

## 学位論文審査報告

蔵脇, 淳一

望月, 博昭

小林, 康秀

村田, 弘志

他

<https://doi.org/10.15017/17154>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 11 (2), pp.233-277, 1989-09-01. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## 学位論文審査報告

氏名(本籍) 蔵脇淳一(鹿児島)  
 学位記番号 総理工博乙第106号  
 学位授与の日附 平成元年3月20日  
 学位論文題目 電子衝撃発光スペクトル法による  
 簡単な水素化合物からの励起水素原子  
 の生成過程

### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 小川 禎一郎  
 (副査)     〃       〃       西村 幸雄  
           〃       〃       村岡 克紀  
           〃       〃       持田 勲

### 論文内容の要旨

分子は電子との衝突により高励起状態にあげられ、そこから解離しイオン種・高リドベルグ種・低リドベルグ種・基底状態種などのフラグメント生成物を与える。初期高励起種の構造・状態と解離ポテンシャル上のダイナミクスのいかにより、どのような生成物がどのような状態で得られるかが決まる。電子衝突による分子の励起解離過程の研究は励起分子の構造とその動的挙動を正しく理解する上で基本的である上、プラズマ・宇宙空間・化学反応などの分野の基礎として学問的な意義を有している。本論文では、電子衝撃発光スペクトル法により水・アンモニア・メタン・水素からの励起水素原子のバルマー線を測定し、高励起分子の解離機構や解離ポテンシャル曲線について考察し、その電子状態について明らかにするとともに、衝突過程における相互作用や励起状態が関与する素反応過程に関する知見を得ることを目的とした。

第1章では、分子と電子の衝突により種々の衝突過程について述べ、解離生成したフラグメント種の並進運動エネルギー分布から、分子の解離機構を明らかにすることができることを示した。 $H^*(D^*)$ 生成の同位体効果、励起分子の解離の角度依存性、対称性に関する知見が、角度分布、Fanoプロット、サブレベル分布の結果を考察することにより、フラグメントを生成する励起分子中間体の対称性について考察することができることを示した。

第2章では、高分解能スペクトル測定用装置と新た

に試作した角度分布測定用装置の性能について述べ、バルマー線のスペクトル線形ならびにその発光強度の角度分布を、それぞれ測定できることを示した。前者の装置ではバルマー線のスペクトル線形を約0.03Åという高分解能で測定でき、その解析から並進運動エネルギー分布が正確に得られることを示した。また後者の装置を用いて励起分子の中間体の対称性について考察できることを示した。

第3章では、高分解能スペクトル測定用装置を用いて、水・重水からのバルマー線を測定し、水分子の励起解離過程について考察した。水・重水の電子衝撃により4つの $H^*(D^*)$ を生成する解離過程が存在することがわかった。第1成分は $H^*(D^*)$ を生成する $H_2O^+(D_2O^+)$ の $\tilde{B}^2B_2$ 状態に取れんする一電子励起のリドベルグ状態に励起され曲線交差によりイオンの $^2B_1$ 状態に取れんするリドベルグ状態を経由して生成すると帰属できた。第2成分はイオンの $^2B_1$ 状態に取れんするリドベルグ状態を、第3成分は同じくイオンの $^2A_1$ 状態に取れんするリドベルグ状態を経由してそれぞれ解離すると結論した。第4成分は多くの二電子励起のリドベルグ状態が寄与している。また、励起解離過程は、 $H^*D^*$ という質量の差や $n=3, 4$ という主量子数の違いに依存せず同じであり、さらには $H^+$ の結果との類似性からコア・イオン・モデルが低いリドベルグ励起水素原子にも拡張できた。しかし、発光断面積には励起電子エネルギーや主量子数に依存する同位体効果が見られ、成分別にみると遅い成分の同位体効果が大きく、前期イオン化と解離の競争、フランクコンドン幅の違いに起因していると結論した。

第4章では、アンモニアの励起解離過程について考察した。アンモニアからの励起水素原子生成過程は5つある。第1, 第2成分はともに $\tilde{B}(2a_1)^{-1}$ 状態に取れんするリドベルグ状態を経由する解離に帰属できる。第3成分の解離過程には、 $H^*(n=4)+H+NH(A)$ ならびに $H^*(n=4)+2H+N(4S)$ が考えられる。第4成分は、光学的に禁制な過程である。第5成分は二電子イオン化状態に取れんする多くの反発型リドベルグ状態からの直接解離により生成する。

第5章では、メタンの励起解離過程についても4つの解離過程が存在することを示した。第1成分は $CH_4^+ \tilde{A}^2A_1$ 状態に取れんする一電子励起のリドベルグ状態を経る直接解離に帰属できた。第2成分は $(1t_2)^{-2}(3a_1)^1$ 状態に取れんするリドベルグ状態を経る解離に

帰属できた。第3成分は  $(1t_u)^{-2}$  状態に収れんする二電子励起の、第4成分は多くの二電子励起のリドベルグ状態を経由する解離に帰属できた。H<sup>\*</sup>, H(HR), H<sup>+</sup>の並進運動エネルギー分布が類似していることから、コア・イオンモデルが低リドベルグ励起水素原子にも拡張できた。

第6章では、試作した角度分布測定用装置を用いて、簡単な二原子分子である水素の励起解離の異方性とその対称性について考察した。水素からのバルマー線の発光強度の角度依存性を測定すると、速い成分の生成過程に異方性が見出された。Fano プロットの測定から水素からのH<sup>\*</sup>の生成には光学禁制、対称許容の両励起過程が重要な寄与をしていることを見出した。また、寿命測定からサブレベル分布を見積り、d状態が支配的な寄与をしていることを示した。

第7章では、総括として本研究で得られた水・アンモニア・メタンの励起解離過程と水素からの励起水素原子生成過程の異方性、対称性に関する知見をまとめた。

## 論文調査の要旨

化学反応の機構を解明し分子の合成法を体系化するには化学反応素過程を微視的に解明することが重要である。電子と分子の衝突相互作用を利用し、分子の励起や解離の素過程を詳しく研究することができる。

本論文は、分子と電子との衝突相互作用で生成する励起種の発光スペクトルに注目し、新しい高性能な測定装置を開発し、水・メタン・アンモニア・水素から生成する励起水素原子の生成過程を解明したものである。その主な成果は次の通りである。

1. 発光の角度分布が測定できる高分解能電子衝撃発光スペクトル測定装置を、電場集束型電子銃とファブリペロ干渉計を用いて試作し、最高分解能 0.02Å 程度を得た。マイクロコンピューター制御による装置の自動化を行い、長時間の積算に耐える安定な装置を完成させた。この装置を用いて励起原子の生成過程の対称性を研究できることを示した。

2. 水分子の電子衝撃により励起水素原子（主量子数 3, 4）を生成する過程を解析し、4つの主な解離過程を見いだした。しきい値の低い順に、第一の解離過程は前期解離を経由して遅い励起水素原子を生成する過程であり、大きな同位体効果を示した。この過程により生成した励起水素原子の発光断面積を他の過程

によるものから分離して求め、電子エネルギー依存性がボルン近似による理論計算結果と一致することを示した。第二の解離過程は励起一電子イオン化状態に収斂するリドベルグ状態を経由する直接解離に、第三の解離過程は一電子イオン化状態に収斂するリドベルグ状態を経由する直接解離に、第四の解離過程は二電子励起リドベルグ状態を経由する直接解離に帰属し、これらの過程から生成する励起水素原子は大きな運動エネルギーを持つことを示した。これらの励起解離過程は主量子数依存性が小さく、プロトンを生成する過程に類似しており、基本的にはコア・イオンモデルが成立することを明らかにした。

3. アンモニア分子の電子衝撃により生じる励起水素原子の生成過程を解析し、5つの主要な解離過程を見いだした。しきい値の低い順に、第一と第三の解離過程は並進運動エネルギーが 3eV 以下の遅い励起水素原子を生成する過程であり、第二・第四と第五の解離過程は速い励起水素原子を生成する過程であった。これらの生成はいずれもリドベルグ状態を経由する解離に帰属された。

4. メタン分子の電子衝撃による励起水素原子生成過程についても同様に研究し、4つの主要な解離過程を見いだした。この場合は第二の解離過程が励起一電子イオン化状態に励起された後前期解離を経由して解離し、遅い励起水素原子を生成する過程であると帰属された。また、第一の解離過程は一電子イオン化状態に収斂するリドベルグ状態を、第三の解離過程は二電子イオン化状態に収斂するリドベルグ状態を経由して直接解離により遅い励起水素原子を生成する過程であると帰属した。

5. 発光スペクトルの角度分布測定装置の結果から、水素分子の電子衝撃により生成する励起水素原子の生成過程の対称性を論じた。しきい値が低く並進運動エネルギーの小さい励起原子を生成する過程と  $\Sigma_g$  状態を経由する過程は等方的であるが、並進運動エネルギーの大きい励起原子を生成する過程は等方的でないことを見いだした。ファノプロットの結果から第一の過程は光学許容、第三の過程は光学禁制過程を経由していることを見いだした。

以上、本論文は電子衝撃発光スペクトル法を利用して分子の電子による励起により生成する励起水素原子の生成過程を解析する手法を發展させ、さらにこの方法を応用して水・アンモニア・メタン・水素からの解

離過程を明らかにしたもので、分子計測学・化学反応論ならびにプラズマ解析に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 望月博昭(宮崎県)  
学位記番号 総理工博乙第105号  
学位授与の日附 平成元年3月20日  
学位論文題目 超音速空気エゼクタの特性に関する研究

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 松尾一泰  
(副査) 〃 〃 小野信輔  
〃 〃 井上雅弘  
〃 〃 速水洋

### 論文内容の要旨

エゼクタは高圧の空気や水蒸気をノズルで膨張させ、その高速の一次流れで低圧の二次流れを吸引し、二つの流れを混合室で混合させ排気する装置で、簡単な構造を持ち、可動部分がなく、設備費が安く、保守も容易なため、化学工業において廃ガスの処理や脱臭、ロケットエンジンの高々度状態のシミュレーション装置、V/STOLの推力増強装置、燃焼装置やその他多くの生産現場で使用されている。しかし現存するエゼクタの性能は十分ではなく、高性能化は重要な課題となっている。

エゼクタはその形状により亜音速エゼクタと超音速エゼクタに分けられるが、エゼクタを駆動する圧力が十分大きければ、混合部入口において一次ノズルからの膨張の程度が大きい超音速エゼクタの方が亜音速エゼクタよりも二次流れの吸引性能は大きい。また超音速エゼクタは混合部の断面積が一定の場合より、混合部にスロートを持つエゼクタの方が、同じ吸引性能を得るのに必要な駆動圧力は小さい。このため高性能エゼクタの開発のためには、混合部にスロートを持つ超音速エゼクタの作動特性を明らかにすることが必要である。しかし従来の研究においては、亜音速エゼクタや混合部の断面積が一定の超音速エゼクタに関するものが大部分で、混合部にスロートを持つ超音速エゼクタの内部流動については現在まだよくわかっていない点が多い。

本論文は、このような観点から、混合部にスロートを持つ超音速エゼクタの内部流動を解明し、高性能エゼクタに関する基礎資料を得るために研究したもので、9章より構成されている。

第1章では、エゼクタの作動原理と歴史について述べるとともに、本論文の内容について概説した。

第2章では、亜音速エゼクタと超音速エゼクタに関する従来の研究について述べ、各エゼクタの特性を比較検討し、問題点を明らかにするとともに、本研究の目的を具体的に示した。

第3章は、本研究で使用した実験装置と実験方法についての記述である。実験装置には間欠式吹き出し風洞を用い、高圧の一次集合洞からの一次流れを混合部に噴出させ、上流が大気につながった二次集合洞からの二次流れを吸引し、混合部で混合させた後、大気に放出した。ノズルと混合部の形状はいずれも矩形断面で、ノズルにはラバルノズルを、また断面積が可変のスロートを持つ混合部を使用した。一次と二次の作動気体はいずれも空気、エゼクタ内の流れはシュリーレン法を用いた瞬間写真と高速度写真で可視化するとともに、流れ場の圧力を測定した。

第4章では、二次流れがない場合のエゼクタの作動特性を調べるために、一次ノズルマッハ数とスロート面積比(混合部におけるスロートとノズルスロートの断面積の比)を変えて実験を行うとともに、流れ場の解析を行った。その結果、作動状態によって、二次集合洞圧力が最小となる最適作動点が存在し、その点における最適のスロート面積比を示すと同時に、最適作動点における内部流動を明らかにした。また最適作動点における流れ状態を求めるモデルを示し、実験値と比較検討した。

第5章では、第4章で述べた最適作動点に到達する過程において、駆動圧力(一次集合洞圧力)のある範囲で、エゼクタ内で流れが変動する現象を実験的に調べた。その結果、駆動圧力のある範囲で、一次ノズルからの噴流が上下に振動し、混合部や二次集合洞内に大きな圧力変動が生じることがわかった。またこの振動が生じる原因を高速度写真観察と圧力測定により詳しく調べ、振動の機構について考察した。

第6章では、二次流れがある場合の作動特性を調べるために、一次ノズルマッハ数とスロート面積比を変えて実験を行った。その結果、各スロート面積比に対し、二次流量が最大かつ二次集合洞圧力が最小とな

る最適作動状態が存在し、また最適作動状態となるのに必要な一次集合洞圧力が最小となる最適スロート面積比が存在することを明らかにした。さらに混合部にスロートをもつエゼクタの作動特性線図は、一次集合洞圧力とスロート面積比によって五つに分類できることを示した。

第7章では、一次集合洞圧力を一定に保ち、二次流量が増加する過程で、二次集合洞圧力が小さい高真空性能、減少する過程で大きい低真空性能を示すいわゆる二重真空現象を、実験的に明らかにするとともに、一次元理論を用いて流れ場の解析を行った。その結果、二重真空現象は、ノズルスロートのみならず混合部のスロートにおける流れがチョークし、エゼクタ内に二つの衝撃波が生じる場合に観察され、二重真空現象の大きさは、スロート面積比が小さい程大きいことが分かった。また二重真空現象が生じる場合のエゼクタ内の衝撃波の挙動を、定常一次元理論を用いて解析し、計算結果は実験結果と定性的に一致することを示した。

第8章では、ノズル出口と混合部におけるスロートの間の流れが超音速になる瞬間、すなわち超音速エゼクタの始動時におけるスロート面積比が一次及び二次集合洞圧力に及ぼす影響など、エゼクタ性能とエゼクタ形状との関係を求める計算法を提示するとともに、種々の気体について計算を行い、エゼクタ圧縮比と、一次と二次の流量比、及びスロート面積比の関係を表す線図を示した。

第9章は、本論文の結論である。

## 論文調査の要旨

エゼクタは、各種の化学工業における脱ガスや脱臭などの排気装置、復水器やロケットエンジンの高真空性能試験設備における真空装置などとして、いろいろな分野で広く使用されており、その駆動気体には、一般に水蒸気と空気が用いられている。空気エゼクタでは、従来、ノズルから噴出する空気の速度が音速より小さい亜音速エゼクタが多いが、比較的高圧の空気を超音速ノズルで噴出する超音速エゼクタを用いると、装置全体を小形化できるだけでなく、真空性能も向上する。しかるに超音速エゼクタでは、内部に発生する衝撃波の挙動や、内部流動とエゼクタ性能との関係など、現在まだよく分かっていない問題点は多く残されており、その解明が望まれている。

本論文は、超音速空気エゼクタの内部流動を解明し、

高性能エゼクタに関する基礎資料を得ることを目的として研究した結果をまとめたもので、本論文中に示された主な成果ならびに知見は次の通りである。

(1) 二次流れがない場合のエゼクタ特性について調べ、二次集合洞圧力が最小となる最適作動状態に対応する一次集合洞圧力は、エゼクタスロートとノズルスロートの面積比（スロート面積比）によって変化し、それが最小となる最適スロート面積比が存在することを示すとともに、最適作動状態は、スロート面積比が最適値より小さい場合には流れがエゼクタスロートでチョークするとき、大きい場合にはノズルスロートで発生した衝撃波がエゼクタスロートの下流へ移動するときに得られることを明らかにしている。

(2) 前項で述べた最適作動状態に到達する過程において、一次集合洞圧力のある範囲でエゼクタ内の流れが振動する現象について実験的に研究し、これは、3～6 Hzの低周波振動に100～150 Hzの高周波振動が重なった振動であることを明らかにし、それぞれの振動の発生機構を解明している。

(3) 二次流れがある場合の作動特性について調べ、エゼクタの作動特性線図は、一次集合洞圧力とスロート面積比によって五つのグループに分類できることを明らかにするとともに、それぞれのグループにおいて二次流量が最大かつ二次集合洞圧力が最小となる最適作動状態における流れを物理的に説明している。

(4) 一次流量を一定に保ち、二次流量が増加する過程で、二次集合洞圧力が小さい高真空性能、減少する過程で大きい低真空性能を示すいわゆる二重真空現象は、流れがノズルスロートのみならずエゼクタスロートにおいてもチョークし、エゼクタ内に二つの衝撃波が生じる場合に起こることを実験的に明らかにしている。またこの場合の衝撃波の挙動を理論的に解析し、計算結果は実験結果と定性的に一致することを示している。

(5) ノズルで生じた衝撃波がエゼクタスロートに達し、超音速エゼクタが始動する際のノズルマッハ数やスロート面積比などの形状パラメータと、一次及び二次集合洞圧力、二次流量、エゼクタ圧縮比などのエゼクタ性能との関係を見積もる計算法を提示し、具体的な例について設計の基礎となる線図を示している。

以上要するに、著者は本論文において、超音速空気エゼクタ内の流動状態を詳細に調べ、作動特性の物理的意味を明らかにし、特定の条件において生じる流れ

の振動現象や二重真空現象に関して多くの知見を得るとともに、エゼクタ形状と性能との関係を求める計算法を示しており、これらの成果は、流動工学上寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 小林 康 秀 (広島県)  
 学位記番号 総理工博乙第107号  
 学位授与の日附 平成元年3月20日  
 学位論文題目 三次元双曲形分布定数系の同定と  
 特性変動の検出に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 相 良 節 夫  
 (副 査)           〃           〃 長 田    正  
                   〃           〃 田 村 英 之  
                   〃           〃 熊 丸 耕 介

## 論文内容の要旨

近年、科学技術の急速な進歩により、取り扱うシステムが大規模、複雑化しつつあり、その制御性能もより高度なものが要求されるようになってきた。このような要求に応えるには、対象とするシステムをできるだけ正確に表現する必要がある。そのため、現実のシステムに伴う空間的な広がり、システムの特性に本質的に関わりをもつ場合は、それらを分布定数系として取り扱わなければならない。

その中で、波動、振動現象を表わす双曲形分布定数系は、振動解析、制御、防振設計、地下資源探査など工学、環境の分野で最近、急速に関心が高まっている。しかし、これまで、三次元空間での挙動を一次元でモデル化するなど、簡略化したモデルについて理論的解析がなされているのみである。また、実システムの制御、診断などを行なう上で重要である同定問題、変動検出問題を扱った例は少ない。

本論文は、以上のことを考慮し、三次元双曲形分布定数系を粘弾性システムとしてモデル化し、その物理パラメータを系統的に同定する方法および特性変動の検出法を提案したもので、8章と付録からなる。

第1章では、本研究の背景、目的ならびに各章の概要を述べている。

第2章では、等方等質な三次元双曲形分布定数系を対象とし、Voigt型粘弾性モデル化し、過渡解析によ

りグリーン関数を導出している。得られたグリーン関数の固有値は、システムパラメータを含んだ複雑な非線形関係式で与えられ、解析解を得るのは困難である。そのため、数値解法に依らざるを得ないが、システム同定の際、システムパラメータのすべての組み合わせについて固有値を求めるには、莫大な計算量を要する。そこで、固有値をシステムパラメータを用い近似陽表示し、システム同定を可能にしている。また、本手法により得られるパラメータ推定値の推定精度について検討し、防振システムおよび地盤振動系などの実際のシステムに適用し、その有効性を明らかにしている。

第3章では、異方性システムのうち比較的多く見受けられる横等方三次元粘弾性システムの同定法について考察している。第2章の等方等質システムに比べ、システムパラメータが増加するため、特性方程式や固有値の関係式がより複雑になる。そこで、異方性の度合などのシステムパラメータを用い固有値を近似陽表示している。この近似の妥当性とそれに基づく同定法の正当性について検証し、異方性を示す実システムの同定を行なっている。提案した同定法によれば、システム応答のデータを原位置で測定可能なため、システムの周囲環境を乱さずに正確に同定できる。さらに、時間領域で解析しているため、正弦波加振器などの大がかりな実験機器で長時間測定する必要がないなどの利点がある。

第4章では、防振系でよく用いられる多層構造のうち最も基本的な二層構造をもつ三次元双曲形分布定数系の過渡解析を行い、グリーン関数を導出している。さらに、本解析結果を実際の防振系および地盤振動系に適用し、グリーン関数の妥当性を検証している。

第5章では、第4章までに対象とした種々の双曲形分布定数系を点観測により、その特性変動を検出する問題について考察している。まず、変動形態として突発的な故障を表わすパラメータの跳躍的变化と経年変化による劣化を表わす連続的变化を考える。この変動形態、変動モードと発生時刻の組み合わせにより、変動事象の伝説を立てる。これらの変動事象の事後確率を求め、これが最大となったモデルを生起した変動事象とする。この事後確率の漸近的性質を考察することにより、本方法によればデータ数の増加と共に正しく変動を検出できることを明らかにしている。

第6章では、防振系などのように入力特性などが変化するシステムを考え、指数族に属する確率過程の統

計量が変動する場合の変動検出法を提案している。さらに、実システムの変動検出を行ない、有効性を確認している。本検出法は、システムの入出力特性がシステムパラメータを用いて正確に記述できない場合でも観測値の統計量変動の検出が可能である。

第7章では、構造が未知で非線形な双曲形分布定数系について考察し、防振系での暗振動などのように、雑音の統計量が未知な場合にも適用可能な同定法を提案する。この方法によれば、データ数が少ないときでも表現可能な低次元モデルを得、データ数の増加と共に正しくシステムの構造を識別し、パラメータの不偏一致推定量を得ることが可能である。

第8章では、以上の研究を総括し、結論を述べている。

## 論文調査の要旨

近年スーパーコンピュータのような超高速演算可能な計算機の出現により、大規模システムや分布定数システムのような複雑なシステムの解析を可能にしている。しかしながら、分布定数システムは次元が増大するに従って計算量が極端に増加するので、これまで二次元分布定数系の研究が多いにもかかわらず、三次元の場合は簡単な場合に限られていた。三次元双曲形分布定数系は宇宙構造物、地下資源探査、防振設計など工学における広範な分野で注目されてきているが、実システムの診断や制御において重要な同定問題や変動検出問題などに関する研究はほとんど行われていなかった。

本論文は、三次元双曲形分布定数系を対象として、等方等質の簡単な場合から始めて、横等方異方性の粘弾性システム及び二層構造をもつシステムの同定問題を、グリーン関数の固有値をシステムパラメータを用い近似陽表示することにより解決している。さらに、これらのシステムに対して、多様なパラメータ変動形態に対する種々の検出法を提案している。

著者はまず、等方等質、横等方異方性の粘弾性三次元双曲形分布定数系に対して、過渡解析によりグリーン関数を導出し、その固有値を近似陽表示することによりシステム同定を可能にする手法を提案している。本手法を防振及び地盤振動系など実際のシステムに適用しその有効性を確かめている。また、横等方の異方性を示す実システムに適用し同定法の正当性について検証している。この手法によればシステムの周囲環境

を乱さずに正確に同定でき、周波数応答試験器のように長時間の測定を必要としない特徴を有している。

著者はついで、多層構造の基本となる二重構造を有する三次元双曲形分布定数系について、上述の手法を拡張して同定できることを示している。多層構造とすることにより防振効果を広い周波数範囲にわたり達成することができるので、有効な防振対策として注目されていたが、このような構造をもつシステムの同定問題はこれまで解析の複雑さのため解決されていなかった。実際の防振システムとして天然ゴムとクロロプレンゴムの二層からなる地盤振動系に適用し有効性を確認している。

