

1. は じ め に

船舶竣工時の速力試運転は、契約条項としての推進性能の確認及び設計資料としての模型と実船の相関係数等を含む実船性能の資料収集のために実施されるが、いずれのためにも高い精度を必要とする。このため、できるだけ平穏な海面で実施することが望ましいことは言うまでもないが、多少の風、潮流や波浪などの外乱の影響は避けられないことが多い。このような場合、これら外乱の影響を修正して推進性能を正しく評価する必要がある。

外乱のうち風と潮流については、すでに実用化された修正法があるが、波浪等については、まだ統一された方法がなく、風と潮流に関する修正法と並ぶような手法の確立が以前から望まれていた。

一方、波浪による抵抗増加など船速及び馬力に影響を及ぼす要因に関する研究の進歩により、船速低下などの波浪影響を定量的に評価できる状況になってきた。

このように波浪影響等の修正法の必要性とその裏付けとなる研究レベルがマッチした現状を背景に、実用的波浪影響等の推定法を提示し、風と潮流に関する現行の修正法と統合することにより、汎用性の高い総合解析法の実用化を目的として、SR208「速力試運転時の波浪影響修正法に関する研究」（部会長：竹沢誠二 横国大教授）が、(財)日本船舶振興会の補助事業として平成2年度から3ケ年計画で発足した。

本部会は次の4研究項目の内容で実施され、①の実情調査にもとづいて④修正法構築の基本方針を策定し、それに沿って②実験及び③理論面の研究を実施し、従来の知見と統合することにより「SR208 速力試運転解析法－波浪及び操舵影響等の修正を含む新解析法－」の完成を見たものである。本報告書はこれらの成果の概要を報告するとともに、④の具体的成果としての新解析法を、関係者に広く利用されるように、末尾に掲げるものである。

- ① 波浪に伴う船速低下及びその推定法の実情調査
- ② 水槽試験
- ③ 理論による推定法の検討
- ④ 修正法構築

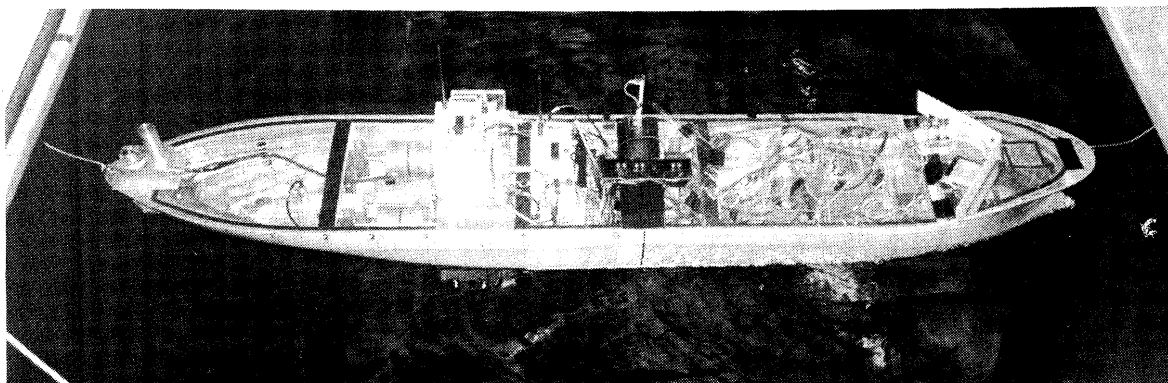


図 2.2 方向スペクトル波中を自由航走中のタンカーモデル

Comparison of SPEED LOSS

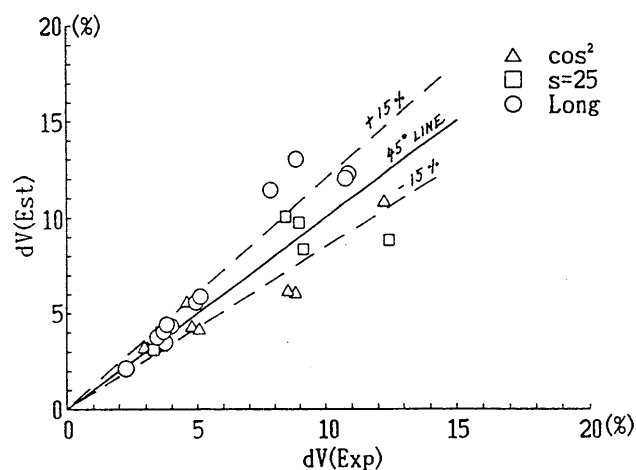


図 2.3 不規則波中（短波頂波，長波頂波）船速低下の実験値（横軸）と推定値（縦軸）の比較，推定では抵抗増加量として実験値を使用した。

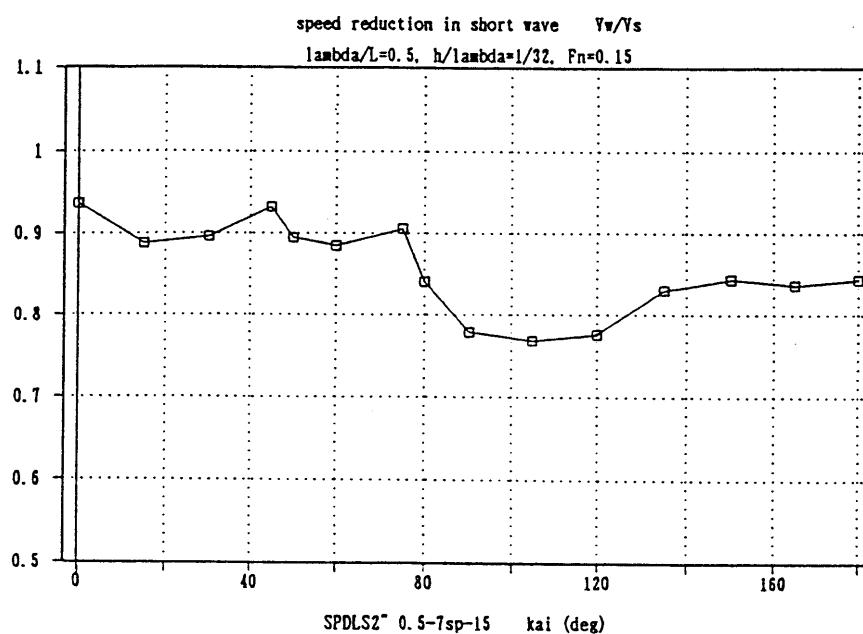


図 2.4 斜波（規則波）中の船速低下（タンカー）の波高影響，波傾斜 $1/32$ ，波長船長比 $1/2$ ， 180 度が向い波状態

3. 理論による推定法の検討

船が波浪中を走るとき、波が船体で反射されたり、船体が動揺することによって波が新たに作られる。新たに作られた波は、船に乗った人から見ると変動しているが、定常的な船の抵抗の原因となる。これが波浪中の抵抗増加と呼ばれるものである。この説明からも判るように波浪中の抵抗増加のほとんどは造波抵抗の増加によるもので、粘性抵抗の増加による部分は小さい。

船が波浪中を走る時に受ける定常的な力は、船の進行方向と反対の方向に働く抵抗ばかりではない。斜波中では船を斜航させる力や回頭させるモーメントも作用する。この力に抗して一定の針路で航行するために当舵をとることが必要になったり、船は僅かに回頭、横流れする。その結果、抵抗が増大する。これはいわば間接的な波浪中の抵抗増加である。抵抗増加に対する操舵影響と言ってもよい。

速力試運転時の波浪影響を修正するためには、これらの直接的、間接的な波浪中抵抗増加を、試運転時に得られる情報に基づいて、また修正を実施するのに十分な精度で、評価する理論的方法が必要である。けれどもどのような海象条件、操縦運動においても正確な方法を見いだすことは非現実的であるから、理論的方法については波浪影響修正法の適用限界を設定することも同時に必要である。以下では、波浪中抵抗増加の理論計算法とそれに基づいた波浪影響修正法の適用限界に関する、本SR208における研究成果のあらましを述べる。

3.1 抵抗増加など波浪中で作用する定常力の推定法の現状

波浪中の抵抗増加を船型に関連づけて推定するために広く用いられている方法は、次のようなものである。

まず、波浪中の船体動揺をストリップ法を用いて計算する。船体動揺によって船が作る波は、船の断面が上下揺や左右揺する時にできる波の大きさと関連づけて計算する。波浪が船体によって反射されることによってできる波は、流体と船体の相対運動がほぼ同一となる船体動揺を見だし、その船体動揺の作る波と同一であるとする。

このようにして船体動揺や入射波が船体によって反射することによってできる波の特性を計算する方法を、今後ストリップ法と呼ぶことにする。実際にはこの方法は本来の意味でのストリップ法とは関係がなく、あくまで便宜的な呼び方である。なおこの方法は、船が細長いことを前提としていることに注意すべきである。

船体動揺や波の反射によって作られる波の特性を、抵抗増加と結び付けるのが丸尾によってあたえられた抵抗増加の積分式である。この式そのものは、動揺や反射による波の特性をどのような方法で決定するかにかかわらずいつも正しい。

ストリップ法では、反射波の抵抗増加に対する影響がきちんと考慮されていない。肥大船型では短波長の入射波の場合に、推定した抵抗増加が実験における計測値に比べて非常に小さく、推定精度が低い。速力試運転時の海象は、大型肥大船にとって波長が短い場合がほとんどであるので、我々の目的にとって深刻な問題である。

これを解決するために藤井と高橋は、航行速度が0の時に船体が非常に短い波長の波から受ける漂流力と、実験的に決められた船の航行速度の影響を組み合わせる船首からの反射波による抵抗増加の半実験式を導いた。肥大船型の船首反射波の抵抗増加に対する影響は、入射波の波長が長ければ無視できるので、この半実験式では波長が長くなると式の値が0になるようにしてある（もともとの意図はそうではないが、結果的にそうになっている）。したがってこの式のあたえる値を、ストリップ法によって推定した抵抗増加に加えることによって、肥大した船型でも入射波の波長の長短にかかわらずかなり正確に抵抗増加を推定することができる。これを藤井・高橋の修正と呼ぶ。

