INMARSAT データ通信を用いる ウェザールーティングシステムの研究—Ⅱ— —実用化に向けての改良—

萩原 秀樹*・鈴木 るり*・
桑島 進*・東 誠**

A Study on Weather Routing System Using INMARSAT Data Communications—Ⅱ— —System Improvement for Practical Operation—

Hideki HAGIWARA, Ruri SUZUKI,
Susumu KUWASHIMA and Makoto HIGASHI

Abstract

In this study, an advanced weather routing system using INMARSAT data communications has been developed, and the onboard experiment has been carried out since 1990 with the container ships plying Japan-California route. After the first experiment performed in Nov.1990 - Mar.1991, the system has been improved mainly in the following points.

- (1) The data communication speed was increased up to 4,800 bps by using new INMARSAT terminal with data/fax line, which enabled us to send a large amount of information such as surface pressure charts to a ship.
- (2) The function to evaluate the captain's route was added to the system.
- (3) The wind/wave data set based on 10-day numerical forecasts by the U.S. National Meteorological Center was prepared for the optimum route calculation.

Using the improved system, the second onboard experiment was performed in Nov.1992-Mar.1993 and the effectiveness of the system was thoroughly demonstrated.

1. はじめに

本研究では、INMARSAT 衛星経由のデジタルデータ通信を用いるウェザールーティングシステムを開発し、1990 年 11 月よりコンテナ船による実船実験を行っている¹⁾。前回(1990 年 11 月～91 年 3 月)の実験では、十分な通信速度が得られなかったため、計算結果を表示するための最小限のデータしか伝送できず、天気図等の情報の利用はできなかった。また、本システムを実際に運用した船長からは、自分で選定した航路を評価したいとの要求が強かったが、この機能についてはソフトウェアの改良が必要であった。これらの点を中心にシステムを改良し、1992 年 10 月から 93 年 3 月までの間、日本～カリフォルニア間を航海するコンテナ船を用いて実船実験を行ったので、その結果を報告する。

2. ウェザールーティングシステムの概要と改良点

本システムは、船に搭載された PC(Personal Computer、以後 Onboard PC と呼ぶ)と INMARSAT 送

* 正会員 東京商船大学(〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

** 正会員 (株)オーシャンルート(〒105 東京都港区芝 3-1-14 日本生命赤羽橋ビル)

受信機及び陸上のオフィスに設置された PC (以後 Office PC と呼ぶ) と Host Computer により構成されている。

写真 1 に示す Onboard PC システムは、2 台のカラーディスプレイ (グラフィック表示用とテキスト表示用)、110MB ハードディスク内蔵の CPU、モデム及びプリンタで構成されており、最適航路計算に必要なデータの入力、Office PC との通信及び航路・気象情報の表示を行う。Office PC は Onboard PC との通信、Host Computer へのデータ転送、送信データの圧縮などを行い、Host Computer は気象・海象データの作成、等時間曲線法を用いた最適航路計算、Office PC へのデータ転送及びテレックスの自動発信を行っている。

陸上の Host Computer は、気象・海象データが更新されるとそのことをテレックスにより船に知らせる。船長は船の位置、時刻、目的地、指令プロペラ回転数等の最適航路計算に必要なデータを Onboard PC に入力し、INMARSAT 衛星経由で Office PC に送信する。この入力データは、Office PC から Host Computer に転送され、Host Computer で最新の気象・海象データを用いて最適航路計算が行われる。最適航路情報は気象情報と共に Host Computer から Office PC に転送され、データ圧縮が行われる。船では計算終了を知らせるテレックスを受信後、再度 INMARSAT 衛星経由で通信を行い、最適航路及び気象情報を受信し、その情報を Onboard PC のディスプレイ上に表示して航路選定を行う⁽¹⁾。

本システムでは陸上側は完全に自動化されており、いつでも最適航路計算を行うことができるので、最新の気象予報データに基づく航路選定が可能である。また最適航路計算を陸上で行うため、膨大な量の気象・海象データの使用が可能であり、高性能の計算機を使用できるので計算時間も短くなる。船に送信するデータは必要最小限のデータのみなので、通信時間を短く、したがって通信コストを節約することができる。