さらに著者は、上述したシステムに対して、突発的な故障を表すパラメータの跳躍的变化、経年変化による劣化を表す連続的な変化に対してシステムの特性変動を検出する問題の研究を行っている。変動モードと発生時刻の組合せにより変動事象の仮説を立てて、変動事象の事後確率を求めそれが最大となったものが生じたとする方法である。事後確率の漸進的性質を考察することによりデータ数が増加するにつれて正しく変動が検出できることを明らかにしている。

また著者は、入力特性の変化する振動系について指数族に属する確率過程の統計量が変動する場合の変動検出法を提案している。この検出法はシステムの入出力特性がシステムパラメータを用いて正確に記述できない場合でも観測値の統計量変動の検出が可能であることを示している。さらに、構造未知の非線形システムについて、雑音の統計量が暗振動のように未知な場合でも適用可能な同定法を提案している。この方法によればデータ数が少ないときは低次元モデルを与え、データ数の増加と共に正しい構造を識別し、パラメータの不偏一致推定量が得られることを明らかにしている。

以上要するに、本論文は工学的に重要な三次元双曲形分布定数系について、同定と特性変動の検出に関して理論的な解析を行い種々の効果的な手法を提案し、実際の防振系などに適用し有効であることを確かめたもので制御工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 村田弘志(山口県)

学位記番号 総理工博乙第108号

学位授与の日附 平成元年3月20日

学位論文題目 インパルス応答を用いた有限整定  
応答制御系の設計に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 相良 節夫

(副査) 〃 〃 長田 正

〃 〃 熊丸 耕介

〃 〃 近藤 英二

## 論文内容の要旨

近年、制御系のデジタル化が急速に進み、より高度な制御性能をめざして現代制御理論の応用も広い範囲で行われている。特に、有限整定応答制御は目標入力あるいは外乱に対し、過渡状態が有限時間内に終了し定常偏差を生じないというデジタル制御固有の特性を有しており、速応性の面からも注目されている。この有限整定制御系の設計に関しては、これまでパルス伝達関数や状態方程式を用いる多くの手法が発表されているが、特に一入出力系の場合には入出力特性が一意に決まってしまう、整定に要するステップ数や入出力応答波形などを調節する余地はまったく残されていない。この結果、目標入力の種類や制御対象によっては、定常値に対し大きな行き過ぎ量を生じたり、過大な操作量をもった実用上使用に供することのできない制御系が設計される場合があり、この解決策が強く望まれていた。

本論文は、インパルス応答モデルを用いた最適有限整定応答制御系の設計法を与えたものである。この設計法は、偏差あるいは制御量と操作量に関する2次形式評価を用いており、制御段数の選択と重み係数のとり方により過渡特性の改善および操作量の制限に対応した制御系が実現できる。本手法は、インパルス応答を用いた簡単な行列演算から最適有限整定操作量を求め、この操作量に対する制御対象の有限整定応答を規範モデルとし、このモデルと閉ループ系の応答を一致させる出力フィードバックによる有限整定制御装置あるいは状態フィードバックゲインを決定しており、設計法が簡単で入出力の過渡応答波形を考慮した融通性のある設計ができ、実用的に有効なことを明らかにしたもので8章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と意義を明らかにし、本論文の概要について述べた。

第2章では、単一入出力系について、時間に関する

多項式目標値および外乱変化に対し、操作量と偏差に関する2次形式評価関数を最小化する最適有限整定操作量を、制御対象の過渡応答を用いて簡単な行列演算から求める方法を提案した。この方法によれば、最短時間有限整定操作量を含む任意の制御段数での最適有限整定操作量が得られ、目標値と外乱に対して同一の手法が適用できる。また、操作量に制限がある場合の有限整定操作量を求めることができる。なお、この方法は系が状態方程式で記述される場合にも容易に拡張可能である。

第3章では、前章で得られたステップ状目標値および外乱変化に対する最短時間有限整定操作量と系のパルス伝達関数の関係を与えた。また、最短時間有限整定操作量と最適有限整定操作量の関係を明らかにし、最適有限整定操作量に対応するオーバーパラメータモデルのパルス伝達関数の極配置と重み行列との関係を示し、重み行列選択の指針を与えた。

第4章では、出力フィードバックによる最適有限整定応答制御装置の設計法を与えた。まず、直列補償形の目標値用制御装置、外乱用制御装置を求め、制御対象のパルス伝達関数との関係を示した。また、目標値と外乱の両者に働く2自由度形の制御装置の設計法を与えた。

第5章では、多入出力系の有限整定操作量を求める計算法を導き、それを用いた有限整定制御装置の設計手法を与えた。まず、多入出力系のインパルス応答を用いた系の記述を行い、最適有限整定操作量を求める評価基準を定め、ステップ状目標値と外乱に対する最短時間有限整定操作量と最適有限整定操作量を求めた。さらに、それらの結果を用いて、2自由度形の制御装置の設計法を提案し、実験結果を示した。

第6章では、動揺のないバンプレスな有限整定応答により手動から自動へ切換えることが可能な、オートチューニングによる制御方式を提案した。この制御方式は2自由度形であり、系の過渡応答の測定—デジタル制御装置の設計—バンプレス処理—定常運転という一連の動作をマイクロプロセッサを用いて行っている。まず、自動運転に切換える以前の入力を考慮した有限整定操作量を求め、最短時間有限整定操作量およびパルス伝達関数との関係を明らかにした。ついで、バンプレス処理を行えば、切換え時に応答の動揺なしに閉ループ系が構成できることを示した。また、試作したオートチューニング制御装置による制御実験によ



り、その有効性を確認した。

第7章では、定常状態にある状態値を零状態に移すレギュレータ操作量と有限整定操作量との関係を与えた。また、これまでの極配置による方法、可制御空間に着目した方法などを用いず、レギュレータ操作量に対する状態値からフィードバックゲインを求める手法を提案した。さらに、オーバーパラメータモデルのパルス伝達関数を用いる方法および最適有限整定操作量に対する状態の応答値を直接用いる方法の2種類の手法について、状態フィードバックによる最適有限整定制御系の設計法を提案し、実験により良好な過渡応答特性が得られることを確認した。

最後に、第8章では、本研究で得られた主な結果について総括した。

## 論文調査の要旨

最近、マイクロプロセッサが素子として容易に使用できるようになって、現代制御理論の応用が急速に広まってきた。特に過渡状態が系の次数のサンプリングステップ数で終了する有限整定応答制御系は、目標値がステップ状に変化する起動時等にすぐれた性能をもっている。これまでパルス伝達関数、状態方程式で記述されるシステムに対する有限整定応答制御の設計は種々提案されてきたが、融通性に乏しく調整できる余地がほとんど残されていなかった。そのため過大の操作量を要したり、大きな行き過ぎ量を生じ有効な方法とは言えず、実用に供し得る設計法が望まれていた。

本論文は、インパルス応答を用いた二次形式評価による最適有限整定応答制御系を設計する方法を提案している。この方法は評価の重み係数を変えることにより操作エネルギーと応答の改善の兼ね合いを調整することが可能な融通性に富んだ設計法といえる。

著者はまず、一入出力系について、操作量と偏差についての二次形式評価関数を最小化する最適有限整定操作量を過渡応答より簡単な行列演算で計算する方法を提案している。この方法によれば、目標値と外乱に対し同一の設計法が適用でき、操作量に制限があっても任意の段数での最適有限整定操作量を求めることが可能である。

著者はついで、状態方程式で記述される場合に対し、最短時間有限整定操作量と系のパルス伝達関数、ならびに最適有限整定操作量の関係を明らかにし、最適有限整定操作量に対するオーバーパラメータモデルの

パルス伝達関数の極配置と重み行列との関係を示し、重み行列を選定する目安を与えている。また、出力フィードバックの場合についての設計法を与え、目標値と外乱の両方に効果的な二自由度制御装置の設計法を示している。なお、多入出力系についても拡張し、実験により、ここで提案する手法の有効性を確認している。

さらに著者は、手動から自動へ動揺なしで、いわゆるバンプレスに切換可能な二自由度形の有限整定応答制御方式を提案している。自動運転に切換える前に過渡応答を同定し、その結果を用い最短時間の有限整定操作量を求めバンプレスで定常運転に入るという一連の動作をマイクロプロセッサで行い、同時にオートチューニング制御装置により切換時に動揺なしに閉ループを構成できる方法を提案している。また、試作した装置により本手法の有効性を確認している。

最後に著者は、状態フィードバックによる最適有限整定制御系の設計法を提案し、実験により良好な過渡特性が得られることを確認している。ここで提案する方法は、最適レギュレータ問題における操作量に対する状態値の関係から直接行列演算により状態のフィードバックゲイン及び直列補償器のパラメータを求めることができる。さらに、オーバーパラメータモデルのパルス伝達関数を用いる方法についても検討している。

以上要するに本論文は、インパルス応答を用いた二次形式評価に基づく最適有限整定応答制御系に関して簡単な行列演算から操作量の制限と整定段数とを任意に選択できる融通性に富んだ設計法を提案したもので制御工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 川崎 勝利 (福岡県)  
 学位記番号 総理工博乙第109号  
 学位授与の日附 平成元年3月20日  
 学位論文題目 地中電力ケーブルの大容量化に関する研究

### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤崎 正則  
 (副査) 〃 〃 藤井 哲  
 〃 〃 村岡 克紀  
 〃 〃 原 雅則

## 論文内容の要旨

我が国の大都市とその周辺は人口が集中過密化し、電力需要もそこに集中している。このため、地下鉄・ガス・下水・上水・通信・電力などの地下埋設設備が輻輳しており、地中電力ケーブルのルート確保が極めて困難で、地中電力ケーブルのルートは地下埋設物の少ない地下30～50mという探部洞道で確保させるを得なくなってきている。一方、地中電力ケーブルの送電容量の増加に伴い、洞道内に布設された電力ケーブル自身のケーブル損失、ケーブル周辺のケーブル支持金物及び洞道躯体の鉄損が増加して送電損失の増大を招いている。このため、洞道冷却等の冷却設備などの付設設備が必要となり送電コスト上昇にも反映して問題になっている。

また、地中電力ケーブルとしてアルミニウム被覆ケーブルの多用に伴ってケーブルシース渦電流損が増大し、例えば導体サイズ2000mm<sup>2</sup> 275kV単心油入ケーブル3条俵積配置では導体損の約70%にも達し、シース渦電流損の従来の計算式の妥当性が議論されるようになってきた。更に、これまでケーブル支持金物或は洞道躯体の鉄損について理論的に検討された例は極めて少なく、今後の大容量地中電力ケーブルの線路設計上の課題の一つと考えられている。なお、送電容量増大策としての各種冷却方式の冷却特性の把握、及び冷却計算方法の確立も線路設計上極めて重要である。以上の課題を踏まえて、本論文は地中電力ケーブルの大容量化について行った研究成果をまとめたもので6章より構成されている。

第1章は序論で、地中電力ケーブルの大容量化に関する研究の背景と現状、ならびに解決すべき課題点を明らかにするとともに、本研究の意義と要約について述べた。

第2章では、大容量地中ケーブルの導体電流によって発生する種々の電力損失を検討した。最初に、任意配置された円形充実導体・円形中空導体・長方形充実導体の表皮効果、及び近接効果係数の計算式を提案して、その妥当性を理論的・実験的に検証した。次に、シースの電気抵抗が小さい場合のシース渦電流損については、他相導体電流のみを考慮した従来の計算式では実際よりもかなりの過大評価となるため、自己相のみならず他相のシース渦電流の影響まで考慮した任意配置のケーブルシース渦電流損が評価できる計算式を

提案した。最後に、パイプ形油入ケーブルの鋼管や海底ケーブルの外装等の鉄損に関する新しい計算式を提案した。

第3章では、ケーブル近傍で発生するケーブル支持材等の鉄損の問題を検討した。地中電力ケーブルの送電容量の増大に伴って、ケーブル近傍の鋼材等の磁性材から成るケーブル受金物、及び立金物等のケーブル支持材の鉄損が大きくなり、送電損失の増大のみならずケーブル支持材の温度上昇によるケーブルへの悪影響、更に冷却設備容量の増大等の問題を生じている。しかしながら、これらの鉄損に関する理論的検討は極めて少なく、電力ケーブルの線路設計に対する一つの課題であったので、表皮効果を考慮して、ケーブルと直交するケーブル支持材の渦電流損に関する新しい計算式を導出した。

第4章では、地中電力ケーブルが布設される種々の洞道で発生する洞道躯体の鉄損について検討を行った。電力ケーブルの大電流化に伴い、これらの洞道躯体損失が線路設計上無視できなくなってきている。そこで、電力ケーブルが布設される代表的洞道である開削洞道・コンクリートセグメントシールド洞道・及びスチールセグメントシールド洞道についての洞道躯体の鉄損の計算式を理論的に導出して、その妥当性を実規模洞道による実測によって検証した。

第5章では、電力ケーブルの強制冷却方式について考察した。地中送電線路の大容量化のために各種の強制冷却方式が検討されるとともに、過渡時冷却計算手法も一部発表されているがその手法はまちまちである。そこで、定常時冷却計算にはSilvesterの展開定理を、また過渡時冷却計算には差分近似による汎用性のある数値計算法を適用する新しい計算法を開発した。特に、内部水冷架橋ポリエチレンケーブルについては、ケーブルの開発から長期安定性の検証、及び実線路への適用を含めた詳細な検討を行った。

第6章では、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の課題を述べて総括した。

## 論文調査の要旨

最近の大都市への人口集中と電力需要の増大に伴って、都心部への大電力輸送のための地中電力ケーブル用地の確保が困難になっている。このため地下30～50mの探部洞道内に大電力ケーブルを布設する技術の開発が進められている。地中ケーブルとしてのアル

ミニウム被覆ケーブルの大容量化及び近接布設に伴って、被覆（シース）の渦電流損の著しい増加が認められ、導体形状の改善や他相導体配置法の工夫とともに、渦電流損の算定法の解明が必要になっている。また、ケーブル支持材及び洞道構造材に生じる損失の推定と、それによる温度上昇並びにケーブルの強制冷却方式についての研究が不可欠になっている。

本研究は、電力ケーブルの導体電流によって生じる種々の電力損失の算定式を見直し、新しい計算式を確立して実験との比較を行うとともに、電力ケーブル近傍のケーブル支持物及び洞道躯体の温度上昇の理論的・実験的研究をもとに、地中電力ケーブルの大容量化に関して行った研究をまとめたもので、その主な成果は次の如くである。

(1) 電線の交流抵抗は直流抵抗に自己電流による表皮効果係数 ( $\lambda_s$ ) と他導体電流による近接効果係数 ( $\lambda_p$ ) を乗じて求められる。従来、 $\lambda_s$  と  $\lambda_p$  を求めるのに必要な電力ケーブルの交流抵抗は、導体の厚さが小で厚さ方向の電流密度を一様と仮定して求められていた。著者は任意配置された大サイズ電力ケーブルに関して厚さ方向の電流分布を考慮に入れた計算式を導き、 $\lambda_s$  と  $\lambda_p$  についてより正確な値を示している。

(2) 電力ケーブルの金属シースの渦電流損について、これまで考慮されていた他相導体電流のほかに、新たに自己相シースの渦電流の影響をも考慮に入れた式を Maxwell の電磁界方程式より導出し、従来の Arnold, Dwight らの回路理論より導いた式と比較している。その結果 3 心ケーブル及び単心鉛皮被ケーブルでは従来の式による結果と著しい差はないが、アルミニウム被覆ケーブルでの差は無視できないことを指摘している。

(3) 地中電力ケーブルの大容量化と長距離化に伴う複雑なシース接地回路の損失を評価できる計算式を新たに導出して、実験によりその有効性を示している。

(4) 地中電力ケーブルの受金物及び立金物として使用される L 鋼, [鋼, □パイプ及び電力ケーブル附属品用フランジが、不平等磁界中にある場合の鉄損と温度上昇を評価する計算式を提案して、その実用性を示している。また、電力ケーブル近傍に布設された鋼管の渦電流損の式を示し、鋼管の厚さが表皮厚さの 2.5 倍以下の場合、従来の近似式では正確な評価ができないことを指摘している。

(5) 地中電力ケーブルが布設される洞道や管路の鉄

損について詳細な検討を行っている。通常の開削洞道、コンクリートセグメント洞道及び管路は、鉄筋とコンクリートで形成されているが、鉄筋はメッシュ構造であるため、その中にループ電流損が生じる。このループ電流損は鉄筋メッシュの接続状態で異なり、接続点が溶接の場合とコンクリート固めの場合及びコンクリートなしの場合では、損失の大きさが 100 対 65 対 25 になることを明らかにしている。また、洞道の鉄損は布設する相順によって大きく影響されるが、適当な相順と撚架によって損失を 50% に低減できることを示している。

(6) 地中電力ケーブルの大容量化を可能にするための強制冷却方式の評価を行っている。すなわち実際のケーブル冷却線路の調整所の冷却設備及び通水条件を考慮して、連続負荷時の定常時冷却計算及び短時間負荷時の過渡時冷却計算に関して、それぞれ新しい方法を開発している。さらに、これらを用いて各種ケーブルの長期安定性の検証と実線路への適用法を示している。

以上要するに、本論文は電力ケーブルの導体損と渦電流損に関して、実用されている形状と配置に適用できる新しい計算法を導き、従来無視されていたサイズ効果と近接効果並びに洞道工作物の渦電流損を正確に評価するとともに、これによる温度上昇を抑制するための冷却方式を提案して、地中電力ケーブルの大容量化のための設計の指針を確立したもので、電力工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 安達 哲朗 (山口県)  
 学位記番号 総理工博乙第110号  
 学位授与の日附 平成元年3月20日  
 学位論文題目 BWR 原子力発電プラントの復水  
 浄化用粉状イオン交換樹脂プリ  
 コートフィルタの性能向上に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 藤井 哲  
 (副査) 〃 〃 長谷川 修  
 〃 〃 中塩 文行  
 〃 〃 宮武 修  
 〃 〃 吉田 駿

## 論文内容の要旨

原子力発電プラントでは、運転基数および運転年数の増加に伴い、定期点検に於ける作業者の被曝線量のより一層の低減が望まれている。被曝線量の増大には、原子炉一次冷却水中のクラッドと呼ばれる鉄酸化物を主成分とする放射性腐食生成物が原子炉周辺の機器、配管等に付着、蓄積することが主因となる。

そこで、腐食生成物を除去する粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタが設置され、プラントの低放射能化を図ってきた。

しかしながら、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタには、廃樹脂による廃棄物発生量の低減、除去性能の一層の向上等の課題があった。

従来、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタに関しては、プリコート層を形成する粉状のアニオン、カチオン交換樹脂からなる樹脂フロック性状の初期特性の検討が主体であったが、樹脂フロックはプリコート操作時及びろ過通水時において、ろ過水流動、クラッド捕捉との相互作用等、流体力学、物理化学的要因によりその性状が変化するため、これらの影響に着目する必要がある。

従って、本研究では、クラッド捕捉による樹脂フロックの性状及びプリコート層形成状態の変化から粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタのろ過機構を明らかにし、その結果をもとに、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタの性能向上方法を見だし、実験的に実証したもので、7章より構成されている。

第1章では、原子力発電プラントの現状について触れ、プラントの放射能低減化対策の重要性について述べ、BWR 復水浄化用粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタの課題並びに本研究の目的、意義について述べた。

第2章では、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタの課題に対して、プリコート材として使用する粉状イオン交換樹脂の先ず基本となる樹脂フロック形成の初期特性を把握するため、樹脂フロック比容積を指標として樹脂フロック形成の影響因子、機構を考察した。そして、樹脂フロックの初期特性だけでなく、その経時変化の把握が必要であるとの観点から、粉状イオン交換樹脂の凝集と分散の影響を明らかにし、樹脂フロック形成モデルを提案した。

更に、粉状イオン交換樹脂の物理的、化学的、電気

化学的性状の測定結果に基づき、イオン交換樹脂の粒径、表面積、イオン交換容量及びイオン交換基の解離度を考慮することにより、樹脂フロック比容積の変化の予測を可能にした。

第3章では、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタのプリコート層の厚さ、空隙大きさで代表されるプリコート層性状に密接に関係する樹脂フロック性状の影響を明らかにした。

更に、プリコート層形成時における樹脂フロック性状の経時変化がプリコート層の厚さ、均一性に大きく影響することから、樹脂フロックの再凝集現象、ろ過塔内の流動特性を考察し、均一プリコート層形成のために再凝集現象の抑制にはろ過塔内プリコート樹脂濃度を0.1wt%以下にすること、及び樹脂フロックの均一供給にはろ過塔内上昇流速を樹脂フロックの沈降速度以上保持することが必要であることを見出した。

第4章では、ろ過時におけるプリコート層のクラッド捕捉機構を、プリコート層を形成する樹脂フロックの性状がクラッドと樹脂フロックの相互付着作用により経時変化することに着目して検討した。プリコート層内の鉄分布特性をX線マイクロアナライザで測定すると共に平均空隙半径の経時変化、クラッド除去特性及びろ過差圧上昇特性から、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタのプリコート層のろ過機構を考察した。

その結果、プリコート層の平均空隙半径の経時変化の推定から、ろ過初期、プリコート層の空隙が大きく、クラッド捕捉機構は、プリコート層内部でクラッドがイオン交換樹脂の静電的な力で捕捉されるろ材ろ過が主体で、クラッドの付着に伴いイオン交換樹脂の表面電荷が中和され、樹脂フロックの凝集力が弱まり微細化するためプリコート層の空隙が小さくなり、次第にプリコート層表面でクラッドが捕捉されるケーキろ過に移行することを明らかにした。

更に、ろ材ろ過及びケーキろ過領域におけるそれぞれのろ過差圧上昇を考慮して、プリコート層のクラッドの捕捉に伴うろ過差圧上昇を予測する関係式を導いた。

第5章では、粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタのろ過機構の適正化を目的として、ろ過機構に及ぼす影響因子をろ材ろ過とケーキろ過機構に分け、イオン交換樹脂、装置構造、運用法及び復水水質の面から把握した。

その結果、ろ過差圧上昇の小さいろ材ろ過時間の延

長により、ろ過寿命の延長が図れるステップブリコート法とカルボン酸型カチオン交換樹脂の適用を、また、ブリコート層形成の均一性が改善できるろ過塔構造を開発した。

ステップブリコート法は、ろ過機構がろ材ろ過からケーキろ過へ移行する時期に再度ブリコート操作を行い、ブリコート層の空隙大きさを回復しろ過を継続するものである。

カルボン酸型カチオン交換樹脂は、従来使用されてきたスルホン酸型カチオン交換樹脂に比べ、イオン交換容量が約2倍大きいためクラッドの捕捉に伴うイオン交換樹脂の荷電中和が少なく、ブリコート層の空隙大きさの変化が小さいためろ過時間は延長できる。

改良型ろ過塔構造はろ過塔内にドラフトチューブを設置し、ろ過塔上部においても上昇流速が保持でき、樹脂フロクの均一供給が図れるものである。

第6章では、第5章で得られた粉状イオン交換樹脂フィルタの性能向上のうち、ステップブリコート法とカルボン酸型カチオン交換樹脂の適用について、BWRプラント適用を目的としてプラント復水を用いて行った試験結果及びその効果を評価した。

その結果、ろ過寿命や除去性能の向上により、廃棄物発生量および原子炉クラッド持込み量が現状を1としてそれぞれ、ステップブリコート法で0.6~0.8, 1.0, カルボン酸型カチオン交換樹脂で0.8, 0.5になると評価した。

第7章は本研究の総括である。

## 論文調査の要旨

BWR原子力発電プラントの定期検査時における放射線被曝の主因として、冷却水中のクラッド(CRUD-Choak River Unidentified Deposit)すなわち鉄酸化物を主成分とする放射性腐食生成物の原子炉周辺機器、配管等への付着、堆積が挙げられる。これを防止するために、復水浄化系に粉状イオン交換樹脂ブリコートフィルタを設置し、プラント運転中、常時、クラッドの除去が行われる。従って、発生する放射性廃イオン交換樹脂量の低減には、濾過寿命の延長および除去性能の向上を図る必要がある。

