

## 船型試験における不確かさ解析法

久米 健一\*、平田 信行\*、長谷川 純\*、  
塚田 吉昭\*、日夏 宗彦\*

### Uncertainty Analysis Method for Ship Performance Test

by

Ken-ichi KUME, Nobuyuki HIRATA, Jun HASEGAWA,  
Yoshiaki TSUKADA and Munehiko HINATSU

### Abstract

Uncertainty analysis has been considerably demanded so as to estimate the reliability of the experiments. Thus, it is conducted in various fields of engineering for explicit description of confidence level. Recently, ITTC(International Towing Tank Conference)<sup>1)</sup> began to concentrate on the issues of towing tank test quality, and the uncertainty analysis has been applied to the tests. This paper concerns the uncertainty analysis applied to the ship model test program with basis of ANSI/ASME Performance Test Code.<sup>2)</sup> The items of model tests presented here are resistance test, self-propulsion test, wake measurement and pressure measurement on the hull surface, which are the fundamental test items in ship hydrodynamics. In order to precisely predict the engine power requirement and other values, we need to clarify the accuracy of tank tests. Further merit of the uncertainty analysis exists in that we can trace causes of errors through the process of analysis. This means that we can reduce dominant errors and can improve the quality of test results. In the following, the procedure of the uncertainty analysis used is presented and applied to towing tank tests. The results of the analysis are then discussed.

---

\*推進性能部

原稿受付 平成11年3月19日

審査済 平成12年9月13日

## 目 次

1. 緒 言
  2. 不確かさ解析概論
    - 2.1 測定値に含まれる誤差
    - 2.2 解析結果の不確かさ区間
  3. 抵抗試験への応用
    - 3.1 測定値に含まれる誤差
    - 3.2 全抵抗係数  $C_t$  の不確かさ
    - 3.3 形状影響係数  $K$  の不確かさ
    - 3.4 造波抵抗係数  $C_w$  の不確かさ
    - 3.5 船体沈下量の不確かさ
    - 3.6 船体平均沈下量の不確かさ
    - 3.7 トリムの不確かさ
  4. 自航試験への応用
    - 4.1 計測精度
    - 4.2 推力減少係数  $1-t$  の不確かさ
    - 4.3 有効伴流係数  $1-w$  の不確かさ
    - 4.4 プロペラ単独効率  $\eta_o$  の不確かさ
    - 4.5 プロペラ効率比  $\eta_R$  の不確かさ
  5. 圧力計測試験への応用
    - 5.1 船体表面圧力の不確かさ
  6. 伴流計測試験への応用
    - 6.1 球形5孔ピトー管の計算式および誤差の伝搬
    - 6.2 伴流速の不確かさ
  7. 考察
    - 7.1 抵抗試験
    - 7.2 自航試験
    - 7.3 圧力計測試験
    - 7.4 伴流計測試験
  8. 結 言
- 参考文献

## 1. 緒 言

これまで、機械関係の分野ではデータの誤差評価は広く一般的に知られており、実際に解析結果の一部としてデータに添付されている。しかし、船舶分野における実験データに関しては、誤差評価はほとんど行なわれておらずここ数年の間に何件かの報告<sup>1,3-7)</sup>がなされた程度であった。年々、計測器の性能は向上し、実験の精度もよくなっているが、船舶に関する試験は多岐にわたり、複雑な試験手順の下での誤差混入はどうしても避けることができない。船舶工学では一般的な試験である抵抗試験を例にとっても、数パーセントの効率向上を議論するため、この誤差は無視できず、定量的に把握する必要がある。

ここでは、利用する試験データの信頼性を確認するための指針とすべく、抵抗試験および自航試験、圧力計測試験、伴流計測試験について不確かさ解析を試み、その方法の確立を目指した。茂里ら<sup>3)</sup>、西

尾ら<sup>5)</sup>、笠原<sup>6)</sup>、鈴木ら<sup>7)</sup>は同一状態の試験を複数回行なう「繰り返し試験」での不確かさ解析について述べているが、本論では計測を一度しか行なわない「単一試験」について考慮した。本来の不確かさ解析は「繰り返し試験」を行ない、アンサンブル平均をとり、分散等の統計量を評価する必要があるが、ここでは通常、ルーチンワークとして行われている水槽試験を念頭に置き、一航走で得られる時系列データから統計量を解析した。

不確かさ解析の効用の一つに、解析結果に含まれる不確かさの伝播経路をさかのぼることにより、その不確かさの主要な原因が何かを知ることができるということが挙げられる。これにより、その要因に対し適切な処置を施すことで、精度の向上が期待される。

今回、解析に用いた実験データは1997年11月に船舶技術研究所三鷹第二船舶試験水槽(400 m水槽)において行なわれた肥大船型に対する試験結果(抵抗、自航、船体表面圧力計測、伴流計測)である。この肥大船の主要目をTable1に示す。

