

7.2 超電導コイルによるエネルギー貯蔵

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

ば、コイル内に蓄えられるエネルギー U (J)は

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

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

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

Table 7.2.1 各種エネルギー貯蔵方式の比較

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

全建設コスト (\$/kW) = $C_p + C_s \cdot T$

の如く減衰していく。また、 R によるエネルギー消費 U_Q (J)は

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

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

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

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

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

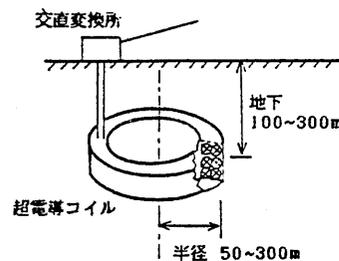


Fig.7.2.1 超電導エネルギー貯蔵装置の概要

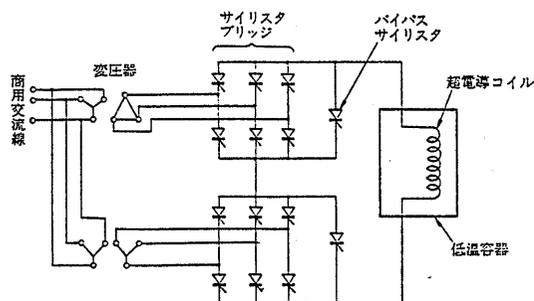


Fig. 7.2.2 代表的なSMESの回路図

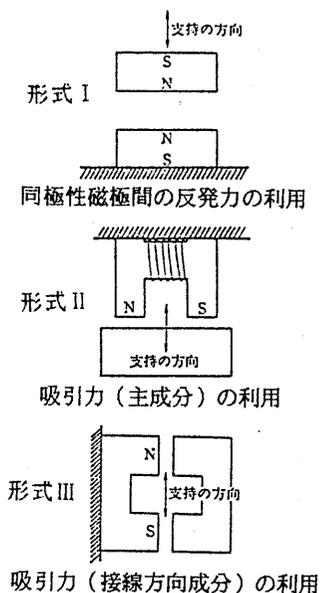
7.3 軸受等荷重支持への応用

7.3.1 磁気軸受

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

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

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

Fig. 7.3.1 磁気力の利用¹⁶⁾

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

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

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

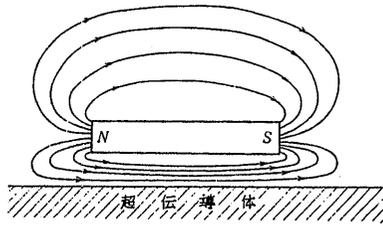
このように、磁気力によって回転体の運動を安定に支持するには、制御機構が必須なために装置が複雑、高価になることや、エネルギー消費が比較的大きいなどの欠点などから実用例は少なかった。近年、エレクトロニクスの発達や高エネルギー積の希土類磁石の出現により、これらの欠点が克服されつつあり、人工衛星の姿勢制御用フライホイールやジャイロ、ターボ分子ポンプ、エネルギー貯蔵用フライホイール、工作機械用スピンドルなどへの応用がすすめられ¹⁹⁾、本格的な実用化の時代に入ったといわれている。