従来、このブリコートフィルタの性能向上に対して、ブリコート材として使用する粉状のアニオン、カチオン交換樹脂の混合時における樹脂フロクの初期の大きさの最適化を主体に検討されてきたが、濾過塔内流

動、樹脂とクラッドの相互作用等、流体力学的および物理化学的な要因によって樹脂フロクの性状が異なることへの考慮が不十分で、実用に当って、有効な結果が得られなかった。

本論文では、クラッド捕捉に基づく樹脂の荷電中和によって生ずるフロクの大きさの変化、それに伴うブリコート層形成状態の変化に着目して、本濾過法の濾過機構を明らかにした。その結果から、新しい濾過技術を開発し、実プラント試験によって、その有効性を評価したもので、主要な成果は次の通りである。

(1) 粉状イオン交換樹脂の凝集と分散が樹脂フロク大きさに及ぼす影響因子(樹脂の粒径、表面積、イオン交換容量およびイオン交換基の解離度)を考慮した樹脂フロク形成モデルを提案した。その結果、樹脂フロクの比容積変化の予測と、最適な粉状イオン交換樹脂の選択を可能とした。

(2) 層の厚さと空隙の大きさとで評価されるブリコート層の形成には、樹脂フロクの大きさ、沈降速度および濾過塔内の水の上昇速度が大きく影響し、沈降速度が小さく、濾過塔内上昇速度が大きいほど均一な層が形成されることを明らかにした。

(3) 濾過塔内における樹脂フロクの大きさの経時変化がブリコート層の厚さと均一性に大きく影響し、経時変化の要因である再凝集現象の抑制には濾過塔内供給液中のブリコート樹脂濃度を0.1wt%以下にすること、および樹脂フロクの均一供給には濾過塔内上昇速度を樹脂フロクの沈降速度以上に保持することが必要であることを明らかにした。

(4) 濾過初期においては、ブリコート層の空隙が大きいため、層内部でクラッドがイオン交換樹脂の静電的な力で捕捉される濾材濾過が主体である。クラッド捕捉に伴いイオン交換樹脂の表面電荷が中和され、樹脂フロクの凝集力の低下と微細化が進み、ブリコート層の空隙が小さくなり、層表面でクラッドを捕捉するケーキ濾過に移行する濾過機構を明らかにした。また、濾材濾過からケーキ濾過へ移行すると急に増大する濾過差圧の経時変化を予測する式も導いた。

(5) イオン交換樹脂の種類、装置の構造、運用法および復水水質の面からフィルタの性能向上を検討し、カルボン酸型カチオン交換樹脂の適用と、ステップブリコート法の採用を提案し、均一ブリコート層形成に有効な濾過塔構造を開発した。すなわち、カルボン酸型カチオン交換樹脂は、従来のスルホン酸型カチオン

交換樹脂に比べて、イオン交換容量が約2倍で、クラッドの捕捉に伴うイオン交換樹脂の荷電中和の影響が少なく、プリコート層の空隙大ききの減少を抑制し濾材濾過時間を延長する。ステッププリコート法は、濾過機構が濾材濾過からケーキ濾過へ移行する時期に再度プリコートし、濾材濾過期間を延長する。改良型濾過塔構造は濾過塔内にドラフトチューブを設置し、均一なプリコート層の形成を図るものである。

(6) ステッププリコート法とカルボン酸型カチオン交換樹脂の適用について、BWRプラント復水を用いて試験を行い、大幅な濾過寿命の延長や除去性能の向上が図れることを実証した。また、改良型濾過塔構造については既にBWRプラントで良好に稼働中である。

以上要するに、本論文は粉状イオン交換樹脂プリコートフィルタの濾過機構を明らかにし、その結果から、フィルタの極めて有効な性能向上法を見だし、実証試験を行ったものであり、熱エネルギーシステム工学の分野に寄与するものである。よって本論文は工学博士の学位論文に値すると認められる。

氏名(本籍) 葉 英 華 (中国(台湾))

学位記番号 総理工博甲第58号

学位授与の日附 平成元年3月27日

学位論文題目 分散強化合金の高温変形機構

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 吉 永 日出男

(副査)           〃           〃 沖 憲 典

                  〃           〃 森 永 健 次

                  〃           〃 吉 田 直 亮

## 論文内容の要旨

金属材料は一般に延性には富むが強度が低いという問題がある。この特性は塑性加工には有利であるが、構造材料として用いる場合には不利である。そのため加工硬化や時効硬化などのいろいろな強化法が開発されているが、高温にも適用できるものは少ない。その数少ない高温での強化法として固溶強化と分散強化がある。固溶強化機構はこれまでの研究でほぼ明らかにされているが、分散強化機構には諸説があり、未だ確定していない。

本研究は、従来の研究結果が不統一である理由を詳細に検討し、その結果に基づいて、モデル分散強化材

として理想的と考えられる共晶 Al-Be 合金、実用材に多い析出型の Al-Mn 合金および固溶強化と分散強化が複合した Al-Mg-Be 合金について、広い温度と応力範囲で高温クリープの実験を行うとともに、転位と分散粒子の相互作用に関する静的および動的観察を行うことにより、従来の結果を含めて統一的に解釈できる強化機構を示したもので、以下の9章より構成される。

第1章では、分散強化合金の高温変形特性と分散強化機構に関する研究の現状および本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、分散強化の2大要因と考えられるオローワン応力とボイド強化応力について、これまでに提案されてきた種々の理論式を比較、検討することにより、最も精度の高いと考えられる理論式を示し、その適用に際しての問題点を述べた。

第3章では、オローワン応力やボイド強化応力の評価のために不可欠な平均粒子間隔等の粒子分散パラメータについて、粒子径の分布を考慮した新しい評価法を示すと同時に、粒子径分布を無視した従来の評価法では平均粒子間隔が著しく過小評価されること、したがって、この間隔に逆比例するオローワン応力やボイド強化応力が著しく過大評価されることを明らかにした。

第4章では、粒子分布の均一性が高く、分散パラメータが温度や時間にほとんど依存せず、分散強化理論との対応を調べるのに理想的な Al-Be 合金について、高温クリープ特性を明らかにした。まず、提案した新しい評価法で分散パラメータを求め、これよりオローワン応力とボイド強化応力を評価して、両者はほぼ等しいことを示した。次に、高温クリープにおいて、変形のしきい応力が明らかに存在することを示した。

また、Be 粒子は Al 母相よりも硬いにもかかわらず、その大きさはボイド強化またはオローワン応力にはほぼ等しいことを見出した。さらに、透過電子顕微鏡観察により、転位と Be 粒子の相互作用は引力型で、転位の応力場は母相と粒子の界面でほぼ完全に消滅(界面緩和)していることを示し、粒子による強化機構は粒子をボイドとみなしたときのボイド強化と同等であることを明らかにした。

第5章では、実用材に多い、析出型の Al-Mn 合金のクリープ特性について述べた。析出型の合金系では温度や時間によって分散パラメータが変化する恐れが

あるため、まず、それぞれの温度における Al<sub>6</sub>Mn の析出量とクリープ前後の分散パラメータを代表的な例について調べ、大きな変化がないことを示した。次に、この合金においても明瞭なしきい応力が存在し、その応力はオローワン応力やボイド強化応力に等しいことを示した。しかし、転位と粒子の相互作用が引力型で、界面緩和もほぼ完全に起きていることから、この合金における強化機構もボイド強化と同等であることを明らかにした。

第 6 章では、Be による分散強化と Mg による固溶強化が複合した Al-Mg-Be 合金について、転位と粒子の相互作用は引力型で、界面緩和もほぼ完全に起きているにもかかわらず、明瞭な変形のしきい応力が現れないことを見出した。その理由について検討し、固溶強化が高ひずみ速度域で大きく、低ひずみ速度域で消失するためであることを示した。

第 7 章では、分散強化機構について本研究で得られた結論と従来の解釈とを対比させ、その食い違いについて考察した。その結果、しきい応力がオローワン応力 (=ボイド強化応力) より低く、局所または一般上昇機構による転位の粒子乗り越えの根拠とされてきた従来の測定結果も、分散パラメータを正しく評価すれば、しきい応力はボイド強化応力とほぼ一致し、ボイド強化機構によって統一的に解釈できることを示した。

第 8 章では、それぞれの合金系について、塑性加工において有用な高ひずみ速度域での変形の状態方程式を示すとともに、変形応力より分散強化分を差し引けば、そのひずみ速度の応力依存性は母相金属のそれと一致することを示した。また、活性化エネルギーの立場から高温変形と拡散の関係について論じた。

第 9 章は本研究の総括である。

## 論文調査の要旨

金属材料は一般に延性に富むが強度が低い。この特性は塑性加工にとっては有利であるが、構造材料として用いる場合には不利である。そのため、加工硬化や時効硬化などのいろいろな強化法が開発されているが、高温にも適用できるものは少ない。その数少ない高温での強化法として固溶強化や分散強化がある。固溶強化機構についてはこれまでの研究でほぼ明らかにされているが、分散強化機構についてはいろいろな説があり、いまだ確定していない。

本研究は、従来の研究結果が不統一である理由を検

討し、その結果に基づいて、モデル分散強化材として理想的と考えられる共晶 Al-Be 合金、実用材料に多い析出型の Al-Mn 合金及び固溶強化と分散強化が複合した Al-Mg-Be 合金について、広い温度と応力範囲で高温クリープの実験を行うとともに、転位と分散粒子の相互作用を透過電子顕微鏡法を用いて静的及び動的に観察することにより、従来の結果も含めて統一的に解釈できる強化機構を追及したもので、以下の結果を得ている。

(1) 転位が粒子の間を通り抜けるときの抵抗であるオローワン応力と、転位の応力場が粒子表面で界面すべりや体拡散により完全に緩和されるときに期待されるボイド強化応力について、従来の理論式の比較検討を行うとともに、これら応力の評価に際して最も重要な平均粒子間隔などの分散パラメータについて、粒子サイズの分布を考慮した新しい評価法を提案し、従来の評価法ではこれらの応力が過大評価されることを明らかにしている。

(2) 粒子分布の均一性が高く、分散パラメータが温度や時間によってほとんど変わらないことから、理論との対応を調べるのに理想的と考えられる共晶 Al-Be 合金について高温クリープ特性を調べ、クリープ速度が急減するしきい応力が存在することを明らかにしている。しかし、転位と Be 粒子との相互作用は引力型で、粒子表面上で転位のひずみコントラストが観察されないことから、しきい応力の発現機構はボイド強化と同等であることを示している。

(3) 実用材料に多い析出型の合金として、Al<sub>6</sub>Mn 粒子を析出する Al-Mn 合金を選び、変形条件による分散パラメータの変化に留意して高温クリープ挙動を調べるとともに、転位と粒子の相互作用を直接観察し、この合金でも高温では明瞭なしきい応力が存在すること、またその発現機構はボイド強化と同等であることを明らかにしている。さらに、粒子サイズの分布が明示されているこれまでの報告について、提案した方法で分散パラメータの再評価を行うと、それらのしきい応力もすべてボイド強化応力と一致し、ボイド強化機構で統一的に解釈できることを示している。

(4) Be 粒子による分散強化と Mg による固溶強化が複合した Al-Mg-Be 合金について同様の実験を行い、転位と粒子の相互作用が引力型であるにもかかわらず、ボイド強化応力付近でのしきい応力が現れないことを見出している。また、その理由について考察し、

高応力域の転位運動によるクリープ変形の速度が固溶強化によって著しく減少するのに対して、低応力域の粒界すべりによる変形が固溶強化の影響をほとんど受けないために、ポイド強化応力を境にして起こるクリープ速度の変化が不明瞭になったものと解釈している。

(5) 定常クリープ速度を温度と応力の関数として与える変形の状態方程式について調べ、特に塑性変形にとって重要な高ひずみ速度領域について、変形応力からしきい応力またはポイド強化応力を差し引けば、ひずみ速度の応力依存性は、上記いずれの合金においても、母相金属または固溶体における依存性と一致することを明らかにしている。また、活性化エネルギーの立場から、高温変形と拡散との関係について論じている。

以上要するに、本論文は分散強化合金の高温変形について、構造材料として使用する際に重要なクリープのしきい応力の発現機構とその評価法、および塑性加工にとって重要な変形の状態方程式を明らかにしたものであって、材料工学及び材料強度学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 米 須 章 (沖縄県)  
 学位記番号 総理工博甲第59号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 リジターノコイルによる大口径  
 ECR プラズマの生成とその特性  
 に関する研究

#### 論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 河 合 良 信  
 (副 査) 〃 〃 赤 崎 正 則  
 〃 〃 伊 藤 智 之  
 〃 〃 渡 辺 征 夫

### 論文内容の要旨

プラズマプロセスを用いた LSI や各種電子材料の製造技術は近年著しい発展を遂げてきた。このプラズマプロセスは効率よくエッチングやデポジションを行なうことが出来るため、現在ではマイクロエレクトロニクスや高分子材料の分野で不可欠の技術として広く用いられている。一方プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) やエッチングにより作られる薄膜

やデバイスの性質は、プラズマの生成法や生成条件に強く依存することが知られている。従って、信頼性の高いプロセス技術を確立するためにはプラズマ発生活の研究が非常に重要である。またデバイスの高集積高性能化と共に大型化が特に最近要求されるようになってきた。このため直径の大きいプラズマ源の開発がプラズマプロセス分野における重要な研究課題となっている。

プラズマプロセス用のプラズマ発生活には種々の放電が利用されているが、高周波放電が、現在実用面で多く用いられている。しかしながら、高周波放電法では、プラズマ密度が低いため成膜速度が遅いこと、放電が一樣に起きないため膜質が均一でないこと、等の欠点が指摘されており、薄膜や基板の大型化には限界がある。

一方、電子サイクロトロン共鳴を利用した ECR プラズマは、低ガス圧で高活性種が多いこと、電子温度が高く、その制御が容易であること、密度が高いこと、等の特長を有しているため、成膜速度が速く、また、緻密性の高い膜が製作できることが知られている。ECR プラズマは、通常導波管や空洞共振器等にマイクロ波を供給し、マイクロ波放電により生成されている。しかしながら、これらの方法は、入射するマイクロ波の周波数によって得られるプラズマの直径が制限されるため、プラズマの大口径化が困難である。

本研究は、リジターノコイルの直径が印加するマイクロ波の周波数に無関係に選択できることに着目して、リジターノコイルにより大口径 ECR プラズマを生成し、その特性を詳細に調べ、考察を行なったものである。

第1章では、プラズマプロセス用 ECR プラズマ源の現状を概観し、本研究の意義と目的を明確にした。

第2章では、ECR によるプラズマの生成・加熱の機構として、ECR 放電と電子サイクロトロン減衰について説明を行なった。

第3章では、リジターノコイルにより ECR プラズマが生成できることを示すため、ミラー磁場中に設置した直径 14cm のリジターノコイルにマイクロ波を印加し、プラズマを生成し、その特性を調べた。得られたプラズマパラメータとしては、電子密度が最大で  $2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度が最大で 20eV、イオン温度が 1~2eV であり、圧力を  $10^{-4}$  torr 以下にすると電子温度が高くなった。これらの結果はリジターノコイルに



より生成されるプラズマが ECR プラズマであることを示している。

第4章では、直径 40cm のリジターノコイルを用いて ECR プラズマの大口径化の実験を行ない、考察を行なった。プラズマパラメータの測定から、電子密度が  $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度が 4~6eV、直径がリジターノコイルの直径とほぼ等しいプラズマが生成されていることが分かった。また、プラズマパラメータの径方向分布の時間推移の詳細な測定、及びリジターノコイル内の電場強度の理論計算から大口径プラズマの生成機構を明らかにした。更に、リジターノコイルで得られるプラズマの最大直径について考察を行なった。

第5章では、直径 14cm の銅製のリジターノコイルにより生成される ECR プラズマ中での不純物の発生機構と輸送について実験を行ない、考察した。不純物とプラズマパラメータの2次元空間分布の測定結果から、中性の銅原子がプラズマ中のイオンによりリジターノコイルからスパッタされ、電子との衝突により電離されることを示した。イオンは、リジターノコイル表面のシースにより加速されるため不純物の発生にはプラズマの空間電位が重要な働きをする事が分かった。更に、以上の結果を用いて求められた不純物の粒子束は実測値とほぼ一致した。また、リジターノコイルの材質を通常使用されている銅よりもスパッタリング収量の低いアルミニウムに替えることにより不純物の発生を大幅に軽減できることを実験的に示した。

第6章では、小口径（直径 9cm）のリジターノコイルを用い、ECR の共鳴点の位置と生成されるプラズマの径方向分布の関係を実験的に明らかにした。共鳴点がリジターノコイルのスリットの中心にある場合、リジターノコイルの内側で様な分布になり、一方、共鳴点がリジターノコイルよりも離れた位置にある場合、リジターノコイルの数倍の直径の様なプラズマが生成できることを示した。

第7章では、各章で得られた結果をまとめ、今後の課題を指摘した。

## 論文調査の要旨

プラズマプロセス技術は効率よくデポジションを行うことが出来るためマイクロエレクトロニクスや高分子材料の分野で不可欠の技術として広く用いられている。これは、プラズマ内に設置された基板表面における化学反応を利用する方法である。従って、得られる

薄膜の膜質や成膜速度はプラズマの特性に強く影響される。最近、デバイスの高集積化と共に大型化が強く要求されている。このため密度が高く、直径の大きいプラズマ源の開発がプラズマプロセスにおける重要な課題となっている。

電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance) を利用した ECR プラズマは、低ガス圧で高活性種が多いこと、電子温度の制御が容易であること、プラズマ密度が高いこと、等の特長を有しており、薄膜の膜質がよく、かつ成膜速度が速いことが知られている。

ECR プラズマは、通常導波管や空洞共振器等にマイクロ波を供給し、マイクロ波放電により生成されている。しかしながら、これら通常の方法では、入射するマイクロ波の周波数によって得られるプラズマの直径が制限されるため、薄膜の大面积化に対応できない。

本論文は、リジターノコイルの直径が印加するマイクロ波の周波数に無関係に選択できることに着目して、リジターノコイルにより大口径 ECR プラズマを生成し、その特性を詳細に研究した結果をまとめたもので、以下の成果を得ている。

1. 電子サイクロトロン共鳴 (ECR) によるプラズマの生成・加熱機構を理論的に解明している。その結果、静磁場中を運動している電子サイクロトロン周波数に等しい周波数を持つ振動電場を印加すると、電子は共鳴し、その速度が時間に比例して増加することを示している。また、波動モデルを用いて電子のサイクロトロン減衰の最適条件を導いている。

2. 単純ミラー磁場装置の一端に直径 14cm のリジターノコイルを設置し、周波数 2.45GHz、出力 1kw のマイクロ波を印加することによりプラズマの生成実験を行っている。まず生成されたプラズマが ECR プラズマであることを確認するためにプラズマパラメータの圧力依存性を詳しく調べている。その結果、圧力が  $10^{-4}$  Torr 以下になると電子温度が高くなることを見出している。このことはリジターノコイルにより生成されプラズマが ECR プラズマであることを示している。また、プラズマパラメータとしては、密度が最大  $2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度が最大 20eV、イオン温度が 1-2eV であり、得られたプラズマがプロセス用プラズマとして適当な値であることを指摘している。

3. 上記の成果をもとに、直径 40cm のリジターノコイルを設計・製作し、ECR プラズマの大口径化に

成功すると共に、その生成機構を明らかにしている。プローブによるプラズマパラメータの測定から、密度が  $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度が 4-6eV、プラズマの直径がほぼ 40cm の ECR プラズマが生成されていることを確かめている。次に、ボックスカー積分器を用いてプラズマパラメータの径方向分布の時間推移を詳細に調べることで、プラズマがリジターノコイル近傍だけでなく、コイル中心付近でも生成されることを見出ししている。また、リジターノコイル内の電場強度の理論解析を行い、電場強度分布が得られたプラズマ密度の分布によく一致していることを示している。

4. リジターノコイルにより生成される ECR プラズマ中の不純物の発生機構と輸送について実験を行っている。直径 14cm の銅製のリジターノコイルにより ECR プラズマを生成し、発生した不純物とプラズマパラメータの 2次元空間分布を測定することにより、不純物の発生機構を説明している。すなわち、リジターノコイル表面のシースで加速されたイオンによってリジターノコイルからスパッタされた中性の銅原子がリジターノコイル近くの電子との衝突により電離されてイオンとなり、磁力線に沿ってプラズマ中心部へ拡散して行くことを示している。また、不純物イオンはリジターノコイルの外側で空間的に不均一な分布をしており、その分布がプラズマ密度の分布とよく一致していることを見出ししている。さらに、リジターノコイルの材質を通常使用されている銅よりもスパッタリング収量の低いアルミニウムに替えることにより不純物の発生を大幅に軽減できることを実験的に確かめている。

5. 直径 9cm の比較的小口径のリジターノコイルを用いて、ECR の共鳴点と生成されるプラズマの径方向分布の関係を詳しく調べている。従来のように共鳴点の位置をリジターノコイルのスリット上に合わせると、リジターノコイルの内側で密度は一樣になるが、外側では容器壁に向かって減少することを確認している。一方、共鳴点の位置をリジターノコイルから離すと、リジターノコイルの内側と外側で同じようにプラズマが生成され、リジターノコイルの数倍の大口径プラズマが得られることを見出ししている。

以上要するに、本論文は、直径の大きいリジターノコイルを設計・製作し、ECR プラズマの大口径化に成功すると共に、プラズマパラメータの空間及び時間推移を詳細に研究することにより大口径プラズマの生

