

サーフェスプロペラの推進性能

— 単独特性と航走シミュレーション —

緒言

1. SPP 単独性能とプロペラ軸レーキの効果
2. 航走シミュレーションによる船体姿勢と推進馬力

水面

緒言

サーフェスプロペラ (surface propeller、正式名は水面貫通型プロペラ : surface piercing propeller) という興味深いプロペラがある。半没水状態でスプレーを巻き上げて作動する特殊プロペラである。

●超高速船用の高い推進性能を発揮する。プロペラは船体停止状態では全没しているが船速の増加と共に船体が浮上、プロペラ上部が露出し、巡航速度ではプロペラ下部だけの半没水状態で航走する。

●没水翼はスプレーを巻き上げながら次々と空中に飛出し、再没入を繰り返して推力を出す。Fig1はSPP装備船“こうべ” (神戸税関広域監視艇) の航走画像である。Fig2-1はSPP単独模型試験 (POT) を示す。没水度30%D_pで作動するプロペラ後流状況の写真である。プロペラのV,N(速度,回転数)が整定すると後流は透明な螺旋状スプレーを形成する。Fig2-2はSPP軸中央断面でのスプレー形状模式図である。

●SPPが高性能を発揮するためには適度な半没水深度で航行することが必要である。船体発進後、船速、船体姿勢、浮上量が整定した時の適度なSPP没水深度が性能を左右する。通常の船舶に比べて性能評価は複雑で難しい。(以下、研究を回顧して概要を纏めた。)



Fig.1 SPP装備船“こうべ”（神戸税関広域監視艇2代目）

SPP装備高速船“こうべ”（神戸税関広域監視艇2代目）の資料提供や実船見学に関して、本船建造会社瀬戸内クラフト（株）様および本船船主神戸税関様のご協力を頂きました。

Typical SPP POT movie

$Z=3, D_p=0.2m,$

$P/D=1.6, J=1.2$

船側

水面



https://drive.google.com/file/d/1v17DEhPN_NffTBg0xspUZYeB_CGMP0w3/view?usp=share_link

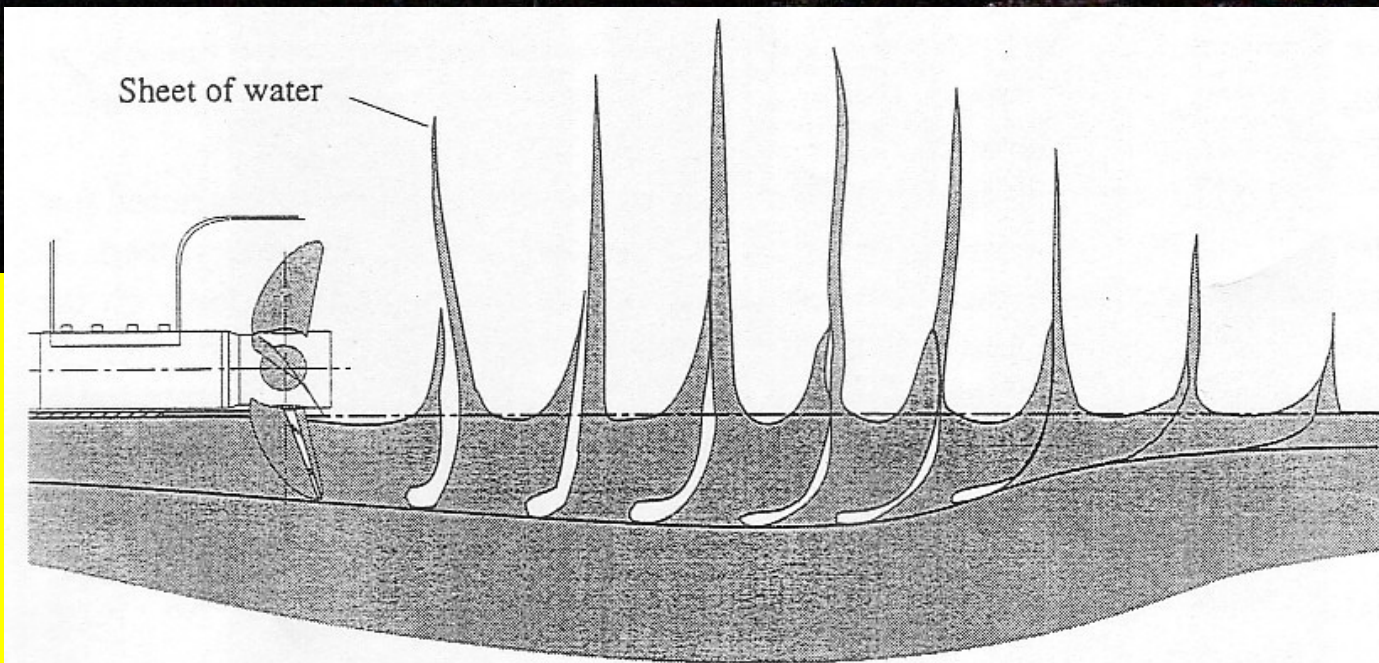


Fig.2-1 SPP单独模型試験(POT)、Fig.2-2 スプレー模式図(軸心断面)

(Qualitative explanation figure quoted from .N.Olofsson's book(reference (4))

船体航走姿勢とSPP没水度の変化は非定常で複雑である。(Fig.3)

- 1) 船体停止時: SPPは水面下に水没している。
- 2) 増速時: 船体が浮上/傾斜しはじめプロペラ軸とSPPは刻々と浮上
- 3) 巡航速度(設計速力 V_s)に到達すると船体浮上/傾斜は整定し、プロペラ軸は水面上に露出、SPPは半没水状態で稼働する。

SPPの特徴: 巡航速度で直径の約1/3の半没水深度に達すると、

- ①プロペラ効率が高く、②プロペラ軸の流体抵抗がなく、
③プロペラキャビテーションが発生しにくい。

➡ 実船推進性能向上

SPPの経緯は1869年米国PhiladelphiaのC.Sharp氏が浅喫水船舶用推進器として“partially submerged propeller”の特許出願したのが始まりで、その後改良、発達を経て現在に至る。主に超高速用プロペラとして使用されたが、特殊プロペラのため実績船が少なく改良すべき点も多い。筆者らはSPP船の発展を期し設計的観点から研究した。(Fig.4)
以下に、単独SSP特性とSSP装備高速船の航走姿勢と馬力推定法について述べる。

1) SPP単独特性試験: 4種のピッチの異なるSPP模型を用いて

- ①没水深度影響、②水平レーキ*)角変化によるプロペラ効率の向上

2) 航走シミュレーションによるSPP船の馬力推定法

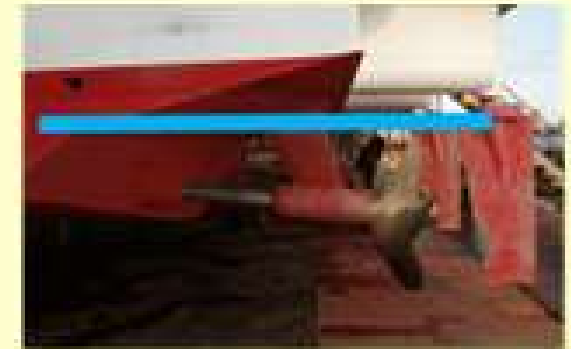
*) 造船用語: “傾斜”、プロペラ軸、マストなどの傾き

高速艇：高速航走時の船体/プロペラの姿勢の変化

状態:

1) 停止時或いは出発直後

SPP: 全没水



2) 増速時：船体徐々にトリム・浮上

SPP: 徐々に浮上

水面

3) 最高設計速力時

SPP: $1/3D_p$ 程度の没水

(船体/SPPの姿勢設計条件)



Fig.3 船速増加に伴う航走姿勢とSPP没水深度の変化

SPP船研究 設計主要目

Lines

$L \times B \times D \times d \times \Delta \times V_{design}$

BHP $\times N \times 2$ 軸

SPP要目 $Z \times D_p \times p \times a_e \times b$

SPP船の評価

- ・推進性能、馬力
- ・船体振動、騒音
- ・操縦性、耐候性
- ・問題点、改良法

(1) SPP単独特性

- ・模型プロペラ
- ・要目: $Z \times D_p \times p \times a_e \times b$
- ・parametric study
ピッチ、没水深度、
- ・プロペラ水平レーキ角の影響
- ・プロペラ特性: $K_t, K_q \sim J$
- ・プロペラチャート

(2) SPP船航走シミュレーション

1) 模型船高速曳航模型試験

動的流体力 (F_x, F_z, M_y) を船体姿勢 (τ, H) を変えて計測

2) 航走シミュレーションプログラム

単独特性、動的流体力データベース

3) SPP船船体姿勢計算、馬力推定、評価

(3) SPP設計研究諸元

1) SPPブレードの翼応力 \rightarrow 翼強度設計

2) ベアリング・フォース/モーメント

\rightarrow 軸系、軸受、船体振動

3) その他

Fig.4 SPP船の研究課題

§ 1 単独SPPの流体力学的特性(POT)

