# 実航海の自然条件や動力系の制約に対処可能な

# 船舶の航海最適化技術

金丸 英幸\*1

# Ship Navigation Optimization Technologies with Countermeasures

for Sea Conditions and Restriction of Propulsive Power System KANAMARU Hideyuki

# Summary

The amount of air pollutant, Sox and Nox, emitted by a ship during ocean navigation is regulated by the International Maritime Organization (IMO) to prevent air pollution on the sea.

The author presented navigation optimization technologies to reduce exhaust gas by adjusting fuel consumption locally during voyages under wave conditions without consideration of tidal or ocean current, as well as restriction of main engine output and safe navigation speed under rough sea conditions.

In this paper, navigation optimization technologies are improved to solve the optimization problem subject to all these additional conditions of the sea and ship operation, corresponding to actual navigation.

Moreover, the effectiveness of expanded optimization technologies is confirmed for several combinations of the above conditions through numerical simulation.

## Keywords: ( optimum navigation, current, main engine output, fuel consumption )

# 1. 緒言

地球環境汚染の社会問題化に呼応して、国際海事機 関(IMO)が船舶運航時の排ガスに含まれる窒素酸 化物や硫黄酸化物に規制を設け、その規制値が段階的 に強化されている<sup>1)</sup>。

筆者は、先行研究<sup>2)</sup>で、航海で消費される燃料を最 小化することによって排ガスの発生を抑制する精密な 航海最適化技術について考察し、波浪下の対水運動を 基礎に、航路保持の下で目的地までの主機出力を最適 に配分するための速力の決定方程式を導いた。

しかしながら、実航海にこの技術を適用するために

\*1 大学院 非常勤講師 / 新技術創成研究所 客員研究員

は、

- (1) 潮流や海流の作用による対地運動への対処
- (2) 主機能力の限界への対応や主推進軸系に過大 な負荷を与える主機の危険回転域回避
- (3) 荒天時の安全確保のための運航限界速力超過 の防止

という問題を解決しなければならない。

本稿では、実航海で発生するこれらの諸条件を考慮 した航海最適化技術について精密に解析し、主機出力、 即ち、速力配分の決定方程式を拡充するとともに、数 値シミュレーションによってその効果を検証する。

2018年3月1日受付 2018年5月28日受理

# 2. 対水運動を基礎とした航海最適化技術 2)

#### 2.1 就航環境の離散値化

気象海象予報のディジタルデータは、一般的に、経 緯度方向の矩形の海域を単位として陸上の気象海象予 報データサービス機関から配信される。Fig.1 に示す 通り、設定航路  $\sigma$  をこの矩形の海域の境界との交点 および変針点によって分割した線分を、航路要素  $\Delta \sigma_i$  ( $i = 1 \cdots n$ ) と定義する。

通常、航海では、航路に沿って一定の距離の定速航 行を繰り返して船舶を目的地に導く。したがって、航 路要素  $\Delta \sigma_i$ 上では速力一定で船を進めることにすれ ば、波浪抵抗やそれに起因する自然減速、進行方向に 対する相対波向などの各種就航条件も一定となり、航 路要素を基本単位として航海最適化を図ることが可能 となる。

#### 2.2 燃料消費量の定式化

船舶の推進運動方程式を馬力変換して主機関の燃料 消費率を掛け合わせ時間軸で積分することによって、 操縦運動を評価する第一評価関数  $J_{1i}$  との重構造で、 船舶運航の燃料消費量(第二評価関数  $J_2$ )を定式化 することができる<sup>2)</sup>。

$$J_{1_{i}} = \int_{0}^{\infty} \left( \frac{(\Delta \psi - \beta)^{2}}{2\alpha_{i}^{2}} + \frac{(m'_{0} + m'_{y})\beta r' + C_{\delta_{i}}'\delta^{2}}{C_{h_{i}}'} \right) dt' \qquad (1)$$

$$\Delta \psi : \text{針路と設定針路の偏差}$$

$$r : 回頭角速度 \quad \beta : 横流れ角$$

$$\delta : 操舵量(舵角)$$

$$m_{0} : 質量 \quad m_{y} : 付加質量(横方向)$$

$$C_{h} : 船体抵抗係数 \quad C_{\delta} : 舵抵抗係数$$

$$J_{2} = \sum [\gamma_{i}^{*} C_{h_{i}} U_{i}^{2} (l_{i} + \alpha_{i}^{2} L J_{1_{i}})]$$

$$U : \bar{w} D \qquad L : \hat{W} \Phi E$$

$$(2)$$

γ\*: 推進軸系の伝達効率と推進効率で補正 された燃料消費率

但し、各々の式の中の添え字「i」は航路要素  $\Delta \sigma_i$ 上の状態量であることを、また、第一評価関数の「'」は、無次元化された量であることを示す。



 $U_i$ ": $\Delta \sigma_i$ 上の船速、 $\alpha_i$ : $\Delta \sigma_i$ 上の波浪による自然減速係数  $\gamma_i^*$ :  $\Delta \sigma_i$ 上の燃量消費量(伝達&推進効率による補正値) Fig.1 航路要素

#### 2.3 最適速力の決定方程式

航路要素毎の最適速力は、航海の定時性確保のため に総航海時間 T<sub>v</sub> を拘束した上で、燃料消費量(第二 評価関数)を最小化することによって求められる。 状態量 X の速力 U による偏微分を

$$X_{U} \equiv \frac{\partial X}{\partial U}$$
(3)

と表して、(2)式に  $\lambda$  を未定係数とするラグランジュ の未定係数法を適用することにより、最適速力  $U_i$  の 精密な決定方程式が (n+1) 元連立方程式として以下 の通り導かれる (精密解法)<sup>2)</sup>。

$$\{C_{h_{l}}[\alpha_{i}^{2}\left(\gamma^{*}_{U_{l}}U_{l}+2\gamma^{*}_{l}\right)l_{i} +\alpha_{i}^{3}\left\{\gamma^{*}_{U_{l}}\alpha_{i}U_{i}+2\gamma^{*}_{i}\left(1-\Delta U_{U_{l}}\right)\right\}LJ_{1_{i}}^{opt} +\gamma^{*}_{i}\alpha_{i}^{4}U_{i}LJ_{1_{U_{i}}}^{opt}] +C_{h_{U_{i}}}\gamma^{*}_{i}\alpha_{i}^{2}U_{i}\left(l_{i}+\alpha_{i}^{2}LJ_{1_{i}}^{opt}\right)\}U_{i}^{3} = (1-\Delta U_{U_{i}})l_{i}\lambda \qquad (4)$$

$$\sum \frac{l_i}{\alpha_i U_i} = \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\nu}} \tag{5}$$

