CPP 1 軸 1 舵船の停止性能について —実船実験によるFPPとの比較—

矢吹 英雄*・佐々木紀幸**・芳村 康男***

Stopping Ability of a Ship with Single CPP and Single Rudder —Comparative Full-scale Experiments between CPP and FPP—

Hideo YABUKI, Noriyuki SASAKI and Yasuo YOSHIMURA

Abstract

A full-scale experiment has been performed to compare each stopping ability of both a ship with a controllable pitch propeller (CPP) and one with a fixed pitch propeller (FPP). The test ship is 5,884 G.T. with a single CPP and has a direct reversing system for her diesel engine as well. Stopping tests were carried out for various $J_{s0}(=U_0/(n \cdot P))$ in both the CPP and FPP operation modes.

As a result, in the range of the maneuvering speed, stopping time and distance in the CPP mode have mostly shown shorter than those in the FPP mode, so that a CPP is superior to a FPP in its stopping ability. In the meantime, in case of the test ship on reverse maneuver, her turning motion in the CPP mode proved less stable than that in the FPP mode and the degree of the motion increased in proportion to $|J_{s0}|$.

During on stopping maneuver of a single CPP ship in harbor, it is therefore recommended, in order to reduce her turning motion, to proceed with minimum ahead pitch and to apply a little higher reversing pitch than in the case of a FPP ship operation.

1. はじめに

可変ピッチプロペラ(CPP; Controllable Pitch Propeller)は、固定ピッチプロペラ(FPP; Fixed Pitch Propeller)に比べ速力制御が容易で、特に港内速力では任意の低速力が得られる、後進操作が簡単で停止時間、停止距離とも短く停止性能に優れている等、操船者にとって扱い易いプロペラであることが知られている。

ディーゼル機関を有するCPP 1 軸 1 舵船の停止性能については、主にクラッシュアスターン性能を対象とした実船実験やシミュレーション計算によりFPPとの比較が行われており、CPPは停止時間、停止距離ともFPPの約半分で、その主たる理由は、CPPの後進翼角への変節所要時間がFPPの逆転操作時間に比べ短いことにあると報告⁽¹⁾されている。

操船者、特に船長の立場から見た場合、クラッシュアスターン性能とあわせて、投錨、着棧といった港内操船でよく使用する前進速力と後進操作の組み合わせにおける停止性能を知っておく必要がある。また、港内操船においては、停止時間、停止距離もさることながら、船体の停止運動に伴う回頭現象を的確に把

* 正会員 運輸省航海訓練所 (〒231-0003 横浜市中区北仲通5-57)

** 非会員 住友重機械工業(株)横須賀造船所技術部 (〒237-8555 横須賀市夏島町19)

***正会員 住友重機械工業(株)横須賀造船所技術部 (〒237-8555 横須賀市夏島町19)

握しておくことが重要である。しかしながら、停止試験の範囲を港内速力まで拡張して実験を行い、回頭現象を含めCPPの停止性能について幅広く検討した報告はない。

ところで、平成9年10月に竣工した航海訓練所の練習船青雲丸(5,884総トン、主機ディーゼル10,500ps×148rpm×1基)は、CPP1軸1舵船として艤装されているが、実習訓練の要求から主機に自己逆転機構を装備しており、翼角を固定することによってFPPと同様にプロペラ逆転による後進が可能な構造となっている。これまで、同一船型を用いた実船実験によりCPPとFPPの停止性能の違いを検討した例はないが、本船によれば、船体の他外乱等がほぼ同一条件のもと、両者の違いが操縦性能に及ぼす影響を調査することが可能である。

以上から、青雲丸を供試船として、プロペラをCPPモードとした場合、FPPモードとした場合それぞれについて停止試験を行い、CPPの停止性能をFPPと比較検討した。

ここでは、主に港内操船の場面を対象として、停止時間、停止距離及び回頭現象等CPPの停止性能の特性について考察し、更に、この結果を踏まえてCPP装備船の操船法を検討する。

表1 青雲丸主要目

船体		
Lpp (m)		105.00
B (MLD;m)		17.90
D (MLD;m)		10.80
Cb		0.5186
プロペラ (CPP)		
翼数		4
D (m)		4.70
P.R. (基準翼角)		1.050 (25.5°)
Skew(deg.)		40
舵(フラップ舵)		
Ar(可動部面積㎡)		10.034
Ar/Ld		1/63.4
アスペクト比		1.865

