電磁推進船の可能性に関する基礎的考察

正員 池田 吉 堯 (横浜国大)

正員 西村 誠 介 (横浜国大)

1. はじめに

電磁推進船は、昭和60年度以来、日本船舶振興会を中心に開発が進められているが、船舶関係技術者や構成部品関係技術者による高度な検討がなされている割合には、電気工学的観点からの推進システムの検討は十分になされていない⁽¹⁾⁽²⁾。

電磁推進船の開発にあたって最大の問題点は、海水の抵抗率が0.1ないし0.3Ω・m程度と高いことである。銅の場合が約 1.7×10^{-8} Ω・mで、電気機械としてこの抵抗率の差を埋め合わせるためには、超伝導電磁石の適用が不可欠となる。しかし、磁界の強さを通常の電気機械の一けた程度以上に上げることは物理的に困難であり、同一出力を得るためには、推進機の寸法ならびに電気機械の回転数に対応する流速を大きく選定する必要がある。後述のように、抵抗率の割合には電流密度を上げ、効率を犠牲にすることも、大形化を避ける意味からやむを得ない面がある。必然的に電源が大きくなり、高価なものとなるであろう。

このような電磁推進船が存在価値をもつとすれば、通常の船では実現できない性能を保有するものでなくてはならない。例えば、50kt(92.6km/hr)程度以上の超高速船の可能性が追求される必要がある。そのためには、単に大形超伝導電磁石の開発だけでは実現不可能な要素が幾つかある。

本論文は、主として電気工学面から電磁推進船の概要を基礎的に考察し、その技術的可能性を確かめるために必要と考えられる今後の研究項目について考察したものである。

2. 電力効率面からの考察

ホール効果は無視されるものとして、電磁力で駆動される流体の単位体積について考察すると、次の諸関係式が成立する。

$$E = \rho j + Bu \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 u ：駆動される海水流速 (x 方向)、
 j ：電流密度 (y 方向)、 E ：電界 (単位長あたりの電圧、 y 方向)、 B ：磁束密度 (z 方向)、
 ρ ：海水抵抗率 (0.1~0.3Ω・m程度)

推進出力

$$P_{out} = Bju \quad \dots\dots\dots (2)$$

所要電力

$$P_{in} = Ej = \rho j^2 + Bju \quad \dots\dots\dots (3)$$

電力効率

$$\eta = \frac{Bju}{\rho j^2 + Bju} = \frac{Bu}{\rho j + Bu} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上記(4)式の関係は、図1に掲げるように Bu 積が大きくなり、 j が小さいほど電力効率が高くなることを示している。

図1 電磁推進機の電力効率特性

Fig.1. Power efficiency characteristics of electro-magnetic propellers.

Basic Consideration on the Feasibility of the Boat Using Electro-Magnetic Propulsion. By Yoshitaka Ikeda, Member & Seisuke Nishimura, Member (Division of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University).

池田吉堯：正員，横浜国立大学工学部情報工学科
 西村誠介：正員，横浜国立大学工学部情報工学科

通常の回転電気機械では、 ρj 積は 1 V/m 以下であり、 Bu 積は 10 V/m 以上と考えられる。すなわち、図 1 での動作領域は図示の範囲より、縦軸に沿って数けた下方に存在している。

電磁推進機内の流速に関しては、船速より数十%程度速い噴射流速のとき、ジェット効率が最大になるとの報告(昭和 61 年, 日本造船振興財団, 超伝導電磁推進船の開発研究報告書, 5 章 p.19)もある。船速 50 kt (25.7 m/s) に対し、望ましい噴射流速として、 $u=35$ m/s を仮定して数値例を挙げてみよう。 $\rho=0.2$ $\Omega \cdot m$, $B=10$ T, $j=3,000$ A/m² を採用すると、 $\eta=36.8\%$ となる。2 倍の船速を想定して、 $u=70$ m/s と仮定しても $\eta=53.8\%$ である。

これらの数値は、電力効率の向上がかなり困難であることを示している。すなわち、大形の強い超伝導電磁石の磁界中で僅少な電流密度のもとに、高速度で駆動することが電力効率面から要求される。

