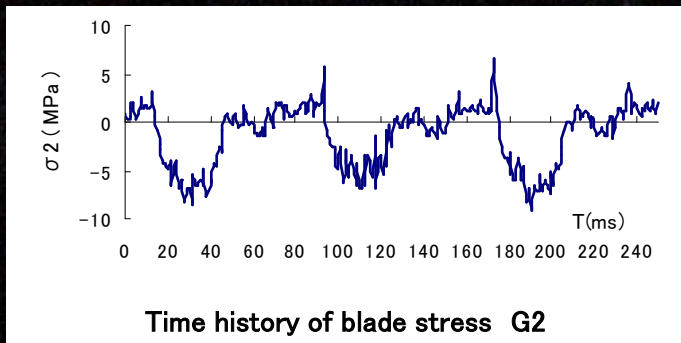


# サーフェスプロペラ

## 翼強度とBearing Force/Moment



水面

---

---

# 緒言

サーフェスプロペラ(水面貫通型プロペラ: surface piercing propeller、SPP)の翼強度設計や起振力となるBearing Force/Momentについて概説する。SPP船の推力はプロペラ一回転中で非常に大きく変動している。半没水のため各翼は水中から次々とスプレーを巻き上げて空中に飛出し再没入を繰り返す。空中に出た翼は殆ど推力が零だが水中直下では最大推力を発生するので各翼の推力 $T_B$ は一回転中に $0 \sim T_{Bmax}$ と大きく変動する。つまり、①時間的平均値が船の推力となり、②変動成分がプロペラや船体の起振力になる。ここでは、主に②の変動成分について2つの課題を考察する。(Fig.1)

- ①翼強度設計: 翼変動応力  $\Rightarrow$  翼折損の原因  $\cdot \cdot$  プロペラ材の金属疲労
- ②船体起振力: 翼の変動外力  $\Rightarrow$  プロペラ軸変動外力(ベアリングフォース/モーメント)  $\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$  船体起振外力

本論では、SPP模型の翼面歪ゲージによる応力計測とプロペラ動力計による推力・トルク計測を行い、翼強度とベアリング・フォース/モーメントを考察する。

**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単独性能**

- ・模型プロペラ
- ・要目:  $Z \times D_p \times p \times a_e \times b$
- ・parametric study
- ・翼数、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 ( $\tau, H$ ) 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 ⇒ 翼強度設計

2) ベアリング・フォース/モーメント

⇒ 軸系、軸受、船体振動

Fig.1 SPP船の研究課題

*Typical SPP POT movie*

$Z=3, D_p=0.2m,$

$P/D=1.6, J=1.2$

船側

水面



SPP POT movie:

[https://drive.google.com/file/d/1v17DEhPN\\_NfFTBg0xspUZYeB\\_CGMP0w3/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1v17DEhPN_NfFTBg0xspUZYeB_CGMP0w3/view?usp=share_link)

SPP裝備高速船”Kobe” on board :

[https://drive.google.com/file/d/19ZM-uGVB0kP4UI6mUtZ6TTjgivsbZc0r/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/19ZM-uGVB0kP4UI6mUtZ6TTjgivsbZc0r/view?usp=share_link)

(filmed by K.Nozawa)

Fig.2 SPP单独模型試験(POT)とSPP高速船プロペラ後流

# §1 SPPの翼応力とスラスト、トルクの計測

- ・流力性能研究と同じSPP動力計 (Fig.3) を使用し、スラスト $T$ 、トルク $Q$ 計測と同時に翼応力の計測を行った。
- ・歪ゲージを貼付したSPPの1翼が水中最深部を通過時にパルスが入るようにして翼回転角位置と翼応力、 $T$ 、 $Q$ のtime historyの現象を把握する。

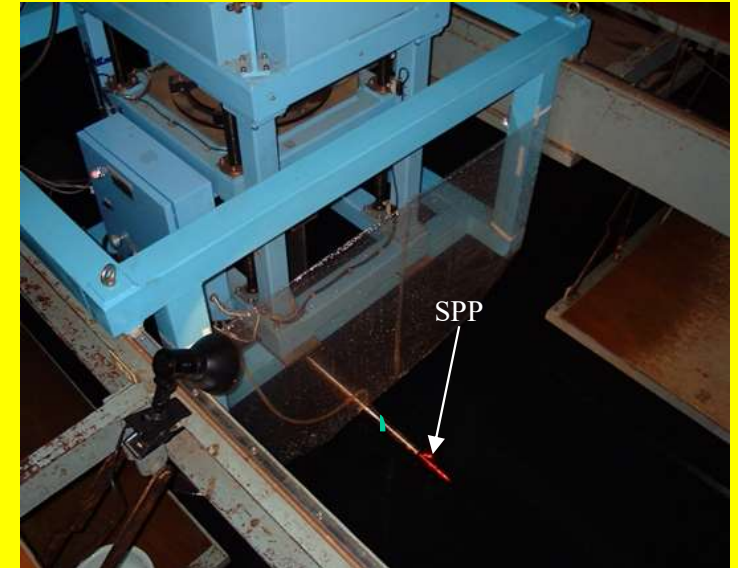


Fig.3 SPP動力計

## ① SPP模型(後出Fig.4)

- ・流力性能研究で使用したSSPA翼断面の3翼のsuper cavitating propellerを使用
- ・直径 $D=0.2\text{m}$ 、展開面積比0.5
- ・ピッチ比  $p=1.6$
- ・作動方法: プロペラ前進速度 $V=3\text{m/s}$ 一定で回転数 $n$ を変化させて前進率 $J$ を変える。

## ②プロペラ翼歪ゲージ位置と計測法

▶SPP模型プロペラ:( $p=1.6$ )の1翼面に歪ゲージ5点を貼付

▶歪ゲージ貼付位置(図4)

