九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

学位論文審査報告

島ノ江，憲剛

徳永，和俊

名合，聡

弘中，哲夫

他

https://doi.org/10.15017/17319

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 15 (3), pp.313-327, 1993-12-01. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

学位論文審査報告

氏　名（本籍）　島ノ江　憲　剛（佐賀県）
学位記番号　総理工博乙第180号
学位授与の日附　平成5年4月26日
学位論文題目　赤外線検出素子に用いられる $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 半導体の表面保護に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　山添　昇
（副　査）　〃　〃　斉藤省吾
〃　〃　〃　鶴島稔夫

論文内容の要旨

$Hg_{1-x}Cd_xTe$（MCT）半導体は，ハンドギャップが小さいなどの特徴をもっており，最近，医療計測や工場，倉庫の温度計測・温度管理のための赤外線検出素子あるいは次世代コンピューター用の高速半導体素子への応用が注目され，一部実用化されている．しかし，まだ充分な素子性能が得られておらず，素子性能の大きな飛躍のために，特に界面特性の優れた表面保護膜の開発が持たれている．現在，MCT 素子用保護膜には，陽極酸化膜と ZnS 膜があるが，前者はn型 MCT 基板にしか用いられない，界面に低電気抵抗層が形成される，という問題があり，また後者には界面準位密度が高い，耐湿性が乏しいという問題がある．このような背景のもとに，著者は，n型およびP型いずれの MCT 基板にも適用でき，固定電荷密度と界面準位密度が低く，耐湿性のある保護膜の開発を企図した．そして，素子作製の初期工程として行われる化学エッチング後の MCT 基板の詳細な表面解析から研究を開始し，原子レベルでの MCT 表面の清浄化法，Langmuir・Blodgett（LB）膜を用いる表面保護膜の形成法，ならびに素子作製法などについて一連の系統的な検討を重ね，所期の性能をもつ赤外線検出素子の構築に成功するに到った．本論文はこれらの研究経過と成果をまとめたものである．

第1章では，赤外線検出素子に用いられる MCT 半導体の表面保護膜について，優れた界面の必要性とそれに対応すべき研究の現状，および問題点を述べた．

第2章では，保護膜形成前に施される Br_2-メタノール系溶液による化学エッチングが，MCT 表面にどのような影響を与えるか検討した．エッチング後の MCT は走査型電子顕微鏡観察によれば粒状物が存在する荒れた表面をもっているが，その表面は化学的にもバルクとは全く異なっていることをX線光電子ペクトル（XPS）により明らかにした．すなわち，Hg. Cd. Te の各 XPS スペクトルにはケミカルシフトが現われ，0の強いスペクトルが観測されることから，各元素は酸化物または水酸化物を形成していると推定した．また，各スペクトルの角度依存性から，各元素の組成がバルク値から大きくずれているばかりでなく，深さ方向によって変わり，エッチング条件にも依存することなどを見出した．Hg の組成は最外表面層で減少する傾向を示すが，XPS スペクトルのX線出力依存性から，これは表面酸化物中に存在する HgO（または $Hg(OH)_2$）がX線の照射により分解，蒸発することに起因すると推定した．

第3章では，MCT 表面の清浄化法および得られた表面の清浄度ならびに安定性を調べた．清浄化法として MCT 表面を酢酸緩衝液中で電気化学的に還元する方法を検討した．ボルタノグラムなどから還元電位および還元時間を決定するとともに，還元表面の XPS 測定を行うことにより，適当な還元条件を設定すれば，化学エッチングにより生じた表面酸化層が完全に除去され，組成や原子価がバルクに一致する表面が得られること，得られた表面は大気中で長時間安定であることを明らかにした．また，走査型トンネル顕微鏡（STM）を用いて，電気化学的還元過程でおこる表面の形状変化を追跡するとともに，還元後の表面が原子オーダーでの平滑性をもっており，Te 原子または Te のモノハイドライド（Te-H）に対応する三回対称性の原子像が得られるまでに清浄化されていることを明らかにした．

第4章では，MCT 清浄表面の保護膜として，製膜エネルギーの小さな Langmuir・Blodgett（LB）膜を用いることを提案し，その基礎データを明らかにするため，種々の基板を用いて，脂肪酸およびジアセチレン化合物を材料とする LB 膜の作製法や膜の性状を具体的に検討した．その結果ジアセチレン化合物を用いれば，紫外線照射による重合で機械的強度の優れたポリジアセチレン膜になること，しかし表面へ堆積した後での重合では膜に亀裂が生じて緻密性が損なわれることがわかった．そこで，ジアセチレン化合物のなかで

分子鎖が長く，親水基がカルボン酸である 10, 12-heptacosadiynoic acid が水面上での圧縮性が良いことを利用して，水面上で部分的な重合を行い堆積後にさらに重合する2段階重合法を考案し，検討した結果，2段階重合したポリジアセチレン LB 膜は緻密性が高く，このため電気絶縁性に優れ，基板の酸化抑制能にも優れていることがわかった．またこの保護膜ではネガ・ポジ両タイプのパターン加工が可能であることを明らかにした．

第5章では，電気化学的還元で清浄化したn型およびP型 MCT 表面に，前章で開発した2段階重合したポリジアセチレン LB 膜を形成し，得られた LB 膜および LB 膜/MCT 界面の電気的性質を調べた．その結果，LB 膜には誘電分散がなく，形成過程での界面への変成層や高電気抵抗層の析出もないことが明らかとなった．また，n型およびP型のいずれの MCT 基板についても，LB 膜/MCT 界面における固定電荷密度，界面準位密度，膜中のトラップ準位密度が極めて小さく，MCT 素子の機能発現の妨げとならない程度であることを明らかにした．これにより，原子オーダーで清浄表面が調製できる電気化学的還元法と低エネルギーの製膜技術である LB 膜法を結びつけた本手法が，優れた界面特性を持つ半導体保護膜を与えるとともに，光伝導型および光起電力型の赤外線センサに適用できることを明らかにした．

第6章では，LB 膜で保護した MCT を用いた光伝導型赤外線センサを試作して，その基本特性を調べ，このセンサが従来品に比べて極めて高い比検出能(D')をもち，高感度赤外線検出素子として充分機能することを実証した．そして，このような高性能化には，製膜エネルギーの高い保護膜を用いた場合に見られる Hg の欠乏がこの場合には起こっていないこと，および MCT の表面がわずかに蓄積状態で少数キャリヤー（正孔）がバルク中に拡散しているため，光励起により発生したキャリヤーの再結合（消失）が防がれていること，の両方が寄与していることを明らかにした．また，同一 MCT 基板上に多数の赤外線センサを構築したセンサアレインについて検討し，これが本研究で開発した保護膜技術で十分可能であることを示すとともに，センサアレイのより一層の性能向上のためには MCT 基板そのものの均質性の改善が求められる段階に達していることを示した．

第7章では本論文を要約し，得られた成果をまとめた．

論文調査の要旨

$Hg_{1-X}Cd_XTe$ (MCT) 半導体は，X によってバンドギャップ (Eg) が連続的に変わり，$x=0.3$ で波長 3 ～ 5 μm（中赤外線）の，$x=0.2$ で 10 μm 以上（遠赤外線）の光に感応する小さな Eg をもつことから，温度計測・管理のための赤外線検出素子材料として注目され，一部実用化されているが，まだ本来の機能を引き出すまでに至っていない．本論文は，素子性能の飛躍的な改善のためには，化学的安定性に乏しい MCT 表面を安定化する適切な表面保護が不可欠であるとの観点から，MCT 表面の評価と清浄化法ならびに Langmuir-Blodgett (LB) 膜を用いた表面保護膜の形成法に関する一連の基礎研究を重ね，これによって所期の性能を持つ赤外線検出素子が構築できることを実証したものである．本論文で得られた主な成果は次の通りである．

1．素子作成の初期工程として MCT に施される Br_2－メタノール溶液（0.1あるいは0.5%）による化学エッチングが MCT 表面に与える影響をX線光電子光法 (XPS) により詳細に調べ，エッチング後の表面の Hg, Cd および Te の各元素がバルクとは異なり酸化物（あるいは水酸化物）として存在しているばかりでなく，組成もバルク値とは大きくはずれていることを明らかにしている．また，各スペクトルの試料回転角度依存性をもとに深さ方向における組成分布を評価し，このような変成層が表面から 2 nm 以上の深さに達していることや深さ約 1 nm 以内では特に Hg 組成の低下が著しいなどの知見を得ている．

