The Society of Naval Architects of Japan

(平成2年11月　日本造船学会秋季講演会において講演)

船舶の一航海省燃費評価基準とその階層構造

正員　金　丸　英　幸*

Hierarchical Structure of the Totalized Fuel Saving Criterion for the Navigating Ship

by Hideyuki Kanamaru, *Member*

Summary

There exist two outstanding streams of researches on the optimization of ship routing operation : the optimum solution of ship speed distribution under the weather and the optimum steering control to reduce the propulsive resistance. Up to now, they have been studied separately each other.

In this paper, the fuel saving criterion for the navigating ship is formulated precisely on the basis of the propulsive motion equation under the weather condition. It consists of some vital ship operation variables such as displacement, ship speed (main engine output), course deviation, rudder angle and many physical characteristics data determined definately for a given ship.

Although it is rather complicated with lots of ship's paramaters and main engine performance data, it is proven that this totalized criterion can be hierarchically decomposed to two performance indices by applying the optimum control theory and the non-dimensionalization technique for the ship maneuverability parameters. As a result of this hierarchical decomposition, the ship speed distribution under the weather can be evaluated with the value of performance index for the optimized steering control in use.

This feature ensures the real optimization of the ship routing operation, justifies approximately the seperate approach of the above two streams and suggests the possibility of integration of optimum ship operation control technique.

1. 緒　　論

近年，海運界では，海上輸送における運航コスト低減に多くの努力が払われ，着実な成果を上げつつある。その具体的な施策については，船型改善や上構の風圧抵抗低減，プラントの燃費向上，操船技術の効率化等，あらゆる角度から研究が行なわれ，新しい技術が開発されて来た。しかしながら，これらの努力は，船体や機関，航海機器等，船の運航部門毎に個別に行なわれる傾向が強く，各々の合理化の結果として，船全体の燃費改善が達成されて来たもので，総合的に評価基準を意識して達成されたものではなかったという感が否めない。例えば船型改善では，粘性抵抗と造波抵抗の低減に注力し，プラントの燃費改善では，単位時間，単位馬力当りの燃料消費量の低減を目標とする等々である。これらの燃費の評価基準が航海する船舶のトータルの燃費にどの様に関わって来るかをこの時点で明確にし，各部門の燃費改善の努力に共通の基準と目標を与えることは，大いに意味があると思われる。

操船をより明確に意識した船の性能の研究には，2通りの流れがある。その第一は，野本[4]の推進抵抗の研究に端を発する自動操舵系の研究で，小山[5]やN. H. Norrbin[6]，小瀬ら[7]は，操縦運動に伴なう抵抗増加という観点から実験的に評価基準の定式化を試みた。また，筆者ら[8]や長谷川[9]は，平水中の推進運動方程式から航海中のエネルギーバランスを求め，エネルギー増加率としての評価基準を提案した。第2のアプローチは，海象下の最適船速の考察に関するもので，山本ら[11),12)]や筆者ら[13),14)]の研究がある。

本論文では，より直接的な燃費の評価基準として，1つの航海において出港から目的地に到達する迄の総燃料消費量を定式化し，その構造的な性質を明きらかにする。この新しい評価基準は，前述の2通りのアプローチを統一的に取り扱うことが可能であるばかりでなく，その一部に最適

* 三菱重工業(株)長崎造船所

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

制御理論を応用することによって，操舵制御最適化の評価関数と航海速力最適化の評価関数に階層的に分解可能であることを示す。

尚，本論文ではSI単位系を用いる。

2. 推進・操縦運動方程式

Fig.1に示す船体固定座標系を用いると，船舶の推進運動と操縦運動は，以下の連立微分方程式で表わすことができる。

$$(m_0+m_x)\dot{U}=T_p(1-t_p)+(m_0+m_y)v\dot{\Delta\psi}-R_\delta-R_0-R_w \tag{2.1}$$

$$(m_0+m_y)\dot{v}-Y_v v+m_y\alpha_y\dot{\Delta\psi}+\{(m_0+m_x)U-Y_{\dot{\psi}}\}\Delta\dot{\psi}=Y_\delta\delta+Y_{\dot{\delta}}\dot{\delta} \tag{2.2}$$

$$m_y\alpha_y\dot{v}-N_v v+(I_{zz}+J_{zz})\dot{\Delta\psi}-N_{\dot{\psi}}\dot{\Delta\psi}=N_\delta\delta+N_{\dot{\delta}}\dot{\delta} \tag{2.3}$$

$$\Delta\psi=\psi-\psi_s \tag{2.4}$$

ここに

U ：前進速度
v ：横流れ速度
$\Delta\psi$：針路偏差
ψ ：針路
ψ_s ：設定針路
T_p ：プロペラスラスト
t_p ：スラスト減少率
R_δ ：舵抵抗
R_0 ：船体抵抗
R_w ：波浪による抵抗