波長が短く且つ斜波の状態では、船首ばかりでなく、船体全体からの反射波も無視できないと考えられる。ストリップ法で用いる相対運動の考え方は、このような波の条件では正確ではない。藤井・高橋の修正は斜波中でも適用されるが、横波に近い状態や追波では適用の根拠に問題がある。

各方向からくるいろいろな周波数の入射波に対して抵抗増加が計算されれば、方向分布を持つ不規則な海洋波中の抵抗増加を計算することは比較的容易である。

斜波状態において船に作用する抵抗増加以外の定常な横力や回頭モーメントについては、詳しく研究されたことがほとんどない。また、ストリップ法によって斜波中の反射波の影響を正確に求めることは問題があるので、これらの力を計算するための新しい合理的な方法を開発する必要がある。

3.2 研究の概要とその成果

波浪及び操舵影響による抵抗増加及び船速低下推定法を確立し、適用限界を明らかにするために実施した2項目の研究概要と成果を以下に示す。

(1) 抵抗増加の推定法

斜波中の抵抗増加や横力などの定常力を推定し、速力試運転における波浪の影響を推定するための合理的且つ精度の高い方法を得る必要がある。SR208では、まずストリップ法がこの目的のためにどの程度有効であるかを詳しく調べ、さらにより合理的な新しい方法を開発し比較検討した。

波浪中の抵抗増加や横力などの新しい計算方法は、ストリップ法と同様に、船が細長いという仮定に基づいて、入射波との出会い周期の長短にかかわらず合理性の保障されたいわゆる Unified Theory を基礎にして開発された。その他にも最近計算方法の改善が報告されている境界要素法の応用についても検討した。

本研究においては、主としてSR196船型(SR208で新しく実験が行われた)ならびにSR108船型の斜波中の抵抗増加の試験結果と各種計算法の結果とを比較した。

研究の成果は、次の通りである。

- 1) 速力試運転時における波浪中の抵抗増加を推定するためには、ストリップ法に藤井・高橋の修正を前方からの入射波に適用する方法が最も実用的である。また、藤井・高橋の修正の代わりに Faltinsen の式を用いても結果はほとんど同じである。(図3.1)
- 2) 波長が長い場合は、ストリップ法、Unified Theory ともにほぼ正確な抵抗増加を与える。また、短波長・斜波状態では、Unified Theory は計算がストリップ法程簡単ではないが、合理性や実験値との一致の点で優れていると思われる。
- 3) 斜波中で船に作用する定常的な横力や回頭モーメントについては Unified Theory を用い、新たに開発された公式によって計算するとほぼ正確で且つ安定した結果が得られる。

(2) 操舵影響の推定法

波浪中を大きく操舵しながら走る船の抵抗増加あるいは船速低下を模型試験をしないで正確に推定することは、一般的に困難である。一方、速力試運転においては船は波浪その他の外乱によって当舵が必要となり斜航し回頭運動をすることもあるが、それは僅かであって直進状態からのズレは小さい。

海洋波中では、操舵が行われ船が完全に直進しないために平水中の抵抗と波浪による抵抗増加が直進時に比べ変化する。速力試運転時における波浪中抵抗増加はもともと小さい(無視は出来ない)ので、その変化量はさらに小さく無視することができる。したがって、速力試運転時には平水中の抵抗に対して操舵の影響を考慮すればよいことになる。

速力試運転時における船の直進時からのズレの量(例えば当舵量、横流れ角、回頭角速度)は、主として風及び波浪による外乱によって生じるが、その時の抵抗の変化は船が平水中で同一の運動をしたときの抵抗の変化として推定して良いであろう。

以上のような観点から研究を実施し、次の成果を得た。

- 1) 波浪中船速低下や操舵による運動を推定するために、波浪中航走時の力学モデルを操縦運動の方程式を用いて構成した。このモデルと新たに開発した斜波中の定常波力の公式を用いて波浪中の船速低下のシミュレーションを実施し、模型実験と対比することにより、このモデルの妥当性を確認し、更に試運転時に生じる程度の大きさの横流れ角、回頭角速度が船速低下に無視できない影響を与えることを明らかにした。
- 2) 操舵影響から見た適用限界を決定するために、速力試運転時には船の運動の直進からのズレができるだけ小さい程、全体的な修正精度は良いこと、具体的に計測できる物理量であること及び当舵、横流れがあっても自航要素の直進時からの変化が小さいことなどを総合的に研究した結果、本解析法の適用限界として当舵及び船首揺れ角の大きさを決定することができた。(図3.2)
- 3) 適用限界内における当舵、横流れ及び回頭角速度による抵抗増加を推定する簡易式を与えた。

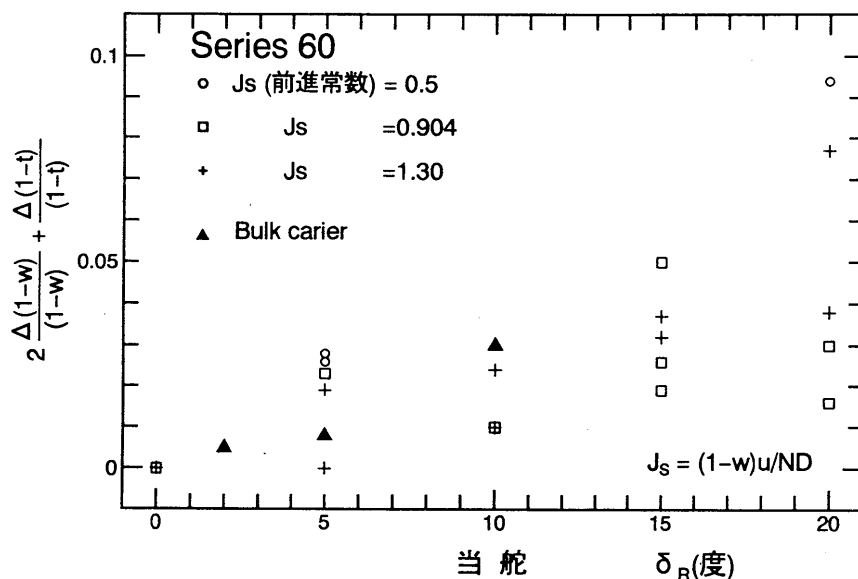
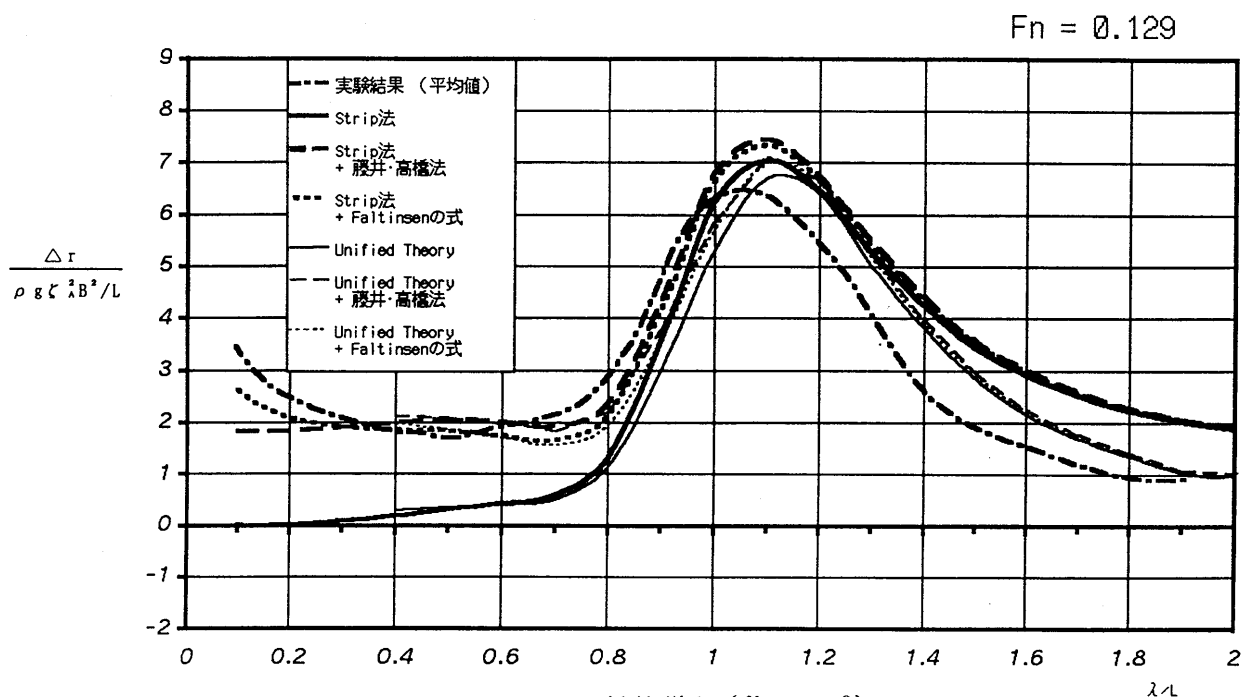


図 3.2 当舵変化による荷重係数への影響

4. 修正法構築

本解析法は、速力試運転時の種々の外乱のうち、風及び潮流の影響を修正する方法として、すでに確立された解析法^{4), 8)}に準拠して、波浪及び操舵影響等の修正を追加するために、これまでの耐航性及び操縦性分野における知見を統合するとともに、修正法構築の面から必要な精度向上と実用化に関する研究を「2. 水槽試験」及び「3. 理論による推定法の検討」において実施し、その成果を取り入れることにより、風、潮流、波浪及び操舵影響を含む新総合修正法として作成したものである。

従って、試運転一般の実施方法及び計測要領等については、既存のコードを遵守して正確なデータを得ることを前提としたものであり、通常の排水量型船舶を対象とするものである。

4.1 解析法構築の方針

初年度に実施した①「船速低下及びその推定法の実情調査」において、アンケート調査を実施して修正法のあるべき姿を明確にし、現状調査により波浪影響として検討すべき項目及びそれに関連する研究項目の位置づけを明らかにした。その結果、修正法構築の基本方針を次のように定めた。

