

平成11年度  
船舶から発生するCO<sub>2</sub>の抑制に関する  
調査研究報告書

平成12年3月

財団法人シップ・アンド・オーシャン財団

## はじめに

本報告は、競艇公益資金による日本財団の平成 11 年度補助事業として実施した「船舶から発生する CO<sub>2</sub> の抑制に関する調査研究」の成果をとりまとめたものであります。

1997 年 12 月に開催されました地球温暖化防止京都会議(COP3)以降、気候変動枠組条約(UNFCCC; United Nation Framework Convention on Climate Change)の締結国会議において、外航船舶からの CO<sub>2</sub> など地球温暖化ガスの排出量の実態把握とその対策が、国際海事機関(IMO)に求められております。これを受けて、IMO では本年度より海洋環境保護委員会(MEPC)において本格的な地球温暖化ガスの調査検討を始めております。

そこで、本事業ではこれらの動向を踏まえ、外航船舶の規模別、船種別の CO<sub>2</sub> 発生量を調査するとともに、外航船舶単体における機関の熱効率や船体の推進効率の向上といったハード面と、外航海運の運航速度やウェザー・ルーティング(気象・海象に対応する最適航路の選定法)といったソフト面の両方から、将来的な CO<sub>2</sub> 削減対策を調査いたしました。

この調査は、芝浦工業大学 平田 賢 教授を委員長とする「船舶から発生する CO<sub>2</sub> の抑制に関する調査研究委員会」各委員の熱心なご審議とご指導、運輸省のご支援、並びに関係各位の多大なるご協力により実施されたものであり、ここに厚くお礼申し上げる次第であります。

本報告書が広く皆様に活用され、地球温暖化物質排出量の削減に役立てていただき、地球環境保全に貢献できることを期待いたしております。

平成 12 年 3 月

財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団  
会 長 今 市 憲 作

# 船舶から発生するCO<sub>2</sub>の抑制に関する調査研究委員会

## 委員名簿 (順不同、敬称略)

委員長	平田 賢	芝浦工業大学 システム工学部 機械制御システム学科 教授
委員	加藤 洋治	東洋大学 工学部 機械工学科 教授
委員	今津 隼馬	東京商船大学 情報システム設計工学講座 教授
委員	西川 栄一	神戸商船大学 商船学部 機関システム工学講座 教授
委員	佐倉 統	横浜国立大学 経営学部 人間行動科学研究室 助教授
委員	波江 貞弘	運輸省 船舶技術研究所 機関動力部 部長
委員	勝原 光治郎	運輸省 船舶技術研究所 システム技術部 システム解析研究室 室長
委員	岡 實	(財)日本海事協会 常務理事
委員	羽田 知所	(社)日本船主協会 新造船幹事会 幹事長 (株)商船三井 技術部 技術部長
オブザーバ	越智 秀信	運輸省 運輸政策局 環境・海洋課 海洋室長
"	渡田 滋彦	運輸省 運輸政策局 環境・海洋課 海洋室 補佐官
"	麻岡 秀行	運輸省 運輸政策局 環境・海洋課 海洋室 専門官
"	門真 和人	運輸省 運輸政策局 環境・海洋課 海洋室 海洋第二係長
"	田淵 一浩	運輸省 海上技術安全局 船用工業課 専門官
"	足利 雄一	運輸省 海上技術安全局 船用工業課 計画係長
"	大嶋 孝友	運輸省 海上技術安全局 安全基準課 専門官
"	田中 誠	運輸省 海上交通局 外航課 第二国際係長
"	鈴木 敦士	運輸省 海上交通局 外航課 第二国際係
関係者	岸本 幸雄	日本エヌ・ユー・エス株式会社 環境事業統括本部 第二事業部 環境リスク評価グループ リーダー
"	華山 伸一	同上 環境事業統括本部 第二事業部
"	山城 勇人	同上 環境事業統括本部 第二事業部
事務局	福井 義人	同上 業務部長
"	川井 啓裕	同上 海洋環境シンクタンク設置準備室 調査役
"	三木憲次郎	同上 業務部 調査課 課長
"	酒井 英次	同上 業務部 調査課 係員

# 目 次

1 調査の概要	1
1.1 調査の目的	1
1.2 調査の経過	1
1.3 調査の内容	2
1.3.1 船舶からの CO <sub>2</sub> 排出量に関する調査	2
(1) CO <sub>2</sub> 排出量算定方法についての調査	2
(2) アンケート調査	2
(3) 船種ごとおよび運航形態毎の CO <sub>2</sub> 排出量の算定	2
1.3.2 船舶単体の改善策に関する調査	3
1.3.3 運航の改善策に関する調査	3
1.3.4 対策の導入方法の検討	3
(1) CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションに関する検討	3
(2) CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制に関する検討	3
1.4 調査結果の概要	4
1.4.1 船舶からの CO <sub>2</sub> 排出量に関する調査	4
(1) CO <sub>2</sub> 排出量算定方法についての調査	4
(2) アンケート調査	4
(3) 船種ごとおよび運航形態毎の CO <sub>2</sub> 排出量の算定	4
1.4.2 船舶単体の改善策に関する調査	4
1.4.3 運航の改善策に関する調査	5
1.4.4 対策の導入方法の検討	5
(1) CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションに関する検討	5
(2) CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制に関する検討	5

2 調査の考え方	6
3 調査の内容	7
3.1 船舶からの CO <sub>2</sub> 排出量に関する調査	7
3.1.1 CO <sub>2</sub> 排出量算定方法についての調査	7
(1) 燃料消費量などによるマクロな CO <sub>2</sub> 発生量	7
(2) CO <sub>2</sub> 排出量算定方法	9
(3) 船種船型ごとの運航量の推定方法	11
3.1.2 燃料消費率に関する調査	22
(1) タンカーにおける燃料消費量に関する調査	22
(2) コンテナ船の燃料消費量に関する調査	27
(3) 他の船種の燃料消費量に関する調査	28
3.1.3 船種ごとの燃料消費量に関する調査	30
(1) タンカーの燃料消費量	30
(2) コンテナ船の燃料消費量	31
(3) 他の船種の燃料消費量	31
3.2 船舶単体の改善策に関する調査	34
3.2.1 主機関熱効率の改善策	34
3.2.2 船体側(船型および推進機)による改善策	37
3.2.3 今後有効と考えられる燃料消費量削減技術	39
3.3 運航の改善策に関する調査	43
3.3.1 減速航行(SLOW STEAMING)に関する調査	43
3.3.2 ウェザールーティングに関する調査	44
(1) WRS の概要	44
(2) WRS の利用状況	45
(3) WRS による航行日数の削減効果	45

(4) 波浪予測の将来的な予報可能期間	46
(5) CO <sub>2</sub> 削減オプションとしてのWRS	48
3.4 対策の導入方法の検討	49
3.4.1 CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションに関する検討	49
(1) 運航量の将来予測	49
(2) 減速航行時の将来予測	53
3.4.2 CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制に関する検討	55
4 調査まとめ	57
4.1 調査結果の総括	57
4.1.1 燃料消費量の計算	57
4.1.2 船舶単体の改善策	57
4.1.3 運航による改善策	57
4.1.4 対策導入方法の検討	58
4.1.5 CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制	59
4.2 問題点および今後の課題	59
(1) 燃料消費量の計算	59
(2) 船舶単体の改善策	59
(3) 運航による改善策	60
(4) CO <sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制	60
(5) 対策導入方法の検討	60
(6) 他の温室効果ガス	60
5 参考資料	61
5.1 船舶から発生するCO <sub>2</sub> 以外の温室効果ガスについて	61
5.2 日本国内における船舶CO <sub>2</sub> 発生量	62

5.3 WR が燃料消費量の削減に及ぼす効果について	63
5.3.1 ウェザー・ルーティング・サービスの概要	63
(1) ウェザー・ルーティング・サービスの変遷	63
(2) ウェザー・ルーティング・サービスの実際	64
(3) ウェザー・ルーティングに利用する資料について	70
(4) 推薦航路の選定とこれに関するコンピューター・プログラム	73
(5) ウェザー・ルーティング・サービスの利用状況	81
5.3.2 波浪予報の現状	83
(1) 波浪予測業務の変遷	83
(2) データの収集	85
(3) 現在の波浪解析・予想システムの概要	86
(4) 数値波浪モデルの精度の推移	90
(5) 数値波浪モデルの改良と次世代モデルの開発	92
5.3.3 ウェザー・ルーティングの効果の推移	94
(1) ウェザー・ルーティングの結果の評価手法	94
(2) ウェザー・ルーティング・サービスの効果の推移	94

# 1 調査の概要

## 1.1 調査の目的

IMO(国際海事機関)は、地球環境問題に関心を持ち続けており、大気汚染物質についてもNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、フロン・ハロンなどについて、MARPOL 73/78の新附属書の作成により迅速な対応を取ってきたことは記憶に新しいところである。同時に、同附属書の中でもCO<sub>2</sub>などの地球温暖化ガスの増加を極力招かないように留意するなど、地球環境に対する配慮を強めている。

一方、京都で開催されたCOP3以降、気候変動枠組条約(UNFCCC; United Nation Framework Convention on Climate Change)の締結国会議席上においては、外航船からのCO<sub>2</sub>排出量の実態把握とその対策がIMOに求められている。同枠組み条約内では、外航船からのCO<sub>2</sub>排出量は、各締結国および非締結国の国別排出量にカウントされていない。そのため、バンカーオイル使用分に関する排出削減量の割り当てはもちろん、現状把握も充分に行われていない状況にある。このため、UNFCCCはIMOに対し、世界レベルでの外航運航に起因する地球温暖化ガス排出量の把握および対策を行うように求めている。これを受けて、本年度よりMEPCにおいても本格的な地球温暖化ガスの調査検討が始まったところである。

これらの動向に対応するためには、機関単体の熱効率の上昇や推進効率の向上といったハード面でのこれまで以上の改善はもちろんのこと、運航形態や平均積み荷率の上昇など、ソフト面も含めてのCO<sub>2</sub>削減対策に繋がる中長期的な技術開発を行う必要がある。本事業では、船舶の規模別、船種別のCO<sub>2</sub>発生量を把握するとともに、その削減策についてリストアップを行い、将来的な削減可能量を算定するものである。

## 1.2 調査の経過

本年度事業の経過は以下の通りである。

平成 11 年	8 月 2 日	第一回委員会開催
	9 月 7 日	海事産業研究所へ船舶明細書について聞き取り
	10 月 26 日	三菱重工神戸造船所高石氏へ聞き取り調査
	11 月 22 日	船用工業会、日本造船工業会へ聞き取り調査
	11 月 24 日	日本造船技術センターへ聞き取り調査
	12 月 13 日	第二回委員会
平成 12 年	2 月 29 日	第三回委員会

### 1.3 調査の内容

本調査では外航船からのCO<sub>2</sub>発生量を取り扱い、内航船舶、港湾内の荷役用船舶、漁船、港湾荷役機械からの発生量は取り扱わないものとした。これらの排出量については、UNFCCCを批准している日本国政府としての削減目標があり、目標に対しての削減策についても総合的に検討されているためである。

なお、COP3においては、地球温暖化物質としてCO<sub>2</sub>に、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>の5物質を加えた合計6物質についての削減目標を設定している。このうち、外航船舶の運航に起因する要素として、CH<sub>4</sub>については、低負荷時における機関からの排出および原油タンカーからの蒸散量が、HFCについては冷蔵コンテナの冷媒として用いられる代替フロンからのリーク分が、相当量あることが予想される。しかし、本調査ではCO<sub>2</sub>排出量およびその削減対策を主として取り扱うものとした。

#### 1.3.1 船舶からのCO<sub>2</sub>排出量に関する調査

##### (1) CO<sub>2</sub>排出量算定方法についての調査

世界全体からのCO<sub>2</sub>排出量は、バンカーオイルの積み出し量より機械的に計算されるが、積み出し地と実際に消費される航路が必ずしも一致しないため、地域毎の排出量あるいは船種ごとの消費割合は、把握できない。地域毎・船種毎の燃料消費量の算定方法について検討を行い、荷動き量から推定する方法を中心に必要なパラメータおよび文献値などについて整理を行い、これらの算出方法の精度について検討を行った。

##### (2) アンケート調査

(1)で考えられるように、地域毎あるいは船種ごとのCO<sub>2</sub>発生量を算定するためには、運航量当たりの燃料消費量を正確に推定することが、数値の精度を高めることになる。

本年度は、日本船舶明細書に記載の燃料消費量を網羅的に調査し、燃料消費量のカタログ値が過去10年間に推移したか、船種、船型ごとに整理した。また、日本船主協会などにオペレーションのモデル化などについて聞き取り調査を行い、世界で一律の運航モデルの構築を行った。

##### (3) 船種ごとおよび運航形態毎のCO<sub>2</sub>排出量の算定

(1)の算定方法に基づき、(2)のアンケート結果や統計資料を用いることで、船種および運航形態毎のCO<sub>2</sub>排出量について試算を行う。試算においては、日本支配下船隊の船舶名称などから、船型、機関の型式、年式、船齢、などによるクラスごとに、船舶明細書に記載の燃料消費量、積載重量などから算出されるカタログ上の燃料消費量より算出される仮想的

な燃料消費量を設定した。

### 1.3.2 船舶単体の改善策に関する調査

船舶のハード面での効率化について、船型の改善、機関効率の改善、燃料転換などの技術について、既存文献、日本造船工業会・学識経験者への聞き取り、などよりリストアップを行い、その低減効果について、検討を行った。

リストアップにおいては、船型の改善など技術的には短期的に実施が可能なアイテムと、A重油やLNGなどへの燃料転換など技術的にも長期的なアイテムに大別した。

短期的なものについては、削減効果のおおよその定量化とコストの問題などについて検討を行い、長期的なアイテムについては、CO<sub>2</sub>削減可能量など技術的な限界を中心に整理を行った。

### 1.3.3 運航の改善策に関する調査

船舶の運航面での効率化について既存文献などよりリストアップを行い、その低減効果について検討を行った。最も有効でコストエフェクティブと考えられる減速運転については、顧客のスピードについてのニーズについて、荷種別の傾向を把握する。また、ウェザールーティングの一層の徹底や改良の余地などについて、聞き取りにより情報を収集した。

長期的な対策として、航空機貨物の海運へのモーダルシフトなどもあげられるが、本年度は扱わなかった。

### 1.3.4 対策の導入方法の検討

#### (1) CO<sub>2</sub>排出量低減オプションに関する検討

1.3.1 で計算されたCO<sub>2</sub>排出量および1.3.2、1.3.3により抽出されたCO<sub>2</sub>低減対策オプションを組み合わせ、低減効果についておおよその定量化を行った。

#### (2) CO<sub>2</sub>排出量低減オプションの実施体制に関する検討

陸上での運輸部門におけるCO<sub>2</sub>税導入など政策的なインセンティブに関する情報および、AIJ (共同実施活動 Activities Implemented Jointly)およびCDM (Clean Development Mechanism)を、便宜船籍国などと実施する可能性などについても、COP4、COP5の動向を把握することで、整理した。

## 1.4 調査結果の概要

### 1.4.1 船舶からの CO<sub>2</sub> 排出量に関する調査

#### (1) CO<sub>2</sub> 排出量算定方法についての調査

統計値よりバンカーオイルの年間消費量を  $131.8 \times 10^6 \text{t/y}$  (CO<sub>2</sub> 発生量に換算すると、 $3.95 \times 10^8 \text{t/y}$ ) と推定された。また、世界のトンマイル輸送実績を、船型船齢ごとの運航速度を設定することで、カテゴリーごとに割り振った。

#### (2) アンケート調査

船舶明細書に記載された燃料消費量に、実航行速度、荷物積載率および機関単体の経年劣化を見込んだモデルを聞き取り調査などにより作成し、両者の組み合わせから船種船型船齢ごとにトンマイル輸送量あたりの燃料消費量を算定した。1970年代に製造された船舶と1990年代の同船型の船舶をトンマイル当たりの燃料消費量で比較すると、後者が70～80%程度低燃費であると評価された。

#### (3) 船種ごとおよび運航形態毎の CO<sub>2</sub> 排出量の算定

年間の燃料消費量に各船種が占める割合は、タンカーで31%、バルカーで29%、コンテナで33%と推測された。ただし、コンテナに関しては運航実態に不明の点が多く、他の船種に比べて誤差が大きいものと考えられた。

全船舶を積上げた上記の燃料消費量計算結果は、前述の年間燃料消費量統計値と概ね等しいものであった。

### 1.4.2 船舶単体の改善策に関する調査

機関単体の熱効率は1990年代までに20%程度向上したが、ここ数年は横ばいであった。今後、燃料噴射の電子化などにより2サイクルで4～6%、4サイクルで4～8%向上する可能性があるが、熱効率の向上とNO<sub>x</sub>の排出量はトレードオフの関係にあることに留意する必要があるものと考えられた。一方、船型の改良により、過去20年程度の間エネルギー消費原単位は15%程度向上した。今後も船型の改良で最大5%程度向上する可能性がある。

技術的に将来有効と考えられるものには、PBCF、二重反転プロペラ、船底塗料(ただし有機スズ系を除く)など、既に一部実用化されているものもあるが、広範な普及にはコスト面での問題が残されている。

#### 1.4.3 運航の改善策に関する調査

運航面における改善策として、減速航行とウェザー・ルーティング・サービス(WRS)に着目した。

運航速度を10%下げた場合、同じ距離を輸送した場合の運航時間の増加を差し引いても燃料消費量は10~20%削減されることが期待される。ただし、減速航行には高速化を望む現在の社会ニーズには必ずしもそぐわないという面がある。

WRSによる航行時間の短縮効果は、例えば北太平洋航路(速い船で横断に10日を要する)において1航海当り5~10%と推測された。今後、利用可能な観測データの量・質の向上が見込まれており、これに伴う予報可能期間の延長によりWRSの効果の向上と普及が期待できる。

#### 1.4.4 対策の導入方法の検討

##### (1) CO<sub>2</sub>排出量低減オプションに関する検討

各船種について運航量の経時的変化から、運航量の将来予測を行い、それに基づく年間の総燃料消費量を推定した。

運航量の増加を考慮しない場合、高船齢船の更新により年間燃料消費量は微減と推定された。運航量の増加を見込んだ場合には、高船齢船の更新の効果があったとしても年間燃料消費量は横ばいもしくは微増傾向になると予測された。高船齢船の更新と同時に10~20%の減速航行を想定した場合には、年間燃料消費量は導入直後に著しく低下し、以後微減と推定された。

##### (2) CO<sub>2</sub>排出量低減オプションの実施体制に関する検討

陸上排出源についてはCOPにおいて、炭素税、排出権売買等の政策的オプションについて検討が進んでおり、シカゴやロンドン市場においては自主的にCO<sub>2</sub>排出取引制度を創設する動きがある。国際海上交通についても同様の枠組みを適用することが理論上は可能であり、陸上排出源の取り扱いに関する今後の国際機関の動向について十分注意を払っておく必要がある。

## 2 調査の考え方

調査の考え方について、以下のフロー図に示した。

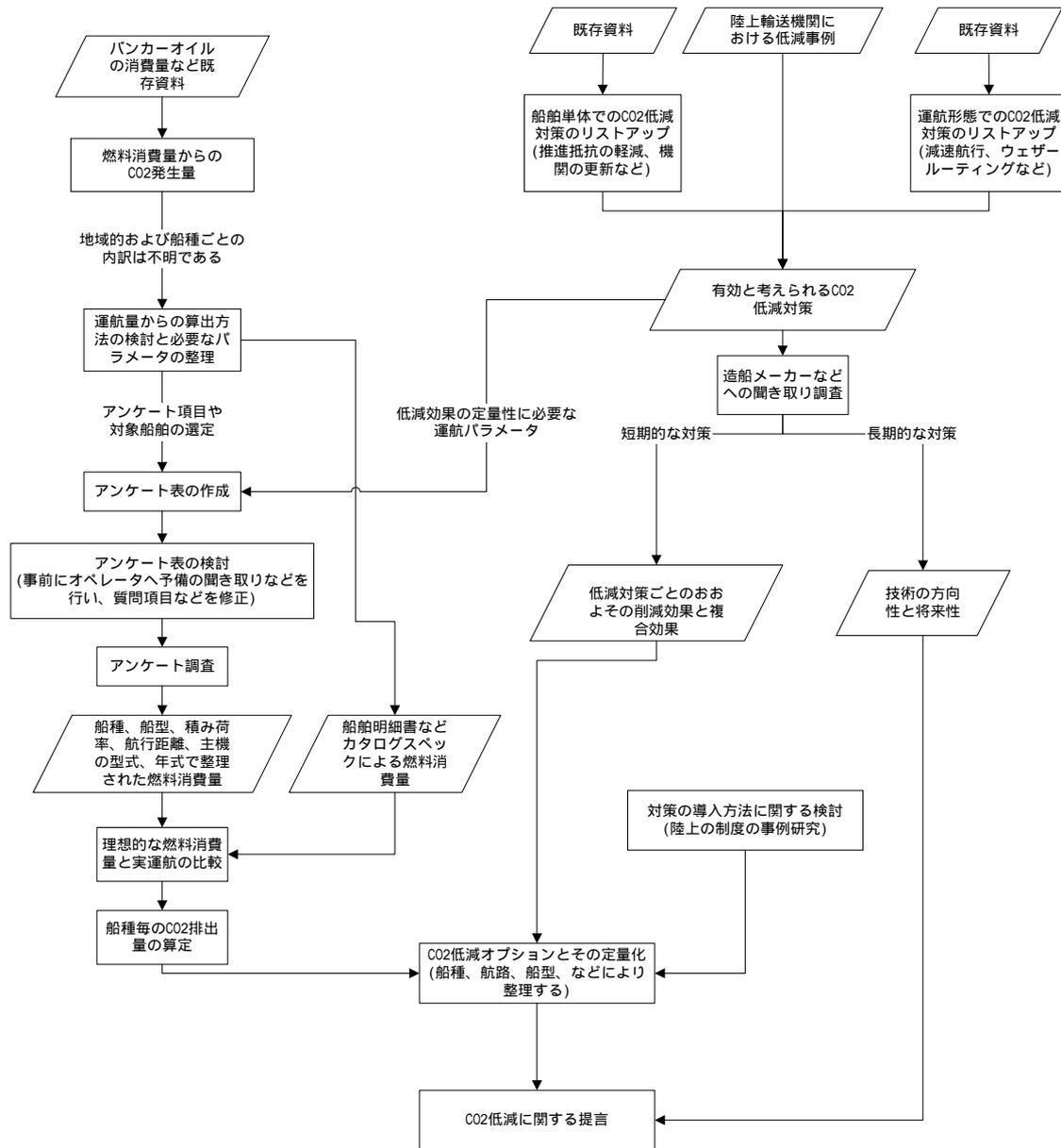


Fig.A 平成 11 年度 船舶から発生する CO<sub>2</sub> の抑制に関する調査研究 実施フロー図

### 3 調査の内容

#### 3.1 船舶からの CO<sub>2</sub> 排出量に関する調査

##### 3.1.1 CO<sub>2</sub> 排出量算定方法についての調査

###### (1) 燃料消費量などによるマクロな CO<sub>2</sub> 発生量

table 1に平成 10 年度 SO 財団調査による船舶からの CO<sub>2</sub> 発生量を示した。統計資料など燃料消費量が把握できるものと、運航実績などから推定したものが含まれる。例えば、世界の内貿は OECD の燃料払い出し量を世界に外挿して計算している。また、漁業、レジャーによる消費量は、使用実態から推定した日本国内における燃料消費量を、使用隻数などを用いて世界における消費量として外挿したものである。

表中には全ての船舶関連の CO<sub>2</sub> 発生量が示されているが、UNFCCC 締結国においては、表中 内貿、漁業、レジャーのカテゴリーで示される排出量は、各政府の CO<sub>2</sub> 削減対象となっており、本調査において対象とするものではない。

table 1 1995 年の船舶からの CO<sub>2</sub> 発生量(10<sup>3</sup>t-CO<sub>2</sub>)

	Gas/Diesel oil	Heavy Fuel Oil	Motor Gasoline	排出量 合計	排出量 割合
内貿	48,136	25,791	17,199	91,127	16%
漁業	34,952	300	4,459	39,711	7%
レジャー	-	-	28,665	28,665	5%
マリンバンカー	88,230	271,673	-	359,904	69%
計	171,318	297,764	50,323	519,407	100%

SO財団1998年調査よりマリンバンカーの値をOECD+非OECD諸国の合計値に修正して作成。

table 2に統計資料によるバンカー払い出し量の違いについて示した。表に示すように統計資料により 2 割近くの差異を生じているが、燃料消費量として 100 × 10<sup>6</sup>t 前半の数値が、世界のバンカー消費量と考えて良いと思われた。本報告書においては、安全側(排出量の多い側)にたち 131.8 × 10<sup>6</sup>t-Fuel(360 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>)を世界のバンカー消費量として考えることとした。

table 2 統計資料によるバンカー燃料消費量の違い(1995 年)

単位 ; 10<sup>6</sup>t

	Gas/Diesel Oil	Heavy Fuel Oil	Motor Gasoline	計
マリンバンカー	30.0	101.8	-	131.8
OECD+非OECD諸国の合計値				
参考値 ; UN資料*にお けるバンカー量(Bunkers)	28.8	90.6	-	119.4

Energy Statistics of OECD Countries 1994-1995 (OECD/IEA,1997) および Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1994-1995(OECD/IEA,1997)より作成。

1996 Energy Statistics Yearbook(UN, 1998)より引用。 Heavy Fuel Oil のバンカー量については UN 資料中の Residual Fuel Oil として区分されているバンカー量を示した。 Gas/Diesel Oil は MDO、 Heavy Fuel Oil は MFO に相当する。

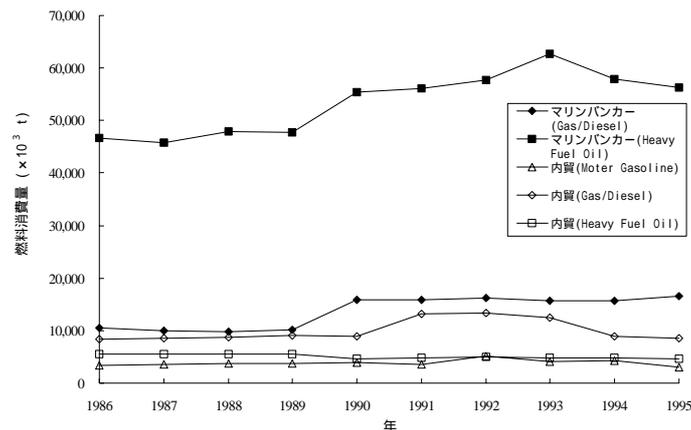
table 2に示した船舶からの排出量と陸上からの排出量の比較をtable 3に示した。全世界の発生量は、オークリッジ研究所の検討値であり、バンカーオイル消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量を含む値である。表に示すとおり船舶由来の発生量は2.2%、うちバンカーオイルは1.5%程度であり、後者はフランス一国から排出されるCO<sub>2</sub>発生量にほぼ相当すると推定された。

table 3 世界におけるCO<sub>2</sub>発生量の比較

		CO <sub>2</sub> 発生量 (10 <sup>3</sup> t)	全世界に 占める割合
全世界		23,503,000	
船舶由来の排出量 (漁業、レジャー、内航海運を含む)		519,407	2.2%
上記のうちバンカー		359,904	1.5%
主な主要国の CO <sub>2</sub> 発生量	米国	5,214,000	22.2%
	日本	1,218,000	5.2%
	スウェーデン	585,000	2.5%
	英国	581,000	2.5%
	カナダ	499,700	2.1%
	フランス	385,000	1.6%

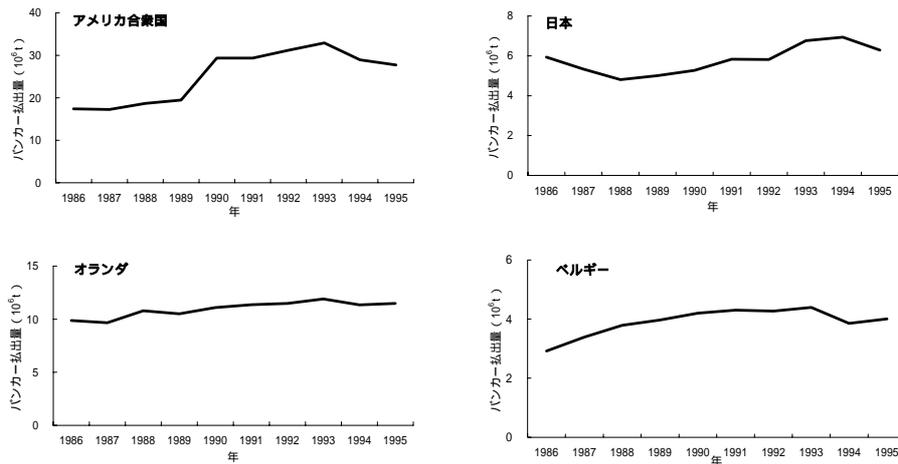
SO 財団平成 11 年調査による、数値は 1995 年のもの、各国の数値は IPCC 提出のもの。  
 全世界の排出量は米国オークリッジ研究所二酸化炭素情報解析センターのもの。

近年のバンカー払い出し量の推移についてFig. 1、Fig. 2、Fig. 3に示した。OECD 諸国からの払い出し量は全体量として微増傾向にあり、同時に日本国からの払い出し量も増加傾向にある。また、Fig. 3の非 OECD 諸国の払い出し量で見ると、シンガポール、UAE など、主要な払い出し国(=UNFCCC 非締結国)で、OECD 諸国全体の伸びを上回る伸びを示していることがわかる。



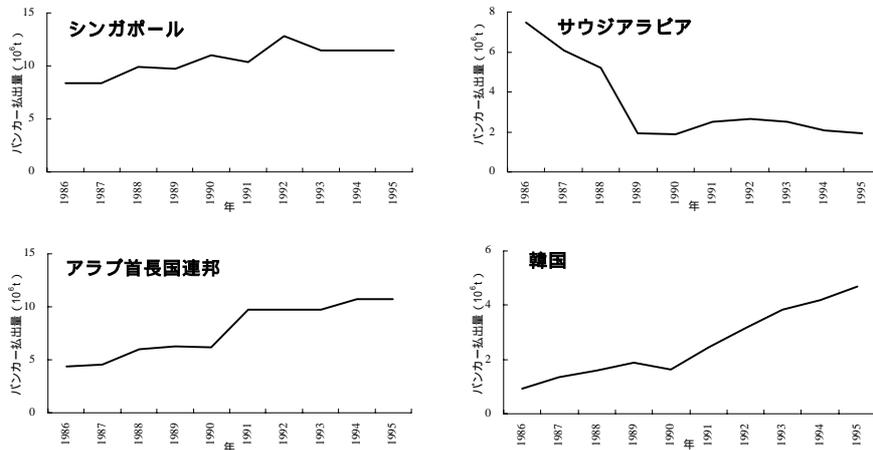
Energy Statistics of OECD Countries(OECD/IEA)より作成