 $T_v$ : 総航海時間(拘束条件)

# 3. 潮流や海流を考慮した航海最適化

#### 3.1 潮流や海流下の対地船速

実際の航海では、対水運動に加えて潮流や海流の影響を受ける。その作用を受けて設定航路上を航海する 「航路保持」のためには、針路の補正が必要になる。 Fig.2 に示す通り、潮流や海流の流速を  $v_{c_i}$ 、その流 向と設定航路の方位との偏差(流向偏差)を  $\Delta \theta_i$ とすれ ば、対地船速  $U^*_i$  および針路補正値  $\Delta \phi_i$  とこれらの状 態量の間には以下の関係式が成り立つ。

$$\boldsymbol{U}^{*}_{i} = \boldsymbol{\alpha}_{i} \boldsymbol{U}_{i} \cos \Delta \boldsymbol{\emptyset}_{i} + \boldsymbol{\nu}_{c_{i}} \cos \Delta \boldsymbol{\theta}_{i}$$
(6)

$$\Delta \phi_i = \sin^{-1} \frac{\nu_{c_i} \sin \Delta \theta_i}{\alpha_i U_i} \tag{7}$$

また、(6)式より、対水運動対応の実航程と航路要素 長の航程比 ζ<sub>i</sub>が、次式で表される。

$$\zeta_i = \frac{1}{\cos \Delta \emptyset_i + v_{c_i} \cos \Delta \theta_i / (\alpha_i U_i)} \tag{8}$$

さらに、航路要素  $\Delta \sigma_i$  に対する相対波向を  $\chi_i$  とすると、潮流や海流に対処する針路補正後の相対波向  $\chi_i^*$  が次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\chi_i}^* = \boldsymbol{\chi_i} + \Delta \boldsymbol{\emptyset_i} \tag{9}$$

以上の結果、潮流や海流下の第二評価関数(燃料消 費量)と総航海時間の拘束条件が、(2)、(5)式に替え て以下の通り導かれる。

$$J_2 = \sum \left[ \gamma_i^* C_{h_i} U_i^2 \left( \zeta_i l_i + \alpha_i^2 L J_{1_i} \right) \right]$$
(10)

$$\sum \frac{\zeta_i l_i}{\alpha_i U_i} = T_{\nu} \tag{11}$$

#### 3.2 主機出力(速力)最適化

本節では主機出力の制約条件を考慮せず、潮流や海 流下の航海最適化技術について考える。(11)式の拘束



Fig.2 潮流補正

条件の下で(10)式にラグランジュの未定係数法を適用 することによって、第二評価関数(燃料消費量)を最 小化する速力 U<sub>i</sub>の決定方程式が、次式と(11)式の (n+1)元連立方程式として導かれる。

$$\{ C_{h_{i}} [\alpha_{i}^{2} \left( \gamma^{*}_{U_{i}} U_{i} + 2\gamma_{i}^{*} \right) \zeta_{i} l_{i} \\ + \alpha_{i}^{3} \left\{ \gamma^{*}_{U_{i}} \alpha_{i} U_{i} + 2\gamma_{i}^{*} \left( 1 - \Delta U_{U_{i}} \right) \right\} L J_{1_{i}}^{opt} \\ + \gamma_{i}^{*} \alpha_{i}^{2} U_{i} \left( \alpha_{i}^{2} L J_{1_{U_{i}}}^{opt} + \zeta_{U_{i}} l_{i} \right) ] \\ + C_{h U_{i}} \gamma_{i}^{*} \alpha_{i}^{2} U_{i} \left( \zeta_{i} l_{i} + \alpha_{i}^{2} L J_{1_{i}}^{opt} \right) \} U_{i}^{3} \\ = \left\{ \left( 1 - \Delta U_{U_{i}} \right) \zeta_{i} - \alpha_{i} U_{i} \zeta_{U_{i}} \right\} l_{i} \lambda$$
(12)

荒天域では、船体が波浪による過大な外力を受けた り、それによって励起される激しい船体運動が発生す る。その結果生じる船体の損傷やデッキの冠水等の危 険を防ぐために、減速して航海するのが一般的である。 したがって、荒天時の船体運動を軽減し航海の安全を 確保するために、速力 **U**<sub>i</sub> のリミッタとして、運航限 界に関する萩原の式<sup>3)</sup>で与えられる運航限界速力 **U**<sub>noli</sub> を導入する。

$$\boldsymbol{U}_{i} = \boldsymbol{U}_{nol_{i}} \qquad \left( \boldsymbol{U}^{\#}_{i} = \boldsymbol{\alpha}_{i} \boldsymbol{U}_{i} > \boldsymbol{U}^{\#}_{nol_{i}} \right) \qquad (13)$$

$$U^{\#}_{nol_{i}} = \alpha_{nol_{i}}U_{nol_{i}} = e^{a_{v}(q_{v_{i}}-h_{i})^{*}} + r_{v_{i}}$$
(14)  

$$h_{i} : 有義波高$$
  

$$\alpha_{nol_{i}} : 運航限界速力対応の自然減速係数$$
  

$$q_{v_{i}} = a_{q} + b_{q}|\chi_{i}^{*}|^{c_{q}}$$
(15)  

$$r_{v} = a_{v} + b_{v}|\chi_{v}^{*}|^{c_{r}}$$
(16)

$$\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{v}_{i}} = \boldsymbol{a}_{r} + \boldsymbol{b}_{r} |\boldsymbol{\chi}_{i}^{*}|^{\boldsymbol{c}_{r}}$$
(16)

因みに、北沢ら<sup>4)</sup>が、造船研究協会108部会のモデ ルシップである一軸コンテナ船を対象に、船首部海水 打ち込み、横揺れ、波浪縦曲げモーメントなど7項目 について、波浪条件と船速の組合せで船体の挙動を分 析し、その上で鋼船規則などを基準とした過大な船体 応答の発現確率に基づいて安全航行の船速域を示した。 萩原の式(13)~(16)はこの研究結果の近似式である。