▼計測装置:

上下/水平角可変なSPP動力計架台(青色)(Fig.5)を船型試験水槽(L=100m)の台車(Fig.6)に設置し、プロペラ没水深度を変えてSPP単独のT、Qを計測。プロペラ軸は上下可変かつ水平面周りに回転可能。没水深度及びレーキ角 ψ を変えた計測が可能である。

▼SPP模型プロペラ(Fig.7)

・SSPA翼断面(super cavitating propeller)
翼数3翼、直径 $D=0.2\text{m}$ 、展開面積比0.5である。

・ピッチ比: 4種類($p=1.0, 1.3, 1.6, 1.9$)

実験法: プロペラ前進速度を $V=3\text{m/s}$ と固定し、回転数 n を種々変化させてPOTを行い、単独特性チャートPOCを得た。

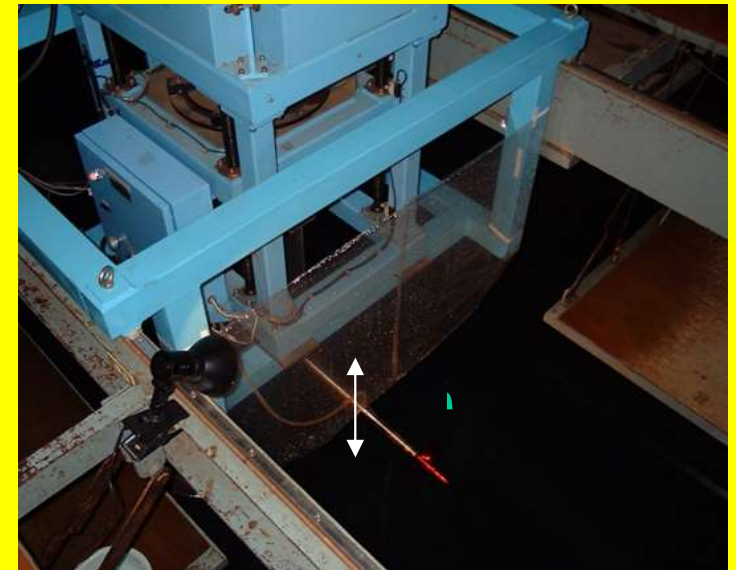


Fig.5 SPP動力計・架台



Fig.6 船型試験水槽と台車

Model SPP:

SSPA type cavitation prop.

$P/D=1.0, 1.3, 1.6, 1.9$

$Z=3, D_p=0.2m,$
 $ae=0.5$



Blade Number	Z	3
Diameter (m)	D	0.20
Pitch Ratio at 0.7R	P/D	1.60
Boss Ratio	b	0.19
Expanded Area Ratio	a_e	0.50
Skew (m)		0.00
Rake (deg)		10.00
Blade Section		SC

Strain gage(G1 to G5)
backside: position:

80 % at 0.5R

20%, 50%, 80%CL

at 0.3R

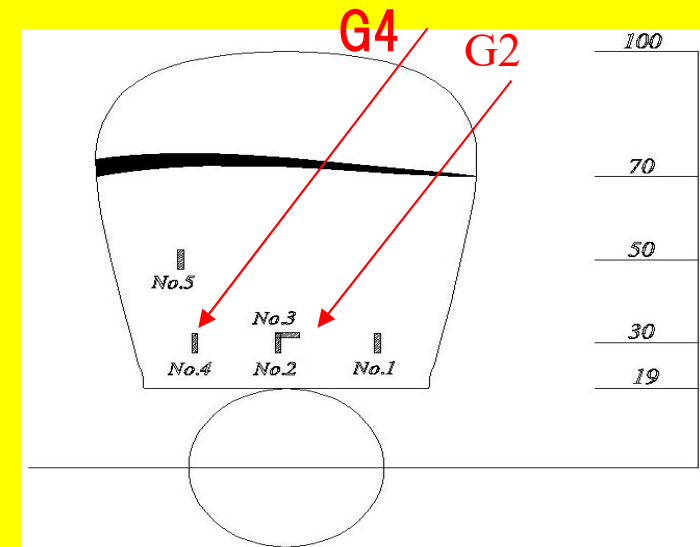
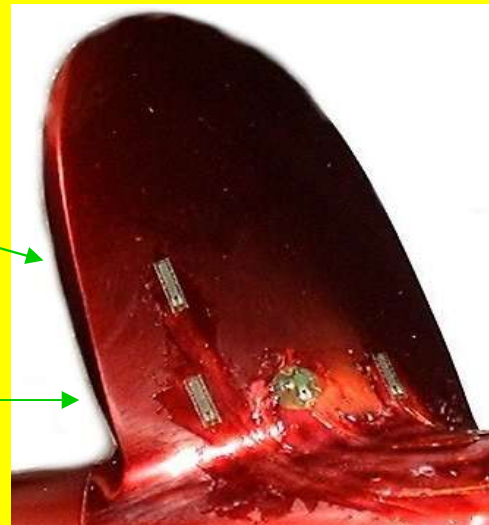


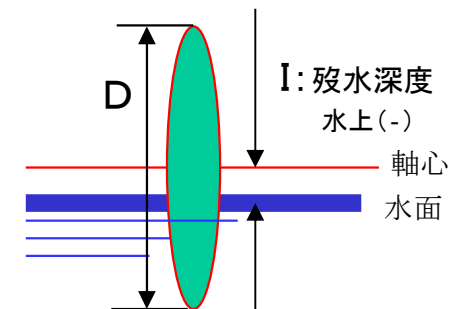
Fig.7 模型プロペラと Strain gages

SPP単独性能試験(模型試験)

①水平レーキ零の場合

SPP模型(P/D=1.6)で没水率I/Dを変化させたPOTを行い、計測したTp,Q,V,nから無次元値 J, Kt, Kq, ηを得た。

Fig.8は没水率I/D=-0.167(30%D)の結果である。



プロペラ直径	D (m)
前進速度	V (m/s)
プロペラトルク	Q (N.m)
プロペラスラスト	T _p (N)
推進方向のスラスト	T _s (N)
プロペラ毎秒回転数	n (rps)
横力推定係数(トルク作用半径比)	γ

前進率

$$J = \frac{V}{nD}$$

トルク係数

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

スラスト係数

$$K_{TP} = \frac{T_p}{\rho n^2 D^4}$$

プロペラ効率

$$\eta_p = \frac{T_p V}{2\pi n Q}$$

推進方向の効率

$$\eta_s = \frac{T_s V}{2\pi n Q}$$

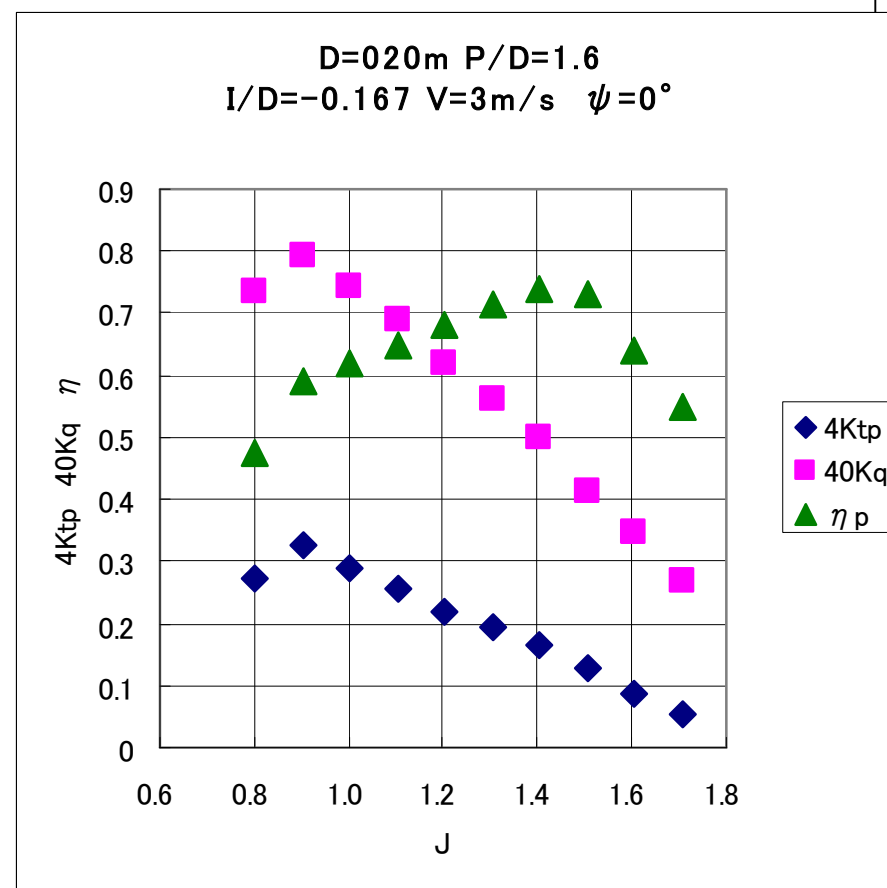


Fig.8 SPPプロペラ単独特性(P/D=1.6、I/D=-0.167(30%D))