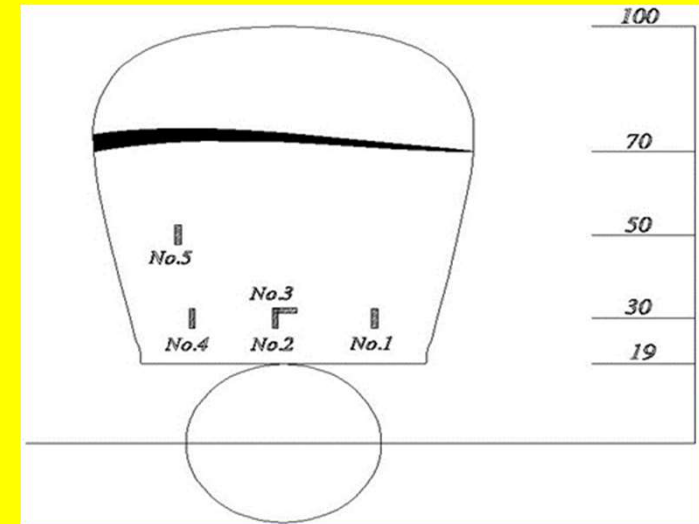
・翼の背面側 5枚のゲージ

・0.3R上に 3点 翼先端から % chord lengthで

G1(20%), G2(50%), G4(80%)・・・向き:半径方向

G3(50%) ・・・向き:回転方向

・0.5Rに1点G5(80 %) ・・・向き:半径方向

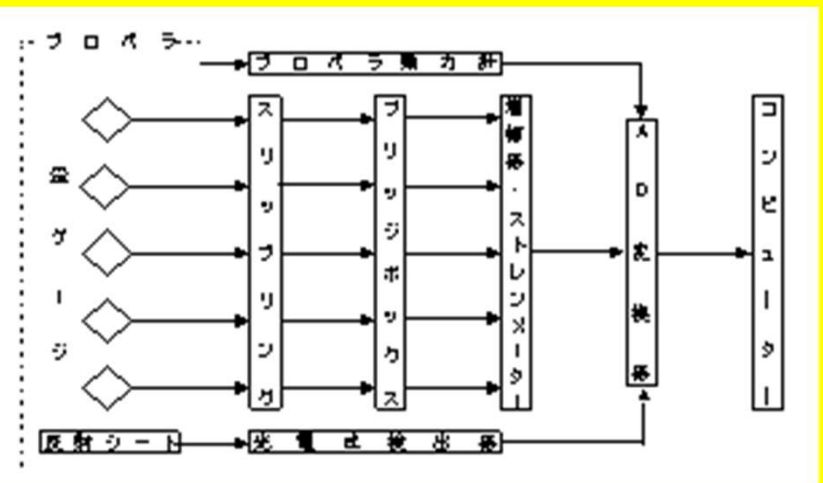


▶翼歪ゲージ出力⇒曳航台車上パソコンへ

・ゲージはプロペラキャップ部に取り付けた軸端型のスリッパリングを経て台車に引き上げ、ブリッジボックスを介して増幅器、AD変換器を経てパソコンに導く(Fig.5)

・ゲージブリッジの組み方は1アクティブゲージ法2線式を用い増幅器はストレインゲージ式変換器用のブリッジ印加電圧を内蔵した汎用直流増幅器を使用した。

・翼位置:プロペラ軸に反射マークを貼付し光電式検出器により翼の回転位置を同時に計測した。パルスはプロペラ1回転中、ゲージG4が水中最深部通過時に発生。



翼ひずみ計測系統図

### ③ 模型プロペラと翼面歪ゲージ位置

Model SPP:

SSPA type cavitation prop.

$P/D=1.6$

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



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)  
背面(backside)

ゲージ位置

80 % at 0.5R

80%, 50%, 20% at 0.3R

(%翼弦長、先端より)

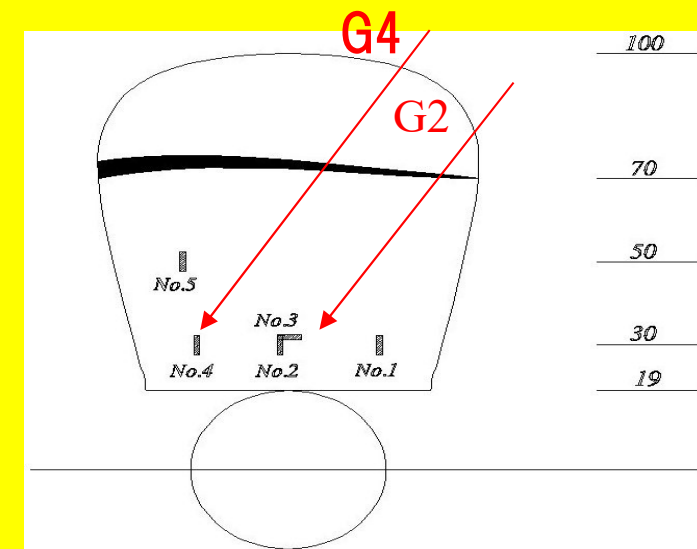
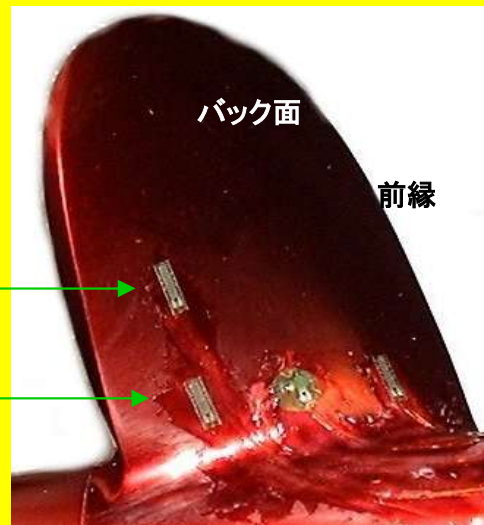
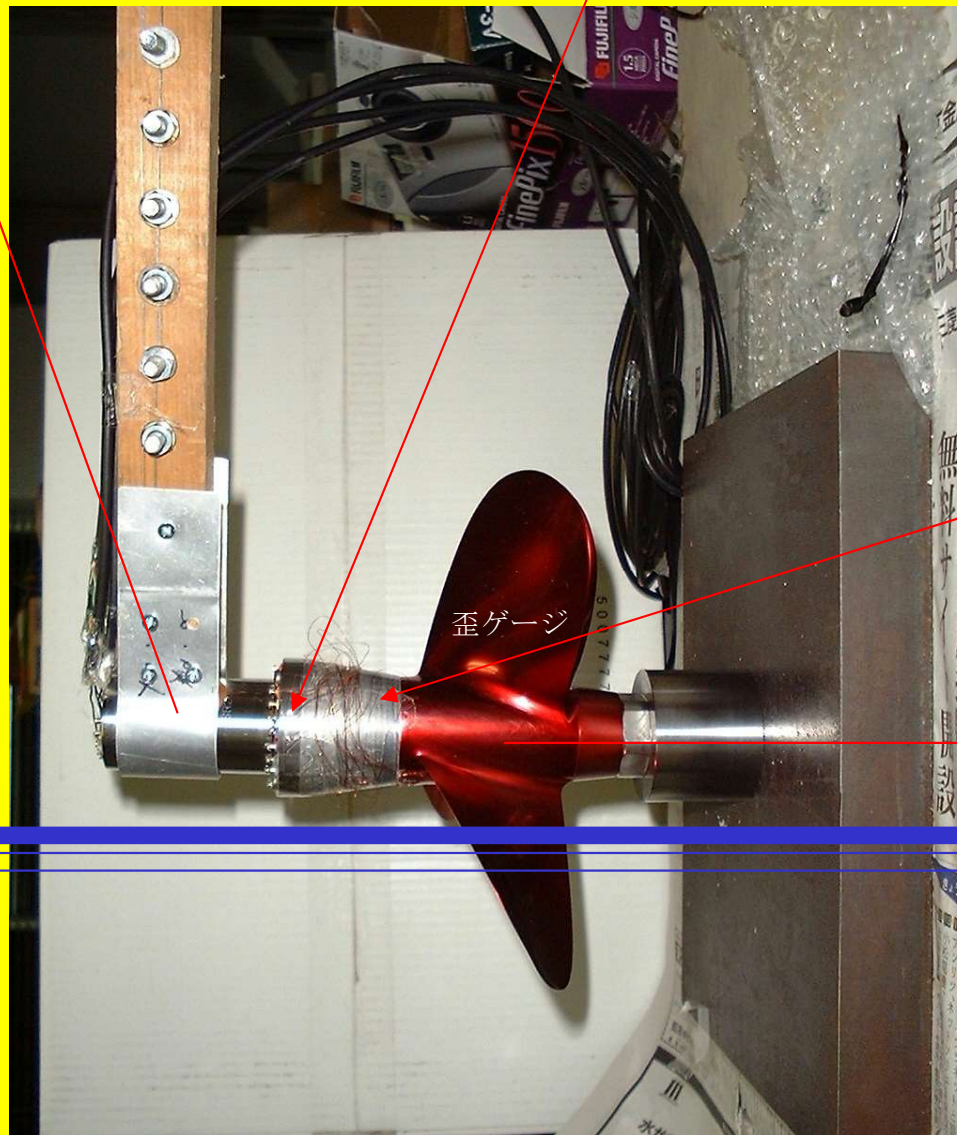