で，m_0は船体質量，m_x，m_yはそれぞれx軸，y軸方向の付加質量，I_{zz}は船体のz軸まわりの慣性モーメント，J_{zz}はz軸まわりの付加慣性モーメント，α_yは付加質量重心と船体質量重心間距離である。また，Y_v，N_v等は操縦性微係数を表わす。

ただし，実際の航海においては，船はほぼ一定の船速を維持し，横流れ速度vは船速Uに比べて十分小さい為，(2.1)～(2.3)式を導く過程で，以下の仮定が置かれている。

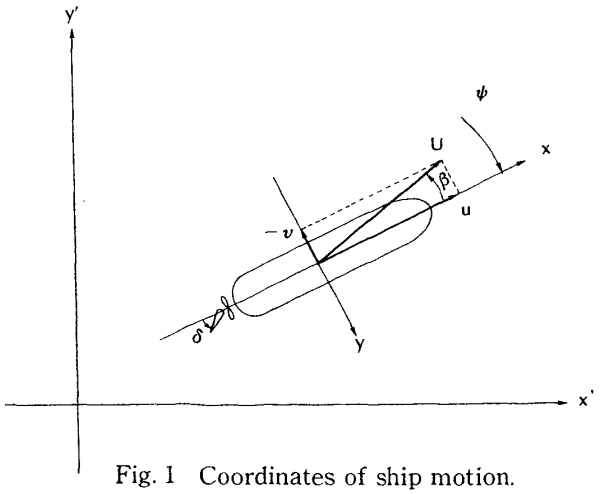

Fig. 1 Coordinates of ship motion.

$$\beta\ll 1 \tag{2.5}$$

$$v=-U\sin\beta\approx-U\beta \tag{2.6}$$

$$u=U\cos\beta\approx U \tag{2.7}$$

$$U=const \tag{2.8}$$

ここにβは，横流れ角である。

ここで，推進運動方程式(2.1)式における舵抵抗R_δは，次の藤井の式で与えられる[17]。

$$R_\delta=C_\delta U^2\delta^2 \tag{2.9}$$

ここに

$$C_\delta=3162.7(1-\omega)^2(1+3.6s^{1.5})\frac{A_R\lambda_r}{\lambda_r+2.2} \tag{2.10}$$

ω ：伴流係数
A_R：舵面積
λ_r ：舵アスペクト比
s ：プロペラスリップ

一方，船体抵抗R_0は次式で与えられる。

$$R_0=\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U^2 \tag{2.11}$$

ここに

∇_a：排水容量
C_{ad}：アドミラリティ係数(有効馬力基準)

一般に，操舵制御系の制御対象として操縦運動を位置付ける場合，(2.2)，(2.3)式から導かれる以下の1次系近似の応答モデルが用いられることが多い。

$$T\dot{\Delta\psi}+\Delta\dot{\psi}=K\delta \tag{2.12}$$

さらに，横流れ速度vは，施回速度$\Delta\dot{\psi}$と舵角δの1次形式で近似することができ，その精度は1次系近似の応答モデルと同等であることが示される[8]。

$$v=a_v\Delta\dot{\psi}+b_v\delta \tag{2.13}$$

$$a_v=\frac{K_v}{K}\left(1-\frac{T_{3v}-T_3}{T}\right) \tag{2.14}$$

$$b_v=K_v\frac{T_{3v}-T_3}{T} \tag{2.15}$$

ここに，T, Kはそれぞれ追従安定性指数と旋回力指数，T_3は操縦運動を旋回速度$\Delta\dot{\psi}$の2階微分方程式で表わした時の$\dot{\delta}$の係数である。また，K_v，T_{3v}は，操縦運動を横流れ速度vの2階微分方程式で表わした時の舵力のゲインと$\dot{\delta}$の係数である。

(2.13)～(2.15)式に(2.6)式を適用することにより，横流れ角βは，近似的に

$$\beta=a_\beta\Delta\dot{\psi}+b_\beta\delta \tag{2.16}$$

$$a_\beta=-\frac{1}{U}\frac{K_v}{K}\left(1-\frac{T_{3v}-T_3}{T}\right) \tag{2.17}$$

$$b_\beta=-\frac{1}{U}K_v\frac{T_{3v}-T_3}{T} \tag{2.18}$$

と表わすことができる。

3. 一航海省燃費評価基準

3.1 運航条件の離散モデル

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

一般に航海においては，船舶は一定の針路を維持して直進(漸長緯度航法)し，ある地点で新しい針路に切換えて再び直進するという方法を繰り返す。大圏航路や集成大圏航路では航路の向きは連続的に変化するが，航海の現場においてはこれを折線近似し，漸長緯度航法を繰り返しながら操船するのが実態である。