2．電気化学的還元により MCT 表面を清浄化する方法について検討し，酢酸緩衝溶液中で MCT をカソードとして Ag/AgCl（基準電極）に対して -0.9 V の電位に保持すれば，変成層中の HgO および TeO_2 は一部 Hg および Te に還元されるとともに，過剰の Te が Te^{2-} に還元されて系外に除去され，また CdO も酢酸中に溶解除去されること，その結果1時間の還元処理（通電量 50mA・s/cm^2）を行えば，XPS によって変成層が全く検知されない清浄表面が得られることを見出し，さらに得られた清浄表面が4時間の大気曝露に対しても安定であることを明らかにしている．また，走査型トンネル顕微鏡により，清浄化過程を追跡するとともに，清浄化表面が原子オーダーで平滑性を

もち，バルクの構造から予想される原子像が観測されることを明らかにしている．

3．温和な条件下で形成できるLB膜がMCT保護膜として適しているとの着想のもとに，種々の有機化合物および基板を用いて膜形成法を詳細に検討し，ジアセチレン化合物の一つである10, 12-heptacosadiynoic acidのCd塩の単分子膜から出発し，LB法による累積（10～30層）と紫外線重合とを組合せた成膜法が機械的強度および電気絶縁性に優れたポリジアセチレン膜を与えること，さらに紫外線重合を水面上単分子膜の予備的重合と累積後の重合の二段階にわけて行なえば，ピンホールが全くない緻密性・気密性に優れた膜が得られることを見出している．また，このような保護膜のパターン加工について検討し，累積後基板をマスクして紫外線重合を行ないクロロホルム溶媒で処理すれば，マスクされた低重合部分が溶出してネガ型のパターンが得られ，また，紫外線重合した後マスクを用いて酸素雰囲気下で紫外線照射すれば，照射部分がオゾン酸化を受けて溶出し，ポジ型のパターンが得られることを明らかにしている．

4．電気化学的還元により清浄化したn型およびp型MCT表面に上記方法により二段階重合ポリジアセチレン保護膜を形成したときの保護膜／MCT界面の電気的性能を，この上に金属電極を付加した金属／絶縁体／半導体（MIS）構造素子の容量－電圧特性，ヒステリシス特性，周波数特性などから評価し，界面の固定電荷やトラップ準位が極めて少ないほぼ理想的な界面であることを確認している．これにより，原子オーダーで平滑な清浄表面と低エネルギー成膜法を組合せた本手法の妥当性を実証している．

5．上記保護膜を付した光伝導性MCT赤外線センサを試作して基本特性を調べ，カットオフ波長がX＝0.2のMCTでは14 μm (0.089 eV)，x＝0.3では4.3 μm (0.289 eV)で，ほぼ理論値に一致することを示すとともに，S/N比および比検出能D*が従来品に比べて高い高感度高性能素子であることを実証している．また，同一MCT上に10個の単素子を集積した10チャンネルアレイ素子について検討し，これが本研究で開発した保護膜技術で充分可能であることを示すとともに，アレイ素子の性能向上にはMCTそのものの均質性向上が持たれる段階に到達したことを明らかにしている．

以上，要するに本論文は，MCT素子の性能向上には，温和な条件下で形成できる保護膜の開発が必要であるとの観点から，MCT表面の清浄化法とLB膜を用いた保護膜形成法に関する独創的な提案と基礎研究を行い，所期の性能を発揮する赤外線検出素子の設計指針を明らかにしたもので，半導体工学，材料工学に寄与するところが大きい．よって本論文は，博士（工学）の学位論文に値するものと認められる．

氏　名（本籍）　徳永和俊（福岡県）
学位記番号　総理工博甲第143号
学位授与の日附　平成5年5月20日
学位論文題目　プラズマ・壁相互作用による材料損傷と不純物放出機構に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　吉田直亮
（副　査）　〃　〃　伊藤智之
〃　〃　〃　蔵元英一
〃　〃　〃　木下智見

論文内容の要旨

将来のエネルギー源として核融合の開発が行われているが，その中でも磁場閉じ込め方式のトカマク型核融合装置は，現在，最も優れたプラズマパラメーターを達成している．従来のトカマク装置ではプラズマの生成，加熱，閉じ込め，安定性に関して研究が行われてきたが，プラズマの温度や密度が高くなるに従い，プラズマと壁との相互作用による不純物発生や壁表面の損傷が新たに問題となってきた．さらに，プラズマの維持時間が長くなるに従い，プラズマ・壁相互作用がプラズマの密度制御に深く関与していることが明らかとなってきている．今後，プラズマの高温，高密度化，長時間化に伴いさらに大きな問題となることが予想され，現象の解明と共にプラズマ制御，材料開発の両面から研究を進めることが必要である．

本論文は，このような観点から行った実機トカマク装置におけるプラズマ・壁相互作用及び熱負荷シミュレーション実験による材料損傷と粒子放出に関する研究についてまとめたものである．

第1章では，まずトカマク装置におけるプラズマ・壁相互作用の現状と問題点について解説し，本研究の目的と位置付けについて述べた．

第2章では，強磁場トカマク TRIAM-1 で長期間使用された Mo 製リミターの損傷について述べた．リミターの損傷は，電子或いはイオンにさらされる側面とプラズマにさらされる面によって異なっている．電子サイドでは，プラズマからの熱負荷，不純物堆積の2つの要因により損傷が発生しており，これらの大小関係により不均一な損傷分布が形成されている．一方，イオンサイドでは，アーキング，水素粒子負荷，不純物堆積の重なりにより複雑な損傷が発生している．これらのことから実機でのリミターは，複数の要因の相乗効果により発生することを明らかにした．

第3章では，TRIAM-1 のスクレイプオフ層に導入した試料プローブの実機プラズマ照射による材料損傷について述べた．プローブ試料には，溶融凝固物，突起，小丘等が形成されており，これらの損傷の形成機構を調べることにより，リミターで観察された損傷の素過程を明らかにした．また，プラズマによる材料の損傷についてほとんど着目されていなかった微細な組織変化について調べ，プローブ試料には転位ループ，水素集合体が発生していることを明らかにした．

第4章では，長時間放電実験が行われている超伝導強磁場トカマク TRIAM-1M で使用された SUS304 製リミターの損傷について述べた．リミターには長時間放電中のプラズマとの接触による深く溶融し凝固した部分が発生しており，この部分において著しい組成変化が観察された．これにより，長時間放電下では，ディスラプションやアーキングによるパルス的な熱負荷と共に，低熱流束で長時間の熱負荷が問題となることを明らかにした．また，熱負荷による溶融と蒸発による組成変化について，蒸発や溶融時のエネルギー損失を考慮した1次元熱伝導方程式により評価し，リミターでの熱負荷による損傷を定量的に明らかにした．

第5章では，TRIAM-1M のスクレイプオフ層にプローブ試料を導入しプラズマ放電後，試料を取り出し分析を行うこと（コレクタープローブ実験）により，プラズマによる照射損傷及び長時間放電下での不純物発生，輸送機構について明らかにした結果を述べた．照射損傷に関しては，荷電交換中性水素粒子及び比較的低エネルギーの水素照射により，それぞれ転位ループ及び水素合体が形成されることを明らかにした．また，不純物挙動に関しては，長時間放電下では，リミターエッシから加熱による蒸発によりリミター材がプラズマ中へ混入するが，スパッタリング等により真空容器から放出された金属原子はスクレイプオフ層のスクリーニング効果によりリミター側面にトラップされ，主プラズマ中には混入しにくいことを明らかにした．

第6章では，実機プラズマ閉じ込め装置で発生している熱負荷による材料損傷と不純物放出について原理的な理解をするために行ったシミュレーション実験について述べた．加熱により試料表面からは，ガス，構成原子，イオン，熱電子が放出され，ガス成分と金属成分では，壁への吸着特性の違いにより減衰の時定数が異なること及び蒸発により放出される中性原子とイオンでは放出挙動が大きくことなることを明らかにした．また，熱負荷を受けた試料の損傷観察により，リミターで観察された複雑な溶融凝固形態の素過程を明らかにした．