(10)、(11)式の ζ<sub>i</sub>、 l<sub>i</sub>と、基準航海および理想航
 海<sup>2)</sup>の船速 U<sup>#</sup><sub>i</sub>、 U<sub>i</sub>とそれぞれの航海時間 T<sup>#</sup><sub>i</sub>、 T<sub>i</sub>
 の間に以下の等価関係

$$\boldsymbol{\zeta}_{i}\boldsymbol{l}_{i} = \boldsymbol{U}^{\#}_{i}\boldsymbol{T}^{\#}_{i} = (\boldsymbol{\alpha}_{i}\boldsymbol{U}_{i})\left(\frac{T_{i}}{\boldsymbol{\alpha}_{i}}\right) = \boldsymbol{U}_{i}\boldsymbol{T}_{i}$$
(17)

が成り立つことを考慮すると、(10)式より、実航海の 主機出力 **P**<sup>\*</sup>*i* が次式の通り導かれる。

$$P^{*}{}_{i} = \frac{1}{\eta_{i}\eta_{p}} C_{h_{i}} U_{i}^{3} \left( 1 + \frac{\alpha_{i}^{2}L}{\zeta_{i}l_{i}} J_{1_{i}}^{opt} \right)$$
(18)  
$$\eta_{t} : 伝達効率 , \eta_{p} : 推進効率$$

運航限界速力 **U**noli 以下の解を求める手法には、リ ミッタの外、ペナルティ関数の導入などが考えられる が、本稿では取り扱いが容易なリミッタ法を採用する。

# 4. 主機の能力と危険回転域を考慮した航海最 適化

本章では、潮流や海流に加えて主機出力の制約と危 険回転域を考慮した航海最適化技術について考察する。 (11)、(12)式の連立方程式は、海象条件や総航海時 間の指定によっては、最適速力として、一部または全 ての航路要素で主機能力や運航限界速力超過、或いは、 危険回転域内の解を与える可能性がある。これらのケ ースではリミッタを適用して、主機出力の最適解を運 転可能域との境界値 **P**bndi</sub> に置き替える。即ち、

$$\boldsymbol{P}^*_{\ \boldsymbol{i}} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{b}\boldsymbol{n}\boldsymbol{d}\boldsymbol{i}} \tag{19}$$

但し、P<sub>bndi</sub>は、以下の通り定義する。
 (1)主機能力の限界 P<sub>mcr</sub> を超過した場合

 $\boldsymbol{P}_{bnd_i} = \boldsymbol{P}_{mcr} \qquad (\boldsymbol{P}_{mcr} < \boldsymbol{P}^*_i) \tag{20}$ 

(2)危険回転域回避を要する場合
 危険回転域の下端を P<sub>hzdL</sub>、上端を P<sub>hzdH</sub>、
 その中間値を P<sub>hzdM</sub> として、

$$P_{bnd_{i}} = \begin{cases} P_{hzdL} & (P_{hzdL} < P^{*}_{i} < P_{hzdM}) \\ P_{hzdH} & (P_{hzdM} \le P^{*}_{i} < P_{hzdH}) \end{cases}$$
(21)  
$$P_{hzdM} = \frac{P_{hzdL} + P_{hzdH}}{2}$$
(22)

$$\boldsymbol{P}_{bnd_i} = \boldsymbol{P}_{nol_i} \qquad \left( \boldsymbol{P}_{nol_i} < \boldsymbol{P}^*_i \right) \tag{23}$$

特に、Pnoliが危険回転域内にある場合は、

$$P_{bnd_i} = P_{hzdL}$$

$$(24)$$

$$(P_{nol_i} < P^*_i \quad cds) \quad P_{hzdL} < P_{nol_i} < P_{hzdH})$$

(11)、(12)式からなる(n+1)元連立方程式と(13),(19)式の組合せが、新たな決定方程式となる。

尚、未定係数 **λ** の値は(8)、(11) および(12)式を連 立させ、反復計算によって収束させる。

一方、主機出力が能力の限界に達した場合や危険回 転域の回避を要する場合の速力  $U_i$  は、 $C_{h_i}$ 、 $\alpha_i$ 、  $\zeta_i$ 、 $J_{1_i}^{opt}$  が  $U_i$  に依存することに留意して、次式 から逆算しなければならない。

$$\frac{1}{\eta_i \eta_p} C_{h_i} U_i^{\ 3} \left( 1 + \frac{\alpha_i^2 L}{\zeta_i l_i} J_{1_i}^{\ opt} \right) = P_{bnd_i} \tag{25}$$

潮流補正を伴う自然減速量および第一評価関数の速 カUによる偏微分 $\Delta U_U$ と $J_{1_U}^{opt}$ の解法を、それぞ れ付章1と付章2に示す。

因みに、リミッタの導入により、これらの方程式から導かれた速力 U<sub>i</sub> は、第二評価関数(燃料消費量) を最小化するという当初の目的に対しては、最適解で はなく準最適解となることに注意を要する。

# 5. 数値シミュレーションによる検証

#### 5.1 シミュレーションの算法

最適速力 **U**<sub>i</sub> の決定方程式(12)式は、左辺、右辺と もに **U**<sub>i</sub> に依存する非線形の方程式である。したがっ て、その求解には反復計算によって解を収束させる手 法(大域的収束計算)を採用した。

一方、大域的収束計算の各反復過程で生じる以下の 状態量や変数の求解にはニュートン法による収束計算 (局所的収束計算)を適用した。

(1) 船体抵抗係数 *C<sub>h</sub>* の計算の基礎となるシェーンヘルの式から導かれる相当平板の摩擦抵抗係数 *C<sub>f</sub>* の計算<sup>2)</sup>

Table 1 コンテナ船主要目

要素	アイテム	記号	単位	値
	船長	L	m	175.00
	船幅	В	m	25.40
船体	吃水	d	m	9.500
	排水容積	$\nabla$	m3	24,154
	ブロック係数	Съ	-	0.572
	舵面積	Ar	m2	33.0376
舵	舵高	HR	m	7.7583
	アスベクト比	λ	-	1.8219
	直径	D	m	6.533
ブロベラ	ビッチ	р		1.009
	ブレード数			5
動力系統	サービス速力	Us	$\mathbf{kt}$	22.5
	主機出力(MCR)	Pmcr	ps	27,500

(2) 運航限界速力 Unoli の計算

(3) 未定係数 **λ**の計算

(4) 主機能力の限界や運航限界速力超過の防止および危険回転域回避のために境界値 P<sub>bndi</sub> から逆算する速力 U<sub>i</sub>の計算

