

## 上空風と太陽熱を利用した新しい複合発電システム 「ウィンドソーラータワー」の研究

岡田, 臣右

<https://doi.org/10.15017/1785413>

---

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

平成28年度  
九州大学大学院工学府  
学位論文

上空風と太陽熱を利用した新しい  
複合発電システム  
「ウィンドソーラータワー」の研究

指導教員： 大屋裕二 教授

航空宇宙工学専攻  
大気流体工学研究室  
岡田 臣右

# 目次

第1章	序論	4
1.1	研究の背景	4
1.1.1	地球温暖化対策の方向性	4
1.1.2	地球温暖化対策における国際貢献	11
1.1.3	エネルギー政策における各エネルギーの位置づけ	13
1.2	従来の研究	26
1.2.1	太陽熱により創る上昇気流で風力発電するソーラーチムニ	26
1.2.2	風を集めて高出力を得るレンズ風車	31
1.3	本研究の目的	34
1.4	論文構成	37
第2章	太陽熱により創る上昇気流を集める研究	38
2.1	コンセプト	38
2.2	室内実験	39
2.2.1	実験目的	39
2.2.2	流れ場の支配方程式と動力的相似性	39
2.2.3	実験用の模型	41
2.2.4	実験装置	42
2.2.5	実験結果と考察	44
2.3	流れ場の数値計算	46
2.3.1	数値計算方法	46
2.3.2	数値計算結果と考察	48
2.4	再現性確認および追加検討結果を踏まえた結論	54
第3章	上空風により上昇気流を集める研究	64
3.1	コンセプト	64
3.2	風洞実験	65
3.2.1	流れ場の支配方程式と動力的相似性	65
3.2.2	実験用の模型	66
3.2.3	実験装置	67
3.2.4	実験結果と考察	69
3.3	流れ場の数値計算	72
3.3.1	数値計算方法	72
3.3.2	数値計算結果と考察	75
3.4	結論	83

第4章	ウィンドソーラータワーの発電量推定に関する研究.....	84
4.1	ソーラーチムニ・プロットタイプの分析.....	85
4.1.1	稼働時間を稼働率として分析.....	85
4.1.2	発電量を設備利用率として分析.....	86
4.1.3	発電量と稼働時間より上昇気流の発生頻度を分析.....	87
4.2	太陽熱により創る上昇気流を集める効果.....	93
4.3	上空風により上昇気流を集める効果.....	95
4.4	上空風および太陽熱を利用して複合発電するウィンドソーラータワーの効果... ..	98
4.4.1	ソーラーチムニ・プロットタイプとの比較.....	100
4.4.2	大型風力タービンを前提とした推定.....	102
4.5	結論.....	107
第5章	結論.....	108
参考文献	.....	113
謝辞	.....	116
付録A	熱線流速計による計測方法.....	117
付録B	熱上昇気流の流速測定に関する試行.....	122
B.1	粒子画像流速測定法と熱線流速計による上昇速度測定方法の比較.....	123
B.2	タンポポの冠毛による計測.....	127
付録C	乱流境界層に埋没した場合に上空風により上昇気流を集める試み.....	130
C.1	実験方法.....	130
C.2	流れ場の数値計算方法.....	132
C.3	結果.....	133
付録D	上空風による吸込み効果に関する試み.....	142

# 第1章 序論

本章では、研究の背景、従来の研究における発想、成果および課題、本研究の発想と研究目的を述べて、最後に論文構成を記す。

## 1.1 研究の背景

本節では、新しい概念の複合発電システムであるウィンドソーラタワーがエネルギー源とする風力および太陽について、地球温暖化対策、エネルギー政策の観点より、今までの推移および今後の見通しについて述べる。

### 1.1.1 地球温暖化対策の方向性

世界各地で発生する極端な気象現象およびそれによる被害が生じている事実より、地球温暖化の要因となる温室効果ガスの排出を緩和する世界情勢になっている。表1. 1. 1-1に世界各地の極端な気象現象および被害をまとめる。環境の変化は、氷床・氷河の融解、海面上昇、海水温上昇、海水酸素濃度の低下、海洋酸性化、サンゴの白化、デング熱を媒介するヒトスジシマカの分布域の拡大にも表れている [文献 1-3]。

国際協力を含む包括的な対応が必要である地球温暖化対策に取り組むため、1988年に国際連合環境計画 (UNEP: United Nations Environment Programme) と世界気象機関 (WMO: World Meteorological Organization) により政府間機関として気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) を設立した。IPCCは、1992年に採択した国際連合気候変動枠組条約 (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) 第2条に規定する目的に準じて、人為起源による気候変化、影響、適応および緩和方策について、科学的、技術的、社会経済学的な見地より包括的な評価を報告書としてまとめている。

表 1. 1. 1-1 : 世界各地の極端な気象現象および被害 [文献 2]

年月	場所	気象現象	自然災害	被害
2005年 8月	米国南部	ハリケーン	—	死亡 1700人以上 経済損失 3兆円
2006年 後半	オーストラリア	干ばつ	少雨	小麦の収穫量減
2007年 7~10月	オーストラリア	干ばつ	少雨	農作物
2007年 6~7月	ヨーロッパ 南東部	熱波	森林火災	死亡 300人以上
2008年 5月	ミャンマー	サイクロン	大雨 高潮	死亡 13万人以上
2010年 6~8月	ロシア西部	熱波	森林火災	死亡 40人以上
2010年 6~8月	ロシア西部	干ばつ	—	小麦の収穫量減
2011年 1月	ブラジル南東部 リオデジャネイロ	集中豪雨	洪水 地滑り	死亡 800人以上
2011年 1~9月	ソマリア付近	干ばつ	—	影響 1000万人以上
2013年	米国西部 カリフォルニア	干ばつ	森林火災	農作物
2013年 11月	フィリピン	台風	—	影響 1200万人以上 死亡 6200人以上 行方不明 1700人以上
2014年 8月	日本	大雨	土砂災害	死亡 80人以上

気候変動に関する政府間パネルが2014年に公表した第5次評価報告書（AR5：Fifth Assessment Report）[文献4]では、人為起源の二酸化炭素排出量に応じて生じる気温上昇，それに伴う気候変動が地球環境，生態系，社会に与える影響，今後求められる持続的な開発を実現するための政策，技術，経済活動をまとめている．この報告書では，工業化前（1861～1880年）における世界平均気温からの気温上昇を2100年時点で2℃未満に抑えるシナリオを実現すると，生態系が気候変動へ適応でき，食糧の生産を脅かすことはない，としている．このシナリオはRCP2.6と称し，2100年時点において強制放射力が+2.6W/m<sup>2</sup>になるRCP（Representative Concentration Pathways）シナリオである．工業化前からの気温上昇を2℃未満に抑えるという基準を達成するには，1870年以降の人為起源となる二酸化炭素累積排出量を約2900GtCO<sub>2</sub>未満に留める必要がある．2011年までに約1900GtCO<sub>2</sub>が既に排出されていることを踏まえて，これを実現するには人為起源の二酸化炭素の正味排出量を2050年までに2010年と比べて40～70%削減し，2100年にはほぼゼロ又はゼロ以下にする必要がある．これにより気候変動に人為的干渉を及ぼさない水準で大気中の温室効果ガスの濃度が安定し，人為起源の二酸化炭素排出が引起す気温上昇は2100年時点で2℃未満になる．以降は気温上昇を生じない．

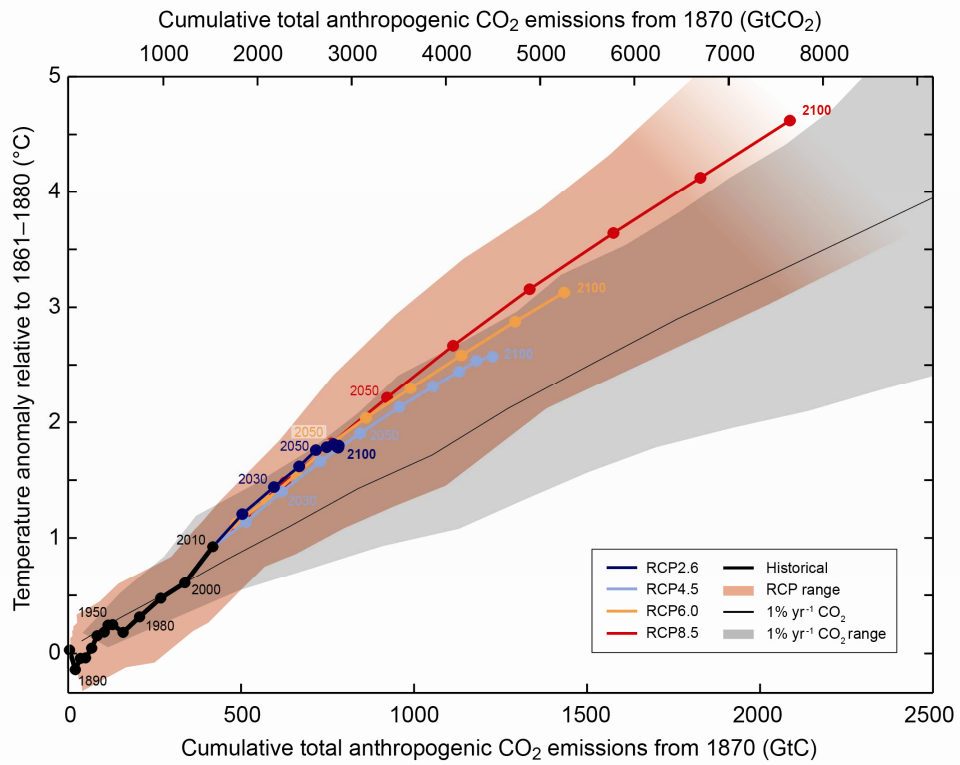


図 1. 1. 1-1 : 人為起源二酸化炭素累積排出量 (G t C O 2) とそれに伴う気温上昇 [文献 4]

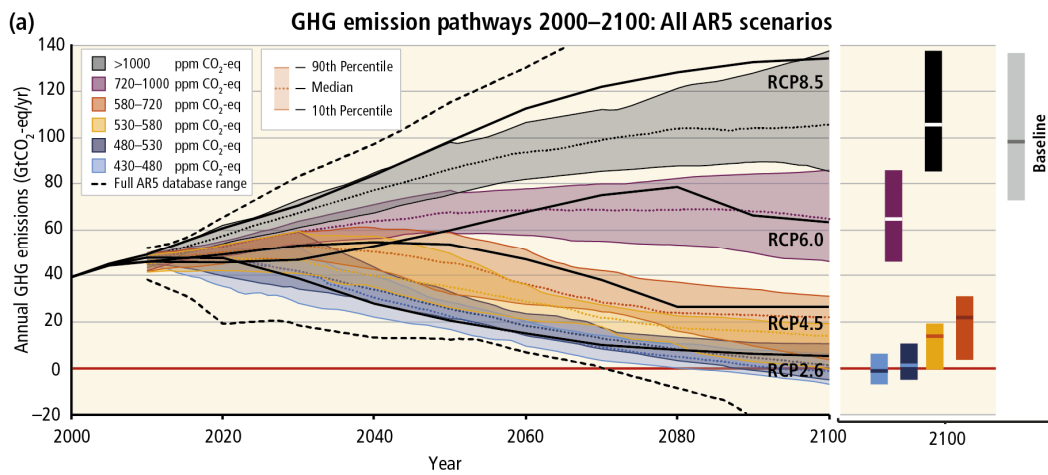


図 1. 1. 1-2 : 温室効果ガス排出シナリオと各シナリオの年間温室効果ガス排出量 [文献 4]



この理想的なシナリオであるRCP2.6を実現するには、次を必要としている。

- (i) 省エネルギーによる温室効果ガス排出低減
  - ✓ 生活様式，食生活
- (ii) エネルギー供給の脱炭素
  - ✓ 発電（バイオ，原子力，風力／太陽等の自然）
  - ✓ 熱（太陽熱／地熱等の自然，廃熱利用）
  - ✓ 移動・輸送（バイオディーゼル，電気，水素）
- (iii) 大気中の二酸化炭素除去
  - ✓ 新規の植林，森林減少の抑制，有機土壌
  - ✓ 二酸化炭素回収・貯留

RCP2.6では、二酸化炭素回収・貯留技術を適用していない化石燃料による発電は2100年までに段階的になくなり、再生可能エネルギー、原子力、二酸化炭素回収・貯留技術、バイオが主流になるとしている。この結果、1℃から2℃の気温上昇になると極端な気象現象が生じるとともに、固有性が高い生物種（珊瑚礁及び極域の生態系など）が気候変動に伴う地球環境の変化（海水温上昇，海水酸素濃度の低下，海洋酸性化など）に適応できなくなると予測しているものの、その後の気温上昇はなく適応していくことが可能であると見立てている。他のシナリオは、RCP2.6で前提にしている事項を具現化する時期が遅れるにつれて、2100年時点の気温上昇が2℃以上になりその後も昇温するシナリオ（RCP4.5：1.1～2.6℃上昇，RCP6.0：1.4～3.1℃，RCP8.5：2.6～4.8℃）へ遷移するとしている。4℃以上の気温になると、生息域の変化に適応できない生物種の絶滅，生態系の変化，漁場及び農地の適地変更による食料減産，高温多湿による健康被害が生じるとしている。すなわち，発電分野では温室効果ガス（主に二酸化炭素）を排出しない発電システムを必須としており，その実現する時期が早期であればあるほど地球温暖化対策として有効であることを示している。

一方で実態としては、各国のエネルギー起源となる二酸化炭素の排出量の推移に着目すると、工業化を果たした先進国では20年間における年間の排出量がほぼ一定であり、新興国と呼ばれる中国、インド、ブラジルにおいては排出量が増加している。

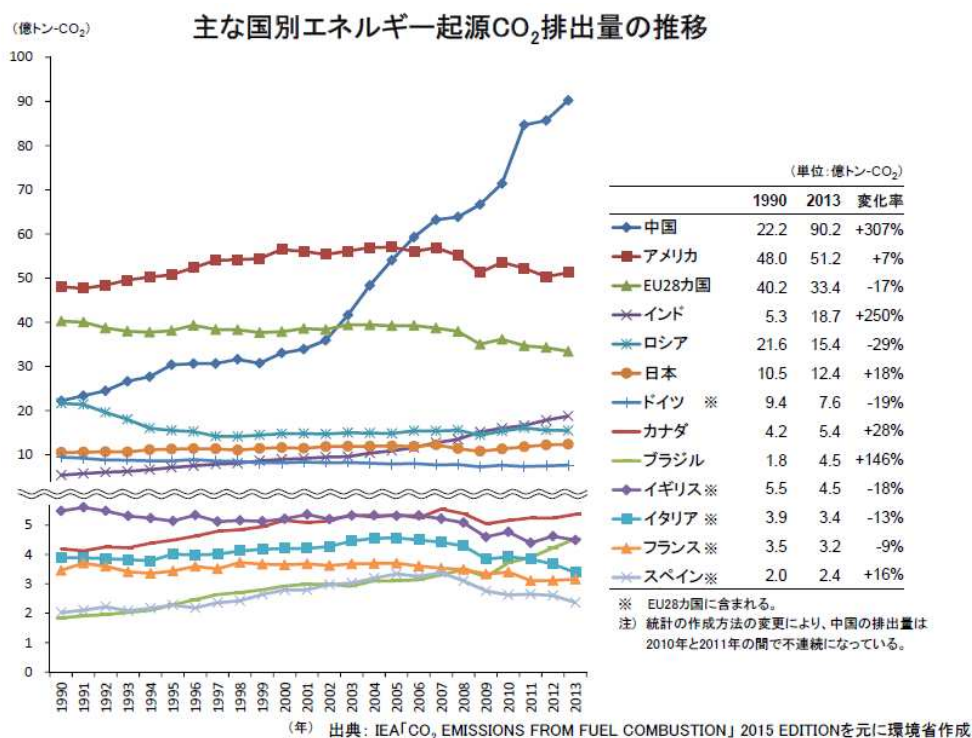


図1. 1. 1-3 : 国別エネルギー起源二酸化炭素排出量の推移  
[文献5]

これは工業を基盤とした社会は莫大なエネルギー消費を化石燃料(石油, 石炭, 天然ガス)が支えていることに起因する。先進国においては主として火力発電および原子力発電によりエネルギー需要を賄っており、新興国においては火力発電に頼っている結果、工業化による経済成長とともにエネルギー起源の二酸化炭素排出量が増加している。この実態と世界経済の持続的な発展を求めている世界情勢のもと、省エネルギーによる温室効果ガス排出低減、エネルギー供給の脱炭素、大気中の二酸化炭素除去を世界各国へ定着するには、国際協力を含む包括的な対応が必要であり、協調性を有する相互補完的な持続的開発が求められる。気候変動に関する政府間パネルの第5次評価報告書では温室効果ガスが大気中に蓄積して引起す気候変動は、世界的な集合行為問題といい、個人、共同体、会社、国など、

主体からの排出が他の主体に影響を及ぼす性質を有しているとしている。したがって、各主体間の共通利益と不利益を踏まえた相互補完的な政策、技術開発、経済活動を包括的に計画立案し、執行、評価を反復的に行い、対応していく必要があると提唱している。これにより、温室効果ガス排出量の緩和に各主体が各々の課題へ持続的に取り組むことができ、排出量を緩和した社会へ効果的に協調して適応していくことができるとまとめている。

### 1.1.2 地球温暖化対策における国際貢献

地球温暖化対策という世界的な集合行為問題に対して、環境省は「ACE (Actions for Cool Earth) : 攻めの地球温暖化外交戦略」を2013年11月に発表し、優れた環境技術、経験、ノウハウ、資金支援を世界へ展開していくことにより、地球規模の温暖化対策に大きな貢献を果たしている。2015年9月時点では15カ国との間で二国間クレジット制度(JCM: Joint Crediting Mechanism)に基づく合同委員会を設置し、採択した事業を履行している状況である。いずれの事業においても、導入国の需要(政策、電力需要予測)と存在する再生可能エネルギーに見合った発電技術を提供して、温室効果ガス排出量の緩和もしくは削減に貢献している。しかしながら、対象は温室効果ガスを排出する社会を形成している先進国もしくは新興国ではない。先進国および新興国においては、足並みを揃えて温室効果ガスを排出しない発電システムを社会に定着していく自主性と協調性が求められている。

表1. 1. 2-1 : 二国間クレジット制度に基づく  
再生可能エネルギー事業[文献6, 7]  
(2014年7月7日採択, 環境省所管)

エネルギー	国名	温室効果ガス 削減量 (tCO <sub>2</sub> /年)	概要
地熱	エチオピア	99,882	20MW級地熱発電。大規模な地熱開発の第一段階。
水力	ベトナム	93,822	40MW級水力発電。火力等の代替。電力需要増加対策。
バイオマス	スリランカ	40,052	10MW級バイオマス発電。同国の再生可能エネルギーの中で持続可能な早生木質。
バイオマス	ミャンマー	38,970	パーム製油工場でバイオガス(メタン)を自製し、自家発電、パーム収集トラック等に再利用。
太陽光	モンゴル	12,687	10MW級太陽光発電。石炭火力・ディーゼル発電の代替。電力需要増加対策。
太陽光	モルディブ	588	EMSを用いた太陽光発電・蓄電池利用システム。ディーゼル発電の代替。隣接する住民島とリゾート島の電力を統合し、再生可能エネルギー由来電力の安定供給を見込む。
太陽光	パラオ	100	小規模太陽光発電。ディーゼル発電の代替。同様な離島などの遠隔地への普及を見込む。

### 1.1.3 エネルギー政策における各エネルギーの位置づけ

我が国のエネルギー政策の基本視点は、“3E+S”である（2014年4月11日付けエネルギー基本計画による[文献 10]）。安全性（Safety）を前提としたうえで、エネルギーの安定供給（Energy Security）を第一とし、経済効率性の向上（Economic Efficiency）による低廉な価格でのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合（Environment）を図るため、最大限の取組を行うとしている。この方向性のもと、電力供給のための電源構成を構築しており、ベースロード電源、ミドル電源、ピーク電源の位置づけに適したエネルギー源を用いて発電し、電力を供給している。

表1. 1. 3-1： 電源構成を考えるうえでの視点 [文献 13]

電源	位置づけ	エネルギー源
ベースロード	発電（運転）コストが、低廉で、安定的に発電することができ、昼夜を問わず継続的に稼働できる電源	原子力、石炭、地熱、水力
ミドル	発電（運転）コストがベースロード電源の次に安価で、電力需要の動向に応じて、出力を機動的に調整できる電源	LNG、LPガス
ピーク	発電（運転）コストは高いが、電力需要の動向に応じて、出力を機動的に調整できる電源	石油、揚水式水力

この電源構成のもと、国内における一次エネルギーの需給構成が決まる。図1. 1. 3-1は、2012年時点の日本・米国・OECD欧州の一次エネルギー構成を比較した図である。いずれも、火力発電および原子力発電を主としており、太陽および風力を含む再生可能エネルギーはその他に分類されて一次エネルギー源の割合として小さい。なお、2012年時点の日本における原子力の割合が1%になっている理由は、2011年3月11日に起きた東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故によるものである。

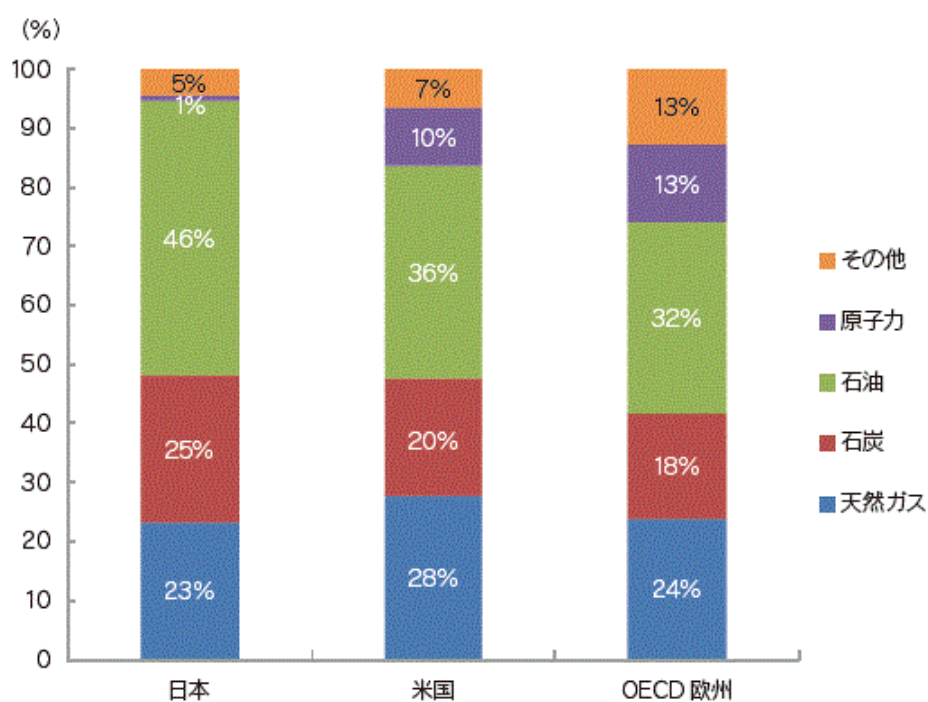


図1. 1. 3-1： 日本・米国・OECD欧州の一次エネルギー構成（2012年）[文献9]

図1. 1. 3-2に2014年までの国内における発電電力量の推移と東日本大震災前後の発電量の比較を示している。1973年11月の第四次中東戦争に伴う原油価格の高騰により石油ショックが世界的に伝播し、国内外ともに石油の代替エネルギーとして原子力による発電量が増加した。しかしながら、国内では2011年3月の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により、放射性物質の漏出に伴う被曝および強制移住などの惨事を省みて、全ての原子力発電所を停止、再稼働するにあたって世界最高水準の規制基準に基づいた安全点検を実施している最中であり、原子力による発電の割合は2014年時点で0%になっている。

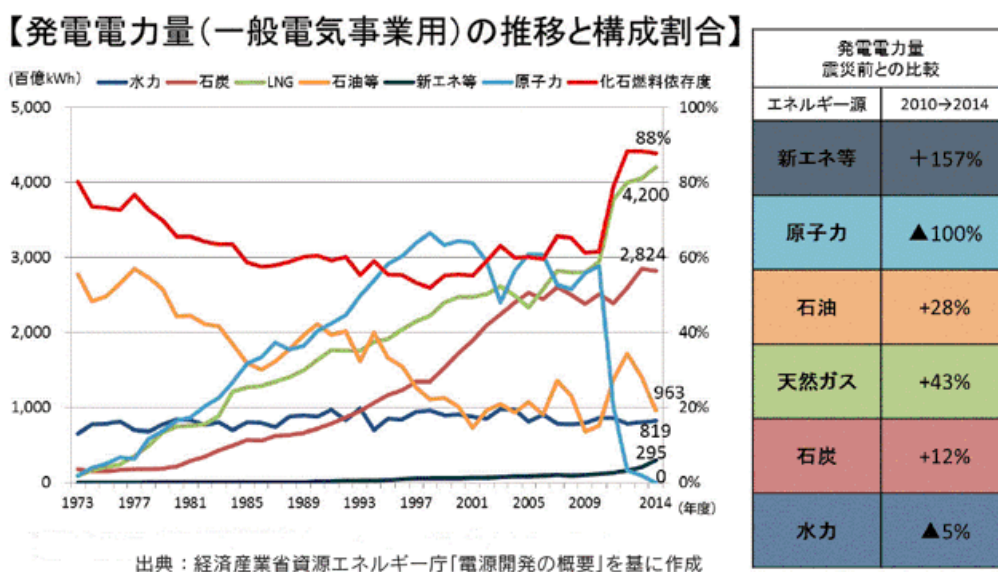


図1. 1. 3-2： 発電電力量構成の推移，東日本大震災前との比較  
[文献9]

国際原子力事象評価尺度において最高基準となるレベル7の深刻な事故を経験して、その後の処置に追われている状況下においても、原子力をベースロード電源のエネルギー源に位置づける理由としては、エネルギー政策の基本視点にある“3E”に優れているためである。安定供給 (Energy Security) が確保されることによりエネルギー自給率が向上し (準国産エネルギーと位置づけられる)、低廉な発電ができることにより経済効率性 (Economic Efficiency) が確保され、温室効果ガスを排出しないため環境 (Environment) へも適合できる。しかしながら、放射性廃棄物の処理、漏出した放射性物質の処理など、解決策を見出せていない課題を抱えたエネルギー源である。



次に化石燃料の電源構成における位置づけについて述べる。図1. 1. 3-3のエネルギー国内供給構成及び自給率の推移を時代背景とともに述べると、まず高度経済成長期といわれる1955年から1973年の間に、世界的な石油利用が拡大したエネルギー流体革命が起こり、国内ではいままで主流であった石炭の供給量を維持しつつ原油の供給量を拡大した。1973年の石油ショックを期に高度経済成長は終焉を迎え、バブル崩壊の1990年まで安定成長となった。この間、世界的に石油の代替エネルギーの必要性が広まり、国内の発電分野においては石油の割合を減少して、原子力発電および天然ガスを燃料とした火力発電を利用し始めた。バブル崩壊の1990年から現在にいたるまで、天然ガスの利用を拡大しており、原子力発電所を停止したのちは、化石燃料となる石油、石炭、天然ガスが国内のエネルギーを供給するエネルギー源になっている。その結果、エネルギー自給率は1960年において58.1%であるにもかかわらず2013年においては6.0%となり、エネルギー安全保障（Energy Security）の観点からは脆弱性を有している。

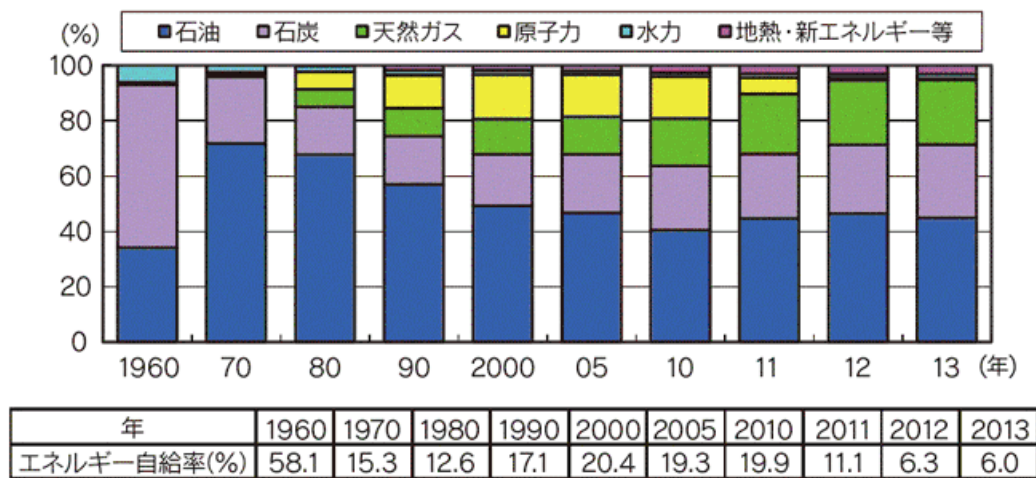


図1. 1. 3-3 : エネルギー国内供給構成及び自給率の推移  
[文献9]

さらには、図1. 1. 3-4の国内総生産と経済成長率の推移と国内エネルギー構成の推移との関連性を整理すると、現社会が化石燃料（石油、石炭、天然ガス）なしに、現社会の国内総生産を維持できないことが理解できる。高度経済成長期には経済成長率10%以上を維持していた。これは、原油を発電用燃料として精製し、電力へのエネルギー転換に使用して、鉄鋼、化学工業、非鉄金属のいわゆる重化学工業の分野で消費し、経済成長を牽引したためである。安定成長期は、目覚しい経済成長率ではないものの、バブルが崩壊するまで国内総生産を伸ばしていた。これは、主として中流階層の生活様式がエネルギー消費を伴う様式に変化していったことによる。都市における高層ビルの建設、移動手段としての電車・自動車、家庭における電化製品が普及し、安定的な経済成長を成し遂げた。この需要に伴い、石油、石炭による火力発電に加えて原子力発電および天然ガスによる火力発電も普及した。平成不況から現在に至るまでは、経済成長は±0%を変動しているが、国内総生産は500兆円規模を維持している。すなわち、経済成長を目的として高度経済成長期および安定成長期に導入・維持してきた化石燃料（石油、石炭、天然ガス）を一次エネルギーとした社会基盤が、現社会の国内総生産を維持していることを鑑みると、たとえエネルギー安全保障（Energy Security）の観点から脆弱性を有したエネルギー供給構成になっているとしても、化石燃料（石油、石炭、天然ガス）を主要なエネルギー源に位置づけなければならない。

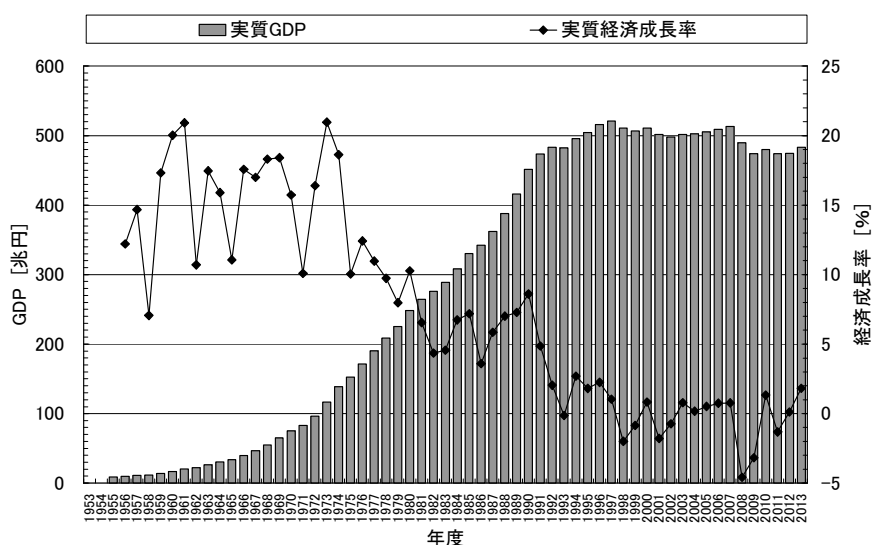


図1. 1. 3-4 : 国内総生産（GDP）と経済成長率の推移  
（内閣府 国民経済計算確報を元に作成）

他方で、経済効率性 (Economic Efficiency) より化石燃料を評価するとなると、枯渇性の資源であり今後の需要拡大を鑑みると、いつまでも低廉な価格で燃料調達ができるとは限らない。図1.1.3-5の世界のエネルギー消費量と人口の推移に示すとおり、国内のエネルギー供給構成と同様な時代背景のもとに世界のエネルギー構成も推移していることがわかる。また、そのエネルギー源の享受を受けられることができる人口が増えるとともにエネルギー消費量も増加することを示している。新興国が工業化とともに経済成長を遂げているなか、2030年までには、世界的にもエネルギー消費量は増大すると予測している。その内訳には、枯渇性の資源である化石燃料（石油、石炭、天然ガス）も含まれており、需要の拡大に伴う燃料調達費の高騰は容易に予測でき、低廉な発電ができる経済効率性 (Economic Efficiency) が確保されたエネルギー源になりえない可能性もある。さらには、環境への適合 (Environment) の観点から化石燃料を評価すると、温室効果ガスを排出するエネルギー源であるため、二酸化炭素回収・貯留技術の革新と普及が必須のエネルギー源となる。

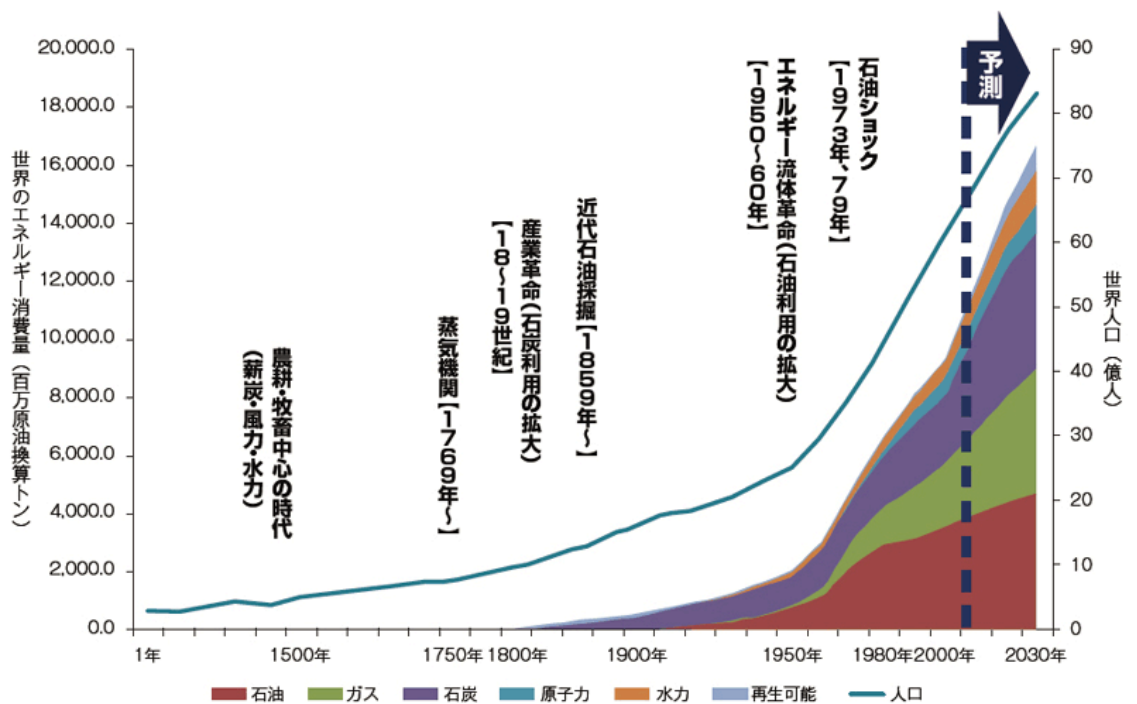


図1.1.3-5： 世界のエネルギー消費量と人口の推移[文献8]

次にエネルギー資源の利用形態について述べる。図1. 1. 3-6は、エネルギー源となる石油、天然ガス、石炭、ウラン、再生可能エネルギーの利用が、製品の原材料、動力、熱、光、情報伝達という形態に変化する過程をまとめている。電力が二次エネルギーという形態で動力、熱、光、情報伝達を担うことができ、石油、石炭、天然ガス、ウラン、再生可能エネルギーのいずれのエネルギー源からも発電することができる。一方で、石油、石炭は電力を発電するのみならず、化学製品、鉄製品の原材料にもなる。すなわち、原材料になりうる石油および石炭は枯渇性の資源であることを踏まえると、その用途を原材料に絞り、発電はその他のエネルギー源（天然ガス、ウラン、再生可能エネルギー）が担い、二次エネルギーとなる電力が動力、熱、光、情報伝達を提供する社会に変革することが望ましいと考える。

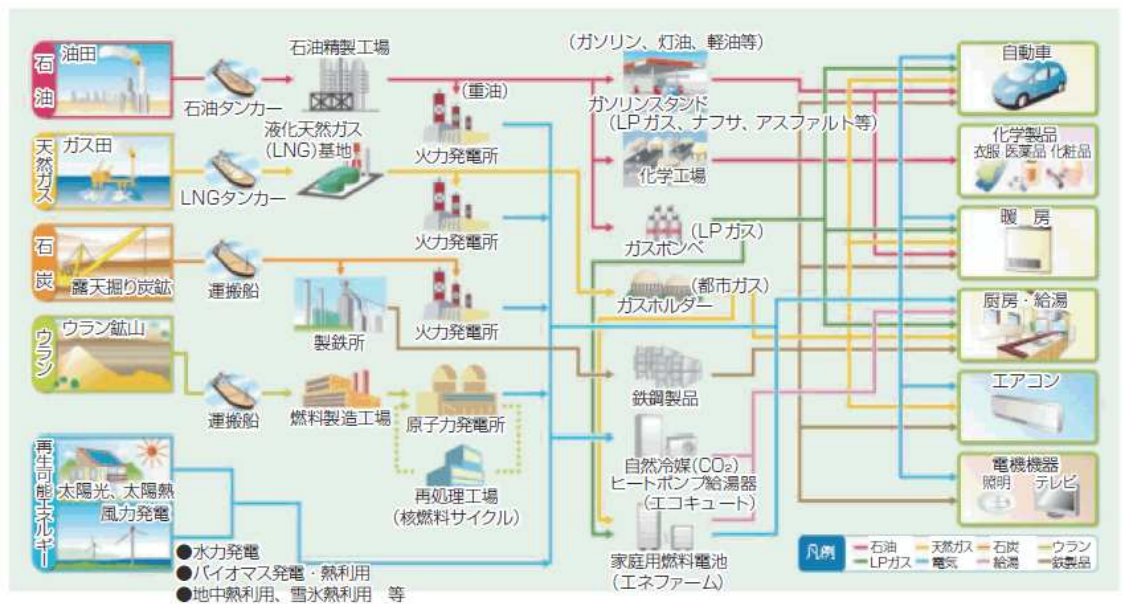


図1. 1. 3-6: エネルギー資源の供給過程と利用形態[文献8]

図1. 1. 3-7の一次エネルギー国内供給及び電力化率の推移に示すとおり、経済成長の終焉となった1990年においては電力化率が20%であったにもかかわらず、その後20年も経て電力化率は25%に向上している。これは、現状の国内総生産・生活様式を維持したまま、限りあるエネルギー資源を有効に活用し、持続可能な社会へと変革していることを示していると考える。

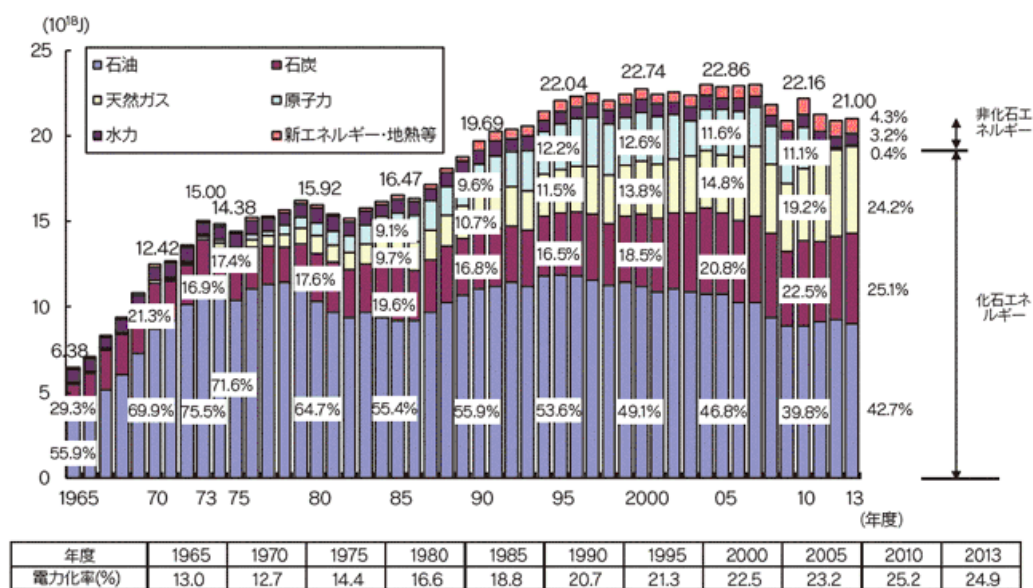


図1. 1. 3-7 : 一次エネルギー国内供給及び電力化率の推移  
[文献 9]

最後に、経済産業省が平成27年7月に策定した2030年に向けた長期エネルギー需給見通し[文献 11-16]について整理し、エネルギー政策における太陽光および風力の位置づけを述べる。

現社会の電源構成において主要なエネルギー源となっている化石燃料（石油、石炭、天然ガス）および原子力は経済成長を果たすために必須であったものの、それを消費することにより化石燃料の場合には温室効果ガスを排出して地球温暖化をもたらす、原子力においては放射性物質の漏出に伴い被曝・強制移住をもたらす、社会に不可逆的な変化を起こした。さらには、新興国の工業化による世界的なエネルギー消費量も増加しており、枯渇性である化石燃料の調達価格高騰・調達中止などの脆弱性が予測できる。

この時代背景および世界情勢のなかで、経済産業省は2030年に向けた長期エネルギー需給見通しを策定し、電力の需給構造については、安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標を同時達成する中で、次を基本方針としている。

- (i) 徹底した省エネルギー（節電）の推進
- (ii) 再生可能エネルギーの最大限の導入
- (iii) 火力発電の効率化
- (iv) 原発依存度を可能な限り低減

この基本方針に沿って、経済成長1.7%/年、2030年度の実質GDPを711兆円、人口が127百万人（2013年度）から117百万人（2030年度）に減少、業種別活動量、交通需要等の前提において、2030年度の一次エネルギー供給構造および電力需給構造を予測している。図1.1.3-8および図1.1.3-9に予測している2030年度の一次エネルギー供給構造および電力需給構造を記している。図1.1.3-10は一次エネルギー供給構造の推移である。

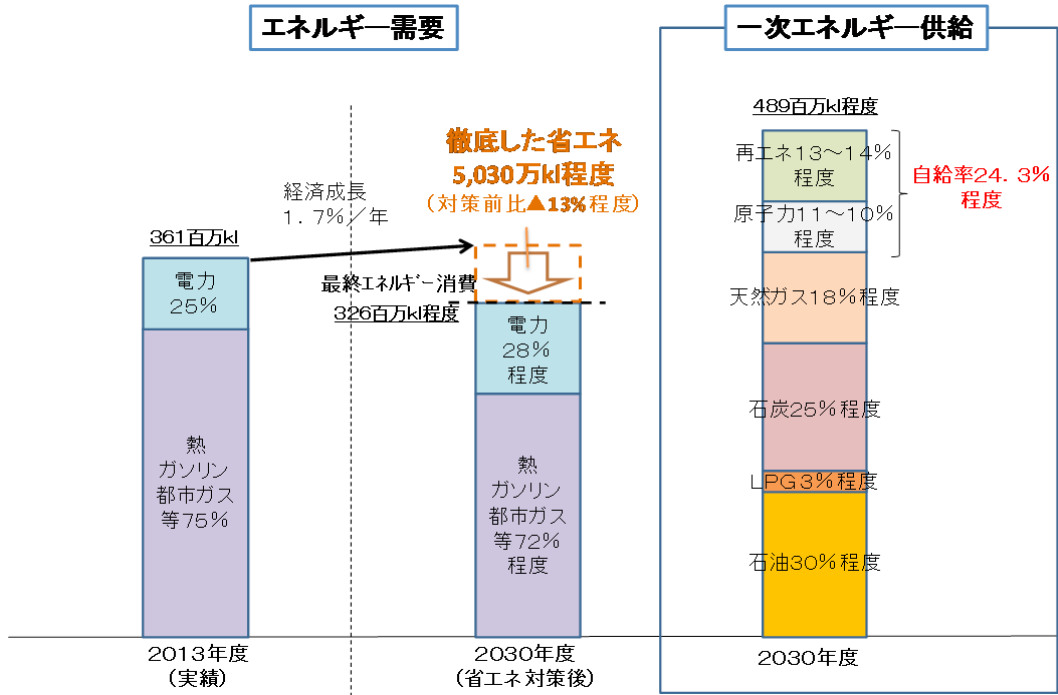


図 1. 1. 3-8 : 2030年度のエネルギー需給構造[文献 11]