第7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

人類の究極のエネルギー源として期待される核融合炉の開発を目指し，多くの英知を集め活発な研究が進められている．核融合プラズマを発生させる方式がいくつか提案されているが，中でもトカマク型の磁場閉じ込め方式が最も有望とされ，すでに臨界プラズマ条件を達成している．しかしながら，プラズマの生成，加熱，閉じ込めや安定性に関する研究が進みプラズマの温度や密度が高くなるに従い，プラズマと壁との相互作用による不純物の発生や壁材料の損傷が新たな問題となってきた．さらに，プラズマの放電持続時間が長くなるにつれ，このようなプラズマと壁との相互作用がプラズマの密度制御に深く関与していることが明かとなってきている．今後，プラズマの高温・高密度化，放電の長時間化に伴い，プラズマ・壁相互作用がさらに大きな問題となることが予想され，早急な現象の解明と対策が求められている．

本論文は，その現像の複雑さから敬遠されることの多かった実際のトカマク装置におけるプラズマ対向材料の損傷を，ミクロ，マクロの両面から詳細に調べるとともに，熱負荷シミュレーション実験を行うことによって，材料の損傷はプラズマによる熱負荷のみならず，水素粒子および不純物粒子の三者の相乗効果として引き起こされることを明らかにしたもので，主な成果は以下の通りである．

(1)　強磁場トカマク TRIAM-1 で長期間使用された Mo 製リミターの表面形状変化，組成変化を詳細に

調査し，プラズマによって引き起こされる損傷は，プラズマとの角度や距離によって大きく変化することを見いだしている．即ち，電子ドリフトサイドでは，主にプラズマからの熱負荷と不純物堆積の2つの要因により損傷が発生しており，これらの要因の大小関係により損傷形態が変化する．一方，イオンドリフトサイドでは，アーキング，水素粒子負荷，不純物堆積の重なりにより，局所溶融，スパッタリング，ブリスタリング等の多彩な損傷が発生する．

(2) TRIAM-1 のスクレイプオフ層に試料搬送装置を用いプローブ試料を挿入することによって，温度，密度，位置などが良く制御されたトカマクプラズマを照射し，高温プラズマによる材料損傷の素過程を研究している．即ち，プローブ試料には熱負荷によりまず微細な溶融凝固物，突起，小丘等が形成される．これらは熱負荷が繰り返されることによって，リミターで観察されたマクロな損傷へと発展する．また，トカマクプラズマの高エネルギー成分により原子はじき出し損傷が起こり，材料内部に転位ループや水素集合体が発生・蓄積されることを世界で初めて見いだしている．

(3) 長時間放電実験が行われた超伝導強磁場トカマク TRIAM-1M で使用された SUS304 製リミターの損傷について詳細に調べることにより，この種の合金を長時間放電のリミター材として使用した場合の材料科学的な問題点を検討している．即ち，長時間の放電により溶融が起こった場合には，溶融層内での拡散が容易なため，蒸気圧の高い Cr の顕著な優先蒸発が起こり，プラズマへの不純物の混入量が増大する．短パルスの熱負荷ではたとえ溶融が起こっても Cr の優先蒸発はそれほど顕著ではないことから長時間放電での特有な問題であることを指摘している．

(4) 上述のリミターの溶融と Cr の優先蒸発について，蒸発や溶融時のエネルギー損失を考慮した1次元熱伝導方程式により解析することによって，リミターでの熱負荷を定量的に評価し，局所的な熱負荷が異常に高いことを明らかにしている．

(5) TRIAM-1M のスクレイプオフ層に試料搬送装置を用いプローブ試料を挿入することによって，高温プラズマによる材料の原子レベルでの照射損傷を調べ，1keV 程度以上の荷電交換中性水素粒子及びエネルギーの低い水素イオンにより，それぞれ原子はじき出し損傷に伴う転位ループ及び水素集合体が形成されることを明らかにしている．この成果は材料の損傷のみならず，長時間放電下での水素リサイクル現象を理解する上でも極めて重要である．

(6) コレクタープローブを用いスクレイプオフ層での金属不純物を計測することにより，長時間放電下では，リミターエッジからの蒸発によりリミター構成元素 (Mo) がプラズマ中へ混入するが，スパッタリング等により真空容器から放出された金属原子はスクレイプオフ層のスクリーニング効果によりリミター側面にトラップされ，主プラズマ中には混入し難いことを明らかにしている．この現象はプラズマへの金属不純物の混入を抑制する方法を示唆するものであり，重要な成果といえる．

(7) TRIAM-1M で観察された熱負荷による材料損傷と，不純物放出の基本的なプロセスの解明を目的として，熱負荷シミュレーション実験を行い，以下の結果を得ている．即ち，加熱により試料表面からはガス，構成原子，イオン，熱電子等が放出され，ガス成分と金属成分では，壁への吸着特性の違いによる減衰の時定数が異なること，及び蒸発により放出される中性原子とイオンでは放出挙動が大きく異なることを見いだしている．また，熱負荷を受けた試料の損傷観察から，リミターで見いだされた複雑な溶融凝固過程の素過程を明らかにしている．

以上要するに，本論文は実際のトカマク装置におけるプラズマ対向材料の複雑な損傷現象を，ミクロ，マクロの両面から詳細に調べ，さらにより制御された熱負荷シミュレーション実験を行うことによって，プラズマによる熱負荷，粒子負荷，不純物負荷とそれによって引き起こされる様々な損傷現象の関係を明らかにしたもので，核融合炉工学に寄与するところが大きい．よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる．

氏　名（本籍）　名合　聡（京都府）
学位記番号　総理工博甲第144号
学位授与の日附　平成5年7月27日
学位論文題目　非充填および不連続繊維充填ポリシアノアリルエーテルの破壊に関する研究
論文調査委員
（主査）　九州大学　教授　高橋　清
（副査）　〃　〃　蔵元英一
〃　〃　〃　吉田直亮
〃　〃　〃　梶山千里

論文内容の要旨

近年，高強度で高温耐熱性の熱可塑性高分子材料の研究，開発が盛んに行われている．熱可塑性高分子材料は熱硬化性のそれに比べて材料リサイクルが容易で成形過程の生産性にも優れている．しかし分子構造の持つ特性からその剛性は一般的に熱硬化性高分子材料より劣るのでガラス短繊維などの充填により剛性の向上が計られる．本研究で用いたポリシアノアリルエーテル（以下 PCAE と呼ぶ）は，近年国内で開発され，1990年に上市された耐熱性の高い新しい結晶性熱可塑性高分子材料である．その常温下での引張り強度（130MPa），引張り弾性率（3.2GPa）および熱変形温度（170℃）などの特性を持ち，スーパーエンジニアリングプラスチックとして既に高い声価を持つ同じ結晶性熱可塑性高分子材料の一つであるポリエーテルエーテルケトンと比較して勝るとも劣らぬ性能を持っている．現在 PCAE は摺動材などに用いられつつあるが，開発されて日の浅いこの材料の破壊に関する性質については1～2の研究例があるだけでほとんどまだ明らかにされていない．本研究の目的は PCAE の力学的な性質，特に破壊挙動を広範な立場から詳しく検討し，そのことを通じて構造材としての PCAE およびその複合材料の材料設計上の指針を与える事である．本論文は全5章から構成されている．

第1章では他の熱可塑性高分子材料と対比させながら PCAE のスーパーエンジニアリングプラスチックとしての位置づけを示すと共に，本研究の目的と概要を述べた．

第2章では非充填 PCAE の破壊挙動の温度依存性に関する検討を行った．ダンベル形式試験片の引張り試験から，－40℃から100℃の範囲で弾性率と引張り強度は温度の上昇に伴い減少するが，破断時の伸びや破断までのひずみエネルギーは増加する事を示した．この理由として分子の構造が極めて剛直であるにも係わらず，ガラス転移温度（140℃）以下にあるこの温度域で材料の延性が増加するためである事を明らかにしている．光学顕微鏡による破断面の観察と，超音波顕微鏡による材料内部の観察結果から，破壊は PCAE 内部の微小なボイドから発生している事を突き止めた．さらに，引張り強度はこの先在的ボイドの大きさに依存しないものの，破断時の伸びおよびひずみエネルギーは大きく依存し，ボイドの直径を 200 μm 以下にする事により破断時の伸びを大幅に向上させる事ができる事を明らかにした．コンパクトテンション形試験片の引張り試験結果から，破壊靱性は－40℃から60℃まではほぼ一定であるが，100℃では大幅に増加する事を示し，この温度依存性が前述の延性の他に破面下に存在する多数のマイクロクラックの生成に関係している事を明らかにした．

