

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360386

研究課題名(和文) 波浪中における曳船・被曳船の連成挙動と索張力の理論計算法に関する研究

研究課題名(英文) Study on a prediction method for coupling motions of tow and towed ships and the towing cable tension in waves

研究代表者

安川 宏紀 (Yasukawa, Hironori)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40363022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：昨年度に開発した計算プログラムを拡張して、斜め規則波中におけるタグや被曳船の運動と曳航索の張力を計算する新しい計算プログラムを開発した。理論計算法の検証データを取得するため、三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽にて水槽試験を実施した。計測にあたり、波パラメータを系統的に変化させ、波周期や波方向等の影響を把握した。開発された計算プログラムを用いて、斜め波中におけるタグと曳航バージの運動と索張力の計算を行った。計算結果は、実施した水槽試験結果と比較を行った。その結果、計算結果は、水槽試験とおおよそ一致し、実用上の精度を有することが確認された。

研究成果の概要(英文)：A new computer code was developed for the prediction of the motions of tow and towed ships and the towing cable tension in oblique regular waves, by extending the code developed in last year. To obtain the validation data for the code, tank tests were conducted at Seakeeping and Maneuvering Basin, Nagasaki R & D center, Mitsubishi Heavy Industries. By systematic change of the wave-maker's parameters, in the measurements, effects of wave period, wave direction and so on were captured. By means of the code newly developed, calculations were made of the motions of tow and towed ships and the towing cable tension in oblique waves, and the results were compared with the tank test results. As a result, it was confirmed that the calculation results roughly agreed with the tank test results. The present method is useful for practical prediction purposes of towing problems in waves.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：曳航 曳船 被曳船 索張力 波浪動揺

1. 研究開始当初の背景

現在では、造船ブロックのような大型構造物建造の分業化が進み、例えば、中国において造船ブロック等を造り、それを日本に持ってきて組み立てるといったことが行われるようになった。その場合、中国から日本にブロックを運搬する方法として、バージの上にブロックを載せ、それをタグボートで曳航して持って来るといった「曳航バージ方式」が採用されている。しかし、中国から日本まで、曳航バージ方式で物を運搬しようとするれば、その間の東シナ海や玄界灘のような荒海を渡ってこなくてはならず、その航行安全性に問題が生じることがある。波浪中を曳航するにあたっては、安全かつ環境にダメージを与えないように、細心の注意が必要であり、この種の問題の理解を十分に深めておく必要がある。

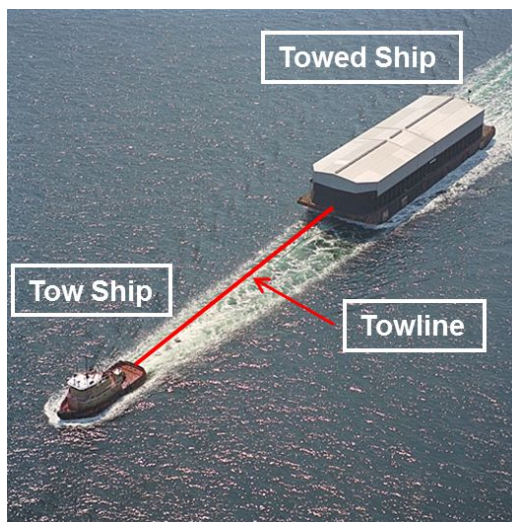


Fig.1 曳船，被曳船と曳航索

そのためには、波浪中をタグ(曳船)によって曳航される船舶(被曳船)とその間を連結する曳航索の挙動ならびに索に作用する張力を時刻歴ベースにシミュレートできる新しい理論計算法が不可欠となる。このような理論計算法により、いわゆる仮想的な数値実験が可能となり、種々の計算を通じて、波浪中曳航時の安全航行に対する具体的な検討を行うことが可能となるからである。それらを通じて得られる運航に関する知見は、曳航バージ方式で海を渡って運搬されている造船ブロック等の安全運航に大きく貢献するものであり、我が国海運業ならびに造船業の発展に資するものである。

2. 研究の目的

本研究では以下の三点を具体的な目的とする。以下の目的を達成する事により、波浪中曳航時における曳船・被曳船の運動に関する実用計算法が確立され、その挙動に関するメカニズムについて考察することが可能となる。

