

## 送電用がいしのフラッシュオーバー特性および着雪特性に基づく雪害対策手法の提案

屋地, 康平

<https://doi.org/10.15017/1866320>

---

出版情報：九州大学, 2017, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：

送電用がいしのフラッシュオーバー特性  
および着雪特性に基づく雪害対策手法の提案

2017年9月

屋 地 康 平

Study on Snow Damage to Overhead Line  
Insulators with Regard to Both Flashover  
Mechanism and Snow Accreting Properties to  
Develop Countermeasure Technique

September 2017

Kohei Yaji

九州大学 博士論文

2017年9月

Doctoral Thesis of Kyushu University

September 2017

---



九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY

システム情報科学府 電気電子工学専攻

エネルギー応用システム工学講座 末廣・中野研究室

Suehiro & Nakano Laboratory

Applied Energy Engineering Course

Department of Electrical and Electronic Engineering

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering

# 目次

## 第1章 序 論

1.1 本研究の背景	1
1.1.1 電力の安定供給の重要性と供給支障	1
1.1.2 電力輸送におけるがいしの役割と塩害の面からの送電線の絶縁設計	9
1.1.3 送電線への自然災害とがいしへの雪害	21
1.1.4 2005年に新潟県下越地域で生じた塩雪害	26
1.2 従来のがいしの雪害研究の概要	31
1.2.1 日本における1950～1960年代の雪害研究	31
1.2.2 日本における1970～1980年代の雪害研究	34
1.2.3 欧米における着氷雪害研究	37
1.3 本研究の位置づけ	38
1.4 本論文の構成	39
第1章の参考文献	42

## 第2章 複素インピーダンス測定に基づく着雪の誘電・絶縁特性の検討

2.1 ま え が き	48
2.2 物理現象の時間遅れに関する線形応答理論	49
2.2.1 緩和現象を表す基礎方程式	49
2.2.2 Debye型およびCole-Cole型緩和関数	50
2.3 人工雪の生成と複素インピーダンス測定	52
2.3.1 人工雪の生成方法	52
2.3.2 複素インピーダンスの測定方法	56
2.3.3 複素インピーダンスの周波数特性	58
2.4 直列結合型等価回路による複素インピーダンスの成分分離	61
2.4.1 直列結合型等価回路	61
2.4.2 複素インピーダンスの成分分離	63
2.4.3 雪の含水率から見た複素インピーダンス特性	69
2.5 ま と め	73
第2章の参考文献	74

### 第3章 小規模モデル実験による着雪時フラッシュオーバー特性の基礎検討

3.1	まえがき	77
3.2	小規模モデル実験の概要	77
3.2.1	環境実験室と課電装置	77
3.2.2	人工雪の生成	79
3.3	課電先行型のフラッシュオーバー実験	84
3.3.1	課電先行型の実験方法	84
3.3.2	がいし着雪の発達と着雪の導電率	87
3.3.3	課電先行型のフラッシュオーバー発生条件	90
3.3.4	課電先行型のフラッシュオーバー過程	96
3.3.5	課電先行型のフラッシュオーバー電圧特性	103
3.4	着雪先行型のフラッシュオーバー実験	107
3.4.1	着雪先行型の実験方法	107
3.4.2	着雪先行型のフラッシュオーバー電圧特性	110
3.5	まとめ	113
	第3章の参考文献	114

### 第4章 実規模がいし装置のフラッシュオーバー電圧特性の検証

4.1	まえがき	115
4.2	実規模フラッシュオーバー試験法の開発	115
4.2.1	環境試験ホールと課電装置	116
4.2.2	人工雪の生成	121
4.2.3	がいしへの着雪	124
4.2.4	湿雪の模擬	124
4.2.5	着雪がいしへの電圧印加	129
4.3	各種がいしのフラッシュオーバー電圧特性	136
4.3.1	雪の導電率から見たフラッシュオーバー電圧特性	137
4.3.2	がいし形状から見たフラッシュオーバー電圧特性	140
4.4	まとめ	144
	第4章の参考文献	146

<b>第5章 がいしの形状と気象条件に基づくがいしの着雪特性の検討</b>	
5.1 ま え が き	148
5.2 自然環境下における着雪特性	149
5.2.1 フィールド観測の概要	149
5.2.2 着雪が発達しやすい気象条件	158
5.2.3 風速から見た着雪様相ならびに漏れ抵抗特性	160
5.3 圧密着雪発生の危険度を評価するための指標	166
5.3.1 がいしへの着雪ポテンシャルの定義	166
5.3.2 着雪ポテンシャルを用いた評価事例	166
5.4 室内着雪実験による着雪特性	169
5.4.1 室内着雪実験の概要	169
5.4.2 下越雪害で見られた筒状着雪の再現	172
5.4.3 磁器がいしの着雪特性に関する数値的評価	175
5.5 ポリマーがいしの雪害環境への適用性	178
5.5 ま と め	186
第5章の参考文献	187
<b>第6章 送電用がいしの塩雪害対策手法の提案</b>	
6.1 ま え が き	189
6.2 塩雪害時のがいしのフラッシュオーバー機構	189
6.3 がいしの塩雪害対策手法	192
6.3.1 がいしへの着雪特性の観点から	192
6.3.2 着雪したがいしのフラッシュオーバー電圧特性の観点から	193
6.4 ま と め	194
第6章の参考文献	195
<b>第7章 結 論</b>	196
<b>謝 辞</b>	199

# Contents

## Chapter 1 Introduction

1.1	Background .....	1
1.1.1	Importance of stable electricity supply and influence of its interruption .....	1
1.1.2	Role of insulators in electric power transmission and general insulation design against a salt damage .....	9
1.1.3	Natural disasters to overhead lines and snow damage to insulators .....	21
1.1.4	Snow damage to insulators related with sea-salt in the Kaetsu area of Niigata Prefecture in 2005 .....	26
1.2	Previous works on insulator flashover under icing conditions .....	31
1.2.1	Study on snow-capped insulators 1950's to 1960's in Japan .....	31
1.2.2	Study on snow-capped insulators 1970's to 1980's in Japan .....	34
1.2.3	Study on ice-accreted insulators in the Western countries .....	37
1.3	Determination of subjects of this study .....	38
1.4	Organization of this thesis .....	39
	References in Chapter 1 .....	42

## Chapter 2 Discussion about Dielectric and Electrical Insulating Properties of Accreted Snow Based on the Complex Impedance

2.1	Prefatory note for Chapter 2 .....	48
2.2	Linear response theory involved with time-lag in physical phenomena .....	49
2.2.1	Basic equations representing relaxation phenomena .....	49
2.2.2	Relaxation functions of the Debye and Cole-Cole types .....	50
2.3	Generation of artificial snow and measurement of complex impedance .....	52
2.3.1	Method for creating artificial snow .....	52
2.3.2	Method for measurement of complex impedance .....	56
2.3.3	Frequency characteristics of complex impedance .....	58
2.4	Components separation of complex impedance using an equivalent circuit characterized as series coupling elements .....	61
2.4.1	Equivalent circuit defined as series coupling elements .....	61
2.4.2	Components separation of complex impedance .....	63
2.4.3	Characteristics of complex impedance related with Liquid Water Content .....	69
2.5	Summary of Chapter 2 .....	73
	References in Chapter 2 .....	74



**Chapter 3 Fundamental Approach on Discharge Propagation Properties Related to Snow Accretion Process by Small Scale Laboratory Experiments**

3.1	Prefatory note for Chapter 3	77
3.2	Outline of the small-scale laboratory experiment	77
3.2.1	Climatic chamber and voltage sources	77
3.2.2	Generation of artificial snow	79
3.3	Pre-energizing flashover tests	84
3.3.1	Pre-energizing flashover test procedure	84
3.3.2	Growth of snow accretion on the insulator and conductivity distribution of snow	87
3.3.3	Determination of flashover occurring condition in the pre-energizing flashover tests	90
3.3.4	Observation of flashover process using a high-speed camera in the pre-energizing flashover tests	96
3.3.5	Flashover voltage characteristics by the pre-energizing flashover tests	103
3.4	Pre-snow-accreting flashover tests	107
3.4.1	Pre-snow-accreting flashover test procedure	107
3.4.2	Flashover voltage characteristics by the pre-snow-accreting flashover tests	110
3.5	Summary of Chapter 3	113
	References in Chapter 3	114

**Chapter 4 Fundamental Approach on Discharge Propagation Properties Related to Snow Accretion Process by Small Scale Laboratory Experiments**

4.1	Prefatory note for Chapter 4	115
4.2	Development of a flashover test method for full-scale insulator strings	115
4.2.1	Climatic hall and voltage sources	116
4.2.2	Generation of artificial snow	121
4.2.3	Snow accreting method on full-scale insulator strings	124
4.2.4	A method for imitating wet snow	124
4.2.5	Voltage application to snow-accreted insulator strings	129
4.3	Flashover voltage characteristics of various insulators	136
4.3.1	Flashover voltage with regard to snow conductivity	137
4.3.2	Flashover voltage with regard to shapes of insulators	140
4.4	Summary of Chapter 4	144
	References in Chapter 4	146

<b>Chapter 5 Fundamental Approach on Discharge Propagation Properties Related to Snow Accretion Process by Small Scale Laboratory Experiments</b>	
5.1 Prefatory note for Chapter 5	148
5.2 Snow accreting characteristics of porcelain insulators under natural conditions	149
5.2.1 Outline of a field observation system at Kaetsu area	149
5.2.2 Suit meteorological conditions for snow accretion on insulators	158
5.2.3 Snow accretion aspect and leakage resistance characteristics with regard to wind velocity	160
5.3 An index proposed to evaluate the risk of severe snow accretion	166
5.3.1 Definition of the Potential ability of Snow accretion ( $P_{\text{snow}}$ )	166
5.3.2 A case study evaluating some typical snow events using $P_{\text{snow}}$	166
5.4 Snow accreting characteristics of porcelain insulators by laboratory tests of snow accretion	169
5.4.1 Outline of laboratory tests of snow accretion	169
5.4.2 Verification of cylindrical shapes of accreted snow seen in the Kaetsu area in 2005	172
5.4.3 A numerical evaluating method for snow accreting properties	175
5.5 Discussion on applicability of composite insulators to environments which causes snow damages	178
5.5 Summary of Chapter 5	186
References in Chapter 5	187
<b>Chapter 6 Fundamental Approach on Discharge Propagation Properties Related to Snow Accretion Process by Small Scale Laboratory Experiments</b>	
6.1 Prefatory note for Chapter 6	189
6.2 Estimation of the flashover mechanism of insulator related to snow damages involved with sea-salt	189
6.3 Countermeasure technics against snow damages involved with sea-salt	192
6.3.1 From the point of view of snow accreting properties	192
6.3.2 From the point of view of flashover voltage characteristics of snow-accreted insulators	193
6.4 Summary of Chapter 6	194
References in Chapter 6	195
<b>Chapter 7 Conclusions and Recommendations</b>	196
<b>Acknowledgements</b>	199

# 第 1 章

## 序 論

### Chapter 1

#### Introduction

# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 電力の安定供給の重要性と供給支障

——最近は、「環境」、「安全・安心」などをキーワードとした領域を開発しなければならない等の評論が多い。これに対して電気工学は後れをとっているような印象を与えている。これは間違いであって、「環境」「利便性」「安全・安心」を与えてきたのが電気工学である[1]。

第 94 代電気学会会長仁田旦三氏の演説の中の一節にあるように、電気工学は、私たちの暮らしの中に「環境」「利便性」「安全・安心」を確保する上でなくてはならないものである。今日、私たちの生活は発電所から送られてくる電気によって成り立っていると言っても過言ではない。電気工学とは、「電気」の関係する現象を研究することによって、社会の利益となる手法・技術を発見し、新しい発明を目的とする学問のことをいい[2]、今後も私たちの暮らしに不可欠であり続けることは明々白々であろう。

この「電気」と私たちの暮らしがどのような関わりを持ってきたのか、そして今後はどうになるのか、数値的に示した例を見てみよう。浜潟ら[3]が 2013 年に行った推計によると、日本の総電力需要は、2010～2030 年度平均で年率 0.1%の割合で増加することが見込まれており、電力化率（最終エネルギー消費に占める電力需要の割合）は 2012 年度の 22.6%から 2030 年度には 26.0%へと上昇することが試算されている。同じく、発電用燃料投入も考慮した一次エネルギーベースの電力化率は、2012 年度の 42.5%から、2030 年度には 45.2%へと上昇すると見込まれており[3]、日本の電力消費およびエネルギー消費の電力シフトは、少なくとも 2030 年程度までゆっくりと進展することを示している。図 1-1 は、世界各国の電力化率と国民一人当たりの実質 GDP の関係を同一平面にプロットし、国家間で比較したものである。日本は、G7 諸国らと同様に、グラフ中右上の領域に位置している。全体で見ると、電力化率が高いほど実質 GDP もこれに応じて大きくなる傾向が見られることから、電力化率は国家の経済活動規模と深く関係することが分かる。また、電力化率は、国内外を問わず、時代と共に上昇してきた歴史があり、今後も世界経済は、電気に依存する形で成長してゆくことが予測されている[4]。

その一方、地球温暖化問題は、最も重要な環境問題の一つであり、1990年代以降気候変動に関する政府間パネル<sup>1</sup>（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）の活動や国連気候変動枠組条約（UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change）の発効など、国際的な枠組みが活発に行われている[5]。日本でも、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標達成[6]のため、省エネ社会の実現が求められている状況にある。このことに関して、IPCC第5次評価報告書では、CO<sub>2</sub>の大幅な削減には電化率の向上が有力な手段の一つとなることが示されている[7]。

次に、日本の電力品質ならびに諸外国との比較について述べる。図1-2は、日本における需要家1軒当たりの年間停電回数と年間停電時間の年次推移を示したものであり、日本では統計を開始した1966年以降、停電回数・停電時間ともに減少傾向を示している。これは、送電線の多ルート化や高信頼度機器の採用、保守点検の合理化などが行われた結果、今日の日本の停電時間・停電回数はいずれも小さく、世界トップ水準にある（図1-3）[8]ためである。その一方で、図1-2では停電回数・停電時間が平年と比べて突出して高い年が見られるが、これらはいずれも、電力需要密度が高い大都市圏が大型の台風・地震を被災した年であり、その影響が現れたものである[8]。大都市圏が被災すると、その影響は大きくなる傾向がある。

このことを踏まえると、災害時や緊急時における電力供給の支障は、その社会的影響が大きくなってしまふことは必然であろう。片岡ら[9]は、大規模災害の発生を想定し、社会基盤をなす電力、ガス、上水道、下水道、情報通信、の各重要インフラ同士の相互波及が無限に続くと仮定したとき、それらの間の直接的・間接的な影響（相互依存マトリクス）の推計を行った。図1-4はその結果であり、同図(a)から電力は他のインフラに与える影響が大きく、他のインフラからは影響を受けにくいインフラであることが分かる。また、同図(b)から電力は他のインフラに強い関連度を持っているとともに、その影響度も強く、最も他のインフラに影響を与えやすい特徴を持つことが分かる。ライフライン施設のうち特に電力施設の被害の影響が瞬時に広域に伝播することに関しては、その他の研究・調査結果からも同様のことが示されており、電力供給システムの防災性を高め、災害時においても平時と同様の安定供給を確保することの重要性が説かれている[10]。

この安定供給のためには、架空送電設備の健全運用が必須であるが、架空送電設備の経過地は様々であり、架空送電設備に生じる事故の要因は多岐に亘っている[11]。その主要なものを摘記すると以下のようなになる[12]。

---

<sup>1</sup> 気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は、国連気候変動枠組条約締結国会議（COP: Conference of the Parties）に対して、科学的知見を調査・評価し、提供することを目的に、1988年に設立された。1990年の第1次評価報告書以降、2014年までに第5次報告書までを発表し、1)自然科学的根拠、2)影響・適用・脆弱性、3)緩和策、などの主要な観点から、様々な提言を行っている[5]。

- 1) 突発的あるいは慢性的な電力不足（有効電力・無効電力の需給のアンバランス）
- 2) 電力設備の偶発的な不具合（故障など）
- 3) 天災（地震・台風・雷・雪など）
- 4) 人災（送電線へのクレーンの接触など）
- 5) 鳥獣（カラス・へびなど）
- 6) 電力設備の工事・保守作業などに伴う意図的な送電停止

表 1-1 は、日本がこれまでに経験した大規模停電の主要な 5 事例[12]の概要である。この中で、御母衣事故（1965 年）、阪神・淡路大震災（1995 年）、新潟大停電（2005 年）はいずれも大規模な自然災害によるものであり、ひとたびこのような大規模自然災害が発災すると、歴史に残る大規模・長時間の停電（供給支障<sup>2</sup>）に至りやすいことが窺える。IT が社会の基盤を支える今般の高度情報化社会においては、供給支障が発生したときの社会的影響は大きくなりやすいため、その発生の防止は不可欠である[13]。また、新潟大停電（2005 年）のような大雪の最中での停電は、私たちの生活に極めて大きな影響を与える[14]ことから、事故を未然に防止するための設備対策、発生後の応急復旧方法等を検討しておかなければならない。

ここまで 1.1.1 項で述べた電力の安定供給の重要性と供給支障を概括すると、以下のようになる。

- ・ 日本の電力品質は、停電時間・停電回数とも世界最高水準にある。
- ・ 日本の電力消費およびエネルギー消費の電力シフトは、少なくとも 2030 年程度までゆっくりと進展する。
- ・ 今後も世界経済は、電気に依存する形で成長する。
- ・ 電力設備の被災は他の基盤インフラへの影響が大きく、その被害の影響が瞬時に広域に伝播する。
- ・ 日本がこれまでに経験したいくつかの主な大規模停電は、御母衣事故（1965 年）、阪神・淡路大震災（1995 年）、新潟大停電（2005 年）を始めとした大規模な自然災害が原因である。
- ・ 特に、IT が社会の基盤を支える今般の高度情報化社会においては、供給支障がもたらす社会的影響は大きいため、その発生の防止は不可欠である。

次の 1.1.2 項では、電力輸送におけるがいしの役割と塩害の面からの送電線の絶縁設計について述べる。

---

<sup>2</sup> 供給支障とは、電気工作物の破損事故、電気工作物の誤操作、電気工作物を操作しないことにより、電気の使用に対する電気の供給が停止、または電気の使用を緊急に制限することをいう。ただし、電路が自動的に再開路されることにより電気の供給の停止が終了した場合は、供給支障事故とはいわない。供給支障事故は、人身や物件に対して被害を及ぼさない場合であっても、その社会的影響が大きいことから、供給支障電力の大きさや、支障時間の長さによって、所管する官庁への報告が義務づけられている[13]。

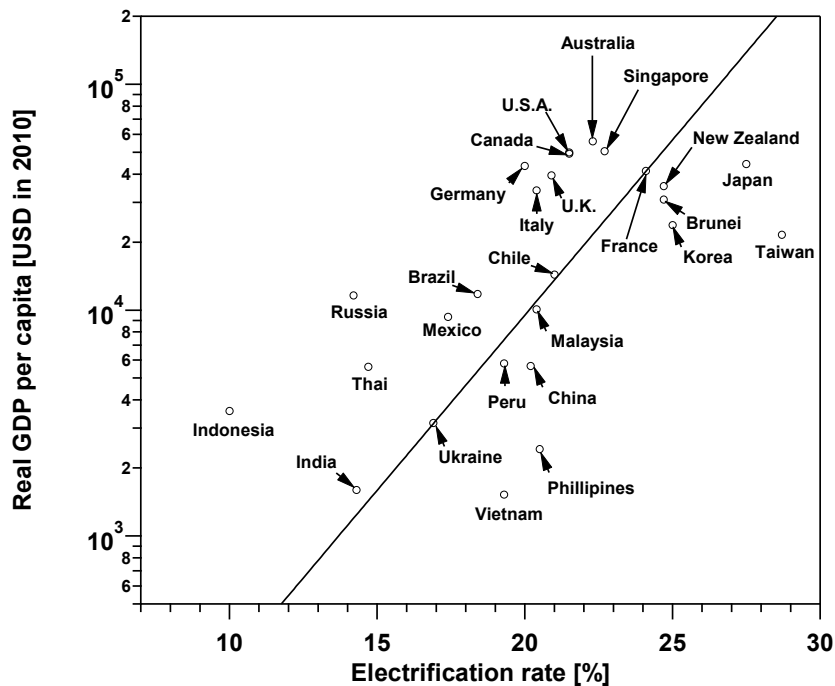


Figure 1-1. Relationship between electrification rate and real GDP of various countries.

This graph was redrawn by the author referring to the Sugiyama's contribution to the web site of International Environment and Economy Institute (IEEI) [15] and "2015 EDMC Handbook of Japan's & World Energy & Economic Statistics" [16] (in Japanese). The regression curve in the above graph was drawn by referring to the data of below 27 countries in 2013.

U.S.A, Canada, Mexico, Brazil, Chile, Peru, U.K., Germany, France, Italy, Russia, Ukraine, China, Japan, Hong Kong, Taiwan, Korea, Singapore, Brunei, Indonesia, Malaysia, Philippine, Thai, India, Vietnam, Australia, and New Zealand.

図1-1 世界各国の実質国内総生産と電力化率の関係

電力化率の実質 GDP に対する評価は杉山[15]の寄稿などの中に見られる。ここに示したグラフは、EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2017年度版）[16]の統計データをもとに筆者が作成したものである。回帰線は 2013 年のデータが入手できた下記 27 カ国のプロットを累乗近似したものである。

米国、カナダ、メキシコ、ブラジル、チリ、ペルー、英国、ドイツ、フランス、イタリア、ロシア、ウクライナ、中国、日本、香港、台湾、韓国、シンガポール、ブルネイ、インドネシア、マレーシア、フィリピン、タイ、インド、ベトナム、オーストラリア、ニュージーランド

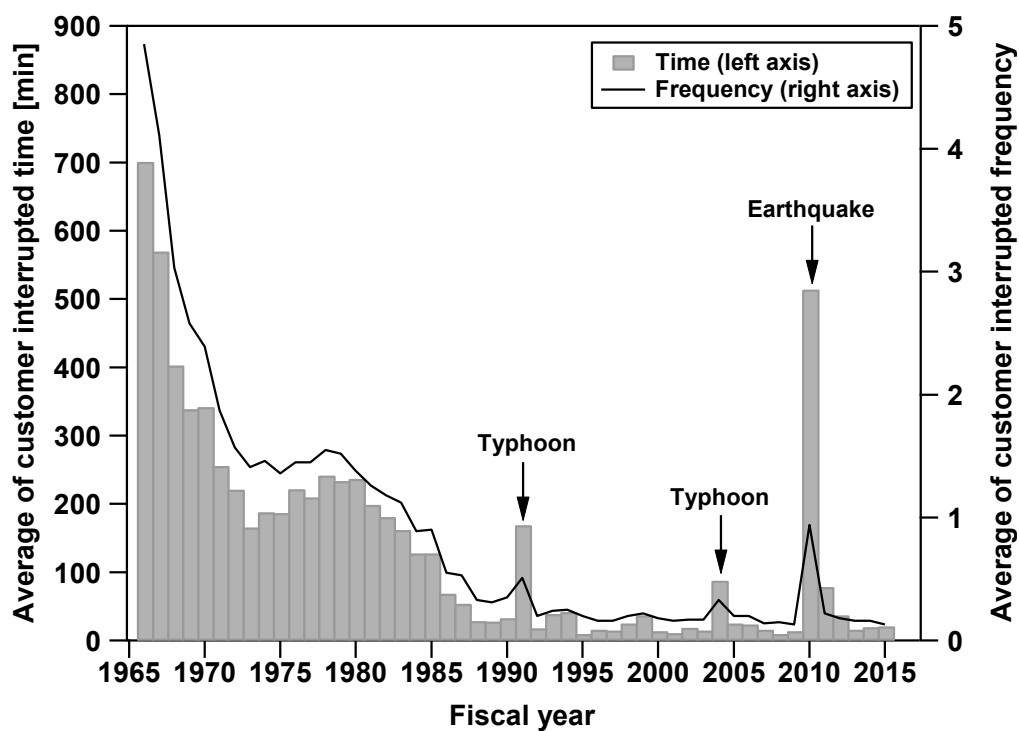


Figure 1-2. Change in customer interrupted time and frequency of all the Japanese utilities.

This graph was redrawn by the author referring to the “INFOBASE 2016” on the web site of the Federation of Electric Power Companies of Japan [8].

### 図1-2 日本の年間停電時間と回数の推移<sup>3</sup>

「INFOBASE 2016」[8]の統計データにもとづく値である。上図は、電気事業連合会から改変の許可を得て、筆者が作成した。

<sup>3</sup> 図中に用いた数値は、作業停電・事故停電を含むものである。1988年度までは電力9社計、以降は電力10社計の値である。



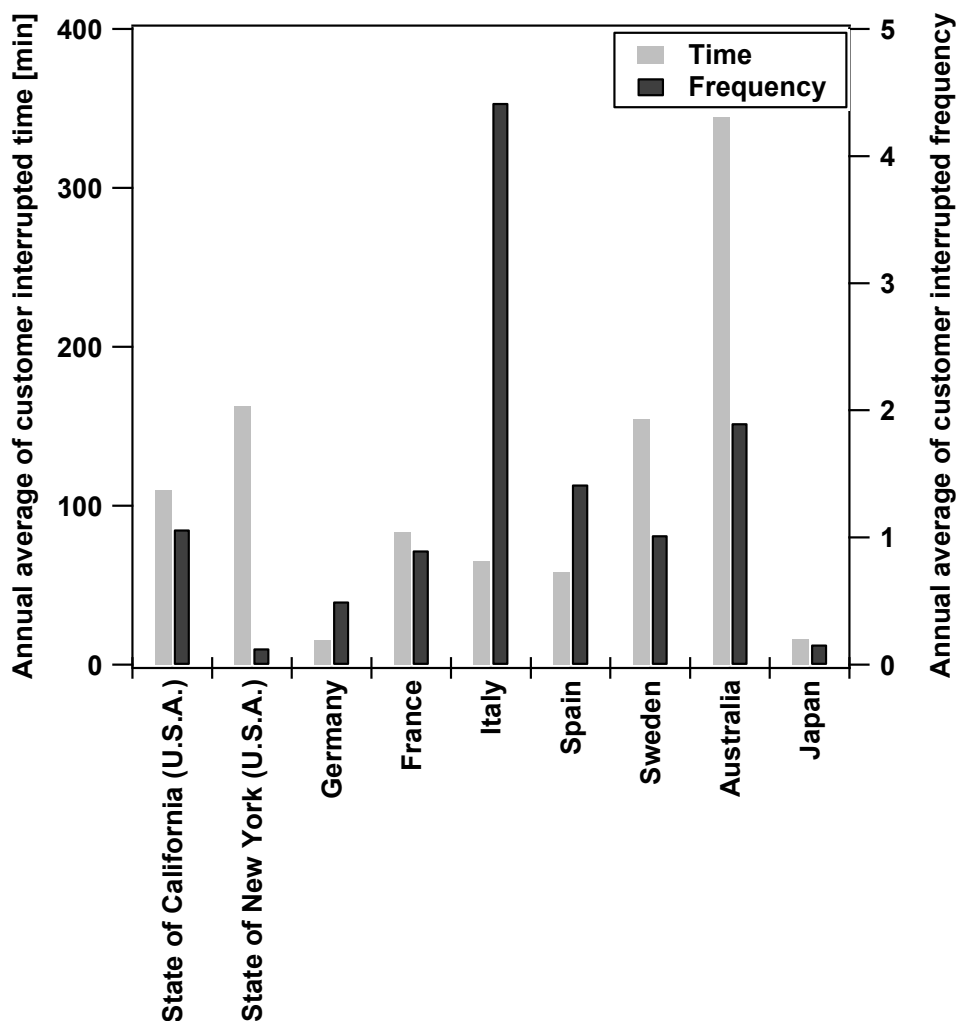


Figure 1-3. Customer interrupted time and frequency of overseas countries.

This graph was redrawn by the author referring to the “Overseas Electric Power Industry Statistic 2016” edited by the Japan Electric Power Information Center [17]. The data in 2013 of eight countries, member countries of OECD, is shown as an example in the above graph. But that in 2011 of only Spain is shown in the same manner.

### 図1-3 世界各国の停電時間・停電回数

海外電力調査会「海外電気事業統計 2016年版」[17]の統計データをもとに筆者が作成した。経済協力開発機構加盟国<sup>4</sup>のうち、データを入手できた8カ国（米国のみ2つの州）の2013年（スペインについては2011年）における統計値を用いた。

<sup>4</sup> 経済協力開発機構（OECD: Organization for Economic Co-operation and Development）とは、先進国間の自由な意見交換・情報交換を通じて経済成長・貿易自由化・途上国支援（OECDの三大目的）に貢献することを目的として、1961年に発足した国際機関である。2017年現在、ヨーロッパ諸国を中心に、日・米を含め35ヶ国の先進国が加盟している。以上、経済産業省ホームページ「政策について>政策一覧>対外経済>通商政策>OECD（経済協力開発機構）」より一部引用。

出展：経済産業省ウェブサイト、[http://www.meti.go.jp/policy/trade\\_policy/oecd/html/](http://www.meti.go.jp/policy/trade_policy/oecd/html/)（閲覧日2017年5月16日）

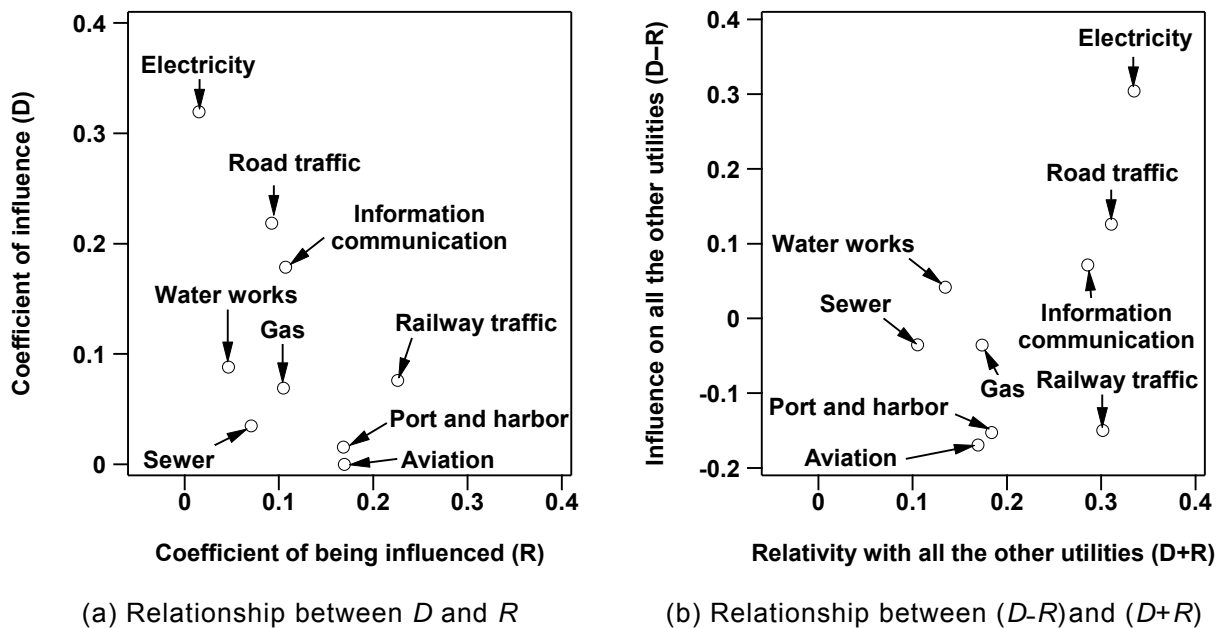


Figure 1-4. Interdependence among major infrastructures.

The above graphs show how independent and how influenced the nine major utilities are when a natural disaster occurs.  $D$  and  $R$  represent the coefficient of influence and that of being influenced, respectively. Therefore,  $D-R$  and  $D+R$  represents the influence on all the other utilities and their relativity with the other utilities, respectively. The electric power influences most greatly the others and has the strongest relationship with the others. These graphs were redrawn by the author quoting from [9] as an example.

図1-4 重要インフラ間の相互依存関係<sup>5</sup>

影響係数  $D$ 、被影響係数  $R$ 、影響度( $D-R$ )、関連度( $D+R$ )

ここでは一例として片岡らの試算結果(文献[9])を引用した(上図は、著者から改変の許可を得て、筆者が作成した)。

<sup>5</sup> 片岡ら[9]によると、同図(a)において影響係数  $D$  は、対象とするインフラが他のインフラに与える影響の大きさの度合いを表し、被影響係数  $R$  は他のインフラから受ける影響の大きさの度合いを表す。グラフ面内の左上には、他のインフラに与える影響が大きく、他のインフラからは影響を受けにくいインフラ(電力等)、右下には他のインフラに与える影響が小さく、他のインフラから受ける影響が大きいインフラ(空港、港湾等)が分布する。

同図(b)において影響係数  $D$  と被影響係数  $R$  の和は、影響を与えることと受けることを合計した他のインフラとの関連の強さを示している。また、両者の差は、両方のインフラ間の影響の偏りを示している。前者をインフラ間の関連度( $D+R$ )、後者をインフラ間の影響度( $D-R$ )と定義する。電力はグラフ面内の右上に位置することから、他のインフラに強い関連度を持っているとともに、その影響度も強く、最も他のインフラに影響を与えやすいインフラであることがわかる。

Table 1-1. Major outages that Japan has ever experienced [12].

表 1-1 日本がこれまでに経験した主な大停電[12]

Date	Name	Affected households / interrupted time	Causes
June 22, 1965	The Miboro Accident	Most of Kansai area 3 hours 4 minutes at longest	Transmission towers collapsed by a typhoon and rock fall caused by heavy rain. Overloaded overhead lines were braked and out-of-phase of load-side thermal power stations occurred successively.
July 23, 1987	The Massive Blackout in Tokyo Metropolitan Area	280 million households 4 hours at longest	After lunch break on a business day, voltage collapse occurred because of a lack of supply of reactive power for the rapid increase in power demand.
January 17, 1995	The Great Haishin Awaji Earthquake	260 million households 6 days at longest	Power distribution facilities such as overhead lines, substations, and distribution lines were damaged greatly because of the vibration of the Hyogo - ken Nanbu Earthquake.
<b>December 22, 2005</b>	<b>The Massive Blackout in Niigata</b>	<b>65 million households 30 hours 53 minutes at longest</b>	<b>Wet snow including sea-salt accreted to transmission lines and insulators. Overhead conductors were short-circuited by galloping.</b>
August 14, 2006	The Massive Blackout in Tokyo Metropolitan Area	139 million households 4 hours 42 minutes at longest	Two of two circuits of the 275 kV overhead line were injured because a floating crane attacked its arm to the overhead conductors.

Above table was re-drawn by the author quoting from the table in [12] and adding some explanations. The ref. [12] was written in Japanese and published before The Great East Japan Earthquake. Therefore, that is not a state of the art. In the Great East Japan Earthquake, 4.66 million households of Tohoku EPCO and 4.05 million households of Tokyo EPCO were affected by the blackout. The power supply came back to about 94% of those who were affected in the Tohoku area in eight days and those who were affected in the Tokyo area in 3.5 days. But that resulted in a historically massive interruption of electric service. At any rate, what the author would like to emphasize here is that the Massive Blackout in Niigata, the main scope of THIS STUDY, is listed as one of such huge outages especially in recent years. The issues seen in the Niigata case are mainly focused on THIS STUDY from an electrical point of view.

同表は、文献[12]の著作権者の許可を得て、著者が転載（一部解説を追記）したものであり、引用元では和文で示されている。また同表は 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震を始めとする東日本大震災以前の文献情報に基づいたものであり、最新のものではない。東日本大震災では、東北電力管内で約 466 万戸、東京電力管内で約 405 万戸の需要家に対する電気の供給が停止し、東北電力管内ではこのうちの約 94%については震災後 8 日で停電が解消<sup>6</sup>、東京電力管内では震災後約 3.5 日で供給支障が解消<sup>7</sup>したものの、歴史的な規模、時間を伴う供給支障となった。

以上のように、我が国における過去の歴史的な大停電をリストアップしてゆくと、近年では 2005 年の新潟大停電がリストアップされており、そこにある電気工学的な問題点を、本論文のメインスコープとして取り上げることにする。

<sup>6</sup> 東北電力管内の停電については、復旧作業への着手が不可能な地域を含んだため 100%ではない。  
出典：中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」、第 9 回会合配付資料（参考資料 2）、「3 月 11 日の地震により東北電力で発生した広域停電の概要」、内閣府ウェブサイト、<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/9/pdf/sub2.pdf>（閲覧日：2017 年 7 月 14 日）

<sup>7</sup> 東京電力管内の停電については、送電系統の復旧が完了した 3 月 15 日午前 0 時 55 分に供給支障の解消と判断された。出典：「東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録」、東京電力株式会社ウェブサイト、[http://www.tepco.co.jp.cache.yimg.jp/torikumi/thermal/images/teiden\\_hukkyuu.pdf](http://www.tepco.co.jp.cache.yimg.jp/torikumi/thermal/images/teiden_hukkyuu.pdf)（閲覧日：2017 年 7 月 14 日）

## 1.1.2 電力輸送におけるがいしの役割と塩害の面からの送電線の絶縁設計

電力系統は発電所・送電線・変電所・配電線・負荷などのさまざまな設備が一体化したシステムであり[18]、私たち一般の需要家が使う電気は、ほとんど例外なく送電線を通して送られている。送電線とは、正確には発電所相互間・変電所相互間・発電所変電所間を結ぶ電線路と定義され、その設備形態により架空送電線と地中送電線に分けられる[18]。架空送電線は、鉄塔<sup>8</sup>、がいし<sup>9</sup>により支持された電力線により電力を輸送するシステムである[18]。このとき送電電圧が高いほど送電容量<sup>10</sup>・送電効率が向上する。このため、日本においては、増大する電力需要と電源の大容量化・遠隔化に対応して、送電線の高電圧化が進められてきた[18]。通常、送電線の電圧は、線間電圧と呼ばれるのが慣例であるが、同一線路であっても線路中の位置や負荷、力率の大小によって線間電圧は必ずしも一定とはならないため、送電線を代表する線間電圧として、公称電圧が用いられる。日本の主な公称電圧には、22 kV、33 kV、66 kV、77 kV、110 kV、154 kV、220 kV、275 kV、500 kV などがある[18]。

送電方式には交流送電方式と直流送電方式があるが、国内外を問わず、交流送電方式が主として採用されている。これは、歴史的に、送電電圧を昇圧してゆく過程で、変圧が容易な交流方式が順次採用されてきたことに由来している[18]。本論文は、交流方式の架空送電線の雪害事象を対象としているため、以後、交流方式の架空送電線のことを単に送電線と呼ぶことにする。

送電線のがいしは、通常運転中の送電電圧が印加されている電力線と接地電位にある構造物の間の電気絶縁と、機械力を把持する機能を担う重要な装置である[5]。送電用に使用されているがいしには、懸垂がいし<sup>11</sup> (図 1-5)、長幹がいし<sup>12</sup> (図 1-6) などがある。これらのがいしの絶縁体には、日本では主としてアルミナ含有磁器<sup>13, 14</sup>が採用されている。良質な磁器が得られない諸外国では、磁器の代わりに強化ガラスで製造された懸垂がいしを、送電線に適用しているところもある。日本で最初の国産の懸垂がいし<sup>15</sup>は、大正初期に製造された[5]。その後、送電電圧の上昇による大型化、製造技術の進歩等により、多種の送電用がいしが開発された。

<sup>8</sup> 架空送電線路における支持物とは、架渉線を支持することを目的とする工作物のことをいい、鉄塔・鉄柱・鉄筋コンクリート柱・木柱等を総称したものであり[19]、その主も一般的なものが鉄塔である。

<sup>9</sup> がいしとは、広義には電気導体を絶縁して支持するための絶縁体とこれと一体に組み立てられた金具とからなる絶縁支持物のことである[20]。本論文では、狭義の意味で、送電線に用いられているがいしのことを送電用がいし、あるいは単にがいしと呼ぶ。

<sup>10</sup> 送電線路で支障の生じない限度で連続して送りうる最大電力のことを送電容量という[19]。

<sup>11</sup> キャップおよびピンを備えた円盤形の連用がいしのことを懸垂がいしという[19]。

<sup>12</sup> 絶縁体の両側にキャップを備えた中実円柱形がいしのことを長幹がいしという[20]。

<sup>13</sup> 無機物質を原料とし、焼成して冷却したとき結晶性を持つものを陶磁器という。陶磁器のうち、素地に吸水性がなくよく焼き締まったものを磁器という[21]。

<sup>14</sup> けい石・長石・粘土を原料とし、10～20%程度の石英、10～20%程度のムライトを結晶として含む磁器を長石質普通磁器といい、長石質普通磁器の石英の代わりに10～40%の酸化アルミニウムを用いた磁器をアルミナ含有磁器という[21]。

<sup>15</sup> これ以前の国産がいしは品質において信頼性が低く、国内の重要な幹線には適用されなかった。大正4年に鶴見埋築株式会社(現・東亜鉄工株式会社)が建設した66 kV送電線に日本陶器合名会社(現・株式会社ノリタケカンパニーリミテド)製の懸垂がいしが1万個採用されたことにより、国産がいしの前途に光が見えてきた[22]。

日本の送電用がいしとして、今日では一般に懸垂がいしが多用されている。表 1-2 に標準的な送電用懸垂がいしの諸元を示す。懸垂がいしは、寸法が標準化できるため量産に適しており使用者側としては予備品の種類が少なく済む、不良がいしを検出したりそれを交換したりすることが可能、といった利点がある[23]。長幹がいしは、中実の磁器部が長く劣化し難いこと、雨洗効果がよいこと、笠の枚数が多くかつ平均直径が小さいため耐電圧の向上が期待できること、などの利点があり[23,24]、154 kV 以下の送電線を中心として一部の電力会社において多用されているものの、懸垂がいしほど一般的ではない。表 1-3 に標準的な送電用長幹がいしの諸元を示す。これらの懸垂がいし・長幹がいしを適用するに当たっては、要求される機械的強度、絶縁強度に応じて同種の懸垂がいしを多数個連結させた「がいし連<sup>16</sup>」を構成して使用される[25]。がいし連を送電線に取り付ける際には、付属品として「架線金具」が取り付けられる。架線金具には、鉄塔に連結するときなどに必要な鉄塔取付部金具、がいしに電線を取り付ける部分であるクランプ、鉄塔取付部とがいしを連結あるいはがいしとクランプなどを連結するときに必要な連結金具、雷の被害を緩和するためのアークホーンなどがある。「架線金具」とがいし本体を合わせてひとつの装置として見た場合には、全体を総称して「がいし装置」と呼ばれる[26]。送電用がいし装置は、電力線用と架空地線用があり、電力線用に関してはその機能、形態によって図 1-7 および表 1-4 のように分類される[26]。懸垂がいしを使用した懸垂装置、耐張装置の一例を図 1-8、図 1-9 に示す。

がいし装置に要求される機能は、送電線が経過する地域の気象条件や地形条件、用地事情などによって多様であり、これまでに多くの製品が開発されてきたが、その一方で、極度の多種多様化は、経済性や合理性の損失にも繋がること懸念された[26]。このような弊害を避けるため、1974 年、電気協同研究会傘下に「送電用がいし装置専門委員会」が設置され、がいしと架線金具の民間規格作成に向けた検討が行われた。この検討結果をもとに、1979 年、送電用がいしに関する日本最初の JEC 規格（JEC-206-1979 「懸垂がいし及び耐塩用懸垂がいし」）が制定され、送電用がいしに関する用語、形状及び寸法、材料、性能、検査などについて仕様の統一が図られた[26]。その後、JEC-206-1979 は JEC-5201-2005 「懸垂がいし及び耐塩用懸垂がいし」へ改正され、さらに 2017 年には JEC-5201:2017 「懸垂がいし」へと改正され、今日に至っている[27]。

一般に電力系統に使用される機器や設備は、常規運転電圧<sup>17</sup>に長期間耐えることに加えて、負荷の脱落や地絡事故<sup>18</sup>の発生などによって発生する持続性の過電圧<sup>19</sup>、雷撃または回路の切換えなどで回路条件が変化した場合に発生する非持続性の過電圧にも耐

<sup>16</sup> 2 個以上のがいしを直列に連結して可とう性を持たせて構成された一連のがいしのことをがいし連という[20]。

<sup>17</sup> 通常の運転状態における送電線の最高電圧のことを常規運転電圧と呼ぶ。154kV 以下の送電線の常規運転対地電圧は次式で与えられる[19]。

$$\text{常規運転対地電圧} = \text{公称電圧} \times \frac{1.15}{1.1} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

<sup>18</sup> 導電部が事故あるいは意図的に大地、または接地金属と導通することを地絡という。回路上の 2 点、あるいはそれ以上の点が無視できる低インピーダンスを通して接続された状態を短絡という[29]。

<sup>19</sup> 系統のある地点の相一大地間、あるいは相間に発生する通常の運転電圧を超える電圧のことを過電圧という[19]。

える必要がある[28]。送電線の絶縁設計の面からは、発生原因よりも過電圧の波形や継続時間によって、雷過電圧、開閉過電圧、短時間過電圧に分類されるのが一般的である[18]。

がいしの絶縁設計の面からは、がいしの貫通破壊電圧が沿面フラッシュオーバ<sup>20</sup>電圧よりも相当に高い[30]のために、その絶縁強度は外部絶縁<sup>21</sup>強度によって決まっている。がいしの表面が清浄で乾燥している場合には、がいし連は気中ギャップと同程度の絶縁性能を有しているが、がいし連が汚損されている場合には、表面の漏れ抵抗が低下して局部アーク放電が伸展しやすくなり、汚損耐電圧<sup>22</sup>が低下する。このため、がいしの種類や連結長は、設置場所の環境条件などを勘案してそれに見合う耐電圧を確保できるように決定される。これらの汚損原因はその地域によりまちまちであるが、日本では海塩が汚損の主原因となっており、外部絶縁の決定要因になっている。がいし表面の汚損程度を表す尺度として、単位面積当たりの塩分付着量 [mg/cm<sup>2</sup>] が広く用いられている。自然界での汚損には海塩以外の導電性物質もあるが、これらも含めて同一導電率<sup>23</sup>を示す食用塩の量に換算し、これを等価塩分付着密度 (ESDD: Equivalent Salt Deposit Density) としてがいしへの汚損量の調査や汚損設計などに採用している。海塩由来の汚損に関しては、がいしの絶縁設計手法が既に確立しており[31]、汚損・湿潤時<sup>24</sup>のがいし連の耐電圧は、懸垂がいし・長幹がいしともに、フラッシュオーバ電圧が 900 kV までの範囲ではがいし連の連結長に比例することが分かっている<sup>25</sup>。したがって、地域の汚損特性が決まれば、必要ながいし個数を求めることができる。絶縁設計の大きな流れは、対象地区におけるがいしの等価塩分付着密度を想定し、その付着密度におけるがいし連の耐電圧が耐電圧目標値より高くなるようがいし個数を選定することである。その一連の手順の概要を図 1-10 に示す[32]。設計汚損耐電圧は、人工汚損試験結果をもとに<sup>26</sup>、過去の事故実績を加味して、実用的見地から決定されている。また、内陸部では、じんあい汚損と呼ばれる石膏などの難溶性塩が汚損の主原因となっている場合もあれば、山間部の汚損の少ない地域では、がいしの絶縁部に冠雪した雪が外部絶縁の決定要因になる場合もある[33]。

諸外国の中には、これらの懸垂がいし、長幹がいしの他、外被に高分子材料を採用し

---

<sup>20</sup> 電極間に加えられた電圧により絶縁物が電氣的に全路破壊する現象を破壊放電という。破壊放電のうち、液体および気体中または固体の表面における破壊放電をフラッシュオーバといい、固体中における破壊放電を貫通という[19]。

<sup>21</sup> 外的条件の影響を受ける気中ギャップ、および機器・設備の絶縁のうち大気に露出している部分を外部絶縁という。反対に、機器・設備の絶縁のうちがい管、絶縁物あるいは金属ケースで覆われ、大気などの外的条件の影響を直接受けない部分を内部絶縁という[55]。

<sup>22</sup> 汚損したがいしに電圧をかけフラッシュオーバしない最高電圧のことを汚損耐電圧という[19]。

<sup>23</sup> 電気伝導において、電流密度  $J$  と電界の強さ  $E$  との関係  $J = \sigma E$  で定義される係数  $\sigma$  のことを導電率という。また、電束密度  $D$  と  $E$  との関係が  $D = \epsilon E$  で定義される係数  $\epsilon$  のことを誘電率という[21]。

<sup>24</sup> 主として海塩由来のがいしへの汚損と、これに湿潤が加わったことによるがいしの絶縁性能低下のことを塩害と呼ぶことがあるため、本論文でもこれに倣って塩害と呼ぶことにする。特に、塩害と後述の塩雪害とを明確に区別する必要がある場合には、ここでの汚損・湿潤による塩害を夏季の塩害などと呼ぶことにする。

<sup>25</sup> 但し、懸垂がいしにおいて連結個数 2 個以下の範囲では連結長比例が成立しないことが確認されている[33]。

<sup>26</sup> がいし表面に塩、とのこなどの汚損物を人工的に付着湿潤させたときのフラッシュオーバ電圧 (または耐電圧) と、汚損の程度 (普通、がいし表面の塩分付着密度、表面導電率、汚損液の塩分濃度などで表す) との関係を求める試験のことを人工汚損試験という[20]。

たポリマーがいし<sup>27</sup>の適用が進んでいる国もある。今日では、ポリマーがいしのほとんどが、撥水性が持続することにより耐汚損特性に優れるシリコンゴム<sup>28</sup>が外被材として広く使われるようになってきている[34]。シリコンゴム製のポリマーがいしの典型的な構造を図 1-11 に示す。電気協同研究会が 2000 年に取りまとめたアンケート調査結果[35]によると、日本では、1997 年から 2000 年までの 3 年間で、77 kV 送電線に 45 本、154 kV 送電線に 174 本のシリコンゴム製のポリマーがいしがそれぞれ試験的に適用されたことが分かっている。ポリマーがいしの相間スペーサへの適用については、送電用ポリマーがいしよりも早い 1990 年から適用が始まり、1999 年まで間に、約 5600 組の相間スペーサにポリマーがいしが適用された。電圧別では、このうちの約 80% が 66 kV あるいは 77 kV 送電線であり、これらは全てシリコンゴム製である。275 kV 送電線にも 440 組の相間スペーサにポリマーがいしが適用されたことが報告されている[35]。また、近年では、東日本大震災後の設備対策の観点から、磁器がいしに比べて折損しにくく、耐震性に優れたポリマーがいしを導入する動きが強くなっている<sup>29</sup>。したがって、本研究においても、日本の送電線で主に使われている磁器がいしに加えて、これらのポリマーがいし類について、そのフラッシュオーバー電圧特性や着雪特性について議論することにした。

ここまでに 1.1.2 項で述べた、電力輸送におけるがいしの役割と塩害の面からの送電線の絶縁設計について概括すると、以下ようになる。

- ・ 送電線は、鉄塔、がいし により支持された電力線、により電力を輸送するシステムであり、日本の主な公称電圧には、22 kV、33 kV、66 kV、77 kV、110 kV、154 kV、220 kV、275 kV、500 kV などがある。
- ・ 送電線のがいしは、通常運転中の送電電圧が印加されている電力線と接地電位にある構造物の間の電気絶縁と、機械力の把持機能、を担う重要な装置であり、主に懸垂がいし、長幹がいしが使用されている。
- ・ がいしの貫通破壊電圧は、沿面フラッシュオーバー電圧よりも相当に高いために、がいしの絶縁強度は外部絶縁によって決まる。
- ・ 海塩由来の汚損に関しては、がいしの絶縁設計手法が既に確立しており、地域の汚損特性が決まれば、必要ながいし個数を求めることができる。
- ・ 内陸部では、じんあい汚損と呼ばれる石膏などの難溶性塩が汚損の主原因と

<sup>27</sup> ポリマーがいしは、高分子がいし、複合がいし、有機がいしなどと呼ばれることもある。

<sup>28</sup> 高分子材料であるシリコンは、重合体の主鎖がケイ素 Si と酸素 O の結合によって作られている。SI と略称されることもある[21]。

<sup>29</sup> 東京電力が東日本大震災直後に行った被害調査結果によると、地震動により送電鉄塔に設置されている磁器製の支持がいしの折損が多数発生し、送電不能となったことが報告されている。この被害を契機として、2011 年 5 月 16 日に行ったプレスリリース「原子力発電所等の外部電源の信頼性確保に関する報告書の経済産業省原子力安全・保安院への提出について」の中で、地震動に対する電力系統の供給信頼性確保を目的として、275kV 東海原子力線を始めとした要対策箇所に関して、磁器長幹がいしに代わり、ポリマーがいし等を適用する対策が取られることが示された。

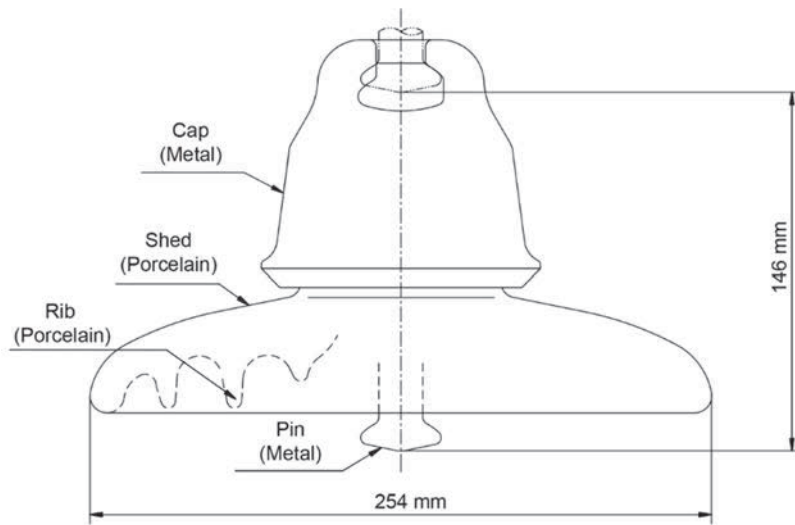
出展：東京電力プレスリリース、<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051604-j.html> (閲覧日 2017 年 6 月 6 日)

なっている場合もあれば、山間部の汚損の少ない地域では、がいしの絶縁部に冠雪した雪が外部絶縁の決定要因になる場合もある。

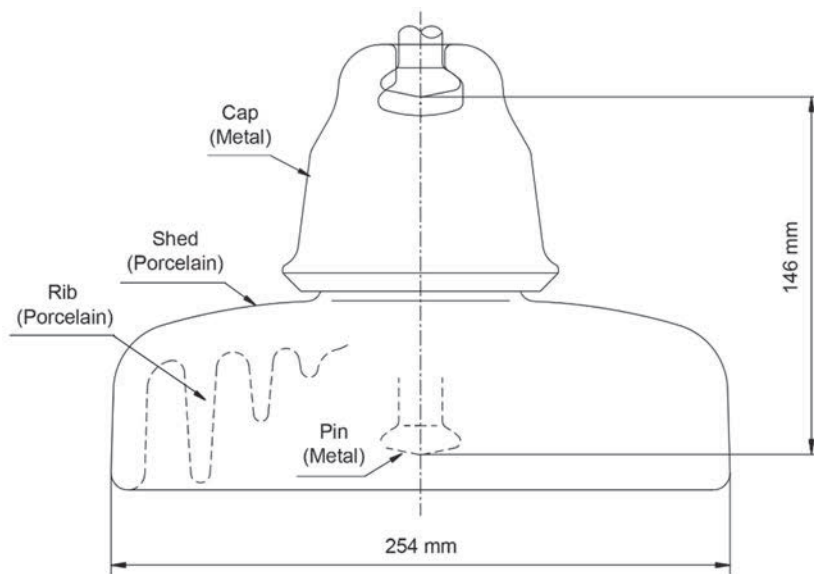
- ・ 近年では、東日本大震災後の設備対策の観点から、磁器がいしに比べて折損しにくく、耐震性に優れたポリマーがいしを導入する動きが強くなっている。

次の 1.1.3 項では、送電線の自然災害とがいしの雪害について述べる。





(a) 250mm cap-and-pin insulator



(b) 250mm anti-fog cap-and-pin insulator<sup>30</sup>

Figure 1-5. General configuration of cap-and-pin insulators.

図1-5 懸垂がいしの概要

<sup>30</sup> 耐塩用懸垂がいしとは、塩塵害に耐えるように考慮して設計された懸垂がいしのことである[20]。

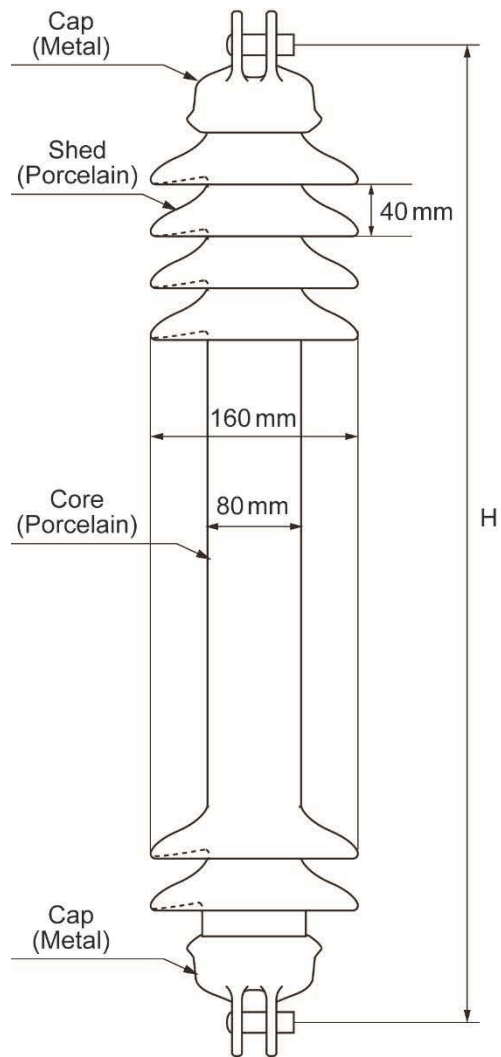


Figure 1-6. General configuration of long-rod insulators.

図1-6 長幹がいしの概要

Table 1-2. Dimensions of Japanese major cap-and-pin insulators used for transmission lines in Japan [36].

表1-2 日本で標準的な送電用懸垂がいしの諸元[36]

Variety specified in JIS standard <sup>31</sup>	Connection length [mm]	Shed diameter [mm]	Leakage distance [mm]	Electro- mechanical failing load [kN]	Weight [kg]
SU-165BN (146-by-254 cap-and-pin)	146	254	280	165	5.7
SU-165BF (146-by-254 anti-fog type cap-and-pin)	146	254	430	165	7.3
SU-210BN (170-by-280 cap-and-pin)	170	280	370	210	8.8
SU-330BN (195-by-320 cap-and-pin)	195	320	460	330	14.5
SU-420BN (205-by-340 cap-and-pin)	205	340	525	420	16.0
SU-530BN (240-by-380 cap-and-pin)	240	380	670	530	22.5

Table 1-3. Dimensions of major long-rod insulators used for transmission lines in Japan [36].

表1-3 日本で標準的な送電用長幹がいしの諸元[36]

Variety specified in JIS standard <sup>32</sup>	Connection length, $H$ [mm]	Core diameter [mm]	Shed diameter [mm]	Shed pitch [mm]	Numbers of sheds	Weight [kg]
LC8017	875	80	160	40	17	22
LC8021	1025	80	160	40	21	26
LC8024	1175	80	160	40	24	29

<sup>31</sup> JIS C 3810: 1999, "Normal type and anti-pollution type suspension insulators", Japanese Industrial Standard (1999)

<sup>32</sup> JIS C 3816: 1999, "Long rod insulators", Japanese Industrial Standard (1999)

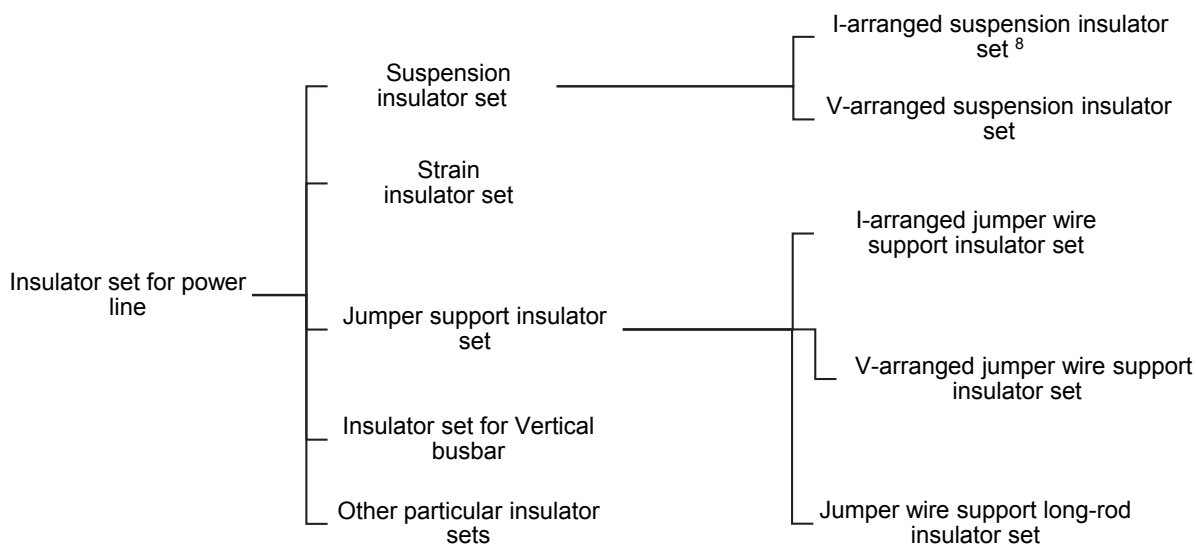


Figure 1-7. Classification of major kinds of insulator sets for overhead lines [26].

図1-7 送電用がいし装置の種別<sup>33</sup>[26]

Table 1-4. General statements of major kinds of insulator sets [26].

表1-4 各種がいし装置の概要[26]

Variety	General statements
Suspension insulator set	It is used for stringing overhead wires in suspended position. One of the most major uses is “I-arranged suspension insulator set” that have insulator strings in a vertical arrangement and support conductors.
Strain insulator set	It is used to hold conductors to transmission towers <sup>34</sup> . The examples of application are; for angle towers, for the towers where both sides of spans have difference in level, for the towers in a consequent suspension towers, and for the towers that require large tension.
Jumper support insulator set	It is used to secure a distance required for insulation between a jumper of a Strain insulator set and a transmission tower. There are two typical patterns; one employs cap-and-pin insulators or long-rod insulators, another one employs long-rod support insulators or station-post insulators.
Insulator set for vertical bus bar	It is used for stringing power lines between upper and lower arms. It is also used for transposing of overhead lines or connecting to underground cables.
Other particular insulator sets	The examples include Line-post insulator set, Semi-strain insulator set, Tie down insulator set, and Arm insulator set.

<sup>33</sup> 上図は、電気協同研究第34巻第2号「送電用がいし装置」p.12 [26]の著作権者の許可を得て、本論文用に一部改変したものである。後に述べるが、本論文の大半は、最も広く使われている直吊りがいし装置の配置（懸垂吊り）を想定した実験・観測を実施している。一部、耐張装置のがいしの配置（耐張吊り）も実施している。したがって、ここではその他多くのがいし装置の種別について詳しく述べることは避ける。ここで掲載されているがいし装置の個々の詳細は文献[26]などを参照いただきたい。

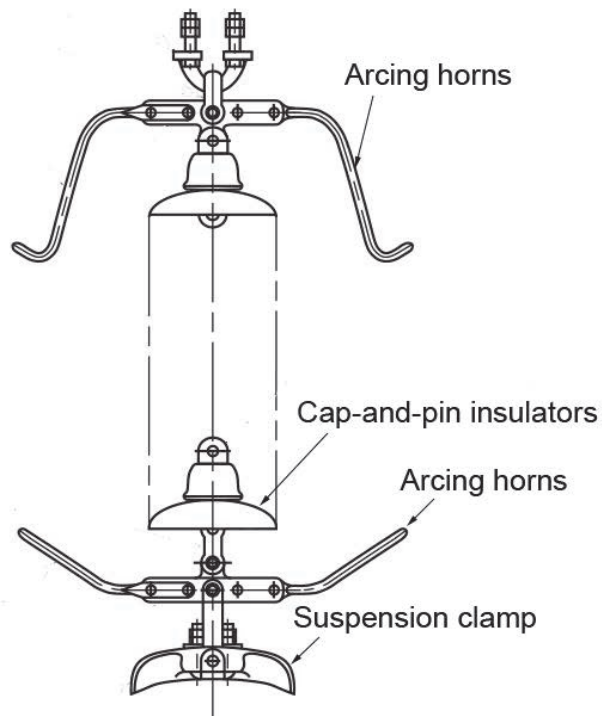


Figure 1-8. An example of I-arranged suspension insulator set with cap-and-pin insulators (a single string for 154 kV line).

図1-8 懸垂がいしを使用した直吊懸垂装置の一例（154kV 一連懸垂）

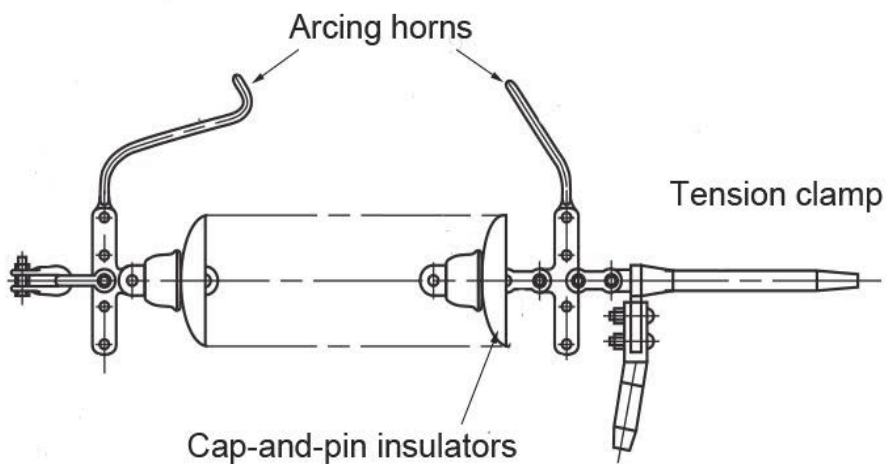


Figure 1-9. An example of strain insulator set with cap-and-pin insulators (a single string for 154 kV line).

図1-9 懸垂がいしを使用した耐張装置の一例（154kV 一連耐張）

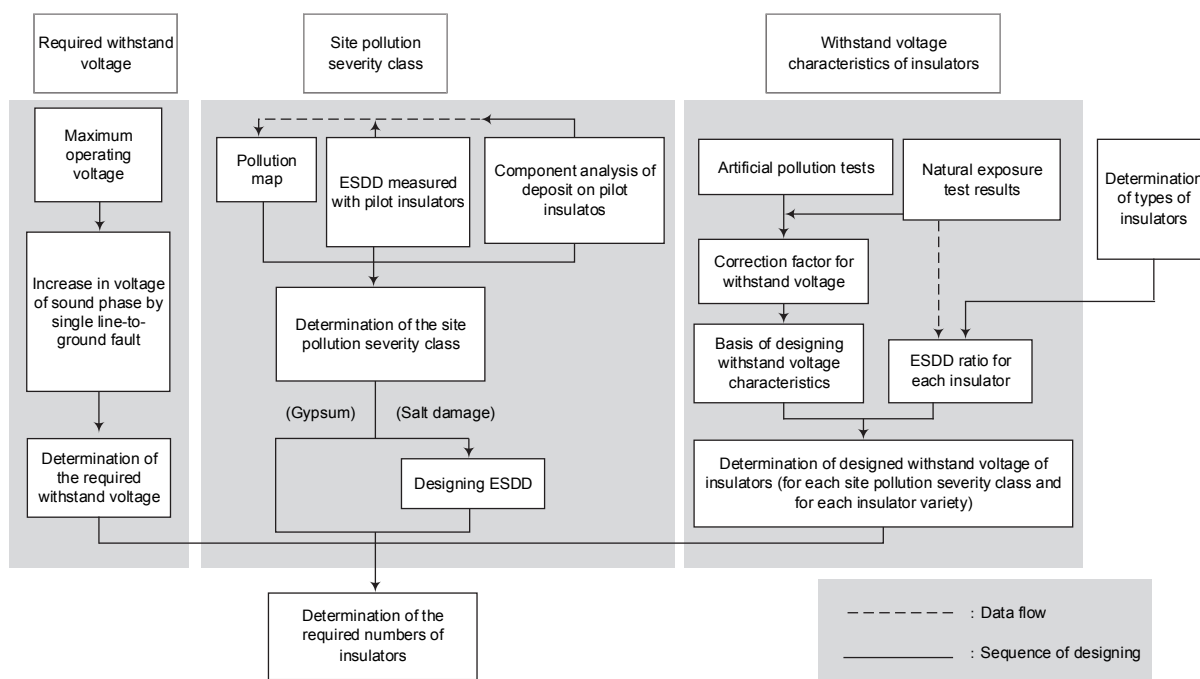


Figure 1-10. General description of the procedure in designing outdoor insulation strength under polluted conditions in Japan [32].

