

機関番号：17102

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19206093

研究課題名 (和文) 縦揺れに同調周期を持たない大型高速 SWATH の研究

研究課題名 (英文) On the Resonance-Free SWATH as an oceangoing fast ship

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

研究成果の概要 (和文)：縦揺れに同調周期を持たない大型高速 SWATH (RFS) 船型が有義波高 6～9m の海洋において良好な耐航性を持つ事を理論及び実験により検証した。まず、駆動翼による運動制御効果に関する理論構築及び実験を行なった後、翼制御された RFS の運動を他船型 (単胴船、双胴船、三胴船) と理論及び実験で比較し、RFS の運動が他船型に比べ極めて小さいことを示した。更に、RFS が持つ負の復原力という特徴を極限まで生かす VSS 非線形制御の理論構築及び実験を行ない、その可能性を示した。

研究成果の概要 (英文)：It is verified by means of theoretical and experimental analyses that a “Resonance-Free SWATH” as the oceangoing large fast ship has the negative restoring moments, because of the extraordinary small water plane area. The RFS is designed to cross 4,800 nautical miles of Pacific Ocean in 5 days punctually at a high speed of 40 knots, with the good seaworthiness such as no speed reduction or absolutely no slamming even in the rough sea. As the result of theoretical estimation and experiment, the maximum stable gain constants for PD control of RFS motions are determined and motion responses of RFS are significantly reduced. Furthermore, non-linear VSS control system is introduced to make a good use of negative restoring moment of RFS. Also experiments in model basin and theoretical predictions are carried out to examine the lowest limit of motion responses in waves. The results in regular and irregular head waves are compared with those of various hull forms, such as mono-hull, ordinary SWATH or trimaran. The predominance of the RFS regarding seaworthiness is pointed out in the conclusion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2008年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：船舶工学

科研費の分科・細目：総合工学・海洋流体工学

キーワード：高速船、物流、定時性、耐航性、波浪中運動性能、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 TSL プロジェクト以後見るべきものがなく、米、英、欧、韓諸国に比べ遅れをとっていた。

2. 研究の目的

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、就中それを実現するための「縦揺れに同調周期を持たない大型高速 SWATH (Resonance-Free SWATH: RFS)」船型の優位性検証を研究目的とした。

3. 研究の方法

各種理論予測及び模型を用いた水槽実験により船体に働くラディエーション流体力、波強制力、運動振幅、位相差、或は非定常翼揚力の値を求め、種々の船型でそれらを比較した。

4. 研究成果

(1) 駆動フィンによる運動制御

(1-1) PD 制御理論構築及び模型実験

まず、PD 制御の理論においては、運動方程式にフィン揚力特性、フィン揚力による制御力及び制御系遅れを考慮し、この運動方程式を制御ブロック図に表現した。ここで、フィン揚力特性は、非定常特性並びにフィン-フィン及びフィン-双胴間干渉を含み、フィン有、無の RFS を対象とした理論計算又は実験において得られる流体力係数から計算する。また、ヒープ制御を固定してピッチのみを制御するステップ 1 とピッチ制御を固定してヒープのみを制御するステップ 2 の 2 段階法を工夫することによりステップ毎の一巡伝達関数を求め、ボード線図を描き、RFS に対して安定で最大の D 制御ゲイン値を求めた。一方、実験では、駆動フィン装置を備える RFS 模型を用いた静水中航走インパルス応答実験により、安定で最大の D 制御ゲイン定数を求めた。理論と実験とで得られた安定最大ゲイン値はよく一致した。これらの制御ゲイン定数を用いて運動方程式による運動応答計算を行なうと共に、正面向波規則波中をフルード数 $F_n=0.43$ で航走する模型の運動測定実験を実施した。この結果、理論予測値と実験値はよく一致し、PD 制御により RFS の運動応答は従来船型の応答に比べ大きく低減されることが分かった。

(1-2) 非線形 VSS 制御方式の開発

次に、負の復原力の運動に対する優位性を究極的に生かすため、図 1 の通り、非線形 VSS 制御法を創案した。本理論において、ピッチ運動における変位 θ と角速度 $\dot{\theta}$ の関係を表し、これにより制御モードをスライドさせる関数を $\sigma = \theta(\dot{\theta} + m_1\theta)$ と定義した。本制御では、 σ の正負によりピッチ制御 P ゲイン K_{P5} を $-q K_{P5}$ にスライドさせる。制御ブロック図に基づく時間領域シミュレーションによりパラメーター m_1 及び q の安定な範囲を求め、同時に運動応答振幅を計算した。一方、実験

