最適航路に関する考察

萩原 秀樹*・巻 島 勉*

A Study on the Optimum Ship Routes

Hideki HAGIWARA and Tsutomu MAKISHIMA

Abstract

In this paper, we try to study optimum ship routes by simulations.

The main purposes of studies are to investigate the effect of wave prediction to the optimum route and to compare a few optimum routes which have different criterion functions.

We used Dynamic Programming for the optimization and 16200 G/T container ship was selected as a model ship.

The wave data were taken from actual daily wave charts of December in 1977.

The main results from simulations are as follows.

1. The tracks of minimum time routes may vary widely and rapidly with the daily changes of wave pattern.
2. A practical weather routing is possible if we can get accurate wave prediction having the first one-third period of the time enroute and optimum route is recalculated every day.
3. Minimum fuel consumption route has approximately the same track as minimum time route.

1. はじめに

一般に Weather Routing を有効に行なうには、気象・海象の予測、船の耐航性能の把握および最適化計算が、迅速かつ正確になされねばならない。

現在、Weather Routing を実施する際の最も大きな障害は、大洋全体にわたる気象・海象の観測が不十分であり、また予測理論も不完全なことから、気象・海象の正確な長期予測が行えないことである。最近、静止気象衛星 (GMS) や海洋衛星 (SEASAT) が打ち上げられ、近い将来、気象・海象の現状把握はかなり改善されるだろうが、それでも正確な長期予測はなかなか難しいと思われる。そこで、どの程度の期間、気象・海象が正確に予測できれば、実用的な Weather Routing が可能であるかということは、一考に値する問題である。

また近年、経済的な理由から減速航海を行なう船が増えてきている。従って Weather Routing Service も単に最短時間航路だけでなく、最小燃料消費航路をも推せんするようなケースが多くなると考えられる。最適化の評価対象が、航海時間から燃料消費量へと変わった場合、最適航路がどのように変化するかということも興味ある問題である。

そこで著者らは、冬季の東京～サンフランシスコ航路を航海するコンテナ船を例にとって、最適航路シミュレーションを行ない、上に述べたような問題について考察した。そして Weather Routing を行なう際に参考となり得る、いくつかの結論を得たので報告する。

2. 最適航路決定問題の定式化および解法

最適航路シミュレーションにおいては、最適化の手法として Dynamic Programming (D.P.) を用いた。以下、

* 正会員 東京商船大学 (東京都江東区越中島 2-1-6)

最適航路決定問題を数式表現して、その D.P. による解法を示す。

2.1 連続過程としての定式化

船の位置ベクトルを $X = \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \end{bmatrix}$

φ : 緯度 λ : 経度

船の制御ベクトルを $U = \begin{bmatrix} \theta \\ P \end{bmatrix}$

θ : コース P : エンジン出力

船体運動ベクトルを $M = \begin{bmatrix} a \\ b \\ \vdots \end{bmatrix}$

$a, b, \dots$: 横揺れ角度, F.P. 上下加速度, 波浪縦曲げモーメント等の船体運動量

と定義する。

この時, X, U, M には, 次のような拘束条件が付帯する。

$$X \in X_a, \quad U \in U_a, \quad M \in M_a \quad (1)$$

ただし

X_a : 許容位置ベクトル (船が航行可能な海域)

U_a : 許容制御ベクトル (船にとって可能な制御量)

M_a : 許容船体運動ベクトル (許容しうる船体運動量)

さて, 船の速度 V は, 気象・海象と船の制御 U の関数である。もし航海中の気象・海象が, 時間と場所の関数として確定しているならば, 船の速度 V は, 船の位置 X , 船の制御 U および時間 t の関数として表わせる。

$$V = \frac{dX}{dt} = f(X, U, t) \quad (2)$$

今, 時刻 t_0 に出発地 X_0 を出発して, 目的地 X_f まで航海する船を考える。この時, 次の評価関数 J を最小にする航路を“最適航路”と呼ぶことにする。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \alpha(X, U, t) dt + \gamma(t_f, t_a) \quad (3)$$