The outdoor insulation design under polluted environment can be determined by the required withstand voltage, the site pollution severity class, and the withstand voltage characteristics of insulators. It is recommended that the site pollution severities of Japan are classified as described in [37] and [38] (both in Japanese), assuming that the maximum ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) might be recorded during a typhoon or something unusual. The importance or reliability of the transmission line shall be taken into account in determining the required withstand voltage of individual lines. This diagram was redrawn by the author quoting from the ref. [32] that summarized above mentioned insulation design techniques.

### 図1-10 がいしの汚損絶縁設計における一連の手順の概要[32]

送電線の汚損に対する絶縁は汚損区分、汚損耐電圧目標値、がいしの汚損耐電圧特性から決定される。塩害汚損区分は、電気協同研究第20巻第2号「送変電設備の塩害対策」[37]、電力中央研究所送電機能研究委員会報告(その6)「送変電設備の耐塩害対策」[38]の推奨値に従って台風などを想定した場合の最大塩分付着密度から決定される。耐電圧目標値およびがいしの汚損耐電圧特性は、当該の送電線の重要性や信頼性を勘案して選定される。なお、上図は、これらをまとめた電気協同研究第44巻第3号「絶縁設計の合理化」[32]の中にある「第4-1図 耐汚損設計の手順」を、著作権者の許可を得て、著者が英訳したものである。

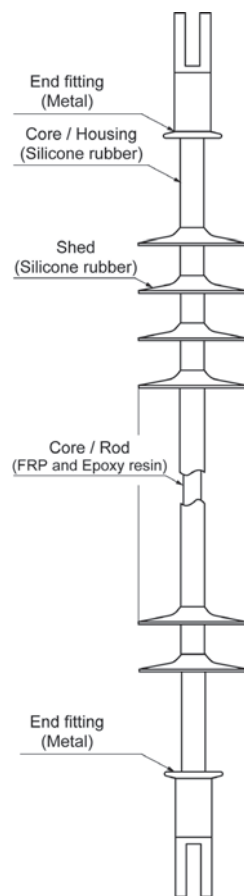


Figure 1-11. General configuration of composite insulators used for overhead lines.

Composite insulators used for overhead lines consists of the FRP core, the weather shed, and end fittings. Silicone rubber is the main stream as a material of weather shed. Silicone rubber shows a superior stability in hydrophobicity and has a recovery ability of the hydrophobicity. Thus, the surface conductivity will not increase due to the discontinuous conductive layer. That leads to the suppression of leakage current along the insulator surface. As partial arc discharge does not propagate easily, composite insulators show good performance against salt damage [35].

### 図1-11 送電用ポリマーがいしの概要

送電用ポリマーがいしは、機械荷重を分担する FRP コアと、この FRP コアを保護し、必要な表面漏れ距離を得るための外被ゴム、および FRP コアが分担する機械荷重を支持物や電線に伝達するための端末金具から構成されている。使用される外被ゴムはシリコンゴムが主流となっている。シリコンゴムは撥水性が大きくかつ撥水性回復特性を有するため、表面に付着した汚損物が湿潤環境下で導電性を有した場合にも、連続した導電層が形成されにくく、漏れ電流通路が分断されて漏れ電流の増加が抑制される。このため、局部アーク放電が伸展しにくく、塩害に対して優れた耐汚損特性を示す[35]。

### 1.1.3 送電線への自然災害とがいしへの雪害

電力各社の架空送電設備に発生した重大事故の21年間の統計(1985～2005年度、全6444件)[11]を見ると、その発生原因は、割合の高い順に雷撃(56.8%)、着雪(13.5%)、鳥獣(9.0%)、風(8.8%)であり、着雪による重大事故は、雷撃に次いで多いことが分かる(図1-12)。一般に、送電線の冠着冰雪現象は、気象条件に大きく依存する現象であり、その物理的な過程から主に、降水着冰雪と雲中着氷、昇華着氷に分類される[39]。さらに、降水着冰雪には、過冷却の雨が物体に衝突し瞬間的に凍結することで着氷が生じる雨氷、氷点以上の気温で降雪が付着する毛管型着雪(湿型着雪)、風が静穏な条件で密度の低い着雪が生じる焼結型着雪(乾型着雪)がある[39]。これらは総称して大気着氷(Atmospheric Icing[40])と呼ばれるが、それらを現象面から分類したものを表1-5に、力学的な観点から分類したものを表1-6にまとめておく。

着冰雪が生じたときの現象や送電設備の被害状況から送電線の雪害の種類を分別すると、重着雪、ギャロッピング<sup>35</sup>、がいし着冰雪に大別される[11]。これらが原因となって発生する大規模な雪害事故は、一般的には南岸低気圧や二つ玉低気圧が通過する際の強風を伴う湿型着雪によるものが大半である。このような大規模な雪害時に見られる強風を伴う多量の湿型着雪は、世界的に見ても発生地域は多くはなく、その実態については未解明な部分が多い。このため、今日に至っても、雪害の発生を完全に防止できる対策は確立されていない。中でも、平成18年豪雪[41]の新潟下越雪害の際には、送電線のがいしに生じた塩雪害<sup>36</sup>により、2005年12月、新潟県下越地域を中心に広域の電力供給支障を含む被害が発生した。がいしへの着冰雪害には、この塩雪害の他、着氷害、冠雪害などがあり、それらの一般的な特徴を表1-7にまとめておく。

架空送電設備に係わる法令の代表的なものに、「電気設備に関する技術基準の解釈」[42](以下、電技解釈)がある。その第94条【特別高圧架空電線路の塩雪害対策】は、平成18年豪雪により発生した塩雪害を受けて経済産業省原子力安全・保安部会内の電力安全小委員会が取りまとめた報告書「今後の雪害対策のあり方について」[14]に基づき書き加えられた条項である。この中には、塩雪害に関して「降雪が多くかつ塩雪害のおそれがある地域ではがいしへの着雪による絶縁破壊を防止する対策を施す」ことが要求されており、その対策方法については「例えば懸垂がいしを使用する方法がある」と言及されている。しかし、上記の「今後の雪害対策のあり方について」[14]には、「塩雪害発生条件等のデータが十分に得られているとはいえない」とも書かれており、塩雪害対策についてはさらに検討を進める必要性のあることが説かれている。

一方、2017年現在、送電設備の雪害対策に関して述べた公的規格は、代表的な国際規格、国家規格(日本)では存在しない。民間規格では、民間自主規格である架空送電規程(JEAC 6001-2013)[43]の第5-9条に唯一の記述があるが、これも2005年の塩雪

<sup>35</sup> 着冰雪により、断面形状が非対称となった架渉線において、水平風に対して揚力が発生することに起因する低周波振動のことをギャロッピングという[19]。

<sup>36</sup> 塩分を含む湿った雪が、強風によりがいし表面の笠間を埋め尽くすほどに付着したことによるフラッシュオーバー事故のことを塩雪害という[42,44,45]。



害事故後に追記されたものであり、内容は電技解釈を踏襲したものである。このような状況を鑑みて、上述の「今後の雪害対策のあり方について」の中で、今後、気象観測にあたっての項目及び方法、発生メカニズム（気象条件、がいし形状等）、これらを踏まえた対策等について検討を進めること、これらから得られる知見を適切に民間規格に反映させていくことなどが強く求められている[14]。

ここまで 1.1.3 項で述べた送電線への自然災害とがいしへの雪害については、以下のように概括される。

- ・ 架空送電設備に発生した重大事故の統計結果によると、着雪による重大事故は、雷撃に次いで多く、送電設備への着雪は主要な重大事故原因の一つである。
- ・ 送電線の雪害の種類を分別すると、重着雪、ギャロッピング、がいし着氷雪に大別される。がいしの着氷雪が顕著になると、その絶縁耐力が低下し、フラッシュオーバーを生じる場合がある。
- ・ 中でも、新潟下越雪害の際には、送電線のがいしに生じた塩雪害により、新潟県下越地域を中心に広域の電力供給支障を含む被害が発生した。
- ・ この塩雪害を受けて経済産業省原子力安全・保安部会内の電力安全小委員会が取りまとめた報告書の中で、気象観測にあたっての項目及び方法、発生メカニズム、これらを踏まえた対策等について検討を進めること等が強く求められている。

次の 1.1.4 項では、新潟県下越地域で生じた塩雪害事象について述べる。

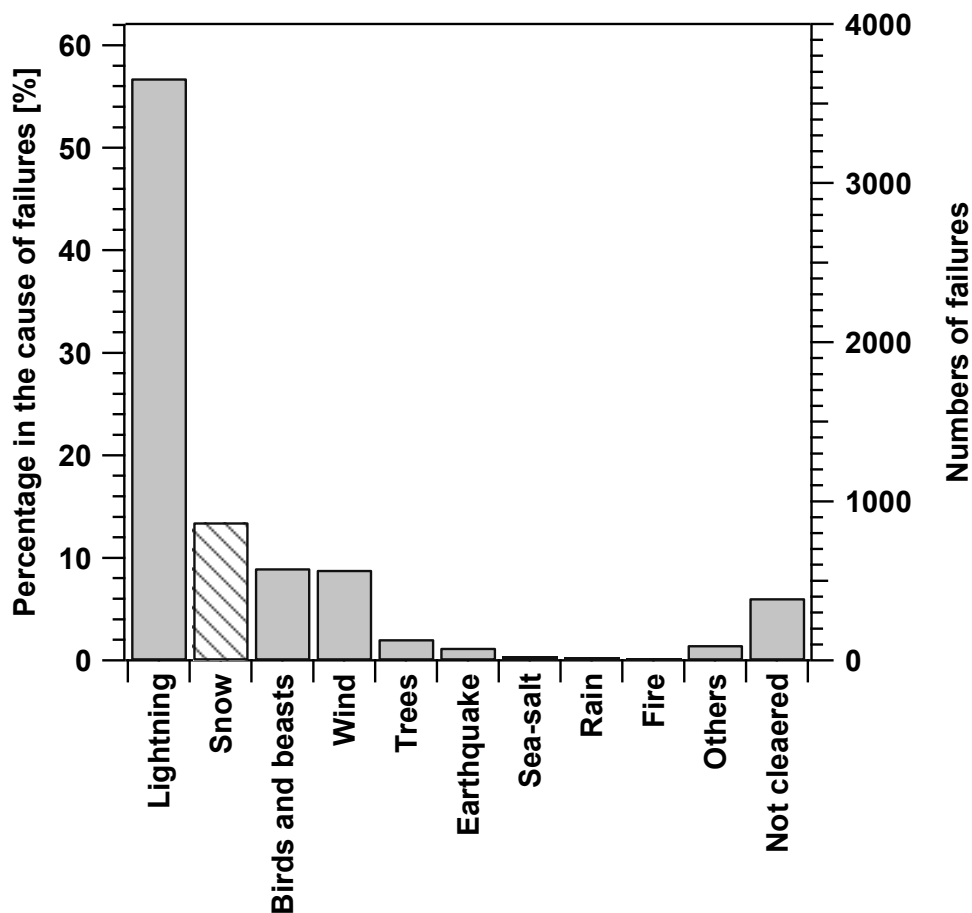


Figure 1-12. 21-years statistic data of severe accidents on overhead lines in Japan (1985 to 2005 fiscal years). [11]

This graph was redrawn by the author quoting from the “Figure 3-1-1. The causes of severe accidents in Japan” in the ref. [11].

図1-12 架空送電設備の重大事故 21年間の統計（1985～2005年度）[11]

上図は、電気協同研究第65巻第3号「自然災害に対する架空送電技術」[11]の「図3-1-1 要因別の重大な事故発生割合」にもとづいている。著作権者の許可を得て、表記法を一部改変している。

Table 1-5. Classification of atmospheric icing from the physical point of view [39,40,46,47].

表1-5 大気着氷の現象別分類[39,40,46,47]

Classification by large category	Classification by middle category
Precipitation icing	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Glaze</li> <li>▪ Snow accretion                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Wet snow accretion</li> <li>Dry snow accretion</li> </ul> </li> </ul>
In-cloud icing	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Glaze</li> <li>▪ Hard rime</li> <li>▪ Soft rime</li> </ul>
Sublimation icing	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hoar frost</li> </ul>




Table 1-6. Classification of ice and snow accretion from the mechanical point of view [40,46,47].

表1-6 着氷雪の力学的分類[40,46,47]

Classification	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Adhesion	Cohesion	Color
Glaze	700-900	Strong	Strong	Transparent
Hard rime	300-700	Strong	Very strong	Transparent or opaque
Soft rime	150-300	Middling	Middling or weak	White
Wet snow accretion	100-850	Middling	Strong or middling	White
Dry snow accretion	50-100	Weak	Weak	White
Hoar frost	<100	Weak	Weak	White

Table 1-7. General features of snow damage caused by packed snow accretion with sea-salt, ice damage, and snow damage caused by mere snow cap [44,45].

表1-7 がいしへの塩雪害、着氷害、冠雪害の一般的特徴<sup>37</sup>[44,45]

Item	Snow damage caused by packed snow accretion with sea-salt	Ice damage	Snow damage caused by mere snow cap	
Weather	Temperature	-5 to +2 °C	-10 to 0 °C	Below 0 °C
	Precipitation	Large	Case by case	Very large
	Wind speed	Over 10 m/sec	Case by case	Calm
Region	Coast or inland area where sea-salt particle could be transported	Cold region	Heavy snow area	
Quality of snow or ice	Wet snow, high density	Ice	Dry snow, low density	
Pollution	Very heavy	Case by case	Very light	
Flashover timing	Developing state	After sunrise, after increase in temperature	After sunrise, after increase in temperature	
Example photograph		 An example of in-cloud icing		

<sup>37</sup> 同表は、著作権者の許可を得て、筆者が本論文用に一部改変したものである。

#### 1.1.4 2005年に新潟県下越地域で生じた塩雪害

これまでの塩雪害の発生例としては、上述の新潟県下越地域での例に加えて、国内では1973年12月に北海道南部の日本海側で発生した例、2004年1月に北海道のオホーツク地域で発生した例 [48]が報告されている。この2例はいずれも、発達した低気圧の通過に伴い、海塩を含む大量の降雪が、強風により33 kV送電線の長幹がいしとLPがいしに着雪したことが原因とされている。海外においては、1984年にノルウェーの西海岸で発生した例 [49] が報告されている程度であり、塩雪害は国内外において稀頻度の事象であるとされている[44,45]。その中でも、歴史的な規模(表1-1)となった新潟県下越地域の塩雪害事象について、その発生状況について以下に述べる。

2005年12月22日、太平洋側に発達した低気圧が日本列島の東を北上するとともに、日本海側にあった低気圧が本州を横断した。この二つの低気圧の影響により、12月22日午前3時から午後5時頃にかけて、新潟県下越地域の外気温は0℃から+2℃の範囲で長時間推移した[50-52]。新潟地方気象台で観測された22日午前3時から午後5時までの累積降水量は26.0 mmであり、平均風速は22日午前9時頃に最大14 m/secを観測した。東北電力の観測システムでは22日午前11時に約25 m/secを超える風速を記録した[52]。

このような気象条件の下、暴風雪の通過中の午前8時17分頃に新潟変電所系統の154 kV送電線で地絡事故が発生した。これにより、健全相の電圧が上昇するなどして多くの送電線でほぼ同時に地絡事故が発生し、多重事故となった。また、これとまた同時に275 kV送電線においてギャロッピングが発生したことにより複数の送電ルートが絶たれ、塩雪害とギャロッピングのために合計30線路、49回線<sup>38</sup>が停止し(図1-14)、新潟県下越地域を中心に約60万kWの供給支障が発生した[14]。

被害状況を確認するために行われた、東北電力株式会社による事故巡視の結果、154kVと66kVの長幹がいしに成長した湿型着雪は、強風により圧密された状態(圧密着雪)となっていたことが確認された。これらは、長幹がいしの笠と笠の間を埋め尽くし、笠間を完全に橋絡していたことが明らかとなった(図1-14)。図1-15(a)に耐張装置への着雪の例を、図1-15(b)に懸垂型の避雷装置への着雪の例を示す。着雪は、がいしの回りに筒状に発達したもの、風上側に向かった三角柱型に発達したものなどが見られた。これらの着雪形状は、それまでによく知られていた着氷事象や冠雪事象とは全く異なったものであった。また、がいしに着雪した雪の比重は約0.54~0.94 g/cm<sup>3</sup>であり、強風により海塩が内陸部まで運ばれたために約200 μS/cmの高い降雪導電率が観測された[50-52]<sup>39</sup>。このような気象条件は、東北電力株式会社管内で過去30年間発生したことはなく、送電設備にとって過去に経験のない過酷な気象条件であったこ

<sup>38</sup> 電力輸送を行う単位となる導体または導体系のことを回線という[19]。

<sup>39</sup> 下越塩雪害後に同地域で行ったフィールド観測により、200 μS/cmを超える降雪は比較的頻繁に観測されることが明らかにされている[53,54]。塩雪害発生には、このような高い降雪導電率の他に、湿った降雪が強風に下で長時間継続することが必要条件である[43,44]。

とが分かっている[14]。この事象における海塩輸送メカニズムを図 1-16 に示す[14]。

一般にがいしの絶縁は自復性<sup>40</sup>を持つため、送電線事故発生時には、故障電流遮断後に一定時間を経て自動的に再送電するケースが多く、相当高い確率で再送電可能である[36]。しかし、この塩雪害に関しては、事故の直接的な原因となっている着雪を除去するまで再送電は不可能である。このため、新潟では、悪天候が比較的回復した 22 日の夜間、延べ 2500 人を超える人手によりがいしに付着した雪を取り除く復旧作業が進められたが、作業は困難を極めた[52]。結果的には、このことが供給支障を長時間に亘り継続させた原因である。この停電の影響を受けた全域の電力供給が復旧したのは、事故が発生してからおよそ 31 時間後のことであった。

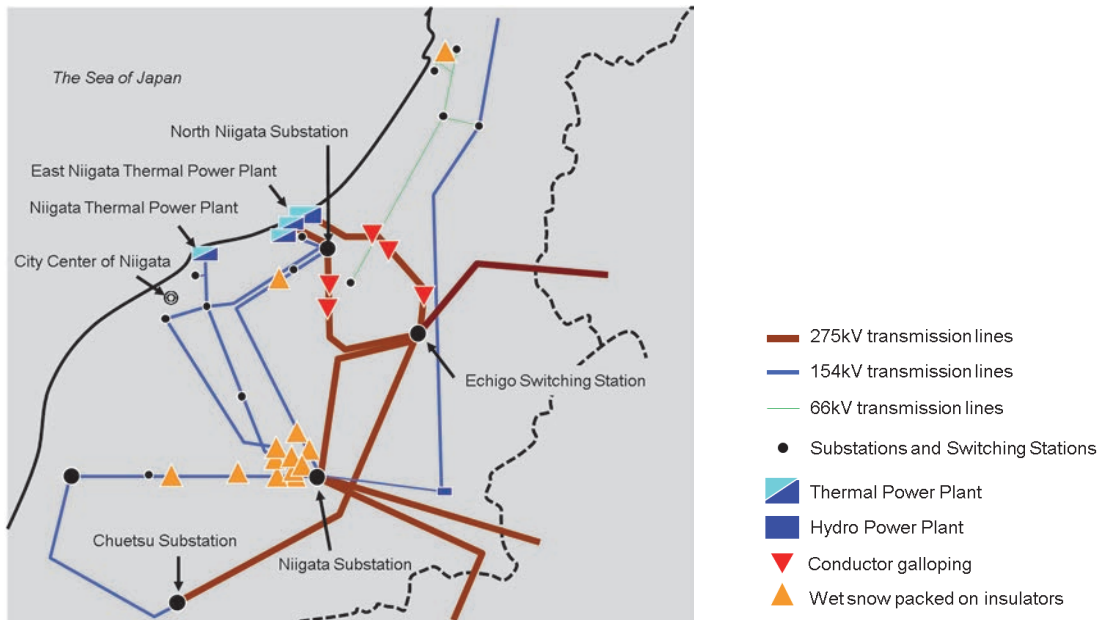
この事故を受けた送電線の塩雪害対策として、当該地域の少なくとも 1 回線の懸垂鉄塔・耐張鉄塔の本線のがいしを長幹がいしから耐塩用懸垂がいしに交換することが決定された[14]。なお、この塩雪害対策工事は、事故からおよそ 2 年後の 2007 年 11 月までに完了した[56]。これをもってひとまず当面の塩雪害対策は終了したが、対策の妥当性の検証ならびに発生メカニズムの解明に関しては、引き続き、電気事業全体で検討を進めることとなった[44]。

本項で述べた塩雪害事象の特徴について概括すると、以下のようになる。

- ・ これまで国内外で塩雪害の発生が報告された例は、新潟県下越地域での事例を含めても 4 例であり、塩雪害は稀頻度の事象であると言える。
- ・ 塩雪害発生時の気象条件の特徴は、外気温が 0 °C から +2 °C の範囲で長時間推移したこと、この間の降水量・風速が共に大きく、過去 30 年間に観測されたことのないほど過酷な気象条件であったことである。
- ・ 塩雪害は従来よく知られた着氷や冠雪とは異なる現象であり、ひとたび塩雪害が発生すると、その被害は広域かつ長時間に及ぶため深刻な事象である。
- ・ ひとまず当面の塩雪害対策は 2007 年までに終了したが、対策の妥当性の検証ならびに発生メカニズムの解明に関して、引き続き、電気事業全体で検討を進めることが求められている。

---

<sup>40</sup> 絶縁破壊を生じた後、過渡状態を経て、絶縁性能を完全に回復することをいう[55]。



Causes	Numbers of lines	Numbers of circuits
Insulator flashover	23	37
Conductor galloping	7	12
Total	30	49

Figure 1-13. Failure points of snow flashover caused by wet and packed snow accretion and sea-salt on the power system network in the Kaetsu area of Niigata Prefecture in 2005 [14].

This diagram was redrawn by the author quoting from the “Figure 1. The snow damage in the Kaetsu area of Niigata Prefecture” in [14].

図1-13 新潟県下越地域における塩雪害事故発生点 [14]

上図は、文献[14]の「図1 新潟県下越地域における雪害事故」をもとに、著作権者の許可を得て、英訳の上で複製したものである。

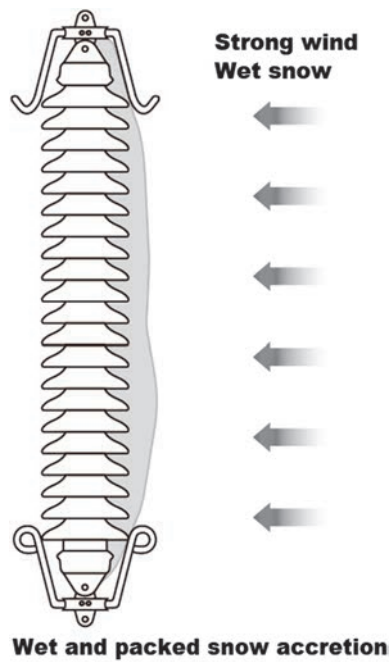


Figure 1-14. Schematic diagram of wet and packed snow accretion on a long-rod insulator string seen in the Kaetsu area of Niigata Prefecture [14].

図1-14 長幹がいしへの圧密着雪の概要[14]



(a) I-arranged suspension long-rod insulator set



(b) Lightning arrester assembly

Figure 1-15. Example photographs of snow accretion when snow damage caused by sea-salt occurred in the Kaetsu area in 2005 [52].

図1-15 2005年下越塩雪害時の長幹がいし・避雷装置への着雪の例<sup>41</sup>[52]

<sup>41</sup> 著作権者の許可を得て転載した。



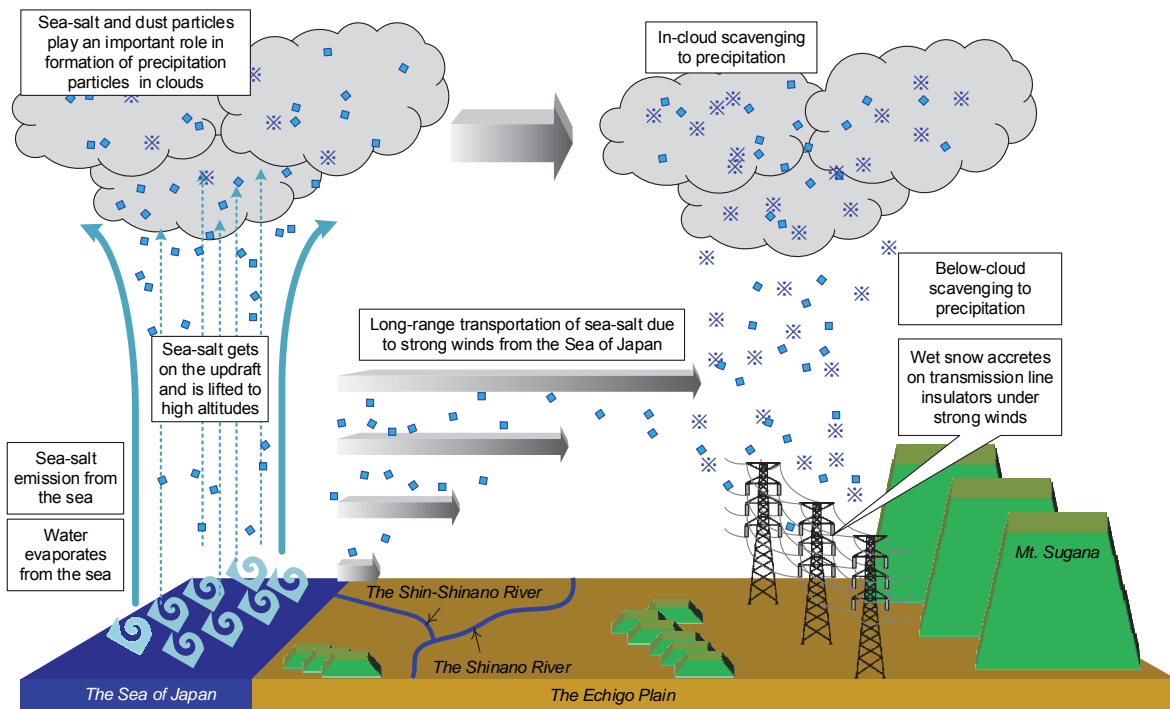


Figure 1-16. Schematic diagram of sea-salt transportation when snow damage caused by sea-salt occurred in the Kaetsu area in 2005.

This diagram was redrawn by the author referring to the “The enclosed pater 4. Estimated mechanism of snow damage caused by packed snow including sea-salt” in the press release by Tohoku EPCO on January 13, 2006. Although the existing overhead line facilities that were affected by the snow damage in 2005 started operations in between 1927 and 1985, these have not never had such like accidents until today [14]. In general, pollution degree by salt decrease with increase in distance from the sea coast. On the other hand, the failure points of the Kaetsu case were distributed mainly in inland area. The process was assumed that in-cloud salt particles were carried by strong winds, the wind flow was blocked by Mt. Sugana, and the cloud made it snow together with sea-salt transported in atmosphere, finally these contaminated snow accreted on the insulators.

#### 図1-16 2005年の新潟県下越地域に生じた塩雪害の海塩輸送メカニズム

図は東北電力株式会社プレスリリース（2006年1月13日）<sup>42</sup>の「別紙4、海塩粒子を含んだ雪のがいしへの着雪メカニズム（推定）」にもとづいている<sup>43</sup>。当該の塩雪害事故が発生した既存の送電設備は、1927年から1985年までに運用開始されたものであるが、現在までに今回のような塩雪害による停電事故を発生したことはない[14]。一般的には、沿岸区域から内陸部に向かうに従い塩汚損は少なくなっていくが、下越塩雪害では、沿岸部よりもむしろ内陸部の送電線の被害が多発した。この理由は、雲中に含まれた海塩粒子が強風で内陸部まで運ばれ、その流れが越後平野の後背に位置する菅名岳を含む山脈に遮られたために内陸の平野部に降雪をもたらし、強風に乗って飛ばされた海塩粒子と共にがいしに付着したためと考えられている[14]。

<sup>42</sup> 出展：東北電力株式会社ウェブサイト、2006年1月13日プレスリリース「新潟県内の停電の原因と再発防止対策について」、<http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2006/01/13.html>（閲覧日：2017年7月9日）

<sup>43</sup> 著作権者の許可を得て、本論文用に一部改変・英訳した。

## 1.2 従来のがいしの雪害研究の概要

1.1 節で述べたとおり、塩雪害は従来の着氷や冠雪などとは異なる現象であり、その発生は稀頻度である。このため、塩雪害の先行研究は数えるほどしかない。一方で、冠雪によるフラッシュオーバ事象は過去に国内でも多数確認されており、これを防止するため古くは 1950 年代から研究されてきた現象である。本節では、これら従来の雪害研究について、大まかに 1950～1960 年代のもの（1.2.1 項）と、1980～1990 年代のもの（1.2.2 項）とに分けて概要を紹介する。また、国際的な動向として、送電線の重大災害に関するクライテリアを述べ、北米や中国で問題となった雨氷による大規模な供給支障について概説する（1.2.3 項）。

### 1.2.1 日本の 1950～1960 年代の雪害研究

日本で本格的な雪害研究がスタートする契機となった事象は、1956 年 1 月の 154kV 只見系統に発生した多重事故[57-59]である。この事象における機器の破損は、しゃ断器 5 台、変流器 1 台、避雷器 2 台の計 8 台であったとされている[57]。降雪による気中絶縁耐力の低下でクリアランスが保てなくなったこと、SP がいしが一部分埋雪<sup>44</sup>（図 1-17(a)）したことにより、がいし沿面のフラッシュオーバ電圧が低下したことが原因と考えられた。同年 12 月に耐雪設計調査打合会が電力会社、新潟大学、電力中央研究所をメンバーとして組織され、清浄雪を対象とした気中クリアランスに関する研究が行われた。その結果、以下のことなどが明らかとなった [59-62]。

- ・ 降雪中の球-球ギャップでは、サージ電圧に対するスパークオーバ<sup>45</sup>電圧が、好天時の 70%程度まで低下する。
- ・ 外部絶縁機器が埋雪した状況を模擬した電極系（棒-平板電極ギャップの平板上に雪があるとき：図 1-17(b)）では、雷インパルス・開閉インパルス<sup>46</sup>の時間域でのフラッシュオーバ電圧最低値は、それぞれ清浄時の 60%、50%程度まで低下する。
- ・ がいし類のフラッシュオーバ電圧-時間特性に及ぼす降雪の影響は小さく、清浄時の値に対して 20%程度しか低下しない。
- ・ 積雪の誘電率は、密度の増加と共に増加する。

<sup>44</sup> 送電線の耐張がいし装置に大量の雪が積もり、長期間留まることを冠雪と呼ぶ。発変電所などの機器が降雪により埋まることを埋雪と呼ぶ[64]。

<sup>45</sup> 気体・液体中で固体表面を越えていく全路破壊をフラッシュオーバというのに対して、気体・液体中で固体表面などを介さず生じる全路破壊をスパークオーバという[18]。

<sup>46</sup> 高電圧試験、絶縁試験などにおいては、各種印加電圧波形上の最高点における電圧の瞬時値を波高値というが、インパルス電圧とは極めて短時間に波高値に達し、その後減衰する高電圧パルスである。標準的な波形およびその定義は、国際的には IEC 60060-1:2010 (High voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements) において、国内では JEC-0202-1994 (インパルス電圧・電流試験一般) において厳密に定められている。インパルス電圧は雷インパルス電圧と開閉インパルス電圧に大別される[5,28]。

- ・ 積雪の固有抵抗は、密度の増加とともに減少する。

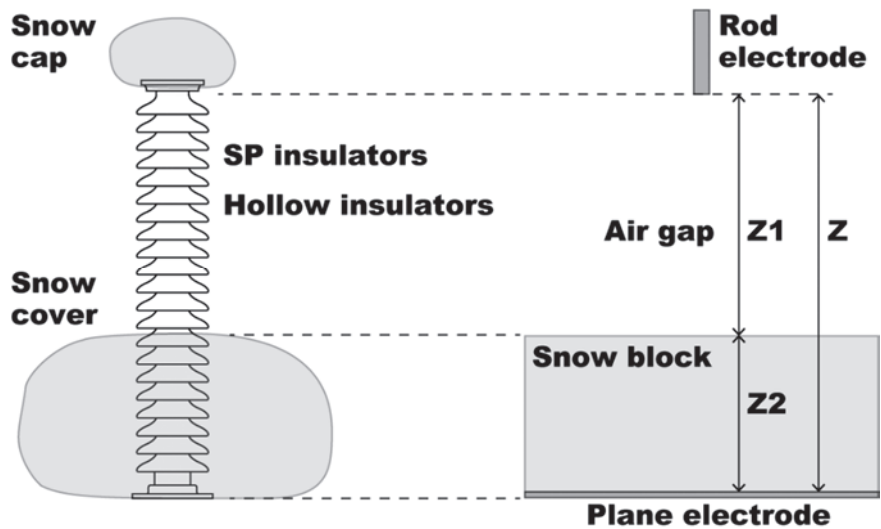
また、只見系統の事故から7年後の1963年には、関西電力275kV新北陸幹線において、冠雪がいしのフラッシュオーバー事故[63]が発生した。この事象では、里側からの遮断器投入の影響で、開閉サージ<sup>47</sup>による線路事故が発生した。この事象を受けて、人工的に冠雪させた耐張がいし連(図1-18)の開閉サージフラッシュオーバー試験が行なわれた。その結果、以下のことなどが明らかとなった[63]。

- ・ 耐張がいし連が部分的に冠雪したときのフラッシュオーバー電圧は、全冠雪時よりも低下し最低値は無冠雪時の約50%となる。
- ・ 部分的な冠雪の中では、碍子連の中間部のみあるいは充電例と接地側の両側から冠雪した場合は、接地側のみから冠雪したときよりもフラッシュオーバー電圧は高くなる。
- ・ アークホーンを装着したがいし連では、冠雪高さが高いほど、フラッシュオーバー電圧が低下する。

以上に述べた1950～1960年代の埋雪、冠雪に関する研究を概括すると、研究の主たる目的が、サージ性過電圧によるクリアランスや、気中フラッシュオーバー特性、アークホーンの絶縁協調などであったと言える。商用周波に対する絶縁設計については、まだこの段階では「垂直ながい管、プッシング、長幹がいしなどのヒダに着雪した程度では、一様に着雪しても電氣的な影響を考慮する必要はない」[63]と記されている。

---

<sup>47</sup> 電力系統における遮断器の遮断または投入によって発生する過渡的な異常電圧のことを開閉サージという。その波高値は常規対地電圧波高値の3倍以下のものが多いが、稀には4倍から5倍に達するものもある[23]。



(a) Station post insulator partially sunk in snow (b) Simulation of (a) with a rod-plane gap

Figure 1-17. Schematic diagram of experimental study on insulators partially sunk in snow in the 1950s and 1960s in Japan.

図1-17 1950～1960年代におけるがいしへの埋雪研究の概要

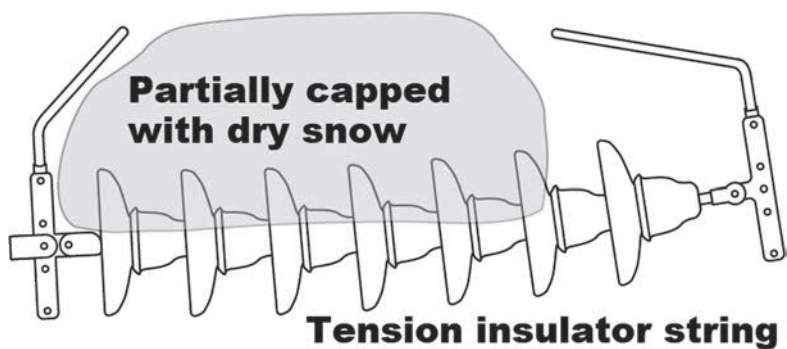


Figure 1-18. Schematic diagram of experimental study on partially snow-capped insulators in the 1950s and 1960s in Japan.

図1-18 1950～1960年代におけるがいしへの部分冠雪研究の概要

## 1.2.2 日本の1970～1980年代の雪害研究

1980～1990年代は、耐張装置のがいしに冠雪したときのフラッシュオーバー特性を中心に研究が行われた。その背景には、山岳部を通過する超高圧送電線において開閉サーージや交流運転電圧による冠雪時の事故が増加したことがあり、主たる目的は、超高圧あるいは将来に向けたUHV送電線の絶縁設計の信頼性を高めることであった[65]。試験時の印加電圧として、商用周波交流電圧の他、短時間商用周波交流過電圧、サーージ性過電圧（雷インパルス、開閉インパルス）、サーージ性過電圧を重畳させた商用周波交流電圧、および直流電圧が用いられた。このように、1980～1990年代の研究は、系統連係や絶縁協調面を考慮している点で、1950～1960年代の研究よりも幅広い検討が行われたと言えよう。一連の研究では、自然雪を用いた人工フラッシュオーバー試験が、各種の条件下で行われた。耐張配置したがいし連に、専用の治具<sup>48</sup>を用いてブロック状に冠雪した状態で、課電を行った。雪の導電率、密度、がいし連の冠雪比率などをパラメータとし、154 kV～500 kV用がいし装置の人工耐電圧試験が行われた。雪の導電率は、内陸部における典型的な値（数十 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度まで）<sup>49</sup>が主なターゲットであった。主要な結果は、以下のように概括される[63-69]。

- ・ がいし連上の冠雪は、応力、日射、気温、商用周波電圧印加による漏れ電流などの影響を受けて、時間の経過とともに、徐々に雪質が変化する。冠雪の自重や、融雪水が重力方向に移動することが原因で、冠雪の密度、含水率は、冠雪下部（がいし表面近く）で大きく変化しやすい。
- ・ がいし表面近くの融雪水は冠雪の切れ間を形成する。商用周波交流電圧が印加されている状況では、この切れ間で局部アーク放電が発生し（図 1-19(a)）、電気絶縁上苛酷な状況が生じる。このことは、フラッシュオーバー発生までの間に、冠雪の融雪水ががいし連近くに移動し、雪の比重、含水率が大きくなり雪の脱落が始まるまでのプロセスが必要であることを示している。したがって、冠雪事故のフラッシュオーバータイミングは、主として日の出後、あるいは、気温の上昇時である。
- ・ 冠雪がいの商用周波交流耐電圧は、実験を行った範囲（冠雪の密度が $0.3\sim 0.55\text{ g}/\text{cm}^3$ 、がいし連長が約 $2.5\text{ m}$ までの範囲）では、がいし連長に比例する。また、最過酷時の冠雪を想定した実験（冠雪の密度が $0.69\sim 0.82\text{ g}/\text{cm}^3$ 、導電率が $30\sim 60\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ）での商用周波交流耐電圧（連結長で規格化したもの）は

<sup>48</sup> 高須ら[69]は耐張吊りにしたがいし連に冠雪用治具を取り付け、地上の積雪(密度 $0.1\sim 0.3\text{ g}/\text{cm}^3$ )をその中に入れて押し固め、がいし連に $30\sim 40\text{ cm}$ の高さの冠雪をつくりあげた(当時、圧雪法と呼ばれた)。もう一つは地上に積雪したしまり雪を長さ $30\text{ cm}$ 、幅 $60\sim 70\text{ cm}$ 、高さ $30\sim 40\text{ cm}$ 程度の大きさにスコップなどを用いて切り出し、がいし連上に数個ならべ、その後小さな雪塊をつめて冠雪がいし連をつくりあげた(当時、切出法と呼ばれた)。

<sup>49</sup> 高須ら[69]は雪の導電率を調整するために、ビニールシートの上に細く砕いた雪を広げ、スコップでかきまぜながら着色した塩水を全体にわたってスプレーした。その後プラスチック製の箱に雪を軽く固め、前述の切出し法と同じようがいし連の上にのせた。噴霧した塩水の濃度は、導電率目標値に応じて変化させ、噴霧量一定とした。

56～59 kV/m である。

- ・ 開閉インパルス印加によるフラッシュオーバ電圧は、がいし連長に対する冠雪長の比率が 60～80%のときに最低となる。この特性は“U-shape characteristics”と呼ばれている。
- ・ 雷インパルス、商用周波交流フラッシュオーバ電圧、開閉インパルスを重畳させた商用周波交流による耐電圧は、いずれも、がいし連長に対する冠雪長の比率が 100%（図 1-19(b)：課電側から接地側まで冠雪したとき）に最低となる。
- ・ 山間部の自然条件で冠雪の観測を行った結果、導電率に関して僅かに海風の影響が認められる。しかし、海方向の風が強くなる場合は、降雪量も少なく、強風のためがいし冠雪も発達しにくい。このことを踏まえて、がいし冠雪量が多くなる内陸の山間部を対象とした絶縁設計においては、冠雪比重 0.3～0.4 g/cm<sup>3</sup>、雪の導電率 50 μS/cm、冠雪高さ 50cm 程度を考慮しておけばよい。このような想定のもとで、冠雪時の耐電圧レベルに対する現行（1988 年当時）の絶縁設計レベルを俯瞰すると、154 kV 系統から 500 kV 系統までの送電線では、商用周波交流運転電圧に対してはほとんど満足している。しかし、電圧階級の低い側では、短時間過電圧、開閉インパルスに対しては現行の設計では厳しくなる可能性がある。

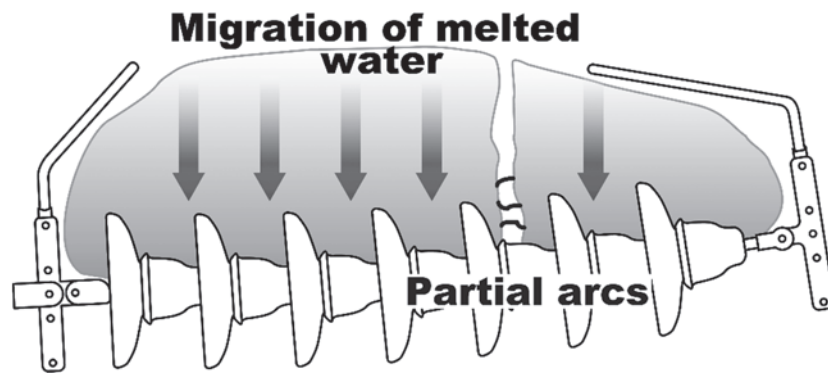
これらの一連の研究結果は、山岳部を通過する送電線の耐冠雪設計に反映されたが、この年代の日本国内では、この他にも、冠雪がいしの耐電圧特性の研究が盛んに行われ[70-72]た。いずれにしても、我が国の冠雪に対する絶縁設計の基礎が確立したと言ってよい。その後、冠雪がいしのフラッシュオーバ電圧特性に関して、IEEE Transaction や国際大電力会議（CIGRE: International Council on Large Electric Systems）<sup>50</sup>の技術報告書の中で多くのレビュー論文が掲載されたが、その中の多くは、この年代に日本で取得された試験データが用いられている[73-77]。ところが、自然環境下での着雪量や発達過程は、気象条件に大きく左右される半面、ここまでのがいし冠雪研究では、気象条件と冠雪発達の関係については詳細には記されていない[78]。

また、上に述べた冠雪がいしのフラッシュオーバメカニズムの中には、日射等による融雪水の移動過程が入っていることから、この間に相当の時間の経過が必要であることが分かる。この点でも、冠雪によるフラッシュオーバ現象が、1.1.4 項で述べたような塩雪害時のものとは異なることを示している<sup>51</sup>。

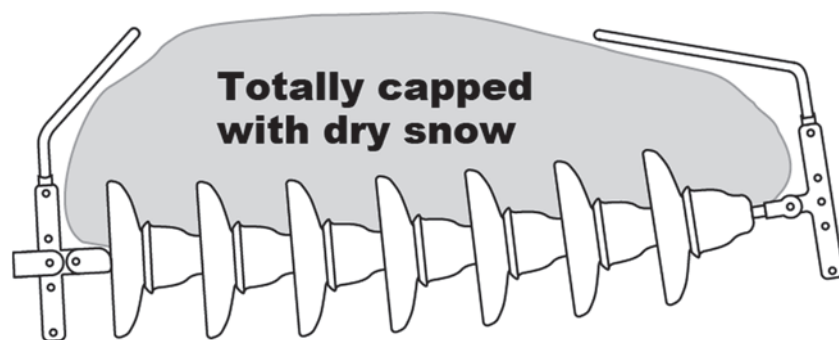
<sup>50</sup> CIGRE（国際大電力システム会議）は民間の非営利団体で、IEC から独立する形で、1921 年にフランスの Jean T. Laspierre 氏によって設立された。IEC が標準規格を定める委員会であるのに対し、CIGRE は IEC の活動に協力して送変電技術の現状についての調査や技術問題を討議する会議体である。その中の技術的な活動は、16 の技術委員会（Study Committee : SC）によって行われている。

出展：日本 CIGRE 国内委員会ウェブサイト「CIGRE の概要」、[http://www.cigre-jnc.org/paris\\_outline.php](http://www.cigre-jnc.org/paris_outline.php)（閲覧日 2017 年 6 月 5 日）

<sup>51</sup> 冠雪がいしのフラッシュオーバメカニズムに関して、カナダの Hemmatjou らは、冠雪がいし上で生じるアーク電圧を測定することにより、放電発生時の状況を電気回路上に表現した[79]。このモデル化により、小規模なポリマーがいしについて、-12℃の低温時の典型的な冠雪状態でのフラッシュオーバ電圧の推定までがなされている[80]。



(a) Migration of melted water from snow cap and occurrence of partial arcs



(b) Totally snow-capped cap-and-pin insulator string

Figure 1-19. Schematic diagram of experimental study on partially snow-capped insulators from the 1950s to the 1960s in Japan.

図1-19 1980～1990年代におけるがいしへの冠雪の研究の概要

### 1.2.3 欧米の着氷雪害研究

欧米では、CIGRE の Study Committee の一つである SC B2 (Overhead Lines) は、過酷な気象が送電線にもたらす影響が非常に大きい事象を BSE (Big Storm Event) と位置づけ、過去の送電線事故実績や各国へのアンケート調査を行った。その結果、BSE については以下のようなクライテリアにより分類することが推奨された[81]。

- ・ 事故時の気象条件が設計値を超過していること
- ・ 影響を受ける範囲が広いこと
- ・ 系統に大きなダメージを与えること
- ・ 大規模停電が発生すること
- ・ 市民生活への影響が大きいこと
- ・ 緊急時復旧システムが動作すること
- ・ 当該事象に対する事故対策が必要とされる施されること

文献[81]では、過去の BSE の一覧を挙げているが、着氷雪関係では、これまでにヨーロッパ、北米、中国など特に海外で多数確認されている雨氷・粗氷によるフラッシュオーバー事故が示されている。中でも、1998年1月5日から、カナダ東部・アメリカ合衆国北東部を襲った雨氷 (Icestorm'98) [82,83]による大停電は、大規模な着氷害として知られており、今日も代表的な参考書においてレビュー[84,85]されるほど有名である。アメリカ連邦緊急事態管理庁 (FEMA: Federal Emergency Management Agency) の当時の報告[71]によると、Icestorm'98における気象条件は、被害の大きかったニューイングランド地方北部の冬季として過去 500 年間で最悪のものであり、鉄塔、鉄柱、電柱、樹木などの倒壊が相次いで発生し、記録的な供給支障をもたらしたことが報告されている。最大で 150 万戸の需要家がこの停電の影響を受け[81]、数十万人の人たちが 3 週間以上も電気のない生活を過ごした[82]。事故後、送電線のがいしに破損や傷のようなものが認められたものの、これらががいしのフラッシュオーバーの発生によるものとまでは断定されなかった。その理由は、この Icestorm においては、送電線の支持物倒壊が早い段階で発生し、着氷に伴うフラッシュオーバー事故の発生を把握することが困難であったためである。したがって、がいし着氷に起因するフラッシュオーバー件数は、停電の直接的な原因としては、公式の記録の中に残っていない[82]。もし支持物倒壊が発生していなければ、多数の送電線のがいしがフラッシュオーバーすることによって、大規模な供給支障を引き起こしたのではないかとする見方[86]もある。

世界的に見ると、北米の Icestorm'98 の他にも、例えば、2008 年の 1 月から 2 月にかけて、中華人民共和国 (中国) 南部の 19 省にまたがる広域で、中国史上、最も甚大な着氷被害とされる送電線事故が、雨氷によって発生している[87]。中国の過去の事故統計によると、これまでに、着氷による送電線のがいしフラッシュオーバー事故は、110~500



kV の交流送電線、±500 kV の直流送電線などの基幹系統でも発生しており、今日も中国国内では、フラッシュオーバー対策に関する研究が盛んに進められている[87]。

以上に述べたようながいし着氷時のフラッシュオーバー現象は、一般に、過冷却水滴ががいしに衝突する際に凝固してがいしの笠にスカート状の氷柱（つらら）が発達し、がいしの漏れ距離を低下させることによって発生することが知られている。その初期段階では、氷柱の先端から streamer（ストリーマ）<sup>52</sup>が発生し、フラッシュオーバーに近づくにつれて放電様相が“white-arc”へと変化してフラッシュオーバーに至ることが分かっている[88]。このとき、氷柱表面には溶けた氷による汚損被膜が形成されるが、フラッシュオーバー電圧特性は、この被膜部分の導電率に大きく依存する。このような実験室での着氷がいしの人工課電試験は、世界中で行われており、がいし種類によるフラッシュオーバー電圧の違いは、多くの部分が明らかにされている[84-86,89]。近年では、中国内陸部の高標高地域に UHV 送電線が建設されている事情もあり、着氷事象に対する関心が一層高まっている。また、がいし表面に、超撥水性あるいは半導電性塗料を塗布することにより、表面を難着氷化する技術などについても、CIGRE を中心に技術的検討が行われている[90]。

なお、日本では、雨氷による絶縁上の不具合事例は、冠雪や着雪のそれに比べて少なく、これを述べた文献もほとんど見当たらない。北米や中国のように雨氷による大規模な供給支障はほとんど発生していないものと思われるが、過去には、北海道空知地方[91]を通過する送電線において、着氷が原因と見られる事故が発生したこともあるため、決して日本と無関係な事象であるとは言えない。

### 1.3 本研究の位置づけ

1.2 節で述べたように、着氷雪がいしの絶縁特性の研究は、国内外問わず、大規模な供給支障を伴う事故が発生し、その対策の必要性に迫られる形で発展してきた歴史がある。この点では、現在、我が国では、2005 年に発生した新潟県下越地域の塩雪害について全容を明らかにした上で、これに基づく塩雪害対策ガイドラインを構築することが喫緊の課題である。特に、電気工学的な観点からは、各種がいしの着雪時フラッシュオーバー電圧特性の把握が必須であるだけでなく、その裏付けとなる、雪の誘電・絶縁特性、フラッシュオーバーに至る際の放電伸展様相の解明が必要である。また、塩雪害が稀頻度な事象であるため、がいしに着雪が形成される過程（着雪特性）そのものも明らかになっておらず、塩雪害事象の全容解明のためには着雪特性の把握も必須である。本研

---

<sup>52</sup> 気体中に高電界部が存在すると、電界によって加速された電子の衝突により気体分子が電離されて電子なだれを生ずる。このうち、正イオンは電気力線の方向に力を受けてドリフトされ、やがて陰極に到達するが、気体の圧力  $p$  と電極間距離  $d$  との積  $pd$  がある一定値以上になると、絶縁破壊に至るまでの時間が正イオンの陰極到達時間よりもはるかに短くなると共に、放電の外観はチャンネル状を呈すようになる。1939 年に Reater が霧箱を使って紡錘状の電子なだれの図形を初めて観測し、電子なだれから導電性のプラズマチャンネルが成長することを発見した。この高速に成長するプラズマチャンネルのことを Streamer（ストリーマ）と呼び、ストリーマが火花放電（破壊放電）を導く放電をストリーマ放電、その理論をストリーマ理論と呼ぶようになった[92]。

究では、こられを踏まえて、日本特有の気象条件と、国内の電力各社の使用実態に応じたがいし種類や形状を考慮し、塩雪害を想定した実験および観測を実施することにより、各種特性の評価を行う。これらの検討は、将来、新たな対策品の選定や設計の合理化などを行う上でも重要になるものと考えられる。本論文は、以下のように構成される。

## 1.4 本論文の構成

第2章では、複素インピーダンス測定に基づく雪の誘電・絶縁特性を検討する。本論文の第3～5章では、着雪がいしの漏れ抵抗に着目して、漏れ抵抗とフラッシュオーバー特性の関係を議論する。その前準備として、雪そのものの複素誘電特性の把握が不可欠である。従来の冠雪の研究においては、その全ての検討において自然条件下の降雪あるいは積雪を用いるのが一般的であったが、日射、気温の変化、焼結などによる雪質の変化のために、実験の再現性の確保が課題であった。そこで、本研究では、環境試験室内の一定条件下において、含有塩分量を規定した水溶液から均一な粒径を持つ氷粒（人工雪）を作製し条件を制御することにより、再現性の問題を小さくすることを試みた。また、測定した人工雪の複素インピーダンスを評価する上で、物理現象の時間遅れに関する線形応答理論と直列結合型等価回路により、融雪過程を電気回路上の素子で表現することに成功した。

第3章では、塩雪害事象を模擬した小規模実験により、着雪時フラッシュオーバー現象についての基礎要素を検討する。33 kV級の長幹がいしに対して、印加電圧方法を変えた2種類の課電実験を行い、フラッシュオーバー過程の観測から、人工的な暴風雪の下でフラッシュオーバーが発生しうることを示す。また、着雪時のフラッシュオーバー電圧に関して、第2章の結果から、その漏れ抵抗値で整理することにより、これまでの冠雪がいしの研究とは異なる観点でフラッシュオーバー特性を表現できることを示す。

第4章では、154 kV実規模級のがいしに対して、着雪の塩分量を変えたときのフラッシュオーバー電圧特性を求める。塩雪害を対象とした湿雪の圧密着雪のフラッシュオーバー電圧試験方法は、国際的にも実施例がないため、実規模試験法の検討からスタートする。1) 人工雪の生成、2) 人工雪のがいしへの着雪、3) 着雪の含水率を上昇、4) 電圧印加、の4つのステップで検討を行い、湿雪が圧密着雪した状態におけるフラッシュオーバー特性の評価が再現性よく実施可能であることを示す。この試験法を、磁器とポリマーがいしに適用することで、各種がいしの実規模でのフラッシュオーバー電圧特性を求める。

第5章では、がいしの形状と気象条件に基づくがいしの着雪特性を検討する。その中では、塩雪害の発生した新潟県下越地域の自然環境下にがいしを暴露し、着雪特性を観測することを主眼に置いたが、自然環境下での観測機会は限られるため、これを

補完し、風速条件によるがいしごとの定量比較を行うために、自然環境下との等価性に注意を払った上で人工着雪試験による評価も実施した。また、圧密着雪発生の蓋然性を評価するための指標として、風速と降水量の積を気温による重み付けした「着雪ポテンシャル」を用い、塩雪害発生の危険度が評価できる可能性のあることを示した。これらに加えて、ポリマーがいしの雪害環境への適用性を評価するための一環として、北海道釧路市において磁器がいしとポリマーがいしを同一の条件で暴露し、それらの着雪発達様相、落雪様相を比較した。

第6章では、第2章から第5章までの結果を踏まえて、塩雪害時のがいしのフラッシュオーバー機構を推定し、これに基づくがいしの塩雪害対策手法を提案する。

第7章では、本研究から得られる結果の要点と、それらが及ぼす効果をまとめて述べる。

以上の本論文の構成、ならびに各章の主要な要素について、その関係を模式的に示すと図1-20のようである。これは大概を示す概念図であり、厳密には全てを網羅しているとは言い難い部分もあるが、本論文の導入部としてその概要を把握するためのキーワードは十分に盛り込んだ。

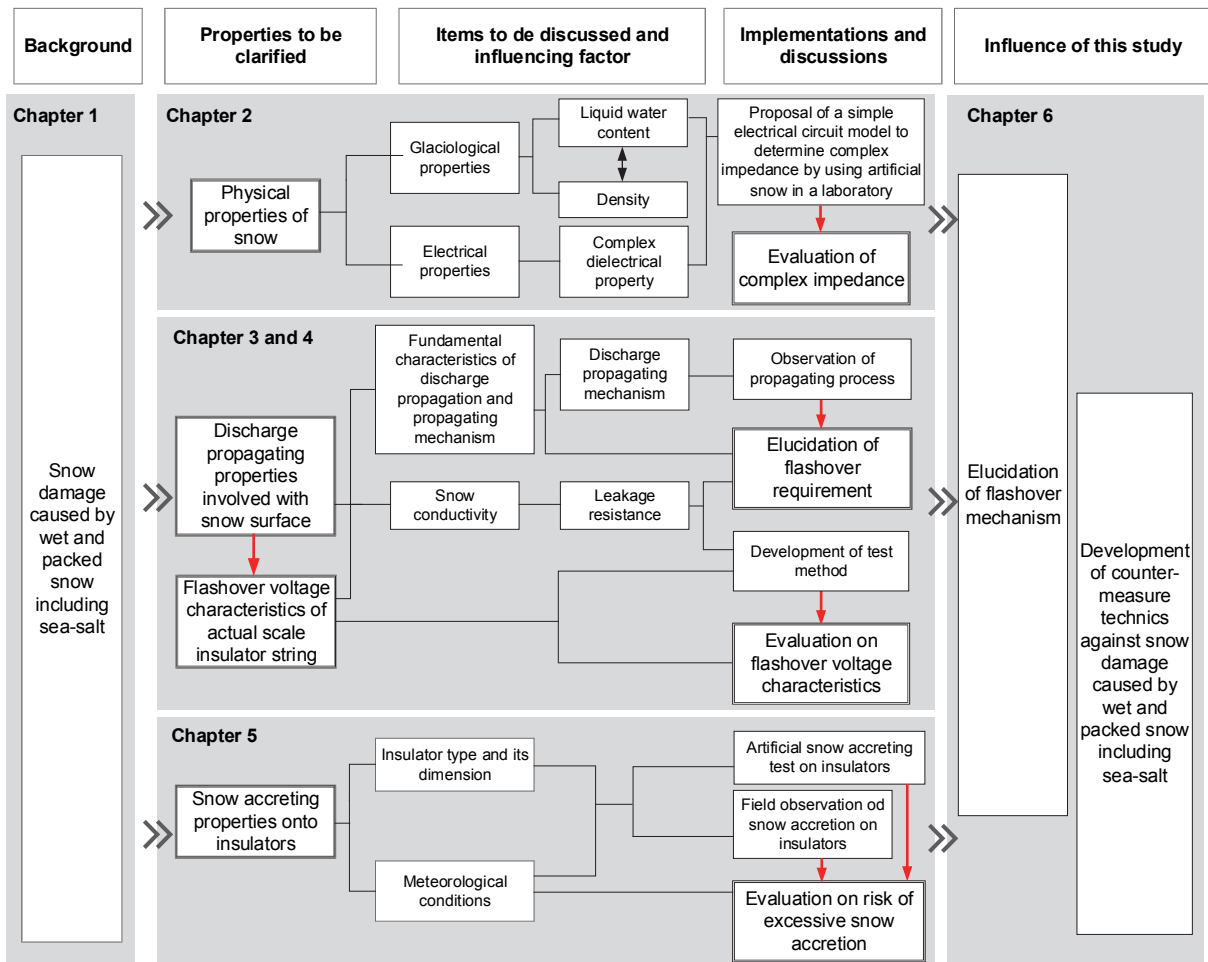


Figure 1-20. Overview of this study and the relation among various contents in each Chapter of this thesis.

Solid lines represent relationships of each elements and major contents that are influenced by the other or involved with each other.