表2 実験時のコンディション

	Crash Ast. Test	Stopping Test	
		CPP mode	FPP mode
Date	Aug. 1997	Oct. 1997	Oct. 1997
Place	Sagami-Wan	Mikawa-Wan	Mikawa-Wan
Depth(m)	450~900	18~20	18~20
Wind (m/s)	2~4	1~4	2~6
Wave (m)	0.3	0.2	0.3
df (m)	5.86	5.90	5.85
da (m)	5.88	6.22	6.19
Trim (m)	0.02 B/S	0.32 B/S	0.32 B/S
△ (ton)	5667	5955	5910

2. 実船実験

2.1 供試船

供試船青雲丸は、船首バルブ、トランサム型船尾を持つ長船首楼付平甲板船である。また、プロペラは船尾から見て右回りである。本船の船体、プロペラ及び舵の主要目を表1に示す。

2.2 実験方法

実船実験は、水深の影響を受けない場所において、できるだけ外乱のない状態で行うこととし、かつ、船体コンディションがほぼ同一となるよう調整して実施した。当時の気象、海象及び船体コンディションを表2に示す。

試験として、クラッシュアスターン試験及び港内速力の範囲で初速と後進翼角(又は後進回転数)の組み合わせを様々な変化させた停止試験を行った。

また、試験に際しては供試船を舵中央の状態です直進させ、後進発令から船体が停止し後進が始まるまでの船首方位、速力等、諸元の変化を本船の研究データ計測システム⁽²⁾で記録した。計測項目と計測機器の詳細を表3に示す。なお、風がある場合は、これを正船首に受けて停止試験を行った。

表3 計測項目と計測機器

計測機器	計測項目
DGPS	船位、船速、進路
ジャイロコンパス	針路、ヨーレート
電磁ログ	船速
音響測深機	水深
舵角指示器	実舵角
CPP翼角指示器	CPP実翼角
自動気象観測装置	風向、風速等
マイクロ波高計	有義波高等
燃焼状態監視装置	回転数、トルク、スラスト

3. 実験結果

3.1 見掛け前進率と有効ピッチの計算方法

船の停止性能は、見掛け前進率 $J_{s0}(=U_0/(n \cdot P))$, U_0 : 後進発令時の前進速度, n : 後進回転数, P :

プロペラピッチ)でよく整理できることが知られている。前進中に後進制動をかけた場合、FPPでは n が負、 P が正となるが、CPPではこれと逆に n が正 P が負となる。この時、翼断面での流入ベクトルは図1のようになり、FPPとCPPでは翼への流入方向が反対となる。従って、FPPとCPPの停止性能を比較するには、従来の0.7Rでの代表ピッチにかえて有効ピッチを用いる必要がある。

CPPの後進時は、プロペラを逆転するかわりにピッチを変えるので、ピッチ分布が前進時と大きく変化する。すなわち α 度だけ変節した時の各半径 r におけるピッチは次式で示される。

$$P_a(r) = 2\pi r \cdot \tan(\beta(r) - \alpha) \quad (1)$$

但し、 β は各半径位置における基準ピッチ角である。

図1に本船のCPPの変節時におけるピッチ分布を示す。図でわかるように、前進時においてはほぼ一定であったピッチも変節することで大きく変化する。特に後進時におけるピッチ分布は、プロペラの外周では大きな後進ピッチとなっているにもかかわらず、ボス付近ではまだ前進ピッチが残っており、全体として非常に効率の悪いピッチ分布となっている。このように大きく変動したピッチ分布の場合は、FPPのように0.7Rにおけるピッチをそのプロペラの代表ピッチとすることは出来ず、CPPの変節時にも通常用いられている有効ピッチの概念を拡張して使用する必要がある。

CPPの有効ピッチの近似的な求め方として次式が考えられる。

$$P = \int_c^1 P_a(r) W(X) dX / \int_c^1 W(X) dX \quad (2)$$

$$W(X) = (X - C) \sqrt{1 - X} \quad (3)$$

但し、 $X (= r/R)$ は無次元半径、 $W(X)$ は各半径位置 X における荷重、 C はボス比である。

FPPの後進時はプロペラ逆転により、流れが後縁側から入るので、 P_0 を前進時の0.7Rにおけるピッチとして、有効ピッチ P を次式で近似的に与える。

$$P = P_0 - 2\pi \times 0.7 \tan(\phi_0) \quad (4)$$

ここで、 ϕ_0 は0.7Rにおけるゼロ揚力角であり、例えば次に示すTelferの近似式⁽³⁾を用いて求めることができる。

$$\phi_0 = \frac{\{1 - (0.5 - c^*/c) y_n / t_{max} - (1.5 + c^*/c) y_t\} t_{max} / c}{1.5 c^*/c} \quad (5)$$

c 、 t_{max} 及び c^* は、それぞれ0.7Rにおける翼長、最大厚さ及び前縁から最大厚さまでの距離であり、 y_n 、 y_t はそれぞれnose高さとtail高さである。供試船の後進側有効ピッチを表4に示す。