成機構を明らかにしており、プラズマ理工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は、理学博士の学位論文に値するものと認める。

~~~~~

氏名(本籍) 渡辺 英雄(福岡県)  
 学位記番号 総理工博甲第60号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 オーステナイト鋼の照射欠陥挙動  
 に及ぼす添加元素の効果に関する  
 研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 吉田 直亮  
 (副査)       〃       〃 高橋 清  
               〃       〃 蔵元 英一  
               〃       〃 木下 智見

## 論文内容の要旨

核融合炉第一壁の有力候補材料としてオーステナイト系ステンレス鋼の1つである SUS 316 鋼及びその改良鋼が有望視されている。しかしながら、これらのステンレス鋼を第一壁材料として用いるためには、核融合反応で発生する 14MeV 中性子の照射による材料の体積膨張(ボイドスエリング)を抑制することが最も重要な課題である。

従来の研究によれば、このボイドスエリングの抑制には Si, Ti, P などの元素を微量添加する方法が有効であることが知られているがその低減機構の解明には未だ至っていない。また、ステンレス鋼では照射誘起による合金組成の変化や析出物の形成なども知られており、これらにより現象がさらに複雑となることもボイドスエリング低減機構の解明を妨げる原因の1つとなっている。

本論文は、オーステナイト系ステンレス鋼中でのボイドスエリング低減機構の解明を目的とし、微量元素の添加及び析出物の形成の2つの観点からボイドスエリング低減効果の問題を取り上げている。超高圧電子顕微鏡による電子線照射を行うことにより、オーステナイト系ステンレス鋼における点欠陥挙動の基本的な特性を、照射条件を抑制したその場観察実験から明らかにしたもので6章より構成されている。

第1章は緒言であり、本研究の目的と意義について述べた。

第2章は本研究に用いた超高压電子顕微鏡による電子線照射実験及びその解析手法について述べた。

第3章では、Fe-Cr-Ni系三元合金での格子間原子型転位のループの形成に関する基礎的機構を解明した後、単原子で最もボイドスエリングを抑制する効果があると考えられているPの効果に注目して、Fe-Cr-Ni合金中におけるP単原子と照射欠陥（格子間原子及び空孔）との動的過程を追求した。その結果、Fe-Cr-Ni合金（非添加材）中に形成される格子間原子型転位ループの核形成は純金属に比べ非常に遅く、ループ数密度が照射時間に比例して増加する本合金系特有な現象が見いだされた。これは反応速度論を用いた考察から、ループの核となる複格子間原子の形成が抑制されていることに起因するものであること、また、転位ループ飽和密度の照射温度依存性より、Fe-Cr-Ni合金中の格子間原子の移動エネルギーはNi量の変化及びTiの添加には余り依存せず0.9eVであることがわかった。

一方、P単独添加材において、照射中に形成された高密度の格子間原子型の転位ループは反応速度論的な手法を用いることによりマトリックス中に固溶しているPを核として形成されたものであること、また、Pと格子間原子との結合エネルギーは0.5eVであり、両者には強い相互作用があることが明らかとなった。

また、P単独添加材では、空孔型欠陥集合体（転位ループ、SFT）が高温まで安定に存在し、そのため、ボイドスエリングのピーク温度は非添加材に比べ100K程高温側に移動した。この現象は、陽電子消滅寿命測定による空孔の移動特性に関する実験結果より、Pと空孔が相互作用することによって起こる空孔の移動度の低下で説明できた。

第4章では改良型ステンレス鋼の代表的な添加元素であるPとTiとの複合効果について述べている。PとTiとの複合添加材において、照射中に形成された格子間原子型の転位ループは、P単独添加材での結果と同様にマトリックス中に固溶しているPを核として形成されていること、また、複合添加により空孔型欠陥集合体がP単独添加材に比べさらに高温まで安定に存在し、照射誘起によるマトリックスでのNi量の減少及びボイドスエリングが著しく抑制されることが示された。このように、高温領域においても空孔型欠陥集合体が安定に存在する現象は、PとTiとが強く結合することによりPの粒界、転位や自由表面への移動

が阻害され、マトリックス中でのPの減少が抑制されることで説明できた。

第5章では、オーステナイト系ステンレス鋼中で照射誘起により形成されるNi<sub>3</sub>Si（ $\gamma'$ ）析出物の電子線照射下での表面析出現象及び固溶過程を調べるために、系が単純モデル化の容易なNi-Si二次元合金系を用いた。その結果、673K以上の高温領域では、表面近傍での $\gamma'$ 析出物の成長と試料中心付近での析出物の収縮が同時に観察された。また、析出物の収縮が起こるまでの時間（照射量）は表面からの距離に依存して変化し、この $\gamma'$ 析出物の再固溶過程にける深さ依存性は表面析出に伴って形成されたSi希薄領域が拡大し、この希薄領域にある析出物が再固溶することにより説明できた。また、表面近傍に形成されたSi希薄領域にある $\gamma'$ 析出物は界面律速反応により収縮することが示され、析出物の収縮速度の温度依存性より空孔の移動エネルギーが1.0eVであると評価できた。この移動エネルギーは陽電子消滅寿命測定法より得られた値（1.2eV）とほぼ等しく、本モデルの妥当性を説明できた。一方、573K以下の低温領域では、収縮速度の温度依存性は観察されず、 $\gamma'$ 析出物の収縮は主に電子線照射による不規則化により進行することが明らかになった。

第6章では本研究で得られた結果を総括した。

## 論文調査の要旨

核融合炉第一壁の有力候補材料としてオーステナイト系ステンレス鋼の1つであるSUS 316鋼及びその改良鋼が有望視されている。しかしながら、これらのステンレス鋼を第一壁材料として用いるためには、核融合反応で発生する14MeV中性子の照射による体積膨張（ボイドスエリング）を抑制することが最も重要な課題となっている。

従来の研究によれば、このボイドスエリングの抑制にはP、Ti、Siなどの元素を微量添加する方法が有効であること、照射誘起による合金組成の変化や析出物がボイドの形成に大きな影響を与えていること、などが知られている。しかしながら、これらの現象の原子レベルでのメカニズムについては理解が遅れており、半経験的に材料の開発が進められているのが現状である。

本論文は、超高压電子顕微鏡による電子線照射下の316ステンレス鋼のモデル合金における照射欠陥の離

合集散過程を実験、理論の両面から研究することによって、ボイドスエリングに及ぼす微量添加のP、Tiの役割及び析出物の形成・分解過程での照射損傷の役割を格子欠陥論の立場から明らかにしたもので、主な成果は以下の通りである。

(1) まず、基本となるFe-Cr-Ni系三元合金について、電子線照射損傷によって発生した点欠陥から格子間原子型転位ループなどの二次欠陥が形成されるプロセスを詳しく調べている。その結果、照射損傷過程を原子レベルで理解する上で基礎となる空孔や格子間原子の熱移動特性及びそれらの基本的な集合過程を明らかにしている。

(2) 二次欠陥の種類は照射温度に強く依存するとともに相互に強い関連があることを見出している。すなわち、低温では格子間原子型転位ループのみが現れるが空孔の熱移動が可能な温度領域まで昇温すると、それに加え空孔型転位ループと積層欠陥4面体(SFT)が形成される。問題となるボイドは、さらに高温においてこれらの空孔集合体の形成が難しくなり密度が低下した段階で初めて形成される。

(3) 次に、ボイドスエリングを抑制する効果が強いとされているPの役割に着目し、Fe-Cr-Ni合金中に微量に添加したP原子が照射点欠陥の離合集散過程に及ぼす影響を調べている。その結果、Pと格子間原子の間には強い結合相互作用が存在し、そのためマトリックス中に固溶しているPを核として高密度の格子間原子型転位ループが形成されることを明らかにしている。さらにPは空孔をもトラップし、空孔型転位ループやSFTの発生を助けるためボイドの出現温度が非添加材に比べ約100K高温側に移動することを見出している。これらの結果は、格子間原子型転位ループ、空孔型転位ループ及びSFTの形成を促進することによってボイドスエリングが抑制できることを実証したもので、耐照射性の高い材料を設計する上で重要な成果である。

(4) P単独添加材では、マトリックス中のPが700K以上で照射誘起拡散によって結晶粒界等へ偏析するためボイドの抑制効果が失われるが、高温まで効果を保持する巧妙な方法を見出している。すなわち、アンダーサイズ原子であるPに対してオーバーサイズ原子であるTiを配し、両者の強い結合力を利用してマトリックス中にPを固定する。これによってさらに高温までPを核とする空孔型転位ループが発生し、ボ

イドの形成を広い温度領域にわたってほぼ完全に抑制できる。このボイド抑制の原理は、ステンレス鋼に限らず他の合金系にも適用できることが予想されるもので、核融合炉材料の開発にとって極めて貴重な成果である。

(5) オーステナイト系ステンレス鋼中で照射により形成されるNi<sub>3</sub>Si(γ')析出物の電子線照射下での表面析出及び再固溶の現象を調べるために、系が単純でモデル化の容易なNi-Si二元系合金の照射実験を行っている。その結果、673K以上の高温領域では、試料内部より格子間原子によって運ばれたSiが表面でγ'析出物を形成すること、それにともない表面下にSi希薄領域が拡大し、そこでは析出物の再固溶が界面津速反応によって起こることをつきとめている。一方、573K以下の低温領域では、γ'析出物の収縮は主に電子線照射による原子の直接的なはじき出しによる不規則化によって起こることを見いだしている。

以上要するに、本論分はオーステナイト系ステンレス鋼のモデル合金中での照射欠陥の離合集散過程を超高压電子顕微鏡照射法を用いて調べることにより、ボイドなどの二次欠陥の形成過程におけるP、Tiの役割および析出・再固溶現象での照射点欠陥の役割を原子レベルで解明したものである。これらの成果は、核融合炉材料や原子炉材料の開発のみならず格子欠陥論の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 郭 東 周(韓国)  
 学位記番号 総理工博甲第56号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 A Study on the Dielectric Strength of PET and Liquid Nitrogen under Environments of Cryogenic Apparatus  
 (超電導機器環境下のPETと液体窒素の絶縁破壊強度に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤 崎 正 則  
 (副査)     〃     〃 齋 藤 省 吾  
           〃     〃 村 岡 克 紀  
           〃     〃 原     雅 則

## 論文内容の要旨

超電導マグネットの電気絶縁系における構成要素は、真空、気体、液体、及び固体等があげられるが超電導体を固体絶縁スペースで支持し、そのまわりを冷媒極低温液体で満たす方式が1つの有力な絶縁方式として考えられている。この場合、絶縁破壊は固体中、液体中、及びそれらの沿面で起こると予想されるが、いずれの場合にも従来の絶縁物より厳しい環境下で絶縁性能を発揮することが要求される。すなわち、固体絶縁物は極低温下、高電磁応力下、放射線照射条件下及びそれらの複合した環境下で使用される。一方、マグネットのクエンチ時には高い異常電圧の発生とともに熱バブルが形成され、冷媒液体の絶縁性能の大きな低下が予想される。

本論文は、これらの問題と関連して固体絶縁物の破壊強度に及ぼす機械的応力の影響、及び熱バブルが存在するときの冷媒液体の絶縁破壊特性を調べた成果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章では、緒論として本研究課題についての文献レビューを行い、超電導機器絶縁における未解決な問題とそれに対する研究の意義を明確にするとともに、本研究の目的と範囲を記した。

第2章では、超電導マグネットの電気絶縁における諸問題と種々の絶縁物の絶縁破壊現象に関する研究の現状を調べるとともに、これまでに提案された絶縁破壊理論を簡単にまとめた。

第3章では、超電導マグネットコイルの絶縁材として広く用いられる PET フィルムを試料として、直流絶縁強度に及ぼす結晶化度と圧縮応力の影響を調べた。フィルムの電気的及び機械的特性はフィルムの製造過程に強く依存するから、PET フィルムの製造過程について述べるとともに真性絶縁強度を測定するための電極系を提案した。

熱処理時間と温度を変えることによって得られる、異なった結晶化度を持つ二軸延伸 PET フィルムの絶縁強度及び機械的特性を調べ、圧縮応力下におけるフィルムの最適の熱処理時間と温度の条件をもとめるとともに、偏光顕微鏡を用いた試料の結晶の観察から、PET の電気的及び機械的特性と結晶化度の関係についての説明を試みた。

その結果、PET フィルムの直流絶縁強度は圧縮応力とともに増加し、ある応力下で最大値に達し、その

後、徐々に低下すること、最大絶縁強度を示すときの圧縮応力は熱処理温度とともに増加するが、熱処理後の冷却条件には依存しないことを明らかにした。応力がない場合、最大絶縁強度は熱処理温度140℃で得られ、熱処理温度の上昇につれて絶縁強度は低下することを実験で確かめるとともに、これが高い熱処理温度における再結晶化現象によってもたらされることを示した。

第4章では、圧縮応力下における二軸延伸 PET フィルムのインパルス絶縁強度の測定がモールド球対平板電極系を用いて行われた。その結果、絶縁破壊は球電極直下を貫通破壊する場合（正常破壊）と、球電極から沿面放電を經由して破壊する場合（異常破壊）があり、異常破壊は圧縮応力が低いとき起こりやすく、破壊電圧は正常破壊時のそれよりかなり低いことを明らかにした。

一方、破壊までに予備課電電圧があるときの遅れ時間は無い場合のそれより長くなり、破壊電圧も高くなる。また、予備課電がある場合、圧縮応力下での絶縁強度はフィルムの弾性変形領域において直流によるそれより高く、破壊特性は単調減少関数になるが予備課電の影響を排除した場合の破壊特性は直流と同様な特性を示した。これは、破壊以前の予備課電電圧によって形成された空間電荷の作用によるもので、空間電荷の形成は約 5MV/cm の電界から始まることを示した。

一方、圧縮応力下で PET が弾性変形する領域では、PET の絶縁強度の圧縮応力の増加に伴う変化は、自由体積中で電子が加速されると考える電子的破壊機構によるものであることを示した。

第5章では、熱バブルが存在するときの大気圧沸騰状態での液体窒素の交流及びインパルス絶縁破壊特性を調べた。実験には、最近高温超電導線材の開発とともに将来の超電導機器の主冷媒及び絶縁媒体として利用が期待される液体窒素を冷媒として選んだ。なお、直流電界下でのバブルの挙動及び破壊電圧も求め、交流及びインパルスの値と比較した。その結果、液体窒素の沸騰現象は印加電圧の波形に著しく依存することが明らかになった。すなわち、直流電界下でのバブルは印加電圧の上昇とともに成長し、ある電界下でバブルはギャップ間をロックするようになる。これに対し、交流電界下では、バブルの形状が電圧の瞬時値に依存して変化するとともに、それ以前のバブルの変形過程にも関係し、バブルのロックが瞬時的に起こる場合が

多いことを明らかにした。特に、交流での電圧が零になる瞬時のバブルは、それ以前のバブルの振動現象の影響を受けて直流の場合の数十倍の大きさになることを実験で明らかにした。これに対し、雷インパルス電圧印加によるバブルの変化は認められなかった。これらのバブルの電界下における挙動を基礎として、バブル条件下の破壊電圧推定法を提案し、実験値とよくあうことを示した。さらに、インパルス電圧印加の場合、破壊までの遅れ時間の研究から、活発な沸騰現象による液体中での低密度領域の形成が、初期電子の注入を促進して統計遅れを減少させることによって、破壊までの遅れ時間が短くなることを明らかにした。

第6章では、本研究で得られた主な研究成果をまとめて結論とした。

## 論文調査の要旨

最近の高温超電導材料の開発によって、液体窒素(LN<sub>2</sub>)を用いた超電導機器の実用化が期待されている。LN<sub>2</sub>を冷却材とする超電導電気機器の絶縁設計では、絶縁構成が液体のLN<sub>2</sub>とこれに浸された固体絶縁物、及び低温窒素ガスからなる複合絶縁構成になって沿面放電が介在すること、固体絶縁物には大きな電磁応力が印加されること、クエンチ時の異常電圧とLN<sub>2</sub>中のバブルの発生、などの複雑な現象に対する基礎的研究が望まれている。

本研究は、超電導機器の固体絶縁物として期待されている二軸延伸されたポリエチレンテレフタレート(PET)のフィルムの圧縮応力下の絶縁特性と、LN<sub>2</sub>中のバブルの発生とこれが絶縁耐力に及ぼす影響について詳細な検討を行った結果をまとめたもので、以下の成果を得ている。

1) 優れた絶縁特性を有することが知られている二軸延伸PETフィルムに関して、熱処理法と結晶化度の関係、及び圧縮応力下の直流絶縁特性を詳細に検討している。まず、二軸延伸処理のみを受けたPETフィルムを、温度20℃、100℃、140℃、180℃、220℃の恒温液に、それぞれ1分間と60分間浸した後、冷却した試料の結晶化度を比重測定により評価するとともに、結晶組織を偏光顕微鏡により観察している。その結果、結晶化度は熱処理温度が高く熱処理時間が長い程大になるが、時間の効果は温度の影響に比べて著しくないことを見出している。

また、PETフィルムの直流絶縁耐力は、圧縮応力

の増加とともに一旦上昇し、最大絶縁耐力を経て次第に低下する。この最大絶縁耐力を示す圧縮応力の値はPETの結晶化度したがって熱処理温度の上昇とともに増加するが、熱処理後の冷却条件には関係しない。これに対して、応力を受けていないときの絶縁耐力は熱処理温度140℃で最大になり、これ以上温度を上げると却って低下することを見出し、これは高い温度での再結晶化現象に起因すると説明している。

2) 二軸延伸PETフィルムの雷インパルス電圧に対する絶縁耐力の試験を行っている。特別のモールド球対平板電極を考案してインパルス電圧を印加した結果、球電極直下を貫通する正常破壊と、球電極から一旦フィルム表面に沿って数mmの沿面放電を経由した後貫通する異常破壊の二つの破壊形式を見出している。更に、圧縮応力の値が小さいときは正常破壊よりも低い電圧で異常破壊が生じ易いことを見出している。

また、破壊の遅れ時間の測定から、予備課電によって供給された空間電荷が多い程、破壊遅れと破壊電圧の瞬時値が大になること、弾性変形領域の圧縮応力下では、負極性ではインパルス電圧による破壊電圧が直流破壊電圧よりも高くなり得ることなどの新しい現象を見出し、これに対する空間電荷効果の定量的説明に成功している。更に、空間電荷効果を除去した圧縮応力下のPETの弾性変形領域の破壊特性が、自由体積中の電子加速による電子的破壊機構に基づくことを明らかにしている。

3) LN<sub>2</sub>中にバブルが存在するときの直流、交流、及び雷インパルス電圧による絶縁破壊特性を調べている。加熱によって作った小さなバブルは、印加電界の上昇によって成長・変形して破壊に至る。直流ではバブルは印加電圧の上昇に伴って成長して電極間を橋絡して破壊に至るが、交流ではバブルは振動してその大きさは直流印加時の数十倍に成長すること、一方インパルス電圧では変形は認められないことを明らかにしている。いずれの場合も絶縁破壊はバブル中のストリーマから成長するという機構を見出し、バブルの変形過程を考慮した新しいLN<sub>2</sub>の破壊電圧推定法を提案している。

以上要するに、本論文は圧縮応力下でのPETフィルムの絶縁破壊特性と、バブル発生条件下でのLN<sub>2</sub>の絶縁破壊機構を明らかにして、LN<sub>2</sub>を用いた超電導機器の絶縁設計に有用な指針を与えたもので、高電圧

工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 屋我実(沖縄県)  
 学位記番号 総理工博甲第57号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 管内の超音速流れにおける衝撃波の特性に関する研究

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 松尾 一 泰  
 (副査) 〃 〃 長谷川 修  
 〃 〃 小野 信 輔  
 〃 〃 難 破 昌 伸

### 論文内容の要旨

管内の超音速流れが亜音速流れに減速する際に発生する衝撃波は、管内壁に発達する境界層と複雑な干渉を起こす。このような干渉は、超音速あるいは遷音速ディフューザ、ジェットエンジンの空気取入れ口、ガスタイナミックレーザのディフューザ部、高圧プラント配管系における絞りの下流などにおいて起こり、流れ場の不安定性や機器の性能低下あるいは騒音の原因となるため、工学上重要な問題である。

従来の研究によれば、管内において境界層と干渉する衝撃波は、その形状によって、垂直衝撃波、湾曲衝撃波、分枝衝撃波、及び擬似衝撃波に分類される。また遷音速ディフューザのスロート近傍に多く観察される垂直衝撃波は、スロート下流のある平均位置の前後に安定的に振動する衝撃波と、スロート上流まで伝ばする不安定な衝撃波に分けられる。そして管内に発生する衝撃波が上記の四つの形状のいずれになるか、あるいはスロート近傍の垂直衝撃波が安定な衝撃波になるか不安定な衝撃波になるかは、干渉直前のマッハ数や境界層の状態、管路の形状、衝撃波下流の圧力こう配などに依存し、現在まだ分かっていない点が多い。

本論文は、このような観点から、間欠式吹き出し風胴を用い、管内における衝撃波の特性について、干渉点近傍に境界層のパッシブコントロールを適用した場合も含めて実験的に調べるとともに、管内における衝撃波の安定性を理論的に解析したもので、7章より構成されている。

第1章では、この研究の重要性を調べるとともに、

本論文の内容について概説した。

第2章では、管内における衝撃波と境界層の干渉及び境界層のパッシブコントロールが衝撃波に及ぼす影響に関する従来の研究について詳述し、その問題点を明らかにするとともに、本研究の目的を具体的に示した。

第3章は、本研究で用いた実験装置と実験方法についての記述である。実験装置には、間欠式吹き出し風胴の測定部に設置した二次元の互いに相似な円弧ディフューザ、双曲形ディフューザ及び直線壁ディフューザを用い、試験気体には空気を使用した。また衝撃波と境界層の干渉の様子は、シュリーレン法によって可視化し、通常のカメラあるいは高速度カメラに記録すると同時に流れ場の圧力測定も行った。

第4章では、二種類の円弧ディフューザと双曲形ディフューザを用いて、ディフューザ内の流れ場を衝撃波の位置及び形状によって三つのパターンに分類し、それぞれのパターンにおける特徴を明らかにした。その結果円弧ディフューザの場合ディフューザ形状が相似であれば、ディフューザ前後の圧力比と衝撃波の位置の関係は、ディフューザの大きさによらず一つの曲線上にプロットされることが分かった。さらにこの三つのパターンの一つである不安定な流れ場についてより詳細に調べ、衝撃波の挙動、スロート上流やスロートにおける圧力変動及びその伝ば方向などを明らかにした。

第5章では、ディフューザ内に発生する垂直衝撃波とその下流から伝ばする微小圧力変動との干渉を、微小じょう乱法を用い、衝撃波の下流のディフューザ効率を考慮に入れて解析した。その結果、ディフューザ内の垂直衝撃波の挙動は、その直前のマッハ数と衝撃波下流のディフューザ効率に大きく依存することが明らかとなり、衝撃波が不安定になる物理的なメカニズムが解明された。さらにこの解析法によって求めた衝撃波の安定限界曲線は、実験結果とかなり良く一致した。

第6章では、衝撃波が境界層と非常に強く干渉する結果として発生する擬似衝撃波に対し、境界層のパッシブコントロールを適用した場合の影響について実験的に調べた。その結果パッシブコントロールを最も効果的に作用させるための流れ方向の範囲には最適の長さが存在し、この状態では、擬似衝撃波が存在すると考えられる流れ場に衝撃波がほとんど観察されず、シ

ショックレスに近い状態となり、擬似衝撃波特有の中心軸上における波状の静圧分布も、壁面の静圧分布と同じように緩やかに上昇する分布となることが確認された。これにより、クロックが擬似衝撃波の究極の流れモデルとして提案したショックレスモデルの流れが境界層のパッシブコントロールを行うことにより実現し得ることが明らかになった。

第7章は、本論文の結論である。

## 論文調査の要旨

衝撃波を伴う管内の超音速流れは、超音速ノズルや超音速ディフューザ、ジェットエンジンの空気取入口、あるいは高圧プラント配管系におけるバルブの下流など、多くの事例において見られる。このような流れにおける衝撃波は、壁面に発達する境界層と干渉し、流れのマッハ数、境界層の状態、管路の形状などに依存する極めて複雑な流れ場となる。このため、この干渉現象について現在まだよく分かっていない問題点は多く残されており、その解明が望まれている。

本論文は、管内の超音速流れが亜音速に減速される際に生じる衝撃波と境界層の干渉問題に関して、実験的に研究するとともに、理論的に解析した結果をまとめたもので、本論文中に示された主な成果ならびに知見は次の通りである。

