

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23246151

研究課題名(和文) 定時性、耐波浪衝撃性を核とする新しい高速海上輸送システムの研究

研究課題名(英文) Fast sea transportation system with superior seaworthiness and economic efficiency

研究代表者

吉田 基樹 (YOSHIDA, MOTOKI)

九州大学・経済学研究科(研究院)・教授

研究者番号：20404080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,600,000円

研究成果の概要(和文)：Resonance-Free SWATH (RFS)減揺船型による新しい高速海上輸送システムを実験、理論計算及び時間領域シミュレーション法を用いて構築した。まず、翼揚力非定常特性の解明を経て、従来のPD制御に加えスライディング・モード制御の効果を示し、RFS船体動揺を極限まで低減した。次に、RFSの波浪中抵抗増加を検討し、それを極限まで低減する方策を見出し、燃費低減に繋げた。更に、輸送品質(運航時間遅れ、スラミング回数)の解析を行って、RFSが従来コンテナ船に比べ圧倒的に優位であることを示した上で、投資額、貨物量、貨物品目、運航原価、貨物運賃などのRFS輸送システム経済性を評価した。

研究成果の概要(英文)：It has been verified by means of theoretical calculations, experiments and time domain simulations that a "Resonance-Free SWATH" as the oceangoing large fast ship has the superior seaworthiness. Firstly, the unsteady characteristics of lift generated by small control fins were clarified. Secondly, the latent ability of RFS for seaworthiness is not completely made use in the case of PD control acts as the large restoring force. A nonlinear sliding mode control has been applied to make up for deficiencies in PD control. As a result, the effectiveness of the sliding mode control has been confirmed. Thirdly, very small added resistance due to waves of RFS has been discussed. Fourthly, the quality of RFS transportation system has been discussed. The quality regarding the navigation time and the number of slammings are very good. Finally, superior economic potential of RFS transportation system has been clarified.

研究分野：船舶工学

キーワード：海洋流体工学 波浪中運動制御 高速船 耐航性 定時性 耐波浪衝撃性 輸送効率 経済性

1. 研究開始当初の背景

大型高速船の開発競争において、日本は欧米諸国に比べ遅れをとっている。本研究では、画期的な Resonance-Free SWATH (RFS)減揺船型を導入し、新しい高速海上輸送システムを創案する。

2. 研究の目的

従来のコンテナ船、フェリー等の海上輸送では、かなりの確率で波浪による欠航、到着遅れ或は貨物破損リスクがあり、「輸送品質」観点を欠く。本研究は、「定時性」及び「耐波浪衝撃性」という輸送品質概念を核として、Sea state 7 (有義波高 6~9m)の海洋において耐航性つまり波浪中船体運動性能および高速航行性能が良好な速力 40kts、貨物積載量 5,000t 以上の大洋航行大型高速船基本コンセプトの確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 翼非線形制御による動揺就中ピッチ動揺の極限までの低減、(2) 波浪中抵抗増加の解析、(3) 具体的海上輸送システムの輸送品質及び経済性評価の各項目に関し、実験、理論計算及び時間領域シミュレーションの解析手法を用いる。

4. 研究成果

(1) 翼非定常揚力特性の解明及び翼非線形制御による動揺就中ピッチ動揺の極限までの低減

RFS の波浪中運動応答を、小型水中翼を用いた非線形スライディング・モード制御により極限まで低減するため、時間領域制御シミュレーターを開発し、各種スライディング・モード制御法の効果を比較検討した。同時に正面向波規則波中模型航走実験による運動測定を行ない、以下の通りの結論が得られた。

翼揚力の非定常特性特に流体力が定まるまでの時間遅れを、制御理論上の無駄時間近似法で表現した時間領域シミュレーターを構築した。時間領域シミュレーターを用いて5種類の制御法の運動制御シミュレーションを行った結果、スライディング・モード制御を行うと運動振幅を低減できることを確認できた。特に、図1の通り、ヒープ及びピッチ連成スライディング・モード制御 (SM4)を行った場合に、ヒープ及びピッチ運動振幅とも PD 制御の場合に比べ半分以下にまで低減できることが分った。

(2) 波浪中抵抗増加の解析

RFS の波浪中抵抗増加は、運動が従来コンテナ船の数十分の1にまで低減される割には極小とはならなかった。そこで、この理由を理論計算により解明を試みた。Strip 法の計算によると、波浪中抵抗増加の主な成分は strut 前、後部からの散乱波部分であることが示された。また、3D-Rankine Panel 法の計算による RFS の造波する diffraction 波の計算でも、strut なしの場合に比べ、strut ありでは strut