第3章ではガラス短繊維充填 PCAE の破壊挙動について検討を行った．充填された繊維の重量含有率は10％と30％であり，成形後のガラス短繊維の平均繊維長はそれぞれ 150 μm および 130 μm であった．これらの充填により材料の剛性はそれぞれ1.5倍および2倍に向上した．コンパクトテンション形試験片を用いた試験から23℃以下の温度領域ではガラス繊維の重量含有率が増加するのに伴い，非充填 PCAE でみられた脆性的な破壊に代わって安定破壊が起こる事を観測した．一方，100℃では非充填 PCAE でみられたような延性的な破壊はみられなかった．破壊靱性値は非充填 PCAE の場合と比較して約70％から50％低い値を示した．この理由を明らかにするために行ったアコースティック・エミッション計測の結果から，き裂先端部付近で生じる微視的な損傷の領域の広がりは約1 mm 程度の幅の中に限られている事が明らかとなった．以上の結果から，平均繊維長が 150 μm 程度のガラス短繊維の充填によっては，剛性は向上し，また安定破壊が得られるものの，破壊靱性の向上を計る事は困難である事を明らかにした．

第4章では，平均繊維長を約5倍にした不連続ガラス長繊維 PCAE を使用して，繊維長の効果を検討した．コンパクトテンション形試験片を用いて常温下で行った試験で，最大荷重点以降の破断までに要する破壊エネルギーが大幅に向上する事が認められた．これ

は不連続ガラス長繊維の充填により，非充填 PCAE の脆性的な破壊やガラス短繊維充填 PCAE の安定破壊などに比べて，破壊形態をより一層安全なものに転換できる事を意味する．動的な破壊挙動を知るために行った衝撃三点曲げ試験の結果によると，破断時の伸びおよび破断時までの破壊エネルギーはガラス短繊維充填のものに比べて増加する傾向のある事を示した．また動的なき裂が進展する方向に対して垂直に配向した集合繊維束が存在する場合には，き裂進展の阻止能力が著しく高められる事を示し，この様な繊維束状の長繊維の充填が動的負荷条件下での破壊エネルギーを著しく増大させる可能性のある事を明らかにした．

第5章では本研究の総括を記した．

論文調査の要旨

熱可塑性高分子は材料成形時の生産性が熱硬化性高分子よりも優れ，また，資源再利用を可能とさせる特徴をもつ．現在多くの種類のものが市場に出ているが，なかでもポリエーテルサルフォン，ポリエーテルイミド，ポリエーテルケトンなどいわゆるスーパーエンジニアリングプラスチックスは耐熱性とそのすぐれた比強度ゆえに重要な構造材料としての地歩を固めつつある．特に分子鎖にベンゼン環を有するいわゆる芳香族系高分子材料は分子鎖の剛直性ゆえに強度及び熱的特性に優れ，これを母材とした繊維強化複合材料は航空，宇宙など苛酷な環境下で利用される先端複合材料として注目を集めている．

本論文で取り上げられたポリシアノアリルエーテル（PCAE）も芳香族系結晶性熱可塑性高分子で，わが国で開発されたスーパーエンジニアリングプラスチックスの一つである．上市されたのは1990年で，現在摺動材などの用途に供せられつつある．しかし上市されて間もない新しい材料であるために破壊挙動についてはほとんど知られていないものであった．本論文は非充填及び不連続繊維充填 PCAE の破壊挙動に関して−40℃から100℃の温度域においてミクロ及びマクロの両面から詳細に研究を重ね，強度及び破壊靱性についての基本的な性質を明らかにし，非充填材としての材料成形上の最適条件を示すと共に，複合材としての材料設計上の指針を与えたものである．本論文で得られた主な成果は次の通りである．

1．熱軟化温度，強度及び剛性の点で PCAE のスーパーエンジニアリングプラスチックスのなかでの位置づけを行い，これらの点でこの材料が優れていることを示した．

2．切り欠きを持たない試片においては破壊のほとんどが内部の微小なボイドから発生することを明らかにした．さらに，強度はこのボイドの大きさにはほとんど依存しないものの，破断時の伸びとひずみエネルギーは大きく依存し，ボイドの最大直径を200ミクロン以下にすることによりこの伸びとエネルギーが大幅に向上すること，ボイドの発生を抑える成形時の熱的な最適条件などを明らかにした．一方，切り欠きを加えた場合には破壊靱性は−40℃～60℃まではほぼ一定で比較的低く，これを向上させる点で改善の余地のあることを指摘している．

3．ガラス短繊維を10重量％及び30重量％充填させた PCAE の剛性はそれぞれ1.5倍及び2倍向上する．そしてこの充填により，常温から−40℃までの温度域で，繊維の含有率が増加するのに伴い破壊形態は非充填時の不安定破壊に代わって安定破壊となる傾向を示すが，破壊靱性の向上をはかることは困難なことを明らかにした．

4．薄片法による透過顕微鏡観察の手法を取り入れ，複合材の高温時における延性の増加が，生成される微少クラックの増加に依るものであることを明らかにした．

5．充填繊維の長さを約5倍（平均 683 μm）とし，表面をポリエーテルイミドの塗膜を施した不連続ガラス長繊維（重量％はガラス繊維36％，ポリエーテルイミド18％）充填 PCAE において，破壊の延性度が大幅に向上することを明らかにした．またこの材料の衝撃破壊エネルギーは短繊維充填 PCAE に比べて増加すること，特に集合状の繊維束が存在する場合には衝撃破壊エネルギーを著しく増加させることを明らかにした．

以上，要するに本論文は，新しく開発されたスーパーエンジニアリングプラスチックであるポリシアノアリルエーテル及びその不連続ガラス繊維充填複合材料の強度，破壊靱性に関して詳細な実験的研究を行い，その基本的な性質を明らかにすると共に，非充填・非切り欠き材の破壊時伸びの向上について具体的な方策を示し，また，破壊靱性向上のために不連続長ガラス繊維の充填が有効なことを明らかにしたもので，材料工学に寄与するところが大きい．よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる．

氏　名（本籍）　弘中哲夫（山口県）
学位記番号　総理工博甲第145号
学位授与の日附　平成5年7月27日
学位論文題目　ベクトルプロセッサの構成方式に関する研究
論文調査委員
（主査）　九州大学　教授　安浦寛人
（副査）　〃　〃　雨宮真人
〃　〃　〃　日高達
〃　〃　〃　岩間一雄

論文内容の要旨

多くの科学技術計算では，多数のデータ要素に対して同一演算を施すデータ処理に，多大な計算時間を費やす，この種の処理の高速化を図る方式の一つとしてベクトル演算方式がある．このベクトル演算方式の有効性はさまざまな点から実証されており，現在の商用スーパーコンピュータに一般的に取り入れられている．

現在のスーパーコンピュータで行われているベクトル演算方式には次のような3つの課題がある．1．ベクトル演算の対象となるループの種類が大きく限定されている点，2．ベクトル演算を実行する上でプロセッサに対するベクトルデータのロード／ストアに非常に大きなメモリバンド幅が必要な点，3．ベクトル演算とスカラ演算間の並列処理が十分に行われていない点である．

本研究では，これらの現在のベクトルプロセッサの課題を整理し，その課題を解決する高速かつ柔軟なベクトル演算が可能なベクトルプロセッサ・アーキテクチャを提案すると共に，本アーキテクチャに基づくベクトルプロセッサの構成例を示し，そのアーキテクチャの妥当性をシミュレーションによって評価・検証した．

