

25 二重反転プロペラを装備した船体周りの流場計算

スーパーエコシッププロジェクトチーム *大橋 訓英、日野 孝則
CFD 研究開発センター 平田 信行

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う温暖化ガス削減のため、船舶においても高効率推進法が必要とされている。多々ある高効率推進法のなかでも、二重反転プロペラは高効率を達成することができる有望な推進法の1つである。二重反転プロペラについては、これまでに研究が行われてきたが、揚力線理論及び揚力面理論に基づくものであった [1]。

一方で、CFD(Computational Fluid Dynamics) は、設計段階で使われる等、広く使われるようになった。CFD により、船の推進性能を推定するには、プロペラをモデル化する必要があるが、簡単にプロペラ影響を表す方法として、体積力分布を用いる方法がある [2][3]。ここでは、CFD により二重反転プロペラ (Contrarotating Propellers) を装備した船体周りの流場計算を行う。二重反転プロペラは体積力分布を用いて表し、推力減少率等を実験結果と比較する。

2. 数値計算法

今回使用した CFD コードは NEPTUNE であり、詳細は文献 [4] に譲る。

支配方程式は非圧縮性 Navier-Stokes の式で、プロペラを体積力分布で表すと以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{e} + \mathbf{e}_v)}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{f} + \mathbf{f}_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{g} + \mathbf{g}_v)}{\partial z} + \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

ここで、 x, y, z は Cartesian 座標系で、 $\mathbf{q} = [p, u, v, w]^T$ 、 $(\mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g})$ 、 $(\mathbf{e}_v, \mathbf{g}_v, \mathbf{f}_v)$ は移流項、粘性項を表す。 \mathbf{H} は体積力項であり、 $[0, -fb_x, -fb_y, -fb_z]^T$ で表される。

プロペラを表す体積力分布は Hough-Ordway の式 [2] より

$$fb_x = A_x r^* \sqrt{1 - r^*} \quad (2)$$

$$fb_y = fb_\theta \sin\phi, fb_z = -fb_\theta \cos\phi \quad (3)$$

$$fb_\theta = A_\theta \frac{r^* \sqrt{1 - r^*}}{(1 - Y_h)r^* + Y_h} \quad (4)$$

ここで

$$A_x = \frac{C_T}{\Delta x} \frac{105}{16(4 + 3Y_h)(1 - Y_h)} \quad (5)$$

$$A_\theta = \frac{K_Q}{\Delta x J^2} \frac{105}{\pi(4 + 3Y_h)(1 - Y_h)} \quad (6)$$

$$r^* = \frac{Y - Y_h}{1 - Y_h}, Y_h = \frac{R_b}{R_p}, Y = \frac{R}{R_p} \quad (7)$$

ϕ ; 任意角度 (図-1 参照), C_T ; 推力係数
 K_Q ; トルク係数, R ; 任意半径
 J ; 前進係数, R_p ; プロペラ半径
 R_b ; ハブ半径, Δx ; 計算格子間隔
で与えられる。

3. 考察

3.1 二重反転プロペラ周り流場計算

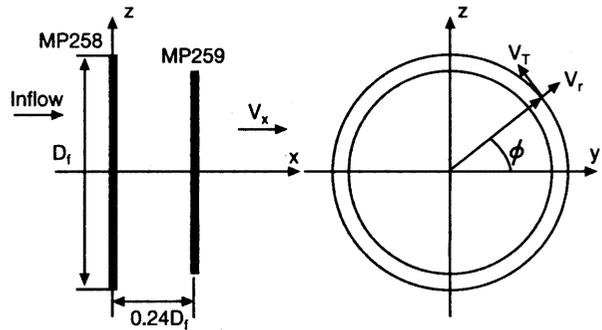


図-1 プロペラ配置及び座標系

表-1 プロペラ主要目及び実験結果

MP.No.	CP		CRP	
	MP258	MP258	MP258	MP259
Diameter(m)	0.250	—	0.2399	0.2399
Boss Ratio	0.220	—	0.229	0.229
Direction of Turning	Right	Right	Right	Left
J	1.06	1.06	1.06	1.11
C_T	0.368	0.367	0.367	0.353
$10K_Q$	0.365	0.367	0.367	0.425

