

超電導材料及びその応用に関する調査研究*

超電導調査研究グループ**

Survey of the Superconductors and those Applications by The Members of Research Group for the Survey

Abstract

Owing to the discovery of ceramic superconductors with higher transition temperatures than the boiling-point of nitrogen, it is expected that various conventional instruments in engineering field could be improved in size and capacity remarkably, and lots of new technologies might come out.

The ceramic superconductors and those applications were surveyed in S.R.I. to cope with the above mentioned trend. Besides the summary of up-to-date technologies, lots of new ideas are proposed in the fields of ship and marine technologies, and some practical subjects to be investigated are indicated. In addition, an experiment on plasma sprayed coatings of the ceramic superconductor was conducted.

The results of investigation are presented on the following six fields. (1) Fabrication of the ceramic superconductors in each state of bulk, thin film, thick film and wire, (2) Low temperature technologies, such as a FPR-made cryostat and cooling method with low temperature fluids, (3) Applications to such sensors as SQUID and NMR, (4) Applications to fluid and combustion controls, and magnetic fluid related technologies, (5) Applications to ship power systems, such as an electric motor, energy storage and load suspension, (6) Applications to ship and marine systems, such as canal navigation control, ship caisson control, a moduled ship, ship maintenance robots, a wave energy transducer and a mooring system.

*「超電導」の表記については、運輸省内の使用例に従って統一した。

**グループ構成員

推進性能部：日夏宗彦

運動性能部：上野道雄

構造強度部：松岡一祥

機関動力部：塚田悠治、波江貞弘、青木修一、
平岡克英、高井元弘(現材料加工部)、
春海一佳、汐崎浩毅

材料加工部：天田重庚、島田道男、秋山 繁、
勝又健一、植松 進、千田哲也

装 備 部：勝原光治郎、山之内 博

システム技術部：有村信夫

原子力技術部：松岡 猛(現システム技術部)

海洋開発工学部：吉元博文、影本 浩(元)

水海技術部：在田正義、前田利雄、桜井昭男
大阪支所：山根健次

原稿受付：平成元年6月30日

目 次

1. まえがき	塚田	3	6. 流体・燃焼場などへの応用	44
2. 超電導技術の概要	汐崎・波江	3	6.1 超電導電磁推進および流場制御	44
2.1 経緯と現状		3	6.1.1 諸論	44
2.2 超電導現象の物理機構		5	6.1.2 数値計算	45
2.2.1 超電導物質の性質		5	6.1.3 結果及び考察	45
2.2.2 BCS理論		5	6.2 燃焼制御	52
2.2.3 高温超電導に対する理論		5	6.2.1 はじめに	52
2.2.4 第1種超電導物質と 第2種超電導物質		6	6.2.2 燃焼に及ぼす電場の効果	52
2.3 超電導技術の応用分野の概要		6	6.2.3 プラズマの利用	56
3. 超電導材料		7	6.2.4 燃焼に及ぼす磁場の効果	58
3.1 製造法の現状と課題		7	6.2.5 まとめ	60
3.1.1 バルク材	高井	7	6.3 磁気分離及び選別	山之内 60
3.1.2 薄膜の作成	高井・秋山	8	6.4 磁性流体	青木 63
3.1.3 厚膜および線材の作成	千田	11	6.4.1 はじめに	63
3.1.4 超電導材料の特性測定技術	天田	11	6.4.2 磁性流体軸シール	64
3.2 プラズマ溶射法による超電導皮膜の作製	植松・千田	12	6.4.3 エネルギー変換装置	65
4. 超低温技術		17	6.4.4 磁性流体比重差選別	67
4.1 FRPクライオスタット	桜井・前田	17	6.4.5 磁性流体のその他の応用	67
4.1.1 極低温用FRP		17	6.4.6 まとめ	71
4.1.2 極低温断熱		20	7. 船用機関への応用	77
4.1.3 クライオスタット構造		21	7.1 超電導電動機	高井 77
4.1.4 今後の研究課題		21	7.2 超電導コイルによるエネルギー貯蔵	天田 80
4.2 低温流体による冷却技術	波江・汐崎	21	7.3 軸受等荷重支持への応用	81
4.2.1 冷却技術の背景		21	7.3.1 磁気軸受	高井 81
4.2.2 極低温流体による冷却方法と 伝熱特性		22	7.3.2 磁気浮上	高井 82
4.2.3 超電導体の安定化設計		24	7.3.3 フライホイールへの応用	天田 82
4.2.4 冷却性能改善による超電導体の 高性能化		25	7.4 超電導電気推進とその原動機	平岡 83
4.2.5 今後の検討課題		27	7.4.1 はじめに	83
4.3 低温用材料	松岡(一)	27	7.4.2 ディーゼル機関とガスタービン 機関の現状	83
4.3.1 熱的性質		27	7.4.3 燃料電池	88
4.3.2 機械的性質		30	7.4.4 推進システムの重量と容積	90
5. 超電導を利用した新計測技術		35	7.4.5 まとめ	91
5.1 強力な磁場を利用する計測法	高井	35	8. 船舶・海洋システムへの応用	94
5.2 SQUIDなどを利用する計測法	島田	38	8.1 運河航行への応用	上野 94
5.2.1 ジョセフソン効果と計測技術		38	8.2 浮力制御および磁力接合	影本・吉元 95
5.2.2 SQUIDの原理及び特長		38	8.2.1 ケーソンの出し入れによる浮力制御	95
5.2.3 微弱磁界の計測		40	8.2.2 磁力接合モジュール船	95
5.2.4 SQUID計測技術の工学的応用		41	8.3 磁気吸引作業ロボット	山根 96
			8.3.1 壁面移動ロボットの現状	96
			8.3.2 超電導磁石吸着型の船体側壁作業 ロボット	97
			8.4 波力発電	天田 99
			9. むすび	塚田 101

1 まえがき

最近の高温超電導材料の目ざましい発展は、船舶、海洋技術の将来に強烈なインパクトを与え、研究開発の分野にも大きな影響があるものと予想される。当所では、昭和62、63年度にわたり、将来の研究計画に資することを目的として、調査研究を行った。対象を推進装置に限定せず、船舶や海洋の幅広い分野について技術の現状調査とそれに基づく研究テーマの発掘を行った。本報告はその結果をまとめたものである。

現時点での船舶海洋部門における超電導技術開発は、推進装置への応用に限られており、わが国はかなり進んでいる。推進法には2種類あり、第一の超電導電磁推進は超電導電磁石による電磁推進力を利用したもので、実証実験船の建造が進行中である。第二の超電導電気推進は超電導モーターによりプロペラを駆動するもので、数百KW級のモーターの試作が行われた。船舶以外の工業分野においても開発の進んでいるものは、電力、鉄道など限られた部門だけである。

当所においては、既に（超電導）電磁推進に関連して、理論的な研究が行われている。このうち、流れ場の制御については、幾つか報告がなされている。また極低温技術、セラミック溶射技術などの関連技術の研究も進んでいる。

本調査研究は、まず文献調査を中心とした技術の現状の調査、分析を行った。具体的な技術開発例が限られているので、調査範囲を磁気利用技術などまで広げ、今後、超電導利用の可能性のあるものを、できるだけ抽出するように努めた。調査結果を基に今後の研究テーマの提案を行ったが、この際、新しいアイデアもできるだけ拾い出すようにした。この様なアイデアは、現在は可能性が低くても、技術の進歩や社会状況の変化により、将来の開発対象として生きてくるものもあり、技術の発展の激しい現段階では大事にすべきであると判断した。

調査対象は、(1)超電導材料 (2)極低温技術 (3)超電導利用計測技術 (4)流体・燃焼場への応用 (5)船用機関 (6)船舶・海洋システムの6項目に分類した。

(1)新しい酸化物系高温超電導材料関係の研究は、材料特性の向上と加工技術に集中している。現時点では、実用に供し得る材料は現れていない。この調査の範囲で材料開発を直接扱うことは少ないと思われるが、全ての開発の出発点になるので、まず取り上げた。従って、解説的内容が主体である。また、当所で酸化物超

電導材料のプラズマ溶射を試みた結果についても若干触れた。

(2)は、新素材製のクライオスタット及び低温流体による冷却技術を主体に述べている。開発が進んでいる分野であり、当所の研究実績も豊富である。

(3)磁気利用計測技術、特にNMR、SQUIDを中心に記載した。超電導利用技術の中でも実用化が進んでいる分野であり、生体、材料、海洋への応用が期待される。

(4)流体への応用は、基礎的な電磁力による流れ場への影響及びその研究手法の数値計算方法について述べている。特に、船体まわりの流れ場の制御についてその可能性、問題点を論じている。開発の進んだ電磁推進は、簡単に触れるだけにした。燃焼場の電磁場による制御については、多くの報告があるが、系統的に研究は行われていない。ここでは今までの報告の紹介にどどめた。効果の確認はこれからの問題である。

(5)船用の機関に関しては、超電動モーター、磁気軸受けなど要素と、動力システムの問題に分けられる。動力システムについては、検討例は僅かである。ここでは、超電導電気推進システムについて紹介し、組み合わせる原動機の特性とシステムの重量の試算例を示した。

(6)この部門は、殆ど未開拓の分野である。そのため、内容は新しいアイデアで占められている。実用化には問題も多いが、将来のテーマとしては検討に値するであろう。

以上見られるように、分野毎に開発の進行、技術レベルに著しい違いがあるので、各章の構成、記述スタイルは、まったく異なっているが、強いて統一しないことにした。また、当所で研究実績のあるものは、なるべく項を別にして詳しく説明した。

2 超電導技術の概要

2.1 経緯と現状^{1),2),3)}

1911年、オランダのカメリン・オンネスは、ヘリウム液化温度(4.2K)まで冷却した水銀の電気抵抗が0になることを発見した。この現象は超電導と名付けられ、以来水銀以外にも同様の性質を示すいくつかの物質が見いだされた。しかしそれらの物質の臨界温度 T_c (超電導現象が維持される最高温度)は最も高いものでも23K程度であり、超電導は超低温の世界での固有の現象と考えられていた。1957年には超電導現象を物理的に説明した初めての理論(Bardeen-Cooper-Schrieffer

によるいわゆるBCS理論)が発表され、そこからは T_c の上限として30~40Kという値が導かれた(BCSの壁)。

ところが1986年、IBMチューリッヒ研究所のミュラー、ペドノルツらは、ランタン系の酸化物(La-Ba-Cu-O)が、従来にない高い温度で超電導を示すことを発見した。続いて、イットリウム系の酸化物(Y-Ba-Cu-O)がBCSの壁をはるかに越える高い T_c (95K前後)を持つことが発見された。特にイットリウム系の T_c は窒素液化温度(77K)を越えており、超電導維持のための冷却には液体窒素を用いばすむため、従来の液体ヘリウム冷却に比べ格段に冷却装置規模及びコストが小さくなり、超電導の工学的応用の可能性が広がって、産業界の注目を集めるところとなった。

その後、125Kという高い T_c をもつタリウム系酸化物や、酸化物の超電導には不可欠と言われていた銅を含まずに高い T_c を示すバリウム-カリウム-ビスマス酸化物など、様々な組成の酸化物超電導材料が発見された。また研究対象も一時の T_c の高さを競うものから、より実用的に、臨界電流密度 J_c (超電導を維持した状態で流すことのできる最大電流/単位面積)、臨界磁場 H_c (同、加えることのできる最大磁界)を向上させるためのものへと移りつつある。

超電導状態と温度、電流密度、磁界にはFig.2.1.1のような関係がある。図から明らかなように、ある大

きさの電流を流して使用するためには、 T_c よりかなり低い温度まで冷却して使わなければならない。逆に窒素液化温度で使おうとすれば、それよりかなり大きな T_c をもつ物質が必要である。

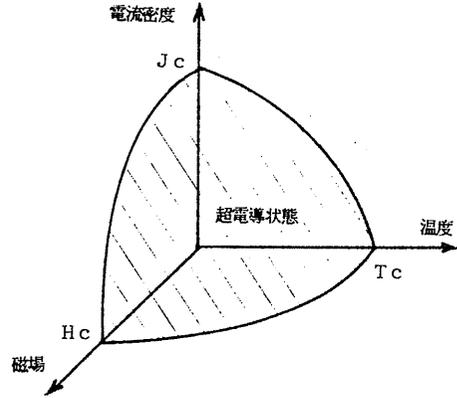


Fig.2.1.1 超電導状態と温度、電流密度、磁界の関係の概念図

現在開発されている酸化物超電導材料の、窒素液化温度における電流密度のトップデータをFig.2.1.2に示す(これを臨界電流密度 J_c と呼ぶことも多い)。図には、従来の代表的な超電導材料であるニオブ合金のデータも併記している。

酸化物超電導物質には結晶に電流が流れやすい方向があり、このため線材に比べ結晶方向をそろえやすい薄膜材料が大きな電流密度を示している。

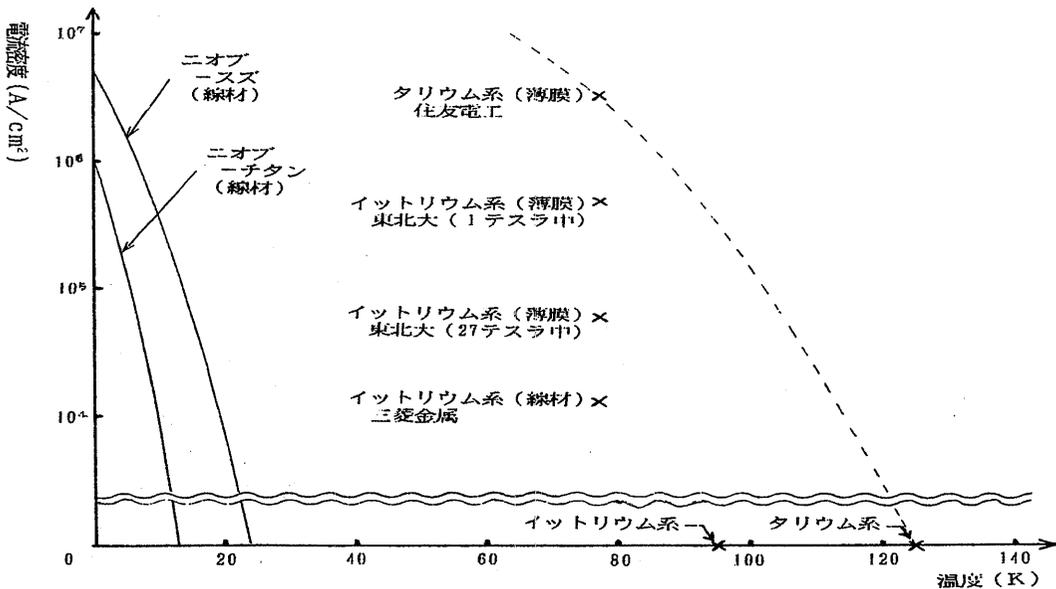


Fig.2.1.2 電流密度のトップデータ (1989年2月1日現在)

2.2 超電導現象の物理機構^{1),3),4),5)}

2.2.1 超電導物質の性質

超電導物質には4つの重要な性質がある。

第1は電気抵抗が0であることで、最も基本的な性質である。

第2はマイスナー効果と呼ばれる、超電導物質が外部磁場を完全に排除して、内部磁界を常に0に保つ性質である(完全反磁性)。電気抵抗が0であることから、超電導物質内部の磁場が変化しないことが理論的には導かれる。しかし、内部磁場が常に0になることまでは導かれない。すなわちマイスナー効果は電気抵抗0とは別の性質である。

第3は、ジョセフソン効果と呼ばれる、超電導電流が薄い絶縁膜を通り抜けて流れる性質である(トンネル効果)。この電流は加える磁界の大きさによって流れたり流れなかったりする。これを利用してスイッチング素子をつくることができる。

第4は磁束の量子化と呼ばれる現象である。超電導物質でリングをつくり、そこに電流を流すと、中心の穴には磁束が発生する。ところがその大きさは、あるとびとびの値に限られる(量子化)。これは次節で述べるように、リングを流れる全電子がある秩序にしたがっており、同じ波に乗って運動しているために、その特徴が巨視的レベルにまで現れたものである。

2.2.2 BCS理論

BCS理論では、電子が結晶格子との相互作用によって2つづつ対をつくる(これをクーパー対と呼ぶ)ことから超電導現象を説明する。

結晶格子の間を電子が通過する際、負の電荷をもつ電子は、正の電荷を持つまわりの格子イオンを引き付ける。格子イオンは電子に比べて質量が大きく(慣性が大きく)、ゆっくり動く。このため電子が通過した後にも正電荷の偏りが残り、ここにもう1つの電子が引き付けられる。こうして格子イオンの振動を仲立ちとして間接的に2つの電子に引力が働き、対が形成される。一方このように電子対が形成されると、パウリの排他原理と呼ばれる、電子相互の存在位置にある種の制約を課す原理によって、1組の電子対は他の電子対と無関係に運動することができなくなる。すなわち、電子全体が1つの秩序に従って運動するようになる(具体的には、全ての電子対の波が同じ波長、位相を持つようになる)。

一般に電気抵抗は、個々の電子が格子イオンに衝突し、散乱されることから生じる。ところが電子全体が

秩序を持って運動している場合は、1つの電子が散乱されることは、他の全ての電子が同時に散乱されることを意味する。これは確率的にほとんど起こり得ないことであり、実際には電子が格子によって散乱を受けない超電導状態となる。

絶対零度では格子イオンは静止しているが、温度が上がるにしたがって格子イオンは大きく振動するようになる。従って電子が対をつくる原因となる格子イオンの振動は、温度上昇と共に激しくなる格子振動に打ち消されて現れなくなり、電子は対を作れなくなる。これが T_c の存在する理由である。

この電子対を壊すのに必要なエネルギーをエネルギーギャップという。これが大きいほど超電導状態は安定であることになる。電子対を壊すエネルギーは、磁場によって与えることができる。 H_c が存在するのはこのためである。また物質に電流が流れると、そのまわりには磁界が生じる。電流がある大きさ以上になると、自ら作り出す磁界によって超電導状態は壊される。これが J_c の存在する理由の一つである。

銅、銀などの良導体は、もともと電子-格子イオンの相互作用が小さい。それが抵抗が小さい理由であるが、逆に電子は対をつくることができず、超電導状態になることはない。一般に超電導物質が絶縁体またはそれに近い物質であるのはこのためである。

2.2.3 高温超電導に対する理論

酸化物超電導の高い T_c は、BCSの壁を大きく上回っている。また、電子対の引力を格子イオンの振動に基づくとするBCS理論によれば、ある格子イオンを、化学的性質が同じで質量が異なる同位体で置き換えれば、電子間引力に影響が現れ、 T_c が変化するはずであった(同位体効果)。しかしランタン系酸化物ではその影響が現れたものの、イットリウム系酸化物ではほとんど差がみられなかった。これらのことから、BCS理論に代わる新たな理論がいくつか提案された。

ただし、電子対そのものが超電導の原因であることを疑ったものは見られない。電子対の存在は実験的にも明らかであり、この電子対を形成する引力が何に起因するかが問題となっている。

エキシトン(励起子)理論と呼ばれる理論では、1つの電子が通過する際に、格子イオンそのものが引き寄せられて動くのではなく、格子イオン内に電荷の分極が起こり、それによって正電荷が集中するとしている。従ってイオンの質量は関係なく、同位体効果が現れないことも説明される。

一方引力の原因を、格子と電子の相互作用でなく電子のスピンの求め、互いに逆向きのスピンを持つ2つの電子が、共鳴状態電子結合と呼ばれる特殊な状態下で結び付き運動するとして説明する理論（アンダーソン理論）もある。

しかし逆にこれらの理論では、同位体効果を示す物質（ランタン系酸化物など）の説明がつかない。

また酸化物系超電導材料については、電流の担い手は通常正孔（ホール）であるが、物質によっては電子である場合も報告されている。

こうしたことから、様々な物質の超電導現象がおの別の物理機構に従っているのではないかという見方もあり、決定的な理論が無いまま現在に至っている。

2.2.4 第1種超電導物質と第2種超電導物質

超電導物質に加える磁界を徐々に強くしていくと、ある強さで物質への磁界の侵入が起こる。このとき、いきなり全体にわたって超電導状態が失われる物質（第1種超電導物質）と、物質内が磁束貫通部（常電導状態）とそうでない部分（超電導状態）に分かれ、さらにある磁界強さまで両者が共存する物質（第2種超電導物質）とがある。実用的な超電導材料はすべて第2種である。

第2種超電導物質において、電流がある程度大きく、自ら作り出す磁束が物質を貫通しているときを考える。このとき磁束には、電流との相互作用により力が働き、動こうとする。磁束が動くとき、それを妨げる方向に起電力が生じる（電磁誘導）。この起電力によって常電導部（抵抗を持つ）に電流が流れると、発熱が起こり、超電導部分が壊される。ところが結晶中に不純物や格子欠陥などがあると、磁束はこれに「ピン止め」されて動かなくなり、発熱が防止される。これを利用して J_c を向上させることが行われている。

超電導材料に交流を流す場合はこのピン止めが逆に邪魔になる。電流が変化するにしたがって磁束も変化するが、このときピン止めのために追従遅れが起き、ヒステリシス損が生じて発熱が起こる。この磁束変化の追従遅れは、例えば導線であれば、線が細いほど減少する。そこで冷却面のメリットとも合わせ、実際の導線には多心細線が用いられている。

2.3 超電導技術の応用分野の概要^{2),5)}

現在一般に用いられている電磁石では、鉄心の物性からくる限界（飽和障壁）により、2テスラ以上の磁場を作り出すことはできない。この障壁はいくつかの

手法によって実験室レベルでは乗り越えられているものの、投入する電力のほとんどが発熱及びその冷却に費やされることになり、実用性はない。従って高磁場の利用は発熱の無い超電導コイルを用いて初めて実用化されるものと言える。

MHD発電は、導電性をもたせた高温燃焼ガスを磁界中に流し、フレミングの法則によって運動方向、磁界双方に垂直な方向に電位差を生じさせ、電力を取り出すものである。実用的な効率を得るためには高磁界が必要となる。

高エネルギー物理学の実験に用いられる粒子加速器では、高速帯電粒子を円運動させるため磁界によって進路を曲げている。磁界を強くしてより大きく曲げれば、この円の半径を小さくすることができ、用地、建設、運用コスト面で大きなメリットがある。

核融合実験においては、超高温のプラズマを壁面に触れさせることなく封じ込める必要があり、高磁界によるプラズマの制御が不可欠である。

リニアモーターカーは磁気反発力・吸引力を利用して浮上する。特に地震国である日本では軌道との隙間を広くとる必要があり、超電導磁石の高磁界にメリットがある。

超電導電磁推進船は、MHD発電とは逆に磁界と電流の相互作用から推進力を取り出すしゅみの船舶である。投入電力を効率よく運動エネルギーに変換するために高磁界が必要となる。

高磁界を利用した医療用センサーであるNMR-C Tでは、磁界が大きいほどより詳細な情報を取り出すことができる。

発電機及びモーターの電磁石に超電導磁石を使用すれば、磁束密度が大きくなり、鉄心も不要となって、大幅に小型軽量化することができる。

高磁界の応用には、多くの場合磁気シールドが問題となる。磁気をシールドするには、対象を厚い鉄板で覆う方法、カウンターコイルによって逆向きの磁界を作り打ち消す方法などがあるが、いずれも完全なものではなく、今後の課題となっている。

一方、超電導材料の電気抵抗が0であることをそのまま利用したものとしては、超電導コイルによる電力貯蔵や、大電力送電用の無損失ケーブルがある。

また、現在のLSI技術においては、既に電流の速度が高速化の壁になっており、さらに高速化を図るには、配線の絶対長さを短くすることが必要になっている。ところが従来の配線材料では、仮に技術的に小型

化できたとしても、結果として発熱が集中することになり焼けてしまう。これを解決するには発熱の無い超電導材料を用いるしかない。

超電導物質のジョセフソン効果を利用したものとしては、前述のジョセフソン素子や、微細な磁気のセンサーであるSQUIDがある。SQUIDは、超電導技術の応用分野としては、NMR-CTと並んで現在最も実用性が高いものである。

参考文献

- 1) 別冊サイエンス：高温超伝導，日経サイエンス社，初版（1987）
- 2) 別冊サイエンス：超伝導応用，日経サイエンス社，初版（1987）
- 3) 日本経済新聞社主催：日米高温超伝導シンポジウム講演集，日本経済新聞社，（1987）
- 4) 菅原 昌敬：超伝導の謎，森北出版，初版（1988）
- 5) 萩原 宏康：応用超伝導，日刊工業，初版（1986）

3. 超電導材料

3.1 製造法の現状と課題

La系酸化物が約30Kで超電導を示すことが発表されて以来、Y系、Bi系、Tl系と T_c が液体窒素温度を越える材料が次々と発見され、これらの材料の結晶構造や組成式の決定、超電導機構の解明、及び再現性のある試料の作成が進められてきたが、これらの材料が実用化されるためには、成膜化や線材化のプロセスの確立が不可欠である。そこで本章では、薄膜、厚膜、線材化の手法について調査し、検討した。

3.1.1 バルク材

酸化物超電導体の作成法は^{1),2),3),4)}、気相、液相、固相よりの方法で行われるが、バルク材の作成法としては、結晶生成速度の早い固相および液相からの作成が一般的である。いずれの酸化物超電導体も最初は固相法によって作成されており、操作は比較的簡単である。

原料となる希土類(La、Y、Erなど)やアルカリ土類(Ca、Sr、Ba、Biなど)の酸化物や炭酸塩とCuOあるいはCuO₂を秤量、混合後、400~900℃、数時間仮焼する。

仮焼体を粉碎、混合後プレスし、La-Ba-Cu-O系では、1100℃、Y-Ba-Cu-O系で900℃、Bi-Sr

-Ca-Cu-O系で800~880℃、数時間から数十時間保持し、炉冷する。原料を調整する方法として粉末を使う粉末攪はん法のほかに、成分元素の酸化物、酢酸塩などを水または酸に溶解し、共沈法などで沈澱させて得る方法もある。原理的には、後者の方が優れており、より均一な調整が可能となるが、バリウムのように沈澱が悪く、安定した試料が得られない場合もある。

固相法によって作成されたバルク酸化物超電導体は、焼結時の温度、雰囲気、焼鈍温度や時間などによって異なった超電導特性を示す。特に結晶中の酸素の量が重要とされ、酸素量により結晶構造が微妙に異なり、超電導特性に大きな影響を及ぼすとしている。(Fig.3.1.1、Fig.3.1.2)

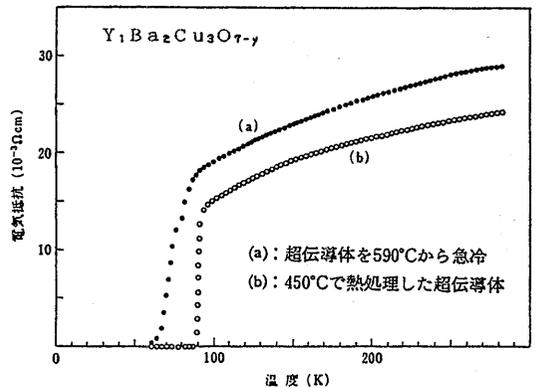


Fig.3.1.1 Y-Ba-Cu-O系の超電導遷移曲線¹⁾

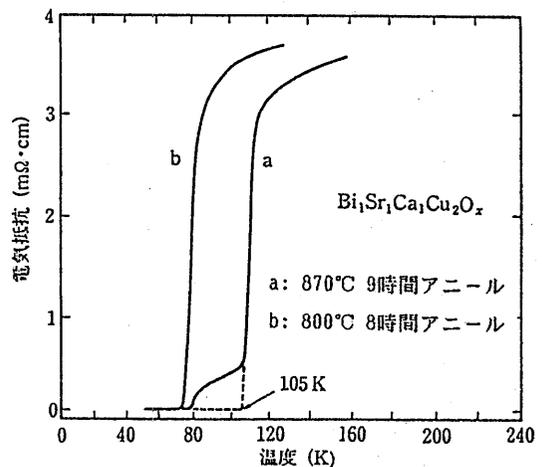


Fig.3.1.2 Bi-Sr-Ca-Cu-O系の超電導遷移曲線²⁾

実用の面からは、酸化物超電導材は金属材料系の超電導材と同様に線材としてまた薄膜としての使用が基本と考えられるが、バルク材としての焼結材は、現状では再加工が不可能に近い。しかし焼結材は構造材料としても強度が高いと考えられ、直接マグネットとしてあるいは、マイスナー効果を利用した浮力材、磁気遮蔽材として成形し、利用することも考えられる。

液相からの作製法は、原料を酸化物の溶液またはフラックス(材料によりCuやCuO+BaOが用いられる)に溶解させ、温度差により固相を析出させるものであるが、酸化物超電導体の単結晶の育成法としてよく用いられている。⁵⁾ 例えば、Y系の単結晶については、CuOあるいはCu+BaOを用いたフラックス

法により、無機材研(日)、NTT(日)(Fig.3.1.3)⁶⁾、ATT(米)(Fig.3.1.4)⁷⁾が、固相反応法によりIBM(米)⁸⁾が、また、東大・物性研が部分熔融条件下の固相反応を用いて成功している。育成された単結晶は、一部のものを除いて、育成後のAs-grown状態では、超電導の開始から完全に超電導を示すまでの温度幅が大きく、育成後、酸素アニールを行うことにより非常に鋭い超電導転移を示すようになる。T_cは、85Kから95Kとなっている。

単結晶の育成は、超電導機構の解明、物性の測定に不可欠であるとして、より良質かつ大型の結晶育成の努力が続けられている。

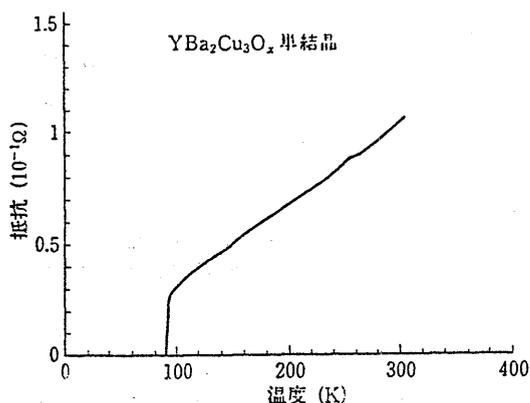


Fig.3.1.3 Y-Ba-Cu-O系単結晶の抵抗の温度変化⁶⁾

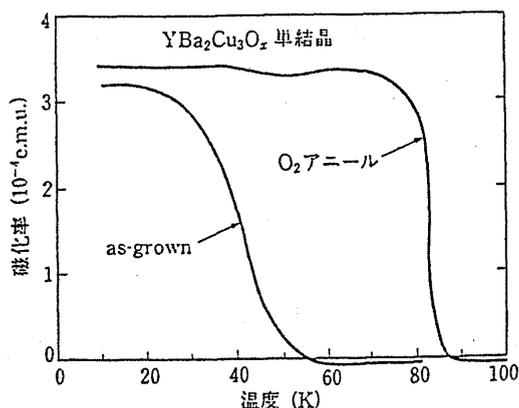


Fig.3.1.4 Y-Ba-Cu-O系単結晶の磁化率-温度曲線⁷⁾

3.1.2 薄膜の作成

(1) スパッタリング法

スパッタリング法は、加速したイオンや中性原子をターゲット(標的の意)と呼ばれる固体材料に衝突させ、ターゲットから飛出した粒子を基板に付着させる方法である。

スパッタリングのメカニズムについては、Starkに始まる運動量転移説、von Hippelの提唱したヒートスパイク理論などがあるが、現在ではカスケード理論が考えられている。カスケード理論は、固体面へ入射した粒子が固体の原子に衝突し、格子点からはじき飛ばされた原子が次の原子に衝突するといった状態を繰返している間に何個かの原子が固体面から放出される

というものである。

初期のスパッタリング装置は構造的には現在とほとんど変わらないが、膜付着速度が遅い上に真空の質も悪く、膜中への不純物ガスの捕捉が多く、真空蒸着より歴史は古いが実用化は遅かった。しかし、高速マグネトロンスパッタリング法の開発より、従来のスパッタリング法の欠点であった膜付着速度が飛躍的に高速化され、その結果スパッタリング法が各方面で応用されるようになった。スパッタリング法は種々あり、その代表的な方式と特徴をTable 3.1.1⁹⁾に示す。他の成膜法と比較して、低温で緻密な膜を作ることができ、基板への付着力が強く、高融点物質や合金、化合物の薄膜形成も容易である。

Table 3.1.1 スパッタリング法の比較⁹⁾

スパッタ方式	スパッタ材料	アルゴン圧力 (Pa)	スパッタ電圧 (kV)	生成速度 (Å/s)	特徴
直流 2 極	導電体	1~10	1~7	~1	構成が簡単
直流 3 極 または 4 極	"	0.1~1	0~2	~数	低圧力, 低電圧, 4 極は 3 極より放電開始電圧低い
高周波	ほとんどすべての材料	~1	0~2	~20	金属のスパッタには電極に直列にコンデンサを入れる
マグネトロン	"	~0.1	0.2~1	数+~300	高速, 低温, 電場と磁場直交, 強磁性体には工夫要す
直流バイアス	導電体	1~10	1~7	~1	基板を陽極に対し 0~500V の範囲でバイアス, 高純度膜
非対称交流	"	1~10	1~5	~1	高純度膜
ゲッタ	活性金属	1~10	1~7	~1	プレススパッタで活性ガスを除去
イオンビーム	ほとんどすべての材料	$\leq 10^{-2}$	~5	~数	差動排気を用いる
反応性スパッタ	"	0.1~10	~7	~数	アルゴンに活性ガスを混入, 化合物膜をつくる

一般的に、スパッタリング法の中では、(高周波)マグネトロンスパッタリング法と反応性スパッタリング法が用いられ、Y系、Bi系、Tl系、BKBO系、Pb系、Nb系、Nd系等の酸化物高温超電導薄膜の作成の報告がなされている。また、基板には、サファイア、MgO、SrTiO₃、YSZ、石英等が用いられている。薄膜の組成比、結晶性は、基板の種類と温度、入力電力、スパッタガスの酸素分圧等により大きく左右される。高T_c(超電導転移温度)膜を作成するためには、それらの要因を制御する必要がある。

(2) CVD(化学気相成長)法

CVD(Chemical Vapor Deposition)法による膜作成は、揮発製原料物質をArやH₂のキャリアガスで基板上に輸送し、熱、プラズマ、光励起などにより化学反応させ、基板上に酸化物超電導体の膜を成長させる方法である。短時間に大面積の膜を成長させることが可能であり、かつ、生産性、制御性に優れた方法であることから、超電導薄膜作成のための研究が進められている。(Fig.3.1.5) また、光励起によるプロセス(光CVD)では、低温での製膜が可能となるため、

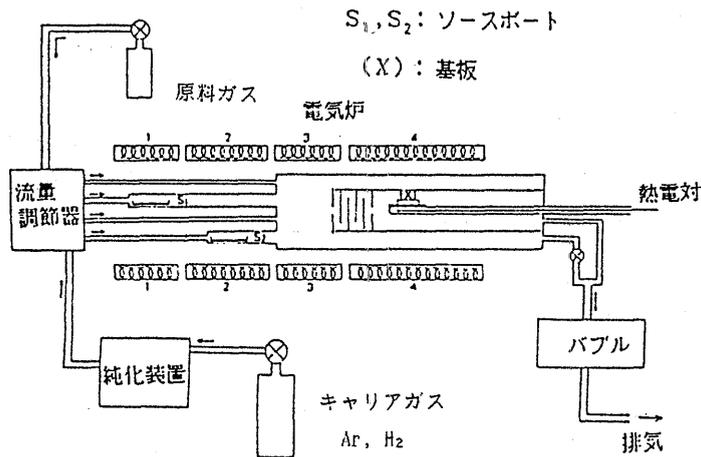


Fig.3.1.5 熱CVDシステム

作成された膜への熱による損傷や不純物の混入が少なくなるため、高集積化エレクトロニクスデバイスへの応用が期待される。しかし、適当な揮発性原料物質が得られないことから、CVD法による高温超電導膜の作製例は見当たらなかった。¹⁴⁾ 1988年6月、富士通研究所(日)が熱CVD法によりBi系の単結晶薄膜の作成に成功している。¹⁵⁾ ハロゲン化合物の原料ガスを用いて、820°Cに加熱し、炭酸マグネシウム基板に厚さ0.3ミクロンのBi-Sr-Ca-Cu-O系の高温超電導体の単結晶薄膜を成長させたもので、 T_c は70~80Kを示したとしている。また、東北大金材研グループが有機金属化合物を原料としてMOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition)法によりY-Ba-Cu-O系の超電導薄膜の合成に成功したという報道も伝えられている。¹⁶⁾ MOCVD法による結晶成長技術は、1968年Manasevit¹⁷⁾により開発されたもので、原料ガスとして有機金属化合物および水酸化物を用い結晶を気相成長させるものである。CVD法より数百度低い温度でのプロセスが可能であるためメリットは大きい。

CVD法、MOCVD法による製膜は、一度に大面積、また連続的製膜プロセスが可能なることから、今後、実用化に向け、臨界電流密度の増大、プロセスの低温化、デバイスへの応用などに向けての研究が進められると思われる。

(3) MBE (分子線エピタキシー) 法

MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法は、約 10^{-9} Paの超高真空中で基盤にエピタキシャル膜の形成を行う。¹⁸⁾ (Fig.3.1.6参照) 原材料は、Knudsenセル (Kセル) と呼ばれる蒸発源セル中で蒸発され、分子

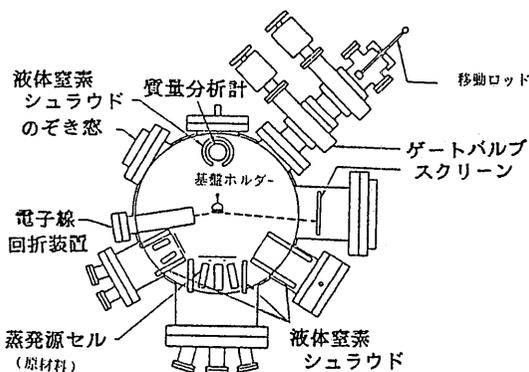


Fig.3.1.6 MBE装置の断面図

線として基盤に供給される。膜形成課程では、電子線回折装置(RHEED)により、その場観察され、化学量論比を保った多結晶が形成されるよう分子線強度、基板温度が制御される。MBE法は、主にGaHsなどの化合物半導体の人工格子製膜用に開発された手法であるが、酸化物超電導体の製膜用としても、超電導現象の再現性が良く、また低温での製膜が可能であるなどの長所から基礎研究用として使用されている。しかし、装置は、非常に高価であり、また膜成長速度も遅く、生産性は期待できない。

(4) 融液冷却法

融液冷却法による酸化物超電導体の作成は、長岡技科大の松下教授グループで試みられており、非常に簡便な方法としてY系、Bi系の高温超電導体膜の作成に成功している。¹⁹⁾

Y系では、原料のBaCO₃、Y₂O₃、CuOを混合し、1400°C1時間溶解後、鉄板上に流し、すばやくプレスし、2~3mmの厚さに仕上げ、750~950°Cで約10時間、空気中あるいは酸素雰囲気中で焼鈍する。 T_c は85~95Kが得られている(Fig.3.1.7)。同様な方法で、Bi系についても試みられているが、Bi系の場合は、熔融急冷後、ガラス(非晶質)状態となり、これを820°C、酸素雰囲気中で24時間焼鈍し、液体窒素中で急冷することにより高温超電導体が得られるとしている。²⁰⁾ 超電導特性は、若干劣るが、ガラス状態での加工が容易なため、コイルや光ファイバーへの加工も可能であると期待されている。

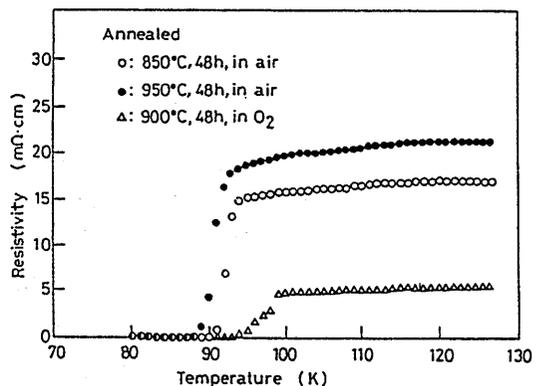


Fig.3.1.7 融液冷却法によって得られたY系の抵抗-温度変化¹⁹⁾

3.1.3 厚膜および線材の作成

超電導のエネルギー分野での応用は、主として大電流コイルによる高磁界の発生を利用するものである。超電導コイルの開発のためには、超電導材料の線材化が求められることになる。超電導線材に要求される特性は、高い臨界温度のほかに、10 T程度の磁場のもとで 10^4 A/cm^2 程度の臨界電流密度(J_c)²¹⁾ および高い安定性である。

超電導線材で問題になる不安定性には、磁界中の超電導材の中に進入した磁束が外乱により動き温度上昇を引き起こし急激な磁化エネルギーの開放が起こる磁束跳躍や、超電導体中でなんらかの原因による発熱がありその部分の温度が上がり常電導に戻るクエンチなどがある。このような不安定現象を防ぐため、金属系の超電導線材では、線径を $100 \mu\text{m}$ 以下、優れたものではサブミクロン ($0.5 \mu\text{m}$ 程度²²⁾) のフィラメント状にし、それを多いときには 10^7 本を無酸素銅に埋め込んでつくられる。細線化により磁束跳躍が防止され、クエンチが起こったときには銅シースを電流がバイパスすることにより温度上昇が抑制される。銅シースの金属超電導線材は、Nb-Ti、Nb₃Sbなどの金属間化合物超電導材を銅に埋め込んだものを冷間加工により線びきしてつくられる。シェブレル型化合物(PbMo₆S₈)では、原料粉末を銀管に詰め伸線加工後熱処理をして超電導相を生成させている²³⁾。

代表的な脆性材料であるセラミックスは、加工性も悪く一般に線材化は容易ではない。しかし、グラスファイバーや炭素繊維では、長繊維の製造が既に可能であり、セラミックス系の超電導材の線材化の試みもいくつかある。

金属系と同じように低電気抵抗金属のシース管により線材をつくる試みがある。Y-Ba-Cu-O系超電導材の焼結体は、各成分の粉末を混合したものを仮焼し、再度微粉化して焼結させる。この仮焼した粉末をシェブレル型と同じように銅シース管につめて線びきしたあと酸化雰囲気中で熱処理して超電導線材をつくることことができる。線びき後、銅を除き超電導体単体の線材をつくったところ77 Kで電流密度 725 A/cm^2 を得たという報告²⁴⁾や、銅のかわりに銀を用いたところアニール時の化学的安定性が増し、90 K級の超電導相を生成したという報告²⁵⁾がある。

セラミック超電導体は、金属系に比べ比熱が3桁以上高く、線径が数mmでも安定であるという解析結果がある²⁵⁾。その程度の線径には、厚膜を生成し丸断面に

押し出す方法を適用することも可能である。磁界を発生させるためには、コイル状に巻いた基板に厚膜を生成することでもできる。厚膜を生成する方法には、プラズマ溶射法、溶剤と練り合わせシート状に焼成するドクターブレード法、基板上に印刷するスクリーン印刷法などがある。

仮焼した粉末を、大気中でアルゴンプラズマを用いて、合金を下地溶射した基板の上に溶射したところ、得られた厚さ 0.13 mm の皮膜は熔融状態から急冷されているため超電導性を示さなかったが、850から 1000°C でアニールすることにより超電導相が得られたという報告²⁶⁾がある。ニッケル合金上に溶射したY-Ba-Cu-O系の膜を 900°C と 500°C で1時間熱処理を施すことにより77 Kで 200 A/cm^2 の電流密度を得た²⁷⁾ものもある。

これらの方法で得た線材や厚膜では、粒子間に空孔が残る、結晶方位が超電導を担う面にそろった材料が得られない、粒界変質相が生成される等により J_c が目標値より2桁低い。しかし、出発原料を変えて異なる反応経路を選択することや、熔融状態から析出させること等により線材や厚膜の作成に適した形状やサイズの粉末をつくることも考えられており²⁸⁾、ち密で配向性のある高い J_c をもつ線材や厚膜の合成の可能性の検討が進められている。

3.1.4 超電導材料の特性測定技術

超電導材料の評価には、状態図の検討から結晶構造・組成・微細組織の評価に加えて、低温物性の測定が必要となる。

(1) 温度測定²⁹⁾

液体He温度までの範囲では抵抗測定型が最も広く用いられ、炭素抵抗温度計、Ge抵抗温度計、白金抵抗温度計等が代表的なものである。これに対し、熱電対型の温度計は、極低温での精度に問題がある点を除けば、常温から液体He温度まで連続的に使用できる利点を持つ。液体窒素までの温度ではCu-コンスタンタン、それ以下ではAu(0.07%Fe)-クロメルが、また磁場中でAu(0.07%Fe)-Agが使用できる。

(2) 電気抵抗測定²⁹⁾

超電導体の最も基本特性となるものでFig.3.1.8に示すように、細長い直方体状の試料を焼結体より切り出し、(a)のような外側の電流端子 [$I(+)$ 、 $I(-)$]、内側の電圧端子 [$V(+)$ 、 $V(-)$] の計4つを平行に設置する。試料が短かく片側に4つの電極が困難な時は()のようにする。できれば電極として金を蒸着したもの

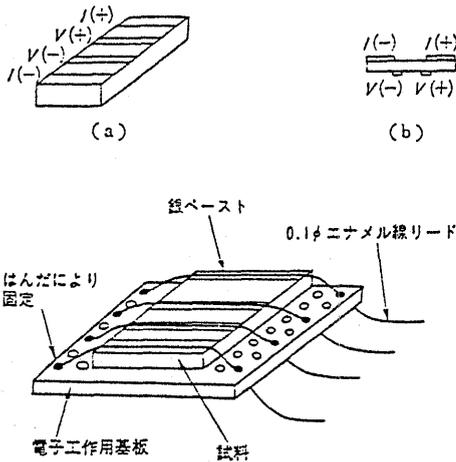


Fig.3.1.8 試料への電極の取り付け

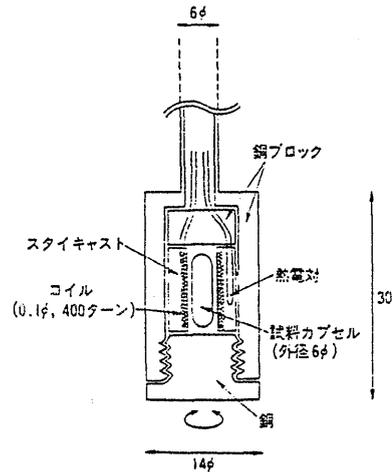


Fig.3.1.9 交流磁化率測定用プローブ

を用い、これにリード線としてエナメル線（～0.1φ）をハンダ付けすれば、四端子法による測定試料ができる。測定系は電流を試料に流し、発生した電圧を測るとい抵抗測定原理に基づき、基本的には電流源と電圧計により構成される。抵抗率 ρ は

$$\rho = \frac{V(+)-V(-)}{I(+)-I(-)} \times \frac{w \times t}{l} \quad (3.1.1)$$

によって算出できる。ただし、 w 、 t 、 l は試料の巾、厚さ、長さである。

(3) 磁化率の測定²⁹⁾

反磁性のシグナルを測定するもので、一般に交流法磁化率測定法が用いられる。特に、超電導転移温度と反磁性シグナルの大きさの相対比較程度の測定ならば、試料を含むコイルの自己インダクタンス L の変化を市販のLCRメータのアナログ出力端子から電圧計により読みとり、データ処理によって測定できる。Fig. 3.1.9にそのプローブの一例を示す。

(4) 臨界電流の測定²⁹⁾

臨界温度 T_c に加えて、臨界電流 J_c と臨界磁場 H_c が重要な材料の性能を示す値となる。 J_c の測定には、試料に大きな電流を通電し、超電導状態が保たれる最大の電流値を測定する。

(5) 外力に対する特性評価の測定³⁰⁾

超電導材料の実用化には必ず機械加工のプロセスが入る。したがって、応力あるいはひずみの付加によって、 T_c 、 J_c 、 H_c がどのような影響をうけるかを調べる必要がある。例えば、 Nb_3Sn の J_c 、 H_c に及ぼ

すひずみ効果を測定すると、付加するひずみ量によって J_c の増加が見込まれるので、酸化物超電導材料についても、このような検討が必要であろう。

(6) まとめ

前述の他に組成の同定用にX線回折³¹⁾、比熱の測定等が超電導材料の評価因子³²⁾としてあげられる。

3.2 プラズマ溶射法による超電導皮膜の作成

酸化物超電導体の成膜化では、前節までに述べられたようにスパッタリング、MBE、CVD、等により緻密で良質な薄膜が作成され、これらの臨界電流密度 J_c は、77Kで平方cm当り数百万Aの値にも達している。しかし、その堆積速度となるとCVDで数 $\mu\text{m/h}$ 程度であり、実用化にはさらに高速の成膜方法が望まれる。一方、プラズマ溶射法は緻密化の点ではCVD法等と比べて劣るが、数 cm/min 程度の高速成膜も可能であることから、テープ状材料、磁気シールド材料等の実用化のためには最も有望な方法と思われる。

これまで報告されている酸化物超電導体の溶射プロセスでは、ほとんどが直流(DC)アークプラズマ溶射を用いたものであるため、この方法を中心に述べ、後ほど高周波(RF)プラズマ溶射、フレーム溶射についてもふれることにする。

プラズマ溶射は、セラミック粒子等の材料を熱プラズマ中に導入し、溶融させるとともに高速度で、基板上に衝突させて皮膜を形成する手法である(Fig.3.2.1)。この皮膜形成に関係がある溶射のパラメータは数多くあるが、その中から代表的なもののいくつかを検討したい。

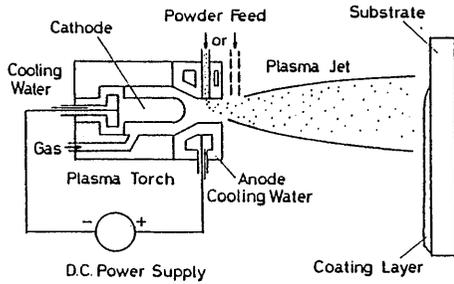


Fig.3.2.1 プラズマ溶射の概要

プラズマ溶射用ガスは、通常アルゴン、窒素が単独で用いられるか、水素、ヘリウムを加えた混合ガスで用いられ、速度を速くしたい場合は単原子ガスを、エンタルピーをあげたい場合は2原子ガスを主成分とする。³³⁾

アルゴン・水素系では皮膜中に含まれる超電導相の割合が減少し、水素と反応した相がみられた。³⁴⁾

超電導体を積層する基板には、金属の他、セラミックス材料も用いられている。ニッケル系超合金ハステロイ、ナイモニック基板が良く、銅または銀基板では皮膜が剝離しやすい。³⁵⁾ また、SUS304ステンレス鋼などではY-Ba-Cu-O層内にFeが拡散し、超電導性が劣化する。³⁶⁾ このような後熱処理時に基板側からの元素拡散を防ぐ目的で、基板にアルミナ等のセラミックス材料を使用したり、³⁷⁾ 鋼基板上をあらかじめスピネル($Al_2O_3 + MgO$)で被覆し、その上に超電導材料を溶射した例³⁴⁾もある。銅基板の方がセラミックス基板よりもより高温で T_c が始まるという報告³⁸⁾もある。

これまで行なわれている溶射雰囲気は、ほとんどの溶射が大気圧下で行われているが、減圧チャンバー内を低圧酸素雰囲気下(酸素分圧5200Pa)にして溶射した例³⁶⁾が報告されている。

使用される材料は $YBa_2Cu_3O_x$ 系の場合、 Y_2O_3 、 $BaCO_3$ 、 CuO を出発原料にして $YBa_2Cu_3O_x$ の比になるように混合し、仮焼結状態または焼結後機械的に粉碎し、ふるいにて通常の溶射材料と同程度の粒径(数十~百 μm 程度粒度分布)に調整したものがほとんどである。また、粒子が溶射することにより組成が変化することを考慮したためか組成比を $Y_{0.3}Ba_{0.7}CuO_x$ としたものもあった。³⁶⁾

