

回流水槽試験による船型開発に関する研究

(Study on Hull Form Development of Ships

by a Circulating Water Channel Test)

2020年9月

西本 仁

目 次

第1章 緒論	
1. 1 研究の背景	1
1. 2 既往の研究	3
1. 3 本研究の目的	4
1. 4 本論文の構成	5
第2章 抵抗試験に影響を及ぼす因子	
2. 1 抵抗試験に影響を及ぼす因子	9
2. 2 水槽特性	9
2. 3 模型船	10
2. 4 結言	11
第3章 制限水路影響と水面勾配の作用	
3. 1 回流水槽試験の特徴	17
3. 2 制限水路影響	17
3. 3 水面勾配	18
3. 4 解析の特徴	20
3. 5 結言	20
第4章 商船の船型開発試験の解析	
4. 1 商船船型の抵抗解析	23
4. 2 修正係数	23
4. 3 修正手法と有効性	24
4. 4 航走姿勢	26
4. 5 結言	26
第5章 漁船の船型開発	
5. 1 船型開発手法	45
5. 2 事例（その1）：小型サンマ漁船の船型開発	46
5. 3 事例（その2）：定置網漁船の船型開発	49
5. 4 結言	54
第6章 結論	82
謝辞	84
参考文献	85

記号一覧	89
付録	92

第1章 緒論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 水槽の変遷

船舶用試験水槽の歴史は 18 世紀末の欧州での曳航水槽の出現から始まり、その後世界各地に曳航水槽が造られていった。次に出現した試験水槽が推進器開発用のキャビテーション水槽で 1910 年に英国に造られ、その後すぐに欧米各地に造られた。回流水槽については土屋¹⁾、田古里²⁾、高幣³⁾ および川島ら⁴⁾ が次のように言及している。キャビテーション水槽が推進器翼面のキャビテーションの発生を観察する目的であったのに対し、回流水槽は船体まわりの流れの観察を主目的に 1933 年にベルリンの水力-船舶研究所 (VWS) に造られた。全長 16.3 m、高さ 6.58 m、測定部長さ 6.99 m の垂直循環型である。1944 年にワシントンの米海軍の船舶研究所 (DTMB) に造られた回流水槽は大型模型船による船型試験用で、全長 44.7 m の垂直循環型、測定部寸法は長さ 18.3 m、幅 6.7 m、水深 2.7 m、そして最大流速は 5.1 m/s である。1965 年に造られたイギリスの国立物理学研究所 (NPL) の水槽も船型試験用で、全長 120 m の水平循環型である。水は一旦水だめに落ちた後にインペラで上流に送られる。測定部寸法は長さ 18.0 m、幅 3.6 m、水深 2.4 m、最大流速は 3.0 m/s である。30 m に及ぶ整定用開水路と縮小比 9:1 のノズルにより、良好の流体力学性能が得られたと言われている。欧米では古くから回流水槽が実用化された。川島ら⁴⁾ はその他の水槽にも言及している。VWS の水槽 (1974)⁵⁾ は測定部が開放可能なキャビテーション水槽で、回流水槽試験の効率性をとらえ、抵抗試験、自航試験、プロペラ単独試験および操縦性試験を目的として計画された。建設費用がかからない利点も考慮された。垂直循環型で全長 54.0 m、測定部寸法は長さ 11.0 m、幅 5.0 m、水深 3.0 m、そして最大流速は 4.0 m/s である。底面は上下に移動でき、浅水状態 (水深 1.0 m) で最大流速 9.0 m/s である。循環路内の各所に工夫がなされ、各種の付属機械装置が導入された。しかし流体力学性能が不明⁵⁾⁶⁾ で、曳航水槽に準じた試験がどこまで可能であったのか明らかでない。リバプール大学の水槽 (1980)⁷⁾ は全長 12.0 m の垂直循環型で、水量は 90 ton、測定部寸法は長さ 4.0 m、幅 1.6 m、水深 0.8 m、そして最大流速は 6.1 m/s である。Kempf and Remmers 社 (現、Cussons 社) 製ということもあり、キャビテーション水槽で開発された技術が多用され、高速化に関する要素技術は高いと推察される。欧米の回流水槽の特徴について、川島ら⁴⁾ の記述をまとめると次のようになる。早期において可能性が着目され、測定部寸法の大型化および高速化等の要素技術の構築と性能向上のための付属機械技術の開発が行われた。しかし性能評価に関しては流速分布の言及は認められるが、自由表面に言及しているにもかかわらず、定在波および水面勾配の言及はない。流体力学性能を表す諸元が示されず、性能を分析的に扱う姿勢に乏しい。

一方、我が国では今より約 70 年前の 1951 年に東京水産大学 (現、東京海洋大学)³⁾ に、1953 年に三菱重工業 (株) 長崎研究所²⁾ に水平循環型が造られた。その後の我が国の回流水槽の変遷を解説した資料として田古里²⁾、高幣³⁾、小倉⁸⁾、奥野⁹⁾ および川島ら⁴⁾ の文献をあげることができる。水槽の変遷を第一、第二、第三および第四世代に分離している。概要を Table 1-1 に示す。第一世代型は Flume (水路) と称される水平循環型で、流れの可視化などを主目的とし実験精度を要求しない水槽であった。Fig.1-1 に東京水産大学の水槽の平面図を示す。全長

4.25 m の小型である。第二世代型は 1956 年から始まる。水槽の性能向上のための多数の技術、工夫が取り入れられた水平循環型で、流れの可視化などの定性的な実験だけでなく、抵抗試験、自航試験、プロペラ単独試験、或いは曳航水槽では計測の難しい船体まわりの流れの計測を目的とした水槽であった。とくに肥大船の船尾渦の構造、三次元境界層の研究に貢献した。操縦性能を含む各種の試験も行われた。大学を中心に設置され、その代表として、防衛大学校¹⁰⁾、東京大学船用機械工学科¹¹⁾、川崎重工業(株)¹²⁾ および大阪府立大学¹³⁾ の水槽をあげることができる。Fig.1-2 に東京大学船用機械工学科の水槽(全長 11.0 m)を示す。第三世代型は 1966 年から始まった。全長 16.2 m の三井造船(株)¹⁾ および全長 26.6 m の日本鋼管(株)(現、ジャパンマリンユナイテッド(株))¹⁴⁾ がその代表である。いずれも垂直循環型、大型化を特徴とし、供試模型は小型であるが、曳航水槽に準じた定量的な船型試験を可能とすることを目的とした。当時の欧米の大型水槽に対抗したためにそれらと共通点が多く、性能向上のために模型水槽で性能を確認し、さらに各種の付属機械装置も開発され、水槽の駆動および計測にはミニコンピューターによるシステムも導入された。三井造船(株)の水槽を Fig.1-3 に示す。一方で姫野ら¹⁵⁾ は定在波が船体抵抗に及ぼす影響を考察するとともに、制波板形状と定在波波高との線型関係について明らかにしており、要素技術の研究も精力的に行われた。その後、小倉ら^{16), 17)} は高性能の水槽を創出した。垂直循環型を特徴とするが、第三世代型の大型水槽よりも水量を少なくして建設コストと試験コストの効率化を図ることに成功した。この水槽は今日の回流水槽を先導したもので第四世代型と称される。川島ら⁴⁾ はこの世代の諸水槽について表にまとめている。2 インペラ方式の駆動を基本特徴とし、ノズル、ディフューザー、各コーナーおよびガイドベーン等、各部形状の見直しを図り、それ以前よりも高性能の水槽を具現化した。特に水面近傍流れの加速技術は船の実験に不可欠で、小倉らは第三世代に模索されたローター型の表面流加速装置¹⁸⁾ を改良して水封型¹⁶⁾ を開発した。この技術により水面近傍の流速分布の均一性が向上し、さらに奥野ら¹⁹⁾ は理論的に最適なローター回転数を求める方法を示した。また測定部底面をより高精度に製作した水面勾配の小さい水槽とし、さらにパソコンの導入により試験と解析の自動化技術を加え、回流水槽試験の可能性を高めることに成功した。全長 14.8 m の代表的な水槽を Fig.1-4 に示す。その後も技術追究は連綿と続き、今日では第五世代型⁴⁾ とも称される水槽に移行し、水槽の主要目や循環路内の構造と形状の抜本的な改良²⁰⁾ だけでなく、水封式二次流れ抑制型表面流加速装置²¹⁾、制波板および水量設定装置など、水槽に装備される大小の要素技術が改良、開発されている。これにより流速分布がほぼ均一、定在波が小、水面勾配が僅少、サージング(流速変動、水位変動)が僅少、混入気泡が無視できる水槽が実現している。最新の水槽を Photo 1-1 に示す。全長は 17.5 m である。

近年の我が国の回流水槽は、独自の継続した性能追究により、特に自由表面の制御技術と流体力学性能に優れ、世界最高水準と位置づけできる。なお我が国周辺の諸外国にも回流水槽は多数あり、その中で韓国の多くは我が国の第 4 世代型である。

1. 1. 2 利用の変遷

第二世代、第三世代型の水槽は流れの可視化試験のみならず、船体まわりの流れ構造の研究に活用され船型学の発展に貢献した。多くの文献の中から一部を挙げると、田古里ら²²⁾ のビ

ルジ渦に関する研究，波多野ら^{23), 24)} および掘田²⁵⁾ の境界層に関する研究，奥野²⁶⁾ の船尾境界層に関する研究がある．これらの先駆的研究は回流水槽の積極的な活用によるもので，今日の学術はこれら先達の努力なくして存在しない．当初の回流水槽による船型開発として，仲渡ら²⁷⁾ による船尾形状の系統的抵抗試験をあげることができるが，その当時は定量的な評価は困難であるとされた．1966年に回流水槽懇談会が発足した．第1回の議事録²⁸⁾ に会の目的として，回流水槽で抵抗試験が可能な技術の研究をすると記されている．その会で第二世代型と第三世代型の回流水槽を用いた持ち廻りの抵抗試験が行われ²⁹⁾，回流水槽における抵抗試験の精度が明らかにされ，同時に水槽特性が計測精度に及ぼす問題点もクローズアップされた．

回流水槽試験では制限水路影響が大きいこと，曳航水槽に存在しない水面勾配の作用が無視できないことは初期から知られ^{2), 8), 16), 17), 29)}，水面勾配作用の修正法の原理は線型モデルではあるが知られていた．しかし回流水槽懇談会による持ち廻り試験で各水槽の試験結果が大きく異なり，修正の検証は困難であった．その後，回流水槽の抵抗試験は比較試験の捉え方で行われてきた．同一水槽であれば，流速分布，制限水路影響および水面勾配等は比較する2船型に対し同じように作用するという考え方を根拠としている．第四世代型になり小倉ら^{16), 17)} は，タイプシップ（類似船型）のデータを用いて小型模型による回流水槽試験結果を大型模型による曳航水槽試験レベルに修正し，船型改良の相対的効果の確認だけでなく，実船の性能推定を行う手法を開発した．その後，この方法は第四世代型回流水槽が多数の造船所に建設されるとともに広まり，各種大型商船を中心に実船の定量的な評価を必要とする船型開発に，回流水槽が日常的に活用されてきた^{30) ~ 35)}．一方で，たとえば佐藤ら³⁶⁾ は造波装置を設置して高速艇の波浪中試験の可能性を示し，秋林ら³⁷⁾ は仮底を設置して模型船の造る浅水波を可視化してその特性を検討した．

以上は推進性能に主眼をおいた例であるが，回流水槽は操縦性能に関する研究，プロペラの開発，各種省エネ装置の開発などにも活用されてきた．また最近のトピックスとして，計測時間に制限がない利点を活かしたPIVによる流場計測³⁸⁾，橋詰ら³⁹⁾ の操縦性能試験に関する新しい試験法をあげることができる．

我が国は回流水槽の利用において，実船性能の推定など定量的な試験を追究し，独自の発展をとげてきた．そして水槽の性能は向上し第五世代型とも称される水槽に移行している．しかし第四世代型の出現以降，残念ながら推進性能に関する活用の進展はほとんど見られない．

1. 2 既往の研究

1. 2. 1 商船の実船性能推定

実船の推進性能推定では大型模型による曳航水槽試験が基本である．そこで既述のように小倉ら^{16), 17)} は，小型模型による回流水槽抵抗試験結果を大型模型抵抗試験レベルに修正する手法を開発した．その手法では，計測された形状影響係数と造波抵抗係数に対してタイプシップ（類似船型）のデータによる修正が必要で，タイプシップの曳航水槽試験結果を必要とするとともに，同時期に2船型の試験を行わねばならず試験時間が倍増する．このためにコストおよび時間効率で難点を伴い，折角の回流水槽の試験効率の高さを阻害する．しかも2船型に対して回流水槽の作用量が同じである保証はなく，回流水槽活用の更なる発展の観点から解決しな

ければならない課題であった。

一方、省エネルギー化を図る船型開発のニーズは、大型商船のみならず内航の小型商船にまで広がっており、回流水槽試験が曳航水槽試験より短い期間で結果が得られることは自明であるが、より低コストで短期間に実船性能が得られる船型開発手法の進展は近年ほとんどない。また、船型形状が年々大きく変化している中、従来と異なる斬新な船型の実船性能推定はタイプシップとの比較による手法では難しい。

1. 2. 2 漁船の船型開発

漁船の船型と推進性能、特に船型開発に関する資料は限られている。船型開発例として、高橋ら⁴⁰⁾によるカツオ漁船の船型開発、荻原ら⁴¹⁾によるマグロ漁船の船型開発、川島ら⁴²⁾による漁業調査練習船のバルジの開発、永松ら⁴³⁾による漁業実習船の船型開発をあげることができる。以上は一部であるが、商船に比べ僅少である。

船型開発があまり行われてこなかった漁船の船型開発では、船型の問題点とその改善指針を的確に明らかにすることが先決で、この目的のためには流体现象の把握が簡単にできる回流水槽が適している。また商船の船型開発では、粘性非粘性を問わず各種の数値計算手法が活用され、最近ではより高度化した数値流体力学（CFD）が有力なツールになっている⁴⁴⁾。しかしながら漁船の船型開発への数値計算手法の利用は、造波現象が大きくかつ複雑であるため、ほとんど行われていない。漁船の船型開発に対して回流水槽試験をどのような視点で活用するのか、数値計算手法をどのように活用するべきか、総じて回流水槽試験の船型開発への活用が大型商船と漁船でどのように異なるのかについて論じた論文はない。短期間で低コストが可能な、商船とは異なる漁船を対象とした回流水槽試験の船型開発への活用法の構築が急がれる。

1. 3 本研究の目的

以上を背景に、本論文は回流水槽試験による船型開発について論ずることを目的とする。

船型開発試験に活用されている第四世代型の水槽特性を明らかにし、性能改善が進んだ水槽でも抵抗試験に及ぼす影響が大きい制限水路影響と水面勾配の作用を考察する。この物理考察を用いて、複数の相似船型の曳航水槽試験結果と回流水槽試験結果を比較検討し、タイプシップの水槽試験結果がなくても、回流水槽試験結果を曳航水槽試験レベルに推定できる手法を提案する。そしてその手法の推定精度を示し、コスト削減、試験時間の半減等、船型開発の効率向上に有効であることを示す。

次に漁船を対象とした船型開発手法を提案する。商船の船型開発では水槽試験が実施されることが通常で、CFDによる船型開発も常套化し、船型開発のためのデータベースも蓄積されている。しかし未だ漁船では多くが経験に頼るのみである。2種類の小型漁船の船型開発事例により、船型の問題点抽出とその改善指針設定に対する回流水槽試験の利便性、それら検討の重要性、および数値計算手法の合理的な活用法を具体的に示し、商船とは異なる漁船に対する回流水槽試験による船型開発について示す。そして本手法の妥当性を検証し、漁船の船型開発の効率向上に有効であることを示す。

1. 4 本論文の構成

本論文の構成は次の各章による。

第2章では、回流水槽試験に影響を及ぼす因子として、水槽特性と小型模型船について検討し、水槽性能は改善されてきているが、制限水路および水面勾配が抵抗試験に及ぼす影響が大きいことを示す。

第3章では、Series 60 船型模型の回流水槽と曳航水槽による抵抗試験結果を比較し、回流水槽では制限水路影響の修正が不可欠であることを示す。つぎに制限水路影響と水面勾配の作用がどのような性質にあるのかを Taylor 展開にて解析的に考察し、回流水槽による抵抗試験の特徴について示す。

第4章では、商船の回流水槽試験の解析に関して、抵抗試験結果を曳航水槽大型模型試験レベルに修正する効率的な手法を示す。主要目の異なる 10 種類の商船船型について、制限水路影響と水面勾配の修正を加えた回流水槽の抵抗試験結果を、曳航水槽の大型模型抵抗試験と比較し、造波抵抗係数と形状影響係数の相違を明らかにする。次にタイプシップ（類似模型）のデータがない条件でも大型模型抵抗試験レベルに修正できる手法を論じ、この手法の推定精度を定量的に評価する。そして回流水槽による小型模型試験（長さ 2.0 m）でも曳航水槽による大型模型試験（同 5~7 m）に準じた結果が得られることを示す。

第5章では、回流水槽試験の漁船の船型開発への活用手法について、具体的に小型サンマ漁船と定置網漁船に適用した結果を示し、その妥当性を検証する。模型船による船体まわりの流れの観察と抵抗試験により船型形状の問題点を抽出し、その改善指針を明確にする。この情報をもとに数値計算手法（線型造波理論、非線型計画法、最適化手法、CFD）を効率的に活用し、改良船型を具体化する。そして回流水槽試験による本手法の妥当性の検証を基に本活用法を論じ、小型模型（長さ 1.0~1.5 m）が充分活用できることも示す。

第6章では、結論として回流水槽試験による船型開発について総括し、今後の課題についても示す。

Table 1-1 Development of circulating water channel in Japan.

generation	1st	2nd	3rd	4th
term	1951~1955	1956~1965	1966~1978	1979~
main type	horizontal	horizontal	vertical	vertical
features	flume	nozzle and rectification device	same as the left and free surface accelerator	same as the left and two driving system
main application	observation around hull using flow visualization	investigation of the flow mechanism around hull using flow visualization	investigation of the flow mechanism around hull, resistance test	resistance test, self-propulsion test, flow visualization, actual ship prediction
velocity deviation*	10~20%	4%	2.0%	1.0~2.0%
steady wave height*	—	—	±2.5 mm	±1.0~±1.5 mm
water surface inclination*	—	—	1/1000	1/3000~1/10000

*) at mean velocity 1.0 m/s.

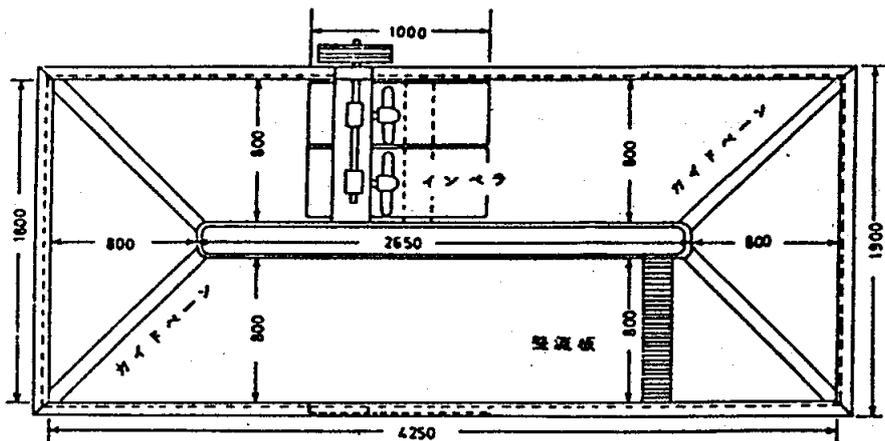


Fig.1-1 First generation type - Tokyo Fisheries University - 9).

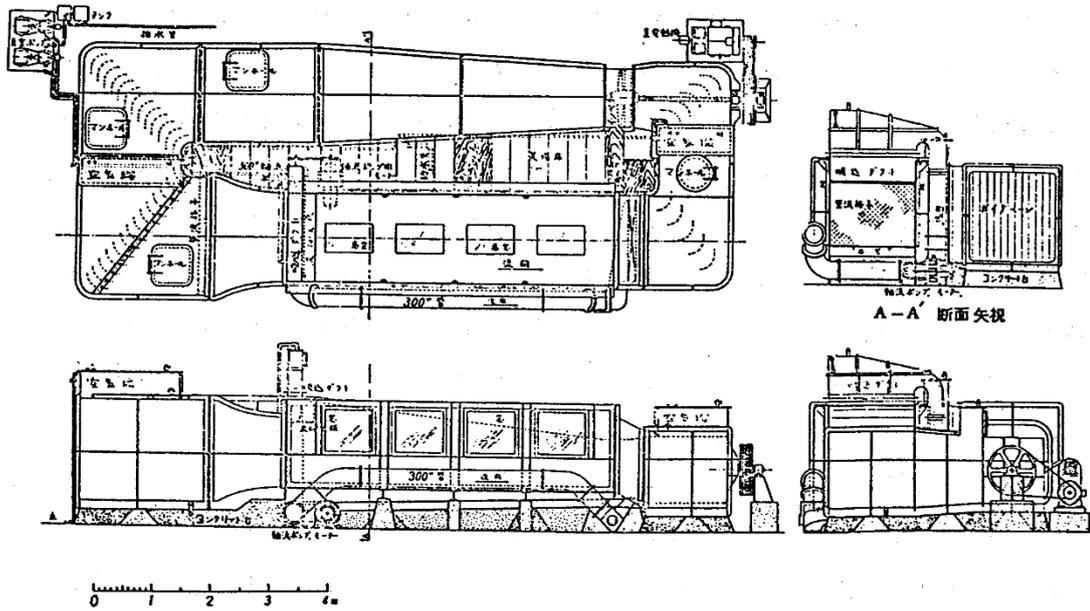


Fig.1-2 Second generation type - University of Tokyo - 9).

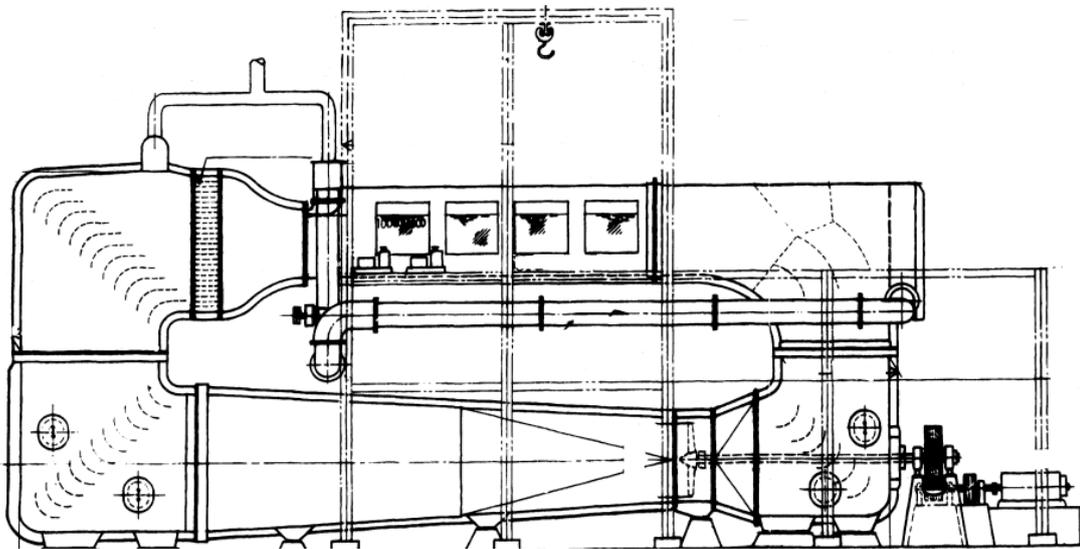


Fig.1-3 Third generation type 1).

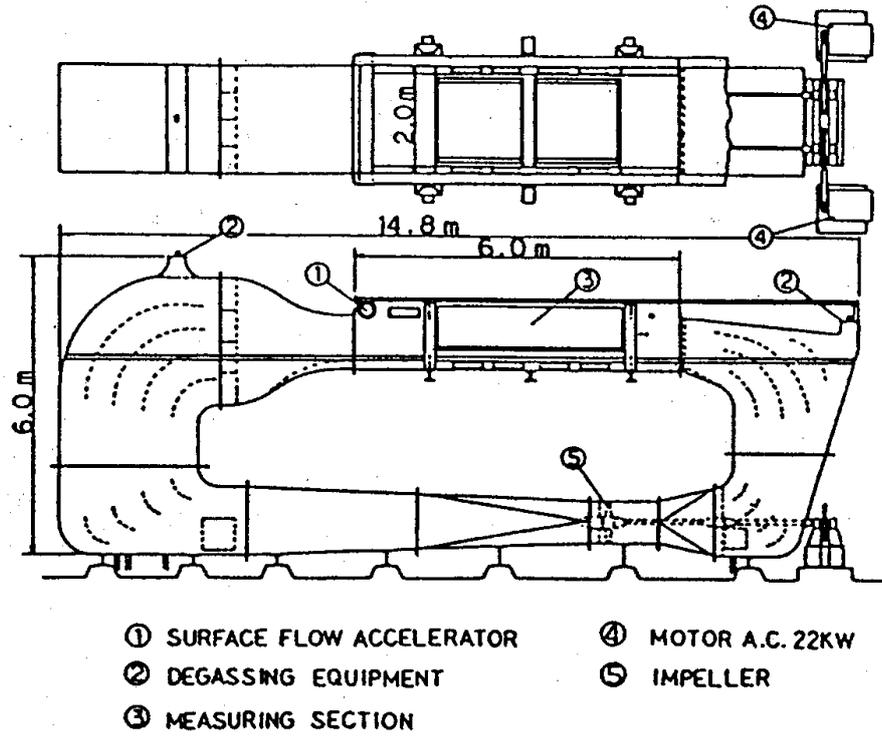


Fig.1-4 Forth generation type ⁹⁾.



Photo 1-1 Fifth generation type.

第2章 抵抗試験に影響を及ぼす因子

2. 1 抵抗試験に影響を及ぼす因子

船舶海洋の分野で回流水槽とは、Fig.2-1 に示す自由表面を有し、水が回流する水槽を表す。試験を行う計測部の水の流れおよび自由表面形状が試験に重大な影響を及ぼし、模型の大きさは曳航水槽よりも小型になる。回流水槽の特性とそれらが模型船抵抗試験に及ぼす影響については、これまで幾つかの研究がなされてきた。高弊ら²⁹⁾は持ち廻り模型船の抵抗試験から、抵抗計測に関する重要な問題点について原因究明と修正法の検討を行い、さらに抵抗計測の精度を明らかにした。そして抵抗試験に不利な影響を与える要因として、(1) 流速分布の不均一、(2) 水面（自由表面）勾配、(3) 自由表面に生じる定在波、(4) 制限水路、(5) サージング（流速変動、水位変動）を挙げている。その当時の回流水槽は第二世代型または第三世代型であり、現在の回流水槽に比べ十分な性能を有していたとは言い難く、「いくつかの類似船型についての抵抗係数の大小の順位は、大型模型船による曳航水槽のそれと一致する」という定性的な記述のように、この当時は定量的な評価について課題があった。一方、姫野ら¹⁵⁾は、自由表面に存在する定在波の波高に比例する Froude-Krylov 力が船体抵抗に及ぼす影響は、波高 ± 0.7 mm 程度であれば問題ないが、 ± 2 mm では影響が大きいことを確認した。なお当時の水槽の波高は代表流速 1.0 m/s で ± 2 mm 程度で、近年の水槽に比べると大きい。近年、川島ら^{45), 46)}は、水面勾配ゼロの位置が存在し、制波板と水量を適正に調整すれば定在波の波高を小さくすることが可能で、そのような場合には抵抗に及ぼす影響は実務上の観点からは無視できることを明らかにしている。

次節以降、回流水槽抵抗試験に影響を及ぼす因子について、船型開発試験に用いられる標準的な第四世代型水槽である（株）西日本流体技研 第2回流水槽（計測部寸法：長さ 6.0 m，幅 2.0 m，水深 1.0 m，最大流速：2.0 m/s）およびその水槽における模型船試験（模型長さ 2.0 m）を中心に検討する。

2. 2 水槽特性

横断面流速分布（自由表面ごく近傍および側壁近傍を除く）の偏差は、第四世代型水槽では代表流速 1.0 m/s にて 2.0%以下⁹⁾で、自由表面近傍についても表面流加速装置により適切に加速されている。対象水槽の制波板先端からの距離 x における深さ方向流速分布を Fig.2-2 に示す。5種類の代表流速（0.35, 0.70, 1.00, 1.30 および 1.60 m/s）について、距離 x が 1.01, 1.51, 2.01, 2.51 および 3.51 m の位置にて、自由表面近傍から水深 0.125 m までの計測結果である。流速が速くなると水深方向流速分布の偏差は大きくなるが、代表流速 1.00 m/s にて ± 2.0 %程度である。Fig.2-3 に距離 x に対する水深 0.125 m までの流速変化の割合 V_r を示す。距離 x が 1.51 m 位置（模型船 F.P.は $x=1.50$ m）における平均流速を基準としている。表面流加速装置による加速効果の減少等で、自由表面付近の流速は制波板から離れるに従い低下するが、水深 0.125 m までの平均では 1.0 m あたり約 0.2~0.3%の速力低下でわずかである。また気泡混入は代表流速 1.6 m/s 以下ではほとんど無い。なお第四世代型の固有乱れは曳航水槽の 0.1%に対して 2%程度である⁹⁾。

水槽中心の自由表面形状計測結果を Figs.2-4(1)~(4)に示す. 計測した代表流速は 0.40, 0.70, 1.00 および 1.30 m/s で, 定在波の波高, 波長および平均自由表面形状変化は流速の増加と共に大きくなる. Fig.2-4(3)に示す代表流速 1.00 m/s の定在波の波高は, 模型船が設置される制波板から 1.5~3.5 m の範囲では $\pm 0.5\sim 1.0$ mm である. 代表流速 1.3 m/s (長さ 2.0 m 模型でフルード数 0.30) 程度までであれば, Froude-Krylov 力が船体抵抗に及ぼす影響はほとんど無いと推定される. 定在波の波長および波高は計測部内で一定でなく, 制波板直後に発生する波以外に, 制波板両端および側面ガラス端部のわずかの凹凸から発生する波, ならびに計測部後方の管路形状が自由表面形状に影響を及ぼしている. なお, 代表流速 1.00 m/s における自由表面変動は幅 0.5 mm, 周期 4.5 sec. である.

自由表面形状を(2-1)式のモデルと仮定し, 各パラメータを Marquardt 法^{47),48)}による非線形最小二乗法によって求め, Figs.2-4(1)~(4)に実線で示す.

$$H(x) = (a_0 + a_1x + a_2x^2) + \left\{ b_0 + b_1 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right\} \cos \left\{ c_0 + c_1 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) + c_2 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right)^2 \right\} \quad (2-1)$$

ここで x は制波板先端からの距離, λ は(2-2)式で表される深水波線型理論による定在波の波長である.

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} v^2 \quad (2-2)$$

水面勾配 (波成分を除いた形状) を(2-1)式中の $(a_0 + a_1x + a_2x^2)$ として求め, Figs.2-4(1)~(4)に点線で示す. 水面勾配は一定でなく, 川島ら^{45),46)}によって見いだされたように, 計測部中央部付近で凸状になり, 水面勾配ゼロの位置が存在する. そして, その位置は本水槽の場合には制波板から約 2.3 m の位置にあり, この位置は代表流速 0.70, 1.00 および 1.30 m/s でほとんど変わらない. 長さ 2.0 m 模型船を制波板から 1.5 m を F.P.として設置すると, 制波板より 2.5 m の位置となる船体中央は水面勾配が小さい位置になる. なお水槽内面形状は, 製作誤差, 観測窓ガラスの取付段差および水圧影響等により完全な平面ではなく, このことが自由表面形状に影響を与えている⁴⁹⁾.

2. 3 模型船

回流水槽では模型試験に与える制限水路影響は曳航水槽に比べて大きく, 水槽横断面積に対する模型船最大横断面積は, 曳航水槽の 1/400~1/160 に対して回流水槽は 1/80~1/40 である. 水槽幅は, 模型船長に対して曳航水槽は 2 倍程度で回流水槽は同程度であり, 模型幅に対して曳航水槽は 10 倍程度で回流水槽は 6 倍程度である. 水深は, 模型船長に対して曳航水槽は同程度以上で回流水槽は半分程度であり, 喫水に対して曳航水槽は 20 倍程度で回流水槽は 10 倍程度である. 水槽横断面寸法の模型船主寸法に対する割合は, 曳航水槽は回流水槽の 2 倍程度ある. なお, 回流水槽計測部の長さは模型船長の 3 倍程度である.

Series 60 ($C_b = 0.6$) 船型の垂線間長 L_{pp} 1.5, 2.0 および 2.5 m 模型の造波抵抗係数 r_w および形状影響係数 K を Figs.2-5(1), (2)に示す. 模型船 F.P. 位置は制波板先端より 1.50 m で, すべ

での模型で同じである。乱流促進として、オーディネイト 9-1/2 に高さ 2.0 mm, 間隔 10.0 mm でスタッドをすべての模型で同じように装着している。造波抵抗係数 r_w は(2-3)式で表示され、フルード数 Fn に用いられた代表長さは水線間長 L_{WL} である。

$$r_w = \frac{Rw}{\rho V^2 \nabla^{\frac{2}{3}}} \quad (2-3)$$

ここで Rw は造波抵抗, ρ は水の密度, V は一様流速, ∇ は排水容積である。

Fig.2-5(1)は計測結果, Fig.2-5(2)は(2-4)式の田村の式⁵⁰⁾で制限水路影響の修正をおこなった結果である。摩擦抵抗係数 C_f は Schöenherr の式, 形状影響係数 K の決定は Prohaska⁵¹⁾の船長フルード数 Fn の 4 次式によった。

$$\frac{\Delta V}{V} = 0.85 \frac{A_M}{A_T} \left(\frac{L_{WL}}{B_T} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{1 - Fh^2} \quad (2-4)$$

ここで ΔV は一様流速の増加量, A_M は模型船最大横断面積, A_T は水槽横断面積, B_T は水槽幅, Fh は水深 h によるフルード数である。

制限水路影響の修正を行うと, 模型間の形状影響係数 K の差は小さくなるが依然として相違がある。また造波抵抗係数 r_w の差はほとんど変化なく, その差の主な原因は模型設置範囲の自由表面形状, 特に水面勾配の相違と推察される。

模型船には乱流促進のためのスタッドが装着される。Series 60 ($C_b = 0.60$) 船型の垂線間長 L_{pp} 2.0 m 模型にてスタッドの影響 (オーディネイト 9-1/2 に高さ 2.0 mm, 間隔 10.0 mm) を検討した。抵抗試験結果を Fig.2-6 に示す。スタッド有無で形状影響係数 K に約 0.02 の相違があり, その固有抵抗は無視できない。

小型模型船の場合, 自航試験で必要となるモータおよび自航動力計を模型内部の船体中央部付近に設置しなければならないため, その付近に曳航ロッドを取付けることが困難である。そこで通常, 曳航ロッド取り付け位置が計測機器上方になり, 曳航点高さが試験吃水よりも高くなる。航走姿勢があまり変化しない排水量型船舶では影響は少ないが, 半滑走以上のフルード数における計測の場合には航走姿勢への影響に留意が必要である。

2. 4 結言

回流水槽抵抗試験に影響を及ぼす因子として, 水槽特性と模型船について検討し, 第四世代型水槽において以下の結論を得た。

- 1) 水槽特性が抵抗試験に及ぼす影響では, 計測部の水の流れおよび自由表面形状が重要である。その主な要素は, (1) 流速分布の不均一, (2) 水面勾配, (3) 自由表面に生じる定在波, (4) 制限水路, (5) サージング (流速変動, 水位変動) である。性能を評価した第四世代型水槽では流速分布の偏差は小さく, また商船を対象とした計測範囲では定在波が小さいために Froude-Krylov 力も小さい。そこで商船を対象とした抵抗試験の場合にはそれらの影響はほとんどない。水面勾配は一定でなく, 計測部中央部付近で凸状になり水面勾配ゼロの位置が存在し, その位置は流速によりほとんど変わらない。模型船設置位置を工夫すると,

船体抵抗に与える水面勾配の影響を少なくできる。

- 2) 模型船サイズは，計測精度の観点を含め，幅 2.0 m の水槽では長さ 2 m 程度が標準とされているが，その場合には制限水路影響が大きい．いずれにしろ回流水槽試験ではその影響は免れない．
- 3) 船長が違う Series 60 ($C_b = 0.6$) 船型模型の抵抗試験を実施した．田村の式で制限水路影響の修正を行うと，船長間の形状影響係数 K の差は小さくなるが依然として相違がある．また造波抵抗係数 r_w の差は修正してもほとんど変わらず，その差の主な原因は模型船設置範囲の自由表面形状，特に水面勾配の影響と推察される．制限水路影響が過大な場合に適した修正法および水面勾配の作用の補正が課題である．
- 4) 乱流促進，曳航点高さ等，小型模型ゆえの課題もある．

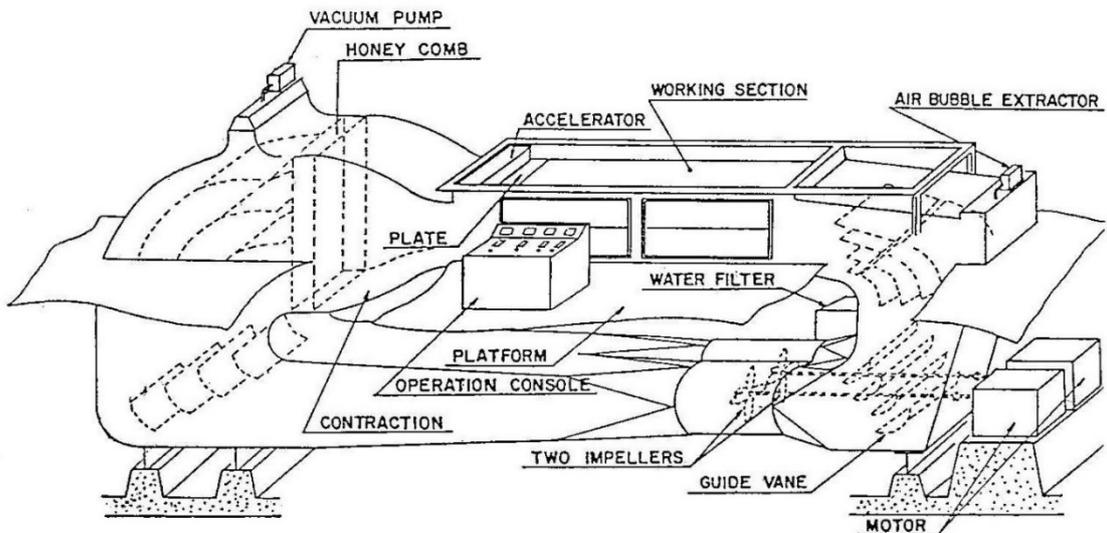


Fig.2-1 Schematic diagram of a circulating water channel ¹⁶⁾.