有効ピッチを用いた J_{s0} で停止性能を整理すると、後述する図4、5のように、停止時間、停止距離がFPP、CPP共に J_{s0} でよくまとまっており、この手法がCPPの停止性能を整理する上で適切と考える。

3.2 停止時間、停止距離について

クラッシュアスターン試験の時系列を図2、3に示す。図には、後進発令から船体停止に至るまでの軌跡、速力、回転数又は翼角の変化が示してある。船体軌跡はHead Reach($X'_s = X_s / L_{pp}$)、Side Reach($Y'_s = Y_s / L_{pp}$)を座標としており、 Y'_s は正の符号が原針路から左への偏位を意味する。

CPPでは停止時間、停止距離ともFPPの約55%であり、CPPのクラッシュアスターン性能が非常に優れていることがわかる。こ

図1 有効ピッチの概念

表4 青雲丸後進側有効ピッチ

	翼角(度)	ピッチ比
CPP	-5.5(D.Slow)	-0.189
	-10.0(Slow)	-0.354
	-14.0(Half)	-0.505
	-18.0(Full)	-0.661
FPP	25.5	0.748

図2 クラッシュアスターン時系列 (FPP)

図3 クラッシュアスターン時系列 (CPP)

図4 停止時間の比較

図5 停止距離の比較

図6 似たような J_{s0} での時系列 (港内速力, FPP) 図7 似たような J_{s0} での時系列 (港内速力, CPP)

の時プロペラが後進側に操作されて後進力を発揮するまでに要した時間を比較すると、CPPではFPPの約1/5となっている。以上の比較結果は岡本らの報告⁽¹⁾と定性的に一致していることから、FPPの逆転操作に比べCPPの後進翼角への変節時間が非常に短いことによりCPPの停止時間、停止距離が短くなり、クラッシュアスターン性能が改善されるといえる。

次に、港内速力の範囲における停止時間($t' = t \cdot (U_0/L_{pp})$)及び停止距離($S' = S/L_{pp}$)の比較結果を J_{s0} をベースとして整理し、図4、5に示す。

$|J_{s0}|$ が小さい計測点を除き停止時間、停止距離ともCPPの方が短くなっていることから、港内速力においてもFPPに比べCPPの停止性能が優れていると考えられる。また、 $|J_{s0}|$ に比例して両者の違いが大きくなっているのも特徴といえる。

港内速力の範囲で初速をやや高く設定し、似たような J_{s0} で行った停止試験の時系列を図6、7に示す。CPPでは、停止時間がFPPの約90%、停止距離が約80%となっている。この時の後進操作の所要時間を比較すると、CPPはFPPの約1/3である。図1に示したように、CPPの後進翼角におけるピッチ分布は全体として非常に効率の悪いピッチ分布となっていることから、プロペラの流体力学的な性能面から見た場合、CPPそのものの後進性能はFPPより劣っているといえ、後進操作の所要時間が短いことがCPPの停止性能を良くしている主因と考えられる。

$|J_{s0}|$ が小さい低速時の停止試験の時系列を図8、9に示す。この例では、CPPでは停止時間、停止距離ともFPPよりわずかに長くなっており、FPPに比べCPPの停止性能が悪い結果となった。後進発令から所定の後進翼角あるいは後進回転数に整定するまでの所要時間をみると、FPPでは後進発令時の回転数が主機の逆転可能回転数に近い極めて短時間で整定しているのに対し、CPPではやや長い時間を要している。従って、低速時のCPPの停止時間、停止距離がFPPより長くなる理由として、前に述べたCPPのピッチ分布に加え、低速時にはFPPの主機の応答特性が早くなることが挙げられる。

なお、操船の実務面から見た場合、 $|J_{s0}|$ が小さい時の停止距離等の差はわずかで、低速時におけるCPPの停止性能は、FPPとほぼ同程度と考えて実用上差し支えないと思われる。