Fig.4 模型プロペラと Strain gage位置

# SPP Blade stress measurement

Gage Output → Carriage: dynamic strain meter-AD-CP(1msec)

Shaft end slip ring

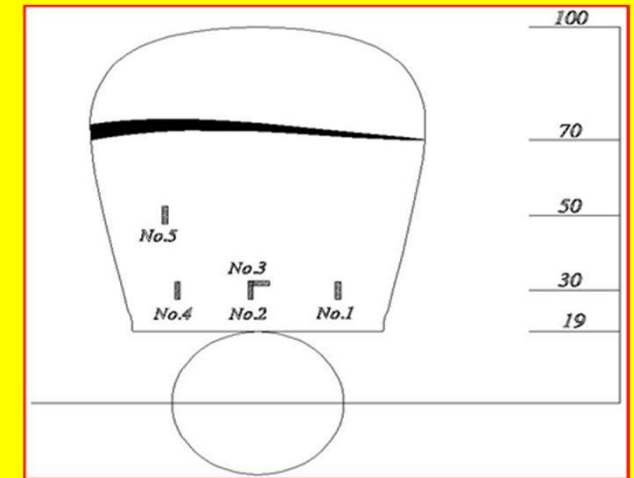


推進方向



WL

歪ゲージ



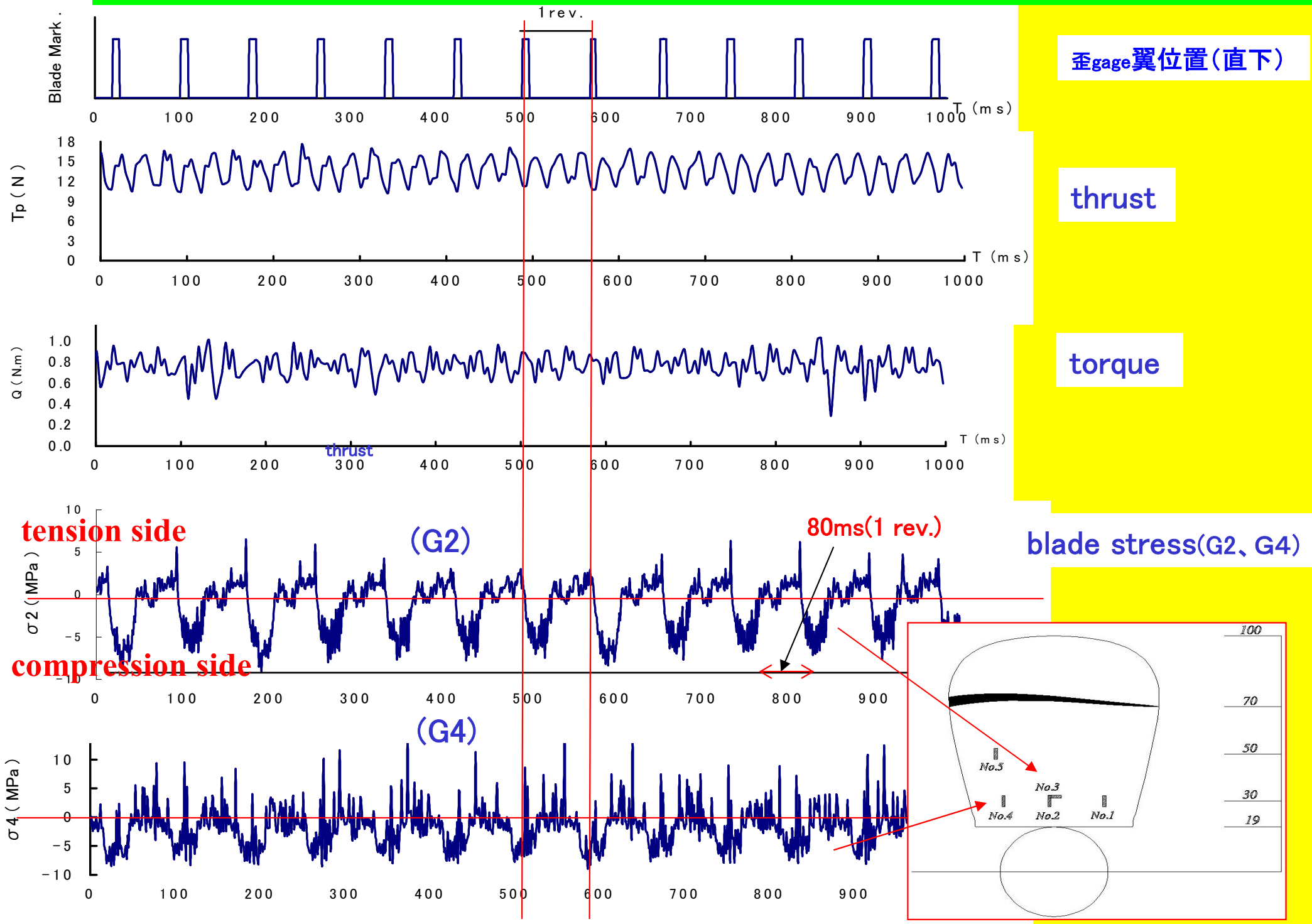
Strain gage(G1-G5)

T,Q : POT dynamo

Fig.5 SPP Blade stress 出力の曳航車台への導出法(模式図)



Fig.6 翼応力、推力/トルクの時系列波形 ( $J=1.2, n=12.5\text{rpm}, v=3\text{m/s}, I/D=-0.167, \phi=0^\circ$ )



歪gauge翼位置(直下)

thrust

torque

blade stress(G2, G4)

# §2 SPP翼計測応力と実機への換算

## ① 梁理論によるプロペラ翼応力の推定式

$F_n$ : 翼面集中荷重と翼根曲げモーメント

$$F_n = (T_B^2 + (Q_B / \chi R)^2)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

$T_B, Q_B$ : 一翼Bladeにかかる推力、トルク  $l$ : 翼長、 $t$ : 翼厚

$M$ : ゲージ翼断面( $\chi R$ )の曲げモーメント,  $D=2R$ : 直径

$$M = F_n(\gamma R - \chi R) \cos(\phi_{\gamma R} - \phi_{\chi R}) \propto T_B \cdot D \dots \dots (2)$$