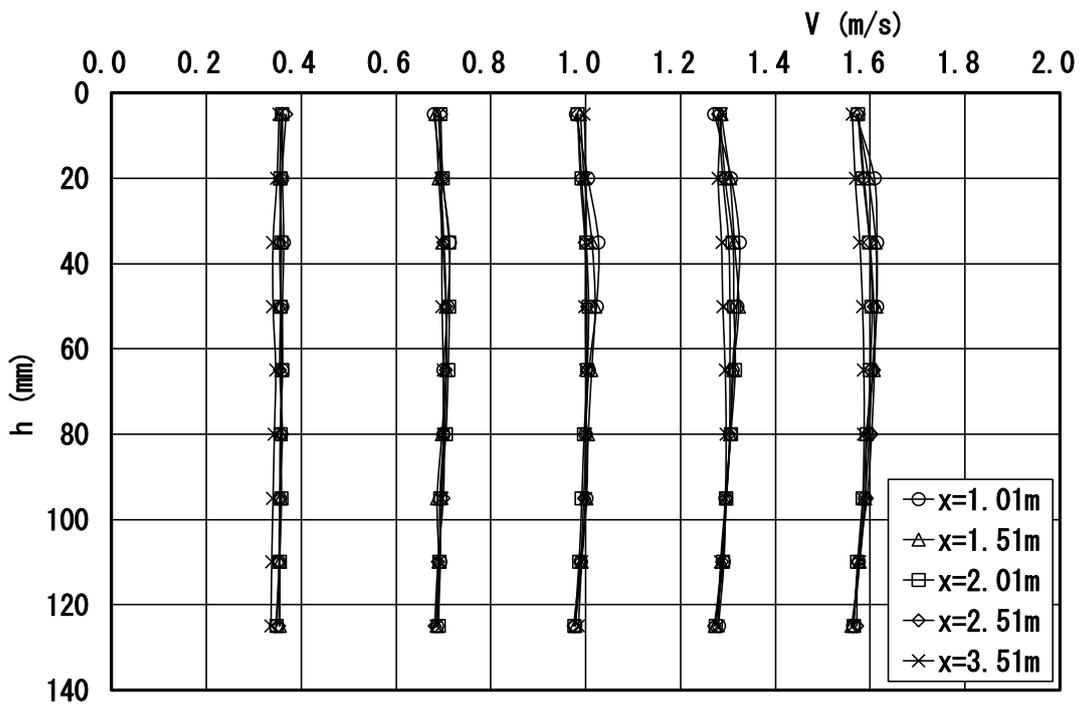


Fig.2-2 Velocity distribution.

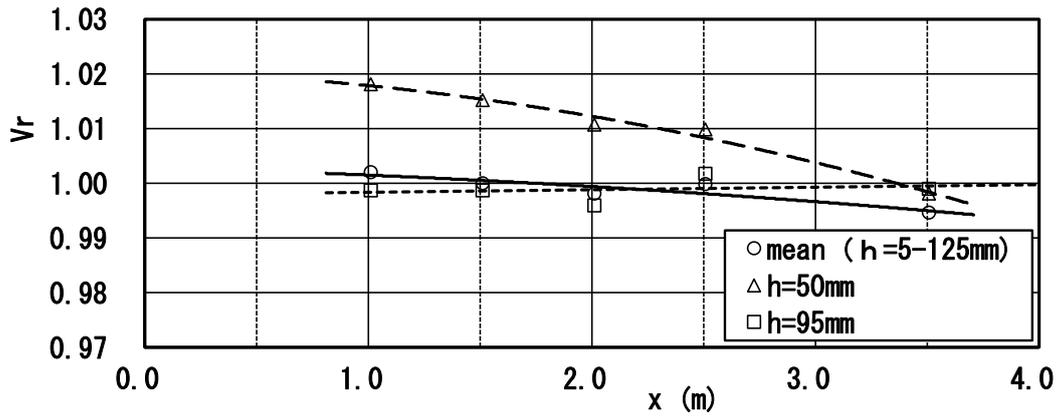


Fig.2-3 Velocity ratio.

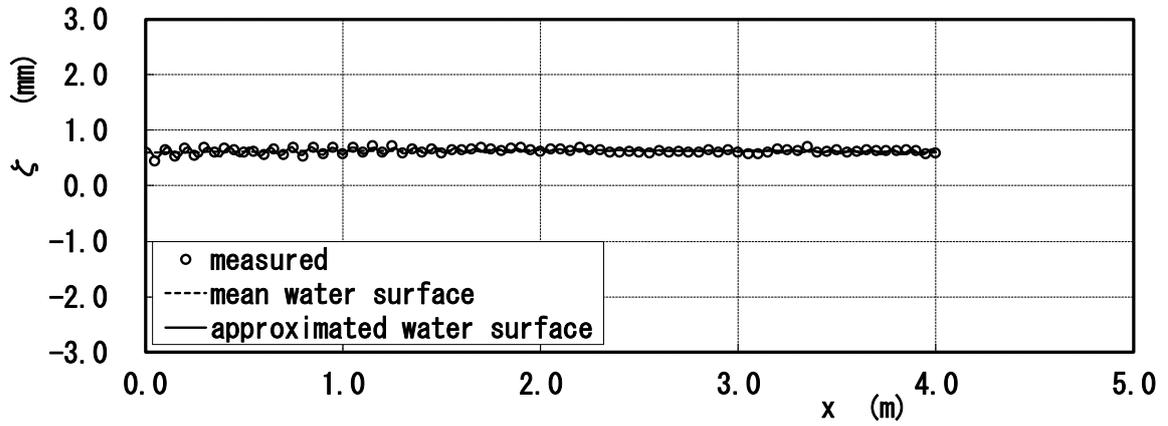


Fig.2-4(1) Free surface at $V=0.40$ m/s.

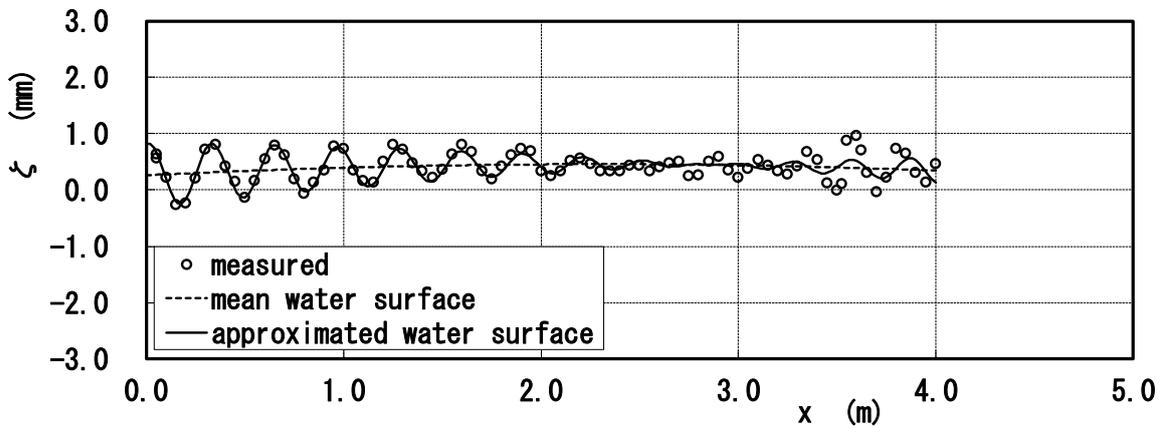


Fig.2-4(2) Free surface at $V=0.70$ m/s.

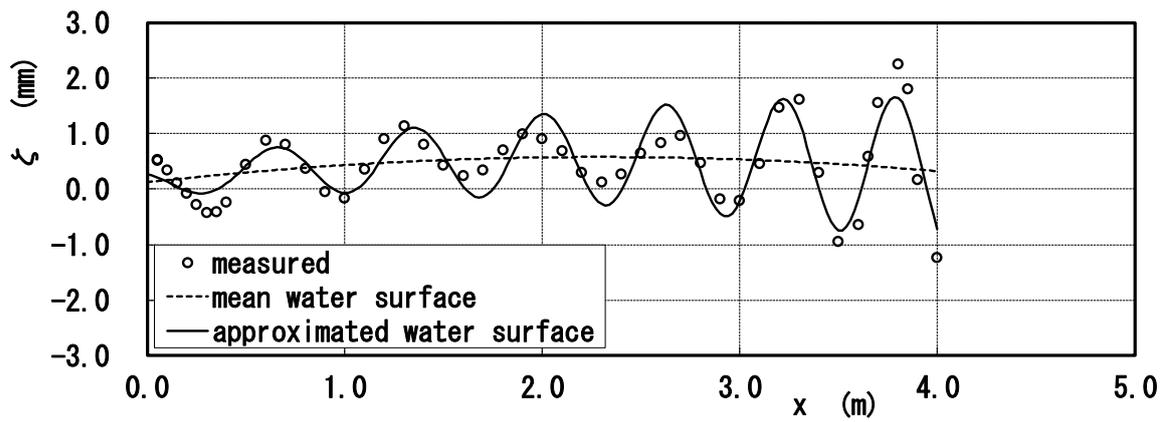


Fig.2-4(3) Free surface at V=1.00 m/s.

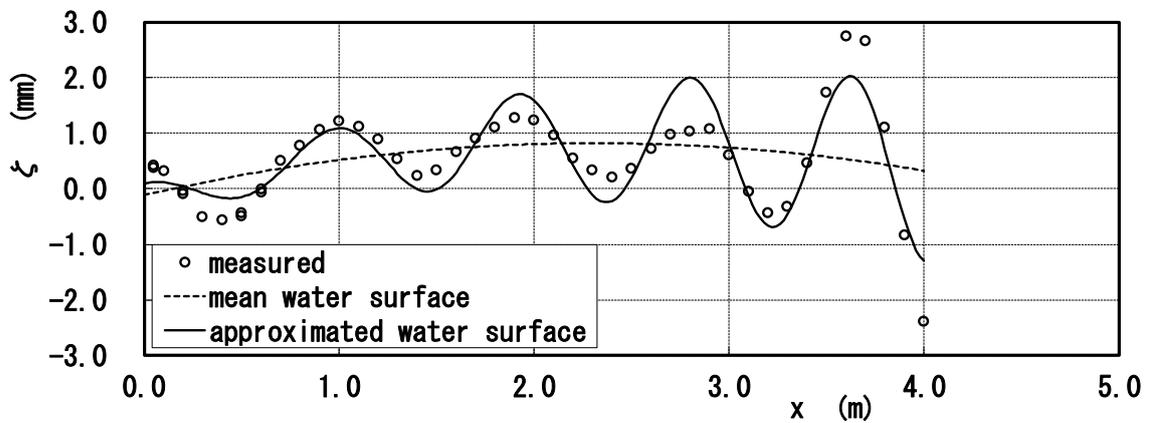


Fig.2-4(4) Free surface at V=1.30 m/s.

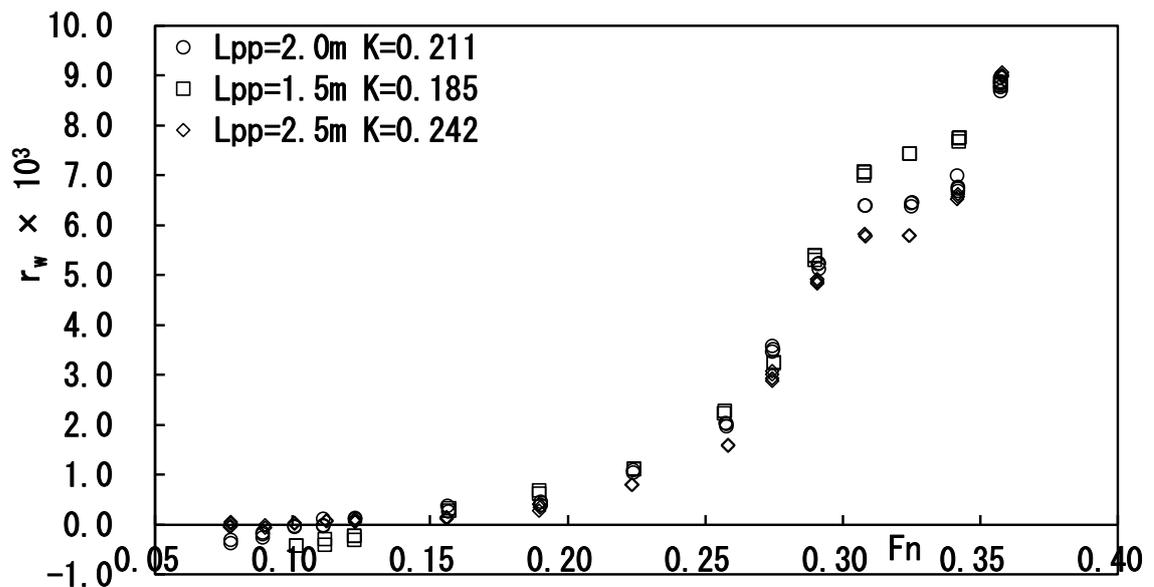


Fig.2-5(1) Resistance factor K and r_w without corrections -model length series-.

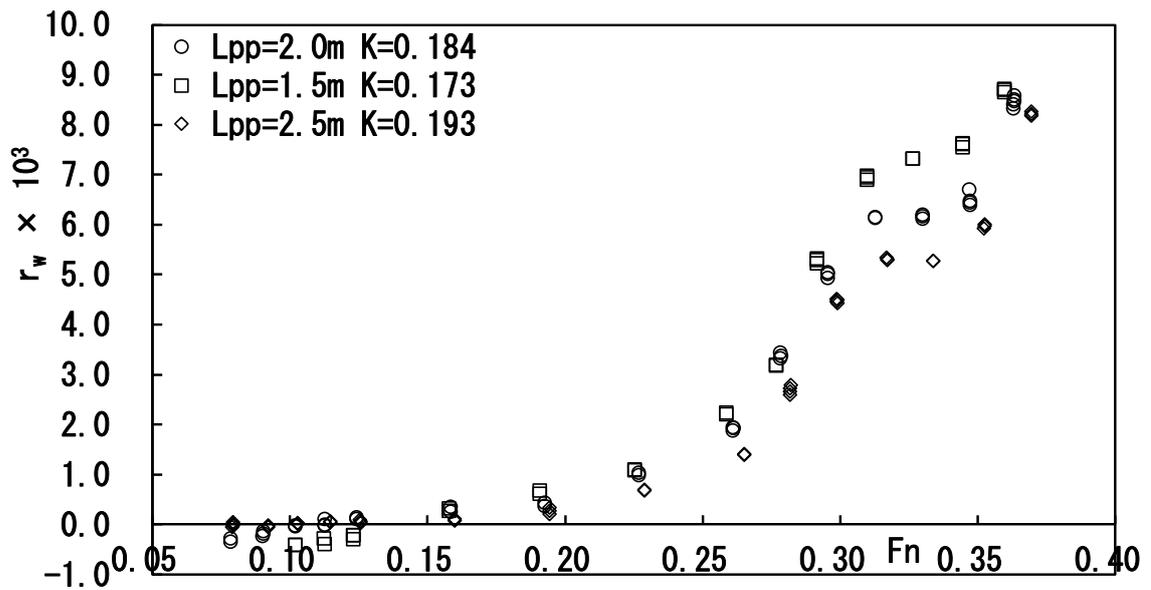


Fig.2-5(2) Resistance factor K and r_w with blockage correction -model length series-.

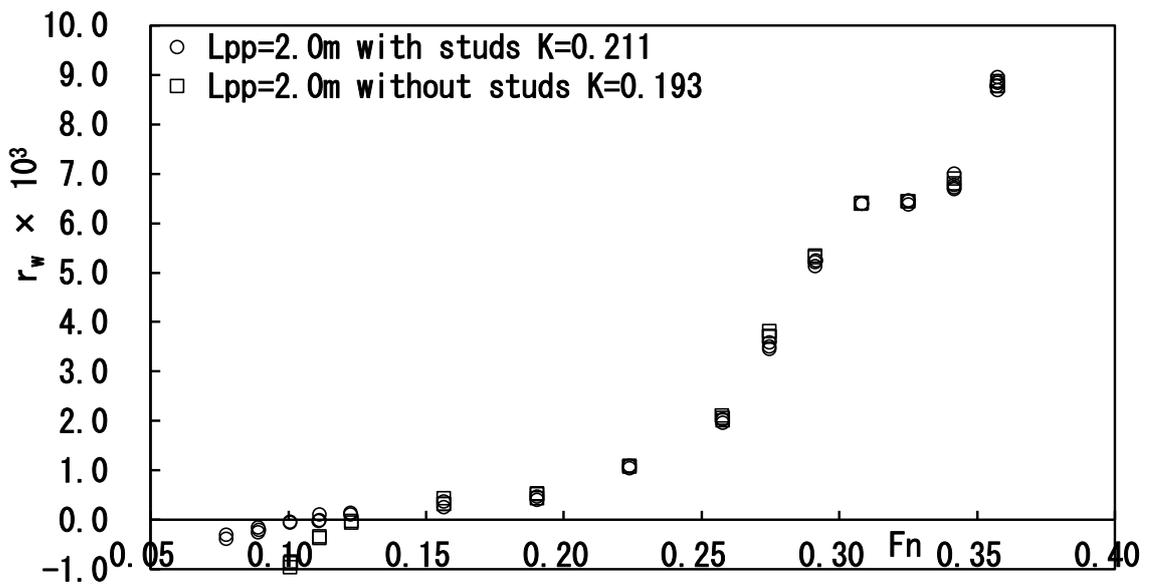


Fig.2-6 Resistance factor K and r_w with and without studs.

第3章 制限水路影響と水面勾配の作用

3. 1 回流水槽試験の特徴

第2章で示したように、回流水槽試験に及ぼす影響が大きい因子に制限水路影響と水面勾配の作用がある。そこで回流水槽試験と曳航水槽試験における制限水路影響を比較し、回流水槽におけるその作用量を調べた。梶谷ら⁵²⁾による長さ2.5 m Series 60 ($C_b=0.6$) 船型模型の東京大学曳航水槽 (UT) における抵抗試験結果 (船長フルード数 F_n に対する浸水表面積ベースの全抵抗係数 C) を Fig.3-1(1)の上部に示す UT-2.5m の実線で、田村の式⁵⁰⁾ で制限水路影響を修正した結果を破線 (seed-data) で示す。制限水路影響は無視できるほどの作用量である。次に UT-2.5m の制限水路影響を修正した結果を用い、二次元外挿法で長さ6.0 m と 2.0 m 模型の抵抗を模擬的に求め (Fig.3-1(1)の SRC-6m の実線および Fig.3-1(2)の CWC-2m の実線)、そして長さ6.0 m 模型を日本造船技術センターの旧目白第一水槽 (SRC) で、長さ2.0 m 模型を第2章に示した回流水槽 (CWC) で試験したとして制限水路の影響量を比較した。Fig.3-1(1)の SRC-6m の一点鎖線、Fig.3-1(2)の CWC-2m の一点鎖線が修正した結果である。それぞれの制限水路量 (水槽横断面積に対する模型最大横断面積の割合) m を Table 3-1 に示す。回流水槽の値は曳航水槽の4~6倍で明らかに大きい。曳航水槽では UT-2.5m, SRC-6m とともに制限水路の影響が無視できるレベルであるのに対し、回流水槽では顕著に存在する。さらに Fig.3-1(2)の二点鎖線が回流水槽の水面勾配の作用の修正結果で (第4章の方法による)、これも無視できないレベルで介在する。

回流水槽では計測精度の向上を目的に計測部断面を大きくすると、水槽建設や模型試験のコストが増加するだけでなく、最も重要な試験効率が損なわれるという指摘⁵³⁾がある。これは小型模型による回流水槽試験の計測精度が向上できれば、その価値は高くなると捉えることができる。Table 3-1 に示すように、模型の排水量を比較すると2 m 模型は6 m 模型の3.7%でしかなく、この数字は試験効率の高さを意味し、計測精度そして実船性能の推定精度の向上の重要性を表している。

3. 2 制限水路影響

3. 2. 1 流速の増加

田村の式⁵⁰⁾では制限水路影響を平均流速の増加としている。その式が模型試験で使用される船長フルード数 F_n の関数として、どのような性質にあるのか Taylor 展開で調べた。

(2-4)式を(3-1)式で表示する。

$$\frac{\Delta V}{V} = 0.85 \frac{A_M}{A_T} \left(\frac{L_{WL}}{B_T} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{1 - Fh^2} = \frac{C_1}{1 - Fh^2} \quad (3-1)$$

ここで C_1 は次式で表される。

$$C_1 = 0.85 \frac{A_M}{A_T} \left(\frac{L_{WL}}{B_T} \right)^{\frac{3}{4}}$$

船長フルード数 Fn で表示すると、(3-1)式は(3-2)式になる。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{C_1}{1 - \frac{L_{WL}}{h} Fn^2} = \frac{C_1 a}{a - Fn^2} \quad (3-2)$$

ここで a は次式で表される。

$$a = \frac{h}{L_{WL}}$$

船長フルード数の修正量 ΔFn は(3-3)式となり、Taylor 展開すると(3-4)式となる(付録参照)。それは船長フルード数 Fn の 1 次項と 3 次項等の線型和になり、第一項のみ取り上げれば船長フルード数 Fn に比例する簡便な性質にある。

$$\Delta Fn = \frac{\Delta V}{\sqrt{gL_{WL}}} = \frac{a C_1 Fn}{a - Fn^2} \quad (3-3)$$

$$\Delta Fn = C_1 \left\{ Fn + \frac{1}{a} Fn^3 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 Fn^5 + \dots \right\} \quad (3-4)$$

回流水槽と曳航水槽との船長フルード数修正量 ΔFn の比較計算結果を Figs.3-2(1), (2)に示す。回流水槽は $a = 0.5$ ($h = 1.0$ m, $L_{WL} = 2.0$ m) , 曳航水槽は $a = 1.0$ ($h = 6.0$ m, $L_{WL} = 6.0$ m) とした。制限水路影響を船長フルード数 Fn の関数で表示すると、低速域 ($0.1 < Fn < 0.2$) では 1 次項が主であるが、高速域では高次項の作用が顕著になり、その作用は回流水槽の方が大きい。

3. 2. 2 抵抗への作用

流速修正に対する全抵抗係数の変化量 ΔCt は、(3-2)式より(3-5)式で近似できる。ここで C_{tm} は計測された全抵抗係数である。(3-5)式を Taylor 展開すると(3-6)式となる(付録参照)。

$$\Delta Ct = -\frac{2\Delta V}{V} C_{tm} = -2C_1 C_{tm} \cdot \left(\frac{a}{a - Fn^2}\right) \quad (3-5)$$

$$\Delta Ct = -2C_1 C_{tm} \left\{ 1 + \frac{1}{a} Fn^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 Fn^4 + \dots \right\} \quad (3-6)$$

回流水槽と曳航水槽の全抵抗係数変化量の比較を Figs.3-3(1), (2)に示す。船長フルード数の修正量 ΔFn と同様に回流水槽は $a = 0.5$ ($h = 1.0$ m, $L_{WL} = 2.0$ m) , 曳航水槽は $a = 1.0$ ($h = 6.0$ m, $L_{WL} = 6.0$ m) とした。高速域になると船長フルード数 Fn の高次項の作用が顕著になる。

3. 3 水面勾配

川島ら⁵⁴⁾は水力学の開水路理論で水面勾配を表現するとき、計測部の流れを一次元で扱えると仮定し、運動量の保存則と連続の式に大気圧条件を課して展開した。なお運動量でなくエ

エネルギー保存則を用いても同展開ができる⁵⁵⁾。その式が制限水路影響と同様に船長フルード数 Fn の関数としてどのような性質にあるのか Taylor 展開で調べた。

水面勾配 θ は(3-7)式で表すことができる⁵⁴⁾。 h , b , A , s , β および τ は計測部の水深, 幅, 横断面積, ぬれ縁長さ, 底面勾配角および壁面の摩擦応力である。線型モデルとして底面勾配角 β は一定, 幅 b の変化は無いとする。また壁面の摩擦応力 τ は境界層の発達小さく計測部内で一定 (速度の2乗に比例⁵⁶⁾) とすると, 自由表面は傾斜するとしても直平面となる。非線型扱いの場合の曲面状自由表面はここでは考えない。さらに, 計測部の水深 h , 横断面積 A およびぬれ縁長さ s は, 流れ方向に変化するがその変化は無視できると仮定すると, (3-8)式で表示される C_2 は定数となる。

$$\theta = \frac{Fh^2}{1 - Fh^2} \left\{ -\frac{1}{\rho g} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{s} \tau - \beta + \frac{h}{b} \frac{db}{dx} \right\} = C_2 \frac{Fh^2}{1 - Fh^2} \quad (3-7)$$

ここで C_2 は次式で表される。

$$C_2 = -\frac{1}{\rho g} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{s} \tau - \beta + \frac{h}{b} \frac{db}{dx} \quad (3-8)$$

(3-7)式の水深フルード数 Fh を船長フルード数 Fn で表現すると(3-9)式になる。

$$\theta = \frac{C_2 \frac{L_{WL}}{h} Fn^2}{1 - \frac{L_{WL}}{h} Fn^2} = C_2 \frac{Fn^2}{a - Fn^2} \quad (3-9)$$

(3-9)式を Taylor 展開すれば(3-10)式を得る (付録参照)。

$$\theta = C_2 \frac{1}{a} \left\{ Fn^2 + \frac{1}{a} Fn^4 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 Fn^6 + \dots \right\} \quad (3-10)$$

水面勾配 θ が抵抗に及ぼす作用は(3-11)式で表される²⁹⁾。その抵抗変化の主成分を重力 (排水量) の傾斜水面に平行な成分 ($\Delta \cdot \theta$) としてモデリングすれば(3-12)式となり, これを Taylor 展開すれば(3-13)式になる。ここで Rt は計測された抵抗値, Rt_0 は水面勾配の作用が補正された抵抗値, Δ は排水量である。排水量 Δ は抵抗値 Rt に対して相対的に大きく, 水面勾配 θ は小さくても抵抗補正量は無視できない量になる。

$$Rt_0 = \frac{Rt}{\cos \theta} + \Delta \sin \theta \quad (3-11)$$

$$\Delta Ct = \frac{\Delta \cdot \theta}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = C_2 C_3 \frac{1}{a - Fn^2} \quad (3-12)$$

ここで C_3 は次式で表される。

$$C_3 = \frac{\Delta}{\frac{1}{2} \rho g S L_{WL}}$$

$$\Delta C_t = C_2 C_3 \frac{1}{a} \left\{ 1 + \frac{1}{a} F_n^2 + \left(\frac{1}{a} \right)^2 F_n^4 + \dots \right\} \quad (3-13)$$

水面勾配の全抵抗係数に及ぼす作用は(3-13)式で表現でき、この式は制限水路影響の全抵抗係数に及ぼす作用の(3-6)式と類似である。したがって制限水路影響と同様に高速域になると船長フルード数 F_n の高次項の作用が顕著になる。

3. 4 解析の特徴

回流水槽の制限水路影響および自由表面の作用については、川島ら^{45), 46), 49), 54), 56), 57)}により詳細に研究されている。第2章でも述べたように、回流水槽試験は曳航水槽試験に比べ制限水路影響が大きく、曳航水槽試験に対して適用される田村の式による平均流速増加のモデリングがどこまで適用できるのかも定かでない。また回流水槽試験は流水中の静止模型というメカニズムであるため、計測部壁面に発達する境界層が平均流速に影響を与え、さらに模型船による計測部境界層の変化が壁面摩擦の変化となって水面勾配に影響を与える。これらは線型扱いとした本方法ではフォローできない成分で、回流水槽による抵抗試験の解析で重要な今後の課題である。

また、Schönherr, Hughes, Prandtl-Schlichting および ITTC1957 の式による摩擦抵抗係数 C_f を Fig.3-4 に示す。横軸は抵抗試験の解析を意図して船長フルード数 F_n としている。4本の線の差は $L=2\text{ m}$ が大きく、それらの傾斜も同様である。これらは摩擦抵抗係数 C_f の選択が回流水槽試験では曳航水槽試験にもまして重要であることを示している。

3. 5 結言

回流水槽における制限水路影響と水面勾配の作用について検討し、以下の結論を得た。

- 1) Series60 船型模型にて回流水槽試験と曳航水槽試験における制限水路影響を比較し、その作用量を調べた。回流水槽の制限水路影響は曳航水槽の4~6倍で、曳航水槽ではその作用が無視できるレベルであるのに対し、回流水槽では顕著に存在する。
- 2) 制限水路影響と水面勾配の作用が、船長フルード数 F_n の関数としてどのような性質にあるかを Taylor 展開で調べた。制限水路影響による流速の増加は船長フルード数 F_n の1次項と3次項の線型和になり、第一項のみ取り上げれば船長フルード数 F_n に比例する簡便な性質にあり、低速域 ($0.1 < F_n < 0.2$) では1次項が主になる。そして高速域では高次項の作用が顕著になり、その作用は回流水槽の方が大きい。また、制限水路影響および水面勾配の抵抗への作用は、低速域 ($0.1 < F_n < 0.2$) では船長フルード数 F_n の作用は小さいが、高速域では船長フルード数 F_n の高次項の作用が顕著になる。
- 3) 回流水槽試験は流水中の静止模型というメカニズムであるため、計測部壁面境界層の影響等、曳航水槽には無い特有の現象があり、制限水路影響の修正方法をはじめ、更なる計測精度向上のために検討すべき課題がある。

Table 3-1 Blockage ratio of CWC compared with TT.

dimension		UT	SRC	C.W.C.
$B_T \times D_T$	(m)	4.0 × 3.5	10.0 × 6.3	2.0 × 1.0
L_{PP}	(m)	2.5	6.0	2.0
Δ	(t)	0.0665	0.9194	0.0340
$m \times 10^3$		2.5	4.0	13.9

remarks; B_T : breadth of tank, D_T : depth of tank,

m : blockage ratio ($=A_M/B_T \cdot D_T$), A_M : maximum sectional area

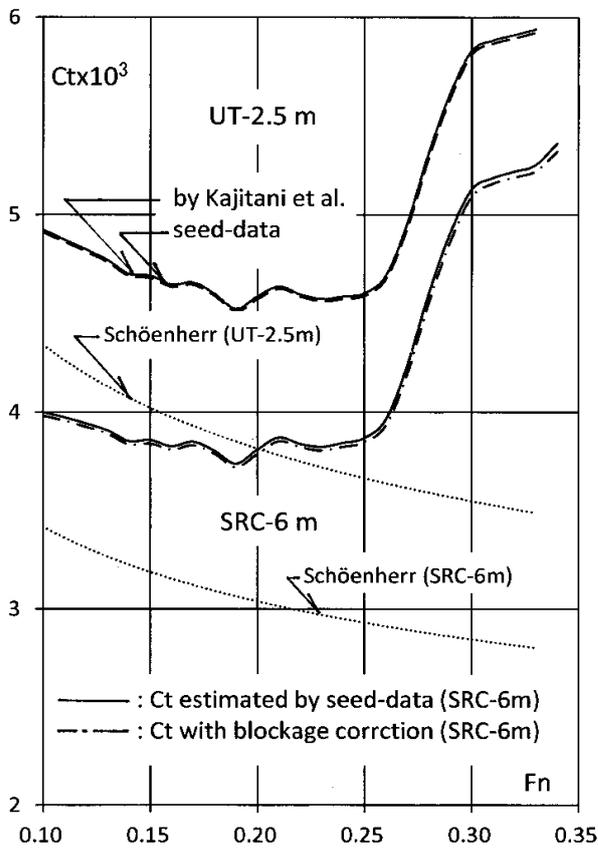


Fig.3-1(1) Effect due to blockage in TT.

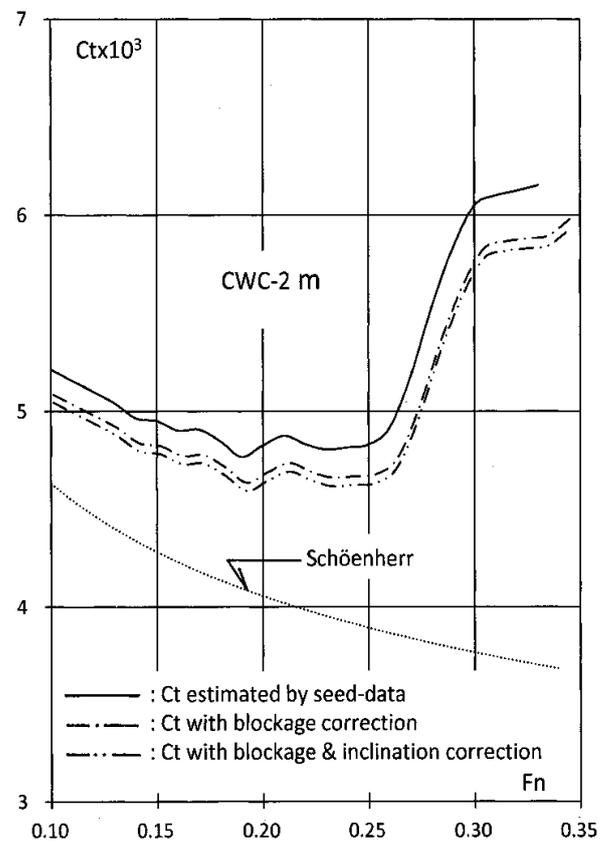


Fig.3-1(2) Effect due to blockage and inclination in CWC.

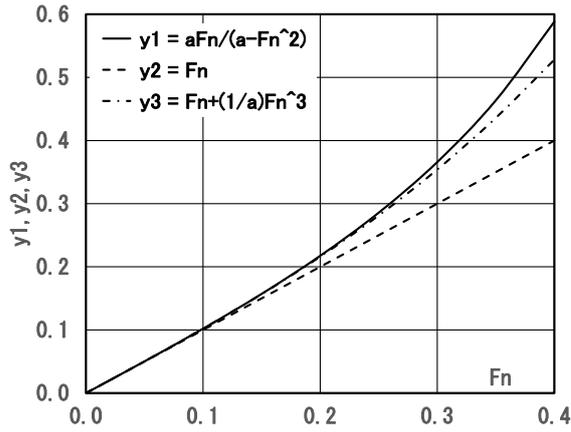


Fig.3-2(1) Increased velocity due to blockage effect in CWC ($a=0.5$).

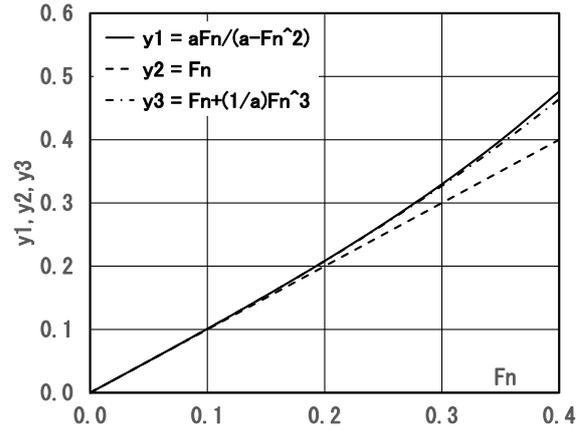


Fig.3-2(2) Increased velocity due to blockage effect in TT ($a=1.0$).

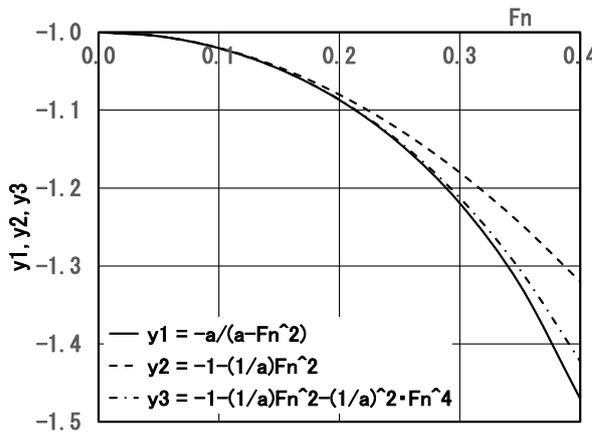


Fig.3-3(1) Effect due to blockage in CWC ($a=0.5$).

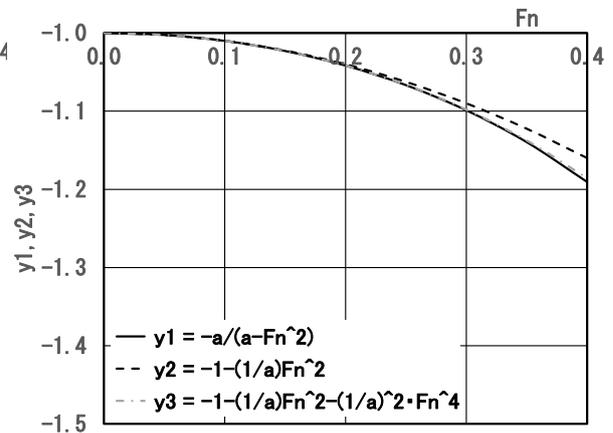


Fig.3-3(2) Effect due to blockage in TT ($a=1.0$).

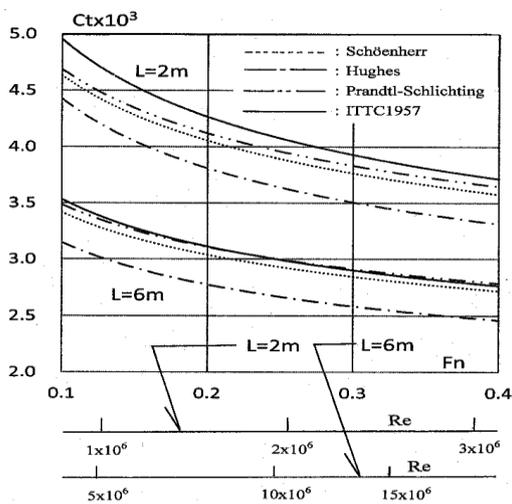


Fig.3-4 Frictional resistance in CWC and TT.

