

海上輸送における風力エネルギー利用の研究 (その1, 帆装船の性質および航路の最適化の研究)

村山 雄二郎*・北村 文俊**・原口 富博***
菊地 正晃****・田中 拓*****

Study on Feasibility of Maritime Transportation
Assisted by Wind - Power
(Part - 1 Performance of Sail Assisted Ships and
Optimization of Their Sea Route)

By

Yujiro MURAYAMA, Fumitoshi KITAMURA, Tomihiro HARAGUCHI,
Masaaki KIKUCHI and Hiraku TANAKA

Abstract

During ten years, many efforts have been made to realize the Modern Sail - Assisted Ship by JAMDA (Japan Marine Machinery Development Association, president Dr. Hamada). For the development of the ship, JAMDA'S interests have been centered upon the following two subjects, that were, studies on the optimum hull design for sail - assisted ships and the best sail - power (main engine) system. This concept has been completed by Hamada⁽⁵⁾ and to date more than seventeen sail - assisted ships have constructed mainly under his general directions.

One of the object of this paper was to make complete equations of dynamics in steady motion in still water for sail - assisted ships by which the evaluation of the propulsive performances of sail - assisted ships having arbitrarily arranged sails was enabled.

In order to use wind power in the best efficiency, it is important to study on the sea route for choosing the least service time.

The authors have proposed a new calculation method for optimization of the sea route applying the Fuzzy Dynamic Programming method with which the calculation could be fairly simplified.

1. まえがき

1973年後半に発生した石油価格の高騰とOPECの
とった石油の供給削減の措置は、当初少なからず世界

* システム技術部

** 海洋開発工学部

*** 運動性能部

**** 機関動力部

***** 推進性能部

原稿受付：昭和61年7月1日

の海運を震撼させ各国はその対策を立てた。この中の一つに、風力利用の有効性を再検討しようとする動きがあり、米国商務省よりミシガン大学 Woodward⁽¹⁾らによる調査結果が報告されている。その後、石油節約をベースにした省エネルギーの考え方が定着して、造船・海運でも省エネ船としての帆装船が見なおされるようになり、日本、米国を中心に多数の研究報告を見ようになった。

これらの流れを見ると、sailing yachtの研究に伝統のある欧米では、石油の消費を最少限とするためにほとんど完全な全装帆船 (Full - rigged Ship) が提案さ

れ若干の近代化のための工夫と経済性などが研究されている^{(1),(2),(3),(4)}。これらの成果は、しばしば参照されて影響を残したが、実船の建造がなかったので研究と調査に止った。上記の帆装船研究に関する石油危機以後の研究については、浜田⁽⁵⁾の報告中でまとめられている。

わが国の研究は、上記とは異った考え方で進展し、約10年間に13隻以上の航洋船が建造されるまでに急成長した。これらの実船開発を目標とした研究は、ほとんどが日本船用機器開発協会（理事長 浜田昇）の指導によっておこなわれたもので、この全貌は浜田⁽⁵⁾によって詳細にまとめられている。

浜田の提唱する省エネルギー船としてその近代帆装商船の着想は、後にも述べるように優れた内容をもっている。当分はこの方向で技術の開発が進むものと思われる。帆装船の研究で最初に重視されるのは、帆推力を高めるための空力的な帆の形状、配置の研究が普通で、わが国でも日本鋼管(株)が担当して実施し、“だいおう”などによる実験がこれに相当している⁽⁶⁾。

その後浜田は、省エネルギー船としての帆装船の技術の中心が、帆の発生する推力とマッチした性能をもつ主機系の開発にあることを見抜き、一連の開発を成功させた。

燃費節約を最大の運航ポイントとしている省エネルギー船では、帆の推力によって主機負荷が大幅に変動する場合でも、（主機-帆）系の全推力を一定に保つように主機出力を調整する必要がある。この場合、帆推力が0の場合でも所定の速力を保持する必要から、主機は通常船と同じ定格出力をもち、帆推力に相当する出力を削減しつつ航走することになる。この方式を浜田は、機主帆従方式と呼んだ。

機主帆従方式で運航する場合、ディーゼル主機の低負荷運転には限界がある。このためにウスキ・パイオニア号では、図1-1に示すように可変ピッチプロペラ（1軸）を中速ディーゼル2機で駆動する方式をとり、50%出力以下では1機駆動として低負荷運転にそなえた。

The two engine/one shaft configuration and the propulsion control system

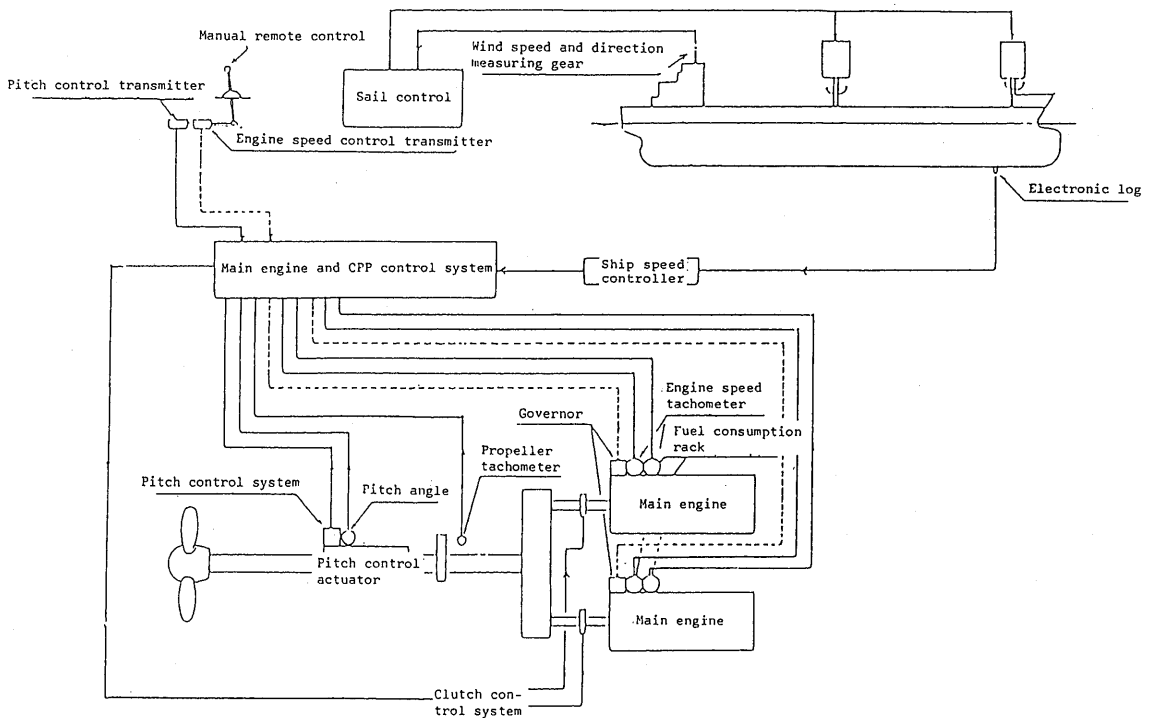


図1-1 現用帆装船の主機システムの例（ウスキ・パイオニア号，文献3より転載）

これに対して本研究が意図したところを述べると、機主帆従方式の帆装船は、通常の商船を運航している船主にとって判りやすい方式で、帆装商船実用化にとって大きな役割をはたしているが、海上輸送への風力利用全体の観点からは、消極的な風力利用法に止っている。船舶技術研究所では、風力を効率よく利用する方法として帆推力と主機に関するハードの研究のほかに、海上の風力分布を最大限に有効に利用するための運航路に関するソフトの研究も重要とした。

現代の船舶は、その近代的な各種の装備にも係らず、航海中の自然条件によって運航スケジュールは少なからぬ影響を受けており、定時運航性（運航スケジュールの時間を守る性能）は不定期船では、可成りの不確定が許容されている。通常の船舶の場合、自然条件の最大のものは海象、特に波浪であるが、帆装船ではこれに風を加えなければならない。推進性能研究の上では、波浪は抵抗の原因と考えるが、風は推進力と抵抗に関連しているので問題は一層複雑になる。

最適運航路の決定法については、すでに通常の船舶では多数研究されていて実用にも供されている。帆装船についても Mays⁽⁷⁾によって基本的考え方が示され、文献2の全装帆船が北大西洋を横断するときの最適路が推定された。

最適運航路決定の研究は、後にも述べるように、帆装船の船長が毎日の航路決定に役立つものであるがまた帆装船の設計に際して、年間の風力分布、波浪分布の判っている海域の運航について、最適な設計の決定にも役立つものである。本研究では、航路決定の基礎となる風力分布などの取扱いを確率分布の代りにファジー (Fuzzy) の概念を導入して複雑なプロセスの計算を簡単にした。

本研究の方針と、浜田らの研究の関係を幾分具体的に述べると、機主帆従方式の根本には、商船の定時運航性を最大限に確保しておきたいとする考え方があるが、実際の定時運航性は必ずしも厳密でなく、先にも述べたように、不定期船には相当の許容が見込まれている。また機主帆従方式が省エネルギーの考え方に根ざしているので、石油の高い時には十分に利益が得られると思われる。しかし運航の実績を見ると、主機出力の利用分布は図1-2に示すように、定格出力で使用されていることは少く、建造コストの上では過大で不経済な主機をもつことになる。

このため、定時運航性に対する許容、運航コスト、建造コストのバランスを考慮すると、機主帆従方式は

必ずしも最良のものでないかもしれない。著者らは、機主帆従方式で設計された帆装船の主機より多少下まわった出力の主機を搭載しても、航路全体を最適化して風力を十分に利用できれば、かなりの定時性が期待できる可能性があると考えた（図1-3参照）。

このように、定時運航性への許容を仮定しながら、直接、間接費を含む帆装船の全コストを最良化することは、一つの主要な研究テーマであるのみならず、将来の石油代替エネルギーの一部として風力の利用を検討するときに重要な視点を与えるものである。

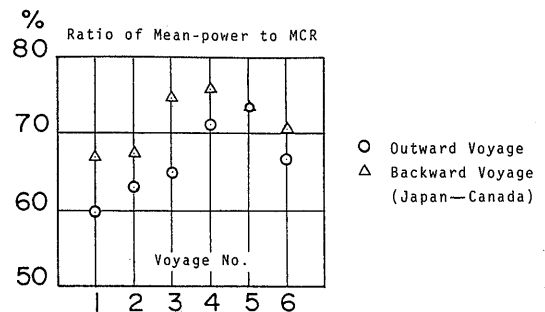


図1-2 航海中平均馬力のMCR出力との比 (ウスキ・パイオニア号, 文献3より転載)

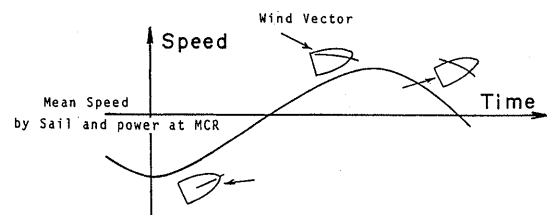


図1-3 帆装船の船速変化の説明図

また船舶技術研究所の立場で考えると、帆装船の目前の応用、改良にとらわれず、帆装船の概念を拡大し新しい意義を付加する研究は重要である。

以上に述べた考え方に従って、本報告「海上輸送における風力エネルギー利用の研究」の構成は、次のようになっている。すなわち、

2章においては、帆装船の力学的釣合をあらゆる数学モデルを明らかにして、風力エネルギーをより有効

に利用するために、帆の配置、種類、大きさを変えて、推進性能上のメリットを追求した。また、3章において使用する帆装船モデルの帆走特性を求めている。

3章においては、2章で計算例として用いた帆装船が、より有効に風力エネルギーを利用して航行するための、航路の選択について述べている。ここでは、航路最適化の手法として、ダイナミック・プログラミング法と、気象等のあいまいさの影響を考慮して、ファジー論理の考え方を導入している。

本報告(その1)においては、固定式の帆による「海上輸送における風力エネルギー利用」について述べているが、別報の報告「海上輸送における風力エネルギー利用の研究」(その2)において、風向によるエネルギー利用特性の優れた船用風車を考案して、その特性について述べており、本報告と合わせて、海上輸送における風力エネルギーのより良い利用を提案している。今後の研究の方向として、上述のような航路最適化

の手法によって、帆装船の航行をシミュレーションし、帆装船の経済性等の評価を含めて、それらをもたらずより良い帆走特性を持った帆装船像を、追求してゆきたいと考える。

2. 帆装船の性能計算

2.1 運動方程式および流体力

平水中一様な風の中の船の運動は、図2-1のような座標系をとると、この場合の運動方程式は一般に次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{前進} & : m(\dot{u} - vr) = X \\ \text{横流れ} & : m(\dot{v} - ur) = Y \\ \text{旋回} & : I_{zz} \dot{r} = N \\ \text{横傾斜} & : I_{xx} \dot{\phi} = K \\ \text{プロペラ回転} & : 2\pi I_E \dot{n} = Q \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

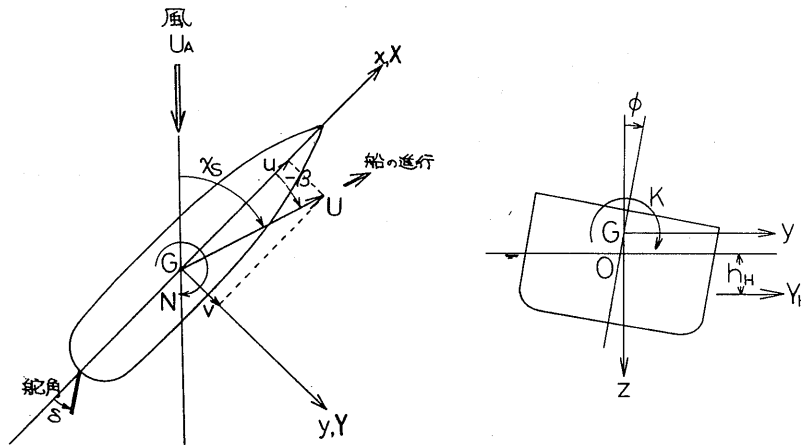


図2-1 運動の座標系

ここに、

- u : 船体前後方向の船速
- v : 船体横方向の船速
- r : 旋回角速度
- U : 船速 ($= \sqrt{u^2 + v^2}$)
- β : 斜航角 ($= -\sin^{-1}(\frac{v}{U})$)
- ϕ : 傾斜角
- δ : 舵角
- n : プロペラ回転数
- X : 船体前後方向に働く力
- Y : 船体横方向に働く力

- N : 回頭モーメント
- K : 傾斜モーメント
- Q : プロペラ軸回りの回転モーメント
- m : 船の質量
- I_{xx} : x軸回りの慣性モーメント
- I_{zz} : z軸回りの慣性モーメント
- I_E : 主機およびプロペラ軸系の回転慣性モーメント
- U_A : 絶対風速
- χ_s : 絶対風向

