

1 - 1 航行不能船舶の漂流予測と曳航技術

環境・エネルギー研究領域	*原正一、山川賢次、星野邦弘、桐谷伸夫
海上技術安全領域	*谷澤克治、上野道雄、南真紀子
海洋開発研究領域	大松重雄、湯川和浩
輸送高度化研究領域	長谷川純

1. はじめに

本報告は、平成10年度から開始した5年計画の国土交通省特別研究「荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究」の成果にもとづいたものである。研究の目的は、荒天下において機関故障等により航行不能に陥った船舶（損傷、折損・分離、転覆により異常形状となった船舶またはその一部）の漂流経路を予測し、安全な場所に曳航する技術を確立することによって、大きな二次的災害を引き起こす危険性を未然に防止することである。このために、パソコン上で航行不能船舶の漂流運動、曳航索張力、曳航操船法及び曳船の曳航馬力を推定できる最適曳航支援システムを開発し、最適な曳航支援ができる情報を海難救助諸機関に対して提供すること、波浪の影響を考慮した漂流経路予測計算プログラムを海上保安庁海洋情報部（旧水路部）に提供することを目標とした。

最適曳航支援システムについては、種々の要素技術に関する計算プログラムを開発し、それらをリンクしてシステムに組み込んだ。さらに、船体運動計算結果を3次元アニメーション表示して、3D-Webを可能にした。

また、漂流経路予測法の開発については、航行不能になった大型船を研究の主たる対象としているが、海難事故による漂流物には大型船舶以外にも、小型船舶、救命艇、救命筏、人体、流出油等があり、これらも海流と潮流、風、波の影響を受けて漂流する。海洋情報部では、これらの小さな漂流物も対象とした漂流予測を行っている。現在、海洋情報部で開発・運用されている漂流経路予測システムでは、海流・潮流と風による漂流速度成分は考慮されているが、波による漂流速度は厳密には考慮されていない¹⁾。そこで、本研究の成果を漂流経路予測システムの予測精度向上に役立てるため、波による漂流速度成分の漂流経路予測システムへ追加した。

本報告では、最適曳航支援システムの概要について詳述するとともに、漂流経路の予測法について述べる。

2. 曳航技術の開発

2.1 最適曳航支援システムの概要

最適曳航支援システム（Optimum Towing Support System: OTSS）は、与えられた海象条件において、遭難船舶の漂流運動、曳航時の索張力、ふれまわり幅、曳船と被曳船の軌跡を推定するパソコンで起動できる計算プログラムである。本システムは、曳船が最適な曳航を実現するための情報を提供するものである。

パソコンシステムの使用環境は、DOS/V 互換機を想定し、OSはマイクロソフト社のWindowsとする。パソコンの仕様として、ディスプレイは1024×768（14インチ以上）、メモリーは64Mb以上、CPUは400MHz以上、HDは1回の3600秒の曳航計算で3.5Mbのデータが保存されるので、余裕をみて容量を大きくとるほうがよい。基本的に、プログラム