プラズマ入熱の大小は、プラズマ温度に大きく影響

する。超電導材料では粉末の融点が低いためか、プラズマトーチへの入力を20~40kwと変化させても皮膜特性にはほとんど差がみられなかった。³⁴⁾

プラズマ溶射により得られた皮膜のままでは、通常超電導を示さず数分~1時間程度の比較的短時間の後熱処理により、 T_c が80~90K前後の皮膜が得られている。一方、 J_c は77Kで200~530A/cm²程度であり^{35),36)}、皮膜に比べてはなはだ低い値である。プラズマ溶射では、皮膜中に多くの気孔や割れを含むため、これらの低減が望まれる。

超音速フレイム溶射はプロピレンと酸素をトーチ内で混合し、超音速燃焼炎を得る方法である。フレイム速度は500m/s以上になる。この溶射法により得られた皮膜表面はプラズマ溶射法のものよりも滑らかで、中に含まれる気孔も少なかった。³⁴⁾

これまでの溶射方法では他の超電導材料の作成と同様に後熱処理が必要である。それに対して、無電極放電型の高周波熱プラズマを用いた吉田らの方法³⁹⁾では後熱処理なしのAs-depo状態を超電導相が得られている。この方法では数 μm 以下の微粒子を酸素リッチなプラズマ中で蒸発させ、気相状態にしてから成膜するもので、液相から成膜する通常のプラズマ溶射と異なっている。皮膜はC軸に配向しており、87Kで完全に超電導状態になっている。(Fig.3.2.2)

これまでプラズマ溶射法を用いたプロセッシングについていくつかの項目について整理してきたが、これらと当研究所で行ってきた実験等の結果をふまえて現在問題にされている点について触れてみたい。

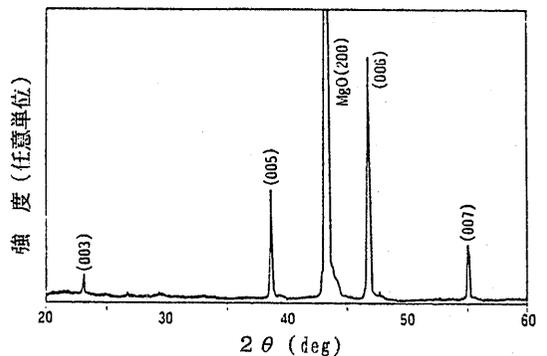


Fig.3.2.2 (a) 高周波熱プラズマにより気相状態から堆積させた $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 膜のAs-depo.状態でのX線回折パターン(Cu α 線)

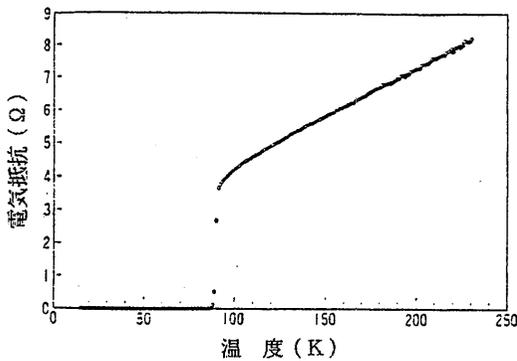


Fig.3.2.2 (b) 同じくAs-depo.状態での直流電気抵抗・温度変化³⁹⁾

まず、プラズマ溶射についての各メカニズムをはっきりさせることである。特にプラズマジェット中の材料間の反応、材料と作動ガスとの反応、すなわちプラズマ中での高温・高活性域での化学反応が十分知見として得られていない。また、一般に超電導材料の成膜においては、皮膜形成後そのままでは超電導を示さず、後熱処理により超電導性が生じてくるようであるが、溶射雰囲気酸素リッチな状態で行い、皮膜形成時に酸素を導入することによって、熱処理なしで超電導相が得られるかを調べてみる必要がある。

材料粉末はできるだけ細かいものを用いて緻密な皮膜形成をすることが臨界電流が高い皮膜を作成するために必要である。この場合パウダーの送給方式やプラズマガス組成の最適化をはかるとともに堆積速度を制御した皮膜形成ができるかがポイントとなる。しかし、プラズマのコア領域は、一般にある領域に限られて存在するので材料を確実に送り込むことは難しい。特にサブミクロン以下の超微粒子では高温へ効率よく送り、成膜するまでの間溶融状態で滞留させることが必要である。長時間滞留させるために回転アークを用いることも考えられる。

J_c値を向上させるには皮膜の割れや剝離を生じないようにする必要があり、皮膜と基板のマッチングも重要な問題である。そのため基板の温度、材質を選ぶ必要がある。

材料粉末の加熱効果を向上させるために近年、プラズマ体積を大きくすることにより均質な粒子加熱、粒子の高速化を得ることを目的とした減圧雰囲気下でのプラズマ溶射技術が開発された。当所でも試作導入し、

減圧下または雰囲気下でのプラズマ溶射に関する基礎データを集めている。今後これらを超電導材料の創製に適用したい。

均質な皮膜を形成させるためには粉体の供給精度が重要である。特に数 μm 以下の粉体は通常の粉体供給源装置では難しいが、局部流動床式とフィードバック制御によりサブミクロンパウダーの高精度送給が可能となった。しかし、そうした小さなパウダーはプラズマジェットにうまく乗りにくいいため注入方式に工夫が必要である。

これまでのプラズマ溶射は単にプラズマフレームを熱源として利用しているだけであるが、高活性という特性をうまく利用することができれば、短時間のうちに高機能性皮膜が作成できるようになると思われる。

その一例として、当質量のBaTiO₃の皮膜を作成したものをFig.3.2.3に示す。⁴⁰⁾X線の回折結果からほぼ完全なBaTiO₃の皮膜となっていた。同様なことが超電導材料でも行えるものと思われる。また、前述の高周波数プラズマで行われた気相合成は、皮膜の品質を向上させる意味で、アークプラズマでもやってみる価値があるであろう。

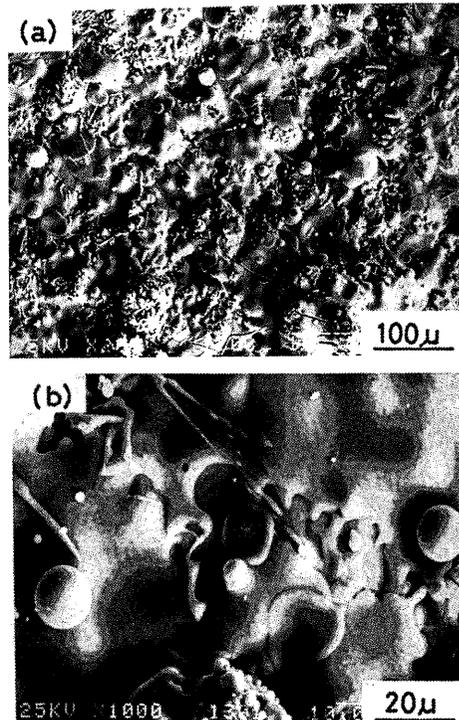


Fig.3.2.3 プラズマジェット中で反応させて生成したBaTiO₃皮膜のSEM写真

参 考 文 献

- 1) 長谷川安利、岡村富士夫、小野晃：超伝導セラミックス、工業調査会、(1987)
- 2) 前田弘他：新しい酸化物高温超電導体、固体物理、Vol.23、No. 3 (1988)
- 3) 笛木和夫、北沢宏一編：酸化物超伝導体の化学、講談社、(1988)
- 4) 村上陽太郎：高温超伝導体の開発と応用、第41回日本舶用機関学会学術講演会、(1987)
- 5) 武居文彦、竹尾浩幸：高温超電導体単結晶の作成、固体物理、Vol.23、No. 9 (1988)
- 6) 日高義和、村上敏明：酸化物高温超電導体単結晶の育成と物理、固体物理、Vol.23、No. 9 (1988)
- 7) L.F.Schneemeyer, J.V.Waszcak, et al : Nature, 328(1987), p.601
- 8) T.R.dinger, et al : Phys. Rev. Letters, 58 (1987), p.2687
- 9) 荒谷雄：PVD・CVD技術による薄膜のハイブリッド化、溶接学会誌、Vol.57、No. 4 (1988)、pp.30~37.
- 10) 福島志郎、細川直吉：スパッタリングの歴史と応用、金属表面技術、Vol.36、No.6(1985)、pp.218~228.
- 11) 寺田数男他：酸化物超伝導体薄膜の作製・超伝導性、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.87、No.30(1987)、pp.19~23(CPM87-4).
- 12) 村上敏明他：酸化物超伝導体薄膜および単結晶の電気的・磁気的特性、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.87、No.30(1987)、pp.25~30(CPM87-5)
- 13) 日経ニューマテリアル No.52(1988)、pp.81~94
- 14) 鯉沼秀臣：酸化物高温超伝導体のイオンおよびレーザ・プロセッシング、応用物理、Vol.23、No.2 (1988)
- 15) 超電導ワークショップ、新機能素子研究開発協会主催、蔵王、(1988)
- 16) 日刊工業新聞(1988年11月9日付)
- 17) H.M.Manasevit: Appl. Phys. Lett., 12(1968)
- 18) 科学技術庁科学技術振興調整費 調査研究報告書：II-VI族半導体の格子欠陥を利用した機能制御に関する調査、(1985)
- 19) 小松高行：Formation Mechanism of High TC Superconducting Ba-Y-Cu-O Oxides in Melt Quenching Method, 日本セラミックス協会学術論文集、96-4(1988)
- 20) 日刊工業新聞、(1988年3月16日付)
- 21) 荻原宏康：超電導体のエネルギー分野への応用、OHM、No.'87/9(1987) pp.32~36
- 22) たとえばT.Ogasawara et al. : Development of Multifilamentary NbTi and Nb₃Sn Composite Conductors with Very Fine Filaments, Design and Fabrication of Conductors, Vol.32, (1986), pp.723~30
- 23) T.Luhman and D.Dew-Hughes: Superconducting Wires of PbMo_{0.1}S₆ by a Powder Technique, Journal of Applied Physics, Vol.49, No.2(1978), pp.936~38
- 24) Y.Yamada et al.: Critical Current Density of Wire Type Y-Ba-Cu Oxide Superconductor, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.26, No.5 (1987), pp.L865~66
- 25) 村瀬暁、荻原宏康：高温超電導体の線材化について、素形材、No.'87.10 (1987), pp.7~11
- 26) R.A. Neiser et al.: Plasma Sprayed Superconducting Oxides, Materials Science and Engineering, Vol.91, (1987), pp.L13~15
- 27) 日経メカニカル 1987.7.27、(1987)、p.26.
- 28) 福長脩：高温超伝導酸化物の線材化、Sen-i Gakkai (繊維と工業)、vol.43、No.8(1987)、pp.325~28
- 29) 岸尾光二：セラミックスの評価法；III.S超電導セラミックス、セラミックス、Vol.23、No.6(1988)、pp.572~579
- 30) 庄子哲雄：超伝導セラミックスの機能性と構造成性、日本機械学会、第65期通常総会先端技術フォーラム資料集(1987)、pp.14~16
- 31) S,N,Song, et al.,: High Tc Superconductivity in Y-Ba-Cu-O System, Advanced Ceramic Materials, Vol.2, No.3B(1987), pp.480~489
- 32) 阿竹徹：低温での熱物性測定法、真空理工(株)、第12回最先端熱測定セミナー資料(1987)
- 33) 明石和夫ほか2名編：光・プラズマプロセッシング、日刊工業新聞社、(1986)
- 34) J.P.Kirkland et al: Thermal spraying Superconducting Oxide Coating, Advanced Ceramic Materials, Vol.2, No.3B, Special Issue, (1987), pp.401~410

- 35) 日刊工業新聞、1987.6.24または日経メカニカル、日経PB社、1987.7.27号、pp.26
- 36) 日経メカニカル、日経PB社、1987.11.2号、pp.18~19
- 37) L.S.Wen et al : Plasma-sprayed high T_c superconductor coatings, Thin Solid Films, Vol.152, (1987), pp.L143~L145
- 38) J.J.Cuomo et al : Large Area Plasma Spray Deposited Superconducting $YBa_2Cu_3O_7$ Thick Films, Advanced Ceramic Materials, Vol.2, No.3B, Special Issue, (1987), pp.422~429.
- 39) 寺嶋和夫、吉田豊信 : 熱プラズマによる電気伝導性セラミックスの合成、セラミックス、Vol.24, No.5(1989)、pp.413~416
- 40) S.Uematsu: Basic Study of Plasma spray Synthesis, Papers of Ship Research Institute, Vol.24, No.3(1987), pp.69~77

4. 極低温技術

4.1 FRPクライオスタット

従来のクライオスタット（極低温断熱容器）は扱いやすさ、作りやすさ、安定性などの点で主として非磁性のステンレス鋼(SUS304等)やアルミニウム合金(A5083等)で作られてきた¹⁾。

しかしながら、核融合、大出力レーザー発振等に用いられるパルスマグネットや超電導発電機あるいは超電導モーター等の回転機では磁界が終始変動するため、金属製のクライオスタットでは電磁誘導により渦電流が発生し、これによる損失や温度上昇が問題となってきた²⁾。また、NMR-CT（核磁気共鳴断層撮影装置）やSQUID（量子干渉計測装置）等の超電導応用計測装置では磁界分布を精密に制御する必要があり、金属クライオスタットの電磁遮蔽効果はないほうが望ましい³⁾。これらの解決には電気絶縁性のクライオスタットの開発が必須であり、FRP製のクライオスタットの必要性が高まっている⁴⁻⁶⁾。

FRPクライオスタットは金属製に比べて次のような特徴を持っている⁷⁾。

- ① FRPは通常の極低温用金属材料に比較して比強度が大きく、軽量である。
- ② 電気絶縁性のため、渦電流によるジュール熱を発生しない。
- ③ 非磁性であるため、磁界分布に影響を及ぼさない。
- ④ 熱伝導率が小さいため、液体ヘリウムの蒸発率が少なく経済的である。また、金属クライオスタットでしばしば行われている液体窒素による中間の熱シールドが不要である。
- ⑤ 熱容量が金属よりも小さいので、液体ヘリウムの移送効率が低い。

しかし他方でFRPに特有の次の欠点があることも事実である^{4,7)}。

- ① マトリックス樹脂の分子間距離がヘリウム原子の直径より大きいいため、ヘリウムが透過する。
- ② FRPの材料選択を誤ると、極低温でクラックを生じることがある。
- ③ 金属に比べ表面からのガス放出が多く、真空断熱層の真空度に悪影響を及ぼす。
- ④ 金属のように溶接ができず、接着にたよることになるので、接合部のクラックやリークが問題となる。

FRPクライオスタットの技術はこれらの長所をいかに発展させ、また欠点をいかに解決するかである。

このため、FRPクライオスタット技術の中核をなす極低温用FRP、極低温断熱、クライオスタット構造の3項目を中心に文献及び技術資料を収集し、技術の現状調査及び問題点の分析、取り組むべき研究課題の抽出等を行った。以下に調査結果を述べる。

4.1.1 極低温用FRP

FRPには繊維と樹脂との組み合わせで種々のものがあるが、極低温用として最も広く用いられているのはガラス/エポキシ系であり、G-10CR、G-11CR^{8,9)}などは商業ベースで入手可能である。またFRPは繊維の配向方法や繊維の含有率を変えて、用途に応じた特性をもたせることが可能である。

クライオスタット用FRPに要求される性能として、①引張強度、圧縮強度、衝撃強度、疲労強度、破壊靱性値、ヤング率等の機械的特性。②熱伝導率、比熱、熱収縮率等の熱的特性。③絶縁強度、帯磁率等の電磁気的特性。④その他、真空特性、加工性、接合性、比重、材料入手の難易性等を挙げることができる^{10,11)}。

極低温用FRPの強度特性として、一般に繊維方向の引張強度は大きく、比強度は金属材料よりも優れている(Fig.4.1.1)。圧縮強度はそれほど強くないが、低温になるに従って疲労強度は向上し(Fig.4.1.2)、低温脆性はみられない(Fig.4.1.3)。また、熱的特性として、熱伝導率は金属よりもはるかに小さく(Table 4.1.1)、熱収縮率も同様であり(Fig.4.1.4)、熱衝撃に対する耐久性にも優れている⁷⁾。電気的特性ではカーボン繊維が繊維方向に導電性が高いという問題があるが一般に絶縁性能は高く、絶縁破壊特性も背後電極がある場合を除いて良好である(Fig.4.1.5)。

しかしながら、これらの材料特性に関する研究は試料となるFRPの分類が明確になっていないことから、必ずしも系統的な議論にはなっていない⁹⁾。このため、材料の規格化、試験方向の標準化を含めたデータベース化などソフト面の開発が必要である^{11,19)}。

FRPの機械的特性の最大の特徴は異方性である。一方的強化材では繊維方向であるか否かによって強度は大きく異なり(Fig.4.1.6)、また直交積層材では、層間のせん断強度は繊維と45°の角度をなす方向で最低になる(Fig.4.1.7)。このため、異方性を十分考慮した材料設計が必要となり、最近では強化繊維を三軸、四軸、五軸等の多次元織物とし、異方性の少ない複合材料の開発が着手されている²¹⁻²³⁾。さらに、複数種類の繊維で強化したハイブリッドFRPについてもクライオスタットの有望材料として極低温域における複

合則の適合性、強度特性の予測法等の検討が進められている²⁴⁾。

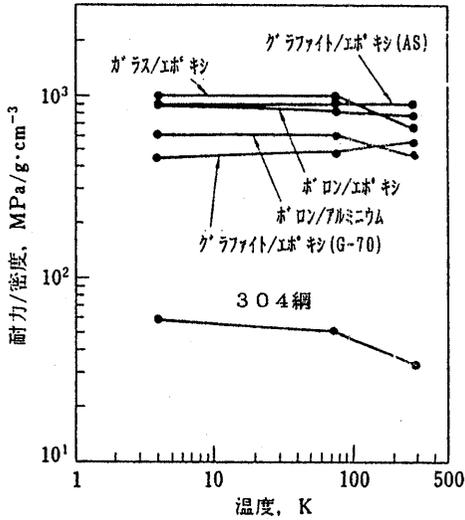


Fig.4.1.1 一方方向強化材の耐力/密度¹²⁾

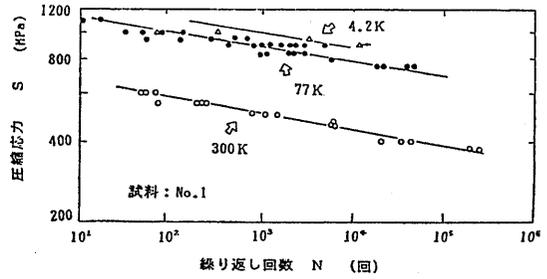


Fig.4.1.2 GFRPの圧縮疲労特性¹³⁾

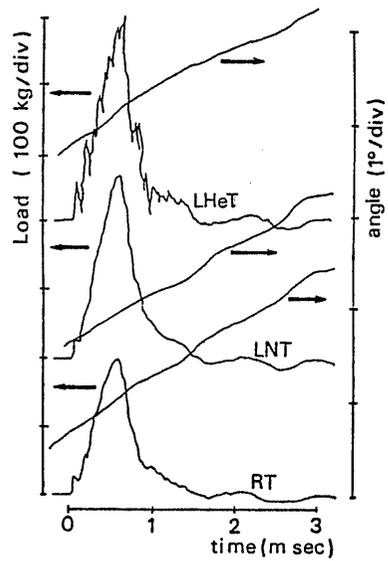


Fig.4.1.3 GFRPの衝撃強度特性⁹⁾

Table 4.1.1 各種断熱支持材の降伏強さと熱伝導率¹⁴⁾

	温度領域 [K]	密度 ρ [g/cm ³]	降伏強さ σ [kg/mm ²]	平均熱伝導率 \bar{K} [mW/cm·K]	$f (= \sigma / \bar{K})$	$\sigma / \rho \bar{K}$
ガラス繊維強化樹脂 GFRP	300~77	2.0	84	8.0	10.5	5.3
	77~4.2		100	2.9	34.5	17.2
炭素繊維強化樹脂 CFRP	300~77	1.5	124	27	4.6	3.1
	77~4.2		107	1.5	71.3	47.6
ボロン繊維強化樹脂 BFRP	300~77	2.0	130	15	8.7	4.3
	77~4.2		(125)	(8)	(16)	(8)
ステンレス鋼 SUS316	300~77	8.0	23	107	0.22	0.03
	77~4.2		49	50	0.98	0.12
チタン合金 Ti-5Al-2.5Sn	300~77	4.5	72	60	1.2	0.27
	77~4.2		124	35	3.5	0.79

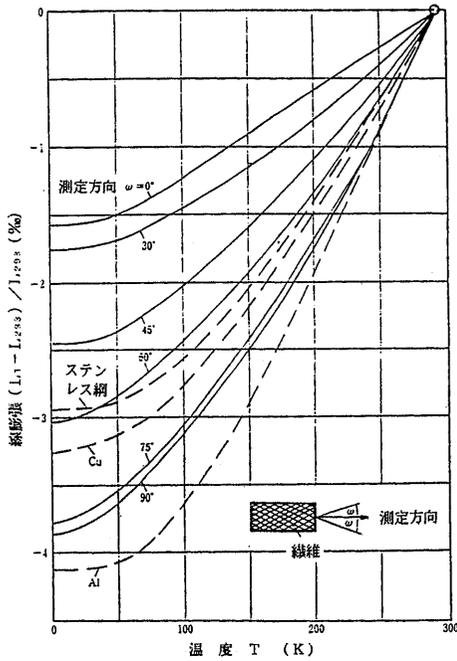
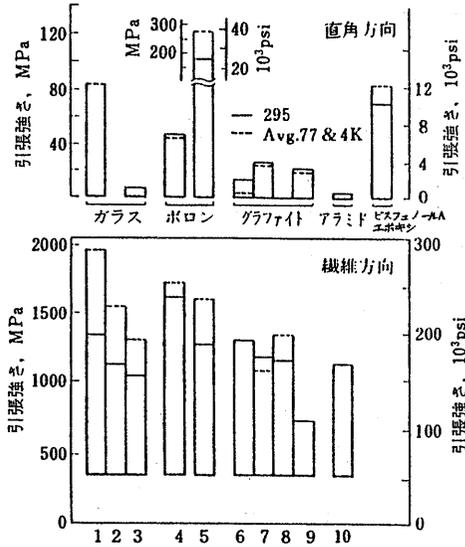


Fig.4.1.4 各種低温構造材の線膨張^{1,15,16)}



- ガラス繊維強化
 1-S-901/樹脂2,66vol.%
 2-R/ビスフェノールA,63vol.%
 3-E/ビスフェノールA,50.6vol.%
 ボロン繊維強化
 4-140 μ m(5.6mil)B 2387エポキシ,
 52vol.%
 5-140 μ m(5.6mil)ボロン/6061アルミ
 ニウム
 合金,47vol.%
 グラファイト繊維強化
 6-AS/樹脂2,64vol.%
 7-HM-S/934,62vol.%
 8-HM-S/ビスフェノールA,55vol.%
 9-GY-70/934,65vol.%
 アラミド繊維強化
 10-ケアラ-49/934,67vol.%

Fig.4.1.6 一方向強化材の繊維方向及びそれと直角方向の引張強度 (上:直角方向,下:繊維方向)¹²⁾

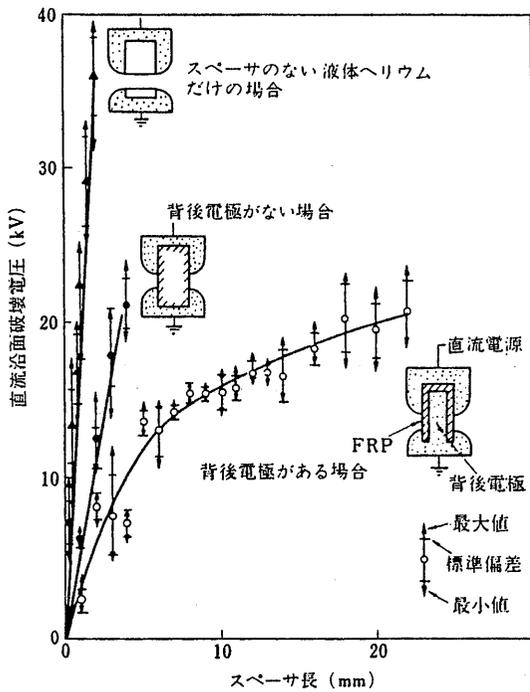


Fig.4.1.5 液体ヘリウム中におけるFRPの沿面破壊特性¹⁸⁾

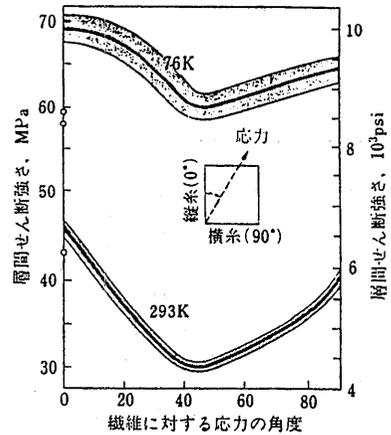


Fig.4.1.7 ガラス/エポキシ(G-10CR)の層間剪断強度²⁰⁾

4.1.2 極低温断熱

断熱技術において金属クライオスタットとFRPのそれとの基本的な違いはなく、一般に真空断熱方式がとられている。FRPのヘリウム透過による真空劣化についても材料の選択、吸着剤の取り付け、維持管理の適正化等によりかなり迎えることができる^{4,6,10,25}。通常は断熱真空層に適当な断熱材を挿入し、放射熱侵入を防止するとともに、この断熱材によって真空層を小さな領域に分割して自然対流を阻止し、高い断熱効果を得ている²⁶(Fig.4.1.8)。なかでも多く利用されているのは、アルミ蒸着フィルムとスペーサーとを何

層も重ねた多層断熱(積層断熱またはスーパーインシュレーションともいう)である。多層断熱を用いることにより、熱侵入量は真空パーライト断熱の1/50以下に減少する²⁶が、前述した真空度をはじめ、多層断熱材の種類(Tabie 4.1.2)、層密度(Fig.4.1.9)、施工法等への依存性が高いので、その最適化は重要な問題である。

新しい断熱方式としては、球径15~150 μ mの中空ガラス球²⁸を挿入断熱材に用いたマイクロスフェア断熱が注目されている。マイクロスフェアは多層断熱と比較して次のような利点がある。^{29,30}

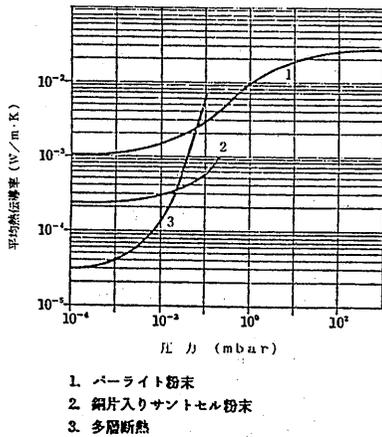


Fig.4.1.8 真空断熱の平均熱伝導率(77~300K)²⁶⁾

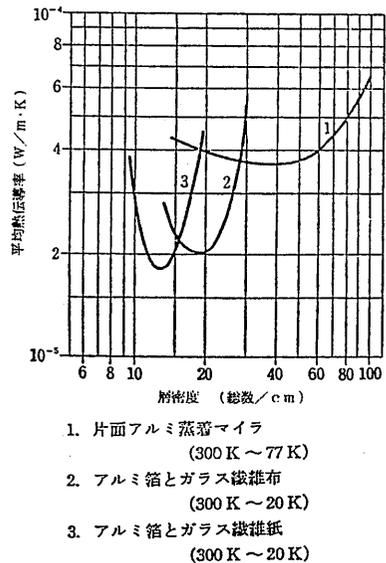


Fig.4.1.9 多層断熱の平均熱伝導率²⁶⁾

Table 4.1.2 スーパーインシュレーションの熱伝導度²⁷⁾

(293K→90K)

	厚み [mm]	熱伝導度 [mW/m·K]
アルミはくと 0.05mmガラス紙 (25層/cm)	18	0.030
アルミはくと 0.05mmガラス紙 (43層/cm)	20	0.090
アルミはくと 0.2mmガラス布 (15層/cm)	22	0.081
アルミ蒸着フィルムと 0.05mmガラス網 (60層/cm)		0.025
アルミ蒸着フィルムと 0.08mmガラス織布 (30層/cm)		0.055

- ① 施工が簡単である。
- ② 筒口や切り通しなどでも、断熱性能に全く問題はない
- ③ 断熱層中の支持材として使用するのに非常に適している。

このほか多層断熱のスペーサに活性炭を被覆したガラス紙を用い、多層断熱層内部の真空度を高めるスカールック断熱法²⁶⁾や液体ヘリウムのボイルオフガスを積極的に利用するガスシールド技術^{4,26)}等が研究されている。

4.1.3 クライオスタット構造

これまでに試作されたFRPクライオスタットは何種類もあり、ほとんどは筒型である^{4-7,10,25)}。Fig. 4.1.10はその一例である。

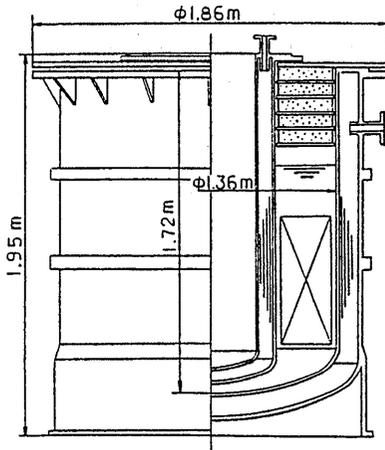


Fig.4.1.10 FRPクライオスタットの

クライオスタットの構造は円筒部、底板、フランジ等の部品を接着して一体化する方法と、一体成形する方法とがあり、前者は大型、複雑形状に向いているが、この場合、接着技術が重要であり、ねじこみ接着方式、リベット併用方式等が検討されている^{9,25,31)}。

クライオスタットの基本性能である断熱性能の向上のためにはいろいろな工夫がなされている。上部開口からの熱侵入を少なくし、ヘリウムガスの散逸を迎えるため、ウレタンブロックと金属板を組み合わせた断熱体を配置している^{10,32)}。また、蒸発したヘリウムガスのエンタルピーを利用する技術(サーマルアンカー)も研究されている^{4,33)}。さらに、真空断熱材は蒸着アルミ中の渦電流を切るためにスリットが設けられてい

る²⁵⁾。断熱支持材についても効果的な構造が検討されている³⁴⁾。

この他、クライオスタットの非破壊検査法としてAE法の検討が始められている³⁵⁾。

しかしながら、これらの研究は個別的であるとともに開発途上のものである。FRPクライオスタットの実用化にはさらなる検討が必要である。

4.1.4 今後の研究課題

FRPをはじめとする複合材料は異種の素材を組み合わせ、それらの中間の性質または新しい性能を持った材料を開発することが目的で作られる。したがって、ほとんど任意の性能を有する材料を開発することができるが、一方材料性能に大きな幅を持ち、また破壊モードが多様になる。このため、低温工学の研究方向としては、材料設計と構造設計とを有機的に結びつけた学問体系の発達とともに品質管理、検査技術の向上等が必要になってくる¹¹⁾。

船研においては、超電導推進船に搭載する軽量・高性能のFRPクライオスタットの開発研究という観点から低温工学発展の一翼を担うこととし、具体的には当面次のような問題に取り組むべきであると考えられる。

① 先進複合材による多層断熱技術の研究

船用クライオスタットの高性能・軽量化に必要な断熱技術として、繊維強化複合材の低熱伝導性を利用し、スーパーインシュレーション、ガラスバブル等を併用した経済的な多層断熱技術の開発を行う。

② 超低温用複合材の機能特性に関する研究

軽量、高強度、耐低温性、断熱性並びに磁気遮蔽性といった多機能要件を要求される超低温用先進複合材の開発の基礎となる機能特性の解明とその評価手法の開発を行う。

③ 超電導船用クライオスタットの適合化に関する研究

上記2課題の成果を踏まえ、超電導推進船に搭載する超電導推進装置のコンパクト化並びに高機能化を目指して、超電導コイルを極低温に冷却・保持する船用クライオスタットの適合化に関する研究開発を行う。

4.2 低温流体による冷却技術

4.2.1 冷却技術の背景

超電導体の冷却で対象となる極低温あるいは低温物質は、従来、液体ヘリウムHe I と超流動ヘリウムHe IIに限られていた。一方、近年の酸化物超電導体の出

現による超電導臨界温度の上昇によって、液体窒素の使用も可能となりつつある。

液体窒素は液体ヘリウムに比べて極めて安価で、資源的偏りの問題もないため、高温超電導体の実用化への期待が非常に大きい理由の一つとなっている。また、高温化がさらに進み、将来常温（大気温度付近）の超電導体の開発の可能性も皆無とはいえない。

このような状況を想定した場合、冷却の必要性の有無を含めて、今後どのような冷却技術（温度範囲、対象システムの形状、寸法、冷却方式など）を検討すべきかは議論を要する点と思われる。ただ、臨界温度の高温化の傾向も窒素温度付近で一段落の感があり、現在はむしろ臨界電流密度、臨界磁界の増大に開発努力が向けられているようである。また、仮に現状以上の高温化が図られたとしても、超電導体の安定化やマグネットシステムの保護、安全性の面から冷却技術の向上は必要と思われる。

4.2.2 極低温流体による冷却方式と伝熱特性

各種の超電導体の現時点での臨界特性値（温度、電流密度、磁界）については第2、3章で述べた。この導体を低温に保持するための極低温流体の物性値はTable 4.2.1³⁶⁾に示すとおりである。表中には比較のため、水の物性値も併記している。

超電導体の冷却方式³⁷⁾はマグネットシステム等、対象とする装置の寸法によって異なる。小型のシステムでは通常クライオスタットに浸漬する冷却方式が採られるため、伝熱形態もプール沸騰による熱除去となる。システムが大型化、高性能化するにつれ、必熱的に強制循環による冷却方式となる。強制循環冷却方式では流体の状態によって、超臨界液ならびに過冷却液による单相の強制対流伝熱の場合と、強制流動沸騰伝熱の場合がある。このうち、大型装置として実用化されているのは超臨界液によるものを中心で、過冷却液および流動沸騰による方式は研究段階にある。このほ

Table 4.2.1 極低温流体の物性値³⁶⁾

流 体 名	記 号(単位)	ヘリウム 4	窒 素	水(参考)
臨 界 圧 力	P_{tc} (MPa)	0.2275	3.400	22.12
温 度	T_{tc} (K)	5.201	126.2	647.3
(以下大気圧状態)				
沸 点 温 度	T_s (K)	4.22	77.3	373.15
蒸 発 熱	Δh (kJ/kg)	20.4	199	2257
表 面 張 力	σ (N/m)	0.105×10^{-3}	8.89×10^{-3}	59.5×10^{-3}
液 体 密 度	ρ_l (kg/m ³)	125	807	958
定 圧 比 熱	C_{p_l} (kJ/kg·K)	4.98	2.07	4.22
熱 伝 導 率	λ_l (W/m·K)	18.9×10^{-3}	135×10^{-3}	677×10^{-3}
粘 性 率	η_l (Pa·s)	3.17×10^{-6}	162×10^{-6}	291×10^{-6}
プラントル数	Pr_l (-)	0.836	2.49	1.81
蒸 気 密 度	ρ_v (kg/m ³)	16.9	4.63	0.598
定 圧 比 熱	C_{p_v} (kJ/kg·K)	9.78	1.12	2.02
熱 伝 導 率	λ_v (W/m·K)	9.14×10^{-3}	7.60×10^{-3}	24.5×10^{-3}
粘 性 率	η_v (Pa·s)	1.25×10^{-6}	5.39	12.2
プラントル数	Pr_v (-)	1.33	0.796	1.004

か、ヘリウム冷却の場合はHeIIの超流動による冷却の設計例もみられる。

一方、構造的には、飽和液による浸漬や低速の強制対流ではマグネットシステムなどの外部に液が存在する形となり、超臨界液と過冷却液の単相強制対流や強制流動沸騰ではシステム内部の流路を循環する形が一般的にとられる。

各流体及び各方式における伝熱特性は、通常超電導体表面から除去される熱の流束 q_w (W/m²) と導体表面・流体間の温度差 ΔT (K) との関係で表示される。Fig. 4.2.1はヘリウム、窒素および参考として併記した水に関する $q_w - \Delta T$ 図であり、沸騰の場合と単相強制対流の場合の両者を同時に示している。図中の各曲線の基になる計算式あるいは実験値はTable 4.2.2にまとめて示すとおりであり、図中と表中の番号がそれぞれ対応している。沸騰の場合、横軸の ΔT_s は導体表面温度または表面に接触する液体温度 T と液の飽和温度(沸点) T_s との差であり、壁面過熱温度と称される。また、単相強制対流の場合は導体表面温度 T と液体主流部の温度 T_l との差 ΔT_l をとる。前者(沸点)での $q_w - \Delta T$ の関係は沸騰曲線と称され、通常N字型に屈折した曲線となる。そして、各部の伝熱形態は図中、左からそれぞれ核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰に対応している。さらに、核沸騰と遷移沸騰、遷移沸騰と膜沸騰

との境界点に対応する熱流束をそれぞれ限界熱流束(あるいはバーンアウト熱流束)および極小熱流束と称する。

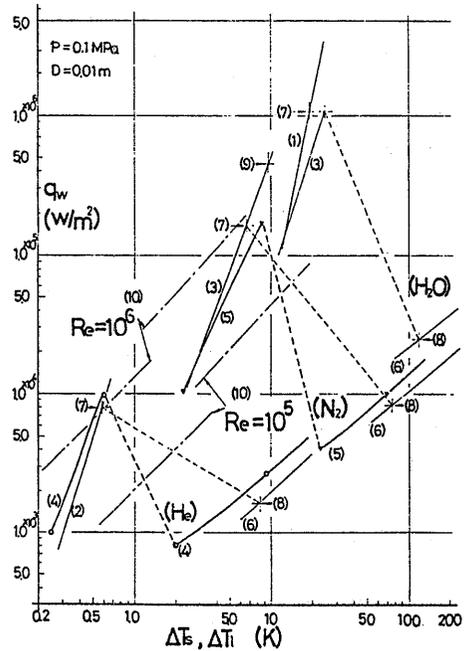


Fig.4.2.1 $q_w - \Delta T$ 相関図

Table 4.2.2 $q_w - \Delta T$ 相関の計算式及び実験値^{36,39,40)}

項目	番号	研究者名
ブール核沸騰伝熱	(1)	西川・藤田の式
	(2)	Kutateladzeの式
	(3)	Stephan-Abdelsalamの式
	(4)	西尾らの実験値 ³⁹⁾
	(5)	桜井らの実験値 ⁴⁰⁾
膜沸騰伝熱	(6)	Bromleyの式
限界及び極小熱流束	(7)	Zuberの式、Kutateladzeの式
	(8)	Zuberの式、Berensonの式
強制対流沸騰の限界熱流束	(9)	甲藤の式
強制対流伝熱	(10)	Dittus-Boelterの式、Giarratanoらの式

4.2.3 超電導体の安定化設計

超電導体は、導体内を直流が正常に流れる場合、ジュール発熱しないため冷却の必要性は少ない。しかし、導体の移動などの微小擾乱が加わった場合、僅かな熱発生に起因して超電導破壊（常電導への遷移）が進展する可能性があり、これを防ぐため通常は磁気化安定設計のほか、冷却による安定化設計が行われる。

冷却安定化とは、マグネットシステム等のごく一部分に常電導遷移が生じ、電流が超電導体の周囲の安定化材に流れてジュール発熱しても、それがさらに伝播するのを冷却によって防ぐ方法である。そして、この考え方はシステムが大型になるほど重要となる。

冷却安定化設計の代表的なものとしてはStecklyらの完全安定化、MaddockらやWilsonらの安定化などがある^{37),38)}。Stecklyらの考え方は、導線の全ての部分について、単位表面積当りに換算した内部発熱量 q_e を、冷媒による除去可能熱流束 q_w 以下に制限するものであり、導体に流せる最大許容電流値 $I_{max}(A)$ は次式で与えられる。

$$q_{emax} = rI_{max}^2 / (A \cdot p) = q_w \quad (4.2.1)$$

ここで、 $r (\Omega \cdot m)$ 、 $A (m^2)$ は安定化材の電気比抵抗および断面積、 $p (m)$ は導線の冷却周囲長である。

式(4.2.1)中の q_w の定め方は、Fig. 4.2.2 に示すとおりである。すなわち、沸騰伝熱の場合で、超電導体の臨界温度 T_c と冷媒の飽和温度との差 ΔT_c が膜沸騰の領域に対応する場合は ΔT_c に対する冷却熱流束、式(4.2.2)を用いる。また、 ΔT_c が極小熱流束点に対応する温度差 ΔT_{MHF} より小さい場合は極小熱

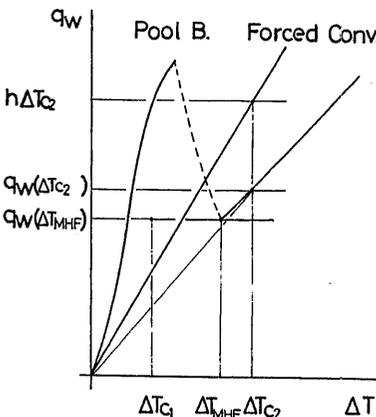


Fig.4.2.2 q_w の決定法(Steckly)

流束、式(4.2.3)を用いる。一方、単相強制対流の場合については特に記述されていないが、前者と同様な考え方ができ、超電導体の臨界温度 T_c と冷媒の主流温度との差 ΔT_c と冷媒熱伝達率 $h (w/m^2 \cdot K)$ を用いて式(4.2.2)で与えられる。

$$q_w = q_w (\Delta T_c) \quad \text{または、} \quad (4.2.2)$$

$$= h \Delta T_c$$

$$q_w = q_w (\Delta T_{MHF}) \quad (4.2.3)$$

Stecklyらの考え方は安全側の設計であるが、現実には導体の全ての部分で同時に発熱が生じるわけではない。そこで、Maddockらは沸騰伝熱における場合に関して、部分的に発生した常電導遷移が伝播しない条件の考察から熱伝導平衡による安定化を提案し、 q_w を次式で与えている。

$$q_w = q_w (A = B) \quad (4.2.4)$$

ここで、 A および B は Fig. 4.2.3 中の曲線に囲まれた面積であり、上式は両者が等しくなるように q_w を定めることを意味する。また、図中の ΔT_r は、超電導体から安定化材に電流が分流を開始する温度 T_r と冷媒主流温度 T_l との差であり、次式で与えられる。

$$\Delta T_r = \Delta T_c (1 - I/I_c) \quad (4.2.5)$$

I_c は超電導体の臨界電流、 I は実際に導体に流す電流である。

Maddockによる上記の式(4.2.4)は次のようにして導かれる。すなわち、安定化材の軸方向 $x (m)$ への熱伝導による熱流束 $\lambda dT/dx (w/m^2)$ 、導線の単位面積

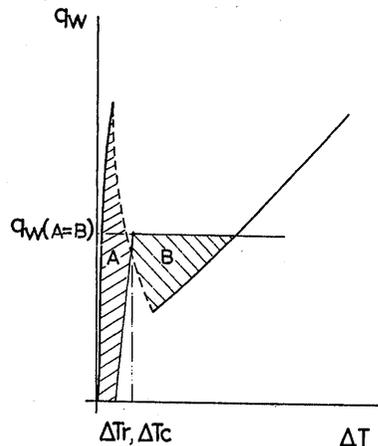


Fig.4.2.3 q_w の決定法(Maddock)

当りに換算した内部発熱量 q_e および導線表面の冷却による除去熱流束 q_w との間には式(4.2.6)が成立する。 λ (w/m·K)は安定化材の熱伝導率である。

$$\frac{A}{p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + q_e = q_w, \quad q_e = \frac{rI^2}{Ap} f(T) \quad (4.2.6)$$

ここで、 $f(T)$ は電流 I がすべて安定化材に流れた場合の内部発熱量 $rI^2/(A \cdot p)$ に対する q_e の比を意味し、超電導体の温度 T の関数であり、Current Sharingモデルと称される次式で与えられる。

$$f(T) = \begin{cases} 0 & T < T_r \\ 1 & T > T_c \\ (T - T_r)/(T_c - T_r) & T_r < T < T_c \end{cases} \quad (4.2.7)$$

式(4.2.6)を温度 T に関して、冷媒温度 T_l から発熱部の導体温度 T_h まで積分すると、

$$\int_{T_l}^{T_h} (q_w - q_e) dT = \frac{A}{\lambda p} \left[\frac{1}{2} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right)^2 \right]_{T_l}^{T_h} \quad (4.2.8)$$

となる。上式において、発熱部の熱量が熱伝導によってすべて低温側に除去され、温度勾配部が軸方向に移動しない(すなわち熱平衡の条件が成立する)場合、 dT/dx は $T = T_l$ 、 T_h において 0 となるため上式右辺は 0 となる。したがって、熱伝導平衡の条件は結局次式で表示される。

$$\int_{T_l}^{T_h} q_w dT = \int_{T_l}^{T_h} q_e dT \quad (4.2.9)$$

この関係をFig.4.2.3と対応させると式(4.2.4)の関係が得られる。

Maddockらの方法による設計ではStecklyらの考え方に比べて許容熱流束 q_w を60%程度高く採ることができるため、電流密度に換算すると約30%高い値に設定できると云われている。³⁷⁾

4.2.4 冷却性能改善による超電導体の高性能化

(1) 存来型(ヘリウム冷却)超電導の安定性改善

超電導体に流せる電流の理論的上限は臨界電流 I_c であるが、実際には前節で述べた安定化設計を行うため、最大電流 I_{max} は式(4.2.1)で与えられる値に制限される。したがって、導体表面での冷却熱流束 q_w が低い場合、必要電流を得るためにはその分、安定化

材の断面積あるいは導体の本数を増加させなければならず、その結果マグネットシステム等の全体の質量や寸法が大きくなってしまふ。このため、冷却性能の算定ならびにその改善は超電導システムの高性能化に不可欠なものである。

ヘリウム冷却超電導体の冷却安定性改善に関しては、西尾ら³⁹⁾の浸漬冷却に関する研究例がある。まず、通常のプール沸騰伝熱で冷却した場合の検討結果をTable 4.2.3中に示す。対象とする超電導体は断面 A が $2.45 \times 1.4 \text{ mm}^2$ 、冷却周長さ p が 5.25 mm 、臨界電流 I_c が 1020 A (4.2 K 、 4 T での値)、安定化材と導体の比が $5:1$ のものである。Maddockの方法による式(4.2.4)を適用すると q_w は $2.8 \times 10^3 \text{ w/m}^2$ 、電流値 I_{max} は 205 A 程度となっている。さらに西尾らは、超電導体の表面に低熱伝導性のPTFE薄膜をコーティングすると、液体窒素の沸騰曲線の核沸騰域が高過熱温度側に移動する性質を利用し、 q_w の値、したがって式(4.2.1)による最大電流 I_{max} を増加させ得ることを提案している。Fig.4.2.4はその効果を示したものであり、コーティング膜の厚さ δ を 0 から $50 \mu \text{ m}$ に増加させると I_{max} が40%程度増加していることが判る。

一方、大型マグネットでは、許容熱流束 q_w を大きくとれること、二相流の不安定がないことなどの利点から、高速の超臨界ヘリウムや過冷却液による単相強制対流による冷却方式も用いられる。例えば、Fig.4.2.1中に示すヘリウム液の強制対流で、 Re 数が 10^5 の場合についてみると、 ΔT_l を $2-3 \text{ K}$ とすることができれば、式(4.2.2)より q_w は約 $5 \times 10^3 \text{ w/m}^2$ となるため、 I_{max} は34%大きくなることが判る。

(2) 高温超電導体の冷却安定性の検討

超電導体の高温化はこの一、二年の間に急激に進められたため、その冷却安定性に関しては検討例が皆無と云ってよい。前にも述べたように、線材、薄膜といった導体の形状が明確でなく、また将来冷却自体が必要でなくなる可能性もあるが、ここでは線材化されること、ならびに窒素冷却が当分必要であることを前提に議論することとする。

タリウム系ならびにイットリウム系の高温超電導体について、許容電流値を検討した例をTable 4.2.3およびFig.4.2.5に示す。これらの導体は、現時点で得られている臨界温度がそれぞれ 125 K 、 95 K であり、窒素冷却の場合 ΔT_c は 48 K 、 18 K となる。また、電流密度 I_c/A_s がタリウム系では、薄膜形状で 320 万 A/cm^2 、線材で 1.3 万 A/cm^2 程度とされている。したがって、仮に

Table 4.2.3 超電導体の冷却安定性評価

評価例	ヘリウム冷却超電導体		窒素冷却超電導体		強制対流及二相流冷却
	浸漬冷却 ³⁹⁾	強制対流冷却	浸漬冷却 (イットリウム系)	浸漬冷却 (タリウム系)	
臨界温度 T_c (K)	7.6	〃	95	125	〃
同電流密度 $\frac{I_c}{A_s}$ ($\frac{A}{cm^2}$)	1.78×10^5 (4T)	〃	4.7×10^5 (1T)	32×10^5 (0T, 薄膜) 0.13×10^5 (0T, 線材)	〃
同電流 I_c (A)	1020	〃	2690	18300, 74	〃
低温流体温度 T_f (K)	4.2	-	77.3	〃	-
冷却温度差 $\Delta T_c = T_c - T_f$	3.4	-	17.7	47.7	-
$\Delta T_f = T - T_f$	-	2~3	-	-	20~30
安定化材比抵抗 r ($\Omega \cdot m$)	0.1×10^{-4}	〃	0.2×10^{-4}	〃	〃
導線断面積 A_T (m^2)	3.43×10^{-6}	〃	} (同一寸法仮定)		
同冷却周長 p (m)	5.25×10^{-3}	〃			
安定化材・導体比 $\frac{A_T - A_s}{A_s}$	5	〃			
冷却熱流束 q_w ($\frac{W}{m^2}$)	2.8×10^3	5.0×10^3	1.8×10^4	2.2×10^4	1.0×10^5
許容電流 I_{max} (A)	205	270	370	410	870
同電流密度 $\frac{I_{max}}{A_s}$ ($\frac{A}{cm^2}$)	3.58×10^4	4.8×10^4	6.4×10^4	7.1×10^4	1.5×10^5

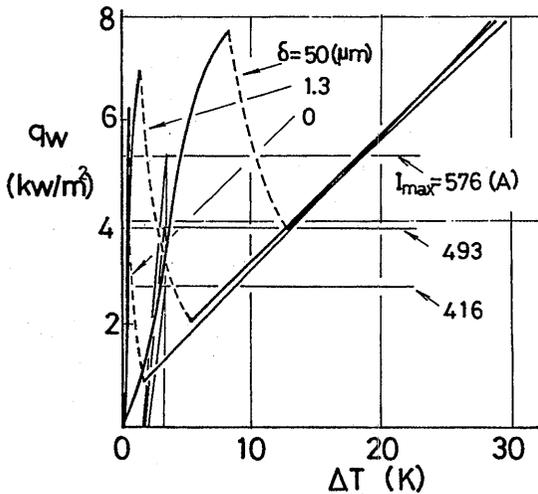


Fig.4.2.4 浸漬冷却における薄膜コーティングの効果³⁹⁾

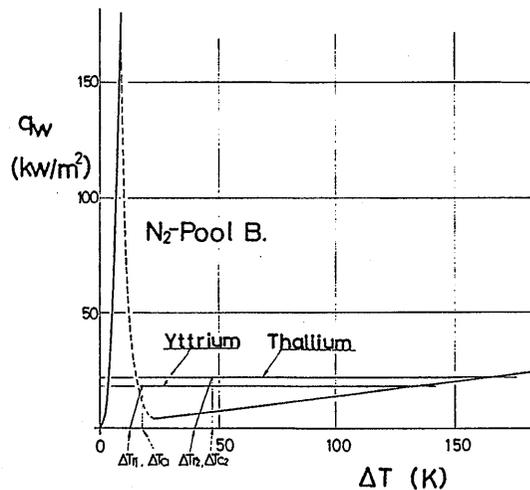


Fig.4.2.5 高温超電導体の許容熱流束 (浸漬冷却の場合)

表中のヘリウム冷却の場合と同等寸法の線材化ができ、電流密度も現在の薄膜程度まで増加させ得るとすると、臨界電流 I_c は $1.8 \times 10^4 \text{ A}$ となる。一方、浸漬沸騰伝熱で熱除去するとして、Maddockの方法により冷却性能を検討すると、Fig.4.2.5に示すように、許容熱流束 q_w はそれぞれ 2.2×10^4 および $1.8 \times 10^4 \text{ w/m}^2$ 程度の値となる。したがって、式(4.2.1)を用いて最大電流を求めるといずれも 400 A (電流密度 7 万 A/cm^2) 前後に制限されてしまう。

窒素冷却の場合に冷却性能を向上させる手法としては、まずヘリウム冷却と同様単相強制対流伝熱による方法が考えられる。液体窒素はヘリウムに比べて沸点が高く、過冷却液による単相強制対流での過冷却度を大きくとることが比較的容易である。Fig.4.2.1において、例えば Re 数を 10^5 、 ΔT_l を $20-30 \text{ K}$ とすると、式(4.2.2)の考え方から q_w は約 $1 \times 10^5 \text{ w/m}^2$ となる。ただ、ヘリウムの動粘度が非常に小さい値であるのに対して、窒素は8倍程度であるため同一の Re 数を実現するためには流速がその分大きくなり ($Re = 10^5$ で 10 m/s)、ポンプ動力が増大すると考えられる。なお、窒素では臨界圧力が 3.4 MPa とヘリウムに比べ極めて高いため、超臨界界による冷却は耐圧や漏れの面から現実的でないと思われる。

もうひとつの手段として、強制流動沸騰冷却(二相流冷却)が考えられる。Fig.4.2.1に示した窒素のプール沸騰の場合、限界熱流束は $1.5 \times 10^5 \text{ w/m}^2$ 程度であるが、流路内を強制的に循環させると一般に限界熱流束は増加し、図中に示すように例えば質量流束 G を $10000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ とすると、 $4.6 \times 10^5 \text{ w/m}^2$ となる。ただし、これは流路長さが十分短い場合に限られる。通常システムでは長さが数m以上になると思われ、この様な場合には発生蒸気(蒸気クオリティ)が増加することによって限界熱流束は低下して結果的にプール沸騰と同程度になってしまう。したがって、Maddockの安定化設計を適用すると、 q_w も浸漬冷却の場合と比べてさほど改善されないことになる。

これに対して、同じ二相流冷却であるが、蒸気流によって導体表面上の液を増速させ、単相強制対流の場合と同程度の熱伝達率が得られれば、式(4.2.2)の考え方をを用いて高い q_w が得られる可能性がある。ただ、マグネットシステム内の流路は、冷却効果を上げ大型化をさけるため、通常狭あい流路となるが、そのような細管内で導体表面が常に液膜で覆われるかどうかと

いった点は検討課題と思われる。

いずれにしても、これらの手段によって許容熱流束 q_w を $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 程度まで高めることができれば電流値を約二倍にまで増加させることが可能となる。この場合でも、冷却性能の向上による超電導システムの高性能化の余地はまだ大きく、冷却技術の検討がさらに必要であろう。なお、強制対流沸騰冷却に関連する研究としては、成合、稲板らによる狭あい流路内における過冷却液の限界熱流束の研究⁴¹⁾、波江、汐崎によるリブ付管内における液膜流の研究⁴²⁾など^{43),44)}がある。また、極最近になって液体窒素のプール沸騰冷却に関し、液体4弗化炭素を少量加えた混合冷媒が高温超電導体の電流密度向上に有効であることが報告されている⁴⁵⁾。

4.2.5 今後の検討課題

超電導体の大型化、高性能化、また現在開発が進められつつある酸化銅高温超電導体の冷却安定化のためには低温流体による冷却技術の向上が必要である。

特に、液体窒素による冷却技術に関しては狭あい流路内の冷媒の流動様式、伝熱特性などを含めた許容熱流束の検討が今後の課題と考えられる。

4.3 低温用材料^{46)~58)}

低温装置を設計製作するためには、材料の熱的性質、機械的性質などを考慮して材料を選択する必要がある。熱伝導率と比熱は冷却、温度保持システムの設計には不可欠な物性値である。また、異種材料を組み合わせる場合には、熱膨張係数も重要な物性である。機械的性質としては強度(降伏応力、引張強度など)、靱性、疲労強度などが重要であり、これらの機械的性質によって、低温領域で使用可能な材料が制限される場合がある。

4.3.1 熱的性質

材料の熱的性質は類推的な説明が可能である。以下に定性的な考察を行うが、個々の材料には一般則と異なる性質を持つ場合もあるので注意を要する。

(温度とエネルギー)

温度 T の固体のフォノンエネルギーは、この温度においてエネルギー $\hbar\omega$ で励起されているフォノンの数 $n(\omega, T)$ 、および、固体の振動スペクトル分布関数 $\mathcal{D}(\omega)$ により、

$$U_{ph}(T) = U_{ph}(0) + \int_0^{\omega_D} \hbar\omega n(\omega, T) \mathcal{D}(\omega) d\omega \quad (4.3.1)$$

と表される。ここに、 ω_D はデバイ振動数であって、デバイ近似により、 $\omega \leq \omega_D$ となる振動子の数が物体中の自由度の数に等しくなるように定められる。 n がボーズ-アインシュタインの分布関数で記述され、 $\bar{\omega}$ が ω^2 に比例するなら、(4.3.1)式は(4.3.2)式の形式になる。

$$U_{ph}(T) = U_{ph}(0) + f(\theta/T) \cdot (T/\theta)^4 \tag{4.3.2}$$

ここに、 θ はデバイの特性温度であって $\hbar \omega_D = K_B \theta$ (K_B はボルツマン定数)で定義される。関数 f は $T \ll \theta$ の低温領域では一定である。

固体中の自由電子も固体の熱エネルギーに寄与する。自由電子の熱的なエネルギーは定性的に

$$U_e(T) = U_e(0) + k_B T \cdot N \cdot (T/T_F) \tag{4.3.3}$$

となる。ここに、 N は電子の総数、 T_F はフェルミ温度である。

(比熱)

温度と熱エネルギーの関係から固体の比熱が求められる。低温における比熱へのフォノンの関与は、(4.