機帆走中の船の運動は(2.1)式の連立微分方程式

を解くことによって求められるが、船がある風向角に対して一定の角度を保ちながら直進する場合の平衡式は、(2.1)式で $\dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = \dot{\phi} = 0$ および $r = \phi = 0$ として次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} X &= 0 \\ Y &= 0 \\ N &= 0 \\ K &= 0 \\ Q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

ここでX, Y, N, K, Qの船体に働く力およびモーメントは日本造船学会のMMG数字モデルを参考にして次の様に表わされる。¹²⁾

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_S + X_{HA} \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_S + Y_{HA} \\ N &= N_H + N_R + N_S + N_{HA} \\ K &= K_H + K_R + K_S + K_{HA} \\ Q &= Q_E + Q_P \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

ここで添字H, P, Rはそれぞれ、水面下の主船体に働く流体力、プロペラ推力およびプロペラトルク、舵力を表わす。Q_Eは主機トルクを表わす。また、添字S, HAはそれぞれ帆に働く流体力、船体上部構造物に働く風圧力を表わしている。

次に(2.3)式の各項については、定常斜航運動を考慮し、以下に述べる式によって推定する。添字H, P, Rの付いた項については平野の方法⁹⁾に従っている。

(1) 主船体の前後方向に働く流体力

主船体に働く前後方向の力は次式で計算される。

$$X_H = X_{(u)}(1 + 13\beta^2) \quad (2.4)$$

ここでX_(u)は直進時の船体抵抗である。平野の方法によればX_H=X_(u)となるが、斜航時による抵抗増加を考慮し神中の方法⁹⁾でこれを表わした。

(2) プロペラ推力およびプロペラトルク

プロペラ推力およびプロペラトルクは次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} X_P &= (1 - t_{P0}) \rho n^2 D_P^4 K_T (J_P) \\ Q_P &= -\rho n^2 D_P^5 K_Q (J_P) \\ J_P &= u(1 - w_P) / (n D_P) \\ w_P &= w_{P0} \exp(-4.0\beta^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ここでρ：水の密度

n：プロペラ回転数

D_P：プロペラ直径

t_{P0}：直進時の推力減少率

w_{P0}：直進時の有効伴流係数

w_P：操縦運動の有効伴流係数

K_T：プロペラ推力係数

K_Q：プロペラトルク係数

J_P：プロペラ前進常数

(3) 主船体に働く横力および旋回モーメント

主船体に働く横力および旋回モーメントは、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} Y_H &= Y_{H0} + Y_{H1} \\ N_H &= N_{H0} + N_{H1} + (Y_{H0} + Y_{H1}) x_M \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

ここでY_{H0}, Y_{H1}, N_{H0}, N_{H1}は、Midshipに原点を置いた座標系で定義される横力および旋回モーメントである。また、x_MはMidshipから重心までの前後方向の距離である。

Y_{H0}, N_{H0}は、横傾斜を考慮しない場合の操縦運動時の横力および旋回モーメントであり、これについては井上らの推定式および推定図表を同いて次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} Y_{H0} &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 [Y'_v v' + Y'_v |v'| v' |] \\ N_{H0} &= \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 [N'_v v'] \\ Y'_v &= -\{-0.5\pi k + f(C_B B/L)\}(1 + 0.67\tau') \\ N'_v &= -k(1 - 0.27\tau'/\ell_v) \\ f(C_B \cdot B/L) &= 1.4C_B \cdot B/L \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ここで k = 2d/L, τ' = τ/d, v' = v/U

ℓ_v = k / {0.5πk + f(C_B 4B/L)}

L：船長（垂線間長）

B：船幅

d：吃水

C_B：ブロック係数

Y_{H1}, N_{H1}は横傾斜を考慮した場合付加される項であるが、一般的な推定法がなく、また適当な実験値も見当らなかったため今回は省略した。

(4) 主船体に働く横傾斜モーメント

船体に働く横傾斜モーメントは次式で計算される。

$$K_H = -W \cdot G_z(\phi) - Y_H Z_H \quad (2.8)$$

ここで W：排水量

G_z(φ)：横傾斜復原挺

なお、Z_Hは重心GからY_Hの着力点までの鉛直方向

の距離であるが、ここでは Y_H の着力点を $d/2$ と仮定して計算を行った。

(5) 舵力および操舵により主船体に誘起される流体力

舵力および操舵により主船体に誘起される流体力は次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(1+a_H) x_R F_N \cos \delta \\ K_R &= -(1+a_H) z_R F_N \cos \delta \\ F_N &= \frac{1}{2} \rho \frac{6.13A}{A+2.25} A_R U_R \sin \alpha_R \\ U_R &\doteq [(1-w_P)/(1-s)] \\ &\times \sqrt{1-2(1-\eta k)s + \{1-\eta k(2-k)\}s^2} \\ \text{ただし, } s &= 1-u(1-w_P)/(nP) \\ \eta &= D_F/h \\ k &= 0.6(1-w_P)/(1-w_R) \\ w_k &= 0.275 \exp(-4.0 \cdot \beta^2) \\ \alpha_R &= \delta + \delta_0 - \gamma\beta \\ \gamma &= C_P \cdot C_s \\ C_P &= 1/\sqrt{1+0.67(2-1.4s)s/(1-s)^2} \\ C_s &= C_{s0}\beta (\beta \leq C_{s0}/C_3) \\ &= C_3 (\beta > C_{s0}/C_3) \end{aligned} \right\} (2.9)$$

ただし, $C_3 = 0.45$, $C_{s0} = 0.5$

ここで, x_R : 重心から舵軸までの前後方向の距離

z_R : 舵圧力中心から重心までの高さ

A : 舵のアスペクト比

h : 舵の高さ

A_R : 舵面積

F_N : 舵直圧力

U_R : 舵への流入速度

α_R : 舵への有効流入角

γ : 整流係数

s : スリップ比

w_R : 舵位置での有効伴流係数

ϕ : プロペラピッチ

今回の計算においては、船体と舵の干渉係数 a_H については、 C_B の一次関数として推定した。また δ_0 は一般には、直進時のスリップ比 s_0 を用いて $\delta_0 = \pi s_0 / 90$ と推定されるが、左右の平均舵角を求めることとしたため今回は省略した。さらに z_R については、舵の中心高さから重心の高さまでの距離とした。

(6) 主機トルク

平野によると Q_B は主機トルクを表わすが、ここでは

主機特性に考慮していない。従ってここでは、 Q_B はプロペラを駆動する上で必要なトルクを表わしている。

今回はこの Q_B より必要な伝達馬力 (DHP) を求めており、帆装船に必要な主機の大きさを DHP で表わすこととした。

(7) 帆により主船体に誘起される流体力

帆により船体に誘起される流体力は次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} X_S &= \frac{1}{2} \rho_a \sum_{i=1}^n C_{XS_i} V_i^2 A_{S_i} \\ Y_S &= \frac{1}{2} \rho_a \sum_{i=1}^n C_{YS_i} V_i^2 A_{S_i} \\ N_S &= \frac{1}{2} \rho_a \sum_{i=1}^n (C_{YS_i} X_{S_i} + C_{NS_i} C_{S_i}) V_i^2 A_{S_i} \\ K_S &= \frac{1}{2} \rho_a \sum_{i=1}^n C_{YS_i} Z_{S_i} V_i^2 A_{S_i} \\ C_{XS_i} &= C_{LS_i} \sin \theta_i - C_{DS_i} \cos \theta_i \\ C_{YS_i} &= C_{LS_i} \cos \theta_i + C_{DS_i} \sin \theta_i \end{aligned} \right\} (2.10)$$

ここで、

ρ_a : 空気密度

V_i : 各帆に対する空気の相対流入速度

A_{S_i} : 各帆の面積

C_{NS_i} : 帆のモーメント係数

C_{S_i} : 帆の平均翼弦長

C_{XS_i} : 帆の推力係数

C_{YS_i} : 帆の横力係数

θ_i : 船首からの相対風向角

C_{LS_i} : 帆の揚力係数

C_{DS_i} : 帆の抗力係数

今回の計算においては、帆は1枚とし、 C_{XS_i} が最大となる様に帆の迎角およびフラップ角を設定した。

(8) 船体上部構造物に働く風圧力

船体上部構造物に働く風圧力は、次式で計算される。

$$\begin{aligned} X_{HA} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{XH} V^2 A_{HA} \\ Y_{HA} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{YH} V^2 A_{HA} \\ N_{HA} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{NH} V^2 A_{HA} \cdot L \\ K_{HA} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{YH} V^2 A_{HA} \cdot z_{HA} \end{aligned}$$

ここで

V : 相対風速

A_{HA} : 水面上船体および上部構造物の横方向投影面積

- z_H : 重心と風圧力着点までの距離
- C_{XA} : 水面上船体および上部構造物に働く前後方向の風圧力係数
- C_{YH} : 水面上船体および上部構造物に働く横方向の風圧力
- C_{NH} : 水面上船体および上部構造物に働く旋回モーメント

今回の計算において、 z_H については、重心から横投影面積の面積中心までの高さとして仮定した。また、風圧力係数については、Wagner²⁾の5万tタンカーの風洞試験結果を用いている。

2.2 計算方法

一様風の中での帆装船の定常斜航運動は、(2.2)式の連立方程式を解けば解は得られるが、今回は主船体に働く流体力に傾斜影響を考慮しておらず、また主機特性も考慮していないため、(2.2)式のX, Y, Nについての連立方程式を解き、その結果から $K=0$, $Q=0$ となる様横傾斜角および Q_E を求めた。この Q_E から帆装船に必要な伝達馬力を求めた。

この連立方程式を解析的に解くのは困難なため、計算機により繰り返し計算法で解を求めた。そのフローチャートを図2-2に示す。計算の繰り返し回数は、外側のループで通常2~3回、横流れ角の大きい所でも10回程度でおおむね収束した。

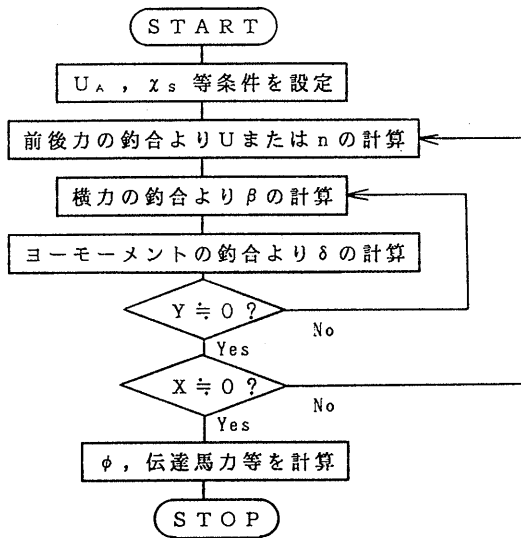


図2-2 計算フローチャート

2.3 計算結果

最初に計算プログラムの妥当性を検証するために、試験船“だいおう”¹⁰⁾¹¹⁾について計算を行った。表2-1に“だいおう”の要目を、図2-3にその計算結果を示す。縦軸は船速、横軸は船首から測った相対風向角である。帆は硬帆、軟帆、三角帆の3枚を装備し、相対風速10m/s、プロペラ回転数は400rpmとして計算を行った。計算結果は“だいおう”の実験結果と良く一致しており、計算プログラムが妥当であることを示している。

表-2.1 ”だいおう”主要目

長さ	L_{PP}	25.025 m
幅	B	4.550 m
深さ	D	2.300 m
喫水	d	1.531 m
主機		電動機
プロペラ		1軸
	直径	D_P 0.627 m
	ピッチ	0.386 m
	舵面積	A_R 0.931 m ²
帆面積	硬帆	28.0 m ²
	軟帆	28.0 m ²
	三角帆	24.4 m ²

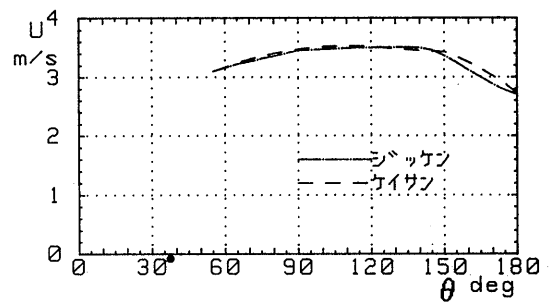


図2-3 試験船“だいおう”についての実験と計算の比較

次に帆装船の基本的な性能を調べるために、模型船による抵抗試験結果等が既知の、ある鉱石運搬船を縮

小したものを仮定し、 δ_0 の有無、プロペラ回転数、風速、帆面積、帆の位置の影響について計算を行った。

この鉾石運搬船は、船体抵抗やプロペラ性能等の模型試験結果が公表されており、これが利用できることからこの船を縮小したもの（以下“N丸”と称する）について計算を行った。このN丸の要目を表2-2に、また以下に述べる翼帆をつけたときの概観図を図2-4に示す。また、帆はこの船のS.S 9の位置で甲板上10mの高さに取り付け、帆面積 $1200m^2$ 、プロペラ回転数 $120rpm$ 、風速 $15m/s$ を計算上の標準状態としている。さらに帆については、船舶技術研究所で模型試験を行ったアスペクト比3のNACA0015翼に、コード長の30%のスプリットフラップを付けたもの（以下“翼帆”と称する）を標準状態として計算に用いた。この翼帆模型の概観図を図2-5に、風洞試験結果を図2-6に示した。また比較のため、翼帆と硬帆および三角帆のポーラ線図を図2-7に示す。翼帆については、図2-6の包絡線に相当する実験点が示してある。こ

れは、揚抗比が最大となるよう迎角に応じてフラップ角を変えることを意味する。計算においては、これらのポーラ線図を関数曲線で近似して用いている。

表-2.2 “N丸” 主要目

長さ	L_{PP}	151.0 m
幅	B	22.1 m
深さ	D	12.1 m
喫水	d	8.5 m
載貨重量	DW	20300 ton
主機		ディーゼル
プロペラ		1軸
	直径 D_P	3.60 m
	ピッチ	2.49 m
舵面積	A_R	19.16 m^2
	アスペクト比 Λ	1.438