半没水/全没水
性能比較

$K_t, K_q, \eta \sim J$

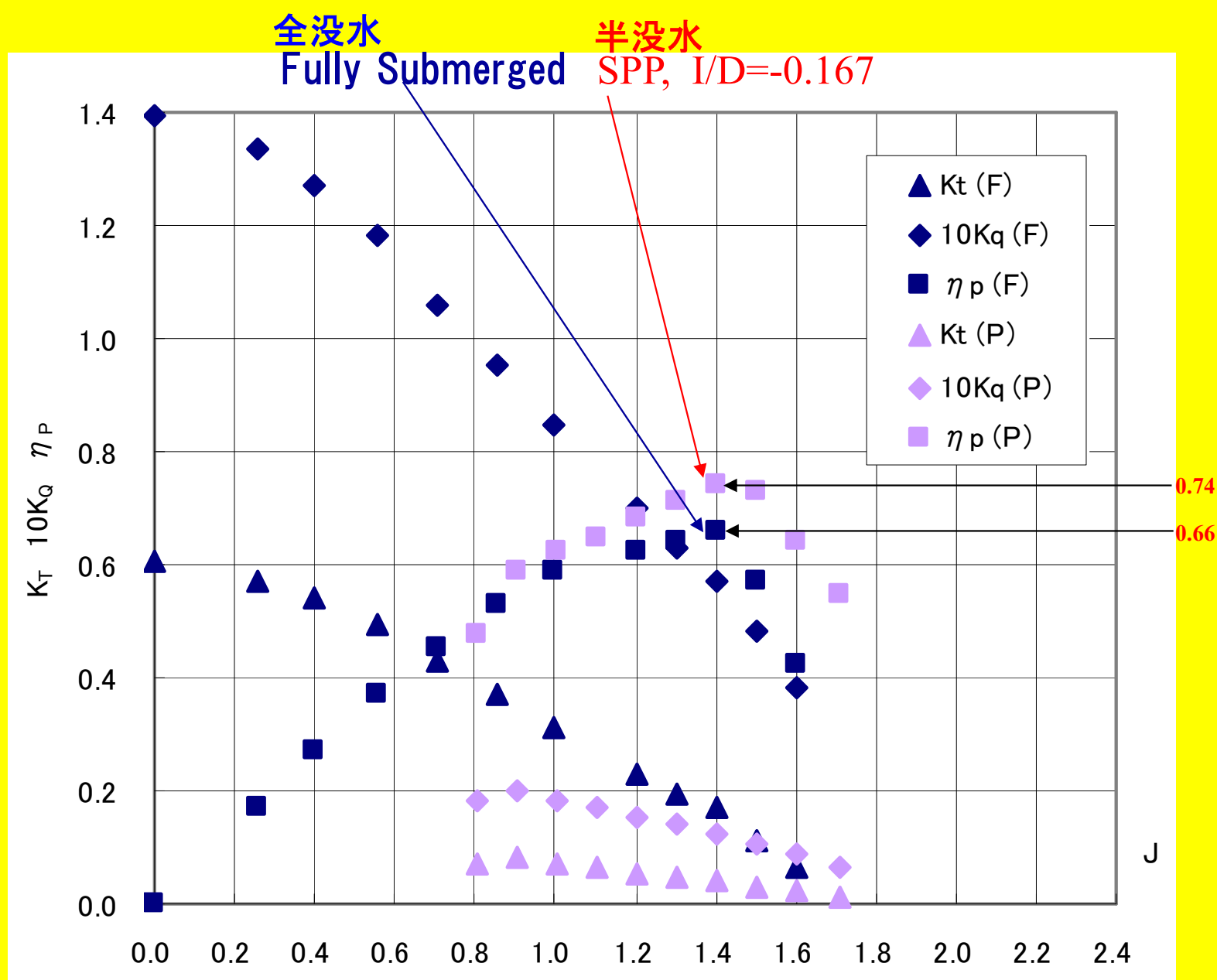
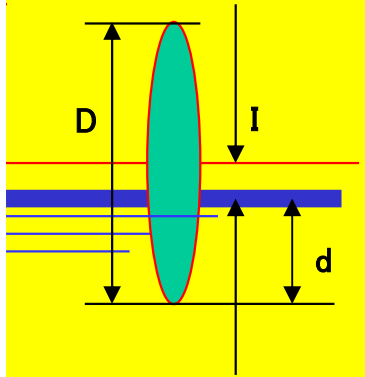


Fig.9 SPP(半没水/全没水)の特性比較: I/D=-0.167(1/3D没水), P/D=1.6

(全没水特性の方は、実船ではキャビテーション発生による効率劣化が見込まれる)

没水率定義



軸心没水率 : I/D

プロペラ没水率: d/D
 $d/D = 0.5 + I/D$

推力荷重度:

$$C_T = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} D^2 V^2}$$

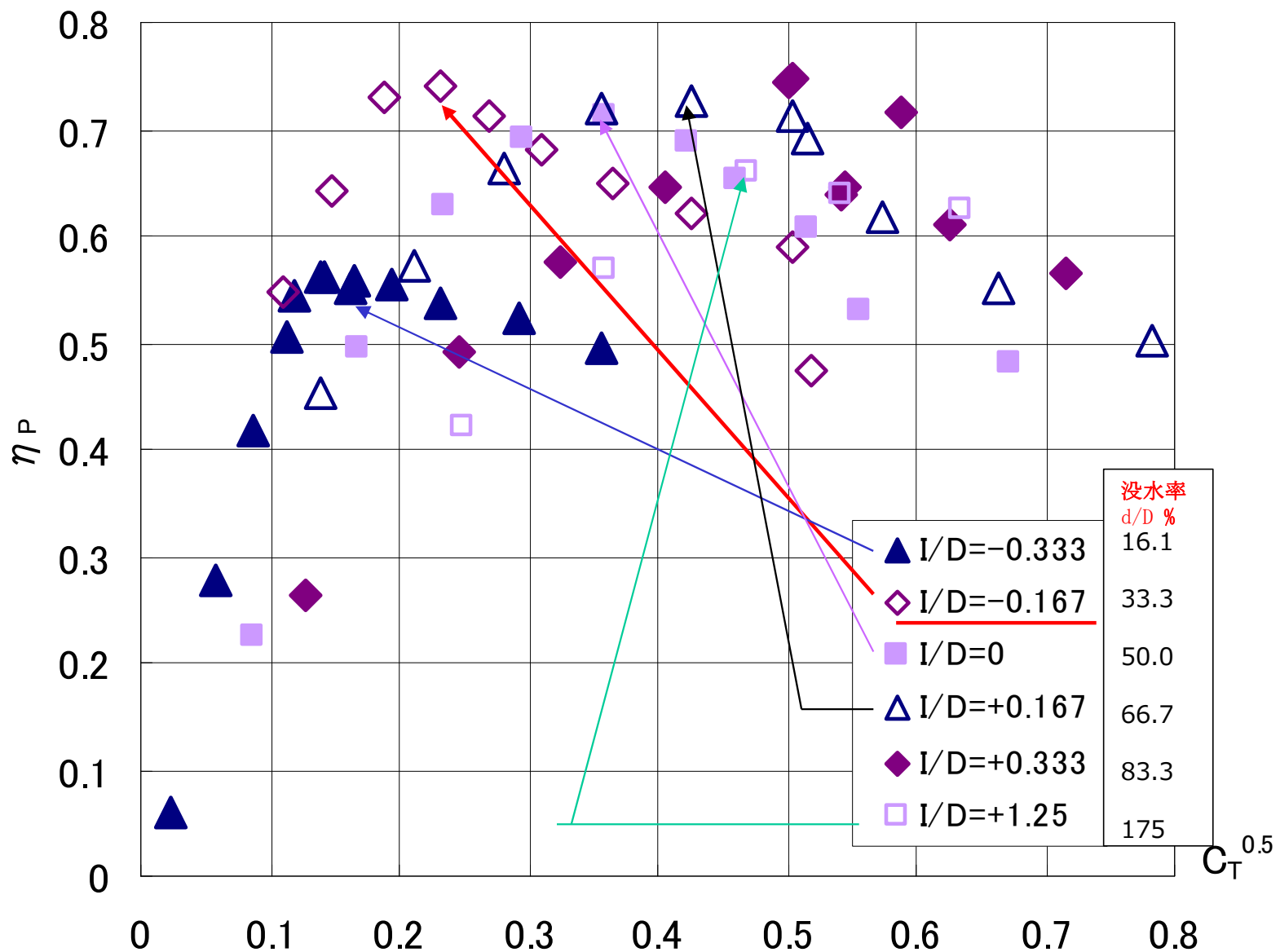
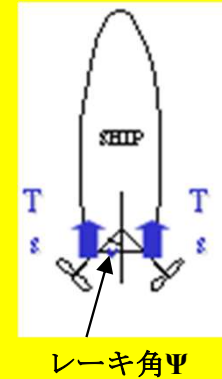