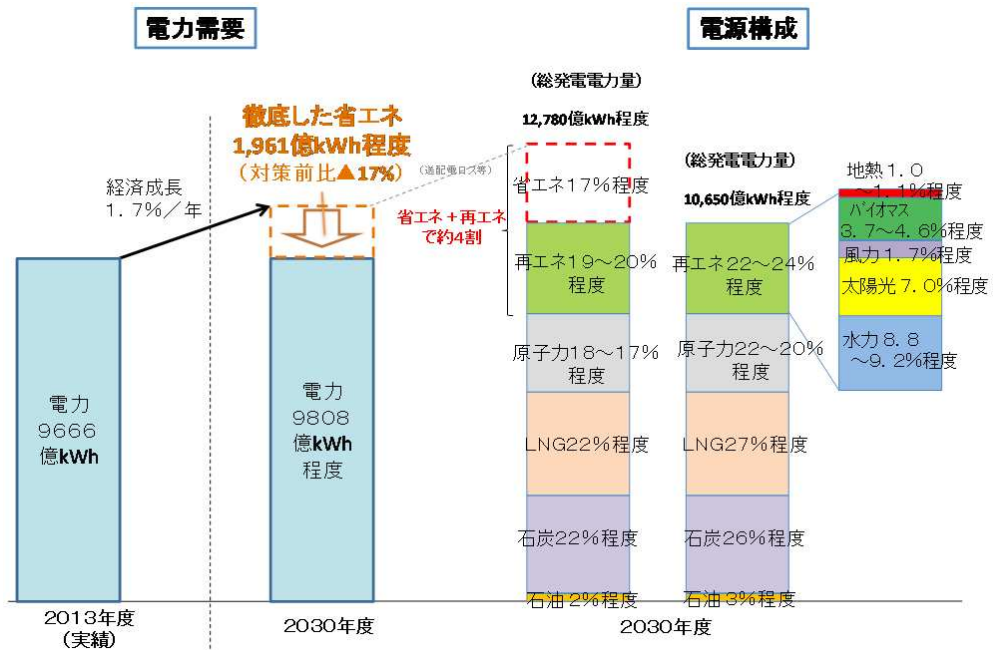


図 1. 1. 3-9 : 2030年度の電力需給構造[文献 11]

一次エネルギー国内供給(百万kl)の推移

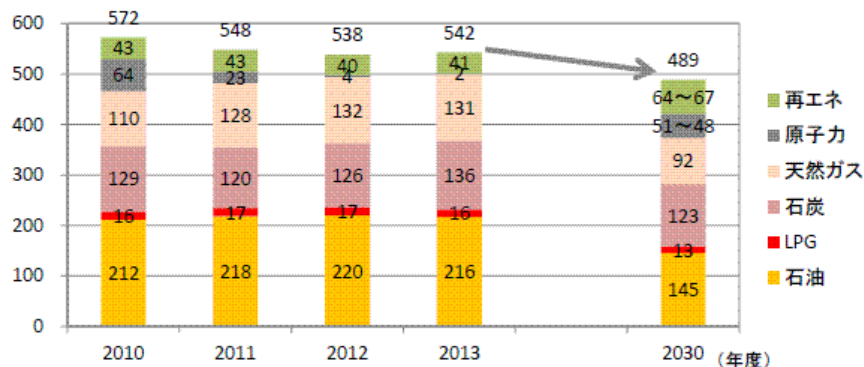


図1. 1. 3-10: 一次エネルギー国内供給の推移[文献12]

これを実現すると、エネルギー政策の基本視点のうち、数値目標が明確な“2E”について、次の改善が期待できる。

- (i) 安定供給 (Energy Security)
  - ✓ エネルギー自給率を24.3%に改善
  - ✓ 現状6%でありOECD34カ国中2番目に低い
  - ✓ 非資源産出国に遜色ない数値に改善
  - ✓ スペイン26.7%, イタリア20.1%, 韓国17.5%
- (ii) 環境適合 (Environment)
  - ✓ 温室効果ガス排出量を26%減(2013年度比)
  - ✓ エネルギー起源CO2排出量を21.9%減(2013年度比)
  - ✓ 欧米に遜色ない数値目標
  - ✓ EU24%減(2013年度比)
  - ✓ 米国18~21%減@2025年

ただし、上記を実現するために、次を前提としている。

- (i) エネルギー自給率24.3%
  - ✓ 再生可能エネルギー及び原子力を、それぞれ国産エネルギーおよび準国産エネルギーとしてエネルギー自給率に含めている。
  - ✓ 原子力発電所の再稼働に伴い11~10%(51~48百万kl)、再生可能エネルギーの導入により13~14%(64~67百万kl)の一次エネルギーを自給する。



✓ 再生可能エネルギーの電源構成における比率は次の通りである。

① ベースロード電源（原子力）を代替

（自然条件によらず安定）

- 8.8～9.2% 水力
- 3.7～4.6% バイオマス
- 1.0～1.1% 地熱

② ミドル電源・ピーク電源（火力）を代替

（自然条件によって出力が変動）

- 7.0% 太陽光
- 1.7% 風力

(ii) 温室効果ガス排出量を26%減（2013年度比）

- ✓ 温室効果ガス排出量は、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出削減量、その他温室効果ガス排出削減量（非エネルギー起源CO<sub>2</sub>、メタン、一酸化二窒素、HFC等4ガス）、吸収源対策（森林、農地土壌、都市緑化）、JCM等国际貢献の合計。
- ✓ エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量21.9%減は、再生可能エネルギー（太陽光、風力）の導入、原子力発電所の再稼働、石炭火力の高効率化による。

すなわち、経済産業省が策定した長期エネルギー需給見通しでは、調整電源と位置づけているミドル電源・ピーク電源のエネルギー源（天然ガス、LPG、石油）を代替してエネルギー自給率を向上するエネルギー源として太陽光および風力を位置づけているとともに、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献するエネルギー源としても位置づけており、2030年度までに最大限導入することを前提としている。

さらには、2030年度以降の見通しとしては、安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標の確実な実現と多層・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築に向け、革新的な蓄電池、水素社会の実現に向けた技術、次世代型再生可能エネルギー、二酸化炭素の回収貯留（CCS）及び利用に関する技術を始めとする新たな技術の開発・利用の推進、メタンハイドレートなど我が国の排他的経済水域内に眠る資源の活用に向けた取組も推進している。これは、エネルギー供給における脱炭素を主軸とした見通しであると考え、太陽および風などの世界中に無尽蔵にある再生可能な一次エネルギーを電力のみならず、水素やバイオディーゼルなどの二次エネルギーにも変換して利用する持続可能で再生可能な社会を見据えた研究が求められていることを示していると考えられる。

## 1.2 従来の研究

本節では、ウィンドソーラタワーを研究するに至るまで着目した従来の研究について、その発想、成果および課題について述べる。

### 1.2.1 太陽熱により創る上昇気流で風力発電するソーラチムニ

太陽熱を利用した風力発電では、「温かい空気は上昇する」という自然現象を大規模に利用したソーラチムニ（またはソーラタワー）[文献 18-25, 31,32]がある。このシステムは Schlaich[文献 20]により提案され実証された。ソーラチムニは、透光性の集熱部により地表面と集熱部との間にある空気を太陽熱により加熱する（ビニルハウスの原理）。これにより、集熱部の中心に設置している円筒状の塔内部に上昇気流を創る。この上昇気流により塔下部に設置している風力タービンを回転して風力発電する。

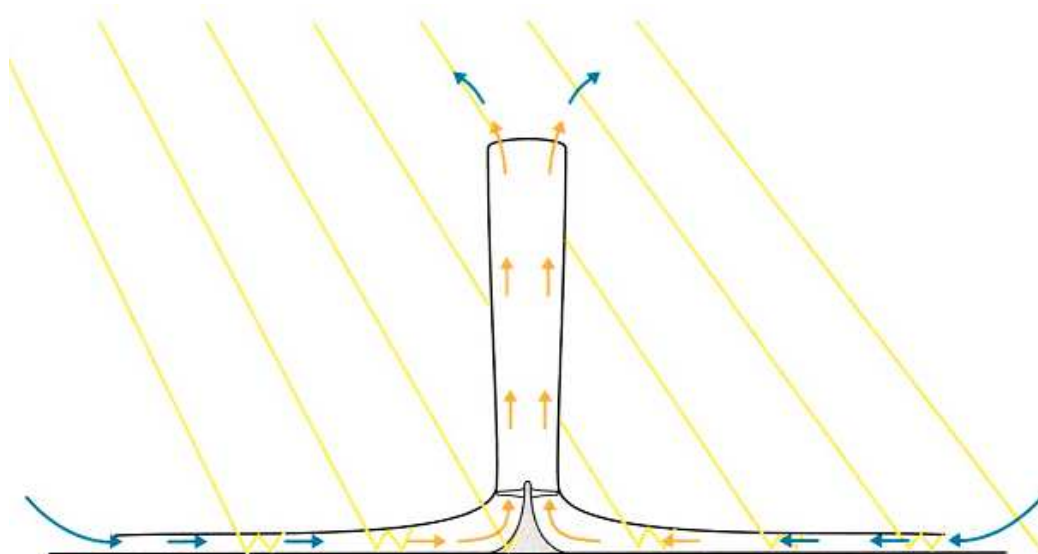


図 1. 2. 1-1 : 太陽熱を利用して上昇気流を創り風力発電をするコンセプト[文献 20]

ソーラーチムニーの出力は、式 (1.2.1-1) により定式化しており、集熱部の面積にて得る日射量と集熱部、円筒型塔、風力タービンの効率の積としている。したがって、設置面積辺りの出力を設計する際には、集熱部の面積および円筒型塔の高さが主要な性能値となる。

$$P_{electric} = P_{wt, max} \eta_{wt} \quad (1.2.1-1)$$

$$P_{wt, max} = \frac{2}{3} \eta_{coll} \eta_c A_{coll} G \quad (1.2.1-2)$$

$$\eta_c = \frac{g}{c_p T_0} H_c \quad (1.2.1-3)$$

$P_{electric}$	W	ソーラチムニーの出力
$P_{wt, max}$	W	風力タービンで得る最大エネルギー
$\eta_{wt}$		風力タービンの効率
$\eta_{coll}$		集熱部の効率
$\eta_c$		円筒型塔の効率
$A_{coll}$	m <sup>2</sup>	集熱部の面積
$G$	W/m <sup>2</sup>	日射量
$g$	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
$c_p$	J/khK	空気の熱容量
$T_0$	K	周囲の気温
$H_c$	M	円筒型塔の高さ

Schlaich の発想は日射が豊富で広大な敷地に集熱部を設置し、集熱部の温暖な環境を農業に活用しながら電力を供給するシステムを提唱している。そのため、単機辺りの発電効率を追求してきた既存の太陽光発電システムおよび風力発電システムに比べると、設置面積辺りの発電効率はよくない。

表 1. 2. 1-1 : 装置規模に対する出力および発電量[文献 20]

出力	MW	5	30	100	200
集熱部直径	m	1110	2200	3600	4000
塔高さ	m	445	750	950	1500
塔内径	m	54	84	115	175
年間発電量※	GWh/y	13.9	87.4	305.2	600.0
※2300kWh/m <sup>2</sup> y の日射を前提					

Schlaich は次の観点を重要視し、15年にわたる研究試作を実施した。

- 石炭・石油より発電すると環境を破壊し、再生可能でない。
- 開発途上の国では石炭および石油を調達する余裕がない。
- 原子力発電所は危うく、受け入れることができない。
- 太陽のエネルギーを利用するにあたり、次が重要である。
  - ✓ 単純で信頼性を有す。
  - ✓ 開発途上国の技術力でも建設できる。
  - ✓ 再生可能な素材により製造できる。
  - ✓ 建設および運用経費が低廉である。

この信念のもと、太陽熱を利用する思想は100kW級の試作機をスペインのマンザナレス地方にて実証試験した際に初めて具現化した。実証試験のうち、連続運転期間中の32ヶ月間には、カットイン風速2.5m/s以上の上昇気流が円筒型塔内部に誘起すると、風力タービンが回転し、発電した電力は公共の電力網へ供給された。一日平均8.9時間発電し、総発電時間は8611時間である。信頼性は95%であり、5%はスペインの電力網が週末に使用停止するため、自動的に運転を停止する仕組みにしていたためである。単純な構造で容易に建設ができて、連続運転時の人員は1名で運用も容易であり信頼性があることを示すことができた。さらには、1987年のデータを整理すると、総発電時間3157時間のうち、夜間の発電時間は244時間であり、残留熱により上昇気流を誘起して発電するときもあったようである。それにもまして注目すべきことは、150W/m<sup>2</sup>以上の日射がある時間帯は3067時間であり、総発電時間が3157時間（うち244時間は夜間）である。これは日射があるときには安定して連続的に発電することを示している。

32ヶ月にわたる連続運転期間中の一日平均・最大・最小の稼働時間および稼働率を月別にまとめたグラフを図1.2.1-2に示す。季節による日射時間の遷移（夏季は多く、冬季は少ない）が稼働時間に表れている。稼働率の最小が1月の22%、最大が6月の51%となり年間を通した平均は37%となる。非稼働となる時間帯には、日射で蓄熱した残留熱を利用して上昇気流を誘起する工夫も研究したようであるが、日射を得ない時間帯における発電は思わしくなかったようである。表1.2.1-2に稼働率と発電量をまとめる。

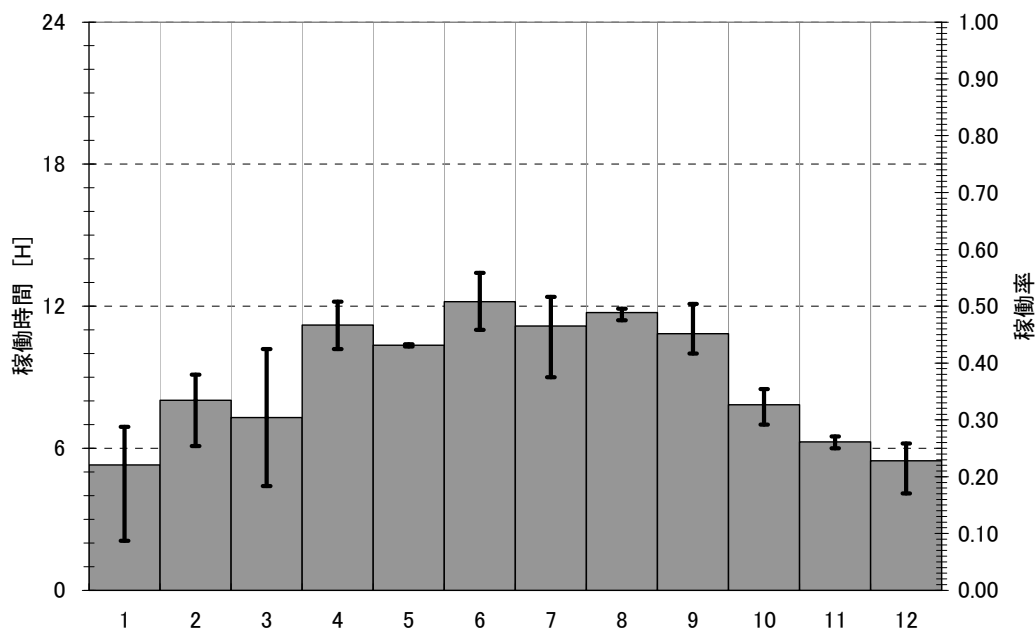


図 1. 2. 1-2 : 実証実験時の稼働時間および稼働率  
 (月別の一日平均・最大・最小,  
 1986年~1989年の連続運転期間32ヶ月)  
 [文献 20]

表 1. 2. 1-2 : プロットタイプ実証実験時の稼働率と発電量  
 (稼働率は1986年~1989年の連続運転期間32ヶ月,  
 発電量は1987年)  
 [文献 20]

統計値	月	稼働率[%]	発電量[kWh/day]
最大	6	51	約270
平均	—	37	約121
最小	1	22	約10

※年間発電量は、44.19MWh.  
 (1987年の実測値)

発電量に影響する性能値として稼働率のほかには出力がある。風力タービンを上昇気流により回転して発電するため、上昇気流の風速が出力に影響する。ソーラーチムニの集熱部および円筒型塔を日射により塔内部に上昇気流を誘起する構造体として考える。Schlaich は、ソーラーチムニの円筒型塔に生じる上昇気流の風速を式 (1.2.1-4) のように定式化している。

$$V_{c,\max} = \sqrt{2gH_c \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (1.2.1-4)$$

$V_{c,\max}$	m/s	円筒型塔内部の上昇気流風速
$g$	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
$H_c$	M	円筒型塔の高さ
$\Delta T$	K	集熱部流入時と 集熱部流出（塔流入）時の温度差
$T_0$	K	地表面周囲の気温

プロットタイプでは、温度差が最大  $\Delta T = 1.7 \text{ K}$  で円筒型塔内部に  $v_c = 1.2 \text{ m/s}$  の上昇気流を記録しており、式 (1.2.1-4) と概ね一致する。ただし、プロットタイプの設計では、温度差が最大  $\Delta T = 3.5 \text{ K}$  になり、円筒型塔内部には  $v_c = 1.6 \text{ m/s}$  の上昇気流を誘起して  $100 \text{ kW}$  の出力を見込んでいたようである。しかしながら、実証試験では設計時に期待したほどの温度差を得ることができず、これにより期待した上昇気流の風速を得ることもできなく、結果として期待した出力の半分である  $50 \text{ kW}$  を得た。この要因は期待したほどの日射を得ることができなかつた、もしくは、期待した日射を得たにもかかわらず熱の散逸により気流の温度差が期待していたほどあがらなかつたためと考えられる。したがって、期待する出力を得るためには集熱部の空気を効果的に加熱する工夫を迫及して、期待する温度差を得る仕組みを確立する必要がある。もしくは、発電の原理が上昇気流により風力タービンを回転することにより発電するため、期待した上昇気流の風速を得る工夫を迫及して、期待する出力を得る仕組みを確立する方策もある。本研究では、後者を迫及していく。

## 1.2.2 風を集めて高出力を得るレンズ風車

風を集めて高出力を得る風車としては、「空気は低圧領域に流れ込む」という自然現象を利用したレンズ風車がある。この風レンズ装置は大屋[文献 26-28, 38]により発案され、風洞実験・野外実験を経て開発された。風レンズ装置は、風車をディフューザの形状をした中空構造体のスロート部に設置し、ディフューザの圧力回復の性質を利用してスロート部に流れ込む空気の流量を増やして高出力化を図る。さらには中空構造体の出口外周を鏝で覆い、構造体外部の流れにより大きな渦を中空構造体の出口部に形成する。これによりディフューザの出口付近をより低圧にしてディフューザに流入する空気の流量をさらに増やす相乗効果を利用することで、風車のみ比べて高出力な風力発電を行う。

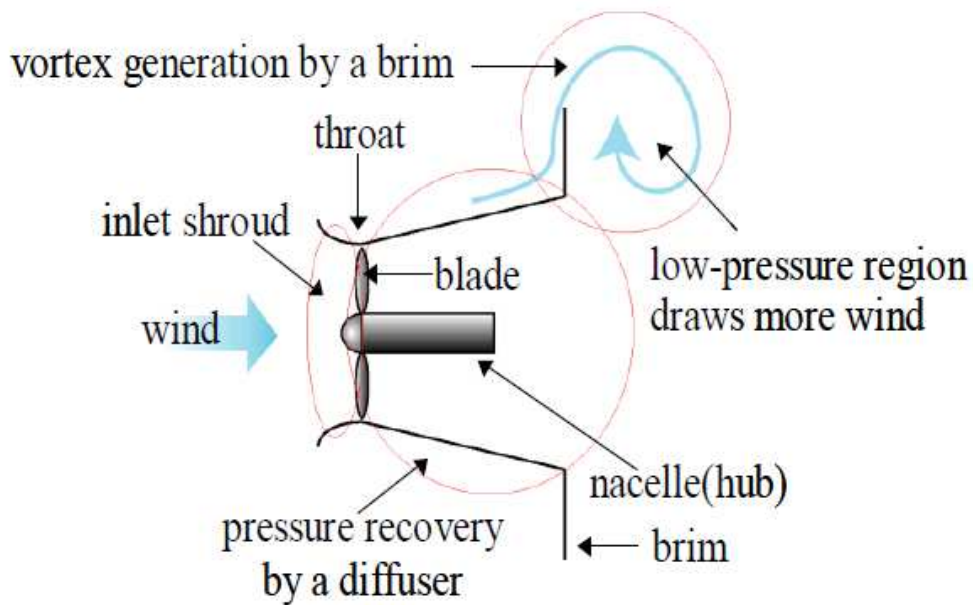


図1. 2. 2-1 : 低圧領域を風車後流に形成して風力発電を高出力化するレンズ風車のコンセプト[文献 28]



風車を設置せずに、中空構造体のみで得る中心軸方向の風速分布を図1. 2. 2-2に示す。ディフューザ形状の中空構造体では、入口部の風速が加速する。したがって、風車をディフューザのスロート部に設置すると、一様流に比べて増速した風が風車のロータ面へ流入することになるため、高出力化が見込める。大屋らは、この特性に着目し、風レンズ装置の基本形状にディフューザを採用した。

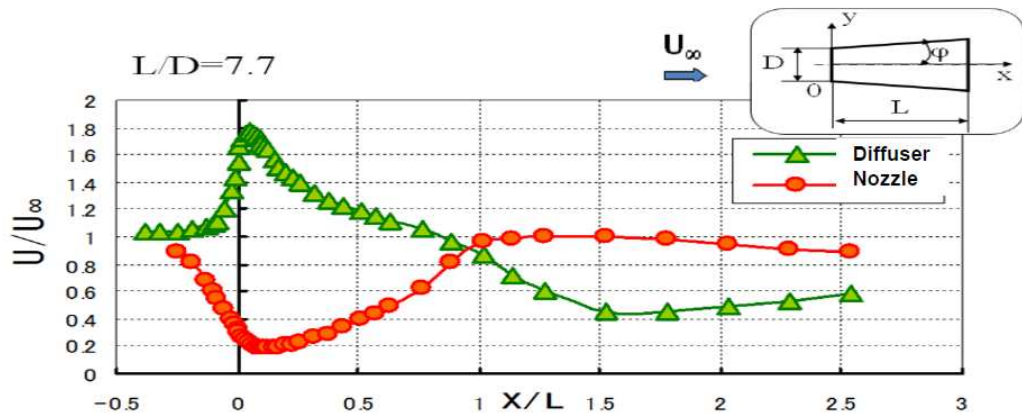


図1. 2. 2-2 : ディフューザのスロート部における風速の増速  
[文献 28]

基本形状がディフューザであるため、中空構造体の中心軸方向が長いほど圧力回復の効果があり、スロート部での増速が見込める。しかしながら、一般の水平軸風車を覆う中空構造体にするには、風車の主軸方向には長い中空構造体を覆うことは現実的でない。風車後流に低圧領域を形成することができれば、さらに増速した流入風速を風車ロータ面に得ることができる。この要求を満たすための発想が、鏝付きディフューザである。ディフューザ形状の中空構造体の出口部を鏝で覆い、中空構造体の外部流が鏝により大きな渦を形成することで、ディフューザ出口部に低圧領域を形成する。これにより、ディフューザ入口部の風速がより加速することになる。図1. 2. 2-3は、鏝付きディフューザのスロート部に風車を設置したレンズ風車の出力を野外実験にて計測した結果を示している。風車のみの場合に比べて、500W級のレンズ風車では、約1.4倍の出力曲線を得ることが実証された。

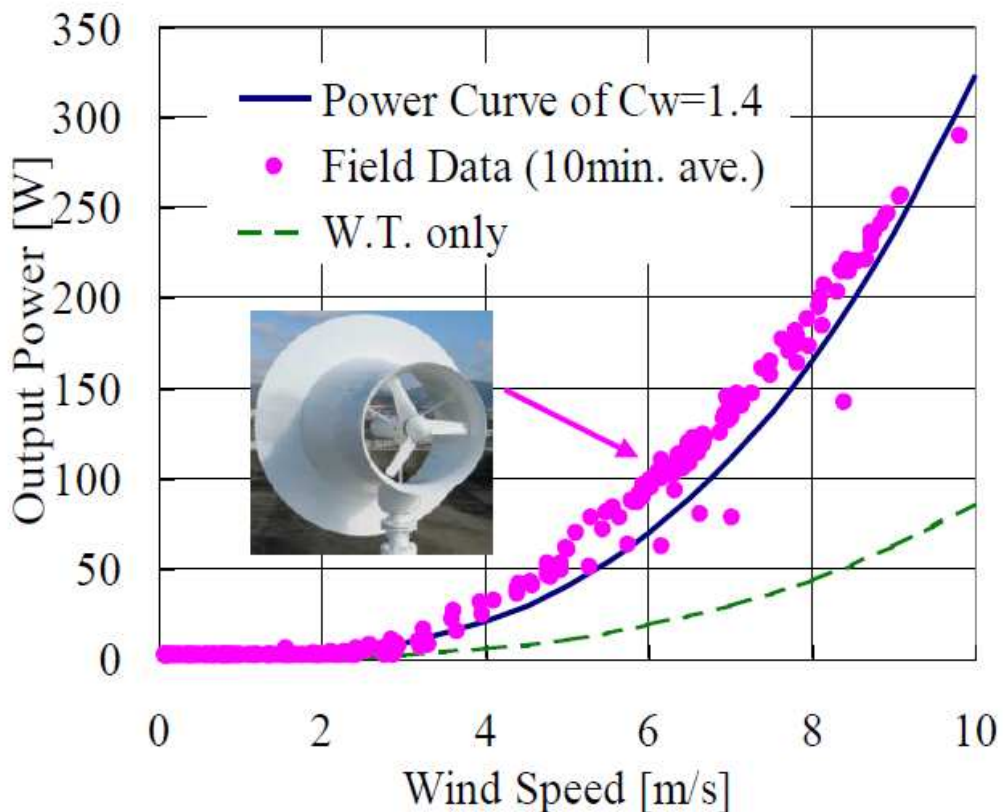


図1. 2. 2-3 : 風レンズ装置による風車の高出力化[文献 28]

### 1.3 本研究の目的

風力および太陽をエネルギー源とする発電システムの研究を行う意義は、社会に不可逆的な変化を及ぼす副産物（温室効果ガス、放射性物質）を排出しない発電システムを実用化するためである。温室効果ガスの排出は地球温暖化を引起している。現状のまま排出すると気温上昇に伴う気候変動に生態系が適応できなくなるため、温室効果ガスの排出を緩和していく必要がある。放射性物質の漏出事故は被曝者・強制移住をもたらした。漏出した放射性物質は、大気・河川・海洋による移流・拡散のみならず、農産品・漁獲類を介して流通品による移送・拡散も懸念されており、その被害範囲は断定できていない。いずれも、元の状態に戻すことができない人為起源の不可逆的な変化であり、持続的かつ再生可能な社会を築くうえで回避しなければならない。本研究では温室効果ガスも放射性物質も排出することがなく、世界中に無尽蔵に存在する風力および太陽を利用する発電システムを研究の対象としている。

風力および太陽をエネルギー源としたときには、その特性により、次が課題となる。

- (i) エネルギー密度が小さい
- (ii) 常時安定的に供給できない
  - ✓ 太陽は日射を得る時間帯に限定される
  - ✓ 風は風が吹くときに限定される

自然条件によって出力が変動する課題があるゆえ、既存の太陽光発電および風力発電は、電源構成においてベースロード電源にはなりえないが、国内で自給できる、かつ、温室効果ガスを排出しないという特性より、調整電源となるミドル電源およびピーク電源の火力発電（天然ガス、LPG、石油）を一部代替できる発電方式として位置づけている。したがって、太陽および風力を利用する発電システムを研究する際には、高出力化・常時安定供給による発電量増加を目的として上記課題に取り組む必要がある。

研究対象となるウィンドソーラータワーは、上空風および太陽熱の独立したエネルギー源を使用して風力発電する新しい概念の複合発電システムである。日射を得るときには太陽熱、上空風を得るときには上空風により風力タービンへ上昇気流を集めて風力発電するコンセプトである。

これを実現するために、基本形状はソーラーチムニの形状とした。これにより、日射を得るときには太陽熱により上昇気流を塔内部に創ることができる。このときの上昇気流は然程速くないため、増速する仕組みを適用することで、上昇気流を加速して高出力化を図る必要がある。本研究では、レンズ風車で風を集めるために採用した基本形状のディフューザを塔内部の形状として採用する。これにより、ディフューザ形状のスロートは低圧領域となり、円筒形状に比べて増速した上昇気流が期待でき、高出力化が見込める。

次に、日射とは独立したエネルギー源となる上空風を利用して上昇気流を集める仕組みについて述べる。本研究では、レンズ風車で試行した鏢付きディフューザの発想を用いて、上空風を渦生成板により乱すことでディフューザ形状の塔出口部に低圧領域を形成し、塔内部に上昇気流を集めることができ、高稼働率化が見込める。

最後に、日射を得るときには太陽熱により上昇気流を創り集めて、日射を得ないときには上空風を利用して上昇気流を集めることとして、各々の場合における発電量、稼働率、設備利用率を推定する。この結果を用いて独立したエネルギー源である上空風および太陽熱を上昇気流という共通の作動流体を用いる複合発電システムとして見込む発電量、稼働率、設備利用率を明らかにする。

まとめると、本研究の目的は次の通りである。

#### 1. 太陽熱により創る上昇気流を集める研究

太陽熱をエネルギー源として利用する際の高出力化を達成するために、風力タービンへ流入する上昇気流が流れる塔内部の形状を円筒からディフューザに変更して上昇気流の増速率を明らかにする。

#### 2. 上空風により上昇気流を集める研究

太陽熱とは独立したエネルギー源である上空風を利用して高稼働率化を達成するために、風力タービンへ流入する上昇気流が塔上部に流れる上空風により誘起することを明らかにする。

### 3. ウィンドソーラータワーの発電量推定に関する研究

独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を用いて風力発電したときに得る発電量，稼働率，設備利用率を明らかにする

本研究は実大の装置を製作する前段の研究であり，卓上の模型を対象として上空風および太陽熱を模擬し，塔内部に誘起する上昇気流を確認する予備実験を行う．さらには，同実験を対象とした流れ場の数値シミュレーションを行い，流れ場の機構を明らかにする．そして，これらの結果より，風力タービンへ流入する上昇気流の増速率を決定し，基本形状であるソーラーチムニと比較した高出力化および高稼働率化に伴うウィンドソーラータワーの発電量，稼働率，設備利用率をまとめる．

## 1.4 論文構成

本研究では、次を段階的に述べて、上空風および太陽熱を利用して複合発電するウィンドソーラータワーの有用性について議論する。

### 第1章 研究の背景、目的の明確化

- 地球温暖化，エネルギー政策の情勢
- 風もしくは太陽を利用する従来の発電システム
- ウィンドソーラータワーの研究目的

### 第2章 太陽熱により創る上昇気流を集める研究

### 第3章 上空風により上昇気流を集める研究

### 第4章 ウィンドソーラータワーの発電量推定に関する研究

- 太陽熱により創る上昇気流を集めて高出力化する効果
- 上空風により上昇気流を集めて出力を得る効果
- 上空風および太陽熱による上昇気流を複合して発電する効果

## 第2章 太陽熱により創る上昇気流を集める研究

本章では、研究対象となるウィンドソーラータワーが太陽熱を使用して風力タービンへ上昇気流を集めて風力発電する場合について、卓上の模型を対象として実施した塔内部に誘起する上昇気流を確認する予備実験および流れ場の数値シミュレーションについて述べる。本章の結論として、風力タービンへ流入する上昇気流が流れる塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更することで得る上昇気流の増速率を決定する。

### 2.1 コンセプト

太陽熱により生じる上昇気流を用いて風力発電をする仕組みはソーラチムニのプロットタイプで実証された。したがって、本研究では基本形状をソーラチムニの形状とした。すなわち、透光性の集熱部 (Heat Collector) の下に存在する空気を太陽熱により加熱し、集熱部の中央に高くそびえ立つ塔内部に上昇気流を誘起して、塔下部に設置する風力タービンを回転することで風力発電を行うシステムに変わりはない。しかしながら、このときの上昇気流は然程速くないため低出力となる。増速する仕組みとして、塔内部の形状をディフューザに変更する。風車の設置位置となる塔下部をスロートにして低圧領域を形成することで増速した上昇気流が期待でき、高出力化が見込める。太陽熱により創る上昇気流を集める概念図を図2. 1-1に示す。

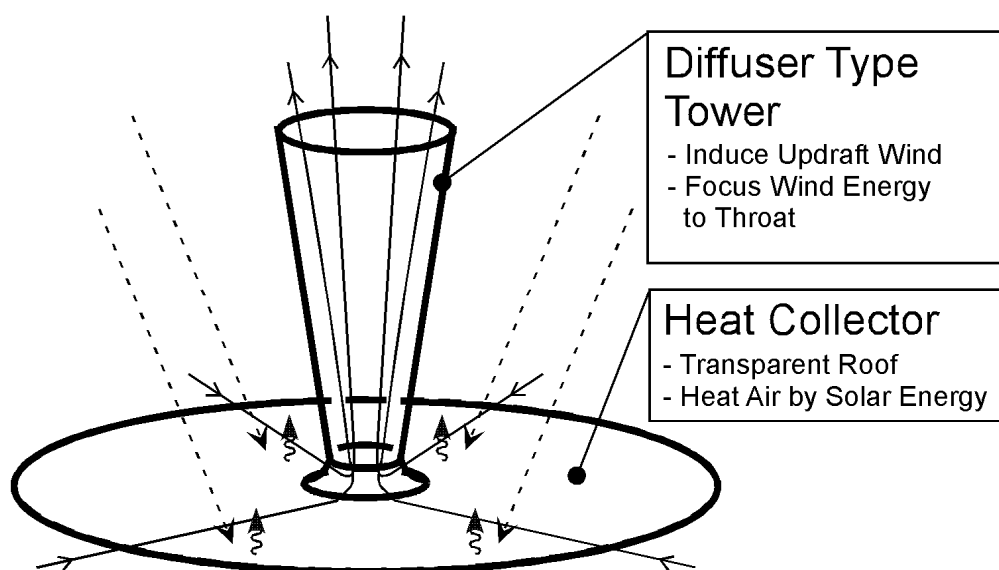


図2. 1-1 ディフューザ形状の塔による創風と集風

## 2.2 室内実験

本研究では実大の装置を製作して実験する前段として卓上の模型を用いて上昇気流を確認する予備実験を行う。さらには、塔下部に風車を設置せずに、風車を覆う構造体の形状差による上昇気流の増速を明らかにする。

### 2.2.1 実験目的

塔内部の形状が円筒ではなくディフューザの場合、スロートにおける上昇気流が増速することを明らかにする。

### 2.2.2 流れ場の支配方程式と動力学的相似性

ウィンドソーラタワーの周囲に存在する風を微小と仮定し、太陽熱により加熱した地面と周囲との温度差により自然対流が生じる環境とする。この環境を表す流れ場の支配方程式には、ブシネスク近似を適用した連続式(式 2.2.2-1)、運動量式(式 2.2.2-2)、エネルギー式(式 2.2.2-3)を用いる。これにより、運動量式に浮力項を導入する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.2-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \text{Ri} \theta' \delta_{i3} \quad (2.2.2-2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{PrRe}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.2.2-3)$$

ここで、 $\delta_{i3}$  はクロネッカーのデルタである。 $\theta' = (\theta - \theta_0) / \Delta\theta$  は、温度を参照温度  $\theta_0$  と代表温度差  $\Delta\theta$  で無次元化した温度である。無次元数は  $\text{Re}$  レイノルズ数、 $\text{Ri}$  リチャードソン数、 $\text{Pr}$  プラントル数である。この3つの無次元数が同じである場合、流れ場の動力学的相似性が成り立つ。すなわち、大規模な実物周りの流れ場と卓上模型周りの流れ場との動力学的相似性が成り立ち、卓上模型で得た流速を用いて実物大の場合における流速を推定することができる。しかしながら、 $\text{Ri}$  リチャードソン数と  $\text{Re}$  レイノルズ数を同時に一致することは出来ないため、浮力項が支配的な自然対流場では  $\text{Ri}$  リチャードソン数を流れ場の動力学的相似性を示す無次元数として使用する。本章で議論する自然対流場では、 $\text{Ri}$  リチャードソン数が動



力学的相似性を示す無次元数となるため、温度設定が同じであるとする、室内実験用の模型で得た流速  $u$  と規模比  $L/l$  の自乗根との積により実物大の場合における流速  $U$  を推定できる (式 2.2.2-4, 式 2.2.2-5)。

$$Ri = \frac{gL}{U^2} \frac{\Delta\theta}{\theta_0} = \frac{gl}{u^2} \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \quad (2.2.2-4)$$

$$U = u \sqrt{\frac{L}{l} \frac{\Delta\theta/\theta_0}{\Delta\theta/\theta_0}} = u \sqrt{\frac{L}{l}} \quad (2.2.2-5)$$

図 2. 2. 2-1 に実物大の流速  $U$  と室内実験時の流速  $u$  との関係を規模比  $L/l$  ごとに示す。つまり、実物大のシステムにおいて、風力タービンのカットイン・カットアウト風速が 5 と 30 m/s と仮定すると、規模比 1/250 の室内実験用の模型においては約 0.3 と 1.9 m/s になる。

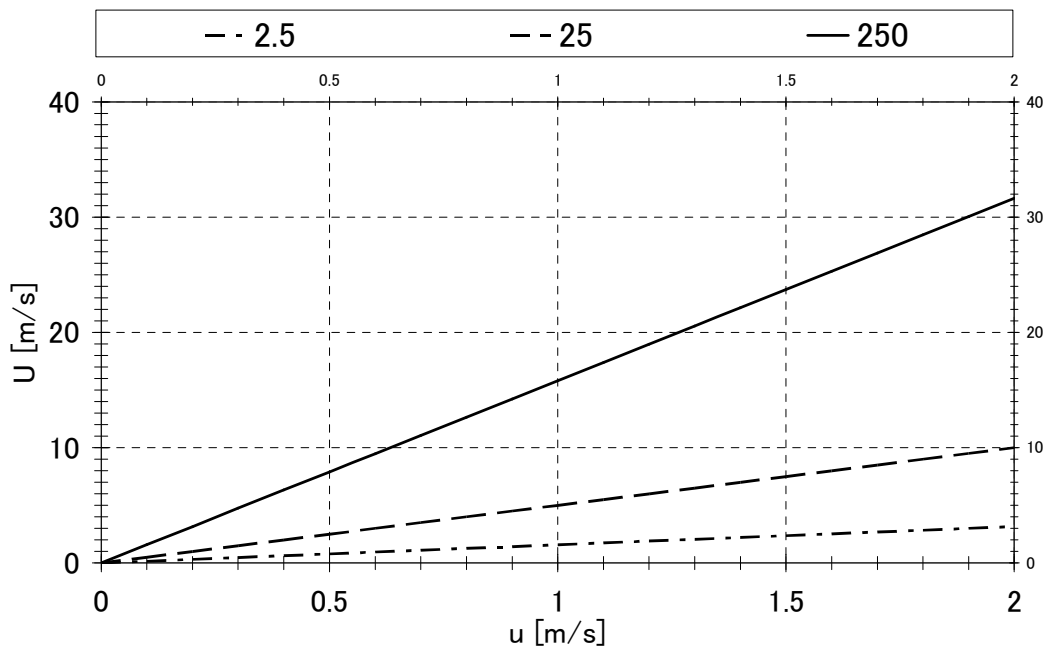


図 2. 2. 2-1 実物大の流速  $U$  と室内実験時の流速  $u$  との関係 (規模比  $L/l$  : 2.5, 25, 250)

### 2.2.3 実験用の模型

円筒形状とディフューザ形状の塔下部における風車ロータ面積を一致させて流入風速を比較する。ディフューザのスロート直径  $D$  を円筒の直径と同一径とする。ディフューザの開き角は  $4^\circ$ 、高さはディフューザ及び円筒ともに  $6.66D$  とする。形状諸元を図 2. 2. 3-1 に示す。高さ  $100\text{ m}$  規模の  $1/250$  模型とするため、スロート直径  $D$  を  $60\text{ mm}$  とした。

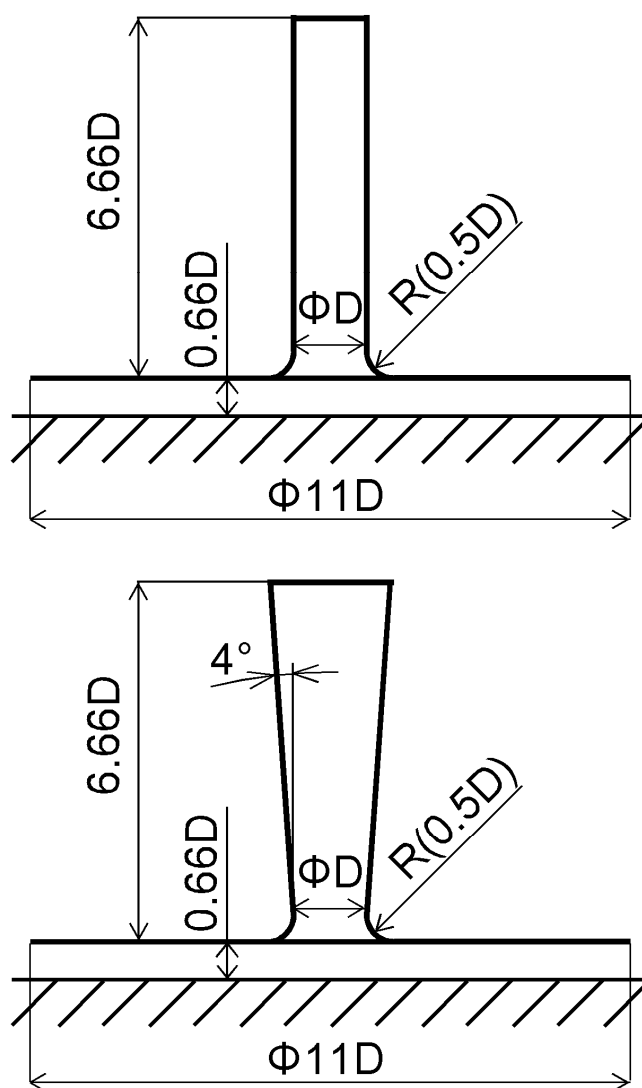


図 2. 2. 3-1 実験用模型の形状諸元  
(上：円筒型，下：ディフューザ型)

## 2.2.4 実験装置

太陽熱が加熱する地表面を模擬した温度制御面の上に模型を設置し、温度制御面の設定温度と室温との温度差により駆動する自然対流を室内に発生させることで流れ場を模擬する。

実験装置は温度制御面、模型及び塔内部の上昇気流の流速を計測する流速計測装置からなる。実験構成を図 2. 2. 4-1 に示す。温度制御面の表面を設定温度で一様に保持するため、シリコンラバーヒータ上に銅板(1 m×1 m)を敷き、銅板の表面温度を白金測温抵抗体にて常時計測して電子温度調節器によりシリコンラバーヒータの加熱及び非加熱を2自由度PID制御する。模型の素材はスモークワイヤ法での上昇気流目視確認や上昇気流の流速計測位置目視確認のため透明なアクリルを用いる。模型は円筒型及びディフューザ型を各々温度制御面の中央に配置する。流速計測装置はI型プローブと結線した熱線流速計、I型プローブ近傍温度を計測する熱電対温度計及びI型プローブの計測位置を制御するトラバース装置からなる。I型プローブと結線した熱線流速計の校正には、九州大学応用力学研究所所属の小型校正装置を用いる。熱線流速計による校正方法を付録Aに記す。なお、熱線流速計により流速を計測するに先立ち、熱線流速計による計測手法の妥当性を粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)での計測結果と比較して検証した。さらにはタンポポの冠毛を上昇気流にのせて、その移流速度を計測し、上昇気流が生じていることを確認した。これらの試みを付録Bに記す。