前縁部から大きな造波が起きていることが分った。従って、波浪中抵抗増加の極限までの低減には、現在の模型で使われた楕円柱数学式形状ではなく、実船 strut にはたとえばレンズ型或はコンテナ船首型のように尖鋭化させる必要があると結論づけた。更に、3D-Rankine Panel 法計算を実行する中で、放射条件を数値的に満足させる必要がある。しかし、既存法では追波、斜波など低速、低周波数領域で放射条件が精度よく満足されず、計算結果が不安定になる欠点があった。そこで、本研究では、Sommerfeld 放射条件を導出して適用し、この問題を解決した。

(3) 具体的海上輸送システムの輸送品質及び経済性評価

まず、RFS 輸送システムの輸送品質として、「定時性」及び「耐波浪衝撃性(貨物破損性)」を考え、その両者を波浪による航海時間遅れ、船体スラミング回数という尺度で評価した。従来コンテナ船と RFS との比較、評価を、北太平洋航路 Tokyo~Oakland 4,554 nm を 39 分割し、運航の時刻歴シミュレーションにより実施した。ここで、大阪大学 RIOS 研究結果の海象時系列(緯度経度 2.5 deg 刻み、1 hour 毎、30 年分)を適用した。従来コンテナ船 20~23 knots、RFS 40 knots である。運航は、大圏航路に沿い、変針を考えず、減速のみ考慮した。更に、減速についても、自然減速を考慮せず、船長指示による意識的減速のみを考慮し、(船首加速度 $>0.8 G$ の確率) $>1/1,000$ の時減速、(船底が海面上に露出かつ船首速度 $>0.08 (gL)^{1/2}$ の確率) $>1/100$ の時スラミング発生のため減速、(プロペラ上部 1/3 が海面上に露出の確率) $>1/10$ の時プロペラ・レーシング発生のため減速とした。この航海時間遅れシミュレーション結果を図3に示す。図より、本シミュレーション結果はおおよそ従来コンテナ船の実績値 (NYK Phoenix) と一致することが分る。従来コンテナ船の運航では、図の通り、かなりの確率で長時間の遅れが発生するが、RFS の運航遅れは1年を通じて冬、夏、西航、東航とも皆無である。また、スラミング回数シミュレーション結果を図4に示す。図より、冬季の西航では、従来コンテナ船は極めて大きな頻度でスラミングを受け、貨物破損を発生させるが、RFS ではスラミングも皆無であることが分る。即ち、従来コンテナ船に比べ、RFS の極めて優れた輸送品質特性が示された。

次に、経済性に関する検討を行った、表1の通り、本 RFS 輸送システムにライター方式を導入することにより、コンテナ・ターミナルやバースを始め従来輸送設備・内陸リンクの大部分を使用できるように設計した。従って、新たな投資はほぼ RFS 建造費に限られる。太平洋往復各1便の場合、RFS は2隻が必要であるので、投資額は 672 億円となる。次に、運ぶべき貨物であるが、高付加価値の航空貨

物を調査解析すると、往復それぞれ 5,400 t/週を航空貨物から確保できる見通しを得た。つまり、現在航空貨物の海上輸送シフトが単価 1~3 円/g 以上の高付加価値貨物を中心に起こりつつあり、その品種は電化製品、家庭用機器、事務機器、医療機器、産業用機器、医薬品、衣類、食料品（輸入）、書類、半製品等である。更に、原価を直接費と間接費に分け、前者を修理費（舶用品、潤滑油等）、港湾費（入港費、水先料金、岸壁使用料、クレーン使用料等）、保険費、人件費（日本人 20 名/隻）、燃料費（144 g/PS h）、雑費、コンテナ・ターミナル費、後者を直接費の 10%とした。原価計算結果をもとに、投資回収年数を 3 年又は 5 年とした場合の設定すべき RFS 貨物運賃を図 5 に示す。図から、投資回収年数 3~5 年の場合には、RFS 貨物運賃を約 80 円弱/t-貨物に設定すればよいことが分る。この運賃は、従来コンテナ船をはるかに上回る RFS 輸送品質競争力と、現状航空貨物運賃 300~350 円/t-貨物を大きく下回る RFS 原価競争力とを勘案して、十分に可能な価格設定であると考えられる。即ち、RFS 輸送システムの優れた経済性を示し得た。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 5 件)

岩下英嗣, 周波数領域ランキンパネル法の放射条件について, *日本船舶海洋工学会論文集第 23 号* 予定. 査読有

岩下英嗣, 周波数領域ランキンパネル法による周波数領域耐航性能計算, *日本船舶海洋工学会論文集第 23 号* 予定. 査読有

Motoki Yoshida, Hidetsugu Iwashita, Masamitsu Kanda, Hajime Kihara, Takeshi Kinoshita, Unsteady characteristics of lift generated by small underwater control fin, *The Royal Institution of Naval Architects, Transactions of RINA, Vol. 158, Part A1, Intl J Maritime Eng, A-51-A-61*, 2016. 査読有