3. 推進機の寸法

流体の粘性や摩擦は、高速流体に対しては大きな付加的駆動力を要求し、条件によっては致命的障壁になる可能性がある。しかしここでは、この重要な問題を無視して、推進機の流れ方向の長さについて考察する。

前述の考察から明らかに、噴射流速と推進機内流速とを等しく設計することは、効率向上の面から望ましく、これを“ u ”と置く。また、船速を“ v ”とすれば、推進器の流れ方向の長さ“ L ”は、海水の質量密度を“ ρ_m ”として次式から得られる。

$$(1/2)\rho_m(u^2 - v^2) = jBL \dots\dots\dots (5)$$

前述の数値例、 $B=10$ T, $j=3,000$ A/m² に対して $v=25$ m/s, すなわち約 50 kt, $u=35$ m/s と仮定すれば、(5)式より必要な推進機の長さとして $L=10$ m を得る。また、 $v=50$ m/s, すなわち約 100 kt, $u=70$ m/s と仮定すれば、 $L=40$ m となる。

非圧縮性流体を扱う電磁推進船の概念図を図 2 に示す。上述の数値例から明らかに、高速電磁推進船の推進機は比較的長いものとなる。ダクト内粘性抵抗に基づく付加的必要推力が極めて大きくなることを考慮すると、高速電磁推進船は相当な大形船でなければ適用できないことが予想される。言い換えれば、実用的なキロワット容量の推進機を用いる限り、電磁推進船はソフトスタート形、すなわち微小加速度で高速に到達する大形長距離航行外洋船が特殊な船舶にのみ適合する可能性が考えられる。それ以外の船に対しては、何らかのイオン添加剤の開発により、実効海水抵抗を少なくとも一けた程度は低下させる必要がある。

4. ダクト内高速海水流中の通電に関する考察

水力発電の分野で知られる水圧鉄管内の流速は通常 3~5 m/s であり、それでも発電所の損失水頭の中では、鉄管内粘性流に基づくものが比較的大きいといわれている。この摩擦損失水頭は管の摩擦係数で異なるが、平均流速の自乗に比例することがよく知られている。電磁推進船に必要な流速は、水力発電におけるノズルからの噴射流速に匹敵するもので、このような違いに高い流速では、層流状態を保つことはできず、様々な非線形要素が加わることが予想される。

これまで、ほとんど未経験の領域と考えられるダクト内流速をどれだけ実現できるかが、超伝導磁界をどれだけ強くできるかということと同様に、電磁推進船開発の要である。

流速が増加するとベルヌーイの定理による圧力低下に基づき、一般に水蒸気が生成されるが、その状況は条件の微細な差によって大幅に異なるものといわれている。また、これによって層流から乱流に変化するおそれがあり、実験的に解決の可能性を探る必要があるばかりでなく、電気工学的に新たな考察も行わなくてはならなくなる。

すなわち、海水中に大電流を通じると電気分解によ

図 2 電磁推進船の原理モデル
Fig. 2. Conceptual model for a boat using electro-magnetic propulsion.

ってもガス発生が観測されるが、高速流の場合には直流電流通路の海水中に気泡が混在すると、摩擦力の増加に加えて見掛け上、海水抵抗率が増加し、電力効率の低下をもたらす。見掛けの抵抗率の増加率は、気泡の体積占有率に大略比例する。

更に、気泡が気相層を構成するような場合には、アーク放電発生の懸念も生じる。アーク放電が発生すると、放電電圧ならびにダクト内電流分布の不均一に基づく電力効率の低下、電極の異常消耗、有害ガスの異常生成など、更に新たな検討事項が追加される。

〈4・1〉 食塩水を電極とするアーク放電の特性

電磁推進で問題になるような気相・液相混合の高速流動海水中でのアーク放電に関するデータは、現在ほとんど見あたらない。わずかに、絶縁物の塩塵汚損沿面を対象とした、放電電流数 mA～数十 A の食塩水沿面アーク放電などの報告がある^{(3)～(5)}。

