

エコ・ナビゲーションシステムによる海環境保全[†]

村 井 康 二*・林 祐 司*

ABSTRACT Recently, the environmental destruction problems are international social problems. The transport systems are important elements for the conservation of the air environment. The environmental parameters are CO_2 , NO_x and SO_x from the transport systems. This paper describes the effects of the reduction for CO_2 , NO_x and SO_x by systematizing ship's navigation schedule planning (Eco-navigation systems: Eco-navi) which can utilize the tidal current and the wind in inland sea. The Eco-navi consists of three sub-systems: "Cell decision system", "Current calculation system", and "Wind calculation system". We define 'Cell' as the minimum unit for calculating the hours underway. The cell, latitude: $1'$ $\times$ longitude: $1'$, has the current and wind information. We can calculate the hours underway by utilizing the current/wind effects. We calculated the hours underway for the neap tides, ligging the tides and the spring tides of 'Kobe' to 'Hesaki' by using the data of training ship *Fukae Maru*, and its time saving ration is 5.1 %, 9.6 %, and 14.8 % respectively, even if we reduce the system errors (3.8%). We proposed about 5 % reduction of air pollution (CO_2 , NO_x , SO_x) from the vessel in inland sea.

1. はじめに

環境問題の対象については、土壌汚染、海洋汚染および大気汚染があげられるが、その中でも近年、地球温暖化や人体の呼吸器疾患に関わる二酸化炭素(CO_2)、窒素酸化物(NO_x)および硫黄酸化物(SO_x)が特に注目されていることは周知のとおりである。

主に産業や運輸活動により排出されている CO_2 排出量の2003年度の部門別割合について、表1に示す¹⁾。

表1より、 CO_2 の排出量割合は、経済活動の原動力を支える発電所等のエネルギー転換部門(a)を除けば、産業部門(b)および運輸部門(c)のみで全体の約5割を占めることがわかる。本研究では、運輸部門の輸送機関である自動車、鉄道、船舶および航空機のうち、原材料および製品輸送の大動脈といえる船舶について注目する。

具体的には、船舶から排出される CO_2 、 NO_x および SO_x の排出量削減を目指し、船速に大きな影響を及ぼす潮流および風を航海計画立案時に積極的に活用し、最短航海時間および最少燃料消費を達成する省エネルギー型航海計画立案支援システム(エコ・ナビゲーションシステム:エコ・ナビ)を構築し、船舶のエネルギー消費軽減、排出ガス抑制を実現し、海上における大気環境の保全を促進させることを目的とする。

Sea Environmental Conservation by Eco-Navigation Systems in Inland Sea. By Koji Murai and Yuji Hayashi (Faculty of Maritime Sciences, Kobe University).

* 神戸大学海事科学部

† 2006年7月3日受付 2006年9月11日再受付

ギー型航海計画立案支援システム(エコ・ナビゲーションシステム:エコ・ナビ)を構築し、船舶のエネルギー消費軽減、排出ガス抑制を実現し、海上における大気環境の保全を促進させることを目的とする。

2. 輸送機関別 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 排出量の現状

自動車、鉄道、船舶および航空機の各輸送機関別の排出量を把握することは、社会的資本^{2,3)}である環境を含めた国内輸送活動のあり方を検討するために重要である。そこで、表2に各輸送機関別に対する CO_2 、 NO_x および SO_x のトン・キロあたりの排出量(g/ton-cargo・km)を示す⁴⁻⁹⁾。ただし、本論における各輸送機関の輸送調査対象は旅客ではなく貨物を対象とし、その中の自動車については営業用普通トラック(トラック)を対象とする。「トン・キロ」は輸送した貨物の重量(トン)に輸送した距離(キロメートル)を乗じたもので、輸送活動の大きさを表す単位として一般的に用いられる。

表2より、 CO_2 や NO_x のトン・キロあたり排出量は、トラックおよび航空機のものが多いことがわかる。そして、トン・キロベースで国内貨物輸送量の約6割¹⁰⁾を占めるトラック(営業用・自家用小型トラックを含む)から排出される CO_2 規制のため、その排出量の少ない鉄道および船舶へのモダシフトが積極的に考え