図1-20 本論文の構成、ならびに各章の主要な要素の概念

実線で結ばれた要素は、片方が他方に関係する、あるいは両方が互いに関係性を持つものである。

## 第 1 章の参考文献

- [1] 電気学会編：「電気学会 125 年史」、電気学会 (2013)
- [2] パワーアカデミーホームページ、電気工学ガイド、  
<http://www.power-academy.jp/electronics/guide/>  
閲覧日 2017 年 5 月 21 日
- [3] 浜渦 純大、星野 優子、永田 豊、桜井 紀久、門多 治：「2030 年までの産業構造・エネルギー需給展望」、電力中央研究所報告、研究報告、Y12033 (2013)
- [4] M. Sugiyama, “Climate change mitigation and electrification”, Energy Policy, Vol.44, Issue C, pp. 464 – 468 (2012)
- [5] 電気科学技術奨励会編：「現代 電力技術便覧」、オーム社 (2007)
- [6] 環境省：「地球温暖化対策計画」、環境省報道発表「「地球温暖化対策計画」の閣議決定について」別添資料 1 (2016)
- [7] 杉山 大志：「IPCC 第 5 次評価第 3 部会報告書の解説（速報）」、電力中央研究所ディスカッションペーパー、SERC14001 (2014)
- [8] 電気事業連合会：「FEPC INFOBASE 2016」、電気事業のデータベースパンフレット、<http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/pdf/infobase2016.pdf>  
閲覧日 2017 年 5 月 16 日
- [9] 片岡 正次郎、鶴田 舞、小路 泰広：「重要インフラ間の相互依存構造のモデル化と地震被害及シミュレーション」、国土交通省国土技術政策総合研究所資料 No. 510, p. 121 – 122 (2009)
- [10] 日本学術会議答申：「地球規模の自然災害の増大に対する安全・安心社会の構築」(2007)
- [11] 電気協同研究会 自然災害に対する架空送電技術の動向調査専門委員会編：「自然災害に対する架空送電技術」、電気協同研究、第 65 巻、第 3 号 (2009)
- [12] パワーアカデミー編：「世界の電気はこうしてつくられる！」、オーム社 (2009)
- [13] 経済産業省 資源エネルギー庁電力・ガス事業部政策課、電力市場整備課、原子力安全・保安院電力安全課編：「電気関係報告規則の解説」、日本電気協会 (2005)
- [14] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会：「今後の雪害対策のあり方について」、経済産業省ホームページ、  
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g70125a01j.pdf>  
閲覧日 2016 年 10 月 19 日
- [15] 杉山 大志：「温暖化の政策科学 —2030 年の電力化率はどうあるべきか」、国際環境問題研究所ホームページ、<http://ieei.or.jp/2015/03/sugiyama150303/2/>  
閲覧日 2017 年 6 月 4 日
- [16] 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編：「EDMC/エネルギー・経済統計

- 要覧 2017」、省エネルギーセンター (2017)
- [17] 海外電力調査会：「海外電気事業統計 2016年版」(2016)
  - [18] 電気学会編：「電気工学ハンドブック 第7版」、オーム社 (2013)
  - [19] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「送電線路」、電気学会電気専門用語集 No. 21、コロナ社 (1988)
  - [20] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「がいしおよびブッシング」、電気学会電気専門用語集 No. 12、コロナ社 (1975)
  - [21] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「絶縁材料」、電気学会電気専門用語集 No. 16、コロナ社 (1983)
  - [22] 藤村 哲夫：「土と炎とエレキテル —がいしの歩んできた道—」、日本ガイシ株式会社 (1992)
  - [23] 鳳 誠三郎、木原 登喜夫：「高電圧工学」、共立出版 (1960)
  - [24] 広瀬 胖、瀬田 泰助：「塩じん害対策」、電気学会雑誌、Vol. 84、No. 911 pp. 1147 - 1156 (1964)
  - [25] 新宮 行太：「碍子とブッシング」、オーム社 (1957)
  - [26] 電気協同研究会 送電用がいし装置専門委員会編：「送電用がいし装置」、電気協同研究、第34巻、第2号 (1978)
  - [27] 電気学会 電気規格調査会編：「JEC-5201:2017 懸垂がいし」、電気書院 (2017)
  - [28] 電気学会 試験電圧標準特別委員会 絶縁試験法小委員会編：「絶縁試験法ハンドブック」、オーム社 (1971)
  - [29] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「電力用開閉装置」、電気学会電気専門用語集 No. 15、コロナ社 (1982)
  - [30] 森田 健児：「架空送電線における懸垂がいしの信頼性向上に関する研究」、東京工業大学博士論文 (1998)
  - [31] 電気学会 送電線絶縁設計要綱調査専門委員会編：「架空送電線の絶縁設計要綱」、電気学会技術報告、II部、第2-220号 (1986)
  - [32] 電気協同研究会 絶縁設計合理化専門委員会編：「絶縁設計の合理化」、電気協同研究、第44巻、第3号 (1988)
  - [33] 有働 龍夫：「電力系統絶縁工学 —サージと事故防止—」、オーム社 (1999)
  - [34] 電気学会 屋外用ポリマー絶縁材料の性能評価・改質技術調査専門委員会編：「屋外用ポリマー絶縁材料の性能評価・改質技術」、電気学会技術報告、第1383号 (2016)
  - [35] 電気協同研究会 架空送電用有機がいし技術専門委員会編：「架空送電用有機がいしの現状と今後の展望」、電気協同研究、第56巻、第1号 (2000)
  - [36] 宅間 董、高橋 一弘、柳父 悟編：「電力工学ハンドブック」、朝倉書店 (2005)
  - [37] 電気協同研究会 塩害対策専門委員会送変電分科会(1)編：「送変電設備の塩害対策」、電気協同研究、第20巻、第2号 (1964)

- [38] 電力中央研究所 送電機能研究委員会編：「500 kV 送変電設備の耐塩害設計」、500 kV 送電に関する研究報告、その 6 (1969)
- [39] 坂本 雄吉：「送電線への着氷雪の機構と荷重推定」、電気学会雑誌、Vol. 109、No. 1、pp. 21 – 28 (1989)
- [40] CIGRÉ WG B2.16, “Guidelines for Meteorological Icing models, Statistical Methods and Topographical Effects”, CIGRÉ Technical Brochure, No. 291 (2006)
- [41] 気象庁：平成 18 年の冬に発生した大雪の命名について、気象庁報道発表資料、  
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0603/01a/18gousetu.pdf>  
閲覧日 2017 年 6 月 4 日
- [42] 経済産業省 大臣官房商務流通保安審議官：電気設備の技術基準の解釈、平成 28 年 5 月 25 日改正 (2016)  
[http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/dengikaishaku.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/dengikaishaku.pdf)  
閲覧日 2017 年 6 月 4 日
- [43] 日本電気協会 送電専門部会編：「架空送電規程 第 8 版 (JEAC 6001-2013)」、電気技術規程送電編、日本電気協会 (2014)
- [44] 西原 崇、杉本 聡一郎、清水 幹夫、本間 宏也、石川 智巳、屋地 康平、松宮 央登、大原 信、木原 直人、麻生 照雄、渡邊 真人、平口 博丸：「送電設備の雪害に関する研究 –2007~2011 年度成果–」、電力中央研究所報告、総合報告、N19 (2013)
- [45] 本間 宏也、屋地 康平、木原 直人、大原 信、西原 崇、平口 博丸：「送電設備の雪害に関する研究」10 ヶ年研究成果 (その 2) –がいし塩雪害の評価手法と対策–、電力中央研究所報告、研究報告、H16004 (2017)
- [46] CIGRÉ WG B2.29, “Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires”, CIGRÉ Technical Brochure No. 438 (2010)
- [47] M. Farzaneh, “Insulator Flashover under Icing Conditions”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 5, pp. 1997 – 2011 (2014)
- [48] N. Sugawara and K. Hosono, “Insulation properties of long rod and line post insulators for 33kV transmission line in wet-snow storm on January 2004”, Proc. of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2005)
- [49] S. M. Fikke, J. E. Hanssen, and L. Rolfseng, “Long range transported pollution and conductivity on atmospheric ice on insulators”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.8, pp. 1311 – 1321 (1993)
- [50] T. Onodera, H. Inukai, and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2007)
- [51] 小田島 達彦、池川 豊年、坂田 学：「新潟下越雪害と再発防止に向けた研究の取

- り組み」、日本風工学会誌、Vol. 2008、No. 114、pp. 17 – 23 (2008)
- [52] G. Sakata and H. Homma, “Overview of Blackout in Niigata and Study on Property of Wet Snow Packed with Sea-Salt on Insulator Strings”, Proc. of INMR World Congress on Insulators, Arresters & Bushings (2009)
- [53] 高橋 章、藤田 慎一、坂田 学：「新潟県下越地域における降雪の電気伝導度の連続観測」、雪氷研究大会 (2008)
- [54] 大原 信、藤田 慎一、杉本 聡一郎、高橋 章：「冬季日本海沿岸地域で観測された降雪と降雨における海塩成分の洗浄比」、電力中央研究所報告、研究報告、V11036 (2012)
- [55] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「絶縁強調・高電圧試験」、電気学会電気専門用語集 No. 17 (1986)
- [56] 東北電力株式会社：「エネルギーセキュリティへの対応と供給信頼度の維持～電気の安定供給～」、CSR Report 2008、pp. 57 – 58 (2008)
- [57] 松沢 清治：「系統絶縁の雪害対策」、電気学会雑誌、Vol. 82、No. 880、pp. 90 – 96 (1962)
- [58] 尾崎 勇造、高木 子平：「雪と閃絡現象」、雪氷、Vol. 29、No. 3、pp. 65 – 69 (1967)
- [59] 若林 疆、小林 六四郎：「放電ギャップの交流火花電圧におよぼす雪の影響」、電気学会雑誌、Vol. 78、No. 833、pp. 176 – 185 (1958)
- [60] 石橋 鏡造、喜多村 博：「積雪の電氣的性質とギャップの交流破壊電圧におよぼす雪の影響」、電気学会雑誌、Vol. 82、No. 880、pp. 97 – 103 (1962)
- [61] 石橋 鏡造、喜多村 博：「複合誘電体の交流破壊電圧特性」、電気学会雑誌、Vol. 82、No. 880、pp.104 – 109 (1962)
- [62] 瀬田 泰助：「サージ性電圧よりみた降積雪の電氣的影響」、電気学会雑誌、Vol. 82、No. 880、pp. 110 – 116 (1962)
- [63] 石橋 鏡造：「雪とフラッシュオーバー現象」、雪氷の研究、No. 5、架空送電線の冰雪害対策、pp. 177 – 184 (1973)
- [64] 高須 和彦、松田 久一：「交流送電線における冠雪がいしの耐電圧特性」、電気学会論文誌 B、Vol. 110、No. 5、pp. 404 – 412 (1990)
- [65] 渡辺 泰夫、熊谷 睦雄、東海林 官二郎、佐藤 妙一、岩谷 高四郎、五十嵐 恒治、藤掛 和男：「冠着冰雪がいしの耐電圧特性(その 1) —冠雪がいしの交流耐電圧実験結果(1980年1月～3月)—」、電力中央研究所報告、研究報告、180010 (1980)
- [66] 熊谷 睦雄、松田 久一：「冠着冰雪がいし連の耐電圧特性 (その 5) —冠雪がいし連の開閉インパルスおよび雷インパルスフラッシュオーバー特性—」、電力中央研究所報告、研究報告、T86005 (1986)
- [67] 高須和彦、熊谷 睦雄、新藤 孝敏、八島 政史、渡辺 泰夫、高橋 宏郎、前田 満、山崎 潤一：「冠着冰雪がいしの耐電圧特性 (その 4) —冠雪がいしの交流および交流開閉インパルス重畳フラッシュオーバー電圧特性—」、電力中央研究所報告、研



- 究報告、184030 (1985)
- [68] 熊谷 睦雄、渡辺 泰夫、高橋 宏郎「冠着雪がいしの耐電圧特性（その3）—冠雪がいしの開閉インパルスフラッシュオーバー特性—」、電力中央研究所報告、研究報告、184011 (1984)
- [69] 高須 和彦、松田 久一、小川 尚：「交流送電線における冠雪がいし連の耐電圧特性」、電力中央研究所報告、研究報告、T88026 (1988)
- [70] T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa, and T. Kawaguchi, “Performance of Insulators Covered with Snow or Ice”, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 98, pp. 1621 – 1631 (1979)
- [71] M. Yasui, K. Naito, and Y. Hasegawa, “AC Withstand Voltage Characteristics of Insulator String Covered with Snow”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, pp. 828 – 838 (1988)
- [72] T. Iwama, Y. Sumiya, H. Matsuoka, S. Ito, and K. Sakanishi, “Investigation of AC insulation performance of tension assembly covered with snow”, NGK Review, No. 14, pp. 26 – 30 (1990)
- [73] M. Farzaneh, T. Baker, A. Bernstorf, J. T. Burnham, T. Carreira, E. Chemey, W. A. Chisholm, R. Christman, R. Cole, J. Cortinas, C. de Turreil, J. F. Drapeau, J. Farzaneh-Dehkordi, S. Fikke, R. Gorur, T. Grisham, I. Gutman, J. Kuffel, A. Phillips, G. Powell, L. Rolfseng, M. Roy, T. Rozek, D. L. Ruff, A. Schwalm, V. Sklenicka, G. Stewart, R. Sundararajan, M. Szeto, R. Tay, and J. Zhang, “Selection of station insulators with respect to ice and snow - Part I: Technical context and environmental exposure”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 264 – 270 (2005)
- [74] M. Farzaneh, T. Baker, A. Bernstorf, J. T. Burnham, T. Carreira, E. Chemey, W. A. Chisholm, R. Christman, R. Cole, J. Cortinas, C. de Turreil, J. F. Drapeau, J. Farzaneh-Dehkordi, S. Fikke, R. Gorur, T. Grisham, I. Gutman, J. Kuffel, A. Phillips, G. Powell, L. Rolfseng, M. Roy, T. Rozek, D. L. Ruff, A. Schwalm, V. Sklenicka, G. Stewart, R. Sundararajan, M. Szeto, R. Tay, and J. Zhang, “Selection of station insulators with respect to ice and snow - Part II: Methods of selection and options for mitigation”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 271 – 277 (2005)
- [75] M. Farzaneh, A. C. Baker, R. A. Bernstorf, J. T. Burnham, E. A. Chemey, W. A. Chisholm, R. S. Gorur, T. Grisham, I. Gutman, L. Rolfseng, and G. A. Stewart, “Selection of line insulators with respect to ice and snow - Part I: Context and stresses”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2289 – 2296 (2007)
- [76] M. Farzaneh, A. C. Baker, R. A. Bernstorf, J. T. Burnham, E. A. Chemey, W. A. Chisholm, I. Fofana, R. S. Gorur, T. Grisham, I. Gutman, L. Rolfseng, and G. A. Stewart, “Selection of line insulators with respect to ice and snow - Part II: Selection methods and mitigation options”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2297 – 2304 (2007)

- [77] CIGRE TF33.04.09, “Influence of Ice and Snow on the Flashover Performance of Outdoor Insulators Part 2: Effects of Snow”, *Electra*, No.188, pp. 55 – 69 (2000)
- [78] H. Hemmatjou, M. Farzaneh, and I. Fofana, “AC Arc Characteristics on a Snow-Covered Cylinder”, *Proc. of the IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 329 – 332 (2005)
- [79] H. Hemmatjou, “Modeling of AC Arc Inside Wet Snow”, Doctoral thesis of University of Quebec (2006)
- [80] 電力中央研究所編：「187kV～1100kV の交流架空送電線の電气的設計ハンドブック」、電力中央研究所報告、総合報告、T02 (1986)
- [81] CIGRÉ WG B2.06, "Big Storm Events What We Have Learned", CIGRE Technical Brochure, No. 344 (2008)
- [82] K.F. Jones and N.D. Mulherin, "An Evaluation of the Severity of the January 1998 Ice Storm in Northern New England Report for FEMA Region 1", US Army Corps of Engineers (1998)
- [83] R.M. Campbell, “Lessons from the ice storm 1998: A Quebec perspective”, *Journal of Canadian studies*, Vol.32, No.4, pp.3 – 4, (1998)
- [84] M. Farzaneh, “*Atmospheric Icing of Power Networks*”, Springer Science+Business Media B.V. (2007)
- [85] M. Farzaneh and W.A. Chisholm, “*Insulators for Icing and Polluted Environments*”, Wiley-IEEE Press (2009)
- [86] INMR, “Selection of Insulators with Respect to Icing”, *Insulator News and Market Report(INMR)*, Issue 111, pp. 66 – 75 (2016)
- [87] X. Jiang, J. Zhao, B. Luo, J. Zhang, and C. Huang, “Survey and Analysis of Ice Accidents of Early 2008 in Southern China”, *Proc. of the 13th International Workshop on Atmospheric Icing of structures (IWAIS)* (2009)
- [88] M. Hara, C.L. Phan, “Leakage current and flashover performance of iced insulators”, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 3, pp.849 – 859 (1979)
- [89] CIGRE TF33.04.09, “Influence of Ice and Snow on the Flashover Performance of Outdoor Insulators Part 1: Effects of Ice” , *Electra*, No. 187, pp. 90 – 111 (1999)
- [90] CIGRE WG B2.44, “Coatings for Protecting Overhead Power Network Equipment in Winter Conditions”, CIGRE Technical Brochure, No. 631 (2015)
- [91] 大浦 久到、守護 雅富、酒井 晃、木村 直行：「送変電設備における塩雪害発生条件の一考察」、北海道の雪氷、No. 27、pp. 5 – 8 (2008)
- [92] 原 雅則、酒井 洋輔：「気体放電論」、朝倉書店、朝倉電気電子工学大系 1 (2011)

## 第 2 章

複素インピーダンス測定に基づく  
着雪の誘電・絶縁特性の検討

## Chapter 2

**Discussion about Dielectric and Electrical  
Insulating Properties of Accreted Snow  
Based on the Complex Impedance**

## 第 2 章 複素インピーダンス測定に基づく着雪の誘電・絶縁特性の検討

### 2.1 まえがき

塩雪害事象の発生メカニズムを検討する上で、塩雪害事象の発生を左右する特徴的な物理量を挙げておくことは重要である。この物理量については、塩雪害発生時の状況証拠などから、気象条件としては気温、湿度、風速などが挙げられ、雪質を表すパラメータとしては着雪量、着雪中に含まれる塩分量・水分量などが挙げられることは想像に難くない。先に述べておくと、本研究では、着雪がいしのフラッシュオーバー電圧特性を整理する上で、着雪がいしのインピーダンスに着目している<sup>1</sup>。

雪は、雪片と雪片が融解した融雪水、ならびにそれらの空隙に存在する大気圧空気から構成される言わば凝集体である。雪は、その融雪過程において、「氷」の一部が「水」に相転移してゆくことで次第に湿った状態に変質する。雪氷学あるいは雪氷工学においては、この雪の湿り度合いのことを含水率（LWC : Liquid Water Content）という指標により表すことが慣例となっている[1,2]。含水率は、雪の中に液体として存在する水の量を、人工雪全体に対する百分率で示したものであり、質量百分率で表す場合と、体積百分率で表す場合がある。本論文では、式(2-1)で定義される質量百分率を用いて含水率を表すこととする[3]。

$$LWC \equiv \frac{W_{water}}{W_{snow}} \times 100 [\%] \quad (2-1)$$

ここで、 $W_{snow}$  は人工雪全体の質量を、 $W_{water}$  は液体の水の質量である。式から明らかなように、含水率が高いほど、湿った雪であることを示している。また、一般的に含水率が適度に高い雪は物体への付着力が大きいことが知られており、これに関して水野ら[4]は 10%から 15%程度で雪の物体への付着力が最大になると報告している。水野らの結果は、例えば屋外を歩いているとき、乾雪と湿雪では湿雪のほうが道路標識等に付着しやすいという私たちの日

---

<sup>1</sup> フラッシュオーバー特性とインピーダンスの関係については、第 3～5 章で吟味する。本章は、そのために必要な前準備として、着雪のインピーダンスの振る舞いを理解し、次章に繋げるための前提条件を検討する。したがって、第 3～5 章での検討内容は、必然的に、本章の結果に立脚していることを予め述べておく。

常の感覚とも一致する。塩雪害発生時に認められた降雪が湿雪であったことは第1章で述べたが、このような高い含水率は、塩雪害を特徴付けるパラメータの一つと考えられ、雪の湿り具合とインピーダンスの関係を調べることは、本研究の重要な検討項目の一つであろう。

ところで、この含水率が、雪の複素誘電特性に影響を与えること、すなわち雪の誘電率の周波数特性が含水率に応じて変化することについては、すでに従来の研究において明らかとなっており、それらの関係性については、これまで雪氷の無線探査技術あるいは広域測定 (Remote Sensing) 技術への応用を目的として、マイクロ波と呼ばれる高周波数域を中心に研究が行われてきた[5,6]。一方、本研究が対象とする周波数については、その上限と下限が、送電線に発生する各種電圧の持つ周波数帯をカバーする必要がある。そこで、本論文では、下限は常時送電線に印加されている商用周波数を、上限は雷による周波数までを含むように定め、この先の議論に進むことにする。ところで、上に述べた無線探査等の研究を始めとした従来の研究は、いずれも本研究と比べてずっと高い周波数帯をターゲットとしているため、低周波数帯での検討例は多くはない。また、周波数帯の高い低いに限らず、このような検討を行う際には天然雪を用いることが大半である。このため雪の粒径などが自然任せであり、実験の再現性が確保されているとは言い難く、例えば含水率だけに依存した物理量変化を見定められているかどうかの検証も必要であろう。また、雪は、0 °C 付近の温度変化で劇的に特性を変化させるという宿命を持っている。このように、雪が自然任せの特性のばらつきを持つことと、0 °C 付近で過剰な温度依存性を示すことは、雪の特性を正確に調べようとするほど、研究的なアプローチを難しくする原因であったとも考えられる。

また、これまでに発表された雪の誘電特性の多くは、ごく微量のイオンを含んだ雪に対して測定されたもの[7]、あるいは氷点下の温度で測定されたもの[8,9]であり、雪が絶縁物に近いものとして扱われてきた[10]という石橋の記述を支持するものと著者は考えている。

そこで、本研究では、これらの特性のばらつきや実験中の意図しない特性変化を可能な限り避けるため、小規模の環境実験室内において、比較的均一な特性を持つ人工雪を生成し、各種のパラメータを制御することにより、含水率と複素インピーダンスの関係を評価することとした。次の2.2節では、複素インピーダンスの解析に用いる基礎理論について述べる。

## 2.2 物理現象の時間遅れに関する線形応答理論

### 2.2.1 緩和現象を表す基礎方程式

時間変化する外場  $f(t)$  の入力に対して線形時不変システムにおける応答  $a(t)$  を求める

には、システムの伝達関数の時間領域表現であるインパルス応答  $x(t)$  と入力波形とのたたみ込み積分 (convolution) を行う必要があるが、電気回路システムの定常応答を考える場合には、それらの周波数領域での表現を用いれば、その代数積で応答が求められる[11]。すなわち、

$$A(\omega) = X(\omega) \cdot F(\omega) \quad (2-2)$$

ここで、 $X(\omega)$  は入力と出力との応答関係に関連づける物理量の周波数領域での表現であり、複素誘電率を取り扱う場合には  $X^*(\omega)$  として次式で表現される[12]。

$$X^*(\omega) = X_\infty + (X_s - X_\infty) \int_0^\infty e^{-j\omega t} \phi(t) dt \quad (2-3)$$

ここで、外場 (入力) と応答 (出力) との関係は、線形であるとの仮定を置いている。ここで、 $\omega$  は角周波数、 $X_\infty$  は  $\omega \rightarrow \infty$  における  $X^*$  の極限值であり、時間遅れを伴わず瞬時に変化する部分である。 $\phi(t)$  は系のインパルス応答 (impulse response) であり、余項関数とも呼ばれる。また次式で表される  $\Phi(t)$  は、系のステップ応答関数 (step response) であり、緩和関数と呼ばれ、 $\phi(t)$  と共に系の時間遅れを表す関数である[12]。

$$\phi(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (2-4)$$

ここで、指数関数型のインディシャル応答 (indicial response) である一次遅れを想定すると、 $\Phi(t)$  は緩和時間を  $\tau_0$  として、次式のように表される。

$$\Phi(t) = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (2-5)$$

式(2-3)~(2-5)より、次式が得られる[12]。

$$\phi(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (2-6)$$

$$\frac{X^* - X_\infty}{X_s - X_\infty} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_0} \quad (2-7)$$

式(2-7)の  $X^*$  は、複素平面上に半円状の軌跡を描く。

## 2.2.2 Debye 型および Cole-Cole 型緩和関数

Debye は、液体中の有極性分子による双極子モーメント密度を Maxwell-Boltzmann 分布から求め、双極子によるローレンツの内部電界を考慮し、交流電界下での分極密度を計算した。その過程で、双極子の反応の一次遅れを表す緩和時間  $\tau_0$  を考慮することで複素誘電率を表し、よく知られている Debye の分散式が示された[13-15]。

$$\frac{\varepsilon_r^* - 1}{\varepsilon_r^* + 2} = \frac{N}{3\varepsilon_0} \left( \alpha_p + \frac{\mu_0^2}{3kT} \frac{1}{1 + j\omega\tau_0} \right) \quad (2-8)$$

ここで、 $\alpha_p$  は電子分極と原子分極による分極率の和、 $k$ 、 $T$  はそれぞれボルツマン定数、双極子のボルツマン分布における絶対温度、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $N$  は単位体積当たりの双極子数である。ここで、静的誘電率  $\varepsilon_{r0}$ 、光学的誘電率  $\varepsilon_{r\infty}$  を改めて定義し式(2-8)を整理すれば、複素誘電率は次の式で表される[16]。

$$\frac{\varepsilon_r^* - \varepsilon_{r\infty}}{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_0} \quad (2-9)$$

また、Debye の式は、有極性液体に対しては定量的によく成り立たないことが知られているが[16,17]、このことは、 $\varepsilon^*$  の軌跡が半円上に乗らないことを意味する。これに対して、Cole らは、種々の有極性液体に関する実測値から、複素誘電率を表す点の軌跡を求め、これが実際半円ではなく、円の劣弧となることを見出し、次の経験式を提案した[17]。

$$\frac{\varepsilon_r^* - \varepsilon_{r\infty}}{\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}} = \frac{1}{1 + (j\omega\tau_0)^{(1-\alpha)}} \quad (2-10)$$

$\alpha$  は、0 から 1 の実数で与えられる係数であり、式(2-9)は式(2-10)で  $\alpha = 0$  の場合に相当する。

以上に述べた Debye、Cole らの議論は、複素誘電率  $\varepsilon^* [M^{-1} L^{-3} T^4 I^2]$  に対して線形応答理論を適用したものに他ならない（この場合、式(2-2)の前提となる  $a(t)$  と  $f(t)$  はそれぞれ電束密度  $[TIL^{-2}]$  と電界強度  $[M L T^{-3} I^{-1}]$  である）。この議論をある物理量  $X$  に対する一般論に戻せば、 $\varepsilon^*$  が持つのと同様の  $\Phi(t)$  が介在することで Kramers-Kronig の関係[18,19]<sup>2</sup>が成

<sup>2</sup> 複素平面での  $X^*$  に関する次の 2 式を Kramers-Kronig[18,19]の関係式という。この関係が成立する場合、 $X^*$  の実部または虚部が分かれば、他方は計算によって算出できることを示しており、式(2-3)から  $\phi(t)$  を消去することで得られる[20]。

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{X^*(\omega)\} - X_\infty &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \operatorname{Im}\{X^*(\mu)\} \frac{\mu}{\mu^2 - \omega^2} d\mu \\ \operatorname{Im}\{X^*(\omega)\} &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [\operatorname{Re}\{X^*(\mu)\} - X_\infty] \frac{\omega}{\omega^2 - \mu^2} d\mu \end{aligned}$$

り立つ  $X^*$  に対しては、そのアナロジーにより(2-10)式に倣った次の式を導出することが可能である。

$$\frac{X^* - X_\infty}{X_s - X_\infty} = \frac{1}{1 + (j\omega\tau_0)^{(1-\alpha)}} \quad (2-11)$$

式(2-11)の  $X^*$  を実部  $X'$  と虚部  $X''$  に分離すると、それぞれ次のようになる[17]。

$$X' = X_\infty + (X_s - X_\infty) \frac{1 + (\omega\tau_0)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_0)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau_0)^{2(1-\alpha)}} \quad (2-12)$$

$$X'' = (X_s - X_\infty) \frac{(\omega\tau_0)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_0)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau_0)^{2(1-\alpha)}} \quad (2-13)$$

ここまでの議論で、本章で用いる解析の準備が整った。以下の節では、人工雪の複素インピーダンス  $Z^*$  [ $\text{ML}^2\text{T}^{-3}\text{I}^{-2}$ ] の周波数領域での挙動を評価するため、式(2-11)～(2-13)で  $X^* \equiv Z^*$  と置きかえた式、ならびにその論理を用いる（この場合  $a(t)$  と  $f(t)$  はそれぞれ電位差 [ $\text{ML}^2\text{T}^{-3}\text{I}^{-1}$ ] と電流 [ $\text{I}$ ] である）<sup>3</sup>。その上で、含水率を変えたときの  $Z^*$  の変化について検討する。

## 2.3 人工雪の生成と複素インピーダンス測定

人工雪の作製からインピーダンスの測定までの一連の実験については、全て、電力中央研究所・横須賀地区にある環境実験室において実施した。

### 2.3.1 人工雪の生成方法

容積  $22.7 \text{ m}^3$ 、床面積  $8.9 \text{ m}^2$  の環境実験室内の温度を、約  $-20^\circ\text{C}$  に保持した状態で、一流体ノズルを通して霧状の水滴（水温  $10^\circ\text{C}$ 、水圧  $0.7 \text{ MPa}$ 、平均粒径  $60 \text{ }\mu\text{m}$ ）を室内に散布した（図 2-1）。

あらかじめ導電率を調整した食塩水をタンクに用意しておき、ポンプを用いて規定圧でノズルに移送した。ノズルから散布された微細な水滴は、捕集用のネットに付着させた。この過程は、実際には樹氷形成と同じメカニズムであり、過冷却水滴がネットに衝突して凝固したものであるが、ネットの上に堆積した人工雪の外観ならびに触感は、自然の雪に近いもの

<sup>3</sup> p. 51 において Debye が想定したの同様に一次遅れ系を示す  $Z$  に対しては、式(2-11)を適用することができる。



であった。また、海塩を取り込んだ自然の降雪と同様、一様に均一な塩分の分布を持っていることが大きな特徴の一つである。本研究では、人工雪に含まれる塩分濃度を、人工雪を融かした融雪水の導電率により規定する（以下、この導電率のことを人工雪の導電率、あるいは雪の導電率と呼ぶ）。

人工雪の導電率  $1150 \mu\text{S}/\text{cm}$  では、塩の溶解による凝固点降下はおよそ  $0.04^\circ\text{C}$ <sup>4</sup>であり、人工雪を融かした融雪水の凝固点は、純水のそれと大差ない。できあがった人工雪の外観と触感は、天然の雪（しまり雪<sup>5</sup>）に似たものである。図 2-2 は人工雪の拡大写真であり、その粒径が噴霧水と概ね同等の数  $10 \mu\text{m}$  から  $100 \mu\text{m}$  程度であり、比較的均一な大きさの氷粒が集まっている状況が確認された。ここでの人工雪の粒子は、国際的な雪の分類コード[1]に基づく定義では“MMrp”（機械で作製した球状粒子）である。

生成した人工雪は、測定に供するまでの間、乾燥を防ぐためのプラスチック製のボックスに密閉し、冷凍庫内で保管した。

---

<sup>4</sup> 塩化ナトリウム水溶液の凝固点降下は次式で与えられる。溶液の凝固点は、溶媒の凝固点よりも低くなる。沸点の場合と同様、希薄溶液において溶質と溶媒の間の相互作用が無視できる程度に小さい場合には、凝固点降下  $\Delta T$  は質濃度及び溶媒固有の定数であるモル凝固点降下  $K$  のみで決まり、溶質の重量モル濃度を  $m$  として  $\Delta T = K \times m$  で与えられる。水についての  $K$  は  $1.853 \text{ K}$  である[21]。

<sup>5</sup>  $0^\circ\text{C}$  以下で、次から次へと雪が積もると、下方の雪は時間が経つにつれて降雪の結晶型が失われると共に、その上の雪の荷重で圧密される。雪粒は丸みを持ち、粒状や柱状の小さな氷の柱が網目状に繋がった組織の丈夫な雪となる[3]。

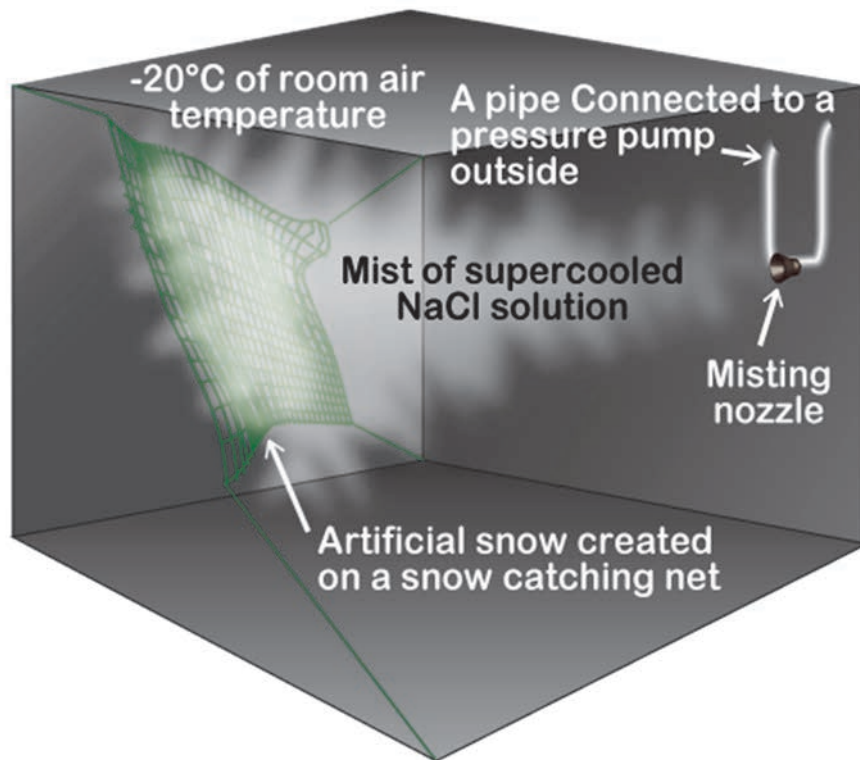


Figure 2-1. Schematic diagram of the artificial snow production in the climatic chamber.

NaCl solution having a defined conductivity was sprayed in the climatic chamber kept at -20 °C. The mist particle having 60 μm average diameter floated in the atmosphere and hit the snow catching net to become artificial snow particle in a manner of rime formation.

#### 図2-1 環境実験室における人工雪生成の概要

-20 °C に調整した環境実験室内において、予め導電率を調整した水溶液を平均粒径 60 μm の霧状にて散布した。霧の粒子は、空中を漂った後に捕集ネットに衝突し、樹氷の形成と同様の機構で凝固して人工雪となった。

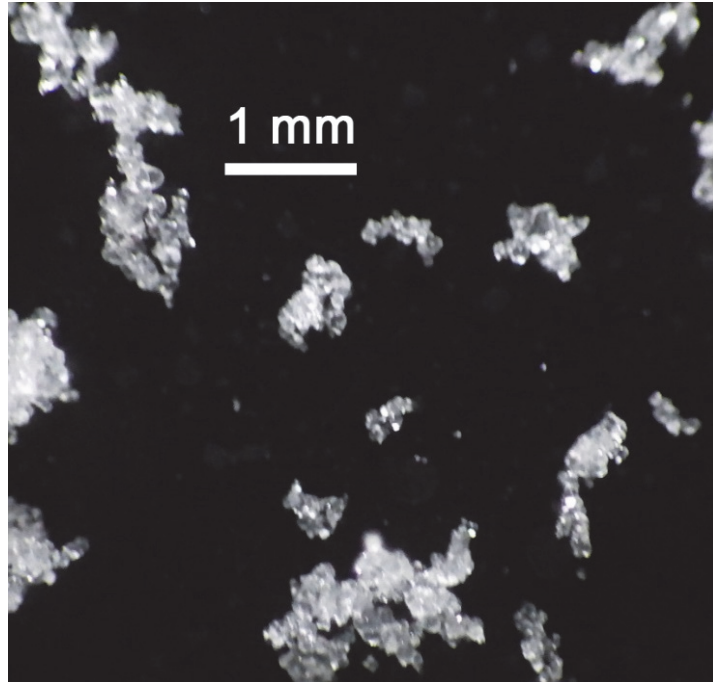


Figure 2-2. Close-up photograph of grains of the artificial snow for the impedance measurement.

The dimension of artificial snow particles was approximately several 10 to 100  $\mu\text{m}$  and almost corresponded to that of mist particles. The particles flocculated together and closely resembled fastened snow particle visually exhibited in [3].

#### 図2-2 インピーダンス測定に用いた人工雪の拡大写真

人工雪の粒子の寸法は、噴霧した霧の粒径とほぼ同等の数 10  $\mu\text{m}$  から 100  $\mu\text{m}$  程度であり、比較的均一な大きさの氷粒が集まっている状況が確認された。この人工雪と同様の外観を持つ天然雪としては、しまり雪と呼ばれる形態のものがあり、[3]ではその状況が視覚的に示されている。

### 2.3.2 複素インピーダンスの測定方法

一般に、1 MHz 以下における雪の複素誘電特性の測定電極系には、平行平板電極系が用いられる[7-9]。本稿では、一辺が 10 cm の立方体のアクリル容器の側面に、向かい合う一対の厚さ 0.3 mm の銅板電極を挿入し、冷凍庫から取り出した後-3°C の室内で休ませた雪を、電極間に密度 0.40 g/cm<sup>3</sup> で敷き詰めた。

この状態から、電極系全体を 2±1°C の室内に曝露して含水率を高めた。2005 年塩雪害が発生した時[22]には、現場での含水率が明確ではないため、本稿での含水率目標値は、水野[4]らの値を目安としておよそ 15%程度までとした。含水率の測定においては、熱量式含水率計[23]を用い、上記含水率調整後の値を測定した結果、2.7~14.4%であり、目標値と概ね一致した。測定時の雪温は概ね 0 °C であった。

インピーダンスの測定は、インピーダンスアナライザ (Keysight Technologies 製、4294A) を用いた。発振電圧 500 mV にて、四端子対法による電極間の  $Z^*$  を測定した (図 2-3)。先に述べたように、本章での測定周波数は商用周波数から雷過電圧<sup>6</sup>をカバーするように検討しなければならない。一般に雷過電圧の波形は、急峻な立ち上がりを持つことが知られているが、この時間変化に関して、Berger ら[24]は雷撃電流の観測から、波高値 2 kA の雷撃電流では、波頭長の 95%値が 1.8 μs (負極性) および 3.5 μs (正極性) になると報告している。したがって、波頭長の 95%値を  $t_{95}$  [s] とし、その逆数の 1/4 が近似的には基本振動周波数  $f_{95}$  [Hz] の 95%値に相当すると仮定すれば、

$$f_{95} \approx \frac{1}{4t_{95}} \quad (2-14)$$

これに基づいて  $f_{95}$  を測定上限の目安とすれば、ここでのインピーダンス測定に関しては高々数百 kHz までが必要である。ここでは、この点を考慮し、インピーダンスアナライザの掃引周波数域をログ掃引にて 40 Hz~1 MHz とした。測定点数は測定器の上限である 801 とした。

---

<sup>6</sup> 雷撃により発生する過電圧のことを雷過電圧という。波高値までの時間が数 μs、継続時間が数十 μs 程度の極めて急峻な波形を持ち、各種の過電圧の中で最も大きい過電圧である。送電線に対しては、現在のところ雷による事故を完全に防ぐことは不可能に近く、ある程度の事故は認める設計がなされている[20]。

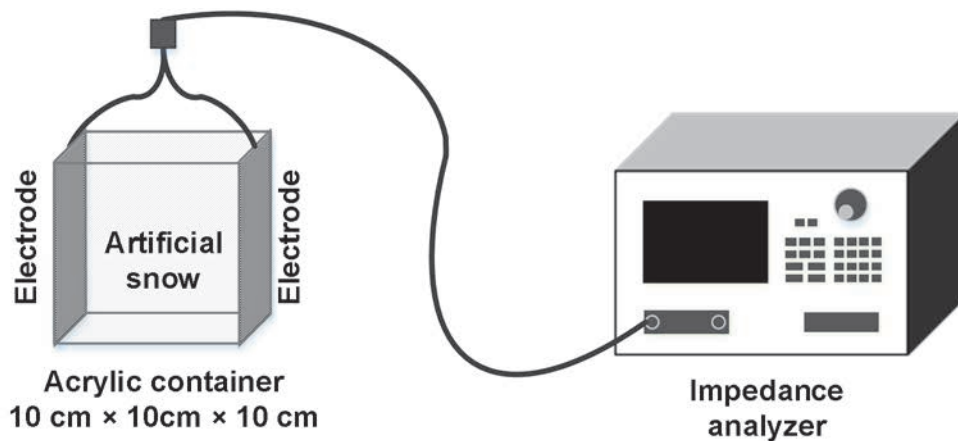


Figure 2-3. Schematic diagram of the experimental set up for measuring the snow impedance.

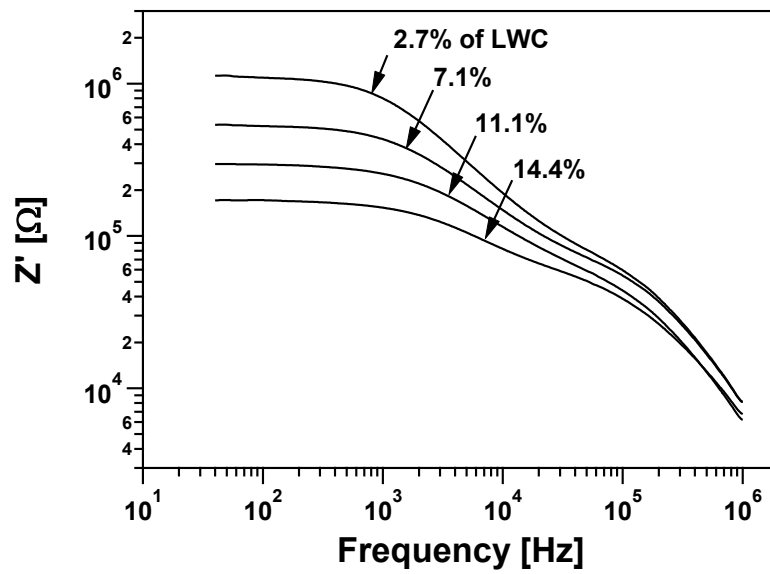
The artificial snow including salt was cured in  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  atmosphere, then it was put into acrylic container whose dimensions were 10 cm by 10 cm by 10 cm and that had a pair of copper electrodes facing each other inside. The snow density was  $0.40\text{ g/cm}^3$ . The impedance analyzer worked in a manner of the four-terminal pair method. The frequency was swept from 40Hz to 1 MHz. The oscillating voltage was 500 mV. The Liquid Water Content (LWC) was varied from 2.7 to 14.4%. The atmosphere was kept at  $+2\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  during the measurement.

### 図2-3 測定電極およびインピーダンス測定回路の概要

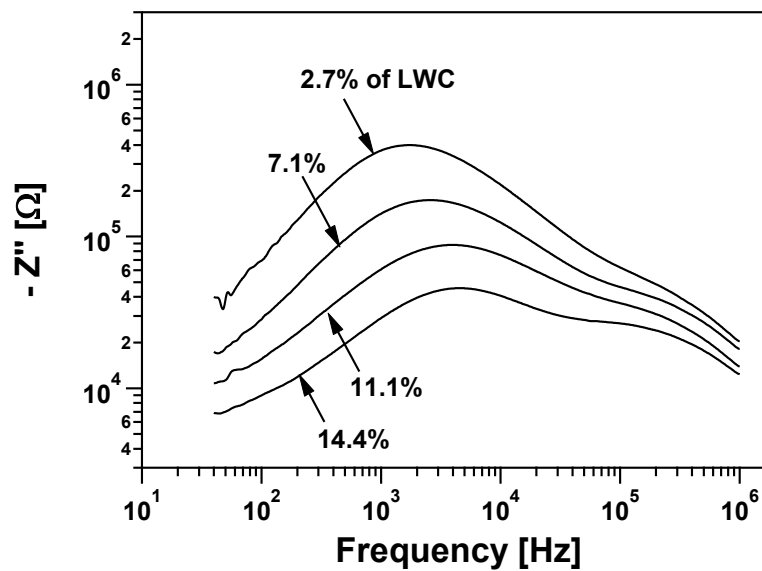
一辺が 10 cm の立方体のアクリル容器の側面に、向かい合う一対の厚さ 0.3 mm の銅板電極を挿入し、冷凍庫から取り出した後 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  の室内で休ませた雪を、電極間に密度  $0.40\text{ g/cm}^3$  で敷き詰めた。インピーダンスアナライザの発振電圧を 500 mV とし、四端子対法にて測定を実施した。含水率は 2.7% から 14.4% の範囲で変化させた。測定中は、室内の温度を  $+2\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  に保持した。

### 2.3.3 複素インピーダンスの周波数特性

各含水率における複素インピーダンスの実部  $Z'$ 、虚部  $Z''$  の周波数依存性を図 2-4 に示す。パラメータとした含水率を図中に記載した。各含水率における曲線を比較し、含水率が高いほど、 $Z'$ 、 $Z''$  とともに低下することが確認された。図 2-5 は、図 2-4 を複素平面上にプロットしたものであり、ここでは原点からの距離が最も遠い点が 40 Hz の値である。円弧は、周波数が高くなるにつれて、1 MHz まで曲線上を移動しながら原点側の端に近づく軌跡を描いた。含水率を変えたときの影響を見ると、本測定結果は、含水率が低いほど原点からの距離が大きく、インピーダンスの絶対値が大きくなる傾向を示した（図 2-5(a)）。また、曲線の原点付近を拡大した図 2-5(b) では、低周波数側の大きい円弧に、高周波数側の小さい円弧が重畳しているのが確認された。この高周波数側の円弧は、含水率 14.4% では識別しやすいが、含水率 2.7% では低周波数側の円弧に隠れて見えにくくなった。これらのように測定結果に現れた複素平面上の二つの円弧は、測定結果が異なる二つの緩和過程を持つことを示している。次の 2.4 節では、この重畳した二つの円弧をそれぞれ単独での円弧に分離する。



(a) Real part



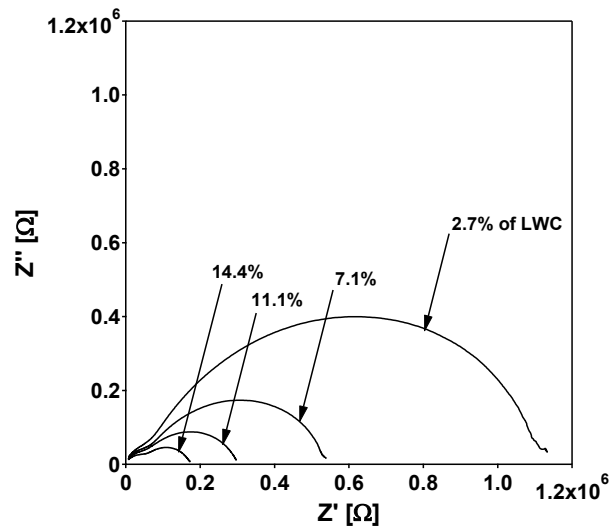
(b) Imaginary part

Figure 2-4. The dependence of frequency on complex impedance of the whole electrode system including artificial snow.

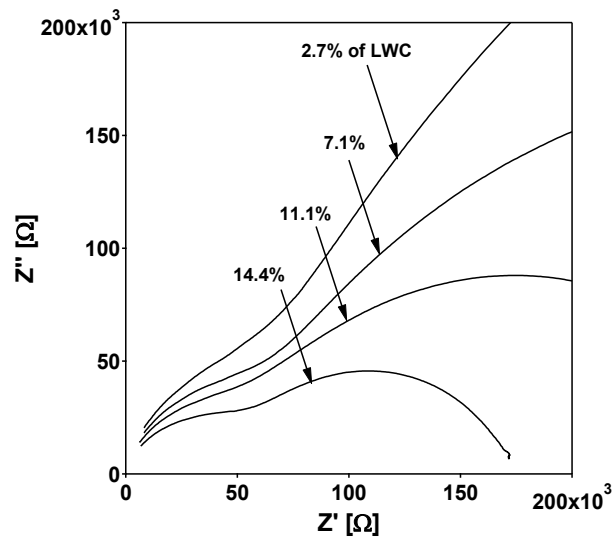
Both  $Z'$  and  $Z''$  decreased with increase in Liquid Water Content (LWC).

図2-4 電極系全体の複素インピーダンスの周波数依存性

含水率が高いほど、 $Z'$ 、 $Z''$ ともに低下することが確認された。



(a) Trace of the complex impedance of the whole electrode system including artificial snow on a complex plane



(b) The high frequency range

Figure 2-5. Trace of complex impedance of the whole electrode system.

The lower Liquid Water Content, the larger absolute value of  $Z$  as shown in figure (a). As for figure (b), which was the magnified tracks in figure (a), the large semi-circles on the low frequency side were superimposed by the small semi-circles on the high frequency side, respectively

### 図2-5 電極系全体の複素インピーダンスの軌跡

含水率が低いほどインピーダンスの絶対値が大きくなる傾向を示した ((a))。また、曲線の原点付近を拡大した(b)では、低周波数側の大きい円弧に、高周波数側の小さい円弧が重畳しているのが確認された。



## 2.4 直列結合型等価回路による複素インピーダンスの成分分離

### 2.4.1 直列結合型等価回路

以下、二つの円弧に対応する緩和過程を考察するため、単純なモデルを考案する。まず、モデルの等価回路を図 2-6 に示す。同モデルは、人工雪そのもの（微視的には氷粒、融雪水、空気が、ある空間的な分布をもって構成された、一つの巨視的な混合体）と電極からなる。このような場合、インピーダンスアナライザの測定端子間には、水-電極界面での伝導に寄与する  $Z_{int}^*$ （電気二重層容量  $C_{dl}$ 、電荷移動抵抗  $R_{ct}$ ）の存在を考えることが一般的である[25]。さらに、 $Z_{int}^*$  と直列に、人工雪のインピーダンス  $Z_{snow}^*$ （容量成分  $C_{snow}$ 、抵抗成分  $R_{snow}$ ）が存在する。また、このような電極系では、 $Z_{int}^*$  の緩和過程が低周波数側に現れることが知られている[26]。したがって、図 2-5 の低周波数側の軌跡は、水と電極の界面において生じる緩和過程を示し、高周波数側の軌跡は雪そのものの緩和過程を示すと考えられる。

次に、複素平面上の二つの円弧を分離するため、重畳して測定された二つの円弧  $Z_{int}^*$ 、 $Z_{snow}^*$  に対して、式(2-11)～(2-13)による回帰を適用する。図 2-6 では、 $Z_{int}^*$ 、 $Z_{snow}^*$  についていずれも CR 並列回路で表されているが、これらをそれぞれ CR 直列回路に変換することで、全体の合成インピーダンス  $Z^*$  の実部と虚部をそれぞれ  $Z_{int}^*$ 、 $Z_{snow}^*$  の実部同士、虚部同士の単純和で表記することができる。（以下、添え字の“m”は測定値であることを、“f”は回帰値であることを、“c”は計算値であることを示す）。つまり、 $Z_m^*$  は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} Z_m^* &= Z'_m - jZ''_m = Z_{int}^* + Z_{snow}^* \\ &= Z'_{int} + Z'_{snow} - j(Z''_{int} + Z''_{snow}) \end{aligned} \tag{2-15}$$

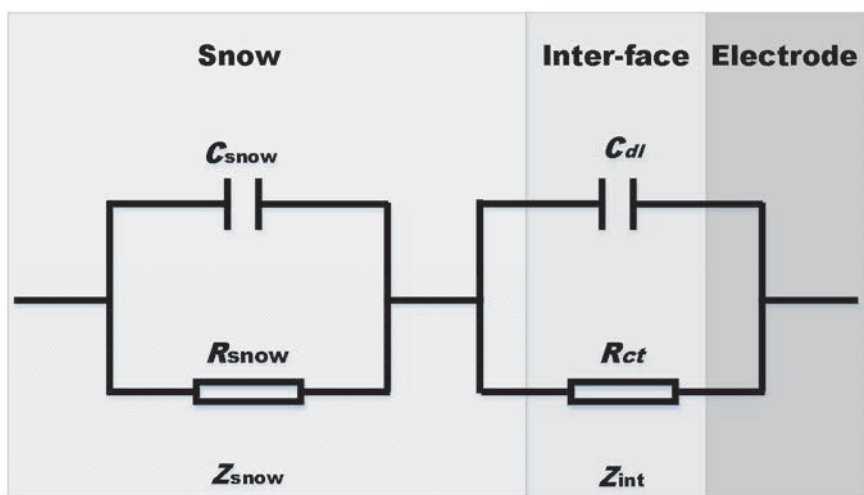


Figure 2-6. Electric circuit equivalent to the whole electrode system including the interface between the electrode and the snow itself.

Each element represented by CR parallel circuit for  $Z_{\text{snow}}^*$  and  $Z_{\text{int}}^*$  can be converted to each series CR circuit. Such like conversion enables simple calculations of the whole impedance  $Z^*$ : real part of  $Z^*$  and imaginary part can be yielded by summing real parts and imaginary parts of  $Z_{\text{snow}}^*$  and  $Z_{\text{int}}^*$  independently.

#### 図2-6 電極系全体の等価回路

$Z_{\text{int}}^*$ 、 $Z_{\text{snow}}^*$  についていずれも CR 並列回路で表されているが、これをそれぞれ CR 直列回路に変換することで、全体の合成インピーダンス  $Z^*$  の実部と虚部をそれぞれ  $Z_{\text{int}}^*$ 、 $Z_{\text{snow}}^*$  の実部同士、虚部同士の単純和で表記することができる。

## 2.4.2 複素インピーダンスの成分分離

2.3.3 項で示した二つの緩和過程の分離は、以下に示す手順で行った。

### (1) 低周波数側のインピーダンス虚部の推定

図 2-4(b)では、 $Z''$ の低周波数側（界面の緩和）のピークが顕著に現れている。この位置での緩和周波数 $f_{0,lf}$ を調べ、緩和時間 $\tau_{0,lf}$ の関係式から、 $\tau_{0,lf}$ が得られる（以下、添え字の“lf”は低周波数側での値であることを、“hf”は高周波数側での値であることを示す）。

$$\tau_{0,lf} = \frac{1}{2\pi f_{0,lf}} \quad (2-16)$$

この $\tau_{0,lf}$ を、式(2-13)の $\tau_0$ に代入し、測定値 $Z''_m$ を低周波側において $Z''_{lf}$ にフィッティングすることにより、その他の未知のパラメータ $Z_{s,lf}$ 、 $Z_{\infty,lf}$ 、 $\alpha_{lf}$ を求めた。ここで、 $Z_{\infty,lf}$ および後に説明する $Z_{\infty,hf}$ を0としてよいことは、図 2-6 の等価回路から自明である。したがって、ここでは、 $Z_{\infty,lf} = Z_{\infty,hf} = 0$ として次式により回帰分析を行った。

$$\begin{aligned} Z''_{lf} &\approx Z''_{int} \\ &= (Z_{s,lf} - Z_{\infty,lf}) \frac{(\omega\tau_{0,lf})^{1-\alpha_{lf}} \cos \frac{\alpha_{lf}\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{0,lf})^{1-\alpha_{lf}} \sin \frac{\alpha_{lf}\pi}{2} + (\omega\tau_{0,lf})^{2(1-\alpha_{lf})}} \end{aligned} \quad (2-17)$$

低周波数側の回帰分析より求めた、緩和の特性式の回帰パラメータを表 2-1 に示す。直流抵抗と等価な値である $Z_{s,lf}$ は、含水率が高くなると共に小さくなった。 $\tau_{0,lf}$ についても、含水率が高くなると共に小さくなった。

### (2) 高周波数側のインピーダンス虚部の推定

式(2-15)の両辺において虚数部の対応から、次の式が得られる。

$$Z''_{snow,m} = Z''_m - Z''_{int,lf} \quad (2-18)$$

これを用いて、高周波数側の $Z''_{snow,m}$ を、測定値と回帰値に基づいて求めることができる。すなわち $Z''_{snow,m}$ に対して、低周波数側と同様に、極大値を示す周波数 $f_{0,hf}$ を調べ、残りの未知のパラメータ $Z_{s,hf}$ 、 $Z_{\infty,hf}$ 、 $\alpha_{hf}$ を回帰分析により求めることができる。なおこのとき、それぞれ式(2-16)、(2-17)と同様に以下二つの式(2-19)と式(2-20)を用いた。

$$\tau_{0,\text{hf}} = \frac{1}{2\pi f_{0,\text{hf}}} \quad (2-19)$$

$$Z_{\text{hf}}'' \approx Z_{\text{snow}}'' = (Z_{\text{s,hf}} - Z_{\infty,\text{hf}}) \frac{(\omega\tau_{0,\text{hf}})^{1-\alpha_{\text{hf}}} \cos \frac{\alpha_{\text{hf}}\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{0,\text{hf}})^{1-\alpha_{\text{hf}}} \sin \frac{\alpha_{\text{hf}}\pi}{2} + (\omega\tau_{0,\text{hf}})^{2(1-\alpha_{\text{hf}})}} \quad (2-20)$$

これらの式を用いて高周波数側の回帰分析より求めた、緩和の特性式 of 回帰パラメータを表 2-2 に示す。直流抵抗と等価な  $Z_{\text{s,hf}}$ 、ならびに  $\tau_{0,\text{hf}}$  は、低周波数側と同様、含水率が高くなると共に小さくなった。ここまで、 $Z''_{\text{m}}$  に対して行った  $Z''_{\text{lf,f}}$  および  $Z''_{\text{hf,f}}$  に関する回帰分析の概要を図 2-7 に示す。なお、図中の  $Z''_{\text{lf,f}}$  と  $Z''_{\text{hf,f}}$  を加えることで  $Z''_{\text{f}}$  を求めることができるが、 $Z''_{\text{f}}$  は  $Z''_{\text{m}}$  とほとんど重なるため図中に示していない。

### (3) 低周波数側および高周波数側のインピーダンス実部の推定

$Z'$ に関しては、すでに全ての緩和の特性式のパラメータが  $Z''$  の算出過程で求めた。このため、以下の二つの式にパラメータを代入することで、即時に計算値を得ることができる。

$$\begin{aligned} Z'_{lf} &\approx Z'_{int} \\ &= Z_{\infty,lf} + (Z_{s,lf} - Z_{\infty,lf}) \frac{1 + (\omega\tau_{0,lf})^{1-\alpha_{lf}} \sin \frac{\alpha_{lf}\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{0,lf})^{1-\alpha_{lf}} \sin \frac{\alpha_{lf}\pi}{2} + (\omega\tau_{0,lf})^{2(1-\alpha_{lf})}} \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} Z'_{hf} &\approx Z'_{snow} \\ &= Z_{\infty,hf} + (Z_{s,hf} - Z_{\infty,hf}) \frac{1 + (\omega\tau_{0,hf})^{1-\alpha_{hf}} \sin \frac{\alpha_{hf}\pi}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{0,hf})^{1-\alpha_{hf}} \sin \frac{\alpha_{hf}\pi}{2} + (\omega\tau_{0,hf})^{2(1-\alpha_{hf})}} \end{aligned} \quad (2-22)$$

計算により求めた  $Z'_{lf,c}$  および  $Z'_{hf,c}$  を、測定値  $Z'_m$  と共に図 2-8 に示す。図中の  $Z'_{lf,c}$  と  $Z'_{hf,c}$  を加えることで  $Z'_c$  を求めることが可能だが、 $Z'_c$  は  $Z'_m$  とほとんど重なるため図中に示していない。

ここまでの工程で、所期の目的であった  $Z'_{hf,c}$  と  $Z''_{hf,r}$  を求めることができた。これらの一連の手法、すなわち測定されたインピーダンスから直列結合型等価回路に基づく成分分離、人工雪のインピーダンスの評価、までの一連の流れの概念を図 2-9 にまとめておく。次の 2.4.3 項では、以上求めてきた雪のインピーダンスについて評価する。

Table 2-1. Parameters of relaxation characteristic curve at low frequency by dielectric diversion of the interface between the electrodes and the artificial snow.

表2-1 低周波数側の誘電緩和パラメータ（界面での分散）

LWC [%]	$Z_{s,lf} [\Omega]$	$Z_{\infty,lf} [\Omega]$	$\tau_{,lf} [s]$	$\alpha_{lf}$
2.7	$9.85 \times 10^5$	0	$9.15 \times 10^{-5}$	0.111
7.1	$4.64 \times 10^5$	0	$6.10 \times 10^{-5}$	0.118
11.1	$2.61 \times 10^5$	0	$4.02 \times 10^{-5}$	0.141
14.4	$1.38 \times 10^5$	0	$3.50 \times 10^{-5}$	0.084

Table 2-2. Parameters of relaxation characteristic curve at high frequency by dielectric diversion of the artificial snow.

表2-2 高周波数側の誘電緩和パラメータ（人工雪の分散）

LWC [%]	$Z_{s,hf} [\Omega]$	$Z_{\infty,hf} [\Omega]$	$\tau_{,hf} [s]$	$\alpha_{hf}$
2.7	$1.12 \times 10^5$	0	$1.43 \times 10^{-6}$	0.278
7.1	$7.27 \times 10^4$	0	$8.56 \times 10^{-7}$	0.1898
11.1	$4.53 \times 10^4$	0	$7.73 \times 10^{-7}$	0.110
14.4	$3.90 \times 10^4$	0	$7.73 \times 10^{-7}$	0.076

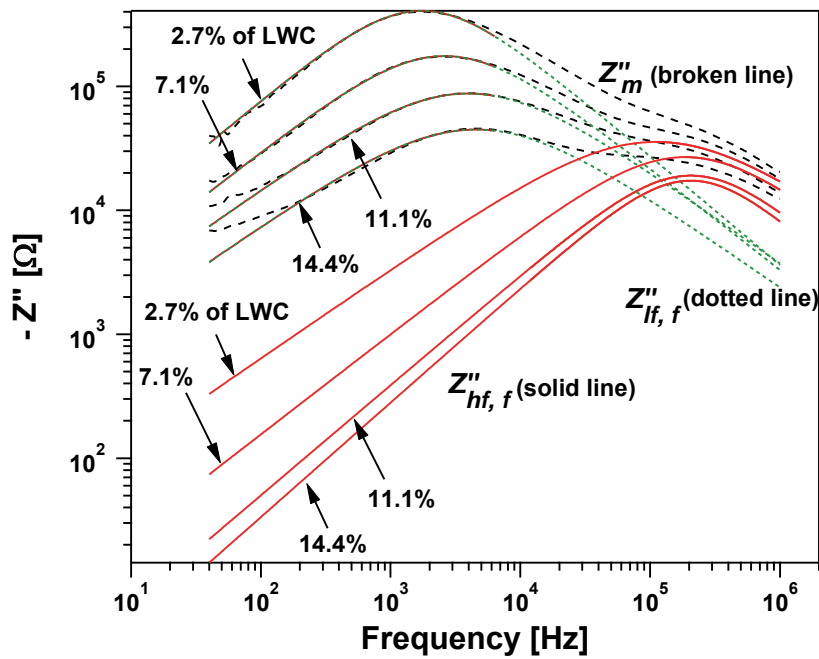


Figure 2-7. Summary of regression analysis of  $Z''_{lf, f}$  and  $Z''_{hf, f}$  fitted for  $Z''_m$ .

図2-7 測定値  $Z''_m$  に対して行った回帰分析 (回帰値  $Z''_{lf, f}$  および  $Z''_{hf, f}$ )

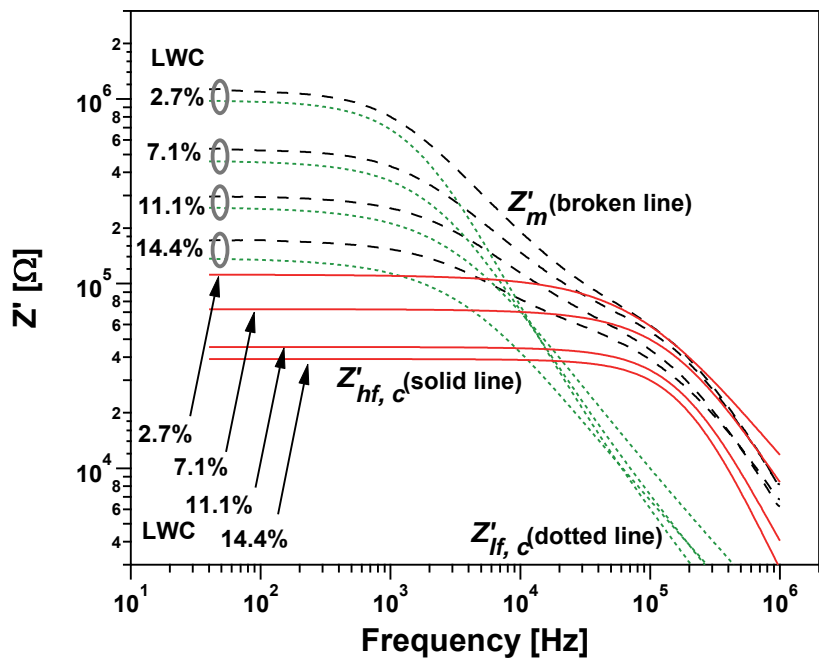
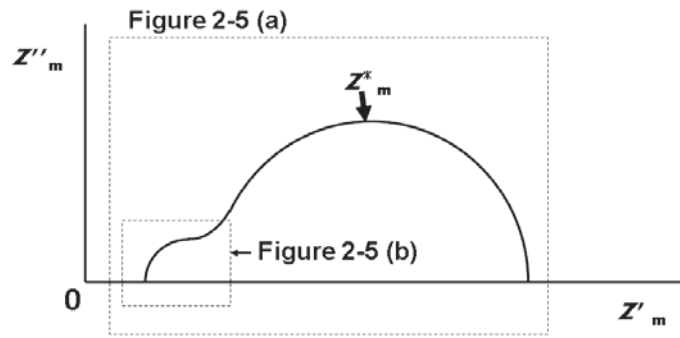
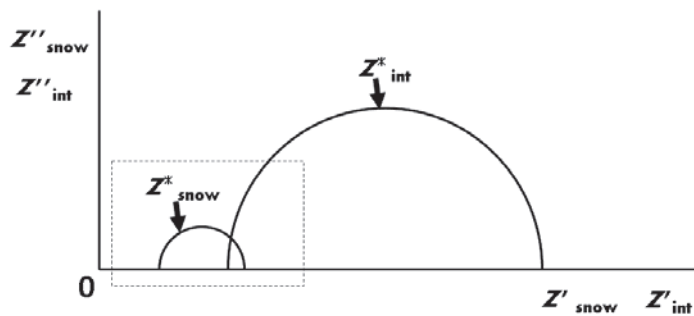


Figure 2-8. Summary of measured curve  $Z'_m$ , calculated curves  $Z'_{lf, c}$  and  $Z'_{hf, c}$ .

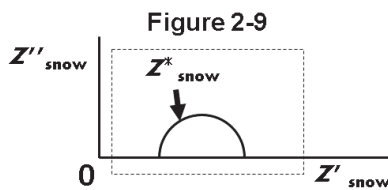
図2-8 測定値  $Z'_m$  ならびに緩和の特性式から求めた計算値  $Z'_{lf, c}$  および  $Z'_{hf, c}$



(a) Measurement of whole impedance,  $Z_m^*$



(b) Determination of  $Z_{int}^*$  and  $Z_{snow}^*$  based on the in-series-equivalent-circuit



(c) Evaluation of  $Z_{snow}^*$

Figure 2-9. Schematic diagram of the sequence of each measurement, determination, and evaluation of the components of the corresponding impedances.

図2-9 測定された複素インピーダンスから直列結合型等価回路に基づく成分分離、人工雪のインピーダンスの評価、までの一連の手法の概念



### 2.4.3 雪の含水率から見た複素インピーダンス特性

まず含水率を変えたときの人工雪そのものの複素インピーダンス  $Z_{\text{snow}}^*$  を複素平面に描くと、図 2-10 のようになる。図 2-10 の半円は、いずれも図 2-9 の手順により図 2-5 から低周波数側（右側）の半円成分を除去したものであり、曲線の高周波数側（左側）の半円成分を抽出したものである。描画した周波数範囲は、測定値の範囲と同様 40 Hz から 1 MHz までである。

次に、代表的な周波数における実部  $Z'_{\text{snow}}$  および虚部  $Z''_{\text{snow}}$  と含水率の関係を図 2-11 に示す。 $Z'_{\text{snow}}$  に関しては、50 Hz から 50 kHz においてほとんど差が見られず、500 kHz になると大きく低下した。 $Z''_{\text{snow}}$  に関しては、50 Hz から 50 kHz までは単純増加を示したが、500 kHz では 50 kHz との差が小さくなった。含水率が雪そのものの複素誘電特性に及ぼす影響は、周波数ごとに異なるが、雪そのものの複素誘電特性はいずれの周波数でも含水率に依存して変化した。

代表的な周波数における人工雪の誘電正接を図 2-12 に示す。50 Hz においては、誘電正接がいずれの含水率でも 100 以上の値をとることが確認された。このことは雪が商用周波で純抵抗に近い挙動を示すことを意味している。このことから、第 3~5 章に示す着雪がいしの商用周波フラッシュオーバー特性を考える場合には、がいしの着雪の 50 Hz でのインピーダンスを直流の絶縁抵抗（漏れ抵抗）で代用することが可能であり、50 Hz でのインピーダンス測定は不要である。このような点を考えると、含水率が大きいほど  $Z'_{\text{snow}}$  は低下する特性（図 2-11）は、とりわけ重要であり、塩雪害事故で見られたのと同様に、がいしに湿った着雪が発達することは、誘電特性の面からもやはり絶縁上看過できない事象であろう。

一方、これとは反対に、500 kHz における誘電正接は、いずれの含水率でも約 1 あるいはそれ以下になっており、雷撃時のフラッシュオーバー特性を考える場合には容量成分を考慮する必要がある。また、誘電正接のこのような挙動から、着雪がいしの商用周波フラッシュオーバー特性と雷インパルスフラッシュオーバー特性は大幅に異なることを示唆されるがこれは本論文のアウト・オブ・スコープである。

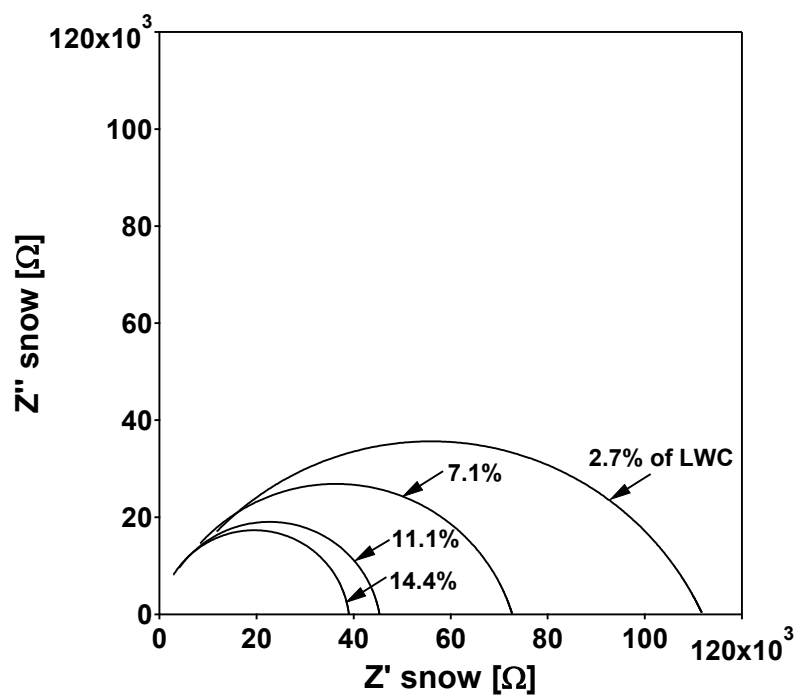
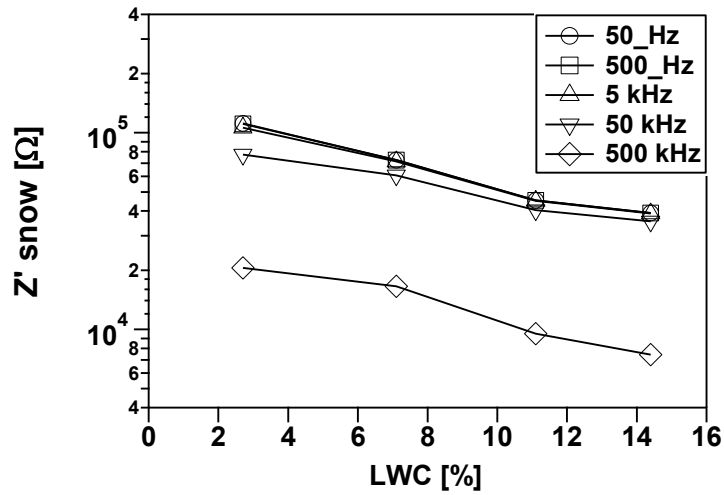
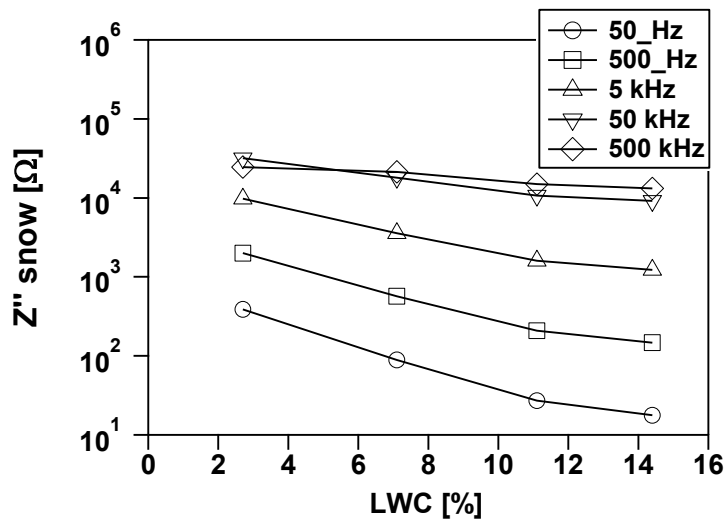


Figure 2-10. Complex impedance of the artificial snow at various Liquid Water Content on a complex plane.

図2-10 含水率を変えたときの各周波数における複素インピーダンス



(a) Real part



(b) Imaginary part

Figure 2-11. Complex impedance related to Liquid Water Content at various frequency.

$Z'_{\text{snow}}$  was almost constant at between 50 Hz and 50 kHz, but decreased when frequency was up to 500 kHz.  $Z''_{\text{snow}}$  simply increased at between 50 Hz and 50 kHz, while  $Z'_{\text{snow}}$  at 500 kHz was close to that at 50 kHz.