超電導の磁気軸受への応用としては、次の2点が考えられる。

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

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

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

Fig.7.3.2 マイスナー効果による磁気力²¹⁾

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

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

7.3.2 磁気浮上

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

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

利用し、10cm程度の浮上高さが必要と考えられている。

7.3.3 フライホイールへの応用

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

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

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

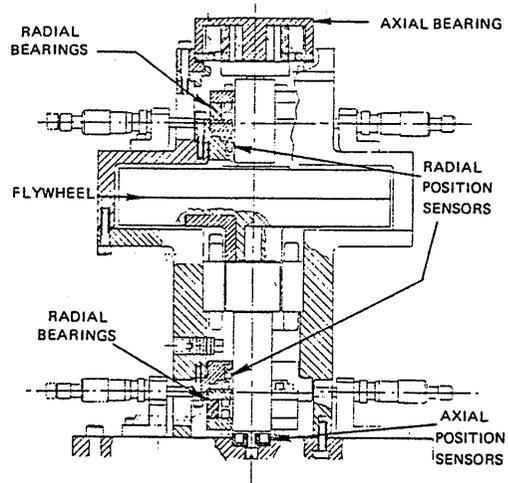


Fig.7.3.3 磁気支持によるフライホイール

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

7.4 超電導電気推進とその原動機

7.4.1 はじめに

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

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

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

Table 7.4.1 電気推進船の建造傾向³²⁾

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

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

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

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

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

7.4.2 ディーゼル機関とガスタービン機関の現状

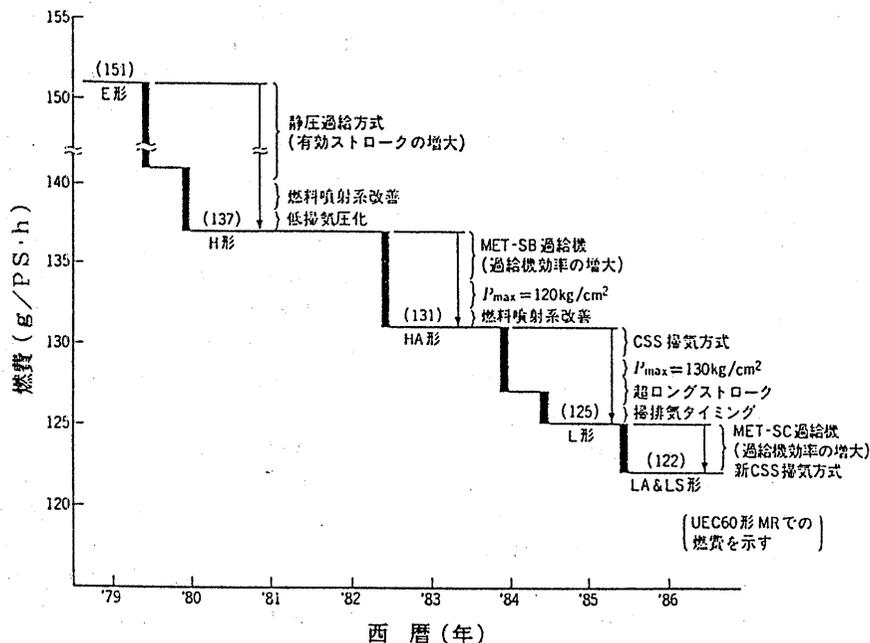
Table 7.4.2³⁸⁾に最近建造された2000 t以上の商船の隻数および搭載機関の種類およびその合計出力を示すが、搭載機関の大半がディーゼル機関である。石油ショック以降、総合的な低燃料消費化を計るため、プロペラ効率の優れている大直径低回転プロペラが多く採用されるようになり、2サイクル低速ディーゼルに関しては、この低回転運転に適する超ロングストローク機関の開発が盛んに行われた。同時に熱効率を向上

