

(昭和 50 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

被曳航 Barge の保針性能について

正員 竹川 正夫* 正員 永松 秀一**
 正員 元良 誠三***

Course Stability of Towed Large Barge

by Masao Takekawa, *Member* Syuichi Nagamatsu, *Member*
 Seizo Matora, *Member*

Summary

Course stability of towed large barge has recently become very important because of the increase of the cargo transportation by "Barge System" in harbor, channel and coastal sea which intends the high work efficiency and the decrease of man's work in the collection and delivery of cargoes. Most of existing barges have, in general, large B/d and small L/B ratio that may cause a poor stability on course. Therefore, these barges, which are often installed a pair of skegs to improve the course quality, are towed not to cause yawing motion by the bridle or two lines towing for the safe and quick towing operation.

Strandhagen et al.¹⁾, Terao²⁾, Inoue³⁾, and Bindel⁴⁾ reported the worthy theoretical works on this essential problem. These papers offer much knowledge on stability criterion of towed ship, but towing test to confirm their theories would not be reported as far as we know.

In this paper, authors discuss the following several points to clarify the validity of the above mentioned theories. The first point is the theoretical and experimental study on the quantitative difference in derivatives due to skeg section shape. Applying wing theory to skeg, the authors modified the coefficients of Strandhagen's equation of motion, and calculated the additional term of derivative, L_{β}' & L_r' (corresponding to lift coefficient in wing theory), using the results of forced yawing test (P. M. M.). These values were compared with the theoretical calculation by three dimensional wing theory and obtained an agreement in good order.

The next subject is to know the effect of skeg shapes and tow line length on course stability in towing condition. The Routh-Hurwitz's criterion was used to select the best skeg section shape and its attachment angle. In the last step, heading angle or turning rate was simulated by "Random Search Method". The simulated time histories showed a good agreement with the measured phenomena at towing test.

As a result of this work, it is verified that the theory by Strandhagen (including our modified equation) gives a good estimation of course stability of towed ship for practical usage.

1 緒 言

積荷集配作業の省力化・能率化を図ったバージ曳航方式による海上輸送が増大している今日、被曳航船の操縦性能が重要視されてきている。一般に、被曳航船は、 B/d が大きく、 L/B の小さな操縦性能の悪いものが多く、この種の船を曳航する際には、曳航索(鎖)に Bridle を用いたり、二本の索(鎖)を用いて、Yawing を起こさな

* 東京大学大学院

** 住友重機械工業(株)船舶設計部基本計画課

*** 東京大学工学部

いようにして曳航するか、または、Skeg を取り付け船自体の保針性能を改善する方法を採用する例が多い。この様に、港湾内、運河さらには沿海で曳航を安全かつ迅速に行なうことは重要な問題で、多くの研究者によって、被曳航船の安定性に関する研究がなされている。例えば、理論的に被曳航船の進路安定性を論じた有名な Strandhagen 等の研究¹⁾、曳航法の保針性能に及ぼす影響を考察した寺尾の研究²⁾、また、被曳航一隻の場合ばかりでなく、複数船舶の曳航時の問題を、曳索(鎖)の性状、曳航法、曳航水域等に関し詳細に論及している井上等の研究³⁾がある。しかし、これらの研究は進路安定性の判定問題が中心で実際に水槽で曳航試験を行ない理論の検証を試みたという報告は著者の知る限りではないように思われる。一方、Skeg の効果を論じた研究としては、主として定性的な議論で理論的取扱いが不足している様に思われるが S. Bindel⁴⁾のものなどがある。

本論文では、吃水が浅くかつ幅広な箱船に近い形状の住友重機械工業(株)設計 Lash Feeder Barge を対象船に選び、強制ヨーイング試験で操縦微係数を求め、船固有の保針性能に及ぼす Skeg の影響を調べ、次に、この決定された微係数と抵抗試験で得られた張力の一次近似としての抵抗とを用い、曳航索によって保針性能がどの様に改善されるかを、理論的及び実験的に言及している。

その際、翼理論を Skeg に応用し、Skeg の効果を定量的に把握できる様に Strandhagen の運動方程式を拡張し、微係数の形で Skeg 断面形状及び取り付け角度の影響について考察している。また、長水槽で、種々の Skeg 状態、曳航索形状に対して、曳航試験を実施し、計測結果を理論に基づいた Simulation と比較検討することにより、理論の検証を試みている。

2 被曳航 Barge の運動方程式

流れの Skeg への流入角度に比例する揚力が Skeg に発生すると仮定すれば、船体と Skeg との相互干渉係数を導入して、船体に取り付けられた Skeg 単体に働く揚力は次の様に書ける。

$$\begin{aligned} \text{Lift} &= C_l \cdot L_\beta \cdot (\delta_0 + \beta + \frac{L_{pp}}{2U} r) \\ &= C_l (L_\beta \cdot \delta + L_r \cdot r) \end{aligned} \quad (1)$$