### 図2-11 代表的な周波数における人工雪の複素インピーダンス

$Z'_{\text{snow}}$  に関しては、50 Hz から 50 kHz においてほとんど差が見られず、500 kHz になると大きく低下した。 $Z''_{\text{snow}}$  に関しては、50 Hz から 50 kHz までは単純増加を示したが、500 kHz では 50 kHz との差が小さくなった。

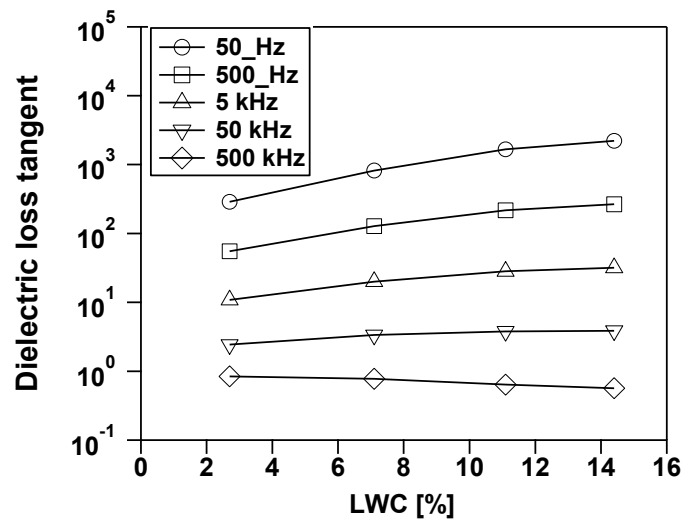


Figure 2-12. Dielectric loss tangent related to Liquid Water Content at various frequency.

The degree of influence of Liquid Water Content on the complex dielectric characteristics of the snow depended on frequency, but change in Liquid Water Content always made difference in the complex dielectric characteristics of the snow.

The dielectric loss tangent at 50 Hz was always greater 100 regardless of the Liquid Water Content, which means that snow behaves as pure resistance at 50 Hz. Therefore DC resistance (leakage resistance) of snow only should be taken into account when thinking about a power frequency flashover performance of snow-accreted insulators. Meanwhile, the dielectric loss tangent at 500 kHz was approximately 1 or less regardless of the Liquid Water Content, which means that the capacitive component should be taken into account when thinking about a flashover performance of snow accreted insulators by lightning impulse voltage.

#### 図2-12 代表的な周波数における人工雪の誘電正接

含水率が雪そのものの複素誘電特性に及ぼす影響は、周波数ごとに異なるが、いずれの周波数でも含水率に依存して雪そのものの複素誘電特性が変化した。

50 Hzにおいては、誘電正接がいずれの含水率でも 100 以上の値をとることが確認された。このことは雪が商用周波で純抵抗に近い挙動を示すことを意味している。このことから、第 3~5 章に示す着雪がいしの商用周波フラッシュオーバー特性を考える場合には、がいしの着雪の 50 Hz でのインピーダンス測定は不要であり、これを直流の絶縁抵抗(漏れ抵抗)で代用することが可能である。反対に、500 kHz における誘電正接は、いずれの含水率でも 1 あるいはそれ以下になっており、雷撃時のフラッシュオーバー特性を考える場合には容量成分を考慮する必要がある。

## 2.5 まとめ

空調設備を有する環境実験室内において、導電率、密度、含水率（含水率）をコントロールした人工雪を作製し、1 MHz までの複素インピーダンスを測定した。人工雪（導電率 1150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）を、密度 0.40  $\text{g}/\text{cm}^3$  で測定容器に敷き詰め、含水率が 2.7~14.4%の範囲で複素インピーダンスを測定した。線形応答理論と直列結合型の等価回路を Coleらの実験式に回帰することで、人工雪のインピーダンスを抽出した。本章の結果のうち主なものを摘記すると、以下のようなものである。

- (1)  $Z'_{\text{snow}}$  への含水率の影響は、周波数ごとに異なるが、いずれの周波数でも  $Z'_{\text{snow}}$  は含水率に対して単純減少を示した。
- (2)  $Z'_{\text{snow}}$  への周波数の影響としては、いずれの含水率でも  $Z'_{\text{snow}}$  は 50 Hz から 50 kHz においてほとんど差が見られず、500 kHz になると極端に低下した。
- (3)  $Z''_{\text{snow}}$  への含水率の影響としては、50 Hz から 50 kHz までの範囲では  $Z''_{\text{snow}}$  は含水率に対して単純減少を示した。
- (4)  $Z''_{\text{snow}}$  への周波数の影響としては、50 Hz から 50 kHz までの範囲では  $Z''_{\text{snow}}$  は周波数に対して単純増加を示したが、500 kHz では 50 kHz との差が小さくなった。
- (5) 50 Hz においては、いずれの含水率でも、誘電正接が 100 以上の値をとることが確認された。このことは雪が商用周波で純抵抗に近い挙動を示すことを意味している。このことから、第 3~5 章に示す着雪ががいの商用周波フラッシュオーバー特性を考える場合には、がいの着雪の 50 Hz でのインピーダンス測定は不要であり、これを直流の絶縁抵抗（漏れ抵抗） $Z'_{\text{snow}}$  で代用することが可能である。
- (6) 含水率が大きいほど  $Z'_{\text{snow}}$  は低下する特性は、とりわけ重要である。塩雪害事故で見られたのと同様に、がいに湿った着雪が発達することは、誘電特性の面からも絶縁上看過できない事象であろう。

## 第 2 章の参考文献

- [1] C. Fierz, R.L. Armstrong, Y. Durand, P. Etchevers, E. Greene, D.M. McClung, K. Nishimura, P.K. Satyawali, and S.A. Sokratov, “The International Classification for Seasonal Snow on the Ground”, The International Hydrological Programme of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO-IHP), Paris (2009).
- [2] 日本雪氷学会編：「新版 雪氷辞典」、古今書院 (2014).
- [3] 日本雪氷学会編：「積雪観測ガイドブック」、朝倉書店 (2010)
- [4] 水野 悠紀子、若浜 五郎：「湿雪の付着強度」、低温科学物理篇、第 35 集、pp.133 – 145 (1977)
- [5] M. Hallikainen, F. Ulaby, and M. Abdelrazik, “Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 34, Issue 11, pp. 1329 – 1340 (1986)
- [6] テレビジョン学会編：「雪氷電波・光工学」、昭晃堂 (1987)
- [7] Z. Yoshida, H. Oura, D. Kuroiwa, T. Hujioka, T. Kojima, and S. Kinoshita, “Physical Studies on Deposited Snow. V. Dielectric Properties”, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University 14, pp. 1 – 33 (1958)
- [8] 黒岩 大助：「積雪の誘電的性質」、低温科学、第 8 集、pp.1 – 57 (1951)
- [9] 竹井 巖、前野 紀一：「融点近傍における雪および霜の誘電的性質」、北陸大学紀要、第 23 号、pp. 13 – 24 (1999)
- [10] 石橋 鎌造：「雪とフラッシュオーバー現象」、雪氷の研究、No. 5、pp. 177 – 184 (1973)
- [11] 小郷 寛、倉田 是共著、電気学会通信教育会編：「回路網理論」、電気学会大学講座、電気学会 (1967)
- [12] 小出 昭一郎：「物理現象のフーリエ解析」、東京大学出版会 (1981).
- [13] 犬石 嘉雄、川辺 和夫、中島 達二、家田 正之共著、電気学会通信教育会編：「誘電体現象論」、電気学会大学講座、電気学会 (1973)
- [14] 鳳 誠三郎、斎藤 幸男、酒井 善雄、日野 太郎、成田 賢仁、沼倉 秀穂、和田 重暢、福井 清共著、電気学会通信教育会編：「電気材料（改訂版）修正・増補 第 51 版」、電気学会大学講座、電気学会 (1985)
- [15] Peter Debye：「化学物理学」、和田 昭允訳、和達 三樹訳、みすず書房 (1973)
- [16] 岡 小天：「誘電体論」、復刻版、現代工学社 (1977)
- [17] K.S. Cole and R.H. Cole: “Dispersion and Absorption in Dielectrics — I Alternating Current Characteristics”, Journal of Chemical Physics, Vol. 9, pp.341 – 352 (1941)
- [18] M.H.A. Kramers, “Diffusion de la lumière par les atomes”, Atti Congr. dei Fisici, Como, 545 (1927)
- [19] C.J. Gorter and R. de L. Kronig, “On the theory of absorption and dispersion in

- paramagnetic and dielectric media”, *Physica*, Vol. 3, Issue 9, pp. 1009 – 1020 (1936)
- [20] 電気学会編：「電気工学ハンドブック（第7版）」、電気学会（2013）
- [21] 大木 道則、大沢 利昭、田中 元治、千原 秀昭共編：「化学辞典」、東京化学同人（1994）
- [22] T. Onodera, H. Inukai, and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, *Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS)* (2007)
- [23] 河島 克久、遠藤 徹、竹内 由香：「熱量式による簡易積雪含水率計の試作」、防災科学技術研究所研究報告、第 57 号、pp.71 – 75 (1996)
- [24] K. Berger, R.B. Anderson, and H. Kroninger, “Parameters of Lightning Flashes”, *ELECTRA*, No. 41, pp. 23 – 37 (1975)
- [25] 板垣 昌幸：「電気化学インピーダンス法 第二版 原理・測定・解析」、丸善出版（2011）
- [26] 花井 哲也：「不均質構造と誘電率」、吉岡書店（2000）

## 第 3 章

着雪過程を考慮した小規模モデル実験  
による着雪時フラッシュオーバー特性の  
基礎検討

### Chapter 3

**Fundamental Approach on Discharge  
Propagation Properties Related to Snow  
Accretion Process by Small Scale Laboratory  
Experiments**



## 第 3 章 着雪過程を考慮した小規模モデル実験による着雪時フラッシュオーバー特性の基礎検討

### 3.1 まえがき

第 1 章の中で述べたように、冠雪がもたらすがいしの絶縁性能への影響についてはすでに研究が進んでいるが、新潟下越雪害のような環境条件下でのがいしフラッシュオーバー特性や放電進展特性は、十分に明らかになっていない。ここで再度、新潟下越雪害の塩雪害事故の特徴を、これまでに知られてきた冠雪によるもの<sup>1</sup>と対比し、主な相違点を摘記すると以下のようなものである[1,2]。

- ・ 冠雪事故は主に耐張装置のがいし上に積雪して起こる（図 1-19）が、塩雪害では、着雪が長幹ががいしの笠間を覆い尽くすほどに成長し、一部では風上に向かって三角状に着雪している様子が認められた（図 1-14、図 1-15）。
- ・ 冠雪事故は、フラッシュオーバー発生までの間に、冠雪の融雪水ががいし連近くに移り、雪の比重、含水率が大きくなり雪の脱落がはじまるまでのプロセスが必要であり、フラッシュオーバーのタイミングは、主として日の出後、あるいは、気温の上昇時である。一方で、塩雪害のケースでは、暴風雪の通過中に事故が発生した。冠雪事故は無風または弱風下で発生するのに対して、塩雪害時の間平均風速は 14 m/s に達した。
- ・ 塩雪害時の着雪はがいしに圧密した状態であり、その密度は冠雪（主に 0.3～0.4 g/cm<sup>3</sup>）よりも高く、最高で 0.94 g/cm<sup>3</sup>であった。
- ・ 塩雪害時の着雪の導電率は、山間部で発生する冠雪事故の導電率（高々数 10 μS/cm）よりも高く、最高で 200 μS/cm 程度であった。最近の研究では、塩雪害の生じる地域の降雪の導電率は 750 μS/cm 以上に達することが明らかになっている。

154 KV 実規模着雪がいしのフラッシュオーバー特性を解明するためには、こうした塩雪害時の観測事実に基づき、当時の事故発生状況を実験室内で再現し、その放電特性等を検討することが重要である。次の第 4 章では、各種 154 KV 実規模がいしの着雪時フ

---

<sup>1</sup> 主として 1970～1980 年代に我が国で行われた研究により明らかになったものである。その概要は 1.2.2 項を参照いただきたい。

ラッシュオーバー試験を実施し、それらのフラッシュオーバー電圧を比較し、議論する。その前準備として、本章では、実験的な検討を容易にした短尺（小規模）のがいしを用い、人工雪の着雪過程と電圧の印加方法<sup>2</sup>を考慮した2種類のモデル実験を行った。

一つ目の実験は、定印法により一定電圧を課電したがいしに対して、人工的な暴風雪を与え、電圧は印加したままで暴風雪のオンとオフを一定の時間間隔で繰り返すものである。これは、実際の送電線路<sup>3</sup>のがいしがフラッシュオーバーする過程を再現するためのものであり、本研究ではこの実験を課電先行型と呼ぶ。

二つ目の実験は、先に所定量を着雪させたがいしに対して、電圧上昇法により電圧を印加するものである。短時間のうちに強制的にフラッシュオーバーを発生させ、融雪を最小限に抑えることにより、フラッシュオーバー現象に対する導電率の影響<sup>4</sup>を評価するために行ったもので、本研究ではこの実験を着雪先行型と呼ぶ。

以下、3.2節で小規模モデル実験全体の概要を述べた後、3.3節では課電先行型の実験結果を、3.4節では着雪先行型の実験結果を詳述する。

## 3.2 小規模モデル実験の概要

### 3.2.1 環境実験室と課電装置

以下の小規模モデル実験は、北見工業大学の附属施設である地域共同研究センター（現・社会連携推進センター<sup>5</sup>）の課電低温実験室を用いて実施した。課電低温実験室の構造および実験設備等の配置を図 3-1 に示す。同実験室内の床はステンレス製であり、面積が 30 m<sup>2</sup> である。今回の実験配置では、室内の温度を最低で -20 °C まで制御することが可能である。また、隣接した屋外に設置された 1 次電圧 6.6 kV の試験用変圧器（東京変圧器製）から、壁貫通ブッシングを介して高電圧を引き込む構造となっており、低温環境でのがいしの各種課電実験が可能である。本研究では、印加電圧の大きさに応じて、試験用変圧器の 1 次側結線を直並列に適宜つなぎ変えて、定格 100 kV、100 kVA、あるいは 50 kV、50 kVA で用いた。塩雪害時のフラッシュオーバー現象の検討を主眼に置き、供試がいしには長幹がいしを用いたが、塩雪害の発生した実設備よりも有効

<sup>2</sup> 電圧印加方法としては、電圧を早く上昇させて試験電圧に達した後、所定の時間連続印加する定電圧印加法（定印法）、所定の上昇率で破壊放電するまで電圧を上昇させる電圧上昇法（上昇法）、所定の試験電圧を突然印加する突然印加法（突印法）がある[3]。

<sup>3</sup> 2005 年 12 月 22 日の新潟県下越地域の塩雪害では、午前 8 時頃に生じた 1 回目のフラッシュオーバーについては、当然、154 kV（対地約 89 kV）が印加された送電中に発生した。この状況を模擬するためには、課電先行型が適切な方法であろう。

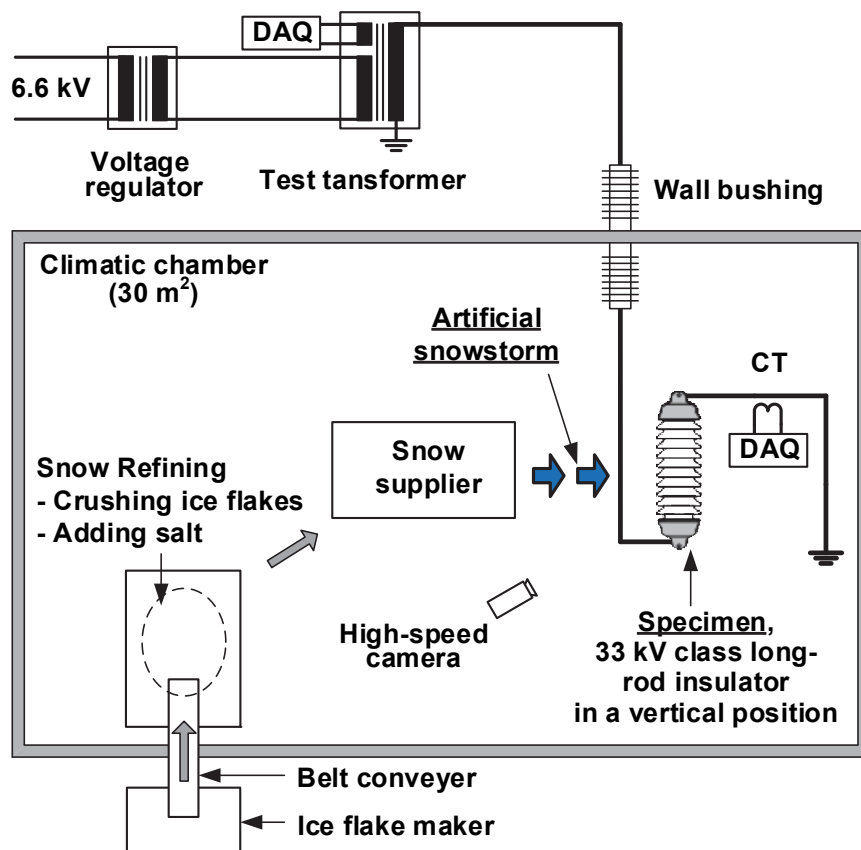
<sup>4</sup> 後に述べるが、課電先行型の実験では、時間経過と共に融雪により着雪の雪質が変化し、また着雪形状も変歪したため、フラッシュオーバー現象に与える導電率そのものの影響を評価し難くなった。このため、着雪先行型により、成形した着雪形状をほとんど保ったまま、短時間のうちに強制的にフラッシュオーバーさせることで、融雪を最小限に抑えた。フラッシュオーバー現象に与える導電率の影響を評価するためには、着雪先行型が適切な方法であろう。

<sup>5</sup> 北見工業大学 社会連携推進センター ウェブサイト、[http://www.crc.kitami-it.ac.jp/wp-content/themes/crc/common/pdf/publication/Outline\\_07.pdf](http://www.crc.kitami-it.ac.jp/wp-content/themes/crc/common/pdf/publication/Outline_07.pdf)（閲覧日：2017 年 6 月 29 日）

長の短い 33 kV 相当の長幹がいしを用いた（JIS 規格記号<sup>6</sup> LC8010／取り付け長 585 mm／笠枚数 10／笠間隔 40 mm／胴直径 80 mm／笠直径 160 mm／有効長 421 mm／乾燥フラッシュオーバー距離 448 mm／表面漏れ距離 1020 mm）。この LC8010 の笠間隔、胴直径、笠直径は 154 kV 実規模相当のがいしと同じであり、笠枚数が違うことにより有効長、乾燥フラッシュオーバー距離、表面漏れ距離に違いがある。なお、本小規模モデル実験のがいしの配置は、第 4 章の実規模フラッシュオーバー試験と同様に、懸垂吊りとした。

---

<sup>6</sup> JIS C 3816: 1999, “Long rod insulators”, Japanese Industrial Standard (1999)



©2014 IEEE

Figure 3-1. Layout of the climatic chamber and experimental setup used in the laboratory simulation of small-scale insulator flashover.

図3-1 小規模モデル実験で用いた環境課電設備の概要

### 3.2.2 人工雪の生成

第 2 章での人工雪は、樹氷形成のメカニズムで生成した微細な氷粒であり、この手法の大きな特徴は、生成された雪が海塩を取り込んだ自然の降雪と同様、一様に均一な塩分の分布を持つことであった。ところが、この手法は、あらかじめ導電率を調整した食塩水をタンクに用意しておき、これを霧状の水滴にして低温の室内に散布する必要があるため、容易な手法とは言い難い。

このような制限から、本章での人工雪は、はじめに塩分が入っていない氷粒を大量に作っておき、これに塩を混合して導電率を調整して生成したものである。この方法の大きな特徴は、第 2 章の方法と比べて、比較的簡易に、大量の人工雪を生成できることである。以下にその生成方法を述べる。

まず、課電低温実験室に隣接した業務用製氷機（ホシザキ電機製、F-1000SB）に現地の水道水（導電率約 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）を注入した。この製氷機は、およそ 1000 kg/day の速さで、フレーク状の氷片（図 3-2(a)）を製氷する。この氷片をベルトコンベアにより課電低温実験室へ輸送した（図 3-1）。このとき、実験室内の気温を約  $-3^\circ\text{C}$  に保つことで、輸送中および輸送後実験室内において氷片の融解を防止した。次に、ステンレス製のメッシュを巻いたドラム 2 個からなる砕氷機（図 3-3）を用いて氷片を破碎し、図 3-2(b)に示すようにその平均粒径がある程度小さくなるまで整えた。この工程を、課電実験に用いる数 10 kg の人工雪が得られるまで続け、生成した人工雪をプラスチック製の容器に蓄積した。所望の量が得られた後、プラスチック製容器の中の人工雪全体を攪拌しながら、食塩を少量ずつ混入することにより、所望の導電率（180～1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）を示す人工雪を生成した。なお、この塩分混合に伴う凝固点降下は、実験室の温度変化  $\pm 1^\circ\text{C}$  と比べて小さいため、凝固点降下に伴う融雪の影響は無視することができる<sup>7</sup>。

人工雪に混入した食塩の量と、人工雪から複数箇所サンプリングした導電率の関係を図 3-4 に示す。人工雪を融かした融雪水の  $25^\circ\text{C}$  における導電率を  $\sigma_{25}$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )、人工雪 1 kg に対する食塩の投入量を  $M$  (g) とすれば、図 3-4 中の曲線の線形近似式は以下のように表される。

$$\sigma_{25} = 2093.9 M + 94 \quad (3-1)$$

当然、上式に  $M = 0$  g を代入したときの切片 94  $\mu\text{S}/\text{cm}$  は、水道水の導電率と概ね一致する。生成した容器内の人工雪の導電率は、実際にはサンプリング場所によって多少のバラツキがあり、例えば目標値 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の場合で、実測値の平均が 724  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、標準偏差が 45  $\mu\text{S}/\text{cm}$  となった。このとき、上の回帰式から求めた導電率は、文献[4]から求めた計算値に対して +3 % 程度の相対誤差であった。この後、がいしへの圧密着雪ならびに電圧印加に先立ち、実験室内の温度を  $+1^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  とし、上記導電率を調整した

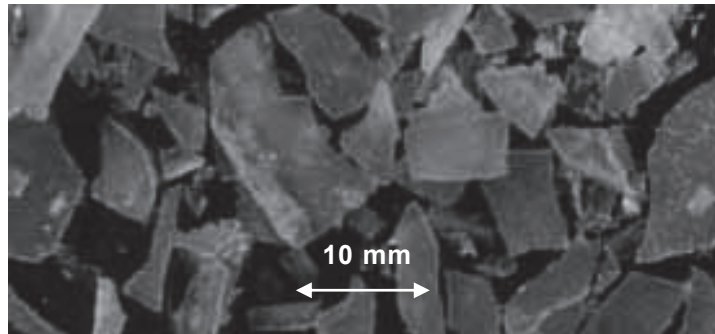
<sup>7</sup> むしろ課電実験中は、漏れ電流のジュール熱に伴う融雪作用が著しく、この作用がフラッシュオーバー特性を左右することになるが、このことについては 3.3 節、3.4 節で詳述する。

人工雪を攪拌しながら一定時間休ませた。このことが、雪の温度を高め、供試がいしに付着させやすい雪質に整える上では重要である<sup>8</sup>。

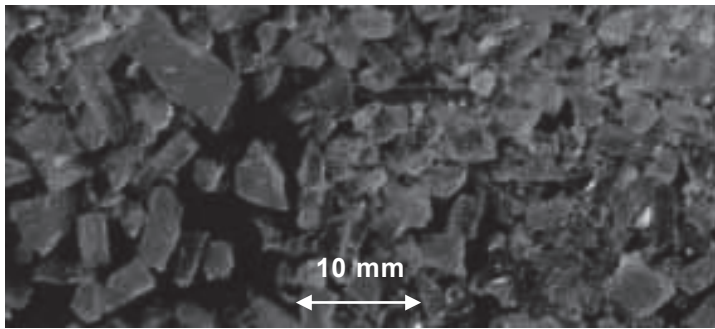
以上の手順で準備した人工圧密着雪がいしを、以下に述べる課電先行型および着雪先行型のフラッシュオーバー実験に供した。がいしへの着雪には、いずれの実験でも園芸用ブロアを用いた。

---

<sup>8</sup> この調整過程を経ない人工雪は、ほとんどがいしに着雪しなかった。



(a) Thin ice flakes after produced by the ice maker



(b) Small ice pieces after milled by the ice milling machine

Figure 3-2. Pictures of enlarged artificial snow particles during snow creation.

図3-2 人工雪作成中の各工程における雪片の拡大写真

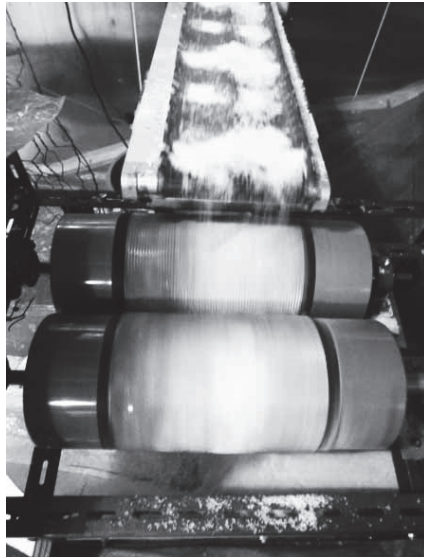


Figure 3-3. A belt conveyer and a custom-made clasher inside the climatic chamber.

The thickness of ice flakes was typically 1-2 mm, but their dimensions were irregular. They were crushed into approximately 1-2 mm grain-like particles with the custom-made clasher.

図3-3 環境試験室内のベルトコンベアおよび砕氷機

製氷機で作製されたばかりの板状の氷片は、厚さが 1-2 mm ほどであり、大きさはまちまちである。これを環境試験室内の砕氷機により、1-2 mm の粒形の氷粒に整えた。

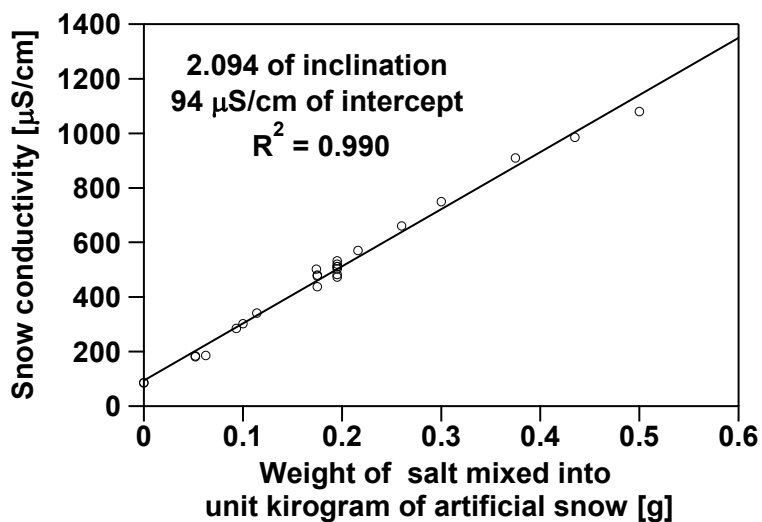


Figure 3-4. Relationship between weight of salt mixed to 1 kg of artificial snow and its conductivity.

図3-4 人工雪 1 kg に対して混合した食塩量と混合後の人工雪導電率の関係



### 3.3 課電先行型のフラッシュオーバー実験

#### 3.3.1 課電先行型の実験方法

はじめに、課電先行型の実験における手順の概要を図 3-5 に示す。課電先行型の実験では、前節の通り+1°Cの実験室内にて休ませた人工雪を、園芸用ブロアを用いてがいしに吹きつけ、着雪を行った。この着雪時の実験室温度についても+1°Cとした。暴風雪環境下における風雪のゆらぎを模擬するために、ブロア操作のオンとオフを切り替えることによって、オン時には暴風雪の供給（10 秒間）、オフ時には暴風雪の休止（20 秒）を繰り返し実施した。以下、この暴風雪の供給・休止の計 30 秒を 1 単位としてサイクルと呼び、 $N$ 回目の繰り返し期間のことを $N$ サイクルと呼ぶ。

暴風雪の発生には、ブロア 4 台を同時に動作させ、それらの吹き出し口を長幹がいしの長手方向と並行に、等間隔に配置することで、暴風雪をがいしに対して直角に衝突させると共に、がいしの全長においておよそ均一な供給量となるよう調整した（図 3-6）。ブロアの吹き出し口とがいし間の距離は、500 mm であり、ブロアがオンのときの風速はがいし周辺で平均して約 10 m/s であった。

がいしの設置位置での平均風速と降雪量を一定とすることで、がいしに与える降雪フラックスを一定とすることができる。がいしの設置位置においてフラックス中心部の人工雪を捕捉し、その質量から求めた雪の空間質量密度<sup>9</sup>は約 9.2 g/m<sup>3</sup>であったが、これによりがいしへの風雪の供給量を規定した。なおこのとき、人工雪は、ブロアを通過する際にブロアの駆動部からの入熱を受けることにより湿った状態となりがいしに付着しやすい雪質へと変化した。ブロアを通過した後の人工雪の拡大写真（図 3-7）から、人工雪の粒径が 1 mm~2 mm 程度であり、それらが湿って凝集している様子が確認できる。

課電先行型の実験では、試験用変圧器の 1 次側の結線を並列接続にして、設備定格 50 kV、50 kVA で用いた。1 回の実験は、最長で 20 分間（40 サイクル）継続し、この間のフラッシュオーバーの有無を調べた。漏れ電流波形については、供試がいしの接地側 CT（PEASON 110、帯域 1 Hz-20 MHz）を、データ記録装置（Yokogawa 製、DL750、16 bit、帯域 DC-40 kHz）を用いて、 $1 \times 10^4$  S/s のサンプリングレートで記録した。また、放電様相の観測は、ハイスピードカメラ（Photron 製 FASTCAM SA5）をフレームレート  $1 \times 10^4$  fps、露光時間  $1 \times 10^{-4}$  s、解像度 448×840、撮影距離 1.2 m の条件で用い、またこれと 25 mm、F/0.95 のレンズを使用することにより、フラッシュオーバー発生時の放電伸展状況を撮影した。がいしの着雪は、フラッシュオーバーの有無に関わらず 1 回の課電ごとに更新した。

<sup>9</sup> ここでは、ブロアからの風雪中に含まれる単位体積当たりの人工雪の質量を空間質量密度と呼ぶ。飛雪を捕捉して質量を量ることで求めた値である。

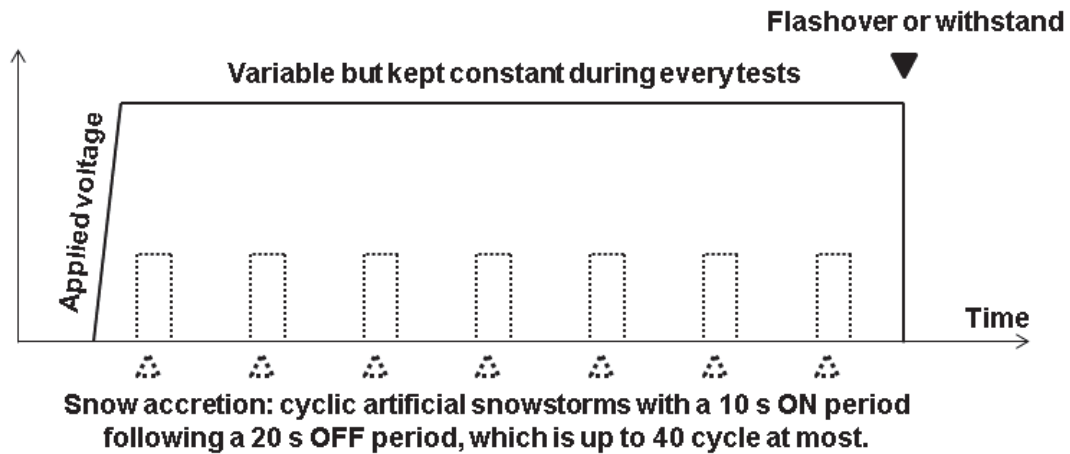


Figure 3-5. Schematic diagram of pre-energizing flashover test procedure.

The constant voltage was applied to the insulator prior to the snow accretion. Snow was accreted on the energized insulator, as it would during a snowstorm. The tests were finished if the insulator flashed over or withstood for 20 min. Snow was refreshed before each test, whether a flashover occurred or not.

### 図3-5 課電先行型の実験における課電および人工雪吹き付けの概要

着雪に先だち、がいしに対して定印法による一定電圧が印加される。自然環境下の送電線のがいしと同様に、課電先行型実験中のがいしは、課電状態にて息継ぎを持つ暴風雪に曝されるのが特徴である。ブローアのオンとオフを繰り返し、実験中のフラッシュオーバーの発生状況を調べた。または、20分間フラッシュオーバーが発生しなかった場合には、耐圧したものととして実験を終了した。着雪はフラッシュオーバーの有無に関わらず1回の実験ごとに更新した。

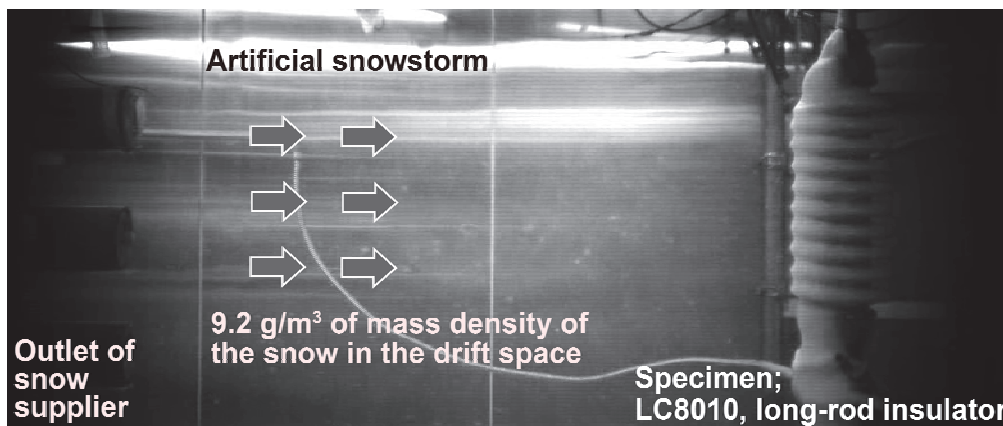
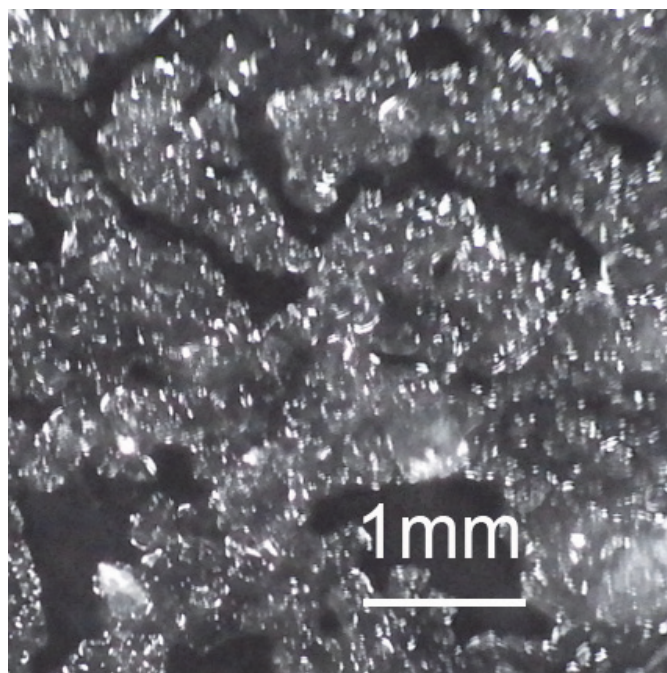


Figure 3-6. Situation of insulator specimen exposed to the quasi-uniform artificial snowstorm in the pre-energizing test cases.

### 図3-6 課電先行型の課電実験における人工的な暴風雪の供給状況



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part II, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2559 – 2567, December 2014.*

Figure 3-7. Photograph of wet snow blown out from the snow supplier.

Artificial snow particles bond to the surrounding liquid water layer, and look like clustered rounded grains. This like situation closely resembles actual snow particles as depicted and described in [5].

### 図3-7 ブロアを通過した後の湿った人工雪の状況

人工雪の粒子は、クラスター状であり、周りの水膜を介して相互に凝集した状況が認められる。このような状況は、文献[5]における実際の雪の状況に似ている。

### 3.3.2 がいし着雪の発達と着雪の導電率

課電先行型の実験に先立ち、課電がない場合の静的な着雪発達特性を調べておく必要がある。そこで、図 3-5 に示したブローアのオン・オフにより、無課電の状態ではがいしに着雪を発達させ、着雪発達形状と雪質を調べた。合計 20 分間 (40 サイクル) の着雪を継続した後の着雪状況を図 3-8 に示す。着雪の形状は、一様に風上側に向かって三角状に発達した状態となり、三角の頂点付近で笠の外径より約 40 mm 出っ張る程度の着雪厚さとなった。このときの着雪質量はがいし全体で 2.2 kg であったが、外観上、上下方向に比較的均一に分布した着雪状況が確認できる。

この 40 サイクル後の状態で、直ちにがいしから着雪の塊を取り外し (図 3-9a)、一つの笠一笠間分を 1 単位として切り取り、がいし笠の外径より内側と外側に分けた (図 3-9(b))。この内側と外側のブロックについて、それぞれの中心部分を数 10 g ずつ切り出して採取し、その採取片ごとに全量融解して導電率  $\sigma_{25}$  を測定した。がいしの上から  $N_{ss}$  番目のサンプルについて、がいし着雪の導電率を測定した結果を図 3-10 に示す。ここで、がいしに吹き付ける前の導電率は 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  である。内側と外側のいずれについても、1 番 (上方) から 9 番 (下方) に向かうにつれて導電率が高くなる傾向が見られた。また、いずれの位置においても、外側の導電率が内側よりも高く、最も高いものでは 1350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  に達した。この不均一な導電率分布は、がいしへの着雪が成長する最中に、着雪の一部が融解して融雪水となり、図 3-10 中の着雪の中に示した矢印の向きに移動したためと考えられる。これと同様の傾向は、これまでにも、屋外での人工着雪実験において確認されており、例えば菅原ら[6]は、塩水を混ぜて導電率を 9.2  $\text{mS}/\text{cm}$  とした自然雪を、送風機を用いて風速 10  $\text{m}/\text{s}$  で懸垂吊りと耐張吊りの長幹がいしに着雪した結果、懸垂吊りと耐張吊り共に、下方ほど導電率が高くなることを示している。このようながいし着雪中の融雪水の移動は、部分的に導電率の高い通路を形成し不均一な電圧分担を生じさせうるものと考えられる。また、融雪水が下方に移動することから、下方の着雪の含水率を上昇させ、下方の着雪ほどがいしから脱落しやすくなることも示唆された。

次の 3.3.3 項では、本節の主な目的である、送電線のがいしに暴風雪のゆらぎを与えた状態を模擬する。

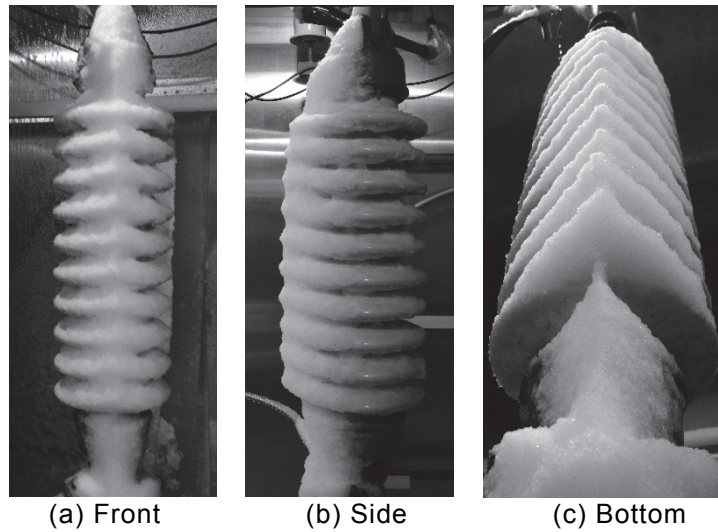
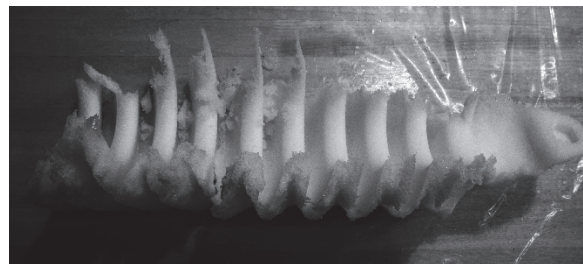
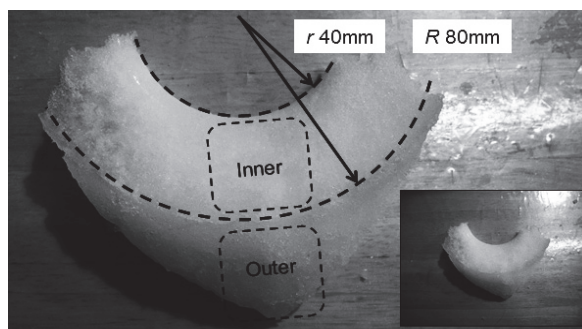


Figure 3-8. State of specimen with pennant-shaped snow accretion after 20 min (40 cycle) of non-energized snow accretion in a manner of what described in Figure 3-5.

図3-8 図 3-5 のサイクルによる 20 分間（40 サイクル）の無課電着雪状況



(a) Snow block on a table taken from the specimen after the snow accretion in Figure 3-8



(b) Section of snow sample divided into pieces from the snow block to measure the distribution of snow conductivity at each shed spacing

Figure 3-9. Situation of snow sampled from the specimen.

図3-9 供試がいしから採取した人工雪

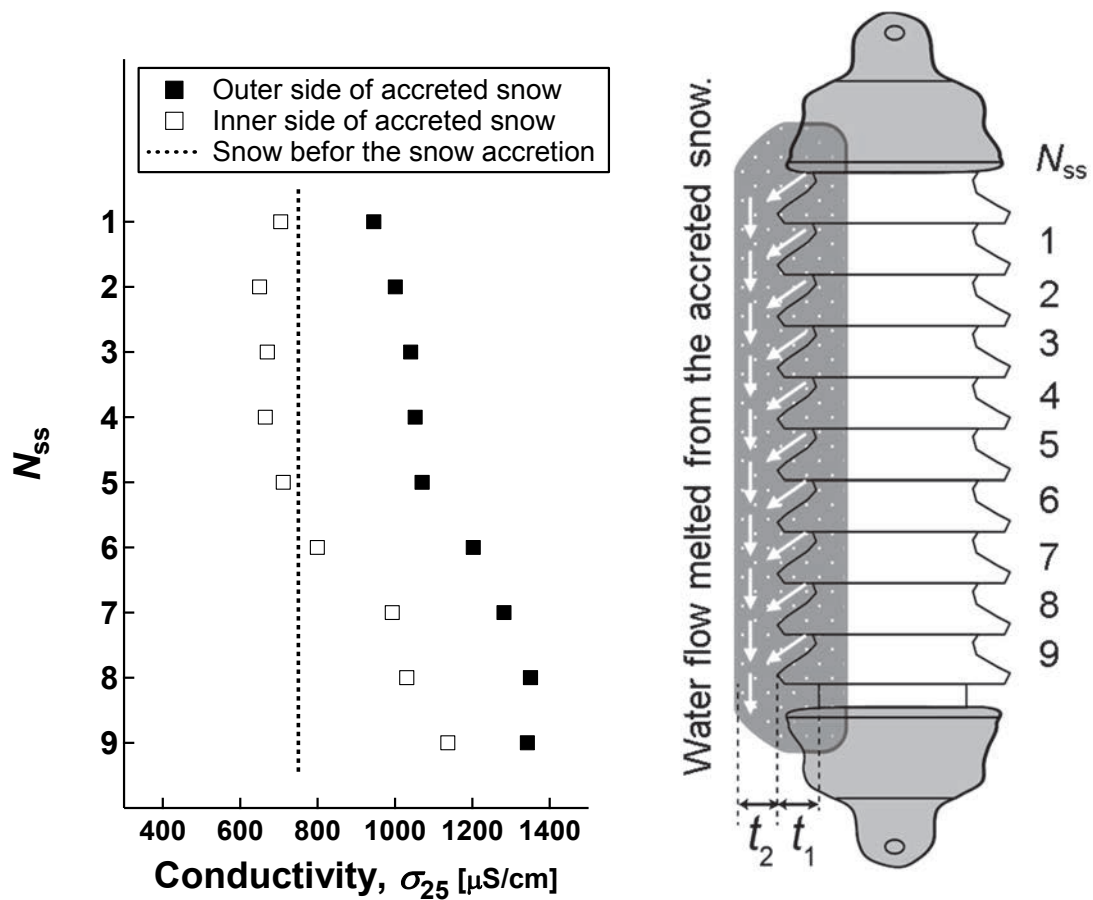


Figure 3-10. Distribution of snow conductivity at each shed spacing.

The snow accreted between one shed pitch in Figure 3-8 and 3-9 was determined as a unit of cut sample.  $N_{ss}$  indicates the location number of the snow sampled from each shed spacing and # 1 corresponds to from the top. Both  $t_1$  and  $t_2$  are 40 mm in thickness. The  $t_1$  and  $t_2$  are 40 mm respectively. The snow conductivity before the tests was 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . The arrow indicates the water flow melted from the accreted snow.

### 図3-10 がいしの各位置における着雪の導電率

図 3-8、3-9 の着雪の笠-笠間分を 1 単位として切り取り、がいし笠の外輪の線に相当するところから内側と外側に分けた。 $N_{ss}$  はがいしの上方からの  $N$  番目の笠間から採取されたサンプルであることを示す。がいしの笠の出張り  $t_1$  および着雪の厚さ  $t_2$  はいずれも 40 mm である。がいしに吹き付ける前の人工雪の導電率は 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  である。図中の矢印は、融雪水の動きを表している。

### 3.3.3 課電先行型のフラッシュオーバー発生条件

ブローのオン・オフにより風雪のゆらぎを模擬した課電先行型の実験を、人工雪の導電率ならびに印加電圧を変えて 27 回行った結果、14 回の実験で耐圧し、13 回の実験でフラッシュオーバーした<sup>10</sup>。また、いずれのフラッシュオーバーについても、その発生のタイミングは、風雪の供給を休止したオフ期間であった。フラッシュオーバーに至る際の、典型的な結果を図 3-11 に示す。図中には、暴風雪のオンおよびオフ、最大漏れ電流波高値<sup>11</sup> $I_{\max}$ 、最大瞬時電力  $P$  を同じ時間軸で示した ( $I_{\max}$ 、ならびに  $P$  については、毎 0.1 秒の最大値をプロットした)。同図から、課電時間の経過とともに放電の発生が活発になり、 $I_{\max}$ 、 $P$  ともに増加し、その後、風雪の供給が休止した状況で、時刻  $t = 612 \text{ s}$  においてフラッシュオーバーしたことが分かった。また、図 3-11 中の  $P$  は、実験開始から終了まで次第に増加しており、この間の着雪への入熱が増加して融雪が加速的に進行することが示唆された。また、経過時間が大きくなるにつれて、 $I_{\max}$  の増加が認められ、その傾向は特に終盤では暴風雪を休止した期間に顕著になっており、この期間に局部アーク放電の大きな伸展があったことが確認された。

一方で、暴風雪を供給している時間帯のみを見ると、経過時間が大きくなると  $I_{\max}$  は飽和する傾向が認められた。このことは、この期間に局部アーク放電の大きな伸展がなかったことを示しているが、これは、電力用の遮断器と同じメカニズムで、風雪により局部アークが冷却される、吹き消されるなどして、大きな伸展が抑制されることなどが原因である。その結果、局部アーク放電はその場で停留ないし消弧して、その伸展が抑えられたと考えられる。

ここで、オン期間とオフ期間の役割と、フラッシュオーバーに至る条件を明確にするため、既述のブロー操作のオンとオフを周期的に繰り返す場合（ケース I）、ならびに、ブロー操作をオン連続とした場合（ケース II）を課電先行型にて比較し、最大漏れ電流波高値の推移を記録した。その実験条件は表 3-1 ならびに図 3-12 のようである。なお、印加電圧を 33 kV とし、ケース I ではその 1 周期当たりの時間を 20 s（オン期間約 10 s、オフ期間約 10 s）とした。ケース II では、1 周期当たりの時間をケース II と合わせる意味で、便宜上、20 s（オン期間約 10 s を 2 回分）でデータを区切って示すこととする。

図 3-13 に、繰り返しサイクル数  $N$  と、ケース I、ケース II の最大漏れ電流波高値の関係を示す。オン期間の漏れ電流波高値は、ケース I、ケース II のいずれの条件でも  $N$  が大きくなると増大するが、 $N = 11 \sim 13$  程度で飽和する傾向が見られた（図 3-13(a)、(b)）。このことから、 $N$  を増すことによって、オン期間にはある程度局部アーク放電の伸展が見られ、数 100 mA から 1 A 程度まで電流波高値が増加したことが分かる。

<sup>10</sup> これらをまとめたフラッシュオーバー電圧特性の全容については、3.3.5 項で述べる。

<sup>11</sup> 高電圧試験、絶縁試験などにおいては、各種印加電圧波形上の最高点における電圧の瞬時値を波高値という[3]。本論文では、漏れ電流の最高点における電流の瞬時値を漏れ電流波高値と呼ぶ。

他方、ケースⅠのオフ期間の漏れ電流波高値は、 $N = 11$  から極端に増加する傾向が見られ、 $N = 13$  のオフ期間においてフラッシュオーバーした (図 3-13(a))。ケースⅠの  $N = 11$  と  $N = 13$  に見られる漏れ電流波高値は、ケースⅡの同時刻の漏れ電流波高値と比べて大きく、その違いが明らかであった。このことから、最も大きな伸展を伴う局部アーク放電は、ケースⅠの  $N$  が増加したときのオフ期間に発生しやすいことが分かった。なお、ケースⅡは、 $N = 14$  になってもフラッシュオーバーに至らず、耐圧した (図 3-13(b))。

以上のことより、自然環境下の暴風雪を仮定した場合のフラッシュオーバー発生条件は、①局部アーク放電が発生し、②これがある程度の融雪を促進する状況を経て、③暴風雪が休止する期間が到来したとき、であることが明らかとなった。



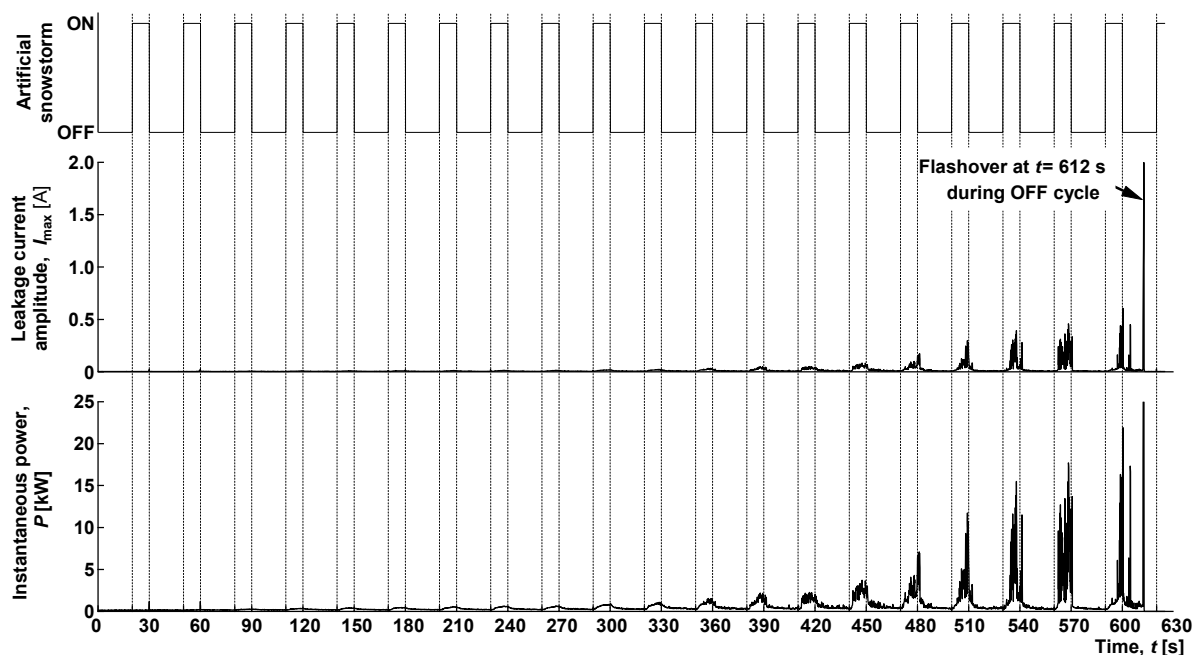


Figure 3-11. Typical transitions of maximum leakage current amplitude ( $I_{\max}$ ), and instantaneous power ( $P$ ) until flashover occurs.

This example was recorded with snow conductivity of  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ , and applied voltage of  $33 \text{ kV}$ . The leakage current gradually increases before finally flashing over when the artificial snowstorm rests; this occurs in the rest time between  $600 \text{ s}$  and  $620 \text{ s}$ . It should be emphasized that flashovers always occurred in these test cases, even though the snow conductivity and the applied voltage were varied. It can be said that suspension of snowstorm make the partial arc discharges active, and induces flashovers.

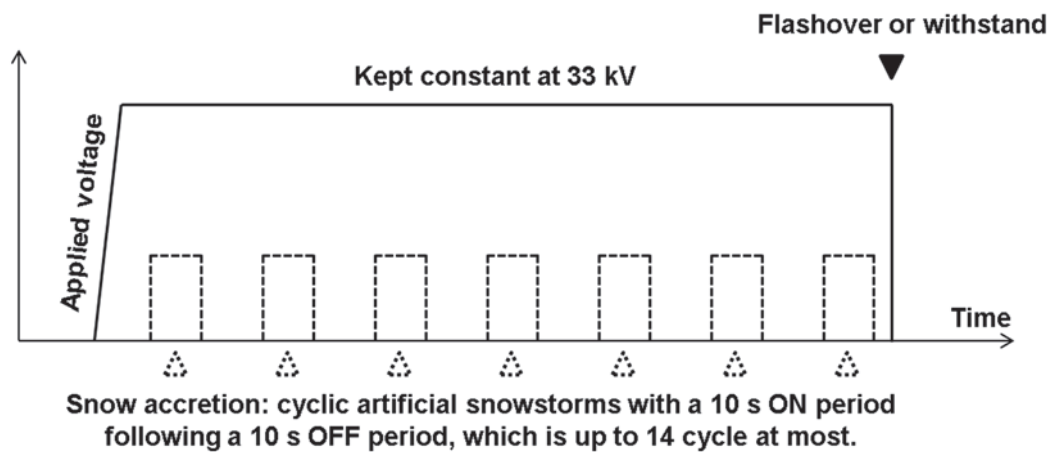
図3-11 フラッシュオーバが発生した典型例における最大漏れ電流波高値 ( $I_{\max}$ )、1 秒当たりの放電電荷量 ( $Q$ )、および瞬時電力 ( $P$ ) の推移

ここでは、着雪導電率  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、印加電圧  $33 \text{ kV}$  の例を示した。漏れ電流波高値は、時間と共に増加し、暴風雪が休止した  $600\text{--}620 \text{ s}$  の間にフラッシュオーバに至った。実験を繰り返した結果、着雪導電率と印加電圧が変わっても、フラッシュオーバのタイミングは必ず暴風雪の休止期間であった。このことから、暴風雪の休止が、フラッシュオーバの発生を誘発することが分かった。

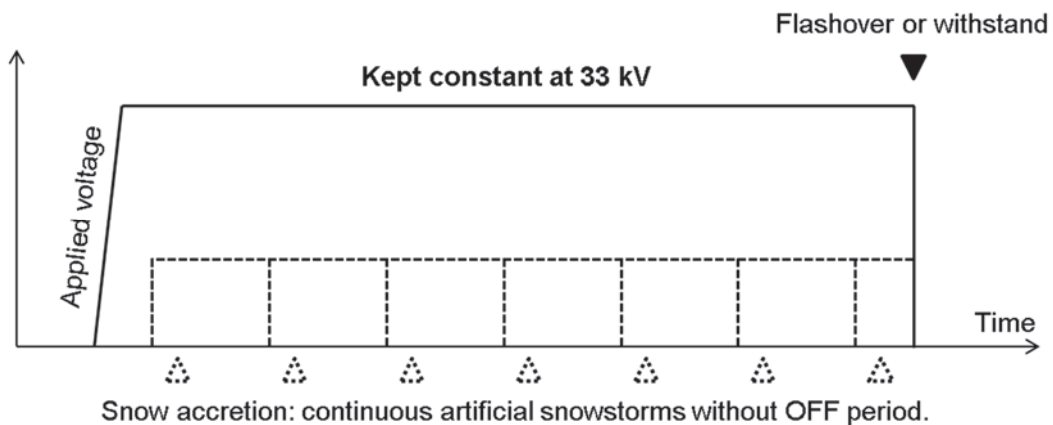
Table 3-1. Experimental conditions for determining the role of ON and OFF period of artificial snowstorms and flashover requirements.

表3-1 オン期間とオフ期間の役割とフラッシュオーバーに至る条件を調べるために行った課電先行型の実験条件

Item	Case I	Case II
Voltage application	Continuous	Continuous
Voltage	Constant (33 kV)	Constant (33 kV)
Snowstorm application	“ON” continuously	“ON” and “OFF” periodically



(a) Case I: Snowstorm was applied at intervals



(b) Case II: Snowstorm was applied continuously

©2014 IEEE

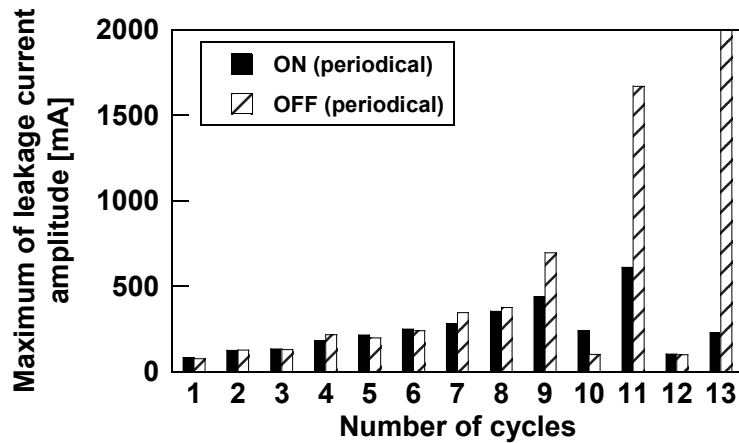
*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part II, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2559 – 2567, December 2014.*

Figure 3-12. Schematic diagram of pre-energizing flashover test procedure for determining the role of the ON-period and OFF-period of blizzard and the requirement for flashover.

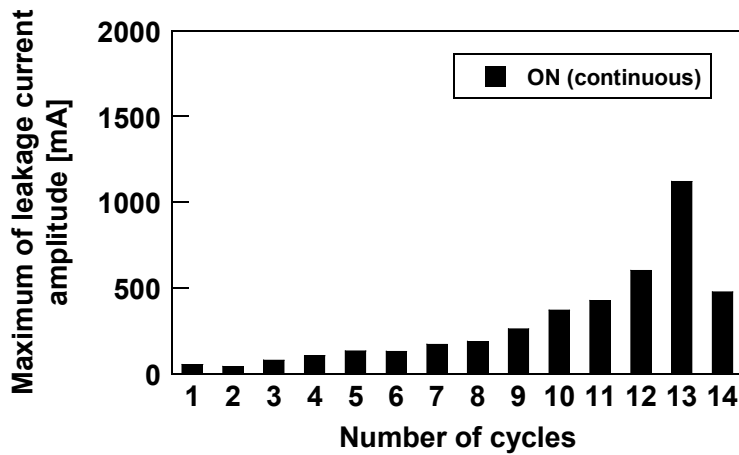
The constant voltage was applied to the insulator prior to snow accretion. Snow was accreted on the energized insulator, as same as Figure 3-5. These procedures aims to determine the role of the blizzard.

### 図3-12 オン期間とオフ期間の役割とフラッシュオーバーに至る条件を明確にするために行った課電先行型の実験の概要

図 3-5 と同様、着雪に先だち、がいしに対して定印法による一定電圧が印加される。この二つのケースを比較することにより、オン期間とオフ期間の役割ならびにフラッシュオーバーに至る条件を明確にすることを目的としている。



(a) Case I: Snowstorm was applied at intervals



(b) Case II: Snowstorm was applied continuously

Figure 3-13. Influence of the artificial snowstorm application on the maximum leakage current in each cycle of the snowstorm.

Both in the Case I and the Case II, partial arc discharges gradually increased with time because of the continuous supply of snow during the ON-periods, but flashover never occurred during the ON-periods. The maximum leakage current saturated at several hundred mA to 1 A. On the other hand, in the Case I, the arc was not cooled or blown by blizzard during the OFF-periods. Therefore, the rest of the blizzard made the arc propagation great and finally induced the flashover.

図3-13 課電先行型における風雪の供給、停止が各サイクルの最大漏れ電流波高値に与える影響

ケース I、ケース II とも、時間の経過と共にオン期間の時間の局部アーク放電の活動が活発になり、数 100 mA から 1 A 程度で飽和した。一方で、ケース I では、オフ期間において局部アークの冷却や吹き消しが作用しないため、 $N$  が進んだ状況のオフ期間に局部アーク放電の伸展が最も活発になり、ついにはフラッシュオーバを誘発した。

### 3.3.4 課電先行型のフラッシュオーバー過程

塩雪害事故の発生した状況を推定するため、課電先行型の実験において、ハイスピードカメラを用いたフラッシュオーバー過程の観測を行った。ハイスピードカメラの諸元と撮影条件を表 3-2 に示す。図 3-14 は、図 3-11 のフラッシュオーバー発生時 (612.0~612.6 s 付近) の電流波形のうち、特に電流が急増した 0.6 秒間の部分を切り出して拡大したものである。漏れ電流  $i$  は、期間<A>より増加し始め、局部アーク放電特有の歪んだ波形となり、その後は過電流継電器により実験回路が遮断されるまで消弧することはない。ここで、期間<B>における  $T_{\text{Trig}}$  は、波形記録装置のトリガ点における時刻であり、漏れ電流瞬時値が正サイクルで 2.0 A に達した時刻に相当する。説明の便宜上、 $T_{\text{Trig}}$  におけるハイスピードカメラのフレーム番号を #10000 とする。

図 3-15 は、期間<A>に記録された電流波形と、その時刻を対応させた放電様相の写真である。電流波形の先頭部分においては、上部、下部のがいし浴面あるいは着雪の空隙で火花のように見える部分放電が現れた (#6359 の上下金具付近を拡大した写真に発光が認められる)。その 0.1 ms 後のフレームでは、これが空隙を橋絡し、やがて局部アーク放電に移行する状況が見られた (#6360)。その後、漏れ電流が波高値の方に向かうにつれて、フレームに撮像される局部アーク放電の発生箇所は増加した (#6365~#6380)。

図 3-16 は、期間<B>に記録された電流波形と、その時刻を対応させた放電様相の写真である。図 3-16 では、それぞれ隣り合う写真の時間間隔は 20.0 ms である。これらはいずれも電流波形のゼロクロス付近の写真であるが、アークが残存しており消弧していないことが明らかである。また、期間<B>全体では、時間が経過するほど波高値が大きくなっており、これに伴って、対応する各フレームに撮像される局部アーク放電のアークルートが移動してアークコラムが長くなった<sup>12</sup> (#9050~#10050)。また、先述の期間<A>、ならびに期間<B>の初期段階においては、並行に発弧したアークコラムも見られた (~#9050) が、局部アーク放電の伸展が進むにつれて並行に発弧したものはなくなった (#9250~)。そして、ついには、全ての局部アーク放電が 1 本に集約されると共に、がいしの金具間の全路を橋絡してフラッシュオーバーした (#10250)。

以上の観察から、期間<A>において空隙で発弧した局部アーク放電は、着雪の浴面を伸展し、互いに繋がり、期間<B>でそれぞれがいしの金具間の全路を橋絡してフラッシュオーバーに至る状況が確認された。

ここで、着雪の導電率 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、フラッシュオーバー電圧 30~42 kV の各条件について、フラッシュオーバーが発生した後のがいし着雪の写真を図 3-17 に示す。いずれの写真でも、がいしの下方には、着雪のない空隙部分が必ず存在しており、がいし上方の空隙も合わせた総空隙長は、印加電圧が大きいほど長くなる傾向が見出された。これは、局部ア

<sup>12</sup> このようなアークルートとアークコラムの挙動のことを、一般的に局部アークの伸展と呼ぶことが多い[7,8]。

ーク放電が、印加電圧が大きくなるほど、長い空隙を越えてがいしの全路に伸展できることに対応すると考えられる。このことから、フラッシュオーバの発生と、空隙の局部アーク放電の挙動は、深く関係していると言えることができる。

西村ら[7]は、通常の汚損湿潤がいしのフラッシュオーバ機構について、がいし表面に一様に連続した汚損被膜が形成される磁器がいしでは「局部アーク伸展による機構」が、撥水性を持ち非連続的な汚損被膜が形成されるポリマーがいしでは「微小放電群のカスケーディングによる機構」が主要因になると述べた。本研究の課電先行型で観測された現象は、局部アーク放電が空隙を橋絡した後のフラッシュオーバ機構は、夏季の塩害における磁器がいしの局部アーク伸展による機構と似た点を持っている。また、このことは氷柱により着氷したがいし沿面のフラッシュオーバ機構にも似た特徴があり、これらの特性について、共通点を見出すことができる。すなわち、夏季の汚損湿潤がいしの表面汚損被膜に形成された乾燥帯、着氷がいしに形成された氷柱の空隙、そして本研究における着雪の空隙は、それぞれ、電圧分担に不均衡を生じさせるきっかけであり、これらが形成されることで十分高い電圧が乾燥帯や空隙の両端に印加される。これらの乾燥帯、空隙の長さが小さく、乾燥帯、空隙以外の残り部分の抵抗が小さければ、そこで局部アーク放電が発弧して、汚損被膜、氷柱、着雪の沿面において伸展を開始する。これががいし両端を橋絡してフラッシュオーバに至るほど伸展するか否かは、それぞれの現象における沿面の特性に依存して決まる。

一方、がいし着雪に独特の特徴としては、着雪の厚さは汚損湿潤沿面の汚損被膜に比べて厚く、熱容量が大きいため、局部アーク放電発生時にも安定した形状を留めやすい傾向が見られた。そのため、汚損湿潤沿面の局部アーク放電に見られる熱的伸展機構や電界的伸展機構[8]に対して、大きな伸展電圧が得られない状況でも、アークルートに定在化が生じ、零点付近でも消弧しにくい図 3-15、3-16 のような局部アーク放電が発生し得る。

汚損湿潤沿面（通常の塩害）のフラッシュオーバ現象、氷柱により着氷したがいしのフラッシュオーバ現象の概念そのものは、これまでに提唱されているものであるが、上述のように本論文での塩雪害時の着雪がいしの現象も含めた局部アーク放電伸展の類似性を、空隙と残余抵抗の役割に着目してまとめたものが図 3-18 である。

Table 3-2. Conditions for observing flashover process using high-speed camera.