Table 7.4.2 建造隻数と搭載機関出力の傾向³⁸⁾

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

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

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

Fig.7.4.1 ディーゼル機関の燃料消費率低減の過程の例³⁹⁾

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

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

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

Table 7.4.3 ディーゼル機関の寸法と重量の例⁴³⁾

サイ クル	型 式	シリン ダ 数	出 力 kW(MC)	燃費率 g/kWh	回転数 rpm	重 量 ton	概略寸法 LxWxH (m)	比重量 kg/kW	比容積 l/kW
2	L90MC	4	13760	171	74	775	9.4x7.9x13.6	56.3	73.7
		12	41280			1835	23.7x7.9x13.6	44.5	62.2
	L70MC	4	8320	172.8	95	390	7.3x6.1x10.6	47.0	56.6
		8	16640			655	12.3x6.1x10.6	39.4	47.7
	L60MC	4	6120	174.1	111	260	6.3x5.2x9.1	42.5	48.8
		8	12240			435	10.5x5.2x9.1	35.7	40.7
	L50MC	4	4240	175.5	133	160	5.2x4.4x7.6	37.7	40.9
		8	8480			270	8.8x4.4x7.6	31.8	34.2
	RTA62	7	10210	169.3	81	385		37.7	
	UEC75LS	4	11770	165	84	436	7.6x7.6x13.2	37.0	64.8
		8	23535			784	12.3x7.6x13.2	33.3	52.4
	UEC60LS	4	7060	166	100	286		40.5	
		8	14120			518		36.7	
	UEC52LS	4	5300	166	120	182		34.3	
		8	10600			330		31.1	
	S26MC	4	1460	177	250	28.5	3.3x3.1x4.8	19.5	33.6
8		2920			51.3	5.3x3.1x4.8	17.6	27.0	
4	L58/64	6	7290	174	428	134	9.7x3.5x5.2	18.4	23.5
		9	10935			186	12.9x3.6x5.2	17.0	21.5
	L40/45	6	3630	181	600	59	7.1x2.6x4.6	16.3	22.7
		9	5445			82	9.3x2.6x4.7	15.1	20.5
	PC40L	5	6075	173	350	127	9.6x3.6x5.6	20.1	31.8
		9	10935			216	13.5x3.6x6.0	19.8	26.7
	PC20L	6	3642	184	475	53.2	7.3x2.0x4.2	14.6	17.1
		9	5463			76.6	9.5x2.0x4.2	14.0	14.8
	PA6L-280	6	1770	200	1000	11.7	3.9x1.4x2.7	6.6	6.2
		9	2655			16.7	5.1x1.4x2.7	6.3	7.4
	PA6V-280	12	3540	200	1000	18.8	3.7x1.8x2.5	5.3	4.6
		20	5900			31.4	5.6x1.8x2.5	5.3	4.2
	PA6L-280CL	6	1770	186	750	15.4	3.9x1.4x2.6	8.7	7.7
		9	2655			19.5	5.3x1.6x2.7	7.3	8.8
	PA6V-280CL	12	3540	186	750	20.9	4.3x1.9x2.9	5.9	6.8
		18	5310			32.1	6.0x2.0x3.0	6.0	6.6
	PA6-280BTC	12	4850	238	1050	23.0	3.7x1.8x2.6	4.7	3.5
		20	8100			42.0	5.5x1.8x2.6	5.2	3.4
	PA4V-200VG	8	1080	223	1475	4.4	2.0x1.6x1.9	4.1	5.2
		18	2430			8.7	3.4x1.7x1.9	3.6	4.5
	M220L-EN	6	735	195	750	7.2	3.2x1.2x2.1	9.8	11.0
	M220AL-EN	6	882	197	1000	7.2	3.2x1.2x2.1	8.2	9.1
6SH-ST	6	441	218	1600	2.6		5.9		
S6R2-MTK	6	588	201	1450	3.9	2.6x1.2x1.8	6.6	9.6	
S6MB-MTK-2	6	220	227	2600	0.9	1.5x0.8x1.2	4.0	6.5	