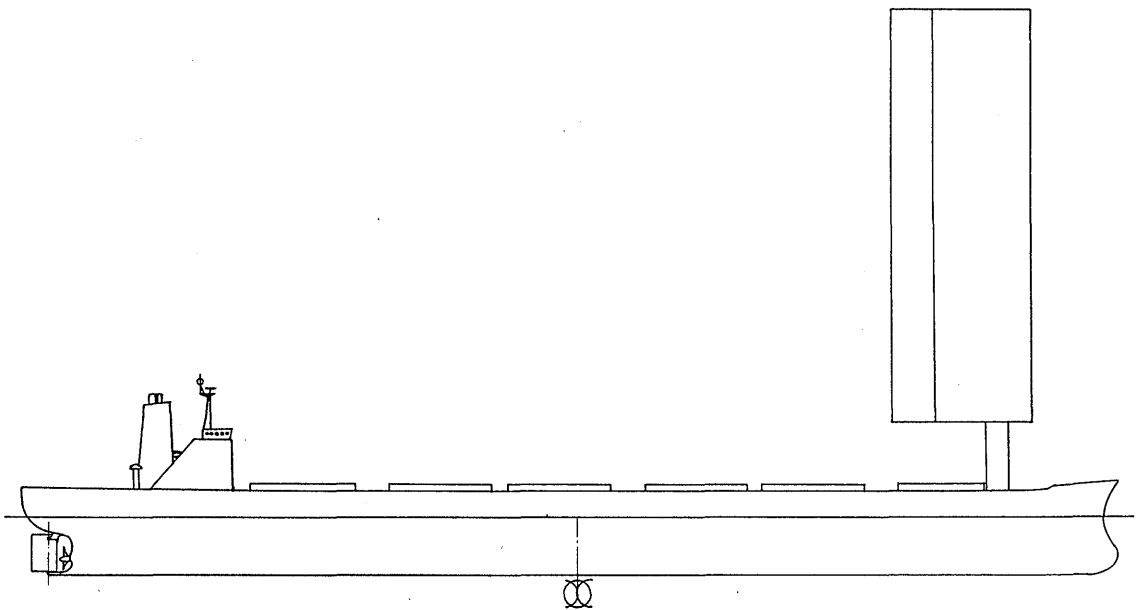


図2-4 “N丸” 概観図

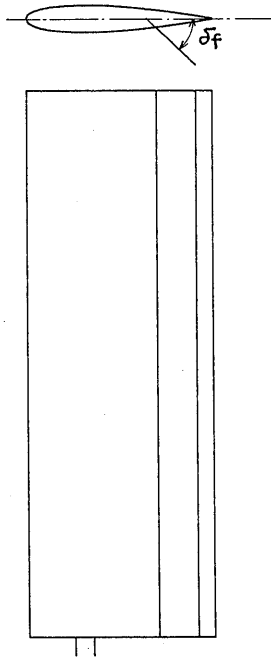


図 2-5 翼帆模型

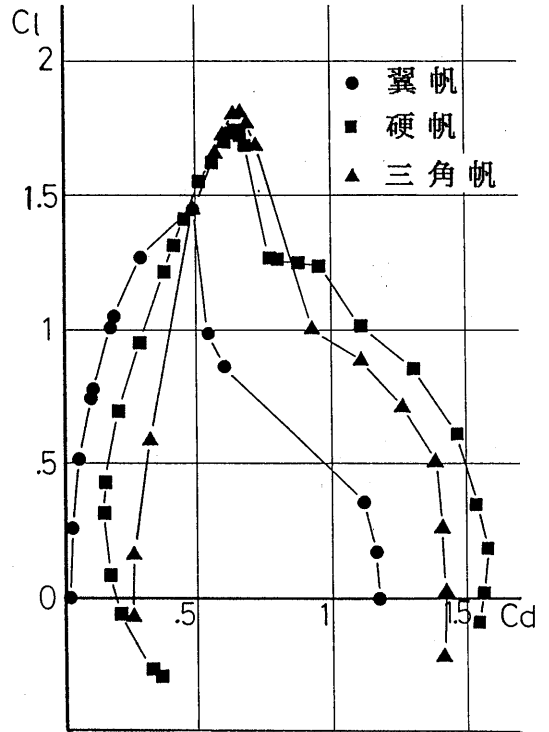


図 2-7 帆のポーラ線図

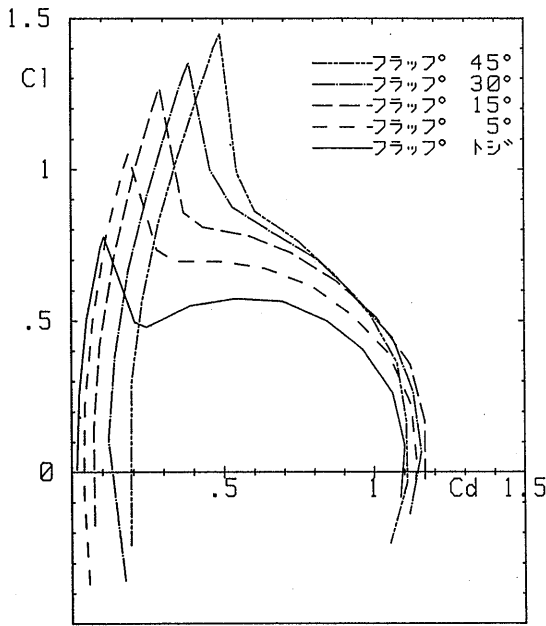


図 2-6 翼帆模型の風洞試験結果

また、これらの帆については常に最大推力が得られるよう迎角を設定した。即ち、図 2-8 に示すように相対風向角 θ で船が直進している時、船体中心線にポーラ線図に接するよう垂線を立てる。今この接線を AB とすると、 OA が θ における最大推力係数に、また AB がその時の横力係数となる。帆の迎角およびフラップ角は B 点における C_L 、 C_D を与える値に設定される。この時相対風向角が斜め追い風の場合、図中の θ_c に相当する角度があり、この θ_c より大きい小さいかで迎角が大きく変化する。このため、帆による横力が大きく変わり、船の横流れ角や舵角などが急激に変化する。図 2-9 以降の図で α_s が 160° 付近で折れ線になっているのに相当する。いわば、揚力利用から抗力利用への変換点とも言える。

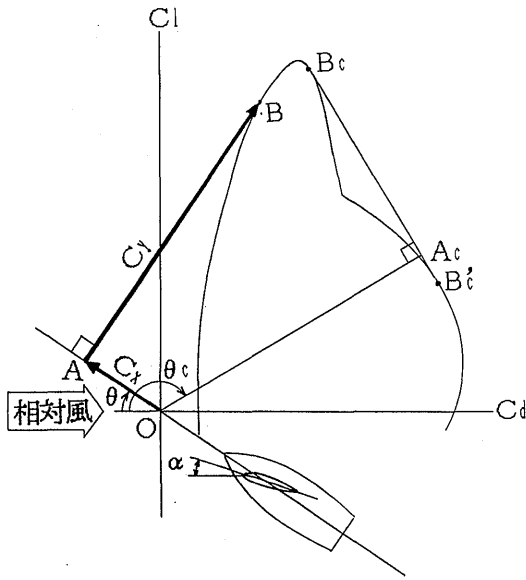


図 2-8 帆の推力係数の推定法

(1) プロペラ回転数の影響

プロペラ回転数 (N_p) を変化させた場合の計算結果を図 2-9 (a) ~ 図 2-9 (e) に示す。これは、主機の大きさが変化した場合に相当するもので、逆に与えられた船速に対して必要な伝達馬力、プロペラ回転数を推定することもできる。これらの図でプロペラ回転数 0 rpm と言うのは、プロペラがない純帆装の場合に相当する。またこの時 $\chi_s = 55^\circ$ 以下で計算結果が得られていない。さらに、80 rpm ではあらゆる絶対風向角 (χ_s) に対して解が得られており、 $\chi_s = 55^\circ$ 以上では船速 (U) の値はかなり 0 rpm の値に近い。このことから、80 rpm ではプロペラによる推力が帆による推力に比べて小さいが、プロペラによる増速効果により舵の力が 0 rpm の時に比べて大きくなり、 χ_s のあらゆる角度に対して解が得られたものと思われる。従って、純帆装の場合舵面積を増やすなどの対策を取る必要があると思われる。

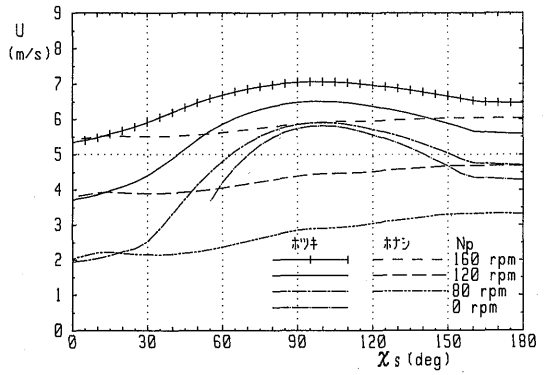


図 2-9 (a) 船速に対するプロペラ回転数の影響

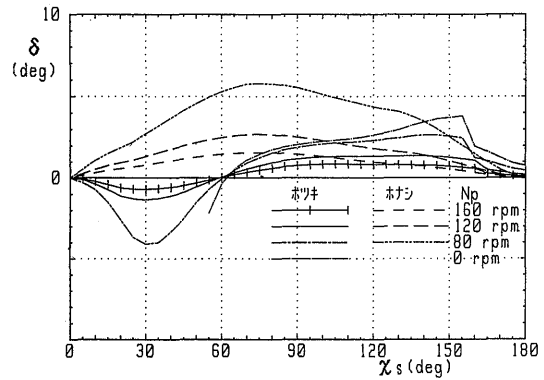


図 2-9 (b) 伝達馬力に対するプロペラ回転数の影響

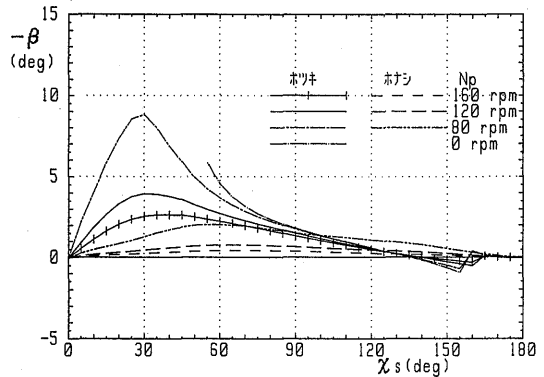


図 2-9 (c) 横流れ角に対するプロペラ回転数の影響

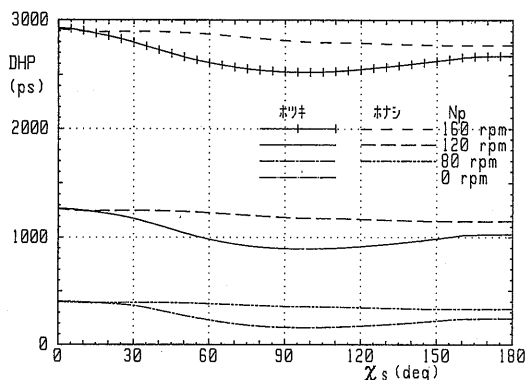


図2-9(d) 舵角に対するプロペラ回転数の影響

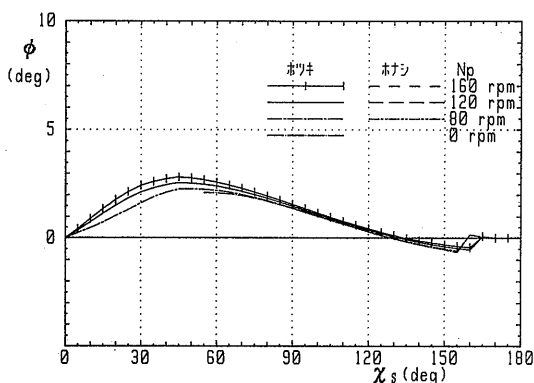


図2-9(e) 傾斜角に対するプロペラ回転数の影響

これらの図から、0 rpmを除くと χ_s が 20° 付近より大きい所で帆無しに比べて船速増加が得られている。また、 $\chi_s = 90^\circ$ 付近で最大船速が得られており、同時に横流れ角 (β) も舵角 (δ) も約 2° 以下と $\chi_s = 30^\circ$ 付近に比べてかなり小さいことから、帆に働く揚力のほとんどが船の推力として作用していると推測され、帆を利用する上で最も効率のいい風向角と思われる。さらに帆が付いた場合、 $\chi_s = 30^\circ$ 付近で β と δ が最大となるが、これはこの付近では風向角が小さいにもかかわらず帆による船速増加がわずかにあることから、帆に働く揚力が $\chi_s = 90^\circ$ に比べて小さな推力と同時に大きな横力を船体に誘起し、この力を打ち消すために β が大きくなり、これらの横力により誘起される旋回モーメントも大きくなるため、これを打ち消すために δ が大きくなったものと思われる。

また、 β , δ は船速、プロペラ回転数の増加とともに小さくなっている。さらに傾斜角については、最大でも 3° 程度で帆の有無で大きな差は見られない。このことは、帆により船体に誘起される横力と、船体に直接誘起される横力が傾斜角を増す方向に働くことを考えると、プロペラ回転数の変化に対してこれらの横力が大きく変化しないものと思われる。船体に直接働く横力は、速度の2乗で効いてくるため、プロペラ回転数が増加し船速が増加するにつれて β が小さくなり、同様な理由で δ が減少したものと思われる。

次に、風圧下直進中の帆無しの船の船速および馬力をそれぞれ U_0 , P_0 とし、帆付き船の船速および馬力をそれぞれ U_s , P_s とした時、船速増加率 (I_u)、馬力低減率 (I_p) を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} I_u &= (U_s - U_0) / U_0 \\ I_p &= (P_0 - P_s) / P_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

この時、縦軸に I_u , I_p を取ったものを図2-9(f), 図2-9(g) に示す。なお、 I_u は浜田の言う速力利得に対応するものである。これらの図から、 χ_s が 90° 付近で N_p が 80, 120, 160 rpm に対してそれぞれ最大約 110, 50, 20% の船速増加率が、55, 25, 10% の馬力低減率が得られること、プロペラ回転数が低い程船速増加率、馬力低減率が大きくなることからわかる。

(3.1) 式から、 N_p が小さくなれば分母が小さくなることから当然とも言えるが、風が有効に利用できれば、かなりの省エネ効果が得られることを示しているとも考えられる。

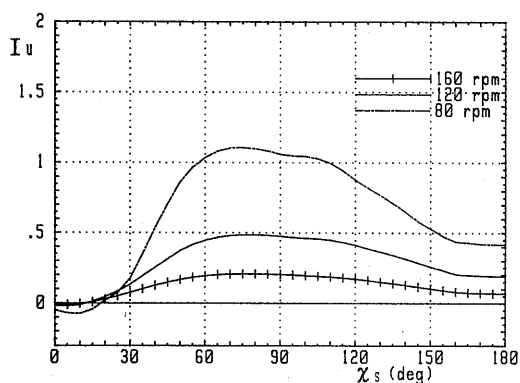


図2-9(f) 船速増加率に対するプロペラ回転数の影響

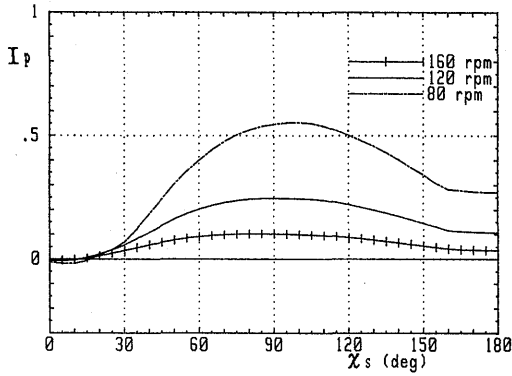


図 2-9(g) 馬力低減率に対するプロペラ回転数の影響

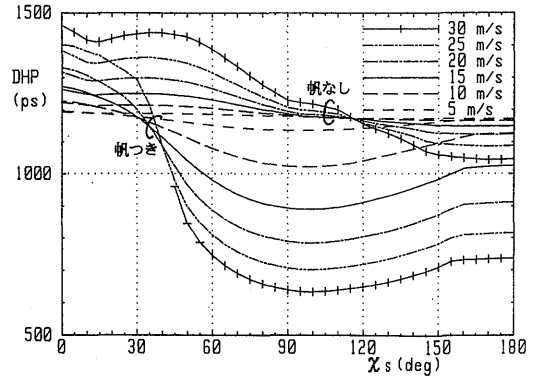


図 2-10(b) 伝達馬力に対する風速の影響

(2) 風速による影響

図 2-10 (a) から図 2-10 (e) に絶対風速が変化した場合の計算結果を示す。これから、風速が増加するにつれて U , β , δ , ϕ のいずれもが増加する。これは、風速が増加するにつれて帆が船体に誘起する横力とバランスするため β が大きくなり、また旋回モーメントのアンバランスも大きくなるため、これを打ち消すために δ が増加したものと推測される。傾斜角が風速の増加とともに増大するが、今回の計算に用いた帆の高さが $60m$ とかなり高いため、着力点と重心の距離が大きくなり帆の横力の増加が傾斜モーメントの増加に大きく影響したと思われる。最大傾斜角は風速 $30m/s$ で最大約 9° とかなり大きいため、あらゆる風向角に対して傾斜角を 5° 以下にするには帆の使用は風速で約 $20m/s$ 以下にする必要がある。