- 波浪影響として、波浪による抵抗増加、当舵、回頭運動及び横流れを含める。
- 修正法としては、波浪影響だけでなく、従来からある風及び潮流の影響を含むものとする。
- 修正計算は、大型計算機とパソコンを組み合わせで行うことを前提とする。

4.2 解析法の概要

末尾に示す「SR208速力試運転解析法」は、修正法の適用限界、解析法及び抵抗増加の計算法から構成され、修正実施に関する図表等を附した実用性の高い「波浪及び操縦影響等の修正を含む新解析法」であり、その概要を次に示す。

(1) 適用限界

適用限界は、自航要素はいずれも外乱中でも平水中と同じであると見なせ、かつ抵抗増加の推定誤差の影響が小さく、実用的に十分な修正精度を保持できる範囲として設定した。

(2) 解析法

解析法は、風と潮流に対する従来の修正法を踏襲しているため、本質的に同じ過程をとり、波浪及び操舵影響の修正は、それによる抵抗増加量を風圧抵抗と同じように扱うことによって行う。

また、試運転時の計測値から外乱の影響を修正し、平水中の推進性能を求める計算の過程を分かりやすくするために標準解析表を作成した。

(3) 外乱及び操舵影響による抵抗増加の計算法

抵抗増加の計算法は、風、波浪及び操舵影響に分けて考え、風については既存の計算法を用い、波浪については丸尾の式¹²⁾に波の反射による成分を加算した計算法としている。また、当舵、回頭運動及び横流れによる抵抗増加は、いずれも速力試運転時の値としては、風や波浪に比べ小さいことから簡単な近似算式を新たに導入した。

4.3 解析法の精度検証

本解析法に則った解析を比較的荒れた海象で実施された14隻の試運転について行い、それぞれの同型船の平穩時実績や水槽試験結果と比較するとともに、従来の解析法と本解析法における模型と実船の相関係数の変化について調査し、本解析法の妥当性を確認した。

5. お わ り に

3年間にわたった本部会は、速力試運転解析という実務上の問題を対象としたため、実験及び理論面とも従来に無い高精度と、特に理論的計算面では簡便さが併せて要求され、更に研究分野も耐航性の他に、操縦性及び推進性能も含むなど多岐にわたるものであった。

こうした特徴のある部会活動を通じて、造船の現在及び将来に寄与する成果が理論、実験両面でそれぞれ得られ、その中から4.に示した「SR208速力試運転解析法」が生まれたものと考えている。

本解析法は、その必要性が強く指摘されてきた波浪及び操舵影響を修正する方法を、具体的に明示したものであり、現時点では最も適切な実用的方法であると考えているが、本法の真の評価は多くの適用実績にまつところが大きく、また、風と潮流に関する修正法と同程度に定着されるには、それらにもとづく改良が必要と思われる。今後、すべての試運転解析に本法を使用いただき、本法をより完全なものにすべくご支援いただきたい。

速力試運転解析の精度を更に向上させるためには、簡便な波浪計測法の確立が望ましく、更に種々の抵抗増加等に関する理論的推定法もその精度や簡便さにおいて、より一層の進歩が望まれる。それらの成果をその都度、本解析法の改良に反映させてゆくことは重要である。

また、本解析法開発の基礎になった現実の海象下における船舶の航海性能の研究は、船舶の真の性能である実海象下での総合的航海性能の評価と改善に直結するものであり、この面への今後の積極的な適用と展開が切望される。

最後に、本研究の実施にあたり補助事業の一環としてご支援頂いた(財)日本船舶振興会に御礼申し上げるとともに、研究に参加された委員各位の努力とご協力に厚く感謝いたします。

「SR208 速力試運転解析法」

— 波浪及び操舵影響等の修正を含む新解析法 —

目 次

1. 新解析法概要	13
2. 適用限界	13
2.1 海 象	13
2.2 操 舵	13
3. 解析法	13
3.1 計測時性能の確認	16
3.1.1 計測時性能	16
3.1.2 計測時のプロペラ作動点	17
3.1.3 計測時の伴流率等	17
3.2 外乱による抵抗増加の修正	18
3.2.1 抵抗増加による荷重係数の変化	18
3.2.2 トルク曲線の作成	18
3.2.3 抵抗増加修正後のプロペラ作動点	19
3.2.4 抵抗増加修正後の対地船速	19
3.3 潮流の修正	19
3.3.1 潮流曲線の作成	19
3.3.2 潮流修正後の対水船速	20
3.4 平水中性能の確定	20
3.4.1 トルク曲線の作成	20
3.4.2 平水中性能	21
4. 外乱及び操舵影響による抵抗増加の計算法	21
4.1 風	21
4.2 波 浪	22
4.2.1 抵抗増加の計算手順	22
4.2.2 抵抗増加応答関数の計算法	23
4.2.3 実海面における抵抗増加の計算法	25
4.3 操 舵 影 響	27
4.3.1 当 舵	27
4.3.2 回 頭 運 動	28
4.3.3 横 流 れ	28
記 号 表	29
参 考 文 献	30

1. 新解析法概要

速力試運転は各種コード1, 2, 5, 6, 7, 8, 9)でも指摘されている通り、できるだけ平穏な海面で実施することが望ましいのは言うまでもないが、時には天候の悪化などにより、風、波浪などの外乱の影響が避けられないことがある。このような場合には、試運転計測値から、各種外乱の影響を除去して性能を評価することが必要となり、これまでも風と潮流に関する修正法1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)はいくつか公表され、広く活用されている。

本解析法は、これらのうち次の修正法に準拠して、新たに波浪及び操舵影響等の修正を追加したものであり、通常の排水量型船舶を対象とするものである。

- 「試運転方案の調査研究」日本造船研究協会、第2基準部会、研究資料No.12R、昭和47年3月⁸⁾
- Taniguchi, K. & Tamura, K., "On a New Method of Correction for Wind Resistance Relating to the Analysis of Speed Trial Results, 11th ITTC, (1966)⁴⁾

以下に、適用限界、解析法及び各種外乱による抵抗増加の推定法について述べる。

2. 適用限界

本解析法は、以下の条件を満たす範囲で運用されることを推奨する。

また、一般的な試運転実施要領等で本報告書に記載されていない事項については、然るべき機関において作成されたコード1, 2, 5, 6, 7, 8, 9)を援用して、正確な計測値を得るものとする。

2.1 海 象

- (1) 計測区間及び助走区間を含む海域における、1航走中の波浪状況がほぼ一定であること。
- (2) 風浪及びうねりの波高をそれぞれ $H_{1/3}$, $H_{s1/3}$ とする時、式(2.1.1)で求められる合成波高: H が、船長: L の区分ごとの次の値を越えないこと。

$$H = \sqrt{H_{1/3}^2 + H_{s1/3}^2} \quad (2.1.1)$$

$$L \geq 100m: H \leq 0.015L \text{ または } 4m \text{ の小さい方}$$

$$L < 100m: H \leq 1.5m$$

2.2 操 舵

波浪及びその他の外乱による操舵状況は、次の条件を満たすこと。

- (1) 船首方位角の変動片振幅: ψ_A は3度以下であること。
- (2) 平均当舵角度: δ_R は5度以下であること。

3. 解 析 法

本解析法は、図3.1のフロー及び表3.1の標準解析表に示すように次の4つの過程からなる。これらの中で準拠した解析法に追加された項目を(*)で示す。

- (1) 計測時性能の確認
- (2) 外乱による抵抗増加の修正
- (3) 潮流の修正
- (4) 平水中性能の確定

以下に、解析表の順序に従って解析要領を示す。項目または記号の後に解析表の番号を示す。

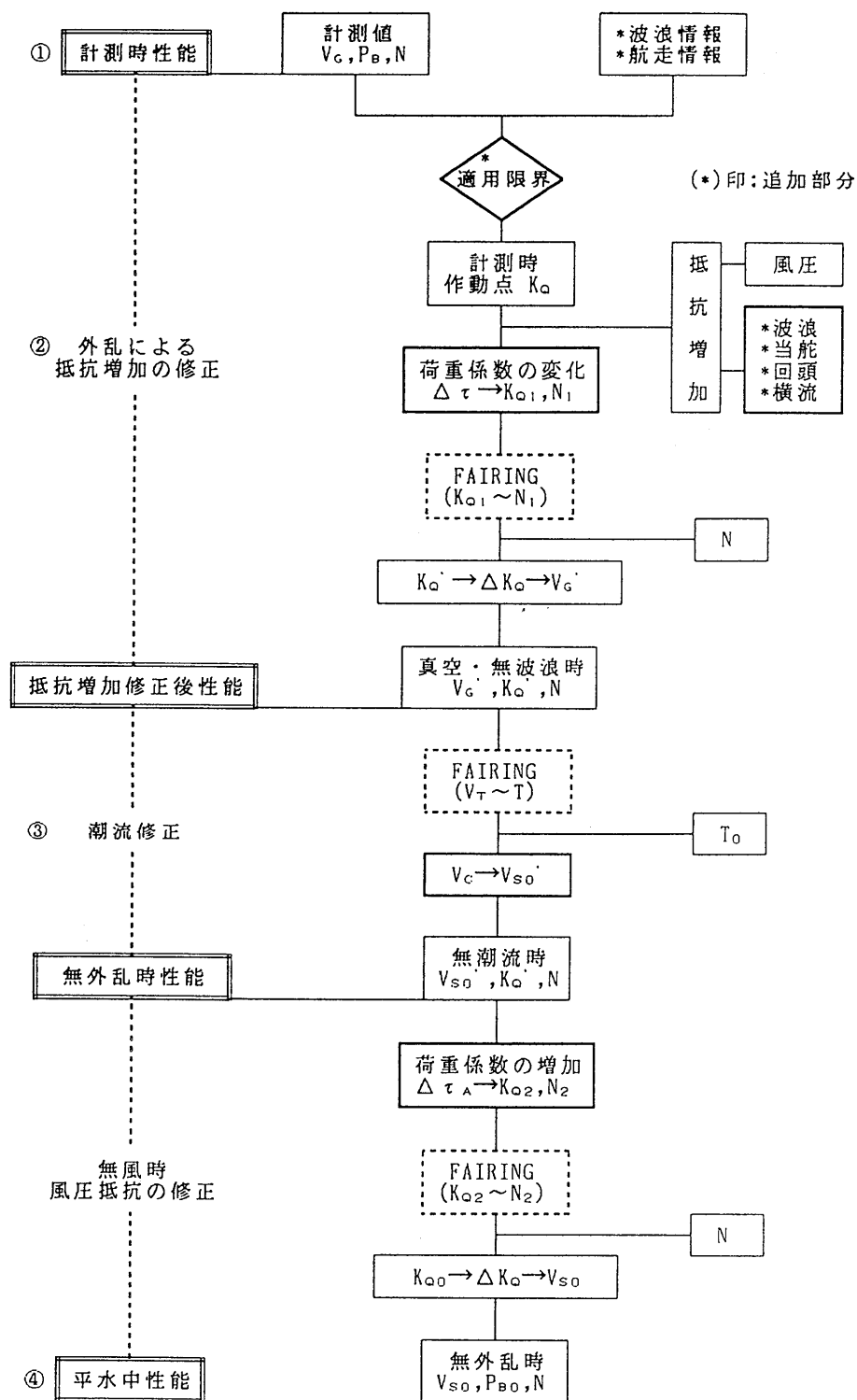


図 3.1 速力試運転解析フロー

3.1 計測時性能の確認(1～32)

