最適航法の基礎研究—II.

杉崎 昭 生*

The Basic Research for Optimum Ship Routing—II.

A. M. Sugisaki

Abstract

The paper deals with the minimal time ship routes using the sea condition prognostic charts which have been facsimile-broadcast. The results of the calculation with the aids of an electronic computer are presented. And it is suggested that the climatological data should be used when the data broadcast are invalid.

1. 序 文

最短時間航路の解析には、解決しなければならない問題が山積されている。その一つは波フィールドの予報についての問題である。現段階では、予報技術がこの最短時間航法に十分役に立つほど発展していない状態であるが、やがては発展するものとして解析を行うことは意義のある事と考える。そこで現在入手できる波フィールドを用い、このデータが十分役立つものとして最短時間航路を決定しようと試み、実用化を目的として解析を行った。またこれと同時に波フィールドの予報データが予報時間の制限から十分役立たないとき——現状がそうである——のことを考慮して、予報データの有効な時間以後は適当なデータで置き換えて解析を行い、前の結果と比較し、問題の持つ意味を検討した。

2. 解 法

2.1 数式 [1]

x, y を座標, v を船速, θ を船のとり針路とし, $\dot{x}, \dot{y}$ を船速の x, y 成分とすれば運動方程式は

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

となり, λ, μ を Lagrange の未定乗数とし, 最小とすべき時間について変分法を適用すれば, λ, μ が微分方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} [\lambda \cos \theta, \mu \sin \theta] \dots\dots\dots (2)$$

を満足するとき最短時間航路がきめられる。すなわち v_θ を船速の θ 偏微分, a を線型結合素子, T を求める時間, $U = (v^2 + v_\theta)^{\frac{1}{2}}$ および $A = (\lambda^2 + \mu^2)^{\frac{1}{2}}$ とすれば, T における目的地よりの x, y のずれ ($\Delta x, \Delta y$)

$$[\Delta x, \Delta y]_T = [-\mu, \lambda]_T J \delta a + [x, y]_T \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

の自乗和 $\Delta x^2 + \Delta y^2$ が基準値 (たとえば 10^{-6}) を越えないような (x, y, t) 群を求め, それを最短時間航路とすればよい。ただし, δa は a の変分, ΔT は T の変動値, J は(4)式を満足する値とする。

$$J = \frac{1}{|F(T)|} \int_0^T U^3 |F|^2 dt / A^3 (v^2 + 2v_\theta^2 - v \cdot v_{\theta\theta}) \dots\dots\dots (4)$$

* 東京商船大学 (東京都江東区深川越中島町)

ここで $|F|$ は λ, μ の独立解 $\lambda_1, \mu_1; \lambda_2, \mu_2$ より作られる行列式 $\begin{vmatrix} \lambda_1 & \mu_1 \\ \lambda_2 & \mu_2 \end{vmatrix}$ を表わしている。

2.2 波予報モデル

波フィールドモデルとしては実際にファクシミリ電送をされている北太平洋の12時間予想図を受信したもののうち4枚を用いた。計算1では、図1は1月30日00Zのものであるが、これを現状図（時間0のときの状態図）とし、図2は1月31日00Z、図3は2月1日00Z、そして図4は2月2日00Zのものであるが、それぞれ24時間、48時間そして72時間予想図に見立てて現状から72時間後までの予想波浪図がえられたことにし、これを利用した。計算2では、図1および図2は

図1 (下縁: $Y=0.0$, 上縁: $Y=0.7$, 左縁: $X=0.0$, 右縁: $X=2.0$)

図2 (座標は図1に同じ)

図3 (座標は図1に同じ)

図4 (座標は図1に同じ)

計算1のときと同様に利用したが、24時間以後は予想波浪図が入手できないものとし、それ以後の波浪は一様に波高3.0mおよび1.5m、波向0度(東)であるとして波浪図を利用した。しかしここで一様としたのは不本意であり、本来なら気候航法をとるべく季節別波浪図を利用すべきであろうが、解析上は何ら特別の意味をもたないのでこのままにしておく。

2.3 船と波との応答

簡単のために θ' を波との出会角とすれば

$$v = v_0 \{1 - (0.05 + 0.025 \cos \theta') \cdot H\}$$

とした。ここで v_0 は平水中の速力、 H は波高とする。

2.4 解法の手順

解析手順は図5のフローチャートに示す通りである。点線で囲まれている部分は計算2のときのみのものである。

3. 計算

3.1 計算方法

計算は東京大学大型計算機センターの HITAC 5020 を使い、プログラム言語は FORTRAN HARP を使い図5をプログラムし計算を行つた。計算は直角座標で行い、船速は 0.05、出発点、到達点間の距離は2.00とした。

3.2 計算結果

計算1および計算2によつて決定された最短時間航路は図6に示されるような曲線となった。またその最短時間航路および最短距離航路(直線航路)を航行したときの遭遇波高も比較しやすいように図示されている。それぞれの航路を航行するに要する時間は表1

図 5

図 6

に示すとおりであった。

電子計算機で計算のために要した時間は、計算1が1分6秒、計算2がそれぞれ約1分10秒であった。これらの時間には、対応する直線航路の計算に要した時間が含まれている。