ただし

$\alpha(X, U, t)$: 単位時間あたりの評価量

$\gamma(t_f, t_a)$: 目的地 X_f における評価量

t_f : 目的地 X_f に到着する時刻 (未定)

t_a : 運航者の希望する到着時刻

最適化の評価対象には, 航海時間, 燃料消費量, 快適度など様々なものが考えられるが, それらを表現するものが, $\alpha(X, U, t)$ である。例えば, 最短時間航路ならば $\alpha=1$, 最小燃料消費航路ならば α =(単位時間あたりの燃料消費量)と置けばよい。

また一般に, 目的地における評価量 $\gamma(t_f, t_a)$ は,

$$\begin{cases} t_f \geq t_a \text{ ならば } \gamma \geq 0 & [\text{delay penalty}] \\ t_f \leq t_a \text{ ならば } \gamma \leq 0 & [\text{dispatch reward}] \end{cases}$$

である。

図 1 連続過程としての表現

評価対象が航海時間ならば $\gamma=0$ であるが, それ以外の場合には, 運航者が γ に具体的な関数形を与えてやればよい。

以上のことから最適航路を決定する問題は, (1) 式の拘束条件を満たしながら, (2) 式に従って船を航走させた時, (3) 式の評価関数 J を最小するように, 制御 U を時間 t の関数として決定することに帰着する。

2.2 離散過程としての定式化

実際にシミュレーションを行なうには、位置 X 、制御 U 、時間 t を適当に離散化し、問題を多段決定過程として扱う方が便利である。

まず (3) 式において、到着時刻 t_f は未定なので、離散化する際に不便である。

そこで $t_0 < t_N < t_f$ となることが確実である時刻 t_N を適当に設定して、(3) 式を次のように変形する。

$$J = \int_{t_0}^{t_N} \alpha(X, U, t) dt + \int_{t_N}^{t_f} \alpha(X, U, t) dt + \gamma(t_f, t_a) \quad (4)$$

さて、 $t_0 \sim t_N$ を N 等分し、

$$t_i = t_0 + i\Delta t \quad (i=0, 1, \dots, N)$$

$$\Delta t = (t_N - t_0)/N$$

$$(5)$$

とする。

時刻 t_i の時の位置を X_i 、時刻 t_i から時刻 t_{i+1} までの制御を U_i と書くことにし、問題を離散的に表現すれば、(2) 式は、

$$X_{i+1} = X_i + f(X_i, U_i, t_i) \Delta t \quad (6)$$

となる。

また、(4) 式の右辺第 2 項を $\beta(X_N, U_N, t_N)$ と書けば、評価関数 J は次のように表わせる。

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha(X_i, U_i, t_i) \Delta t + \beta(X_N, U_N, t_N) + \gamma(t_f, t_a) \quad (7)$$

ここで $\beta(X_N, U_N, t_N)$ は、時刻 t_N に到達した位置 X_N から目的地 X_f までのラムライン上を、制御 U_N により航走した場合の、 $X_N \sim X_f$ の評価量を意味する。(従って、制御 U_N はエンジン出力のみに依存する。)

従って、離散過程として最適航路を決定する問題は、(1) 式の拘束条件を満たしながら、(6) 式に従って船を航走させた時、(7) 式の評価関数 J を最小にするように、制御 U_i ($i=0, 1, \dots, N$) を決定することに帰着する。

2.3 Dynamic Programming による解法

$C_{n+1}(X_{N-n}, t_{N-n})$ を、時刻 t_{N-n} ($t_0 \leq t_{N-n} \leq t_N$) の時、位置 X_{N-n} から目的地 X_f を目指して出発した場合の、 $X_{N-n} \sim X_f$ の最小評価量とする。

$$C_{n+1}(X_{N-n}, t_{N-n}) = \text{Min.}_{U_i} \left\{ \sum_{i=N-n}^{N-1} \alpha(X_i, U_i, t_i) \Delta t + \beta(X_N, U_N, t_N) + \gamma(t_f, t_a) \right\} \quad (8)$$

ただし C_{n+1} の添字 $n+1$ は、制御 U_i ($i=N-n, N-n+1, \dots, N$) による $n+1$ 段の最適化を行なうことを表わす。