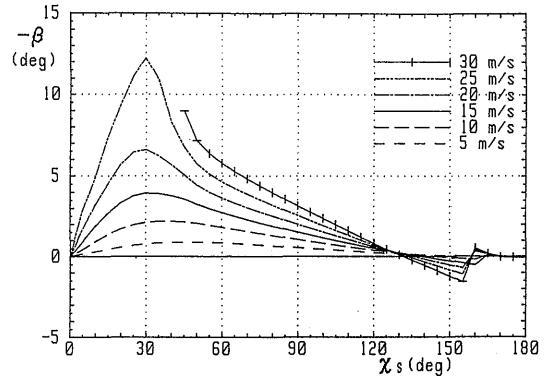


図 2-10(c) 横流れ角に対する風速の影響 (帆が付いた場合)

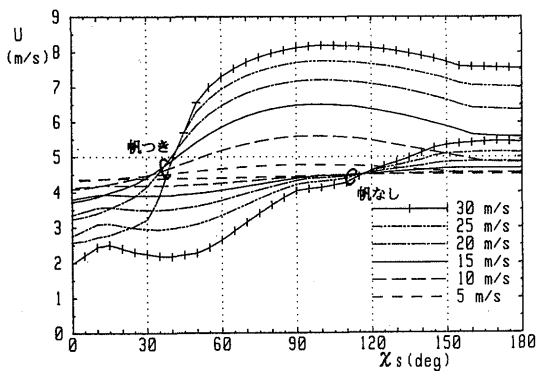


図 2-10(a) 船速に対する風速の影響

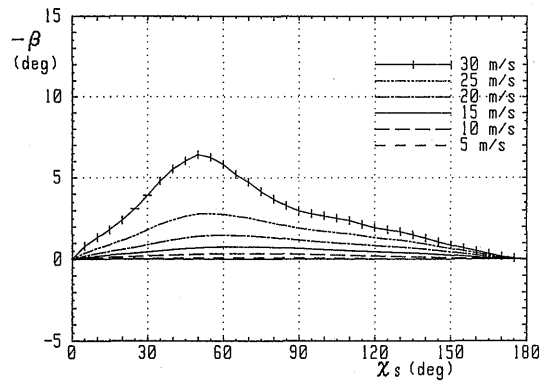


図 2-10(d) 横流れ角に対する風速の影響 (帆が無い場合)

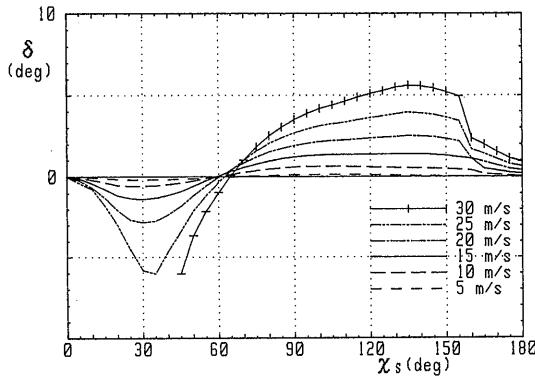


図2-10(e) 舵角に対する風速の影響
(帆が付いた場合)

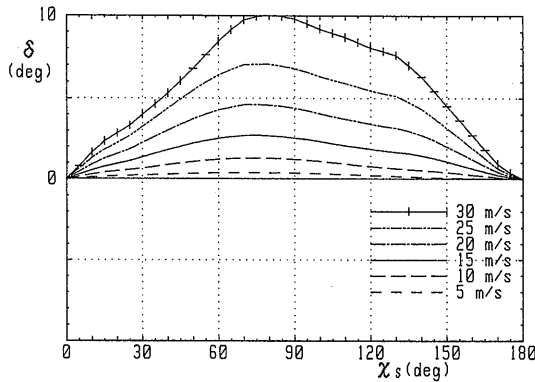


図2-10(f) 舵角に対する風速の影響
(帆が無い場合)

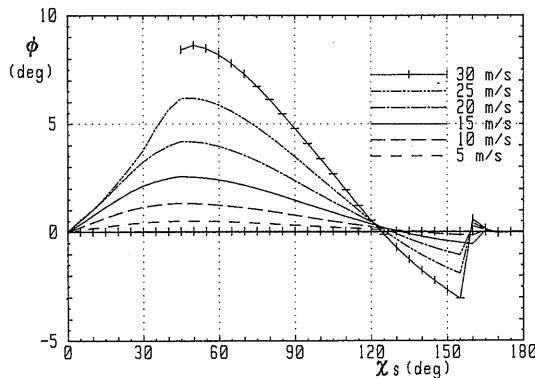


図2-10(g) 傾斜角に対する風速の影響

(3) 帆面積の影響について

図2-11(a)~図2-11(e)に帆の面積(アスペクト比一定)を変えた時の計算結果を示す。傾向としては(2)で述べたことと同様なことが言える。また、帆の面積が $1800m^2$ ($A_s/Ld=1.4$)を越えると船速増加率や馬力低減率において大幅な改善が得られないことがわかる。これは、帆に働く力が面積に比例するのに対し、船速にはその $1/2$ 乗で効いてくることによるが、帆を利用する上で最も有効な帆の面積が存在すると思われる。

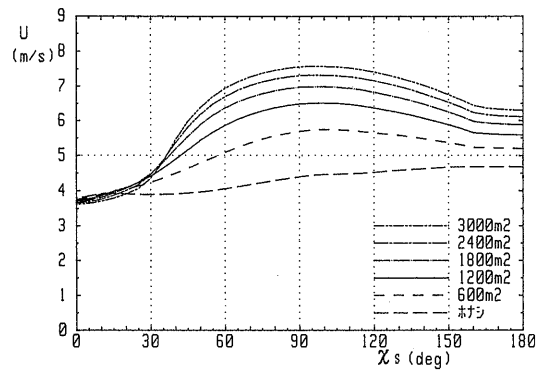


図2-11(a) 船速に対する帆面積の影響

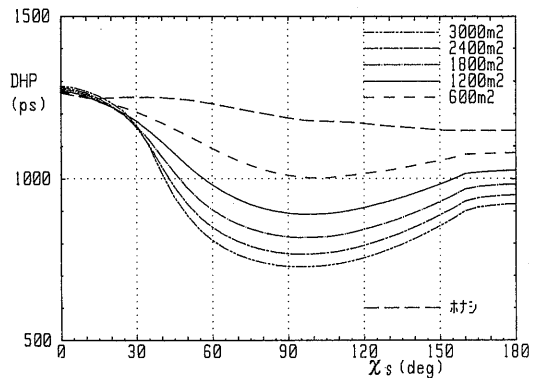


図2-11(b) 伝達馬力に対する帆面積の影響

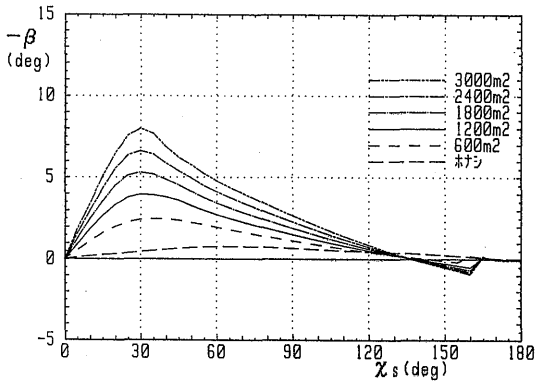


図 2-11(c) 横流れ角に対する帆面積の影響

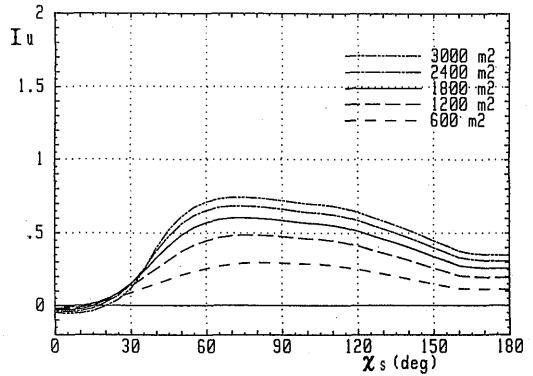


図 2-11(f) 船速増加率に対する帆面積の影響

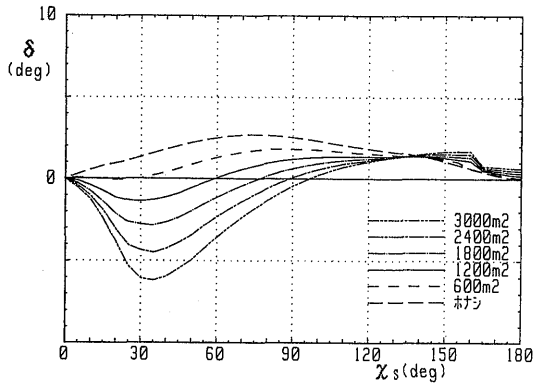


図 2-11(d) 舵角に対する帆面積の影響

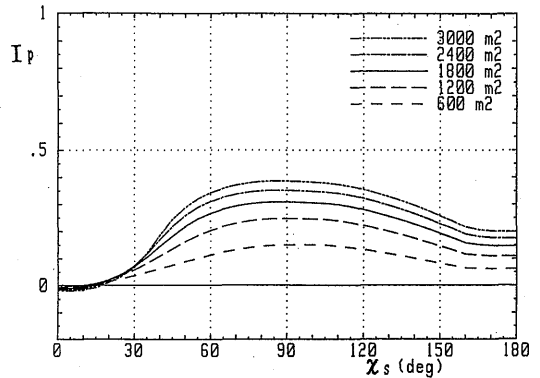


図 2-11(g) 馬力低減率に対する帆面積の影響

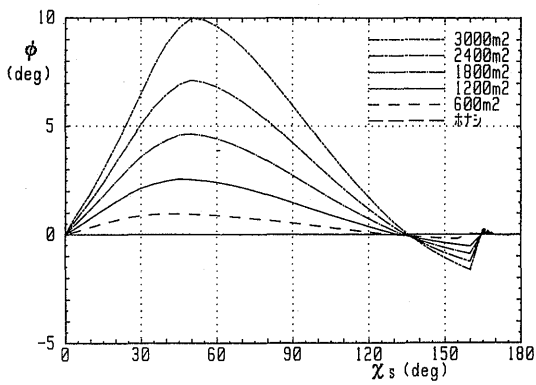


図 2-11(e) 傾斜角に対する帆面積の影響

(4) 帆の形状の影響について

図2-12(a)~図2-12(e)に帆形状の影響について示す。ここでは、各帆とも帆面積は同じとし、縮帆はしないものとして計算を行っている。

揚抗比の良い翼帆は χ_s が 60° 以内の向い風領域で、揚力係数、抗力係数の大きな硬帆、三角帆が、横風から追い風領域で船速増加などの点で、それぞれ優れていることがわかる。

これらの図から、帆装船としては χ_s がおおよそ 40° より大きい風の所でその効果は大きいと思われるが、実際の運航に際しては航路によってはそういう風ばかりとは言えない。従って、 χ_s が 40° 以下でも風が利用できる範囲を広げる方が展帆率を上げることもでき、帆装の効果をより大きく得られるものと思う。その意味で今回の翼帆のような工夫、検討が帆についても必要と思われる。また菊地ら¹¹⁾のような全ての風向角で推力を得ることができる風車型のものを利用することも一つの考え方と思われる。あるいはまた、次章で述べ