第4章 商船の船型開発試験の解析

4. 1 商船船型の抵抗解析

商船の船型開発の評価として実船の推進性能推定があり、それは大型模型による曳航水槽試験が基本である。そこで、回流水槽における小型模型と曳航水槽における大型模型の相似船型抵抗試験結果を比較した。供試 10 船型の船型主要目を Table 4-1 に、方形係数 C_b と長さ幅比 L_{pp}/B の関係を Fig.4-1 に示す。供試 10 船型は商船船型主要目の大半を包含している。それら船型の中には、固有の設計条件のために船型主要目からの一般的な最適フルード数と違う条件で設計された船型が含まれる。そこで、評価に一般性をもたせるために造船設計便覧⁵⁸⁾に示されている柱形係数 C_p に対する最適な設計フルード数で評価した。その評価フルード数 $Fn_{evaluated}$ は Fig.4-2 に示すように、最適フルード数の上限と下限の間にある。

回流水槽試験は第 2 章と同じ水槽で実施された。模型船長はすべて $L_{pp} = 2.0$ m である。一方、曳航水槽試験の相似模型船長さは、実施した水槽が異なるため同一でなく $L_{pp} = 5 \sim 7$ m である。曳航水槽試験の水槽横断面、模型船長、排水量比および制限水路量を Table 4-2 に示す。回流水槽試験は模型排水量で 3~6 %、制限水路量で 4~6 倍になる。なお乱流促進としてスタッドを、曳航水槽の条件に準じてバルバスバウ先端と F.P.との中間に高さ 1.5 mm、オーディネイト 9-1/2 に高さ 2.0 mm、それぞれ間隔 10.0 mm で装着した。

回流水槽の代表流速 1.0 m/s における計測部中心の自由表面形状を Fig.4-3 に示す。模型を設置する制波板から 1.5~3.5 m 付近において、定在波の波高は $\pm 0.5 \sim 1.0$ mm、水面勾配は -0.40×10^{-4} である。本水槽は第四世代型の初期に設置 (1984 年) されたこともあり、最近の水槽よりも波高は大きい。流速 1.3 m/s 程度までは模型の造波に比べ無視できる。なお川島⁴⁵⁾ は第四世代型回流水槽にて、排水量型流速域 ($0.1 < Fn < 0.3$) において模型船設置位置を系統的に変えて抵抗に対する定在波の作用を調べ、定在波を小さくなるように制御すれば実務上の観点から、その作用はほぼ無視できることを明らかにしている。任意流速の模型設置位置の水面勾配を得るために、制波板から 1.5~3.5 m 付近における流速 0.70 および 1.30 m/s のデータを加え、水深フルード数 Fh と水面勾配 θ の関係を Fig.4-4 に示す。水面勾配 θ の線型式 (3-7) 式の定数 C_2 は -0.40×10^{-3} である。

計測結果を制限水路影響は(3-1)式、水面勾配の作用は(3-7)式 による水面勾配を用いた(3-11)式で修正した。摩擦抵抗係数 C_f は Schöenherr の式、形状影響係数 K の決定は Prohaska⁵¹⁾ の船長フルード数 Fn の 4 次式によった。10 船型の形状影響係数 K と(2-3)式で示す排水容積で無次元化した造波抵抗係数 r_w を Figs.4-5(1)~(10)に示す。それぞれの図には曳航水槽試験結果も示している。曳航水槽試験結果も形状影響係数 K の決定は Prohaska の船長フルード数 Fn の 4 次式によったが、制限水路影響の修正は行っていない。回流水槽試験結果に制限水路影響および水面勾配の作用の修正を行うと、形状影響係数 K は曳航水槽試験に近づくが未だ相違がある。造波抵抗係数 r_w も同様である。

4. 2 修正係数

4. 2. 1 形状影響係数

回流水槽試験の形状影響係数 K について曳航水槽試験を基準に Fig.4-6 に示す。制限水路影響、水面勾配の作用、回流水槽のその他の特性および小型模型の影響等により 50%程度回流水槽試験で大きく、この結果もこれら影響を修正することの重要性を示唆している。また制限水路影響および水面勾配の作用の修正を加えても回流水槽の形状影響係数 K は 20%程度大きい。

(4-1)式に示す、制限水路影響と水面勾配の作用の影響を修正した条件で得られた回流水槽試験の形状影響係数 K_{CWC} と、曳航水槽試験の形状影響係数 K_{TT} との差 ΔK を方形係数 C_b を基準に Fig.4-7 に示す。0.03~0.06 程度大きい。形状影響係数の差 ΔK を回流水槽試験の K_{CWC} を基準に(4-2)式で定義した係数 C_K も同図に示す。方形係数 C_b にほぼ比例して大きくなる。

$$\Delta K = K_{CWC} - K_{TT} \quad (4-1)$$

$$C_K = \frac{\Delta K}{K_{CWC}} \quad (4-2)$$

ΔK の要因の一つとして尺度影響が考えられる。田中ら⁵⁹⁾は Wigley 船型において、長さ 6.0 m 模型で $K = 0.031$ 、4.0 m 模型で $K = 0.077$ 、2.5 m 模型で $K = 0.100$ で、小型模型で大きくなることを明らかにした。しかし同文献には痩せた船型の逆の結果もあり、本研究では Fig.4-7 に示す、方形係数 C_b の増加とともに係数 C_K が大きくなるという結果に基づき進めた。形状影響係数の差 ΔK の要因分析は今後の課題である。

4. 2. 2 造波抵抗係数

供試 10 船型について、Fig.4-2 に示す評価フルード数 $Fn_{evaluated}$ における回流水槽試験と曳航水槽試験の造波抵抗係数の差 Δr_W を Fig.4-8 に、造波抵抗係数の差 Δr_W を回流水槽試験の造波抵抗係数 $r_{W.CWC}$ で無次元化した係数 C_{rW} を Fig.4-9 に示す。造波抵抗係数の差 Δr_W は(4-3)式で、係数 C_{rW} は(4-4)式で表される。なお水槽の浅水影響については、本研究が実務的な観点からの修正法の開発と提案を主眼としているため、文献⁶⁰⁾を参考に修正していない。船長フルード数 Fn 0.20~0.22 近傍で造波抵抗係数の差 Δr_W および係数 C_{rW} の値が大きいが、本データからは定まった傾向は見られない。なお、有効馬力に及ぼす影響は形状影響係数の差 ΔK に比べ小さい。

$$\Delta r_W = r_{W.CWC} - r_{W.TT} \quad (4-3)$$

$$C_{rW} = \frac{\Delta r_W}{r_{W.CWC}} \quad (4-4)$$

4. 3 修正手法と有効性

小倉ら¹⁶⁾は小型模型による回流水槽試験結果を大型模型の曳航水槽試験レベルに修正する手法を開発した。それは形状影響係数と造波抵抗係数をタイプシップ(類似船型)のデータを用いて修正する手法である。そして回流水槽試験と曳航水槽試験では、造波抵抗係数はほぼ一致するが形状影響係数は回流水槽の値が大きいこと、タイプシップを用いた比較試験により実用上さしつかえない程度で大型模型の曳航水槽における抵抗係数を推定することが可能である

ことを示した。しかし船型開発のたびに曳航水槽試験結果を必要とすると共に、同時期に2船型の試験を行わねばならず時間が倍増する。このためコストおよび時間効率で難点を伴った。しかも2船型に対して回流水槽の作用量が同じである保証はなく、回流水槽活用の更なる発展の観点から解決しなければならない課題があった。

タイプシップのデータを必要としない修正法を開発した。(4-2)式で表される形状影響係数 K の修正係数 C_K が、Fig.4-7 に示したように方形係数 C_b と比例関係にあることに着目し、その関係を一次式で近似した。これにより任意の船型の修正係数 C_K を方形係数 C_b から推定でき、曳航水槽試験に相当する形状影響係数 K を求めることができる。Fig.4-10 に計測および修正された形状影響係数 K を曳航水槽試験の値に対して示す。回流水槽にて計測された形状影響係数 K は曳航水槽試験の値の1.3~1.5倍であるが、制限水路影響と水面勾配の作用を修正し、さらに係数 C_K の修正を加えるとほぼ曳航水槽試験と同じ値となる。

(4-3)式および(4-4)式で示される造波抵抗係数の差 Δr_w および係数 C_{rw} は、Figs.4-8, 4-9 に示すように評価フルード数 $Fn_{evaluated}$ 0.20~0.22 近傍で差が大きいが、粗い扱いであるが係数 C_{rw} をゼロとした。つまり造波抵抗係数 r_w には尺度影響等がなく、回流水槽試験でも曳航水槽と同じ値になると仮定する。自由表面形状等がさらに改善された回流水槽では係数 C_{rw} が無視できる可能性がある。

形状影響係数 K には制限水路影響、水面勾配の作用および係数 C_K の修正を、造波抵抗係数 r_w には制限水路影響と水面勾配の作用の修正を加えて算出した剰余抵抗係数 r_R を Figs.4-11(1)~(10) に示す。なお剰余抵抗係数 r_R は(2-3)式で表す造波抵抗係数 r_w と同様に排水容積 ∇ で無次元化されている。三次元外挿法の特徴として形状影響係数を大きく推定すると造波抵抗係数は小さく、逆に形状影響係数を小さく推定すると造波抵抗係数は大きくなる。そこで形状影響係数 K と造波抵抗係数 r_w を含む剰余抵抗係数 r_R で比較評価した。(4-5)式で示される、得られた剰余抵抗係数 $r_{R,estimated}$ と曳航水槽試験の剰余抵抗係数 $r_{R,TT}$ の差 Δr_R を、Fig.4-2 に示す評価フルード数 $Fn_{evaluated}$ に対し Fig.4-12 に示す。剰余抵抗係数の差 Δr_R は $-0.05 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ である。

$$\Delta r_R = r_{R,estimated} - r_{R,TT} \quad (4-5)$$

また Figs.4-13(1), (2) に小倉ら¹⁶⁾ の手法により得られた剰余抵抗係数 r_R との比較を示す。曳航水槽試験の値との差は同程度である。

本手法で得られた値がすべての開発ステージで許容できるわけではない。しかし本手法を用いれば、大型模型曳航水槽試験結果(タイプシップ)がない条件でも、ここで評価した精度内での有効馬力の推定が可能であり、その限界をふまえた有効な活用が期待できる。タイプシップの模型試験が不要となれば、その曳航水槽試験費用が不要となり、そして必要な試験時間が半減し、それに代わって供試船型の隻数を増やすことも容易となる。船型開発の効率向上に貢献でき、回流水槽試験の試験効率の高さと相まって、さらなる活用が期待される。

大型模型による曳航水槽試験は必須で回流水槽は補完の立場でしかない。しかし回流水槽の可能性を追求するためには曳航水槽試験データに頼ることを認め、その価値を高める模索が重要である。最新の回流水槽でも制限水路影響と水面勾配の作用から逃れることはできず、低速域の計測精度とも関係する形状影響係数 K の算出法および修正係数 C_K と C_{rw} の高度化は次の

課題である。しかし各回流水槽の形状影響係数 K ，修正係数 C_K および C_{rW} は水槽の主要目および流体力学性能，主対象とする船型群，或いは採用している摩擦抵抗係数 C_f の式によって事情は異なるであろうが，制限水路影響と水面勾配の作用を差し引き，本手法に準じた修正法を模索すればよい。この手法には一般性があり，各々の回流水槽で活用できるはずである。

4. 4 航走姿勢

供試船型 4 船型について抵抗試験時の姿勢変化を Figs.4-14(1)~(4)に示す。回流水槽試験結果に制限水路影響の修正を行っても，曳航水槽試験結果に比べて F.P. の沈下量が大きい傾向にある。なお，Fig.2-4 に示すように水面勾配は小さくなく，Fig.4-4 における代表流速 1.30 m/s（長さ 2.0 m 模型で $Fn = 0.29$ ）に対応する $Fh^2/(1-Fh^2) = 0.208$ の水面勾配は -0.086 mm/m で，模型船長さに相当する 2.0 m の範囲でも -0.17 mm であり姿勢計測への影響は少ない。F.P. の沈下量の相違は制限水路影響の修正方法および自由表面の波面形状が一因とも言えるが，船首部付近の自由表面近傍流速の影響も考えられる。この姿勢の相違は特に造波抵抗に影響を及ぼすため，造波抵抗係数の修正係数 C_{rW} の高精度化への検討にあたっては留意すべき点である。

4. 5 結言

回流水槽試験による船型開発について，抵抗試験結果を曳航水槽試験レベルに修正する効率的な手法を検討し，以下の結論を得た。

- 1) 商船 10 船型を対象に，制限水路影響と水面勾配の作用を相似模型の曳航水槽試験結果との比較により検討した。回流水槽試験の形状影響係数 K は，制限水路影響，水面勾配の作用，回流水槽の他の特性および小型模型の影響等により 50%程度曳航水槽試験より大きく，制限水路影響および水面勾配の作用の修正を加えても 20%程度大きい。そして方形係数 C_b が増すほどその差が大きい傾向にある。また造波抵抗係数 r_w には，制限水路影響および水面勾配の作用の修正を加えても差が残るが，設計フルード数に対応する評価フルード数ではほぼ同一であると粗い捉え方をすることができる。
- 2) 形状影響係数の修正係数 C_K と造波抵抗係数の修正係数 C_{rW} を導入し，大型模型による曳航水槽試験レベルにタイプシップ（類似船型）のデータがなくても修正できる手法を提案した。そして本手法を剰余抵抗係数 r_R で比較評価し，船型開発に必要な抵抗要素と有効馬力を実用上さしつかえないレベルで推定できることを確認した。本手法は水槽要目や流体力学性能の異なる他の水槽にも適用できる。各水槽でそれら係数を求めればよい。但し，本研究では造波抵抗係数の修正係数 C_{rW} の詳細な検討はできなかった。形状影響係数の修正係数 C_K の高精度化を含め今後の課題である。
- 3) 本手法によりタイプシップの模型試験が不要となれば，その曳航水槽試験費用が不要となり，そして必要な試験時間が半減し，それに代わって供試船型の隻数を増やすことが容易となる。船型開発の効率向上に貢献でき，回流水槽試験の試験効率の高さと相まって，さらなる活用が期待される。また船型形状が年々変化している中，タイプシップとの比較による実船性能推定の場合には，従来と異なる斬新な船型に対する性能推定は難しい。直接に実船性能推定が可能となればこの問題は解消される。

Table 4-1 Principal particulars of models.

Hull Form	L_{pp}/B	B/d	C_b	C_p	C_m	design F_n
①	5.50	3.00	0.68	0.70	0.978	0.231
②	5.53	2.47	0.78	0.78	0.989	0.199
③	5.67	2.54	0.75	0.76	0.988	0.211
④	5.86	2.84	0.56	0.63	0.891	0.261
⑤	5.96	3.91	0.51	0.56	0.898	0.317
⑥	6.00	3.00	0.65	0.67	0.976	0.241
⑦	6.00	3.00	0.70	0.72	0.979	0.221
⑧	6.00	3.00	0.75	0.76	0.978	0.201
⑨	6.06	2.52	0.81	0.82	0.996	0.175
⑩	6.34	2.41	0.70	0.71	0.980	0.221

remarks; B : breadth, d : design draft

Table 4-2 Blockage ratio in CWC and TT tests.

Dimension	T.T.-A	T.T.-B	T.T.-C	C.W.C.
$B_T \times D_T$ (m)	10.0 × 6.5	13.0 × 6.5	18.0 × 8.0	2.0 × 1.0
L_{pp} (m)	5.0~6.0	6.5	6.9	2.0
$m_{C.W.C.} / m_{T.T.}$	3.6~6.0	4.0	6.1	
$\nabla_{C.W.C.} / \nabla_{T.T.}$	0.037~0.064	0.029	0.024	

remarks; B_T : breadth of tank, D_T : depth of tank, m : blockage ratio ($=A_M/B_T \cdot D_T$)

A_M : maximum sectionl area

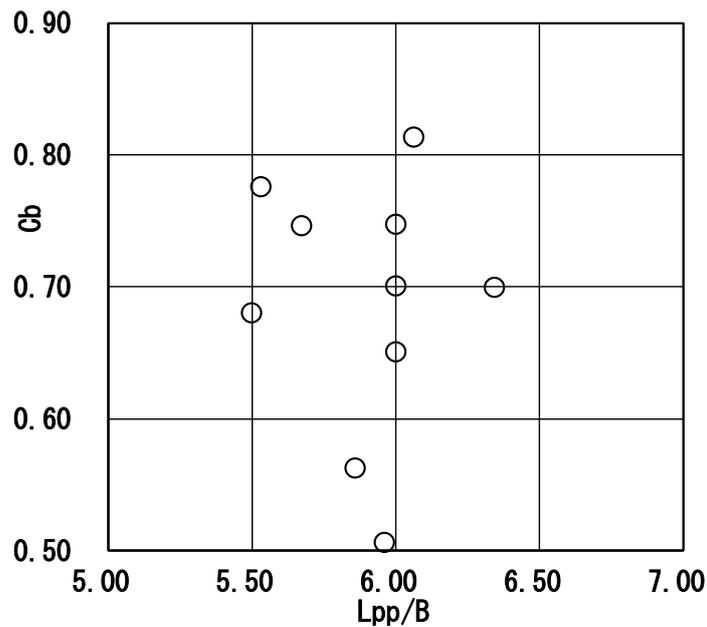


Fig.4-1 C_b vs L_{pp}/B of models.

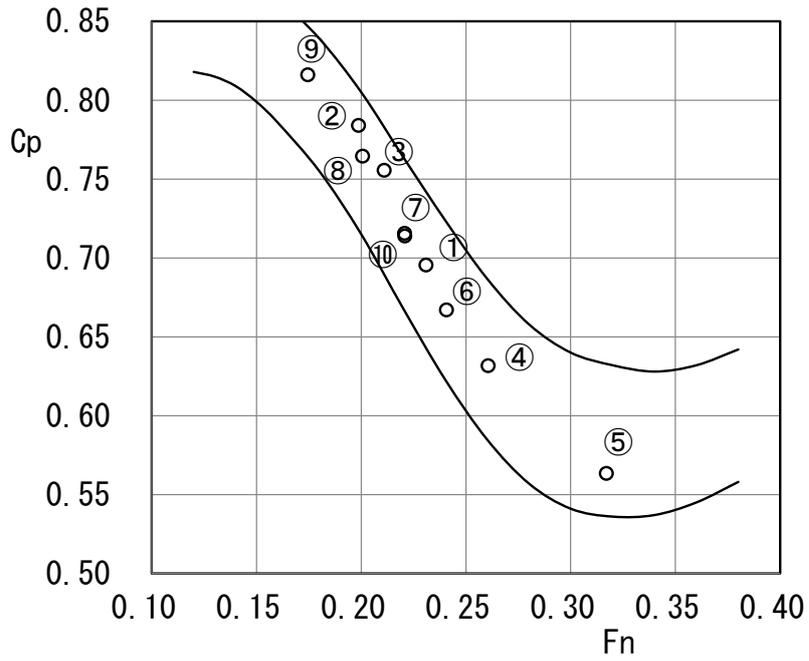


Fig.4-2 Evaluated Froude number $Fn_{evaluated}$ of models.

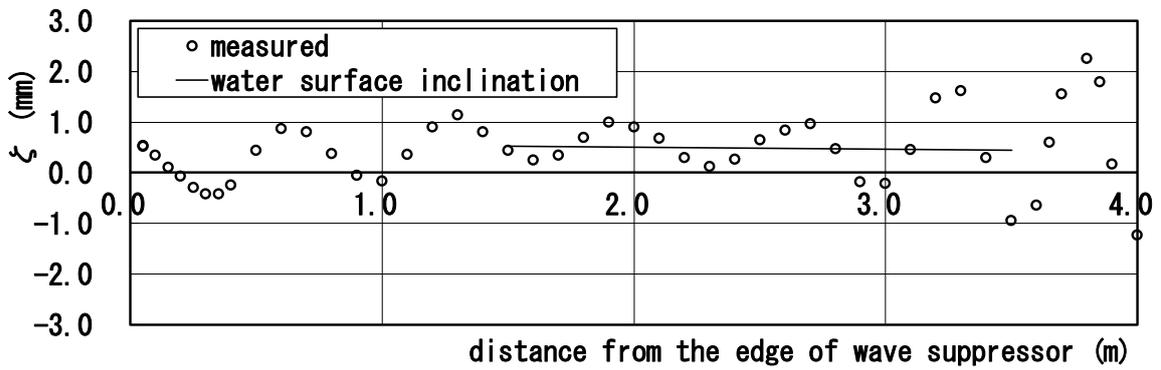


Fig.4-3 Free surface at $V=1.0$ m/s.

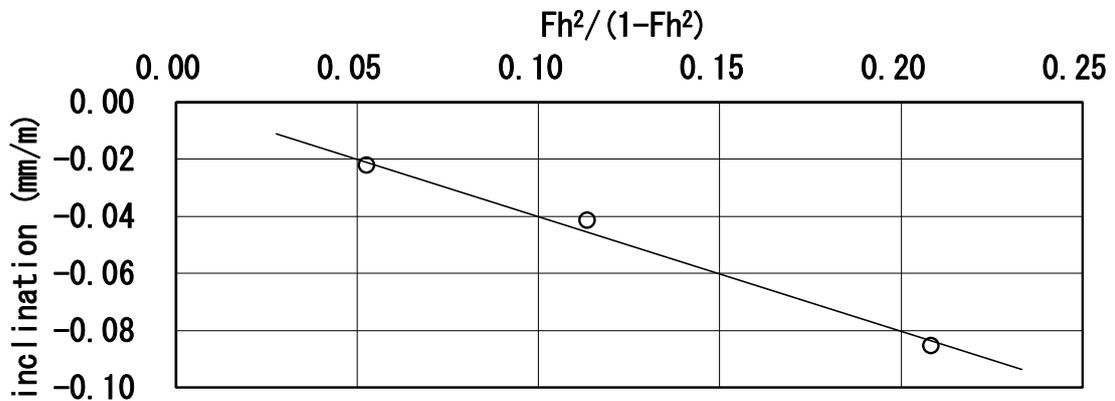


Fig.4-4 Inclination of free surface.

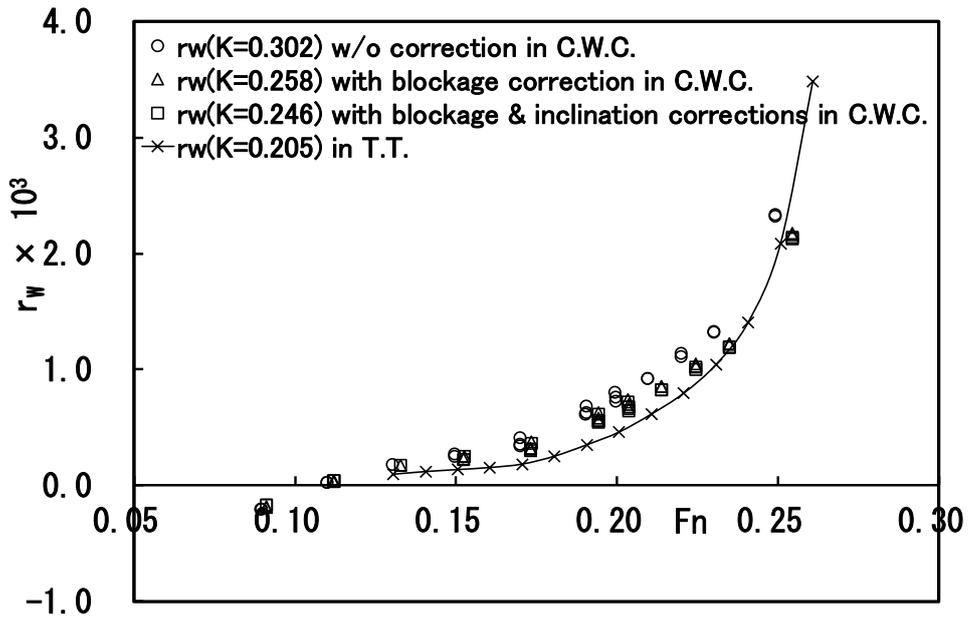


Fig.4-5(1) Resistance factor K and r_w -Hull form ①-.

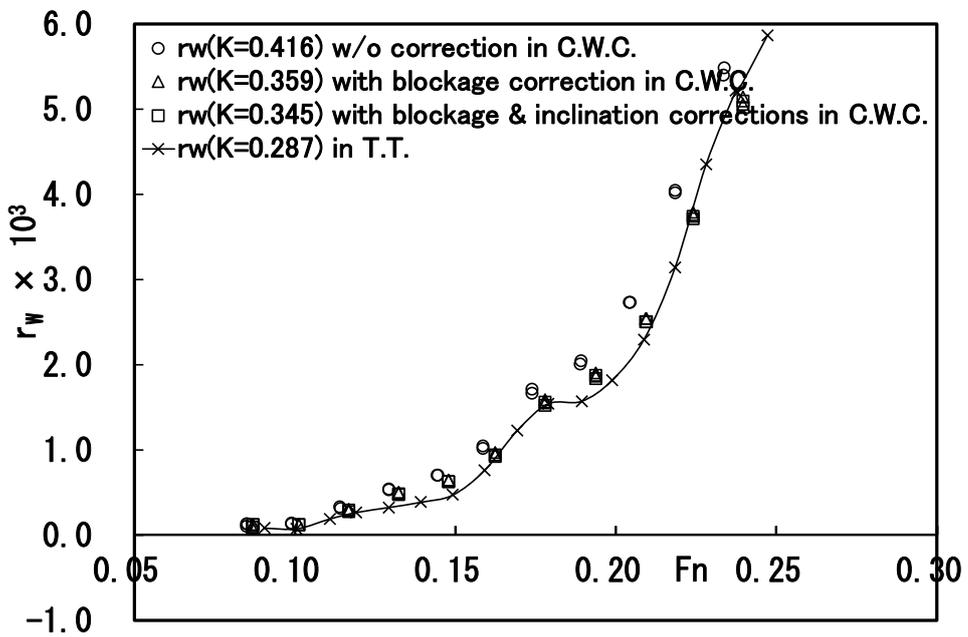


Fig.4-5(2) Resistance factor K and r_w -Hull form ②-.

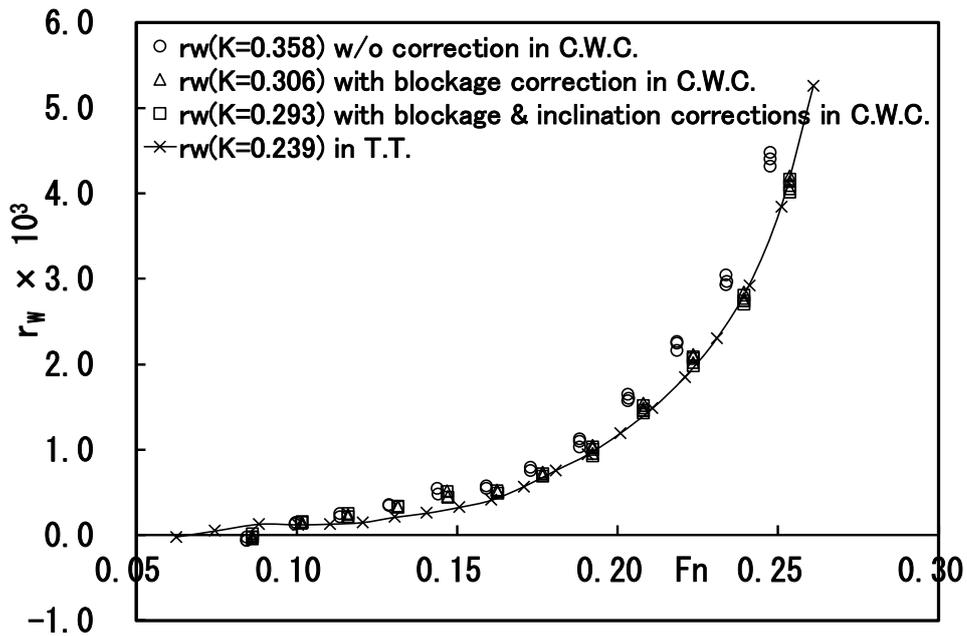


Fig.4-5(3) Resistance factor K and r_w -Hull form ③-.

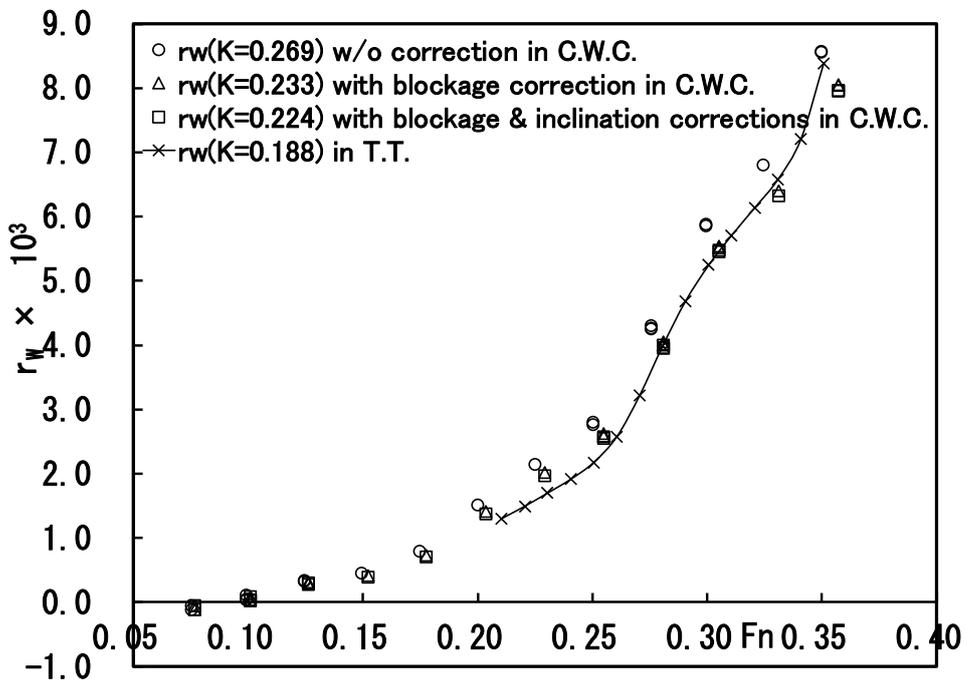


Fig.4-5(4) Resistance factor K and r_w -Hull form ④-.

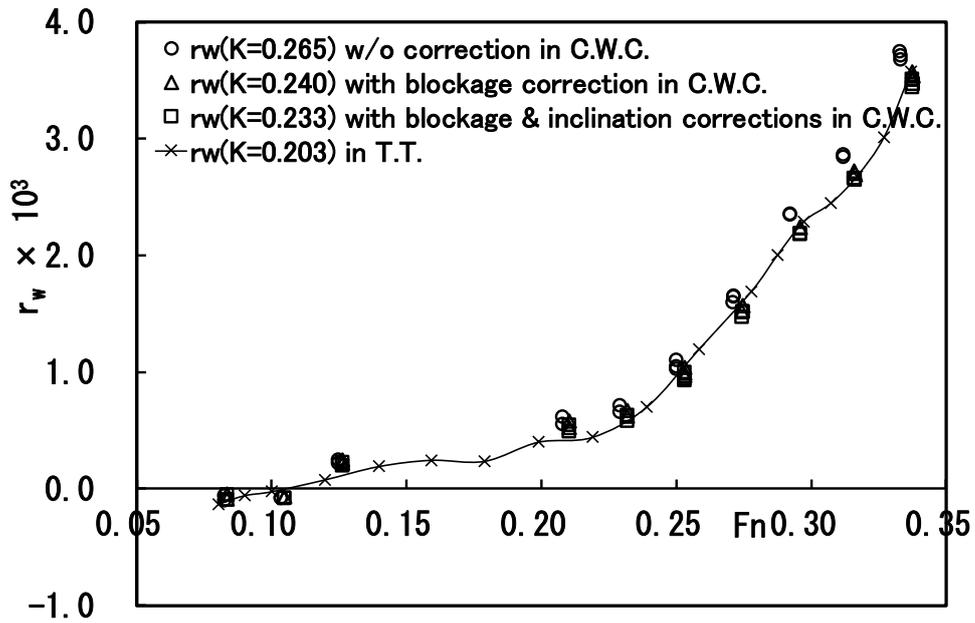


Fig.4-5(5) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑤-.

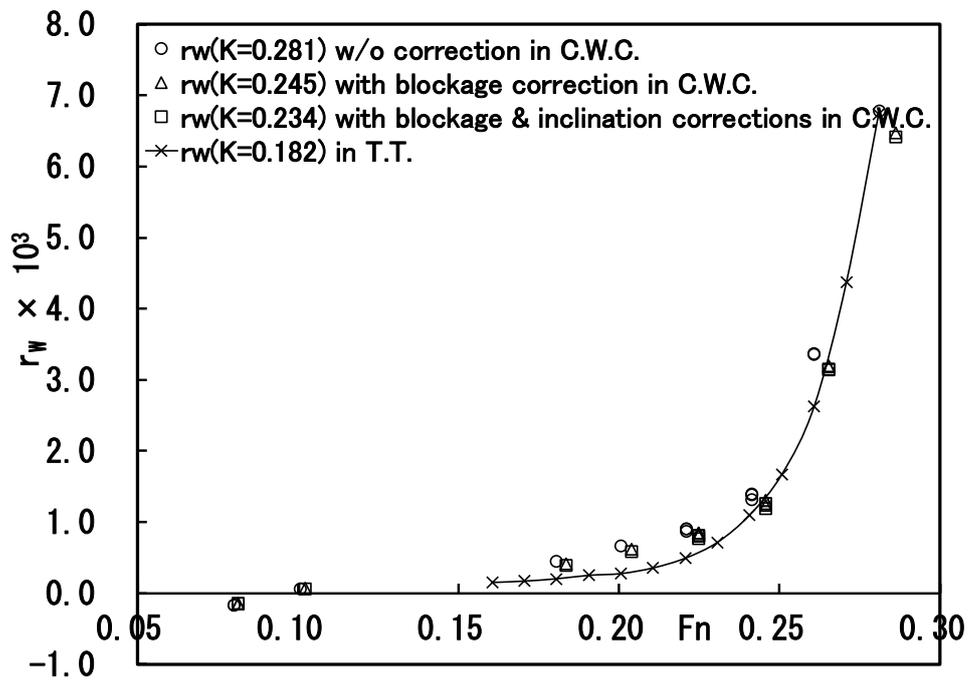


Fig.4-5(6) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑥-.

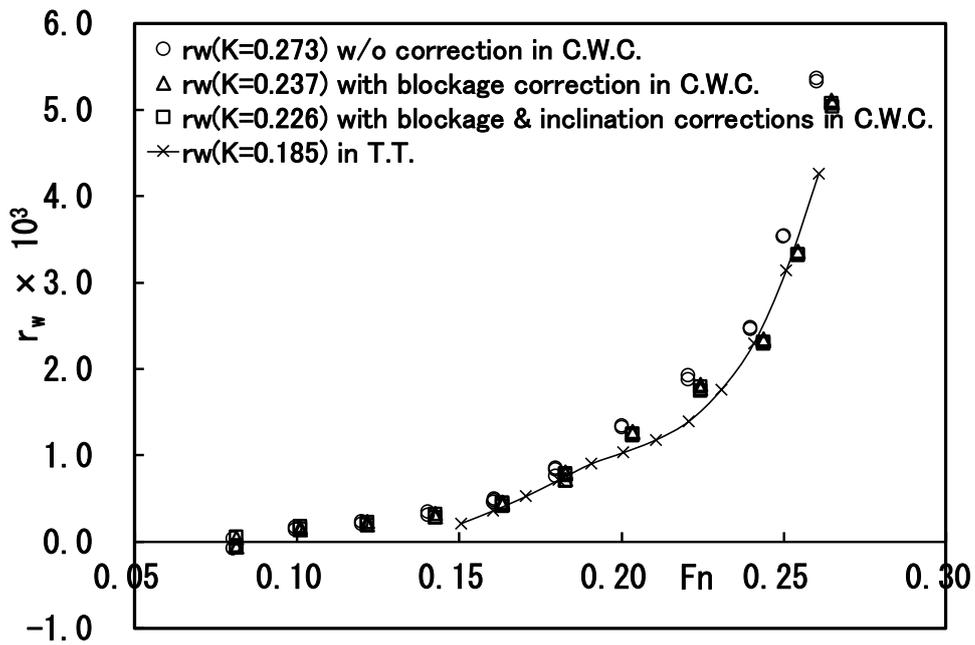


Fig.4-5(7) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑦-

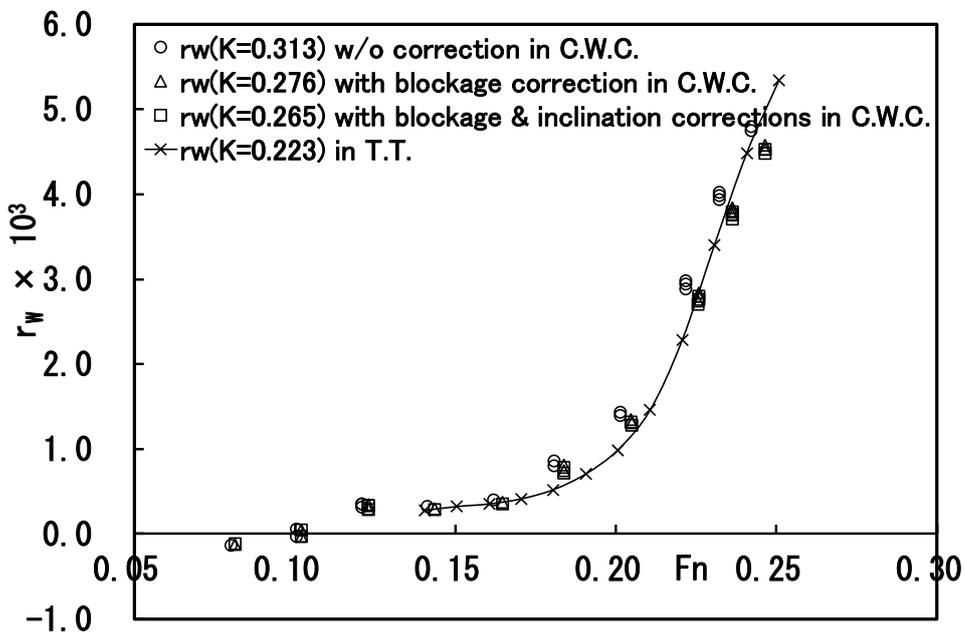


Fig.4-5(8) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑧-

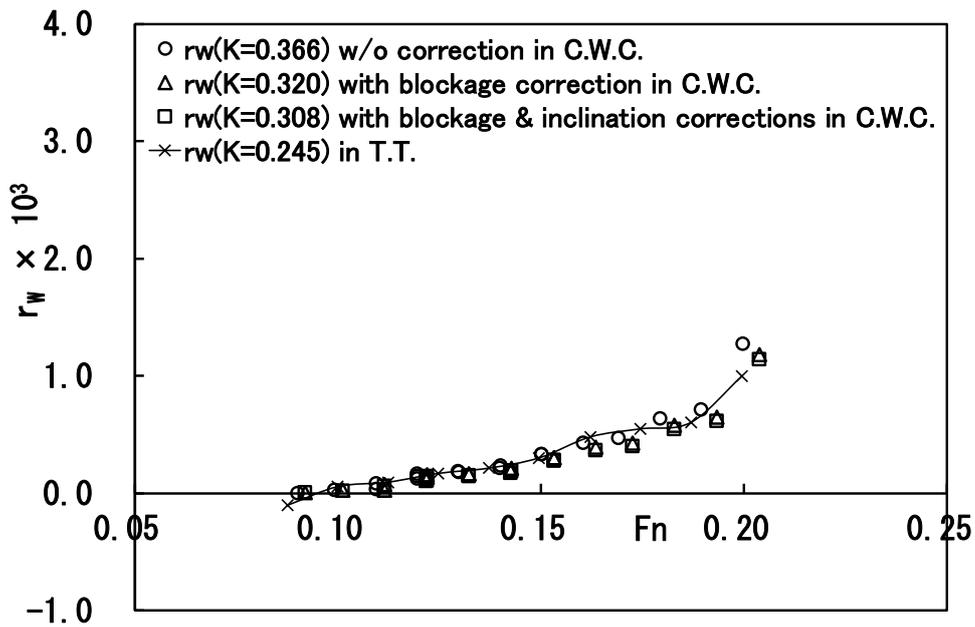


Fig.4-5(9) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑨-.

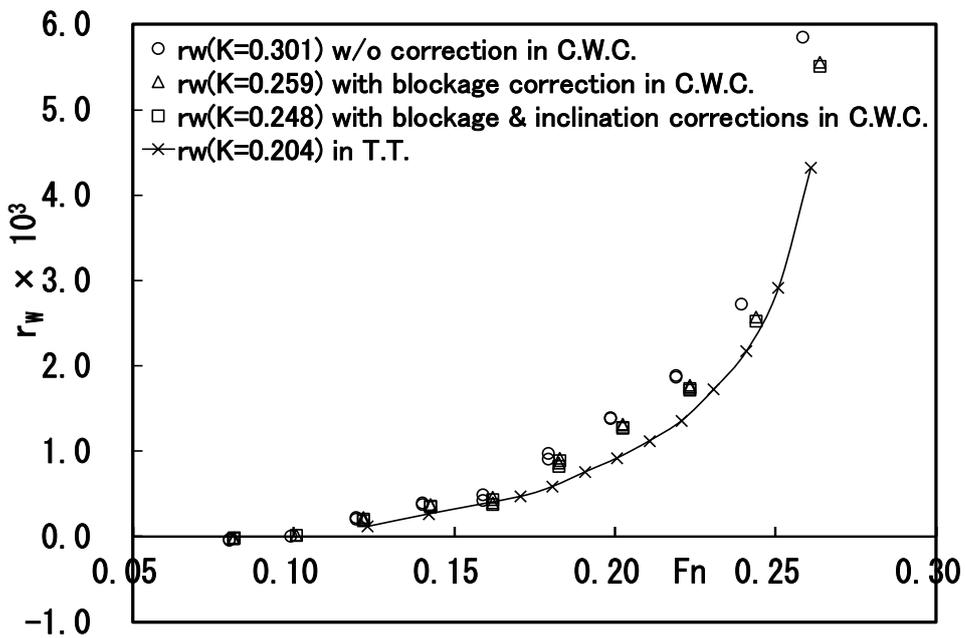


Fig.4-5(10) Resistance factor K and r_w -Hull form ⑩-.