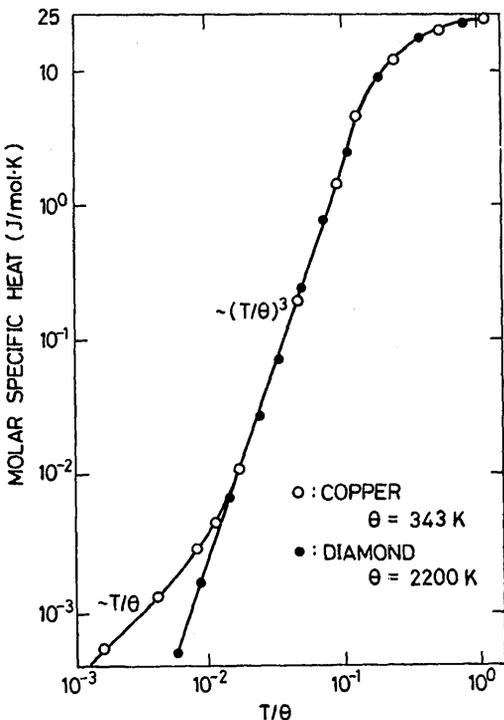


Fig.4.3.1 銅とダイヤモンドの比熱の温度依存性 (28)

3.2)式を温度で微分して求められる。

$$C_{ph} = \alpha(T/\theta)^3 \tag{4.3.4}$$

電子の比熱への関与は(4.3.3)式を微分して(4.3.5)式となる。

$$C_e = \gamma'(T/T_F) \tag{4.3.5}$$

(4.3.4)(4.3.5)式を併せると、低温でのフォノンと準電子による比熱は(4.3.6)式となる。

$$C = \gamma T + \alpha(T/\theta)^3 \tag{4.3.6}$$

準電子の影響は、導体が10K以下に冷却された時に現れて来る。Fig.4.3.1は銅とダイヤモンドのモル比熱を T/θ で整理して示したものである。 $T/\theta = 0.02 \sim 0.1$ では2つの物質の比熱は $(T/\theta)^3$ に比例し、よく一致する。しかし、導体である銅ではこの温度より低温では、温度に比例する曲線に沿うようになる。Fig.4.3.2には幾つかの構造材料の比熱を示している。有機材料の比熱もほぼ T^3 に比例すること、金属材料の比熱は10K以下では T に比例する曲線に沿うようになることがわかる。

複合材料の比熱は、材料の配合などにより変化し、所定の比熱の材料を作ることは可能である。

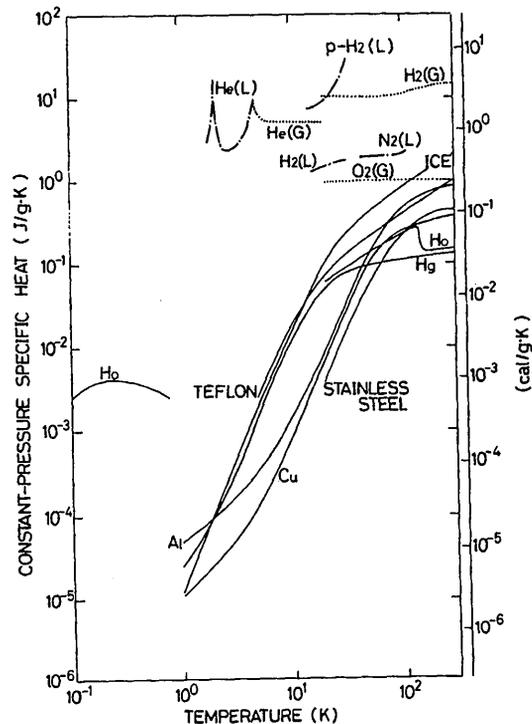


Fig.4.3.2 構造材料、ガスなどの比熱の温度依存性

(熱伝導)

理想気体と置き替えられた準粒子系の熱伝導率 λ は(4.3.7)式で表される。

$$\lambda = \frac{1}{3} c v \ell \quad (4.3.7)$$

ここに、 c は定積比熱、 v は準粒子の平均速度、 ℓ は平均自由行程である。フォノンと準電子によるエネルギー輸送を考えると、全体としての熱伝導率は(4.3.8)式となる。

$$\lambda = \lambda_{ph} + \lambda_e \quad (4.3.8)$$

絶縁体ではフォノンによるエネルギー輸送が支配的であり、 ℓ の影響を大きく受ける。結晶体などの格子欠陥が少ない固体が低温の場合には(4.3.4)式により

$$\lambda_{ph} \propto T^3 \quad (4.3.9a)$$

となる。高温では

$$\ell \propto \exp(\theta/T), \quad T \ll \theta \quad (4.3.9b)$$

$$\ell \propto 1/T, \quad \gg \theta \quad (4.3.9c)$$

である。

格子欠陥が多い材料ではフォノンによるエネルギー輸送に対する抵抗が大きい。Fig.4.3.3は水晶と石英ガラスの熱伝導率の温度依存性を示している。水晶では、上述の定性的な説明がよく当てはまるが、石英ガラスでは、はるかに小さな熱伝導率になっていることがわかる。

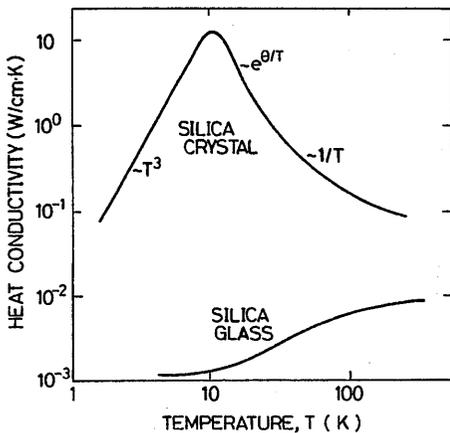


Fig.4.3.3 水晶と石英ガラスの熱伝導率の温度依存性

導体、特に金属の場合、 λ_{ph} と λ_e がともに重要となる。金属の λ_{ph} と λ_e は(4.3.10)、(4.3.11)式で表わされる。

$$\lambda_{ph} \propto T^2 \quad (4.3.10)$$

$$\lambda_e \propto T \quad (4.3.11)$$

(4.3.10)(4.3.11)式より(4.3.12)式が得られる。

$$\lambda = AT + BT^2 \quad (4.3.12)$$

ここに、 A 、 B は定数である。

Fig.4.3.4に各種材料の熱伝導率の温度依存性を示した。Fig.4.3.5に液体窒素温度程度までの各種保温材料の熱伝導率を示した。

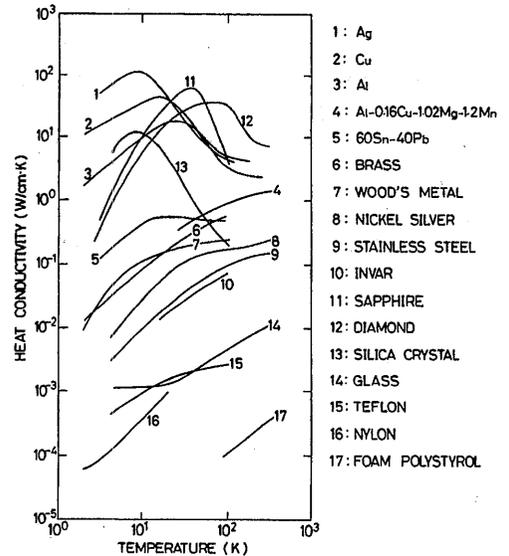


Fig.4.3.4 各種材料の熱伝導率

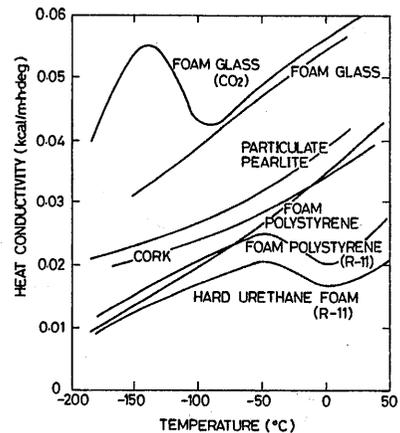


Fig.4.3.5 各種保温材料の熱伝導率 (()内は発泡気体) (29)

合成樹脂など非晶質材料の熱伝導率は、一般に小さい。大きな熱伝導率が要求される時には、熱伝導率の大きな粉末あるいは繊維を混ぜることで所定の熱伝導率が得られる。FRPなどの繊維強化材料では繊維の方向による熱伝導率の異方性が現れる場合があるので、注意を要する。

(熱膨張)

固体の熱膨張は原子のポテンシャルの非対称性から説明される。原子間距離に対してポテンシャルエネルギーはFig.4.3.6のようになる。0 Kでは原子はポテンシャル曲面の底で止まり運動しない。温度が上昇すると、原子のエネルギーが大きくなり熱運動するようになる。温度 T における原子の熱運動の範囲は d_a から d_b であり、平均原子間距離は d_e となる。ポテンシャル曲面の非対称性から、 d_e は 0 Kにおける原子間距離 d_0 より大きくなる。この平均原子間距離の温度依存性が熱膨張である。Fig.4.3.6を見てもわかるように、平均原子間距離の温度依存性は低温では小さく、高温になるほど大きくなる。Fig.4.3.7に線膨張の線図を示した。0 K近傍ではポテンシャル曲線がほぼ対称であるため、熱膨張は小さい。

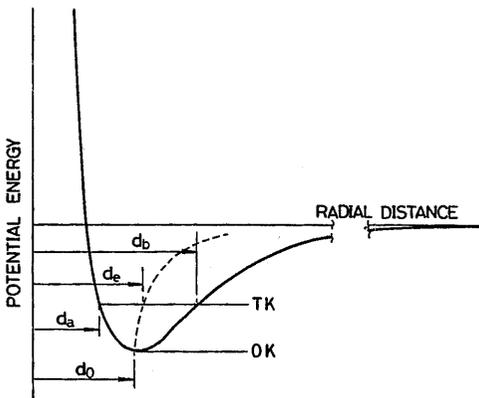


Fig.4.3.6 原子間距離とポテンシャルエネルギーの関係

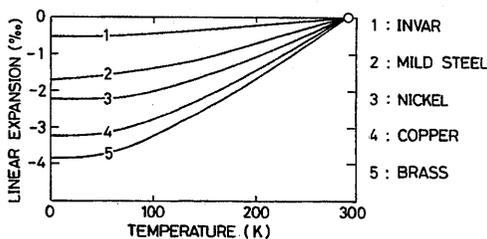


Fig.4.3.7 金属材料の熱膨張

体積膨張係数は等方性材料では線膨張係数の3倍となる。異方性材料では方向によって線膨張係数が異なる。特異な材料、 α ウランなどでは負の線膨張係数を持つ方向がある。繊維強化材料でも繊維の方向によっては著しい異方性を示す場合がある。

4.3.2 機械的性質

機械的性質の温度依存性を単一のモデルで表現する事は不可能に近い。固体の伸-荷重関係は一般にFig.4.3.8に示される温度依存性を持つ。すなわち、温度が低くなるほど、弾性率および破断強度が上昇し、伸びが低下する。Fig.4.3.9に縦弾性係数の温度依存性を、Fig.4.3.10に降伏応力あるいは0.2%耐力の温度依存性を示した。金属材料では低温における靱性が問題となる。複合材料では温度依存性の異なる材料が用いられており、破壊モードが変化したり複雑な現象が観察される場合がある。

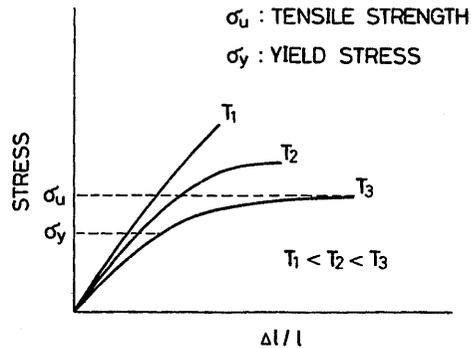


Fig.4.3.8 応力-ひずみ関係と温度

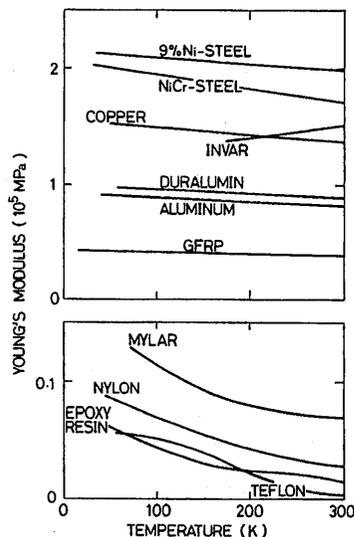


Fig.4.3.9 各種材料の縦弾性係数

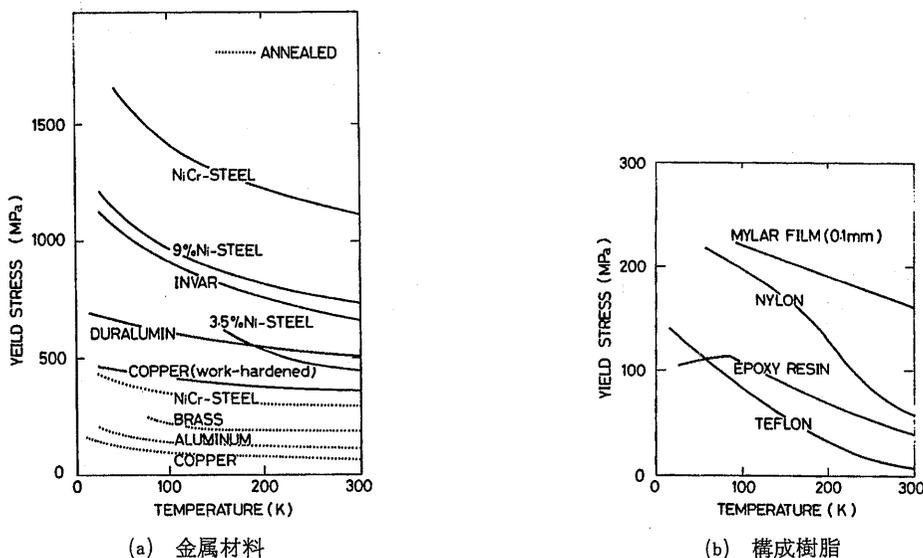


Fig.4.3.10 各種材料の降伏応力 (0.2%耐力を含む)

(金属材料)

低温、極低温でも、金属材料は有望な構造材料の候補である。Table 4.3.1に極低温構造材料の用途と要求される性質をまとめた。これを見ると、304、304L、316などのオーステナイトステンレスが主要な材料であることがわかる。析出物強化型あるいは窒素強化型金属材料では、4.2Kでの降伏応力・靱性の大ききあるいは急激な伸びの低下に問題があり

一般的なオーステナイトステンレスに優るものではない。Fig.4.3.11~13に各種オーステナイトステンレス鋼の引張特性を示した。

オーステナイトステンレスの他にもTiおよびTi合金は極低温における伸びが大きく注目に値する材料である。Fig.4.3.14にこれらの材料の引張特性を示した。

Table 4.3.1 極低温用構造材料の用途及び特性

用途		核融合用超電導マグネット		超電導発電機		磁気浮上列車	液体燃料ロケット	高エネルギー物理	
		コイル枠(容器)	支持材料	トルクチューブ	電磁ダンパー	クライオスタット	タンク材料	水素泡箱	コイル枠
機械的性質	強度	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	○
	延性	○	◎	○	◎	○	○	◎	○
	初性	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	○
	比強度	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	○
物理的性質	疲労特性	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	○
	溶解性	○	○	○	○	○	○	◎	○
	熱伝導率	○	◎	○	○	◎	○	◎	◎
	非磁性	○	◎	○	○	◎	○	◎	◎
候補材料	ヤング率	○	◎	○	○	◎	○	◎	◎
	熱膨張率	○	◎	○	○	◎	○	◎	◎
電導率	電導率	○	◎	○	◎	○	○	◎	◎
	電導率	○	◎	○	◎	○	○	◎	◎
候補材料	ステンレス鋼 高Mn鋼 超合金 チタン合金	ステンレス鋼 高Mn鋼 超合金 繊維強化樹脂	ステンレス鋼 チタン合金 超合金	銅合金	ステンレス鋼 アルミ合金 チタン合金 繊維強化樹脂	ステンレス鋼 アルミ合金 チタン合金 繊維強化樹脂	ステンレス 高Mn鋼	ステンレス 高Mn鋼 超合金	
使用例	LCT : 304LN 316LN MFTF : 304LN	LCT : 316LN MFTF:304LN A286	A286 Inconel 718 Ti-6Al-4V Ti-5Al-2.5Sn		304L	301 2219-T87 2014-T6	CERN: Mod. CX-20 Kromarc 58		

○:必要とされる特性 ◎:特に必要とされる特性

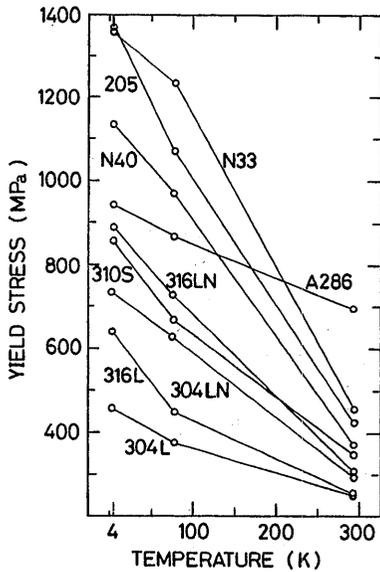


Fig.4.3.11 降伏応力

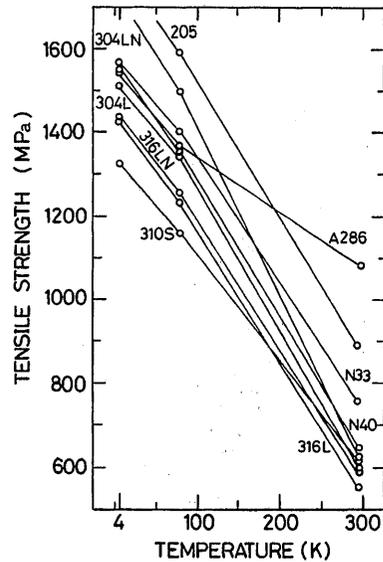


Fig.4.3.12 引張強さ

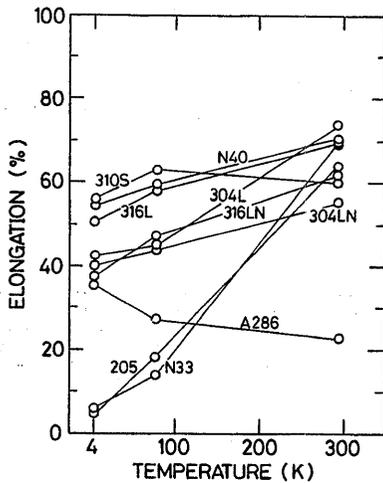


Fig.4.3.13 伸び

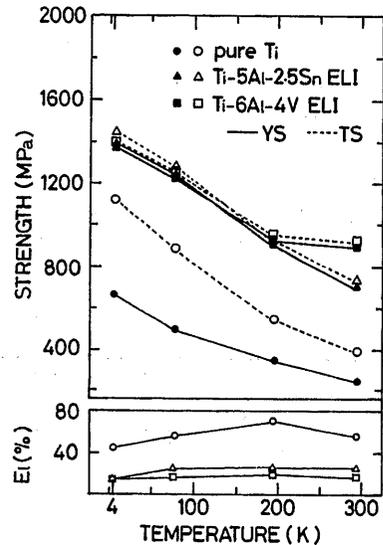


Fig.4.3.14 TiおよびTi合金の引張特性

極低温における靱性は体心立方晶型の一般的な鋼では小さい。オーステナイトステンレスは降伏応力の温度依存性により、むしろ靱性が増加する傾向が見られる。しかし、炭素量が大きいほど、降伏応力が高いほど靱性は低下する。Fig.4.3.15,16に304, 304Lステンレスの靱性に及ぼす炭素量と降伏応力の影響を示した。

構造材料として金属を用いる時、疲労強度につい

での検討が必要である。一般に、極低温に至っても伸びの低下しない金属材料では、疲労強度も低下しない。Fig.4.3.17にTi合金のS-N曲線を、Fig.4.3.18にオーステナイトステンレスのS-N曲線を示した。これらをFig.4.3.13, 14を参考にしながらめると、低温でも伸びの低下しない材料は温度低下に伴って疲労強度が増加することがわかる。

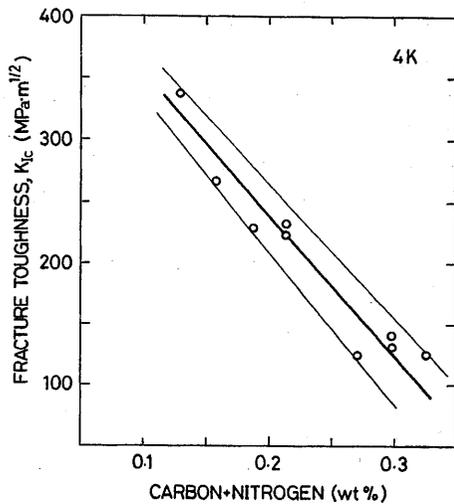


Fig.4.3.15 304ステンレスの靱性に及ぼす炭素当量の影響 (4 K)

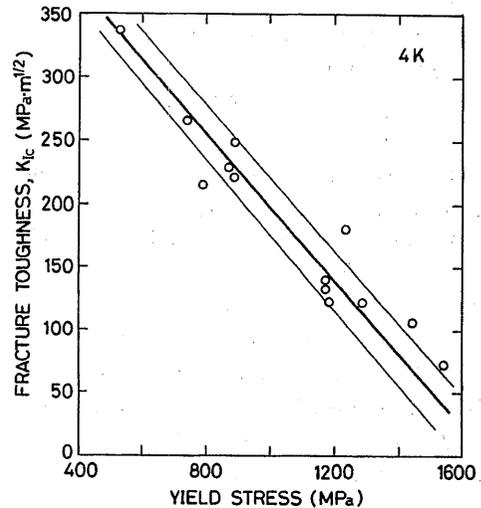


Fig.4.3.16 304ステンレスの靱性に及ぼす降伏応力の影響 (4 K)

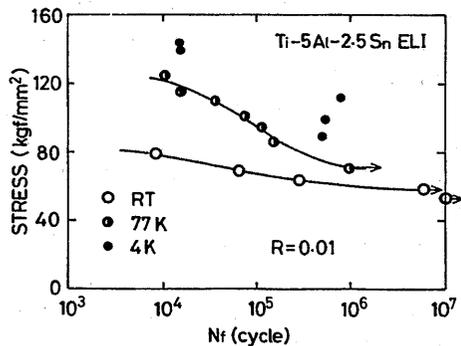


Fig.4.3.17 Ti合金のS-N曲線

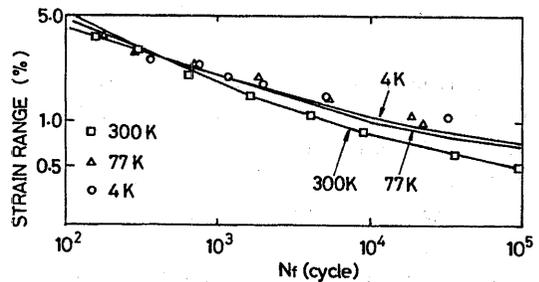


Fig.4.3.18 304LステンレスのS-N曲線

(FRP)

FRPは電気あるいは熱的な絶縁性が必要とされる場合には、有望な構造材料である。GFRP、CFRPともに、温度が低下するに従って引張強度、層間せん断破壊応力、切欠靱性が増加する。これらの強度増加は、繊維の強度増加によるものであって、マトリックスとしてのポリマーの強度は温度低下と共に若干低下する (Fig.4.3.10のエポキシ樹脂を見ると、90K以下で強度の低下が見られる)。そのため、引張強度の増加に比べて層間せん断破壊応力の増加は少ない。また、切欠靱性は低温では大幅に増加するが、破壊の機構が変化する。常温では繊維の破断、極低温では繊維とマトリックスの付着破壊が生じる。

参考文献

- 1) 岡田東一：低温工学ハンドブック、内田老鶴圃新社、(1982)、PP.297~314
- 2) 中嶋秀夫ほか：極低温構造材料の開発と構造設計基準—核融合炉用超電導コイルを中心として、低温工学、第21巻第4巻(1986)、PP.197~204
- 3) 高橋良昌ほか：超伝導磁力計、島津評論、第41巻、第1・2号(1984)、PP.99~113
- 4) 別所久美ほか：FRPクライオスタット、低温工学、第17巻第6号(1982)、PP.322~325
- 5) 伊藤大佐ほか：大型FRPクライオスタットの開発、低温工学、第17巻第6号(1982)、PP.326~331
- 6) 倉岡康郎ほか：プラスチックデュワーの開発、低

- 温工学、第17巻第6号(1982)、PP.332~336
- 7) 門谷建蔵ほか：FRPクライオスタットの開発状況、強化プラスチック、第31巻第3号(1985)、PP.123~129
- 8) J.R.Benzinger, et al.: *Advances in Cryogenic Engineering*, vol 26, (1980), p.252
- 9) 倉岡康郎ほか：GFRP材料の特性試験—大型GFRPデューワー開発のために—、低温工学、第21巻第1号(1986)、PP.30~36
- 10) 倉岡康郎ほか：大型GFRPデューワーの開発、低温工学、第21巻第1号(1986)、PP.44~50
- 11) 緒形俊夫ほか：低温工学の将来展望／構造材料、低温工学、第21巻別冊(1986)、PP.41~44
- 12) R.P.Reed, et al.: *Materials at Low Temperatures*, ASM, (1983)
- 13) 福士慶滋：GFRPの低温特性、低温工学協会材料部会資料(1987)
- 14) 堀内健文ほか：極低温用断熱支持材料の熱的・機械的特性、神戸製鋼技法、第25巻第4号(1975)、PP.84~88
- 15) G.Hartwig, et al.: *Kunststoffe*, No.64(1974), P.32
- 16) R.J.Corruccini, et al.: *Thermal Expansion of Technical Solids at Low Temperatures*, NBS Monograph, No.29(1961)
- 17) 前田利雄ほか：0°C~LHe温度における繊維強化複合材の諸特性、FRP漁船、第122号(1989)、PP.29~34
- 18) 萩原宏康：応用超電導、日刊工業新聞社、初版(1986)、P.238
- 19) M.B.Kasen, et al.: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol 28, (1981), P.271
- 20) H.Becker, E.Eroz: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol 26, Plenum Press, NY(1980), P.259
- 21) 王永安ほか：三次元織物で強化されたGFRPの極低温特性、第37回低温工学研究発表会予稿集、低温工学協会、(1987)、P.17
- 22) 王永安ほか：3D-GFRPの低温における剛性と強度、昭和62年度秋季低温工学会予稿集、低温工学協会、(1987)、P.163
- 23) 有沢三治ほか：三次元織物、強化プラスチック、第33巻第5号(1987)、PP.208~212
- 24) 西嶋茂宏ほか：低温におけるガラス・カーボンハ
イブリッド材料の機械的性質、低温工学、第21巻第6号(1986)、PP.321~326
- 25) 小林久恭ほか：加圧超流動および飽和超流動によるハイブリッド冷却用プラスチック・デューワー、低温工学、第22巻第2号(1987)、PP.133~135
- 26) 岡田東一：低温工学ハンドブック、内田老鶴圃新社、(1982)、PP.248~263
- 27) M.G.Kaganer: *Thermal Insulation in Cryogenic Engineering*, Israel Program for Scientific Translations, (1969)
- 28) スリーエム社：“スコッチライト” グラスバブルス 技術資料
- 29) F.Ruccia, R.Hinckley: *The Surface Emittance of Vacuum-Metalized Polyester Films*, *Advances in Cryogenic Engineering(AICE)*, Vol. 12, (1967)
- 30) G.Cunnington, C.Tien: *Apparent Thermal Conductivity of Vncoated Micro-sphere Cryogenic Insulation(AICE)*, Vol.22, (1977)
- 31) 前田利雄ほか：超低温用プラスチック構造材の接合方式(第1報)、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集(1984)、PP.151~154
- 32) S.R.Baliozian, et al.: *Low Thermal Mass Dewar Neck Plug*, *IBM Technical Disclosure Bulletin*, Vol. 25, No. 7B(1982), PP.3805~3806
- 33) 榎ほくさん：FRPデューワー 技術資料
- 34) J.R.Becker, et al.: *GFRP Support for the Helium Tank of a Space Cryostat*, *Proceedings of 8th International Cryogenic Conference*, (1980), PP.93~96
- 35) 西嶋茂宏ほか：プラスチックのAE GFRPデューワーのAEによる監視、低温工学、第22巻第1号(1987)、PP.50~54
- 36) 伝熱工学資料(改訂4版)、日本機械学会編、(1986)、P.214, P.331
- 37) 超電導技術の現状、極低温冷却技術の現状、日本造船振興財団、(1986)、P.31, P.26
- 38) Peck, S.D.: *Practical Design Aspects for Superconducting Magnets Cooled with Pool Boiling He I*, *Cryogenics*, 31(1986), P.375
- 39) 西尾茂文、Chandratilleke, G.R.: 超伝導コイル冷却安定性の改善に関する研究、第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(1987)、P.371
- 40) 桜井彰、塩津正博ら：蒸気膜崩壊に伴う膜沸騰極小点からの非定常熱伝達(II)、第22回日本伝熱シ

- ンポジウム講演論文集、(1985)、P.58
- 41) 成合英樹、稲坂富士夫ら：狭あい流路における均一加熱条件での限界熱流束（クオリティ零近傍での特性）、日本機械学会論文集、54-502B(1988)、P.1406
- 42) 波江貞弘、汐崎浩毅：ら旋細線などを挿入した管内における環状液膜流の研究（蒸発伝熱の改善を目的とするエントレインメント抑制について）、日本機械学会論文集、56-524B(1990)、No.89-0354A
- 43) 中込秀樹、栗山透：極低温機器における伝熱、伝熱研究、28、108(1989)、P.127
- 44) 伊藤猛宏：超臨界圧の乱流熱伝熱、伝熱研究、26、103(1987)、P.83
- 45) 天野俊之：窒素-4フッ化炭素混合冷媒の沸騰熱伝達に関する研究、第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集、2(1989)、P.448
- 46) 岩村：固体の統計力学、槇書店、(1968)
- 47) VDI: Lehrgangshandbuch Kryotechnik, (1977). (邦訳) VDI低温工学ハンドブック、内田老鶴圃新社、(1982)
- 48) R.L.Tobler, D.T.Read, & R.P.Reed: Strength/Toughness Relationship for Interstitially Strengthened AISI 304 Stainless Steels at 4 K Temperature, Fracture Mechanics:13th Conf., ASTMSTP 743, (1981), PP.250~268.
- 49) 町田：低温度領域(-40~160℃)における熱伝導率の測定、建材試験報告、3(1983)、PP.14~21.
- 50) E.Fitzer, R.Weiß & G.Hartwig: Fracture of Carbon-Fiber-Reinforced Epoxy Resins at Low Temperatures, High Temperatures-High Pressures, Vol.15, (1983), pp.147~150.
- 51) 小川 他：極低温用構造材料の低温特性、FAPIG, No106, (1984), PP.28~35.
- 52) 極低温化学技術の研究推進について、科学技術庁研究調整局極限科学技術(極低温)研究推進連絡会報告書、(1977)
- 53) 園井 他：チタニウム、ジルコニウム、Vol.22, No.3(1974), PP.143
- 54) 西垣 他：軽金属溶接、Vol.14, No.1(1976), PP.25~
- 55) 石川 他：第30回低温工学研究発表会予稿集、(1983)、PP.53
- 56) 関根、藤田、穴山：極低温における繊維分散有機

複合材料の破壊靱性と微視破壊機構、低温工学、Vol.20, No2(1985), pp.95~101

- 57) 鈴木、深倉、森：液体He温度での軸ひずみ制御による304Lステンレス鋼の疲労特性評価、第17回(A85070458)、(1985)、P.133~137.
- 58) D.Xuet al.: Fracture Behavior of Glass-Cloth/Polyester Composite Laminate at Low Temperature, J.I.Reinforced Plastic and Composites, Vol.4, (1985), PP.205~211.

5. 超電導を利用した新計測技術

5.1 強力な磁場を利用する計測法

超電導マグネットより発生される高安定かつ高強度の磁界を利用した計測法として、間接的な利用法を含めて次の2点をあげてみたい。

- ① SOR (Synchrotron Orbital Radiation、シンクロトロン放射光) を利用する計測法
- ② NMR (Nuclear Magnetic Resonance、核磁気共鳴) を利用する計測法

5.1.1 SORを利用した計測法

SORは、高エネルギー電子が磁場等により偏向された時に発する光であり、電子のエネルギーが十分高ければ、そのスペクトルは電波領域からX線領域に及ぶ連続分布となる。放射光の強度が最大になる波長 λ_c は、式(5.1.1)で示される。¹⁾ (Fig.5.1.1)

$$\lambda_c = 18.64 / (B_0 \cdot E) \quad (5.1.1)$$

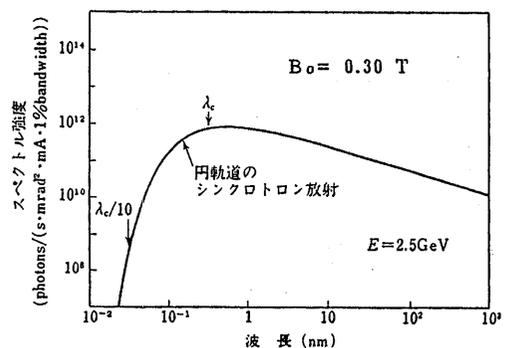


Fig.5.1.1 シンクロトロン放射スペクトル例¹⁾

λ_c はÅ単位で表わした時の波長、 B_0 は偏向磁場の強さで単位はT(テスラ)、 E は加速電子のエネルギーで単位はGeVである。従って、波長を短くするには

B_0 または E を大きくする必要がある。 B_0 を発生させる偏向用電磁石をウィグラーあるいはアンジュレータと言うが、この磁場に超電導マグネットの高磁場を利用するものである。 $B_0 = 1.5 \sim 1.8 \text{ T}$ の磁場では通常の電磁石が用いられているが、X線回折に必要な 1 A 以下の波長領域のX線を得るには、超電導マグネットの使用が必要であり、また、磁界の安定性の向上、設計の容易さ、装置の小型化も可能となることから、超電導マグネットを用いたウィグラーの開発が行なわれている。

SORより得られるX線は、X線管を使って得られる特性X線強度の $10^2 \sim 10^3$ 倍の強度を持つと同時に連続波長である。SORより得られる放射光をX線源として用い、小角散乱法、EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure)法等により物質の原子配列、電子状態を分析する手段は、現在、最も注目されている計測技術の一つである。³⁾ 物質に入射されたX線のエネルギーが原子の内殻電子を励起できるエネルギー以上では、電子の励起に伴ってX線が吸収される。吸収は励起エネルギーに等しくなるところで鋭く立ち上がり、より高エネルギー側では振動的に変化する。²⁾ (Fig.5.1.2) EXAFSでは、この振動的変化の微細構造を解析することにより原子周辺の配位構造を知ることができ、長距離秩序を有しない極薄膜、アモルファス、融体、液体、構造的乱れの大きい系について適用可能である。

また、SORより得られるX線は、次世代の超集積化電子デバイス作成用のリソグラフィ用光源としても注目を集めている。

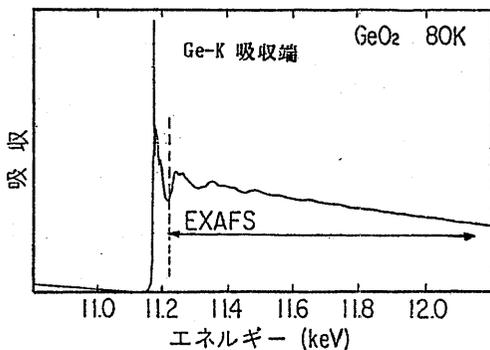


Fig.5.1.2 六方晶 GeO_2 のEXAFS例²⁾

5.1.2 NMRを利用する計測法

磁気を帯びたコマと考えられる原子核を静磁場 B_0 の中におくと、磁場 B_0 方向を軸として、角速度 ω_0 で回転運動(ラーモア歳差運動)を行い、運動方程式は式(5.1.2)で示される。(Fig.5.1.3)

$$\begin{aligned} dJ/dt &= \mu \times B_0 = J \times \omega_0 \\ (\omega_0 &= \gamma B_0) \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

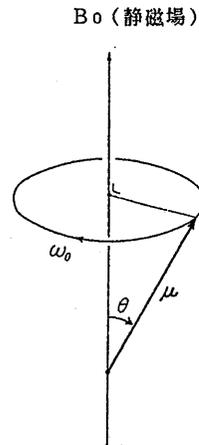


Fig.5.1.3 ラーモア歳差運動

J は、原子核の持つ角運動量(スピン)で量子数 I によって決まる原子核固有の値である。 μ (γJ) は、原子核の持つ磁気モーメントで原子核固有の定数 γ (磁気回転比)とスピン量によって決まる。共鳴周波数 ω_0 をラーモア周波数と言ひ、原子の結合状態により周波数 ω_0 がソフトする。

静磁場 B_0 の直角方向から振動磁場 B_1 (B_0 に比べ磁場強度は弱くてもよく、実際はrf (radio frequency) 電磁波) をかけると、 B_1 の周波数が ω_0 近傍付近でエネルギーの吸収が起こる。NMRの測定は、振動磁場用電磁波の周波数を共鳴周波数近傍で掃引し、物質の周波数領域でのスペクトルデータを得る方法(CW法)と、共鳴周波数近傍の振動磁場をパルス的に加え、時間応答を示す T_1 (スピン格子緩和時間)、 T_2 (スピン-スピン緩和時間) を測定する方法(パルス法)があるが、一般にはパルス法がよく用いられる。特定の原子NMRを観察することにより化合物の分子構造の決定、分子相互作用の解明だけでなく、反応の追跡も行いうることができるのが大きな利点である。測定可能な原子核は、角スピンを有する全ての核種が対象となるが、

濃度、感度の問題もあって、 ^1H 、 ^{13}C 、 ^{31}P 、 ^7Li 等が対象となっている。

超電導マグネットは、空間的に均一で、高磁場かつ時間的に安定な必要がある磁場 B_0 を発生させるために使用される。すでに医学診断用としては、 $0.5\sim 1.5\text{T}$ (テスラ)の超電導マグネットを使用したMRI (磁気共鳴断層撮影装置、NMR-CTと言うべきか)が米、西独、日本などのメーカーにより市販されており、人体に殆ど悪影響がないことからX線CTに変わる癌組織などの診断装置として注目されている。^{4)、5)}

工学的な応用で最も注目されているのは、生体材料、各種プラスチック、エラストマー、複合材料などの各種非破壊検査への応用である。特に、航空宇宙機器の構造材料への応用が進められている複合材料の非破壊検査では、複合材料内のポイドや層間剝離といった物理的な欠陥以外にも、マトリックスとして使用されている樹脂の化学変化を知ることにより硬化度や湿度、熱、化学物質などによる劣化、⁶⁾ 衝撃力によるダメージの程度などの測定が可能と言われているが、現状は、医学、生物分野に比較し、基礎的段階にある。

Fig.5.1.4~Fig.5.1.6にMatzkanin^{7)、8)}によって試みられたNMRを用いた複合材料の非破壊検査の実験結果を示す。

Fig.5.1.4、Fig.5.1.5は、 30MHz のrfコイルを用い、パルス法によりKFRP (ケブラー繊維強化プラスチック) 及びGFRP (ガラス繊維強化プラスチック) 内の湿度を測定した結果であり、 $200\mu\text{s}$ のパルス加えたときの材料内の水素の自由誘導減衰 (Free Induction Decay, FID) 振幅を測定したものであ

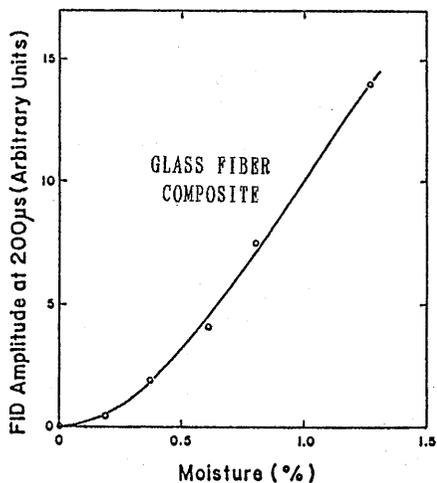


Fig.5.1.4 自由誘導減衰(FID)と湿度の関係 (GFRPの場合)⁸⁾

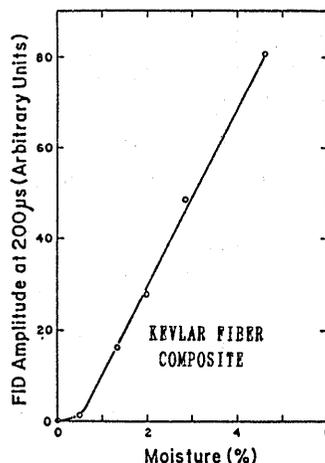


Fig.5.1.5 自由誘導減衰(FID)と湿度の関係 (KFRPの場合)⁸⁾

る。FID、 T_1 及び T_2 時間により特徴づけられる値であり、材料内の湿度とリニアな関係が得られている。Fig.5.1.6は、合成繊維のナイロン、アクリル、ポリエステル製の三種のファイバーについて、rf周波数を変え、スピン格子緩和時間(T_2)を測定した結果である。ナイロン、ポリエステルは周波数についてリニアであり、水素の T_1 時間に相当するが、アクリルについては不連続点が現れ、ファイバー中の窒素の四重極モーメントによるものであるとしている。その他、KFRPに衝撃損傷を与えた時のNMR信号の変化を測定した結果も報告されている。

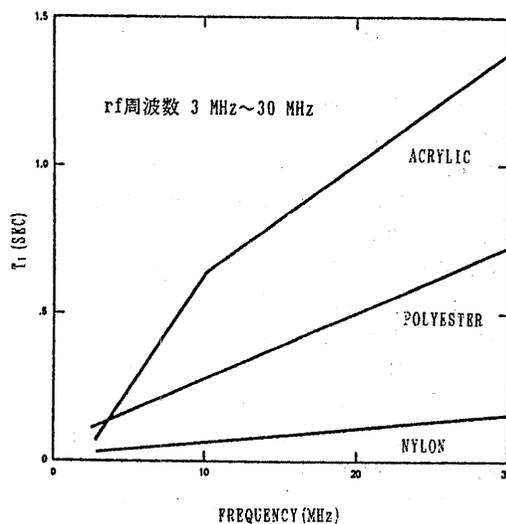


Fig.5.1.6 各種ファイバーのスピン格子緩和時間(T_1)⁸⁾

合を2個含むDC-SQUIDと1個含むAC-SQUIDがある。

DC-SQUIDはリング内に2個のジョセフソン接合を持ち、Fig.5.2.3に示すとおり外部から供給する電流とAB間に表われる電圧を観測する。動作原理は固体量子論を基礎としており、その理解は容易でないが、定性的に以下のように考えることが出来る。

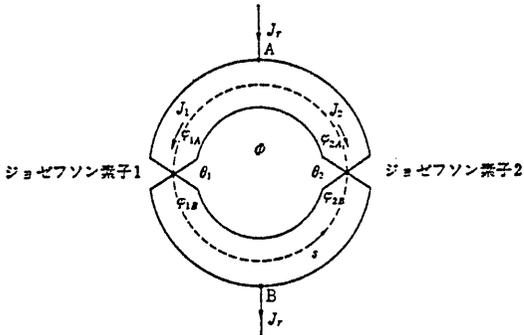


Fig.5.2.3 DC-SQUID⁹⁾

Fig.5.2.3において磁場がない場合には、左右の接合を通る電流は等しい。外部磁場が加わると、外部磁場に対する遮蔽電流（環状電流）が加わる。従って、2接合に流れる電流は等しくなく、超電導状態で外部から流せる最大電流 J_c は減少する。さらに外部磁場が大きくなり、リング内外の磁束の差が $-\phi_0/2$ 或は $\phi_0/2$ （正確には磁束密度、 ϕ_0 は磁束量子 $=h/2e$ 、 h はプランク定数、 e は電子の電荷）となると、 J_r はゼロとなる。すなわち、電流の大きい方の接合部は常電導状態となり、接合部を通して1本磁束（ ϕ_0 ）がリングに進入する。この場合、遮蔽電流の向きはリング内外の磁束密度の差を打ち消すべく、侵入前と逆方向に流れる。さらに外部磁場が大きくなると、遮蔽電流ゼロのとき J_r が最大を示した後、再びリング内外の磁束密度の差が $\phi_0/2$ 或は $-\phi_0/2$ となったところで、更に一本磁束が侵入するというサイクルを繰り返す。

磁束密度とSQUIDの外部供給電流の関係はFig.5.2.4のごとくなる。一般には2接合の特性が等しくないため、ここに示した通り、それぞれの接合の最大超電導電流 J_{r1} 、 J_{r2} の和と差の間を ϕ_0 周期で繰り返す。実用の回路構成はFig.5.2.5に示すように、交流で信号を扱えるような変調方式を用い、常にDC-SQUID

の $V-\phi$ 特性の極値で動作するよう帰還をかけ、帰還電流の大きさから ϕ を求める。入力部も超電導体コイルとして、直流の信号磁束をトランス結合でSQUIDリングに伝える。

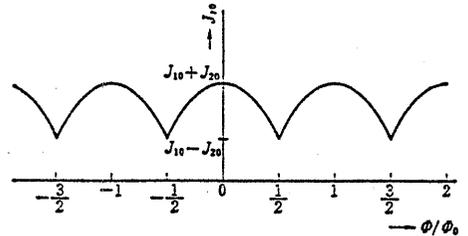


Fig.5.2.4 DC-SQUID最大超電導電流と磁束密度の関係⁹⁾

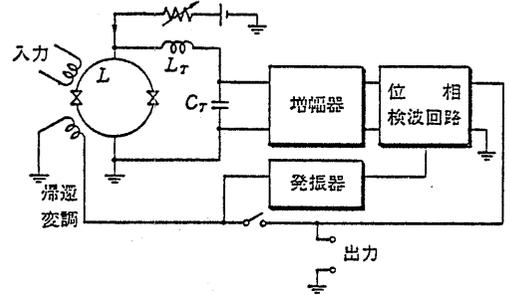


Fig.5.2.5 DC-SQUID回路方式⁹⁾

SQUIDは磁束量子単位で動作するため極めて高い磁束分解能を有する。DC-SQUIDの磁束分解能は、 $V-\phi$ 特性の振幅 ΔV 、増幅器の入力換算ノイズ δV 、増幅器直前の共振回路の Q 値を用いて、次の通り表わされる。

$$(\delta \Phi)_{min} = \Phi_0 (\delta V / \Delta V Q) \tag{5.2.1}$$

$$Q = 2\pi f L_T / R_d$$

ここで、 f は変調周波数、 R_d はDC-SQUIDの抵抗、 L_T はFig.5.2.5に示す通りである。 $\Delta V = 2 \mu V$ 、 $\delta V = 2 \times 10^{-9} V / \text{Hz}^{1/2}$ 、 $f = 100 \text{ kHz}$ 、 $L_T = 220 \mu H$ 、 $R_d = 1 \Omega$ を用いると、

$$(\delta \Phi)_{min} / \Phi_0 = 1 \times 10^{-5} [\text{Hz}^{-1/2}] \tag{5.2.2}$$