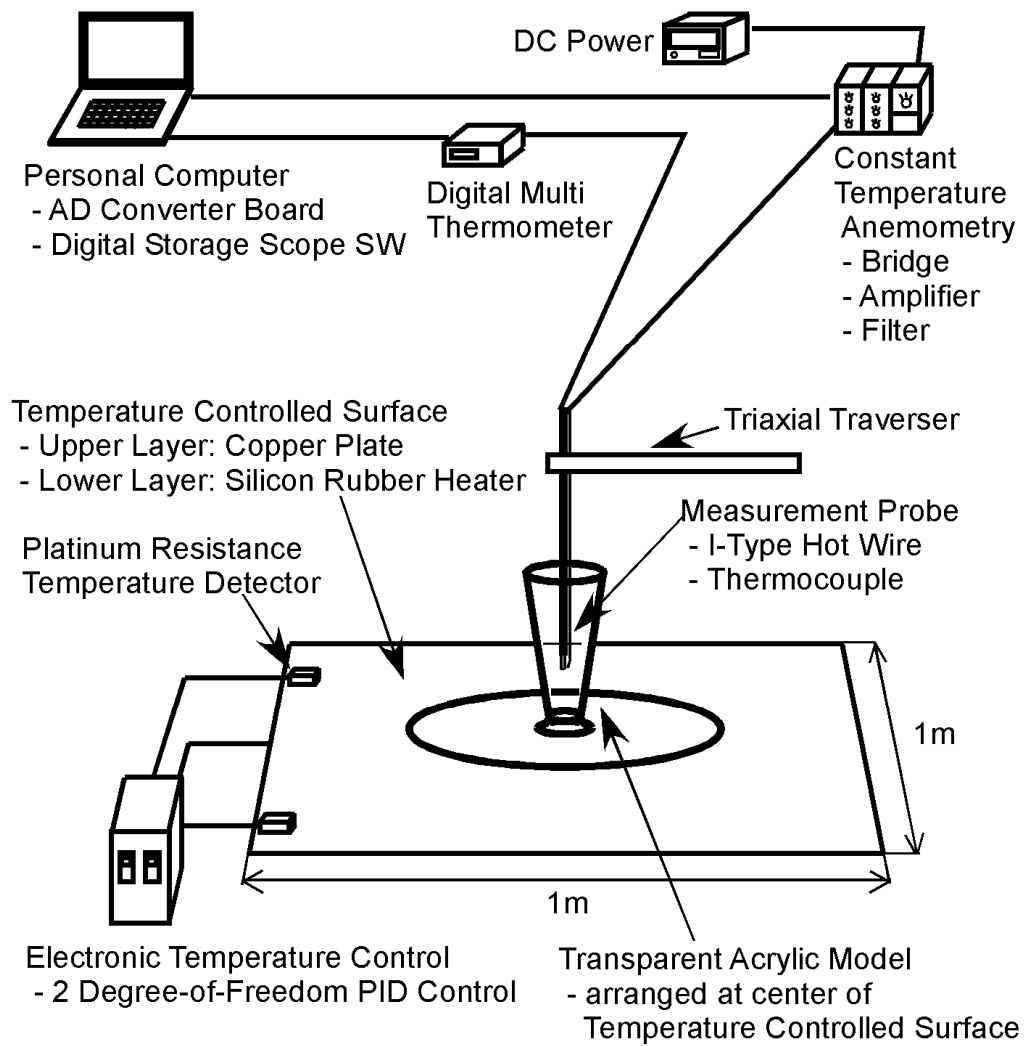


図 2. 2. 4 - 1 室内実験の構成

## 2.2.5 実験結果と考察

塔中心線と温度制御面との交点を原点とし、塔中心線の高さ方向を  $z$  軸正方向とする。計測位置を図 2. 2. 5-1 に示す。温度制御面の設定温度は実験開始時の室温に  $30^{\circ}\text{C}$  を加えた温度とする。計測は温度及び上昇風速であり、サンプリング周波数  $500\text{Hz}$ 、サンプリング時間  $20\text{s}$  で取得した時系列データの平均値とする。

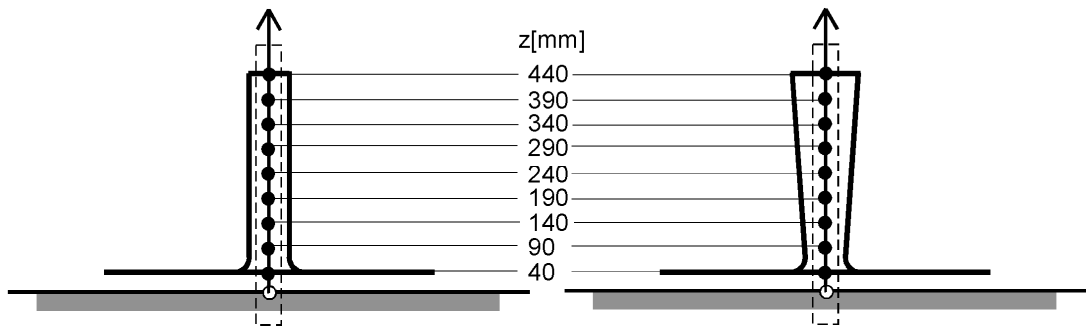


図 2. 2. 5-1 計測位置 (左：円筒型, 右：ディフューザ型)

図 2. 2. 5-2 に計測結果を示す。温度制御面の設定温度は実験開始時の室温  $16^{\circ}\text{C}$  に  $30^{\circ}\text{C}$  を加えた  $46^{\circ}\text{C}$  である。上昇風速分布に着目すると、円筒は約  $0.55\text{m/s}$  で上昇する一定流速であり、ディフューザはスロート近傍 ( $z=90\text{mm}$ ) で約  $0.75\text{m/s}$  の速い流速を示し、風路塔の開口に伴い約  $0.40\text{m/s}$  まで減速する。これはディフューザによる圧力回復効果が上昇気流の流速として表れていると考える。すなわち、塔内部の断面積が最も狭いディフューザのスロートにて低圧領域を形成すると、集熱部の加熱された空気はスロートへ吸い込まれるように流れ込みスロートにて最も速い流速を得る。その空気が塔内部を上昇するにつれて塔出口部の圧力へ徐々に回復して減速する。風力タービンを設置するスロートに着目すると、塔内部を円筒からディフューザに変更するだけで  $1.4$  倍の増速を得る。高さ  $100\text{m}$  規模の塔における風車ロータ面への流入風速を式 2.2.2-5 より推定すると、円筒の場合  $8.7\text{m/s}$ 、ディフューザの場合  $11.9\text{m/s}$  となる。風力タービンのロータ径へ流入する上昇気流の運動量が風速の 3 乗に比例することを考えると、高出力化に大きく寄与することが明白である。本実験では塔内部の圧力勾配を可視化できないため、ディフューザにより形成するスロートの低圧領域が上昇気流を増速する要因であることを断定できない。これは、流れ場の数値計算により本実験を再現して、明らかにする。

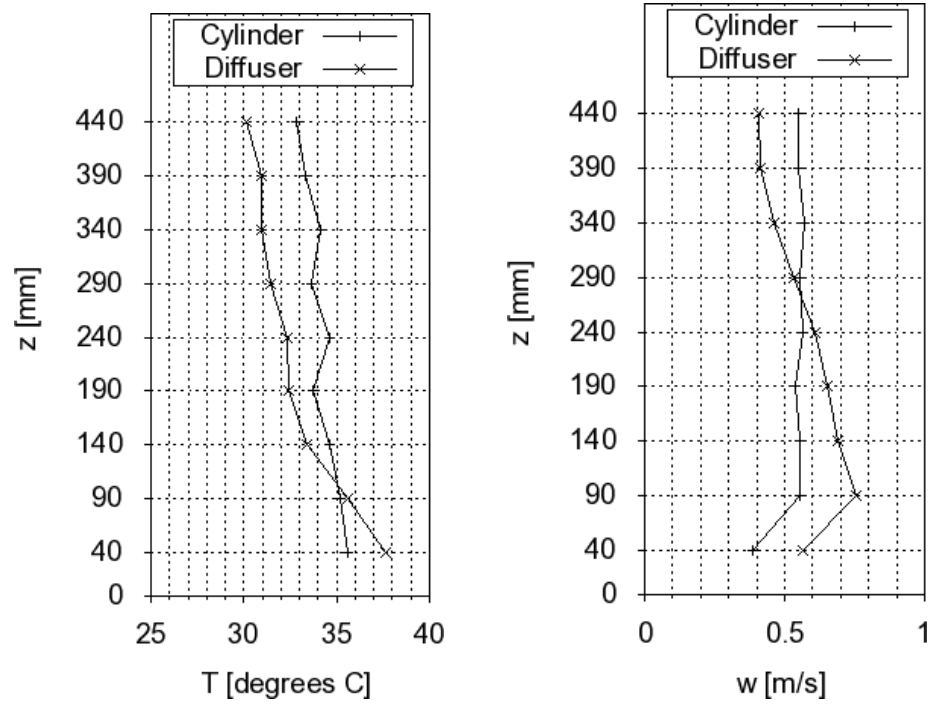


図 2. 2. 5 - 2 実験結果

(左：温度の垂直分布，右：上昇風速の垂直分布)

## 2.3 流れ場の数値計算

室内実験における塔内部の上昇気流を流れ場の数値計算により再現し、室内実験の流れ場について考察する。

### 2.3.1 数値計算方法

解析対象は室内実験を模擬した自然対流場とする。すなわち、温度制御面の設定温度と室温との温度差により駆動する自然対流の流れ場を数値計算し、室内実験との比較を行う。流れ場の支配方程式はブシネスク近似を用いた連続式(式 2.2.2-1)、運動量式(式 2.2.2-2)、エネルギー方程式(式 2.2.2-3)とする。計算方法は有限差分法による直接数値計算 DNS(Direct Numerical Simulation)である。速度場と圧力場のカップリングにはオイラー陽解法に基づいた部分段階法[文献 35]を用いる。圧力場は運動量式の発散であるポアソン方程式を導き、逐次過大緩和法(SOR法: Successive Over Relaxation Method)により緩和計算をする。運動量式の空間項は二次精度中心差分とし、対流項は対流型補間法[文献 37]に基づいた二次精度中心差分を用いる。計算領域は直交座標系の不等間隔スタガード格子とし、模型を矩形格子近似法で配置する。計算格子は流れ場の性質を決定する温度制御面の上部及び塔内部に集める。図 2.3.1-1 に計算領域内の計算格子及び温度制御面の中央に配置する模型を示す。

計算領域側面の境界条件を周期境界条件とする。上面、床面及び物体を粘着条件とする。上面と物体の温度条件を断熱条件、温度制御面を室内実験条件と等しくし、他の床面を室温と等しくする。圧力は、上面及び床面をノイマン条件とする。初期条件は、速度成分  $u, v, w$  成分を 0m/s、圧力を 0 (以後、圧力とは計算領域内の平均圧力からの差分圧力を示す)、温度を室温とする。時間刻みは、 $1 \times 10^{-4}$ s とする。20s(20000step)の計算を行い、塔内部を上昇風が定常的に流れるまで発達させる。この助走計算後、全ての格子点における速度、温度、圧力をサンプリング周波数 10kHz、サンプリング時間 5s(50000step)で取得し、時系列データの平均値を各格子点における計測値とする。計算機は九州大学情報基盤センタ所属のハイパフォーマンス・コンピュータ TATARA(富士通 PRIMEQUEST580, デュアルコア Intel Itanium2 プロセッサ 9050)を使用し、4 コアを用いたマルチコア並列演算処理を行う。

Grid: 161(x)\*161(y)\*251(z)    x: width 60.0D, min 0.033D, max 4.167D  
Grid Total: 6506171            y: depth 60.0D, min 0.033D, max 4.167D  
D=60mm (Tower Diameter)        z: height 33.3D, min 0.033D, max 3.333D

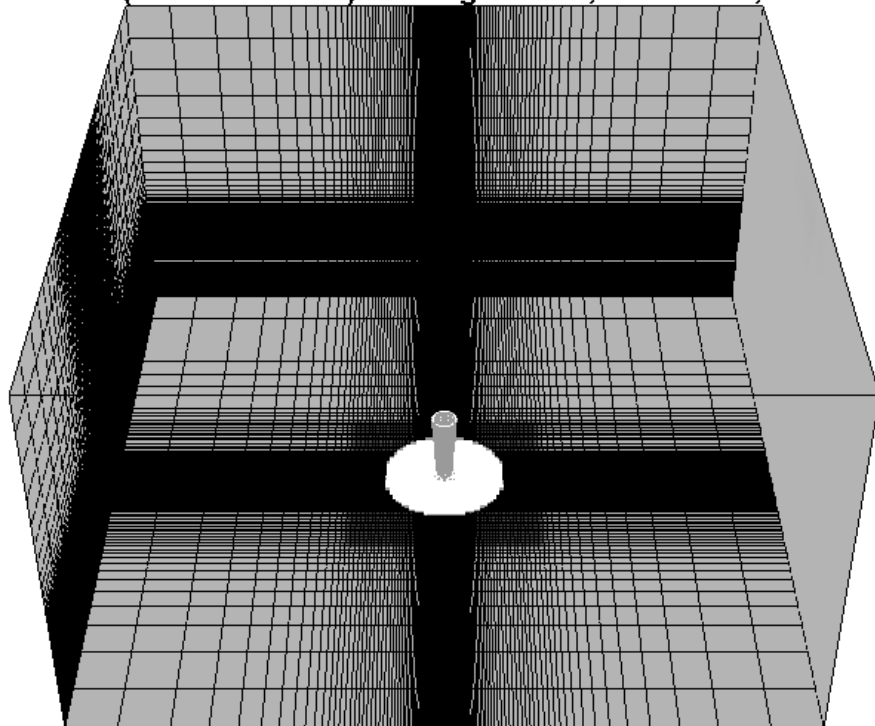


図 2. 3. 1-1 計算領域の計算格子及び温度制御面上に配置する模型  
( $D$ は図 2. 2. 3-1 の実験用模型における塔内径の定義と同じである)



### 2.3.2 数値計算結果と考察

図2.3.2-1, 図2.3.2-2, 図2.3.2-3は数値計算により取得した塔中心線を含む x-z 断面の温度分布, 圧力分布, 上昇速度分布をカラーマップにより可視化した図である。図2.3.2-1の温度分布より, 地表面近傍にある模型周囲の空気が温度制御面上で加熱されながら塔へ流入して上空へ流出する様子を確認できる。図2.3.2-2の圧力分布より, 円筒ではほぼ様な圧力分布を塔内部に形成するのに対し, ディフューザではスロート近傍に低圧領域を形成し, 塔上部の開口に伴い周囲圧力へ回復するディフューザの特徴が現れている。これに対し, 図2.3.2-3の上昇速度分布では, 円筒では様な上昇速度を塔内部に形成しているのに対し, ディフューザではスロート近傍に円筒より速い上昇速度を形成し, 上昇するとともに減速している。これは, 室内実験で得た上昇気流の流速の増減と同様な傾向を示しており, 数値計算結果からディフューザの圧力回復効果が要因であることが明白に理解できる。

図2.3.2-4は室内実験及び数値計算により取得した塔中心線上の温度分布及び上昇速度分布である。円筒及びディフューザともに計算結果と実験結果の分布傾向が類似しており, ディフューザにおけるスロート近傍の速い上昇速度も確認できる。定量的には, 温度分布に関して最大 5°C 高い結果, 速度分布に関して最大 0.2m/s 速い結果を計算結果で示している。

図2.3.2-5は室内実験及び数値計算により取得したディフューザの塔中心線上における上昇流速を円筒の計測結果で割った上昇流速の増速比を示す。ディフューザにおいて速い上昇流速を得るスロート近傍 ( $z=90\text{mm}$ ) では, 1.4~1.5 倍の上昇気流増速率となる。

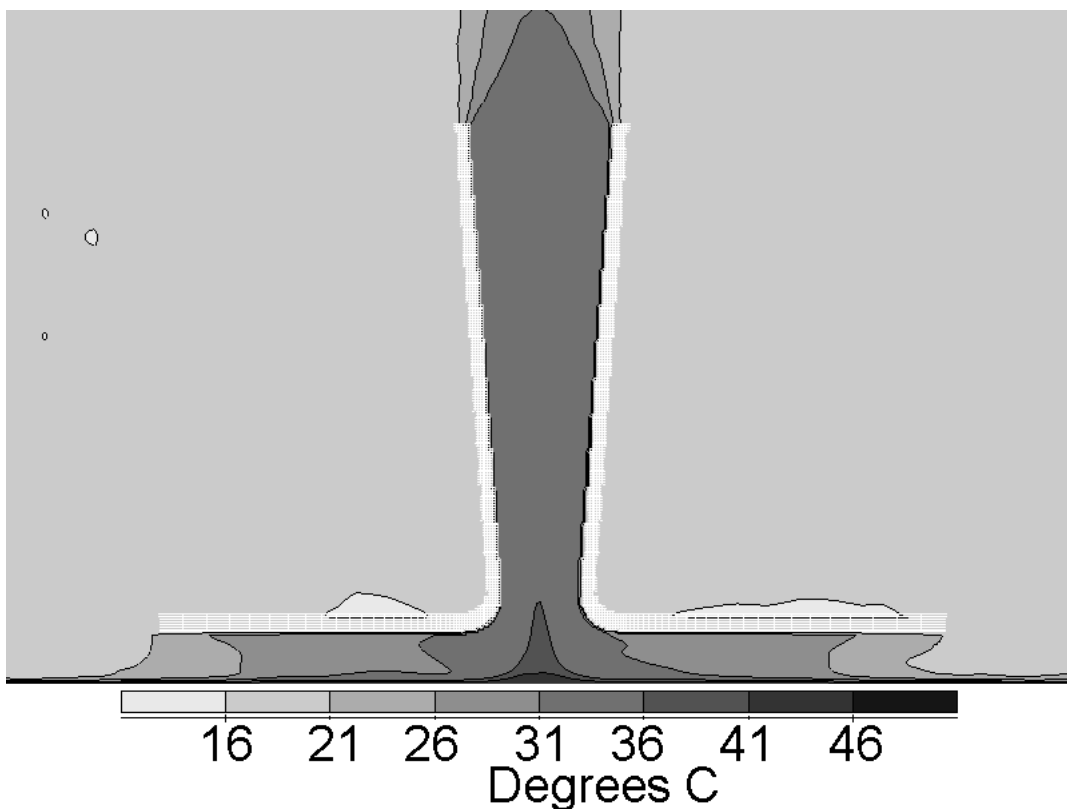
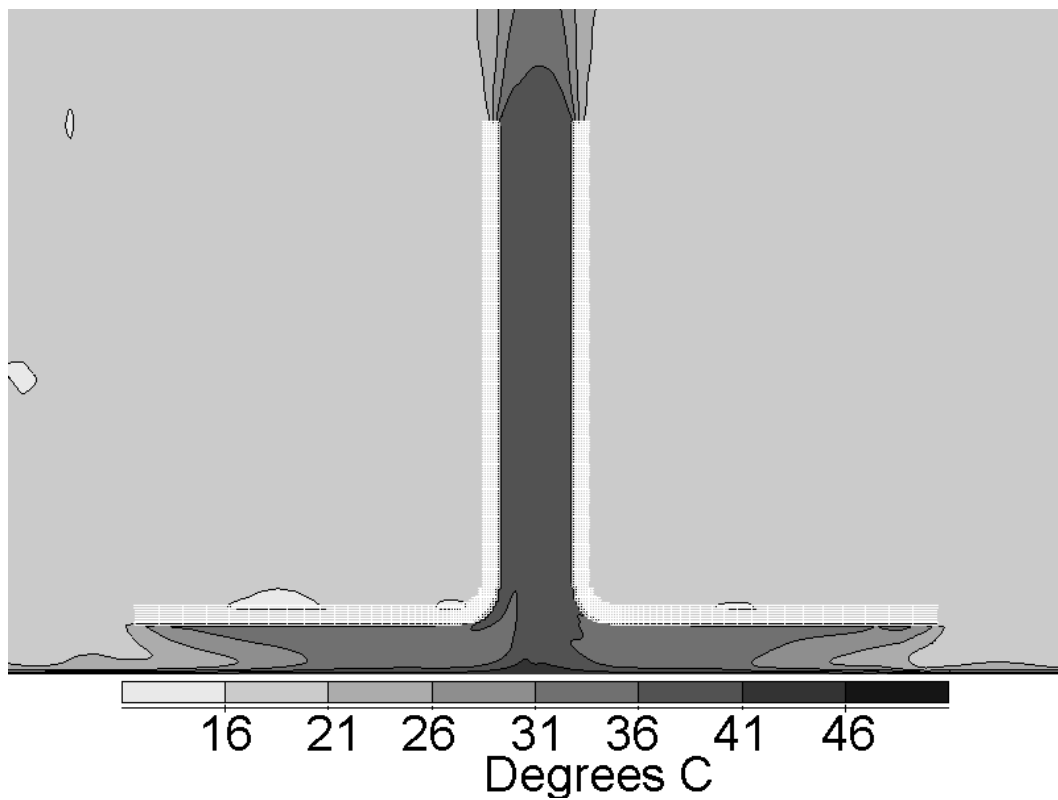


図 2. 3. 2-1 塔中心線を含む x-z 断面の温度分布図  
(上：円筒型，下：ディフューザ型)

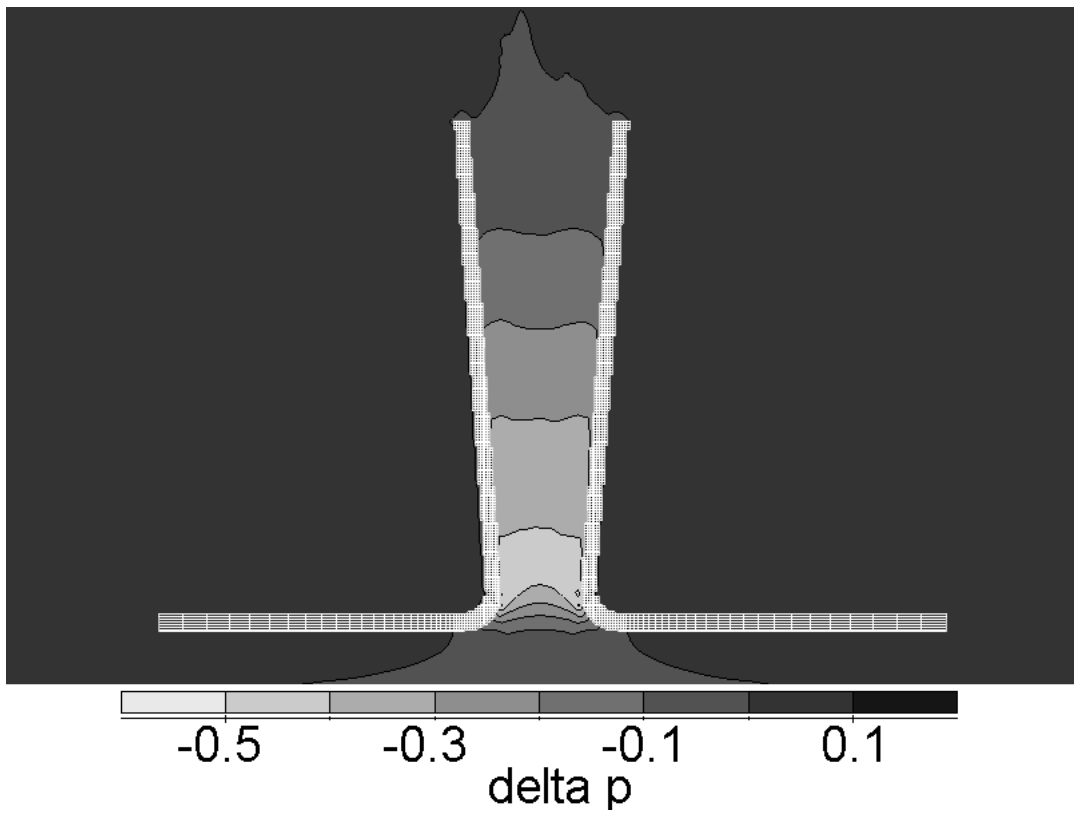
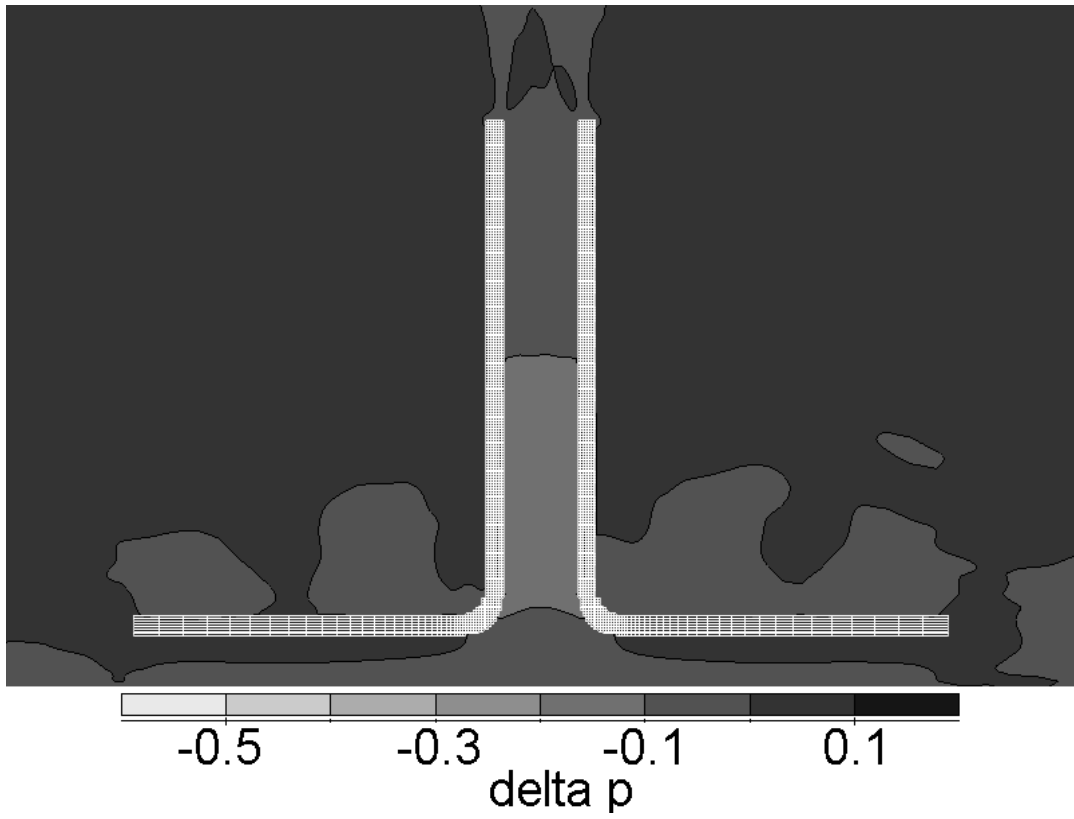


図 2. 3. 2-2 塔中心線を含む x-z 断面の圧力分布図  
(上：円筒型，下：ディフューザ型)

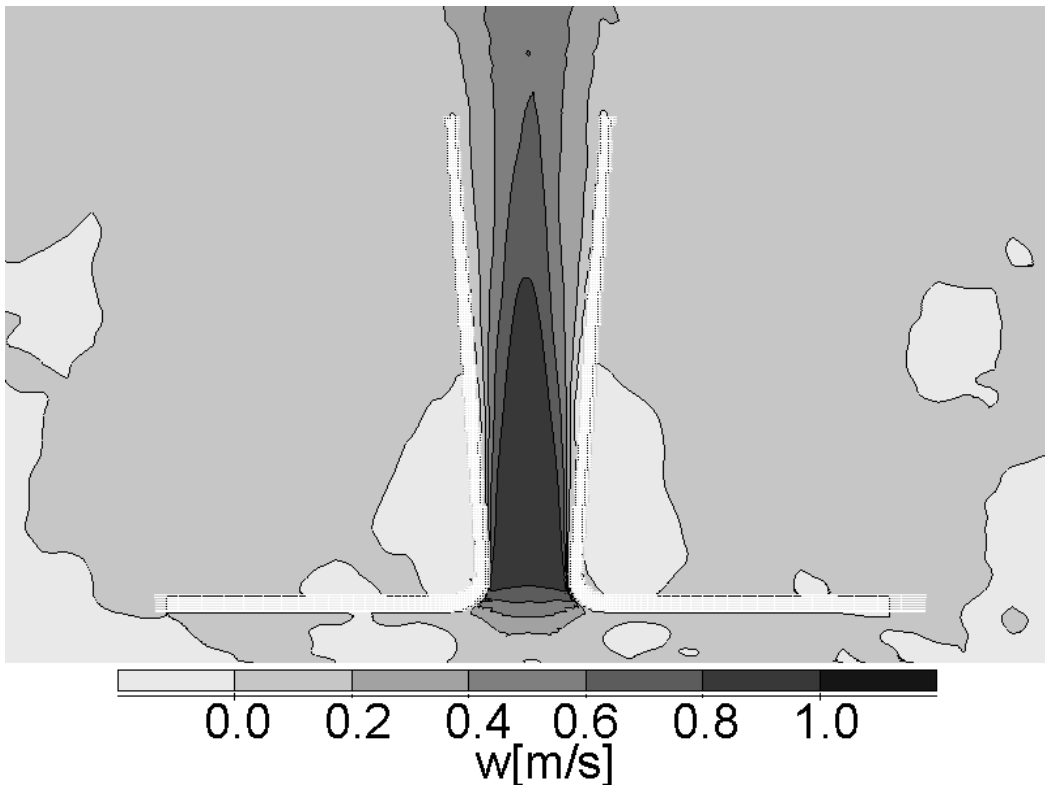
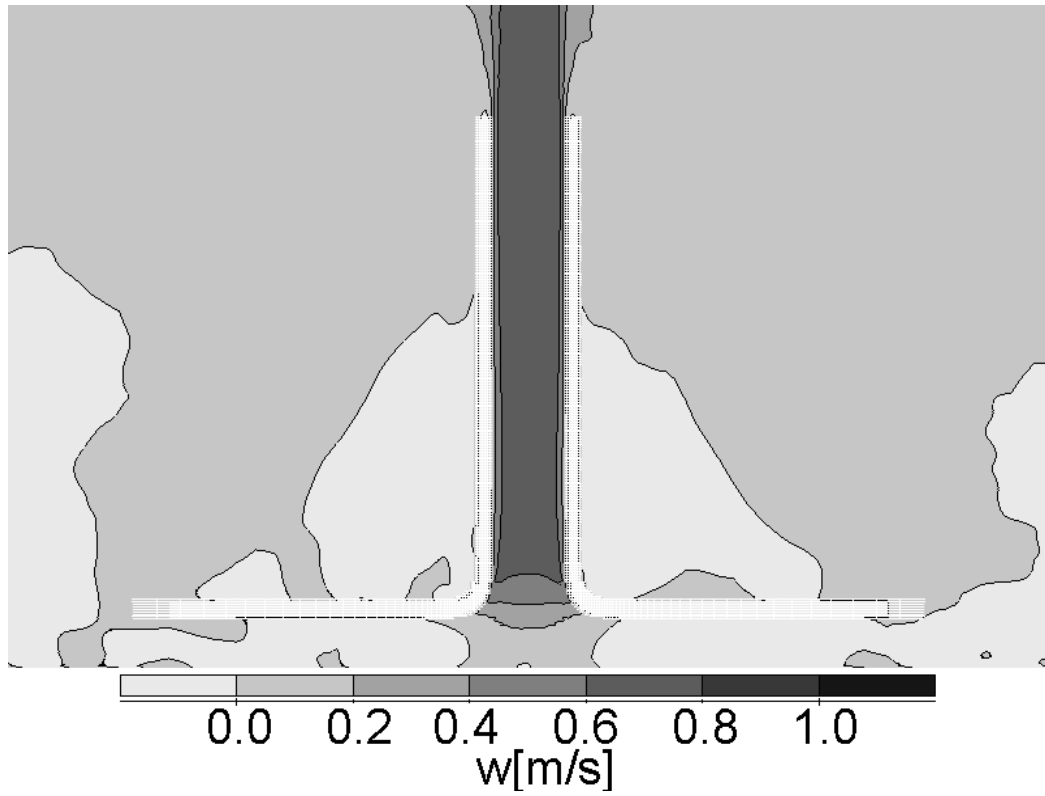
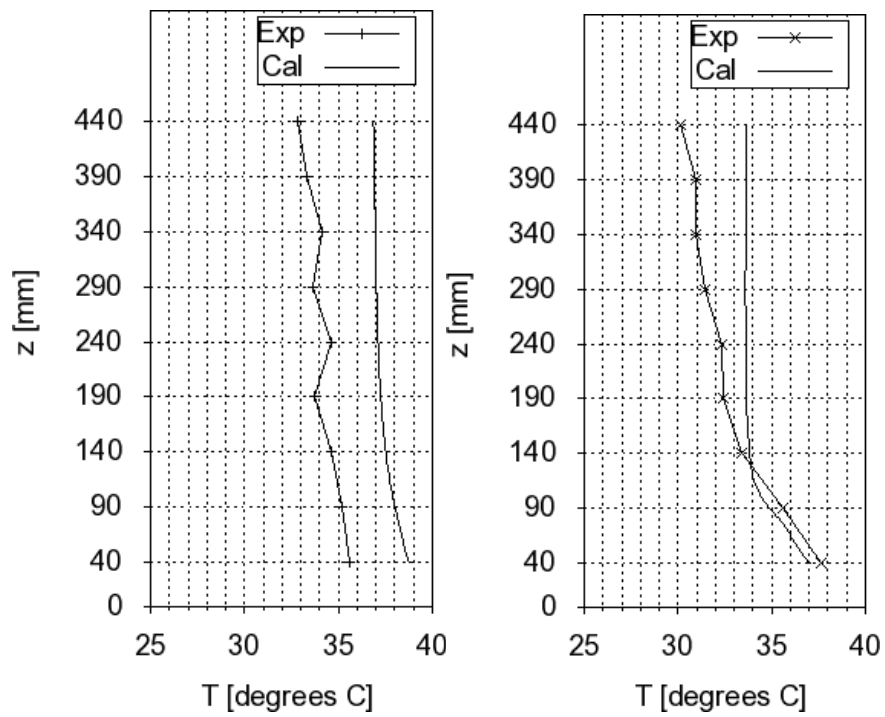
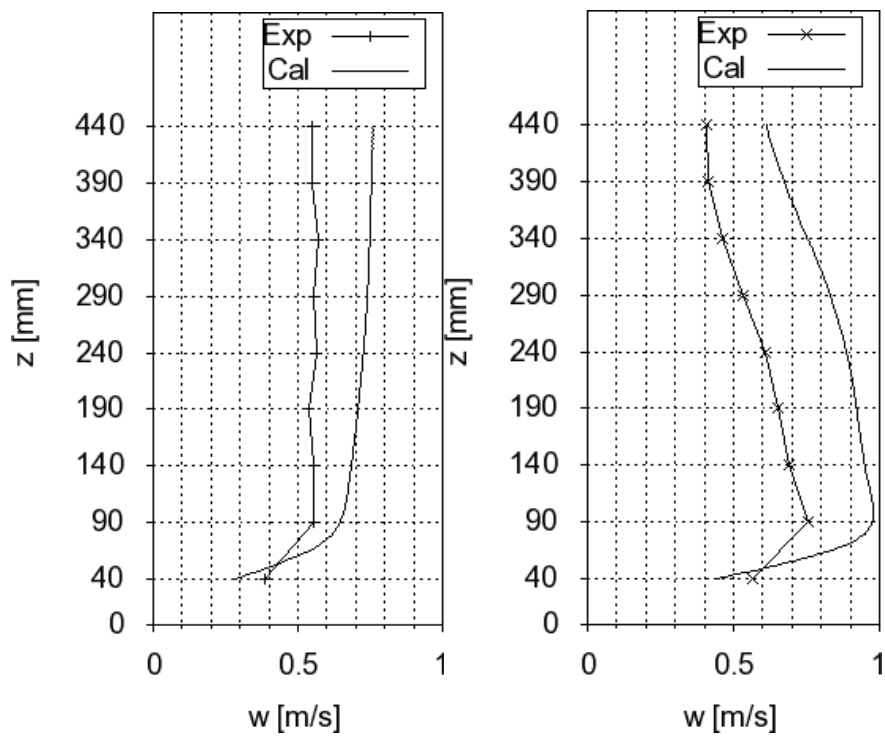


図2. 3. 2-3 塔中心線を含む x-z 断面の上昇速度分布図  
(上：円筒型，下：ディフューザ型)



(a) 温度分布



(b) 上昇速度分布

図 2. 3. 2-4 塔中心線上の温度と上昇速度の比較  
(左:円筒型, 右:ディフューザ型)

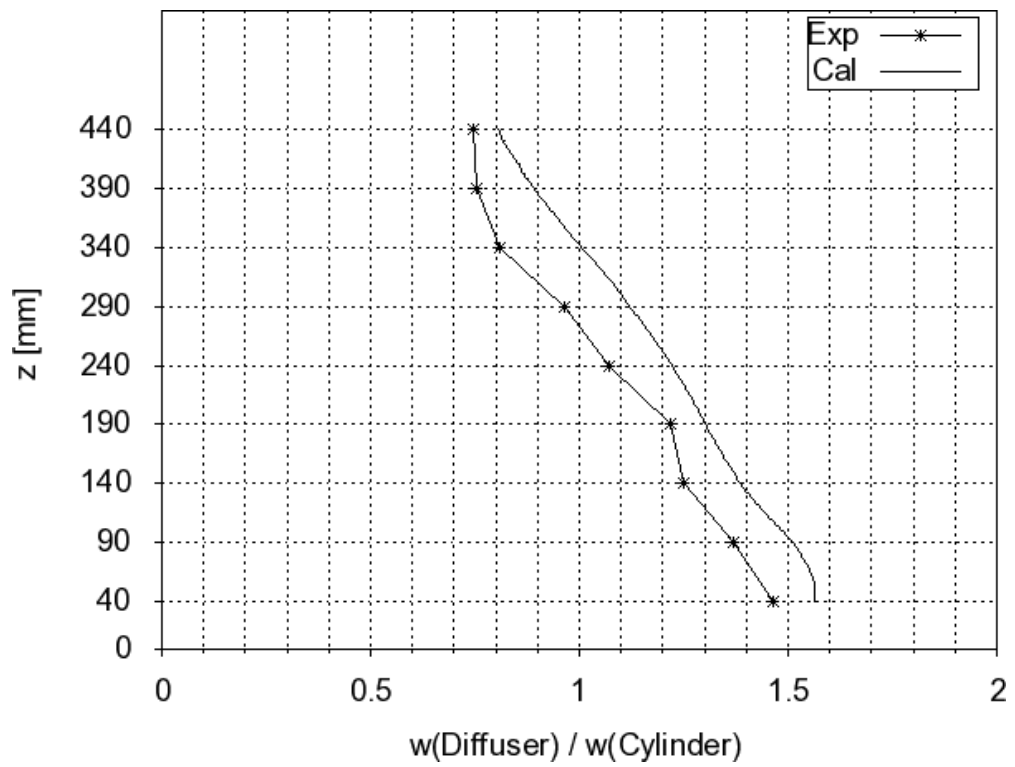


図2. 3. 2-5 ディフューザ vs 円筒の上昇流速増速比 (塔中心線上)

## 2.4 再現性確認および追加検討結果を踏まえた結論

本節では、再現性確認および追加検討結果について述べる。

2.2節および2.3節の検討では、次の点より追加検討が必要である。

- (i) 集熱部と周囲との温度差が $30^{\circ}\text{C}$ の場合しか検討していない
  - ✓ 温度差を変化したときに得る上昇気流の流速を確認する追加検討が必要である。
  
- (ii) 実験結果と流れ場の数値計算結果に差異がある
  - ✓ 温度差の変化に伴う上昇気流の流速を明らかにする過程において実験および流れ場の数値計算法を必要に応じて見直す必要がある。

したがって、上記の二つの観点を踏まえて、再現性確認および追加検討した実験および流れ場の数値計算結果を考察する。

2.2節および2.3節の実験方法および流れ場の数値計算法との相違点は次の通りであり、いずれの変更点も実験および流れ場の数値計算法を改善している内容である。

- (i) 実験方法
  - ✓ 温度制御面上の温度を検知する白金抵抗体を模型下部に配置した。
  - ✓ 上昇気流の流速を計測する塔中心軸上の計測点を変更した。
  - ✓ 周囲温度は $13^{\circ}\text{C}$ のときに実施した。

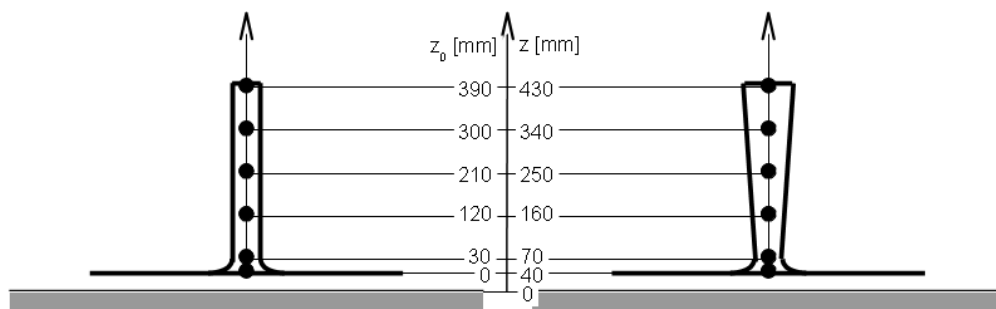


図2.4-1 熱線流速計により上昇気流を計測する  
塔中心軸上の計測点

(ii) 流れ場の数値計算方法

- ✓ 対流項の離散化を補完法[文献 37]に基づく三次精度風上差分[文献 36]で行い, 助走計算には数値粘性項の係数 $\alpha$ を3.0としたのち, データ取得には0.5として, 数値粘性項の影響を少なくした.
- ✓ 計算機は, 九州大学応用力学研究所所属のNEC SX-8を使用.
- ✓ 計算領域の格子を再検討した. 塔内部の計測点近傍では最小格子幅が3軸ともに均一にして, 計算領域をより広くし, 数値粘性を導入しているため総格子数を計算結果および計算時間に影響が出ない程度に適度に設定した.