Fig. 1 OECD 諸国における船舶による燃料消費量の年変化



Energy Statistics of OECD Countries(OECD/IEA, 1997)を基に、  
1987-1995 年の払出平均量上位 4 カ国について作成

Fig. 2 OECD 主要各国におけるマリンバンカー払出量の経年変化



Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries  
1994-1995(OECD/IEA,1997)を基に、1987-1995 年の払出平均量上位 4 カ国について  
作成

Fig. 3 非 OECD 主要各国におけるマリンバンカー払出量の経年変化

(2) CO<sub>2</sub> 排出量算定方法

燃料消費量から算定される CO<sub>2</sub> 排出量は、各国からのバンカー払い出し量から計算される。しかし、バンカー払い出し量は、その積み出し地と実際に消費される航路が必ずしも一致しない。そのため、払い出し量より算定される CO<sub>2</sub> 排出量も、地域毎の排出量と必ずしも一致しない。将来において、CO<sub>2</sub> 排出量の評価や管理を行うためには、海域(=航路)別の排出量および船種別の排出割合を、把握する必要がある。現在、貨物の輸出入量は統計値として各国において集計がされており、正確に把握しやすい統計量であることから、地域毎・船種毎の燃料消費量の算定方法についてはFig. 4に示すように実際の運航に基づくトンマイルベースの排出量が有効であると考えた。

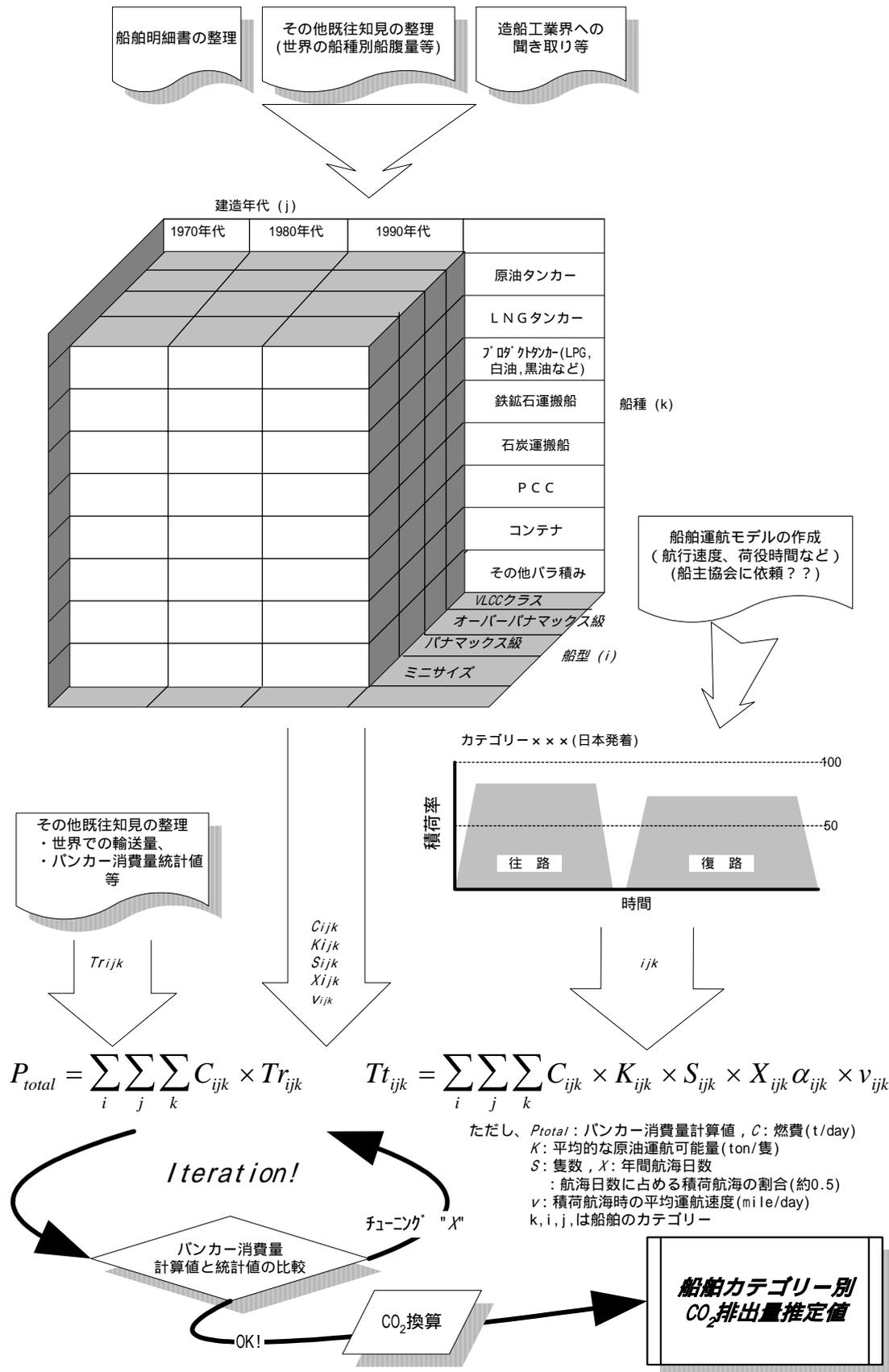


Fig. 4 外航船舶からの二酸化炭素排出量の推定に関する基本的な考え方

(3) 船種船型ごとの運航量の推定方法

table 4に世界の運航量を、荷種毎に輸送トンおよび輸送トンマイルで比較したものを示した。同時にコンテナについても輸送 TEU を示した。1TEU を 23 トンと仮定(平成 10 年における横浜港の実入りコンテナ平均値)すれば、輸送トン数は  $772 \times 10^6$  トンと計算され、全バルク合計の 3 割程度の輸送重量トンと推定される。また、バルクの中では、原油がトンベースとトンマイルベースのいずれにおいても過半数を占めており、燃料消費量としても大きな割合を占める可能性が考えられた。原油輸送における地域間輸送の内訳を見ると、日本着の荷動きが世界全体の 20%弱を占めており、日本向けの荷動きによる排出割合も相応のものがあると推定されることから、原油タンカーについて詳細な検討を行うこととした。

table 4 世界の運航量(TR)の把握(1997 年)

	輸送トン ( $10^6$ トン)	輸送トンマイル ( $10^9$ トンマイル)	平均輸送 距離 ( $10^3$ マイル)
Crude Oil	1,534	7,677	5.00
Other Oil Products	410	2,050	5.00
Iron ore	430	2,444	5.68
Coal	460	2,332	5.07
Grain	203	1,169	5.76
Bauxite and Alumina	54	206	3.81
Phosphate	32	133	4.16
dry Bulk 計	1,179	6,284	5.33
バルク合計	2,713	13,961	5.15
コンテナ (原単位は TEU)	$33,550 \times 10^3$ (1TEU=23t と して 772)		

Fearnleys;世界バルク貨物輸送 1998、運輸省日本海運の現況(平成 11 年版)より

(ア) 原油タンカー運航量および平均運航日数の推定

全世界における総運航量の大きい原油タンカーについて、そのトンマイルベースの運航量を、船型船齢ごとに割り振る方法について考える。原油タンカーは、往航は原油が満載状態で運航を行い、復航は積み荷がないバラスト状態で運航を行うことが一般であり、積み荷率や運航速度などの運航形態が比較的単純なことから、モデル化が容易であると考えられた。

原油タンカーによる地域ごとの年間の輸送総量 TR(ton-mile/year)については、table 4に示すように Fearnley's 海運研究所がまとめた資料がある。しかし、船型クラス毎の内訳や実運航時間については同資料から把握できない。ここでは、以下に示す式により、全てのタンカーがある運航速度下において平均的に運航に従事しているモデルを考えた。

原油タンカーの船型区分を  $i$ 、建造年代を  $j$  とすると、原油タンカーによる年間原油輸送総量  $TR$ (ton-mile/year)は次の式で表現できる。

$$\text{運送総量 } TR = \sum_i \sum_j tr_{ij} \quad \text{ここで } tr_{ij} = K_{ij} \times S_{ij} \times X_{ij} \alpha_{ij} \times v_{ij}$$

ただし、	$tr_{ij}$ :	カテゴリ- $i,j$ の原油輸送量(ton-mile/year)
	$K_{ij}$ :	カテゴリ- $i,j$ の平均的な原油運航可能量(ton/隻)
	$S_{ij}$ :	同 隻数
	$X_{ij}$ :	同 年間航海日数(280 day/year)
	$\alpha_{ij}$ :	同 航海日数に占める積荷航海の割合(約0.5)
	$v_{ij}$ :	同 積荷航海時の平均運航速度(mile/day)

$TR$ 、 $K$ 、 $S$ は前出統計により既知であるが、 $X$ と $v$ には各カテゴリー毎の平均的な運航実態の把握が必要である。これらは運航パターンや稼働率に関わるパラメータであり、本来は各船型あるいは船齢ごとに詳細なデータが得られることが望ましい。しかしながら、現状ではこれらに関する世界的なデータが得られていないことから、 $X$ と $\alpha$ は船型や船齢によらず一定とし、 $v$ については新造時の設計運航速度にシーマージンや経年劣化等を勘案した上で平均的な運航モデルを構築の上仮定した。

table 5に世界に現存するタンカーの船齢・船型分布を示した。320 × 10<sup>3</sup> DWT以上のタンカー(16万総トン数以上のULCC)は、1985年以降建造されていない。一方で、一回り小型の30万重量トン以下のVLCCタンカーが多く建造されている。なお、Jacobs & Patners 刊行のWorld oil Tanker Trendsによれば、1998年末における10,000重量トン以上の商用タンカー(プロダクト、ガスタンカーも含む)隻数は3,367隻となっており、世界で稼働中の石油タンカーは3,000隻弱と考えられる。

各タンカーが輸送可能な原油量はtable 6に示すように推定した。ここでは、各カテゴリーにおける平均DWTより、バラスト水、輸送のための燃料の割合など荷物以外の積載量や荷役のために必要な日数などを考慮し、10万DWT以上の大型タンカーでは9割、それ以下の中小型タンカーでは8割を油槽の大きさ(輸送可能量)と仮定した。

table 5 TANKER SIZE AND AGE DISTRIBUTION.

(世界に現存するタンカーの船型・船齢構成)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 3	1994 ~ 98	TOTAL
10-25	185	82	48	21	34	371
25-50	303	146	145	127	157	878
50-80	61	120	58	40	10	289
80-100	104	89	65	99	53	410
100-120	13	8	17	26	50	114
120-200	117	17	14	83	58	289
200-320	132	9	28	113	91	373
320+	43	9	-	-	-	52
TOTAL	960	479	375	509	453	2,776

DWT 毎の存在隻数は、Fearnley's World Bulk Fleet January 1999 による 備蓄用タンカー一隻数(21 隻)はあらかじめ除外した。「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

table 6 タンカーの平均的な輸送可能量(t-crude oil/隻)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 3	1994 ~ 98
10-25	14,545	14,337	14,167	12,143	12,500
25-50	27,778	30,068	31,655	32,795	34,650
50-80	53,468	51,557	54,224	57,375	59,500
80-100	75,192	73,539	74,538	79,848	80,189
100-120	97,143	95,625	90,000	88,269	90,100
120-200	118,292	127,500	115,357	121,867	123,103
200-320	229,375	226,667	209,464	232,434	247,527
320+	334,457	340,000	-	-	-

10万DWT以上の大型タンカーではDWTの9割、小型タンカーではDWTの8割が油槽の大きさと仮定し、各カテゴリーの平均DWTよりタンカーの平均的な輸送可能量として設定した。「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

タンカー全体での理論上の輸送可能重量トン(油槽の合計トン)は、約  $269 \times 10^6$  トンであり、輸送距離を無視すればtable 4に示した原油輸送総量  $1,534 \times 10^6$  トンを、各タンカーが平均 5.7 航海/年で運んでいることになる。輸送距離についても考慮し、各カテゴリーの運航速度をtable 7と仮定し、全てのタンカーが一律に原油輸送に携わった場合の輸送トンマイルの内訳は、table 8に示すとおりである。トンマイルベースの輸送量で見た場合、船齢別には 1978 年までに建造された旧型タンカーが、船型別には、20 万 ~ 32 万 DWT の VLCC タンカーが輸送量のうち大きな割合を占めていることがわかる。

往航、復航を合計した年間の航海日数は 205 日と推定されているが、次節で述べるように、特に小型タンカーについては、内航や重油など他の石油製品輸送に従事している可能性がある。

table 7 タンカーの平均的な航行速度(knt)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98
10-25	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
25-50	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
50-80	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
80-100	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
100-120	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
120-200	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
200-320	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
320+	13.5	13.5	-	-	-

船舶明細書における平均的な巡航速度などから、新造時の航行速度をまず設定した。次に経年変化として、一定の負荷で航行した場合の速度低下を およそ5%/10年として設定を行った。「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

table 8 原油タンカーの船型・船齢別運航量の推定値

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	10 <sup>9</sup> Tonmile /year					
	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	TOTAL
10-25	70	31	20	8	15	144
25-50	219	115	133	132	188	787
50-80	85	163	91	73	21	432
80-100	250	211	164	289	168	1,081
100-120	41	24	52	84	178	378
120-200	440	72	55	370	281	1,218
200-320	968	64	198	961	888	3,079
320+	464	93	0	0	0	558
TOTAL	2,538	773	712	1,917	1,737	7,677

運航量総量はFearnleys World Bulk Fleet January 1999による。

平均航行日数は、205日。「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

#### (イ) 他の石油製品の運航量および平均運航日数の推定

table 8に示した運送実績(TR)には、原油以外の石油製品輸送量および原油の内航輸送量がカウントされていない。実際には、table 9で示すように、他の石油製品の輸送実績および、原油の国内輸送に従事した航海も存在すると考えられる。

今回の試算では、小型タンカーと大型タンカー間、あるいは旧型タンカーと新型タンカーの稼働率あるいは、長距離輸送と短距離輸送への従事割合などについては情報が少なく、VLCCも含めた大型タンカーが他の石油製品の運送に従事したとして参考値として計算を行うと平均71日の年間運航日数が推定される。

仮に前節で述べた原油タンカーの平均運航日数205日に、他の石油製品および表に示す国内輸送を輸送実績に含め、同時に油撤兼用船やLPG、LNG大型タンカーを、石油タンカーに含めた場合、平均運航日数は280

日程度と計算され、ほぼ妥当な値であると考えられた。

table 9 Fearnleys 社の統計対象外の石油製品の運送実績

	運送実績	
	トンマイルベース	トンベース
	10 <sup>9</sup> トンマイル	10 <sup>6</sup> トン
原油 北海周辺	82	103
原油 日本国内	28	26
原油 米国内	78	65
原油 その他	337	96
内航原油移動の小計	525	290
他の石油製品の輸送量	約2,050	410
タンカー輸送量	2,575	700

地域ごとの原油輸送量は輸出入量および地域間移動量と平均運航距離から計算、他の石油製品はFearnleys社Bulk Fleet1999より

table 10 油タンカーによる石油製品の運航量の推定値

(他の石油製品および原油の内航移動による)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	10 <sup>9</sup> Tonmile /year					
	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	TOTAL
10-25	24	10	7	3	5	48
25-50	73	39	45	45	63	264
50-80	29	55	30	24	7	145
80-100	84	71	55	97	56	362
100-120	14	8	18	28	60	127
120-200	148	24	19	124	94	409
200-320	325	22	66	322	298	1,033
320+	156	31	-	-	-	187
TOTAL	851	259	239	643	583	2,575

table 9の輸送量を全て液体タンカーで均一に運搬したと仮定した。原油タンカーの航行日数の上乗せは、71日。

(ウ) コンテナ船運航量および平均運航日数の推定

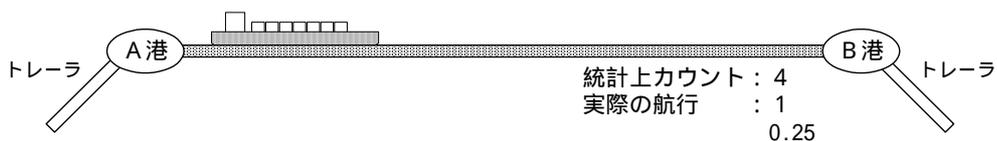
世界におけるコンテナの輸送実績を、table 11に示した。

Containerisation International Year Bookに記載されている年間の取扱TEU量には、内航のコンテナ輸送個数および陸上での輸送個数も含まれている。同資料はコンテナヤードを通過したコンテナ個数を、経路の如何に関わらず2倍して統計値としているためである。

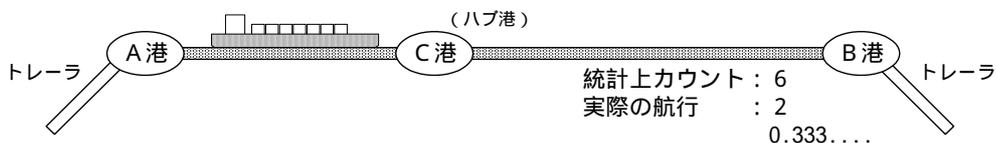
内航コンテナであっても、国際定期航路により運搬されることがオペレーションとして一般であるため、内航コンテナについては外航コンテナ船がバンカーオイルを消費して運搬しているものと仮定して、大きな誤差がないと考えた。

一方、同様の理由により、消費地や生産地など陸地からの運送には、船舶が用いられていない可能性が大きい。また、近年はシンガポールなど、ハブ港においてコンテナの積み替えも増えていることから、本計算ではFig. 5に示すように統計値に0.3を乗じて今後の計算を行った( $163,744 \times 10^3 \text{ TEU} \times 0.3 = 49,123 \times 10^3 \text{ TEU}$ )。この仮定を基に、1997年の船舶による地域間輸送実績を、TEUベースについてはtable 12にTEUマイルベースについてはtable 14に示した(地域間ごとの係数は0.3で一定とし、地域間の平均マイル数を乗じたもの)。いずれも、アジア発着の荷動きおよびアジア域内での荷動きが大きな割合を占めており、シンガポール、香港、高雄などアジア内のハブ港を中心とした動きが多いことがわかる。

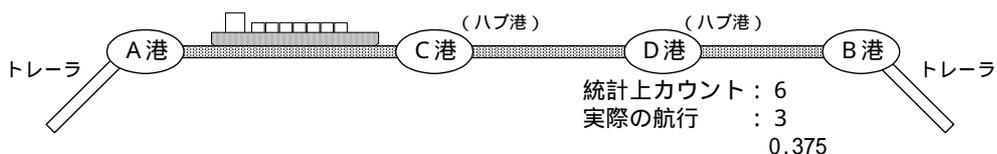
ケース1：寄港地が2個所の場合



ケース2：寄港地が3個所の場合



ケース3：寄港地が4個所の場合



各ケースの割合は不明 平均的な統計値  $\times 0.3 =$  航行回数

Fig. 5 コンテナ船舶の航行回数の考え方

table 11 コンテナ船とコンテナ輸送実績の年代別推移

年	隻数	総コンテナ 積載数	平均コンテナ 積載数	コンテナ取り 扱い実績
		(千 TEU)	TEU/隻	10 <sup>3</sup> teu
1988	2008	1881	937	73,810
1989	2082	1997	959	79,816
1990	2172	2132	982	85,597
1991	2271	2296	1,011	93,646
1992	2382	2500	1,050	102,906
1993	2461	2624	1,066	113,212
1994	2703	2940	1,088	128,320
1995	2738	3160	1,154	137,239
1996	2965	3584	1,209	150,753
1997	3189	3972	1,246	163,744

Containerisation International YearBook,1999 より作成

table 12 コンテナの地域間 TEU 輸送実績(1997 年)

単位:1000 TEU

受入先	輸出元				合計
	北米	欧州	南米	アジア	
北米	0	2,606	1,757	7,321	11,684
欧州	2,196	0	0	4,613	6,809
南米	1,714	0	0	0	1,714
アジア	5,081	3,602	0	0	8,683
小計	8,990	6,209	1,757	11,933	28,889
地域不特定分					
アジア域内					8,917
その他					11,318
総計					49,123

日本海運の現況 平成 11 年版および Containerisation International YearBook より作成。

Table 13 コンテナの地域間 TEU マイルベースの輸送実績(1997 年)

単位 10<sup>6</sup> TEU Mile

受入先	輸出元				合計
	北米	欧州	南米	アジア	
北米	0	11,816	10,466	45,202	67,484
欧州	9,957	0	0	75,798	85,756
南米	10,204	0	0	0	10,204
アジア	31,370	59,195	0	0	90,565
合計	51,532	71,011	10,466	121,000	254,009
地域不特定分					
アジア域内					42,333
その他の域内					55,586
総計					351,927

日本海運の現況 平成 11 年版および Containerisation International YearBook より作成。

table 14に示すように、コンテナ船の船齢・船型別の存在隻数を見ると、タンカーとは異なり、1990年以降も船舶の建造が活発に行われており、かつ大型コンテナの建造も続いていることがわかる。各年代毎の隻数のばらつきも少ない。

Fig. 6にコンテナの建造隻数と建造されたコンテナ船の可能搭載 TEU の合計を示す。近年のコンテナ輸送のニーズに伴い、1990年から建造隻数が大幅に増加していることがわかる。

table 14 1998年11月現在世界に現存するフルコンテナ船の船型・船齢構成

可能搭載量 (TEU/隻)	～1978	1979～83	1984～88	1989～3	1994～98	TOTAL
1000未満	584	352	266	261	251	1,714
1000以上～1999未満	197	153	122	115	202	790
2000以上～2999未満	29	56	57	53	171	366
3000以上～3999未満	5	29	29	37	78	177
4000以上～4499未満	-	-	15	30	41	86
4500以上	-	-	11	32	13	56
TOTAL	815	590	500	528	756	3,189

Containerisation International YearBook,1999より作成

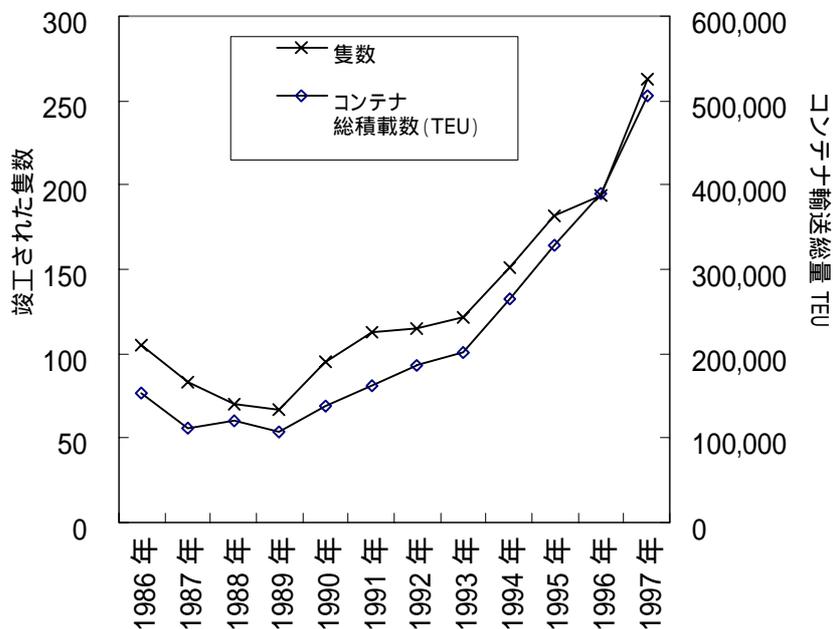


Fig. 6 コンテナ船の建造隻数と総積載コンテナ数の年代別推移  
(左軸が竣工された隻数を示し、右軸がコンテナ輸送総量 TEU を示す)

タンカーで作成したモデルと同様に、コンテナ船の船型区分を  $i$ 、建造年代を  $j$  とすると、コンテナ船による年間輸送総量  $TR$ (TEU-mile/year)は次の式で表現できる。タンカーと異なる点は、バラスト状態での航行を 0 としている点である。

$$\text{輸送総量 } TR = \sum_i \sum_j tr_{ij} \quad \text{ここで } tr_{ij} = K_{ij} \times S_{ij} \times X_{ij} \alpha_{ij} \times v_{ij}$$

ただし、  
 $tr_{ij}$  : カテゴリ- $i,j$ のコンテナ輸送量(TEU-mile/year)  
 $K_{ij}$  : カテゴリ- $i,j$ の平均的なTEU積載能力(TEU/隻)  
 $S_{ij}$  : 同 隻数  
 $X_{ij}$  : 同 年間航海日数(day/year)  
 $\alpha_{ij}$  : 同 航海日数に占める積荷航海の割合(1)  
 $v_{ij}$  : 同 積荷航海時の平均運航速度(mile/day)

平均的な消席率を、アジア-北米-欧州間の 3 大航路において 80%、他の短期航路のもので 60%と仮定し、他の船舶と同様に平均的な年間航海日数を算出した。平均航行日数は、約 251 日/年/隻と推定される。

地域ごとに見ると、大阪商船三井の資料によれば極東-北米航路に就航する定期コンテナ船の隻数および最大積載 TEU は、それぞれ 349 隻、1,075 千 TEU と集計されている。一方、table.13 に示された TEU-mile を運搬するために必要なコンテナ船は、それぞれ 743 隻、865 千 TEU と推計されており、推定はほぼ妥当であると考えられた。

table 15 1 隻あたりの最大輸送可能量(TEU/隻)

可能搭載量(TEU/隻)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 3	1994 ~ 98
1000 未満	432	445	401	414	402
1000 以上 ~ 1999 未満	1,276	1,273	1,376	1,443	1,585
2000 以上 ~ 2999 未満	2,046	2,022	2,286	2,535	2,503
3000 以上 ~ 3999 未満	3,373	3,307	3,253	3,383	3,436
4000 以上 ~ 4499 未満	-	-	4,128	4,204	4,229
4500 以上	-	-	5,694	5,693	5,881

日本船舶明細書より求めた平均のDWTより各カテゴリごとの最大搭載TEUを推定した。「-」はその船型のコンテナが存在しないことを示す。

table 16 コンテナ船の平均的な航行速度(knt)

可能搭載量(TEU/隻)	～ 1978	1979～ 83	1984～ 88	1989～ 3	1994～ 98
1000 未満	21	21	21	21	21
1000 以上～ 1999 未満	21	21	21	21	21
2000 以上～ 2999 未満	21	21	21	21	21
3000 以上～ 3999 未満	21	21	21	21	21
4000 以上～ 4499 未満	-	-	21	21	21
4500 以上	-	-	21	21	21

「-」はその船型のコンテナが存在しないことを示す。船舶明細書に記載の満載時航行速度などより設定。

table 17 コンテナ船の船型・船齢別運航量の推定値

可能搭載量(TEU/隻)	10 <sup>9</sup> TEUmile /year					TOTAL
	～ 1978	1979～ 83	1984～ 88	1989～ 3	1994～ 98	
1000 未満	22,347	13,873	9,468	9,563	8,933	64,184
1000 以上～ 1999 未満	22,284	17,267	14,920	14,769	28,398	97,638
2000 以上～ 2999 未満	5,259	10,038	11,474	11,889	38,031	76,692
3000 以上～ 3999 未満	1,495	8,502	8,217	11,079	23,616	52,909
4000 以上～ 4499 未満	-	-	5,482	11,007	15,545	32,034
4500 以上	-	-	5,566	16,262	6,641	28,470
TOTAL	51,385	49,679	55,129	74,570	121,164	351,927

「-」はその船型のコンテナが存在しないことを示す。平均航行日数は251日。

(エ) バラ積み船運航量および平均運航日数の推定

タンカーやコンテナ船と同様に、鉄鉱石運搬船および石炭運搬船の船型・船齢別の運航量を推定結果をtable 18およびtable 19に示した。鉄鉱石専用船および石炭専用船の正確な隻数および両者の輸送に従事する一般ドライ貨物船の隻数が把握できない。このため、両船種が日本船舶明細書の全ドライバルク貨物船に占める隻数比が世界においても一定であり、平均航行日数は、両者とも 220 日であると仮定した。

また、他の荷種については、上記 2 種の隻数を除いた全ての船舶で平均的に運航するものとした。運航速度については、船舶明細書ではタンカーほど明確な傾向が見られないことから、コンテナ船と同様に、15knt で一定であると仮定した。

table 18 鉄鉱石運搬船の船型・船齢別運航量の推定値

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	10 <sup>9</sup> Tonmile /year					TOTAL
	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	
10-25	88	61	51	45	66	311
25-50	413	284	243	214	309	1,464
50-80	111	77	65	58	83	392
80-100	3	2	2	2	2	12
100-120	10	16	30	32	41	3
120-200	74	50	44	39	56	262
200-300	10	13	12	16	10	26
300以上	-	-	-	-	-	0
TOTAL	690	474	407	357	517	2,444

「-」はその船型の船舶が存在しないことを示す。平均航行日数;220日。

table 19 石炭運搬船の船型・船齢別運航量の推定値

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	10 <sup>9</sup> Tonmile /year					TOTAL
	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	
10-25	84	58	49	43	63	297
25-50	394	271	232	204	295	1,397
50-80	106	73	62	55	79	374
80-100	3	2	2	2	2	11
100-120	1	1	0	0	1	3
120-200	71	48	42	37	53	250
200-300	-	-	-	-	-	0
300以上	-	-	-	-	-	0
TOTAL	658	452	388	341	493	2,332

「-」はその船型の船舶が存在しないことを示す。平均航行日数;220日

table 20 鉄鉱石、石炭以外のドライバルクの船型・船齢別運航量の推定値

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	10 <sup>9</sup> Tonmile /year					TOTAL
	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	
10-25	52	37	31	26	42	193
25-50	256	177	151	130	193	903
50-80	68	47	42	37	52	240
80-100	0	0	1	2	2	5
100-120	0	0	0	0	0	0
120-200	47	31	26	26	37	162
200-300	-	-	-	-	-	0
300以上	-	-	-	-	-	0
TOTAL	428	292	250	219	318	1,508

