実海域省エネ装置 STEP の開発

辻本 勝*1、黒田麻利子*1、白石耕一郎*1、佐々木 紀幸*2

内藤 牧雄*3、表 正和*4、野嶋 宣男*4、加賀 正人*4

Development of Energy Saving Device for Actual Seas STEP

by

Masaru TSUJIMOTO, Mariko KURODA, Koichiro SHIRAISHI, Noriyuki SASAKI, Makio NAITO, Masakazu OMOTE, Nobuo NOJIMA and Masato KAGA

Abstract

Technical development on reduction in fuel consumption and CO₂ emission from ships in service is desired for shipping sector. Aiming to improve ship performance in actual seas, research and development for energy saving device for actual seas 'STEP' was carried out.

The concept of STEP is that it does not affect the performance in calm sea. Thereby STEP is equipped in bow and above static swell up level.

The target of the development is set to slender ships such as container ship and RoRo ship. By numerical calculations and tank tests in waves, the shape and the position of STEP were examined and the energy saving effect was estimated. For RoRo vehicle carriers, on board measurement for one and a half years was carried out to make validation for the energy saving effect of STEP. As a result, it was shown that the effect is 3% in the weather condition where Beaufort scale of wind of 6 (the significant wave height is 3m) with the wave direction between ± 90 degrees from heading.

In addition to equipping STEP for new ships, retrofit in dock has been done for RoRo cargo ships.

^{*1}海上技術安全研究所流体設計系、*2株式会社 MTI (研究当時:海上技術安全研究所)、
*3日産専用船株式会社、*4内海造船株式会社 原稿受付 平成 26年7月31日 審 查 日 平成 26年8月22日

目 次

1. はじめに・・・・・46
 ステップのコンセプト・・・・・・・・・・・・・・・・・46
 3. 数値計算による検討・・・・・・・・・・・・・・・・47
3.1 検討対象船舶・・・・・・・・・・・・・・・・47
3.2 ステップの設計条件・・・・・・・・・・47
3.3 水面上形状を考慮した波浪中抵抗増加計算
法48
3.4 数値計算による最適ステップの検討・・・・49
4. 水槽試験の実施・・・・・・・・・・・・・・・49
4.1 水槽試験の概要・・・・・・・・・・・・49
4.2 水槽試験による検討基礎データ収集・・・・49
4.3 小型模型船による調査・・・・・50
4.4 最終ステップ形状の水槽試験・・・・・52
5. ステップの評価・・・・・56
5.1 実海域での抵抗成分の評価・・・・・56
5.2 燃料消費量削減効果の推定·····57
 (6. 実船計測による検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
6.1 実船計測手法······57
6.2 実船計測データ·····58
6.3 実船計測による効果の評価・・・・・58
7. まとめ・・・・・・61
謝辞61
参考文献・・・・・62
付録 レトロフィットの実施・・・・・62

1. はじめに

地球温暖化対策として、二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガスの排出量削減が進められている中、 国際海運分野についても、国際海事機関(IMO) の場で、設計・運航面からの削減方法が検討され、 船舶による汚染の防止のための国際条約

(MARPOL)附属書 VI の一部改正が採択された。 これにより 2013 年 1 月 1 日から新造船に対して エネルギー効率設計指標(EEDI)を一定値以下 にすること、既存船を含む適用対象船に対して船 舶エネルギー効率管理計画書(SEEMP)の船上 保持の義務化が開始された。

船舶から排出される CO₂の量は、ほぼその主機 出力に比例するため、大型船からの排出を低減さ せることが重要である。しかしながら、平水中の 性能については、造船各社により鎬を削って船型 開発が行われているが、実海域性能の向上に関す る研究開発はあまり行われていないのが現状であ る。外航船のような大型船の場合、船長は 150m を越え、平均的な海象状態での波長に対して船長 は2倍以上となる。外洋の波浪を構成する波長の 成分(周波数スペクトラム)を考えると、船長に 対して相対的に波長が短いところでの波浪中抵抗 増加が主要となるため、この短波長域での抵抗増 加を低減させることが実海域性能の向上に効果的 である。

この短波長域での抵抗増加を低減することを目 的に、痩型船を対象に船首水面上に装着する実海 域省エネ装置 STEP (Spray TEaring Plate:ステ ップ)を考案し、設計海象での燃料消費量 2%削 減を目標に開発を行った。水槽試験及び実船計測 によりその効果を評価したので、その内容を報告 する。ステップの装着イメージを図-1.1、1.2 に 示す。



図-1.1 ステップ装着イメージ(コンテナ船)



図-1.2 ステップ装着イメージ(自動車運搬船)

2. ステップのコンセプト

船舶の計画・設計では、船舶が運航する実海域 で主要な影響因子となる波浪影響はシーマージン として考慮される。この波浪影響のうち、波浪中 抵抗増加は水面上形状の影響を大きく受けること が知られており、このことを考慮して水面上形状 を工夫した船型設計も行われている。

ステップの開発にあたり水面上形状の工夫によ り波浪中抵抗増加を低減させることを基本コンセ プトとした。

基本コンセプトでは、 ①痩型船を対象とする ②静的水位上昇より上方に装着する ③入射波の反射を船幅方向に促す こととした。 外航船のような大型船の場合に重要となる短波 長中の抵抗増加は、内藤・上田 ¹⁾により、速度 0 の場合に水線面形状を三角形とする場合が最小で あることが解析的に示されている。このことから、 水面上形状においても三角形形状を構成すること が有効と考えた。

水線面形状は図-2.1 の通り凸型の形状(肥大船)と凹型(痩型船)に大別できる。



水線面形状が凸型の肥大船では形状を変更する ことでしか三角形形状を構成することはできない。 一方、水線面形状が凹型の痩型船では、形状変更 をしなくても付加物により見かけ上の三角形形状 とすることが可能である。このため、痩型船がス テップ装着の対象となる。

波浪中の全抵抗を最小とする設計検討は Sakamoto-Baba²⁾により行われている。波高等に より最適形状が変わるため設計海象を決める必要 があるが、最適水線面形状では、造波抵抗が大き くなるもののその分波浪中抵抗増加を低減させ、 全抵抗が低減する場合があることが示されている。 このようなアイデアもあるが、ステップは水面上 に装着することとし、平水中性能に影響すること がなく設計可能とした。すなわち、船舶が平水中 を航走するときに生じる航走波(静的水位上昇と いう。図-2.2 参照)よりも上方に装着すること で、原理的に平水中性能を悪化させることがない。