$Z$ : ゲージ翼断面G回りの断面係数

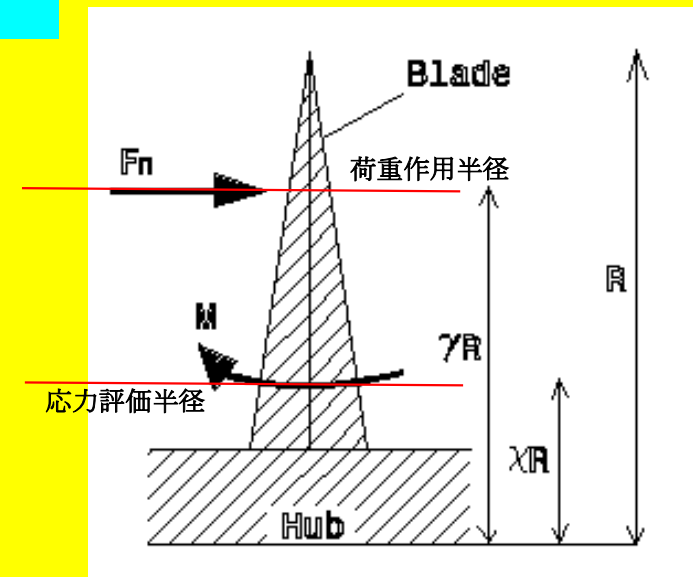
$I$ : ゲージ翼の断面慣性モーメント、

$\eta$ : 中性軸までの距離,  $k_p, C$ : 翼断面により決まる係数

$$Z = I / \eta = [k_p / (1 - C)] [I \cdot t^2] \propto I \cdot t^2 \dots \dots \dots (3)$$

貼付ゲージ位置の曲げ応力

$$\sigma = M / Z = M / (I / \eta) \propto (T_B \cdot D) / (I \cdot t^2) \dots \dots \dots (4)$$



応力評価半径の翼断面

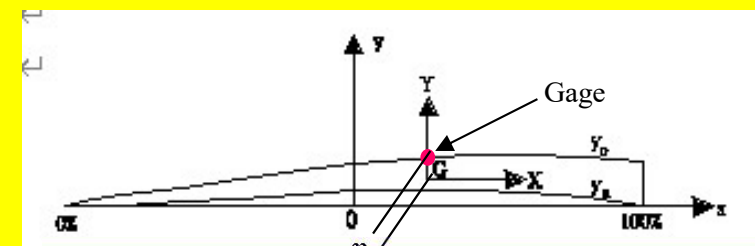


Fig.7 模型翼応力の実機への推定法

## ② 相似則による $\sigma_s$ の推定法

実機sが模型mと形状が(長さ/厚さ方向に)相似に作られている場合、(2)式を利用して $\sigma_m$ から $\sigma_s$ を推定できる。即ち、

$$\sigma_s / \sigma_m = [(T_B \cdot D) / I \cdot t^2]_s / [(T_B \cdot D) / I \cdot t^2]_m \dots \dots (5)$$

翼数Zの変化( $Z_m=3, Z_s$ )も考慮して

$$\sigma_s = \sigma_m (D_s / D_m) (T_s / T_m) (t_m / t_s)^2 (l_m / l_s) (3 / Z_s) \dots \dots (6)$$

ここで、 $D_s/D_m=\alpha$ 、 $t_m/t_s=1/\alpha$ 、 $l_m/l_s=1/\alpha$  (夫々の寸法比:直径 $\alpha$ 、翼厚 $\alpha t$ 、弦長 $\alpha l$ 、実機翼数:Z)

$$\sigma_s = \sigma_m(\alpha)(T_s/T_m)(1/\alpha t)^2(1/\alpha l)(3/Z_s) \dots\dots(7)$$

▶ (実例) 模型から実機 ( $\alpha = 5.25$ ) のSPP翼の  $\sigma_s$  を推定

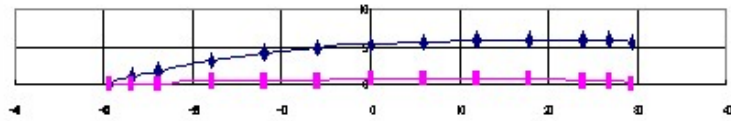
- ・模型実験値:  $D_M=0.2m$ ,  $V=0.3m/s$  at  $J=1.2$ ,  $T_m=15.7N$ ,  $\sigma_m=5.4MPa$  at G4
- ・実機想定 :  $D_s=1.05m$   $V_s=36Kts$ ,  $L_{pp}=24m$ ,  $T_s=29.4KN$   $\Rightarrow \sigma_s = ?$

### ③ 梁理論によるSPP実機翼応力 $\sigma_s$ の推定と設定

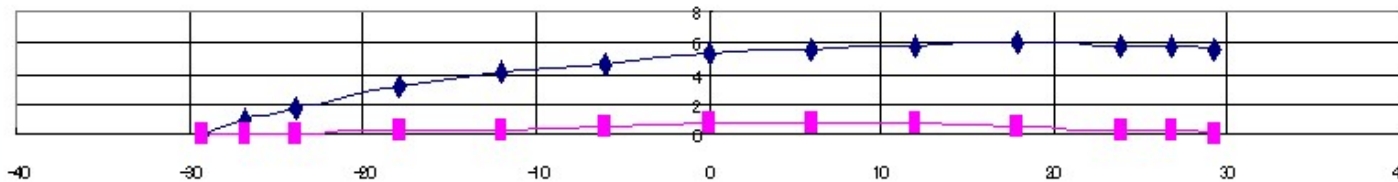
1) Model SPP  $Z=3$ ,  $T_m=15.7N$  at G4,  $J=1.2$   $\rightarrow \sigma_m=5.4MPa$



2) Full scale  $Z=3$ ,  $T_s=29.4KN$   $\alpha = \alpha t = \alpha l = 5.25$   $\rightarrow \sigma_s = 365MPa$



3) Full scale,  $T_s=29.4KN$   $\alpha=5.25$ ,  $\alpha t=7.88$ ,  $\alpha l=10.5$   $\rightarrow \sigma_s=81.4MPa$



.....  $Z=3 \rightarrow Z=4$  .....

4) Full scale,  $T_s=29.4KN$ ,  $\alpha=5.25$ ,  $\alpha t=7.88$ ,  $\alpha l=10.5$   $\rightarrow \sigma_s=61MPa$

● Full scale SPP Blade Stress can be reduced by appropriate choice of SPP

particulars. 4 bladed SPP gives lower blade stress.

Fig.8

(初期値)

▶ SPP模型応力計測値

▶ SPP直径1.05mの実機 (scale factor:  $\alpha=5.25$ ) 完全相似翼型

$\sigma_s=365MPa$  ←大きい

(Material of propeller is considered.)

▶ 翼型 → 厚翼、広弦長化  $\alpha t=7.88$ ,  $\alpha l=10.5$

$\sigma_s=81.4MPa$  ←略妥当

▶ 翼数変更 (BF/BM対策として)  $Z_s: 3 \rightarrow 4$ ,

$\sigma_s=61MPa$  ←妥当

(4)式は翼の設計応力 $\sigma_{design}$ を満たす翼要目(翼厚、翼幅……)を相似則的手法で求める方法としてよく使用される。

#### ④ゲージ翼位置と翼応力波形の時系列の詳細観察 Fig.5

①翼は没水①後、最深没水②で最大推力を生じそれにより最大曲げ応力5.9Mpaが発生、③空中に出て④⑤の微小振動波形の後、⑤⑥間で引張応力■が持続。これには推力と逆方向の力(Bが正圧、Fが負圧)<sup>(注)</sup>が必要である。Fig.2の激しい空中螺旋後流のV動画を見ると水中⇄空中の交替時、翼面F/B上の極めて複雑な圧力移動現象が予想される。