るような方法で帆の性能に応じた最適航路、運航方法（タッキングを行いながら走る）を検討する必要もあると思われる。

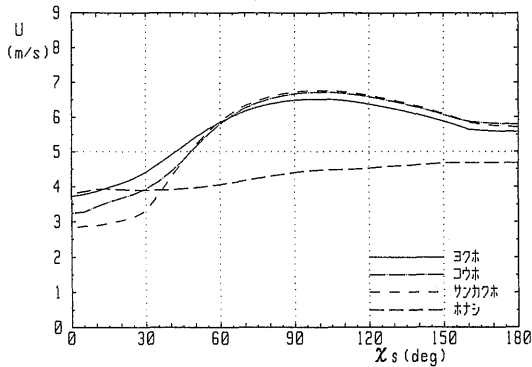


図2-12(a) 船速に対する帆形状の影響

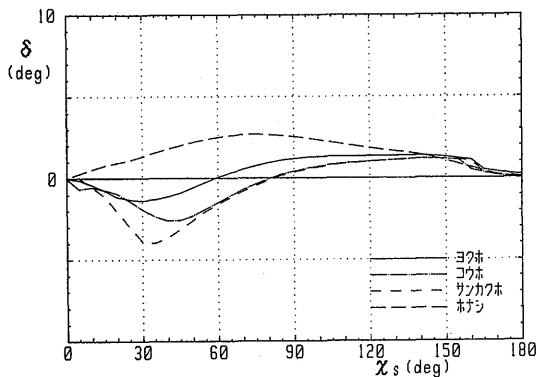


図2-12(b) 伝達馬力に対する帆形状の影響

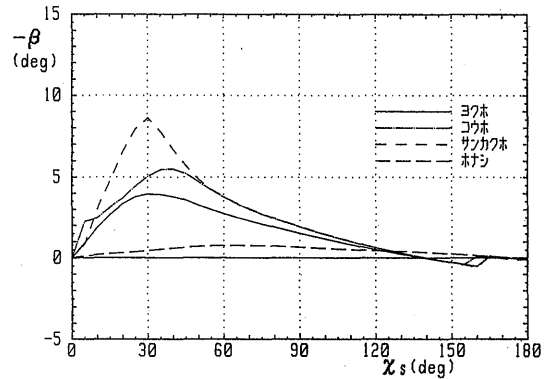


図2-12(c) 横流れ角に対する帆形状の影響

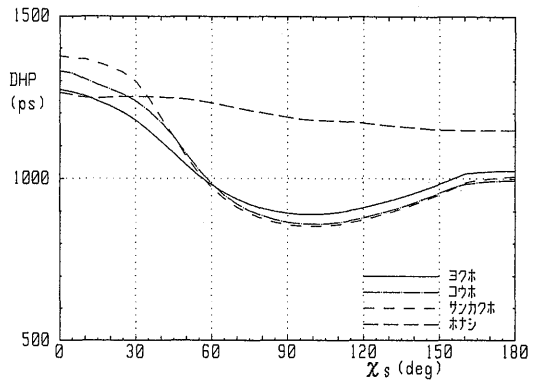


図2-12(d) 舵角に対する帆形状の影響

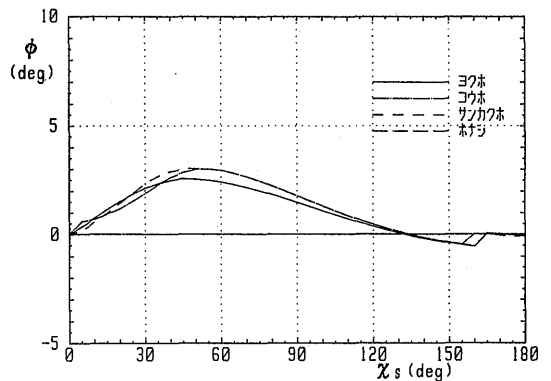


図2-12(e) 傾斜角に対する帆形状の影響

(5) 帆の取付け位置の影響

図2-13(a)~図2-13(e)に帆の取付け位置の影響を示す。速度や、伝達馬力については、 χ_s が90°より小さい所で差が表われ、Midshipより前方が船速増加、伝達馬力の低減にとっては有利であり、Midshipより前方であればそれらには大差ないことがわかる。 β については、帆が前に行く程大きくなり、逆に ϕ は帆が前に行く程小さくなっている。これは、帆が船体に誘起する横力と水面下の流体力により主船体に誘起される横力がバランスし、これらの力による旋回モーメントとのアンバランスを舵により主船体に誘起されるモーメントでバランスしているため、帆がMidshipより後方にくると帆による力と水面下の流体力による力が同じ方向の旋回モーメントを発生し、その結果大きな当て舵が必要となるものと考えられる。逆に帆がMidshipより前にくると、帆による力と水面下の流体力による旋回モーメントの方向が逆になるため、小さな当て舵

ですむものと思われる。また、傾斜角については大きな差は見られない。

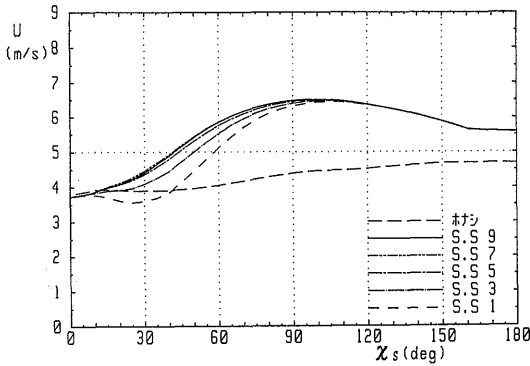


図2-13(a) 船速に対する帆取付け位置の影響(1)

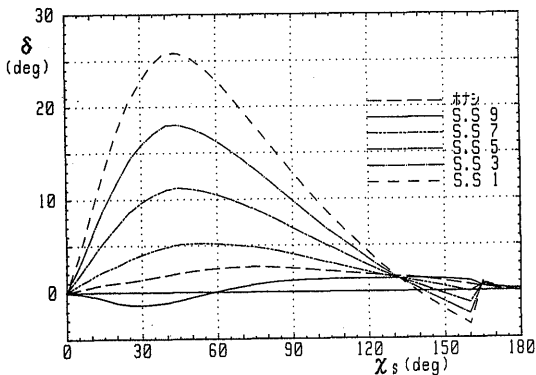


図2-13(b) 伝達馬力に対する帆取付け位置の影響(1)

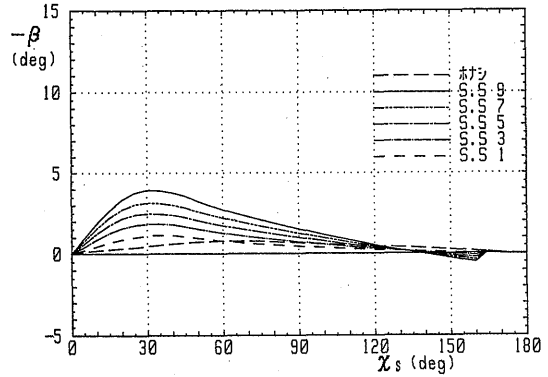


図2-13(c) 横流れ角に対する帆取付け位置の影響(1)

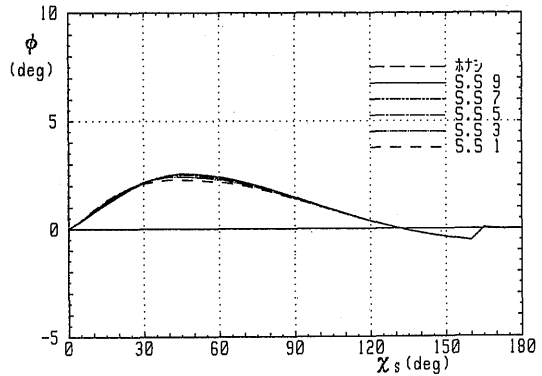


図2-13(d) 舵角に対する帆取付け位置の影響(1)

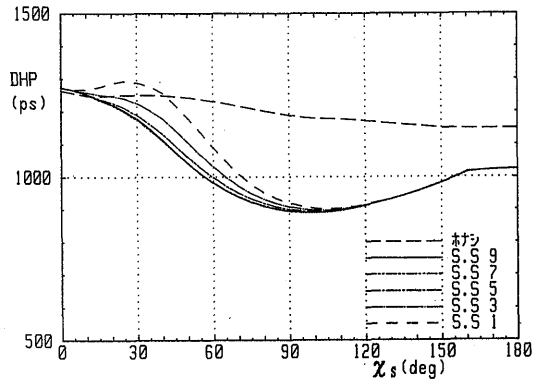


図2-13(e) 傾斜角に対する帆取付け位置の影響(1)

図2-14(a)~図2-14(d)に、横軸を帆の取り付け位置に取った図を示す。これから、帆の取り付け位置による影響が明らかである。浜田が述べているように帆はMidshipより前方にある方が舵量が少くなるなど、性能が改善される。

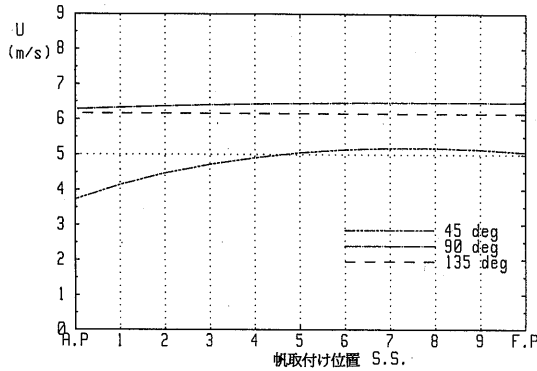


図2-14(a) 船速に対する帆取付位置の影響(2)

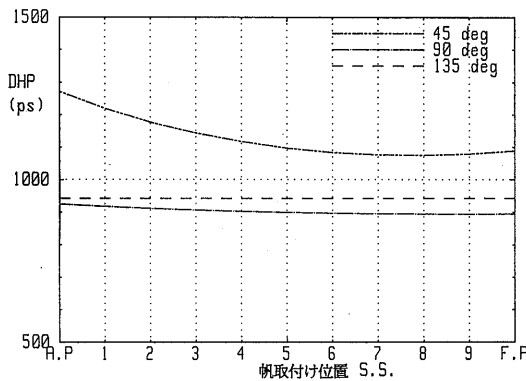


図2-14(b) 伝達馬力に対する帆取付位置の影響(2)

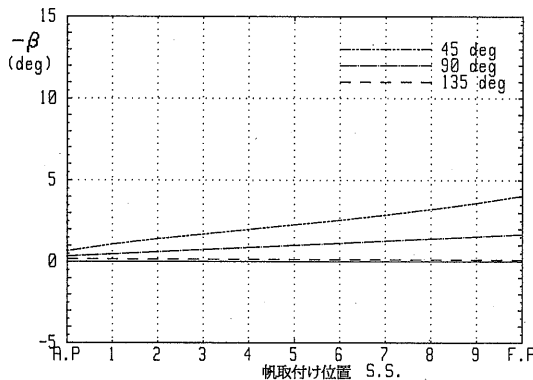


図2-14(c) 横流れ角に対する帆取付位置の影響(2)

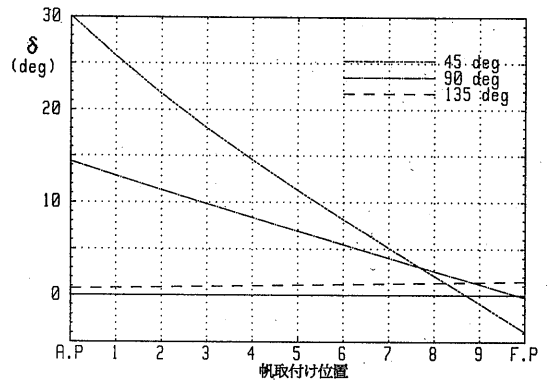


図2-14(d) 舵角に対する帆取付位置の影響(2)

2.4 まとめ

帆装船としてある鉾石運搬船を仮定し、プロペラ回転数、風速、帆面積、帆の特性、帆の取り付け位置の影響について、シミュレーション計算を行い、次のことがわかった。

(1) 絶対風向角が90°付近で大きな船速増加率、馬力低減率が得られ、プロペラ回転数120rpmでは、船速増加率で約50%、馬力低減率で25%となる。また、プロペラ回転数が小さい程、船速増加率、馬力低減率が大きくなる。

(2) 風速が増加するにつれて船速、横流れ角、舵角、傾斜角とも増加する。例えば傾斜角があらゆる風向角に対して5°以下に制限されている場合には、風速20 m/s以上では帆走できない。

(3) 帆面積（アスペクト比一定）を増加すると、(2)と同様、船速、横流れ角、舵角、傾斜角が増加する。また、面積が1800m² (A_s/L_d=1.4)を越えると船速増加率の大幅な改善は得られない。

(4) 帆の特性の違いによる影響は、絶対風向角が60°以上では硬帆、三角帆が、絶対風向角が60°以下では翼帆が、船速増加などの点でそれぞれ優れている。

(5) 帆の取り付け位置による影響は、帆がMidshipより前方にある程風力により船速増加が顕著に現れる。

今回の計算において、水面下の流体力について横傾斜の影響は無視しているが、帆装船の性能については大よそ把握できたものと思う。しかしながら、今回、帆と船体との干渉についても考慮しておらず、また、実際の海面は一様風ではなく波もあることから、計算通りの帆装効果が得られることは期待できない。浜田は実船試験結果や実際の運航結果の解析から、計算結果に近い効果が得られることを示している。しかし、帆装効果をより大きなものとするには、帆の性能の改善や、帆装船の最適航路、運航方法についても検討を行う必要があると考える。

3. 帆装船の航路最適化

帆装船の性能を十分に発揮させるためには、その航路の選定が重要である。航路の最適化の手法としては、従来から等時間曲線による方法や、最大原理を用いる方法がよく使われている¹⁴⁾。等時間曲線による方法は、始点から一定時間後の各方向毎の最大到達距離を求めてその包絡線（等時間曲線）を描き、更に曲線上の各点に法線を立て、その点から一定時間後の最大到達距離の包絡線（2番目の等時間曲線）を求める。以下この作業を繰り返して終点に至り、始点に至る経路を遡って最短時間航路を求めるものである。

最大原理を用いる方法は、航路における船の拘束条件の式と、ポントリヤギンの最大原理を表す偏微分方程式を連立して、数値解を求めるものである。しかし、いずれの方法も、評価関数が所要時間以外の場合や、気象海象のあいまいさの影響の評価が難しい。

そこで、ここでは、帆装船の最適航路を求めるために、あいまいな数量を表現して数学的に扱えるファジー集合と、最適航路決定のような多段決定過程の最適化に適したダイナミック・プログラミングの手法を組合せた方法を提案している。

この章では、初めに帆装船の最適航路を求める立場による問題点について述べ、最適航路問題は単に最短時間航路を求める問題ではなく、帆装船の最適設計や航行援助システムにもつながる問題であることを述べている。次いでファジー・ダイナミック・プログラミングについて述べているが、ダイナミック・プログラミングとファジー集合については、付録において別に説明をしている。

次いで、計算に用いるデータのファジー表現方法と各種の最適航路計算例を紹介し、実船の航路との比較

考察を行っている。

最適航路計算に用いた帆走特性は、2章の計算結果を用いている。

3.1 最適航路決定の問題点

帆装船の最適航路を求める立場としては、帆装船の運航計画時における船長の立場と、実際に帆装船を運航している船長の立場とがある。帆装船の運航計画時においては、帆装船の経済性を検討するために、外的条件としての輸送需要(発着地)、気象海象、燃料価格等と、選択できる条件としての帆装船の要目、機関と帆との出力比等をパラメータとして、最適航路における運航シミュレーションを行ない、求められる建造費、運航費、運賃収入から利益額を推定する。この運航シミュレーションが正しく行なわれるならば、船主は最大の利益を与える帆装船の要目を選び出すことができ、帆装船の経済性を検討することができる。このような場合において最適な航路という意味は、最大の利益をもたらす航路であり、必ずしも最短時間航路とか最小運航費の航路ではない。ここで最初に問題となることは、最適運航シミュレーションにおいて最適にすべき評価関数の選択と、その変更の容易さを考慮することである。第二の問題点は、パラメータの値の不確定さに対する方策である。特に気象海象のデータは統計的には得られているが、運航シミュレーションにおける扱いにおいて考慮が必要である。

一方、帆装船を運航している船長にとっては、最短所要時間、最少消費燃料、安全性の確保等をもたらす航路を、刻々と変化する気象海象のもとで選ぶことは、重要なことであろう。今日では、ウェザー・ルーティング・サービス機関が、気象海象にもとづいて最適な航路を推奨してくれるが、目的地や積荷、所要時間と燃料消費との重要度比、船や帆の特性等の変更や変化が、最適航路や所要時間にどのように影響を与えるかがすぐにわかるような会話型の装置があれば、よりきめの細かい航路の選択が可能となろう。

帆装船の航路の決定を困難にしている要素の一つは、気象海象の不確定さである。これは、気象海象に運航が左右される帆装船の船速や航走の様子を予想することが難しいために、所要時間等の不確定な要素のある、多くの候補航路の内から、最適なものを選ばなければならないためである。すなわち、帆装船の航路決定における問題点は、不確定な値の評価の点数（以下評価関数という）しかわからない数多くの候補航路の要素