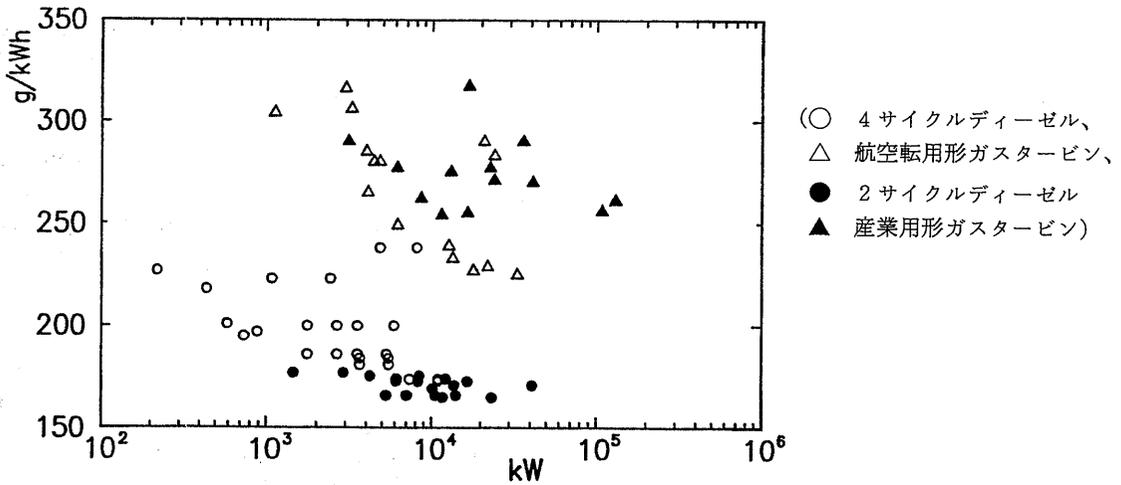


Fig.7.4.2 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と燃料消費率

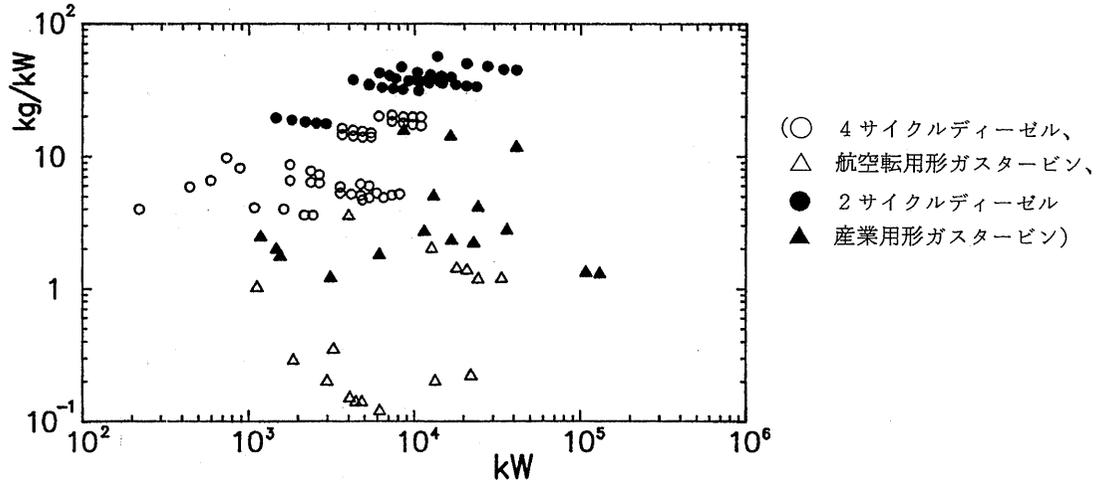


Fig.7.4.3 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と比重量

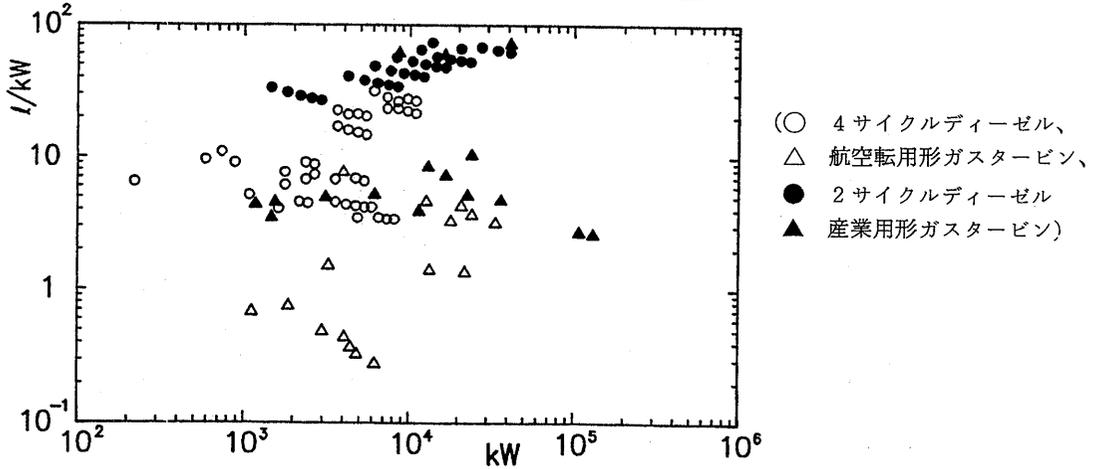


Fig.7.4.4 ディーゼル機関とガスタービン機関の出力と比容積

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

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

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

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

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

Table 7.4.4 ガスタービン機関の寸法と重量の例⁵⁴⁾

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

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

7.4.3 燃料電池⁵⁶⁾

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

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

以下に開発状況を簡単に述べる。

Table 7.4.5 各種燃料電池の種類と特徴⁵⁸⁾

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

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

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

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

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

Table 7.4.6に各種燃料電池の比重量、比容積の例を示す。

Table 7.4.6 燃料電池の出力と比容積・比重量の例⁵⁷⁾

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

7.4.4 推進システムの重量と容積