図-2.2 船首船体側面と静的水位上昇

波浪中で抵抗が増加するのは、船体運動に より造波することによる抵抗の増加と、船体 からの波の反射・攪乱による抵抗の増加で構 成される。短波長の波では船体運動がほとん ど生じないことから、船体からの反射・攪乱 による抵抗増加が主となる。船体が波を返す とき、船体に作用する力の船尾方向成分が、 抵抗増加である。すなわち船体に沿って上昇 する波をステップにより抑え、同時に波を返 す方向を船幅方向に変えることによりこの 抵抗増加を減少させることができる。

数値計算による検討

ステップを装着することによる実海域性能向上 を評価するため、水面上形状を考慮した波浪中抵 抗増加計算法により、波浪中抵抗増加の低減効果 を推定するとともに、ステップの最適装着位置の 検討を行う^{3),4)}。

3.1 検討対象船舶

対象船舶は、2500TEU コンテナ船と 5000 台積 み自動車運搬船とした。主要目を表-3.1 に示す。

項目	2500 TEU	5000 台積み	
	コンテナ船	自動車運搬船	
垂線間長	188.0 (m)	170.0 (m)	
船幅	32.2 (m)	30.2 (m)	
夏期満載喫水	11.25 (m)	8.95 (m)	
計画船速	abt. 22 (knot)	abt. 19 (knot)	

表-3.1 対象船の主要目

3.2 ステップの設計条件

ステップは、平水中性能に影響を及ぼさず、波 浪中抵抗増加を低減させることを目的とするため、 静的水位上昇位置より上方に装着する。静的水位 上昇位置は船速により異なり、また、装着高さは 喫水に関係するため設計条件を定める必要がある。

ステップ開発の検討時に運航者へのヒアリング を行い、リスクを最小とした安全性が求められる ことから、今回は夏期満載状態を計画船速で航行 する状態を設計条件とする安全設計とした。

波浪の条件は、遭遇波浪の頻度を考え、北太平 洋、北大西洋の平均的な海象に近いビューフォー ト風力階級⁵⁶ (BF6) 相当の向波を対象とした。 ビューフォート風力階級により定めた短期海象を 表-3.2に示す。なお、平均風速は各ビューフォ ート風力階級の中央値とし、有義波高は参考波高 とし、平均波周期(T)は外洋の完全発達波の関 係から、(3.1)式に示す有義波高(H)との関係式 ⁶⁾で求めた。

$$T = 3.86\sqrt{H} \tag{3.1}$$

	/亚/911母 31		
風力	平均風速	有義波高	平均波周期
階級	$V_{_{\scriptscriptstyle W}}[{\sf m/s}]$	<i>H</i> [m]	T [s]
BF3	4.4	0.6	3.0
BF4	6.9	1.0	3.9
BF5	9.8	2.0	5.5
BF6	12.6	3.0	6.7
BF7	15.7	4.0	7.7
BF8	19.0	5.5	9.1

表-3.2 ビューフォート風力階級により定めた 毎期海象

以上より、ステップ設計条件をまとめると以下 となる。

- ・静的水位上昇位置より上方に装着する。
- ・喫水状態、船速を設定する
 一今回は夏期満載状態、計画船速とする。
 ・海象条件を設定する
- -今回はBF6(有義波高3m)相当の向波を対象とする。
- 3.3 水面上形状を考慮した波浪中抵抗増加計算法 設計段階で波浪中抵抗増加に対する水面上形状 を評価する方法としては、Matsumoto et al.^{7),8)} により船首端での静的水位上昇高さの W.L.形状 を用いる方法がある。

水面は静的水位上昇位置を中心として波浪によ り変動するため、波浪中抵抗増加に関する実質の 形状影響は静的水位上昇位置の形状を強く受ける。 そこで、静的水位上昇高さでの形状を静止水面に 投影させ、この投影形状を取り入れることにより、 水面上形状を考慮した。静的水位上昇位置とその 船体形状を投影した水線面形状の概念図を図-3.1に示す。



図-3.1 静的水位上昇と船体形状の投影

外航船のような大型船の場合、船長に対して波長 の短い波(短波長という)の中での波浪中抵抗増加 の推定精度の確保が重要となる。

従来の数値計算法では短波長域での推定精度が

不十分のため、数値計算法に短波長中で行う簡易化 した波浪中水槽試験を組込むことで、十分な推定精 度を確保し、合わせて水面上形状の影響も考慮する ことができる計算法が Tsujimoto et al.⁹⁾により開発 されている。

この方法は波浪中の船体運動をストリップ法に より算出し、規則波中抵抗増加(*R_{AW}*)を、ラディ エーション力とディフラクション力を考慮した丸 尾の式¹⁰⁾で計算(*R_{AWM}*)し、その特異点分布は藤井・ 高橋の方法¹¹⁾に従い平均喫水位置のサブサーフェ スとする。これに短波長域で主として作用するディ フラクション力に関する修正項(*R_{AWR}*)を付加し、 (3.2)式で計算する。

$$R_{AW} = R_{AWM} + R_{AWR} \tag{3.2}$$

 R_{AWR} は一般に反射波抵抗増加と呼ばれるもので、 本手法では短波長域で実施する簡易な水槽試験から速度影響係数 (C_U) を求め、ブラントネス係数 (B_f) 、 喫水周波数影響 (α_d) 、速度影響項 $(1+C_UF_n)$ から (3.3)式の通り計算する。水槽試験を組込むことで、従来数値計算では困難だった水面上形状の影響を評価することができる。

$$R_{AWR} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 B_{max} B_f \alpha_d (1 + C_U F_n)$$
(3.3)

ここで、 ρ :流体密度、g:重力加速度、 ζ_a :波振 幅、 B_{max} :船幅、 $F_n = V / \sqrt{gL_{wl}}$:フルード数、V: 船速、 L_{wl} :水線長である。

本手法により、表-3.1に示すコンテナ船の向 波規則波中抵抗増加を算出した結果を図-3.2に 示す。ここで、 λ :波長であり、規則波中抵抗増 加係数 (K_{AW})を(3.4)式に示す。

$$K_{AW} = \frac{R_{AW}}{4\rho g \zeta_{a}^{2} B_{max}^{2} / L_{wl}}$$
(3.4)

なお、IACS スペクトラム¹²⁾で有義波高 3m、平均 波周期 6.7s (ビューフォート風力階級: BF6 相当) における波の周波数スペクトラム (S) を算出した 結果を図-3.2 に併せて示す。