表1 2003年度CO₂排出量環境省算定値

	Direct discharge ratio [%]	Discharge ratio after the demand distribution [%]
(a) Energy conversion	6.8	31.6
(b) Industry	37.9	30.3
(c) Transportation	20.7	20.1
(d) Work	15.7	5.0
(e) Home	13.3	5.0
(f) Industrial process	3.8	3.8
(g) Waste	1.9	1.9

注) 統計誤差, 四捨五入等のため, 排出量割合の合計は必ずしも100%にならない。

表2 各輸送機関別CO₂, NO_xおよびSO_xのトン・キロあたりの排出量

	Truck	Train	Ship	Airplane
CO ₂	174	21	38	1,480
NO _x	1.34	0.06	1.11	102.71
SO _x	0.113	0.007	0.561	0.335

られている^{11,12)}。つまり, 国内物流におけるユーザーは貨物輸送手段に対して安く, 早く(Just in time), 安心, 安全に貨物を輸送できることを希望していると考えるが, 近年ではこのような地球環境や道路混雑問題等から, 「運賃」や「時間」のみでなく「環境」も重視した貨物輸送機関の利用が重要課題となっている。ここでいうモーダルシフトとは, 幹線貨物輸送である自動車から船舶(海運)や鉄道にその手段を転換することをいう。

3. 研究対象海域(瀬戸内海)

瀬戸内海は, 本州, 四国および九州により囲まれており, 紀伊水道または豊後水道を経て太平洋に, また, 関門海峡を経て日本海に通じている日本最大の内海である。その広さは, 東西約240海里(444.5 km), 南北10~30海里(18.5~55.6 km)の海域であり, その中に大小約3,000の島が散在している。瀬戸内海には, 狭水道および潮流の強い所が多く, 大型船からレジャー船まで大小各種の船舶が頻繁に往来する。季節によっては, 漁船が群集する所も多く衝突海難も度々発生する。次に, 潮流の変化については複雑であるが, 平均2ノット(3.7 km/h)の潮流が約6時間周期で, その方向

を180度変え, 瀬戸内海中央部に向かって, または東西の出口の海峡に向かって流れている。最大流速が10ノット(18.5 km/h)を超える来島海峡, 7ノットの明石海峡, 8ノットの関門海峡, 日本の主要航路(8航路)が複数存在し, 通航船舶数も多い。上記の理由から, 日本沿岸において, 瀬戸内海は航海計画立案時に潮流等の船体外力影響を積極的に活用する対象海域として十分な意義をもつと考えられ, この海域を研究対象に選ぶ。さらに, 「船舶交通量の多さ」および「船舶交通流の整流化」に対する船舶の省エネルギー効果による環境保全が期待できるエコ・ナビの適用海域として最適であると考ええる。

ここで, 海里(カイリ)とはポンド・ヤード法におけるSea mile(または, Nautical mile)のことで1海里=1852.2メートルである。また, 1時間に1海里進む速さの単位がノットである。

4. 航海情報と航海計画立案

船舶の安全かつ効率的な運航を導くための航海に必要な情報(航海情報)は, 時間的に変化する情報と変化しない情報として, 静的航海情報と動的航海情報に分類される¹³⁾。静的航海情報とは, 何らかのメディアに記録, 蓄積および規定された情報であり, 長期間をかけて更新される。例としては, 水路図誌記載情報などがあげられる。ここで, 水路図誌とは, 陸上における地図や案内記のようなものであり, 海図と水路書誌(水路誌, 灯台表, 天測暦, 潮汐表など)に大別される¹⁴⁾。また, これらの静的航海情報は, 海上保安庁が紙メディアで出版している。次に, 動的航海情報とは自船舶(自分が操縦している船舶), 他船舶(自船舶以外の船

船)および自船舶周囲(物理的および経済的)の環境に関する刻々と変化、適用および推測される情報であり、メディア化されていないリアルタイムの航海情報を言う。例としては、他船舶に関する針路および速力情報や各海域の気象・海象などがあげられる。

航海計画の立案は、主として予定航行海域の静的航海情報を調査し、安全かつ効率的な運航を可能とする航路を海図上に記載し、目的地への到着時刻に対する出港時刻を設定することで行なわれる。