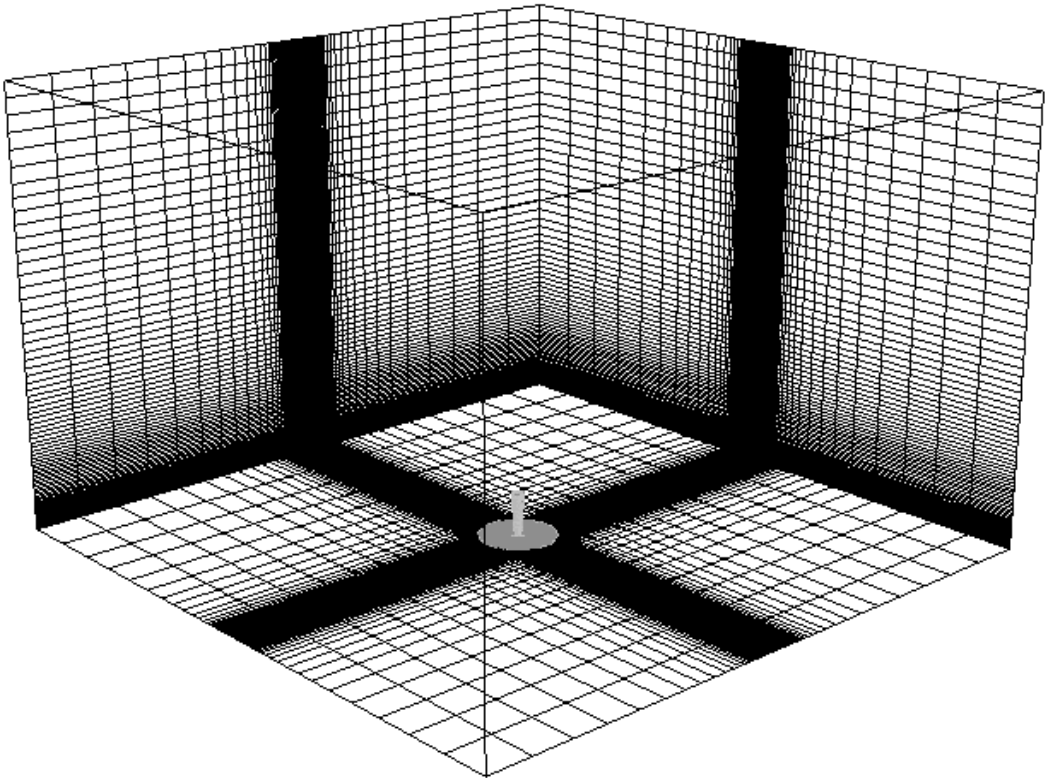


図2. 4-2 計算領域の計算格子及び温度制御面上に配置する模型

6 m (100D) × 6 m (100D) × 4 m (66.6D)

131 × 131 × 101 (約173万点)

X方向の格子幅: 最小0.04D, 最大7.50D

Y方向の格子幅: 最小0.04D, 最大7.50D

Z方向の格子幅: 最小0.04D, 最大4.33D

(Dは図2. 2. 3-1の実験用模型における塔内径の定義と同じである)



集熱部と周囲との温度差を $10^{\circ}\text{C}$ から $50^{\circ}\text{C}$ の範囲で $10^{\circ}\text{C}$ 毎にデータを取得すると、いずれの温度差においても、ディフューザ形状の塔を採用することにより、円筒形状の塔を使用するときと比べて、 $1.27$ から $1.58$ の上昇気流の増速を得ており、ディフューザ形状の有用性が表れている。実験結果と流れ場の数値計算結果はよく一致しているため、ここではその要因を整理するとともに、温度差 $30^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ の場合を抜粋して結果の考察をあらためて行う。

図2.4-3～2.4-5では、塔中心線上の温度を比較している。円筒形状およびディフューザ形状の塔内部の温度傾向は温度差 $30^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ の場合においても同様である。図2.4-6～2.4-8では、塔中心線上の上昇流速を比較している。ディフューザ形状では高さ $70\text{mm}$ の場合に $0.77\text{m/s}$ （温度差 $30^{\circ}\text{C}$ ）、 $0.93\text{m/s}$ （温度差 $40^{\circ}\text{C}$ ）であり、円筒形状では $0.55\text{m/s}$ （温度差 $30^{\circ}\text{C}$ ）、 $0.65\text{m/s}$ （温度差 $40^{\circ}\text{C}$ ）である。温度差に係わらずディフューザによる上昇気流の増速効果が実験および流れ場の数値計算結果に表れていることが確認できた。上昇気流の増速率は $1.38\sim 1.44$ であり、2.2節および2.3節の実験および流れ場の数値計算結果で結論付けていた上昇気流の増速率とほぼ一致することが確認できた。

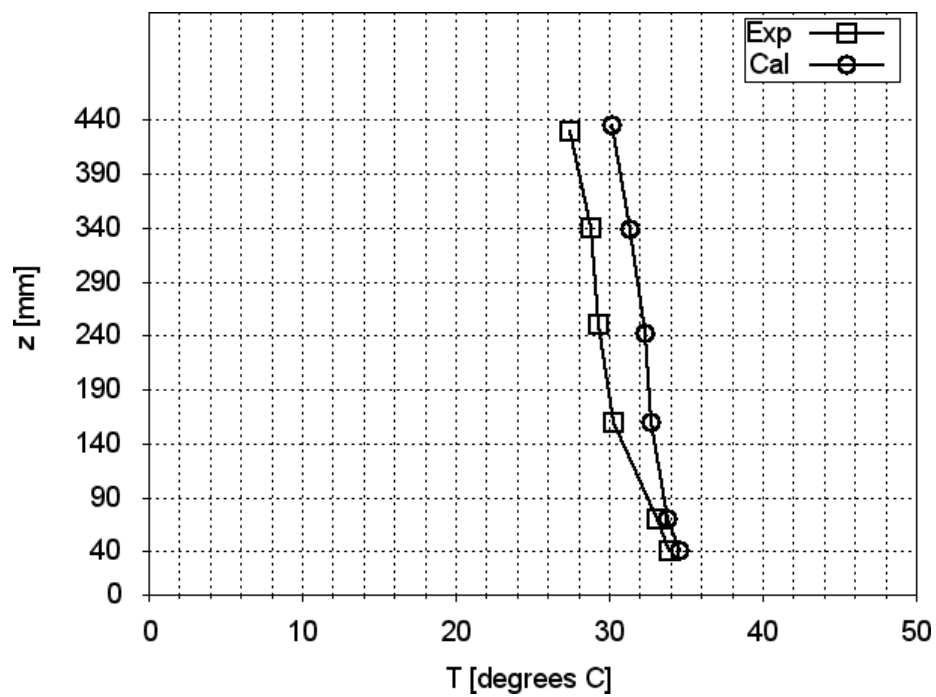
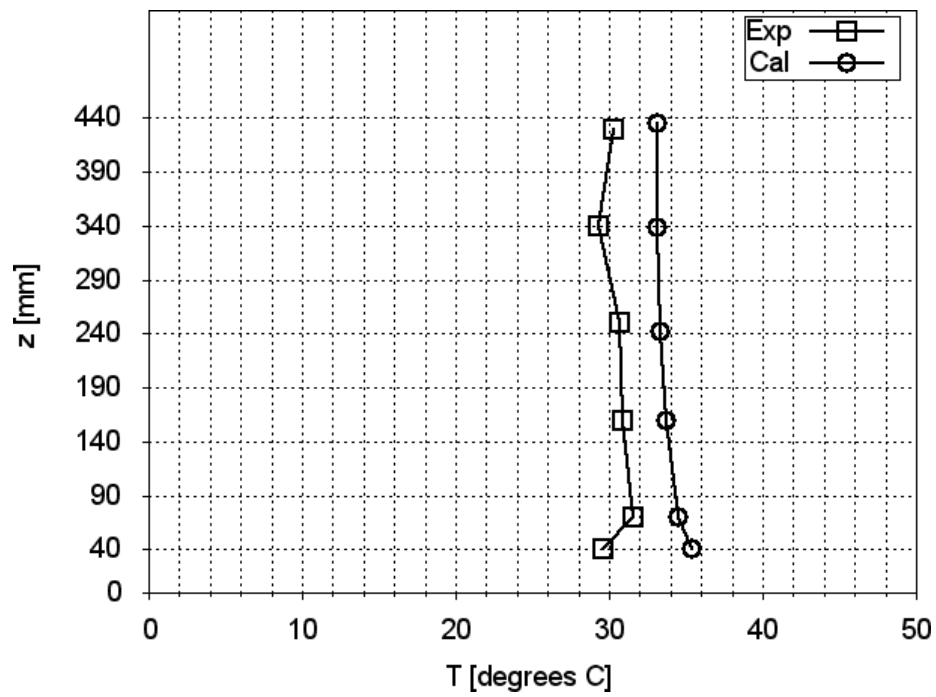


図 2. 4-3 塔中心線上の温度比較 温度差 3.0 °C  
 (上: 円筒形状, 下: ディフューザ形状)

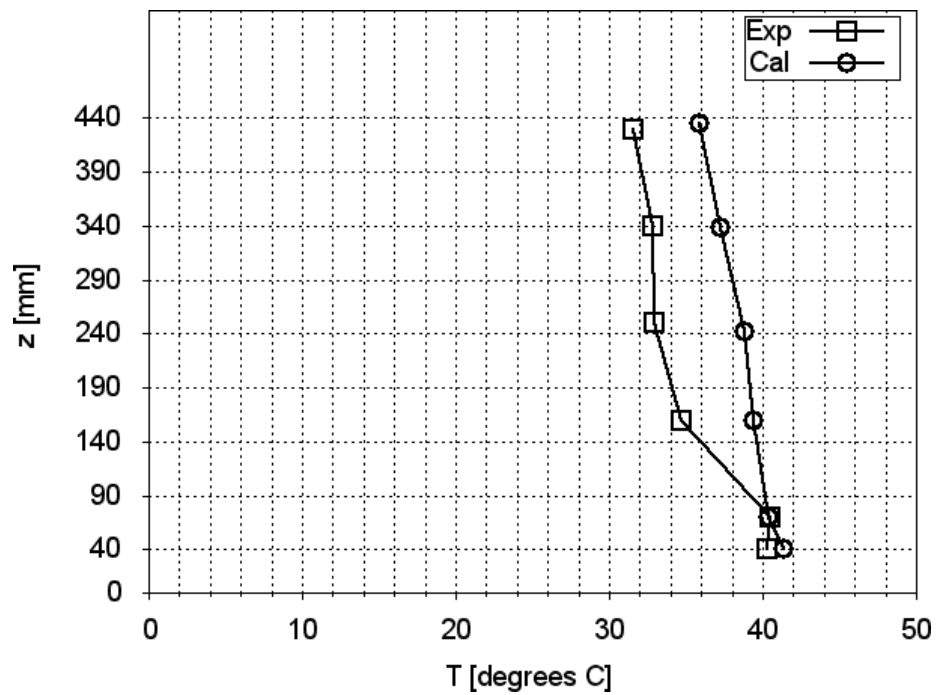
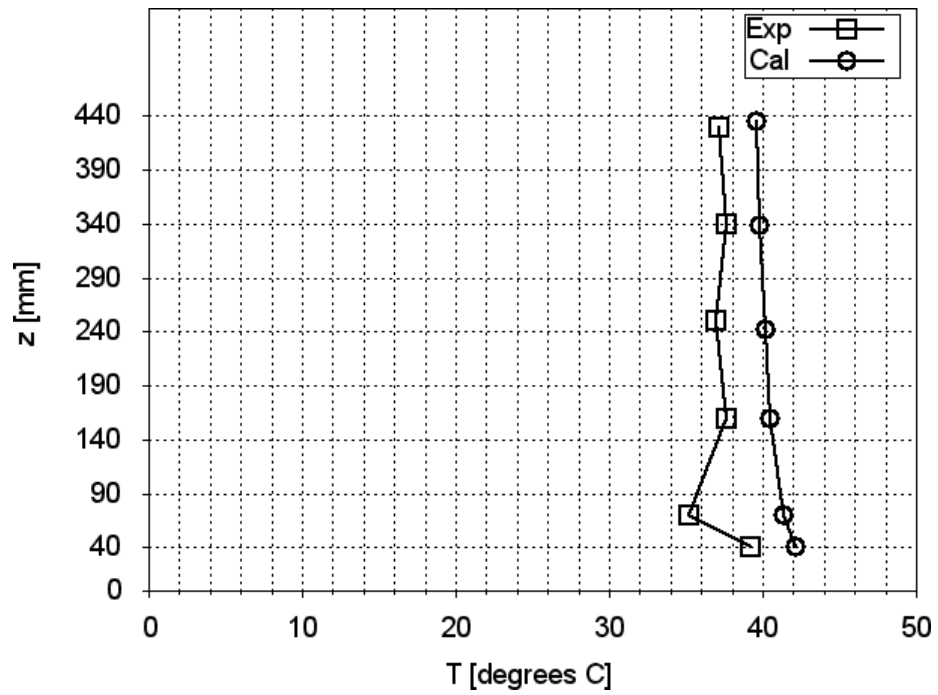


図 2. 4-4 塔中心線上の温度比較 温度差 40 °C  
 (上：円筒形状，下：ディフューザ形状)

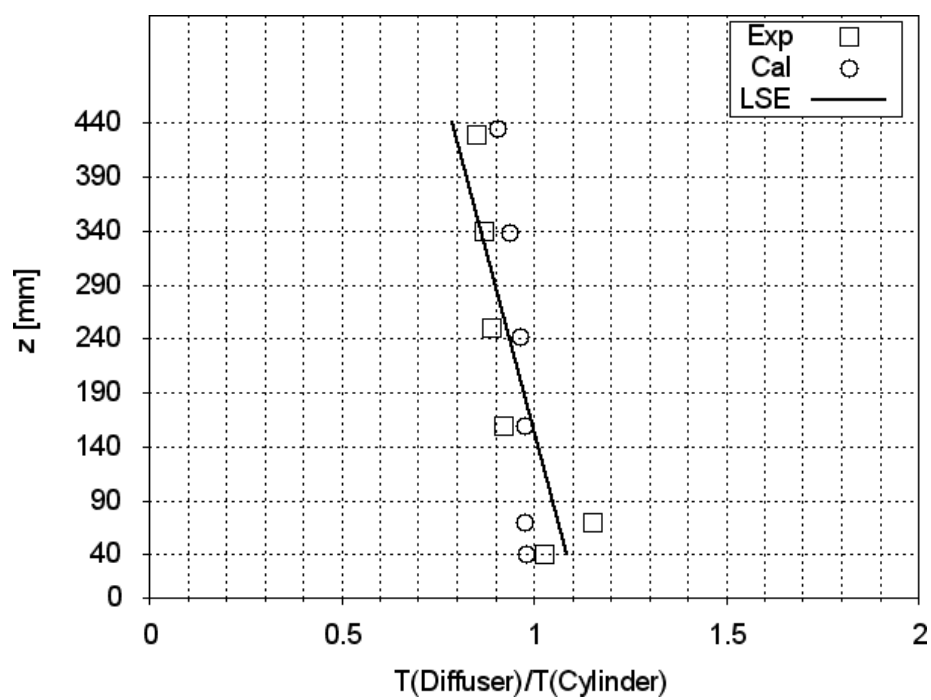
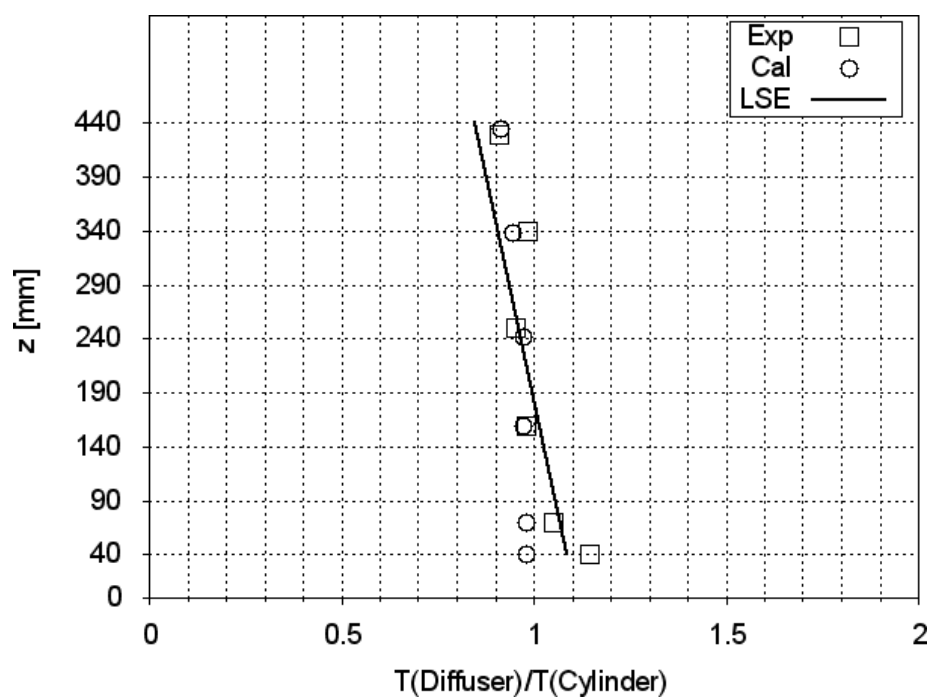


図2. 4-5 塔中心線上の温度比較  
(上: 温度差  $30^\circ\text{C}$ , 下: 温度差  $40^\circ\text{C}$ )

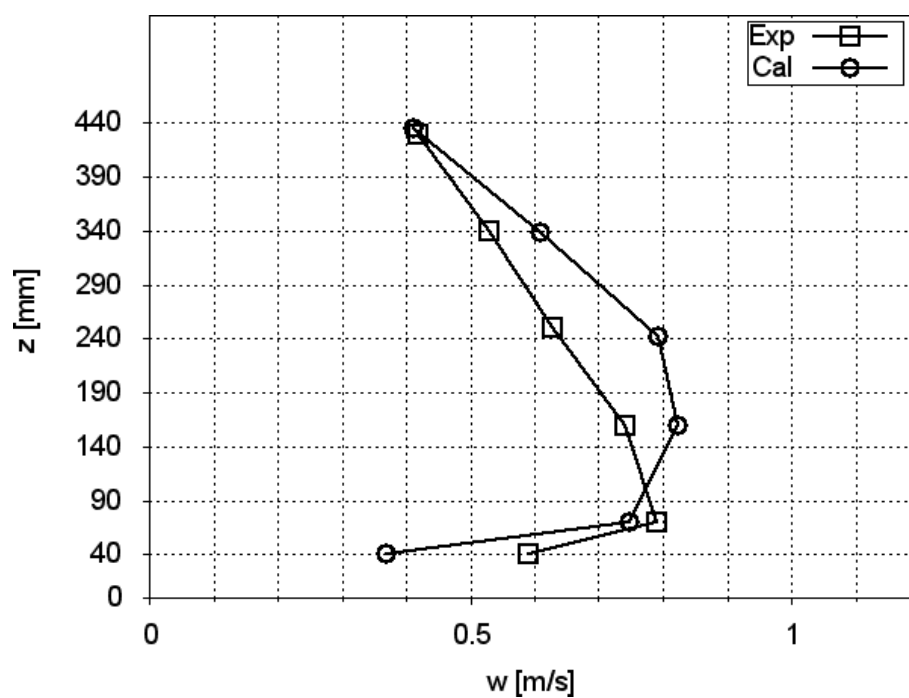
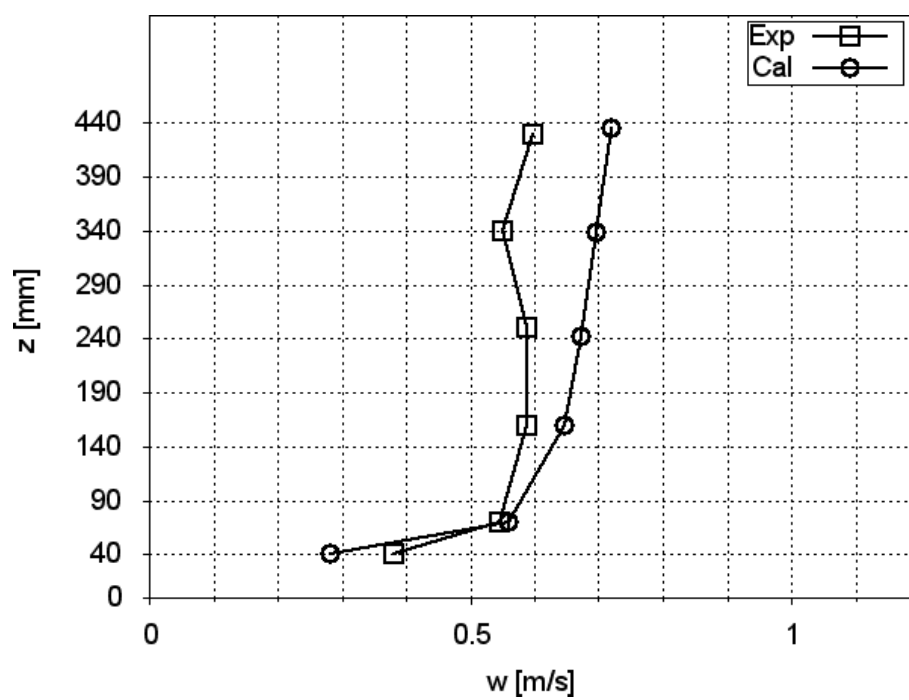


図 2. 4-6 塔中心線上の上昇流速比較 温度差 30 °C  
 (上: 円筒形状, 下: ディフューザ形状)

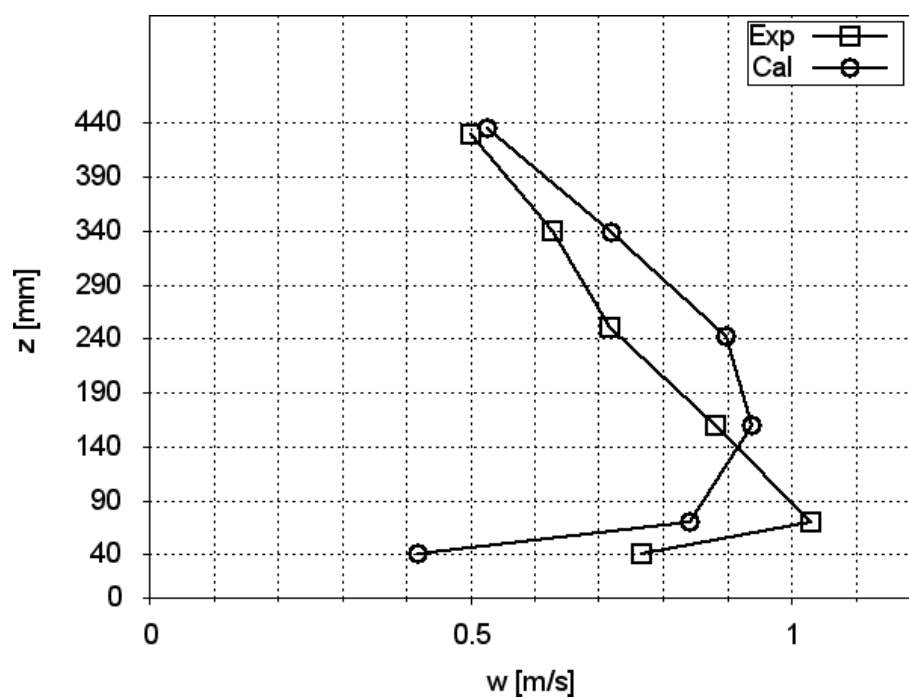
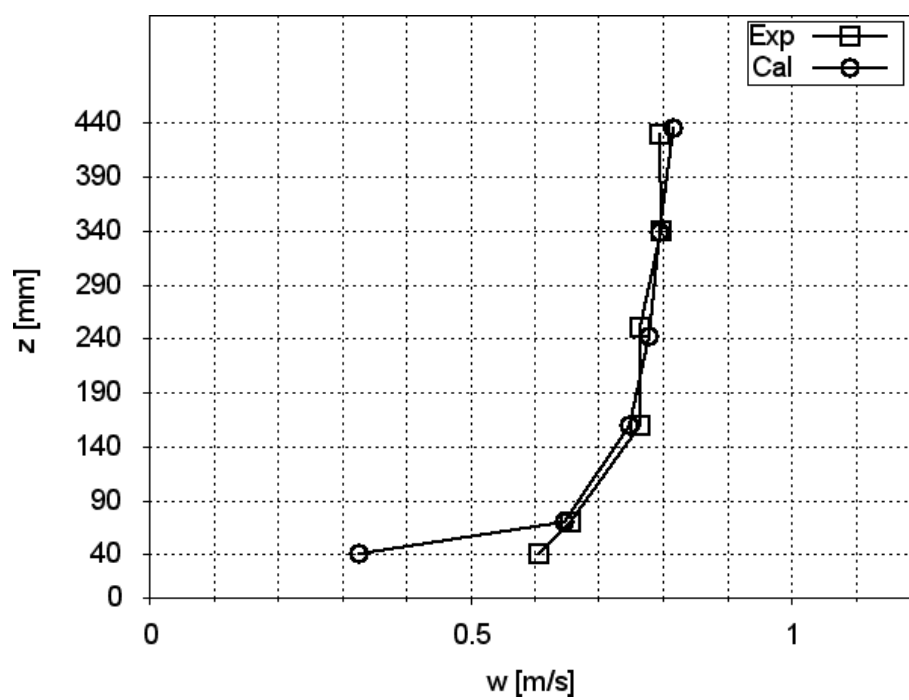


図 2. 4-7 塔中心線上の上昇流速比較 温度差 4.0 °C  
 (上: 円筒形状, 下: ディフューザ形状)

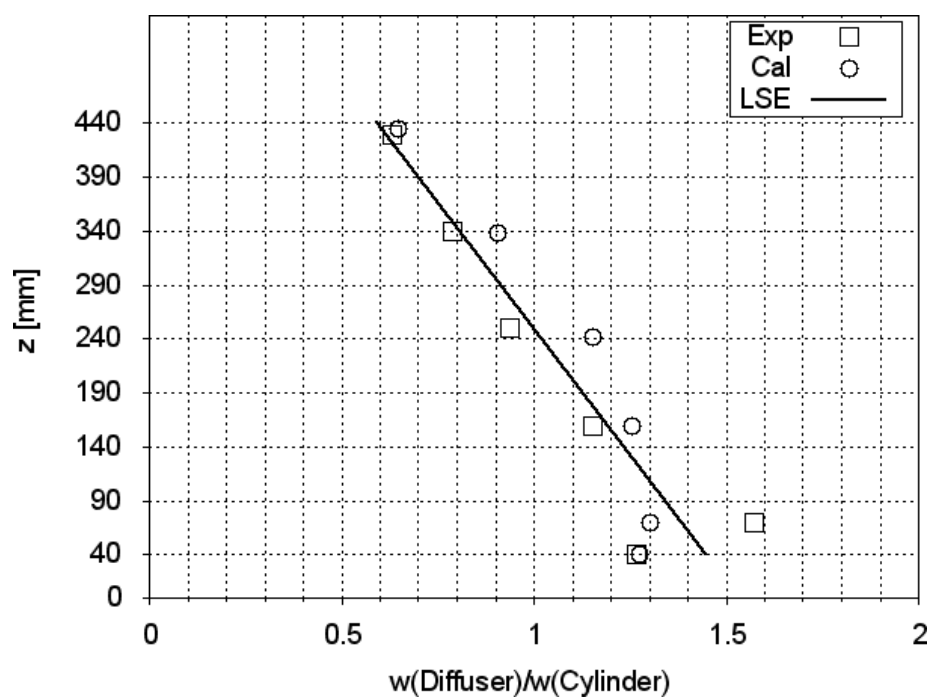
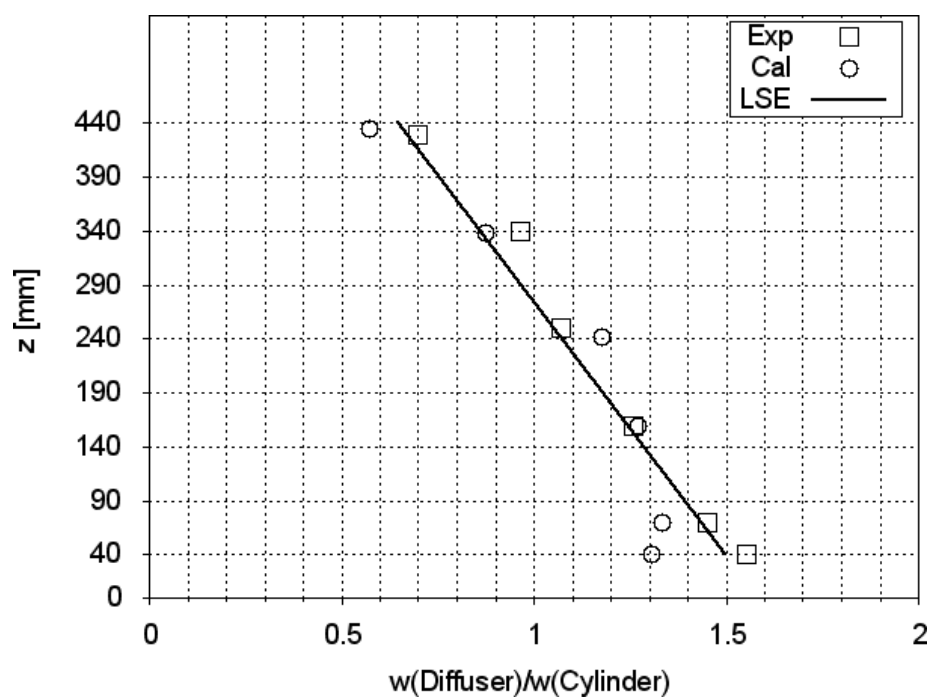


図2. 4-8 塔中心線上の上昇速度比較  
(上: 温度差 3.0°C, 下: 温度差 4.0°C)

本章の結論は次の通りである。

- (i) ウィンドソーラータワーが太陽熱を使用して塔内部に上昇気流を誘起する現象は、卓上模型を用いた室内実験および流れ場の数値計算において、室内中の上空周囲の外気温と卓上模型下の床面温度との温度差を設定することで模擬することができた。
- (ii) 卓上模型を使用した実験および数値計算結果では、室内中の上空周囲の外気温と卓上模型下の床面温度との温度差が $30^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ の場合に、塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更して約1.4倍の上昇気流の増速率を得る。
- (iii) 卓上模型の規模では、室内中の上空周囲の外気温と卓上模型下の床面温度との温度差が $30^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ の場合に、風力タービンを設置することになる場所において上昇気流の流速は $0.55\sim 0.65\text{ m/s}$  (円筒),  $0.77\sim 0.93\text{ m/s}$  (ディフューザ) となる。
- (iv) 卓上模型と比較して $L/l = 250$ 規模 (高さ $100\text{ m}$ , 塔スロート内径 $15\text{ m}$ , 集熱部面積約 $21205\text{ m}^2$ ) の大型構造体では、卓上模型の結果に基づいて流れ場の相似則を用いて推定すると、上空の外気温と集熱部との温度差が $30^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ の場合に、 $8.7\sim 10.3\text{ m/s}$  (円筒),  $12.2\sim 14.7\text{ m/s}$  (ディフューザ) 程度の上昇気流を見込む。



### 第3章 上空風により上昇気流を集める研究

本章では、研究対象となるウィンドソーラータワーが上空風を利用して風力タービンへ上昇気流を集めて風力発電する場合について、卓上の模型を対象として実施した塔内部に誘起する上昇気流を確認する予備実験および流れ場の数値シミュレーションについて述べる。本章の結論として、上空風に対する上昇気流の増速率を決定する。

#### 3.1 コンセプト

本章では、第2章で採用したディフューザ形状の塔を基本形状として、太陽熱とは独立したエネルギー源である上空風を利用して塔内部に上昇気流を誘起すること示す。まずは、塔上部の流出部上流側に渦形成版 (Vortex Plate) を設置して、塔上部に存在する上空風を堰止めて塔上部の流出部に大きい渦を形成して低圧領域にすることで塔内部の空気を上空へ吸出す効果を利用する。さらには、塔内部の形状を円筒ではなくディフューザにすることで、塔下部のスロートをより低圧領域にして集熱部下にある空気を吸い込む効果を利用する。また、集熱部下にある空気を塔内部へ導くガイドシャッターを設置することにより、集熱部下流への流出を防止する。これにより、日射とは独立したエネルギー源である上空風を利用して日射を得ることができない時間帯においても、塔内部に上昇気流を誘起することで高稼働率化が見込める。概念を図3. 1-1に示す。

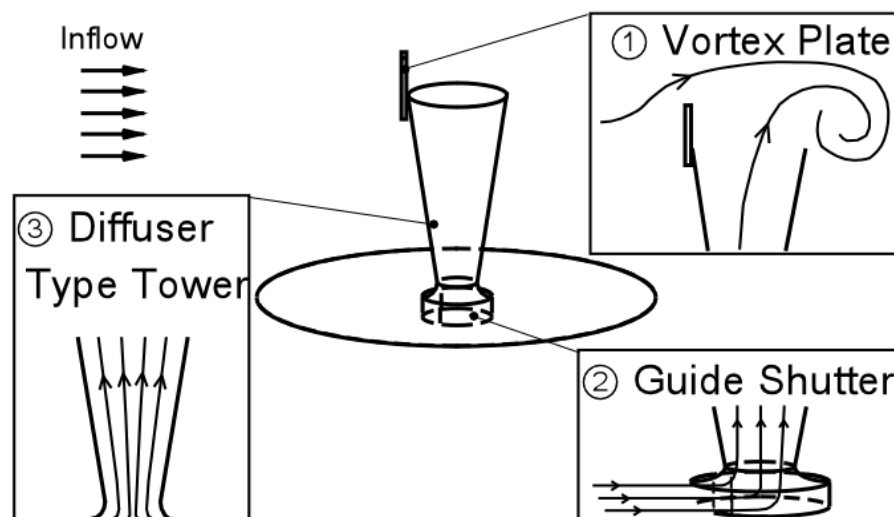


図3. 1-1 上空風を利用して塔内部に集風する概念

## 3.2 風洞実験

本研究では実大の装置を製作して実験する前段として卓上の模型を用いて上昇気流を確認する予備実験を行う。さらには、塔下部に風車を設置せずに、風車を覆う構造体の形状により得る上空風に対する塔内部の上昇気流の増速を明らかにする。

### 3.2.1 流れ場の支配方程式と動力的相似性

太陽熱による影響をなくして、上空風を利用する流れ場を対象とするため、温度差による影響が無い中立流とする。したがって流れ場の支配方程式は連続式（式 3.2.1-1）と運動量式（式 3.2.1-2）となる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.2-2)$$

中立流の場合、無次元係数は  $\text{Re}$  レイノルズ数のみとなり、流れ場の動力的相似性を議論する際には  $\text{Re}$  レイノルズ数を合わせることで、実物大と室内実験との流速の対比が可能である。

### 3.2.2 実験用の模型

円筒形状とディフューザ形状の塔下部における風車ロータ面積を一致させて流入風速を比較する。ディフューザのスロート直径  $D$  を円筒の直径と同一径とする。ディフューザの開き角は  $4^\circ$ ，高さはディフューザ及び円筒ともに  $6.66D$  とする。渦生成板は高さ  $D$ ，幅を塔上部直径とする。ガイドシャッターは一様流入風方向に  $120^\circ$  開口し，直径  $3.66D$  とする。形状諸元を図 3. 2. 2-1 に示す。高さ 100m 規模の 1/250 縮小模型とするため，スロート直径  $D$  を 60mm とした。

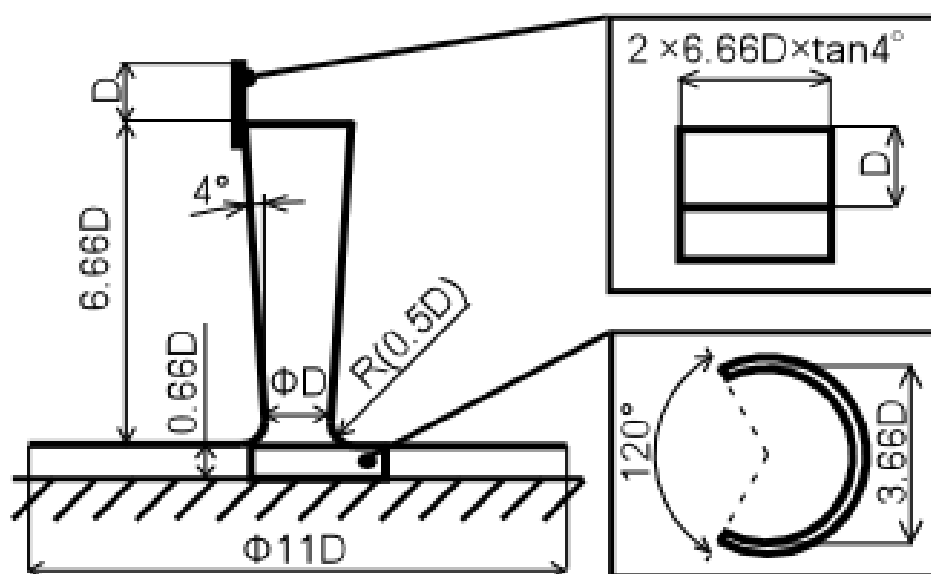


図 3. 2. 2-1 実験用模型の形状諸元

### 3.2.3 実験装置

風洞は九州大学応用力学研究所所属の地球大気動態シミュレーション装置（大型境界層風洞）である。大型境界層風洞は単回路回流式の風洞であり、幅 3.6m、高さ 2.0m、長さ 15m の計測部を有す。風速範囲は 0.5m/s から 30m/s を設定可能であり、乱れ強さは 0.5%以下である。風洞内には風洞外から制御可能なトラバース装置を実装しており、風速計測には I 型プローブをトラバース装置に取り付け、熱線流速計を使用して計測する。計測部は塔の中心軸を z 軸、流れ方向を x 軸とし、 $y=0$  の x-z 平面における上昇速度分布とする。風洞実験構成及び計測位置を図 3. 2. 3-1 に示す。塔内部をスモークワイヤ法により可視化し、塔内部の上昇風を観察するため、模型は透明なアクリルと塩化ビニルシート（厚さ 0.5mm）で作成している（図 3. 2. 3-2）。スモークワイヤは、塔内部及び外部を観察するため、塔下部と上部付近にワイヤを張る。模型への近寄り風速が風洞の床面に発達する境界層の影響を受けないように、高さ 510mm、幅 1825mm、長さ 1850mm の土台上に模型を設置する。一様な近寄り風速にするため、土台の上流側には高さ 11mm、長さ 60mm の導入板を取り付ける。模型中心位置から 525mm 上流側における近寄り風速のプロファイルは、ブラシウスの境界層厚さの理論解とほぼ一致するように調整する。本実験ではスモークワイヤ法による可視化の場合には煙の濃度を保つため、近寄り風速を 1m/s とする ( $Re=0.4 \times 10^4$ )。I 型プローブを使用した風路塔内部上昇風速計測の場合には近寄り風速を 3m/s とする ( $Re=1.2 \times 10^4$ )。

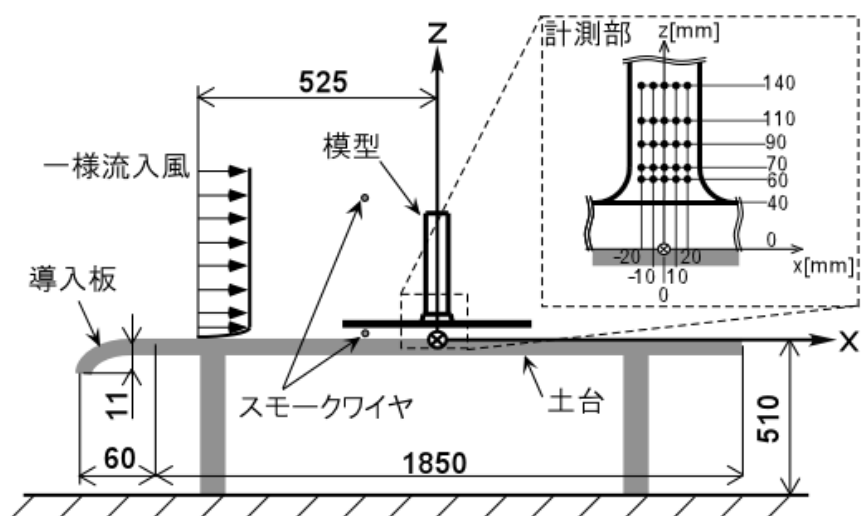


図 3. 2. 3-1 風洞実験構成及び計測位置

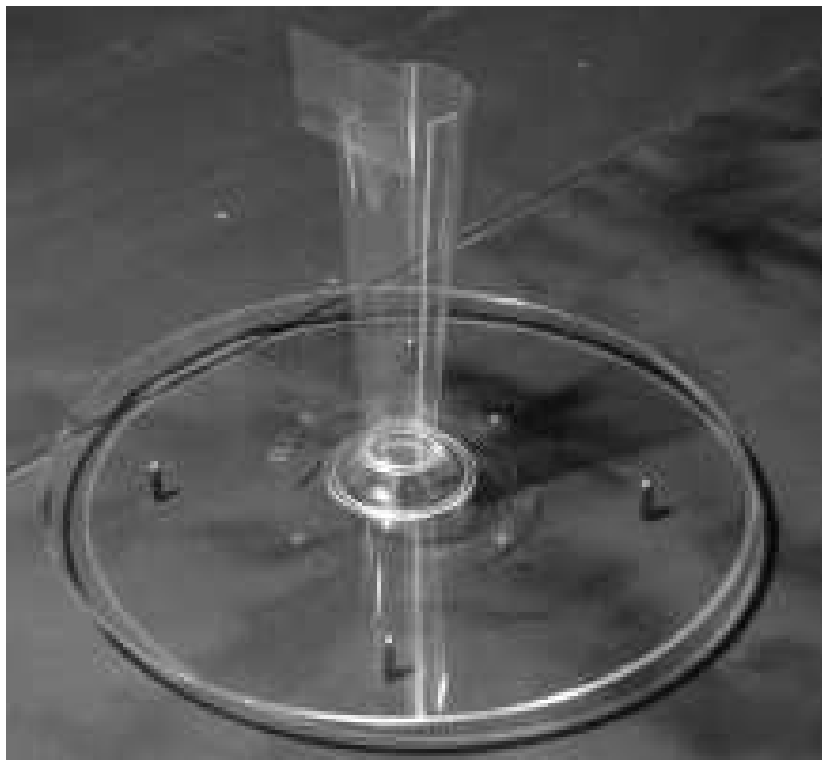
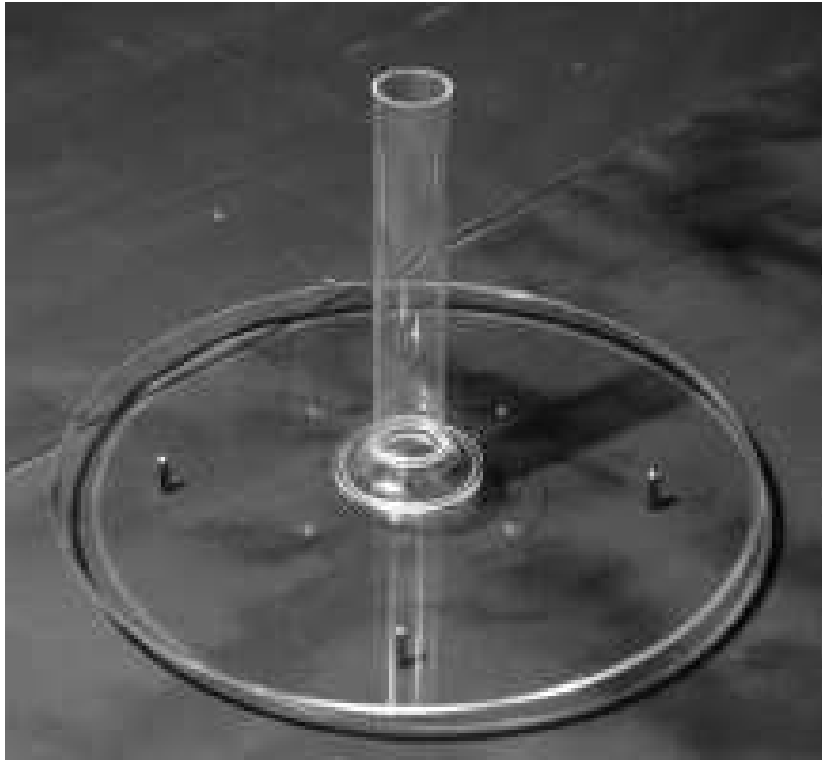


図 3. 2. 3-2 風洞実験用の模型  
(上：ソーラチムニ型，下：上空風利用型)

### 3.2.4 実験結果と考察

スモークワイヤ法により、模型内部及び上空風を模擬した塔上部の流れ場を可視化した(図3.2.4-1)。ソーラチムニ型では模型下部を流れる煙を塔内部へ誘引していない。一方、上空風利用型では模型下部を流れる煙を塔内部に誘引している。したがって、上空風利用型のコンセプトである渦形成板、ディフューザ形状の塔、ガイドシャッターを用いることにより、上空風を利用して塔内部に上昇気流を誘起することを示すことができた。

熱線流速計により塔下部の上昇風速を計測した結果、ソーラチムニ型では風車ロータ面となる $z=90\text{mm}$ 近傍で一樣流入風速の約0.6倍の上昇風速である。一方、上空風利用型では一樣流入風速の約1.9倍の上昇風速を得る(図3.2.4-2)。したがって、定量的にも上空風利用型のコンセプトである渦形成板、ディフューザ形状の塔、ガイドシャッターを用いることにより、上空風より増速した上昇気流を塔内部に誘起することを示すことができた。

次にスモークワイヤ法での可視化結果により渦形成板、ディフューザ形状の塔、ガイドシャッターの効果について考察する。渦形成板の効果が表れている領域は渦形成板の後流になる。渦形成板を塔出口部の上流に設置することで、塔内部から流出する上昇気流と塔上部を流れる一樣流を大きな渦により混合して拡散している様子を示している。大きな渦を形成している領域は低圧領域となるため、塔内部の上昇気流が流出しやすい低圧領域を塔上部に形成していることが推察できる。また、ガイドシャッターを設置することにより、模型下部の流れが塔下部の後流へ流出せずに塔内部に導かれている様子を示している。これは、渦形成板により形成している塔上部の低圧領域がディフューザ形状の塔の圧力回復効果によりスロートにおいて更なる低圧領域を形成していることに起因すると推察できる。しかしながら、スモークワイヤ法による可視化では渦形成板の後流および塔内部の流速および圧力勾配を可視化できないため、渦形成板およびディフューザ形状の塔により形成する低圧領域がスロートに上昇気流を導く仕組みであることを説明できない。したがって、流れ場の数値計算により本実験を再現して、流速および圧力勾配を可視化することにより、渦形成板およびディフューザ形状の塔により形成する圧力領域が塔内部に上昇気流を導く仕組みであることを明らかにする。