Table1: Principle dimensions of ship model

垂線間長	$L_{pp}(m)$	7.489
水線長	$L_{wl}(m)$	7.650
船幅	$W(m)$	1.358
喫水	$d(m)$	0.452
浸水表面積(舵付き)	$A(m^2)$	14.374

## 2. 不確かさ解析概論

一般的な不確かさ解析法は、米国機械学会性能試験規約「計測の不確かさ」<sup>2)</sup>に示されている。ここでは簡単にその内容を説明することとし、詳細については原文を参照されたい。

## 2.1 測定値に含まれる誤差

測定結果には誤差が含まれ、それは測定値から真の値を差し引いた値として定義される。さらにこの全誤差 $\delta_j$ はFig.1のように、かたより誤差 $\beta$ と偶然誤差 $\epsilon_j$ に分けられる。かたより誤差は試験期間を通じて変化のない一定値をとり、偶然誤差は繰り返し測定するたびに異なる値を示し、完全に一致することは期待できない。

ここで、かたより誤差の上限に対する推定値を正確度 $B$ 、母集団から得られる標準偏差の推定値を精密度 $S$ と定義する。

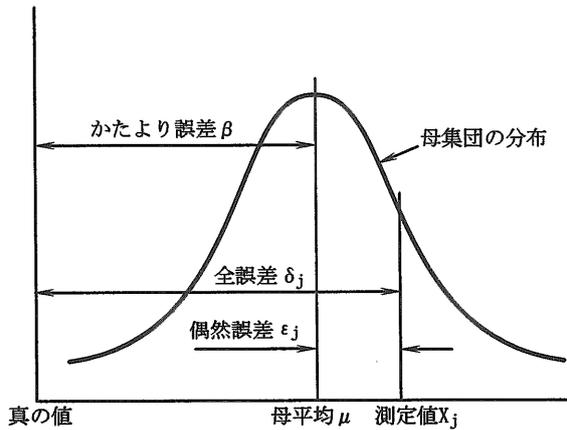


Fig.1: Errors in the measurement

2.1.1 かたより誤差

ある物理量を同一の手法および同一の環境下で繰り返し測定する場合、測定結果にはある一定の値を取るかたより誤差が含まれる。かたより誤差は正負どちらの値を取るか予想できないため、正確度  $B$  は  $\pm B$  と表わす。

2.1.2 偶然誤差

繰り返し計測を行なうことにより、毎回、異なる値の誤差が混入する。母集団が正規分布の場合には母平均を  $\mu$ 、標準偏差を  $\sigma$  とすると、 $\mu \pm 2\sigma$  の区間において、ばらつきを有する測定値の95%を含むことになる。この標準偏差を推定するための値を精密度であり、(1)式で表わされる<sup>9)</sup>。

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (1)$$

$N$ : 計測回数  $\bar{X}$ : 測定値  $X_j$  の平均値

ただし船型試験においては、母集団に属する個々の測定値よりもそれらの平均値に注目しているため、ここでは、(2)式に示す平均値  $\bar{X}$  の精密度  $S_{\bar{X}}$  を用いることにする。

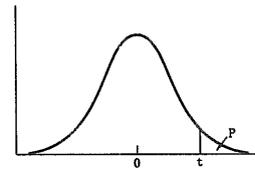
$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N(N-1)}} \quad (2)$$

2.1.3 総括正確度、総括精密度

測定値の正確度  $B$  および精密度  $S$  は各誤差要因に対する正確度  $B_i$  と精密度  $S_i$  について二乗和の平方根で

Table2: Distribution of student-t (P=0.025)

ここで  $P$  とは、 $t$  が表中の学生値を超える確率を表わす。負の  $t$  の値に対しては分布の対称性を利用するといふ。



$\nu$	$t$	$\nu$	$t$	$\nu$	$t$
1	12.706	13	2.160	25	2.060
2	4.303	14	2.145	26	2.056
3	3.182	15	2.131	27	2.052
4	2.776	16	2.120	28	2.048
5	2.571	17	2.110	29	2.045
6	2.447	18	2.101	30	2.042
7	2.365	19	2.093	...	...
8	2.306	20	2.086	40	2.021
9	2.262	21	2.080	60	2.000
10	2.228	22	2.074	120	1.980
11	2.201	23	2.069	...	...
12	2.179	24	2.064	$\infty$	1.960

与えられる。これらをそれぞれ総括正確度、総括精密度と呼び、(3)、(4)式に示す。

$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^M B_i^2} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^M S_i^2} \quad (4)$$