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

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

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

燃料電池は、出力密度の高いものが宇宙用等に開発

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

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

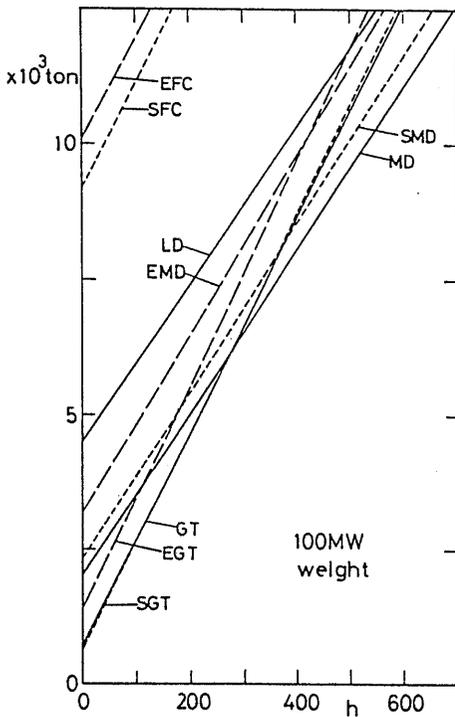
Table 7.4.7 動力伝達機器の比重量と比容積

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

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

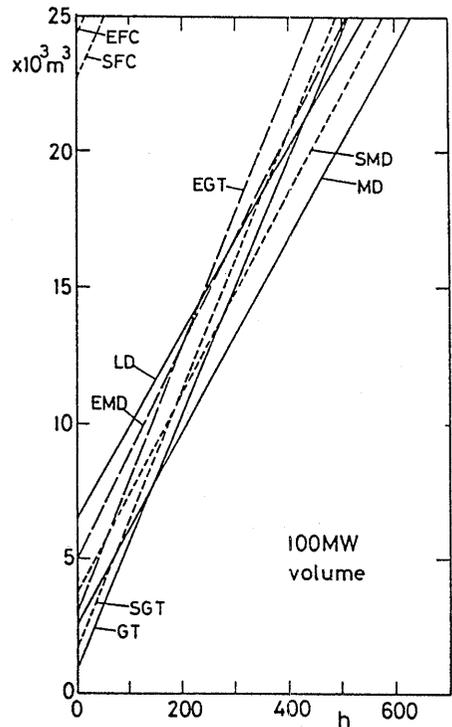
増大するが多数機関の接続が容易になる。また航続時間が比較的長いところでは超電導電気推進システムの重量と容積の増加分は燃料タンクのそれに比して小さい。

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



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

Fig.7.4.5 各種推進方式の重量の比較



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

Fig.7.4.6 各種推進方式の容積の比較

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

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

7.4.5 まとめ

以上、超電導電気推進システムに使用する原動機の

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

参 考 文 献

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

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

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

- 74) 電気工学ハンドブック、電気学会、(1967)
- 75) 上之園博：「電力機器への応用」、電気学会誌、第104巻、第1号、(昭和59年1月)、p.13
- 76) 立花康夫ほか：「船用軸発電装置の概要」、富士時報、第56巻、第2号、(1983-2)、p.150