因みに、大域的収束計算、局所的収束計算共に、収 束判定基準は相対誤差 **10<sup>-8</sup>** 未満とした。

#### 5.2 供試船

供試船は、前出の造船研究協会108部会の一軸コ ンテナ船を基本に、データ不足は船型の指標が近い船 で補完した。代表的な主要目をTable 1に示す<sup>4),5)</sup>。

#### 5.3 航路および波浪条件

Table 2 に航海の設定条件<sup>2)</sup>を示す。航路は房総半 島沖からサンフランシスコ沖に至る北太平洋航路とし、

Table 2 航海条件

站败西事	変針角	航程	有義波高	相対波向
પ્રાા¢ેક્વ≁ે	(deg)	(ml)	(m)	(deg)
房総沖	0.0	568.0	1	150
1	6.4	500.1	4	-45
2	6.9	452.0	2	-170
3	7.2	421.0	1	80
4	7.4	405.2	3	30
5	7.4	403.3	4	120
6	7.4	415.1	5	160
7	7.3	441.6	4	-135
8	7.0	484.7	2	-90
9	2.0	447.0	3	60
S.F.冲				
計		4538.1		

波浪はビューフォート風力階級6以下を基本として、 有義波高および相対波向を均等に割り振った。

#### 5.4 潮流や海流による効果

北太平洋の海流については、「東日本大震災で流出 した瓦礫が、2~3年後に本格的に北米大陸西海岸に 漂着した」という報道を参考にして、流速が航路に沿 って西から東に平均0.2ktとした。また、航路要素 の進行方向に対する流向の偏差については、検証を容 易にするために30度(順行)を基本として海流なし の場合と比較した。

さらに、供試船が海流と逆行する場合の効果も検証 するために、流向が正反対(偏差-150度)の場合 の試算も行った。

Table 3 に数値シミュレーション結果を示す。表中 の凡例「操舵制御ゲル(k1|k2)」のk1とk2は、それ ぞれ、第一評価関数に基づいて最適化された操舵制御 の比例ゲインと微分ゲインである<sup>2)</sup>。

Table 3 シミュレーション結果(海流効果)

航海時間 設定(hr)	208.00	主機出力 最大(ps)	27500							表記法	潮流/海流 有 <b>煮</b>	燃料消費量 (t)	実航海時間 (hr)	流速 (kt)	流向偏差 (deg)
	魚	554.680	208.00	0.0	-	有 <mark>(順行)</mark>	<b>542.620</b>	208.00	0.2	30.0	有 <mark>(</mark> 逆行)	567.024	208.00	0.2	-150.0
航路要素	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ケイン
	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	<b>k</b> 2)	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	<b>k</b> 2)	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	<b>k</b> 2)
<b>房総沖(0</b> )	0.000	21364	21.81	0.196	10.232	-0.265	20888	21.64	0.196	10.314	0.261	21848	21.98	0.196	10.152
1	0.000	24270	21.87	0.200	10.189	-0.264	23755	21.68	0.200	10.277	0.260	24794	22.05	0.200	10.103
2	0.000	21467	21.81	0.196	10.231	-0.265	20990	21.64	0.196	10.313	0.261	21952	21.98	0.196	10.151
3	0.000	21379	21.81	0.196	10.232	-0.265	20903	21.64	0.196	10.314	0.261	21863	21.98	0.196	10.152
4	0.000	<b>22980</b>	21.83	0.198	10.213	-0.265	<b>22491</b>	21.65	0.199	10.297	0.260	23478	22.00	0.198	10.129
5	0.000	22189	21.81	0.197	10.224	-0.265	21705	21.64	0.197	10.307	0.261	22681	21.98	0.197	10.142
6	0.000	22723	21.82	0.198	10.217	-0.265	22232	21.64	0.198	10.301	0.260	23223	22.00	0.198	10.133
7	0.000	22148	21.81	0.197	10.224	-0.265	21662	21.64	0.197	10.307	0.261	<b>22641</b>	21.98	0.197	10.142
8	0.000	21531	21.81	0.196	10.231	-0.265	21053	21.64	0.196	10.313	0.261	22018	21.98	0.196	<b>10.150</b>
9	0.000	22398	21.81	0.198	10.221	-0.265	21917	21.64	0.198	10.304	0.261	22887	21.99	0.197	10.139
<b>S.F.冲</b> (10)						Ι					Ι				

航海時間 設定(hr)	193.00	主 <b>楼</b> 出力 最大(ps)	27500		表記法	主機能力 処理法	燃料消費量 (t)	実航海時間 <b>(hr</b> )	流速 (kt)	流向偏差 (deg)
	無制限	623.892	193.00	0.2	30.0	リミッタ法	624.041	193.00	0.2	<b>30.0</b>
航路要素	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン
	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	k2)	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	<u>k</u> 2)
房総沖(0)	-0.246	25864	23.29	0.195	9.567	-0.245	26102	23.37	0.195	9.536
1	-0.244	28979	23.47	0.199	9.479	-0.249	27500	22.99	0.199	9.683
2	-0.246	25 <b>976</b>	23.30	0.195	9.564	-0.245	26214	23.37	0.195	<b>9</b> .534
3	-0.246	25881	23.29	0.195	9.566	-0.245	26118	23.37	0.195	9.536
4	-0.245	27616	23.38	0.197	9.522	-0.245	27500	23.34	0.197	<b>9</b> .538
5	-0.246	<b>26761</b>	23.33	0.196	9.545	-0.245	27002	23.41	0.196	<b>9</b> .514
6	-0.245	27335	23.36	0.197	9.530	-0.245	27500	23.41	0.197	9.509
7	-0.246	<b>26714</b>	23.33	0.196	9.547	-0.245	26954	23.41	0.196	<b>9</b> .515
8	-0.246	26046	23.30	0.195	9.563	-0.245	26284	23.37	0.195	<b>9</b> .532
9	-0.245	26991	23.34	0.197	9.539	-0.245	27233	23.42	0.196	<b>9.508</b>
<b>S.F.沖</b> (10)						[				

Table 4 シミュレーション結果(主機能力効果)

尚、総航海時間の指定は、供試船の主機の能力や主 推進軸系の特性を考慮して208時間とした。

#### 5.5 主機能力の限界の影響

主機能力の限界を伴う航海最適化の確認のために、 主機出力無制限の場合の試算も行い、それらの効果を 比較・評価した。

尚、航路および波浪条件はTable 2 をそのまま使用 し、海流条件は 5.4 節の基本形の西から東へ流速0.2 k t、流向は航路の進行方向との偏差30度の順方向 とした。また、最適化された主機出力が一部の航路要 素で能力を超えるクリティカルな状況を創るために、 総航海時間を5.4 節より短縮し、193時間とした。