図-3.2 より、波の周波数スペクトラムとの関係で実海域性能の向上には短波長域の抵抗増加が 重要であり、この短波長域では *R*_{AWR} 成分が大半 を占めることが分かる。



図-3.2 向波規則波中抵抗増加と周波数スペク とトラムの関係(コンテナ船)

3.4 数値計算による最適ステップの検討

3.3 節で示した水面上形状を考慮した波浪中抵 抗増加計算法を用いて最適ステップの検討を行う ことができる。この計算には静的水位上昇の情報 が必要になるが、水槽試験での船側波形の撮影、 もしくはランキンソース法や CFD (Computational Fluids Dynamics)等の数値計算により推 定することができる。





図-3.3 は、表-3.1 に示す自動車運搬船の静的 水位上昇を水槽試験結果から取得したものである。 この静的水位上昇位置の船体形状を静止水面に投 影した水線面形状を図-3.4 に示す。ここで、Z は 上下方向位置を表し、上方が正である。図-3.3 から、静的水位上昇が最大となる位置は S.S. 9.5 付近であり、図-3.4 の投影形状と静止水線面形 状との差から、形状変化が大きい位置は S.S. 9.5 付近であることが分かる。この位置で発生する波 の反射による抵抗増加を低減させるため、ステッ プを S.S. 9.5 から船首側に装着することが有効で ある。

4. 水槽試験の実施

4.1 水槽試験の概要

水槽試験に使用した模型船は、コンテナ船は大 型模型(垂線間長 6.010m)と小型模型(垂線間 長 3.535m)とし、尺度影響調査を行うこととし た。自動車運搬船では、先に実施したコンテナ船 の結果から、尺度影響は見られず小型模型で十分 評価できることから、小型模型で試験を実施した。 模型船の寸法を表-4.1に示す。なお、船首部に アンカー用のボルスターを備えた船舶では、ボル スターに波があたった場合、前方に波が返され、 抵抗となることも考えられる。このため、コンテ ナ船模型ではボルスターを設置した(図-4.1参 照)。

水槽試験は、大型模型では、海上技術安全研究 所三鷹第二船舶試験水槽(長さ:400m、幅:18m、 水深:8m、造波機:プランジャー式)で実施した。 小型模型では三鷹第三船舶試験水槽(長さ:150m、 幅:7.5m、水深:3.5m、造波機:プランジャー式) で実施した。また、小型模型で行った斜波中試験 は海洋構造物試験水槽(長さ40m,幅27m,水 深1.5m,造波機:フラップ式)で実施した。

表-4.1 模型船サイズ

前八开门	垂線間長		計田
加口生	実船	模型船	1716年9月
2500TEU	100.0()	6.010(m)	大型模型*
コンテナ船	188.0(m)	3.535(m)	小型模型*
5000 台積み 自動車運搬船	170.0(m)	3.565(m)	小型模型

* ボルスターを付けて試験

4.2 水槽試験による検討基礎データ収集

ステップの開発にあたり、最初に基礎試験とし て、ステップの形状・装着位置と波浪中抵抗増加 低減効果の関係について調査することとした。こ のため、形状の異なる4種類のステップの模型を 作成し、コンテナ船の大型模型に取付けて水槽試 験を行った。

試験に用いたステップは、STEP-1、STEP-2 が張

り出しを持った矩形構造のもの、STEP-3、STEP-4 は傾斜板状のものである。船首部の模式図、装着 状況を図-4.1に示す。





図-4.2 大型模型での規則波中試験の様子(コン テナ船)



図-4.3 波浪中試験の状況(STEP-2:コンテナ船)

波浪中試験(図-4.2)は、喫水 11m 相当、計画 船速(Fn=0.259)とした。規則波は、実船での波 高 3m 相当の短波長($\lambda/L_{wl}=0.5$)、向波で行った。 水槽試験で取得した規則波中抵抗増加量を比較し、 その低減効果を算定した結果、STEP-2で最も高い 効果となり、波浪中抵抗増加 9%減が得られた。 なお、STEP-1は 6%減、STEP-4は 8%減と同程度 の効果が認められた。STEP-3は低減効果が見られ なかった。

STEP-2 の波浪中試験の様子を図-4.3 に示す。 これから、ボルスターに波があたっている様子、 ボルスター後方でステップにより波が剥離してい る様子が認められる。ボルスターでの波浪衝撃が 抵抗となっていると予想され、これを抑えるよう にボルスター下部にステップを装着することが有 効だと考えられる。

また、水槽試験時の様子からステップにより波 が横方向に返される様子が見られたことから、波 による前後方向の力の成分の方向が変わり、抵抗 低減の効果を得ることができる。STEP-1、STEP-2 は張り出しをもった矩形構造であり、傾斜板状の STEP-3、STEP-4に比べ、横方向に波を返す効果が 高いと考えられる。なお、STEP-4は、傾斜板式で あるが、比較的大型で船首部前端に近い場所で、 ボルスター下部に装着しているため、ボルスター への波浪衝撃の低減もあり、複合的に効果が得ら れたものと考えられる。

以上から、張り出しを持つ矩形構造が効果的で あること、及び、ボルスターの下部前方に装着す ることが効果的であるという知見が得られた。

4.3 小型模型船による調査

(A) コンテナ船

ステップの形状については、工作の簡便性から、 基礎試験で用いた STEP-1 をベースとし、アルミ 板と粘土によりステップの模型を製作した。基礎

試験の結果から、ボルスター下部に装着すること が有効と考えられるので、ボルスター下部近辺で 装着位置を変化させて試験を行った。

ステップの配置検討では、断面図における傾斜 面の角度が船長方向でほぼ一定とするとともに、 アンカリング時に錨がステップに当たらないよう、 ステップの張り出し幅がボルスター部を超えない こととした。ステップの船体への装着状況を表す 模式図を図-4.4 に、試験したステップの装着状 況を図-4.5に示す。



図-4.4 ステップの装着位置の模式図



図-4.5 ステップの配置 (コンテナ船)



図-4.6 小型模型での規則波中試験の様子(コン テナ船)

