

PS-3 プロペラ逆転時の操舵の影響を考慮するための数学モデルの研究

流体性能評価系 北川 泰士、*塚田 吉昭、宮崎 英樹

1. 緒言

緊急回避のための危急停止操船を行う場合、固定ピッチプロペラ装備船ではプロペラを逆回転させて後進力を得る。一方、プロペラ逆転時は舵効きが低下することが過去の研究より明らかとなっており、プロペラ逆転時の操縦運動を検討する際は舵力の影響は無視されることが通例である。

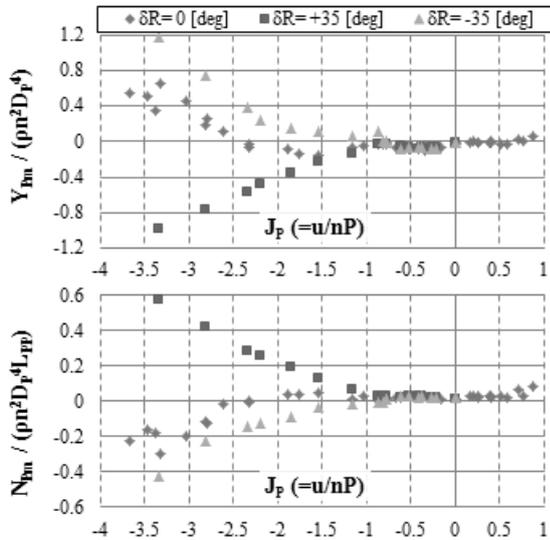


図-1 プロペラ逆転時不平衡流体力の計測値

ここで、図1はプロペラ逆転を伴う直進曳航拘束模型試験の結果であり、逆転流によって生じる横・回頭方向の不平衡流体力 Y を操舵角ごとに示している。横軸の J_p はプロペラ作動状況を表す変数であり、船速と回転数・プロペラピッチの積の比で示される。回転数とプロペラピッチの積はプロペラ逆転流の流速と概ね等価であるため、 J_p は船速とプロペラ逆転流の大小関係を示す変数と言える。ここで、 J_p が-1より大きい領域では不平衡流体力の挙動は操舵量に関わらず同じであり、 J_p の定義よりこの領域では船速よりもプロペラ逆転流が支配的であると言える。一方、 J_p が-1より小さい領域では操舵の方向に有意に流体力が発生している。この領域では逆転流よりも船速成分が支配的であり、本結果より逆転時においてもプロペラの作動状況によっては舵力が船体運動に与える影響が決して無視できない事が分かる。

そこで本研究では、船舶の操縦運動数学モデルとして実績の多いMMGモデルの外力項として、プロペラ逆転時の舵力および舵力の評価に必要なプロペラ力の数学モデルを提案した。そして、提案したモデルを用いて危急停止操船状態の試算を実施し、操舵が航跡に影響を与える例を示す²⁾。

2. プロペラ力・舵力の数学モデル

2.1 対象船

本研究の対象船2隻を表-1に示す。2隻はそれぞれタンカー船型、バルクキャリア船型である。タンカー船型はベンチマーク船型として多くの研究例があるKVLCCであり、バルクキャリア船型はパナマックスサイズである。

この2隻を対象に数学モデル検討のための拘束模型試験を実施し流体力を計測した。模型船は直進状態で前進方向に曳航し、舵角は±35度を取り、幅広い逆転回転数と船速の組合せで試験を行っている

表-1 供試船2隻の主要目

	Ship A (Tanker)		Ship B (Bulk Carrier)	
	Ship	Model	Ship	Model
Scale	Ship	Model	Ship	Model
L_{pp} [m]	320	2.909	217	4.585
B [m]	58.0	0.527	32.26	0.682
d [m]	20.8	0.189	12.2	0.258
C_b	0.810		0.840	
D_p [m]	9.86	0.090	7.1	0.150
P (0.7R)/D	0.7212		0.8436	
A_R [m ²]	112.3	0.0093	80.50	0.0359
H_R [m]	15.8	0.1437	9.00	0.1901

2.2 プロペラ有効推力のモデル

$$\begin{cases} X_p = (1-t_p)T \\ T = \rho n^2 D_p^4 \cdot K_T [J] \\ J = u(1-w_p)/nD_p \end{cases} \quad (1)$$

(1)式のようにプロペラ正転時と同様の表現で逆転時のプロペラ有効推力を検討する。ここでは推力減少係数 $1-t_p$ とプロペラ有効伴流率 $1-w_p$ についてモデリングを検討する。

2.2.1 推力減少係数

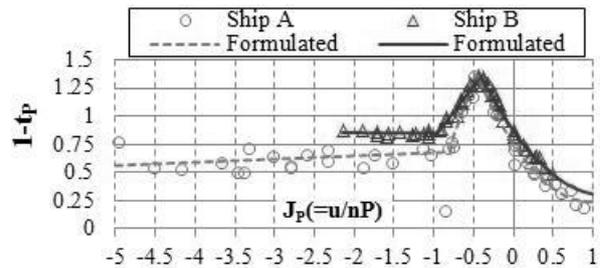


図-2 推力減少係数 計測値と提案モデルによる予測値

プロペラ逆転時の推力減少係数を図2に示す。 J_p が-1より負の領域では線形的な挙動であるが、正の領域では複雑な挙動が確認できる。ただし、2船とも定量的に同様な挙動であるため、本検討では図中の予測線のように J_p の領域に応じて線形近似等を組み合わせてモデル化を行った。