本論文は7章から構成される．

第1章ではベクトルプロセッサが生まれるに至った背景について述べ，ベクトルプロセッサの根幹をなすベクトル演算方式について説明し，その高速化を達成する上での課題について述べ，最後に本研究の目的とその成果の概要について述べる．

第2章と第3章は現状のベクトルプロセッサに関する基本事項をまとめ，ベクトルアーキテクチャの提案を行う．まず，第2章ではベクトルプロセッサ・アーキテクチャの現状についてまとめる．第3章では現状のベクトルプロセッサ・アーキテクチャの問題点を洗い出し，従来のベクトル演算方式に比べて，より柔軟でかつ高速なベクトル演算を可能とするMSFV (Multithreaded Streaming/FIFO Vector) アーキテクチャの提案を行う．MSFVアーキテクチャは以下に示すような特長をもつ．

1．マルチスレッド処理 (M: Multithreaded): ベクトル命令レベルでマルチスレッド処理を行う．すなわち，1本のパイプラインは，1個のベクトル命令の実行に占有されるのではなく，複数個のベクトル命令に時分割共有される．これにより，パイプライン使用率を向上させると同時に，一時に実行可能なベクトル命令の数を増やせる．

2．ストリーミング (*S*: *Streaming*): スカラ命令およびベクトル命令の双方からベクトルジスタ内のベクトルデータにアクセスできる．これにより，スカラ命令のループでもFIFO内のベクトルデータに対する演算が行える．すなわち，小さなオーバヘッドでベクトルースカラ協調処理が可能となる．

3．FIFOベクトル・レジスタ (*F*: *FIFO*): ベクトル・レジスタとしてリングFIFOバッファを用いることにより，1個のベクトル命令で一時に処理可能なベクトル長を制限しない．すなわちストリップ・マイニング処理が不要となり，ベクトル命令再発行に伴うオーバヘッドを取り除くことができる．

4．柔軟なチェイニング機能：チェイニング機能に関して，その方向および対象命令を柔軟なものとしている．マルチスレッド処理および柔軟なチェイニング機能により，特殊なマクロ演算命令ないし専用ハードウェアを用いることなく，回帰型演算（総和，内積，最大／最小値検索，1次回帰等）の効率的なベクトル処理を可能としている．

第4章と第5章では*MSFV*アーキテクチャに基づくプロトタイプ・ベクトルプロセッサについて述べる．まず，第4章ではプロトタイプ・ベクトルプロセッサの命令セットアーキテクチャについて述べた後，*MSFV*アーキテクチャの特長であるFIFOベクトル・レジスタ，ストリーミング，マルチスレッド処理，および，柔軟なチェイニング機能を用いたマクロ演算，条件付きベクトル演算，ベクトルースカラ協調処理について述べ，簡単な評価を行った結果を示す．第5章では*MSFV*アーキテクチャに基づくプロトタイプ・プロセッサの具体的なハードウェア構成について述べ

る．

第6章では *MSFV* アーキテクチャの性能評価について述べる．この章では第5章のハードウェア構成に対してソフトウェア・シミュレータを用いて評価を行い，その結果を示す．ソフトウェア・シミュレータによる評価では，14種の標準的なベンチマーク・プログラムに対して，*MSFV* アーキテクチャの特長である．FIFO ベクトル・レジスタ，ストリーミング，マルチスレッド処理の効果を評価した．その結果，FIFO ベクトル・レジスタにより最高24.2%（平均10.7%），ストリーミングにより最高32.9%，マルチスレッド処理により最高333.8%（平均43.6%），の性能向上率が得られ，総合的には従来型のベクトル・プロセッサに比べて最高334.9%（平均59.0%）得られることが示された．また，*MSFV* アーキテクチャによるメモリバンド幅の節減能力についても評価を行った．その結果従来型ベクトルプロセッサの半分程度のメモリバンド幅で同様の演算スループットを達成できることが示された．以上より，*MSFV* アーキテクチャが従来型のベクトル演算方式に比べて，より柔軟でかつ高速なベクトル演算を可能とするベクトルアーキテクチャであることが明らかになった．

最後に第7章において，本研究の成果をまとめると共に，今後の課題について述べる．

論文調査の要旨

科学技術計算で多くの時間を費やす処理として，多数のデータ要素に対して同一演算を施す計算がある．このような処理の高速化手法として，ベクトル演算方式が商用のベクトルプロセッサとして広く利用されている．しかしながら，現在用いられているベクトルプロセッサ・アーキテクチャには幾つかの解決すべき問題がある．具体的には，高ベクトル化率の達成，ベクトル化不可能なスカラ演算部の高速化，メモリ・バンド幅の節減，マイクロプロセッサ化に向くアーキテクチャの構築などである．

本研究ではこれらの問題点に対処する新しいベクトルプロセッサ・アーキテクチャの提案を行っている．本研究で得られた成果は，以下の6点に要約できる．

(1) NSFV 型ベクトルプロセッサ・アーキテクチャの提案

従来のベクトル演算法式に比べて，より柔軟なベクトル処理およびベクトルースカラ協調処理を可能とする *MSFV* (*Multithreaded Streaming/FIFO Vector*) アーキテクチャを提案している．

(2) 柔軟なマクロ演算への対処法の提案

MSFV アーキテクチャでは，柔軟なチェイニング能力とマルチスレッド処理により，ベクトル化に不適なデータ依存関係にある総和，内積，最大値探索，回帰演算を特別なハードウェアを必要とすることなく，従来のベクトルプロセッサと同様の性能を達成している．

(3) 条件付きベクトル演算への対処法の提案

ベクトル化が困難である「IF 文を含む DO ループ」に対処するため *MSFV* アーキテクチャの特長を利用した．ベクトル分配/併合方式，ベクトル実行停止の2つの新しいベクトル化手法を提案し，その有効性を示している．

(4) 部分ベクトル化可能なループへの対処法の提案

MSFV アーキテクチャではデータ依存関係があるベクトル化可能ループとベクトル化不可能ループ間でもストリーミングを用いてベクトルースカラ協調処理による並列処理を行っており，その有効性も示している．

(5) メモリ・バンド幅節約手法の提案

MSFV アーキテクチャの特長である FIFO ベクトル・レジスタ，ストリーミング，マルチスレッド処理を用いることで，メモリ・バンド幅を節減することが可能であることを示している．評価の結果，ほとんどすべてのベンチマーク・プログラムで従来方式の半分のメモリ・バンド幅しか持たない *MSFV* 方式が従来方式と同等，もしくはそれ以上の性能を持つことを示している．マイクロベクトルプロセッサなど I/O ピン数の制約によりチップ外メモリ・バンド幅を大きく取れない場合，大変有効であると考えられる．

(6) プロトタイプ *MSFV* 型プロセッサの設計および評価

MSFV アーキテクチャにより達成可能な性能を評価するため，MSFV 型プロセッサを設計し，さらにそれをシミュレートするソフトウェア・シミュレータを作成し，評価を行っている．その結果，プロトタイプ *MSFV* 型プロセッサは従来型のベクトルプロセッサに比べて，平均的に約60%性能が良いことを示している．

以上要するに，本研究はベクトルプロセッサの構成方式に関して，その実現上の課題となる問題を明確化し，それらを解決する高速かつ柔軟なベクトル演算が

可能なベクトルプロセッサ・アーキテクチャを提案すると共に，本アーキテクチャに基づくベクトルプロセッサの構成例を示し，そのアーキテクチャの妥当性をシミュレーションによって評価・検証し，その有効性を証明したもので，情報システム学上寄与するところが大きい．よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる．

氏　名（本籍）　北川　毅（長崎県）
学位記番号　総理工博乙第181号
学位授与の日附　平成5年7月27日
学位論文題目　Rare-Earth-Doped Silica-Based Lightwave Circuits（希土類添加石英系プレーナ光波回路の研究）
論文調査委員
（主査）　九州大学　教授　森永健次
（副査）　〃　〃　齋藤省吾
〃　〃　〃　沖憲典
〃　〃　〃　入江正浩