波浪中試験は、実船での波高 3m 相当の短波長 $(\lambda/L_{w}=0.5)$ 、向波で試験を行い、ステップの効果 を調査した (図-4.6)。なお、今回のステップの サイズは実機相当で長さ3.7m、高さ0.8mである。 水槽試験結果を図-4.7 に示す。STEP-A は前端が F.P.より 1.4m 前、下端が 14.7WL となるように装 着した、STEP-Bは STEP-A を下方向に 0.4m 平行 移動させたものであり、STEP-Cは STEP-B から後 方に 1.4m 平行移動させたものである。波浪中試 験の結果、この3つの中では STEP-B で最も高い 効果が得られた。試験時の観察からステップによ り波が横方向に返されている様子が見られたこと から、波による前後方向の力の向きがステップに より変えられることにより波浪中抵抗増加が低減 している。STEP-B の位置は静的水位上昇に最も 近く、また最も前方にあるため、高い効果が得ら れたと考えられる。

上記の結果を基に、*STEP-B*の長さを後方に 35% 延長させた STEP-D 装着して試験を行った。その 結果、図-4.7 に示す通り STEP-D では 10%の波浪 中抵抗増加低減が得られた。これはステップのサ イズが大きくなったことにより、波浪中抵抗増加 の低減効果が高くなったためである。



図-4.7 ステップの規則波中抵抗低減効果(コン テナ船)

以上から、ステップによる波浪中抵抗増加を低 減させるため、波力の向きを変える形状とするこ と、ボルスターへの波浪衝撃も低減するように、 ボルスター下部前方に装着し、長さが大きいもの が適するという知見が得られた。

(B) 自動車運搬船

コンテナ船と同様に自動車運搬船についてもス テップの装着位置・大きさについて検討した。形 状については、コンテナ船を対象とした検討から、 効果と工作上の簡便性を考慮し、船長方向に平行 に装着し、構造強度を確保できる程度に張り出す 形状(張り出し面と水平面の角度が32度以上)と した。位置については,静的水位上昇を用いた検 討から、後端を含めて S.S.9.5 より前方に装着する こととし、上下位置は、平水中性能に影響を及ぼ さないように静的水位上昇より上方とした。

水槽試験に用いたステップは、装着位置・サイ ズを変えた STEP-A から STEP-F の 6 種類である。 STEP-A から STEP-D は実船で長さ 5m、高さ 1m の比較的小型で同型のものとし、装着位置を変更 して位置の検討を行った。それぞれの位置を図-4.8 に模式的に示す。下面位置の高さ、及び下面 平行部前端位置を基準とし、STEP-A は高さ W.L.11.8、前端位置は F.P.に装着したもの、STEP-B は STEP-A を下方に 0.5 m移動したもの、STEP-C は STEP-A を後方に 1 m移動したもの、STEP-D は STEP-A を上方に 0.5 m移動したものである。長さ 方向装着位置は後端も含め、静的水位上昇を用い た検討より S.S.9.5 から前方とした。



図-4.8 STEP-A,B,C,Dの配置(自動車運搬船)

波浪中試験は、実船での波高 3m 相当の短波長 (波長船長比 0.3)、向波で試験を行い、ステップ の効果を調査した。

STEP-AからSTEP-Dの中で波浪中抵抗増加低減 効果の高い装着位置は,STEP-A、STEP-Dのもの であった。STEP-A、STEP-Dは船首端に近い位置 に装着しており、波浪中抵抗増加の低減効果が高 い。なお、STEP-Bは、STEP-A、STEP-Dと同様に 船長方向位置は船首端に近いが、高さ位置が STEP-A、STEP-Dより下方であり、ステップより 前方の船首端の波がSTEP-Bを超えて上方を進む 様子が水槽試験で観察された。このため、波浪中 抵抗増加の低減効果が比較的小さい。

次に、サイズを長くした場合の効果を調査する ため、STEP-A、STEP-D をそれぞれ 1m 後方に延 長させた形状の STEP-E、STEP-F について水槽試 験を行った。



図-4.9 STEP-Eの配置(自動車運搬船)



図-4.10 STEP-E による波浪中抵抗増加の低減 (自動車運搬船)

水槽試験結果から、*STEP-E*で波浪中抵抗増加の 18%低減が得られた。*STEP-E*の装着状況と波浪中 抵抗増加低減効果を図-4.9、4.10にそれぞれ示す。 ここで、 H_w は波高、 λ/L は波長船長比、 α は波 向(0 deg.は向波を表す)である。

4.4 最終ステップ形状の水槽試験

4.3 節までの検討でコンテナ船、自動車運搬船 のステップの基本形状を決定したが、設計条件以 外の条件下での効果を測定する必要がある。

(A) コンテナ船

コンテナ船については、最も高い効果が得られた STEP-D について、波高、船速を変えて試験を行った。

1) 波高影響

波高について、設計条件の 3m に対し 2m、4m での効果を調べた。その結果を図-4.11 に示す。 波高 3m での効果が最も高いが、波高 2m、4m に おいても低減効果が認められる。

2) 船速影響

また、実海域での船速低下を考慮し、計画船速 (F_n=0.245)よりも低い船速での効果を調査した。 試験結果を図-4.12に示す。低速域では、静的水 位上昇が小さくなり船首造波が抑えられるため、 ステップにあたる波の量が減るものの効果が認め られる。

なお、船速影響から、反射波抵抗増加 (R_{AWR}) の速度影響 ($\alpha_U = C_U F_n$) を求めたものを図-4.13 に示す。これから、ステップの有り無しで速度影 響係数 ($C_U = a_U/F_n$) に差があることが分かる。速 度影響係数 C_U はステップ有りの場合と無しの場 合で比較すると、ステップ有りの方が約 17%小さい。









図-4.13 速度影響係数の比較(コンテナ船)

3) 短波頂不規則波中抵抗增加

短波頂不規則波中での抵抗増加低減効果を調査 する。

短波頂不規則波中抵抗増加(*ΔR_{AWC}*)は(4.1)式 で計算する。

$$\varDelta R_{AWC} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} R_{AW}(\omega, \alpha) S(\omega) D(\alpha) d\omega d\alpha \quad (4.1)$$

ここで、 R_{AW} : (3.2)式に示す規則波中抵抗増加、 S(ω):波の周波数スペクトラムで IACS スペクト ラム、 $D(\alpha)$:方向分布関数でコサイン二乗型とす る。なお、 R_{AW} のうち R_{AWR} 成分は水槽試験結果を 元に算定し、 R_{AWM} 成分については本コンテナ船で は規則波中抵抗増加の波長影響は調査していない こと、波スペクトラムとの関係から短波長域での 抵抗増加量が重要となることから、ステップ有り の場合も無しの場合も同じとしている。また、斜 波中での R_{AWR} 成分での速度影響係数 (C_U)の扱 いは多数の短波長中の試験結果を基にブラントネ ス係数 (B_f) との関係を整理して作成した式⁹で 計算する。