(8) 式は、Bellman の最適性の原理により、次のような関数再帰方程式として表わせる。

$$C_{n+1}(X_{N-n}, t_{N-n}) = \text{Min.}_{U_{N-n}} \{ \alpha(X_{N-n}, U_{N-n}, t_{N-n}) \Delta t + C_n(X_{N-n}, t_{N-n} + \Delta t) + f(X_{N-n}, U_{N-n}, t_{N-n}) \Delta t, t_{N-n} + \Delta t \} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

境界条件として、

$$C_1(X_N, t_N) = \text{Min.}_{U_N} \{ \beta(X_N, U_N, t_N) + \gamma(t_f, t_a) \} \quad (10)$$

(10) 式により C_1 を求め、以後 (9) 式を用いて順次、 $C_2, C_3, \dots, C_{N+1}$ を求めることによって、 $X_0 \sim X_f$ の最小評価量 $C_{N+1}(X_0, t_0)$ が得られる。そして同時に、最適制御ベクトル U_i^* ($i=0, 1, \dots, N$) と最適航路 X_i^* ($i=1, 2, \dots, N$) を決定することができる。

(9)、(10)式は、様々な評価対象を扱うことができ、また多くの拘束条件を容易に取り入れることもできる。そしてその解は、最適航路であるための十分条件を備えている。

シミュレーションでは、(9)、(10) 式に基いて最適化計算を行なった。

図 2 離散過程としての表現

3. シミュレーションに使用する波浪データ

船の運航に影響を与える気象・海象には、風、波、海流、流氷、霧など様々なものがあるが、それらの中で Weather Routing を行なう際に、最も考慮すべきものは、波である。そこでシミュレーションにおいては、モデルの簡略化を図るため、使用する気象・海象データは波のみとし、有義波高と卓越波向の2つのパラメータで波を表わすことにした。

図 3 波浪データの1例

図 4 統計的な波浪データ

シミュレーションでは、接続させる波浪データとして、1954～1963年の12月における風浪の平均値⁽¹⁾を用いた。その波浪データを図4に示す。

4. 航走させるコンテナ船の耐航性能

シミュレーションでは、16200 G/T, 175 m L_{PP} のコンテナ船（デッキ上3段積み）を航走させた。

このコンテナ船の波浪中での自然減速および運航限界を決定するには、細田、北沢らの研究^{(2),(3)}を参考にした。以下、自然減速および運航限界に関する式は、彼らの研究結果に対する近似式である。

自然減速については、短波頂不規則波中での船速を、次のような式で表わした。

$$V = V_0(P) - m(P) \cdot f(h) \cdot g(\phi) \quad (11)$$

$$V_0(P) = 0.905 P^{1/3}$$

また実際の Weather Routing では、当然のことながら、予想波浪図を用いるのであるが、シミュレーションでは実況波浪図を用いた。すなわち波浪予測は必ず的中するとして、Weather Routing を行なったことになる。

波浪データは、有義波高については、気象庁の外洋波浪図から読み取った。また卓越波向については、上記波浪図からはわかりにくいので、FNWC（米海軍艦隊数値予報センター）の波浪図から読み取った。

データの期間は、

1977年12月1日～12月31日

データの海域は、

20°N～60°N, 130°E～120°W

読み取りの時間間隔は、

1日（毎日0900 J.S.T.のもの）

読み取りの格子点間隔は、

緯度方向 4°、経度方向 5°である。

図3に1例として、12月12日の波浪データを示す。

さて、現在の波浪予測は、スペクトル法で約3日間が限度であり、最適航路を計算するにはそれ以後、適当な波浪データを接続しなければならない。そしてそれには普通、類似予測（過去のデータとの相関による予測）のデータや、月別の統計的なデータが用いられている。

$$m(P)=1.4-2.8 \times 10^{-5} P$$

$$f(h)=12.0(1.0-e^{-3.2 \times 10^{-3} h^{2.8}})$$

$$g(\phi)=0.8e^{-4.1 \times 10^{-5} \phi^{2.4}}+0.2$$

ただし

V : 速力 (KT)

P : エンジン出力 (B.H.P.)

h : 有義波高 (m)

ϕ : 相対波向 (deg.)