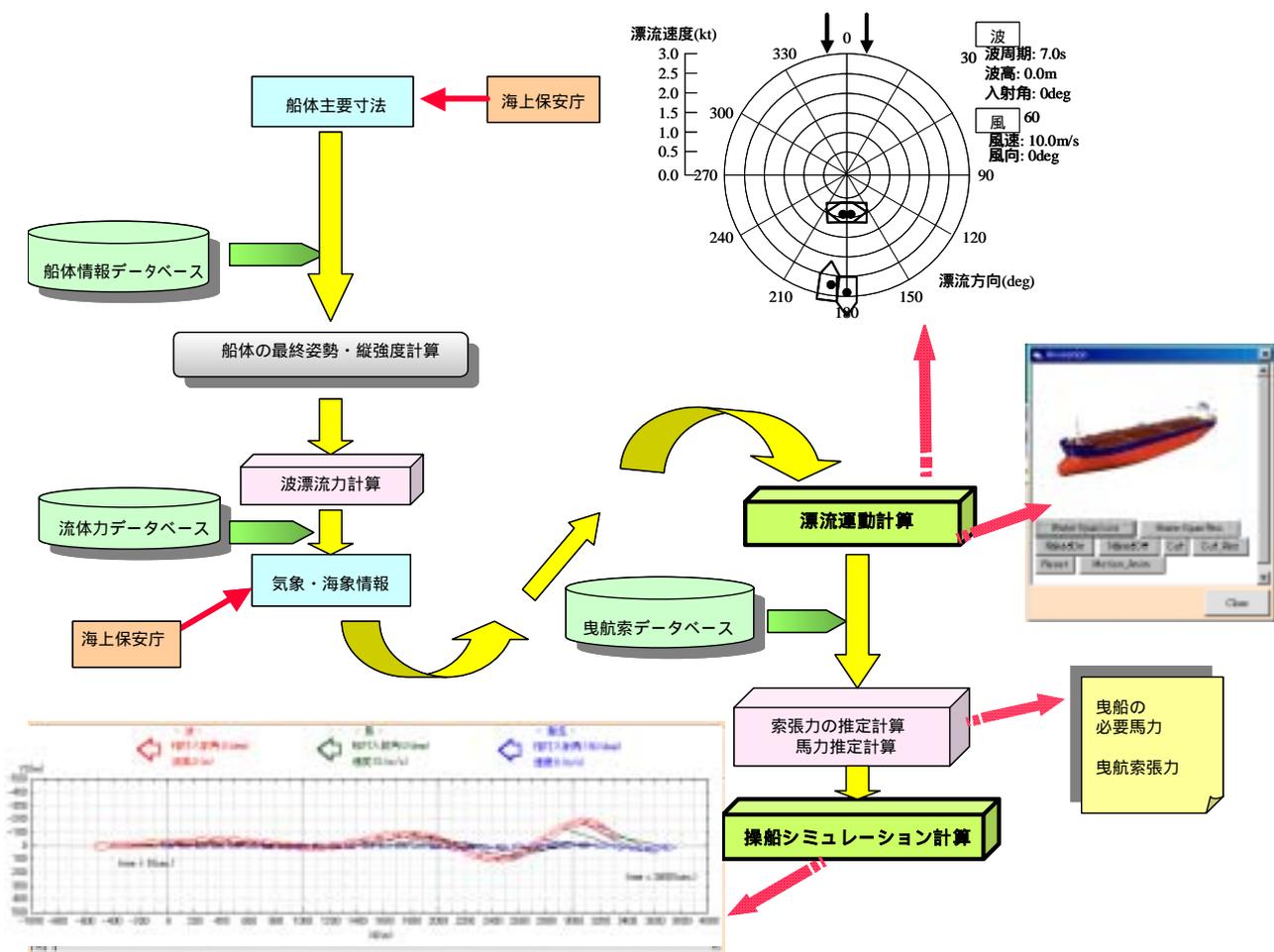


図1 最適曳航支援システムの流れ

はヴィジュアルベシック、FORTRAN 及び C++で書かれており、対話形式で内部の計算に必要とされるデータを入力することにより、情報が入手できるシステムとなっている。

本システムの特徴のひとつは、波浪中での船体運動のシミュレーション結果をアニメーションで表示していることである。これは、ViewPoint 社のメタストリームと呼ばれる手法により、数 100Kbyte の非常に少ないデータ容量で 3D-Web のアニメーションで船体運動を表現している²⁾。3D-Web をエンジニアリング分野に活用できたことで画期的であるといえる。船体の表現は、上部構造物の艀装品まで忠実に描かれており美しい。

表 1 母型船の主要寸法

船種	タンカー	タンカー	コンテナ船	バージ	PCC	貨物船	漁船
D/w型式	258,000	150,000	23,700		12,500	18,000	499GT
Lpp (m)	320.00	265.00	200.00	70.00	180.00	156.00	53.00
B(mld) (m)	58.00	48.30	32.00	20.00	32.00	26.60	9.40
D(mld) (m)	28.80	22.40	16.50	4.00	14.00	14.10	3.95
d (mld) (m)	18.50	15.20	10.50	3.80	8.50	9.00	3.60
Cb	0.83	0.83	0.56	0.92	0.55	0.70	0.66
lcb (%)	-3.70	-3.30	2.40	-0.90	2.38	-0.54	1.15
	シングルハル	ダブルハル					

2.2 最適曳航支援システムの主な機能

パソコンシステムが有する機能の概略を以下に述べる^{3),4),5)}。また、システムの流れを、図1に示す。

(1) 相似処理機能

対象とする被曳船(遭難船)に近い船型を予めデータベースに登録された母型船から選択する。その種類と主要寸法を表1に示す。この積載状態(満載、軽荷)、主要目(長さ、幅、型深さ、喫水)の入力により、船内区画、載貨重量などが母型船と相似な被曳船の諸データを計算できる。

(2) 重量重心計算機能(浸水計算の追加機能)

折損時も含め船体の重心計算を行い、この値を使用し、姿勢計算および浸水計算を行う。

(3) 波漂流力計算用メッシュ作成機能

船体の全表面のメッシュ作成を行い、水面下の船体メッシュを出力する。このメッシュは、3次元パネル法による流体力計算に使用する。

(4) 船体最終姿勢予測計算機能(浸水シミュレーション計算機能)