但し、 $\delta = \delta_0 + \beta$, $L_r = L_\beta \cdot \frac{L_{pp}}{2U}$

δ_0 : 攪乱がない時の流入角度

L_β : Skeg 単体に働く揚力の比例定数

C_l : 揚力に関する船体と Skeg との相互干渉係数

L_{PP} : 船長, U : 船速

同様に、抗力も

$$\text{Drag} = C_d (D_\beta \cdot \delta + D_r \cdot r + D_0) \quad (2)$$

と仮定する。

本論文では、一対の Skeg を対称な位置に取り付けた場合を扱っているため、揚力に関しては initial な流入角度 δ_0 による部分が相殺され、また、抗力については、非定常な部分が打ち消し合う為、Skeg 付き被曳航 Barge の Sway-Yaw に関する運動方程式としては、Strandhagen の理論^{1,2,5)}を拡張して次の様に書ける。(Fig.1 参照)

$$\begin{aligned} (m^* + m_y^*) U \dot{\beta} + (2C_l \cdot L_\beta + Y_\beta) \beta + \{2C_l \cdot L_r + Y_r - (m^* + m_x^*) U\} r &= F_0^* (\lambda + \psi) \\ (I_{zz}^* + J_{zz}^*) \dot{r} + (2b \cdot C_l \cdot L_r - N_r) r + (2b \cdot C_l \cdot L_\beta - N_\beta) \beta &= -F_0^* a (\lambda + \psi) \\ ar - U\beta &= l \dot{\lambda} - U\psi \end{aligned} \quad (3)$$

但し、* は Skeg 付きを意味し、

$F_0^* = F_0 + 2C_d (D_\beta \cdot \delta_0 + D_0)$ で Skeg 付きの抵抗を示す。

Skeg の効果が、 β , r の係数を修正する項として現われてくるのが判る。

上式で、 $\lambda = \dot{\lambda} = 0$, $\psi = 0$ とおくと、先ず、直進中の船の固有の進路安定性を判断する方程式(4)が得られる(直進時の保針性と呼ぶことにする)。

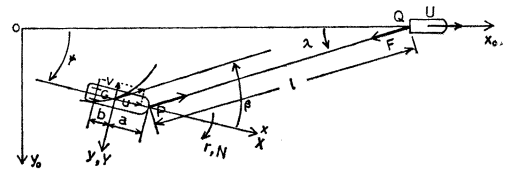


Fig. 1 Co-ordinate System

$$\frac{(I_{zz}^*+J_{zz}^*)(m^*+m_y^*)U}{N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^*} \ddot{\psi} + \frac{(I_{zz}^*+J_{zz}^*)Y_{\beta}^*-(m^*+m_y^*)U \cdot N_r^*}{N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^*} \dot{\psi} + r = 0 \quad (4)$$

但し、 $Y_{\beta}^*=Y_{\beta}+2C_L \cdot L_{\beta}$ 、 $N_{\beta}^*=N_{\beta}-2b \cdot C_L \cdot L_{\beta}$ 、 $Y_r^*=Y_r-(m^*+m_x^*)U+2C_L \cdot L_r$ 、 $N_r^*=N_r-2b \cdot C_L \cdot L_r$ 一般に、船の固有の進路安定性は二次の微係数まで考慮した操縦性指数の形で整理しているの、本論でも上式の代りに次式で考えることにする。

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1+T_2) \dot{\psi} + r = 0 \quad (5)$$

但し

$$T_1 T_2 = \frac{(m^*+m_y^*)U(I_{zz}^*+J_{zz}^*)+N_{\beta}^* \cdot Y_{\beta}^*}{N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^*}$$

$$T_1+T_2 = \frac{(I_{zz}^*+J_{zz}^*)Y_{\beta}^*-(m^*+m_y^*)UN_r^*+N_{\beta}^* \cdot Y_r^*+N_{\beta}^* \cdot Y_r^*}{N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^*}$$

進路安定である為には、上式で $T_1, T_2 > 0$ でなければならないので

$$N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^* = Y_{\beta}^*Y_r^* \left(\frac{N_{\beta}^*}{Y_{\beta}^*} - \frac{N_r^*}{Y_r^*} \right) > 0 \quad (6)$$

が必要である。

N_{β}^*/Y_{β}^* が小さく、かつ、 N_r^*/Y_r^* が大きいほど安定性は良いので、当然の事ながら Skag* に揚力が発生するほど、すなわち、 L_{β}, L_r が大きいほど進路安定となることが判る。

一方、曳航時の保針性能については、(3) 式の解を、

$$\beta = K_1 e^{\mu t}, \quad \psi = K_2 e^{\mu t}, \quad \lambda = K_3 e^{\mu t} \quad (7)$$

とすれば、次の特性方程式を得る。

$$\mu^4 + A\mu^3 + B\mu^2 + C\mu + D = 0 \quad (8)$$

但し

$$A = \frac{Y_{\beta}^*}{(m^*+m_y^*)U} - \frac{N_r^*}{I_{zz}^*+J_{zz}^*}$$

$$B = \frac{N_{\beta}^*Y_r^*-Y_{\beta}^*N_r^*}{(I_{zz}^*+J_{zz}^*)(m^*+m_y^*)U} + \frac{F_0^*}{l(I_{zz}^*+J_{zz}^*)} \left(\frac{I_{zz}^*+J_{zz}^*}{m^*+m_y^*} + a^2 + al \right)$$

$$C = \frac{F_0^*}{(m^*+m_y^*)(I_{zz}^*+J_{zz}^*)} \left[-\frac{1}{U} (N_{\beta}^*-aY_{\beta}^*) + \frac{a}{l} \{ Y_r^* + (m^*+m_y^*)U \} + \frac{a}{Ul} (aY_{\beta}^*-N_{\beta}^*) - \frac{N_r^*}{l} \right]$$

$$D = \frac{F_0^*}{(m^*+m_y^*)(I_{zz}^*+J_{zz}^*)} \cdot \frac{1}{l} \cdot (aY_{\beta}^*-N_{\beta}^*)$$