表 1

計 算 の 種 類	航 行 所 要 時 間	
	最 短 時 間 航 路	最 短 距 離 航 路
予報データのみの場合 (計算1)	43 時 間 49 分	44 時 間 04 分
気候データを使用した場合 (計算2) 波 高 3.0m	47 39	47 47
気候データを使用した場合 (計算2) 波 高 1.5m	44 37	44 50

4. 問 題 点

この解析には、波浪フィールドの予想図が72時間後まで24時間間隔で得られたものとし、それに基づいて任意の時間の波フィールドを線型的に内挿して求め計算を行った。しかし現状ではせいぜいよい精度が得られるのは使用状態で36時間が限界のようである。また任意の時間の波フィールドを作るための内挿には、時間変化の少ないところでは線型的に処理をしても誤差は少なく問題と思われるが、急激な変化を示すところでは非線型的な内挿が必要となってくる。このような見地から波浪予想図の精度の向上と予想時間の長期化が望まれる。もちろん上記の問題はある程度は波浪図作成の方式そのままを電子計算機に導入すれば解決できるものである。

太平洋横断にはほぼ高速船で10日を要する現状に波浪予想図を適用してもなかなかよい航路の予想は困難である。しかし困難だからといって、データを使用しないのは策のない話である。そこで有効予想時間後の処理を考えれば、ある程度有効にデータを用いることができる。その方法の一つとして有効予想時間後には、波浪予想図の代りに季節別などの波浪図*を使用することが

* 船舶通報資料別冊 No.18 船主協会 41.3 など

考えられる。これは気候航法との接続を試みようとする考え方で、波浪予報の長期化が実現されるまで有効な手段と考えられる。そこでこの種の解析が大規模に行われることは必要である。

他の問題は、この最短時間航路の解明に必要な要素の種類が問題である。波浪予報に続いて海流予報の実用化は時間の問題と考えられる[2]。この海流予報についても波浪予報と全く同じ問題を持つており、同じような扱い方が考えられる。この他、実際的に出てくる問題としては、島、流水および高波高区域の回避の問題がある。これらはすべて波と同様に考えてよく、ただ波高に重みづけをすること——例えば、船速を原速の20分の1におとすような波高にセットする——で解決できている。ただ波高の変化率を少々工夫をこらす必要はある。このように種々な問題を導入することとその結果得られる利得との関係の問題、それらの問題解決に要する時間（とくに電子計算機の使用時間）の最大限などが今後研究されなくてはならない問題であろう。

5. 結 論

数多くの問題を含んでいるこの解析において、つぎのような事柄が明らかとなった。

表1で示されるように、最短時間航路は最短距離航路（直線航路）より、距離はほぼ0.4%の増加にもかかわらず、時間においていずれも0.4~0.6%の利得となつている。この最短時間航路は、図6からわかるように最短距離航路から全航程の約4%ずれているが、そのためにかえつて遭遇する波高は約1.2mの減少となつている。このことは、最短時間航路はより安全な航路であること、また定量的にははつきりしないが定性的には燃料が少なくすむ航路であることを示している。（燃料については今後の研究でもつとはつきりするだろう。）

問題点においても触れた予報時間が短いときの処理はつぎのように考えてよいと思われる。すなわち予報データが十分役立つはんいで波高のかなり大きな区域をさけるように決つた最短時間航路が、予報データが欠如しているところで波高にあまり差違が現実にならないような航路であつたとき、予報データの完備している場合とほぼ同様な結果がえられる。しかし反対に予報データが役立つところで波高にあまり差がなく、役立たないところできわめて差があるときは、気候データを用いても、あまり有効な結果は出てこない方が多いと見るべきだろう。具体的に太平洋の天気の周期を考えて見るに、東航の場合はしけに遭遇する回数が少ないので、予報データが役立たないところでも気候データなどからよい結果がでやすく、西航の場合はしけと遭遇する回数が多いので、どのしけが最大影響度をもつかで航路は大きくみだれ、よい結果は得にくいだろう。このような立場からは長期の航海には毎日の航路計算が重要な手段となつてくる。

最短時間航路に限らずあるパターンについての最適な航法——パターン航法[1]——を行うには、パターンが静的なものであれば、パタンの把握が最大重要事であるが、この最短時間航路のようにパターンが動的（時間）である場合は、パタンの推移が問題の解決の鍵を握っているといつても過言ではない。そこで予報データが完備するまでは、過去のデータからパタンの統計的な推移の研究が必要であることが結論的に出てくる。そこで著者は今後この方面から最適航法を眺めてみようと思う。

6. 結 び

実際に放送されている波浪図を用いて解析し、そこから考慮すべき点などをまとめてみた。予報データさえあればここで述べられた方法で十分実用になる結果を得られることと思う。この研究にあたり、計算においては東京大学工学部元岡達助教授はじめ元岡研究室の皆様の御忠言に、またデータの使用には日本郵船K. K. 海務部海務課の御協力によるところ大であるのでここに謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] 最適航法の基礎研究 I 杉崎昭生 日本航海学会誌第34号 40年12月
- [2] Computer Produced Synoptic Analyses of Surface Currents and Their Application for Navigation :
W. E. Hubert, Navigation Vol. 12 No. 2 Summer 1965