母型船の種類および積載状態(満載、軽荷)、船体主要目の入力し、浸水計算入力画面で必要なデータを入力することにより浸水計算を行い、遭難船の最終船体姿勢を推定する。

(5) 転覆・折損時を含む復原性計算機能

転覆・折損時を含む船体の浸水計算を実施し、GZ 曲線、最終釣り合い位置(喫水、トリム、ヒール)を算出する。折損時には、折損位置を考慮して折損タンクを自動的に検出して計算する。

(6) 縦強度計算機能

船舶の船体を一本の梁と仮定し、梁にかかる荷重と浮力を積分して、船体長さ方向の各位置における、剪断力を計算し、これを積分して、曲げモーメントを計算する。

(7) 流体力、運動計算機能

流体力(付加質量力、造波減衰力、波強制力)を計算し、さらに船体運動、波漂流力を求める。次に波向きを入力して船体運動アニメーションを見ることができる。

(8) 定常漂流運動計算機能

曳航時の流体抵抗、風圧抵抗、波漂流力、流れによる抵抗の計算結果を利用して、定常釣合方程式の解を求める。計算では、漂流船体の船首の向き、漂流速度、漂流方向を求めることができる。解が一意的に決まらず複数解となることが有り得る⁶⁾。

(9) 操船シミュレーション計算機能

曳船 被曳船の曳航系でつくる操船シミュレーション計算を行う。曳船の操縦微係数は、巡視船模型等を用いた実験データ、数式表現された実験式、当所が開発した流体力データベースにより自動的に求められ、操縦方程式の解を求める。これより被曳船のふれまわり運動などの挙動、曳航索張力を計算し、曳船と被曳船の水平面の軌跡を時系列で表わす。

2.3 曳航操船の計算例の紹介

この研究を始める直接の動機となったのは、1997年1月に発生したナホトカ号の重油流出事故であった。タンカーの船首部約1/3が転覆して漂流し、福井県三国町の海岸に漂着した。最適曳航支援システムにおいて、この折損・転覆した船体状態を模擬して、操船シミュレーション計算結果を試みた結果を図2および図3に示す⁷⁾。設定した海象条件は、波高3m、波周期9秒、風速15mで、同一方向から波と風が入射し、曳航速度は1ktと2kt

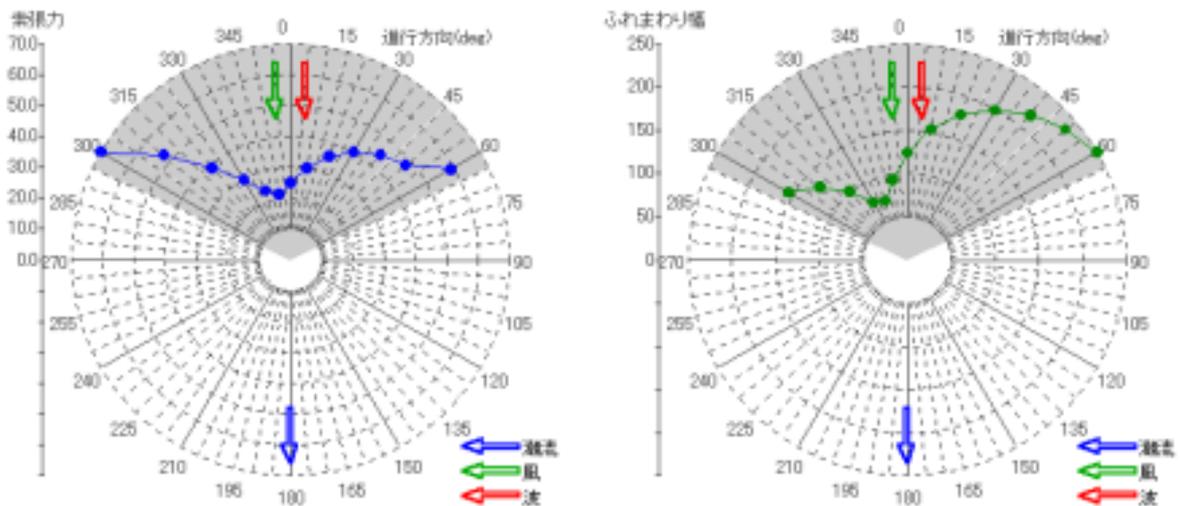


図2 ナホトカ号の曳航時の索張力とふれまわり幅の最大値
 (風速 15m/s 風向 0deg 波高 3m 波向 0deg 波周期 9s 流速 0m/s 流向 0deg 曳航速度 1kt)