進路安定である為には、(8) 式が負の実根を持つか、複素根の場合は実数部が負でなければならないので、Routh-Hurwitz の安定判別条件を応用すると、

$$A, B, C, D > 0 \quad \text{かつ} \quad A \cdot B \cdot C - C^2 - A^2 D > 0 \quad (9)$$

上式が安定である為の条件である。また、(8) 式の根を比較すれば、Skag 状態、張力 F_0^* の着力点 a 、曳索の長さ l 等の安定の強さに及ぼす影響を知ることができる。

3 実験及び解析

前述の理論に従って保針性能を調べる為に、強制ヨーイング試験で流体微係数を、抵抗試験で張力(抵抗)を求め、理論計算を進めるとともに、長水槽で曳航試験を行ない、理論の実証を試みた。

強制ヨーイング試験は、東大本郷運動性能水槽で、曳航試験は造船技術センターの長水槽で実施した。

実験船速は $F_n=0.17$ の一種とし、強制ヨーイング試験では Skag 形状、取り付け角度による微係数の変化について、曳航試験では Skag 形状 (Skag Series)、曳索長 (l/L_{pp} Series)、曳索形状 (Bridle Series) の保針性能へ及ぼす影響を調べた。

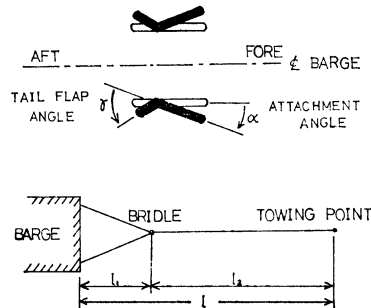


Fig. 2 Skag Section Shape and Tow Line

Table 1 Principal Dimension of Model

垂線間長 (L_{pp})	2.00m	型幅 (B)	0.61m	型吃水 (d)	0.08575m
排水量 (Δ)	87.63 kg	C_b	0.8444	C_{∞}	0.9296
C_p	0.9083	C_w	0.9855	$\overline{\overline{B}}$	$-0.242\% L_{pp}$
慣動半径 (k_{zz})	強制ヨーイング試験 $0.25 L_{pp}$		曳航試験 $0.28 L_{pp}$		

3.1 Skeg 及び曳索の呼称

Fig.2 に Skeg 及び曳索の呼称を示す。

3.2 供試模型

住友重機械工業(株)設計 Lash Feeder Barge の 1/40 木製模型を使用した。模型の主要寸法及び実験時の慣動半径 (k_{zz}) を Table 1 にまとめておく。

Table 2 Test Condition

Test Series	Bridle		Skeg	
	l/L_{pp}	l_1/L_{pp}	γ	α
Skeg Series	3.0625	0.5625	Without Skeg	
	<Standard Bridle>		0°	0°, 5°
l/L_{pp} Series	2.0			
	3.0625	0.5625	0°	0°
	4.0			
Bridle Series	3.0625	0.551	0°	0°
		1.102		
		2.755		
	3.0	0	0°, 10°	5°

3.3 実験項目

1) 強制ヨーイング試験

文献6) に詳述されている方法で、種々の Skeg 断面形状 γ , Skeg 取り付け角度 α の組合せについて (Table 3), 実験・解析を行なった。

2) 曳航試験

計画の曳航法 (Standard Bridle と称す。 $l/L_{pp}=3.0625$, $l_1/L_{pp}=0.5625$, $l_2/L_{pp}=2.50$) を中心にして、Table 2 の実験を行なった。実験の要領は、初期条件をなるべく同一にする為、初期偏位 (約 $1.5B$ 横にずらした状態) を一定にして、模型船を拘束し定速に達した時点で拘束を解いて自由にし、方位と角速度を計測する様にした。

3.4 無次元表示

解析結果は次の無次元表示で示されている。

$$\begin{aligned}
 Y_{\beta}' &= Y_{\beta}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 \right., \quad N_{\beta}' = N_{\beta}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d U^2 \right. \\
 Y_{\dot{\beta}}' &= Y_{\dot{\beta}}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d U \right., \quad N_{\dot{\beta}}' = N_{\dot{\beta}}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^3 d U \right. \\
 Y_{\gamma}' &= Y_{\gamma}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d U \right., \quad N_{\gamma}' = N_{\gamma}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^3 d U \right. \\
 Y_{\dot{\gamma}}' &= Y_{\dot{\gamma}}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^3 d \right., \quad N_{\dot{\gamma}}' = N_{\dot{\gamma}}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^4 d \right. \\
 m', m_y' &= m^*, m_y^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d \right., \quad I_{zz}', J_{zz}' = I_z^*, J_z^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^4 d \right. \\
 T_{1,2}' &= T_{1,2} / (L_{pp} / U), \quad \mu_{1,2,3,4}' = \mu_{1,2,3,4} / (U / L_{pp}) \\
 A' &= A / (U / L_{pp}), \quad B' = B / (U / L_{pp})^2, \quad C' = C / (U / L_{pp})^3, \quad D' = D / (U / L_{pp})^4 \\
 F_0' &= F_0^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp} U^2 d \right., \quad V' = l / L_{pp}, \quad l_{1,2}' = l_{1,2} / L_{pp} \\
 a' &= a / L_{pp} = 0.5 + l_1', \quad b' = b / L_{pp} \\
 L_{\beta}' &= L_{\beta}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 \right., \quad L_{\gamma}' = L_{\gamma}^* \left/ \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d U \right.
 \end{aligned}$$

4 考 察

4.1 操縦微係数と直進時の保針性

強制ヨーイング試験で得られた操縦微係数を Table 3 に示す。Added Mass は Skeg 断面形状・取り付け角

Table 3 Results of P. M. M.