Fig.10 SPP特性 η_p の没水率影響

($D=0.2m, P/D=1.6, \phi=0deg$)

②水平レーキ付SPPの効果

SPPでは水平レーキ角 Ψ (船体中心線とプロペラ軸の為す角)をつけると効率(推力)が増す。



原理: Fig.11

SPPはプロペラ没水領域(下半部)の水を掻き流体力を発生する。

①プロペラ翼により発生する流体合力 F_t :

$$F_t = \text{Lift} + \text{Drag} = \text{Thrust} + \text{Torque force (横力)}$$

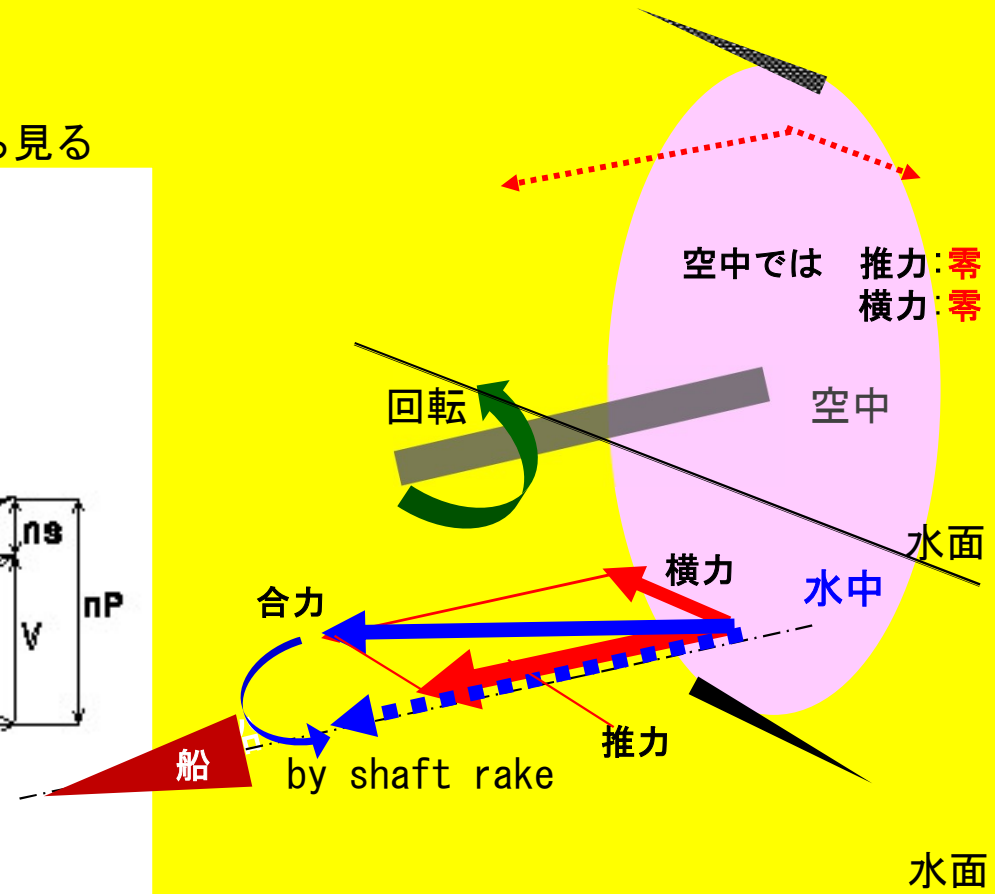
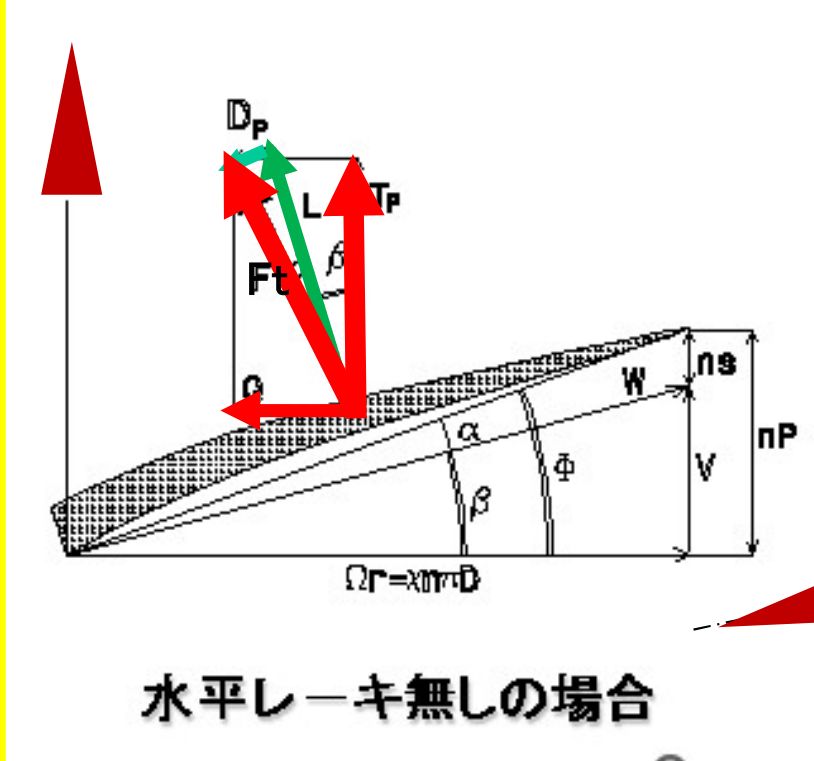
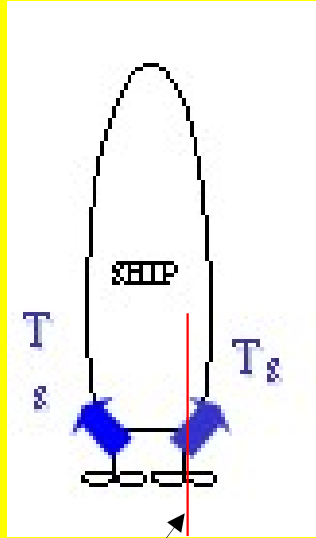
- ・全没プロペラは全翼の重ね合わせによりプロペラ横力は略零
- ・SPPは下半部のみ没水なので水中の翼のみ流体力が発生、プロペラ回転中の横力の重ね合わせは零とならない。
- ・このためSPPの合力 F_t の方向は推進方向から偏倚している。

②水平レーキ Ψ をつける:

合力 F_t を船体推進方向に一致させるためプロペラ軸を角度 Ψ だけレーキさせる。つまり、横力を推進力に付加できる。

合力を推進方向に向ける
 ようなレーキ Ψ を付加

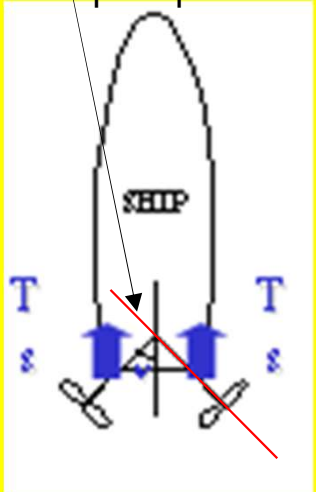
$\Psi = 0^\circ$: 下部翼断面を上から見る



プロペラ
 軸レーキ

$\Psi = 0^\circ$

$\Psi = \Psi^\circ$



水平レーキ付加

- ① F_t を角 Ψ だけプロペラ軸方向にをレーキさせる。
- ② F_t を T_p 方向に一致させる Ψ は？

Fig.11 プロペラ軸レーキ角 Ψ が推力を増加させる原理

Shaft rake angle Ψ

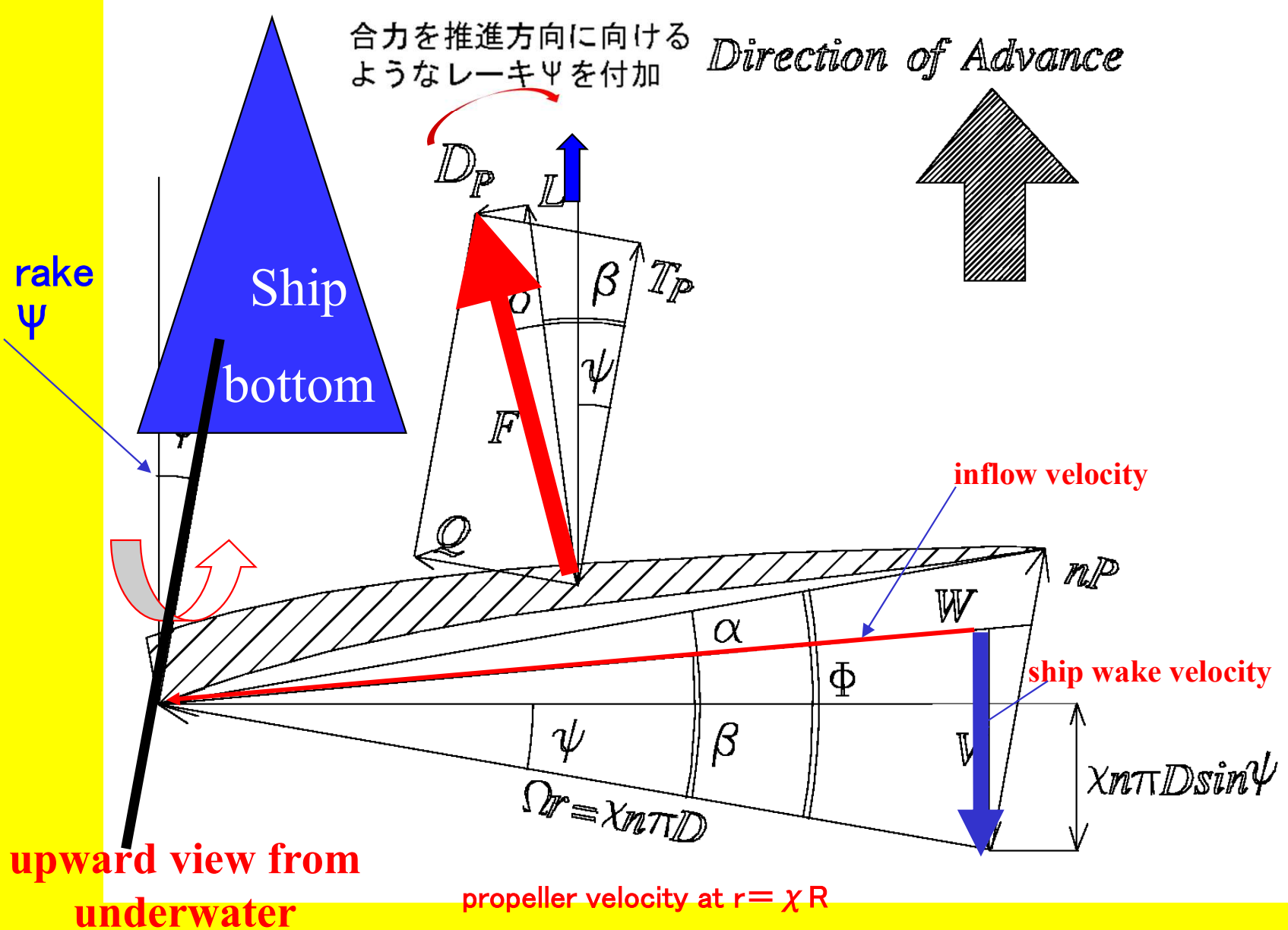


Fig.12 プロペラ軸レーキ角 Ψ のメカニズム(2軸SPPを想定)

実験と解析:

SPP16を使用してレーキ角 ψ を4種類(0° , 10° , 20° , 30°)変えてPOTを実施し解析した。POCをFig14に示す。(今回、横力 F_{HM} は計測されていない。トルク Q 作用半径比 γ から推定)

レーキ角 ψ の補正式:

$$K_{TS} = \frac{T_S}{\rho n^2 D^4} = \frac{T_{PM} \cos \psi + F_{HM} \sin \psi}{\rho n^2 D^4}$$

$$\eta_s = \frac{T_S V}{2\pi n Q} = \frac{J}{2\pi} \frac{K_{TS}}{K_Q}$$

Propeller
Lateral Force

$$F_{HM} = \frac{1}{\gamma} \frac{Q}{D/2}$$

$\gamma = R_0/R$: Lateral Force Acting Position

Fig13 Propulsive efficiency of η_s including shaft rake angle effect

Propeller efficiency increase by horizontal shaft rake angle

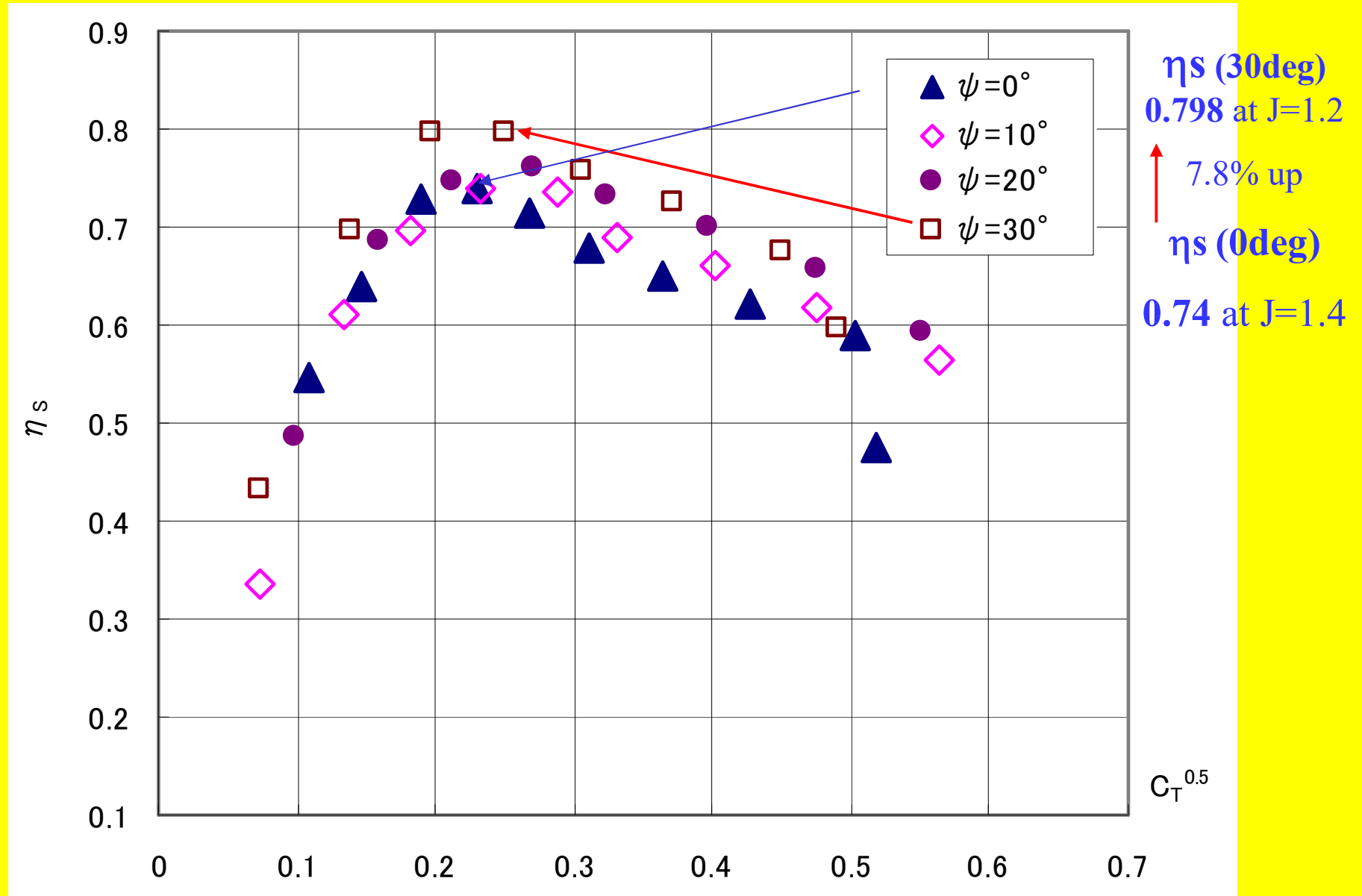


Fig.14 Effect of shaft rake angle, SPP (SSPA prop) $P/D=1.6$, $I/D= -0.167$

SPPの単独特性まとめ

- (1) 没水深度を変化させたPOT単独特性試験によれば、半没水SPPの効率は大没プロペラより良い。
- (2) SPP半没水率が30%(1/3D)の場合のプロペラ効率が最も良く、大没時と比べて約12%向上する。
- (3) SPPの水平シャフトレーキ Ψ をつけると推進効率が向上する。 $\Psi=30^\circ$ 時が最も良く、 $\Psi=0^\circ$ に比べて7.8%増加した。

§ 2 SPP船航走姿勢/馬力シミュレーション

高速船2隻「こうべ」、「オリーブ」を対象船としてSPP船の航走シミュレーションを行い、航走姿勢、馬力の推定により自航状態のSPP単独特性を評価した。



Koube

Length (P.P.)	24.0m
Breadth	5.50m
Depth	2.85m
Draft(Designed)	0.90m
Model Scale	1 / 32
Max Speed	43.5kt
Warped-hull with SPP	