5. 航海計画立案のシステム化

5.1 エコ・ナビの概要

潮流および風は、船舶の速力(船速)に大きく影響を与える船体外力である。そして、これらの予測機能を付加した航海計画立案システムが構築可能であれば、潮流および風の影響に伴う誤差を最小限にした航海計画立案が可能となり、最短航海時間、最少エネルギーの運航を支援することが可能になる。つまり、船舶が潮流に順行して目的地へ向かう場合と潮流に逆行して目的地へ向かう場合には、当然、その航海時間に差が生じる。そして、潮流に上手く順行することをベースに瀬戸内海を東西航行する様に船舶が航海計画を立案すれば、多大な省エネルギー効果と交通整流効果が期待できる。そこで、船舶運航への船体外力となる潮流および風の推定を可能とする航海計画立案のシステム化(エコ・ナビ)が必要となる。ただし、潮流と風では、潮流の方が、気象条件に依存する風よりも主たる船体外力要素であり、推定対象としても安定している。ここで、交通整流効果とは各船舶が潮流を活用することにより、出港時刻が一意に決まり、潮流に則した船舶交通流が形成されることを意味する。

航海計画立案のシステム化の概要を図1に示す。図1のように航海計画立案のシステム化により実現可能となるエコ・ナビは、自船舶の起程地(航海の計算の起点とする地点)から着達地(航海の計算の終点とする地点)までの全航程における潮流および風が船速に与える影響を推算し、これら外力の影響を積極的に利用した最短時間航海計画の立案を支援することができる。そして、自船舶の機関速力(船体外力が存在しない時の船速)に潮流や風の影響を活用し、同じ機関速力でより航海距離を長くし、航海時間を短縮することで低燃費による省エネルギー、排出ガス削減のエコ・ナビゲーションを実現可能とする。

潮流および風による影響は、ユーザーが設定した機関速力に付加され、この船速により航海時間を推定す

る。また、本システムでは、潮流および風による影響を付加した船速および航海時間を算出する際に、「予定航路と交差するセル単位で算出する」というアルゴリズムに基づいて計算を行う¹⁵⁾。セルと予定航路の概要について図2に示す。

「セル(Cell)」とは緯度および経度1分のグリッドにより作られた本システムの計算最小単位面積である。つまり、瀬戸内海に対する潮流および風データをセルに埋め込み、予定航路を計算機へ入力することにより、予定航路に交差するセル内の情報を検索するという手法を用いる^{16,17)}。図2では、予定航路が交差するセル番号1からセル番号12に埋め込まれたデータを使用することになる。

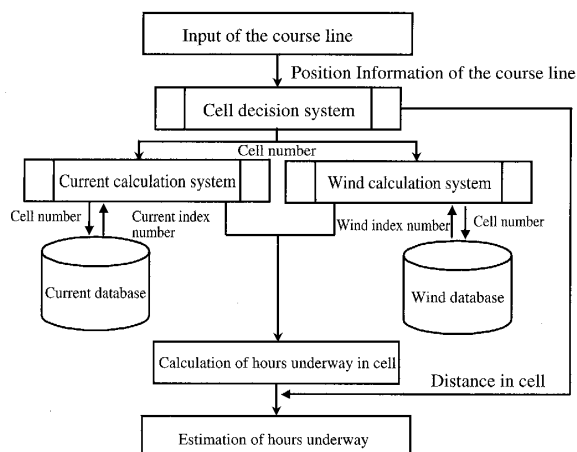


図1 航海計画立案のシステム化の概要

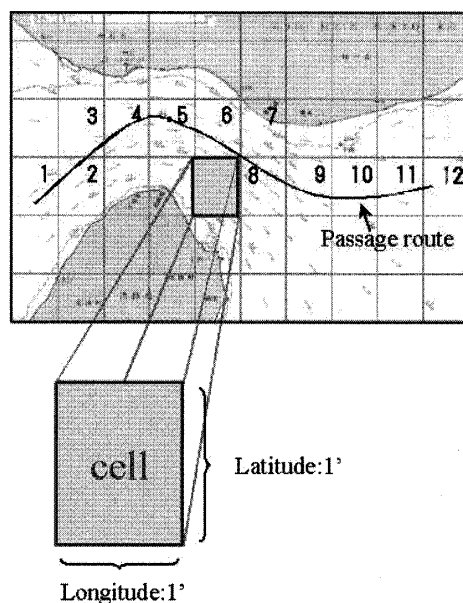


図2 セルと予定航路の概要

5.2 エコ・ナビ

本研究で用いるエコ・ナビ(図1)は、交差判定システム(Cell decision system)¹⁵⁾、潮流計算システム(Current calculation system)、風計算システム(Wind calculation system)の3つのサブシステムにより構成される。エコ・ナビにおける推定航海時間(Estimation of hours underway)の算出手順について、以下に説明する。