[船の針路と卓越波向とのなす角]

図 5 相対波向 ϕ

また運航限界については、短波頂不規則波中において、F.P. 上下加速度の限界値を $0.8g$ とし、その限界発生確率を $1/10^8$ 回に設定した。これは、縦運動の平均周期を 7.2 秒とすれば、2 時間に 1 回に相当する。

本船型の運航限界には、このほか、F.P. 海水打ち込み、横揺れ、波浪縦曲げモーメントなどが影響するが、今回のシミュレーションでは、F.P. 上下加速度のみを取り上げた。

ある波浪状態における運航限界速力は、次式により決定されるとした。

$$V_{\text{limit}}=e^{0.13(q(\phi)-h)^{1.6}}+r(\phi) \quad (12)$$

$$q(\phi)=12.0+1.4 \times 10^{-4} \phi^{2.3}$$

$$r(\phi)=7.0+4.0 \times 10^{-4} \phi^{2.3}$$

ただし V_{limit} : 運航限界速力 (KT)

最適航路計算において、 $V > V_{\text{limit}}$ となった場合には、運航限界を越えたとして、そのコースとエンジン出力による探索を中止することにした。

図 6 (a), 6 (b), 6 (c) に、エンジン出力が 7900, 10000, 12500 B.H.P. の場合の、速力 V (実線) および運航限界速力 V_{limit} (点線) を示す。図でハッチングをほどこした部分は、運航限界を越える領域である。

5. 最適航路シミュレーション

以上述べてきたような準備のもとに、東京～サンフランシスコ航路を例にとって、最適航路シミュレーションを行なった。

このシミュレーションでは、最適化を行なうステージ数を 9 とし、各ステージの長さは 1 日とした。(ただし第 9 ステージは最終ステージなので、長さは不定である。)

また各ステージにおいて、制御 U による探

図 6 (a) エンジン出力 7900 B.H.P. の場合

図 6 (b) エンジン出力 10000 B.H.P. の場合

図 6 (c) エンジン出力 12500 B.H.P. の場合

図 6 短波頂不規則波中における速力 (実線) および運航限界速力 (点線)

索を行なうための出発点 X として、次のような格子点を設定した。

格子点の範囲: $25.0^{\circ}\text{N} \sim 57.5^{\circ}\text{N}$, $138.0^{\circ}\text{E} \sim 123.0^{\circ}\text{W}$

格子点間隔: 緯度方向 2.5° , 経度方向 3.0°

以下、シミュレーションの結果を示し、最適航路の特性について考察する。

5.1 1日ごとの出港日に対する最短時間航路

ここでは1日ごとの出港日に対する20日間の最短時間航路を求め、その形状、航海時間、平均速力等について考察した。またそれらが、大洋航路誌記載の推せん航路に比して、どの程度有利かということも調べてみた。

なお波浪データは、航海の全期間について、正確にわかっているものとした。

5.1.1 計算方法

(9), (10) 式において,

$\alpha=1$, β =(最終ステージの航走時間), $\gamma=0$, $\Delta t=24$ 時間, $N=8$ として計算した。

各ステージにおける探索は、コースについては、格子点から目的地に到る大圏航路の初期針路の左右に、11通り (10° ごと) 行なった。また、エンジン出力については 12500 B.H.P. とし、その出力で運航限界を越えた場合には、順次 10000 B.H.P., 7900 B.H.P. と出力を落とすことにした。

5.1.2 結果

12月1日～20日出港の最短時間航路を、図7(往航), 図8(復航)に示す。

図中、点線の航路は、大洋航路誌による推せん航路であり、北からベーリング海を通る航路、大圏航路、 35°N の距等圏を通る航路となっている。(以後、北方航路、大圏航路、南方航路と呼ぶことにする。)