Skeg Shapes	Without	$\gamma = -10^\circ$						$\gamma = 0^\circ$			$\gamma = 10^\circ$		
		$\alpha = -5^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 5^\circ$		$\alpha = -5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = -5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 5^\circ$
Derivative													
$m' + m_y'$	0.659	0.675	0.062	0.681	0.660	0.663	0.676	0.668	0.657	0.672			
Y_β'	0.271	0.463	0.453	0.415	0.472	0.467	0.424	0.496	0.490	0.445			
N_β'	0.123	0.0475	0.0475	0.0603	0.0318	0.0325	0.0521	0.0230	0.0258	0.0423			
N_β'	-0.00753	-0.0125	-0.0125	-0.0111	-0.0107	-0.0107	-0.0143	-0.00865	-0.0101	-0.0128			
$I_{zz}' + J_{zz}'$	0.0374	0.0397	0.0376	0.0376	0.0385	0.0376	0.0365	0.0361	0.0353	0.0374			
Y_r'	-0.547	-0.475	-0.470	-0.479	-0.461	-0.452	-0.475	-0.447	-0.444	-0.455			
Y_r'	0.0416	0.0377	0.0377	0.0353	0.0325	0.0284	0.0352	0.0314	0.0299	0.0198			
N_r'	-0.0180	-0.0512	-0.0553	-0.0508	-0.0577	-0.0606	-0.0514	-0.0639	-0.0640	-0.0553			
N_r'/Y_r'	0.0329	0.109	0.118	0.121	0.125	0.134	0.108	0.143	0.144	0.122			
N_β'/Y_β'	0.453	0.103	0.105	0.145	0.0674	0.0696	0.123	0.0465	0.0528	0.095			
$Y_r' Y_\beta' [N_\beta'/Y_\beta' - N_r'/Y_r']$	-0.623	0.00147	0.00277	-0.00492	0.0126	0.0136	-0.00292	0.0214	0.0199	0.00537			
m_y'/m'	0.291	0.321	0.295	0.333	0.292	0.298	0.323	0.307	0.287	0.315			
J_{zz}'/I_{zz}'	0.180	0.251	0.185	0.186	0.216	0.185	0.152	0.138	0.113	0.181			
T_1'	-0.923	52.6	22.1	-7.80	4.51	4.24	-20.3	2.62	2.84	10.8			
T_2'	0.422	0.437	0.406	0.414	0.442	0.427	0.403	0.425	0.405	0.428			

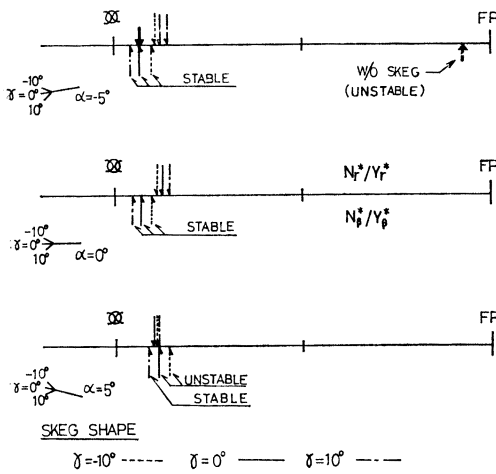


Fig. 3 N_{β}^*/Y_{β}^* , $N_{\gamma}^*/Y_{\gamma}^*$

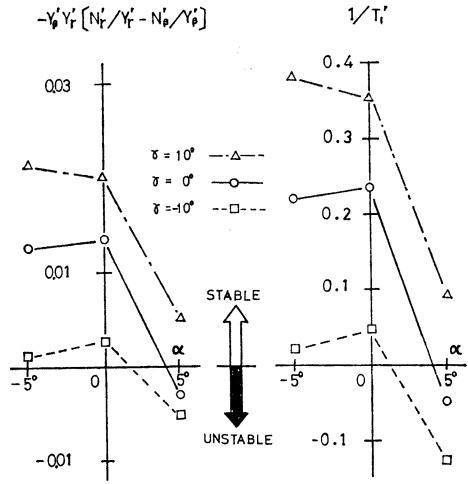


Fig. 4 Stability Criterion and Stability Index

Table 4 Comparison of Derivatives (*: from Ref. 6)

Derivative	Ship Series 60 ($C_b=0.80^*$)	Barge (w/o Skew)	Barge (With Skew $\gamma=10^\circ, \alpha=0^\circ$)
Y_{β}'	0.354	0.271	0.490
Y_{γ}'	-0.156	-0.547	-0.444
N_{β}'	0.0864	0.123	0.0758
N_{γ}'	-0.0601	-0.0180	-0.0640
N_{γ}'/Y_{γ}'	0.385	0.0329	0.144
N_{β}'/Y_{β}'	0.244	0.453	0.0528

