特 集

高 速 船

超電導電磁推進船ヤマト 1*

坂井 廣**, 松山 千秋**, 南 正晴**, 竹澤 節雄***

Superconducting MHD Ship YAMATO 1*

by Hiroshi Sakai**, Chiaki Matsuyama**, Masaharu Minami** and Setsuo Takezawa***

キーワード: 超電導電磁推進船, 超電導コイル, ヤマト1, 電磁推進, アルミ合金, フレミングの左手の法則

1. はじめに

超電導電磁推進船ヤマト1は1985年(財)シップ・アンド・オーシャン財団(SOF)が超電導電磁推進船開発研究委員会(笹川陽平委員長)を組織し, 船分科会(分科会長元良東大名誉教授), 装置分科会(分科会長今市阪大名誉教授)の2つの分科会によって開発研究が進められた。1985年から87年にかけて, 基本計画, 模型船による自力航行実験, 実験用電磁推進装置の製作と特性試験が行われ, 1988年から実験船の船体および電磁推進装置の設計・製作が行われた。1992年に実験船内装置の総合調整を行い, 6月から航走実験に入っている¹⁻⁵⁾。

2. 超電導電磁推進の推進原理

船舶用超電導電磁推進はフレミングの左手の法則に基づいており, 図1に示す, 人差指方向に磁場を加え, 中指方向に電流を流すと, 親指方向に電磁力(□-レンツ力)が発生する。

電磁推進装置においては固定した超電導コイルによって海水中に磁場を作り, この磁場に直角に交わるように海水中に電流を流すと, 海水に電磁力が発生し, その反力によって船は進む。

このため, プロペラによって生ずるキャビテー

図1 推進原理

ションが発生しない, 回転機構を持たないため振動, 騒音が発生しにくい, 保守が容易である等の特長を持っている^{3,6,7)}。

3. 電磁推進船

3.1 全体配置

ヤマト1の主要機器の配置を図2に, 主要要目を表1に示す。外観形状は, 未来への可能性を無限に秘めた本船を象徴するために, 無限大記号 ∞ をイメージしてデザインされ, 3次曲面で構成された流線形状が採用されている。ヤマト1の神戸港内の航走状況を図3に示す。

船内の区画は, 前方より操縦室, 電極電源盤室, 機関室の三つに仕切られている。

操縦室には, 前部中央に, 操縦ハンドル・推進機出力制御レバー・磁気コンパス・後方安全確認用のITVモニターを組み込んだコンソール, 右舷側に主発

*原稿受付 平成4年8月7日

** 三菱重工業(株) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

*** シップ・アンド・オーシャン財団 Ship & Ocean Foundation

図 2 主要機器配置図

表 1 主要要目

長さ	(全長)	約 30 m
幅	(型)	10.39 m
深さ	(型)	2.50 m
計画満載喫水	(型)	1.50 m
総トン数		約 280 T
排水量		約 185 t
主発電装置		
	原動機	ディーゼル機関 2 基
	最大出力	約 2,000 kW×2 基
速力		約 8 ノット
適用法規		JG
定員		10 名

電機・補助発電機・補機等の制御・監視機器を組込んだコンソールがそれぞれ配置されている。天井から側壁にかけて、アクリル板と強化ガラスで覆われ、操縦室は明かるく解放的かつ機能的で、夢のあるコックピット感覚にまとめられている。

電極電源盤室には、主発電機により発電された交流電流を直流電流に変換し、推進装置の電極へ給電

するための電極電源盤 2 基と、その左舷側前部には、超電導磁石関係の計測機器類および海水ダクト関係の計測機器類を収めた計測ラック、右舷側前部には、専用空調機、電極電源盤の両舷側部には、超電導磁石の制御盤各一基が配置されている。

機関室には、船体中央部に主発電機 2 基、両舷水線下の膨出部に超電導磁推進装置各一基計 2 基、右舷前部にヘリウム冷凍システムの圧縮機一基、右舷後部に補助発電機一基、左舷後部に主発電機用主要補機類がそれぞれ配置されている。さらに、機械的な後進もできるように、海水噴射ノズル後方にバケット昇降式の後進装置を装備している。