このシステムは前回の実船実験時と比べ、データ通信速度が改善され、10 日先までの予想天気図の表示機能及び船長が自分で設定した航路の評価機能が付加されている。

通信速度の向上については、前回より高性能の INMARSAT 送受信機 (古野電気社製の "FELCOM 5B") を用いて、データファックスライン (Data/Fax Line) を使用し、モデムを高速ファイル伝送モードに設定することで、高速通信が可能になった。実験当初は通信に音声回線を使用していたため、コンパンダ (音節圧伸器) の影響により、通信途中でエラーが発生し中断されることが多かった。しかしその後、コンパンダを介さないデータファックスラインを使用することにより安定した高速通信が可能となり、前回の実験時 1200bps であった通信速度を 4800bps まで上げることができた。データ通信時間は、船からの入力データの送信が約 5 秒、陸上で計算された航路情報の受信が 10~20 秒、気象情報の受信が 150~200 秒であった。(航路情報は出港直後はデータ量が多く、到着直前ではデータ量が少ない。)

通信速度が 4 倍になったので大量のデータ伝送が可能となり、アメリカ国立気象センター NMC (U. S. National Meteorological Center) による 10 日先までの地上予想天気図を Onboard PC に送れるようになった。Onboard PC 上では地上予想天気図に航路を重ね合わせて描き、天気図の予報時刻における船位を表示できるようにした。

図 1 は、3 月 19 日 1700GMT に行った計算で求められた最短時間航路に、19 日 00GMT を予報基準時とする 168 時間予想天気図を重ねた画面をプリンタ出力したものである。図中、実線は最短時間航路、丸印は天気図の予報時刻における船位、矢の向き・矢羽は風向・風速、数値は高/低気圧の中心示度の下 2 桁を示している。また右下のウィンドウ内では、天気図の予報時刻、船位、風速 (ノット)、波高 (m) を数値で示し、その時刻・船位における針路を船の形の向きで、風向及び波向を矢印及び波形の矢印で示している。図 1 では、26 日 00GMT に船は低気圧中心の南西側を航行するため、NW15 ノットの風、NW から 2m の波が予想されている。このように、天気図に航路情報を重ねて表示することにより、計算結果の信

写真 1 Onboard PC システム
(上からプリンタ、グラフィック表示用
ディスプレイ、テキストデータ表示用
ディスプレイ、キーボード及び CPU)

頼性が容易に評価できるようになった。

また、船長が自分で設定した航路（以後 Captain's Route と呼ぶ）を評価できるように、Onboard PC に任意の航路の作成及び表示機能が付加された。この機能は前回の実験時に本システムを使用した船長からもっとも要望の強かった機能である。Captain's Route は現在位置から目的地までのウェイポイントの緯度・経度及びウェイポイント間の航法を指定することにより作成される。図 2 に Captain's Route の作成画面のハードコピーを示す。図の右側に Captain's Route のウェイポイントとウェイポイント間の航法（G：大圏航法、R：ラムライン航法）が表示されている。（この Captain's Route は、アラスカ湾を北上し、Unimak 水道からベーリング海に入り、カムチャツカ半島の南端から千島列島に接航して野島埼沖に至る航路である。）Captain's Route は、図 2 の左側に示すデータと共に陸上のオフィスの Host Computer に送られ、最適航路計算と同じ気象・海象データを使用して、航海時間、燃料消費量等が計算された。船側では最適航路・大圏航路の情報とともに Captain's Route の情報を受け取り、Onboard PC のディスプレイ上に表示して比較・検討を行った。

図 1 最短時間航路と地上予想天気図を重ねて表示した例
[天気図の予報時刻：1993 年 3 月 26 日
00GMT (168 時間予報)]

PREPARE INPUT FOR OPTIMIZATION	
Optimization Method (MFR/MTR): 0	
Departure Time: MAR-19-93	17:00
Departure Point: 47°15'N	133°27'W
Destination Time: - -	:
Destination Point: 34°48'N	139°54'E
RPM: 83.5	
Specific Fuel Consumption:	0.130
Input Route Points: Y	

1.	47°15'	133°27'W
2.	G 54°00'	145°00'W
3.	R 54°05'	162°00'W
4.	R 54°23'	165°30'W
5.	G 53°25'	170°30'E
6.	G 50°00'	158°00'E
7.	G 35°00'	140°30'E
8.	R 34°48'	139°54'E
9.	°	'
10.	°	'
11.	°	'
12.	°	'
13.	°	'