短波頂不規則波中抵抗増加係数 K_{AWC} を計算した結果を図-4.14に示す。ここで、 K_{AWC} は(4.2)式で無次元化した値であり、H:有義波高である。

$$K_{AWC} = \frac{\Delta R_{AWC}}{8\rho g H^2 B_{max}^2 / L_{wl}}$$
(4.2)

このとき、短波頂不規則波中抵抗増加における ステップの波浪中抵抗増加低減効果は、BF6 相当 (*T*=6.7 s)において、約 8.2%と推定される。



図-4.14 短波頂不規則波中抵抗増加係数(コン テナ船)

4) 尺度影響調査

ステップの効果に尺度影響がないかを確認する ため、大型模型船で実施した基礎試験での STEP-2 を小型模型船に装着し、大型模型と小型模型の比 較を行った。 小型模型船の波浪中試験では、8.6%の規則波中 抵抗増加低減効果が得られた。これは、大型模型 船では8.8%であったため、今回の試験では尺度影 響は見られないことが分かった。

(B)自動車運搬船

自動車運搬船について、最も高い効果が得られた STEP-E について、波向、波高、周波数、船速を変えて水槽試験を行った。

計画船速での向波中水槽試験の様子を図-4.15 に示す。ステップをつけない場合にはフレア上方 まで波が達し、崩れ落ちているが、ステップをつ けた場合、ステップ下面で船体から剥がされてい る様子が分かる。





(a) ステップを装着していない場合





(b) ステップを装着している場合

図-4.15 ステップの試験の様子(自動車運搬船)

1) 波向影響

ステップは波浪影響が大きい向波中を設計対象 条件として開発することとしたが、向波以外の波 向の場合における影響を調査するため、波向を α=20,80 deg. として、夏期満載状態、波長船長 比 0.3、実船相当の波高 3m で水槽試験を行った。 なお、水槽試験での計測区間を確保するため、船 速については計画船速より低速の $F_n=0.195$ で実 施した($\square-4.16$)。試験結果を $\square-4.17$ に示す。 この結果から、斜向波から横波においても波浪中 抵抗増加の低減効果が確認できる。なお、横波状 態では、波浪は片舷の STEP にしか作用しないた め、向波より波浪中抵抗増加低減効果は小さくな る。



図-4.16 斜波中試験の様子(自動車運搬船)



図-4.17 ステップの波向影響(自動車運搬船)

2) 波高影響

波高が STEP 設計条件と異なる実船相当 2m、4m で、夏期満載状態、計画船速、波長船長比 0.3 の 向波中で水槽試験を行い、波浪中抵抗増加の低減 効果を調査した。試験結果を図-4.18 に示す。

試験結果から、設計対象の波高 3m における効 果が最も大きいが、波高が±1m 変化した波高 2m、 4m でもステップによる波浪中抵抗増加低減効果 が確認できる。これは、波高 2m の場合、ステッ プにあたることにより返される波が波高 3m の場 合より少ないためである。波高 4m の場合は、ス テップの高さを超える波が波高 3m の場合より増 えるため、ステップによる波浪中抵抗増加低減効 果が小さくなる。



3) 周波数影響

波浪中試験では、波スペクトラムとの関係から 短波長を調査対象としたが、船体運動が大きくな る長波長における影響を調査するため、波長を変 えた試験を行い、船体運動、波浪中抵抗増加への 影響を調査した。試験結果を図-4.19から図-4.23に示す。ここで、 z_a は上下揺振幅、 ε_z は上下 揺位相差、 θ_a は縦揺振幅、kは入射波の波数、 ε_{θ} は縦揺位相差であり、位相差は、入射波の山が船 体中心線で船体中央にある時を基準に、遅れを正 としている。



図-4.19 ステップの周波数影響(規則波中抵抗 増加:自動車運搬船)







図-4.21 ステップの周波数影響(上下揺位相応 答:自動車運搬船)



図-4.22 ステップの周波数影響(縦揺振幅応答:自動車運搬船)



図-4.23 ステップの周波数影響(縦揺位相応 答:自動車運搬船)

図-4.19から、長波長においてもステップによ る波浪中抵抗増加の低減効果が確認できる。一方 で、図-4.20から図-4.23より,船体運動への影 響はほとんどないことが分かる。これは、より長 波長域においても、ステップに波が当たることに より、波浪の持つエネルギーの進行方向が変えら れ、波浪中抵抗増加が低減されるが、船体運動に ついては、ステップは小型で船全体と比較すると その排水量はほぼ無視できるため、影響がほとん どないものと考えられる。

4) 船速影響

今回、ステップの設計条件を、夏期満載状態、 計画船速としたが、実際の運航では、波や風による抵抗増加により計画船速より低速で航行することも想定されるため、計画船速($F_n=0.239$)より低い船速($F_n=0.195$ 、0.150)におけるステップの効果を調査した。

試験結果を図-4.24 に示す。計画船速より低速 側については、静的水位上昇量が小さくなるため、 ステップにあたる波が減り、波浪の持つエネルギ ーの低減や進行方向の変化も小さくなるが、 *F*_n=0.195 においても効果があることが確認できる。 最も低速の状態(*F*_n=0.15)においては、静的水位 上昇量の低下によりステップにほとんど波が当た っておらず、この波高では効果は見られない。

なお、船速影響から、反射波抵抗増加 (R_{AWR}) の速度影響 ($\alpha_U = C_U F_n$)を求めたものを図-4.25 に示す。これから、ステップの有り無しで速度影 響係数 ($C_U = a_U/F_n$)に差があり、速度影響係数 C_U は、ステップ有りの場合と無しの場合とで比較す ると、ステップ有りの方が約 16%小さい。



図-4.24 ステップの船速影響(自動車運搬船)



図-4.25 速度影響係数の比較(自動車運搬船)

5) 短波頂不規則波中抵抗增加

短波頂不規則波中抵抗増加の比較を図-4.26 に 示す。短波頂不規則波中抵抗増加におけるステッ プの効果は、BF6 相当 (*T* =6.7 s) において、約 4.2%と推定される。



5. ステップの評価

ステップにより向波規則波中抵抗増加を18% 低減することができることを水槽試験により確認 することができた。その結果から、実海域での抵 抗成分の評価を行う。また、燃料消費量の低減効 果についても推定する。