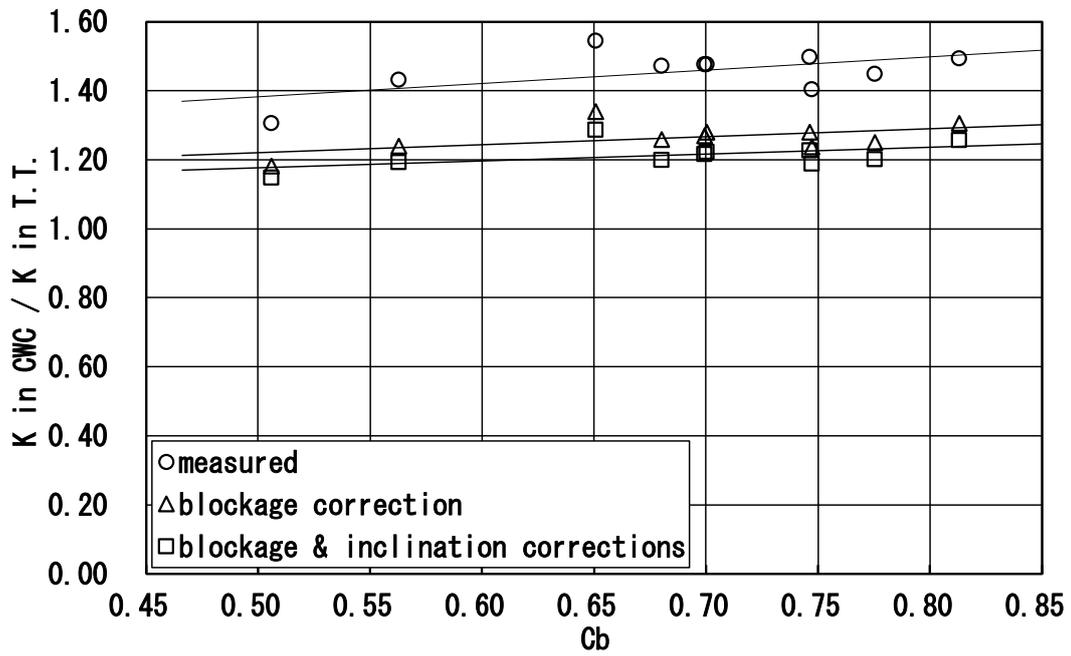


Fig.4-6 Ratio of form factor compared CWC and TT.

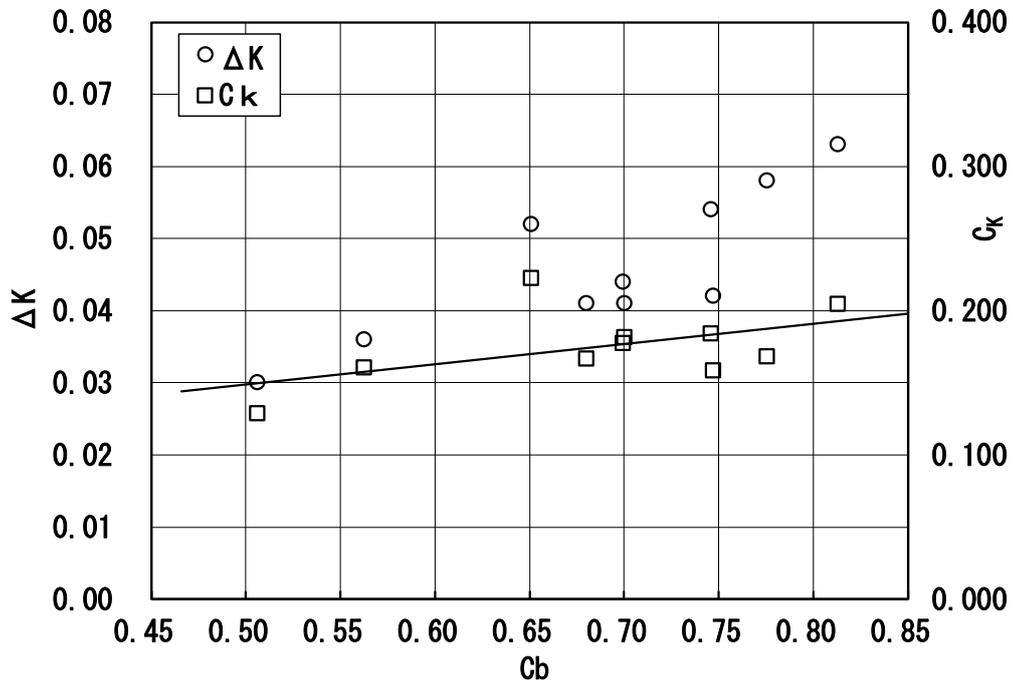


Fig.4-7 Difference of form factor ΔK .

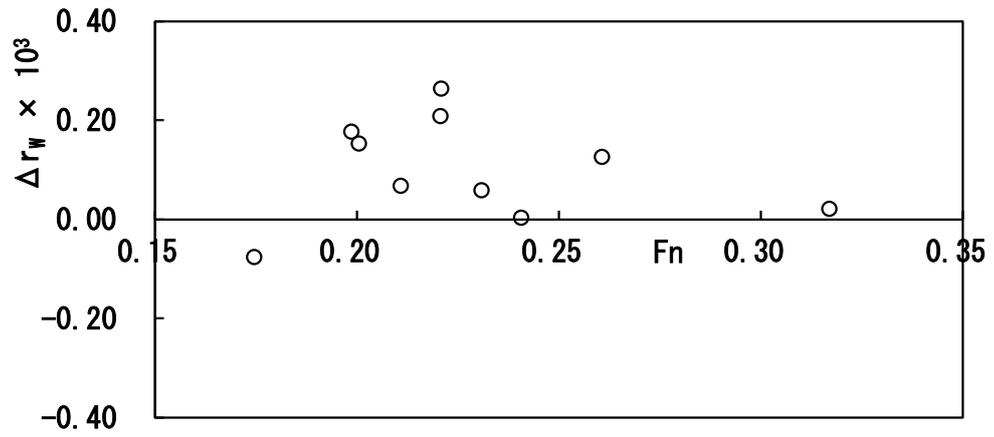


Fig.4-8 Difference of wave making resistance Δr_w under F_n evaluated.

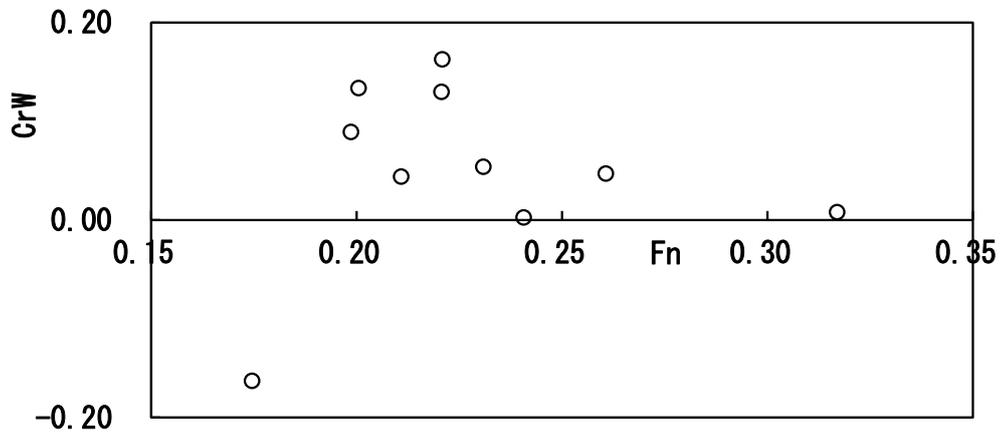


Fig.4-9 Ratio of difference of wave making resistance Cr_w under F_n evaluated.

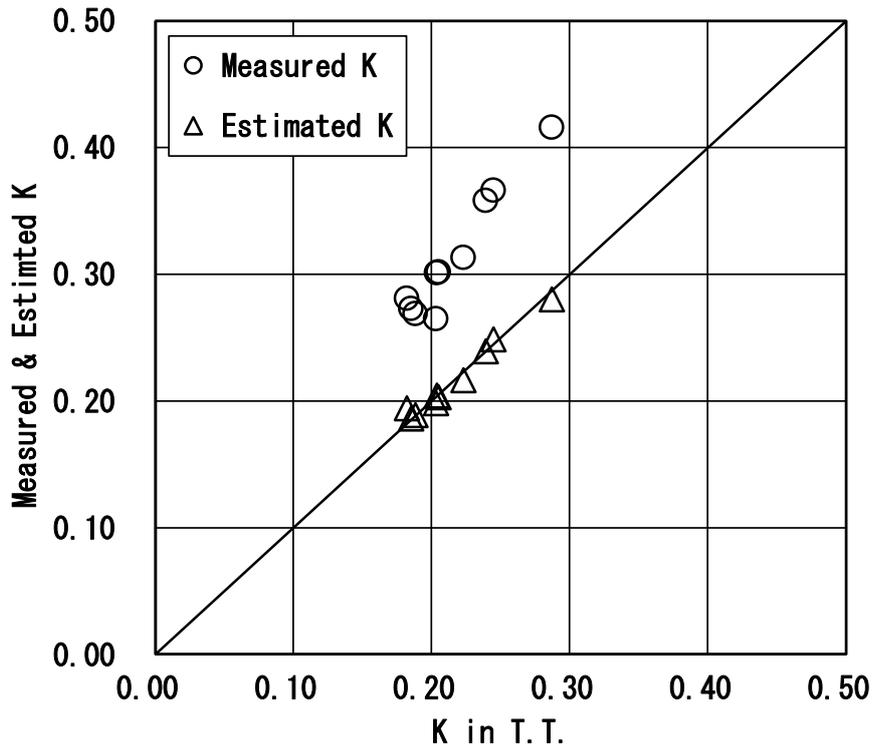


Fig.4-10 Relation of form factor between in TT and CWC.

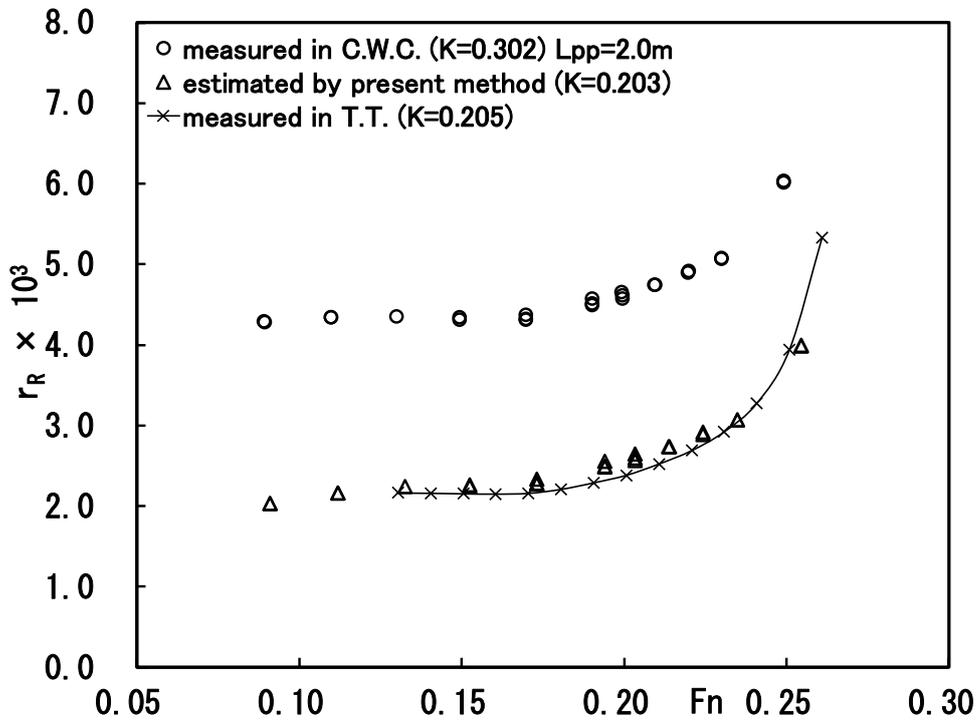


Fig.4-11(1) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ①-.

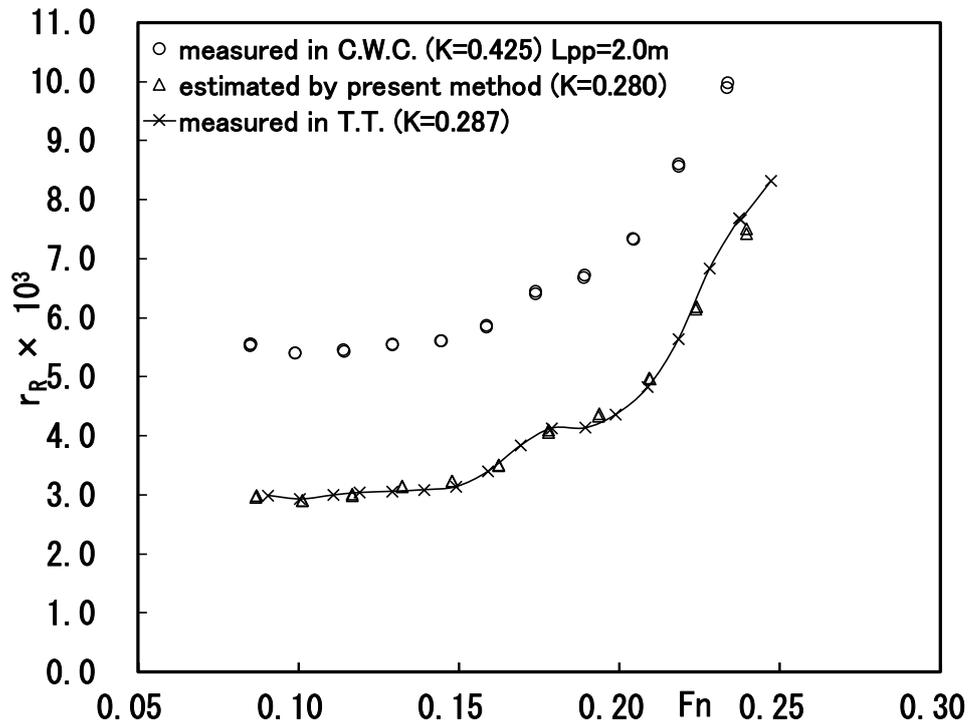


Fig.4-11(2) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ②-.

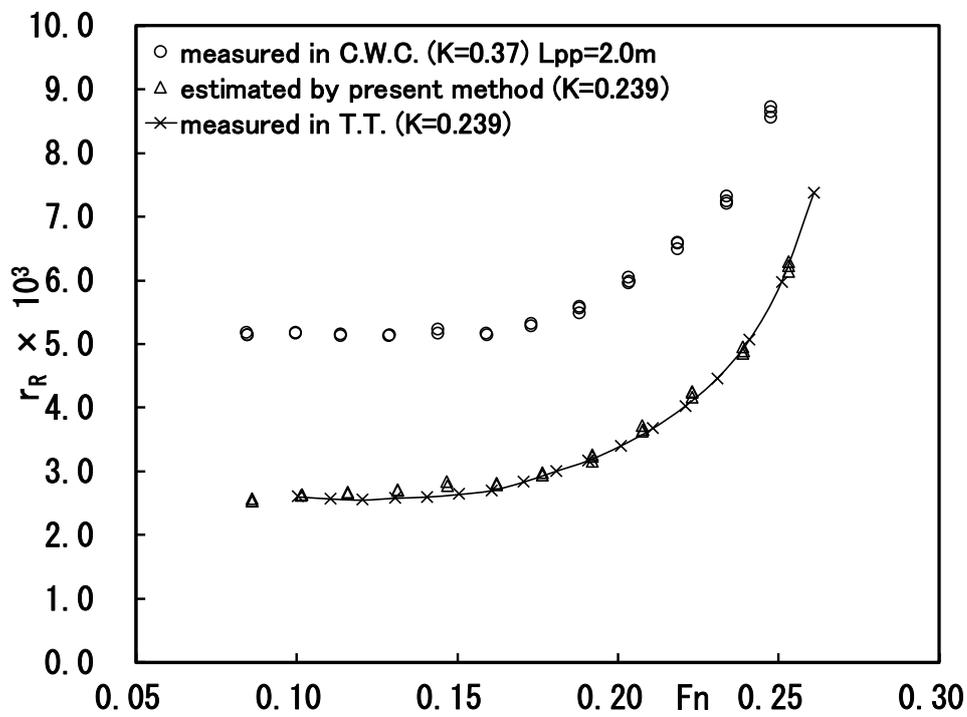


Fig.4-11(3) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ③-.

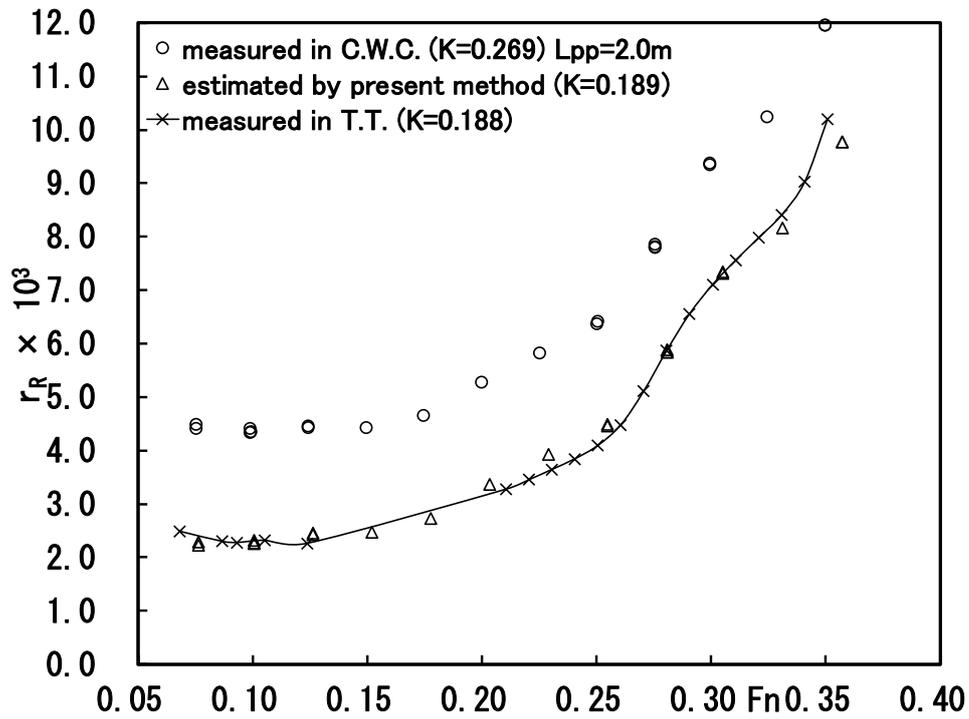


Fig.4-11(4) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ④-.

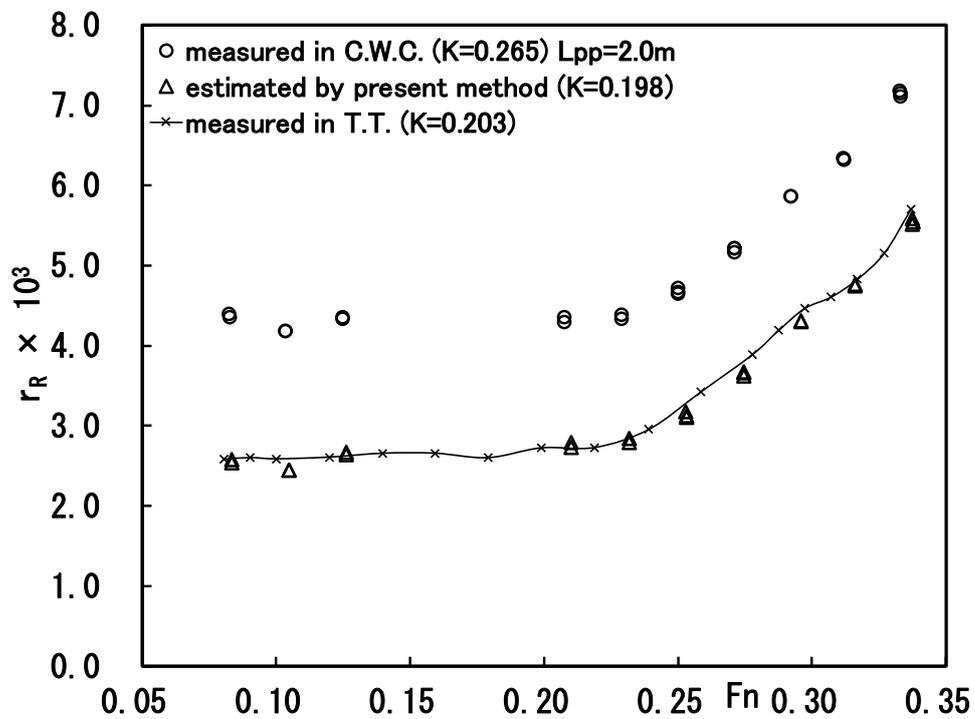


Fig.4-11(5) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑤-.

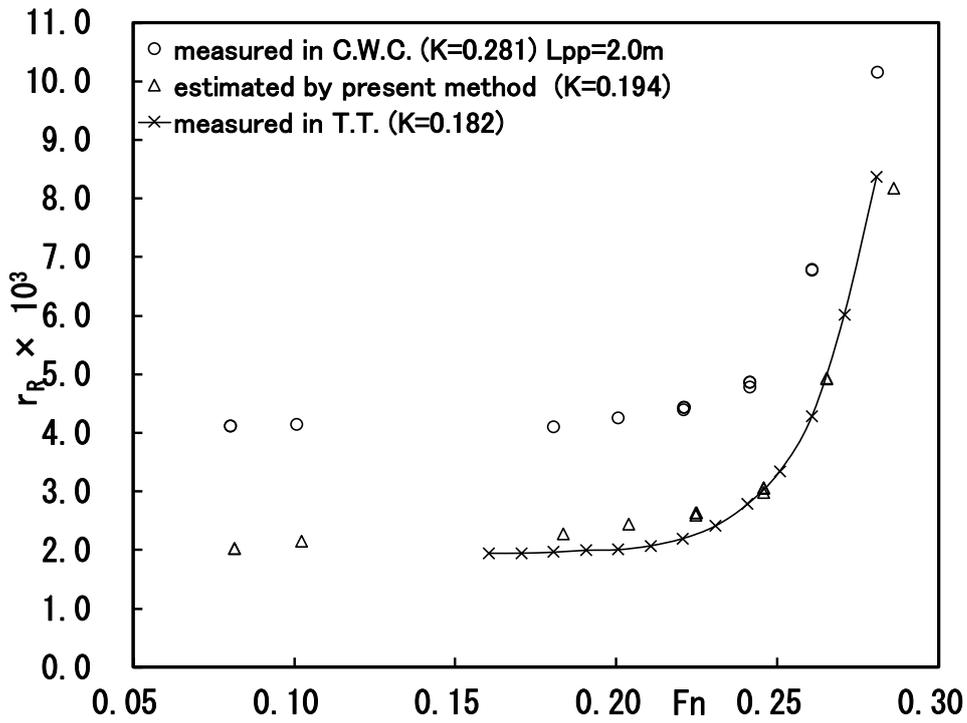


Fig.4-11(6) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑥-.

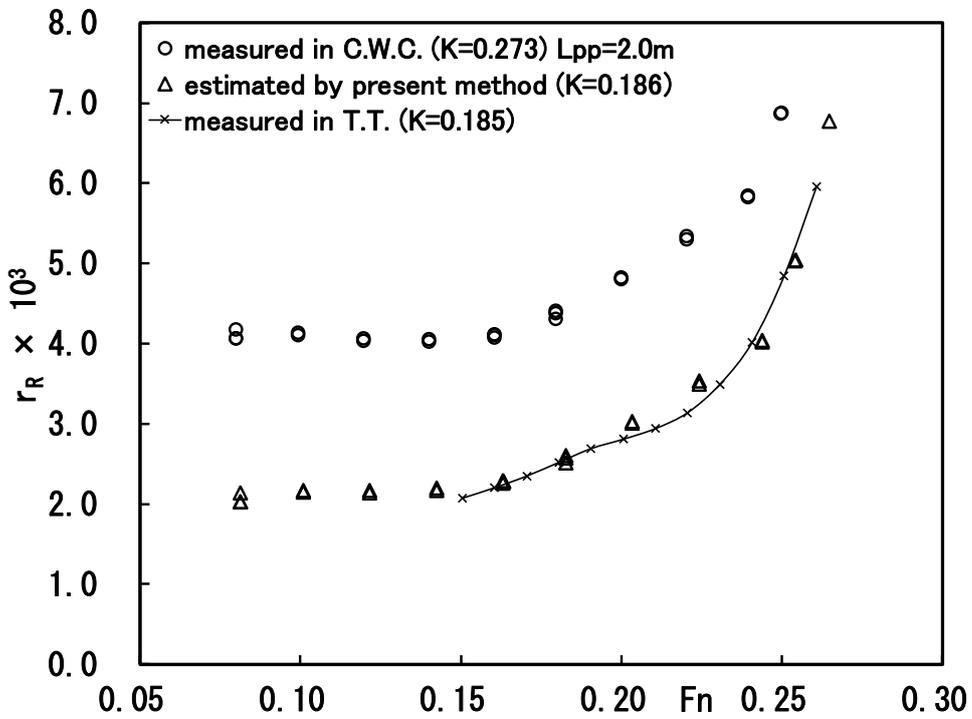


Fig.4-11(7) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑦-.

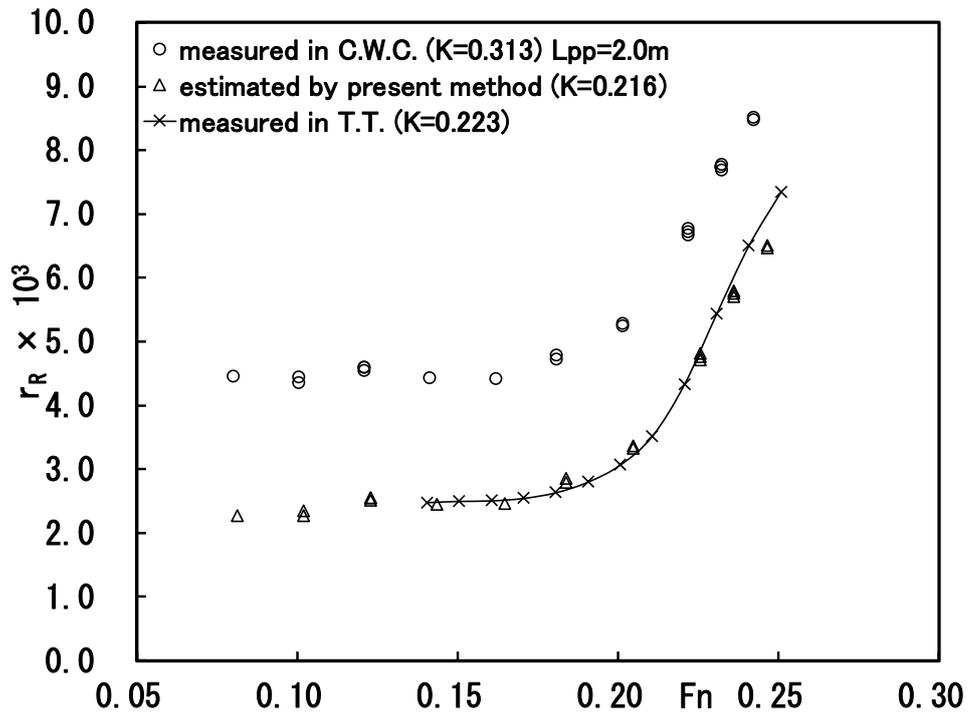


Fig.4-11(8) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑧-.

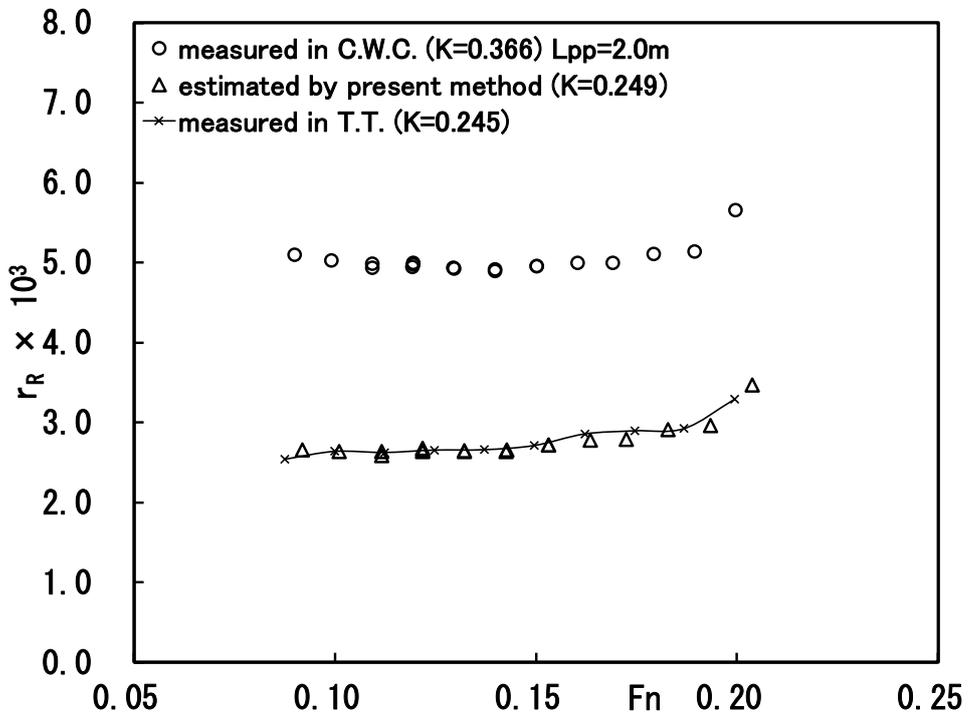


Fig.4-11(9) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑨-.

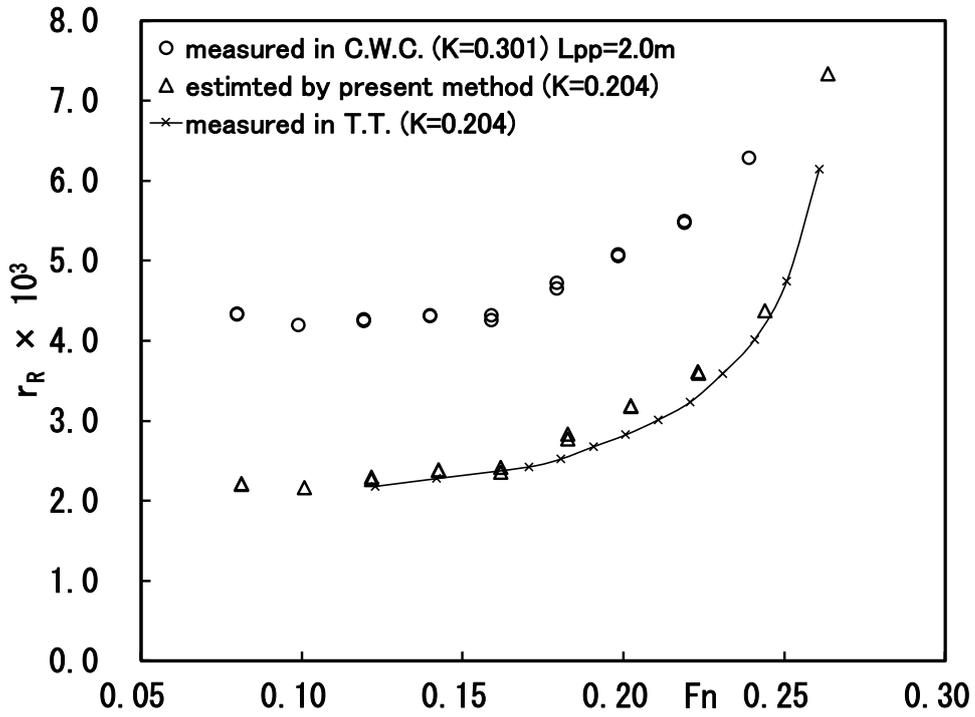


Fig.4-11(10) Residual resistance coefficient r_R -Hull Form ⑩-.

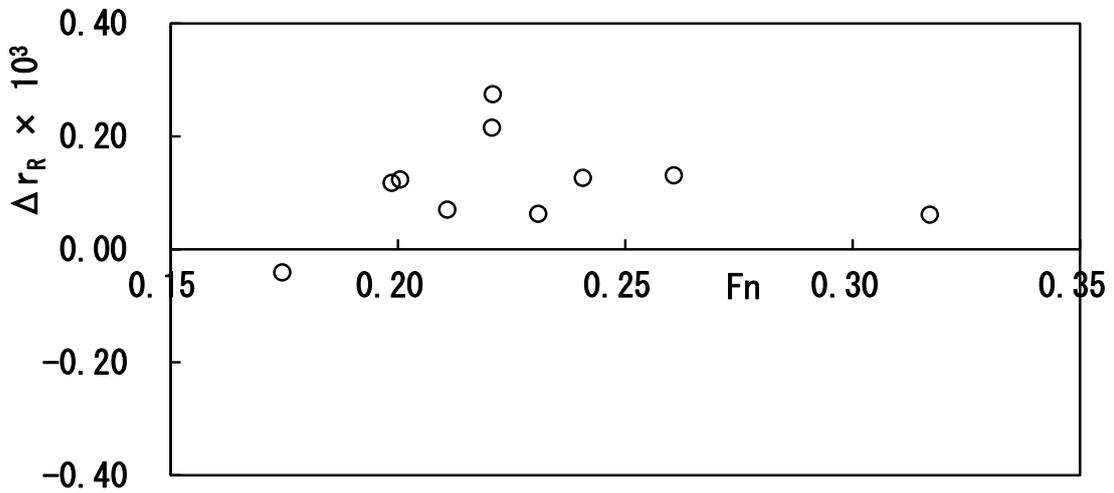


Fig.4-12 Difference of residual resistance coefficient Δr_R under F_n evaluated.

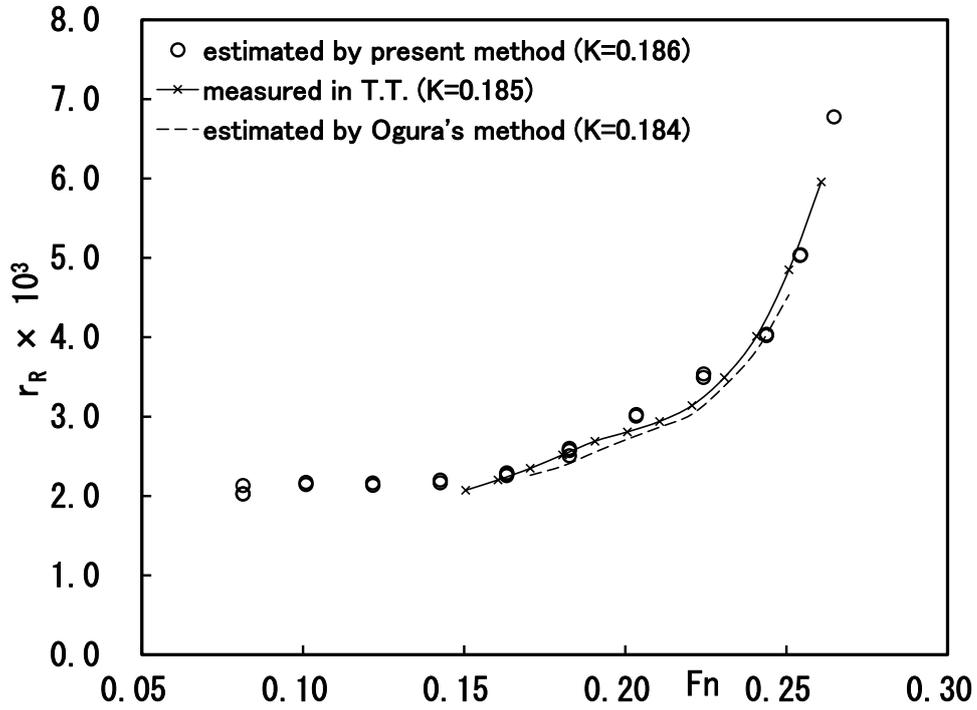


Fig.4-13(1) Residual resistance coefficient r_R compared with Ogura's method -Hull Form ⑦-.

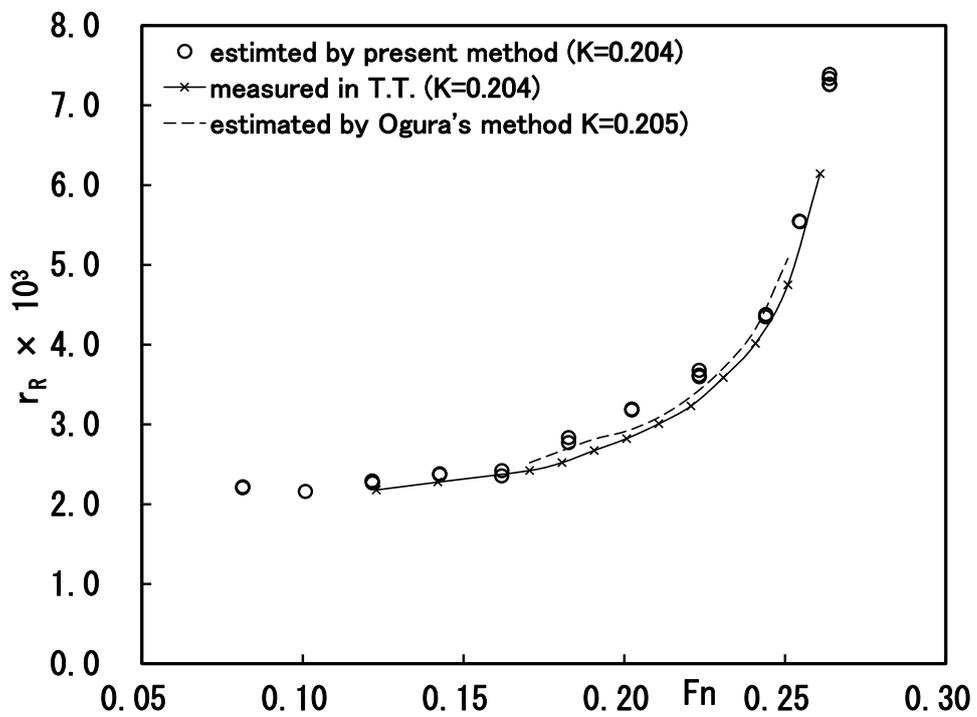


Fig.4-13(2) Residual resistance coefficient r_R compared with Ogura's method -Hull Form ⑩-.