図 2 最適航路計算のためのデータ入力画面（左側）と Captain's Route のデータ入力画面（右側）

3. 実験船の船速とエンジン出力の推定

実験に使用したコンテナ船 (41,144G/T、244.8m L_{OA}) の波浪中における船速及びエンジン出力の推定については、実船の Log Book や Chief Engineer's Log 等を調査し、さらにこれまでの耐航性に関する研究結果を用いた。

波浪中における船速 V は、平水中における船速 V_{calm} から波浪中における減速量 ΔV を減じて計算できる。 V_{calm} はプロペラ回転数 n に比例するものとした。 ΔV は実用的には波高と相対波向の関数と見なせるが、今回の実験船には信頼性の高い波浪データの記録がなかったため、ほとんど同船型・同サイズである前回の実験船の減速量推定式⁽¹⁾をそのまま採用した。

$$V = V_{\text{calm}} - \Delta V \quad (1)$$

$$V_{\text{calm}} = 0.26786n \quad (2)$$

$$\Delta V = A \{1 - \exp(-Bh^c)\} \{\exp(-D\phi^E) + F\} \quad (3)$$

V : 波浪中における船速 (knots)

V_{calm} : 平水中における船速 (knots)

ΔV : 波浪中における減速量 (knots)
 n : プロペラ回転数 (rpm)
 h : 有義波高 (m)
 ϕ : 船の針路と卓越波向とのなす角 (rad)
 $A=15.006$ $B=0.005338$ $C=1.9004$
 $D=0.4627$ $E=1.8997$ $F=0.3091$

(3) 式による減速量 ΔV には風の影響も含まれており、最適航路計算では波浪データ (有義波高、卓越波向) のみを用いて船速を算出している。

また船速を推定する場合、船体動揺による運航限界を考慮する必要がある、ここでは実験船と類似のやや小さいコンテナ船において、船首上下加速度 $0.8g$ が $1/1000$ の確率で発生する船速を運航限界速力 V_{limit} とした⁽¹⁾⁽²⁾。最適航路計算では、 $V > V_{\text{limit}}$ の場合、 $V < V_{\text{limit}}$ となるまでプロペラ回転数を 1rpm ずつ下げるようにした。

波浪中におけるエンジン出力 $P(\text{PS})$ は、プロペラ回転数 n と船速 V の関数として与えられる。

$$P = 0.10875n^3 - 0.20256Vn^2 \quad (4)$$

(4) 式は、プロペラ回転数が一定ならば、荒天により船速が低下するとエンジン出力が増大することを示している。

1 時間あたりの燃料消費量 $F(\text{kg/hour})$ は次式から求められる。

$$F = KP \quad (5)$$

ただし、 K は燃料消費率 ($\text{kg}/(\text{PS} \cdot \text{hour})$) であり、実験船では $K=0.130$ である。

通常、船用ディーゼルエンジンでは、ガバナにより回転数が一定値 (指令値) に保たれているが、波高が大きくなりエンジン負荷が増大すると、燃料ポンプのリミッタが作動して燃料注入量を制限するため、指令した回転数を維持できなくなり船速が低下する。最近のコンテナ船のエンジンでは、リミッタの作動点がかかなり安全サイドに設定されており、この現象 (以後エンジン過負荷と呼ぶ) が顕著である。エンジン過負荷を考慮するために最適航路計算においては、エンジンのトルクに相当する P/n が限界値 (実験船では 387.0) を越える場合、 $P/n < 387.0$ となるまでプロペラ回転数を 1rpm ずつ下げるようにした。

実船の船速の計算例を図 3 に示す。図 3 には、横軸を有義波高とし、船首から $0^\circ \cdot 60^\circ \cdot 90^\circ \cdot 120^\circ \cdot 180^\circ$ の 5 通りの波向に対して、プロペラ回転数が $83 \cdot 79 \cdot 70 \cdot 55\text{rpm}$ の 4 通りの場合の速力曲線が示してある。 83rpm の場合及び 79rpm で正面波以外の場合に速力曲線が途切れているのは、エンジン過負荷が原因である。 79rpm と 70rpm で正面波の場合に速力曲線が途切れているのは、船速が運航限界速力を超えたことが原因である。