論文内容の要旨

近年，情報化の進展を背景に，光通信の大容量化と適用領域拡大が強く要望されている．大容量光伝送システムや光加入者ネットワークを実現するためには，様々な機能を有する導波路型集積光部品の開発が必要不可欠となっている．各種導波路の中で，石英系プレーナ光波回路（Planar Lightwave Circuit, 以下 PLC と略す）は優れた特徴を数多く有しており，実用的な集積光部品の筆頭と目されている．しかし，光増幅やレーザー発振などの能動機能を有しておらず，PLC の機能は専ら受動的なものに限定されている．一方，希土類元素である Er を微量添加した石英系光ファイバが光通信に重要な1.5 μm帯において優れた光増幅特性を有することから，Er 添加光ファイバ増幅器が既に光通信システムの必須部品となっている．さらに希土類元素を石英系 PLC に添加することにより，能動機能を有する集積光部品を得ることができると期待されているが，希土類元素を添加した光導波路に関する研究例は少なく，Nd 添加ガラス導波路による1.05 μm光増幅とパルス発振が報告されているのみで，Er 添加光導波路に関する報告は皆無である．

以上のような背景の下で，能動光集積回路の実現を目的として，希土類添加石英系 PLC の研究を実施した．本論文はこれらの研究の結果得られた内容をまとめたものである．

第1章では，石英系 PLC 型集積光部品の位置づけと問題点及び希土類添加光部品開発の歴史を述べ，本研究の目的及び本論文の構成を記した．

第2章では，希土類添加光導波路による光増幅の原理を記し，光増幅を劣化させる要因を分析して，希土類添加 PLC 光部品を実現する上で解決すべき課題を整理した．

第3章では，高品質希土類添加石英系 PLC 作製技術を開発した．火炎堆積法と反応性イオンエッチング法により高濃度の Nd 及び Er イオンをコアに添加した PLC を作製できることを示し，希土類イオンの分布が添加濃度とコアの組成に強く依存することを明らかにした．すなわちコアに共添加する P が少ない場合には，高い濃度で添加した希土類イオンはクラスタとして析出することを明らかにし，このクラスタが波長の－4乗に比例する散乱損失の原因となること，及びアップコンバージョン過程により Er イオンの消光を惹起することを明らかにした．P の添加量を増すことにより，クラスタの発生を低減化し，散乱損失の小さくかつ蛍光発光強度の大きい高品質希土類添加 PLC を作製可能であることを示した．

第4章では，希土類添加導波路材料の光増幅特性に与える影響を評価し，世界に先駆けて 1.5 μm 帯用 Er 添加ガラス導波路素子を実現した．まず Er イオンの濃度消光を支配するアップコンバージョン過程を考慮した光増幅器理論を構築し，この理論に基づき，Er 添加 PLC の光増幅特性の濃度依存性からアップコンバージョン過程のエネルギー伝達レートを定量的に評価することに成功した．その結果 PLC に添加した Er イオン間のエネルギー伝達レートが弗化物ガラスに添加したイオン間のレートより僅かに大きいことを明らかにした．この伝達レートを用いて高利得光増幅器を得るために必要とされる Er 濃度及び導波路長を設計し，Er 濃度 0.5wt%，導波路長 35cm の Er 添加 PLC を作製，利得 23dB の高利得を達成した．また，Er 添加 PLC を用いてファブリペロ共振器を構成し，出力 5 mW の高出力レーザー発振に成功した．

第5章では，導波路構造による励起効率の増強を評価し，Nd 添加 PLC による CW レーザ発振を実現した．まず，有限要素法による光導波路解析と実験によ

りNd添加PLCの導波路構造が制御性よく形成されていることを確認し，次にNd添加PLCファブリペロレーザを作製，その発振閾値がコア幅8 μmで最小となることを明らかにした．導波路の散乱損失を考慮したレーザ理論に基づき，コアの狭小化に伴う励起光密度及び散乱損失の増大のトレードオフにより最適コア幅が定まることを示した．その結果最適コア幅を有するNd添加PLCを用い，発振閾値25mW，微分効率2％の特性を有する半導体レーザ励起PLCレーザを得ることに成功した．

第6章では，前章までに得られた結果を基に，Er添加PLCにより受動光回路要素を構成し，1.5 μm帯用光集積回路として損失補償光分配器及び能動リング共振器を実現した．まず，Y分岐1×2光分配器を設計・作製し，1.5 μm帯損失補償光分配動作に初めて成功した．さらに方向性結合器と交差を備えたEr添加PLCリング共振器を設計・作製し，世界で初めて希土類添加集積リングレーザ，及びフィネス可変光周波数弁別器の実現に成功した．

第7章では，各章で得られた知見をまとめて総括した．

論文調査の要旨

実用的な集積光部品である石英系プレーナ光波回路(PLC)は，現在光通信システムへの応用が進められているが，さらに適用領域を拡大するためには光増幅などの能動機能を付与することが不可欠となっている．本論文は希土類イオンを添加した石英系PLCについて，能動光集積回路の実現を目指し，新たに開発した方法により光導波路を作製し，導波路材料およびその構成と光増幅特性の関係を調べ，物理的見地から議論するとともに，能動光集積回路への応用を検討したもので，以下の成果を得ている．

1．火炎堆積法と反応性イオンエッチング法により高濃度に希土類イオンをコアに添加した石英系PLCの作製技術を開発している．コアの組成と希土類イオンの微視的分布の関係を調べ，コアに共添加するP_2O_5が少ない場合には，高い濃度で添加した希土類イオンはクラスタとして析出すること，及びP_2O_5を22重量％程度添加することにより，クラスタの発生を低減化できることを明らかにしている．この結果，散乱損失の小さく，かつ蛍光発光強度の大きい高品質希土類添加PLCの作製を可能としている．

2．希土類添加導波路材料が能動PLCの光増幅特性に与える影響を理論的・実験的に評価し，世界に先駆けて1.5 μm帯用Er添加ガラス導波路光増幅器及びレーザを実現している．Erイオンの濃度消光を支配するアップコンバージョン過程を考慮した光増幅器理論を構築し，この理論に基づき，Er添加PLC光増特性の濃度依存性からアップコンバージョン過程のエネルギ伝達レートを定量的に評価し，PLCに添加したErイオン間のエネルギ伝達レートが弗化物ガラスに添加したイオン間のレートより僅かに大きいことを明らかにしている．この伝達レートを用いて高利得光増幅器を得るために必要とされるEr濃度及び導波路長を設計し，Er濃度0.5重量％，導波路長35cmのEr添加PLCを作製し，23dBの高い利得を達成している．また，Er添加PLCを用いてファブリペロ共振器を構成し，出力5mWの高出力レーザ発振に成功している．

3．導波路構造による励起効率の増強を理論的・実験的に検討し，Nd添加石英系PLCによるCW（連続発振）レーザの発振を実現している．有限要素法による光導波路解析と実験により，Nd添加PLCの導波路構造が制御性よく形成されていることを確認するとともに，実際にファブリペロレーザ共振器を構成し，そのレーザ発振閾値がコア幅8 μmで最小となることを明らかにしている．導波路の散乱損失を考慮したレーザー理論に基づき，コアの狭小化に伴う励起光密度の増加と散乱損失の増大の兼ね合いにより最適コア幅が定まることを明らかにしている．最適コア幅を有するNd添加PLCを用い，発振閾値25mW，微分効率2％の特性を有する半導体レーザ励起PLCレーザを得ている．

4．上記検討結果を基に，Er添加PLCにより1.5 μm帯用能動光集積回路を初めて構築している．Y分岐1×2光分配器を設計・作製し，1.5 μm帯損失補償光分配動作に成功している．さらに，方向性結合器と交差を備えた能動リング共振器を設計・作製し，集積リングレーザ及びフィネス可変光周波数弁別器を実現している．

以上，要するに本論文は，希土類添加石英系PLCによる能動光集積回路の実現を目的とし，新たに開発した方法により光導波路を作製し，導波路材料およびその構成と光増幅特性の関係を調べることにより物理的見地から議論するとともに，能動光集積回路への応

用を検討したもので，材料工学及び光電子工学に寄与するところが大きい．よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める．

氏　名（本籍）　坂本慶司（福岡県）
学位記番号　総理工博乙第182号
学位授与の日附　平成5年7月27日
学位論文題目　プラズマ加熱用大電力電磁波の発振と伝送に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教授　河合良信
（副　査）　〃　〃　伊藤智之
〃　〃　〃　神田幸則
〃　〃　〃　村岡克紀