したがって，航路はメルカトール図上において始点 P_0 から終点 P_N に至る折線で表わされる。

一方，Fig.2 に示す通り，海洋中における気象・海象データの分布の単位を緯度および経度方向に分割された矩形の海域で与える。この上に航路 P_0P_N を重ね，その折点(変針点) および各々の矩形との交点から成る点列 $\{P_i\}$

$$\{P_i\}=(P_0, P_1, \cdots\cdots, P_N)=\sigma \tag{3.1}$$

を定義し，始点 P_0 から順に付番していく。この時の終点を P_N とすると，線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ の間は針路および気象・海象データともに一定で，運航の環境条件の単位と見做すことができる。即ち，この間は一定の制御方法で運航することが可能である。以後，線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ を航路要素 $\Delta\sigma_i$ と呼ぶ。

ここで導入した海域の離散化は，既に現在行なわれている気象・海象データサービスで一般的に用いられており，特に，予報データに基づく航海の計画にとって有用な方法である。

以上の結果，航海における制御の指針として以下の 2 点を挙げることができる。

(1)線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ 間では，一定の針路を保つ保針制御を実行し，航路の折点(すべての P_i ではない)で新しい針路に向けて変針する。

(2)線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ 間では，一定の船速(主機回転数)で航走し，点 P_i で新しい気象・海象に合わせて航海速力を変更する。

この 2 点が航海最適化の基本的な操作である。

ここで以降の議論に備え，次の状態量を定義する。

l_i ：線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ の長さ

U_i：線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ 間の対水船速(完全静水中換算)

α_i ：線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ 間の気象・海象下における対水船速の自然減速係数

これらの定義により，気象・海象下で船舶が線分 $\overline{P_iP_{i+1}}$ 間を実際に航走する航海速力(対水) $\bar{U}_i$ は

$$\bar{U}_i=\alpha_iU_i \tag{3.2}$$

となる。

3.2 一航海省燃費評価基準の構築

航海の経済性指標として一航海総燃料消費量 $F(\sigma)$ を導入すると，$F(\sigma)$ は伝達効率 η_t，推進効率 η_p，総航海時間 $\hat{T}$ および主機関の燃料消費率 γ を用いて以下の様に定式化することができる。

$$F(\sigma)=\int_0^{\hat{T}}\gamma\frac{T_p(1-t_p)}{\eta_t\eta_p}\bar{U}d\tau \tag{3.3}$$

ここに，T_p，t_p，$\bar{U}$ は，それぞれ，推進運動方程式(2.1)式のプロペラスラスト，スラスト減少率および航海速力である。また，燃料消費率 γ は単位馬力・単位時間当りの燃料消費量で，Fig.3 に示す様に主機の負荷の関数となる。

推進運動方程式(2.1)式に(2.6)式を適用し，船速を $\bar{U}$ で表わして(3.3)式に代入すると

$$\begin{aligned}F(\sigma)=&\int_0^{\hat{T}}\frac{\gamma}{\eta_t\eta_p}(m_0+m_x)\dot{\bar{U}}\bar{U}d\tau\\&+\int_0^{\hat{T}}\frac{\gamma}{\eta_t\eta_p}\left\{\frac{\nabla_a^{2/3}}{Cad}\bar{U}^3+(m_0+m_y)\bar{U}^2\beta\Delta\dot{\psi}\right.\\&\left.+C_\delta\bar{U}^3\delta^2+R_w\bar{U}\right\}d\tau\end{aligned} \tag{3.4}$$

ここで

$$\bar{\gamma}=\frac{\gamma}{\eta_t\eta_p} \tag{3.5}$$

とおくと，$\bar{\gamma}$ は伝達効率 η_t と推進効率 η_p で校正した主機の燃料消費率と考えることができ，(3.4)式は，次の様に表わされる。