4. 実船実験の結果と考察

実船実験は 1992 年 10 月から 93 年 3 月の期間に 4 往復航海について行われた。試験期間であった第 1 回目の東航を除き、残りの 7 航海を Voy.1, ..., Voy.7 と呼ぶ。奇数の Voy.No. は西航 (San Francisco 沖 → 野島崎沖)、偶数の Voy.No. は東航 (野島崎沖 → Point Conception 沖) である。

4.1 使用した気象・海象データ

最適航路計算で使用した風と波のデータは、Voy.1 ~ Voy.5 については、72 時間先まではアメリカ海軍数値予報センター FNOC (Fleet Numerical Oceanography Center) による数値予報データを、72 時間以降 10 日先までは 5 日平均東西指数から求められた東西指数のクラス別 5 日平均風/波分布モデル (ZI モデル) を、その後は月別の平均値を使用した。以後、この風/波データセットを、FNOC+ZI データと呼ぶことにする。

Voy.6 及び Voy.7 については、240 時間先まではアメリカ国立気象センター NMC による数値予報の出力である予想地上気圧分布から計算された海上風および波の予測データを、240 時間以降は月別の平均値

図 3 実験船の速力曲線

を使用した。以後この風/波データセットを NMC データと呼ぶことにする。FNOC+ZI データ及び NMC データの構成を図 4 に示す。なお、Voy.5 については NMC データを、Voy.6 及び Voy.7 については FNOC+ZI データを使用した最適航路計算も同時に行った。

NMC の 10 日間予報地上天気図について、実況天気図と予報天気図を比較して調査した結果、3 日先までの予報精度はかなり高くほぼ確実な予報であった。4 日先以降の予報精度は 3 日先までに比べかなり低くなるが、5～6 日先位までは高/低気圧の大まかな分布パターンについては良く捉えている場合が多かった。

なお海流については、月別のアメリカ版パイロットチャートをデジタル化したデータベースを使用した。

4.2 Voy.5 についての考察

Voy.5 は 1993 年 2 月 4 日に San Francisco を出港し、野島埼沖まで西航した航海であるが、FNOC の実況(解析)データによると、西航船にとっては非常に厳しい気象状況であったので、特にこれについて考察を行った。

出港直後の 2 月 4 日 0830GMT に FNOC+ZI データを用いて計算した最短時間航路を、図 5 に (a) に示す。図中、実線が最短時間航路、点線が大圏航路、破線が Captain's Route である。各航路につけられている矢印の先端が 24 時間毎の本船の推測位置であり、矢の向きが波向、矢の長さが波高を示している。24 時間毎の等時間曲線が①及び+で描かれている。

出港直後の最短時間航路は、東西指数の予測値が低かったため³⁾、アリューシャン列島の南側を航行する航路となっている。また荒天域を示すダブルポイント(等時間曲線が出発地の方へ鋭く後退している点)が約 30°N より南にしか存在しないため、最短時間航路の航海時間や燃料消費量は、大圏航路及び Captain's Route のものと大差はない。

出港から約 2.5 日後の 2 月 6 日 1800GMT の位置で、FNOC+ZI データを用いて計算された最短時間航路を、図 5(b) に示す。航路上の○は、本船が最適航路計算を行った船位を示す。この時点で予想された最短時間航路は、ベーリング海経由となっている。航海中は少なくとも 1 日に 1 回このように船の現在位置を出発点として、最新の気象・海象データを用いて最適航路計算が行われた。Voy.5 では出港後、野島埼沖に到着するまでに 13 回の最適航路計算が行われた。出港直後の 2 月 4 日 0830GMT に、NMC データを用いて計算した最短時間航路を、図 5(c) に示す。航海時間及び燃料消費量の予測値は、FNOC+ZI データを用いた場合(図 5(a))とあまり差はないが、最短時間航路はベーリング海経由の航路となっている。また、等時間曲線に顕著なダブルポイントはなく、北太平洋全域にわたってひどい荒天域は予想されていない。