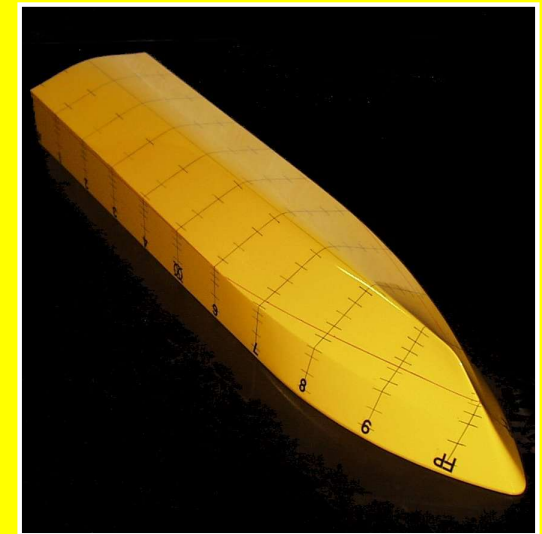
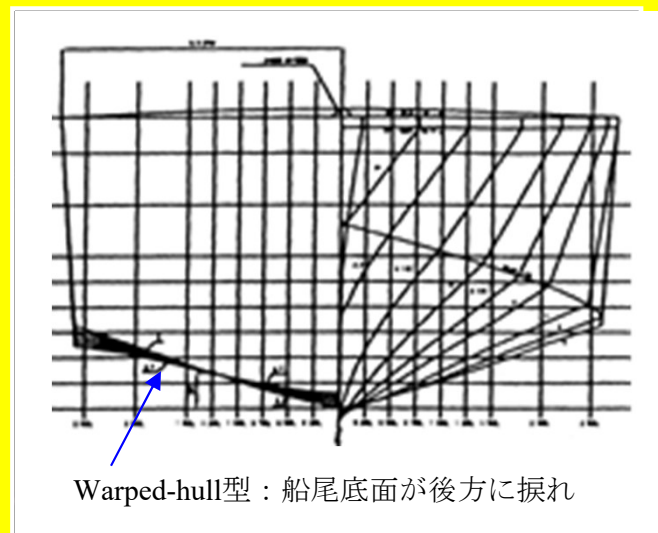
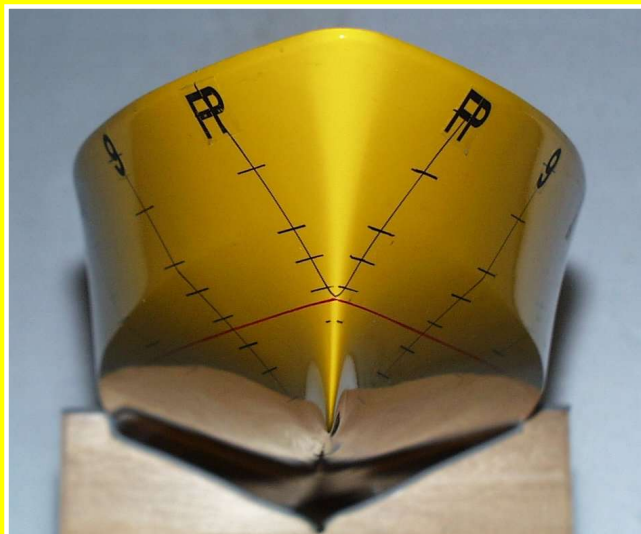


Fig.15 SPP装備船広域監視艇“こうべ” 模型要目・形状

小型高速艇模型 (旅客船おりいぶ号)

“旅客船おりいぶ号”



船体主要目

Length (P.P.)	23.2m
Breadth	5.20m
Depth	2.40m
Draft (Designed)	0.87m
Model Scale	1 / 31

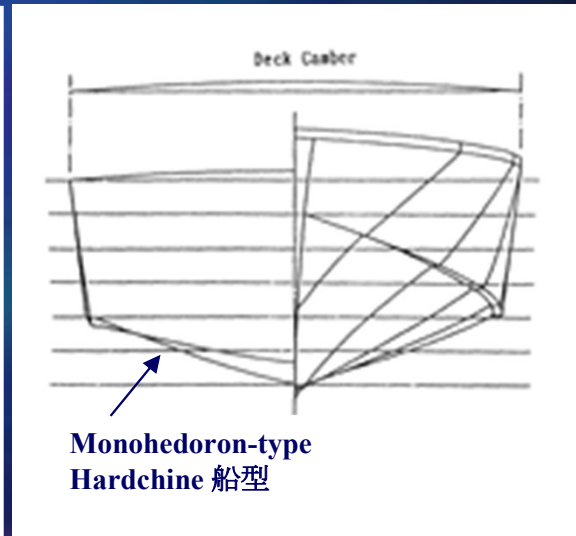
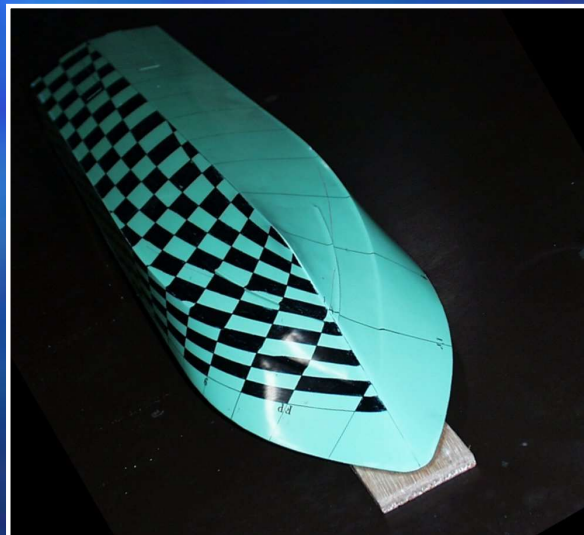
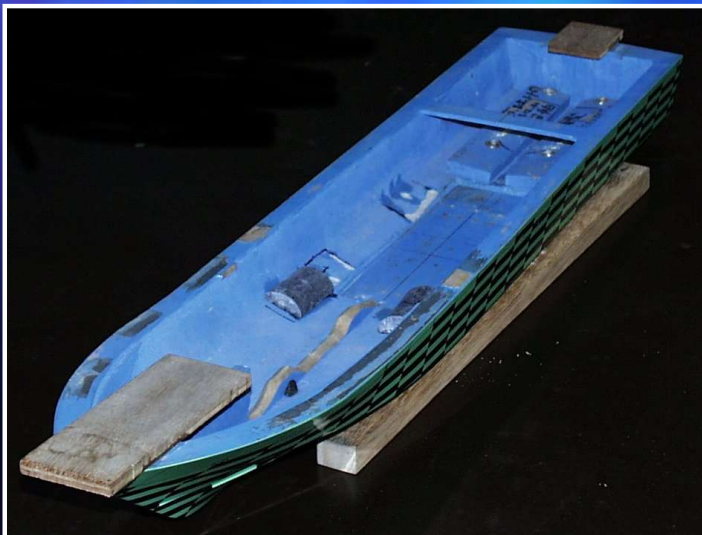


Fig.16 小型高速艇模型“おりいぶ” 模型要目・形状

①SPP性能の評価方法:

SPP船の特徴は停止時プロペラ全没状態から、プロペラ作動により船体が加速、増速して徐々に浮上、SPPが半没水状態になり巡航速度至る。この過程でSPPが最適な没水深度になっている事が重要で、人為的に与えた没水深度でのSPP単独性能だけではSPP船の評価はできない。このため巡航速度Vまでの航走シミュレーションを実施し、SPP船の推進特性(船体姿勢、馬力、船速)を推定し評価することが必要となる。

(1)対象模型船型:

船体肋骨船形状が異なる 2隻“こうべ”、“オリーブ”を使用

- ・こうべ :Warped-hull型:船尾底面が後方に向けて捩れ(Fig.15)
- ・オリーブ:Monohedoron型:船尾底面傾斜が同一(Fig.16)

(2)拘束模型データベース取得:(Fig.17)

- ・計算機上での自航試験:「航走シミュレーション・プログラム」の作成
- ・拘束模型試験とデータベース取得:
船速V一定下で各種の(浮上量×トリム)を固定した拘束系統模型試験を行い 抵抗 F_x 、上下力 F_z 、モーメント M_y を計測

$$F_X = F_T \cdot \cos(\tau + \beta) \quad (1)$$

$$F_Z + F_T \cdot \sin(\tau + \beta) + F_B = W \quad (2)$$

$$M_G + F_T \cdot L_T + M_B = 0 \quad (3)$$

Where,

F_X : Resistance F_Z : Lift W : Dispt.