では、モードのスライディング以外は PD 制御と同様の運動応答測定実験を行なった。これらの結果より、制御系のスライディング時間に余裕のあると考えられる実船において VSS 制御を工夫すると、RFS 運動応答を更に低減できる可能性があることが分かった。

(2) 波浪中運動性能

4 種類の船型の波浪中運動応答を水槽模型実験及び理論予測により比較した。これらの船型のうち、通常型 SWATH 及び RFS の模型は、装着された駆動フィンにより運動が PD 制御された。PD 制御では、通常型 SWATH 及び RFS それぞれに対する最小の P ゲイン定数が決められた上で、安定最大の D ゲイン定数が系統的に探索され、制御に適用された。

その結果、まず、正面向波規則波中の実験及び理論予測から以下のことが分かった。即ち、波長 λ /船長 L 比に対するヒープ及びピッチ運動結果比較は図 2 及び図 3 の通りとなった。重要な波長域 $\lambda/L=1.0-2.0$ における PD 制御された RFS の運動応答は、単胴船或は三胴船に比べヒープ運動で $1/57 \sim 1/22$ まで、ピッチ運動では $1/8$ まで大きく低減される。従来減揺型船型とされてきた通常型 SWATH と比べても、RFS 運動応答は、ヒープ運動で $1/16 \sim 1/5$ まで、ピッチ運動で $2/3$ まで低減される。また、図 4 の通り、実海域尺度で波高 8 m という大きな波の中においても、RFS のフィン或は船首位置の相対水位、又は船首加速度などの耐航性指標は極めて良好であると推定される。

次に、正面向波不規則波中の実験及び理論予測から、以下の通り考察される。即ち、フィン揚力により PD 制御された RFS 模型は、図 5 の通り、実海域尺度で波高 10 m 近い大きな波を含む波浪中においても、スラミング、プロペラ空転、海水打込み、上部デッキ下面の波浪衝撃等が皆無で、極めて安定した高速航走が可能であった。また、実験で造波した不規則波は、目標とした ISSC スペクトルを精度よく模擬できたものであったが、通常型 SWATH 及び RFS の運動応答実験結果は、図 6 及び図 7 の通り、それらの規則波中応答関数と ISSC スペクトルとを重ね合せ計算した応答予測値と極めてよく一致した。これは、規則波中及び不規則波中双方の良好な実験精度を裏付けるものであろう。更に、実海域尺度の有義波高 8 m 強を持つ不規則波中において、RFS 運動応答の有義値或は $1/1000$ 最大期待値通常型 SWATH に比べヒープ運動で $1/4$ 、ピッチ運動で $2/3$ まで低減される。

なお、上述した各種船型における運動応答振幅値の比較を総括して表 1 に示す。

(3) 理論計算法の開発

(3-1) ストリップ法

小型水中翼による揚力を準定常的に考慮し、ディフラクションの境界値問題を近似的に解いて波強制力を計算し、かつ双胴間での流体力の干渉効果を修正するストリップ法を開発した。本法を通常型 SWATH 及び RFS に適用した。その結果、波のエネルギーが双胴間に閉じ込められるストリップ法に固有の現象を回避でき、前進速度の有無に応じて計算法を使い分けることなく実用的計算が可能となった。

(3-2) 3次元ランキン・パネル計算法の開発

双胴（非揚力体）と小型水中翼（揚力体）との自由表面影響下での流体力学的干渉を考慮した計算コードを開発した。特に、双胴間の翼と胴との干渉の解析を行い実験値と比較した。

更に、単胴船或は三胴船に本法を適用するために、トランサム・スターンを持つ場合の船尾流場の取扱い法を解析した。

(4) 成果のまとめ

まず、Sea state 7（有義波高 6~9m）の海洋において耐航性が十分に良好な速力 40 knots、貨物積載量 5,000t 以上の大洋航行大型高速船としての RFS 船型の優位性を理論及び模型実験の両面から実証した。また、模型のみならず RFS の実船型も最適設計案を提示し、抵抗、推進、構造強度計算の計算前提とした。更に、RFS 制御運動に関し、従来は実船スケールの試作船でしか試験できなかった翼制御シミュレーションを模型による水槽実験で可能とし、かつ理論化も行い、極めて簡便に設計計算を行なえる可能性を示した。これらは造船学界、造船業界への波及効果が大きいと考えられる。

次に、設計ツールとしての計算コードもストリップ法、3次元法、翼制御並びに揚力非定常及び干渉効果を考慮した運動計算理論などを開発、整備した。

更に、流体力、運動、翼揚力、耐航性全般指標などの 4 船型における諸データを蓄積、整備し、設計システムに組込む準備を整えた。

従来、船体運動に関して積極的な低減を目指す研究は極めて少なかったが、本研究の結果、RFS 船型アイデアにより大型高速船の運動振幅を場合により数十分の一から数分の一まで低減することが可能なことを世界で初めて実証した。