1) 交差判定システム

マウスポインターを用いて入力され、平均中分緯度航法¹⁸⁾により計算された予定航路が、交差するセルをすべてのセル群から検索する(図2の場合、予定航路(黒線)と交差するセル番号1から12となる)。そして、検索された交差セル内におけるセル航走距離(distance in cell)を算出する。

2) 潮流計算システム

選択された交差セルの潮流情報を潮流データベース(Current database)から検索および計算し、航行時刻における交差セルでの潮流値を推算する。ここで、潮流データベースの構築は潮汐表¹⁹⁾および潮流図²⁰⁾における潮流情報を統合してセル内に埋め込む。潮流図は、1時間間隔の12枚分の潮流図データから、適切な時機の潮流データベースを選び検索対象とする。

3) 風計算システム

選択された交差セルの風情報を風データベース(Wind database)を用いて計算し、真風向および真風速値(風値)を得る。ここで用いる風データベースは、神戸大学海事科学部附属練習船深江丸(深江丸)の航海における気象観測データにより構成される。気象観測データは、サンプリング周期30秒で収集され、真風向および真風速の30秒間のベクトル平均として求める。風計算システムについては、今後、天気図からの風値推定アルゴリズムの構築が課題となるが、主な船体外力が潮流であること、およびエコ・ナビのシステム化実現が主目的であることから、本研究ではエコ・ナビに使用するデータとして信頼性の高い実データを用いたデータベースとする。

4) セル航走時間算出

船舶の機関速力と推算された潮流値および風値から、潮流および風の影響を付加した船速をベクトル計算により算出する。そして、セル航走距離からセル航走時間を算出する。図3に潮流影響に対する船速算出について示す。風影響についても、同様のベクトル計算を行う。具体的には、潮流および風の影響を付加した結果が予定航路となるようにベクトル計算することであり、図3中のActual speed vectorの長さからセル航走時

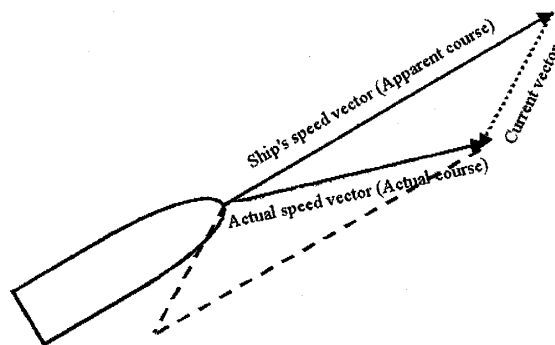


図3 潮流影響のベクトル計算

間を算出し、針路の補正は実際の海上で航海士が予定航路上を航行するために行うことになる。

5) 推定航海時間算出

上記の手順を起程地から着達地までの交差セル(図2の場合、セル番号1から12)において繰り返し行い、算出された各セル航走時間の総和を推定航海時間とする。

6. エコ・ナビによる海環境保全

船舶の運航スケジュールに大きな影響を与える潮流および風の船体外力情報を積極的に取り入れたエコ・ナビによる航海計画の立案が、どの程度CO₂、NO_xおよびSO_xの排出量削減を実現可能かについて評価、検討を行う。

6.1 評価方法

エコ・ナビによる海環境保全の有効性評価は、1)エコ・ナビの航海時間推定精度の確認および2)その推定誤差を考慮したエコ・ナビによるCO₂、NO_xおよびSO_xの排出削減量の評価により行う。それぞれ順に説明する。