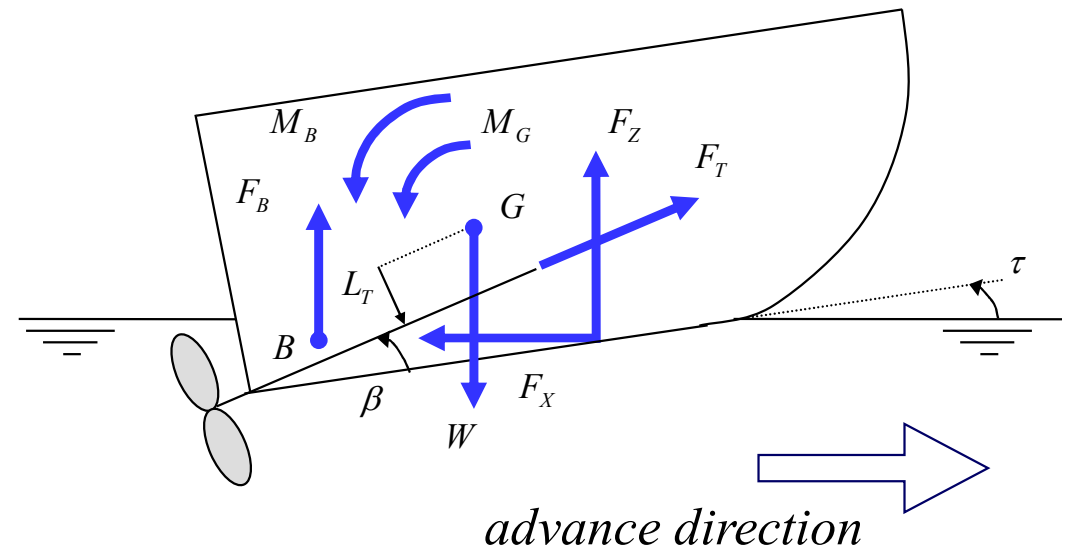
F_T : Thrust F_B : Buoyancy

τ : Trim β : Angle(shaft-B.L.)

L_T : Dist.(shaft-CG)

M_G : Dynamic Trim Mt as for CG

M_B : Trim Mt due to Buoyancy as for CG



Balance of Forces on a Running HSS

Fig.17 拘束模型試験によるSPP船模型の流体力データベース取得方法

自由航走時の力、モーメントの式を(1)、(2)、(3)式に示す。船速 V ベースの浮上量とトリム τ を求めるために(1)~(3)式を(4)式のような各誤差の二乗総和 R が略零になるようにトリム τ 、浮上量、抵抗、揚力を繰返し計算で求めた。(Fig.18) $F_n=0.40\sim0.6$ で沈下量とトリムの変化が大きく高速になるほど“こうべ”(Warp型)のトリムが大となり抵抗の増加度が少ない。

$$R = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 \quad (4)$$

$$R_1 = \{ F_X - F_T \cdot \cos(\tau + \beta) \} / W$$

$$R_2 = \{ F_Z + F_T \cdot \sin(\tau + \beta) + F_B - W \} / W$$

$$R_3 = \{ M_G + F_T \cdot L_T + M_B \} / (W \cdot L_{PP})$$

Fig.18の抵抗 F_x から実船換算により推進馬力を求めた。“こうべ”について、SPP装備とCP装備の場合の推定馬力曲線を計算しFig.19に示す。 $V_s \doteq 40$ kts以上の高速域でSSP船の性能が向上することが分かる。(40kts前後の不連続性はSPP特性のbreakdown現象によるものある。)

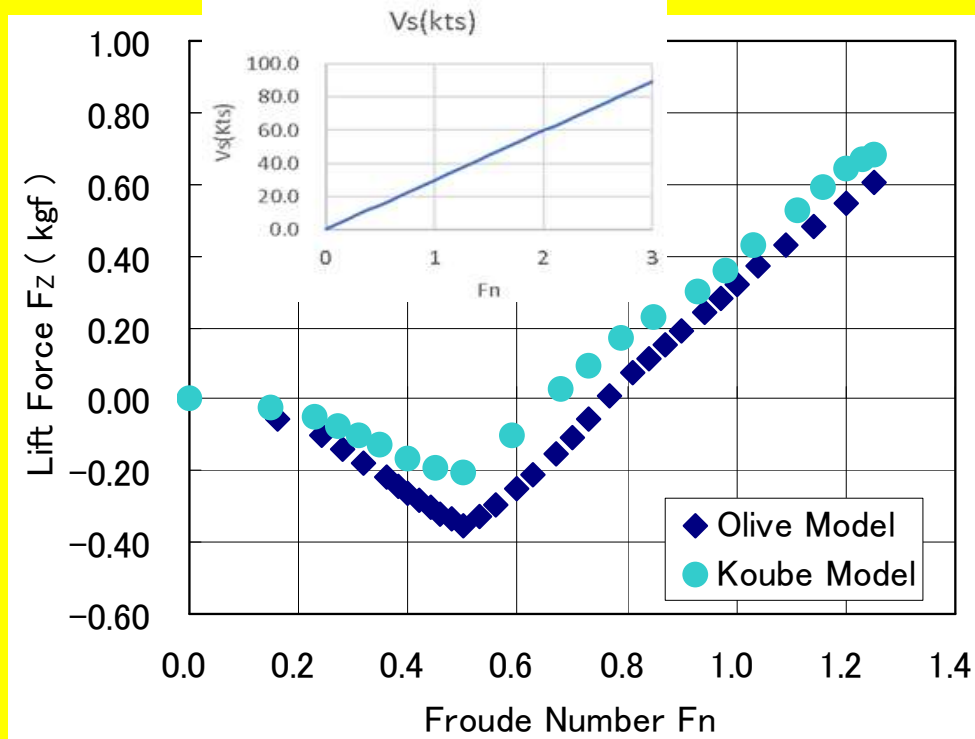
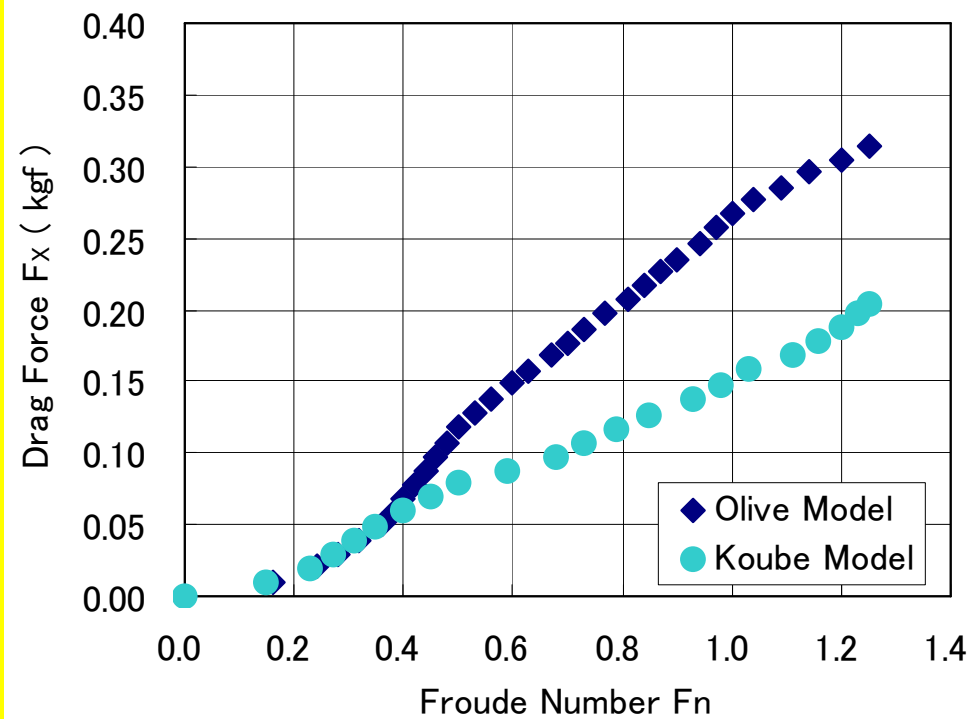
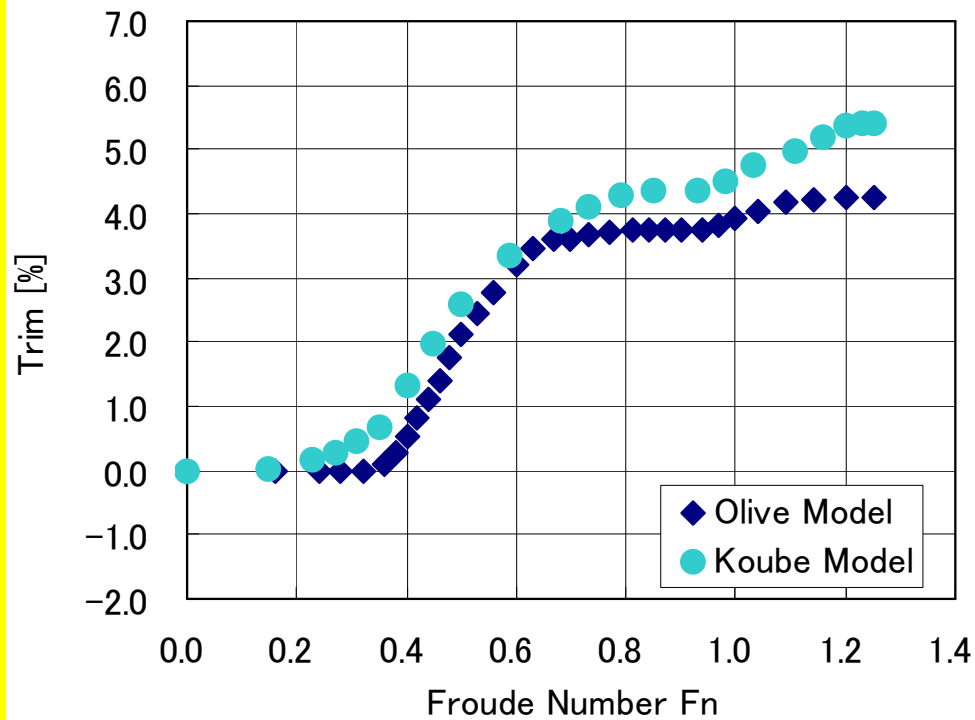
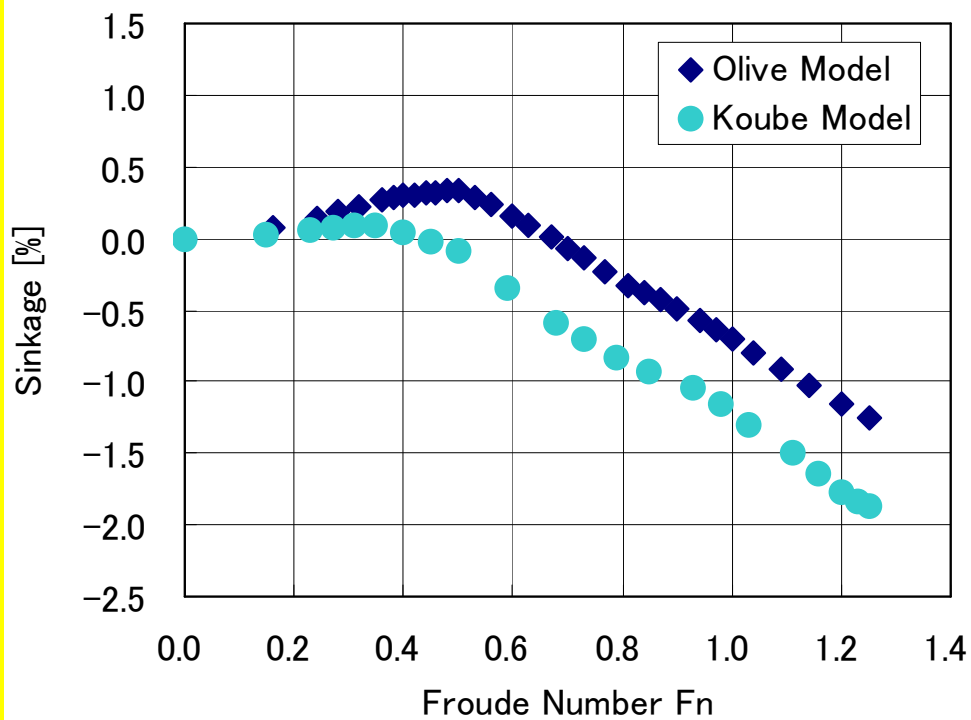