「-」はその船型の船舶が存在しないことを示す。平均航行日数;165日

### 3.1.2 燃料消費率に関する調査

前節で分解した各カテゴリー(ij)毎に、日当たりの燃料消費率  $C_{ij}$  を推定できれば、平均航行日数と乗じて合計することで、総燃料消費量が算出される。ある速度設定下における各カテゴリーごとの燃料消費量は、平均積み荷率、シーマージンおよび船体および機関の経年劣化などの影響を受けることが予想される。

当初計画では船舶の実燃料消費量については、アンケート調査により実態を把握することを予定していたが、諸般の事情により大規模なアンケート実施は困難であることが判明した。

そこで、船舶明細書に記載の試験航海時の燃料消費量を用いることでまず概算を行い、精度について問題が生じた場合に今後追加調査をおこなうこととした。

#### (1) タンカーにおける燃料消費量に関する調査

船舶明細書に燃料消費量の記載のあるタンカーの数を table 21 に示した。

table 21 燃料消費量を算定したサンプル数

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	TOTAL
10 -25	6	4	0	0	0	10
25 -50	14	8	4	1	1	28
50 -80	14	26	3	2	1	46
80 -100	18	24	2	2	1	47
100 -120	4	8	0	0	1	13
120 -200	22	3	0	0	0	25
200 -320	14	1	17	14	0	46
320 +	-	-	-	-	-	-
TOTAL	92	74	26	19	4	215

「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

また、船舶明細書に記載の燃料消費量の信頼性を検証するために、理論上の燃料消費量とカタログスペックの燃料消費量との比較を行った。

船舶明細書に記載された個々のタンカーについて、アドミラルティ係数(Cadm)、排水容積( $\nabla$ )、船の長さ(L)、フルード数(Fn)より  $\varepsilon_H$  および  $\varepsilon_H$  を算定した。

$$\varepsilon_H = 36.7304 \times (L / \nabla^{1/3}) \times Fn^2 \times Cadm^{-1}$$

$$Cadm = \Delta^{2/3} \times V^3 / DHP$$

$$\varepsilon = H_0 \times SFC \times \varepsilon_H$$

$H_0$ : 燃料発熱量(kcal/kg-Fuel)

$SFC$ : 主機燃費(kg-Fuel/PSh)

$\varepsilon_H$ : 有効抗揚比

SFCについては、SR 研究資料により回帰式を作成(1970年から1985年まで150g/PShから120g/PShに減少、それ以降は120g/PShで一定)と仮定した。

荷物輸送に消費されるエネルギー総量(kcal) =  $\varepsilon$  \* 有効な仕事量(ton\*km)

満載航海速度時の仕事量(トンキロ)をかけることで、一日あたりのエネルギー消費量を算出し、船舶明細書の燃料消費量と比較した。算出結果をFig. 7に示す。理論上の燃料消費量と、船舶明細書における燃料消費量は、傾き、相関係数ともに良好な直線関係を示しており、船舶明細書の燃料消費量を用いることは、その時代の船型ごとの代表性を有すると考えてよいと考えられた。

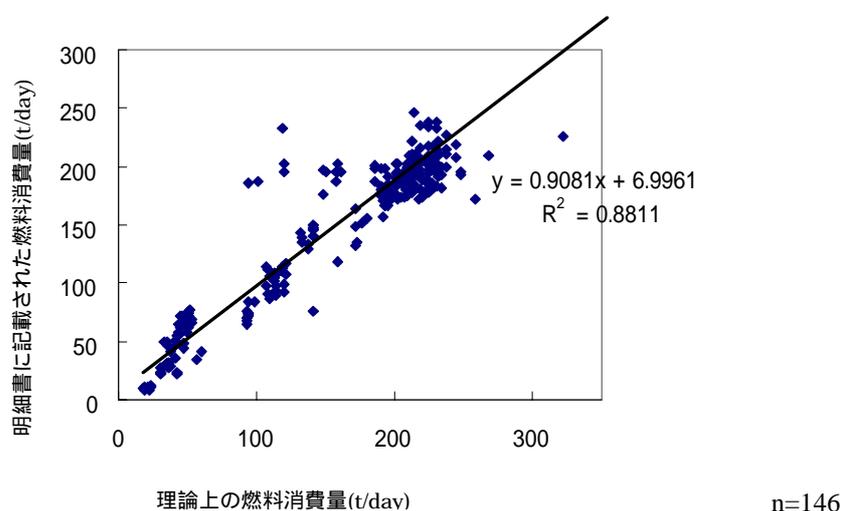


Fig. 7 原油タンカーにおける理論上の燃費と船舶明細書の燃費の比較

船舶明細書の燃料消費量を、各建造年代で整理平均しプロットした結果をFig. 8に示した。明細書に記載の燃料消費量は、新造時(試験航海時)の最大航海速度時のものであり、各船舶により航海速度は異なる。以下の式を用いて同一の速度での燃料消費量に揃えた。

$$\frac{FUEL}{FUEL_0} = \left( \frac{SPD}{SPD_0} \right)^\beta$$

$FUEL$ : 今回設定した航海速度時の燃料消費量(t/day)

$FUEL_0$ : 船舶明細書記載の燃料消費量(t/day)

$SPD$ : 今回設定した航海速度(knt)

$SPD_0$ : 船舶明細書記載の満載航海速度(knt)

$\beta$ : 定数(船種により異なる。タンカー: 1.87、鉄鉱石船・石炭船: 1.64)

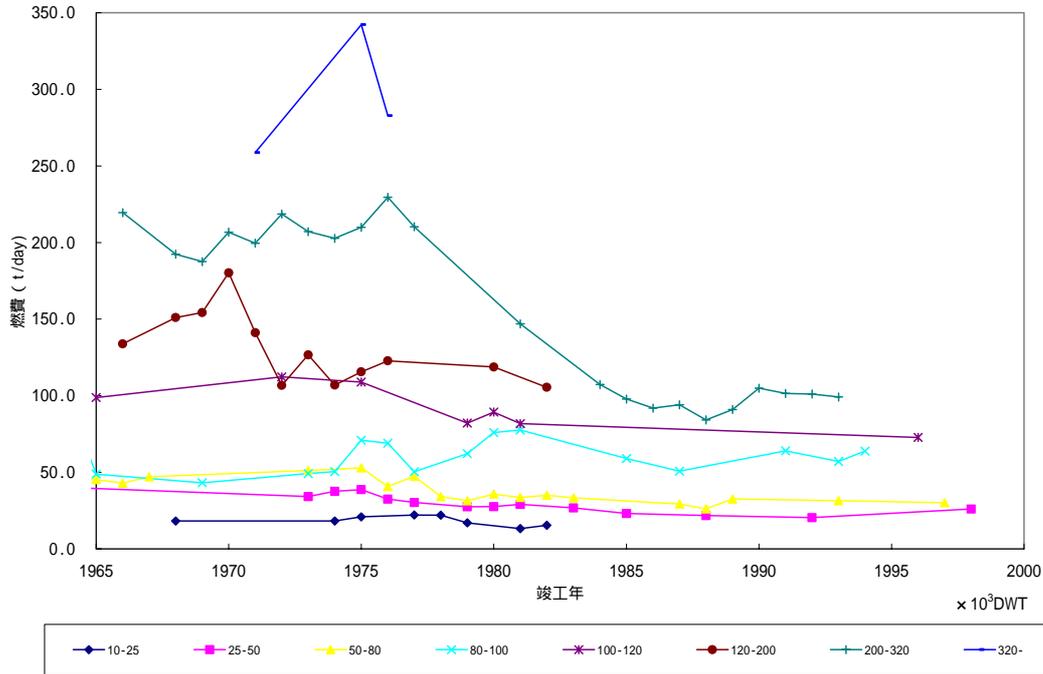


Fig. 8 原油タンカーの一日当たりの燃料消費量の経年変化(新造時)

船型ごとに一日当たりの速度補正後の燃料消費量の平均値を示した。ULCCから船型が小さくなるに従い、新造時の一日当たりの燃料消費量は低下している。また、竣工年が新しくなるに従って、燃料消費量は減少する。VLCCクラス(図中+)では、おおよそ半分まで減少している。

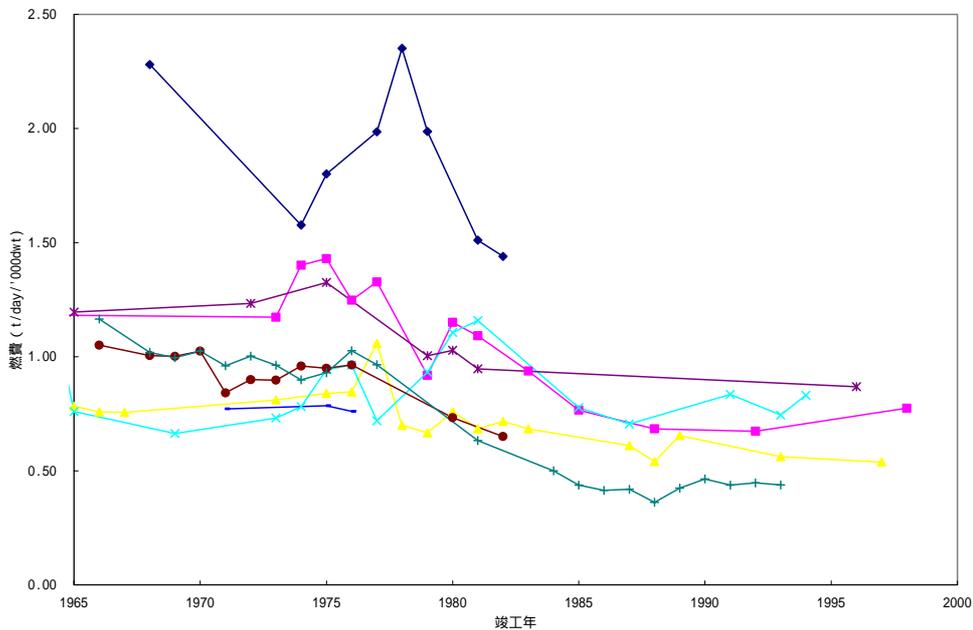


Fig. 9 原油タンカー運送量あたりの燃料消費量の推移(新造時)

船型ごとに上記のFig.5の燃料消費量を更に積載可能量で割った値を示している。船型が大きくなるに従い、運送量あたり一日あたりの燃料消費量は低下している。なお、Fig.5と傾向が一部異なっているのは、当該年の平均DWT(建造されたタンカーの大きさ)が異なるためである。

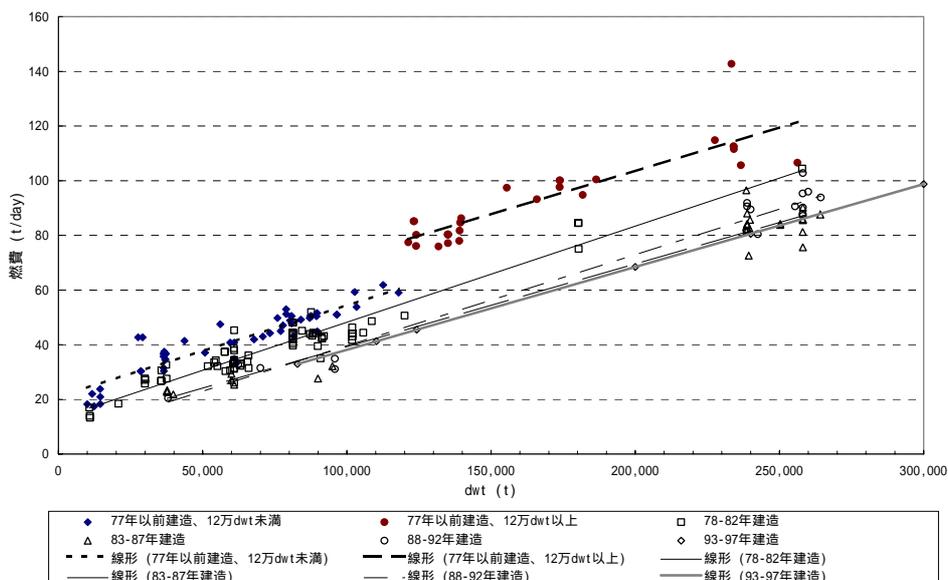
Fig. 8およびFig. 9に示される古い明細書から得た高船齢船の燃料消費率は、タービン船を含むものである。このため、新造時の燃料消費量で見た場合でも20-32万DWTのタンカーの一日当りの燃料消費量は、およそ半減していることがわかる。

さらに輸送効率を比較するため、日当たりの燃料消費量をDWTで割った値で比較したものをFig. 9に示した。Fig. 9でも輸送効率の向上は明らかであり、それぞれの年の輸送実績をもとに加重平均を行った場合、1970年に新造されたタンカーと1990年代に新造されたタンカーでは、平均20%程度の輸送効率の向上が見られる。

以上の新造時における燃料消費量の検討を踏まえて、船型船齢カテゴリーごとの現在の燃料消費量を算定する。

まず蒸気タービン船については、DE主機への換装が行われていると考えられる。これらの古いタンカーについては我が国では登録されていないため、主機換装などの変更内容および実施時期は把握困難である。そこでタービン主機船は、全てディーゼル主機船に換装されたものと仮定した。船舶明細書からタービン主機のデータを除き、DWT階級ごとに近似式を求めたものをFig. 10に示した。船舶明細書で把握できない32万DWT以上のULCC船については、一ランク小さな船型の近似式を用いて推定した。

設定された航行速度および、一定の平均DWTをFig. 9で求めた燃料消費量の推定式に代入し求められる燃料消費量をtable 22に示した。同表は、同じDWTのタンカーを各年代で建造した際に、新造時においてどの程度の燃料消費量を差異があるかを示している。



横軸はDWT、縦軸は一定航行速度における一日あたりの燃料消費量(t/day)を示す。

Fig. 10 タンカーの DWT と燃料消費量の関係

table 22 タンカーの新造時の平均的な燃料消費量

単位;t-Fuel/day/隻

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98
10 -25	28.7	19.1	14.2	12.0	13.1
25 -50	34.2	24.5	18.9	17.2	17.8
50 -80	44.9	35.1	28.0	27.3	26.9
80 -100	53.9	44.1	35.8	35.8	34.7
100 -120	63.1	53.2	43.6	44.4	42.5
120 -200	84.3	62.0	51.1	52.7	50.0
200 -320	125.8	107.9	90.7	96.2	89.6
320 +	165.2	151.4	-	-	-

新船時の燃料消費量の推定式に ~ 1978年の平均DWTを代入した場合の理論上の値。  
 1983年までは120-320+までのVLCCの運航速度を15kntと設定。  
 タービン主機船は全てディーゼルに換装と仮定。  
 「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

実際には経年劣化による航行速度の低下および機関単体の SFC(g/PSh)の低下も見込むべきである。今回は聞き取りなどから、熱効率で 5%/10年で劣化すると仮定した。また各建造年度ごとにクラス内での平均 DWT が異なることからこれらの補正をした上で、1 隻あたりの燃料消費量を table 23 のように設定した。

table 23 タンカーの平均的な燃料消費量

単位;t-Fuel/day/隻

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98
10 -25	19	17	16	13	12
25 -50	24	23	22	21	20
50 -80	34	32	31	31	29
80 -100	43	41	39	40	36
100 -120	51	50	45	43	40
120 -200	70	64	55	56	52
200 -320	111	105	92	100	96
320 +	151	152	-	-	-

実DWTおよび機関などの経年劣化を含んだ設定航海速度を代入した場合の平均的燃料消費量。熱効率で 5%/10年で劣化すると仮定した。  
 「-」はその船型のタンカーが存在しないことを示す。

(2) コンテナ船の燃料消費量に関する調査

船舶明細書に燃料消費量の記載のあるフルコンテナ船の燃料消費量を、各建造年代で整理したものをFig. 11に示した。タンカーと同様に燃料消費量は新造時(試験航海時)の最大航海速度時のものであり、各船舶により船舶明細書に記載の航海速度は異なる。ここでは21kntで航行した場合の日当たり燃料消費量に揃えた。

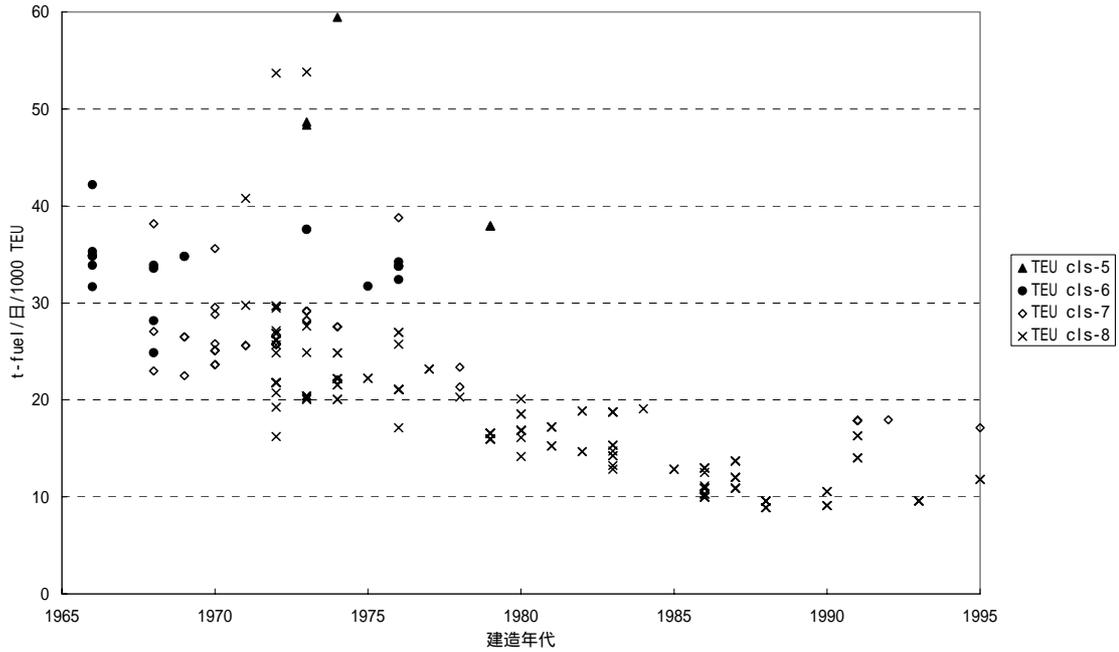


Fig. 11 フルコンテナ船の日当たり TEU 当たりの燃費

table 24 コンテナ船の平均的な燃料消費量

単位;t-Fuel/day/隻

可能搭載量(TEU/隻)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 3	1994 ~ 98
1000 未満	60	55	53	40	40
1000 以上 ~ 1999 未満	60	55	53	40	40
2000 以上 ~ 2999 未満	74	68	66	53	54
3000 以上 ~ 3999 未満	87	81	79	66	67
4000 以上 ~ 4499 未満	101	94	91	79	81
4500 以上	-	-	104	92	94

実DWTおよび機関などの経年劣化を含んだ設定航海速度(本船種では21kntで一定)を代入した場合の平均的な燃料消費量。推進効率で 5%/10年で劣化すると仮定した。

「-」はその船型のコンテナが存在しないことを示す。

(3) 他の船種の燃料消費量に関する調査

鉄鉱石運搬船の燃料消費量の傾向についてFig. 12に、石炭運搬船の燃料消費量の傾向についてFig. 13に示した。鉄鉱石運搬船では、船型との関係を見た場合に明らかに不連続なポイントが20万DWT以上の大型船で見られる。DWT対燃料消費量を船舶明細書などで細かく検討した結果、72～88年の20万DWTの鉄鉱石船については、小型船舶よりも搭載馬力数が少なく、Fig. 12に示すような傾向が実際にあることが確認された。

タンカーやコンテナと同様に、経年劣化の効果を導入し、各船型船齢ごとの燃料消費量を table 26 および table 27 に示すように推定した。なお、他の船種については、データが少ないことから石炭船のデータを流用することとした。

table 25 average fuel consumption t/day/vessels

(鉄鉱石船の平均的な燃料消費量t-Fuel/day/隻)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)		～ 1978	1979～83	1984～88	1989～93	1994～98
10	-25	21.9	24.7	21.7	20.6	22.7
25	-50	32.2	28.0	20.9	19.8	21.8
50	-80	42.5	33.4	26.3	24.9	27.5
80	-100	49.8	43.5	30.5	28.9	31.9
100	-120	58.4	46.1	45.3	43.0	47.3
120	-200	88.9	77.4	58.0	49.9	55.0
200	-320	80.0	70.2	50.4	50.4	50.4
320	+	-	-	-	-	-

実DWTおよび機関などの経年劣化を含んだ設定航海速度を代入した場合の平均的な燃料消費量。推進効率で5%/10年で劣化すると仮定した。「-」はその船型の鉄鉱石船が存在しないことを示す。

table 26 average fuel consumption t/day/vessels

(石炭船および他の貨物船の平均的な燃料消費量t-Fuel/day/隻)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)		～ 1978	1979～83	1984～88	1989～93	1994～98
10	-25	23.3	24.2	17.4	19.5	19.5
25	-50	31.9	27.2	20.5	20.5	21.9
50	-80	41.2	35.5	26.1	25.4	25.4
80	-100	49.6	35.3	32.0	33.5	36.2
100	-120	56.3	46.5	46.0	40.5	42.5
120	-200	71.5	62.2	50.4	54.2	52.8
200	-320	-	-	-	-	-
320	+	-	-	-	-	-

実DWTおよび機関などの経年劣化を含んだ設定航海速度を代入した場合の平均的な燃料消費量。推進効率で5%/10年で劣化すると仮定した。「-」はその船型の石炭船が存在しないことを示す。

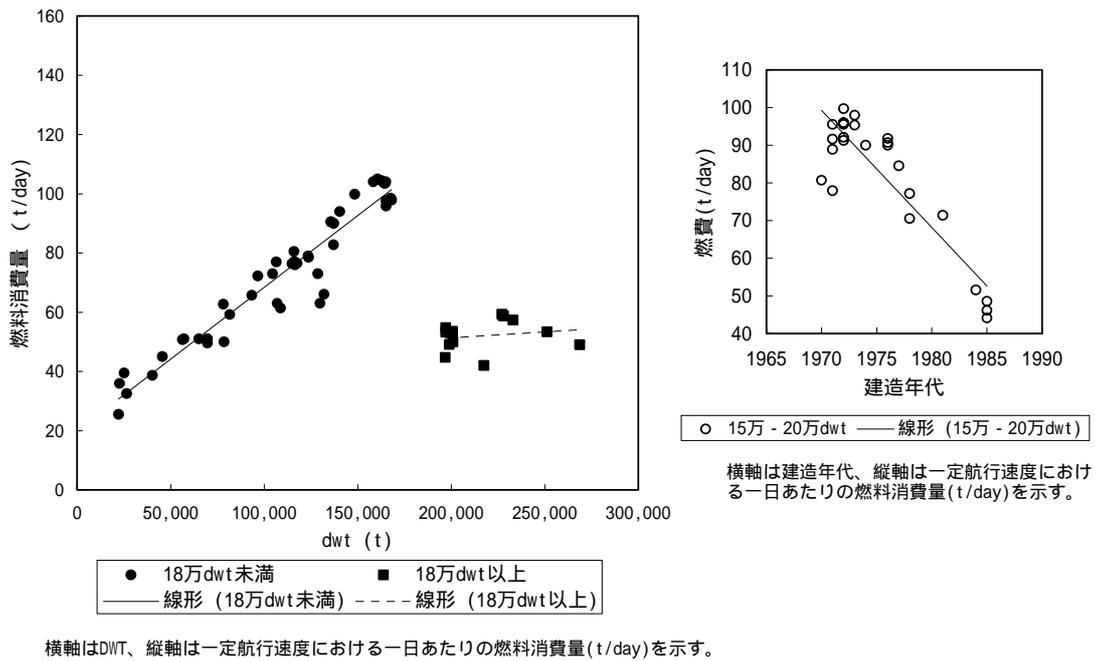


Fig. 12 DWT と燃料消費量の関係(鉄鉱石船)

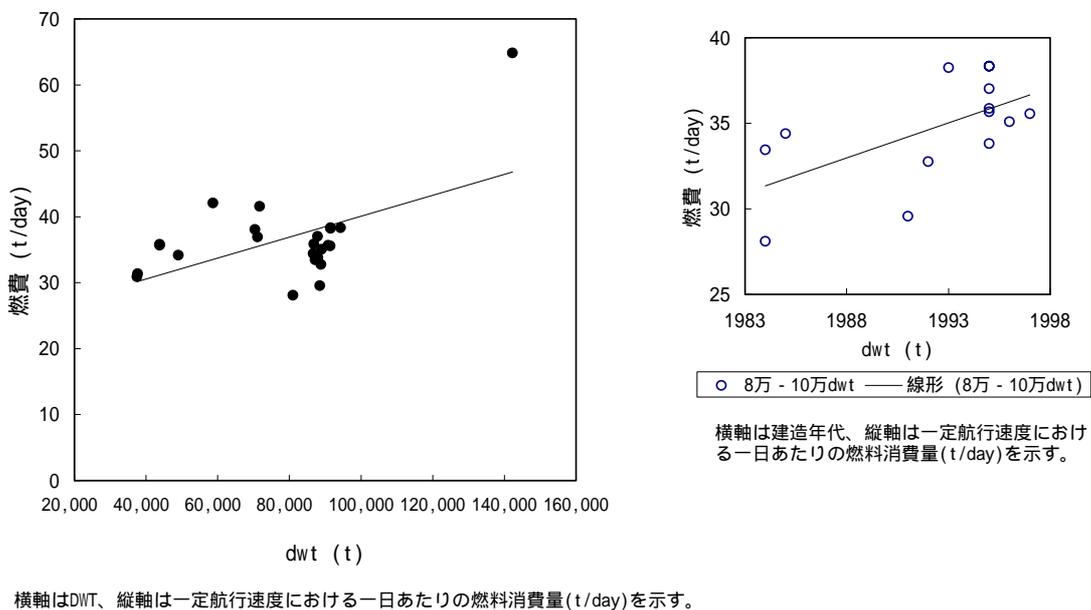


Fig. 13 DWT と燃料消費量の関係(石炭船)

### 3.1.3 船種ごとの燃料消費量に関する調査

#### (1) タンカーの燃料消費量

各カテゴリーに属するタンカーが年間に使用する燃料消費量  $p_{ij}$  はおよび総燃料使用量  $P$  は以下の式で計算される。1997年の推定結果をtable 27 に示した。

$$P = \sum_i \sum_j p_{ij} = \sum_i \sum_j C_{ij} \times tr_{ij} \quad \text{ただし、} p_{ij}: \text{カテゴリー-}i,j \text{の燃料消費量}$$

(t-Fuel/year)

table 27に示すように、1977年までに建造された旧型タンカーが、もともと隻数ベースで全体の3割強を占めることから((ア)参照)、燃料消費量においても大きな割合を占めている。これら旧型タンカーに対しては、計算上は、蒸気タービン主機からディーゼル主機へのレトロフィットを全隻行ったと仮定しているが、実際には輸送効率が悪いいため、船齢の若いタンカーと同様の稼働率で運航されていない可能性もある。しかし、日本船籍のタンカーはもちろんのこと、日本国内に荷揚げを行うタンカーではこれら旧型のタンカーが使用されることがごく少ないため、旧型タンカーの使用の実態については把握することが出来なかった。今後は、海外のオペレーターや船主へのアンケート調査も含めて、旧型タンカーの稼働率の把握することが、推定の精度を高めることにつながると考えられた。

table 27 fuel consumption in 1997 by crude oil tanker

(原油タンカーの船型・船齢別運航量の燃料消費量の1997年推定値)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)		~ 1977	1978 ~ 82	1983 ~ 87	1988 ~ 92	1993 ~ 97	TOTAL
10 -25		900	375	201	60	79	1,614
25 -50		1,799	850	821	552	642	4,665
50 -80		489	909	440	246	61	2,144
80 -100		1,017	833	605	771	411	3,637
100 -120		154	85	181	219	428	1,066
120 -200		1,741	240	179	902	650	3,712
200 -320		3,105	191	581	2,142	1,931	7,950
320 +		1,372	264	-	-	-	1,636
TOTAL		10,578	3,745	3,007	4,891	4,201	26,423

10<sup>3</sup>t/year

(2) コンテナ船の燃料消費量

各カテゴリーに属するコンテナ船が、年間に使用する燃料消費量  $p_{ij}$  および総燃料使用量  $P$  は以下の式で計算される。1997 年の推定結果を table 28 に示した。

$$P = \sum_i \sum_j p_{ij} = \sum_i \sum_j C_{ij} \times tr_{ij} \quad \text{ただし、} p_{ij}: \text{カテゴリー-}i,j \text{の燃料消費量}$$

(t-Fuel/year)

小型コンテナの燃料消費量が大きな割合を占めている一方、近年の建造も盛んなことから、船齢別で比較すると、燃料消費量はほぼ均一に分布している。前者の背景に 1000TEU 未満の小型コンテナ船の稼働率を実際より高めに設定している可能性もあるが、運航実態が明らかでない現在では、算定方法の限界となっている。

table 28 fuel consumption in 1990 by crude oil tanker

(フルコンテナ船の船型・船齢別運航量の燃料消費量の1997年推定値)

可能搭載量(TEU/隻)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 3	1994 ~ 98	TOTAL
1000 未満	8,803	4,864	3,548	2,620	2,520	22,355
1000 以上 ~ 1999 未満	2,970	2,114	1,629	1,160	2,032	9,905
2000 以上 ~ 2999 未満	535	955	936	705	2,304	5,436
3000 以上 ~ 3999 未満	109	589	563	613	1,305	3,179
4000 以上 ~ 4499 未満	0	0	344	586	839	1,769
4500 以上	0	0	289	745	301	1,335
TOTAL	12,417	8,522	7,309	6,429	9,301	43,979

10<sup>3</sup>t/year

(3) 他の船種の燃料消費量

鉄鉱石船、石炭船、その他のバルク貨物に従事する船舶の 1997 年における燃料消費量推定結果を、table 29、table 30およびtable 31 に示した。

table 29 fuel consumption in 1997 by iron ore bulk ships

(鉄鉱石船の船型・船齢別運航量の燃料消費量の1997年推定値)

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	TOTAL
10 -25	4,377	1,376	658	209	422	7,042
25 -50	443	178	217	45	110	994
50 -80	1,149	893	506	328	619	3,495
80 -100	13	7	2	2	3	28
100 -120	189	73	6	0	8	276
120 -200	275	400	437	594	853	2,622
200 -320	9	7	10	15	23	0
320 +	0	0	0	0	0	0
TOTAL	6,456	2,935	1,836	1,193	2,037	14,456