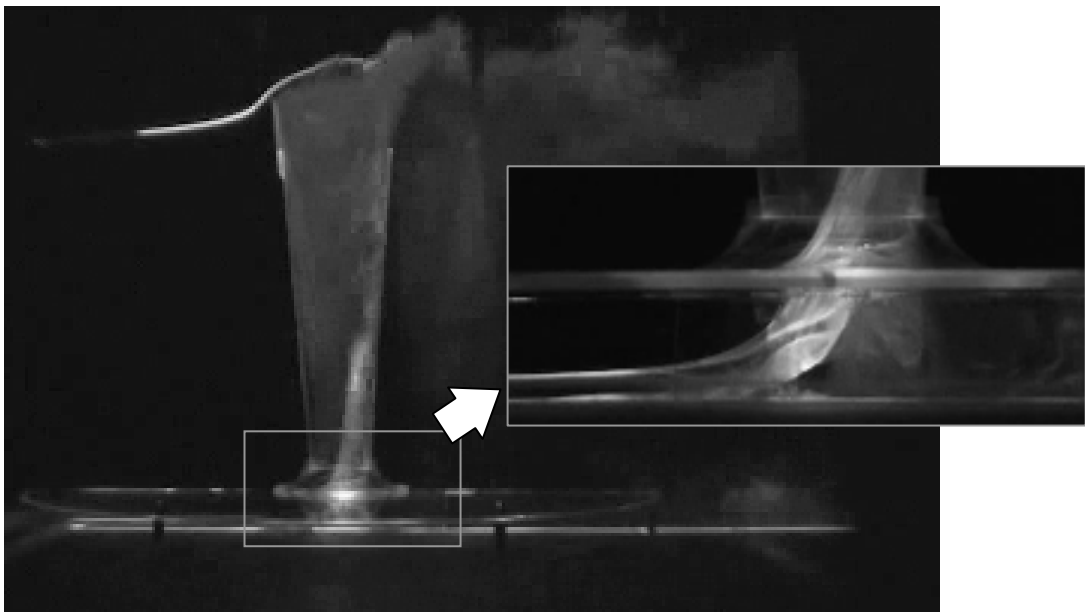
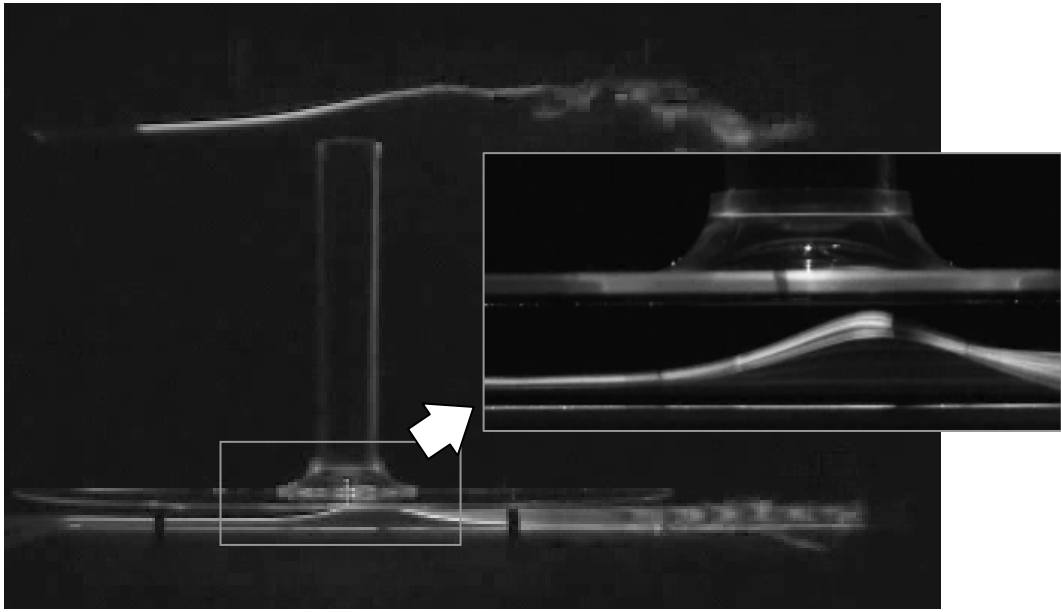


図3. 2. 4-1 塔内部及び外部の流れ場可視化（近寄り風速 1m/s）  
（上：ソーラチムニ，下：上空風利用型）

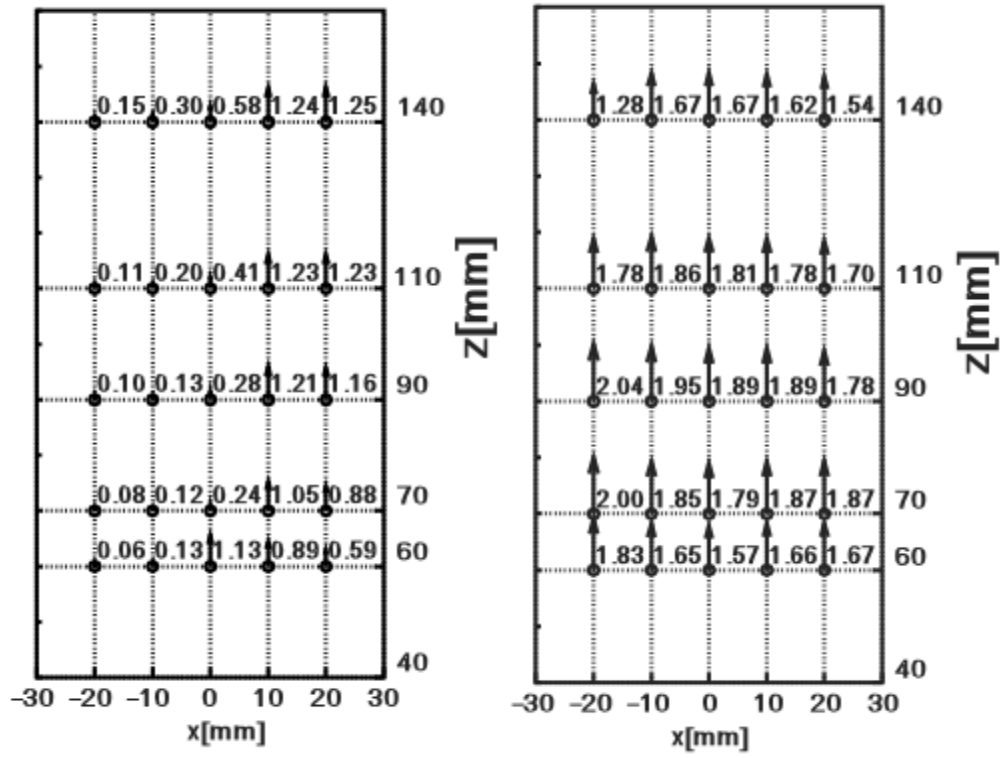


図3. 2. 4-2 塔下部の上昇風速分布 (塔中心線を含む  $x$ - $z$  断面)  
(左: ソーラチムニ, 右: 上空風利用型)



### 3.3 流れ場の数値計算

風洞実験における塔内部の上昇気流を流れ場の数値計算により再現し、風洞実験の流れ場について考察する。

#### 3.3.1 数値計算方法

解析対象は風洞実験を模擬した中立流とする。すなわち、一様流入風が存在するなかに、ソーラチムニもしくは上空風利用型の模型を配置し、流れ場を数値計算により計算し、風洞実験との比較を行う。流れ場の支配方程式は連続式(式 3.2-1)と運動量式(式 3.2-2)とする。計算方法は有限差分法による直接数値計算 DNS(Direct Numerical Simulation)である。速度場と圧力場のカップリングにはオイラー陽解法に基づいた部分段階法[文献 35]を用いる。圧力場は運動量式の発散であるポアソン方程式を導き、逐次過大緩和法(SOR法: Successive Over Relaxation Method)により緩和計算をする。運動量式の空間項は二次精度中心差分とし、対流項は補間法[文献 37]に基づき四次精度中心差分で離散化し、数値粘性項に  $\alpha=3$  の四階微係数を導入する修正三次精度風上差分(K-K Scheme)[文献 36]を用いる。計算領域は直交座標系の不等間隔スタッガード格子とし、模型を矩形格子近似法で配置する。計算格子は流れ場の性質を決定する模型下部及び塔内部に集める。上空風利用型の構成品ごとに場合わけの計算をする際には、計算時間の都合上、約 240 万点 ( $153(x) \times 141(y) \times 111(z)$ ) の計算格子を使用し、塔中心線上の上昇測度分布を実験結果と照合する際には、約 445 万点 ( $183(x) \times 161(y) \times 151(z)$ ) の計算格子を使用する。図 3. 3. 1-1 に計算領域内の計算格子及び一様流入風内に配置する模型を示す。図 3. 3. 1-2 に矩形格子近似にて作成した模型を示す。

計算領域側面及び上面は滑り条件、下面及び物体は粘着条件とする。圧力場は全周ノイマン条件とする。流入条件は  $u=1\text{m/s}$ ,  $v=w=0\text{m/s}$ , 流出条件は対流流出条件として風洞への入出力を模擬する。時間刻みは  $1 \times 10^{-4}\text{s}$  とし、初期条件を  $u=1\text{m/s}$ ,  $v=w=0\text{m/s}$ ,  $P=0$  で与えるインパルススタートを採用する。10s(100000step)の計算を行い、物体周囲の流れ場を十分に発達させる。この助走計算後、全ての格子点における速度及び圧力をサンプリング周波数 10kHz, サンプリング時間 10s(100000step)で取得し、時系列データの平均値を各格子点における計測値とする。本計算のレイノルズ数は、代表長  $D=60\text{mm}$  (塔のスロート直径), 代表速度を流入風速の  $1\text{m/s}$  であるた

め、 $Re=0.4 \times 10^4$ である。計算機は九州大学応用力学研究所所属のハイパフォーマンス・コンピュータ富士通 VPP5000 を使用し、ベクトル演算処理を行う。

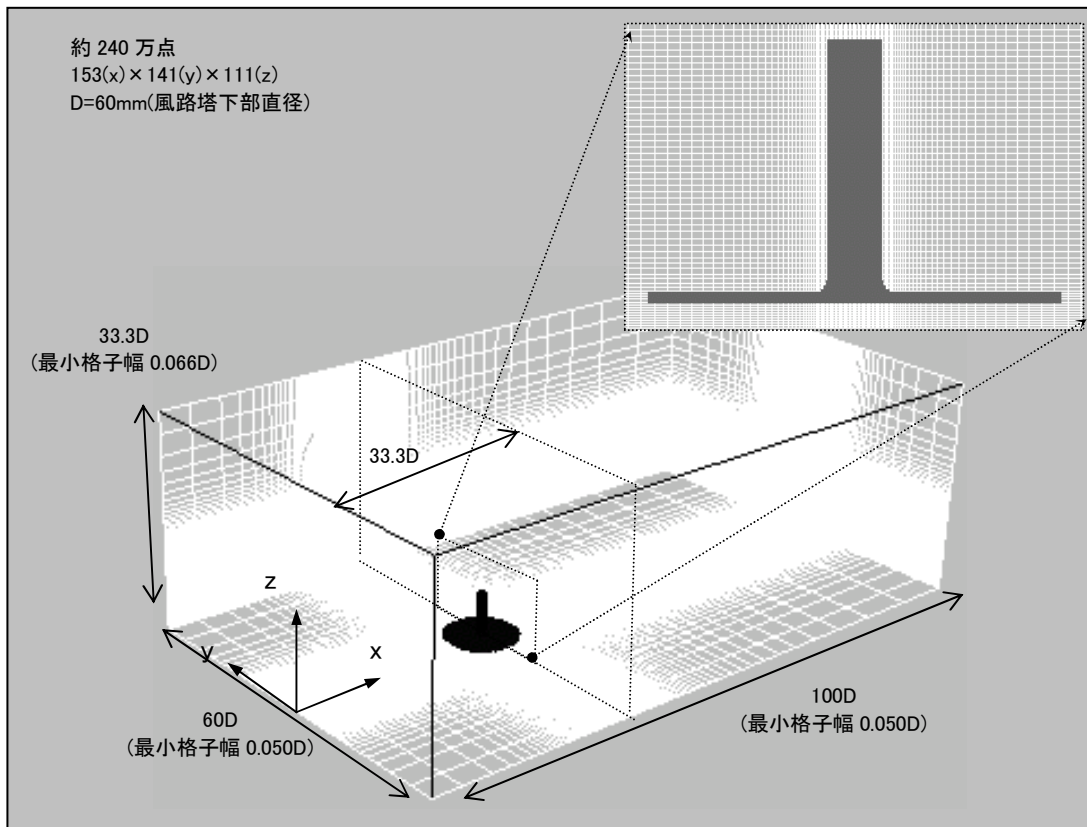


図 3. 3. 1-1 計算領域の計算格子及び一様流入風内に配置する模型  
 ( $D$ は図 3. 2. 2-1 に示す実験用模型の塔内径と同じ定義である)

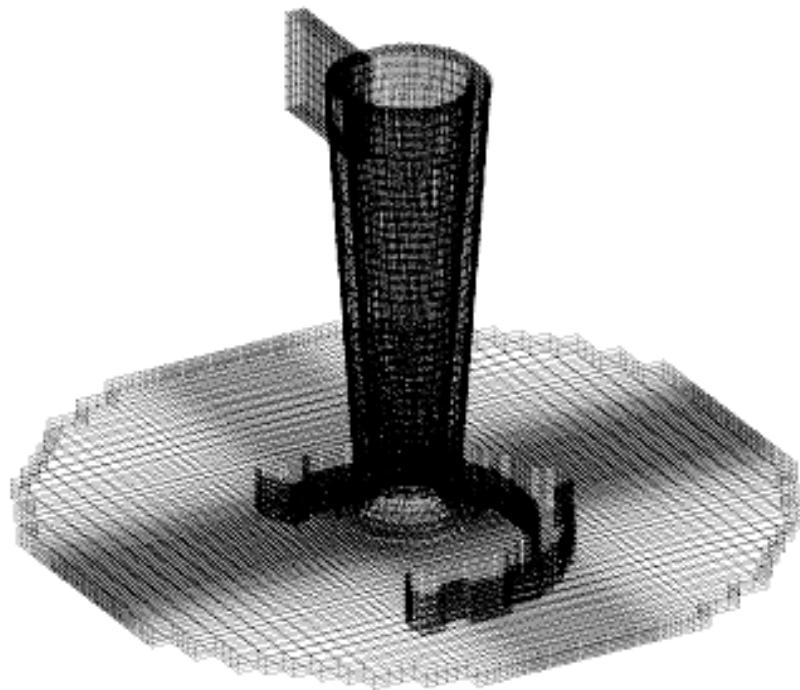
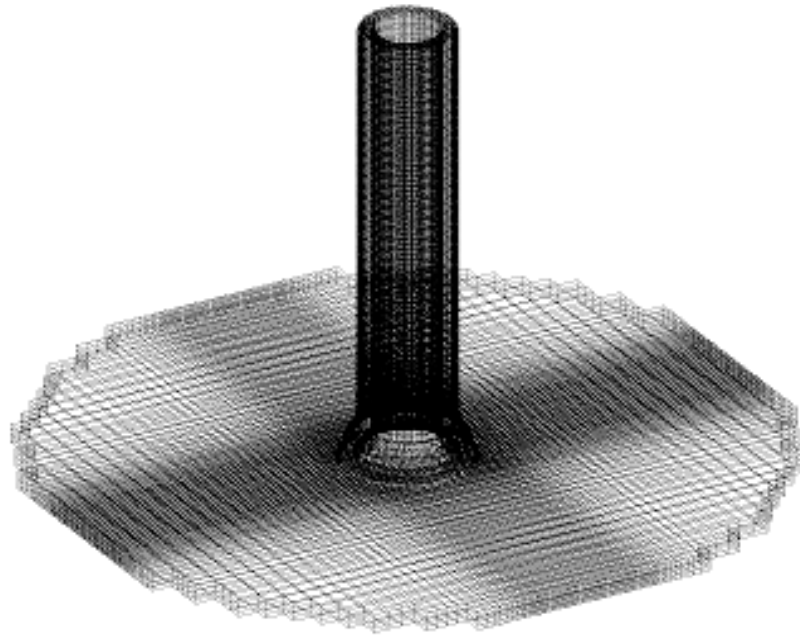


図3. 3. 1-2 矩形格子近似にて作成した計算領域内の模型  
(上：ソーラチムニ，下：上空風利用型)

### 3.3.2 数値計算結果と考察

図3.3.2-1は塔上部を流れる上空風および塔内部から流出する空気が混合する様子を流線図で可視化している。上空風を渦形成板で堰き止めることにより後流に大きい渦を形成して、塔内部の空気を吸出している様子を示している。図3.3.2-2は計算領域の平均静圧からの圧力差を示す。上空風利用型の各構成品による効果が、この静圧分布に示している。渦形成板は塔の流出部における低圧領域を形成している。ガイドシャッターは塔の流入部に高圧領域を形成している。ガイドシャッターにより形成する高圧領域はディフューザの圧力回復効果により低圧領域となり、結果として渦形成板、ディフューザ形状の塔、ガイドシャッターを適用した上空風利用型の場合にはディフューザのスロートが最も低圧領域となって表れている。これにより、集熱部下の空気が塔内部へ流入し、ソーラチムニ型に比べて増速した上昇気流をスロートで得る様子を図3.3.2-3の上昇気流の速度分布が表している。図3.3.2-4はスロート近傍の流線図を示す。ソーラチムニ型では下流へ流れ出ているのに対し、上空風利用型では塔内部に空気が上昇している様子が確認できる。これは、風洞実験のスモークワイヤー法にて可視化した様子と一致している。

図3.3.2-5は室内実験及び数値計算により取得した塔中心線上の上昇速度分布である。ソーラチムニ及び上空風利用型ともに計算結果と実験結果の分布傾向が類似しており、ディフューザにおけるスロート近傍の速い上昇速度も確認できる。定量的には、最大0.7m/s 遅い結果を計算結果で示すが、塔上部や下部に生じる乱流現象を数値計算により解くために数値粘性を導入している影響であると推察する。このことより、定量的には実験結果の値を上昇風速の推定値として使用する。したがって、上空風の風速となる1m/sにより塔中心線上の上昇気流の流速を正規化すると、ディフューザのスロート近傍、すなわち風車ロータ面で得る上昇気流の上空風に対する増速率は1.9となる。

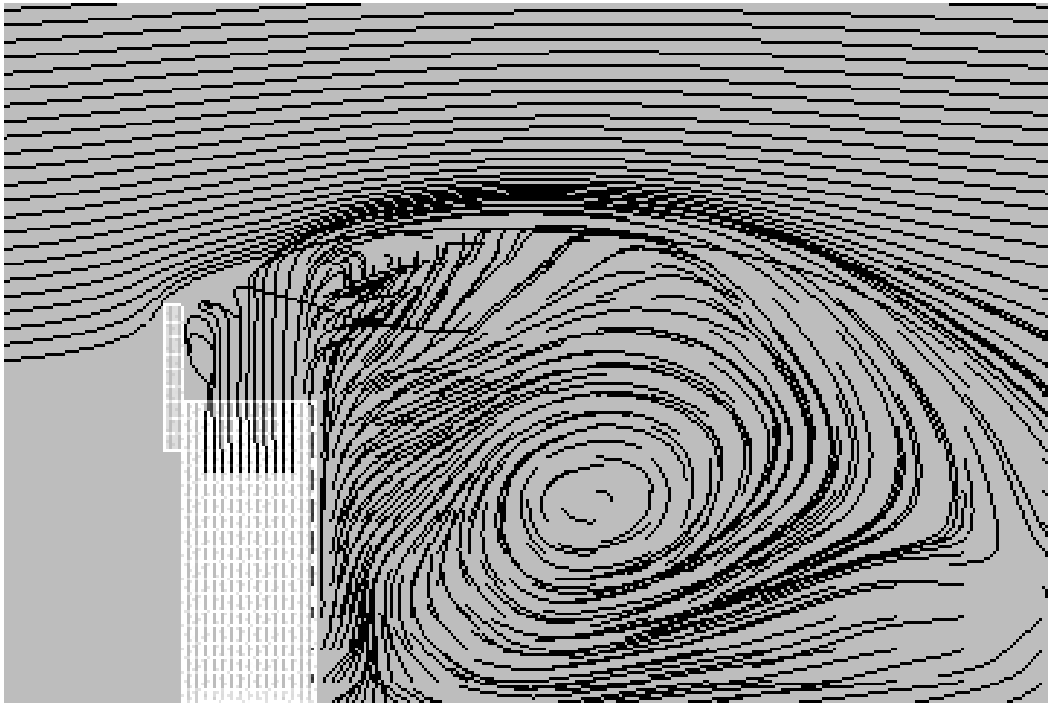
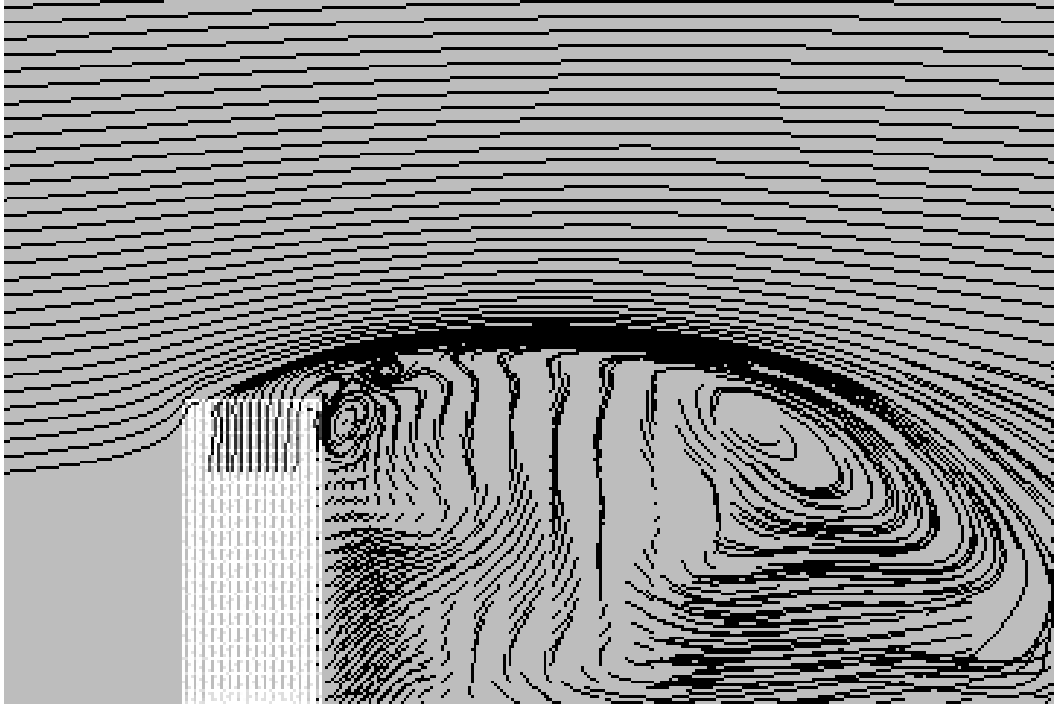


図 3. 3. 2-1 渦形成板周囲の流線図  
(上：渦形成板 無し，下：渦形成板 有り)

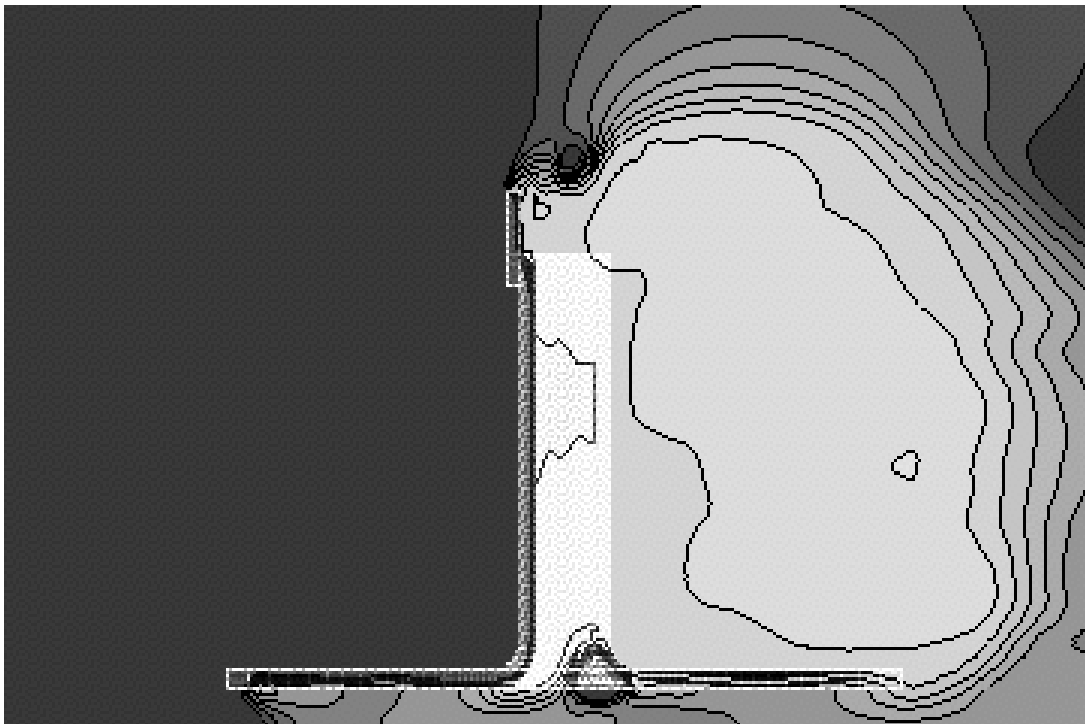
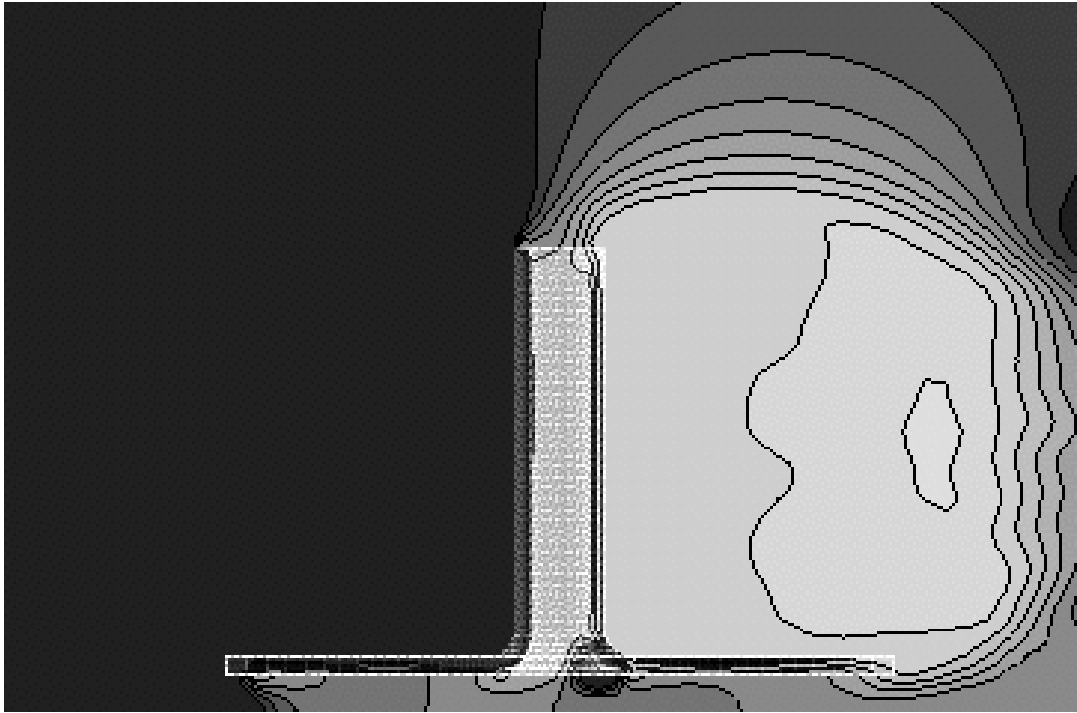


図3. 3. 2-2(a) 塔中心線を含む x-z 断面の圧力分布  
 (圧力場の等値線図  $-0.5 \sim 0.0$  を 10 分割)  
 (上: ソーラチムニ, 下: 渦形成板を付加)

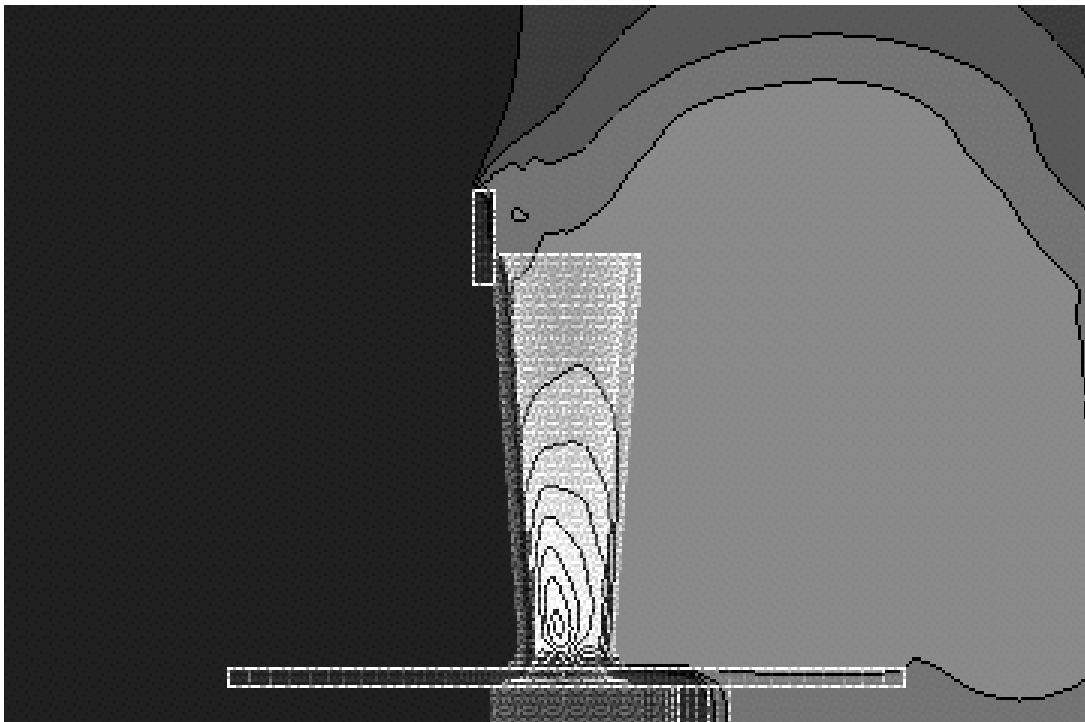
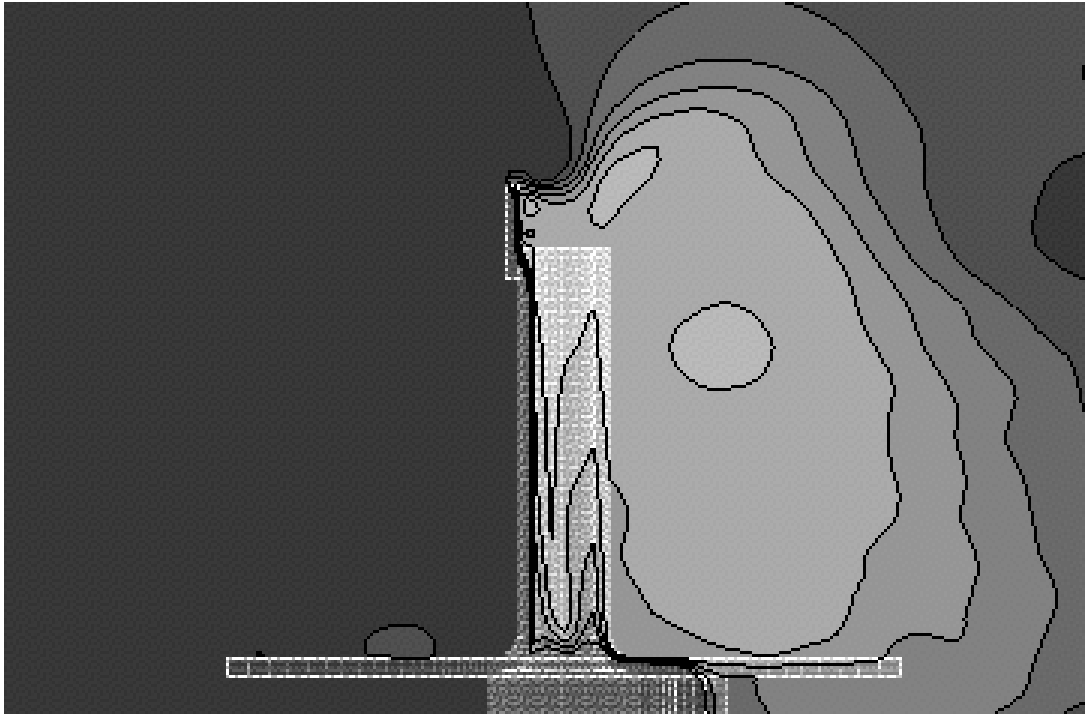


図 3. 3. 2 - 2 (b) 塔中心線を含む x-z 断面の圧力分布  
 (圧力場の等値線図  $-0.5 \sim 0.0$  を 10 分割)  
 (上：渦生成版と風導壁を付加，下：上空風利用型)

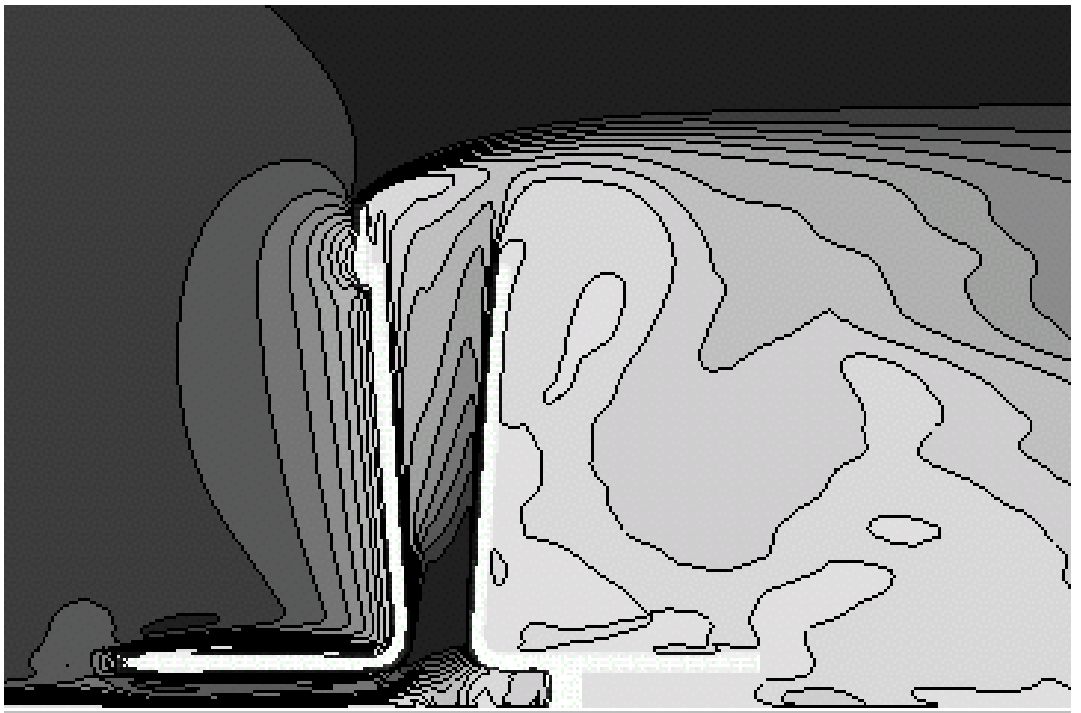
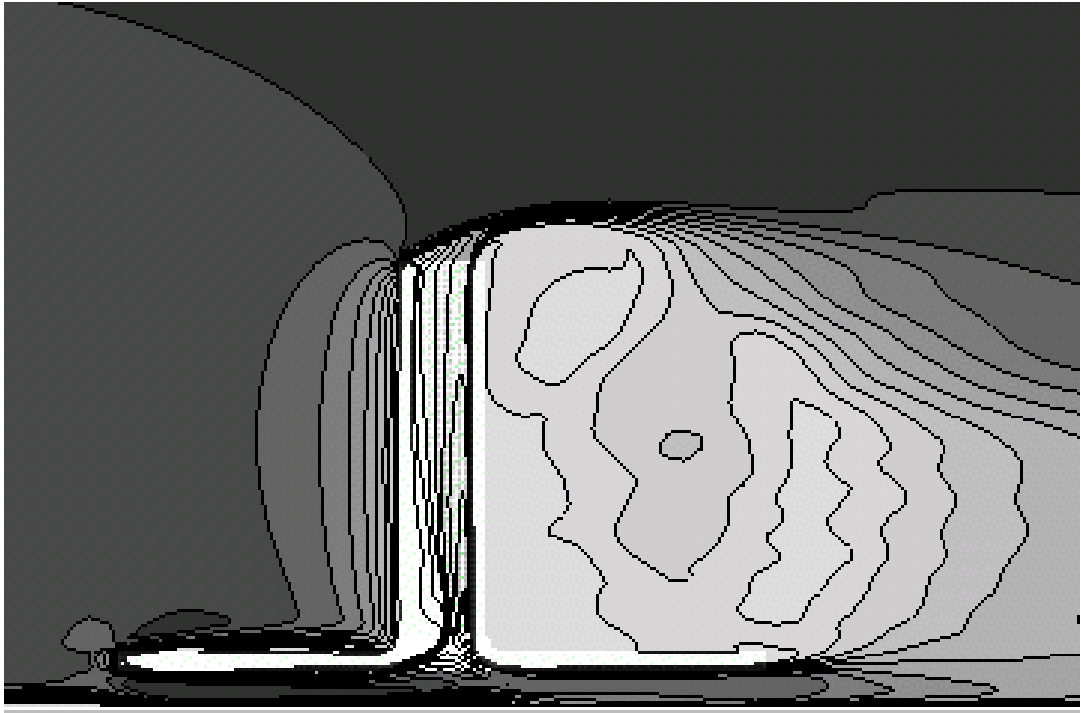


図3. 3. 2-3(a) 塔中心線を含む x-z 断面の速度場等値線図  
 (0.0~1.0m/s を 10 分割)  
 (上: ソーラチムニ, 下: 上空風利用型)



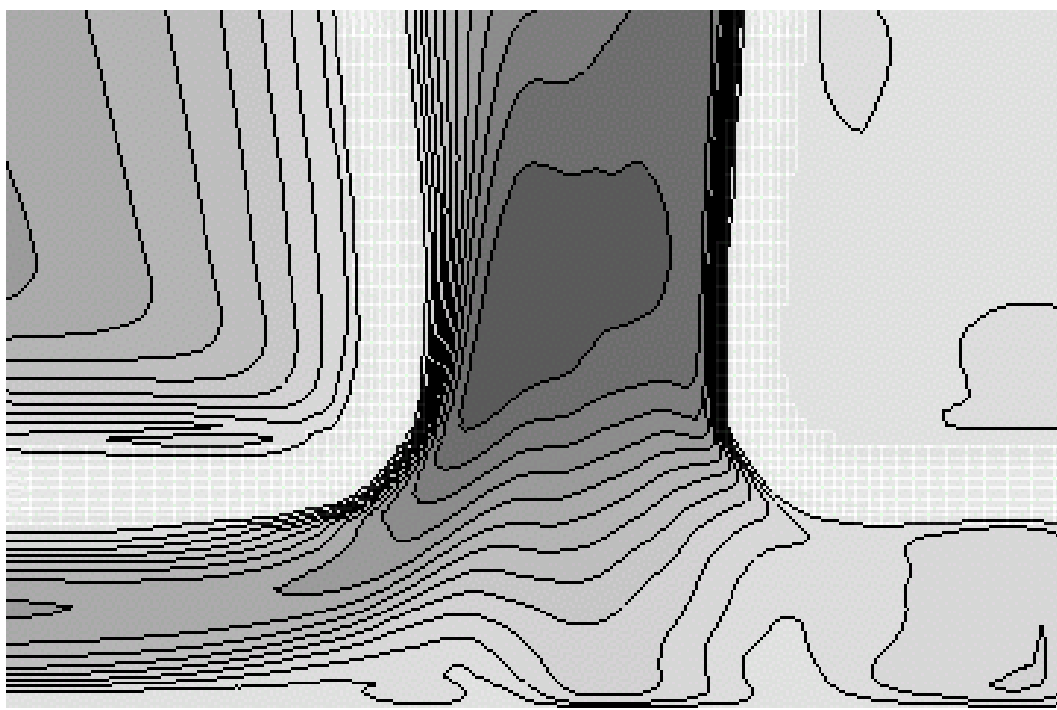
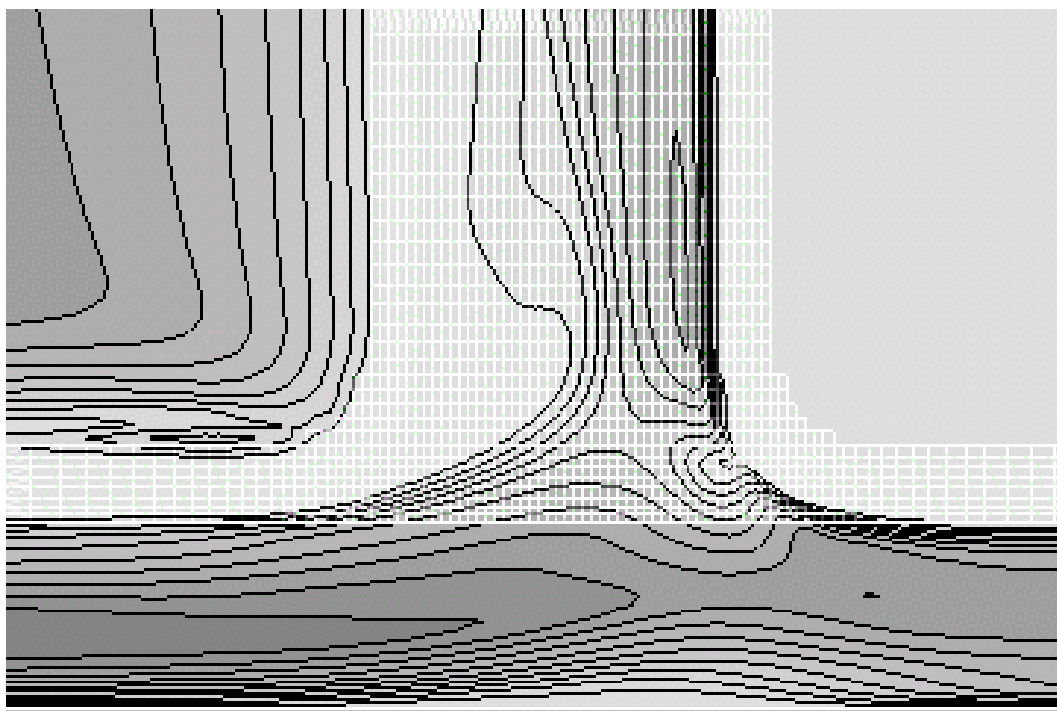


図 3. 3. 2 - 3 (b) 塔中心線を含む x-z 断面の速度場等値線図  
 (0.0~1.0m/s を 10 分割)  
 (上 : ソーラチムニ, 下 : 上空風利用型)

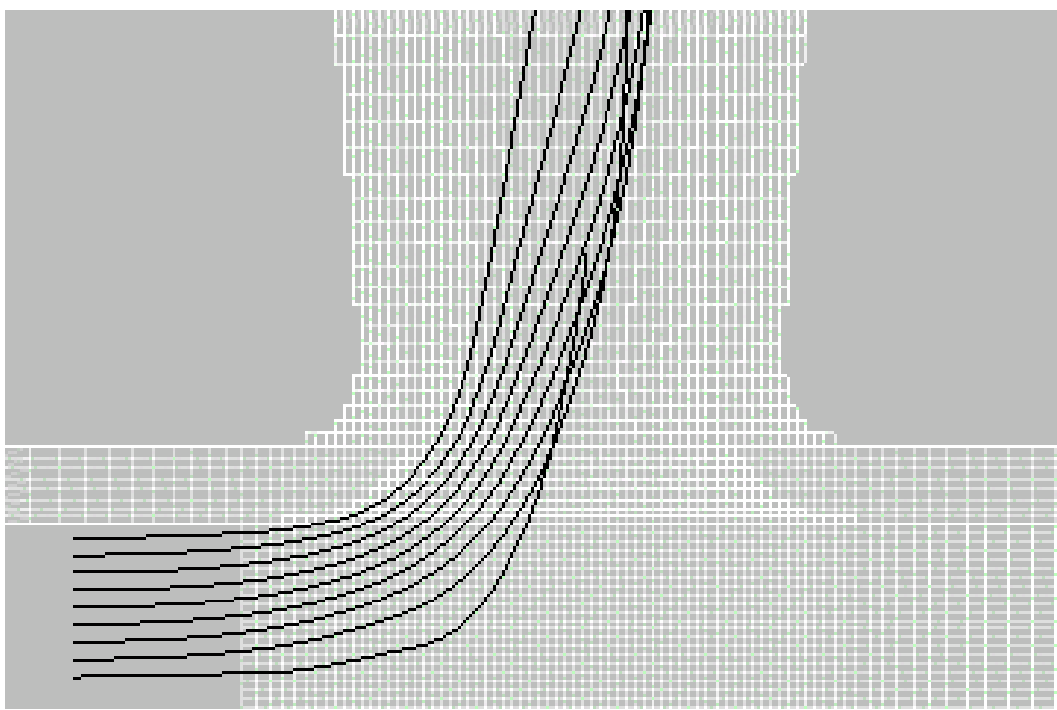
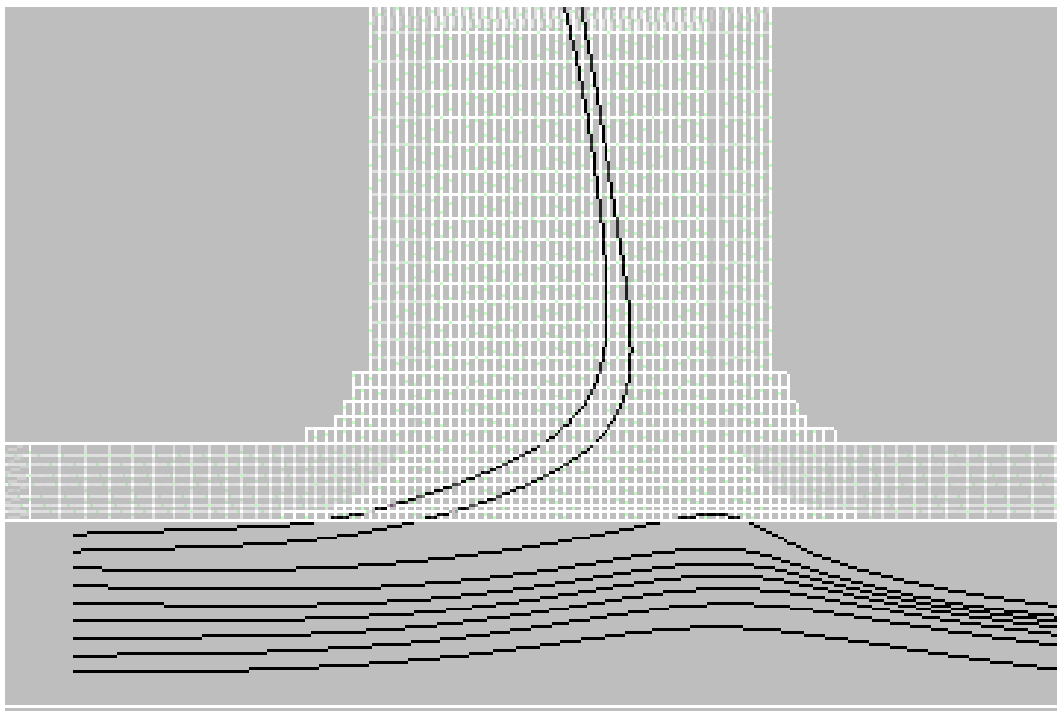


図3. 3. 2-4 ディフューザのスロート近傍における流線図  
 (上: ソーラチムニ, 下: 上空風利用型)

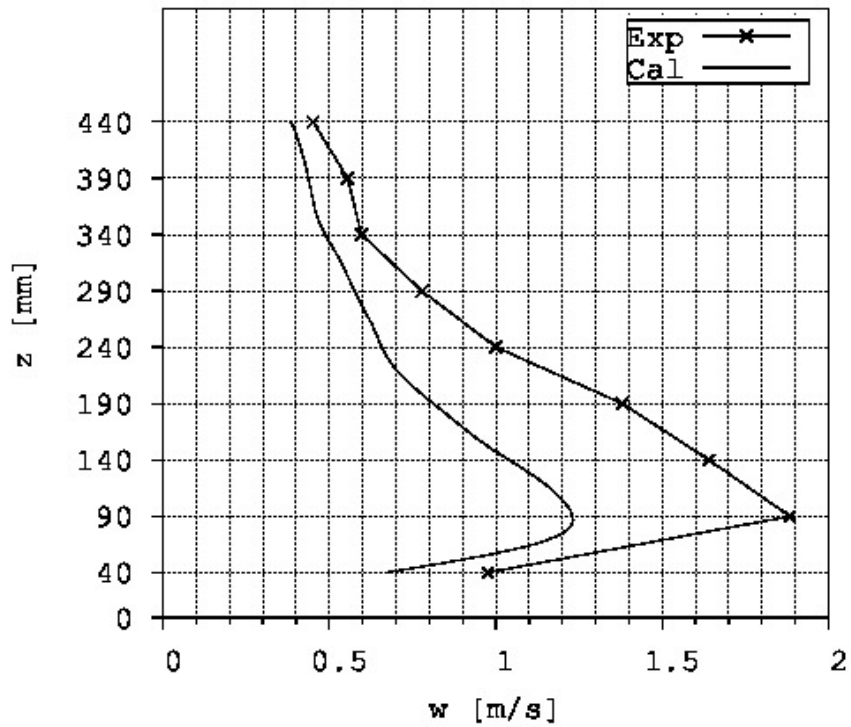
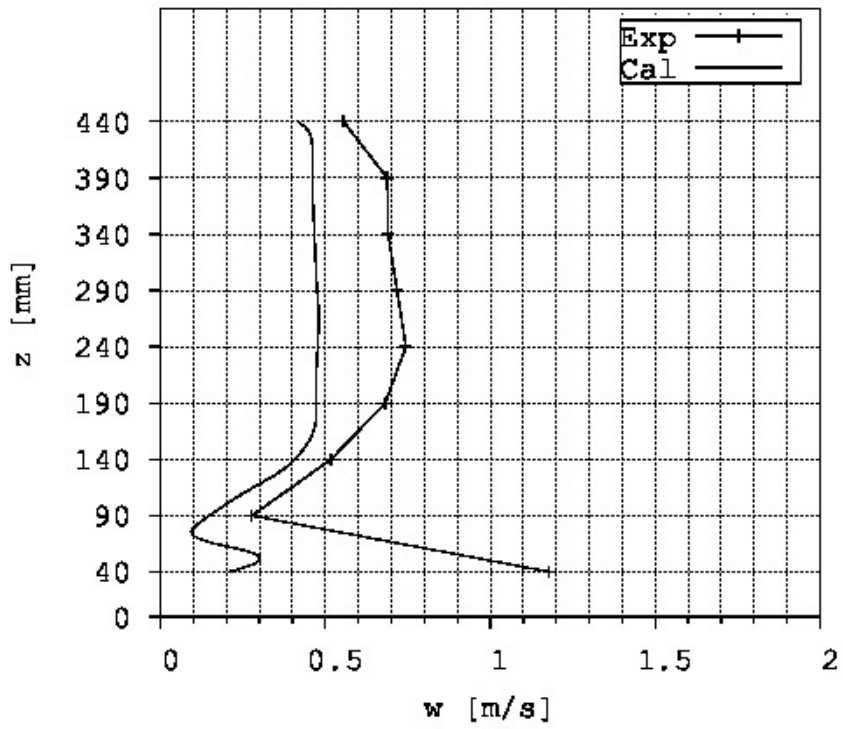


図3. 3. 2-5 塔中心線上の上昇速度の比較  
(上：ソーラチムニ，下：上空風利用型)

### 3.4 結論

本章の結論は次の通りである.