DOI:10.3940/rina.ijme.2016.a1.348

吉田基樹, 梶原宏之, 神田正光, 波浪中 Resonance-Free SWATH 運動の水中翼による非線形制御, *日本船舶海洋工学会論文集第 22 号, 119-128*, 2015. 査読有

DOI:10.2534/jjasnaoe.22.119

Motoki Yoshida, Hajime Kihara, Hidetsugu Iwashita, Masamitsu Kanda, Takeshi Kinoshita, Superior seaworthiness of a Resonance-Free fast oceangoing SWATH, *The Royal Institution of Naval Architects, Transactions of RINA, Vol 156, Part A4, Intl J Maritime Eng, A-315-A-332*, 2014. 査読有

DOI:10.3940/rina.ijme.2014.a4.305

〔学会発表〕(計 10 件)

松木督子, 木原 一, 吉田基樹, 箕浦宗彦, 縦揺れに同調周期を持たない RFS 船型の経済性評価について, *日本船舶海洋工学会講演論文*, 2015.11.17. ,東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区)

Hiroyuki Kajiwara, Masamitsu Kanda and Motoki Yoshida, Sliding-Mode control system for an experimental model with Resonance-Free SWATH, *Proc. 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2015*, 2015.06. ,(St.John'a,Canada) 査読有,

梶原宏之, 吉田基樹, Resonance-Free SWATH におけるピッチ運動低減のための制御技術, *日本船舶海洋工学会講演論文*, 2015.05.25. ,神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

梶原宏之, 神田雅光, 吉田基樹, Resonance-Free SWATH におけるピッチ運動低減のための Sliding-Mode 制御技術について, *日本船舶海洋工学会第 27 回推進性能・運動性能合同研究会講演論文*, 2015.01.22. ,(神奈川県横須賀市)

梶原宏之, 神田雅光, 大石剛央, 吉田基樹, Resonance-Free SWATH に対する Sliding-mode 制御系設計, *日本船舶海洋工学会講演論文*, 2014.12.21. ,長崎ブリックホール (長崎県長崎市)

Motoki Yoshida, Masamitsu Kanda, Hajime Kihara, Hidetsugu Iwashita and Takeshi Kinoshita, Unsteady characteristics of lift generated by small underwater controlling fins, *Proc. 10th Symposium on High Speed Marine Vehicles, Naples, (HSMV2014)*, 2014.10.16. ,(Naples,Italy) 査読有

Go Oishi, Hidetsugu Iwashita, Masamitsu Kanda, Motoki Yoshida, Hajime Kihara and Takeshi Kinoshita, Lift characteristics of controlling fins of Resonance-Free SWATH, *Proc. 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2014)*, 2014.06.10. ,(San Francisco,USA) 査読有

神田雅光, 岩下英嗣, 大石剛央, 吉田基樹, 木原 一, 木下 健, Resonance-Free SWATH 水中翼の揚力特性, *日本船舶海洋工学会運動性能研究会講演論文*, 2014.06.06. ,(三重県伊佐市)

M. Yoshida, H. Kihara, H. Iwashita and T. Kinoshita, Seaworthiness of Resonance-Free SWATH with movable fins as an oceangoing fast ship, *Proc. 11th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST2011)*, 2011.09.28. ,(CALIFORNIA,USA) 査読有

M. Yoshida, H. Iwashita, H. Kihara and T. Kinoshita, Seaworthiness of Resonance-Free SWATH as an oceangoing fast ship, *Proc. 9th symposium on high speed marine vehicles (HSMV2011)*, 2011.05.26. ,(Istanbul,turkiye) 査読有

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 基樹 (YOSHIDA MOTOKI)
九州大学・大学院経済学研究院・教授
研究者番号：20404080

(2) 研究分担者

木下 健 (KINOSHITA TAKESHI)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：70107366

(3) 研究分担者

梶原 宏之 (KAJIWARA HIROYUKI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30114862

(4) 研究分担者

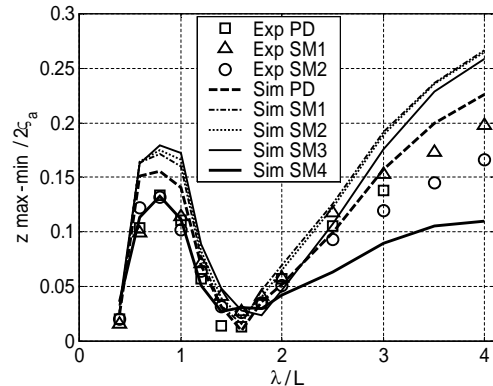
木原 一 (KIHARA HAJIME)
防衛大学校・機械システム工学科・教授
研究者番号：40283717