航海終了後に FNOC による実況波浪データを用いて計算した真の最短時間航路を、図 5(d) に示す。

この図では予測データを使用した場合(図 5(a)、図 5(c))と異なり、等時間曲線が大きく屈曲していて顕著なダブルポイントが見られる。特に 170°W 以西では、35°N～45°N を中心に等時間曲線が出発地の方へ大きく後退しており、西航船にとっては極めて厳しい気象・海象状況であったことがわかる。真の最短時間航路はベーリング海経由の北方航路であって、Captain's Route とほぼ一致していた。また、図中には破線でラムライン航路も示した。この航海ではラムライン航路は非常に不利で、280.7 時間もの航海時間を要した。航海中は高波高の向かい波を受けて航行することが多く、3. で述べたエンジン過負荷による減速が航海中ほとんどの期間で発生した。また、船速が運航限界速力を越えることによる減速も頻繁に生じた。

以後、図 5(a)～(c) で示されたような予測波浪データを用いて計算された最短時間航路を PMTR (Predicted Minimum Time Route)、図 5(d) で示されたような実況波浪データを用いて計算された真の最短

図4 FNOC+ZI データ及び NMC データの構成

時間航路を TMTR (True Minimum Time Route) と呼ぶ。

FNOC+ZI データを用いた出港直後の PMTR (図 5(a)) 及び NMC データを用いた出港直後の PMTR (図 5(c)) は、共に大略的には北方航路であり、予測された航海時間及び燃料消費量にも大きな差はなく、特に図 5(c) の PMTR は実況波浪データを用いた図 5(d) の TMTR とほぼ一致している。しかし等時間曲線について図 5(a)、(c) と図 5(d) を比較すると、出港後 3 日先までの等時間曲線は大略その形状が類似しているが、出港後 4 日先以降の 160°W 以西の荒天についてはまったく予測されていない。ただし図 5(b) に示されるように、最新の気象・海象情報を用いて最適航路を更新していくと PMTR は TMTR に近づいていき、出港直後には予測できなかった荒天域を回避することができる。

図 5 (a) 出港直後の FNOC+ZI データに基づく最短時間航路(実線), 大圏航路(点線)及び Captain's Route(破線)
(1993 年 2 月 4 日 0830GMT における計算)

図 5 (b) FNOC+ZI データに基づく最短時間航路(実線), 大圏航路(点線)及び Captain's Route(破線)
(1993 年 2 月 6 日 1800GMT における計算)

図 5 (c) 出港直後の NMC データに基づく最短時間航路(実線), 大圏航路(点線)及び Captain's Route(破線)
(1993 年 2 月 4 日 0830GMT における計算)

図 5 (d) FNOC 実況波浪データに基づく真の最短時間航路(実線), 大圏航路(点線), Captain's Route(破線)及びラムライン航路(破線)
(1993 年 2 月 4 日 0830GMT における計算)

Voy.5 の航海中に計算された各 PMTR がどの程度有利な航路であったかを調べるために、各 PMTR 上を FNOC 実況波浪データを用いて船を航走させた場合の航海時間と各 PMTR を計算した位置からの TMTR の航海時間との比較を行った。図 6 は、横軸に出港時から最適航路計算を行った時点までの経過時間を取り、縦軸に各 PMTR の上を実況波浪データを用いて船を航走させた場合の航海時間と TMTR の航海時間との差(以後、航海時間差と呼ぶ)を示した図である。図中、●が FNOC+ZI データを用いた場合の航海時間差、▲が NMC データを用いた場合の航海時間差である。FNOC+ZI データを用いた場合、出港直後に計算された PMTR は、アッツ島の南で発達した低気圧による荒天を予想しきれなかったため、

アリューシャン列島の南側を航行する航路であった。TMTR はベーリング海を通りアッツ島の北側を通過する航路であり、両航路の航海時間差は 10.4 時間にもなった。しかし、出港から約半日後に計算された PMTR はベーリング海経由となり、TMTR にかなり近づいて航海時間差は 3.7 時間まで縮まった。その後、航海に進むにつれて航海時間差は徐々に縮まり、出港から 110 時間以後は航海時間差は 1 時間以内となっている。