主機出力の能力限界を拘束条件として実施した数値 シミュレーションの結果を Table 4 に示す。表中、 「主機出力」欄の朱記表示は主機能力超過を示す。

また、臙脂色の表示は、主機出力が能力限界値(最

大値)であることを示す。

#### 5.6 主機の危険回転域の回避

主機の危険回転域回避の効果を確認するために、航 海時間を262時間に延長した減速航海を想定し、危 険回転域を主機出力最大 **P**mcr の41~42%<sup>6)</sup>の範 囲として主機出力無制限の場合と比較した。

シミュレーションの結果を Table 5 に示す。表中、 「主機出力」欄の赤色表示は主機出力が危険回転域内 に、また、赤紫色と紫色の表示は、それぞれ危険回転 域の上端と下端の境界上にあることを表す。

#### 5.7 運航限界の影響

荒天域における航海最適化技術の安全性を確保する 目的で導入した運航限界速力の効果を検証するために、 Table 2 の航路要素5の有義波高を6m、相対波向を 0°(正面向い波)、航海時間の指定を204時間と

航海時間 設定(hr)	262.00	主機出力 最大(ps)	27500		表記法	主機能力 処理法	燃料消費量 (t)	実航海時間 (h <del>r</del> )	流速 (kt)	流向偏差 (deg)
	無制限	378.666	262.00	0.2	30.0	リジッタ法	378.667	262.00	0.2	<b>30.0</b>
航路要素	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン
	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	k2)	(deg)	(ps)	(kt)	(k1	<b>k</b> 2)
房総沖(0)	-0.333	10746	17.20	0.198	13.033	-0.333	10762	17.21	0.198	13.026
1	-0.336	12969	17.04	0.207	13.145	-0.336	12986	17.04	0.207	13.138
2	-0.333	10822	17.20	0.198	13.037	-0.333	10838	17.20	0.198	13.030
3	-0.333	10757	17.20	0.198	13.034	-0.333	10773	17.21	0.198	13.027
4	-0.335	11972	17.10	0.203	13.096	-0.335	11989	17.11	0.203	13.089
5	-0.334	11365	17.15	0.201	13.065	-0.335	11275	17.10	0.201	13.103
6	-0.335	11770	17.11	0.202	13.086	-0.335	11787	17.12	0.202	13.079
7	-0.334	11332	17.15	0.201	13.063	-0.335	11275	17.12	0.201	13.087
8	-0.333	10870	17.19	0.199	13.039	-0.333	10886	17.20	0.199	13.032
9	-0.334	11529	17.13	0.201	13.072	-0.334	11550	17.15	0.201	13.064
<b>S.F.沖</b> (10)										

Table 5 シミュレーション結果(危険回転域回避)

航海時間		主機出力			主機能力	燃料消費量	実航海時間	流速	流向偏差
設定(hr)	204.00	最大(ps)	27500		処理法	(t)	(hr)	(kt)	(deg)
	亦社舟	8:1:41	士美油古	相計速度	リミッタ法	586.648	204.00	0.2	30.0
航路要素	支到 用	用几个玉	有我极同	11日 자기 신文 143	針路補正	主機出力	実船速	操舵制	御ゲイン
	(deg)	(ml)	(m)	(deg)	(deg)	(ps)	(kt)	<b>(k1</b>	<b>k</b> 2)
房総沖(0)	0.000	568.0	1	150	-0.252	24090	22.73	0.195	9.809
1	6.391	500.1	4	-45	-0.251	27119	22.86	0.199	9.738
2	6.877	452.0	2	-170	-0.252	<b>24198</b>	22.73	0.196	9.807
3	7.193	421.0	1	80	-0.252	24106	22.73	0.195	9.809
4	7.375	405.2	3	30	-0.251	25790	22.79	0.198	9.774
5	7.442	403.3	6	0	-0.340	18749	16.83	0.225	13.437
6	7.405	415.1	5	160	-0.252	25517	22.78	0.197	9.780
7	7.257	441.6	4	-135	-0.252	<b>24913</b>	22.75	0.197	9.794
8	6.982	484.7	2	-90	-0.252	24265	22.73	0.196	9.806
9	1.967	447.0	3	60	-0.252	25183	22.76	0.197	<b>9.788</b>
SF油(10)									

Table 6 シミュレーション結果(運航限界速力超過防止)

して数値シミュレーションを実施した。

シミュレーション結果を Table 6 に示す。表中、緑 色表示は、運航限界速力に対応した主機出力を示す。

#### 5.8 数値シミュレーション結果に対する考察

## 5.8.1 潮流または海流の影響

海流のみが作用する場合は、Table 3 より以下の合理的な結果を読み取ることができる。

- (1) 海流に対して順行の場合は、海流がない場合 に比べて主機出力が小さく抑えられる。その結 果、実船速も小さくなり、燃料消費量を約2.
   2%(約12.1トン)削減することができる。 これは、海流に乗って対地船速が大きくなるこ とが原因である。
- (2)海流に逆行する場合は、必要な対地船速を確保 するために、海流がない場合に比べてより大き な主機出力を要し、燃料消費量も約2.2% (約12.3トン)増大する。
- (3)各々の場合で適切な針路補正値が導かれるが、 各航路要素で海流データが一定であるにも拘ら ず、その値は一定ではない。これは、航路要素 毎に波浪データが異なるため自然減速が同一に はならないことが主な原因である。

以上の結果は、実航海では、本船の進行方向が海流 に対して順向の場合はそれを利用し、逆向の場合は回 避して航海することによって、燃料消費量、したがっ て、排ガスの削減が可能となることを示している。

#### 5.8.2 主機能力の限界の影響

海流に加えて主機能力の限界が拘束条件となる場合は、 Table 4 より以下の特徴を読み取ることができる。

- (1) 主機出力無制限の場合は、燃料消費量を最小化 する解が得られるが、航路要素1と4で主機出 力が能力を超えるため航海の現場に適用するこ とはできない。
- (2) リミッタを用いて主機出力を最適化した場合は、 航路要素1と4の出力が能力の限界値に抑えられ、無制限の場合に比べて、他の航路要素で主 機出力が大きくなっている。特に、航路要素6 では、主機出力が新たに能力を超えて限界値に 抑えられているが、それも含めて全体的な最適 化が行われ、かつ、定時性(総航海時間)も確 保されている。
  - (3)決定方程式やリミッタの非線形性のために、反 復計算なしでは定時性を満足する主機出力の解 を得ることができないが、大域的収束計算によ って諸条件を全て満足する解が得られている。