10<sup>3</sup>t/year

table 30 fuel consumption in 1997 by coal bulk ships  
 (石炭船の船型・船齢別運航量の燃料消費量の1997年推定値)

10<sup>3</sup>t/year

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	~ 1978	1979 ~ 83	1984 ~ 88	1989 ~ 93	1994 ~ 98	TOTAL
10 -25	1,174	517	341	147	413	2,592
25 -50	1,666	944	1,602	458	1,552	6,224
50 -80	505	551	429	388	1,018	2,892
80 -100	38	29	12	18	35	130
100 -120	54	29	3	0	8	94
120 -200	115	203	287	385	703	1,694
200 -320	0	0	0	0	0	0
320 +	0	0	0	0	0	0
TOTAL	3,552	2,274	2,674	1,396	3,728	13,625

table 31 fuel consumption in 1997 by other ships  
 (その他船舶の船型別運航量の燃料消費量の1997年推定値)

10<sup>3</sup>t/year

DWT(10 <sup>3</sup> ton)	GRAIN	ポーキサ イト	燐	その他
10 -25	0.903	0.132	0.104	0.131
25 -50	4.241	0.413	0.390	0.315
50 -80	1.136	0.351	0.256	0.146
80 -100	0.032	0.016	0.009	0.007
100 -120	0.009	0.000	0.002	0.005
120 -200	0.759	0.348	0.176	0.086
200 -320	0.000	0.000	0.000	0.000
320 +	0.000	0.000	0.000	0.000
TOTAL	7.080	1.260	0.936	0.690

またtable 32には、集約表として船種ごとの燃料消費量の積み上げと1.1で示したバンカーオイル払い出し量との比較および船種全体の平均輸送効率を掲載した。バンカーオイル払い出し量  $131.8 \times 10^6$ t に対して不明分を除いた積み上げ分は  $121.8 \times 10^6$ t と全体の92%を占めており、今回の試算結果がほぼ妥当であるものと考えられた。

table 32によると、コンテナの輸送量と、原油輸送量は、トンマイルベースでほぼ同等となっている。一方、燃料消費量ベースでは1.7倍と、同じ量の荷物を運ぶ際の燃料消費量は悪化している。タンカーなど他のバルク船では、空荷運航があることを考えると、往復航とも60%以上の消席率で運航されるコンテナ輸送の輸送効率は、2倍以上悪いことになる。これは、コンテナ船が21kntと他の貨物輸送と比較して高速航行を設定している点が大きく影響していると考えられる。ただし、運航システム全体の効率を考えた場合、コンテナ運航では荷物の積み替えなどに要するエネルギーおよびコストの節約分を見込まなけ

ればいけない。また、コンテナ輸送の場合ばら積みでは困難な、複数種貨物の同時輸送というメリットもある。従って、輸送システム全体としてコンテナ輸送が非効率的であるとは必ずしもいいきれない。一例として内航海運の燃料消費率をtable 33に示した。どの荷種においても内航海運の平均値の半分以上となっており、スケールメリットが現れている結果となった。

なお、今回の試算では、海域ごと、季節ごとの海象の影響が全く考慮されていない。試験航海時は平穏な気象海象条件下で、データが取られることが一般であるため、現在の方法では、実航海時の燃料消費量は過小評価になっている可能性が高い。

table 32 荷種別の燃料消費量(1997年)

荷種	輸送トン ( $10^6$ トン)	輸送トンマイル ( $10^9$ トンマイル)	燃料消費量 ( $10^6$ t)	総排出量 に対する比率	燃料消費量 t/トンマイル ( $\times 10^{-6}$ )
CRUDE OIL	1,534	7,677	26	20%	3.4
OIL PRODUCTS	626	3,500	15	11%	3.5
IRON ORE	430	2,444	14	11%	5.8
COAL	460	2,332	14	11%	6.1
GRAIN	203	1,169	7	5%	6.3
アルミ	54	206	1	1%	6.3
燐	32	133	1	1%	6.3
その他	20	189	1	1%	6.3
コンテナ	933	6,687	43	33%	7.0
unknown	-	-	10	7%	-
合計			131.8	100%	

空コンテナも含めたTEUあたりの貨物重量を19tと仮定した

table 33 内航貨物の輸送トン当たりの燃料消費量比較

	貨物	
	輸送量A	233,835
トンマイル当たりの燃料消費量	22	t/トンマイル ( $\times 10^{-6}$ )
輸送量	528,841	$10^3$ トン
平均輸送距離	442	km

1993年ベース

環境庁の船舶温室効果ガス排出量等総合調査(1995)より作成。

## 3.2 船舶単体の改善策に関する調査

一般的に、同一船種においては船舶が大型になるほどton-mile当たりの輸送効率は高い(同一運航速度下における輸送ton-mile当たりの燃料消費量が少ない)。また、船齢別には建造年の新しい船舶ほど、新造時における輸送効率は高い。輸送効率の向上は船型の改良などによる推進効率の向上、機関単体の熱効率の向上の複合的な効果によるものであるが、ここでは過去10年間に於ける両者の向上を検討する。また、聞き取り調査などにより、将来において有望と考えられる輸送効率改善技術を抽出した。

### 3.2.1 主機関熱効率の改善策

3.1 で行った船舶明細書の整理から、船舶の輸送効率は平均的には1970年代から1990年代までに20%程度向上したが、ここ数年は横ばい状態にある。1990年代までの輸送効率の向上には、主機関の熱効率アップが寄与するところが大きいと考えられる。

Fig. 14に示すように、1970年代に製造された低速2サイクルディーゼル機関と1990年代に製造された低速2サイクルディーゼル機関を比較した場合、燃料消費率(SFC)は150 g/PSh程度から120 g/PSh程度へと、約20%程度減少している。さらにデレーティングを行った場合は25%程度の減少が見られる。これは、Fig. 15に示した最高燃焼圧力の上昇、機関回転数の低速化、ロングストローク化などによるものである。Fig. 16に示すように低速4サイクル機関においても15%程度燃料消費率の向上が見られた。

なお、同時に機関重量も軽減化が進み、船舶全体での輸送効率改善に繋がっているものと考えられた。

しかし、同図によれば近年は4サイクル機関、2サイクル機関ともに熱効率の向上が止まりつつある。これは、以下示す複合的な要因によると考えらる。仮に燃料価格が大幅にアップするなど、外的要因があれば再び燃料消費率重視の技術が開発される可能性もある。

- 燃料価格が安値安定している近年においては、機関に対する要求される性能の重点が、メンテナンス性の向上、機関そのものが安価であること、低質燃料に対応可能であること、といった点に移行しつつあること。
- IMOにおいてNO<sub>x</sub>規制がスケジュールされており、NO<sub>x</sub>排出量と燃料消費率とはトレードオフの関係にあるため、両者の妥協点を見出さなければいけないこと。
- コンテナ船などにおいて、高速化が要求されており、機関の出力増大が求められていること。

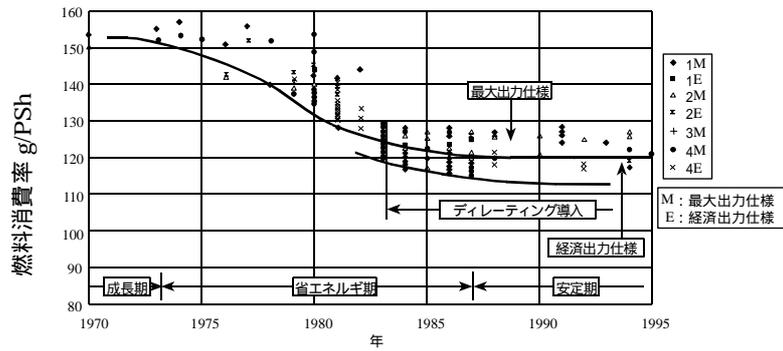


Fig. 14 低速2サイクル機関における燃料消費率の製造年代による推移  
 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(機関部門)(社)日本造船研究協会、平成10年

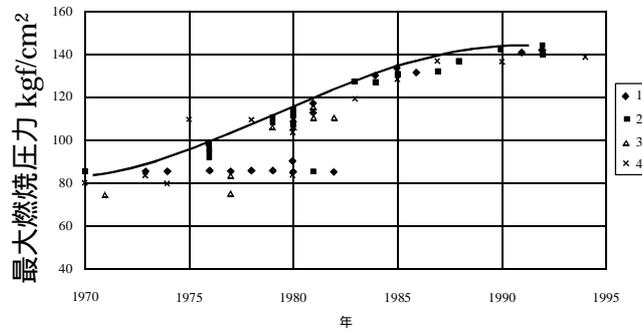
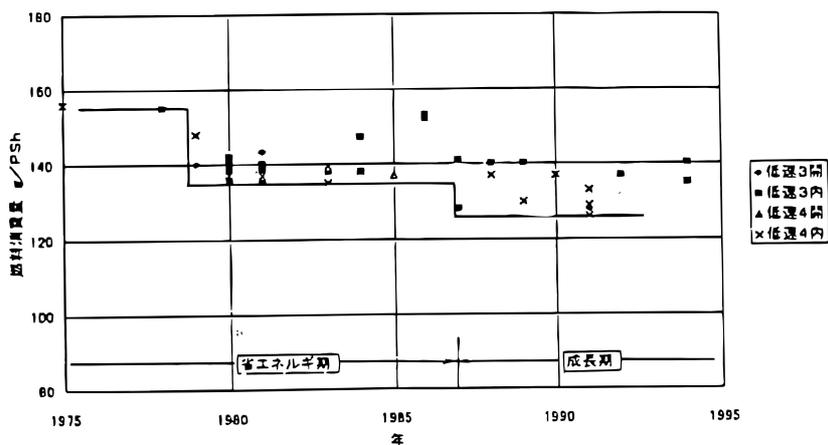


Fig. 15 低速2サイクル機関における最高燃焼圧力(Pmax)の製造年代による推移  
 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(機関部門)(社)日本造船研究協会、平成10年

燃料消費量の推移



最大燃焼圧力の推移

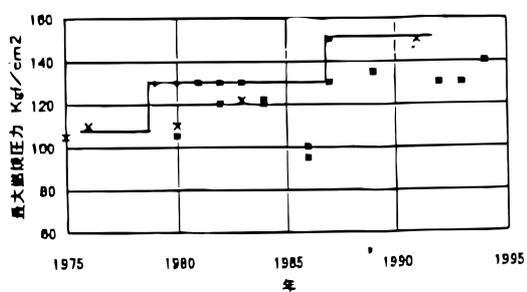


Fig. 16 4サイクル低速ディーゼル機関の低燃費化  
 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査  
 (機関部門)(社)日本造船研究協会、平成10年

### 3.2.2 船体側(船型および推進機)による改善策

船体側の輸送性能を式1で定義される $\varepsilon$ で表す。ここで $\varepsilon$ は船体をある速度で運航するのに要するエネルギー原単位を表している。 $\varepsilon$ は式2に示すように分解される。

$$\varepsilon = \text{総エネルギー消費量(kcal)} / \text{仕事量(ton*km)} \quad (\text{式1})$$

式2において、 $\varepsilon_H$ がエネルギー原単位のうち船体側の性能を示す指標といえる(値が小さいほど経済性の高く燃料消費量の少ない船体)。

Fig. 17に示すように、タンカーでは、10万DWT以上の大型タンカーの $\varepsilon_H$ のほうが、2-10万DWTの小型タンカーの $\varepsilon_H$ よりも小さな値を示しており、大型タンカーの方が船体として効率が高いことがわかる。また、建造年による変化は、主機ディーゼル熱効率の建造年による変化ほど大きくないが、大型タンカーでは15%程度となっている。なお、他の船種においては、 $\varepsilon_H$ は近年悪化の傾向が見られる。これは、近年の貨物船においては重量物運搬が多いため、幅広の船型の採用と高速化によるものと考えられる。逆に、仮に今後石油事情の変化などで、タンカーにおいても高速化が要求された場合、長期的には $\varepsilon_H$ の高い船型が設計される可能性もある。

$$\varepsilon = H_0 \times SFC \times \varepsilon_H \quad (\text{式2})$$

$H_0$ : 燃料発熱量(kcal/kg-Fuel)  
 $SFC$ : 主機燃料消費量(kg-Fuel/PSH)

$$\varepsilon_H = DHP / \Delta \times V \quad (\text{式3})$$

$$= 6.8587 \times (L / \nabla^{1/3}) \times Fn^2 \times r_T / \eta$$

$\Delta$ : 排水重量トン(ton)

$V$ : 船速(knt)

$DHP$ : 伝達馬力(ps)

$L$ : 船の長さ

$\nabla$ : 排水容積

$Fn$ : フルード数

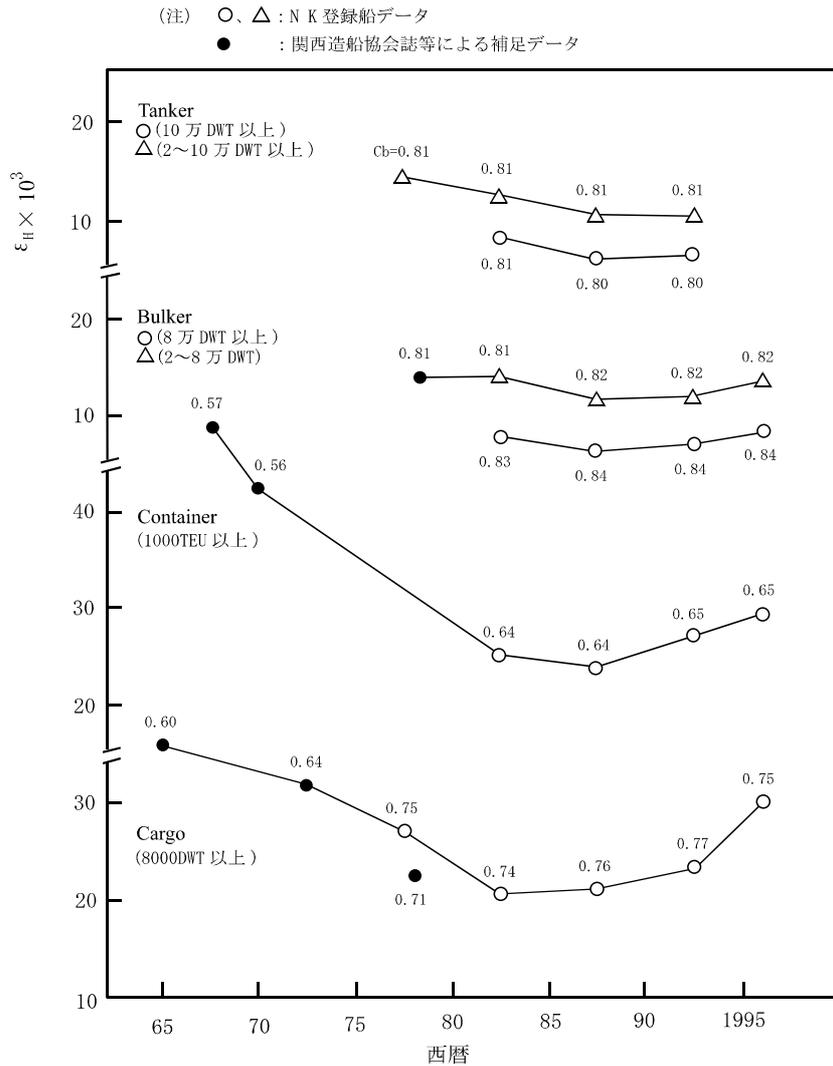
$r_T$ : 実船の全抵抗係数(粗度修正係数を含む)

$\eta$ : 実船の推進係数( $\eta = EHP / DHP$ 、 $EHP$ は有効馬力を示す)

$Cadm$ : アドミラルティ係数

$$\varepsilon_H = 36.7304 \times (L / \nabla^{1/3}) \times Fn^2 \times Cadm^{-1} \quad (\text{式4})$$

$$Cadm = \Delta^{2/3} \times V^3 / DHP$$



図中 C<sub>b</sub> は肥せき係数:満載排水量を垂線間長さと型幅、満載喫水で割った指数。

Fig. 17 船種別のエネルギー消費原単位  
 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査  
 (流力部門)(社)日本造船研究協会、平成10年

### 3.2.3 今後有効と考えられる燃料消費量削減技術

これまで見てきたように、機関単体では熱効率で 20%程度の向上が見られ、船体や推進機の改良で 15%程度の消費エネルギー原単位の向上が見られた。また、同 DWT クラスの一日あたりの燃料消費量を、80 年代初頭(1980-1984)と 90 年初頭(1990-1995)で比較すると、VLCC タンカー(20 万 ~ 30 万 DWT)では、17%程度の向上が、同じく大型コンテナでは 13%程度の上昇が見られた。

この後に 3.4.1 において示すように、輸送量の増加を見込んで燃料消費量の将来動向を予測すると、現在技術レベルで新造船が建造された場合、2010 年代には 1990 年比 3.3%程度の増加が想定されることから、船舶からの CO<sub>2</sub> 発生量を 1990 年レベル程度に低減維持するためには、一層の技術開発等が必要である。そこで、今後輸送効率向上に対して有効と考えられる技術等について造船メーカーなどへの聞き取り調査により定性的な評価を行った。

輸送効率向上に対して技術的に有効と考えられる技術について個々に評価した結果を table 34 とりまとめた。ここでの短期的 長期的技術の区分は、COP の目標設定年である 2010 年に実船に対して技術的に適用可能であるかを基準とした。国際的な競争下にある外航船舶においてコスト評価は非常に困難であるが、ここでは技術開発コストを含めたイニシャルコストが大きいかどうかを定性的に評価することに加えて、それによって得られるランニングコスト(燃料消費量)の削減が十分に期待できるかどうかを定性的に判断することとした。

その結果、設置の容易さ、既存の船にも導入可能なこと、およびイニシャルコストが比較的低いこと等から、PBCF 等の船体付加物が短期的な削減技術として適していると考えられた。また、仮に迅速な CO<sub>2</sub> 削減対策が求められた場合には、既存船舶に特段の新しい装備等を必要としない減速航行が最も有効であると判断された。ただし、減速航行は社会経済的に求められている高速輸送に反する面を有すること、措置の実効性を担保するためには世界での協調が必要であること等に留意する必要がある。

現状では、個々の技術については実験水槽やテストベッドでの性能評価がほとんどであり、必ずしも実海域での性能が十分予測できるとは言えない面がある。また、単体技術での効率向上は僅かであっても、幾つかの技術を複合することで実海域において相乗的な効率向上(あるいは相殺効果による性能低下)がもたらされる場合もあると考えられる。したがって、今後の技術評価においては、波浪を含めた実際の航行時をできるだけ想定して評価することが肝要であり、そのためには、既存船において採用されている技術について、試験データと比較対照すべき実運航データの収集・解析(モニタリング)手法の開発等が必要である。

table 34 燃料消費量削減に有効と考えられる諸技術の定性的評価

区分	項目	技術等の概略	長所	短所	備考
短期的技術	船体性能の向上	船型の最適化	C <sub>0</sub> 値やアドミラルティ係数を最適化できるような船形を設計。バルブ形状の最適化。	過去の研究により十分な知見が蓄えられている。	船型の改良で、最大で現船型から5%程度向上の可能性がある。
		造波抵抗の低減	小型フィン等船体付加物による改良。	既存船に設置可能。過去の研究により十分な知見が蓄えられている。	10%程度の改善が期待できる。
	摩擦抵抗の低減	喫水下面積の最小化。	喫水下面積の最小化。	過去の研究により十分な知見が蓄えられている。	ほぼ同等の船型で、喫水下面積を減少させ、数%低下した計算例もある。
		有機スズ系に代わる新たな船底防汚塗料の使用により、従来と同等またはそれ以上に汚損生物の付着を防止する。	有機スズ系全面規制の動向に対応すべく、既に開発が進められている。	今のところ、有機スズ系を上回るコストパフォーマンスを持つものができていない。	
	推進性能の向上	二重反転プロペラ	同軸上に重ねて配置したプロペラを互いに反転させる。	振動およびキャビテーションの防止にも有効。	プロペラおよびギアボックスのイナーシャルコストが高い。燃料費が上昇すれば適用が促進される可能性がある。
		PBCF (プロペラボスキャップフィン)	ボスキャップにフィン等の船体付加物を設置する。	既存船舶での改造が可能。	既に100以上の実施例があり、約4%の推進性能向上が期待できる。
	ポッドプロペラ	電動モーターとプロペラが一体化した推進機を船尾に設置する。推進機自体を回転させることにより舵の機能も併せ持つ。	技術的には可能。既にフェリー等で設置されている例がある。	イナーシャルコストが極めて高い(二重反転プロペラより高価)。電機モーターで全推進エネルギーを賄うため、大規模な発電設備が必要であり、発電効率面でも問題あり。	舵が不要なことによる船尾の設計の自由度の向上、省スペース等により、総合的に輸送効率向上が期待される。新造船での適用は可能性がある。
		船形とプロペラの相互干渉の利用	船尾付近の流れを考慮したプロペラ位置と船尾形状の最適化。	過去の研究により十分な性能評価手法が整備されている。	二重反転プロペラ、ポッドプロペラ等の新型プロペラの場合、推進効率を10%程度向上可能。

区分	項目	技術等の概略	長所	短所	備考
機関の改良	新式機関への換装(T/Cの換装など含む)	熱効率が低い旧型ディーゼル機関を高効率の新式機関に交換する。	技術的に可能であり、過去においてタービン主機からディーゼル主機への換装実績は多数ある。	改造費用が高額なものとなる。改造時のドック入りの期間が長い。	船齢、コストとの兼ね合いで、実行できる船舶と実行できない船舶が生じると考えられる。燃費を最大20%程度向上可能。また、T/C単体の換装も考えられる。
	総合的な主機関熱効率の向上	電子制御による燃焼室への燃料の噴射タイミング・噴射時間・噴射率の最適化、燃焼室形状の最適化など。	コスト的に比較的安価。既存船での改造も可能。	NOx排出量とトレードオフの関係にある。 長時間運転時の燃料噴射系制御の信頼性が不十分。	2サイクルで4~6%、4サイクル機関で4~8%程度向上できる可能性がある。 燃焼室内温度の均一化により、NOxの発生量の抑制と機関の効率改善の両立が期待される。
維持管理の改善 短期的技術	メンテナンス技術及び頻度の向上・主機性能の維持	船底の汚れを定期的に除去する。T/Cの圧力マッチング、掃気弁の清掃。	全ての船に有効であるため、全体に対しての効果が大きい。	ドックでのメンテナンスを前提にすると、現状よりドック期間が長くなり、コストが高い。	15%/10年程度で推進効率が悪化する現在の経年劣化を、10%/10年程度に抑えることができる可能性がある。 停泊中のメンテナンス技術が不足している。船底口ボットなどの導入などが考えられる。
	運航速度の最適化	減速航行	技術的に問題はない。	運航日数が増大する。 仮に速度規制を行った場合、世界的な協調を実施しないと、実効性が担保できない。	特にコンテナ船では近年、荷主が高速化を望んでいる。経済的に見合うことが必要。 全世界的な燃料消費量の削減効果は、3.4.1参照。
運航の改善	運航速度の最適化	船舶の大型化による輸送効率の向上。余剰船腹数の削減による平均積荷率の向上など。	技術的に問題はない。	一企業で調整できる範囲はごく狭い。また、港湾設備の整備、国際間の調整が必要。	港湾設備の整備も必要。 船型別のトンマイルあたりの輸送効率は、3章を参照。



### 3.3 運航の改善策に関する調査

#### 3.3.1 減速航行(slow steaming)に関する調査

船舶の主機の負荷率は、プロペラ則により航行速度の3乗に比例することが一般に知られている。このため、運航速度を90%に減速した場合、運航時間の増加を差し引いても、負荷率は80%程度となり、SFCがその負荷域内で一定であれば、直接燃料消費量の削減につながる。実際には、プロペラやターボとのマッチングなどにより、削減の程度は理論値の8~9割程度に収まることが多いといわれる。

現在の運航パターンにおいては、コンテナ運航を中心に高速化志向にあると言われ、減速航行を行ってまで運賃コストを抑える傾向は石油ショック直後よりは薄れている。それでも、VLCCなどは輸送運賃の契約形態WS(World Scale)と呼ばれる基準運賃に対する割合で定められるため、その割合が少ない契約形態の場合基準運賃の算出基準である平均航海速力14kntより、減速したほうが経済的になる場合が多い。

### 3.3.2 ウェザールーティングに関する調査

#### (1) WRS の概要

WRS の具体的な内容については、ウェザー・ルーティング研究グループ (1992) に詳しくまとめられている。ここでは、WRS の概要について同書からとりまとめたものを示す。Fig. 18 に WRS の概要について示した。

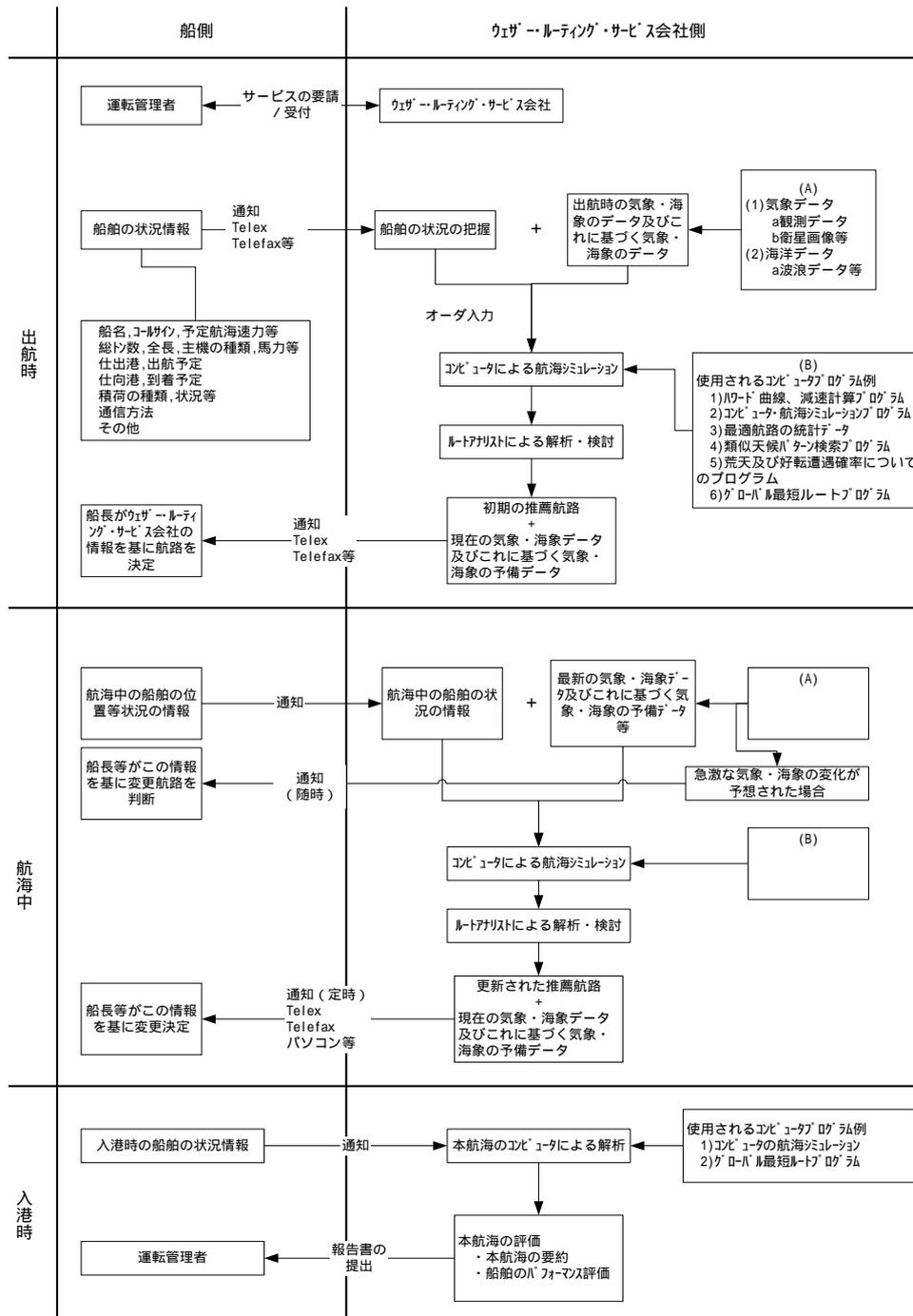


Fig. 18 WRS の流れ

WRS は船舶、気象など WR に必要な知識を十分に備えた、ルート・アナリストにより実施される。ルート・アナリストは、WRS の対象となる船舶が出航する前に、その船舶に関する情報(喫水線、積荷の状態、平水速度等)を可能な限り入手する。次に、過去の統計結果から、推薦されるべき航路を大まかに選定し、これについて気象関連機関から提供される予報プロダクト(予測値、実況値、実況図、予想図等)および既存の統計値に基づいて最適航路を決定する。また、その際、予測値データに基づいたコンピュータ・プログラムが最適航路の選定の中心となる。現在、予測値の十分な精度が維持される予報可能期間(以後、予報可能期間)は、3~4 日程度である。このため、ルート・アナリストは、予報プロダクトが更新される毎に最適航路を更新し、最新の最適航路を対象船舶に連絡する。

航海終了後、実況値等を基に推薦された最適航路(推薦航路)について検証が行われ、顧客に報告される。この際にもいくつかの、コンピュータ・プログラムが使用される。一般的に行われている評価の指標は、WRS を受けた船が実際に航行した時間と同じ海象条件下で最短距離航路を航行した場合の時間の差である。最短距離航路を航行した場合より、実際の航行時間が短縮されていれば、WRS は成功したことになる。ただし、悪天候域、航路上の冰山などを迂回することによる航行時間の延長もあり得る。

上述のように、WRS のためにいくつかのプログラムが開発されているが、全てのプログラムが推薦航路の選定に使用されているわけではなく、主として事後の評価に使用されている。これは、予報可能期間が3~4 日であるため5 日を越える長期の航海では傾向予想になり、予報可能期間が延長されれば、これらのプログラムも推薦航路の選定に使用可能になる。

## (2) WRS の利用状況

民間 WRS 団体等の聞き取りによれば、WRS の利用数(約 1500 航海/年)は、1991 年のピーク時を境に、最近の利用数は 60%程度に落ちこんでいる。利用数の減少傾向の理由としては、顧客側の経費削減によるとのことである。