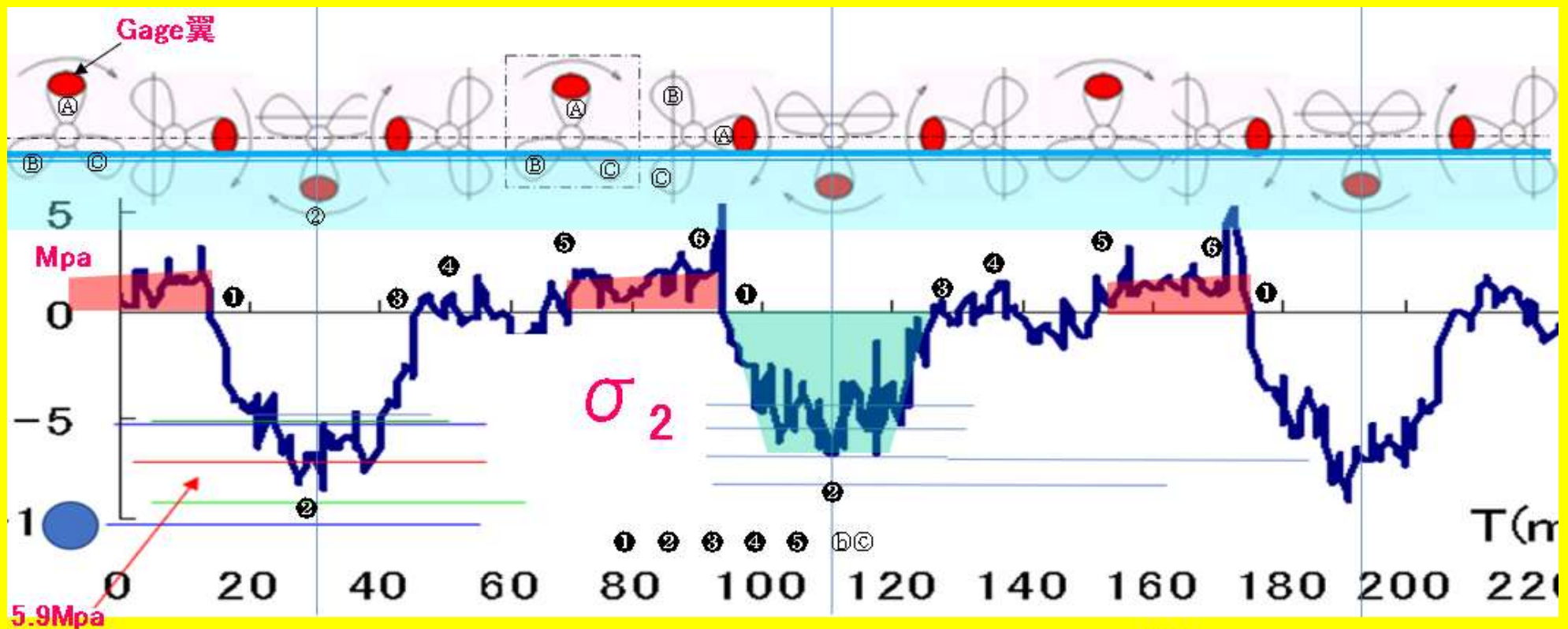


Fig.9 ゲージ翼3回転中の姿勢と $\sigma_2$ 応力波形の変化 <sup>(注)</sup> F/B: face面/back面

## §4 SPPのベアリングフォース・モーメント

### ① ベアリングフォース/モーメントの定義および一翼T/Qからの計算法

#### ■ Bearing Force/Bearing Moment (BF/BM)の定義(次頁Fig.10)

- ① BF/BMはプロペラ推力/トルクの変動成分に基づく流体外力で、軸受(ベアリング)を介して船体に伝達され船体起振力となる。
- ② 一翼についてBF/BMの成分を考えると(9)、(10)式のように計6種類である。
  - ① 推力 $T_B(\theta)$ とそれによる曲げモーメント $M_B(\theta)$ の垂直成分 $M_{VB}$ と水平成分 $M_{HB}$
  - ② 翼のトルク力 $F_B(\theta)$ とそれによる垂直成分 $F_{VB}$ と水平成分 $F_{HB}$
- ③ プロペラ全体では(11)式,(12)式のように翼数 $Z$ の重ね合わせにより $T$ 、 $Q$ 、 $M_V$ 、 $M_H$ 、 $F_V$ 、 $F_H$ の計6種類となる。

#### ■ 3翼SPPのBF/BM

- ① SPPは変動大: 1翼の推力・トルクは一回転中で0~Maxと大きく変動する。(Fig.11, Fig.12)
- ② 一翼のスラスト $T_B(\theta)$ 、トルク $Q_B(\theta)$ のtime historyの推定:  
Fig.12でゲージ翼(赤)は水中最深時( $\theta = 180^\circ$ )で水を最大に掻く時、他2翼は空中にあり推力は零。よって、ゲージ翼もプロペラもピーク値 $T_b \max = T_p \max$ である。また、 $\theta = 90^\circ$ 、 $270^\circ$ ではゲージ翼は空中にあるため $T_B \doteq 0$ である。(プロペラ推力は他翼が水中にあるため零ではない) 以上から、一翼の $T_B(\theta)$ 、トルク力 $Q_B(\theta)$ はFig.12の実線(空色着色した孤立釣鐘分布)のように推定できる。
- ③ 3翼プロペラのBF/BM:  
一翼のスラスト/トルク変動 $T_B(\theta)$ 、 $Q_B(\theta)$ から、(11)、(12)式より翼数の重ね合わせを経て3翼プロペラのBF/BMが求められる。

## ► For one blade : Force and Moment

← if  $T_B, Q_B, L_t, L_q$  of one Blade are estimated,

$$M_B(\theta) = T(\theta) \times L_T \quad F_B(\theta) = \frac{Q_B(\theta)}{L_Q} \quad (8)$$

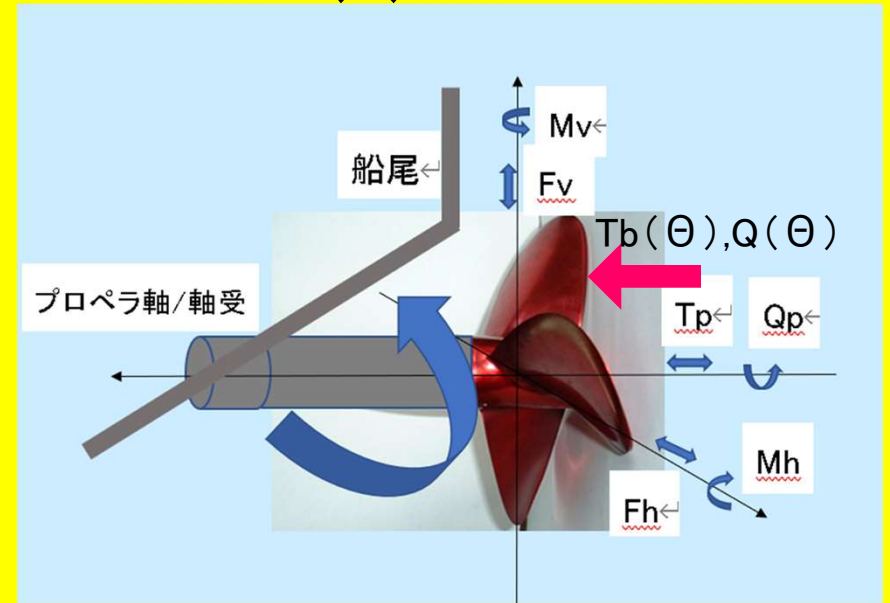
### Vertical / horizontal components

$$M_{VB}(\theta) = M_B \cos \theta \quad (9)$$

$$M_{HB}(\theta) = M_B \sin \theta$$

$$F_{VB}(\theta) = F_B(\theta) \sin \theta$$

$$F_{HB}(\theta) = F_B(\theta) \cos \theta \quad (10)$$



## ► BF/M of one propeller with 3 blades:

$$T_P(\theta) = T_B(\theta - 120^\circ) + T_B(\theta) + T_B(\theta + 120^\circ) \quad (11)$$