第一の目的は、正面向波中を航行する曳

船・被曳船の運動に関する理論計算法を構築することである。波浪中曳航時における各船の運動の定式化の手法が妥当であるか否か、まずは水平方向における各船の操縦運動及び被曳船の振れまわり運動を考慮しない場合の運動シミュレーション法を構築し、水槽試験結果を用いて検証を行う。また、併せて、各船の運動計測のため開発した水槽試験技術について示すとともに、水槽試験から得られる各船の運動特性に関する知見をまとめる。

第二の目的は、正面向波中を航行する曳船・被曳船の運動連成に関するメカニズムについて考察することである。第一の目的で構築した理論計算法に基づいて、各船の運動に影響を与える主たる要素を明らかにし、各船の運動連成について考察する。

第三の目的は、曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関する実用計算法を提案することである。曳航時の各船の操縦運動、被曳船の振れまわり運動、各船の波浪動揺の全てを考慮した統合運動シミュレーション計算法を構築し、水槽試験結果と比較することで、同計算法の精度を検証する。また、併せて、水槽試験結果から得られる各船の波浪中6自由度運動特性に関する知見をまとめ、そのメカニズムについて考察する。

3. 研究の方法

次に示す流れで研究を実行する。

1. 基礎理論式の誘導
2. 正面向波中における計算プログラムの開発と水槽試験の実施，計算法の検証と改良
3. 斜め波中における計算プログラムの開発と水槽試験の実施，計算法の検証と改良
4. 曳船・被曳船系における航行安全に関する指針に関する検討

理論と実験による検証という方法で曳船・被曳船の波浪動揺ならびに索張力等の理論計算法を開発する。初年度に、正面向波の問題に取り組み、次により一般的な斜め波中での問題に取り組む。最終的には、開発された計算プログラムを用いて、曳船・被曳船系の安全航行に関する指針を策定する。

4. 研究成果

本研究では、正面向波中を航行する曳船・被曳船の運動に関する理論計算法を構築するとともに、水槽試験結果及び線形理論に基づいて、その際の曳船・被曳船の運動連成に関するメカニズムについて考察した。続いて、同計算法を発展させ、曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関する実用計算法を提案した。さらに、水槽試験結果から得られる各船の波浪中6自由度運動特性に関する知見をまとめ、そのメカニズムについて考察した。以下に得られた成果をまとめる。

正面向波中を航行する曳船・被曳船の運動に関する理論計算法

曳航索をいわゆるランプドマス法で取り扱い、正面向波中における曳船・被曳船の縦方向船体運動シミュレーション計算法を提案した。本計算法は、従来の微小振幅波を仮定した線形理論による船体運動方程式ならびに Lagrange 方程式に基づく各集中マスに関する運動方程式に、各船の抵抗及び推力に関する項ならびに索張力による外力項を付加し、それらの式を数値的に解くことで、正面向波中曳航時の曳船・被曳船の船体運動及び索張力をシミュレートすることを可能としている。また、本計算法は、索張力の推定式を使用する必要が無いことに加え、曳航索の自重影響及び流体から受ける抵抗を考慮できる点に特徴がある。