WRS の代表的な船種毎の利用内訳は、コンテナ船および PCC はほぼ全船、バルクキャリアでは 70%程度であり、タンカーではほとんど受けていない。また、夏季は海象が穏やかになるため、全体の利用率が 30%程度減少する。コンテナ船は航行時間の短縮のため、PCC では揺動からの積荷保護のため WRS を受けている。

## (3) WRS による航行日数の削減効果

WRS による航行日数の削減効果の推移について、わが国の WRS を行っている団体に、聞き取りを行った。

民間のWRS団体では、平成7年度以降のWRSについて評価を実施している。しかし、データ数が少ないこと、航海時の詳細なデータが未詳なことから、WRSによる航行日数の削減効果の傾向をつかむことは困難であった。

また、別の民間WRS団体の回答では、過去の資料について詳細なデータはとりまとめられておらず、WRSによる航行日数の削減効果は、北太平洋航路について夏季で半日、冬季で1日程度(横断には、高速船で片道10日間を要する)であるとのことであり、過去10年程では大きく異ならないとのことであった。

#### (4) 波浪予測の将来的な予報可能期間

WRでは、数値波浪予測に基づいて推薦航路の選定が行われており、予報可能期間はWRによる航行日数の削減効果に大きな影響を与える。

現在の数値波浪予測では、予報可能期間は3~4日程度である。北太平洋は、WRによる航行日数の削減効果が最も期待できる航路であるとされている(ウェザー・ルーティング研究会、1992)が、20knt程度の高速船でも横断に片道で約10日を要する。この北太平洋航路を例に取れば、予報可能期間が10日に延長され、その予測値が入手可能になれば、WRによる航行日数の削減効果は大きく向上する(萩原、聞取り)。ここでは、わが国の気象庁の波浪予報業務の変遷とこれに伴う予報精度の推移について述べ、最後に今後の予報可能期間の傾向について考察する。

#### (ア) 波浪予測業務の変遷と精度の推移

現在、先進国のほとんどが数値気象モデルを用いて、予報業務をとりおこなっている。数値気象モデルの発展にはコンピューターの計算能力の向上が少なからず関与している。

わが国の気象波浪業務は、1972年に波浪予報業務が始まっている(羽島、1991)。

数値波浪モデルはこれまでに何度かの更新がなされており、こうした、モデルの更新時に新旧モデルの比較などが実施されその結果が公表されている(土田ら、1975；気象庁海洋気象部、1986；市成、1997)。また、波浪予測に重要な海上風予測に関連するモデルの精度比較についての結果もいくつか公表されている(気象庁海洋気象部、1989；1990)。これらの既存の資料では、モデルの比較・検討のための指標として、波高・周期それぞれの計算値および実況値の相関係数、二乗平均平方根誤差(RMSE)等が用いられているが、集計範囲(地点、予測時間等)が異なることから、これらの値をおしなべて比較することはできない。このため、数値波浪モデルの予報可能期間の推移について既存の資料から情報を得ることは困難であ

った。

数値波浪モデルではないが、参考までに数値気象モデルである北半球スペクトルモデル(NSM)および全球スペクトルモデル(GSM)精度の推移について比較した資料があるので、これをFig. 19に示した。

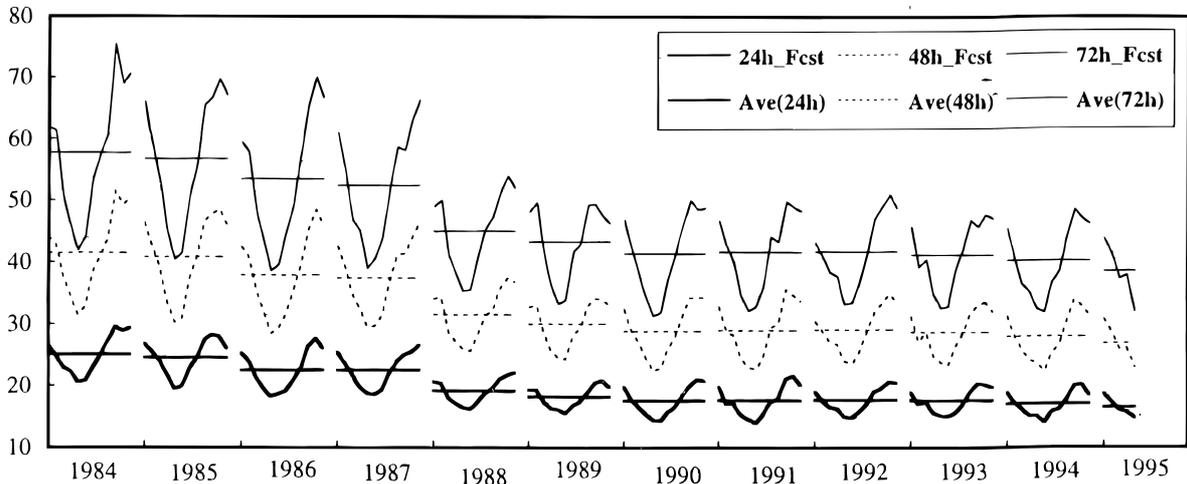


Fig. 19 北半球モデル・全球モデル(GMS)の二乗平均誤差(RMSE)の変遷  
気象庁の全球モデル(1988.3～)および北半球モデル(1983.3～1988.2)の北緯  
20°以北の500hPa高度場の二乗平均平方根誤差(RMSE)。客観解析に対する各  
予報時間の誤差の大きさを表す。期間は1984年3月から1995年4月までで、  
太い実線は24時間予報、破線は、48時間予報、細い実線は72時間予報を表す。  
横軸に平行な線は、1年間の平均値を示す。

これによると、1995年現在の72時間予報の誤差は、1988年以前の48時間予報の誤差と同程度であり、同じ誤差を許容するならばこの10年間で予報可能期間が1日向上していることが分かる。

#### (イ) 波浪予報の今後

数値予報モデルの精度はかなり向上してきており、予報可能期間の長短は観測データの質によるところが大きくなってきている(気象庁、1997)。しかし、従来、波浪の観測値は目視によるものがほとんどで品質に大きなバラツキがある(市成、1998)。また、その75%が一般船舶によるものであり、海域によりそのデータ数は大きく偏っている(羽島、1991)。また、WRS団体等への聞き取り結果によると、最近では日本籍船において人件費の削減から船員数が減少し、船舶からの観測データの通報数は減る傾向にある。

一方、地球観測衛星の発達に伴い信頼できる波浪観測値(海上風、波高、波浪スペクトル)を定常的に供給されるようになりつつあり、これらのデ

ータを同化<sup>1</sup>の技術開発が世界各国の研究の主要テーマとなってきた。 (市成、1998)。

また、運輸省がアメリカの FNOC と協力して、観測用パイロットを増設するアルゴ計画が進行しており、同計画から得られる波浪等の情報により予想可能期間が向上することが期待される。

#### (5) CO<sub>2</sub> 削減オプションとしての WRS

WRS が実施されている代表的な航路である北太平洋航路の横断にかかる航行日数は、速い船で片道 10 日程の航程である。もし、予報可能期間が 10 日以上まで延長されれば、WR を受けた場合の航行日数の削減効果は大きく向上する。しかし、モデルによる予報可能期間の向上は足踏み状態にあるという指摘がある。一方で、(イ)(4)で示したように、近い将来初期条件データの時間的、空間的密度が大きく改善され、リアルタイムの予測に必要な基盤が整備される可能性があり、この場合現行モデルによっても予報可能期間の向上を期待でき、しいては WRS による航行日数の削減効果の向上が期待できる。

WRS の利用状況からは、次のような課題が考えられる。

- 一部の船舶では最短時航行に主眼を置いて WRS が行われているが、その方針を燃料消費量の削減に変更する。
- 公的機関から提供される波浪予報可能期間の延長により、WRS の燃料消費量の削減効果向上をはかる。(現状、北太平洋航路では最大 10% 程度の航行日数の削減が期待できる)。

---

<sup>1</sup> 観測データをモデルに取り込む処理過程のこと。気象庁では、データの品質管理、各格子に対する内挿処理、重力波によるノイズ除去を行う初期値化に第一推定値の提供までを含めて、同化と呼んでいる。

### 3.4 対策の導入方法の検討

#### 3.4.1 CO<sub>2</sub> 排出量低減オプションに関する検討

##### (1) 運航量の将来予測

CO<sub>2</sub> 排出量の将来予測計算例として、タンカーによる原油運送の燃料消費量予測を行った。前章で述べたように将来的に大きな低減に望めない輸送効率と運送実績の伸びが相殺して、古い船舶が自然代替された場合でも、排出量が将来増加に転じる可能性もある。Fig. 21に日本着の原油輸送量および世界における輸送総量の年毎の推移を示した。日本着の原油輸送については、中近東から南アジア方面への原油積み出し地の多様化などにより、平均輸送距離の減少があるため、トンベースでは1%/年の増加傾向にあるもののトンマイルの輸送実績では、ごく微増傾向となっている。

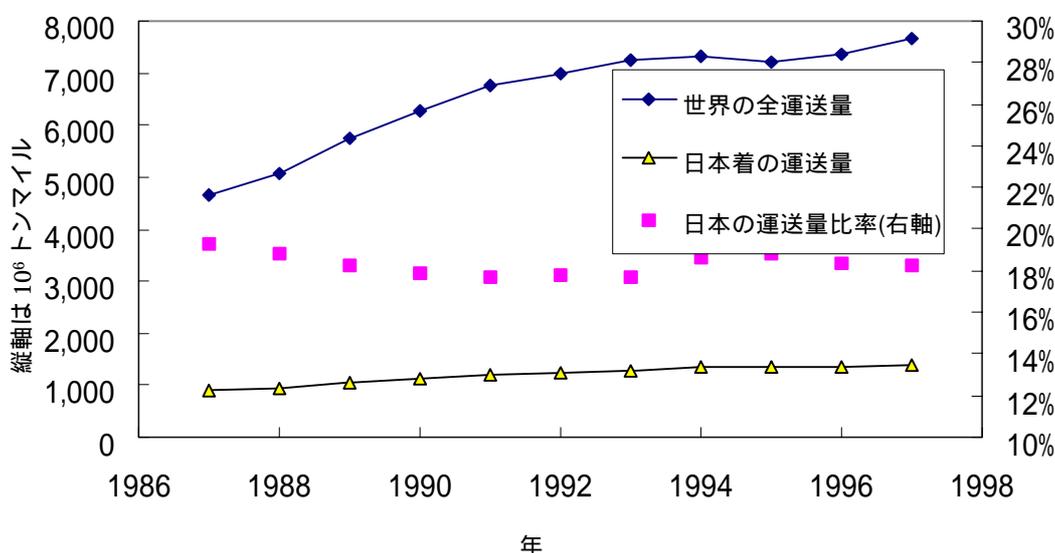
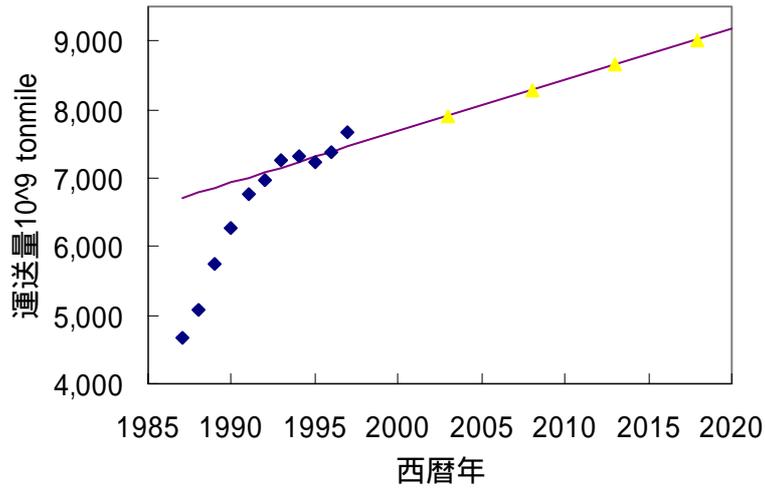


Fig. 20 世界の原油運送量と日本着運送量の推移

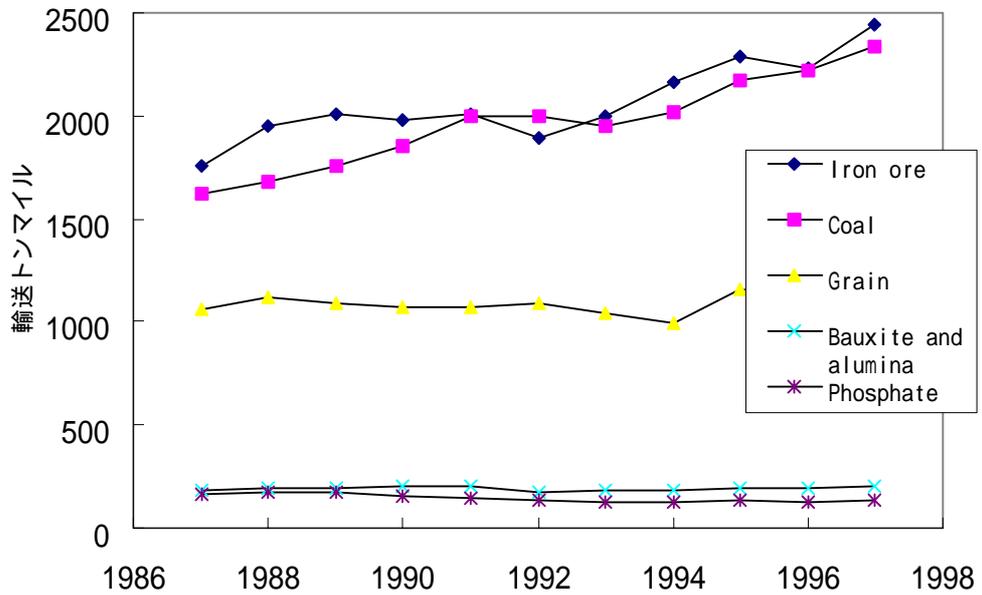
一方、世界の輸送量は大きな伸びを示している。Fig. 21に示すように近年5年のトレンドを直線近似すると、1997年比で  $75/7677=0.97\%$ /年の増加が見込まれる。将来的には、UNFCC加盟国においては、燃料資源の節約が求められるため、原油の輸入量は少なくなることが予測される(一方、LNGの輸送量は今後増加の可能性はある)。従って、OECD諸国において経済成長率2%程度の伸び率の中で、原油の輸送実績の伸びが1.0%/年弱という予想は、ほぼ妥当性があると考えられる。

同様に他の貨物についても、Fig. 22に示すように重量貨物である石炭、鉄鉱石はいずれも1997年比2~3%/年の伸びを、コンテナについてはFig. 23に示すように6%/年程度と高い伸びが予想される。



Feanley's の "World Bulk Fleet January 1999" による

Fig. 21 タンカー運送の実績値とその将来予測



Iron ore	2.1%
Coal	2.8%
Grain	0.4%
Bauxite and alumina	0.5%
Phosphate	-3.6%

Fig. 22 他の貨物運送の実績値とその将来予測

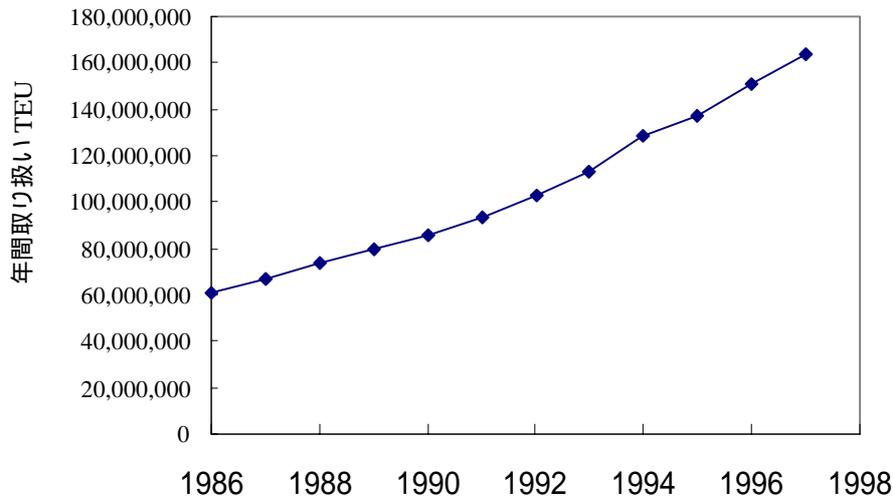


Fig. 23 コンテナ取扱量の実績値とその将来予測  
(取り扱い量の伸びは1997年比で5.68%/年)

以上の運航量予測に基づいて推定される燃料消費量の将来予測として運航量が増加しない場合をtable 35に、増加する場合をtable 36に示した。また消費量の将来トレンドをFig. 24 に示した。図中点線は運航量増加を見込んだ場合を、実線は見込まない場合示している。

ここでは、船舶全体の隻数およびDWT構成が将来に渡って変化しないものと仮定した。従って、30年の船齢を迎えた船舶から自然代替が進み、35年で全て代替を終了するものとした。このため、table 35に示す平均稼働日数でわかるとおり、2017年付近において、タンカーおよびコンテナ船では船腹数の不足が生じる。ここでは、船腹不足数は全て各船種の最大船型で補われると仮定した。

輸送量の伸びを見込まないcase1では、船舶の自然代替による効果を、船齢船型比が異なる船種ごとに計算していることになる。case1ではタンカーの自然代替の効果が大きい。これは新型タンカーの燃料消費量節約の効果が大きいこと、旧型船の占める割合が他の船種に比較して大きいことによる。その結果、全体でも2010年前後において1997年比10%弱の燃料消費量の減少が見込まれる。一方、輸送量の伸びを見込んだ場合、2010年前後での減少はほとんど見込めない。

船腹数の増加をシミュレーションに組み込むためには、増加するDWTの総トン数階級内での割合(隻数比率)、あるいは造船能力を考慮した上で、どのタイミングから増加傾向を組み込むか、などの情報が必要である。同時に日本国由来の排出量については、中近東からインドネシア方面への輸入先の移行(マ

イル数の減少つながらる)など、輸送マトリックスの将来予測が必要である。今後の詳細な検討にはタンカー運航の経済的評価や造船能力の将来設定など、経済的側面での情報と、将来の国別エネルギー政策についての情報入手が不可欠と考えられた。

table 35 燃料消費量予測結果(Case1)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	23.0	22.7	22.7	22.7
コンテナ	43.0	42.1	41.3	40.4	40.4
他のバルク	62.7	60.7	59.9	59.9	59.4
合計	131.8	125.8	123.9	123.0	122.5
合計値の1997年比	100.0%	95.5%	94.0%	93.3%	93.0%
タンカーの平均航行日数	289	246	226	217	213
コンテナ船の平均航行日数	251	251	251	251	251

運送量が1997年のまま、自然代替のみ。

table 36 燃料消費量予測結果(Case2)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	23.2	23.1	23.4	23.6
コンテナ	43.0	44.5	46.1	47.7	50.4
他のバルク	62.7	61.4	61.2	61.9	62.2
合計	131.8	129.1	130.5	133.0	136.2
合計値の1997年比	100.0%	98.0%	99.0%	100.9%	103.3%
タンカーの平均航行日数	289	292	297	306	318
コンテナ船の平均航行日数	251	265	280	296	313

運送量が増加した場合、自然代替のみ。

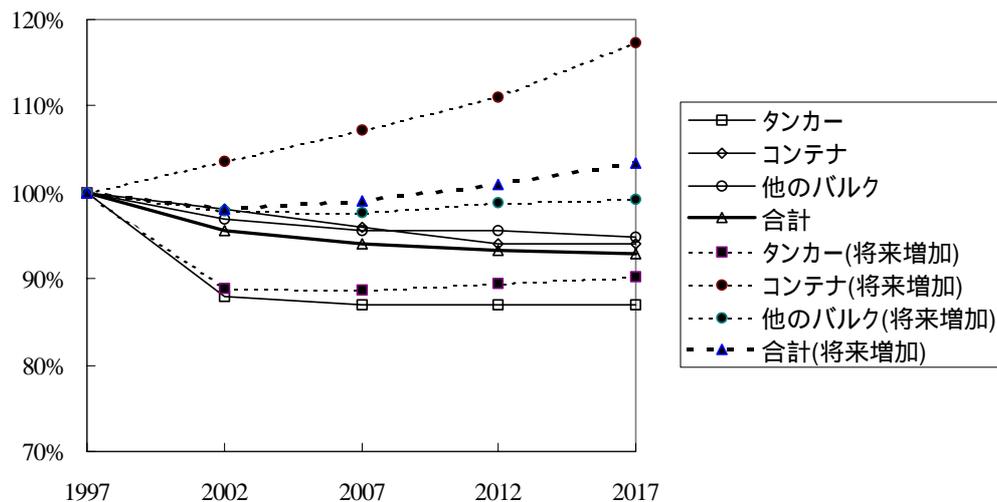


Fig. 24 将来の燃料消費量予想(1997年比)

(2) 減速航行時の将来予測

減速航行を行った場合の将来予測を table 38 ~ table 40 に示した。case3 および case4 においては、最も高速のコンテナ船舶が一律に現状の 8 割( $21\text{knt} \times 0.8 = 17\text{knt}$ )、タンカーは slow steaming を現状でも行っている場合が多いため、現状の 9 割、他の船舶も一律で 9 割で減速航行を行うものとした。全船型に対して行うため、船腹数の不足が生じる。平均航行日数が 310 日(年間の 85%)を超えた場合は、それぞれの最大船型、最新船型の隻数を増やし、不足分を補うこととした。また case5 においてはモデラートな条件として全船舶とも設定航行速度より 1knt づつ減速航行を行うものとした。

いずれの Case においても、その効果は自然代替の効果より大きく、仮に緊急に燃料消費量の削減が求められた場合は、減速航行を世界的に行うことで、対応できる可能性が示唆された。

table 37 燃料消費量予測結果(Case3)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	19.4	19.2	19.2	19.2
コンテナ	43.0	30.2	31.0	30.7	30.7
他のバルク	62.7	50.2	49.5	49.5	49.2
合計	131.8	99.8	99.7	99.4	99.0
合計値の1997年比		75.7%	75.7%	75.4%	75.1%
タンカーの平均航行日数	289	273	251	241	237
コンテナ船の平均航行日数	251	310	310	310	310

運送量が1997年のまま、自然代替かつ減速航行。

table 38 燃料消費量予測結果(Case4)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	19.6	19.6	19.7	19.9
コンテナ	43.0	31.9	32.7	33.5	34.3
他のバルク	62.7	50.8	50.6	51.2	51.4
合計	131.8	102.3	102.9	104.4	105.6
合計値の1997年比		77.6%	78.0%	79.2%	80.1%
タンカーの平均航行日数	289	310	310	310	310
コンテナ船の平均航行日数	251	310	310	310	310

運送量が増加した場合、自然代替かつコンテナ船で80%、他の船舶で90%の減速航行。

table 39 燃料消費量予測結果(Case5)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	19.7	19.9	20.6	21.5
コンテナ	43.0	40.1	43.8	44.4	47.4
他のバルク	62.7	52.8	52.7	55.1	56.6
合計	131.8	112.6	116.4	120.1	125.4
合計値の1997年比	100%	85%	88%	91%	95%
タンカーの平均航行日数	289	301	310	310	310
コンテナ船の平均航行日数	251	279	302	310	310

運送量が増加した場合、自然代替かつ一律に1knt減速航行。

### 3.4.2 CO<sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制に関する検討

ここでは、陸上での運輸部門における CO<sub>2</sub> 税導入、燃料消費量割り当て制度、地球環境への負荷を定量化した上で公表を義務づける制度、など政策的なインセンティブに関する情報などを入手し、国際的な制度への導入の可能性について検討する。

COP5 において AIJ(共同実施活動 Activities Implemented Jointly)および CDM (Clean Development Mechanism)という二つの国際的な国家間の協調実施について枠組みについては具体的な進展はなかった。

そこで、現在電力会社など民間企業と豪州ロシアなどの企業間および行政の間で一部契約が進んでいる排出権取引について情報を収集し、船舶運航への適用について考える。

排出権取引が、市場として機能しているのは米国 SO<sub>2</sub> 排出権について取引するシカゴ市場だけである。ここでは、米国内で総量規制がなされている SO<sub>2</sub> 排出権について売買ができる。排出権を売却できるのは、連邦より施設ごとの排出総量を割り振られた電力会社など一部の大規模 SO<sub>2</sub> 発生施設の管理者のみである。一方、購入側は割り振られた発生側事業者だけでなく、地方自治体や自然保護団体も購入可能である。つまり、地方自治体が管理内の排出権を税金などで購入し、これを転売せずに保管(stock)してしまえば、地域内の SO<sub>2</sub> 発生量は連邦レベルで決定した総量規制の枠組みよりもさらに減少することが期待できる。本手法は CO<sub>2</sub> においても可能になると考えられ、陸上の CO<sub>2</sub> 排出権を海運業界もしくは IMO といった団体が購入することは将来可能になると考えられる。

一方、COP の枠組み内では、第 17 条に規定があるものの、詳細については全く未定である(ただし COP 内で決定されるため条約が発効する前に、詳細を決定することもできる)。前述のように至近の COP5 の議論においても、具体的な実施内容についての進展はなく、植林などによる CO<sub>2</sub> 吸収量の定量的評価についても先送りされた。つまり、現状では植林事業などで、CO<sub>2</sub> 排出権を購入してもその権利による排出可能量は未定である。従って、IMO の枠組みも未定である現状で、排出権取引の枠組みを予想することは、きわめて困難である。

しかし、現在の絶対量削減を大前提とする条約枠組みに反対の立場を取る米国では、2008 年(第一コミットメント期)以前に企業の自主参加に基づく早期排出権削減クレジットの取引制度を国内的に創設することを考えている。

このため、シカゴ市場あるいはロンドン市場などでは、自国内の企業を対象に自主的な CO<sub>2</sub> 排出権取引制度を創設する動きがある。ただし、今後この市場内によって取引されたクレジットが COP の作る枠組みに適合するかは全く解らない。COP では、締約国会合の下に何らかの管理機関;administrative body を置き数値目標の割り当て、排出枠の発行、モニタリング、排出権のトラッキングを行うものと予想される。

陸上においてもエネルギーの下流消費者であり、割り当ての困難な運輸部門に対する排出権割り当ては困難と言われている。たとえば、トヨタ自動車がおーストラリアの植林の共同事業によって排出権を確保する事業を予定しているが、これはあくまでも自動車の製造過程で発生する CO<sub>2</sub> 発生量に対する排出権であり、自動車を利用する過程で発生する CO<sub>2</sub> 発生に対する将来的な担保ではない。

ただし、陸上分野で余剰が予想される排出権を、海運業界または IMO が自主的に購入することは、排出権の割り当てが行われていない現状においても理論的には可能である。

## 4 調査まとめ

### 4.1 調査結果の総括

#### 4.1.1 燃料消費量の計算

統計値(Energy Statistics of OECD Countries 1994-1995 (OECD/IEA,1997)および Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1994-1995(OECD/IEA,1997))からタンカーオイルの年間消費量を  $131.8 \times 10^6 \text{t/y}$  ( $\text{CO}_2$  発生量に換算すると、 $3.95 \times 10^8 \text{t/y}$ )とした。

外航船舶由来の  $\text{CO}_2$  発生量の削減方法を検討するには、船種ごとにその発生量を把握する必要がある。既存の統計資料に基づき、タンカーおよびバルカー、コンテナ船について年間の燃料消費量の推定を行った。その結果、各船種が占める割合は、タンカーで 31%、バルカーで 29%、コンテナで 33%と推測された。ただし、コンテナに関しては運航実態に不明の点が多く、他の船種に比べて誤差が大きいものと考えられた。

全船舶を積上げた上記の燃料消費量計算結果は、前述の年間燃料消費量統計値と概ね等しいものであった。この場合の平均航行日数は原油タンカーで 300 日程度、コンテナ船で 250 日程度であることから、現状をほぼ再現できているものと考えられた。

#### 4.1.2 船舶単体の改善策

機関単体の熱効率は 1990 年代までに 20%程度向上したが、ここ数年は横ばいであった。今後、燃料噴射の電子化などにより 2 サイクルで 4~6%、4 サイクルで 4~8%向上する可能性があるが、熱効率の向上と  $\text{NO}_x$  の排出量はトレードオフの関係にあり、排ガス規制動向によっては改善が低く抑えられる可能性があることに留意する必要があるものと考えられた。一方、船型の改良により、過去 20 年程度の間エネルギー消費原単位は 15%程度向上した。今後も船型の改良で最大 5%程度向上する可能性がある。また、波浪中で抵抗増加の少ない船型の開発が望まれる。

技術的に将来有効と考えられるものには、フィン、PBCF などの付加物、二重反転プロペラ、船底塗料(ただし有機スズ系を除く)など、既に一部実用化されているものもあるが、広範な普及にはコスト面での問題が残されている。

#### 4.1.3 運航による改善策

運航面における改善策として、減速航行とウェザー・ルーティング・サービス(WRS)に着目した。

運航速度を 10%下げた場合、同じ距離を輸送した場合の運航時間の増加を差し

引いても燃料消費量は10～20%削減されることが期待される。ただし、減速航行には高速化を望む現在の社会ニーズには必ずしもそぐわないという面もある。

WRSによる航行時間の短縮効果は、例えば北太平洋航路(速い船で横断に10日を要する)において1航海当り5～10%と推測された。しかしながら現在は、海象の予報可能期間が3～4日であるため、WRSは十分活用状況には至っていない。今後、利用可能な観測データの量・質の向上が見込まれており(衛星データ利用技術の開発、アルゴ計画)、これに伴う予報可能期間の延長によりWRSの効果の向上と普及が期待できる。

#### 4.1.4 対策導入方法の検討

各船種について運航量の経時的変化から、今後の増加の予測を行い、将来の年間の総燃料消費量を推定した。計算結果をtable 40～table 42に示した。

table 40 燃料消費量予測結果(高船齢船更新、運航量が1997年のまま)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	23.0	22.7	22.7	22.7
コンテナ	43.0	42.1	41.3	40.4	40.4
他のバルク	62.7	60.7	59.9	59.9	59.4
合計	131.8	125.8	123.9	123.0	122.5
(1997比)	100.0%	95.5%	94.0%	93.3%	93.0%
タンカーの平均航行日数	289	246	226	217	213
コンテナ船の平均航行日数	251	251	251	251	251

table 41 燃料消費量予測結果(高船齢船更新、運航量増加)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	23.2	23.1	23.4	23.6
コンテナ	43.0	44.5	46.1	47.7	50.4
他のバルク	62.7	61.4	61.2	61.9	62.2
合計	131.8	129.1	130.5	133.0	136.2
(1997比)	100.0%	98.0%	99.0%	100.9%	103.3%
タンカーの平均航行日数	289	292	297	306	318
コンテナ船の平均航行日数	251	265	280	296	313

table 42 燃料消費量予測結果(高船齢船更新、減速率：コンテナ10%、他20%)