- (i) ウィンドソーラータワーが上空風を使用して塔内部に上昇気流を誘起する現象は, 卓上模型を用いた風洞実験および流れ場の数値計算において, 外部風速を一様流として設定することで模擬することができた.

(注記1) 地表面近傍の流速を上空風と比較して低速にした場合の試みを乱流境界層に埋没した場合として付録Cに記載する.

(注記2) 地表面近傍の流速を無風として上空風のみを発生した場合の福富氏による試み [文献 41] との本研究との差異に関する考察を付録Dに記載する.

- (ii) 卓上模型を使用した実験および数値計算では, 塔上部の上流側に渦形成板を設置し, 塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更して, 塔下部にガイドシャッターを設置することで, 上空風より増速した上昇気流をディフューザのスロートで得る. (実験結果では1.9倍の増速率)

## 第4章 ウィンドソーラータワーの発電量推定に関する研究

本章では、独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を複合して風力発電したときに得る発電量，稼働率，設備利用率を明らかにする。

比較対象とするのは、太陽熱により誘起した上昇気流で風力発電を実証したソーラーチムニ・プロットタイプである。したがって、はじめにソーラーチムニ・プロットタイプの公開されている風力タービンのロータ径，年間の稼働時間および発電量をもとに，塔内部に誘起した上昇気流の発生頻度分布を推定する。つぎに，同発生頻度分布を用いて，塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更した場合に得る上昇気流の増速率（第2章の結論）を適用した際の発生頻度分布を推定し，年間の発電量，稼働率，設備利用率の向上を試算する。他方で，太陽熱とは独立したエネルギー源である上空風については，上空風を仮定し，上空風速に比べた塔内部の上昇気流の増速率（第3章の結論）を適用した際の上昇気流の発生頻度分布を推定し，年間の発電量，稼働率，設備利用率を試算する。最後に，上空風および太陽熱により発生する上昇気流の発生頻度分布を複合する際には，各々の事象が独立した時間帯に発生すると仮定した発生頻度分布を推定し，ウィンドソーラータワーの年間の発電量，稼働率，設備利用率として試算する。これにより，ソーラーチムニ・プロットタイプと比較して，塔内部形状のディフューザ化がもたらす高出力化の効果，上空風利用への形状変更がもたらす高稼働率化，独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を複合して風力発電する効果をまとめる。

#### 4.1 ソーラーチムニ・プロットタイプの分析

ソーラーチムニ・プロットタイプの実証試験で取得した年間の稼働時間及び発電量より，風力タービンの出力を仮定して，年間の上昇気流の発生頻度分布を分析する．

##### 4.1.1 稼働時間を稼働率として分析

稼働時間は，年間を通して出力を得た時間の総和である．これに従うと，プロットタイプの稼働時間は 3157 時間であり，非稼働時間は 5603 時間である．年間の 64%の時間は出力を得ていない（図 4. 1. 1-1）．

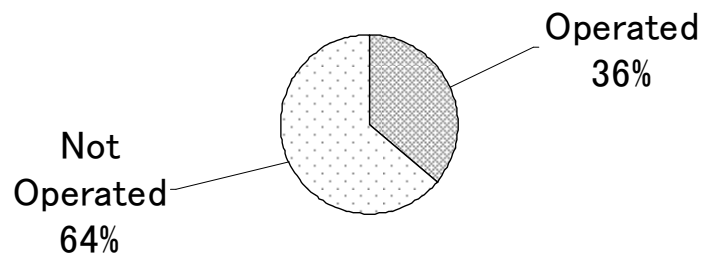


図 4. 1. 1-1 ソーラチムニ・プロットタイプの稼働率

一年間のうち，昼間と分類できる時間は 4346 時間で，そのうちソーラーチムニの昼間の稼働時間は 2913 時間，すなわち稼働率 0.67 である．一方夜間の時間を 4414 時間とすると，そのうちソーラーチムニの夜間の稼働時間は 244 時間，すなわち 0.06 である．つまり，昼間の稼働時間が年間の稼働時間の大半を占めており，夜間の低い稼働率が年間の稼働率を 0.36 に下げている（表 4. 1. 1-1）．

表 4. 1. 1-1 ソーラチムニ・プロットタイプの稼働時間と稼働率

項目	稼働時間	年間時間	稼働率
昼間	2913	4346	0.67
夜間	244	4414	0.06
年間	3157	8760	0.36

#### 4.1.2 発電量を設備利用率として分析

ソーラーチムニは風力タービンを回転することで発電する。したがって、設備利用率（Energy Availability Factor） EAFを一般に普及している水平軸風車との比較をするため、風力タービンの定格出力  $P_{\text{nominal}}$ ，年間発電量  $W_{\text{annual}}$ ，年間時間  $T_{\text{annual}}$  を用いて表す。

$$\text{EAF} = \frac{W_{\text{annual}}}{P_{\text{nominal}} T_{\text{annual}}} \times 100 \quad (4.1.2-1)$$

風力タービンの定格出力  $P_{\text{nominal}}$  は風車ロータ面の直径  $D$  の自乗に比例する。

$$P_{\text{nominal}} \propto D^2 \quad (4.1.2-2)$$

風力タービンのロータ径は、塔内部の直径と等価であるとする。ソーラーチムニ・プロットタイプのロータ径は 10m と仮定できる。ロータ径 10m の風力タービンの定格出力は 30kW@定格風速 12m/s 程度である。ソーラーチムニ・プロットタイプの年間の発電量は 44.35MWh であるため、式 4.1.2-1 より年間の設備利用率は 16.8%となる。設備利用率 20%以上が大型風力発電システム（陸上）として採算性があると見なす目安である[文献 17]。したがって、ソーラーチムニ・プロットタイプを商用目的として開発する際には設備利用率の向上が必須である。

### 4.1.3 発電量と稼働時間より上昇気流の発生頻度を分析

ソーラチムニは塔内部に誘起する上昇気流により風力タービンを回転することで発電する。これを言い換えると、発電量 $W$ は風力タービンの流入風速ごとの出力曲線 $P(w)$ 、風力タービンへ流入する上昇風速の発生頻度分布 $f(w)$ 、上昇風速の総発生時間 $T_w$ より算出できる。ここで、上昇風速の総発生時間 $T_w$ は、塔内部に下降風速が発生している時間と塔内部に風速が発生していない時間を含まない。

$$W = \int_0^{\infty} P(w)f(w)T_w dw \quad (4.1.3-1)$$

ソーラチムニ・プロットタイプ実証試験の年間の発電量 $W$ と稼働時間 $T_{op}$ は既知である。したがって、風力タービンの出力曲線 $P(w)$ を仮定することにより、上昇風速の発生頻度分布 $f(w)$ を年間の発電量 $W$ と稼働時間 $T_{op}$ より一意に推定することができる。これにより、年間の平均上昇風速を上昇気流の発生頻度分布 $f(w)$ の期待値より推定できるとともに、年間の上昇気流の総発生時間も推定できる。

風力タービンの出力曲線 $P(w)$ は、風力タービンのロータ面へ流入する空気の運動量（式 4.1.3-3）と風力タービンの出力係数 $C_p(w)$ （式 4.1.3-4）の積である（式 4.1.3-2）。

$$P(w) = W_0(w)C_p(w) \quad (4.1.3-2)$$

$$W_0(w) = \frac{1}{8}\pi\rho D^2 w^3 \quad (4.1.3-3)$$

$$C_p(w) = a(w-b)^l + c \quad (4.1.3-4)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $D$ は風力タービンのロータ径、 $l$ は風力タービンの出力係数 $C_p(w)$ の次数、 $a, b, c$ は風力タービンの出力係数 $C_p(w)$ を調節する定数である。風速 12m/s における定格出力 30kW の風力タービンで使用する定数を表 4. 1. 3-1 に示し、風力タービンの出力係数曲線と出力曲線を図 4. 1. 3-1 に示す。



表4. 1. 3-1 風速 12m/s, 定格出力 30kW の風力タービン  
( $P(w)$ の算出に使用する定数)

パラメータ		値			
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1.23			
$D$	m	10			
$C_p(w)$		l	a	b	c
$0 \leq w \leq 2.5$	m/s	0	0	0	0
$2.5 < w \leq 12$		0	0	0	0.42
$12 < w \leq 13$		2	0.04	14	0.26
$13 < w \leq 23$		-3	650	0	0
$23 < w \leq 25$		1	-0.026	23	0.53
$25 < w \leq 50$		0	0	0	0

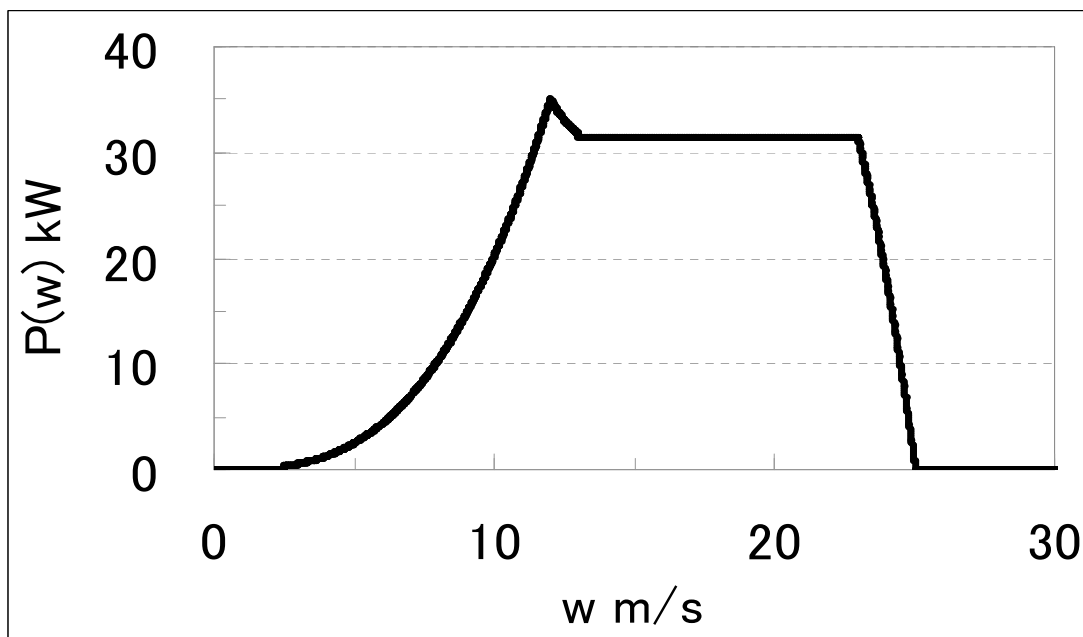
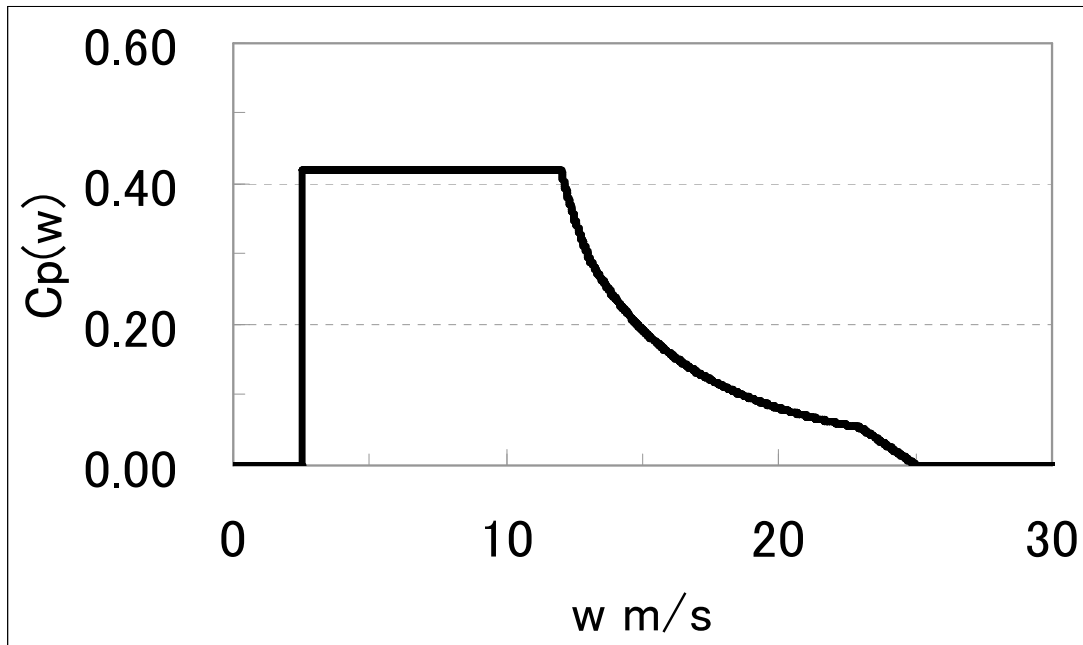


図4. 1. 3-1 風速 12m/s, 定格出力 30kW の風力タービン  
 (上:  $C_p(w)$  出力係数曲線, 下: 出力曲線  $P(w)$ )

太陽熱により誘起する上昇気流の発生頻度分布 $f(w)$ を一意に定義するにあたり、正規分布を使用する。上昇風速 $w$ を連続した確率変数とし、発電に供する上昇風速の値の範囲は $0 < w \leq w_{\max}$ とする。ここで $w_{\max}$ は上昇風速の最大値である。正規分布の確率密度関数 $f(w)$ 、累積密度関数 $F(w)$ 、最頻値Mode、期待値Eを式 4.1.3-5, 4.1.3-6, 4.1.3-7, 4.1.3-8 に示す。

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(w-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < w \leq \infty \quad (4.1.3-5)$$

$$F(w) = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{w-\mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \quad (4.1.3-6)$$

$$\text{Mode} = \mu \quad (4.1.3-7)$$

$$E = \mu \quad (4.1.3-8)$$

ここで $\mu$ は平均、 $\sigma$ は標準偏差、 $\operatorname{erf}(\ )$ は誤差関数である。これにより、年間の発電量 $P$ と年間の稼働時間 $T_{op}$ を満たす上昇風速の発生頻度分布 $f(w)$ を推定する際には、式 4.1.3-1 を満足する統計値 $\mu, \sigma$ を推定することになる。これに加えて、式 4.1.3-1 にある上昇気流の総発生時間 $T_w$ は、年間の稼働時間 $T_{op}$ と異なることに気をつける必要がある。風力タービンのカットイン風速とカットアウト風速は2.0m/sと25.0m/sとして表4. 1. 3-1に仮定しているため、上昇風速の総発生時間 $T_w$ のうち、風車の出力がある2.0m/sから25.0m/sまでが年間の稼働時間 $T_{op}$ となる。したがって、式 4.1.3-1 を満足する統計値 $\mu, \sigma$ を推定する際には、年間の稼働時間 $T_{op}$ を満たす上昇気流の総発生時間 $T_w$ を算出し、かつ、年間の発電量 $P$ を満たす統計値 $\mu, \sigma$ を推定する。具体的には年間の発電量 $P$ が44.35MWh、年間の稼働時間 $T_{op}$ が3157時間とすると正規分布の統計値 $\mu, \sigma$ は複数の解があることが予想される。ここで、推定する変数を一つに絞り込むため、上昇気流の最大流速が $\mu + 3\sigma$ となる分布を推定する。ソーラーチムニ・プロットタイプの実証試験で得た上昇気流の最大風速は $w_{\max} = 12.0\text{m/s}$ である。したがって、平均が $\mu = 8.7\text{m/s}$ 、標準偏差が $\sigma = 1.1\text{m/s}$ となる。図4. 1. 3-3に推定した上昇気流の年間発生頻度分布を示す。ここで上昇気流の総発生時間 $T_w$ は3157時間であり、年間5603時間(64%)は上昇気流が発生していなかったことを示す(図4. 1. 3-4)。

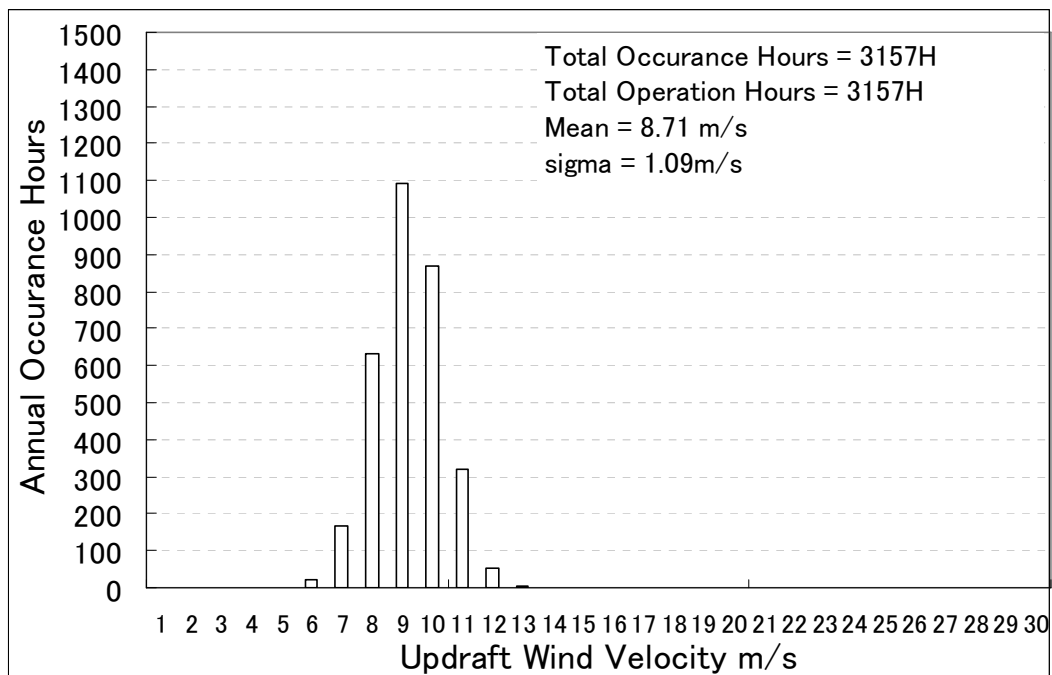


図4. 1. 3-3 ソーラーチムニ・プロットタイプが誘起したと推定できる上昇気流の年間発生頻度分布  
(年間の発電量 44.35MWh, 年間の稼働時間 3157 時間より推定)

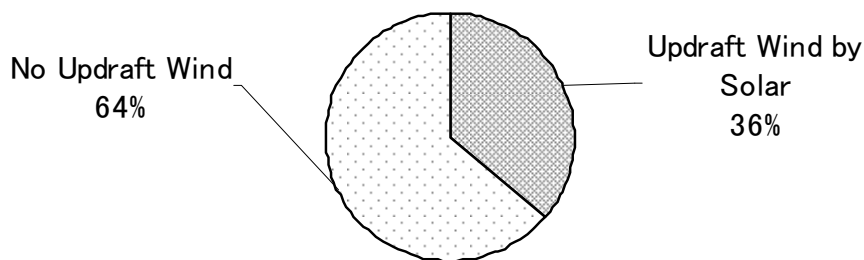


図4. 1. 3-4 ソーラーチムニ・プロットタイプが誘起した上昇風速の年間総発生時間の割合

上昇気流が発生する場合と発生しない場合に分けて、発電量、発生時間、発生率、平均上昇風速を表4. 1. 3-2に纏める。ここで上昇気流が発生している場合の平均上昇風速は式 8.71m/s となる。しかしながら、上昇気流が発生していない年間の時間を踏まえて年間の平均上昇風速を発生率による加重平均として算出すると 3.14m/s となる。ここで上昇気流が発生

しない場合の平均上昇風速を 0.0m/s としている。これは上昇気流が発生しない時間帯が年間の平均上昇風速が低い主な原因であることを示す。

表 4. 1. 3-2 ソーラチムニ・プロットタイプが誘起した  
 上昇風速の年間総発生時間と平均上昇風速の推定値  
 (年間の発電量 44.35MWh, 年間の稼働時間 3157 時間より推定)

年間の統計値		上昇気流 有り	上昇気流 無し	総和
発電量	MWh	44.35	0.00	44.35
発生時間	Hours	3157	5603	8760
発生率		0.36	0.64	1.00
平均上昇風速	m/s	8.71	0.0	3.14

上記に示すソーラチムニ・プロットタイプの実証試験結果を纏めると、太陽熱エネルギーより誘起する塔内部の上昇気流を用いて風力タービンを回転して発電する仕組みは実証できていたことがわかる。しかしながら、太陽をエネルギー源とする発電システム全般の短所として挙げられる日射を得ることができない夜間帯における低稼働率は、ソーラチムニにおいても現れている。これに加えて、設置する風力タービンの出力曲線に適した上昇風速が発生していなく、風力タービンが有する発電性能を十分に発揮していない。これらの課題を解決することにより、ソーラチムニの建設・維持費を同等にしながらも、年間にわたる発電量の増加が見込める。

## 4.2 太陽熱により創る上昇気流を集める効果

上昇気流増速率 $c_g$ を円筒に比べたディフューザのスロートにおける上昇気流の増速率とする。ディフューザを使用した場合の上昇気流の発生頻度分布 $f(w)$ は、円筒で得た上昇気流の発生頻度分布 $f(w)$ の平均 $\mu$ と上昇気流増速率 $c_g$ との積により算出する平均 $\mu_g$ に基づく発生頻度分布とする。

$$\mu_g = \mu C_g \quad (4.2-1)$$

第2章の室内実験および数値解析結果により上昇気流増速率 $c_g$ を1.4とする。上昇気流の出現している時間帯における平均 $\mu$ は、4.1節のソーラチムニ・プロットタイプの分析により8.7m/sであり、上昇気流増速率 $c_g$ との積は12.2m/sとなる。これに基づく発生頻度分布をディフューザ型の塔が見込む上昇気流の発生頻度分布とする。図4.2-1にソーラチムニ・プロットタイプと比較したヒストグラムを示す。稼働時間は風車の発電風速内にあるため稼働時間は3157時間（稼働率0.36）で変わらない。風力タービンの出力曲線における高出力域（11m/sから23m/s）における上昇風速の出現時間が比重を増し、等しい稼働時間においても、ディフューザは円筒に比べて年間の発電量を2.2倍の97.45MWhに増加する。設備利用率も35%に増加する。一般の大型風力発電システムの設備利用の目安は陸上で20%、洋上で30%[文献17]であり、同等となる。

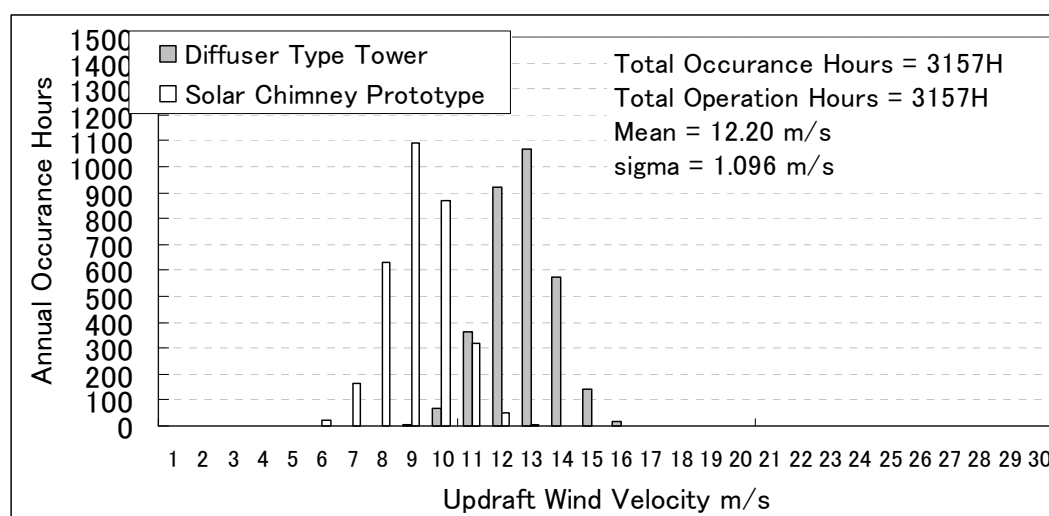


図4.2-1 ディフューザ型の塔が見込む上昇風速の年間発生頻度分布

上昇気流が発生する時間帯における年間の平均上昇風速は 12.2m/s となる。上昇気流が発生しない時間帯を踏まえると、年間の平均上昇風速は 4.4m/s (表 4. 2-1) であり、いぜんとして太陽熱により上昇気流が発生しない時間帯が存在することにより年間の平均上昇風速を低い水準に保っている。

表 4. 2-1 ディフューザ型の塔が見込む  
 上昇風速の年間総発生時間と平均上昇風速  
 (年間の発電量 97.45MWh, 年間の稼働時間 3157 時間を見込む)

年間の統計値		上昇気流 有り	上昇気流 無し	総和
発電量	MWh	97.45	0.00	97.45
発生時間	Hours	3157	5603	8760
発生率		0.36	0.64	1.00
平均上昇風速	m/s	12.2	0.0	4.69

ディフューザ型の塔は、風力発電するエネルギー源が太陽熱エネルギーであることに変わらず、太陽熱エネルギーを得ることが出来ない時間帯には発電がほぼできない特徴は変わらない。しかしながら、同じ太陽熱エネルギーを得たときにディフューザは円筒より速い上昇気流を風車ロータ面に創りだし、風力タービンの高出力領域における風速の出現時間を多くすることで発電量の向上が見込める。

### 4.3 上空風により上昇気流を集める効果

風の発生頻度分布を一般的に表現する際に使用するレイリー分布（ワイブル分布の  $k=2$  の場合）を発生頻度分布とする。風速  $u$  を連続した確率変数とした場合に、ワイブル分布の確率密度関数  $f(u)$  (式 4.3-1, 4.3-2), 累積密度関数  $F(u)$  (式 4.3-3, 4.3-4), モード  $Mode$  (式 4.3-5), 期待値  $E$  (式 4.3-6) の形状係数を 2 にすることでレイリー分布を表す。

$$f(u) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{u}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^k}, \quad u > 0 \quad (4.3-1)$$

$$f(u) = 0, \quad u \leq 0 \quad (4.3-2)$$

$$F(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^k}, \quad u > 0 \quad (4.3-3)$$

$$F(u) = 0, \quad u \leq 0 \quad (4.3-4)$$

$$Mode = \lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad k \geq 1 \quad (4.3-5)$$

$$E = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.3-6)$$

ここで  $k$  は形状係数,  $\lambda$  は尺度係数,  $\Gamma(\ )$  はガンマ関数である。レイリー分布  $f(u)$  は尺度定数  $\lambda$  により一意に決定するため, 年間の平均風速を決めると, 確率密度関数, 累積密度関数, 最頻値が一意的に決まる。したがって, ここでは塔流出部周囲における上空風速  $u$  を確率変数とし, 夜間の年間の平均時間を 9 時間とし, この時間帯に出現する低層ジェット (LLJ: Low Level Jet) を含む上空風の年間の平均風速を  $U = 6\text{m/s}$  [文献 34] とすると, 上空風の発生頻度分布の尺度係数は  $6.8\text{m/s}$  となり, 確率密度関数および累積密度関数も一意に決まる。

上空風により塔下部に誘起される上昇気流の年間の期待値  $E_c$  を, 年間の上空風の期待値  $U$  と上空風により塔下部に誘起される上昇気流の増速率  $C_c$  との積とする。

$$E_c = UC_c \quad (4.3-7)$$



風洞実験結果より得た上昇気流増速率  $C_c=1.9$  を使用すると、塔下部に誘起する上昇気流の期待値  $E_c$  は  $11.4\text{m/s}$  となる。年間を通して夜間に発生する上空風の総発生時間を  $3285$  時間 ( $9$  時間  $\times 365$  日) として同時間帯に塔内部において上昇気流を誘起したとする。期待値が  $11.4\text{m/s}$  となるレイリー分布の尺度係数は  $12.9\text{m/s}$  となり、確率密度関数および累積確率関数は一意に決まる。確率密度関数に基づく上昇気流の年間の発生頻度分布は図 4. 3-1 の通りになる。稼働時間は  $2870$  時間 (稼働率  $0.33$ ) と昼間の  $3157$  時間に劣るものの、夜間を対象とした稼働率であればソーラーチムニ・プロットタイプの夜間の稼働時間である  $244$  時間に比べて  $11.76$  倍になり高稼働率である。

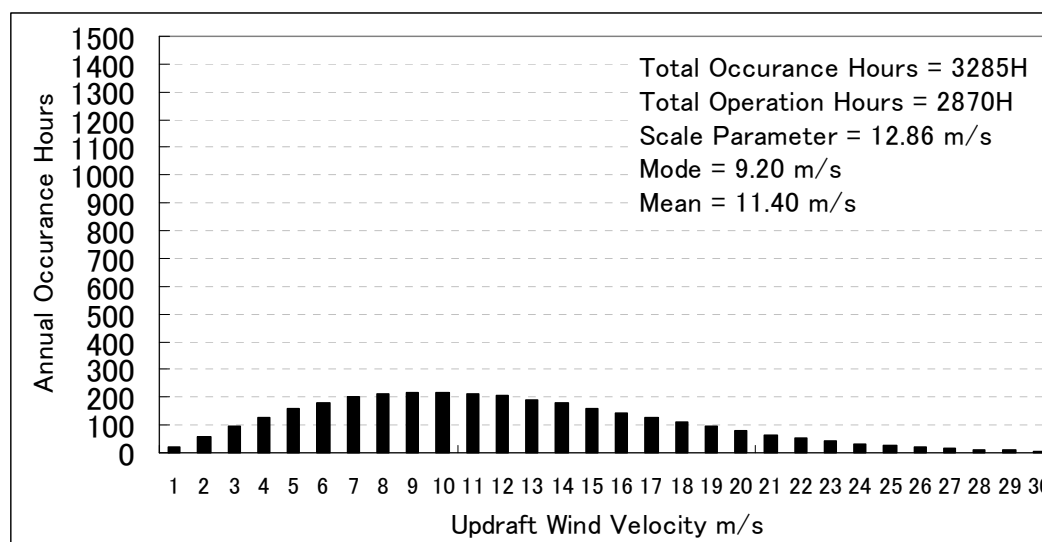


図 4. 3-1 上空風利用型の塔が見込む上昇気流の年間発生頻度分布

夜間帯に発生する上空風の年間の平均風速が  $6\text{m/s}$  程度であっても、上空風を利用して風を集める仕組みを導入することで、塔内部に上昇気流を発生する時間帯における年間の平均上昇風速は  $11.4\text{m/s}$ 、発電量は  $62.33\text{MWh}$ 、設備利用率は  $24\%$  となる。稼働率はソーラーチムニ・プロットタイプに比べて  $0.9$  倍に低下するものの、平均上昇風速は  $1.36$  倍に増速し、発電量と設備利用率は  $1.41$  倍に増加する。この設備利用率は一般の大型風力発電システム (陸上) での目安  $20\%$  [文献 17] と同等になる。上昇気流が発生しない時間帯を踏まえると、年間の平均上昇風速は  $4.3\text{m/s}$  と低水準になる (表 4. 3-1)。

表 4. 3 - 1 上空風利用の塔が見込む  
 上昇気流の年間総発生時間と平均上昇風速  
 (年間の発電量 62.32MWh, 年間の稼働時間 2870 時間を見込む)

年間の統計値		上昇気流 有り	上昇気流 無し	総和
発電量	MWh	62.32	0.00	62.32
発生時間	Hours	3285.0	5475.0	8760
発生率		0.38	0.62	1.00
平均上昇風速	m/s	11.4	0.0	4.33

#### 4.4 上空風および太陽熱を利用して複合発電するウィンドソーラータワーの効果

独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を複合して風力発電へ利用することを前提とした上昇気流の発生頻度分布を推定する。太陽熱により誘起する上昇気流は昼間の日射を得る時間帯に生じ、上空風により誘起する上昇気流は夜間の日射を得ない時間帯に生じて、各々独立した時間帯に発生する事象として扱う。これにより、太陽熱を利用した上昇気流の発生頻度分布と上空風を利用した上昇気流の発生頻度分布を各々の総発生時間を割合にした加重和として、上昇気流の複合した発生頻度分布を導出できる。図4. 4-1に上空風および太陽熱により誘起する上昇気流の年間を通した発生頻度分布を示す。上昇気流の年間の総発生時間は6442時間(74%, 図4. 4-2), 上昇気流が発生している時間帯の平均上昇風速(上昇気流発生時の平均)は11.8m/sとなる(以降、上空風をLLJ(Low Level Jet)と図で標記する)。

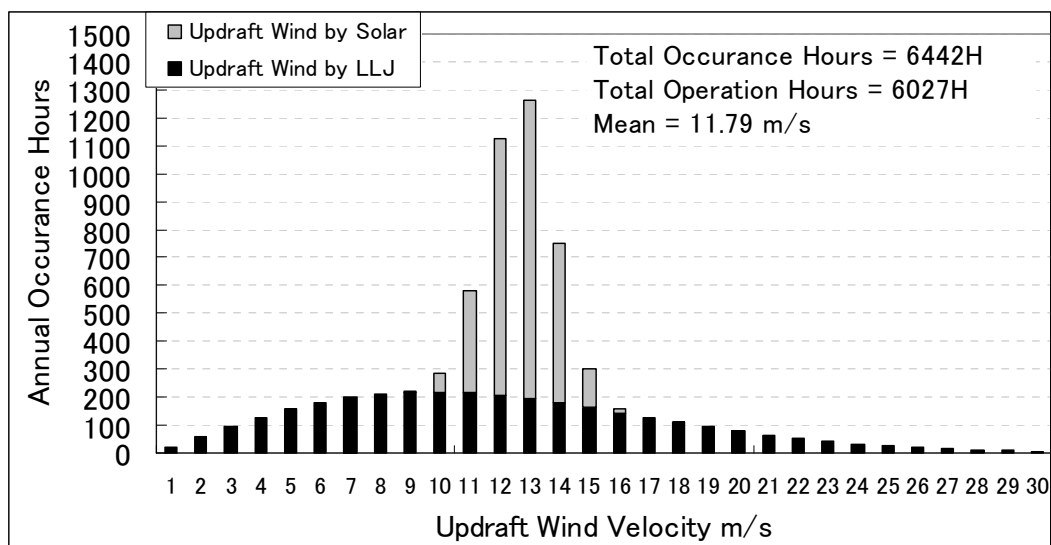


図4. 4-1 上空風および太陽熱を利用した  
上昇気流の年間発生頻度分布

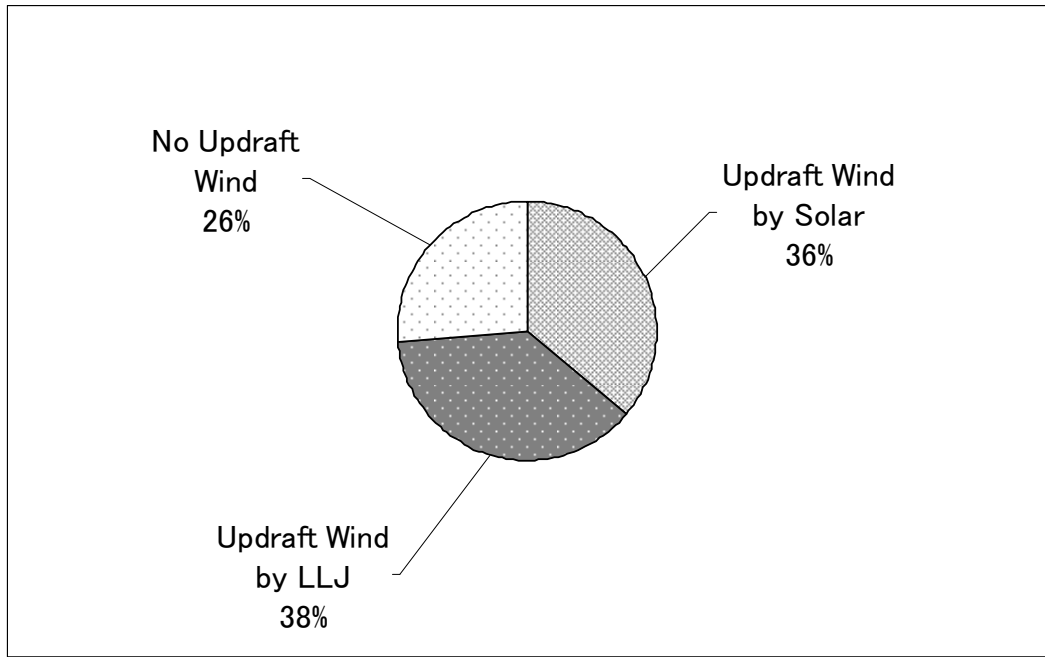


図4. 4-2 上空風および太陽熱を利用した  
上昇気流の年間総発生時間の割合

#### 4.4.1 ソーラーチムニ・プロットタイプとの比較

図4. 4-1で導出した上空風および太陽熱により誘起する上昇気流の年間の発生頻度分布に基づき、ソーラーチムニ・プロットタイプのロータ径（10m）で発電を行うとすると、稼働時間は6027時間（稼働率0.69）、発電量160MWh、設備利用率58%の見込みである。一般の大型風力発電システムにおける設備利用率の目安、陸上で20%、洋上で30%[文献17]を大きく上回る。図4. 4. 1-1にソーラーチムニ・プロットタイプを基準としたディフューザ形状の塔（4.2節）、上空風利用型（4.3節）、ウィンドソーラータワー（本節）の稼働率・発電量・設備利用率の増加率を纏める。

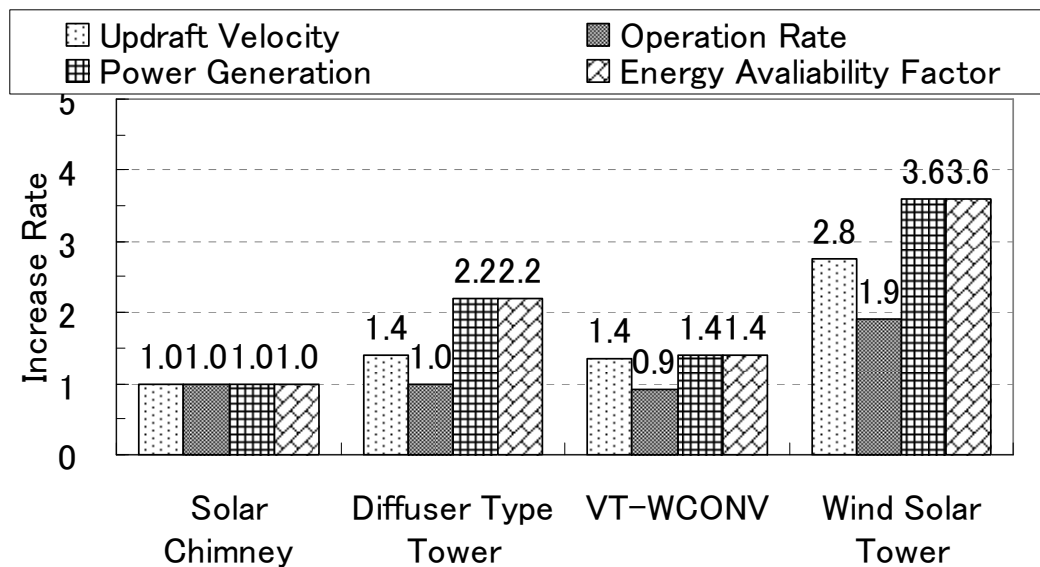


図4. 4. 1-1 ソーラーチムニ・プロットタイプと比較した太陽熱利用ディフューザ型，上空風利用型，ウィンドソーラータワーの平均上昇風速，稼働率，発電量，設備利用率の増加率