5.1 実海域での抵抗成分の評価

実海域でのステップの効果を推定する場合、波 浪中抵抗増加だけでなく、風圧抵抗増加も推定す る必要がある。

風圧力の推定は、多数の風洞試験結果を基に回 帰分析を行い、主要目による推定式を作成した Fujiwara et al.¹³⁾による方法を用いる。

船体に働く前後力、左右力、回頭モーメントの 釣り合いから、設定海象における実海域中の主機 出力、船速等を算出することができる⁹⁾。力の釣 合点が求まれば、その時の波浪中抵抗増加、風圧 抵抗が算定できる。



図-5.1 海象と抵抗成分の比較(コンテナ船)



図-5.2 海象と抵抗成分の比較(自動車運搬船)

コンテナ船、自動車運搬船の実海域での抵抗成 分の比率を求めたものを、平水中抵抗を100%と して図-5.1、5.2 に示す。

これから、コンテナ船、自動車運搬船共に波に よる抵抗増加は BF6 の状態で平水中抵抗の約 28%であり、また、風による抵抗増加と比較する と、BF5 以下の海象では、風による抵抗増加の方 が波による抵抗増加より大きいが、BF6 を超える と波による抵抗増加が卓越してくる様子が分かる。

5.2 燃料消費量削減効果の推定

5.1 節での実海域中の主機出力の計算を基に実 海域中の主機燃費推定を(5.1)式で行った。

$$F_C = \lambda_C(P_B)P_B \tag{5.1}$$

ここで、 F_C :単位時間当たりの燃料消費量、 λ_C : 燃料消費率、 P_B :主機出力である。

ステップ設計条件である BF6 (有義波高 3m、 平均波周期 6.7s、平均風速 12.6m/s)、向波向風中 において、夏期満載状態、計画船速で航行中の場 合、ステップによる燃料消費量、CO₂排出量の削 減は、コンテナ船の場合 3%、自動車運搬船の場 合 2%と算定される。

実船計測による検証

6.1 実船計測手法

水槽試験結果を利用した実海域性能計算から算 定されたステップの省エネ効果を検証するため、 実際にステップを装着している自動車運搬船(図 -6.1)及びステップを装着していない同型船(図 -6.2)について実船計測を行った¹⁴⁾。

データの計測期間は、ステップ無し自動車運搬船 については 2011 年 1 月 28 日から 2012 年 5 月 31 日 までの約 16 ヶ月であり、ステップあり自動車運搬 船については 2011 年 6 月 30 日から 2013 年 3 月 12 日までの約 20 ヶ月である。

実船計測では, 表-6.1 に示す項目のデータを1 時間間隔で取得した。

実船計測では、ステップ有り、無しの本船計測 データから、主機出力及び船速の比較を行い、ス テップの効果を検証することが目的である。この ため、表-6.1に示した項目の他、排水量・喫水・ 主機出力・波データ(有義波高・平均波周期・主 波向)を用いて解析を行う。これらのデータは表 -6.1に示した自動計測データと同じ方法で計測 されていない。排水量・喫水についてはアブログ データから時間補間して求めた値を用い、主機出 力については燃料消費量から推定した値を用い、 波データについては波浪推算値(気象庁全球波浪 モデル)を利用し、日時と経度緯度から、その地 点・時刻の値を補間して求めた。



図-6.1 自動車運搬船(ステップ有り)



図-6.2 自動車運搬船(ステップ無し)

計測項目	計測方法
時刻	GPS
経度、緯度	GPS
対地船速	GPS
船首角	ジャイロコンパス
相対風速、相対風向	風向風速計
対水船速	電磁ログ
舵角	舵角表示機
主機回転数	回転数表示機
燃料消費量	流量計

6.2 実船計測データ

計測期間中の航路については、ステップ無しの 自動車運搬船は、日本から東南アジア・インドを 通り、アフリカ西部または地中海を経てヨーロッ パを結ぶ航路であり、ステップ有りの自動車運搬 船は、日本から東南アジア・インド・地中海を通 ってヨーロッパへ至る航路であった。このため、 同じ海域を航行するデータが含まれている。

計測期間中の平均風速、平均風向、有義波高、 平均波周期、主波向の頻度分布を図-6.3 から図 -6.7 に示す。ここで、平均風向、主波向は船首 を基準として、時計回りを正にしている(0 deg. は向いを示す)を表す。計測期間が異なるためデ ータ数が異なるが、分布形状はほぼ同じであるこ とが分かる。

遭遇した風と波の平均値を表-6.2 に示す。こ れから、ステップ有りの船の方が有義波高の平均 値は高いが、平均波周期、平均風速はほぼ同等で あることが分かる。





図-6.6 平均波周期の頻度分布(左:ステップ有り、 右:ステップ無し)



図-6.7 主波向の頻度分布(船首から船尾向きを0 とする)(左:ステップ有り、右:ステッ プ無し)

表-6.2 遭遇した風と波の平均値

項目	ステップ有り	ステップ無し	
平均風速	7.94 m/s	7.34 m/s	
有義波高	1.56 m	1.22 m	
平均波周期	$5.62 \mathrm{~s}$	$5.62 \mathrm{~s}$	

6.3 実船計測による効果の評価

6.3.1 実船データの解析方法

実船計測データの解析では、Sogihara et al.¹⁵⁾

の方法に従い、最初に有効データの抽出、評価条 件に近いデータの選定を行う。次に出力、排水量 を基準状態に補正し、気象海象条件を基準条件に 補正して行う。そして、ステップ有りの場合と無 しの場合の比較を行うことにより、ステップの効 果を検証する。

(1) 有効データの抽出

計測データの時系列から出入港等の状態を除い た通常運航状態で、必要データ項目がすべて計測 されているデータを有効データとして抽出する。 ここで必要となる項目は、日付、緯度経度、対地 船速、相対風速・相対風向、対水船速、燃料消費 量、排水量である。有効データ数は、ステップ無 し自動車運搬船で9,670 点、ステップ有り自動車 運搬船で9,790 点であった。

(2) 評価条件に近いデータの選定

抽出した有効データから、評価条件とするステ ップ設計状態(夏期満載状態・常用出力・向波) に近い状態のデータを選定する。アドミラルティ 係数の考え方を利用して、排水量・出力について、 それぞれ基準状態との差の補正を船速で行う。デ ータの抽出では、常用出力に対してその上下 5% 以内のデータ、夏期満載状態の排水量に対してそ の下方に 7.6%(これは、アドミラルティ係数に おいて主機出力 5%の変化に相当する)以内のデ ータを抽出し、波向については向波から横波(± 90deg.)の範囲のデータを抽出する。さらに、対 水船速について、対水船速計の精度・信頼性の観 点から、海流・潮流の大きいデータは誤差も大き いと考え除外する。今回は対水船速と対地船速の 差が 0.5 knot 以上のデータを除外する。