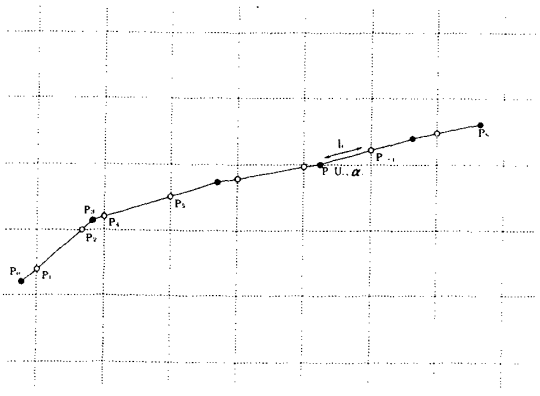

Fig. 2 Discrete sea areas devided on the navigation conditions

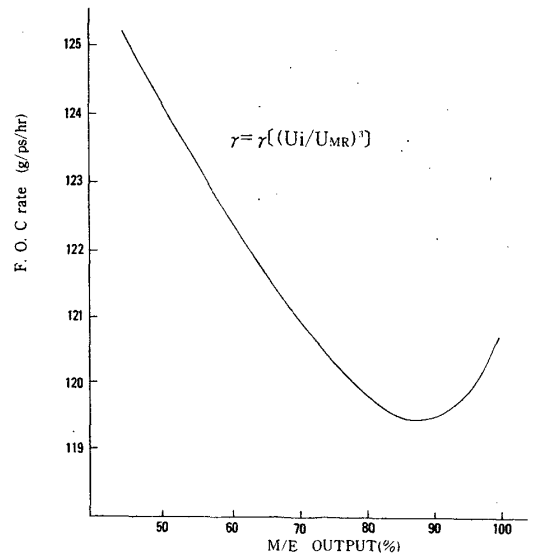

Fig. 3 Main engine Performance curve for fuel consumpition

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$F(\sigma)=\int_0^{\hat{T}}\bar{\gamma}(m_0+m_x)\dot{\bar{U}}\bar{U}d\tau+\int_0^{\hat{T}}\bar{\gamma}\left\{\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\bar{U}^3+(m_0+m_y)\bar{U}^2\beta\Delta\dot{\psi}+C_\delta\bar{U}^3\delta^2+R_w\bar{U}\right\}d\tau \tag{3.6}$$

(3.6)式は，さらに離散値化した航路要素毎の総燃料消費量の和として書き表わすことができる。

$$F(\sigma)=\sum_i\left[\int_{\hat{T}_i}^{\hat{T}_{i+1}}\bar{\gamma}(m_0+m_x)\dot{\bar{U}}\bar{U}d\tau\right]+\sum_i\left[\int_{\hat{T}_i}^{\hat{T}_{i+1}}\bar{\gamma}\left\{\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\bar{U}^3+(m_0+m_y)\bar{U}^2\beta\Delta\dot{\psi}+C_\delta\bar{U}^3\delta^2+R_w\bar{U}\right\}d\tau\right] \tag{3.7}$$

ここに $\hat{t}_i$, $\hat{t}_{i+1}$ は，それぞれ点 P_i, P_{i+1}を通過する時刻である。3.1節で論じた環境条件の離散モデル化により航路要素 $\Delta\sigma_i$ の中ではすべての状態量は一定と考えることができる。即ち，航海速力 $\bar{U}$，校正燃料消費率 $\bar{\gamma}$ および波浪による抵抗 R_w は区間 $[\hat{t}_i, \hat{t}_{i+1}]$ では一定で，以後航路要素 $\Delta\sigma_i$ におけるこれらの状態量に添字 i を付して表わせば，

$$\bar{U}_i=\text{const} \tag{3.8}$$

$$\bar{\gamma}_i=\text{const} \tag{3.9}$$

$$R_{wi}=\text{const} \tag{3.10}$$

である。

以上の議論により，(3.7)式の右辺第1項の積分を実行すると

$$\sum_i\left[\int_{\hat{t}_i}^{\hat{t}_{i+1}}\bar{\gamma}_i(m_0+m_x)\dot{\bar{U}}\bar{U}d\tau\right]=\sum_i\left[\frac{1}{2}\bar{\gamma}_i(m_0+m_x)\bar{U}_i^2\right]_{\hat{t}_i}^{\hat{t}_{i+1}}=0 \tag{3.11}$$

となる。したがって，

$$t=\tau-\hat{t}_i \tag{3.12}$$

$$\hat{T}_i=\hat{t}_{i+1}-\hat{t}_i \tag{3.13}$$

とおいて，(3.7)式を変形すると

$$F(\sigma)=\sum_i\left[\int_0^{\hat{T}_i}\bar{\gamma}_i\left\{\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\bar{U}_i^3+(m_0+m_y)\bar{U}_i^2\beta\Delta\dot{\psi}+C_\delta\bar{U}_i^3\delta^2+R_{wi}\bar{U}_i\right\}dt\right] \tag{3.14}$$

と単純化される。

実際には，点 P_i において航海速力が再設定される為船速が変化し，(3.11)式は厳密には0にならない。しかしながら，航路要素 $\Delta\sigma_i$ の接続点における操作が航海全体に占める割合は，時間的にもエネルギー的にも充分小さく無視することができる。

(3.14)式の被積分関数の第2項は船首揺による馬力損失に対応するが，船首揺は，操舵の外に波浪や風等の外乱によっても誘起される。しかしながら，波浪や風によるエネルギーロスをスペクトル分析した結果として，次の事実が知られている[4),5)]。

(a)波浪のパワーは高周波域で顕著であるが，操舵による操縦運動の周波数帯域がこれをカバーできない為，操舵によって波浪によるエネルギーロスを打ち消すことは不可能である。これに反応して操舵を実行すると，却って操舵による抵抗増を招き，エネルギーロスとなる。