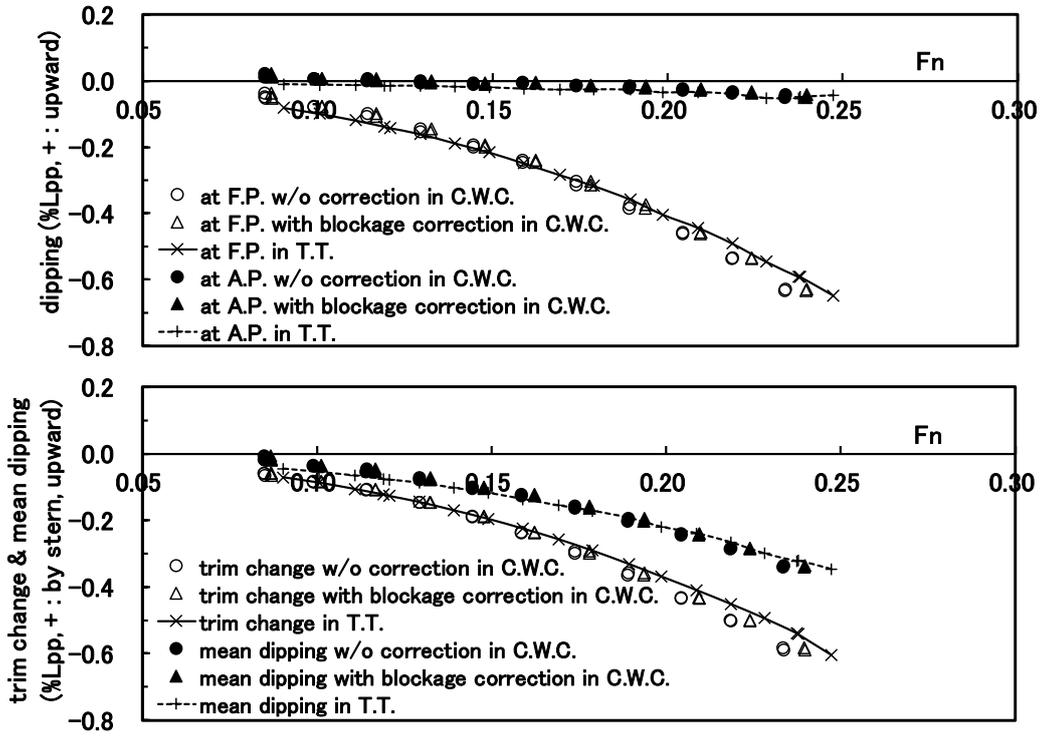


Fig.4-14(1) Dipping and trim change -Hull Form ②-.

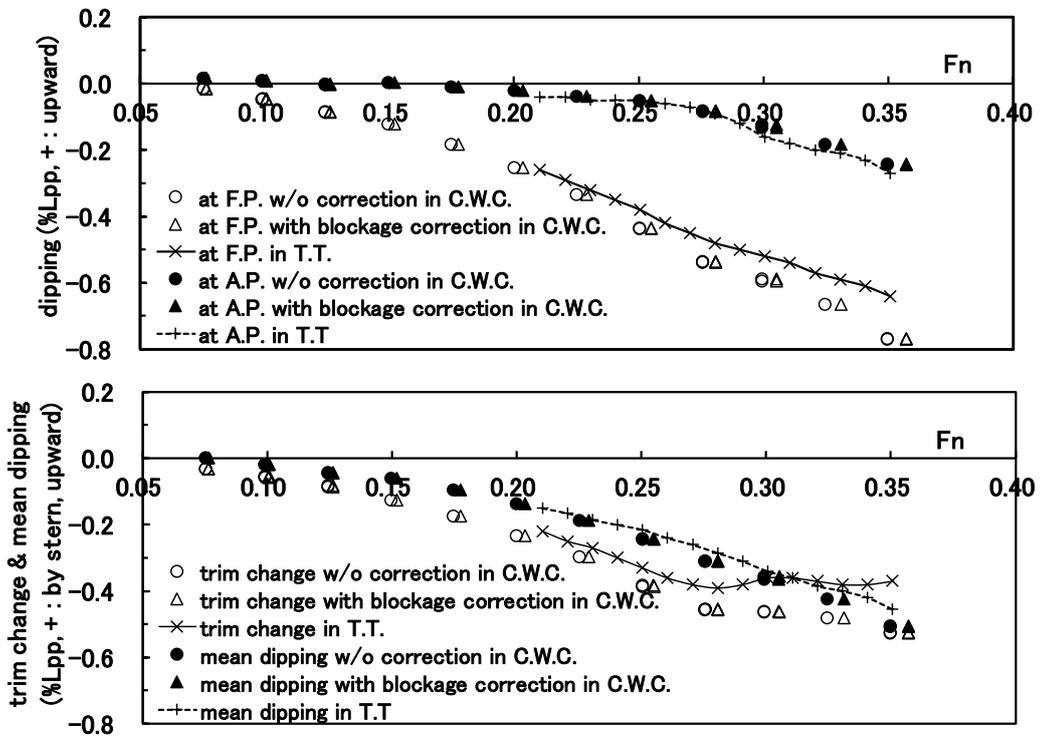


Fig.4-14(2) Dipping and trim change -Hull Form ④-.

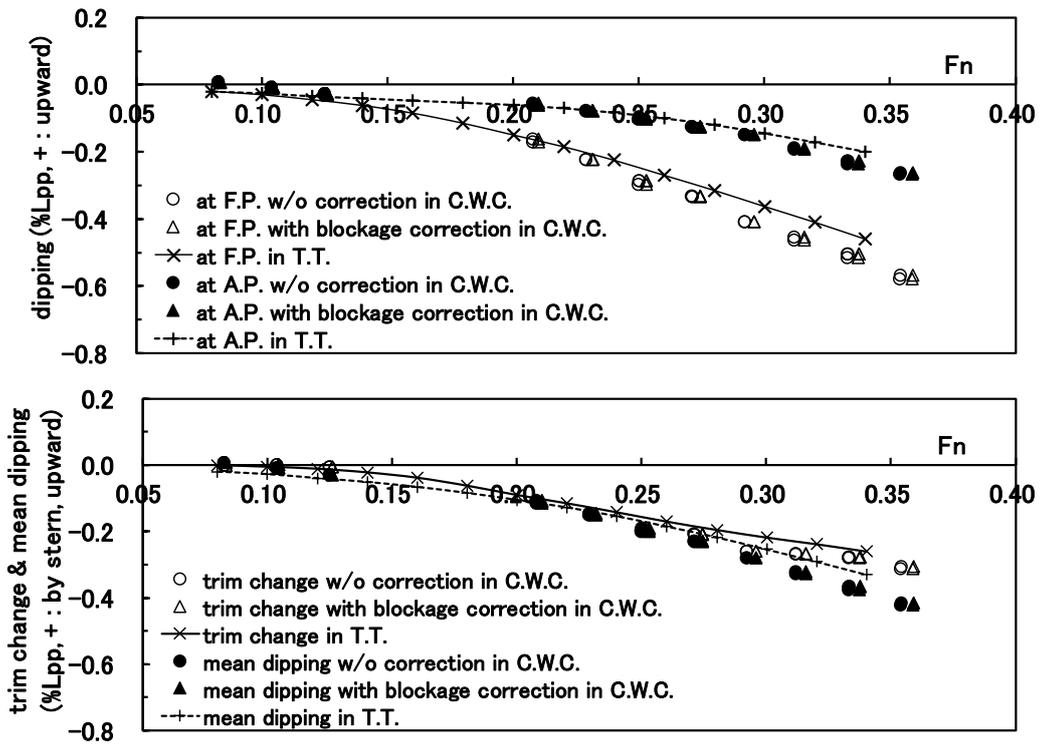


Fig.4-14(3) Dipping and trim change -Hull Form ⑤-.

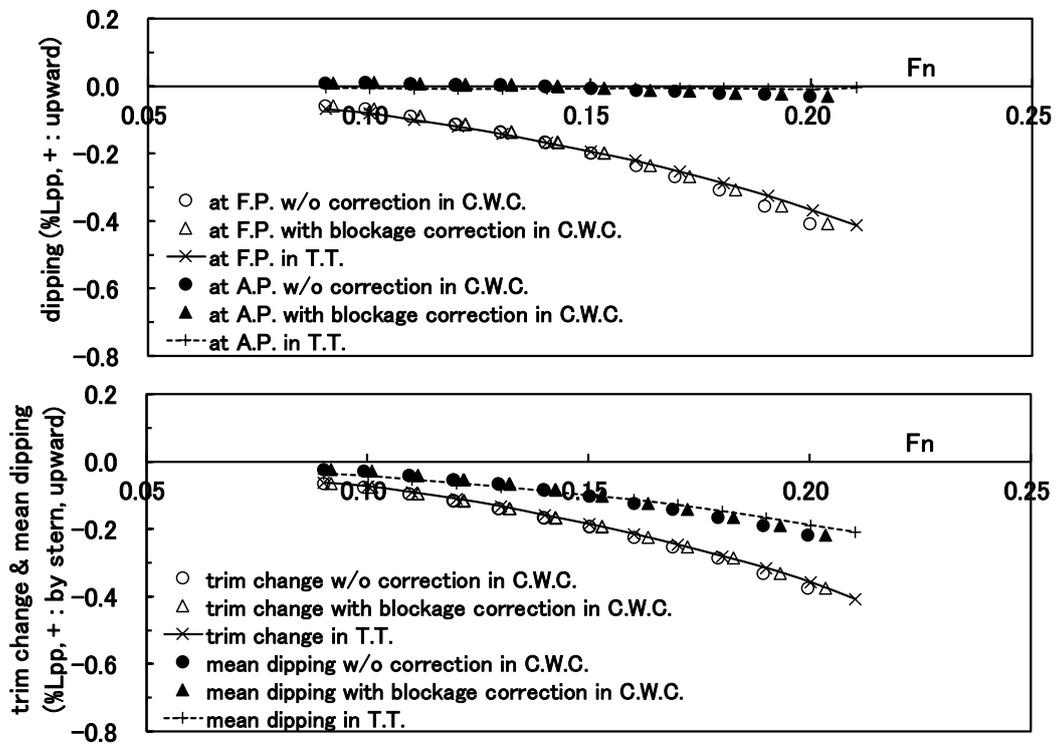


Fig.4-14(4) Dipping and trim change -Hull Form ⑨-.

第5章 漁船の船型開発

5.1 船型開発手法

船型開発が精力的に行われている商船とあまり行われてこなかった漁船では、回流水槽の活用も異なる。商船では実船性能の推定が中心となり、試験項目は抵抗試験、自航試験および操縦性試験が主である。一方漁船では、船型の問題点の抽出とその改善策を見いだすための、抵抗試験と波形観察等の流れの可視化が重要になる。

回流水槽試験の利点について高幣ら¹⁷⁾や小倉⁸⁾は「実験が手軽で、コストが低く、流れの観察が容易で、計測時間が無限で、技術開発が短時間になる。」としている。また別所¹⁰⁾は回流水槽試験の役割を「目に見える事手で触れる事、の研究の中での意味は想像を遙かに越えて大きいものがある。」としている。実現象の把握および精査に回流水槽試験は有効である。たとえば排水量およびトリムの変更、ならびに船型形状の局所的な変更による波形変化の把握が容易にでき、短期間に船型上の問題点を抽出し、その改善指針を明確にすることができる。未開発性の高い船種を対象とした時、特に回流水槽試験の利点が活用でき、大型模型にて商船の船型開発をする場合とは水槽試験の捉え方が異なる。

そこで、漁船を対象とした回流水槽の特徴を活かした効率的な船型開発手法を提案し、小型サンマ漁船と定置網漁船に適用する。この船型開発の流れを Fig.5-1 に示す。

- 1) 漁船の場合、重要とされる性能が商船とは違う場合が多く、漁船では漁場での漁労性能が漁港と漁場間の推進性能より重視される場合がある。また積荷（漁獲）の量や航海距離等、日々、運航形態が変わる。従って船型開発にあたり、これら情報入手のための実態調査が重要となる。
- 2) 船型上の問題点抽出に回流水槽試験を活用する。原型（既存船型）模型の波形観察および抵抗試験により船型上の問題点を抽出する。これが本船型開発手法の中で最も重要な過程で、混沌とした現象の中から開発のポイントを抽出し精査する。この点がこれまで船型開発が行われてきた商船に対する手法とは大きな相違がある。さらにランキンソース法⁶¹⁾にて船体表面圧力分布および造波抵抗成分を求め、問題点をクローズアップする。これらにより問題点を抽出し、その改善指針を明確にして次の船型開発過程をリードする。
- 3) この指針を基に船型学手法により船型改良を具体化する。船体前半部については、川島ら⁶²⁾により開発された造波抵抗理論と非線形計画法を骨子とする船型の最適化手法を適用する。これは造波抵抗を評価関数として、制約条件に付加容積一定条件を課して横切面積曲線を最適化する方法である。船体後半部については、Basoら⁶³⁾により開発された格子粒子ハイブリッド差分法を用い、形状変化による全抵抗の変化を求める。さらに流場シミュレーションで問題となる現象を把握する。
- 4) 得られた船型改良の骨子を具体化し、船型設計を行う。
- 5) 回流水槽にて改良船型の模型試験を行い、その効果を検証する。

回流水槽試験で船型の問題点を把握しその改善指針を明確にすることで、数値計算手法にて容易に短期間で有効な解を見だし、船型開発を効率化する。商船の船型開発では一般的に数値計算手法は模型試験に先行するが、本手法では模型試験が数値計算手法をリードして船型開

発を効率的に進める。

試験結果に及ぼす水槽の影響は、前章までに述べたように制限水路影響が大きく、それは船長フルード数 Fn が高いほど顕著で、漁船模型では影響が大きい。従って本船型開発においても(3-1)式の田村の式でその修正を行う。水面勾配の作用も船長フルード数 Fn が高いほど顕著ではあるが、(3-7)式の水面勾配式の定数 C_2 が速い流速で不明確であるため、その修正は行わない。また通常の漁船船型場合には航海速力において、船体の造波に比べ定在波の波高は小さく、本解析では定在波の影響は無視できると仮定する。

5. 2 事例（その1）：小型サンマ漁船の船型開発

5. 2. 1 小型サンマ漁船の特徴

サンマ漁船は魚群を見つけ、停船して光で魚を船体まわりに集め、網で漁獲する。終夜この作業をくり返し、翌早朝に帰港し漁獲した魚を水揚げする。遠くても良い漁場に行き、できるだけ漁場に留り多くの漁獲を得、遠くても価格が高い市場に水揚げする。そのためには速力は欠かせない。また小型サンマ漁船は大型船との競合もあり、過大な魚倉や過剰な集魚機器と発電機を装備せざるを得ず、代表的な重装備型の漁船でもある。船型は船型学の常識から外れ、肥大船型であるにもかかわらず、売上げ追求のために高馬力の主機を装備して造波抵抗係数がラストハンプ近傍のフルード数で航行し、燃料を多量に消費する。採算性向上の観点から省エネルギーの追求が重要であるとされてきたが、集魚灯の光量増加、航海・魚群探索機器の高度化等の漁獲能力向上は行われる一方で、省エネルギーに密接に関係する船型形状の科学的検討は行われてこなかった。近年、LED集魚灯の導入が図られているが、それが船内配置を含め船型をどのように変えることができるかなどの模索もない。

5. 2. 2 実態調査と原型の問題点

漁船のように漁獲が主目的で、日々航海状態が変わる船舶では実態調査が欠かせない。船型開発対象とした19GT型小型サンマ漁船の実態調査によると、小型サンマ漁船の船型に共通していることは、船体前半部の肥大度が著しく、排水量型でありながらチェーン等の滑走艇船型の要素を含み、船尾部は箱形で作業性および復原性を重視している。

Photo 5-1 は市場に漁獲物を水揚げ後の出港時（漁港発）で、Photo 5-2 は漁場からの市場への帰港時（漁場発）である。帰港時は船体中央から前方の魚倉に漁獲物を搭載し船首喫水が深い状態にある。またサンマ漁船はサンマ漁以外に裏作として他の漁業も行い、その時の漁具および漁労機械は大幅に違う。このように漁船の船型設計では、漁業の内容を理解しないと実用性が担保できない。

推進性能を明らかにするため、原型（既存船型）模型の抵抗試験と波形観察を実施した。評価する状態を、排水量が多い上に速力性能が重視される漁場発とした。主な船型主要目と模型試験状態を Table 5-1 に示す。模型は縮尺 1/13.79 の硬質ウレタン製で、垂線間長 L_{pp} は 1.5 m である。装着付加物はフラップ舵、船側のバルジ（張出し）、センターキール、シューピース、バウスラスタ孔、スタンスラスタ孔および船底のソナーで、乱流促進としてバルバスバウ先端と F.P. の中間に高さ 1.5 mm のスタッドを 10.0 mm 間隔で、オーディネイト 9-1/2 に高さ 2.0

mm のスタッドを 10.0 mm 間隔で装着した。抵抗試験より得られた(2-3)式で表される排水容積ベースの造波抵抗係数 r_w を Fig.5-2 に示す。摩擦抵抗係数 C_f には Schöenherr の式を用い、形状影響係数 K は低速域での抵抗係数の垂れ下がりがあるため、フルード数 Fn 0.10 付近で造波抵抗係数 r_w がゼロとなる値を採用した。航海速力 11 knot ($Fn = 0.388$) は造波抵抗が急増する領域で、形状影響係数 K もかなり大きい。このように推進性能の常識から外れた排水量型の限界の状態では航海する。同図に示す同クラスのサンマ漁船の造波抵抗曲線と形状影響係数の値も類似で、この推進性能は原型のみの課題ではなく、19 GT 型サンマ漁船に共通する課題である。航海速力 11 knot ($Fn = 0.388$) 相当の模型船波形を Photo 5-3 に示す。船首部の崩波、船首拡散波、オーディネイト 7 付近の船側波形の谷、および船尾後方の水面の乱れが著しい。船体前半部および船尾部の形状に問題があることが明らかである。バルバスバウを簡易的に大型化して波形観察を行い、大型化は船首部造波現象の減少に効果があるが、オーディネイト 8 付近の造波現象の変化にはあまり関係なく、船体前半部全般の形状変更が必要であることが判明した。また船尾部に関しては、その肥大度と船尾端没水量が造波現象に及ぼす影響が大きいことが判明し、さらに船体全般にわたるナックルによる渦の発生も確認された。このように短期間に船型上の問題点を抽出し、その対策の指針を得た。さらに原型の問題点について、川島ら⁶²⁾によりランキンソース法でフルード数 Fn 0.388 における船体表面圧力分布が調べられた。造波抵抗成分をガース方向に積分した結果を Fig.5-3 に示す。点線が二重模型流場、実線が自由表面を考慮した結果で、船首の圧力変化が著しく、船体前半で抵抗を受け、船体後半では圧力回復が認められない。

5. 2. 3 船型改良方針の検討

船体前半部の具体的船型改良には、川島ら⁶²⁾により造波抵抗理論と非線形計画法を骨子とする船型の最適化手法が適用された。まず Fig.5-4 に示すように、バルバスバウを中心としたオーディネイト 8 より前方の横切面積曲線を変形し最適形状を探索した。フルード数 Fn 0.389 では Fig.5-5 に示すように、原型に対する排水容積の増加比率 $ds = 0.002$ (Opt-1) で 4%、 $ds = 0.010$ (Opt-2) で 12% の造波抵抗係数 r_w の減少であった。つぎに改良の部分をオーディネイト 6 より前方とし、バルバスバウを規則限度の長さ (突出量 11.6% L_{pp}) とした。横切面積曲線の変化量 ΔC_p を Fig.5-6 に、造波抵抗係数 r_w を Fig.5-7 に示す。フルード数 Fn 0.389 では、原型に対する排水容積の増加比率 $ds = 0$ (Opt-3) で 51% 減少、 $ds = 0.01$ (Opt-4) で 66% 減少、 $ds = 0.02$ (Opt-5) で 74% 減少である。これらの結果はバルバスバウのみ大きくしてもそれだけでは効果が得られず、船体前半部全域の最適化を必要することを示す。なお波崩れが顕著な非線形現象に対して造波抵抗理論を適用した本手法が有効であるのは、本船型のようなラストハンプに近い航海フルード数では、船首の波崩れと強い相関関係がある造波抵抗が支配的で、それを反映した模型試験結果を重み関数として導入していることで、波崩れの影響が適切に考慮できていると推察される。

小型漁船の船体後半部甲板下には機関室、居室、各種タンク等が設けられ、船尾甲板には漁具と漁労機械が配置され、しかも作業時の作業スペースにもなる。裏作での他の漁労の考慮も必須である小型サンマ漁船は特に船尾部形状変更の自由度が小さい。船体後半部については

川島ら⁶²⁾により格子粒子ハイブリッド差分法で検討された。3例の概略形状図と得られた全抵抗の変化率を Fig.5-8 に示す。Stern-1 は船尾端から 14 % L_{WL} の範囲において船幅を垂直に徐々に狭く（船尾端で全幅の 57 %），Stern-2 は船尾端から 14 % L_{WL} の範囲において船長方向船底傾斜を大きく（船尾端没水量を原型の 54 %に），Stern-3 は船尾端から 51 % L_{WL} の範囲において船側傾斜を設けて船幅を船底方向に徐々に狭く（船尾端船底で全幅の 71 %）した形状である。計算条件はフルード数 Fn 0.39，レイノルズ数 Rn は 1.2×10^6 で船長 1.5 m に相当する。3例ともに約 10 %の抵抗減少となり，船尾排水容積を減少させる必要性を示している。また流場シミュレーションで，Stern-2 では原型と比較して船尾端後方水面近傍の渦の発生と剥離現象が抑制されていることが確認された。

5. 2. 4 改良船型とその性能

5. 2. 3 の船型改良検討結果を基に改良船型を設計した。船体前半横切面積曲線は Opt-3 を，船尾形状は Stern-2 を基準とし，バルバスバウ突出量および A.P.から船尾端までの長さは規則で許される限度まで伸ばした。また，船の復原性の確保は必須条件のため，船側のバルジの突出量を増やし，横メタセンター高さ TKM を原型以上の値とした。改良船型の船型主要目と模型試験状態を Table 5-1 に示す。模型試験状態は原型と改良船型で同じ排水量およびトリムとしている。

模型は原型と同じ縮尺 1/13.79 で，垂線間長 L_{pp} は 1.5587m である。乱流促進のスタッドおよび装着付加物は原型と同じである。流れの可視化試験，抵抗試験および自航試験を実施した。全抵抗値を (2-3) 式と同様に排水容積で無次元化した全抵抗係数 r_T を Fig.5-9 に示す。原型に比べて改良船型がかなり小さい。原型の結果は同時期に行われた再試験の結果である。摩擦抵抗係数 C_f に Schöenherr の式を用いて得た造波抵抗係数 r_w および形状影響係数 K を Fig.5-10 に示す。改良船型は造波抵抗係数 r_w および形状影響係数 K とも大幅に小さくなっている。航走姿勢の変化を Figs.5-11(1), (2) に示す。改良船型の船首部沈下量が原型に比べて少ない。その原因として，フルード数 Fn 0.40 付近までは船体前半部の変更による負圧の減少，フルード数 Fn 0.40 より高速域ではバルバスバウ変更による浮力の増加が考えられる。また，船尾部沈下量がフルード数 Fn 0.40 より高速域で改良船型が多い原因として，改良船型の船尾部の浮力減少が考えられる。11 knot ($Fn = 0.388$) 相当の模型船波形を Photo 5-4 に示す。改良船型は原型 (Photo 5-3) に比べ船首部の崩波が小さくなっている。また，船尾後方の水面の状況も，改良船型では水面の乱れがかなり緩和されている。

小倉らの方法^{16), 17)}と同様にタイプシップ（類似船型）の試験結果を用い，造波抵抗係数，形状影響係数および自航要素を曳航水槽における模型 ($L_{pp} = 3.0$ m) 試験結果相当に修正し，実船の馬力と速力の関係を推定した。なお，試験結果に及ぼす影響が大きい制限水路影響の修正を行い，解析精度の向上を計っている。プロペラの翼数 3 枚，直径 1.70m および展開面積比 0.50 は原型と改良船型で同じとし，ピッチはそれぞれで最適値に設計された。有効馬力 EHP 曲線および制動馬力 BHP 曲線を Fig.5-12 に示す。改良船型は原型に対し，航海速度 11 knot で有効馬力 EHP は 44 %減少，制動馬力 BHP は 52 %減少である。なお有効馬力 EHP 減少の約 90% は造波抵抗係数の削減効果による。

5. 2. 5 実船の評価

改良船型をベースに該当造船所の経験による工夫が加えられ2隻建造された。完成時の写真を Photo 5-5 に示す。建造後1年間のサンマ漁業のみの燃料消費量の比較⁶⁴⁾を同時期に建造された5隻とともに Fig.5-13 に示す。A および B が改良船型をベースとした新船型、C, D, E, F および G はそれぞれ船型が異なる従来型で、新船型の燃料消費は従来型に比べて25~35%減少である。得られた改良船型と新船型で形状が完全に同一でなく、新船型の省エネルギー効果が速力アップに置き換わった可能性もあり、新船型の燃料消費が従来型に比べて半減していないが、有意な効果であることは明らかである。本手法により短期間で画期的な船型が得られた。

5. 3 事例（その2）：定置網漁船の船型開発

5. 3. 1 定置網漁船の特徴

定置網漁業は漁場に固定した網に入った魚を漁獲する。そこで定置網漁船は探索が不要で、漁具・漁労設備はほとんど有しない。この漁業では網内に魚群をどのように誘導できるかが最重要で、このため「待ちの漁業」「静の漁業」とも称され、油を多量に消費せず水産資源や環境にやさしいといわれている。そこで集魚・漁労技術に関する開発は精力的に行われてきたが、船型や推進性能に関する資料はほとんどなく、船型開発はほとんどされなかったと推察される。

5. 3. 2 実態調査と原型の問題点

船型開発の原型として岩手県北域の19GT型を採用した。一般配置図を Fig.5-14 に、漁港発の様子を Photo 5-6 に示す。漁場により運用方法は異なるが、船体前部から中央部に船体の大きさに比べて大きな魚倉（甲板の全長に対し約60%）を、船体後部に機関室と操舵室を配置するという特徴は共通である。また、舷側は垂直、ビルジ部はチェーン型、そして船尾張出し部は箱型で、形状はシンプルである。定置網漁場のロープと網を越えるため、船首尾端船体中心にはそれらと船体との絡みを防ぐための丸棒を、プロペラ回りには同様の目的と船側からの網の巻き込み防止のための丸パイプで構成されたプロペラガードを装備する。漁場（定置網）に向かう漁港発と漁獲物を搭載して水揚げ漁港に向かう漁場発で大きな喫水差を有し、その時の速力は漁港発12~14knot（フルード数 Fn 0.407~0.475）、漁場発12knot（フルード数 Fn 0.407）で、「静」の漁業に使われる漁船であっても必ずしもフルード数 Fn は低くない。また漁場と水揚げ漁港との距離は必ずしも短くなく、調査対象地域を含め、航海時間1時間以上の地域は多数存在する。したがって定置網漁船といえども船型と推進性能の問題は無視できない。

プロペラガードの影響を含む推進性能の特徴を把握するため、原型模型の抵抗試験と波形観察を実施した。原型の主要目および試験状態を Table 5-2 に示す。模型は縮尺1/20の硬質ウレタン製で、その写真を Photo 5-7 に示す。通常、漁船の模型試験では長さ1.5m程度の模型を用いるが、高フルード数の計測に対する水槽の性能上の制約もあり、前述の縮尺 ($L_{pp} = 1.075$ m) とした。本模型試験では、推定精度よりも問題点の抽出と対策を見いだすことを優先した。船首尾端船体中心には丸棒（実船相当：直径80mm）を、プロペラ回りにはプロペラガード（実船相当：パイプ直径80mm、船底取付け部間隔2.0m）を既存船と相似な形状で取り付けた。

乱流促進として、バルバスバウ先端と F.P.の間に高さ 1.5 mm のスタッドを 10 mm 間隔で、オーディネイト 9-1/2 には高さ 2.0 mm のスタッドを船底から 20 mm までは 5mm 間隔、それより上方は 10 mm 間隔で装着した。模型試験はプロペラガード有り無しで行われた。なお、半滑走および滑走状態の模型試験の場合には、曳航方向が航走姿勢に大きな影響を及ぼすため、曳航方向は常に推進軸方向とした。

Fig.5-15 に全抵抗を(2-3)式と同様に排水容積で無次元化した全抵抗係数 r_T を、Fig.5-16 には造波抵抗係数 r_w と形状影響係数 K を示す。なお、制限水路影響の修正を行っているが、本模型は小さく浅喫水のため、商船およびサンマ漁船の模型ほどその影響は大きくない。摩擦抵抗係数 C_f には Schöenherr の式を使用し、形状影響係数 K はフルード数 Fn 0.10 付近で造波抵抗係数 r_w がゼロとなる値を採用した。航海速度 12~14 knot ($Fn = 0.407 \sim 0.475$) は抵抗係数のラストハンプであるフルード数 Fn 0.47~0.50 に近く、造波抵抗係数 r_w が急増する領域である。プロペラガード (P.G.) の抵抗はかなり大きく、またこの解析方法によるとプロペラガード有り無しで、造波抵抗係数 r_w 曲線の傾向に大きな相違がある。Figs.5-17(1), (2)に示す姿勢変化では、プロペラガードが航走姿勢に及ぼす影響はあまり大きくないが、プロペラガード装着により船尾沈下が少なくなり、平均沈下量が多少減少する。プロペラガード周辺の流速低下の影響が考えられる。なお、魚を搭載している漁場発と搭載していない漁港発では、造波特性および航走姿勢が大きく異なる。漁場発では航海速度である 12 knot ($Fn = 0.407$, 排水容積フルード数 $F_v = 0.92$) 付近で船首沈下および船首側トリムが最大である。一方、漁港発ではフルード数 Fn 0.35 を越えると船尾側トリムが徐々に増加し、航海速度 12~14 knot ($Fn = 0.407 \sim 0.475$, $F_v = 0.96 \sim 1.12$) では船首部が急激に上昇する。

プロペラガードの抵抗を求めるため、計測された抵抗値 R_t を流速 V の 5 次多項式で近似して Fig.5-18 に示す。各状態とも抵抗値 R_t と流速 V との関係をはば表現している。この多項式の妥当性については精査の必要があるが、目的が船型開発にあるため本多項式を採用した。これらの式から得られた各状態のプロペラガード有り無しの抵抗差 ΔR_t から、(5-1)式で示すプロペラガードの抵抗係数 C_d を求めた。なお抵抗差 ΔR_t は船体とプロペラガードの干渉を含んでいる。

$$C_d = \frac{\Delta R_t}{\frac{1}{2} \rho A_p V^2} \quad (5-1)$$

ここで ρ は水の密度、 A_p は船尾側から見た代表的部材形状 (U 型) の投影面積である。

Fig.5-19 に(5-2)式で示すパイプ直径 d_ϕ を代表長さとしたレイノルズ数 R_n に対するプロペラガードの抵抗係数 C_d を示す。ここで ν は動粘性係数である。また図中の抵抗係数 C_d はフルード数 Fn 0.47 のラストハンプ手前までの値を示す。レイノルズ数 R_n に対する抵抗係数 C_d の変化は少ない。抵抗値の近似式の精度によるため、曲線の傾向に関する考察はできないが、漁場発と漁港発の相違としてトリムの影響が考えられる。

$$R_n = \frac{V d_\phi}{\nu} \quad (5-2)$$

プロペラガード付き抵抗値 R_t から、Fig.5-19 の抵抗係数 C_d の平均値（漁場発：2.720，漁港発：2.825）を用いたプロペラガードの抵抗を差し引き，プロペラガード無しの形状影響係数 K を使って造波抵抗係数 r_w を求めた．プロペラガード無し模型の造波抵抗係数 r_w との相違を Fig.5-20 に示す．プロペラガードと船体を一体として解析すると Fig.5-16 示すように，形状影響係数 K はプロペラガード無しの 2.8～3.0 倍となり，造波抵抗係数 r_w はプロペラガード有り無しで大きく異なる．しかし，この方法により船体との干渉を含むがプロペラガードのみの抵抗を算出し，その抵抗係数が流速に依らず一定であるとして解析すると，プロペラガード有り無し模型で造波抵抗係数 r_w の差はあまりない．本解析方法が実際により近いと解釈される．近似式から得られた模型の全抵抗係数 r_T に対して，プロペラガードの抵抗，摩擦抵抗，形状抵抗（ $K \times$ 摩擦抵抗）および造波抵抗に分離した図を漁場発について Fig.5-21 に示す．プロペラガードの抵抗は，微低速では全抵抗の 45 % 程度，航海速度である 12～14 knot ($Fn = 0.407 \sim 0.475$) 付近では 25 % 程度であり，プロペラガードの抵抗は無視できない量である．

漁場発状態 12 knot ($Fn = 0.407$) 相当のプロペラガード付き模型船波形を Photo 5-8 に示す．また，同様に漁港発状態 12 knot および 14 knot ($Fn = 0.475$) 相当の模型船波形を Photos 5-9(1)，(2) に示す．漁場発状態 12 knot では船首部造波，船首肩波および船尾後方造波がかなり大きい．漁港発は漁場発と造波現象が大きく異なる．漁場発状態ではバルバスバウは没水しているが，漁港発状態では没水していない．漁港発では魚倉が空のためバルバスバウが水面より浮き上がり，半滑走状態に移りつつある．漁場発では魚倉に漁獲物を入れて船首喫水が深くなり，船首の波崩れが顕著で漁港発と差が著しい．

バルバスバウは漁場発では没水体として，漁港発では水面貫通体として作用を及ぼし，また本船は半滑走型と排水量型の二面性をもつ．漁港発と漁場発の船首部の造波現象は大きく異なるが，バルバスバウ形状を簡易的に変更し波形を観察したところ，延長により排水量型状態である漁場発では没水時の造波干渉効果が，半滑走状態である漁港発では船体延長および水面貫通部の水線入射角減少の効果が得られることが判明した．しかしながら，バルバスバウの形状変更のみでは船体前半部の造波現象の減少効果は限られ，船体前半部全般にわたる形状変更が必要であることが判明した．一方，船尾喫水は漁場発と漁港発で変わらないため，船尾の造波現象は 2 状態であり相違がなく，また造波現象に対して船尾肥大度と船尾端の没水量の影響が大きいことが判明した．従って，船首部および船尾部の船型変更は 2 状態に同じような影響をもたらすと推察され，またプロペラガード形状の変更は推進性能改善に必須であることも判明した．回流水槽試験により短期間に船型上の問題点を抽出し，その対策の指針を得た．

また川島ら⁴⁶⁾によりランキンソース法で原型の圧力分布が調べられた．漁場発の速力 12 knot ($Fn = 0.407$) の造波抵抗成分をガス方向に積分した結果を Fig.5-22 に示す．船首で抵抗を受け，船体後半の圧力の回復が認められない，典型的な「箱船船型」の特徴をもつ．

5. 3. 3 船型改良方針の検討

本来なら漁場発（排水量型）と漁港発（半滑走型）の 2 状態に対し重み付き最適化が望ましいが，模型試験での改良指針の検討で，船首尾部の形状変更が 2 状態で同様の効果の得られることが推察された．そこで抵抗が大きく，航走距離も長い漁場発状態を船型改良の対象とした．

川島ら⁶⁵⁾により船体前半部の検討が最適化手法で行われた。変更部分はオーディネイト 6 より前方部分で、排水量は原型と同じとした。横切面積曲線の変化量 ΔC_p を Fig.5-23 に、造波抵抗係数 r_w を Fig.5-24 に示す。Opt-1 はバルバスバウを原型より 0.30 m 伸ばして突出量 0.90 m ($4.2\%L_{pp}$) とし、オーディネイト 7~9 の横切面積は大きく減少させ、船首部横切面積は大きく増加させた条件、Opt-2 は Opt-1 と原型との中間の条件である。Opt-3 は Opt-2 に対しバルバスバウを規則を無視し意図的に伸ばして突出量 1.14 m ($5.3\%L_{pp}$) とした。フルード数 Fn 0.407 では、Opt-1 は 52 %、Opt-2 は 40 %の減少である。Opt-1 は魚倉を大幅に減らす変形であるため Opt-2 を採用した。Opt-3 は Opt-2 と同程度の 43 %減で、バルバスバウを長く伸ばしても必ずしも造波干渉による抵抗減少が得られてはいない。

川島ら⁶⁵⁾により格子粒子ハイブリッド差分法を用いて船体後半部形状の改良が行われた。機関室付近の形状変更は船内配置の抜本的な変更が必要となり、また作業甲板の形状変更は漁労の方法と作業性に関係する。そこで改良部分を推進性能に大きな影響を及ぼしている船尾張出し部甲板下方の水面近傍に限ることとした。小型サンマ漁船の開発でも同じであったが、船体後半の抜本的な改良は難しく、この事情は小型漁船に共通する。まずオーディネイト 1/2 より後方の船幅を狭くする条件で船尾端幅を系統的に変えて抵抗の変化を調べ、剥離が発生しない船尾端幅として原型の 80 %を得た (Stern-1)。つぎに船尾端没水量の影響を Stern-1 の船尾端喫水に対する 20 %を基準に、Stern-2 は 10 %、Stern-3 は 15 %として調査した。変形の概要を Fig.5-25 に、全抵抗減少量を Fig.5-26 に示す。Stern-2 で 25 %減少となった。計算条件は漁場発状態のフルード数 Fn 0.41、レイノルズ数 Rn 1.0×10^5 である。船尾端周りの流場シミュレーションによると、原型では船尾端後方に淀み域が形成されているが、Stern-2 では船尾端後方の低速域が抑制され、船尾後方域の圧力勾配が小さくなっており、それらが抵抗減少につながったと考えられる。

5. 3. 4 改良船型とその性能

原型の模型試験から得られた知見をベースとした数値計算による検討結果を踏まえ、改船船型を設計した。船体前半部は Opt-2 を、船尾部は Stern-2 をベースに実用性の担保を考慮して設計し、原型と同様の模型試験を実施した。原型との船型主要目の比較を Table 5-3 に、試験状態の比較を Table 5-4 に示す。試験状態は原型と改良船型で同じ排水量とトリムとした。模型は原型と同じ縮尺 1/20 の硬質ウレタン製で、その写真を Photo 5-10 に示す。プロペラガード形状は、船側から見た縦部材(船尾側からは U 型)は原型の 4 本に対して改良船型では 3 本に、同方向から見た横部材(船長方向)は原型の片舷 7 本に対して改良船型では片舷 4 本にした。なお縦および横部材の断面形状(円形、実船相当で縦部材直径 80 mm、横部材直径 40 mm)ならびに縦部材の間隔は原型と改良型で同じとした。さらに、船側から見た縦部材の船幅方向(左右舷方向)の船底取り付け部間隔は、原型の実船相当 2.0 m に対して改良船型では 1.7 m と狭くし、プロペラに多少近づいた。改良船型では部材総長さを短くして抵抗減少を計った。

プロペラガード有り無しの全抵抗係数 r_T を Fig.5-27 に示す。プロペラガードの抵抗はまだ大きい。航走時の姿勢変化を Figs.5-28(1), (2)に示す。プロペラガード取付により、原型と同様に船尾は上昇する傾向にある。プロペラガード無しの原型(再試験)と改良船型の全抵抗係数

r_T を Fig.5-29 に、摩擦抵抗係数 C_f に Schöenherr の式を使用して求めた造波抵抗係数 r_w と形状影響係数 K を Fig.5-30 に示す。船型変更によりフルード数 Fn 0.40 付近にて、全抵抗係数 r_T は漁場発状態で約 15 %減少、漁港発状態で約 20 %の減少である。造波抵抗係数 r_w はおの約 10 %および約 20 %の減少、形状影響係数 K は半減している。船体前半部と船尾部の局所改良であっても大幅な効果の得られた。Figs.5-31(1), (2)にプロペラガード無しの航走時の姿勢変化を示す。改良船型は原型に比べ、船首が上昇傾向、船尾が沈下傾向にあり、改良船型の航走時トリムは原型に比べ、漁場発状態の中速域では船首側トリムが小さくなり、その他の速力では船尾側トリムが大きくなった。平均沈下量はほとんど変わらないが、船首喫水が浅くなることは一般的に航行には好ましいと推察される。

Fig.5-32 に各状態の抵抗値 Rt と流速 V の 5 次式によるその近似曲線を示す。この曲線は改良船型においても原型と同様に流速 V と抵抗値 Rt との関係をほぼ近似している。Fig.5-33 に原型と同様に解析したプロペラガードの抵抗係数 C_d を原型の値と共に示す。原型に対して 25 %程度の減少である。プロペラガード付き模型試験結果から、Fig.5-33 の抵抗係数 C_d の平均値（漁場発：1.958，漁港発：2.104）を用いたプロペラガードの抵抗を差し引き、プロペラガード無し
の模型試験における形状影響係数 K を使って造波抵抗係数 r_w を求め Fig.5-34 に示す。プロペラガード有り無しの造波抵抗係数 r_w は、原型と同じようにほとんど変わらない。