※各プロペラ直径で無次元化

二重反転プロペラを装備した船体周りの流場計算を行う前に、まず二重反転プロペラ単独試験状態において、プロペラ後方流速分布を実験結果 [1] と比較する。

計算に用いたプロペラ配置を図-1 に示し、主要目及び実験結果を表-1 に示す。二重反転プロペラの場合、プロペラ間距離は $0.24D_f$ である。

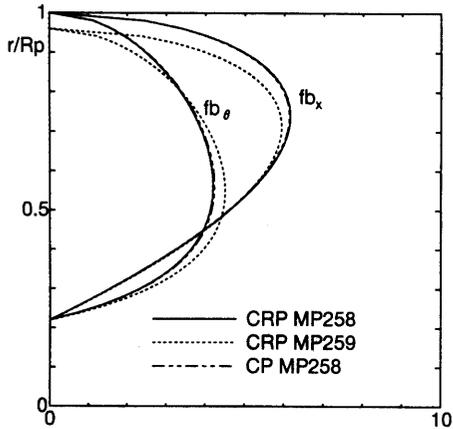


図-2 体積力分布

図-2に体積力分布を示す。MP258に関しては2種類あり、1つは単独状態(CP)、もう1つは二重反転プロペラ(CRP)の場合である。計算領域は

$$-4.0 < x < 8.0, -4.0 < y, z < 4.0 \quad (8)$$

であり、前プロペラ直径で無次元化し、座標原点は前プロペラ中心である。

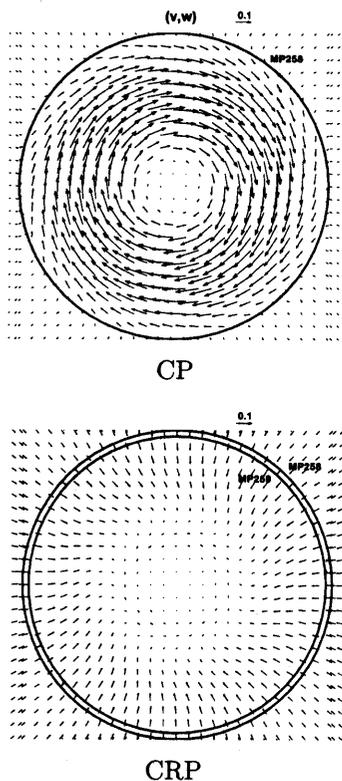


図-3 プロペラ後方流速ベクトル図 ($x=0.36$)

図-3にCP及びCRPにおけるプロペラ後方 $x=0.36$ におけるベクトル図を示す。これより、CRPでは、前プロペラの回転流を後プロペラが回収することで、回転流が大幅に減少することが分かる。図-4に x 軸方向流速分布及び接線方向流速分布を実験結果 [1] と共に示

す。 x 軸方向流速は実験結果と概ね一致しているが、接線方向流速については実験値と差が大きい。接線方向流速を精度良く推定するためには、今回より高度なモデルが必要と思われるが、推力減少率等は推定が可能と思われる。

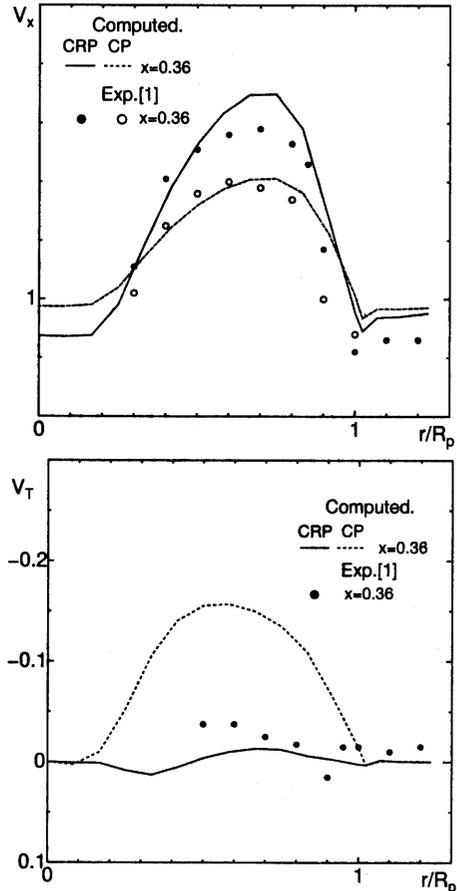


図-4 流速分布比較図

3.2 二重反転プロペラを装備した船体周り流場計算

3.1においてプロペラ単独状態について、プロペラ周り流場の検討を行い、推力減少率については推定可能であることを確認した。ここでは、船体に二重反転プロペラが装備された状態について流場計算を行い、推力減少率について実験結果 [1] と比較し、また、プロペラ後方流場についてCPとCRPで比較する。