(b)風によるエネルギーロスは，操舵によるエネルギーロスとほぼ同じ周波数帯域にあるが，そのパワーは操舵によるエネルギーロスに比べて充分小さい。。

以上の知見により，以降の議論においては，波浪や風による外乱が船首揺による馬力損失に及ぼす影響は考慮の対象から除外する。

ここで理想航海という新しい概念を導入し，以下の様に定義する[8)]。

『理想航海とは，操舵制御を実行しなくても船首揺を生じず，設定された針路を維持して直進する航海である』

現実には波浪や風等の外乱により船首揺が誘発される為，この様な理想航海はあり得ない。ここでは，現実の航海における燃費増の評価の基準を与える為にこの概念を導入する。

理想航海においては，船首揺に起因する航程増が生じない為，航海時間が短縮される。理想航海における航海時間を T_i とし

$$T_i=\hat{T}_i-\Delta T_i \tag{3.15}$$

と表わす。

また，船首揺や操舵に起因する抵抗増も発生しない為，理想航海における推進運動方程式(2.1)式は，以下の様に表わすことができる。

$$(m_0+m_x)\dot{\bar{U}}=T_p(1-t_p)-\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\bar{U}^2-R_w \tag{3.16}$$

さらに，(3.16)式で表わされる推力 T_p で完全静水中を理想航海した時の船速を U とすると，この場合の推進運動方程式は次式となる。

$$(m_0+m_x)\dot{U}=T_p(1-t_p)-\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U^2 \tag{3.17}$$

(3.16)，(3.17)式の各々の推進運動方程式に対して(3.3)式から(3.14)式に至る過程を適用することにより，以下の関係式を導くことができる。

$$\sum_i\left[\int_0^{Ti}\bar{\gamma}_i\left(\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\bar{U}_i^3+R_{wi}\bar{U}_i\right)dt\right]=\sum_i\left[\int_0^{Ti}\bar{\gamma}_i\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U_i^3dt\right] \tag{3.18}$$

(3.18)式の U_i は完全静水中を理想航海する場合の船速で，抵抗として船体抵抗のみが考慮されている為，船舶に搭載された主機関の出力を示すパラメータと考えることができる。

(3.15)，(3.18)式を用いて(3.14)式を変形し，さらに(3.8)～(3.10)式を適用して積分を実行した後，(3.2)式を用いると

$$F(\sigma)=\sum_i\left[\bar{\gamma}_i\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U_i^3T_i\right.$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$\times\left[1+\alpha_i^3\left\{\left(1+\frac{R_{wi}/(\alpha_i U_i)^2}{\nabla_a^{2/3}/C_{ad}}\right)\frac{\Delta T_i}{T_i}+\frac{1}{T_i}\int_0^{T_i+\Delta T_i}\frac{(m_0+m_y)\beta\dot{\Delta\psi}/(\alpha_i U_i)+C_\delta\delta^2}{\nabla_a^{2/3}/C_{ad}}dt\right\}\right] \tag{3.19}$$

を得る。

ここで，(3.19)式中の航海時間増加率 $\Delta T_i/T_i$ に関しては，次の補題が成り立つ[8]。

〔補題 3.1〕

理想航海に対する実際の航海の航海時間の増加率は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta T_i}{T_i}=\frac{1}{T_i}\int_0^{T_i}\frac{(\Delta\psi-\beta)^2}{2}dt \tag{3.20}$$

一般に，ビューフォート指標 6 迄の海域で保針制御下にある船舶では，(2.5)式の仮定に加えて

$$\Delta\psi\ll 1 \tag{3.21}$$

が成り立ち，$\Delta\psi$，β は 0 のまわりで変化する。したがって航海時間増加率についても

$$\frac{\Delta T_i}{T_i}\ll 1 \tag{3.22}$$

が成り立つ。一方，同様の海象下では，波浪外力の船体抵抗に対する割合についても

$$\frac{R_{wi}}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})(\alpha_i U_i)^2}\ll 1 \tag{3.23}$$

が成り立つことが実験的に確かめられている[15]。したがって

$$\frac{R_{wi}}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})(\alpha_i U_i)^2}\cdot\frac{\Delta T_i}{T_i}=0(\Delta^2) \tag{3.24}$$

となり，この項は無視することができる。

(3.20)，(3.24)式を(3.19)式に代入し Δ^2 のオーダの項を無視すると，航路 σ に対する一航海省燃費評価基準を次の様に定式化することができる。

$$F(\sigma)=\sum_i\bar{\gamma}_i\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U_i^3T_i\times\left[1+\frac{\alpha_i^3}{T_i}\int_0^{T_i}\left\{\frac{(\Delta\psi-\beta)^2}{2}+\frac{(m_0+m_y)\beta\dot{\Delta\psi}/(\alpha_i U_i)+C_\delta\delta^2}{\nabla_a^{2/3}/C_{ad}}\right\}dt\right] \tag{3.25}$$

(3.25)式の ∇_a，C_{ad} は，排水容量およびアドミラリティ係数で船体関係の状態量である。また積分項は操縦運動の状態量から成り，航海部門に関係している。さらに T_i および U_i は，それぞれ理想航海時の航海時間と完全静水中換算の船速で主機関の出力に依存する状態量である。即ち，一航海省燃費評価基準は，船舶運航の主要 3 部門である船体(荷役)，航海，機関の代表的な状態量から構築される。