3.2 船体構造

船体材料の選定に当たって、軽量化、耐磁場性、耐食性を考慮し耐食アルミ合金を採用している。主構造には、強度、耐食性、溶接性が優れており、船舶用構造材料として広く使用されている Al-Mg 系アルミ合金の A 5083 (板材) と A 5083-H 112 (型材) を、甲板・隔壁の一部には溶接ひずみの減少をねらって、板骨一体の π 型セクションの押出し型材を採用している。また上甲板上の構造材には、3 次元の

図3 ヤマト1・航走状況

曲面形状の工作性と軽量化を考慮し、薄板化が可能な A 5052-0 (板材) と 6 N 01-T 5 (型材) を採用している。

本船は海水中に直流大電流を流すため、万一主船体のアルミ合金製外板が陽極になった場合、アルミが海水中に溶け出る恐れがある。このため、外板と電極、電極への給電系とは電氣的に完全に絶縁し、漏電対策を十分に行っている。さらに、推進ダクト内の電極間通電電流以外の迷走電流による電気化学的溶解に関しても、ダクト内をライニングすることにより絶縁を十分に施している。

3.3 推進システム

ヤマト1の推進ダクト系は超電導磁石が6連環型式内部磁場型であるため、海水入口部、六分岐部、推進装置内の電磁力作用部、6合流部、海水噴射部から成っている。これらの流路断面積は、海水入口部から、海水噴射部へ流れるに従い、段々と縮小させている。

電磁力作用部に取付けた電極は、推進装置一基当たり、6対あるため、給電ラインの接続形式は4種類が考えられるが、電源装置の小形化、漏洩電流の低減化、保護協調の容易性より、2並列3直列接続式を採用している。この接続方式により、推進装置一基当たりの直流電圧は最大 450 V、直流電流は最大 4000 A となっている⁸⁻¹⁰⁾。

この電極給電用主発電機は、保守性・軽量化の面より交流ブラシレス発電機を採用し、周波数は 90 Hz と高くして、脈動平滑用リアクトルの低容量化を図り、さらに、脈動率低減化のため、ダイオード整流方式を採用している。

推進力の制御は、操縦室コンソール上の推進出力

レバーで、電極電流を増減することにより行なうことができる。さらに、左右舷独立して制御ができるため、片舷の極性を逆転させることにより、旋回も可能である。

4. 超電導電磁推進装置

4.1 全体構成

図2の電磁推進船“ヤマト1”の主要機器配置図中に、本推進装置部の断面図を、その推進装置の外観図を図4に示す。

超電導磁石の磁場漏洩を少なくし、実用化に際しての実現性を考慮するとともに、効率を上げるべく、6連環内部磁場型電磁推進装置を採用した。すなわち、海水管内に設けた電極により発生する電場と、本超電導磁石により発生する磁場を直交配置させた推進作動部6本を同心円状に配置し、クライオスタット内にワンセットにして一つの推進装置とし、各舷一基ずつ設けたものである^{1,8,10,11)}。

4.2 推進装置の仕様

表2に、本電磁推進装置の仕様を示す。本超電導コイルは、超電導線材として NbTi を用い、浸漬冷却方式による2層ダイポール型で、推進特性向上面から軽量化を図るため、コイル押えに Al 合金鋳物を採用している。

また、本コイルを収納する He 容器は、極低温材料として実績のあるステンレス鋼とし、フランジ部の歪みを極力抑える必要から電子ビーム溶接を用い、液体ヘリウムのシール材として、追従性の良いインジウム被覆のヘリコフレックスシールを用いた。

真空容器は、軽量化を図るため、Al 合金鋳物を用いた。

図 4 電磁推進装置の外観図

表 2 超電導電磁推進装置の仕様

型 式	6 連環内部磁場型超電導磁石
構 成	数量: 6 本 型式×線材: 2 層ダイポール型×NbTi 単体中心磁場: 3.5 T (6 連環 4 T 相当) 巻線部内径×外径: 360 mm×400 mm 磁界有効長: 3,000 mm コイル押え: Al 合金鋳物 冷却方式: 液体ヘリウム浸漬冷却
	クライオスタット 材質: Al(真空容器), SUS (He 容器) 外形寸法: 1.85 m dia×全長 5.4 m
推 進	発生ローレンツ力: 8,000 N (約 800 kgf)/6 連環 (電極電流: 4,000 A/6 連環)