燃料消費量推定値(10 <sup>6</sup> t)	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
タンカー	26.1	19.4	19.2	19.2	19.2
コンテナ	43.0	30.2	31.0	30.7	30.7
他のバルク	62.7	50.2	49.5	49.5	49.2
合計	131.8	99.8	99.7	99.4	99.0
(1997比)	100.0%	75.7%	75.7%	75.4%	75.1%
タンカーの平均航行日数	289	273	251	241	237
コンテナ船の平均航行日数	251	310	310	310	310

運航量の増加を考慮しない場合、高船齢船の更新により年間燃料消費量は微減と推定された(table 40)。船種別に見ると、タンカーではその傾向は著しい。運航量の増加を見込んだ場合には、高船齢船の更新の効果があったとしても年間燃料消費量は横ばいもしくは微増傾向になると予測された(table 36)。船種別に見ると、特にコンテナ船で増加傾向が顕著であった。これは、近年のコンテナ取り扱い量の増加が著しく、その延長上線で運航量の増加を見込んでいるため、今後コンテナ船の運航量が大きく増加すると設定していることによる。高船齢船の更新と同時に10~20%の減速航行を想定した場合には、年間燃料消費量は導入直後に著しく低下し、以後微減と推定された(table 42)。

#### 4.1.5 CO<sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制

陸上排出源については COP において、炭素税、排出権売買等の政策的オプションについて検討が進んでおり、シカゴやロンドン市場においては自主的に CO<sub>2</sub> 排出取引制度を創設する動きがある。しかしながら、これらの動きを国際的にどのように取り込んでいくのかについては、今のところ明確になっていない。

国際海上交通についても同様の枠組みを適用することが理論上は可能であり、陸上排出源の取り扱いに関する今後の国際機関の動向について十分注意を払っておく必要がある。

## 4.2 問題点および今後の課題

### (1) 燃料消費量の計算

現時点では実運航速度、実燃費、小型船・高船齢船の稼動状況等、現実の運航実態に関する情報が不足しており、特にコンテナで不明な点が多い。よって、現状をよりの確に反映した燃料消費量の将来予測のためには、これらについて詳細な情報収集および解析が必要である。なお、小型船・高船齢船は日本発着の運航に従事していることが少ないため、海外での情報収集が必要である。

### (2) 船舶単体の改善策

IMO で NO<sub>x</sub> 規制が予定されており、熱効率の向上および NO<sub>x</sub> 発生量の低減を両立させるような技術開発が必要となる。

将来有効と考えられる技術については、その効果および経済性についてより定量的な評価が必要である。また長期的には、代替燃料およびこれを用いる機関の開発など、抜本的な技術開発も必要であろう。

(3) 運航による改善策

・減速航行

減速航行による年間燃料消費量の削減効果は大きく、その実施において技術的な問題点はない。ただし、運航時間の増加に伴う経済的な損失等を考慮する必要があり、減速航行の実施のためには、社会経済システム全般を踏まえた検討が望ましい。

・WRS

WRSに係る海上の観測データの量・質的な向上が今後期待されているが、一方でWRSの効果については、必ずしも定量的な把握に至っていない。したがって、WRSの利用率が高く運航量も多いコンテナ船を対象とし、WRSの効果のモニタリングを実施する必要がある。

(4) CO<sub>2</sub> 排出量低減オプションの実施体制

政策的なCO<sub>2</sub>削減の動向を把握するため、COPなどの国際機関の動向について情報を収集しておく必要がある。

(5) 対策導入方法の検討

上記、(2)、(3)、(4)で得られた成果をもとに、より具体的かつ現実的なCO<sub>2</sub>削減シナリオを設定し、将来の燃料消費量の削減効果について、より高精度な推定を行う必要がある。これには経済的な影響等をシナリオに組みこむことも必要であろう。

(6) 他の温室効果ガス

CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>

これらの地球温暖化係数はCO<sub>2</sub>よりも大きいのが、船舶からの排出実態は不明な点が多く、当面はその排出実態について把握する必要がある。

O<sub>3</sub>

O<sub>3</sub>はNO<sub>x</sub>が関与した光化学反応による二次生成物質であるため、排出濃度等の把握は困難である。海洋上の光化学反応を考慮したシミュレーションを実施し、船舶運航の寄与率について検討する必要がある。

## 5 参考資料

### 5.1 船舶から発生する CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスについて

温室効果ガスとしてはCO<sub>2</sub>が有名であるが、その他にCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC類、SF<sub>6</sub>、さらにはSPM、H<sub>2</sub>OおよびO<sub>3</sub>にも温室効果があることが知られている。表Aにこれら地球温暖化物質の比較を示した。単位濃度当りの温室効果の強度で比較すると、CH<sub>4</sub>はCO<sub>2</sub>の約21倍、N<sub>2</sub>Oは同じく310倍、フロンハロン類では、数千倍になり、排出量が微量であっても温暖化を招くことになる。ただし、大気中濃度を考慮した放射強制力(温室効果の度合い、表中最下欄参照)を見ると、現在ではCO<sub>2</sub>の寄与が一番大きく、今後の温暖化の約60%がCO<sub>2</sub>の寄与と考えられている。

1997年9月に行われたCOP3京都会議においては、CO<sub>2</sub>にCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>の5物質を加えて、合計6物質について削減目標を設定した。6物質の選定においては、地球温暖化に寄与する割合(大気中の絶対量×温暖化係数)、他の有害性、増加速度、寿命、実施対策の容易さなどから選定されている。

船舶の場合、CH<sub>4</sub>は機関の排ガス中にも含まれるが、原油タンカーの移動中に積み荷より発生する量が無視できないと考えられる。また代替フロンについては、リーファー(冷凍コンテナ)などでその使用量も多く、陸上の冷凍施設との比較では管理も緩いことが想定されるため、そのリーク量も多いことが考えられる。

table 43 各地球温暖化ガスの特徴の比較

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O (亜酸化窒素)	HCFC-22 (代替フロン HFCの代表)	CF <sub>4</sub> (PFCの代表)	SF <sub>6</sub>
産業革命前の 大気中濃度	280 ppm	700 ppb	275 ppb	0	0	0
1994年の 大気中濃度	358 ppm	1720 ppb	312 ppb	268 ppt	110 ppt	72 ppt
年増加率	0.4%/年	0.6%/年	0.25%/年	0%/年	5%/年	2%/年
大気中の寿命(年)	50-200	12	120	50	12	50,000
地球温暖化係数	1	21	310	1,700	6,300	24,900
放射強制力 Wm <sup>-2</sup>	1.56	0.47	0.14	0.12 (HFC全体 として)	0.10 (PFC全体 として)	0.002

## 5.2 日本国内における船舶 CO<sub>2</sub> 発生量

ここでは、マクロな燃料消費量から算出される船舶からのCO<sub>2</sub>排出量と陸上排出量との比較を示すことで、CO<sub>2</sub>削減対策の必要性を概説する。

国内におけるCO<sub>2</sub>発生量について、表Bに示した。IPCCへの報告量のうち運輸部門の占める割合は、20%程度であり1990年以降、割合・絶対量ともに微増している。運輸部門の内訳としては、自動車が90%を占めているとされており、船舶分はわずか3.1%と推計されている。

運輸部門に関してのCO<sub>2</sub>削減の具体的方策としては、自動車を中心に交通機関単体技術によるエネルギー消費効率の向上および低公害機関の普及、貨物輸送全体のエネルギー消費効率の向上が、挙げられている。

しかし、内航船舶単体からのCO<sub>2</sub>削減策に関して本格的な検討が行われていない。例えば、環境庁編の地球温暖化対策技術評価検討会報告書においては、内航船舶の輸送トン当たりの排出単位は $21.6 \times 10^{-6}$  t/トンマイルであり、将来に渡って改善が見込まれていない。運輸省内の検討においても、例えば「運輸部門からのCO<sub>2</sub>排出抑制のためのガイドラインおよび推進方策の策定に関する調査」委員会の報告書によれば、輸送原単位は、自動車の585.8 kcal/トンキロが2000年度には、573.1 kcal/トンキロに改善されることを盛り込んでいるのに対して、内航海運の原単位146.9 kcal/トンキロ( $27 \times 10^{-6}$  t/トンマイル)の改善は盛り込まれていない。仮に、モーダルシフトを行った場合には、内航海運の輸送トンキロ増はそのままCO<sub>2</sub>排出量の純増に繋がる計算になっている。

table 44 日本国からの CO<sub>2</sub> 発生量(電力配分後)

単位:10<sup>3</sup> t-CO<sub>2</sub>

年度	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1A 燃料の燃焼							
1A1 エネルギー産業部門	77,449	78,491	79,608	78,966	83,215	82,695	82,582
1A2 製造業・建設業部門	455,647	452,381	441,981	435,865	454,921	455,163	461,877
1A3 運輸部門	213,780	223,251	228,317	230,127	241,368	248,547	254,815
1A4 民生・農林水産業部門	297,292	306,692	318,989	311,868	332,297	338,462	335,707
1A5 その他	8,792	11,946	16,314	7,570	21,498	13,284	17,183
合計	1,124,532	1,147,845	1,162,314	1,143,794	1,213,940	1,220,218	1,234,904
上記 1A3 の 内訳割合	自動車	90%					91%
	船舶	3.2%					3.1%
	航空機	1.1%					0.9%
	鉄道	5.7%					5.1%
参考							
バンカーオイル	30,806	33,036	34,095	36,688	37,494	37,328	32,420
外航分(200 海里内)							6,022

日本国政府;IPCC 第二回通報、第三回通報などより作成

## 5.3 WR が燃料消費量の削減に及ぼす効果について

### 5.3.1 ウェザー・ルーティング・サービスの概要

ウェザー・ルーティング(以下、WR)とは「航海中の気象・海象状態をできるかぎり正確に予測し、当該船舶の耐航性能を考慮して、ある評価基準に対する最適な航路を選定すること」とされている。

現在の WR は、低気圧の回避、波浪による減速の影響の低減を主眼として、最適と判断される航路(推薦航路)が示される。船舶の動揺についてシミュレート可能なプログラムも開発されているが、気象予測データの精度の不足から推薦航路の選定には活用されておらず、主にサービス終了後に実施される実況値に基づいた推薦航路の評価に用いられている。

本節では、WRS の歴史的経過およびそのサービスの実際の流れ、使用されるデータ、推薦航路の予測・検証に使用されるコンピューター・プログラムについて概要を示す。

なお、本項をとりまとめるにあたり、WR 研究グループ(1991)を参考にした。

#### (1) ウェザー・ルーティング・サービスの変遷

WR は、1957 年の米国海軍水路部 R. W. James による「Application of wave forecasts to marine navigation」および東京商船大学杉崎教授による「最適航法の基礎的研究」等の研究論文(1965)により、1970 年までにその概念が形成されていった。

しかし、当時は、気象・海象の予測の精度および、高度経済成長に伴い大型化した船舶の耐航性能の評価手法が不十分であったことから、WRS の大きな効果は期待できるものではなかった。

実際の船舶の運航は、船長が、大洋航路誌、パイロット・チャート等の情報と、過去の実績、経験を基に、これらを照らし合わせ、不十分な気象・海洋情報を目視観測等により補いながら、船舶の安全保持を最優先として行われてきた。また、当時は世界経済も飛躍的な発展を遂げつつあり、船舶の運航経費に対する要求も現在のように厳しいものではなかった。

このような環境の中で、欧米では WR の初歩的なサービスが開始されている。米国では 1950 年代に海軍数値予報センターが軍艦を、オランダにおいては、1960 年代に気象庁がそのサービスを始めている。民間では、米国のオーシャンルーツ(現、ウェザーニューズ)が商業ベースの WRS を 1950 年代前半から開始している。

1970 年半ばからは、二度にわたるオイルショックとこれに伴う世界経済の低迷により、経済成長期に建造した船舶が過剰となり、運賃市況の低迷、発展途上国の海運への参入等により、先進国の海運は極めて厳しい環境を迎えること

となる。

このような環境の下、低質燃料の使用、省力化、混乗の導入、便宜置籍化船舶の運航経費の節減が厳しく求められ、船舶の運動能率の向上も重要な課題となってきた。一方、この時代になると学術的な研究も活発となり、研究者の層も厚くなっていった。これに伴い、気象・海象の予測、船舶の耐航性能の評価技術も向上していった。

気象・海象の予測については、国際的な規模での観測、情報の交換、気象衛星の開発・利用、高層気象の研究・情報提供が、コンピュータの情報処理能力の急速な向上も伴い、多くの学術研究上の成果、予報制度の向上、予報期間の延長へとつながっていった。

また、船舶の耐航性能についても波浪中における船速や船体運動がかなりの精度で推定できるようになり、WR に必要となるデータの収集・解析が行われた。

これらの学術的な研究の発展により、以前比べ格段に効果的な WR が可能になっていった。

日本の船社が WR に関する商業ベースのサービスを本格的に受け始めて行ったのも、1970 年代の中頃のことであった。

我が国においても 1970 年代から(財)日本気象協会が本格的にサービスを実施している。

## (2) ウェザー・ルーティング・サービスの実際

船長が最善の航路を選択する場合に考慮できる要因として、船のエンジンや航海機器(レーダー、LORAN、SATNAV、GPS 等)の状態および積荷の種類など航海を始める段階ですでに分かっているものがいくつかある。

しかしながら、最適航路を決定する上で重要な航海中の気象・海象については、船長が最初に航路を決定する時点ではまだ分かってはいない。大洋を航行する船舶で得られる情報としては各国が放送している気象ファクシミリ、無線または音声による注意報・警報等が主なもので、船上における気象・海象情報の入手には自ら限界がある。しかし、できるかぎり最善の航路を選択するためには、長期的な予想天気図をはじめとして波浪予報、海潮流の予想、霧予報、海水・流氷、気温・水温の見通しなど、より多くの有効な資料を入手することが望ましい。

船長が最適航路を選択する際、船舶側では入手が困難なこれらの情報を陸上から提供することにより、船舶の安全性を確保し航海時間の短縮および燃料の節約による運航効率を高め、さらに船体および貨物・甲板機器等の損害の軽減、乗組員の快適性の向上等を図るとともに、推薦航路の提供を行うサービスとして WRS がある。

ここでは、実際の WR のサービスについて、上記 2 社で行われているサービスをおりまぜながら、まず、その情報を船舶に提供するサービスの手順等の概要について航海開始時(出港時)、航海中、航海終了時(入港時)とに分けてその概要を説明し、次にサービスを行う陸上の気象予報技術者(ルート・アナリスト)が入手している情報並びに技術および使用しているコンピューター・プログラムについて紹介する。Fig. 25に WRS の流れを示した。

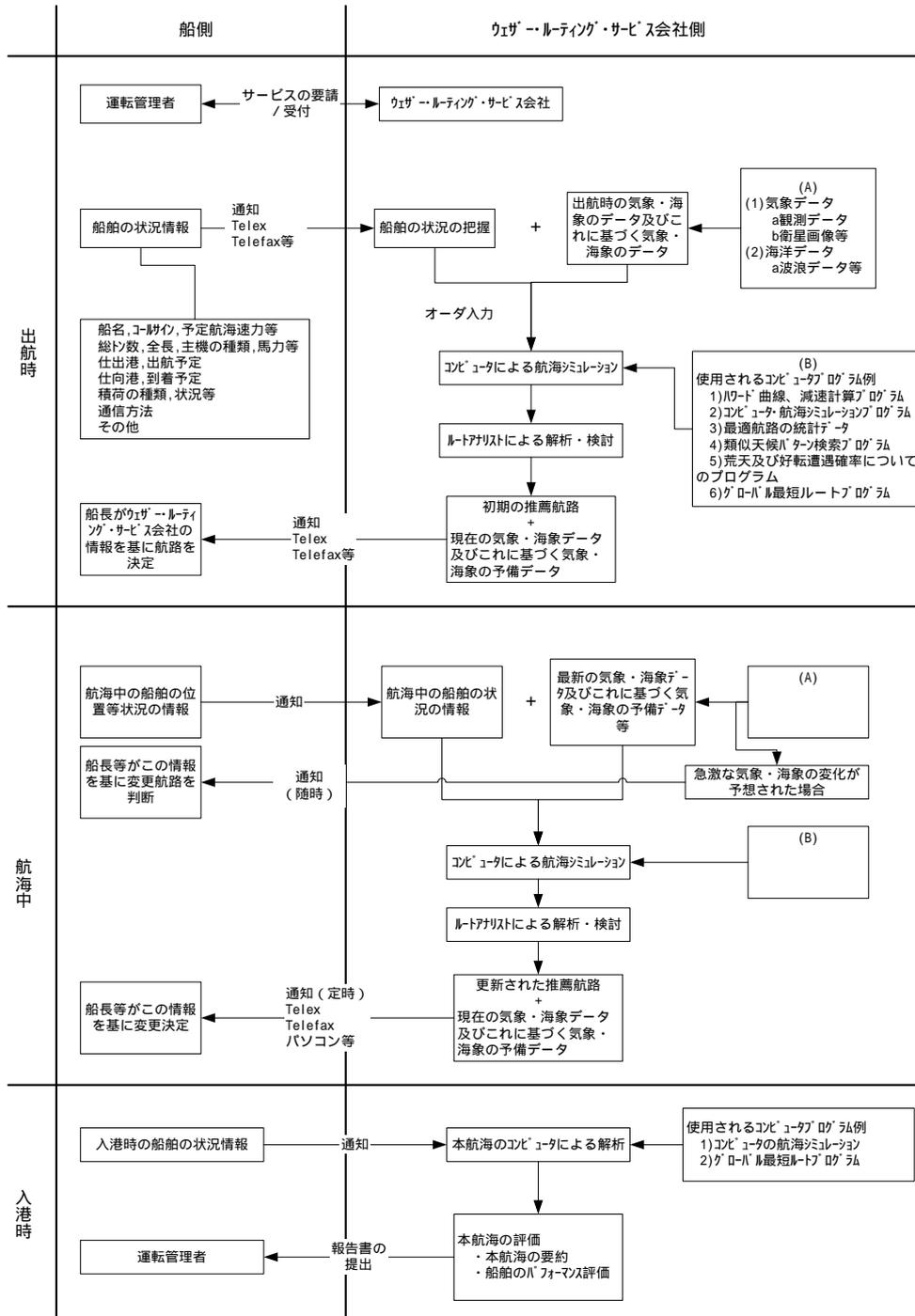


Fig. 25 WRS の流れ

(ア) 航海開始時

・オーダー入力

WRS 会社へ、運航管理者から少なくとも出航の前日までに次の事項が提供される。

船名、コールサイン、予定航海速力、航海番号  
総トン数、全長、主機の種類、馬力、燃料消費量、動揺周期、  
GM 値、喫水(船首および船尾)  
仕出し港名、出航予定日時(ETD)  
仕向港名、到着予定日時(ETA)  
積荷の種類、状況(甲板積みの有無、高さ、貨物の特殊性)な  
ど  
通信方法(インマルサット<sup>2</sup>または SITOR 番号、あるいは海岸  
無線局)  
その他留意すべき事項(動揺の最大許容度、遭遇波高の高さ  
の限界、船倉内の貨物の特殊性等)

これらの情報はルーティングを行うその会社の、ルート・アナリストに  
よって航海ルート・ファイルに入力され運用されることになる。

・初期航路の推薦

予報と推薦航路に最新の気象・海象データを反映させるため、また船長  
が出発前に推薦航路を検討することができるようにするため、出港数時間  
前までにテレックス等によって推薦航路が提供される。最初の推薦航路を  
作成するときルート・アナリストはその日のごく普通の船舶の推薦航路で  
ある基準航路を参考にする。

航行上の制約条件、また天候上の制約条件が連絡されている場合にはこ  
れらも考慮に入れられ、それぞれの航海のための特別な推薦航路が作成さ  
れる。何ら特別の条件が連絡されていない場合には、ルート・アナリスト  
は航路選択の条件として、特に損傷しやすい貨物は船舶に存在しないもの  
と想定し、また船舶およびその航海機器は良好な状態にあり航海の目的は  
その船舶に重大な損傷を与える可能性がある荒天状況に船舶を遭遇させ  
ることなく、できるかぎり早く目的地に到達することであると想定する。  
最初のルーティング・メッセージには、通常以下の事項が含まれている。

---

<sup>2</sup> インマルサット装備船が増加傾向にあり、世界の船舶のうち 1985 年末で 5 千数百隻余に搭載されているとい  
われている。日本船はそのうちの 1 割を占めるに至っている。また、現在、テレファックスを装備している  
船舶はごくわずかであるが今後の普及が待たれる。テレファックス搭載船には、図面を交えた情報が提供で  
きるので極めて有利といえる。

少なくとも最初の 3~4 日間航海に影響することが予想される主要な気圧系の発達および移動についての詳細な概況と説明

航海中遭遇するであろうと予測される主要な低気圧の経路および継続的な荒天域の長期的な概況

推薦航路およびその理由並びに推薦航路に沿った場合の目的地までの概略の距離および航海時間

推薦航路で少なくとも最初の 3~4 日間に予測される風および波の詳細な説明

関係する海洋情報

例)最新の黒潮、メキシコ湾流の中心の位置または流氷、冰山などの位置

実際の出港時刻と船長の意図する航路等を連絡する旨の要請

その他(到着予想時刻、予想航海速力、鮭鱒漁業操業図等)

船長の意図している航路が連絡され、しかもそれが推薦航路とは大幅に異なるものである場合、推薦された航路と船長の意図した航路との比較を追加する場合がある。

船長が最初の予報と推薦航路を検討した後、推薦がなされた理由を理解できない場合、あるいはその特定航海についてその推薦が適切でないと思われる場合は、船長は直接 WRS 会社に問い合わせを行うことになる。

ルート・アナリストは船長に納得してもらうよう説明を加えるか、あるいは船長から連絡を受けた新たな情報に基づいて新しい推薦航路を提供することになる。

WR のメリットを最大限に達成するために、船長が WRS の能力を信頼することが重要であり、また、ルート・アナリストは代替ルートを適切に評価するために必要な船舶および貨物についてのすべての情報および知識を持っていることが重要である。

## (イ) 航海中

### ・航海中の船位確認

定期的に世界気象機関(WMO : World Meteorological Organization)に対し船舶気象通報を行う船舶は、通常、その位置を直接 WRS 会社に連絡する必要はない。WMO データ回線は当該船舶によって行われる観測結果を得るために WRS 会社のコンピューターによりモニターされている。位置および気象データは自動的に抽出され、船舶の航海ファイルに入力され、船舶の今後の位置を推定するために使用されている。

WMO 船舶気象通報を行わない船舶は 2 日ごとに正午位置、進路、船速、

風、波浪、船の状態等を WRS 会社に連絡する。

また、熱帯低気圧の付近を航行中、あるいは悪天候に遭遇した場合は毎日通報するように要請される。

船長は、また、エンジン出力の大きな変更または航路変更、エンジン停止を行った場合、あるいは推薦航路とは異なった航路を採用しようとする場合にはその理由を連絡するよう要請される。それは今後遭遇するであろう天候状態をできるだけ正確に予報するために必要となる。

#### ・航海中のサービス

毎日予報が行われ、航行中の各船舶の航路、気象・海象の状況、船速、仕向港への到着時刻、航程等がチェックされる。通常更新された予報・推薦航路およびチェックされた内容を船内時間の正午までに船舶に連絡する。

本船の航路上で気象・海象の急激な変化が予想され、その悪天候を回避あるいは、その影響を最小限に抑止するために即刻行動する必要がある海域を航行中の船舶に対しては優先的にサービスが行われる。また、船長から情報あるいは推薦航路を求める特別の要請があった場合も優先的にサービスが行われている。

ルート・アナリストが提供している情報は、コンピューター・ディスプレイに表示される。このディスプレイには航海、船舶の特性、通信方法、特別な航路考察条件、最新の推薦航路、報告位置、今後 3～4 日間の推測位置および船長に対しての連絡並びに船長からの連絡等最新のメッセージなどが含まれている。前に船長に連絡した予報と推薦航路は現在の予報に照合してチェックされ、必要な場合は更新される。また、最近では、気象・海象や航海に関する資料類についても、多重タスク機能を有するパソコン上への表示が可能となっている。WRS 会社のホスト・コンピューターから、船舶に設置されたパソコンに必要なデータを随時送信し、プログラムメニューの中から任意に出力表示ができるシステムである。ある会社では、次のような基本メニューが用意されている。

地上・高層の実況天気図と予想天気図  
実況波浪図の波浪予想図(波高と波向)  
メッシュ上の風向風速(実況と予想)  
メッシュ上の波浪(波高と波向)  
船舶気象電報実況および地図上への表示  
台風・ハリケーンの実況と予想の表示  
診航海解析報告書(速報)  
ロスト・タイム表  
バンカーモニタリング  
デイリーレポート情報  
推薦航路情報  
航海中の航路表示および気象・海象の実況値と予想値の表示等である。

さらにオーダー追加メニューとしては、衛星雲写真、アメダス資料、各地天気予報、注意報・警報、海流実況値、海水・流水実況等、幅広い出力表示が可能である。

このような連絡を行った後で、新しい気象データが得られると、これを評価し、予報を変更すべきかどうかを判定する。予報が大幅に変更される場合には、その変更の影響を受ける船舶が調査され、必要に応じて予報および推薦航路が連絡される。さらに、新しい位置報告が行われるごとに自動的にコンピューター・プログラムによって確認され、船舶が推薦航路を採用しているかどうか調査される。船舶が大幅にその航路から外れている場合には、ルート・アナリストに警報が発せられ、新しい予報および推薦航路が連絡される。また、船舶が悪天候に遭遇しているという連絡を受けた場合には、ルート・アナリストが当該船舶に最後に連絡した予報を検討し、その状況が予報に折り込み済みであるかどうかを確認し、必要な場合には更新、された予報が連絡される。

なお、このようなサービスを行う際に、船長は、ファックス等により天気図を入手しており、現在の天気状況および24時間～36時間を対象とする短期予報が提供されていると想定されている。したがって、ルート・アナリストは、通常、この範囲を越えた期間についての気象情報を船長に提供することを主眼としている。また、船長はそのファックス等による天気図を船舶の現在の位置により選択した一つの機関から受信するものである(例えば、東太平洋の場合は米国気象庁(NWS)、西太平洋の場合は日本国気象庁(JMA))。

WRS 会社では複数の情報源からの数値気象予報(NWP)データを使用し、その後、最も信頼性の高い予報と判断されたものを使う。そのため、WRS 会社から連絡された予報がファックス等による天気図の予報と矛盾して

いる場合がある。

#### (ウ) 航海終了時

航海終了時、その航海についての要約および船舶のパフォーマンス予備評価についての報告書が WR 会社から運航管理者等に対し提出される。出発港と到着港間の航海距離、出入港月日、船舶位置と時刻と航海距離および平均速力、海流並びに気象・海象による減速量、その航海の平水速力と契約速力、風・波浪の段階別遭遇時間、日平均気象・海象値と日最大値、それに推薦航路と実際の航跡の航路図等である。

船長は、これを次の航海における航路選択の際の参考とすることができる。また、WRS 会社にとっても、契約船の過去の航路や航海分析として整理しておき、次の航海で推薦航路を選定する際に、そのサービスの向上に役立つ貴重な資料となる。

#### (3) ウェザー・ルーティングに利用する資料について

大洋を航海する船舶の船上における気象・海象の情報の入手には限界がある。

船上で得られる情報としては各国が放送している気象ファクシミリ、無線またはボイスによる注意警報等がある。しかし、船舶においては、長期の予想天気図をはじめとして、波浪予報、海潮流の予想、霧予報、海氷・流氷の状況、気温・海水温の見通しなど、より多くの有効な資料の入手が望まれている。

これらを補完する意味で陸上から適切な情報を提供することにより、船舶の安全性を確保し、航海時間の短縮および燃料の節約による運航効率を高め、さらに船体および貨物・甲板機器等の損害の軽減、乗組員の快適性追求に寄与しようとするのが WR の主たる目的である。

WR のために以下の資料が活用されている。

#### (ア) 気象データ

##### ・観測データ

世界気象機関(WMO)、気象庁等から提供される世界規模の陸上・海上における天気観測データ。この他、船舶から送られてくる気象情報。

##### ・衛星画像

日本の GMS、米国の GOES、LANDSAT および欧州の METEOSAT 等の人工衛星から提供される大洋のリアルタイム画像。

大洋域からの観測データは通常まばらである。したがって、低気圧を初期に発見するために、特にそれが発達段階にある場合には、リアルタイムにグローバルなデータが得られる衛星画像データは非常に価値が高い。こ

ここでいう低気圧には熱帯低気圧も含まれているが、これはコンピューターによる数値予報では正確に予報しにくい。

・実況天気データ

日本国気象庁(JMA : Japan Meteorological Agency)による地上および 500mb 解析図、米国気象庁(NWS : National Weather Service)による地上および高層解析、欧州中期予報センター(ECMWF : European Center For Medium - Range Weather Forecasts)による全地球域での地上および 500mb 解析並びに熱帯域(35°N - 35°S)での 850mb および 200mb の風解析データ。

これらのデータを基に、ルート・アナリストが作成する詳細な天気解析図。

この他、米国海軍艦隊数値海洋センター(FNOC : Fleet Numerical oceanography center)の地上気圧および地上風解析を利用している WRS 会社もある。

・数値気象予報(NWP : Numerical Weather Prediction)

モデルからの予報情報

JMA による 72 時間(3 日間)先の地上および 500mb 予報並びに 8 日間先までの概況

NWS による 120 時間(5 日間)先までの平均地上および高層レベル予報ならびに 6 ~ 10 日間先の優勢な低気圧の動きを予測するための、北半球の高層レベルでのフロー・パターンに関する情報

FNOC による 120 時間(5 日間)先までの全球地上気圧および地上風予報

ECMWF による北半球および南半球(20°N - 90°N、20°S - 90°S)の 144 時間(6 日間)先までの地上気圧および 500mb の予報、並びに 72 時間(3 日間)先までの熱帯(35°N - 35°S)風予報