表3-2 ハイスピードカメラを用いたフラッシュオーバ過程の撮影条件

Item	Value
Applied voltage	33 kV
Snow conductivity	750 $\mu$ S/cm
Frame rate	$1 \times 10^4$ FPS
Exposure time	$1 \times 10^{-4}$ s
Distance between insulator and camera	1.2 m
Resolution	448x840 pixels
Color	Monochrome
Focal length	25 mm
F-value	0.95
Trigger position for start recording (and corresponding frame number)	+2.0 A (#10000)

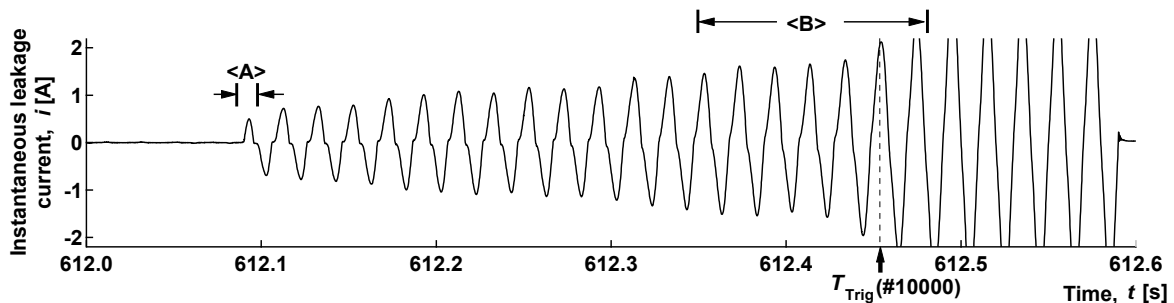
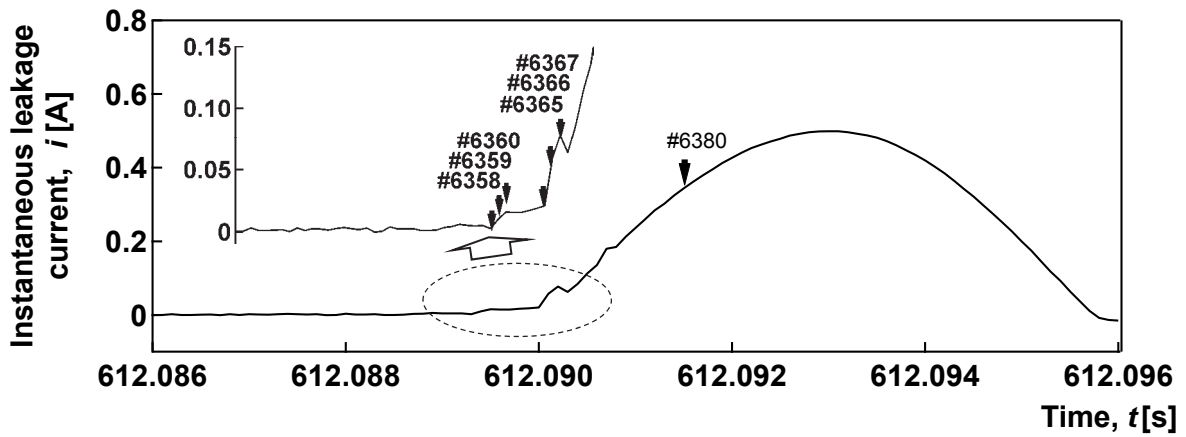


Figure 3-14. Enlarged waveform of leakage current during the flashover around  $t = 612$  s in Figure 3-8.

$T_{\text{Trig}}$  during <B> corresponds to the trigger position of instantaneous leakage current.

図3-14 フラッシュオーバが発生したケース（図 3-8）のフラッシュオーバ発生直前（ $t = 612$  s 付近）の電流波形

期間<B>における  $T_{\text{Trig}}$  は、波形記録装置のトリガ点における時刻を示す。



(a) current waveforms



(b) photos by the high-speed camera

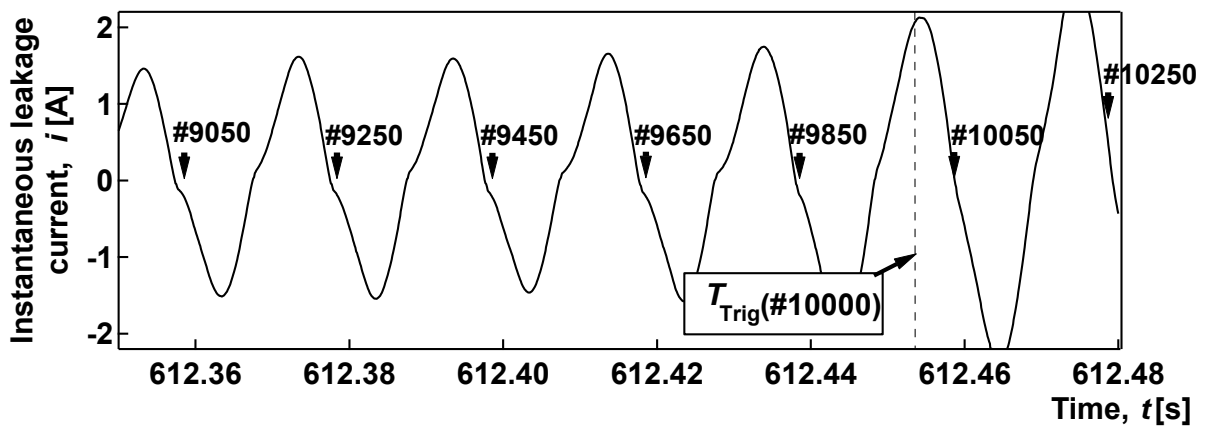
Figure 3-15. Observation result for the start of current waves during <A> period.

A small plateau (#6359–#6365) was seen in the waveform diagram. Corresponding to this plateau, there was light emission from near the surface of the upper electrode and between the snow gaps near the lower electrode. The lights between the snow gaps in #6359 appear to be a spark-like discharge. After that, the brightness of the light emissions intensified, then transferred to partial arcs (#6380).

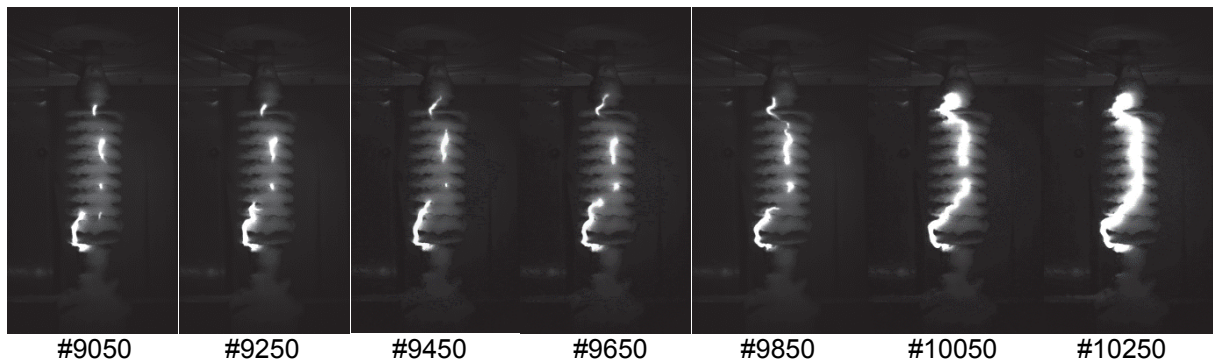
図3-15 電流波形の先頭部分（期間<A>）および期間<A>における放電様相

電流波形の先頭部分においては、上部・下部のがいし沿面あるいは着雪の空隙で火花のような部分放電が現れ（#6359）、これが空隙を橋絡し、やがて局部アーク放電に移行する状況が見られた。その後、局部アーク放電の発生箇所が増加し、これに伴って電流瞬時値  $i$  も波高値に向かって増加した（#6380）。





(a) current waveform



(b) photos by the high-speed camera

Figure 3-16. Observation result for the transition to flashover during <B> period.

The time intervals were 20.0 ms. It was obvious that partial arcs were not extinguished while each photographs corresponded to every zero-crossing points at the same phase angle for power frequency. The leakage current height got greater and the lengths of major arcs got longer toward the flashover (#9050 – #10050). In the period <A> and early in the period <B>, not only major arc columns but also minor ones were seen in parallel in the pictures (up till #9050). After that in the period <B>, the parallel appearance of partial arcs were not seen because those ones were aggregated into major arcs (from #9250). Finally partial arc discharges connected with each other and the flashover was attained at #10250.

図3-16 フラッシュオーバーへの移行時（期間<B>）における電流波形および放電様相

それぞれ隣り合う写真の時間間隔は 20.0 ms であり、これらはいずれも電流波形のゼロクロス付近の写真であるが、局部アークが残存しており消弧していないことが明らかである。期間<B>全体を見ると時間が経過するほど波高値が大きくなっており、これに伴って、対応する各フレームに撮像される局部アーク放電のアークルートが移動してアークコラムが長くなった（#9050～#10050）。また、期間<A>から、期間<B>の初期段階においては、並行に発弧したアークコラムも見られた（～#9050）が、局部アーク放電の伸展が進むにつれて、並行に発弧したものはなくなった（#9250～）。そして、ついには、全ての局部アーク放電が 1 本に集約されると共に、がいしの金具間の全路を橋絡してフラッシュオーバーした（#10250）。

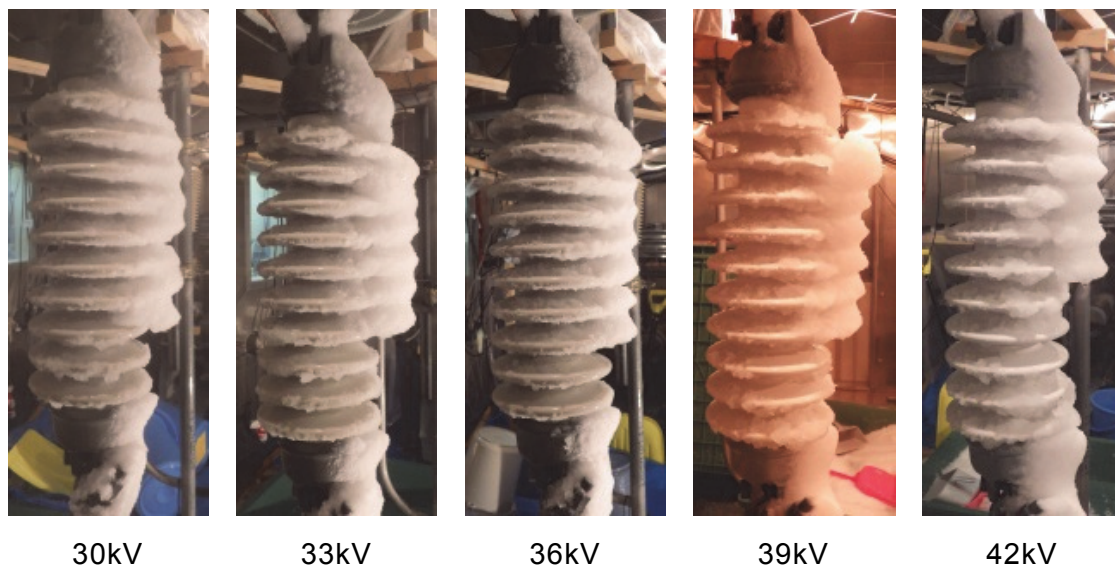
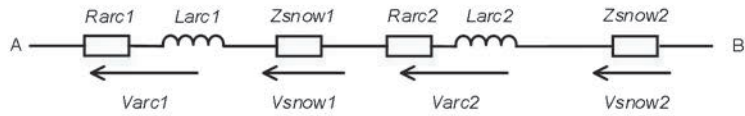
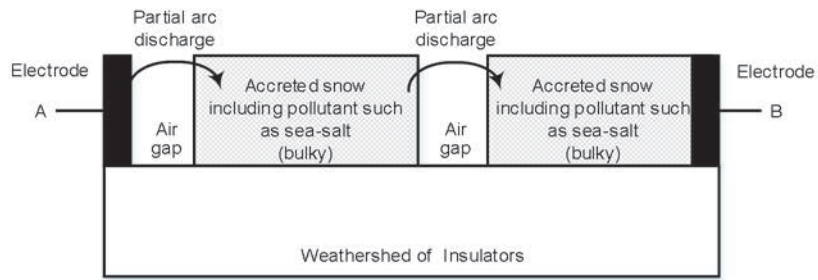


Figure 3-17. Situations of air gaps after insulators flashed over in the pre-energizing flashover voltage tests.

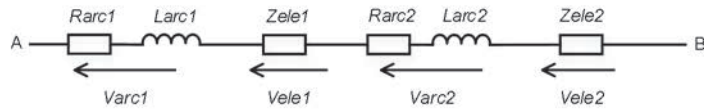
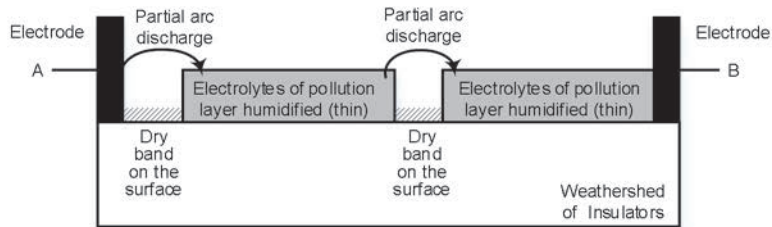
The snow conductivity was  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$  in all cases, but the flashover voltage were 30 to 42 kV, respectively. The air gaps at the bottom of the insulators were always appeared in all cases. These gaps were longer as the flashover voltage increased. This result indicated that the higher voltages could make the partial arc discharge bridge the longer gaps. Therefore, it can be said that there is a strong relation between occurrence of flashover and the behavior of partial arc discharges at air gaps.

#### 図3-17 課電先行型のフラッシュオーバー後のがいしに見られた着雪の空隙の概要

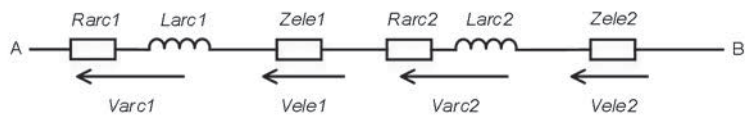
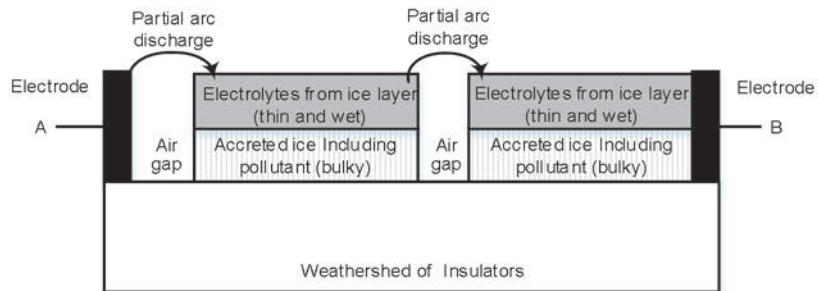
着雪の導電率  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、フラッシュオーバー電圧 30～42 kV の各条件の結果である。いずれの写真でも、がいしの下方には、着雪のない空隙部分が必ず存在しており、フラッシュオーバー時の印加電圧が 42 kV では、空隙の長さをもっとも大きくなった。これは、局部アーク放電が、印加電圧が大きくなるほど、長い空隙を越えてがいしの全路に伸展できることに対応する。このことから、フラッシュオーバーの発生と、空隙の局部アーク放電の挙動は、深く関係していると言することができる。



(a) Salt-contaminated snow accretion



(b) Orthodox salt contamination



(c) Salt-contaminated ice accretion

Figure 3-18. Similarities of discharge phenomena in flashover process between snow-accreted, salt-contaminated, and ice-accreted insulators.

図3-18 塩雪害、通常の塩害、着氷害時のがいしに生じる放電現象の類似性

### 3.3.5 課電先行型のフラッシュオーバー電圧特性

課電先行型の実験では、人工雪の導電率を 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の 4 水準とした。図 3-19 に、ON、OFF のある暴風雪環境下で、人工雪の導電率を変えて前項と同じ課電先行型のフラッシュオーバー実験を繰り返し行った場合のフラッシュオーバー電圧、フラッシュオーバー時間、消費電力特性を示す。フラッシュオーバーを○印で、耐圧を△印で示す。このうち、フラッシュオーバーしたケース（丸印のプロット）については、フラッシュオーバーまでの時間と散逸エネルギー（電力量）を示す。

同図より、フラッシュオーバー電圧は、導電率が増加しても、それほど低下しない。導電率 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  では、導電率 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  よりもフラッシュオーバー電圧が高くなり、予想とは反する結果となった。これは、局部アーク放電に伴う漏れ電流が、着雪を融解・脱落させたことが原因であり、実際に導電率 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  での耐圧は、ほとんど全ての着雪が実験中がいしから脱落してしまったケースであった。そのような傾向は、導電率が高くなるほど頻繁に見られ、このために最低フラッシュオーバー電圧が予想されるほど低下しない原因と考えられた。

上記の実験事実と、実送電線に生じた現象、つまり海塩の混入により高い導電率を示す着雪が塩雪害を生じたという事実ははどのような関係があり、実験結果をどのように評価すべきか考察する必要が生じた。

ここに、実際の送電線の状況を考える。実際の送電線では、懸垂鉄塔 1 基ごとに、少なくとも回線数の 3 倍（3 相分）の数のがいし連が連結されている。耐張鉄塔では、懸垂鉄塔の 2 倍となる。電気回路的に見れば、同じ電位差に多数のがいし連が並行に挿入された状態と同様と見ることができる。これらの多数のがいし連のうち 1 連でもフラッシュオーバーが発生すれば、その回線は電気事故となることから、多数のがいし連のうち 1 連でも落雪を免れる危険性、着雪ががいし上に留まる危険性があれば、このことを絶縁設計に反映しなければならない。一方で、本研究での着雪がいしの実験結果は、高々数回の試験によりフラッシュオーバー電圧を評価している。実験では、落雪を免れる危険性を評価することができない。実験を、例えば導電率 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  で、図 3-19 よりも低い電圧で相当回数に繰り返せば、いつかは脱落を免れるがいしが現れ、低いフラッシュオーバー電圧になるかもしれない。このやむを得ない事情に対して、実際の送電線では、次式で示される統計的な評価を行うことが提唱されている[9]。

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \quad (3-2)$$

ここで、 $p_1$  は単一のがいし連のフラッシュオーバー確率、 $p_n$  は  $n$  連並列のがいし連のうち少なくとも 1 連がフラッシュオーバーする確率である。

$p_1$  が与えられたときの  $p_n$  の大きさを示すために、仮に  $p_1$  がある確率変数  $x$  に関する標準正規分布であるとする（事象  $X$ ）。 $p_n$  は、 $x$  と  $n$  を用いて、

$$p_n = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \right\}^n \quad (3-3)$$

このとき、 $p_n$ と $n$ の関係は図 3-20(a)のようになる。同図から、 $x$ の絶対値が大きい、すなわち稀な事象ほど、 $n$ の影響が大きいことが分かる。図 3-20(b)は、 $x=3$ における $p_n$ を図示したものであり、所謂 $3\sigma$ 値と呼ばれる値である。 $p_1=4.4\times 10^{-3}$ であるのに対して、同一確率の事象が200個並列した $n=200$ の状況では $p_{200}=5.9\times 10^{-1}$ となり無視できないほど大きくなる。実際の場面では、一般にがいし連の $p_1$ を実験から求めることは困難であり、式(3-2)そのものは、がいしの絶縁設計においては概念的なものとして扱われることが多い。しかし、 $p_1$ がゼロでない以上、 $n$ が大きくなったときの $p_n$ は無視できないほど大きい値を示すことを図 3-20(b)は示している。前述したように、がいし着雪が脱落を免れる事象が稀頻度であっても、見逃せない理由はここにある。したがって、課電先行型の実験において雪の導電率とフラッシュオーバー電圧の関係を示した図 3-19を解釈する上で、実験事実と現実の送電線との相違には十分注意することが必要である。

次節では、融雪に伴う落雪の影響を可能な限り排除して、人工雪の導電率とフラッシュオーバー電圧の関係を実験的に評価し、着雪ががいしからの脱落を免れた場面での導電率の影響を把握する。

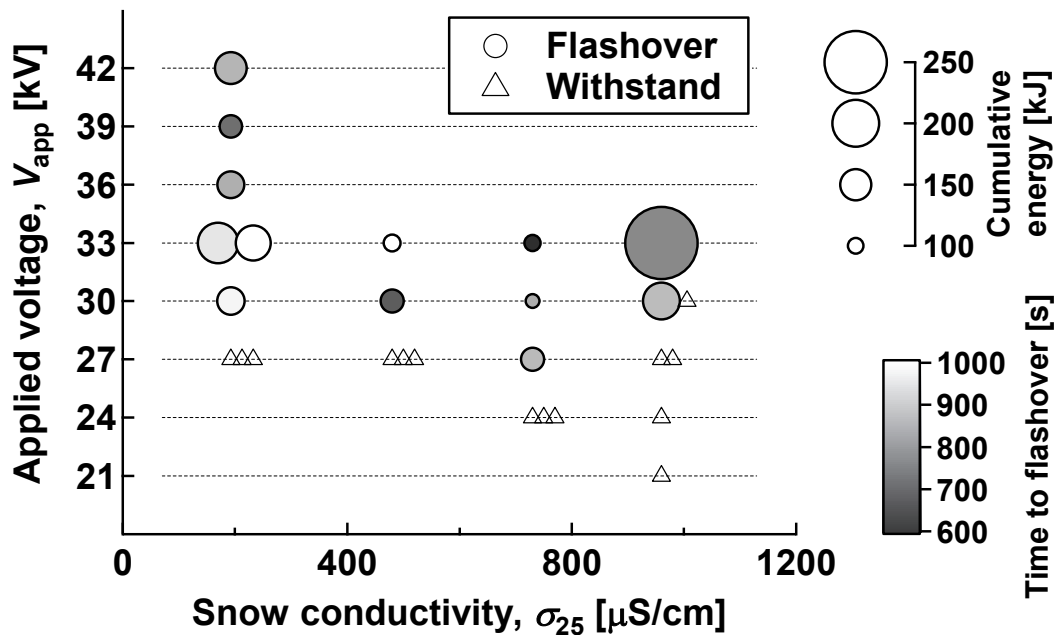
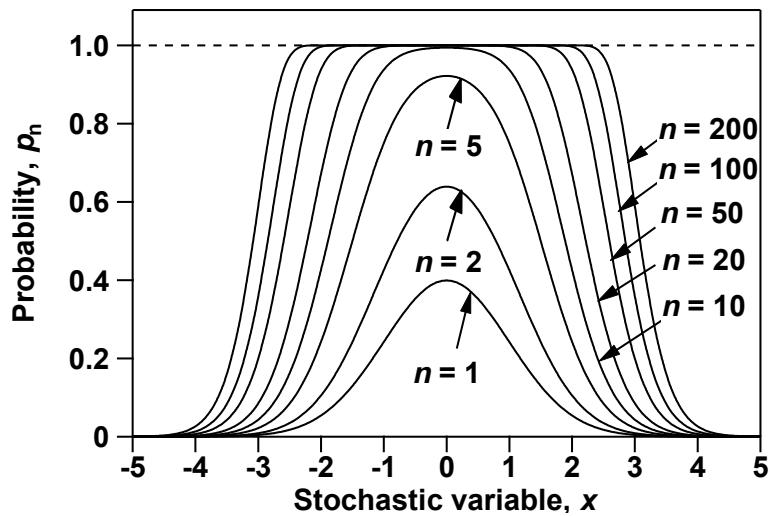


Figure 3-19. Flashover characteristics as a function of snow conductivity under artificial snowstorms.

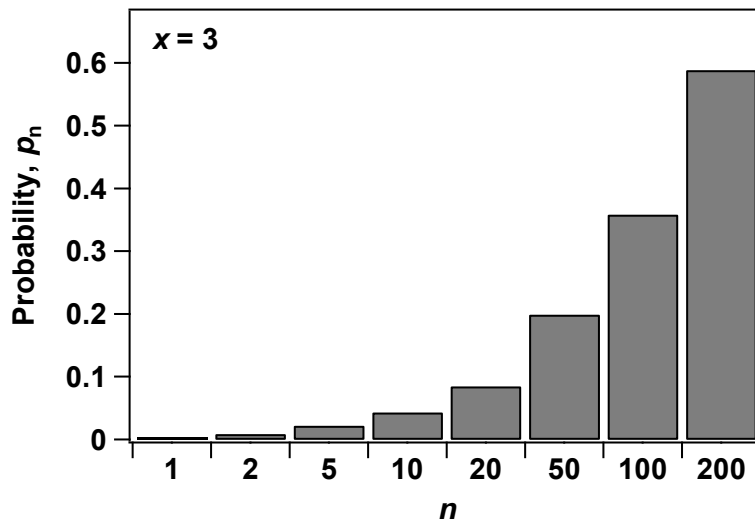
Circle denotes that the insulator flashed over and triangle denotes that the insulator withstood. In the flashover cases, the size of each circle indicates the cumulative energy until the flashover. The color of each circle indicates the time to flashover as well.

図3-19 課電先行型において雪の導電率を変化させたときのフラッシュオーバー電圧特性

フラッシュオーバーしたケースは丸印のプロット、フラッシュオーバーしなかったケースは三角印のプロットで示した。フラッシュオーバーした場合には、フラッシュオーバーまでの時間をコンターで示し、散逸エネルギー（電力量）を丸の大きさで示した。



(a) Effect of  $n$  on  $P_n$  as a function of  $x$



(b) Variation of  $P_n$  at  $x = 3$  as a function of  $n$

Figure 3-20. Flashover probability of a lot of parallel insulator strings on overhead lines yield from a general statistical idea.

Here we concern about a single event “X” which follows the standard normal distribution. While the probability of a single rare case ( $x = 3$ )  $p_1$  is  $4.4 \times 10^{-3}$ , the probability that at least one in same 200 events (200 “X”s in parallel,  $n = 200$ ) occur ( $p_{200}$ ) is  $5.9 \times 10^{-1}$ .  $p_{200}$  is much higher than  $p_1$  and it could not be negligible if “X” were failures on overhead lines.

### 図3-20 送電線上にある多数のがいし連のフラッシュオーバー確率の通念

例えば、標準正規分布に従う一つの稀な事象  $X$  ( $x = 3$ ) の発生確率 ( $p_1$ ) が  $4.4 \times 10^{-3}$  であるのに対して、事象  $X$  が 200 個並列 ( $n = 200$ ) の状況を考えて場合の「少なくとも一箇所で  $X$  が発生する確率 ( $p_{200}$ )」は  $5.9 \times 10^{-1}$  となる。もし、事象  $X$  が送電線事故の生起確率に繋がるものであれば、この値は無視できないほど大きいと言える。

### 3.4 着雪先行型のフラッシュオーバー実験

前節では、塩雪害事故の発生した状況を推定するため、課電先行型の実験を実施した。その中で、雪の導電率が高くなることによるフラッシュオーバー電圧の変化が、放電と漏れ電流による着雪の融解と脱落により説明と評価が難しい点も見られた。そこで、3.4節では、融雪に伴う落雪の影響を可能な限り排除してフラッシュオーバー電圧特性を評価するために行った、着雪先行型の実験について述べる。

#### 3.4.1 着雪先行型の実験方法

着雪先行型の実験の手順の概要を図 3-21 に示す。着雪先行型の実験では、がいし無課電の状態、がいしの一方向から、ブローの距離約 500 mm を保持して人工雪を吹き付け、がいしの片面に着雪を発達させた。このときのブローからの風速は、がいし周辺で約 12 m/s である。この条件で、ブローを上下に動かしながら人工雪を吹き付け、着雪ががいしの笠間を埋め尽くすよう着雪を与えた。がいしに着雪量は、長幹がいしの笠先端部での着雪厚さが約 5 mm となるように調整した (図 3-22)。がいしから採取した着雪の密度は、およそ  $0.7 \text{ g/cm}^3$  である。その状況は、2005 年新潟下越雪害で見られた「片面三角状着雪」(第 1 章の図 1-15 参照)と同様である。着雪を施した後は、速やかに電圧上昇法による電圧の印加を実施した。およそ  $3 \text{ kV/s}$  の昇圧速度で、フラッシュオーバーが発生するまで昇圧した (図 3-21)。これにより、30 s 以内の時間で、強制的にフラッシュオーバーを発生させた。着雪先行型の実験では、試験用変圧器の 1 次側結線を直列にして、定格 100 kV、100 kVA で用いたが、設備上の都合により、印加電圧の上限を 80 kV とした。

人工雪の導電率は、 $180 \mu\text{S/cm}$ 、 $370 \mu\text{S/cm}$ 、 $500 \mu\text{S/cm}$ 、 $660 \mu\text{S/cm}$ 、 $980 \mu\text{S/cm}$  の 5 水準とした。電圧印加前の雪の含水率は、含水率計の検出下限に近い値であり、正確に測定できないものもあったが、総じてゼロより少し高い程度であったと推測できる。各回の実験後 (フラッシュオーバー後) も、課電先行型に比べて着雪の融解は少なく、着雪の大部分ががいしに付着したまま残った。がいし着雪に不必要な融解熱を与えることなく、フラッシュオーバー電圧を求めることができ、フラッシュオーバー電圧と着雪の導電率の影響を調べることができる。各導電率につき、少なくとも 5 回のフラッシュオーバー電圧を求めた。がいしに着雪は、1 回の実験ごとに更新した (図 3-21)。漏れ電流については、課電先行型の実験と同様、供試がいしの接地側 CT (PEASON 110、帯域 1 Hz-20 MHz) を、データ記録装置 (Yokogawa 製、DL750、16 bit、帯域 DC-40 kHz) を用い、 $1 \times 10^4 \text{ S/s}$  のサンプルレートで波形を記録した。

本研究では、着雪がいしのフラッシュオーバー電圧特性を整理する上で、着雪がいしのインピーダンスに着目している。第 2 章の末尾で触れたように、人工雪のインピーダンスは、含水率と周波数によって大きく変化する。しかし、50 Hz において評価する場



合は、人工雪の誘電正接が 100 以上と大きいため、人工雪は純抵抗に近い挙動を示す。このことから、着雪がいしの商用周波課電実験では、がいしの着雪の 50 Hz でのインピーダンスを直流の絶縁抵抗（漏れ抵抗）で代用することとする。着雪先行型の実験においては、着雪が完了した後着雪がいし両端の金具間の漏れ抵抗を記録し、その後速やかに課電を始め、印加電圧を上昇した（図 3-21）。

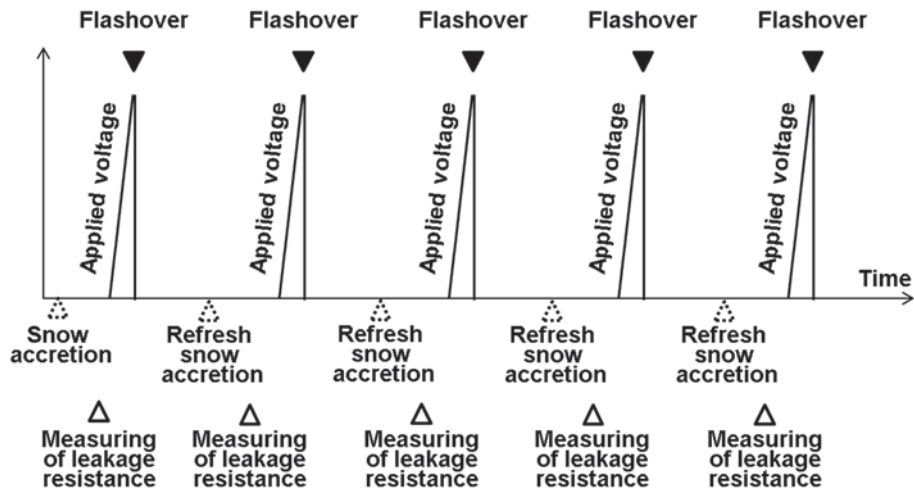
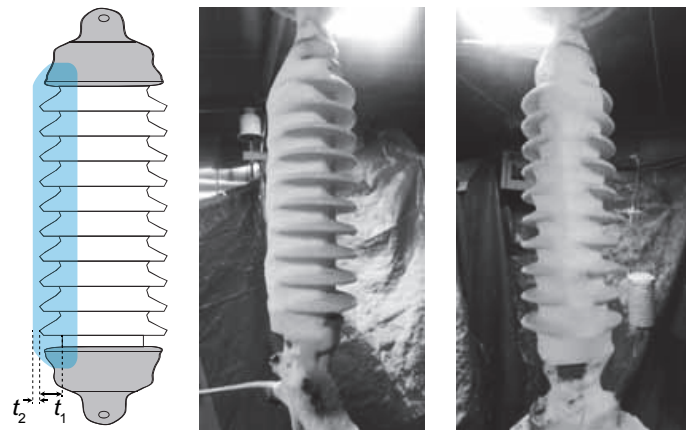


Figure 3-21. Schematic diagram of pre-snow-accreting flashover test procedure.

Snow was accreted on the non-energized insulator prior to voltage application. Applied voltage was increased at a constant rate until flashover. Snow was refreshed before each test.

図3-21 着雪先行型の実験における課電および人工雪吹き付けの概要

課電に先立って、無課電にてがいしに着雪を施した。着雪したがいしに対して、電圧上昇法により課電を行い、フラッシュオーバーまで一定の昇圧速度で電圧を上昇した。着雪は1回の実験ごとに更新した。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part II, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2559 – 2567, December 2014.*

Figure 3-22. State of the specimen with pennant-shaped snow accretion just prior to the high-voltage application of the pre-snow-accreting flashover test.

Where  $t_1$  and  $t_2$  are 40 mm and 5 mm, respectively.

図3-22 着雪先行型の課電実験における供試がいしへの着雪状況

がいしの笠の出張り  $t_1$  および着雪の厚さ  $t_2$  はそれぞれ 40 mm と約 5 mm である。

### 3.4.2 着雪先行型のフラッシュオーバー電圧特性

フラッシュオーバー電圧  $E$  と雪の導電率  $\sigma_{25}$  の関係を図 3-23 に示す。プロットは  $E$  の平均値を示し、エラーバーは  $E$  の標準偏差を示す。曲線は  $E$  を累乗関数で近似した平均値は  $\sigma_{25}$  の上昇と共に低下した。 $E$  を  $\sigma_{25}$  の累乗関数で近似すると式(3-4)のようであり、二乗平均誤差 (RMSE) は 7.7 kV であった。エラーバーは  $E$  の標準偏差を示すが、 $E$  の大きさに対して、標準偏差はおよそ 7% から 11% の範囲にあり、ばらつきの幅は比較的大きくなっていることが分かった。

$$E = 136 \sigma_{25}^{-0.15} \quad (3-4)$$

なお、ここでの近似式のべき乗数は-0.15 となったが、この値は、従来知られている一般的な汚損耐電圧[10,11]における等価塩分付着密度 (ESDD) に対するべき乗数<sup>13</sup>よりもやや小さい値であったが、実験回数が少ないこととばらつきの大きさを考えれば、ここでのべき乗数は塩害の汚損耐電圧の ESDD に対する値とほぼ同じ水準と考える構わない。

次に、上記フラッシュオーバー電圧のばらつきの原因が、漏れ抵抗とどのような関係があるか考察する。その第一段階として、着雪がいの漏れ抵抗  $R$  と雪の導電率  $\sigma_{25}$  の関係を図 3-24 に示す。プロットは、 $R$  の平均値を示し、エラーバーは  $R$  の標準偏差を示す。各  $\sigma_{25}$  における  $R$  の標準偏差は、 $R$  の大きさに対しておよそ 40% から 80% の範囲にあり、 $\sigma_{25}$  に対するフラッシュオーバー電圧曲線 (図 3-23) の  $E$  のばらつきよりも 6 倍から 7 倍程度大きくなった。この結果は、電圧印加前においてがいの着雪の形状と導電率をコントロールした場合でも、実際には着雪密度、着雪重量、含水率など厳密にコントロールするのが難しいパラメータがあるため、 $R$  のばらつきが大きくなることを示していると考えられる。その結果として、 $R$  のばらつきが、 $E$  の大きさを左右したとみれば、 $E$  を評価するときには  $\sigma_{25}$  よりもむしろ  $R$  の大きさを見るべきであろう。このことを検証するため、図 3-23 の  $E$  を図 3-24 の  $R$  の逆数 ( $1/R$ ) で整理した結果を図 3-25 に示す。この場合の  $E$  の RMSE は 4.8 kV/m であり、 $\sigma_{25}$  で整理したときの値の 60% 程度になった。このことから、漏れ抵抗  $R$  に着目してフラッシュオーバー電圧を検討することは、妥当であると考えられる。また、図 3-25 の  $E$  を図 3-23 と同様の累乗関数で近似した回帰曲線を図中の実線で示す。この回帰曲線の  $E$  は、 $\sigma_{25}$  に対するべき数と同様、 $1/R$  の-0.15 乗に比例して低下した。従来の研究により、冠雪時のがいの耐電圧は雪の導電率と関係があることはすでに明らかとなっており、このため雪の導電率を用いたフラッシュオーバー電圧の整理方法が経験的に多用されてきた[12]。導電率は測定も比較的易しく、感覚的にも簡潔で分かりやすいため、フラッシュオーバー電圧を整理するパラメータとしては有用であるが、本研究の結果は、これに加えて、漏れ抵抗も有望な指標となることを示唆するものと著者は考えている。特に、停止した送電線を系統に連結して再送電する場合などは、漏れ抵抗がその判断材料の一つになるのではないだろうか。

<sup>13</sup> 一般的には汚損湿潤時のがいの耐電圧は ESDD の-0.2 乗に比例することが分かっている。

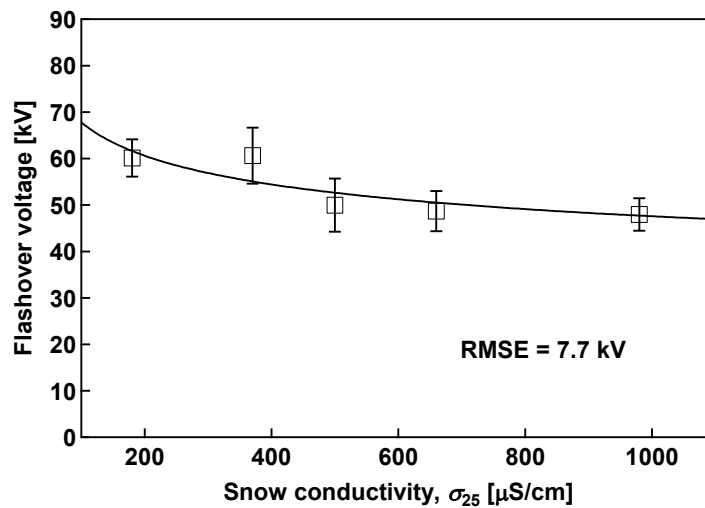
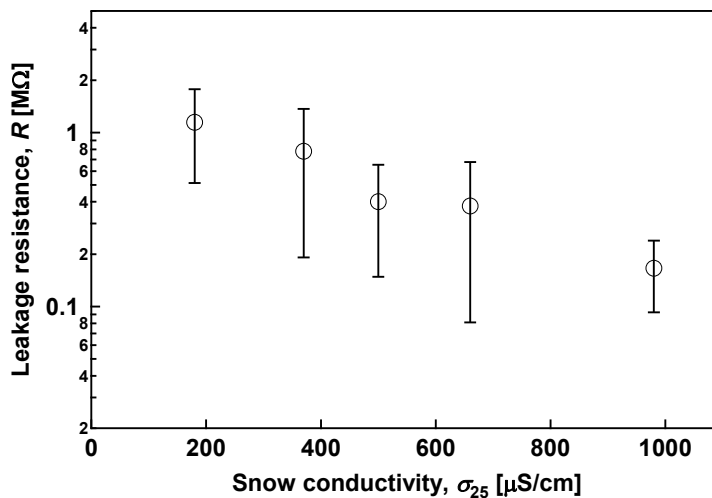


Figure 3-23. Flashover voltage characteristics as a function of snow conductivity of the pre-snow-accreting flashover test.

図3-23 着雪先行型の実験におけるフラッシュオーバー電圧と雪の導電率の関係

プロットはフラッシュオーバー電圧の平均値を、エラーバーはフラッシュオーバー電圧の標準偏差を示している。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part II, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2559 – 2567, December 2014.*

Figure 3-24. Relationship between leakage resistance of snow-accreted insulator and snow conductivity of the pre-snow-accreting flashover test.

Plots represent the mean value of  $R$ , and the error bars represent the standard deviation of leakage resistance of  $R$ .

図3-24 着雪先行型の実験における着雪がいしの漏れ抵抗と雪の導電率の関係

プロットは  $R$  の平均値を、エラーバーは  $R$  の標準偏差を示している。

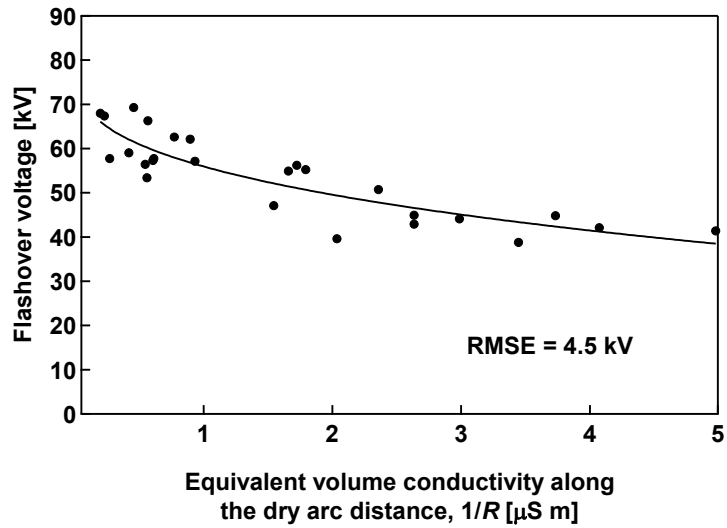


Figure 3-25. Flashover voltage characteristics as a function of leakage resistance of the pre-snow-accreting flashover test.

There can be found the reasonable correlation between  $E$  and  $1/R$ .

図3-25 着雪先行型の実験におけるフラッシュオーバー電圧と着雪がいしの漏れ抵抗の関係

$E$  と  $1/R$  の間に、累乗関数で示される明確な因果関係が見出された。

### 3.5 まとめ

本章では、154 KV 実規模着雪がいしのフラッシュオーバー特性を解明するための第一段階として、33 kV 級がいしを用い、人工雪の着雪過程と電圧印加方法を考慮した2種類の小規模モデル実験を行った。得られた成果のうち特に重要なものを摘記すると、以下のようなものである。

- (1) 自然環境下の暴風雪を仮定した場合のフラッシュオーバー発生条件は、①局部アーク放電が発生し、②これがある程度の融雪を促進する状況を経て、③暴風雪が休止する期間が到来したとき、である。
- (2) 汚損湿潤沿面（通常の塩害）のフラッシュオーバー現象、氷柱により着氷したがいしのフラッシュオーバー現象と、本論文での塩雪害時の着雪がいしのフラッシュオーバー現象には、局部アーク放電伸展において共通点を見出すことができる。すなわち、夏季の汚損湿潤がいしの表面汚損被膜に形成された乾燥帯、着氷がいしに形成された氷柱の空隙、そして本研究における着雪の空隙は、それぞれ、電圧分担に不均衡を生じさせるきっかけであり、これらが形成されることで十分高い電圧が乾燥帯や空隙の両端に印加される。これらの乾燥帯、空隙の長さが小さく、乾燥帯、空隙以外の残り部分の抵抗が小さければ、そこで局部アーク放電が発弧して、汚損被膜、氷柱、着雪の沿面において伸展を開始する。これががいし両端を橋絡してフラッシュオーバーに至るほど伸展するか否かは、それぞれの現象における沿面の特性に依存して決まる。
- (3) がいし着雪に独特の特徴としては、着雪の厚さは汚損湿潤沿面の汚損被膜に比べて厚く、熱容量が大きいため、局部アーク放電発生時にも安定した形状を留めやすい。そのため、汚損湿潤沿面の局部アーク放電に見られる熱的伸展機構や電界的伸展機構に対して、大きな伸展電圧が得られない状況でも、アークルートの定在化が生じ、零点付近でも消弧しにくい局部アーク放電を生じうる。
- (4) 塩雪害のフラッシュオーバーでは、着雪の導電率が高いほどフラッシュオーバーしやすく、フラッシュオーバー電圧は、導電率のおよそ-0.15 乗に比例して低下する傾向があるが、導電率だけでは雪質を十分に表現することができない。より進んだ方法として、着雪の導電率と、着雪したがいしの漏れ抵抗の測定を併用することにより、フラッシュオーバーの危険性を評価することが望まれる。特に、停止した送電線を系統に連結して再送電する場合などは、漏れ抵抗がその判断材料の一つになるのではないだろうか。

### 第3章の参考文献

- [1] T. Onodera, H. Inukai, and T. Odashima, "Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm", Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2007)
- [2] G. Sakata and H. Homma, "Overview of Blackout in Niigata and Study on Property of Wet Snow Packed with Sea-Salt on Insulator Strings", Proc. of the INMR World Congress on Insulators, Arresters & Bushings (2009)
- [3] 電気学会 試験電圧標準特別委員会 絶縁試験法小委員会編：「絶縁試験法ハンドブック」、電気学会 (1971)
- [4] 日本化学学会編：「化学便覧基礎編 II」, pp.1184, 丸善 (1975)
- [5] C. Fierz, R.L. Armstrong, Y. Durand, P. Etchevers, E. Greene, D.M. McClung, K. Nishimura, P.K. Satyawali, and S.A. Sokratov, "*The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*" the International Hydrological Programme of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO-IHP), Paris (2009)
- [6] 菅原 宣義、田島 創一郎、大内 均、土方 正範：「塩雪害環境下がいし付着湿雪の導電率—長幹がいしの吊り方とサンプリング点への依存性—」、電気学会全国大会講演論文集、第7分冊、pp. 203 – 204 (2007)
- [7] 木之下 道政、清水 博幸、上野 貴博、西村 誠介：「汚損環境におけるシリコーンゴムの耐エロージョン性の評価法—電解液滴下法(交流電圧)—」、電気学会誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-16-91 (2016)
- [8] 西村 誠介：「局部アーク伸展に基づく汚損沿面絶縁破壊に関する研究」、東京大学博士論文 (1985)
- [9] M. Farzaneh, T. Baker, A. Bernstorf, J. T. Burnham, T. Carreira, E. Chemey, W. A. Chisholm, R. Christman, R. Cole, J. Cortinas, C. de Turreil, J. F. Drapeau, J. Farzaneh-Dehkordi, S. Fikke, R. Gorur, T. Grisham, I. Gutman, J. Kuffel, A. Phillips, G. Powell, L. Rolfseng, M. Roy, T. Rozek, D. L. Ruff, A. Schwalm, V. Sklenicka, G. Stewart, R. Sundararajan, M. Szeto, R. Tay, and J. Zhang, "Selection of station insulators with respect to ice and snow – Part II: Methods of selection and options for mitigation" , IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 271 – 277 (2005)
- [10] F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge," Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 – 136 (1958) (in German)
- [11] 電気学会編：「がいし」、電気学会 (1983)
- [12] 高須 和彦、松田 久一、小川 尚：「交流送電線における冠雪がいし連の耐電圧特性」、電力中央研究所報告、研究報告、T88026 (1988)

## 第 4 章

### 実規模がいし装置のフラッシュオーバ 電圧特性の検証

## Chapter 4

### Verification of Flashover Performance of Full- scale and Various Insulator Strings



## 第 4 章 実規模がいし装置のフラッシュオーバ電圧特性の検証

### 4.1 まえがき

第 1 章で述べたように、新潟下越雪害の塩雪害においては、気温 0～2℃において、強風を伴った降雪が長時間継続し、66 kV と 154 kV 送電線の長幹がいしに大量の着雪が発達したことで地絡事故が発生した。この塩雪害については、国内外において、その発生事例が非常に稀であるため[1-3]、着雪時のがいしのフラッシュオーバ電圧特性やフラッシュオーバ機構は十分に解明されておらず、それらの検討に向けた試験方法の開発と評価が必要となっている[4]。第 3 章では、放電伸展過程の観測等から、フラッシュオーバ機構を明らかにした。

本章では、着雪の導電率や密度、含水率などの工学的なパラメータを実フィールドと合わせた、人工雪を用いた実規模着雪がいしのフラッシュオーバ試験方法を検討するとともに、各種がいしのフラッシュオーバ特性の検証を行う。以下、6.2 節では、実規模フラッシュオーバ試験法の開発の経緯や試験方法について述べ、実際の試験時の着雪がいしの放電様相などについて典型例を用いて概要を説明する。6.3 節では、この試験方法を各種磁器がいし、ポリマーがいしに適用し、これらのフラッシュオーバ電圧特性を求めた結果について述べる。また、この実規模フラッシュオーバ試験と、第 3 章で示した小規模モデル実験の違いについても言及し、開発した実規模フラッシュオーバ試験の課題と位置づけについて検討を行う。

### 4.2 実規模フラッシュオーバ試験法の開発

がいしの着氷雪による送電線事故は、古くからその存在が報告されており、第 1 章で述べた日本の 154kV 只見系統に発生した埋雪等による多重事故[5-7]、275kV 新北陸幹線における冠雪がいしのフラッシュオーバ事故[8]、カナダ東部・アメリカ合衆国北東部を襲った雨氷による重着氷害[9,10]、中国での雨氷による広域的な着氷フラッシュオーバ事故[11]などがある。これらの他にも、米国[12]、ノルウェー[13]ならびに日本[14]での雨氷による着氷害、カナダでの樹氷による着氷害[15]、英国での着霜による着氷害[16]、旧ユーゴスラビアでの着氷雪害[17]など、多くの諸外国から送電線事故報告やそ

れを懸念する発表がなされており、枚挙に暇がない。このように、着氷雪害は、冬季の送電線の絶縁信頼性を脅かす重大な問題の一つであり続けてきたが、その一方で、着氷雪環境でのがいしの耐電圧特性、フラッシュオーバ電圧特性を、実験室内で人工的に確かめるための試験法は、2000年代後半まで確立されなかった。この観点では、雪氷分野の高電圧試験技術は、他の分野と比べて国際的な標準化が遅れたと言えよう。ようやく、2009年に、着氷雪環境でのがいしの人工試験を行うための手引書がIEEEから発効され[18]、その中に冠雪、雨氷・樹氷・樹霜により着氷したががいし連に対する試験の一連の手続きが示された。しかし、塩雪害に関しては、その発生頻度が少なく、情報に乏しいため、その手引書の中に試験法を示されるまでに至っていない。そればかりか、試験法確立に向けた検討例もほとんど存在しない。

このような状況のため、本研究では、着雪の導電率や密度、含水率などの工学的なパラメータを実フィールドと合わせた実規模着雪がいしのフラッシュオーバ試験方法を検討するところからスタートした。

#### 4.2.1 環境試験ホールと課電装置

本章の実験は、全て、高電圧試験研究機関であるSTRI社(Swenden)<sup>1</sup>の試験設備を用いて行った。図4-1に試験設備の概要を示す。直径18m、高さ23mの円筒形の環境試験ホールの中は、室温を-10°Cから+55°Cまでの範囲でコントロールできるため、ここに供試がいしを設置することで、各種の環境条件におけるフラッシュオーバ試験が実施可能である。課電装置の概要を表4-1に示す。電源側の電圧は10kVであり、試験用変圧器は、印加電圧に応じて、単独あるいは2台をカスケード接続して用いた。

フラッシュオーバ試験の実施にあたっては、1)人工雪の生成、2)人工雪のがいしへの着雪、3)着雪の含水率を上昇、4)電圧印加、の4つのステップで検討を行った。自然環境下の湿雪形成プロセスを忠実に模擬することは困難であった。このため、ここでは、表4-2に示す基本的な着雪のパラメータを、雪害時に観測されたものと合わせることに主眼を置いて、実験手順を検討した。また、本章の実規模試験では、試験の実施を安全かつ簡便にし、さらには毎回の再現性を確保することを優先したため、第3章のような自然環境を模擬した電圧印加中の風雪供給過程を省いた<sup>2</sup>。

154kV級の実規模供試がいしには、長幹がいし、耐塩用懸垂がいしに加えて、ポリマー支持がいし、ポリマー相間スペーサを用いた。

これは、近年、ポリマー支持がいしやポリマー相間スペーサが国内の電力各社で採用が進められているものの、着雪時の耐電圧特性が確認されていないためである。本研究では、154kVポリマー支持がいしおよびポリマー相間スペーサのフラッシュオーバ電

<sup>1</sup> STRI社ウェブサイト、<http://www.stri.se> (閲覧日：2017年6月26日)

<sup>2</sup> 第3章のような電圧印加中の風雪供給を154kV実規模がいしに対して行うためには、かなり大きな安全離隔距離が必要となり、現実的には実現が難しい。また、規定の条件で着雪を施した後に電圧印加を行う方が、再現性確保の面でも好都合であった。

圧特性、フラッシュオーバ様相などについて、磁器がいし類との比較を行うことにした。なお、実線路に導入されているポリマーがいしの笠形状や胴径等は様々であり、磁器がいしのように画一的ではないが、ここでは、およそ我が国において標準的な形状のものを用いた。これらの諸元を表 4-3 に示す。

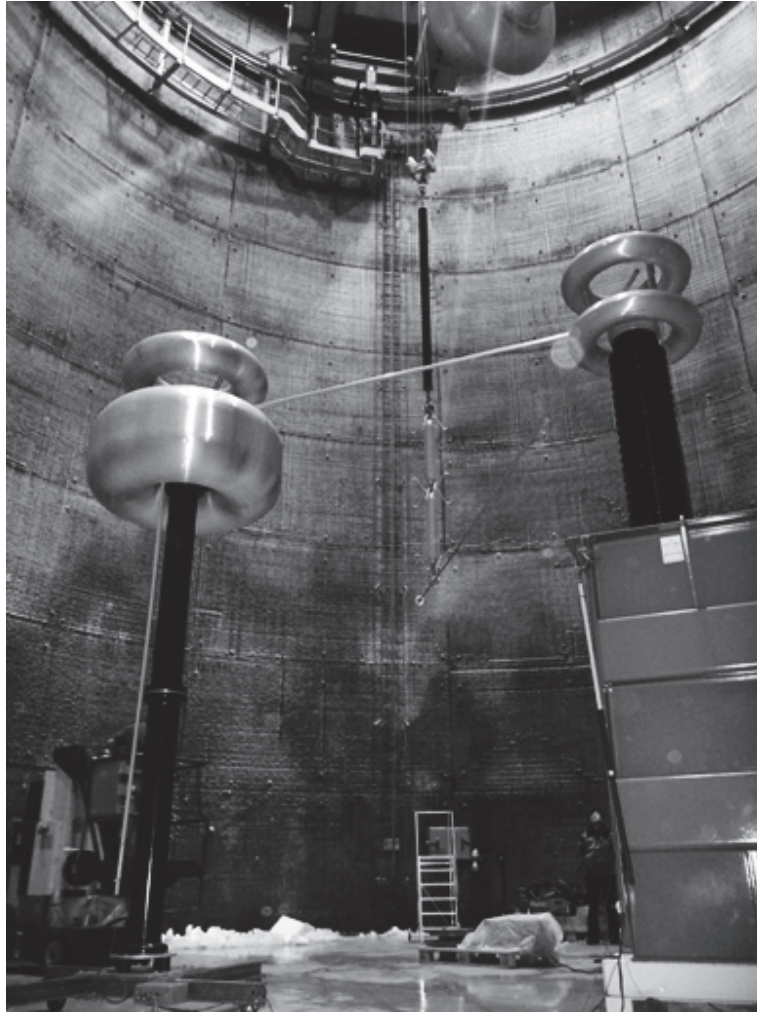


Figure 4-1. Overview of climatic test hall and experimental setup.

The climatic hall is 18 m in diameter and 24 m in height. It is possible to perform not only snow tests but also various pollution tests and ice tests. The right object is a test transformer and the left one is a voltage divider. The insulator specimen is hanged in the center of the hall.

#### 図4-1 環境試験ホールおよびフラッシュオーバ試験装置の概要

環境試験ホールは直径 18 m、高さ 23 m の円筒型であり、着氷雪の試験のほか、各種の汚損試験にも用いることができる。右に見えるのが試験用変圧器、左が分圧器である。供試がいしはホールの中央に吊り下げて設置した。

Table 4-1. Ratings of high voltage sources used for the 154 kV full-scale flashover tests.

表4-1 154 kV 実規模フラッシュオーバ試験における課電装置の概要

Item	Voltage regulator	Test transformer (single use)	Test transformers (use in cascade)
Primary voltage	10 kV	2 kV	2 kV
Secondary voltage	0 to 2 kV	250 kV	500 kV
Primary current	0 to 78 A	250 A	500 A
Secondary current	375 A	2 A	2 A
Power	780 kVA	500 kVA	1000 kVA
Impedance	3.16%	2.33%	10.1%
Manufacturer	Brentford	ABB	ABB

Table 4-2. Target values of snow parameters.

表4-2 着雪の特性の目標値

Parameter	Target value
Size of snowflakes	0.1 to 0.2 mm
Shape of accreted snow	Cylindrical
Snow density	0.5 g/cm <sup>3</sup> and higher
Snow weight	About 10 kg per unit length of dry arc distance in meter
Liquid water content of accreted snow	20 to 30%
Conductivity of accreted snow	200 and 800 μS/cm

Table 4-3. Specification of insulator specimens for 154 kV full-scale flashover tests.

表4-3 154 kV 実規模フラッシュオーバ試験に供試したがいしの諸元

Item	154 kV Long-rod insulator	154 kV Anti-fog cap-and-pin insulator	Composite 154 kV jumper support insulator	Composite 154 kV inter-phase spacer
Weathersheds	Porcelain	Porcelain	Silicone rubber	Silicone rubber
Model	LC8021 (Standardized in JIS standard <sup>3</sup> )	SU-165BF (Standardized in JIS standard <sup>4</sup> )	–	–
Manufacturer	NGK Insulators	NGK Insulators	NGK Insulators	NGK Insulators
Shed profile	Standard	Anti-fog	Alternative	Equal
Pitch of sheds [mm]	–	–	30/30	70
Shed diameter [mm]	160	254	172/139	160
Number of sheds per unit	21	–	67	21
Core rod diameter [mm]	80	–	74	34
Connecting length per unit [mm]	1025	146	2222	1730
Number of units	2	13	1	2
Total length [mm]	2050	1898	2222	3460
Dry arc distance [mm]	1774	1960	2087	3184
Total creepage distance [mm]	4280	5590	6850	7570

<sup>3</sup> JIS C 3816: 1999, “Long rod insulators”, Japanese Industrial Standard (1999)

<sup>4</sup> JIS C 3810: 1999, “Normal type and anti-pollution type suspension insulators”, Japanese Industrial Standard (1999)

#### 4.2.2 人工雪の生成

人工雪の生成方法は、基本的には第 2 章でインピーダンスを評価したときのものと同様であり、低温に保った環境試験室内に、導電率を調整した水を噴霧することで、目標となる導電率を示す人工雪を生成した（図 4-2）。

本章の人工雪の導電率については、以下の 2 水準を目標に調整した。その一つ目は、2005 年の雪害発生直後に供試がいしから採取された着雪の融雪水の導電率であり、200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  である[1]。もう一つは、雪害発生後に同地域で実施された屋外観測で実測された降雪の導電率<sup>5</sup>であり、今回はその目標値を 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  とした。目標値 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の水については、STRI 社のある Dalarnas 県 Ludvika 市の現地水道水（約 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）と、近隣の Väsman 湖の湖水（約 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）ならびに脱イオン水を混ぜたものである<sup>6</sup>。一方、目標値 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の水は、水道水に塩を加えて調整したものである。作成した人工雪と新潟県下越地域で採取した降雪のイオン成分の比較を表 4-4 に示す。人工雪では  $\text{Ca}^{2+}$  の濃度が高く、新潟県下越地域の降雪では  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  が高くなったが、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  に関してはそれほど差異が見られなかった。

これらの導電率を調整した水を、室温約  $-9^\circ\text{C}$  から  $-10^\circ\text{C}$  の環境試験ホール内に設置した木製の簡易風洞（図 4-2(a)）の中で、圧縮空気により粒径の細かいノズル（図 4-2(b)）から噴霧することで、簡易風洞の中に人工雪を蓄積させた（図 4-2(c)）。得られた人工雪の外観は図 4-3 のようであり、外観ならびに触感は、第 2 章の人工雪と同様、自然の雪に近いものであった。この人工雪は、粒径が 0.1 mm から 0.2 mm 程度の氷粒の集まりであり、この時点（ $-9^\circ\text{C}$  で）の含水率は 0%であり典型的な乾雪の触感であった。なお、人工雪の導電率はおよそ目標値を示すものであったが、風洞内の場所に依存した若干のばらつきが認められた。実際にフラッシュオーバー試験に使用した人工雪の導電率の平均値は、各目標値に対して 170~209  $\mu\text{S}/\text{cm}$  および 784~802  $\mu\text{S}/\text{cm}$  であった。

<sup>5</sup> 塩雪害後の 2007 年冬期から 10 年間同地域で行った降雪導電率の屋外連続観測により、200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  を超える降雪は比較的頻繁に観測されることが明らかにされている[19,20]（観測は 2017 年現在も継続されている）。

<sup>6</sup> 大量の脱イオン水を用いることが困難であったため、湖水も混ぜて導電率を調整した。



(a) Spray ramp with nozzles blowing into tunnel



(b) Detail of single spray nozzle blowing into tunnel



(c) Overview of tunnels in climatic test hall

Figure 4-2. Setup for snow production in the 154 kV full-scale tests.

30 air assisted spray nozzles supplied water with defined conductivity (200 or 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). The temperature of test hall was kept low enough (-9 to -10  $^{\circ}\text{C}$ ) and limiting the amount of injected water, dry snow with desired properties was generated.

#### 図4-2 154 kV 実規模試験における人工雪生成の概要

圧縮空気を用いた 30 個のノズルから、所定の導電率の水分を噴霧した。ホール内の気温は-9  $^{\circ}\text{C}$  から-10  $^{\circ}\text{C}$  であり、噴霧水の流量を調整することで、所望の乾雪が得られた。

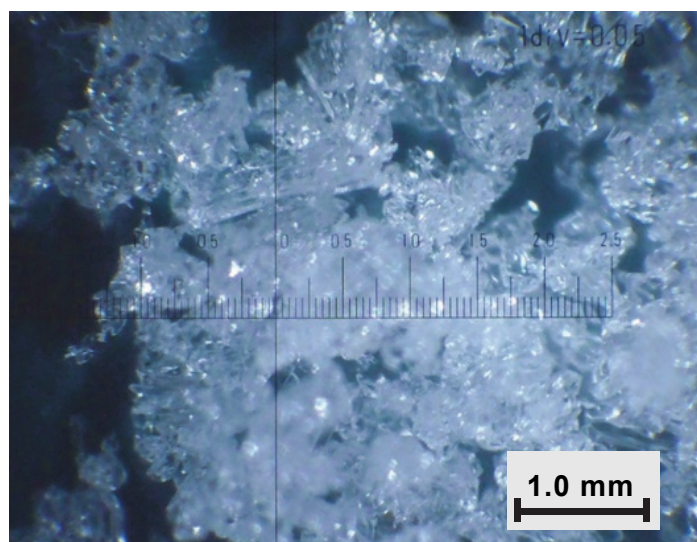


Table 4-4. Ion components of artificial snow and natural snow at Niigata.

表4-4 人工雪と新潟下越地域の降雪のイオン成分

	Snow Conductivity	pH	Ion components							
			Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Artificial snow	200 μS/cm	8.2	21.0	2.9	7.4	17.4	1.3	2.6	3.3	14.7
Natural snow at Niigata <sup>7</sup>	193 μS/cm	3.8	22.9	9.6	15.7	13.0	3.3	0.9	1.7	1.4

Unit of ion components [mg/l]



©2014 IEEE

*H. Homma et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part III, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2568 – 2575, December 2014.*

Figure 4-3. Appearance of the artificial snow for the 154 kV full-scale tests.

Snowflake size was about 0.1 to 0.2 mm, and the visual appearance was very similar to natural snow as well as the artificial snow in Chapter 2. As the temperature was low enough the liquid water content was zero at the time.

#### 図4-3 154 kV 実規模試験における人工雪の外観

外観ならびに触感は、第2章の人工雪と同様、自然の雪に近いものであった。この人工雪は、粒径が0.1 mmから0.2 mm程度の氷粒の集まりであり、この時点(-9℃で)の含水率は0%であり典型的な乾雪の触感であった。

<sup>7</sup> 屋外導電率観測による2009/1/19の観測結果であり、導電率が200 μS/cmに近い降雪の値である。

### 4.2.3 がいしへの着雪

上記で得られた人工雪を、一旦、 $-10^{\circ}\text{C}$ の冷凍コンテナに移動して保管し、環境試験ホールの室温を約 $+1^{\circ}\text{C}$ に調整した。引き続き、同ホール内に設置した各種の供試がいしに対し、園芸用ブロアを用いて人工雪を吹き付けることで、がいしの表面に圧密した着雪を形成した<sup>8</sup> (図 4-4)。がいしとブロアの距離を約 500 mm (このときがいし周辺での風速は約 15 m/s) とし、天井クレーンのフックに懸垂吊り<sup>9</sup>にしたがいしをターンテーブルに固定させて回転させることで、全方向から一様な着雪を施し、周方向に一様な形状の筒状着雪を形成した。いずれのがいしでも、乾燥フラッシュオーバ距離当たりの着雪質量がおよそ  $10\text{ kg/m}$  となるよう着雪量を調整した<sup>10</sup>。このとき、長幹がいしは笠間が完全に着雪で埋まる「筒雪」となり、着雪厚さは笠の最外径よりも 20 mm 程度出張る形となった。一方で、ポリマー支持がいし、ポリマー相間スペーサ種は、「筒雪」は形成されたが笠の最外径と同じ程度の形となった。耐塩用懸垂がいしは、笠に沿って着雪の外輪線が残った状態であり「筒雪」にはならなかった。以上の着雪が完了した状態では、いずれのがいしの着雪も密度が  $0.5\sim 0.6\text{ g/cm}^3$  であった。

### 4.2.4 湿雪の模擬

引き続き、室温約 $+1^{\circ}\text{C}$ の環境試験ホール内において、下越での雪害時に見られた湿雪による圧密着雪を模擬するために、上記着雪後の着雪表面に、人工雪の融雪水と同じ導電率を持つ水を一定量スプレーすることにより、含水率の増大を図った (図 4-5)。その結果、およそ着雪内部まで湿った状態 (平均含水率約 20~30%) となり、密度はおよそ  $0.7\text{ g/cm}^3$  となった。散水直後 (電圧印加直前) には、第 3 章と同様の観点から供試がいし両端の金具間の漏れ抵抗 (直流絶縁抵抗) を測定した。その結果を表 4-5 に示す。長幹がいしは、笠間が完全に着雪で埋まってしまうため、漏れ距離を確保できずに漏れ抵抗が最も低下した。またこの傾向は、一連の試験において常に同様に確認された。

ここまでの工程により、目標とした「導電率が  $200\text{ }\mu\text{S/cm}$  と  $800\text{ }\mu\text{S/cm}$  にコントロールされた」「密度  $0.7\text{ g/cm}^3$  まで圧密した」「湿雪」という所期条件が揃った。引き続き、着雪がいし金具間の漏れ抵抗を測定した後、供試がいしを環境試験ホール内の中央付近までクレーンに懸垂吊りしたままで吊り上げ、速やかに電圧印加線ならびに接地線

<sup>8</sup> 試験に先立ち、手作業でがいしに雪を付着させる方法や、簡易型除雪機を用いる方法などを試行したが、手作業では付着した雪が容易に脱落すること、除雪機では雪の圧密が困難であることなどから、ブロアを用いる方法を採用することとした[4]。

<sup>9</sup> 耐張吊り配置についても検討したが、着雪形成は可能であるものの装置を適切に保持するための頑強な架台が必要であり、作業時間もより多く必要であることなど、試験効率の面で課題が見られた。このことから、以降のフラッシュオーバ試験は、懸垂吊りの配置で行った。

<sup>10</sup> この条件では、長幹がいし、懸垂がいしの笠先端部での着雪厚さはいずれも 20 mm 程度がおよその目安となった。

をがいしの両端の金具に接続し、電圧を印加した。電圧印加前のがいしの着雪状況を図 4-6 に示す。次の 4.2.5 項では、フラッシュオーバー試験の状況について述べる。

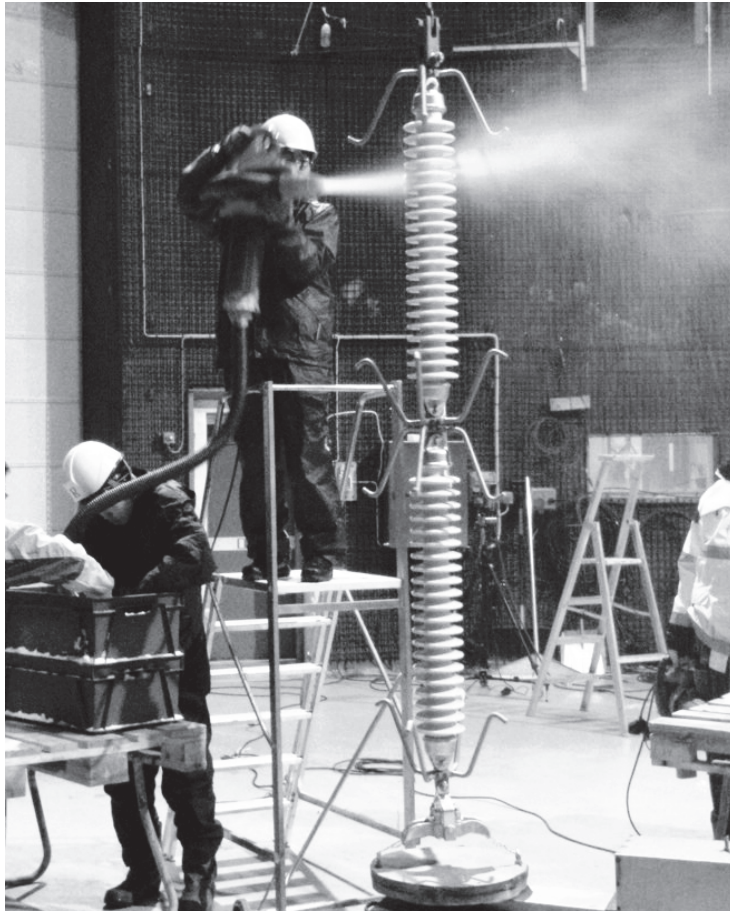


Figure 4-4. Packed snow obtained by a small handheld vacuum cleaner in the full-scale tests.