水槽試験による精度検証を実施した結果、同計算法は、正面向波中曳航時の曳船・被曳船の運動及び索張力の挙動を実用上の精度を持って推定できることがわかった。

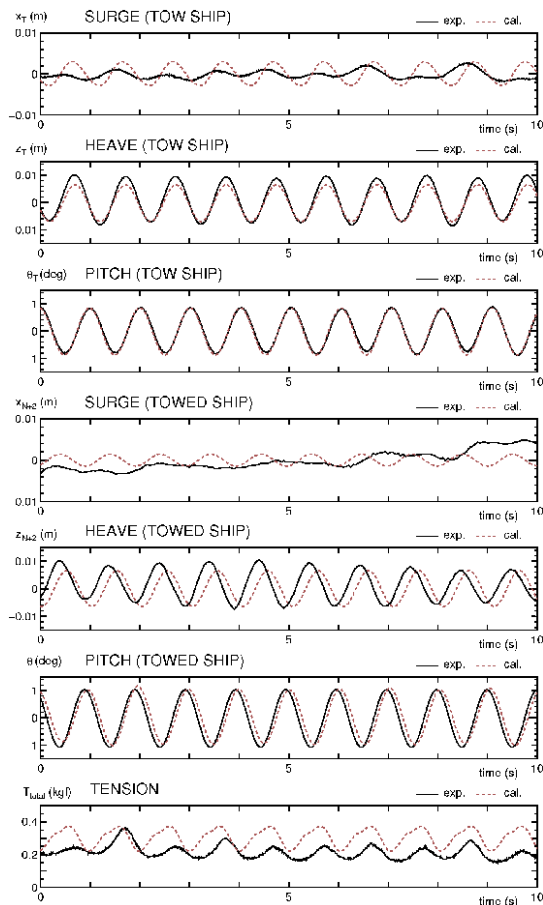


Fig.2 正面向波における曳船、被曳船の運動と索張力の理論計算と実験結果の比較

正面向波中を航行する曳船・被曳船の運動連成に関する考察

正面向波中を航行する曳船・被曳船の運動連成に関するメカニズムについて考察した。その結果を以下に示す。

- 索張力の定常成分の主たる要素は、被曳船の平水中抵抗と波浪中抵抗増加であ

る。

- 索張力の非定常成分の主たる要素は、被曳船に作用する surge 方向の波強制力と被曳船の surge 運動に関する慣性項である。
- 曳船の surge 運動は、被曳船に作用する surge 方向の波強制力、ならびに被曳船の surge 運動に関する慣性項に依存して影響を受けることとなる。よって、それらの項の位相差がどの程度になるかということが重要な要素となる。
- 各船の heave 運動及び pitch 運動に影響を与える主たる要素は、索張力の定常成分、曳航索長、ならびに各船の重心と曳航点との距離となる。各船の heave 運動及び pitch 運動に関する復原力係数は、それらの要素に依存して増加または減少する。また、各船の運動には、相手船の heave 運動及び pitch 運動に起因する強制力項が作用するが、その影響の度合いを決定するのも、それら 3 つの要素である。
- 索張力の定常成分の主たる要素は、被曳船の平水中抵抗及び波浪中抵抗増加であるため、その値は波高には比例しない。よって、波浪中曳航状態における各船の heave 運動及び pitch 運動は、波高に比例しないこととなる。これは、一般的な波浪中船体運動が示す傾向とは異なる、曳航問題に特有の現象である。
- 曳航索長が無限に長いと仮定すると、各船の heave に関する運動方程式は、各船が波浪中を単独航走する場合の運動方程式に完全に一致する。一方、各船の pitch に関する運動方程式は、自船の pitch に関する復原力係数にのみ、索張力の定常成分ならびに各船の重心と曳航点との距離の影響が残ることとなる。
- 被曳船の surge 運動は、曳船の surge 運動とは異なり、基本的に単独航走時に近い運動傾向を示すが、索長が短い場合や被曳船の抵抗が大きい場合(曳航索が常に張っている場合)には、曳船の surge 運動の影響を直接的に受けることとなる。

曳船・被曳船の波浪中 6 自由度運動に関する実用計算法

波浪中における曳船・被曳船の操縦運動及び 6 自由度波浪動揺の両方を総合的に取り扱うことのできる実用的なシミュレーション計算法を提案した。本計算法は、操縦運動を扱う低周波数の運動方程式と波浪動揺を扱う高周波数の運動方程式を完全に分離させ、それぞれを別個に解くことによって、波浪中を航行する曳船・被曳船に関する 6 自由度運動計算を可能としている。なお、本計算法は、曳航索を 1 本のトラス要素として取り扱っているため、索の変形とその動的な影響を考慮することはできない。