3.3 一航海省燃費評価基準の階層構造

一般に操縦性能の分野では，各種状態量を有次元値で取り扱うことは稀で，以下に示す無次元化の手続きを取る。

$$\begin{aligned}
m_0'&=m_0/\frac{\rho}{2}L^2d\\
m_y'&=m_y/\frac{\rho}{2}L^2d\\
t'&=t/(L/U)\\
K'&=K\cdot(L/U)\\
T'&=T/(L/U)\\
T_1'&=T_1/(L/U)\\
T_2'&=T_2/(L/U)\\
T_3'&=T_3/(L/U)\\
K_v'&=K_v/U\\
T_{3v}'&=T_{3v}/(L/U)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

ここに

ρ：海水密度

L：船長(垂線間長)

d：吃水

で，(3.26)式の無次元量は本節の考察に関係するもののみを列記した。

また，(3.26)式を(2.17)式および(2.18)式に代入すると，a_β，b_β の無次元量と変換式が以下の通り求められる。

$$\beta=a_\beta'\dot{\Delta\psi}+b_\beta'\delta \tag{3.27}$$

$$a_\beta'=-\frac{K_v'}{K'}\left(1-\frac{T_{3v}'-T_3'}{T'}\right)=a_\beta(L/U) \tag{3.28}$$

$$b_\beta'=-K_v'\frac{T_{3v}'-T_3'}{T'}=b_\beta \tag{3.29}$$

但し，$\Delta\psi$ の上の「˙」は無次元化された時間 t' による微分を意味する。

さらに，(2.1)，(2.9)，(2.11)式に基づいて C_δ および $\nabla_a^{2/3}/C_{ad}$ を次元解析すると

$$[C_\delta]=[\nabla_a^{2/3}/C_{ad}]=M\cdot L^{-1} \tag{3.30}$$

となる。したがって，これらの定数の無次元量は，それぞれ次式で与えられる。

$$C_\delta'=C_\delta/\frac{\rho}{2}Ld \tag{3.31}$$

$$\left(\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\right)'=\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}\Big/\frac{\rho}{2}Ld \tag{3.32}$$

波浪中における航海速力は船速低下の為に αU となる。したがって，(3.26)～(3.29)式および(3.31)，(3.32)式の U の代わりに αU を用いて(3.25)式の被積分項に代入すると，一航海省燃費評価基準は次式で与えられる。

$$F(\sigma)=\sum_i\bar{\gamma}_i\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U_i^3T_i\times\left[1+\frac{\alpha_i^3}{T_i'}\int_0^{T_i'}\left\{\frac{(\Delta\psi-\beta)^2}{2}+\frac{(m_0'+m_y')\beta\dot{\Delta\psi}+C_\delta'\delta^2}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}dt'\right] \tag{3.33}$$

ここに

$$T_i'=T_i/\left(\frac{L}{\alpha_i U_i}\right) \tag{3.34}$$

(3.33)式の積分項は，操作量として船速 U_i を含まず操舵量 δ のみから成る。そして，操舵量 δ はこの積分項以外には含まれない。これは，積分項が単独で操舵制御最適化

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

の評価関数として成り立つ可能性を示している。したがって

$$J_{1i}=\int_0^{T_i'}\left\{\frac{(\Delta\psi-\beta)^2}{2}+\frac{(m_0'+m_y')\beta\dot{\Delta\psi}+C_\delta'\delta^2}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}dt' \tag{3.35}$$

とおくと，J_{1i} は，操縦運動に起因するエネルギー増加率に対応する量である。さらに一航海総燃料消費量 $F(\sigma)$ を J_2 とおき，(3.34)式を適用すると，(3.33)式は以下の様に表わされる。

$$J_2=\sum_i\bar{\gamma}_i\frac{\nabla_a^{2/3}}{C_{ad}}U_i^3T_i\left(1+\frac{a_i^2L}{U_i}\cdot\frac{1}{T_i}\cdot J_{1i}\right) \tag{3.36}$$

ここで，評価関数の無次元化に合わせて操縦運動モデル(2.12)式を(3.26)式により無次元化すると次式が得られる。但し，ここでは状態変数ベクトル形式で表わす。

$$\dot{x}'=A'x'+B'u',\quad x'(0)=x_0' \tag{3.37}$$

ここに変数ベクトルおよび係数行列は，次の様に定義される。

$$x'=\begin{bmatrix}\Delta\psi\\ \dot{\Delta\psi}\end{bmatrix},\quad u'=\delta \tag{3.38}$$

$$A'=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -\frac{1}{T'}\end{bmatrix},\quad B'=\begin{bmatrix}0\\ \frac{K'}{T'}\end{bmatrix} \tag{3.39}$$