$M$ : 全誤差要因数

2.1.4 自由度および学生値

測定値の不確かさを計算するには、学生値  $t$  が必要である。学生値とは統計学の用語であり、小さすぎる標本からは標準偏差の「精度のよい推定値」が得られないため、新しく提案された変数である。この変数  $t$  は標本数  $N$  の値にのみ関係するので、 $(N-1)$  で与えられる自由度  $\nu$  の関数となる。ある  $k$  個の物理量の誤差要因それぞれについて、自由度を  $\nu_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) とすれば総括精密度  $S$  に対する自由度  $\nu$  は次式 (Welch-Satterthwaite の式) で与えられる。

$$\nu = \frac{(\sum_{i=1}^M \frac{S_i^2}{\nu_i})^2}{\sum_{i=1}^M \frac{S_i^4}{\nu_i^2}} \quad (5)$$

$$\nu_i = N_i - 1$$

$S_i$ : 各誤差要因の精密密度  $\nu_i$ :  $S_i$ の自由度

$M$ : 全誤差要因数  $N_i$ : 標本数

このようにして求めた自由度を用いて、Table2からスチューデント値  $t$  を求める。

Table2から分かるように、自由度  $\nu$  が約30以上あればスチューデント値は近似的に2.0としてよい。さらに、すべての誤差要因が十分な標本数(約30以上)を持つのであれば、自由度  $\nu$  の計算は必要なく、はじめから  $t = 2.0$  として問題ない。

ここで行なう船型試験の誤差解析では、すべての誤差要因において十分な数の標本があるとみなし、簡単のため  $t = 2.0$  として計算を進めていく。

### 2.1.5 測定値の不確かさ区間

すべての誤差要因について正確度  $B_i$ 、精密度  $S_i$  が把握され、それらが総括正確度  $B$ 、総括精密度  $S$  という形で得られており、かつ総括精密度の自由度  $\nu$  が(5)式により計算され、それに対応するスチューデント値  $t$  が得られていれば、測定値の不確かさ区間が計算できる。

不確かさとは、統計学における「信頼度」と呼べるほど厳密な値ではない。なぜなら、かたより誤差は実験者の判断や過去の経験などあいまいな部分を多く含むものであり、当然このかたより誤差を用いて求められた不確かさも厳密さを欠くものとなる。そこで、95%または99%信頼度と類似の「包括度」という値を用いる。「包括度」とは、「あるパラメータに対して推定される区間が真の値を含むと期待される頻度」と定義され、「信頼度」とは異なる。

95%包括度を持つ不確かさ区間  $U^{RSS}$ 、99%包括度を持つ不確かさ区間  $U^{ADD}$  は、それぞれ(6)、(7)式で計算できる。

$$U^{RSS} = \sqrt{B^2 + (t \cdot S)^2} \quad (6)$$

$$U^{ADD} = B + t \cdot S \quad (7)$$

スチューデント値  $t$  は精密度  $S$  を計算する時に用いた自由度  $\nu (= N - 1)$  の関数であり、 $(t \cdot S)$  は偶然誤差の妥当な推定値といえる。

### 2.2 解析結果の不確かさ区間

多くの場合、解析結果は計測データをパラメータとする関数の形で表わされ、当然この解析結果にもかたより誤差、偶然誤差が混入している。これらの誤差は、各パラメータの単位量の変化に対する結果の変化量を表わす「感度」を用いて計算することができる。測定パラメータを  $P_k (k = 1, \dots, L)$ 、解析結果を

$r = f(P_1, P_2, \dots, P_L)$ 、感度係数を  $\theta_k^r (k = 1, \dots, L)$  とすれば、解析結果の絶対正確度および絶対精密度は(8)、(9)式で求められる。

$$B_r = \sqrt{\sum_{k=1}^L (\theta_k^r \cdot B_k)^2} \quad (8)$$

$$S_r = \sqrt{\sum_{k=1}^L (\theta_k^r \cdot S_k)^2} \quad (9)$$

$$\theta_k^r = \frac{\partial r}{\partial P_k}$$

$B_r, S_r$ : 解析結果  $r$  の絶対正確度、絶対精密度

$B_k, S_k$ : 測定パラメータの総括正確度、総括精密度

$k$ : 全パラメータ数

ここで注意すべき点は、解析結果の不確かさを求める際に、各測定パラメータの「不確かさ」に感度係数を乗じて求めてはいけないことである。正確度と精密度は不確かさ解析の最終段階まで別々に扱われるべきであり、測定パラメータの総括正確度および総括精密度に感度係数を乗じて、結果の絶対正確度および絶対精密度を求める。その後、(6)式、あるいは(7)式を用いて不確かさを求める手順を踏まなければならない。そして、このようにして得られる不確かさ区間は「真値がこの中に存在する確率が95% (あるいは99%) である。」という意味を持つ。