Stability Criterion と Stability Index を示した。但し、ここでは Stability Index T_1', T_2' のうち大きな値、言い換えるならば、不安定側の値を T_1' として採用している。同図から言えることは、 $\gamma=10^\circ$ の Skew 形状の場合が最も保針性能上好いが、 $\alpha=5^\circ$ の様に流れが Skew に対して小さな角度になると性能は劣ってくること、及び、Skew の取り付け角度を Center Line に対して内側 ($\alpha < 0$) にとっても Skew の効果は余り期待できず、また、抵抗が増す欠点を考え合せると、Center Line にはほぼ平行に Skew を取り付けることが望ましいと判断される。

ところで、本論文で対象にした大型 Barge と Series 60 ($C_b=0.80$) の微係数の相違を比較した Table 4 を

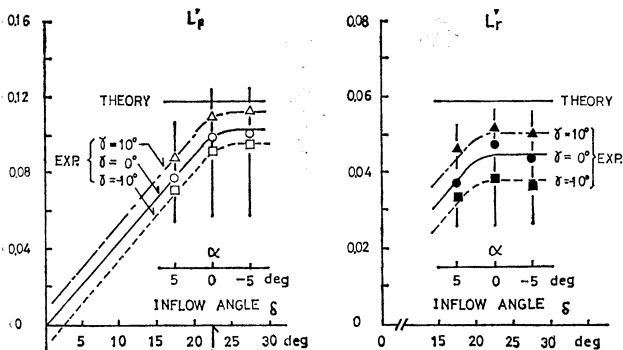


Fig. 5 Coefficient L_{β}', L_{γ}'

度の影響を余り受けず Skew なしの場合とはほぼ等しく 30% 程度である。一方、Added Mass Moment of Inertia の方は Skew によって変化が見られるが 20% 程度である。Fig. 3 には、横流れ抵抗力及び旋回抵抗力の着力点の変動を示した。Skew なしの場合、非常に進路不安定であったものが、Skew を付けることにより、安定化の方向に着力点が移動し、 $\alpha=5^\circ$ で取り付けた $\gamma=0^\circ, -10^\circ$ の二種を除いて他は全て安定である。この様に Skew を取り付けることにより保針性能が著しく改善されることが判る。Fig. 4 には、さらに具体的に安定の強さを、すなわち、直進時の

を見ると、Skew なしの Barge がいかに進路不安定か、また、Skew 付き Barge の安定性がどの程度か理解されよう。

次に、著者の修正した運動方程式中の微係数 L_{β}', L_{γ}' 及び着力点 b' を Table 3 の数値を用いて求めてみる。(3) 式中の $Y_{\beta}, N_{\beta}, Y_{\gamma}-(m+m_x)U, N_{\gamma}$ が Skew なしの場合の微係数であるから Skew 付きの場合の微係数 $Y_{\beta}^*, N_{\beta}^*, Y_{\gamma}^*, N_{\gamma}^*$ との差から、船体と Skew との相互干渉を無視するなら ($C_l=1$ とする)、 L_{β}, L_{γ} は

$$\begin{cases} L_{\beta} = (Y_{\beta}^* - Y_{\beta})/2 \\ L_r = \{Y_r^* - Y_r + (m + m_x)U\}/2 \end{cases} \quad (10)$$

着力点 b は

$$b = (N_{\beta} - N_{\beta}^*)/2L_{\beta} \text{ or } (N_r - N_r^*)/2L_r \quad (11)$$

となる。

(10) 式より計算した定常流れの中に置かれた有限翼の揚力係数に対応する係数 L_{β}' , L_r' を Fig. 5 に示したが、 $-5^{\circ} \leq \alpha \leq 0^{\circ}$ では L_{β}' がほぼ一定であるから揚力は流入角度に比例すると言えるが、 $0^{\circ} \leq \alpha \leq 5^{\circ}$ では、流入角度の 2 乗に比例している様に推察される。そこで、縦横比の非常に小さな翼の揚力は流入角度の 2 乗に比例すること、及び、 $r = \pm 10^{\circ}$ の Skeg はフラップ付きの翼に相当することを考慮しながら、試みに攪乱のない場合の流入角度 δ_0 を推定すると $\delta_0 = 22.5^{\circ}$ となった。また、平板状 Skeg を投影面積の等しい矩形翼と看做し線型三次元翼理論により計算した揚力係数と比較して見ると、理論値は実験値より大きいオーダーの一致をみた(計算の際の縦横比は 1.046, 流入速度は 0.753 m/sec (船速) である)。

同図で見られる差は、視点を変え、 L_{β}' は一定だが船体と Skeg との相互干渉によるものと考え、 $\delta = 25^{\circ}$ 付近で $r = 0$ の Skeg の場合、干渉係数 C_i は 0.85 程度になる。すなわち、 L_{β}' が大きい程、保針性能は良いことから、適切な位置に Skeg を取り付けること 15% 程度の Skeg と船体との相互干渉による性能低下ですむことになる。次に、Fig. 6 の着力点 b' を見ると、パラッキは大きいものの Skeg の 1/4 chord を中心に点在しており、ほぼ妥当な値であるといえよう。