The insulators were hanged in a vertical position and turned around by a turn table. The snowflakes were blown onto the insulator under +1 °C of temperature by a small handheld vacuum cleaner operating in reversed mode until the snow accreted and packed to the gaps between the sheds as observed in the Niigata case (see Table 1-7 and Figure 1-15 in Chapter 1). The distance between the vacuum cleaner and the insulator was about 500 mm, and the wind velocity at the insulator was approximately 15 m/s. The weight of snow accreted onto the insulators was recorded before each test. The packed snow showed almost 0% of liquid water content and 0.5 to 0.6 g/cm<sup>3</sup> of density.

図4-4 154 kV 実規模試験における園芸用ブロアによる圧密した着雪の形成状況

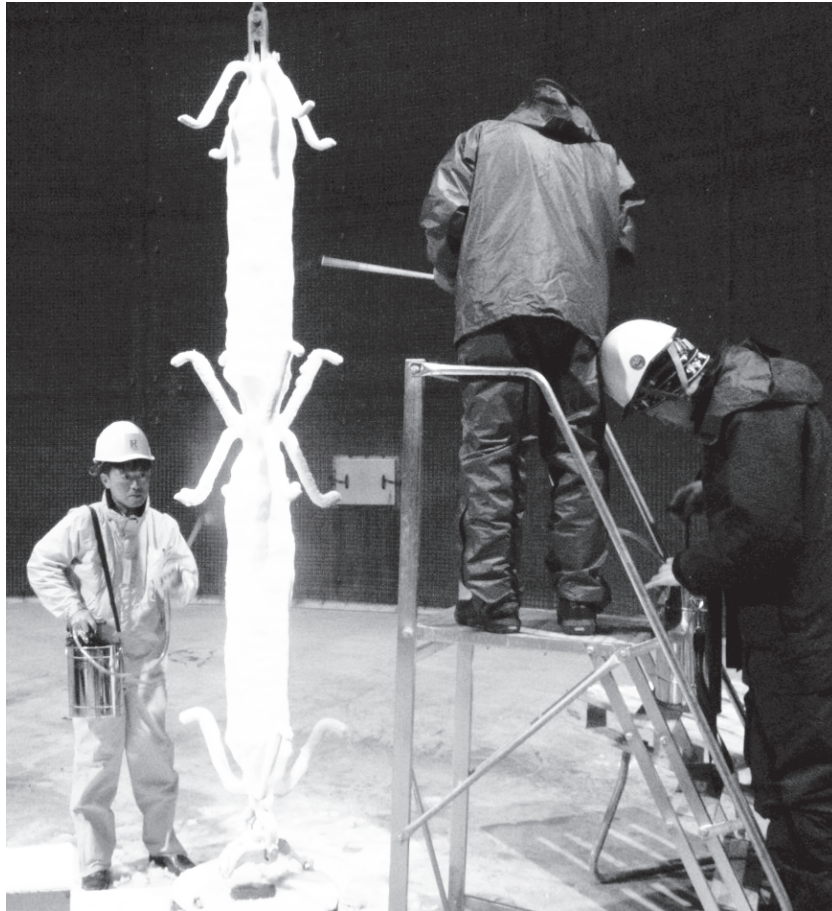


Figure 4-5. Spraying water onto snow accreted full-scale insulator.

図4-5 154 kV 実規模試験における着雪がいしへのスプレー状況

Table 4-5. Leakage resistance of snow accreted insulators measured just before applying voltage for the full-scale flashover tests.

表4-5 実規模フラッシュオーバ試験の電圧印加前に測定した各がいしの漏れ抵抗

Snow conductivity	Leakage resistance [MΩ]			
	Porcelain long-rod insulator	Porcelain cap-and-pin insulator	Composite jumper support insulator	Composite inter-phase spacer
200 μS/cm	0.21	0.73	0.50	1.01
800 μS/cm	0.04	0.27	0.14	0.27

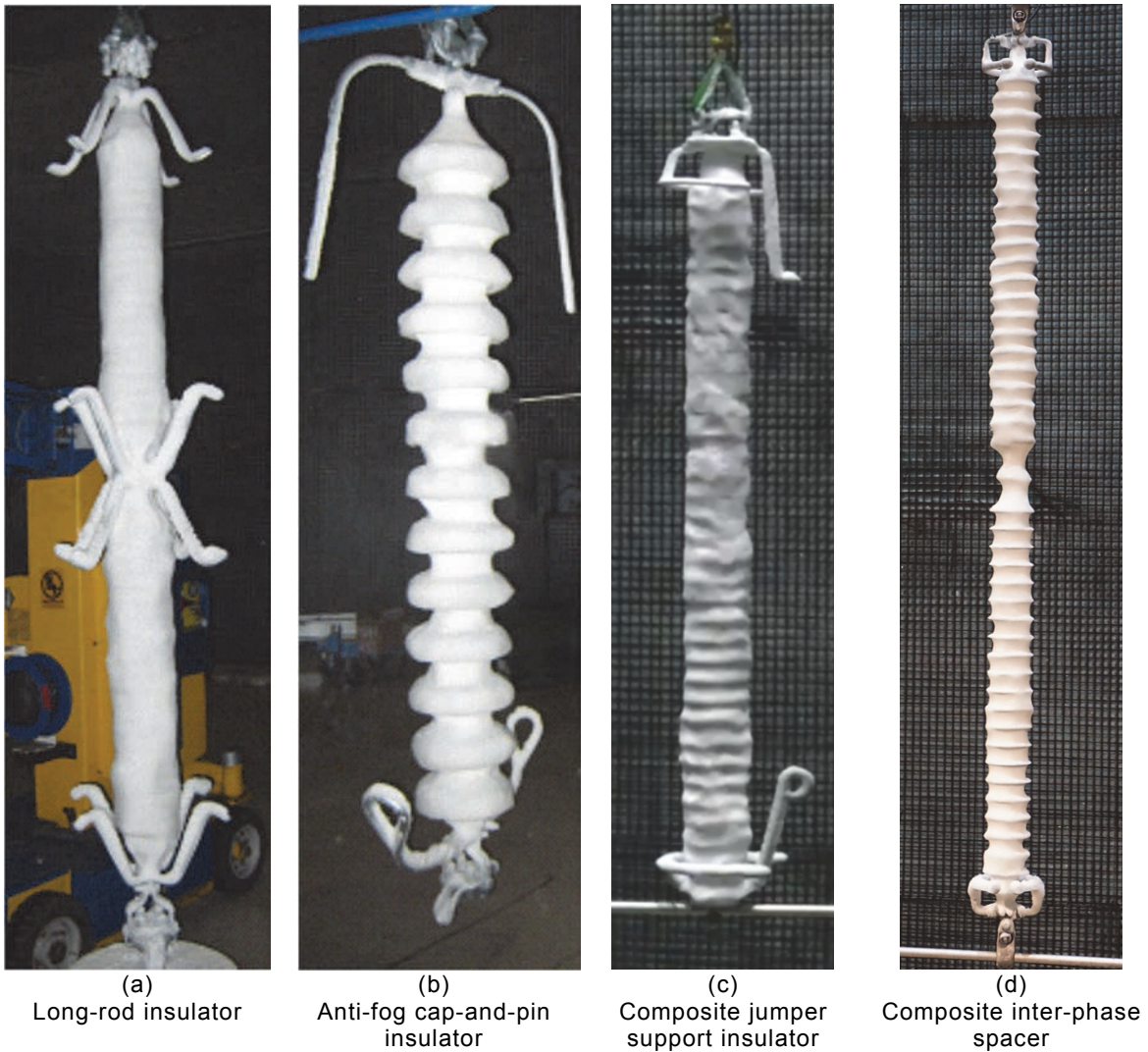


Figure 4-6. Appearance of the artificially-snow-accreted full-scale insulators before the voltage application simulating wet and packed situation seen in the Niigata case.

Photographs of insulators with well packed, accreted snow at a density in the range of 0.5-0.6 g/cm<sup>3</sup>. Cylindrical snow accretion, as observed in the Niigata case, was achieved by rotating the insulator on a turntable during accretion. Thickness of the accreted snow at the shed surface was about 20 mm for both the long-rod and cap-pin insulators. For the long-rod insulator, composite jumper support insulator, and composite inter-phase spacer, all the shed-to-shed spaces were almost filled with high density packed snow, resulting in like a cylindrical shape (a), (c), and (d). The cap-and-pin insulator maintained visible disk spacing even after snow accretion (b).

図4-6 下越での雪害を模擬した 154 kV 実規模がいしの電圧印加前の状況

#### 4.2.5 着雪がいしへの電圧印加

前項に続き、室温約+1°Cの環境試験ホール内において、154 kV 着雪がいしのフラッシュオーバー試験を行った。試験回路を図 4-7 に示す。フラッシュオーバー試験においては、印加電圧を 3 kV/s から 7 kV/s の速さで昇圧し、短時間に所定の電圧に到達した後、電圧一定として、放電発生様相の時間変化とフラッシュオーバーの有無を観測した。試験中は、接地線から漏れ電流の測定を行った。

フラッシュオーバー発生時には、着雪を更新した後、目標電圧を順次約 7%ずつ低下していき、最低のフラッシュオーバー電圧を求めた。課電開始後、1 時間以内に漏れ電流の発生が止まり、着雪の状態にも変化が認められなくなった場合に耐圧（フラッシュオーバー無し）と判定した。また、融雪による着雪の脱落が著しく、相当量の着雪が脱落した場合には、時間に関係なく、耐圧と判定して試験を終了した。試験ケースの制約から、2 回の耐圧が確認された電圧の 1 ステップ上の電圧を最低フラッシュオーバー電圧とした。

長幹がいし電圧を印加した直後の放電発生状況ならびにフラッシュオーバー発生までの放電様相の推移の典型例を図 4-8 に示す。また、図 4-9 は、同じ試験中の印加電圧と漏れ電流の時間変化である。これらの図に見られるように、電圧印加の直後から、漏れ電流の増加（数 100 mA）が観測され、これに応じてがいし全体に亘って着雪内部から紫色の放電発光が観察された（図 4-8(a)）。この漏れ電流は、がいし着雪の融解をもたらし、10 数秒後には着雪の一部に融雪による空隙が形成され、その部分に局部アーク放電の発生が認められた。この後数分間は漏れ電流が一旦減少し、断続的に、局部アーク放電の発生と消滅を繰り返した後、再び放電発生が活性化して（図 4-8(b)）、ついにはフラッシュオーバー（図 4-8(c)）に至る状況が観測された。この間の典型的な漏れ電流波形の変化を図 4-10 に示す。課電開始直後の漏れ電流が数 100 mA 流れる段階（図 4-8(a)）においては、これに対応する漏れ電流波形はほぼ正弦波であった（図 4-10(a)）。空隙の形成に伴い、局部アーク放電の発生が認められた後、間欠的な漏れ電流が流れる段階においては、これに対応する漏れ電流波形はそのほとんどが歪み波形であることが観測された（図 4-10(b)）。がいしを換えて同様の試験を行ったところ、フラッシュオーバーする場合に限っては、上述した電流波形の時間変化の傾向が、典型的なパターンとして、いずれのがいしにおいても同様に確認された。図 4-11 は、耐塩用懸垂がいしのフラッシュオーバーまでの放電様相の推移であるが、長幹がいしと同様の過程であった。

このように、フラッシュオーバーする場合の漏れ電流ならびに放電様相の推移は基本的には一様に同じプロセスで既述することができる。しかし一方で、試験時間が長くなってからフラッシュオーバーする場合、ならびに所定の時間フラッシュオーバーせずがいしが耐圧する場合には、それらの着雪の空隙の状況が、がいしの種類ごとに特徴的な様相を呈した。例えば耐塩用懸垂がいしは、長幹がいしに比べて着雪が明らかに磁器面に垂直に剥がれ落ちやすく、早期に脱落してもはやフラッシュオーバーの可能性が見込めない（早期に耐圧と判断される）傾向が見られた。また、ポリマー支持がいし、ポリマー

相間スペーサについては、長幹がいしとは異なった空隙が形成され、その違いが結果に直結する形となったが、このことについては次の 4.3 節で述べる。



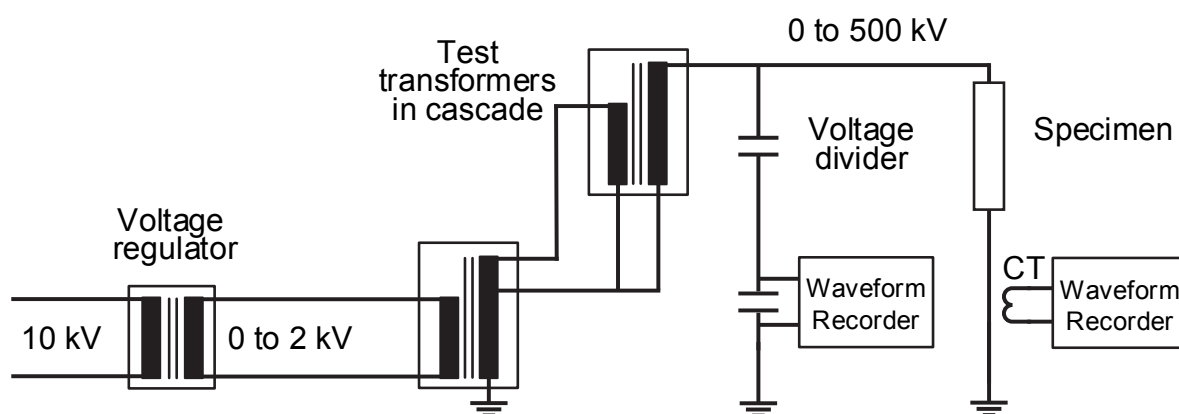


Figure 4-7. Circuit of full-scale flashover voltage tests.

The applied voltage was increased to the desired value at a rate of 3-7 kV/s and thereafter kept constant until the insulator either flashed over or withstood. The leakage current signal was recorded from the ground line of the test circuit.

#### 図4-7 154 kV 実規模がいしのフラッシュオーバ試験回路

フラッシュオーバ試験においては、印加電圧を 3 kV/s から 7 kV/s の速さで昇圧し、短時間に所定の電圧に到達した後、電圧一定として、放電発生様相の時間変化とフラッシュオーバの有無を観測した。試験中は、接地線から漏れ電流の測定を行った。

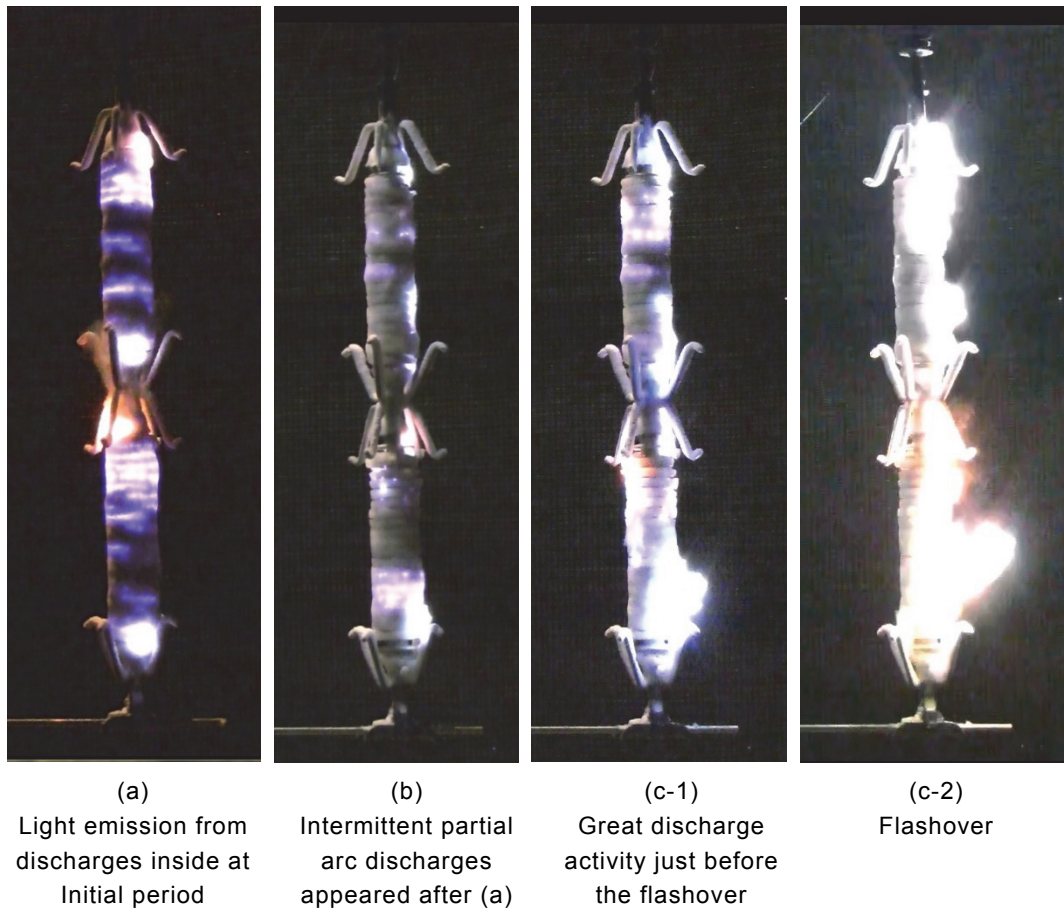


Figure 4-8. Photographs of typical transition of discharge activity during a voltage test with the long-rod insulator.

In this study, withstand was defined as no flashover within one hour of voltage application with sufficiently low leakage current that future flashover seemed unlikely. In addition when significant parts of snow fell down the tests were determined as withstood regardless of the elapsed time. The minimum flashover voltage of an insulator was defined as being equal one voltage step higher than the maximum withstand voltage which the insulator withstood twice.

図4-8 実規模フラッシュオーバー試験における放電様相の典型例（長幹がいし）

フラッシュオーバー発生時には、着雪を更新した後、目標電圧を順次約 7%ずつ低下していき、最低のフラッシュオーバー電圧を求めた。漏れ電流の発生が止まり、着雪の状態にも変化が認められなくなった場合に耐圧（フラッシュオーバー無し）と判定した。また、融雪による着雪の脱落が著しく、相当量の着雪が脱落した場合には、時間に関係なく、耐圧と判定して試験を終了した。試験ケースの制約から、2 回の耐圧が確認された電圧の 1 ステップ上の電圧を最低フラッシュオーバー電圧とした。

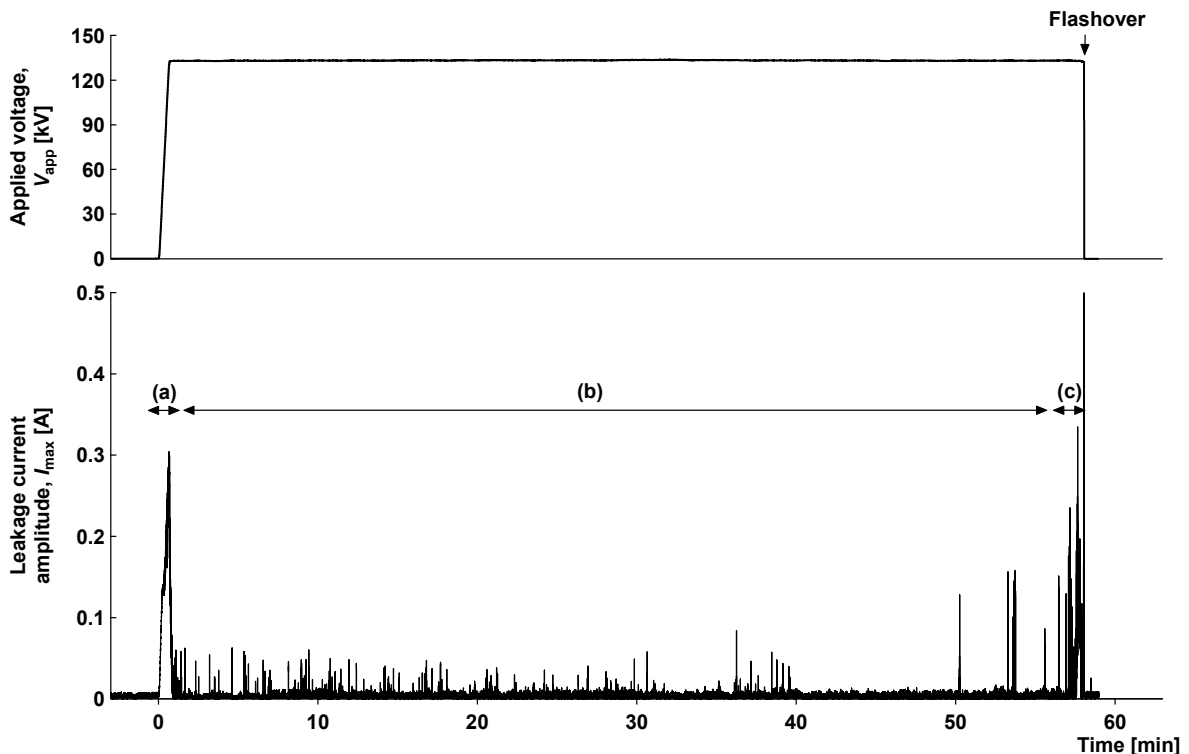


Figure 4-9. Typical time variation of voltage and leakage current during the full-scale flashover tests.

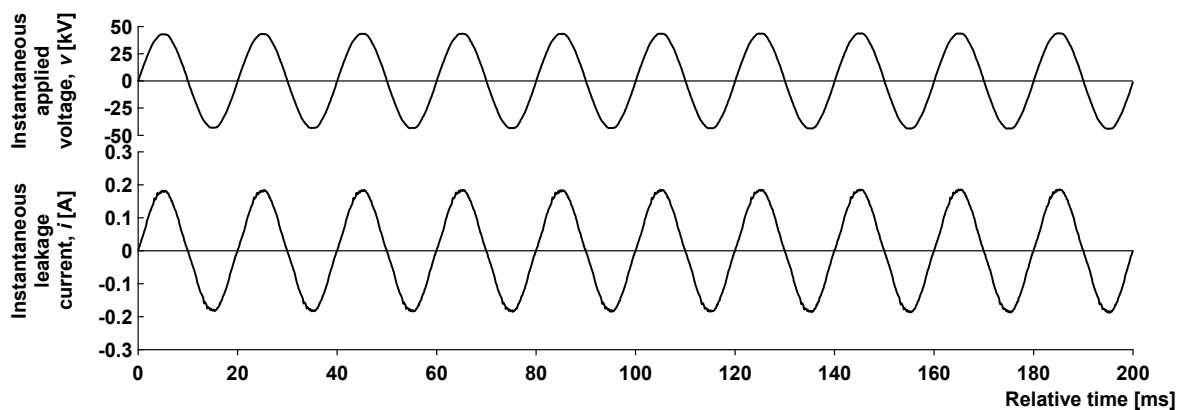
In general, three typical phases in flashover process were figured out involved with the all insulator specimen.

- (a) During the initial period of voltage application, light emission from discharges appeared inside the accreted snow, and the leakage current amplitude increased during increasing applied voltage. A number of air gaps were created at the snow as a result of such a large current flow.
- (b) A few tens of seconds after voltage application, relatively intensive partial discharges appeared and distributed along the accreted snow on the insulator, and maximum currents in the range of 100 to several 100 mA were observed. Right after this event, the appearance of these discharges gradually turned relatively weak and intermittent.
- (c) The large current due to the intensive partial arc discharges again initiated continuously and propagated along the both surface of the insulator and accreted snow. This finally resulted in a development into a complete flashover.

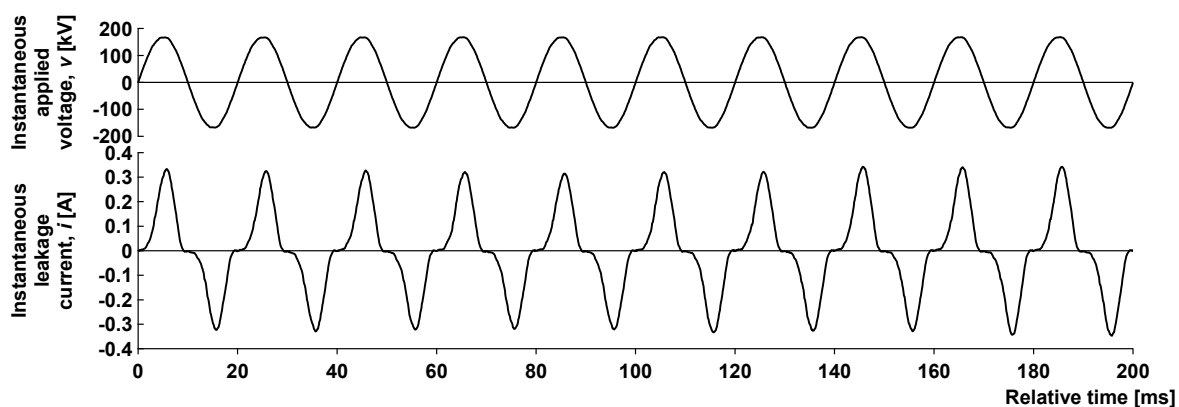
#### 図4-9 フラッシュオーバーまでの電圧・電流の推移の典型例

基本的には全ての供試がいしについて、フラッシュオーバーまでの間に三つのフェーズのことが確認された。

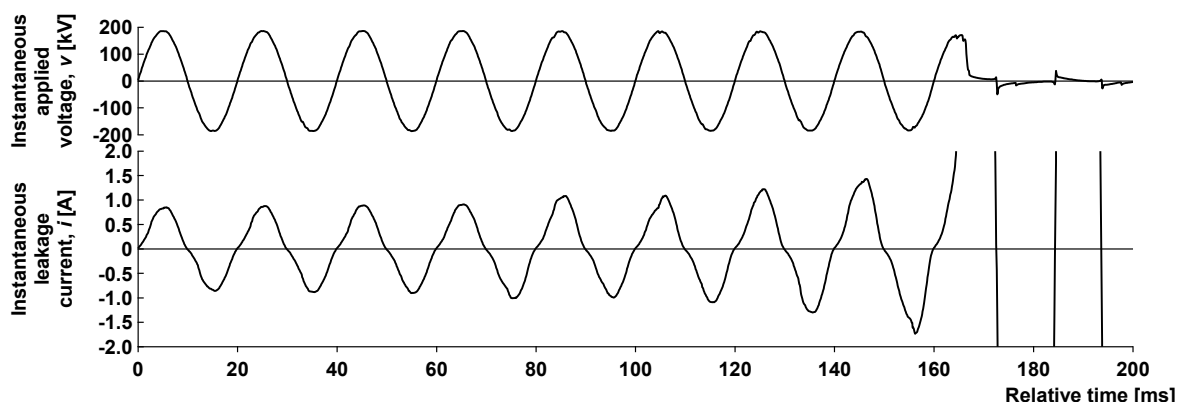
- (a) 初期段階においては、着雪の中から放電光が観測される。印加電圧を上昇する間は、これに伴って漏れ電流波高値も増大していく。このような大きな電流は急速にがいし着雪を部分的に融解して着雪に部分的な空隙を作り出す。
- (b) 数 10 秒後、比較的強い放電ががいし着雪に沿って全体に現れる。このとき、最大 100 mA から数 100 mA の漏れ電流が観測されるが、このイベントのすぐあとには放電は比較的弱くなり、その発生は間欠的になる。
- (c) 再び強い局部アーク放電に伴う大きな電流が連続して発生するようになり、がいしとがいし着雪沿面を伸展する。これがついには完全なフラッシュオーバーに成長する。



(a) Initial period of voltage application



(b) When relatively intensive partial discharges appeared



(c) When intensive partial arc discharges developed into a complete flashover

Figure 4-10. Waveforms of leakage current during the test.

The sinusoidal waveforms of the leakage currents was observed during the initial period (a), which changed into a typical distorted waveform due to the partial arc discharge during the period (b).

#### 図4-10 実規模フラッシュオーバー試験における漏れ電流波形の典型例

初期段階(a)の期間においては正弦波状の漏れ電流波形が観測され、これが次の段階(b)の期間になると典型的な局部アーク放電の歪み電流波形となった。

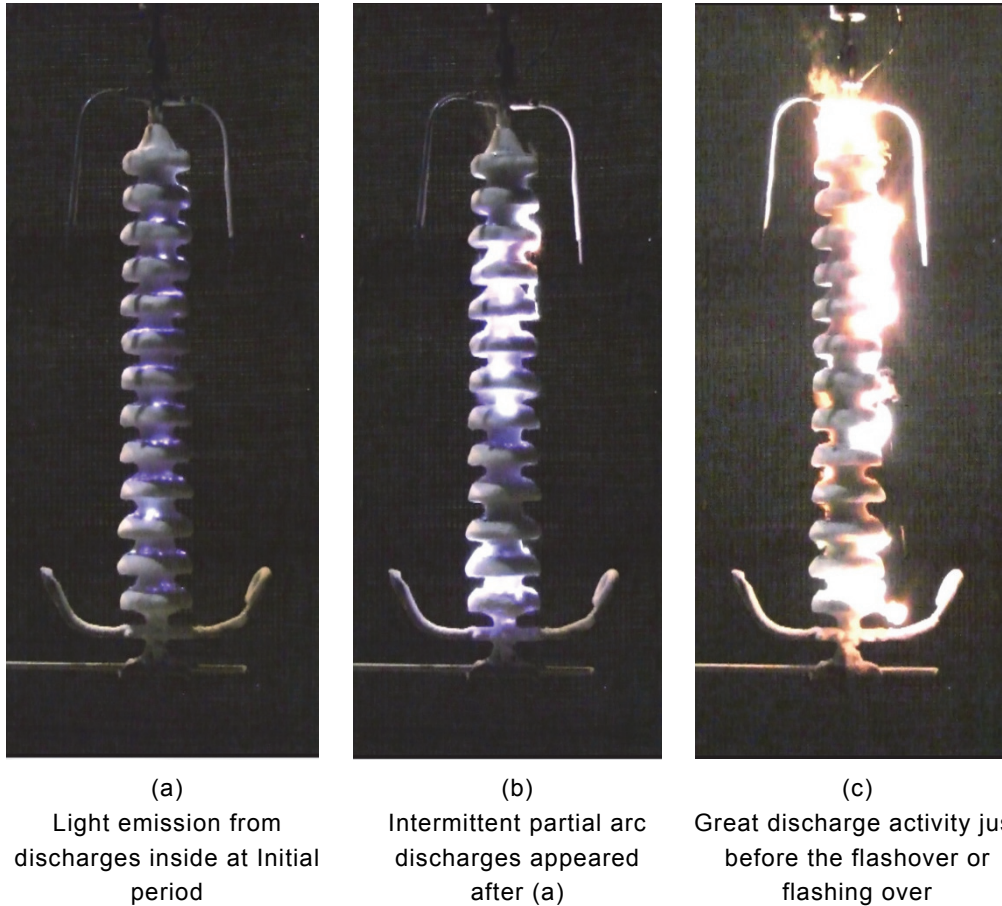


Figure 4-11. Photographs of typical transition of discharge activity during a voltage test for the anti-fog cap-and-pin insulator.

The same process as observed on the long-rod insulator was took place.

図4-11 実規模フラッシュオーバ試験における放電様相の典型例（耐塩用懸垂がいし）

耐塩用懸垂がいしにおいても長幹がいしと同様の放電様相の推移が観測された。

### 4.3 各種がいしのフラッシュオーバ電圧特性

表 4-6 に、154 kV 実規模がいしの着雪フラッシュオーバ試験結果の概要ならびに導電率に対する最低フラッシュオーバ電圧を示す。X 印はフラッシュオーバ、O 印は耐圧したことを示している。(a)は長幹がいしと耐塩用懸垂がいしの結果、(b)はポリマー支持がいしとポリマー相間スペーサの結果である。長幹がいしの導電率 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、印加電圧 108 kV でのフラッシュオーバが、全ての試験において最も低い電圧でのフラッシュオーバとなった。

Table 4-6. Results of flashover tests of snow-accreted 154 kV full-scale insulators.

表4-6 154 kV 実規模がいしの着雪フラッシュオーバ試験結果

(a) Long-rod insulator, cap-and-pin insulator

Insulator type		Long-rod insulator		Cap-and-pin insulator	
Snow conductivity, $\sigma_{25}$ [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]		200	800	200	800
Applied voltage [kV]	222			X	
	207			O O	
	157				X
	146				O O
	136				O
	132	X O			
	124	O O	X O		
	116		X O		
	108		X O		
	100		O O		
Minimum flashover voltage [kV]		132	108	222	157

(b) Composite jumper support insulator, composite inter-phase spacer

Insulator type		Composite jumper support insulator		Composite inter-phase spacer	
Snow conductivity, $\sigma_{25}$ [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]		200	800	200	800
Applied voltage [kV]	297			X	
	276			O O	
	247			O	
	237				X
	220				O O
	205				
	191	X			
	178	O O	X		O
	166	O	O O		
	154		O		
Minimum flashover voltage [kV]		191	178	297	237

#### 4.3.1 雪の導電率から見たフラッシュオーバー電圧特性

図 4-12 は、各条件における最低フラッシュオーバー電圧、および、その電圧を乾燥フラッシュオーバー距離で除したがいし金具間の平均的な電位傾度をまとめたものである。フラッシュオーバー電圧は棒グラフで、その目盛りは左側の軸に示した。最低フラッシュオーバー時の電位傾度は折れ線グラフで、その目盛りは右側の軸に示した。いずれのがいしの最低フラッシュオーバー電圧も、154 kV 送電線の最高運転電圧<sup>11</sup>より高く、実際に運転電圧でフラッシュオーバーに至った下越雪害の発生状況を忠実に再現するには至らなかった。この原因として考えられるものは、以下の二つである。

一つ目の原因は、第 3 章で示した風雪の供給と息継ぎがなかったことである。第 3 章の小規模モデル実験を振り返ってみよう。課電先行型により、電圧を印加したがいしに風雪のオン・オフを与え続けた結果、風雪の供給が継続するうちに次第に放電の活動が活発になり、最後は必ず風雪が止んだタイミングにフラッシュオーバーが生じた。このことから、電圧の印加中に、風雪の供給が継続することと、少なくとも最後の段階では風雪の停止があることが、フラッシュオーバーを誘発しやすいという結論が導かれた。一方で、本章の実規模試験では、試験の実施を簡便にするために、このような風雪供給の過程を省いている。すなわち、着雪の工程は全て電圧印加前に完了させており、電圧印加中の風雪の供給は行われることはない。このことが、実験での最低フラッシュオーバー電圧が高めに評価され、下越雪害の発生した電圧レベルよりも高くなった一つ目の原因と考えられる。

二つ目の原因は、フラッシュオーバー現象の確率に起因するものであろう。例えば気中の棒-棒ギャップの雷インパルスフラッシュオーバーなどを考えた場合に分かりやすいが、一般的に放電現象は確率的な現象であり、ギャップ長と大気の状態が一定の状況でのフラッシュオーバー生起確率は印加電圧に応じて変化する。印加電圧が同じであれば、一定の生起確率でフラッシュオーバーを生ずるが、雷インパルスの大気圧空気の気中ギャップの場合にはこの確率分布が正規分布であり、その標準偏差は 1%から 2%とされている[21]。開閉インパルスの場合には同 4%から 5%程である。着雪がいしの試験となると、電圧印加スタート時の着雪のばらつきや、融雪による脱落のばらつきなども入ってくるため、気中ギャップのインパルスフラッシュオーバーのように確率を求めることはできないが、これらに比べて相当に大きくなると考えられる。

実験の都合上、本章では、高々2回の耐圧を確かめた段階で、その一段上の電圧を最低フラッシュオーバー電圧と定義した。しかし、第 3 章の図 3-20 に示したように、実際の送電線では多数のがいしが並列に接続されているため、実験で確かめた電圧より低い電圧でも、フラッシュオーバー発生の可能性は多いにあると考えられる。

<sup>11</sup> 運用中の送電線において印加される電圧の最高値は、対地電圧が印加される長幹がいし、耐塩用懸垂がいし、ポリマー支持がいしについては常規対地電圧 93 kV が基準となる。一方で、相間の電圧が印加されるポリマー相間スパーサについては、最高使用電圧 161 kV が基準となる。

これらの理由から、着雪の導電率や密度、含水率などの工学的なパラメータを実フィールドと合わせただけでは、下越雪害事故の再現という観点で所望の結果を得られないことが分かった。実線路での最過酷条件を人工的な実規模試験でどのように再現するかが、今後の課題として残った。実規模試験の結果を「耐電圧<sup>12)</sup>」ではなく「最低フラッシュオーバー電圧」と表示している理由も、このような状況を鑑みてのことである。

相対評価の面から人工雪の導電率 2 点に対するフラッシュオーバー電圧を比べると、導電率 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  が 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  よりも低く、フラッシュオーバー電圧に対する着雪の導電率の影響は、第 3 章から得られた結論と同様である。このことが実規模のがいしで確かめられたことは、大きな成果であろう。次の 4.3.2 項では、最低フラッシュオーバー電圧をがいしごとに比較する。

---

<sup>12)</sup> 汚損したがいしに電圧をかけフラッシュオーバーしない最高電圧のことを汚損耐電圧[22]と呼んでおり、統計的な検討ならびに過去の送電線事故実績をもとに規定され、古くから常套的に用いられている用語である。JEC-0201-1988「交流電圧絶縁試験」の中では、耐電圧のことを「機器・設備が所定の条件において耐える電圧」と定めており、中でも付属書に書かれているがいしの「定印霧中耐電圧試験」の行では、同じ印加電圧で 4 回フラッシュオーバーしない電圧を求めることを厳密に耐電圧試験と呼んでいる。本章の結果は、そのような厳密性を担保するものではなく、「耐電圧」表示が招く誤解を恐れたため、敢えて「最低フラッシュオーバー電圧」での表示とした。



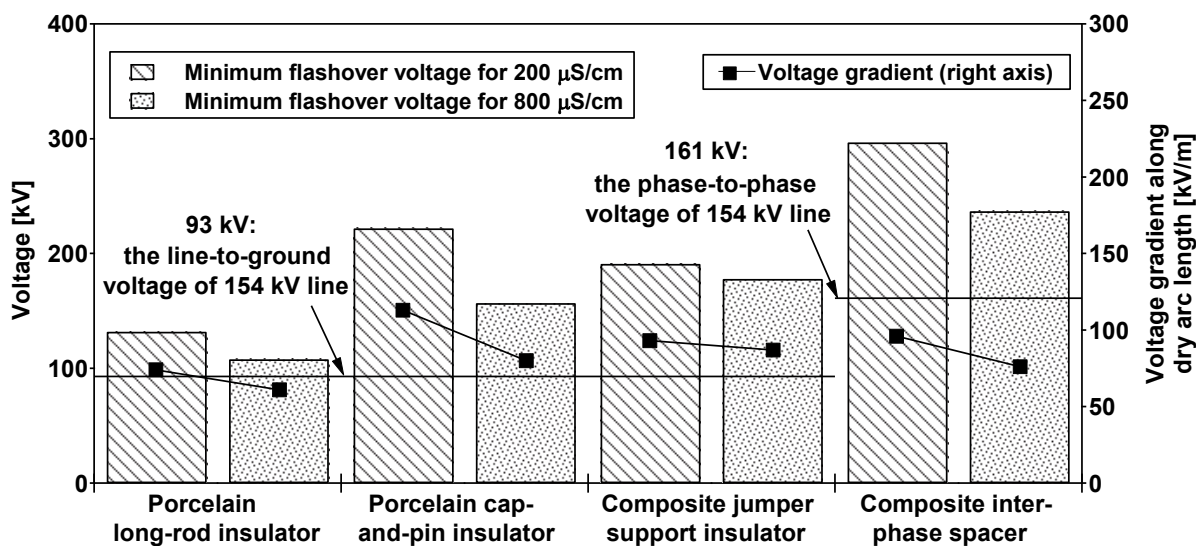


Figure 4-12. Results of flashover voltage tests in comparison among porcelain and composite insulators.

This graph presents the minimum flashover voltages of the snow-accreted porcelain and composite insulators at the two snow conductivities. The test results showed that the minimum flashover voltage of all the insulators decreased with the increase of snow conductivity just same as the result of the flashover voltage in Chapter 3. Additionally, the flashover gradients along the insulation length of all the insulators were higher than the normal operating voltage gradients of 154 kV lines. The reason seemed that the most severe condition would be yielded by the successive supply and the “breathing” of snowstorms in a natural manner such as shown in Chapter 3. On the other hand, since the full-scale tests do not accompanied with any snow application after the tests start, flashover voltage seems to be high.

#### 図4-12 磁器がいし・ポリマーがいしに対して行った実規模フラッシュオーバー試験の結果の概要

このグラフは、2水準の導電率に対する各供試がいしの最低フラッシュオーバー電圧 [kV] (左軸) と、その最低フラッシュオーバー電圧でのがいしの乾燥フラッシュオーバー距離に沿った電位傾度 [kV/m] (右軸) を示す。最低フラッシュオーバー電圧は、第3章の小規模モデル実験のフラッシュオーバー電圧と同様、雪の導電率の上昇と共に低下した。ところが、いずれのがいしについても、最低フラッシュオーバー電圧が 154 kV 送電線の常規運転電圧より高くなった。この理由としては、着雪がいしに電圧が印加されている時、絶縁上厳しくなる条件は、第3章に示したように、継続的な風雪供給の中に“息継ぎ”のような期間がある場合である。一方で、実規模フラッシュオーバー試験では、試験が始まってからは一切の風雪供給がないため、フラッシュオーバー電圧が高めになるかもしれない。

#### 4.3.2 がいし形状から見たフラッシュオーバー電圧特性

各がいし種類ごとに、最低フラッシュオーバー電圧時のがいし金具間の電位傾度を比較すると、以下のようなになる。

- ・ 耐塩用懸垂がいしの最低フラッシュオーバー時の電位傾度は、長幹がいしに比べて、およそ 50% (200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) および 30% (800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 程度高いことが確認された。
- ・ ポリマーがいし類 2 種のフラッシュオーバー電圧は、長幹がいしに比べて、およそ 30% (200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) および 30~40% (800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 程度高いことが確認された。

このような差異が現れた原因としては、4.2 節で述べたように、着雪の空隙の状況が、がいしの種類ごとに特徴的な様相を呈したことであろう。例えば、耐塩用懸垂がいしは長幹がいしに比べて着雪が明らかに磁器面を垂直に剥がれ落ちやすく、早期に脱落して、耐圧しやすい特徴が見られた。また、ポリマー支持がいし、ポリマー相間スペーサについても、長幹がいしとは異なった空隙が形成され、その違いが夫々の電圧でのフラッシュオーバー発生の有無に直結する形となった。ここで、各がいしの試験後十分な時間が経過した状況の例として、耐圧時の着雪の状況を確認してゆくことにする。

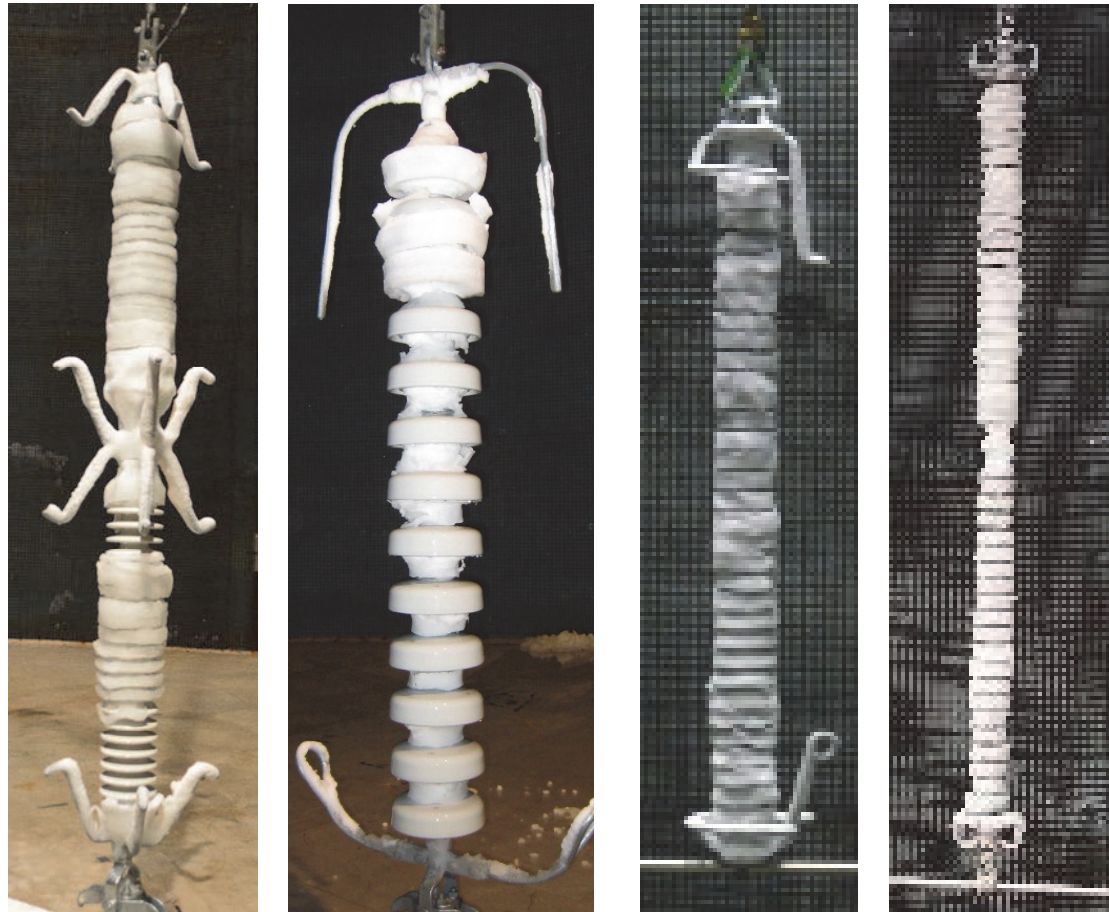
図 4-13 は、局部アーク放電の発生はあったが最終的には耐圧したケースの、耐圧直後の各がいしの状況である。写真から、着雪の残り方に関して、各がいしにはそれぞれ特徴的な様相が見られた。

長幹がいし(a)では、着雪の一部が完全がいしから脱落していることから、電圧印加時には電圧分担が著しく変歪していたと考えられる。このような状況が局部アーク放電の伸展を助長し、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が低くなったと考えられる。また、長幹がいしは、笠間が狭く、着雪時に筒状になると漏れ距離を維持できないため、漏れ抵抗が低下しやすい傾向がある。このことも、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が低くなる原因の一つと考えられる。

耐塩用懸垂がいし(b)では、磁器部の着雪の大部分が脱落し、キャップとピンの部分にしか着雪が残っていない。このような状況から、耐塩用懸垂がいしはより高い電圧にも耐えうるほど十分な絶縁耐力を有していたと考えられ、結果的には最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が高くなる。また、耐塩用懸垂がいしは、笠間が広く、着雪時にも漏れ距離を維持できるため、長幹がいしより高い漏れ抵抗を保持しており、このことも、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が高くなる原因の一つと考えられる。

ポリマーがいし 2 種(c)(d)では、いずれも大部分の着雪がいしの上に残っているが、これは試験中にほとんど漏れ電流が流れなかったためである。スリット状の空隙が笠の周囲に等間隔に見られ、電位分布が均一化されたことが示唆される。このよう

な状況は、漏れ電流を遮断し、局部アーク放電の伸展を妨げ、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が高くなる。



(a) Porcelain long-rod insulator

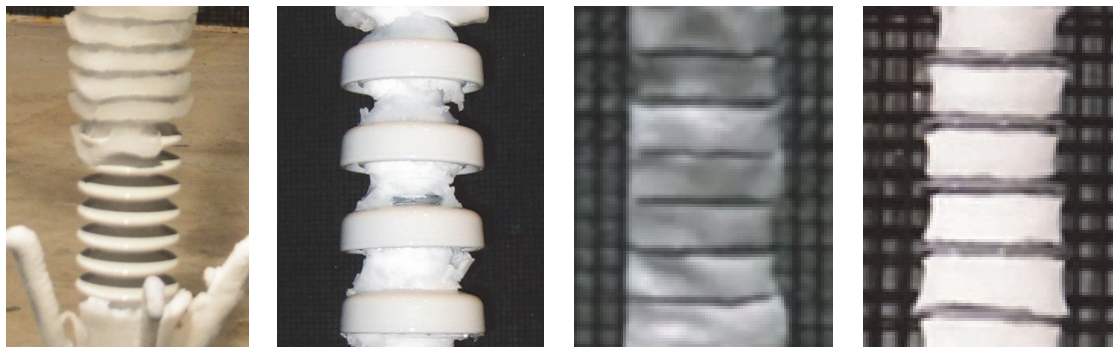
(b) Porcelain anti-fog cap-and-pin insulator

(c) Composite jumper support insulator

(d) Composite inter-phase spacer

Figure 4-13. Typical aspect of insulator specimens after much time had passed (particularly after withstood) during the 154 kV full-scale flashover tests.

図4-13 実規模フラッシュオーバー試験において十分な時間経過後（耐圧時）の各種がいしの着雪の状況例



(a) Long-rod insulator

(b) Anti-fog cap-and-pin insulator

(c) Composite jumper support insulator

(d) Composite inter-phase spacer

Figure 4-14. Magnified image of uncovered surfaces in Figure 4-13.

As for the porcelain long-rod insulator (a), the snow partially completely fell down from the insulator specimen, which suggested that there was a quite distorted voltage distribution along the insulator string during energized. Such like situation seemed to help partial arcs propagate, then led to lower flashover gradients. As for the porcelain anti-fog cap-and-pin insulator (b), most of snow accreted on the surface of the porcelain fell down and only snow accreted on the caps and pins maintained, which suggested that the insulator string had a high insulation strength even if higher voltage would be applied. Such like situation seemed to lead to higher flashover gradients for the porcelain anti-fog cap-and-pin insulator. As for the composite insulators, most of the accreted snow maintained on the composite insulators as shown in (c) and (d) because only few leakage current flew in the snow. The recorded small and equal interval gaps around the edges of the sheds, looked like ordered slits, suggested that there were relatively uniform voltage distributions along the composite insulators and suppressed the leakage current. Such like situation seemed to prevent arc propagation and led to higher flashover gradients for the composite insulators.

#### 図4-14 がいし着雪が剥がれ落ちた状況（図 4-13）の拡大

長幹がいし(a)では、着雪の一部が完全にがいしから脱落しており、電圧印加時には電圧分担が著しく変歪していたと考えられる。このような状況は、局部アーク放電の伸展を助長し、低いフラッシュオーバ電圧を導く。耐塩用懸垂がいし(b)では、磁器部の着雪の大部分が脱落し、キャップとピンの部分にしか着雪が残っていない。このような状況から、耐塩用懸垂がいしはより高い電圧にも耐えうるほど十分な絶縁耐力を有していたと考えられ、結果的には高いフラッシュオーバ電圧が導かれた。ポリマーがいし2種(c)(d)では、いずれも大部分の着雪がいしの上に残っているが、これは試験中にほとんど漏れ電流が流れなかったためである。スリット状の空隙が笠の周囲に等間隔に見られ、電位分布が均一化されたことが示唆される。このような状況は、漏れ電流を遮断し、局部アーク放電の伸展を妨げ、高いフラッシュオーバ電圧を導く。

## 4.4 まとめ

本章では、着雪の導電率や密度、含水率などの工学的なパラメータを実フィールドと合わせた、人工雪を用いた実規模着雪がいしのフラッシュオーバー試験方法を検討するとともに、各種がいしのフラッシュオーバー特性の検証を行った。得られた成果のうち特に重要なものを摘記すると、以下のものである。

- (1) フラッシュオーバーする場合の漏れ電流ならびに放電様相の推移は基本的には一様に同じプロセスで既述することができることが分かった。すなわち、
  - (a) 初期段階においては、着雪の中から放電光が観測された。印加電圧を上昇する間は、これに伴って漏れ電流波高値も増大した。このような大きな電流は急速にがいし着雪を部分的に融解して着雪に部分的な空隙を作り出した。
  - (b) 上の状況から数 10 秒後、比較的強い放電がいし着雪に沿って全体に現れた。このとき、最大 100 mA から数 100 mA の漏れ電流が観測されたが、このイベントのすぐあとには放電は比較的弱くなり、その発生は間欠的になった。
  - (c) 再び強い局部アーク放電に伴う大きな電流が連続して発生するようになり、がいしとがいし着雪沿面を伸展した。これがついには完全なフラッシュオーバーに成長した。
- (2) がいしの種類ごとに、着雪の空隙の形成状況が特徴的な様相を呈し、その違いが夫々の電圧でのフラッシュオーバー発生の有無に直結することが明らかとなった。すなわち、
  - 1) 長幹がいしは、電圧分担が著しく変歪することで、局部アーク放電の伸展を助長した。また、笠間が狭いため着雪時に筒状になり漏れ距離を維持できず、これらの理由により最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が低くなった。
  - 2) 懸垂がいしは、着雪の大部分が脱落しやすく、また、笠間が広いため着雪時にも漏れ距離を維持できるため、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が高くなった。
  - 3) ポリマーがいしは、スリット状の空隙が笠の周囲に等間隔に発現しやすく、電位分布が均一化される。このような状況は、漏れ電流を遮断し、局部アーク放電の伸展を妨げ、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度が高くなった。
- (3) 人工雪の導電率 2 点に対するフラッシュオーバー電圧を比べると、いずれのがいしでも導電率 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  では 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  よりも低くなったことから、フラッシュオーバー電圧に対する着雪の導電率の影響は、第 3 章から得られた結論と同様に「導電率が高いほどフラッシュオーバー電圧は低くなる」であった。
- (4) 各がいしについて、最低フラッシュオーバー電圧における電位傾度を比較すると、結果は以下のものである。

- 1) 耐塩用懸垂がいしの最低フラッシュオーバー時の電位傾度は、長幹がいしに比べて、およそ 50% (200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) および 30% (800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 程度高くなった。
  - 2) ポリマーがいし類 2 種のフラッシュオーバー電圧は、長幹がいしに比べて、およそ 30% (200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) および 30~40% (800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 程度高くなった。
  - 3) このことから、耐塩用懸垂がいしと、ポリマー支持がいしおよびポリマー相間スペーサは、フラッシュオーバー電圧特性の面からは長幹がいしに代わる塩雪害対策品として有用な選択肢の一つになり得ることが確かめられた。
- (5) 一方で、着雪の導電率や密度、含水率などの工学的なパラメータを実フィールドと合わせただけでは、常規運転電圧でのフラッシュオーバーを確認することができず、下越雪害事故の再現という観点では所望の結果を得られないことが分かった。実線路での最過酷条件を人工的な実規模試験でどのように再現するかが、今後の課題である。

本章の結論は以上であるが、塩雪害対策品としての有効性を評価するに当たっては、フラッシュオーバー電圧特性と併せて、着雪特性も検討し、総合的な検証を行うことが必要である。このため、各種がいしの着雪特性については、第 5 章において比較・評価を行う。

#### 第4章の参考文献

- [1] T. Onodera, H. Inukai, and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2007)
- [2] N. Sugawara and K. Hosono, “Insulation properties of long rod and line post insulators for 33kV transmission line in wet-snow storm on January 2004”, Proc. of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2005)
- [3] G. Sakata and H. Homma, “Overview of Blackout in Niigata and Study on Property of Wet Snow Packed with Sea-Salt on Insulator Strings”, Proc. of INMR World Congress on Insulators, Arresters & Bushings (2009)
- [4] H. Homma, K. Yaji, G. Sakata, T. Aso, A. Dornfalk and I. Gutman, “Development of Withstand Voltage Test Method for Snow Accreted Insulators –Preliminary Test with 33kV class insulator samples–”, Proc. of the 14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2011)
- [5] 松沢 清治 : 「系統絶縁の雪害対策」、電気学会雑誌、Vol. 82、No. 880、pp. 90 – 96 (1962)
- [6] 尾崎 勇造、高木 子平 : 「雪と閃絡現象」、雪氷、Vol. 29、No. 3、pp. 65 – 69 (1967)
- [7] 若林 彊、小林 六四郎 : 「放電ギャップの交流火花電圧におよぼす雪の影響」、電気学会雑誌、Vol. 78、No. 833、pp. 176 – 185 (1958)
- [8] 石橋 鎌造 : 「雪とフラッシュオーバー現象」、雪氷の研究、No. 5、架空送電線の冰雪害対策、pp. 177 – 184 (1973)
- [9] K.F. Jones and N.D. Mulherin, "An Evaluation of the Severity of the January 1998 Ice Storm in Northern New England Report for FEMA Region 1", US Army Corps of Engineers (1998)
- [10] R.M. Campbell, “Lessons from the ice storm 1998: A Quebec perspective”, Journal of Canadian studies, Vol.32, No.4, pp.3 – 4, (1998)
- [11] X. Jiang, J. Zhao, B. Luo, J. Zhang, and C. Huang, “Survey and Analysis of Ice Accidents of Early 2008 in Southern China”, Proc. of the 13th International Workshop on Atmospheric Icing of structures (IWAIS) (2009)
- [12] M. Kawai, “AC Flashover Test at Project UHV on Ice-Coated Insulators”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 8, pp. 1800 – 1804 (1970)
- [13] S. M. Fikke “Possible Effects of Contaminated Ice on Insulator Strength” 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (1990)
- [14] N. Sugawara, S. Watanabe, and K. Hokari, “Flashover Performance of Transmission Line



- Insulators covered with Salt- Contaminated Ice and Icicles”, Proc. of the 7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) (1991)
- [15] M. M. Khalifa and R. M. Morris, “Performance of Line Insulators Under Rime Ice”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 6, pp. 692 – 698 (1967)
- [16] D.C. Jolly, “Contamination Flashover Theory and Insulator Design”, Journal of the Franklin Institute, Vol. 294, pp. 486 (1972)
- [17] Z. Vuckvic and Z. Zdravkovic, “Effect of Polluted Snow and Ice Accretions on High-Voltage Transmission Line Insulators”, Proc. of the 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (1990)
- [18] IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, “IEEE Guide for Test Methods and Procedures to Evaluate the Electrical Performance of Insulators in Freezing Conditions” (IEEE Std. 1783-2009) (2009)
- [19] 高橋 章、藤田 慎一、坂田 学：「新潟県下越地域における降雪の電気伝導度の連続観測」、雪氷研究大会 (2008)
- [20] 大原 信、藤田 慎一、杉本 聡一郎、高橋 章：「冬季の日本海沿岸地域における降水による粒子状物質の取り込み」、大気環境学会誌、Vo. 48、No. 2、pp. 74 – 81 (2013)
- [21] 有働 龍夫：「電力系統絶縁工学 —サージと事故防止—」、オーム社 (1999)
- [22] 電気学会 電気用語標準特別委員会編：「送電線路」、電気学会電気専門用語集 No. 21、コロナ社 (1988)

## 第 5 章

がいしの形状と気象条件に基づく  
がいしの着雪特性の検討

## Chapter 5

**Discussion about Snow Accreting Properties  
with Regard to Insulator Profile and  
Meteorological Conditions**

# 第 5 章 がいしの形状と気象条件に基づくがい しの着雪特性の検討

## 5.1 まえがき

本章では、各種がいしの着雪特性の比較・形状効果の解明、ならびに、これらを踏まえた対策品の効果について、電気工学的な観点から検討する。これらを検討するに当たっては、自然環境下における観測により、各種がいしへの着雪発達過程に及ぼす気象条件、がいし形状等の影響を明確化する必要がある。これまでに発表されたがいしの冠着氷雪の観測結果は、ノルウェーのオスロ近郊の実送電線を利用したガラスがいしと送電用ポリマーがいしへの冠雪の観測[1]、中国の海拔 1400 m にある山岳部の試験所 Xuefeng Mountain Natural Icing Station での着氷の観測[2]、日本の豪雪地域（東北電力管内米沢実験場）における長幹がいしと送電用ポリマーがいしへの冠雪の観測[3,4] などがあるものの、自然環境下の各種がいしの冠着氷雪過程を、気象条件と共に、連続的に長期間に亘って観測した研究は見当たらない。

したがって、本研究では、自然環境下のがいしの着雪過程を長期間連続観測し、気象条件とがいし形状に関連付けることを試みた。このため、本章での検討は、基本的には自然環境下でのフィールド観測をベースとしたが、これらのフィールド観測でデータ取得が困難な気象条件、中でも強風域のデータについては、室内着雪実験の実施により補完あるいは代用した。以下、5.2 節では、新潟地区と釧路地区の観測システムの構成について述べた後、自然環境下における着雪特性について、主に新潟地区で行った観測結果を述べる。5.3 節では、降雪のフラックスを用いてがいしの塩雪害発生の危険度を推定する方法を提案し、自然環境下での観測結果に適用する。5.4 節では、室内着雪実験の結果を述べ、各種磁器がいしの着雪特性に関する数値的な評価を試みる。5.5 節では、2005 年の下越雪害以来の慣習となっている「冠雪」「圧密着雪」といった言葉の使い分けが、現象的にはどのように違うかを指摘し、この二つの事象に対するポリマーがいしの適用性を検討する。

## 5.2 自然環境下における着雪特性

本研究のフィールド観測は、新潟地区、釧路地区で実施した。新潟地区での観測は、2005年に塩雪害の事故点が集中した下越地域にある、新潟市秋葉区内の実運用中の送電用鉄塔敷において2008年度から2015年度までの8冬季間実施した。また、2014年度から2015年度は、高頻度な観測機会を求めて、強風湿型の着雪が頻繁に発生する釧路地区での観測を実施した。本節では、これらの観測地点における観測結果から明らかになったことをまとめて述べる。なお、以下、風速3 m/s未満を弱風、3～8 m/sを中風、8 m/sより大きいものを強風と呼ぶ[5]。

### 5.2.1 フィールド観測の概要

#### (1) 新潟地区

新潟地区がいし着雪観測システムの位置を図5-1に示す。越後平野の比較的内陸部に位置しており、標高は6 m程度である。日本海の海岸線からの距離は約17 kmである。第1章の図1-13の新潟市街中心部と新潟変電所を結ぶ線上に位置し、新潟変電所から市街地方向に直線距離でおよそ13 kmの地点である。供試がいしは、66 kV実送電鉄塔の下側の空き回線<sup>1</sup>の腕金に、懸垂吊りの配置で、無課電で設置した(図5-2、図5-3および表5-1)。設置高さはおよそ17 mである。気象要素は、地表面の気温、相対湿度、地上10 m付近での風向、風速の他、降水量とその導電率(降雪の場合はその融雪水の導電率)を測定し、それぞれの10分値を記録した。がいしへの着雪の状況は、ネットワークカメラ(CANON製、VB-C50iR)により、66 kV相当の長幹がいし(LC8024)ならびに、耐塩用懸垂がいし(SU-165BF)の着雪状況の連続観測を行い、着雪特性に関するがいし間の比較を行った。また、同敷地内では、別途、これら2種類のがいしの漏れ抵抗の測定と着雪様相の記録も実施した(図5-4)。

#### (2) 釧路地区

前項の新潟下越地域でのフィールド観測においては、強風湿型着雪の観測機会が限られており、限られた研究期間の中で十分なデータを得ることが難しかった。そこで、より高頻度な観測機会を得るため、北海道釧路市大楽毛に強風・湿型のデータ取得を主眼としたがいし着雪観測システムを構築し、2014年度に観測を開始した。本項では、2014～2015年度冬季に得られたがいし着雪事象について報告する。

釧路地区観測システムの位置を図5-5に、観測機器の設置状況を図5-6示す。がいしの冠着雪特性監視システムでは、試験用の鉄塔の地上高約10 mの位置に9連(8種類)の送電用がいし類を設置して観測を実施した。供試がいし類の形状を図5-7に示す。長

<sup>1</sup> 電線が架線されていない回線のことをここでは空き回線と呼ぶ。

幹がいし (LC8017) については、懸垂吊りと耐張吊り (水平) で各 1 連を設置した (がいし No. 1-2)。懸垂がいしについては、250 mm 耐塩用懸垂がいし (SU-165BF)、250mm 懸垂がいし (SU-165BN) を各 7 個連結し、それぞれ 1 連ずつ設置した (がいし No. 3-4)。ポリマーがいしについては、がいしの形状が着雪特性に及ぼす影響を把握するため、笠間隔、同直径、および笠直径に違いをつけた 5 連を設置した (がいし No. 5-9)。以上の供試がいしは、いずれも 66 kV 相当の連結長・表面漏れ距離を持つものである。吊り方は、長幹がいし 2 連のうち 1 連を耐張吊りとした以外は、懸垂吊りであり、いずれのがいしも、新潟下越における観測と同様、無課電で曝露を行った。がいしの種類、吊り方、主要寸法などを表 5-2 にまとめて示す。

気象要素は、地表面の気温、相対湿度、地上 10 m での風向、風速、放射量、降水量の各 10 分値を記録した。がいし類への着雪の状況は、ネットワークカメラ (SONY 製、SNC-RS86N) により、がいしからの距離約 9 m の位置から 5 分おきに撮影した。また、長幹がいしに関しては、耐張吊り、懸垂吊りとも、支持点に設置したロードセル (共和電業製、LUX-B-500N-ID) により着雪の質量の経時変化を測定した。夜間の観測には、ハロゲンランプを用い、ネットワークカメラと同じ距離から照射した。

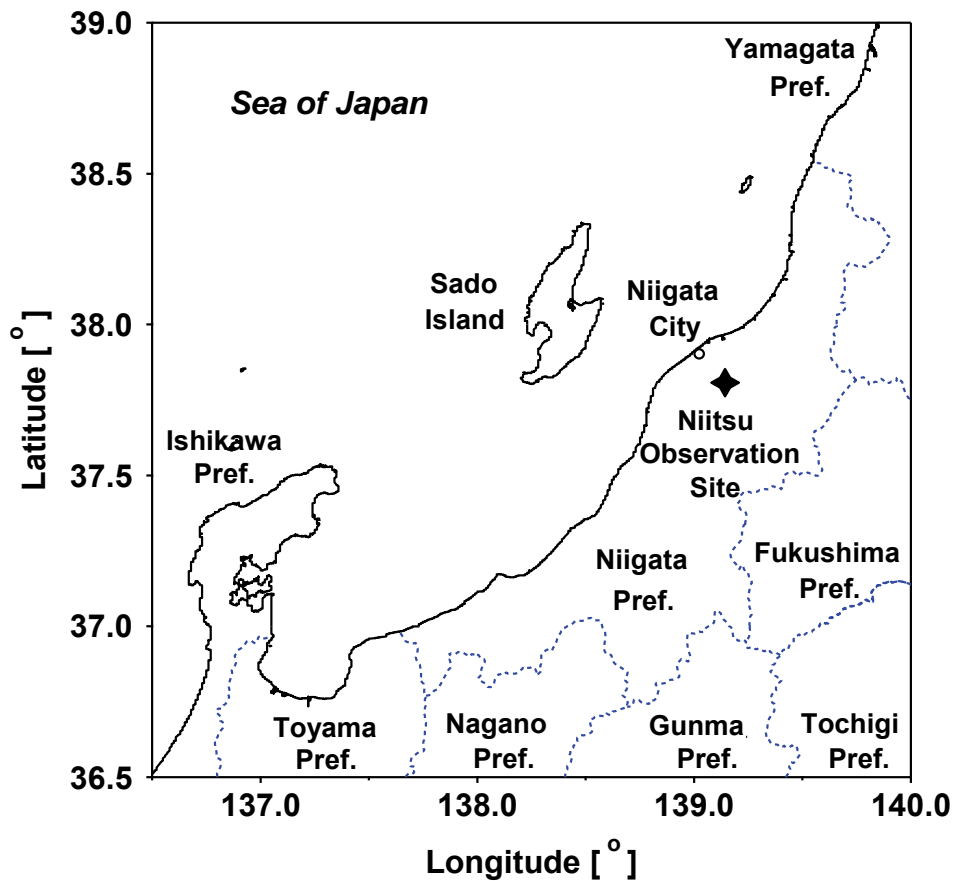
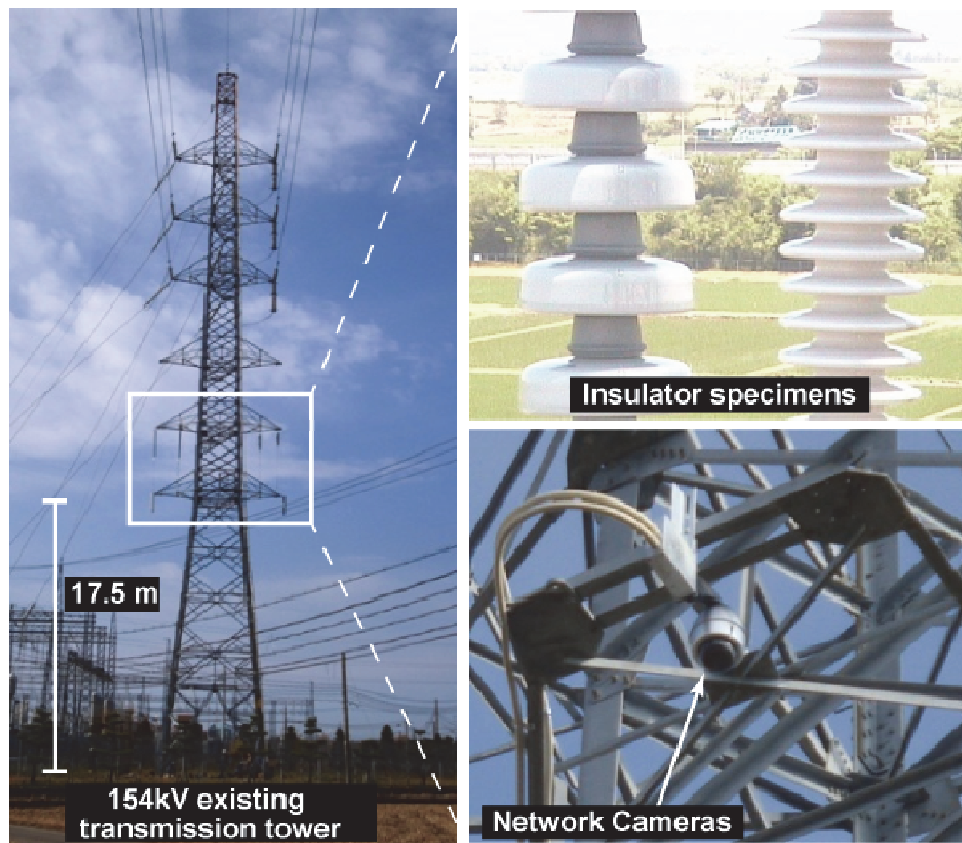


Figure 5-1. Location of the observation site.