これにより、我国においても欧米等に負けず大型高速船に関するより進んだフィージビリティ研究の促進が図られ、造船会社研究所の参加も得て、時段階開発の計画が可能となり、次期科学研究費補助金・基盤（A）研究課題として実現した。

今後は、RFS 船型に関するより実用的な詳細、精密な諸データを追加し、大型高速船単

体のみならず世界の物流システムとして RFS が従来の中速コンテナ船、航空機に比して如何なる特長があり、如何なる輸送形態をとるべきかを検討する必要がある。

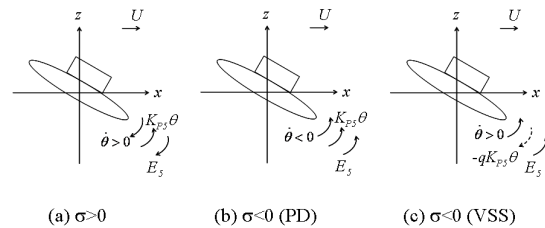


図 1 非線形 VSS 制御方式の模式図

(Pitch 運動する船が波強制力 E_5 に従って船首下げ方向に向う状態(a)から反転し、船首下げの位置にはあるが船首を上げつつある場合(b)には、多少の位相差はあるが波強制力 E_5 、船の角速度 $\dot{\theta}$ 及び P ゲインによる復原力 $K_{p5}\theta$ の方向が一致するので、船の運動は助長され、同調現象につながる。そこで、波強制力 E_5 が反転した直後に P ゲインを 0 又は負の値 $-qK_{p5}$ に sliding させ(c)、その後船の位置が 0 近くに回復した時点で P ゲインをもとの正の値に戻す方法。)