・特殊気象警報

各国の気象機関等からの高波警報、強風警報、暴風およびさまざまな沿岸の天気および海象状況の予報

台風、ハリケーンおよびサイクロンに関する予報は、JMA、NWS ハリケーン・センター(マイアミ、レッドウッド・シティおよびホノルル)、JTWC(Joint Typhoon Warning Center)、マニラ、香港およびオーストラリアの気象庁並びにナンディ、レユニオンおよびモーリシャスの予報センターから入手される。

・気候学的データ

各グリッドポイントにおける毎月の平均風速・風向並びに平均海況(波浪、うねり)のグリッド化されたデータベース  
現在の気象パターンを考慮するために開発された特別な現況適応型気候データ。(特にその時点で異常な天気パターンが優勢である時に、通常の気候学的平均値による場合よりも、より精度の高い航海シミュレーションおよびETA 計算を行うために有効)。  
コンピューターでフォーマット化されたパイロット・チャート・データ(風向、頻度、平均風速、強風頻度等)

(イ) 海洋データ

・波浪データ

JMA から出される波浪実況図および予報図  
NWS から出される北大西洋および北太平洋の波高並びにうねりの高さの実況図および予報図  
全大洋を対象とする FNOC のグローバル・スペクトラム波浪モデル(GSOWM)による 72 時間先までのグリッド化された解析データおよび予報データ

・海水データ

北西大西洋において目撃された冰山を対象とする米国沿岸警備隊からの海水パトロール通報  
北西大西洋、セントローレンス湾並びに他のカナダ沿岸水域における流氷および冰山通報  
米海軍および NOAA(米国海洋大気庁)の全球にわたる海水解析および 30 日概況  
スウェーデンからのボスニア湾およびバルチック海の海水解析  
北海道、千島列島付近の北西太平洋、オホーツク海、日本海についての海水解析  
NWS からのベーリング海およびビューフォート海の海水解析  
飛行機観測に基づくケープホーン付近および以南の領域での海水解析  
ルーティング・サービスを受けている船舶からの冰山等の観測報告

・大洋表面海流

優勢な海流を表示する全大洋のパイロット・チャート  
パイロット・チャートから作成された優勢な海流の月ごとの  
グリッド化データベース(コンピューター航海シミュレーション用)  
JMA からの黒潮および親潮の中心部分の位置および強さの  
解析データ  
NWS からの通報およびファクシミリチャートのメキシコ湾  
流の位置の解析データ

(4) 推薦航路の選定とこれに関するコンピューター・プログラム

WRS 会社において、推薦航路の選定は、先に述べた各種資料を基に気象・海象についての豊富な知識、船体と航海に関する知識を十分に備えているルート・アナリストと呼ばれる専門家が種々のコンピューター・プログラムを駆使して、解析・検討することにより行われている。

ここでは、実際にルート・アナリストがどのようなコンピューター・プログラムを用いて推薦航路を選定していくのかその概要について説明する。

(ア) 推薦航路の選定

船舶の最適航路については、1957年ジェームスが波浪図と船舶の性能曲線(Performance Curve)を使って航路選定を行う試行を初めて行った。彼は波高と波向(向かい波・横波・追い波の3段階に分類)に対する船舶の速力の自然減速量を求める手法を開発した。そして波高・波向と性能曲線を使ってある地点から放射状に船を進めてその線が12時間ないし24時間後に到達する位置を計算し、それらを連ねた線を等時間曲線(Isochrone or Time Front)とした。

そしてこの等時間曲線上に垂線を立て、その方向に波高・波向と性能曲線を使って12時間ないし24時間船を進めて自然減速量を計算しながら船の到達位置を算出した。これが2日後の船の等時間曲線である。この作業を繰り返して仕向港までの等時間曲線を求めて最後の曲線から逆に遡って最適航路(最短時間航路)を選定した。この方法は、等時間曲線法と呼ばれている。

以来最適航路を求める手法として変分法、ポントリアーギンの最大原理の応用、ダイナミック・プログラミングなどを用いた解法が多くの研究者によって試みられている。

しかしながら、最適航路は、いずれの手法においても全航程の気象・海象の予報の精度に大きく左右される。

船舶が太平洋を横断するには、高速船(20ノット)で約10日、中速船で

12～13日、低速船に至っては18日程度に及ぶ長期間の航海となる。この間の気象・海象の予報には、過去の風・波浪の資料の統計に基づき季節ごとあるいは月～旬ごとに予報を行う気候学的方法とコンピューターによるシミュレーションを用いて気象・海象のメッシュ予報を行う気象学的方法とがある。実際には、これらを併用して最適航路の選択が行われることになる。

特に、近年スーパーコンピューターの導入により先進国では7日から10日先までの数値予報が計算され実用化されている。数値予報で算出された地上気圧値の検証を行った結果では、 $r=72$ 時間までは、相関係数で0.8以上の信頼度が確認されている。また、 $r=120$ 時間では平均的に0.6程度になるが実用には充分耐え得ると判断される。Fig. 26に推薦航路決定に関するフローチャートの一例を示した。

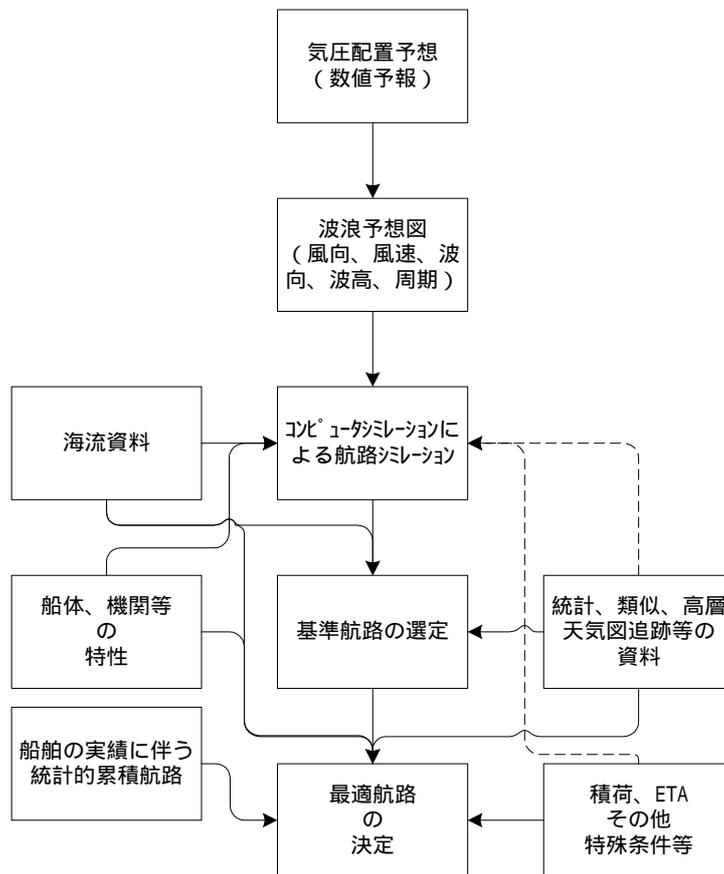


Fig. 26 推薦航路決定に関するフローチャート

図中のコンピューターによる航路シミュレーションは、前述の等時間曲線法のプログラムによって計算される。数値気象予報では、初期値  $T$  は120時間(5日間)まで出力される。この気圧メッシュデータを使って波浪推

算プログラム(原型は気象庁モデル)により波高、波向、波周期の各要素を計算する。波を推算する風は米国の Cardone(1969年)の手法を基礎として、エクマン層と地表層とからなる大気2層モデルを仮定して、境界層理論から高度20mにおける風を計算している。

ある WRS 団体では、以前は、波浪予測を独自に予測を行っていたが、最近では、1996年に導入された気象庁の全球波浪モデルが本格的に運営され、このプロダクト利用されつつある。

シミュレーションの実行には最低10日間の予想値が必要であるが、現在十分な精度が得られていないため、5日以降のデータは統計値によって補完される。過去30年間の蓄積された気象・海象データから当該期間のデータが類似法によって選択される。抽出されたデータと波浪推算より得たデータを結合させ、その一連のデータを使ってシミュレーションを行う。予想値は毎日更新され、予想が的中している期間では、提供された情報は適切と判断される。しかし、予想に変化の兆しが現れたときは、その都度船舶の現在位置からシミュレーションを実行し直す。

シミュレーションにより選定された航路を参考として、ルート・アナリストによる出港地別の基準航路の選定が実行される。これは、低気圧経路、低気圧の発達程度等を高層天気図と照合させて検討したり、高波高域の生成海域および移動等、パターン化した一連の資料を参考に船種、船型別の航路を決定する作業である。基準航路が選定された後、船舶からの希望事項や積荷の特殊性、到着時間等を勘案し、さらに船体の動揺、スラミング、レーンゲ、海水打ち込み等が最小となるような最適航路が契約船舶ごとにルート・アナリストによって選定される。

#### (イ) 推薦航路の選定に用いられるコンピューター・プログラム

現在、コンピューターによる数値気象予報は、4～5日予報の範囲を越えても十分に正確であって、この予報だけに依存できるというような水準にまではまだ到達していない。現在、熟練したルート・アナリストがNWPモデルによって作成された予報を解析し、モデルの計算結果に含まれていることが判明している誤差を取り除き、モデルが把握しきれていない気象の状況を洗い出し適宜修正を行っている。

コンピューターだけでは一貫して十分満足できる予報とルート選択を行うことはできないが、コンピューターはルート・アナリストがWRSを提供する際の意志決定についてきわめて重要な役割を果たしている。次に示す、のコンピューター・プログラムはこのために開発されたものの一例である。

## ・コンピューターによる速力・位置の推定

(ハワーズ曲線と SRA : Speed reduction algorithm)

適切な WRS を提供するためには、ルート・アナリストは船舶の現在位置および航海に影響を及ぼす主要な気圧系との関連で将来の船舶の位置を推定することが必要である。船舶から報告された位置から、船舶の航行速度と遭遇した天候状態および今後遭遇する可能性がある天候状態等を考え合わせて、現在位置の、また今後到達すると考えられる位置の推定を行うことができなければならない。

これは人間の手で行うこともできるが、多くの船舶が同時にルーティングを受けている場合には非常に時間がかかる作業である。それでは全船舶に対してタイムリーな航路推薦を行うことはできない。したがって、ルート・アナリストが主として天気予報とルートを選択に集中することができるように、グリッド化された風および波の数値予報を入力すれば(あるいはアナリストが予報に同意しない場合は、自分自身で修正した値を入力することにより)、推薦航路(あるいは可能な代替ルート)に沿って船舶の減速量を求め位置推定を行うコンピューター・プログラムが開発されている。それは、ハワーズ曲線および SRA の 2 種類の減速計算プログラムである。他に、table 45 のようなプログラムが開発されているが、現状では事後の検証等に利用されている。ここでは、主に推薦航路の選定に使用されている、ハワーズ曲線および SRA についてその詳細を説明する。

table 45 WRS で用いられるシミュレーション用プログラム

プログラム/データ・ベース	用途	概要
ハワーズ曲線(H-カーブ)	推薦航路の選定	現在、推薦航路の選定に主として使われている。必要とされるデータが、比較的少ないため、計算速度が速い。
SRA (Speed Reduction Algorithm)	主として推薦航路の事後評価	現在の数日間先までの典型的な予報精度では、SRA プログラムによる船速予測の結果は、現在まだH カーブによる場合よりも大幅に優れているとはいえない。
SURVEY Program	主として推薦航路の事後評価	現時点では、グリッド化された気象予報データは 5 日分しか提供されないため、SURVEY は航海があと 6~7 日しか残っていない場合に非常に有効でとなる。
TRES (Trade Route Evaluation Study)	推薦航路に近い航路の選定	世界の主な航路に関する 5 年間の日データをもとに作成された、減速量、航海時間・荒天データに関する月間統計値。 データ精度改善のため、現在も統計は続行中。
ANALOG(類似)プログラム	推薦航路に近い航路の選定	FNOC の実況データベース、TRES データの検索用プログラム。 過去の類似天候パターンにおいてはどのルートが最適であり、どのルートに沿った場合に悪天候が多かったかを出力する。
WIND P プログラム /TRIKE P プログラム	荒天に遭遇する確率の推定	過去の予報誤差に基づく総合的な統計解析値
GMTR (Global Minimum Time Route)	主として推薦航路の事後評価	任意の貿易ルートにおけるあらゆる種類の船舶の最適ルートの推定。可変ではあるがグリッドによる代表点を用いるため、近似の最適航路となる。

・ハワーズ曲線(H カーブ)

ハワーズ曲線(H カーブ)は、気象条件と船舶の減速量(あるいは増速量)との関係を表すものである。H カーブは米国 WRS 会社の、ハワード・キャスター氏が、ルーティング・サービスを受けていた船舶の速度に及ぼす風と波の影響について多くの観測結果に基づいて開発したものである。H カーブは最初は表とグラフの形式で、人間の手による位置推定のために使用された。以来、データは蓄積され、H カーブはコンピューター・シス

テムで使用できるようになっている。Fig. 27に、簡略化された H カーブの実例を示す。これはビューフォート風力階級の形式で表現した気象状態と、平水速力を 100%とし百分率表示された速力との関係を追い風・横風および向かい風について表示している。

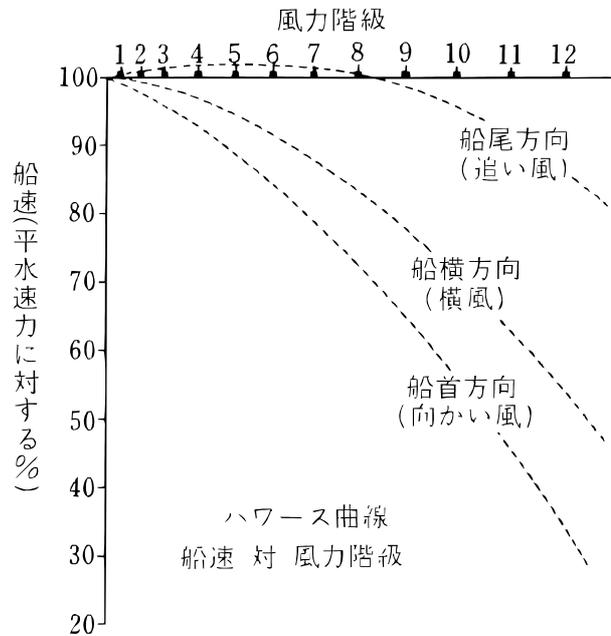


Fig. 27 簡略化された H カーブの一例

例えば風力階級 8~9 の横風に遭遇している船舶の速度は、平水状態で航行する速度の約 80%に減少する。実際に運用されている H カーブはさらに 2 方向からの波やうねりなどの他の要因も考慮している。H カーブはコンピューターによる推測航法を行うには非常に適したものである。H カーブは速力低下率と船舶の進行方向と相対的な風や波の状態との波の関係を表しているため、プログラム化が簡単である。他に入力しなければならないのは風の状態(風力、風向)および平水状態での船の速度だけであるため、多数の推測航法計算を非常に短時間の間に実行することができる。H カーブの短所は、これが特定の船舶に固有のカーブではなく一般的な船舶のパフォーマンスカーブであるということである。H カーブによる推測航法は、実際の船舶の形状、サイズおよび積荷条件により精度がさまざまに変動する。しかしながら、H 係数という補正係数を船舶の形状、サイズ、積荷条件がさまざまに異なる船舶に対して使用することにより、特定の船舶のパフォーマンスを表すことが可能で、それにより H カーブの能力は大幅に増大する。一般に特定船舶に H カーブを適用するこ

とにより生じる推測航法上の誤差は、気象予報が不正確であるために(あるいはデータ希薄地域の実況解析の不正確さのために)生じる誤差よりもはるかに小さい。

H カーブに加えて特定のクラスの船舶のための、経験的な減速曲線も開発されている。しかしながら、気象予報データの精度不足や、また、船舶の積み荷条件についての詳細な情報が不足していることの方が、その船舶固有のカーブを使用するかどうかよりも重要であることが多い。多くの異なった速度曲線を保存したり使用したりしても、コンピューターの処理時間が長くなるだけで実質的に精度が大幅に向上することはないため、むしろ WR・プロセスを最適化するために H カーブが日常的には使用されている。

・SRA(Speed Reduction Algorithm)プログラム - 減速計算プログラム -

一方で、将来期待される気象予測のモデルの大幅な精度の向上に対応して減速アルゴリズム(SRA : Speed Reduction Algorithm)プログラムが開発されている。気象による減速の一般化された関係を同型船に使用する H カーブのやり方に替わって、SRA プログラムは個々の船舶の精密な形状を使用して船舶に作用するさまざまな外力を計算する。これらの外力には、風による抵抗、波抵抗、海流、海水中を移動することによって発生する摩擦抵抗などが含まれる。これらの抵抗を克服するために必要なエンジン出力を使用可能なエンジン出力から差し引き、これを基に船の速力が求められる。正確な天候のデータおよび詳細な船体構造と積荷条件のデータなどと合わさって初めて、SRA プログラムは非常に正確な結果を生み出す。

しかしながら、WRS が提供されるときには、しばしば船体や積み荷についての詳細な条件がサービスを提供する側では分かっていないことが多い。このため SRA プログラムは、設計速力、設計喫水、船体の深さ、垂線間長、船幅、載貨重量トン数および船舶の形状など、船舶についての最低の情報で運用できるようにプログラムされている。通常この情報は、例えばロイズ船級協会からの出版物などによって入手することができる。

正確な天候データが入力されるならばたとえ船舶についての情報が最低の量のもので、SRA プログラムを使用することによって非常に正確な速力推定ができる。さらに、実際の航海の喫水、乾舷、トリム、軸馬力、船底汚損の程度などについて追加の情報が提供されるならば、SRA プログラムの精度はさらに良くなる。Fig. 28に大型コンテナ船(長さ 262m)、自動車専用船(長さ 180m)、大型タンカー(長さ 324m)についての SRA プログラム出力の実例を示す。

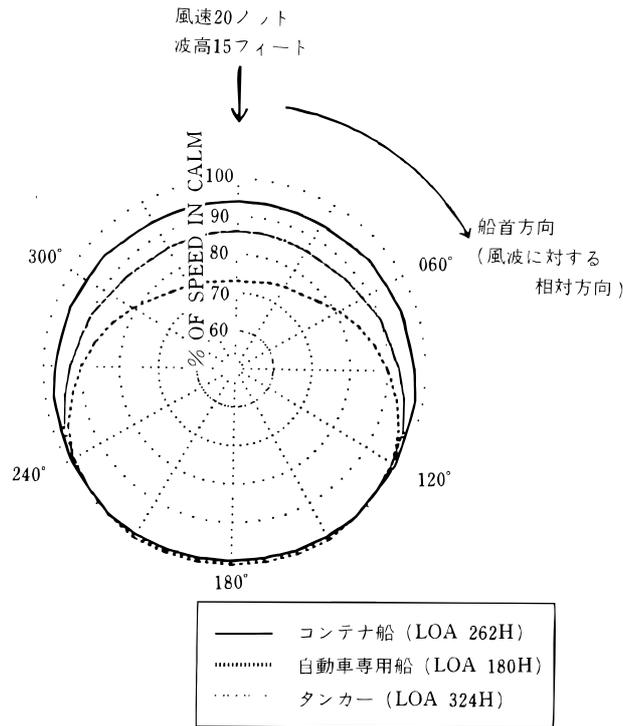


Fig. 28 減速計算(SRA)プログラム出力の例  
(大型コンテナ船・自動車専用船・大型タンカー)

この例の場合、天候条件は20ノットの風および同一方向からの15フィートの波であり、他方向からの波やうねりはないという条件である。その結果が、風波に対する相対的な船首方向について平水船速に対する百分率の形で示されているが、これによると同じ天候条件でも船種により風と波からうける船速への影響が大きく違うことがよく分かる。

SRAプログラムは船舶の大きさおよび形状によって鋭敏に影響されるため、気象データはきわめて正確でなければならない。SRAプログラムは特に、船舶の長さに対する相対的な波の方向および波の周期に対して非常に敏感である。

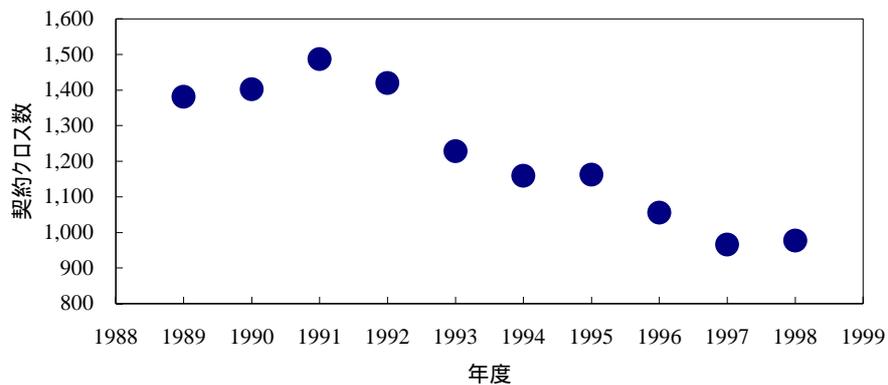
波の周期における誤差(予報または解析)によって、SRAプログラムで計算された船舶の速度には大幅な誤差が生じる可能性がある。しかし、波の周期は測定や解析または予測が最も困難なものの一つである。したがって、風速および風向また波高と波向が正確に解析され予報されたとしても、波の周期の誤差によってSRAプログラムの船速予測精度が不十分となる可能性がある。現在の数日間先までの典型的な予報精度では、SRAプログラムによる船速予測の結果は、現在まだHカーブによる場合よりも大幅に優れているとはいえない。SRAプログラムを使用する場合にコンピューター処理時間は、Hカーブを使用する場合よりも数倍多くかかるため、通

常の船速予測の手法としては、現在でもHカーブが使用されている。SRAプログラムは主として航海終了後の解析目的のため、またパフォーマンス評価のために使用されている。事後解析においては、より正確な気象の解析・実況データが使用できる。このような状態は気象予報データの精度がさらに改善され、SRAプログラムを日常的にWR・オペレーションに使用することができるようになるまで、このまま続くことが予想される。

(5) ウェザー・ルーティング・サービスの利用状況

(ア) 利用数の傾向

民間WRS団体における過去10年のWRSの利用状況の傾向を、Fig. 29に示した。1991年のピーク時に比べて、最近の利用数は60%ほどに落ちこんでいる。利用数の減少傾向の理由としては、顧客側の経費削減によるものである。



民間WRS団体提供資料より作成。クロス数の合計は、複数の航路を含む。

Fig. 29 WRSの契約クロス数(航海数)の変化

(イ) 利用船種の内訳

table 46に主な船種における WR の大まかな利用内訳を示した。

table 46 利用船種別 WR・サービスの利用割合の内訳

(夏季は全体として7割程度に減少する)

船種	利用割合(%)
タンカー	0(非常に少ない)
コンテナ船	100
自動車専用船	100
バルクキャリア	70

タンカーでは、高速で走る必要がないため、ほとんど WRS を受けていない。コンテナ船は一般に高速で航行する必要があり航行時間の短縮のため、自動車船では積荷保護のため WRS を受けている。

(ウ) 欧米における WRS

萩原(1987)によると、欧米では、1950年代から60年代にかけて、WRS が開始された。現在、ヨーロッパでは、日本の気象庁に相当する国立の機関がサービスを行っている。一方、アメリカでは10社程の民間会社がサービスを行っているが、軍艦に対しては、海軍の数値予報センターが WRS を行っている。

table 47に、欧米において実施されている代表的な WRS の概要を示した。

table 47 欧米における代表的な WRS(山田、1990 より作成)

国	機関	サービスエリア
英国	UKMO (United Kingdom Meteorological Office)	主として北大西洋。希望すれば北半球全域も可能。
オランダ	Royal Netherlands Meteorological Institute	北大西洋を対象とする一般のサービスの他、北海におけるオイルリグの移動や設置にかんして3~4日先までの気象・海象予報を行う。
アメリカ	Oceanroutes, Inc(現ウェザーニューズ)	San Francisco本社が、東京及びLondon支社と合わせて全海洋を覆うサービスを行っている。
	Bendix Field Engineering Corporation	主として大西洋海域のサービス。

### 5.3.2 波浪予報の現状

WRS の精度向上には、その推薦航路予測の基本となる波浪予報の精度向上が不可欠である。本項では、わが国の気象庁の波浪予測業務を中心にその現状の概要を述べる。

わが国の波浪予測業務は、海上気象課において実施されている。海上気象課では、数値波浪モデルを開発・運用して波浪の実況解析や予想を行っており、その結果を波浪プロダクトとして利用者へ提供している。

1996年3月の気象庁の気象資料総合処理システム(COSMETS)の更新に合わせ海上気象課では、外洋波浪モデルの計算領域を北西太平洋から全球に拡大した全球波浪モデルの運用を開始するとともに、格子間隔の細分化と予想時間の延長が図られた。また、これまでのマニュアル(手書き)による波浪の解析・予想作業をワークステーション(EWS)上での対話型システムに移行し、波浪図作成の迅速化と客観化が推し進められた。

本項では、まず、わが国の数値波浪予報の歴史的変遷とこれに伴う精度の推移について述べる。次に、現在運用されている数値波浪モデルの概要を示すとともに、最近導入された第3世代数値波浪モデルについてその概要を示し、最後に今後の波浪予測の展望について紹介する。

なお、本項をとりまとめるにあたり、羽島(1991)、市成ら(1997)、市成(1998)を参考にした。

#### (1) 波浪予測業務の変遷

気象庁では1973年に最初の数値波浪モデルMRI - を気象研究所で開発し、これを基に1977年から北西太平洋の波浪予想を開始した。このモデルは当初外洋域を対象に運用されていたが、1983年3月からは日本近海の波浪状況を詳細に表現するために、日本近海を対象とした近海波浪モデルの運用も開始した。さらに、沿岸域における詳細な波浪表現を可能にするため、近海波浪モデルの結果を基に診断的に計算する沿岸波浪モデルの運用も同時に開始した。この外洋と近海の数値波浪モデルMRI - は1986年9月まで使用され、MRI - に移行した。MRI - は物理過程として風波の発達に重要な働きをする成分波間の非線形エネルギー輸送が考慮されており、波浪のスペクトルレベルでの現実的な予想が可能になった。table 48にわが国の気象庁の波浪予報業務の経過を、Fig. 30にわが国の数値予報モデルの歴史的経過を示した。

table 48 気象庁の波浪予報業務の歴史的経過

年・月	内容
1972年1月	外洋波浪実況図(AWPN)放送開始
1973年	気象研究所 第1世代の波浪モデル開発
1974年	気象研究所 診断的境界層モデル開発
1976年3月	沿岸波浪計の展開開始
1977年3月	MRIの現業化および外洋波浪24時間予想図(FWPN)放送開始
1979～82年	海洋気象部 沿岸波浪予報モデル開発
1983年3月	沿岸波浪予報モデルの現業化 沿岸波浪実況図(AWJP)および同24時間予想図(FWJP)CDF放送開始
1984年	気象研究所 第二世代のモデル波浪モデルMRI - 開発
1986年9月	MRI - の現業化
1987年3月	AWJPおよびFWJPのJHM放送開始
1988年3月	沿岸波浪48時間数値計算予想図(FWJP04)および同時系列資料部内配信開始
1989年3月	数値波浪モデル格子点資料GPVの配信開始(新東京L-ADESS) パーソナルコンピュータ用沿岸波浪モデルの開発
1991年2月	数値気象予報海上風の直接利用開始

内容/年	1971	72	73	74	75	76	77	78	79	80	1981	82	83	84	85	86	87	88	89	90	1991
外洋波浪モデル		MRI	海上風モデル開発	現業化							MRI (第1世代の波浪モデル)							MRI-II (第2世代)			
海上風											診断的境界層モデル										
気象モデル											4L-NHM		8L-NHM		12L-HSM			16L-GSM		21L-GSM	
近海波浪モデル											モデル開発	現業化						MRI		MRI-II	
沿岸波浪モデル											沿岸波浪モデル開発	現業化						沿岸波浪モデル		診断的境界層モデル	
																		12L-FLM		16L-ASM	
																		12L-FLM		13L-VFM	
																				16L-ASM	19L-JSM
台風補正モデル											開発	現業化								台風補正モデル (海上風)	

(注) NHM 北半球プリミティブモデル、HSM 北半球スペクトルモデル、GSM 全球スペクトルモデル  
 FLM ファインメッシュモデル、ASM:アジア域スペクトルモデル  
 VFM:ベリファインメッシュモデル、JSM 日本域スペクトルモデル

Fig. 30 気象庁の数値予報モデルの歴史的経過

波浪は非常に不規則で、発達中の風浪では個々の波の峰はとがり、波の峰幅は2~3倍程度しか続かない。一方、うねりは風浪に比べて丸みを帯び規則的

になってくるが、それでもなおかなり不規則な変化を示す。

このような複雑な波浪を表現するために有義波という概念が導入されたが、数値波浪予報モデルでは更に複雑なスペクトルが利用されている。スペクトルは、複雑な海面変化を、周期、波高、波向の異なった多くの正弦波の重ね合わせで表現し、これらの正弦波の成分のエネルギー分布を、周波数並びに波向別に示したものである。

スペクトルに対するエネルギー平衡方程式に基づく予測法を、スペクトル法と呼んでいるが、方向スペクトルの全成分について計算が行われるため計算量が膨大で、大型コンピュータの導入により初めて実用化した予測手法である。

波の伝播における波どうしの相互作用は非線型であり、これをほとんど無視した第1世代モデル、パラメータ化して取り扱った第2世代モデル、可能な限り理論的に取り扱おうとしている第3世代モデルという順序で発展してきている。

## (2) データの収集

### (ア) 一般船舶による観測および通報

波浪観測資料の多くは、海上気象観測の一部として一般船舶と漁船から通報されるもので、海岸無線局や国際海事衛星 INMARSAT を経由して集められる。船舶や漁船から通報されるデータは目視による波浪観測結果で、観測項目には

- ・波向(10°単位)
- ・周期(1s単位)
- ・波高(0.5m単位)

の3要素があり、風浪とうねりを分けて観測し FM13 SHIP 海上実況通報式に従って観測されている。ここで、うねりは卓越する2つの成分まで通報される。

### (イ) 気象庁による観測

気象庁独自の観測データは次のものには、次のものがある。

- ・海洋気象観測船(6隻)
- ・海洋ブイロボット(4基)
- ・沿岸波浪計(11基)
- ・その他、沿岸の気象官署・アメダスによる風などが実況解析に利用されている。

海洋気象観測船は、一般の船舶同様に波浪の目視観測を含めた海上気象観測通報を行うとともに、船用波浪計搭載してより高精度な観測が行われている。通報されるデータは、有義波の波高(0.5m および 0.1m 単位)と周

