

リニア発電機を用いた船体運動のエネルギー回収システムの開発

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻船舶海洋工学コース
海洋空間開発工学領域 柏木研究室所属

井上 恵 太

1. 緒言

船舶を利用した海上輸送は他の輸送手段に比べて一度に大容量の輸送が可能であり、経済活動を行う上で必要不可欠である。実海域での大型商船の燃料費は1日数万円にも上ると言われており、特に日本は重量ベースで貿易量の99パーセント以上を船舶による輸送に依存している海運大国であるため、更なる省エネルギー船の開発は急務であると言える。近年の重油価格の高騰や、国際海事機関（IMO）での二酸化炭素排出規制強化に伴い、船舶の省エネルギー化を目標に様々な取り組みがなされてきた。

その例として船体上での再生可能エネルギー利用という観点の下、船体に Moonpool と呼ばれる竪穴を開け、その中の水の動きによりウェルズタービンを回して波浪エネルギーを吸収する装置の開発や、船首部に翼を取り付けることで発生する揚力を船の前進力に応用する研究がなされてきた¹⁾⁶⁾。しかしながら、これらは船体構造の大幅な変更や付加物を必要とし、強度的な問題が生じるため、荒い海象を航行する大型船に対しては実用化には至っていない。

そこで Fig. 1 に示す、コンテナ内に収納されたりニア発電機を用いて船体の運動エネルギーを回収するシステムを提案し、その実現可能性を検証する。エネルギー回収コンテナの外観は他の貨物コンテナと同じである。従って船体構造への負担が少なく、装置自体のメンテナンスにも手間がかからない。その上、航海中はコイルと磁石の間で相対運動が起こる限り発電可能であるため、安定した電力供給が期待できる。回収された電力は船内居住区や航海計器等での利用が想定されている。

船体とコイルの運動を併せて考慮することで船体上でのコイルの運動を数学的にモデル化し、その運動と回収電力量を数値計算により推定する。その数学モデルに基づいて対象船が北太平洋を特定条件下で航行す

る際のシミュレーションも行い、その実現性を検討している。また模型船にコイルの模型を搭載した実験を行うことで、数学モデルの妥当性を確認するとともに、システムでの発電効率を評価する。

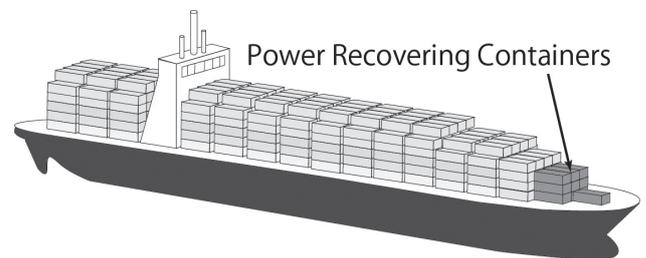


Fig. 1 船体への発電機設置の様子

2. リニア発電システム

リニア発電機は運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため、エネルギー変換効率が良いとされている。この発電システムは Fig. 1 に示す通り、船体の鉛直方向の運動量が最も多いと予想される船首部付近のコンテナ内に設置されている。

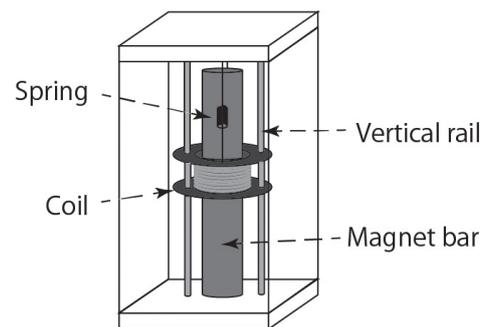


Fig. 2 発電機の内部構造

Fig. 2 は発電機内部の構造を示している。マグネット棒は発電機底部に固定されており、船体と一緒に運動する。一方コイルは、発電機天井からばねによりつり下げられており、内部を鉛直方向に自由に運動する。コイルに接続されたばねの定数を調整することで、コイル運動の固有周期を調整できる。また垂直レールを設置することで船体に対するコイルの運動方向を鉛直