漁場発状態の 12 knot ($Fn = 0.407$) 相当のプロペラガード付き模型船波形を Photo 5-11 に示す。また同様に漁港発状態の 12 knot 相当および 14 knot ($Fn = 0.475$) 相当の模型船波形を Photos 5-12(1), (2)に示す。原型 (Photos 5-8, 5-9(1), (2)) に比べ漁港発では船首波崩れが減少している。漁場発では波崩れは無くなっていないが原型に比べ小さい。船尾は完全な波切り状態ではないが、原型と比べて淀み域が小さくなり船尾部改良効果が得られていると考えられる。

3 次元解析にて有効馬力を推定した。造波抵抗係数 r_w および形状影響係数 K には Fig.5-30 に示すプロペラガード無し状態における計測値を使用した。なお摩擦抵抗係数には Schöenherr の式を用いた。プロペラガード付きについては、Table 5-5 に示す Fig.5-33 のプロペラガードの抵抗係数 C_d の平均値を用いて、その抵抗を船体抵抗に付加した。プロペラガードのレイノルズ数 Rn は模型では 10^3 のオーダー、実船では 10^5 のオーダーである。文献⁶⁰によると、円柱の抵抗係数の変化はレイノルズ数 Rn が 1.0×10^3 から 5.5×10^5 の間でほとんどないため、Table 5-5 示す抵抗係数 C_d の平均値をプロペラガードの実船での抵抗係数とした。自航要素に類似な船型の模型試験結果を用い、プロペラは 4 翼の直径 1.4 m とした。なお、これらは原型と改良船型で同じ値とした。有効馬力 EHP 曲線をプロペラガード有り無しについて Figs.5-35(1), (2)に、プロペラガード付きの制動馬力 BHP 曲線を Fig.5-36 に示す。原型と改良船型の船型形状差（プロペラガード無し）による 12 knot 付近における有効馬力 EHP 差は、漁場発にて 16 %，漁港発にて 25 %である。一方、プロペラガード付きの 12 knot 付近における有効馬力 EHP 差は、漁場発にて 22 %，漁港発にて 29 %である。船型とプロペラガードの改良により 20~30 %の馬力削減となる。改良船型は 12 knot 付近の同一制動馬力 BHP の速力で、漁場発で約 0.8 knot，漁港発状態で約 1.0 knot のアップとなる。改良船型の TKM は原型と同程度で復原性は変わらず、定置漁船に必須の甲板面積と側面の直線形状も原型と同じである。船体前半部の魚倉の形が少し変わるが、本質的な問題は伴わない。そのほかの基本要素も原型と同等であり、改良船型の実

用性は満たされていると判断できる。なお、プロペラガードによる速力低下は、漁場発状態で1.0～1.2 knot、漁港発状態ではそれ以上になり、その形状の最適化はこの種の漁船において大きな課題である。

小型模型による回流水槽試験，抵抗値の近似およびプロペラガードの抵抗係数の設定等，実船の推進性能推定に多少精度的に劣るが，ある程度信頼できる船型改良効果が得られている。

5. 4 結言

漁船を対象とした回流水槽試験による船型開発手法を提案し，小型サンマ漁船および定置網漁船に適用してその有効性について以下の結論を得た。

- 1) 本手法では，まず既存船型の実態調査を行い，回流水槽模型試験（抵抗試験および流れの観察）により船型の問題点とその改善指針を明らかにし，船型学の数値計算手法（造波抵抗理論，非線形計画法，最適化手法，数値流体力学）を用いてその改善指針を具体化する。そして，改良船型の推進性能を回流水槽試験で確認する。回流水槽試験の情報が数値計算手法のインプットとなり，容易に短期間で有効な解を見いだし，船型開発を効率化した。
- 2) 本手法を2種類の漁船に適用した。小型サンマ漁船では航海速力で半分以上，定置網漁船では約20%の馬力削減となった。そして小型サンマ漁船では開発船型を参考に2隻建造され，従来型に比べ格段の燃料削減効果が確認された。実態調査から模型試験による効果確認までに要した期間は約半年であるが，半分の期間に短縮が可能である。以上により，短期間で船型開発が行える本手法の有効性が確認された。なお小型模型（長さ1.0～1.5 m）が充分活用できることも確認された。

Table 5-1 Principal particulars and test condition of saury fishing vessel.

hull form		prototype	improved
length over all L_{oa}	(m)	26.89	26.89
L_{pp} * (L_r)	(m)	20.69	21.5
L_{wl}	(m)	21.69	23.7
breadth $B(B_r)$	(m)	4.1	4.1
draft from B.L. d	(m)	1.7	1.7
bulbous bow length from F.P. L_{bulb}	(m)	1.90 (9.2% L_{pp})	2.50 (11.6% L_{pp})
aft end length from A.P. L_{stern}	(m)	1.45 (7.0% L_{pp})	2.20 (10.2% L_{pp})
center of buoyancy lcb	(m)	0.261 (1.26% L_{pp}) aft	0.527 (2.45% L_{pp}) aft
transverse KM TKM	(m)	2.310 (56.3% B)	2.475 (60.4% B)
displacement ∇	(m ³)	133.2	145
L_{pp} / B		5.05	5.24
B / d		2.41	2.41
block coefficient C_b		0.924	0.968
test condition		from fishing grounds	
displacement ∇	(m ³)	128.9	128.9
mean draft from B.L. d_m	(m)	1.643	1.533
draft at F.P. from B.L. d_f	(m)	1.52	1.41
draft at A.P. from B.L. d_a	(m)	1.766	1.656
trim t	(m)	0.246	0.246
submersion amount at aft end	(m)	0.94	0.72
center of buoyancy lcb	(m)	0.554 (2.68% L_{pp}) aft	0.770 (3.58% L_{pp}) aft
transverse KM TKM	(m)	2.326 (56.7% B)	2.567 (62.6% B)
blockage coefficient C_b		0.9248	0.9537
displacement-Lpp ratio ∇ / L_{pp}^3		14.6×10^{-3}	13.0×10^{-3}
design speed V_s	(knots)	11.0	11
design Froude number F_n		0.388	0.371

*) F.P. is the front edge of upper deck.

Table 5-2 Principal particulars and test conditions of prototype set net fishing boat.

length over all L_{oa}	(m)	25.35	
L_{pp}^* (L_r)	(m)	21.50	
L_{wl}	(m)	23.50	
breadth $B(B_r)$	(m)	5.00	
draft from B.L. d	(m)	1.30	
displacement ∇	(m^3)	119.5	
L_{pp} / B		4.30	
B / d		3.85	
block coefficient C_b		0.855	
displacement-Lpp ratio ∇ / L_{pp}^3		12.02×10^{-3}	
test condition		from fishing grounds	from fishing port
displacement ∇	(m^3)	99.1	75.9
mean draft from B.L. d_m	(m)	1.1	0.85
trim t	(m)	0.2	0.7
center of buoyancy lcb	(m)	1.09 (5.1% L_{pp}) aft	2.30 (10.7% L_{pp}) aft
blockage coefficient C_b		0.838	0.831
displacement-Lpp ratio ∇ / L_{pp}^3		9.97×10^{-3}	7.64×10^{-3}
design speed V_s	(knots)	12.0	12.0 ~ 14.0
design Froude number F_n		0.407	0.407 ~ 0.475
design Froude number F_{∇}		0.92	0.96 ~ 1.12

*) F.P. is the front edge of upper deck.

Table 5-3 Principal particulars of prototype and improved type set net fishing boats.

hull form		prototype	improved
length over all L_{oa}	(m)	25.35	
L_{pp}^* (L_r)	(m)	21.50	
L_{wl}	(m)	23.50	
breadth $B(B_r)$	(m)	5.00	
draft from B.L. d	(m)	1.30	
bulbous bow length from F.P. L_{bulb}	(m)	0.60(2.8% L_{pp})	1.00(4.7% L_{pp})
aft end length from A.P. L_{stern}	(m)	2.00(9.3% L_{pp})	2.00(9.3% L_{pp})
center of buoyancy lcb	(m)	0.84(3.9% L_{pp}) aft	0.60(2.8% L_{pp}) aft
transverse KM TKM	(m)	2.57(51.3% B)	2.47(49.3% B)
displacement ∇	(m^3)	119.5	116.7
L_{pp} / B		4.30	
B / d		3.85	
block coefficient C_b		0.855	0.835
displacement-Lpp ratio ∇ / L_{pp}^3		12.02×10^{-3}	11.74×10^{-3}

*) F.P. is the front edge of upper deck.

Table 5-4 Test conditions of prototype and improved type set net fishing boats.

test condition	from fishing grounds		from fishing port	
	prototype	improved	prototype	improved
displacement ∇ (m ³)	99.1		75.9	
mean draft from B.L. d_m (m)	1.100	1.122	0.850	0.871
draft at F.P. from B.L. d_f (m)	1.000	1.022	0.500	0.521
draft at A.P. from B.L. d_a (m)	1.200	1.222	1.200	1.221
trim t (m)	0.200	0.200	0.700	0.700
submersion amount at aft end (m)	0.500	0.272	0.500	0.271
center of buoyancy lcb (m)	1.09(5.1% L_{pp}) aft	0.84(3.1% L_{pp}) aft	2.30(10.7% L_{pp}) aft	1.97(9.2% L_{pp}) aft
transverse KM TKM (m)	2.83(56.6%B)	2.67(53.4%B)	3.34(66.9%B)	3.13(62.6%B)
block coefficient C_b	0.838	0.822	0.831	0.811
displacement-Lpp ratio ∇/L_{pp}^3	9.97×10^{-3}		7.64×10^{-3}	
design speed V_s (knots)	12.0		12.0 ~ 14.0	
design Froude number F_n	0.407		0.407 ~ 0.475	
design Froude number F_{∇}	0.92		0.96 ~ 1.12	

Table 5-5 Mean drag coefficient of propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

condition	from fishing grounds		from fishing port	
	prototype	improved	prototype	improved
mean drag coefficient C_{dm}	2.720	1.958	2.825	2.104

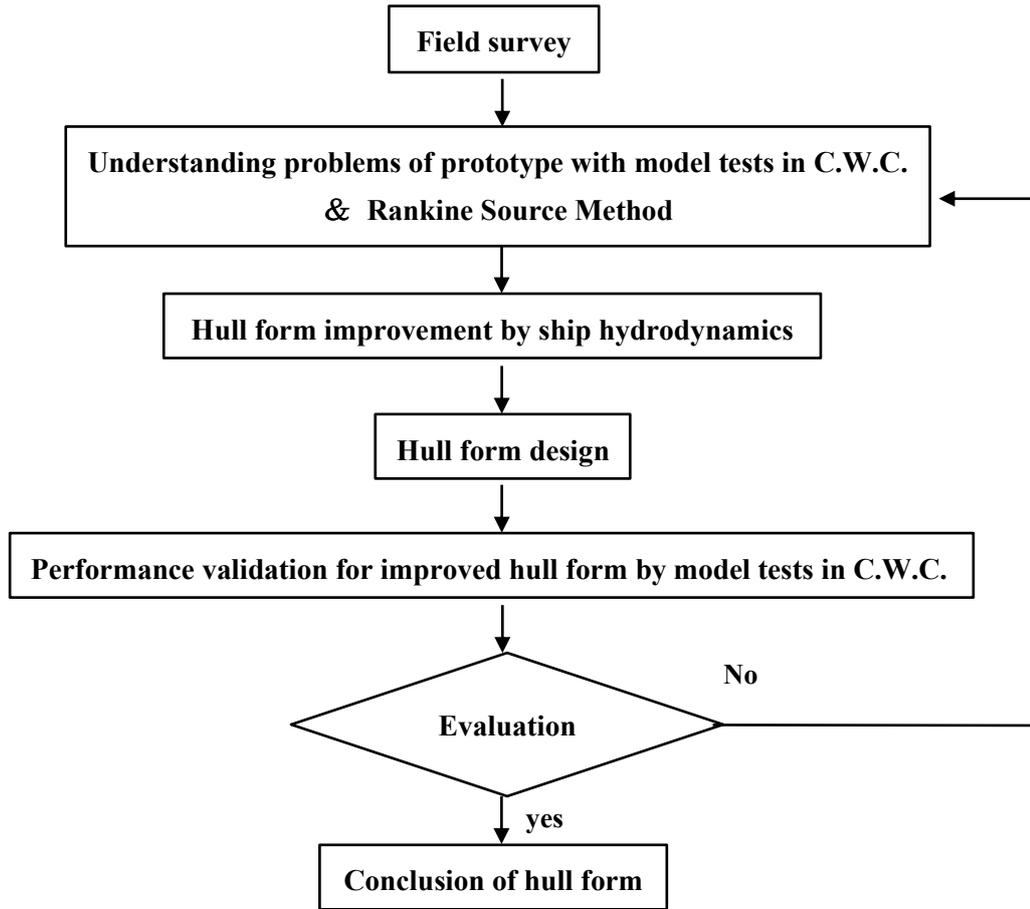


Fig.5-1 Flow chart of hull form development.

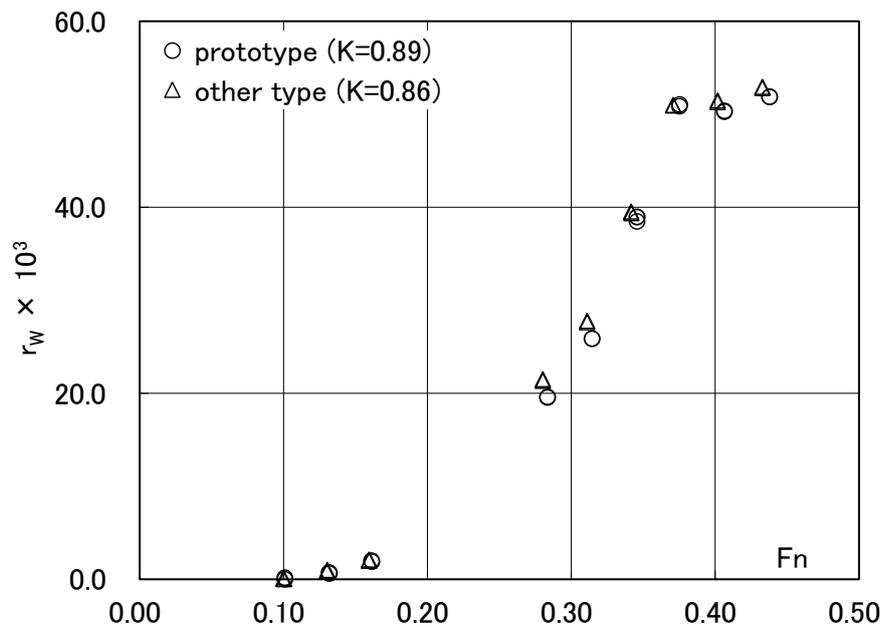


Fig.5-2 Wave making resistance coefficient and form factor of prototype and other saury fishing vessels.

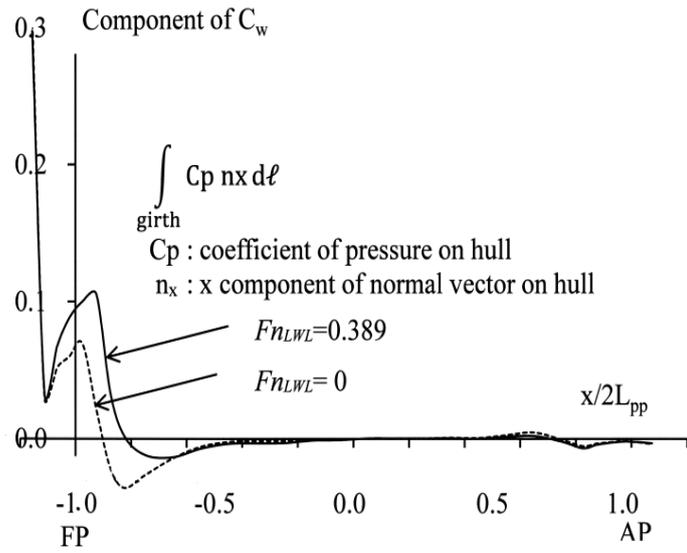


Fig.5-3 Component of wave making resistance of prototype saury fishing vessel.

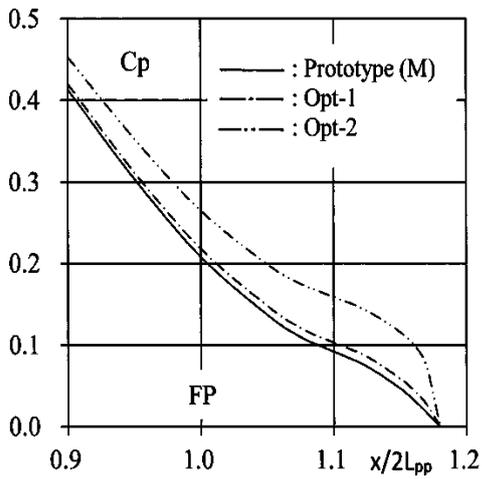


Fig.5-4 ΔC_p curves of improved bulbous bow type saury fishing vessels.

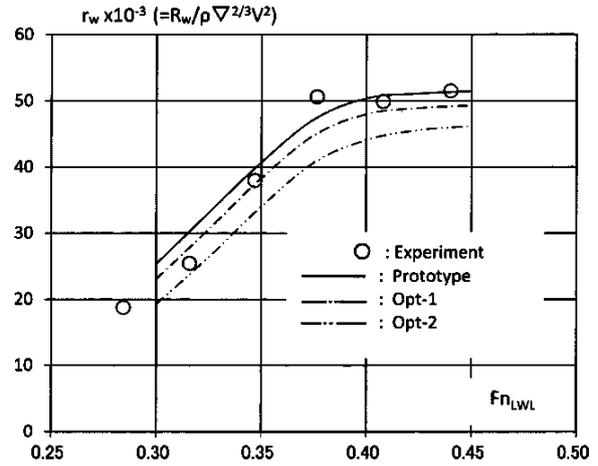


Fig.5-5 Wave making resistance of improved bulbous bow type saury fishing vessels.

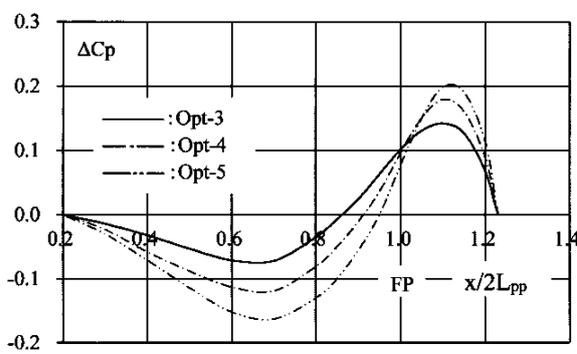


Fig.5-6 ΔC_p curves of improved fore part type saury fishing vessels.

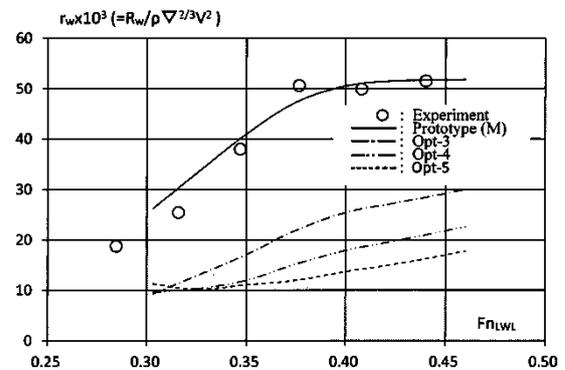


Fig.5-7 Wave making resistance of improved fore part type saury fishing vessels.

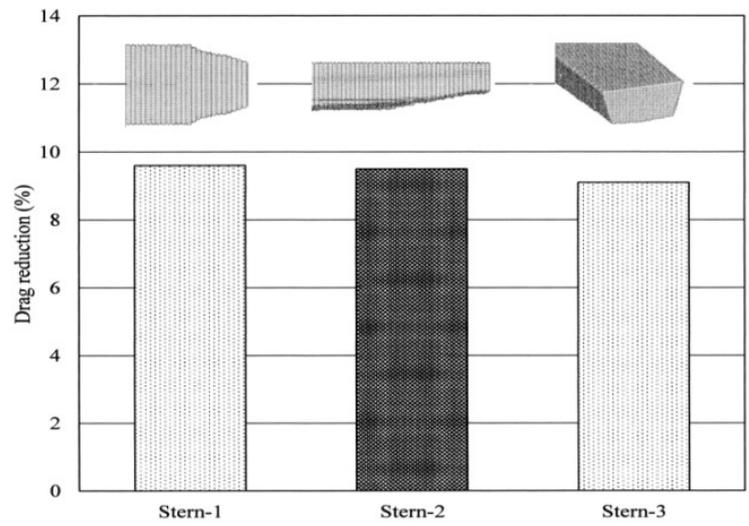


Fig.5-8 Drag reduction of improved stern type saury fishing vessels.

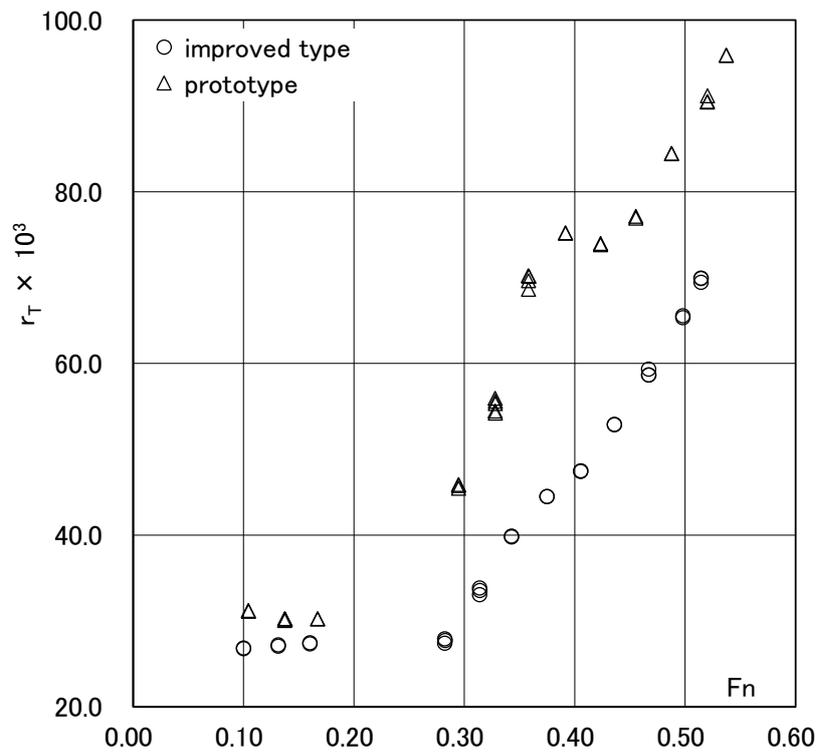


Fig.5-9 Total resistance coefficient of prototype and improved type saury fishing vessels.

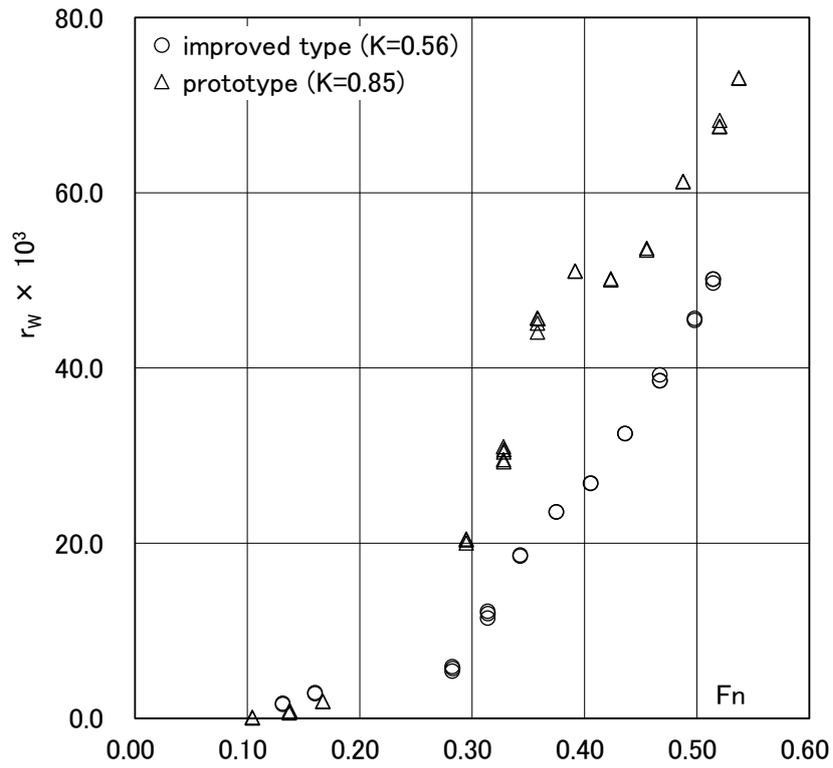


Fig.5-10 Wave making resistance coefficient and form factor of prototype and improved type saury fishing vessels.

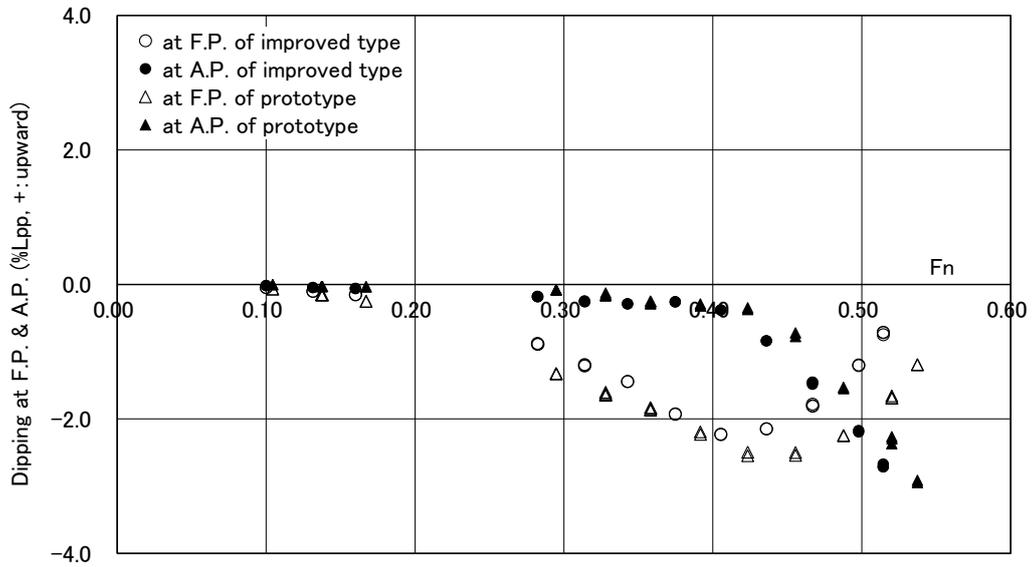


Fig.5-11(1) Dipping at F.P. and A.P. of prototype and improved type saury fishing vessels.

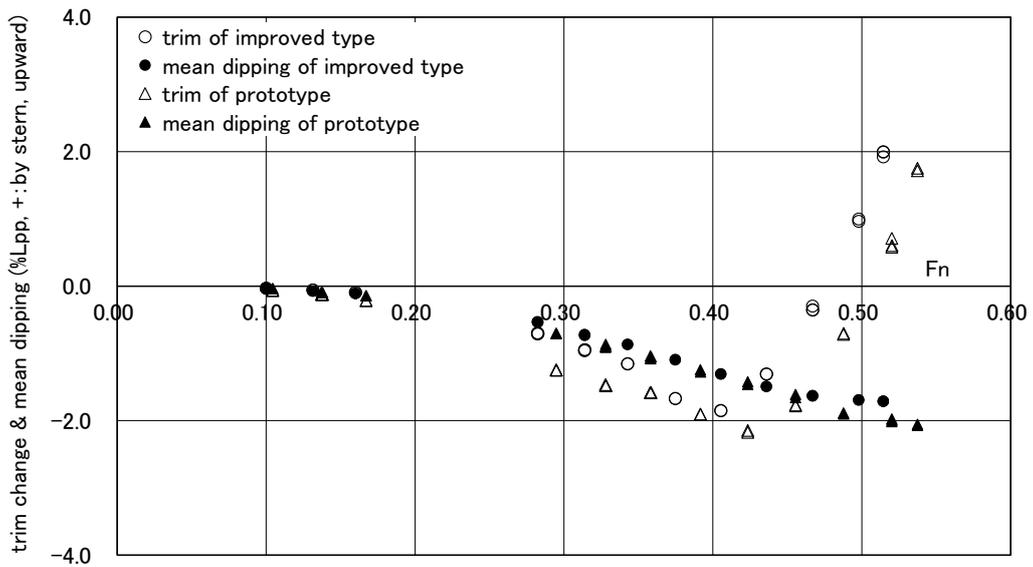


Fig.5-11(2) Trim change and mean dipping of prototype and improved type saury fishing vessels.

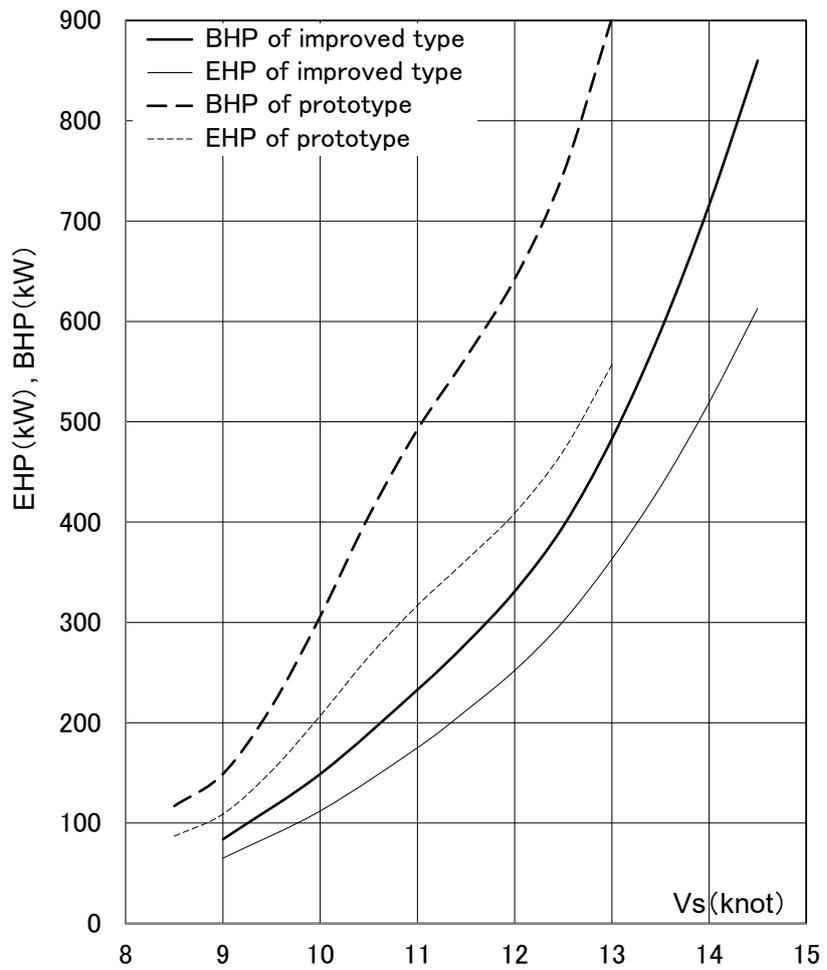


Fig.5-12 Estimated *BHP* and *EHP* of prototype and improved type saury fishing vessels.

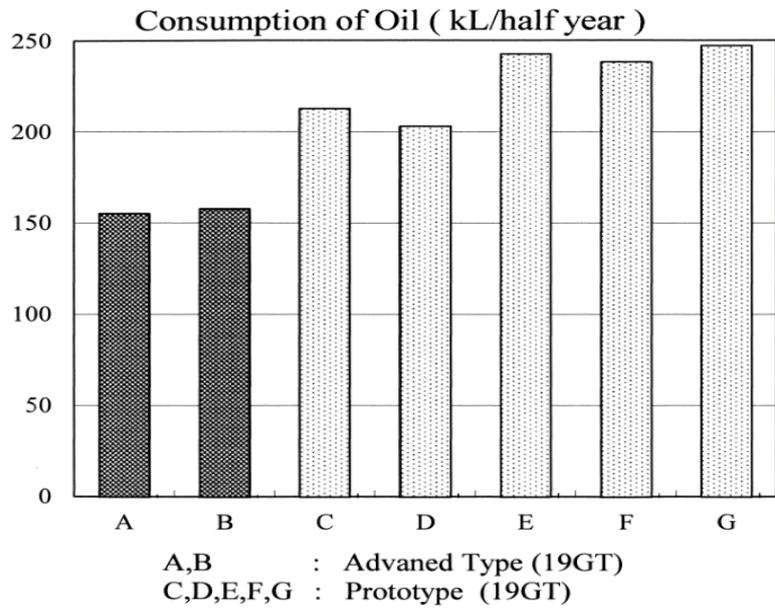


Fig.5-13 Oil consumption of various saury fishing vessels.

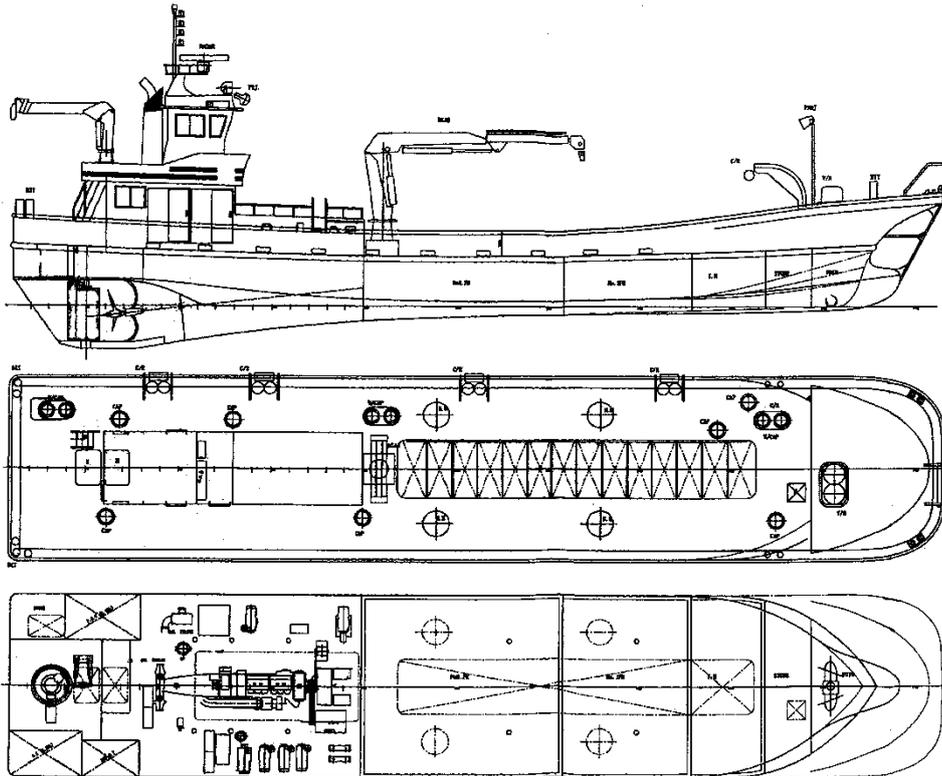


Fig.5-14 General arrangement of prototype set net fishing boat.

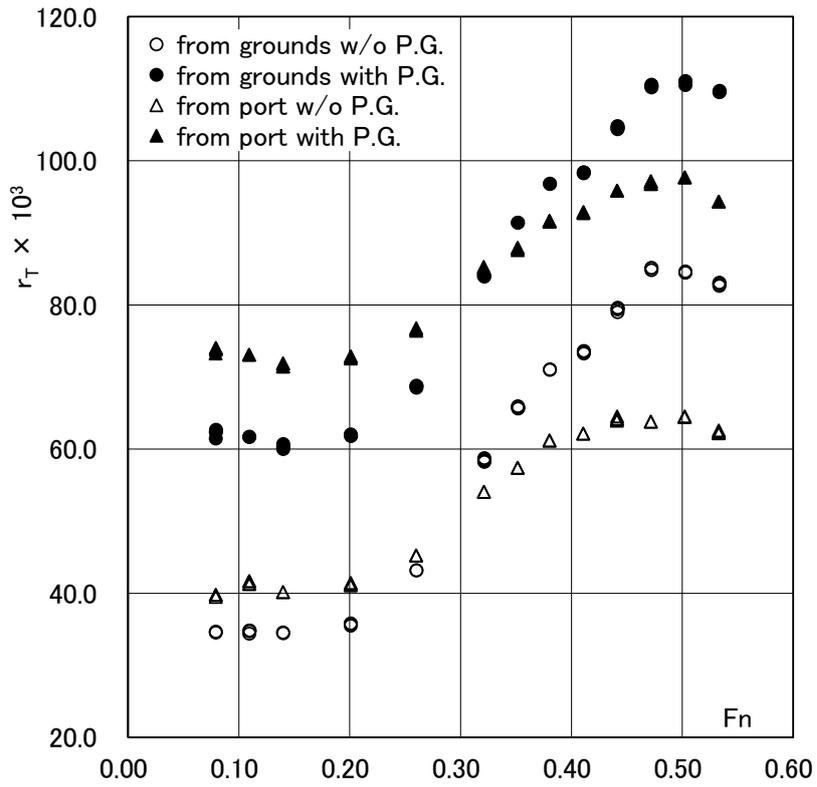


Fig.5-15 Total resistance coefficient without/with propeller guard of prototype set net fishing boat.

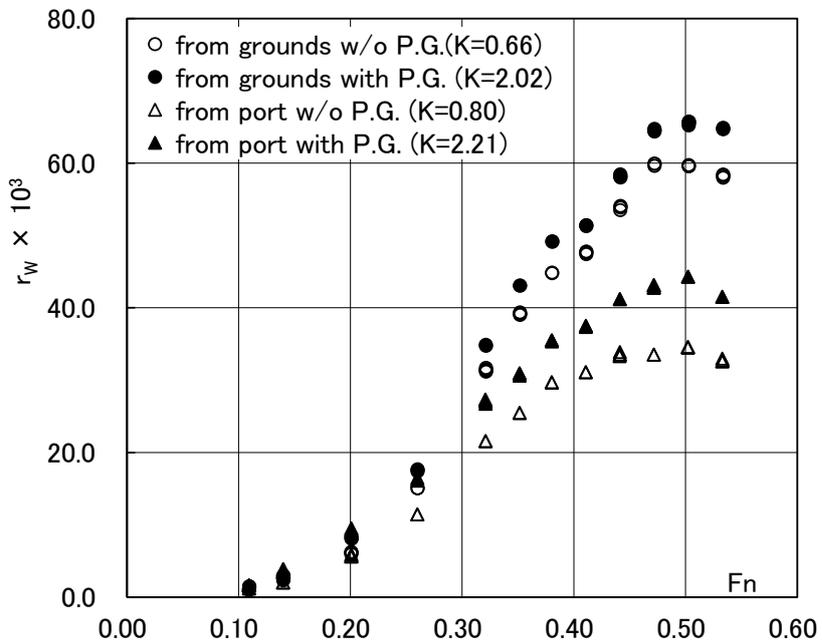


Fig.5-16 Wave making resistance coefficient and form factor without/with propeller guard of prototype set net fishing boat.