各航走ごとに、計測時の海象下における性能を確認するとともに、解析を始める前に海象及び操舵状況が適用限界内にあることを確認する。

3.1.1 計測時性能(1～23)

- 各航走を区分するものとして、主機負荷、航走番号及び航走方位： ψ_0 を(1～3)に記入する。
- (4～23)には性能計測値、風、波浪情報及び操舵等に関する計測値または観測値を記入する。
- 風波とうねりが並存する場合は、それぞれの有義波高： $H_{1/3}$ 、平均波周期： T_m 及び波向： χ を記入する。目視の場合は、観測された波高及び波周期とし、計測の場合は T_{02} を記入し、式(4.2.7)を用いる。また、 χ は図4.2.2で定義される値とする。
- 絶対風速： U_{TW} 及び風向： γ_T を式(3.1.1)、(3.1.2)で計算し、図3.1.1のような図面を作成し、変化の連続性から計測値の妥当性を確認する。

$$U_{TW} = \sqrt{U_{RW}^2 + U_G^2 - 2U_{RW} \cdot U_G \cdot \cos(\gamma_R)} \quad (m/sec) \quad (11) \quad (3.1.1)$$

$$\gamma_T = \tan^{-1} \left\{ \frac{U_{RW} \sin(\psi_0 + \gamma_R) - U_G \sin(\psi_0)}{U_{RW} \cos(\psi_0 + \gamma_R) - U_G \cos(\psi_0)} \right\} \quad (deg.) \quad (12) \quad (3.1.2)$$

$$U_{RW} : \text{相対風速} \quad (m/sec) \quad (8)$$

$$U_G : \text{対地船速} \quad (m/sec) \quad (5)$$

$$\psi_0 : \text{針路} \quad (deg.) \quad (3)$$

$$\gamma_R : \text{相対風向} \quad (deg.) \quad (9)$$

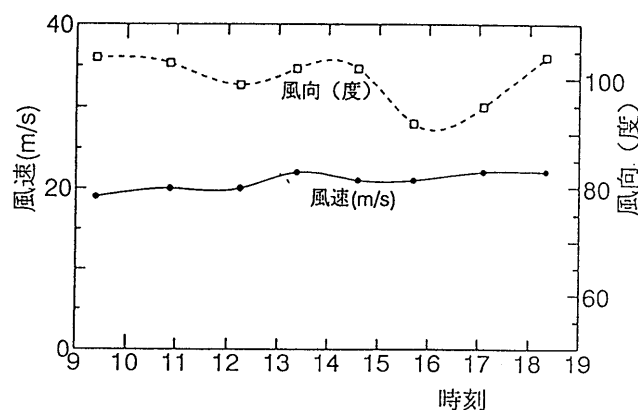


図 3.1.1 絶対風速と風向

- 回頭角速度の2乗平均： $\overline{r^2}$ を船首揺れから求める時は、式(3.1.3)で計算する。

$$\overline{r^2} = 0.5 \left(\frac{2\pi\psi_A}{T_\psi} \right)^2 \quad (rad.^2/sec^2) \quad (22) \quad (3.1.3)$$

$$\psi_A : \text{船首揺れ片振幅} \quad (rad.) \quad (20)$$

$$T_\psi : \text{船首揺れ周期} \quad (sec) \quad (21)$$

3.1.2 計測時のプロペラ作動点 (24~27)

- 計測時の制動馬力： P_B 及び回転数： N から、トルク係数： K_Q を式 (3.1.4), (3.1.5) で計算し、これに対応するプロペラ作動点での前進常数： J 及び荷重係数： τ を図 3.1.2 に示すように、プロペラ特性曲線から読みとり、(26), (27) にそれぞれ記入する。

$$P_D = P_B \times \eta_T \quad (ps) \quad (24) \quad (3.1.4)$$

$$K_Q = 24668 \frac{P_D}{\rho N^3 D^5} \times \eta_R \quad (25) \quad (3.1.5)$$

$$P_B : \text{制動馬力} \quad (ps) \quad (7)$$

$$\eta_T : \text{伝達効率}$$

$$N : \text{プロペラ回転数} \quad (rpm) \quad (6)$$

$$\eta_R : \text{プロペラ効率比}$$

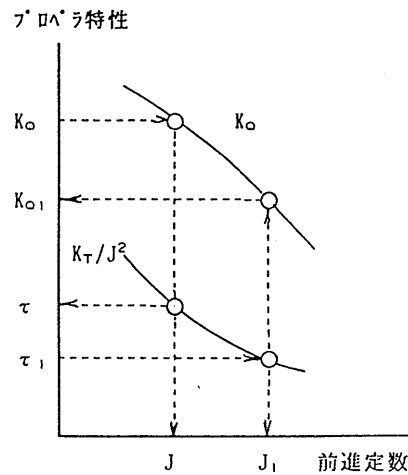


図 3.1.2 プロペラ特性と作動点

3.1.3 計測時の伴流等 (28~34)

- 計測時のスリップ比： S_R を式 (3.1.6) で計算する。

$$S_R = 1 - \frac{D \cdot J}{P} \quad (28) \quad (3.1.6)$$

$$P : \text{プロペラピッチ} \quad (m)$$

$$J : \text{前進常数} \quad (24)$$

- 式 (3.1.7) により、対地船速： V_G を用いて伴流率： $(1 - w)$ を往復航について計算し、その平均値： $(1 - w)_m$ を (30) に記入する。

$$1 - w = \frac{N \cdot D}{30.867 V_G} \times J \quad (29) \quad (3.1.7)$$

$$V_G : \text{対地船速} \quad (kt) \quad (4)$$

$$N : \text{プロペラ回転数} \quad (rpm) \quad (6)$$

- 対水船速の近似値：U を式 (3.1.8) で求める。

本解析法では、これを抵抗増加の計算に必要な対水船速として用いる。

$$U = \frac{N \cdot D}{60 (1-w)_m} \times J \quad (m/sec) \quad (31) \quad (3.1.8)$$

$$(1-w)_m : \text{平均伴流率} \quad (30)$$

- 全抵抗： R_T を式 (3.1.9) で求める。

$$R_T = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot U^2 \cdot (1-w)_m^2 (1-t) \cdot \tau}{1000} \quad (t) \quad (32) \quad (3.1.9)$$

$$U : \text{対水船速} \quad (m/sec) \quad (31)$$

$$1-t : \text{推力減少率}$$

$$\tau : \text{荷重係数} \quad (27)$$

3.2 外乱による抵抗増加の修正 (35～51)

風、波浪、横流れ、当舵及び回頭運動に起因する抵抗増加量の修正を次の手順で行う。これらによる抵抗増加量の計算法は、4. に示す。

3.2.1 抵抗増加による荷重係数の変化 (35～41)

- (35～39) では4. に示す方法に従って、それぞれの抵抗増加量を計算する。
- 全抵抗増加量： ΔR を式 (3.2.1) で求める。

$$\Delta R = R_{AX} + R_{AW} + R_{\delta\delta} + R_{vr} + R_{\beta\beta} \quad (t) \quad (40) \quad (3.2.1)$$

$$R_{AX} : \text{風圧抵抗} \quad (t) \quad (35)$$

$$R_{AW} : \text{波浪による抵抗} \quad (t) \quad (36)$$

$$R_{\delta\delta} : \text{当舵による抵抗} \quad (t) \quad (37)$$

$$R_{vr} : \text{回頭運動による抵抗} \quad (t) \quad (38)$$

$$R_{\beta\beta} : \text{横流れによる抵抗} \quad (t) \quad (39)$$

- 抵抗増加に対応する荷重係数の変化量： $\Delta\tau$ を式 (3.2.2) で求める。

$$\Delta\tau = \frac{\Delta R}{R_T} \times \tau \quad (41) \quad (3.2.2)$$

3.2.2 トルク曲線の作成 (42～45)

- 抵抗増加を修正した時の荷重係数： τ_1 を式 (3.2.3) で求める。

$$\tau_1 = \tau - \Delta\tau \quad (42) \quad (3.2.3)$$

- τ_1 に対応する前進常数： J_1 及びトルク係数： K_{Q1} を、図 3.1.2 に示すように、プロペラ特性曲線から読みとり、(43) 及び (44) に記入する。
- J_1 に対応するプロペラ回転数： N_1 を式 (3.2.4) で求め、図 3.2.1 に示すように $K_{Q1} \sim N_1$ 曲線を作成し、平均線を引く。

$$N_1 = N \times \frac{J}{J_1} \quad (rpm) \quad (45) \quad (3.2.4)$$

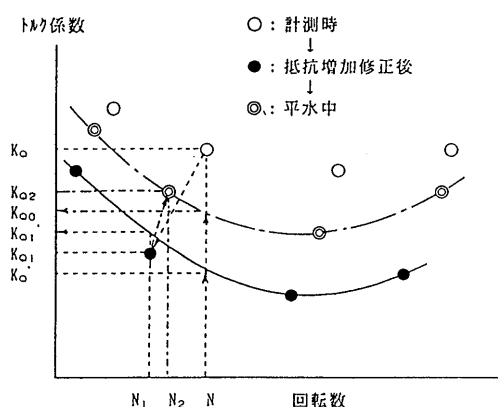


図 3.2.1 トルク曲線と回転数

3.2.3 抵抗増加修正後のプロペラ作動点 (46～49)