#### 5.8.3 主機の危険回転域の回避

- Table 5 より、以下の特徴を読み取ることができる。
- (1) 主機出力無制限の場合には、航路要素5、7、9で解が危険回転域内にある。



(2) 一方、リミッタを伴う最適化処理の結果、主 機出力が、航路要素5、7では低回転域側、航 路要素9では高回転域側の境界上に回避され、 さらに、定時性も確保されている。

#### 5.8.4 運航限界速力超過の防止

- Table 6 より、以下の特徴を読み取ることができる。
- 航路要素5で実船速が運航限界速力を超過し、
   主機出力が低く抑えられている(緑色表示)。
- (2) 主機出力の抑制と荒天域の波浪抵抗増による自 然減速によって、実船速が安全な範囲まで低減 されている(太字表示)。また、他の航路要素 で増速することにより定時性も確保されている。

#### 5.8.5 大域的収束過程

Table 4 に示す主機能力限界の制約を付した場合に、 燃料消費量および各航路要素に配分された速力が準最 適解に収束していく様子をFig.3 に示す。本図より、 与えられた諸条件の下で解が速やかに収束し、23回 の反復計算で収束判定基準に達していることが分かる。 因みに、Table 3 ~ Table 6 の全てのケースで、

12~30回の反復計算で解が収束した。

以上の結果、航海の現場では主機能力の限界や危険 回転域が存在し、また、荒天時の航海もあり得ること を考慮すると、本技術のリミッタ処理と大域的収束計 算は実航海への適用にとって必須の要件である。

## 6. まとめ

本研究では、対水運動を基礎に導いた航海最適化の 技術<sup>2)</sup>に、航海の現場で直面する

- (a) 潮流や海流への対応
- (b) 主機能力の限界と危険回転域への対処
- (c) 荒天域における運航限界速力超過の防止

という3通りの条件を付加し、対地運動を基本とする 実航海最適化のための速力の決定方程式を導いた。

一般的には、この解法は燃料消費量最小化という意 味では準最適解を与えるが、主機の能力不足への対応 や危険回転域の回避、運航限界速力超過の防止という 実航海の制約条件に対応可能で、さらに、

- (1) (20)式において、主機出力無制限(P<sub>mcr</sub> = ∞) の場合や(21)式の危険回転域がなく、かつ、速力 の最適解が運航限界速力以下でリミッタを必要と しない通常の場合には、基本となる決定方程式 (12)式が無条件で成立する。
- (2) さらに、v<sub>c</sub> = 0 とおくことにより、(12)式と
   (11)式から海流がない場合、即ち、対水運動を基礎とした決定方程式(4)式と(5)式を導くことができる。

したがって、本研究で提案した技術は、就航海域の 自然条件や主機能力の限界、荒天時の船体の危険防止 などを考慮しなければならない実航海に適用するため の最も一般化された求解の手段で、潮流や海流がない 場合や完全静水中の航海最適化問題も網羅している。

航海の現場では、荒天域を回避して航路を計画し、

主機の能力や危険回転域を考慮して総航海時間を指定 するのが通例である。したがって、多くの場合にリミ ッタが不要となって、本稿で導いた解法は、燃料消費 量最小化という本来の目的に対して最適解を与える。

最後に、数値シミュレーションで、潮流や海流の補 正機能、主機に関する制約条件や荒天時の運航限界速 力を考慮した航海最適化技術の効果を定量的に評価し、 本研究で提案した技術が、実航海における船舶の燃料 消費量、したがって、排ガス削減による海洋の大気汚 染抑制のために有効に機能することを確認した。

本技術の基礎となる海象データについては、波浪デ ータは地球規模で当日から11日先まで予報する技術 が確立しており、既に、日に4回の頻度で更新され、 オンライン配信サービスも行われている<sup>8)</sup>。一般的に 高速コンテナ船による北太平洋航路の航海は片道1週 間~10日を要するので、航海の期間中の全海域の波 浪予報最新データを入手することができる。また、大 洋の海流は季節毎に比較的安定しており、月毎のデー タがパイロットチャートでサービスされている。さら に、日付変更線以西の北太平洋では海流の1ヶ月予報 の技術も確立されており、月に3回の頻度で、更新さ れた予報データの配信をオンラインで受けることがで きる<sup>8)</sup>。

波浪は、大洋の海流に比べて変動が激しいが、本技 術を航海支援装置に組み込む際に、通信衛星などを経 由して更新データを入手した時点で、最新の現況・予 報データに基づき、再度、その位置から目的港までの 航海最適化処理を実行する機能を賦与することによっ て、海象予報の変動にも対処可能である。

# 参考文献

- 1) 技術トピックス、日本海事協会
- 金丸:船舶の航海最適化技術の精密化とオンボード 航海支援装置への適用のための処理効率化、長崎総 合科学大学紀要(2017)57巻、1号 p.45-60
- 萩原、巻島:最適航路に関する考察、日本航海学会 論文集(1980)62号 p.77-88
- 4) 北沢、黒井、高木: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)
   p. 269-276

- 5) 孫、野本:高速コンテナ船の操縦運動と横揺れの連 成挙動について、日本造船学会論文集、第150号 (1981) p. 232-244
- 6) 佐々木、高木:ディーゼル主機関の過度応答時の挙
   動について、日本博陽機関学会誌、第9号(1995-9)
   p.651-660
- 7) 塙;随想・造波抵抗論議あれこれ
- (財)気象業務支援センター ホームページ オンライン気象情報

# 付章1 潮流補正を伴う自然減速量の偏微分

潮流や海流が存在する場合は、潮流補正の結果、(9) 式と(7)式より、補正した相対波向 χ\* が針路偏差 ΔØ を介して速力 U の関数となる。

一方、自然減速量 **ΔU** は、自然減速に関する萩原の 式<sup>3)</sup>によって以下の通り与えられる<sup>2)</sup>。

$$\Delta U = m(P^*)f(h)g(\chi^*)$$
(26)

$$\boldsymbol{m}(\boldsymbol{P}^*) = \boldsymbol{a}_{\boldsymbol{m}}\boldsymbol{P}^* + \boldsymbol{b}_{\boldsymbol{m}} \tag{27}$$

$$f(h) = a_f \{ 1 - exp(b_f h^{c_f}) \}$$

$$\tag{28}$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\chi}^*) = \boldsymbol{1} - \boldsymbol{a}_{\boldsymbol{g}} \{ \boldsymbol{1} - \boldsymbol{e} \boldsymbol{x} \boldsymbol{p} (\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{g}} \boldsymbol{\chi}^{* \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{g}}}) \}$$
(29)