3%食塩水 (18℃で、抵抗率は $\rho=0.25 \Omega \cdot \text{m}$) と金属電極間、あるいは3%食塩水表面間に点じた食塩水沿面アーク放電電圧の数値に関しては、10 A 程度以下の電流範囲に対して、次の実験式で与えられている⁽³⁾。

$$V_a = (60\lambda/i) + 40\lambda + C_a + C_k \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 V_a : アーク電圧 (V), λ : アーク長 (cm 単位で代入), i : アーク電流 (A 単位で代入), C_a : 陽極点降下電圧 (表 1), C_k : 陰極点降下電圧 (表 1)

更に、大電流領域 (20～30 A) のデータとしては、沿面ではなく大気中の磁気駆動電解液電極アークに関するデータが報告されている⁽⁵⁾。この条件は、より電磁推進機ダクト中に発生するかも知れないアーク条件に近似すると考えられるが、表 1 の食塩水の場合と類似して、液面上の電極点降下電圧はそれぞれ、 $C_a=200 \text{ V}$, $C_k=530 \text{ V}$ という高い数値の測定結果が報告されている。

なお、放電電流の増大に伴い、電解液面上の陰極点は複数個に分割され、陽極点は面積が拡大するだけとの観測所見も併せて報告されているが、陰極点の分割現象に関しては、水銀アークの溜陰極や真空アークの

金属陰極では、衆知の現象である。

また、アーク柱部に気流や電磁力を作用させると、電極材料によって陰極点が円滑に駆動される場合と、そうでない場合とがあることが知られているが、食塩水陰極は前者に属し、いわゆる電界放射形陰極材料であろうと報告されている。

〈4・2〉 アーク放電発生の可能性とその影響

前項の報告データから類推されるように、海水などの電解液面を電極とするアーク放電は、一般周知の金属電極間の気中アークとは著しく異なる幾つの特徴をもつことが指摘されるであろう。特に、電磁推進機の効率低下に直接影響するおそれのある事実は、アーク電圧が著しく高い値を呈することである。これは、電解液表面に形成されるアーク電極点の電圧降下が大きいため、電極材料としての電解液の物性に起因する。

もし、ダクト内壁の通電電極に接する部分に、気相が層状に生成すると、電流通路の両端電極部にそれぞれ金属・海水電極間アーク放電が直列に点じ、また気相層が電流通路の中央部に生成されると、海水電極間アークが点じる結果になるであろう。いずれの場合にもアーク長 λ は十分に短く、アーク柱部の降下電圧が無視できると仮定しても、(6) 式の放電電圧 V_a は陽極点ならびに陰極点降下電圧の和だけで、1,000 V 以上に達することが予想される。

前述の数値例 ($B=10 \text{ T}$, $u=35 \text{ m/s}$, $j=3,000 \text{ A/m}^2$, $\rho=0.2 \Omega \cdot \text{m}$) で、ダクト内電極間隔を $D=1 \text{ m}$ と仮定すると、逆起電力 $BuD=350 \text{ V}$ に対し、 $\rho j D=600 \text{ V}$ の内部抵抗電圧に加えてアーク電圧 1,000 V を必要とするのでは、エネルギー変換機として効率的に成立するものではない。

一般には、気相層の生成が直ちにアーク発生につながるとは限らない。何らかの回路が構成される可能性も高い。また、高速気流に曝露されて吹消されるためにアークは定常的には点じ難く、異常電圧発生なども考えられる。

いずれにしても、放電挙動は気相層の生成、分布、流速、推進機の構成などの周囲条件に大きく依存するので実験的に検討する必要がある。

5. 各種考察

〈5・1〉 流速と磁界ひずみ 電磁流体としては、導電媒質の流動に基づく渦電流による磁束分布ひずみの面から、流速限界を吟味して置く必要がある。磁気粘性が十分高く、磁界がひずまない条件は磁気レイノルズ数 R_m が、1 に比べて十分小さいことである。す

表 1 アークの電極点降下電圧 (C_a , C_k) の値
Table 1. Values of voltage drop (C_a , C_k) at arc spots.