となる。SQUIDの半径を1mmと仮定すると、検出可能最小磁束密度 $(\delta B)_{min}$ は

$$(\delta B)_{min} = 6 \times 10^{-15} [\text{THz}^{-1/2}] \tag{5.2.3}$$

$$= 6 \times 10^{-11} [\text{GHz}^{-1/2}]$$

となる。これまで最高感度とされてきたルビジウム磁束計より1000倍ほど鋭敏であり、地磁気の約 10^{-10} の大きさが測定可能である。SQUIDの面積を大きくすれば、さらに感度向上ができる。しかし、測定原理から磁束の絶対値の精密計測より、変化量の測定に適していると言える。

また、周波数応答も良く $\phi 0$ 程度の磁束ならば、20 kHzぐらいまで応答する事が分かる。高分解能と高速応答性がSQUIDの特長である。

RF-SQUIDはリング中にジョセフソン接合をひとつしか持たず、また外部から直流電流も供給しない。磁束の信号も検出信号もすべてトランス結合によっている。動作原理は、DC-SQUIDと同様に外部磁場の増加に従い磁束が1本ずつリング内に侵入するが、そ

の際のインダクタンス変化を検出コイルで検出する方式である。代表的な仕様は、

$$(\delta\Phi)_{min}/\Phi_0 = 4 \times 10^{-4} [Hz^{-1/2}] \quad (5.2.4)$$

スルーレート $10^4 \Phi_0 [S^{-1}]$

が得られている。性能はDC-SQUIDよりやや劣り(磁束分解能)、動作温度のコントロールもDC-SQUIDより精密に行なう必要がある。しかし、接合を1つしか持たず、構造、調整が簡単のため、市販されているSQUIDにはRF-SQUIDが多い。Fig.5.2.6に製品化されたRF-SQUIDの例を示す。RF-SQUIDでは変調周波数をマイクロ波まで高め、1 GHzまでの磁場変化を計測した例もある。

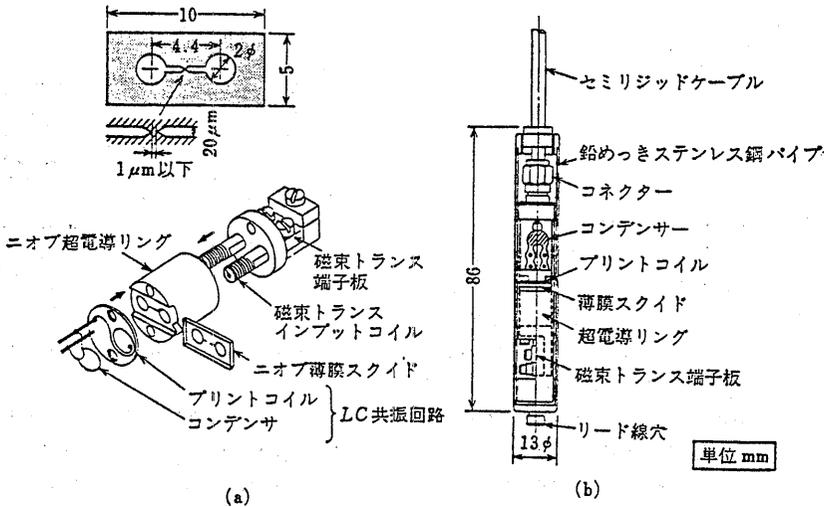


Fig.5.2.6 市販RF-SQUIDの例⁹⁾

5.2.3 微弱磁界の計測⁹⁾

SQUIDは前述したとおり、現在の磁束計測器としては最高の分解能を有する。Fig.5.2.7に各種現象における磁界強度と各磁気センサーの守備範囲を示す。

この図から、SQUIDセンサーによって、生体が発生する種々の磁界が計測可能な事が分かる。X線や超音波と異なり人体に何も入れずに内部の活動状況の情報が得られる点で、これからの発展が期待される。

SQUID計測では、Fig.5.2.7に示した通り、対象とする計測量よりも、地磁気や都市雑音の方がずっと大きい。例えば、屋内に配線した商用電源からは、 10^{-7}

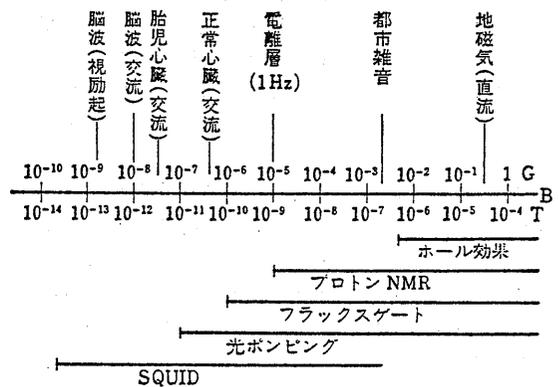


Fig.5.2.7 各種現象における磁界強度と磁気センサーの守備範囲⁹⁾

Tを越える磁界が検出される。また、電車は1kmぐらい離れても計測しじゃまになるノイズを発生する。

これらのノイズを取り除くために、幾つかの方法が考えられている。測定対象が小さい場合には、超電導体で磁気遮蔽する方法がある。しかし、リード線の取り入れ等のため完全な遮蔽は困難なので、通常さらに外側を高透磁率の材料（パーマロイ等）で取り囲む。微小材料の高精度帯磁率の測定に用いられている。大きな測定対象には、高透磁率材料・高電導度材料で囲んだ上に、ヘルムホルツコイルを用いて、地磁気等の残留直流磁場を打消す方法がある。都市雑音レベルを 10^{-11} Tまで落した記録がある。

他の有力な方法は、ノイズを拾わない検出部とすることで、Fig.5.2.8に示す検出コイルを用いる。(a)では L_1 を貫く磁束をすべて検出するが、(b)に変えると L_{11} と L_{12} を貫く磁束の差だけが検出される。ノイズとなる地磁気や都市雑音は通常計測器から離れているので、二つのコイル出力の差を取る(b)方式では検出されない。近くの測定対象が発生する磁束だけが検出される。ノイズ除去効果は、 $L_{11} = L_{12}$ の精度で決まる。

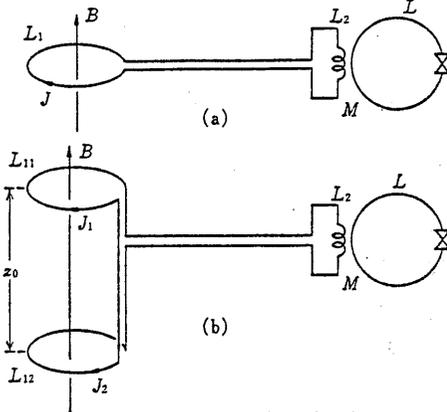


Fig.5.2.8 ノイズを除去する磁束検出部⁹⁾

$(L_{11} - L_{12}) / L_{11} = 10^{-6}$ のノイズ除去が可能である。この方法は磁界の勾配のみを検出するので、グラジオメーターと呼ばれる。上述の生体磁場の計測はグラジオメーターによって、容易になった。

5.2.4 SQUID計測技術の工学的応用

SQUIDを用いた計測法は極めて高感度であり、その応用が多くの分野で試みられているが、極低温及びノイズ遮蔽が必要であるため、工学的な実用化例は少

ない。しかし、近年高温超電導体が発見され、液体窒素温度で作動するSQUIDも実験室レベルでその可能性が確かめられている¹¹⁾。近い将来比較的使いやすい計測法となる可能性がある。従って、工業的応用もさらに推し進められるであろう。ここでは、当研究所で取組み可能な応用を考える。

1) 磁気検査への応用^{12), 13)}

鉄鋼材料を主体とした現代の多くの構造物において、鋼材の磁氣的性質を利用した計測法が、その機能・安全性確保のため多く用いられている。例えば、磁気弾性効果を利用した応力測定法は、初期値の設定が不要なので、出来上がった構造物の残留応力測定には無くてはならないものである。また、変動荷重を受ける構造物の疲労度の推定、高温稼働中機器の熱による材料劣化、原子炉材の中性子照射脆化の評価など、材質変化に敏感な磁氣的計測法の適用が望まれる範囲は広い。

これらの磁気計測法は、古くから研究されているが、その金属学的原理は必ずしも明らかでない。鋼材が塑性変形或は熱処理を経験すると、磁気計測値は、それまでと異なる挙動を示し、応力測定、疲労度の推定などは困難となる。Fig.5.2.9は応力-透磁率関係に及ぼす塑性ひずみ(ϵ)の効果の例を示す。これらは、塑性変形によって導入されたマイクロストレス或いは熱処理によるマイクロストレス、金属組織変化が原因と考えられているが、その機構には明らかでない部分が多い。

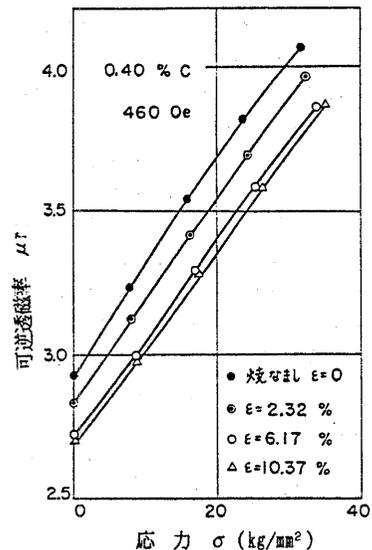


Fig.5.2.9 炭素鋼の応力-透磁率関係に及ぼす塑性変形の影響¹²⁾ (41)

これまでの磁気センサーは常電導体のピックアップコイルやホール素子などによるもので、マクロな大きさであれば、センサーとして十分な感度確保が可能であるが、小型化した場合には、感度低下を補うことが出来ない。SQUID磁気センサーは元々超高感度なので、素子製作技術があれば超小型化が可能である。Fig.5.2.10は実際に超電導体で作製された径25ミクロンのピックアップコイルをもつSQUIDシステム図である。図中Luがピックアップコイルであり、Ltのステップアップトランスをへて磁束信号は左側のLi(SQUID)に伝えられる。現在の

超微細加工技術を用いれば、さらに小さな素子製作も可能であろう。

このような高分解能磁気センサーを用いれば、鋼材の結晶粒単位或いは結晶粒内の磁気構造の計測が可能となり、上記のマイクロストレス、金属組織の効果の内容解明、塑性や熱処理に伴う磁気計測値挙動の変化について新しい知見を得ることが出来、磁気計測法確立に大きな寄与が出来るであろう。また、マイクロな磁気構造を明らかにする顕微鏡としても多くの利用が可能と考えられる。

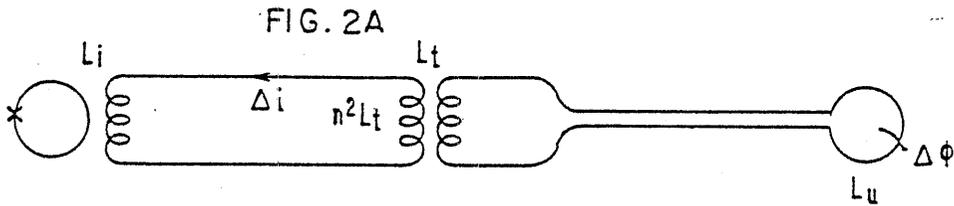


Fig.5.2.10 高位置分解能SQUID磁気センサー回路図¹³⁾

2) 電気抵抗計測への応用¹⁴⁾

金属材料の電気抵抗は、金属結晶中のわずかな原子配列の乱れや、不純物元素に敏感であり、格子欠陥等の物理研究に用いられている。これらの性質を利用して、金属材料に対する電気抵抗法は、欠陥検査より、材質評価法として用いられる事が多い。例えば、高温稼働中の熱による材質劣化及び中性子照射による脆化などは、不純物元素と格子欠陥の挙動によるものと考えられており、その解明は実用的見地からも大きな意味がある。

しかし、磁気検査でも述べた様に、結晶粒界の影響が大きく、これまでのマクロな測定では解明できない現象が多い。Fig.5.2.11は粒界数と抵抗の関係である。マイクロな領域の電気抵抗は極めて小さな値となるため、電圧として取り出せる信号は極端に小さく、従来計測法では、測定困難である。

SQUIDは内部抵抗のない検出器であるため、小さな抵抗 R_s を持つ源から生じる電圧 V_s に対する感度は大きい。 $R_s = 3 \times 10^{-5} \Omega$ で電圧感度 $10^{-13} V$ が得られている。これは R_s の極低温での熱雑音で決まっている。通常の計測法では $10^{-8} V$ が限界である。材料劣化現象におけるマイクロ領域の電気抵抗変化の解明により、電気抵抗法による材質評価技術の一層の高度化が期待される。

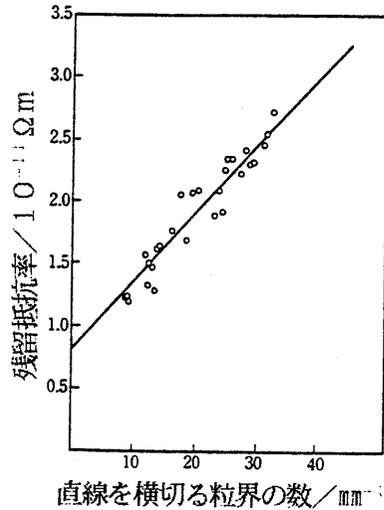


Fig.5.2.11 銅の抵抗率と粒界密度¹⁴⁾

3) 海洋探査技術としての応用^{15), 16)}

磁気探査技術としては海中に潜む潜水艦を対象としたいわゆるMADがあるが、文献にはその記事は殆ど表われず、その詳細は不明である。しかし、磁束密度は距離の3乗に比例して拡散するので、水深が大きくなると急激に困難となろう。

陸上では磁気嵐等地球以外から来る低周波電磁振動による地電流応答をSQUID計測法で求め、地下構造を推定する方法が、資源探査に有力な武器となりつつある。特に、高電導度の地層を伴う場合が多い石油・ガス田、地熱資源の探査で近年関心と呼んでいる。

Fig. 5.2.12は低周波電磁振動の表皮効果の深さを各種岩石について示したものである。低周波を用いることにより10kmに及ぶ探査が可能である。海中ではその比抵抗が $0.24 \Omega \cdot \text{m}$ と岩石に比べて小さいので深海底の探査にはさらに低い周波数が必要である。

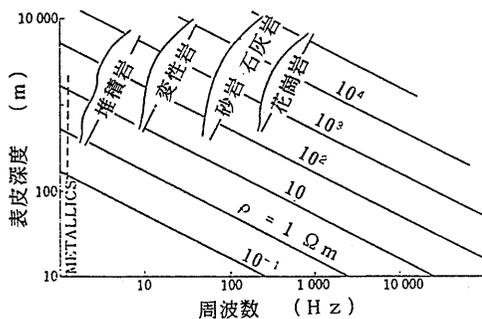


Fig. 5.2.12 各種岩石の表皮深度¹⁵⁾

このような低周波 ($\sim 0.03 \text{ Hz}$) の微小磁場変動 ($\sim 2 \times 10^{-7} \text{ G}$) 及びその誘導の測定は従来の誘導コイルによる方法では容易でない。SQUIDによれば $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ G}$ 、DC $\sim 10 \text{ kHz}$ の感度を容易に得ることができ、海洋調査、海底地質調査に大きく役立つと思われる。

また、地震予知との関連で海底地殻変動のモニター法として、海底磁気計測が行なわれ、その磁気検出部としてSQUIDの利用が試みられている。海底では、地上と比較しノイズが少ないので精度の高い計測が可能となる。

4) その他の応用

上記以外にも沢山の応用が図られている。最も研究が盛んなのは、脳波、心電図等を非接触で計測する試みで既に、研究室レベルでは実用に近いものができている¹⁷⁾。近年はさらに空間磁界分布を計測し、磁界を生み出している電流分布をコンピューターを用いて再構成する研究も進められている¹⁸⁾。このような技術が進歩すれば、物体中の電流分布を非接触で検出できることになり、材料・欠陥評価にも大き

く役立つであろう¹⁹⁾。

また、渦流探傷への応用²⁰⁾、NMRの電磁波検出部をSQUIDで行ないSN比向上或は低周波NMRを実現する試み²¹⁾、SQUIDによる超高感度変位計測法を用いて、重力波を検出する試み²²⁾など極めて広範囲の応用が進められている。これらについては説明を省略し、文献を挙げるに留めたい。

参 考 文 献

- 1) 近藤淳：ウィグラー及び自由電子レーザー、電子技術総合研究所調査報告、第200号、(昭54-5月)
- 2) 電総研ニュース：蛍光EXAFSによる極薄膜の構造解析、第418号(1984)
- 3) 高良和武：新ビーム技術による高性能機能材料の分析・評価技術、科学技術総合シンポジウム、(昭63-3月)
- 4) 巨瀬勝美、佐藤幸三他：NMR-CTスキャナ、東芝レビュー、38巻8号(1983)
- 5) S.Foner, T.P.Orlando：Superconductors—The Long Road Ahead, TECHNOLOGY REVIEW, February/March (1988)
- 6) E.Kong：Physical Aging in Epoxy Matrices and Composites, Advanced Polymaterials Science, Vol.80, (1986)
- 7) G.A.Matzkanin：NMR peers into materials analyses nondestructively, Plastic engineering, May (1987)
- 8) G.A.Matzkanin et al：Applications of Nuclear Magnetic Resonance to the NDE of Composit, ASME Winter Meeting, Chicago, December (1986)
- 9) 中村 彬：クライオエレクトロニクス入門、オーム社
- 10) 中村 彬：ジョセフソン効果の応用、固体物理 Vol.9, No.5(1974), pp.251-259
- 11) Robbes D, Monfort Y, Lam Choksing M, Stephan R：Dispositif magnéto-métrique à sonde céramique YBaCuO, C R Acad Sci Ser 2(FRA), 306[2], (1988), pp.121-124
- 12) 岩柳 順二：炭素鋼の磁気ひずみ効果による残留応力測定に関する基礎的研究、船舶技術研究所報告、第12巻、第2号 (昭和50年)
- 13) J.M.Jaycox and M.B.Ketchen：High Spatial

Resolution Magnetometer Head for Commercially Available SQUID, IBM Technical Disclosure Bulletin Vol.27, No.5, (1984), pp2822-2823

- 14) 中道 功、紀 隆雄：SQUID（超伝導量子干渉計）による個々の結晶粒界の電気抵抗の測定、日本金属学会会報、第27巻、第2号(1988), pp.102-109
- 15) 駒井 二郎、陶山 淳治：SQUID磁力計の物理探査への応用、応用物理、第44巻、第4号(1975), pp.342-349
- 16) 中埜 岩雄、堀田 隆俊、江村 富男：海底超伝導磁力計の試作、海洋科学技術センター試験研究報告No.11(1983), pp.131-148
- 17) D.Cohen：Magnetic Fields of Human Body, Physics Today, 23-8,33/34(1976)
- 18) M.Singh, D.Doria, V.W.Henderson, G.C.Huth and J.Beatty：Reconstruction of Images from Neromagnetic Fields, I E E E Transaction on Nuclear Science, Vol.NS-31, No.1, February (1984), pp.585-589
- 19) P.Chauhari, M.B.Ketchen, L.Krusin-Elbaum and C.C.Tsuei：Use of SQUID System to Locate Resistance Leakage in Elctronic Packages, IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol.25, No.1, June (1982), pp8-14
- 20) J.C.Moulder and T.E.Capobianco：Detection and Sizing of Surface Flaws With a SQUID-Based Eddy Current Probe, J. of Research of the National Bureau of Standard, Vol.92, No.1. Jan-Feb. (1987), pp27-33
- 21) L.J.Friedman, A.K.M.Wennberg, S.N.Ytterboe, and H.M.Bozler：Direct Detectin of Low-Frequency NMR using a dc SQUID, Rev.Sci. Instrum. 57(3).March (1986), pp410-413
- 22) H.A.Chan, H.J.Paik, M.V.Moody and J.W.Parke：Superconducting Technique for Gravity Survey and Inertial Navigation, I E E E Transaction on Magnetism, Vol.MA G-21. No.2, March (1985), pp411-414

6. 流体・燃焼場などへの応用

6.1 超伝導電磁推進及び流場制御

6.1.1 緒 論

流体力学的効率の向上を目的とした流場制御に関する研究は、今日まで多くの研究者によってなされてきた。これら多くの研究の成果として、例えば、航空分野では翼におけるボルテックスジェネレーターや境界層吸い込み、多段フラップや前縁スラット、船舶の分野では、船首尾のバルブやダクトプロペラ等が挙げられよう。しかしながらこれらは境界層吸い込みを除き、主として付加物によって流場の制御を行おうとするものであった。

一方、船舶の推進に電磁力を利用する電磁推進の調査がPhillips¹⁾や、山口ら²⁾によって行われ、また北野ら³⁾は模型船を用いた電磁推進法の研究を行った。その結果、海水の電気抵抗が非常に大きいため、推進効率は非常に小さいこと、また電磁推進に要求される磁場の強さは非常に大きいことなどが明らかにされ、それらは電磁推進船の実用化に大きな支障となるものであった。しかしながら、近年の低温工学や超伝導工学の進歩は目を見はるものがあり、今までは実現が困難とされてきた強磁場の発生やその工学への応用が可能となりつつある。実際、日本造船振興財団では昭和60年から超伝導電磁推進船の開発研究を進めており、昭和63年には内部磁場型超伝導電磁推進船の磁力航行試験を行っている。⁴⁾

これらの技術のバックボーンのひとつとして、流体運動に電磁力が及ぼす影響に関する基礎的研究が必要不可欠である。その具体例として、本所で行われた研究を以下に照会する。

船舶の推進手段としての電磁力の利用は、推進効率の悪さが問題となる。一方、部分的な流場の制御には電磁力の利用は可能ではないかと考えられる。こういったことを背景に、電磁力を利用した流場制御技術の可能性を評価することを目的とした研究がおこなわれた。

研究の手法は、主としてCFD(Computational Fluid Dynamics)によった。CFDは流場の支配方程式を、直接数値計算によって解こうとするもので、近年の計算機の大型化、高速化に伴って各方面で急速に発展している分野である。

一般に電磁流体力学上の実験は、コストが非常にかかり、また流場計測用のプローブが電磁場を乱さないように配慮せねばならないなど、実験そのものも難し

い。このような場合でも、CFDによればパラメータを変えるだけでいろいろな状況をシミュレートすることができ、かつ流場に関する多くの情報がえられるので、非常に有力な手段となる。

6.1.2 数値計算⁵⁻¹⁶⁾

弱い電導性を有する流体の電磁場中での運動の無次元化された支配方程式を以下に示す。

$$\frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta u + \frac{Ha^2}{Re} (E + u \times B) \times B \quad (6.1.1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6.1.2)$$

乱流場における平均流に関する支配方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} \\ &+ \frac{Ha^2}{Re} \epsilon_{ijk} (E_j B_k + \epsilon_{ilm} \bar{u}_l B_m B_k) \end{aligned} \quad (6.1.3)$$

式中の渦動粘性係数 ν_t を得るために $k-\epsilon$ モデルを用いた。 k 及び ϵ 方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \nu_T \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{Ha^2}{Re} B_i B_j \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \epsilon - \frac{4}{3} \frac{Ha^2}{Re} C_a B_j^2 k \end{aligned} \quad (6.1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_1 \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \nu_T \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{4}{3} \frac{Ha^2}{Re} \\ &\cdot C_b B_j^2 \epsilon \end{aligned} \quad (6.1.5)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = \text{constant} \quad (6.1.6)$$

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_1 = 1.44,$$

$$C_2 = 1.92 \quad (6.1.7)$$

計算は3種類の系(層流状態の翼型周り流れ、乱流状態の翼型周り流れ及びWigley船型周り流れ)について行った。層流場の計算には式(6.1.1、6.1.2)、乱流場の計算には式(6.1.2~7)を用いた。ただし、乱流状態のWigley船型周り流れについては $k-\epsilon$ モデルを用いなかった。各式を、計算対象とする物体に適合する座標系に返還した後、離散化して解くことにより、シミュレーションをおこなった。ここでは、数値解析スキームとして、IAF法(Implicit Approximate Factorization; 近似因数分解法)^{17,18)}を用いた。計算の詳細については、文献を参照されたい。

6.1.3 結果及び考察¹⁶⁾

(1) 層流状態の翼型周りの流場制御の計算¹⁰⁾

翼型周りの計算にはFig.6.1.1に示したC-グリッドを用いた。計算に用いた翼型はNACA0012で $Re = 10^4$ で迎角は 5° とした。Fig.6.1.2に格子分割を示す。壁近傍で格子間隔が小さくなるように分割している。Fig.6.1.3に電磁力を印加しない場合の翼型周りの流れの計算結果を示す。翼背面で大きな層流剝離をおこなっているのがわかる。

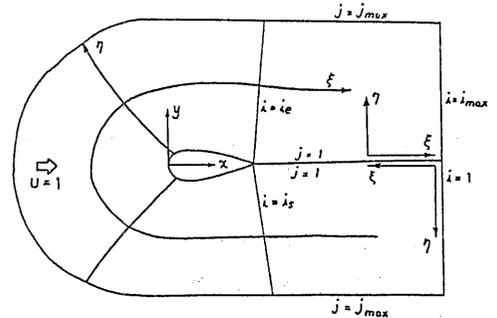


Fig.6.1.1 Coordinate system for C-grid topology

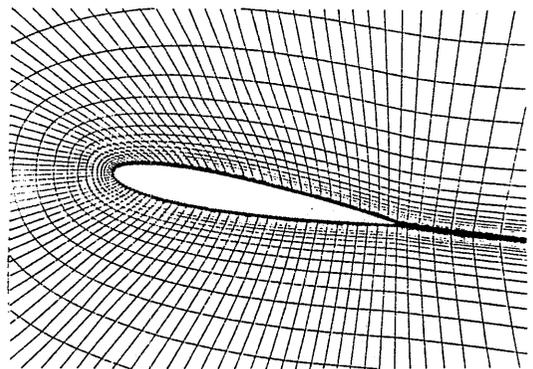
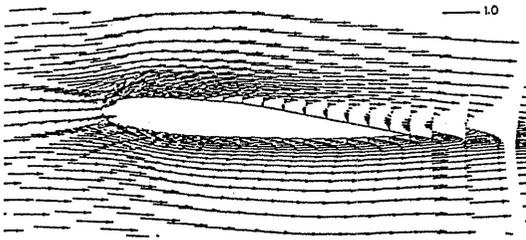
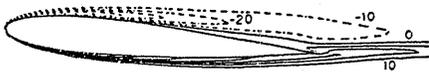


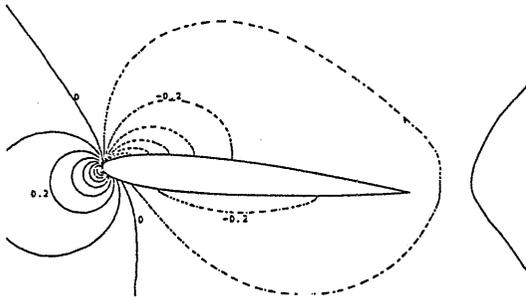
Fig.6.1.2 Mesh division for computation of flow around wing section (angle of attack = 5°) (45)



(a) Velocity distribution



(b) Vorticity distribution



(c) Pressure distribution

Fig.6.1.3 Computed result of flow around wing section in non-MHD condition ($Re=10^4$, angle of attack=5 deg.)

翼背面に生じた剥離を電磁力の作用によって消滅させるには、翼背面で電磁力を翼後縁に向かうように印加すればよい。このため、翼背面にFig.6.1.4に示すような磁場を印加した。この磁場の翼背面後半部に紙面垂直に手前から裏側に向かって電流を流すとFig.6.1.5で示すような電磁力が発生する。

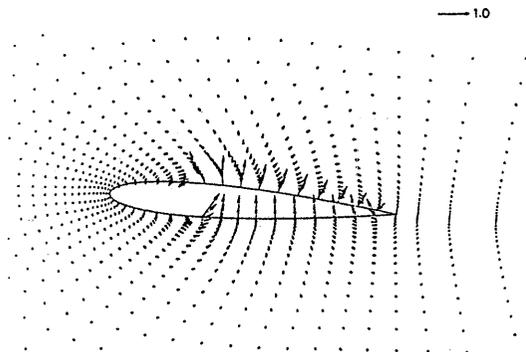


Fig.6.1.4 Distribution of magnetic field around wing section (46)

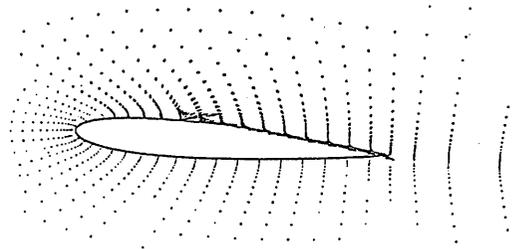
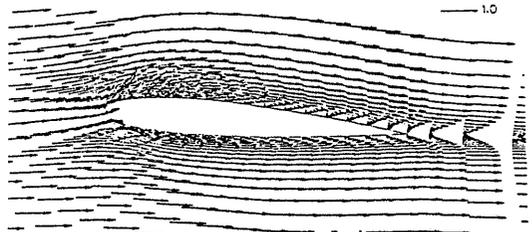
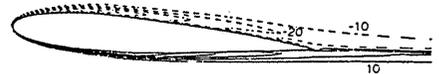


Fig.6.1.5 Lorentz force distribution around wing section

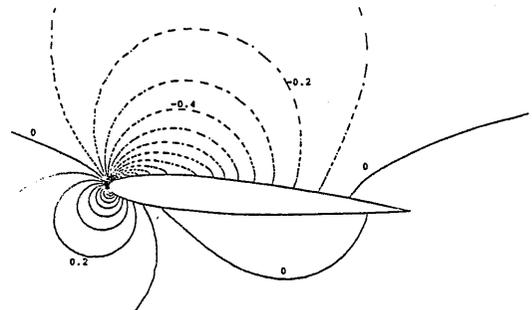
この電磁力を流場に作用させたときの計算結果をFig.6.1.6に示す。ここで想定した磁場強さは、最大磁場強さで無次元加して Ha (Hartmann Number) = 12.64とし、電場の強さは $E = -200$ としたものである。



(a) Velocity distribution



(b) Vorticity distribution



(c) Pressure distribution

Fig.6.1.6 Computed result of flow around wing section ($Ha=12.64$, $E=-200$) ($Re=10^4$, angle of attack=5 deg.)

有次元化すると翼弦長が10cm、一様流速が10cm/secとしたとき最大磁場強さは2 tesla (1 tesla=10⁴gauss)程度、電場強さは40V/mとなる。背面の剝離は消滅している。電場を印加すると翼背面の圧力が低く、また翼正面側でも負圧の大きさが小さくなっているのがわかる。Fig.6.1.7に翼面圧力分布を示す。電場を印加すると翼背面負圧のピークが大きくなっているのがわかる。また翼後端圧力が電磁力の印加によって負から正へと変化し、それに伴って翼正面の圧力が正の方向に増大している様子がよくわかる。なお、翼背面圧力分布に屈曲がみられるが、これは電磁力の分布がこの付近から急激に大きくなっているためである。

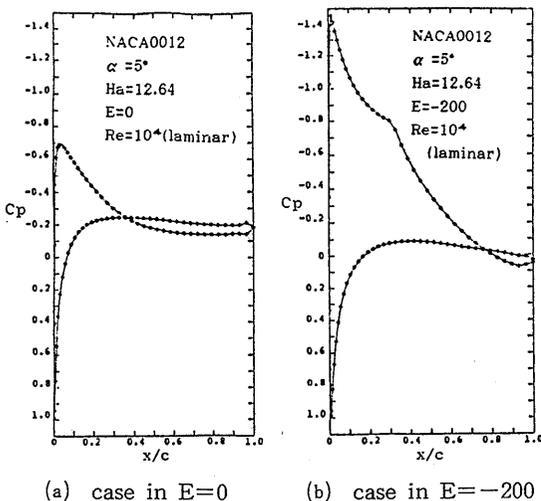


Fig.6.1.7 Comparison of computed pressure distribution
(Re=10⁴, angle of attack=5 deg.)

Fig.6.1.8に電場の強さと揚力及び揚力成分の関係を示す。揚力はほとんど表面圧力積分による成分で決まっているのがわかる。電磁力の反作用による揚力成分は、電磁強さと比例関係にある。これは電磁力項のうち $(E \times B)$ の項が $(u \times B) \times B$ の項に比べて圧倒的に大きいからである。電場の強さが0から-100付近までは、電場の強さと揚力の関係は線型的であるが、電場の強さをさらにあげて行くと、この関係は非線型的関係に変化している。この理由は、印加する電磁力が小さいときは、主として電磁力方程式の圧力勾配項に影響を及ぼし、大きくなると非線型項である対流項に影響を及ぼすようになるためと思われる。

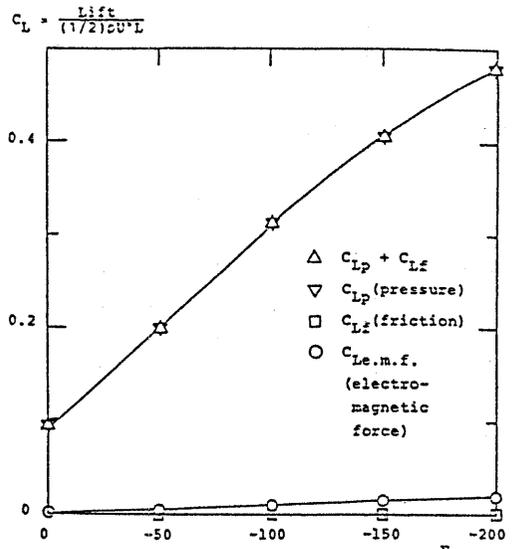


Fig.6.1.8 Relation between intensity of applied electric field and lift coefficient of wing
(Re=10⁴, angle of attack=5 deg.)

Fig.6.1.9に抗力及びその成分と電場強さの関係を示す。摩擦応力に起因する抗力成分と表面圧力による抗力成分はほぼ同じ大きさであるが、電場強さの増大につれて、摩擦応力により成分がまさってくる。一方、翼前縁の圧力低下により前縁吸引力が、推力として作

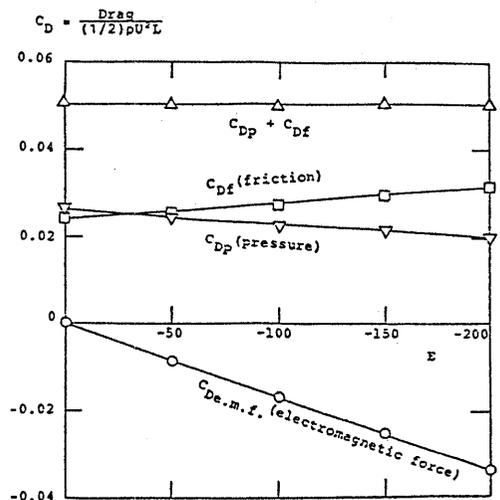


Fig.6.1.9 Relation between intensity of applied electric field and drag coefficient of wing
(Re=10⁴, angle of attack=5 deg.)

用するので、結果的にはこれら両者の和はほぼ一定である。一方、電磁力の反作用による抵抗は負となり、かつ推力として作用しているのがわかる。この電磁力成分による推力は、電場強さと比例関係にある。この推力の大きさは $E = -200$ では摩擦応力による抗力成分を上回っており、全抗力を結果的に減少させる重要な働きをしている。

(2) 電磁力による翼型周り乱流場の流場制御の計算¹⁴⁾

翼型周りの乱流場の、電磁力による流場制御の計算を行った。迎角は10度とした。印加磁場はFig.6.1.4と同じである。電場の印加領域も、同じく翼背面後半部に限った。

無次元磁場強さ Ha は126.4の一定とした。これは $Re = 10^6$ のとき、一様流が1 m/s、翼弦長が1 mとしたとき、最大磁場強さが2 tesla 程度に対応する。無次元電場強さは-800まで変化させた。このとき電磁力項 $(E + u \times B) \times B \times Ha^2 / Re$ のオーダーは最大値で $O(10)$ 程度になる。また無次元電場強さが-800は、上記の状態では-1600v/m程度となる。以下に結果を示す。

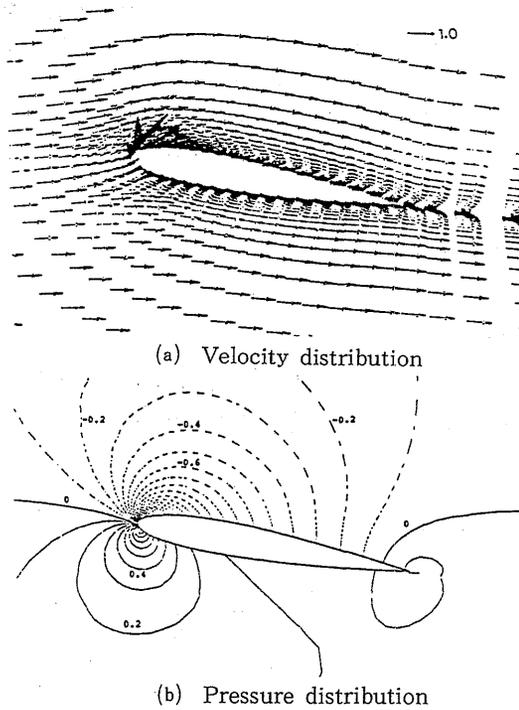


Fig.6.1.10 Computed result of flow around wing section ($k-\epsilon$ model, non-MHD condition, $Re=10^6$, angle of attack=10 deg.)

Fig.6.1.10には、電磁力の作用がない場合の流速分布を示す。流れの剝離は生じていない。Fig.6.1.11には、 E が-800のときの、流速分布と圧力分布を示す。大きな電磁場を印加したとき、翼後縁から流体がジェット状に吹き出ている様子がわかる。圧力分布を見ると、前縁付近で負圧が大きくなっている。Fig.6.1.12に翼表面圧力分布を示す。層流状態の場合と同様の傾向が見られる。

Fig.6.1.13に揚力係数と印加電場強さの関係を示す。摩擦力による揚力係数成分は非常に小さいことが乱流の場合でもいえる。印加電場の増大に伴って、揚力が増大している。ここで、電場強さが-600付近から揚力の増え方が鋭くなっているのは、電磁力の影響が、支配方程式の非線形項である対流項に大きく作用しているためと思われる。しかし層流状態で示されたような大きな揚力の利得は得られず、外部乱流場を電磁力によって制御することの困難さが理解される。 $Re = 10^6$ の層流状態では、電磁場が印加されないときは、翼背面で剝離流が生じており、これが電磁力効果により消滅するという流場の大きな変化があった。乱流状

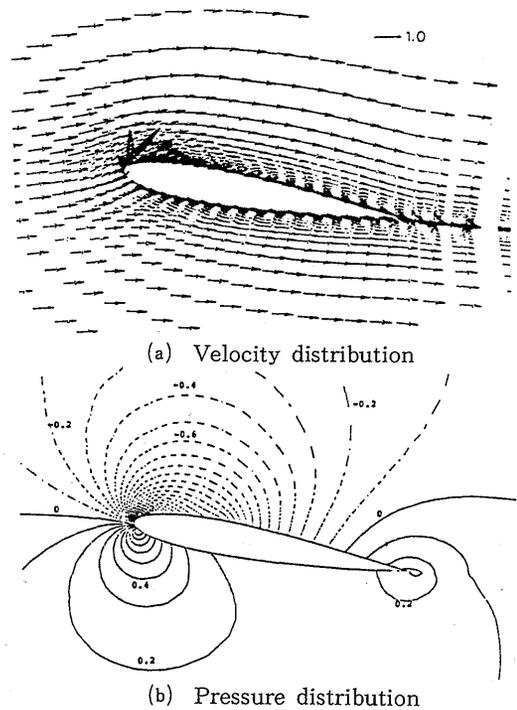
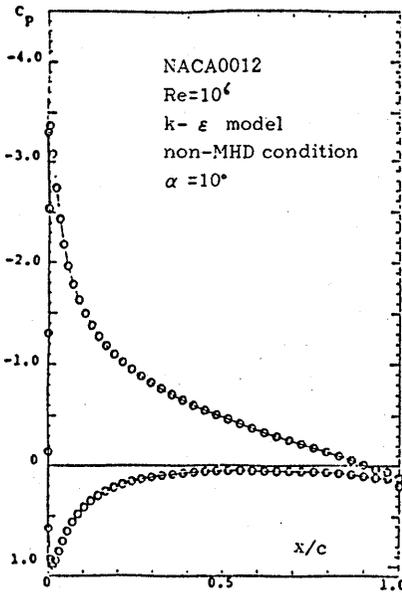
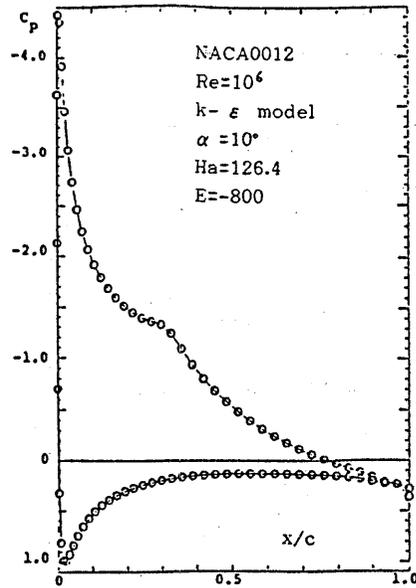


Fig.6.1.11 Computed result of flow around wing section ($k-\epsilon$ model, $Ha=126.4$, $E=-800$, $Re=10^6$, angle of attack=10 deg.)



(a) case in non-MHD condition



(b) case in $Ha=126.4, E=-800$

Fig.6.1.12 Comparison of computed pressure distribution ($Re=10^6$, angle of attack=10 deg.)

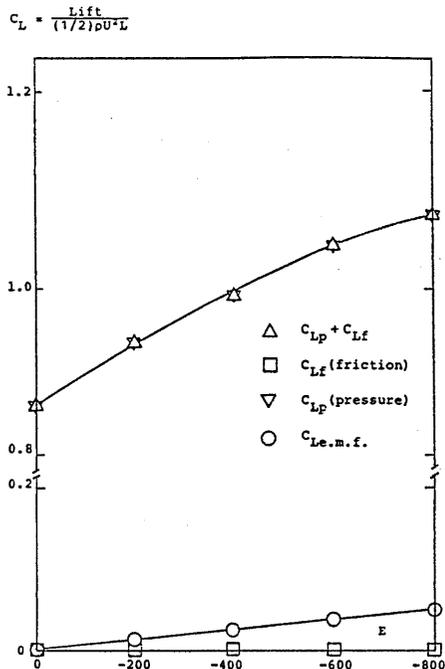


Fig.6.1.13 Relation between intensity of applied electric field and lift coefficient of wing

($Re=10^6$, angle of attack=10 deg.)

態では、電磁力の印加がないときでも流れの剥離が生じないために、層流状態ほど大きな電磁力により効果を示すことはできなかった。

Fig.6.1.14に抗力係数と印加電場強さの関係を示す。電場強さを大きくすると、摩擦力による抗力が増加している。しかし、同時に圧力による抗力が減少しており、圧力と摩擦力による抗力の和は、電場強さの変化に関係なくほぼ一定である。これは、層流状態のときにも見られた傾向である。電磁力による力は、推力として働いているため、トータルとしての翼抗力は電場強さの増加とともに減少し、 $E=-800$ ではほぼ0になっている。

(3) Wigley 船型まわりの乱流場の電磁力による流場制御シミュレーション

ここでは、三次元流場に対する電磁力を利用した流場制御法について考察する。計算の対象として、Wigleyの数式船型まわりの流れを用い、 $Re=10^6$ で乱流とした。

Wigley船型周りの高レイノルズ数流れの計算は、児玉¹⁴⁾によって行われているが、そこで用いられているBaldwin-Lomaxの0方程式モデルを、本計算で

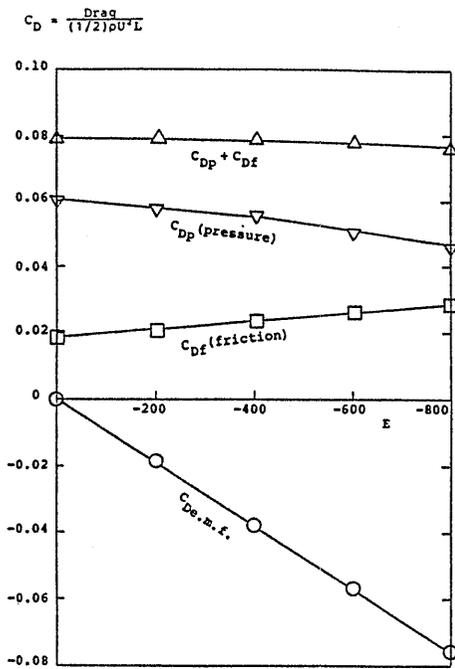


Fig.6.1.14 Relation between intensity of applied electric field and drag coefficient of wing
($Re=10^6$, angle of attack=10 deg.)

も乱流モデルとして用いる。また、電磁力の乱流モデルに与えられる影響も無視し、電磁力項は単に外力として与えた。

今回の計算に使用した格子分割をFig.6.1.15に示す。直交座標系は、船体長さ方向に x 軸、幅方向に y 軸、深さ方向に z 軸をとり、物体適合座標系は、船体長さ方向に ξ 軸、ガス方向に η 軸、船体から放射方向に ζ 軸をとった。

印加磁場は次のようにして与えた。船体表面上にFig.6.1.16に示すように矩形的環状電流を配置しそれが誘導する誘導磁場をビオーサバルの式を用いて計算した。実際に配置した環状電流の位置をFig.6.1.17に示す。

電場は、環状電流で囲まれる領域(ξ, η)に対し、 ζ が2から18までに囲まれる6面体を考え、その領域に対して、 η 軸に沿うように電流がながれるものとして与えた (Fig.6.1.18参照)。これは近似的に、Fig.6.1.18でハッチングを施した箇所に電極板を置いたときに得られる電流と見なすことができる。この位置に環状電流を置いた理由は、電磁力によって、水面付近の広い速度欠損部分を出来るだけ改善することを狙ったためである。

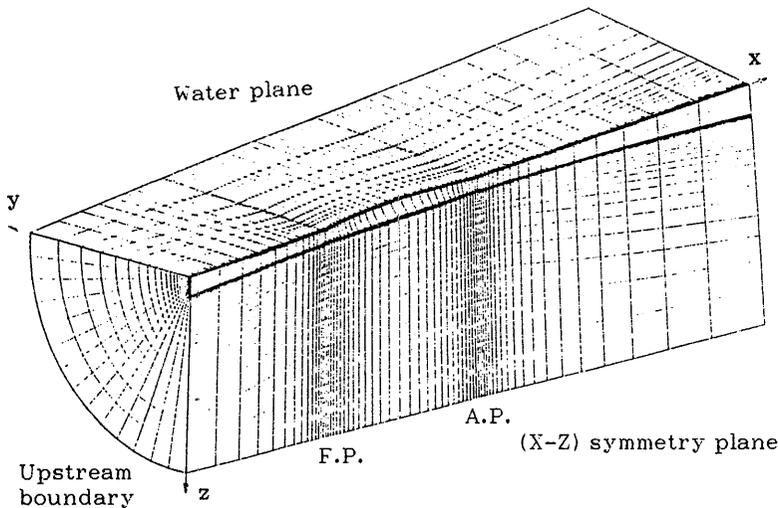


Fig.6.1.15 Grid division around Wigley ship form

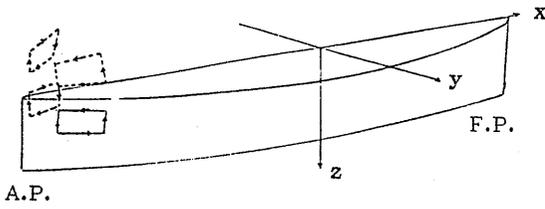


Fig.6.1.16 Arrangement of rectangular circuit for computation of magnetic field

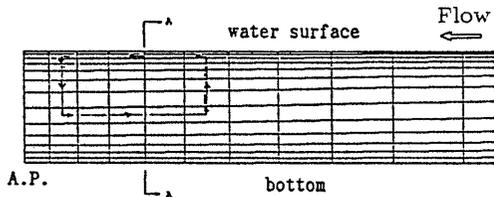
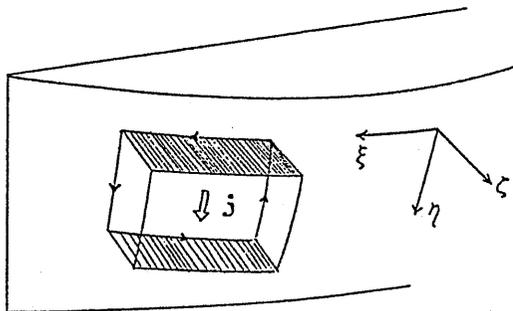


Fig.6.1.17 Actual location of rectangular circuit



A.P.

Fig.6.1.18 Illustration of domain of applied electric field

今回与えた磁場強さは、印加磁場の最大値を代表磁場強さとして、 $Ha = 126.4$ 、無次元電場強さは800とした。これは、例えば船長を4 mとしたとき、磁場強さは0.5tesla、電場強さは、 $Re = 10^6$ から船速が0.25m/sとなるので、100v/m程度に相当する強さである。

はじめに、電磁力が印加されていないときの計算結果を示す。Fig.6.1.19にはA.P.での伴流分布を実験値と計算値の比較を示す。実験値と計算値はよく合っている。Fig.6.1.20(a)にはA.P.での伴流分布の計算結果を、(b)には船体表面圧力分布を示す。実線が正圧を、破線が負圧を表している。

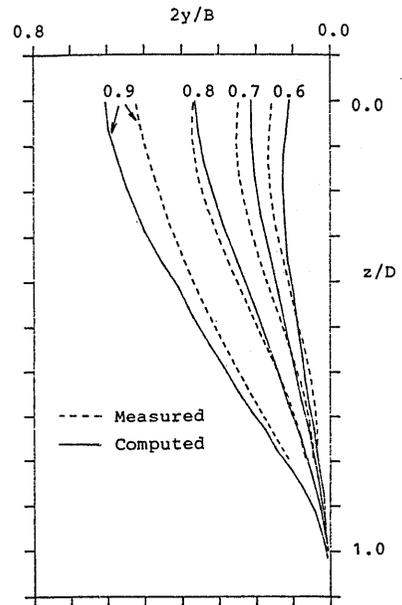
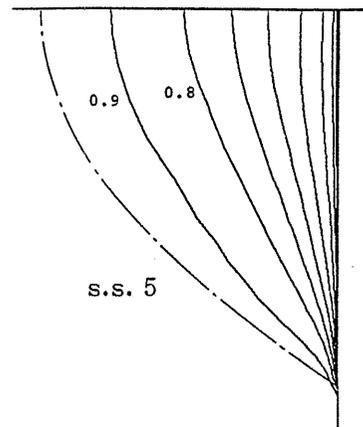
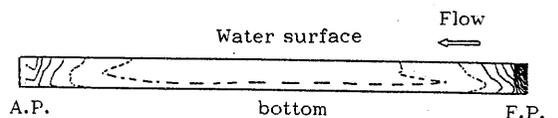


Fig.6.1.19 Comparison between experiments and computations on the wake at A.P. (Wigley model, $Re=10^6$)



(a) Computed wake distribution at A.P.