- **P**\* : 主機出力
- **h** : 有義波高
- χ\* : 潮流補正後の相対波向

したがって、(26)式より、自然減速係数  $\alpha$  とその 速力 U による偏微分  $\alpha_U$  が以下の通り導かれる。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha} &= \mathbf{1} - \frac{\Delta U}{U} \end{aligned} \tag{30} \\ \boldsymbol{\alpha}_{U} &= \frac{\Delta U}{U^{2}} - \frac{\Delta U_{U}}{U} = \frac{\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha} - \Delta U_{U}}{U} \end{aligned} \tag{31}$$

また、(26)式より、自然減速量の速力 U による偏 微分 **ΔU**<sub>U</sub> が次式で表され、

$$\Delta U_U = a_m P^*_U f(h) g(\chi^*) + m(P^*) f(h) g_{\chi^*}(\chi^*) \chi^*_U$$
(32)

さらに、波浪抵抗や操縦運動を伴う実航海における主 機出力 **P**\* が次式で与えられる。

$$\boldsymbol{P}^* = \frac{1}{\eta_l \eta_p} \boldsymbol{C}_h \boldsymbol{U}^3 \left( \mathbf{1} + \frac{\alpha^2 \boldsymbol{L}}{\zeta l} \boldsymbol{J}_1^{opt} \right)$$
(33)

ー般に、航路要素長 l は船体長 L より遥かに大きい。 また、数値シミュレーションによる試算の結果  $J_1^{opt}$  は  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  のオーダーとなるため、(33)式右辺の() 内第2項は第1項の「1」に比べて無視できる程小さく、 主機出力の偏微分  $P_{U}^*$  に影響する度合いは僅少と考え られる。しかしながら、本研究では無視することなく精 密な解析を試みる。即ち、

$$\boldsymbol{P}^*_{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{a}_{\boldsymbol{p}} (\boldsymbol{1} - \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{U}}) + \boldsymbol{b}_{\boldsymbol{p}}$$
(34)

$$a_p = \frac{1}{\eta_t \eta_p} \boldsymbol{C}_h \boldsymbol{U}^3 \frac{\alpha^2 L}{\zeta l} \left( \frac{a_\zeta \alpha}{\zeta} + 2 \right) \boldsymbol{J}_1^{opt}$$
(35)

$$b_{p} = \frac{1}{\eta_{t}\eta_{p}} \{ \boldsymbol{U}^{2} (\boldsymbol{C}_{h_{U}}\boldsymbol{U} + \boldsymbol{3}\boldsymbol{C}_{h}) \left( \boldsymbol{1} + \frac{\alpha^{2}L}{\zeta l} \boldsymbol{J}_{1}^{opt} \right) + \boldsymbol{C}_{h} \boldsymbol{U}^{3} \frac{\alpha^{2}L}{\zeta l} (2\boldsymbol{J}_{1}^{opt} + \boldsymbol{J}_{1u}^{opt}) \} \quad (36)$$

$$\boldsymbol{a}_{\zeta} = \frac{\cos\Delta \boldsymbol{\theta} - \sin\Delta \boldsymbol{\theta} \tan\Delta \boldsymbol{\theta}}{(\alpha U \cos\Delta \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{v}_c \cos\Delta \boldsymbol{\theta})^2} \boldsymbol{v}_c \tag{37}$$

(36)式において、船体抵抗係数  $C_h$  が摩擦抵抗係数と 剰余抵抗係数に分解され、剰余抵抗係数が一定 <sup>7)</sup>という 条件の下では、船体抵抗係数  $C_h$  の速力 U による偏微 分  $C_{hy}$  は、海水密度  $\rho$ 、速力 U、シェーンヘルの式 から求められる相当平板の摩擦抵抗係数  $C_f$  および浸水 表面積 S を用いて、次式で計算することができる <sup>2)</sup>。

$$C_{h_U} = -\frac{\rho}{2} \frac{1}{U} \frac{C_f}{1 + \frac{0.558}{2} \frac{1}{\sqrt{C_f}}} S$$
(38)

さらに、(29)式より  $g(\chi^*)$ の  $\chi^*$  による偏微分 $g_{\chi^*}(\chi^*)$ が以下の通り求められる。

$$\boldsymbol{g}_{\boldsymbol{\chi}^*}(\boldsymbol{\chi}^*) = \boldsymbol{a}_g \boldsymbol{b}_g \boldsymbol{c}_g \boldsymbol{\chi}^{*c_g - 1} \boldsymbol{e}^{\boldsymbol{b}_g \boldsymbol{\chi}^{*c_g}}$$
(39)

また、(7)、(9)式および(31)式より、相対波向 **X**\*の 速力 **U** による偏微分 **X**\*<sub>U</sub> が次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\chi}^*_{\boldsymbol{U}} = \Delta \boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{U}} = -\frac{\boldsymbol{v}_c \sin \Delta \boldsymbol{\theta}}{\cos \Delta \boldsymbol{\phi}} \cdot \frac{1 - \Delta \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{U}}}{(\boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{U})^2}$$
(40)

以上の結果、(32)、(34)、(40)式を連立して解くこと により、自然減速量の速力 U による偏微分 ΔU<sub>U</sub> を計 算することができる。

尚、付章2に示す通り、(36)式の $J_{1_U}^{opt}$ にも $\Delta U_U$ が含まれているため、この連立方程式は非線形となる。 したがって、ここでは最適速力Uの求解のための収束 計算(大域的収束計算)の過程で $\Delta U_U$ も同時に収束さ せる方法を用いた。