最終的に抽出されたデータは、ステップ無し自 動車運搬船で121点、ステップ有り自動車運搬船 で88点となった。

(3) 出力と排水量の基準状態への補正

ステップ有り、無しの船の比較をするため、抽 出したデータを基準状態における値に補正する。 すなわち、出力・排水量についてはアドミラルテ ィ係数を利用して、(6.1)式により常用出力・夏期 満載状態に相当する値に対水船速を補正する。

$$V_{wM} = V_{wM} \times \left(\frac{P_0}{P_M}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\nabla_0}{\nabla_M}\right)^{-\frac{2}{9}}$$
(6.1)

ここで、V'wM は補正後の対水船速、VwM は補正前の対水船速計測値を表し、P、∇ はそれぞれ出力、 排水量で、下付添字の0、M はそれぞれ基準値、 計測値を示す。

(4) 気象海象の基準状態への補正

遭遇する気象海象は様々なため、同一状態で評価するためビューフォート風力階級を基に定めた 短期海象(表-3.2)を基準状態とする。

有義波高、平均波周期、主波向、平均風速、平 均風向をそれぞれパラメトリックに変化させたと きの主機出力、速力低下の計算結果を用いて、遭 遇した気象海象を基準状態に補正する。

なお、ステップによる波浪中抵抗増加の低減量 を確認することが目的であることから、今回は無 風状態に対応するように補正し、波浪影響だけの 比較ができるようにする。

6.3.2 船速の比較

6.3.1 節に従い実船データを解析し、船速低下量 で比較した結果を図-6.8 に示す。有義波高 2m 以上の範囲でステップ有りの船の方が船速低下が 小さく、ステップによる波浪中抵抗増加の低減効 果が分かる。ステップ開発において実施した水槽 試験では,波高 2m から 4m の短波長向波規則波 中で波浪中抵抗増加の低減効果が確認されており、 図-6.8 の実船計測結果はそれを説明する結果と なっている。



図-6.8 船速低下の比較(夏期満載状態、常用出 力、波向は正面から±90度の範囲)

6.3.3 出力の比較

船速-主機出力曲線を用いて定量的に燃費削減 効果の比較を行う。そのため、実船データの解析 方法では、以下とする。

(1)評価条件に近いデータの選定:出力の絞込みは せず、排水量、波向、対水船速で絞込みを行う。

(2)出力と排水量の基準状態への補正:排水量についてのみアドミラルティ係数を利用して夏期満載状態に対応する船速に補正する。



図-6.9 計測データ(補正無し)

(3)気象海象の基準状態への補正:ステップ有りの 自動車運搬船の実船計測データはステップ無 しの自動車運搬船での波、風をパラメトリック に変化させたときの計算結果計算を用いる。ど ちらの船についてもステップ無しの自動車運 搬船の計算結果を用いて補正することにより、 ステップ無しとステップ有りとの補正後のデ ータの差が、ステップの効果となる。

補正を行う前の計測データを図-6.9 に示す。 計測データに補正を行い得られたデータから海 象状態により場合分けをして比較を行った。最初 に、ステップの有無による影響がない有義波高 1m以下の海象平穏時の比較を図-6.10 に示す。

主機出力から見たステップの効果を r_p %として(6.2)式により算出する。ここで、 $Power_{withSTEP}$ は実船計測結果から得られたSTEP有りの自動車運搬船の主機出力、 $Power_{w/oSTEP}$ は実船計測から得られたステップ無しの自動車運搬船の主機出力であり、計測点が含まれる船速範囲で r_p を求める。

$$r_{p} = \frac{Power_{withSTEP} - Power_{w/oSTEP}}{Power_{w/oSTEP}} \times 100$$
(6.2)

有義波高 1m 以下の場合、 r_p は約 7%となった。 この波高条件ではステップに波が当たらないため、 この時の r_p はステップに関係のない計測上の誤 差の大きさとして考えることができる。

次に、ステップの効果が見込まれる有義波高



波高 1m 以下、波向は正面から±90 度の範 囲)



2m 以上のデータについて、同様に補正を行った 結果から得られる主機出力-船速曲線の比較を図 -6.11 に示す。この時、rpは約-10%となった。

海象平穏時(有義波高 1m 以下)の|**r**_p|を計測、 補正による誤差として考慮すると、ステップの正 味の出力低減効果は約 3%となり、燃費削減効果 についても約 3%となる。

このことから、ステップの有効性が示された。

6.3.4 計測データの直接比較

6.3.2、6.3.3 節の比較は計測データの補正を伴 うものであるため、計測データの直接比較を試み た。

多数の実船計測データから、ほぼ同じ運航状態 になっているデータの抽出を行い、僅か2状態で あるもののデータを抽出した。抽出された状態を 表-6.3に示し、このデータの比較を図-6.12に 示す。

表-6.3 同一状態として抽出した風と波の範囲

	平穏海象		海象下	
項目	ステッ プ有り	ステッ プ無し	ステッ プ有り	ステッ プ無し
有義波高 [m]	$0.2 \sim 0.4$	0.2	$2.5 \sim 2.7$	$2.5 \sim 2.6$
平均 波周期[s]	-	-	7.9~8.3	6.6
主波向 [deg.]	$-14 \sim -8,$ $12 \sim 15$	-15~-14	-20	-19~-18
平均風速 [m/s]	$0 \sim 3$	$2 \sim 3$	11~14	$14 \sim \! 15$
平均風向 [deg.]	-	-	-16~-12	-13~0
データ数	6	2	3	3