(b) Computed hull surface pressure distribution

Fig.6.1.20 Computed result of flow in non-MHD condition (Wigley model, $Re=10^6$)

次に、電磁力を印加したときの結果を示す。Fig.6.1.21(a)には伴流分布を示す。電磁力により、境界層の厚さが薄くなって流れが加速されているのがわかる。このときの船体表面圧力分布をFig.6.1.21(b)に示す。電磁力が流れをA.P.側に加速するために、A.P.で圧力が上昇しその結果船尾付近での圧力の回復が電磁力の印加がないときに比べて著しい。

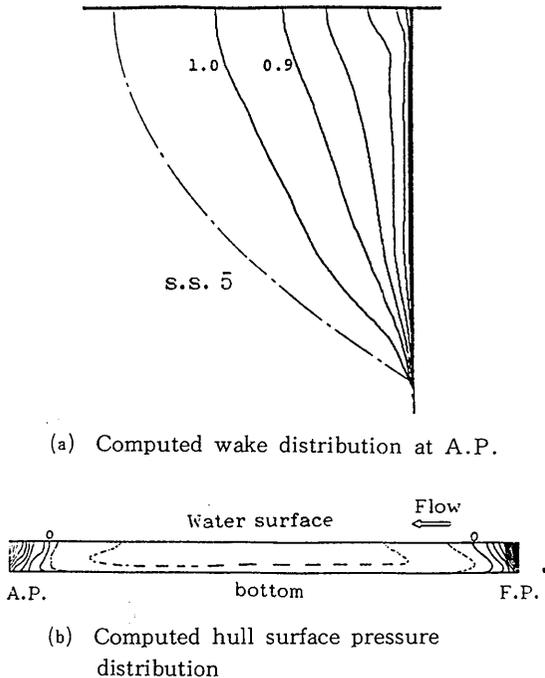


Fig.6.1.21 Computed result of flow
($Ha=126.4$, $E=800$, Wigley model, $Re=10^6$)

今回の計算に対応する入力パワーを概算してみると両舷全体では0.294馬力となる。一方、Wigleyの4 m模型の抵抗試験の結果から、 $Re=10^6$ で有効馬力は0.124馬力であった。このことから、流場制御に要した入力パワーは、有効馬力の2.37倍に相当することがわかり、効率的には非常に悪いと言えよう。

6.2 燃焼制御

6.2.1 はじめに

燃焼制御は燃焼研究のメインテーマであり、各種工業炉、ボイラや熱機関が所定の性能を発揮するように燃料、空気を制御することや、1970年代に入り大気汚

染が内外共に厳しく問題にされるようになってから、それらが排出する大気汚染物質を低減することなどのために盛んに研究されている¹⁾。

ここでは、燃焼制御に関連した問題のうち、将来安価で使い易く、安定な高温超電導物質が開発されたときに超電導技術の応用が考えられる、燃焼に及ぼす電場、磁場、プラズマの効率に関する問題に限って述べる。

6.2.2 燃焼に及ぼす電場の効果

燃焼現象を電場を用いて制御しようとする試みはかなり古くからしばしば行われてきたが、確立した技術として成功したものは現在までほとんどないと言っても過言ではない²⁾。しかし、電場の効果に対する基礎研究は地道に行われているので、その花がいつか実を結ぶことを期待して、次に、幾つかの文献を示す。

(1) 火炎への影響

Nooraniら^{3,4)}はメタン-空気の予混合火炎に電場を印加すると火炎の安定性が増すと報告している。流量 $75\text{cm}^3/\text{s}$ で電場を印加しないときの火炎の安定下限界はメタン5.5%であり、10kVの直流電場を印加すると約3%に下がる。縦方向電場はメタン-空気火炎の安定に著しい効果をもつ。横方向電場はメタン-空気火炎の安定に寄与しない。バーナの吹き消え下限界は電場がないときの吹き消え下限界を数倍広げる。結果として、バーナはより希薄な混合気でも燃焼できる。火炎伝播速度に対する電場の効果は見いだせないと述べている。

Bermanら⁵⁾はメタン-空気の予混合火炎に電場を加えて、すすの生成、火炎の安定性に及ぼす影響を調べた。燃焼エネルギーの0.1%以下の電場を印加すると最大噴出速度を2.5倍に、燃料/空気比の範囲を3.2倍に、すすの生成速度を2.5倍に広げる。電場はイオンに機械的に作用し、火炎中での滞留時間を制御すると述べている。

田中ら⁶⁾は円形バーナによるプロパン-空気の拡散火炎に交流電場(10Hz-50kHz, 0-5kV)を印加して電場中の火炎の挙動を調べた。電場をかけると火炎は変形し、電圧が低いとき火炎は少し伸び、電圧を高くして行くと、大きく伸縮振動し、更に高い電圧では大きな横方向振動(蛇行)、及び回転振動する。電圧が高くなると、火炎輝度は低くなる。火炎の変動はほぼ80Hz付近までは、電源電圧と同じ変動周波数で火炎輝度も変化するが、その変動振幅は周波数が大きくなると逆に小さくなる。100Hz以上の電源周波数の場

合は変動振幅の大きな10-20Hzの低周波の変動火炎となると述べている。Fig.6.2.1に電場による等輝度分布図を示す。

今後、電場をかけた場合の火炎の温度分布、濃度分布、乱れ分布などの火炎構造の詳細な計測が望まれる。

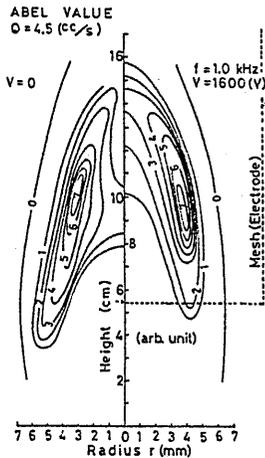


Fig.6.2.1 電場による等輝度分布図⁴⁰⁾

(2) すすへの効果

ディーゼル機関から排出されるすすは50-100mg/Nm³ (同規模のガソリン機関の40-100倍)で、その重量の約70%はサブミクロン粒子であり、大気中に長く浮遊する。そのすすの表面には種々の有害成分が付着しているので、人体に悪影響を及ぼすことが懸念され、現在すすの排出規制が行われつつある。この現状に鑑み、ディーゼル車のすす低減に関する研究は喫緊のことである。

最近、東大で開かれたシンポジウム“燃焼機構の解明と制御”で、河野⁷⁾は拡散火炎のすす粒子に及ぼす電場の効果について以下のように概説している。

燃焼におけるすすの生成に関連して、電場の効果があることは非常に古くから知られている。例えば、1814年に、Brandeは対向した電極の間にローソクの火炎を置いた実験を行い、負電極の加熱される程度の大きいこと、ローソクの火炎先端からでるすす(煙)や輝炎が負電極方向に引き寄せられることなどを報告している。続いて、1924年にMalinowskiらは伝播する炭化水素燃料の火炎に電場を印加した実験を行い火炎が拘束されるのは炭素の付着が認められるときだけで

あること、それ以外の場合には火炎速度が減少していることを確かめた。燃焼に及ぼす電場の効果はすすの粒子が発生しない場合、通常輝炎が発生しない条件においても存在する。その代表的なものがイオン風であり、含まれている正イオンによって火炎が負電極の方へ偏移する現象として古くから知られている。

Heinsohnらは対向拡散火炎について、見かけの火炎強度が電場強度とともに若干増大すること、Jonesら、Dayalらはイオン風効果によって火炎帯が移動することによる流速、温度分布の変化があることなどを報告している。これらの研究で用いられた1kV/cm程度の電場ではイオン風効果以外の燃焼に対する影響はほとんど無い。輝炎の発生、火炎から未燃のすす排出がある場合に、電場によって火炎の輝度変化、すす生成量、形状などが影響を受ける。Weinbergらは電場によるすす生成の制御に重点を置き、イオン風の影響を最小にするために対向形パーナを使い、アセチレンを主燃料とした。すす生成を制御するには強電場(2kV/cm以上)が効果的であり、帯電核の除去によりすす生成量を90%も減少できること、熱分解帯における滞留時間を変えることによって生成量、大きさが制御できること、完全に成長したすすを電気的に捕集出来ることなどを確認している。このような強電場で捕集されるすす粒子の直径はほぼ一定で9.2nmであると述べている。また、粒子の移動度の測定などから全ての粒子は正の単位電荷をもち、従って、すす生成はイオンなどの関係しない中性核上で成長し、前述の大きさになって帯電し、電場の影響を受けていると考えられている。このような強電場では火炎帯のイオンが減少し、核生成に寄与することが不可能であるためと考えられているが、イオン濃度が最大となる弱電場(約0.5kV/cm)では、帯電核、中性核によって生じた2種類のすす粒子が存在することが認められ、その割合が電場強度によって変化することが報告されている。Mitchelらはすすを排出している乱流拡散火炎に半径方向に交流電場(最高400Hz)を印加し、電場強度の増加とともに火炎長が減少し、横幅が増大すること、輝度が減少することなどを報告している。中原らは拡散火炎および予混合火炎に流れと直角方向の交流電場(最高800Hz)を印加し燃焼場のすす粒子の大きさ、形状を調べた。電場による火炎の変形に代表される流れ場の変化と言う2次的な影響が無視できない。この程度の周波数ではイオンや直径20nm程度のすす粒子に対しても直流電場と同等の作用をすると考えられる。従って、電場

は比較的大きいすす粒子の凝集、酸化、燃焼、鎖状大粒子の振動による乱れの発生などに対して交流特有の影響を及ぼすものと考えられる。辻川らは単一燃焼液滴に更に高い周波数（ $\sim 20\text{kHz}$ ）の電場を印加し、燃焼時の蒸発係数が周波数によって変化し、すす生成の傾向の大きい燃料ほど影響を受け易いと述べている。この場合に、イオン風の影響と燃料蒸発に及ぼす影響が無視できないと考えられる。Howardらは凝集の過程において、すす粒子の帯電が凝集速度、凝集体が鎖状に成長すること、凝集体に含まれる粒子の個数などに関係することを示唆している。また、1気圧のプロパン-酸素及び低圧（ 20mmHg ）のアセチレン-酸素の予混合火炎を用いて、すす粒子が前者では1-2個の単位電荷を保有し、後者では全体の約1/3が帯電していることを示唆していると述べている。

謝ら⁸⁾は拡散火炎のすす生成に及ぼす高周波数電場の影響を調べるために、多孔質円筒バーナにより、すすの発生し易いアセチレンの対向流拡散火炎を使い、その生成と密接に関連する火炎輝度に及ぼす電場（直流-10MHz）の効果を実験した。Fig. 6.2.2にフォトトランジスタにより測定された火炎輝度に及ぼす電場の影響を示す（電場を印加しない場合を100とする）。

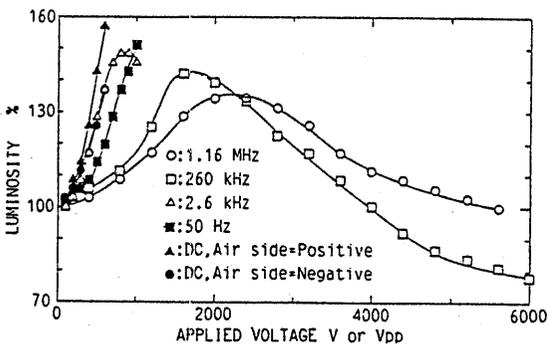


Fig. 6.2.2 火炎輝度に及ぼす電場の影響⁴²⁾

2.6kHz以下の低周波では印加電圧を増加すると、ある電圧で火炎の変形が発生する。50Hzと直流では輝度が電場強度とともに一様に増加する。2.6kHz以上の周波数では火炎輝度は一旦ピークを示してから減少する。電場を印加すると輝度分布が主として空気側で変化する。そのメカニズムは火炎の空気側におけるすすの生成量が電場によって影響を受ける、またはすすが電場の影響によって温度の異なる領域に移動するこ

とによると考えられている。260kVの時逆に輝炎の厚みは減少する。青炎に電場を印加した時、高周波電場と低周波電場では火炎輝度分布が非常に異なると報告している。

定方ら^{9,10)}はコロナ放電プラズマによるすすの酸化を調べた。拡散火炎バーナを用いて都市ガス（主にメタン）を還元性雰囲気中で燃焼し、放電場のすすの酸化はOHラジカルが最も重要な化学種である。また、放電によりすすはCOに転化し、排ガス中のCO₂が放電により一部COに解離すると述べている。

電場による火炎中のすすへの効果に対する研究には上述のほかいくつかの文献¹¹⁻¹⁷⁾がある。

(3) 幅射への影響

幅射に対する電場の効果は未だ殆ど調べられていないが、浅川¹⁸⁾は水の赤外線吸収スペクトルを調べて、端数 $3,000-4,000\text{cm}^{-1}$ 付近で電場による吸収が大きくなると述べている。

(4) 熱伝導への影響

浅川は固体の熱伝導に対する電場の効果として、電極を磁性管に入れ、固体中に挿入し、15kVの交流を印加すると鉄ブロックの冷却が遅くなると述べている¹⁹⁾。

(5) 液滴への影響

Kajiら²⁰⁾は液滴に電場を印加し伝熱を促進させる研究を行った。液滴の変形振動は断続する電場と正弦波状に変わる電場で生じ、主に電場方向に偏長したラグビーボールのような回転楕円体の形に変形し、元の球形に戻る形状振動をする。電場の周波数が大きくなるにつれて、最大変形量まで達しなくなり効果が小さくなるが、球の共鳴振動域でも形状振動が生じており、熱伝達率は最大3倍程度まで増大すると報告している。

(6) 燃焼技術への応用

a) 火炎体の増大法

Weinbergによる火炎中に存在する帯電微粒子を用いて燃焼過程を電氣的に制御し、すす生成の抑制または促進、燃焼ガスから固体への伝熱促進の試みがある。このような火炎内部での現象の解明と共に、その性質を利用したり、より積極的に火炎構造を人工的に改造して、有用な火炎構造をつくり出すことも考えられており、その例として、竹野²¹⁾による火炎帯の幅を人工的に厚くして火炎の負荷率を増やす構想がある。自然の層流予混合火炎の火炎帯幅はきわめて薄く常圧で1mm以下であるが、火炎を技術的に利用する場合にこのように薄くしておく必然性はなく、火炎帯の幅が増やせばそれだけで混合気の滞留時間が増えて負荷率は増

大する。簡単な理論モデルによる計算から火炎帯の厚さを10倍にするだけで混合気吹き飛びの限界速度が燃焼速度の100倍近くになると述べている。このような新しい燃焼技術の芽が今後幾つも現れると期待されている。

b) ボイラへの応用

ボイラに於ける伝熱では火炎幅射が重要であるので、火炎形状を電場で制御できれば、伝熱促進効果も大きくなりうる。また、高電圧コロナ放電によりイオン風は蒸発、燃焼、熱伝達にも促進効果があり、浅川の方法²¹⁾ (コロナ放電部分を火炎の中に配置する方法) では火炎形状に大きな影響が現れる。火炎形状変形の効果として、燃料油の蒸発を伴う拡散火炎の場合、火炎横幅の増大、火炎長さの増大が観察されている¹⁹⁾。

c) 燃焼器への応用

土方ら²²⁾ は拡散形低温触媒燃焼器の熱負荷(10-25 kw/m²)を広げるために電場の効果を調べた。電場の印加によりコロナ風による酸素輸送量の方が対流熱伝達率の促進より優っているために、熱負荷50kw/m²まで、熱効率のかなりの向上が認められると述べている。Fig.6.2.3に電場による熱負荷と燃焼効率の関係を示す。

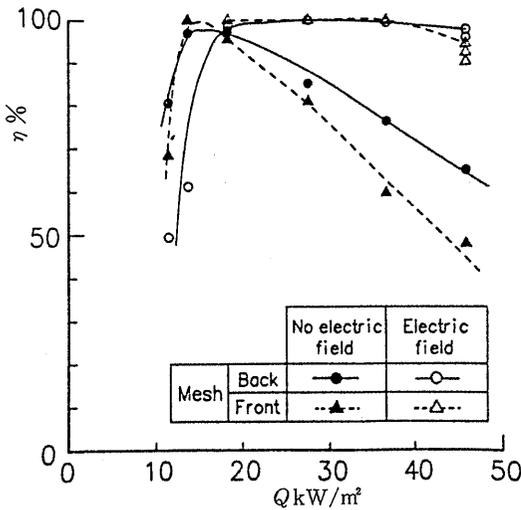


Fig.6.2.3 電場による熱負荷と燃焼効率⁵⁶⁾

d) 家庭用燃焼器への応用

西田ら²³⁾ は単炎ロバーナ、多炎ロバーナ、家庭用ガスコンロ、家庭用湯沸器の火炎に及ぼす電場の影響

を調べた。Fig.6.2.4に電場による多炎ロバーナの熱流束の比較を示す。多炎ロバーナではバーナを陽極にして電場を加えると火炎の流れが被加熱側へ加速され熱流束が増加する。家庭用ガスコンロのバーナ部を電

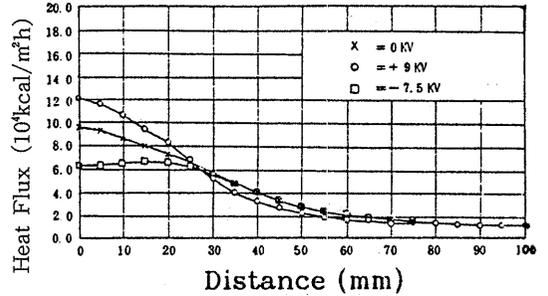
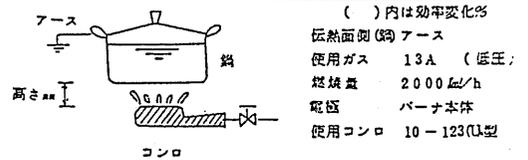


Fig.6.2.4 電場による多炎ロバーナの熱流束の比較⁵⁷⁾

極にし鍋をアースして、バーナに+5 kVの直流電圧を印加すると熱効率が3-5%増加する。Table.6.2.1に電場によるガスコンロの熱効率の変化を示す。この変化は火炎が鍋に引き寄せられるために鍋側の境界層厚さが減少し伝熱が促進されることによる。バーナに-5 kVのDCまたは5 kVのACを印加すると、熱

Table 6.2.1 電場によるガスコンロの熱効率の変化⁵⁷⁾

バーナ付加電圧	電場	電流		
		無付加	直流 (+)	直流 (-) / 交流 +5 kV
空気孔 高さ mm	15 mm	49.2%	52.0% (2.8%)	
	20	48.3	52.0 (3.7)	45.5% (Δ2.8%)
	30	48.5	50.8 (2.3)	
中	15	49.0	52.6 (3.6)	
	20	51.2	54.1 (2.9)	50.2% (Δ0.1%)
	30	46.2	51.5 (5.3)	
小	15	53.1	56.2 (3.1)	
	20	48.3	52.8 (4.5)	47.7 (Δ0.6)
	30	46.1	49.3 (3.2)	



効率は印加しないときとほとんど変わらない。Fig.6.2.5に家庭用湯沸器でバーナ部を電極とし、熱交換器をアースにとった時の燃焼特性を示す。湯沸器のバーナに-5 kVのDCを印加すると良好燃焼領域が拡大する。これらの実験で電場を印加するのに消費した電力は1 W以下で、燃焼に使用された熱エネルギーの0.1

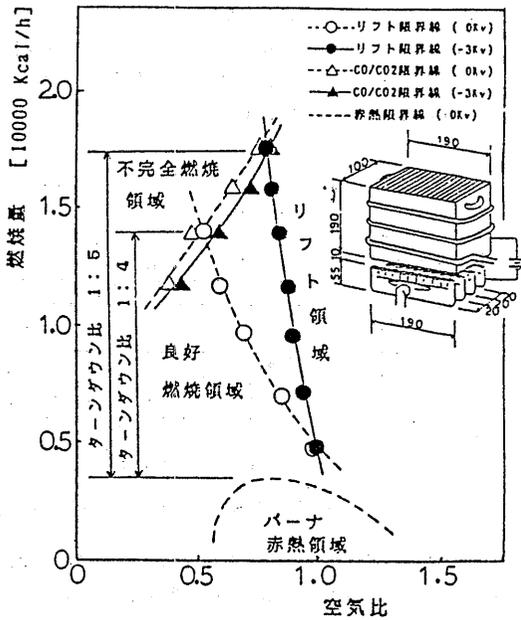


Fig.6.2.5 電場による家庭用湯沸器の燃焼特性⁵⁷⁾

%以下である。燃焼火炎に電場を印加すると火炎は陰極側に引き寄せられる。針電極のような極端な不平等電場中では極性に関係なく針電極からのコロナ風に支配される。リフトし易いバーナに於いてはバーナ側を陰極にすれば燃焼の安定化に役立つ。コンロの様に燃焼に余裕のあるバーナではバーナ側を陽極にすると、火炎の集中化、火炎速度の増加から熱効率向上に役立つと述べている。

(7) EHD熱交換器への応用

静電場を印加すると凝縮、沸騰、強制対流等の電熱が促進される現象を利用した技術にEHD (Electro-Hydro-Dynamics電気流体力学)熱交換器^{19,24,25)}がある。

6.2.3 プラズマの利用

プラズマは熱機関、プラグ、MHD発電などへの利用が考えられており、電磁場で制御できるので以下にとりあげた。

(1) プラズマジェット

プラズマジェット^{2),26)}は電場、磁場を用いて制御が可能であり、熱機関への応用が考えられているので、次に、いくつかの文献にふれる。

Harrisonら²⁷⁾は化学量論比のメタン-空気混合気火炎に窒素プラズマを注入すると火炎の吹き消え限界

流量を7倍に増加できる事を示した。また、プラズマジェット中に生成されたラジカルによる優れた保炎特性や着火特性についても述べている。

Homらはプラズマジェットが乱れを発生させる効果と活性粒子による燃焼反応促進効果をもつことを示した。乱れは火炎面の増加によって燃焼を促進させるが、乱れが強すぎると反対に火炎面を引きちぎるので局部的に消炎効果をもたらし、その結果燃焼を抑制することがある。燃焼速度の早い化学量論比付近の混合気に対しては乱れの増加が効果的であり、一方希薄な可燃限界付近の混合気では活性粒子が効果的であると述べている²⁾。

(2) プラズマジェットの応用

a) 燃焼器への応用

プラズマ注入がすすの生成を抑制したり、窒素酸化物を減少させる効果が見いだされている。プラズマジェットによる保炎性能の増加は種々の燃焼器、特に連続燃焼器において利用価値がある。ジェットエンジンの再着火用プラグ、微粉炭燃焼器における保炎装置、寒冷地におけるディーゼルエンジンの始動装置などへの応用が考えられている。燃焼器に应用する場合の最大の問題点はプラズマを発生するための電極の損耗が大きいことと電極などでのエネルギー損失が大であることである²⁾。

木村ら²⁸⁾はプラズマジェットとして電力を5%負荷するとプロパン-空気混合気を用いた攪拌燃焼器の負荷率が3倍に増加すると述べている。

極超音速旅客機(HST)用の超音速ラムジェット(Scramjet)エンジンは反応速度の大きい水素を燃料として用い、マッハ数2~3、静温1,000K程度の気流中での乱流拡散燃焼が考えられている。この場合、火炎安定化と燃焼器の長大化が問題となり、このような超音速燃焼における火炎の安定化、燃焼の促進に対してプラズマジェット(投入電力3kw程度以上)が有効であるといわれる²⁹⁾。

b) 内燃機関及びプラズマジェットプラグへの応用

Tozziら³⁰⁾は希薄混合気を燃焼する火花点火機関にプラズマジェットを用い、キャビティ容積やガスの種類を変えて燃料消費率や大気汚染物質濃度などの測定を行った。希薄混合気に対する燃料消費率が著しく改善され、大気汚染物質濃度も改善されることを示した。Fig.6.2.6に燃料消費率に与えるプラズマジェットの効果を示す。

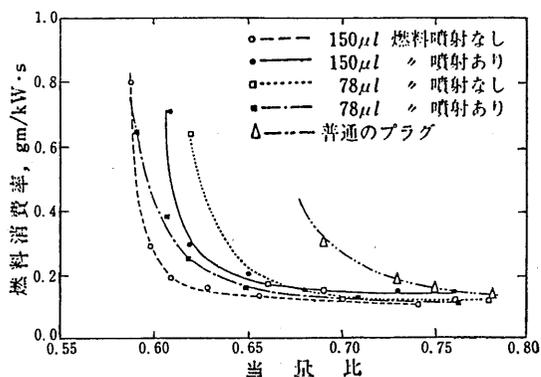
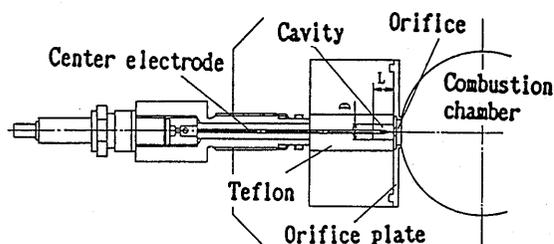
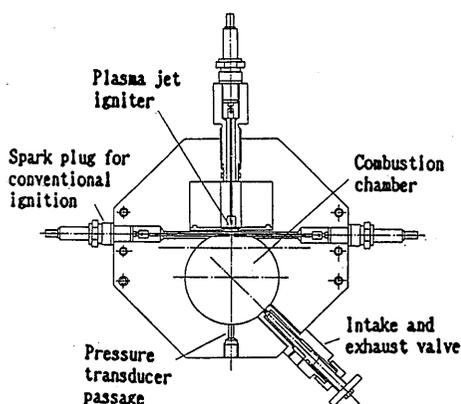


Fig.6.2.6 燃料消費率に与えるプラズマジェットの効果^{36,64)}

吉田³¹⁾は火花点火機関にプラズマジェットプラグを用いて希薄混合気を確実に点火し、燃焼促進効果のあることを示した。Fig.6.2.7にプラズマジェットプラグと定容燃焼容器を示す。



a) プラズマジェットプラグ



b) 定容燃焼容器

Fig.6.2.7 プラズマジェットプラグと定容燃焼容器⁶⁵⁾

Orrinら³²⁾はプラズマジェットプラグの実験を行った。Fig.6.2.8にこのプラズマジェットプラグの例を示す。この特徴は先端のキャビティの中で放電をおこなわせ、それによって生成された活性粒子が加熱されて膨張したガスとともに、オリフィスを通り抜けて高速で燃焼室に噴射される。これによって燃焼室内に激しい乱れを作るとともに、活性粒子を室内にばらまくことにより燃焼を著しく促進させる。オリフィスの幾何学的形状やキャビティ内のガスを変えることによって、ジェットのパターンや活性粒子の種類を制御することが可能である。

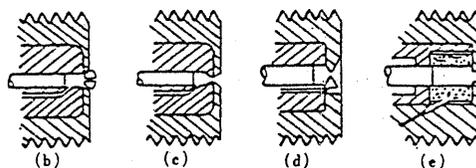
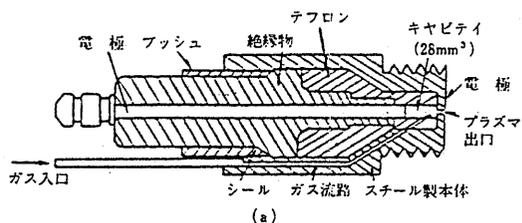


Fig.6.2.8 プラズマジェットプラグの例^{36,66)}

Carletonら³³⁾はプラズマジェットプラグではプラグに与えられた電力の内、プラズマに与えられるものは元のエネルギーの10%程度に過ぎないことを示した。この為エネルギー損失をできるだけ少なくして、普通のプラグと同じ電力でプラズマジェットをつくる工夫を考えている。

プラズマジェットによる燃焼促進に関する文献は上述の他に燃焼シンポジウムで幾つか発表³⁴⁻³⁶⁾されている。

(3) MHD発電

MHD (Magneto-Hydro-Dynamics電磁流体力学) 発電³⁷⁻³⁹⁾はファラデーの法則に基づき、導電性流体 (高温プラズマや液体金属) を磁場中に設けた発電ダクトに流し、その壁に設けた電極から電気出力を取り出す。Fig.6.2.9にMHD発電の原理を示す。

MHD発電のうち研究開発が一番進んでいる開放サイクル型では石炭、石油や天然ガスなどの化石燃料を

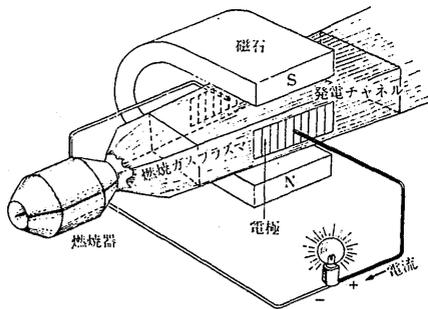


Fig.6.2.9 MHD発電の原理⁷²⁾

高温燃焼 (2,200–2,900K) させ、それに燃焼ガスの導電性を高めるためにシード物質として電離電圧の低いセシウム化合物やカリウム化合物を1%程度混ぜている。発電ダクト材料保護のためにプラズマ温度は3,000K以下に限定されている。MHD発電では発電

ダクト出口でもガス温度はなお2,000K以上あり、この高温排熱の一部は燃焼用空気の前熱に用い、残りを蒸気ボイラに用いるMHD発電と蒸気タービン発電(超電導発電機を使用すると効果的である)とのコンバインド・サイクルが考えられている。Fig.6.2.10にMHD-汽力発電プラントの基本構成を示す。このコンバインド・サイクルにより現在の新鋭火力発電の効率を10%以上向上させることを狙いとしている。このためにMHD発電では流速、磁場、電離度を高めることが必要である。そのために、ノズル加速(約1,000m/sec)、超電導磁場(磁束密度は6T程度必要)、シード物質を利用している。これらの面からも使いやすく、性能の安定した高温超電導物質の登場及び有効なシード物質の回収・再生法が待たれている。

閉サイクル型MHD発電では作動流体としてアルゴンやヘリウムを加熱しプラズマをつくる。プラズマ温度は2,300K前後と比較的低い。

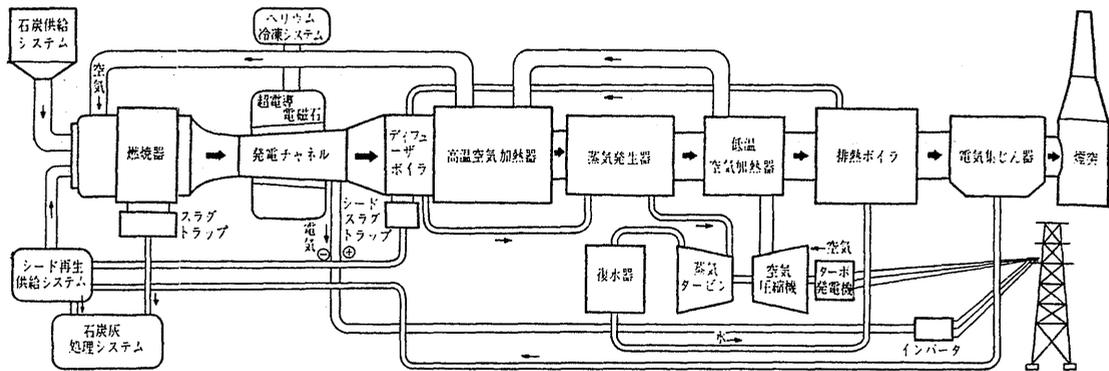


Fig.6.2.10 MHD-汽力発電プラントの基本構成⁷²⁾

(4) 核融合

D(重水素)-T(三重水素)またはD-D反応を使う核融合炉⁴⁰⁾ではそれぞれプラズマ温度1または6億度に達する超高温プラズマを磁場により安定に閉じ込め制御しなければならない。現在のところD-T反応を使うトカマク型核融合炉が限界プラズマ条件を一番早く達成するだろうと言われている。この核融合炉を実現(安定したプラズマを温度1億度、密度百兆個/cm³、持続時間1秒間以上で閉じ込める必要がある)させるためには、プラズマ封じ込めに高磁場を発生できる超電導マグネットが必要不可欠である。

人類からエネルギー問題を開放してくれるといわれる

核融合炉の実用化までには乗り越えなければならないハードルは高くかつその数も多いので、その実現は21世紀後半になるものと言われている。

6.2.4 燃焼に及ぼす磁場の効果

(1) 火炎への影響

林ら⁴¹⁾、若山ら^{42,43)}は火炎に磁場をかけた場合の火炎に及ぼす影響を調べた。その結果、燃焼反応では火炎中の寿命の短い活性種の発光が観測され、そのスペクトルの磁場効果はゼーマン効果による。火炎中の活性種の発光強度も磁場により影響を受ける。酸素-水素炎、プロパン-酸素炎ではOHラジカルの発光強度は磁場(1.8T)の存在下で増加する。磁場をかけ

て燃やすと化学種により火炎が明るくなるもの、火炎が暗くなるもの、火炎が変化しないもの、燃焼条件によって火炎が明るくなったり暗くなったりするものなどに分かれる。すすの場合は磁場強度により火炎が明るくも暗くもなる。火炎の磁場効果のメカニズムとして磁場による荷電粒子の螺旋運動によって火炎がかき混ぜられること、燃焼反応の素過程の一部に磁場が作用すること、または化学種の発光過程に磁場が作用することが考えられると延べている。

上野ら⁴⁴⁻⁴⁷⁾は白金面上でのベンジン、アルコールの触媒燃焼反応に0.1-1.0Tの均一磁場を加えた場合に燃焼速度が特定の磁場強度で促進されたり、抑制されたりすると述べている。メタノールは0.9Tの磁場でのみ平均燃焼速度が減少し、燃焼温度も降下する。特に、磁場1T、100T/mオーダの勾配磁場で燃焼温度が100-200℃低下することが測定された。また、燃焼温度変動の揺らぎの成分も速やかに増加する。0.9Tの磁場を除き、0-1Tの磁場ではそれらの変化はない。エタノール、プロパノール、プタノールもある特定の磁場強度で平均燃焼速度が減少する。勾配磁場を加えた場合は燃焼温度がステップ状に速やかに変化

し、温度分布が著しく変化する。燃焼温度はある位置で磁場強度と磁場勾配の積に比例して減少する。アルコール触媒燃焼に勾配磁場を加えた場合の燃焼温度計測は著しい抑制作用を示したが、これは常磁性酸素分子と反応中に現れるラジカルの振舞いにより、燃焼部での常磁性物質の局所濃度変化が酸化反応すべき物質の結合チャンスを減少させていると考えている。Fig. 6.2.11に勾配磁場をかけた時のメタノールの燃焼温度変化を示す。また、メタン、プロパン、水素ガスを燃焼し、これらのガスの火炎を最大磁場1.6T、磁場勾配220T/mに曝したとき、火炎は高磁場から逃れるように曲がることを示した。また、炭素ガスと酸素ガスを最大磁場2.2T、磁場勾配330T/mに曝したところ、流速20-140ml/minの流れは磁場により止められたりして変化する。この火炎やガス流の磁場による変化は酸素の働きによる。勾配磁場中であらうそくを燃焼させたところ、火炎の形状が大きく変化することが観察されたと述べている。

現在までに行われた実験範囲では火炎に及ぼす磁場の効果は電場よりかなり小さいようである。

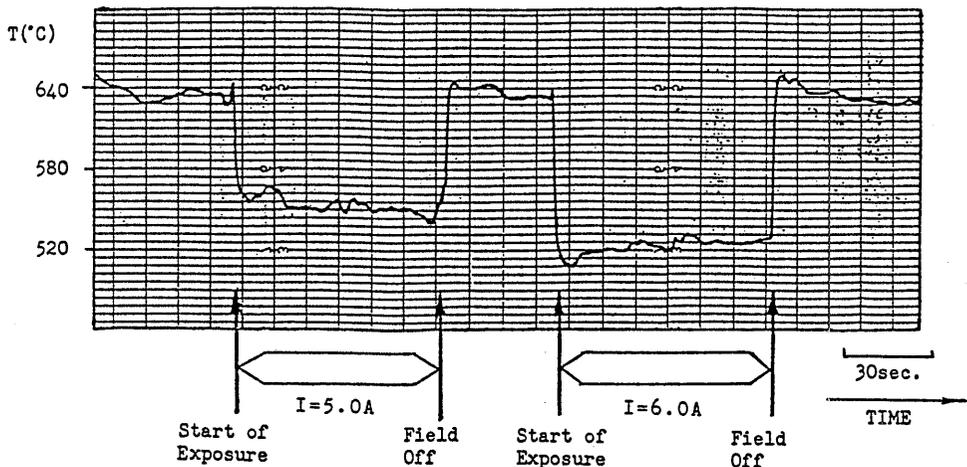


Fig.6.2.11 勾配磁場をかけた時のメタノールの燃焼温度変化⁷⁹⁾

(2) 燃料への影響

吉村⁴⁸⁾は燃焼前の液体燃料に適正な磁場処理を施すと燃焼効果を高めると述べている。Fig.6.2.12に磁場処理を施したC重油の燃焼による煤塵(すす)の変化を示す。灯油に1.4-3.6kGの磁場をかけたとき、

すすは少なくなる。ボイラや火炉では燃料油に磁場処理を施すとほぼ1%の燃費節減、ガソリンエンジンでは10%以上節減が得られる。船用ディーゼルやディーゼル車では配管振動や燃料噴射ポンプによる振動流のため磁場処理の効果が確かでない述べている。

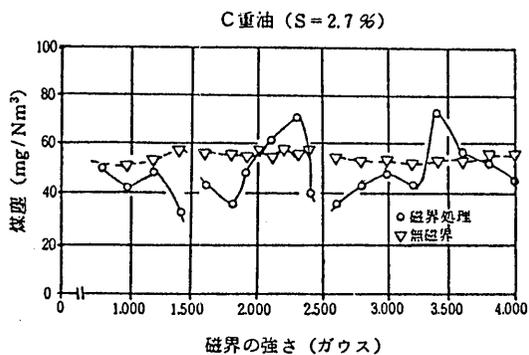
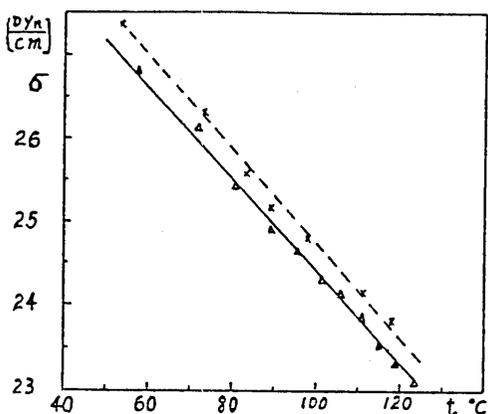


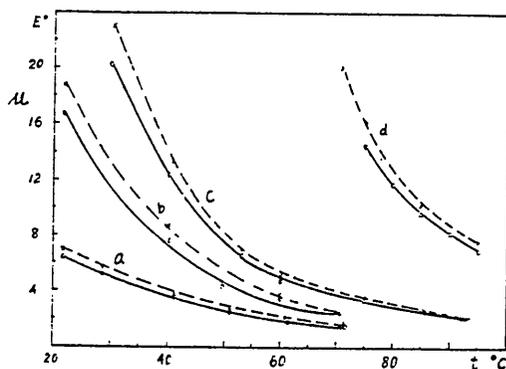
Fig.6.2.12 磁場処理を施したC重油の燃焼による煤塵の変化⁸²⁾

Chenら⁴⁹⁾は重油の表面張力、粘性が磁場をかけると低下すると述べている。Fig.6.2.13に磁場による表面張力と粘性係数の変化を示す(実線は磁場をかけた後、点線は磁場をかける前を示す)。適当な磁場をかけると、燃料液滴の平均粒径の微細化、分散が良くなる。ガス及び液体燃料の磁場処理による燃焼効率の向上のメカニズムについてはもっと磁場による燃料の物理化学的性質を調べる必要があると述べている。

これらの燃料に対する磁場処理は実際上全く効果が無いとも言われておりその評価は定かでない。省エネルギーに密接に関係する問題であるので、然るべき研究機関において燃焼に対する磁場処理効果及びそのメカニズムを詳細に評価する必要がある。



a) 表面張力



b) 粘性係数

Fig.6.2.13 磁場による表面張力と粘性係数の変化⁸³⁾

6.2.5 まとめ

火炎に磁場、電場、プラズマを印加すると、燃焼の促進、省エネルギー、大気汚染物質の低減化等が計られる可能性があり、それらによる燃焼制御により高効率低公害エンジン開発の可能性はある。これらの研究は緒に付いたばかりであり今後の研究の進展が期待される。

将来の研究課題：火炎に及ぼす電場、磁場またはプラズマの効果をレーザ干渉CT法^{50,51)}(Fig.6.2.14に示す)による火炎の温度分布計測およびパルスレーザ・ラーマン法⁵²⁾(Fig.6.2.15に示す)による火炎の多化学種濃度と温度の同時計測およびLDV(レーザ・ドップラ流速計)による火炎の流速分布、乱れ分布の計測などから詳細に比較検討する必要がある。

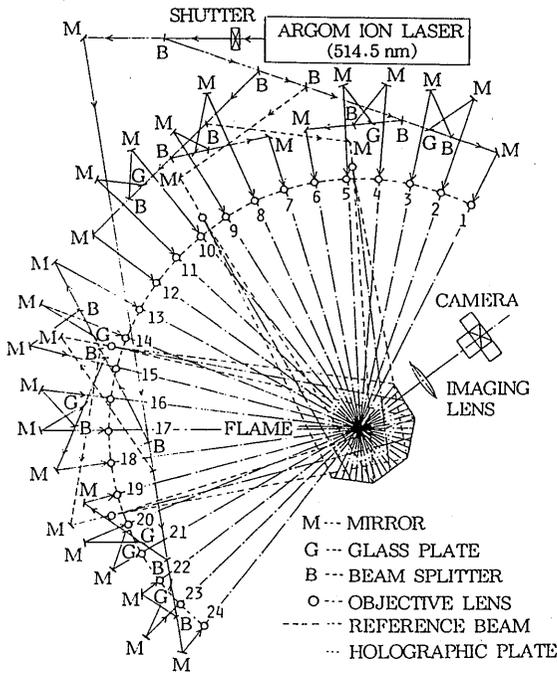
6.3 磁気分離および選別

磁石による磁気力を利用して、種々の物質を分離する手法を磁気分離技術と呼び1880年頃には、鉱山の選鉱過程で鉱石中から鉄や鉄磁鋼のような強い磁性体を分離するために使われた。

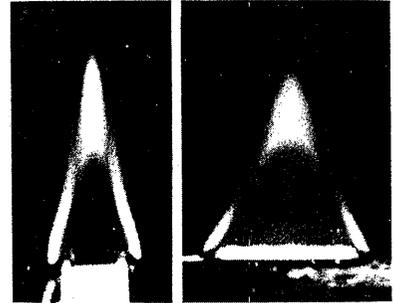
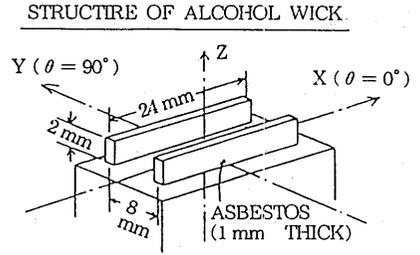
現在、磁気を使用した分離・処理法として以下のようものが使用されている。

- 1) 高勾配磁気分離技術(HGMS, High Gradient Magnetic Separation)による選別
- 2) 磁性流体を使用した比重差選別
- 3) 水の磁気処理

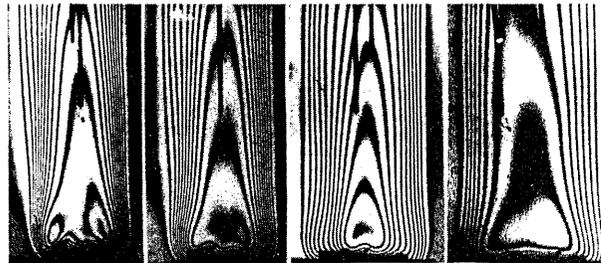
まず、高勾配磁気分離技術による選別の原理は、均一磁界中では磁性体粒子の両極に作用する力の大きさが等しく反対方向のために粒子に働く力は、結果とし



a) 多方向ホログラフィ干渉光学系



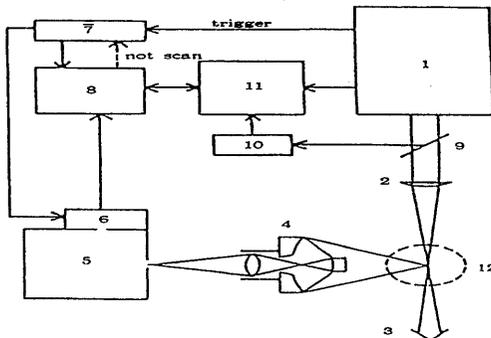
b) アルコール芯火炎



PROJECTION ANGLE 11.8° 26.5° 41.5° 78.1°

c) アルコール芯火炎干渉写真

Fig.6.2.14 レーザ干渉CT法^{84),85)}



- 1 YAG laser: THG (355 nm), 10 MW, 10-20 Hz
- 2 Condensing lens: $f = 500$ mm
- 3 Beam stopper
- 4 Light collecting optics
- 5 Grating monochromator: $f = 500$ mm, single
- 6 Multi-channel detector: diode array, -20 C cooling
- 7 Pulsar: delay and exposure control
- 8 Controller: triggered by the laser
- 9 Beam splitter
- 10 Power meter; pin diode
- 11 CPU: 250 kbyte
- 12 Burner: diameter 12 mm

Fig.6.2.15 パルスレーザー・ラーマン法⁸⁶⁾

て零になるが、不均一磁界中では磁性体粒子の両極における磁界の強さが異なるため、磁性体粒子に磁気力が作用し粒子は移動する。磁気分離の応用例をTable 6.3.1に示す⁸⁷⁾。この磁気分離法とフェライト化処理法を組み合わせることによって2次公害のない重金属処理を行うことができる。ただ、廃液中に多くの物質が含まれていると処理行程が非常に複雑になるために、初めからそれぞれに対応した分別貯留と他の処理法と組み合わせた処理システムを作る必要のあることが提案されている。

つぎに、磁性流体を使用した比重差選別は、磁性流体が加えられた磁場によって見かけの密度を変化させることを利用したものである。分離したい物質は等磁場面に沿って移動し、磁場の影響しない場所で沈降し

て分離される⁸⁹⁾。なお、この磁性流体を使用した比重差選別に関しては、6.4.4節において再びふれる。

最後に、水の磁気処理についての検討が種々報告されている。ただ、その評価については現在のところ十分とは言えないようである。水の磁気処理についての基本的な考え方は、水分子が持つ双極子モーメントが磁場中で受ける力により発生する僅かの物性変化が水処理に寄与していると考えられている。期待される効果としては、スケールの生成抑止と除去、水中微生物の除去、腐食防止が取り上げられている。ただ、装置がうまく起動するためには、一定の流速が必要であり、また、磁場強度が特定の値を取るらしいことが述べられている^{90),91),92)}。

Table 6.3.1 HGMSの種々の分野における応用例⁸⁷⁾

応用分野	応 用 例	ランク
(1) 水 処 理	(a) 廃水中の重金属処理	A, B
	(b) 用・廃水、河川水の処理	C
	(c) 鉄鋼廃水の処理	A
	(d) 火力・原子力発電所系統水の処理	C
	(e) 地熱発電所排水の処理	D
	(f) 食品工業用水中の鉄分除去	C
	(g) 流出油、エマルジョンの処理	C
	(h) 赤潮の処理	C
(2) 空 気 浄 化	(a) 電気炉、転炉、焼結炉排ガスの集塵	C
	(b) 吸入性ダスト(アスベスト繊維)の除去	C
(3) 磁 気 選 鉱	(a) 鉄鉱石の磁気選鉱、品位上昇	A
	(b) 低品位マンガン鉱石(タングステン鉱)の粗選	A
	(c) 金属アルミとアルミナの分離	A
(4) 窯業原料の品位上昇	(a) カオリンなど陶土、硅砂中の不純物除去	A
(5) 資源採取	(a) 海水中からのウラン採取	C
(6) 燃料中の不純物除去	(a) 石炭、液化石炭の脱硫	C
	(b) 原油中の金属除去	D
(7) 有用物回収	(a) 有価金属の回収	B

ランクA：実用化されているもの C：研究中で有望であるもの
B：実用化されつつあるもの D：検討中のもの

6.4 磁性流体

6.4.1 はじめに

1930年代の初めにF. Bitterは磁区構造を可視化して調べる一方であるコロイド法(ビッタ法)用にマグネタイト(Fe_3O_4)微粒子のコロイド溶液(磁性流体)を作製した。しかし、この磁性流体はコロイド溶液として不安定でありそれ以上発展しなかった。本格的な磁性流体は1965年にNASA(米国航空宇宙局)のS. Papellによって発明された。その頃NASAはアポロ計画を遂行中であった。そのため、宇宙服の可動部分の密閉シールや無重力下での液体ロケット燃料の管内移送を磁石を利用して制御することなどを目的として磁性流体の応用研究・開発が始まったと言われる。1969年にアポロ計画によって、人類が初めて月着陸船で月面に着陸し、宇宙飛行士が月面上を歩行した。その宇宙飛行士が着ていた宇宙服内部を外部の真空から1気圧に保って、頭部のヘルメットを自由に回転させるために宇宙服には磁性流体真空シールが使われていたと言う。磁性流体はその時からにわかに脚光を浴びることとなった⁹³⁾⁻⁹⁵⁾。

磁性流体(ferrofluid, magnetic fluid)は水やケロシンなどの非磁性ベース溶液に多量の強磁性体の金属超微粒子(直径約 $100\text{\AA}=10\text{nm}$ 、 10^{17-18} 個/ cm^3)を強力な界面活性剤を加えて、合体、凝集を防止し、安定に分散させたコロイド溶液である。この磁性流体粒子の分散モデルをFig. 6.4.1に示す。標準状態の空気

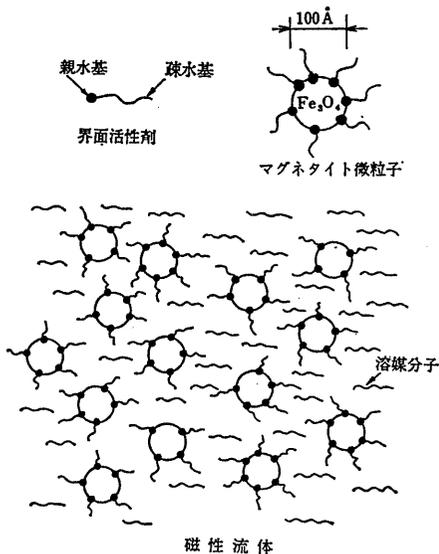


Fig. 6.4.1 磁性流体粒子の分散モデル⁹⁵⁾

の分子数は 2.7×10^{19} 個/ cm^3 であるので、この強磁性体金属超微粒子が如何に小さいものであるかが想像できる。金属超微粒子はマグネタイト、マンガン亜鉛酸化鉄($\text{Mn} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_5$)などを使用し、粒子はほぼ球形である。金属超微粒子が互いに接触せず、反発しあうように親水基を超微粒子側に、疎水基を外に向けたオレイン酸などの界面活性剤の長鎖状分子でコーティングし、ベース溶液に分散する。超微粒子はベース溶液中でブラウン運動する。この磁性流体は分散性に優れており、遠心力や重力の作用下で、凝集や沈降などの固液分離を生じるようなことがなく、液体自体が均質で強い磁性を持っているように振舞う^{94), 95)}。

磁性流体に関する主な文献として磁性流体の構造、性質、オレロジ、流体力学といった基礎分野に重点をおいて詳しく書かれたRosensweigの本⁹⁶⁾、応用についても言及した彼の文献⁹⁷⁾及び磁性流体の製法、基礎、応用にわたる広範囲について書かれた竹富・近角の優れた本⁹⁵⁾がある。また、文部省科研費による磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書^{98), 99)}及び日本機械学会磁性流体工学に関する調査研究分科会成果報告書¹⁰⁰⁾がある。文献(98)と(100)とは内容に重複が多い。日本では1986年から毎年、磁性流体講演会¹⁰¹⁾⁻¹⁰³⁾が開催されている。一方、磁性流体国際会議の第1回は1977年にイタリアで、第2回は1980年に米国で、第3回は1983年に英国で、第4回は1986年に東京と仙台で開催された。第5回は1989年にソ連で開催される予定である。第4回会議録¹⁰⁴⁾には神山、Rosensweigによりその時点までに公表された磁性流体に関する文献及び特許のリストがそれぞれ約500件づつ掲載されている。

次に、磁性流体の特徴について述べる¹⁰⁵⁾。

磁性流体のマクロ的性質として、

- 1) 磁場の作用下で磁性流体は重力、圧力、遠心力などに逆らって磁氣的に任意な位置付けができる、
- 2) 磁性流体中に置かれた磁性体は安定した状態で浮揚する、
- 3) 磁性流体中に置かれた非磁性体は磁性流体の比重を磁氣的に制御することによって自由に浮遊位置付けができる、
- 4) 磁性流体を加熱、冷却することによって生じる磁気熱サイクルは機械的駆動部なしに流体運動を起こす、
- 5) 接線方向の磁場により表面波動の伝播が制御できる、