4.3 推進装置の設計・製作

4.3.1 線材特性とロードライン

本電磁推進装置の心臓部となる超電導導体の断面形状、および導体の臨界電流特性とロードラインの関係を図 5 に示す。φ0.85 mm の素線を 25 本撚った形で導体を構成し、その周囲を電気絶縁のためにカプトン (ポリイミド樹脂) 被覆している。

本導体が、鞍型状に上下各 2 層に、それぞれ 110 ターン巻きつけられている。コイル通電電流 3770 A 時に、ダクト中心磁場 4 T となるように設計されている。この時、コイル最大経験磁場は 5.5 T である。

4.3.2 コイル押え構造とコイル組立

コイルは、前述の巻線後、加熱成型を行ったのち、コイル押えにより初期圧縮力が付加され、単体コイ

図 5 超電導体の臨界電流特性とロードライン

ルが組立てられる。この単体コイル 6 本は、同心円状に配置し、電気的に直列に接続され、クライオスタット内に永久電流スイッチ、および電流リードと共に組込まれる。

コイル押えは、電磁力作用が曲げモーメント支配型であることに着目し、曲げ作用に対し有効で軽量化し得る補剛シェル形式のコイル押え構造とした^{12,13)}

初期圧縮力は、電磁力作用時に線材が電磁力で動きクエンチを起こさないようにするために付加されるもので、大きすぎると絶縁材を破損する恐れがある。このため、電磁力解析、線材圧縮特性試験、絶縁破壊特性試験等を行い、本コイルにおいては、58.8 MPa {6 kgf/mm²}~88.2 MPa {9 kgf/mm²} に初期圧縮力を導入することとした^{14,15)}。この初期圧縮応力については、コイル押えに埋込んだロードセルに

図6 コイル押え取付状況

より計測確認を行っている。図6に、コイル押え取付状況の外観写真を示す。

本コイル、およびコイル押えの設計にあたり、詳細な電磁力解析を行った。図7に、磁束密度分布解析結果の例を、図8に、コイル押え変形解析結果の例を示す。

単体コイル連続製作の前に、25点の電圧タップを取付けた試作コイルを作り、液体ヘリウム浸漬状態で単体通電試験を行い、クエンチ挙動を把握すると共に、上述の初期圧縮応力値の妥当性を確認した。この試作コイルのクエンチ挙動計測結果に基づき、

図7 磁束密度分布解析

図8 コイル押え変形解析

単体コイルおよび 6 連環コイルのシミュレーション解析を実施した^{16,17)}。

単体コイルは、組立後、全数につき通電試験を実施し、コイル押えの強度、および磁場性能の確認を行った。

4.3.3 コイル電気回路および保護システム

コイルには地上設備として設置されている直流電源装置より電流が供給され、所定の電流値に達した時点で永久電流スイッチが投入され、永久電流モードとなる。この時点で、電源装置とコイル側の接続を切離し、船の出航準備が整う。

各コイルには、コイル中間点に電圧タップを設け、アンバランス電圧をクエンチ検出装置にて検出し、クエンチ発生時には、保護抵抗回路にコイル電流が流れるシステムとした。なお、保護抵抗値は前述のクエンチシミュレーション結果に基づき、 $0.1\Omega \times 6$ とした。

4.3.4 電流リード

船の走行時、冷凍機系の制約から、クライオスタットへの熱侵入量を極力抑える必要から、電流リードに対して 1 W/1 本の仕様が設定された。本仕様に対し、市販品では対応できないため、低熱侵入型電流リードの開発を行った¹⁸⁾。

本電流リードは、侵入熱低減を図るため、熱伝導率の小さいリン脱酸銅を用いるとともに、伝熱長を長くするため、スパイラル構造を採用した。また、ジュール発熱対策として、He ガスによる強制冷却構造とした。