以上のことから、著者が拡張した Skeg 付き被曳航 Barge の運動方程式は微小攪乱の範囲で正しいことが確認されると同時に有限翼理論で L_{β}' を計算すれば船体との干渉を適当に考慮することにより Skeg なしの場合の流体微係数を用いて Skeg を取り付けた時の保針性能の概略を推定できると考えられる。また、具体例として、本論文で扱った Skeg 形状のうちでは Fig. 5 から判断すると $r = 10^{\circ}$ のような Skeg をほぼ Center Line に平行に取り付けることが最良であると結論される。

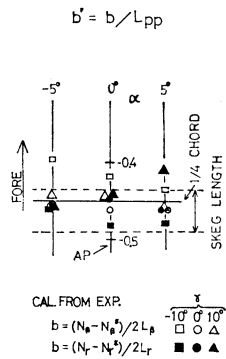


Fig. 6 Lever b'

4.2 被曳航時の保針性と運動の Simulation

前節で述べた微係数と抵抗試験結果とを使い Routh-Hurwitz の安定判別式及び特性方程式の解を求め、曳航試験結果と比較しながら、被曳航時の保針性について考察する。ここで、曳索として Bridle を用いている場合には、寺尾の仮定²⁾に基づいて、Fig. 1 の P 点が単に Bridle の所に移動したものと計算したこと、また、実験では Standard Bridle として $l' = 3.0625$ ($l_1' = 0.5625$, $l_2' = 2.50$) を基準にしているが、計算の方は $l' = 3.0$ としているので、 l_1' (or l_2') が実験とは若干異なっていることを付記する。

まず、Skeg なしの場合、理論計算ではいかなる曳航法を採用しても進路不安定であり、また、曳航試験でもごくわずかは攪乱で運動が発散してしまった (Fig. 7-(a) 参照)。一方、Skeg 付きの場合、計画の曳航法に対して Routh-Hurwitz の安定判別式を調べたところ、全て進路安定であることが判明した。Fig. 7-(a) に、 $r = 0^{\circ}$

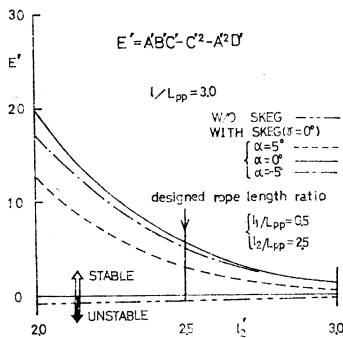


Fig. 7-(a) Effect of Tow Line Length on Stability (α series)

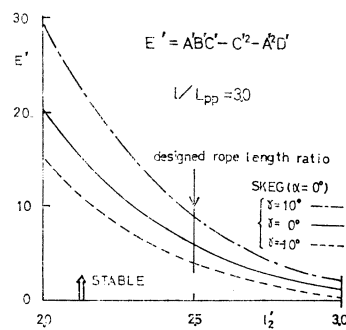


Fig. 7-(b) Effect of Tow Line Length on Stability (r series)

Table 5 Solution of Eq. (8)

Skeg & Rope	S. Bridle $l/l_p=3.0 \alpha=0^\circ$		
	$r=-10^\circ$	$r=0$	$r=10^\circ$
μ_1'	$-0.345+0.857 i$	$-0.545+0.841 i$	$-0.565+0.265 i$
μ_2'	$-0.345-0.857 i$	$-0.545-0.841 i$	$-0.565-0.265 i$
μ_3'	-0.428	$-0.613+0.166 i$	$-0.714+0.826 i$
μ_4'	-1.037	$-0.613-0.166 i$	$-0.714-0.826 i$

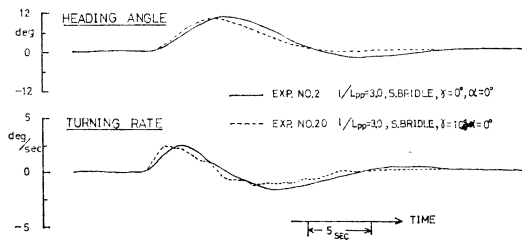


Fig. 8 Samples of Towing Test

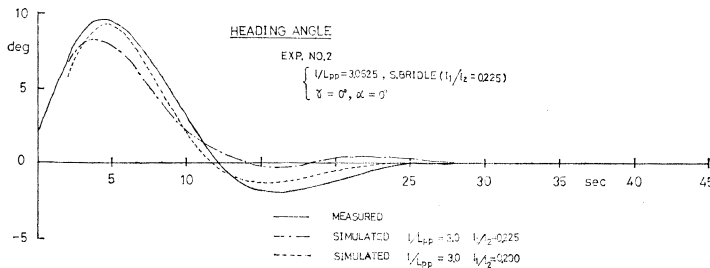


Fig. 9 Simulation of Heading Angle
(Standard Tow Line, Skeg ($r=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$))

果と比較してみる。ただし、Table 2 に示した様に種々の曳航試験を実施しているが、ここは、二、三の例を示すにとどめる。

計画曳航法による実験例を Fig. 8 に示したが、 $r=0^\circ$ と $r=10^\circ$ とでは余り差が見られなかった。Fig. 9 には、Fig. 8 の Exp. No.2 の方位について Random Search 法による Simulation の結果と実測値を比較して示してある。ここでいう Simulation は、例えば、安定な場合の方位角が特性方程式の根を用いて

$$\psi_c(t) = A_1 e^{-\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \epsilon_1) + A_2 e^{-\sigma_2 t} \sin(\omega_2 t + \epsilon_2) \quad (12)$$