期(1s 単位)である。波浪計からは、有義波などに加えて周波数スペクトルなどの情報を収集が可能であり、数値波浪予報モデルの改良等に活用されている。

この他、全球気象観測網(GTS)から得られる船舶やアメリカ海洋大気庁(NOAA)の海洋気象ブイロボットのデータも収集され利用されている。特に、NOAA ブイは 1990 年 9 月より、国際気象通報式 FM65 WAVEOB 波浪スペクトル通報式により方向スペクトルのデータが通報されており、有用な情報となっている。

Fig. 31は、気象庁でリアルタイムに収集した波浪観測資料の分布である(海洋気象部海上気象課、1990)。

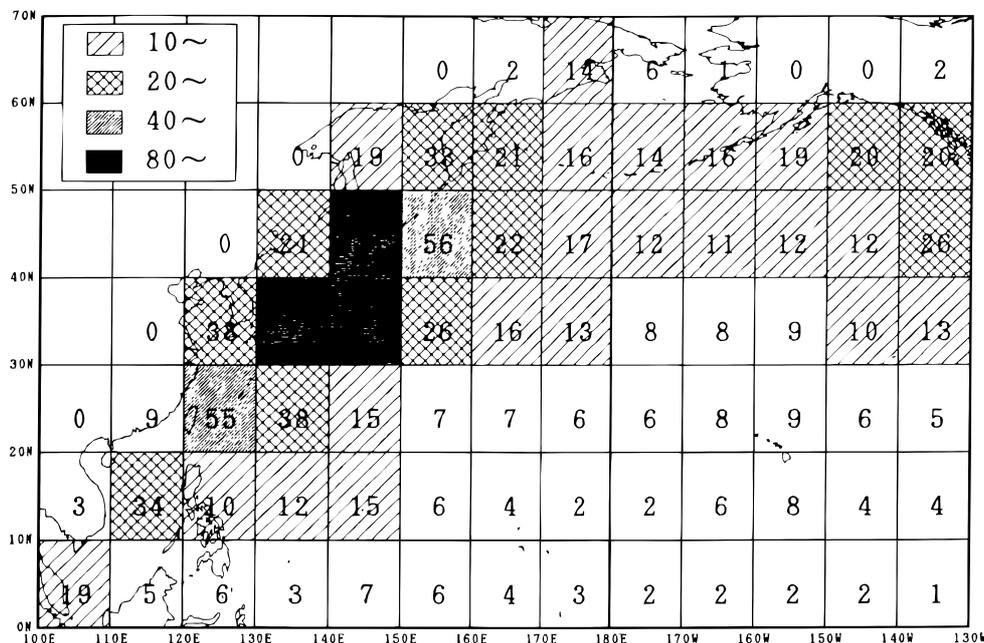


Fig. 31 気象庁でリアルタイムに収集した波浪観測資料の日平均分布(1985 ~ 1988 年)

数字は、東西 10° × 南北 10° の矩形の範囲内の日平均の全データ数である。約 75% が一般の船舶から通報されてきており、北米航路などの航路上に集中している。一方、赤道海域は非常に少ない。

### (3) 現在の波浪解析・予想システムの概要

#### (ア) 新しい数値波浪モデルの特徴

COSMETS の更新に合わせて、この 3 つの数値波浪モデルのバージョンアップが行われている。主な変更点は次の通りである。

外洋波浪モデルは計算領域を北西太平洋域から全球へと大幅に拡大さ

れている(実際に計算するのは北緯 70 度から南緯 70 度までであるが、両極の周辺は海水と大陸のため、この計算範囲ではほぼ全球の波浪をカバーできる)。また、格子系をポーラステレオ投影面上の正方格子から緯経度格子(球面座標)とし、格子間隔を 381km から若干細分化して 2.5 度(約 250km)とした。この結果、かつては表現されなかった南半球からのうねりの伝播など遠来のうねり表現が可能になり、さらにその伝播経路も大圏コースを通るようになり、より現実的になった。

近海波浪モデルについても緯経度格子系を採用し、格子間隔を 127km から 0.5 度(約 50km)と大幅に細かくしたことから日本近海域のより詳細な表現が可能になった。沿岸波浪モデルについては、計算領域を拡大して近海波浪モデルと同一にそろえた。格子間隔は従来同様 0.1 度(約 10km)と高解像度になっている。計算方法等については、従来の沿岸波浪モデルと同様に診断的なモデルである。沿岸の波浪分布については、海上気象課波浪現業作業においてマンマシンシステムで解析された結果を基に沿岸波浪モデルの計算値を補正し、“ガイダンス”化されたデータとして提供されている。数値波浪モデル(外洋および近海波浪モデル)を駆動する海上風や摩擦速度等の物理量は、気象の全球モデル(GSM)計算値の 3 時間積算値よりそれぞれの格子位置に換算して用いている。一方、沿岸波浪モデルを駆動する海上風のデータについては領域モデル(RSM)の計算結果を参照でざる領域に対しては 51 時間先まで RSM の計算値を内挿して用いている。さらに日本の担当海域の台風周辺の風については、予報課が作成する 6 時間ごとの熱帯擾乱データによる台風の位置・中心気圧等を基に傾度風を算出して 48 時間先まで補正を行っている。

#### (イ) システムの概要

波浪予報業務では、数値波浪モデルの運用、波浪の実況解析および予想を行っており、作成された情報は FAX 図や GPV(格子点資料)の形で気象官署や船舶、民間気象事業者等(気象業務支援センター経由)に配信されている。

COSMETS 更新に伴い導入された「波浪解析・予想システム」では、従来の手書きによるマニュアル解析・予想作業を EWS を使った対話型のマンマシンシステムとし、ディスプレイ上に表示した各種波浪関連データを用いて波浪の解析や予想の修正を行い、さらに解析・予想結果の配信および保存までを一貫して EWS で行うようになったことにより業務の改善が図られた。また、システムの導入により情報作成および配信の迅速化とともに従来は困難であったマニュアル解析(予想)結果の数値化が可能となり、客観的な精度評価等を行えるようになった。

### (ウ) データの種類と取得・編集

Fig. 32に新しい波浪解析・予想システムにおけるデータの流れと処理を示す。

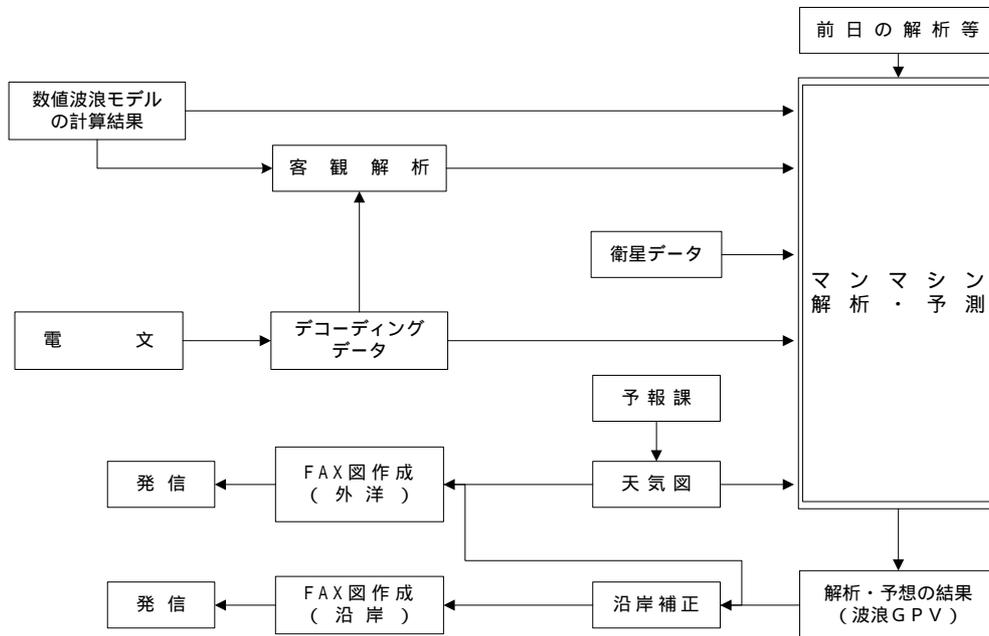


Fig. 32 マンマシン解析・予想システムのデータの流れと処理

マンマシンによる波浪解析・予想に関連するデータは、波浪および海上風の観測通報値を編集したデコーディングデータ<sup>3</sup>、数値波浪モデルのGPV(海水データ、数値予報モデルで計算された海上風データを含む)、予報課作成の天気図データ(等圧線、気圧系、地上気象観測値)、衛星による波浪観測データである。マンマシン解析・予想作業により作成された波高GPVおよび波向等の付加情報は、引き続き外洋波浪図作成発信処理、沿岸補正モデル、同発信処理の作業に渡され、これらがこの波浪解析・予想システム全体を形成している。

### (エ) マンマシンによる波浪解析

波浪の実況解析では、画面上に船舶やブイの波浪観測データと共に、数値波浪モデルの計算結果で得られた波浪のGPVを基にしたの等波高線が表示される。このほか数値予報モデルの海上風、数値波浪モデルの周期・波向、地上天気図解析結果、前日の波浪の解析結果および衛星による波高

<sup>3</sup> 電文を翻訳し、計算機処理しやすい形式に変換したもの。このデコーディングデータには、波浪解析・予想作業の結果得られた各船舶の位置における波高の解析値が品質情報とともに書きこまれ、翌日以降の解析で当該船舶データの評価等に利用されている。

の観測結果が必要に応じて重ねて表示できる。また、プリンター出力されたアメダスデータ、衛星による海上風、波の方向スペクトル等のデータも併せて検討しながら GPV の修正を行うことで解析値を作成している。

波高の修正は、等波高線を直接修正するのではなく、GPV を修正し等波高線を再描画するという方法をとっている。これはマンマシンの波浪解析の目的は、外洋波浪図の作成だけでなく、沿岸波浪モデルの外部境界条件の作成でもあり、等波高線を直接修正した場合、それを基に GPV を修正することが困難だからである。外洋における実況解析で使用する船舶による波浪観測データは目視観測に依存しており、その値の信頼性は解析の精度を大きく左右する。そのため、船舶データの品質管理を行い、解析に有効利用できるように船舶表示プログラムを利用して船舶の観測値の傾向をつかむとともに、天気図やモデルの値、周辺船舶の観測値などと比較して、その精度を検討している。

解析作業によって得られた解析 GPV は最終解析値として確定され、その結果は外洋波浪図および湾内や島影での遮へいによる沿岸補正処理を行った沿岸波浪図の FAX 図の作成に利用されるとともに、それぞれ GPV として保存される。

#### (オ) マンマシンによる波浪予想

波浪予想作業では、船舶やブイ等の観測データがないので、数値波浪モデルの値(周期、波高、波向)や数値予報モデルの風を予報課作成の予想天気図(FSAS)、当日の波浪解析結果や天気図(ASAS)等と共に画面上に表示し、実況解析と同様に GPV を修正する方法で行う。

波浪予想作業では、実況解析に比べ利用できるデータが少ないため、予想天気図(FSAS)と共に数値予報モデルおよび数値波浪モデルの計算結果の信頼性(数値波浪モデルは、数値予報モデルの海上風を基に計算を行っているので数値予報モデルの精度が大きく影響してくる)が重要となる。そのため、予想担当者は数値波浪モデルの特性や予想天気図の気圧パターンを考慮して、前日の数値波浪モデルの予想結果と今日の実況解析値とを比較、検討し、モデルの傾向をつかむとともに、さらに波の発達、衰弱や地形による影響等の波の特性を考慮した上で予想作業に当たることが重要となる。

予想結果は、解析同様 FAX 図が作成されるとともに、GPV として保存される。

#### (4) 数値波浪モデルの精度の推移

##### (ア) 数値予報精度の検証

Fig. 30に示されているとおり、初めて外洋波浪モデルが導入された1977年時点には、4層北半球モデルであった。その後の数値モデルは進展を続け、1988年のCOSMETS導入と共に運用が開始されたGSM、ASM、JSMでは、空間分解能が細分化され、更に鉛直方向についても高分解能となり適切な取り扱いが行われるよう改善されている。その結果、海上風の予想精度が向上してきた。

気象庁予報部(1997)によれば、ルーチン的に行われている毎日の検証は、モデルの基本的な予報精度あるいは誤差特性を評価するもので、地上気圧、850、500および250hPaにおける高度場、風、気温および湿度などの数値予報結果を客観解析場やゾンデ観測に対して検証している。同部では、数値予報結果の利用上の注意点としての観点と、数値予報モデルの改善と言う観点から、精度の検証を行っている。例えば、Fig. 33に示した北半球モデル・全球モデル(GMS)の二乗平均誤差(RMSE)の変遷をみると、1995年現在の72時間予報の誤差は、1988年以前の48時間予報の誤差と同程度であり、この10年間で予報精度が1日向上していることが分かる。

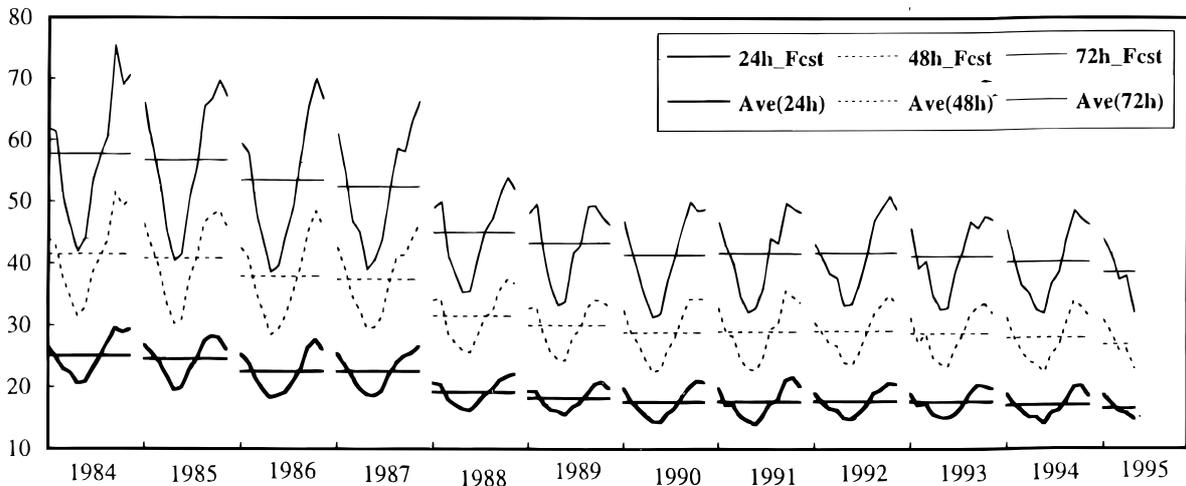


Fig. 33 北半球モデル・全球モデル(GMS)の二乗平均誤差(RMSE)の変遷

気象庁の全球モデル(1988.3~)および北半球モデル(1983.3~1988.2)の北緯20°以北の500hPa高度場の二乗平均平方根誤差(RMSE)。客観解析に対する各予報時間の誤差の大きさを表す。期間は1984年3月から1995年4月までで、太い実線は24時間予報、破線は、48時間予報、細い実線は72時間予報を表す。横軸に平行な線は、1年間の平均値を示す。

#### (イ) 数値波浪モデルの精度の推移

数値波浪モデルにおいても、新たなモデルの導入、更新等があった場合、モデルの精度の検討が行われている。

外洋の波浪予測業務が本格化する契機となった、わが国初の数値波浪モデルである MRI - 導入以前、気象庁では気研モデルを用いて数値波浪モデルの検討・開発を行っている。この時使用されていたモデルは気研モデルと呼ばれており、わが国近海を対象とするものであった。

土田ら(1975)は、気研モデルについてポイント相関係数(計算波高と実況波高の相関係数)を指標として複数の海域において最大 48 時間までの予測結果について検討を行っている。0 時間予測値(波浪予測では初期値も計算によって求めており、予測時間 0 でも相関係数は 0 にならない)であっても相関係数が 0.7 を下回るものもあり、48 時間予測値では非常に悪くなっている。また、地点ごとに相関係数が大きくばらついていることも望ましいとは思えない。ただし、同報の中で土田らが指摘しているが、ポイント相関係数は波高のパターンは類似しているが周期が異なる場合、高い相関係数は望めず、参考程度にとどめるべきだと述べている。

わが国初の数値波浪モデルである MRI - から MRI - への更新の際、気象庁海洋気象部海上気象課(1986)が、計算結果と実況値の波高および周期の平均自乗誤差、波向の偏差のヒストグラムによる等による新旧モデルの比較を行っている。波高の相関係数については大まかに言って新旧とも、0.7~0.9 の間にあり概ね良好である。同報によると波高の相関係数については、優位差なしとの結論が示されている。なお、波向の偏差については海上ブイロボットのデータ現状を上手く反映できていないとの、指摘もあった。

これ以後の検討結果では、モデルの比較・検討のための指標として、波高・周期それぞれの計算値および実況値の平均自乗誤差、相関係数が用いられているようである。

table 48におよびFig. 30に示されていないが、地球全域をほぼ対象範囲とする全球波浪モデルが、1996 年に導入されている。この全球波浪モデルについては、市成ら(1997)が波高について計算値およびブイロボットから得られた実況値の相関係数を求めている。両者の相関係数 0.8 は 3 日間程度まで維持されるが、8 日後には 0.5 程度となる。

その他、波浪予測に重要な海上風予測に関連するモデルの精度比較が、気象庁海洋気象部海上気象課・気象庁予報部予報課(1989)、気象庁海洋気象部海上気象課(1990)により発表されている。

(5) 数値波浪モデルの改良と次世代モデルの開発

(ア) 世界各国における波浪モデルの運用と開発状況

MRI - を含めた第2世代の波浪モデルはかなりの精度で波浪状況を推算するものの、風波の発達程度、風が急変した場合の挙動や、うねりの伝播状況等で若干精度が伴わない時がある。こうした中で欧米を中心に新しい波浪モデルの開発気運が高まり、波浪発達の物理過程を詳細に表現した第3世代の波浪モデルの研究開発が1980年代に行われた。これらの成果はWAMモデルに代表されるが、計算機の能力の大幅な向上とともに現在運用される波浪モデルの主流になりつつある。世界各国の主な波浪モデルの運用状況と開発状況をtable 49に示した。

table 49 世界各国の波浪モデルの運用・開発状況

国・地域名	モデル名	対象区域	格子	モデルの種類	運用開始	備考
ECMWF	WAM(cycle 4)	全球 地中海 全球	1.5° × 1.5° 0.25° × 0.25° 0.5° × 0.5°	第3世代 第3世代 第3世代	1994.7	ECMWFメンバー 各国利用
オランダ	NEDWAM	北海		第3世代	1993	WAM(cycle3)領域 モデル
スペイン		地中海		第3世代		運用状況は不明
イギリス	UKMO WAM	全球 全球 欧州	0.833° × 1.25° 同上 0.4° × 0.25°	第2世代 第3世代 第2世代	1993	ルーチンモデル UKMOの比較
カナダ	CSOWM WAM(cycle4)	北西大西洋 北東太平洋	2.0° × 2.0° 1.0° × 1.0° 同上	第1世代 第3世代 第3世代		ルーチンモデル 1995年より試験 運用中 同上
アメリカ	NOAA/WAM	全球 アラスカ 東海岸 全球	2.5° × 2.5° 30海里 0.25° × 0.25° 1.25° × 1.25°	第3世代 第2世代 第3世代 第3世代	1994.10 1994.5	WAM(cycle4)  WAM(cycle4) WAM(cycle3)
ロシア	MOSCOW	北太平洋	3° × 3°	第3世代		1995年より試験 運用中

1988年のWAMDIグループによる世界初の第3世代モデル(WAMモデル)の開発以来、開発に関与した国をはじめとした各国においてWAMモデルの業務運用が進んでおり、WAMモデルを基に独自のモデルを開発している国も多い。1993年以降、モデルの開発自体から衛星データ等の波浪モデルへの同化技術の開発と気象モデル等とのカップリングに研究の主体が移りつつある。

(イ) 第3世代波浪モデル

風波の発達・減衰、うねりの伝播は、波浪の発達を記述する力学の精度に依存する。波浪モデルは以下のエネルギーバランス方程式を基に計算される。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \cdot \nabla E = S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

ここで  $E = E(f, \theta, x, t)$  は、位置  $x$ 、時刻  $t$  に対する波浪の2次元エネルギースペクトルで周波数  $f$ 、方向の成分  $\theta$  で表現される。 $C_g = C_g(f)$  は群速度である。 $S_{net}$  は外力項を表し、風によるエネルギーの入力  $S_{in}$ 、成分波間の非線形エネルギー輸送  $S_{nl}$ 、砕波や粘性等によるエネルギーの消散  $S_{ds}$  の3つから構成される。この中で非線形エネルギー輸送の取扱いは特に計算量が大きくなることから、無視するか(第1世代モデルと呼ぶ)、簡単なパラメータを用いて表現していた(第2世代モデルと呼ぶ)。MRI -

を含めた第2世代の波浪モデルは、風波の発達程度、風が急変した場合のスペクトル表現や、うねりの伝播状況等に若干精度が伴わない時がある。近年、計算機の能力アップによってある程度の近似をおこなえば非線形項もともに計算することが可能になった。これを第3世代波浪モデルと呼ぶ。気象庁でも、第3世代波浪モデルのプロトタイプを気象研究所において開発し、平成9年度末に現業化に向けて海上気象課で準備を進めている。

第3世代波浪モデルを導入することで、台風域内等の風浪とうねりの表現が改善され、特に現用のモデルで顕著だったうねりがすぐに減衰してしまう欠点が改善される見込みである。

### 5.3.3 ウェザー・ルーティングの効果の推移

WRS の利用価値を効果的にする、技術以前の自然条件は、東西距離が長いこと、気象海象が不規則で、航行安全度の格差が大きい比較的高緯度であること、選択可能水域が広いこと等が挙げられ、北太平洋がその典型である。

北大西洋は東西距離が比較的短く、流水や Grand Bank による海域の制約が大きく、南インド洋および南大西洋は、気圧配置がある程度定型化していること、大圏航路が選択外であることなど、メリットは少ない。

北太平洋、東航船にとって風波は一般的に大部分が追い風追い波と思って間違いないが、航路選択によって風力、波高の程度の差は大きい。

西航船については、昔から「南ルートを選んだ船の方が、船体・積荷のダメージが大きい」とよく言われてきた。重大事故の発生海域は全て、 $30^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$  と比較的低緯度である。

本節では、WRS の効果とその向上の見込みについて、WRS 団体等に対する聞き取り結果をとりまとめたものを示す。

#### (1) ウェザー・ルーティングの結果の評価手法

WRS 団体等に対する聞き取り結果によれば、一般的に評価項目として航行時間の短縮をあげている。本来ならば、各航海ごとに気象条件およびこの影響による航路の差異、積荷、船体の状況等に違いがあるため、時間短縮率として評価できれば望ましいが、こうした集計は実施されていないとのことである。民間 WRS 団体では、航海時間の短縮以外に、波による速力の低下(W.E. 削減量)を評価指標として用いている。「航海時間の短縮時間」および「W.E.の削減量」の評価方法の一例を次に示す。

短縮時間： $t_p$   $t_s$

$t_p$ ：推薦航路を航行した時の航行時間

$t_s$ ：大圏航路を速度  $v_{s1}$  で航行した時の速度

$v_{s1}$ ：推薦航路を航行した時の速度から波浪の影響を除いた平均速度

W.E.の削減量： $v_p$   $v_{s2}$

$v_p$ ：推薦航路を航行した時の平均航行速度

$v_{s2}$ ： $v_{s1}$  で大圏航路を航行し実況波浪の影響を受けたときの平均速度

#### (2) ウェザー・ルーティング・サービスの効果の推移

ある団体では、a)に示したような評価は平成7年度以降のWRSについて実施している。これらのレポートは、各顧客に対するWRS終了後その評価を行ったものであり、table 50にこれらのデータについてとりまとめたものを参考と

して示した。

table 50 WR による海域別・年別・船種の短縮された  
航海時間の平均値(時間/1 航海)

航路	年	船種						
		PCC	コンテナ船	その他 不定期船	鉱石船	穀物・ チップ	撒積船	木材船
太平洋	94	6.2	1.1					
	95	13.4	2.9		10.6	1.4	2.4	7.9
	96		3.3	23.2				
	98						11.9	
南シナ海	95	2.6						
南大西洋	95		0.5					
北大西洋	95		-4.6					
	96	12.0	0.2					

民間団体提供の資料より作成

海域別の傾向としては、どの船種においても太平洋では WRS により航海時間が短縮されている。コンテナ船では、太平洋以外の航路では WRS の効果が小さく、航路によっては航海時間が延びている。PCC では、どの海域においても WRS による航海時間が短縮されている。

経年変化については、コンテナ船のみ太平洋航路で複数の値があり、短縮時間が増加、すなわち WRS 効果が良くなっているようにも見える。

太平洋以外の航路において WRS の結果が良くないのは、主に荒天、特に北大西洋では特に冰山回避のため、大きく迂回せざるを得なかったケースが含まれていたためである。

しかし、基となっている資料は、サンプル数が少ない上、実際の航海時の天候、積荷等の諸条件は入手できなかったため、特に WRS の効果の経年変化について傾向を見るには更に詳細な資料が必要とされる。

また、別の民間 WRS 団体の回答では、過去の資料について詳細なデータはとりまとめられておらず、WRS の効果は、北太平洋航路について夏季で半日、冬季で 1 日程度の航行時間の短縮であるとのことであった。また、こうし傾向は過去 10 年程では大きく異ならないとのことであった。

今回の聞き取り結果によれば、WRS による航海時間の削減効果は概して最大 1 日程度であるといえる。

## 参考文献

- OECD/IEA(1997) Energy Statistics of OECD Countries 1994-1995  
OECD/IEA(1997)Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1994-1995  
United Nations( 1998) 1996 Energy Statistics Yearbook  
海事産業研究所(1999) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1998  
海事産業研究所(1998) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1997  
海事産業研究所(1997) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1996  
海事産業研究所(1996) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1995  
海事産業研究所(1995) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1994  
海事産業研究所(1994) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1993  
海事産業研究所(1993) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1992  
海事産業研究所(1992) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1991  
海事産業研究所(1989) Fearnleys 世界バルク貨物輸送 1990  
運輸省(1999)日本海運の現況(平成 11 年版)  
運輸省(1998)日本海運の現況(平成 10 年版)  
海事産業研究所(1999) Fearnleys World Bulk Fleet 1998  
海事産業研究所(1998) Fearnleys World Bulk Fleet 1997  
海事産業研究所(1997) Fearnleys World Bulk Fleet 1996  
海事産業研究所(1996) Fearnleys World Bulk Fleet 1995  
海事産業研究所(1995) Fearnleys World Bulk Fleet 1994  
海事産業研究所(1994) Fearnleys World Bulk Fleet1993  
海事産業研究所(1993) Fearnleys World Bulk Fleet1992  
海事産業研究所(1992) Fearnleys World Bulk Fleet 1991  
海事産業研究所(1989) Fearnleys World Bulk Fleet 1990  
海事産業研究所(1999) Fearnleys World Bulk Fleet1998  
The National Magazine Limited(1998) Containerisation International Year Book 1998  
The National Magazine Limited(1997) Containerisation International Year Book 1997  
The National Magazine Limited(1996) Containerisation International Year Book 1996  
The National Magazine Limited(1995) Containerisation International Year Book 1995  
The National Magazine Limited(1994) Containerisation International Year Book 1994  
The National Magazine Limited(1993) Containerisation International Year Book 1993  
The National Magazine Limited(1992) Containerisation International Year Book 1992  
The National Magazine Limited(1991) Containerisation International Year Book 1991  
日本海運集会所(1998)日本船舶明細書 1999  
日本海運集会所(1997)日本船舶明細書 1998  
日本海運集会所(1996)日本船舶明細書 1997  
日本海運集会所(1995)日本船舶明細書 1996  
日本海運集会所(1994)日本船舶明細書 1995  
日本海運集会所(1993)日本船舶明細書 1994  
日本海運集会所(1992)日本船舶明細書 1993  
日本海運集会所(1991)日本船舶明細書 1992  
日本海運集会所(1990)日本船舶明細書 1991  
日本海運集会所(1989)日本船舶明細書 1990  
日本海運集会所(1988)日本船舶明細書 1989

日本海運集会所(1983)日本船舶明細書 1984  
日本海運集会所(1978)日本船舶明細書 1979  
日本海運集会所(1973)日本船舶明細書 1974  
(社)日本造船研究協会(1998) 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(機関部門)  
(社)日本造船研究協会(1998) 船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(流力部門)  
池田宗雄(1992)「ウェザー・ルーティングの経済的効果(上)」, 海運, 775, 19 - 23  
市成隆(1997)「新数値波浪モデルと波浪解析・予想システム」, 測候時報, 64, 2, 45 - 67  
市成隆(1998)「数値波浪モデル」, 測候時報, 65, 特別号, S87 - S97  
ウェザー・ルーティング研究グループ編(1992)「ウェザー・ルーティング - 気象情報に基づく最適航法 - 」, (株)成山堂書店, 東京, pp281  
気象庁(1995)「数値予報の基礎知識 - 数値予報の実際 - 」, pp164  
気象庁(1997)「最新数値予報ガイド - 新 COSMETS と解析予報システム - 」, pp96  
気象庁海洋気象部海上気象課(1986)「波浪モデルの精度評価について - 計算値と観測値・解析値との比較 - 」, 測候時報, 53, 4, 231 - 247  
気象庁海洋気象部海上気象課(1990)「アジア域スペクトルモデル(ASM)及び日本域スペクトルモデル(JSM)による海上風の精度検証」, 研究時報, 42, 3, 89 - 104  
気象庁予報部(1989)「数値予報とGVP」, 平成元年度数値予報 研修テキスト, 56 - 66  
土田正夫(1975)「数値波浪予報モデル(気研モデル)の追試結果について」, 測候時報, 42, 11, 365 - 372  
羽鳥光彦(1991)「波浪予報業務の現状と展望」, 測候時報, 58, 2, -  
山田耕士(1990)「ウェザー・ルーティングとその利用」, 広島商船高等専門学校紀要, 12, 123 - 144

船舶から排出される CO<sub>2</sub> の抑制に関する調査研究報告書

平成 12 年 3 月発行

発行 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団 業務部

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1 - 15 - 16 日本財団ビル  
Tel.03-3502-1828 Fax.03-3502-2033

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。 ISBN4-88404-006-6