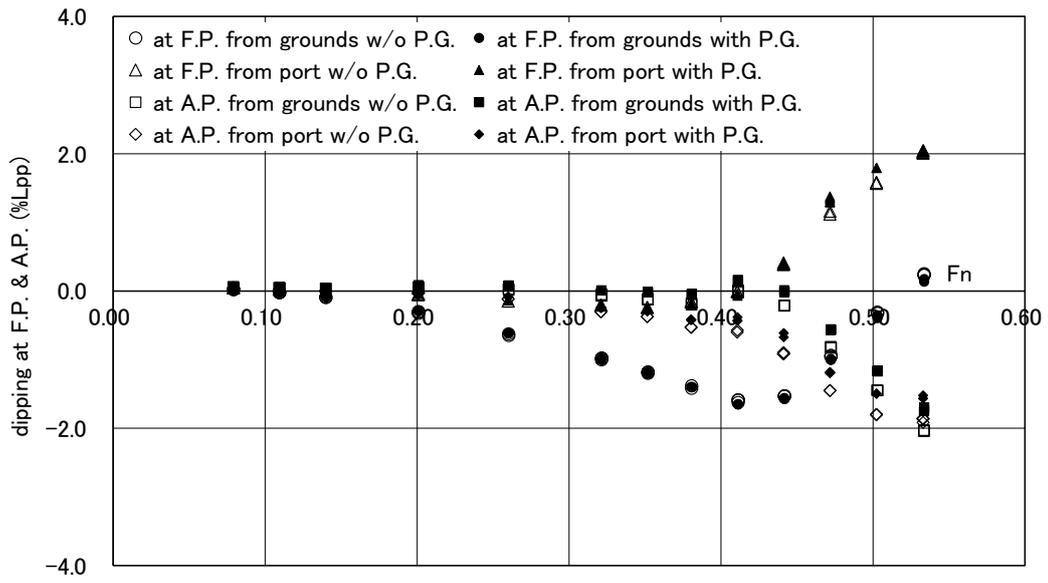


Fig.5-17(1) Dipping at F.P. and A.P. without/with propeller guard of prototype set net fishing boat.

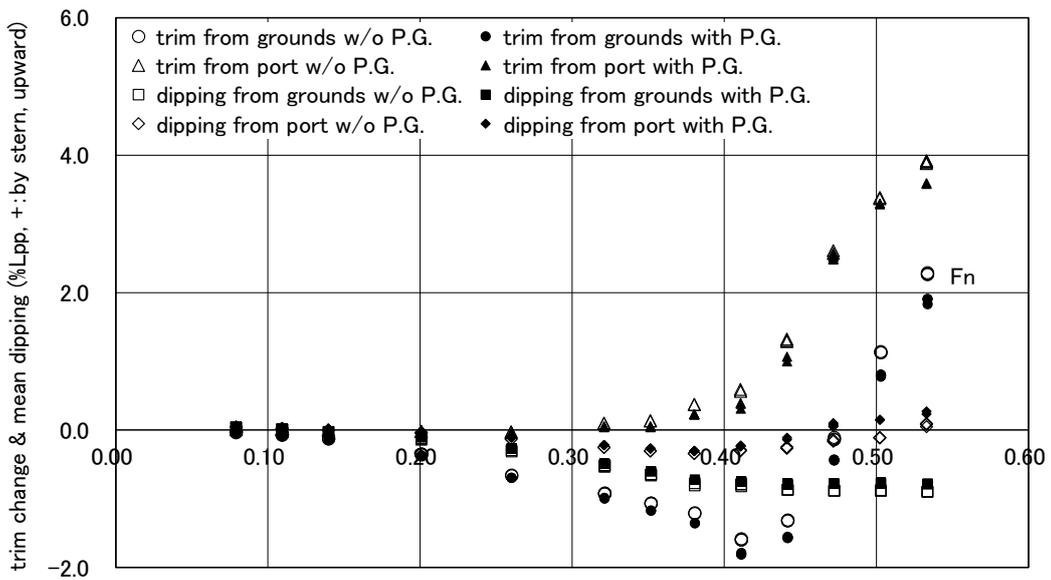


Fig.5-17(2) Trim change and mean dipping without/with propeller guard of prototype set net fishing boat.

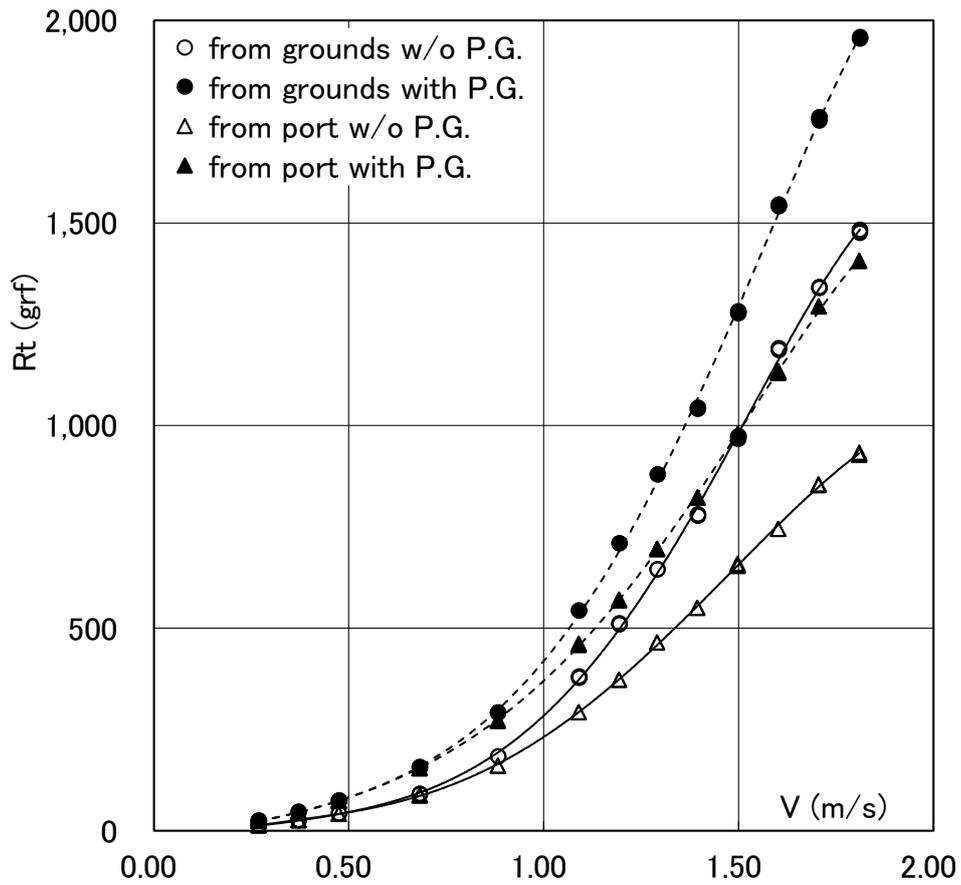


Fig.5-18 Total resistance without/with propeller guard of prototype set net fishing boat.

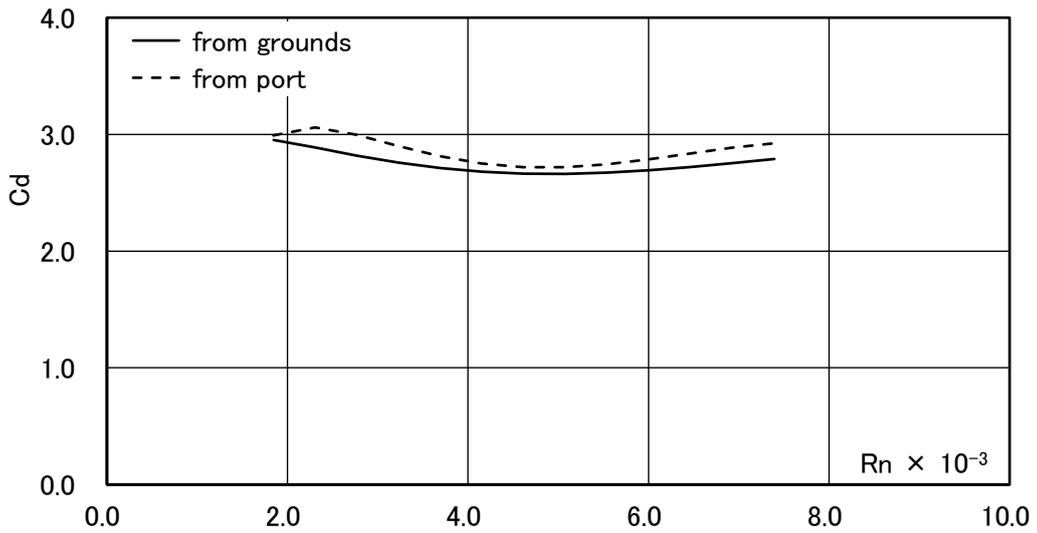


Fig.5-19 Drag coefficient of propeller guard of prototype set net fishing boat.

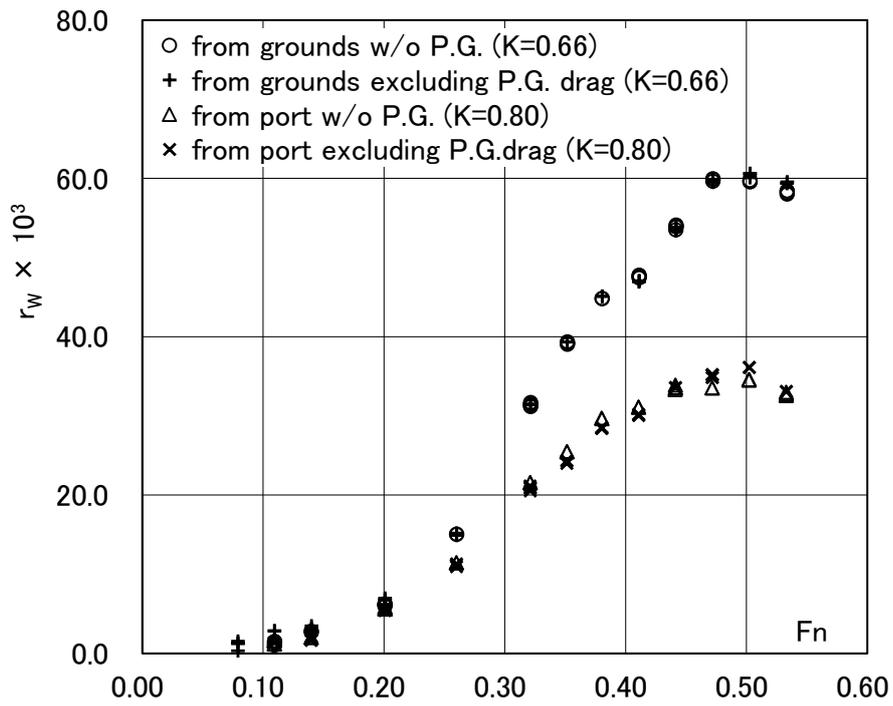


Fig.5-20 Wave resistance coefficient and form factor without propeller guard of prototype set net fishing boat.

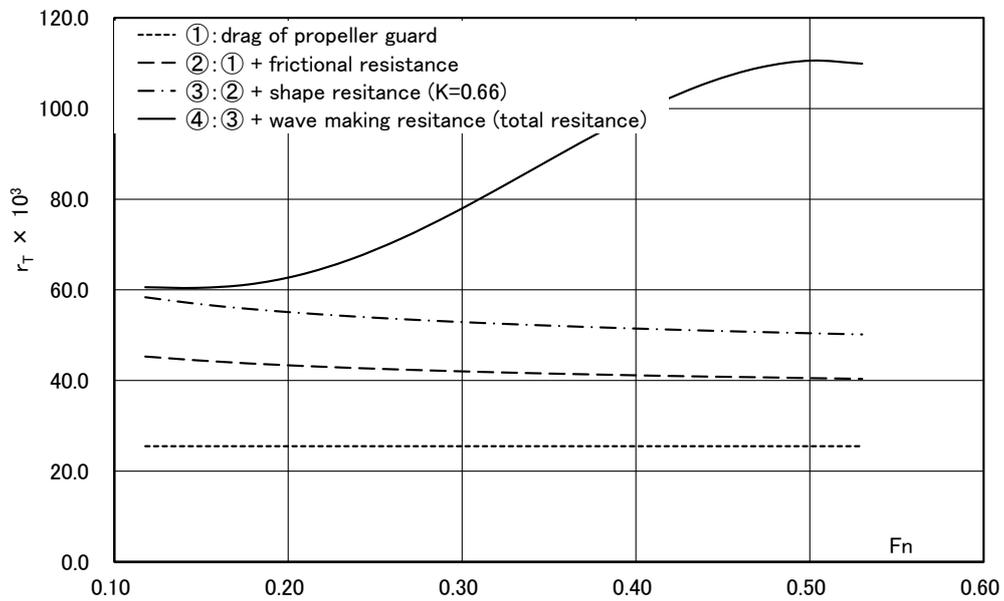


Fig.5-21 Model ship resistance coefficients from fishing grounds of prototype set net fishing boat.

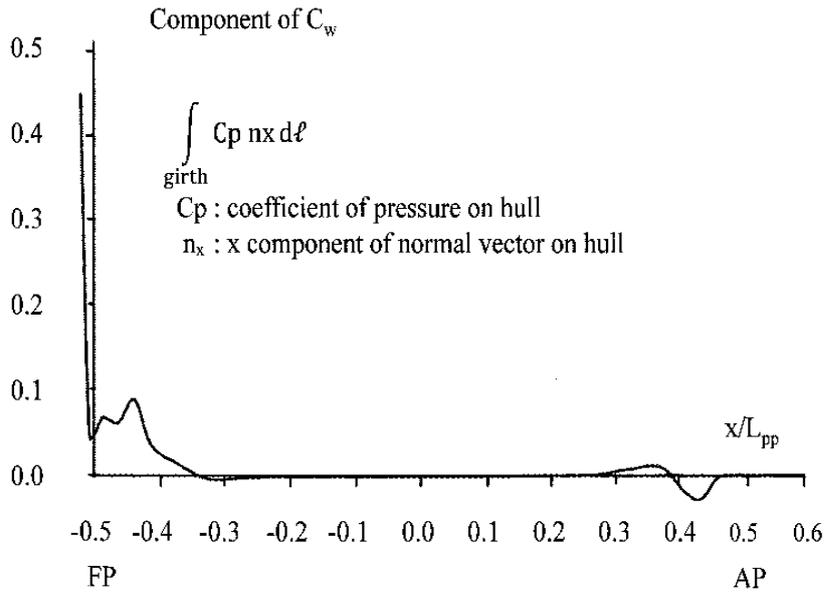


Fig.5-22 Component of wave making resistance of prototype net setter.

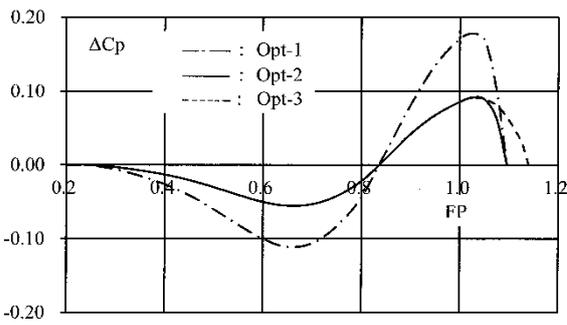


Fig.5-23 ΔC_p curves of improved fore part type set net fishing boats.

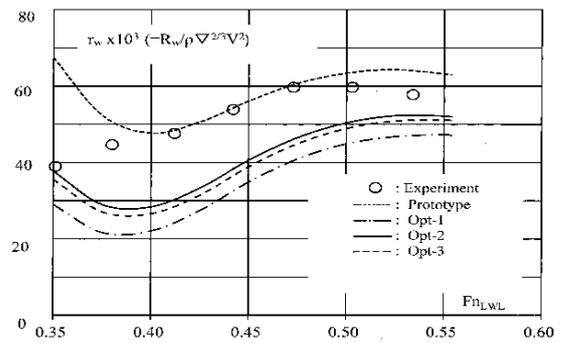


Fig.5-24 Wave making resistance coefficient of improved fore part type set net fishing boats.

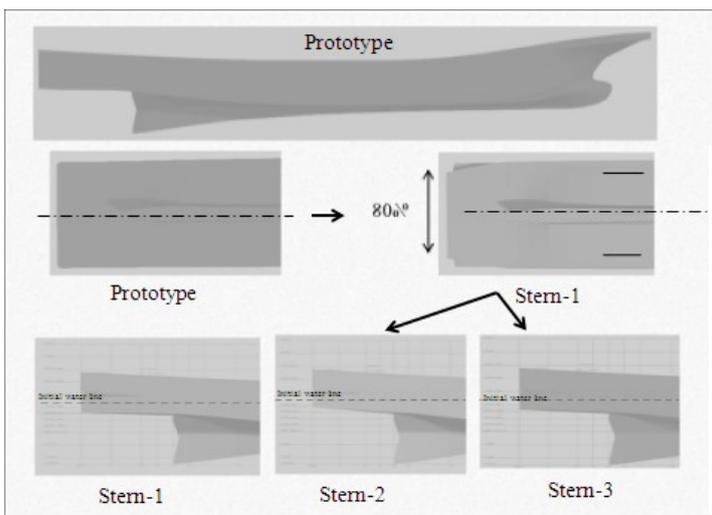


Fig.5-25 Outline of improved aft parts of set net fishing boat.

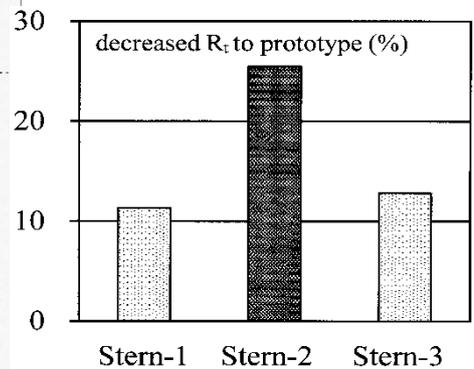


Fig.5-26 Drag reduction due to aft parts of set net fishing boat.

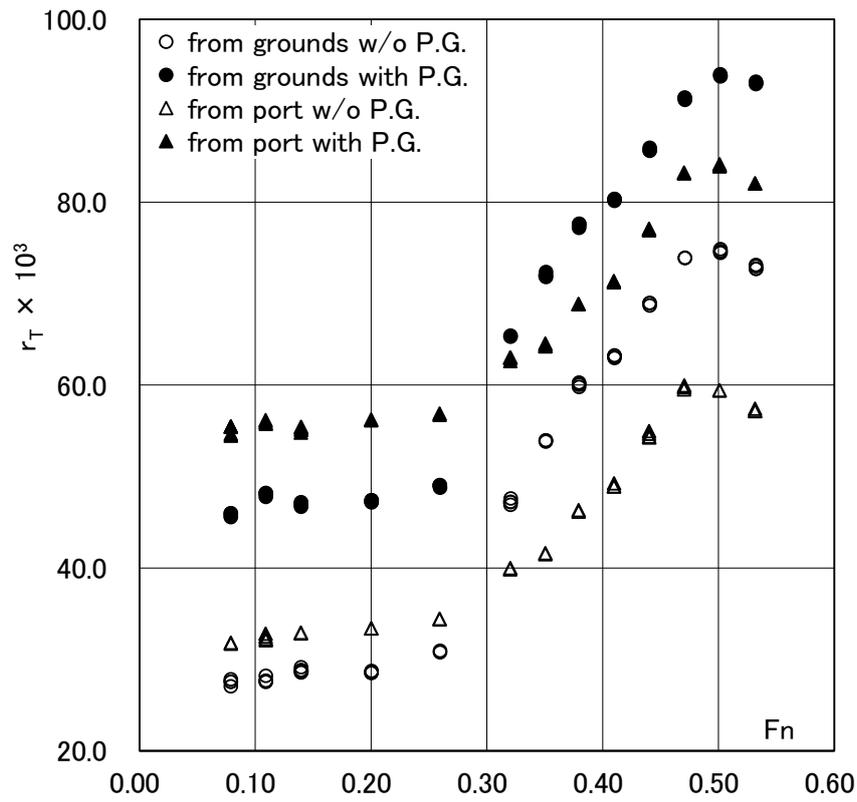


Fig.5-27 Total resistance coefficient without/with propeller guard of improved type set net fishing boat.

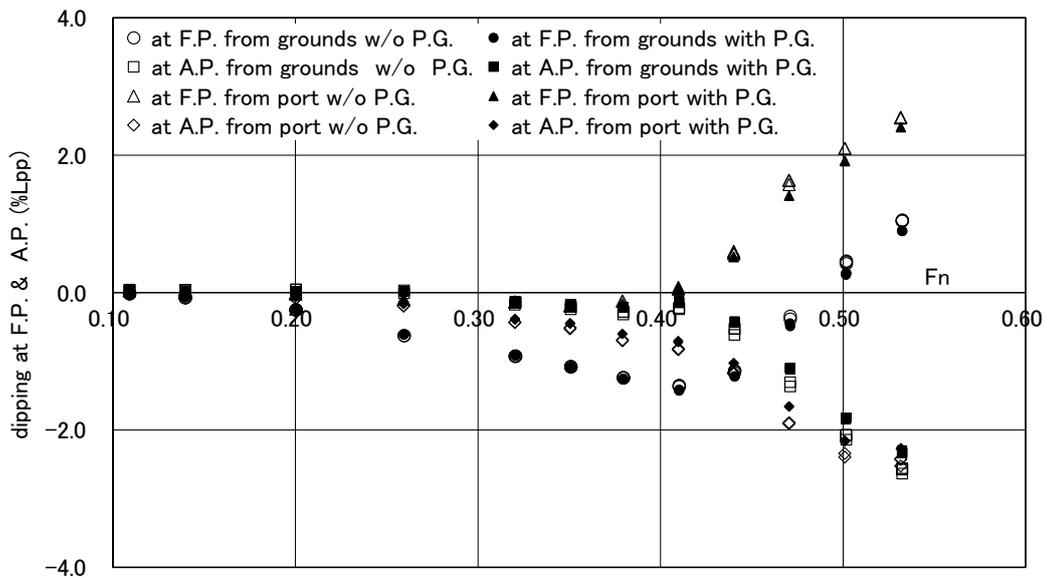


Fig.5-28(1) Dipping at F.P. and A.P. without/with propeller guard of improved type set net fishing boat.

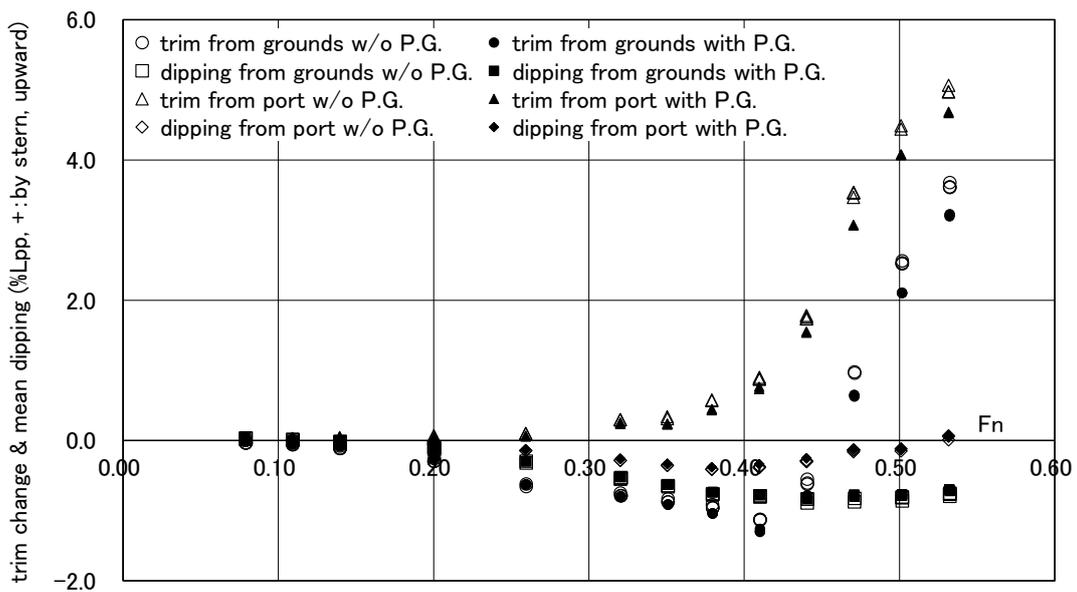


Fig.5-28(2) Trim change and mean dipping without/with propeller guard of improved type set net fishing boat.

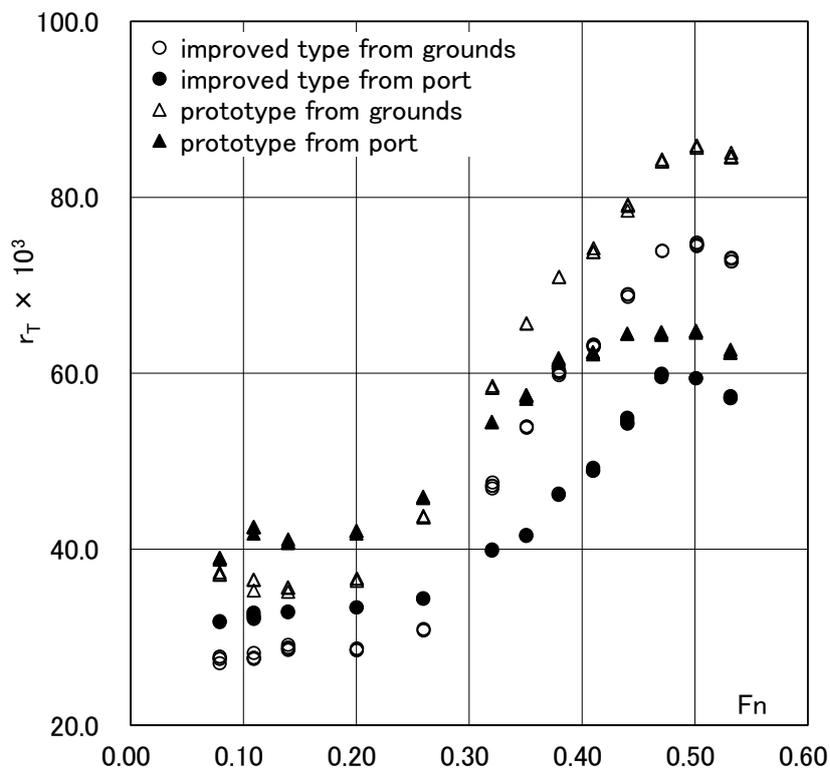


Fig.5-29 Total resistance coefficient without propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

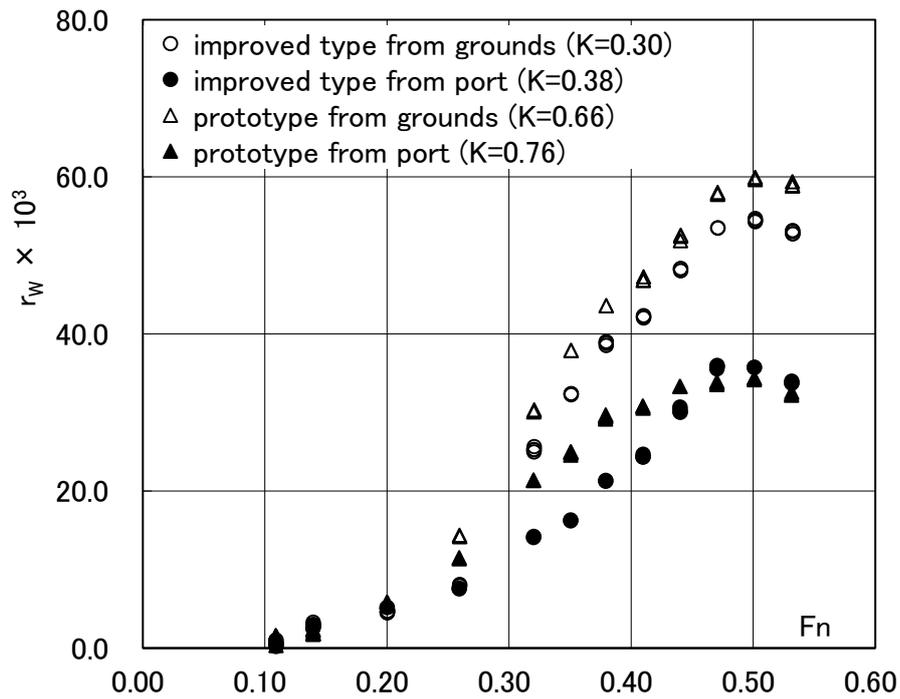


Fig.5-30 Wave making resistance coefficient and form factor without propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

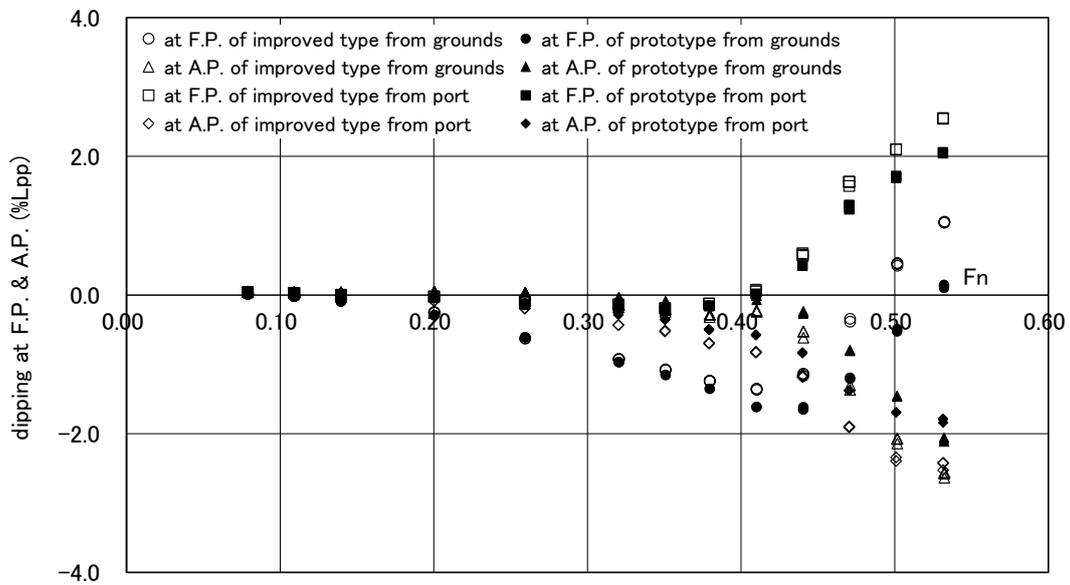


Fig.5-31(1) Dipping at F.P. and A.P. without propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

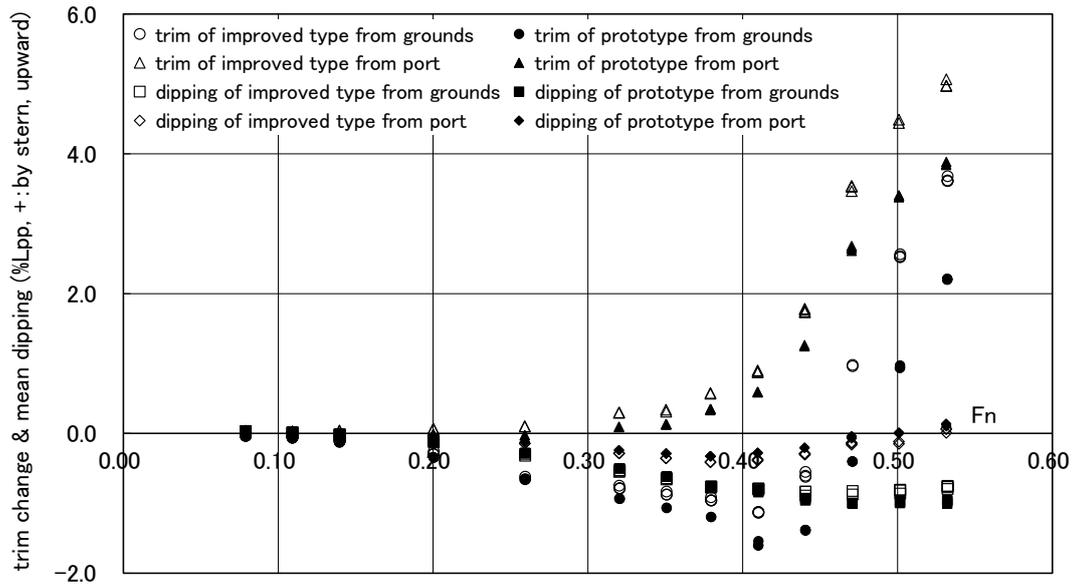


Fig. 5-31(2) Trim change and mean dipping without propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

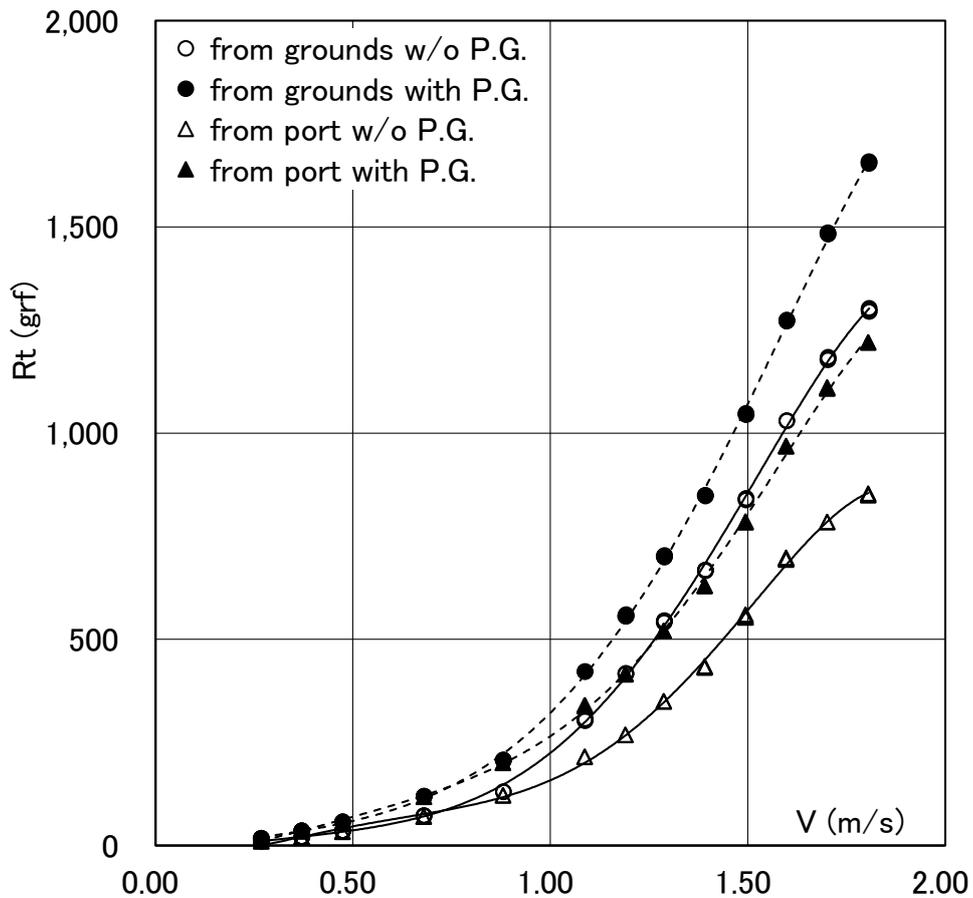


Fig.5-32 Total resistance without/with propeller guard of improved type set net fishing boat.

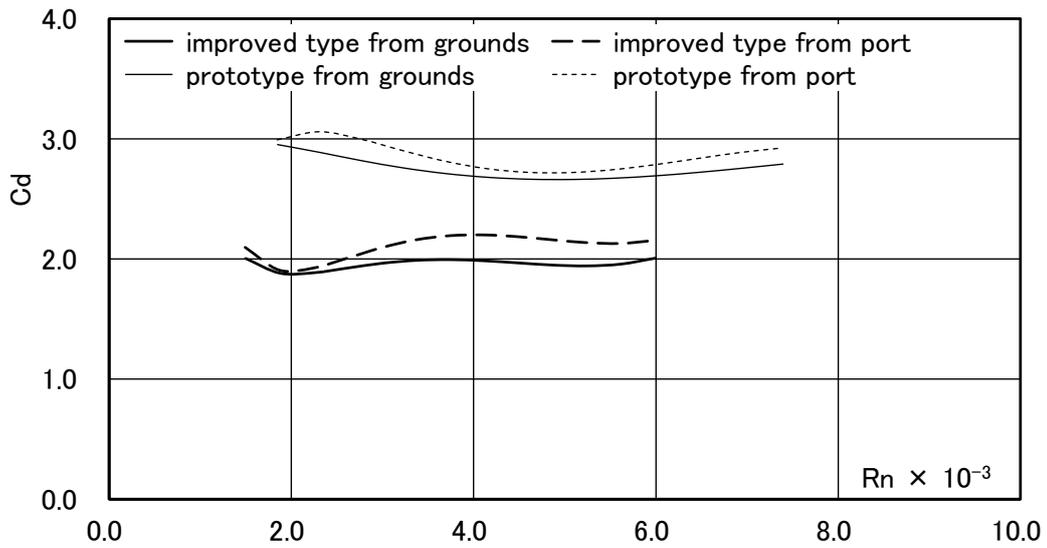


Fig.5-33 Drag coefficient of propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

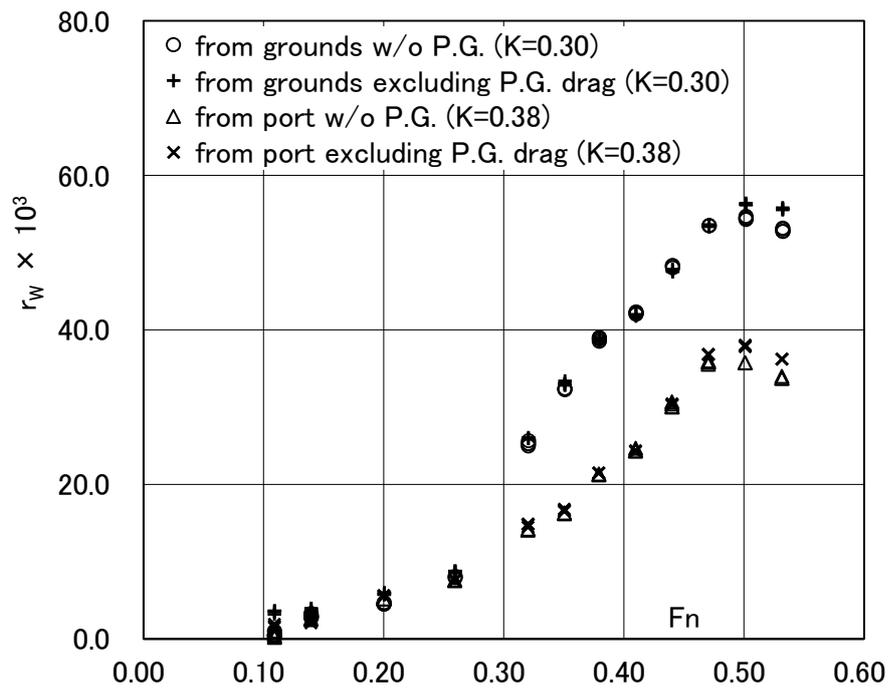


Fig.5-34 Wave making resistance coefficient and form factor without propeller guard of improved type set net fishing boat.