のなかから、全体の評価関数が最適（例えば所要時間最小）になる組み合わせを見いださねばならないことである。

このような不確定な要素がある最適問題の解決のためには、ファジー・ダイナミック・プログラミングの手法が力を発揮することが知られている¹⁵⁾。以下、ファジー・ダイナミック・プログラミングを適用しておこなった、帆装船の航路の最適化について述べる。

3.2 ファジー・ダイナミック・プログラミング

ダイナミック・プログラミングは、R. Bellman¹⁶⁾が提唱した多段決定過程の最適方策を求める手法であって、少ない手順で複雑な系に関する最適解を求めることができる（付録1参照）。例えば、航路を経度10度ごとに n 区間に区切り、全航路の所要時間が最小になるように、各区間で通過する最適な緯度を求めるような問題の解法に適している。

エンジン船のように、各区間の所要時間が比較的是っきりと与える場合の航路の最適化問題は、この方法で求めることができる。しかし、帆装船の航路の場合には、気象海象などのように不確定な要素が多く、このままダイナミック・プログラミングの手法を適用するわけにはいかない。このような場合、モンテカルロ法のような統計的な手法を用いることもできるが、膨大な演算時間を要し実用的ではない。そこで不確定な要素を数学的に表わすのに適しているファジー数を、ダイナミック・プログラミングの各区間の評価関数に導入したファジー・ダイナミック・プログラミングの手法を、ここでは採用した。ファジー数とは、Zadeh¹⁷⁾が提唱したファジー集合論にもとづいているもので、全体集合 X の要素 x が、ある概念を表わすファジー集合 A に属している程度を、図3-1に例を示すような $[0-1]$ の値（メンバーシップ関数という）で表わす（付録2参照）。ファジー・ダイナミック・プログラミングでは、各区間の評価関数をファジー数で表わして演算を行ない、区間全体の評価関数のメンバーシップ関数の分布の下限値、上限値、頂点値のいずれかを最適にする解を求める。例えば、所要時間最短の帆装船航路を求める場合に、確率的には低くても最小の所要時間を望む場合（楽観的）、最悪の組み合わせの内の最短（これよりは悪くはならない、悲観的）を望む場合、最も実現しそうな所要時間の中で最短（期待値最短）を望む場合には、それぞれ下限値、上限値、頂点値最小の解を求めるように、帆装船航路の決定は、そ

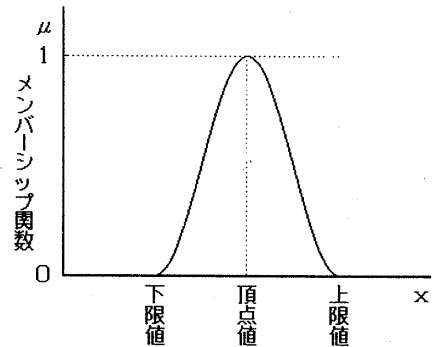


図3-1 ファジー集合

の目的に応じてそれらの最適解の中から選択してあげばよい。

3.3 データのファジー表現

運航計画時には、帆装船の船型や航路の経済性等の評価のための最適航路を求めることが多く、一般に頂点値最適航路を求める。そのため使用する気象データはなるべく範囲を広げ、長期の通年または季節別の風向、風速の統計データを用いる。各区間の評価関数は、対象船舶の帆走特性と気象データの分布から、ダイナミック・プログラミング各段階（経度メッシュ間）の船の進行方向ごとに所要時間の確率分布を求め、ファジー数である区間所要時間のメンバーシップ関数の分布をきめる。頂点値最適航路を求めることが多い帆装船航路の場合には、演算が容易な三角形のメンバーシップ関数が適している。即ち、所要時間の期待値を頂点値とし、所要時間の最大、最小値をそれぞれ上限値、下限値とする三角形でファジー数のメンバーシップ関数を表わす。（図3-2）

運航中の最適航路決定は、時間と共に変化する環境、条件、目的に応じて航路を選定する。気象情報のない海域や遠い海域の評価関数は、季節別の統計データから求めた運航計画時と同じファジー数を用いるが、情報がある海域は、航行中に通報された風速、風向をそれぞれある不確定さの幅を持った三角形のメンバーシップ関数を持ったファジー数（以下三角ファジー数という）で表わし、帆走特性とファジー数演算の拡張原理を適用して求めた所要時間ファジー数であらわす。

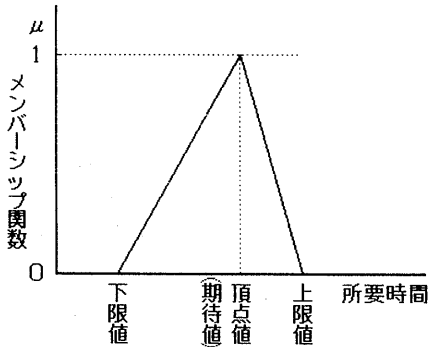


図3-2 各区間の所要時間のファジー数

3.4 最適航路計算例

3.4.1 最適航路計算

最適航路を求める計算は、まず、ダイナミック・プログラミングの各メッシュ間（ここでの例では経度10度、緯度5度毎）の各区間を通過する所要時間等の評価関数の値を求めることから始める。例えば、最小所要時間航路を求めるのであれば、各区間の風向風速の分布と、メッシュ各点間の方向、帆走特性とから、各区間毎に、各メッシュ間を通過する所要時間の確率分布を求める。

求められた各区間の各経路の所要時間の確率分布から、3.3で述べたように、所要時間の期待値を求め、それを各区間各経路の所要時間を表す三角ファジー数の頂点値とし、また、所要時間分布の最大、最小値をそれぞれ三角ファジー数の上限値、下限値とする。

ファジー・ダイナミック・プログラミングは、評価関数が三角ファジー数の場合に、3種類の解が得られる。すなわち、解の頂点値が最適になる場合と、下限値、上限値がそれぞれ最適になる解とがある。例えば所要時間の頂点値最小の航路を求める時には、先に求めた各区間各経路の所要時間のファジー数の頂点値のみに注目して、通常のダイナミック・プログラミングの演算をおこない、最適解である航路を求める。次いで、最適航路に沿って、各区間の経路の所要時間の三角ファジー数の上限値、下限値を、それぞれファジー数の拡張原理（付録2参照）に従ってたしあわせたも

のを、解の上限値、下限値とする。上限値最小の航路を求める場合にも、各区間各経路の上限値にのみ注目して通常のダイナミック・プログラミング演算を行い、最適航路を求めてから、最適航路沿いに各区間の頂点値、下限値をそれぞれファジー論理に従ってたしたものを解の頂点値、下限値とする。下限値最小航路の場合も同様である。

頂点値最小の解は、通常の運航計画や航行に際して用いやすいものである。下限値最小解は望みうる最短の時間の航路を与えはするが、実際に最短時間で走れる確率も極めて小さいことを意味し、極めて楽観的な航路である。上限値最小解は、最悪の状態でもこれよりは時間がかからないという航路となり、最低保証の航路となる。

3.4.2 運航計画時の航路最適化

運航計画時の航路の例として東京ーパナマ航路の例を示す。ダイナミック・プログラミングのメッシュとして、経度10度おき、緯度5度おきと定めた。この値は目的に応じた、精度と演算所要時間とのかねあいで、自由に決めることができる。ファジー・ダイナミック・プログラミング演算においては、経度10度毎の各段階の間の緯度の変化は±10度（±2メッシュ）までとした。すなわち、あるメッシュ点から次の区間までに進める経路は、緯度で±10度、±5度、0度の5経路としている。風のデータは、風向30度おき、風速10kt（ノット）刻みの、10年間平均の通年の統計データ¹⁹⁾を用いた。1区間の風向風速の確率分布例を表3-1に示す。計算に使用した対象帆装船は第2章のN丸とした。この船の帆走特性を図3-3に示す。

計算においては最低船速を4ktとして、風が十分になく船速がそれ以下の場合には、補助機関を併用運転して、最低船速を確保することとした。また、風速が40kt（約20m/sec）を越える時には、安全のために帆をたたむこととした。風向が船首方向に近い場合は、タッキングして前進することを、計算で考慮している。

所要時間最適解の一例を図3-4にしめす。東行の頂点値最適航路はコースA、西行はコースBとなる。上限値、下限値の最適航路は東行、西行共に最短距離のコースCとなる。これは上限値は船速が4ktと一定であり、また、下限値は利用出来る最高の風速40ktで得られる船速で常に航走するから、最短コースが最適コースとなるからである。一般に速度に制限がある場合には、最短コースが上下限値の最適航路となりやすい。

表—3.1 風向風速頻度分布例

(北緯40°~45°, 東経140°~150°。

縦軸は風向を, 横軸は風速を, 上段の数字は観測事例数を, 下段の数字は頻度を表す。)

THE STATISTIC ANALYSIS OF THE MARINE METEOROLOGY

= = = NORTH PACIFIC OCEAN = = =

PAGE 1. 5. 102

DIRECTION (WIND)		ALL SEASONS								(1964-1973)		23586.....SAMPLE TOTAL
WIND SPEED (KNOT)												14.862.....MEAN OF DATA
AREA	E03-04 (40N-45N, 140E-150E)											
CODE		1 00 -	2 10 -	3 20 -	4 30 -	5 40 -	6 50 -	7 60 -	8 70 -	9 CALM	10 TOTAL	11 MAX
1	NORTH	471 2.00	625 2.65	273 1.16	75 .32	14 .06	2 .01	1 .00	-	-	1461 6.19	60.00
2	(02)	462 1.96	617 2.62	244 1.03	75 .32	18 .08	3 .01	2 .01	-	-	1421 6.02	65.00
3	(03)	598 2.54	845 3.58	336 1.42	91 .39	20 .08	3 .01	-	-	-	1893 8.03	55.00
4	EAST	579 2.45	710 3.01	248 1.05	116 .49	16 .07	4 .02	1 .00	-	-	1674 7.10	62.00
5	(05)	506 2.15	637 2.70	222 .94	67 .28	8 .03	7 .03	-	-	-	1447 6.13	55.00
6	(06)	577 2.45	752 3.19	213 .90	68 .29	10 .04	-	-	-	-	1620 6.87	47.00
7	SOUTH	673 2.85	890 3.77	302 1.28	67 .28	9 .04	2 .01	-	-	-	1943 8.24	55.00
8	(08)	622 2.64	1001 4.24	302 1.28	70 .30	6 .03	1 .00	-	-	-	2002 8.49	50.00
9	(09)	618 2.62	957 4.06	370 1.57	96 .41	23 .10	8 .03	-	-	-	2072 8.78	51.00
10	WEST	551 2.34	1001 4.24	610 2.59	271 1.15	79 .33	15 .06	2 .01	-	-	2529 10.72	60.00
11	(11)	498 2.11	1144 4.85	839 3.56	330 1.40	67 .28	9 .04	2 .01	1 .00	-	2890 12.25	72.00
12	(12)	480 2.04	948 4.02	567 2.40	162 .69	29 .12	5 .02	-	-	-	2191 9.29	52.00
13	CALM	-	-	-	-	-	-	-	-	443 1.88	443 1.88	.00
14	TOTAL	6635 28.13	10127 42.94	4526 19.19	1488 6.31	299 1.27	59 .25	8 .03	1 .00	443 1.88	23586 100.00	72.00

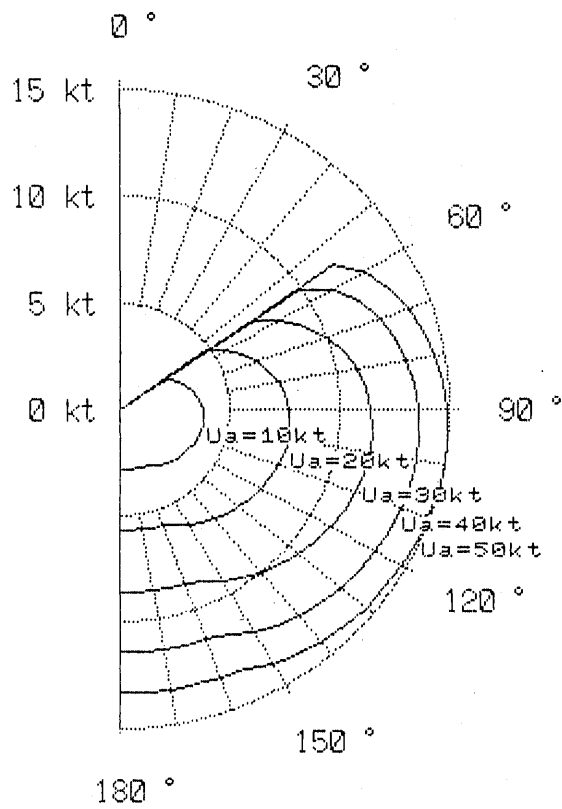


図3-3 N丸の帆走特性

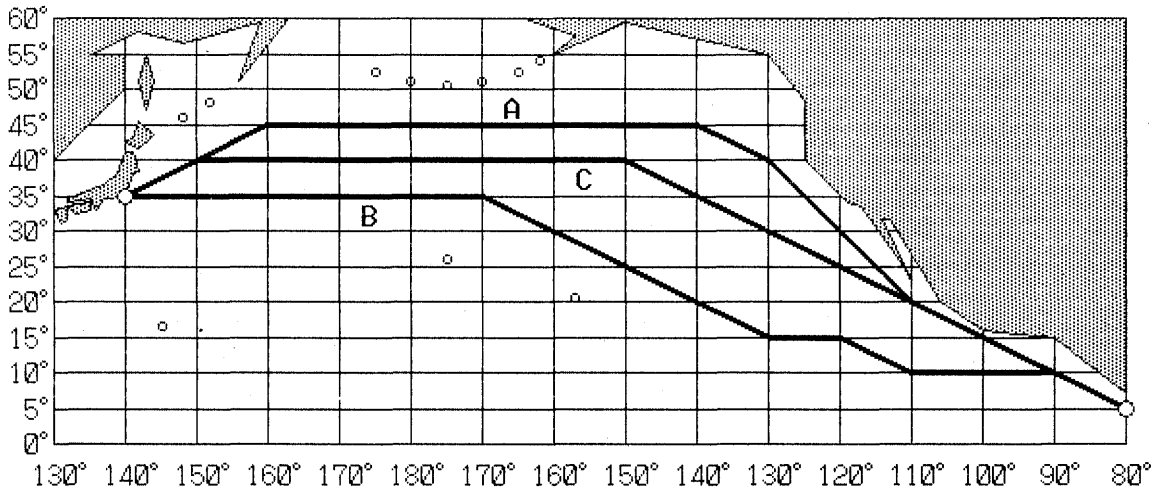


図3-4 所要時間最適コース (N丸)