図-6.12から、平穏海象ではステップ無しのデ ータがやや船速が高く、有義波高 2.5m 程度の海 象下では逆にステップ有りのデータの船速が高い 結果となった。

これは 6.3.3 節の結果と整合し、補正を行わな いデータで見てもステップの効果が示された。

7. まとめ

実海域省エネ装置ステップの開発を行い、その 結果をまとめると以下となる。

- ・2500TEUのコンテナ船及び 5000 台積みの自動 車運搬船を対象に、波浪中抵抗増加を低減する 実海域省エネ装置ステップの開発を行い、短波 長中の抵抗増加を約 18%低減することを水槽 試験で示した。
- ・設計条件以外の状態でのステップの効果を確認 するため、波高影響、波向影響、周波数影響、 船速影響を水槽試験で調査し、設計条件と異な る波高、波向、周波数、船速でも幅広く波浪中 抵抗増加を低減する効果があることを確認した。
- ・ 垂線間長約 6.0m の模型船、垂線間長約 3.5m の 模型船による水槽試験により、ステップによる 効果に尺度影響は見られないことを示した。
- ・実海域性能計算を行い、BF6 向波向風状態で燃 費削減効果が約3%であることを示した。
- ・5000 台積みの自動車運搬船にステップを装着し、ステップを装着しない同型船と共に、ステップの燃費削減効果を検証するための実船計測を行った。約1年半に亘る実船計測から、ステップの効果は設計条件(夏期満載状態、有義波高2m以上、向波±90 deg.)において、燃費削減効果3%となり、ステップの有効性を確認した。
- ・ステップが比較的小型の構造で、船首水面上に 装着することから、内航 RoRo 貨物船に対して レトロフィットを実施した。

原稿執筆時点で自動車運搬船、RoRo貨物船の6 隻がステップを装着している。今後も実運航での CO2排出削減を推進するため、積極的に取り組ん でいきたい。

謝 辞

実海域省エネデバイス STEP の開発は、国土交 通省からの高効率船舶等技術研究開発費補助金、 ボートレース交付金による日本財団の助成金、及 び一般財団法人日本海事協会の「業界要望による 共同研究」のスキームによる研究支援並びに一般 財団法人日本造船技術センターの共同研究事業に よる支援を内海造船株式会社が受け、海上技術安 全研究所と共同で実施しました。また、実船計測 による検証は、海上技術安全研究所、日産専用船 株式会社、内海造船株式会社の共同研究として実 施しました。関係者にお礼申し上げます。

水槽試験の実施に当たっては、海上技術安全研 究所の星野 邦弘水槽試験技術グループ長、長谷川 純上席研究員(研究当時)、後藤 英信主任研究員、 藤沢 純一主任研究員、深澤 良平研究員、枌原 直 人研究員、一ノ瀬 康雄研究員の方々にご協力いた だきました。ご協力にお礼申し上げます。

参考文献

- 内藤 林、上田 武志: 短波長域における船首形 状と抵抗増加の関係、関西造船協会誌、第 217 号(1992)、pp.103-113.
- 2) T. Sakamoto and E. Baba: Minimization of Resistance of Slowly Moving Full Hull Forms in Short Waves, Proceedings of 16th ONR symposium (1986), pp.598-612.
- 3)黒田 麻利子、辻本 勝、佐々木 紀幸、表 正和、 野嶋 宣男、加賀 正人:波浪中抵抗増加低減の ための船首水面上ステップの効果について、日 本船舶海洋工学会論文集、第14号、pp.105-110、 2011.
- 4) 黒田 麻利子、辻本 勝、白石 耕一郎、佐々木 紀 幸、表 正和、野嶋 宣男、加賀 正人:自動車運 搬船のための波浪中抵抗増加低減 STEPの開発、 日本船舶海洋工学会論文集、第16号、pp.17-23、 2012.
- 5) World Meteorological Organization: Manual on Codes, International Codes, Vol. I.1, Part A - Alphanumeric Codes, WMO-No. 306 (1995 edition).
- 6) W. G. Price and R. E. D. Bishop: Probabilistic Theory of Ship Dynamics, Chapman and Hall Ltd (1974).
- 7) K. Matsumoto, S. Naito, K. Takagi, K. Hirota and K. Takagishi: Beak-Bow to Reduce the Wave Added Resistance at Sea, Proc. of PRADS'98 (1998), pp527-533.
- 8) K. Matsumoto, K. Hirota and K. Takagishi: Development of Energy Saving Shape at Sea, Proc. of OC2000 (2000), pp479-485.
- 9) M. Tsujimoto, K. Shibata, M. Kuroda, K. Takagi: A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves, Journal of the

Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.8 (2008), pp. 177-184.

- 10)H. Maruo: Resistance in waves, Research on Seakeeping Qualities of Ships in Japan, The Society of Naval Architects of Japan, Vol.8 (1963), pp. 67-102.
- 11)藤井 斉、高橋 雄:正面規則波中における抵 抗増加、三菱重工技報、Vo.4、No.6 (1967)、 pp.86-92.
- 12)International Association of Classification Societies: Standard Wave Data, IACS Rec. No.34 (Rec. 2000/Corr. 2001).
- 13)T. Fujiwara, M. Ueno, Y. Ikeda: A new Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships on the basis of Physical Components Models, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.2 (2006), pp. 243-255.
- 14) M. Kuroda, M. Tsujimoto, N. Sasaki, M. Naito, M. Omote, N. Nojima, M. Kaga: Analysis on Onboard Measurement Data for the Validation of the Effect of the Energy Saving Device STEP, Proc. of PRADS2013, pp.346-351, 2013.
- 15)N. Sogihara, M. Ueno, K. Hoshino, M. Tsujimoto and N. Sasaki: Verification of Calculation Method on Ship Performance by Onboard Measurement, Proc. of ISOPE2010, Vol.4 (2010), pp 750-757.

付録 レトロフィットの実施

ステップは比較的小型の構造で、船首水面上に 装着することから、新造船だけでなく、就航船に 事後装着(レトロフィット)することも可能であ る。

内航 RoRo 貨物船(船長約 140m) にステップ のレトロフィットを行ったので、その内容を紹介 する。

レトロフィットを行う場合、水槽試験結果が無 く、船体の詳細な図面やデータが無い場合もある。 ステップの効果を高めるためには、静的水位上昇 の推定精度が重要となるが、詳細なデータが無い 場合、主要目等から簡易的に推定することも可能 である。



図-A.1 船首部航走波の撮影(平穏海象中)



図-A.2 静的水位上昇の推定



図-A.3 レトロフィット工事前の様子



図-A.4 レトロフィット工事の様子



図-A.5 ステップ装着後の様子

内航 RoRo 貨物船にステップのレトロフィット を行うため、本船に乗船し船側波形を撮影(図-A.1) することで静的水位上昇データの取得を行 った。

撮影した船側波形を基に推定した静的水位上昇 を図-A.2に示す。

ステップは3節、4節に記載したこれまでの知 見に基づき設計を行った。レトロフィット工事の 様子を図-A.3からA.5に示す。