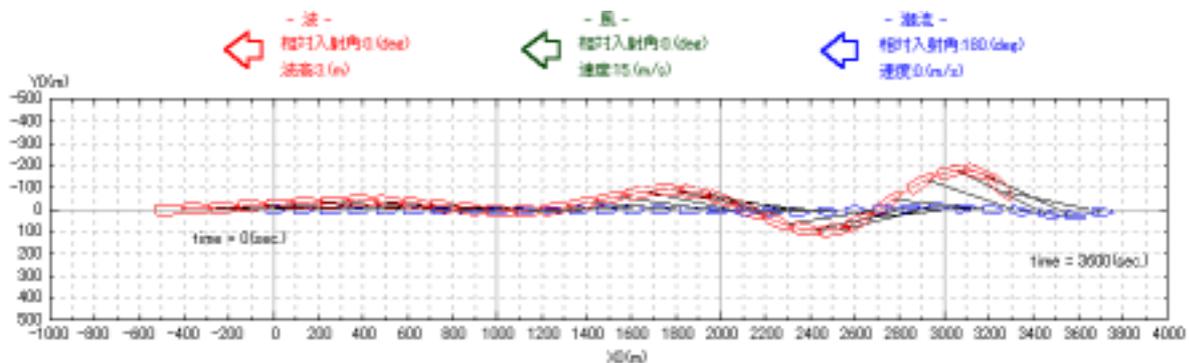


図3 ナホトカ号の曳航時のふれまわり運動
 (風速 15m/s 風向 0deg 波高 3m 波向 0deg 波周期 9s 流速 0m/s 流向 0deg 曳航速度 2kt)

の場合を示した。図2は、図の左が曳航方向によって最大索張力が変化の様子を示し、この曳航方向の範囲は、操作者が最初に自由に設定できる。右の図は、曳航方向によるふれまわり幅を示す。このように、システムはナホトカ号の曳航方向を決める際の判断情報を提供することができる。また、図3は曳船とナホトカ号の平面上の3600秒間の軌跡を表わしている。折損・転覆したナホトカ号は、大きく曳航中にふれまわることがわかる。

2.4 最適曳航支援システムの活用

最適曳航支援システムは、海難事故に遭遇した折損、転覆を含む千差万別の状態の船舶を対象として開発を進めてきた。しかしながら、荒天下において、このような遭難船舶を操船するシミュレーション計算には、種々の計算上の制約がある。これをシステムの適用限界として、曳航速度範囲、船体姿勢の影響、船体形状の影響、舵性能の推定精度、曳航点の選択の制限などが挙げられる。

通常の使用方法として、遭難船舶の主要寸法から相似船型を生成する。船舶の詳細なデータが存在する場合、対話型の本プログラムではなく別途開発した詳細計算プログラムを使用する必要がある。これを利用してオフセット、船内区画等を任意に設定することが可

能である。

ここで紹介したシステムに船舶のデータを予め登録することにより、船舶が遭難して救助支援が必要な場合に当該船舶の的確な情報を海難救助機関が保持しているとすれば迅速な対応がとれる。すなわち、大規模な海難事故を未然に防ぐことができる可能性がある。これは、船舶が救助を必要とする時に、船舶情報を的確に伝達する手段が確保されている船舶は救助率が高いことになる。諸外国の海難救助機関がIMO等の国際的機関の合意のもとに本システムを採用すれば、より有用なシステムとなるであろう。

3．漂流経路予測法の開発

3．1 波による浮体の漂流速度

波による浮体の漂流速度は、波漂流力が作用する短波長域では波漂流力と流体抗力との釣り合いから、また波漂流力がほとんど生じない長波長域では波により誘起される自由表面近傍の流速によって決まる^{8),9)}。

3．1．1 短波長域での漂流速度

波漂流力とは浮体が波を反射することによって生じる力である。浮体の寸法より相対的に波長が短い場合には、浮体による波の反射が顕著であり、大きな波漂流力が働く。波漂流力は波高 H_w の自乗に比例し、

$$F_w = \frac{1}{8} \rho g D C_w H_w^2 \quad (1)$$

と表される。ここでは ρ は水の密度、 g は重力加速度、 D は浮体の代表寸法、 C_w は浮体の動特性と波長により定まる無次元化波漂流力である。 C_w は浮体形状や重心位置等が分かれば理論計算や数値計算で求めることができる^{10),11),12),13)}。

一方、流体抗力は漂流速度 V の自乗に比例する力で、

$$F_D = \frac{1}{2} \rho B C_D V^2 \quad (2)$$

と表される。ここで B は浮体の水面下の投影面積、 C_D は抗力係数である。 C_D の値は浮体の水面下の形状により異なり、精密には水槽試験を行って計測する必要があるが、予め種々の形状についての計測結果にもとづいて構築された抗力係数データベースから推定することも可能である¹⁴⁾。

(1),(2)式の釣り合いから短波長域での波による漂流速度と波高の関係を求めると、

$$\frac{V}{\sqrt{Dg}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_w \lambda^2}{C_D B}} \frac{H_w}{\lambda} = a \delta \quad (3)$$