- 6) 磁性流体に回転磁場を作用させると磁性流体中に渦が発生する、
 - 7) 磁性流体は磁場の作用下で凝集する、
- などである。

磁性流体のミクロ的性質（磁気光学的性質）として、

- 1) 複屈折（光学的異方体に光が入射するとき、一般に二つの屈折光が現われる現象）
- 2) 二色性（光が媒質中を通過するとき特定の振動面を持つ直線偏向、または特定の向きの方偏向が強く吸収される現象で、前者を直線偏向二色性、後者を円偏向二色性という）

を示す。

Table 6.4.1に磁性流体の応用分野¹⁰⁵⁾を示す。以下に磁性流体の応用例について述べる。

Table 6.4.1 磁性流体の応用分野¹⁰⁵⁾

利用される性質		応用機器
磁性	磁性流体に働く力、流動性	インクジェットプリンタ、検知装置（位置センサなど）、磁気潜像の現象および定着、磁気テープ、不良個所のマーク付けと選別、磁性薄膜、水位計、比重計、圧力計、磁性流体研磨
	凝集性	光ファイバ接続装置
磁場中の磁性流体に働く力、磁場による位置決め、形状変化	シーリング作用	回転軸シーリング装置、機械部分のないポンプ、バルブのシール、アクチュエータ
	潤滑作用	軸受、回転装置、引抜き加工装置
	粘性	ダンパ
	その他	表示装置、油水分離、制ガン剤の誘導
磁性流体中の物体に働く力	操重力効果	比重差選別装置
温度による磁性の変化	磁性流体に働く力	ヒートポンプ、エネルギー変換機
	温度特性	温度計測装置、温度制御装置
	熱交換	熱交換装置、変圧器、ヒートパイプ、スピーカのボイスコイルの保持
磁気光学効果	複屈折	磁場センサ、光シャッター、光モジュレータ、ディスプレイ、光信号増幅器
	二色性	偏光子

6.4.2 磁性流体軸シール

磁性流体の応用として、磁性流体軸シールは現在のところ最も成功しており、広く実用化されている。

熊谷ら¹⁰⁶⁾は液体水素輸送船の補機に関する研究の中で磁性流体軸シールの実験及び検討を行った。その結果、磁性流体軸シールは比較的低压のガスシールに有効であるが、欠点として使用温度の上限は約60~100℃であり、その下限は-30~-50℃と使用温度範囲は狭い。しかし、低温圧縮機の二次シールとして使用する場合、この範囲にすることは可能であると述べ

ている。

最初の液体ヘリウムで冷却された超電導発電機はMITの4MVA機で、シールはカーボン・フェイスイールを用いた。ほぼ同じ頃にウエスティングハウス社で5MVA機が作られ、シールとして特殊なメカニカル・シールを用いた。それらのシールは寿命が短く実用に耐えなかった。超電導発電機への磁性流体軸シールの適用に初めて成功したのは富士電機・三菱電機共同開発による6MVA機からである。その後、GE社、日立製作所でも磁性流体軸シールを用いた超電導発電機が作られている。液体ヘリウム冷却超電導発電機ではヘリウムが高価であるので、冷却後の回収が必要である。また、ヘリウム流路に他のガス（O₂、N₂）が混入すると極低温のためにそれらのガスが固化して流路を塞いでしまうので、ヘリウム流路における回転子と固定部の接合部はシール性能の非常によい軸シールが必要となる。この目的に磁性流体軸シールは適している^{95),107),108)}。

磁性流体軸シールが広く使われるようになってから、高速回転、大直径の軸シールへの適用が要求されるようになってきた。磁性流体軸シールも他のシールと同様に発熱がある。磁性流体軸シールの発熱は磁性流体の粘性が原因である。発熱量は軸径の3乗、回転数の2乗に比例するので高速回転、大直径の軸シールでは発熱問題は重要である。

磁性流体軸シールの特徴¹⁰⁹⁾をまとめると、長所としては、

- 1) 非接触で完全密封型シールである、
- 2) 軸の静止時、回転時ともに密封性を保つ、
- 3) 固体面間の摺動がなく長寿命である、
- 4) 軸の変位、表面あらさに関して許容範囲が広い、
- 5) 構造が簡単でコンパクト化に適する、
- 6) 動力損失が小さい、

などである。

短所としては、

- 1) 磁性流体の耐熱性が小さく使用範囲が限られている、
 - 2) 高圧力差には適さない、
 - 3) 液体用及び往復動シールとしての使用は難しい、
- などである。

具体例としては上述の他に、計算機用磁気ディスクの防塵シール、高真空器内の回転軸の真空シール、電力貯蔵用大型フライホイールシステムの真空シールなどがある。

Fig.6.4.2に磁性流体軸シールの基本構成を、Fig.6.4.3に磁性流体軸シールの具体的な構造を示す。

現在、磁性流体軸シールはシール圧 $\Delta p < 200\text{kPa}$ 、使用温度 $T < 100^\circ\text{C}$ 、軸回転周速度 $v < 20\text{m/s}$ までの使用が広く普及している¹¹⁰⁾。

上述の文献の他にも磁性流体軸シールについては優れた解説¹¹¹⁾⁻¹¹⁵⁾や論文集¹⁰¹⁾⁻¹⁴⁴⁾、論文^{116),117)}がある。

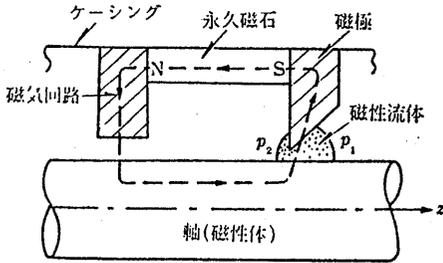
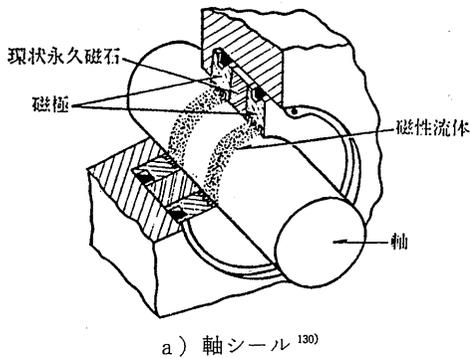
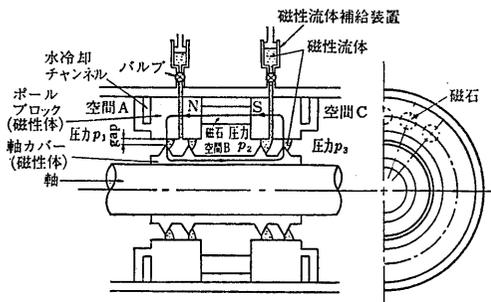


Fig.6.4.2 磁性流体軸シールの基本構成¹³⁰⁾



a) 軸シール¹³⁰⁾



圧力 p_1, p_2, p_3 は $p_3 < p_2 < p_1$ となっている。

b) 軸シール¹¹¹⁾

Fig.6.4.3 磁性流体軸シール

6.4.3 エネルギー変換装置

磁性流体は適当な温度勾配（キュリー温度近くにおける磁化強さの強い温度依存性を利用する）および磁場勾配の存在する領域内に置かれると、圧力勾配が発生して流動を誘起させる。

磁性流体を作用流体とした太陽熱暖房装置の基本形をFig.6.4.4に示す。磁性流体はコレクタと蓄熱・放熱器間に満たされ、その循環には自然対流及び可変磁力線源を使用し、蓄熱エネルギーを効率よく変換できる¹⁰⁵⁾。

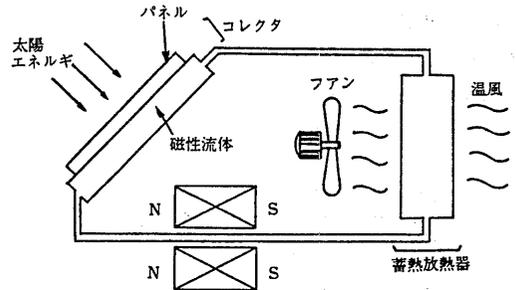


Fig.6.4.4 磁性流体太陽熱暖房装置の基本形¹⁰⁵⁾

作用流体に磁性流体を使用したヒートパイプは磁性流体中の揮発性分散溶媒が液体の熱運動速度で還流するため、速い蒸発速度でも蒸発部の作用流体の不足が発生せず、従来の同一タイプのものと比較して2.5~4倍以上の伝熱効率を得られている¹⁰⁵⁾。

磁性流体を使用した変圧器の原理をFig.6.4.5に示す。この変圧器は鉄心に相当する部分に磁性流体を使用し、かつ、この磁性流体を循環させて冷却・放熱も行わせるようにしたものである。磁性流体変圧器は油を用いて冷却・放熱を行わせる従来の変圧器に比べて放熱効率が高く、かつ小型化、簡略化でき、また油による公害の恐れもないなど優れた性能を有している¹⁰⁵⁾。

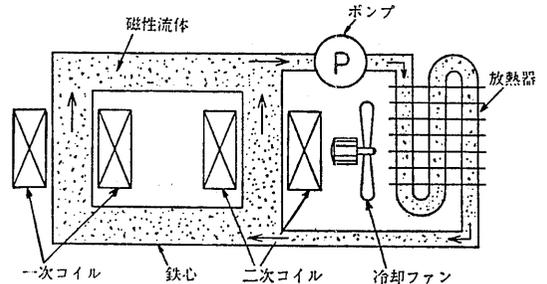


Fig.6.4.5 磁性流体変圧器の原理¹⁰⁵⁾

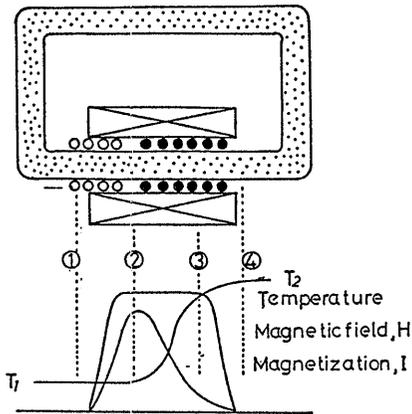
(磁性流体熱機関) Reslerら^{118),119)}は磁性流体熱機関の提案を行い、実験的検証も行った。松木ら¹²⁰⁾は磁性流体熱機関の実験を行った。しかし、それら初期のものは運動性が乏しいものであった。

土方ら¹²¹⁾は磁性流体熱機関の改善と磁気熱力学の検討を行った。ところで、この磁性流体熱機関はエジソンが磁性材料を用いて熱エネルギーを別のエネルギーに変換するという原理特許を1888年に英国で取ったことに始まる。細いパイプの中に入れた磁性流体に強力な永久磁石で強い磁界をかけながら、パイプの片側を12℃に冷却し、もう一方をニクロム線ヒータで70℃に加熱し、温度差をつくる。パイプの中の磁性流体は永久磁石の方に引き込まれるような力を受けるが、温度が高くなると磁化が弱まるため、低温部に比べると高温部の圧力が小さくなる。その結果、磁性流体は低温

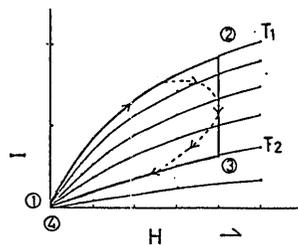
側から高温側に押し流されるように移動し始める。この状態にしておくと、パイプの中を磁性流体は巡り続け、磁性流体の流れの中に羽根車を置くと回転する。しかし、その回転力は非常に弱い。

Fig.6.4.6に磁性流体熱機関とそのサイクルのモデルを示す。磁性流体が①→②で等温的に磁化され、②→③で一定磁界中で加熱され、③→④で等温的に消磁される。④→①は断熱的に冷却され、1サイクルを終わる¹²¹⁾。

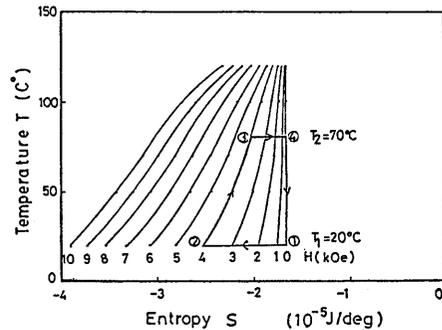
ベース溶液を熱伝導度の高い液体金属とし、これにキュリ温度以上の高温でも長期間安定な飽和磁化の大きい金属超微粒子を懸濁した磁性流体が得られるならば、可動部分がなくても熱エネルギーを効率よく電気エネルギーなどに変換することが出来るので、発電や熱機関として利用が可能となる¹⁰⁵⁾。



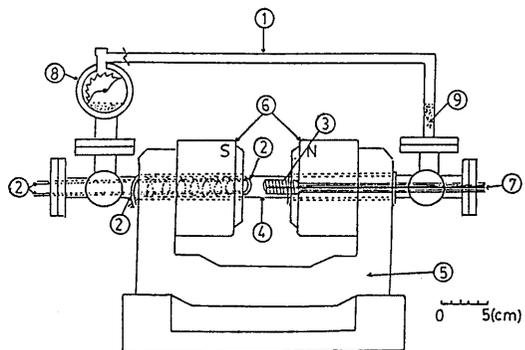
a) 温度分布及び磁界分布



b) サイクルの磁化-磁界線図



c) サイクルの温度-エントロピ線図



- 1 : パイプ 2 : 低温熱交換器 3 : 高温熱交換器
- 4 : パイプ 5 : 磁界発生装置 6 : 永久磁石
- 7 : 熱電対 8 : 羽根車 9 : パラフィンベースの Mn-Zn フェライト磁性流体

d) 磁性流体熱機関モデル

Fig.6.4.6 磁性流体熱機関とそのサイクル・モデル¹²¹⁾

6.4.4 磁性流体比重差選別 (6.3節参照)

垂直方向に磁場勾配を持つ境界中に磁性流体を充填し、その中に非磁性体をおき、これに働く力を F とすると、

$$F = V \left\{ (\rho - \rho')g - \bar{M}(dH/dx)/4\pi \right\} \quad (6.4.1)$$

で与えられる。ここで、

- V : 非磁性体の体積
- ρ : 非磁性体の密度
- ρ' : 磁性流体の密度
- g : 重力の加速度
- \bar{M} : 非磁性体の位置における磁性流体の平均磁化
- dH/dx : 磁場勾配、下向きに磁場が増加するときを正とする。

右辺の第1項は重力による沈降、第2項は磁気的浮力を示す。磁場が強いほど見かけの比重は大きくなり、比重3以上の重液を容易につくることができる。現実には比重8以上の重液にすることもできる。処理材と重液との分離可能比重差は0.1である¹²²⁾。

磁性流体比重差選別装置による磁性流体の損失が現在のところ処理トン当たり1ℓ近くあり、磁性流体が高価なので、コスト高であるが、回収金属の単価が高価なものには有望である¹²²⁾。Fig.6.4.7 に磁性流体比重差選別装置の原理とその例を示す。

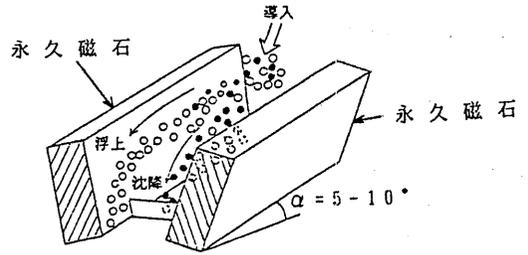
葛岡ら¹²³⁾は坑水より回収したフェライト(マグネタイト-マグヘマイト固溶体)を用いた水ベース磁性流体(比重 $\rho=1.05$) 比重差選別装置を使い、塩化ビニール ($\rho=1.45$)、アルミ合金 ($\rho=2.4\sim 2.7$)、銅線 ($\rho=8.9$) の混合物の回収実験をおこなった。その結果、磁場の強さ $0.96 \times 10^5 \text{A/m}$ で塩化ビニールは完全に回収され、 $1.35 \times 10^5 \text{A/m}$ で銅線とアルミ合金を完全に分離できた。

鉱山から排出される鉄イオンを含む坑水は一般に中和処理されている。しかし、その結果多量の中和沈澱物が新たに発生し、その処理が問題となっていたが、最近混合法により坑水からフェライトを回収する技術が開発された。回収されたフェライトは粒径が微細であり、また水溶液懸濁物として存在するため安価な水ベース磁性流体の開発に適していると言う¹²³⁾。

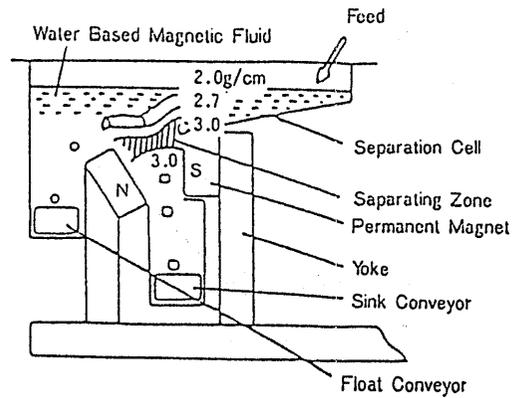
6.4.5 磁性流体のその他の応用

(1) 磁性流体ダンパ

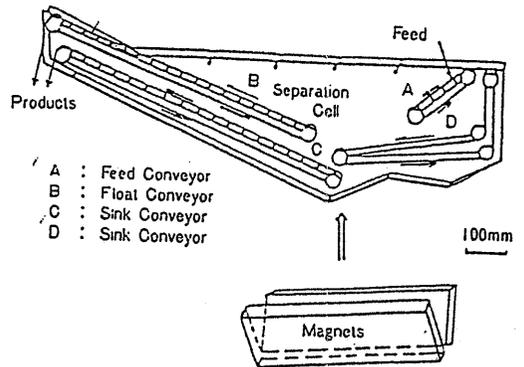
磁性流体の保持、圧力分布、粘性が磁場の作用によって制御可能であると言う性質を利用したもので、リニアダンパ、回転粘性ダンパ、ダッシュポット形ダンパなどが研究開発されている¹⁰⁵⁾。



a) 装置の原理¹¹⁰⁾



b) 重力式¹²²⁾



c) コンベア式¹²²⁾

Fig.6.4.7 磁性流体比重差選別装置の原理とその例

Fig.6.4.8は磁性流体ダンパのステップモータへの応用例、Fig.6.4.9はスピーカのボイスコイルの共振を抑える粘性ダンパの例を示す。後者では磁性流体はダンパとしての役割のほか、コイルの発熱に対する冷却効果による瞬間的出力の増大やコイルが中心位置からずれるのを防ぐことによるダイヤフラムの安定性向上などの役割を果たしている¹¹⁰⁾。

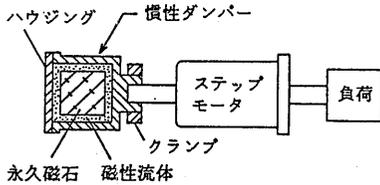


Fig.6.4.8 ステップモータへの応用例¹¹⁰⁾

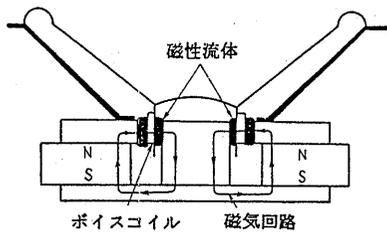


Fig.6.4.9 スピーカのボイスコイルへの応用例¹¹⁰⁾

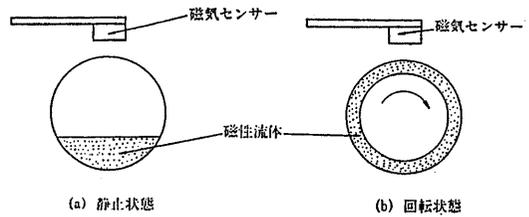


Fig.6.4.10 磁性流体遠心力スイッチの原理^{95),125)}

b) 傾斜センサ⁹⁵⁾ Fig.6.4.11のように磁性流体を入れたU字管の一方に一次側コイルと二次側コイルを持つ作動トランスを設けてある。台が水平な位置から傾くと磁性流体の液面の位置も変わる。このために相互インダクタンスが変化し、二次側コイルに発生する電圧も変わるので、逆に、二次側コイルの電圧を測って傾斜を知ることが出来る。

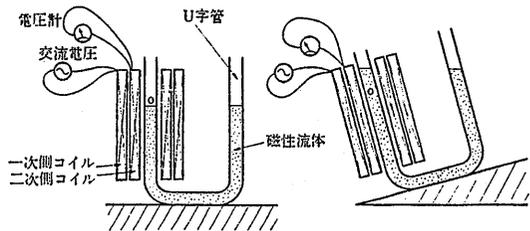


Fig.6.4.11 磁性流体傾斜センサの原理⁹⁵⁾

(2) 磁性流体アクチュエータ¹⁰⁵⁾

磁性流体の運動を介して電気・磁気エネルギーから機械の運動エネルギーへのエネルギー変換を行うものである。作動原理によって大別すると、

- 1) 磁性流体界面の変形運動を利用するもの、
- 2) 磁性流体プラグの往復運動を利用するもの、
- 3) 磁性流体中の非磁性体の運動を利用するもの、

となる。これらの原理を利用したアクチュエータは多数開発されているが、実用化は今後の研究課題である。

(3) 磁性流体センサ

a) 遠心力スイッチ^{95),125)} Fig.6.4.10のように回転円筒容器の中に磁性流体が入っており、容器が静止している間は図のように磁性流体は底に溜まっている。磁場の検知には永久磁石とホール素子を振りつけたセンサによるものとリレー式スイッチによるものがある。円筒容器が回転しているか否かを電気回路のオンオフで検知し、逆に円筒容器が回転しているか否かで電気回路のスイッチをオンオフできる。

c) 加速度センサ^{95),125)} Fig.6.4.12のように作動トランスを形成する一次側コイルと二次側コイルを巻いた円筒容器の中に磁性流体が入っている。加速度のかかっていない状態（静止状態または一定速度で動いている状態）では磁性流体の液面は水平に保たれている。図のように横方向に加速度 α が働くと磁性流体の液面は角度 θ だけ傾く。加速度が加わると容器内の磁

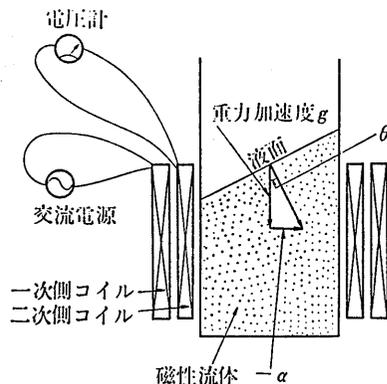


Fig.6.4.12 磁性流体加速度センサの原理^{95),125)}

性流体の形が変わるので相互インダクタンスが変わり、二次側コイルに発生する電圧も変わる。逆に、電圧を測って加速度を知ることが出来る。

d) 回転速度センサ^{95),125)} Fig.6.4.13のように磁性流体を入れた回転する円筒容器中の液面は遠心力のために図の様な回転放物面になる。このため相互インダクタンスが変わり、二次側コイルの電圧も変わるのでこれより回転数を測る事が出来る。

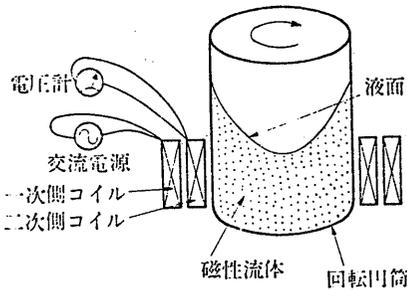
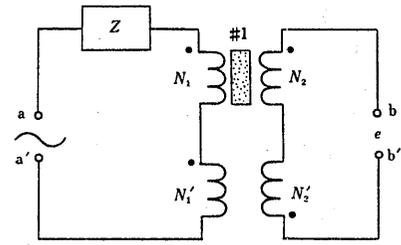


Fig.6.4.13 磁性流体回転速度センサの原理^{95),125)}

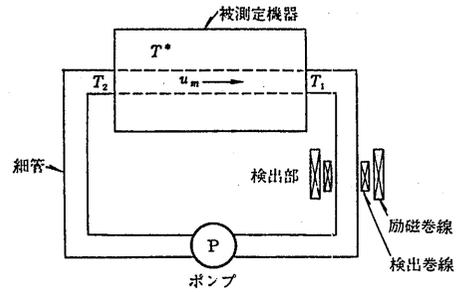
e) 磁界センサ⁹⁵⁾ 透過光強度は印加磁場強度の単調増加関数となるので未知の磁場が加えられているときに透過光強度を測定することによりその磁場の大きさを知る事が出来る。

f) 温度センサ¹³²⁾ 感温磁性流体は温度によりその磁束密度が変わるので、被測定物に一定容積の磁性流体を塗布し、この磁束密度の値を測定素子で計測すれば、その物体の温度を磁束値を媒介として計測できる。これを塗布法による温度計測と言う。Fig.6.4.14(a)に塗布法による温度計測の基本回路構成を示す。図において、#1は塗布した磁性流体であり、 N_1 は励磁用コイル、 N_2 は計測用コイルである。 N_1' 、 N_2' は誤差調整用空芯コイルである。

回転部、可動部を有する大きな機械の内部の温度を計測したい場合、複雑な機構のために表面から直接接触出来ない部位の温度を計測したい場合には、機器内部に狭い流路を設けて、感温磁性流体を強制循環させ、外部よりその磁性流体の磁束値を連続測定すれば必要部位の温度が計測できる。これを循環法による温度計測と言う。Fig.6.4.14(b)に循環法による温度計測の基本構成を示す。図に示すように、被測定機器内部と励磁及び検出巻線よりなる温度計測部との間に、感温磁性流体を小型ポンプにより強制循環させることにより、内部の温度計測が出来る。



a) 塗布法



b) 循環法

Fig.6.4.14 感温磁性流体による温度計測の基本構成¹²⁴⁾

(4) 磁性流体研磨

最近、切削、研削やラッピング等では加工が困難な複雑な曲面や難加工材の高精度・高能率加工が求められている。このような新しいニーズに答える新しい加工法として、磁性流体中の磁気浮揚力を用いた磁性流体研磨法がある。これを磁性流体磁気浮揚研磨法¹²⁶⁾⁻¹²⁹⁾という。この方法はFig.6.4.15のように磁性

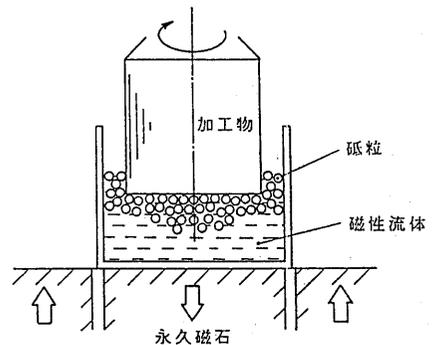


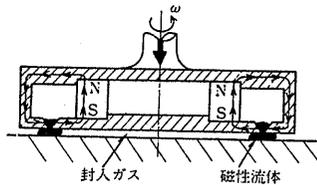
Fig.6.4.15 磁性流体磁気浮揚研磨法の原理¹¹⁰⁾

流体と砥粒（非磁性体）を入れた容器を磁石の上に置いた場合、砥粒は上方に磁気浮揚力を受ける。磁場を制御すれば砥粒を研磨に最適な位置に集めることが出来る。浮揚した砥粒を用いて研磨する複雑な形状の研磨面に対して任意に制御できる加工圧力を与えることが出来る。

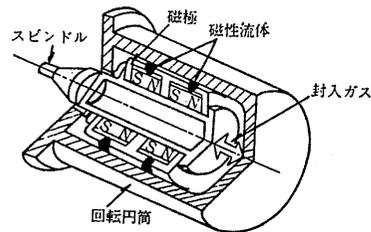
この他に、磁性流体中に砥粒を懸濁させ、その砥粒の動きを磁場により制御して研磨する砥粒懸濁加工法、電磁石によって磁性流体に磁気力を作用させ、回転ゴム板（この上に水に砥粒を懸濁した研磨剤を供給する）を膨らませて加工圧を与えて研磨する磁性流体封止加工法、穿孔したポリウレタンシートの穴の中に磁性流体と砥粒をいれておき、それに働く浮力を利用して砥粒をポリウレタンシート上にだし、これと接した加工物を研磨する作用砥粒制御研磨法がある¹⁰⁵⁾。

(5) インクジェットプリンタ¹⁰⁵⁾

磁性流体をインクに混ぜ、ノズルより高速で噴射さ



a) ジャーナル軸受



b) スラスト軸受

Fig.6.4.16 磁性流体軸受¹³⁰⁾

(7) 流れの制御¹³¹⁾

パイプラインのベンド部や管断面積の変化する管壁などの流れの剝離し易いところに磁性流体をコーティングし、不均一磁場をかけて流れの剝離を制御しようという研究がある。

(8) 磁性流体による流出油回収¹³²⁾

最近、大型タンカー事故がしばしばおきている。そして、海を汚染するばかりでなく、魚介類に大きな被害を与えている。磁気を利用して海面に浮いた重油などの油を除去することが実験されている。そして、磁性流体を海面に浮いた油の表面に撒布し、磁力で油を回収する試みがおこなわれている。

(9) 検知用メモリ¹²⁴⁾

微細な粉末にした数種の感温磁性材料のキュリ温度を固定メモリとして利用し、その混合粉末をタンカーの積荷に混入し、漏油の検出や指定海域における廃油

せ、そのジェット方向を磁場によって制御し、紙面に印字する高速インクジェットプリンタが研究開発されている。最近、インクによる目づまりを起し易いノズルを使用せずに、磁場により磁性流体界面を隆起させ、高電圧下でのクーロン力を利用してジェットを誘導する新しい方式のインクジェットプリンタが開発されている。

(6) 磁性流体軸受^{96),105),130)}

磁性流体中に固体を安定に浮遊させる磁気作用、潤滑作用は軸受に利用できる。紡績機械の高速、軽荷重スピンドル軸受用として、直径2cmの円筒形軸受が試作された。回転数10,000rpmまで、磁性流体軸受は玉軸受を使用した場合に比較して騒音が少なく、始動トルクはほぼ同一であった。Fig.6.4.16に磁性流体軸受の例を示す。

の不法投棄等の監視に利用しようという提案がある。提案の一例として、用いる感温フェライトの粒子直径25nm程度、キュリ温度が10℃間隔の11種の感温フェライト粉末を組み合わせ、約2000種の識別コードを作成し、このフェライト粒子の混合物を10ppm程度の希薄濃度でタンカーの積荷油の中に添加混入しておけば、漏出した油はどの船の積荷であるかを識別できる。わが国においても海上における廃油の不法投棄の監視の目的で実験が行われ、可能であることが確かめられている。Fig.6.4.17に感温フェライト粉末を用いたタンカーの漏油不法投棄監視システムと検出回路図を示す。

(10) 磁性流体を用いた純流体素子¹³³⁾

作動流体として磁性流体を用い、電磁石で噴流を制御する電磁制御式層流形比例増幅素子が考えられている。Fig.6.4.18に電磁制御式層流形比例増幅素子の例を示す。

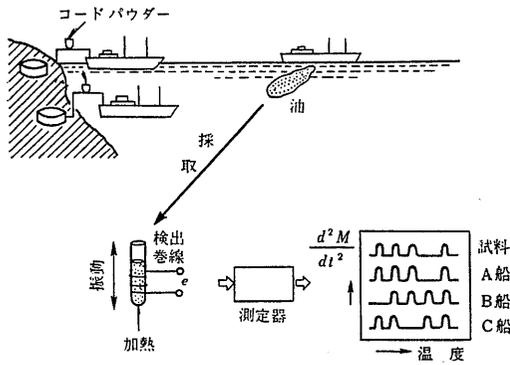


Fig.6.4.17 感温フェライト粉末を用いたタンカーの漏油検出、廃油不法投棄監視システムとパルス電圧検出回路¹²⁴⁾

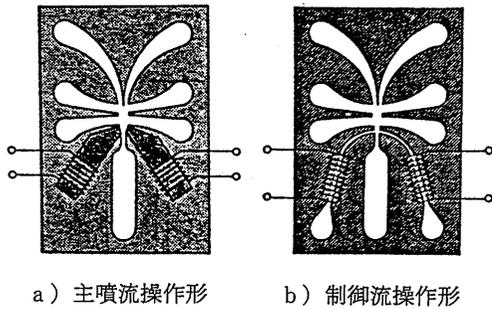
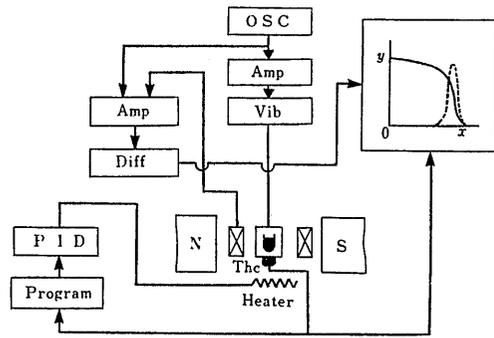


Fig.6.4.18 電磁制御式層流形比例増幅素子¹³³⁾

その他の磁性流体の応用として、光シャッター、光モジュレータ、光双安定性素子、光信号増幅器、マイクロウェーブ素子への応用、触媒への応用や磁性流体を使った超音波非破壊検査法などがある。また、医療分

野への応用として制ガン剤を混入した磁性流体によるガン治療、X線の造影剤への応用などが考えられている^{93),95),105)}。

6.4.6 まとめ

今後、磁性流体の特徴を生かした軸シール、比重差選別、ダンパ、アクチュエータ、音響、制御、センサ、電子工学や医療分野への一層の発展が期待される。更に、磁性流体の優れた特性を生かしてますます多用途への応用が考えられている。しかし、磁性流体の歴史は浅く、また磁性流体の研究が多分野にまたがっているためにその製法、性質、構造、レオロジ、流体力学は未だに良く解明されているとは言えず、その発展途上にある。

将来のこととして、安定で使い易い高温超電導物質が発見・開発されれば手軽に高磁場が得られ、磁性流体と組み合わせると更なる用途が広がるものと期待される。また、磁性流体を用いた流出油回収が可能と考えられる。

将来の研究課題：液体水素、液体ヘリウム等の極低温流体を安全に漏洩無しに移送するためのポンプ、圧縮機、その他の補機類に使用する磁性流体軸シール法の研究を進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) Phillips, O.M.: The Prospects for Magnetohydrodynamic Ship Propulsion, J. of Ship Research, Vol.5. No.4 (1962), pp.43-51
- 2) 山口一、加藤洋治：電磁推進に関する文献調査及び一考察、第9回推進性能委員会公開資料、(1986)
- 3) 北野稔、岩田章、佐治吉郎：超電導マグネットによる電磁推進の基礎理論 I、II、神戸商船大学紀要第2類、第26号、(1978)、pp.219-262
- 4) 玉眞洋：超電導電磁推進船について、第14回造船学会夏期講座「新しい造船学」、(1988)
- 5) Kodama, Y.: Computation of 3-D Incompressible Navier-Stokes Equations for Flow around a Ship Hull Using an Implicit Factored Method, Proc. of Osaka Colloquium on Ship Viscous Flow, (1985)
- 6) 児玉良明：渦粘性モデルを用いた二次元翼型まわり高レイノルズ数流れに関するナビエ-ストークス方程式の数値解法、昭和60年度 (第46回)

- 船舶技術研究所研究発表会講演集、(1985)、pp.89-93
- 7) Hinatsu, M., Kodama, Y. : Numerical Simulation of Flow Controlled by MHD Effect (2-D Laminar Flow), J. of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.201, (1986), PP.91-100
- 8) 日夏宗彦：船体周りの流場制御シミュレータへのCFDの応用、昭和61年度(第48回)船舶技術研究所研究発表会講演集、(1986)、pp.72-75
- 9) 日夏宗彦：MHD流れにおける $k-\epsilon$ 方程式とチャンネル流れの計算例、第2回NSTシンポジウム、東京大学生産技術研究所、(1987)
- 10) 日夏宗彦：電磁力による二次元翼型周りの流場制御に関する研究、船舶技術研究所報告、第24巻、第5号、(1987)、p.15-29
- 11) Hinatsu, M. : $k-\epsilon$ Modeling of MHD Flow and Its Simulation of Channel Flow, J. of the Soc. of Naval Architects of Channel Flow, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, vol. 161, (1987), pp.34-41
- 12) Kodama, Y. : A Method to Assure Positiveness of k and ϵ in the Computation of the $k-\epsilon$ Turbulence Model, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol.160, (1987), pp.21-27
- 13) 日夏宗彦、児玉良明：指数表現を用いた $k-\epsilon$ 方程式による乱流場の数値シミュレーション、第5回航空機計算空気力学シンポジウム論文集、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-8、(1987)
- 14) Kodama, Y. : Computation of High Reynolds Number Flows Past a Ship Hull Using the IAF Scheme, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol. 161, (1987), pp.24-33
- 15) 日夏宗彦：電磁力で制御された翼型まわり乱流場の流場制御シミュレーション、日本造船学会論文集第163号、(1988)、pp.88-96
- 16) Hinatsu, M., Kodama, Y., Ukon, Y. : Study on Flow Control Using the MHD Effect, Proc. of 17th Symp. on Naval Hydrodynamics, to be published
- 17) Beam, R.M., Warming, R.F. : An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations, AIAA J., Vol.16, No.4.(1978), pp.393-402
- 18) Kodana, Y. : Computation of the Two-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations for Flow Past a Circular Cylinder Using an Implicit Factored Method, Papers of Ship Research Institute Vol.22, No.4 (1985), pp.25-67
- 19) Steger, J.L. : Implicit Finite Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries, AIAA J., Vol.16, No.7 (1987), pp.679-686
- 20) 北村健三、平田賢：直交強磁場下における液体金属の流動および熱伝達に関する研究(第1報、長方形管内乱流に及ぼす入口磁場形状の影響)、日本機械学会論文集(B編)、第46巻、第401号、(1980)、pp.67-75
- 21) Kitamura, K., Hirata, M. : Turbulent Heat and Momentum Transfer for Electrically Conducting Fluid Flowing in Two-Dimensional Conducting under Transverse Magnetic Field, Proc. 6th IHTC, Vol.3, M-18, (1978)
- 22) 須藤浩三、富田幸雄：垂直磁場における液体金属の流動に関する研究(第3報、遷移に及ぼす電磁場の影響)、日本機械学会論文集(B編)、第40巻、第322号、(1974)、pp.983-992
- 23) 須藤浩三、富田幸雄：垂直磁場における液体金属の流動に関する研究(第4報、乱流の管摩擦係数)、日本機械学会論文集(B編)、第40巻、第332号、(1974)、pp.993-1002
- 24) Girshick, S.L., Kruger, C.H. : Experimental Study of secondary flow in a magnetohydrodynamic Channel, J.F.M., vol.170, (1986), pp.233-252
- 25) Lykoudis, P.S., Brouillette, E.C. : Magneto-Fluid-Mechanic Channel Flow, II. Theory, Phys. Fluids, Vol.10.No.5 (1967), pp.1002-1007
- 26) Hanjalic, K. and Launder, B.E. : A Reynolds Stress Model of Turbulence and Its Application of Thin Shear Flow, J.F.M., Vol.52, part 4, (1972), pp.609-638

- 27) Yoshizawa, A. : Statistical modeling of a transport equation for the kinetic energy dissipation rate, *Phys. Fluids*, Vol.30, No.3 (1987), pp.628-631
- 28) Laufer, J. : Investigations of Turbulent Flow in a Two-Dimensional Channel, NACA Report, 1053, (1951)
- 29) 足達宏之、日夏宗彦、神蔵輝男：薄い船の抵抗成分分離の実験的研究、船舶技術研究所報告、第19巻、第1号、(昭和57年)、pp.13-48
- 30) Rodi, W. : Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review-, IAHR STATE-OF-THE-ART PAPER, (1980)
- 31) 今井功、桜井明：電磁流体力学、岩波講座現代物理学、岩波書店、(1959)
- 32) Huges, W.F., Young, F.J. : The Electromagnetodynamics of Fluids, John Wiley & Sons Inc., (1966)
- 33) White, F.M. : Viscous Fluid Flows, McGraw-Hill, (1974), p.476
- 34) Abbott, I.H., Doenhoff, A.E. : Theory of Wing Sections, Dover, (1959)
- 35) 竹野忠夫：新しい燃焼技術(1)、機械の研究、第38巻、第2号(1986)、pp.246-250
- 36) 竹野忠夫：新しい燃焼技術(2)、機械の研究、第38巻、第3号(1986)、pp.367-372
- 37) R.I.Noorani and R.E.Holmes : Effects of Electric Fields on the Blowoff Limits of a Methane-Air Flame, *AIAA Journal*, Vol.23, No.9(1985), pp.1452-1454
- 38) R.I.Noorani and R.E.Holmes : Effects of Electric Fields on the Flame Propagation Velocity of Methane-Air Flame, *AIAA Journal*, Vol.24, No.1 (1986), pp.190-192
- 39) C.Berman, R.J.Gill, D.G.Keil and H.F.Calcote : Enhanced Soot Radiation using Electric Fields, PB-88-101811, (1987)
- 40) 田中秀憲、齊間厚：電界中の火炎の振舞い、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.289-291
- 41) 河野通方：拡散火炎のすす粒子に及ぼす電界の影響、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.68-81
- 42) 謝林、田村健次、杉山元、河野通方、畔野昭彦、染谷常雄：拡散火炎のすす生成に及ぼす高周波電界の影響、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.179-181
- 43) 定方正毅、原野安土、佐藤正之、佐賀井武：コロナ放電プラズマに於けるOHラジカルによるすすの酸化、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.67-69
- 44) 定方正毅：すす粒子の成長およびOHラジカルによる酸化の機構、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.10-18
- 45) E.R.Place and F.J.Weinberg : The Nucleation of Flame Carbon by Ions and the Effect of Electric Fields, 11th International Symposium on Combustion, (1967), pp.245-255
- 46) F.J.Weinberg : Electrical Aspects of Aerosol Formation and Control, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.307, (1968), pp.195-208
- 47) P.J.Mayo and F.J.Weinberg : On the Size, Charge and Number-Rate of Formation of Carbon Particles in Flames Subjected to Electric Fields, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.319, (1970), pp.351-371
- 48) R.T.Ball and J.B.Howard : Electric Charge of Carbon Particles in Flames, 13th International Symposium on Combustion, (1971), pp.353-362
- 49) S.K.Dayal and T.P.Pandya : Aerodynamic Structure of Counterflow Diffusion Flames with and without Electric Fields, *Indian Journal of Technology*, Vol.18, No.1 (1980), pp.17-24
- 50) M.Kono, K.Iinuma and S.Kumagai : The Effect of DC to 10MHz Electric Field on Flame Luminosity and Carbon Formation, 18th International Symposium on Combustion, (1981), pp.1167-1174
- 51) H.Tsuji : Counterflow Diffusion Flames, Progress on Energy and Combustion Science, Vol.8, (1982), pp.93-119

- 52) 浅川勇吉：電場による燃焼・蒸発・伝熱系の促進に関する考察（第2報）、第10回日本伝熱シンポジウム、(1973)、pp.285-291
- 53) 矢部彰：電場を利用した伝熱技術、日本機械学会、第600回講習会“先端技術と熱的制御”、(1985)、pp.15-29
- 54) N.Kaji, Y.H.Mori, Y.Tochitani and K. Komotori: Electrohydrodynamic Augmentation of Direct-contact Heat Transfer to Drops Passing through an Immiscible Dielectric Liquid; Effect of Field-Induced Shuttle Migration between Parallel Plane Electrodes of Drops, 7th International Heat Transfer Conference, Vol.5, (1982), pp.231 - 236
- 55) 浅川勇吉：アサカワ効果応用の小型ボイラの試験成績、エネルギー・資源研究会、第1回研究発表会講演文集、(1982)、pp.127-130
- 56) 土方邦夫、長崎孝夫、大矢浩史：電場による触媒燃焼の促進、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.295-297
- 57) 西田利雄、武石康夫、豊永肇：電場の火炎の流れに及ぼす影響、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.292-294
- 58) 菊地健太郎：EHD熱交換技術とその応用、機械の研究、第37巻、第12号(1985)、pp.1307-1313
- 59) 甲藤好郎、佐藤俊、西川兼康、水科篤郎、森康夫：伝熱学特論、養賢堂、(1984)、pp.248-257
- 60) 神沢淳：プラズマ流体工学とその応用、機械の研究、第39巻、第6号(1987)、pp.659-664
- 61) A.J.Harrison and F.J.Weinberg, Flame Stabilization by Plasma Jets, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.321, (1971), pp.95-103
- 62) I.Kimura and M.Imajo: An Experimental Investigation of an Arc-Heated Stirred Reactor, 16th International Symposium on Combustion, (1976), pp.809-815
- 63) 木村逸郎：乱流拡散燃焼過程に及ぼすプラズマジェットの効果、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.57-67
- 64) L.Tozzi and E.K.Dabora: Plasma Jet Ignition in a Lean-Burn CFR engine, 19th International Symposium on Combustion, (1982), pp.1467-1474
- 65) 吉田幸司、沖西覚、李冠東、斉間厚：プラズマジェットによる定容容器内の可燃混合気の着火に関する研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.212-214
- 66) J.E.Orrin, I.M.Vince and F.J.Weinberg: A Study of Plasma Jet Ignition Mechanisms, 18th International Symposium on Combustion, (1981), pp.1755-1765
- 67) F.B.Carleton, I.M.Vince and F.J.Weinberg: Energy and Radical Losses from Plasma Jet Igniters to Solid Surfaces, 19th International Symposium on Combustion, (1982), pp.1523-1531
- 68) 中山良男、那賀川一郎、木村逸郎：プラズマジェットによる燃焼促進機構の研究、第20回燃焼シンポジウム、(1982)、pp.250-252
- 69) 中山良男、木村逸郎、神藤正樹：放電による燃焼反応促進機構に関する研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.64-66
- 70) 村瀬英一、小野信輔、花田邦彦、仲原彰治、園田精一：プラズマジェット点火に及ぼす混合気初期圧力の研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.317-319
- 71) 相山義道：MHD（電磁流体）発電研究開発の動向、電気学会誌、第103巻、第12号(1983)、pp.1209-1216
- 72) 池田茂：MHD発電技術—研究開発の現状—、機械の研究、第35巻、第12号(1983)、pp.1331-1336
- 73) 粥川尚之、山崎初男：オープンサイクルMHD発電機の性能—新磁界配位による性能改善—、日本機械学会誌、第88巻、第802号(1985)、pp.1023-1028
- 74) 伏見康司編：実験物理学講座第30巻、プラズマ・核融合、共立出版(1979)
- 75) 林久治、中村敦子、長倉三郎：火炎中のOHラジカルの発光強度の外部磁場効果、第20回燃焼シンポジウム、(1982)、pp.28-30
- 76) 若山信子、林久治、小笠原一郎、福田健三：火炎中の活性種の発光強度の磁場効果、第22回燃焼シンポジウム、(1984)、pp.79-81

- 77) 若山信子、野副尚一、小笠原一郎、福田健三：燃焼反応の磁場効果と微量リンの検出、第23回燃焼シンポジウム、(1985)、pp.412-414
- 78) 上野照剛、江崎浩、原田耕介：磁場と燃焼反応、日本電子通信学会、技術研究報告、第85巻、第306号(1986)、pp.1-8
- 79) 上野照剛、江崎浩、原田耕助：触媒燃焼に及ぼす磁界の効果、電気学会、マグネティックス研究会資料、Mag-86、No.10-24(1986)、pp.9-27
- 80) 上野照剛、原田耕助：触媒による燃焼とガス流の制御について、日本応用磁気学会誌、第11巻、第2号(1987)、pp.445-448
- 81) S.Ueno and K.Harada : Effects of Magnetic Fields on Flames and Gas Flow, IEEE Transactions of Magnetics, Vol.25, No.5, Part 1 (1987), pp.2752-2754
- 82) 吉村克郎：燃料燃焼に利用した磁界処理装置の効果、燃料及び燃焼、第49巻、第3号(1982)、PP.241-254
- 83) D.Z.Chen, X.S.Han and L.Q.Jia : Influence of Electro-Magnetic Field on Flame Structure and Combustion Characteristic of Hydrogen and Hydrocarbon Fuels, 6th Hydrogen Energy Progress, Vol.3, (1986), pp.1045-1050
- 84) S.Sato : Measurement of Three-Dimensional Flame Temperature Fields by Holographic Interferometry and Computed Tomography, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion eds. by K.Iinuma, T.Asanuma, T.Ohsawa and J.Doi, Springer Verlag, (1987), pp.187-194
- 85) 佐藤誠四郎、熊倉孝尚：レーザー干渉法とCT法による火炎温度分布測定、日本機械学会論文集B編、第55巻、第511号(1989)、pp.841-844
- 86) S.Yamagisi : Multiple Species Concentration and Temperature Measurements in Hydrocarbon Flame by Pulsed Laser Raman, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion eds. by K.Iinuma, T.Asanuma, T.Ohsawa and J.Doi, Springer Verlag, (1987), pp.125-132
- 87) 見目善弘、阪田総一郎：磁気分離、NEC技報、Vol.37、No.9、(1984)、pp.62-70
- 88) 玉浦裕、桂 敬：フェライト化処理法とは、用水と排水、Vol.28、No.2(1986)、pp.147-154
- 89) 武富荒、近角聡信：磁性流体（基礎と応用）、日刊工業新聞社、(1988)
- 90) 平田悦朗：磁気利用における処理技術の実際と可能性、資源テクノロジー、No.233(1986)、p p.53-57
- 91) 中山善信：磁気による水処理装置、冷凍空調技術、Vol.34、No.403(1983)、pp.120-123
- 92) J.Chowdhury, F.J.Tanzosh : Magnetic Units, Chemical Engineering, January 23, (1984), pp.22-25
- 93) 神山新一、下飯坂潤三：磁性流体とその応用、日本機械学会誌、第88巻、第799号(1985)、pp.596-602
- 94) 富田幸雄：磁性流体とその応用(1)、機械の研究、第37巻、第10号(1985)、pp.1101-1107
- 95) 武富荒、近角聡信：磁性流体—基礎と応用—、日刊工業新聞社、(1988)
- 96) R.E.Rosensweig : Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, (1985)
- 97) R.E.Rosensweig : Fluid Dynamics and Science of Magnetic Liquids, Advances in Electronics and Electron Physics, Vol.48, (1979), pp.103-199
- 98) 磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書、文部省科学研究費補助金“総合研究(B)”、(1985)
- 99) 磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書、昭和61年度文部省科学研究費補助金“総合研究(A)”、(1987)
- 100) 磁性流体工学に関する調査研究分科会成果報告書、日本機械学会、(1986)
- 101) 日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)
- 102) 磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1987)
- 103) 磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)
- 104) Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Proceedings of the 4th International Conference on Magnetic Fluids, eds. by S. Kamiyama and J.Shimoiizaka, Vol.65, Nos.2 & 3 (1987)