(1) 発生する衝撃波が弱い遷音速ディフューザの流れについて実験的に研究し、ディフューザの上流と下流の圧力差によって、スロートのすぐ下流に複数の垂直な衝撃波が形成され、それらが不安定で流れの振動が起こる場合、スロートの下流に安定した1本の垂直衝撃波が形成される場合、及び衝撃波が壁面境界層との干渉により分枝する場合の三つのパターンに分類するとともに、それぞれのパターンの特徴を明らかにしている。

(2) ディフューザ形状が一つの円弧で表される二次元円弧ディフューザにおいては、スロート高さ $h^*$ と円弧の曲率半径 $R$ との比が一定であれば、ディフューザのスロートから衝撃波までの距離を円弧ディフューザの特性長さ $\sqrt{Rh^*}$ で無次元化した値とディフューザ前後の圧力比との関係は、 $R$ や $h^*$ の異なるディフューザに対しても一つの曲線上にプロットされることを理論的に示し、実験的に確認している。

(3) ディフューザ内のスロートの下流に形成される垂直衝撃波とその下流から上流へ伝ばする微小圧力変

動との干渉を、微小じょう乱法を用いて解析し、干渉により、衝撃波がスロート下流のある平均位置の前後に安定的に振動する場合と、スロートの上流まで伝ばする不安定な衝撃波となる場合があることを理論的に明らかにしている。

(4) 前項で述べた衝撃波の安定性は気体の比熱比に依存し、空気など比熱比が1.4の気体では、衝撃波直前の気流マッハ数 $M_1$ が1.48より大きければ、衝撃波は安定であるが、 $M_1$ が1と1.48の間にある衝撃波の安定性は、衝撃波下流の亜音速流れのディフューザ効率 $\eta_{sub}$ に強く依存し、 $M_1$ が小さいほど衝撃波が不安定となる $\eta_{sub}$ の範囲が広がることを明らかにするとともに、衝撃波の安定限界となる $M_1$ を $\eta_{sub}$ の関数として与えており、その結果は実験結果と良く一致することを示している。

(5) 衝撃波が境界層と強く干渉する結果として生じる擬似衝撃波に対し、境界層のパッシブコントロールを適用し、その場合の流れ場を実験的に詳細に調べることによって、境界層のパッシブコントロールが擬似衝撃波の特性に及ぼす影響を明らかにしている。

以上要するに、著者は本論文において、管内における衝撃波が境界層と干渉する現象に関して実験と理論の両面から研究を行い、遷音速ディフューザの流れのパターン、ディフューザ前後の圧力比と衝撃波の挙動との関係、衝撃波が不安定となり流れの振動が起こる条件、及び境界層のパッシブコントロールを適用した場合の擬似衝撃波の特性に関して多くの新知見を得ており、これらの成果は、流動工学上寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 中牟田 浩典(福岡県)  
学位記番号 総理工博甲第61号  
学位授与の日附 平成元年3月27日  
学位論文題目 MHD 燃焼ガスプラズマのレーザ計測法に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤崎 正則

(副査) 〃 〃 松尾 一泰

〃 〃 村岡 克紀

〃 〃 渡辺 征夫



## 論文内容の要旨

オープンサイクル MHD 発電機を火力発電設備の初段に設置すると、50%以上の発電効率が期待できるため、その実用化が急がれている。実用規模の発電チャンネルになると電磁流体力学的相互作用が大きくなり、これによって生じるプラズマパラメータの非一様性と揺らぎは、チャンネルを損傷させる拘束アーク放電の発生原因となるとともに、発電出力の変動を発生させる。従って、この非一様性と揺らぎの性質を理解し、制御する方法を開発する事は、MHD 発電実用化のために重要であり、このためには、現状では先ず発電特性に直接関係するシード原子密度、電子密度、及び導電率等の MHD プラズマパラメータの高精度測定法を開発しておく事が肝要である。

従来、シード原子密度はスペクトル線吸収法で、また、電子密度と導電率は、静電プローブ法や高周波プローブ法等で測定されてきた。しかしながら、これ等の方法は、時間・空間分解能が低く、プラズマを乱す等の欠点を有しており、これ等の短所をもたないレーザー計測法の開発が望まれてきた。原理的にはシード原子密度はレーザー誘起蛍光法により、また、電子密度は遠赤外レーザー干渉法、導電率は遠赤外レーザー透過法により高精度で測定できる可能性がある。しかし、燃焼ガスプラズマにレーザー誘起蛍光法を適用したときの蛍光の吸収と強い背景光の影響、また、大型装置に遠赤外レーザー法を適用する際の測定に及ぼす中性ガスやレーザービームの屈折効果については未だ明らかにされていない。さらに、MHD プラズマ中の揺らぎ現象を解明するという点から、電子密度と導電率の同時測定を行い、その相関を知る方法を開発する事は重要である。本論文は MHD プラズマパラメータのレーザー計測法に関するこれ等の問題点を解決する事を目標としたものであり、6章より成る。

第1章では、MHD 発電開発研究の現状を概観するとともに、これに関連して MHD 発電チャンネル内の燃焼ガスプラズマ計測法開発の必要性を述べ、その問題点を指摘した。

第2章では、本研究で用いた計測法開発用燃焼ガスプラズマ発生装置の詳細を述べた。燃焼ガスプラズマは、水酸化カリウム添加灯油-酸素及び水酸化カリウム添加エタノール-酸素の二種類の燃料を用いて発生し、得られたパラメータは、温度とシード密度に関し

て実際の MHD 発電実験に用いられているものと同程度の値を有する事を明らかにした。

第3章では、定常発振の色素レーザーを用いたレーザー誘起蛍光法による MHD プラズマ中のシード原子密度の揺らぎ測定法の開発のための研究結果について述べている。燃焼ガス中のシード物質であるカリウムの原子密度は、シード物質に不純物として微量存在するナトリウムの原子密度に比例する事が分かっている。そこで、定常発振色素レーザーのビームを音響光学変調器により高速でチョップし、その波長を燃焼ガス中の蛍光吸収の少ないナトリウムの D 線に同調させ、得られた蛍光信号をロックイン増幅器を通すという方法で蛍光強度を測定した。その結果、高い SN 比でチャンネル内のナトリウム原子密度分布とその揺らぎの空間分布、及び、各位置での揺らぎのスペクトル分布が得られる事を明らかにした。

第4章では、燃焼ガスプラズマの電子密度と導電率を高精度で測定するための遠赤外レーザー法について詳細に検討している。遠赤外レーザー法を大型の発電チャンネルに適用する場合、中性ガスによる干渉縞移動とレーザービームの屈折による広がりが無視できなくなる。これ等の効果を小形の装置で明らかにするため、本研究では中性ガスの影響を検出できる程度の小さい干渉縞移動量測定が可能で、かつ複数本の波長が利用できる干渉計を製作した。この干渉計を用いて得られた中性ガスの屈折率は、従来の室温における理論を高温の燃焼ガス状態に拡張する事によってよく説明できる事が明らかとなった。その結果、電子による干渉縞移動数は0.03以内という高精度で測定できるようになり、得られた電子密度は燃焼の化学平衡理論計算値とよく一致した。また、屈折効果について検討するため、プラズマ透過後のレーザービームの半径方向強度分布を測定した結果、レーザービームは、長波長のもの程プラズマ透過後に広がる事が明らかとなった。本研究では、その対策として、レーザービームの半径方向強度分布を積分して透過率を評価する方法を提案した。その結果、得られた導電率は燃焼の化学平衡理論計算値とよく一致した。

第5章では、電子密度と導電率の同時測定法の開発について述べた。遠赤外レーザー法では電子密度と導電率の測定の光学系が異なるため、これ等を同時に測定するためには新しい光学系の開発が必要である。本章では、従来のマイケルソン干渉計に改良を加え、同時

測定が可能な光学系を考案した。この新しい光学系を用いて実験を行い、電子密度と導電率が同時に高精度で測定できる事を実証した。

第6章では、本研究で得られた成果についてまとめ、さらに今後の発展の可能性を示し結論とした。

## 論文調査の要旨

電力需要の増加に伴って高効率・大容量の発電方式の開発が望まれている。化石燃料を使用するオープンサイクル MHD 発電はその一つとして期待されているが、高温の燃焼ガスとそこに含まれるスラグによる発電チャンネルの損傷の軽減と、燃焼ガスプラズマの揺らぎに基づく発電出力の時間的変動の抑制が実用化の課題になっている。前者に対しては、基本的には高温耐熱材料の進歩とスラグの積極的活用が期待がかけられている。一方、後者は電力系統との連携の障害になるので、その低減策が不可欠の研究課題である。しかしながら、従来の MHD 発電の研究は実用化の直接的障害である前者に主眼がおかれ、後者の研究は著しく遅れている。

本研究は、燃焼ガスプラズマ中のシード原子密度、電子密度及び導電率をレーザを用いて高精度で測定するとともに、揺らぎの周波数特性を求める方法の開発を行ったもので、次のような成果を得ている。

1) MHD 発電チャンネル内のシード原子密度の揺らぎを測定するために、レーザ誘起蛍光法 (LIF 法) の適用を行っている。その際 0.1wt% のカリウムをシードした灯油燃焼ガス中に含まれている微量のナトリウム (Na) がカリウムと同じ分布をとることから、Na の D 線を用いた LIF 法による揺らぎ計測を行っている。光源として連続発振アルゴンイオンレーザ励起色素レーザビームを用い、これを音響光学変調器により 10~200kHz でチョップする方法により背景光の大きい燃焼ガスプラズマ中のシード原子密度を高い SN 比で測定している。また、得られた蛍光信号のスペクトル解析を行った結果、スペクトルには特徴的なピークが認められないことから、燃焼ガス中のシード原子は不規則に揺らいでいることを見出している。

2) 電子密度 ( $n_e$ ) の測定に適した遠赤外レーザ干渉法を開発している。燃焼ガスプラズマでは中性粒子特に水分の影響の評価が必要である。電子と中性粒子の屈折率の波長依存性を詳細に検討した結果、 $n_e$  が  $10^{19} \text{m}^{-3}$  程度である MHD プラズマでは、 $80 \mu\text{m}$  以上

の遠赤外線が測定に適していることを見出して、光源として  $\text{CO}_2$  レーザ励起メチルアルコールレーザの  $118.8 \mu\text{m}$ ,  $250.1 \mu\text{m}$  及び  $570.8 \mu\text{m}$  を選定している。また、実用規模の大型 MHD 発電のチャンネルでは、中性ガスによる干渉縞移動量が全干渉縞移動量の 10% に達することを指摘して、中性ガスによる移動量を詳細に評価している。その結果、燃焼ガス中の中性ガスの屈折率は、標準の大気中でのサブミリ~ミリ波に対する実験式を拡張して適用することにより評価できること、及び水分子の回転吸収に起因する屈折率の波長依存性は高温では無視できることを明らかにしている。以上の考察から得られた結果をもとに遠赤外レーザビームを用いた正確な干渉法の開発に成功している。

3) 導電率  $10 \text{Sm}^{-1}$  程度の MHD 燃焼ガスプラズマの導電率の正確な測定を行っている。導電率を透過法による衝突頻度の測定から求めるのに適用可能な波長範囲は、電子密度測定の前記と同様に遠赤外域であることを見出している。また、この程度の波長ではプラズマ透過時に生じるレーザビームの半径の拡大を無視できないことを指摘し、レーザビームの半径方向強度分布を積分して正確な透過率を求める方法を提案している。

4) マイケルソン法による干渉縞測定回路の入射光路に一個のビームスプリッタを追加して、干渉縞移動量と透過率を同時に測定できる方法を開発している。従来の干渉測定では、参照ミラーを移動させて干渉縞移動量を測定する必要があったが、本方法によれば干渉信号と透過光の強度変化から計算によって干渉縞移動量と透過率が求められる。これによって電子密度と導電率の高精度同時測定を行っている。この方法は参照ミラーを移動する必要がなく、再現性が良好で優れた方法である。また、この測定回路の検出器として高速度応答性のショットキーバリアダイオードを用いると、時間的揺らぎの測定が可能となることを指摘している。

以上要するに、本論文はオープンサイクル MHD 発電の燃焼ガスプラズマ中のシード原子密度、電子密度及び導電率とその揺らぎを高い時間・空間分解能で測定するためのレーザ計測法を開発したもので、レーザ工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 宮良明男 (沖縄県)  
 学位記番号 総理工博甲第55号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 非共沸混合冷媒を用いたヒートポンプサイクルの高性能化に関する研究

## 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 藤井 哲  
 (副査) 〃 〃 伊藤 猛 宏  
 〃 〃 吉田 駿  
 〃 〃 今石 宣之

## 論文内容の要旨

1973年および1978年の石油危機以来、石油消費節減のために新エネルギーおよび省エネルギー技術の開発が盛んに行われた。それによって先進国の石油需要はしだいに減少し、現在、石油の需要と供給の関係は安定状態にある。しかし人類が発展するためには、エネルギー需要は必然的に増加させるを得ないであろう。このために、原子力や核融合、自然エネルギーなどを使った新エネルギーの開発が各方面で積極的に行われている。これらの新エネルギーの開発は一層積極的に行う必要があるが、それと同時に、エネルギーを無駄なく有効に使う省エネルギー技術を開発する必要がある。

本論文では、省エネルギー技術の一つとして注目されているヒートポンプの非共沸混合冷媒を用いた高性能化について論述する。

第1章においては従来の研究の調査を行い以下の問題点をまとめた。

(1) 非共沸混合冷媒の使用によるヒートポンプサイクルおよび冷凍サイクルの性能の改善を実機試験およびシミュレーション解析によって明らかにしようとした研究があるが、実験条件および計算条件は、各研究者によって異なっており、適切な性能評価の方法がまだ確立されていない。

(2) 非共沸混合冷媒の管内凝縮に関する研究は始まったばかりで、物質の組合せが少なく、その伝熱特性はまだほとんど解明されていない。また圧力損失については、二重管環状部での凝縮に関する研究が一報あるのみである。

(3) 非共沸混合冷媒の管内沸騰に関する研究は、最近盛んになり、凝縮に比べれば多くの物質の組合せで

実験が行われているが、伝熱特性の解明はまだ十分ではない。また、実験は電気加熱方式がほとんどで、実際に使用される流体加熱によるものがない。圧力損失に関する報告は一報あるのみである。

(4) 内面加工管内における非共沸混合冷媒の凝縮および沸騰の伝熱特性に関する研究は、まだほとんど行われていない。

本論文では以上の問題点をふまえ、非共沸混合冷媒を用いたヒートポンプサイクルの性能評価の方法を確立すること、非共沸混合冷媒の内面溝付き水平管内の凝縮および沸騰における熱伝達および圧力損失の特性を解明することを目的に研究を行った。

第2章では、混合冷媒の熱力学的および輸送的性質の推算方法を説明した。

第3章では、非共沸混合冷媒を用いたヒートポンプサイクルのシミュレーション解析を行い、混合冷媒サイクルの性能評価を行うためには冷媒と熱源流体との熱交換を考慮する必要があることを示した。また、伝熱促進の成績係数向上に及ぼす効果は、混合冷媒を用いた場合の方が純冷媒を用いた場合より大きくなることを示した。

第4章では、水平管内凝縮および沸騰における熱伝達および圧力損失の実験に用いた実験装置および実験方法について説明した。本研究では伝熱管には内面溝付き管を用いた。また、冷媒としては R22 と R114 を用いた。

第5章では、凝縮の実験結果から、非共沸混合冷媒を用いることによって冷媒と熱源水の温度差を管軸方向にほぼ一定に保ち得ることを示した。局所熱伝達係数については純冷媒の平滑水平管内凝縮に関する整理式と比較し、溝による伝熱促進効果で純冷媒の場合に40~80%程度高い熱伝達係数が得られ、混合冷媒の場合にはそれより低い値となることを示した。平均熱伝達係数については藤井・長田の式を参考にして実験式を提案した。圧力損失に関しては、圧力降下の流れ方向変化の特性を組成比ごとに示し、摩擦損失勾配のデータを Lockhart-Martinelli の手法で整理した。

第6章では、沸騰の実験結果から、非共沸混合冷媒を用いることによって、凝縮の場合と同様に、冷媒と熱源水の温度差を管軸方向にほぼ一定に保ち得ることを示した。局所熱伝達係数については、平滑水平管に関する吉田らの式と比較し、溝の効果で純冷媒の場合に90~120%程度高い熱伝達係数が得られ、混合冷媒

の場合にはそれより低い値となることを示した。さらに、実験値を±30%の誤差で整理する実験式を得た。圧力損失に関しては、凝縮の場合と同様に、圧力降下の流れ方向変化の特性を組成比ごとに示し、さらに摩擦損失勾配の特性が凝縮の場合と同様であることを示した。

第7章では、本論文の総括を行った。

## 論文調査の要旨

石油危機の後、省エネルギー対策が国際的に討議された際、ヒートポンプの高性能化が最重点項目としてとりあげられた。爾来その進歩は目ざましく、従来方式の性能は限界に近づきつつある。この限界を越えるために、非共沸混合冷媒の採用が試みられはじめた。一方、成層圏に達した一部のフロンオゾン層破壊が確実視されるようになり、代替フロンの開発が緊急課題となった。非共沸混合冷媒もその候補の一つと考えられている。本論文は、以上の背景の下に、非共沸混合冷媒を用いたヒートポンプサイクルの高性能化の熱工学的研究を行ったものである。

現在使用されているヒートポンプは主として圧縮式ヒートポンプである。それは、圧縮機、凝縮器、膨張弁、蒸発器から構成されるヒートポンプサイクルにより、熱量を低温熱源から高温熱源にくみ上げる装置である。凝縮器と蒸発器において冷媒と熱源流体との間に温度差が存在するのであるが、それらの温度差を冷媒あるいは熱源流体の流れ方向に一定に保つと、サイクルの成績係数が飛躍的に向上するであろうと予想されている。それは、非共沸混合冷媒の相変化の進行とともに平衡温度が変化する特性を利用して実現することができる。

ヒートポンプの性能評価法にはまだ定説がない。しかし、ヒートポンプの目的に従えば、高温熱源の温度、温度上昇、交換熱量及び利用可能な低温熱源の温度が指定されなければならない。この観点に立脚して、著者は混合冷媒 R22+R11 及び R22+R114 について、凝縮器と蒸発器の熱通過係数  $K$  と伝熱面積  $F$  の積をパラメータとして、熱交換を考慮した現実的サイクルの特性の予測を行い、それが考慮されていない従来の理想サイクルと比較している。そして、実際のサイクルは理想サイクルほど成績係数が高くならず、成績係数の混合冷媒の組成依存性が理想サイクルと実際のサイクルとは異なり、最大成績係数があらわれる組成も両

サイクルで著しく異なることを明らかにした。更に純冷媒のサイクルとの比較も行い、FK 値が大きくなるほど、混合冷媒サイクルの優位性が顕著になることを示している。以上の知見は混合冷媒サイクルの性能評価法に重要な貢献をしたものであり、また伝熱促進の重要性をサイクル論から指摘したものである。

次に著者は水平二重管対向流型の凝縮器及び蒸発器における混合冷媒 R22+R114 の熱伝達及び流動抵抗について、冷媒側に内面加工管を用いた場合の実験的研究を行い、以下の諸特性を明らかにしている。

(1) 凝縮器についても蒸発器についても、冷媒の組成、冷媒と熱源流体の流量及び熱交換量の特定の条件の下に、冷媒と熱源流体との温度差を管軸方向にほぼ一定に保った熱交換が可能である。

(2) 混合冷媒の凝縮及び蒸発の局所熱伝達係数は、純冷媒のそれらより低い。そして、それは低冷媒流量の凝縮の場合に顕著である。

(3) ドライアウト点までの局所蒸発熱伝達のデータは、単成分平滑管の場合の吉田らの式に類似の式で整理できる。

(4) 平均凝縮熱伝達のデータは、単成分平滑管について得られた藤井—長田の式の関数形を適用することによって整理できる。

(5) 摩擦圧力損失のデータは、凝縮と蒸発のいずれについても、二相流の Lockhart-Martinelli の方法で整理できる。そして、摩擦圧力損失は単成分平滑管の場合より約40%高い。

要するに本論文は、熱交換を考慮した混合冷媒のヒートポンプサイクルの解析によって性能評価の方法を明らかにするとともに、内面加工管における混合冷媒の凝縮及び蒸発の伝熱・流動特性を実験的に明らかにした最初のものであり、熱エネルギーシステム工学に寄与するところ多大である。よって本論文は工学博士の論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 張 晴 原(中国)  
学位記番号 総理工博甲第62号  
学位授与の日附 平成元年3月27日  
学位論文題目 換気による住宅のパッシブクーリングに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 片山 忠 久

(副査) 九州大学 教授 浦野良美  
 〃 〃 藤井哲  
 〃 〃 中村洋  
 〃 〃 深野徹

## 論文内容の要旨

季節蒸暑地域が大部分の日本では、通風は最もポピュラーな住宅の採涼方法として広く利用されてきた。それにもかかわらず、通風の温熱効果およびそれに基づく省エネルギー効果を定量的に解析した研究は非常に少ない。一方、住宅の床下地表面は日射遮蔽と水分蒸発により、夏季においても低温な面である。したがって、この地表面と接した床下の冷気を換気によって室内に導くことは、採涼の手段として有効であろうと考えられる。

本論文は集合住宅における通風の利用と、戸建住宅における床下冷気の利用に関し、それらのパッシブクーリング効果を、建築計画的な観点から定量的に解析したものであり、「序論」および「総括」を含めて5章から構成されている。

第1章では、研究の目的、関連する既往の研究および本論文の構成について述べた。

第2章では、集合住宅を対象に、その住棟配置計画と通風の温熱効果および省エネルギー効果の関係を明らかにしている。

まず、通風環境下にある実在住戸内で被験者を用いた温熱感覚に関する申告実験を行った。申告値から得られる人体の快適感をASHRAEの標準新有効温度SET\*との関係から検討し、SET\*が26℃以下であれば生理・心理的に快適であることが明らかになった。

次に、住棟配置計画が室内の通風量に及ぼす影響を調べるため、縮率1/400の住棟群模型を使用し、自然風との相似則を考慮した風洞実験を行った。通風の駆動力となる住棟壁面に作用する風圧力を、住棟の高さ、容積率および風向との関係で整理した。

最後に、住戸内に形成される温熱環境を室温変動シミュレーションを用いて解析し、通風による温熱環境の改善および通風の省エネルギー効果を検討した。同シミュレーションでは、多数室の空間相互換気を考慮し、換気量の計算に必要な風圧係数は前述の風洞実験結果を用い、室内の温熱環境はSET\*を用いて表現される。通風の省エネルギー効果は住棟の容積率の増大に伴い低下するが、地域の気候特性との関連が大きい。

札幌、東京および鹿児島島の3地域の解析結果から、札幌ではその効果が非常に小さいが、東京では9~17MJ/dayの省エネルギー量に達し、鹿児島島の約2倍の値となった。

第3章では、床下冷気を換気によって居室に導入するパッシブクーリング手法の可能性を実験的に明らかにした。

まず、戸建住宅の床下を含む地盤の温度分布を、差分法を用いて検討し、床下地表面が夏季の冷熱源として有効であることを確認した。

次に、床下地表面との接触で冷却される空気を居室に導入するパッシブクーリング手法の効果を、2棟の試験家屋による屋外比較実験で明らかにした。試験家屋の1棟は床下冷気を居室へ導入し、他の1棟は密閉または在来の換気を行う。両棟の室温変動について、壁体の断熱性能、窓の透過日射熱取得、換気量等の条件を変化させて検討した。同試験家屋では、夏季昼間に窓による透過日射熱取得がある場合でも、床下冷気の導入により、居室の空気温度を外気温度より2~3℃低下させることができ、同パッシブクーリング手法の有効性を確認した。また、試験家屋についての室温変動シミュレーションによる予測値と実測値との一致から、同シミュレーション法の精度も確認した。

第4章では、床下冷気を利用するパッシブクーリング手法の実在家屋への適応性をシミュレーションにより検討した。

まず、床下地表面の冷却エネルギーを詳細に検討するため、床下空気の温湿度変動を、流れ方向の一定区間で瞬時一様拡散、一次元熱伝導を仮定してモデル化した。同冷却エネルギーは入口空気の温湿度、換気量、流路長さ、地表面の蒸発比および地中温度の組み合わせにより変化するが、福岡に建設されると想定した床下面積32m<sup>2</sup>の戸建住宅では、1800Wの冷却エネルギーが期待できる。

次に、建築面積64m<sup>2</sup>の戸建住宅への床下冷気を利用するパッシブクーリング手法の適用を想定し、同住宅の室温変動シミュレーションを行った。木造の平屋建と2階建、外断熱を有するコンクリート造平屋建などの構造を有する住宅を福岡市内に建設した際、8月上旬の盛夏において、外気温度が35℃近くに達する日も、居室空気温度を30℃以下に保つことができるという結果を得、床下冷気の利用によるパッシブクーリングの実用化の可能性を示唆した。

第5章では、各章で得られた知見をまとめて総括とした。

## 論文調査の要旨

季節蒸暑地域が大部分の日本の住宅においては、夏季に涼しい居住環境を形成することが設計の基本であろう。省エネルギーの観点からは、建物躯体の断熱と日射の遮蔽のみではなく、自然エネルギーの利用による住宅の冷却方法いわゆるパッシブクーリング手法の開発と実用化が重要な課題となる。通風は伝統的かつ有効な対暑方法として位置付けられているが、その温熱効果およびそれに基づく省エネルギー効果を定量的に解析した研究は非常に少ない。一方、戸建住宅の床下地表面は日射遮蔽と水分蒸発により、夏季において他の部位表面に比較して最も低温の面となっており、これに接して冷却される床下の空気を居室に導入することは、室温を外気温以下に維持する手法として期待できる。しかし、その効果を実証的に研究した例はまだない。