## 付章2. 第一評価関数の偏微分

海流がない場合、航路要素における第一評価関数の最
 適値およびその速力 U による偏微分は、始点の変針べ
 クトル x'<sub>m</sub>(0) を用いて、次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$J_{1}^{opt} = {}^{t}x'_{m}(0)P'_{m\alpha}x'_{m}(0)$$
(41)  

$$J_{1}_{U}^{opt} = J_{1\alpha}\alpha_{U} + J_{1C_{h}'}C_{h'}U + J_{1C_{\delta}'}C_{\delta'}U$$

$$= \alpha_{U} {}^{t}x'_{m}(0)P'_{m\alpha}x'_{m}(0)$$

$$+ C_{h'}U {}^{t}x'_{m}(0)P'_{mC_{h'}}x'_{m}(0)$$

$$+ C_{\delta'}U {}^{t}x'_{m}(0)P'_{mC_{\delta'}}x'_{m}(0)$$
(42)

但し、 $Q'_{m_{\alpha}}$ 、 $S'_{m_{\alpha}}$ 、 $R'_{m_{\alpha}}$ は第一評価関数の係数を行 列形式で表現した時の係数行列 $Q'_{m}$ 、 $S'_{m}$ 、 $R'_{m}$ の自然 減速係数  $\alpha$  による偏微分、また、 $P'_{m}$ は、これらの係 数行列と操縦運動に関する状態方程式の係数行列 $A'_{m}$ 、  $B'_{m}$ で構成されるリッカチの方程式

$$(P'_{m}B'_{m} + S'_{m})R'_{m}^{-1} ( {}^{t}B'_{m}P'_{m} + {}^{t}S'_{m} ) -P'_{m}A'_{m} - {}^{t}A'_{m}P'_{m} - Q'_{m} = 0$$
(43)

の解行列<sup>2)</sup>で、(41)~(43)式の各変数の「'」は無次元化 量であることを示す。

また、(42)式右辺第1項の  $\alpha_U$  は、自然減速係数  $\alpha$ の速力 U による偏微分で(31)式で与えられ、 $P'_{m_{\alpha}}$  は、以下のリアプノフの方程式の解行列として得られる<sup>2)</sup>。

$$P'_{m\alpha}A'_{f} + {}^{t}A'_{f}P'_{m\alpha} + Q'_{f} = 0$$
(44)

$$A'_f = A'_m - B'_m K'_f \tag{45}$$

$$K'_{f} = R'_{m}^{-1} \left( {}^{t}B'_{m}P'_{m} + {}^{t}S'_{m} \right)$$
(46)

$$\mathbf{Q}_{f}^{\prime} = \mathbf{Q}_{m\alpha}^{\prime} - {}^{t}K_{f}^{\prime} {}^{t}\mathbf{S}_{m\alpha}^{\prime} - \mathbf{S}_{m\alpha}^{\prime}K_{f}^{\prime} + {}^{t}K_{f}^{\prime}\mathbf{R}_{m\alpha}^{\prime}K_{f}^{\prime}$$

$$(47)$$

因みに、(42)式右辺の  $P'_{mC_h'}$  と  $P'_{mC_{\delta'}}$  についても、 (44)~(47)式において  $\alpha$  をそれぞれ  $C_h'$ 、 $C_{\delta'}$  に置き 換えることによって計算することができる。

一方、海流が存在する場合は、第一評価関数の最適値  $J_1^{opt}$ において、航路要素の始点における変針ベクトル  $x'_m(0)$ も、潮流補正値  $\Delta \phi$  を介して速力 U の関数と なる。したがって、一般的に、航路要素  $\Delta \sigma_i$  の始点で 隣接する状態量 X の差分を

$$\nabla(X) \equiv X_i - X_{i-1} \tag{48}$$

と定義すると、航路要素の始点における海流下の変針ベ クトル x'<sub>cm</sub>(0) は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{m}}}^{\prime}(\boldsymbol{0}) = \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{m}}^{\prime}(\boldsymbol{0}) + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\nabla}(\Delta \boldsymbol{\emptyset}) \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix}$$
(49)

$$\nabla(\Delta \phi) = \Delta \phi_i - \Delta \phi_{i-1} \tag{50}$$

また、(42)式に替えて、第一評価関数の偏微分  $J_{1U}^{opt}$  が 次式の通り導かれる。

$$J_{1U}^{opt} = \alpha_U {}^t x'_{cm}(0) P'_{m\alpha} x'_{cm}(0) + C_{h'U} {}^t x'_{cm}(0) P'_{mC_{h'}} x'_{cm}(0) + C_{\delta'U} {}^t x'_{cm}(0) P'_{mC_{\delta'}} x'_{cm}(0) + 2 {}^t x'_{cm}(0) P'_{m} x'_{cm}(0)$$
(51)

(49)式の x'<sub>m</sub>(0) は隣接する航路要素の方位差で、航路のみに依存し速力 U には依存しない。したがって、
 (40)式を用いることによって、(49)式から(51)式の右辺第4項の x'<sub>cm</sub>(0) が以下の通り求められる。

$$\boldsymbol{x}_{c_{\boldsymbol{m}\boldsymbol{U}}}'(\boldsymbol{0}) = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\nabla}(\Delta \boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{U}}) \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \boldsymbol{\nabla}\left(\frac{\boldsymbol{v}_{c}\sin\Delta \boldsymbol{\theta}}{\cos\Delta \boldsymbol{\phi}} \cdot \frac{1 - \Delta \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{U}}}{(\alpha \boldsymbol{U})^{2}}\right) \\ \boldsymbol{0} \end{cases}$$
(52)

以上の結果、(49)式と(52)式を(51)式右辺の最終項に 適用することにより、海流下での第一評価関数の速力 Uによる偏微分  $J_{1_U}^{opt}$  を計算することができる。但し、こ の計算には速力 U が必要となるが、速力 U の決定方 程式(12)の左辺にも  $J_{1_U}^{opt}$  が含まれているため、付章 1 と同様、その値は大域的収束計算の中で収束させる。

# 【正誤表】

ワードによる本論文の初稿作成時に(43)式に入力ミ スがあったので、以下の通り修正しました。

正	$(P'_{m}B'_{m}+S'_{m})R'_{m}^{-1}({}^{t}B'_{m}P'_{m}+{}^{t}S'_{m})$	
(現)	$-P'_mA'_m-{}^tA'_mP'_m-Q'_m=0$	(43)
誤	$(P'_{m}B'_{m}+S'_{m})R'_{m}^{-1}({}^{t}B'_{m}P'_{m}+{}^{t}S'_{m})$	
(旧)	$+P'_mA'_m+ {}^tA'_mP'_m-Q'_m=0$	(43)

尚、本件は単純な入力ミスで、数値シミュレーショ ンのプログラムは当初より正しく作成されていること を確認しました。したがって、シミュレーション結果 や本論文のまとめには影響しません。