- 図 3.2.1 の平均線から、 N_1 及び N に対応するトルク係数： K'_{Q1} 及び K'_Q を読みとり、(46) 及び (47) に記入する。
- 計測時作動点を求めたように、図 3.1.2 から K'_Q に対応する前進常数： J' 及び荷重係数： r' を読みとり、(48) 及び (49) に記入する。

3.2.4 抵抗増加修正後の対地船速 (50～51)

- 抵抗増加を修正することによる対地船速の変化量： ΔV_S を式 (3.2.5)⁸⁾ 及び式 (3.2.6)²⁴⁾ で求める。

$$\Delta V_S = \frac{a \cdot D \cdot N \{ (K'_Q - K_Q) - (K_{Q1} - K'_{Q1}) \}}{(1-w)_m} \quad (kt) \quad (50) \quad (3.2.5)$$

$$a = \frac{J_H - J_L}{30.867 (K_{QH} - K_{QL})} \quad (kt/m/rpm) \quad (3.2.6)$$

K_{QH} : K_Q の計測値の最大値

K_{QL} : K_Q の計測値の最小値

J_H : K_{QH} に対応する前進常数

J_L : K_{QL} に対応する前進常数

- 抵抗増加修正後の対地船速： V'_G を式 (3.2.7) で求める。

$$V'_G = V_G + \Delta V_S \quad (kt) \quad (51) \quad (3.2.7)$$

3.3 潮流の修正 (52～58)

抵抗増加が無い状態での対地船速： V'_G から、潮流曲線を作成し、対水船速： V'_{s0} を求める。

3.3.1 潮流曲線の作成 (52～56)

- (52), (53) には航走中間時刻及び一群航走中間時刻を記入し、(54) には (51) から潮の順逆を判定し記す。
- 逆潮時の対地船速： V'_{GA} を順潮時の回転数： N_W に合わせた場合の対地船速： V''_{GA} を式 (3.3.1) で求める。

$$V''_{GA} = V'_{GA} \times \frac{N_W}{N_A} \quad (kt) \quad (55) \quad (3.3.1)$$

V'_{GA} : 逆潮時の対地船速 (kt) (51)

N_W : 順潮時の回転数 (rpm) (6)

N_A : 逆潮時の回転数 (rpm) (6)

- 一群の中間時刻：Tでの平均潮流： V_T を式(3.3.2)で求め、図3.3.1のような潮流曲線を作成する。

$$V_T = \frac{V'_{GW} - V''_{GA}}{2} \quad (kt) \quad (56) \quad (3.3.2)$$

$$V'_{GW} : \text{順潮時の対地船速} \quad (kt) \quad (51)$$

3.3.2 潮流修正後の対水船速(57～58)

- 図3.3.1から各航走ごとの中間時刻： T_0 における潮流： V_c を読みとり、(57)に記入し、潮流修正後の対水船速：

$$V'_{s0} \text{を式(3.3.3)で求める。} \quad V'_{s0} = V'_G + V_c \quad (kt) \quad (58) \quad (3.3.3)$$

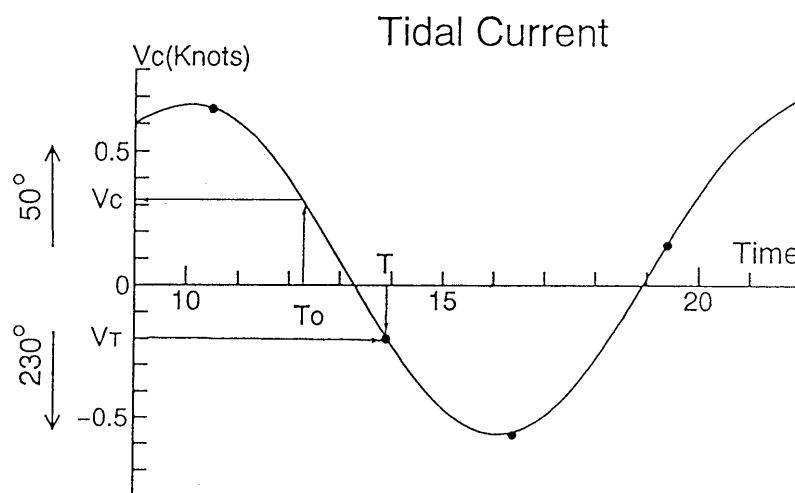


図 3.3.1 潮流曲線

3.4 平水中性能の確定(59～69)

抵抗増加がない状態での荷重係数： r' に自走分の風圧抵抗の影響を加えることにより、対水船速： V'_{s0} とトルク係数を修正する。これにより風、潮流、波浪及び操舵影響がない平水中の性能を求める。

3.4.1 トルク曲線の作成(59～63)

- 船速相当分の風圧抵抗に対応する荷重係数の変化分： Δr_A を式(3.4.1)で計算する。

$$\Delta r_A = \frac{\rho_A \cdot A_T \cdot C_{X0}}{2\rho \cdot D^2(1-t)(1-w)_m^2} \quad (59) \quad (3.4.1)$$

ρ : 海水の質量密度 $(kg \cdot sec^2/m^4)$

ρ_A : 空気の質量密度 $(kg \cdot sec^2/m^4)$

A_T : 水面上正面船体投影面積 (m^2)

C_{X0} : 正面風圧抵抗係数

D : プロペラ直径 (m)

$(1-t)$: 推力減少率

$(1-w)_m$: 平均伴流率 (30)

- 平水中の荷重係数： r_2 を式(3.4.2)で求め、 r_2 に対応する前進常数： J_2 及びトルク係数： K_{Q2} を、抵抗増加の修正の場合と同じように、図3.1.2から読みとり、(61)及び(62)に記入する。

$$r_2 = r' + \Delta r_A \quad (60) \quad (3.4.2)$$

- J_2 に対応する回転数： N_2 を式(3.4.3)で求め、図3.2.1のようなトルク曲線を作成し、平均線を求める。

$$N_2 = N \times \frac{J}{J_2} \quad (rpm) \quad (63) \quad (3.4.3)$$

3.4.2 平水中性能 (64~69)

- 図 3.2.1 から計測時回転数：N に対応するトルク係数： K_{Q0} を読みとり (63) に記入し，式 (3.4.4) により，自走分の風圧抵抗に相当する船速修正量： $\Delta V'_S$ を求める。

$$\Delta V'_S = \frac{a \cdot D \cdot N (K_{Q0} - K'_Q)}{(1-w)_m} \quad (kt) \quad (65) \quad (3.4.4)$$

- 回転数が計測時と同じ N で，平水中を航走する場合の船速 V_{S0} 及び伝達馬力： P_{D0} を，それぞれ式 (3.4.5) 及び (3.4.6) で計算する。

$$V_{S0} = V'_{S0} + \Delta V'_S \quad (kt) \quad (66) \quad (3.4.5)$$

$$P_{D0} = \frac{K_{Q0}}{K_Q} \quad (ps) \quad (68) \quad (3.4.6)$$

4. 外乱及び操舵影響による抵抗増加の計算法

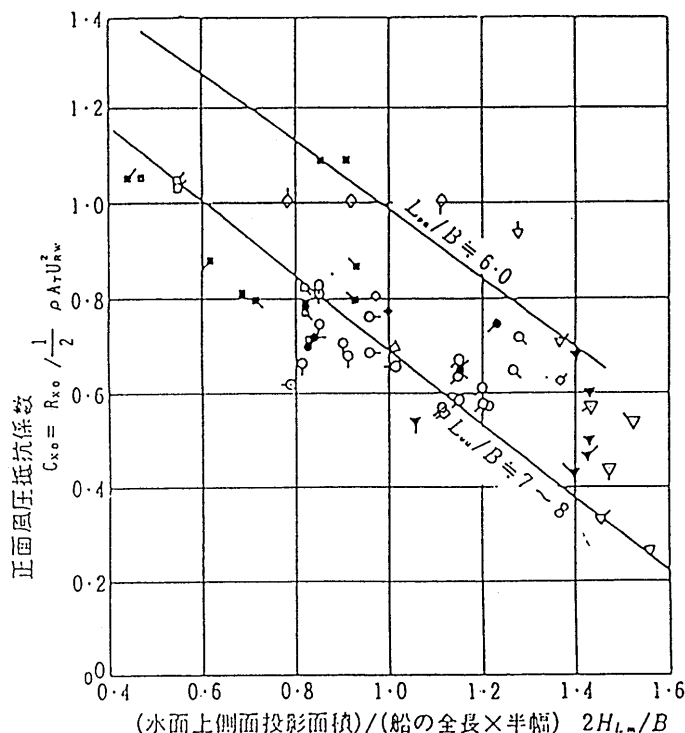
風，波浪，横流れ，当舵及び回頭運動に起因する影響を修正する場合は，以下に示す方法で抵抗増加量を計算する。

4.1 風

風圧抵抗： R_{AX} は式 (4.1.1) で計算する。

$$R_{AX} = \frac{\frac{1}{2} \rho_a \cdot C_X(\gamma_R) \cdot A_T \cdot U_{RW}^2}{1000} \quad (t) \quad (35) \quad (4.1.1)$$

- ρ_a : 空気の質量密度 $(kg \cdot sec^2/m^4)$
 $C(\gamma_R)$: 風圧抵抗係数
 γ_R : 相対風向 (deg) (9)
 A_T : 水面上正面船体投影面積 (m^2)
 U_{RW} : 相対風速 (m/sec) (8)