6.1.1 エコ・ナビの精度

エコ・ナビの精度評価は、エコ・ナビにより立案された航海計画による航海時間(推定航海時間)と実際の運航データ(実績航海時間)を比較することで行なう。運航データは、深江丸による10回の実船航海データ(神戸-池田湾間:3航海、池田湾-尾道間:2航海、尾道-高松間:2航海、高松-神戸間:2航海、池田湾-高松間:1航海、合計10航海)を用いる。そして、エコ・ナビの潮流および風情報の影響に対する航海時間の推定誤差を割合(航海時間誤差割合 [%])として、(1)式により求める。

$$\text{航海時間誤差割合} = \frac{|\text{推定航海時間} - \text{実績航海時間}|}{\text{実績航海時間}} \times 100 \quad (1)$$

各実船航海(Nav1 ~ Nav10)の海域、船速(ノット)、

表3 実船航海の概要

Navigation	Sea area	Ship's speed [knot]	Departure time	Arrival time	Tide Moon age
Nav ₁	Kobe (1) to Ikeda (2)	13.6	10 ^h 02 ^m	15 ^h 22 ^m	N 21.7
Nav ₂	Ikeda (2) to Onomichi (3)	13.3	08 ^h 25 ^m	13 ^h 50 ^m	N 22.7
Nav ₃	Onomichi (3) to Takamatsu (4)	13.5	09 ^h 15 ^m	13 ^h 10 ^m	N 23.7
Nav ₄	Takamatsu (4) to Kobe (1)	13.6	08 ^h 40 ^m	13 ^h 30 ^m	L 24.7
Nav ₅	Kobe (1) to Ikeda (2)	13.6	11 ^h 20 ^m	16 ^h 10 ^m	S 28.7
Nav ₆	Ikeda (2) to Onomichi (3)	13.5	08 ^h 00 ^m	12 ^h 25 ^m	S 0.3
Nav ₇	Onomichi (3) to Takamatsu (4)	13.3	09 ^h 45 ^m	13 ^h 45 ^m	S 1.3
Nav ₈	Takamatsu (4) to Kobe (1)	13.6	08 ^h 35 ^m	14 ^h 05 ^m	L 2.3
Nav ₉	Kobe (1) to Ikeda (2)	13.3	11 ^h 20 ^m	16 ^h 05 ^m	S 13.3
Nav ₁₀	Ikeda (2) to Takamatsu (4)	13.3	09 ^h 00 ^m	15 ^h 20 ^m	S 14.3

S: Spring tides, N: Neap tides, L: Lagging the tides

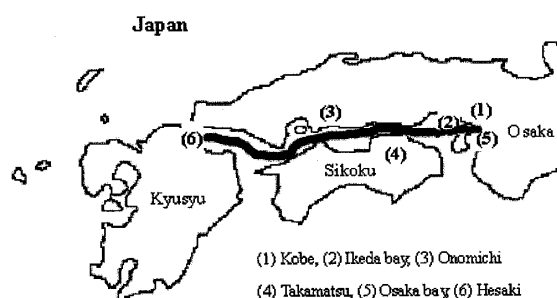


図4 海域の概略

出航時刻、到着時刻および潮汐・月齢について表3に示す。また、航行海域の概略を図4に示す。ただし、図4の瀬戸内海海域に示す黒線は、CO₂、NO_xおよびSO_x排出削減量評価のための航路概要(瀬戸内海航路)を示している。また、表3中の海域番号(1)から(4)は、図4中の番号と対応している。

6.1.2 エコ・ナビによるCO₂、NO_xおよびSO_xの排出量削減

図4に示す瀬戸内海航路(黒線：神戸－部埼間)により、潮流および風情報を活用した場合の航海時間の推定を行う。そして、潮流および風影響を付加した最短航海時間によるCO₂、NO_xおよびSO_x排出量を表2に示したトン・キロあたりの排出原単位から算出する。さらに、CO₂、NO_xおよびSO_xの排出量をコスト換算し、社会的資本としての費用(社会的費用²⁾)から評価を