$$Q(\theta) = Q_B(\theta - 120^\circ) + Q_B(\theta) + Q_B(\theta + 120^\circ)$$

$$F_V(\theta) = F_{VB}(\theta - 120^\circ) + F_{VB}(\theta) + F_{VB}(\theta + 120^\circ)$$

$$F_H(\theta) = F_{HB}(\theta - 120^\circ) + F_{HB}(\theta) + F_{HB}(\theta + 120^\circ)$$

$$M_V(\theta) = M_{VB}(\theta - 120^\circ) + M_{VB}(\theta) + M_{VB}(\theta + 120^\circ)$$

$$M_H(\theta) = M_{HB}(\theta - 120^\circ) + M_{HB}(\theta) + M_{HB}(\theta + 120^\circ)$$

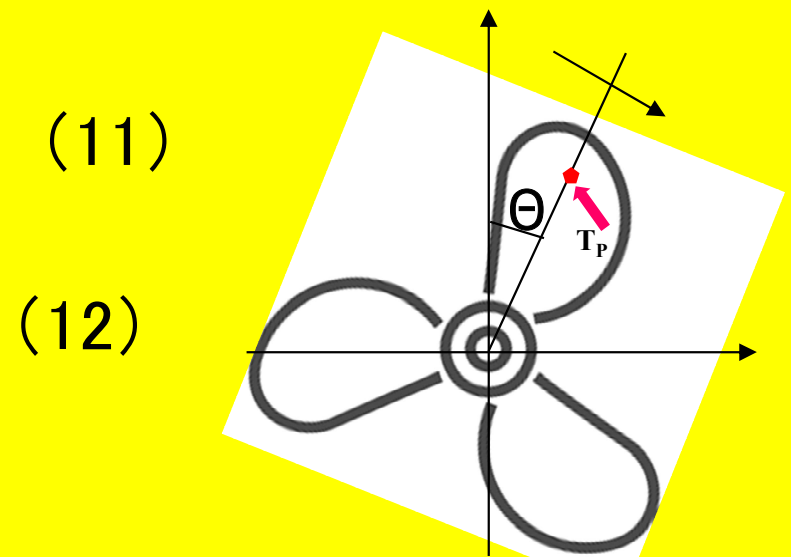


Fig.10 BF/BMと座標系

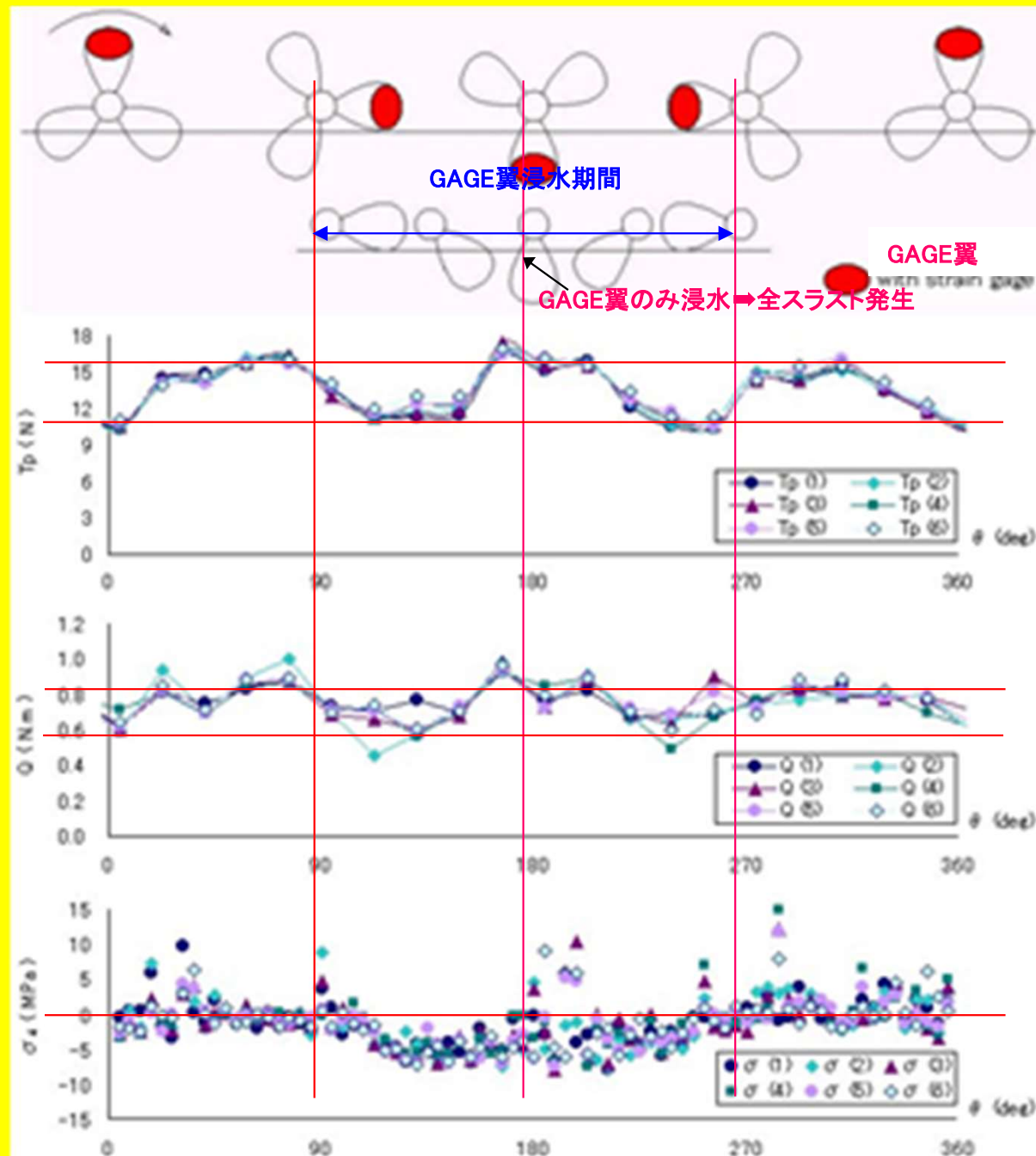


Fig.11 スラスト、トルク変動と翼応力変動およびゲージ翼回転関係  
( $J=1.2$  ,  $I/D=-0.167$ )