Kind of ship	Full load	Ballast	$L_{\perp}/B$
Cargo 4500 DW	○	○	7.65
Cargo 10000 DW	○	○	8.03
Ref. Cargo	○	○	7.67
Tanker	○	○	7.24
Train ferry	○	○	7.70
Passenger ferry	○	○	7.70
Ocean tug	○	○	4.08
Tanker	○	○	7.66
Cargo	○	○	7.89
Cargo	○	○	7.89
Passenger liner	○	○	8.26
Car ferry	○	○	7.70
Tanker	○	○	6.45
Tanker	○	○	7.90
Cargo	○	○	7.45
Ferry	○	○	7.49
Container	○	○	7.50
Container	○	○	7.58
Car carrier	○	○	6.85
Cargo	○	○	5.91
Container	○	○	6.50
Car carrier	○	○	6.98
Car carrier	○	○	5.90
LNG carrier 75000m³ (prismatic tanks)	○	○	6.39
LNG carrier 125000m³ (prismatic tanks)	○	○	6.53
LNG carrier 125000m³ (spherical tanks)	○	○	6.53

図 4.1.1 正面風圧抵抗係数

また、風圧抵抗係数を式(4.1.2)の形で表示することもできる。

$$C_X(\gamma_R) = C_{X0} \times K(\gamma_R) \quad (4.1.2)$$

C_{X0} : 正面風圧抵抗係数

$K(\gamma_R)$: 風向影響係数

正面風圧抵抗係数及び風向影響係数の推定図表を図4.1.1と図4.1.2に示す。

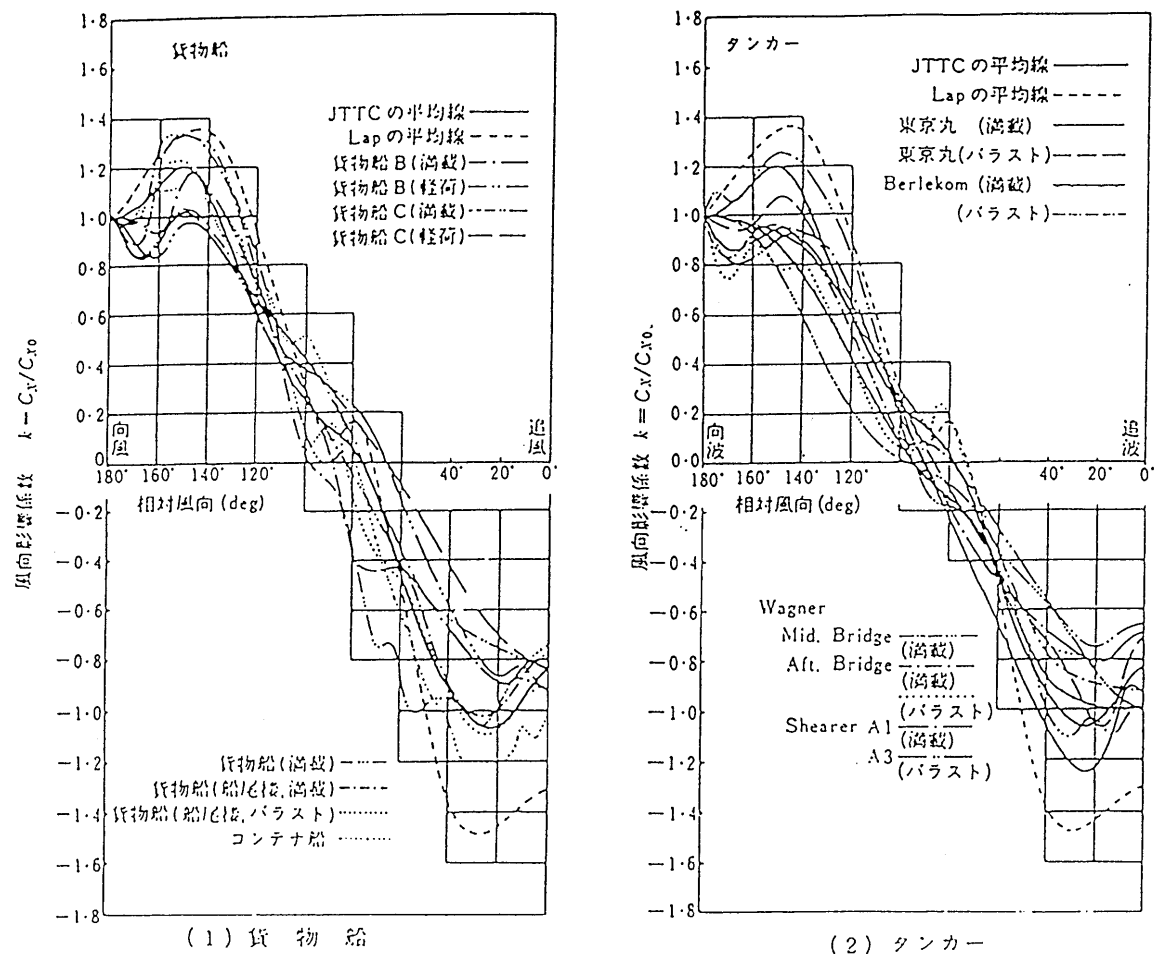


図4.1.2 風向影響係数²³⁾

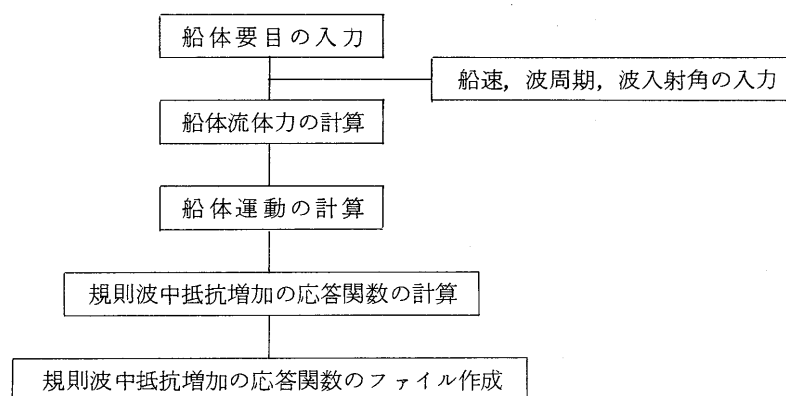
4.2 波 浪

4.2.1 抵抗増加の計算手順

実海面における波浪中抵抗増加の計算は、図4.2.1に示すフローのように陸上における準備計算と船上における積分計算とに分けて行う。

計算に必要な有義波高、平均波周期および波入射角の主方向は、目視あるいは波浪推算によって求める。

また、風波による成分とうねりによる成分が混在している場合には、それぞれの抵抗増加成分の和として、全抵抗増加を求める。



(陸上) 規則波中における抵抗増加応答関数の計算

(船上) 実海面の不規則波スペクトルに対する抵抗増加応答関数の積分計算

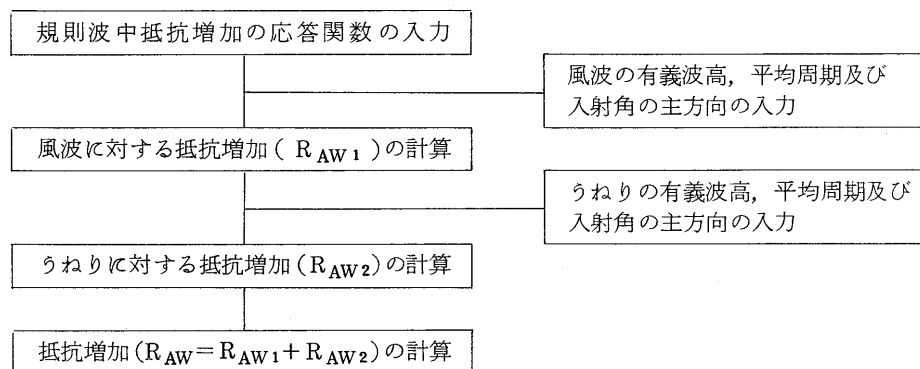


図 4.2.1 波浪による抵抗増加の計算フロー

4.2.2 抵抗増加応答関数の計算法

(1) 船体運動を含んだ抵抗増加計算法

抵抗増加応答関数は、丸尾の式¹²⁾

$$\Delta r = \frac{\rho}{4\pi} \left[-\int_{-\infty}^{m_1} + \int_{m_2}^{m_3} + \int_{m_4}^{\infty} \right] \frac{K(m)(m - K \cos \chi)}{\sqrt{K^2(m) - m^2}} (|C(m)|^2 + |S(m)|^2) dm \quad (4.2.1)$$

$$\left. \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \end{matrix} \right\} = -\frac{K_0}{2}(1 + 2\tau \pm \sqrt{1 + 4\tau})$$

$$\left. \begin{matrix} m_3 \\ m_4 \end{matrix} \right\} = \frac{K_0}{2}(1 - 2\tau \mp \sqrt{1 - 4\tau})$$

$$K(m) = \frac{(m + K_0\tau)^2}{K_0}$$

$$\tau = \frac{U\omega_e}{g}$$

であり, $r > 1/4$ では $m_3 = m_4$ として積分範囲は連続すると考える。また,

ρ	: 流体密度	$(kg \cdot sec^2/m^4)$
g	: 重力加速度	(m/sec^2)
U	: 船速	(m/sec)
χ	: 波入射角	(rad)
ω	: 入射波円周波数	(rad/sec)
ω_e	: 出会い波円周波数	(rad/sec)
K	: 波数 $(= \omega^2/g)$	$(1/m)$
K_0	: 波数 $(= g/U^2)$	$(1/m)$
$C(m)$	: 船の左右対称なコチン関数	
$S(m)$	: 船の左右反対称なコチン関数	

である。ここで, コチン関数は船体周りの流場を表す特異点分布によって求められるものであり, 次のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} C(m) &= \int_L Q(x) e^{imx} dx \\ S(m) &= \int_L D(x) e^{imx} dx \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