となり、漂流速度は波高に比例することが分かる。ここで δ は波傾斜 H_w/λ である。本報では、 $a = \sqrt{C_w \lambda^2 / C_D B} / 2$ を一次の波漂流速度係数と定義する。図4にルイスフォーム断面を有する2次元浮体の、また図5に球形ブイの波漂流速度係数の推定値を実験計測値と比較して示す。球形ブイでは長波長側での一致度は悪いが、短波長域では実験結果と良く一致している。

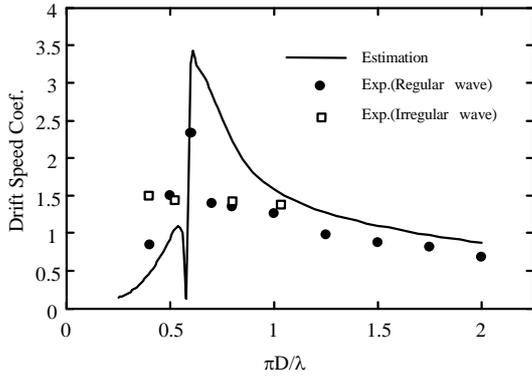


図4 一次の波漂流力係数
(ルイスフォーム2次元浮体：幅D)

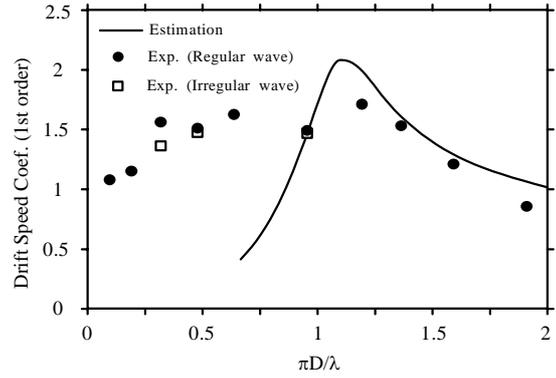


図5 一次の漂流速度係数
(球形漂流ブイ：直径D)

3.1.2 長波長域での漂流速度

長波長域では波は浮体により散乱・反射されずほぼ全透過するので、浮体に波漂流力は殆ど働かない。よって波漂流は波による質量輸送に起因するものと考えられる。Stokes波による質量輸送速度 U は波傾斜を $\delta = H_w / \lambda$ として

$$U = c\pi^2\delta^2 e^{2kz}, \quad c^2 = \frac{g}{k} \left(1 + \pi^2\delta^2 + \frac{1}{2}\pi^4\delta^4 \right) \quad (4)$$

で与えられる¹⁾。ここで $k \equiv 2\pi/\lambda$ は波数、 c はStokes波の位相速度で、この高次項を省略して U をフルード数で表すと

$$\frac{U}{\sqrt{Dg}} = \frac{\pi^2\delta^2 e^{2kz}}{\sqrt{kD}} \quad (5)$$

となる。 U は深さ方向に e^{2kz} で急激に減少するため、自由表面近傍に限定された流れである。浮体の漂流速度 V は波による質量輸送速度 U を浮体の水面下の投影面で積分して求めた平均速度で近似できると仮定すると、

$$\frac{V}{\sqrt{Dg}} = \frac{\pi^2\delta^2}{B\sqrt{kD}} \int_B e^{2kz} dB = b\delta^2 \quad (6)$$

で与えられる。本報では右辺の δ^2 にかかる係数 $b = \pi^2 / B\sqrt{kD} \int_B e^{2kz} dB$ を二次の漂流速度係数とよぶ。図6に球形ブイの二次の漂流速度係数の推定値を実験計測値と比較して示す。推定値は実験結果を良く説明している。

3.1.3 全波長域での漂流速度

全波長域で成り立つ波による漂流速度の推定式は、短波長域と長波長域の漂流速度成分を足し合わせて概ね次式で与えられると考える。

$$\frac{V}{\sqrt{Dg}} = a\delta + b\delta^2 \quad (7)$$

図7に本式による推定値を計測値と比較して示す。本図の縦軸は漂流速度、横軸は波傾斜である。中間波長域での推定精度が良くない箇所もあるが、全体としては推定値の間に収

まっております、波による漂流速度の推定式として利用可能であると考えられる。中間波長域での精度が低い原因として、単に(3)式と(6)式の和で(7)式を与えていることが上げられる。 $\pi D/\lambda$ の関数としての重み関数を導入し、重み付きの和として実験値と一致するように調節することは可能であるが、球形ブイの漂流実験結果に合うように調節しても一般性があるとは限らないため、本報では(7)式を示すにとどめる。