8. 船舶・海洋システムへの応用

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

8.1 運河航行への応用

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

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

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

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

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

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

8.2 浮力制御および磁力接合

8.2.1 ケーソンの出し入れによる浮力制御

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

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

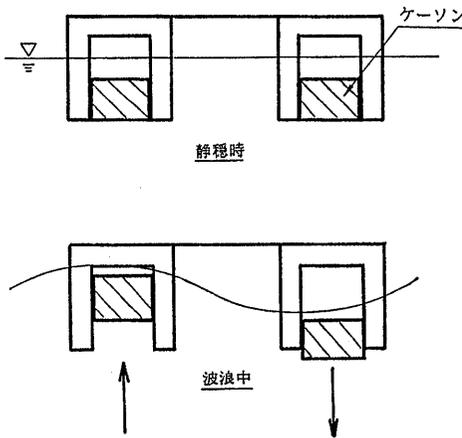


Fig.8.2.1 浮力制御の概念図

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

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

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

解決すべき技術的課題としては

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

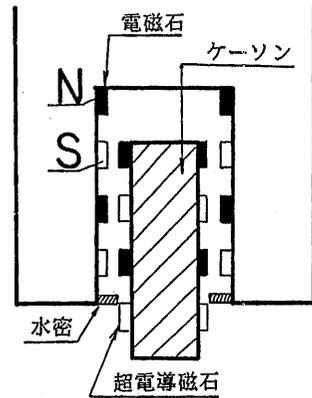


Fig.8.2.2 リニアモーターによる制御

8.2.2 磁力接合モジュール船

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

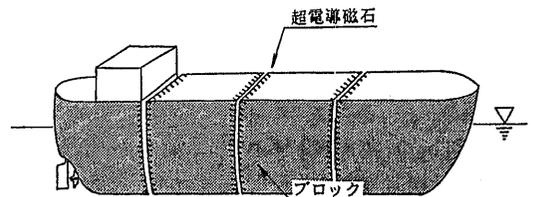


Fig.8.2.3 磁力接合モジュール船の概念図

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

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

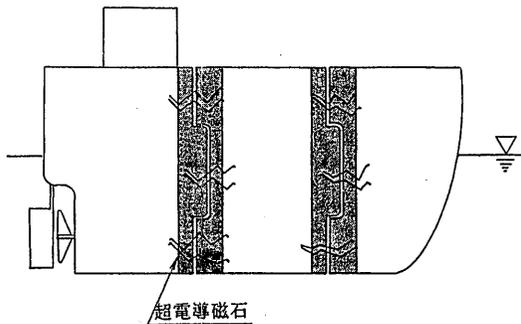