# 一翼のスラスト、トルクの推定結果

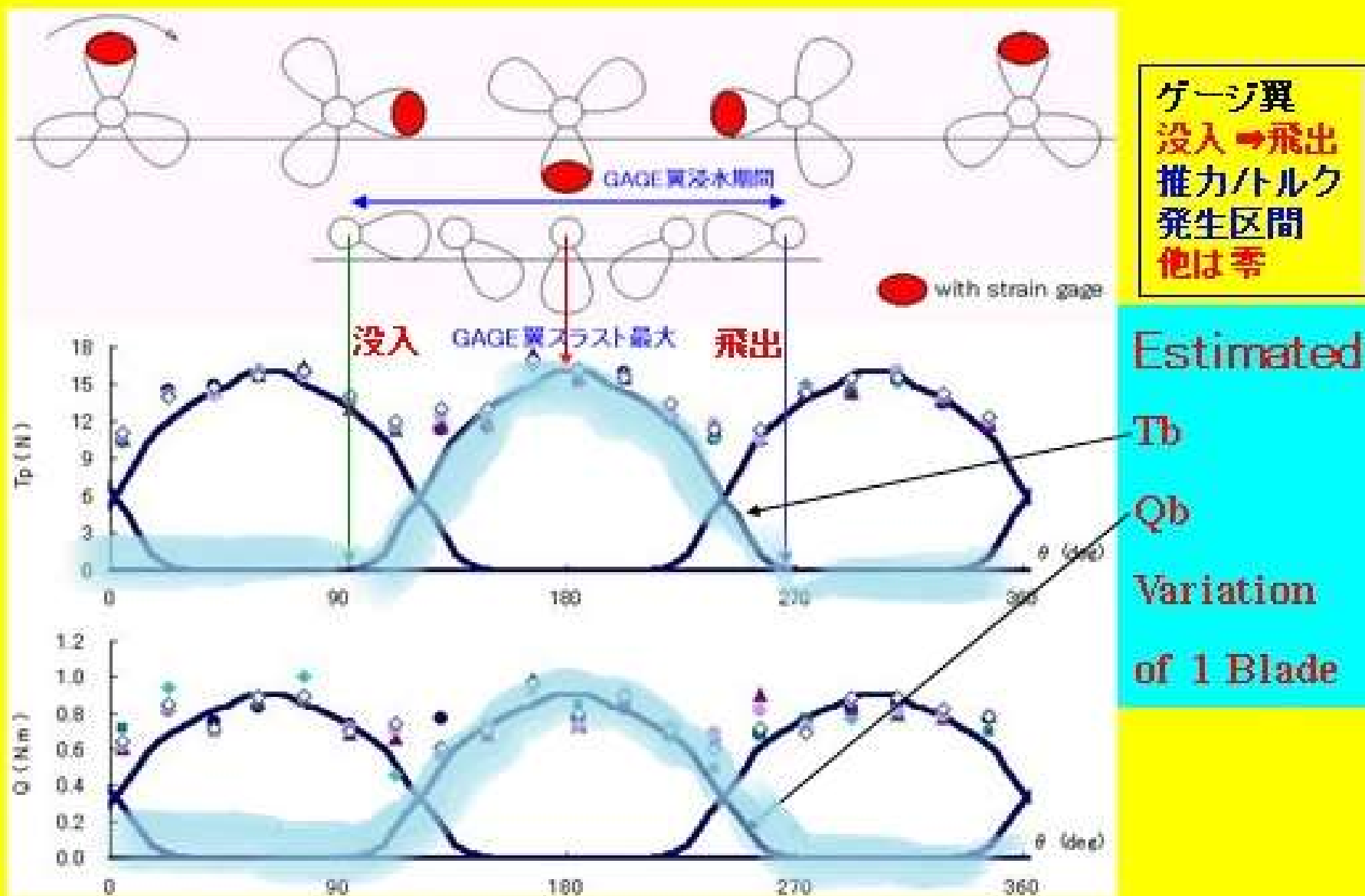


Fig.12 一翼のスラスト・トルクの推定結果

( $J=1.2$ 、 $I/D=-0.167$ )



## ② SPPのベアリングフォース・モーメントの推定結果と考察

### ① 3翼SPP模型のベアリングフォース・モーメント:

(11),(12)式で計算したBF/BMをFig.13aに示す。

条件:  $Z=3$ 、 $D=0.2\text{m}$ 、 $n=12.5\text{rpm}$

- ・3翼のため一回転に3個のピークが現れている。Blade Frequency :  $nZ$ 、.....
- ・SPP船は巡航時は船尾が浮上しプロペラ軸は水面上に出るためPOT状態となるため、今回のBF/BMの結果はSPP船の一般的傾向に近いと考えられる。

### ② 翼数変化の傾向

BF/BMの3翼、4翼の比較をするため近似的に4翼の計算を行う。

#### 1) 4翼SPPの一翼T、Q変動波形の設定条件

- ・3翼SPPと4翼SPPの全スラストを同一
- ・1翼のT,Q最大ピーク値を3翼時の3/4

#### 2) 3翼と4翼のBF/BMの比較

▶ 3翼と4翼のBF/BM:  $T_p, Q_p, F_V, F_H, M_V, M_H$ の計算結果 Fig.13a,b

▶ 変動波形のMax,Mean,Min および見掛けの全振幅 Table1

▶ 3翼と4翼の各変動成分の(3翼の全振幅 $\Delta_3$ に対する)比率 $\Delta_4/\Delta_3$

・スラストとトルクは約1.07、4翼が7%とやや増加するが大差なし。

・BF/BMの各成分比率 $\Delta_4/\Delta_3$ は $F_V:0.29$ 、 $F_H:0.13$ 、 $M_V:0.11$ 、 $M_H:0.30$ と4翼が減少する。特に、 $F_H$ 、 $M_V$ が顕著である。