試作・試験を行い、通電電流 4000 A、侵入熱量 1 W/1 本の性能を検証した。

4.3.5 電 極

電極の材料は、耐蝕性を考慮しチタン合金を母材とし、陽極は、PFA*コーティング、陰極は、白金メッキを施したものを使用した。

5. ま と め

超電導電磁推進船は世界で初めて実船規模で航走実験を行っているもので、その結果は世界の注目を集めている。本船開発にあたっては開発研究委員会委員長笹川陽平氏はじめ、分科会長元良誠三東京大学名誉教授、今市憲作大阪大学名誉教授はじめ多くの先生方の御指導と東芝、神戸製鋼の協力によって成し遂げられました。ここに感謝の意を表します。

*テトラフルオロ-エチレン-パーフルオロアルキル-ビニールエーテル共重合体

参 考 文 献

- 1) 竹澤, 超電導電磁推進船の開発計画について, 日本造船学会 第 709 号 1988 年 7 月 P 33~P 44
- 2) 今市, 超電導電磁推進船への道, 大阪港 38 巻 4 号, No 177 1987 年
- 3) 竹澤, 超電導電磁推進船ヤマト-1, 電気学会誌 111 巻 8 号 1991 年 P 695~699
- 4) 浅羽, 超電導電磁推進船, 世界の艦船 1988 年 4 月 P 146~P 151
- 5) 玉真, 超電導とその応用, Coastal Development 1987 年 11 月
- 6) 矢崎, 電磁推進と船舶, 造船技術, 1987 年 6 月 P 39~P 53
- 7) 岩田, 佐治, 超伝導による電磁推進の科学, 朝倉書店, 1991 年
- 8) 島本, 松山, 竹澤, 超電導電磁推進船の推進装置, 関西造船協会誌, 第 216 号, 1991 年 9 月 P 239~P 246
- 9) M. Hashii, C. Matsuyama, K. Shimamoto, S. Takezawa, K. Imaichi, Research on Superconducting Electro-Magnetic Propulsion Ship, ISME KOBE '90
- 10) 島本, 橋井, 森本, 上山, 森, 浅田, 竹澤, 超電導電磁推進船の推進システムについて, 日本船用機関学会誌 第 27 巻第 1 号, 平成 4 年 1 月 P 26~P 36
- 11) 島本, 藤田, 南, 超電導電磁推進船, 機械の研究, 1992 年 1 月号 P 89~P 93
- 12) 島本, 森田, 神野藤, 岩本, 竹澤, 超電導電磁推進船用ダイポールマグネットの補剛シェル形式電磁力指示構造の開発, 日本船用機関学会誌, 第 27 巻第 5 号, 平成 4 年 5 月, P 368~P 374
- 13) K. Shimamoto, C. Matsuyama, H. Morita, K. Hayakawa, M. Minami, Design, Manufacturing and characteristics of Superconducting Magnet for YAMATO 1 (Left thruster), MHDS 91
- 14) 島本, 松山, 森田, 神野藤, 南, 竹澤, 超電導電磁推進船用大型ダイポールマグネットにおけるコンプレッション導入とコイル挙動特性, 日本船用機関学会誌, 第 27 巻第 5 号, 平成 4 年 5 月, P 376~P 382
- 15) 南, 島本, 多田, 竹澤, 極低温下における超電導線材の摩擦特性, 日本潤滑学会トライボロジ会議'91 春 予稿集 (1991), 591
- 16) Y. Kannoto, K. Morimoto, M. Fujiwara, Y. Maekawa, H. Sakai, K. Shimamoto, Mechanical structure and performance of Superconducting magnet for YAMATO 1 (Left thruster), MHDS 91 (1991)
- 17) 島本, 松山, 森田, 早川, 南, 神野藤, 藤原, 森本, 和気, 竹澤, 超電導電磁推進船用ダイポールマグネットのクエンチ挙動(1), (2), (3), '91 秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 低温工学会, P 77~P 79
- 18) 島本, 中野, 松山, 早川, 南, 入江, 藤原, 荻野, 竹澤, 超電導磁石用低熱侵入型電流リードの開発, '91 秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 低温工学会, P 144