(3.27)式を用いて第1評価関数(3.35)式の被積分関数を変形すると，以下の様に $\Delta\psi$, $\dot{\Delta\psi}$, δ の2次形式が得られる。

$$\begin{aligned}&\frac{(\Delta\psi-\beta)^2}{2}+\frac{(m_0'+m_y')\beta\dot{\Delta\psi}+C_\delta'\delta^2}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\\&=\frac{1}{2}\Delta\psi^2-a_\beta'\Delta\psi\dot{\Delta\psi}\\&+a_\beta'\left\{\frac{1}{2}a_\beta'+\frac{m_0'+m_y'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}\dot{\Delta\psi}^2\\&-b_\beta'\Delta\psi\delta+b_\beta'\left\{a_\beta'+\frac{m_0'+m_y'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}\dot{\Delta\psi}\delta\\&+\left\{\frac{1}{2}b_\beta'^2+\frac{C_\delta'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}\delta^2\end{aligned} \tag{3.40}$$

したがって，第1評価関数(3.35)式は，次式で与えられる。

$$J_{1i}=\int_0^{T_i'}\{{}^tx'Q'x'+2{}^tx'S'u'+{}^tu'R'u'\}dt' \tag{3.41}$$

ここに，無次元荷重係数行列 Q', S', R' は，以下の様に定義される。

$$\begin{aligned}Q'&=\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}a_\beta'\\ -\frac{1}{2}a_\beta' & a_\beta'\left\{\frac{1}{2}a_\beta'+\frac{m_0'+m_y'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}\end{bmatrix}\\S'&=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}b_\beta'\\ \frac{1}{2}b_\beta'\left\{a_\beta'+\frac{m_0'+m_y'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\right\}\end{bmatrix}\\R'&=\frac{1}{2}b_\beta'^2+\frac{C_\delta'}{(\nabla_a^{2/3}/C_{ad})'}\end{aligned} \tag{3.42}$$

但し，(3.41)式の「t」は，転置行列を示す。

プロセスのモデル(3.37)式の制御を2次形式評価関数(3.41)式に基づいて最適化する問題は最適レギュレータ問題としてよく知られており，その解は以下のフィードバック制御として求まる。

$$u'=-R'^{-1}({}^tB'P'+{}^tS')x' \tag{3.43}$$

ここに，P' は次のリッカチの微分方程式の解として決定される。

$$\dot{P}'=(P'B'+S')R'^{-1}({}^tB'P'+{}^tS')-P'A'-{}^tA'P'-Q' \tag{3.44}$$

$$P'(T_i')=0$$

また，評価関数の最適値は，次式で与えられる。

$$J_{1i}^o={}^tx_{0i}'P_0'x_{0i}',\quad P_0'=P'(0) \tag{3.45}$$

Fig.4 に示す様に航路要素 $\Delta\sigma_{i-1}$ と $\Delta\sigma_i$ における設定針路の差を $\Delta\psi_{si}$ とすると，(3.37)式の初期値 x_{0i}' は次式で与えられる。

$$x_{0i}'=\begin{bmatrix}\Delta\psi_{si}\\ 0\end{bmatrix} \tag{3.46}$$

ここで，T_i' が有限値の場合は，リッカチの微分方程式(3.44)式の $t'=0$ の解 $P'(0)$ は T_i' の関数となる。T_i' は無次元化の過程で船速 a_iU_i に依存する為，(3.45)式の P_0'，したがって第1評価関数の最適値 J_{1i}^o も船速の関数となり，評価関数の分解は成立しない。

しかしながら，一般に，実際の航海では航路要素 $\Delta\sigma_i$ の航海時間が操縦運動の時定数よりも十分大きい。したがって，この最適化問題は $T_i'\to\infty$ の無限過程として取り扱うことができ，P_0' は船速に依存しない無次元定数行列となる。その結果，航路が与えられると，(3.45)，(3.46)式より第1評価関数の最適値 J_{1i}^o が事前情報として無次元値で確定し，評価関数の分解が可能となる。

即ち，航海最適化の手続きに関して次の性質が成り立つ。

〔評価関数の分解〕

一航海総燃料消費量を最小にする制御則の求解は，

(1)(3.35)式の無限過程で表わされる第1評価関数 J_{1i} を最小とする最適操舵則を求め，

(2)その最適評価値 J_{1i}^o を用いて，(3.36)式で表わされる第2評価関数 J_2 を最小とする最適船速分布 $U_i(i=0\sim N-1)$ を求める

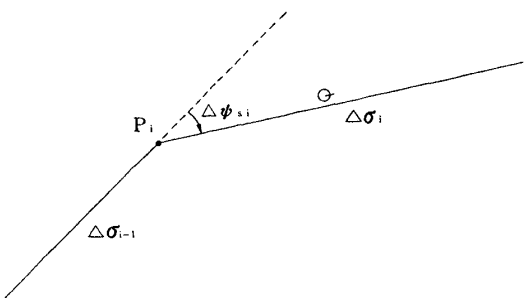

Fig. 4 Set course difference at the waypoint

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

という2つの段階に分離して行なうことができる。即ち，一航海省燃費評価基準は，操舵制御最適化と航海速力(主機回転数)最適化の2つの評価関数に階層的に分解することが可能である。