または

$$\psi_c(t) = A_1 e^{-\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \epsilon_1) + A_2 e^{-\sigma_2 t} + A_3 e^{-\sigma_3 t} \quad (13)$$

と書けるので、曳航試験で測定された方位角 $\psi_m(t)$ と計算値 $\psi_c(t)$ との差の 2 乗積分 I

$$I = \int_0^T (\psi_m(t) - \psi_c(t))^2 dt \quad (14)$$

を最小にする様な振幅と位相を持つ time history $\psi_c(t)$ を Random Search 法で決めることを指している。

計画 Bridle ($l_1/l_2=0.225$) と $l_1/l_2=0.20$ の場合を比べると、 $l_1/l_2=0.20$ の方が実測値に近いが、寺尾の仮定に基づく計算の為、計画 Bridle が安全側であることは当然といえよう。ここで解析精度を確認する意味から、 $l_1/l_2=0.20$ の場合について、方位と角速度との関係を用い Simulation の結果を検討してみる。方位が (12) 式の様仮定されているから (Table 5 を参照)、角速度は

Skeg に対し取り付け角度による相違を示したが、計画の曳航法では、 $\alpha=0^\circ$ と $\alpha=-5^\circ$ では大差ないものの、 $\alpha=5^\circ$ とすると保針性能が悪化するといえる。同図-(b) には、 r の影響を知る為に、 $\alpha=0^\circ$ に対する Skeg 断面形状による変化が比較されている。 $r=10^\circ$ が一番良いことがわかる。

計画の曳航法に対する $\alpha=0^\circ$ の時の各 Skeg 断面形状について、特性方程式の根を求めてみると Table 5 の様になり、不安定側の根の実数部を比較すれば、やはり、 $r=10^\circ$ の Skeg が最良であるといえる。ここで、直進時の結論と比較すると、両者の結論には矛盾はなく、 $r=10^\circ$ のような形状の Skeg を Center Line にほぼ平行に ($\alpha=0^\circ$) 取り付けると良いことが再確認された。

次に、今まで述べてきた理論計算結果の妥当性を検証する為に長水槽で行なった曳航試験結

$$r_c(t) = \frac{d\psi_c}{dt} = A_1\sqrt{\sigma_1^2 + \omega_1^2}e^{-\sigma_1 t} \sin\left(\omega_1 t + \varepsilon_1 + \Omega_1 + \frac{\pi}{2}\right) + A_2\sqrt{\sigma_2^2 + \omega_2^2}e^{-\sigma_2 t} \sin\left(\omega_2 t + \varepsilon_2 + \Omega_2 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

但し $\Omega_1 = \tan^{-1}(\sigma_1/\omega_1)$, $\Omega_2 = \tan^{-1}(\sigma_2/\omega_2)$

となり, 方位の Simulation での諸変数は

$$\begin{cases} A_1 = 14.6, & \sigma_1 = 0.231, & \omega_1 = 0.0627, & \varepsilon_1 = 160^\circ \\ A_2 = 16.4, & \sigma_2 = 0.205, & \omega_2 = 0.317, & \varepsilon_2 = 4^\circ \end{cases}$$

であったから (Fig. 9 の破線に対応), 角速度の振幅と位相は

$$\begin{cases} A_1' = A_1\sqrt{\sigma_1^2 + \omega_1^2} = 3.48, & \varepsilon_1' = \varepsilon_1 + \Omega_1 + 90^\circ = 325^\circ \\ A_2' = A_2\sqrt{\sigma_2^2 + \omega_2^2} = 6.20, & \varepsilon_2' = \varepsilon_2 + \Omega_2 + 90^\circ = 127^\circ \end{cases}$$

また, 直接の解析では

$$\begin{cases} A_1' = 3.32, & \varepsilon_1' = 299^\circ \\ A_2' = 4.84, & \varepsilon_2' = 109^\circ \end{cases}$$

であった。両者の値を比較すると, Random Search 法という解析の方法から見て良く一致している方ではないかと考えられる。

別の例として, Single Line で曳航される場合を取り上げる。元来, 運動方程式は Single Line による曳航について立てられているので理論の検証としては最適な例である。Fig. 10, 11 に, 直進時には不安定であるが被曳航時にはかろうじて進路安定である Skeg 断面形状 ($\tau=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$) について, Simulation したものを示す。理論計算の減衰率がやや大きく安全側を予測しているものの, 実測値と良く一致しているといえるであろう。本例の数学モデルは

$$\begin{aligned} \psi_c(t) &= A_1 e^{-\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \varepsilon_1) + A_2 e^{-\sigma_2 t} + A_3 e^{-\sigma_3 t} \\ r_c(t) &= A_1 \sqrt{\sigma_1^2 + \omega_1^2} e^{-\sigma_1 t} \sin\left(\omega_1 t + \varepsilon_1 + \Omega_1 + \frac{\pi}{2}\right) + (-\sigma_2 A_2) e^{-\sigma_2 t} + (-\sigma_3 A_3) e^{-\sigma_3 t} \\ &\equiv A_1' e^{-\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \varepsilon_1') + A_2' e^{-\sigma_2 t} + A_3' e^{-\sigma_3 t} \end{aligned} \quad (16)$$