表-2に模型船主要目及び実験状態を、図-5に計算格子を示す。格子点数は主流方向145分割、ガース方向65分割、幅方向81分割で、計算領域は

$$-1.5 < x < 3.0, -2.0 < y < 2.0, -2.0 < z < 0.0 \quad (9)$$

であり、 L_{pp} で無次元化し、座標原点はFPである。乱流モデルはSpalart-Allmarasモデルである。なお、自由表面は考慮していない。

表-2 模型船主要目及び実験状態

MS.No.234	
L_{pp} (m)	6.960
B(m)	1.009
d(m)	0.365
Fn	0.278
Rn(抵抗試験時)	1.833×10^6

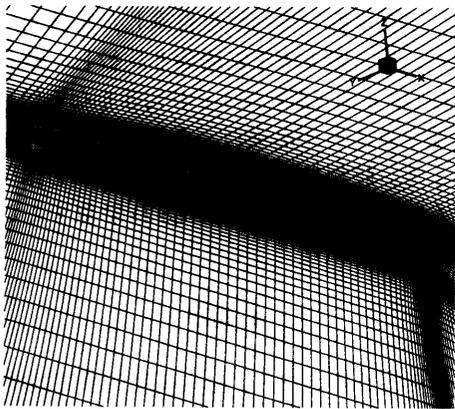


図-5 計算格子

表-3 に抵抗試験状態における計算結果及び実験結果 [5] の比較を示す。公称伴流係数 w_n については実験値と差があるが、形状影響係数 $1+K$ についてはほぼ一致していることより、船体抵抗については推定可能であると思われる。

表-3 抵抗試験状態での比較

	$1+K$	w_n
Comp.	1.15	0.292
Exp.	1.16	0.236

表-4 に CP の主要目を示す。なお CRP については表-1 と同じである。図-7 に CP,CRP 単独試験実験結果を示す。今回の計算では推力一致法により自航計算を行う。自航状態は Ship Point で

$$\Delta R = R' - T - SFC = 0 \quad (10)$$

R': 自航計算時船体抵抗

T : プロペラ推力

SFC : 摩擦修正係数

を満たした場合とし、SFC は実験で使われた解析法である二次元外挿法により

$$SFC = (C_f(Rn_m) - C_f(Rn_s) - \Delta C_f) * \frac{1}{2} \rho S' V^2 \quad (11)$$

$Rn_m = 1.400 \times 10^6$: 模型船レイノルズ数

$Rn_s = 2.071 \times 10^9$: 実船レイノルズ数

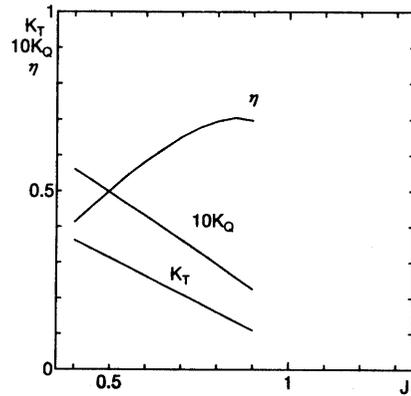
$\Delta C_f = -1.0 \times 10^{-4}$: 粗度修正係数

S': 模型船浸水面積, ρ : 水の密度, V : 船速

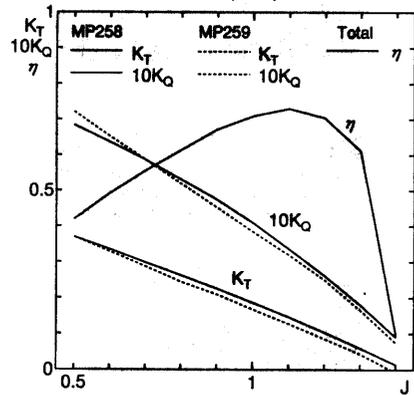
で求められる。

表-4 プロペラ主要目

MP.No.	MP145
Diameter(m)	0.256
Boss Ratio	0.180
Direction of Turning	Right



MP145(CP)