3.4.3 運航中の航路最適化

運航中に気象の情報が得られた場合の例を示す。東京を出航するときに、図3-5のハッチをした海域の風速が20kt、風向が時計盤で2時の方向と通報があったとして、風速のファジー数を 20 ± 5 kt、風向のファジー数を 2 ± 1 時方向と、三角形のメンバシップ関数を持つファジー集合におきかえて最適解を求めた。所要時間の上限値、下限値の最適の航路はコースD、Eに、頂点値最適の航路はF、燃料消費量の頂点値最適航路はGの各コースである。これらの各コースから、航行目的が定期航行かレースかとか、指定入港時刻との関係等で評価関数の戦略がえらばれ、最適航路がきまる。

航行しながら航路の途中で求める最適解は、航行海域の気象が船自身でわかることや、最新の予報が利用できること、終点までの段数が少ないことなどであいまいさが減ってくる。また、現在位置が出航時に予測された解からずれてくることもある。これらの結果をみて、区間の評価関数の変更や、運航に関する知識、ノウハウ等を通して最適解へフィードバックすることは望ましいし、方策や目的地、最低船速の変更もありうる。そのためには、航路決定用のファジー・ダイナミック・プログラミングの実行は会話型になっていることが必要である。(図3-6)

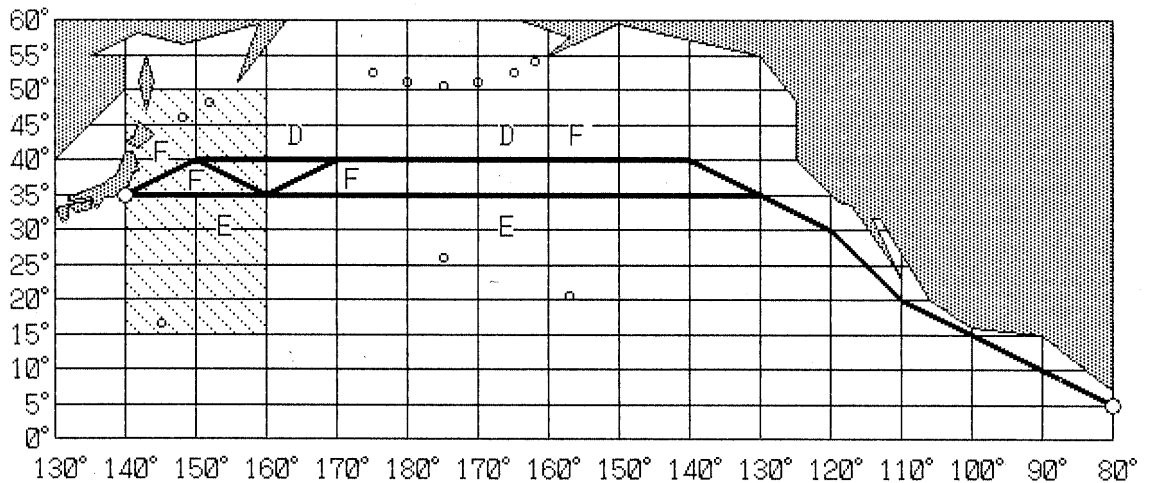


図3-5(a) 気象通報がある場合の最適コース (所要時間)

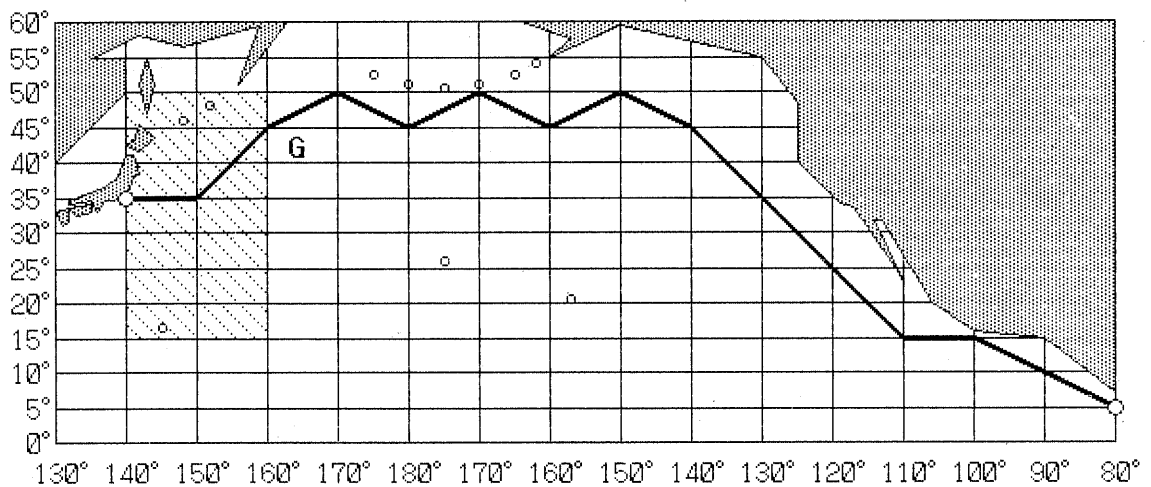


図3-5(b) 気象通報がある場合の最適コース (燃料消費量)

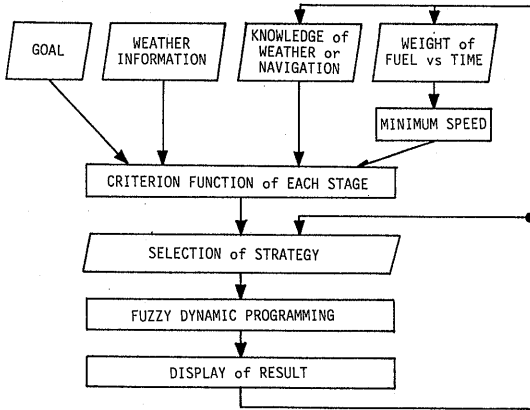


図3-6 帆船航路の最適化フロー

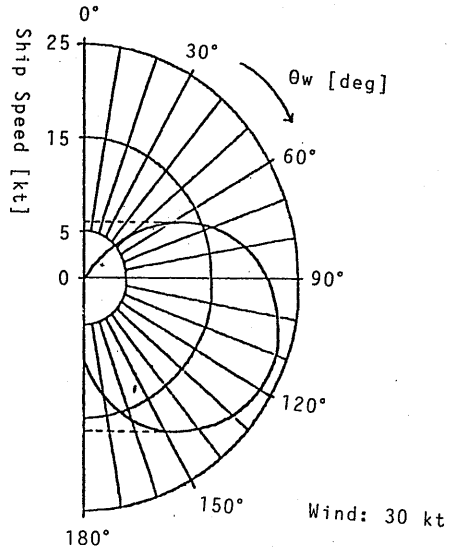


図3-7(a) 帆走特性

3.4.4 帆装船の違いによる最適航路の差

風に対する帆装船の推進性能の差が、最適航路へどのように影響するかをみるために、異なった帆装船を対象として、3.4.1と同じ条件で最適航路をもとめてみた。対象帆装船は、参考文献(1)にある帆装船のうち、排水量15,000ton 帆面積8,176m²のものである。図3-7に、帆走特性と外観図を示す。

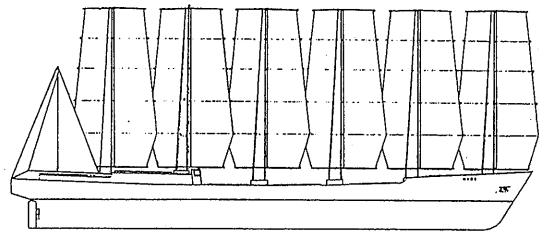


図3-7(b) 帆装船モデル

得られた最適航路は図3-8のようになった。前述のN丸で得られた結果と比較すると、所要時間最適航路においては大きな違いはなく、燃料消費量最適航路と航路所要時間に、帆走特性の差が現れるだけである。

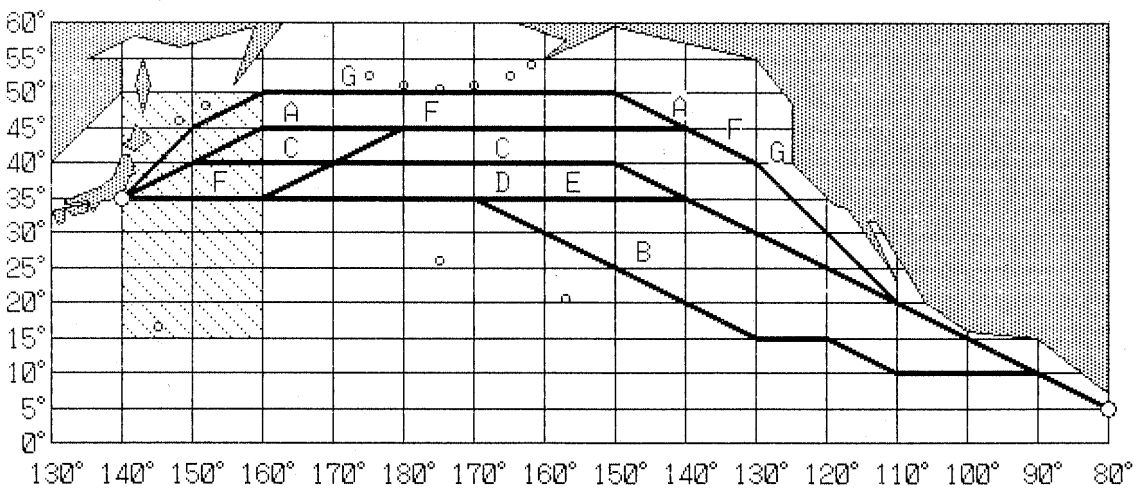


図3-8 各種の最適航路

3.4.5 実船の航路との比較

図3-9の点線で示すコースH, Iは, 帆装船ウスキ・パイオニア号が北米西海岸へ往復した第1次航海の時の航路である¹⁹⁾。この航路を3.4.4で述べた帆装船が航海したとして求めた最適航路は, 往復路ともコースJになった。計算と実際の航路が大きくずれているのは, 近くにいた低気圧の影響を計算の過程で考慮しなかったためと考えられる。

実際の帆装船の運航で, 低気圧が多い海域を通るときには, 「波高6mを超える海域は避けた方が安全である」, 「低気圧に向かうときには, その右側に避けた方が波高が低い」というような航海に関する知識が, 航路を決める際に用いられている。そこで最適航路計算

において, 帆装船の進行右側のメッシュ点へ至る航路の評価関数を15時間優位にとった場合の結果をみると, コースK, Lのように実際の航路に近づいてくる。

このことから, 実際の船舶の航路は, 単に見掛け上の最短所要時間航路というだけではなく, 安全性などに関連した種々の知識, ノウハウが関係しており, 帆装船の最適航路決定にも, より一層そのような知識, ノウハウの集積と計算への反映が必要であることがわかる。

ここに示した最適航路を求めるファジー・ダイナミック・プログラミングの手法は, 帆装船だけでなく, エンジン船のウェザー・ルーティングにも利用できよう。

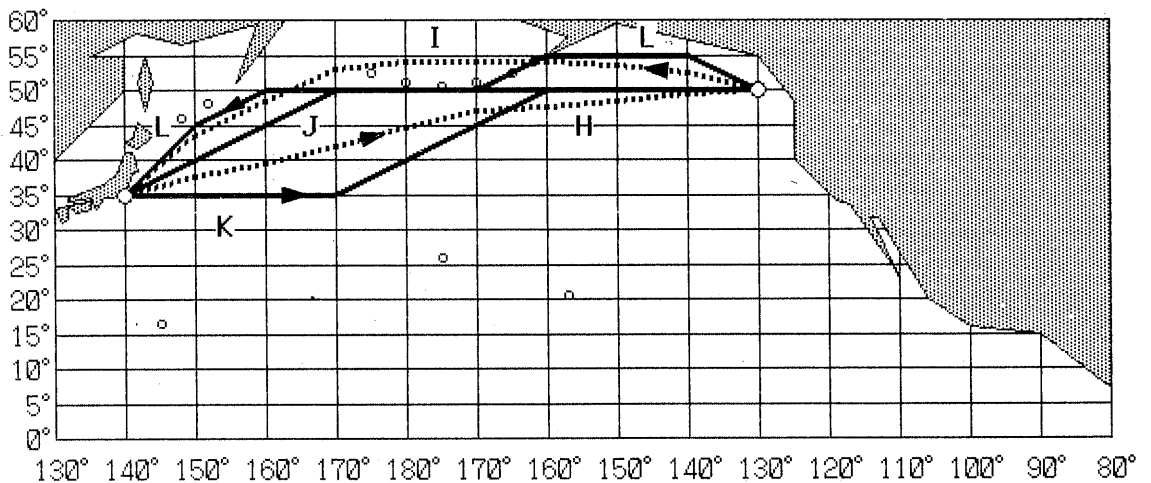


図3-9 実船の航路との比較

3.5 まとめ

- (1) データにあいまいさがある場合, 大洋を航行する帆装船の最適航路を求めるためには, ファジー・ダイナミック・プログラミングの手法が適している。
- (2) 最適航路は目的によって異なってくる。最適航路を求めるファジー・ダイナミック・プログラミングは, 航海中の環境, 条件, 予定とのずれ等の変化に応じた, より良い変更ができるような, 会話型が良い。
- (3) 実際の帆装船航路の評価関数は, 所要時間や燃料消費量だけではなく, 安全性も大きな要素となっている。これらを実験関数に組み込んで, より実用的なものにするためには, 更に, 実帆装船で用いられている運航の知識, ノウハウの収集が必要である。

4. あとがき

昭和59年度に船研で著者らによる帆装船の研究が開始されて2年を経過した。本研究では, 62年度までに海上輸送に対する風力利用法の将来の動向を調べて, 行政に役立つ知識をまとめたと考えており現在はその中間点に相当する。

本報告の研究成果は, 各章の末尾に示したが, これらを総合すると次の通りである。

- (1) 帆装中の定常航走中の運動の釣り合い方程式を求め, 繰返し近似計算法による解の算出法を作り, 精度を検討した。
- (2) 上記の計算例として, 長さ151mの鉱石運搬船

に帆装した場合のエネルギー利得、帆の配置などの影響を検討した。

- (3) 最適航路の算出法として、ファジー・ダイナミック・プログラミング (Fuzzy Dynamic Programming) を適用する方法を開発したが、その概要と理論的背景について説明した。
- (4) 上記の供試船について、太平洋を横断する場合の最適航路を各種の条件のもとに算出し、検討した。

緒言で述べたように、風力を積極的に利用した帆装船の設計には、運航の最適化の研究が有用であると考え、これを試みた。今後は、この方向でさらに研究を続けるが、帆装船については研究者の経験から得られたものが少く、物理的な認識において誤る恐れがある。このため実船試験を通してのデータ収集および乗船体験が極めて貴重で、この方向の計画も検討している。

謝 辞

本研究の第1章、第2章をまとめるにあたって、日本船用機器開発協会理事長、濱田昇博士の御指導をいただきました。また“だいおう”の計算については日本鋼管の皆様の御教示をいただきました。

第3章のファジーダイナミックプログラミングについては法政大学、寺野寿郎教授の御指導をいただき、計算は法政大学卒業研究生、樋口孔治氏に担当していただきました。また実船における航路選定と、ウェザールーティングの実際面については、日本気象協会の師橋昌氏に御教示いただきました。