論文内容の要旨

大電力電磁波の発振および伝送に関する研究は，これまでに通信，放送，誘電体加熱等への応用を中心に行われてきたが，現在では核融合分野における磁気閉じ込めプラズマの加熱もその大きな応用分野の1つとなっている．磁気閉じ込めプラズマでは核融合反応を持続させるためにそのイオン温度を1億程度以上に加熱しなければならないが，このためにはプラズマを追加熱する必要がある．大電力電磁波は，プラズマ追加熱の手段として使用できるだけでなく，トカマク型プラズマ閉じ込め装置におけるプラズマ電流の駆動法として使用できその定常化運転に道を開くことも可能である．プラズマ加熱に用いられる周波数帯には，電子加熱のための100GHz帯（電子サイクロトロン共鳴波帯;ECRF），あるいは電流駆動に適した数GHz帯（低域混成波帯;LHRF）等がある．本論文は，大型装置におけるプラズマの電磁波による加熱のために必要なこれらの周波数領域の大電力電磁波の発振と伝送に関する実験および理論的研究に関するものであり，7章から構成されている．

第1章では，電磁波によるプラズマ加熱の現状および大電力電磁波源の開発状況を概観し，本研究の意義と目的について述べた．

第2章では100keV以下，数10Aの電子ビームを用いた電子管による電磁波の発振について記述した．LHRF用電子管として2GHz大電力クライストロンについて研究し，出力窓での放電による異常加熱を抑制することにより，2GHzにおいて出力1MW，パルス幅10秒の発振に成功した．ECRF電子管としては回廊モードを発振モードとしたジャイロトロンについて研究した．その結果，モード変換器を内蔵したジャイロトロンで周波数120GHz，出力460kW，パルス幅100ミリ秒を得た．

第3章では，ミリ波帯自由電子レーザーについて述べた．まず，ウイグラー（電子ビームと電磁波の相互作用部で周期磁場配位を持つ）中での電子軌道を解析し，軸上でウイグラー磁場強度が最小となるいわゆる収束型ウイグラー磁場配位が電子ビーム伝送に対し有効であることを示した．また，軸磁場印加時には電子のジャイロ共鳴の高次モードが存在し，これが電子ビーム伝送特性を著しく劣化させうることを明らかにした．次に自由電子レーザの設計製作を行い，誘導型線形加速器（インダクションライナック）による1MeV，数100Aクラスの大電流相対論的電子ビームを用いた自由電子レーザーの実験を行った。ウイグラーの永久磁石列のポールピース面を放物線状に整形して収束磁場配位を形成させることにより長さ1.5m，内径22mmの導波管において高い伝送効率（80%以上，ビーム電流約300A）を得た．また，前述の電子のジャイロ共鳴の高次モードによるビーム伝送特性の劣化を観察し解析結果と非常によく一致することを示した．ミリ波増幅実験では，45GHzにおいて空間成長率56dB/m，増幅利得52dB，出力6MWを達成した．これは先に述べたように細い内径の導波管において安定な電子ビーム伝送が達成されたため大電流の電子ビームと高い電力密度の電磁波の強い相互作用が可能となり，結果として短い相互作用長で大きな利得が得られたものである．

第4章では，大電力電磁波の導波管伝送において生じる放電現象の問題を論じた．周波数GHz程度以下，数kW以上の電磁波伝送では，真空中での高周波放電が大きな問題となる．これは導波管壁の2次電子放出に起因する高周波電界との共鳴的な電子増倍現象すなわちマルチパクタ放電が生じるためである．この章ではまず，マルチパクタ現象の数値解析法を開発し過去行われた実験との比較を行い，その実験結果の説明に成功した．次にプラズマ加熱用アンテナで重要となる磁場中でのマルチパクタ放電の実験を行い，これによる導波管の著しい温度上昇（100度/0.1秒）を観測するとともにカーボンコーティングで抑制されること

を示した.

第5章では，大電力電磁波の放射及びモード変換に関する研究について記述した．アンテナからの電磁波放射の新しい計算法を提案するとともに，ミリ波伝送系における主要な構成要素であるモード変換器（ジャイロトロンの出力モードである回廊モードから長距離伝送に適したガウス型電磁ビームモードへのモード変換）について，準光学型モード変換器を開発しこの検証実験を行い，回廊モードより有効にガウス型電磁ビームに変換されることを示した.

第6章では，大電力電磁波の実際の大型トカマクプラズマの加熱への適用として，前章までに研究した内容に基づいてJT-60用LHRFシステム，次期実験炉用ECRFシステムの検討を行い，さらにJT-60におけるおけるLHRFによるプラズマ電流駆動及び電子加熱実験について記述した．電流駆動実験では，2章で述べた大電力クライストロンを使用し，電子密度3.1×10^{12}個cm^{-3}において3.1MW（2GHz）の入射により2MAのプラズマ電流の駆動に成功した．また，電子加熱実験では，電子密度1.7×10^{13}個cm^{-3}において2.4MWの入射により，中心電子温度6.0keVを得た.

第7章は，本研究で得られた成果の総括である.

論文調査の要旨

高温プラズマの高周波加熱は，大電力電磁波をプラズマに印加することにより，電磁波のエネルギーをプラズマに吸収させ，プラズマの温度を上げる加熱法であり，(1) 発振器をプラズマ発生装置から切り離すことができる，(2) プラズマの局所加熱が行える，(3) トカマクプラズマにおいては波の伝播方向を制御することにより電流駆動が可能になる，こと等の特徴をもっており，核融合研究において不可欠の加熱法となっている.

大型トカマクプラズマの電子加熱には周波数100GHz帯，出力1MW，電流駆動には数GHz帯，出力1MWの大電力電磁波が必要であり，これらの周波数での大電力発振源は存在しないので，独自に開発しなければならない。また，発振器の大電力化に伴い，それに対応できる伝送システムの開発も必要である.

本論文は，電子サイクロトロン共鳴周波数及び低域混成波周波数に対応する高周波発振源，伝送系，放射について考察を行うことにより，大型トカマクプラズマ高周波加熱に必要な大電力電磁波の発振と伝送について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．大容量電子ビーム（エネルギー 100keV 以下，電流数 10A）を用いて大電力電磁波の発振について研究を行い，周波数 2GHz；出力1MW（パルス幅10秒）の大電力クライストロン，周波数 120GHz，出力460kW（パルス幅100ミリ秒）のジャイロトロンの発振に成功している.

2．相対論的電子ビームを利用した大電力ミリ波自由電子レーザについて，ビーム伝送及びミリ波増幅の解析と実験を行い，収束型ウイグラーを用いることにより，軸磁場の印加によるビームのドリフトによる発散を抑え，ビーム伝送効率80％以上を得ている．45GHz のミリ波増幅実験では，大電流の電子ビームを細い内径の導波管に入射し，電子ビームと電磁波の強い相互作用を起こさせることにより，最大空間成長率 56db/m，利得 52db，最大電力 6 MW を達成している.

3．マイクロ波領域の大電力電磁波の導波管伝送で問題となるマルチパクタ放電の数値解析法を開発し，過去に行われた実験結果の説明に成功している．次に，プラズマ加熱用アンテナで重要となる磁場中のマルチパクタ放電の実験を行い，カーボンコーティングにより導波管の著しい温度上昇を抑制できることを確認している．この結果をもとにJT-60トカマクプラズマの低減混成波用アンテナに適用し，アンテナ内の放電を未然に防止している.

4．ミリ波帯電磁波の放射を，電磁波の強度及び位相をそれぞれ一次関数で近似することにより解析的に求め，少ないメッシュ数で正確な数値解析を行う方法を提案し，ガウス型電磁ビームの反射板を用いた伝送特性の解析に適用し，数値解析法の有効性を示している．また，2枚の反射板を用いて準光学型のモード変換器を開発し，回廊モードからガウス型電磁波ビームモードに有効に変換されることを示している.

5．JT-60トカマクプラズマの電流駆動実験用の位相制御型アレイアンテナを開発し，2GHzの大電流クライストロンにより，電子密度$3.2\times10^{18}m^{-3}$で，2MAの電流駆動に成功している．また，電子加熱実験を行い，プラズマ中心で 6 keV の電子温度を達成している.