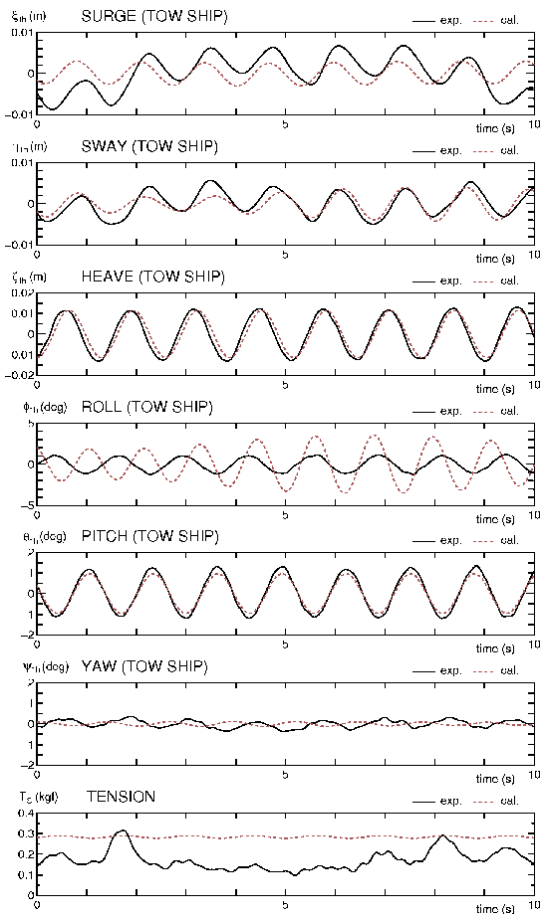


Fig.3 斜波における曳船の運動と索張力の理論計算と実験結果の比較

水槽試験による精度検証を実施した結果、本計算法には以下の特徴があることがわかった。

- 向波、斜波中曳航時の各船の運動振幅を計算する場合、本計算法は水槽試験結果が示す傾向を定性的に捉えることができる。
- 横波中曳航時の各船の運動振幅を計算する場合には、どの波浪条件においても、本計算法は水槽試験結果が示す傾向を捉えることができる。
- 横波中曳航時の各船の運動については、その位相についても、時刻歴ベースでおおよそ再現することが可能である。
- 波浪中曳航時の索張力に関する計算結果については、今後も検討が必要である。

本計算法は、演算時間が短くて済むという利点があるため、曳航操船シミュレータ等への適用も可能であると考えられる。

曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関する考察

曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関するメカニズムについて考察した。その結果を以下に示す。

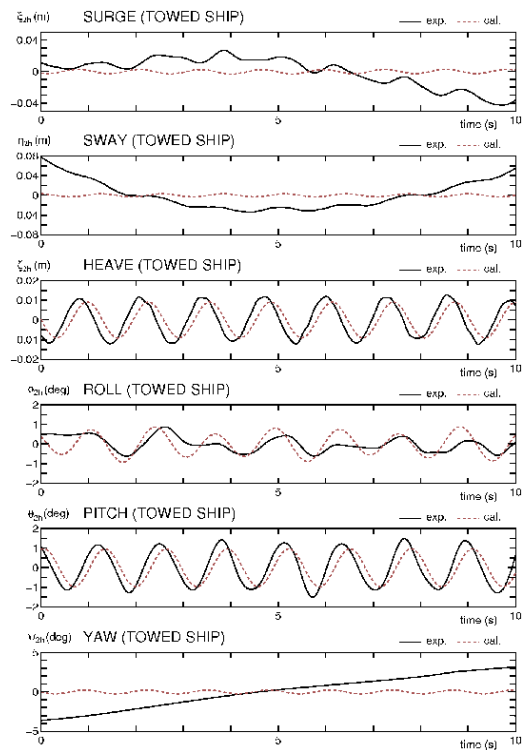


Fig.4 斜波における被曳船の運動の理論計算と実験結果の比較

- 向波中曳航時の曳船・被曳船の縦運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。曳船の surge 運動については、被曳船の surge 運動に起因する索張力の変動成分が曳船の surge 運動を減衰させる方向に作用したことが原因である。それ以外の運動については、曳航索の拘束による影響が主たる要因と考えられる。
- 向波中曳航時の曳船・被曳船の横運動は、単独航走時と同様、大きく発達することは無い。ただし、何らかの影響で被曳船の定常位置が曳船の船体中心線上からずれた状態となると、各船に若干量ではあるが roll 運動が生じる。
- 斜波中曳航時の曳船・被曳船の縦運動は、向波の場合と同様、単独航走時のそれらよりもやや小さくなる傾向が見られた。
- 斜波中曳航時の曳船の sway 及び yaw 運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。これは、被曳船があたかもシーアンカーのように作用し、それらの運動を抑制した結果であると考えられる。
- 斜波中曳航時の曳船の roll 運動ならびに被曳船の全ての横運動は、単独航走時のそれらよりも大きくなる。これは、波漂流力により、被曳船の定常位置が曳船の船体中心線上からずれた状態となることによって、各船に作用することとなる索張力による横力・モーメントの変動成分が原因であると考えられる。
- 上記の斜波中曳航時において得られた知見は、 $\approx 30\text{deg}$ という比較的浅い角度