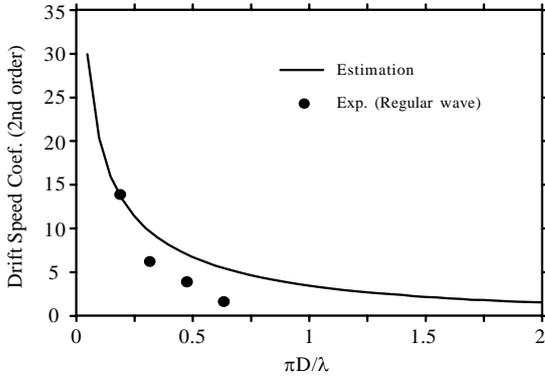


図6 二次の波漂流力係数
(球形漂流ブイ：直径D)

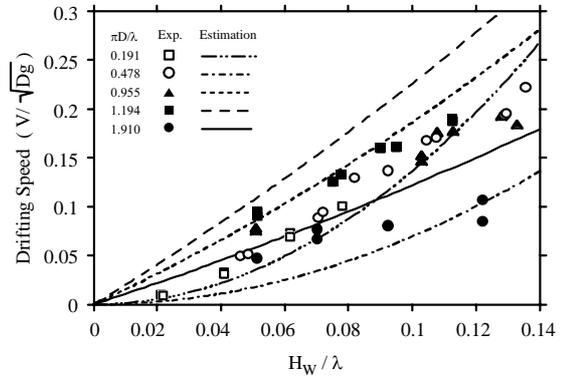


図7 漂流速度の推定値
(球形漂流ブイ：直径D)

3.1.4 不規則波中での漂流速度

本研究では不規則波中での漂流速度についても検討した。不規則波中での漂流速度の計測結果を図4と図5に白抜き四角形で示す。不規則波中での漂流速度のプロットに際しては、平均波高と目視波長を用いて波傾斜を計算した。この図から不規則波であっても平均波高と目視波長を用いて規則波中での漂流速度と対応させると良い一致を示すことが分かる。よって、不規則波中での漂流速度を推定にも規則波中での推定法を用いることが可能であると考えられる。

3.2 浮体の漂流経路予測

3.2.1 漂流経路予測の現状

海上保安庁海洋情報部では漂流経路予測を業務として実施している。漂流予測にとって最も基本的な情報は漂流現場の海流と潮流の速度である。漂流物は主に海流や潮流により流される。風や波による漂流速度は海流や潮流の速度より小さい。海洋情報部で開発・運用されている漂流経路予測プログラムは、警備救難部の救難マニュアル¹⁵⁾に従って作成されたもので、漂流速度成分として以下の3成分が考慮されている。

- ・海潮流による速度成分： $V_s(kt)$

海潮流による速度成分は、海洋情報部にて蓄積されている観測資料と、現場に到着した巡視船のGEK、音波ログ等により与えられる。

- ・風圧による速度成分： $V_e(kt)$

漂流物の水面上の投影面積(A)と水面下の投影面積(B)との比 A/B、ならびに風圧流係数を用いて次式で与えられる。

$$V_e = \begin{pmatrix} 0.0680 \\ 0.0485 \end{pmatrix} \sqrt{\frac{A}{B}} V_w \quad (8)$$

ここで、 V_w は風速(m/sec)、風圧流係数は風圧中心の高い船舶等では 0.068、低い救命艇等では 0.0485 である。漂流方向は風下方向を中心として ± 15 度の偏角を考える。

・吹送流による速度成分： V_c (kt)

吹送流の速さは、現場の緯度・と風速 V_w を元に

$$V_c = 0.0245V_w / \sqrt{\sin \varphi} \quad (9)$$

で与えられる。方向はコリオリ力により風下方向から右に 45 度偏向する。

3.2.2 波による漂流速度の追加

本研究ではこれらの漂流速度成分に波による漂流速度成分を追加した。

・波による漂流速度成分： V_v (kt)

$$V_v = \sqrt{\frac{Dg}{B} \sqrt{\frac{C_w}{C_D}} \frac{H_{1/3}}{1.6} + 2\pi^2 \sqrt{\frac{g}{k} \frac{1-e^{-2kd}}{2kd}} \left(\frac{H_{1/3}}{1.6\lambda}\right)^2} \quad (10)$$

ここで、 d は漂流物体の喫水、 $H_{1/3}$ は有義波高 ($H_{1/3}/1.6$ は平均波高) である。目視観測で波周期 T が分かれば、波長は $\lambda = T^2 g / 2\pi$ で求められる。なお、この式は(7)式で与えた全波長域での漂流速度の推定式をベースに求めた式で、現場での使用を考えて(7)式中の積分を近似式で与え、直接ノット単位の漂流速度を出力するように改めたものである。また、式への入力値も観測者が直接求め安いものに改めた。