3.3 回頭現象について

後進発令から船体停止に至るまでの回頭角(Ψ)の比較結果を図10、11に示す。図には、舵を中央としたまま後進操作を行った場合の回頭角に加え、後進発令と同時に右35度または左35度の舵角を与えた場合の回頭角が示してある。

FPPでは常に右回頭して停止し、 $|J_{s0}|$ が大きくなるにつれ回頭角も大きくなる等、FPP右回り1軸船の特性が表れている。また、回頭角が J_{s0} でよく整理できており、操舵により右35度または左35度の舵角を与えた場合も確実にこれに回答している(図10)。これは主として、本船が針路安定性に優れた船であること、 $|J_{s0}|$ が大きくなる領域では一般に初期速力が高く、FPPの遊転時間が長くなって舵が効きやすくなるものと考えられる。

一方、CPPでは $|J_{s0}|$ に比例して回頭角が大きくなる傾向はFPPと同様であるが、回頭方向は左右にばらつき一定しない。また、操舵に対する応答にもはっきりした規則性が見られない(図11)。

この原因については、後進推力中の流体力特性を模型試験等で明確にすることがまず必要であるが、FPP

図8 低速時の時系列 (FPP)

図9 低速時の時系列 (CPP)

図10 回頭角の比較 (FPP)

図11 回頭角の比較 (CPP)

とCPPで前進推力から後進推力への移行過程がかなり異なることが、その一つの要因と考えられる。すなわち、FPPでは後進発令後プロペラはまず遊転し、逆転可能回転数まで回転が低下して初めて後進に入ることになる。プロペラ遊転中は舵力が低下するものの舵効は依然残っており、操舵は可能である。また遊転後、後進推力に転じる過渡的時間が短いことから、その後の船の運動はその時点の船速と回転数の J_{s0} でほぼ規定されることとなる。これに対し、CPPでは後進発令後直ちにプロペラ翼角が変節し始めFPPのような遊転中の操舵は全く期待できない他、プロペラ翼角の変節時間が少なからず存在し、この変節中の流体力がFPPに較べ大きく変化することによって、両者で回頭現象が異なるものと推測される。あるいはまた、このCPPの後進時の流体力については、文献(4)、(5)に報告されているように、翼角を零とした時と同様のプロペラ付近の攪乱された流れによって船尾付近の流れが変形し、船体に働く力がFPPに較べて定常状態になりにくく時間的に変動することが不安定な回頭運動を起こす一因とも考えられる。この点については、模型試験によりプロペラ及び船体に働く流体力を計測して確認する必要があると思われる。

Head Reach (X'_s) の比較結果を図12に、Side Reach (Y'_s) の比較結果を図13に示す。Head Reachは、FPPに較べCPPが全体に短く、 $|J_{s0}|$ に比例して両者の差が大きくなっている。これは3.2で述べたFPPとCPPの停止時間の違いによる。

Side Reachは、FPPの場合、 $|J_{s0}| < 0.9$ の範囲ではわずかに左偏する現象が見られるが、 $|J_{s0}|$ がこれより大きくなると右偏し、かつ、 $|J_{s0}|$ に比例して右への偏位が急激に大きくなる。これに対しCPPでは、偏位の方向は左右まちまちであるが、 $|J_{s0}|$ の小さい範囲では偏位はわずかで、操船上殆ど問題にはならないと考える。また、 $|J_{s0}|$ に比例して偏位が大きくなる傾向はFPPと同様である。

4. 港内操船について

投錨、着棧といった操船の場面では、各船毎に設定されている速力減速標準に従って港内全速から2～3ノット程度の舵効が維持できる最小の速力(以下、仮に最小舵効速力とする)まで減速した上、プロペラを後進させて本船を停止させるのが通例である。またこの時、船首の振れや横偏位が生じず、ほぼ原針路を向いたまま停止するのが望ましい。

まず、港内全速から最小舵効速力まで減速する手順を考えると、FPPでは、Full AheadからSlow又はDead Slow Aheadまで順次減速し、次にStop eng.として最小舵効速力とする。CPPでは、翼角を零に変節して減速した場合、舵効の低下や不規則な船首振れにより操船が極めて困難となることが指摘⁽⁴⁾⁽⁵⁾されていることから、いわゆるStopの操作を行うことは不適当である。変節により容易に任意の速力を得ることができるCPPの特性を利用して相当早めに減速を開始し、徐々に最小舵効速力に対応した前進翼角