$Q(x)$, $D(x)$ が x 軸上の特異点分布であり, それぞれ吹き出し, 2重吹き出しの強さを表わしている。

$Q(x)$, $D(x)$ を船型や船体動揺に関連して計算するには, ストリップ法や Unified Theory 16, 17, 20) などによる。

(2) 短波長域における抵抗増加の簡易計算法

タンカーのように船首が肥えた船型では, 短波長の波は船首部で反射され, これが短い波長の入射波中での抵抗増加の主要な成分: Δr となる。

ストリップ法, Unified Theory とともに船体が細長いことを仮定しており, 肥えた船首からの反射波の影響を正しく考慮することができないので, この影響を補正する必要がある。このためには(1)で計算した抵抗増加に次の(a), (b)いずれかの式で計算した値を加算すれば良い。

(a) 藤井・高橋法 19)

$$\Delta r = \frac{1}{2} \rho g \zeta_A^2 \alpha_1 (1 + \alpha_2) \left[\int_I \sin^2(\chi - \theta) \sin \theta d\ell + \int_{II} \sin^2(\chi + \theta) \sin \theta d\ell \right] \quad (4.2.3)$$

(b) Faltinsen の式

$$\begin{aligned} \Delta r = \frac{1}{2} \rho g \zeta_A^2 \alpha_1 & \left[\int_I \left[\sin^2(\chi - \theta) - \frac{2\omega U}{g} \{ \cos \chi - \cos \theta \cos(\chi - \theta) \} \right] \sin \theta d\ell \right. \\ & \left. + \int_{II} \left[\sin^2(\chi + \theta) - \frac{2\omega U}{g} \{ \cos \chi - \cos \theta \cos(\chi + \theta) \} \right] \sin \theta d\ell \right] \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

θ : 船体の水線の接線が x 軸となす角 (rad)

x : 船体の水線の x 座標

y : 船体の水線の y 座標

ℓ : 船体の水線に沿った座標

α_1 : 喫水影響係数 $\left(= \frac{\pi^2 I_1^2 (1.5 K d)}{\pi^2 I_1^2 (1.5 K d) + K_1^2 (1.5 K d)} \right)$

I_1, K_1 : 変形ベッセル関数

K : 波数

$(1/m)$

d : 船体の喫水

(m)

α_2 : 船速影響係数 $(= -3.5 \cos \chi \sqrt{F_n})$

F_n : フルード数 $\left(= \frac{U}{\sqrt{gL}} \right)$

U : 船速

(m/sec)

ここで、基準となる座標系を図 4.2.2 に示す。

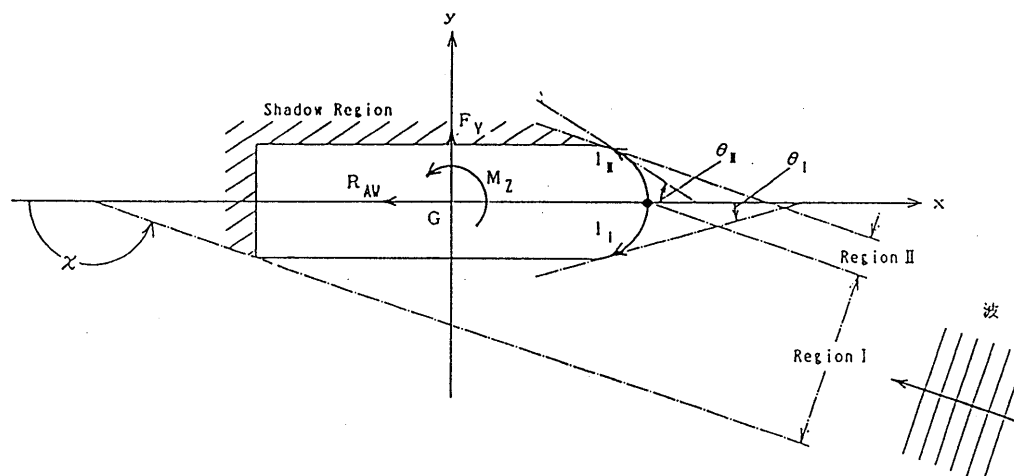


図 4.2.2 座 標 系

4.2.3 実海面における抵抗増加の計算法

短波頂不規則波中を走航する船舶の抵抗増加は、規則波中応答関数を用いて次式で求める。

$$R_{AW}(\chi) = 2 \int_{-\pi}^{\pi} G(\alpha - \chi) d\alpha \int_0^{\infty} S(f) \frac{\Delta r(f, \alpha)}{\zeta_a^2} df \quad (4.2.5)$$

- χ : 波入射角の主方向 (rad)
 α : 入射成分波の入射角 (rad)
 f : 入射成分波の周波数 (1/sec)
 S : 入射波スペクトルの周波数分布関数
 G : 入射波スペクトルの方向分布関数
 $\frac{\Delta r}{\zeta_a^2}$: 抵抗増加の規則波中応答関数 (kg/m²)
 ζ_a : 規則波振幅 (m)

風波の場合は、入射波のスペクトルとして式(4.2.6)の ITTC スペクトル(原式は円周波数: ω で表示されている)を用いる。

$$S(f) = \frac{0.11 H_{1/3}^2 T_{01}}{(T_{01} f)^5} \exp \left\{ -\frac{0.44}{(T_{01} f)^4} \right\} \quad (4.2.6)$$

- $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 T_{01} : 平均波周期 (sec)

波高、波周期を目視観測で求める場合は、 $H_{1/3}$ および T_{01} には観測された平均波高及び平均波周期を用いる。

また、計測値が利用できる場合には式(4.2.7)に示すスペクトルを使用する。

$$S(f) = \frac{0.08 H_{1/3}^2 T_{02}}{(T_{02} f)^5} \exp \left\{ -\frac{0.32}{(T_{02} f)^4} \right\} \quad (4.2.7)$$

ここに, T_{01} および T_{02} は式 (4.2.8), (4.2.9) で定義される周期である。

$$T_{01} = \frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty S(f) f df} \quad (4.2.8)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty S(f) f^2 df}} \quad (4.2.9)$$

また, 方向分布関数は $\cos^2$ 分布を標準とするが, 集中度が大きい場合には $\cos^4$ 分布を用いる。方向分布関数: $G(\alpha)$ を式 (4.2.10) に示す。

$$G(\alpha) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2 \alpha & \text{または、} \\ \frac{8}{3\pi} \cos^4 \alpha \end{cases} \quad \left(-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.2.10)$$

うねりの場合は, 周波数に対する分布幅の狭い式 (4.2.11) に示す JONSWAP スペクトルを用いる。また, 方向分布関数としては s パラメータを含む式 (4.2.12) を用いる。集中度の小さいうねりから大きいうねりに対して, $s = 50 \sim 75$ の値を使用する。

$$S(f) = \frac{0.072 H_{1/3}^2 T_{01}}{(T_{01} f)^5} \exp \left\{ -\frac{0.44}{(T_{01} f)^4} \right\} \cdot 3.3 \exp \{ -0.5(1.3 T_{01} f - 1)^2 / \sigma^2 \} \quad (4.2.11)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{for } f \leq (1.3 T_{01})^{-1} \\ 0.09 & \text{for } f > (1.3 T_{01})^{-1} \end{cases}$$

$$G(\alpha) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{2s} \quad (-\pi < \alpha < \pi) \quad (4.2.12)$$

Γ : ガンマ関数

$$G(\alpha) = \begin{cases} 2.000 \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{100} & \text{for } s = 50 \\ 2.447 \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{150} & \text{for } s = 75 \end{cases}$$

図 4.2.3 に風波とうねりの方向分布関数を比較して示す。

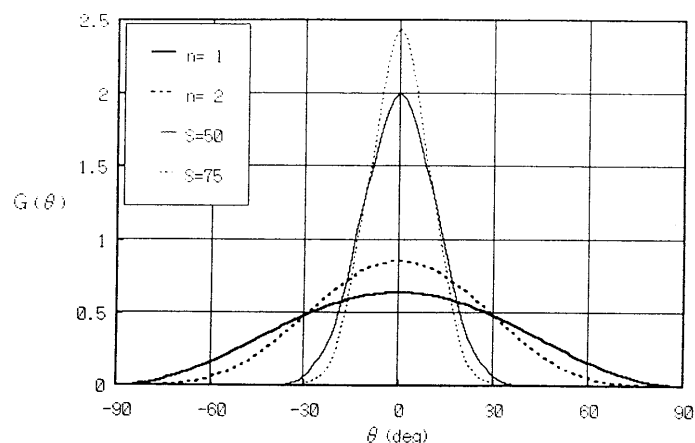


図 4.2.3 波スペクトルの方向分布関数

4.3 操舵影響

4.3.1 当 舵

当舵による抵抗 $R_{\delta\delta}$ は、式 (4.3.1) から式 (4.3.3) を用いて計算する。

$$R_{\delta\delta} = (1 - t_R) \frac{\rho f_a(\Lambda) \cdot A_R \cdot U_R^2 \cdot \delta_R^2}{2 \cdot 1000} \quad (t) \quad (37) \quad (4.3.1)$$

$$f_a(\Lambda) = \frac{6.13\Lambda}{2.25 + \Lambda} \quad (4.3.2)$$

- ρ : 水の密度 $(\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4)$
 t_R : 操舵抵抗減少係数
 A_R : 舵面積 (m^2)
 U_R : 舵への有効流入速度 (m/sec)
 δ_R : 舵角 (rad.) (19)
 Λ : 舵のアスペクト比

操舵抵抗減少係数: t_R は図 4.3.1 (22) から推定する。

舵への有効流入速度: U_R は式 (4.3.3) で計算する。

$$U_R = \frac{0.75U}{(1 - s_R)} \sqrt{1 - 2(1 - \eta\kappa)s_R + \{1 - \eta\kappa(2 - \kappa)\}s_R^2} \quad (\text{m}/\text{sec}) \quad (34) \quad (4.3.3)$$

$$s_R = 1 - \frac{D \cdot J}{P} \quad (28) \quad (4.3.4)$$

$$\eta = \frac{D}{h} \quad (4.3.5)$$

$$\kappa = 0.8(1 - w)_m \quad (33) \quad (4.3.6)$$

h : 舵高さ (m)