(5) 研究分担者

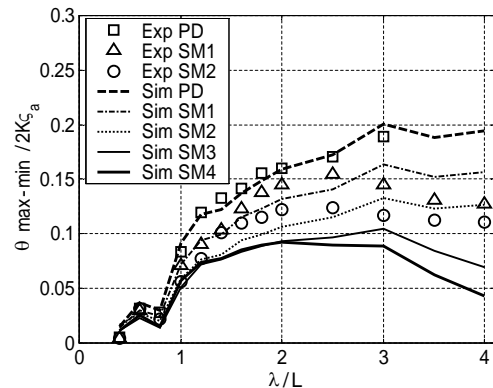
岩下 英嗣 (IWASHITA HIDETSUGU)
広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60223393

(6) 研究分担者

神田雅光 (KANDA MASAMITSU)
株式会社三井造船昭島研究所
研究者番号：00561573



(a) ヒープ動揺



(b) ピッチ動揺

図 1 スライディング・モード制御の効果

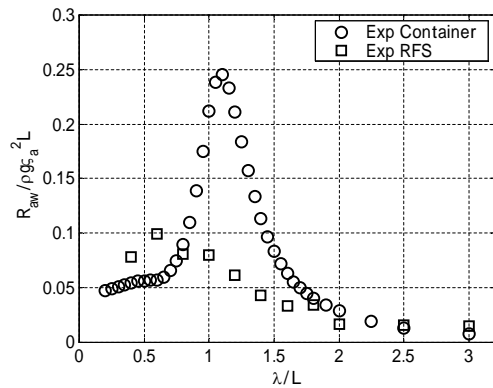


図 2 向波規則波中抵抗増加

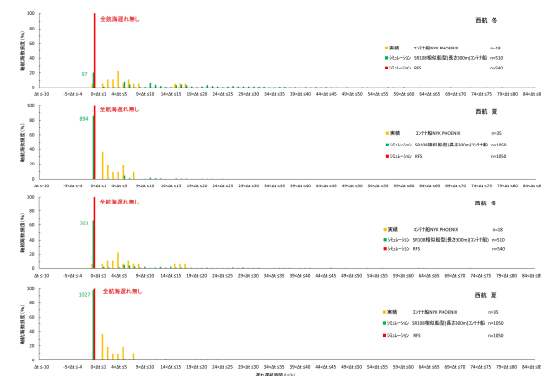


図 3 運航遅れ時間のシミュレーション結果

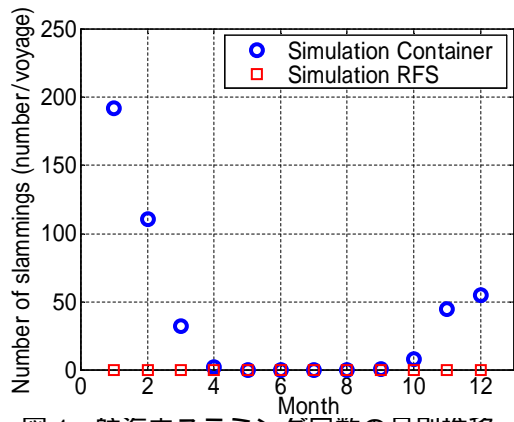


図4 航海中スラミング回数の月別推移

表1 RFSの主要目

| |
|---|
| Displacement tonnage: 24,000 t |
| Light weight: 10,367 t |
| Power plants: 3,157 t |
| Dead weight: 13,633 t |
| Lighter: 1,000 t |
| Payload: 5,400 t, 540 containers (40 ft) |
| Fuel: 6,833 t |
| Upper hull: 200 m length, 55 m breadth |
| Lower hull: 230 m length, 8.85 m maximum diameter |
| Strut: 90 m length, 4.425 m maximum breadth |
| Draft: 12.85 m |
| Speed: 40 knots |
| Resistance: 810 tf |
| Main engine: 8 gas turbines (44,000 HP/turbine), total 352,000 HP |
| Propulsion: 8 contra-rotating propellers |
| Cruising distance: 4,800 nautical miles (Pacific Ocean) |
| Controlling fin: 8 fins, total fin area: 160 m ² |

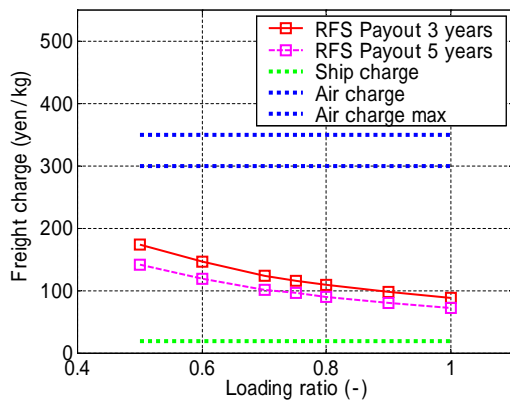


図5 RFS 輸送システムの損益