図12 Head Reachの比較

図13 Side Reachの比較

(Minimum Ahead Pitch)までもってゆくのがよい。

次に、プロペラの後進操作による停止操船の場面について考察する。3.2及び3.3で述べたように、港内速力の範囲では、CPPの停止時間、停止距離はFPPより短いほぼ同程度と考えて良いが、CPPの後進操作に伴う船首の回頭方向をあらかじめ予測することは困難で、強い前進行き脚を残したままAsternとするなど、 $|J_{s0}|$ が大きくなるような後進操作を行った場合、回頭現象が大きくなるという特性がある。また、この時の回頭運動を操舵によって抑えることは困難である。これを補うには、前進行き脚を最小舵効速力に押さえた上でゆっくりと前進し、翼角を零とすることなく、一気に前進側から後進側に変節し、かつ、Slow、Halfといったやや強めのAsternとすればよい。この操作により翼角を零とすることに伴う不規則な船首振れを避けることができ、併せて $|J_{s0}|$ が小さくなるため、図11、図13に示したように回頭方向の予測は難しいものの、回頭角、Side Reachを小さくすることができる。また、Head Reachも小さくなり操船上有利である。図14は供試船の例で、同一速力で前進中、弱いDead Slow Ast.としたのでは大きく回頭して停止するが、強いFull Ast.とすればほぼ原針路を向いたまま停止させることができる。

図14 停止操船の例 (青雲丸)

5. まとめ

同一船型を用いた実船実験により、CPPの停止性能の特性をFPPと比較検討し、これをふまえてCPP 1 軸 1 舵船の効果的な操船法を考察した。

主要な結論は次の通りである。

- (1) CPPの停止性能は、プロペラの有効ピッチを用いた見掛け前進率 J_{s0} でよく整理することができる。
- (2) 港内速力の範囲では全体にCPPの停止時間、停止距離が短く、FPPに比べCPPの停止性能が優れていると考えられる。両者の違いは、 $|J_{s0}|$ が大きいほど顕著である。また、 $|J_{s0}|$ の小さい低速時の停止性能は、実用上、FPPとほぼ同程度とみて差し支えないと考える。
- (3) CPPの後進操作に伴う回頭現象については、本船のような針路安定性のよい船型にあっても回頭方向がFPPのように一定しない。また、CPPでは後進発令時の操舵による回頭の制御もFPPに比べて効きが悪く、操船上やや注意を要する。これは、プロペラと船体とが流体力として複雑に関係することの他、CPPでは前進推力から後進推力に移行する過程がFPPとかなり異なることがその一因と推測され、模型試験やシミュレーションで確認する必要があるだろう。

(4) CPP 1 軸 1 舵船の停止操船に際しては、 $|J_{s0}|$ が小さくなるような後進操作、すなわち港内速力の範囲では変節により任意の速力が得られ、後進操作に対する応答が早いという特性を生かして、舵効が維持できる最小の前進ピッチで前進し、やや強めのAsternを使用するのが有効と考える。

最後に、本稿をまとめるにあたり貴重な御助言をいただきました船舶技術研究所運動性能部野中晃二氏、実船実験に協力いただいた青雲丸の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 岡本 洋・田中 陽・野沢和男・斉藤泰夫：可変ピッチプロペラ装備船の後進性能(第1報)，関西造船協会誌 第140号，(1971)。
- (2) 矢吹英雄・倉持貴好：航海訓練所練習船青雲丸の概要，日本造船学会誌 第826号，(1998)。
- (3) Yamazaki R. : Study on Screw Propellers, Memoirs of Faculty of Engineering, Kyushu Univ., Vol.19, No.1, (1960)。
- (4) 武田誠一・佐藤 要・芳村康男：1 軸CPP装備船の減速時の操縦性能，日本航海学会論文集 第86号，(1992)。
- (5) 館 清志・井上欣三・遠藤 真：CPP装備船のピッチゼロ時の船首振れについて－I. ーピッチゼロ時の転舵効果とその可視化－，日本航海学会論文集 第86号，(1992)。

質 疑 応 答

世良 亘(神戸商船大学)：CPPの停止操船時の回頭方向と外力、特に相対風向との関係について整理した結果がありましたら教えて下さい。

矢吹英雄：今回はまず、平水中の停止性能についてのみ整理しました。外乱中の停止性能につきましてもデータがまとまり次第公表する予定です。