の斜波の場合における結果によるものである。よって、 δ が大きくなった場合には、また違った傾向が現れる可能性があることに注意を要する。

- 横波中曳航時の曳船・被曳船の surge 及び pitch 運動は、単独航走時と同様、大きく発達することは無い。
- 横波中曳航時の曳船・被曳船の heave 運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。
- 横波中曳航時の曳船・被曳船の横運動は、単独航走時のそれらよりも大きくなる。これは、波漂流力により、被曳船の定常位置が曳船の船体中心線上からずれた状態となることによって、各船に作用することとなる索張力による横力・モーメントの変動成分が原因であると考えられる。なお、横波の場合には、被曳船のシーアンカーとしての作用が相対的に小さい。

波浪中における曳航作業における一提案

波浪中曳航時の曳船・被曳船運動に関する考察を踏まえ、曳航作業において有用と思われる知見を以下に示す。

- 船体に破口があるような損傷船舶を曳航する場合には、沈没・転覆を防ぐため、その船舶をできる限り動揺させずに目的港まで運ぶ必要がある。よって、そのような場合には、向波に近い方向から波を受けて曳航することが望ましい。また、破口が船首もしくは船尾にあり、その位置が波振幅よりも高い位置にある場合には、heave の同調点を除けば、横波中でも曳航は可能であると考えられる。
- 斜波・横波中曳航時において各船の横運動が増大することを防ぐためには、被曳船ができる限り曳船の真後ろを追従するようにすればよい。波漂流力による被曳船の横偏位を抑制する方法としては、被曳船に舵を取らせること、被曳船にセンターボードのような付加物を設置すること等が考えられる。

本研究の最終目標は、実務における曳航作業に伴う危険を、除去もしくは低減させるための対策を確立することである。そのためには、気象・海象を含めた様々な曳航条件において、各船の運動及び索張力の挙動を精度良く再現することが可能なシミュレーションツールが必要となる。本研究で提案した曳船・被曳船の波浪中 6 自由度運動に関する実用計算法の精度を向上させ、この目的に叶うシミュレーションツールが構築できるよう検討を続けていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者および研究分担者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

1. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Yoneda, T., Koh, K. K. and Maimun, A., Analysis of an Asymmetrical Bridle Towline Model to Stabilise Towing Performance of a Towed Ship, Jurnal Teknologi, Vol.66, No.2, Special Edition on Marine Technology, 2014, January, 151-156. (査読有り)
<http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/index>
2. Fitriadhy, A., Yasukawa, H. and Koh, K. K., Course Stability of a Ship Towing System in Wind, Ocean Engineering, Vol.64, 2013, May, 135-145. (査読有り)
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00298018>
3. 安川宏紀, 平田法隆, 横尾亮介, Fitriadhy, A., 曳船・被曳船の巡回運動時におこる索のたるみについて, 日本船舶海洋工学会論文集 第 16 号, 2012 年 12 月, 41-48. (査読有り)
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjasnaoe/-char/ja/>
4. 中山喜之, 安川宏紀, 平田法隆, 正面向波中における曳船・被曳船の船体運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集 第 15 号, 2012 年 6 月, 91-100. (査読有り)
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjasnaoe/-char/ja/>

[学会発表](計 5 件)

1. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Yoneda, T. and Koh, K. K., Effect of Asymmetrical Bridle Towline Configuration on Course Stability of a Towed Ship, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics (APHydro 2012), Johor, Malaysia, September 2012, 83-89.
2. Zan, U. I., Yasukawa, H., Koh, K. K., and Fitriadhy, A., Model Experimental Study of a Towed Ship's Motion, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics (APHydro 2012), Johor, Malaysia, September 2012, 313-318.
3. Nakayama, Y., Yasukawa, H., Hirata, N. and Hata, H., Time Domain Simulation of Wave-Induced Motions of a Towed Ship, Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 2012 (CD-R)
4. Nakayama, Y., Yasukawa, H. and Watanabe, J., Dynamic interaction of tow and towed ships in head seas, , 2nd Int. Conf. on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Trondheim, Norway, May,

2011, 265-272.

5. Fitriadhy, A., Yasukawa, H. and Masaki, Y., Slack towline on Tow-Towed Ships Interaction during Manoeuvring, 2nd Int. Conf. on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Trondheim, Norway, May, 2011, 127-136.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

安川 宏紀 (YASUKAWA HIRONORI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：4 0 3 6 3 0 2 2

(2)研究分担者

田中 進 (TANAKA SUSUMU)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：1 0 2 0 7 1 0 2

平田 法隆 (HIRATA NORITAKA)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：8 0 1 8 1 1 6 3