- 105) 富田幸雄：磁性流体とその応用(2)、機械の研究、第37巻、第11号(1985)、pp.1249-1252
- 106) 熊谷直直、比気正：液体水素輸送船の補機に関する研究、船舶技術研究所報告、第19巻、第2号(1982)、pp.89-106
- 107) 武富 荒：磁性流体軸シールの進歩と高温超電導発電機への応用(1)、機械の研究、第40巻、第4号(1988) pp.481-486
- 108) 武富 荒：磁性流体軸シールの進歩と高温超電導発電機への応用(2)、機械の研究、第40巻、第5号(1988)、pp.587-590
- 109) 尾崎浩一：磁性流体シール、潤滑、第33巻、第12号(1988)、pp.895-899
- 110) 神山新一：磁性流体の力学と応用、日本機械学会、第627回講習会“ハイテックと流体工学”、(1986)、pp.111-122
- 111) 武富 荒：磁性流体軸シールの原理と応用(1)、機械の研究、第36巻、第1号(1984)、pp.18-22
- 112) 武富 荒：磁性流体軸シールの原理と応用(2)、機械の研究、第36巻、第2号(1984)、pp.264-268
- 113) 佐藤公男：磁性流体シールとその応用、機械の研究、第37巻、第2号(1985)、pp.253-259
- 114) 武富 荒：磁性流体シールの原理と進歩状況、日本機械学会関西支部、第160回講習会、(1988)、pp.103-114
- 115) 神山新一：磁性流体シール、潤滑、第27巻、第3号(1982)、pp.153-158
- 116) 岸田卓也、広山弘夫、古川義夫、新居勝敏：オイルミスト用磁性流体シールの開発、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.28-30
- 117) 井小萩利明：磁性流体シール特性の評価について、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.31-32
- 118) E.L.Resler, Jr. and R.E.Rosensweig : Magnetocaloric Power, AIAA Journal, Vol.2, No.8(1964), pp.1418-1422
- 119) E.L.Resler, Jr. and R.E.Rosensweig : Regenerative Thermomagnetic Power, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Vol.89, No.3 (1967), pp.399-406
- 120) H.Matsuki, K.Yamasawa and K.Murakami : Experimental Considerations on a New Automatic Cooling Device Using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, No.5 (1977), pp.1143-1145
- 121) 土方政行、中谷功、高橋務：磁性流体熱機関の試作とその考察、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.33-36
- 122) 加藤博明：廃棄物の物理的分別法における最近の動向、P P M、第16巻、第11号(1985)、pp.2-11
- 123) 薦岡孝則、江間俊一、佐藤敏人：抗水処理フェアライトを用いた水ベース磁性流体の特性と応用、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.49-51
- 124) 村上孝一：感温磁性流体とその応用-機械技術者のために-、機械の研究、第39巻、第7号(1987)、pp.763-769
- 125) 神崎勇二、山沢清人、石橋誠一、内藤光雄、中村浩：磁性流体による機械量の検出法、日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)、pp.22-24
- 126) 河田研治、谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法-Magnetic Float Polishing-、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1987)、pp.50-52
- 127) 加藤康司：浮子を用いた磁性流体研磨、日本機械学会誌、第92巻、第843号(1989)、pp.160
- 128) 梅原徳次、加藤康司：磁性流体研磨の研究(輝線の発生条件)、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.62-64
- 129) 山本豊寿、加藤康司、梅原徳次：磁性流体研磨の研究(砥粒の浮揚分布)、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.65-67
- 130) 神山新一：軸受・潤滑技術に対する電磁力の利用、機械の研究、第34巻、第1号(1982)、pp.201-206
- 131) R.E.Rosensweig : Magnetic Fluids, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.19, (1987), pp.437-463
- 132) 杉本光男：磁性材料の新しい応用、機械の研究、第39巻、第9号(1987)、pp.975-981

- 133) 壁井信之、土屋喜一：磁性流体を作用流体とした電磁制御式層流形比例増幅素子、日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)、pp.25-27

7. 船用機関への応用

7.1 超電導電動機

ここでは超電導電動機と発電機の構造について述べる。原動機を含めたシステム全体については7.4節で取扱う。

超電導電動機と発電機を組み合わせた超電導電気推進システムは、たとえ液体窒素温度で使える高温超電導体の応用が可能となり、冷却効率が格段に向上したとしても、運動エネルギーを電気エネルギーに変換する際のロス(5~25%)¹⁾のために従来のディーゼル主機直結推進システムに比較し効率が悪くなることは避けられない。しかし、SWATH(小水線面双胴船)、SES(表面効果船)などの新形式船舶では、超電導電気推進システムは機関、動力伝達系の配置の容易なこと、動力伝達効率が良いこと、また一般の商船においても機関室の重量、空間の減少によるペイロードの向上が期待できることから、総合的なエネルギー効率は現状の機関より向上する可能性が考えられる。また、将来、燃料電池など効率が良く、直接電気エネルギーの供給が可能な機関との組合せにより、現状の推進システムを大幅に越えるエネルギー効率を持つ推進システム実現の可能性も考えられる。

超電導電動機の研究開発は、おもに、米国、英国、日本で進められている。米国では、DTRC(David Taylor Reserch Center)が中心となり開発が進められ²⁾、1980年には、300kW、2,400RPMの超電導単極電動機および300kW、19,500RPMガスタービン駆動同発電機の開発を完了し、全長約20mのアルミ製実験船ジュピター2世号に搭載しテストを続けている。引き続き、2.25MW、1,200RPMの超電導電動機を開発、前記ジュピター2世号にて海上試験に成功したとしている。

英国では、国防省の後押しで、IRD社(International Reserch and Development Company Limited)が研究開発を進めており^{3),4)}、1975年には1MWクラスの超電導単極電動機と同発電機の試作を完了し、19

79年から15~25MWクラスの設計、製作に着手したが、財政的理由から開発のテンポは遅いようである。

日本では、1979年より日本船舶機器開発協会と住友重機械工(株)が共同で船用超電導単極電動機の開発に着手し、1982年に50PS級超電導単極電動機を開発し、現在、650PS、420RPMの同電動機の開発を進めているところである^{5),6),7)}。

〔超電導電動機の構造と問題点〕

常電導の直流機は、N、S両性磁極でトルクを発生する異極機であるが、開発が進められている超電導機は、いずれも一定方向、一定量の磁束によりトルクを生じる単極機である(Fig.7.1.1)。単極機は、現在、発電機としては、アルミニウム精練、粒子加速用強磁界電磁石や電磁ポンプの励磁電源など構造が簡単かつ堅固で効率の良い低電圧大電流源として利用されているが、電動機としての利用はほとんどないと思われる。超電導機の場合、単極機とせざるを得ないのは、異極機にすると電気子電流が時間的に変化するため、界磁コイルの超電導巻線に交流損失による発熱が生じ、クエンチの原因になるとともに、冷却のための損失が莫大となるのが大きな理由である。一般に4.2Kにおける1Wの発熱を冷却するためには500W~1kWの電力を必要とすると言われている。しかし、最近、低損失の交流超電導線の開発が伝えられ、異極機の開発の進展が期待される⁸⁾。

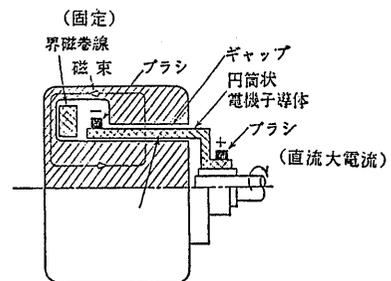
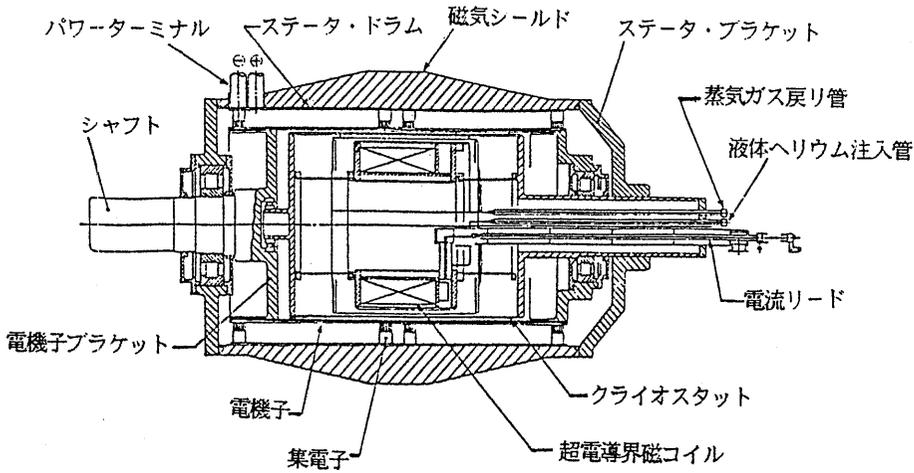
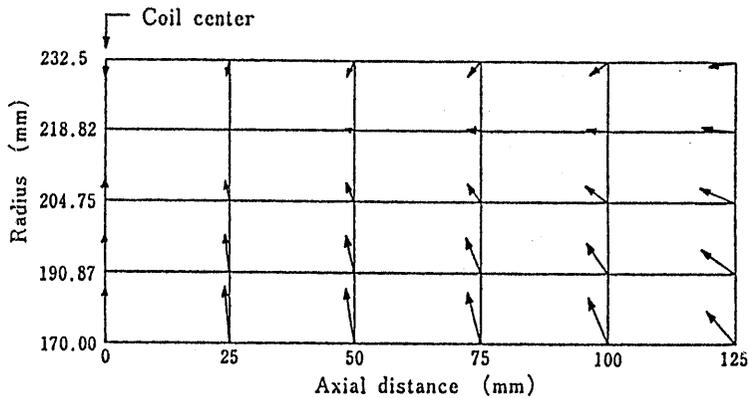


Fig.7.1.1 単極回転機

Fig.7.1.2に代表的な超電導単極電動機の構造図を示す⁵⁾。超電導巻線は界磁コイルに使用され、強磁界となるので鉄心を使用しないため、巻線に全トルクの反作用がかかり、超電導巻線が動きクエンチの原因となるため強固な機械的支持構造が必要となる。Fig.7.1.3に超電導コイルに働く電磁力分布の計算例を示

Fig.7.1.2 超電導単極電動機の構造⁵⁾Fig.7.1.3 コイル中の電磁力分布計算例⁵⁾

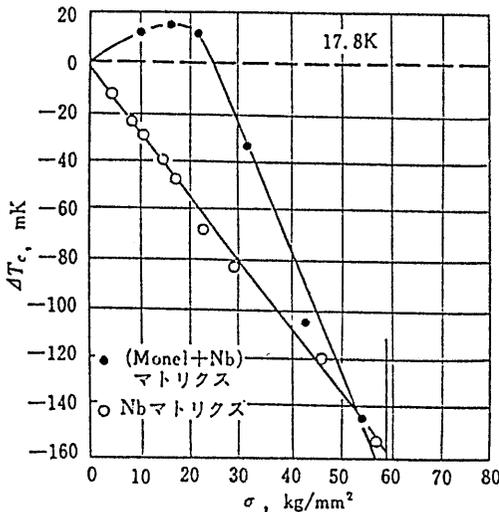
す⁵⁾。計算用コイルの諸元をTable 7.1.1に示す。巻線の半径方向の力は、コイル中心部で膨張力が最大となり、コイル最外層では圧縮力となる。巻線の軸方向には圧縮力が働き、このため巻線は軸方向に移動しようとする。

超電導巻線の機械的動きを抑えるため、コイル押さえによりコイルは軸方向に締めつけられるほか、エポキシ樹脂を含浸させながらコイルを巻き、成形後、エポキシ樹脂を硬化させる方法が用いられている。エポキシ樹脂により熱伝導率を低下させないため、巻きもどしを可能とするため、樹脂を含浸せず超電導線材に巻き張力を加えて巻く方法などもとられている。こ

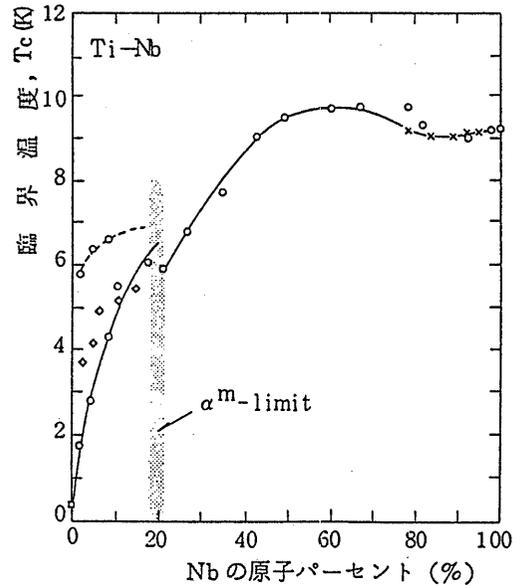
の場合、超電導線材の臨界温度 T_c は応力、歪を受けると低下するため、張力の大きさをどの程度にするかが重要な問題になる。Fig.7.1.4は Nb_3Sn 線材の引張応力による T_c の変化を示したものである¹⁰⁾。 $NbTi$ については詳しい定量的データは見あたらないが、 Nb_3Sn より若干変化は少ないようである。超電導線材は超電導材のフィラメントとCuなどをマトリックスとした複合構造であるため、液体ヘリウムで冷却されると、熱収縮差によりフィラメントに残留圧縮応力が働き T_c が低下する。従って、図に示すように、引張応力が加わると、 T_c はまず上昇し、残留歪がゼロの時最大と成ったのち低下する。

Table 7.1.1 計算用コイル諸元⁹⁾

項目		物性値
巻 枠	内半径 (mm)	170.0
	外半径 (mm)	175.0
コイル	内半径 (mm)	177.0
	外半径 (mm)	232.5
巻枠の弾性率 (Kgf/mm ²) (SUS304)		19400
コイルの弾性率 (Kgf/mm ²)		1910
巻枠の熱収縮率 (%)		-0.296
コイルの熱収縮率 (%)		-0.283
巻枠のポアソン比		0.290
コイルのポアソン比		0.345
コイル通電電流 (A)		691.1

Fig.7.1.4 引っ張り応力によるNb₃Sn線材のT_cの変化¹⁰⁾

超電導電動機では、超電導フィラメントとして、現在最も広く用いられているT_cが10K前後のNbTi (Fig.7.1.5) が使用され⁹⁾、マトリックスのCuあるいはCuNiの中にフィラメントを多数本埋め込んだ極細多芯複合導体と呼ばれる構造としている。超電導コイルは、液体ヘリウムにより4.2Kに冷却される。

Fig.7.1.5 NbTi合金のNb組成と転移温度⁹⁾

回転する電動子は、二分割のドラムタイプで、トルクチューブに接続されている。単極機であるために電動子には大電流の供給が必要である。高速で回転する電動子に最小のメカニカルロスと最小の電気的ロスで大電流の供給を可能とする集電機構の開発が最も困難な課題の一つと言われてきた。DTRC(米)では、ブラシに液体金属(NaK共晶合金)を使用し、電流密度750~1500A/cm²以上を満足している²⁾。NaKは常温で液体であり、集電には最も適当な性能を持っているが、空気、水と爆発的に反応するため密閉部で使用せねばならないという欠点がある。IRD(英)⁴⁾および日本⁷⁾では、金属メッキ炭素繊維ブラシを開発し、電流密度100A/cm²が可能と報告している。この他、炭素繊維強化Cu-Sn合金、ガリウム・インジウム共晶合金を用いたブラシの集電特性が報告されているが、いずれも寿命、信頼性については、未だ十分とは言えないようである。

7.2 超電導コイルによるエネルギー貯蔵

超電導貯蔵(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) システムとしてはTable 7.2.1¹¹⁾にかかげるように、貯蔵効率がよく、大容量化が可能なこと、さらに応答性が良いこと等の特徴を有する。超電導コイルによりエネルギー貯蔵は電磁エネルギーで行われる。コイル中に流れる電流は磁界を生じ、この電流と磁界によってエネルギーが蓄積される¹²⁾。コイルのインダクタンスを L (H)、流れる電流を I (A)とすれ

ば、コイル内に蓄えられるエネルギー U (J)は

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7.2.1)$$

常電導コイルは純粹のインダクタンスではなく、抵抗 R (Ω)を含むので、初期電流 I_0 の電流は時間 t (s)と共に

$$i = I_0 \exp\left[-\frac{t}{(L/R)}\right] \quad (7.2.2)$$

Table 7.2.1 各種エネルギー貯蔵方式の比較

貯蔵方式	効率 (%)	エネルギー密度 (kWh/m ³)	建設コスト		注意
			C_p (\$/kW)	C_s (\$/kWh)	
揚水	65~70	0.3 ($h=100$ m)	90~160	2~12	純揚水、ピークシェービング現存
バッテリー(鉛)	75~80	30	70~80	65~110	360 GJ の概念設計
新型バッテリー	75~80	//	60~70	20~60	
フライホイール	85		65~75	100~300	小型に適する
圧縮空気	70	1	100~210	4~30	検討中
水素貯蔵	~20	2,300	500~860	6~15	
超電導エネルギー貯蔵	93~97	2	50~60	30~140	10,000 MWh 概念設計

全建設コスト (\$/kW) = $C_p + C_s \cdot T$

の如く減衰していく。また、 R によるエネルギー消費 U_Q (J)は

$$U_Q = i^2 R \quad (7.2.3)$$

となる。エネルギー貯蔵用で製作された最大規模のコイルはワシントン州タコマ変電所に設置された30MJのものである¹³⁾。SMESの基本的概念設計は1976年に発表されたウインソコシン大学のものである。これをもとに、アメリカ電力研究所(EPR I)や日本のNEDO等で大規模な5GWhクラスの概念設計がなされた¹⁴⁾。Fig.7.2.1はその模式図である。地下100m~300m程度の硬質岩盤に直径100~400mのコイルを3個ほど構築するものがNEDO案である。

貯蔵コイルは直流であり、交流系統から電力を導入するためにはサイリスタが必要となる。現実的なSMESの回路図をFig.7.2.2に示す。

SMESで解決すべき重要課題として、コイルの電磁力を如何に閉じ込めるかがある。超電導コイルに大

きな電磁力が作用すると、コイルの膨張力となって現れる。この力を支持する母体として硬質岩盤が要求される¹¹⁾。次に、磁界シールドの問題がある¹⁵⁾。生体系や電気機器系に与える影響を防ぐため、シールドコイルや強磁性体のシールド板の設置等が考えられている。

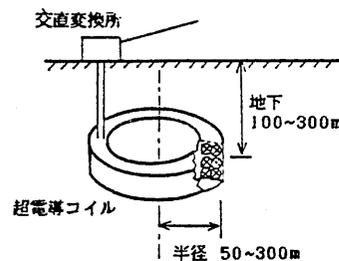


Fig.7.2.1 超電導エネルギー貯蔵装置の概要

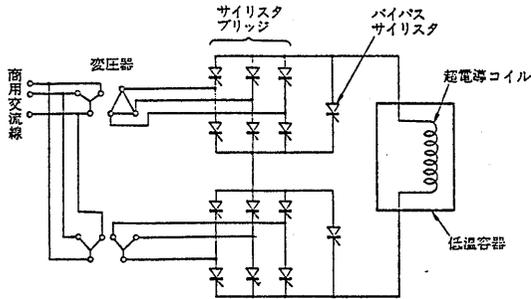


Fig.7.2.2 代表的なSMESの回路図

7.3 軸受等荷重支持への応用

7.3.1 磁気軸受

永久磁石や電磁石の磁気力を利用した磁気軸受は、非接触で摩擦がなく、また、潤滑油が不用であるため真空、低温、高温などの特殊環境で使用が可能であることなどから理想的な軸受として期待されてきた。

空間における剛体は、並進運動及び回転運動それぞれ3自由度の合わせて6自由度を持ち、磁気軸受は回転軸回りの運動を除く5自由度を磁気力により制御し、非接触で支持しようとするものである。

磁気力の利用の仕方としてFig.7.3.1に示す3形式が考えられる^{16),17)}。同極性の反発力を利用する場合(図中の形式I)は、反発力が磁極間の距離が大き

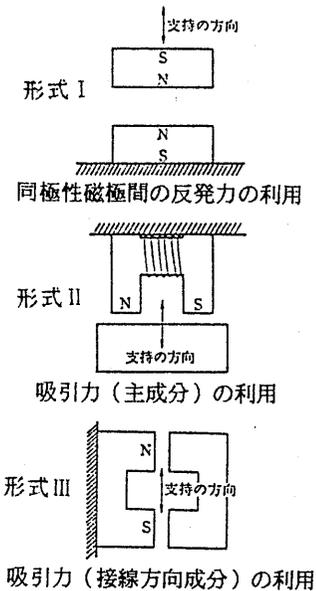


Fig.7.3.1 磁気力の利用¹⁶⁾

なると減少することから起磁力を制御しなくても反発力の働く方向に関しては安定である。

異極性の吸引力を利用する場合(形式II)は、吸引力が磁極間の距離が小さくなるとますます大きくなるため無制御で吸引支持を行うことは不可能である。

形式IIIの場合は、磁極面と平行な方向に働く力が釣合位置への復元力となるから、この方向に関しては磁力制御を必要としない。従って、形式位置と形式IIIを組み合わせれば制御機構を必要としない磁気軸受が実現できそうであるが、原理的に不可能なことが知られている(Eranshawの原理¹⁸⁾)。

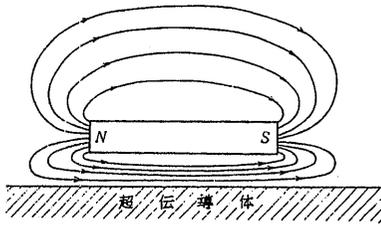
このように、磁気力によって回転体の運動を安定に支持するには、制御機構が必須なために装置が複雑、高価になることや、エネルギー消費が比較的大きいなどの欠点などから実用例は少なかった。近年、エレクトロニクスの発達や高エネルギー積の希土類磁石の出現により、これらの欠点が克服されつつあり、人工衛星の姿勢制御用フライホイールやジャイロ、ターボ分子ポンプ、エネルギー貯蔵用フライホイール、工作機械用スピンドルなどへの応用がすすめられ¹⁹⁾、本格的な実用化の時代に入ったといわれている。

超電導の磁気軸受への応用としては、次の2点が考えられる。

- ① 常電動電磁石の代わりに超電導電磁石の強力な電磁力を利用する。
- ② 超電導の持つマイスナー効果(Meissner effect)を利用する。

前者は、超電導電磁石の強力な吸引力を利用するもので、原理的には常電導を用いた磁気軸受と変わらないが、エネルギー消費が少なく、かつ小型で高い負荷能力を持つ軸受が可能となる²⁰⁾。従って、超大型、高速船や特殊船舶の軸系や大形の超遠心分離機、大形の膨張タービンなどへの応用が考えられる。しかし、軸受を安定化するためには、励磁電流を制御する必要があるため、交流損失の少ない超電導線材の開発が必須となる。

超電導体は、超電導状態になると外部磁場がある値以下の時、磁場を完全に外部に追い出してしまうマイスナー効果を示す。これは、比透磁率 μ が零の完全磁性材料であるといえる。Fig.7.3.2はその様子を示したもので、超電導体の表面に磁界の侵入を食い止めるように遮蔽電流が流れ、超電導体は磁石と反発する²¹⁾。従って、超電導体の上に磁石を浮かすと、重力に対して釣り合う位置で安定するために、磁場の大きさを必

Fig.7.3.2 マイスナー効果による磁気力²¹⁾

ずしも制御する必要がない。将来、常温での超電導材料が実現した場合、センサや磁力制御装置の不用な磁気軸受が可能となり、計測器、民生機器などの小型軸受として大量に使用される可能性がある。

マイスナー効果の既存の軸受への応用として、転がり軸受の転動体（ボール）の保持器に超電導体を用い、内・外輪には非磁性材を用いて外輪内周の一部に磁石を埋め込み、マイスナー効果により保持器を浮上させ、さらに磁化ボールを用い、ボールと保持器の接触をなくし、この箇所での焼付などの損傷をなくそうとする試みがある²²⁾。

7.3.2 磁気浮上

磁気浮上は、同極性の磁極間の反発作用あるいは、異極性間や磁石と強磁性体間の吸引力を利用して行うことが可能である²³⁾。財団法人鉄道総研で開発を進めている超電導磁気浮上鉄道（JR方式、時速500km）は反発力を利用するものであり²⁴⁾、HSST（日本、時速300km）及びトランスラピッド（西独、時速400～500km）は吸引力を利用するものであることは良く知られている。JR方式は、電磁誘導による誘導反発式で、車両側に超電導磁石を使用し、高速になる程反発力が増し、時速百キロ以上では、10cm程度の浮上力がえられるとしている。定速時には、補助支持装置が必要であるが、特別な制御を必要としない。

吸引力を利用するHSST、トランスラピッドは、常電導磁石を使用し、浮上高さは約1cmと少ない。停車中も浮上力が得られるが、ギャップセンサーにより常に浮上高さを測定し、電磁力を制御する必要がある。実用化に向けては、トランスラピッドがJR方式に比べ一歩進んでおり、1989年末には全てのテストを終え、現在、西独国内で実験線計画が検討されていると言われている²⁵⁾。しかし、ヨーロッパに比べ、地盤の状態が悪く、地震の多発する日本では、ガイドウエーの精度維持、超高速での走行安定性の面から超電導磁石を

利用し、10cm程度の浮上高さが必要と考えられている。

7.3.3 フライホイールへの応用

エネルギー貯蔵用として設計されたフライホイール（FW）は貯蔵したエネルギーを放出するまで、出来るだけ損失なしに保持する必要がある。損失のなかで大きな割合を占めるのに支持損失がある。この損失を小さくするため磁気軸受が用いられる²⁶⁾。

Fig.7.3.3はアメリカのCharles Stark Draper Lab.製のフライホイールで、10 lbの重量、25,000rpmの最大回転数を有し、2個のラジアル磁気軸受と、上部に1個のスラスト磁気軸受を配置している。磁気軸受に必要なエネルギーは次式にて与えられる²⁷⁾。

$$Power = aM (K_H B^n f + K_E B^2 f^2) + I^2 R \quad (7.3.1)$$

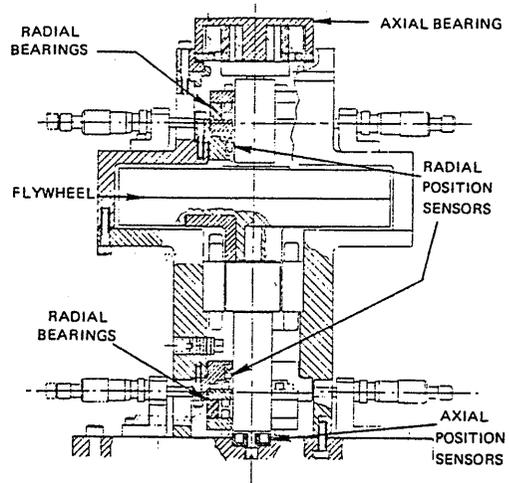


Fig.7.3.3 磁気支持によるフライホイール

ここで、 aM は磁束によって影響を受ける制御系の質量、 B は磁場の強さ、 f は周波数、 K_H はヒステリシス係数、 K_E は渦電流係数、 n は材料によって決まる定数、 I は電流、 R は抵抗値である。これより、ローターの重量をできるだけ小さくすることは支持の面からも有利となる。また、磁気軸受で問題となるのが安定性である。Earnshawの定理からパッシブな三軸の磁気支持のうち少なくとも一軸が不安定となり、この軸をアクティブ制御する必要がある。この動的な制御系の研究が磁気軸受の応用に対する重要な問題となっている²⁸⁾。

7.4 超電導電気推進とその原動機

7.4.1 はじめに

超電導回転機本体の構造に関しては7.1節に述べたので、本節では原動機を含めた電気推進システムについて述べる。なお、電気推進全般にわたっては文献^{29),30)}に詳しく述べられている。

電気推進方式³¹⁾は、原動機による直接推進方式に比して操縦性、トルク特性、応答性などの性能や機能の

良さ、機器配置の自由度の高さ、推進システムの高信頼性などの利点を持つ。一方、装置の重量・容積の増加、エネルギー伝達効率の低下、設備費が高価格であるという欠点を持っている。このため、近年電気推進の適用例は作業船、砕氷船などの特殊船に限られ一般商船への適用例はほとんどない。近年建造された電気推進船の船種と隻数をTable 7.4.1³²⁾に示す。

Table 7.4.1 電気推進船の建造傾向³²⁾

建造年	作業船						砕氷船	旅客船 フェリー RO/RO	合計	
	掘削	潜水	クレーン	浚渫	ケーブル	調査				その他
1981	2	1			1	1	4	1	1	11
1982	11	2		1		2	7	2		25
1983	8	3			1	1	3	2	1	19
1984	6	4	1		2		3	2		18
1985	1	1	4	3			1		1	11
1986		1	1	1	2	4	3	6	4	22
合計	28	12	6	5	6	8	21	13	7	106

超電導電気推進³³⁾は、原理的には常電導電気推進と同じである。しかし、発電機・電動機を超電導化することによりこれら回転器が小型化、軽量化、高効率化されるため、機関室スペースも小さくなり従来の電気推進システムの総合的な効率が向上することが期待されている。さらに、回転機械が大幅に小型化、軽量化されるので電気推進システムが適用可能な船舶の種類も増えると考えられている。例えば水中翼船、半没水型双胴船、表面効果船等の特殊形状を有する高速船舶、または大型砕氷船、砕氷LNG船、砕氷大型タンカー等の大出力を要し、且つ、高度の操船性が求められる排水量型船舶がある。

電気推進船の原動機は、近年建造されているものについてはほとんどディーゼル機関に限られていると言っている。これは、ディーゼル機関が非常に高い熱効率を有しているからであろう。その他の在来型原動機の内、蒸気タービンはディーゼル機関に換装されている^{34),35)}。ガスタービンは小型軽量ではあるが現状では熱効率が低いため、調査時に静粛さを要求される試験艦³⁶⁾やガス燃料とA重油を併用する石油生産試験船³⁷⁾に使用されている程度である。一方、新形式の電気推進用原動機として、高効率かつ直接発電が可能な燃料

電池が考えられる。これは近年研究開発が盛んに行われており、将来電気推進船に応用される可能性がある。

回転機器の超電導化により電気推進の適用範囲が拡大される可能性があるが、発電に必要な原動機も含めた超電導電気推進システムとして検討しておく必要もあろう。推進システムの原動機の決定に当たっては燃料経済性が大きな比重をしめる。しかし、適用船種によっては熱効率のほか推進システムの重量、容積も選定の重要な因子になる場合も考えられる。そこで本稿ではディーゼル機関、ガスタービン機関、燃料電池の開発状況およびその重量・容積に関する調査をするとともに超電導電気推進システムの重量、容積に関して簡単な比較検討を行った。以下にその結果を述べる。

7.4.2 ディーゼル機関とガスタービン機関の現状

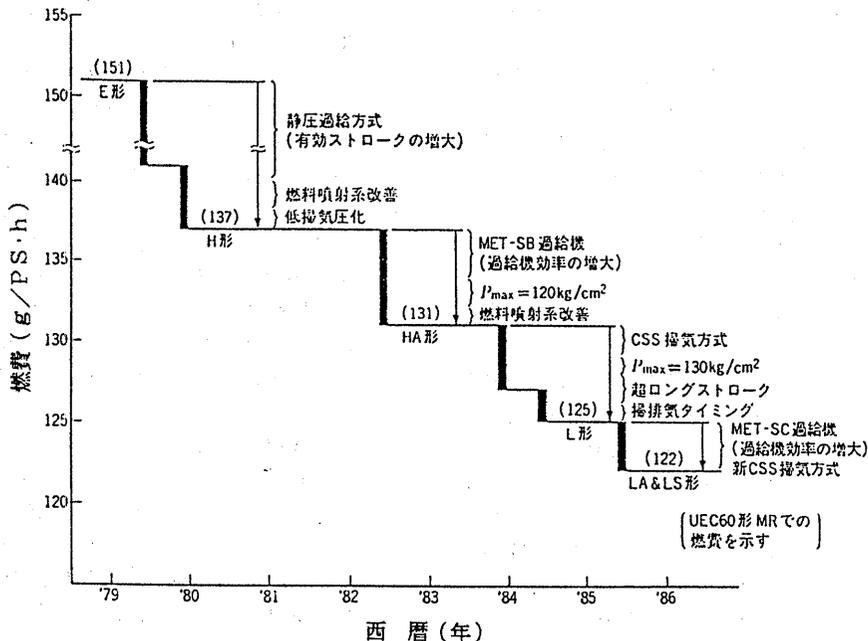
Table 7.4.2³⁸⁾に最近建造された2000 t以上の商船の隻数および搭載機関の種類およびその合計出力を示すが、搭載機関の大半がディーゼル機関である。石油ショック以降、総合的な低燃料消費化を計るため、プロペラ効率の優れている大直径低回転プロペラが多く採用されるようになり、2サイクル低速ディーゼルに関しては、この低回転運転に適する超ロングストローク機関の開発が盛んに行われた。同時に熱効率を向上

Table 7.4.2 建造隻数と搭載機関出力の傾向³⁸⁾

建造年		低速ディーゼル	中高速ディーゼル	蒸気タービン
1982	隻数	684(61.6%)	425(38.2%)	2(0.2%)
	出力(BHP)	7969973(74.5%)	2671074(25.0%)	64000(0.5%)
	出力/隻	11652	6284	32000
1983	隻数	588(58.3%)	411(40.7%)	10(1.0%)
	出力(BHP)	6832367(70.3%)	2593103(26.7%)	301000(3.0%)
	出力/隻	11619	6309	30100
1984	隻数	659(65.4%)	341(33.9%)	7(0.7%)
	出力(BHP)	7230399(76.0%)	2058798(21.6%)	228200(2.4%)
	出力/隻	10972	6038	32600
1985	隻数	650(73.1%)	238(26.8%)	1(0.1%)
	出力(BHP)	6840669(81.1%)	1548863(18.4%)	40000(0.5%)
	出力/隻	10524	6508	40000
1986	隻数	599(66.1%)	306(33.8%)	1(0.1%)
	出力(BHP)	7335020(79.0%)	1873526(20.2%)	75000(0.8%)
	出力/隻	12245	6122	
1987	隻数	334(63.7%)	190(36.3%)	0
	出力(BHP)	4157771(74.6%)	1414290(25.4%)	0
	出力/隻	12448	7443	0

するため、筒内最高圧力の増大、燃料噴射圧の高圧化等による熱発生改善、過給機の効率改善、掃気効率の改善等多くの開発が行われ、熱効率が50%を越す機

関が出現した。Fig.7.4.1³⁹⁾にその過程の1例を示す。また、悪化する低質燃料油対策も施され、700cst(50℃)の燃料の使用も可能とされている。

Fig.7.4.1 ディーゼル機関の燃料消費率低減の過程の例³⁹⁾

4サイクル中速ディーゼルは、従来から多数シリンダで小型高出力であること、減速機を介して最適な回転数が選択可能なこと等の利点の反面、低質油が使用できない、メンテナンスが複雑という欠点を有していた。しかし、最近では、大口径小数シリンダ長ストロークの機関が開発され^{40),41)}、燃料消費率、低質油使用性も2サイクル低速ディーゼル機関並になってきた。省メンテナンスも重視され、例えば排気弁メンテナン

ス間隔7000~10000時間、使用寿命2万時間等と大幅に省メンテナンス化が進められている。これらは最近大型旅客船（電気推進）や大型カーフェリーの主機として採用されている⁴²⁾。

Table 7.4.3⁴³⁾にディーゼル機関の出力、概略寸法、重量の例を示す。Fig.7.4.2~7.4.4に2サイクル低速、4サイクル中速ディーゼル機関の燃料消費率、連続最大定格出力にたいする比重量、概略寸法から計算した比容積の例を示す。

Table 7.4.3 ディーゼル機関の寸法と重量の例⁴³⁾

サイ クル	型 式	シリン ダ 数	出 力 kW(MC)	燃費率 g/kWh	回転数 rpm	重 量 ton	概略寸法 LxWxH (m)	比重量 kg/kW	比容積 l/kW
2	L90MC	4	13760	171	74	775	9.4x7.9x13.6	56.3	73.7
		12	41280			1835	23.7x7.9x13.6	44.5	62.2
	L70MC	4	8320	172.8	95	390	7.3x6.1x10.6	47.0	56.6
		8	16640			655	12.3x6.1x10.6	39.4	47.7
	L60MC	4	6120	174.1	111	260	6.3x5.2x9.1	42.5	48.8
		8	12240			435	10.5x5.2x9.1	35.7	40.7
	L50MC	4	4240	175.5	133	160	5.2x4.4x7.6	37.7	40.9
		8	8480			270	8.8x4.4x7.6	31.8	34.2
	RTA62	7	10210	169.3	81	385		37.7	
	UEC75LS	4	11770	165	84	436	7.6x7.6x13.2	37.0	64.8
		8	23535			784	12.3x7.6x13.2	33.3	52.4
	UEC60LS	4	7060	166	100	286		40.5	
		8	14120			518		36.7	
	UEC52LS	4	5300	166	120	182		34.3	
		8	10600			330		31.1	
	S26MC	4	1460	177	250	28.5	3.3x3.1x4.8	19.5	33.6
8		2920			51.3	5.3x3.1x4.8	17.6	27.0	
4	L58/64	6	7290	174	428	134	9.7x3.5x5.2	18.4	23.5
		9	10935			186	12.9x3.6x5.2	17.0	21.5
	L40/45	6	3630	181	600	59	7.1x2.6x4.6	16.3	22.7
		9	5445			82	9.3x2.6x4.7	15.1	20.5
	PC40L	5	6075	173	350	127	9.6x3.6x5.6	20.1	31.8
		9	10935			216	13.5x3.6x6.0	19.8	26.7
	PC20L	6	3642	184	475	53.2	7.3x2.0x4.2	14.6	17.1
		9	5463			76.6	9.5x2.0x4.2	14.0	14.8
	PA6L-280	6	1770	200	1000	11.7	3.9x1.4x2.7	6.6	6.2
		9	2655			16.7	5.1x1.4x2.7	6.3	7.4
	PA6V-280	12	3540	200	1000	18.8	3.7x1.8x2.5	5.3	4.6
		20	5900			31.4	5.6x1.8x2.5	5.3	4.2
	PA6L-280CL	6	1770	186	750	15.4	3.9x1.4x2.6	8.7	7.7
		9	2655			19.5	5.3x1.6x2.7	7.3	8.8
	PA6V-280CL	12	3540	186	750	20.9	4.3x1.9x2.9	5.9	6.8
		18	5310			32.1	6.0x2.0x3.0	6.0	6.6
	PA6-280BTC	12	4850	238	1050	23.0	3.7x1.8x2.6	4.7	3.5
		20	8100			42.0	5.5x1.8x2.6	5.2	3.4
	PA4V-200VG	8	1080	223	1475	4.4	2.0x1.6x1.9	4.1	5.2
		18	2430			8.7	3.4x1.7x1.9	3.6	4.5
	M220L-EN	6	735	195	750	7.2	3.2X1.2X2.1	9.8	11.0
	M220AL-EN	6	882	197	1000	7.2	3.2X1.2X2.1	8.2	9.1
	6SH-ST	6	441	218	1600	2.6		5.9	
	S6R2-MTK	6	588	201	1450	3.9	2.6X1.2X1.8	6.6	9.6
S6MB-MTK-2	6	220	227	2600	0.9	1.5X0.8X1.2	4.0	6.5	

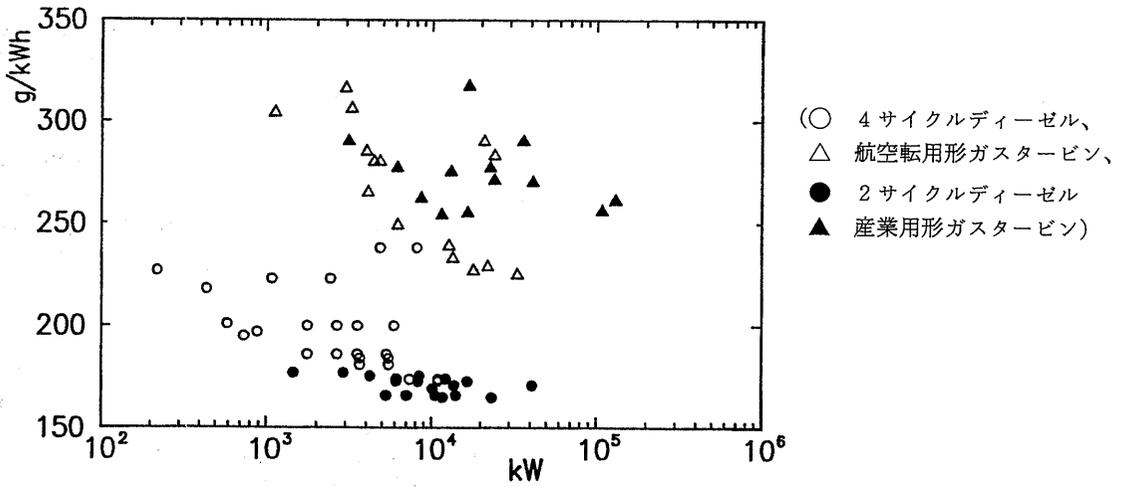


Fig.7.4.2 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と燃料消費率

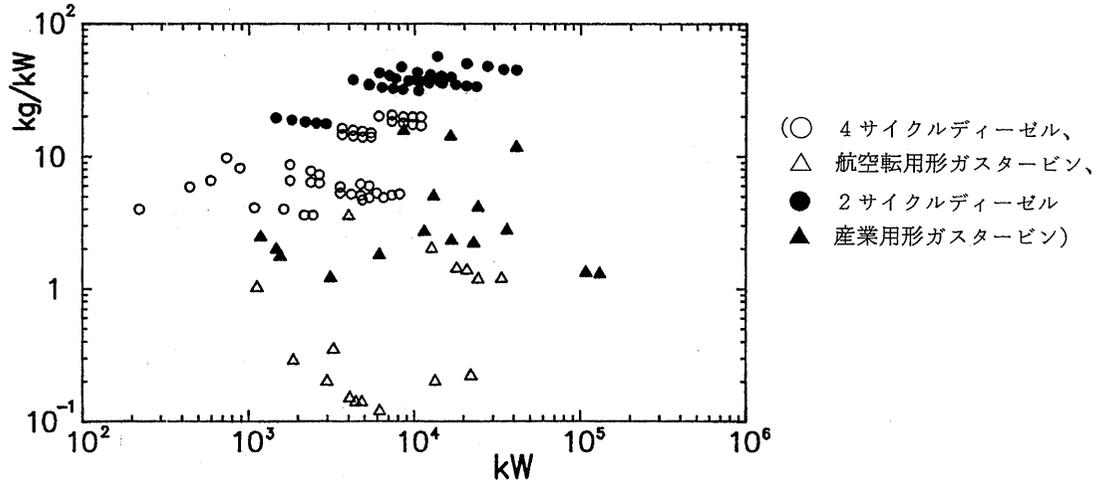


Fig.7.4.3 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と比重量

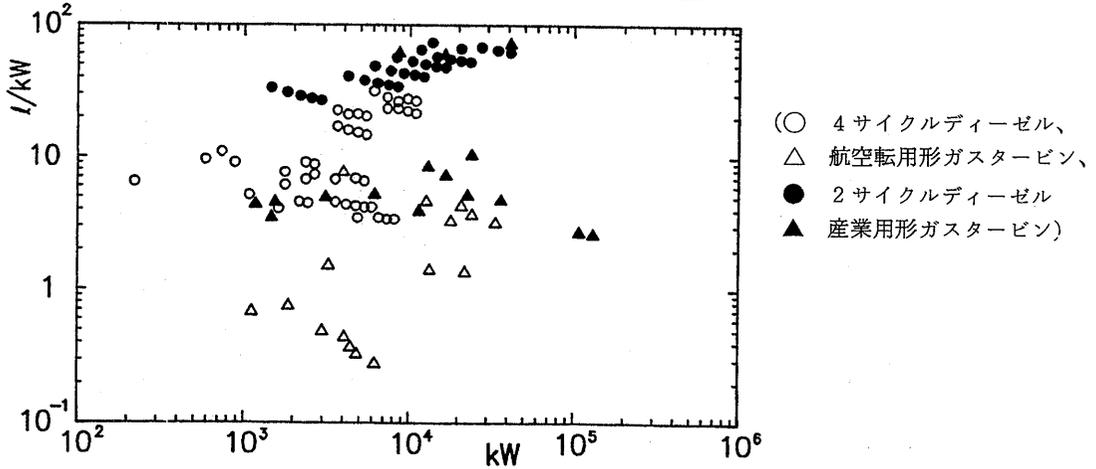


Fig.7.4.4 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と比容積

大型商船用主機としてのガスタービンは1970年代に、C重油燃焼が可能なGE社の産業形MSシリーズガスタービンがコンテナ船等15隻（このうち10隻が電気推進）、航空転用ガスタービンFT4が大型フェリー「Finnjet」に搭載されたが、その後の石油ショックを契機としてすべてC重油が使用可能でかつ熱効率の高いディーゼル機関に換装されている⁴⁴⁾。艦艇用主機には航空転用ガスタービンが、その軽量、大出力、高機能性、静粛性、整備の省力性等の特徴をいかして多く採用されており、現在世界で760隻以上、ガスタービン2700台以上、全出力38MPSが使用されている⁴⁵⁾。

単純サイクルガスタービンの熱効率向上は、高温高圧化、高圧力比化によって達成されるが、最近では航空用⁴⁶⁾においては、タービン入口温度1400℃、圧力比30～36となっている。産業用では、1260℃、圧力比14、熱効率32%以上のものが^{47),48)}が開発されている。これらの高温化は、耐熱耐食超合金材料およびその製法（一方向凝固翼、単結晶翼等）、高性能冷却法（インピンジ冷却とフィルム冷却）、熱遮蔽セラミックコーティング、耐食性合金コーティング等の技術開発に負うところが大きい。現在、さらに1500℃以上の高温化

をめざしてセラミックス、炭素/炭素複合材料等の研究が進められている。セラミックスは無冷却で高温で使用に耐えるが脆性等に問題があり、製造・検査技術等の確立が課題である^{49),50)}。自動車用セラミックスガスタービンが1370℃レベルの使用をめざして研究開発中である。また、発電用では産業用ガスタービンの1150℃クラス（51),52)を使用したLNG焚き複合サイクル発電で総合発電効率47%(LHV)が達成されている。

ガスタービンでは、灯油、軽油やLNG等の良質な燃料を使用する。重構造産業形においてはC重油も使用されるが⁵³⁾、C重油中に含まれるヴァナディウムが超合金を腐食するので、対腐食添加材を必要とすることと、使用温度が900℃レベルと低く押さえられている。したがってメンテナンス、熱効率の点に欠点がある。今後船用ガスタービンの経済性向上のためにC重油の使用を可能とするためには、セラミックス等の新材料を使用し、防食添加材が不用で、使用温度レベルの高いガスタービンの開発が必要であろう。

Table 7.4.4⁵⁴⁾に現在使用されている産業用・船用ガスタービンの出力、概略寸法、重量等の例を示す。

Table 7.4.4 ガスタービン機関の寸法と重量の例⁵⁴⁾

機種	出力 kW	燃費率 g/kWh	圧力比	タービン入 口温度℃	回転数 rpm	重量 ton	概略寸法 LxWxD (m)	比重量 kg/kWh	比容積 l/kWh	
航空 転用 形	501-KF	3230	306	9.3	982	13820	1.13	2.7x1.35x1.35	0.35	1.52
	570-KF	4808	280	11.2	1077	11500	0.65	1.86x0.9x0.96	0.14	0.33
	571-KF	6183	249	12	1077	11500	0.68	1.89x0.9x0.96	0.12	0.28
	TF15	1119	304	13.3		3000	1.14	1.45x0.88x0.6	1.02	0.68
	TF25	1865	377	6.5	970	14500	0.54	1.4x0.88x1.13	0.29	0.75
	TF40	2984	316	8.4	1060	15400	0.60	1.47x0.88x1.13	0.20	0.49
	LM500	4066	265	14.3		7000	0.59	2.2x0.9x0.9	0.15	0.44
	LM1600	13428	233	21.5	1150	9000	2.72	5.2x1.8x2.0	0.20	1.39
	LN2500	22007	229	18.8	1170	3600	4.76	6.7x2.1x2.1	0.22	1.34
	IM400	4439	280	9.3	1230	13820	0.6	2.3x0.9x0.8	0.14	0.37
	IM5000	33570	225	30	1160	3600	40	8.9x3.5x3.4	1.19	3.16
	TM3B	20877	290	10.3	950	5660	28.6	9.2x2.6x3.7	1.37	4.24
	TM3C	24225	283	11	1050	5660	28.6	9.2x2.6x3.7	1.18	3.85
	RM1C	3982	285	12.5	1050	3425	14.1	5.6x2.1x2.6	3.54	7.68
SM1A	12750	239	18.9	1050	5220	25.5	7.5x2.3x3.4	2	4.6	
SM1C	18000	227	21.8	1200	5500	25.5	7.5x2.3x3.4	1.42	3.26	
産 業 用 形	M1A-02	1177	377	7.8	950	1800	2.88	2.25x1.48x1.55	2.45	4.39
	M1A-05	1471	372	9.1	1000	1800	2.91	2.25x1.48x1.55	1.98	3.51
	KG2	1549	384	3.9	825	825	2.7	2x1.6x2.2	1.75	4.55
	KG5	3111	290	8.7	850	850	3.76	3.7x1.9x2.2	1.21	4.97
	MF-111	11510	254	14	1250	9383	31	6.7x2.6x2.6	2.69	3.9
	MW-151	22820	277	11		6543	50	10.1x3.3x3.5	2.2	5.1
	MW-251	36300	290	11		4894	100	12.4x3.7x3.7	2.75	4.7
	MW-501	107900	256	14		3600	143	11.6x5.7x4.4	1.33	2.7
	MW-701	130400	261	14		3000	170	12.5x5.2x5.2	1.3	2.6
	SB30	6150	277		1000	9410	11	4.1x2.1x3.7	1.8	5.2
	SB60	13070	275		1000	5680	65	7.4x3.3x4.5	5.0	8.4
	SB90	16810	317		927	5471	39	7.3x3.2x5.2	2.3	7.2
	SB120	24170	271		1000	100	100	9.4x4.4x6.0	4.1	10.3
	MS3002R	8600	262	6.9	900	6500	134	9.45x6.1x9.15	15.6	61.2
MS5002RA	16540	255	8.2	900	4670	234	11.9x7.3x11.3	14.1	59.3	
MS7002R	41310	270	8.4	900	3020	458	18.6x11.9x13.4	11.7	71.8	

なお、表中のMSシリーズMS3002R等は1970年代ガスタービン船に搭載された再生形ガスタービンの例である⁵⁵⁾。Fig.7.4.2~7.4.4に燃料消費率、比重量、比容積をディーゼル機関と比較して示す。

7.4.3 燃料電池⁵⁶⁾

燃料電池は電解質によって電極反応、作動温度、電池材料等が基本的に異なるため電解質によってよく分類される。Table 7.4.5⁵⁷⁾にその典型例としてアルカリ型、りん酸型、熔融塩型および高温固体電解質型の特徴を要約したものを示す。

燃料の典型的なものは水素で、化石燃料を利用する場合は電極反応が容易に進行する水素に改質装置等を利用して変換する。セルの電圧は普通1V以下なので、実際に利用するには必要な電圧になるように多数直列に配列しなければならない。このセルを積層したものをスタックと呼んでいる。スタックにするにはガスの均一な供給、セルの冷却、電流の取り出しなど技術的な課題がある。燃料電池から得られる電流は直流なので一般電力にするには直交変換装置が必要になる。

以下に開発状況を簡単に述べる。

Table 7.4.5 各種燃料電池の種類と特徴⁵⁸⁾

項目	低温燃料電池		高温燃料電池	
	アルカリ水溶液型	りん酸型	熔融炭酸塩型	固体電解質型
電解質	水酸化カリウム (KOH)	りん酸 (H ₃ PO ₄)	炭酸リチウム (Li ₂ CO ₃) 炭酸カリウム (K ₂ CO ₃)	安定ジルコニア (ZrO ₂ +Y ₂ O ₃)
イオン導電種	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
状態	液体	液体	液体	固体
使用状態	マトリックスに含浸	マトリックスに含浸	マトリックスに含浸 又はペースト化	薄円筒状
作動温度	50~150°C	170~220°C (常圧~10気圧)	600~700°C (常圧~10気圧)	~1000°C
比抵抗	~10Ωcm	~1Ωcm	~0.1Ωcm	~10Ωcm
抗腐食性	中程度	強	強	弱
電極部	高価な触媒 (代表例) 燃料極反応 酸化剤極反応	必要 (白金) H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻ 1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ O	不要 H ₂ +CO ₃ ²⁻ → H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻ 1/2O ₂ +CO ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻	不要 H ₂ +O ²⁻ → H ₂ O+2e ⁻ 1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻
電材	合成樹脂等 比較的制約少ない	合成樹脂等 比較的制約少ない	セラミック等 耐久性有	セラミック等 耐熱性、耐食性無
槽液もれ	有	有	有	無
燃料(二次燃料)	純水素 (炭酸ガス含有不可)	水素 (炭酸ガス含有可)	水素、一酸化炭素 (炭酸ガス含有可)	水素、一酸化炭素 (炭酸ガス含有可)
燃料の原料(一次燃料)	電解工業の副生水素 水の分解等	天然ガス、ナフサ メタノール	石油、天然ガス、石炭ガス、メタノール	石油、天然ガス 石炭ガス
化石燃料を用いた時の発電システムの熱効率(ボトムングサイクル込)	60% (但し、燃料電池本体の効率)	40~45%	45~50% (50~60%)	50~55% (50~60%)
問題点および開発課題	<ul style="list-style-type: none"> CO₂が電解質に溶解すると劣化する(燃料中のCO₂除去技術) 水、熱収支の制御が必要 燃料電池本体の効率 	<ul style="list-style-type: none"> 安価な触媒の開発 白金残用量の低減化(現状; 6g/kw程度) 発電システム全般にわたる超寿命化 低コスト化 	<ul style="list-style-type: none"> 構成材料の耐食、耐熱性 CO₂循環系など要素技術の開発 熱収支、ボトムングサイクルを考慮したシステム解析 	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱材料 電極の安定化と性能向上 電解質の薄膜化