### 3. 抵抗試験への応用

これまで述べたように、実験の測定値にはかたより誤差と偶然誤差が含まれる。そしてこれらの誤差はそれぞれ独立に試験の最終結果へと伝播していく。

抵抗試験の場合について述べると、解析で対象となる項目を全抵抗係数  $C_t$ 、造波抵抗係数  $C_w$ 、形状影響係数  $K$  とすれば、この解析に必要な計測データは全抵抗  $R_t$ 、水の密度  $\rho$ 、浸水面積  $A$ 、曳航速度  $V$ 、相当矩形平板の摩擦抵抗  $C_{f0}$  である。さらに、 $R_t$  は  $V$  に、 $\rho$  は水温  $T$  に、 $A$  は模型船の長さ  $L_{wl}$ 、幅  $W$ 、喫水  $d$  に、 $C_{f0}$  はレイノルズ数  $R_n$  により変化し、順に誤差が伝播してくる。したがって、まず測定値そのものである  $V, T, L_{wl}, W, d$  の正確度および精密度を求め、その後それらの誤差伝播過程を調べることにより  $R_t, \rho, A$  の総括正確度と総括精密度を求め、最後に  $C_t, C_w, K$  の絶対正確度、絶対精密度および不確かさ区間を求める手順を踏むことにする。

これより、三鷹第二船舶試験水槽で行なわれた肥大船の抵抗試験から得られたデータを使って、不確かさ解析法を具体的に説明するが、ここでは特に、この船の設計速度である  $F_n = 0.138$  の場合について述べる。また、Table6に不確かさの計算表を示した。

### 3.1 測定値に含まれる誤差

各計測機器には公称精度、ヒステリシス特性、非直線性などの誤差要因があり、これらがまず誤差の伝播過程の上流部分になる。これらの誤差はかたより誤差に分類され、今回は仕様書に記載されている値を用いた。また、仕様書に明記されていないなどの理由で不明な場合は、実験者の判断による値を採用し、これを Table3 に示した。

次に、計測機器から出力された電気信号は A/D 変換器を通るが、ここではアナログデータをデジタルデータに変換するため必ずデジタルエラー(離散化誤差)が生じる。コンピュータを用いてデータ解析する以上避けることができない誤差である。また、計測値そのものは計測中に変動しており、その変動量を計測値の標準誤差として誤差の一部とする必要がある。これは偶然誤差とみなされる。

### 3.2 全抵抗係数 $C_t$ の不確かさ

$C_t$  は次式で計算される。

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V_w^2} \\ &= 4.504 \times 10^{-3} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

つまり、 $C_t$  には全抵抗  $R_t$ 、水の密度  $\rho$ 、浸水面積  $A$ 、模型船の対水曳航速度  $V_w$  の誤差が伝播しているので、これら誤差要因の総括正確度および総括精密度を求め、それらの二乗和の平方根を求めることにより  $C_t$  の絶対正確度、絶対精密度および不確かさを求める。

#### 3.2.1 長さ

$L_{pp}$ 、 $W$ 、 $d$  などは定盤上のコージネータで計測される。したがって模型船の寸法には、そのコージネータによる計測精度および船自身の経年変化による影響等が関係しており、設計値に対して 0.001m の誤差があるものとした。

$$\begin{aligned} B_{L_{pp}} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ B_{L_{wl}} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ B_W &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ B_d &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \end{aligned}$$

#### 3.2.2 水温

使用した温度計は最小目盛 0.1K であるため、読み取り時の正確度  $B$  はその半分の 0.05K とする。また、目視による計測のバラツキを最小目盛の 20% の 0.02K

とする。

$$\begin{aligned} B_T &= 5.000 \times 10^{-2} \text{ (K)} \\ S_T &= 2.000 \times 10^{-2} \text{ (K)} \end{aligned}$$

#### 3.2.3 水の密度

温度  $T$  と水の密度  $\rho$  の関係式は次式で表わされる<sup>10)</sup>。

$$\rho = \frac{\rho_4}{1 + \alpha|T - 4|} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} T &= \text{水温 (}^\circ\text{C)} \\ \alpha &= 0.00043 \\ \rho_4 &= (\text{水温 } 4^\circ\text{C での水の密度)} \\ &= 102.04 \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4) \end{aligned}$$

つまり密度は温度の関数であるため、温度の誤差が密度に伝播する。密度の温度に対する感度係数は  $\theta_T^\rho = d\rho/dT$  であり、実験時の水温は 17.6 $^\circ\text{C}$  なので、

$$\begin{aligned} \theta_T^\rho &= \frac{-\rho_4 \cdot \alpha}{(1 + \alpha|T - 4|)^2} \\ &= -4.337 \times 10^{-2} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4/\text{K)} \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、 $\rho$  の正確度  $B(\rho)$  および精密度  $S(\rho)$  は次のように計算される。

$$\begin{aligned} B_\rho &= \sqrt{(\theta_T^\rho \cdot B_T)^2} \\ &= 2.169 \times 10^{-3} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4) \\ S_\rho &= \sqrt{(\theta_T^\rho \cdot S_T)^2} \\ &= 8.674 \times 10^{-4} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4) \end{aligned}$$