行う。換算価格は、京都議定書の目標達成のためのCO₂排出抑制費用や環境保全効果のコスト換算事例により、それぞれトンあたり価格9,450円/ton-CO₂、66,315円/ton-NO_x、50,159円/ton-SO_xとする²¹⁾。ただし、10回の航海で用いる船速は、実船航海の平均船速13.5ノットとする。また、潮流影響については、その大小を比較検討するために大潮、中潮および小潮の3種類を対象とする。エコ・ナビによる瀬戸内海航路の1日あたりの削減効果の評価には、活用しようとする潮流(潮汐)変動が1日に2回(複数回)あること、および経済活動として、最大効果を見込む潮流のみを選択することは必ずしも可能でないことから、現在推定されている1日の総船舶数(内航海運船舶：約3,000隻)と同数を対象に用いる。

6.2 結果と考察

6.2.1 エコ・ナビの精度

実績航海時間およびエコ・ナビにより算出した推定航海時間から、(1)式により求めた実績航海時間に対する航海時間誤差割合結果を表4に示す。なお、エコ・ナビによる航海時間の推定は、潮流および風影響を付加した場合、潮流影響のみを付加した場合および潮流および風の船体外力影響を一切付加しない場合に対してそれぞれ行った。

表4より、実績航海時間と潮流および風影響を付加

表4 航海時間誤差割合(%)

	AH vs. EH_CW	AH vs. EH_C	AH vs. EH
Nav ₁	0.9	0.6	3.4
Nav ₂	0.9	3.4	1.9
Nav ₃	8.9	9.8	8.1
Nav ₄	2.8	2.8	2.1
Nav ₅	9.0	9.3	12.4
Nav ₆	1.5	1.1	1.1
Nav ₇	0.4	0.0	2.5
Nav ₈	0.3	0.3	7.9
Nav ₉	3.5	4.6	8.8
Nav ₁₀	5.0	5.8	0.5
Ave.	3.3	3.8	4.9

AH: Actual Hours underway, EH: Estimated Hours underway

CW: including Current and Wind effects

C: including Current effect

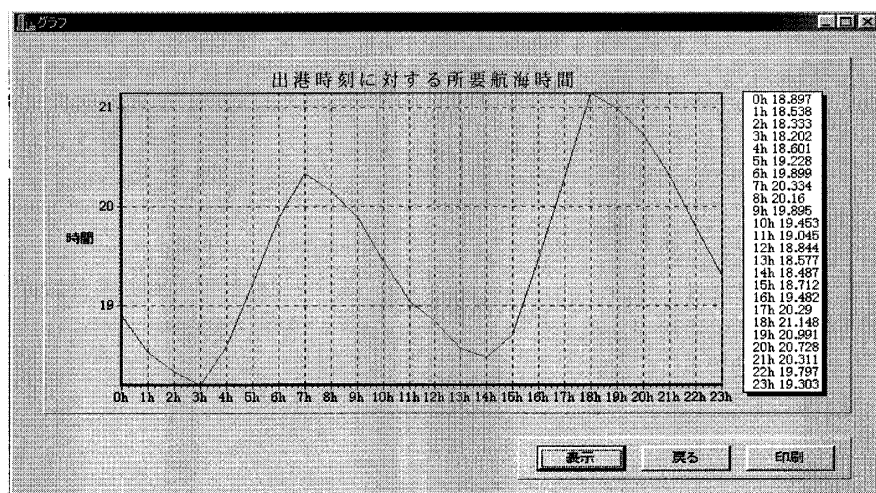


図5 潮流影響を付加したエコ・ナビの出力結果例(神戸-部埼間)

したエコ・ナビによる推定航海時間の誤差割合(AH vs. EH_CW)は、平均3.3%、最大9.0%の精度で推定可能であることがわかる。そして、潮流のみを付加した場合の誤差割合(AH vs. EH_C)では平均3.8%、最大9.8%である。風影響分は、平均誤差割合でその差0.5%となり、深江丸の船型では潮流影響が船体外力としてかなり大きいと考えられる。

6.2.2 エコ・ナビによるCO₂、NO_xおよびSO_xの排出量削減

まず、瀬戸内海航路(神戸-部埼間)を対象とし、エコ・ナビにより出力された1時間毎の各出港時刻(x軸)と潮流のみを付加した場合の推定航海時間(y軸)の関係について、一例を図5に示す。