また、出港日に対する航海時間を図9(往航), 図10(復航)に、平均速力を図11(往航), 図12(復航)に、Vertexを図13に示す。

5.1.3 考察

i) 図7, 図8の航跡を見ると、平均的には、往航では大圏より南方、復航では大圏より北方の航路が有利であったと言える。また真の最短時間航路は、あまり屈曲した形をとらないこともわかる。

ii) 図9, 図10を見ると、北方、大圏、南方の推せん航路では、航海時間の変動幅が1日近くに及んでいるものがある。また相続く出港日に対して、航海時間の差が10時間近くになる場合もある。

このことから日々の波浪パターンは、かなり大きく、また急激に変化しうることがわかる。従って、ここで使用した波浪データからは、季節別の推せん航路などは、あまり当てにならないと言える。

iii) 一航海の平均速力を比較すれば、各航路の波浪状態が推測できる。図11, 図12を見ると、特に復航の南方航路では平均速力の小さい航海が多く、西方からの波が卓越していたことがわかる。

図7 12月1日～20日出港の最短時間航路(往航)

図8 12月1日～20日出港の最短時間航路(復航)

次に 20 回の航海中、運航限界を越えたことにより、エンジン出力を絞った航海の回数を表 1 に示す。この表からも、復航の南方航路は荒天が多く、不利であったことがわかる。

表 1 エンジン出力を絞った航海の回数

	OUTWARD VOYAGE	HOMEWARD VOYAGE
MINIMUM TIME ROUTE	0	0
NORTHERN ROUTE	3	1
GREAT CIRCLE ROUTE	2	4
SOUTHERN ROUTE	0	10

また最短時間航路は、往航、復航ともエンジン出力を絞った航海がなく、波浪状態の良い海域を通ったことがわかる。

iv) 図 13 を見ると、最短時間航路の Vertex は、往航、復航とも約 10° に及ぶ幅で変動しており、その変化も急激な場合がしばしばある。特に、復航の出港日 12 月 11 日と 12 日の航海では、出港日が 1 日違うだけで、Vertex の差が 10° 以上にも及んでいる。

これは、最短時間航路が波浪パターンの変化に対し、かなり敏感であることを示すもので、Weather Routing には正確な長期波浪予測が不可欠であることがわかる。

5.2 波浪予測期間を 0,1,2,... (days) とした場合の最短時間航路

5.1 では、航海中の波浪データがすべてわかっているものとしたが、波浪予測を行なえる期間には限度がある。

ここでは波浪予測期間を 0,1,2,... (days) と変えた場合、最短時間航路がどのように変化するかを調べた。そしてどの程度の期間、正確な波浪予測が得られれば、実用的な Weather Routing が可能であるかを考察した。

5.2.1 計算方法

航海中においても、波浪予測データは 1 日ごとに更新される。そこで波浪予測データが更新されるたびに、その時の船位を新たに出

図 9 出港日に対する航海時間（往航）

図 10 出港日に対する航海時間（復航）

図 11 出港日に対する平均速力（往航）

図 12 出港日に対する平均速力 (復航)

図 13 出港日に対する最短時間航路の Vertex

図 14 波浪予測期間をいろいろと変えた場合の最短時間航路 (往航, 出港日 12 月 1 日)

発点として、最短時間航路を再計算するようにした。

従って、(9), (10) 式において N は、出港時の計算で 8, その後 1 日ごとの再計算では、7, 6, ..., 0 とした。 $\alpha, \beta, \gamma, \Delta t$ は、5.1 と同様である。また、コースおよびエンジン出力の探索についても、5.1 と同様である。

なお、予測期間以後の波浪データには、図 4 の統計データを用いた。

5.2.2 結果

波浪予測期間をいろいろと変えた場合の最短時間航路を、図 14 (往航, 出港日 12 月 1 日) および図 15 (復航, 出港日 12 月 18 日) に示す。図中、点線は 5.1 で求めた真の最短時間航路であり、各航路に付してある数字は、その航路を計算した際の波浪予測日数である。

また、波浪予測期間に対する航海時間を、図 16 に示す。

5.2.3 考察

i) 図 14, 図 15 を見ると、往航、復航ともに波浪予測を 3~4 日行なえば、ほぼ真の最短時間航路に近い航路が得られている。また図 16 からも、3~4 日の予測期間があれば、航海時間は十分減少することがわかる。