電極材料	陽極点降下電圧 C_a	陰極点降下電圧 C_k	放電条件、電流範囲
3%食塩水	300 V	800 V	食塩水沿面, 10 A 以下
	200 V	530 V	磁気駆動, 20～30 A
銅	8 V	20 V	空气中, 数 A～数十 A

なわち、

$$R_m = \mu_0 L u / \rho \ll 1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

これまでの数値例より、ひずみの観点から最も厳しい組合せの条件を採用し、 $L=40 \text{ m}$ 、 $\rho=0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $u=70 \text{ m/s}$ と仮定すると、 $R_m \approx 0.035$ とほぼ限界の数値に近づくが電磁推進船では、まず磁界のひずみを考慮する必要がないことが考察される。

〈5・2〉 電源装置 電磁推進船が実現した場合の特徴としては、静止推進機をもち、速度制御が自由なことが挙げられる。従って、そのための可変電圧直流電源が必要となる。一般に、船内という限られた場所の系統電源としては、専用の100～300 Hzの交流発電機を用いることが、電気機器を小形化する面から望ましい。推進機電源としては、独立の同一周波数タービン発電機を設置し、その出力を整流して上記電源に変換する方式が電圧変動の面から望ましい。この場合の電圧制御は、発電機界磁のチョッパ制御、またはサイリスタ変換装置による位相制御、あるいは直流出力のチョッパ制御によって行う方法が考えられ、比較検討されるべきである。特に、新規開発の必要性ある問題は想定されない。

〈5・3〉 その他の考察 第3章に述べたダクト長 L の数値から、ダクト内の流れに沿う電流分布、温度変化ならびに、ホール効果の影響なども条件によっては吟味する必要がある。

一般的には超伝導磁界の縁端効果もあり、電流分布の平滑化のため、流れ方向に電極を分割する必要があると想定され、発電機系と整合のとれた給電方式として、並列給電システムと直列給電システムの適当な組合せが推進機の全体構成と共に検討されることになるであろう。

流れ方向の温度変化が問題になるのは始動時であり、原則として直列給電システムを併用することにより、温度変化に伴う電流分担の問題を軽減することができる可能性がある。

ホール効果に関してはイオン伝導であり、海水の抵

抗率が高いので無視できるであろう。

燃焼ガスを用いたMHD発電で強磁界の場合、問題になるイオンスリップ効果も液体では問題にならないと想定される。

6. 終りに

電磁推進船としては、大形高速船の可能性が追究されるべきであることを記述すると共に、電気工学的観点から問題点を列挙した。口径の大きいダクト内磁界をどこまで強くできるかという衆知の基本問題のほか、ダクト内流速を効率良くどこまで速くできるか、また気相中アークを生じることなく、一様な通電を高速流中に実現できるかという基本問題を実験的に検証することが、電磁推進船の可能性のかぎである。

本論文の内容は、昭和60年9月日本造船振興財団の「超伝導電磁推進船の開発研究委員会・船分科会」に、著者の一人が提出した論文（資料No. EMTS, 3-9）を修正補足したものである⁽⁶⁾。電磁推進船の実用化には、船舶関係者の流体力学的考察を不可欠とするが、本論文の電気工学面からの考察がその開発研究に参考になれば幸いである。

上記委員会では、燃料電池による電源の静止化の可能性をも模索していることを付記すると共に、種々御示唆をいただいた上記開発研究委員会委員長ならびに委員の方々に謝意を表する次第である。

（昭和63年6月7日受付、平成元年1月12日再受付）

文 献

- (1) 斉藤・黒石：「船舶電磁推進」，電学誌，106，995(昭61-10)
- (2) 多田：「電磁推進船の現状と将来」，昭63電気学会大会，S. 13-6
- (3) 西村・中島：「電解液面を伸展する局部アーク放電の特性」，電学論文A，97，77(昭50-2)
- (4) R. Wilkins："Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films"，*Proc. Instn. Elect. Engrs.*，116，457(1969)
- (5) 西村・佐藤・中島：「電解液面を電極とするアークの磁気駆動」，昭51電気学会大会，No. 72
- (6) 池田：「電磁推進船の可能性に関する基礎的考察」，昭63同上，No. 710