#### 3.2.4 浸水面積

浸水面積に関する誤差を求めるにはガース長さを計測し、実際に積分して面積を求める必要があるが、今回は姫野らが用いた簡便な方法<sup>4)</sup>を採用した。つまり浸水面積  $A$  の誤差は  $L_{wl}$ 、 $W$ 、 $d$  に影響され、それらに対する感度係数はそれぞれ次のように求められる。

$$\begin{aligned} \theta_{L_{wl}}^A &= A/L_{wl} \\ &= 1.879 \\ \theta_W^A &= A/W \\ &= 10.58 \\ \theta_d^A &= A/d \\ &= 31.80 \end{aligned}$$

Table3: Errors in apparatus

	公称精度	ヒステリシス特性	非直線性
抵抗動力計	0.05kgf	0.03 % F.S.	0.02 % F.S.
ポテンショメータ	0.1 % F.S.	0.10 % F.S.	
翼車式流速計	0.001m/s		

船体寸法が持つ誤差は3.2.1節より

$$B_{L_{wl}} = 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$B_W = 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$B_d = 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

よって、浸水面積  $A$  の総括正確度  $B_A$  は次のように計算される。

$$\begin{aligned} B_A &= \sqrt{(\theta_{L_{wl}}^A \cdot B_{L_{wl}})^2 + (\theta_W^A \cdot B_W)^2 + (\theta_d^A \cdot B_d)^2} \\ &= 3.357 \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

### 3.2.5 対水速度

翼車流速計を用いたときの誤差要因には、流速計の公称精度に基づくかたより誤差、流速計の検定により得られた回帰直線に対する推定標準誤差(SEE:Standard Error of Estimate)、測定値のバラツキによる標準誤差(SE:Standard Error)などが考えられる。

**翼車流速計** 今回は翼車流速計の公称精度が不明であったため、経験的に0.001m/sとした。

$$B_{V_w}^{acc} = 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

**翼車流速計の検定** 翼車流速計を検定して得られた回帰曲線に対して、測定値のバラツキを表す推定標準誤差(SEE)は次式で求められる。

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_k - y_{LS,k})^2}{N - C}} \quad (12)$$

$y_k$ : 測定値  $N$ : 計測回数

$y_{LS,k}$ :  $k$ 番目の測定に対応する回帰曲線上の値

$C$ : 回帰に含まれる定数の数(直線近似のとき  $C=2$ )

この式を用いると、翼車流速計の検定による精密度  $S_{V_w}^{SEE}$  は、

$$S_{V_w}^{SEE} = SEE = 1.683 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

**測定値の誤差** 抵抗計測中に約10個の対水速度データが記録されているので、(2)式を用いて対水速度の標準誤差が求められる。これによると、測定値のバラツキによる精密度  $S_{V_w}^{disper}$  は、

$$S_{V_w}^{disper} = SE = 1.669 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

**対水速度の正確度と精密度** このように求められた各誤差要因の正確度および精密度より、対水速度の総括正確度  $B_{V_w}$ 、総括精密度  $S_{V_w}$  が計算される。

$$\begin{aligned} B_{V_w} &= \sqrt{(B_{V_w}^{acc})^2} \\ &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w} &= \sqrt{(S_{V_w}^{SEE})^2 + (S_{V_w}^{disper})^2} \\ &= 2.370 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

### 3.2.6 フルード数

フルード数は  $V_w$  と  $L_{wl}$  の関数であるため、これらの誤差が伝播する。フルード数の  $V_w$  と  $L_{wl}$  に対する感度係数  $\theta_{L_{wl}}^{F_n}$ 、 $\theta_{V_w}^{F_n}$  はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \theta_{L_{wl}}^{F_n} &= \frac{\partial F_n}{\partial L_{wl}} = \frac{-V_w}{2L_{wl}\sqrt{g \cdot L_{wl}}} \\ &= -8.892 \times 10^{-3} \\ \theta_{V_w}^{F_n} &= \frac{\partial F_n}{\partial V_w} = \frac{1}{\sqrt{g \cdot L_{wl}}} \\ &= 1.154 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

よってフルード数の絶対正確度  $B_{F_n}$  および絶対精密度  $S_{F_n}$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} B_{F_n} &= \sqrt{(\theta_{V_w}^{F_n} \cdot B_{V_w})^2 + (\theta_{L_{wl}}^{F_n} \cdot B_{L_{wl}})^2} \\ &= 1.157 \times 10^{-4} \\ S_{F_n} &= \sqrt{(\theta_{V_w}^{F_n} \cdot S_{V_w})^2} \\ &= 2.735 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