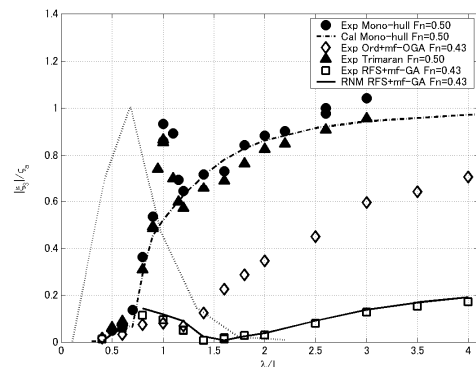


図 2 正面向波規則波中ヒープ運動応答振幅の船型比較

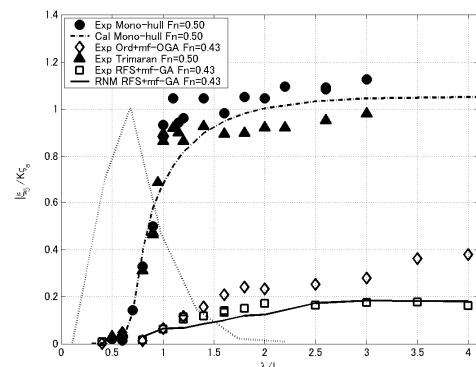


図 3 正面向波規則波中ピッチ運動応答振幅の船型比較

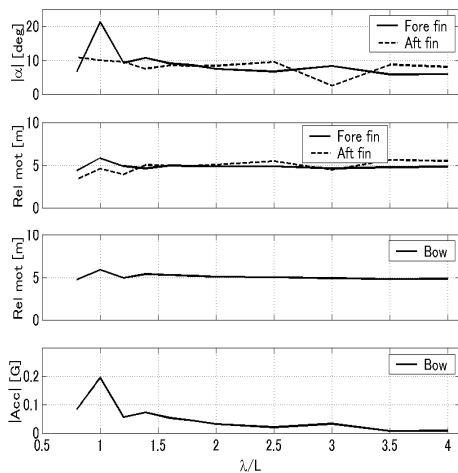


図 4 正面向波規則波中を 40 knots で航走する RFS の耐航性指標

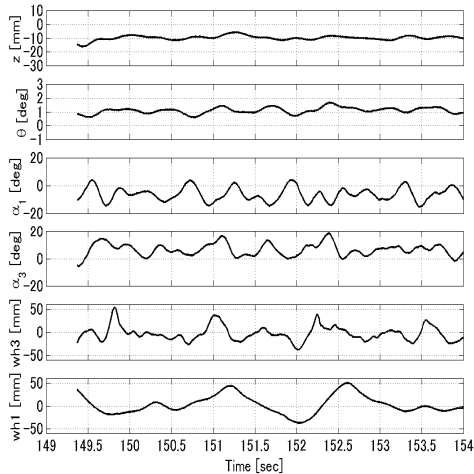


図 5 正面向波不規則波中を 40 knots で航走する RFS の運動応答指標

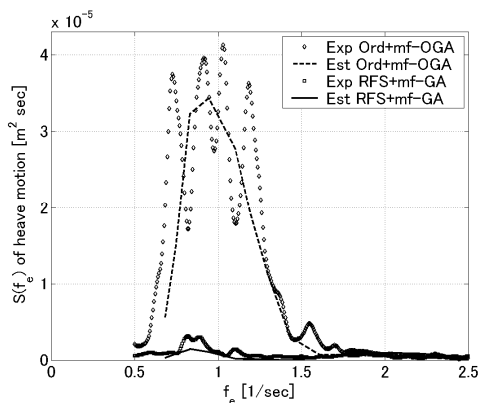


図 6 正面向波不規則波中を $F_n=0.43$ で航走する通常型 SWATH 及び RFS のヒープ運動スペクトル比較

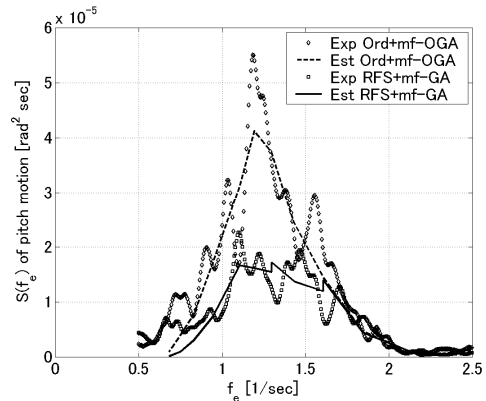


図 7 正面向波不規則波中を $F_n=0.43$ で航走する通常型 SWATH 及び RFS のピッチ運動スペクトル比較

表 1 運動応答の 4 船型比較総括

	Max. wave energy $\lambda/L=1.6$		Important range $\lambda/L=1.0-2.0$		1/1000 max. exp. irregular $H_{1/3}=8$ m	
	Heave	Pitch	Heave	Pitch	Heave	Pitch
Mono-hull Trimaran	57	7	22	8	---	---
Ordinary SWATH	16	1.5	5	1.4	4	1.4
RFS	1	1	1	1	1	1

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)

① 吉田基樹, 岩下英嗣, 木原 一, 木下健, Resonance-Free SWATH の波浪中運動性能, 日本船舶海洋工学会論文集, No. 12, 2010, 89-99. 査読有

② 吉田基樹, 梶正和, 木原 一, 岩下英嗣, 木下 健, Resonance-Free SWATH の駆動 fin による運動制御, 日本船舶海洋工学会論文集, No. 12, 2010, 79-88. 査読有

③ 吉田基樹, 木原 一, 岩下英嗣, 木下健, Resonance-Free SWATH の概念設計と対航性能, 日本船舶海洋工学会論文集, No. 10, 2009, 73-81. 査読有

④ 木原 一, 吉田基樹, 岩下英嗣, 木下健, Resonance-Free SWATH の運動応答解析, 日本船舶海洋工学会論文集, No. 10, 2009, 83-96. 査読有

⑤ M. Elangovan and H. Iwashita, Seakeeping estimations of fast ships with transom stern, Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineers, No. 7, 2008, 195-206. 査読有

〔学会発表〕（計 12 件）

- ① M. Yoshida, H. Iwashita, H. Kihara and T. Kinoshita, Motion control of Resonance-Free SWATH using small movable fins, The Second International Conference on High Speed Marine Vessels, RINA, 106-118, March 3, 2011. 査読有
- ② M. Yoshida, H. Kihara, H. Iwashita, H. Itakura, W. Bao and T. Kinoshita, The effect of controlling fins on the motion of Resonance-Free SWATH (RFS) platform, OMAE 2010-20275, 2010.6.10. 査読有
- ③ H. Kihara, M. Yoshida, H. Iwashita and T. Kinoshita, On the Resonance-Free SWATH as an oceangoing fast ship, FAST 2009, 2009.10.5, 267-278. 査読有
- ④ M. Yoshida, H. Kihara, H. Iwashita, H. Itakura, W. Bao and T. Kinoshita, On the Resonance-Free SWATH (RFS) as an oceangoing large fast platform, OMAE 2009-79103, 2009.6.3. 査読有
- ⑤ M. Yoshida, H. Kihara, H. Iwashita, and T. Kinoshita, On the Resonance-Motion-Free SWATH as an oceangoing fast ship, International Conference on Innovation in High Speed Marine Vessels (RINA), 31-38, January 28, 2009. 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
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

(3)連携研究者

佐野 偉光 (SANO IKOU)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：

(4)研究協力者

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