Fig.8.2.4 磁力接合方式

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

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

磁力接合モジュール船の解決すべき技術的課題としては、

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

などがあげられる。

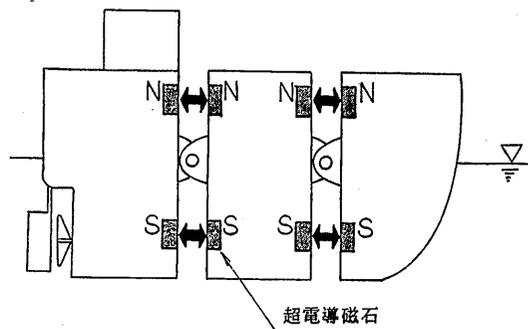


Fig.8.2.5 超電導磁石の反発力の利用

8.3 磁気吸引作業ロボット³⁾⁻⁶⁾

8.3.1 壁面移動ロボットの現状

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

Table 8.3.1 船側壁面移動ロボットの特徴と問題点

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

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

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

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

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

次に移動方式について種類別に特徴を要約する。

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

8.3.2 超電導磁石吸着型の船体側壁作業ロボット

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

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

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

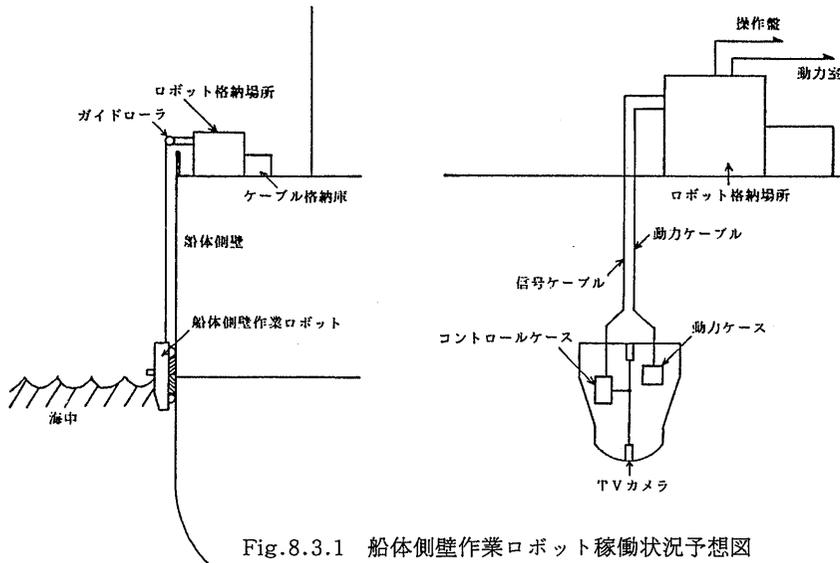


Fig.8.3.1 船体側壁作業ロボット稼働状況予想図

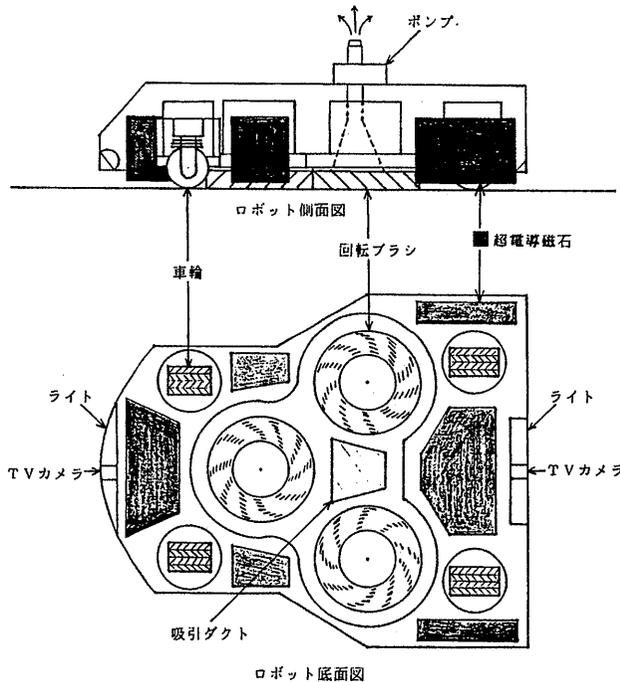


Fig.8.3.2 超電導磁石吸着型船体側壁作業ロボット

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

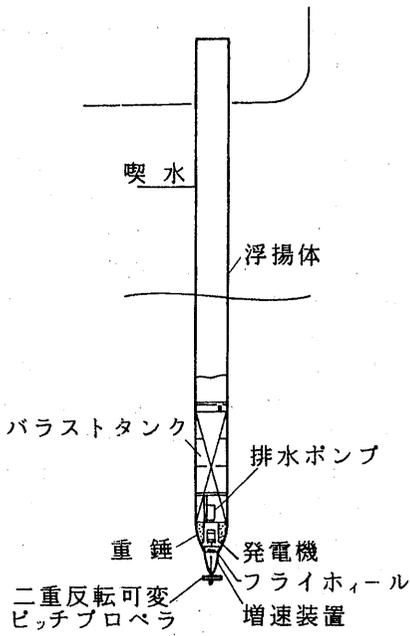