本論文は集合住宅における通風の利用と、戸建住宅における換気による床下冷気の利用に関し、それらのパッシブクーリング効果を実験および数値シミュレーションにより解析したものである。

著者はまず、集合住宅を対象とし、通風による室内熱環境の改善と省エネルギー効果に関する解析を行っている。通風時に形成される室内の熱環境を体感の面から評価するために、通風が行われている実在の住戸内で被験者を用いた温熱感覚に関する申告実験を行い、人体の快適感と総合的な熱環境指標である標準新有効温度との関係を調べている。通風量の計算に必要な住棟の壁面風圧に関し、縮率1/400の住棟群模型を用いて風洞実験を行い、住棟の高さ、容積率および風向との関係を求めている。また、多数室の空間相互換気と室内放射伝熱を考慮に入れた室温変動のシミュレーションの妥当性を実測値との比較により確認した後、それを使用して住宅内の熱環境を解析し、通風による省エネルギー量の算出法を提案して定量的な計算を行っている。その結果、通風の省エネルギー効果は住棟の容積率の増大に伴って低下すること、地域の気候特性との関連が大きく、札幌では1~2MJ/day、東京では9~17MJ/day、鹿児島では3~10MJ/dayの省エネルギー量になることなどを明らかにしている。以上の知見は通風計画および住棟配置計画上の重要な指針とな

るものである。

次に著者は、戸建住宅を対象に、床下冷気を換気によって居室に導入する手法を提案し、その効果を2棟の試験家屋による屋外比較実験により調べている。夏季昼間に窓ガラスから透過日射熱取得がある場合、密閉された居室の空気温度が外気温より3~4℃高温になるのに対し、床下冷気を導入することにより居室の空気温度を外気温より2~3℃低下させることに成功している。その時の床下における流入開口と流出開口の空気温度の差から床下地盤の冷却能力を求め、その値は最大100W/m<sup>2</sup>に達するという結果を得ている。

更に著者は、床下冷気を利用する上記手法を実大家屋へ適用した際の効果を、前述の室温変動シミュレーションにより検討している。床下空間を流れる空気の温湿度変動に関し、地盤面からの蒸発潜熱を考慮した計算モデルを作成し、それによる計算値を実測値と比較することによってモデルの妥当性を確認した後、床下地表面の冷却能力およびその影響因子を検討している。この冷却能力は床下空間の換気量や流路の長さなどの建物設計時の計画要素、地域の気候特性および地盤の熱特性により変化するが、福岡市の場合、夏季昼間におけるその値は約60W/m<sup>2</sup>になるという算定結果を得ている。この結果を木造および外断熱コンクリート造の建築面積64m<sup>2</sup>の戸建住宅に適用した場合、外気温度が35℃近くになっても、居室空気温度を30℃以下に保つことができることを指摘している。このことは床下冷気を利用する本手法の実用化の可能性を示唆するものである。

以上要するに本論文は、住宅における通風利用と換気による床下冷気利用のパッシブクーリング効果を実験と数値計算の両面から定量的に明らかにしたもので、熱エネルギーシステム工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 渡部 正治 (福岡県)  
学位記番号 総理工博甲第63号  
学位授与の日附 平成元年3月27日  
学位論文題目 多成分混合気の平板上での凝縮に関する理論的研究  
論文調査委員  
(主査) 九州大学 教授 藤井 哲

(副査)      〃      〃      伊藤 猛 宏  
              〃      〃      宮 武 修  
              〃      〃      吉 田 駿

## 論文内容の要旨

近年、低温度差発電プラント、ヒートポンプおよび冷凍機等の性能向上のため、作動流体として混合冷媒を用いたサイクルが有望視されており、その伝熱特性を把握することは、熱交換器の性能向上および製作コストの低減、さらに、サイクル効率の向上とサイクルの最適設計を図る上で必要不可欠なことである。しかし、多成分混合気の凝縮は単一成分の凝縮と異なり、熱と物質の同時移動現象であり、その特性は十分に解明されていない。

本論文は、多成分混合気の平板上での膜状凝縮に関して、二相境界層理論を用いた解析を行い、その凝縮特性を明らかにすると共に、熱伝達および物質伝達に関する表示式を提案し、凝縮量および伝熱量を簡単に予測するための方法を示したものである。

第1章では、本研究に関連する従来の研究を検討し、その問題点を示し、本研究の意義と目的を明らかにした。

第2章では、2成分混合気の強制対流凝縮および体積力対流凝縮について従来の研究よりも厳密な相似解を数種の具体的な物質の組合せを与えて数値的に求め、諸パラメータが相似解あるいは伝熱特性に及ぼす影響を明らかにした。また、計算結果を式化し、熱伝達および物質伝達を予測（強制対流凝縮では流動抵抗も含む）するための連立代数方程式を提案し、それらの式を用いた解法の手順を例示した。更に、体積力対流凝縮では、2成分混合気の熱と物質の同時移動を伴う自由対流の理論解を取り込むことにより、初めて飽和蒸気および過熱蒸気の両方を取り扱える式を導出した。

第3章では3成分混合気の体積力対流凝縮に関するメタノール+エタノール+水混合気の凝縮について厳密な相似解を数値的に求めた。その際、直交交換により濃度方程式を線形化した。この線形化法は相似解を解く上でも、また無次元の表示式を導出する上でも、有効な方法であることを示した。更に、濃度差に基づく浮力と温度差に基づく浮力の相互干渉が熱伝達と物質伝達に及ぼす影響を明らかにするために、先ず3成分混合気の熱と物質の同時移動を伴う自由対流に関する相似解を数値的に解いた。次に、3成分混合気

の自由対流における物質伝達係数および熱伝達係数の近似式を導出した。また、これらの式を多成分混合気へ拡張した式を提案した。最後に、3成分混合気の自由対流における物質伝達係数および熱伝達係数の近似式を基に、3成分混合気の体積力対流凝縮の凝縮特性を予測するための連立代数方程式を提案し、解法の手順を例示した。

第4章では、第2章および第3章で得られた2成分混合気の強制対流凝縮および2、3成分混合気の体積力対流凝縮に関する熱伝達と物質伝達を予測するための連立代数方程式の特性を示した。すなわち、強制対流凝縮では、第3章で用いた濃度方程式の直交交換の考えにより多成分混合気の凝縮へ拡張した連立代数式の提案および不凝縮ガスを含む場合の2成分混合気、過熱純蒸気、飽和純蒸気および単相の強制対流への式の導出を示した。また、変換した代数式を用いて、伝熱量と凝縮量に及ぼす飽和純蒸気の液膜内の対流の影響および過熱純蒸気の過熱度の影響を明らかにした。更に、2成分混合気の凝縮に関してはエタノール+水系、R114+R11系および空気+水系を計算例とし、熱伝達係数の低下と周囲蒸気濃度および温度差の関係を示した。また、他の研究者による予測法との比較を行い、計算結果の精度および計算手順の上で、提案した予測法の優位性を確認した。

体積力対流凝縮に対しても同様に、多成分混合気の凝縮へ拡張した連立代数式の提案および不凝縮ガスを含む場合の2成分混合気、過熱純蒸気、飽和純蒸気、多成分混合気の自由対流および単一成分の自由対流への式の変換を示した。また、代数式を用いて過熱純蒸気の凝縮の伝熱量および凝縮量に及ぼす過熱度の影響を明らかにした。更に、2成分混合気の凝縮に関して、エタノール+水系、R114+R11系および空気+水系を、3成分混合気の体積力対流凝縮に関してメタノール+エタノール+水系をそれぞれ計算例として、熱伝達係数の低下と周囲蒸気濃度および温度差の関係を表した。また、3成分混合気の体積力対流凝縮の伝熱特性の予測に関して浮力の取り扱いを検討し、浮力の相互干渉が無視できないことを示した。

第5章では、総括を行った。

## 論文調査の要旨

各種の化学装置における多成分混合気の凝縮問題はケースバイケースの実験によって、あるいは非常に単

純化されたモデルに基づく理論によって解決されてきた。最近、小温度差発電やヒートポンプへの混合媒体の採用が有望視されるようになり、それらの凝縮器の設計および媒体の選択のために、一層高精度でかつ一般的な伝熱特性の知識が要求されている。平板上の凝縮の研究は、この種の問題の解明に適した最も基本的なものである。本論文は混合気体が平板上で強制対流凝縮する場合および体積力対流凝縮する場合を二相境界層理論によって解明し、高精度でかつ簡便な実用的計算法を提案したものである。主な成果は次のとおりである。

(1) 二成分混合気に関して、数種の物質の組合せについて高精度の数値解を求めた。更に $\rho\mu$ 比、無次元比熱差、プラントル数、シュミット数、相変換数等の物性値パラメータの影響を明らかにするために、仮想的物質の組合せについての数値解を追加し、熱伝達および物質伝達に関するそれらの解の境界値の特性を式化した。これらの特性式には液膜内の対流、気相境界層のエネルギー方程式に現れる拡散項および蒸気の過熱の諸影響が正確に表現されている。また体積力対流凝縮の場合についてはグラスホフ数に含まれる浮力に及ぼす濃度と温度の相互作用の影響が正確に表現されている。更にこれらの特性式から単成分の飽和蒸気と過熱蒸気の凝縮特性および単相の熱および物質伝達の特性をも導くことができる。

(2) 三成分混合気については、まず濃度に関する二つの基礎式の拡散係数を含む項を線形化し、それらを相似変換して得られた連立常微分方程式を更にそれぞれ独立の常微分方程式に直交変換し、二成分混合気の数値解析で得られた境界値を適用して、三成分混合気の凝縮の特性式を作成した。体積力対流凝縮についてはメタノール+エタノール+水の混合気の相似解を求め、上述の特性式が正しいことを確認するとともに温度と濃度の相互作用を的確に表現することができるグラスホフ数を見出した。

(3) 二成分混合気から三成分混合気への拡張の考えを多成分混合気へ適用して、その特性式を示した。

(4) 熱伝達と物質伝達の特性式および相平衡の式を連立的に解くと、熱流束、凝縮質量流束および気液界面状態が求まるが、本論文で得られた式によれば誤差は相似解の2~3%である。従って、本論文の結果は凝縮装置の設計のみならず実験結果の整理に有効である。

以上要するに、本論文は、凝縮伝熱現象の最も基本的な問題である多成分混合気が平板上で強制対流凝縮する場合および体積力対流凝縮する場合について、高精度の数値解を求め、それを式化して無次元パラメータの影響を明確にするとともに、実用に便利な熱流束および凝縮質量流束の算出法を示したものであり、熱エネルギーシステム工学上価値ある業績である。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 玄 容 翊(韓国)  
 学位記番号 総理工博甲第64号  
 学位授与の日附 平成元年3月27日  
 学位論文題目 可変ノズル式ラジアルタービンの研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 速水 洋  
 (副査) 〃 〃 本田 博 司  
 〃 〃 松尾 一 泰  
 〃 〃 井上 雅 弘

## 論文内容の要旨

ラジアルタービンは小型ガスタービンや自動車用ターボチャージャーなどに広く使用されている。これらのタービンのノズルを可変式にすれば広流量域で高効率を得られ、部分負荷特性や加速特性が大いに改善できる。しかしながら、ノズルの翼端とケーシングとの間にはすきまができるので、そのすきまからの漏れによる性能低下が大きな問題となる。一方、タービンロータの設計に際してはロータへの流入状態を正しく予測することが不可欠であるから、すきまによってノズル出口における速度分布の歪みの状態がどのように変化するかなど流動状態の変化を解明しておくことが必要である。

翼端すきまと翼幅の比(すきま比)が大きいラジアルタービン用の可変ノズルの場合には特に、翼端すきまが性能に及ぼす影響は大きい。それらを調べたほとんどの研究では、タービンロータと組み合わせて得られる段効率のノズル翼端すきまによる低下量に主眼がおかれており、ノズル出口の流れ状態、ノズル特性およびノズル負荷分布などの変化を詳細に調べた報告は見当たらない。

本論文は、ラジアルタービンの可変ノズル翼端すき



まを通る漏れ流れ挙動を解明し、漏れ流れとノズル特性およびタービン特性との関係を明らかにしたもので7章より構成されている。

第1章では、ラジアルタービンに関する従来の研究を紹介し、問題点を示して、本研究の目的を述べた。

第2章では、実験装置および計測方法について述べた。ノズル角およびノズル翼端すきま寸法が任意に設定でき、かつノズル単体の実験あるいはロータと組み合わせた実験が簡単にできる実験装置を用いた。計測方法については、特に、ノズル出口の旋回強さの測定精度を確認するために、ノズル出口の速度分布、ノズルに働く反力、ノズル下流の半径方向圧力分布、および流出する流れが羽根車を駆動するモーメントの互いに独立な4種類により測定し、いずれの方法を用いてもノズル出口の旋回強さを高精度で計測できることを示した。

第3章では、可変ノズル単体の場合について、ノズル設定角と翼端すきまの組み合わせを15通り変えた一連の実験を行い、ノズル出口の流動状態やノズル特性が変化する様相を詳細に調べた。その結果、ノズル出口の流動状態はすきまを通る漏れ流れが巻き上がってできる翼端うず支配され三次元的で著しく歪んでいること、そのうずの影響が直接及ぶ領域はノズルすきまと共に広がるが、うずの強さはそれほど変化しないことを明らかにした。さらに、すきま比の増加はノズル出口流れの旋回強さの減少と全圧損失係数の増大となって現われ、この傾向は翼負荷の増大と共に顕著となることを示した。

第4章では、翼端すきまを変えた場合にノズルにかかる負荷が変化する様子を、ノズル翼面圧力分布およびスパン方向圧力分布を測定して調べた。その結果、すきまからの漏れによって翼の有効長さが減少すること、および一部の流れはノズル作用を受けずに翼端すきま部を通ると見なされることが判明したので、ノズル通路を翼列部を通る流れとすきまを通り抜ける流れの二つの層に分けた二層モデルを提案し、漏れ流れによる翼端付近の翼負荷の減少量を漏れ流れの縮流係数と関連づけた。さらに、ノズル出口で二つの層の流れは混合して一様になるとして取り扱うことによって、ノズル設定角およびすきま比が広い範囲に変化する場合においても、平均流出角および圧力損失が精度よく予測できることを示した。

第5章では、ノズル翼端すきまを通る漏れ流れによ

るロータ入口速度分布歪みがロータ性能に及ぼす影響を調べる目的で、翼端すきまがない場合と翼端すきまがロータのハブ側あるいはシュラウド側にある場合の3種類の流入速度分布歪みの場合について、翼数20枚と従来の設計法での推奨値よりも少ない翼数10枚のタービンロータを用いて特性試験を行った。その結果、翼負荷が適切な翼数20枚のロータの場合には、流入速度分布歪みによる影響がロータ性能にほとんど及ばないので、従来の一次元ロータ性能予測法が適用できること、一方、翼負荷が大きな10枚翼ロータの場合には、ロータ入口の速度分布歪みはロータ性能に著しい影響を及ぼし、ロータ性能は予測よりもはるかに低下することを示した。

第6章では、ノズル翼端すきまによってロータへの流入速度分布は歪むが、流れはロータに流入する前に混合されるとして、ノズル部については二層モデルを、またロータ部については従来の一次元ロータ性能予測法を用いてタービン特性を予測する方法を導いた。一方、ノズル翼端すきま比およびロータ回転数を種々変えて実験を行い、予測結果と比較した。その結果、本実験のすきま比の範囲内では、正規負荷ばかりでなく部分負荷においても、実用的に差し支えない程度の精度で予測できることを示した。

第7章では、本論文の総括を行った。

## 論文調査の要旨

小型ガスタービンや自動車用ターボチャージャーなどに広く使用されているラジアルタービンでは、負荷変動に応じて広い流量範囲での運転が要求される。すなわち、部分負荷特性の改善は、省エネルギーの観点から、高効率化とともに重要な課題の一つである。その対策として種々の方法が試みられているが、その一つの方法は、タービンロータの上流にあるノズル翼の設定角を負荷に応じて変えることである。しかしこの場合には、ノズルの翼端とケーシングとの間にはすきまを設けざるをえないし、すきま比(翼端すきまと翼幅の比)が小さくないので、すきまを通る漏れ流れによるタービンの性能低下が問題となる。従来、このすきまによるタービン段効率の低下量のみが注目されてきたが、タービンの設計に際しては、ロータへの流入状態がすきまによってどう変化するかなどを解明しておくことが必要である。

本論文は、可変ノズル式ラジアルタービンのノズル

翼端すきまを通る流れの挙動を調べ、流れとノズル特性およびタービン特性との関係について検討を行ったもので、本研究で示された特色ある結果ならびに知見は以下の通りである。

(1) ノズル単体の場合について、翼端すきまおよびノズル設定角を種々変化させてノズル出口の流動状態を3孔プローブを用いて詳細に計測して、全圧、速度、流れ角の断面分布およびノズル翼ピッチ間平均の翼幅方向分布を示し、流れが巻き上がり、その結果生じる翼端うずによって速度分布が著しく歪むこと、うずの影響が及ぶ範囲はすきまとともに広がるがうずの強さはそれほど変化しないことなどを明らかにしている。さらに、すきまの増加とともに、ノズル出口の旋回強さは減少し全圧損失係数は増大すること、その傾向は翼負荷の増大とともに顕著になることを明らかにしている。

(2) ノズル出口の旋回強さを評価するために、速度分布、ノズルに働く反力、下流の半径方向圧力分布、および流出する流れがロータを駆動するモーメントを互いに独立に測定し、それから算出される値を比較検討することにより、信頼性の高いデータを得ることに成功している。

(3) ノズル翼の翼面圧力分布および翼幅方向圧力分布のすきまによる変化を調べ、流れによって翼端付近の負荷が軽減される現象を、翼の有効幅と縮流係数の概念を用いて説明し、すきまを含むノズル通路を二つに分けた二層モデルを提案している。さらに、このモデルに基づく理論計算を行い、すきま比およびノズル設定角が広い範囲に変化する場合においても、平均流出角や圧力損失などのノズル特性が精度よく予測できることを示し、モデルの有用性を明らかにしている。

(4) ロータ入口速度分布歪みのロータ性能への影響について、翼数が20枚と10枚のロータをノズルと組み合わせた実験を行い、翼数20枚で翼負荷が適切な場合には、入口速度分布歪みの影響はほとんどないこと、一方、ロータ翼数が10枚で翼負荷が大きい場合には、入口速度分布歪みの影響は大きく、ロータ性能は予測よりもはるかに低下することを見出している。

(5) 著者が提案した二層モデルによるノズル性能予測法を、従来の一次元ロータ性能予測法と組み合わせて、タービン特性を予測する方法を提案している。本方法による予測値を、翼数20枚のロータについての実験結

果と比較し、本方法が部分負荷運転状態においても実用的な精度で十分適用できることを示している。

以上要するに本論文は、可変ノズル式ラジアルタービンのノズル翼端すきまの影響について、すきま比やノズル設定角などの因子を広範囲に変えて実験を行い、流動状態、ノズル特性およびタービン特性の変化を明らかにするとともに、新しい二層モデルを基礎とする特性予測法を提案し、実験結果との比較によってその有用性を検討したもので、多くの知見を得ており、熱エネルギーシステム工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 岩下寛之(大分県)

学位記番号 総理工博甲第65号

学位授与の日附 平成元年3月27日

学位論文題目 円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 宮武 修

(副査) 〃 〃 藤井 哲

〃 〃 伊藤 猛 宏

〃 〃 吉田 駿

## 論文内容の要旨

本研究は、円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達、すなわち円柱群とその間隙を軸方向に流れる流体との間の層流熱伝達について、未だ解明されていない軸方向に変化する熱伝達特性に関する知見を得ることを目的として行ったものである。

従来から、原子炉燃料棒の冷却等に関連して、円柱群間隙軸方向流の乱流熱伝達についての研究は数多くなされているが、層流熱伝達についてはほとんど研究されておらず、円柱群が軸方向に一樣壁面熱流束に保たれ、なおかつ円柱群が十分長い場合に限定された漸近的な熱伝達特性が提出されているだけであった。

円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達は一つの基本熱伝達系と考えられ、多管型熱交換器や蓄熱装置等の実用装置に類似熱伝達系が多々あり、それらの実用装置の設計に際して、軸方向に変化する熱伝達特性に関する知見は不可欠なものである。

本論文は円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関して行った理論的実験的研究の結果について述べたもので

あり、以下の6章から構成されている。

第1章は緒論であり、円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関する従来の研究について紹介した。そして、この熱伝達系について軸方向に変化する熱伝達特性を解明した研究がないことを示し、本研究の目的と意義を述べた。

第2章では、三角形配列円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関して、円柱群が周方向及び軸方向共に一様壁面温度の場合ならびに一様壁面熱流束の場合について数値解析を行い、その結果を詳細に検討した。数値解析は有限差分法を用いて行い、種々の円柱間隔比（円柱間距離と円柱直径の比） $\sigma$ をもって配置された円柱群に対して、局所ヌセルト数  $Nu_{loc}$  と局所グレッツ数  $Gz_{loc}$  の関係、対数平均ヌセルト数  $Nu_{lm}$  とグレッツ数  $Gz$  の関係（一様壁面温度の場合）などを求めた。その結果、 $\sigma$  が小さくなるにつれて熱伝達は促進されるが、 $\sigma$  が1.1~1.2以下になると熱伝達はかえって劣化することを見いだした。さらに、利用に簡便なように  $Nu_{loc}$  を  $Gz_{loc}$  と  $\sigma$  の関数、 $Nu_{lm}$  を  $Gz$  と  $\sigma$  の関数（一様壁面温度の場合）として式化した。

第3章では、第2章で行った解析と同様に、正方形配列円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関し、周方向及び軸方向共に一様壁面温度の場合ならびに一様壁面熱流束の場合について数値解析を行い、その結果を詳細に検討した。数値解析は有限差分法を用いて行い、種々の円柱間隔比  $\sigma$  をもって配置された円柱群に対して、局所ヌセルト数  $Nu_{loc}$  と局所グレッツ数  $Gz_{loc}$  の関係、対数平均ヌセルト数  $Nu_{lm}$  とグレッツ数  $Gz$  の関係（一様壁面温度の場合）などを求めた。正方形配列の場合も、三角形配列の場合と同様に、 $\sigma$  が小さくなるにつれて熱伝達は促進されるが、 $\sigma$  が1.2~1.5以下になると熱伝達は劣化することを見いだした。さらに、利用に簡便なように、 $Nu_{loc}$  を  $Gz_{loc}$  と  $\sigma$  の関数、 $Nu_{lm}$  を  $Gz$  と  $\sigma$  の関数（一様壁面温度の場合）として式化した。

第4章においては、第2章、第3章で提出した数値解析結果を基に、円柱群の配列の違いによる熱伝達特性の差異を詳細に比較検討した。その結果、円柱群が一様壁面温度の場合、所定空間内に同数の円柱が充填されている状態、すなわち、同じ円柱充填率  $\epsilon$  では三角形配列の方が伝熱上有利であることがわかった。しかし、 $\epsilon$  が小さくなるにつれて、配列による伝熱上の差は小さくなり、円柱群間隙の入口付近における漸近

ヌセルト数  $Nu_{loc,0}$ 、 $Nu_{lm,0}$  については  $\epsilon < 0.5$ 、円柱群間隙の十分下流における漸近ヌセルト数  $Nu_{loc,\infty}$ 、 $Nu_{lm,\infty}$  については  $\epsilon < 0.1$  になると配列の差異はないとみなしてよいことを示した。また、円柱群が一様壁面熱流束の場合についても、一様壁面温度の場合と同じ特徴を示すことがわかった。

さらに、Bejan が提出している相当直径を用いたヌセルト数の予測法を適用して検討を行ったが、本熱伝達系の場合には、漸近局所ヌセルト数に限定しても、相当直径を用いて予測できないことを示した。これは、特に三角形配列の場合においてより大きい誤差をもたらす。

第5章においては、三角形配列及び正方形配列円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関し、第2章、第3章で行った数値解析結果の妥当性を検証するために、円柱群が周方向及び軸方向共に一様壁面温度の場合について実験を行った。実験は、三角形配列及び正方形配列の円柱群が接触した状態を模擬して行い、一様壁面温度の円管内熱伝達に対して Sieder-Tate が導いた流体の粘度変化の補正を適用すれば、対数平均ヌセルト数  $Nu_{lm}$  とグレッツ数  $Gz$  の実験結果は数値解析結果と良好に一致することを示した。

第6章は総括であり、本研究で明らかになったことをまとめた。