The Niitsu observation site was set near the area where multiple ground faults were triggered during the snowstorm of 2005. The location is in an open field, 6 m above sea level, and approximately 17 km away from the Sea of Japan shore.

#### 図5-1 新潟地区観測システムの位置

越後平野の比較的内陸部に位置しており、2005年に塩雪害の事故点が集中した下越地域にある。標高は6m程度である。日本海の海岸線からの距離は約17kmである。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-2. Outlook of the transmission tower at the Niitsu observation site, and installation of the test insulators and CCD cameras.

The non-energized insulator specimens were installed in a vertical position in the empty arms of an existing 154 kV transmission tower approximately 17.5 m in height. Three network cameras were employed and photographs of the specimens are taken every 10 min. Meteorological instruments were also used to monitor the ambient climatic conditions, such as surface temperature, relative humidity, wind velocity, wind direction, precipitation, and snow conductivity, in 10-min intervals.

### 図5-2 新潟地区観測システムの機器設置状況

供試がいしは、154 kV 実送電鉄塔の下側の空き回線の腕金に、懸垂吊りの配置で、無課電で設置した。設置高さはおよそ 17 m である。がいしへの着雪の状況は、ネットワークカメラにより、10 分間隔で記録した。気象要素は、地表面の気温、相対湿度、地上 10 m 付近での風向、風速の他、降水量とその導電率を、それぞれの 10 分値を記録した。

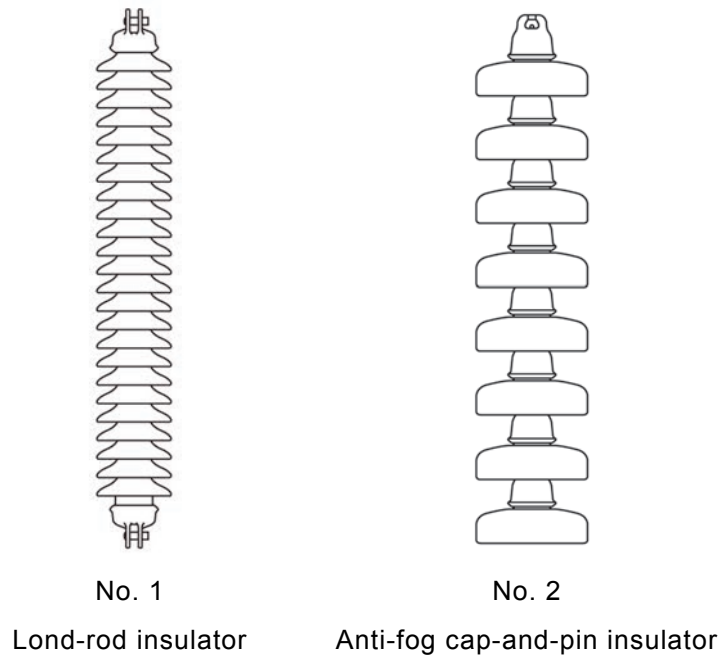


Figure 5-3. Schematic drawings of the insulator specimens at Niitsu observation site.

図5-3 新潟地区観測システムにおける供試がいしの概要

Table 5-1. Specifications of porcelain insulator specimens at Niitsu observation site.

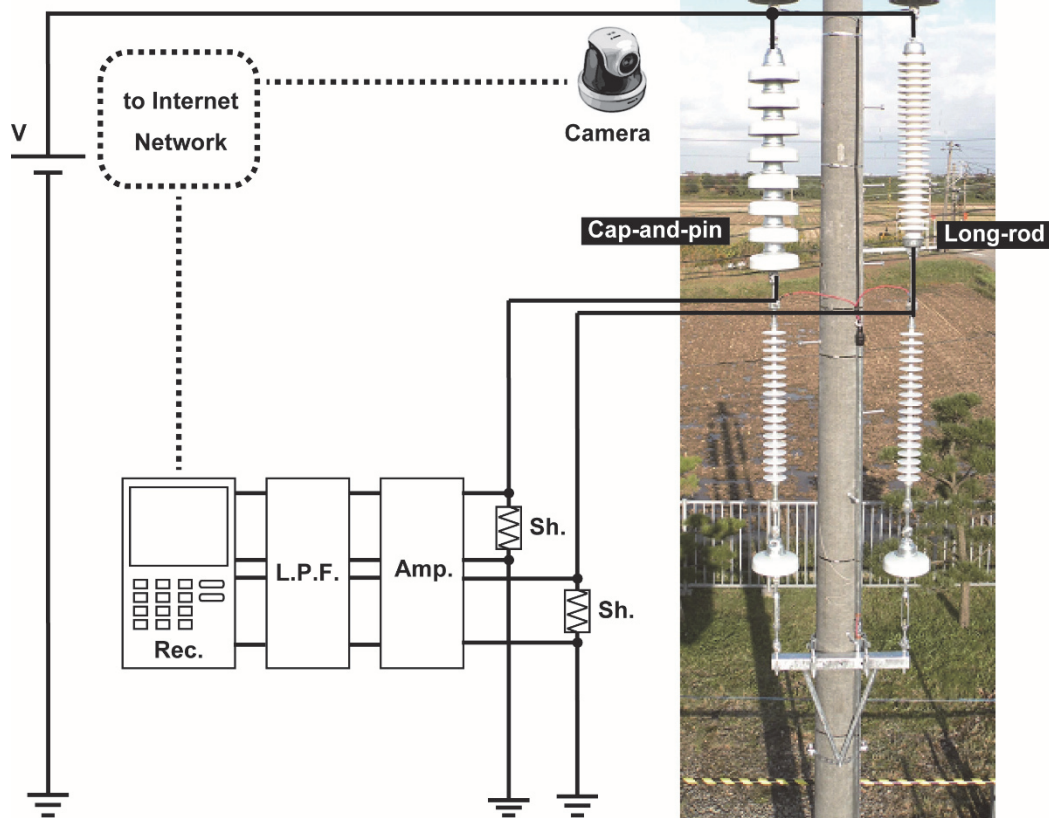
表5-1 新潟地区での観測において供試した磁器がいしの諸元

No.	Type	Description in JIS standards <sup>2</sup>	Units	Position	Connection length [mm]	Creepage distance [mm]	Numbers of sheds	Shed spacing [mm]	Rod diameter [mm]	Shed diameter [mm]
1	Long-rod insulator	LC8024	1	Suspension	1175	2470	24	Approximately 40	80	160
2	Anti-fog cap-and-pin insulators	SU-165BF	8	Suspension	1168	3440	—	Approximately 80	—	254

<sup>2</sup> JIS C 3810: 1999, “Normal type and anti-pollution type suspension insulators”, Japanese Industrial Standard (1999)  
 JIS C 3816: 1999, “Long rod insulators”, Japanese Industrial Standard (1999)



**V** : Voltage source (DC, 100V)  
**Amp.** : Isolation amplifier  
**L.P.F.** : Low-pass filter  
**Rec.** : Recorder (http and ftp server)  
**Sh.** : Shunt resistor (10 kΩ)



©2014 IEEE

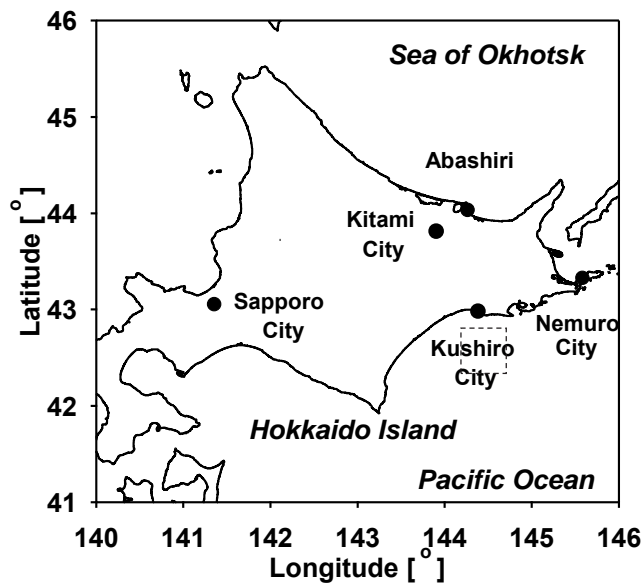
*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-4. The setup of test insulators on the distribution pole to measure leakage resistances of a long-rod insulator and eight anti-fog cap-and-pin insulators as same as those on the tower.

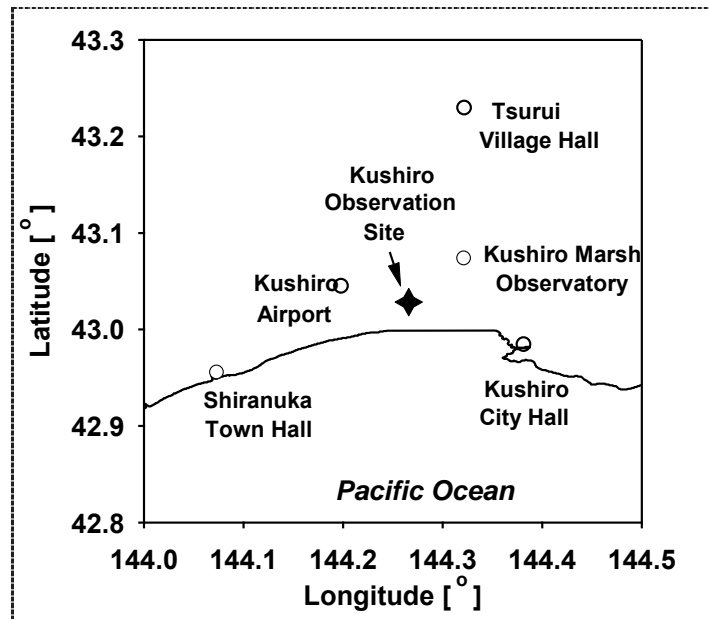
This aims to detect shed bridging and determine the insulation degradation of snow accreted insulators. 100 V of DC voltage was applied to measure the leakage resistance. A network camera worked together with the instruments.

#### 図5-4 新潟地区観測システムにおける供試がいしの概要

配電用の鉄筋コンクリート柱を利用して、鉄塔上と同じ長幹がいし 1 本と耐塩用懸垂がいし 8 個連を設置し、漏れ抵抗測定のために DC 100 V を印加した。



(a) Wide area map



(a) Magnified area map

Figure 5-5. Location of the Kushiro observation site.

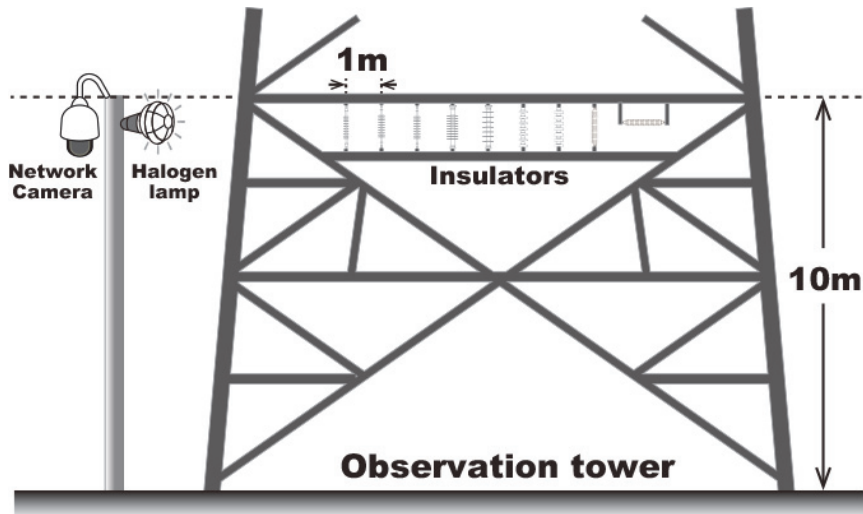
Wet snow accompanied with strong winds can be observed at the East Hokkaido area during low pressure systems pass through the south coast of Hokkaido. Moreover, the Otanoshike district does not have any major buildings, thus insulator specimens easily receive strong winds.

### 図5-5 釧路地区観測システムの位置

道東地区は、北海道南岸を低気圧が発達しながら通過する際に、強風湿型着雪が発生する地域である。さらに、釧路市大楽毛地区は、周辺に遮蔽物がなく地形的要因からも強風に曝されやすいことなどの好条件を備えている。



(a) Overview of the observation site



(b) Schematic drawing of the observation system

Figure 5-6. Situation of the snow-accretion observation system at Kushiro.

The non-energized insulator specimens were installed in a vertical position at approximately 10 m in height in test transmission tower. A network cameras were employed and photographs of the specimens are taken every 5 min. Meteorological instruments were also used to monitor the ambient climatic conditions, such as surface temperature, relative humidity, wind velocity, wind direction, solar radiation, and precipitation in 10-min intervals. In addition, snow weight accreted on the long-rod insulators was recorded.

### 図5-6 釧路地区着雪観測システムの機器設置状況

供試がいしは、試験用送電鉄塔の塔体に、懸垂吊りの配置で、無課電で設置した。設置高さはおおよそ 10 m である。がいしへの着雪の状況は、ネットワークカメラにより、5 分間隔で記録した。気象要素は、地表面の気温、相対湿度、地上 10 m 付近での風向、風速、放射量、降水量について、それぞれの 10 分値を記録した。長幹がいしの着雪荷重をロードセルで測定した。

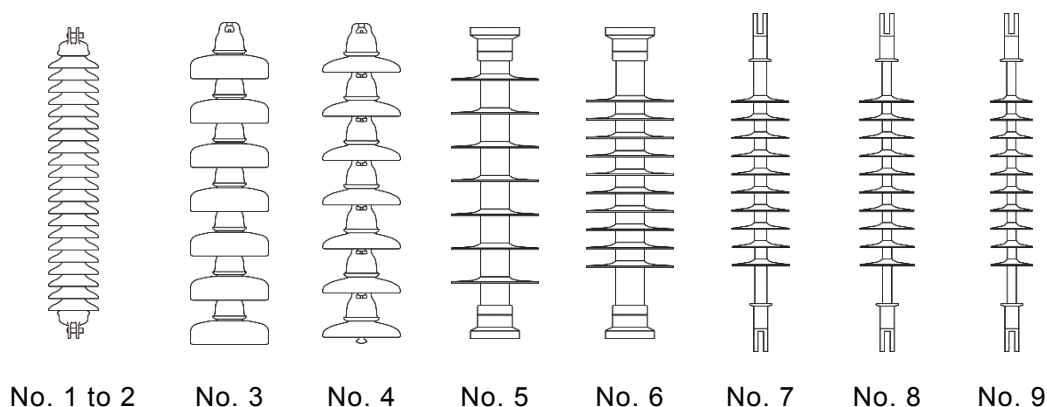


Figure 5-7. Schematic drawing of insulator specimens at Kushiro.

Specimen numbers from 1 to 4 are porcelain insulators and ones from 5 to 9 are polymeric insulators.

図5-7 釧路地区着雪観測システムにおける供試がいしの概要

供試がいし No.1 から No.4 までは磁器がいし、No.5 から No.9 まではポリマーがいしである。

Table 5-2. Specifications of Insulator Specimens at Kushiro observation site.

表5-2 釧路地区での観測において供試した各種がいしの諸元

No.	Type	Description in JIS standards <sup>3</sup>	Units	Position	Connection length [mm]	Creepage distance [mm]	Numbers of sheds	Shed spacing [mm]	Rod diameter [mm]	Shed diameter [mm]
1	Long-rod insulator	LC8017	1	Horizontal	875	1750	17	Approximately 40	80	160
2	Long-rod insulator	LC8017	1	Vertical	845	1750	17	Approximately 40	80	160
3	Anti-fog cap-and-pin insulator	SU-165BF	7	Vertical	1022	3010	---	Approximately 80	---	254
4	Standard cap-and-pin insulator	SU-165BN	7	Vertical	1022	1960	---	Approximately 140	---	254
5	Composite insulator	---	1	Vertical	1020	2725	7	112	94	284
6	Composite insulator	---	1	Vertical	1020	3550	10	60	94	284
7	Composite insulator	---	1	Vertical	1040	2600	10	60	43	191
8	Composite insulator	---	1	Vertical	1040	2600	10	60	30	178
9	Composite insulator	---	1	Vertical	1040	2000	10	60	30	138

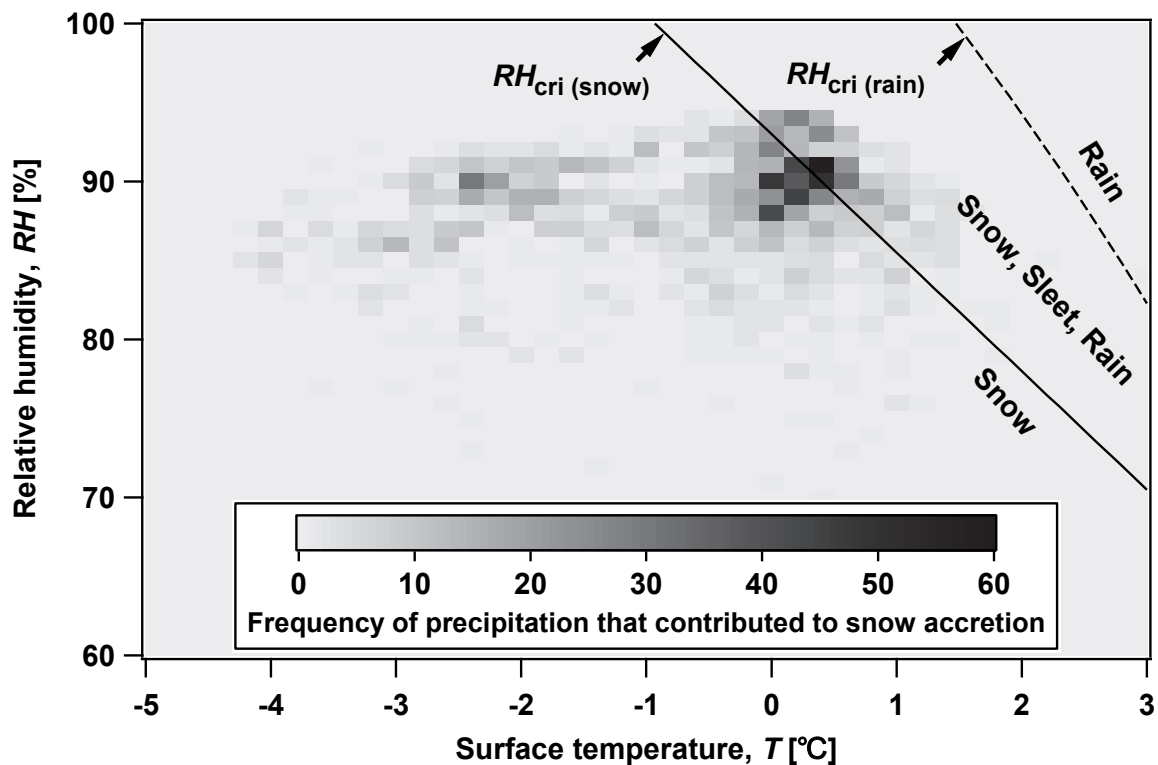
<sup>3</sup> JIS C 3810: 1999, "Normal type and anti-pollution type suspension insulators", Japanese Industrial Standard  
JIS C 3816: 1999, "Long rod insulators", Japanese Industrial Standard

## 5.2.2 着雪が発達しやすい気象条件

がいし着雪が生じ得る危険性について考察する上で、着雪の頻度と気象条件との関係の評価することが重要である。特に、気温、相対湿度、風速、風向、ならびに、降水量は、各地の気象観測所から容易に入手することができることから、これらの観測データを用いた評価手法を確立することが望まれる。この観点から、まず、がいしに着雪が生じやすい気象条件とその発生頻度を明らかにするため、長幹がいしにおいて着雪が発達した際の降雪と気象条件を、3年分のカメラの画像から洗い出した。続いて、すべての降雪について、図 5-8 に示すような気温－湿度帯ごとの選別を行った。ここで用いた気温と湿度から気象条件を選別する手法は、Matsuo と Sasyo [6-8]によって提案されたものである。図中の実線 “ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ” で表された直線は、雪とそれ以外を区分する気象の境界線である。一方、破線 “ $RH_{\text{cri(rain)}}$ ” で表された曲線は、雨とそれ以外を区分する気象の境界線であり、それぞれ(5-1)式で与えられる。

$$\begin{aligned}RH_{\text{cri(snow)}} &= -7.5T + 93 \\RH_{\text{cri(rain)}} &= 46\sqrt{6.2 - T}\end{aligned}\tag{5-1}$$

この “ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ” と “ $RH_{\text{cri(rain)}}$ ” で囲まれた部分は、雨と雪の境界領域となっており、ここにはみぞれも含まれる。この領域では、湿った雪が観測されやすいとされている。“ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ” より低温側では雪となり、高温側では雨となる。図より、新潟下越の観測地点においては、気温  $0.6^{\circ}\text{C}$  (相対湿度 91%) で最も頻繁に着雪が発達していることが分かる。特に、“ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ” の近傍に、頻度分布が高くなっているように見られる。このグラフは、風速ごとに整理したものではないため、弱風から強風まで幅広い条件を含んでいる。また、ここで見られた特性は、がいしへの着雪事象に一様に現れる現象であるのか、あるいは、地点ごとの特徴があるのか、がいし形状によってどの程度差が出てくるのかなどについては、現時点では不明である。



©2014 IEEE

K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.

Figure 5-8. Atmospheric conditions when snowfall accreted on the insulator specimen.

Atmospheric conditions when snowfall accreted on the insulator specimen and its volume was increasing, which were recorded at the Niitsu observation site in the 2010–2012 winter. The number of ten-minutes corresponds to the count of a ten-minute during which 0.5 mm or more precipitation contributed to snow accretion. The total number is up to 1680 in this  $RH-T$  plane, and the most frequent points appear approximately  $0^{\circ}\text{C} - 1.0^{\circ}\text{C}$  nearby “ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ”.

図5-8 新津地点における着雪発達時の気温、湿度の分布（2010-2012年度）

がいしへの着雪が発達しているときの気温–湿度を抽出し、それらの発生頻度を平面にプロットした。データは2010年度から2012年度冬季の新津地点で観測されたものを用いた。グラフの1カウントが、10分値の気象データの「降水あり」に相当し、平面全体では、1680カウントのデータが存在する。気温  $0^{\circ}\text{C}$  から  $1.0^{\circ}\text{C}$  かつ“ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ”の近傍で多頻度の着雪が生じている。

### 5.2.3 風速から見た着雪様相ならびに漏れ抵抗特性

がいし着雪が発達し、がいしの笠間を橋絡するようになると、がいしの両端金具間に導電通路が形成されるため、漏れ抵抗値は低下する（その詳細は 5.4.3 項で述べる）。したがって、漏れ抵抗値を測定することにより、絶縁性能低下を検出することが可能となる。ここで、新津地点で観測された 3 種類の典型的な着雪事象から「強風を伴う降雪があるものの、着雪はそれほど発達しない気象条件」「強風を伴い、かつ、降雪が多く、着雪も比較的発達する気象条件」「弱風下で着雪が発達する気象条件」についてそれぞれの特徴を調べることにする。図 5-9 から図 5-11 は、これらの各事象における漏れ抵抗の経時変化、および、着雪形状、気象条件を示したものである。図中、降水量の多さは「○」の大ききで示している。

#### (1) 強風を伴う降雪があるものの、着雪はそれほど発達しない気象条件（図 5-9）

本事象においては、2010 年 1 月 13 日、7:00～8:00 に雪が降り始めた後、南西方向からの風速の上昇とともに、降雪の導電率は  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$  を超過した。雪が降り始めたのは 7:00～8:00 であり、その後、最大で  $16.2 \text{ m/s}$  の風速を記録し、強風下での湿型着雪が発達した。この時間帯の降雪の導電率は、一部、 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$  を超過した。しかし、その後は、断続的な降雪はあったものの、がいしへの着雪は発達しなかった。漏れ抵抗については、耐塩用懸垂がいしのみ、13:00～14:00 にかけて低下するのが確認されたが、高々  $100 \text{ M}\Omega$  程度までの低下に留まり、がいしの漏れ抵抗としては十分に高い値であった<sup>4</sup>。この漏れ抵抗の低下は、耐塩用懸垂がいしのヒダの内側に堆積した汚損物が融雪水に溶解し、導電性を有したためと考えられる。この事象において、耐塩用懸垂がいし、長幹がいしの笠間は、いずれも橋絡しなかった。それを裏付けるように、当該事象の発生した当日は、観測地点一帯の実送電線において、塩雪害と疑われる事故は 1 件も発生していない。08:40-14:10 における気象条件の観測値は、降水量  $6.0 \text{ mm}$ 、平均風速  $9.0 \text{ m/s}$ 、最大瞬間風速  $25.2 \text{ m/s}$  であった。

#### (2) 強風を伴い、かつ、降雪が多く、着雪も比較的発達する気象条件（図 5-10）

本事象は、新津地点に下越雪害 2005 年 12 月以来に到来した暴風雪の中で最も顕著なものである。2016 年 1 月 19 日は、未明のうちから断続的に降雪があったが、気温が少し高め、着雪と脱落を繰り返すことにより、着雪が発達しにくい状況が続いた。雨雪判別式を用いた推定でも、湿型の降雪の時間帯が長時間継続した。また、明け方から早朝の風速は  $5 \text{ m/s}$  程度であり、極端に大きくはないものの、高い降雪導電率が観測された。最も高い値としては、6:30 頃に約  $470 \mu\text{S}/\text{cm}$  を、南西寄りの風向で観測している。その後は、気温が少しずつ低下し、14:00 頃から本格的な着雪発達が始まった。

<sup>4</sup> 第 3 章、第 4 章でのフラッシュオーバー実験では、漏れ抵抗を数  $10 \text{ k}\Omega$  のオーダーまで低下させた着雪がいしに対して実験を行った。これに比べると、フィールド観測により測定された漏れ抵抗は十分に大きいと判断できる。

この時間帯でも、風向は南西寄りを保持した。14:00～18:30頃にかけて、がいし着雪は急速に発達した。その発達過程である15:00頃、長幹がいしの笠間が橋絡し、それとほぼ同時に、長幹がいしの漏れ抵抗が急激に低下し始めた。この事象において、笠間が橋絡したのは長幹がいしのみであり、耐塩用懸垂がいしの笠間は最後まで橋絡しなかった。漏れ抵抗については、長幹がいし、耐塩用懸垂がいしとも着雪により低下した。しかし、それらの最低値は長幹がいしで138 MΩ、耐塩用懸垂がいしで32 MΩまでの低下に留まり、がいしの漏れ抵抗としては十分に高い値であった。最終的には、長幹がいしの着雪は徐々に融けてなくなり、耐塩用懸垂がいしの着雪は翌20日の9:00頃一気に脱落した。これらに追従する形で、いずれのがいしの漏れ抵抗も上昇した。なお、この事象において、着雪が急激に発達した14:00～18:30の気象条件の観測値は、降水量9.5 mm、平均風速8.0 m/s、最大瞬間風速33.4 m/sであった。これらの統計値は、2008年度からの新津地点の観測データでは、降雪時としては最大規模であり、顕著な強風湿型着雪事象であったとすることができる。

### (3) 弱風下で着雪が発達する気象条件 (図 5-11)

本事象においては、2011年01月23日19:30頃からがいしへの着雪が始まった。長幹がいしは、23日21:00頃に笠間が橋絡し。漏れ抵抗値もこの時刻から24日04:00頃にかけて低下した。長幹がいしの漏れ抵抗値は、最も低い点でも565 MΩと強風下の事象と比べても非常に高く、絶縁の面で問題となる水準ではない。本事象においては、耐塩用懸垂がいしは最後まで笠間が橋絡しなかった。耐霧型懸垂がいしの漏れ抵抗値は、着雪の始まった23日19:30頃から、落雪した24日10:00頃にかけて緩やかに減少した。その後は、降雪がなかったが、着雪は両方のがいしの上に残ったため、漏れ抵抗値は、ともに600 MΩ程度の一定値で推移した。最終的には、24日10:00頃の着雪の落下とともに、長幹がいし、耐塩用懸垂がいしの漏れ抵抗値もほぼ同時に急上昇して元の値を回復した。この事象において、着雪が発達した23日20:40～24日09:20の気象条件の統計値は、降水量6.5 mm、平均風速2.3 m/sであった。降雪導電率も終始200 μS/cm以下の低い値であった。着雪形状も、笠の上に積もる形が画像から示されており、典型的な冠雪事象である。また、当該事象の発生した当日は、観測地点一帯の実送電線において、塩雪害と疑われる事故は1件も発生していない。

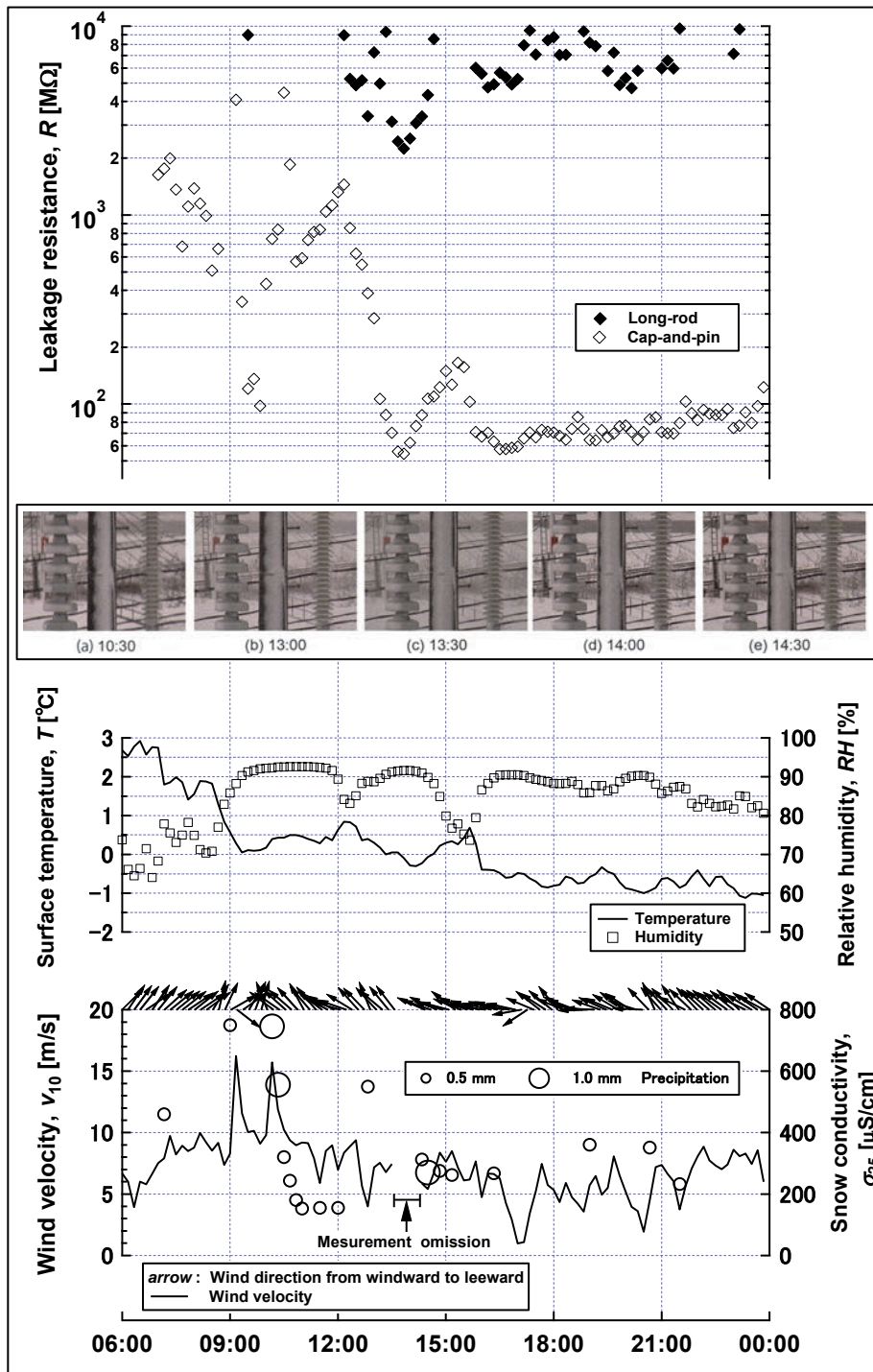
上記(1)から(3)に例示した個々の事象について、風速の面から強風下、弱風下の事象に分別すると、それぞれの条件でのがいし着雪事象の一般的な特徴として、以下のことが言える。

- ・ 新津地点（下越地域）においては、強風下では、弱風下に比べて導電率の高い降雪が観測される。
- ・ がいしの漏れ抵抗は、弱風下の着雪時に比べて、強風下の着雪時に低下しやすい。また、笠間が橋絡する場合は、橋絡しない場合に比べて漏れ抵抗が低下しやすい。



- ・ 着雪発達量は、雪の湿り具合に左右される。湿った降雪が長時間続くと、着雪は大きく発達する。

以上をまとめると、強風下で湿った降雪があり、笠間が橋絡するほどに発達した場合に、漏れ抵抗が低下して、塩雪害の発生が懸念される。その判断基準などについては、今後のデータ蓄積による詳細な考察が望まれる。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-9. The chronological changes of leakage resistances, aspects of snow accretion and ambient conditions related to high  $v_{10}$ , little precipitation, and little snow accretion observed at Niitsu site on January 13, 2010.

図5-9 強風を伴う降雪があるものの、着雪はそれほど発達しない気象条件での漏れ抵抗、着雪様相、気象条件の経時変化

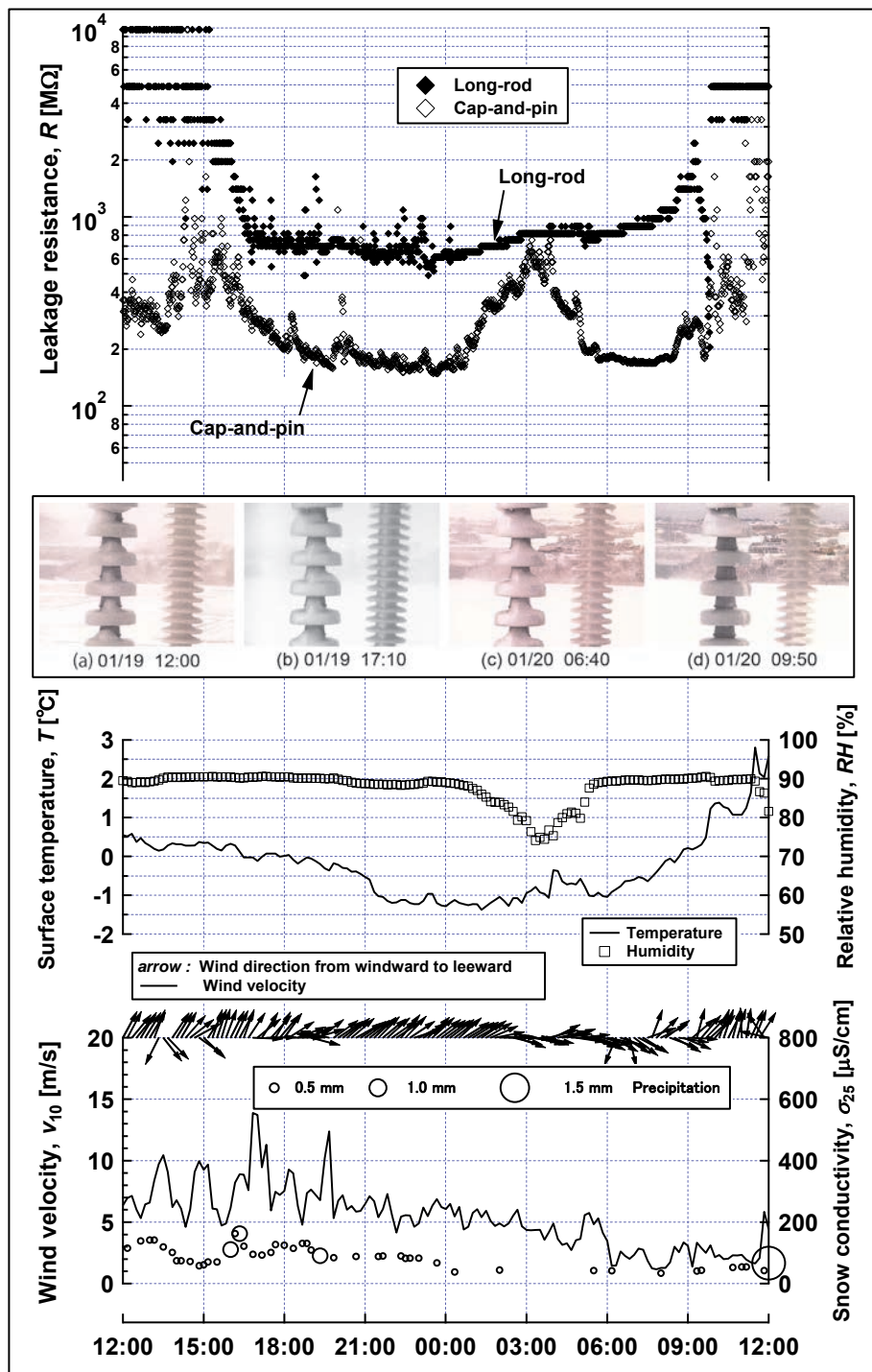
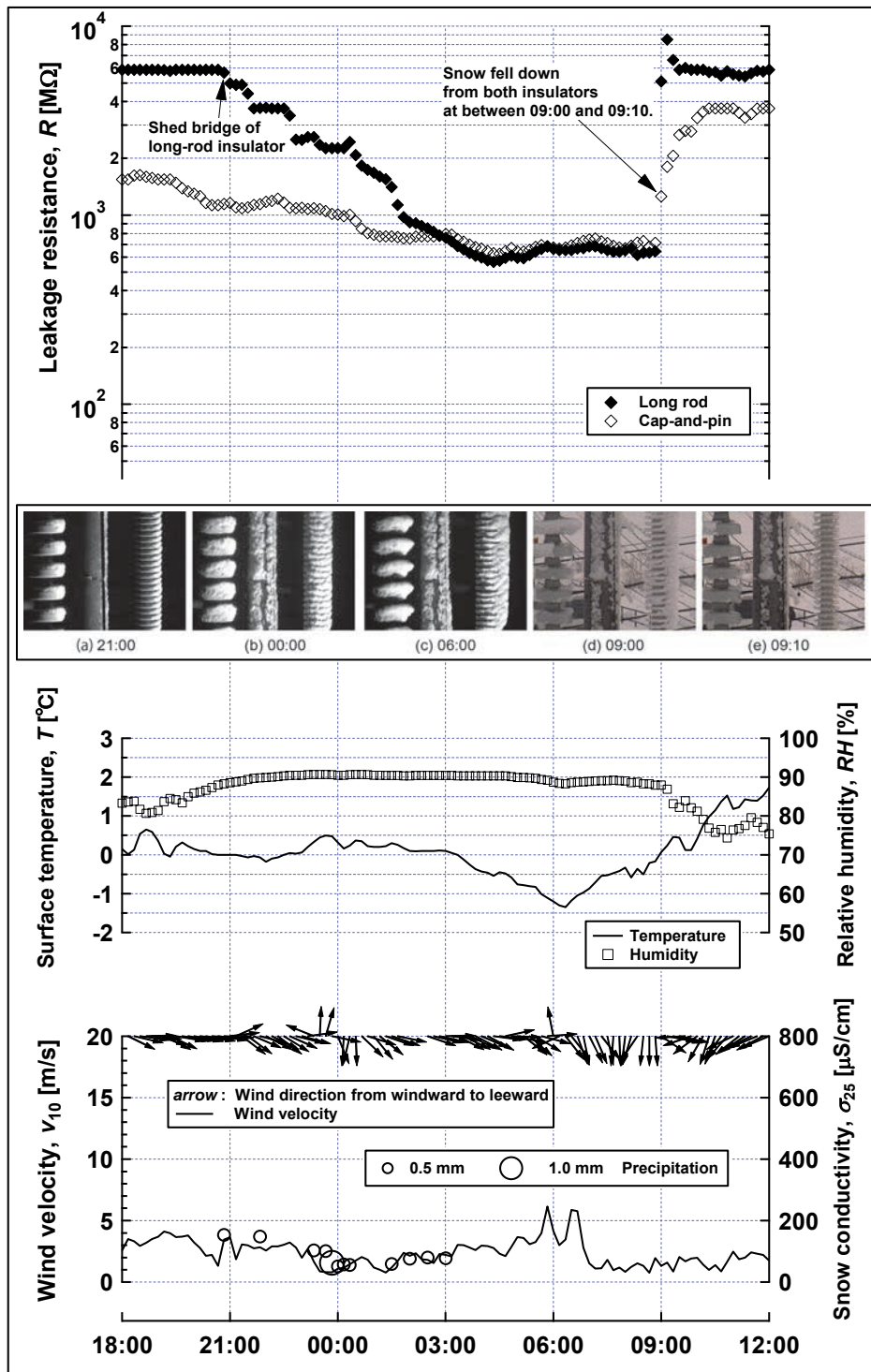


Figure 5-10. The chronological changes of leakage resistances, aspects of snow accretion and ambient conditions related to high  $v_{10}$ , much precipitation, and much snow accretion observed at Niitsu site on January 19 to 20, 2016.

図5-10 強風を伴い、かつ、降雪が多く、着雪も比較的発達する気象条件での漏れ抵抗、着雪様相、気象条件の経時変化



©2014 IEEE

K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.

Figure 5-11. The chronological changes of leakage resistances, aspects of snow accretion and ambient conditions related to low  $v_{10}$  observed at Niitsu site on January 23 to 24, 2011.

図5-11 弱風下で着雪が発達する気象条件での漏れ抵抗、着雪様相、気象条件の経時変化

### 5.3 圧密着雪発生の危険度を評価するための指標

設備への着雪量を表す指標には、風速、気温、降水量から求められる着雪ポテンシャルが活用できることが示されてきた[5]。本節では、これを塩雪害時に見られた圧密着雪の危険度を推定する手法として、がいし着雪に適用する。

#### 5.3.1 がいしへの着雪ポテンシャルの定義

第二段階として、ある気象条件の下でがいしに供給されうる雪の量を数値化するため、着雪ポテンシャルによる評価を行った。ある期間  $a$ [h]で積分された着雪ポテンシャル  $P_{\text{snow}}$  [kg/m<sup>2</sup>]は次式で与えられる。

$$P_{\text{snow}}(t) = \rho_w \int_{t-a}^t p \frac{v}{w} E_T dt \quad (5-2)$$

ここで、 $t$ は時間 [h]であり、 $\rho_w$ は水の密度(1000 kg/m<sup>3</sup>)、 $p$ は1時間降水量 [m/h]、 $v$ は水平方向風速 [m/s]、 $w$ は雪の落下速度であり、ここでは1 m/sと設定する。 $E_T$ は気温  $T$  [°C]のみに依存した着雪効率であり、次式で与えられる。

$$E_T(t) = \begin{cases} 1 & -0.5^\circ\text{C} \leq T \leq 1.5^\circ\text{C} \\ 0 & T < -0.5^\circ\text{C}, T > 1.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5-3)$$

すなわち、 $P_{\text{snow}}$ の次元は[M<sup>1</sup>L<sup>-2</sup>]であり、水平方向の降雪の質量フラックス（単位時間・単位面積を通過する降雪の質量）に無次元量の着雪効率を乗じたものについて、必要な期間だけ時間積分して求まる量である。言わば、単位面積に切り取った板を壁のように垂直に立てたとき、風の乱れと端の乱れの影響を受けない理想的な条件での板への着雪の質量である。当然、 $P_{\text{snow}}$ が大きいほど、がいしへの着雪量が多くなりやすく、塩雪害発生の危険度は大きいと見てよい。

#### 5.3.2 着雪ポテンシャルを用いた評価事例

図 5-12 は、実際に現地新潟で発生した4つの着雪事象について、(5-2)式ならびに観測データを用いて算出した着雪ポテンシャルである。それぞれ、以下のような特徴を持つ事象である。(1)~(3)については、いずれも、「5.2.3 風速から見た着雪様相ならびに漏れ抵抗特性」で述べた(1)~(3)と同じ着雪事象である。(4)は新潟下越雪害が発生した時間ごろ最大値であるが、これについては観測値がないためアメダス観測点「新津」のデータを引用して求めた。

- (1) 降雪量が比較的少なく強風を伴う着雪の気象条件（2010年1月13日）
- (2) 降雪量が比較的多く強風を伴う着雪の気象条件（2016年1月19日）※2005年12月以来の暴風雪
- (3) 弱風下における典型的な冠雪の気象条件（2011年1月23-24日）
- (4) 新潟下越雪害（2005年12月22日）

図 5-12 から、「(3)弱風下における典型的な冠雪事象」における着雪ポテンシャルは、風速が低いために他の3事象に比べて小さくなっていることが分かった。また、「(1)降雪量が比較的少なく強風を伴う着雪事象」における着雪ポテンシャルは、風速は比較的大きいものの降雪量が小さいために「(4)新潟下越雪害」と「(2)降雪量が比較的多く強風を伴う着雪事象」よりも小さくなっていることが分かった。反対に、「(4)新潟下越雪害」においては、主風向の西南西方向（海側）の着雪ポテンシャルが、他の方角、あるいは他の三つの着雪事象よりも明らかに大きくなっていたことが確かめられた。このことから、2005年雪害時の暴風雪が、着雪ポテンシャルの面から見て、最も厳しい気象条件であったことを示された。

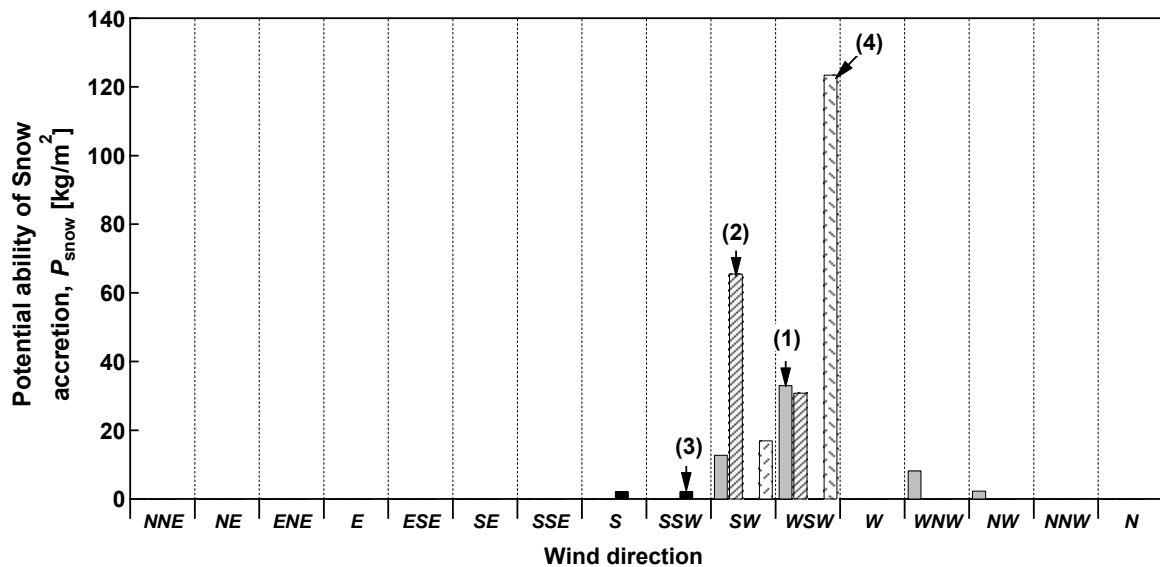


Figure 5-12. Examples of evaluation on four snow events using  $P_{snow}$ .

These events were those observed at Niitsu site and described in Clause 5.2.3 and the snowstorm at Niigata Kaetsu area on December 22, 2005 as shown below.

- (1) The case of high  $v_{10}$ , little precipitation, and little snow accretion observed at Niitsu site on January 13, 2010.
- (2) The case of high  $v_{10}$ , much precipitation, and much snow accretion observed at Niitsu site on January 19, 2016.
- (3) The case of low  $v_{10}$  observed at Niitsu site on January 23 to 24, 2011.
- (4) The snowstorm at Niigata Kaetsu area on December 22, 2005.

The case (2) was the  $P_{snow}$  from south-southwest was much larger than the other directions because south-southwest was the main wind direction at the disaster. Moreover, it can be concluded that the snowstorm in 2005 was an unexpectedly severe event because of much higher  $P_{snow}$  than the others.

図5-12 新潟下越地域におけるがいし着雪の4事象について算出した風向別着雪ポテンシャル

- (1) 降雪が比較的少なく強風を伴う着雪事例（観測日 2010年1月13日）
- (2) 降雪が比較的多く強風を伴う着雪事例（観測日 2016年1月19日）
- (3) 弱風下における典型的な冠雪事例（観測日 2011年1月23-24日）
- (4) 新潟下越雪害（2005年12月22日）

弱風下での典型的な冠雪事例では、着雪ポテンシャルが他の3事例に比べて極めて小さくなった。2005年の新潟下越雪害においては、主風向の西南西方向（海側）の着雪ポテンシャルが、他の方角、あるいは他の三つの着雪事象よりも格段に大きくなった。このときの暴風雪が、着雪ポテンシャルの面からも厳しい気象条件であったことが示された。

## 5.4 室内着雪実験による着雪特性

前節のような自然環境下においては、周囲の気象条件は時々刻々と変化しており、定量的な解析を行うことを困難にする。また、強風下での自然着雪事象は、弱風下ほど頻繁には観測できない。このようなフィールド観測の不足データを補完し、かつ、コントロールされた環境での数値的なデータを得ることを目的として、風洞設備を利用した室内着雪実験を行った。

### 5.4.1 室内着雪実験の概要

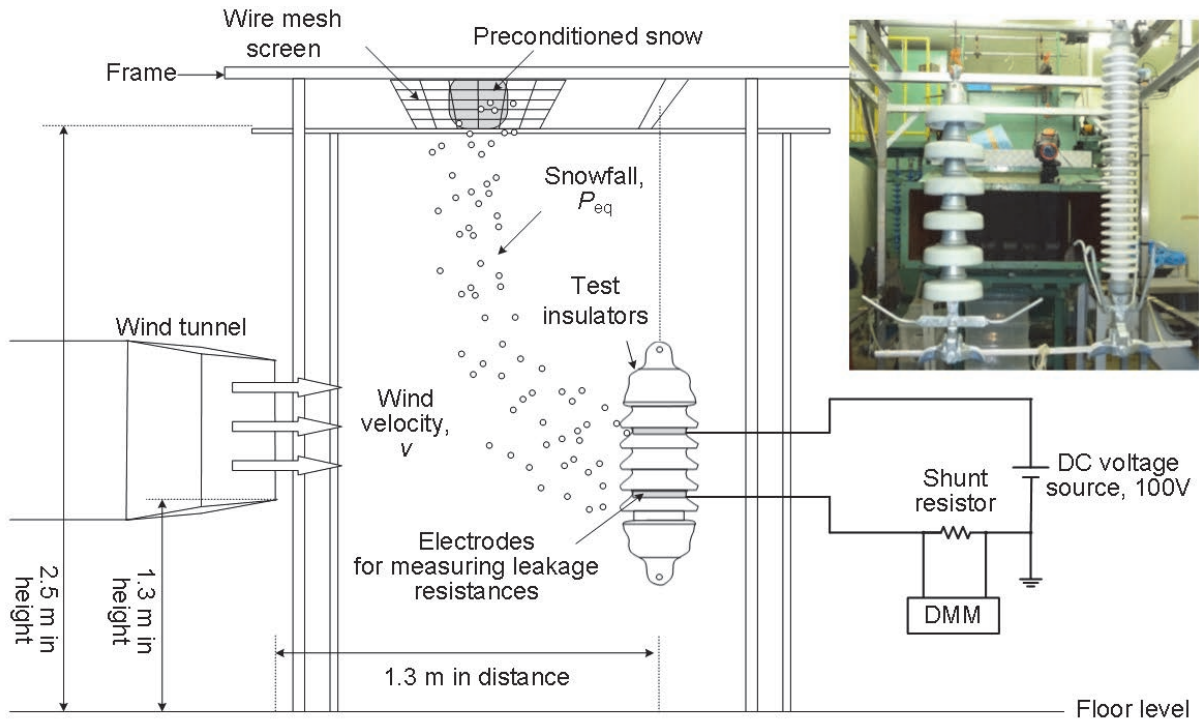
室内着雪実験は、株式会社ジェイ・パワーシステムズ（現・住友電気工業株式会社）が保有する室内着雪実験場<sup>5</sup>の風洞設備を用いて行った。当該の実験場は、降雪が多い新潟県南魚沼郡湯沢町に位置していることから、冬季は、自然の雪を用いた各種室内着雪実験が可能である。本研究においては、実験に先立ち予め試験場の屋外の積雪表面の新雪を採取し、これを、ふたの付いたプラスチック製の小箱に小分けして封入し、実験に供すまで冷凍庫で保管した。

室内着雪実験の概要を図 5-13 に示す。風洞設備は開放型であり、吹き出し口寸法が横 1500 mm、縦 500 mm である。吹き出し口における風速が、最大約 20 m/s までの出力が可能である。実験では、この風洞口に正対するようがいしを吊り下げる架台を設置した。供試がいしには、長幹がいし (LC8005 および LC8024)、標準懸垂がいし (SU-165BN)、耐塩用懸垂がいし (SU-165BF) を用いた。吊り方は、いずれの供試がいしも懸垂吊りとした。

がいしへの着雪方法は、吹き出し口と供試がいしの間を結んだ直線の間接点の上方に設けたふるいにより、雪片を自然落下させ、所要の風速でがいしに供給することで連続的な着雪を行った。風速  $v$  [m/s] は、3.0~12.5 m/s の範囲で変化させるとともに、降水強度  $p$  [mm/h] を測定した。毎回の降雪量を規定するために、 $p$  と  $v$  の積で表される降雪フラックスを調整することで、これが常に 350 となるよう雪の量を調節した。室内の気温は、着雪がしやすいよう  $1 \pm 0.5$  °C に制御した。降雪前の雪の含水率 (LWC) は、約 7% 程度に調整したが、ばらつきが大きく、5% から 9% の範囲で実験を行った。また、着雪が笠間を橋絡したことを検出するために、着雪中の供試がいしの漏れ抵抗を、フィールド観測と同様に測定した。以上の室内着雪実験の実験条件をまとめると、表 5-3 のようになる。

<sup>5</sup> 株式会社ジェイ・パワーシステムズウェブサイト、<http://www.jpowers.co.jp/product/pdf/kakuA.pdf>  
(閲覧日：2017年6月27日)





©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-13. Experimental setup for the laboratory tests.

Fresh natural snow was collected from the ground surrounding the laboratory and stored in a freezer until before the tests. Snowflakes were fallen from over the outlet of the wind tunnel and were borne on controlled wind velocity  $v$  [m/s]. Test conditions are summarized in Table 5-3.  $v$  was varied from 3.0 m/s to 12.5 m/s, and the precipitation intensity,  $p$  [mm/h], was measured by a custom made cylinder set nearby test insulators. Where, the snow flux expressed by the product of  $p$  and  $v$  per unit time was maintained as a constant value of 350 to ensure repeatability of the tests. The ambient temperature was kept  $+1^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . The liquid water content (LWC) of snow was adjusted to almost 7% by preconditioning the snow; however, it was scattered from 5% to 9%. Leakage resistance was recorded continuously to detect shed bridging as same in the field observation. Long-rod, anti-fog cap-and-pin, and standard cap-and-pin insulators in vertical position were used as insulator specimens.

### 図5-13 室内着雪実験の概要

実験に先立ち予め試験場の屋外の積雪表面の新雪を採取し、これを、ふたの付いたプラスチック製の小箱に小分けして封入し、実験に供すまで冷凍庫で保管した。がいしへの着雪方法は、吹き出し口と供試がいしの間を結んだ直線の間接点の上方に設けたふるいにより、雪片を自然落下させ、所要の風速でがいしに供給することで連続的な着雪を行った。風速  $v$  [m/s]は、3.0~12.5 m/s の範囲で変化させるとともに、降水強度  $p$  [mm/h] を測定した。毎回の降雪量を規定するために、 $p$  と  $v$  の積で表される降雪フラックスを調整することで、これが常に 350 となるよう雪の量を調節した。室内の気温は、着雪がしやすいよう  $1 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  に制御した。降雪前の雪の含水率は、約 7%程度に調整したが、ばらつきが大きく、5%から 9%の範囲で実験を行った。供試がいしには、長幹がいし、耐塩用懸垂がいし、標準懸垂がいしを用いた。吊り方は、いずれの供試がいしも懸垂吊りとした。

Table 5-3. Conditions for laboratory tests of snow accretion.

表5-3 室内着雪実験における実験条件

Items	Values
Snow volume density before the tests	Almost 0.2 g/cm <sup>3</sup>
Liquid water content (LWC) before the tests	Almost 7% (5% to 9%)
Ambient temperature, $T$	+1 ± 0.5°C
Wind velocity, $v$	3.0 m/s to 12.5 m/s
Snow flux, product of precipitation intensity $p$ [mm/h] and $v$ [m/s], which corresponds to	350 kg/m <sup>2</sup> with 12% of standard deviation
Potential ability of Snow accretion $P_{\text{snow}}$	

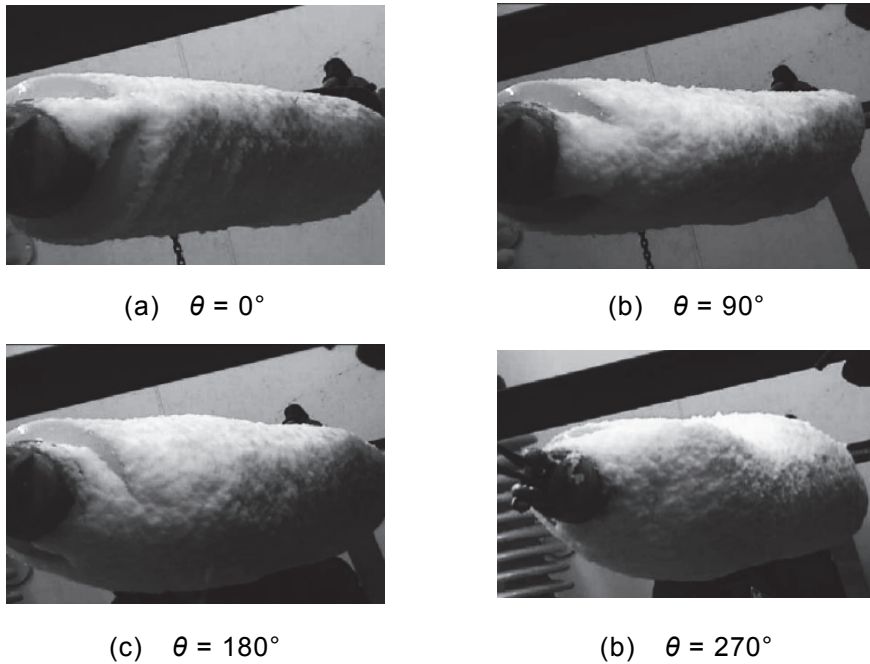
©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

#### 5.4.2 下越雪害で見られた筒状着雪の再現

第1章で述べたように、下越雪害では、一部の長幹がいしに、周囲一周に亘って筒状の着雪が観測された[9]。その形成過程について。このような着雪は、塩雪害を特徴付けるものの一つであると考え、その形成過程を調べるため、室内着雪実験での筒状着雪の再現を試みた。

風速を 5.0 m/s とし、耐張吊りの長幹がいしに対して形成された筒状着雪の状況をその途中の着雪過程と共に、図 5-14 に示す。写真に見られる状況は、Sakamoto の報告にある、電線に対して行った着雪実験[10]での結果に酷似している。[10]に記録されている電線への筒状着雪は、湿雪によって図 5-15 のような過程で形成されるとされており、がいしに筒状着雪が形成される過程と同様であることを示している。すなわち、図 5-15 では、始めに雪ががいしの風上側の表面に付着する。続いて、着雪は、自分の重さと風圧の影響を受けて下方へ滑る。その結果裸になったがいしの風上面には、また後から新たな着雪面が作られる。このような過程が複数回繰り返され、ついには、筒状の着雪体となる。しかし一方で、この屋内着雪実験では、懸垂吊りのがいしに筒状着雪を形成することができなかった。これは、耐張吊りでは着雪体に重力が作用することによる回り込みが発生しやすいのに対し、懸垂吊りでは回り込み方向に重力が作用しないためと考えられる。



©2014 IEEE

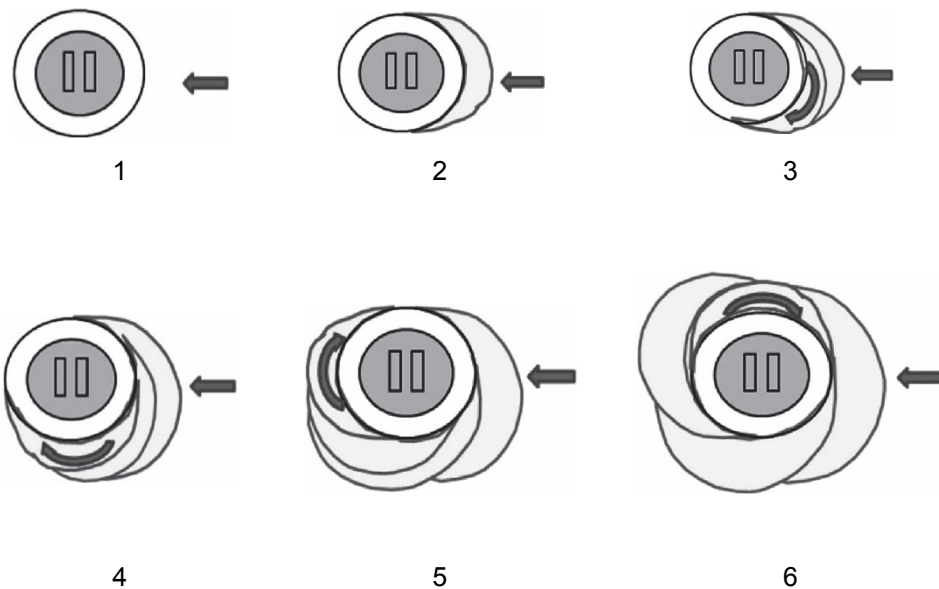
*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-14. Example photographs of cylindrical snow accretion around the long-rod insulator in horizontal position.

$\theta$  denotes the approximate rotation angle along the insulator between the first accreted snow and the current windward direction. Gravity contribute to snow sliding along the insulator surface. Wet snow accretion to overhead wires also looks like just like these photos to be cylindrical aspect of such wires. On the other hand, in case of the same long-rod insulator in vertical arrangement, such like cylindrical snow accretion was never observed besides the experiments were conducted in the same way as the horizontal position.

図5-14 耐張吊りの長幹がいしに対して形成された筒状着雪の状況の一例

$\theta$  は、がいし着雪の滑りによる初期の着雪方向からの回転角である。着雪に重力が作用することで、がいし表面を  $\theta$  に沿って滑りながら筒状着雪に成長する様子が記録された。これは、電線着雪への筒状着雪の発達過程と同じである。一方で、本研究で実施した範囲では、同様の実験を懸垂吊りの長幹がいしに対して行っても筒状着雪は形成されなかった。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-15. Schematic drawing of the snow accreting process rotating around the axis of horizontal long-rod insulator to achieve the cylindrical snow accretion.

The rotation is induced by the wind pressure and the weight of the accreted snow as shown by the elapse of time 1 to 6.