ウィンドソーラータワーでは、塔内部形状のディフューザ化による太陽熱利用時の高出力化および上空風利用による高稼働率化により年間の稼働率は1.9倍の0.69と高水準になり平均風速を2.8倍の8.7m/sまで増加する。これにより、ソーラーチムニ・プロットタイプに比べて発電量については160MWhで3.6倍、設備利用率は58%で3.6倍になる。表4. 4. 1-1に上昇気流の年間総発生時間と平均上昇風速の内訳を示す。

表 4. 4-1 ウィンドソーラータワー（ロータ径 10 m）

上昇気流の年間総発生時間と平均上昇風速

（年間の発電量 160MWh, 年間の稼働時間 6027 時間を見込む）

年間の統計値		上昇気流 有り		上昇気流 無し	総和
		太陽熱 利用	上空風 利用		
発電量	MWh	97.45	62.33	0.00	159.78
発生時間	Hours	3157.0	3285.0	2318.0	8760
発生率		0.36	0.38	0.26	1.00
平均上昇風速	m/s	12.2	11.4	0.00	8.7

#### 4.4.2 大型風力タービンを前提とした推定

上空風および太陽熱により上昇気流を風力タービンの作動流体として集めて風力発電するため、出力および発電量の計算には既存の風車の原理を用いることができる。すなわち、発電量  $W$  は発電風速の範囲 ( $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$ ) における出力  $P(w)$  と風力タービンへ流入する風速の総時間  $T(w)$  の積を積分することにより算出できる (式(4.5-1))。出力  $P(w)$  は、風力タービンのロータ面へ流入する空気の有する運動量 ( $\rho$  は空気密度、 $D$  は風力タービンのロータ径) と風力タービンの出力係数  $C_p(w)$  の積により算定できる (式(4.5-2))。

$$W = \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} P(w)T(w)dw \quad (4.5-1)$$

$$P(w) = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 w^3 C_p(w) \quad (4.5-2)$$

したがって、発電量を増加する工夫とその度合いは次の通りである。

##### (i) 風力タービンへの流入風速 $w$ を加速する

流入風速  $w$  の発生頻度が低風速域に偏っている状況下において流入風速  $w$  を加速すると出力  $P(w)$  は流入風速  $w$  の3乗に比例するため、発電量を最も効果的に増加することができる。

一般に普及している水平軸風車においてナセルの設置高さを可能な限り高くして、上空に存在する風速の速い風を捉える根拠である。本研究では、塔内部形状をディフューザ化することで、風力タービンへの流入風速を増速した。

##### (ii) 風力タービンへ流入する風速の総時間 $T(w)$ を増やす

発電する時間帯を増やすことで発電量を増加することができる。

本研究では、風力タービンへの流入風となる上昇気流を独立したエネルギー源である上空風および太陽熱を利用することで、上昇気流を誘起する総時間を増やした。

(iii) 風力タービンのロータ径  $D$  を広げる

大規模な風力タービンを使用すると出力  $P(w)$  は風力タービンのロータ径  $D$  の 2 乗に比例するため、発電量を大幅に増加することができる。

一般に普及している水平軸風車においてナセルの設置高さを可能な限り高くして、ロータ径の大きい風力タービンを用いる大型化の根拠である。本節にて、ロータ径の大きい垂直軸風力タービンを設置することを前提に、発電量を推定する。

(iv) 風力タービンの出力係数  $C_p(w)$  を流入風速の発生頻度で最大化

風力タービンへの流入風速が等しくとも、風力タービンおよび発電装置の工夫により高出力を得て、発電量を増加することができる。

(v) 発電風速  $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$  の範囲を広げる

カットイン風速を低風速化  $w_{\min}$ ，カットオフ風速  $w_{\max}$  を高風速化することで、発電する風速域を広げて発電できる時間帯を増加して発電量を増加することができる。



4. 4. 1節では、表4. 4. 2-1に示すとおり、風および太陽をエネルギー源としたときの課題と本研究での解決策を整理すると、(i)および(ii)を追求し、ディフューザ形状の塔による高出力化および上空風と太陽熱により上昇気流を集める高稼働率化による発電量の増加を議論した。ここでは、発電量が2乗で比例する風力タービンのロータ径 $D$ を広げる効果について議論する。

表4. 4. 2-1： 風および太陽をエネルギー源としたときの課題と本研究の発電コンセプトが有す利点

課題	本研究の発電コンセプト	利点
風および太陽はエネルギー密度が小さい	風もしくは太陽のエネルギーにより上昇気流を創り集めて風力タービンを回転することにより風力発電する	<b>高出力化</b> 風力タービンへ流入する上昇気流の流速を増速する高出力化が可能
風および太陽は常時安定的に得ることができない ✓ 太陽放射を得る時間帯に限定される ✓ 風が吹くときに限定される		<b>高稼働率化</b> 太陽放射もしくは恒常的な風が観測される上空風により上昇気流を創り集めて風力タービンを回転するため、いずれかのエネルギー源により発電する高稼働率化が可能

表4. 1. 3-1で設定した風力タービンの出力係数曲線（風速2.5から12m/sまでの出力係数を0.42としている）を使用し，ロータ径60mの出力曲線を算出すると，図4. 4. 2-1となる．最頻値を定格出力にすると1130kWとなる．図4. 4-1で導出したウィンドソーラータワーが見込む上昇気流の年間発生頻度分布（発生平均：太陽熱12.2m/s（発生率0.36），上空風11.4m/s（発生率0.38，上空風速平均6m/sのレイリー分布と仮定），年間平均：9.0m/s）を使用すると，発電量については5752MWhとなり，ロータ径を10m，定格出力を30kWとした場合の発電量160MWhに比べて36倍の発電量を得ることができる．これはロータ径を6倍にすることで，発電量がロータ径の2乗に比例して増加する効果を示している．ソーラーチューブ・プロットタイプに比べると発電量は130倍である．ただし，塔高さは同程度の200m，塔内径6倍の60m，集熱部面積36倍の1.62km<sup>2</sup>と広大な土地が必要となる．稼働率は69%（太陽熱36%，上空風33%），設備利用率は58%（太陽熱35%，上空風23%）となる．大型水平軸風車における設備利用率の目安が陸上20%（@年平均風速6m/s），洋上30%（@年平均風速7m/s）[文献17]であることを踏まえると，十分な設備利用率である．

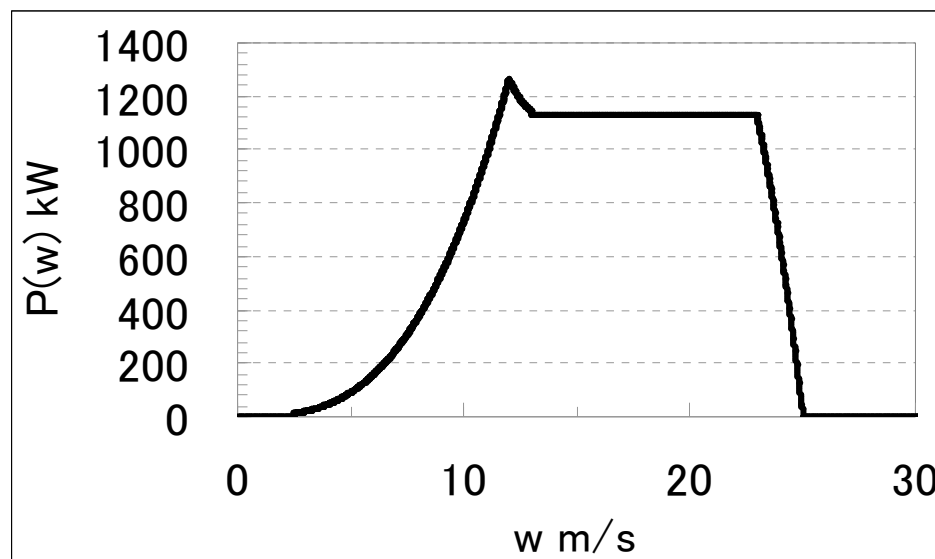


図4. 4. 2-1 風速12m/s，定格出力1130kW，風力タービン出力曲線 $P(w)$

表 4. 4. 2-1 ウィンドソーラータワー（ロータ径 60 m）

上昇気流の年間総発生時間と平均上昇風速

（年間の発電量 5752MWh, 年間の稼働時間 6027 時間を見込む）

年間の統計値		上昇気流 有り		上昇気流 無し	総和
		太陽熱 利用	上空風 利用		
発電量	MWh	3508	2244	0.00	5752
発生時間	Hours	3157.0	3285.0	2318.0	8760
発生率		0.36	0.38	0.26	1.00
平均上昇風速	m/s	12.2	11.4	0.00	8.67

## 4.5 結論

本章の結論は次の通りである。

- (i) ソーラーチムニー・プロットタイプの発電量, 稼働率, 設備利用率は, 44 MWh, 0.36, 16.8%であり, 設備利用率は一般の大型風力発電システムの目安, 20% (陸上), 30% (洋上) を下回るため, 高出力化・高稼働率化による発電量の増加が必要である。
  
- (ii) ウィンドソーラータワーをソーラーチムニー・プロットタイプと比較すると, 発電量は3.6倍の160 MWh, 稼働率は1.9倍の0.69, 設備利用率は3.6倍の58%を見込める。設備利用率は一般の大型風力発電システムの目安, 20% (陸上), 30% (洋上) を大きく上回る。これは, ウィンドソーラータワーに次の改良を適用する前提に基づき推定した結果である。
  - 太陽熱により創る上昇気流を加速する
    - ▶ 出力は風力タービンへの流入風速の3乗に比例することを追求し, 塔内部形状を円筒からディフューザに変更して, スロートの低圧領域に集熱部の空気が流れ込む工夫。
  - 上空風より加速した上昇気流を創る
    - ▶ 出力は風力タービンへの流入風速の3乗に比例することを追求し, 塔内部形状を円筒からディフューザに変更, 塔出口部に低圧領域を形成して集熱部の空気を吸出す効果を増強する渦形成板を設置, 塔下部に集熱部の空気を塔内部へ導くガイドシャッターを設置して, 太陽熱によらずに上空風によりディフューザのスロートに集熱部の空気が流れ込む工夫。
  - 上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を用いた複合発電
    - ▶ 独立したエネルギー源である上空風および太陽熱を利用してディフューザのスロートに集熱部の空気が流れ込む時間帯を増やすことで高稼働率化を図る。
  
- (iii) ウィンドソーラータワーのロータ径を10 mから60 mの大型化を図ると, 出力はロータ径の2乗に比例するため, 発電量は3.6倍の575.2 MWh (ソーラーチムニー・プロットタイプの130倍) を見込める。ただし, 塔高さは等倍の200 m, 塔内径は6倍の60 m, 集熱部面積は3.6倍の1.62 km<sup>2</sup>と広大な土地が必要となる。

## 第5章 結論

第1章では、風力および太陽に代表される再生可能エネルギーのさらなる普及が求められている背景を地球温暖化対策、エネルギー政策の推移を踏まえて述べることにより、風力および太陽のエネルギーを用いた発電の研究を行う意義を明らかにして、本研究の目的を述べた。

結論は次の通りである。

- (i) 2100年まで段階的に人為起源となる二酸化炭素の正味排出量を削減してゼロ以下にすると、気候変動に人為的干渉を及ぼさない水準で大気中の温室効果ガスの濃度が安定し、人為起源の二酸化炭素排出が引起す気温上昇は2100年以降 $2^{\circ}\text{C}$ 未満になる。
- (ii) 2030年度はいぜんとして火力発電および原子力発電を基準とした電源構成になるが、太陽光および風力は最大限導入するエネルギー源であり、太陽光7.0%、風力1.7%を見込む。(経済産業省 平成27年7月 長期エネルギー需給見通しによる)
- (iii) 太陽および風力は、エネルギー政策の基本視点である“3E+S”のうち、環境への適合(Environment)、安全性(Safety)および自給率に優れているが、エネルギーの安定供給(Energy Security)および経済効率性(Economic Efficiency)の観点より電源構成の主となる火力(石炭、天然ガス、石油)および原子力に及ばないものの、高出力化・安定供給性の改良を追求していく必要がある。
- (iv) 本研究の対象となるウィンドソーラータワーは、独立したエネルギー源である上空風および太陽熱を利用して上昇気流を誘起して風力発電する新たな概念の複合発電システムであり、高出力化および高稼働率化を迫及し、一般の大型風力発電システムの設備利用率を大きく上回る可能性があることを述べることとした。

第2章では、ウィンドソーラータワーのエネルギー源の一つである太陽熱を利用する際に、風力タービンへ流入する上昇気流を増速する仕組みとして、上昇気流が流れる塔内部形状を円筒からディフューザに変更した。この結果、ディフューザのスロートに低圧領域を形成し、集熱部の空気が流れ込みやすくなり、上昇気流が増速した。風力タービンの出力は流入風速の3乗に比例するため、増速した上昇気流は高出力化に大きく寄与する。結論は次の通りである。

- (i) ウィンドソーラータワーが太陽熱を利用して塔内部に上昇気流を誘起する現象を、卓上模型（塔高さ40cm、塔スロート内径6cm、集熱部面積 $0.34\text{m}^2$ ）を用いた室内実験および流れ場の数値計算において模擬した。
- (ii) 卓上模型を使用した実験および数値計算結果では、室温と卓上模型下の床面温度との温度差が $30^\circ\text{C}$ および $40^\circ\text{C}$ の場合に、塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更して約1.4倍の上昇気流の増速率を得た。
- (iii) 卓上模型の規模では、室温と卓上模型下の床面温度との温度差が $30^\circ\text{C}$ および $40^\circ\text{C}$ の場合に、風力タービンを設置することになる場所において得る上昇気流の流速は $0.55\sim 0.65\text{m/s}$ （円筒）、 $0.77\sim 0.93\text{m/s}$ （ディフューザのスロート）となる。
- (iv) 卓上模型と比較して $L/1=250$ 規模（高さ100m、塔スロート内径15m、集熱部面積約 $21205\text{m}^2$ ）の大型構造体では、卓上模型の結果に基づいて流れ場の相似則を用いて推定すると、上空の外気温度と集熱部との温度差が $30^\circ\text{C}$ および $40^\circ\text{C}$ の場合に、 $8.7\sim 10.3\text{m/s}$ （円筒）、 $12.2\sim 14.7\text{m/s}$ （ディフューザ）程度の上昇気流を見込む。

第3章では、ウィンドソーラータワーのエネルギー源の一つである上空風を利用する際に、風力タービンへ流入する上昇気流を上空風よりも増速する仕組みとして、上昇気流が流れる塔内部形状を円筒からディフューザに変更し、塔上部の上流側に渦形成板を設置し、塔下部にガイドシャッターを設置した。この結果、渦形成板により塔上部の出口部には大きな渦により低圧領域が形成され、さらには塔内部形状がディフューザであることからスロート部にはさらなる低圧領域が形成され、塔下部に設置したガイドシャッターにより集熱部下に流れる空気はディフューザのスロートにおいて上空風よりも増速した上昇気流となった。風力タービンの出力は流入風速の3乗に比例するため、増速した上昇気流は高出力化に大きく寄与するとともに、太陽熱とは独立したエネルギー源である上空風を利用して上昇気流を誘起しているため、高稼働率化に大きく寄与する。

結論は次の通りである。

- (i) ウィンドソーラータワーが上空風を使用して塔内部に上昇気流を誘起する現象は、卓上模型を用いた風洞実験および流れ場の数値計算において、外部風速を一様流として設定することで模擬することができた。

(注記1) 地表面近傍の流速を上空風と比較して低速にした場合の試みを乱流境界層に埋没した場合として付録Cに記載する。

(注記2) 地表面近傍の流速を無風として上空風のみを発生した場合の福富氏による試み〔文献41〕との本研究との差異に関する考察を付録Dに記載する。

- (ii) 卓上模型を使用した実験および数値計算では、塔上部の上流側に渦形成板を設置し、塔内部の形状を円筒からディフューザへ変更して、塔下部にガイドシャッターを設置することで、上空風より増速した上昇気流をディフューザのスロートで得る。(実験結果では1.9倍の増速率)

第4章では、ウィンドソーラータワーの独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を用いて風力発電したときに得る発電量、稼働率、設備利用率をソーラーチムニ・プロットタイプ（塔高さ200m、塔内径10m、集熱部面積45000m<sup>2</sup>）と比較し、さらには一般の大型風力発電システムが目安としている設備利用率の目安、20%（陸上）、30%（洋上）を基準に評価した。

結論は次の通りである。

- (i) ソーラーチムニ・プロットタイプの発電量、稼働率、設備利用率は、44MWh、0.36、16.8%であり、設備利用率は一般の大型風力発電システムの目安を下回るため、高出力化・高稼働率化による発電量の増加が必須である。
- (ii) ウィンドソーラータワーをソーラーチムニ・プロットタイプと比較すると、発電量は3.6倍の160MWh、稼働率は1.9倍の0.69、設備利用率は3.6倍の58%を見込める。設備利用率は一般の大型風力発電システムの目安を大きく上回る。ただし、次を適用していることを前提に推定している。
  - 太陽熱により創る上昇気流を増速する
    - 第2章の結論より塔内部形状を円筒からディフューザに変更することで得る上昇気流の増速率を1.4とした。
  - 上空風より増速した上昇気流を創る
    - 第3章の結論より塔内部形状を円筒からディフューザに変更、塔出口部の上流側に渦形成板、塔下部に集熱部の空気を塔内部へ導くガイドシャッターを設置することで、上空風よりも1.9倍増速した上昇気流を得るとした。上空風は、年間平均9時間/日、年間平均6m/s発生すると仮定した。
  - 上空風および太陽熱により誘起する上昇気流を用いた複合発電
    - 独立したエネルギー源である上空風および太陽熱により上昇気流が誘起する時間帯は夜間と昼間で独立した時間帯に発生すると仮定した。



- (iii) ウィンドソーラータワーのロータ径を10 mから60 mの大型化を図ると、出力はロータ径の2乗に比例するため発電量は36倍の5752 MWhを見込める（ソーラーチムニ・プロットタイプの130倍）。ただし、塔高さは等倍の200 m、塔内径は6倍の60 m、集熱部面積は36倍の1.62 km<sup>2</sup>と広大な土地が必要となる。

よって、本研究の総括としてウィンドソーラータワーに対する次の結論が導ける。

- (i) 上空風および太陽熱という独立した再生可能エネルギーを上昇気流という共通の作動流体として風力発電用途に供することで、従来のソーラーチムニ（もしくはソーラータワー）および一般に普及している大型の水平軸風車よりも、年間の発電量および設備利用率を向上する複合発電システムであることを示した。
- (ii) 発電量の規模は、高出力化・高稼働率化を追求した本研究の結果であっても、我が国の主電源となる火力（石炭、天然ガス、石油）および原子力の発電施設と同等の発電量には至らないうえ、水力および地熱の再生可能エネルギーに匹敵する電源でもない。
- (iii) 我が国においては、2030年度に向けて最大限導入する再生可能エネルギー利用の枠組みの中で、太陽および風力による発電の新たな複合発電システムとして提案できるシステムである。
- (iv) 世界規模での二酸化炭素排出量削減を見越すと上空風および太陽熱は世界中に遍在しているため、二国間クレジット制度に基づく再生可能エネルギー事業の枠組みのなかで立地条件と電力需要の適した地域へ提案できる“3E+S”に優れたシステムである。

## 参考文献

- [1] 温暖化から日本を守る 適応への挑戦, 2012年, 環境省
- [2] STOP THE 温暖化 緩和と適応へのアプローチ 2015, 環境省
- [3] 21世紀末における日本の気候 不確実性評価を含む予測計算, 環境省および気象庁
- [4] Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014
- [5] 世界のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量, 2013, 環境省
- [6] 二国間クレジット制度(JCM)促進のための取組み 概要, 平成27年10月, 公益財団法人 地球環境センター
- [7] 二国間クレジット制度(JCM)促進のための取組み 事例紹介, 平成27年10月, 公益財団法人 地球環境センター
- [8] エネルギー白書, 2013年, 資源エネルギー庁
- [9] エネルギー白書, 2015年, 資源エネルギー庁
- [10] エネルギー基本計画, 平成26年4月, 資源エネルギー庁
- [11] 長期エネルギー需給見通し, 平成27年7月, 経済産業省
- [12] 長期エネルギー需給見通し関連資料, 平成27年7月, 資源エネルギー庁
- [13] 各電源の特性と電源構成を考える上での視点, 平成27年3月, 資源エネルギー庁
- [14] エネルギー情勢について, 平成23年10月, 資源エネルギー庁
- [15] 2030年のエネルギー需給の姿, 2010年6月8日, 資源エネルギー庁
- [16] エネルギー関係技術開発ロードマップ, 平成26年12月, 経済産業省
- [17] 洋上風力の調達価格に係わる研究会取りまとめ報告書 参考資料, 2014年1月, 経済産業省
- [18] 藤原正純, 作田宏一. ソーラーチムニー発電システム. SOLAR ENERGY, Vol. 9, No. 1, pp. 24-28, 1983.
- [19] NEDO 情報センター/NEDO シドニー事務所. 本気?高さ1kmのソーラーチムニー発電(豪州). NEDO 海外レポート, No. 869, pp. 1-3, 2001.

- [20] Schlaich, J., 1995, *The Solar Chimney*, Edition Axel Menges, Stuttgart, Germany.
- [21] Schlaich, J., Bergemann, R., Scheil, W., and Weinrebe, G., 2005, "Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems—Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation," *ASME J. Sol. Energy Eng.*, 127(1), pp. 117–124.
- [22] Richards, R., 1981, "Spanish Solar Chimney Nears Completion," *Mod. Power Syst.*, 1981(6), pp. 21–23.
- [23] Richards, R., 1982, "Solar Prototype Developments in Spain Show Great Promise," *Mod. Power Syst.*, 1982(2) pp. 21–23.
- [24] Richards, R., 1982, "Hot Air Starts to Rise Through Spain's Solar Chimney," *Electr. Rev.*, 210(15), pp. 26–27.
- [25] Trieb, F., Langnib, O., and Klaib, H., 1997, "Solar Electricity Generation—A Comparative View of Technologies, Costs and Environmental Impact," *Solar Energy*, 59(1–3), pp. 89–99.
- [26] Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K., and Inoue, M., 2008, "Development of a Shrouded Wind Turbine With a Flanged Diffuser," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96(5), pp. 524–539.
- [27] Toshimitsu, K., Nishikawa, K., Haruki, W., Oono, S., Takao, M., and Ohya, Y., 2008, "PIV Measurements of Flows Around the Wind Turbines With a Flanged-Diffuser Shroud," *J. Therm. Sci.*, 17(4), pp. 375–380.
- [28] Ohya, Y., and Karasudani, K., 2010, "A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power With Wind-Lens Technology," *Energies*, 3(4), pp. 634–649.
- [29] Okada, S., Ohya, Y., Uchida, T., and Karasudani, T., 2006, "Convergence of Wind Using VT-WCONVS (Vertical Type Wind Convergence Structure)," *Proceedings of the 19th National Symposium on Wind Engineering (in Japanese)*, Tokyo, pp. 145–150.
- [30] Okada, S., Uchida, T., Karasudani, T., Ohya, Y., 2015, "Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower", *Journal of Solar Energy Engineering*, ASME, June 2015, Vol. 137 / 031009-1.
- [31] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., and Schlaigh, J., 1983, "Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares," *Int. J. Solar Energy*, 2(1), pp. 3–20.
- [32] Haaf, W., 1984, "Solar Chimneys Part II: Preliminary Test Results From the Manzanares Pilot Plant," *Int. J. Solar Energy*, 2(2), pp. 141–161.
- [33] Ohya, Y., and Uchida, T., 2008, "Laboratory and Numerical Studies of the Atmospheric Stable Boundary Layers," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96(10–11), pp. 2150–2160.
- [34] Blackadar, A. K., (1957) Boundary layer wind maxima and their

- significance for the growth of nocturnal inversions. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **38**:283-290
- [35] Kim, J., and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comput. Phys.*, 59(2), pp. 308-323.
- [36] Kawamura, T., Takami, H., and Kuwahara, K., 1986, "Computation of High Reynolds Number Flow Around a Circular Cylinder With Surface Roughness," *Fluid Dyn. Res.*, 1(2), pp. 145-162.
- [37] Kajishima, T., 1994, "Upstream-Shifted Interpolation Method for Numerical Simulation of Incompressible Flows," *Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng. B (in Japanese)*, 60(578), pp. 3319-3326.
- [38] 井上雅弘, 桜井篤晃, 大屋裕二, (2002)つば付ディフューザー風車の簡易理論. *ターボ機械*, 30(8):42-46.
- [39] 煙突型集風構造体による熱上昇風の生成と風の集束、平成14年度修士論文, 岡田 臣右
- [40] ソーラータワーの創風性能向上に関する研究, 平成18年度 修士論文, 深川 達矢
- [41] ウィンドソーラータワーの上空風吸い込み効果による風力発電, 平成26年度 修士論文, 福富 翔

## 謝辞

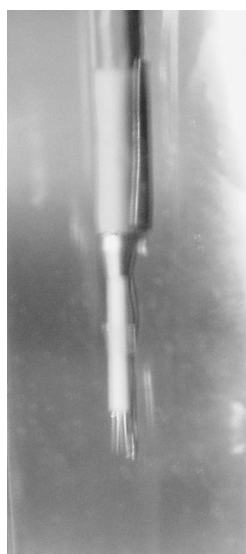
修士課程のご指導からはじまり、社会人博士課程への挑戦、雇用元が提供する海外留学の推薦と社会人博士課程休学に対するご理解、復学したあとの博士論文のご指導、単位取得退学後の博士号取得への助言など、16年間に渡って幾度も岐路に立った際に御厚情ある後押しを頂いた大屋裕二教授に心より御礼申し上げます。本論文について、第三者的な立場より査読してご指導頂いた麻生茂教授、胡長洪教授、烏谷准教授におかれましても御礼申し上げます。第2章の内容については、ASME Journal of Solar Energy Engineering の Associate Editor である Yves Gagnon 博士より有益なご指摘を頂き、投稿内容について精査頂いた。海外の研究者との学術的な議論は初めてのことであり緊張したが、ご指摘を一件一葉対応するにつれ意思疎通を図ることができて自信に繋がった。ここにあらためて御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導を賜った。実験や数値解析に関して、その基礎から応用まで幅広く懇切丁寧にご指導頂いた内田孝紀准教授（当時、助手）、実験全般に渡りご指導頂いた杉谷賢一郎技官、模型作成に携わって頂いた渡辺公彦技官、実験に関する助言をして頂いた深町信尊技官、さらには研究を進めるさいにご助力を頂いた烏谷隆准教授（当時、助教授）にはこの場をお借りしてあらためて感謝の意を述べる。また本研究テーマの再現性確認実験および追加実験を共同で実施した深川達也氏（当時、修士課程の学生）、および、その後、野外実験まで推し進めて頂いた本山雅孝氏（当時、博士課程の学生）には、研究の進捗を適宜共有頂き、新たな成果を見出す喜びを共有して頂いた。都度、本予備実験の成果が実っていく過程を経験することができた。この場にて、あらためて感謝を申し上げます。

この研究を纏め上げるうえで得た各種知識・技術については、今後の雇用元における業務に活かし、社会に還元していく所存である。

## 付録A 熱線流速計による計測方法

冷線と熱線を使用した流れ場の温度と速度の計測は応答性が高いため、計測位置における温度と速度の変動が頻繁におこる乱れた流れ場の流速を計測する際に使用する。今回計測の対象とする流れ場は、計測位置における温度と速度の変動はほとんどなく低応答で十分であるが、計測位置によって温度と速度が異なる流れ場である。したがって、流速を熱線により計測する以上は計測位置における温度も同時に計測する必要がある。しかしながら、温度の高応答出力は必要ないため温度計測には冷線を使用せずに熱電対温度計を使用する。計測位置の少し上流に熱電対温度計を配置して計測位置に流れ込む気流温度を計測し、計測位置に配置する熱線からの出力と熱電対温度計の温度により、計測位置の流速を算出する。図A-1に熱線と熱電対温度計を配置したプローブを示す。



図A-1 熱線（I型プローブ）と熱電対温度計を配置したプローブ

熱電対温度計の出力  $E$  [V] と温度  $\Theta$  [°C] との関係は線形であり、比例定数は 100 である。

$$\Theta = 100 * E \quad (\text{A-1})$$

熱線の校正式には、気流による放熱量  $Q_D$  と熱線での発熱量  $Q_H$  が平衡であるとの仮定により導出できる次の式を使用する。

$$E^2 = (A + BU^m) * (T_H - T_a) \quad (\text{A-2})$$

ここで、 $m = 0.5$ 、 $E$  は出力電圧[V]、 $U$  [m/s] は流速、 $T_H = 250$  は熱線表面温度[°C]、 $T_a$  は気流温度[°C]である。 $A$  と  $B$  は、熱線と結線する計測機器の抵抗を示めす定数に加えて気流の放熱特性を含むため気流温度の 1 次式とする。

$$A = a_1 + a_2 T_a \quad (\text{A-3})$$

$$B = b_1 + b_2 T_a \quad (\text{A-4})$$

今回の計測に使用する熱線流速計の計測システムで得る出力電圧  $E$  [V] と流速  $U$  [m/s] と気流温度  $T_a$  [°C] の関係は、 $a_1, a_2, b_1, b_2$  により補正する。校正には九州大学応用力学研究所所属の小型校正装置を使用する。この装置は、気流の流速制御を超音波流速計からの出力で行い、気流の温度制御を熱電対温度計からの出力により行うことで、各々の出力に対する校正対象の熱線流速計の出力を得ることができる。したがって、今回対象とする流れ場の流速領域 0.3m/s～1.3m/s、温度領域 30～40°C を小型校正装置により設定し、熱線流速計の出力電圧  $E$  [V] を計測する。表 A-1 に超音波流速計の示す流速  $U$  [m/s] と熱電対温度計の気流温度  $T_a$  [°C] に対応した熱線流速計の出力電圧  $E$  [V] を示す。

表A-1 熱線流速計を校正した際のデータ  
 (超音波流速計の示す流速  $U$  [m/s], 熱電対温度計の気流温度  $T_a$  [°C],  
 熱線流速計の出力電圧  $E$  [V])

U	Ta	E'	E	E*E
0.349	29.36	-0.1868	0.99066	0.981407
0.48	29.48	0.2189	1.010945	1.02201
0.777	29.44	0.9956	1.04978	1.102038
1.025	29.31	1.5231	1.076155	1.15811
1.284	29.34	1.9888	1.09944	1.208768
0.349	34.33	-0.5825	0.970875	0.942598
0.503	34.34	-0.1034	0.99483	0.989687
0.771	34.36	0.5609	1.028045	1.056877
0.986	34.3	1.0166	1.05083	1.104244
1.259	34.32	1.4862	1.07431	1.154142
0.336	39.35	-1.0224	0.94888	0.900373
0.503	39.25	-0.5334	0.97333	0.947371
0.748	39.31	0.0627	1.003135	1.00628
1.003	39.2	0.5734	1.02867	1.058162
1.27	39.22	1.0311	1.051555	1.105768

ここで、出力電圧  $E'$  [V] はゲイン 20 とオフセット 1[V] が含まれる出力値であるため、式 A-5 により出力電圧  $E$  [V] に補正している。

$$E = E' / 20 + 1 \quad (\text{A-5})$$

表 A-1 の流速  $U$  [m/s], 気流温度  $T_a$  [°C], 熱線流速計の出力電圧  $E$  [V] の自乗値を用いて式 A-2, A-3, A-4 の校正係数となる  $a_1, a_2, b_1, b_2$  を最小自乗法により算出した結果が次である。

$$a_1 = 0.003562939$$

$$a_2 = -0.000008220926$$

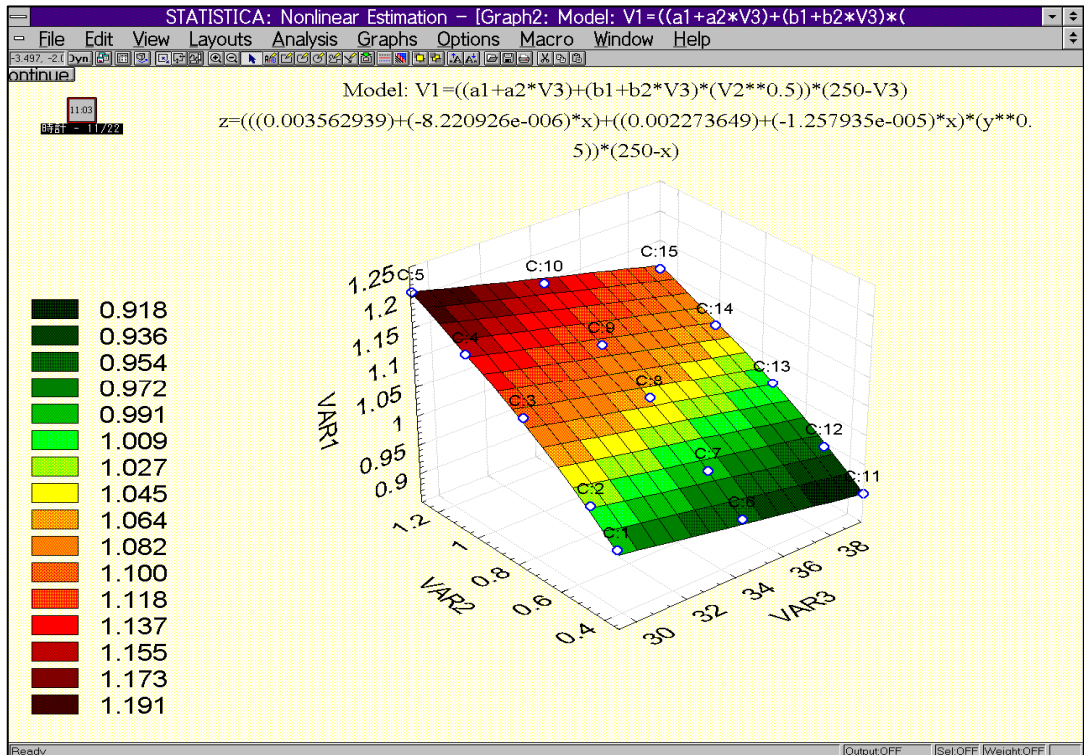
$$b_1 = 0.002273649$$

$$b_2 = -0.00001257935$$



図A-2に Statistica を使用して導出した校正係数及び校正曲線を示す。これにより、流速領域 0.3m/s~1.3m/s, 温度領域 30~40°Cの流れ場に熱線を配置して出力電圧  $E$  [V]を取得し、同時に同位置に配置する熱電対温度計の気流温度  $T_a$  [°C]を取得することにより、式A-2, A-3, A-4 を変形した式A-6 を用いて流速  $U$  [m/s]を導出することができる。

$$U = \left( \frac{\left( \frac{E^2}{(250 - T_a)} - (a_1 + a_2 T_a) \right)}{b_1 + b_2 T_a} \right)^2 \quad (\text{A-6})$$



図A-2 Statistica による校正係数と校正曲線の導出結果

熱線の校正式の導出過程を整理すると、気流による放熱量 $Q_D$ は次の King の式により表すことができる。

$$Q_D = (A' + B'U^m) * (T_H - T_a)$$

ここで、 $A'$ と $B'$ は気流の放熱特性による定数、 $U$ は流速、 $T_H$ は熱線表面温度、 $T_a$ は気流温度である。熱線での発熱量 $Q_H$ は熱線流速計内部に組んであるブリッジ回路の電圧と抵抗値により表現できる。

$$Q_H = \frac{V_H^2}{R_H} = V^2 \frac{R_H}{(R_H + r)^2}$$

$Q_D = Q_H$ として式を整理すると次になる。

$$V^2 = (A' + B'U^m) * (T_H - T_a) \frac{(R_H + r)^2}{R_H} = (A + BU^m) * (T_H - T_a)$$

ここで、 $A$ と $B$ は、気流の放熱特性による定数 $A'$ および $B'$ と、熱線と接続する導線や流速計内の抵抗値を示す定数として扱うこともできるが、今回のように温度の依存性を1次式として導入することもできる。

$$A = A' \frac{(R_H + r)^2}{R_H} = a_1 + a_2 T_a$$

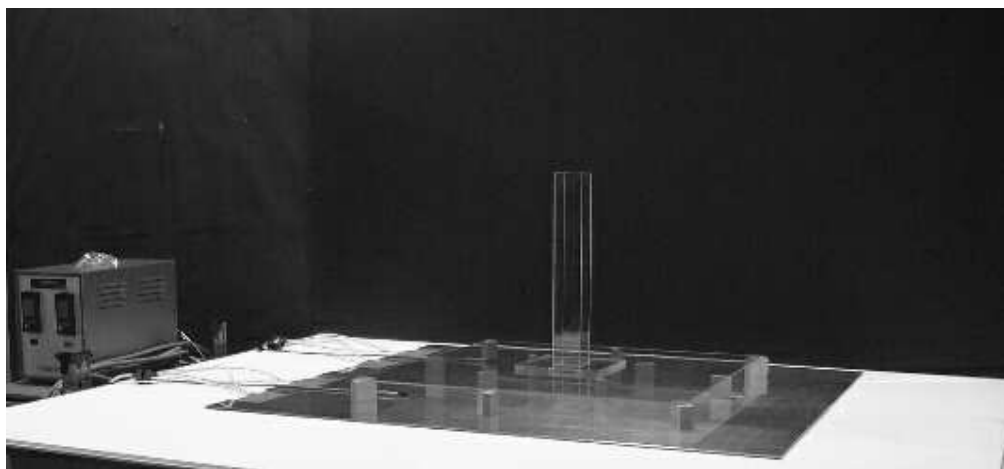
$$B = B' \frac{(R_H + r)^2}{R_H} = b_1 + b_2 T_a$$

## 付録B 熱上昇気流の流速測定に関する試行

床面温度と周囲温度との差により、塔内部に熱上昇気流が生じるものの、熱上昇する気流を熱線流速計で計測すると、熱線が有する熱自体により上昇気流が加熱され、増速する可能性がある。また、熱線のプローブを塔内部に挿入するため、上昇気流を多少堰止める可能性がある。

この2点の懸念を解消するため、計測プローブを塔内部に挿入しない流速計測手法として、粒子画像流速測定法（PIV: Particle Image Velocimetry）により上昇気流を計測した。さらには、熱線流速計による計測結果と比較して、熱線流速計により計測した上昇気流の流速が妥当であることを確認した。ただし、粒子画像流速測定法を行う際には、流れ場の流速にしたがって浮遊する煙などのシードを流れ場に混合し、高速度カメラにより流れ場を撮影して、シードの時間変化を追跡することで流速を計測する。したがって、シードとなる煙自体が保有する熱により上昇気流の流速が加速される可能性がある事に加え、煙を導入する際の圧力が上昇気流の流速を加速する可能性がある。この懸念を解消するために、熱を保有せず、導入する際に流れ場に圧力を与えないタンポポの冠毛をシードとして、タンポポの冠毛の移流速度を計測して、上昇気流が温度制御板と周囲の温度差により生じていることを確認した。

図B-1に、本検証を実施した際に使用した角型模型を示す。実験の初期段階では、上昇気流が生じることさえ疑わしかったこともあり、塔内部の可視化が容易である透光性の角型模型を使用した。



図B-1 温度制御した銅版上に配置する角型模型

## B.1 粒子画像流速測定法と熱線流速計による上昇速度測定方法の比較

煙を加熱床面上に流し込み、塔内部に上昇する煙の様子を高速度CCDカメラにより撮影し、上昇気流が塔内部に生じていることを確認した（図B. 1-1）。



図B. 1-1 煙が塔内部を上昇する様子  
（上：温度差なし，下：床面と周囲温度の差あり）

FlowVec32 のパターン追跡アルゴリズムにより煙の上昇速度を粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) により計測した (図 B. 1-2). また, 熱線流速計により塔内部の熱上昇風の流速を計測した (図 B. 1-3).