のみに拘束している。

船体が波浪を受けて動揺すると、コイルと磁石の間に相対運動が生じ、それに起因する電磁誘導の誘導起電力から電力を回収する。

3. 規則波中での数学モデル

運動力学と電磁気学の理論に基づいて、規則波中を航行する船体上でのコイルにかかる外力を数式化し、それらを基に運動方程式を構築することで、コイルの運動を推定した。コイルには、誘導電流が流れることにより生じる電氣的な減衰力、垂直レールと接触することによる機械的な摩擦力、ばねから受ける復元力が作用している。電氣的な減衰力はコイルを含む電気回路の抵抗値に大きく依存し、合成抵抗値が小さくなると電流量が増加するためコイルには大きな減衰力がかかる。機械的な摩擦力はコイルとレールの間にベアリングを介すことで最小化されている。コイルの固有周期はばね定数によって調整することができ、これと波浪を受けた船体運動の固有周期を一致させることでコイルの運動振幅を増大させることができる。

運動方程式を基に得られたコイル運動の動揺特性から、回収電力量を推定する数学モデルを構築した。

4. 不規則波中での数学モデル

海洋中の不規則波、船体運動、コイル運動のパワースペクトラムの線形関係を考慮することで、特定の海象下、波向き、船速での回収電力量が求められる。

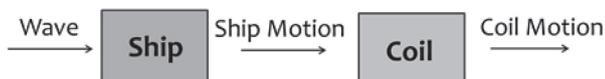


Fig. 3 船体運動とコイル運動の線形応答

この結果と波浪発現頻度確率や波向き遭遇確率といった、実海域を航行する際に船体運動に影響を与える要因を併せて考えることで、対象船が特定海域を航行する際の回収電力量が推定できる。

5. 数学モデルを用いたシミュレーション

構築した数学モデルを基に数値計算を行い、対象船が特定の海象を、定速で航行する場合の回収電力量の推定を行った。

対象船としては垂線間長 175 [m] の SR-108 船型のコンテナ船を用いた。その主要目を Table 1 に示す。

Table 1 船体主要目 (SR-108)

Principal dimensions	Values [unit]
Overall length L	185.50 [m]
Length between p.p. L_{pp}	175.00 [m]
Breadth B	25.40 [m]
Depth D	16.50 [m]
Draft d	9.50 [m]
Block coefficient C_b	0.57
Displacement ∇	2.46×10^4 [t]

コイルについては 100 [kg] のものを 1 つだけ搭載した場合について検討した。Beaufort Scale 6 という比較的荒れた海象の条件下で、それぞれの波向き主方向での回収電力量の平均値を算出した結果の一例を Fig. 4 に示す。

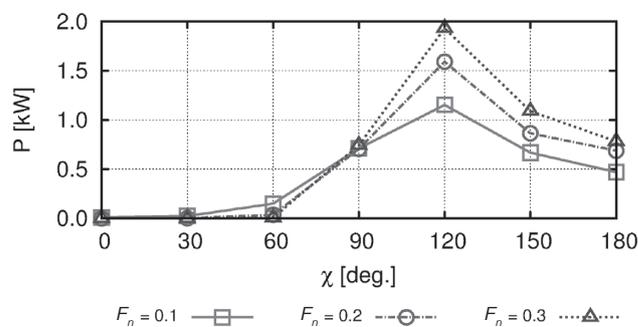


Fig. 4 回収電力量の平均値 (Beaufort Scale 6)

横軸は波向きの主方向を表し、0 [deg.] が追い波、90 [deg.] が横波、180 [deg.] が向かい波である。凡例中の F_n は船速を表すパラメータであり、 $F_n = 0.1$ は約 8 [knots]、 $F_n = 0.2$ は約 16 [knots]、 $F_n = 0.3$ は約 24 [knots] に相当する。

最大回収電力量は約 2.0 [kW] で、一般に居住区等で必要な船内電力は約 200 [kW] 程度であると言われていたため、最大回収電力量で換算した場合、この装置を 100 機搭載すればよいことが分かる。100 機分の装置の重量は船体総重量の 1 [%] 未満であるため、船体運動に影響を与えないと考えられる。

他の海象条件についても計算を行い、波浪発現頻度確率と波向き遭遇確率を考慮することで、対象船が北太平洋全域を約 24 [knots] で航行する場合の回収電力量の平均値は約 0.6 [kW] であることが明らかになった。

6. 模型船を用いた実験 (SR-108)

構築した数学モデルの妥当性を検証するために、大阪大学の船舶海洋試験水槽で模型実験を行った。数学

モデルに準ずる発電装置の模型を製作し、SR-108 船型の模型船に搭載した。向かい波中で前後揺れ、上下揺れ、縦揺れ運動を自由にして実船換算で約 20 [knots] の条件下で模型船を曳航した。模型船の主要目を Table 2 に示す。本実験ではコイル模型の重量は船体重量の約 0.2 [%] とした。