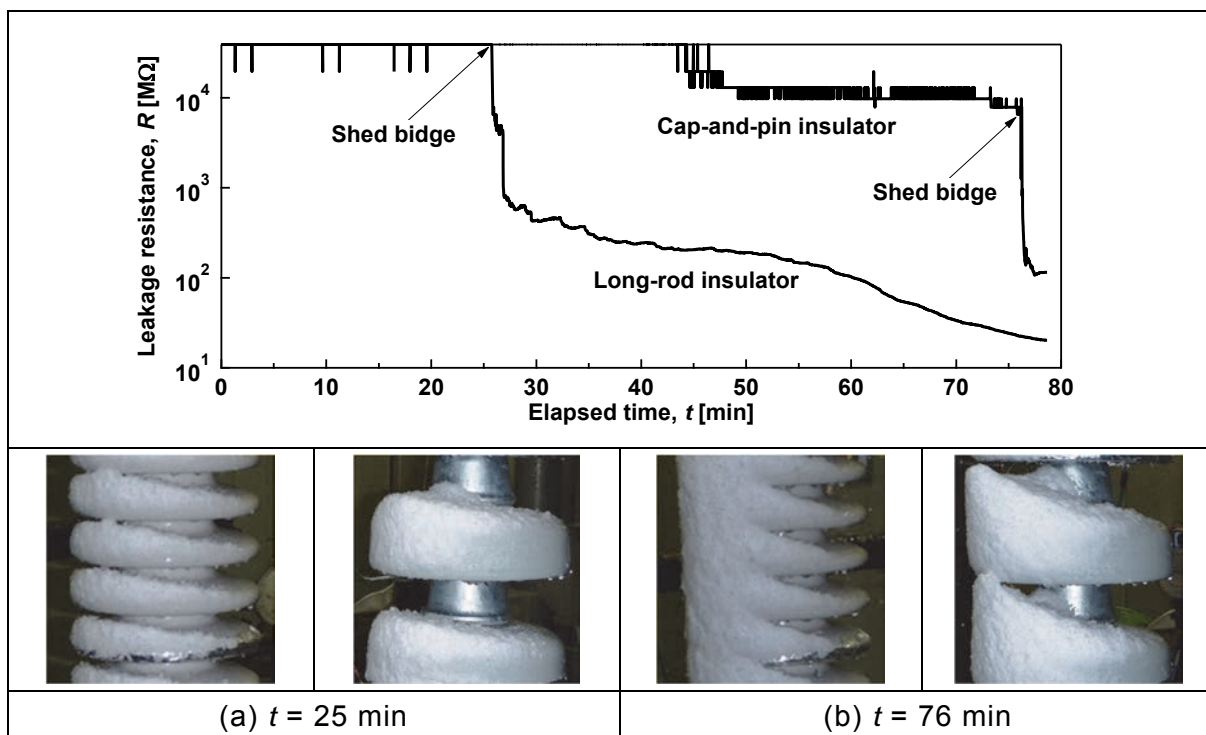
図5-15 着雪が耐張吊りの長幹がいしの周りを回転して筒状着雪が生じる過程

1 から 6 のように、湿った着雪が風圧と自重の影響でがいしの表面に沿った回転力を受ける。

### 5.4.3 磁器がいしの着雪特性に関する数値的評価

フィールド観測において、着雪による笠間の橋絡と漏れ抵抗値の変化と大きく関係することを示した。この観測事実に関して、室内着雪実験での再現を行い、その関係性が正しいことを確かめておく必要がある。そこで、長幹がいしと耐塩用懸垂がいしを、ともに懸垂吊りで設置し、風速 5.0 m/s のフラックスに曝しながら、漏れ抵抗の変化を測定した。笠間橋絡発生前後の漏れ抵抗の推移を、図 5-16 に示す。各がいしに笠間の橋絡が発生した時間は、長幹がいしで 25 分、懸垂がいしで 76 分である。図 5-16 から、いずれのがいしの漏れ抵抗値も、がいしの笠間が着雪で橋絡すると共に急激に減少したことが分かり、フィールド観測での結果を裏付けるものである。なお、図中には、 $t=25$  分、76 分において撮影された各がいしの橋絡時の着雪様相も併せて示したが、これらの着雪形状は、フィールド観測による着雪事象によく似ていることが分かる。

次に、図 5-17 は、降雪のフラックスを一定に保って、風速を変え、供試がいしの笠間が橋絡するまで着雪実験を続けたときの結果であり、笠間の橋絡が発生するまでの着雪ポテンシャルを、風速に対して整理したものである。つまり、橋絡が発生するまでの着雪ポテンシャルが大きいほど、大きな降雪フラックスが必要であるため、笠間が橋絡しにくいことを示している。長幹がいしの笠間橋絡に要する着雪ポテンシャルは、耐塩用懸垂がいしの 1/9 程度、標準懸垂がいしの 1/25 程度となった。この結果は、懸垂がいしはいずれも、長幹がいしに比べて優れた耐着雪特性を有することを示しており、これは主に、懸垂がいしの笠間の広さと笠直径の大きさによる影響と考えられる。また、同時に、図 5-17 は、風速が大きいほど、がいしごとに比較したときの橋絡までの着雪ポテンシャルも大きくなる傾向も示している。これは、風速 が大きいほど、降雪粒子が衝突する際にはじかれて付着率が低下する[11]ことに起因している。このことは、風速が大きい気象条件では着雪が発達しにくいフィールドでの結果とも矛盾しない。なお、夫々のがいしに対して、回帰分析を行うと、およそ風速の累乗関数となり、そのべき数は約 3 である[11]。



©2014 IEEE

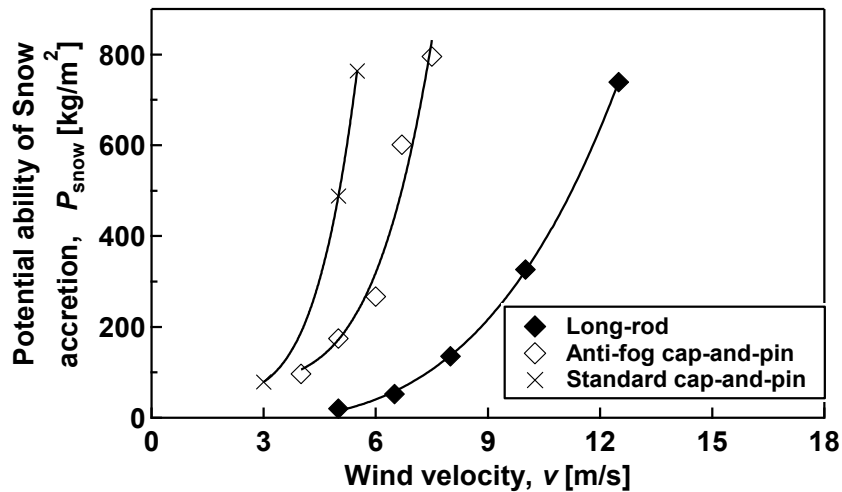
*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.*

Figure 5-16. An example of transitions of leakage resistances before and after shed bridge in laboratory tests.

In this case, the test insulators were the long-rod insulator and the anti-fog cap-and-pin insulator, both mounted vertically.  $v$  was 5.0 m/s. The sheds were bridged when the elapsed time,  $t$  was 25 min for the long-rod insulator and 76 min for the anti-fog cap-and-pin insulator. The leakage resistances showed rapid decreases due to shed-bridge as same in the field observations. Photographs of the snow accretion conditions for  $t = 25$  min and 76 min looks like the results of field observations, which well simulate the situations under natural conditions.

#### 図5-16 着雪による笠間橋絡発生前後の漏れ抵抗の推移の一例

長幹がいしと耐塩用懸垂がいしを、ともに懸垂吊りで設置し、風速 5.0 m/s のフラックスに曝しながら、漏れ抵抗の変化を測定した。各がいしに笠間の橋絡が発生した時間は、長幹がいしで 25 分、懸垂がいしで 76 分である。いずれのがいしの漏れ抵抗値も、がいしの笠間が着雪で橋絡すると共に急激に減少したことが分かり、フィールド観測での結果を裏付けるものである。図中、 $t = 25$  分、76 分において撮影された各がいしの橋絡時の着雪様相は、フィールド観測による着雪様相によく似ていることが分かる。



©2014 IEEE

K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part I, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2549 – 2558, December 2014.

Figure 5-17.  $P_{\text{snow}}$  until shed bridge by the laboratory tests as a function of  $v$ . Cap and pin insulators require larger  $P_{\text{snow}}$  until shed bridge than long rod.

In order to compare the snow accretion performance of various insulators,  $P_{\text{snow}}$  until the shed bridging was measured in a same manner as that used in the field observations.  $P_{\text{snow}}$  for the long-rod insulator is approximately 1/9 times that for the anti-fog cap-and-pin insulator and approximately 1/25 times that for the standard disc cap-and-pin insulator. This result indicates that the cap-and-pin insulator exhibits superior performance when compared with the long-rod insulator. In addition,  $P_{\text{snow}}$  for all the specimen insulators increases with the wind velocity. This is because the coefficient of collection of snow particles,  $E_T$  in equation (5-2) decreases with the increase in  $v$  [7]. These results agree with the conditions observed in nature, which were supposed to be evidence that  $P_{\text{snow}}$  can be a feasible index for the evaluation or/and prediction of snow accretion on insulators.

#### 図5-17 着雪による笠間橋絡発生前後の漏れ抵抗の推移の一例

各種がいしの着雪特性を比較するために、フィールド観測で評価に用いた  $P_{\text{snow}}$  について、室内実験でがいしの笠間が橋絡するまでに要する値を求めた。風速  $v$  を変えて測定を行った結果、いずれの風速でも、長幹がいしの  $P_{\text{snow}}$  は耐塩用懸垂がいしの  $P_{\text{snow}}$  のおよそ 1/9 倍であり、標準懸垂がいしの  $P_{\text{snow}}$  のおよそ 1/25 倍であった。このことから、いずれの懸垂がいしも、長幹がいしに比べて優れた耐着雪特性を示すことが確認された。また、いずれのがいしにおいても、橋絡までの  $P_{\text{snow}}$  が  $v$  と共に大きくなったが、これは、 $v$  が大きくなると着雪効率 ((5-2)式における  $E_T$ ) が悪化するためである [11]。これらの実験結果は、総じてフィールド観測の結果と同様の傾向であり、 $P_{\text{snow}}$  はがいし着雪の危険度を見積もる有用なパラメータであることが示唆された。



## 5.5 ポリマーがいしの雪害環境への適用性

本項では、再びフィールド観測での着雪特性検討に立ち戻り、2014年度（2014年12月～2015年4月）、ならびに2015年度（2015年12月～2016年4月）に釧路地点で観測された結果を用いて、強風湿型着雪と弱風乾型着雪の二種類の事象について解析する。それぞれの事象から明らかとなった特徴を概括し、この二つの着雪形態を気象条件から分別する。さらに、これら2種類の着雪形態で、磁器がいしとポリマーがいしの着雪発達を比較してポリマーがいしの雪害環境への適用性検討を試みる。

### (1) 強風湿型着雪事象

2016年12月16日から18日にかけて、がいしへの顕著な強風湿型着雪が観測された。強風下では、弱風下に比べて、がいしへの着雪が発達しにくくなる。このため、強風下では、笠間隔が小さい長幹がいしさえも、笠間が着雪で覆われるほどの事象はそれほど頻繁には見られない[12]。ところが、当該の事象では、16日18:00からの24時間で平均8.4 m/sの強風下で、累計43 mmに達する降水（雪）が観測され、これによって、懸垂吊り長幹がいしで5 kg程度に及ぶ着雪が観測された。この値は、釧路地点における着雪量としては、観測開始以降2年間の中で最大のものであり、当該の着雪事象は、がいし着雪量の観点から顕著な着雪事象と言えよう。降雪時の気象条件が、着雪に適した状態で推移したことが、この著しい着雪発達に寄与したものと考えられる。当該事象における気象条件、降雪導電率、および長幹がいしへの着雪に伴うロードセルの荷重の経時変化を図5-18にまとめて示す。

ネットワークカメラによる各段階の強風湿型着雪様相の概要を図5-19に示す。がいしごとの着雪状況の時系列画像を比較した結果、以下のことが確認された。

- ・ 初期着雪段階において、着雪の発達が始まった時刻は、磁器がいし、ポリマーのいずれも同じである。また、その後の着雪発達段階においても、各時刻における雪の付着（着雪発達）の有無が、磁器がいし、ポリマーがいしでほとんど違いが見られない。このことから、着雪初期および着雪発達に関して、がいし表面の材質による違いは実用上小さいと言える（図5-19(a)）。
- ・ 着雪脱落過程では、脱落のしやすさががいしごとの違いが見られる。このことにより、見た目の着雪量が最大となる時刻は、がいしにより異なる（図5-19(b)、(c)）。
- ・ 磁器がいしは、着雪ががいし表面を滑る傾向があり、着雪発達中にもその一部が落雪しやすい。特に、耐塩用懸垂がいし、標準懸垂がいしの着雪は、長幹がいしよりも頻繁に滑落しやすく、大きな発達を免れる傾向がある（図5-19(c)、(d)）。
- ・ ポリマーがいしは、笠のエッジが磁器がいしより鋭く、笠の傾きがほとんど水平に近いため、着雪は磁器がいしよりも長く残りやすい（図5-19(d)）。
- ・ 耐張吊りでは、懸垂吊りより着雪が滑りやすく、着雪発達中も、着雪が断片的な脱落を繰り返しやすい。また、ロードセルにより得られた長幹がいしの懸垂吊りと耐

張吊りの着雪量を比較すると、その最大値は、耐張吊りのほうが小さく、着雪質量も大きくなりにくい。このことは、強風湿型着雪が、耐張吊りで着雪量が大きくなる弱風乾型着雪（冠雪[13]）とは異なる特性を持つことを示している。

- ・ 磁器がいし、ポリマーがいしともに、笠間隔と笠直径がどちらも大きいがいしほど、笠間の橋絡までに長時間を要することが確認された。

このように、笠間の橋絡に着目すると、これまで磁器がいしの室内着雪実験において確かめられていたことと同じことが、自然環境下の磁器がいし、ポリマーがいしに対しても適用できる。また、近年適用が拡大しているポリマーがいしは、設計時の制約が磁器がいしよりも比較的少ないことから、笠間隔と笠直径を大きくすることにより、笠間の橋絡を抑制できることが見出され、その形状次第では、各種の冠着冰雪環境下において、懸垂がいしと同等か、それ以上の性能を期待できること考えられる。

## (2) 弱風乾型着雪事象

2016年1月14日の未明から、氷点下での降雪があり、2:30頃～10:30頃、磁器がいし、ポリマーがいし共に、弱風乾型着雪（冠雪）が認められた。当該事象の期間中においては、釧路気象台からの大雪警報、着雪注意報はいずれも発表されていない。本事象における気象条件の経時変化を図5-20に示す。2:30における気温は、氷点よりずっと低い-7.6℃であり、風速は1.1 m/sであった。その後、気温は、冠雪がなくなるまで一度も氷点を越えることなく推移した。その後、降雪イベントの終わり頃に風速6.8 m/sを記録したものの、大半の冠雪は、弱風～中風に曝された状態で発達した。

がいしから冠雪がなくなるまでのネットワークカメラによる弱風乾型着雪様相を図5-21に示す。その特徴は、次のように概括される。

- ・ 着雪が始まった時刻について、がいし形状や材質による顕著な違いは見られない（図5-21(a)）。
- ・ いずれのがいしでも、冠雪状の着雪が風上側の笠上に発達した。その形状は、前項に示したとおりであり、がいし形状、材質による違いは見出されない。
- ・ 長幹がいしの耐張吊りと懸垂吊りでは笠間が橋絡した（図5-21(b)）。長幹がいし以外は、笠間橋絡しなかったが、これは長幹がいしの笠間隔が最も小さいためである。
- ・ 降雪が止んで湿度が急に低下し始めると、いずれのがいしでも、冠雪が昇華して冠雪が次第に少なくなり（図5-21(c)）、着雪のほとんどが消失した（図5-21(d)）。

## (3) 「圧密着雪」と「冠雪」

図5-22は、上記の強風湿型着雪と弱風乾型着雪事象の発生時間帯における降水(雪)に対する気温、相対湿度の分布である。実線は、道東・オホーツク海沿岸域における“ $RH_{cri(snow)}$ ”と“ $RH_{cri(rain)}$ ” [1]である。

強風湿型着雪発達中の気温、湿度は、“ $RH_{cri(snow)}$ ”と“ $RH_{cri(rain)}$ ”で囲まれた領域の中央部のやや“ $RH_{cri(snow)}$ ”側に集中して分布していることが分かる。気温の平均値は0.2℃で

ある。文献[1]では、40年間の気象官署のデータをもとに、二つの判別式ではさまれる領域は、雨、みぞれ、あるいは雪のどの粒子も状況に応じて降る「混合域」であるとされている。当該の事象の分布は、強風・湿型着雪時において着雪が生じやすいとされる気温、相対湿度の分布と概ね一致する。

一方で、弱風乾型着雪発達中の気温、湿度は、 $RH_{\text{cri(snow)}}$ から左（低温）側に大きく離れた分布であり、強風湿型により圧密着雪を生じる条件とは異なる。このことから、この事象における降雪は、完全な乾型であったことが分かる。このように、がいしへの強風湿型着雪と弱風乾型着雪は、異なる気象条件で発生するが、これらは、これまで慣例的に「圧密着雪」「冠雪」と呼ばれてきたものである。これまでの「圧密着雪」は主に強風湿型着雪のことであり、同様に「冠雪」は弱風乾型着雪に対応するものである。これらは、気温－相対湿度の分布から概ね分別することができる。

また、注目すべきは、強風湿型と弱風乾型いずれの着雪形態でも、着雪開始と発達に対して、がいし材質による違いは、実用レベルではほとんど見られないことである。ポリマーがいしの表面には撥水性が備わっているため、磁器がいしより優れた耐着雪特性を示すのではないかと感覚的には思われることもあるが、観測では撥水性の効果はそのほかの現象に隠れて見られなかった。

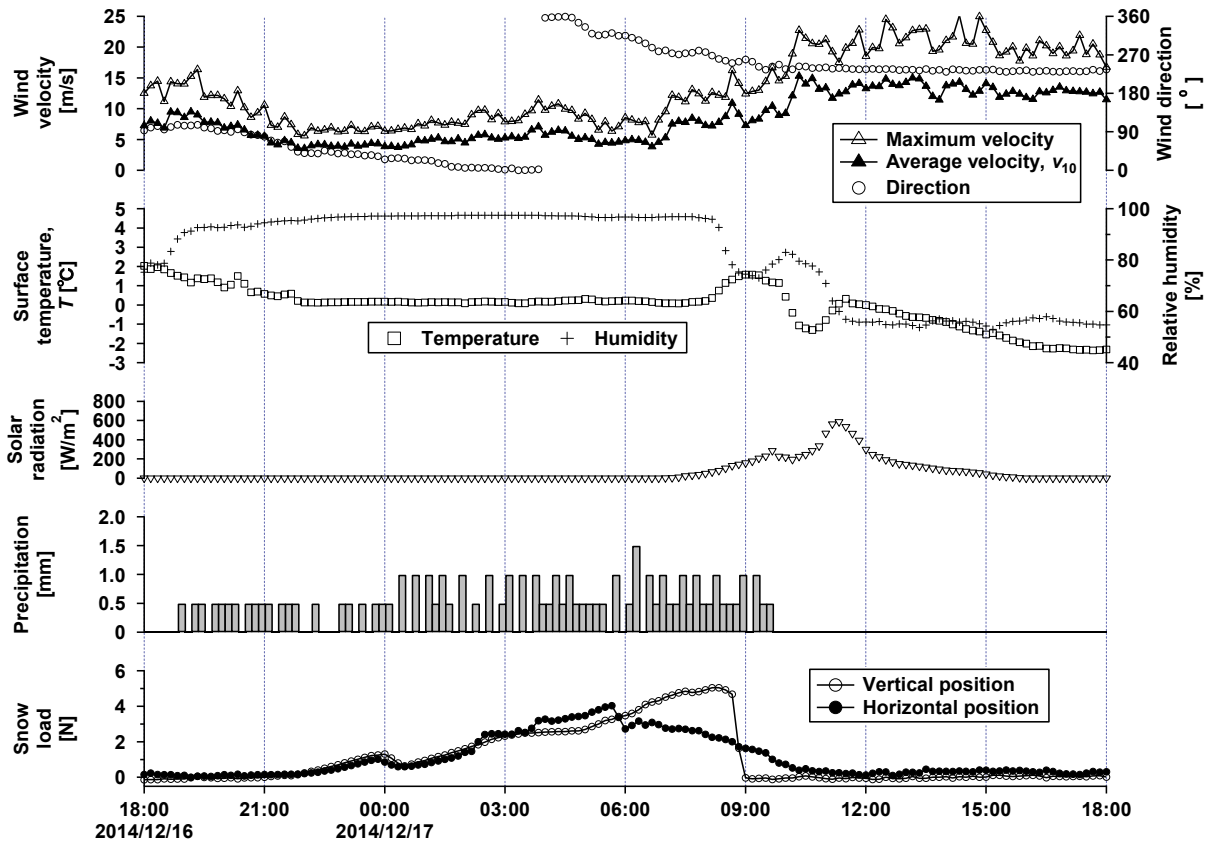
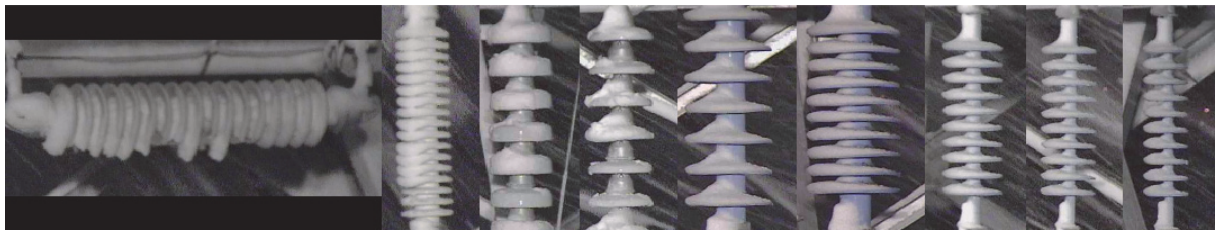
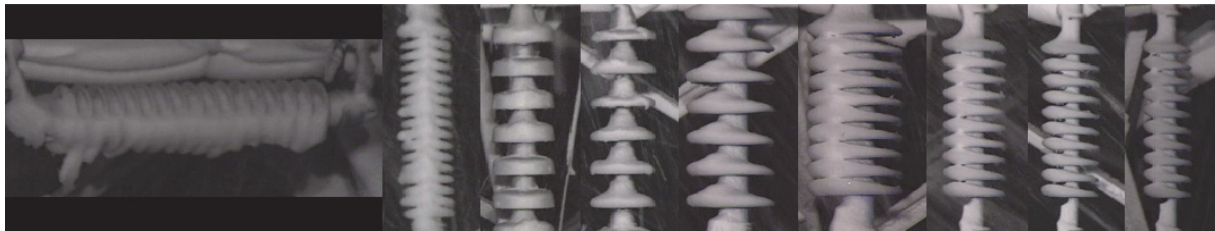


Figure 5-18. The chronological changes of ambient conditions related to high  $v_{10}$  and wet snow that resulted in paced snow accretion on insulators, and snow load to the long-rod insulator observed at Kushiro site on December 16 to 17, 2014.

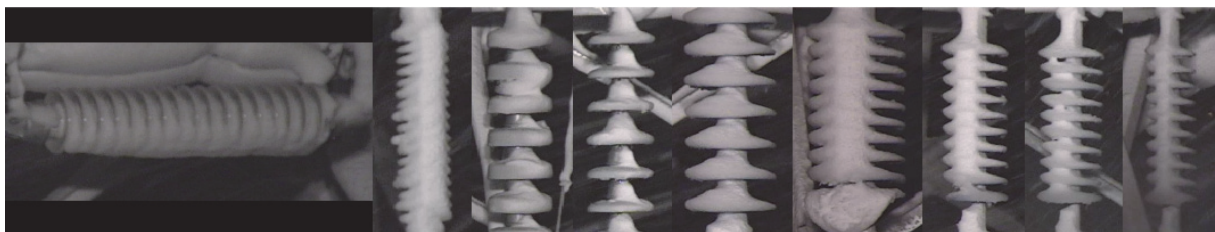
図5-18 釧路地点での強風湿型着雪（圧密着雪）時の気象要素ならびに長幹がいしへの着雪荷重の経時変化（2014年12月16日~17日）



(a) 0:00 a.m.



(b) 3:00 a.m.



(c) 6:00 a.m.



(d) 9:00 a.m.

Figure 5-19. Photos of snow accretion growing related to high  $v_{10}$  and wet snow that resulted in packed snow accretion on insulators observed by network camera at Kushiro site on December 17, 2014.

図5-19 ネットワークカメラによる強風湿型着雪様相（2014年12月17日）

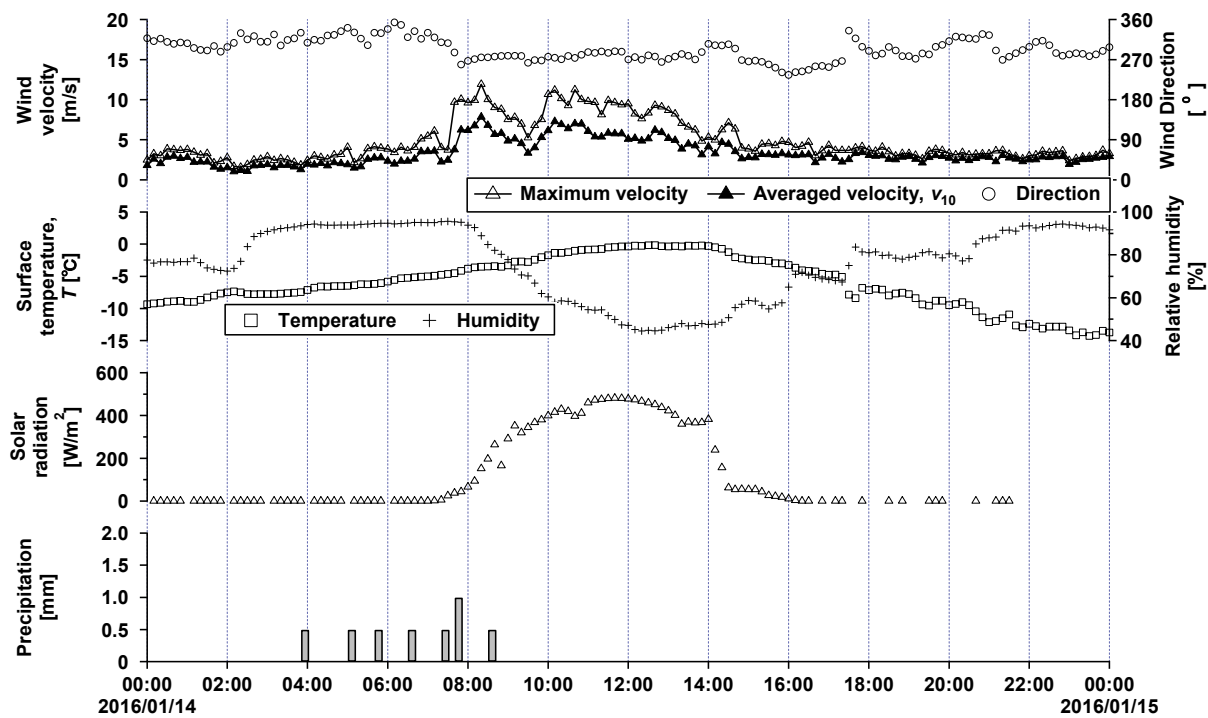
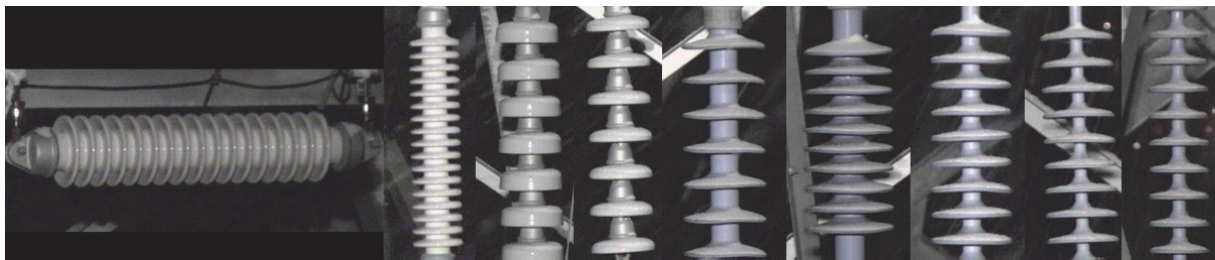
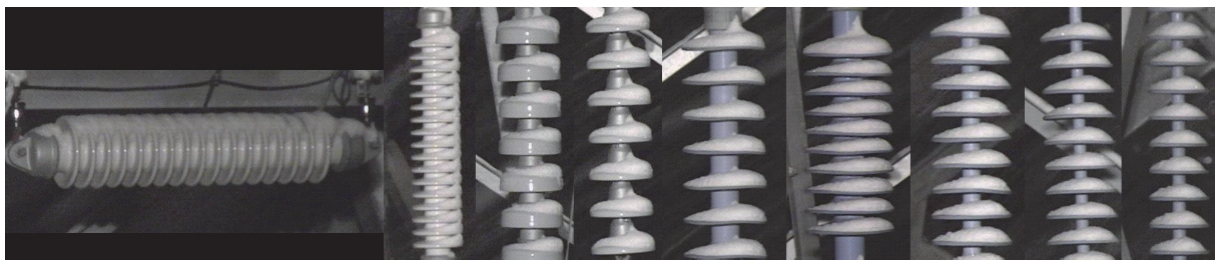


Figure 5-20. The chronological changes of ambient conditions related to low  $v_{10}$  and dry snow that resulted in snowcap on insulators observed at Kushiro site on January 14, 2016.

図5-20 釧路地点での弱風乾型着雪（冠雪）時の気象要素の経時変化（2016年1月14日）



(a) 2:30 a.m.



(b) 4:30 a.m.



(c) 8:00 a.m.



(d) 10:00 a.m.

Figure 5-21. Photos of snow accretion growing related to low  $v_{10}$  and dry snow that resulted in snowcap on insulators observed by network camera at Kushiro site on January 14, 2016.

図5-21 ネットワークカメラによる弱風乾型着雪様相（2016年1月14日）

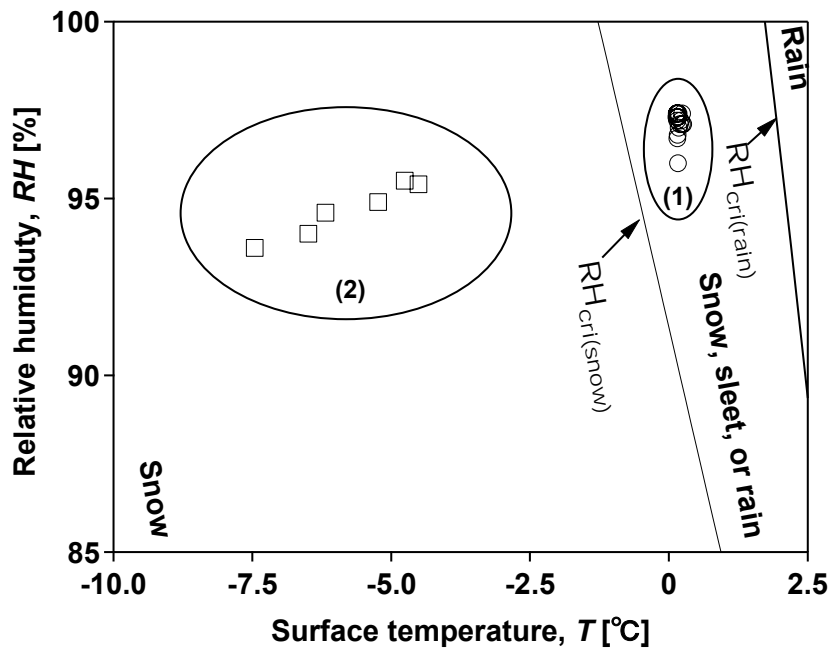


Figure 5-22. Atmospheric conditions when snowfall accreted on the insulator specimen at Kushiro site.

Typical two atmospheric conditions when snowfall accreted on the insulator specimens and its volume was increasing, which were recorded at the Kushiro site with regard to ambient conditions during snow accretion. (1) was the case that snow accretion grew related to high  $v_{10}$  and wet snow resulting in packed snow accretion, corresponding to Figure 5-18 and 5-19. (1) was so called “packed-snow-accretion” seen during the Kaetsu snowstorm of 2005. On the other hand, (2) was the case that snow accretion grew related to low  $v_{10}$  and dry snow resulting in capped snow accretion, corresponding to Figure 5-20 and 5-21. (2) was so called “Snow-cap” seen in the inland snow area. In this study, these two types of snow accretion clearly determined on the  $RH - T$  plane.

#### 図5-22 釧路地点における強風湿型着雪発達時の気温、湿度の分布

がいしへの着雪が発達しているときの典型的な二つの気象条件を抽出し、 $RH-T$ 平面にプロットした。事象(1)は、強風湿型の着雪であり、図 5-18 と図 5-19 に対応するものである。また、事象(1)は、慣例的に「圧密着雪」と呼ばれることもある。一方、事象(2)は、弱風乾型の着雪であり、図 5-20 と図 5-21 に対応するものである。また、事象(2)は、慣例的に「冠雪」と呼ばれることもある。本研究により、この二つのがいし着雪の形態が、 $RH-T$ 平面上で明確に分別された。



## 5.6 まとめ

本章では、各種がいしの着雪特性の比較・形状効果の解明、ならびに、これらを踏まえた対策品の効果について、電気工学的な観点から検討した。その中では、自然環境下のがいしの着雪過程を長期間連続観測し、気象条件とがいし形状に関連付けた。その手法は、基本的には自然環境下でのフィールド観測をベースとしつつ、これらのフィールド観測でデータ取得が困難な強風域のデータ等については、室内着雪実験の実施により補完あるいは代用した。得られた成果のうち特に重要なものを摘記すると、以下のようなものである。

- (1) 新潟下越の観測地点においては、気温  $0.6^{\circ}\text{C}$  (相対湿度 91%) で最も頻繁に着雪が発達した。特に、“ $RH_{\text{cri(snow)}}$ ” の近傍で頻度分布が高くなる傾向が見られた。
- (2) 強風下では、弱風下に比べて導電率の高い降雪が観測された。がいしの漏れ抵抗は、弱風下の着雪時に比べて、強風下の着雪時に低下しやすく、笠間が橋絡する場合は、橋絡しない場合に比べて漏れ抵抗が低下しやすいことが確認された。
- (3) 着雪発達量は、雪の湿り具合に左右され、湿った降雪が長時間続くと、着雪は大きく発達した。
- (4) これまで慣例的に用いられてきた「圧密着雪」は主に強風湿型着雪のことであり、同様に慣例的に用いられてきた「冠雪」は弱風乾型着雪のことであり、これらは気温－相対湿度の分布から概ね分別することができることが確認された。
- (5) 強風湿型で大量の降雪があった場合、長幹がいしは比較的短時間で着雪が発達して笠間橋絡が発生するが、懸垂がいしは笠間隔と笠直径が大きいため笠間橋絡が発生しにくいことが確認された。また、懸垂がいしの着雪はがいし表面を滑る傾向があり、着雪発達中にもその一部が頻繁に滑落しやすく、長幹がいしに比べて、大きな発達を免れる傾向が認められた。
- (6) 強風湿型と弱風乾型のいずれの着雪形態に対しても、磁器がいしとポリマーがいしの材質の違いによる着雪特性への影響は実用レベルでは認められなかった。しかし、ポリマーがいしについては、笠間隔と笠直径を大きくすることにより、笠間の橋絡を抑制できることが見出され、その形状次第では、各種の冠着氷雪環境下において、懸垂がいしと同等か、それ以上の性能を期待できることが分かった。
- (7) 着雪ポテンシャル  $P_{\text{snow}}$  は、がいし着雪の危険度を見積もる有用なパラメータであることが示唆された。

## 第 5 章の参考文献

- [1] S.M. Berlijn, I. Gutman, K.A. Halsan, M. Eilertsen, and I.Y.H. Gu, “Laboratory Tests and Web Based Surveillance to Determine the Ice- and Snow Performance of Insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 6, pp. 1373 – 1380 (2008)
- [2] L. Shu, Z. Yang, X. Jiang, Q. Hu, C. Sun, and Q. Yuan, "A Model for Calculating Deviation Angle of Icicle Buildup on Insulators And Its Experimental Validation", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 315 – 329 (2013)
- [3] Y. Higashiyama, M. Johsho, and G. Sakata, "Observation of Capped Snow Over 275kV Polymer-insulator Strings", Proc. of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of structures (IWAIS) (2002)
- [4] Y. Higashiyama, T. Sugimoto, M. Kokufu, "Formation of Capped Snow over 66 kV Longrod Insulators and Leakage Current", Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of structures (IWAIS) (2007)
- [5] 清水 幹夫、松宮 央登、杉本 聡一郎、石川 智巳、野村 光春、橋本 篤、西原 崇、平口 博丸：「送電設備の雪害に関する研究」10 ヶ年研究成果（その 1）－重着雪とギャロッピングの評価手法と対策－、電力中央研究所報告、研究報告、N16010 (2017)
- [6] T. Matsuo and Y. Sasyo, “Melting of Snowflakes below Freezing Level in the Atmosphere”, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No.1, pp.10 – 25 (1981)
- [7] T. Matsuo and Y. Sasyo, “Non-Melting Phenomena of Snowflakes Observed in Subsaturated Air below Freezing Level”, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No. 1, pp. 26 – 32 (1981)
- [8] T. Matsuo, Y. Sasyo, and Y. Sato, “Relationship between Types of Precipitation on the Ground and Surface Meteorological Elements”, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No.4, pp.462 – 476 (1981)
- [9] G. Sakata and H. Homma, “Overview of Blackout in Niigata and Study on Property of Wet Snow Packed with Sea-Salt on Insulator Strings”, Proc. of the INMR World Congress on Insulators, Arresters and Bushings (2009)
- [10] Y. Sakamoto, “Snow accretion on overhead wires”, Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 358, No. 1776, pp. 2941-2970 (2000)
- [11] 屋地 康平、本間 宏也、渡邊 真人、坂田 学、高橋 毅：「送電用がいしの着雪特性の検討－新潟下越におけるフィールド観測および風洞実験－」、電力中

央研究所報告、研究報告、H11014 (2012)

[12] 屋地 康平、松宮 央登、市川 英治、西原 崇、本間 宏也：「各種がいしの冠着氷雪特性の評価－北海道道東における観測システムの構築および 2014～2015 年度観測結果－」、電力中央研究所報告、研究報告、H16001 (2017)

[13] 有働 龍夫：「電力系統絶縁工学 －サージと事故防止－」、オーム社 (1999)

## 第 6 章

### 送電用がいしの塩雪害対策手法の提案

## Chapter 6

### Proposal of Countermeasures Against Snow Damage of Insulators Used for Overhead Lines Caused by Wet and Packed Snow Including Sea-salt

## 第6章 送電用がいしの塩雪害対策手法の提案

### 6.1 まえがき

ここまで、第2章から第5章において、塩雪害時のがいしのフラッシュオーバ機構を検討するための材料を見出すべく、各種の実験と観測を行ってきた。

以下、本章では、6.2節でこれまでに述べてきた実験、観測結果を用いてフラッシュオーバ機構を推定すると共に、6.3節でがいしの塩雪害に関して物理現象に立脚した対策手法を提案する。

### 6.2 塩雪害時のがいしのフラッシュオーバ機構

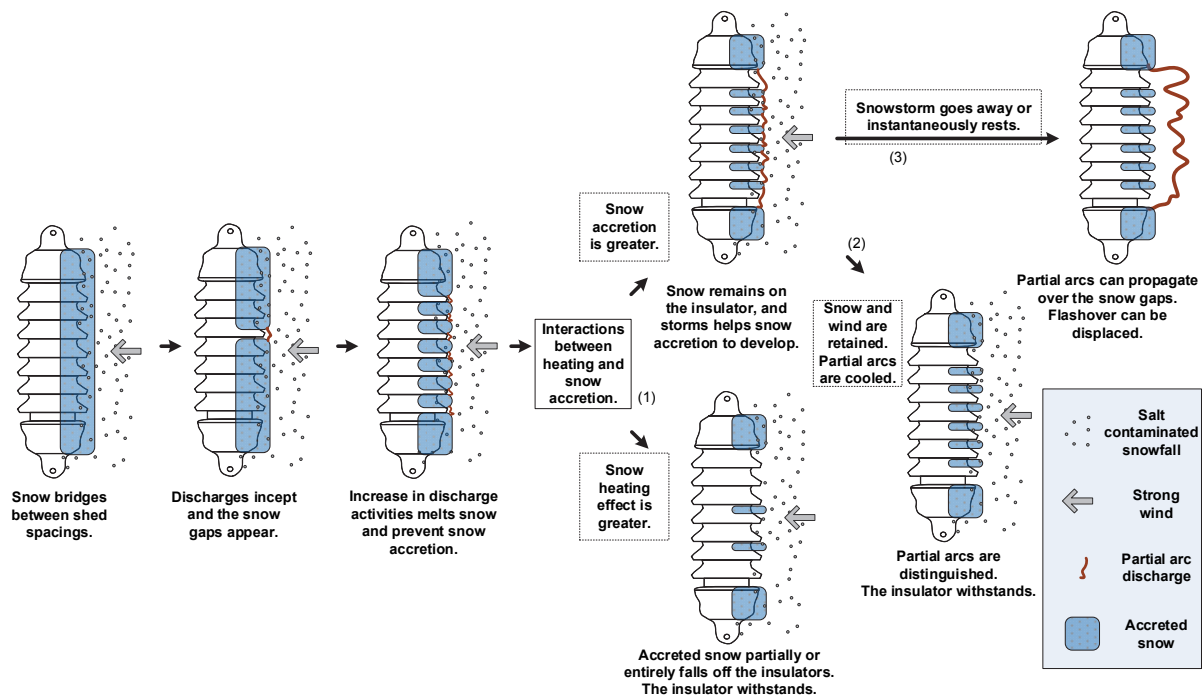
主に、第3章と5章の結果から、塩雪害発生時のがいしフラッシュオーバ機構は、概略以下のように説明できる。

- ・ 暴風雪時、塩分を含む湿雪ががいしに圧密着雪して、その笠間を橋絡する。
- ・ このとき、笠間隔が大きいがいしは、小さいがいしに比べて湿雪による笠間の橋絡が発生しにくい。
- ・ 笠間を橋絡した着雪の中を漏れ電流が流れることで、ジュール熱による融雪が進み、着雪の一部に空隙が形成される。
- ・ 形成された空隙により電圧分担が崩れ、空隙部分に過大な電圧が印加されることで、空隙部分を橋絡する局部アーク放電が発生する。
- ・ さらに着雪が進行すると、空隙での局部アーク放電発生はなお活発になり、逆に着雪ががいしを完全に覆うことを妨げるとともに、がいしから着雪を脱落させる方向に作用する。放電による融雪の作用は、着雪の導電率が高いほど大きく、放電による融雪の作用と着雪発達的作用は互いに干渉する。
- ・ フラッシュオーバの発生と、空隙の局部アーク放電挙動は、深く関係している。これは、局部アーク放電が、課電電圧が大きくなるほど、長い空隙を越えてがいしの全路に伸展できることに対応する。
- ・ また、がいし着雪に独特の特徴としては、着雪の厚さは汚損湿潤沿面の汚損被膜に比べて厚く、熱容量が大きいため、局部アーク放電発生時にも安定した形状を

留めやすい。そのため、汚損湿潤浴面の局部アーク放電に見られる熱的伸展機構や電界的伸展機構[1]に対して、大きな伸展電圧が得られない状況でも、アークルートの定在化が生じ、零点付近でも消弧しにくい局部アーク放電を生じうる。

- このような状況の下、融雪が進むのに伴い漏れ抵抗値がさらに低下し、漏れ電流が増大する条件が揃った状況において、局部アーク放電の伸展が起こることでフラッシュオーバーに至る。
- 暴風雪環境においては、風のゆらぎに伴い、風速が低下したタイミングで、局部アーク放電の伸展とフラッシュオーバーが起こりやすい。

これらを模式的に表したものが、図 6-1 である。



©2014 IEEE

*K. Yaji et al.: Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part II, IEEE TDEI, Vol. 26, No. 6, pp.2559 – 2567, December 2014.*

Figure 6-1. Schematic drawing of typical flashover process of snow-accreted long-rod insulator when exposed to the snowstorms with high snow conductivity.

Contaminated by sea-salt and wet snow bridges the air gaps in the shed spacings. But once the sheds are bridged the leakage current flow into the accreted snow, that heat snow and cause air gaps appear. Since most of the applied voltage is born by the air gaps, partial arc discharges incept at the air gaps. On the other hand, increase in discharge activities melts more snow and is likely to prevent snow accretion. Such heating and snow accretion are contrary to each other and interfere with each other.

1) If snow heating effect is greater than that of snow accretion, accreted snow partially or entirely falls off the insulator. The insulator withstands.

If the effect of snow accretion is greater than the snow heating effect, snow remains on the insulator and storms helps snow accretion to increase.

2) If the blizzard remains and the partial arcs are cooled, partial arcs are extinguished. The insulator withstands.

3) In the case that blizzard goes away or instantaneously rests, partial arcs can propagate over the snow gaps. Flashovers can be displaced.

### 図6-1 塩雪害時の長幹がいしのフラッシュオーバーバメカニズムの概念図

塩分を含む暴風雪に曝されたがいしの空間に着雪で覆われると、部分放電が発生し、漏れ電流が流れる。その熱によって、着雪には部分的な融解が発生し、がいし着雪を部分的に分割する小さな空隙が形成される。このとき、電圧分担が崩れて空隙部分に過大な電圧が印加されると、空隙部分を橋絡する局部アーク放電が発生する。

さらに着雪が進行すると、空隙での局部アーク放電発生はなお活発になり、逆に着雪ががいしを完全に覆うことを妨げるとともに、がいしから着雪を脱落させる方向に作用する。放電による融雪の作用と、着雪発達的作用は、互いに干渉する。ここで、

1) 着雪の大部分が脱落した場合、がいしの耐電圧は回復する。しかし、がいし着雪が脱落することなく、さらに発達する場合、局部アーク放電は、さらに活動を活発にする。

もしここで、着雪の発達が、漏れ電流による着雪の融解・脱落を凌駕すると、さらに着雪が発達する方向に進んでいく。このとき、

2) 暴風雪が継続した場合には、局部アーク放電が引き延ばされ、冷却される効果により、局部アーク放電は複数の空隙を乗り越えるような大きな放電に移行し難い。

3) 暴風雪が停止、あるいは弱まった場合には、局部アーク放電が着雪沿面を大きく伸展し、金具間を橋絡するフラッシュオーバーに移行し易い。

## 6.3 がいしの塩雪害対策手法

がいしの塩雪害対策手法を検討する上で、その方針は、専ら二つに絞られる。一つは、がいしの着雪特性を中心に対策を講じるものであり、もう一つは放電伸展あるいはフラッシュオーバー特性を中心としたものである。つまり、これらうちのいずれか、あるいは両方に優れるがいしを実線路に適用することが、塩雪害における直接的かつ実効的な対策になり得るであろう。ところが、このような方針の下での具体的で現実的な対策となると、実際に採り得る方法はそれほど多くはないことが、以下「がいしへの着雪特性の観点から」と「着雪したがいしのフラッシュオーバー電圧特性の観点から」の検討から導かれる。

### 6.3.1 がいしへの着雪特性の観点から

例えば、着雪対策を向上させることを目的とした場合、送電用のがいしとして必要な機能を低下させることなく「着雪しない」または「着雪しにくい」製品を作り出すことは、現在の技術では難しい。我々は、シリコーンゴムの持つ表面撥水性に着目し、ポリマーがいしには元来難着雪性能が備わっているかも知れないとの憶測も持ったが、第5章のフィールド観測の結果は、これを否定するものであった。ポリマーがいしといえども、強風湿型、弱風乾型の降雪のいずれに対しても、磁器と同様の難着雪性能を示すことが明らかとなった。したがって、「着雪しない」「着雪しにくい」製品を作るという発想は、現時点では現実性に乏しく、塩雪害の対策には適当ではないと言えよう。

それでは、「着雪する」ことを認めた上で、「着雪してもフラッシュオーバーしない」という発想はどうだろうか。先に結論を述べれば、このような特徴を持つ製品の開発は、現実的な範囲で可能である。まず、第3章の小規模モデル実験の結果から導かれた以下の結論――

- i) 着雪したがいしがフラッシュオーバーに至るためには、がいし着雪にある複数の空隙で発生した局部アーク放電が、大きく伸展することが必要である。

空隙で放電が発生する前まで時間を遡ると、同じく第3章から導かれた結論――

- ii) 上記の空隙が形成されるためには、着雪ががいしの笠間を橋絡し、その結果として着雪中を漏れ電流が流れる過程が必要である。

つまり、塩雪害のフラッシュオーバーを防止するためには、笠間の橋絡を回避するのが最も妥当な手段となることが、ここに導かれた。そこで、第5章のフィールド観測と人工着雪試験の結果を思い出してみると――



- iii) 笠間隔が狭い、あるいは笠径が小さいがいしは、着雪して笠間が橋絡し易い（笠間隔が狭い、あるいは笠直径が小さいがいしは、着雪特性において不利である）。

つまり、着雪特性の観点からは、塩雪害の発生を防止するための方策として「笠間隔が広くかつ笠直径が大きいがいしを用いること」が論理的に導かれた。

### 6.3.2 着雪したがいしのフラッシュオーバ電圧特性の観点から

他方、着雪した後のフラッシュオーバ電圧特性については、第4章の実規模フラッシュオーバ試験の結果から、がいし形状の影響が大きいことが明らかとなった。

- i) 長幹がいしは、電圧分担が著しく変歪することで、局部アーク放電の伸展を助長する。また、笠間が狭いため着雪時に筒状になり漏れ距離を維持できず、これらの理由により最低フラッシュオーバ電圧における電位傾度が低くなる。
- ii) 懸垂がいしは、着雪の大部分が脱落しやすく、また、笠間が広いいため着雪時にも漏れ距離を維持できるため、最低フラッシュオーバ電圧における電位傾度が高い。
- iii) ポリマーがいしは、スリット状の空隙が笠の周囲に等間隔に発現しやすく、電位分布が均一化される。このような状況は、漏れ電流を遮断し、局部アーク放電の伸展を妨げ、最低フラッシュオーバ電圧における電位傾度が高くなる。

つまり、着雪した後のフラッシュオーバ電圧特性の観点からは、塩雪害の発生を防止するための方策として「懸垂がいし、あるいはポリマーがいしを用いること」が論理的に導かれた。

以上の結果を総合的に勘案すると、塩雪害の発生リスクに対して、着雪特性および絶縁性能ともに、笠間の狭い長幹がいしは不利であるが、笠間が広く、また融雪により脱落し易い懸垂がいしは有利であることが分かる。また、近年、相間スペーサやジャンパ支持がいしなどへの導入が進むポリマーがいしに関しては、笠間や笠径などの形状設計において磁器がいし以上の自由度があることから、上記の形状のメリットを引き出しやすい。さらに、ポリマーがいしについては、シリコンゴムの化学的、物理的な表面現象に起因する可逆的な撥水性を有しており[2]、さらに形状的な要因も加わって[3]、塩害に対する汚損耐電圧特性が磁器がいしに比べて向上するという多数の報告がなされている[4]。したがって、ポリマーがいしは、所要の漏れ距離を確保した上で、笠間隔を大きくする、あるいは笠形状に傾斜を持たせるなど、適切な設計を行うことにより、塩雪害防止、更には着雪を伴わない汚損湿潤時の絶縁性の向上にも効果が期待できる。

## 6.4 まとめ

従来よく知られた冠雪がいしのフラッシュオーバー現象は、そのプロセスの中に必ず、冠雪後、日射によって冠雪の融解する時間が必要であった。このことがネックとなり、2005年の下越雪害で、暴風雪の最中に複数の送電線で繰り広げられたフラッシュオーバーを上手く説明することができなかった。本論文の示した結論は、このような場面では、むしろ暴風雪が継続することにより局部アーク放電が活発に発生し、着雪の一部が融解・脱落することであり、これが次第にがいし着雪の電圧分担を大幅に崩し、局部アーク放電を大きく伸展させる原因となることであった。最終的には、“ちょうどよい具合”に着雪が融解・脱落し、漏れ抵抗が低下し、風雪の勢いが弱まり、あるいは無風となった場面でフラッシュオーバーすることを明らかにした。

この雪害への対策面について、論理的に導かれた結論の一つが、笠間が広く、また融雪により脱落し易い懸垂がいしは、長幹がいしと比して着雪特性および絶縁性能ともに有利であることであり、2005年の下越雪害の発生を受けた直後に東北電力が採った対応策[5]<sup>1</sup>、ならびに、これを妥当と判断した当時の経済産業省（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会）の判断[6]が、適切なものであったことを示すこととなった。しかし、今後の塩雪害対策としては、相間スペーサやジャンパ支持がいしなどポリマーがいしの形状設計に関して、機能面での優位性を見出し、適切な設計を行うことも視野に入れることが必要ではなかろうか。このことにより、塩雪害防止、更には着雪を伴わない汚損湿潤時の絶縁性向上に向けた効果が期待できる。

---

<sup>1</sup> 事故を受けた送電線の塩雪害対策として、当該地域の少なくとも1回線の懸垂鉄塔・耐張鉄塔の本線のがいしを長幹がいしから耐塩用懸垂がいしに交換することが決定された[6]。なお、この塩雪害対策工事は、事故からおおよそ2年後の2007年11月までに完了した[7]。

## 第 6 章の参考文献

- [1] 西村 誠介 : 「局部アーク伸展に基づく汚損沿面絶縁破壊に関する研究」、東京大学博士論文 (1985)
- [2] 本間 宏也 : 「シリコンゴムの外部絶縁性能評価のための撥水性および経年劣化に関する研究」、横浜国立大学博士論文 (2001)
- [3] 畔柳 俊幸 : 「送電用高分子がいしの急速汚損時の塩分付着特性と霧中耐電圧特性」、電力中央研究所報告、研究報告、H08018 (2009)
- [4] 近藤 邦明 : 「高分子がいしの電気絶縁特性に関する基礎研究」、名古屋工業大学博士論文 (1997)
- [5] T. Onodera, H. Inukai, and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, Proc. of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS) (2007)
- [6] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会 : 「今後の雪害対策のあり方について」、経済産業省ホームページ、  
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g70125a01j.pdf>  
閲覧日 2016 年 10 月 19 日
- [7] 東北電力株式会社 : 「エネルギーセキュリティへの対応と供給信頼度の維持～電気の安定供給～」、CSR Report 2008、pp. 57 – 58 (2008)

# 第 7 章

## 結 論

### Chapter 7

### Conclusions and Recommendations

## 第7章 結 論

本研究は、国内でも史上稀に見る大停電の主要因となった2005年新潟県下越地域の塩雪害に主眼を置き、その発生メカニズムの解明と対策技術構築に向けた工学的な基盤を提供することを試みたものである。従来、よく知られた冠雪がいしのフラッシュオーバー現象は、そのプロセスの中に必ず、冠雪後、日射によって冠雪の融解する時間が必要であった。このことがネックとなり、暴風雪の最中にフラッシュオーバーに至った下越雪害の発生を、上手く説明することができなかった。この未知の塩雪害に対して、現象に基づく確たる対策手法を提示するために本研究が行ったことは、以下の通りである。

第1章では、電気工学を学んだことのない読者でも、がいしとは何か、雪害の影響はどのようなものか、本論文の目的と効用は何かを理解できるよう、これらについて丁寧に説明した。まず、日本経済に対するインフラとしての電気事業の重要性、日本の電力品質の高さ、電力輸送技術におけるがいしの役割、2005年の新潟下越雪害が社会に与えたインパクトについて順を追って説明し、塩雪害の原因究明と対策技術の確立の重要性を述べた。

第2章では、湿雪の含水率と誘電・絶縁特性の関係に着目し、環境試験室内で作製した人工雪を用いた独自の基礎実験を行い、含水率とインピーダンスの関係を明らかにした。雪の誘電正接を評価することにより、商用周波電圧への絶縁特性が直流漏れ抵抗で評価できることを示した。

第3章では、塩雪害の状況が、これまでに知られてきた冠雪によるものと異なる様相であったことを、小規模なモデル実験から定量的に明らかにし、そのフラッシュオーバー過程と発生条件を明確にした。このことを踏まえたフラッシュオーバー機構の詳細は第6章にまとめた。また、着雪がいしのフラッシュオーバー電圧は、着雪の導電率が高いほど低下することを示した。更に、第2章の結果を援用し、着雪がいしの漏れ抵抗を用いたフラッシュオーバー電圧の評価方法を提案した。この方法を、上昇法による長幹がいしの着雪フラッシュオーバー電圧特性に適用して、その有用性を示した。

第4章では、これまでに例のない154kV実規模着雪がいしのフラッシュオーバー試験方法を開発し、開発した手法を各種の実規模がいし装置に適用して、フラッシュオーバー電圧特性を確認した。既存の長幹がいしと耐塩用懸垂がいしについて、導電率とフラッ

シオーバ電圧の関係を確認するとともに、塩雪害対策の一例として、ポリマーがいし類も供試してそのフラッシュオーバ特性を評価した。その結果、耐塩用懸垂がいしとポリマーがいしの最低フラッシュオーバ電圧時の電位傾度は、長幹がいしに比べて、30%から50%高くなることを示した。東日本大震災を受けて国内の送電線へのポリマーがいし導入が急速拡大する現下の状況において、塩雪害環境へのポリマーがいしの適用性を評価した点でも、本章の示す意味は大きい。

第5章では、各種がいしへの着雪発達様相、脱落様相のフィールド観測を行い、これまで知られていなかった自然環境下の各種気象条件での着雪特性を明らかにした。さらに、気象官署から入手できるデータを用いて、降雪の単位時間・単位面積当たりの質量フラックスである「着雪ポテンシャル」を算出し、新潟下越雪害時の気象について着雪の面から数値的に評価することができ、これが今後の塩雪害発生リスクについて一つの指標となり得ることを示した。加えて、第4章と同様の理由で、ポリマーがいしの塩雪害環境への適用性を調べ、ポリマーがいしの持つ撥水性は、従前の予想とは反対に着雪に対してほとんど効用はないが、その形状設計次第では、懸垂がいしと同等か、それ以上の性能を期待できることを示した。

第6章では、これまでの章の結果を踏まえた塩雪害発生時のがいしフラッシュオーバメカニズムを検討し、既存の磁器がいしと新規ポリマーがいしの塩雪害対策品としての有用性を評価した。従来よく知られた冠雪がいしのフラッシュオーバ現象は、そのプロセスの中に必ず、冠雪後、日射によって冠雪の融解する時間が必要であったが、このことがネックとなり、2005年の下越雪害で、暴風雪の最中に複数の送電線で繰り広げられたフラッシュオーバを上手く説明することが難しかった。本論文の示した結論は、このような場面ではむしろ暴風雪が継続することにより、局部アーク放電が活発に発生し、着雪の一部が融解・脱落することであり、これが次第にがいし着雪の電圧分担を大幅に崩して局部アーク放電を大きく伸展させる原因となることであった。

また、この雪害への対策について、論理的な結論を導き、2005年の下越雪害の発生を受けた直後に東北電力が採った対応策、ならびに、これを妥当と判断した当時の経済産業省（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会）の判断が、適切なものであったことを示した。しかし、今後の雪害対策として、上記ポリマーがいしの形状設計による機能面での優位性を見出し、適材適所の導入を視野に入れることが必要であると言及した。

以上に示した本論文の検討手法、ならびに検討結果は、本研究の個性を強く特徴付けるものであると同時に、我が国あるいは海外において今後の雪害対策を検討する上で、有用なヒントとなろう。

このような成果が得られた一方で、本論文は塩雪害に関する本格的な研究の第一報とも言え、稀頻度の塩雪害の状況を把握し切れているとは言い難い。実現象との等価性、あるいは評価の定量性といった点では、本論文の検討手法には改善の余地が残されている。各種がいしの着雪特性、着雪時のフラッシュオーバー特性、さらにはそのフラッシュオーバーメカニズムの解明に向けて、自然現象をより適確に表現でき、かつ工学的な合理性をも併せ持った検討手法やモデルの探求が引き続き必要と考える。

また、外部絶縁分野には、これまでに広く研究されてきた汚損湿潤浴面での放電現象、近年熱心に研究されているポリマー材料浴面での放電現象、あるいは、海外で研究されるようになった熱帯地域特有の豪雨時の浴面放電現象、更には数 1000 m 級の高地における低気圧環境下の汚損湿潤浴面の放電現象、といった種々の現象が存在する。これらの現象は、互いに、物理的共通点を少なからず持っており、著者は、本論文の第 3 章で検討した着雪浴面の放電現象、およびその検討結果が、外部絶縁分野の上記諸現象をも巻き込んだ議論に一石を投じることを望んでいる。外部絶縁分野には、未だ解明されていない点が数多く残されており、上記現象を包括的に捉えることが、個別の現象を解明する手がかりになるばかりでなく、その全容を解明する上で重要となるであろう。これらの面が、今後の研究で向上されることを期待する。

## 謝 辞

本論文の著者は、2008年4月より、財団法人 電力中央研究所（2012年度、一般財団法人に法人格を移行）電力技術研究所に、また、2014年10月より、九州大学大学院システム情報科学府 電気電子工学専攻 博士後期課程に在籍し、高電圧・絶縁の研究に従事してきました。その中で巡り会った研究テーマの一つが「送電設備の雪害に関する研究」であり、中でも主に著者が担当したミッションは、塩雪害の原因究明であります。本論文は、その成果を取りまとめたものであり、その間多くの方々からご助言とご協力を頂きました。この紙面を借りて、謝意を述べさせていただきます。

まず本論文の指導教官であり主査の九州大学大学院 システム情報科学研究院 電気システム工学部門 末廣純也教授には、本論文全体の取りまとめにおいて、熱心なご指導を賜りました。また、研究者の在り方や、研究者が元来備えるべき倫理感を、時には言葉で、また時にはその後ろ姿で教えて頂きました。そればかりか、末廣先生には、学部・修士課程の頃より、修士論文の取りまとめを始めとして、ゼミでの輪講、キャンパス移転に伴う研究室の引っ越し、研究室旅行、著者の就職活動に至るまで、公私に亘り温かいご指導・ご助言を賜りました。衷心より御礼申し上げます。

また副査の九州大学大学院 システム情報科学研究院 情報エレクトロニクス部門 白谷正治教授、九州大学大学院 システム情報科学研究院 電気システム工学部門 岩熊成卓教授には、本論文の構成と表現につきまして多くのご指摘・ご助言を頂きました。お二人の副査の先生方のアドバイスにより、初稿の不備が改善され、本論文の適正性を向上することができました。改めて御礼申し上げます。

九州大学 原 雅則名誉教授には、著者の学部・修士時代から、高電圧下で電離・放電現象に関して多くのご指導を賜りました。原先生のご指導が、著者の研究の礎となっていることは明らかであり、また、このことが、今日の著者の研究やネットワーク形成にも役立ちました。ここに、篤く御礼申し上げます。

電力中央研究所 電力技術研究所 足立和郎博士には、高電圧・絶縁分野のエキスパートとしての幅広い見識に基づくご助言を賜りました。また、国外での実験や、九州大学への通学に要する出張に際しては、サービス面でのご理解、ならびに多くのサポートを賜りました。ここに、深く御礼申し上げます。



本論文の第3章、第4章および5章は、電力中央研究所が設置した「送電設備の雪害に関する研究委員会」(2007年7月～2017年3月)のご助言等を頂きながら、実験・観測を進めたものであります。中でも、研究委員会委員長であられた神奈川大学 大熊武司名誉教授、委員であられた横浜国立大学 西村誠介名誉教授(元 日本工業大学 超高電圧研究センター長)、菅原宣義先生(元 北見工業大学 准教授)には、これまでの外部絶縁関連研究の変遷や、雪害研究を行う上での重要な論点について、数多くのご助言を賜りました。また、当時 北見工業大学 菅原研究室の学部生諸氏には、第3章の小規模モデル実験においてご協力を頂きました。ここに、篤く御礼申し上げます。

雪害研究のため電力各社から電力中央研究所 地球工学研究所に出向された、北海道電力株式会社 麻生照雄氏、守護雅富氏、東北電力株式会社 坂田 学氏、渡邊真人氏、大塚 弘氏、東京電力パワーグリッド株式会社 田中一成氏(元 東京電力株式会社)には、我が国の送電設備の建設、保守・運用技術などについて、懇切にご教授頂きました。いずれの方々も、我が国の送電分野における第一級の技術者ですが、若輩者である著者の意見にも温かく耳を傾け、質問や議論にも気軽に応じて下さいました。著者は、そのような議論の中から、本研究のニーズやアイデアの種を得ると同時に、研究の幅をも広げることができました。ここに、篤く御礼申し上げます。

本論文の第4章の実規模フラッシュオーバ試験を実施するにあたっては、スウェーデンの STRI 社の試験設備を使用させて頂くと共に、試験設備の操作など技術的なサポートを頂きました。中でも、Dr. Igor Gutman、Dr. Andreas Dernfalk には、多くの議論の中から有益なアドバイスも頂きました。ここに、記して御礼申し上げます。

本論文の第5章のフィールド観測を実施するにあたっては、その観測装置を、東北電力株式会社管内の実送電鉄塔に設置させていただきました。8年間に亘る観測期間中は、観測装置の軽微な故障などは何度かあったものの、同新潟支店 電力ネットワーク本部(送電) 殿、同新潟技術センター 送電技術課殿のご協力を得て、事故など1件もなく、安全に観測を終えることができました。また、観測設備の設置・保守などの工事においては、株式会社ユアテック 新潟支社 工務部ならびに関連会社各社の皆様のご協力を賜りました。特に、幼少時代を鹿児島県で過ごした著者が、雪国の方々が雪とどのように向き合って生活してきたかを理解する上で、ここに記した方々との会話が非常に参考になったことを申し添えておかなければなりません。また、気象要素の観測に関しては、柳川瀬賢幸博士を始めとしたクリマテック株式会社の方々に大変お世話になりました。これらの方々に、深く感謝の意を表します。

本論文全体に亘り、電力中央研究所 研究アドバイザー 田中伸和博士（元 電力中央研究所 地球工学研究所 首席研究員）、電力中央研究所 電力技術研究所 八島政史博士には、研究予算や研究計画策定などに関して、大局的な観点から多数のご助言やサポートを賜りました。電力中央研究所 地球工学研究所 西原 崇博士、電力中央研究所 電力技術研究所 本間宏也博士には、研究計画策定、研究予算の獲得、設備の構築および維持、研究成果の外部への発信など、研究に必要な多くの技術を適切にご助言頂きました。また、高橋 毅氏（元 電力中央研究所 電力技術研究所 特別嘱託）、電力中央研究所 電力技術研究所 畔柳俊幸氏には、著者が電力中央研究所に入所して以来、送電線の外部絶縁に関する幅広い内容について、ご指導を賜りました。また、電力中央研究所の雪害研究メンバー各位には、“ここぞ”の場面を乗り切るための各種アドバイスや、機械工学、土木工学、気象学、大気環境学、情報数理学を始めとした他分野からの専門的なご助言を頂きました。中でも、同雪害研究において共に研究下積み時代を過ごした地球工学研究所 松宮央登博士、大原 信氏には、様々な場面で助けを頂きました。これらの方々に、記して御礼申し上げます。

本論文を取りまとめる上では、上の方々の他、本当に多くの方々のご支援やご協力を賜りました。ここには書き切れない支援者・協力者の方々や、研究成果を引用、参照させていただいた論文・報告書の著者諸氏に対し、記して御礼申し上げます。また、著者を産み育ててくれた田舎の両親、著者を陰ながら応援してくれた弟 健作にも感謝の意を表します。

最後に、本論文執筆のために多くの時間を割いた著者を理解し、常に励ましてくれた細君 真実に心から感謝すると共に、送電線の雪害事故による重大な社会トラブルの発生頻度が一層低下することを祈念して、ここで筆を置くこととします。

2017年9月 著者 屋地 康平