次に NMC データを用いた場合については、出港直後の PMTR はベーリング海経由で、TMTR にかなり近いものであり、航海時間差は 1.6 時間であった。しかしその後の計算では、PMTR がアリューシャン列島の南側を通ることも多く、航海時間差は大きくばらついている。この航海では NMC の予報が安定せず、荒天域にかなり近づくまでそれを正確に予測できなかったと言える。実船は 2 月 10 日 03GMT (出港から 140 時間後) にアッツ島の南にあった 954hPa の低気圧中心の北側を通過した。低気圧中心の北側通過時より 4 日前に予報された気象データを用いた計算 (出港から 84.5 時間後に行われた計算) では、この低気圧による荒天を予測しきれず航海時間差は 8.9 時間であったが、低気圧中心の北側通過時より 3 日前に予報された気象データを用いた計算 (出港から 94.5 時間後に行われた計算) では、航海時間差は 0.7 時間となった。これは気象データが 1 日分更新された時点で、アッツ島の南の低気圧についての予報が正確になったためである。

このことから、航海中、気象・海象データが更新された時に迅速に最適航路計算を行い、航路を修正していくことが極めて重要であると言える。この航海で NMC データを用いた場合のように、予報が安定しないときは航海半ばでも PMTR は TMTR とかなり異なる場合があるので、予報期間の長い数値予報データについては、その精度を十分に調査し慎重に使用する必要がある。

4.3 各航海の概要

図 7 から図 13 に Voy.1 から Voy.7 の各航海について、出港直後に計算された PMTR を点線、その後計算された PMTR を細線、出港直後に PMTR を計算した位置からの TMTR を破線、実航路を太線で示す。図中○印は最適航路計算を行った船の位置であり、右上に出港直後の PMTR の計算を行った時刻が示されている。

Voy.1 (図 7) では、出港直後に計算された PMTR (点線) は TMTR (破線) とほぼ一致していた。実船は PMTR に従わず、ほぼ San Francisco 沖から野島埼沖までのラムライン航路に沿って航行した。(実船はウェザールーティングサービスを受けており、その推薦航路がラムライン航路であった。) PMTR は出港後 4 回目 (2.5 日後) の計算時まで北方航路であり、その後は南方航路に変わった。計算を行った各船位に対して TMTR を調べると、TMTR が北方航路であったのは出港後 2 回目 (約 1 日後) の計算までで、その後は南方航路であった。

Voy.3 (図 9) では、TMTR はアリューシャン列島の南側を航行するものであったが、出港直後の PMTR はより北側でベーリング海経由の航路であった。PMTR は、出港後 6 回目の計算時 (約 4 日後) からほぼ TMTR と一致した。実航路は出港後アラスカ湾北部に荒天が予想されたため、アリューシャン列島の Amukta 水道までラムラインで航行してベーリング海に入り、Amchitka 水道からベーリング海を出て南下する航路であり、TMTR (破線) に近いものであった。この実航路は、ウェザールーティングサービスの推薦航路にほぼ一致するものであった。

図 6 実況波浪データを用いて PMTR 上を航走させた場合の航海時間と TMTR の航海時間との差

図 7 予測波浪データに基づく最短時間航路 (点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路 (破線) 及び実航路 (太線) (Voy.1)

図8 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.2)

図9 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.3)

図10 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.4)

図11 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.5)

図12 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.6)

図13 予測波浪データに基づく最短時間航路(点線と細線), 実況波浪データに基づく最短時間航路(破線)及び実航路(太線) (Voy.7)

Voy.5 (図11) では、4.2 で詳述した通り、FNOC+ZI データを用いた出港直後の PMTR はアリューシャン列島の南を航行する航路、TMTR はベーリング海経由の航路であった。実航路は、アラスカ湾で TMTR よりやや北側を通ったが、Unimak 水道以西ではほぼ TMTR に一致した。

Voy.7 (図13) は、実船実験に NMC データを用いた航海であり、TMTR と PMTR はほぼ一致してベーリング海を経由しており、10 日先までの数値予報がうまくいった例である。FNOC+ZI データを用いた出港直後の PMTR もベーリング海経由の航路で、ベーリング海及びその出口付近では NMC データを用いた PMTR より北側を航行する航路であった。