### 3.2.7 抵抗

抵抗の誤差要因として、動力計の公称精度に基づくかたより誤差、動力計検定時の回帰直線に対する推

定標準誤差(SEE)、A/D変換に伴う誤差(デジタルエラー、非直線性、ヒステリシス)、測定値のバラツキによる標準誤差、また、曳航速度の誤差に伴う偶然誤差を考慮した。

**抵抗動力計** 今回使用した抵抗動力計の公称精度は0.1% F.S.であり、これはかたより誤差に分類される、したがって、この動力計(50kgf)の公称精度に基づく正確度  $B_{R_t}^{acc}$  は、

$$B_{R_t}^{acc} = 0.001 \times 50 = 5.000 \times 10^{-2} \text{ (kgf)}$$

**抵抗動力計の検定直線** 抵抗動力計の検定は実験日の最初と最後に行われているが、それにより得られた回帰直線はほとんど同一なため、今回は最初の検定の値を採用した。

(12)式を用いると、動力計の検定による精密度  $S_{R_t}^{SEE}$  は、

$$S_{R_t}^{SEE} = SEE = 3.254 \times 10^{-3} \text{ (kgf)}$$

**A/D変換に伴う誤差** アナログ値をデジタル値に変換することにより生じる誤差は1/2LSB(Least Significant Bit)であり、これはかたより誤差に分類される。

今回使用したA/Dボードは12ビット、コンピュータは16ビットの処理を行なっているため検定係数とLSBの関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} 1LSB &= (\text{検定係数}) \times 2^4 \\ &= 0.00343268 \times 16 \\ &= 5.4923 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

したがって、A/D変換による正確度  $B_{R_t}^{digit}$  は、

$$\begin{aligned} B_{R_t}^{digit} &= \frac{1}{2}LSB \\ &= 0.5 \times 5.4923 \times 10^{-2} \\ &= 2.746 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

**抵抗動力計の非直線性による誤差** 抵抗動力計の非直線性に関する公称値は0.02% F.S.であり、これによる精密度  $S_{R_t}^{line}$  は、

$$\begin{aligned} S_{R_t}^{line} &= 50(\text{kgf}) \times 0.0002 \\ &= 1.000 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

**抵抗動力計のヒステリシスによる誤差** 抵抗動力計のヒステリシスの公称値は0.03% F.S.であり、これによる精密度  $S_{R_t}^{hys}$  は、

$$\begin{aligned} S_{R_t}^{hys} &= 50(\text{kgf}) \times 0.0003 \\ &= 1.500 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

**測定値のバラツキによる誤差** 計測中において、抵抗には規則的と思える振動が見られる。今回の解析では、これらの振動を平均値に対する標準誤差とみなし、(2)式を用いて、計測された抵抗の精密度  $S_{R_t}^{disper}$  を求めた。

$$S_{R_t}^{disper} = SE = 2.058 \times 10^{-1} \text{ (kgf)} \quad (\text{at } F_n = 0.138)$$

**曳航速度の誤差による抵抗の誤差** 抵抗には曳航速度の変化も影響を及ぼしているが、ここでは便宜上、速度の代わりにフルード数を用いた。

抵抗のフルード数に対する感度係数  $\theta_{F_n}^{R_t}$  は、

$$\begin{aligned} \theta_{F_n}^{R_t} &= \frac{\partial R_t}{\partial F_n} \\ &= 61.74 \text{ (kgf)} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

したがって、 $R_t$ の  $F_n$ に対する正確度  $B_{R_t}^{F_n}$ と精密度  $S_{R_t}^{F_n}$ は、

$$\begin{aligned} B_{R_t}^{F_n} &= \theta_{F_n}^{R_t} \cdot B_{F_n} \\ &= 7.143 \times 10^{-3} \text{ (kgf)} \\ S_{R_t}^{F_n} &= \theta_{F_n}^{R_t} \cdot S_{F_n} \\ &= 1.689 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

**抵抗の正確度と精密度** これらより抵抗の総括正確度  $B_{R_t}$ および総括精密度  $S_{R_t}$ は次のように計算される。

$$\begin{aligned} B_{R_t} &= \sqrt{(B_{R_t}^{acc})^2 + (B_{R_t}^{digit})^2 + (B_{R_t}^{F_n})^2} \\ &= 5.749 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \\ S_{R_t} &= \left\{ (S_{R_t}^{line})^2 + (S_{R_t}^{SEE})^2 + (S_{R_t}^{disper})^2 \right. \\ &\quad \left. + (S_{R_t}^{hys})^2 + (S_{R_t}^{F_n})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 2.073 \times 10^{-1} \text{ (kgf)} \end{aligned}$$