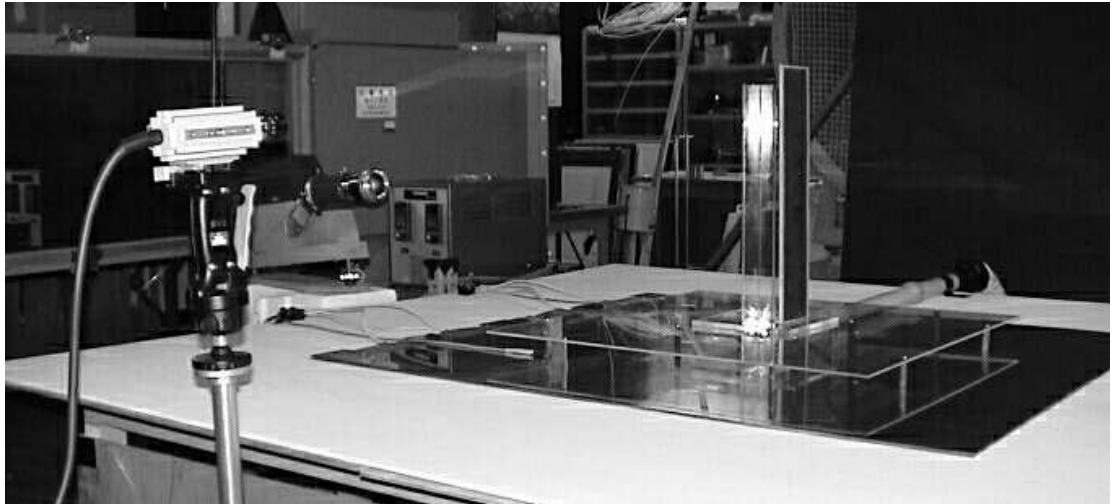
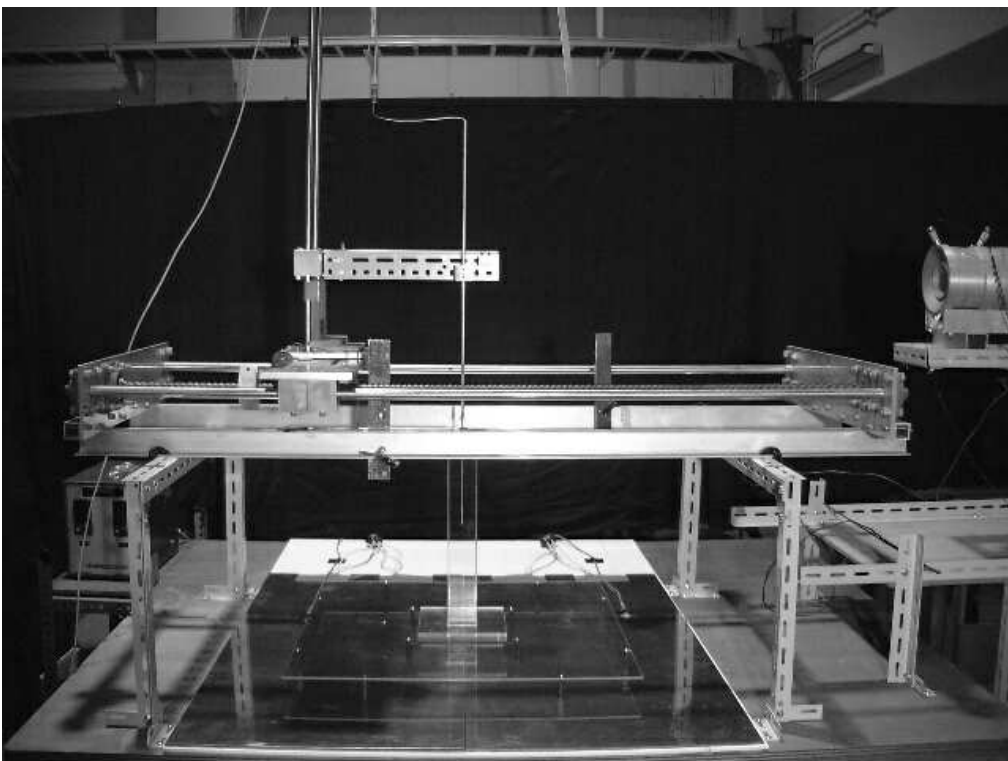
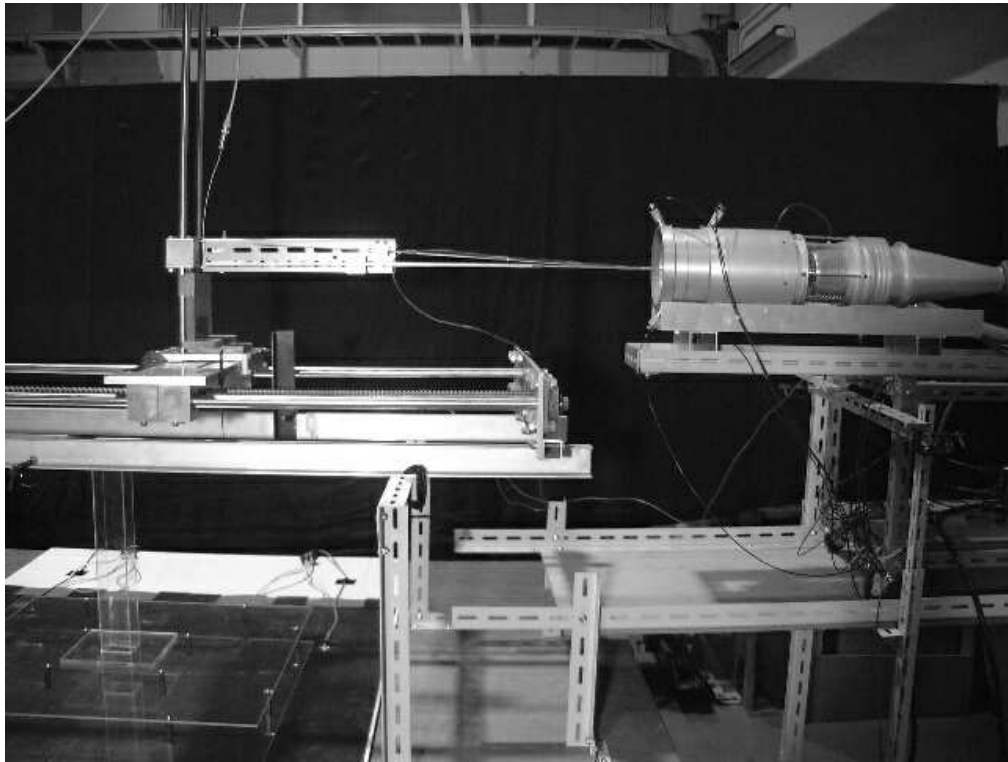
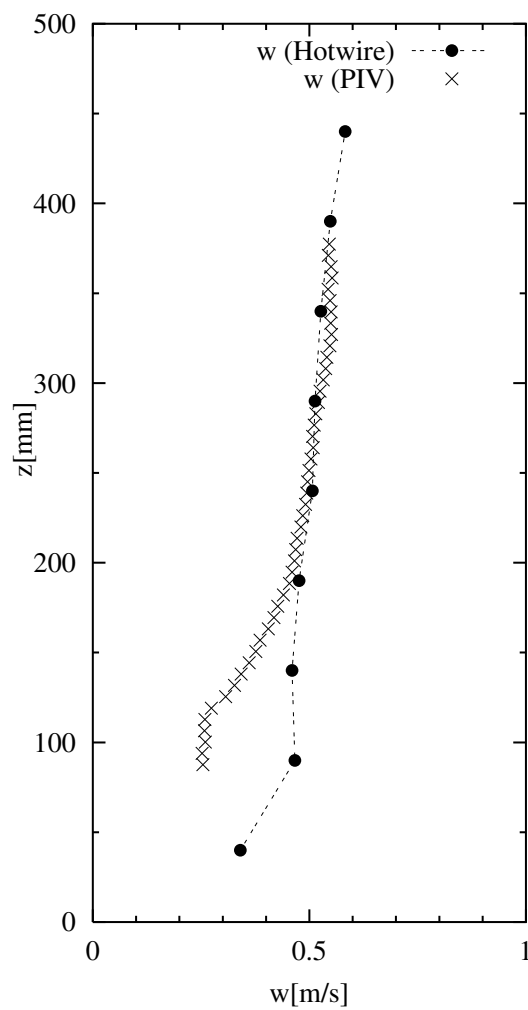


図 B. 1-2 光源のプロジェクタと高速度 CCD カメラを配置した PIV 実験構成



図B. 1-3 熱線流速計による流速測定実験構成  
(上：校正時，下：計測時)

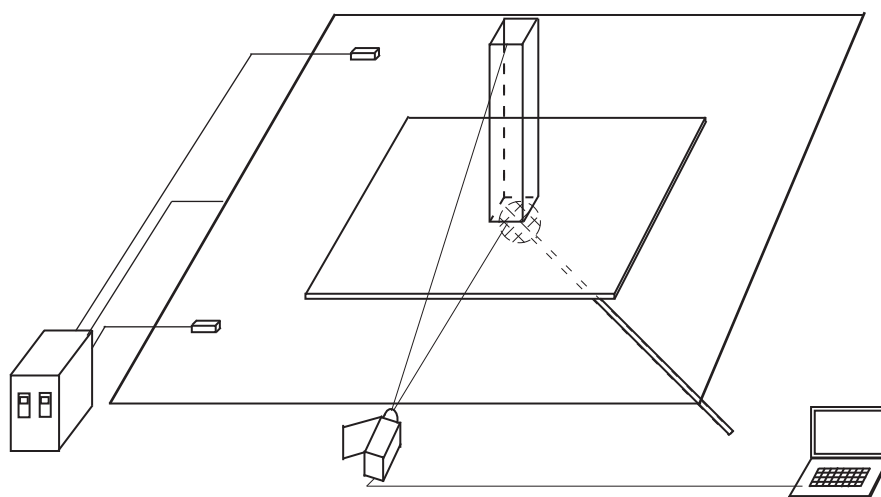
P I Vにより画像解析した塔内部の上昇流速と、熱線流速計により計測した塔内部の上昇流速を比較した結果、煙のパターンが明確な塔中上部にて流速の一致を得た。(図B. 1-4)



図B. 1-4 P I Vと熱線流速計による上昇流速の比較

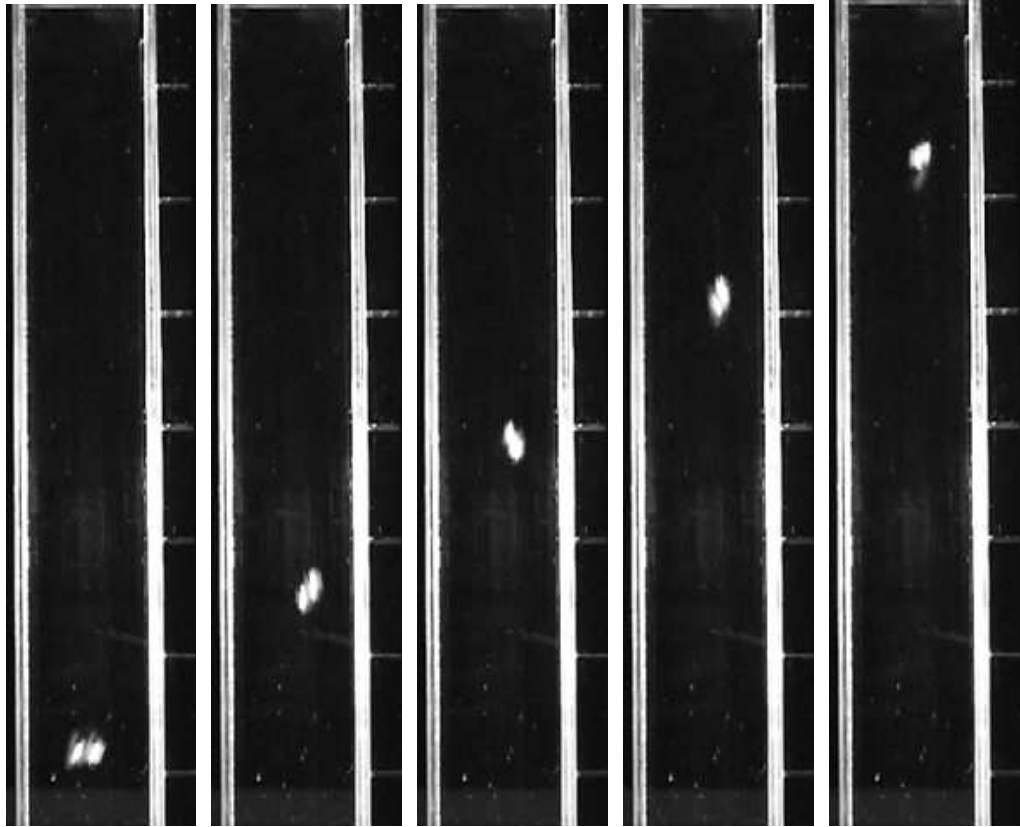
## B.2 タンポポの冠毛による計測

空気の温度に影響を与えずに、熱上昇気流が塔内部に発生している様子を観察するため、タンポポの冠毛を使用した。タンポポの冠毛を棒の先に取り付けた網により塔下部へ配置し、上昇気流によって塔内部を上昇する映像を高速カメラにより撮影した。図B. 2-1に実験構成図を示す。映像の各フレーム間で移動する距離を計測して、タンポポの上昇速度を計測することで、塔内部に上昇気流が生じていることを確認した。図B. 2-2にタンポポが上昇する様子を撮影した映像を示し、図B. 2-3にタンポポの上昇する速度を計測した結果を示す。



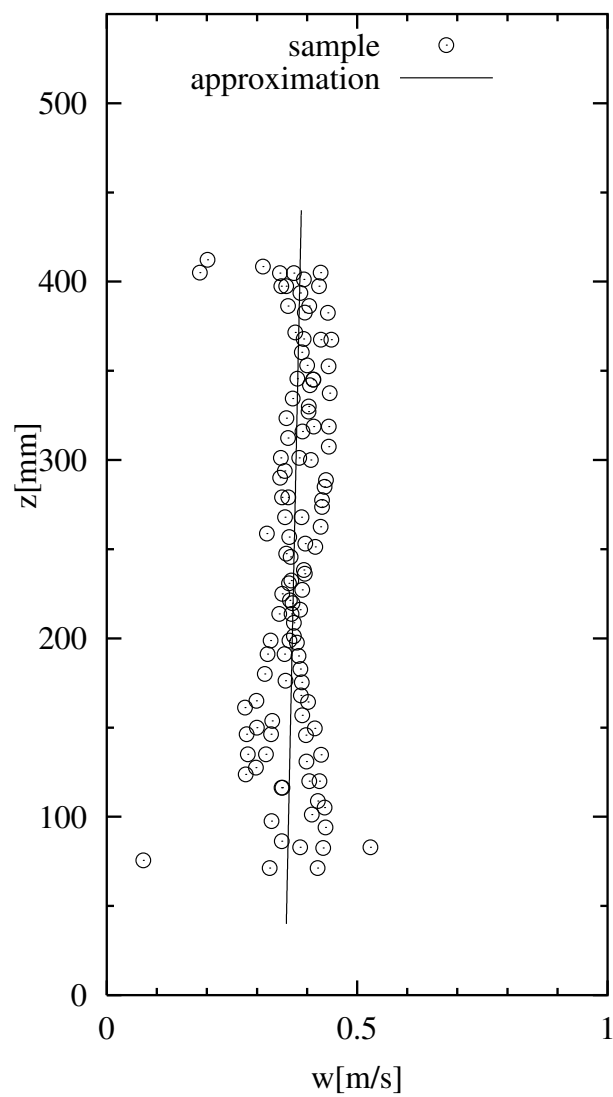
図B. 2-1 タンポポの冠毛を使用した塔内部の熱上昇気流確認





図B. 1-2 タンポポの冠毛が塔内部を上昇する様子  
(1 フレーム間=5/30 秒, 一目盛 5cm)

velocity of the pappus of a dandelion



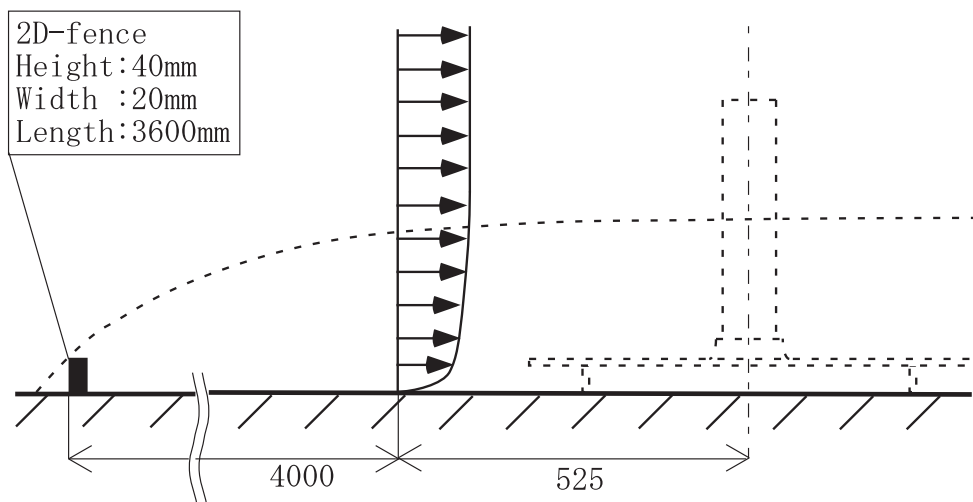
図B. 1-3 タンポポの冠毛の上昇速度 (約 0.36m/s)

## 付録C 乱流境界層に埋没した場合に上空風により上昇気流を集める試み

乱流境界層に埋没した場合における上空風を利用した上昇気流を集める効果についてまとめる。

### C.1 実験方法

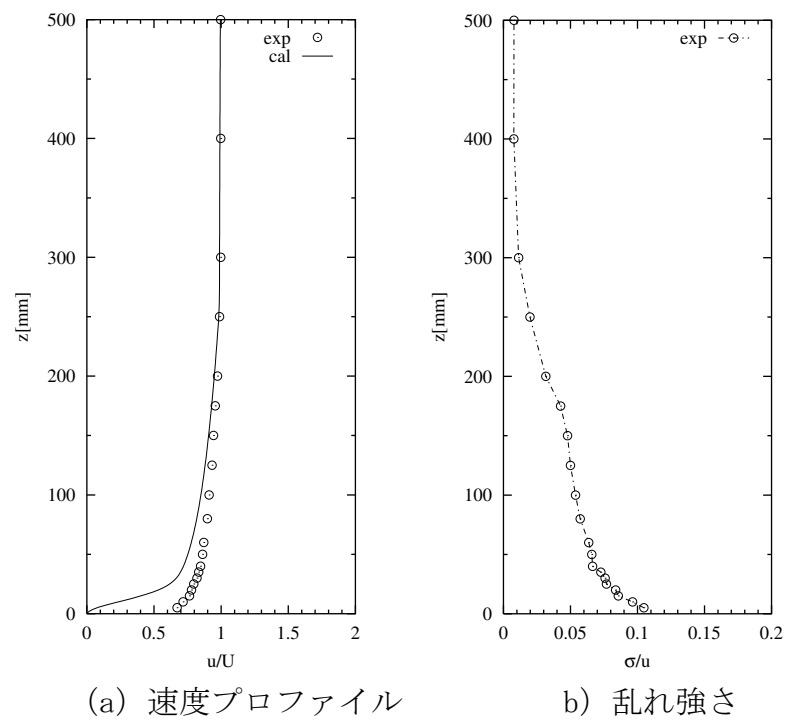
本実験は風洞の床面に模型を直接置き、その上流に高さ 40mm、幅 20mm の二次元フェンスを配置して乱流境界層を発達させる(図C. 1-1, 図C. 1-2)。模型の中心から、上流側に 525mm の位置における主流方向の速度プロファイルおよび乱れ強さを、図C. 1-3 に示す。境界層厚さは約 250mm であり、床面付近では適度に乱れが生成されている。この流入条件のもとで、円筒形状およびディフューザ形状+渦生成板の上空風を利用する効果を評価する。なお、設定した上空風速は 3m/s である。



図C. 1-1 乱流境界層に埋没した場合の風洞実験構成



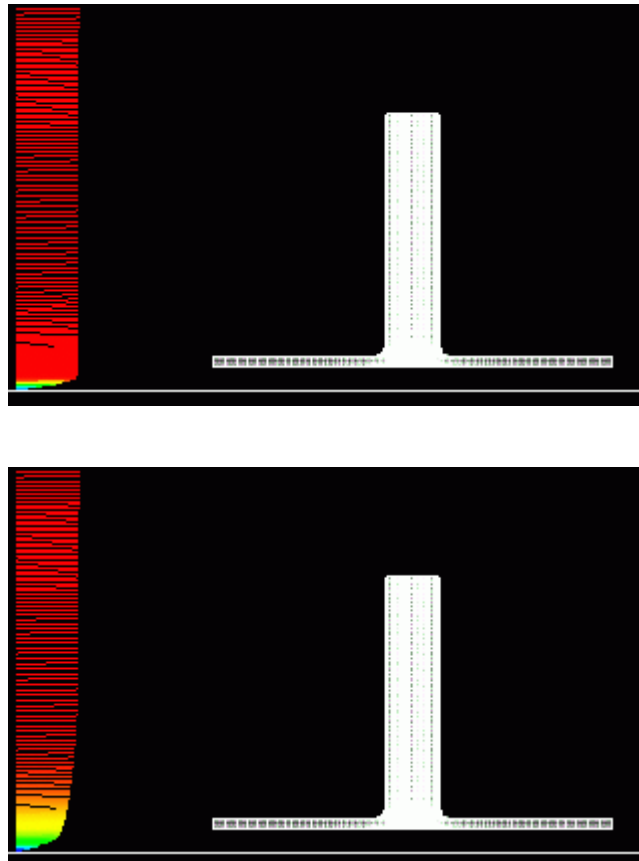
図C. 1-2 風洞内の模型および流速計測装置



図C. 1-3 外部流の速度プロファイルと乱れ強さ

## C.2 流れ場の数値計算方法

本計算では3.3節で用いた計算スキームおよび計算格子を用いる。地表付近に速度シアを伴う流入風を検討するため、流入条件には1/7乗則に基づく境界層厚さ250mmの速度プロファイル(図C.2-1)を与え、流入風の乱れを考慮せずに、流れ場の解析を行う。



図C. 2-1 外部流の速度プロファイル  
(上：3.3節の一様流入風，  
下：本節の1/7乗則に基づく速度プロファイル)

### C.3 結果

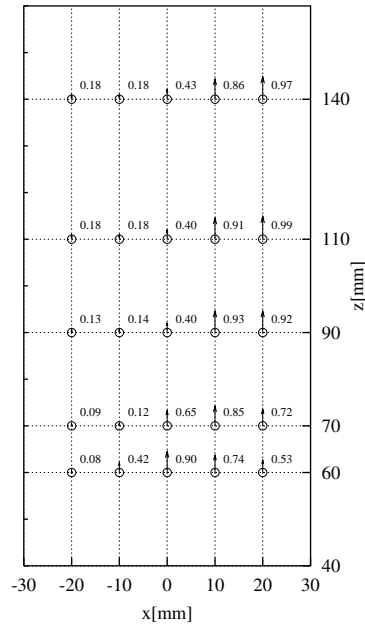
図C. 3-1, C. 3-2 に風洞実験より得た円筒形状 およびディフューザ形状+渦生成板の塔入口部における上昇流速分布を示す. ここで上昇風速は上空風速で正規化している. 図C. 3-1における上昇速度のベクトル分布を見ると, 上昇気流が塔内部に生じている様子がわかる. ディフューザ形状+渦生成板においては,  $z=90\text{mm}$  の  $xy$  断面内で上空風速に対して約 1.3(1.0~1.5) 倍の増速が得られる. 地表面付近の平均流速(0~40mm の平均速度) は 0.78 であり, これと比べると塔内部には約 1.7(1.3~1.9) 倍増速した上昇気流を得ている.

図C. 3-3, C. 3-4 は実験および流れ場の数値計算により得た塔内部中心軸上の上昇速度分布と  $z=90\text{mm}$  における  $x$  軸上の上昇速度分布を示している. ディフューザ形状+渦生成板の場合に, 上昇風速が  $z=90\text{mm}$  で最大になり, 円筒形状より増速している様子がわかる.

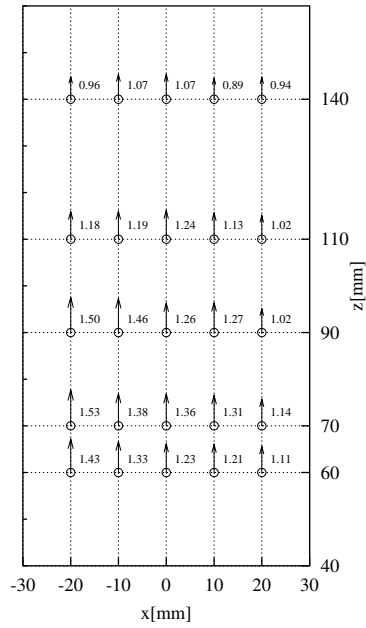
図C. 3-5~C. 3-10は速度の絶対値および圧力の分布を示している. ここで物理量は 10~20s の平均値である. 一様な流入風の場合と同様に, 速度シアを伴った流入風の場合においてもディフューザ形状+渦生成板の場合には円筒形状に比べて塔内部に増速した上昇気流を得ている様子を示している. 上空風速よりも早い. 圧力差の分布を見ると塔下部における低圧部が構造体下部全体に影響を及ぼし, 塔に流れを引き込んでいく様子が観察される. このことから, 地表面付近に速度シアを伴う流入風の場合においても, 構造体下部へ近寄り流れを引き込み, 煙突内部に上昇気流を誘起していることがわかる.

以上, 風洞実験および流れ場の数値計算結果より乱流境界層に埋没した場合もしくは地表面付近に速度シアを伴う流入風においても, ディフューザ形状+渦生成板を適用した構造体においては, 上空風により上昇気流を集める効果が確認できた.

Distribution of w/U in xz-plane(y=0mm)

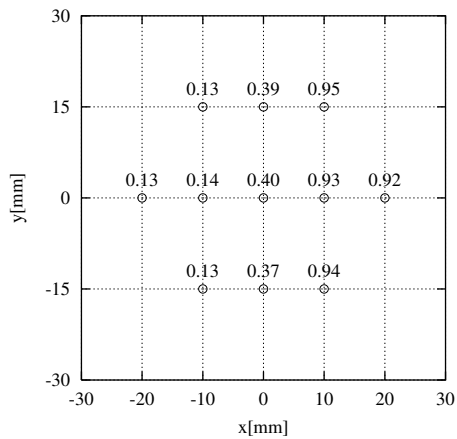


Distribution of w/U in xz-plane(y=0mm)

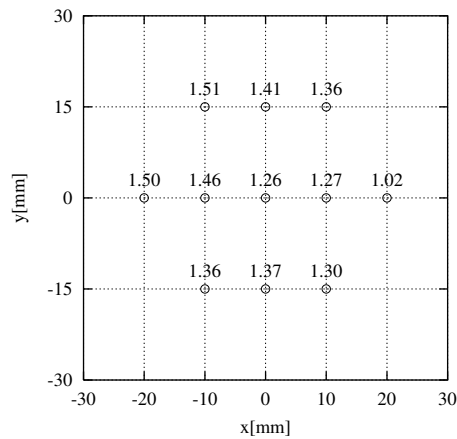


図C. 3-1 上空風速で正規化した上昇速度分布  
 (実験計測値, x z 断面, y = 0 mm)  
 (左: 円筒, 右: ディフューザ+渦生成板)

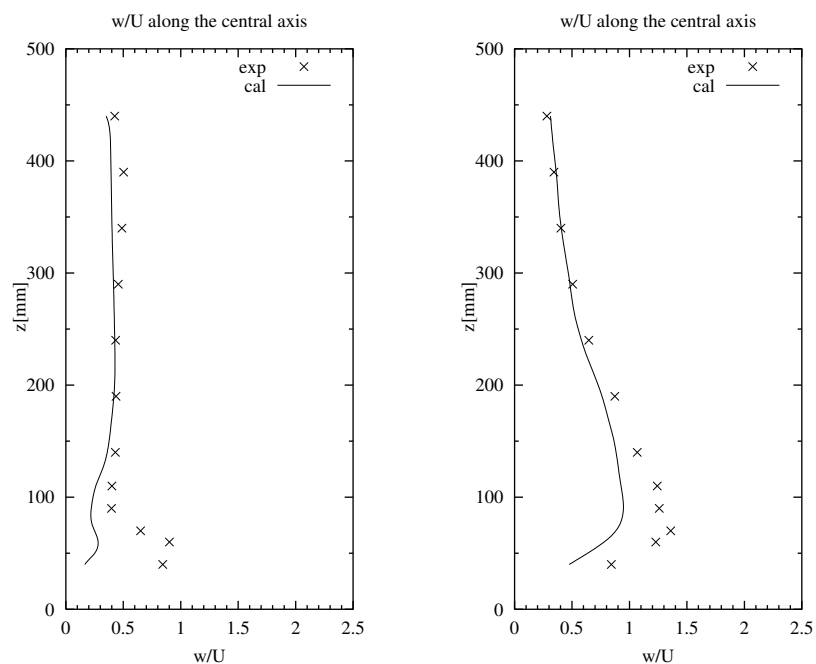
Distribution of w/U in xy-plane



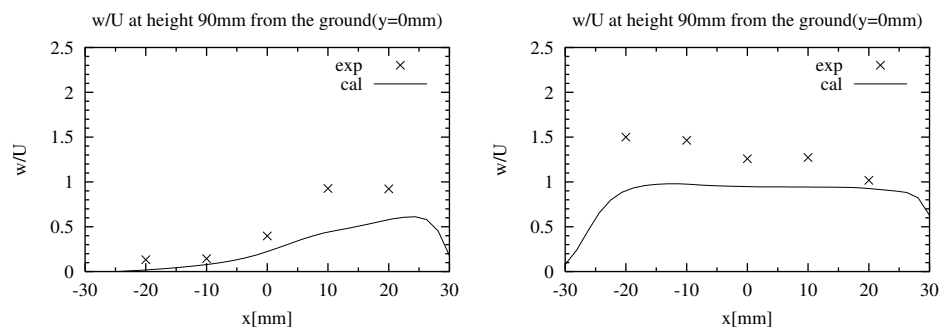
Distribution of w/U in xy-plane



図C. 3-2 上空風速で正規化した上昇速度分布  
 (実験計測値, x y 断面, z = 90 mm)  
 (左: 円筒, 右: ディフューザ+渦生成板)

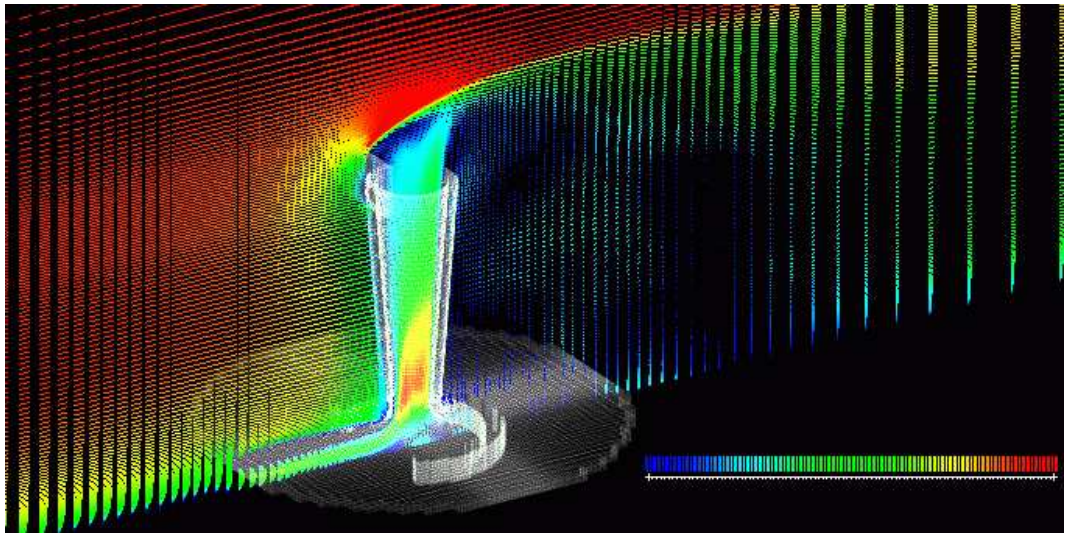
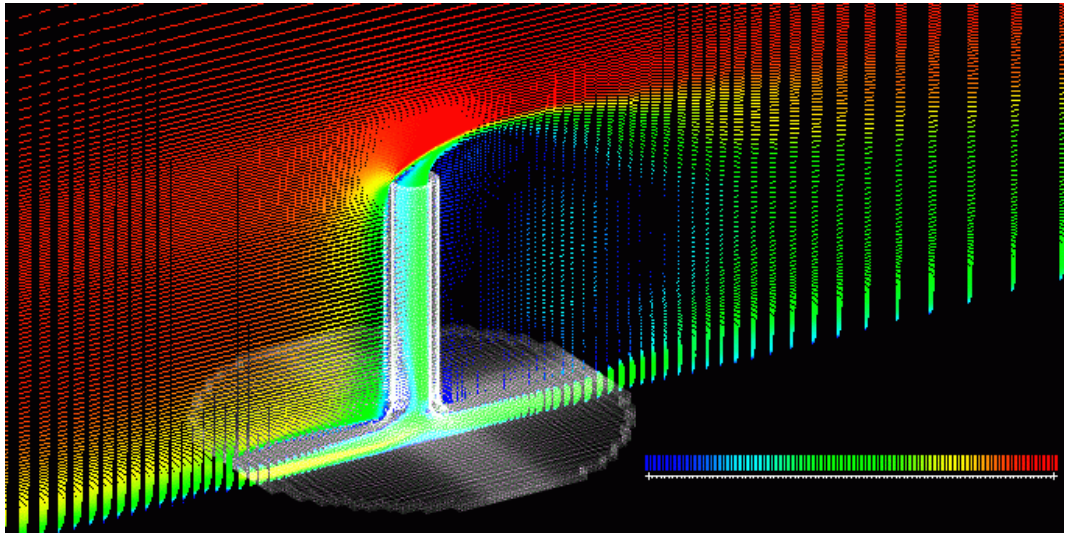


図C. 3-3 上空風速で正規化した上昇速度分布  
 (z軸上,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ )  
 (左:円筒, 右:ディフューザ+渦生成板)



図C. 3-4 上空風速で正規化した上昇速度分布  
 (x軸上,  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 90 \text{ mm}$ )  
 (左:円筒, 右:ディフューザ+渦生成板)

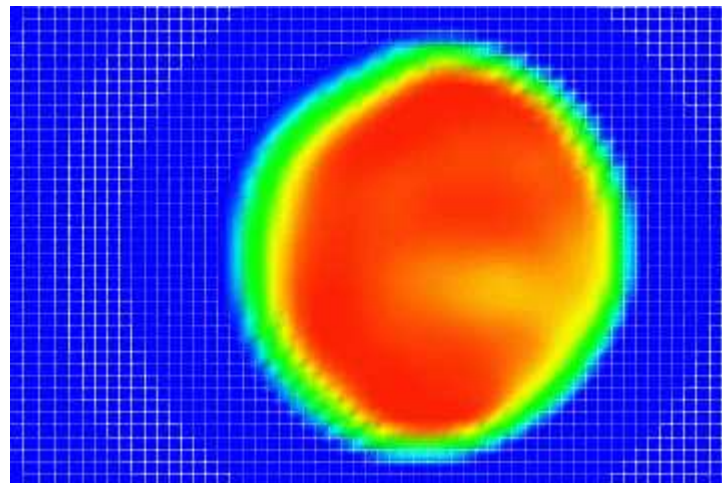
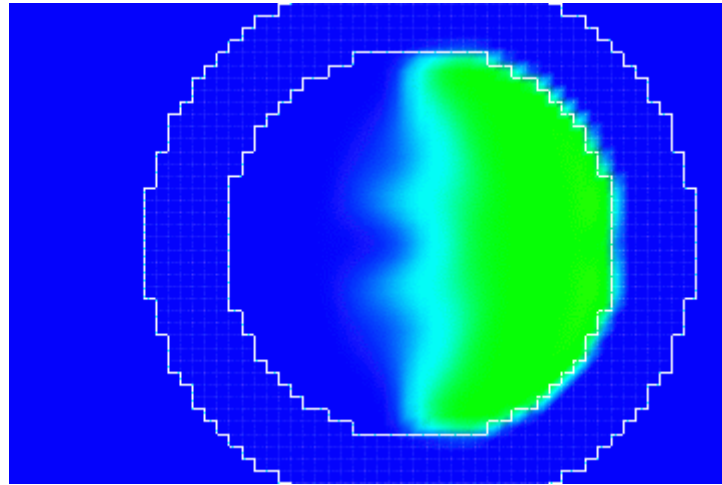




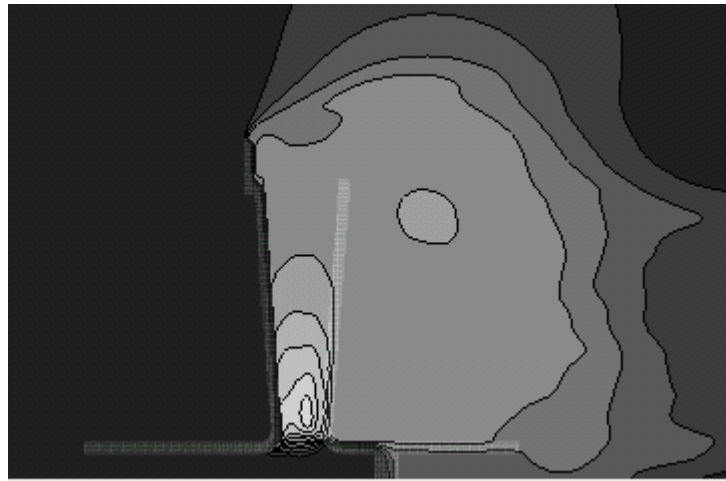
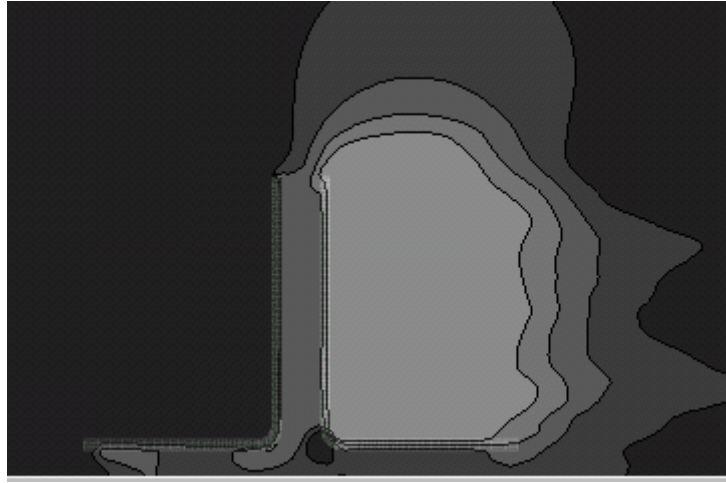
図C. 3-5 速度分布

(速度ベクトルを絶対速度0～1.1 m/sでカラーマップ)

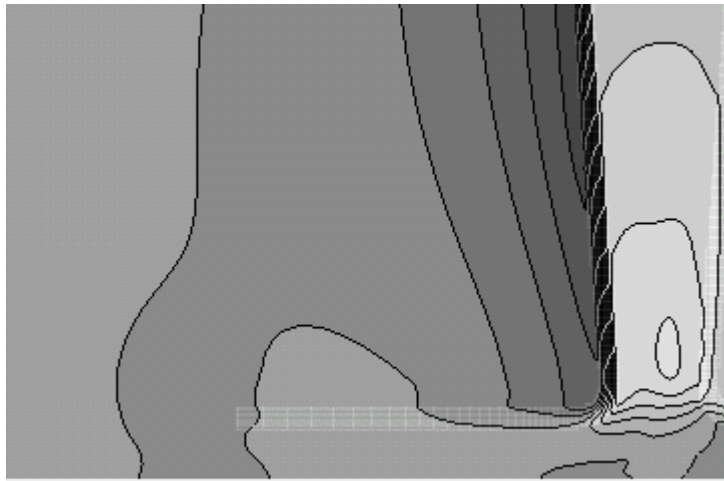
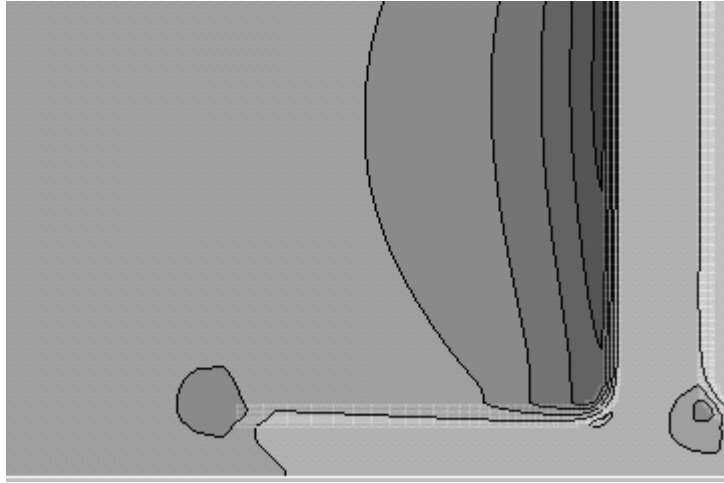
(上：円筒，下：ディフューザ+渦生成板)



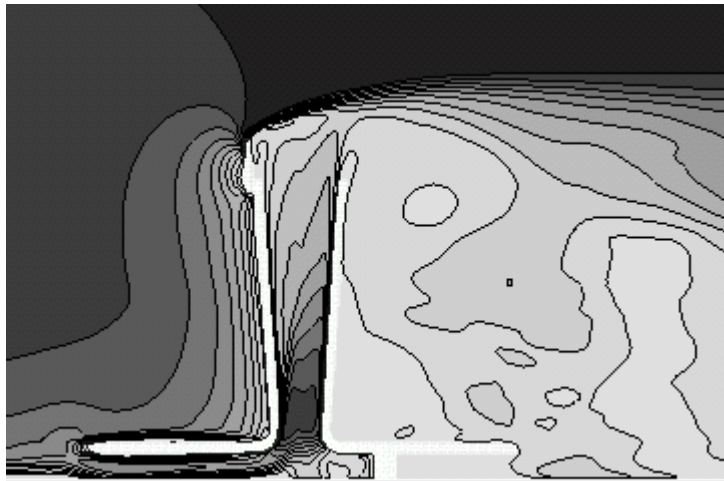
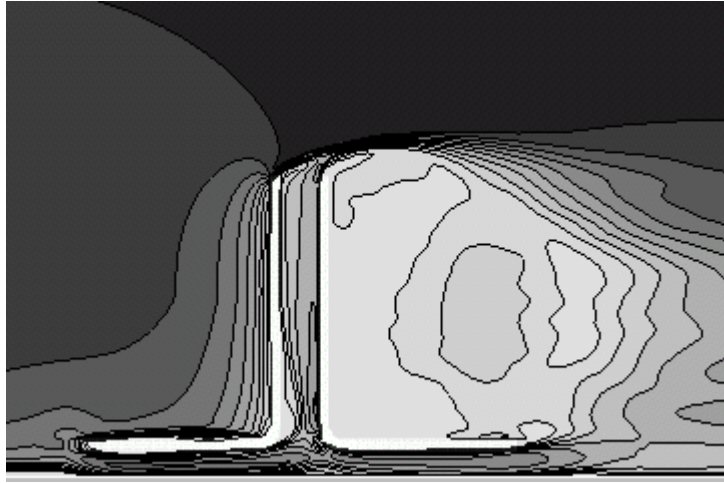
図C. 3-6 上昇速度分布 (x y 断面,  $z = 90 \text{ mm}$ )  
(上: 円筒, 下: ディフューザ+渦生成板)



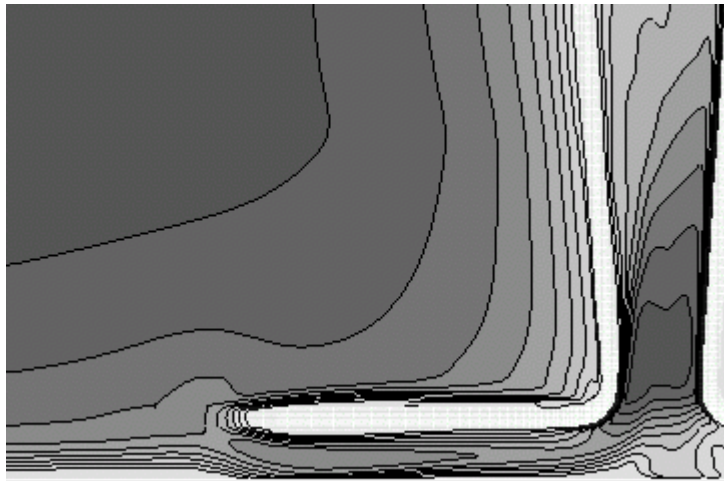
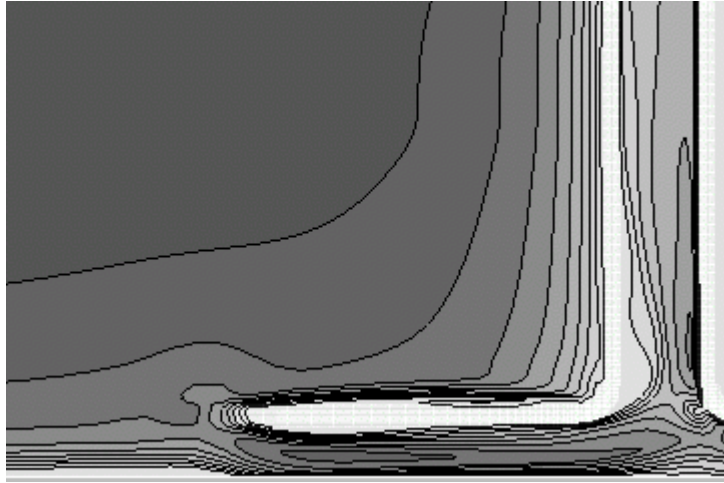
図C. 3-7 圧力差 (-0.5~0を10分割)  
(上:円筒, 下:ディフューザ+渦生成板)



図C. 3-8 圧力差 (-0.5~0.5を10分割)  
(上:円筒, 下:ディフューザ+渦生成板)



図C. 3-9 速度の絶対値 (0~1m/sを10分割)  
(上:円筒, 下:ディフューザ+渦生成板)



図C. 3-10 速度の絶対値 (0~1 m/s を10分割)  
(上:円筒, 下:ディフューザ+渦生成板)

## 付録D 上空風による吸込み効果に関する試み

本付録では、本研究の第3章における上空風を利用した上昇気流の風洞実験における模擬方法について福富 [文献 41] による模擬方法との差異および結果の差異について考察する。

本研究の成果に加えて追加検討をすべき点は次の通りである。

- (i) 上空風の流速が  $1 \text{ m/s}$  と  $3 \text{ m/s}$  の場合しか検討していない
  - ✓ 上空風の流速を変化したときに得る上昇気流の流速を確認する追加検討が必要である。
  
- (ii) 実験結果と流れ場の数値計算結果に差異がある
  - ✓ 高レイノルズ数場である上昇気流の流速を明らかにする過程において実験および流れ場の数値計算法を必要に応じて見直す必要がある

福富は、上空風の流速を  $1 \text{ m/s}$  から  $9 \text{ m/s}$  の範囲で  $1 \text{ m/s}$  毎にデータを取得して纏めている。いずれの流速においても、渦形成板による効果およびディフューザ形状の塔による効果ならびに渦形成板とディフューザ形状の塔による相乗効果が確認でき、円筒形状の塔に比べて上昇気流の流速増加が確認できる。ディフューザ形状の塔に渦形成板をつけると円筒形状の塔に比べて最大 2.9 倍の上昇流速が確認でき、その際には上空風の流速に比べると 1.14 倍の上昇流速を得ることができる。上空風の流速に比した上昇流速の増加率が筆者の検討結果より小さい理由としては、上空風の模擬方法の差異により生じている。筆者の場合には、外部流を一葉流として検討し、塔内部計上をディフューザにする以外にもガイドシャッターを用いて集熱部下に流れ込む外部流を塔内部に導く工夫を施して、塔内部へ流入する空気を集めた。一方で、福富は上空風のみを考慮して塔の上半分のみ外部流を一様流として下半分の外部流れは一様流がない状態として検討した。これにより、筆者の検討では上空風に対する上昇気流の流速増加率が 1.9 であったにも係わらず、福富の検討では 1.14 となっている。この傾向は妥当と考える。理由としては、筆者の検討のなかで塔の下半分の外部流に地表面付近の流速を  $1/7$  乗則に基づく速度シアを考慮した乱流境界層に埋没した場合の実験結果があり、そのときには上空風に対する上昇気流の流速増加率は 1.3 程度であった。付録 C に乱

流協階層に埋没した場合の実験および流れ場の数値計算結果を示す。すなわち、地表面付近の外部流速が上空風の外部流速に比べて小さいと塔内部に得る上昇気流の流速も小さくなることを示しており、福富の場合においてはその最たる条件である。言い換えると、地表面付近に風がなくとも、上空風による吸込み効果を利用することにより上空風より少し強い上昇気流を塔内部に創りだすことができることを福富の結果は示している。さらには、ガイドシャッターのように地表面付近の風も塔内部に流れ込む工夫を施すことで、上空風による吸込み効果を増幅することが可能であることを筆者の実験結果では示している。

一方、流れ場の数値計算について福富は、汎用熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+を用いてLESのSGSモデルを選択して分析しており、実験結果と定量的な一致を得ている。流れ場の数値計算の一環として、筆者が実施した外部流を一様流とした場合の分析も実施している。福富の結果では、円筒形状とディフューザ形状の塔に対して計算を行っており、ガイドシャッターを採用していないため、ディフューザのスロート部断面における風下側には上昇気流を得るものの風下側には下降気流も見受けられている。