Voy.2(図8)、Voy.4(図10)、Voy.6(図12)の東航では、どの航海についても野島埼沖から Point Conception 沖までの TMTR は実航路より北側となっている。東航では波を斜め後方から受けて航走することが多いが、大波高の斜め追波中ではローリングが激しくなるため、東航船は北方にある低気圧中心に余り近づかずに航行するのが普通である。しかし現在使用している最適航路計算のプログラムは、ローリングについては考慮しておらず、また斜め追波中での船速低下は小さいので、最短時間航路は北方の低気圧中心に近づく傾向がある。今後、ローリング角度の推定法を確立し、プログラムに組み込む必要がある。

4.4 各航路の航海時間と燃料消費量の比較

表1に Voy.1~Voy.7の航海について、出発地点(西航: San Francisco 沖、東航: 野島埼沖)から目的地(西航: 野島埼沖、東航: Point Conception 沖)までの5通りの航路(①~⑤)の航海時間と燃料消費量をまとめた。ここで出港直後の PMTR と TMTR とは、出港して最初に計算を行った位置からの PMTR と TMTR を意味する。

前述したように、実験航海中に①を計算した予測波浪データは、Voy.1~Voy.5については FNOC+ZI データであり、Voy.6、Voy.7については NMC データである。また Voy.5については NMC データを、Voy.6、Voy.7については FNOC+ZI データを用いた計算も行った。②,③,④の計算には、FNOC による実況波浪データを用いている。なお計算で用いたプロペラ回転数は、Voy.1、Voy.2、Voy.6、Voy.7が 83rpm、Voy.4、Voy.5が 82rpm、Voy.3が 78rpm である。

表中において、①と②の比較は、出港直後の最適航路計算に使用した予測波浪データの精度を示している。①と②の差が特に大きいのは Voy.1 と Voy.5 で、Voy.1 では実際の波浪状況は予測よりおだやかなものであり、Voy.5 では逆に予測より厳しいものであった。

②と③の比較は、システムが提供した最短時間航路が真の最短時間航路にどのくらい近いものであったかを示している。特に気象状態が厳しかった Voy.5 以外の航海では、②と③の差はほとんど1時間以内であり、システムは出港直後の時点で真の最短時間航路に近い航路を提供してくれたことがわかる。

②と④の比較は、システムが出港直後に提供した最短時間航路が実航路に比べ、どの程度有利だったかを表している。Voy.1 と Voy.5 (FNOC+ZI データ) 以外では、②と④に大差はない。Voy.1 では、実船は San Francisco から野島埼沖までのラムライン航路に沿って航行したが、もしシステムが提供したベーリング海経由の航路を採用していれば、航海時間を 13.0 時間も短縮できたことがわかる。Voy.5 については 4.2 で述べたとおり、実際の気象状況は予測よりはるかに厳しいものであって、FNOC+ZI データを用いた出港直後の最短時間航路は、アッツ島の南で大波高の向かい波を受ける不利な航路であった。

④と⑤の比較は、FNOC の実況波浪データが実際の波浪状態にどの程度近いものであったか、また波浪中における船速とエンジン出力の推定がどの程度正しかったかを示している。Voy.3 の燃料消費量を除いて④と⑤はかなり近い値となっている。したがって、FNOC 実況波浪データは実際の波浪状態をよく再現しており、船速やエンジン出力の推定も実用的には十分な精度で行われたと言える。(Voy.3 では、⑤

表1 各航路の航海時間と燃料消費量の比較

航路の種類 ↓	Voy.No. → 使用データ →	Voy.1	Voy.2	Voy.3	Voy.4	Voy.5	Voy.6	Voy.7	Voy.5	Voy.6	Voy.7
		FNOC+ZI data							NMC data		
航海時間 (h)	①出港直後の PMTR	229.9	214.0	222.3	215.2	212.5	212.7	219.5	214.8	209.2	211.1
	②実況波浪データを用いて ①の航路上を航走させた場合	214.9	213.1	224.2	221.5	230.4	211.0	215.7	221.6	210.9	216.3
	③出港直後の TMTR	215.5	212.0	223.8	221.6	220.1	210.1	215.7	-----	-----	-----
	④実況波浪データを用いて 実航路上を航走させた場合	227.9	215.5	225.4	222.7	221.6	211.9	216.1	-----	-----	-----
	⑤実航路(実際の値)	220.2	215.0	232.1	223.5	223.2	215.7	217.7	-----	-----	-----
燃料消費量 (t)	①出港直後の PMTR	908.0	875.9	762.9	863.3	852.5	867.7	894.2	860.1	856.9	863.8
	②実況波浪データを用いて ①の航路上を航走させた場合	880.5	875.9	775.7	886.2	890.1	862.1	883.3	890.2	862.2	883.5
	③出港直後の TMTR	873.7	874.1	773.4	887.9	887.2	859.6	883.3	-----	-----	-----
	④実況波浪データを用いて 実航路上を航走させた場合	925.4	884.7	777.6	893.0	894.0	866.8	884.1	-----	-----	-----
	⑤実航路(実際の値)	908.6	871.1	856.6	904.3	898.8	825.1	896.1	-----	-----	-----