であり, 方位の変数は

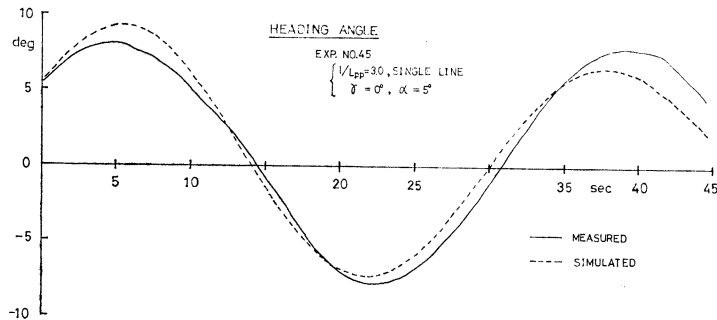


Fig. 10 Simulation of Heading Angle (Single Tow Line, Skeg ($\tau=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$))

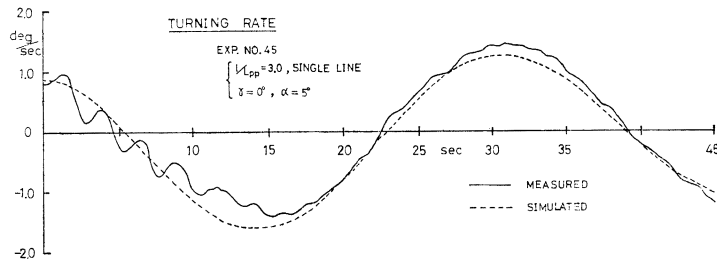


Fig. 11 Simulation of Turning Rate (Single Tow Line, Skeg ($\tau=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$))

Table 6 Comparison of Period

Test Condition		Period (sec)	
Tow Line	Skeg	Measured	Theory
S. Bridle $l/L_{pp}=3.0625$	$\gamma=0^\circ, \alpha=5^\circ$	20.2	20.9
"	$\gamma=10^\circ, \alpha=5^\circ$	18.1	19.3
Single Line $l/L_{pp}=3.0$	$\gamma=0^\circ, \alpha=5^\circ$	34.0	32.3
"	$\gamma=10^\circ, \alpha=5^\circ$	32.2	33.2

$$\begin{cases} A_1=9.19, & \sigma_1=0.0903, & \omega_1=0.194, & \epsilon_1=358^\circ \\ A_2=1.26, & \sigma_2=0.102, & A_3=3.66, & \sigma_3=0.646 \end{cases}$$

角速度の計算値は

$$A_1'=1.75, \quad A_2'=-0.100, \quad A_3'=-0.470, \quad \epsilon_1'=118^\circ$$

角速度の解析値は

$$A_1'=1.67, \quad A_2'=-0.685, \quad A_3'=-0.064, \quad \epsilon_1'=105^\circ$$

であった。 A_2', A_3' の計算値は解析値と全く合っていないが、 σ_2, σ_3 が、 σ_1 よりオーダー違いで大きいこと、及び、 A_1' に比べ両者ともオーダー違いで小さいことを考えると、time history に及ぼす影響は非常に小さい。 A_1' と ϵ_1' については、両者良く一致しているので、これら両解析の変数は Random Search 法の許容範囲内で十分正しいものと判断できる。

ところで、現象が(16)式の様な周期項を一個もつ場合には実測 time history から周期が求められるので、理論値と比較してみたものが Table 6 である。その値を見ると、非常に良い一致を示しており、Strandhagen の計算モデルは十分妥当なものであると結論される。

以上の考察から、被曳航時の保針性能は Strandhagen の理論で推定可能であり、また、Bridle を使用する時には、寺尾の仮定を用いて計算すれば安全側を推定するものの誤りは犯さないとと言える。

5 結 論

被曳航 Barge の保針性能について、理論及び実験の両面から考察してきたが、本研究で得られた結論を再度列挙すると以下の様になる。

1. Strandhagen 等による理論は、被曳航船の運動を十分説明することが実証された。また、Skeg の効果を加味した修正運動方程式も妥当であり、三次元翼理論を用いると Skeg の保針性能に及ぼす影響の大略を推定できる。

2. 減衰する現象の Simulation が Random Search 法で可能な事を示した。

3. 本研究で対象とした Skeg のうちでは、 $\gamma=10^\circ$ の様な外側に折れ曲った Skeg を Center Line にほぼ平行に取り付けるのが最も良い。

最後に、Random Search 法をお教えいただいた小山健夫東大船舶工学科助教授、三次元翼理論による揚力係数の計算をしてくださった船研の右近良孝氏、多忙な日程のなかを本実験の為に水槽使用の便宜を図っていただきました造船技術センターの関係者各位、実験を担当していただいた東大運動性能研究室の伊田力助手ほか多数の皆様から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. G. Strandhagen et al. : The Dynamic Stability on Course of Towed Snips, S. N. A. M. E., 1950.
- 2) 寺尾 進 : 被曳船の進路安定, 海上保安大学校研究報告, 第 18 卷, 第 1 号, 昭和 47 年 (1972).
- 3) 井上正祐, 林 承治 : 被曳船の進路安定, 西部造船会々報, 第 42, 43, 44, 46 号.
- 4) S. Bindel : Course Stability of Towed Vessels, ASSO Technique Maritime et A'eronautique, May, 1962.
- 5) 並川俊一郎 : 曳航バージの運動に関する考察, 東大船舶修士論文, 昭和 46 年 (1971).
- 6) 第 2 回操縦性シンポジウム