これらの皆様にあつく感謝いたします。

参考文献

- 1) Woodward, J. B. et al.: "Feasibility of Sailing Ships for the American Merchant Marine", 米国商務省, Mar Ad, Cont. 4—37110, 1975 (Michigan 大学報告 No.168)
- 2) Wagner, Von B.: "Windkanalversuche für einen Sechsmastigen Segler nach Prölss", Schiff und Hafen, Heft 3 1967
- 3) Wagner, Von B.: "Fahrtgeschwindigkeitsberechnung für Segelschiffe", JSTG, 61 Band ('67)
- 4) Prölss, W.: "Zur Frage der Wirtschaftlichkeit von windangetriebenen Handelsschiffen", JSTG, 61 Band ('67)
- 5) 濱田 昇: "近代帆装商船の性能実証研究" 大阪大学学位論文, 1986
- 6) Ishihara, M. et al.: "Prospect of Sail-Equipped Motorship as Assessed from Experimental Ship "Daioh", SNAME, Shipboard Energy Conservation Symposium, 1980
- 7) Mays, J. H.: "Sailing Ship Weather Routing", Symposium on Wind Propulsion of Commercial Ships, RINA, 1980
- 8) 平野雅祥 他: "造船設計への操縦運動モデルの応用", 第3回操縦性シンポジウム(日本造船学会) 1981
- 9) 神中竜雄 他: "高速船旋回に関する二, 三の問題", 造船協会論文集, 第111号
- 10) 瀬尾敏一 他: "試験船だいおうによる抵抗推進性能の実験", 日本造船学会論文集, 第142号 1978
- 11) "Sail Equiped Motor Ships", Nippon Kokan Technical Bulletin 1980
- 12) 小瀬邦治: "操縦性の数学モデルの具体化", 日本造船学会, 第3回シンポジウム, 1981
- 13) 菊地正晃, 村山雄二郎: "海上輸送における風力エネルギー利用の研究(その2 推進動力源としての新型式風車の基礎研究)", 船舶技術研究所報告(未刊)
- 14) 細田龍介 他: "最適航法", 第2回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1977
- 15) Terano, T. et al.: "Planning in Management by Fuzzy Dynamic Programming", IFAC Sympo. "Fuzzy Information, Knowledge Representation & Decision Analysis", (1983)
- 16) Bellman, R.: "Dynamic Programming", Princeton Univ. Press, (1957)
- 17) Zadeh, L. A.: "Fuzzy Sets", Information and Control 8, 3, 1965
- 18) Takaishi, Y. et al.: "Winds and Waves of the North Pacific Ocean", Papers of Ship Research Institute, Supplement No.4, (1980)
- 19) "近代帆装貨物船ウスキ・パイオニア第1次航海報告書", 日本船用機器開発協会 (1985)

付録1 ダイナミック・プログラミング (DP)

ダイナミック・プログラミングとは、R. Bellman によって提唱された多段決定過程の最適方策を求める手

法である。ここでは航路の最適化に必要な程度の説明にとどめてあるので、詳細は参考文献を参照されたい。
 多段決定過程：図付1-1のように、直列に接続されている n 個の区画（段階）がある時に、各区画毎に決定すべき値 u_i があり、各区画の出口の状態 x_{i+1} は、入口の状態 x_i と決定 u_i とによって一義的に決まり、それが次の区画の入口の状態となっている系を多段決定過程という。

最適方策：各段階での決定の組 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ を方策といい、系の評価関数を最適（最大又は最小）にする方策を最適方策という。

評価関数：系において最適にしたい目的の値を、評価関数という。これは一般に各段階の状態 x_i と決定 u_i との関数になっている。

最適性の原理：系の因果律と評価関数のマルコフ性が成立するならば、次のような性質を持つ最適方策がある。すなわち、「最適方策は、系の最初の状態と最初の決定がどのようなものであっても、その後の決定は最初の決定によって生じた系の状態に関して最適方策となっていなければならない」。

系の因果律：系の状態変化速度 dx/dt が、その時の系の状態だけで定まり、過去の挙動に無関係の場合に、系の因果律が成り立つという。系を多段決定過程で表現した時に、各区画の出口の状態 x_{i+1} が入口の状態 x_i と決定 u_i とだけによって一義的に決まり、それより前の状態とは無関係の場合に相当する（単純マルコフ過程）。

評価関数のマルコフ性： n 段の多段決定過程において、 k 段の決定がすでになされた場合、残りの $(n-k)$ 回の決定が全体の評価関数の値におよぼす影響は、 k 段の出口の状態 x_{k+1} とその後の決定 $\{u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_n\}$ だけが関与する時に、評価関数はマルコフ性を持つという。

一般的に、評価関数が(付1.1)～(付1.3)式の形の時には、マルコフ性を持つ。

$$J = \sum_{i=1}^n g(x_i, u_i) \tag{付1.1}$$

$$J = g(x_n) \tag{付1.2}$$

$$J = \prod_{i=1}^n g(x_i, u_i) \tag{付1.3}$$

ダイナミック・プログラミングの実行例

図付1-2に示すような n 区間に区切られた航路があり、各区間の所要時間が与えられている場合の、全航路の所要時間が最小になるようなコースを求めてみる。

この場合、評価関数である所要時間 J は(付1.1)式のように和の形で与えられる。

ここで、 $g(x_i, u_i)$ は、 i 区間通過の所要時間であり、 x_i は i 区間入口の船の位置、 u_i は i 区間において選択決定される船の航路である。次の区間の x_{i+1} は i 区間の変換演算 T_i で与えられる。

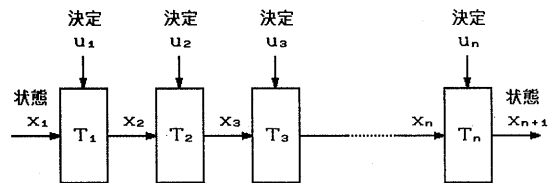
$$x_{i+1} = T_i(x_i, u_i) \tag{付1.4}$$

ダイナミック・プログラミングは最小の J をもたらす u_i の組、すなわち最適方策を求めることである。これは、最適性の原理「最適方策は、系の最初の状態と最初の決定がどのようなものであっても、その後の決定は最初の決定によって生じた系の状態に関して最適方策となっていなければならない」に基づいて、最小の評価関数を与える u_i を、最後区間 n の式(付1.7)から逐次(付1.5)式まで遡って、決めてゆけばよい。

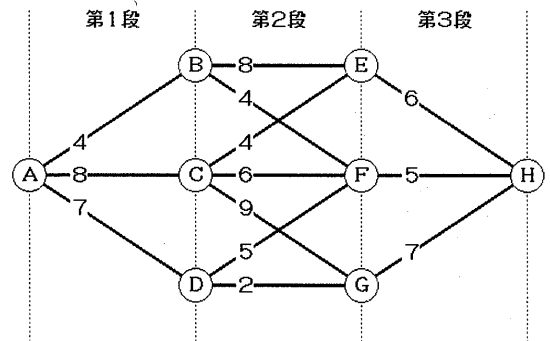
$$f_n(x_1) = \min_{u_1 \in U} [g(x_1, u_1) + f_{n-1}\{T_1(x_1, u_1)\}] \tag{付1.5}$$

$$f_{n-1}(x_1) = \min_{u_2 \in U} [g(x_2, u_2) + f_{n-2}\{T_2(x_2, u_2)\}] \tag{付1.6}$$

$$f_1(x_1) = g(x_n, u_n) \tag{付1.7}$$



図付1-1 多段決定過程



図付1-2 ダイナミック・プログラミング計算例

図付1-2の計算例

第1段

$$f_3(A) = \min_{u_1} [g_1(u_1) + f_2\{T_1(A)\}]$$

第2段

$$f_2(B \text{ or } C \text{ or } D) = \min_{u_2} [g_2(u_2) + f_1\{T_2(B) \text{ or } T_2(C) \text{ or } T_2(D)\}]$$

第3段

$$f_1(E \text{ or } F \text{ or } G) = g_3(u_3)$$

第3段では、入口状態EFGを決めると、自動的に f_1 が決まる。すなわち、

$$f_1(E) = 6, f_1(F) = 5, f_1(G) = 7$$

となる。

第2段の $f_2(B)$ は、

$$g_2(E) + f_1(E) = 8 + 6 = 14$$

と、 $g_2(F) + f_1(F) = 4 + 5 = 9$

とのうち小さな方、すなわち9を選び、それをもたらすFに至るコースを u_2 の候補として決める。

$$f_2(B) = 9$$

同様に、C、DはそれぞれE、Gへ至るコースを f_2 が最小になる u_2 の候補として選び、

$$f_2(C) = 10$$

$$f_2(D) = 9$$

が決まる。

第1段でも同様に、 $f_3(A)$ は、

$$g_1(B) + f_2(B) = 4 + 9 = 13$$

と、 $g_1(C) + f_2(C) = 8 + 10 = 18$

$$g_1(D) + f_2(D) = 7 + 9 = 16$$

を比較して、最小の $f_3(A)$ をもたらすBを u_1 として定める。ここで $f_3(A) = 13$ が全航路の最小所要時間として、また、ABFHが最適コースとして得られる。

参考文献

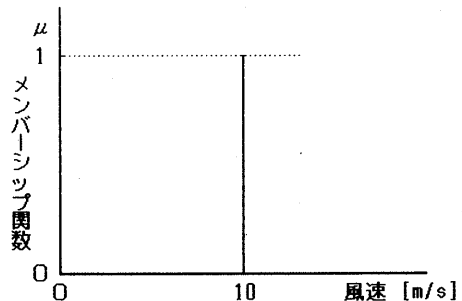
- 1) 小田中俊雄：ダイナミック・プログラミング，丸善，1963
- 2) 寺野寿郎：ダイナミック・プログラミングの考え方，日本機械学会第294回講習会教材「近代自動制御理論のやさしい解説」，3，1986

付録2 ファジー集合

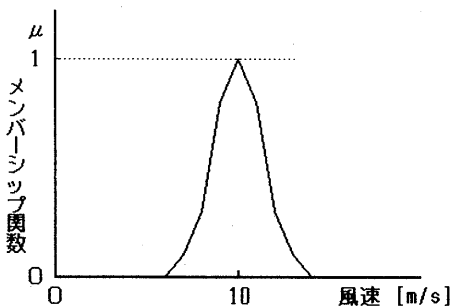
ファジー集合論は、1965年に Zadeh によって提唱された不確実なもの、人間の認識、言語表現のようにあ

いまいなものを数学的に表現する手法である。ここでは航路の最適化に必要な程度の説明にとどめてあるので、詳細は参考文献を参照されたい。

風速10mの風といった時に、普通の集合の考え方では、10m/s以外の風は「風速10mの風の集合」に属さないから、図付2-1に示すように、集合に属している程度（メンバーシップ関数という）が0か1になる。しかし通常感覚では、9m/sの風も11m/sの風も、全く10m/sの風でないとはいいたくない。ここで多少の許容範囲を認めて、9m/sの風も11m/sの風も、風速10mの風の集合に属する程度、すなわちメンバーシップ関数を0.8と見積り、それ以外の速さの風も、それぞれにメンバーシップ関数を決めてかいた「風速10mのファジー集合」が、図付2-2である。一般に各元に対するメンバーシップ関数の値はかなり主観的であって、系の評価、関係者の合意形成、統計的分布などに根拠をおいて、ファジー集合の使用目的によって、かなり大胆に決めている。



図付2-1 風速10m/sの風の集合



図付2-2 風速10m/sの風のファジー集合

ファジー集合Aが有限集合の場合には、その構成要素(元という)を u_1, u_2, \dots, u_n と離散的に表し、それらに対するメンバーシップ関数の値が $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ であるとしたとき、ファジー集合Aは

$$A = \mu_1/u_1 + \mu_2/u_2 + \dots + \mu_n/u_n$$

$$= \sum_{i=1}^n \mu_i/u_i \quad (\text{付2.1})$$

と書く。ここで+は加算ではなく論理和である。さきほどの風速10mのファジー集合Aは次式のように書くことができる。

$$A = .1/7 + .3/8 + .8/9 + 1/10 + .8/11$$

$$+ .3/12 + .1/13$$

補集合：ファジー集合Aの補集合 $\neg A$ は次式で与えられる。

$$\neg A = \sum_{i=1}^n (1 - \mu_i)/u_i \quad (\text{付2.2})$$

風速10mのファジー集合Aの補集合は

$$\neg A = \dots + 1/5 + 1/6 + .9/7 + .7/8 + .2/9$$

$$+ 0/10 + .2/11 + .7/12 + .9/13 + 1/14 + 1/15 + \dots$$

論理和：集合Aと集合Bとの論理和は次式で与えられる。

$$A \cup B = \sum_{i=1}^n (\mu_{A_i} \vee \mu_{B_i})/u_i \quad (\text{付2.3})$$

μ_{A_i}, μ_{B_i} は u_i に対するA, Bのメンバーシップ関数である。記号 \vee は、 μ_{A_i} と μ_{B_i} のいずれか大きい値をとるという演算を示す。

論理積：集合Aと集合Bとの論理積は次式で与えられる。

$$A \cap B = \sum_{i=1}^n (\mu_{A_i} \wedge \mu_{B_i})/u_i \quad (\text{付2.4})$$

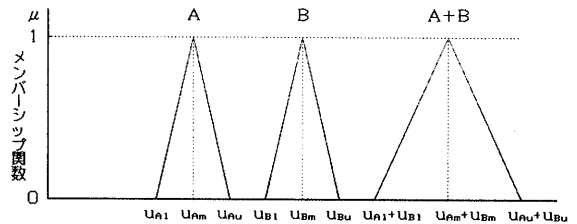
記号 \wedge は、 μ_{A_i} と μ_{B_i} のいずれか小さい値をとるとい

う演算を示す。

拡張原理：2つのファジー集合 $A = \sum_{i=1}^n \mu_{A_i}/u_{A_i}$ と $B = \sum_{j=1}^m \mu_{B_j}/u_{B_j}$ の関数演算 $f(A, B)$ は次式で与えられる。

$$f(A, B) = \sum_{i,j}^{n,m} (\mu_{A_i} \wedge \mu_{B_j})/f(u_{A_i}, u_{B_j})$$

もし集合A, Bともに図付2-3のようにメンバーシップ関数が三角形に分布しているとき、 $A+B$ も三角形のメンバーシップ関数を持ち、 $A+B$ の u の上限値、下限値、頂点値は、A, Bそれぞれの u の上限値、下限値、頂点値どうしの和になる。帆船船航路のダイナミック・プログラミングの評価関数は和の形をしているので、評価関数を三角形のメンバーシップ関数を持つファジー集合にすると演算が容易になる。



図付2-3 ファジー集合演算の拡張原理例 (加算)

参考文献

- 1) 寺野寿郎：システム工学入門—あいまい問題への挑戦，共立出版，1985，pp281/316
- 2) 西田，竹田：ファジー集合とその応用，森北出版，1978
- 3) 浅居，Negota：あいまいシステム理論入門，オーム社，1978