▶ SPP船の起振力低減の観点から: 4翼が優れていることが分かる。

Fig.13a Z=3、1回転分

Fig.13b Z=4、1回転分

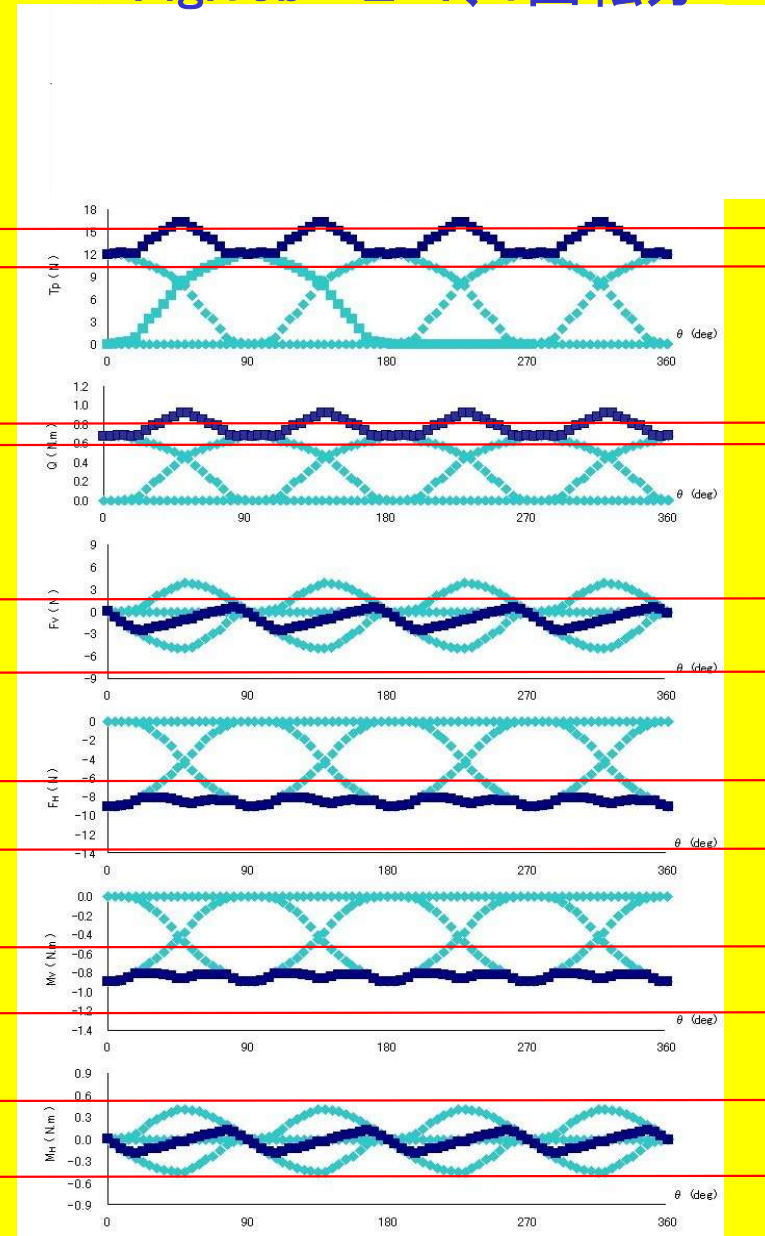
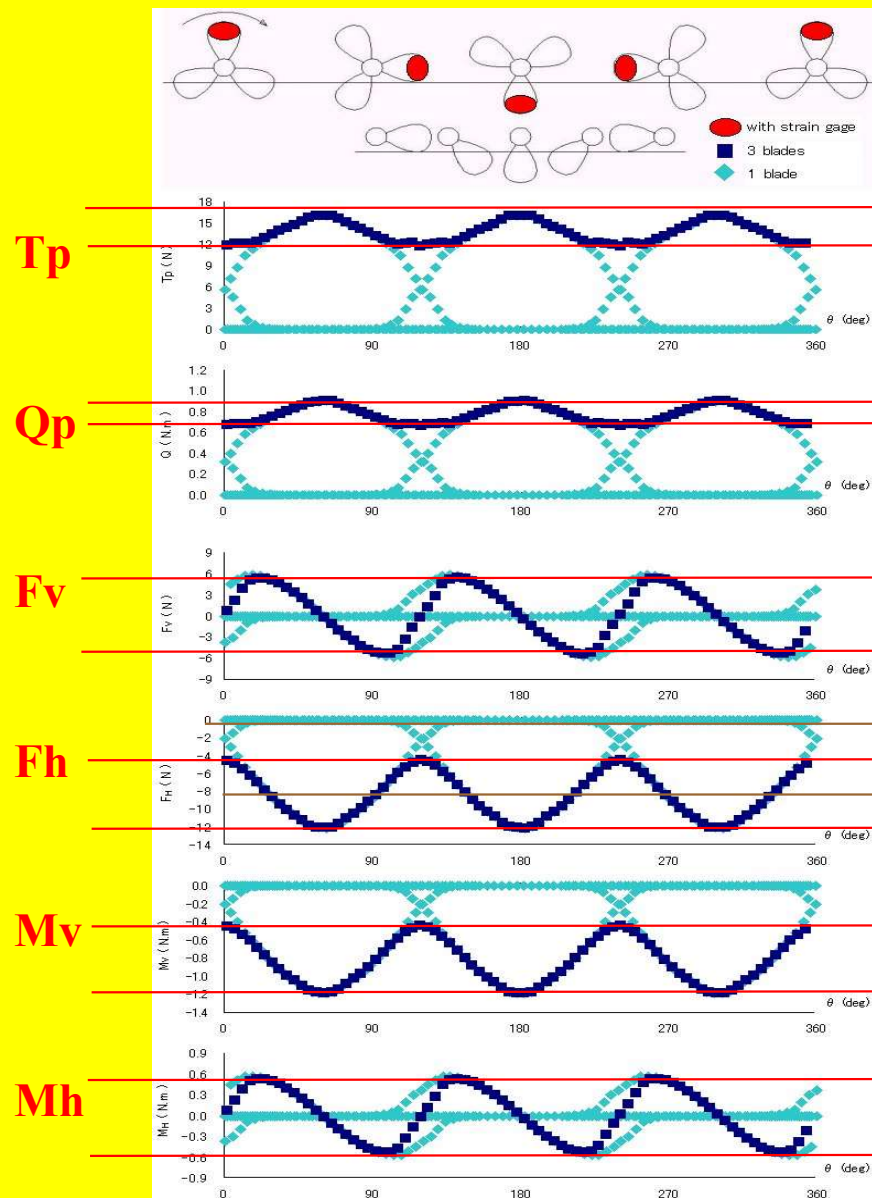


Fig.13a,b Bearing force and moment by equations 11 & 12 (3翼、4翼)

P/D=1.6, J=1.2, I/D=-0.167

➔ 3翼から4翼にするとBF/BMがかなり減少

T,Q,BF/BMの変動と振幅 $\Delta$  (max-min)を下表に示す。← Fig.13a, Fig.13b

3翼	T (N)	Q (Nm)	Fv (N)	Fh (N)	Mv (Nm)	Mh (Nm)
max	16.017	0.904	5.366	-4.464	-0.438	0.527
mean	13.850	0.781	-0.027	-8.601	-0.844	-0.003
min	12.015	0.678	-5.378	-12.073	-1.185	-0.528
$\Delta 3(\text{max-min})$	4.002	0.226	10.745	7.609	0.747	1.054
4翼	T (N)	Q (Nm)	Fv (N)	Fh (N)	Mv (Nm)	Mh (Nm)
max	16.333	0.921	0.600	-8.081	-0.887	0.124
mean	13.848	0.781	-1.003	-8.594	0.849	-0.033
min	12.062	0.680	-2.551	-9.044	-0.806	-0.188
$\Delta 4(\text{max-min})$	4.271	0.241	3.151	0.963	-0.081	0.311
$\Delta 4/\Delta 3$	1.067	1.067	0.293	0.127	-0.106	0.295

Table1 3翼と4翼のBF/BMの比較 (SPP模型POT Z=3 / Z=4 : Estimated)

## 5. 結論

水中と空中を翼が回転する極めて特殊な半没水プロペラSSPについて

①プロペラ翼応力/強度、②振動外力となるベアリングフォース/モーメント (BF/BM)を概説した。

①ではPOT時の翼応力を計測し実態を把握、SSP設計法の基礎を纏めた。

②ではSPPのBF/BMの変動挙動および翼数影響を明らかにした。

これらは前報の“SPP船の推進性能”と併せ、SPP装備船の設計に役立つであろう。

(後記)

本研究の初期、SPP装備船“こうべ”(神戸税関広域監視艇第2代)につき神戸税関殿から乗船とドック時見学の貴重な機会を得た。著者の体感ではSPP船の乗り心地は良好で、ドック時SPP/舵の顕著なキャビテーション・エロージョンは見られなかった。SPP船への期待をより深めることが出来た。

### 参考文献

1) <https://ndlonline.ndl.go.jp/#!/detail/R300000001-I000003593619-00>

APHydro 2002 : Asia Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Asia Pacific Maritime Congress : proceedings  
Hydrodynamic Performance and Exciting Force of Surface Piercing Propeller/ K. Nozawa ; N. Takayama /198

2)熊井豊二: 船体振動起振力としてのプロペラ Bearing Force, 西部造報, 22号 (1961).