### 3.2.8 全抵抗係数 $C_t$ の不確かさ区間

以上により、 $R_t$ 、 $\rho$ 、 $A$ 、 $V_w$ それぞれについての総括正確度および総括精密度が求められた。最後に  $C_t$ の絶対正確度  $B_{C_t}$ および絶対精密度  $S_{C_t}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} B_{C_t} &= \left\{ (\theta_{R_t}^{C_t} \cdot B_{R_t})^2 + (\theta_{\rho}^{C_t} \cdot B_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{C_t} \cdot B_{V_w})^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_A^{C_t} \cdot B_A)^2 \right\}^{1/2} \\ &= 5.822 \times 10^{-5} \\ S_{C_t} &= \sqrt{(\theta_{R_t}^{C_t} \cdot S_{R_t})^2 + (\theta_{\rho}^{C_t} \cdot S_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{C_t} \cdot S_{V_w})^2} \\ &= 2.054 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}\theta_{R_t}^{C_t} &= \frac{\partial C_t}{\partial R_t} = 9.872 \times 10^{-4} \\ \theta_{\rho}^{C_t} &= \frac{\partial C_t}{\partial \rho} = -4.440 \times 10^{-5} \\ \theta_A^{C_t} &= \frac{\partial C_t}{\partial A} = -3.134 \times 10^{-4} \\ \theta_{V_w}^{C_t} &= \frac{\partial C_t}{\partial V_w} = -7.642 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

これらより、 $C_t$ の不確かさ $U_{C_t}^{RSS}$ を求めると、

$$\begin{aligned}U_{C_t}^{RSS} &= \sqrt{(B_{C_t})^2 + (t \cdot S_{C_t})^2} \\ &= 4.149 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

また、このようにして得られる $C_t$ の不確かさ区間をFig.3に示す。

### 3.3 形状影響係数 $K$ の不確かさ

$K$ は $F_n = 0.09$ における $C_t$ 、 $C_{f_0}$ を用いて、次式により計算される。

$$\begin{aligned}K &= \frac{C_t}{C_{f_0}} - 1 \\ &= 4.254 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.09)\end{aligned}$$

つまり、 $K$ には $C_t$ 、 $C_{f_0}$ の誤差が伝播しており、 $K$ の絶対正確度 $B_K$ および絶対精密度 $S_K$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned}B_K &= \sqrt{(\theta_{C_t}^K \cdot B_{C_t})^2 + (\theta_{C_{f_0}}^K \cdot B_{C_{f_0}})^2} \\ &= 4.087 \times 10^{-2} \quad (\text{at } F_n = 0.09) \\ S_K &= \sqrt{(\theta_{C_t}^K \cdot S_{C_t})^2 + (\theta_{C_{f_0}}^K \cdot S_{C_{f_0}})^2} \\ &= 5.902 \times 10^{-2} \quad (\text{at } F_n = 0.09)\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}B_{C_t} &= 1.324 \times 10^{-4} \\ B_{C_{f_0}} &= 2.097 \times 10^{-6} \\ S_{C_t} &= 1.912 \times 10^{-4} \\ S_{C_{f_0}} &= 3.711 \times 10^{-6} \\ \theta_{C_t}^K &= \frac{\partial K}{\partial C_t} = \frac{1}{C_{f_0}} \\ &= 3.087 \times 10^2 \\ \theta_{C_{f_0}}^K &= \frac{\partial K}{\partial C_{f_0}} = -\frac{C_t}{C_{f_0}^2} \\ &= -1.425\end{aligned}$$

これらより、 $K$ の不確かさ $U_K^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}U_K^{RSS} &= \sqrt{(B_K)^2 + (t \cdot S_K)^2} \\ &= 1.249 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.09)\end{aligned}$$

(414)

### 3.4 造波抵抗係数 $C_w$ の不確かさ

$C_w$ は $F_n=0.09$ において求めた $K$ を用いて、次式により計算される。

$$\begin{aligned}C_w &= C_t - (1 + K) \cdot C_{f_0} \\ &= 1.979 \times 10^{-4} \quad (\text{at } F_n = 0.138)\end{aligned}$$