図5より、出港時刻により必要とする推定航海時間

は最小18.2時間、最大21.1時間であり、約3時間の差が生じることがわかる。この結果から、エコ・ナビによる最短航海時間の選択は、航海時間の短縮分に対する省エネルギーと排出ガス削減に貢献することが強く期待できる。さらに、各船舶が潮流を有効活用できる推薦出港時刻を採用することにより、船舶交通流の整流効果が発生し、海難発生抑制に有効であると考えられる。

次に、船体外力影響として最も大きい潮流影響について、瀬戸内海航路による評価を、実船航海データ(表3)の大潮(Nav5:月齢28.7)、中潮(Nav8:月齢2.3)および小潮(Nav1:月齢21.7)を対象として、最長航海時間(HU_long)および最短航海時間(HU_short)を求めた結果を表5に示す。

表5より、航海時間差は大潮時で3時間38分、小潮時で1時間37分となり、航海計画立案のシステム化により、潮流影響を積極的に取り込めば約2～3時間の航海時間短縮を見込むことができる。この結果は、小潮、中潮および大潮に対して順に、8.9%、13.4%、18.6%の航海時間短縮を意味し、この数値は各排出ガスの削減割合に直接繋がる。また、この結果はエコ・ナビの平均推定航海時間誤差分(3.8%)を差し引いても、順に5.1%、9.6%、14.8%であり、十分に有効であると考ええる。

航海時間の短縮によるCO₂、NO_xおよびSO_xの排出削減量(g/ton-cargo)およびそのコスト換算金額(円)をそれぞれ表6、表7に示す。表6の各排出ガス排出量(g/ton-cargo)は、表2に示した船舶のトン・キロあたりの排出量(CO₂: 38 g/ton-cargo・km, NO_x: 1.11 g/ton-cargo・km,

SO_x: 0.561 g/ton-cargo・km)に潮流影響を積極的に取り入れた場合に短縮できる航海時間分(表5の値)と機関速力(13.5 ノット)により求めた距離を乗じて算出している。また、表7の金額は表6に示したトンあたりの排出ガス量に6.1.2節で説明した換算価格を乗じて算出している。

瀬戸内海を東西に航行する内航海運船舶は1日に約3,000隻と推定され、表6および表7に得られた結果から、潮流による影響を付加したエコ・ナビによる航海計画立案により、3,000隻/日を想定すれば1日あたり少なくとも4,608 kg-CO₂/ton-cargo, 134.7 kg-NO_x/ton-cargo, 68.1 kg-SO_x/ton-cargoの排出ガス、社会的費用としての金額換算では45,000 Yen-CO₂/ton-cargo, 9,000 Yen-NO_x/ton-cargo, 3,000 Yen-SO_x/ton-cargoを削減/セーブすることが期待できる。

本研究の結果から、内航船舶の航海計画立案のシステム化によるエコ・ナビの活用により、海環境保全を促進させることが有効であることを定量的に評価、確認できたと考える。

7. おわりに

本研究では、海環境保全のための一方法論として、船舶運航に大きな影響を与える船体外力である潮流および風情報を付加したエコ・ナビにより、特にその影響が大きい潮流影響を積極的に取り込んだ最短航海時間の推定を行った。そして瀬戸内海を対象海域として、出港時刻と潮流の関係から生じる航海時間差に対する船舶排出ガス量を定量的に評価し、潮流を有効に活用した航海計画が排出ガス削減に大きく貢献可能であることの提案を行った。

結果として、瀬戸内海を東西に航行する場合、少なくとも潮流を積極的に活用することで約5%の排出ガスを削減できる可能性を示した。また、世界各国には、強い潮流を持つ内海域が多数存在し、本研究の成果は多くの国々で利用可能と推定できる。

今後は、さらに各船種、船型別の航海データを収集し、本研究で提案したエコ・ナビシステムの船種、船型別の有効性の検証や本システムを用いた船舶の整流効果の評価について実施する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 環境省: 2003年度(平成15年度)の温室効果ガス排出量速報値(環境省算定値)について, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2003sokuho.pdf>
- 2) K. William Kapp: Environmental Disruption and Social Costs,