3.2.3 漂流予測計算例

図 8 に漂流予測計算例を示す。対象は木材運搬船で、本船は平成 10 年 10 月 24 日 14 時 30 分頃、石垣島北方約 60 海里において航行不能となった。25 日正午から午後 4 時までの 4 時間の漂流予測結果を、実際の漂流経路と比較して示す。25 日正午の時点で真北から時計回りに 135° の方向に 1.4 ノットの海流があり漂流船はこの海流に乗って流されるが、東から西へ 12.3m/s の風があるため、風圧流と吹送流により西へ吹き流されている。海流+風圧流+吹送流の予測結果は、実際の漂流経路に近い経路を示している。一方、風向きと同じ東から西へ伝播する波高 3.3m、波周期 7.5 秒の風浪があるため、波によっても西へ流されるため、海流+風圧流+吹送流+波漂流の予測結果は、実際の漂流経路からかなり外れた方向を与える結果となった。波による漂流速度成分を加えると、残念ながらこの例では予測精度を低下させる結果になった。

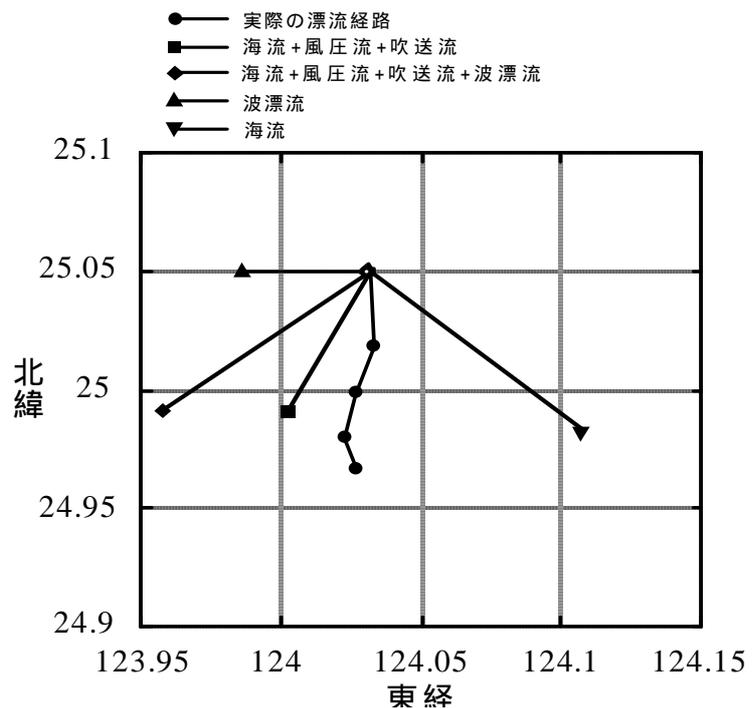


図 8 漂流予測計算例

3.2.4 考察

本研究で漂流経路予測システムに追加した波による漂流速度の推定式は、水槽実験結果をよく説明できる式であり、理論的にも妥当なものであると考える。しかし、今回示した漂流予測例では、実際の漂流経路からかえって外れる結果となった。この原因は今後海洋情報部と共同で解明する必要があるが、現時点では次のような問題があると考えられる。

現在の漂流経路予測システムは、波による漂流速度を陽に考慮せずに風による修正だけで観測結果と合うように調節しているため、風圧流や吹送流成分に波漂流成分が経験則として陰に含まれていると思われる。しかしこの方法では、風向と波向が異なる場合や微風でうねりが卓越した海象下で波漂流成分を正しく推定できない。そこで、より合理的な予測手法を開発するには風圧流や吹送流の成分から波による成分を分離し、成分毎に精度の高い推定式を再構築する必要がある。また吹送流の成分については、それが自由表面の表層にのみ存在することを勘案し、航行不能船舶等の喫水の深い巨大な浮体に対する適用方法を再検討する必要がある。

4.まとめ

最適曳航支援システムは平成14年度に完成したが、今後は本システムを海上保安庁、民間のサルヴェージ会社等の協力を得て実際の曳航現場で適用し、その運用評価をすることが重要となる。評価と同時に曳航を実施した際のデータが上がるので、それを蓄積することにより曳航データベースが構築できる。そのためのプログラム整備も同時に進める予定である。

さらに、運用評価によりプログラムが改善でき、実用化できればインターネットを利用した曳航データ管理システムも検討したい(図9参照)。

また、漂流経路予測法に関する問題点を解決するには、予測システム全体の再調節が必要になり、大幅な見直しが求められる。見直しには海上保安庁警備救難部の救難マニュアルの改訂作業も伴うため容易ではないが、海洋情報部では2004年度に大規模な漂流経路予測システムの更新を計画しているとの事で、海上技術安全研究所でもこの更新に技術情報の提供や、水槽試験データの提供を通じて協力する計画である。