## 論文調査の要旨

円柱群間隙軸方向流の熱伝達、すなわち円柱群とその間隙を軸方向に流れる流体ととの間の熱伝達に関する研究は、主に原子炉燃料棒の冷却に関連して、殆どが乱流熱伝達を対象に行われている。層流熱伝達については、三角形配列円柱群の壁面熱流束が軸方向に一様である場合のみについて、しかも十分に長い円柱群の下流領域に限って適用できる漸近温度分布および漸近局所ヌセルト数がこれまでに提出されているだけであった。

円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達は、高粘性流体を取り扱う多管型熱交換器、管外流速を低く抑える大型プラスチック多管型熱交換器、円柱群蓄熱体を用いる潜熱蓄熱器などでよく遭遇するものであり、基本的な熱伝達系の一つと考えられるが、軸方向に変化するその熱伝達特性に関する知見が皆無であったため、管長（円柱長さ）と流体温度上昇の関係の予測、所要伝熱面積の算定などが不可能であり、装置設計の面で支障

があった。

本論文は、この問題を解決するために、円柱群の配列と円柱壁面での温度境界条件を (1) 三角形配列で一様壁面温度, (2) 三角形配列で一様壁面熱流束, (3) 正方形配列で一様壁面温度, (4) 正方形配列で一様壁面熱流束の合計 4 通りに変えた場合について、円柱群間隙軸方向流の軸方向に変化する層流熱伝達特性に関する知見を初めて与えたものである。

著者は先ず、上記 4 通りの場合のそれぞれについて、円柱間距離と円柱直径の比で定義した円柱間隔比と、軸方向距離 (円柱長さ) および円柱 1 本当りの流体流量が関与した無次元数であるグレッツ数を、関心のある領域をすべて網羅する広い範囲に変え、反復を伴う前進・陰解法を用いて差分化したエネルギー方程式を解き、円柱群間隙流路断面にわたる温度分布、円柱直径を代表長さにとって定義した局所ヌセルト数と平均ヌセルト数 (一様壁面温度の場合) の数値解を得ている。その結果から、円柱間隔比が小さくなるにつれて、円柱群間隙の流路断面積が減少し、円柱壁面における速度勾配が増大するので、熱伝達は一旦促進されること、しかし間隔比がある値より小さくなると、円柱が互いに接近した部分の円柱壁面における速度勾配が減少し、その部分で流体の温度も上昇する (特に一様壁面熱流束の場合) ので、熱伝達がかえって劣化してくることなどの特異的な熱伝達特性を明らかにしている。

ついで著者は、上記 4 通りの場合のそれぞれの数値解析結果から、グレッツ数の大きい場合と小さい場合の両極限における漸近ヌセルト数を円柱間隔比の関数として式化し、それら両漸近ヌセルト数の式を滑らかに結び、かつ特異的な熱伝達特性を表現する形で、局所ヌセルト数および平均ヌセルト数を予測するのに適した近似式を円柱間隔比とグレッツ数の関数として導出している。これらの式は、数値解析結果の簡便な利用を可能にしたもので、装置設計において極めて有用な資料となる。

さらに著者は、一様壁面温度、一様壁面熱流束のそれぞれの場合について、三角形配列と正方形配列の熱伝達特性上の差異について詳細に比較検討し、円柱充填率が同一の条件下では一般的に三角形配列の方が熱伝達上有利であるが、円柱充填率が小さくなるにつれてその差異は小さくなり、円柱充填率が 0.5 以下になると本質的な差異はないことを明らかにしている。また、Bejan が提唱している相当直径を用いたヌセルト

数の予測法を円柱群間隙流の場合について検討し、相当直径を適用してヌセルト数を予測することは一般的には不可能であることなども明らかにしている。

最後に著者は、三角形配列および正方形配列の円柱群が互いに接触した場合に形成される間隙と同一の流路断面形状をもつダクトを用い、一様壁面温度の密充填円柱を模擬した場合の円柱群間隙軸方向流の層流熱伝達に関する実験を行っている。ダクトの口径と長さを変え、流体流れの方向を上昇流と下降流に変えて実測した平均ヌセルト数は、粘度の温度依存性と自然対流の影響を考慮すると、数値解析結果および導出した近似式とよく一致することを示し、数値解析結果と近似式の妥当性を実験的に検証している。

以上要するに本論文は、種々の円柱群の配列、間隔、壁面境界条件のもとで、円柱群とその間隙を軸方向に流れる流体との間の層流熱伝達を数値解析することにより、軸方向に変化する熱伝達特性について多くの有用な知見を提出するとともに、ヌセルト数の無次元近似式を導出し、実験的検証を加えたものであり、熱エネルギーシステム工学の分野に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値すると認められる。

氏名 (本籍) 酒井 浩 (熊本県)  
 学位記番号 総理工博甲第66号  
 学位授与の日附 平成元年 3月27日  
 学位論文題目 Studies on Knowledge Bases with Incomplete Information  
 (不完全情報を含む知識ベースの研究)

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 有川 節 夫  
 (副査) 〃 〃 浅野 長一郎  
 〃 〃 〃 日高 達  
 〃 〃 〃 藤野 精 一

#### 論文内容の要旨

より知的で融通性のある質問応答方式を計算機システム上に実現し、広く利用できるようにしていくことは人工知能や知識情報処理研究の大きな課題である。今日における知識システムは、演繹推論を主とした推論機能を持ち、問題解決や意志決定支援等を行う。こ

の枠組みは、融通性のあるシステム実現に大きな役割を果たしている。しかし、現在の演繹推論においては、対象とする知識に完全性が要求されている。このために、知識ベースに取り込める知識に制約が付くという新たな問題が生じる。ある程度の不完全な情報も知識ベースに取り込めて、かつ、利用できる推論系や検索機能の研究が今後の知識ベース研究には重要である。このような観点から、主に次の2課題について研究を行った。

- (1) 不完全な知識に基づく質問応答方式
- (2) 知的な情報検索方式

本論文は、上記2課題に関する研究をまとめたもので、7章から構成されている。

第1章では、以下の章での論議に必要な準備を行った。まず Marek と Pawlak のシステム、さらにそれから派生した Lipski の不完全情報システムと Codd の空値問題等を紹介し、関係データベースに基づく質問応答方式の研究経過を概説した。次に、ホーン論理による知識ベースの基礎理論を Lloyd に従って準備した。また、知的情報検索のためのシソーラスと質問式改良問題に言及した。

Lipski や Codd の議論における情報の不完全性は、主キーに対する属性値の不完全性を対象としたものであるが、主キーの集合自身に欠落があるために生じる不完全性も実際には存在する。この種の情報は、Reiter の閉世界仮説を仮定できない不完全な情報である。この問題については、最近 Motro が完全性情報という概念を用いた研究をしている。

第2章では、上記2種類の不完全情報の問題を統一的に議論するための定式化を行った。情報の不完全性に応じた3種類の不完全情報システムを定義し、各システムにおける質問応答を議論した。質問式の評価のために、3値論理による解釈を与えた。また、完全性情報との関係により、主キー集合の不完全性の影響を受けない質問式を規定した。

次に、いずれか一方は成立するが、どれが成立するかは断定できない、いわゆる Or 型の不完全な知識に基づく知識ベースについて議論した。Or 型知識については、閉世界仮説と両立しないことや最小モデルが定まらない等の問題点が指摘されている。ホーン節においては、頭部の選言を許していないためにこの種の問題は起こらないが、そのため Or 型知識の表現もできない。

第3章では、通常の原始論理式に対応する概念として要素式とよぶ新たな論理式を導入し、ホーン節の拡張を行い、3値論理に基づく解釈を与えた。この解釈により知識ベースの最小モデルを規定できる。推論の方式により拡張エルプランベースのベキ集合からそれ自身への2種類の写像を定義し、最小モデルが一方の写像の最小不動点と一致することを示した。導出に關しても2種類の方式を定義し、強い条件を課した導出法の健全性と安全性を示した。また、この結果に基づき Or 型の知識を扱える簡単な証明系を Prolog により実現した。

第4章では、有川、北川によって研究・開発された多段階情報検索システム MIR-RF を論理プログラム向きに再定式化し、Prolog によって実現した。本システムの特徴であるキーワードの獲得は、関連するキーワード含む研究者によるシソーラスを探索する方式により実現される。この基本的な手続きは論理プログラムでは、簡単にしかもごく自然に表現できる。MIR-RF では複数の研究者によって蓄積されたシソーラスを編集し、検索時に用いることができ、検索に研究者の独自性を反映することができる。シソーラスは一種の知識ベースと考えられるので、本システムの定式化は、そのまま知識ベースの問題にも応用できる。

第5、6章では、質問式改良の問題を議論した。この問題は、動的に質問式を改良し、必要とする対象を検索するための一連の検索過程をシミュレートすることである。

第5章においては、転置ファイルを使う検索システムにおいて、論理記号の用い方により質問式を4つに類別し、各クラスの質問式の検索能力を調べた。第4類の質問式は任意の検索をできるが、複雑である。第1類の質問式は最も単純であるが、検索能力は最も低い。各クラスの検索能力を検索される文献集合の性質により規定した。さらに、索引付けによって生じる対象間の半順序関係を利用して、各類の検索能力を特徴付けた。このように検索能力を規定できるために、転置ファイルを有するシステムにおける質問式改良の限界を特徴付けることができた。

第6章においては、Salton の定式化に基づく質問式改良の問題を議論した。Salton の定義では、対象も質問式も重み付きのベクトルとして表現され、2つのベクトルの内積があるしきい値を越えれば、その対象が検索される。この方式において、ベイズ学習により履

歴の概念を取り込み、さらにファジイ理論の枠組みを用いてあいまいな検索を可能にした。これは、帰納推論の具体的な応用例とも考えられる。

第7章では、不完全な情報と知的検索に関する本研究のまとめを行った。

## 論文調査の要旨

データ・知識ベースの利用は、各種のデータベースシステムやエキスパートシステムに代表される知識ベースシステム等を通じて、今日の情報化社会に浸透し定着しつつある。こうした情報システムとより知的で融通性のある質問応答をする方式を研究することは、人工知能や知識情報処理における重要な課題となっている。しかし、ほとんどのデータ・知識ベースシステムが、基本的にデータ・知識に完全性を要求しているため、データ・知識の収集や取得、整備等を行う上で大きな障害となっている。このような障害を克服するために、データベースシステムにおける不完全情報の研究を始めとして、知識ベースシステムにおけるデフォルト推論等の研究が活発に進められている。

本論文では、こうしたデータ・知識ベースシステムにおける不完全情報の問題を新しい視点から理論的かつ体系的に研究し、さらに文献情報検索におけるシソーラスに関係した問題を多面的に議論し、質問式の分類と改良の問題を理論的に研究して、以下のような独創的かつ基本的な成果を得ている。

1. データベースシステムにおける情報の不完全性の問題は、主キーに対する属性値の欠落と主キー自体の欠落とに大別され、従来は別々の問題として論じられてきた。そのために、理論に統一性がなく、知識ベースへの拡張も困難であった。本研究では、上記2つの問題を同じ枠組みの中で捉えて定式化し、情報の不完全性に応じた3種類の情報システムを定義し、各システムにおける質問応答方式についてその解決を与え、システム間の関係を理論的に究明している。さらに、完全性情報との関係を用いて、情報の欠落に影響をうけない質問式を規定している。

2. 知識ベースにおいては、AまたはBは成立するがA、Bのうちのどれが成立するかは断定できないという意味でのOr型の不完全知識と呼ばれる不完全情報の問題がある。こうしたOr型不完全知識については、閉世界仮説が使えず、また最小モデルが定まらないために、知識ベースシステムの実現に難点があった。

本研究では、まず原始論理式を拡張した要素式という概念を導入して、ホーン節の拡張を行い、3値論理に基づいた解釈を与えている。それによって最小モデルの定義と不動点意味論を可能にしている。また、新たな2つの導出法を導入して、その1つに対して健全性と完全性を証明している。さらに、これらの論理的成果に基づいて、Or型の知識を扱う自動証明システムをPrologを用いて実現している。

3. 有川・北川によって提案・開発された多段階情報検索システム(MIR-RF)は、研究者が自分で用意した断片的なシソーラスという一種の不完全情報を効果的に扱える情報検索システムであるが、本研究では、これを論理プログラム向きに再定式化している。また、それをPrologにより実現し、MIR-RFの思想が知識ベースシステムとしても有効であることを確認している。

4. 転置ファイルを使う情報検索システムにおける質問式の類別について研究し、4つの質問式のクラスを導入して、各クラスの検索能力を数学的に特徴付け、質問式改良の限界を明らかにしている。

5. 情報検索システムに関しては、さらにSaltonの定式化に基づいた質問改良の問題を論じ、バイズ学習による履歴の概念の取り込み、ファジイ理論を応用した曖昧検索に関する独創的な成果を得ている。

以上要するに、本論文はこれまで別個の問題として扱われていた属性値の欠落と主キー自体の欠落という2種類の不完全情報の問題を1つの枠組みで統一かつ理論的に究明し、知識ベースシステムにおけるOr型知識を対象にした理論を展開し、それに基づいてシステムを実現し、さらに情報検索システムにおけるシソーラスに見られる不完全情報、質問式改良、検索能力の評価等を理論的かつ実際に研究したもので情報科学に寄与するところが大きい。よって本論文は理学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 耿 直(中国)  
学位記番号 総理工博甲第67号  
学位授与の日附 平成元年3月27日  
学位論文題目 ANALYSIS OF MULTI-DIMENSIONAL CONTINGENCY TABLES WITH OR WITHOUT INCOMPLETE DATE

(不完全データを伴う多次元分割表の解析)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 浅野 長一郎  
 (副査) 〃 〃 有川 節夫  
 〃 〃 〃 富田 眞治  
 〃 〃 〃 工藤 昭夫

## 論文内容の要旨

近年、情報の蓄積が各界にわたって極めて盛んで、多種多数のデータベースが構築されている。その中にはカテゴリカルデータおよびカテゴリカル化して再構成されるデータが多数含まれ、とくに多次元データに関しては交叉分類し、多次元分割表に整理し分析されるのが通例である。しかし、このように現実の需要が非常に多いにもかかわらず、現在の分析方法論は現実の高次元性や種々の不完全性などへの対応が未だ十分でなく、理論的にも重要な研究課題となっている。

本論文は多次元分割表解析における多くの現実的困難に対して、尤度論および Bayes 理論の双方の立場から多面的な研究を行い、カテゴリカルデータに基づく推測理論及び推測アルゴリズムに関する研究成果をまとめたものである。まず、分割表分析における推測過程において、分割表に内在する対称性を活用した推測、およびデータ収集に関するコスト最小の立場から A. Wald らの SPRT (Sequential Probability Ratio Test) に準じた推測を提案し、それらの特性評価を行っている。次に、不完全データを伴う多次元分割表の分解可能性と併合可能性に関して詳細に論じ、分割表の低次元化の方式を提示するとともに、この方式に基づく実用的な再帰的アルゴリズムについて述べている。また、種々の不完全性を持つ分割表の分析に関して、事前情報を利用する Bayes 理論の適用について議論を行い、いくつかの具体的な新解析法を提案している。なお、一連の研究で得られた理論的成果は、それぞれ対応するコンピュータ・プログラムとして全て開発され、直ちに実証的解析に用いることができる。

本論文は二部から構成され、第一部は研究の理論的成果で七章から成る。第二部は三章から成り、研究開発されたソフトウェアに関して詳述し実用的有用性を例示している。

まず序論として第一章では研究課題に関する現状を概論し、本研究の位置づけを行っている。第二章は、

分割表の構造に関する対称性と部分対称性を先ず定義し、これらの対称性を検証しモデル構造を確認した後、母数を推定する過程を定式化し推測特性を解明して最適方式を与えている。第三章では、分割表に関する逐次検定方式を考究し、とくに分割表に対する標本群逐次観測を提唱し理論的考察と最適方式を提唱している。

次いで、欠測データの発生機構を論じる。第四章では不完全データをもつ分割表の分解可能性と併合可能性に着目し、大型の分割表分析を小型の分割表分析で済ませる解法を提唱し、全体の母数に関する推定・検定・連関性などの統計的解析を容易にする方式を提唱している。第五章は、前章の結果をうけ、統計的解析に際し二つの再帰アルゴリズム形成の可能性を見つけ、類用される IPFP 法・EM アルゴリズム・Newton-Raphson 法を改善し、とくに高次元分割表に対して有効なアルゴリズムを開発している。第六章は、データに関して欠測機構が無視できる際、事前情報を利用した Bayes 理論により、不完全データ・粗分類データを含む分割表の解析を研究している。さらに、事後平均推定量に関する再帰式が証明され、この性質と EM 法に基づき近似的事後平均推定値を簡単に求めるアルゴリズムを研究開発している。第七章では、データの欠測機構が無視できない際の Bayes 理論に基づく不完全データを含む分割表の新解析を提唱している。ここでは欠測機構として指示変数と応答変数をもつ対数線形モデルを与え、IP (Imputation-posterior) アルゴリズムによって事後分布と事後平均を示している。

本論文では一般に計算が複雑かつ膨大な量になり、研究開発された理論結果を如何に実現するかが常に問われる。このため、第八章は、分割表の対数線形モデルに関する簡約化された最尤推定式と尤度比検定式を求める PASCAL プログラムを提示している。第九章では、当研究室で研究開発されている NISAN システムの中で第五章の再帰アルゴリズムを実行し、適用例を詳しく解説している。第十章は、第六章で証明された事後平均推定量の再帰式による計算を PASCAL 言語によって提示している。

## 論文調査の要旨

多種多様な入力情報が産・学・官において収集されデータベースとして構築されている現在、これらの素情報を分析する通例の方法は分割表を形成して解析す

ることである。この際には、高次元の交叉分類を行って整理し、複雑な多次元解析をする必要があり、その中にはカテゴリカルデータ以外にもカテゴリ化して再構成されるデータが多数含まれる。しかし、通常この種の入力情報には欠落や誤記などを含むことが多く、このような欠測情報が一部であれば交叉分類表に入れることができず、情報としての活用の観点から大きな障害になっている。このように分割表の解析には現実に利用頻度が非常に高いにもかかわらず、現在の解析には高次元性・データの種々の不完全性等への対応が不十分で理論的研究課題となっている。

本論文は、上記の観点から多次元分割表の解析法における現実的諸問題の解決に新しい理論と方法を与えたもので、尤度論と Bayes 理論の双方の立場から、カテゴリカルデータに基づく推測理論および推測アルゴリズムに関する研究成果を示している。まず、分割表分析における推測の過程として、分割表の対称構造を検討した後に、この検討結果を活用した推測法を論じて最適推測方式を提唱し、次いで資料の収集に要する費用の最小化の立場から従来の逐次確率比検定論を変容した推測方式を示して、それらの詳細な特性評価を行っている。次に、不完全データを伴う多次元分割表の分解可能性と併合可能性の独創的理論を展開し、具体的に高次元分割表の低次元化の方式を提示するとともに、この方式に基づく実用的な再帰的アルゴリズムを研究開発している。また、種々の不完全性を伴う分割表の分析に関しては、先験情報を利用する Bayes 理論の適用について考究し、ここでも具体的な新しい解析法を提案している。なお、一連の研究で得られた理論的成果は各々対応するコンピュータ・プログラムとして全て開発し、実証解析に利用できる。

本研究の主要な成果は次の通りである。

1. 分割表の分析における推測過程として、分割表の数学的モデルに対する対称性および部分対称性を検定し、そのモデル構造を確認した後に母数を推定する過程の方式を定式化し、その推測特性を解明し、推測方式の設計に有用な最適有意水準を与えている。

2. 資料の収集に要する費用の最小化の立場から、逐次確率比検定論に準じた分割表に関する逐次検定方式を提案し、とくに標本群による逐次観測の特性評価を行い、その推測理論特性を詳細に論じて有用性を示している。

3. 不完全データを伴う多次元分割表の分解可能性

と併合可能性の理論を詳細に論じ、高次元かつ大型の分割表の分析を低次元の小型分割表の分析で済ませる解法を提唱し、全母数に関する推定・検定・連関性等の統計的解析を容易にする新しい方式を提唱している。

4. 分割表の低次元化法に基づいて、実用的な再帰的アルゴリズムを研究開発している。この際に頻用される反復比例適合手順、EM アルゴリズム、Newton-Raphson 法を改良して、とくに高次元分割表の分析に有効なアルゴリズムを開発している。

5. 種々の不完全データや粗い分類データを含む分割表の分析に関して、事前情報を利用する Bayes 理論の適用を考究し、いくつかの具体的な新しい解析法を提唱している。さらに、事後平均推定量の再帰式を証明し、この性質と EM アルゴリズムに基づき、近似的事後平均推定値を簡単に求めるアルゴリズムを研究開発している。

6. データに関する欠測機構が無視できない際に、不完全データを含む分割表の新しい解析法を Bayes 理論によって提唱している。ここでは、欠測機構を指示変量と応答変量をもつ対数線形モデルの中において、インピュテーション・ポステリア・アルゴリズムによって事後分布と事後平均を示している。

7. 上記の一連の研究で得られた理論的成果は、各々対応するコンピュータ・プログラムとして全て開発され、直ちに実証的解析に用いることができる。

以上本論文は、不完全データを伴う多次元分割表の独創的解析法を研究し、その数学的な基礎づけを与え、さらにその有用性を現実の適用面から示したもので、情報科学に寄与するところが大きい。よって本論文は理学博士の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 田中俊幸(滋賀県)  
学位記番号 総理工博甲第68号  
学位授与の日附 平成元年3月27日  
学位論文題目 周期構造系を利用した相対論的電子ビームによる電磁放射に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安元清俊  
(副査) 〃 〃 福光於菟三  
〃 〃 的場優  
〃 〃 青木和男



## 論文内容の要旨

近年、相対論的電子ビームが容易に作れるようになり、電磁波工学への種々の応用が理論、実験の両面から盛んに研究されている。その中に、相対論的電子ビームと高周波の電磁波の相互作用を利用して、高出力の電磁波を放射させようという試みがあり、ミリ波からサブミリ波帯における高出力のコヒーレントな電磁波放射源として期待されている。電子ビームを利用した電磁波放射源の研究はマイクロ波進行波管に見られるように古くからあるが、電子ビームの速度が相対論的であるために、より高周波で、より高出力の電磁波が得られるようになった。また、この電磁放射を利用した自由電子レーザーは半導体レーザーと違って発振周波数が可変であるので、新たにこの分野が注目を集めている。

本論文では、電子ビームを利用した種々の電磁放射の中で、特に周期構造系を利用した相対論的電子ビームによる電磁放射の問題について議論している。電子ビームによる電磁放射の現象は、自然放射と誘導放射とに大別することができる。自然放射は電子ビーム能動アンテナとして、誘導放射はミリ波およびサブミリ波帯の増幅器あるいは発振器としての応用が考えられる。いずれの放射機構を利用するにしても実用的な放射系を統計するためには、電子ビームと電磁波を効率良く結合させるための電子ビームおよび周期構造の形状、さらにそれらを含めた全体的な配置に関する詳細な議論が必要である。特に、自然放射の問題では放射効率と放射指向性の解析、誘導放射の問題ではその源となる不安定性の最大増大率とその中心周波数の解析が主要な課題となる。本論文は、自然放射としてスミス・パーセル放射、誘導放射としてチェレンコフ放射およびスミス・パーセル型自由電子レーザーの不安定性を採り上げ、最も有効な放射系の構成に関する研究結果をまとめたものである。

第1章は序論であり、電子ビームを利用した電磁放射に関するこれまでの研究状況を述べ、本論文の意義と目的を明らかにしている。

第2章では、進行波管増幅器の代表的な遅波構造として知られている円形コルゲート導波管、同軸コルゲート導波管および誘電体装荷導波管を採り上げ、これらの導波管内を管軸方向に加えられた一定の静磁界に沿って伝搬する中空あるいは中実の相対論的電子

ビームによるチェレンコフ放射の問題を理論的に考察している。解析手法としては、電子ビームの密度が低い、すなわち電子プラズマ周波数が信号周波数に比べて十分に小さいとして摂動法を用いている。その結果、3つの遅波構造の中で、同軸コルゲート導波管を用いて、電子ビームを導波管の管壁の近くに伝搬させた場合が、空間電荷チェレンコフ不安定性、サイクロトロン・チェレンコフ不安定性とともに最も大きな不安定性増大率を与えることを明らかにしている。さらに、全ての遅波構造に共通して、サイクロトロン・チェレンコフ不安定性の増大率は空間電荷チェレンコフ不安定性のそれに比べてかなり小さくなることも指摘している。また、全電子数を一定に選んだ場合には、中空ビームを用いた方が、中実ビームを用いるよりも大きな増大率が得られることを明らかにしている。