の燃料消費量が④より 79 トンも多く、航海時間も⑤が④より 6.7 時間長くなっているが、これは航海中プロペラ回転数を出港直後の 78rpm よりかなり高くしていた期間が長く、また日本沿岸でエンジンを止めて漂流し到着時刻の調整を行ったためである。)

5. まとめ

以上、ウェザールーティングシステムの改良点を述べ、1992 年 10 月～93 年 3 月にかけて行った実船実験の結果について解析し、考察を行った。計算した航路と 10 日先までの地上予想天気図とを重ねて表示する機能及び Captain's Route の評価機能は、本システムを使用した船長から高い評価を得ることができた。また、気象・海象データとして従来の FNOC+ZI データの他に NMC データも使用して、並列に最適航路計算を行った。

NMC の 10 日間数値予報に基づく予測データからは、結果的には有利な航路を選定できたが、4.1 で述べたように NMC データの予測が正確なのは 3 日先までで、現在の段階ではそれ以後 5～6 日先までについては、高/低気圧の大まかな分布パターンを捉えている程度である。NMC データについては、その予測精度をより詳しく調査する必要がある。

今回の実験でも、戦略的な航路選定には ZI モデル(東西指数のクラス別 5 日平均風/波分布モデル)の使用が極めて有効であることが再確認できた。現在 3 日先までの期間に使用している FNOC の数値予報データは、データの更新のタイミングによっては、1.5 日～2 日分しか使用できないことがある。そのため NMC データが比較的信頼できる 5 日先までについては NMC データを使用し、それ以後は ZI モデルを接続したデータセットの使用を検討している。

また、今年中に INMARSAT B システムで 9600bps までのデジタル専用回線が利用できる予定であり、Onboard PC へより大量のデータを低コストで送れるようになるので、10 日先までの風向・風速データ及び波高データを Onboard PC に送り、風向・風速図及び波高図を表示することを計画している。波浪中の船速及びエンジン出力の推定についても精度の向上を図り、さらに海水打ち込み確率やローリング角度の推定法等を開発していく予定である。

最後に、実船実験を行うにあたり、絶大なご協力を頂いた大阪商船三井船舶(株)海務部海務チームの方々と大村義人船長及び西原裕人船長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 萩原秀樹、桑島 進、岩坂直人、石塚正則、東 誠、田中 充、鈴木るり：INMARSAT データ通信を用いるウェザールーティングシステムの研究 ―コンテナ船における実船実験一、日本航海学会論文集、第 86 号、1992 年 3 月
- (2) 萩原秀樹、巻島 勉：最適航路に関する考察、日本航海学会論文集、第 62 号、1980 年 1 月
- (3) 須田 健、巻島 勉、桑島 進、萩原秀樹：冬季北太平洋における高層気象と波浪分布、日本航海学会誌“航海”、第 81 号、1984 年 9 月

質 疑 応 答

越水 豊(日本郵船(株))：発表で使用された最適航路は、FNOC+ZI データに基づく航路と、NMC データに基づく航路の他に Captain's Route(船長が自分で選定した航路)が存在し、相互の比較について検討されたようですが、Captain's Route が FNOC+ZI データや NMC データに基づかずに選定したものとすれば、いったい何のデータに基づき、本船船長は Captain's Route を選定したのか、わかったらご教示下さい。

鈴木るり：ケーススタディとして例に示した 1993 年 2 月 4 日出港の San Francisco から東京への航海における Captain's Route は、船長が受けていたウェザールーティングサービス会社による推薦航路でした。また、そのほかの航海における Captain's Route も、ほとんどのものがウェザールーティングサービスによる推薦航路でした。