表5 航海時間への潮影響

	The longest hours underway	The shortest hours underway	Diff.
Neap tides	18 ^h 08 ^m	16 ^h 31 ^m	1 ^h 37 ^m
Lagging the tides	18 ^h 51 ^m	16 ^h 19 ^m	2 ^h 32 ^m
Spring tides	19 ^h 33 ^m	15 ^h 55 ^m	3 ^h 38 ^m

表6 エコ・ナビによるCO₂、NO_x、SO_x排出削減量(g/ton-cargo)(神戸-部埼間)

	CO ₂	NO _x	SO _x
Neap tides	1,536	44.9	22.7
Lagging the tides	2,407	70.3	35.5
Spring tides	3,452	100.8	51.0

CO₂(g/ton-cargo)=38×航海時間(表5の値)×13.5ノット
 NO_x(g/ton-cargo)=1.11×航海時間(表5の値)×13.5ノット
 SO_x(g/ton-cargo)=0.561×航海時間(表5の値)×13.5ノット

表7 エコ・ナビによるCO₂、NO_x、SO_x排出削減量コスト換算金額(Yen/ton-cargo)(神戸-部埼間)

	CO ₂	NO _x	SO _x
Neap tides	15	3	1
Lagging the tides	23	5	2
Spring tides	33	7	3

CO₂(Yen/ton-cargo)=CO₂(g/ton-cargo)(表6の値)
 ×9,450(Yen/ton)
 NO_x(Yen/ton-cargo)=NO_x(g/ton-cargo)(表6の値)
 ×66,315(Yen/ton)
 SO_x(Yen/ton-cargo)=SO_x(g/ton-cargo)(表6の値)
 ×50,159(Yen/ton)

Iwanami, Japan (1975)

- 3) 宇沢弘文：社会的共通資本，岩波新書（2004）
- 4) 国土交通省総合政策局情報管理部：陸運統計要覧（平成15年版）（2003）
- 5) 財団法人省エネルギーセンター：燃料消費効率改善に関する調査報告書（平成10年版），<http://www.eccj.or.jp/fuel/98/p-23.html>
- 6) 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID），<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/index-j.html>
- 7) 国土交通省：調査研究の目的と検討の枠組み，<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/gomizero15.pdf>
- 8) 国土交通省：輸送機関毎の二酸化炭素排出量と輸送量等の推移，<http://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/koutu/kankyou/1/shiryous.pdf>
- 9) 環境省：運輸部門における温室効果ガス排出量推計，<http://www.env.go.jp/earth/report/h12-03/4-3.pdf>
- 10) 日本内航海運組合総連合会：内航貨物輸送，<http://www.naiko-kaiun.or.jp/300/>
- 11) 国土交通省：平成16年度モーダルシフト促進アクションプログラムの策定について，http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/15/150602_.html
- 12) 山鹿知樹，柴崎隆一，角野隆，渡部富博：鉄道および船舶による国際海上コンテナ貨物の国内輸送特性に関する分析，沿岸域学会，17-1，39/50（2004）
- 13) 林祐司：航海情報の現状とその認識，第354回航法研究会資料（2002）
- 14) 杓名景義，坂戸直輝：海図の読み方，舵社（2005）
- 15) 林祐司，若林伸和，南里崇史，和氣博嗣：航海情報のデータベース化とその検索・表示方法についての研究，日本航海学会論文集，94，249/255（1996）
- 16) 林祐司，若林伸和，村井康二，河口信義：ランドマーク・テーブルとコースラインによる水路誌記載情報の獲得，日本航海学会論文集，105，111/118（2001）
- 17) 林祐司，青木健，村井康二，石田廣史：潮流・風情報を利用した航海計画立案支援システム，日本航海学会論文集，105，103/109（2001）
- 18) 長谷川健二，平野研一：地文航法，海文堂（1993）
- 19) 海上保安庁水路部：平成13年潮汐表第一巻
- 20) 海上保安庁水路部：鳴門海峡・友ヶ島水道・明石海峡潮流図，大阪湾潮流図，播磨灘潮流図，備後灘及備讃瀬戸潮流図，来島海峡潮流図，広島湾及安芸灘潮流図，豊後水道付近潮流図，周防灘及付近潮流図，関門海峡潮流図
- 21) 環境省：平成16年3月環境会計の現状と課題，http://www.env.go.jp/policy/kaikei/kento/16_03/mat03_4.pdf