ロボットの比較的重要な機能部品を以下に簡単に説明する。

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

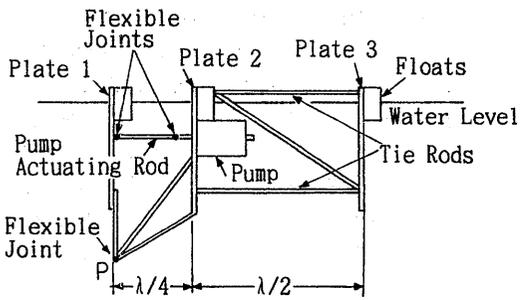
また、残骸を海洋投棄できない場合には集塵袋に回収する役目も行う。

8.4 波力発電

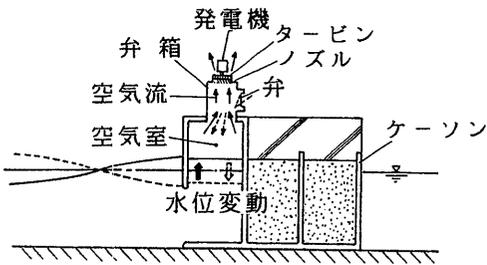
周囲をぐるりと海に囲まれた日本は自然の恵みとして漁業資源のみならず、海洋エネルギーの豊庫として潜在的な地位を有する。従って、後者を如何に利用できる形にて取出せるかは、その技術開発に全く依存している。もし取出せれば、環境を汚さないクリーン・エネルギーとして魅力あるものとなる。例えば、年間に日本の沿岸に打寄せる波浪パワーは約 5×10^7 kW と推定される⁷⁾。それ故、何等かの方法でこれを利用できれば、我が国の21世紀のエネルギー展望に明るい光を照らすことになる。当所においても波力発電の研究が、ここ数年間鋭意実施されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。一般に、波浪エネルギーを利用可能な電気エネルギーとして取出す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



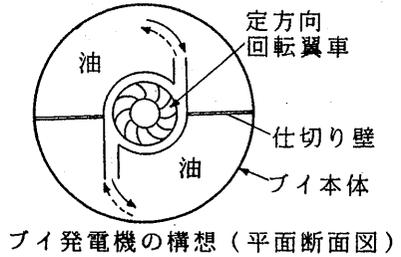
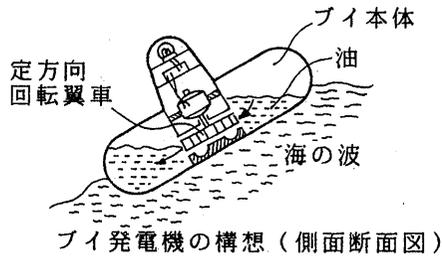
(1) 上下動型



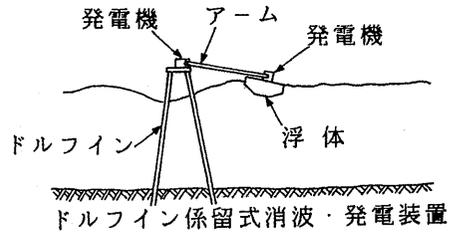
(3) 水平運動型



(5) 振動水柱型



(2) 回転運動型



(4) 連成振動型

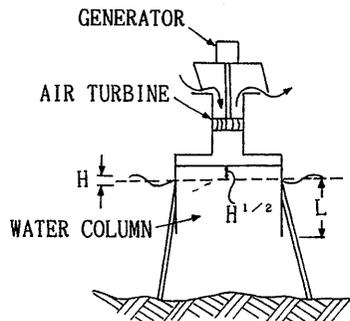


Fig.8.4.1 波浪発電の種々の型¹⁾

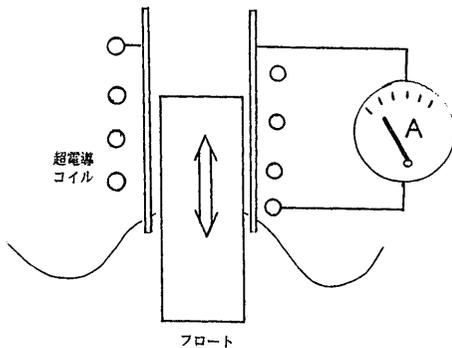


Fig.8.4.2 波力直接発電システム

参 考 文 献

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

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

9 む す び

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

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

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