アルカリ電池は宇宙用に早くから開発され、すでにアポロやスペースシャトルに実用されている。

りん酸型燃料電池⁵⁸⁾では、I F C社から導入した装置による東京電力の4.5MW発電(天然ガス改質、2420h運転後解体、昭和60年)、東京ガス、大阪ガスによるオンサイト熱併給発電(I F C社PC18型40kW、1万時間以上運転)に続きムーンライト計画による1MW発電(天然ガス改質、加圧水冷、昭和62年)も成功している。また、電力会社、ガス会社各社により50~200kW級国産電池(天然ガス、メタノール改質)の離島用、業務用熱併給発電実験が各種行われている。以上のようにほぼ実用化段階になっている。しかし、低コスト化がまだ課題であり、現在スタックの価格は約50万円/kWといわれている⁵⁹⁾。このうち白金は12000~15000円/kW程度で黒鉛などの材料費や加工費がかなりの部分を占めている。

熔融塩炭酸塩型燃料電池はムーンライト計画において10kW級発電(昭和62年)に成功している⁶⁰⁾。さらに1000kW発電(1995年)をめざして開発研究が現在すすめられている⁶¹⁾。また効率がより高くなるとされている内部改質形燃料電池も研究されている⁶²⁾。

固体電解質燃料電池⁶³⁾では、アメリカのWH社の技術が最も進んでいる。円筒管並列形電池の開発を進め、5kW発電に成功している。日本では東京ガス、大阪ガスの両社がWH社から3kW発電装置を導入しフィールドテストを行っている。ムーンライト計画では電総研で定格500kWの円筒管直列形電池を開発した。アメリカのANLでは高出力密度が期待できるmonolithicセルの研究が進められている⁶⁴⁾。

Table 7.4.6に各種燃料電池の比重量、比容積の例を示す。

Table 7.4.6 燃料電池の出力と比容積・比重量の例⁵⁷⁾

アルカリ電池 富士電気3.6kWDC ⁽⁵⁵⁾	水素酸素使用 比容積75L/kWDC、比重量27.8kg/kw
アルカリ電池 UTC PC-17C 4.5kW ⁽⁵⁶⁾	スペースシャトル用、2500時間、白金触媒20mg/c 比容積43.6L/kw 比重量20.2kg/kw
燐酸型燃料電池 三洋電気5kWAC ⁽⁵⁶⁾	可搬型メタノール改質 比容積100L/kwAC 比重量76kg/kwAC
燐酸型燃料電池 ERC 60kW ⁽⁵⁷⁾	30人乗りバス用設計 メタノール改質(36%LHV) Ni-Cd電池とハイブリッド使用 燃料電池・改質器 19.4kg/kwFC 電池 16.9kg/kwFC
燐酸型燃料電池 IFC PC18 40kWAC ⁽⁵⁸⁾	天然ガス改質 パッケージ熱効率40%(LHV) 比容積224L/kwAC 比重量90kg/kwAC
燐酸型燃料電池 ムーンライト200kWAC ⁽⁵⁷⁾	パッケージ比容積340L/kwAC、比重量105kg/kw 電池部分 83L/kw 22.5kg/kw 改質変成分 225L/kw 75kg/kw 直交変換部分 32L/kw 7.5kg/kw (但し比容積は推定)
燐酸型燃料電池 ムーンライト269kWDC ⁽⁵⁹⁾	1000kWAC用スタック、天然ガス改質 寿命4万時間 熱効率40%(HHV) 単セル寸法 60x60x0.6 cm(4.3L/kwDC) スタック寸法 1.7φ x4.8 m(42L/kwDC)
熔融塩炭酸塩形 10kWスタック ⁽⁶⁰⁾	29セル(単セル寸法 71x79x0.72 cm 6.8L/kw)
固体電解質高温電池 3kWDC ⁽⁷⁰⁾	熱効率42%(LHV) 水素使用 単セル寸法 15.5φ x440 mm パッケージ比容積1344L/kw 比重量430kg/kw

7.4.4 推進システムの重量と容積

推進システムの重量と容積を比較するにあたって考慮する範囲は原動機からプロペラ軸に動力を伝達するまでの部分とする。ただし、推進システムの効率は、一定時間航続に必要な燃料タンクの大きさを左右するので、燃料の重量と容積も推進システムのそれに含めることにする。

比較する推進システムは、直接推進は低速ディーゼル、中速ディーゼル(ディーゼル用平行軸型減速装置付き)、航空転用ガスタービン(タービン用平行軸型減速装置付き)の各原動機によるとする。電気推進では、中速ディーゼルとガスタービンによる発電および燃料電池による直接発電とする。発電機、電動機の両回転機は最近交流化が進んでいるので同期機とし、サイリスタコンバータによる周波数制御を行うこととする。

超電導電気推進では、交流磁界に適した超電導線はまだ開発されていないが、交流回転機が超電導化されるとし、常電導電気推進と同じ機器構成とする。ただし、重量、容積が常電導回転機の1/4から1/5になると仮定し、効率は常電導機の損失が半分になるとする。

燃料電池は、出力密度の高いものが宇宙用等に開発

されているがこれらは比較的寿命が短い。船用には長寿命、高効率の燃料電池が必要と考えられる。このため現在電力用に最も開発が進んでいるりん酸型燃料電池程度の性能が得られるものと仮定する。現在開発されている電池の出力レベルは小さいが、大出力レベルのものは基本的にはこれらを多数配置する形となると考えられる。負荷追随性の点では、蓄電池とハイブリッド形式も考えられるが、今回は比較を簡単にするため天然ガスを燃料とした交流出力パッケージをそのまま拡大したもので直接電動機を駆動すると仮定する。

出力レベルは、超電導電気推進システムの応用が考えられる大出力のものとして100MWとする。使用する燃料は燃料電池の改質装置を使用することを考慮して液化天然ガスとする。また、ガスタービン機関、ディーゼル機関の燃料消費率は燃料の発熱量によって換算する。Table 7.4.7に想定した原動機、減速機、動力伝達電気機器の出力レベル、熱効率、動力伝達効率、出力に対する重量と容積を示す。航続時間に対する各推進システム(燃料を含む)の重量、容積をFig.7.4.5～6に示す。

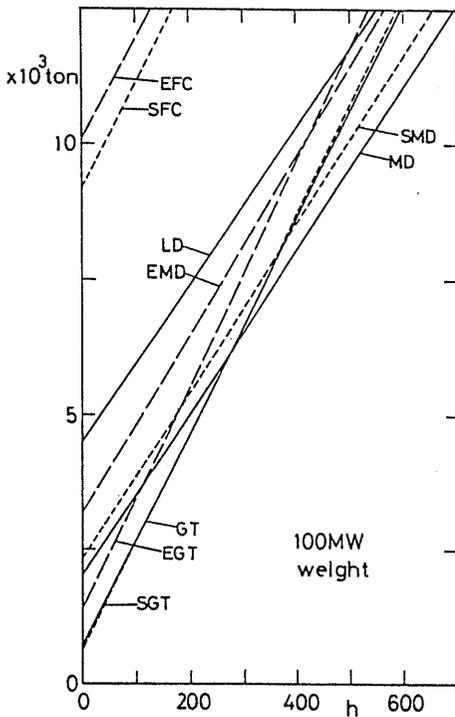
Table 7.4.7 動力伝達機器の比重量と比容積

動力・伝達装置	出力レベル	効率/燃費	比重量	比容積	参考文献
低速ディーゼル(LDE)	35MW	171g/kwh	45kg/kw	64.5L/kw	(43)
中速ディーゼル(MDE)	8～10MW	174g/kwh	17kg/kw	22L/kw	(43)
航転ガスタービン(GT)	20～30MW	225g/kwh	1.2kg/kw	3.2L/kw	(54)
MDE用減速装置(平行軸形)		98.5%	3kg/kw	3.5L/kw	(71)(72)
GT用減速装置(平行軸形)		96.5%	5.6kg/kw	6.4L/kw	(71)(73)
MDE用発電機(AC)	10MW	96%	2.7kg/kw	3.1L/kw	(34)
GT用発電機(AC)	20～30MW	98%	2.5kg/kw	1.8L/kw	(74)
同期電動機(AC)	50MW	96%	6.8kg/kw	14.8L/kw	(34)
DE用超電導発電機(AC)	10MW	98%	0.7kg/kw	0.5L/kw	
GT用超電導発電機(AC)	20～30MW	99%	0.6kg/kw	0.3L/kw	(75)
超電導電動機(AC)	50MW	98%	1.3kg/kw	3.0L/kw	
サイリスタ変換機		98%	3kg/kw	10L/kw	(76)
燃料電池パッケージ	50MWAC	45%	90kg/kw	200L/kw	

低速ディーゼルは1基10筒35000kWクラスの機関3軸という構成になろう。燃料消費率は良いがかなり高重量の推進システムになる。中速ディーゼルは1基10筒12500kWクラスの機関8基2軸の構成になろう。比較的軽量コンパクトになるが多数の機関を減速装置で効率よく接続することが課題となろう。そこでこれを超電導電気推進にすれば推進システムが多少重量は

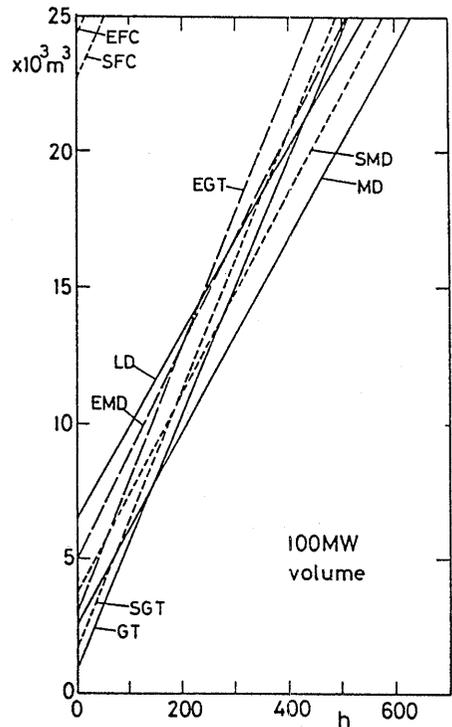
増大するが多数機関の接続が容易になる。また航続時間が比較的長いところでは超電導電気推進システムの重量と容積の増加分は燃料タンクのそれに比して小さい。

ガスタービンは25000kWクラスのもの4基2軸で構成できシステムは非常に軽量コンパクトになる。超電導電気推進システムにした場合、超電導機器と減速装置との重量と容積の差が小さいため直接推進システ



- LD 低速ディーゼル
- MD 中速ディーゼル
- GT ガスタービン
- EMD 常電導中速ディーゼル
- EGT 常電導ガスタービン
- EFC 常電導燃料電池
- SMD 超電導中速ディーゼル
- SGT 超電導ガスタービン
- SFC 超電導燃料電池

Fig.7.4.5 各種推進方式の重量の比較



- LD 低速ディーゼル
- MD 中速ディーゼル
- GT ガスタービン
- EMD 常電導中速ディーゼル
- EGT 常電導ガスタービン
- EFC 常電導燃料電池
- SMD 超電導中速ディーゼル
- SGT 超電導ガスタービン
- SFC 超電導燃料電池

Fig.7.4.6 各種推進方式の容積の比較

ムの重量、容積と大きな差がない。しかしながらガスタービンの熱効率が低いいため航続時間が長いと燃料タンクの容量が非常に大きくなる。

燃料電池は改質装置を必要とする場合他の原動機に比し推進装置が約5倍大きくなる。燃料は水素が使用できる場合は改質装置が不用となり発電システムは約1/3になる。しかし燃料電池を船用に利用するためには燃料電池の出力密度を2倍以上向上する必要がある。

7.4.5 まとめ

以上、超電導電気推進システムに使用する原動機の

特質を考察するため、ディーゼル機関、ガスタービン機関、燃料電池の現状および容積と重量について簡単に述べた。また、大出力レベルにおける超電導電気推進システムの重量と容積について検討し、航続時間の短いものについてはガスタービンが、長いものについては中速ディーゼルが適していることを示した。燃料電池は、天然ガスを燃料とする船用原動機として使用するためには約5倍出力密度を向上しなければならないことを示した。

参 考 文 献

- 1) 外岡幸吉、森弘之他：超電導電気推進システム、日本船用機関学会誌、第16巻、第11号(1981)
- 2) T.J.Doyle, H.O.Stevens : A 300kW Superconductive DC Ship Drive with Liquid Metal Current Collector, Marine Engineers Review, April (1985)
- 3) A.D.Appletor : Developments of Engineering Applications of Superconductivity at IRD, Cryogenics, September (1982)
- 4) A.D.Appoeton : Design and Manufacture of Large Superconducting Motor and Status of Superconducting A.C. Generator, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-19, No.3, May (1983)
- 5) 宝田直之助、前田日出人 他：船用超電導推進システムの開発(I)超電導界磁コイル：住友重機械技報、Vol.30, No.89, August (1982)
- 6) 桜庭順二、宝田直之助 他：船用超電導推進システムの開発(II)電機子模擬装置、住友重機械技報、Vol.31, No.93, December (1983)
- 7) N.Takarada : Development of A Marine Superconducting Motor and High Speed Ship, UJNR Meeting, May (1988)
- 8) 塚本修巳：超電導の交流応用、鉄と鋼、Vol.74, No.12, December (1988)
- 9) 超電導応用・関連技術に関する調査研究、未来工学研究所、May (1984)
- 10) 和田 仁：超電導材料の特性と負荷応力による挙動、機械の研究、第40巻、第1号(1988)
- 11) 増田正美：電力貯蔵技術のひみつ、日刊工業新聞社(1981)
- 12) エネルギー貯蔵に関する基礎調査、科学技術庁資源調査所、資料第93号(1981)
- 13) J.F.Hauer : Control Aspects of The Tacoma Superconducting Magnetic Energy Storage Project, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWR-2, No.2 (1987), pp.443-450
- 14) 田中祀捷：超電導エネルギー貯蔵技術の進歩と課題、OHM、3月号(1987) pp.48-52
- 15) 金丸保典 他3名：超電導エネルギー貯蔵装置の境界シールドの計算、電子通信学会技術研究報告、86-335 (1987)、pp.39-44
- 16) 樋口俊郎：磁気軸受の制御系、精密機械、第50巻、第5号、(1984-6月)
- 17) 樋口俊郎：機械要素技術への超伝導の応用、日本機械学会誌、第91巻、第835号、(1988-6月)
- 18) S.Earnshaw: On the Nature of the Molecular Forces, Trans. Cambridge Phil. Soc., Vol.7, (1839)
- 19) H.Habermann, G.L.Liard : Practical Magnetic Bearing, IEEE Spectrum, Vol.16, (1979)
- 20) 清水久二、谷口修 他：超電導電磁石を用いた磁気軸受の研究、日本機械学会論文集、第38巻、第306号(昭47-2月)
- 21) 北沢宏一、岸尾光二：超伝導現象と超伝導材料研究の現状、日本機械学会誌、第91巻、第835号、(1988-6月)
- 22) 高畑良一 他：酸化高温超伝導材料を用いた磁気軸受に関する検討、第36回応用物理学会関係連合会講演会予稿、(1989-4月)
- 23) J.R.Powell, G.R.Danby : High Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME Paper 66-WA/RR5 (1966)
- 24) 田中 一：超電導磁気浮上式鉄道の開発、日本船用機関学会第43回学術講演会(昭63-10月)
- 25) 高木肇：時速 500キロへの挑戦-超電導磁気浮上式鉄道の開発、トランスポート、第38巻、第11号(1988)
- 26) D.K.Anand, et al. : System Consideration for a Magnetically Suspended Flywheel, IECEC-86, 21st-3 (1986), pp.1829-1833
- 27) D.Eisenhaure, et al. : Factor Affecting the Control of a Magnetically Suspended Flywheel, 1980 Flywheel Tech, Symposium, DOT (1980), pp.380-391
- 28) L.L.Bucciarelli & A.Rangarajan : Dynamic Analysis of Magnetically Suspended Energy Storage Wheel, 1980 Flywheel Tech Symposium, DOT (1980), pp.218-224
- 29) 「電気推進特集号」、日本船用機関学会誌、第19巻、第2号、(1984年2月)
- 30) 「電気推進特集号」、日本船用機関学会誌、第16巻、第9号、(1981年9月)
- 31) 井上馨：「電気推進の各種方式の特質と動向」、日本船用機関学会誌、第19巻、第2号、(1984年2月、p.90)

- 32) The Motor Ship, (Feb, 1982~1987)の船舶建造統計より作成
- 33) 外岡幸吉ほか：「超電導電気推進システム」、日本船用機関学会誌、第16巻、第11号、(1981年11月)、p.58
- 34) “Re-engining QE2”, The Motor Ship, (June, 1987)
- 35) The Motor Ship, (November, 1988), p.51
- 36) 丹羽公一ほか：「電気推進への無整流子電動機の適用」、日本船用機関学会誌、第19巻、第2号、(1984年2月)、p.157
- 37) “Petrojar 1”. The Motor Ship, (September, 1986), p.20
- 38) The Motor Ship, (Feb.1983~1987) および (March 1988)の船舶建造統計より作成
- 39) 宮野弥明ほか：「超ロングストローク三菱UEC-L S形ディーゼル機関の開発」、三菱重工技報、第24巻、第2号、(1987-3)、p.143
- 40) 森田秀夫ほか：「三菱-MAN 8 L58/64型ディーゼル機関の概要」、船の科学、Vol.39、(1986-7)、p.65
- 41) 今井智彦ほか：「IHI-SEMT Pielstick 9 PC40L形ディーゼル機関」、内燃機関、第26巻、第5号、(1987-5)、p.53
- 42) ビエール・ブソー「ロングストロークピールスティック機関の1年間の稼動実態」、内燃機関、第27巻、第8号、(1988-8)、p.96
- 43) 以下のカタログ、文献から作成した。
L-MC機関、L58/64、L40/45機関 (川崎重工カタログ)
PC、PA機関 (SEMT-PIELSTICKカタログ)
RTA62機関 (石川播磨技報、第26巻、第3号、(昭和61年5月)、p.185)
UEC機関 (三菱重工技報、第24巻、第2号、(1987-3)、p.143)
S26MC機関 (船の科学、Vol.41、(1988-5)、p.47)。
S6機関 (日本船用機関学会誌、第23巻、第7号、(1988-7)、p.401)
M220機関 (日本船用機関学会誌、第22巻、第7号、(1987-7)、p.418)
6SH機関 (日本船用機関学会誌、第21巻、第7号、(1986-7)、p.417)
- 44) 田辺 清：「過去10年の発達とその展望 ガスタービン」、日本船用機関学会誌、第21巻、第11号、(1986年11月)、p.681
- 45) Eugene F. Brady：“Gas Turbine Systems for World Navy Ships”, ASME GT-paper, 88-GT-166
- 46) 村島完治：「航空用ガスタービンの動向」、日本ガスタービン学会誌、Vol.16、No.61、(Jun.1988)、p.7
- 47) 寺西光夫ほか：「高効率ガスタービン(H-25型)の開発」、日本ガスタービン学会誌、Vol.16、No.64、(Mar. 1989)、p.105
- 48) 桧垣定夫ほか：「三菱石油水島製油所におけるMF-111型ガスタービンを利用した産業コージェネレーションシステム」、日本ガスタービン学会誌、Vol.15、No.60、(Mar. 1988)、p.44
- 49) 石渡正治：「セラミックガスタービンの研究開発動向」、日本ガスタービン学会誌、Vol.16、No.61、(Jun. 1988)、p.70
- 50) 阿部俊夫：「発電用大型ガスタービンのセラミックス化」、日本ガスタービンセミナー第15回資料集 (1987-1)、p.57
- 51) Y.Sudo et al.：“Operating Results of Gas-Steam Combined Cycle Plant for Higashi Niigata Thermal Power Station No.3”, Proceedings of The 1987 Tokyo International Gas Turbine Congress, 87-TOKYO-IGTC-128
- 52) 小島民生：「富津コンバインドサイクル発電プラント」、日本ガスタービン学会誌、Vol.15、No.57、(Jun. 1987)、p.97
- 53) 田口悟郎ほか：「低質油燃料焚きガスタービンによるコンバインド・コージェネレーション設備」、日本ガスタービン学会誌、Vol.15、No.60、(Mar. 1988)、p.51
- 54) 「船用ガスタービンの現状に関する調査研究報告書」、日本船用機関学会、研究委員会報告No.206、(昭和63年2月)
「国産ガスタービン資料集」、日本ガスタービン学会、(1984-4)
上記2編から作成した。
- 55) 三輪光砂：「最近のヘビーデューティ船用ガスタービン」、日本船用機関学会誌、第10巻、第12号 (1975年12月)、p.963
- 56) 高橋武彦：燃料電池、1984、共立出版
- 57) 野崎 健：「燃料電池発電技術」、日本ガスター

- ビン学会誌、Vol.14、No.56、(1977)、p.36
- 58) 穴原良司：「りん酸型燃料電池技術開発の現状と問題点」、水素エネルギー技術会議(日本能率協会)、(昭和63年2月)、pp.1-9
- 59) 城上 保：「りん酸型燃料電池技術開発の現状と問題点」、水素エネルギー技術会議(日本能率協会)、(昭和61年2月)、pp.1-27
- 60) 佐藤誠二ほか：「熔融炭酸塩型燃料電池の開発」、石川島播磨技報、第27巻、第6号(昭和62年11月)、p.321
- 61) 児玉皓雄：「熔融炭酸塩型燃料電池開発の現状」、水素エネルギー技術会議(日本能率協会)、(昭和61年2月)、pp.1-43
- 62) T.Tanaka et al.：“Development of Molten Carbonate Fuel Cell”, IECEC 889123
- 63) 永田 進：「固体電解質形燃料電池の開発状況」、電気学会誌、第108巻、第1号、(昭和63年)、p.71
- 64) C.C.McPheeters et al.：“Recent Advances In Monolithic Solid Oxide Fuel Cell Development”, IECEC 889207
- 65) 原嶋孝一ほか：「アルカリ形燃料電池の開発」、富士時報、Vol.61、No.2、(1988)、p.168
- 66) Sohokura, K.et al.：“Portable Methanol/Air Fuel Cell Power Unit”, 8th International Alcohol Fuels, (1988), p.935
- 67) Chang V.Chi, Donald R. Glenn：“Air-cooled PAFC and Ni-Cd Batteries”, ICECE 889121
- 68) 菊地謙一：「新しい水素利用技術としての燃料電池システム」、水素エネルギー技術会議(日本能率協会)、(昭和59年2月)、pp.4-59
- 69) 広田俊夫ほか：「リン酸形燃料電池1000kW発電プラントの建設(ムーンライト計画)燃料電池本体」、富士時報、Vol.61、No.2、(1988)、p.133
- 70) 菊地謙一ほか：「燃料発電システムー ガス事業の立場から」、水素エネルギー技術会議(日本能率協会)、(昭和63年2月)、pp.1-37
- 71) 山田富稔：「船用遊星歯車の展望」、船用機関学会誌、第10巻、第8号、(1975-8)、p.586
- 72) 中野英明：「ギヤードディーゼルの計画と実際」、日本船用機関学会誌、第7巻、第7号、(1972-7)、p.508
- 73) 田辺 清：「最近の航空転用形船用ガスタービンとその運転実績」、日本船用機関学会誌、第10巻、第12号、(1984-12)、p.972

74) 電気工学ハンドブック、電気学会、(1967)

75) 上之園博：「電力機器への応用」、電気学会誌、第104巻、第1号、(昭和59年1月)、p.13

76) 立花康夫ほか：「船用軸発電装置の概要」、富士時報、第56巻、第2号、(1983-2)、p.150

8. 船舶・海洋システムへの応用

船舶・海洋システムへの応用に関しては、従来検討された例が極めて少ない。このため本章では、アイデア(現時点で可能性が低いと思われるものも含む)を主体に記述する。

8.1 運河航行への応用

船が運河のような制限水路を航行する場合に、もっとも注意しなくてはならないことの一つにいわれるバンクサクシオンがある。これは運河の中心線上から右あるいは左にはずれたところを船が航行する場合に、そのはずれた方の岸壁が船をすいよせるように働く力のことをいう。このような状況では船は適当な角度の舵をとって、ある平行状態で航行することになる。しかし水路幅あるいは水深は一般に変化するため、運河を航行する船は危険な状況に置かれているといっている。

ここで、強力な磁力を発生する超電導磁石あるいは超電導材を利用して、バンクサクシオンに抗する力を船と運河壁との間に発生させてやれば、岸壁と衝突することなく安全でより高速の運河航行が実現できる可能性があると考えられる。このような超電導技術の応用は、すでに実用化に向けて多くの研究がなされているリニアモーターカーの浮上・推進・案内といった運動関係の問題のうちの案内の問題と非常に類似しているといえる。すなわちリニアモーターカーをガイドウェイに接触することなく運動させるという問題である。

しかし、問題は類似でもその解決法をそのまま船の運河航行に応用することはできないと考えられる。JRのリニアモーターカーの場合、車両に超電導磁石を積み、ガイドウェイの両側にコイルを配置して左右のコイルをヌルフラックス結線と呼ばれる方法で接続することによってガイドウェイの中心線上からはずれた車に左右方向の復原力が働くように考えられている¹⁾。この方法では車両が走っているのはじめて左右方向の案内力が発生するのであって、数100km/hで走っている場合には有効であるが低速時には案内力は弱く、実際

リニアモーターの場合でも低速時には左右方向に車輪を出して案内を行なっている。一方船の運河航行の場合には高々数ノットの世界であること、あるいは極端な場合にはほとんど停止している場合さえも考慮に入れなくてはならないことからリニアモーターと全く同じ手法を船に適用することはできないと思われる。

従って超電導を利用した強力な磁力で運河中にある船の案内を行うためには、まずその強力な磁力の発生方式および制御方式から検討しなくてはならないと考えられる。同時にどの程度の磁力が必要となるかを推定するために、おそらく従来考えられてきたよりもより狭い幅の制限水路中を航行する船に働く流体力の研究も必要であると思われる。

このほかにもリニアモーターと船の運河航行との関連でいえば、運河壁あるいは運河底と船とでリニアモーターを構成することにより推進力を得ることも不可能ではないと思われる。しかし保守等の上から運河底が実際的ではないとすればこの方式の推進を考える場合にもまず上述の水路内での案内の問題を解決しなくてはならないと思われる。

8.2 浮力制御および磁力接合

8.2.1 ケーソンの出し入れによる浮力制御

半潜水型石油掘削船は、水線面積を小さくすることで波による浮力変動を小さくし、動揺を軽減することに成功した例であるが、本アイデアは浮体の排水容積を可変にして浮力制御を行ない、波力を小さくしようとするものである。

すなわち、Fig.8.2.1に概念的に示すように、浮体に内蔵されたケーソンを、波の山谷に応じて、あるいはさらに進んだ方式としては波力に応じて、出し入れ

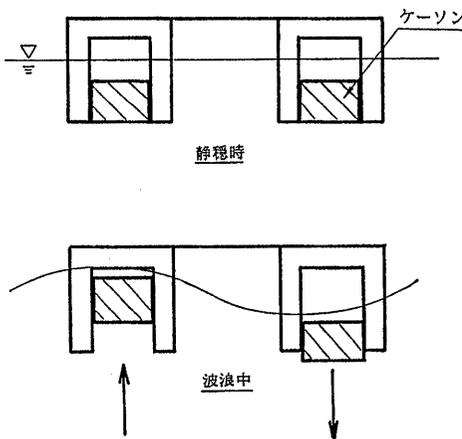


Fig.8.2.1 浮力制御の概念図

することにより、浮体を積極的に制御し、波力や動揺を小さくできる。現在の典型的な半潜水型石油掘削船では、波1mあたり100トン程度の上下力が加わるから、上下方向の波力を全て相殺するためには、体積数100m³のケーソンを5～10秒程度の変動周期で変位制御することが必要となる。

このように大きな力で変位制御するために、超電導磁石の作り出す強力な磁界を利用できる可能性がある。

制御の方法としては種々考え得ると思うが、例えば、Fig.8.2.2に示すリニアモーター方式も有力である。

解決すべき技術的課題としては

- (1) ケーソンの制御
- (2) ケーソンの出し入れ機構（すべり、水密性等）
- (3) ケーソンの内蔵のための最適船形
- (4) 大きな変動力に対する構造強度
- (5) ケーソンの出入りによる動揺の動的な影響等があげられる。

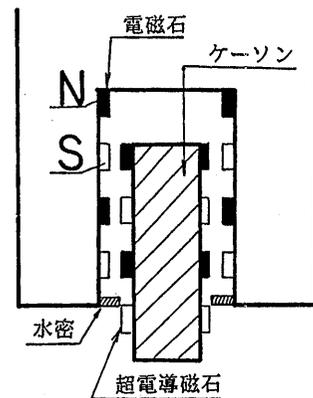


Fig.8.2.2 リニアモーターによる制御

8.2.2 磁力接合モジュール船

磁力接合モジュール船は、超電導磁石の作り出す強力な磁界を応用したものであり、船をいくつかのブロックに分割し、このブロックを超電導磁石を用いて接合したものである。Fig.8.2.3に磁力接合モジュール船の概要を示す。

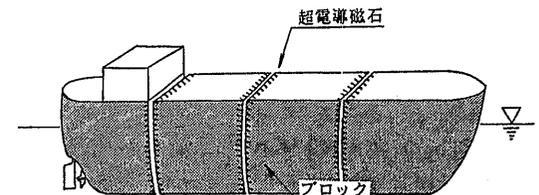


Fig.8.2.3 磁力接合モジュール船の概念図

このモジュール船の特徴は、超電導磁石を制御することにより、船体の各ブロックを容易に接合あるいは着脱することができることである。これを応用し、新運航システムを開発することができる。例えば、貨物船を例にとる。貨物船をホールドと推進器を有するブロックに分割し、貨物船が荷を降ろす港にあらかじめいくつかの代替ホールドのブロックを用意する。貨物船の入港とともに、船体から荷の積んであるホールドを切り放してホールドのみを荷役棧橋に接岸させ、貨物船は、推進器を有するブロックに新たに代替ホールドのブロックを接合して再び出航する。この運航システムを用いれば、従来、船が入港した際に要した荷役時間を省くことができ、船の効果的な運用を行なうことができる。また、積み荷の種類、量により、貨物船のホールドのブロックの取り替え、あるいはホールドのブロックの数の調節などを行ない、一隻の船を多目的に活用することができる。さらに、船がなんらかの損傷を受けた場合には、従来の船のようにドックインして修理を行なう必要がなく、このモジュール船は、損傷を受けたブロックのみを取り替えればよく、船のメンテナンスを行なう上でも非常に効率が良い。

さて、磁力接合モジュール船を計画する上で大きな課題は、各ブロックの接合方法であり、接合部の構造である。接合方式としては、種々考えられると思うが、例えば、Fig.8.2.4に示すような接合方式も考えられる。

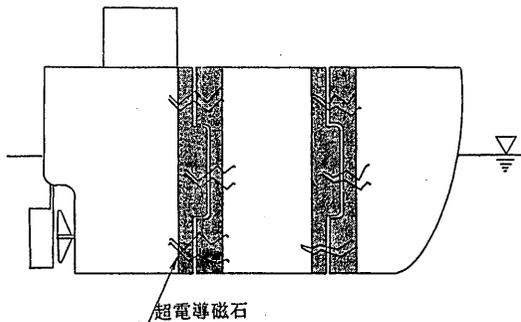


Fig.8.2.4 磁力接合方式

磁力接合の他に、超電導磁石の反発力を利用する方式も考えられる。Fig.8.2.5に概念図を示す。これは、多関節船のように船体の各ブロックをピンで結合し、ブロックごとの接触を緩衝あるいは防止するために、超電導磁石の反発力をショックアブソーバとして利用

するものである。現在、研究の進められている多関節船²⁾が実際に検討される場合には、超電導磁石を用いた緩衝器が有効ではないかと考えられる。

磁力接合モジュール船の解決すべき技術的課題としては、

- (1) 各ブロックの接合方式
- (2) モジュール船の船体運動
- (3) モジュール船の構造強度
- (4) モジュール船の運航システム

などがあげられる。

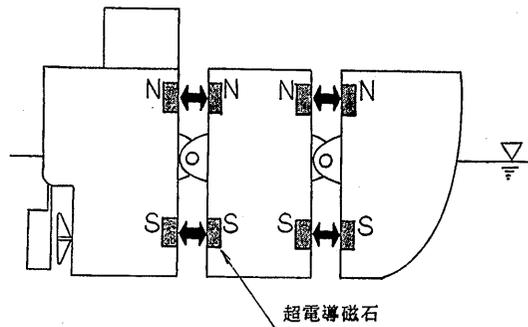


Fig.8.2.5 超電導磁石の反発力の利用

8.3 磁気吸引作業ロボット³⁾⁻⁶⁾

8.3.1 壁面移動ロボットの現状

大型船舶、海洋構造物に付着・生育する海洋生物は推進抵抗の増大に代表される大きな被害損失をもたらす。従来この問題に対しては防汚染料や特殊銅合金から溶出するイオンによる化学的な成育抑制を行ってきたが、環境保護上の制約や有効期間の短さなど解決すべき点は多い。一方、付着物を機械的に除去するためには、船舶ではドック入りの上、高圧ジェット水噴射やサンドブラスト、海洋構造物では潜水のうえ回転ブラシ、スクレーパといった大掛かりな作業が必要である。これらの作業を人間に変わってロボットにさせるには、対象となる場所が垂直壁面、オーバーハング面が殆どであり、重力に逆らって本体を保持し移動する機構を備えることが不可欠である。中でも垂直壁面を吸着し移動するには十分な吸着力と摩擦力が必要であり、空气中でこの機能を達成させるために様々な研究がおこなわれている。Table 8.3.1は従来研究されてきた垂直壁面移動機構を組み合わせて船体側壁面移動ロボットを構成した場合に考えられる各型式の機能別評価を行ったものである。以下、吸着機構別に簡単な特徴と問題点を述べる。

Table 8.3.1 船側壁面移動ロボットの特徴と問題点

吸着機構	移動方式				車輪				クローラ				歩行式			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
真空式分散（吸盤）型	×	×	×	×	△	×	△	×	△	△	△	×	△	△	△	×
真空式集中型	△	○	×	×	△	○	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×
推力押付型	○	×	△	×	○	×	△	×	○	×	△	×	○	×	△	×
永久磁石吸着型	×	○	×	○	×	△	△	○	△	×	△	○	△	×	△	○
電磁石吸着型	×	○	×	×	×	△	△	×	△	△	△	×	△	△	△	×
超電導磁石吸着型	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○

- A：吸着力不足によるはがれ、こり落下の危険性はないか
 B：機動性、操縦性に問題はないか
 C：凹凸面、曲面に対して正常な移動機能を保持するか
 D：吸着力保持においてエネルギー消費はないか

- (1) 真空式分散（吸盤）型：大気圧により壁面に押し付けられる力を利用し、複数個の吸盤によって吸着する。比較的軽量化が可能で歩行式に向いている。船体などの壁面に応用する場合を想定すれば、かき、ふじつぼといった海洋生物が付着している部分を走行すると真空もれをおこし吸着力を失う。
- (2) 真空式集中型：ロボットの中心部付近に大きな吸盤を構成し、常に空気を排出しながら吸盤内の負圧を保つ。吸盤の面積が大きく採れるので分散形に比べて吸着力が大きいが限界を越える空気もれで吸着力を失う。
- (3) 推力押付型：小形のジェットエンジンや動力とプロペラの組み合わせによって推力発生機構を備え、推力の作用線を壁面に押し付けてロボットを保持する方式。突風などによる不測の事態における制御が難しい。
- (4) 永久磁石吸着型：吸着を維持するために外部からエネルギーの供給を必要としないことから、吸着のためのエネルギー喪失事故に対して本質的な安全性を持つ。半面、吸着面と磁石の距離が離れると吸着力を失うことから、移動に伴う壁面への着脱に工夫がいる。
- (5) 電磁石吸着型：コイルに流す電流制御によって磁気力を変化させることができることから、着脱が容易である。強い電磁力を得るためには通電電流を大

きくする必要性から必然的にコイルが重くなり、重量当たりの吸着力を大きくすることが難しい。

水面に浮いた状態での船の側面は乾舷部分と吃水下では環境状態が大きく変わるが、これらの吸着機構の中でどちらの環境状態にも対応できるのは電磁吸着方式だけである。水中では浮力によって大部分のロボットの重力を打ち消すことが可能であり空气中に比べると吸着保持の点からは有利である。

次に移動方式について種類別に特徴を要約する。

- (1) 車輪：連続的でスムーズな走行が可能であるが、接地面積が小さいため吸着力を大きくすることが難しい。
- (2) クローラ：無限軌道、履帯とも呼ばれる方式で車輪に次いでスムーズな走行が可能であるが、本質的に軌道が持つ「たるみ」によって吸着した履帯の総てがロボットを支える力とはなりえない。
- (3) 走行式：吸着機構を持つ複数の脚を交互に脱着して移動するもので、動作が間欠的で移動速度は遅いが吸着能力に優れている。

8.3.2 超電導磁石吸着型の船体側壁作業ロボット

Table 8.3.1に示すように現時点ではそれぞれ的方式に一長一短があり船体側壁を移動しながら海洋付着生物を機械的に除去することのできる安全で信頼性の高いロボットの実用化は困難である。しかしながら、信頼性の高い軽量な超電導磁石によって強い磁場が実

現できるという前提においては、Table 8.3.1に示す組み合わせによって、実用レベルの船体側壁作業ロボットが可能となる。Fig.8.3.1に船体側壁を無人で移動しながら海洋付着生物の除去作業を行っているロボットの想像図を示す。また、Fig.8.3.2にはロボットの機能の概略図を示す。一台のロボットでこの作業を行

う場合、大型船舶では作業範囲が広いため、大変大きな行動半径のものが必要となる。しかし、作業用動力の供給を外部から行う場合には、有線となり作業範囲が限られる。また作業時間を短くする必要性もあり、船体の大きさに応じて複数台のロボットの投入が必要となろう。

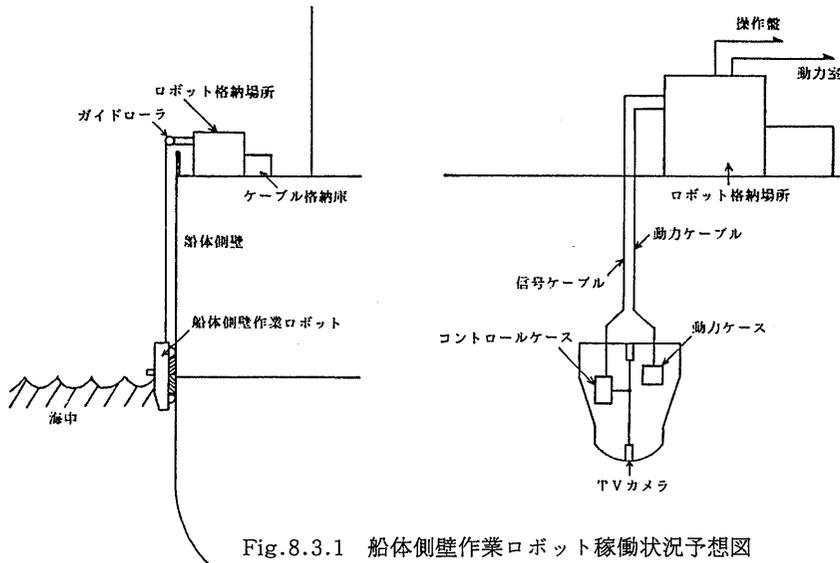


Fig.8.3.1 船体側壁作業ロボット稼働状況予想図

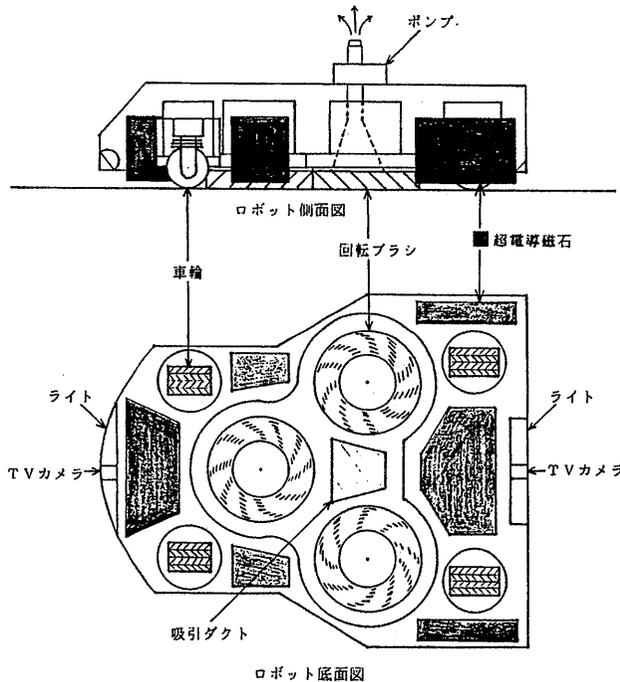


Fig.8.3.2 超電導磁石吸着型船体側壁作業ロボット

一連の作業を想像すると、まず、デッキの適当な場所に設けられたロボットの格納場所より、船体側壁の乾舷部分を磁力で吸着しながら降りていく。水中部分に入ると係員が操作盤上のテレビ画面で前方を監視し、海洋付着生物の成育状況に応じて回転ブラシによる清掃作業を行いながら移動していく。ブラシによってかきとられた海洋付着生物の残骸は吸引ダクトによって集められ適当な集塵袋にためられる。予定作業の完了あるいは集塵袋の容量に達すると再び乾舷部分を吸着しながら昇っていき所定の格納場所に帰り、次の作業の準備を行う。これら一連の作業は船舶の形状データをもとに自動化することも可能である。

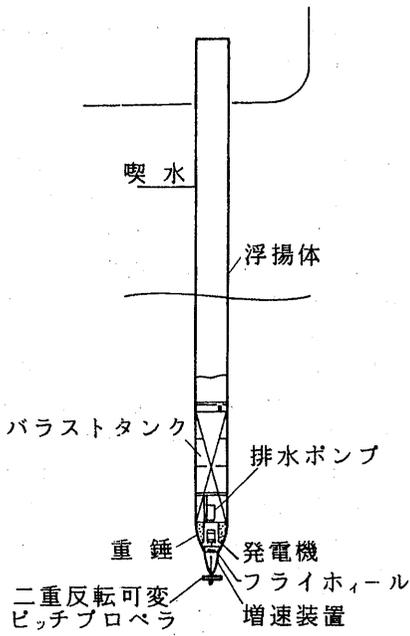
ロボットの比較的重要な機能部品を以下に簡単に説明する。

- (1) 超電導磁石：船体にロボットを吸着させる力を発生させる。乾舷部分を吸着して移動するためにはロボットを支えるために大きな力が必要で壁面と磁石面の間を小さな距離で一定にたもつ必要がある。乾舷部分では海洋付着生物はほとんどなく、また壁面も平坦な部分が多く水中部分に比べて磁石を壁面から一定にたもつ機構は簡単であろう。
- (2) 車輪：移動する力を得る。ロボットの重量、磁石の吸引力に応じてより大きい摩擦力を得る工夫が必要。
- (3) 水中テレビカメラ：多くの情報を操作員に伝える。ブラシでかきとられた海洋付着生物の残骸により視界が妨げられることのない配慮が必要。
- (4) 回転ブラシ：船体に塗られた塗料を傷めることなく海洋付着生物を機械的にかきとる能力が要求される。付着生物の種類によってはスクレーパ型の回転体に取り替える必要性もある。
- (5) 吸引ダクト：かきとられた付着生物の残骸を吸引し、テレビカメラの視界を確保するよう装備する。

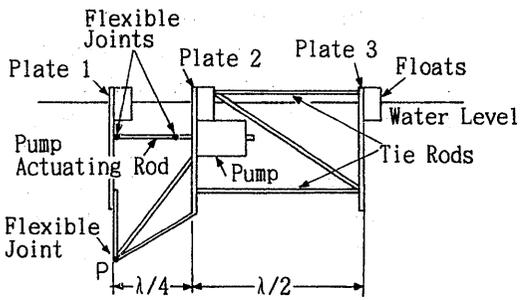
また、残骸を海洋投棄できない場合には集塵袋に回収する役目も行う。

8.4 波力発電

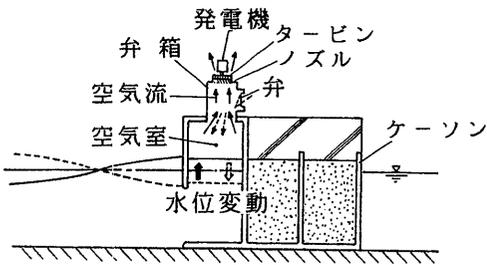
周囲をぐるりと海に囲まれた日本は自然の恵みとして漁業資源のみならず、海洋エネルギーの豊庫として潜在的な地位を有する。従って、後者を如何に利用できる形にて取出せるかは、その技術開発に全く依存している。もし取出せれば、環境を汚さないクリーン・エネルギーとして魅力あるものとなる。例えば、年間に日本の沿岸に打寄せる波浪パワーは約 5×10^7 kW と推定される⁷⁾。それ故、何等かの方法でこれを利用できれば、我が国の21世紀のエネルギー展望に明るい光を照らすことになる。当所においても波力発電の研究が、ここ数年間鋭意実施されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。一般に、波浪エネルギーを利用可能な電気エネルギーとして取出すには、力学的エネルギーに変える一次変換装置と、これを電気エネルギーに変える二次変換装置とが必要となる。二次変換装置はこれまでに開発された技術で十分に対応可能と思われるが、問題は一次変換装置の開発にかかっている。図8.4.1¹¹⁾に代表的な種々の方法を示す。このうち、実験的段階のものもあれば、アイデアのものもある。いずれの装置も最終段階にて発電機を必要とするので、このコイル部分に電気抵抗の無い高温超電導材料が応用できれば、エネルギー変換効率が上昇し、波力発電の実用化に大いに役立つと推察される。さらに、効率を上げるには、一次変換と二次変換装置とを一緒にした装置が考えられる。Fig.8.4.2がその一例で、超電導コイルで巻かれたシリンダ内にフロートを浮かせ、波浪によってフロートを上下させることにより直接発電させるシステムである。本システムの詳細はこれからの研究課題である。



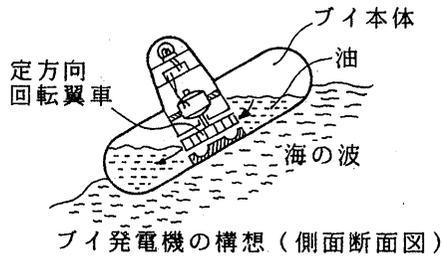
(1) 上下動型



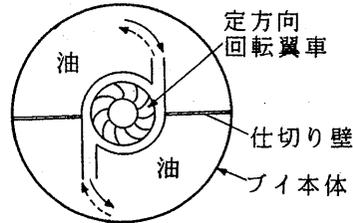
(3) 水平運動型



(5) 振動水柱型

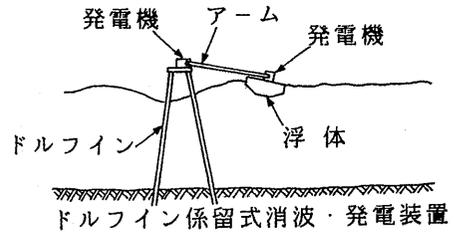


フイ発電機の構想 (側面断面図)



フイ発電機の構想 (平面断面図)

(2) 回転運動型



ドルフィン係留式消波・発電装置

(4) 連成振動型

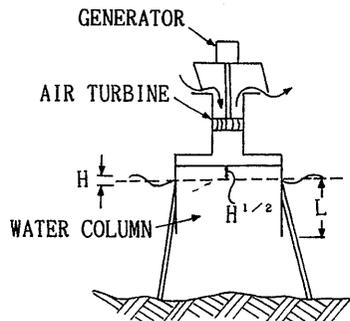


Fig.8.4.1 波浪発電の種々の型¹⁾

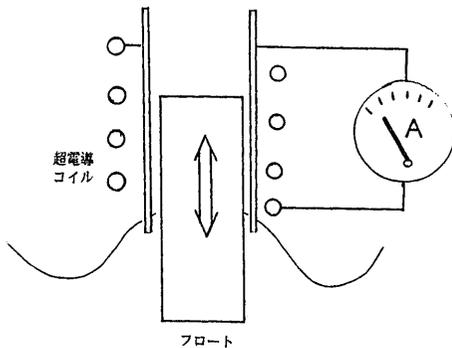


Fig.8.4.2 波力直接発電システム

参 考 文 献

- 1) 岩花 武彦、藤江 洵治：超電導磁気案内特性、鉄道技術研究所報告、浮上式鉄道に関する研究、第4冊(1976)、pp.85-92
- 2) 渡辺 敏、上野道雄：多関節船の波浪中特性について、船舶技術研究所発表会講演集、第50回(昭和62年秋期)、pp.92-95
- 3) 西 亮、推進型壁面移動ロボットの研究(II設計条件)、第5回日本ロボット学会講演会、Vol.15(1987-11)、pp.535-538
- 4) 内藤 紳司、他2名：壁面移動ロボットの開発、Robot, No.48(1985)、pp.72-78
- 5) 西 亮、他2名：垂直壁面移動機構の設計、日本ロボット学会誌、第2巻、第3号(1984)、pp.39-45
- 6) 平井 晴美、枝広 喬介、他2名：海洋生物清掃用水中ロボットの開発、三菱重工技報、Vol.20、No.5(1983)、pp.532-541
- 7) 山口 栄三、新井 信一：波浪発電・波浪情報、日本造船学会誌、第637号(1982-6)、pp.2-10
- 8) 勝原光治郎、北村 文俊：灯標用空気式波浪発電装置の研究(その2、ウエルズタービン)、船舶技術研究所報告、第24巻、第8号(昭和62年5月)
- 9) M.Katsuhara, F.Kitamura, M.Yahagi and K.Kajiwara: Impulse, Wells and Savonius Air Turbine for Wave Activated Generators Used at Light Beacons, Proceedings of Pacific Congress on Marine Science & Technology (May 16-20, 1988), MRM 2/14-20

- 10) 勝原光治郎：波力発電装置におけるエアタービンへの不規則波の影響、日本船用機関学会第45回講演会講演前刷集(平成元年10月)、pp.83-86
- 11) 前田 久明、山下 誠也：波浪エネルギー・一次変換装置、日本造船学会誌、第637号(1982-6)、pp.10-21

9 む す び

超電導技術の船舶・海洋への応用の本命は推進装置であろう。しかし、これ以外にも、有望な研究対象は多く、例えば船体回りの流れ場の制御、燃焼の制御、新素材製クライオスタット、超電導利用計測技術の海洋探査への応用などが挙げられる。また、興味ある新アイデアの例としては、磁力による運河航行、磁気接合モジュール船、浮力制御による動揺抑制、磁気吸引ロボットなどが挙げられる。いずれも検討が十分にされているわけではないが、船舶・海洋の特徴を生かしたテーマであり、材料技術の進歩に合わせて取り上げて行くことよと思う。いずれにしても、実用化には超電導磁石の性能向上、コストダウン、取扱容易などが実現することが前提条件となる。そのほか、この報告では取り上げなかったが、強磁場の人体に及ぼす影響とその対策も、実用化に当たっては重要な問題である。

近い将来、当所が超電導プロジェクトに着手するとすれば、実績のある研究、例えば流場制御、低温技術などを中心にスタートし、これに当所にポテンシャルを持つ分野が協力して発展させて行くことが効果的であろう。この際、基本施設としては、極低温実験基本施設(ヘリウム液化精製装置、極低温流体伝熱実験装置、極低温疲労試験装置など)、高電場発生装置、高磁場発生装置などが必要となる。

今回の調査研究は、企画室が中心となり、所内全研究部からの参加者を得て、超電導研究グループを作り、実施したものである。今後も、この様な協力体制での研究が実施され、成果を挙げることを期待する。