以上要するに，本論文は大型装置におけるプラズマの高周波加熱に必要な大電力電磁波の発振と伝送につ

いて実験と数値解析を行い，大電力下でのそれらの問題点について具体的な方策を示し，大電力電磁波の発振と高効率伝送に成功すると共に，大型トカマクプラズマ装置 JT-60 に適用し，高周波加熱の有効性を示しており，プラズマ物理学に寄与するところが大きい．よって，本論文は，博士（理学）の学位論文に値するものと認められる．

氏　名（本籍）　平　田　勝　哉（香川県）
学位記番号　総理工博乙第183号
学位授与の日附　平成５年７月27日
学位論文題目　ギャロッピングの発生機構に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　松　尾　一　泰
（副　査）　〃　〃　中　村　泰　治
〃　〃　〃　本　地　弘　之
〃　〃　〃　益　田　光　治

論文内容の要旨

近年，自然風にさらされる高圧送電線，吊橋，高層ビルなどの構造物は，その長大化，軽量化等に伴う可撓性の増大および構造減衰率の減少が著しいため，風による自励振動（フラッタ）を起こす可能性が増えている．フラッタは往々にして構造物の部分的あるいは全体的崩壊をもたらすので，その防止は構造物の耐風設計上最も重要な課題の一つとなっている．

構造物の形は一般に非流線形であるため，そのまわりの流れは剝離しており，従って，構造物に生じるフラッタは剝離流フラッタであって，剝離流特有の機構によって発生することが多い．剝離流については理論的取り扱いが困難であって，剝離流フラッタについても同様に理論にとぼしい．

本研究が対象とするギャロッピングは剝離流フラッタの一つであるが，例外的に準定常理論による取り扱いが高風速に限って可能である．しかし，低風速での取り扱いや，ギャロッピングが何故起こるのかという発生機構に関係する基本的問題は未解決のままである．これに対し，本研究では，低風速まで研究範囲を広げ，発生／消失機構に統一的説明を与えることをこころみた．ここで，本研究の最大の特徴は，ギャロッピングの発生／消失機構の解明のため，物体の後流中に長いスプリッタ板を挿入した場合も，スプリッタ板がない場合と同様に，詳しく調べた点である．

本研究は，全８章から構成されており，各章の内容を以下に列記する．

１章は序論で，本研究の背景と目的を解説した．

２章では，本研究の実験方法および実験装置について述べた．本研究は風洞実験に依っている．その内容は，自由振動実験によるギャロッピング空力発散率の測定，強制振動実験による物体表面の圧力測定および流れの可視化などである．

３章では，曲げ一自由度フラッタの発生域を，自由振動実験により明らかにした．その結果，よく知られている高風速ギャロッピングと渦励振以外にも，あらたに低風速においてギャロッピングが発生することを明らかにした．また，同じ条件でかつ後流中に長いスプリッタ板を設置したとき，断面が流れ方向に薄い物体からある程度偏平な物体まで，風速の広い範囲でギャロッピングが発生することもしめした．本研究では，それをスプリッタ板つきギャロッピングと呼ぶ．また，スプリッタ板を挿入した場合の結果に一般性をもたせるため，スプリッタ板の長さの影響について調べた．以上の結果から，ギャロッピングの発生機構を考える上で鍵となる新しい実験事実を四つ指摘した．

４章では，ギャロッピングの発生機構を論じた．まず，ギャロッピング発生の基本機構とその問題点について述べ，つぎに，この基本機構を機能させるためには“剝離域にある側面間の圧力均一化の阻害”という前提条件が必要であると考え，その前提条件を満足する三つの例を挙げた．それらは，(1)“スプリッタ板”(2)“低風速”，(3)“剪断層と後縁の直接干渉”の三つである．上記の三つの例に関し，強制振動実験をおこない，この仮説を実証した．その際，３章で指摘した四つの実験事実が，この仮説の重要な証拠となることを明らかにした．

５章では，ギャロッピングの消失機構を論じた．まず高風速で断面を流れ方向に偏平化していったときの消失機構を，つぎに断面形状を固定して風速を下げていったときの消失機構を調べ，ギャロッピングの消失が，断面の流れ方向への偏平化，あるいは風速の低下につれて，剪断層と後縁の直接干渉が強められた結果であることをしめした．

６章では，３章から５章までにおこなったギャロッピングの発生機構と消失機構に関する研究を総括した．

7章では，6章までのギャロッピングに関する基礎研究の結果にもとづいて，ギャロッピングの空気力学的防振対策について述べた．

8章では，本研究で得られた成果をとりまとめ，結論とした．

論文調査の要旨

ギャロッピングは，風による構造物の自励振動（フラッタ）の一種であって，送電線のほか，橋梁など他の多くの構造物に発生する．送電線では，線間接触，断線等，電気的・機械的事故が避けられない．ギャロッピングも含め，フラッタの防止は，構造物の耐風設計上最も重要な課題となっている．有効な防振手段を見出す上で，フラッタの発生機構の正確な理解が必要であることはいうまでもない．しかし，構造物のフラッタはいわゆる剝離流フラッタであって，剝離流の取り扱いの難しさのため，発生機構について未解決の問題が，現在，なお多く残されている．本研究の対象とするギャロッピングは，準定常理論による取り扱いが，例外的に高風速に限り可能である．しかしフラッタ限界風速の推定など低風速における問題，また，ギャロッピングが何故起こるかという流体力学的発生機構に関する基本的問題は未解決のままである．

本論文は，ギャロッピングの発生機構に関し，矩形柱を主供試体とした風洞実験の結果を取りまとめたものである．実験は，自由振動実験によるギャロッピング発生範囲の同定ならびに強制振動実験による表面圧力の計測と流れの可視化よりなっている．本研究の特徴は，ギャロッピングの発生機構を解明する目的で，柱体背後に長いスプリッタ板を挿入し，単独柱体と同様な実験を試みたことである．本論文で得られた主な知見は以下のとおりである．

1．矩形柱のギャロッピングは，従来の知見と大きく異なり，断面比と風速域の幅広い範囲で発生する．すなわち，カルマン渦に関する共振風速を基準にして，高風速と低風速に分類すると，1）正方形柱など臨界断面より厚い柱体に既知の高風速ギャロッピングが発生する．2）逆に，臨界断面以下の薄い柱体で低風速ギャロッピングが発生する．3）物体背後に長いスプリッタ板を挿入すると，断面比のきわめて小さい柱体から大きい柱体まで広範囲にギャロッピングが発生する．その風速域は低風速より高風速の広範囲にわたる．4）この内，低風速ギャロッピングの特性は，スプリッタ板のない柱体のギャロッピングに一致する．以上の実験事実は，ギャロッピングの発生機構を解く上で重要な鍵を与える．

2．ギャロッピングの発生機構に関し，従来の考察には重大な不備がある．すなわち，「剝離域内にある上下両側面上の流れが互いに干渉しない」という前提条件が必要であり，この前提条件が満足されてはじめて，ギャロッピングの発生にいたる．

3．前項の考察に基づき，実験事実を検討すると，1項に示したいずれのギャロッピングもこの前提条件を満足することがわかる．すなわち，1）臨界断面において，実質的に剪断層再付着現象が始まる．したがって，臨界断面以後，上下側面流は互いに干渉しない．2）振動後流の柱体側面流へおよぼす影響は風速の低下とともに漸近的に消失する．つまり，上下側面流は低風速では互いに干渉しない．3）スプリッタ板により上下側面流は互いに独立の流れとなる．

4．高風速で柱体断面比を増すとき，また，断面比を固定して風速を低下させるとき，いずれの場合もギャロッピングは消失する．それらはともに，剝離剪断層と後縁の直接干渉が強められた結果である．

以上要するに，本論文は，風洞実験によりギャロッピングを研究し，従来知られていた高風速ギャロッピングのほか，広範囲の風速と断面形状の領域でギャロッピングが発生することを明らかにするとともに，ギャロッピングの発生と消失の流体力学的機構について統一的説明を提示したもので，風工学，流体工学上寄与するところが大きい．よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる．