

YAMATO-1

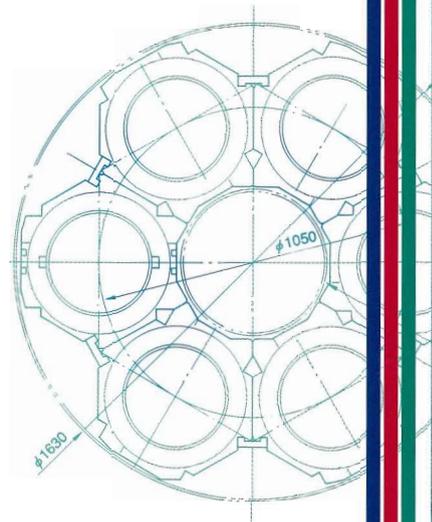
World's First Superconducting Magnetohydrodynamic Propulsion Ship



Directed by

Yohei Sasakawa

Chairman of Research and Development Committee
on Superconducting Magnetohydrodynamic Propulsion Ship



「ヤマト-1」

—— 世界初の超電導電磁推進船 ——



監修 笹川陽平

超電導電磁推進船開発研究委員会 委員長

目次

	あいさつ…………… 4
第 1 章	はじめに…………… 9
第 2 章	実験船「ヤマト-1」の概要…………… 17
第 3 章	電磁推進の原理と方式…………… 31
第 4 章	実用化に際して解決すべき諸問題…………… 41
第 5 章	超電導電磁推進装置の構造…………… 55
第 6 章	ユニットスラストの構造…………… 65
第 7 章	電極および海水管…………… 87
第 8 章	艤装と船殻…………… 99
第 9 章	全推進系の構成…………… 125
第10章	「ヤマト-1」の海上試験…………… 135
第11章	終わりに…………… 147
	付…………… 155
	索引…………… 160

あいさつ

1985年当時、日本の造船界は海運不況の影響を受けて業績が大幅に悪化し、新しい研究開発への取り組みも沈滞傾向にありました。また、日本は世界の造船量の50%を超えるシェアを占め造船王国と呼ばれていましたが、コンテナ船やLNG船あるいはホーバークラフト、ジェットフォイルといった付加価値の高い船はすべて外国で開発されたものであり、船舶の心臓部ともいえるエンジンもそのほとんどが外国からの輸入やライセンス生産に頼らざるを得ないというのが実情でありました。

私は、このような日本の造船界に問題を提起して刺激を与えるとともに、若い技術者や学生たちに技術開発の夢を抱いていただくために、世界で初めてスクリュープロペラのない「超電導電磁推進船ヤマト-1」の開発を計画しました。

もちろん、手探りの中からのスタートであり、難問山積は当然のことでありましたが、多くの学者や技術者の熱気は次々に難問を解決していききました。しかし、最大の難問は超電導磁石をいかに軽くするかでした。計画当初の計算では、50トンの船に100トン以上の超電導磁石が必要となりました。研究者や技術者の方々のたゆみない努力と熱意により、当初100トンを超えるといわれていた超電導磁石も30トンに軽量化されるなど、さまざまな技術課題が克服されて、1992年6月に実験船「ヤマト-1」が世界初の海上航走に成功しました。

この「ヤマト-1」の成功には2つの異なる反応がありました。日本では「効率が低い」とか「実用化は無理だ」といった専門家のさめた反応でした。これに対して欧米の反応は、「ヤマト-1」のようにリスクの高い挑戦的なオリジナリティーのある開発計画については極めて評価が高かったことです。試運転当日も外国から多くのマスコミ関係者が集まり、新聞や科学雑誌等で大きく取り上げられました。その後も世界各国から講演の依頼が舞い込み、英国船用機関学会からシルバーメダル賞、米国

海洋技術学会からコンパス国際賞を受賞するなど、国際的に高い評価をいただきました。

スティーブソンの開発した蒸気機関車の効率は最初から高かったわけではなく、その後の長い年月の改良によって実用化へと進んだのです。来るべき21世紀に最も期待されるのは超電導技術です。超電導コイルの中心に当たる線材技術の飛躍的な進歩の実現が必ずや超電導時代の幕開けを期待させます。そのとき、今回の「ヤマト-1」の経験が大きく役立つことを期待しております。

この「ヤマト-1」の開発過程で得られた成果は貴重なものであり、これを次の世代へ伝えることは超電導電磁推進船の研究のみならず超電導技術の応用にとっても極めて重要であると考え、今般「ヤマト-1」の開発過程や建造中に得られたノウハウ、開発のポイントなどを平易にとりまとめ一冊の本にいたしました。

この本が、研究者や技術者を目指している高校生や大学生をはじめとして、多くの方々にとって、今後の超電導電磁推進船の開発の道しるべとなり、21世紀に花を咲かせる素材としてお役に立てば幸いに思います。

終わりに、この研究開発に携わられた元良誠三博士（東京大学名誉教授）ほか多くの関係各位に対し、特に本書の執筆を担当された今市憲作博士（大阪大学名誉教授）に対して厚くお礼申し上げます。また終始温かいご支援を賜りました日本財団に対して心より感謝申し上げます。

1996年10月

超電導電磁推進船「ヤマト-1」開発研究委員会

委員長 笹川陽平



「ヤマト-1」

— 世界初の超電導電磁推進船 —

YAMATO-1

— WORLD'S FIRST SUPERCONDUCTING MAGNETOHYDRODYNAMIC PROPULSION SHIP —

第 1 章

はじめに

「ヤマト-1」というのは、超電導電磁推進装置による海上航行に、世界で初めて成功した実験船の名前です。

現在、船舶の推進装置として広く使用されているのは、19世紀半ばに実用化されて以来、急速に普及したスクリュープロペラ*1)です。しかし現在でも、スクリュープロペラ以外の推進装置も用いられています。西部劇に登場する外車船*2)は今でもミシシッピ流域ではショーボートとして華やかに走っています。また近ごろ、海岸でよく見かけるようになった水上スクーター、あるいは高速を売り物にした高速連絡船などはウォータージェット(Water Jet)を用いています。普通のウォータージェットは船の底あるいは船首付近から導水管で水を吸い込み、吸い込んだ水をインペラ(Impeller)と呼ばれる高速で回るプロペラで加速し、高速の水を船尾から噴出してその反動で進む方式です。このように船の周りの水を吸い込み、これを噴出して進むという点で、空気を吸い込みそれを高速ジェットとして後ろへ吐き出して反動で進むジェット機と原理的には同じです。普通のウォータージェットはここで述べたようにインペラで水にエネルギーを与えて高速のジェットを作り出すわけで、水はインペラという一種のプロペラ——専門家はこの機械部分を羽根車と呼んでいます——のする機械的な仕事という形でエネルギーをもらうのです。その意味では見慣れたスクリュープロペラと同じです。これに対してわれわれが走らせた「ヤマト-1」は超電導(Superconductivity)を利用した電磁推進装置(Electromagnetic Thruster)により推進したのであり、「ヤマト-1」はその超電導電磁推進装置による海上航行に、世界で初めて成功した船というわけです。

「ヤマト-1」に用いた推進方式では、強力な磁場*3)を得るために超電導を用いましたが、原理的には強力な磁場さえ作れば推進できるわけで、この原理そのものは、割に早くから知られていました。

米国のW. A. Riceは、液体金属を移送する電磁ポンプの反作用を利用して船を推進する方式を提案し、1961年に「推進システム」という特許を取得しています。

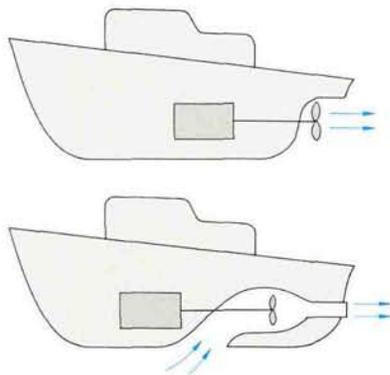
これを機に、米国では、電磁推進装置に関する研究が、数多く行われるようになりました。

その中でも、特に注目し値するのが、マサチューセッツ工科大学(MIT)で高速船の研究をしていたLt. R. A. Doraghと、ウェスティングハウス社の技術者だったS. Wayの、2人の研究です(文献1, 2)。

Doraghは、航空機が、高速化に伴って、プロペラ推進方式から、プ

*1) スクリュープロペラ(Screw Propeller)

船のスクリュープロペラを見たことがないという人は少ないでしょう。最近の船のスクリュープロペラの多くは家庭でなじみの扇風機の風を送り出す部分、すなわち羽根車とよく似た形をしています。見た目の通り、流体力学的には両者とも全く同じ原理で空気や水を送り出します。もちろん飛行機のプロペラも同じです。ただ、飛行機や扇風機が空気という縮みややすい性質の気体を扱うのに対し、スクリュープロペラは水というほとんど縮まない液体を相手に働くという点で細かい部分は異なっています。スクリュープロペラなどの羽根は飛行機の主翼と同じような翼型(Airfoil)の断面をもっており、現在では翼理論を用いてその性能設計が行われています。しかし、少し古い時代まではスクリュープロペラは文字通りスクリュー(Screw、ねじ)と考えた設計方法が一般的でしたし、また構造的にもねじに近いような形のものでした。スクリュープロペラという名前は、その名残でしょう。



付図 スクリュープロペラとウォータージェット

*2) 外車船(Paddle Wheel Ship)

船の両舷あるいは船尾部に水車のような大きな車が付いており、その車の外周には櫂の役目をする板、すなわちパドルが一定間隔で取り付けられています。この車をエンジンで回して進む船のことを外車船といえます。琵琶湖に就航している観光船ミシガンは船尾にパドルホイールを取り付けた船です。この船は比較的単純な構造のパドルホイールをもっていますが、スク

ロペラを使わないジェットエンジン推進方式に変わったことに着目し、船のジェットエンジン化ができないものかと考えました。その結果、彼がたどりついたのが、電磁推進による船の高速化ということでした。

そこで終わっていたら、彼はそれほど注目されなかったかもしれません。Doraghの素晴らしい点は、船を推進させるに足るほどの高い磁場を得るためには、従来の常電導コイルでは不可能で、超電導コイル (Superconducting Coil) を使うしかないと考えたことでした。

当時、MITでは、世界に先駆けて、超電導コイルの試作に成功したばかりだったのですが、Doraghは、いち早く、その超電導コイルを電磁推進に応用することに着眼したわけです。

もう1人のWayは、1966年に、「EMS-1」という図1.1に示すような模型の電磁推進潜水船を用いて、カリフォルニア海岸において、電磁推進装置による世界で初めての航行実験を試みました。

しかし、彼のこの試みは、うまくいきませんでした。彼の模型船は、電磁推進装置の磁場を作り出す磁石として、超電導コイルではなく、通常の導線に直流電流を流す常電導コイルを使用していたため、磁場があまりにも弱く、模型船を走らせるのに十分な推進力が得られなかったからです。

Wayの実験失敗の影響のためか、また模型船を走らせるために必要なだけの大きな超電導コイルを作る技術的背景が整わなかったためか、その後10年間ほど、電磁推進装置の研究は、ほとんど行われませんでした。

リュープロペラが実用化されるまでの外車船ではかなり複雑な構造で効率のよいバドルホイールが実用化されていました。

*3) 磁場 (Magnetic Field)

変わった読み方をする言葉ですが、物理学における学術用語です。磁石により磁力の作用する場所、あるいは磁力の作用そのものを指します。詳しくは32頁の第3章の注*1)および*3)を参照して下さい。

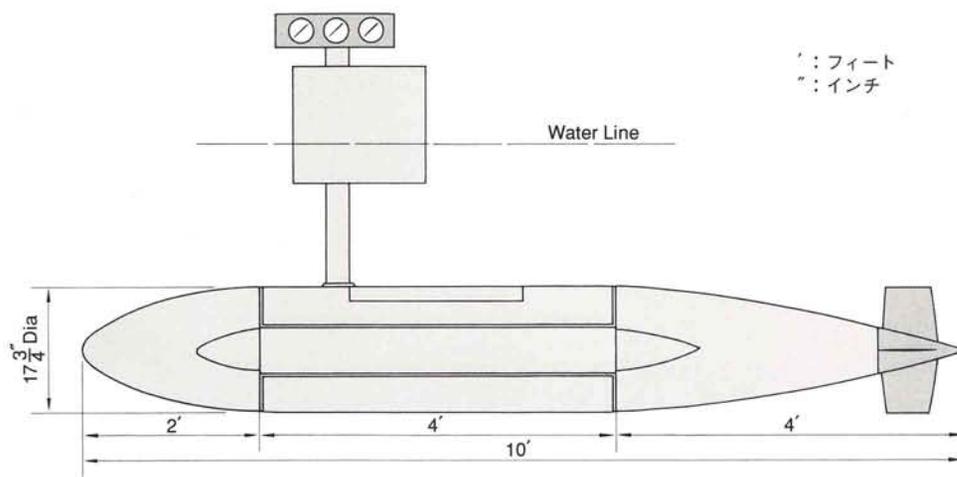


図1.1 S.Wayのを使用した模型の電磁推進潜水船「EMS-1」(1966年)

1970年代に入って、Wayらの研究を継承して、超電導コイルを使った電磁推進装置の研究開発に着手したのが、日本の神戸商船大学の佐治吉郎教授（現名誉教授）と、彼のグループです。

佐治教授の専門は、元々は、液体ヘリウムなどの低温液体を取り扱う技術および超電導技術ですが、超電導コイルが常電導コイルに比べて非常に強い磁場が得られることに着目して、超電導コイルによる電磁推進船の研究開発に乗り出したわけです。

佐治教授のグループが最初に行ったのが、超電導電磁推進模型船「SEM D-1」による走行実験でした（文献3）。この模型船は写真1.1に示すような形状の推進装置を船体下部につるした構造で、この推進方式は後述する外部磁場型であります。

「SEM D-1」は、全長約1メートルで、船体のキール部（ヨットの艇体の下にある突き出した部分）に、全長25センチメートルの超電導コイルを取り付けた模型船です。佐治グループは、このSEM D-1の人工海水の水槽での走行実験を成功させました。この実験は、模型船といえども、超電導コイルで船を動かした世界初の例として、海外の研究者な

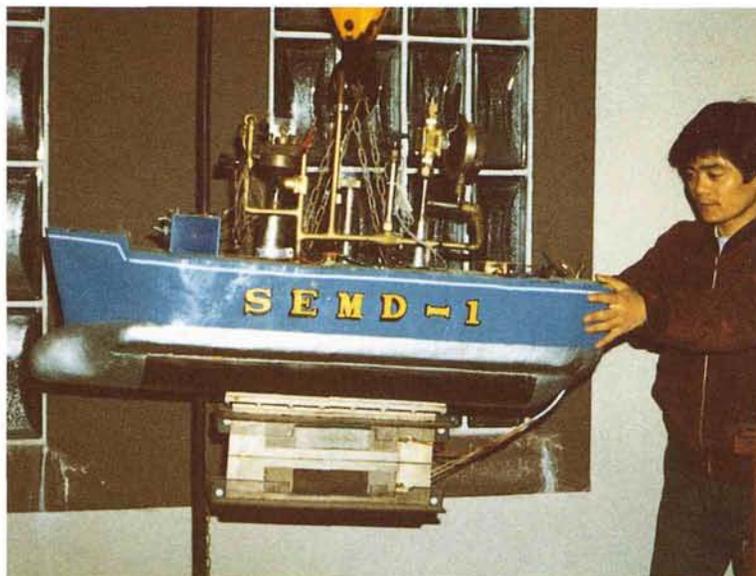


写真1.1 神戸商船大学グループの開発した超電導電磁推進模型船「SEM D-1」（1976年）
船体の下部に突き出している部分が超電導電磁推進装置
（神戸商船大学名誉教授 佐治吉郎氏のご好意による）

どからも、大いに注目されました。この船はつくばの科学博覧会にも出品されたので、ご覧になった方もいると思います。

これに力を得た佐治グループは、続いて、全長3.6メートル、重量700キログラムの、より大型の超電導電磁推進模型船「ST-500」を製作し、1979年には、その走行実験にも成功しています(文献3)。ST-500は、やはり外部磁場型の推進方式を採用しています。写真1.2はST-500の航走状況です。

佐治グループの研究は、プロペラがなくても、超電導コイルで船を推進することができることを世界で初めて実験で証明したという点で、極めて意義のあるものといえます。

このような超電導電磁推進船*4)の研究状況と、当時、盛んに研究が進められていた超電導技術の成果(例えば、国鉄の磁気浮上式鉄道、すなわちリニアモーターカー)などを踏まえて、「シップ・アンド・オーシャン財団」(当時は「日本造船振興財団」)では、1985年に、「超電導電磁推進船開発研究委員会」(委員長 笹川陽平・現日本財団理事長)を設置して、超電導電磁推進船の開発研究を開始しました。

*4) 超電導電磁推進船

日本語に忠実な英訳としては、Superconducting Electromagnetic Propulsion Shipというのがよいのですが、本文で述べたようにこの研究に先鞭を付けた米国ではMagnetohydrodynamic PropulsionもしくはMHD Propulsionという言葉が用いられています。これに敬意を表してわれわれも英文ではSuperconducting MHD Propulsion Shipとします。



写真1.2 神戸商船大学の水槽を走る超電導電磁推進模型船「ST-500」(1979年)
(神戸商船大学名誉教授 佐治吉郎氏のご好意による)



この開発研究の最大の目標は、超電導電磁推進装置 (Superconducting MHD Thruster) で航行する自己完結型の実験船 (模型ではなく、自分自身で航行のためのエネルギー源をもつ実物の船) を建造して、この実験船を、研究室のプールなどではなく、実際の海の上で走らせるということでした。

実験船を実際の海で走らせることによって、それまで研究室レベルの域を出ていなかった超電導電磁推進船の開発研究を、少しでも実用レベルに近づけようとしたわけです。

開発研究委員会には、当時の超電導電磁推進船研究の第一人者である佐治吉郎教授と、磁気浮上式鉄道研究の第一人者である日本国有鉄道の京谷好泰氏という、いわば船と鉄道の超電導技術の両巨頭をはじめ、機械や電気関係など、さまざまな専門分野の優れた学者、研究者に、委員として参加していただきました。

また、開発研究委員会の下部機構として、船体分科会 (分科会長 元良誠三・東京大学名誉教授) と、装置分科会 (同 今市憲作・大阪大学名誉教授) が設置され、前者が超電導電磁推進船としての最適な船型の開発を、後者が超電導磁石を用いた推進装置の開発を担当し、それぞれ理論と実験の両面から研究を進めました。

船体分科会には東京大学の田古里哲夫教授（故人）、広島大学の仲渡道夫教授、運輸省船舶技術研究所の田中拓推進性能部長などの人が、装置分科会には鉄道技術研究所の中島洋主任研究員、高エネルギー物理学研究所の和気正芳博士などが参加していました。分科会の研究スタッフは、いずれも大変に熱心で、そのために、関係会議の際には、いつも議論が百出して、意見と意見がぶつかりあい、ときには、興奮のあまり「それでは私はやめます」というスタッフもいたほどです。それほど、白熱した議論が交わされたわけです。

そうした中で開発は進行し、1989年には、それまでの開発研究の成果に基づいて、実験船の建造に着手し、1990年7月には、長さ約30メートル、幅約10メートル、排水量185トンの実験船の船体が三菱重工株式会社（MHI）の神戸造船所において完成しました。

実験船は、「ヤマト-1」と命名されました。この「ヤマト-1」という名前は、戦艦大和や宇宙戦艦ヤマトに象徴されるように、昔から日本人が船に抱く大いなる期待をイメージして、笹川陽平委員長が考えたものです。日本を表すやまと言葉「やまとは国のまほろば……」*5)の「やまと」の意味も、込められています。

その後、「ヤマト-1」には2基の推進装置が搭載され、各装置・機器類の総合調整を経て、1992年6月16日、世界で初めて、超電導電磁推進装置による海上航行に成功したわけです。

この本は、世界初の超電導電磁推進船「ヤマト-1」について、8年間にわたる開発研究の内容と成果をまとめたものです。

次章以下で、その開発過程における技術的な成果、電磁推進装置や船体の設計の詳細、および海上運転の解析結果などについて、詳しく述べてみたいと思います。

*参考文献

- (1) Lieut. R. A. Doragh: "Magnetohydrodynamic Ship Propulsion Using Superconducting Magnets", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 71, 1963, pp.370 ~ 386
- (2) S. Way: "Electromagnetic Propulsion for Cargo Submarine," *Journal of Hydronautics*, Vol. 2, 1968, pp.49 ~ 57
- (3) 岩田章、佐治吉郎:「超伝導による電磁推進の科学」、朝倉書店（1991）

*5)

「やまとは国のまほろばたなつくあをがきやまご
もれるやまとしうるわし」と古事記に記されている日本武尊（やまとたけるのみこと）の歌。

第 2 章

実験船「ヤマト-1」の概要

ほま
*1) 補機類 (Auxiliary Machinery)

船が直接推進のためのエネルギーを得るための機械、例えばスクリーブローバを回しているエンジン、これは主機と呼ばれます。しかし、船は推進以外、例えば電灯をつけたりあるいは航海用機器を動かしたり、いかり錨を揚げたりなどの仕事をしなければなりません。このための機械装置が補機です。代表的なものは発電機を動かすためのエンジンです。

「ヤマト-1」は、世界で初めて、実海域を航行可能な自己完結型の超電導電磁推進船として設計されました。そのため、航行に必要な設備、すなわち超電導電磁推進装置、動力電源装置、操縦装置、補機類*1)などは、すべて船内に搭載されています。

ここに示した写真2.1が、その「ヤマト-1」の船影です。

写真は、1992年6月16日に、「ヤマト-1」が神戸港内を処女航海したときに撮られたもので、この処女航海のときは、文字通り、世界で初めて、超電導電磁推進船が実際の海を走る、それもエネルギーをほかから供給せずに自分で走る自己完結型の船ということで、内外から大きな関心が寄せられ、日本のマスメディア、造船関係者だけでなく、海外からも多くの取材陣、海軍関係者などが、見学にやってきました。

「ヤマト-1」の処女航海成功は、ロイター通信その他のメディアの記事で世界に伝えられました。写真2.2は、そのときのワシントン・ポストの記事です。

超電導電磁推進装置による実物の船が、実際に海の上を走るということは、それほど画期的なことだったので。

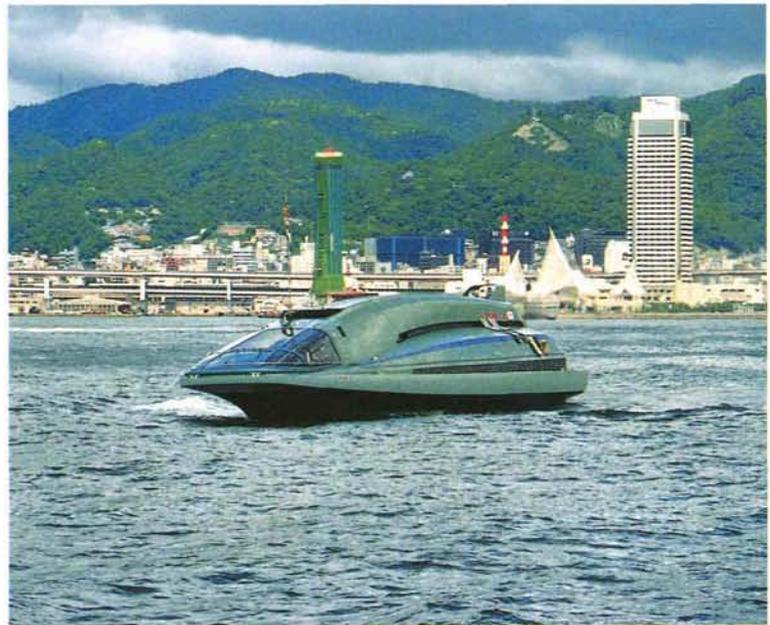


写真2.1 (a) 神戸市街をバックに航走する「ヤマト-1」(1992年)



写真2.1 (b) 神戸港内で旋回する「ヤマト-1」(1992年)

The Washington Post

WEDNESDAY, JUNE 17, 1992

Page 1

Ship Sails on High-Tech, 'Silent' Drive Japan Tests New Propulsion System Reminiscent of 'Red October'

By T. R. Reid
Washington Post Foreign Service

KOBE, Japan, June 16—A mysterious silent propulsion system reminiscent of author Tom Clancy's fictional submarine "Red October" went to sea in real life today—not at a Russian naval base, but in Japan's most advanced high-tech shipyard.

While workmen at Mitsubishi Heavy Industries' Kobe yard beamed with pride, the 185-ton experimental ship Yamato 1 plowed through the choppy harbor here powered by a revolutionary no-propeller water-propulsion system based on recent advances in superconducting technology.

American, European, and Soviet



Yamato 1 cruises in Kobe harbor, using a revolutionary no-propeller system.

researchers have tried since the 1960s to develop the so-called "magneto-hydrodynamic" propulsion system—MHD, for short—but today's sea trial marked the world's first actual MHD voyage.

Accordingly, executives of the Japanese research consortium that has poured more than \$40 million

into the project compared today's trial run to the maiden voyage of the first steamship in 1807 and to the 1955 sea trial of the U.S. submarine Nautilus, the world's first nuclear-powered ship.

Coupled with a nuclear- or solar-powered engine, the propeller-free

See JAPAN, A32, Col. 1

写真2.2 「ヤマト-1」の処女航海の成功を伝えるワシントン・ポストの記事(1992年)

「ヤマト-1」の仕様と主要目

*2) 仕様 (Specifications)

機械や道具で装置や物を製作する際に、その形状、性能を具体的に規定する数値や規格値をこのように呼んでいます。製造ビジネス上では極めて重要な事項です。

*3) 表中の述語については、第8章100頁を参照して下さい。

次に「ヤマト-1」の仕様*2)と主要目について述べましょう。船体の主要目は表2.1の通りです。

表2.1 「ヤマト-1」の主要目*3)

YAMATO-1	
長さ(全長)	30.0メートル
長さ(垂線間長)	26.4メートル
幅(型)	10.39メートル
深さ(型)	2.50メートル
計画満載喫水(型)	1.50メートル
公称排水量	185トン
計画最大速力	8ノット
船殻の材質	アルミニウム合金
定員	10人(乗員3人、その他7人)

*4) 排水量 (Displacement)

アルキメデスの原理に従えば、船が水に浮かんだ場合、その水面下の体積に相当する水の重さはまさに船の重量に当たります。

*5) 船殻 (せんこく、Hull)

殻の字は辞書には「かく」という読み方が記載されていますが、造船の世界ではこのような読み方が慣用されています。

*6) 耐食性 (Corrosion Resistance)

海水は化学的に活性なものですから、船体は

排水量*4)というのは船の重量のことで、排水量185トンというと、一般の客船でいえば、500人の乗客をゆうに収容できる大きさがあります。しかし、「ヤマト-1」の場合は、推進装置ならびにそれにかかわるシステム全体が極めて重く大きいため、残念ながら、排水量185トンで定員はわずか10人となったわけです。

船殻*5)というのは、船の中身をとったいちばん外側の船体という意味ですが、この船殻には、船の軽量性、耐食性*6)、非磁性性を考慮して、アルミニウム合金を使用しました。

非磁性性というのは、磁石の影響を受けない性質のことで、アルミニウ

ムやある種ステンレススチール*7)などは、磁石の影響を受けず、反応もしないので、非磁性体といます。それに対して、磁石の影響を受ける性質のことを磁性といい、普通の鋼材がその中心で、磁石の影響を受け、磁石に完全に反応する材質なので、磁性体と呼ばれます。

一般の船の船殻には、値段が安くて、溶接がしやすいことなどから、普通の鋼材が使われることが多いのですが、「ヤマト-1」は、推進装置として磁石を積むので、船体が磁石の影響を受けたり、逆に磁石が船の影響を受けたりしないように、非磁性体のアルミニウム合金*8)を船殻に使うことにしたわけです。

以上が、「ヤマト-1」の仕様と主要目ですが、最終的にそこに落ち着くまでには、開発研究委員会の研究スタッフの悪戦苦闘の歴史がありました。

一例を挙げれば、船の排水量、すなわち重量です。当初、委員会の計画では、排水量50トンくらいの船が考えられていました。ところが、その後、推進システムを構成する装置機器類の重量や大きさが明らかになってくるにつれて、とても排水量50トンではこれらを搭載することが無理だということが分かってきました。

というのは、この50トンの船を設計速度8ノットで走らせることにし、船の右舷と左舷*9)にそれぞれ1基ずつの超電導電磁推進装置が搭載されることになったのですが、その時点で陸上で使われている超電導磁石の構造様式を踏襲してそのまま推進装置を設計すると、推進装置の重量が1基だけで50トン近くになってしまったからです。船には、推進装置のほかに、その推進装置に電力を供給するための発電機、原動機なども積み込まなければなりません。そのために、排水量を大幅に変更せざるを得ませんでした。

そこで、委員会では、船を大型化すると同時に、あらゆる知恵を絞って、装置機器類の小型軽量化を図り、当時の技術のベストを尽くして、推進装置本体の重量を1基当たり20トン以下に抑えました。そしてなんとか排水量185トンに収めることができたわけです。

どのように軽量化したのかについては、あとで詳しく述べることにしますが、推進装置を構成する超電導磁石の軽量化に成功したことが、世界初の超電導電磁推進船「ヤマト-1」の成功につながったといっても過言ではありません。

なぜならば、当時、おそらく超電導電磁推進装置そのものを作る能力は、世界の中の幾つかの国はもっていたはずですが、しかし、実物の船を

海水におかされ錆^{さび}となって消耗します(Chemical Corrosion)。錆となって消耗することの少ない性質を耐食性といいます。

また船殻の一部として異種金属が使われていれば、残りの金属との間で電池と同じような回路が構成され、正極(陽極)となった金属は溶け出し、減っていきます。これは電食(Galvanic Corrosion)と呼ばれる作用です。これについての対策も考えなければなりません。

*7) ステンレススチールのすべてが非磁性ではありません。オーステナイト系のステンレスは磁性を示しません。例えば「ヤマト-1」の場合、コイルを入れたヘリウム容器はJIS(日本工業規格)のSUS316Lというオーステナイト系の材料を用いました。オーステナイトというのは鋼材を構成する鉄の結晶組織の名称です。

*8) アルミニウム合金(Aluminum Alloy)

現在ではアルミニウム製の船が多く造られるようになり、比較的小型の連絡船や大型のプレジャーボートなどの大部分がアルミニウム船です。使用されるアルミニウム材はJIS規格A5083という、成分としてマグネシウムを含む系統のアルミニウム合金です。

*9) 船の左舷・右舷

船に乗り、船首の方向を向いたときに左側となる部分を左舷(Port Side)、右側を右舷(Starboard Side)と呼びます。

自力で走らせるだけの推進力をもった推進装置となると、非常に大きくて重くなり、その装置を船の中に収めて走ることは、工学的にも、工業技術的にも、非常に困難だったのです。そのため、各国とも、超電導電磁推進装置を作る能力はありながら、実際に超電導電磁推進船を造るところまではいたっていませんでした。

それをやり遂げたところに、「ヤマト-1」の意義があるといえます。

船内機器の一般配置図

ここに示された図2.1が、「ヤマト-1」の船内一般配置図です。推進装置すなわち両スラストが大きな空間を占めていることがよく分かると思います。

*10) 横隔壁 (Bulkhead)

船体の内部には所々に横方向の仕切り壁が設けられています。この仕切り壁を横隔壁と呼びます。横隔壁は船体の強さを増すと同時に、仮に船体の一部が破損して浸水しても、これらの壁が水密であれば、通路を閉じれば浸水は船体の一部にとどまり、安全です。潜水艦内部を写す映画では隔壁に設けられた通路を抜けて人間が移動するシーンがよく見られます。

*11) 推進動力 (Propulsive Power)

船がある速度で水の中を進むときには、船体には必ずその進行を妨げる方向に大きな力を水から受けます。すなわち抵抗です。この抵抗に抗して船は所定の速さで進むわけです。力学で習ったように力に抗して進むためにはそれだけのエネルギー、単位時間当たりで考えると(抵抗の大きさ)×(速度)の推進動力が必要なわけで、この推進動力を船は推進装置からもらうわけです。その推進装置は推進動力を出すためのエネルギーを動力源から供給され続けなければならないのです。

*12) 並列 (パラレル、Parallel)

機械などを2つ左右に並べた場合、並列とかパラレル (Parallel) の配置といいます。船の機関ならば船首方向を見て左舷と右舷と1つつ横並びという配置をします。これとは異なり、前後の配置を直列とかタンデム (Tandem) といいます。普通の自動車の座席はパラレル配置ですし、小型の飛行機の座席はタンデム配置が多いようです。これ以外に3個の物を三角形の頂点に配置するマカダム (Macadam) という形式があります。

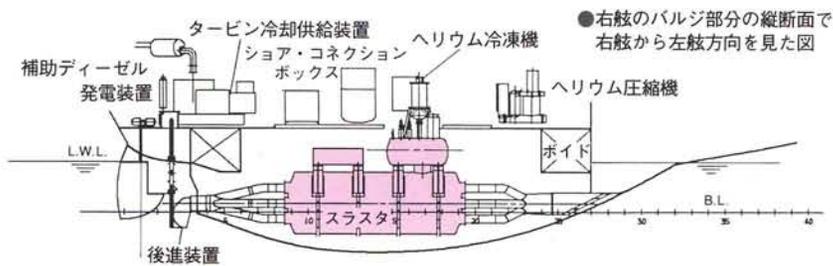
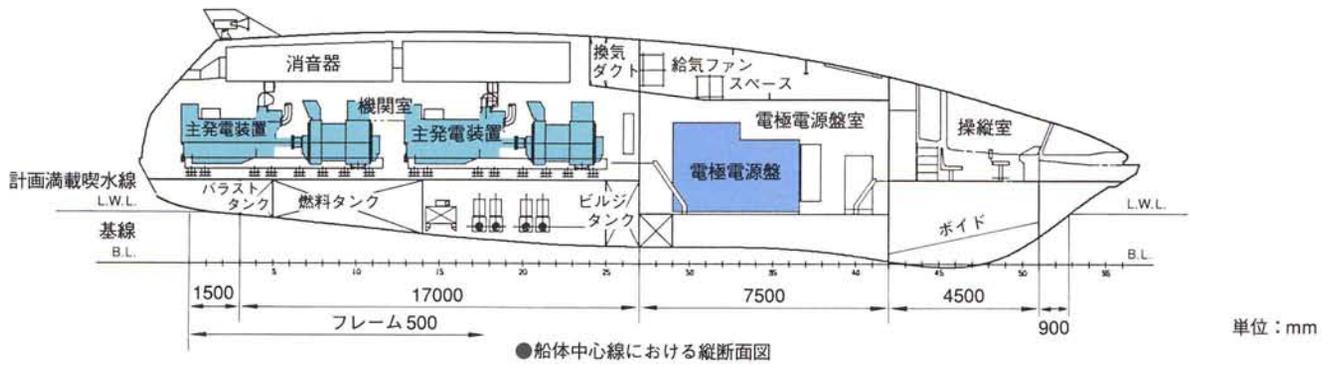
「ヤマト-1」の船体は、2枚の横隔壁*10)で3つの区画に分けられていて、前方から操縦室、電極電源盤室、機関室(動力室)というようになっています。

2基の超電導電磁推進装置は、船の右舷、左舷の下側に張り出したバルジ (Bulge: 船殻の張り出し部分をわれわれはこう呼びました) の中に、それぞれ1基ずつ収められています。

普通の船でいえば、スクリュプロペラに相当するのが、この超電導電磁推進装置になるわけです。超電導電磁推進装置といえども、そこにエネルギーを供給しなければ、船を動かすための推進動力*11)は得られません。そこで、超電導電磁推進装置にエネルギーを与えるための動力源として、「ヤマト-1」の機関室には、2基のディーゼル発電装置が搭載されています。推進装置は、右舷、左舷に並列*12)に配置されていますが、ディーゼル発電装置の方は、機関室上甲板^{じょうこうばん}上に一直線 (タンデム) に配置されています。そして、この2基のディーゼル発電装置から、右舷、左舷の超電導電磁推進装置に独立に直流電流すなわちエネルギーが供給されるようになっているわけです。

船の推進の力学的な説明をしますと、プロペラ船では、水中に突き出したスクリュプロペラが、スクリュプロペラの回転面内に入ってくる水を後方に力強く送り出し、その反作用で船が進みます。同様に電磁推進船でも、船が推進するのは、推進装置の作動域に流れ込んでくる水を船体後方へ押し出す、あるいは噴き出すことによる反作用によります。

「ヤマト-1」の推進装置は、初めに述べた通常のウオータージェット



*スラストと記されているのが超電導電磁推進装置

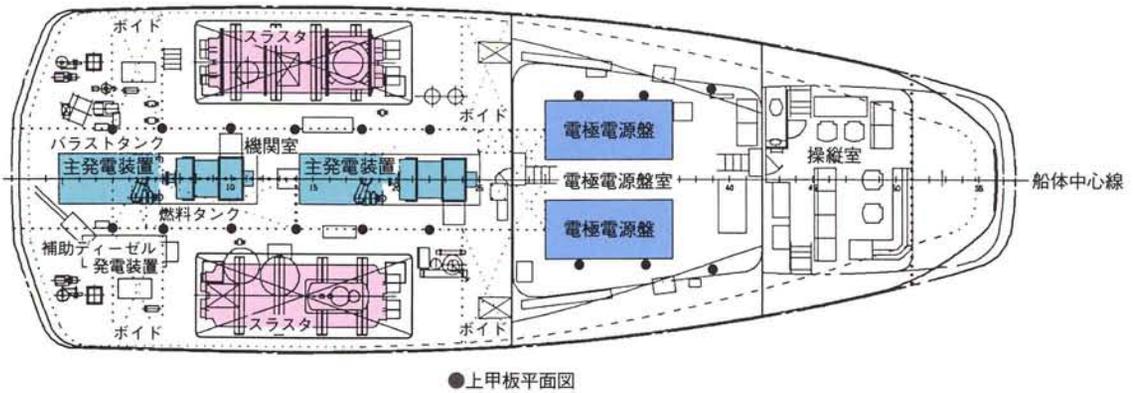
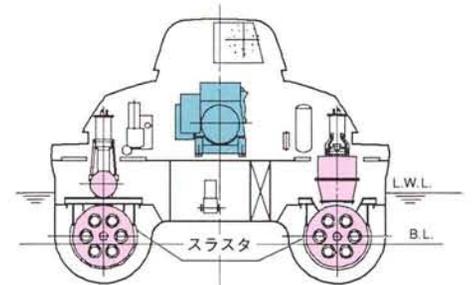


図 2.1 超電導電磁推進船「ヤマト-1」一般配置図



*13) ジェットフォイル (Jetfoil)

ボーイング社製の高速船で、航走に入ると水中翼で浮き上がり、水中から吸い上げた水を加速して船尾から噴き出し、40ノットの高速で走行します。水の噴き出しは普通水面のすれすれの位置で行われます。

システムと同じように水中から水を吸い込み、インペラでなく、後述するような電磁力的方法でその水にエネルギーを与えて、水中に力強く噴き出すようになっています。

水を噴き出すのは、水中である必要はなく、空中でも、原理は同じです。例えば、新潟—佐渡島間、大阪—高松間などの航行に使われているジェットフォイル*13)という船はウォータージェットで推進しますが、水中から水を吸い込み、空中に水を噴き出すという構造になっています。

「ヤマト-1」の場合は、機器の配置、重量配分、船の安定性や速度などを考慮して、水中から水を吸い込み、水中に水を噴き出すという形にしたわけです。

ちなみに、2基の超電導電磁推進装置は、それぞれ異なるメーカーによって作られました。すなわち、右舷のものは株式会社東芝の製作、左舷のものは三菱重工株式会社によるものです。

なぜ2基とも同じメーカーに製作を依頼しなかったのかというと、そもそも、「ヤマト-1」の製作は、超電導電磁推進装置の開発研究として

行われたもので、そこで得られる知識をなるべく広く造船工業界あるいは重工業界に行き渡らせることを、当初からの目的のひとつとしていました。それで、2基の超電導電磁推進装置の製作をわざわざ別々のメーカーに頼んだわけです。

もちろん、別々のメーカーに頼んだといっても、右舷と左舷で仕様や性能が全く違ってしまったのでは、一対の推進装置として船を動かすことはできません。したがって、推進装置の重量や大きさなどの基本的な仕様や、磁場の強さなどの最終的な性能値は、表2.2に示すように、全く同じになるように設計されています。その基本的な仕様や性能を守ったうえで、細かい部分、例えば、コイルに巻く線材の太さや巻き数などの部分で、それぞれのメーカーのノウハウ*14)を生かして、技術を競ってもらったわけです。

いい意味での競争は、技術の進歩に役立ちます。技術者が、それぞれのメンツをかけて、よりよいものを作ることにしのぎを削るからです。

表2.2 最終的に確定した超電導磁石の基本仕様

YAMATO-1	
形式	6連環内部磁場型超電導磁石
● コイル	
数量	6対
中心磁界 単体	3.5テスラ(T)
6連環	4.0テスラ(T)
磁界有効長	3000mm
冷却方式	液体ヘリウム浸漬冷却
● クライオスタット*15)	
外径	1850mm
全長	5400mm
常温ボア径*16)	260mm
重量	15トン(t)以下
熱侵入量	7ワット(W)以下

*これが超電導磁石設計のために委員会がメーカーに提示した性能値です。

*14) ノウハウ (Know-how)

機械その他の加工品などの製造上や取り扱い上の知識、経験、こつのようなもので、事改めて特許などにはしにくいですが、実際には極めて重要な知識、情報および技術のことをいいます。

*15) クライオスタット (Cryostat)

超電導磁石を構成する要素で、超電導コイルを収め、かつ極低温(−269℃)を維持するための断熱容器です。詳細については第5章59頁を参照して下さい。

*16) ボア (Bore)

円筒形のクライオスタットの一方の端面からもう一方の端面まで抜けている6本の中空部分のことで、この中にローレンツ力を受けて加速された海水が流れる海水管が挿入されます。詳しくは第5章62頁を参照して下さい。

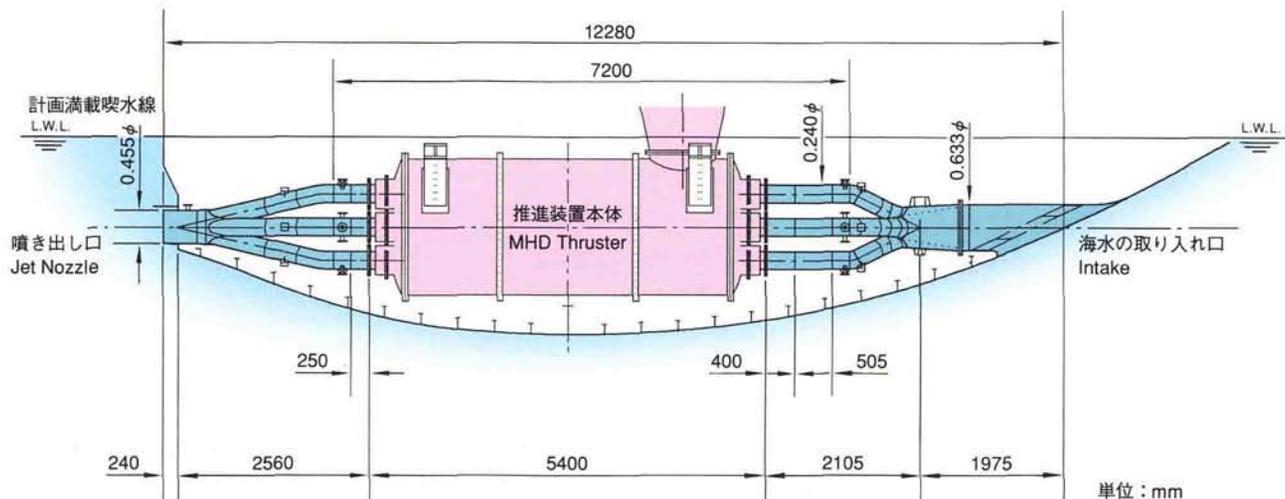


図 2.2 バルジ部に取められた超電導電磁推進装置とダクトシステムの全体図

このときの競争製作には、そういう狙いも込められていました。

超電導電磁推進装置が搭載されている バルジ部分の内部

バルジ部分の内部にある推進装置を側面から示したのが、図 2.2 です。図の右側が船の前方、左側が船の後方になります。

バルジ部分の前部と後部には、海に通じる開口部が1つずつあって、それぞれ海水の取り入れ口、噴き出し口になっています。写真 2.3 に海水の取り入れ口と噴き出し口を示します。

図 2.2 の中央に位置するのが超電導電磁推進装置で、推進装置の内部は、6本のユニットスラスト (Unit Thruster) が同心円上に等間隔で並ぶ「6連環構造」になっています。それを示したのが、図 2.3 です。

なぜこういう構造になったかについては、章を改めて詳述しますが、ここで簡単に触れておくと、われわれが得たいと思っている性能を、直径の大きな1本の推進装置で得ることは、これに使用する超電導コイルの強度*17)上、不可能だったからです。それで、直径のより小さい6本のユニットスラストを集めて、全体で1個の推進装置にしたわけです。

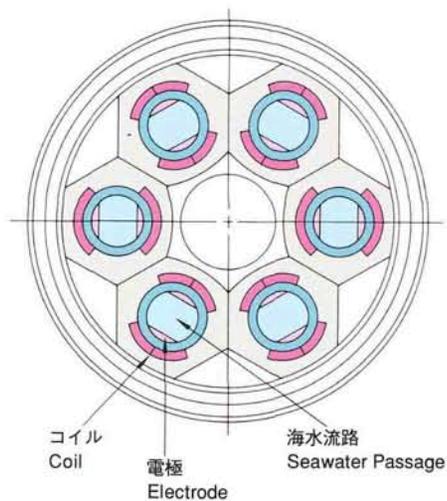


図 2.3 超電導電磁推進装置の断面

*17) 強度 (Strength)

ここでいう強度というのは機械的な強度、Strength のことで Intensity の意味ではありません。あとで説明す

これは、自動車やジェット機などで、エンジンのピストンシリンダーを1気筒ではなく、4気筒とか6気筒にしているのに通じます。

推進装置の前後には、6分岐・6合流*18)のダクト(管路)*19)が接続されています。それらのダクトはそれぞれ1本になってバルジ部分の前部と後部の船殻の開口部分につながっているわけです。

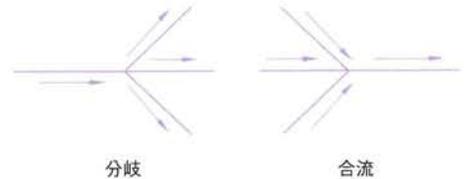


写真2.3 「ヤマト-1」の海水の取り入れ口と噴き出し口

るようにコイルの電線は自身の作り出す磁場と自分の中を流れる電流との相互作用で強い電磁力を受けます。その電磁力に耐えて、ちぎれたり変形したりしないだけの強さという意味です。

*18) 分岐、合流

パイプやダクト(管路)において、1本の管の中の流れが数本の管に分かれて流れ出すような管のつなぎを分岐、逆に数本の管の中の流れが1本の管の中の流れへとなる管のつなぎを合流といいます。川の支流、分流と比べて下さい。



*19) ダクト(Duct)

水や空気が流れる管路で、工学では普通比較的断面の大きなものに使います。

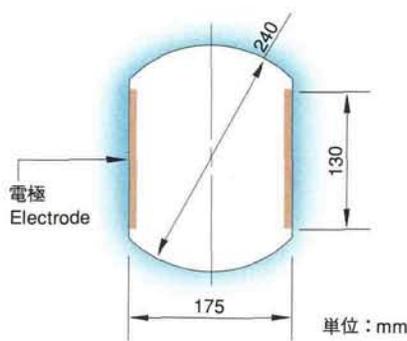


図2.4 超電導電磁推進装置内の海水流路の断面

すなわち、水はバルジの先端の水の取り入れ口 (Intake) から吸い込まれ、6本に分岐して推進装置の中を通過して、バルジ後端のノズル (Nozzle) から噴出されます。この海水の流れをたどってみましょう。

バルジ前部の取り入れ口から入った海水は、すぐに6本のより細いダクトに分かれて流れます。この6本のダクトは、それぞれ推進装置を構成する6本のユニットスラストの海水管 (Seawater Duct) につながります。

ユニットスラスト内で海水が動力を受ける部分の断面を示したのが、図2.4です。すなわち、ユニットスラスト内の両側に管軸と平行に正負の電極 (Electrodes) があり、正の電極から負の電極へ管を横切って直流電流が流れ、その直流電流に直角に上下方向に磁力線が通るようになっています。その結果、あとで述べる「フレミングの左手の法則」によって、海水は流れる方向へ強く押され、機械的な仕事を与えられます。つまり、海水はここで高エネルギーを得るわけです。奇妙なのは、水が力を受けるのはこの電極に挟まれた空間そのもので、そこにはインペラもスクリュウプロペラも必要がないことです。初めて電磁推進装置を見た人はこのことが不思議なのです。

6本のユニットスラストから出てきた高エネルギーの海水は、6本のダクトを通過して、再び1本の管に集められ、この管が、推進力を得るためのジェットノズルとなります。すなわち、海水は取り入れ口から吸い込まれ、電磁推進で加速され、このノズルから高速のジェットとして噴出されるわけです。したがって、初めに説明したようにわれわれが作り上げた推進装置も一種のウォータージェットであったわけです。

6本のダクトを合流させて1本のノズルにしたのは、6本に分かれたまま高エネルギーの海水を出すよりも、1本に集めて出した方が、エネルギー効率がいいからです。ジェットエンジンなどでも、同じ方法がとられています。

「ヤマト-1」には、右舷、左舷に推進装置がありますから、船は、2つのノズルから高速で噴出されるジェットの反動で前に進むわけです。飛行機でいえば双発機に相当します。普通のスクリュウプロペラ船でもスクリュウを2個、3個ともったものがあります。

「ヤマト-1」は実験船として造られた船ですが、開発当初から、通常の海域での航行を目指していたため、その設計、建造、運航に関しては、通常の船舶と同じように、現行の海事関係法令の適用を受けています。

具体的にいえば、船舶法、船舶安全法、およびそれらの関係法令などです。

ちょうど自作した自動車を公道上で走らせるために、関連する法令の適用について運輸省の許可が必要なと同じことです。

したがって、車検と同じように運輸省の検査官により法規にかなう構造と強度になっていることを詳細にチェックされます。そして、「ヤマト-1」は、これらの関係法令の基準をすべて満たし、船舶国籍証書や船舶検査証書の交付を受けています。それらを写真2.4に示します。

船舶国籍証書 第25058号

番号	133000	総トン数	166トン
信号旗字	JG5168	艀場都合積	1019.3062高
種類	汽船	上甲板下の容積	547.8926高
船名	ヤマト1	上甲板上の容積	471.4646高
		船首樓の容積	/ 高
船籍港	東京都	船橋樓の容積	/ 高
		船尾樓の容積	/ 高
船質	軽合金	甲板室の容積	471.4646高
		艀場所容積	/ 高
艀場所容積	2箇	艀場所容積	/ 高
推進器の種類	電磁推進器	艀場所容積	/ 高
進船地	兵庫県神戸市	艀場所容積	/ 高
進船者	三菱重工工業株式会社	艀場所容積	/ 高
進水の年月	平成3年4月	艀場所容積	/ 高

尺 上甲板の下面において船首樓の前面より船尾樓の後面に至る長さ 28.50m
 船体最広部においてプレムの外面より外面に至る幅 10.42m
 長さの中央においてキールの上面より船尾におおむね上甲板の下面に至る深さ 2.07m

所有者 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号
 財団法人
 シップ・アンド・オーシャン財団

上記の事項はいずれも正確であり本船は日本国の国籍を有することを証明す。
 平成4年6月30日

日本国
 関東運輸局東京海運支局

写真2.4 (a)「ヤマト-1」の船舶国籍証書

*本文中では「ヤマト-1」とハイフン“-”を付けて船名を書きましたが、法規上船名はハイフン“-”を付けることが認められていませんので「ヤマト1」としました。これが法的に正式な名前です。

船舶検査証書 第 119 号

船種及び船名	汽船 ヤマト1	船舶番号、船舶検査証書の番号又は船舶検査番号	第133000号	船種港又は登録港	東京都
総トン数又は船舶の長さ	166トン	用途	超電導電磁推進実験船	船舶所有者	財団法人シップ・アンド・オーシャン財団
航行区域又は従業制限	平水区域				
最大乗員数	乗客				0人
	船員				3人
乗船者	乗客				7人
	計				10人
制限	汽 圧				
その他の航行上の条件	(1) 日没から日の出までの間の航行を禁止する。 (2) 航行中は随伴船を伴うこと。				
有効期間	平成4年7月3日から平成10年7月2日まで				
船舶安全法第9条第1項の規定により交付する。 平成4年7月3日					
神戸海運監理部長 西村泰彦					

写真2.4 (b)「ヤマト-1」の船舶検査証書

第 3 章

電磁推進の原理と方式

電磁推進の基本原則

電磁気学の基本法則のひとつに、「フレミングの左手の法則」と呼ばれるものがあります。

左手の親指、人さし指、中指を互いに直角になるように開き、人さし指方向に磁場*1)を働かせ、中指方向に電流を流すと、電流の担い手は親指方向に電磁力、すなわちローレンツ力*2)を受けるというのが、フレミングの左手の法則 (Fleming's Left-hand Rule) です。

超電導電磁推進船の推進原理は、このフレミングの左手の法則を応用したもので、それを分かりやすく示したのが図3.1です。

図を見ていただければ分かるように、船内には、棒磁石が固定して置かれています。この棒磁石から磁力線*3)が出て、磁場を形成するわけですが、その磁力線をよく通過させるように、船体は、アルミニウム合金やステンレス鋼などの非磁性体で作られています。したがって、棒磁石による磁場が、船体を取り巻く海中に形成されるわけです。

また、船体の底の外側壁には、左右対称に正、負の電極が設けられていて、海水中で磁場と直角にもしくは直角に近い角度で交わるように、

*1) 磁場 (Magnetic Field)

一般的な話として、われわれが取り扱う力の中には、動いている2つの物体が衝突した際に発生するような、2物体が直接接触し合ったりしたことで働く力ではなく、重力とか正の電極同士が反発したりする力とかいうふうに、空間を隔てた物質間で及ぼし合う力があります。

これらの力を考えるとき場という概念を使います。例えば、私は地球の上に暮らしています。したがって、常に万有引力により引っ張られているわけで、その場合、私は地球の引力の働く空間、すなわち、重力場にいるというように考えます。もちろん私自身の引力の作る場も存在するわけですが、地球と私との関係だけ考え、地球に対する私の運動を考えるというような場合は、地球の重力場に私がいるというように考えればよいわけです。

このように力の原因となる存在があり、その周りの空間で、空間を介して力が働く場合としては、電極の作る静電作用の働く電場と、磁石による磁気作用すなわち磁力の働く空間、すなわち磁場、それに引力による引力場 (地球の場合、地表近くに限定して地球による引力を重力と呼ぶ) が、われわれが通常経験するものです。

*2) ローレンツ力 (Lorentz Force)

磁場の中を動く電子に働く力をローレンツ力と呼びます。この本では磁場と電流との関係で表現されていますが、電流は電子の流れ (ただし、電子は電流とは逆に負極から正極へ動いています) ですから、内容的には同じです。

*3) 磁力線 (Lines of Magnetic Force)

白い紙の上に鉄粉を一様にばらまき、その紙の下に馬蹄磁石を置いて、軽く紙を揺するよく知られた実験があります。紙の上には磁石の両側をつなぐきれいな線図を描いて鉄粉が並びます。これらの線は磁力線を目で見えるようにしたものです。要するに磁石の力の作用線を連ねた線です。

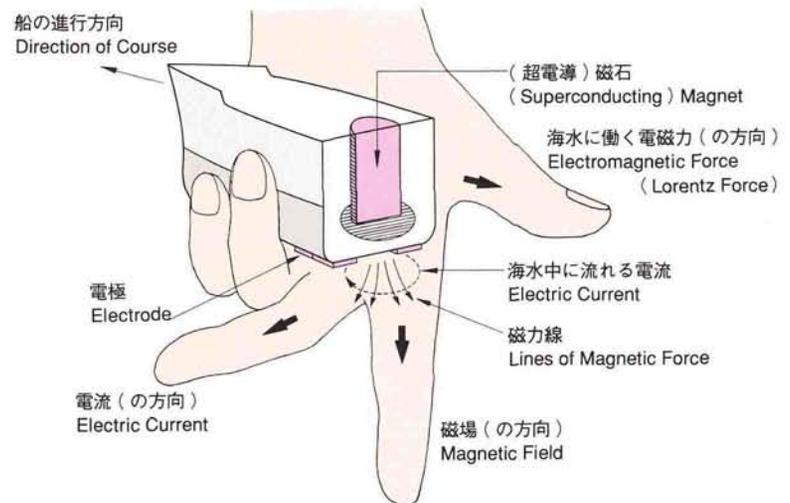
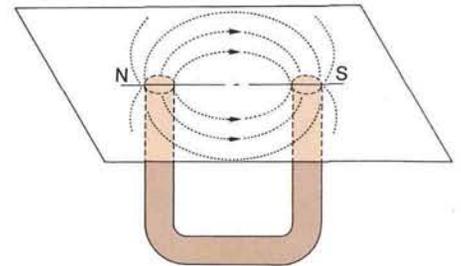


図3.1 外部磁場型電磁推進の原理とフレミングの左手の法則



この線の上に小さな針磁石をもってくるとそれはこの線に沿う形になります。すなわち、針磁石のN極は磁力線に沿って馬蹄磁石のS極の方を指します。磁力線は、この小さな針磁石のN極の向く方向、すなわち、馬蹄磁石のNからSへ向かう方向を向いていると考えます（これは約束事です）。そしてこれらの線の分布は両極の近くで密になっています。このことから明らかかなように、磁力線の分布の密なところは磁石による力が強いということです。ある磁石から出た磁力線が通っているところが、その磁石の作る磁場です。実際上は磁力線の密度がある程度以上に大きい場所だけを問題にすればよいのです。



付図 磁力線

直流電流が流れるようになっていきます。そうすると、フレミングの左手の法則によって、電流の担い手である海水に、電磁力、つまりローレンツ力が働くことになるわけです。

このローレンツ力は、海水を船の後方へ押しやる方向に働きます。そこで、船は、その反作用の力を磁石に受け、その磁石は船に固定されているため、船は前に進むわけです。

これが、電磁推進の基本的な原理です。

電磁推進の方式

次に電磁推進の方式についてももう少し詳しく説明しますと、電磁推進は磁場の種類の違いと作用域の違いによって、それぞれ2つの方式に分類されます。

まず、磁場の種類による分類としては、交流磁場方式と直流磁場方式の2つがあります。

交流磁場方式というのは、交流磁場によって海水中に誘導される電流と磁場との相互作用によって、電磁力を得る方法です。この方式ですと、海水中に直接通電をする必要がありません。したがって、電磁推進方式としては、直流磁場方式より望ましいのですが、残念ながら、交流用の超電導磁石そのものがまだ実用化されていないため、「ヤマト-1」の電磁推進装置では、直流磁場を用いるしかありませんでした。

次に、電磁力の作用域による分類としては、図3.1のように、船体外周の海水中に電磁力を発生させ、その電磁力を利用して船を推進させる外部磁場方式と、図3.2のように、船体内部を前後方向にダクト（管路）を貫通させ、そのダクト内の海水に電磁力を働かせて船を推進させる内部磁場方式、すなわちウォータージェット形式の2方式があります。

前述したように、電磁推進の基本原理のところでも触れたのは、外部磁場方式によるものです。

それぞれの特徴を述べますと、外部磁場方式は、内部磁場方式に比べて、システムの構成が単純であるという利点があります。したがって、モデルシップなどを走らせる場合には、よくこの外部磁場方式が使われます。第1章で述べたWayや神戸商船大学の佐治教授グループが試みたのも、この方式でした。図3.3に佐治教授グループのSEMD-1の推進装置を示します。SEMD-1はこれを船の底につすように取り付け

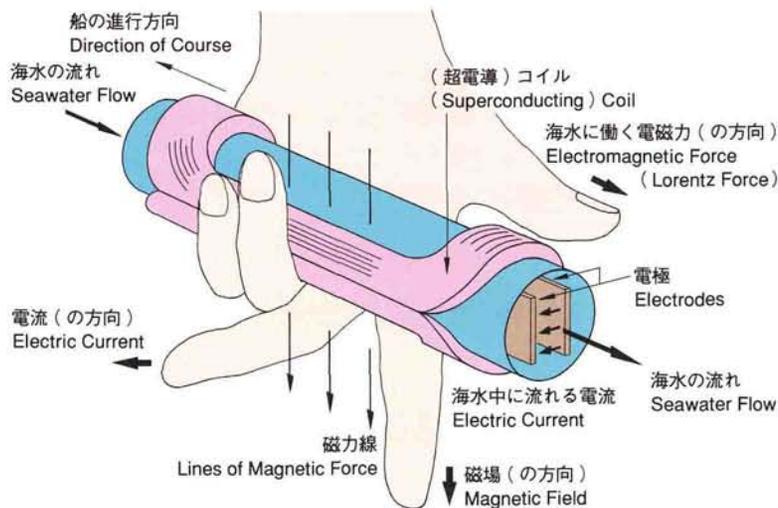


図3.2 内部磁場型電磁推進の原理とフレミングの左手の法則

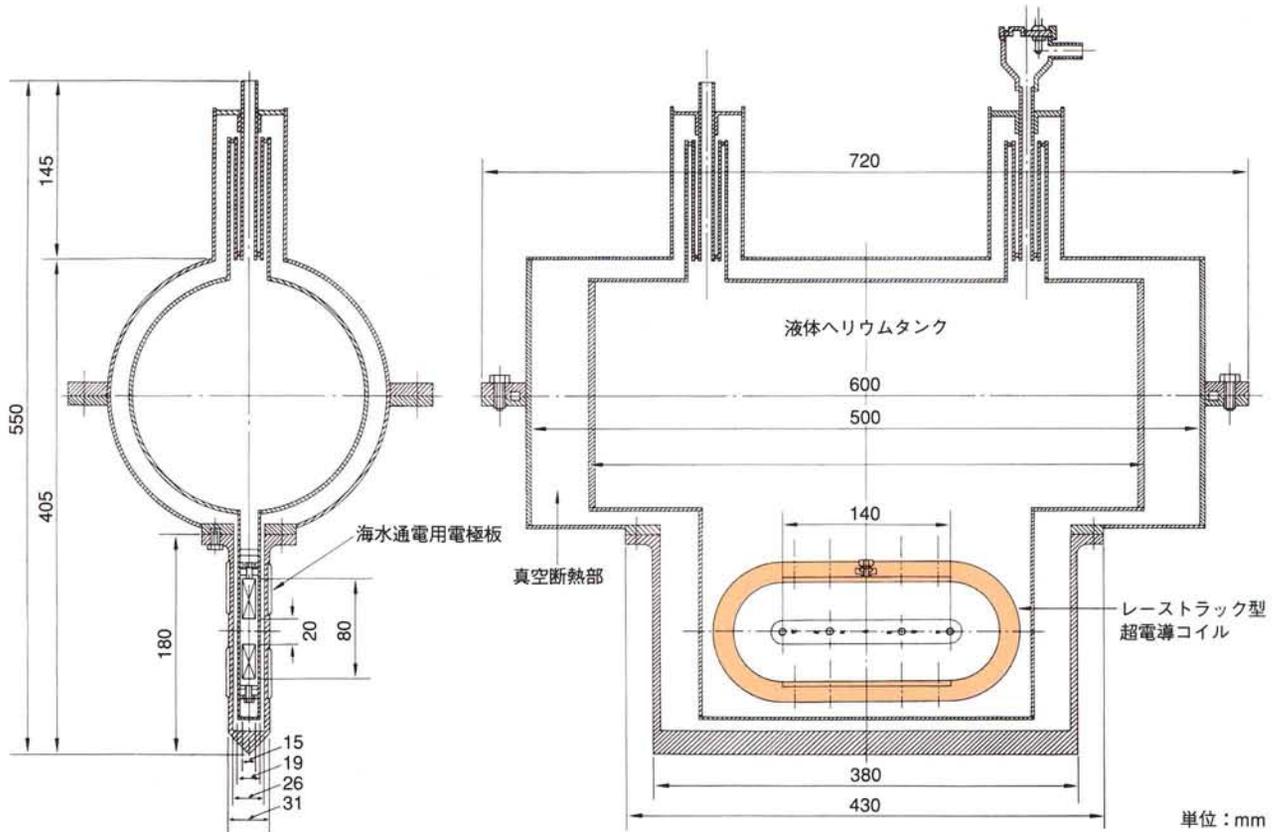


図3.3 模型船「SEMD-1」に使用した超電導電磁推進装置

(岩田章、佐治吉郎：「超電導による電磁推進の科学」、朝倉書店刊(1991)による)

ています。

しかしながら、外部磁場方式では、船体外周の海水の中に強力な磁場を作り、そこに強大な電流を流すために、外部環境への影響が極めて大きいというマイナス面があります。

例えば、海水中に鉄製のものがあると、強い磁場に反応して、それが船底に付いてしまいますし、また、鋭敏な電気計器が近くにあつたりしますと、強い磁場の影響を受けて、電磁気的な障害を引き起こしてしまうわけです。

さらには、生物に与える磁場の影響という問題もあります。鳥などは、強い磁場があると、逃げてしまいます。人体への磁場の影響はこの時点では一応ないとされていたのですが、しかし、それとても、はっきりし

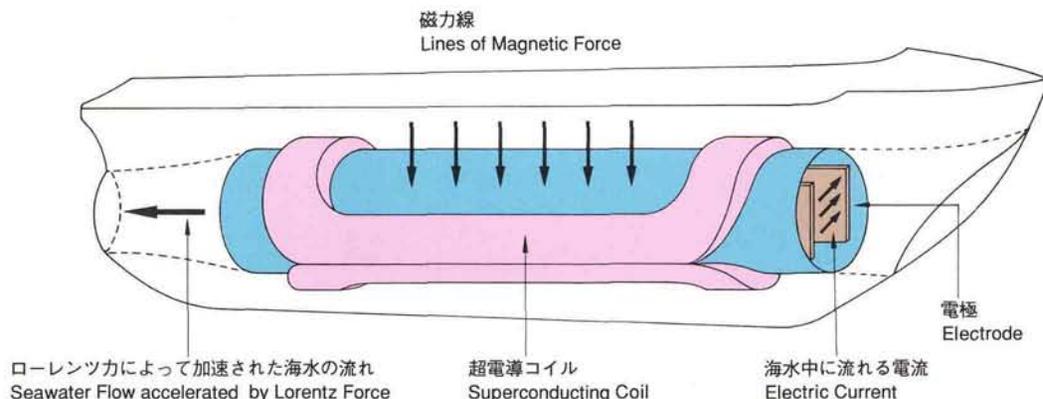


図3.4 内部磁場型電磁推進船の概念図

船首の開口部から海水を取り込み、中央の電磁推進装置で加速して、船尾の開口部から海水を噴き出し、その反動で前に進みます。

た実験データがあるわけではないのです。少なくとも、ペースメーカーや補聴器のようなものを付けている場合は当然影響があるはずです。

以上のような理由から、模型船ならともかくとして、実際の船に外部磁場方式を使用するのは、あまり適当ではないといえます。

これに対して、内部磁場方式の場合は、ダクト内を海水が流れるために、ダクト内での流体摩擦が大きくなり、結果として、船の推進の効率をいささか悪くするという難点がありますが、磁場と電場の作用域をダクト内の一部に限定しやすく、また、漏れ磁場に対する対策もできるという利点ももっています。

このため、「ヤマト-1」では、外部環境への影響などを考慮して、外部磁場方式でなく、内部磁場方式を採用することにしました。

次に、「ヤマト-1」で採用した内部磁場型電磁推進装置について、詳しく述べることにしましょう。

内部磁場型電磁推進装置のモデル

図3.4が、「ヤマト-1」で採用された内部磁場型電磁推進装置の概念図です。

船体内部には前後方向にダクトが走っていて、船首、船尾に1つずつある開口部で海とつながっています。船首の開口部からダクト内に水が

入ってきて、船尾の開口部から水が出ていくようになっているわけです。

ダクトは、磁場に影響を及ぼさないように、非磁性体の材料でできていて、ダクトの外壁には、鞍（Saddle）のような形をした2つのコイルが、向かい合うように取り付けられています。この2つのコイルが、ダクトと直交する強い磁場をダクト内の空間に作るわけです。

ダクト内に磁場を発生させるコイルとしては、鞍型のほかに、レーストラック型といって、運動場のレーストラックのような形をしたものもあります。ただ、このレーストラック型だと、磁場の最も強い部分を有効に使うことができません。それに対して、鞍型のコイルは、ダクト内に均一な磁場が得られ、しかも磁場の強い部分を有効に使うことができるため、「ヤマト-1」では、鞍型を採用したわけです。

さて、磁場が形成されるダクト部分の内壁には、図3.4のように、両側に正と負の電極が設けられ、電流が海水中を磁場およびダクトの軸と直交する方向に流れるようになっています。2つの電極のどちらが正でどちらが負かを、電極の極性といいます。この電極の極性は、磁場の向きに対応して海水が船尾の方へ流れるように設定されます。すなわちフレミングの左手の法則によって、ダクト内の海水は、船尾方向にローレンツ力を受けることになるわけです。



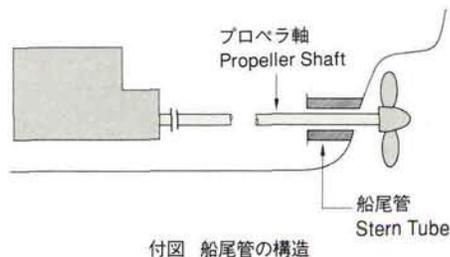
*4) 電場 (Electric Field)

電気量をもったもの(電荷をもったもの)の周りの空間では電氣的な力が働くようになります。このような場所をその電荷による電場といいます。磁場、重力場などと同じ類の言葉です。

*5) 船尾管 (Stern Tube)

スクリュープロペラで進む船の場合、小型のモーターボートなどに用いられる船外機は別として、普通の船は船内に設置されたエンジンもしくはエンジンにつながる歯車装置から出ている軸がスクリュープロペラの軸とつながってこれを回転させます。したがってこのプロペラの軸は船外から船殻を通して船内へと入らなければなりません。その個所でプロペラ軸を支えると同時に船外からの水の浸入を抑える役をするのが船尾管で、管の内側はプロペラ軸を抱くと同時にそれがスムーズに動くように特別の材料で作られています。この材料は昔は中南米産のリグナムバイタという木材が用いられていましたが、現在は硬質ゴム状の有機化合物が用いられています。

このような構造であるからどうしても少量の水が船外から船内へ、あるいは逆に船内のビルジが船外へということが起きます。さらに現在の大型船ではこの部分にはもっと複雑で高級な装置が用いられています。



付図 船尾管の構造

ローレンツ力によって海水がエネルギーを与えられるダクトの内部を、磁場と電場*4)の作用域と呼ぶのですが、この作用域の中で、電流を通じている海水はローレンツ力を重力と同様に存在する体積に比例して働く力、すなわち体積力という形で受けることになります。そしてその力の方向はダクトの軸の方向と一致し、向きは船尾の方を向いています。したがって、ダクトのこの部分を通れる水はちょうど重力場に垂直に置かれたダクトの中を水が流下する場合とよく似たことになります。すなわち、ダクトの中を船尾方向に流れるにつれて海水の圧力は高くなります。

ベルヌーイの定理流にえば、この間で海水は圧力のエネルギーをもらうことになります。そしてこの高圧の水はダクトの船尾側のノズルにおいて、圧力エネルギーを速度エネルギーに変え、このノズルからジェット噴流となって勢いよく噴出されます。このジェット噴流の反動によって、船は前進するわけです。

電磁推進の特徴

電磁推進には、従来のスクリュープロペラによる推進と違って、次のような優れた特徴があります。

1. 従来のプロペラ推進の場合、プロペラやそれに回転力を伝える軸系などの機械的な動力伝達機構が存在し、それらが大きな力を船体に伝える構造になっているのに対して、電磁推進の場合は、プロペラや軸系などの機械的な動力伝達機構がないため、これらに起因する振動や騒音は全くありません。
2. 船体を貫通する回転軸がないため、船尾管*5)が不要になり、海水が船内に浸入したり、船内のビルジ*6)が船外に漏れたりすることがありません。
3. プロペラがないため、従来の船に比べて、自由度の高い船尾設計が可能になります*7)。
4. 超電導磁石の発生磁場が一定の場合、推力は海水通電電流に比例するため、電流の方向や大きさを変えることによって、前後進*8)を含めた速度の制御が容易になります。簡単にいえば、船の速度制御が電流のコントロールだけでできるのです。
5. スクリュープロペラの場合、高速回転をさせるとキャビテーション*9)が発生して、推力や効率が低下するとともに、振動や騒音が発生



します。それに対して、電磁推進の場合は、キャビテーションがあまり起きないので、高速推進が可能となります。

電磁推進には、以上のような優れた特徴があるために、電磁推進船の実用化の意義があるわけです。

電磁推進船が実用化されたあかつきには、スクリュープロペラでは達成できない超高速船として、また振動や騒音の極めて少ない客船として、さらには、速度制御の容易さを利用した性能のいい観測船などとして、幅広く活躍できるものと、期待されています。

*6) ビルジ (Bilge)

船底にたまる汚水、日本語ではあかという言葉が使われます。

*7) 船尾形状

船尾には、船の推進力を発生させるためのスクリュープロペラや船の進行方向を変えるための舵といった重要なものが付くため、水の流れや強度・振動などを十分に考慮した設計・製作を行う必要があります。

*8) 船の後進

船の推進は船首の方へ進むことに重点が置かれ、後進のために特別に装置を設けることは少なく、スクリュープロペラを逆転させる場合が多いようです。このために、小型の船では自動車のように歯車を使った逆転装置を使います。大型船でプロペラとエンジンの出力軸が文字通り直結されている場合は、エンジンを逆転させることとなります。

*9) キャビテーション (Cavitation)

スクリュープロペラがプロペラとして働くのは、プロペラの回転方向を向いている面に働く水の圧力が高く、回転方向と反対側の面に働く水の圧力がより低くなるからです。そして両羽根面での圧力分布は一様ではなく、高いところ、低いところが存在します。回転方向と反対側の面のいちばん圧力の低い個所の圧力が、そのときの水の温度に対応する水の蒸気圧より低くなると、局所的にそこで水が蒸発して水中に空洞を生じます。これがキャビテーション現象です。これが次々と発生すると、その空洞が下流へ流れて消滅するとき強い高周波の水中音が発生し、現象が激しい場合はプロペラの羽根面に虫の食ったような孔が開きます。

第 4 章

実用化に際して解決すべき諸問題

開発研究委員会では、「ヤマト-1」の推進装置として、内部磁場方式を採用することに決定しましたが、この方式の電磁推進装置を製作して「ヤマト-1」に搭載し、実際に船を動かすことができるだけの推進力を得るまでには、解決しなければならない、しかも解決が非常に難しい、技術上の問題が幾つかありました。

これらの問題は、最終的にはなんらかの形で解決したわけですが、その解決にいたるまでには、極めて長くて厳しい道りを要したといわなければなりません。

第一の問題は、強烈な磁場を、いかにして外部に漏らさないように処理するかということでした。

外部磁場方式にしても、内部磁場方式にしても、強烈な磁場を作ることによって、船を推進させるためのローレンツ力を得るという基本的な原理には、変わりがありません。

その際、外部磁場方式がその強烈な磁場をいわば外に出しっ放しであるのに対して、内部磁場方式の方は、磁場をダクト内に限定しやすいため、開発研究委員会では、内部磁場方式を採用したわけですが、その内部磁場方式といえども、ダクト外への漏れ磁場が全くないというわけではないのです。

したがって、われわれとしては、磁場をなるべく外に漏らさないような方法を、なんとしても考案しなければならなかったわけです。

漏れ磁場を防ぐためには、基本的には、磁気を遮へいするものを装置の外に巻き付けてしまえばいいわけですが、これは言うはやすく行うは難しで、現実的な解決方法ではありませんでした。なぜなら、強い磁場の力を残しながら、外への影響力だけを弱める遮へい物を作るためには、強い磁場を作るのと同じくらいの手間と装置が必要になるからです。

そこで、われわれは、磁力線を推進装置の中だけで走らせるような構造について、十分な討議を尽くし、その結果、次の章で詳しく述べるような「6連環構造」の推進装置にすることによって、漏れ磁場を極力少なくすることにしました。この方法だと、磁場の強さを残したままで漏れ磁場を防げるというめどが立ったため、内部磁場方式を進めることができたわけです。

この漏れ磁場の問題をいかに解決するかということが、推進装置を開発することだったといっても、決して過言ではありません。

第二の問題は、内部磁場方式というアイデア自体は昔からあるものですが、それを実用化した場合、果たして推進装置としてどれだけ効率よ

く動くのか、つまり、効率がどれくらいになるのかということでした。

これは、現在、一般に使用されているプロペラ推進についてもいえることですが、船を動かすために投じられたエネルギーのすべてが、船の推進に使われるわけではありません。一部が熱エネルギーとして放出されてしまったり、機械部分相互の摩擦のために使われたりして、実際に船を推進するために使われるエネルギーは、投じたエネルギーの何十%とか何%とかになるわけです。

推進装置に投じたエネルギーのどれだけの割合が船の推進のために使われたか、その割合が高ければ高いほど、効率*1) がいいということになるわけです。

「ヤマト-1」は、実験船とはいえ、当初から、実際の海での航行を目標としていましたから、内部磁場方式を実用化するに当たっては、どうしてもこの効率の問題を考えなければならなかったわけです。具体的にいえば、どれくらいの強さの磁場を作ることができれば、プロペラ推進の効率に負けないだけの効率が得られるかということです。残念ながら、それについての詳しい研究というのは、それまであまりありませんでした。ある意味では、それも無理のないことなのです。なぜなら、電磁推進による実物の船というのは、それまでなかったものだからです。

確かに佐治教授の「SEMD-1」や「ST-500」は走りましたし、その資料はありましたが、これらは外部磁場方式です。そこで、内部磁場方式のモデルを作り、それを筑波にある研究所の水槽で走らせるとともに、「ヤマト-1」のユニットスラストのプロトタイプとでもいうべき超電導電磁推進装置を作り、これを筑波研究所で運転し詳細なデータを得ました。

一方、理論的にもこの磁場の強さと推進効率の問題について、独自の研究をすることにしました。その成果については、開発研究委員会のメンバーである大阪大学名誉教授の今市憲作と、シップ・アンド・オーシャン財団の玉眞洋とが、共著で英国船用機関学会*2) に提出した論文、“The superconducting magnetohydrodynamic propulsion system of Yamato-1: design, structure and performance”の中で、詳細に論じられています(ちなみにこの論文は、英国船用機関学会からシルバーメダルなど、3つの賞を受賞しました)。

ここでは、結論だけをいいますと、この研究の結果、現在、一般に使用されている商業用のプロペラ推進装置と競争できるだけの効率を得る

*1) 効率 (Efficiency)

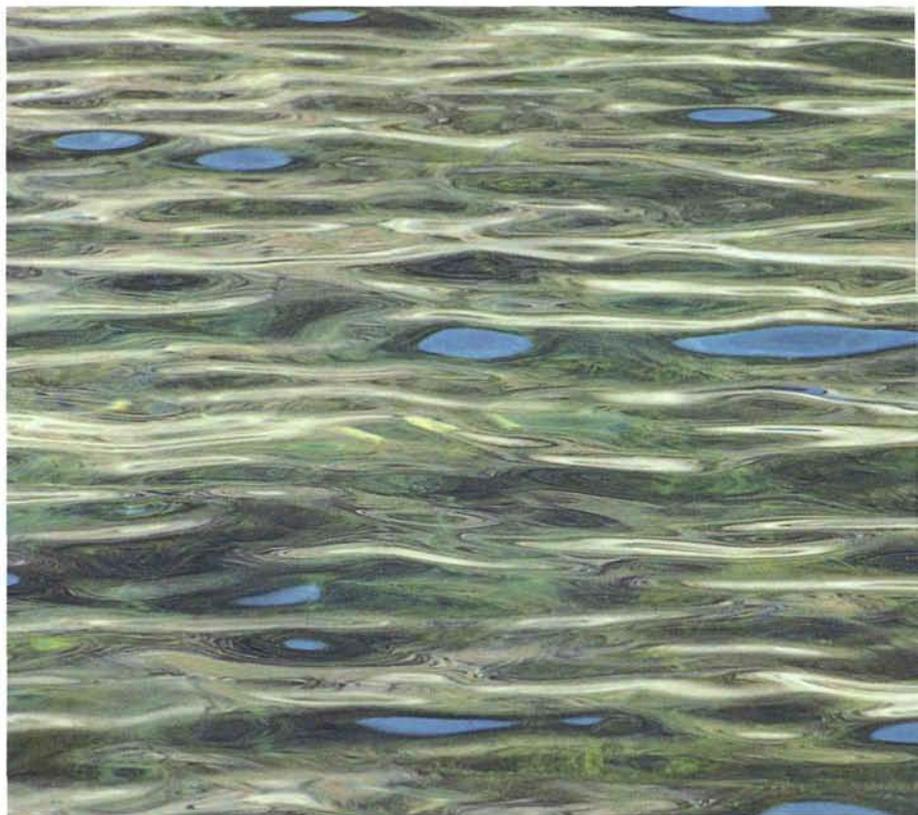
効率ということを考えてみましょう。

普通の船の多くはディーゼル機関を原動機として積んでいます。ディーゼル機関は重油もしくは軽油を燃料とします。これらの燃料は、ほぼ1万kcal/kg = 4万1850kJ/kgの(低位)発熱量をもっています。このエネルギーは燃料の燃焼によりピストンへ35~40%くらいが伝えられます。この割合が熱効率です。残りの65~60%の熱は最終的には煙あるいは冷却水とともにエンジンから出ていきます。そしてピストンのもらったエネルギーの98%程度がエンジンのクランク軸端から機械的な出力として取り出されます。この98%程度がエンジンの機械効率です。残りはエンジン内でのピストンやクランク軸の運動に伴う摩擦損失となり潤滑油の温度を上げることになります。エンジンからの出力はプロペラ軸へ伝えられ、スクリーブプロペラにその大部分が伝えられ、2~5%は途中の軸や船尾管で摩擦損失として失われます。したがってエンジン出力がプロペラの必要動力となる割合、すなわち伝達効率が95~98%となります。スクリーブプロペラのもらった動力は推進のためにその一部を、残りは後方へ押しやられる水の運動エネルギーとして使われます。その割合が推進効率で最も良好な運転状態で50~70%です。したがって初めに示した燃料の燃焼で与えられる発熱量のごく一部が推進動力となるに過ぎません。

なお、熱力学の理論の示すところに従えばディーゼル機関、ガソリン機関、ジェットエンジン、および蒸気機関などの熱機関では燃料の燃焼で発生する熱量をすべて機械的な仕事に変えることはできません。ここで示したディーゼル機関はその効率が最も高い方で、機関車などの蒸気機関ではたかだか10%程度に過ぎません。

*2)

The Institute of Marine Engineers (London, England)



*3) テスラ (Tesla)

磁場の強さを表すSI (国際単位系) 単位で、このように大文字のTを用います。電磁気学でよく用いられる単位はG (ガウス, Gauss) であり、 $1\text{T}=10000\text{G}$ の関係にあります。

テスラはクロアチア生まれの電気工学者 Nikola Tesla (1857~1943) の名にちなんだもので、27歳で米国に渡り帰化、現在の交流発電・送電システムの基礎を確立しました。

なお、ガウスは1930年の国際電気標準会議で定められた単位で、ドイツの大学者 Karl F. Gauss (1777~1855) の名をとったものです。

われわれの住む日本における地磁気の強さは約0.46 G、すなわち $4.6 \times 10^{-5}\text{T}$ です。このことから1Tといえば相当強い磁場ということが分かります。

なお本書の中では、ほかの記号と間違わないようになるべくテスラ、ガウスと書いています。

ためには、電磁推進装置の磁場として、少なくとも20~30テスラ(T)*3)の強さのものが必要になるということが分かりました。1テスラというのは1万ガウス(G)ということですから、20~30万ガウスの強い磁場が利用できれば、電磁推進でも、プロペラ推進と同じくらいの効率が得られるということです。

しかしながら、そのように強い磁場を「ヤマト-1」の推進装置に用いることは、開発研究委員会の発足当時としては、全く不可能なことでした。おそらく現在でも、船舶用推進装置において、それほどの強い磁場を実現することは、極めて難しいと思われます。

というのも、単純に磁場の強さというだけのことなら、当時でも、20~30テスラの磁場は実現していましたし、現在では、それよりはるかに強い磁場、例えば50テスラとか、80テスラといった磁場の実現が、実験



物理の世界では報告されています。しかし、これらはいずれも、その磁場の空間的な大きさや広がり数が数センチメートル四方と小さく、しかも、あくまでも短時間実現されたに過ぎないのです。したがって、大きな船の推進装置として使用するために、20～30テスラの強さの磁場を十分な空間内で一様に、なおかつ持続的に得るということは、不可能だったわけです。

そこで、開発研究委員会では、当時の技術的なレベルから判断して、実現可能で、しかもわれわれの目的にかなうだけの十分な空間的広がりをもつ磁場の強さを検討して、目標設定値を4テスラと考えました。

4テスラの磁場の強さですと、電磁推進装置として達成できる推進効率は、たったの2%、もしくはそれ以下という値になってしまいます。推進効率を高めるためには、当然のことながら、もっと強い磁場が必要

なわけですが、なぜ磁場の強さの目標設定値を4テスラにしかできなかったかといいますと、当時としては、4テスラの強さでさえ、空間的広がりと時間的持続性をもって、その磁場を作り出すというのは、容易なことではなかったのです。

率直に言えば、果たして本当に4テスラの磁場を作ることができるのかという懸念もあったほどです。しかし、目標を設定して、それを目指して努力していくことこそが、技術の進歩につながっていくという考えから、設計する際の磁場の強さを4テスラとしたわけです。

目標設定値を4テスラにしかできなかった理由は、ほかにもありました。仮に4テスラ以上の強さの磁場を作ること自体はできても、その磁場に耐え得るコイル構造を、船に搭載できる軽さに作るということが、技術的に極めて困難だったのです。

どういうことかといいますと、強い磁場を作ると、磁場を作っているコイルそのものも、自分が作り出している強い磁場と自分自身を流れる電流の影響を受け、コイル導線の断面、あるいはその支持構造物の断面に、非常に強い力がかかります。これをフープストレス（Hoop Stress、たが応力）*4) というのですが、このフープストレスに耐えるだけの強

*4) たが応力（フープストレス、Hoop Stress）

「たが」というのは、桶や樽などの周りにはめて、その胴の部分を締め付け離れないようにしている竹や針金で作られた輪です。英語ではHoopがこれに相当します。フラフープのフープと同じ言葉です。

桶や樽が形を保っているのは、この輪すなわち、たがが円錐上の胴にかしめ込まれて、胴の部材を締め付けているからです。当然、その反作用としてこの輪はびんと伸び切ります。この状態でこの輪の断面が引き合っている力が「たが応力」です。



さをもっていないと、コイルは切れてしまうのです。

例えば、くぎに銅線を巻き付けて電磁石を作り、そこに強い電流を流すと、銅線に磁場に耐えるだけの強さがない場合は、自分が作り出した磁場によってフープストレスを生じて、切れてしまいます。

しかもなお悪いことに、超電導コイルの場合、常電導コイルよりも導線の素材そのものが極めて細くて力に対して弱いものが多いので、なんらかの対策をとらないと、フープストレスで簡単に切れてしまうのです。

そこで考えられる解決策としては、コイル押さえとって、コイルを鉄とかコンクリートなどの頑丈なもので固めて、コイルを押さえ込んでしまうことですが、船の電磁推進装置には、この方法を使うことはできないのです。なぜなら、鉄やコンクリートで固めてしまうと電磁推進装置の重量が非常に重くなってしまって、船に搭載することができなくなってしまふからです。

さらには、超電導コイルを冷却させるための冷却剤の問題もありました。

超電導状態（電気抵抗がゼロの状態）を作り出すためには、コイルを冷却して、極低温状態に保ち続けなければなりません。そのための冷却剤としては、超電導材料としてニオブチタン（NbTi）*5) を用いた場合、 -269°C の液体ヘリウムを使わなければなりません。そのためには、導線およびその周りの構造の収縮率を、できる限り均一にすることも必要になってきます。

以上のようなさまざまな理由から、開発研究委員会では、目標とする磁場の強さを最終的に4テスラとし、実際に船を動かす電磁推進装置の開発に当たったわけです。

超電導^(文献1, 2)

ここで、「ヤマト-1」の超電導電磁推進装置の話に入る前に、超電導現象について少し触れることにします。

先に述べたように、電磁推進に必要な磁場を得るには強力な電磁コイルが必要です。そのコイルの導線には普通の材料、すなわちわれわれになじみの深い銅、銀、アルミなどの電線を普通の温度（常温）のまま用いるわけにはいきません。その理由はすでに述べたように、常温ではこれらの電線はすべて電気抵抗をもっており、強い磁場を作るための大電流および長い導線の長さは電気抵抗に起因する大量の熱の発生*6)を伴

*5) NbTi

これはニオブとチタンの合金を表したものです。このような記号を用いると化合物のように見えますが、慣用に従い本書でもこの記号を用いました。合金、金属間化合物については50頁の第4章の注*9)、*10)を参照して下さい。

*6) 熱の発生

物質中を電流が流れる場合の発熱量は、物質の電気抵抗とその中を流れる電流の2乗に比例します。これをジュールの法則といい、その発熱量をジュール熱と呼びます。

今、抵抗をR（オーム； Ω ）、電流をI（アンペア；A）とすると、時間t秒（s）間の発熱量H（ジュール；J）は次式で表されます。

$$H = I^2 R t$$

単位時間当りの発熱量Qワット（W）は

$$Q = \frac{H}{t} = I^2 R$$

となります。

*7) 抵抗率 (Resistivity)

銅の抵抗率は、温度0℃では

$$\rho_0(\text{Cu}) = 1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

です。ここで温度を指定しましたが、これは温度によって抵抗が変化するからです。銅の場合、温度-195℃では

$$\rho_{-195}(\text{Cu}) = 0.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

であり、明らかに温度の低下につれて抵抗も減少しています。

*8) 絶対温度 (Absolute Temperature)

0Kはオーケーではなく、ゼロケルビンと読みます。熱力学の研究から、温度は物理的に考えられる最低値が存在することが分かっています。その値は-273.15℃とされています。K(ケルビン)はこの点を0とし、摂氏と同じ目盛りで測る温度目盛りです。われわれが温度の規準の1つとする水の三重点は絶対温度で273.16Kであり、摂氏温度では+0.01℃です。したがって、絶対温度aKは摂氏温度で(a-273.15)℃ということになります。そして「°K」ではなく「K」とのみ記します。なお、ケルビンは英国の有名な物理学者 William Thomson (1824~1907)の爵位名 Lord Kelvin からとったものです。

い、その大量の熱を取り除くことが容易ではありません。そのため、どうしても抵抗のない超電導材料の導線を用いなければ、重量制限の厳しい船舶用の電磁推進用コイルを作ることはできません。

普通の材料で作った電線の常温域での電気抵抗は、電線の長さに比例しその断面積に逆比例します。要するに同じ材料の電線でも太く短いものほど電気抵抗は小さいわけです。そこで材料としての電気抵抗値は長さ1メートル、断面積1平方メートル(m²)当たりについての値、抵抗率ρオーム・メートル(Ωm)を用います。この抵抗率は純金属の場合、温度の低下とともに小さくなっていきます*7)。

このことは今世紀の初めにはすでによく知られており、当時の実験物理学者にとって絶対温度0K*8)において金属の電気抵抗値がどのようになるかは大きな問題でした。当時考えられた可能性は、絶対零度0Kに向かって温度を下げていくとき、電気抵抗は連続的にどんどん減少し絶対零度でゼロになる、そうではなくある温度に達するとそれ以下の温度では電気抵抗は一定値になる、あるいはある温度までは抵抗値は下がるが、それ以下の温度域では再び抵抗は増加する。このような3通りのものでした。この問題は結局、オランダの偉大な物理学者カメリン・オンネス(Kamerlingh Onnes, 1853~1926)とそのグループの学者によって解明されました。

1882年にライデン大学の実験物理学講座の教授となったオンネスは、1894年に世界で初めての低温科学実験室(Cryogenic Laboratory)を開設し、1908年には、液化されないで残されていた唯一の気体、ヘリウム(He)をついに液化させることに成功しました。Heの液化の温度は4.2Kです。彼は液化されたHeを用い、1K程度までの低温域の物体の物理的性質を次々に解明していきました。

1911年オンネスとその仲間の人たちは、水銀(Hg)の電気抵抗がこの温度領域でどのようになるかを調べるうちに、温度を下げていき4K近くになると図4.1に示すように突然に、正確な表現をすれば、不連続的に電気抵抗がゼロあるいは測定不能なまで小さくなることを発見しました。さらに同様の現象が7.2Kで鉛(Pb)に、3.7Kでスズ(Sn)について発生することを明らかにしました。要するに当時の予測として述べた3つの可能性のどれにも当てはまらない現象が観測されたのです。このことは1913年、シカゴの学会で発表され、そこで初めて超電導状態(Superconductive State)という言葉が用いられました。

この超電導状態は抵抗が極めて小さいということは直ちに認められま

したが、果たして本当に抵抗がゼロになっているかということの実験的証明はそれほど簡単ではありません。鉛で作ったリングを冷却して超電導状態にして、そこに電磁誘導作用で電流を誘起してやると、その電流が2年半後も全く減衰せずに流れ続けていることが米国のMITの研究者により実験的に示されました。

このように、超電導状態では電気抵抗はゼロであり、超電導材料のみで作った回路には永久電流 (Persistent Current) の流れる状態を作ることが可能だと考えられるにいたりました。当然、電磁石のコイルを超電導材料で作って永久電流による強大な磁石を作ろうという考えがオネスのグループはもちろん、多くの人たちの頭に浮かんだのですが、それほど話は簡単ではありませんでした。

超電導現象の発見から間もなく、オネスたちは超電導状態にある金属の導線を磁場の中に置くと、その磁場がある強さになれば超電導状態が壊れてしまうことを発見しました。このときの磁場を臨界磁場 B_c と呼びます。 B_c の値は温度とともに変化し、転移温度 (臨界温度) T_c では $B_c = 0$ 、すなわちこの温度では磁場をかけると直ちに超電導状態は破れてしまいます。もちろん温度が T_c よりも低くなれば B_c の値はゼロではなくなります。しかし、それはあまり大きな値ではありません。また、超電導状態を維持しながら1本の導線に流すことのできる電流にも限界値 (臨界電流) I_c が存在することが明らかになりました。

そして、オネスたちが最初に超電導性を発見した純金属類は一般にこの B_c 、 I_c の値が比較的小さく、到底強磁場を作る導線材料として利用できるものではありませんでした。これらの超電導性を示す純金属材料は第一種超電導体と呼ばれています。第一種超電導体の示す超電導特性については種々の実験的、理論的研究がなされ、超電導現象は物性の研究において極めて重要で、奥深い現象であることが分かってきました。

しかし、それはそれとしてわれわれの望むような B_c 、 I_c の大きい材料はなかなか見いだすことができませんでした。1930年代に入るとビスマス (Bi) と鉛 (Pb) の合金が超電導の材料に望ましい性質をもつことが分かり始めました。そして、その研究は第二次大戦後に花開くことになり、ニオブ (Nb)、バナジウム (V) といった金属自身やその合金あるいは金属間化合物が、純金属材料の B_c や I_c の数倍の値をもつことが次々に明らかにされ、1954年にニオブ (Nb) とスズ (Sn) の化合物であるニオブ3スズ (Nb_3Sn) などは15テスラの磁場の中で 10^4 A/cm^2 以上もの電流密度で超電導性を示すことが明らかにされま

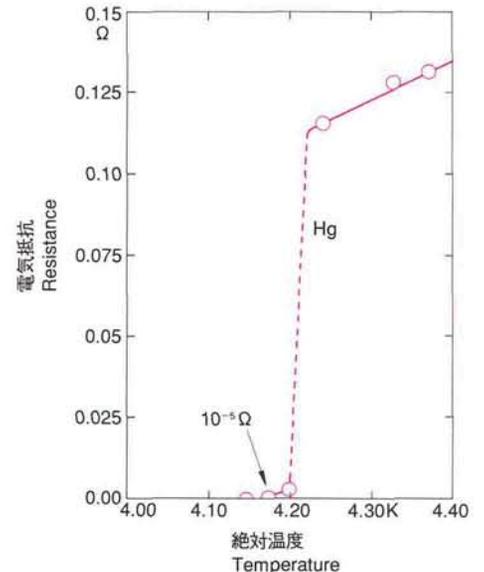


図4.1 1911年にオネスらが水銀の電気抵抗と温度との関係を調べた実験結果 (Werner Buckel: Superconductivity - Fundamentals and Applications, VCH (1990)に掲載されている図を参考にして作成)

＊9) 合金 (Alloy)

合金は、2種以上の金属あるいは金属とよくなじむ元素を混ぜ合わせ作られた金属的な性質をもつ材料の総称です。航空機に広く用いられるジュラルミンは、アルミニウムを母材としてこれに銅4%程度とマグネシウム、マンガンなどの微量を加えた合金です。鋼は鉄とわずかな炭素の合金です。

合金は主たる成分、すなわち母材の名をとってアルミニウム合金、鉄合金のように呼ばれることが多いのですが、多種の金属が同じ程度の比で加え合わされ、母材がどれか分からぬような複雑な構成のものもたくさん作られており、全く新しい名前と呼ばれることもあります。

＊10) 金属間化合物 (Intermetallic Compound)

合金のことについては＊9)で述べましたが、同じ合金の間でも、ジュラルミンや炭素鋼は固溶体 (Solid Solution) と呼ばれる類で、合金を構成する元素の割合を変えても合金として成り立ち、その性質も元素の割合の変化につれて連続的に変化します。

これに対し、構成する元素の割合が厳密に確定しており、それを変えると合金として成り立たなくなる類のものがあります。これは構成元素が化学的に固く結び付き1つの化合物 (Compound)、すなわち新しい物質となっている場合です。これが金属間化合物と呼ばれるものです。

した。また合金＊9)としてはニオブチタン (NbTi)、ニオブジルコニウム (NbZr) といった多くの合金材料もまた同様の高いBc値、Ic値をもつことが分かってきました。図4.2はこれらの材料のうちで実用性が高いと考えられている合金NbTiと金属間化合物＊10) Nb₃Sn、ニオブ3ゲルマニウム (Nb₃Ge) の超電導特性値Tc、Bcおよび臨界電流密度Jcの関係を、それぞれ絶対温度Tケルビン (K)、磁場の強さBテスラ (T)、電流密度Jアンペア毎平方センチメートル (A/cm²) の3座標上の曲面で示したものです。われわれがこれらの材料を超電導の導線として使用できるためには、使用状態のT、B、Jの値で定まる点が図に示されるそれぞれの材料の特性面の内側 (原点側) になければならないということです。

さて、われわれはすでにコイル強度などの点から磁場は4テスラと定めています。この4テスラはあくまで海水の流れるところの磁場の強さでコイルの内部にはもっと強い磁場が発生しますが、仮にB=4テスラと考えましょう。コイルの冷却は大気圧下の液体ヘリウムで冷却しますから温度はT=4.2Kです。そこで図4.2に示したような曲面群からT=4.2KにおけるBとJcの関係を取り出すと図4.3のようになります。

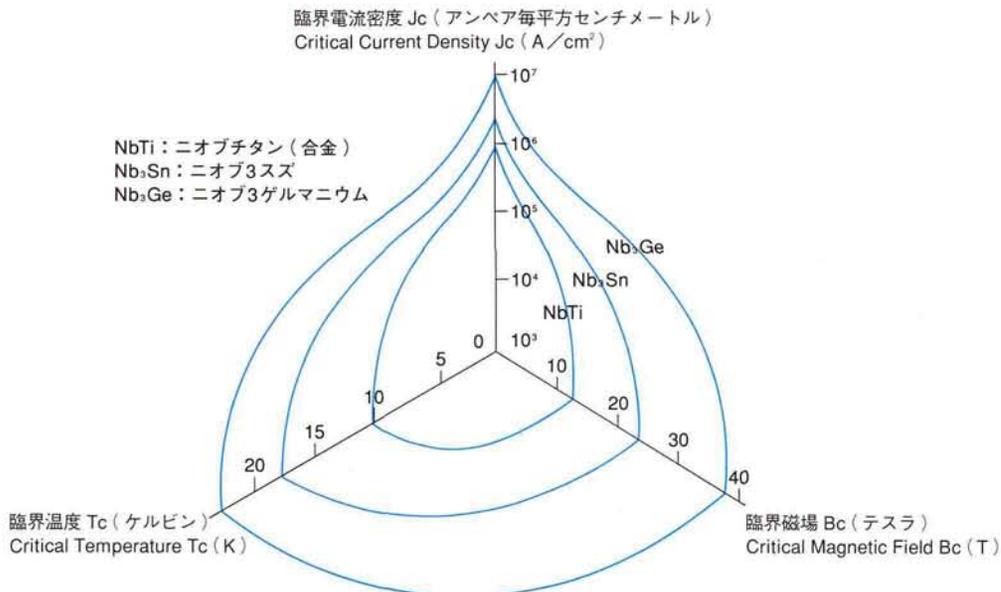


図4.2 利用しやすい第二種超電導材料の超電導に関する臨界特性

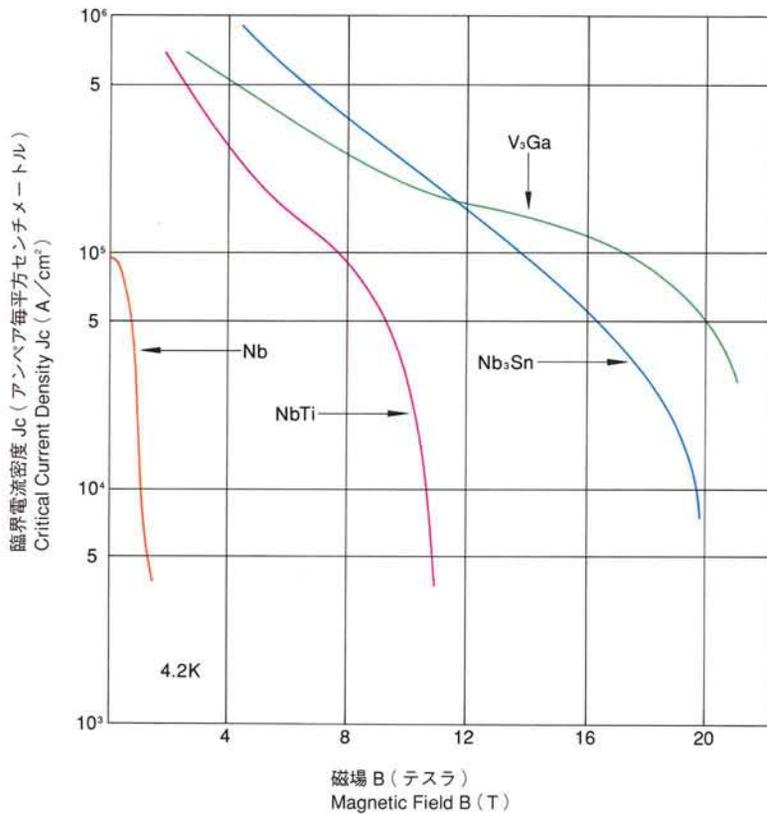


図4.3 T = 4.2Kにおける磁場の強さBと臨界電流密度Jcとの関係

あとで述べるようにわれわれは加工性の点から合金NbTiをコイルの線材としました。この図でB = 4テスラに対応するNbTiの臨界値は $J_c \approx 3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ という大きな値です。

話を元に戻して、合金NbTiあるいは金属間化合物Nb₃Snなどの材料の示す超電導性は、先に述べた第一種の純金属材料とはいささか異なる現象を示すため、この種の材料は第二種超電導体と呼ばれています。現象の由来はともかくとして、エンジニアたちにとってはとりあえずコイルに利用できる、高磁場の下で高電流密度まで超電導性を保つ材料が得られたことはうれしいことです。

しかし好まぬ多しとはよくいったもので、第一種の材料は軟らかく延性*11)に富むのに対し、第二種の材料は一般に、特に金属間化合物は硬くもろい性質があります。したがって線材として加工することが難しく、

*11) 延性 (Ductility)

純金や鉛で分かるような純粋な金属の多くは、常温付近ではたたくと簡単に延びていきます。このような材料を延性材料 (Ductile Material)、この性質を延性といいます。これに対し鉄鋳物のように硬くてたけが割れてしまうような材料を脆性材料 (Brittle Material) と呼びます。鉄鋳物のこの性質は鉄に含まれる炭素のせいで、含有炭素を少なくして純鉄に近くなれば鉄もまた延性材料となります。そのような鉄を軟鋼 (Mild Steel) と呼んでいます。

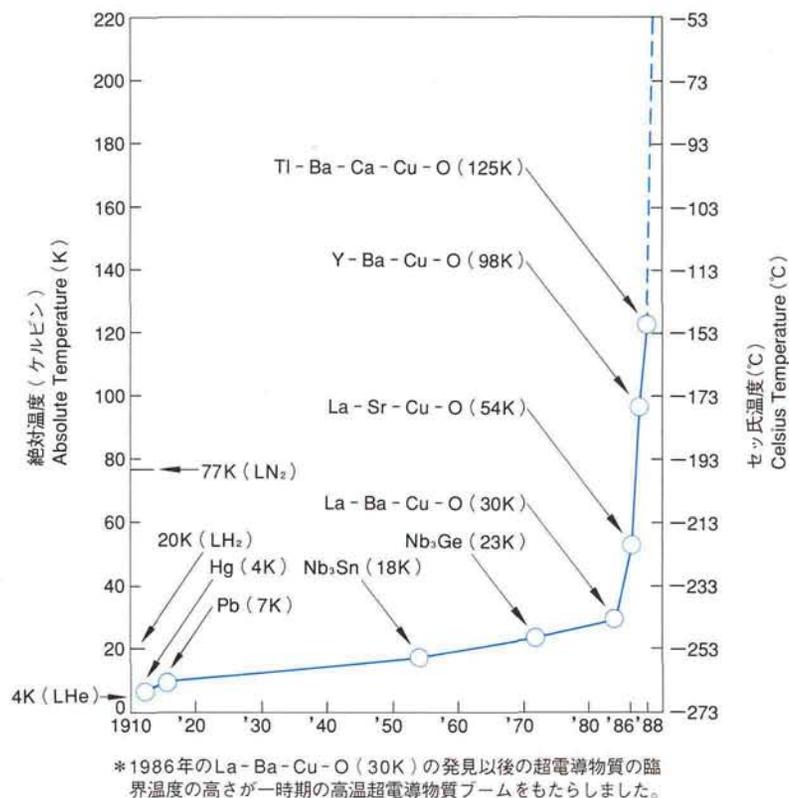


図4.4 各種超電導材料の発見年次とその転移温度
(電気学会大学講座「超電導工学(改訂版)」、電気学会(1991)による)

Nb₃Snなどはその線材を作り、それをコイルに巻くのが大変な作業です。もしわれわれが当時Nb₃Snを「ヤマト-1」の超電導コイルの線材として採用していれば、紙の上では確かに実際に製作された「ヤマト-1」のコイルよりもはるかに高性能のコイルをもつ推進装置が得られたでしょう。しかしそれはしよせん、紙の上の話で、コイルを作るための技術上の障壁に全精力を使い果たして結局失敗にいたっていたのではないかと考えられます。しかし、今再び挑戦するとなればNb₃Snのコイルは第一の候補となるでしょう。この10年の間の技術の進歩は素晴らしく十分それを可能にしています。

そこでわれわれは加工性がよく線材とするための方式が確立されており、経済的にも優れた合金材料NbTiを用いることに決定しました。そ

の決定は委員会における激しい討議の結果でした。ある意味ではNbTiの採用が「ヤマト-1」を完成させるにいたった大きな因子であったかもしれません。

そしてここでもうひとつ特筆しなければならないのは、われわれがこのプロジェクトに入って2年目、1987年ごろになるといわゆる高温超電導材料のブームが沸き起こり、われわれの周りも騒然としてきました。それは1986年にベトノルツ (J. G. Bednorz, 1950~) とミュラー (K. A. Müller, 1920~) によって発表された、La-Ba-Cu-O系として呼ばれる銅の酸化物の電気抵抗の低温での特性の研究に端を発した、いわゆる高温超電導体の発見ラッシュとフィーバーであり、最終的にはTl-Ba-Ca-Cu-O系の $T_c=125\text{ K}$ という驚嘆すべき物質の存在まで明らかにされました*12)。これらの材料は現在では銅酸化物超電導体と呼ばれています。

以上に述べたこれまでの超電導材の発見の状態を図4.4にまとめています。図から明らかなように1986年から線が急に立ち上がっています。これが高温超電導という名の由来をよく示しています。

さて、この高温酸化物超電導体が「ヤマト-1」に使用できるのであればすくにも飛び付きたかったのですが、残念ながら臨界電流密度・臨界磁場の値、機械的強度、材料の安定性、加工性などについて検討した結果は、到底当時は使用できないと判断されました。その事情は現在でもまだ大きくは変わっていないようです。もしこれらの材料が、われわれの目的に対して実用になれば、液体窒素 (沸点 77.3 K) を用いて冷却ができるわけで、冷却剤の費用、断熱構造の経済性などすべての点で素晴らしいの一語に尽きます。また、臨界温度の高い材料は理論的に臨界磁場も高いといわれています。強い磁場が必要な超電導電磁推進船にとつては、一日も早い実用化が希望されます。

*参考文献

- (1) 恒藤敏彦：「超伝導の探究」、岩波書店 (1995)
- (2) Werner Buckel: *Superconductivity-Fundamentals and Applications*. (English Edition). VCH (1990)

*12) La, Tl, Ba

あまりなじみのない元素記号ですが、次の表のような名前の元素です。

記号	名 称	原子番号
La	ランタン Lanthanum	57
Tl	タリウム Thallium	81
Ba	バリウム Barium	56

なお、Cu、Ca、Oは銅、カルシウム、酸素です。

第 5 章

超電導電磁推進装置の構造

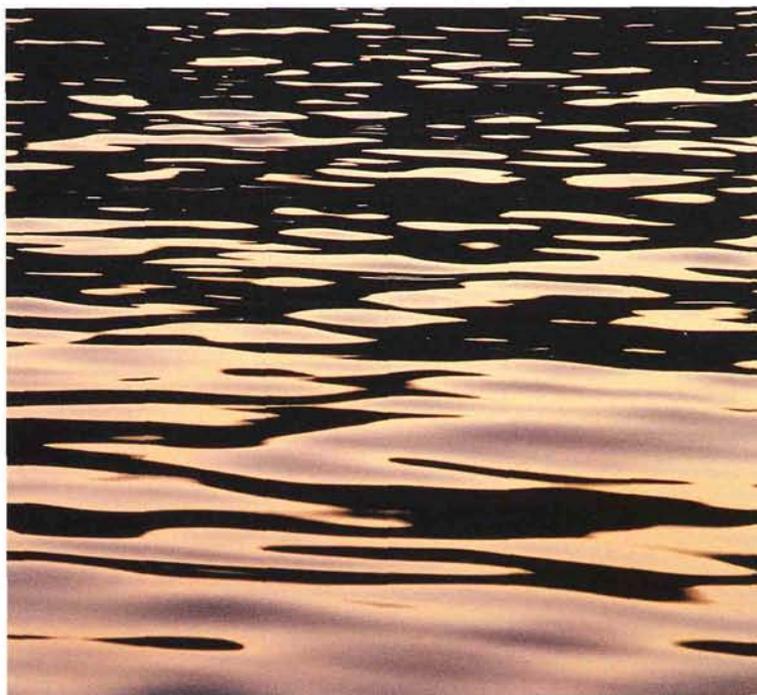
さて次に、「ヤマト-1」に採用した超電導電磁推進装置の構造について、詳しく述べることにしましょう。

ここに示す図5.1が、「ヤマト-1」の電磁推進装置（東芝製）の透視断面図です。

すでに述べましたように、「ヤマト-1」の電磁推進装置は、6本のユニットスラストから構成され、それぞれのユニットスラストが同心円上に等間隔で並ぶ「6連環構造」になっています。

なぜこういう構造になったかといいますと、その理由は主に2つあります。

ひとつは、電磁推進装置を使って実際に船を動かすためには、非常に強い磁場を要するわけですが、われわれが得たいと思っている4テスラという磁場の強さを、直径の大きな1本の推進装置、すなわち、第3章の図3.4で示したような構造で実現することは、コイルの強度上、不可能でした。そこで、直径のより小さい6本のユニットスラストを集めて、全体として1個の推進装置とする方法が考えられたわけです。



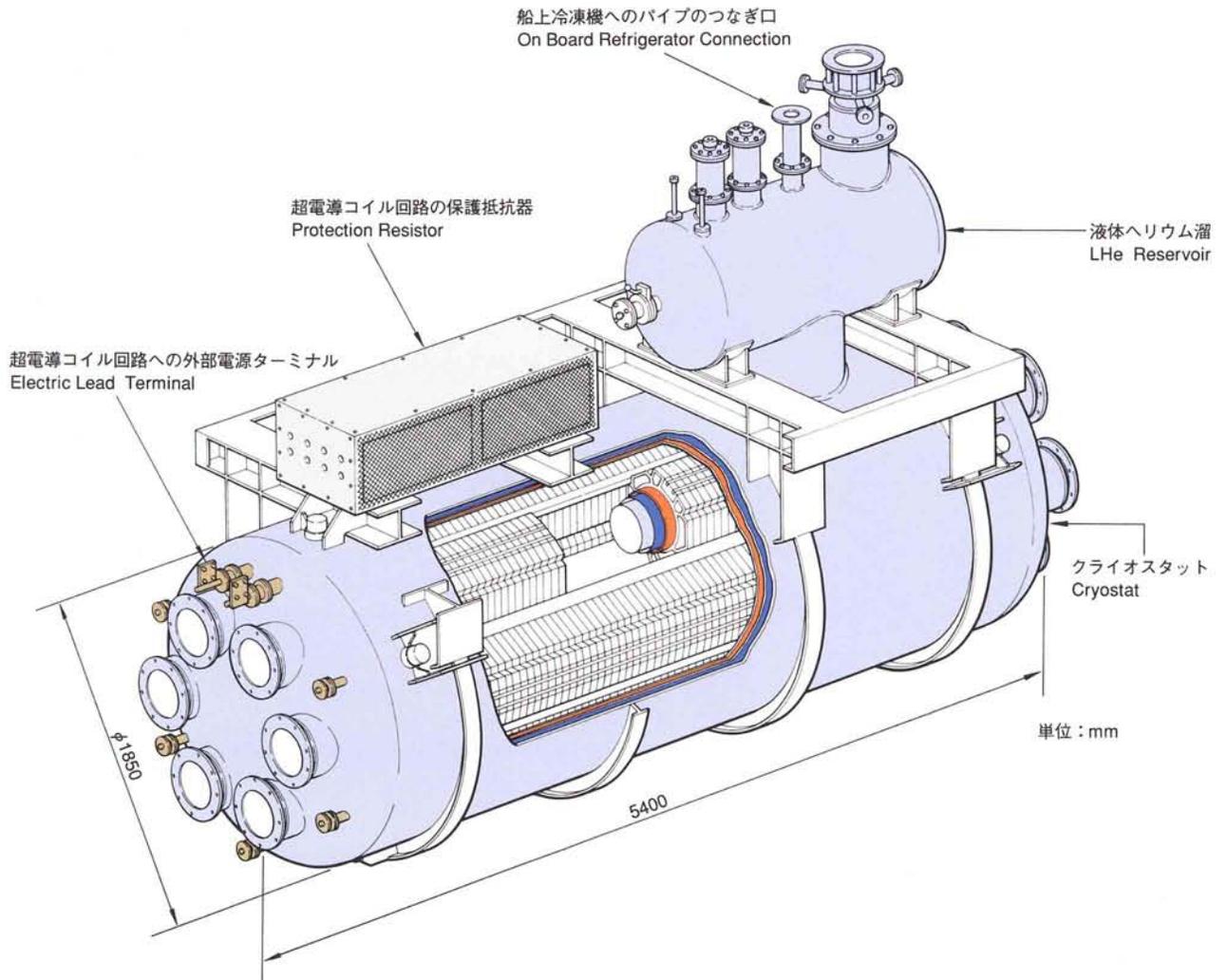


図 5.1 超電導電磁推進装置の透視断面図（東芝製）

もうひとつの理由は、外部への漏れ磁場を極力少なくするためです。ユニットスラスタ1本だけだと、普通の棒磁石のように、磁場が開かれた状態にあるので、周りに鉄製のものがあると、全部、ユニットスラスタに引き寄せられてしまいます。実際に、ユニットスラスタ単体で実験してみたところ、周りにすさまじい磁場ができて、漫画のような話ですが、1メートルほど離れたところにあった鉄製のものが、それこそ飛

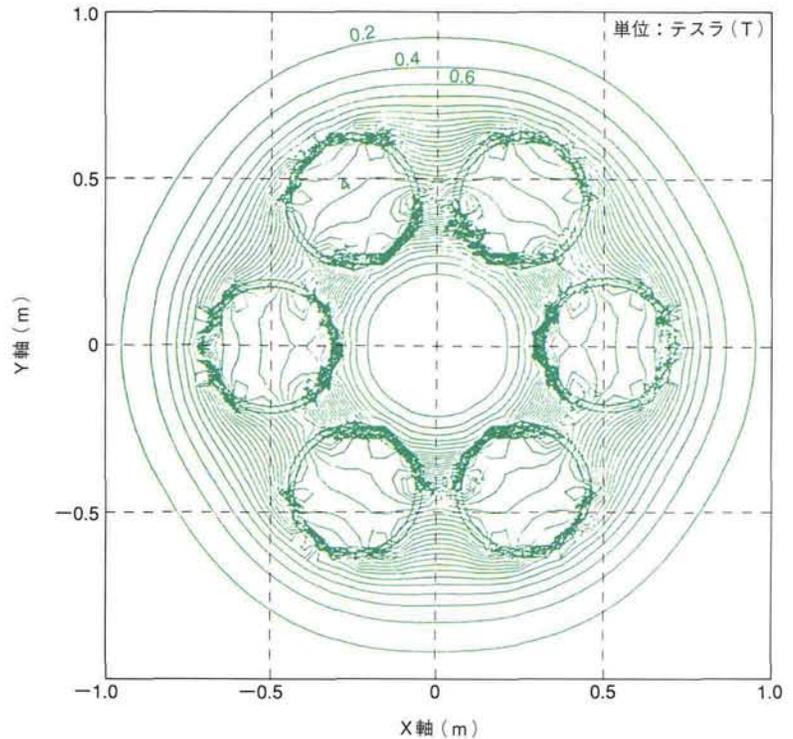


図5.2 コンピューターで求めた超電導磁石の断面における磁場の強さ分布を示す線図

ぶようにユニットスラストに吸い寄せられてしまいました。

これに対して、ユニットスラストを6本集めて同心円上に等間隔に並べ、連環構造にしてやりますと、それぞれのユニットスラストが作り出す磁場の方向が、その同心円の接線方向を向き、全体として1個のリング状の磁場が形成されるのです。つまり、連環構造にすることによって、6本のユニットスラストが作り出す磁場が全部つながり、その磁力線がそれぞれ円環をなすわけです。

われわれは、これを磁場が閉じた形と呼んでいるのですが、磁場が閉じることによって、推進装置から漏れ出す磁場は、極めて弱いものになります。それを表したのが、図5.2です。

この図は、推進装置断面における磁場のコンタライン（等高線）*1)をコンピューターで求めたもので、個々のユニットスラスト内の磁場は、ほとんど一様に4テスラになっていることが分かります。

*1) コンタライン（Contour Line、等高線）

地図の上で標準海面からの高さが同じ点を連ねたものが等高線です。これと同じく磁場の中で磁場の強さが同じところを連ねたのが、ここでいうコンタラインです。

では、推進装置からの漏れ磁場はどうでしょうか。図でも明らかなように、推進装置の外周近くでも漏れ磁場は0.2テスラ（2000ガウス）と弱いことが分かります。この構造の磁場では距離の6乗で磁場の強さが急激に減少するという特徴がありますので、推進装置からわずか10センチメートル、20センチメートル離れるだけでも、磁場の強さは600ガウス、300ガウスと急減していきます。1メートルも離れると10ガウス以下になります。

一般に市販されている磁気式の肩こり治療薬の磁場の強さが、磁石のごく近くの最も強いところで1000ガウスくらいですから、推進装置からの漏れ磁場がいかに小さいかが分かると思います。しかも、推進装置は、図2.1の一般配置図を見ていただくと分かるように、人が通る上甲板の下のバルジの部分に収められますので、漏れ磁場による外部への影響はほとんどありません。

実際、海上運転中に上甲板上で漏れ磁場を計測したところ、1ガウス以下で、地球磁場（約0.5ガウス）と同じ程度でした。したがって、心臓にペースメーカーを装着している人が上甲板上を通っても、全く問題ないと思われま

す。ユニットスラストを6連環構造にすることによって、われわれが解決しなければならなかった大問題、すなわち、推進装置近辺に生じるかもしれない強大な漏れ磁場による外部への影響、特に人体への生理的障害の問題は、これで完全に解決できたわけです。

次に、6本のユニットスラストを収めているクライオスタット（Cryostat）について、説明しましょう。もう一度、図5.1を見て下さい。

クライオスタットというのは、分かりやすくいえば、大型の魔法瓶のことで、本体の壁は3枚の壁を重ねた構造になっています。ここでは仮に、内側から順に、A、B、Cとしておきます。このA、B、Cの3枚の壁の間の2層は、真空に保たれています。そのために、クライオスタット全体が、大型の魔法瓶の働きをするわけです。

なぜ魔法瓶のような構造にしたかといいますと、クライオスタットの内部には、安定した超電導状態を維持するために、コイルの冷却剤として、 -269°C の液体ヘリウムが注入されています。仮に空気の温度が 20°C としますと、その温度差は 300°C 近くになるわけです。これだけの温度差がありますと、外部の空気からの熱の侵入によって、液体ヘリウムが簡単に蒸発して、冷却剤としての役割を果たさなくなってしまう

*2) 靱性 (Toughness)

構造材料などとして使用される物質において、外部からの大きな力や衝撃を自身の弾性変形や場合によっては塑性域の変形(力を取り去っても元に復さない変形)によって耐える性質。

*3) 伝導、対流、輻射

伝導 (Conduction) は、火の中に鉄の棒を差し込んでしばらくすると手元まで熱くなってくるような熱の伝わり方をいいます。対流 (Convection) は、やかんの中の水のように、底で温められた水が上部の温度の低い水と入れ代わる状態を繰り返して温度が上がるように、物質の移動に伴う熱の伝わりを指します。輻射 (Radiation) はストーブにかざした手が温かく感じるように物体がその温度に応じた量の熱を熱線 (赤外線) という形で放射して熱を伝えることをいいます。

す。それを避けるために、A、B、Cの壁の間を真空にして、なるべく外部の空気の熱が侵入しないようにしたわけです。

いちばん内側の壁Aは、厚さ5ミリメートルのステンレス鋼板で作られています。この壁Aは、クライオスタットの内部に注入される液体ヘリウムを保持する容器としての役割を果たしているため、ヘリウム容器 (Helium Vessel) と呼ばれています。ヘリウム容器としての壁Aの材質には、極低温において優れた強度や靱性*2)をもち、しかも磁場に影響を与えない非磁性体のステンレス鋼板が選ばれたわけです。

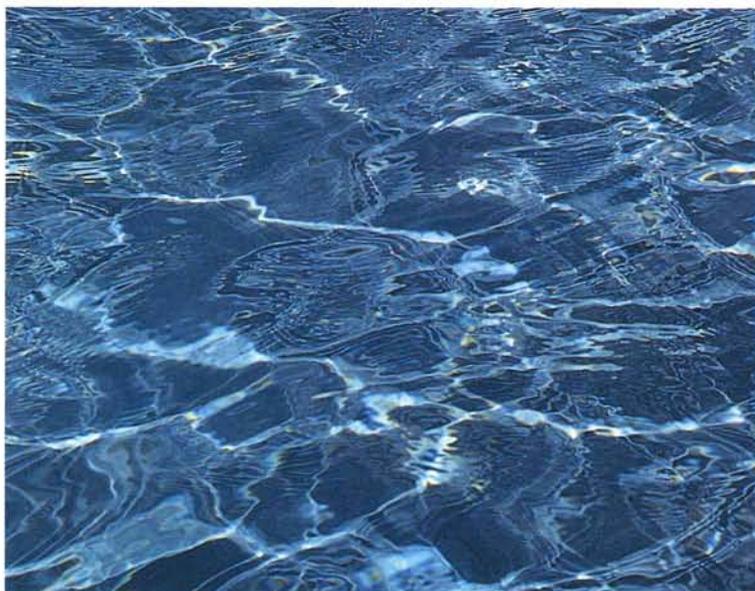
常温部と接する最外壁のCは、厚さ10ミリメートルのアルミニウムの板からできています。そして、AとこのCの間の隙間は、外部からの熱の侵入をなるべく防ぐために、真空に保たれているわけですが、 -269°C の極低温を保持するためには、これだけではまだ十分とはいえません。なぜかといいますと、熱の伝わり方には、物質から物質への接触によりじかに伝わる伝導*3)、気体によって伝わる対流*3)、熱線として伝わる輻射*3)の3つがあって、真空にすることによって、対流による熱は防げませんが、支持構造物からの伝導や、輻射による熱は防げないからです。

そこで、われわれは、2つの工夫を凝らしました。

ひとつは、真空の隙間空間に、ミドルプレート (中間壁) として、熱シールド板と呼ばれるステンレス鋼板の壁Bを挿入したことです。この熱シールドのための壁Bの表面には、細いパイプがたくさん走っています。そのパイプの中を、外部のタンクから供給される -196°C の液体窒素を循環させることによって、外部から侵入してくる熱をまずここで取り去ることにしたのです。AとBとの温度差は 73°C あります。2壁の間の輻射による熱の侵入は、高温側の絶対温度の4乗と低温側の絶対温度の4乗の差に比例しますので、AとBの間の熱輻射が、BとCの間の熱輻射と比べて、格段に低くなるわけです。これがひとつの工夫です。

さらに、輻射による熱侵入を抑えるために、AとB、BとCのそれぞれの壁の間に、アルミ蒸着マイラーとポリエステルネットを組み合わせた超断熱材 (Superinsulation) を、30層くらい積層して、挿入しました。

アルミ蒸着マイラーというのは、極めて薄いテフロン系の高分子材の薄膜の片面に、アルミの膜を蒸着したもので、非常に強い金属光沢を持っています。黒っぽい色の物体ほど、輻射熱を吸収しますが、金属光沢があると、ピカピカ光って熱線を反射させるので、それだけ物体の内部に熱が侵入してくるのを防げるわけです。



夏になると、太陽熱の輻射によって車内が熱くなるのを防ぐために、自動車の窓に金属光沢のあるものを張ることがありますが、あれと同じ原理です。

クライオスタットの外部と内部の温度差があまりない場合は、輻射による熱の影響をそれほど考えなくていいのですが、300℃も温度差があると、輻射による熱の影響は非常に大きくて、小さなゴミで金属光沢がわずかに鈍るだけでも、放射されてくる熱の反射が悪くなって、そこから熱が入ってしまうほどです。そういったことも考慮して、アルミ蒸着マイラーを何十層も積層して、3枚の壁の間に挿入したわけです。

以上が、クライオスタットの壁面構造です。しかし、3枚の壁が完全につながっていないというわけにはいきません。支持のための最低限のつながりはあるわけで、そのような支柱を通して伝熱作用で熱は侵入します。

このクライオスタットの中には、6本のユニットスラスタが収められています。次に、クライオスタットと6本のユニットスラスタが、どのようにつながっているかを述べましょう。

クライオスタットの最内壁であるヘリウム容器の端面、すなわちヘリウム容器のエンドプレート（End Plate）には、6本のユニットスラス

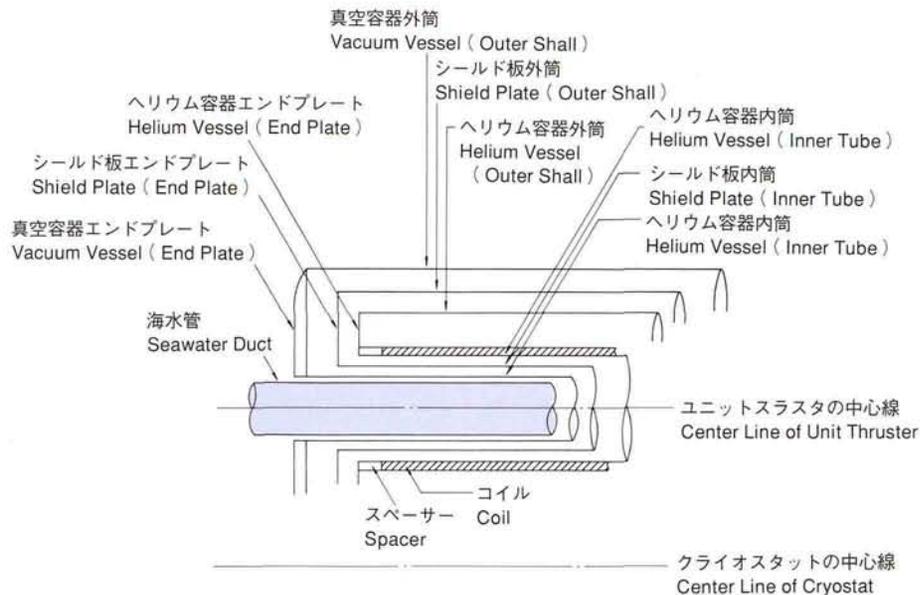


図 5.3 クライオスタット端部における構造模式図

タの内部を貫通するダクト、すなわちインナーチューブ (Inner Tube) につながる穴が開けられています。この穴の部分で、両者はつながっているわけです。

しかも、ただつながっているわけではありません。少し複雑になりますが、クライオスタットの3枚の壁面が、エンドプレートの穴のところで、ちょうど洋服の上着を脱ぐときに、そでが裏返しになって胴の部分に引き込まれてしまったような形で、ユニットスラストの中を貫通する構造になっているのです。

図5.3を見て下さい。胴の中に引き込まれたそでのような部分を、ボア部分と呼んでおきますと、クライオスタットの3枚の壁面は、ボア部分ではちょうど裏返しになっていますから、クライオスタットの最外壁のCは、ボア部分では最内壁になり、クライオスタットの最内壁のAは、ボア部分では最外壁になるわけです。その両者の間にはBの壁が入ってきて、中間壁となっています。

前述したように、クライオスタットの最内壁のAは、液体ヘリウムを保持するためのヘリウム容器で、ステンレス鋼できています。ボア部分では、そのステンレス鋼のAが最外壁になり、1本のステンレスパイ

ブとして、コイルの内側を貫通していることとなります。そして、このステンレスパイプは、実は、ユニットスラストが機械的強度を保つための重要な構成要素ともなっているのです。

図5.4は、ユニットスラストの透視断面図です。

この図の中で、ヘリウム容器（インナーチューブ）として示されているのが、今述べたステンレスパイプということになります。これからは、インナーチューブという名称を使うことにします。

さて、次の章では、超電導推進装置のかなめであるユニットスラストの構造について、詳しく述べることにしましょう。

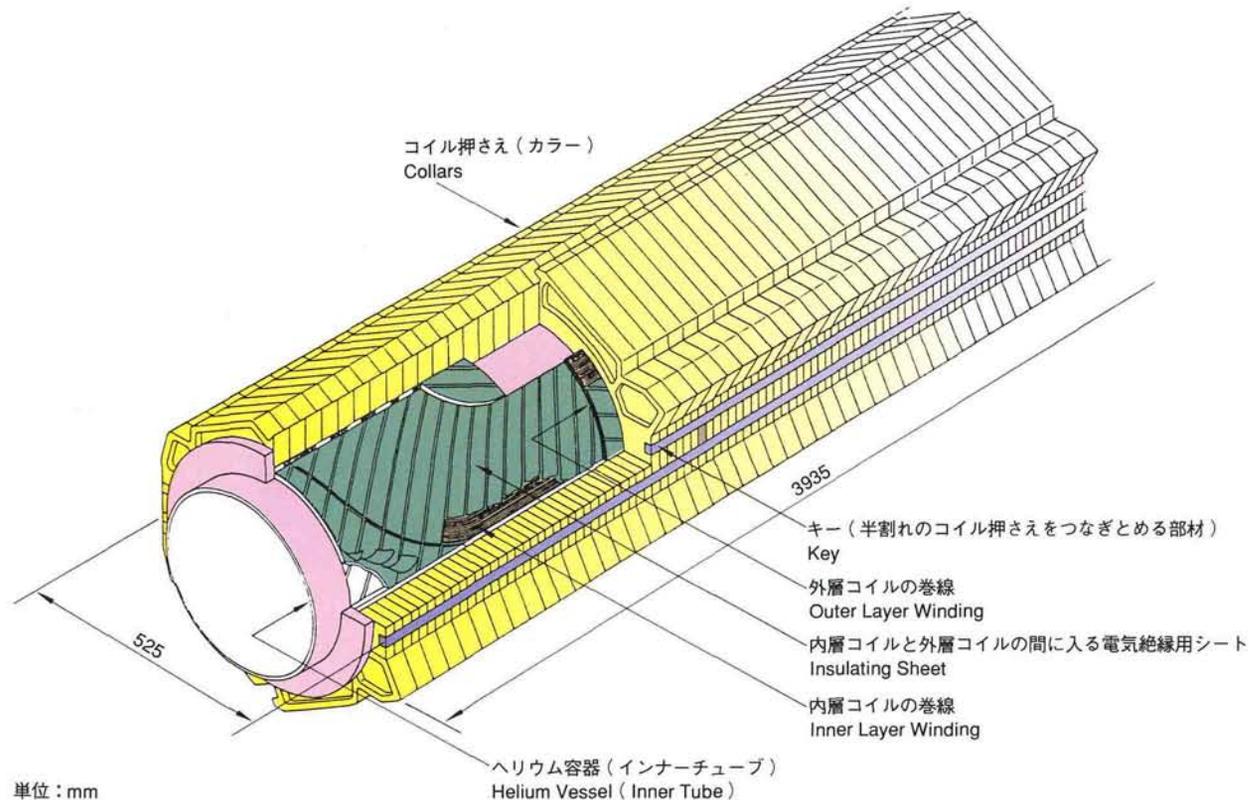


図5.4 ユニットスラストの透視断面図

第 6 章

ユニットスラストの構造

ここでもう一度、ユニットスラストの透視断面図（図5.4）を見ることにします。

この図にあるように、ユニットスラストは、インナーチューブ、超電導コイル、コイルを押さえるためのカラーの3つの部分から構成されています。

それぞれの構成部分について、説明しましょう。

インナーチューブ

前章でも述べましたように、インナーチューブは、最終的には、クライオスタットの最内壁のヘリウム容器に、エンドプレート部分で溶接されてつながるステンレスパイプです。したがって、このパイプ自身も、ヘリウムを内蔵する容器の一部分を構成しています。

使う側の立場からいえば、このインナーチューブの内径は、大きければ大きいほど、利用できる磁場空間も広くなり、便利になるのですが、内径が大きくなると、電磁力による応力*1)、すなわちフープストレスも大きくなって、コイルそのもの、あるいはコイルを保持しているカラー（Collar）などの強度よりも、その応力の方が大きくなると、電磁石の構造が破損してしまう恐れがあります。

この応力に対する強度という条件を考慮して計算すると、4テスラの磁場を作り出す場合、われわれが用いようとしているコイルなどの構造やその材料の強さなどを考えて計算すると、安全にすなわち壊れないで使用できることが保証できるのは、インナーチューブの直径として350ミリメートルまでだという結論になりました。

「ヤマト-1」のユニットスラストでは、これに近い値が採用されています。

超電導コイル

次にコイルですが、内部磁場型の超電導電磁推進装置のコイルとしては、海水ダクトに直交し、なおかつ、ダクトに沿った広い範囲に均一な強い磁場を発生させることが要求されます。われわれは、その要求を満たすコイルの形状を検討して、磁場の均一性やコイルのコンパクトさな

*1) 応力（Stress）

例えば消しゴムを両手で挟んで押し付ける場合、右手が加えた圧力はゴムを介して左手の力（右手の力に対する抗力と考えます）と釣り合うわけです。両手に挟まれたゴムはこの状態では少し変形しています。これは右手の力が左手まで伝わっている状態に対応しています。このような場合、ゴムの内部は隣り合う部分同士が圧力という形で右手から力を左手まで伝えています。その圧力で少し変形をしたわけです。このゴム内部の圧力のように物体に働く外力に対応してその物体内に発生する力を一般的に応力と呼び、圧力のように単位面積当たり幾らといった形で表現されます。フープストレス・たが応力はコイルに働く電磁力に応じて発生する応力で、圧力と反対の張力となります。

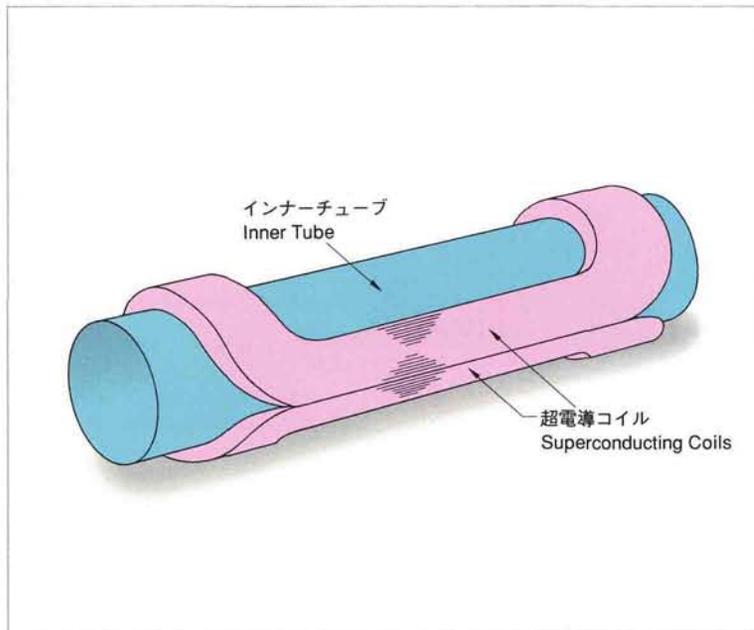


図6.1 鞍型コイル対が向かい合って乗るインナーチューブ

どから、鞍型のコイルを採用することになりました。

その鞍型のコイル一対が、図6.1に示したように、インナーチューブの軸を中心として、インナーチューブの外側にぴったり沿うように、上下対称に取り付けられています。

一対のコイルのそれぞれは全く同じもので、その1個は、図6.2に示すように、内層コイルと外層コイルの2層からできています。1層のコイルの巻き数(ターン数、Turn)は、120ターン程度で、4つのコイルは、それぞれのコイルが作り出す磁場の方向がそろうように結線されていますから、コイル全体としての巻き数は約500ターンということになります。

磁場の強さは、コイルの巻き数と電流で決まり、巻き数と電流の値、すなわちアンペアターンが大きくなればなるほど、磁場も強くなるのですが、われわれは、自分たちが求めている4テスラという磁場の強さを発生させるために必要なコイルの巻き数と電流を計算し、種々の条件を考慮したうえで、約4000アンペアの電流値に対して一対のコイルの総巻き数を全体で約500ターンとなるように決めたわけです。

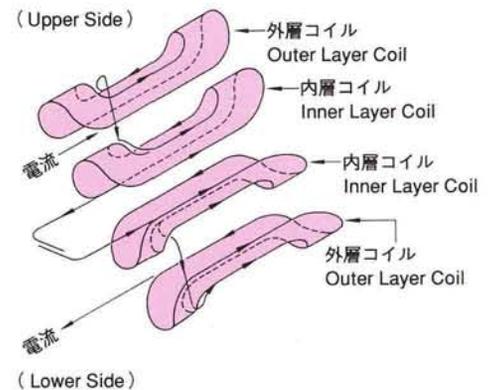


図6.2 鞍型コイル対の構成と結線

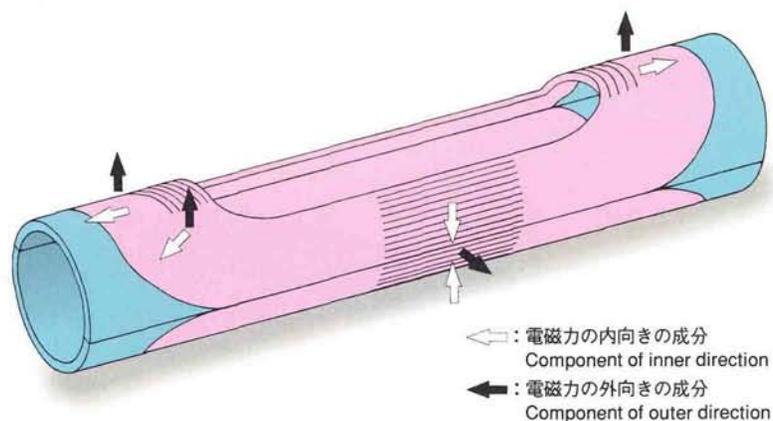


図6.3 鞍型コイル対に作用する電磁力の概念図

コイル押さえ

鞍型コイルをインナーチューブの外壁にしっかりと押し付けて保持すると同時に、コイルに電流が流れて磁場が発生したときに、コイルの変形や破壊を避けるために取り付けられているのが、カラーと呼ばれるコイル押さえです。

前にも述べましたように、コイルに電流が流れて磁場が発生すると、コイル自体も、自分が作った磁場によって、強い電磁力を受けます。その結果、コイルが動いてずれてしまったり、ひどい場合には、大きく変形したり切れたりしてしまうことがあります。

鞍型コイルの場合でいえば、磁場が発生して強い電磁力をコイルが受けると、最も抵抗のない形になろうとして、コイルが平たくなろうとします。つまり、せっかく鞍型にしたものが、最終的には、平面的な円形のコイルになってしまうおそれです。図6.3はコイルに働く力を概念的に示したもので、こうしたコイルのずれや変形を避けるために、カラーでコイルを押さえしておくわけです。

図6.4が、そのカラーの詳細です。

材質は、非磁性体のアルミニウム合金です。鉄などの磁性体ですと、

磁力線がその影響を受けるので、リング状の磁場が形成されなくなります。そこで磁力線がカラーの部分に障害を受けずに通るように、非磁性体のアルミニウム合金を採用しました。一般に、アルミニウムというと弱い感じがしますが、マグネシウム(Mg)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)などを適量加えてアルミニウム合金にするとかなり強くなります。

カラーの形状は、図のように六角形の半割れになっており、インナーチューブの軸方向に、半割れの部分が一直線になるように、必要枚数を重ねるようになっていきます。また、それに向かい合う半割れも同じように並べられるわけです。両者のかみ合いは、図6.4に示すように、かみ合うべき部分がカラーの半分に仕上げられています。上下の半割れ同士は全く同じもので、お互いを裏表ひっくり返しただけの配置になっています。

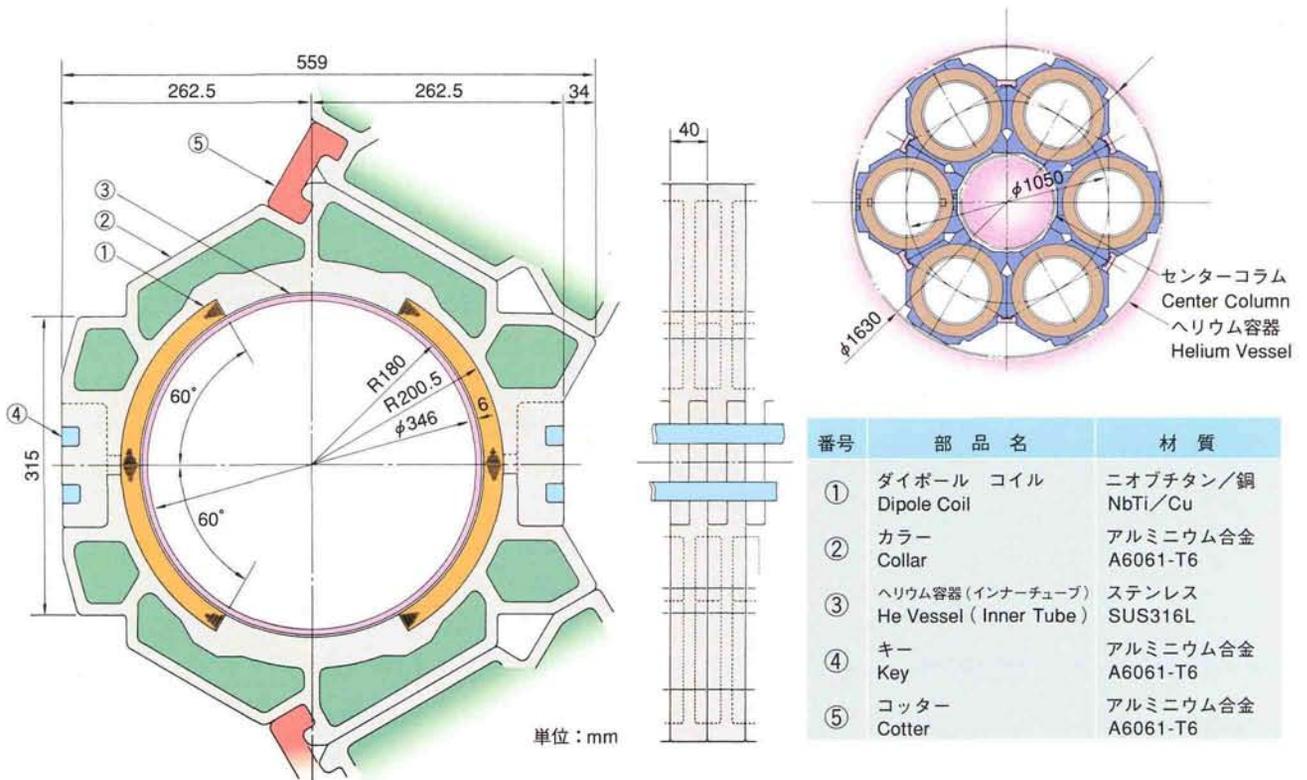


図6.4 コイル押さえ(カラー)の詳細

*2) キー (Key)

円板の中央に適当な大きさの穴を開け、これに合う軸を差し込んだとします。そのときに軸がずれ回りをしないように、円板と軸を固定してくさびの役目をする小さな部材を両者の合わせ目に打ち込む形で入れます。この種の小さな部材を機械工学ではキーと呼んでいます。

*3) 電流密度

家庭用の電線では、銅線の場合、通常6~10A/mm²程度の電流密度が安全の限界とされています。

*4) 47頁の第4章注*6)を参照して下さい。

*5) クエンチ (Quench)

クエンチには焼き入れという意味もあり、一般的には、この焼き入れという意味で使われることの方が多いのですが、超電導工学の分野では、超電導状態が一気に破れることを指しています。

ます。機械部品の点数をなるべく少なくすることが、経済的に重要だからです。

さらに、平面図で緑色で示した部分は、重量軽減の目的でえぐり取られたくぼみです。もちろん、大きな力を受ける部材ですから、十分その力に耐えられるだけの強さを残して、削り取られています。そして、これらの半割れのカラーの内面は円形になっていて、インナーチューブにフィットするようになっています。これらを長い通しキー*2)で固定して、一体に組み上げる構造になっているのです。

分かりやすくいえば、インナーチューブとこれらのカラーでコイルを挟み込んで、動かないようにつながり保持しているわけです。コイルを動かないようにするために、一列に並んだ半割れのカラー同士を押し付けるときの力は、実に1000トン(約1万キロニュートン)にもなります。

なぜこのようにコイルをがっしりと保持するかといいますと、コイルの保持が不完全なために、電磁力によってコイルがずれたり変形したりすると、いったん超電導状態を作っても、それが途中で壊れてしまうのです。

超電導電磁推進装置にとって、ここは重要なポイントなので、詳しく説明しましょう。

コイルが冷却されて超電導状態(電気抵抗がゼロの状態)に入ると、その中を常電導状態(電気抵抗がある状態)では考えられないような大きな電流密度、すなわち超電導材料断面当たり700A/mm²*3)といった大きさの電流が流れ、常電導状態では考えられないような強大な電磁力が発生します。そうすると、まずコイル自身に強大な電磁力が働き、そのままでは、コイルの一部が相対的にずれたり、変形したりします。

それらの部分を仮にA点としますと、A点の部分に外れや変形に伴う運動によって、摩擦熱が発生します。その摩擦熱が限度を超えると、A点の温度も臨界値以上に上昇し、超電導状態が壊れて、常電導状態になってしまいます。コイルには大電流が流れているため、常電導状態になったA点では、大電流が電気抵抗を受けて、局所的にかなりのジュール熱*4)が発生します。その結果、隣接部分の臨界状態も破れて常電導状態になり、それが急速に伝播して行って、コイルの超電導状態が一気に破れるということになってしまいます。

このように、コイルとしての安定した超電導状態が破れてしまう現象を、超電導工学の分野の研究者、技術者たちは、クエンチ*5)と呼んで、

大変に恐れています。クエンチが起きると、コイルが磁石としての機能を発揮できなくなるばかりでなく、速やかにコイルの持っているエネルギーを外に逃がしてやらないと、コイルが焼けてしまう場合もあります。

このクエンチが起きないようにするためには、コイルが動かないようにカラーでしっかりと固定する必要があるわけです。カラーの第一の役割は、そこにあります。

カラーには、重要な役割がもうひとつあって、それは、6本のユニットスラストをタイトに一塊に集め、その磁場をほぼ完全なリング状にまとめるということです。

前述したように、カラーの輪郭形状は六角形に作られています。丸いインナーチューブをなぜ六角形のカラーで覆うことにしたかという、ハチの巣を思い浮かべていただくと分かるように、六角形という形のは、空間的に非常にち密で安定した状態に、寄せ集めることができるからです。

このようにして、同心円上に6本のユニットスラストを配置した構造、すなわち6連環構造に集められた各ユニットスラストの内部には、同心



円の接線方向に沿うように磁場が働き、全体として完全なリング状の磁場が形成されます。

そして、このリング状の磁場は、各ユニットスラストをタイトに結び付ける求心力を生み出しますから、ユニットスラスト全体のまとまりは、カラーの六角形の輪郭と相まって、非常にしっかりとしたものになるわけです。

コイル線材

次に、われわれがコイルに用いた超電導線材について説明しましょう。

写真6.1はその断面を示したもので、1本の線材（Cable）は25本ないしは26本のストランド（Strand、素線）をより合わせてできています。ストランドの本数が異なるのは、メーカーの違いによるものです。ここでは、25本のストランドを用いた線材（三菱重工製のコイル）の場合について述べますが、本質的には、26本のストランドを用いたコイルの線材でも同じことです。

図6.5を見ていただくと分かるように、線材の断面は台形になっています。台形の2つの斜面の角度をキーストーン角（Keystone Angle）といいます。

なぜ断面を台形にしたかといいますと、鞍型にコイルを巻いていく場合、断面が丸い線材だと、コロコロと動いて不安定で、なかなかうまく巻けないのです。そのために、断面を台形にして、コイルの主要部である直線部分の断面形状が円柱断面形になるように、角度を付けたわけです。こうすると、インナーチューブの円周に沿わせた形で、台形を積み重ねていくことができるので、非常にきれいに鞍型に巻いていくことができます。

線材を構成するストランドの断面を示したものが、写真6.2です。図6.5に示すように、1本のストランドの外径は0.85ミリメートルで、写真の中の白い部分は銅（Cu）、小さい黒点の部分は、ひとつひとつが、ニオブ（Nb）とチタン（Ti）の合金材であるニオブチタン（NbTi）のごく細いフィラメント（Filament）になっています。この写真に示した線材では、NbTiにおけるNbとTiの重量比は47対53になっています。

フィラメント1本の直径はわずか20ミクロン（ $\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ）で、

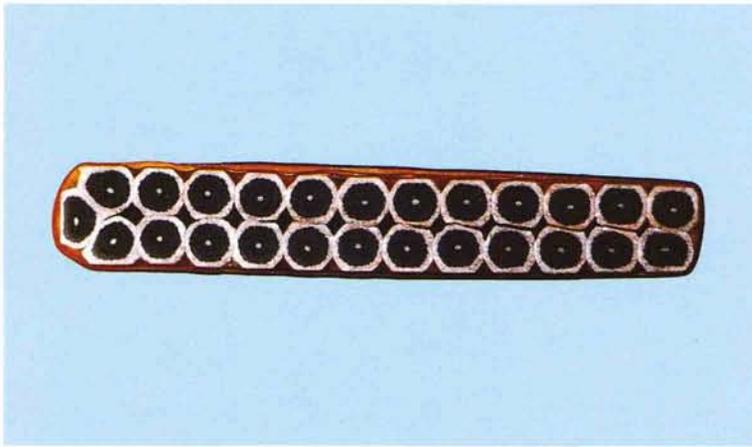


写真 6.1 三菱重工製超電導コイルに用いた線材の断面

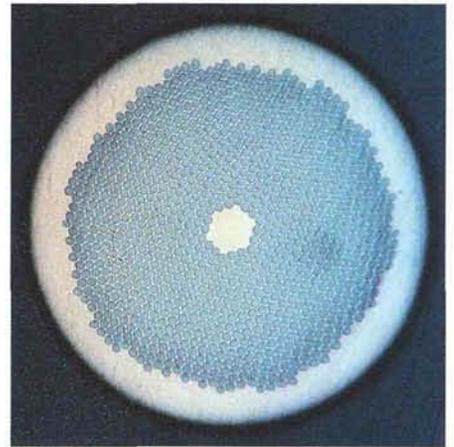


写真 6.2 超電導線材を構成するストランドの断面
実物の外径は 0.85 ミリメートル

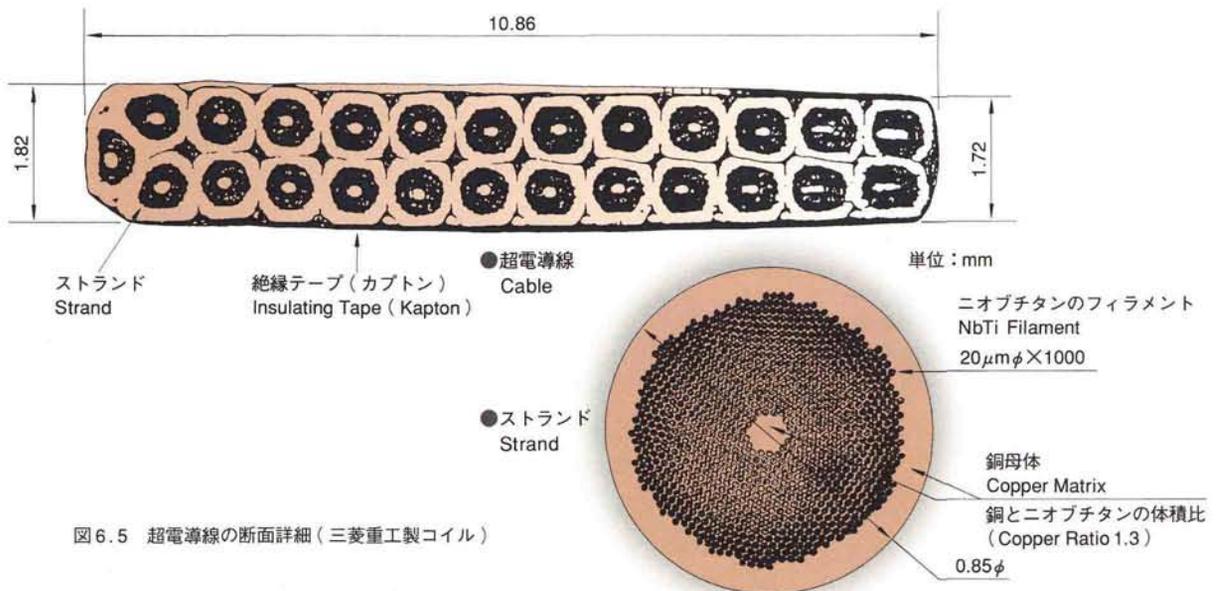


図 6.5 超電導線の断面詳細 (三菱重工製コイル)

1本のストランドの中に、このフィラメントが約1000本通っています。別のメーカーのものはもう少し太くて、約300本です。

いずれにしても、1本のストランドは、これらのごく細かいNbTiのフィラメントを、銅で包み込んだ構造になっているわけです。面積比でいいますと、フィラメント部分が1に対して、銅の部分が約1.3倍あり



*6) カプトン (Kapton)

米国デュボン社が開発した絶縁材の商品名が一般化されています。ポリイミド樹脂で-269℃の超低温から+400℃までの間で物理的・化学的特性が安定しており、宇宙開発素材として用いられています。

ます。ついでにいいますと、写真6.1において線材断面の最外層の赤褐色の薄い層は、カプトン*6)と呼ばれるテープ状の絶縁材です。

銅は電気抵抗があるので、超電導状態になると、銅の中は電流が流れずに、電気抵抗が全くなかったごく細いフィラメントの部分だけを電流が流れることになります。つまり、NbTiのフィラメント群こそが、超電導コイルの主役になるわけです。

超電導状態では、常電導状態では考えられないような高い電流密度で、大きな電流が流れます。一般の家庭で使用している電線の定格電流は、10アンペアか15アンペアですが、超電導状態では、この細いフィラメントの束の中を実に数千アンペアの電流が流れるのです。いかに超電導の威力が大きいか分かります。

しかも、定格電流値がわずか10アンペアの電線でも、定格以上の電流が流れると、電気抵抗の熱でヒューズが飛んだり、プラスチックの覆いが溶けて火事を起こしたりしますが、超電導状態のこの線材には、家庭用の電流の数百倍もの大きさの電流が、なんの損失も伴わずに流れるのですから、まことに不思議というか、驚くべき現象というべきでしょう。

コイルの巻き線作業から ユニットスラスト組み立てまで

次に、写真を使って、コイルを巻くところからユニットスラストが組み立てられるまでを、順を追って見てみましょう。

コイルを鞍型に巻きやすいように、線材の断面を台形にしてあるわけですが、それだけではまだ十分ではありません。コイルの直線部は、線材の断面を台形にすることでかなりきれいに巻けるのですが、ターンオーバー部分すなわち、まさに鞍型を作り出す部分は曲線になっているので、なんらかの工夫をしないと、きれいに巻くことはできません。

そこで、われわれは、線材を巻いていくときに、巻き線の間、隙間をなくし、巻き加減を補正するためのプラスチック製のプレートを挿入することにしました。このプレートをスペーサー（Spacer）といいます。線材を巻いている途中の工程を示したのが写真6.3で、線材はあらかじめ



写真6.3 巻線機を使ったコイルの巻き線作業状況
巻き付けられる線材にかかっている張力を一定に保つために、このコンピューター制御の巻線機が開発されました。

め定められた張力を常に保つことができるロボットマシンで巻かれました。このロボットはこの目的のために製作されました。

スペーサーを使って巻き上がったコイルの状態を示したのが、写真6.4で、ターンオーバー部分に見える白いものがスペーサーです。

続いて写真6.5は、巻き上がったコイルをインナーチューブの両側に

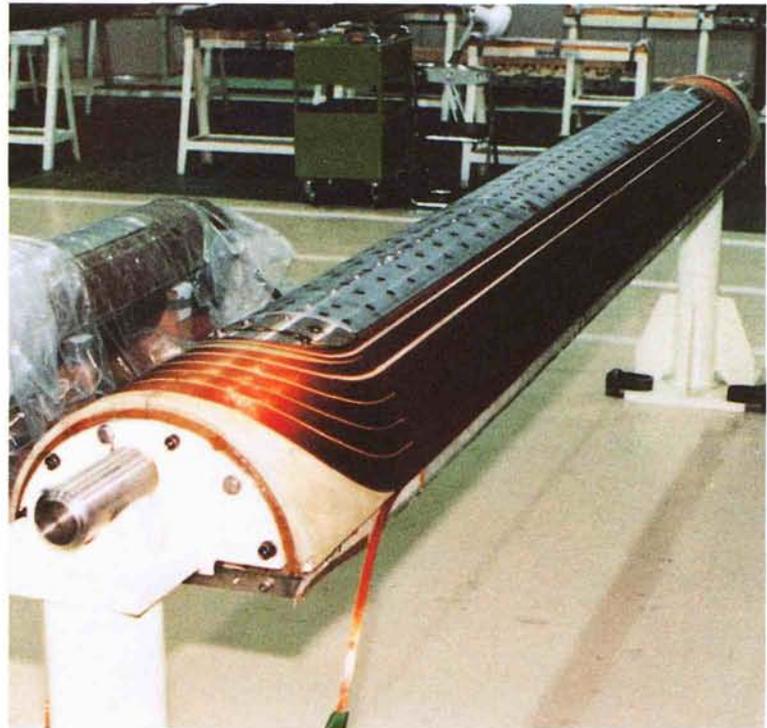


写真6.4 巻き上がったコイル

赤銅色の鞍のような形の部分が巻線機で巻き上げられた鞍型コイルです。写真の状態では、この巻く作業のための芯となるインナーチューブと同径の治具の上で巻かれています。コイルの線材が芯の型をまたぐ部分に見える白い半月形の部材は、スペーサーと呼ばれるもので、コイルを鞍型に仕上げるために必要なプラスチック（GFRP）製の部品です。写真の形のままで、150℃程度まで加熱し、同時に線材同士を6 kgf/mm²（= 60 MPa）程度で加圧することにより線材に巻き付けられた絶縁テープ（カプトン）の表面に塗布されていたエポキシ樹脂が熱硬化して線材同士が固くくつき、芯材などのもろもろの治具を取り去っても鞍型の形を保つようになります。それでコイルの仕上がりです。

乗せて、それをカラーで挟み込んだところを示したものです。このあと、カラーをプレスで両側から押し付け合わせ、半割れのカラーの結合部分にキーを通し、コイルがずれないようにします。

以上のような手順で、1本のユニットスラストができあがるわけです。このようにしてできあがった6本のユニットスラストを寄せ集め、6

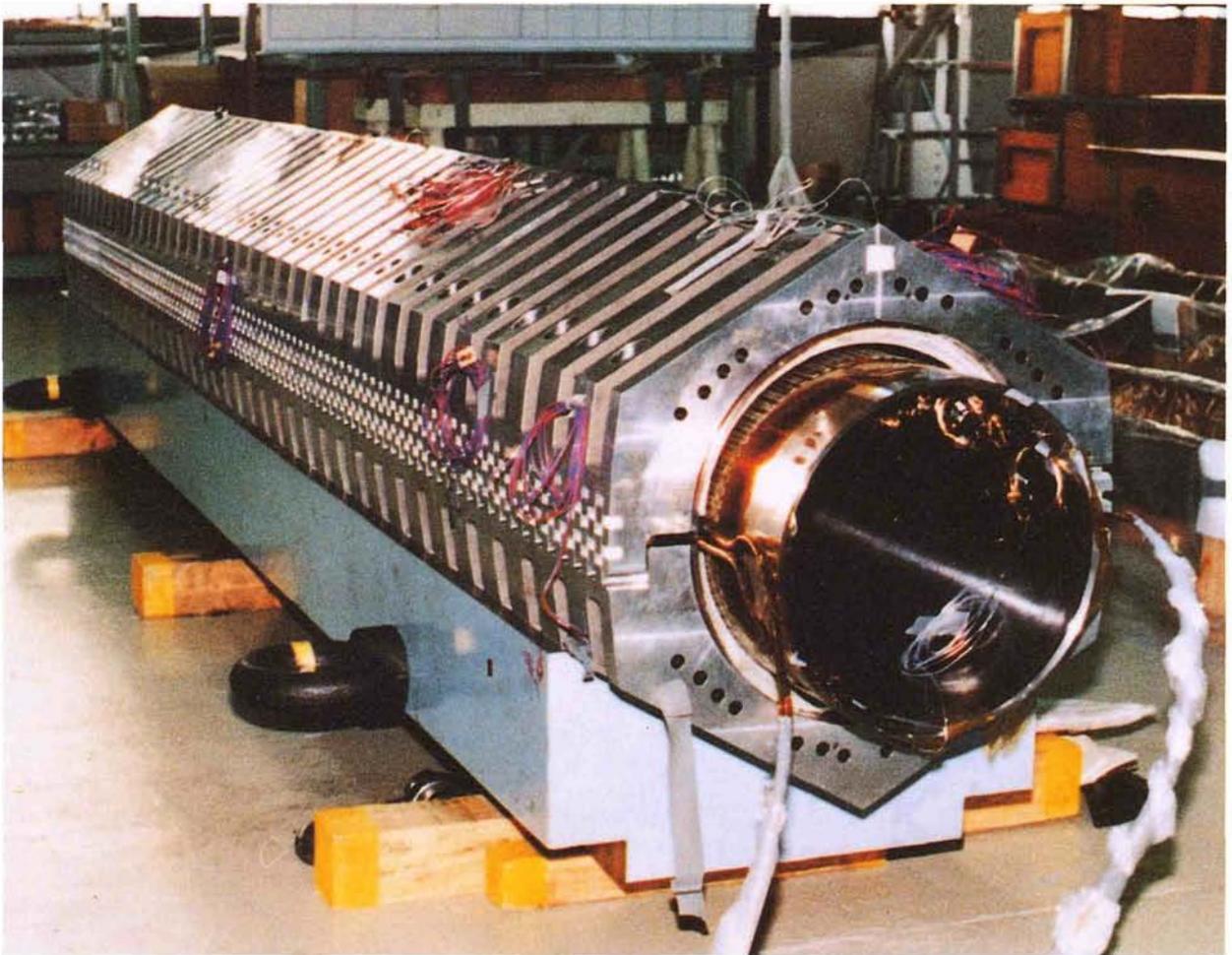


写真6.5 コイルにカラーを取り付けた状態

巻き上がったコイルをインナーチューブの外側に乗せてカラーで挟み込んだ状態。このあとカラーを両側から圧縮し、カラーを結び付けるキーを挿入して完成します。



連環に組み上げて、1個の推進装置のコイル系にしたところを示したのが、写真6.6です。

6本のユニットスラスタを組みやすくするために、6連環構造の中央には、センターコラムが入れています。ユニットスラスタの周りを覆っているのは、前にも述べたヘリウム容器の外筒です。

このヘリウム容器の中に極低温、正確に言えば、大気圧下で絶対温度4.2Kの液体ヘリウムを注入して、コイルを冷却し、超電導状態を作っていくわけですが、注入される液体ヘリウムの総量は、1基当たり約3000リットルになります。200リットル用のドラム缶で、15本分です。実際には、業者の1000リットル入りのデュワー容器*7)で運びました。

「ヤマト-1」には、右舷と左舷に1基ずつ、計2基の推進装置が付けられていますから、2基で6000リットルの液体ヘリウムが注入されることになります。

このほかに、予備の液体ヘリウムも準備しなければなりませんから、「ヤマト-1」の実験では、非常に多量の液体ヘリウムを必要としました。

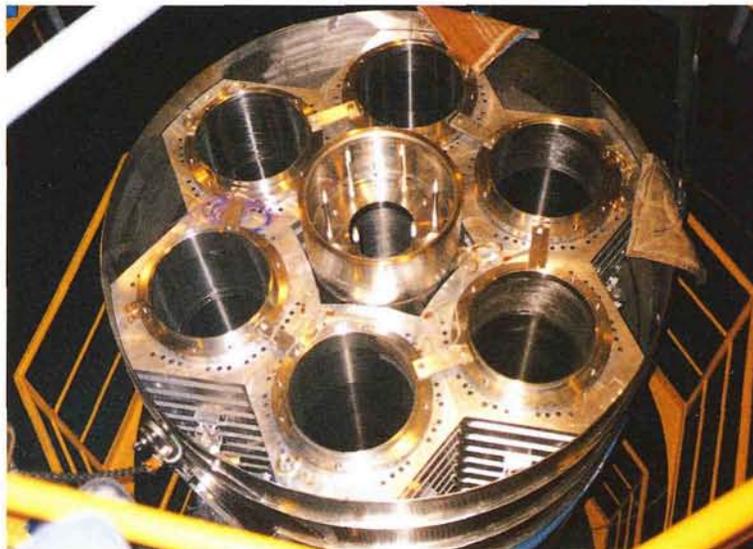


写真6.6 6連環コイルの端面

コイル6本をそれぞれ六角形のカラーを使って6連環構造に組み上げてヘリウム容器の外筒に収めた状態です。これにヘリウム容器のエンドプレートが乗ってふたとなります。

*7) デュワー容器 (Dewar Vessel)

二重壁でできた容器で、壁と壁の間は熱の伝導・対流を妨げるため排気され、真空に面した壁面は熱線を反射するように工夫されています。要するに高級な魔法瓶です。特に液体ヘリウム用のデュワー容器には、断熱材を多数積層した真空多層断熱方式が採用されています。

なお、デュワーとは、この容器の発明者であり、水素の液化に初めて成功した英国の化学物理学者であるJames Dewar (1842～1923)の名前に由来します。

余談ですが、この液体ヘリウムに関しては、面白いエピソードがあります。

液体ヘリウムはなかなか高価なもので、1リットル当たり1000円から2000円もします。それが6000リットル以上必要になりますから、かなりの費用になるわけです。

1992年に、開発研究委員会の装置分科会会長を務めた今市憲作・大阪大学名誉教授（現シップ・アンド・オーシャン財団会長）が、英国の造船造機関係者を対象に、「ヤマト-1」の開発研究に関する講演をしたときに、この液体ヘリウムの値段の話をしたところ、聴衆の英国人の間から、期せずして「ホー」という驚きの声が上がりました。「そんなに高いものを6000リットルも使うのか」というわけです。

そのとき、今市がジョークで、「そんなに驚くことはありません。私たち日本人にとっては、液体ヘリウムよりスコッチの方がもっと高い」と話したところ、講演が終わってから、何人かの英国人が今市のところへやってきて、「英国ではスコッチはもっと安く飲めます」と、わざわざ



写真 6.7 完成した超電導電磁推進装置の全景（三菱重工製）

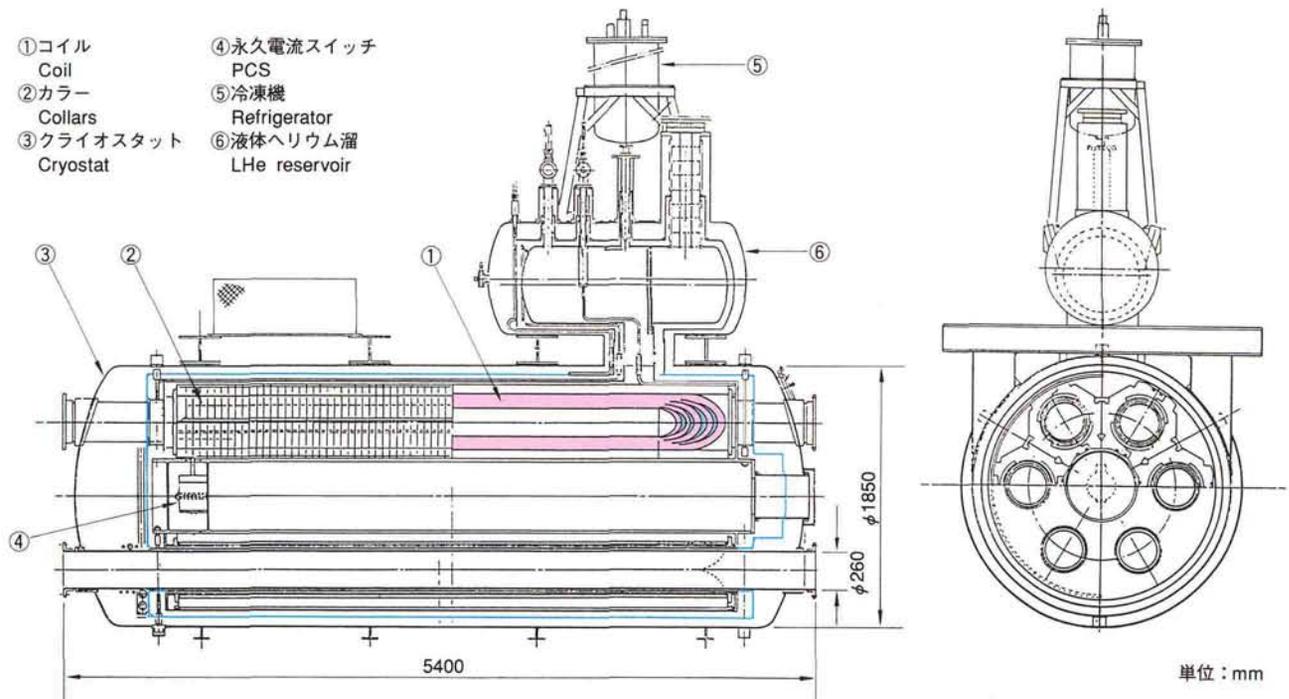


図 6.6 超電導電磁推進装置全体組み立て図、ただし海水管は未挿入（東芝製）

ざ訂正していきました。

開発研究委員会のメンバーにとっては、こんなエピソードも懐かしい思い出となっています。

完成した推進装置

写真 6.7 は、前述のようにして完成した推進装置の全景です。また図 6.6 は推進装置の図面を示したものです。クライオスタットの中には、6本のユニットスラスタが収まっています。6本のユニットスラスタのボアの中には、電極を付けた海水管が通ることになるわけですが、図 6.6 では海水管は描かれていません。クライオスタットの上部に載っているのは、液体ヘリウムを貯液する予備タンク（リザーバー、Reservoir）

です。

なぜこの予備タンクが必要かといいますと、クライオスタットの中に注入されている液体ヘリウムは、外部から侵入してくる熱をもらって、蒸発してヘリウムガスになってしまいます。その分、液体ヘリウムが減ってしまうわけです。液体ヘリウムが減ってしまえば、超電導コイルを十分に冷却することはできません。そこで、蒸発して減った分の液体ヘリウムを補充してやるために、クライオスタット上部の予備タンクに液体ヘリウムを入れておき、そこから供給する仕組みになっているわけです。

さらに、蒸発したヘリウムガスは、蒸発したままでは困るので、クライオスタット上部で回収され、この船に積まれている液化装置に集められます。そこで液体ヘリウムにしてから、再び予備タンクに戻されるようになっています。

ちなみに、クライオスタットの中の液体ヘリウムには、特別に圧力をかけることはしていません。しかし、重力の影響がありますので、クライオスタットの下部の方には、予備タンクの液面からの高さ3.6メートル分の圧力がかかっていることになります。

水の場合は、10メートルで1気圧（1000ヘクトパスカル）ですから、3.6メートルなら0.36気圧の圧力がかかることになりますが、液体ヘリウムの比重は0.125で、水の8分の1の軽さなので、予備タンクの高さ分の圧力が下部にかかるといっても、その力は0.05気圧程度で、圧力としてはわずかなものといえます。

ここで、液体ヘリウムが蒸発してヘリウムガスになり、そのヘリウムガスが液化されて再び液体ヘリウムになるまでを、熱の動きとの関係から、詳しく見てみましょう。

クライオスタットの中に外部から熱が侵入しないように、さまざまな工夫をしていることは、すでに述べた通りです。しかし、どんなに高度なテクニックを駆使しても、現在のわれわれの技術では、外部からの熱侵入を完全に遮断してしまうことはできません。どうしてもいくらかは入ってくるようになります。

入ってきた熱はどうなるかといいますと、クライオスタットの中の液体ヘリウムを温めます。液体ヘリウムは気化しやすいので、その熱で蒸発するわけですが、その際、熱を取り去ってってくれるので、液体ヘリウム自体の温度は、上がらないことになります。液体が気体になるためにはエネルギーを要します。そのエネルギーを熱という形でもってってくれるわけです。

このように、熱が加わっても、表に温度として現れない熱を潜熱 (Latent Heat) といいます。それに対して、熱が加わると、その分の温度が上がる状態の熱の入り方を、顕熱 (Sensible Heat) といいます。

具体的な例で説明しましょう。

水に熱を加えると、1気圧のもとでは、100℃までは温度が上がっていきます。これは顕熱です。しかし、1気圧のもとで、水の温度が100℃に達すると、いくら熱を加えても、水が蒸発していだけで、それ以上には温度が上がリません。水が気体になるときに要するエネルギーを熱の形で奪っていくので、いくら熱を加えても、温度は変化しないわけです。1キログラムの液体が蒸発するために要する熱量を、気化の潜熱といい、水の場合1気圧のもとでの気化の潜熱は、539キロカロリー／キログラム (kcal/kg) です。

気化の潜熱に対して、液化の潜熱というものもあります。氷に熱を加えると、溶けていきますが、氷が溶けきらずにまだ残っている限りは、溶けた水の温度は上がっていきません。氷が溶けて水になるためには、やはりエネルギーを要し、そのエネルギーを熱の形で奪っていくので、温度が変わらないわけです。固体が液化するために要する熱量を、液化の潜熱といいます。

潜熱についての考え方が分かっていただけだと思いますが、ここで液体ヘリウムに話を戻すと、液体ヘリウムの気化の潜熱は、水に比べてはるかに低く、5.0 kcal/kg です。

気化の潜熱が低いということは、外部から熱が入ってくると、どんどん蒸発していくということです。蒸発することで、外からの熱をどんどん取り去ってってくれるので、液体ヘリウムの温度が上がらないで済むわけです。

逆にいうと、液体ヘリウムが蒸発して、どんどん熱をもっていくと、温度が上がってクエンチ現象が起きてしまうということになります。

さて、蒸発したヘリウムガスは、前述したように、クライオスタット上部で回収され、液化装置で液化されて、予備タンクに戻されるわけですが、ここで液化するときに、液化の潜熱に相当する熱量分だけ、ヘリウムガスは冷やされることになります。すなわち、クライオスタットへ侵入した熱量は、ヘリウムガスで液化装置まで運ばれ、そこで外へ捨てられるわけです。このような形で熱が取り去られるので、クライオスタット内部の温度は、極低温状態すなわち4.2 K (=-269℃) に保たれる

*8) ワット (Watt)

この単位は時間当たりどのくらいの仕事ができるか、あるいは時間当たりどのくらいの熱量が発生するか、消費するか、侵入するか、などエネルギーの時間当たりの移動を表するのに用いられます。ここでは外部からクライオスタットへ侵入する熱量を表しています。すなわちワット (Watt) は

$$1 \text{ ワット (W)} = 1 \text{ ジュール毎秒 (J/s)}$$

で1秒間に1ジュール (J) のエネルギーを生む (消費する) ということです。

一方、ジュール (J) は機械的な仕事すなわち「力×距離」で定義された単位で

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ (ニュートンメートル)}$$

です。機械の仕事はエネルギーとして熱量と等価であり、換算は1 cal (カロリー) が

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

です。

Watt は蒸気機関を作った英国の有名なエンジニア、James Watt (1736~1819) の名をとったものです。また Joule は実験によって熱と機械の仕事との関係を明らかにした英国の物理学者 James P. Joule (1818~1889) の名によります。

わけです。

この「ヤマト-1」のクライオスタットは、上述のように6本のボアの通った複雑な構造のために設計製作には十分注意しました。しかし残念ながら、設計時に予想した熱侵入量7ワット (W)*8) に対し、実際は約15ワットの熱侵入があったと考えられました。この熱侵入量に対する設計予想値と実際値とのずれは、クライオスタット内の液体ヘリウム の予定量以上の蒸発を生じる結果になりました。したがって、超電導電磁推進装置の実運転時には船内ヘリウム冷凍機をフル運転し、なお不足する分は予備タンクの液体ヘリウムを使うことで対応しました。

実験終了後、クライオスタットへ予想以上の熱侵入があった問題については詳細な解析が行われました。いずれにしても電流と違って熱の侵入を完全に遮断することは現在では不可能であり、それを許容範囲にとどめる技術もまた大変難しい問題です。超電導技術の応用における大きな障壁のひとつといえます。

第 7 章

電極および海水管

海水管の構造

写真7.1は、ユニットスラストのボアの中に挿入される海水管の外側を示したものです。

海水管は、その内部を海水が流れるため、船底外板と同じように、水圧に対して、十分な強度と水密性が要求されます。また、電極を介して海水に通電するため、電極と超電導磁石との間の電気絶縁性や、海水の電気分解によって発生する塩素に対する耐薬品性もなければなりません。こうした条件を考えて、海水管の材質にはガラス繊維で補強した強化プラスチック（GFRP）*1) を使いました。

*1) GFRP

Glass Fiber Reinforced Plastic の略称です。

*2) フランジ（Flange）

一般には構造物の部材においてその主要部から張り出した部分をいいます。例えば列車の車輪に付いている張り出しなどです。ここでいうのはパイプをつないでいくために、パイプの端面に溶接あるいはねじ込みで、刀のつばのように取り付けられる円板状の部材のことで、隣のパイプのフランジと重ねて、ボルトで締め付けて順次パイプをつなぎ、必要な長さの管路を作ります。

海水管の端面に付いているのは、フランジ*2) と呼ばれるもので、海水管をユニットスラストのボアの中に挿入したあとで、船体側の海水管をつなぐ役割をします。

海水管の両端に最初からフランジを付けてしまうと、ボアの中に挿入できなくなってしまうので、最初は片方だけ付けておき、海水管をユニットスラストのボアの中に挿入してから、もう一方の端面にフランジを取

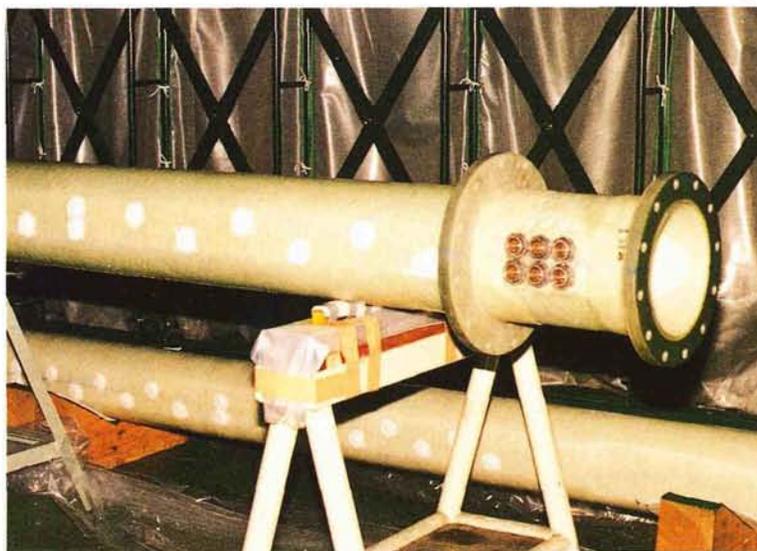


写真7.1 海水管の外観

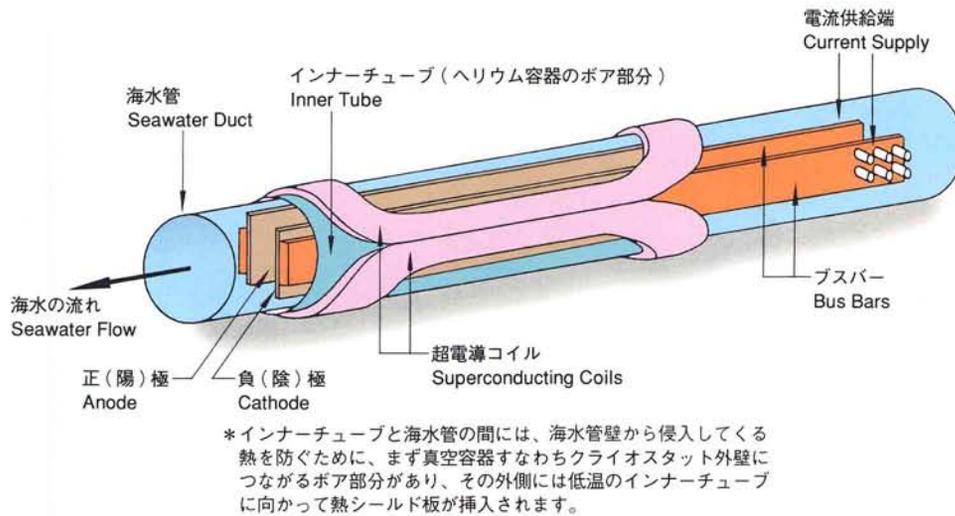


図 7.1 海水管挿入後のクライオスタットボア部分の概念図

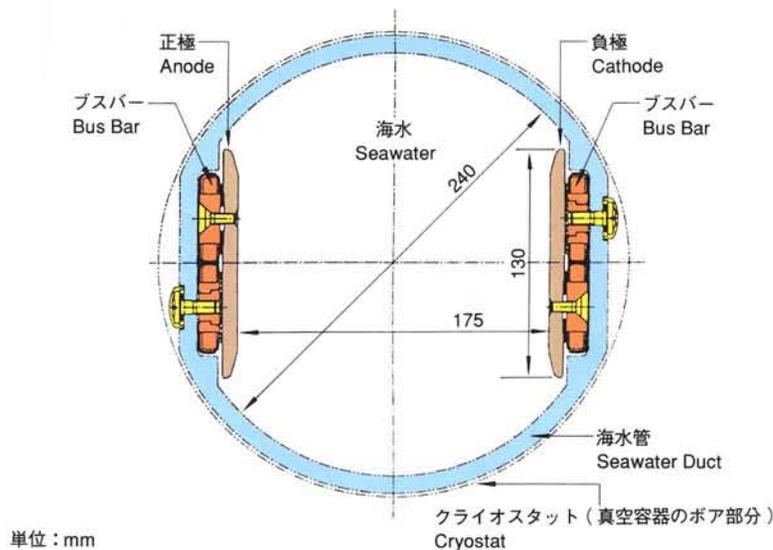


図 7.2 海水管断面図

バスバーは電極まで大電流を運ぶ導線。陽極と陰極は電気化学的見地からそれぞれ別の材料で作られています。

り付けるようになっています。

海水管を挿入したあとのクライオスタットボア部分の構造の概念図を図 7.1 に示します。また、海水管の電極のある部分の断面を示したのが、図 7.2 です。

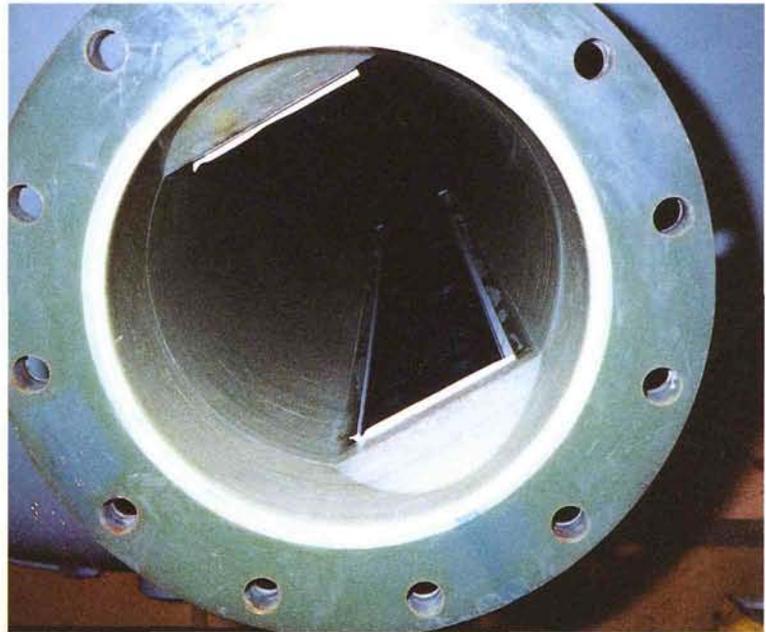


写真7.2 海水管を端からのぞいたところ。電極が認められます。

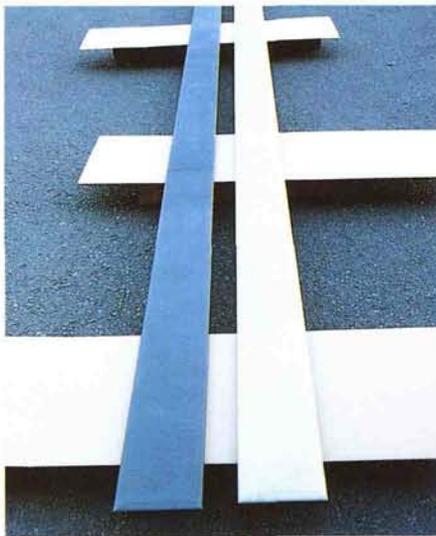


写真7.3 海水管に挿入される電極。
左側が正極（陽極）

この図を見ていただくと分かるように、海水管の内面壁には、正負（陽陰）の電極が向かい合って取り付けられています。

電極は、超電導電磁石によって磁場が形成されている海水中に、磁場の方向と直角に電流を流して、ローレンツ力を発生させるためのもので、正負の2極（Anode、Cathode）と、それぞれの極へ直流電流を送り込むためのブスバー（Bus Bar）と呼ばれる回路から構成されています。また、海水管をクライオスタットのボアの中へ挿入して取り付ける場合は、両電極を連ねる方向が、磁場の方向すなわち6連環のボアの中心を連ねる円の周方向と直交するように、すなわちそれぞれの海水管の中で磁場の方向と海水中を流れる電流の方向が直交するように、そして当然極性を考慮して取り付ける必要があります。

電極とブスバーが取り付けられた海水管内部を示したのが、写真7.2です。電極がよく見えると思います。

電極には、最大2000アンペアという多量の電流が流れるため、電極の材料には、その電流に対して消耗することなく、長期的に安定した性能を発揮することが要求されます。

また、海水中に通電すると、電気分解*3)が起きて、正極から塩素ガスと酸素ガスが、負極からは水素ガスが発生します。正極から発生する塩素ガスと酸素ガスの割合は電極の材質によって異なってくるので、外部環境への影響を考慮して、なるべく塩素ガスの発生が少ないものを選びなければなりません。

そこで、われわれは、幾つかの材料を検討して、正極には、電気化学分野での使用実績が多く、高電流に対する耐久性が高い、イリジウム酸化物をベースにした商品名DSAと呼ばれる電極を用いることにしました。写真7.3は海水管に取り付ける前の電極板を示したもので、向かって左側が正極です*4)。

ちなみに、「ヤマト-1」の航走実験のとき、推進装置のノズルの出口の部分で、海水中に発生している塩素ガスの量を測定してみたところ、フル稼働のときでも、その量は予想していたよりもずっと少なく、わずか0.1 ppmでした。水道水に含まれる塩素ガスの量の最低値が0.1 ppmですので、「ヤマト-1」の海水管の電極から発生する塩素ガスの量が、非常に少ないことが分かります。

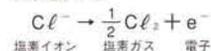
電極へ直流電流を送り込むための回路であるブスバーにも、高電流や強い電磁力に耐えられる材料が求められます。さらにいえば、ブスバーは常電導状態で使用するので、できるだけ抵抗が少ない材料が必要です。こうした条件を考えて、ブスバーには、銅で作った大きな断面



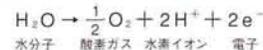
*3) 電気分解 (Electrolysis)

塩水中に正負の電極を置いた場合

正極側では



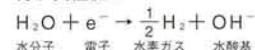
塩素イオン 塩素ガス 電子



水分子 酸素ガス 水素イオン 電子

2つの酸化反応が生じます。すなわち酸素ガスと塩素ガスが発生します。そして電極の種類によりどちらの反応が優先するかが定まります。

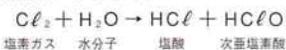
一方、負極側では



水分子 電子 水素ガス 水酸基

の還元反応が進行し、水素ガスが発生します。

正極で発生した塩素ガスは水と反応して、塩酸と次亜塩素酸になります。



塩素ガス 水分子 塩酸 次亜塩素酸

「ヤマト-1」の航走中の写真で白く見えている部分の一部はこの推進装置の負極から発生した水素の気泡です。酸素ガスはおそらく大部分海水に溶けてしまっていると考えられます。

*4)

電磁推進船では、磁石の発生磁場が一定の場合、電極間に流す電流の方向を変えることによって、前進力、後進力を得ることができます。

したがって、電極板に用いる材料としては、正極にも負極にも使える材料が望ましいのですが、塩素の発生を抑え、かつ耐久性の富む両極用の材料はまだ開発されていませんでした。そこで、「ヤマト-1」では、正極にはチタンにイリジウム酸化物をベースにしたDSAという電極を、負極にはチタンに白金をメッキした電極を使用しました。しかし、将来的には、極性を切り替えるのに十分耐えられるだけの電極板の開発が必要であり、それは可能と考えられます。

なお、「ヤマト-1」では、電極の極性切り替えは「極性切り替え試験」のときにしか行いませんでした。通常の後進時には、ノズルから噴出する水流の方向を前進時と逆向き(船首方向)にする装置(スラストリバーサー、Thrust Reverser)を使用しました。この装置は、前進時には抵抗となるため船内に格納し、後進時に船内からノズルの直後に降ろすようになっています。図2.1の一般配置図を参照して下さい。

の板を使うことにしました。

超電導コイルのところでも触れたように、超電導状態では、直径わずか20ミクロンの細いフィラメントの束の中（総面積6 mm²）を、最大5000アンペア近い電流が流れるわけですが、海水管の中のプスパーを流れるのは常電導電流なので、2000アンペアの電流でも、非常に大きな導線（断面積1000 mm²）が必要になるわけです。いかに超電導の威力が大きいか分かるかと思います。

電極群への電流供給回路

次に、1基の推進装置の電極群、すなわちそれぞれのユニットスラストに1対ずつある正負極の対の全体に対してどのような方式による電流の供給、すなわち船の航走動力の供給が行われるかについて、説明しましょう。

図7.3がその電流供給の原理的な回路図です。実際はあとで分かるように非常に複雑ですが、原理的にはこの図のように、主発電機関のディーゼルエンジンを回して発電機で起こした交流電流を、整流器によって直流電流に変換します。電極へ流すのは直流電流ですから、整流器を通して、そこで交流成分を取り去ることによって、直流に変えるわけです。整流器を通して、交流成分が完全になくなってしまいうわけではありま

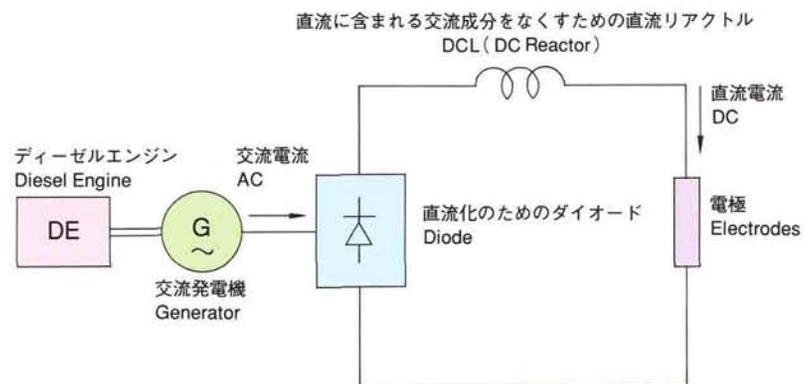


図7.3 電極電流供給の原理的な回路図



せん。そこで、残りの交流成分をさらに取り去るために、直流リアクトル盤を通して電流を平滑にしたあと、すなわち直流に含まれる交流成分をなるべく小さくしたのち、その直流電流をユニットスラスト内の電極へ流すわけです。

ここで注目していただきたいのが、1基の推進装置に属する6本のユニットスラストのそれぞれの電極対相互間の接続方法です。

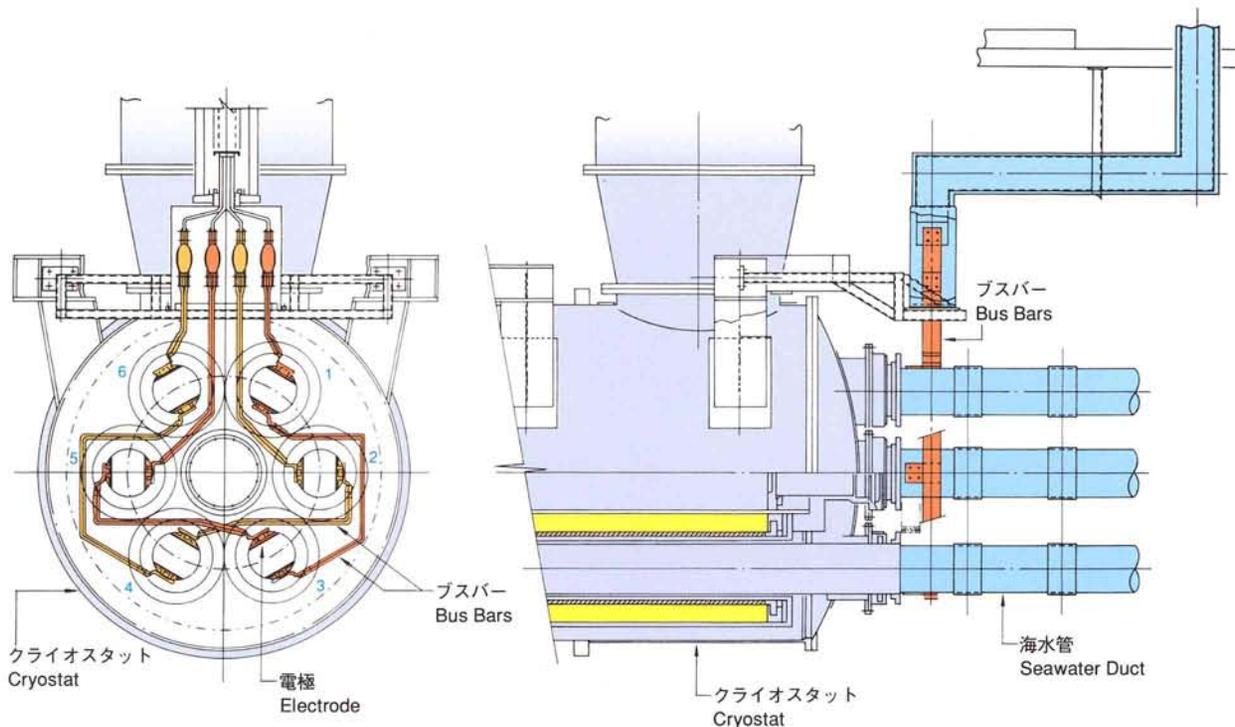


図7.4 電極の接続概念図

図7.4は、電極と電源との実際の接続状態を分かりやすいように示したものです。また図7.5は、図7.3で原理的に示した電源側をもう少し詳しく書いて、6組への電力供給を示した実際に近い電気回路図です。

これらの図から分かるように、「ヤマト-1」の6本のユニットスラストの電極対は、2系統に分かれて接続されています。すなわち、ユニットスラスト1の電極対を通った電流は、次に1つ置いて3に行き、さらに5に流れて、また配電盤へ返ってきます。これが1系統です。もう1系統の方は、同様に、ユニットスラスト6から4へ行き、さらに2に流れて、配電盤に返ってくるわけです。

なぜこのような接続方法にしたかといいますと、幾つかの理由があります。

6本のユニットスラストの電極対相互間の接続方法としては、6本並列接続、6本直列接続、2本直列3並列接続、そして3本直列2並列があります。

これらの接続方法には、それぞれに特徴があって、6本並列および2本直列3並列の場合は、電極電流が大きくなり過ぎて、既製の発電機保護遮断器の容量を超えてしまうため、既製の保護装置が使えないという欠点があります。

それに対して、3本直列2並列および6本直列の場合は、電極電流がそれほど大きくなりませんので、どちらも既製の保護装置が使用できます

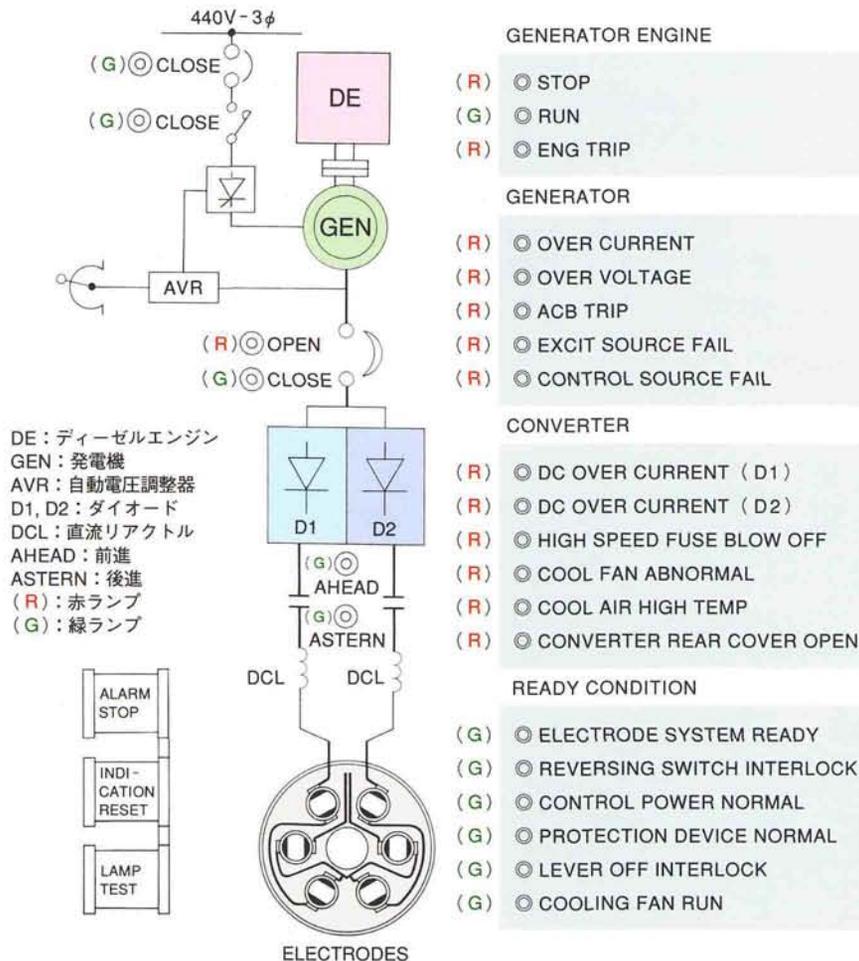


図 7.5 電極電源と6組の電極をつなぐ回路図

右側に縦に並んでいるのは各種機器の作動状態を示すためのランプ類を示したもので、実際の配電盤にこのように英語で表示されています。運転が正常であればグリーンランプ(G)が点灯し、不具合が生じれば異常個所に対応して赤ランプ(R)が点灯します。

が、6本直列の場合、漏えい電流が大きいという欠点があります。つまり、電流を流すのは、磁力線の走っている部分に働きかけて、ローレンツ力を発生させるためですから、磁力線が走っている部分を流れないと意味がないわけですが、その本来流れるべき部分を電流が流れずに、磁力線が通っていない部分を流れる無効電流が多くなるのです。具体的にいうと、6本直列の場合、流した電流の15～30%が無駄になってしまいます。

以上のような理由から、開発研究委員会では、最も効率的で合理的な接続方法として、3本直列2並列接続を採用したわけです。また2系統のうち1系統がダウンしても、残りの1系統でバランスのとれた推力が得られるように、1つ置きに電極を接続するようにしました。

*5) AVR
Automatic Voltage Regulator
自動電圧調整器の略称です。

電極への電流量の制御は、図中にAVR*5)とある電圧調整器によって、電極板間の電圧を調整する方法で行われます。電流を流さなければ、船は動きませんし、電流をたくさん流せば、出力が上がります。電圧調整器で電流量を制御することによって、船の推進力を制御できるわけです。

第 8 章

ぎ そう せん こく
艤装と船殻

少し船について一般的な話をしましょう。

まず、日本語でふねといえば舟、船の字が使われます。これ以外に舢舨、艦などがふねを指します。われわれの感覚として舟は矢切の渡しに使われるようなふねを、そして船はもっと大きなふねを指すようです。すでに7000年前にエジプトで、一応の構造をもった舟が使われていたようです。今日われわれが、舟あるいは船の字を借りた中国でも、これに負けない古い時代からふねはあったようです。そして時代が下り漢字が出現すると舟、船、舫、舶、舸、艦などその大きさや構造、用途に応じて分類されて呼ばれています。中国の文明の奥深さがしのばれます。

英語も細かい言葉遣いがされているようで、舟の類を表現するのに Vessel、Ship、Boat、Ferry、Barge などの言葉が使われています。

いずれにしてもこのような言葉の違いは、ふねとしてひとまとめにするのにはあまりにも抵抗が大きく、別々のものとして区別した結果でしょう。そのように歴史が古いだけに船には、まことに多種多様なものがあります。使用目的から考えても、お金をとって客や荷物を運ぶことを主体としたいわゆる商船に対し、軍艦、測量船、ケーブル敷設船など特定の作業や目的のみ使用される船があります。漁船は言うまでもなく後者に入ります。また、超電導電磁推進装置の海上での実船試験を目的とした「ヤマト-1」も当然、後者の部類に入ると思います。

このように多種多様な船が存在しますが、基本的な名称や構造原理はほぼ共通の基盤のうえにあるので、少しそれに触れることにします。

まず、船の寸法ですが長さ (Length) と幅 (Breadth) と喫水 (Draft) の定義を述べます (図 8.1)。造船工学上、あるいは法規のうえでは垂線間長 (Length between Perpendiculars) というのが用いられ、記号も L_{pp} が用いられます。これは船の満載時に船首のちょうど水面のところ、もう少し学術的表現をすれば、計画満載喫水線の船首材前面から船尾にある舵 (Rudder) の芯棒の中心、すなわち舵頭材の中心までの水平距離を用います。また文字通り船のへさきの前端から船尾の後端までの水平距離を全長 L_{OA} (Length over all) といいます。

そして船体の幅のいちばん広いところでの、外板の内側から反対側の外板の内側までの水平距離 B_{mid} (Moulded Breadth) を型幅、これに両外板の厚みを加えた値を全幅 B_{ext} といいます。もちろん船の横断面の形状は長方形ではなく、複雑な形のものも多くありますが、それぞれについて幅の決定法が定められています。

満載時の船の底面の中央部の内側、正確に言えばキール (船体底面の中

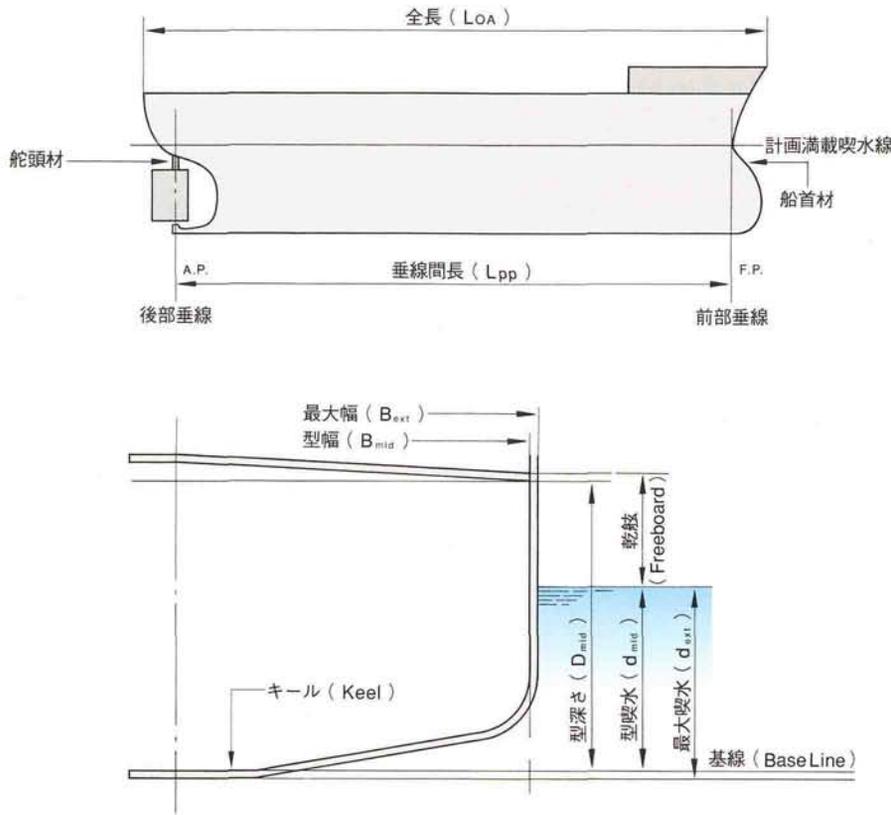


図 8.1 船の長さ、幅、喫水等

中央部を走る厚い部材)の上面から水面までの高さを型喫水 d_{mid} (Moulded Draft)、底面の外側から喫水面までの高さ、すなわち型喫水値にキールの厚みを加えたものを最大喫水 d_{ext} といいます。

そして水面から上甲板の端までの高さを乾舷 (Freeboard) といいます。乾舷の値が小さいということは船体上面が水面に近いということ、その意味では波浪が浸入する危険があるということになります。

船は、人間の作る動くものとしては最大で、大型タンカーなどでは長さ300メートル、幅50メートルを超えるものも珍しくありません。船の最大のありがたさは海の上を道や軌道を作らずに、必要なところまで自

由に行ける点です。しかし海も場所により深さが違ってきます。したがって喫水の値は大変重要で海の深さ、川の深さ以上の喫水をもつ船をそういうところへ航行させれば座礁します。大きいだけに一度座礁すればそこを離れるのは大変な作業になります。

船の大きさは読者のだれもがご存じの通り、トンという単位で表現されます。このトン数は少し面倒です。最も理解しやすいのは貨物船やタンカーに利用される載貨重量（Dead Weight）で、文字通り積載できる貨物の重量を表し、DWと略記されます。船自身（船殻）の重量や航海に必要な装置機器類、燃料、水、乗員などの重量は含まれません。

これに対し客船では100立方フィートすなわち 2.83 m^3 を1トン（容積トン）として、船内の有効に利用できる容積の和で船の大きさを表し、これを総トン数（Gross Tonnage）といい、GTと略記します。もちろん、エンジンルームとかトイレなどの容積は勘定に入っていません。日本の和船の千石船という場合の石数は、18立方尺を単位として石数を測りました。発想は総トン数と同じでしょう。

最後に軍艦などのようにその中に有償で利用できるスペースをもたないものは、船体の水面下の容積に海水比重（場所によって異なりますが、通常1.025を用います）をかけて計算した排水量で表します。したがって、この値はアルキメデスの原理から間違いなくその船全体の重量ということになります。普通、満載時の排水量（Full Load Displacement）で表します。戦艦大和の7万8000トン（重量トン）はまさにこの値です。われわれの「ヤマト-1」もまた排水量で大きさを表します。

船の形は船首、船尾の部分にそれぞれ目立つ構造物があり、船体中央部には船橋（Bridge）と呼ばれる船の動きをコントロールする重要な機材の収まる構造を備えている形式が見慣れたものです。これは船の上部構造としては三島型（Three Islander）^{さんとうが}といわれる古典的な形式です。現在は船も全く多種多様で、このような古典的な形は少なくなったようです。最近の沿岸を走る客船やフェリーなどの上部構造の外観は、自動車などと同じく工業デザイナーの手になることも多いようです。

船が構造上、自動車や列車といちばん違う点は、自分自身や積み荷の巨大な重量を、喫水線（Water Line）より下の船体部分全体にわたって働く水の圧力、すなわち浮力（Buoyancy）で受けている点です。その点では翼全面で重量を支える飛行機に似ていますが、飛行機の場合は揚力という動力学的な作用によるもので、船のようにじっとしていても働く浮力とは違います。自動車では全重量を4個の車輪で集中的に支え

るわけです。したがって車輪という限定された部分に大きな力が働き、それに耐える構造になっています。これに対し船はその巨大な重量を船体外板から水の圧力により、船首から船尾にわたる広い部分で受けとめています。人間は立っているときは全体重を足の裏で比較的集中的に受けとめています、あお向けに寝ているときは、全体重を背中から大腿の裏までの広い部分で布団の綿の圧力を受けて、一様に支持することになります。船はこの状態なのです。

海は布団と違って絶えず波やうねりがあり、ときには信じられないような大波に船首から突っ込むことがあります。水は密度が大きく、加えて縮む性質*1) がほとんどないので、波による力は巨大なものです。船体はこれに耐える構造に造られます。現在、大型の船はほとんど鋼材で造られています。小型、中型船はアルミ材で造られるものも多くなってきましたが、やはり全体としてみれば鋼材の船が圧倒的に多いのです。鋼材が用いられる理由は、安いこともあります。強度や加工性*2) で断然優れているからです。

普通の商船を造るには、まず底となる部分の中央に船首から船尾へ向かってキールプレート (Keel Plate) と呼ばれる厚く丈夫な帯のような鋼材が置かれます。昔の木造船ならば龍骨 (Keel) と呼ばれた頑丈な木材が置かれた個所です。このキールプレートを中心にフレーム (Frame) と呼ばれる構造材が人間の背骨からろっ骨が出るように取り付けられます。キールプレートとフレームの取り付け部には丈夫な補助部材が用いられます。フレームの外側には外板が溶接されます。もちろん十分の強度をもつように、外板の内側にはガーダ (Girder) とかスティフナ (Stiffener) と呼ばれる補助部材が縦横に挿入されています。

船体の両端となる船首部と船尾部は、それぞれ特有の頑丈な構造となっています。船首は航行時に水を切り開き、荒天時に大きな波が打ち付けるところです。当然それに見合うよう頑丈な構造が必要です。また船尾には普通推進器が取り付けられ、プロペラの大きな推進力を受けてそれを船体に伝えなければなりません。さらに大きな舵も取り付けられます。舵は船の運動方向を変えるための大きな力を受けます。要するに船体の中で大きな集中力を受ける唯一の部分といえます。したがって十分頑丈な作りになっています。

フレームに張り付けられた外板で船の底と側面が作られ、船首、船尾が取り付けられると、細長い容器のような構造ができます。この容器のふたに相当するのが上甲板です。船底や船側の外板とともに船の機能を

*1) 縮む性質

圧縮性 (Compressibility) という言葉で呼ばれています。本文で述べたように水はほとんど縮みません。そのために激しく打ち寄せられる波にたたかれるような場合には、強い衝撃を受けます。このような水の圧縮性が小さいために生じる衝撃をウォーターハンマー (Water Hammer) と呼んでいます。

*2) 加工性

船殻を作っていく工程は曲げや切断、溶接が主な作業となりますが、曲げ加工にあまり大きな力を必要とせず、また加工の際にもひび割れや局所的な破損が発生しにくく、溶接作業もことさらに面倒な工程をとらなくてもよい、このような性質をまとめてここでは加工性がよいと表現しています。



果たす重要な部分です。上甲板も箱のふたのように簡単に付いているわけではなく、上甲板の裏側の船体内部には補強の部材が付いています。さらには、船体内部を長手の方向に幾つかの独立した空間に仕切るための横隔壁（Bulkhead）がはめ込まれています。甲板を完全にふたとしたのでは船の用をなしませんから、船倉部分とか人や物が出入りするための開口部（Hatch）が必ず上甲板には設けられます。これで船殻ができあがるわけです。

このような構造をもつ船殻の建造は、少し昔までは船台の上にもず長々とキール材を置き、それにフレームを取り付け……という順序ですべての鋼材を船台に運び、主としてリベットでつないでいく工法でした。今は船体を全体として、幾つかのブロック（Block）と呼ばれる部分に分け、そのブロックをそれぞれ独立に作り上げ、それらを近代的なクレーンで運び溶接でつないで完成させる方法がとられます。溶接でつなぐといえ



ば簡単に聞こえますが、この溶接でキールのような船体の重要部材もつながるわけで、それが元からひとつのものとして造られた場合に比べて強度、その他で劣るところがないものにするのは大変な仕事です。日本は今やこのような製造工程に関しては世界でもエキスパートとして知られており、日本の造船業を支える技術上の大きな柱の1本がこの点といえます*3)。

さて、船の性能をいちばん左右するのは、船体が水面から水をのけている面積、すなわち水線面積ならびに水面下の船体の形状です。鉄の大きな空き箱を水に浮かべるだけならば、おわんや金ダライを静水(Still Water)に浮かべると同様で簡単なことです。しかし、これにちょっとした重いもの(一寸法師に限りません)を載せた場合、そのおわんやタライが傾かないようにするのはそれほどやさしくはありません。船はおわんやタライに比べれば細長く、そのうえ、中に必要な重いものをいっば

*3) 造船の技術

現在、日本の大型の鋼船の製造事業は設計に始まり、工程の管理、さらには船殻の曲面部の製作工程にいたるまで広くコンピューターを応用する技術が開発され、少し前では考えられなかったような省力化、省人化が行われています。その結果、世界で最も効率よく船を作ることができる技術やノウハウ(Know-how)を作り上げているといえます。これが現在日本をして世界のトップを行く造船国であらしめている最大の理由のひとつと考えられます。

い積んでいます。さらに貨物も積まねばなりません。そのときに、船は設計時に考えた形で浮かばなければ困ります。正しい設計がされていないと、波もない静水中でも船が左右あるいは前後に大きく傾いたり、ひどい場合は浸水したりすることもあり得るわけです。

船の重心（Center of Gravity）に働く船の重量と、船体が水から受ける浮力がうまく釣り合う形で船は浮かぶわけです。その浮かび方が予定した状態になるように、設計製作されているわけです。そのためには水面下の形状や重量の配分を詳細に計算し、それに合うように製作がなされます。さらに静水で船が所定の状態で浮くことは当然として、波などで船体が傾いた場合も、船は直ちに元のような浮き方へ戻ろうとします。この性質が復原性（Stability）です。この復原力は船の重心と船に働く浮力の作用点である浮心（Center of Buoyancy）との相対位置で定まります。よく知られているように、浮心に対して重心の相対位置が高いほど復原性は悪くなり、ついには船は傾いた方向へますます傾き転覆という事態が生じます。北の海で操業する漁船で極寒の中、マストに付いた氷を落とす作業がテレビで放映されたりしますが、この作業こそは船の重心位置が着氷により高くないようにするための重要な仕事なのです。

さらに船は航走してこそ船です。したがってまず速度が設計値通り出るか、舵が正しく作動するかなど、その船の運動性能を確かめなければなりません。これらの性能を理論的に完全に明らかにすることは現在の造船学では不可能です。したがって、新しい船型の船を造るときは必ず模型船を使って水槽でのテストを行い、性能を確認し、必要となれば設計の部分的修正さらには全面的な再設計ということもあります。

以上は船についての一般的な話です。われわれの「ヤマト-1」は特殊な船ですが、やはり船ですから上で述べたようなことはすべて十分に検討されました。出発点となるのは当然超電導電磁推進装置の重量と形状寸法です。それを装置分科会が示すことのできたのは1987年のことでした。その2基の乾燥重量、すなわち、この装置の海水管中へは海水が、クライオスタット中には冷却用のヘリウムが入っていない状態で30トン、そしてスラスト作動部の長さを3メートル、推進装置のユニットスラストの海水管内径240ミリメートルです。これに電力を供給するディーゼル発電装置2000キロワット×2基の重量、寸法ならびに交流として発電された電気を直流に整流するための諸設備や、電圧調整装置および電

極への配電関係の諸設備などの重量値が見積もられました。

通常の商船であればまず搭載されるべき旅客数あるいは貨物量、種類といったいわゆるペイロード (Pay Load) や、航路、速度などが初めに示され、それに応じて経験的資料に基づき機関重量などが順次見積もられて船体設計が進行します。しかし「ヤマト-1」では実験対象である超電導電磁推進装置が最優先となります。そして船という大きなシステムの設計を進めるうえでの技術上のフィロソフィー、すなわち基本設計概念は、この船に対しては次のようなものでした。

- (1) 両舷の推進装置の最大出力時、すなわちスラスト内で海水に働くローレンツ力の合計が1万6000ニュートン (N) の状態で、8ノット*4) で航走する。排水量は150トン为目标とする。したがって船型は航走時の抵抗が極めて小さくなるような船型とするとともに、装置を極力軽量化する。
- (2) 超電導電磁推進装置の点検整備が十分行えることが重要である。したがって推進装置本体を船から取り出したり、再び船に取り付けることができるべく容易に行える船体構造、機器配置とする。
- (3) 本船は世界で初めての超電導電磁推進の実船である。したがって船型、特に外観形状について従来の船という観念にとらわれない船型にする。

この基本設計概念に基づき、具体的な数値を入れる設計が1987年末ごろから始まりました。もちろんそれ以前に装置分科会での仕事の進行に合わせた大まかな装置の設計図に基づき、船型について活発な論議が行われ、1987年にはすでに基本的な模型試験が行われていました。そのような前駆的な開発資料を下敷きにして単純な単胴船型、双胴船型、複合船型など種々のものについて理論的検討にとどまらず、必要な模型実験を行い、1988年には一応現在の「ヤマト-1」の原型となるものが確定しました。

この船は喫水が浅く、両舷に推進システムを収めるためのバルジ (膨出部) をもつ船型です。またこの船はディーゼル発電機などの重量物が船尾に集中します。したがって、船の重心は船体後方に偏ることになります。また両バルジは、その周りを流れる流れが干渉し合って抵抗が増えないように、なるべくバルジ間の距離を広くとる必要があります。これらの点から、船体の幅が最も広くなる船の後方にバルジも配置されました。この結果、ますます重心は後退し、船の長さとの比 (L/B) の小さい幅広浅喫水船型となりました。さらに船首側の船底形状が円弧

*4) ノット (Knot)

船の速度を表すのに現在でも慣用されている単位で、1時間 (hr) に1海里 (Nautical Mile) を走る速度を1ノット (kt) とします。1海里というのは、元々は北緯45度付近における子午線上で中心角1分に相当する長さといわれています。現在、日本では1925年の国際水路会議で定められた1海里 = 1852 m とされています。したがって、1 kt = 1.852 km/h となります。

またノットという言葉は、昔船速を計るために船尾から浮子を流し、それに付けた網の結び目 (Knot) を数える方式であったのに基づいています。

*5) 交流成分を低減させる装置

「ヤマト-1」のように交流発電機で作った交流を整流装置で直流に変換して用いる場合、どうしてもその直流中に交流の成分が含まれます。これは通常リップル (Ripple) と呼ばれていますが、本来完全な直流が流れるものとして考えた回路に交流成分が流れることは種々の不都合を引き起こします。したがって普通は直流に対する交流成分の割合をなるべく低くし、ある限界を設けます。われわれの場合これを電圧比で3%以下としました。このための装置です。

*6)

だれでも知っているように、自動車は外観がその売れ行きに大きく影響します。そのために専門のデザイナーたち、普通工業デザイナー (Industrial Designer) と呼ばれる人たちが人々の心を捉え、町の景観にマッチするボディーの形を考えます。その形を基にエンジニアたちがボディーの製造を考えるのが当たり前になっています。

現在の日本では比較的大きな船の外観形状の設計を完全に専門の工業デザイナーに任すということはまだ少ないようです。「ヤマト-1」はその数少ない例です。船本来が持つ機能美だけに頼らず、積極的な美的感覚を盛り込んだ船の形は、日本の海をもっと楽しくしてくれると思われま

す。に近いU型をしていたために、針路不安定が懸念されました。そこで模型船を使って操縦性、耐航性試験を実施し、それに基づいて単胴部の船首付近の船底をV型にするとともに、船底ラインも変更して水面下の船体を横から見たときの面積を大きくして、直進性の向上を図りました。それについては、あとで詳しく述べることになります。

さらに、電極へ流す直流に含まれる交流成分を低減させるための装置*5)の増設を行うことになったので、船体を延長しました。その結果、最終的に1989年にいたり $L_{pp} = 26.40$ メートル、 $B = 10.39$ メートル、 $D = 2.5$ メートル、 $d = 1.50$ メートル、排水量185トンの「ヤマト-1」の設計が確定しました。

船体の上甲板から下の部分の構造、いわゆる、主船体の設計と製作は三菱重工業で行われ、構造材はアルミ系の材料が用いられました。写真で見るとあの美しい上部形状は、広島にあったブルーズナーバルという設計事務所^{キソウ}で設計されました*6)。その図面を基に構造などについての詳細設計がされ、製作は大阪の協力工場で行われました。そこで完成した上部構造は、三菱重工業の下関造船所へ海路運ばれ、電極通電用の主電源や補助電源などを搭載した下部構造とつながりました。その後、最も重要な超電導電磁推進装置を搭載できるばかりの状態として、海路を神戸まで曳航されました。そして神戸造船所^{キソウ}において、推進装置その他の重要な機材の積み込み据え付け、すなわち艤装工事を受けました。

「ヤマト-1」の艤装については、あとで詳しく述べます。

艤装^{キソウ}前の装置の諸試験

船内に搭載する諸装置は、完成するとすぐに船に搭載されるわけではありません。いろいろな段階での検査や試験を経て、問題のある部分を点検、改善し、設計時の機能、能力を十分果たせることを確認してから、初めて船に搭載することが可能になるわけです。

具体的な例を挙げますと、ユニットスラストのための超電導コイルは、巻き上がったあと、単体専用の試験用クライオスタットの中に縦ぐりにして、1本ずつ、励磁試験というテストを行います。写真8.1は、その単体励磁試験の様態を示したものです。

どういう手順で試験が行われるかといいますと、まず巻き上がったコイルを単体試験用のクライオスタットの中に縦ぐりにして入れます。こ

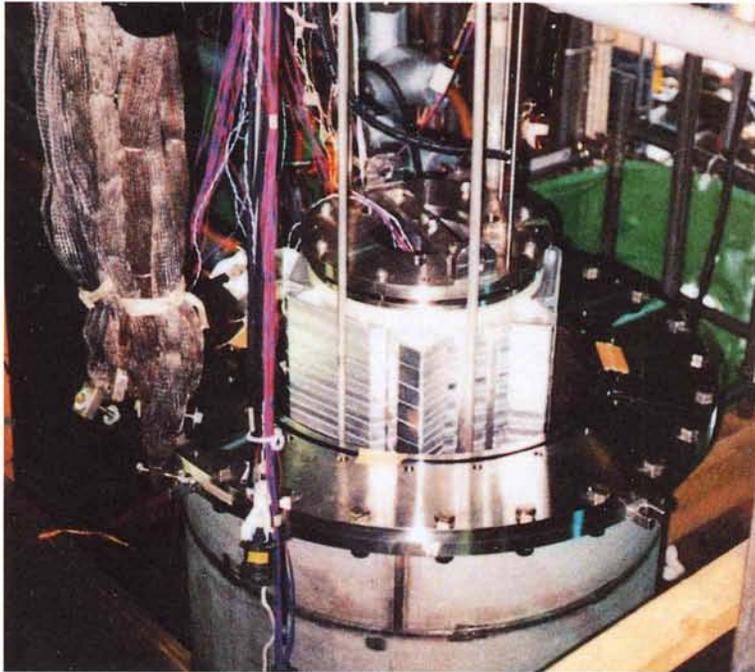


写真 8.1 単体コイルの励磁試験状況

- (a) 単体コイルを縦づりにして試験用クライオスタットの中へ挿入している写真。
- (b) 試験用クライオスタットに収まったコイルに電流を流して励磁試験を実施中。

の状態、クライオスタットの中によく冷えたヘリウムガスを送り込み、それを循環させて全体をよく冷やしていきます。内部の温度が20Kに達したら、今度はそこへ液体ヘリウムを注ぎ込みます。コイルが液体ヘリウムの中にドブっと漬かった状態になるので、われわれはこの作業を「ドブ漬け」とも呼んでいました。

次に、クライオスタットの中のコイルに電源装置や保護装置を接続し、それらの回路が正常に作動することを確認します。それから、超電導コイルに少しずつ直流電流を流していきます。最終的には、6連環にした場合の設計時の電磁力か、あるいはそれ以上の電磁力が得られるまで、電流の数値を上げていきます。その際、最初からいきなり大電流を流すと、急激に生じた強い電磁力の影響でコイルが膨れ上がるような変形が生じ、場合によってはクエンチ現象を起こしてしまうことがあるので、徐々に電流の量を上げていくわけです。

6連環にしたときにコイルが受ける電磁力に相当する力がコイルにかかるためには、単体の試験では4000アンペア近い電流を流して、3.5テスラの磁場を得る必要があります。その状態が達成維持できるかどうかを、実験をして1本1本について確かめるわけです。

この単体励磁試験には、ただ単に超電導コイルに問題がないかどうかをみるだけでなく、コイル自体をトレーニング（訓練）するという目的も含まれています。電流を流すことによって、コイルにかかる電磁力を発生させ、コイル本体とカラーのなじみをよくし、製造工程時に生じたかもしれない小さなゆがみなどを取り去り、設計時に予想した理想に近い形になるようにするわけです。このプロセスをトレーニングと呼んでいます。

図8.2は、6本のユニットスラストの単体励磁試験の結果を表したものです。黒丸はクエンチ現象が起きたことを表し、白丸はホールド、すなわち目標の電磁力を得られる3.5テスラの磁場が達成できたことを表しています。

この図を見ていただくと分かるように、すべてのユニットスラストが1回か2回のクエンチ現象を起こし、その後に試験基準の電流値と磁場を達成しています。

クエンチを起こした場合は、電流を切って元の状態に戻し、もう一度最初からやり直すのですが、1回目はクエンチを起こしても、2回目か3回目には、ホールドしていることになります。このことから、試験によって、コイルが訓練されていくことが分かると思います。一度、電

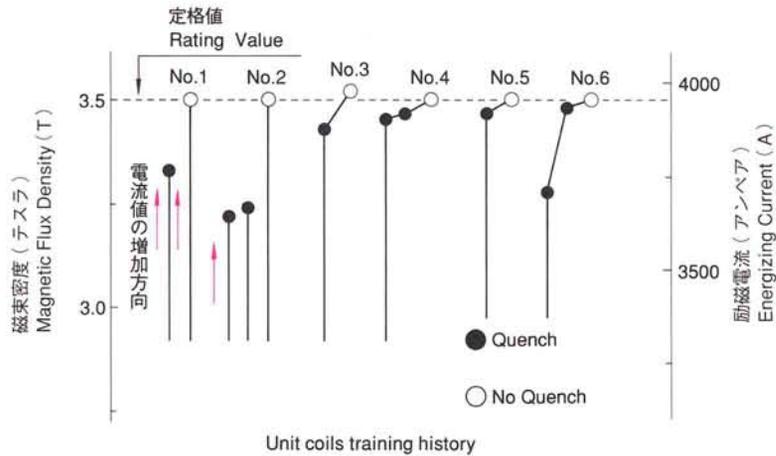


図8.2 単体コイルの励磁試験結果

この図は少し理解しにくいので説明します。

試験用クライオスタットの中で冷却されて超電導状態になったコイルに電気を通して電流値を大きくしていきます。例えばNo.1の場合、黒丸に向かう線の上でゆっくりと電流を増していきます。そして黒丸のところに達すると、コイルの一部の超電導状態が破れ、自動的に電源が遮断されます。ここでちょっと問題になるのは、電源を遮断した瞬間、コイルが磁場を形成する際に必要としたエネルギーが磁場の消滅とともに吐き出されます。すなわち、コイル両端内に高い電圧が発生することです。この電圧によってショートしてコイル自身焼損が起ころぬように、コイルと並列に適当な抵抗が入れてあり、この回路へ瞬間的に電流が流れ、磁場のエネルギーは消費されます。さて、このようにいったん電流が切られたコイル回路に再び電流を流し始めると、先ほどの試行でコイルの線の並び具合がなじみ、黒丸よりもさらに高い白丸まで何事もなく電流を流し込めます。そこで電流値を一定にして一定期間ホールドします。すなわちこのコイルは定格電流値でクエンチを起こさず使用できるということになります。No.2のコイルのように3回目の試行で定格に達するものもあります。中には途中で損傷した不良コイルもありました。

流がコイルを流れることによって、コイルの線材同士あるいはコイルとカラーがなじみ、理想に近い形になるので、2回目か3回目には無理なく電磁力を受けとめることができるようになり、その結果、基準値の電流まで上げられ、目標の磁場が得られるようになるわけです。

以上のような試験を経て初めて、そのユニットスラストは、実際の推進装置に使用することが可能になります。

「ヤマト-1」には推進装置が2基ありますから、全部で12本のユニットスラストが必要なわけですが、正直にいきますと、12本作って12本全部が試験をクリアしたわけではありません。製造工程上の原因と思われる理由で、どうしても試験をパスせず、使用できなくなったユニットスラストも、何本かありました。このように大型のコイルを巻くということは、初めてのことなので、生産上のプロセスのコントロールについては、まだ完全な解決にいたっていない点が多々あるように思われます。

さて、試験をクリアしたユニットスラストが6本ずつ2基分できたところで、今度はそれを6連環構造に組み上げていくわけですが、組み上がった段階でも、冷却試験や励磁試験が行われます。

諸装置について、こうしたさまざまな試験を行ったうえで、船内に搭載し、所定の位置に取り付ける艤装工事に入るわけです。

艤装の方法

艤装自体は、諸装置を船内の所定の位置に取り付けるだけですから、それほど難しいものではないのですが、いつ船内に搭載するかによって、大別して2つの方法があります。

ひとつは、船の中身をとったいちばん外側の船体、すなわち船殻ができあがったら、進水して水に浮かべる前に、船台の上またはドックの中でできるだけ多く艤装も済ませてしまうという方法です。進水前に艤装を行うので、これを先行艤装といっています。

もうひとつは、船殻ができあがったら、最低限の装置だけ積んで、いったん進水して水に浮かべてしまい、それを岸壁に横付けにして、水に浮かべた状態で艤装をする方法です。これが従来からの一般的な艤装です。

つまり、進水前に艤装を行うか、進水してから艤装を行うかで、分かれるわけです。

いつ艤装を行うかは、船の種類や大きさによって異なってくるので、一概にはいえませんが、一般的には、積み込む諸装置が軽い場合には、船台の上で艤装も済ませてから進水することが多く、諸装置が重い場合には、中身が空に近い状態で進水して、水に浮かべてから徐々に積み込んでいくという方法がとられています。

なぜこういう方法の違いが出てくるかというと、船は、ドックの中あるいは船台に置かれているときと、水に浮かんでいるときとでは、船体

に受ける力がまるで違うからです。

言うまでもなく、本来、船は水に浮かべるものですから、船体の構造もそれを前提にして設計されています。ですから、船の側からいえば、水に支えられて浮かんでいるときに、人間が布団の上に寝ているときと同じで、最も自然で無理がないわけです。

一方、船がドックあるいは船台の上に置かれている場合は、集中的に船を支えているために、どうしても船に無理な力がかかります。船の側からいえば、水に浮かべられるまで、やむを得ずそれに耐えているともいえます。

そういう状態で、重い装置を積み込みますと、船にさらに無理な力がかかることとなります。そのために、重いものを積み込むときは、船殻ができた段階で進水させ、水に浮かべてから艦装を行うわけです。

重いものを積み込むときに、あとで艦装が行われる理由が、もうひとつあります。

船台の上で船が完成しますと、テレビでよく知られているような進水式を行います。船の持ち主などの偉い人が、銀のおのなどで支綱を断ち、くす玉が割られて、船は船尾から静々と水に入っていきます。関係者はみな感激するシーンですが、実は、船は進水して水に浮かべられるこのときに、船の一生で最も大きな力とひずみを船体に受けるという経験をするのです。

そのときに、あまり重い装置を船に積み込んでいますと、水に浮かんだときのひずみで、装置を支える支え方の状態が変わってきて、装置が痛んだり、ゆがんだりしてしまう可能性があります。それを避けるために、装置が重い場合には、水に浮かべてから艦装を行うという方法がとられるわけです。

ただし、例外もあります。例えば、軍艦のように、船殻をがっしりとした装甲板で囲まなければならない船の場合は、装置がいくら重くても、あらかじめ積んでおかないと、あとからでは積み込めなくなってしまいます。そのため、軍艦などは、ドックの中で装置を積み込みながら船を組み立て、完成したら、ドックの中に水を入れて、船を動かさずにそのままの状態の水に浮かべるという方法をとることが多いのです。船が水に浮かぶときのショックをできるだけ防いでいるわけです。

以上、艦装の方法について述べてきましたが、最近では、船台の上で船を造り、船体が完成したのちに海上に進水させる方式よりも、ドックの中で船を造り、水をドックの中に入れて進水させる方式が多くなりまし



た。これに伴い、早い時期から艀装を行う先行艀装が多くなっています。

「ヤマト-1」の場合はどういう方法がとられたかといいますと、超電導電磁推進装置という、非常にデリケートな装置を積んでいるため、一般の船とは異なる艀装と進水の方法がとられました。

船体の建造と船殻については、次の項であらためて触れますが、「ヤマト-1」は、船殻がアルミ製で非常に軽く設計されています。率直に言えば、非常に傷つきやすいわけです。そのため、船の建造過程や進水の際に、船体がゆがんだり傷ついたりしないように架台の上で建造し、完成した船体は架台ごと海上クレーンでつり上げ、そのまま水に浮かべます。写真8.2はその様子を写したものです。

船体の建造と船殻^{せんこく}

ここで、船体の建造と船殻についても触れておくと、「ヤマト-1」の船体は、計画満載喫水線上1メートルのところにある上甲板を境にして、それよりも上の上部構造と、下の下部構造とで構成されています。

船としての強度は下部構造だけで受けもたれており、したがって、下部構造が主船体の役割を果たすわけです。



写真8.2 クレーン船を使って架台ごと「ヤマト-1」をつり上げ、海上に着水させるときの写真

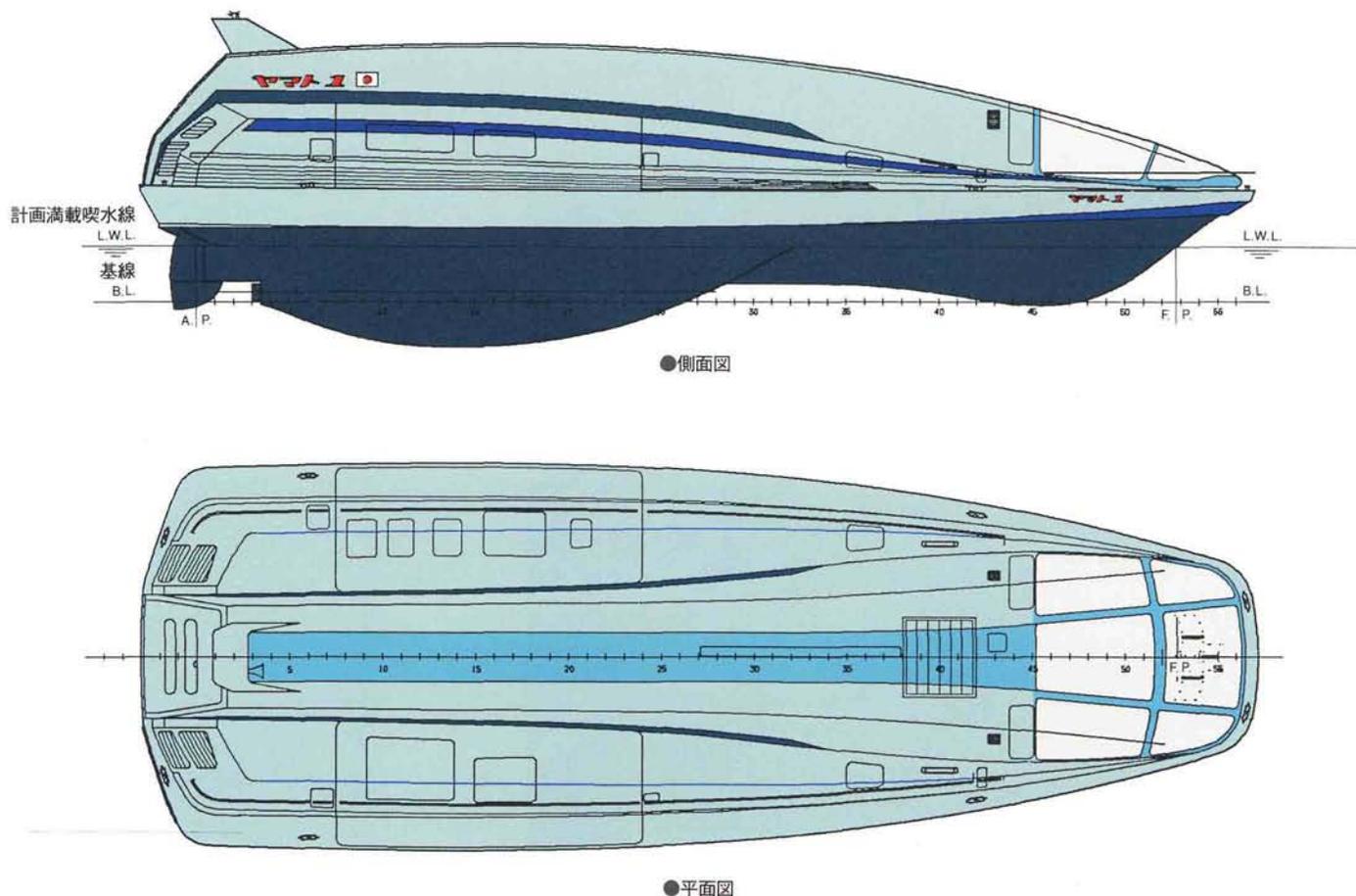


図8.3 「ヤマト-1」の船体外観図

図8.3は、「ヤマト-1」の船体外観図です。

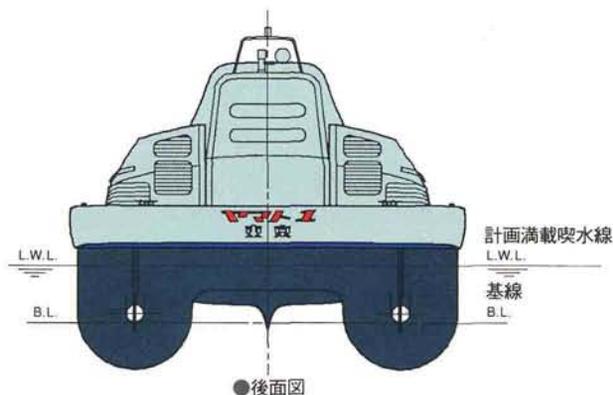
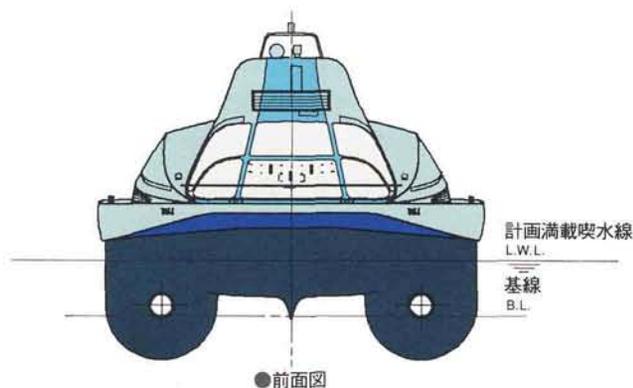
上部構造の外観は、未来の可能性を無限に秘めた超電導電磁推進船を象徴するために、「夢のある魅力的な形状」をテーマにデザインされ、曲線で構成された流線形をしています。

主船体部は、前半部は、保針性*7)や^{あやほ}凌波性*8)を考慮して、V型の単胴船型をしており、後半部は、超電導電磁推進装置を装備するための膨出部(バルジ)を両舷に設け、中央部で連結した双胴タイプの特殊な形をしています。

船体の建造は、三菱重工の下関造船所で行われたのですが、実際の

*7) 保針性 (Course Stability)

船が一定の針路を保って航走している場合でも、船体には波やうねりなどにより、その運動を妨げるような力が絶えず働きます。これを外乱といいます。この外乱があまり大きくない限り、特別の舵操作をしなくても、普通船は所定の針路を保つ性質をもっています。しかし、この性能は船型により著しく異なり、平水中



を航走中でもフラフラ走る場合があります。このようなものを保針性が悪いといいます。もちろんこのような性能の船は航走できませんので、船体形状を修正しなくてはなりません。この種の船の性能を明らかにするためには、普通の曳航水槽ではなく、122頁の注*10)で述べるような広い水面の水槽での模型による航走試験を行います。

*8) 凌波性 (Seaworthiness)

船は特殊なものを別にして船首は高くそして鋭くなっています。これは進行中に寄せてくる波を切り裂き、少しでも波の力による衝撃を少なくするためです。この性能をここでは凌波性という言葉で表現しています。当然のことながら船首部の形状がこの性能を決定する最も重要なファクターの1つです。

建造に入る前に、模型船を使って、さまざまなテストが行われました。

なぜ模型船によるテストが必要かといいますと、船は性能や安定性などを考慮して設計されるわけですが、設計された船が、果たして設計時の思惑通り動いてくれるかどうかという問題があるからです。

船というのは、真っすぐに走るということが、一般に考えられているよりずっと難しいのです。方向安定性が少しでも悪いと、航行時に船が自分で作り出す波の反作用を受けたり、自然の風や波の影響を受けてフラフラし、真っすぐに走ることができないのです。ですから、模型船を使って実験をしてみて、まず真っすぐに走るかどうかを確認する必要があります。

あるわけです。

また、運動性能についても、設計上の思惑通りに動くかどうかを調べなければなりません。例えば、舵を切った場合、思ったように曲がるかどうか、どれくらいで戻るのかといったことをテストするわけです。設計通りに船が動いてくれないと、事故につながりかねませんので、実験段階で厳しくチェックしておく必要があるのです。模型船による実験は、船の運動性能を専門に調べている三菱重工業の長崎研究所で行われました。

言うまでもなく、模型船は実際の船と同じ形をしていなければ意味がありません。これを幾何学的相似というのですが、実験では、実際の船の約8分の1の模型船が使われました。

実験に当たって、幾何学的相似のほかに、もうひとつ考慮しなければならないのが、模型のためのスピードをどうするかという力学的相似の問題です。

どういうことかといいますと、模型船を使って運動性能を調べるときに、模型船が8分の1なら、スピードも8分の1にして実験すればいいかということ、実はそう簡単ではないのです。船の大きさや速度が違えば、船に働く水の抵抗も違い、船が必要とする推進力も違ってくるからです。

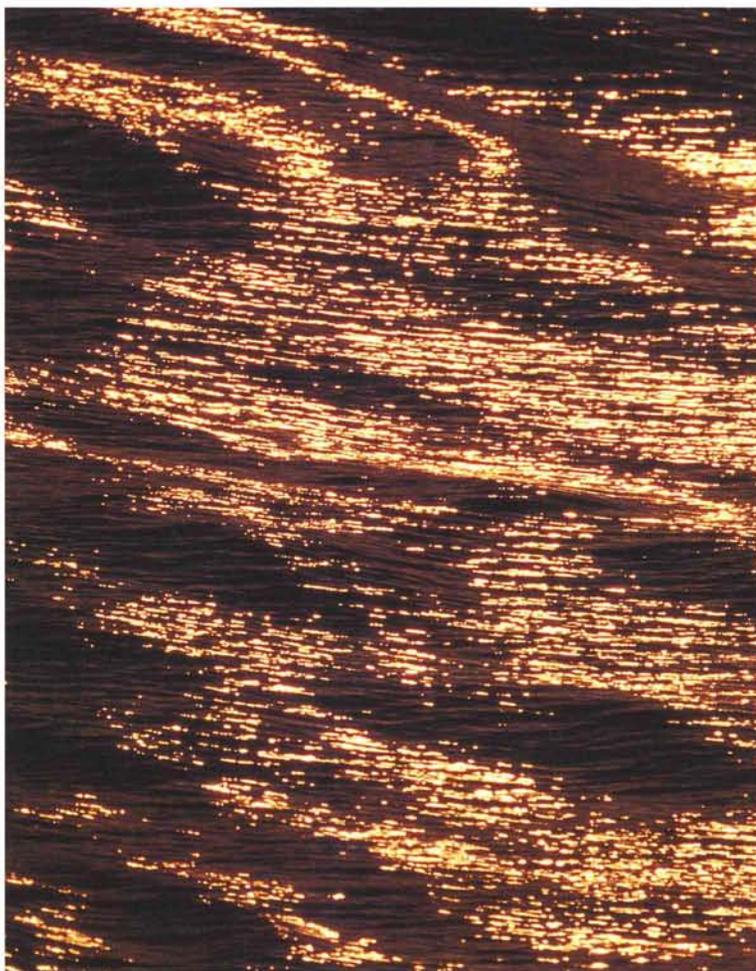
そういう点を考慮して、ある大きさの模型をどれくらいのスピードで走らせればいいのかを決めることを、力学的相似にするといいます。

船の場合は、次のような式で、模型のスピードを決めています。

$$\begin{aligned} & \frac{\text{実際の船のスピード}(U)}{\sqrt{\text{実際の船の長さ}(L) \times \text{重力の加速度}(g)}} \\ = & \frac{\text{模型船のスピード}(u)}{\sqrt{\text{模型船の長さ}(\ell) \times \text{重力の加速度}(g)}} \end{aligned}$$

実際の船の長さ、スピードは、設計時に分かっているわけですから、模型船の大きさが決まったら、その長さ ℓ をこの数式に当てはめれば、模型船のスピードが算出できることになります。

力学的相似を考え、そのスピードで模型船を走らせて、実験を行うわ



けです。この式で与えられた数値をフルード数（Froude Number）といいます。船の抵抗は主としてこのフルード数によって決定付けられるということです。なお重力の加速度 g はよく知られているように $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ です。

具体的に実験の内容を述べましょう。まず抵抗試験というものをを行います。曳航水槽*9)の細長い水路に船の模型を浮かべ、それを水路の外側にあるレール上を走る台車で引っ張って、そのときに台車にどれくらいの抵抗力がかかるかを、スピードを変えてテストするわけです。この抵抗試験は、普通波のない状態の水槽で行われます。

*9) 曳航水槽（Towing Tank）

「ヤマト-1」の抵抗試験を行った三菱重工業長崎研究所の曳航水槽は、長さ165m、幅12.5m、水深6.5mで、最大10m/s速度で曳航できます。また最大波高0.4mの造波装置が備えられています。写真8.3(b)を参照して下さい。

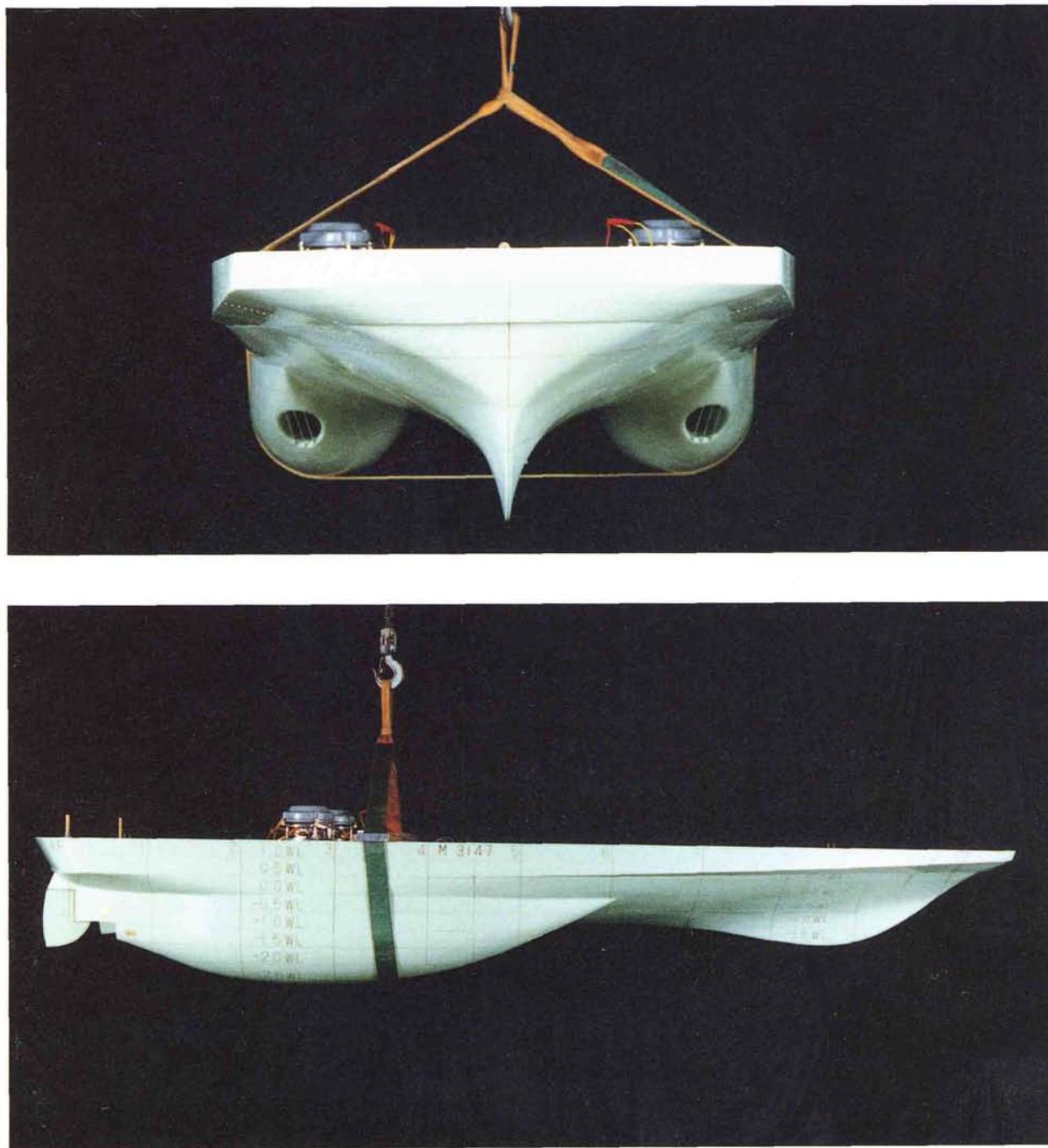


写真8.3 (a) 水槽試験に使用した「ヤマト-1」の $\frac{1}{8}$ スケールの模型船

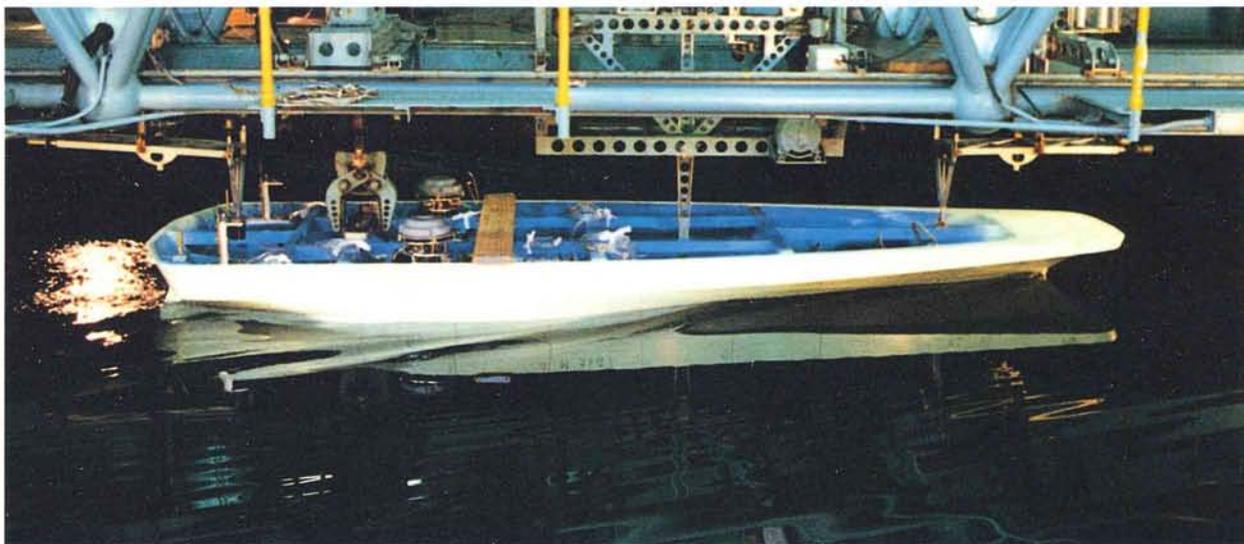


写真8.3 (b) 模型船を用いた抵抗試験の状況

模型船は上にある台車に取り付けられており、台車は水槽の長手方向に敷かれたレールの上を定められた速度で走ります。そのとき、模型船を台車に取り付けている部材に働く力を詳細に測定します。その測定結果から、流体力学的相似則に従って実物の船に働く抵抗を算出します。

写真8.3は水槽試験に使用した「ヤマト-1」の模型船とそれを用いた抵抗試験の様子を示したものです。

また、高速艇のように、時速40ノットとか50ノットで走る速度の速い船の場合には、風の抵抗も大きな問題になるので、風洞を使って、風の抵抗を調べる模型試験も行いますが、「ヤマト-1」の場合は、速度が8ノットと遅く、風の抵抗はそれほど問題にならないので、風洞を使った試験は行いませんでした。

ちなみに、風で走るヨットの場合、風は重要な要素になります。ですから、アメリカズ・カップに出るようなヨットを設計するときは、風が吹く特殊な水槽を使って、風の力と水の力との関係調べる模型試験が行われています。

抵抗試験と同様に重要なのが、船がどのように動くかを調べる運動性能試験です。設計上の思惑通りに動くかどうかを検証するために、広い



写真8.4 模型船を使った運動性能試験の状況

船体抵抗を測定した水槽とは異なるプールのような広がりをもつ水槽の中で、模型船に搭載されたモーターと電池でプロペラを回して航走し、そのときの船の運動状況をテレメータで計測します。その結果から力学的な関係に基づいて実船の性能が予測されます。

*10) 耐航性水槽

「ヤマト-1」の運動性能試験を行った三菱重工業長崎研究所の水槽は耐航性能水槽と呼ばれ、長さ190m、幅30m、水深3.5mで、最大波高0.4mの造波装置が備えられています。写真8.4を参照して下さい。

水槽*10)の中で模型船を走らせて、その位置を時々刻々測定し、舵を切るとどれくらい曲がるか、どれくらいで元に戻るかを見ます。この運動性能試験をやりますと、真っすぐ走らせるつもりが曲がったり、曲がらせるつもりが曲がらなかったりといったことが、しばしば起こります。

「ヤマト-1」の模型試験(写真8.4)でも、1回目のときには、船がフラフラして、針路が定まりませんでした。これは、「ヤマト-1」に限らず、タンカーなどの太った船ではよくあることです。特に、「ヤマト-1」の場合は、2基の超電導電磁推進装置を入れるためのバルジが左右両舷に張り出していて、特殊な形をしているので、その分、安定性を得るのが難しいという面もありました。

そこで、1回目の運動性能試験で分かった問題点を開発研究委員会の船体分科会で再検討し、設計上、改善すべきところを改善して、あらためて運動性能試験をし直しました。

2回目の試験で、今度は設計上の思惑通りに動いてくれることが確認されましたので、それを最終的な形に決定して、実際の船の建造に入っ

たわけです。

建造の手順としては、まず主船体を4つのブロックに分けて、船底を上にした形で造り、それらが完成したらひっくり返して架台に載せ、一体にしてその上に上部構造を載せるという方法がとられました。

下関造船所で完成した船体は、下関から海路神戸に運ばれ、いったん陸揚げしたうえで、最終工事と、推進装置などの艦装が施されました。

ちなみに、従来の日本の船は、主船体部分から上部の外観までを含めて、すべて造船技術者によって設計されることが多かったのですが、「ヤマト-1」の場合は、上部構造については、デザインを重視して、造船技術者ではなく、先に述べたように工業デザイナーに設計してもらいました。日本の造船技術者が設計すると、どうしても機能を第一に考えて、船の外観や色彩といった造形性や芸術性が、ほとんど考慮されないことが多いからです。

外国の造船技術者の場合は、必ずしもそうではなくて、昔から、機能とともに造形性や芸術性も重視して、設計しているようです。外国に美しい船が多いのはそのためでしょう。

ところが、今まで日本では、造形性や芸術性が考慮されるということは、船大工さんが造る和船を除いては、ほとんどありませんでした。多分、それは、日本の造船技術者が機能第一の軍艦を造ることが多かった影響だと考えられます。

大学の造船関係の学部、学科でも、最近でこそ、工業デザインについて教えるところも出てきましたが、それまでは技術や機能に関する授業ばかりで、船の意匠についての専門的な教科はなかったようです。

そのために、日本の造船技術者が設計した船は、外国の船に比べて、どこかもっさりしていて、あかぬけなかったわけです。

「ヤマト-1」は実験船ではありますが、未来の可能性を無限に秘めた船ですから、従来の日本の船のように、もっさりした印象では困ります。船体そのものも、モダンで芸術性があることが求められます。このデザイン重視ということに最も熱心だったのが、開発研究委員会の笹川陽平委員長だったこともあって、船体の上部構造の設計に、思い切って工業デザイナーを登用したわけです。

そのかいがあって、「ヤマト-1」は、従来の日本の船にはない、モダンな形と色彩をもった船になったと自負しています。事実、神戸で内外の造船関係者を呼んで、「ヤマト-1」の航行実験を行ったとき、この船の形と色彩は、大変評判になったものでした。

第 9 章

全推進系の構成

前章で述べましたように、陸上で艤装を完了した「ヤマト-1」は、海上クレーンで架台ごとつり上げられ、水に浮かべられます。

船体を初めて水に浮かべることを進水（Launching）といい、一般的にはこの進水のときに、船の門出を祝って進水式を行うのですが、「ヤマト-1」の場合は、進水そのものが変則的なものであったため、進水に先だって、命名式というものを行いました。

写真9.1は、その命名式のときのものです。

「ヤマト-1」の命名者である笹川陽平・開発研究委員会委員長（現日本財団理事長）が、「ヤマト-1」の海上航行実験の成功を祈ってテープカットを行い、これを進水式に代えたわけです。

したがって、実際の進水のときには、これといったセレモニーは行っていません。

さて、「ヤマト-1」を海上に浮かべたら、岸壁に横付けにして、この状態で、推進装置を除いた主発電装置や電極電源盤などの調整運転を実施し、異常がないことを確認したうえで、「ヤマト-1」を再び陸揚げしました。

本来なら、これら諸装置の調整運転が済んだら、そのまま海上で推進装置に液体ヘリウムを注入し、超電導コイルを冷やしていけばいいので



写真9.1 「ヤマト-1」の命名式

1990年7月11日、開発研究委員会の笹川陽平委員長が「ヤマト-1」と命名した瞬間です。

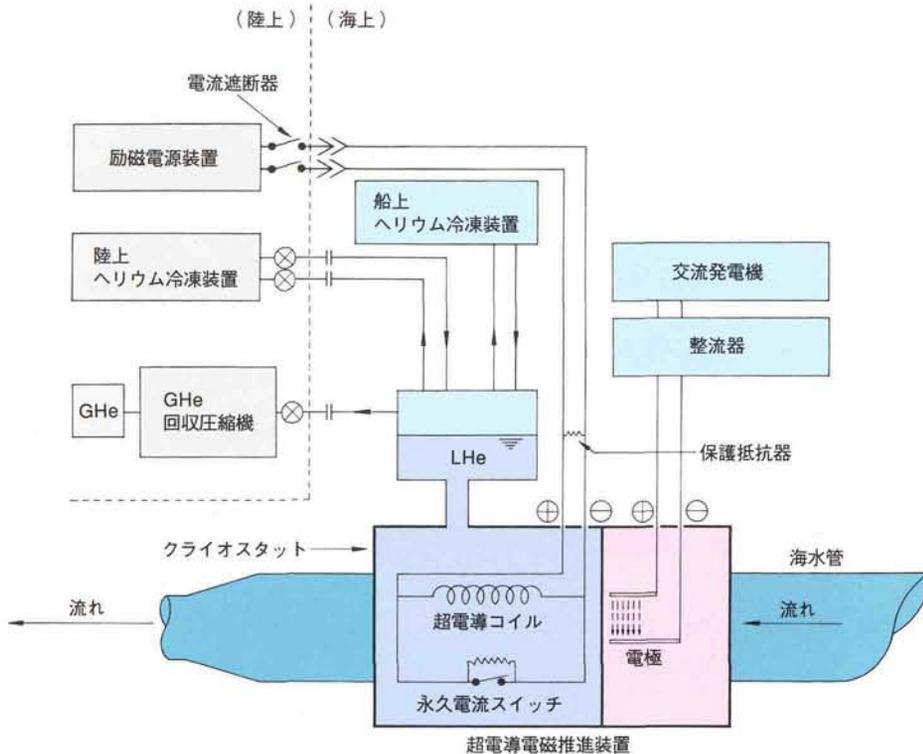


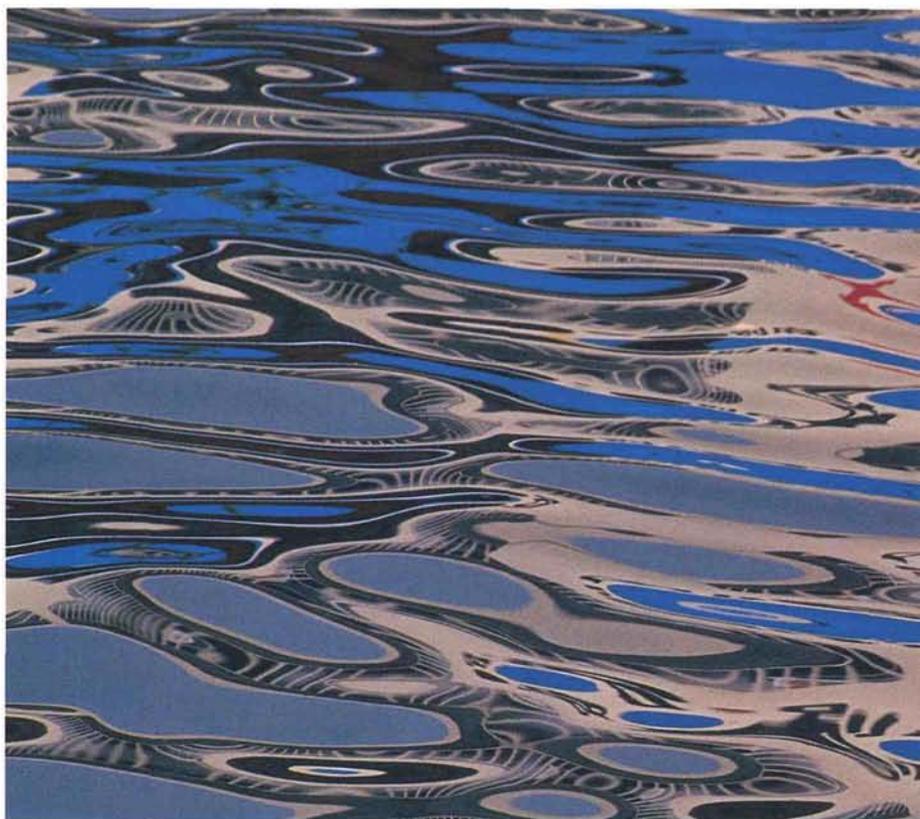
図9.1 超電導電磁推進装置および陸上支援設備の構成と接続
 陸上設備からの励磁電流は太いケーブルで船へ送られ、ヘリウムは気相時も液相時もトランスファーチューブと呼ばれる、極めて断熱能力の高い一種のホースで陸上から船へ送られます。

すが、後述するように、ヘリウムで超電導コイルを冷やすにはかなりの日数がかかります。その間に台風などがくると、船が逃げられなくなって困るので、調整運転を終えたあと、いったん陸揚げをしたわけです。

地上には、ヘリウムの液化冷凍装置や、超電導コイルを励磁し、コイルに永久電流を供給するための電源装置などの支援設備があります。その陸上のヘリウム液化冷凍装置から、陸揚げした「ヤマト-1」の推進装置にヘリウムを注入し、超電導コイルを十分に冷却、すなわちクールダウン（Cool Down）していくわけですが、この作業はかなり慎重を要し、時間もかかります。

その作業の手順を説明しましょう。

図9.1は、推進装置全体ならびに陸上支援設備の構成と、諸要素間の

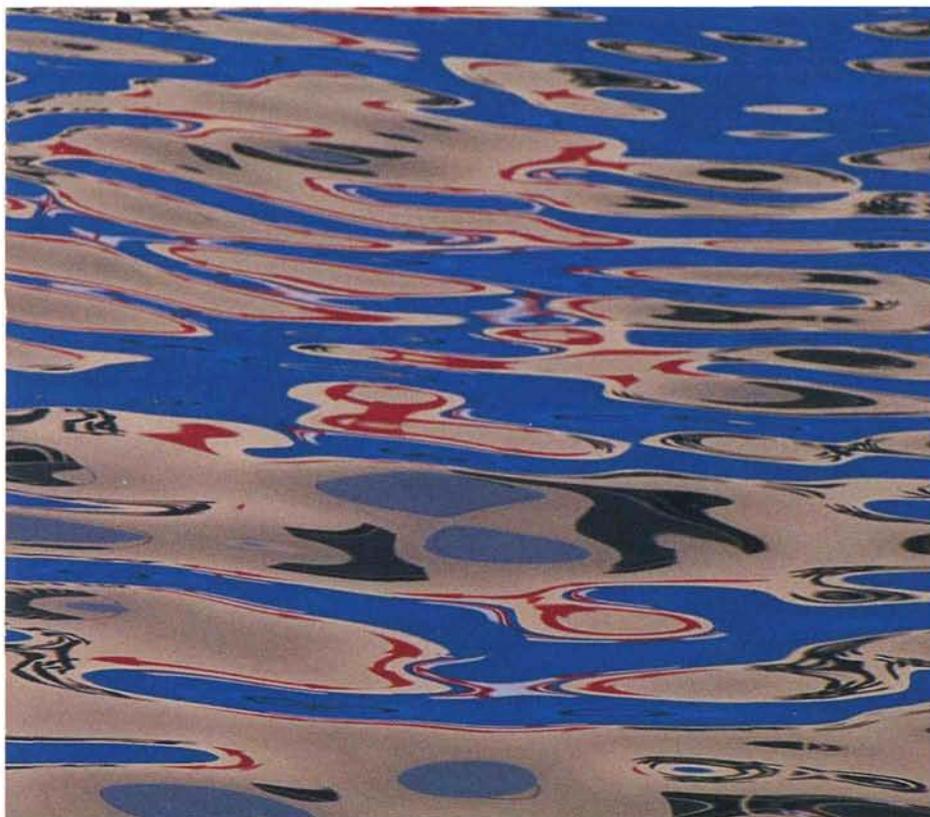


結合を模式的に示したものです。

この図の超電導コイルを4.2 K (−269℃)までクールダウンしていくわけです。ちなみに、図中の永久電流スイッチ (Persistent Current Switch : PCS) は、コイルを4.2 Kにまで冷却した状態において、通電状態から永久電流の閉回路状態すなわち永久電流モード (Persistent Current Mode) に完全に移行させるための装置です。PCSの仕組みについては、あとで詳しく述べますが、PCSの材質は、超電導コイルと同じように、超電導材料で作られています。

さて、超電導コイルを4.2 Kまで冷却するといっても、最初からいきなりヘリウム容器の中に4.2 Kの液体ヘリウムを注入するわけにはいきません。

ヘリウム容器の中には最初空気が入っています。空気中の酸素も窒素



も、 -196°C くらいまでには液化してしまい、さらに冷やせば固体になってしまいます。したがって、いきなり液体ヘリウムを入れると、固体となった空気が、本来、液体ヘリウムで充満していなければならないところをふさいでしまうからです。もちろん、空気に含まれる水分も大敵です*1)。

そこで、水分や空気が凝固してしまうことがないように、まず常温の純度の高いヘリウムガスを送り込み、水分や空気を含んで出てきたヘリウムガスを回収して、それらの不純物を取り除きます。このプロセスを連続的にを行い、水分や空気を完全に追い出すという作業をします。

次に、1時間に100リットルの液化能力と、1時間に300ワットの冷凍能力をもっている陸上支援設備のヘリウム液化冷凍装置を使ってヘリウムガスを冷やします。

*1) ヘリウムなどの沸点と融点

物質は一般に気体、液体、固体の3相をとることが分かっています。ある物質が1つの相から別の相へ移るときの状態、すなわち圧力と温度との関係は定まっています。その関係の中で圧力が1気圧のもとで固体から液体へ変わる温度を融点 (Melting Point)、液体が気体へ変わる温度を沸点 (Boiling Point) と呼んでいます。もちろんこれらの過程はそれぞれ同一の温度で逆方向、すなわち気体から液体へ、液体から固体へと状態変化が進行することができます。次の表は融点および沸点の例です。

物質名	融点(°C)	沸点(°C)
水	0	100
水銀	-38.86	356.72
鉄	1535	2754
酸素	-218.4	-182.97
窒素	-209.86	-195.8
水素	-259.14	-252.8
ヘリウム	-272.2	-268.9

理科年表(1996)

この表で分かる通り、1気圧のもとでヘリウムが液体となる温度 -268.9°C にまで温度を下げれば、水はもちろん固体すなわち氷に、酸素も窒素も固体になります。したがって、クライオスタットの中にこれが残されていれば石のように固まり、液体ヘリウムの流れを妨げてしまいます。

*2) トランスファーチューブ (Transfer Tube)

ひとつの水槽の水をほかの水槽へ移す場合にはホースを使うことが多いものです。液体ヘリウムなどの極低温の液体も同じようにホースを使って移動させます。しかしその作業を大気中で行うとすれば、ホースの管壁が熱の侵入を許さない構造になっていなければなりません。このような目的に使うホースはトランスファーチューブと呼ばれ、普通のホースとは比べものにならない複雑な構造をもっています。「ヤマト-1」のクライオスタットへ液体ヘリウムを流し込むために使用したものは、液体ヘリウムの流れるいちばん内側の管の内径が32mm、1本の全長が30mのステンレス製のもので、この内径32mmの管はさらにステンレス製の三重構造の管の中に収められています。内側の管と三重管との間の空間は、真空に保たれています。さらに三重管の中央を液体窒素が流れ、その外側は真空に保たれ、外部からの熱の侵入を極力防ぐようになっています。要するにクライオスタットと同じような構造です。それと大きく違うところは、このトランスファーチューブもまた普通のホースと同じように曲げることができなければなりません。したがって上に述べたトランスファーチューブを構成している管の類はすべてフレキシブルな管壁をもっており、全体として相当自由に曲げることができるようになっています。われわれが使用したのはドイツ製で、構造から分かる通りかなり高価なもので、これを計2本使用しました。

*3) 熱応力 (Thermal Stress)

金属類は温度によりかなり膨張、収縮します。そのために環境の温度変化に伴い、金属構造物内部に内在的に力のかかる部分を生じることがあります。そのとき、この内在的な力を熱応力といいます。例えば常温で1本の金属の丸棒に異なる金属のリングを軽くはめ合わせたとします。この物を常温よりはるかに温度の低い環境へ持ち込んだとします。そのとき丸棒の金属の収縮に比べリングの金属の収縮ははるかに大きいとすると、両者のはめ合いは非常にきつくなります。このときリング自身の内部、リングのはまっている部分の丸棒には相当な力が働き、丸棒は絞め込まれ、リングは広げられる形で当然内部的な力が働きます。これを熱応力と呼んでいます。当然のことながら温度環境が元に戻ればこの力は消滅します。逆に温度がさらに下がると、応力が増大し、場合によってははめ合いの部分が破損します。このような熱応力現象は、温度変化の激しい環境で使用する構造を設計製作する場合には、最も注意を要する問題の1つです。

冷やしたヘリウムガスをトランスファーチューブ*2)を使って推進装置のヘリウム容器の中に送り込み、それを循環させて内部の温度が一律に20K(約-253℃)になるまで、ヘリウム液化冷凍装置を使って徐々に冷やしていきます。

ここまでのプロセスを予冷といいます。この予冷は、ゆっくり時間をかけて、慎重に行う必要があります。急いでやって、ヘリウム容器内に温度分布のムラが生じると、局所的に熱応力*3)が生じて、ヘリウム容器やコイルが破損してしまう恐れがあります。そういう失敗を避けて、20Kまでゆっくりクールダウンしていくためには、約10日間を要します。

予冷が済んだところで、次に液体ヘリウムを送り込み、ヘリウム容器と、推進装置の上部に載っている予備タンクを、4.2Kの液体ヘリウムで満たしていきます。この作業にも約2日間を要します。

ここまでの作業が済んだら、船からトランスファーチューブを外し、「ヤマト-1」を再び海上に降ろして、栈橋に係留します。係留後、今度は船上のヘリウム液化冷凍装置の運転を開始します。液体ヘリウムは外部からの熱侵入によって蒸発しやすいので、船内の液化冷凍装置で蒸発したヘリウムガスを再液化しながら冷却を続け、クライオスタット内が4.2Kの状態を保つようにするのです。



以上のような作業を経て、初めてコイルに電流を流せる状態になるわけです。

次に、コイルに電流を流して永久電流モード、すなわち永久電流が流れる状態が生じるまでを説明しましょう。

図9.1に示す励磁電源装置によって、超電導コイルに直流電流を流し、少しずつ電流値を上げていきます。コイルはすでに、単体の段階でも、6連環構造に組み上がった段階でも、励磁試験で電流を経験していますが、急に大電流を流すと、コイル線材がずれたりして、クエンチ現象を起こす可能性があるため、数十分くらいかけて電流値を上げていきます。

この状態では、超電導コイルは超電導状態ですが、回路的には電源とつながった状態、すなわち永久電流スイッチ（PCS）が開いてOFFになっています。

この電源とつながった状態での電流の流れをいいますと、外部電源からきた電流は、クライオスタットの中の6本のコイルを、シリーズ（Series）に流れて、再び電源装置へ返ります。

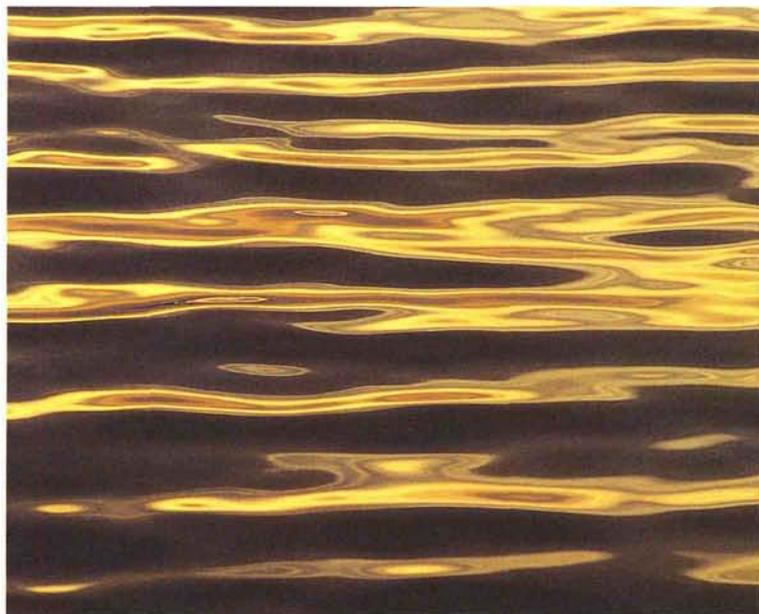
つまり、豆電球を使って電池の実験をするときに、電池のプラスとマイナスを豆電球の線でつなぐと、電池を含めた閉じた回路ができて、その中を電流が流れるように、外部電源と6本のコイルの間に閉じた回路ができて、その中を電流がグルグル流れるわけです。

この段階では、PCSはOFFになっていますから、当然のことながら、PCSの回路の方には電流は全く流れていません。

そのままの状態ですらに電流を流し、最終的に目標の電流値まで電流を上げたところで、PCSのスイッチを閉じ、ONの状態にします。前述したように、PCSの回路は超電導コイルと同じ材料で作られているので、この時点では、PCSの回路自身の抵抗もゼロになっています。そうすると、今まで超電導コイルの中だけを流れていた電流は、PCSの回路の方にも流れることができるようになります。そこで、外部電源の電流の値を下げていきますと、電源電流とコイル電流の間に差が生じ、その差の分の電流が自動的にPCS回路の方を流れるようになります。

電源電流がゼロになると、コイルとPCSから構成される閉回路の中を、設定値の電流すべてが流れるようになって、永久電流モードの状態が出現するわけです。

推進装置のコイルシステムが永久電流モードになってしまえば、このコイル系の回路には外部電源の必要はなくなります。したがって、船は陸上支援設備との連絡を断っても、独自で出航、航行可能な状態になる



わけです。

航行が終わり永久電流モードを解消するためには、今述べた作業を逆に行えばいいわけです。すなわち、陸上の電源装置をコイルに接続して、電源電流を上げていきます。そうするとコイルに流れる電流は所定の電流が依然流れていますが、PCSに流れる電流は、電源電流が増えた分だけ減少していきます。電源電流の値が設定電流値に達すると、PCSを流れる電流はゼロになります。

ここでPCSのスイッチを開いてOFFにし、抵抗のある状態にすると、PCSの閉回路はなくなってしまいますから、電流はコイルと電源回路の中だけを流れるようになるわけです。この状態で電源電流を下げるとコイル電流も下がり、電源電流を切るとコイル電流もゼロになって磁場は消滅し、推進装置の機能は停止します。

航行試験を終えて、船を岸壁に係留した状態になれば、このような手順をとるわけです。

以上が推進装置を動かすための原理的なプロセスです。これで「ヤマト-1」が航行に入るためには、かなり時間をかけた準備が必要であることが分かるかと思います。

第10章

「ヤマト-1」の海上試験

いよいよ海上試験に入るわけですが、試験当日の作業の進め方を示したものが、表10.1です。

この表にもあるように、まず栈橋に係留した船の発電装置に燃料、オイルなどを供給します。

次に、推進装置のリザーバー（予備タンク）に液体ヘリウムを補充するためのトランスファーチューブや、コイルに電流を供給するためのケーブルを接続し、トランスファーチューブを使って、液体ヘリウムと液体窒素を船内に供給します。液体窒素は、外部からの熱侵入に対処して、クライオスタットの熱シールド板を冷却するためのものです。

次に、超電導コイルに電流を流して、永久電流の状態にまでもっていき、その後、トランスファーチューブなどの陸上支援設備との接続を断ちます。

表10.1 「ヤマト-1」の海上試験のための作業手順

YAMATO-1

● 準備作業

- (1) 長尺トランスファーチューブの取り付け（実験船陸上設置状態）
- (2) ヘリウム液化冷凍装置による超電導磁石の予冷（20K）
- (3) 超電導磁石への液体ヘリウムの注液
- (4) 長尺トランスファーチューブの取り外し
- (5) 実験船の着水・係留

● 海上試験当日の作業

- (1) 燃料・潤滑油・清水等の補給
- (2) 励磁ケーブル・トランスファーチューブの接続
- (3) 液体ヘリウム・液体窒素の補充
- (4) 超電導磁石の励磁
- (5) 励磁ケーブル・トランスファーチューブの切り離し
- (6) 出港
- (7) 海上試験
- (8) 帰港
- (9) 励磁ケーブル・トランスファーチューブの接続
- (10) 超電導磁石の消磁

以上のような作業を経て出航可能になり、海上でのさまざまな試験が行える状態になったわけです。

ここまでの作業を行うための所要時間は、5、6時間です。したがって、出航当日、作業員や研究担当者は朝9時の出航に備えて午前3時には岸壁や船に集合しておりました。

さて、「ヤマト-1」の海上試験としては、係留運転（Mooring Trial）、ボラード試験（Bollard Test）、海上試運転（Sea Trial）、および海上評価試験などが行われました。

それぞれの試験の内容について、簡単に説明します。係留運転というのは、できあがった船を岸壁、ポンツーン（Pontoon、浮棧橋のようなものと考えて下さい）などにつなぎ、推進装置を働かせます。もちろん、係留されている船体は動きませんが、推進装置を通る水だけが後ろへ強く押し出されます。普通の新造船の場合では、主機（航走用の原動機）の艤装後初めての公式運転ということになります。私どもの場合には、「ヤマト-1」を棧橋に係留した状態で、超電導コイルを励磁し、電極に最大2000アンペアまで通電して、超電導コイルや電極電源装置などが正常に作動するかどうかを確認するために行われました。

係留運転によって、装置、機器類が正常に機能することを確認したのち、ボラード試験を実施します。

ボラード試験というのは、岸壁上のボラード（Bollard、船をつなぐ柱の意味）と「ヤマト-1」の間をテトロン製の曳引索で結び、「ヤマト-1」の超電導電磁推進装置を1テスラ、2テスラで動かして、船が静止している状態での曳引力を測定する試験です。当然、船が航行しているときの推進力とは異なります。しかし、船が航行しているときの推進力の値は、測定することがかなり難しいので、この曳引試験によって得られたデータを基に、航走時の推進性能を解析する資料にするわけです。曳引力の測定は、曳引索を結び付けるボラードと索の間に、ロードセル（Load Cell）と呼ばれる測定装置、一種のばねばかりのようなものを挿入して行われます。

次の海上試運転は、実際に海上で船を走らせて行われます。船舶の基本性能を把握するとともに、海上を航行する場合に必要な船舶検査証書の交付を受けるためのもので、運輸省の検査官の立合いの下に速力、操舵、旋回、後進などについて、試験を行います。

最後の評価試験も、同じく海上で実際に船を走らせて行われるもので

*1) 随伴船

「ヤマト-1」は実験船であり、種々の計測器や計測員を文字通り満載していますが、それら以外にも、その航走時には船外からも種々の観測をしなければなりません。また、設計や製作に携わった多くの人々もそれぞれの目的や意図をもって、その航走を見る必要があります。したがってその試験航走に際して、この大切な船の航路を安全に確保するなどの航走上の直接的必要もあり、「ヤマト-1」とともに走る船が、2、3隻用意されました。これらの船を随伴船と呼んでいます。もちろんこちらには多くの報道関係者も乗り込んでいました。

す。試験条件を変えた場合の速力試験、船体抵抗試験など、電磁推進船としての評価をするために行われます。

以上のような諸試験は、図10.1に示される試験海域で行われました。この図に示されるように、試験海域は、神戸港内の海面です。港外へ出ることも考えられましたが、「ヤマト-1」の場合、各種の計測が「ヤマト-1」の船内だけでなく、随伴船*1)や陸上からも行われたこと、また

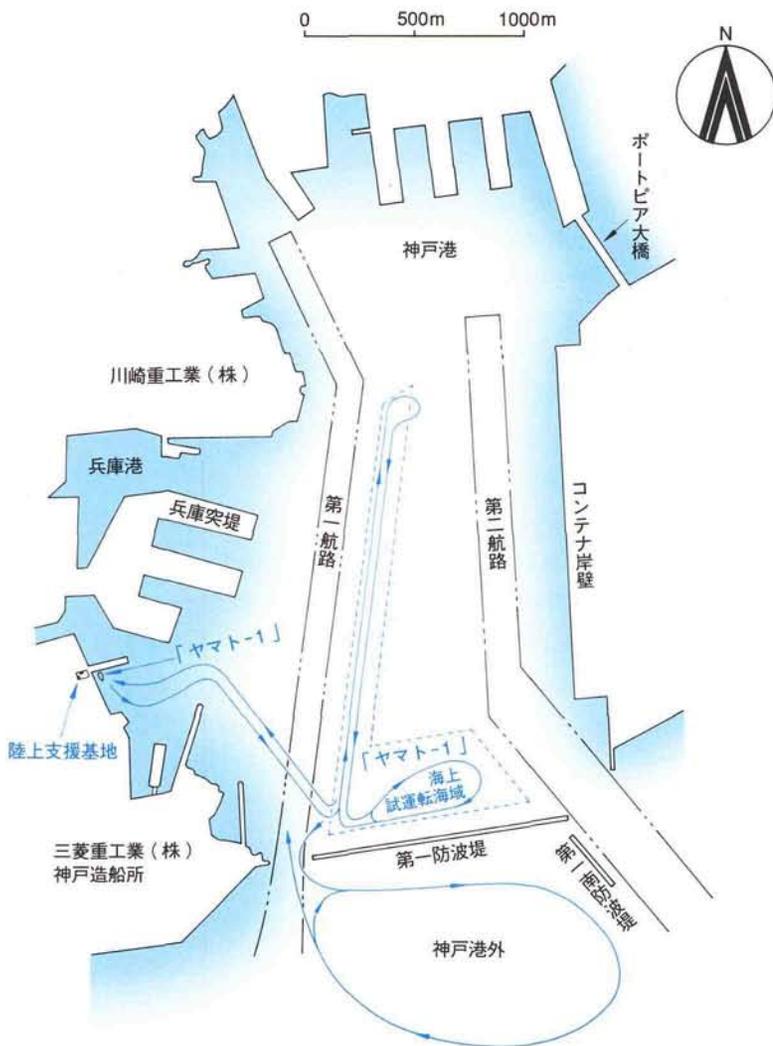


図10.1 「ヤマト-1」の試験海域図



航行時に不具合が生じた場合に、直ちに対応がとれるようにとの配慮に基づいて、試験海域を港内にすることに決めたわけです。

ここで、速力試験の結果について述べますと、開発研究委員会では、当初、超電導コイルの磁場の強さを、それぞれ1テスラ、1.5テスラ……と、0.5テスラ刻みで一定に保って、最終目標値の4テスラまでの速力試験を行う予定でした。しかし、残念ながら実際には、最後の4テスラでの速力試験は、PCSの故障で全く実施できませんでした。PCSの故障の原因については、後述します。

磁束密度 Magnetic Flux Density (T)	海水密度 Density of Seawater (kgf/m ³)	海水導電率 Conductivity of Seawater (S/m)	記号 Marks	試験日 Date
1.0	—	—	○ ———	'92.6.9
1.5	1019	4.59	△ - - -	'92.7.7
2.0	1019	4.49	□ ·····	'92.7.16
2.0	1022	4.69	■ ·····	'92.6.24

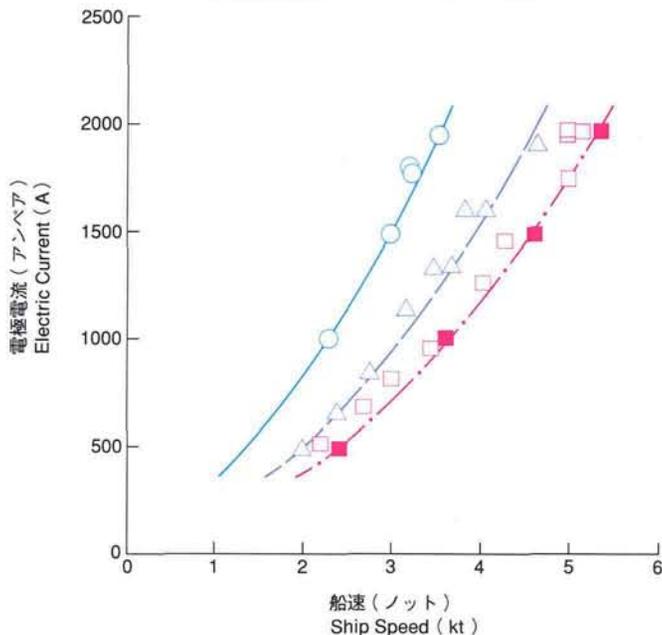


図 10.2 磁場の強さが一定の場合の電極電流と船速の関係

図 10.2 は、磁場の強さを一定に保ったままで、電極電流を変えていった場合の、電流と船のスピードの関係を示したものです。横軸は船のスピードを、縦軸は電極電流を表します。

最初に磁場の強さを 1 テスラとして、電流と船のスピードの関係を調べ、次に 1.5 テスラの場合、2 テスラの場合という具合に調べたわけです。

船のスピードは、電極電流と磁場の強さの両方に関係するのですが、磁場の強さを一定にして、電流と船の関係を見ると、図からも明らかのように、電流とスピードの関係が非常に滑らかだということがわかります。このことは、電流を制御することによって、極めてスムーズな航行ができることを意味しています。

ちなみに、現在のところは、出航するときにつくった磁場の強さを航行

中に変えることはできません。出航時に1テスラの強さの磁場を作ったら、航行中にその磁場の強さを上げ下げすることはできないわけです。

しかし、将来的には、航行中に磁場の強さを自由に調整できるようになるかもしれません。原理的には、例えばコイルの回路と電極電流回路を直列に接続し、磁場を作る電流がそのまま電極へ流れる方式も考えられます。仮にその方法が可能になれば、電流と磁場と船のスピードの関係にも、また違った特性が出てくるものと思われれます。

さらに言うと、もし今述べたような方法が可能であれば、PCSは不要となり、今回の実験におけるようなPCSの不具合も生じなかったことでしょう。そういう意味では、これは非常に合理的な方法なのですが、しかし、このような方式をとるとすれば、それはそれで、解決しなければならない問題がたくさん出てきます。単純に考えても、導線を伝わってクライオスタット内に侵入してくる熱をいかにして取り除くかが、大きな問題となります。したがって、目下のところは、出航時に作った強さの磁場で航行するしかないわけです。

次の図10.3は、電極間電流を最大許容値の2000アンペアにした場合の、それぞれの磁場の強さと最大船速の関係を表したものです。すなわち、磁場の強さが1テスラするとき、電極間電流を最大許容量の2000アンペア流すと、船のスピードは3.6ノット、同じく1.5テスラときは4.6ノットになるという意味です。

この図において、3テスラの磁場の強さのところまでは、実線で表されていますが、3テスラと4テスラの間は点線になっています。これは、PCSの故障で4テスラでの実験ができなかったため、3テスラまでの幾つかの測定値から外挿して描いたもので、実際に4テスラでの実験が行われた場合、種々の条件から判断して、7.5ノットのスピードが出たであろうということです。

われわれは、「ヤマト-1」のスピードを、4テスラの磁場において8ノットにすることを目標にしていたわけですが、この外挿値はそれを0.5ノット下回っていることとなります。その理由は、われわれが模型試験などで予想した船の抵抗値よりも、実際の船の抵抗値の方が大きかったためと考えられます。

これはある程度やむを得ないことで、模型試験は実物と模型の間に幾何学的相似と力学的相似を成り立たせて行われますが、一般的には完全に相似を成立させるということは、かなり難しいことだからです。

分かりやすい例を挙げれば、人間の5分の1の大きさの人形に洋服を

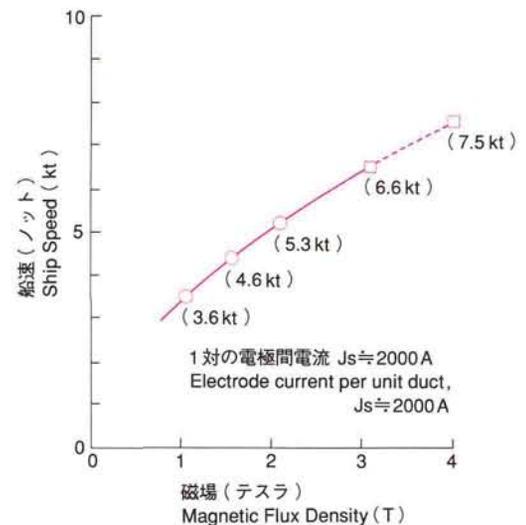


図10.3 電極電流2000アンペアの場合の磁場の強さと船速の関係

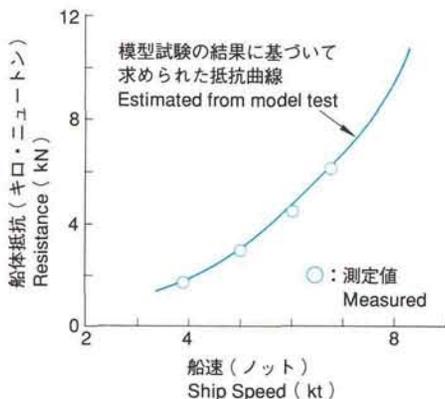


図 10.4 船体抵抗の計測結果
「ヤマト-1」をタグボートで引っ張り、ロードセルで計測した船体の抵抗の値と模型試験で計測した船体抵抗の値を比較したもので、両者はよく一致しています。

*2) レイノルズ数 (Reynolds Number)

ポンプのように流体を流す機器、あるいは飛行機、船のように流体中を進む物体では、機器の流路面あるいは物体表面と流体との間に生じる摩擦 (Friction)、すなわち流体摩擦が原因となる抵抗力が発生します。この流体摩擦は流体の粘性 (Viscosity) によって生じます。

流体摩擦の関係する現象の相似則を支配するファクターは、発見者である英国の O. Reynolds (1723~1792) の名をとってレイノルズ数と呼ばれます。流体の関係する現象ではフルード数、マッハ数 (Mach Number) とともに非常に重要なファクターの一つです。

着せるとします。その場合、幾何学的相似を考えて、人形の洋服の大きさを人間の洋服の5分の1に作ることはできても、その縫い目まで5分の1にすることはできないわけです。したがって、それは、厳しくいえば、完全な幾何学的相似ではないわけです。

力学的相似についても、同じようなことがいえます。

つまり、あらかじめ模型試験をしたからといって、実際に船を動かした場合の抵抗や船の速度について、すべて完全に解明できるわけではないということです。

詳しく説明しましょう。図 10.4 は、「ヤマト-1」そのものをタグボート (曳き船) で引っ張って実測した船体抵抗試験の値を、モデルを使った水槽試験の結果と比較したものです。極めてよく合致していることが分かると思います。これは、波を作ることによって生じる抵抗、すなわち造波抵抗を決定するファクターであるフルード数を、実際と同じにして模型試験をしたからです。したがって、船体自身の抵抗に関しては、非常に良い見積もりが水槽試験の結果として得られたわけです。

しかし、「ヤマト-1」は、多量の水を推進装置に吸い込み、その水をダクトの中で電磁氣的に加速して、ノズルから吐き出しています。このプロセスにおける流体抵抗も、推進装置の負荷となります。この抵抗発生 の流体力学的メカニズムは、船体の抵抗とは異なるもので、主としてレイノルズ数*2) といわれるファクターによって支配されています。この種の抵抗の評価のためのダクトのモデルと実際の船のダクトのレイノルズ数を合致させることは、実際上不可能でした。また幾何学的相似を完全に実現させることも不可能でした。このために、この流体抵抗の見積もりが小さ過ぎたものと考えられます。その結果、設計時の目標速度と実際の船の速度とに、若干の差が生じたわけです。

いずれにしても、電極間電流を最大に保った場合の磁場の強さと船のスピードとの関係も、極めて滑らかで、磁場の強さにほぼ比例して船速がスムーズに上がっていくことが分かりました。このことから、超電導電磁推進船が非常に制御しやすい性能をもっていることが証明されたわけです。

さて、われわれにとって非常に残念だったことは、4 テスラの実験を完遂できない原因となった PCS の故障です。

PCS の機能については先にも述べましたが、構造を少し詳しく説明しますと、われわれが用いた PCS は、永久電流回路を ON — OFF にす

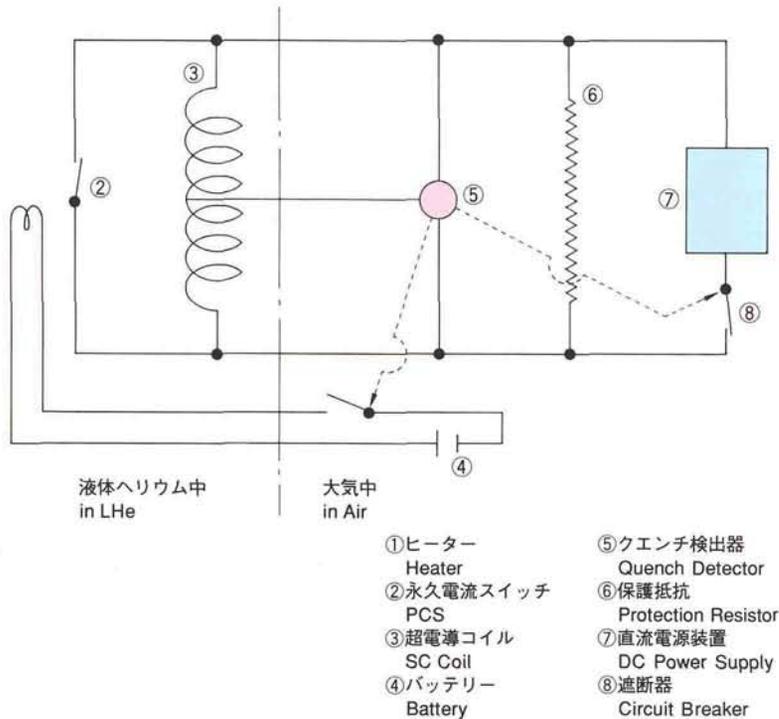


図 10.5 超電導コイルの電気回路

超電導線で作られた永久電流スイッチ（PCS）は、ヒーターを入れることによって抵抗のある常電導状態になり、スイッチが開いた状態になります。一方、ヒーターを消すとPCSは超電導状態になって、スイッチが閉じた状態になります。すなわち、PCSのON-OFF状態は、ヒーターのOFF-ONによって出現します。

る際、一般的なスイッチのように、手で入れたり切ったりする仕組みにはなっていません。どういう仕組みになっているかといいますと、超電導コイルと同じ超電導材料で作ったスイッチの横に、ヒーターを設置しておいて、そのヒーターの加熱によって、PCSのスイッチがONになったりOFFになったりするようにできています。

図10.5は、PCSとヒーターの関係を示したのですが、このヒーターに電流を流すと、PCSが温められます。PCSはコイルと同じ材料で作られているので、温められているとPCSの超電導状態は常に破られることになり、PCSは開いた状態、すなわちOFFになるわけです。この状態では、超電導回路が遮断されています。

次にPCSをONにするときには、ヒーターを切ります。そうすると、

PCSの温度が液体ヘリウムの温度である4.2 K、すなわち-269℃まで下がり、PCSが超電導状態になってスイッチがつながり、PCSとコイルから構成される部分が超電導回路になるわけです。

要するに、常電導状態から超電導状態への移行をするPCSのON—OFFの切り替えを、ヒーターの熱で温めたり冷やしたりすることで行っているわけですから、考えてみれば、これは非常に頼りない方法と言わざるを得ません。

しかし、ほかにいい方法があるかという、何千アンペアもの大電流を流して、それに耐え得るスイッチというのは、常電導でもなかなか開発が難しく、まして超電導回路での大容量のスイッチの開発は、今回、われわれがやったものがおそらく初めての試みなのです。

少なくとも3テスラの磁場の強さまでは、この方法でうまく機能した事実があるわけですから、われわれとしては、原理的にはこの方法が確立したものと考えています。

このPCSは、3テスラの永久電流モード中、超電導磁石のコイルがクエンチした際にトラブルを起こしました。なぜトラブルを起こしたのでしょうか。考えられるのは、原理的には正しいけれども、なにしろ初めての試みであるために、構造その他でどこかに不十分な点があったのではないかということです。そのために、クエンチ現象が起きたときにPCSが焼損したのではないかと考えられます。

開発研究委員会では、3テスラにおけるPCSの故障以来、その原因解明についての研究を続けてきていますが、現在のところ、まだはっきりとした原因は分かっていません。

PCSは超電導なので、機能的に非常に優れています。数千アンペアもの大電流のスイッチであるにもかかわらず、直径わずか300ミリメートル、高さ365ミリメートルの円筒に収まってしまいます。これが常電導で数千アンペアの電流に耐え得るスイッチとなると、その大きさは1メートル単位のものになってしまいます。いかにこのPCSが機能的に優れているかが分かるかと思えます。

実用に十分耐え得るだけのPCSが開発されないと、超電導電磁推進船の本格的な開発も遅れてしまうので、PCSの研究開発は非常に重要なファクターといえます。

開発研究委員会では、1995年度以来、引き続きPCSの研究を行っています*3)。

*3)

シップ・アンド・オーシャン財団では「ヤマト-1」以後も超電導電磁推進装置関係の研究と開発が継続されており、その研究グループは1996年にいたり、Nb、Snを用いた定格1000アンペアのPCSの開発、製造に成功しました。この結果は近く適当な国際会議で発表の予定となっています。そしてこのグループは現在、10テスラ以上の磁場を発生する超電導磁石のコイルに流れる1万アンペア程度の電流をON—OFFできるPCSの開発を進めています。

第 11 章

終わりに

成果と問題点

開発研究委員会では、1985年から超電導電磁推進船の開発を進めてきました。

実験船「ヤマト-1」の使命は、必要な装置・機器類を搭載して、電磁力によって実際に海の上を航行できることを証明することにあつたわけですが、1992年6月に、世界で初めての海上航行実験に成功し、所期の目的を達成することができました。その意味で、このプロジェクトは成功したといえます。

そして、その開発の過程において、超電導電磁推進装置を構成する超



電導コイルやヘリウム液化冷凍装置などが、具備すべき要件や問題点が明らかになるとともに、関連する理論的研究の幾つかについても、さまざまな成果を得ることができました。

「ヤマト-1」の開発研究過程で得られた成果をまとめてみると、次のようになります。

1. 「ヤマト-1」は、搭載機器類の諸試験や海上航行実験などによって、所定の性能を具備していることが確認されたのち、船舶国籍証書および船舶検査証書が運輸省から交付され、世界で初めて海上航行できる超電導電磁推進船として、正式に認められました。また、このことによって、超電導電磁推進装置が船舶の推進装置として使用可能であることが、実証されたわけです。

第2章の写真2.4にあるのが、前述の船舶国籍証書および船舶検査証





書です。一般の船もこれと同様のものをもらって初めて、日本の船であることが認められるわけです。自動車でいえば、車検証のようなものです。

2. 超電導コイルの冷却や励消磁、ヘリウム冷凍装置の運転など、従来のスクリュープロペラ船とは異なる超電導電磁推進船に特有の操作要領を確立することができました。

また、実際に超電導電磁推進船を運用することによって、航行準備作業や操船要領、試験後の保冷作業などについての実態を把握できるとともに、今後改良すべき問題点も、明らかになりました。

3. なんとといっても大きな成果は、軽量でありながら、4テスラ、23メガジュール(MJ)*1)という大型で安定した強磁場の超電導磁石の製作技術が得られたことです。

われわれは、「ヤマト-1」の磁場の強さの目標設定値を4テスラとしたわけですが、開発研究当時、4テスラの磁場の強さを、船を推進するに足る十分な空間的広がり、時間的継続性をもって得ることは、容易なことではありませんでした。これは、現在でも同様だと思います。その困難な課題を達成するために採用されたのが、鞍型コイルを六角形のカラーで押さえ、6本のコイルを6連環構造にするという方法です。この方法によって、推進装置の磁場を強めるとともに、外部への磁場の漏

*1) メガジュール(MJ)

ジュールは仕事、すなわちエネルギーの単位です。物体が1ニュートン(N)の力を受けて、その力の方向に1m動いたときにもらう仕事が1ジュールです。

1ジュール(J)=1ニュートンメートル(Nm)ということです。そしてメガジュール(MJ)というのは1000キロジュール(KJ)すなわち100万ジュールです。磁石の大きさ、すなわちどれだけ大きな磁場をもっているかを表すにはこの磁場を作り出すのに費やされたエネルギーの量で表現します。したがってMJというエネルギーの単位を用います。もちろん磁石が小さければkJあるいはJを用いれば十分です。

えいを極めて少なくすることにも成功したわけです。

4. 「ヤマト-1」で採用した内部磁場型超電導電磁推進装置の特性が明らかになり、磁場および電流が一様に作用し、互いに直角に交わる場合は、ほぼ理論通りのローレンツ力が得られることが分かりました。

5. 超電導状態で、電極電流の大きさや方向を変えることによって、推進力の大きさや方向を容易に制御できることも、確認されました。

6. 永久電流状態に移行させるためのPCSについては、故障の原因解明、さらにはより優れた性能のPCSの研究を、今後も続けていく予定になっています。これは、将来にわたる重要な課題といえます。

以上に述べた「ヤマト-1」の開発研究の成果は、今後の超電導電磁推進装置の研究分野における工学的発展にとどまらず、リニアモーターカーなどの超電導コイルの応用分野にも、極めて資するところが大きいと考えられます。

今後の課題

将来的には、このような方法で、商業的な価値をもった船を走らせられるかどうか、最も重要なポイントになるかと思います。

われわれのグループが理論的に解明した結果では、電磁推進装置の磁場の強さを20～30テスラのところまでもっていければ、商業的にも十分使用できるようになると思われ*2)。

現状では、実験物理学の世界で瞬間的に達成されている磁場は別として、船の推進装置としての空間的広がりや時間的持続力をもった磁場としては、われわれの達成した4テスラがおそらく最高値だと思われます。強い磁場に耐え得る超電導コイル線材などの開発によって、大型で強い超電導コイルが1日も早く開発されることが望まれるわけです。技術は日進月歩です。おそらく遠からずこの願いは達成されるでしょう。

なお、われわれはこの磁場を作り出すのに超電導コイルを用いたのですが、科学技術が進歩し、最終的な使用状態としては永久磁石のような形で磁場を利用することになるかもしれません。そうすれば「ヤマト-1」の場合にわれわれが苦労したフープストレスの問題がもう少し楽に解決できることでしょう。

超電導電磁推進船は、スクリュープロペラや軸系がないため、それら

*2) このことは、43頁で触れた文献の中で論じられています。

に起因する振動や騒音がなく、電極電流の大きさや方向を変えることによって、前後進を含めた速度制御をスムーズに行うことができます。さらには、スクリュープロペラの場合、高速回転させるとキャビテーションが発生し、推力や効率が著しく低下しますが、電磁推進装置の場合は、キャビテーションの問題が少ないため、高速船に適しているという特性をもっています。「ヤマト-1」の海上航行実験でも、これらの特性は証明されました。

したがって、超電導電磁推進船に対する需要は、将来、必ずや高まると思われれます。

開発研究委員会としては、「ヤマト-1」の開発研究の成果が、超電導電磁推進船の1日も早い実用化に向けて、大いに役立ってくれることを願う次第です。

それとともに、「ヤマト-1」の開発の途上で明らかにされた超電導機器の製造上や性能・機能上での幾つかの問題は、超電導を利用する上では非常に重要なものです。したがって、これらの問題について、われわれが開発した対策や明らかにしたデータ類は超電導工学にとり極めて有用なものです。これらが大いに利用されて、素晴らしい超電導工学の成果につながっていくことを期待しています。また開発中に浮かび上がった幾つかの研究テーマは、将来の超電導電磁推進船の開発におけるキーポイントになるものです。それらの一部については、現在もシップ・アンド・オーシャン財団の中の研究委員会で継続して行われており、その成果の一部は144頁で述べた通りです。

付

「超電導電磁推進船開発研究委員会」委員名簿（敬称略）



超電導電磁推進船開発研究委員会

委員長 笹川 陽平（日本財団 理事長）

開発委員会 船体分科会

分科会長 元良 誠三（東京大学 名誉教授）

開発委員会 装置分科会

分科会長 今市 憲作（大阪大学 名誉教授）

●開発研究委員会委員

池田 吉堯（横浜国立大学）

今市 憲作（大阪大学）

大西 重雄（運輸省）

岡田 光豊（運輸省）

片岡 榮夫（運輸省）

京谷 好泰（日本国有鉄道）

佐々木 博通（運輸省）

佐治 吉郎（神戸商船大学）

田古里 哲夫（東京大学）

太刀川 恭治（金属材料技術研究所）

土井 平孝（運輸省）

田中 拓（船舶技術研究所）

仲渡 道夫（広島大学）

濱田 昇（（財）日本船用機器開発協会）

星野 次郎（（財）日本海事協会）

元良 誠三（東京大学）

矢崎 敦生（（財）シップ・アンド・オーシャン財団）

●船体分科会委員

池田吉堯 (横浜国立大学)	田中拓 (船舶技術研究所)
一色浩 (日立造船(株))	谷田宏次 (石川島播磨重工業(株))
今市憲作 (大阪大学)	津嘉山朝邦 ((財)日本海事協会)
大内一之 (大阪商船三井(株))	仲渡道夫 (広島大学)
岡正志 (川崎重工業(株))	南波壮八 (三菱重工業(株))
貝川義昌 (日本鋼管(株))	馬場栄一 (三菱重工業(株))
日下祐三 ((株)三井造船昭島研究所)	平山俊次 (三菱重工業(株))
国武吉邦 (三井造船(株))	福田和広 ((株)三井造船昭島研究所)
倉数輝夫 (日本郵船(株))	保坂治幸 (日本郵船(株))
黒田隆 ((財)日本海事協会)	満喜良男 (日本鋼管(株))
小林幹弘 (三菱重工業(株))	松尾稔 (大阪商船三井(株))
佐治吉郎 (神戸商船大学)	松尾元敬 (日本鋼管(株))
佐藤和範 ((財)日本造船技術センター)	宮島進 (船舶技術研究所)
佐藤隆一 (石川島播磨重工業(株))	矢木常之 (川崎重工業(株))
渋谷唯司 (石川島播磨重工業(株))	矢崎敦生 ((財)シップ・アンド・オーシャン財団)
白勢康 (石川島播磨重工業(株))	吉川孝雄 (大阪大学)
田古里哲夫 (東京大学)	吉田昌平 (川崎重工業(株))

●装置分科会委員

秋元弘而 ((株)日立製作所)	多田栄一 (大阪大学)
石村眞文 ((株)東芝)	立花康夫 (富士電気(株))
伊藤進 ((株)東芝)	田中拓 (船舶技術研究所)
植村知正 (大阪大学)	富田信義 (三菱重工業(株))
大石紀夫 (三菱電機(株))	中島洋 (日本国有鉄道)
大熊啓嗣 ((株)東芝)	東嘉三 ((株)神戸製鋼所)
岡田勇 (富士電機(株))	藤野治之 (富士電機(株))
勝亦二郎 ((財)日本海事協会)	堀謙二郎 (三菱電機(株))
兎玉隆夫 (大阪市立大学)	松本清 ((株)神戸製鋼所)
小松博康 ((株)神戸製鋼所)	三根進 ((株)東芝)
斎藤龍生 ((株)日立製作所)	室谷正彰 (大阪電気通信大学)
坂井廣 (三菱重工業(株))	矢崎敦生 ((財)シップ・アンド・オーシャン財団)
佐治吉郎 (神戸商船大学)	山下紀久夫 ((株)神戸製鋼所)
佐藤隆 (三菱電機(株))	横田公男 (三菱重工業(株))
志岐紀明 ((株)神戸製鋼所)	吉川孝雄 (大阪大学)
島本幸次郎 (三菱重工業(株))	和気正芳 (高エネルギー物理学研究所)
宝田直之助 (住友重機械工業(株))	

*所属は委員就任初年度の所属を示す。

超電導電磁推進船「ヤマト-1」の開発経過

昭和60年度 (1985)	昭和61年度 (1986)	昭和62年度 (1987)	昭和63年度 (1988)
<ul style="list-style-type: none"> ● EMT船の構成およびシステム調査 ● 船型設計・モデルテスト (単胴1軸) (W=95t) 	<ul style="list-style-type: none"> ● EMT船の推進効率の研究 ● 船型設計・モデルテスト (単胴1軸) (単胴2軸) (W=150t) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験船の概念設計 ● 船型設計・モデルテスト (双胴型) ● ダクト(6分岐・合流部)の設計・モデルテスト 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験船の基本設計・詳細設計 ● 船型設計・モデルテスト (変形単胴型) ● ダクト(インレット・アウトレット部)の設計・モデルテスト
<ul style="list-style-type: none"> ● 超電導磁石および低温技術の調査 	<ul style="list-style-type: none"> ● 超電導磁石の基本設計 ● 船上用・地上用ヘリウム冷凍装置の基本設計 ● 動力電源装置の設計 	<ul style="list-style-type: none"> ● 超電導磁石の詳細設計 単体コイルの試作 ● 冷凍装置の詳細設計 膨張タービンの試作 ● 動力電源装置の全体設計 	<ul style="list-style-type: none"> ● コイル・クライオスタットの製作 ● 冷凍装置の製作 ● 動力電源装置の製作 ● 電極の設計・製作
			<ul style="list-style-type: none"> ● 試験海域の調査
			<ul style="list-style-type: none"> ● 陸上支援設備の設計
<ul style="list-style-type: none"> ● 回流水槽の製作 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験棟の建設 ● 回流水槽の設置 	<ul style="list-style-type: none"> ● 長水槽の建設 	
	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験用超電導電磁推進装置(EMT)の製作 ● EMT性能試験 	<ul style="list-style-type: none"> ● EMT動特性試験 (回流水槽) ● EMT性能試験(長水槽) 	<ul style="list-style-type: none"> ● EMT模型船自航試験 (長水槽)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 電極材実験 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電極材実験 ● 磁気シールド 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電極材耐久実験 ● 磁気シールド

* EMT : Electromagnetic Thruster の略 * W : 船の排水量

平成元年度 (1989)	平成2年度 (1990)	平成3年度 (1991)	平成4年度 (1992)
●実験船の詳細設計・建造・ 艤装	●実験船の船体の完成 ●命名式	●超電導磁石の搭載・艤装 ●実験船の調整運転	●実験船の海上試運転 ●実験船の評価試験
●コイル・クライオスタットの 製作 超電導磁石の組立調整 ●冷凍装置の組立調整 ●動力電源装置の組立調整 ●電極の製作	●超電導磁石の組立調整 ●電極の超電導磁石への組 込み		
●評価試験方法の調査 ●計測機器類の整備			
●陸上支援基地の建設 (三菱神戸造船所内)	●陸上支援設備の調整		
●EMT性能試験(長水槽)			
		●国際シンポジウム (MHDS91)の開催	

索引

ア行

アルキメデスの原理 (Archimedean Principle)	20, 102
アルミニウム合金 (Aluminum Alloy)	21
インナーチューブ (Inner Tube)	62, 66
インペラ (Impeller)	10
ウォータージェット (Water Jet)	10
右舷 (Starboard Side)	21
運動性能試験	121
永久電流 (Persistent Current)	49, 131
永久電流スイッチ (Persistent Current Switch : PCS)	128, 131, 142
永久電流モード (Persistent Current Mode)	128, 131
曳航水槽 (Towing Tank)	119
液体窒素 (Liquid Nitrogen : LN ₂)	53
液体ヘリウム (Liquid Helium : LHe)	48, 79, 82, 128
延性 (Ductility)	51
横隔壁 (Bulkhead)	22
応力 (Stress)	66

カ行

外車船 (Paddle Wheel Ship)	10
海上試運転 (Sea Trial)	137
海水管 (Seawater Duct)	28, 88
外部磁場方式 (External Magnetic Field Type)	34, 42
ガウス (Gauss)	44
加工性 (Workability)	103
カプトン (Kapton)	74
カメリン・オンネス (Kamerlingh Onnes)	48
カラー (Collar)	66, 68
キー (Key)	70
幾何学的相似 (Geometric Similarity)	118
艀装 (Fitting)	112
キャビテーション (Cavitation)	38
強度 (Strength)	26
極性 (Polarity)	37
金属間化合物 (Intermetallic Compound)	50
クールダウン (Cool Down)	127
クエンチ (Quench)	70, 110
クライオスタット (Cryostat)	25, 59
鞍型コイル (Saddle-shaped Coil)	37, 67
係留運転 (Mooring Trial)	137
ケルビン (Kelvin)	48
顕熱 (Sensible Heat)	83
効率 (Efficiency)	43

コイル押さえ (Collar)	47, 68
高温超電導材料 (High Temperature Superconductor)	53
合金 (Alloy)	50
交流磁場方式 (AC Magnetic Field Type)	33
交流電流 (Alternating Current)	92
コンタライン (Contour Line)	58

サ行

載貨重量 (Dead Weight)	102
左舷 (Port Side)	21
ジェットフォイル (Jetfoil)	24
支援設備 (Support Facilities)	127
自己完結型	14
磁場 (Magnetic Field)	10, 32
ジュール熱 (Joule Heat)	47, 70
主機 (Main Engine)	18, 137
主発電機関 (Main Dynamo Engine)	92
仕様 (Specifications)	20
磁力線 (Lines of Magnetic Force)	32
進水 (Launching)	126
韌性 (Toughness)	60
推進動力 (Propulsive Power)	22
垂線間長 (Length between Perpendiculars)	100
スクリュプロペラ (Screw Propeller)	10, 38
ストランド (Strand)	72
スペーサー (Spacer)	75
整流器 (Rectifier)	92
絶対温度 (Absolute Temperature)	48
船殻 (Hull)	20, 102
線材 (Cable)	72
潜熱 (Latent Heat)	83
船舶検査証書 (Ship Inspection Certificate)	29
船舶国籍証書 (Certificate of Ship's Nationality)	29
船尾管 (Stern Tube)	38
総トン数 (Gross Tonnage)	102
速力試験 (Speed Trial)	139

タ行

第一種超電導体 (Type 1 Superconductor)	49
耐食性 (Corrosion Resistance)	20
第二種超電導体 (Type 2 Superconductor)	51
対流 (Convection)	60
たが応力 (Hoop Stress)	46
縮む性質 (圧縮性、Compressibility)	103

超断熱材 (Superinsulation)	60
超電導 (Superconductivity)	10, 47
超電導コイル (Superconducting Coil)	11, 66
超電導状態 (Superconductive State)	48
超電導電磁推進船 (Superconducting Magnetohydrodynamic (MHD) Propulsion Ship)	13, 18
超電導電磁推進装置 (Superconducting MHD Thruster)	10, 14, 22, 24, 56
直流磁場方式 (DC Magnetic Field Type)	33
直流電流 (Direct Current)	92
抵抗試験 (Resistance Test)	119, 142
抵抗率 (Resistivity)	48
ディーゼルエンジン (Diesel Engine)	92
ディーゼル発電装置 (Diesel Generator)	22
テスラ (Tesla)	44
デュワー容器 (Dewar Vessel)	79
電圧調整器 (Voltage Regulator)	96
電気抵抗 (Electric Resistance)	47
電気分解 (Electrolysis)	91
電極 (Electrode)	28, 32, 37, 88, 90
接続方法	94
電流供給	92
電磁推進の特徴	38
電磁推進装置 (Electromagnetic Thruster, MHD Thruster)	10
伝導 (Conduction)	60
電場 (Electric Field)	38
銅酸化物超電導体 (Copper Oxide Superconductor)	53
トランスファーチューブ (Transfer Tube)	130
トレーニング (Training)	110
ナ行	
内部磁場方式 (Internal Magnetic Field Type)	34, 42
ニオブ3スズ (Nb ₃ Sn)	49, 50
ニオブチタン (NbTi)	47, 50, 72
熱応力 (Thermal Stress)	130
熱シールド板 (Thermal Shield Plate)	60
ノウハウ (Know-how)	25
ノット (Knot)	107
ハ行	
排水量 (Displacement)	20, 102
発電機 (Generator)	92
バルジ (Bulge)	22, 26
フィラメント (Filament)	72
フープストレス (Hoop Stress)	46, 66

復原性 (Stability)	106
輻射 (Radiation)	60
ブスバー (Bus Bar)	90
フランジ (Flange)	88
フルード数 (Froude Number)	119
フレミングの左手の法則 (Fleming's Left-hand Rule)	32
並列 (パラレル、Parallel)	22
ヘリウム容器 (Helium Vessel)	60
ボア (Bore)	25, 62
補機 (Auxiliary Machinery)	18
保針性 (Course Stability)	116
ボラード試験 (Bollard Test)	137
マ・ヤ・ラ行	
漏れ磁場 (Leakage Magnetic Field)	42, 57
ユニットスラスタ (Unit Thruster)	26, 28, 75, 88
予冷 (Pre-cooling)	130
力学的相似 (Dynamic Similarity)	118
陸上支援設備 (Land-based Support Facilities)	127
凌波性 (Seaworthiness)	116
臨界温度 (Critical Temperature)	49
臨界磁場 (Critical Magnetic Field)	49
臨界電流 (Critical Current)	49
励磁試験 (Exciting Test)	108
レイノルズ数 (Reynolds Number)	142
レーストラック型 (Racetrack Type)	37
ロードセル (Load Cell)	137
ローレンツ力 (Lorentz Force)	32
6 連環構造	26, 42, 56, 71
英字	
AVR (Automatic Voltage Regulator)	96
EMS-1	11
GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic)	88
PCS	128, 131, 142
SEMD-1	12, 34
ST-500	13

「ヤマト-1」
— 世界初の超電導電磁推進船 —

1996年11月18日 発行

監 修 笹川陽平
発 行 所 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団
〒105 東京都港区虎ノ門1丁目15番16号
電話(03)3502-1828 FAX(03)3502-2033
装 丁 菅沼 完
編集協力 株式会社共同通信社
株式会社オズクリエティブ
印刷製本 凸版印刷株式会社

本書の無断複写は著作権上の例外を除き禁じられています。

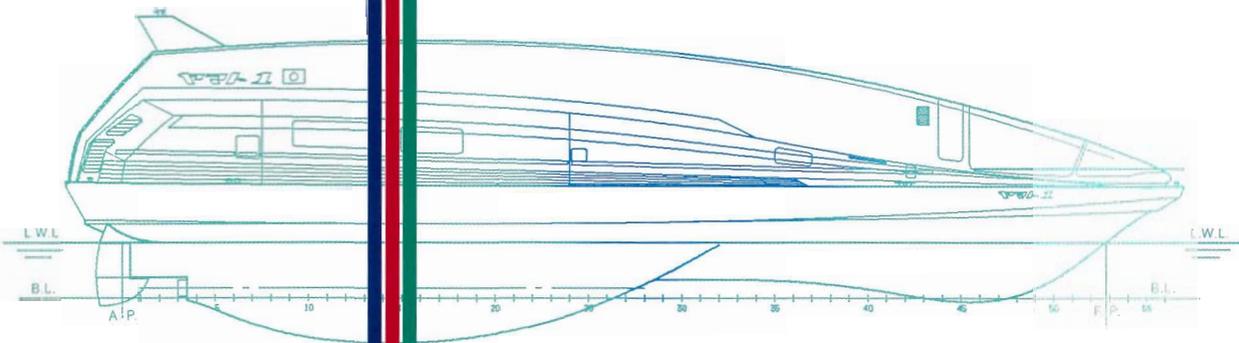
©SHIP & OCEAN FOUNDATION 1996

ISBN4-916148-01-0

Printed in Japan

YAMATO-1

World's First Superconducting Magnetohydrodynamic Propulsion Ship



"YAMATO-1" SIDE VIEW