Table 2 模型船主要目 (SR-108)

Principal dimensions	Values [unit]
Length between p.p. L_{pp}	4.00 [m]
Breadth B	0.59 [m]
Draft d	0.21 [m]
Block coefficient C_b	0.56
Displacement ∇	276.90 [kg]

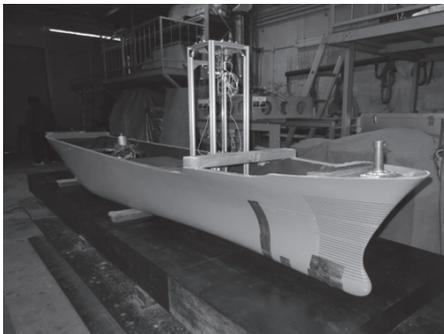


Fig. 5 供試船型 (SR-108)

造波機を用いて規則波を造り、その中で模型船を曳航し船体が運動した際の、船体とコイルの運動について評価を行った。Fig. 6 は船体運動の計測結果である。上図における横軸は入射波長 λ を船の長さ L で除したものを表し、縦軸は入射波振幅 ζ_a に対する船体の運動振幅 Z_b を示している。

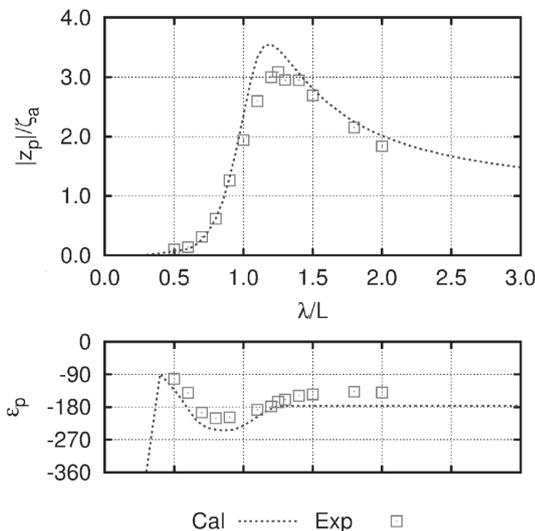


Fig. 6 発電機設置部での船体運動の応答関数 (SR-108)

模型船での実験結果より、実機スケールでの船体の運動が推定できる。例えば実船の垂線間長と同じ長さの波長 175 [m] (横軸 $\lambda/L=1.0$)、波高が 1 [m] の波が入射した際、発電機設置部において船体は鉛直方向に約 2 [m] (縦軸 $|Z_p|/\zeta_a=2.0$) の振幅で運動するということがこの結果から予想できる。

船体上でのコイルの運動についても同様の評価を行った。Fig. 7 にその結果が示されており、横軸は入射波長 λ を船の長さ L で除したものを表し、縦軸は入射波振幅 ζ_a に対するコイルの運動振幅 Z_r である。ピーク付近では入射波振幅に対するコイルの運動振幅の比が約 12 倍程度となっており、コイルの運動が大きくなりすぎていることがわかる。これは実船のスケールを考えた場合少し現実性に欠けてしまう。コイルの運動振幅は作用する減衰力の減衰力係数に左右されるため、減衰力係数を上手く調整することでコイルの運動を現実的な範囲に抑える、ということが次回への実験の課題として残った。しかしながら数値計算結果と実験結果がよく一致していることから、構築した数学モデルの妥当性を確認することができた。

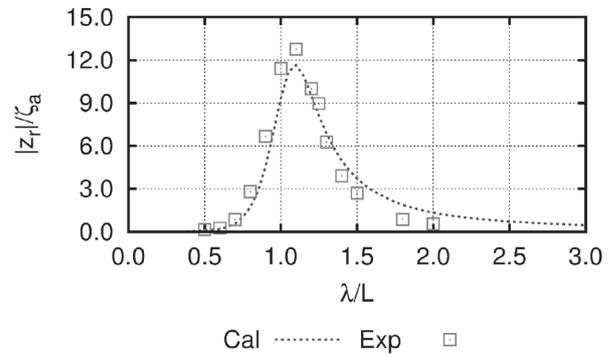


Fig. 7 船体上でのコイルの応答振幅 (SR-108)

7. 模型船を用いた実験 (R-201412)