Fig.18 Simulated running trim, sinkage and force(Koube and Olive model)

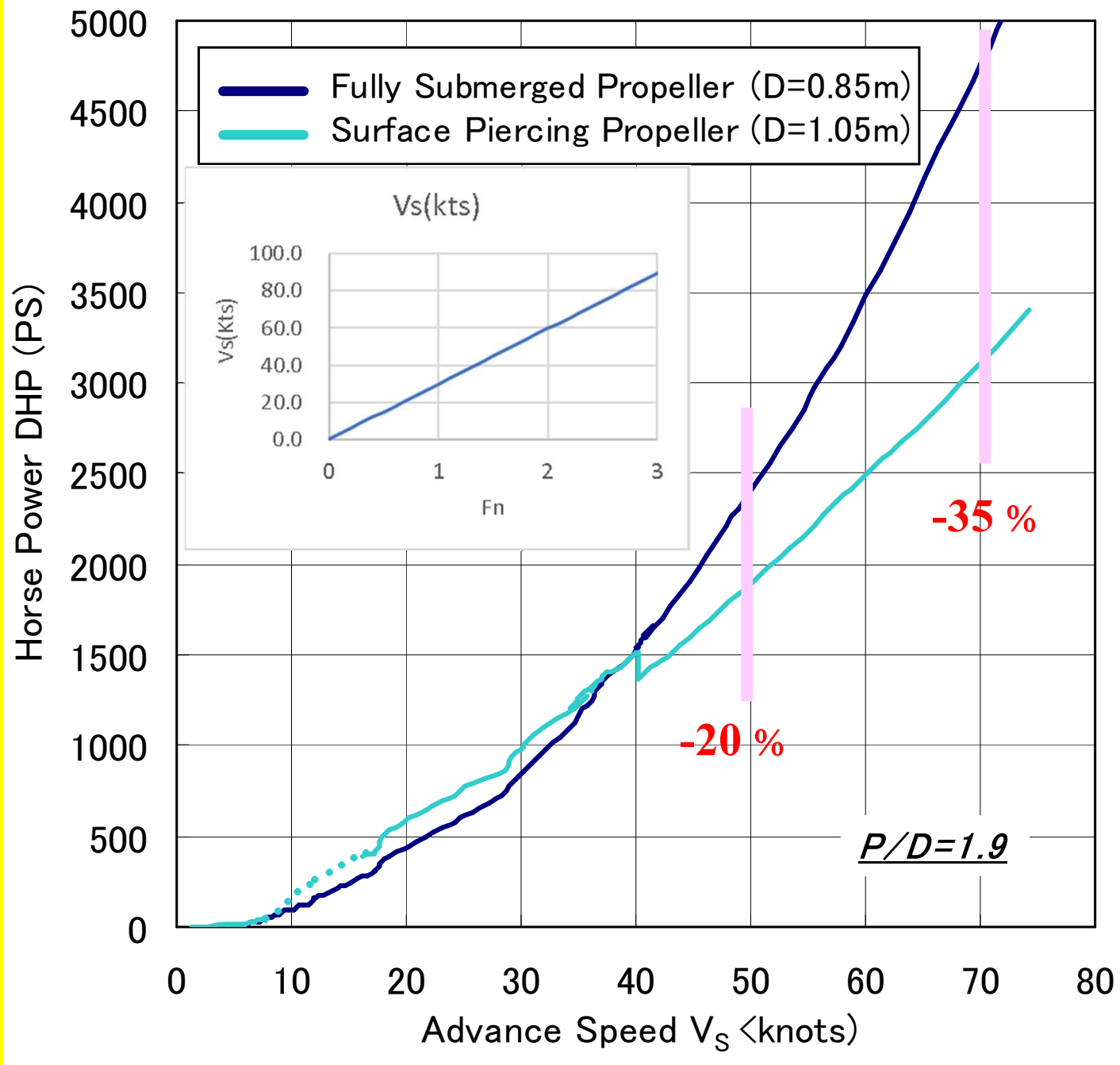


Fig.19 Horse Power Curves of Koube (SPP/CP installed)

5. 結論

- 1) 単独特性試験POTによりSPPは約30%Dの半没水状態で高い推進効率を持つ。プロペラ軸に水平レーキ角を付けることによりさらに効率が增加する。
- 2) SPP装備船が自航状態で高い推進性能が達成できるかを調べるためにSPP船の航走姿勢シミュレーションを行った。シミュレーションに必要な流体力学的諸量を“こうべ”と“オリーブ”の拘束模型試験で計測、データベースを取得使用した。
- 3) 船速ゼロの状態から巡航速度までの各船速での浮上量、トリム、抵抗、スラスト計算し馬力を推定した。
- 4) 半没水SPP装備船と全没水CP装備船の比較：高速域で半没水SPP装備船が優れ、超高速域に向かい差が増大する傾向を得た。
(なお、CP装備船は実船高速域でキャビテーション発生が見込まれ馬力は高くなる傾向がある。)

なお、曳引台車の速度限界 ($Fn=1.25$ 、40kts相当)により超高速域は外挿推定となった。



参考文献

- (1)野澤和男、高山尚久:サーフェスプロペラの推進性能に関する実験的研究、関西造船協会誌
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jksna/2002/237/2002_237_237_63/_pdf/-char/ja
 - (2)野澤和男、高山尚久:サーフェスプロペラ装備高速船の航走シミュレーションの研究、
関西造船協会誌
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jksna/2004/241/2004_KJ00000789797/_pdf/-char/ja
 - (3)R.S.Alder、D.H.Moore:Performance of an Inclined Shaft Partially-Submerged Propeller
Operating Over a Range of Shaft Yaw Angles、DTNSRDC Report、SPD-802-01、1977.
 - (4) Niclas Olofsson:Force and Flow Characteristics of a Partially Submerged Propeller、
Chaimers Tekniska Hogskola、1996.
 - (5)菊地弘憲、佐々木紀幸、村上恭二、木原一、藪下和樹、鈴木勝雄:水平レイキ付サーフェス
プロペラに関する実験的研究、関西造船協会誌、第232号、1999、pp1-8.
- 一般参考資料として、
- (6)野澤和男、佐々木紀幸:プロペラ性能の原理と設計、らん、関西造船協会
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ran/54/0/54_KJ00001930282/_pdf/-char/ja
 - (7)野澤和男;船_この巨大で力強い輸送システム :大阪大学出版会、野澤和男 (sumomo.ne.jp)