シミュレーションに使用したコンテナ船は、約 10 日間で太平洋を横断するから、‘波浪予測が正確で、航海時間の約 1/3 程度の予測期間があれば、実用的な Weather Routing が可能である。’と言える。

ii) このシミュレーションの結果には、最適化計算を出港時だけでなく、航海中も波浪予測データが更新されるたびに行なったということが、大きく貢献している。

現在の Weather Routing Service は、出港時に推せん航路を与え、以後はその船を follow して、新たに荒天が予測される場合には、推せん航路を変更するという方式が多い。

このような方式では、毎日更新される波浪予測データを、十分活用しているとは言えない。これからの Weather Routing は、ここで行なったように、波浪予測データを最大限利用すべきである。

iii) このシミュレーションでは、波浪予測が正確であることを前提とした。し

かし、現在のスペクトル法による波浪予測では、せいぜい 1~2 日間しか十分な精度を維持できない。

従って、その後 1 週間程度の波浪予測を、適当な方法（例えば類似予測）で行なう必要がある。そしてその波浪予測の精度が、Weather Routing の成果に大きく影響すると言える。

5.3 最小燃料消費航路

近年、多くの船が経済的な理由から減速航海を行なっている。それらの船は、ある決められた期日までに目的地に着くことを前提として、できるだけ燃料を節約しようとしているわけである。

ここでは到着日時を指定して、その日時までに目的地に着くことを条件とする最小燃料消費航路を求め、最短時間航路との比較を行なった。なお波浪データは 5.1 と同様、航海の全期間について、正確にわかっているものとした。

5.3.1 計算方法

(9), (10) 式において、

$\alpha = (\text{1 時間あたりの燃料消費量})$

$\beta = (\text{最終ステージにおける燃料消費量})$

$$\begin{cases} r=0 & (t_f \leq t_a) \\ r=K & (t_f > t_a) \end{cases} \quad \text{ただし } K \text{ は非常に大きな定数}$$

$\Delta t = 24 \text{ 時間}, N=8$

として計算した。

各ステージにおける探索は、コースについては、格子点から目的地に到る大圏航路の初期針路の左右に、7 通り (15° ごと) 行なった。またエンジン出力については、12500, 10000, 7900 B.H.P. の 3 通りとした。

なお燃料消費量は、3 通りのエンジン出力に対し、3.5, 2.8, 2.2 ton/hour とした。

図 17 到着期限をいろいろと変えた場合の最小燃料消費航路 (往航, 出港日 12 月 1 日)

図 15 波浪予測期間をいろいろと変えた場合の最短時間航路 (復航, 出港日 12 月 18 日)

図 16 波浪予測期間に対する航海時間

5.3.2 結果

到着期限を出港後、9.5, 10.0, 10.5, 11.0 日とした場合の最小燃料消費航路を、図 17 (往航, 出港日 12 月 1 日), 図 18 (復航, 出港日 12 月 18 日) に示す。図中、点線は 5.1 で求めた最短時間航路であり、各航路に付してある数字は、到着期限を表わしている。

また、航海時間に対する燃料消費量の関係を、図 19 に示す。

5.3.3 考察

i) 図 17, 図 18 の航跡を見ると、最小燃料消費航路は、到着期限を 1~2 日変えた程度では、さほど変わらないことがわかる。また各航路は、点線で示した最

図 18 到着期限をいろいろと変えた場合の最小燃料消費航路
(復航, 出港日 12 月 18 日)

図 19 最短時間航路および最小燃料消費航路の航海時間に対する燃料消費量

シミュレーションの結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 最短時間航路は、波浪パターンの変化によって、かなり大きく、また急激に変動する。従って Weather Routing には、正確な長期波浪予測が不可欠である。
- (2) 波浪予測が正確で、航海時間の約 1/3 程度の予測期間があれば、実用的な Weather Routing が可能である。
- (3) 最小燃料消費航路は、到着期限をあまり遅らさない限り、最短時間航路と一致する。