2. 2. 2 プロペラ有効伴流率

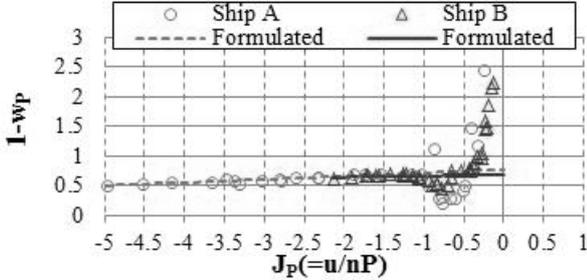


図-3 有効伴流率 計測値と提案モデルによる予測値

プロペラ逆転時のプロペラ有効伴流率を図3に示す。推力減少係数と同様に J_p が-1より正の領域で複雑な挙動となった。本点の考察は参考文献²⁾に委ねるが、図中に示す予測線のように J_p が-1より負の領域の試験結果を用いた線形近似によるモデル化を行えば結果としてプロペラ推力を精度良く推定できることが分かった。

2. 3 舵力モデル

$$\begin{cases} X_R = -(1-t_R)F_N \cdot \sin \delta \\ Y_R = -(1+a_H)F_N \cdot \cos \delta \\ N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (2)$$

プロペラ有効推力と同様、プロペラ正転時と同じ表現で逆転時の舵力数学モデルを検討する。舵力を予測するには舵への有効流入速度を予測する必要があるが、舵位置の流場は船体後方からのプロペラ逆転流成分と前方からの船速成分が混在するためこれらを合理的に考慮しなければならない。

$$\begin{cases} u_R = \text{sgn}(u_{Rsq}) \cdot \sqrt{|u_{Rsq}|} \\ u_{Rsq} = \eta \cdot \text{sgn}(u_{RPR1}) \cdot u_{RPR1}^2 + (1-\eta) \cdot u_{RPR2}^2 + C_{PR} \cdot u^2 \\ u_{RPR1} = u(1-w_R) + nD_P k_{x,PR} \sqrt{-8K_T/\pi} \\ u_{RPR2} = u(1-w_R) \end{cases} \quad (3)$$

(3)式はプロペラ運動量理論を応用したプロペラ逆転時の舵の前後方向有効流入速度の提案式²⁾である。船速が正の状態を対象としていて、 u_{RPR2} はプロペラ面外の流速、 u_{RPR1} は逆転流も考慮したプロペラ面内の流速を示す。ここで、 u_{RPR1} 中の逆転流の考慮は停止状態を前提としているが、係数 C_{PR} は船速が有る状態を推定するための実用的な補正処理を意味する。また、逆転流によって有効流速が後方から発生することも想定し、 sign 関数を用いて流速の方向を便宜的に考慮できるようにした。この提案式で推定された舵直圧力は水槽試験で計測された傾向に従うことを確認している。

3. 危急停止操船の操舵影響評価

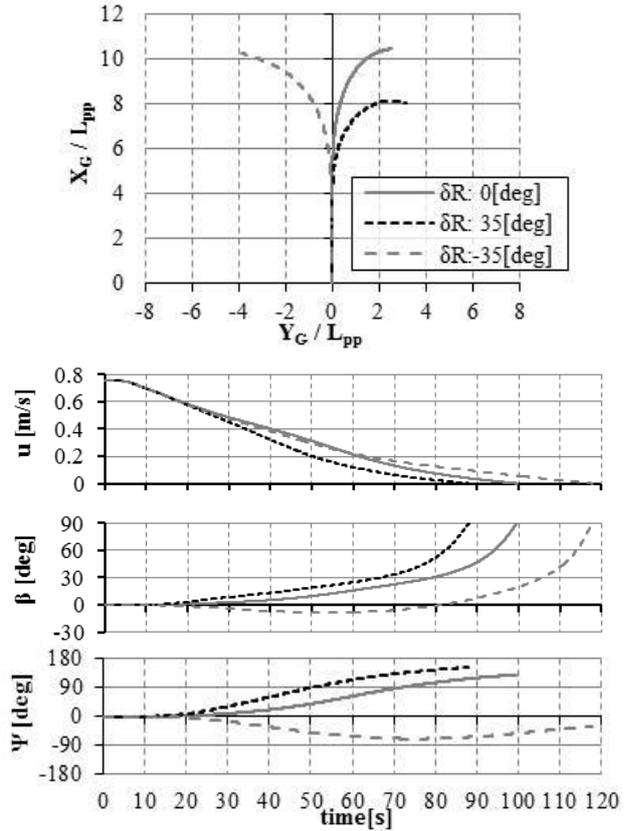


図-4 危急停止操船の予測計算（航跡と時系列）

図4は2項で提案した数学モデルを用いた”ShipA”の模型尺度における危急停止操船の予測計算結果である。上から、船体重心の航跡、前後方向船速・斜航角・回頭角の時系列である。船体は設計速力相当で直進航走し、その状態からプロペラ逆転や操舵を行う。プロペラ回転の操作は計算開始から3秒後に実船相当の速度で回転数を低下させ、そのまま正転時回転数の半分の値まで逆転させる。操舵はプロペラが正転から逆転に至った直後に実船相当速度でそれぞれ ± 35 度の操作を行った。計算は前後方向船速が0になるまで行った。

計算結果より、舵角が0度の場合でも航跡が右に逸れるのは逆転時の不平衡流体力に因るが、操舵を伴う場合は操舵した方向に針路が変更されていることが確認できる。また、船速が0に至るまでに必要な時間も操舵によって異なることもわかる。以上より、提案した数学モデルを用いれば操舵の影響を考慮したプロペラ逆転時の船体運動の検討が可能となる。これは安全運航の観点から有意義であると言える。

参考文献

- 1) 例えば、藤野正隆、切田篤：プロペラ逆転による制動時の船の操縦性について（第一報）、関西造船協会誌、第169号、1978、pp.57-70
- 2) 北川泰士、塚田吉昭、宮崎英樹：プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第20号、2015、pp.117-120