SR-108 船型を用いて実施した実験より、数学モデルの妥当性を確認することができた。しかしながらコイルの運動振幅等で少し現実性に欠ける箇所が見られた。本システムの有用性を検討するため、より現実に近い条件下での模型実験を実施した。模型船についても、より現代のコンテナ船に近い船型をしたものに変更し、コイルの重量は船体重量の約 1 [%] とした。向かい波中で前後揺れ、上下揺れ、縦揺れ運動を自由にして実船換算で約 25 [knots] の条件下で模型船を曳航した。模型船の主要目を Table 3 に示す。

Table 3 模型船主要目 (R-201412)

Principal dimensions	Values [unit]
Length between p.p. L_{pp}	3.50 [m]
Breadth B	0.53 [m]
Draft d	0.17 [m]
Block coefficient C_b	0.61
Displacement ∇	192.78 [kg]

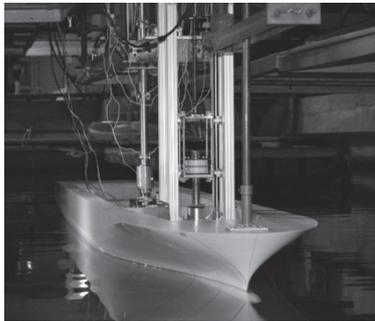


Fig. 8 供試船型 (R-201412)

以下に数値計算と模型実験の比較結果を示す。Fig. 9 は船体運動の結果である。実験結果の凡例のうち、丸印はコイルを固定して模型船を曳航した際の結果で、四角印はコイルを模型船上で自由に運動させた際のものである。これらの結果にほとんど相違が見られないことから、コイル運動は船体運動に影響を与えないということを確認することができる。

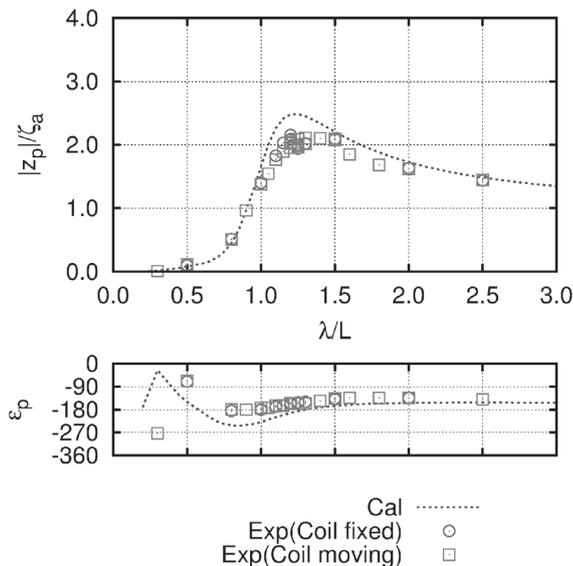


Fig. 9 発電機設置部での船体運動の応答関数 (R-201412)

Fig. 10 は船体上でのコイル運動の結果であり、減衰力係数を調整することでコイルの運動振幅が現実的な範囲で抑えられていることがわかる。また数学モデルの妥当性も再度確認することができた。

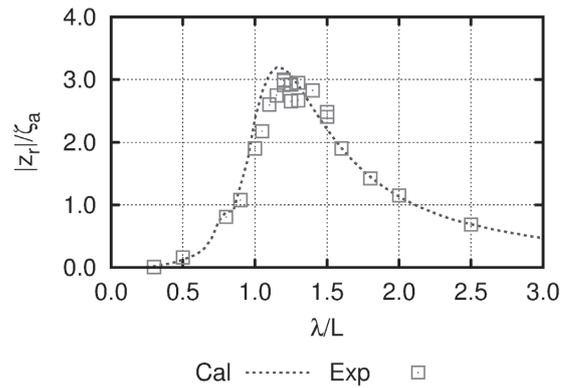


Fig. 10 船体上でのコイルの応答振幅 (R-201412)

コイルでの回収電力量に関しても検討を行った。一般に船舶が波浪中を航行すると、船体にかかる抵抗は波が全くない平水中と比べて増加する。船舶工学の分野ではこれを「波浪中抵抗増加」と呼び、この増加量を精度よく推定したり、それにより損失するエネルギーを少しでも減らすため、多くの取り組みがなされている。波浪中抵抗増加によるエネルギーロスに対する、本システムのエネルギー回収量の比率を「エネルギー回収率」と定義し、回収効率を精査した。その結果が Fig. 11 に示されており、エネルギー回収率は最大で約 15 [%] 程度になることがわかった。