第3章では、電子ビームの厚さと空間電荷の影響を考慮に入れた self-consistent な取り扱いで、完全導体からなる正弦波状回折格子の上を外部静磁界に沿って伝搬する板状の相対論的電子ビームによる二次元的なスミス・パーセル放射の問題を、磁界の強さを無限大と近似して議論している。解析手法としては、格子の深さが格子の表面からビームの中心の位置までの距離に比べて十分に小さいものとして多重空間座標に基づく摂動法を用いている。格子の深さに対して2次までの摂動計算を行い、漏洩放射を決定する空間電荷波の漏洩係数と2次の位相変化量の解析的表現を求め、最も大きな漏洩係数を与える最適な電子ビームの位置と電子ビームの厚さが存在し、特に遅い空間電荷波に対しては最適な電子密度も存在することを明らかにしている。さらに、放射効率と放射電力指向性についても議論している。

第4章では、第3章で議論した問題を外部静磁界の強さを有限としてより一般的に取り扱い、漏洩放射に及ぼす外部静磁界の影響について詳細に議論している。解析の結果、磁界が有限の場合には、磁界を無限大として取り扱った場合に得られなかったモードが存在し、このモードは磁界の強さに大きく依存しており、サイクロトロン波の性質をもつことを指摘している。さらに、通常の実験で用いられている強さの静磁界を想定した場合、漏洩係数の値は静磁界を無限大として取り扱った時のそれに比べて約3割程度大きくなることも明らかにしている。

第5章では、第3章で議論したスミス・パーセル放

射の問題を、境界値問題の精密な数値解法として知られている安浦の方法（モード整合法）を用いて数値解析し、摂動法の有効範囲を明らかにしている。さらに、回折格子によって束縛された表面電磁波と電子ビームに付随した空間電荷波が遅波領域で結合することによって生じるスミス・パーセル型自由電子レーザーの不安定性についても数値計算し、不安定性の最大増大率とその中心周波数について詳細な議論を行なっている。

第6章に本論文で得られた結果および今後の課題を示している。

## 論文調査の要旨

電子技術の進歩により、相対論的速度をもった電子ビームが容易に得られるようになり、電磁波工学への広範な応用が図られている。その中に、周期構造に沿って伝搬する相対論的電子ビームと高周波の電磁波の線形相互作用を利用して高出力の電磁波を放射させようという着想があり、ミリ波からサブミリ波帯におけるコヒーレントな新しい電磁放射源を実現するものとして大きな期待が寄せられている。現在、その放射の物理的機構はほぼ解明されており、実用的な放射系の設計を目指して放射の諸特性を電磁波工学的な立場から定量的に評価する段階にある。自然放射を利用する放射系では放射指向性と放射効率あるいは放射利得の評価、誘導放射を利用する放射系ではその源となる波動の最大増大率と中心周波数の評価が主要な課題であり、そのために、有限の広がりをもった運動電子の集団に対する放射電磁界の反作用、すなわち、空間電荷の影響を考慮に入れた self-consistent な解析が要求されている。

本論文は、具体的な放射系として導波管型の閉じた周期構造系と反射型回折格子からなる開放型の周期構造系を採り上げ、誘導チェレンコフ放射、スミス・パーセル放射及びスミス・パーセル型自由電子レーザーの主要な放射特性をマクスウェル方程式と冷たい電子の集団に対する相対論的な運動方程式に基づいて self-consistent に解析し、それぞれの放射系について最適な構成パラメータを明らかにしたものである。

著者はまず、導波管型の代表的な周期構造系として知られている円形コルゲート導波管、同軸コルゲート導波管、及び誘電体装荷導波管を考え、管軸方向に加えられた外部静磁界に沿って伝搬する中空電子ビームと中実電子ビームのそれぞれについて誘導チェレンコ

フ放射を記述する一般的な分散式を導出し、最も大きな増大率を与える放射系の構成について議論している。この場合、空間電荷波型のチェレンコフ放射とサイクロトロン・チェレンコフ放射が可能であるが、後者の増大率は前者のそれに比べてかなり小さくなることを指摘し、更に空間電荷波型の放射については、同軸コルゲート導波管と中空電子ビームを使用したときに最も大きな増大率が得られること及び増大率を最大にする最適な電子ビームの速度が存在することを明らかにしている。

次に著者は、反射型の回折格子の上を外部静磁界に沿って伝搬する電子ビームによる2次元的なスミス・パーセル放射の問題を解析している。この自然放射を回折格子によって乱された空間電荷波の洩れ放射としてとらえ、多重空間座標に基づく摂動理論を展開して、放射を決定する洩れ係数と2次の位相変化量の解析的な表現を導いている。この表現式は著者によって初めて与えられたものであり、注目すべき研究成果である。又、与えられた信号周波数に対して洩れ係数を最大にする最適な電子ビームの位置、厚さ、及び電子密度が存在することを指摘し、この最適なパラメータを使って放射指向性と放射効率を数値計算している。その結果、電子ビームの伝搬方向に対して後方に半角度が1度以内で放射利得が数+dBの鋭いスミス・パーセル放射が得られることを示している。

最後に著者は、反射型回折格子を利用した2次元的なスミス・パーセル型自由電子レーザーについて解析している。この誘導放射は回折格子の表面近傍に束縛された固有の表面電磁波と空間電荷波の結合により生じるものであり、摂動理論は適用できない。著者は、電磁界の境界値問題の数値解法として知られているモード整合法を適用して、自由電子レーザーの最大増大率、中心周波数と電子ビーム及び回折格子に関する最適な形状パラメータの関係を数値的に明らかにしている。これまで定性的にしか把握されていなかったスミス・パーセル型自由電子レーザーの特性を数値的に解明したことは高く評価できる。又、その解析は誘導放射の領域から自然放射の領域にわたって有効な Full Wave Analysis であり、応用範囲も広く、能動媒質を含む周期構造系の境界値問題の解明に資するところが大きい。

以上本論文は、周期構造系を利用した相対論的電子ビームによる電磁放射の問題を電磁波工学の立場から

理論的に解析し、ミリ波からサブミリ波帯における新しい電磁放射源を実現する上で必要な放射系の構成について明らかにしたもので、情報通信工学に寄与するところが大きい。よって本論文は工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 池上知顯(福岡県)  
 学位記番号 総理工博乙第111号  
 学位授与の日附 平成元年4月25日  
 学位論文題目 MHD 燃焼ガスプラズマ中のシードアルカリ金属原子密度測定に関する基礎的研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤崎政則  
 (副査) 〃 〃 相良節夫  
 〃 〃 村岡克紀  
 〃 〃 渡辺征夫

## 論文内容の要旨

オープンサイクル MHD 発電機を汽力発電プラントのトッパーとして用いる複合発電サイクルは、エネルギー変換効率を高め、燃料として低品位炭の使用が可能となることから、その実用化を目指して、数千時間の連続運転が可能な発電チャネルの開発が行われている。しかし、第一世代の MHD 発電チャネルの電極は冷却を必要とするため、その結果、電極表面には温度境界層を生じる。この境界層内では導電率が低下するため、電流密度が  $1\text{A}/\text{cm}^2$  程度になると拘束アークを生じ、これが著しい電極損傷の原因となっている。また、境界層内での導電率の低下はホール電流の循環をもたらし、発電機の出力密度減少の原因となっている。このような観点から、MHD 発電チャネルの電気的特性に関連の深いパラメータを精度良く測定することが重要となっている。MHD 発電プラズマにおいて、シードとして用いられるアルカリ金属原子（以下シード原子と記す）は、燃焼ガスの熱によって電離し、燃焼ガスに導電性を与え、それによって電気エネルギーを取り出すことから、熱エネルギーを電気エネルギーへ変換する役割を担っており、シード原子がチャネルの電気的特性に与える影響は大きい。従って、シード原子密度の測定に関して、従来のスペクトル吸収法を用いた時間・空間平均値の測定に代わる、高い時間ま

たは空間分解能を持つ手法の開発が必要である。

このような背景のもとに、本論文は、MHD 発電チャネル内の境界層に生じる現象の研究を進める際に必要となる、高い時間または空間分解能を持つシード原子密度の測定に注目し、それを達成するためのレーザー法を含むいくつかの計測法を提案するとともに、境界層及びアーク近傍でのシード原子密度測定を行ったもので、6章から構成されている。

第1章は緒言であり、MHD 発電チャネル電極の境界層内に生じる拘束アーク放電現象、及びレーザーを主体とした MHD 発電プラズマ診断に関する従来の研究を概観し、本研究の意義と目的を述べた。

第2章では、熱平衡状態にある MHD プラズマ中のシード原子密度の測定法として、ナトリウム (Na) 原子をカリウム (K) 原子のトレーサとして用いるレーザー誘起蛍光 (LIF) 法を提案し、その検討結果について述べた。その結果、無放射遷移が多い燃焼ガスプラズマ中においても、それに打ち勝つ程度の強度のレーザー光を用い、レーザー光と波長の異なる飽和した蛍光を測定することにより、迷光の少ない計測が可能であることを示した。

第3章では、揺らぎの大きな MHD プラズマ中において、温度境界層及びアーク近傍のシード原子密度の空間分布を、瞬時に、しかも二次元的に測定可能な、イメージインテンシファイアとダイオードアレイを用いた二次元 LIF 計測システムの開発に関する研究結果について述べた。開発したシステムでは Na 原子密度の空間分布を  $8 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$  以上の密度領域において、時間分解能  $1 \mu\text{s}$ 、空間分解能  $1 \text{mm}$  で測定可能である。また、本計測システムを用いて、燃焼ガスプラズマ中の温度境界層内及び橋絡アーク柱の Na 原子密度の空間分布測定を行った結果、前者については、冷却平板近傍で Na 原子密度が熱非平衡分布となること、また、後者については、アーク柱内でシードが、ほぼ完全電離しており、アーク温度は約  $6000 \text{K}$  以上になることを見いだした。

第4章では、シードが高濃度の場合、シード原子密度の絶対値を直接測定する方法として、レーザーを用いた近共鳴レーリ-散乱法を提案した。実験の結果、レーザーのラビ周波数  $\Omega$  に比べて、共鳴線周波数とレーザー周波数との差  $\Delta$  が十分大きい条件のもとで、 $(\Omega/\Delta)^2$  に比例するレーリ-散乱光が観測され、レーザー光強度を与えれば、レーリ-散乱光強度からシード原子密度が

測定できることを明らかにした。Na 原子やK 原子のように第一励起準位が二重項である場合には、二重項の間のあるエネルギーに相当するレーザ周波数を用いると、レーザ散乱光は入射レーザ光の偏光方向に対して垂直に偏光することを実験的に示し、この特性の利用が、迷光の除去に有効であることを明らかにした。

第5章では、MHD 発電チャネル電極の境界層内のシード原子密度の空間分布の決定機構に注目して、燃焼ガスプラズマ中で、流れに平行に置かれた冷却金属平板周りの境界層でのK 原子密度分布を測定するとともに、計算機シミュレーションにより、実験結果の解析を行った。実験結果から、平板周りの境界層においては、平板に近付くにつれてK 原子密度は、一旦、主流部の密度の2~3倍まで上昇し、その分布はガス温度分布から予想される熱平衡分布とは著しく異なることを見いだした。また、計算機シミュレーションによって、このK 原子の熱非平衡分布は、境界層内でのH, OH, H<sub>2</sub>の密度が熱平衡値より大きくなることによって説明できることを明らかにした。

第6章は総括であり、本研究の成果をまとめるとともに、今後に残された諸問題、及び将来の展望を示した。

## 論文調査の要旨

オープンサイクル MHD 発電では、作動流体の導電率を高める目的で重量比1%程度のアルカリ金属化合物をシードとして添加する。高温の発電チャネル内主流部ではシード原子は十分に電離して一様電流を流し得るが、低温の電極の表面に形成される境界層部では導電率が低下して電流が局所的に集中するアーク放電を招き、電極損傷の主要な原因となっている。このアーク発生は境界層内のシード分布に密接に関連し、またアーク放電による電極の損傷は電極表面上のシード層の有無によって大きく影響されることが知られている。したがって、MHD 発電のチャネル壁の損傷を防ぎ連続運転を実現するためには、チャネル内のシード原子の時間変化及び空間分布を定量的に計測して、その挙動を把握しておく必要がある。

本研究では、MHD 発電チャネル内のシード原子密度を高い時間・空間分解能で測定するためのレーザ計測法の開発を行っている。この方法を用いて境界層及びアーク放電部分でのシード原子密度分布を二次元表示して可視化するとともに、低温の境界層におけるア

ルカリ金属原子が熱非平衡分布を生じる機構の解明を行ったもので、以下のような成果を得ている。

(1) MHD 発電チャネル内のプラズマ主流部では熱平衡を仮定できることを理論と実験で確認し、シードとして用いられるカリウム (K) とプラズマ中に含まれるナトリウム (Na) の原子密度を計算によって求めている。その結果、十分な蛍光信号強度を得るためのシード原子密度の上限は、蛍光の吸収を考慮するとKでは波長766.5nmのレーザビームに対して $8.4 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ 、Naでは589.0nmに対して $1.8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ であることを見出している。また、ガス温度1400~3000Kの範囲内では、KとNaの密度比が一定であることを指摘し、KのトレーサとしてNaが利用できることを、したがってレーザ誘起蛍光 (LIF) 法によって求めたNaの密度分布からKの密度分布を求め得ることを示している。

(2) プラズマの流れ方向に垂直な平面でのLIFの強度分布を瞬時計測するために、イメージインテンシファイヤとダイオードアレイを用いて二次元表示できる二次元LIF法を開発して、密度分布の可視化を実現している。この方法で、 $8 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 以上のNaの原子密度の空間分布を時間分解能1 $\mu\text{s}$ 、空間分解能1mmで測定できることを明らかにしている。

(3) ガス温度とシード原子密度測定法として従来から用いられているスペクトル吸収法に加えて、新たに受光系に狭帯域干渉フィルタを用いた二次元LIF法を適用して、これまで測定されたことなかった境界層とプラズマ中の橋絡アークに関してガス温度とNa原子密度の空間分布を明らかにしている。それによって、アーク内部ではシード原子は完全電離していること、アーク周辺ではNa原子密度が高いこと、及び陰極近傍と減衰時におけるアーク内部からはイオンの再結合によると思われる強い発光があって、これらの領域の温度が6000K以上であることを見出している。

(4) シードとして用いられる高濃度のKの原子密度の絶対値を直接測定するために、近共鳴レーザ散乱法の適用条件の検討を行っている。レーザのラビ周波数に比べて共鳴周波数とレーザ周波数の差を大きくとり、レーザ散乱光が入射光と垂直方向に偏光することを利用すれば、高いSN比が得られることを明らかにしている。この方法で、Naについてレーザ波長を588.0nmから589.6nmまで0.1nmずつ変化させた場合の偏光特性を確認している。これらの結果から、

K に対しては DI 線から 1.1nm 離れたアレキサンドライトレーザの 768.8nm を用いた近共鳴レーザ散乱法が適用可能であることを指摘している。

(5) 燃焼ガスプラズマ中に置いた冷却金属平板周りの境界層内の K 原子密度分布を実験と計算機シミュレーションにより求めている。その結果、平板に近づくとき K 原子密度が主流部の 2~3 倍に増加して非平衡分布になることを指摘し、これは境界層内での H, H<sub>2</sub>, OH の密度と平板表面での KOH 密度が熱平衡値と異なることによって生じると説明している。

以上要するに、本論文はレーザ誘起蛍光法とスペクトル吸収法による測定と計算機シミュレーションによって、MHD 発電チャンネル内のプラズマの温度境界層及びアーク放電部のシード原子密度分布を明らかにして、壁面近傍の低温層におけるシード原子密度が熱平衡値と異なる機構を明らかにしたもので、プラズマ工学に寄与するところが大きい。よって本論文は、工学博士の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 稲田 浩一 (栃木県)  
 学位記番号 総理工博乙第112号  
 学位授与の日附 平成元年4月26日  
 学位論文題目 STATISTICAL INFERENCE  
 PLANS ON THE BASIS OF SOME  
 PRIOR INFORMATION  
 (事前情報に基づく統計的推測方式)

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 浅野 長一郎  
 (副査) “ “ 有川 節夫  
 “ “ 日高 達  
 “ “ 白谷 克巳

### 論文内容の要旨

統計的推測の伝統的な立場は、予め設定された母集団からランダムに抽出された標本を観測し、そのデータから得られた知見に限定した情報を獲得して、客観的推測の維持を強調することであった。そこでは、データと既存の先験的知識や事前情報を結合するような推測の方式を採ることはすくなかった。しかし、その後の Bayes 理論の展開のように、既存の知識の利用を母数の事前分布として導入し、統計的推測に先験

的情報を利用する方式が考案され、所謂 Bayesian 学派によって研究されている。

実際、まだ数学理論として妥当化されていなくとも、現実には事前知識を標本の提供する情報に組み合わせる推測方式が自然な思考として多く適用されている。たとえば、推定すべき未知母数の値が、予めある区間内にあるという情報を有しているならば、このことを利用することは自然であろう。すなわち、一方において既存の事前的知識の設定とその利用を認め、他方において当然ながらデータの与える情報を尊重することが重要である。

本研究の発端は、上記の二種の相異なる情報源の存在を前提とし、しかも両者を結合する自然な思考として推測方式を確立することにある。

本論文は、6章からなっている。第1章は、先ず本論文の目的と構成について、人間の自然な思考方法としての推測に関して記述している。

第2章では、正規母集団の母平均に関する不完全規定模型において、事前情報を利用して母平均を推測する新しい方式を提唱している。すなわち、従来の Bancroft (1944), Asano (1960) や Kitagawa (1963) 以降の一連の研究における予備検定後の推定の偏りや平均二乗誤差の変化、および近年の Hirano (1978) による予備検定における最適有意水準の提唱があるが、これらに対して著者は従来とは異なる事前情報の利用を考案して母平均に関する一つの推測法を研究した。この推測における良さの基準として平均二乗誤差の改良成果を示し、統計的推測の性質を明らかにしている。

第3章では、二次元正規分布  $N(\mu, \Sigma)$  において事前情報を利用する母平均ベクトル  $\mu$  と母相関係数  $\rho$  の推測方式を提唱して AIC 基準を用いた方式の最適設計を与えている。いま、 $\mu = [\mu_1, \mu_2]$ ,  $\Sigma = \sigma^2 \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix}$  とおいて、母平均に関して、(i)  $\mu_1 \geq 0$ ,  $\mu_2 \geq 0$  (ii)  $\mu_1 = \mu_2 = 0$  (iii)  $\mu_1 \geq 0$ ,  $\mu_2 \geq 0$  (少なくとも、一方の不等式は成立する) の何れかであることは知られているが、択一的には確定的でないとする。このような事前情報のもとで、予備検定の最適有意水準を AIC 基準によって研究している。すなわち、(i) は事前情報として与えられているが、(ii) であるか (iii) であるかは確定的でないという状況下での最適有意水準を持つ推測方式を提示している。さらに、 $\mu_1$  の値が規定されている事前情報のもとで、 $\mu_2$  に関する予備検定および相関係数  $\rho$  に関する予備検定に

ついて最適有意水準を持つ推測の方式を与えている。

第4章では、正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  の分散  $\sigma^2$  に関し、ある種の事前情報に基づく  $\sigma^2$  の推測について論じている。通常、 $\sigma^2$  の推定量としては不偏推定量を用いるのであるが、分散  $\sigma^2$  に関して何かの事前情報がある場合には、その情報を利用した  $\sigma^2$  の推定量を構成するのが自然であろう。ここでは、未知母分散  $\sigma^2$  の値が既知の値  $\sigma_0^2$  に概略的に近似するという情報を有する場合の分散の推測について研究している。具体的には、分散  $\sigma^2$  が既知の  $\sigma_0^2$  を含む区間内にあるという事前情報によって、未知母分散  $\sigma^2$  に対する新しい推測方式を提唱している。この推測方式は、平均二乗誤差を推測の良さの基準として、予備検定推定方式と比較して優れていることを示している。

第5章では、分散の推定に際して、2群のデータの併合問題を事前情報の存在を通して論じている。日常のデータ解析においては、予めデータに関する事前チェックや事前処理が不可欠であり、これから得られる事前情報を如何に上手に、既存の統計的推測の方式に結合し利用するかが重要な研究課題となる。ここでは、等母平均の2つの正規母集団からそれぞれデータが得られたときに、併合分布の単峰性基準と正規性の適合基準を与え、母分散の推測に関する2群のデータの併合方式を漸近的性質によって提唱している。

第6章は、本論文で提唱した推測方式を従来の方式と推測の良さの基準の上で比較するソフトウェアの研究開発である。すなわち、提唱した推測方式中の各推定量の重みおよび平均二乗誤差を考究し、推定量の間の相対効率を知る上で有用な計算アルゴリズムと図表を画くソフトウェアを研究開発し、解説と共に提示している。

## 論文調査の要旨

統計学的推測における当初の方法論は、主として完全に規定された数学模型で定義された母集団からの無作為観測データに基づき解析的に情報を得ることであり、そこに科学的・客観的推測として大きな意義を有していた。その後、データ解析の際に既存の事前情報を利用する推測方式も研究され、いわゆる Bayesian 学派の誕生をみた。しかし、この立場はデータ解析における推測理論に合理性を保つための補助的・消極的方法論に留まることが多く、事前情報を標本の提供する情報に組み合わせず積極的推測方式の提唱は比較的少

ない憾みがあった。したがって、上記のような2種の相異なる情報源の存在を前提とし、しかも両者を結合する自然な着想を定式化した推測方式の確立は現在の重要な研究課題になっている。

本論文は、データと既存の事前情報を結合した積極的な統計的推測方式を提唱し、その推測特性を解明し、さらに具体的な数値的評価と解析結果の信頼性について研究を行ったもので、次の成果を得ている。

1. 正規母集団に関する不完全規定模型において、母平均に関する事前情報を利用し所与の観測データから母平均を推測する新しい方式を提唱し、この推測における理論特性を明確にしている。すなわち、評価基準とする平均二乗誤差における優れた改良成果を提示し、同時に、従来の推測方式との比較に際しては数値的評価を可能に有用なソフトウェアを研究開発している。

2. 二次元正規母集団において事前情報を利用した母平均ベクトルと母相関係数の推測方式を提唱し、AIC 基準を用いて方式の最適設計を与えている。さらに、母平均ベクトルの一要素値が規定されている事前情報のもとで、他方の要素値に関する予備検定について研究し、最適有意水準を伴う推測方式を与えている。

3. 正規母集団の母分散の推測に関し、母分散がある区間内にあるという事前情報のもとで、新しい推測方式を提唱している。ここでは、平均二乗誤差による相対効率を導入し推測方式の評価基準とし、提唱の推測方式が従来の予備検定推定方式に比し、数値評価において優れていることを示している。また、その数値的評価を可能とするソフトウェアの研究開発に成功している。

4. 統計的データ解析における分散の推測に際し、2群のデータの併合問題を事前情報の存在を通して研究し、優れた成果をあげている。すなわち、等母平均の2つの正規母集団からそれぞれ観測データが得られたとき、併合分布の単峰性基準と正規性の適合基準を与え、母分散の推測に関する2群のデータの併合方式を漸近的性質に基づいて提唱している。

以上要するに本研究は、事前情報に基づく統計的推測方式の理論特性を現実の種々の条件のもとで明確にし、さらにこれに基づき具体的なソフトウェアを構成して数値的評価を与える研究成果を示したもので、情報科学に寄与するところが大きい。よって、本論文は理学博士の学位論文に値するものと認められる。