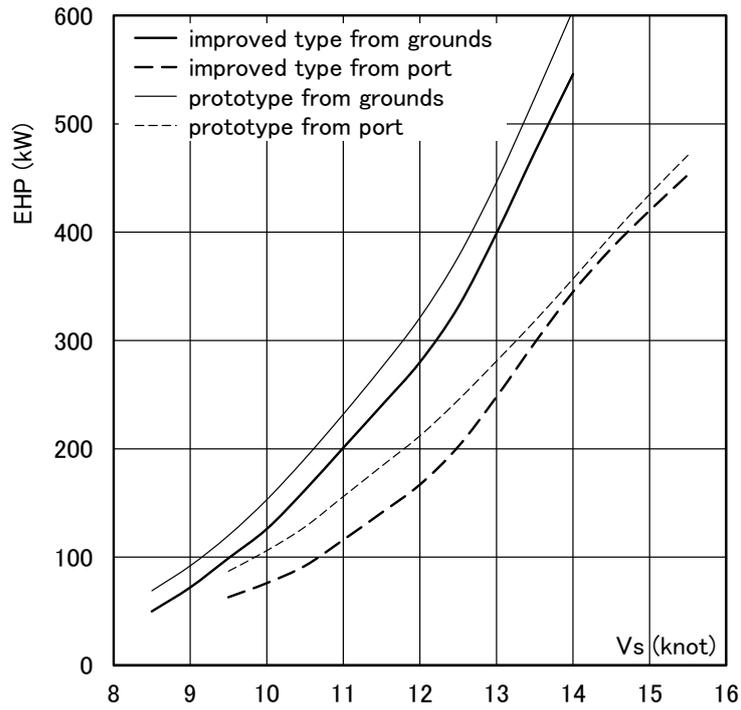


Fig.5-35(1) Estimated *EHP* curves without propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

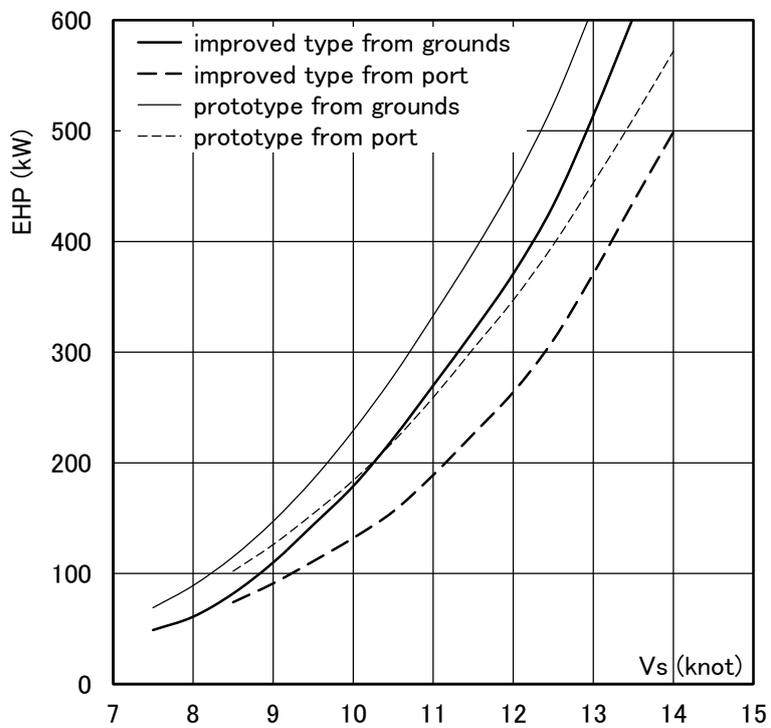


Fig.5-35(2) Estimated *EHP* curves with propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.

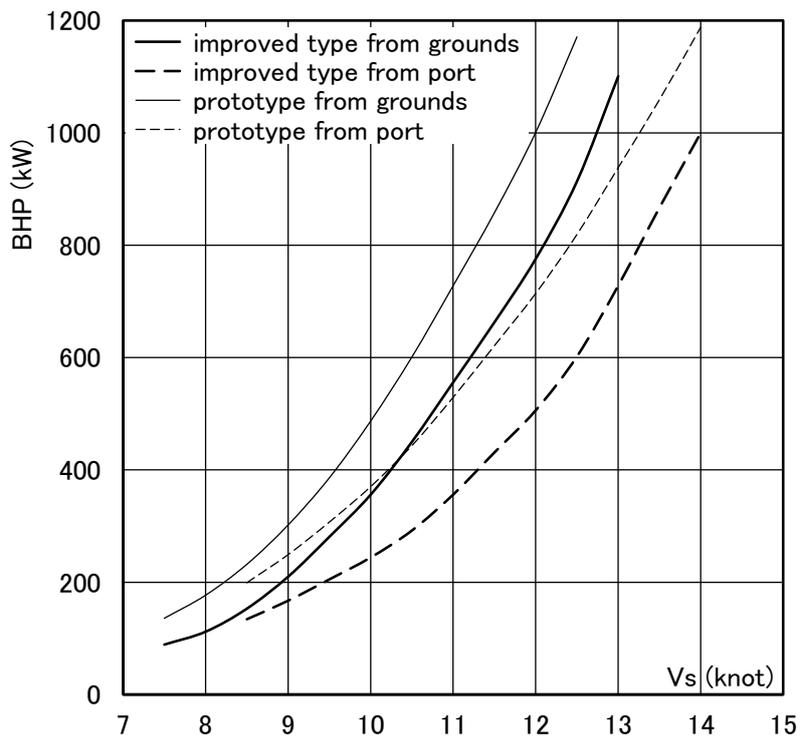


Fig.5-36 Estimated *BHP* curves with propeller guard of prototype and improved type set net fishing boats.



Photo 5-1 Small saury fishing vessel from port.



Photo 5-2 Small saury fishing vessel from fishing grounds.



Photo 5-3 Wave pattern of prototype saury fishing vessel. - $V_s = 11$ knot, $F_n = 0.388$ -



Photo 5-4 Wave pattern of improved type saury fishing vessel. - $V_s = 11\text{knot}$, $Fn = 0.371$ -



Photo 5-5 Improved type small saury fishing vessel.



Photo 5-6 Set net fishing boat at North area of Iwate Prefecture (19GT).



Photo 5-7 Prototype set net fishing boat model.



Photo 5-8 Wave pattern from fishing grounds of prototype set net fishing boat with propeller guard.

- $V_s = 12\text{knot}$, $F_n = 0.407$ -

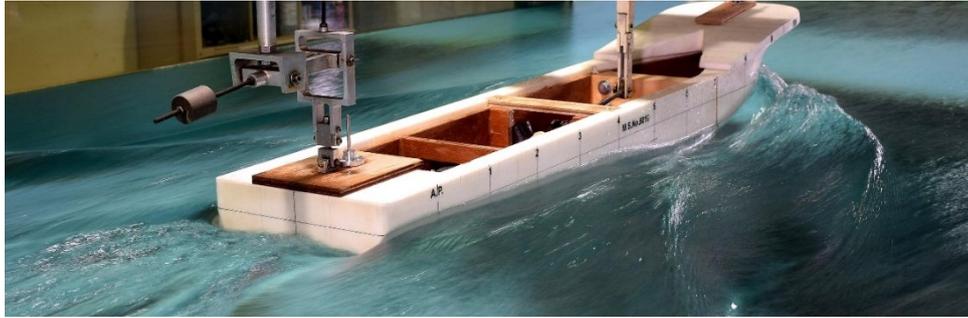


Photo 5-9(1) Wave pattern from fishing port of prototype set net fishing boat with propeller guard.

- $V_s = 12\text{knot}$, $F_n = 0.407$ -

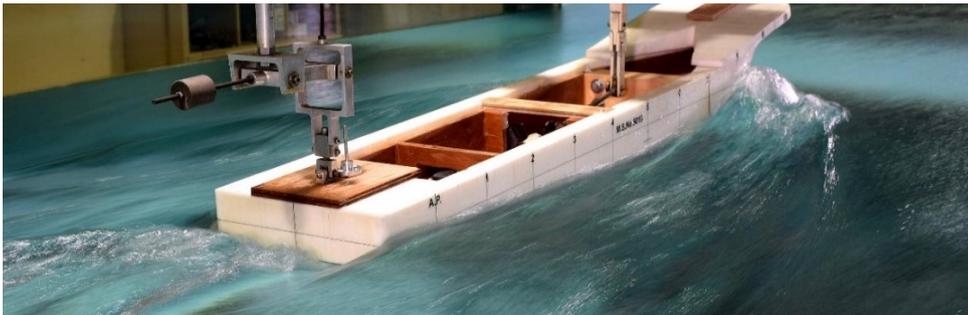


Photo 5-9(2) Wave pattern from fishing port of prototype set net fishing boat with propeller guard.

- $V_s = 14\text{knot}$, $F_n = 0.475$ -



Photo 5-10 Improved type set net fishing boat model.

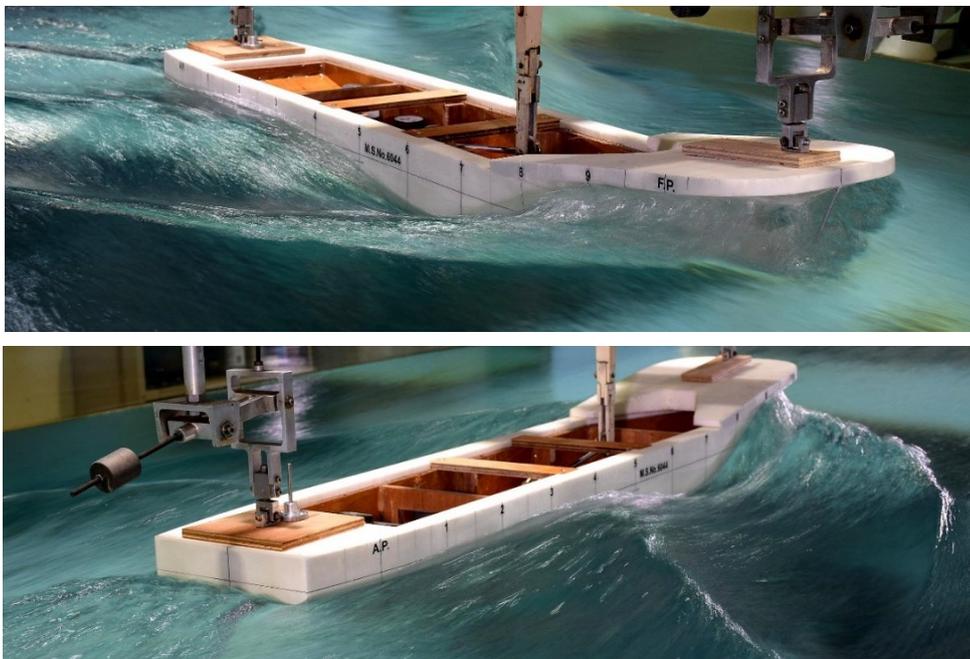


Photo 5-11 Wave pattern from fishing grounds of improved type set net fishing boat with propeller guard.

- $V_s = 12\text{knot}$, $F_n = 0.407$ -



Photo 5-12(1) Wave pattern from fishing port of improved type set net fishing boat with propeller guard.
- $V_s = 12\text{knot}$, $F_n = 0.407$ -



Photo 5-12(2) Wave pattern from fishing port of improved type set net fishing boat with propeller guard.
- $V_s = 14\text{knot}$, $F_n = 0.475$ -

第6章 結論

回流水槽試験による船型開発について、試験に活用されている第4世代型回流水槽の特性を明らかにし、抵抗試験における制限水路影響と水面勾配の作用の性質を考察した。そして、曳航水槽試験（大型模型）と回流水槽試験（小型模型）との相似模型群の試験結果を比較検討して、抵抗試験結果をタイプシップ（類似船型）不要で大型模型抵抗試験レベルに修正する手法を提案した。また、これまでほとんど船型開発が行われていない漁船に有効な、回流水槽試験の特徴を活かし、さらに船型学の手法を併用した船型開発手法を提案し、その成果を検証した。そして以下の結論を得た。

- 1) 第2章では、回流水槽抵抗試験に影響を及ぼす因子について検討した。船型開発に活用されている第4世代型回流水槽では水槽性能が改善され、流速分布の偏差は小さく、商船を対象とした流速範囲では定在波の波高も小さく、Froude-Krylov力が船体抵抗に及ぼす影響もほとんどない。しかし、制限水路影響および水面勾配の作用が抵抗試験に及ぼす影響は無視できない。ただし、水面勾配は凸状で計測部中央部付近に勾配ゼロの位置が存在する。模型船設置位置を工夫すればその影響を少なくできる。また小型模型ゆえの抵抗試験に及ぼす影響もある。
- 2) 第3章では、Series 60船型模型の回流水槽と曳航水槽による抵抗試験結果を比較し、回流水槽では制限水路影響の修正が不可欠であることを示した。そして回流水槽試験に顕著に影響する制限水路と水面勾配の作用を、フルード数 Fn を関数とした Taylor 展開にて調べた。制限水路影響による流速増加はフルード数 Fn の1次項と3次項の線型和で表され、低速域 ($Fn < 0.2$) では1次項が主になる。また制限水路影響および水面勾配の抵抗への作用は、低速域ではフルード数 Fn の作用は小さいが、高速域では Fn の高次項の作用が顕著になる。これらの影響は回流水槽が曳航水槽より顕著である。
- 3) 第4章では、商船の回流水槽試験による船型開発について、タイプシップを必要としない大型模型抵抗試験レベルの抵抗要素を求める手法を提案した。商船 10 船型を対象に抵抗試験結果から制限水路影響と水面勾配の作用を除去し、相似模型の曳航水槽試験結果と比較した。回流水槽試験の形状影響係数はまだ大きく、造波抵抗係数は粗い捉え方であるが、設計フルード数でほぼ同一である。形状影響係数の修正係数 C_K と造波抵抗係数の修正係数 C_{rw} の導入し、タイプシップ不要で抵抗要素を修正する新しい手法を評価した。この手法によれば船型開発に必要な抵抗要素と有効馬力を実用上さしつかえないレベルで推定できる。修正係数は各々の水槽により異なるが、要目や流体力学性能が異なる他の水槽にも適用できる。本手法によりタイプシップが不要になれば、コスト削減、船型開発模型試験の時間半減等、船型開発の効率向上に貢献できる。また斬新な船型に対する実船性能推定精度も向上する。
- 4) 第5章では、漁船の船型開発に対して回流水槽の特徴を十二分に活かした手法を提案した。まず既存船型の実態調査と回流水槽模型試験により船型の問題点とその改善指針を明らかにし、船型学の数値計算手法（線形造波理論、非線形計画法、最適化手法、数値流体力学）を用いてその解決策を具体化する。そして、改良船型の推進性能を回流水槽試験で確認する。回流

水槽試験が数値計算手法をリードし、容易に短期間に有効な解を得、船型開発を効率化する。本手法を小型サンマ漁船と定置網漁船に適用し、大幅な馬力削減が可能な船型を開発した。この船型開発において最も重要な、船型に起因する流体现象の把握および精査に回流水槽試験は有効で、短期間の船型開発に寄与した。そして小型模型（長さ 1.0～1.5m）でも充分活用できることを確認した。

回流水槽試験による船型開発について論じた。回流水槽を船型開発により活用していくためには、以下のような課題がある。

- 1) 回流水槽試験に及ぼす影響として、制限水路影響と水面勾配を中心に取り上げた。制限水路の影響が曳航水槽試験よりかなり大きいことに加え、回流水槽試験は流水中の静止模型というメカニズムであるため、計測部壁面境界層の影響等、曳航水槽には無い特有の現象がある。曳航水槽試験で使われる修正方法ではなく、回流水槽独自の制限水路影響の修正方法の検討が望まれる。
- 2) 回流水槽の抵抗試験結果の解析・修正にあたり、形状影響係数の修正係数 C_K には、模型の尺度影響および乱流促進等の小型模型ゆえの影響に加え、個々の影響は小さいが未考慮の水槽特性の影響が含まれている。この C_K のデータの蓄積と分析が形状影響係数の修正精度向上に繋がる。また造波抵抗係数の修正係数 C_{rw} にはデータの蓄積と分析が必要である一方、高速域では定在波との干渉問題もある。これら修正係数の分析が待たれる。

本研究が、今後の船型開発に対する回流水槽の活用の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なる御指導と詳細にわたる御教示を賜りました広島大学名誉教授土井康明先生および同大学大学院先進理工系科学研究科 輸送・環境システムプログラム 教授陸田秀実先生に深く感謝申し上げます。また国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所 元研究員川島敏彦博士には、本研究全般にわたり懇切丁寧なご指導・ご助言を頂きました。さらに広島大学大学院先進理工系科学研究科 輸送・環境システムプログラム 教授岩下英嗣先生、同 教授安川宏紀先生および同 准教授作野裕司先生には、査読、審査会および公聴会にわたり、適切にご指摘ご助言を賜り深く感謝申し上げます。

回流水槽における模型試験の研究は、九州大学名誉教授故山崎隆介先生からの御助言御指導から始まりました。かれこれ 20 年以上経過し、やっとまとめることができました。深く感謝するとともに、ここに心から先生のご冥福をお祈り申し上げます。

東京大学名誉教授梶谷尚先生には幾度となく激励を賜りました。また本研究にあたり論文のデータ利用についてご快諾を頂き、さらに本内容に対し有益なご助言を頂きました。深く感謝いたします。

回流水槽懇談会（現、回流水槽研究会）の方々からは、入社間もない若輩の時から、懇切丁寧に回流水槽の基本を御教示頂きました。関係の方々には深く感謝申し上げます。

本研究の船型開発に関する数値計算については、土井康明先生、陸田秀実先生および川島博士に、漁船の基本設計についてはベッセル船舶工業株式会社 代表取締役松田英輝氏社長に御指導を賜りました。ここに深く感謝いたします。また造船所および漁業協同組合の方々には、漁船の調査にあたり多大な便宜を図って頂きました。感謝申し上げます。

株式会社西日本流体技研 代表取締役石井正剛社長および同社顧問松井志郎博士には、終始暖かいご鞭撻を頂き深く感謝いたします。同社副社長橋詰泰久博士には研究内容について幾度となく御助言を頂き、また同社スタッフの方々には全面的な協力を頂きました。特に船型開発部 田中健二部長、渡辺幸英君および荒木啓輔君には水槽の性能計測および模型試験で、ならびにクリエイター室の方々には論文の編集等で多大な協力を頂きました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土屋九一, 安部光弘, 岸本 修, 政住国之, 三池敏之: 新設回流水槽の基本性能, 三井造船技報, No.78, 1970.
- 2) 田古里哲夫: 回流水槽の現状と問題点, ターボ機械, No.4, Vol.8, 1976.
- 3) 高弊哲夫: 回流水槽の歴史と展望, 回流水槽懇談会 回流水槽セミナーテキスト第 2 章, pp.3-14, 1985.
- 4) 川島敏彦, 橋詰泰久: 回流水槽の現状と課題, 日本船舶海洋工学会 推進性能研究会シンポジウム-水槽試験の現状と展望-テキスト第 8 章, pp.161-196, 2010.
- 5) E.A.Weitendorf, J.Friesch, C.C.S.Song: Considerations for the new Hydrodynamics and Cavitation Tunnel(HYKAT) of the Hamburg Ship Model Basin(HSVA), Schiffstechnik Bd.35, 1988.
- 6) Chr.Boës, P.Bade: Großer Umlauftank für Hydrodynamik, Akustik und Kavitations Versuche, Schiff und Hafen, Heft3, Jahr Gang22, 1970.
- 7) A.Millward, K.Nicholson, and J.H.Preston: The Use of Jet Injection to Produce Uniform Velocity in a High-Speed Water Channel, Journal of Ship Research, Vol.24, No.2, June, 1980.
- 8) 小倉理一: 回流水槽の性能, 回流水槽懇談会 回流水槽セミナーテキスト第 3 章, pp.15-38, 1985.
- 9) 奥野武俊: 回流水槽の魅力と将来の課題, 回流水槽懇談会 第 100 回記念シンポジウム-回流水槽の魅力と将来の課題-テキスト, pp.1-12, 1992.
- 10) 別所正利: 回想の回流水槽, 回流水槽懇談会 第 100 回記念シンポジウム-回流水槽懇談会のあゆみ-テキスト第 2 章, pp.17-19, 1992.
- 11) 田古里哲夫: 東大工学部境界層吸込み付き回流水槽, 日本造船協会誌, No.444, pp.35-36. 1966.
- 12) 小西積男, 坂尾 稔: 新設回流水槽について, 関西造船協会誌, No.145, pp.29-36. 1972.
- 13) 田中紀男, 姫野洋司, 永井順一, 奥野武俊: 大阪府立大学船舶工学科新設回流水槽について, 関西造船協会誌, No.151, pp.43-49, 1973.
- 14) 永島雄吉, 芦立 勲, 代田国彦: 壱型回流水槽の基本性能, 日本鋼管技報, No.71, 1975.
- 15) 姫野洋司, 奥野武俊, 林田 滋, 田中紀男: 回流水槽の定在波について, 関西造船協会誌, No.155, pp.123-131, 1974.
- 16) 小倉理一, 松井志郎, 玉島正裕, 西本 仁: 新型回流水槽の諸特性と抵抗試験について, 西部造船会々報, No.64, pp.81-91, 1982.
- 17) 高弊哲夫, 小倉理一: 回流水槽の活用, 日本造船学会 試験水槽委員会第 1 部会シンポジウム “船型開発と試験水槽” テキスト第 2 部第 3 章, pp.241-262, 1983.
- 18) 小倉理一, 今村国利, 山崎芳嗣: 回流水槽における表面流の増速装置について, 西部造船会々報, No.48, pp.1-5, 1974.
- 19) 奥野武俊, 三宅秀明, 田中紀男: 回流水槽観測部の自由表面付近の流速分布, 関西造船協会誌, No.210, pp.19-25, 1988.

- 20) Zuogang Chen, Yumi Kurokawa, Hitoshi Nishimoto : CFD Application on the Development of Circulating Water Channel, ISOPE, 2006.
- 21) 川島敏彦, 玉島正裕, 田上良仁, 近藤 茂, 松尾雅彦, 宮地宣幸 : 回流水槽の水面近傍流速の均一性改良について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, No.3, pp.319-322, 2006.
- 22) 田古里哲夫, 増永公明, 岡本 恒, 馬場信義 : 肥大船船尾ビルジ渦に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, No.123, pp.49-58, 1968.
- 23) 波多野修次, 仲渡道夫, 掘田多喜男, 松井志郎 : 三次元境界層理論による船の摩擦抵抗の計算, 日本造船学会論文集, No.130, pp.1-10, 1971.
- 24) 波多野修次, 茂里一紘, 掘田多喜男 : 船の境界層流れの実験および境界層の諸仮定に関する考察, 西部造船会々報, No.56, pp.73-92, 1978.
- 25) 掘田多喜男 : A new skin friction meter of floating-element type and the measurements of local shear stress, 日本造船学会論文集, No.138, pp.74-80, 1975.
- 26) 奥野武俊 : 船体表面の摩擦応力分布および境界層内の二次流れに関する研究, 日本造船学会論文集, No.139, pp.1-12, 1976.
- 27) 仲渡道夫, 山田通政, 綾野 徳, ウトドパンエスト : 回流水槽における船尾形状の系統的实验, 関西造船協会誌, No.126, pp.29-39, 1967.
- 28) 田古里哲夫 : 第 1 回-回流水槽懇談会議事録, 1966.
- 29) 高幣哲夫, 田古里哲夫, 岸本 修 : 回流水槽における抵抗試験, 関西造船協会誌, No.159, pp.57-63, 1975.
- 30) 田中一朗, 戸田保幸 : キール下突起船尾船型の抵抗推進性能, 関西造船協会誌, No.188, pp.67-77, 1983.
- 31) 玉島正裕, 西本 仁, 小倉理一, 茂里一紘 : 静水中における高速肥大船の船首近傍流れの実験的調査, 西部造船会々報, No.68, pp.1-10, 1984.
- 32) 田辺 和, 宮園昌治, 松下雄一, 松井志郎, 玉島正裕, 小倉理一 : 超幅広浅吃水船の推進性能に関する実験的検討, 西部造船会々報, No.68, pp.59-65, 1984.
- 33) 福島祥人, 釘宮 了, 西本 仁, 塙 友雄 : 自由表面の攪乱抑制法を取り入れた設計コンセプトによる幅広高速船 ($F_n=0.38$) 船型改良の研究, 関西造船協会誌, No.216, pp.1-13, 1991.
- 34) 塙 友雄, 福島祥人, 釘宮 了, 西本 仁 : 船体中央部に特異点分布を付加した高速船型に関する研究, 関西造船協会誌, No.226, pp.23-34, 1996.
- 35) (社) 日本中型造船工業会 : たとえば中型高速 RO-RO 船設計指針, 1996.
- 36) 佐藤信一, 鈴木勝雄 : 回流水槽用造波機による造波実験と高速艇の波浪中試験, 日本船舶海洋工学会論文集, No.1, pp.127-135, 2005.
- 37) 秋林秀聡, 山本聖子, 鈴木和夫 : 回流水槽における模型船の造る浅水波の可視化, 可視化情報, Vol.27 Suppl., No.1, pp.75-76, 2007.
- 38) 回流水槽研究会 (旧回流水槽懇談会) : 回流水槽における PIV 技術に関するミニシンポジウム, 2019.
- 39) 橋詰泰久, 佐野将昭, 安川宏紀 : 回流水槽における操縦流体力の計測精度について, 日本船舶海洋工学会論文集, No.23, pp.95-103, 2016.

- 40) 高橋洋二, 田中満佐人: 省エネルギー漁船船型の開発, 石川島播磨技報, Vol.18, No.3, pp.270-277, 1978.
- 41) 荻原誠功, 高橋洋二, 神代顕明: 省エネルギー形まぐろ延縄漁船の開発, 石川島播磨技報, Vol.21, No.1, pp.21-27, 1981.
- 42) 川島敏彦, 芳村康男, 鈴木四郎, 大本耕司: バルジによる漁船の船型改良について, 日本造船学会論文集, No.193, pp.1-9, 2003.
- 43) 永松哲郎, 重廣律男, 堀田好洋, 池田 勉: 漁業練習船-第3代「南星丸」の船型開発, 鹿児島大学水産学部紀要, No.52, pp.1-12, 2003.
- 44) 平田信行: 船舶の設計における CFD の活用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, No.48, Vol.5, pp.47-50, 2013.
- 45) 川島敏彦, 梶谷 尚: 回流水槽の定在波と水面勾配に関する研究, 関西造船協会誌, No.219, pp.25-36, 1993.
- 46) 川島敏彦: 回流水槽の水面勾配に関する研究, 関西造船協会誌, No.221, pp.49-62, 1994.
- 47) 中川 徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1984.
- 48) 渡部力, 名取亮, 小国力: Fortran による数値計算ソフトウェア, 丸善, 1989.
- 49) 川島敏彦: 回流水槽の測定部流れの基本性質に関する研究(続報), 関西造船協会誌, No.230, pp.21-36, 1998.
- 50) Kinya Tamura: Study on the Blockage Correction, 日本造船学会論文集, No.131, pp.17-28, 1972.
- 51) Prohaska, C. W.: A Simple Method for the Evaluation of the Form Factor and the Low Speed Wave Resistance, ITTC Resistance Session Brief Summary of Written Contributions, pp.65-66, 1966.
- 52) Hisashi Kajitani, Yoshinori Tsuchiya, Makoto Kanai: Report of ITTC Cooperative experiments on Series 60 Hull at UT-Tank, pp.58, 1986.
- 53) 横尾幸一: 水槽試験の始まりとその発展, 日本造船学会試験水槽委員会第1部会シンポジウム-船型開発と試験水槽-テキスト第1部第1章, pp.3-28, 1983.
- 54) 川島敏彦, 梶谷 尚: 回流水槽の測定部形状の自由表面に及ぼす作用に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, No.5, pp.169-175, 2007.
- 55) 久住昇三, 土屋好寛, 金井 誠, 梶谷 尚: Blockage Effect に関する一考察, 西部造船会々報, No.72, pp.75-82, 1986.
- 56) 川島敏彦: 回流水槽の測定部流れの基本性質に関する研究, 関西造船協会誌, No.230, pp.1-19, 1998.
- 57) 川島敏彦: 回流水槽の制限水路影響に関する研究, 水産工学研究所研究報告, No.17, pp.65-73, 1996.
- 58) 関西造船協会: 造船設計便覧(第4版), pp.460, Fig.175, 海文堂出版, 1983.
- 59) 田中 拓, 足達宏之, 日夏宗彦, 梶谷 尚, 並松正明, 荻原誠功: Wigley 相似模型の水槽試験結果の評価 -1.相似性の検討-, 関西造船協会誌, No.195, pp.61-70, 1984.
- 60) 藤沢純一, 深澤良平, 辻本 勝: 浅水試験による抵抗・自航性能と船速・馬力評価, 日本船舶海洋工学会論文集, No.25, pp.47-54, 2017.

- 61) 川島敏彦, 鈴木四郎 : 漁船の船型問題へのランキンソース法の応用, 水産工学, Vol.40, No.3, pp.217-222, 2004.
- 62) 川島敏彦, 西本 仁, 土井康明, 陸田秀実, 松田英揮 : 小型サンマ漁船 (19GT 型) の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, No.31, pp.1-14, 2020.
- 63) Suandar Baso, Hidemi Mutsuda, Takehiro Kurihara, Takayuki Kurokawa, Yasuaki Doi : An Eulerian Scheme with Lagrangian Particle for Evaluation of Seakeeping Performance of Ship in Nonlinear Wave, Jiangang SHI International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.21, No.2, pp.103-110, 2011.
- 64) 全国さんま棒受網漁業協同組合 : 地域漁業復興プロジェクト漁業復興計画書, 水産庁ががんばる漁業復興支援事業, 2012.
- 65) 川島敏彦, 西本 仁, 土井康明, 陸田秀実, 松田英揮 : 定置網漁船 (19GT 型) に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, No.31, pp.15-27, 2020.
- 66) Sighard F. Hörner : Fluid-Dynamic Drag, pp.3-9, Figure 12, HOENER FLUID DYNAMICS, 1965.

記号一覧

A	: 計測部の横断面積
A.P.	: 後部垂線
A_M	: 模型船最大横断面積
A_p	: プロペラガードの正面投影面積
A_T	: 水槽横断面積
a_0, a_1, a_2	: 自由表面形状モデルの近似式係数
B	: 船幅
BHP	: 制動馬力
B_{max}	: 船の最大幅
B_r	: 登録幅
B_T	: 水槽幅
b	: 計測部の幅
b_0, b_1	: 自由表面形状モデルの近似式係数
C_b	: 方形係数
C_d	: プロペラガードの抵抗係数
C_{dm}	: プロペラガードの抵抗係数の平均値
C_f	: 摩擦抵抗係数
C_K	: ΔK の K_{CWC} に対する割合
C_m	: 中央横断面積係数
C_p	: 柱形係数
ΔC_p	: 柱形係数の変化量
$C_p(x)$: 横断面積曲線
C_{rW}	: Δr_W の r_{wCWC} に対する割合
C_t	: 浸水表面積ベースの全抵抗係数
ΔC_t	: 浸水表面積ベースの全抵抗係数の増加量
C_{tm}	: 計測で得られる全抵抗係数
C.W.C.	: 回流水槽
c_0, c_1, c_2	: 自由表面形状モデルの近似式係数
D_T	: 水槽深さ (水深)
d	: 船の計画喫水
d_a	: A.P.における喫水
design Fn	: 設計フルード数
d_f	: F.P.における喫水
d_m	: 平均喫水
ds	: 排水容積の増加比率
d_ϕ	: プロペラガードパイプ外径

EHP	: 有効馬力
F.P.	: 前部垂線
Fh	: 代表長さを水槽の水深 h とするフルード数
Fn	: 代表長さを船の水線間長とするフルード数
ΔFn	: 代表長さを船の水線間長とするフルード数の変化量
Fn_{LWL}	: 代表長さを船の水線間長とするフルード数
$Fn_{evaluated}$: 代表長さを船の水線間長とする, 抵抗係数の評価フルード数
F_{∇}	: 排水容積フルード数
GT	: 総トン数
g	: 重力加速度
h	: 水深
K	: 形状影響係数
ΔK	: K_{CWC} と K_{TT} の差
K_{CWC}	: 回流水槽試験の形状影響係数
K_{TT}	: 曳航水槽試験の形状影響係数
L_{aft}	: A.P.から船尾端までの距離
L_{bulb}	: バルバスバウの突出量
L_{oa}	: 船の全長
L_{PP}	: 垂線間長
L_r	: 船の登録長さ
L_{stern}	: A.P.から船尾端までに長さ
L_{WL}	: 水線間長
lcb	: 前後方向浮心位置
m	: 制限水路 (ブロックージ) 量
$m_{C.W.C.}$: 回流水槽計測部の制限水路量
$m_{T.T.}$: 曳航水槽の制限水路量
Rn	: レイノルズ数
R_t	: 計測された抵抗値
R_{t0}	: 水面勾配の作用が補正された抵抗値
ΔR_t	: プロペラガード有り無しの抵抗値の差
R_W	: 造波抵抗
r_R	: 排水容積ベースの剰余抵抗係数
Δr_R	: $r_{R,estimated}$ と $r_{R,TT}$ との差
$r_{R,estimated}$: 推定された剰余抵抗係数
$r_{R,TT}$: 曳航水槽試験の剰余抵抗係数
r_T	: 排水容積ベースの全抵抗係数
r_W	: 排水容積ベースの造波抵抗係数
Δr_W	: $r_{W,CWC}$ と $r_{W,TT}$ の差

$r_{w.CWC}$: 回流水槽試験の造波抵抗係数
$r_{w.TT}$: 曳航水槽試験の造波抵抗係数
S	: 浸水表面積
s	: 計測部のぬれ縁長さ
TKM	: 横メタセンター高さ
$T.T.$: 曳航水槽
t	: トリム (+ : 船尾側トリム)
V	: 一様流速, 代表流速
ΔV	: 一様流速の増加量
V_r	: $x=1.51\text{m}$ における水深 0.125m までの平均流速に対する流速の割合
V_s	: 実船速力
x	: 回流水槽計測部の制波板先端からの距離 x
∇	: 排水容積
$\nabla_{C.W.C.}$: 回流水槽模型船の排水容積
$\nabla_{T.T.}$: 曳航水槽模型船の排水容積
Δ	: 排水量
β	: 計測部の底面勾配角
ζ	: 回流水槽計測部の水面高さ
θ	: 回流水槽計測部の水面勾配
λ	: 定在波の波長
ρ	: 水の密度
τ	: 計測部壁面の摩擦応力
ν	: 水の動粘性係数

付録

Taylor 展開について記す.

○ (3-4)式の根拠を示す. 表記の簡単化のために(1A) 式に対する展開とする.

$$y = \frac{x}{a - x^2} \quad (1A)$$

(1A)式を Taylor 展開すると(1B)式になる.

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{a - x^2} + \frac{2x^2}{(a - x^2)^2} \\ y'' &= \frac{6x}{(a - x^2)^2} + \frac{8x^3}{(a - x^2)^3} \\ y''' &= \frac{6}{(a - x^2)^2} + \frac{48x^2}{(a - x^2)^3} + \frac{48x^4}{(a - x^2)^4} \\ y'''' &= \frac{120x}{(a - x^2)^3} + \frac{480x^3}{(a - x^2)^4} + \frac{384x^5}{(a - x^2)^5} \\ y''''' &= \frac{120}{(a - x^2)^3} + \frac{2160x^2}{(a - x^2)^4} + \frac{5760x^4}{(a - x^2)^5} + \frac{3840x^5}{(a - x^2)^6} \end{aligned}$$

以上より,

$$\begin{aligned} y(0) &= 0, \quad y'(0) = \frac{1}{a}, \quad y''(0) = 0, \quad y'''(0) = \frac{6}{a^2}, \quad y''''(0) = 0, \quad y'''''(0) = \frac{120}{a^3} \\ y &= \frac{1}{a} \frac{x}{1!} + 6 \left(\frac{1}{a}\right)^2 \frac{x^3}{3!} + 120 \left(\frac{1}{a}\right)^3 \frac{x^5}{5!} + \dots \\ &= \frac{1}{a} x + \left(\frac{1}{a}\right)^2 x^3 + \left(\frac{1}{a}\right)^3 x^5 + \dots \end{aligned} \quad (1B)$$

○ (3-6)式の根拠を示す. 表記の簡単化のため(2A)式に対する展開とする.

$$y = \frac{1}{a - x^2} \quad (2A)$$

(2A)式を Taylor 展開すると(2B)式になる.

$$\begin{aligned} y' &= \frac{2x}{(a - x^2)^2} \\ y'' &= \frac{2}{(a - x^2)^2} + \frac{8x^2}{(a - x^2)^3} \end{aligned}$$

$$y''' = \frac{24x}{(a-x^2)^3} + \frac{48x^3}{(a-x^2)^4}$$

$$y'''' = \frac{24}{(a-x^2)^3} + \frac{288x^2}{(a-x^2)^4} + \frac{384x^4}{(a-x^2)^5}$$

$$y''''' = \frac{720x}{(a-x^2)^4} + \frac{3840x^3}{(a-x^2)^5} + \frac{3840x^5}{(a-x^2)^6}$$

$$y'''''' = \frac{720}{(a-x^2)^4} + \frac{17280x^2}{(a-x^2)^5} + \frac{57600x^4}{(a-x^2)^6} + \frac{46080x^6}{(a-x^2)^7}$$

以上より,

$$y(0) = \frac{1}{a}, \quad y'(0) = 0, \quad y''(0) = \frac{2}{a^2}, \quad y'''(0) = 0, \quad y''''(0) = \frac{24}{a^3}, \quad y''''''(0) = 0,$$

$$y''''''''(0) = \frac{720}{a^4}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{a} + 2 \left(\frac{1}{a}\right)^2 \frac{x^2}{2!} + 24 \left(\frac{1}{a}\right)^3 \frac{x^4}{4!} + 720 \left(\frac{1}{a}\right)^4 \frac{x^6}{6!} + \dots \\ &= \frac{1}{a} \left\{ 1 + \frac{1}{a} x^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 x^4 + \left(\frac{1}{a}\right)^3 x^6 + \dots \right\} \end{aligned} \quad (2B)$$

○ (3-10)式の根拠を示す. 表記の簡単化のため(3A)式に対する展開とする.

$$y = \frac{x^2}{a-x^2} \quad (3A)$$

(3A)式を Taylor 展開すると(3B)式になる.

$$y' = \frac{2x}{a-x^2} + \frac{2x^3}{(a-x^2)^2}$$

$$y'' = \frac{2}{a-x^2} + \frac{10x^2}{(a-x^2)^2} + \frac{8x^4}{(a-x^2)^3}$$

$$y''' = \frac{24x}{(a-x^2)^2} + \frac{72x^3}{(a-x^2)^3} + \frac{48x^5}{(a-x^2)^5}$$

$$y'''' = \frac{24}{(a-x^2)^2} + \frac{312x^2}{(a-x^2)^3} + \frac{672x^4}{(a-x^2)^4} + \frac{384x^6}{(a-x^2)^5}$$

$$y'''''' = \frac{720x}{(a-x^2)^3} + \frac{4560x^3}{(a-x^2)^4} + \frac{7680x^5}{(a-x^2)^5} + \frac{3840x^7}{(a-x^2)^6}$$

$$y'''''''' = \frac{720}{(a-x^2)^3} + \frac{18000x^2}{(a-x^2)^4} + \frac{74880x^4}{(a-x^2)^5} + \frac{34560x^6}{(a-x^2)^6} + \frac{46080x^8}{(a-x^2)^7}$$

以上より,

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = 0, \quad y''(0) = \frac{2}{a}, \quad y'''(0) = 0, \quad y^{(4)}(0) = \frac{24}{a^2}, \quad y^{(5)}(0) = 0, \quad y^{(6)}(0) = \frac{720}{a^3}$$

$$\begin{aligned} y &= 2 \frac{1}{a} \frac{x^2}{2!} + 24 \left(\frac{1}{a}\right)^2 \frac{x^4}{4!} + 720 \left(\frac{1}{a}\right)^3 \frac{x^6}{6!} + \dots \\ &= \frac{1}{a} x^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 x^4 + \left(\frac{1}{a}\right)^3 x^6 + \dots \\ &= \frac{1}{a} \left\{ x^2 + \frac{1}{a} x^4 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 x^6 + \dots \right\} \end{aligned} \tag{3B}$$