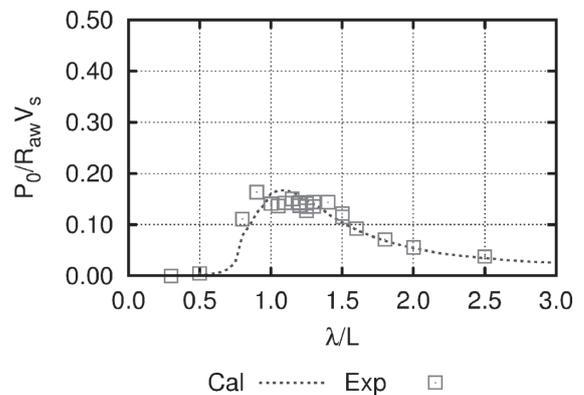


Fig. 11 システムでのエネルギー回収率 (R-201412)

8. まとめと今後の課題

リニア発電機を用いた船体の運動エネルギー回収システムの開発について検討した。電磁気学と運動力学に基づいて船体上でのコイルの運動や回収電力量の数学モデルを構築し、模型実験を行うことでその妥当性を検証した。

数学モデルに基づいた発電量の推定を SR-108 船型のコンテナ船を用いて行った。船体が 100 [kg] のコイルを搭載して北太平洋を約 25 [knots] の定速で航

行する場合、平均回収電力量は約 0.6 [kW] となることが明らかになった。

数学モデルの妥当性を確認するため、SR-108 船型の模型船とコイル模型を用いて、試験水槽での実験を行った。実験ではモデルの妥当性は確認できたものの、コイルに働く減衰力が小さかったため、コイルの運動振幅が現実的な範囲に抑えられなかった。

より現実的な条件下での実験を行うため、R-201412 船型を用いた実験では、コイルと並列に接続された抵抗素子の抵抗値を小さくすることで、電気的な減衰力を増大させ、コイルの振幅を現実的な範囲に抑えた。実験値から算出した回収電力量を、波浪中抵抗増加の数値計算結果を用いて評価することで、最大で波浪中抵抗増加により船体が失うエネルギーの 15 [%] 程度を本システムで回収できることが明らかになった。波浪中抵抗増加は実海域ではシーマージンに相当するため、この評価結果は実船スケールにも適用でき、更なる省エネ船開発への可能性を秘めた結果であると言える。

これらを踏まえた今後の課題としては、船体への入射波方向を変更した際の数学モデルの妥当性の検証、実用化に向けたばね定数の可変システムや装置の複数配置、電力の貯蓄方法等の検討などが挙げられる。

〈謝辞〉

本研究はジャパンマリユナイテッド株式会社技術研究所と共同研究の下、実施したものであり、ミーティング等で研究をサポートして頂いた同研究所田中寿夫様、吉田尚史様に深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり熱心にご指導をいただいた箕浦宗彦准教授、柏木正教授にもこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) 内藤林、檜垣祥市、加藤淳、水野滋也、山森隆江：船首固定翼による波浪中抵抗増加の減少及び推力の発生に関する研究、関西造船協会誌第 235 号、2001, pp.79-89.
- 2) David Elwood, Solomon C. Yim, and Joe Prudell et.al. : Design, Construction, and Ocean Testing of a Taut-moored Dualbody Wave Energy Converter with a Linear Generator Power Take-off, Renewable Energy, 2010, vol. 35.
- 3) K. Rhinefranka, E.B. Agamloha and A. von Jouannea et.al. : Novel Ocean Energy Permanent Magnet Linear Generator Buoy, Renewable Energy, vol. 31, 2006, pp. 1279-1298.
- 4) Kashiwagi, M., Mizokami, S., Yasukawa, H. and Fukushima, Y. : Prediction of Wave Pressure and Loads on Actual Ships by the Enhanced Unified Theory, Proc. of 23rd International Symposium on Naval Hydrodynamics, 2000, pp.95-109.
- 5) Nathan Tom : Confirmation of a Nonlinear Model Predictive Control Strategy Applied to a Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Conversion, Proc. of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE) , OMAE 2014-24711, 2014.
- 6) S. Naito : Effect of Bow Wings on Ship Propulsion, CD Proc. of 2nd International Symposium on Aqua Bio Mechanism, S.6-08, 2003.
- 7) Soding H. : Global Seaway Statistics, Schriftenreihe Schbau Report 610, TU Hamburg-Harburg, 2001.



日本郵船株式会社

(船舶海洋 平成 25 年卒 27 年前期)