今回のシミュレーションでは、実況波浪図を用いたので、波浪予測の精度については考慮しなかった。今後は、予想波浪図を用いたシミュレーションを行ない、予測精度が最適航路に及ぼす影響を調査するつもりである。

最後に、本研究を行なうにあたり、多くの御指導を頂いた、東京商船大学須田教授、杉崎・大津・堀籠助教授および貴重なデータを提供して下さい、気象庁、OCEANROUTES (株)、日本郵船 (株) の方々に深謝致します。

短時間航路から、あまり大きくは離れていない。

従って、“到着期限をあまり遅らさない限り (波浪パターンに、あまり大きな差異が出て来ない範囲において)、最小燃料消費航路は、最短時間航路と一致する。すなわち、燃料をもっとも節約するには、最短時間航路上を、エンジン出力を適当に絞りながら航走すればよい。”と言える。

ii) 図 19 から、到着期限を早めるにつれて、燃料消費量は急速に増大することがわかる。

また、同じ到着期限でも、出港日によって (すなわち波浪パターンの違いによって)、燃料消費量には大きな差がでることもわかる。

iii) エンジン出力と波高、相対波向の間には、明確な相関は見い出せなかった。

最小燃料消費航路を決定する際には、航海全体における波浪パターンが関与し、またコースも制御変数の 1 つとして、荒天域を避けるように働く。従って、単にエンジン出力と波浪状態のみに着目しても、その関係は単純ではないわけである。

6. ま と め

以上、最適航路決定問題を定式化して、その Dynamic Programming による解法を示し、最適航路シミュレーションを行なって、最適航路の特性について考察した。

参 考 文 献

- (1) Y. Yamanouchi and A. Ogawa: Statistical Diagrams on the Winds and Waves on the North Pacific Ocean, Papers of Ship Research Institute, Supplement No. 2, March 1970
- (2) 日本造船研究協会第125研究部会: 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究, 研究資料 No. 188, 1974年3月
- (3) 北沢孝宗, 他: コンテナ船の波浪中での限界速度, 日本造船学会論文集, 第138号, 1975年12月
- (4) H. T. Chen, E. G. Frankel, A. E. Fiore and H. Carleton: Optimization of Ship Weather Routing, Ship Operation Automation II, 1976
- (5) 杉崎昭生: 最適航法の基礎研究 I~V, 日本航海学会誌, 第34・35・36・38・39号, 1965・1966・1967・1968
- (6) 黒井昌明, 他: 理論的限界速度を用いた最適航路計算 1~4, 関西造船協会誌, 第147・154・156・159号, 1973・1974・1975
- (7) 日本造船学会: 耐航性に関するシンポジウム I・II, 1969・1977
- (8) 日本航海学会: 船舶の荒天運航に関するシンポジウム, 1973
- (9) 尾形克彦: ダイナミックプログラミング, 培風館, 1973
- (10) Julius T. Tou (中村・伊藤・松尾 共訳): 現代制御理論, コロナ社, 1966

質 疑 応 答

今津隼馬: 最小燃料消費航路が最短時間航路とほぼ一致していると言われたが, 波浪パターンの影響が大きいとすれば, 一概に言えないのでは。

萩原秀樹: シミュレーションでは, 同一の出港時刻について, 最小燃料消費航路と最短時間航路とを比較しました。波浪パターンの影響は, 出港時刻が同一で, 航海時間が多少異なる場合よりも, 出港時刻が異なる場合に大きく現われると思われます。

榊 正三: 太平洋航路においては, 海流の影響が非常に大きいと思いますが, その点は如何ですか。

萩原秀樹: 確かに海流は大きなファクターとなりますが, 今回のシミュレーションでは, モデルの簡略化を図るために考慮しませんでした。今後はデータとして, INPUT していくつもりです。

井上篤次郎: 針路を制御するわけですが, その進路のとり方は, 連続量か離散量か。また離散量の場合, 何度ずつに選んだか。

萩原秀樹: 離散量です。探索は, 設定した格子点から目的地に到る大圏航路の初期針路の左右に, 10° ずつ, 11通り行ないました。