この性質は，特に，航海の最も基本的な操作である操舵制御と航海速力の調整を最適化する場合に極めて重要な意味を持つ。同時に，航海速力の最適化は，操舵制御の最適化が保証されて初めて実行可能となることを示しているが，通常の航海においては，操舵制御実行の結果，(3.36)式中の燃料消費量の増加率

$$\frac{a_i^2 L}{U_i}\cdot\frac{1}{T_i}\cdot J_{1i}=\frac{a_i^3}{T_i}J_{1i} \qquad (3.47)$$

が絶対値としては1に比べて小さいこと，主機回転数の最適化に影響するのは航路要素 i に対するこの絶対値のバラツキであること，そして，このバラツキはそれ程大きくないと考えられること等を考慮すれば，一航海省燃費評価基準(3.36)式における(3.47)式の項はほぼ定数と見なすことができる。即ち，主機回転数最適化の過程で

$$J_{1i}{}'=0 \qquad (3.48)$$

の条件を設定しても，特に不具合を伴わない。

この性質は，従来，操舵制御最適化とは独立に研究されて来た航海速力(主機出力)最適化の試みが，妥当なアプローチの方法であることを示している。

4. 結　　論

航海する船舶に対して，操船技術まで取込んだ包括的な省燃費評価基準を確立する為に，推進運動方程式に基づいて一航海総燃料消費量を定式化した。この評価基準は，操舵系統の評価量と主機運転系統の評価量の「弱い」結合体として成り立ち，船型データや船型性能或いは主機の燃費特性等の物理的な性能諸データに加えて，航海，荷役，機関各部門の運転に関係する諸量から構成される。

特に，操舵系統の評価基準は，針路偏差とその変化率および舵角の2次形式汎関数の構造をもっており，最適化の手続きは現代制御理論の最適レギュレータ問題に帰着されることを示した。さらに，操縦性能の分野で通常用いられている無次元化操作の適用と，実際の航海では一様な環境下で直進する時間が操縦運動の時定数に比べて充分大きいという性質により，この最適評価値が船速に依存しないことを示し，一航海省燃費評価基準が，主機運転系統の評価関数と操舵制御系統の評価関数の2つに階層的に分解可能であることを明きらかにした。

この性質は，主機の制御とは無関係に操舵制御の最適化を行ない，その最適評価値を用いて航海速力(主機出力)の最適化を実行することの妥当性を保証し，航海する船舶の省燃費評価や省燃費を目的とする操船技術最適化の研究にとって，極めて重要な意味を持つ。同時に，航海・荷役・機関を包括する船舶運転の統合化に対しても1つの道標となり得るものである。

参 考 文 献

1) Mandel, P.: Ship maneuvering and control, Chap. VIII, Principles of Naval Architecture, Soc. Naval Architecture & Marine Engineering, (1967).
2) 野本謙作：船の操縦性，第1回操縦性シンポジウム，(昭和39年).
3) 小川陽弘，浜本剛実：操縦運動の数学モデルの基礎，第3回操縦性シンポジウム，(昭56年).
4) 野本謙作，元山登雄：船首揺にもとづく推進馬力の損失について，造船協会論文集，第120号，(昭和41年).
5) 小山建夫：外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究，造船協会論文集，第122号，(昭和42年).
6) Norrbin, N. H.: On the added resistance due to steering on a straight course, Report of Performance Committee, Appendix 8, 13th ITTC, (1972).
7) 小瀬邦治，佐々木直人：保針操舵の評価函数について，西部造船学会技術委員会第68性能部会資料，(昭和51年).
8) Kanamaru, H. and Sato, T.: Adaptive autopilot system with minimum propulsive energy consumption, Proc. of the 3rd ISSOA, (1979).
9) Hasegawa, K.: On a performance criterion of autopilot navigation, Jounal of Kansai SNA, JAPAN, No.178, (1980).
10) 大津皓平，長谷川和彦：オートパイロットの評価と展望，日本造船学会，第3回操縦性シンポジウム，(昭和56年).
11) 山本修：波浪中経済速力について，関西造船協会誌，第191号，(昭和58年)
12) 山本修，西口映：波浪中経済速力について(第2報)，関西造船協会誌，第194号，(昭和59年).
13) Kanamaru, H.: One approach to the on-board weather routing and its coupling to the optimum streering control, Proc. of the 7th SCSS, Vol. 2, (1984).
14) Kanamaru, H. and Matsuda, K.: Super integrated ship operation control, Proc. of Maritime Communications and Control, Institute of Marine Engineers, (1988).
15) 浅井滋：風および波浪による定常力を考慮した航海中保針性能に関する研究，大阪大学学位論文，(昭和60年).
16) 藤井斉：自航模型船による舵特性の研究(1)，造船協会論文集，第107号，(昭和35年).
17) 藤井斉，津田達雄：自航模型による舵特性の研究，造船協会論文集，第110号，(昭和36年).

NII-Electronic Library Service