MP258/259(CRP)

図-7 プロペラ単独試験実験結果

表-5 1-t の比較

	1-t	
	CRP	CP
Comp.	0.868	0.844
Exp.	0.836	0.800

表-5 に推力減少率 t から求まる 1-t の比較を示す。CP、CRP とも実験値 [1] と比較して、概ね一致している。また、CP と CRP を比較すると CRP の 1-t が CP より大きくなる傾向を再現することができた。

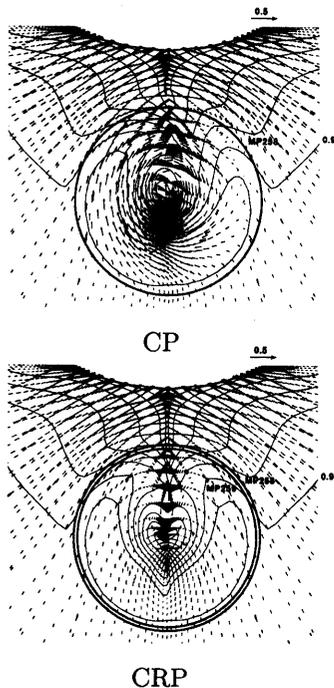


図-8 プロペラ後方流場比較 ($x=1.0$)

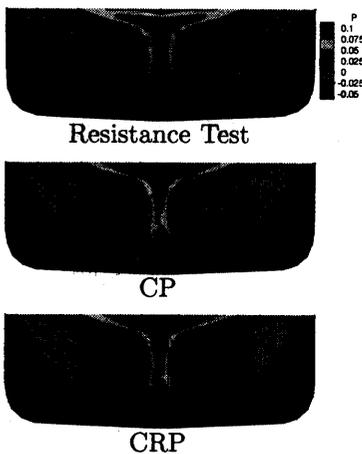


図-9 船体表面圧力分布比較

図-8 にプロペラ後方流場比較 (AP 位置, $x=1.0$)、図-9 に船体表面圧力分布比較を示す。CP と比較し、CRP ではプロペラ単独状態と同様にプロペラ後方で回転流が回収される様子が捉えられている。また、CP より CRP では $1-t$ が大きくなる理由として、船尾の圧力が CP ほど低下しないことが考えられ、計算結果にその傾向が現れている。

4. まとめ

今回、二重反転プロペラ周りの流場計算及び二重反

転プロペラを装備した船体周り流場計算を行い、以下の結果を得た。

まず、二重反転プロペラ単独状態でプロペラ周り流場計算を行い、実験値と同様にプロペラ後方流場において CP と比較し回転流が大幅に減少することが確認された。また、実験結果と比較し、 x 軸方向流速については概ね実験結果と一致したが、接線方向流速については実験結果と差があり、今後体積力分布を表すモデルについて高度化が必要である。

次に、二重反転プロペラを装備した船体周り流場計算を行い、推力減少率を実験値と比較し、概ね一致した。また CP より CRP が $1-t$ が大きくなる傾向を計算でも再現することが出来た。今後は CFD コードの高度化として、舵付き自航計算、プロペラを体積力分布ではなく回転する物体として CFD 計算することが挙げられる。

4. 謝辞

本計算を行うにあたり、輸送高度化研究領域 船型開発研究グループ長 右近良孝博士には、実験結果を提供して頂き、貴重な討論を頂きました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 右近 良孝他：二重反転プロペラの設計について — 高速コンテナ船への適用 —, 西部造船会会報, 第 75 号, pp.52-64, (1988)
- [2] Stern, F. et.al : Viscous-Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction, Journal of Ship Research, Vol.32 No.4, pp.246-262, (1988)
- [3] 日夏 宗彦他：プロペラ影響を考慮した船体まわり流れの数値シミュレーション, 西部造船会会報, 第 88 号, pp.1-12, (1994)
- [4] Hirata, N., Hino, T. : An Efficient Algorithm for Simulating Free Surface Turbulent Flows around Advancing Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.185, pp.1-8, (1999)
- [5] 門井 弘行他：キャビテーション試験水槽における模型船船尾の伴流分布, 船舶技術研究所報告, 第 17 巻 第 3 号, pp.261-271, (1980)