U : 対水船速 (m/sec) (31)

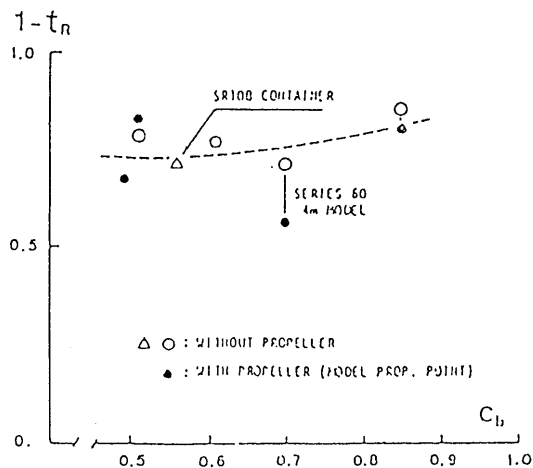


図 4.3.1 操舵抵抗減少係数

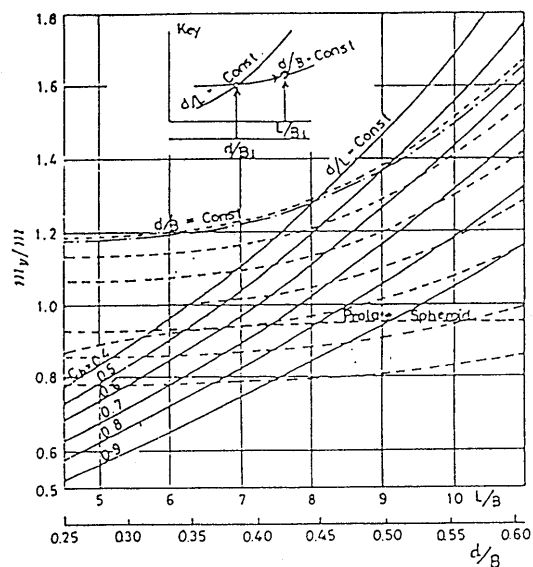


図 4.3.2 横方向の付加質量係数

4.3.2 回頭運動

回頭運動に伴う抵抗増加量： R_{or} は式 (4.3.7) で計算する。

$$R_{\text{or}} = \frac{0.4L(m + C_B \cdot m_y)\overline{r^2}}{1000} \quad (t) \quad (38) \quad (4.3.7)$$

$$\begin{aligned} L &: \text{船長} && (m) \\ W &: \text{船の排水重量} && (kg) \\ g &: \text{重力加速度} && (m/sec^2) \\ C_B &: \text{方形係数} \\ m &= W/g \\ m_y &: \text{船の左右方向付加質量} && (kg) \\ r &: \text{回頭角速度} && (rad./sec) \quad (22) \end{aligned}$$

船の左右方向の付加質量係数： m_y/m は図 4.3.2 21) により求める。

回頭角速度の 2 乗平均： $\overline{r^2}$ を船首揺れから求める場合は式 (3.1.3) による。

4.3.3 横流れ

横流れによる抵抗： $R_{\beta\beta}$ は、式 (4.3.8) で計算する。

$$R_{\beta\beta} = \frac{\pi \rho \cdot d^2 \cdot U^2 \cdot \beta^2}{4 \cdot 1000} \quad (t) \quad (38) \quad (4.3.8)$$

$$\begin{aligned} \rho &: \text{水の密度} && (kg \cdot sec^2/m^4) \\ d &: \text{喫水} && (m) \\ U &: \text{対水船速} && (m/sec) \quad (31) \\ \beta &: \text{横流れ角} && (rad.) \quad (23) \end{aligned}$$

記 号 表

(ITTC 1990 年度版を含む)

記号	説明	記号	説明
A	面積	T	スラスト、周期
A_L	水面上側面投影面積	t	スラスト減少係数
A_T	水面上正面投影面積	T_E	出合周期
A_R	舵面積	T_m	平均波周期
B	船の型幅	t_R	操舵抵抗減少係数
b	舵平均巾	T_ψ	船首揺れ周期
C_B	方形係数	U	流速
C_M	風圧モーメント係数	u	x 軸方向の速度成分
C_{Th}	プロペラ荷重度	U_G	対地船速 (m/sec)
C_X	風圧抵抗係数	U_R	舵の流入速度 (m/sec)
C_{X0}	正面風圧抵抗係数	U_{RW}	相対風速 (m/sec)
C_Y	風圧横力係数	U_{TW}	絶対風速 (m/sec)
D	プロペラ直径	V	船速
d	船の型喫水	v	y 軸方向の速度成分
F	力	V_A	プロペラの前進速度
f	周波数	V_G	対地船速 (kt)
F_n	フルード数	V_S	対水船速 (kt)
g	重力加速度	V_T	潮流速度 (kt)
h	舵高さ	W	排水重量
$H_{1/3}$	有義波高	w	Taylor の伴流係数、 z 軸方向の速度成分
J	プロペラ前進常数	α_E	有効迎角
$K(\gamma_R)$	風向影響係数	α_R	舵有効流入角
K_Q	トルク係数	β	横流れ角
K_{Q0}	プロペラ単独トルク係数	γ_R	相対風向
K_T	スラスト係数	γ_T	絶対風向
K_{T0}	プロペラ単独スラスト係数	Δr	規則波中の抵抗増加
L	船長	δ_R	実際舵角
L_{WL}	水線長さ	ζ_A	波振幅
M	モーメント	ζ_W	波高
m	質量	η	効率
N	プロペラ回転数 (rpm)	η_R	プロペラ効率比
n	回転数 (1/sec)	η_0	単独プロペラ効率
P	プロペラピッチ	θ	縦揺れ角、トリム角
P_B	制動馬力	θ_A	縦揺れ振幅
P_D	プロペラ伝達馬力	κ	波数
Q	トルク	λ	山から山までの波長
R	抵抗	Λ	舵アスペクト比
r	回頭角速度	ρ	質量密度
R_{AX}	正面風圧抵抗	ρ_A	空気の質量密度
R_{AY}	側面風圧抵抗	ψ	船首揺れ角
R_{AW}	波浪中での平均抵抗増加	ψ_A	船首揺れ振幅
R_n	レイノルズ数	ψ_0	針路
R_T	全抵抗	σ	抵抗増加係数 ($= \Delta r / \rho g \zeta_A^2 B^2 / L$)
R_{vr}	回頭運動による抵抗	τ	荷重係数 ($= R / \rho D^2 U^2 (1-w)^2 (1-t)$)
$R_{\beta\beta}$	横流れによる抵抗	ω	円周波数
$R_{\delta\delta}$	当舵による抵抗	χ	波入射角
S_R	真のスリップ比		
$S_\zeta(\omega)$	一次元波スペクトル密度		
$S_\zeta(\omega, \chi)$	二次元波スペクトル密度		

参 考 文 献

- 1) 「速力試運転標準解析法試案」水槽委員会, 造船協会雑纂, (昭和19年1月)
- 2) 「確定速力算出明細書及び確定速力の算出要領」運輸省告示第174号, (昭和30年4月8日)
- 3) 谷口 中, 田村欣也: 「風圧抵抗修正の新しい方法について」西部造船会会報, (昭和34年8月)
- 4) Taniguchi, K. & Tamura, K.: On a New Method of Correction for Wind Resistance Relating to the Analysis of Speed Trial Results, 11th ITTC, (1966)
- 5) 「巨大船の海上試運転施行方案の試案作成について」造船協会, 試験水槽委員会, 造船協会誌, 442号, (昭和41年5月)
- 6) "ITTC Guide for Measured-Mile Trials", Report of the Performance Committee, Appendix I, Proceedings of 12th ITTC, (1969)
- 7) "Standardization Code for Trials and Testing of New Ships", NV, (1971)
- 8) 「試運転方案の調査研究」日本造船研究協会, 第2基準部会, 研究資料 NO. 12R, (昭和47年3月)
- 9) "Code for Sea Trials", SNAME, (1973)
- 10) "BSRA Standard Method of Speed Trial Analysis", BSRA Report NS 466, (1978)
- 11) 神中龍雄: 「船の速力試運転解析について」西部造船会会報, (昭和57年8月)
- 12) Maruo, H.: Wave Resistance of a Ship in Regular Head Seas, 横浜国立大学工学部紀要, Vol. 9, (1960)
- 13) 丸尾 孟, 石井昭良: 簡易化公式による向い波中抵抗増加の計算, 造船学会論文集, 第140号, (1976)
- 14) 丸尾 孟, 岩瀬和夫: 斜波における抵抗増加の計算, 造船学会論文集, 第147号, (1980)
- 15) Faltinsen, O.M., Minsaas, K. J., Liapis, N., Skjoldal, S.O.: Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway, Proc. of 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo (1980)
- 16) Newman, J.N. and Sclavounos, P.D.: The Unified Theory of Ship Motions, Proc. of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, (1980)
- 17) Sclavounos, P.D.: The Diffraction of Free-Surface waves by a Slender Ships, J.S.R., Vol. 26, No. 1, (1984)
- 18) Sakamoto, T., Baba, E.: Minimization of Resistance of Slowly Moving Full Hull Forms in Short Waves, 16th Symp. on Naval Hydrodynamics, Berkeley (1986)
- 19) 高橋 雄: 波浪中抵抗増加の実用的推定法とその船型計画への応用, 西部造船会々報 第75号, (昭和63年3月)
- 20) 柏木 正: 細長船理論によるKochin 関数の計算法, 日本造船研究協会 第208研究部会平成2年度報告書, (1991)
- 21) 元良誠三: 船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて-その3 左右動に対する付加質量-, 造船協会論文集, 第106号, (1960)
- 22) 松本 憲洋, 末光 啓二: 拘束模型試験による操縦性の予測, 関西造船協会誌, 第176号, (1980)
- 23) 造船設計便覧第4版: 風による抵抗増加, 関西造船協会編, (昭和58年) P. 428
- 24) 造船設計便覧第4版: 速力試運転解析, 関西造船協会編, (昭和58年) P. 409