謝辞

本研究では、海上保安庁、大学、日本サルヴェージ(株)、東京製綱ロープ(株)、東京製綱繊維ロープ(株)によって構成される曳航技術研究委員会を設置し、曳航技術および漂流

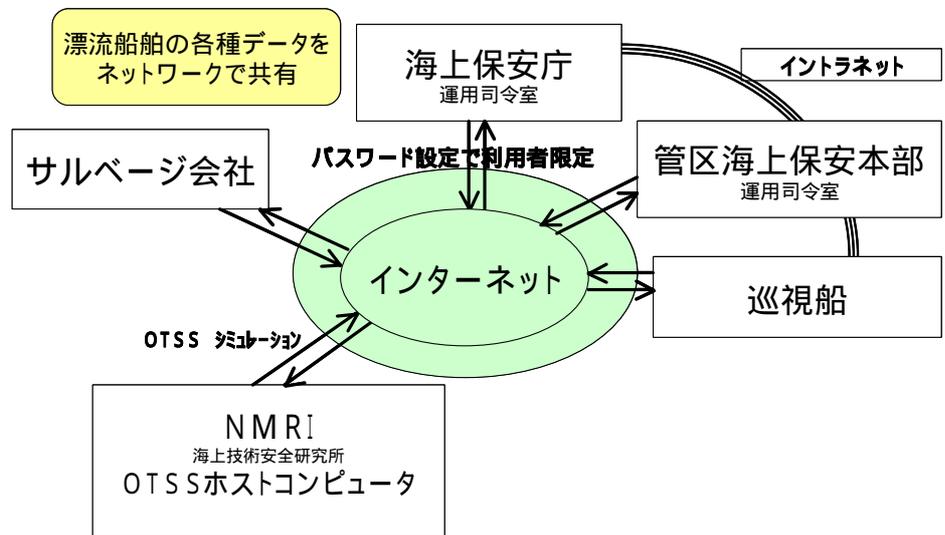


図9 最適曳航支援システムの将来構想

予測等に関する貴重なご意見をいただき、研究を進捗させるために多大なご協力を賜りました。また、大阪大学内藤林教授、九州大学貴島勝郎教授、海上保安大学校道本順一教授には、専門分野で貴重なご意見を賜りました。ここに、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kinsman, B.: Wind Waves, Dover Books on Earth and Science, (1965)
- 2) 湯浅肇、3D-WEB とエンジニアリングへのインパクト、日本造船学会誌、第 871 号、平成 15 年 1 月
- 3) 原正一、荒天下における航行不能船舶の漂流防等に関する研究概要（最適曳航支援システムについて）、第 74 回船舶技術研究所研究発表会講演集、平成 12 年 6 月
- 4) 原正一、最適曳航支援システム（その 1 . 損傷船舶の最終姿勢）、第 1 回海上技術安全研究所発表会講演集、平成 13 年 6 月
- 5) 原正一、星野邦弘、湯川和浩、山川賢次、最適曳航支援システムの開発（その 2 ）、第 2 回海上技術安全研究所発表会講演集、平成 14 年 6 月
- 6) 上野道雄、二村正、宮崎英樹、航行不能船舶の定常漂流運動について、日本造船学会論文集、第 192 号、平成 14 年 12 月
- 7) 湯川和浩、星野邦弘、原正一、山川賢次、荒天下における折損タンカーの曳航について、日本造船学会論文集、第 191 号、平成 14 年 6 月
- 8) 谷澤克治、南真紀子、井本泰司：波による浮体の漂流速度について、船論、第 190 号、(2002)
- 9) Tanizawa, K. and Minami, M., : On the drifting speed of floating bodies in waves, Proc. 12th ISOPE Conf. (2002)
- 10) 谷澤克治、南真紀子：非線形シミュレーションによる波漂流力の推定、第 72 回船研研究発表会講演集、(1998)
- 11) Tanizawa, K., Minami, M. and Naito, S. : Estimation of wave drift force by numerical wave tank, Proc. 9th ISOPE Conf., vol.3, Brest, (1999)
- 12) Tanizawa, K., Minami, M. and Naito, S. : Estimation of wave drift force by numerical wave tank, 2nd Report, Proc. 10th ISOPE Conf., vol.3, Seattle, (2000)
- 13) 谷澤克治、南真紀子、沢田博史：波漂流力に及ぼす水底段差の影響について、船論、第 187 号、(2000)
- 14) 星野邦弘：浮体式海洋構造物に働く粘性流体力の推定法に関する研究、学位論文、九州大学、(1997)
- 15) 海上保安庁警備救難部救難課：救難マニュアル、第 2 編執務・運用、pp331-366