つまり、 $C_w$ には $C_t$ 、 $K$ 、 $C_{f_0}$ からの誤差が伝播しており、 $C_w$ の絶対正確度 $B_{C_w}$ および絶対精密度 $S_{C_w}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned}B_{C_w} &= \left\{ (\theta_{C_t}^{C_w} \cdot B_{C_t})^2 + (\theta_K^{C_w} \cdot B_K)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{C_{f_0}}^{C_w} \cdot B_{C_{f_0}})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 1.366 \times 10^{-4} \\ S_{C_w} &= \left\{ (\theta_{C_t}^{C_w} \cdot S_{C_t})^2 + (\theta_K^{C_w} \cdot S_K)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{C_{f_0}}^{C_w} \cdot S_{C_{f_0}})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 2.720 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}B_{C_t} &= 5.822 \times 10^{-5} \\ B_K &= 4.087 \times 10^{-2} \\ B_{C_{f_0}} &= 1.556 \times 10^{-6} \\ S_{C_t} &= 2.054 \times 10^{-4} \\ S_K &= 5.902 \times 10^{-2} \\ S_{C_{f_0}} &= 2.329 \times 10^{-6} \\ \theta_{C_t}^{C_w} &= \frac{\partial C_w}{\partial C_t} = 1.000 \\ \theta_K^{C_w} &= \frac{\partial C_w}{\partial K} = -C_{f_0} \\ &= -3.021 \times 10^{-3} \\ \theta_{C_{f_0}}^{C_w} &= \frac{\partial C_w}{\partial C_{f_0}} = -(1 + K) \\ &= -1.491\end{aligned}$$

これらより、 $C_w$ の不確かさ $U_{C_w}^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}U_{C_w}^{RSS} &= \sqrt{(B_{C_w})^2 + (t \cdot S_{C_w})^2} \\ &= 5.609 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

また、このようにして得られる $C_w$ の不確かさ区間をFig.4に示す。

### 3.5 船体沈下量の不確かさ

前後ガイドの上下方向変位をそれぞれ $dF$ および $dA$ 、また、F.P.とA.P.位置での上下方向変位を $\Delta dF$ および $\Delta dA$ とすれば、船体沈下量を表わす $\Delta dF/L_{pp}$ 、

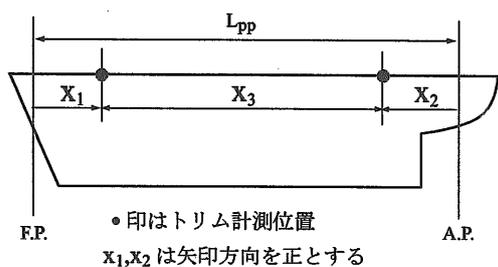


Fig.2: Location of F.P.,A.P.and both guides

$\Delta dA/L_{pp}$ は次式により計算される。ただし、 $x_1$ および $x_2$ 、 $x_3$ についてはFig.2に示す部分の長さである。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta dF}{L_{pp}} &= \frac{dF + \frac{x_1}{x_3} \cdot (dF - dA)}{L_{pp}} \times 100 \\ &= 1.804 \times 10^{-1} (\% L_{pp}) \quad (\text{at } F_n = 0.138) \\ \frac{\Delta dA}{L_{pp}} &= \frac{dA - \frac{x_2}{x_3} \cdot (dF - dA)}{L_{pp}} \times 100 \\ &= 1.984 \times 10^{-3} (\% L_{pp}) \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

したがって、 $\Delta dF/L_{pp}$ および $\Delta dA/L_{pp}$ には $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $L_{pp}$ 、 $dF$ 、 $dA$ の誤差が伝播している。

$\Delta dF/L_{pp}$ 、 $\Delta dA/L_{pp}$ の絶対正確度 $B_{dipF}$ 、 $B_{dipA}$ および絶対精密度 $S_{dipF}$ 、 $S_{dipA}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} B_{dipF} &= \left\{ (\theta_{dF}^{dipF} \cdot B_{dF})^2 + (\theta_{dA}^{dipF} \cdot B_{dA})^2 \right. \\ &\quad + (\theta_{L_{pp}}^{dipF} \cdot B_{L_{pp}})^2 + (\theta_{x_1}^{dipF} \cdot B_{x_1})^2 \\ &\quad \left. + (\theta_{x_3}^{dipF} \cdot B_{x_3})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 4.831 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{dipF} &= \sqrt{(\theta_{dF}^{dipF} \cdot S_{dF})^2 + (\theta_{dA}^{dipF} \cdot S_{dA})^2} \\ &= 1.973 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{dipA} &= \left\{ (\theta_{dF}^{dipA} \cdot B_{dF})^2 + (\theta_{dA}^{dipA} \cdot B_{dA})^2 \right. \\ &\quad + (\theta_{L_{pp}}^{dipA} \cdot B_{L_{pp}})^2 + (\theta_{x_2}^{dipA} \cdot B_{x_2})^2 \\ &\quad \left. + (\theta_{x_3}^{dipA} \cdot B_{x_3})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 5.145 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{dipA} &= \sqrt{(\theta_{dF}^{dipA} \cdot S_{dF})^2 + (\theta_{dA}^{dipA} \cdot S_{dA})^2} \\ &= 1.841 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} B_{dF} &= 3.481 \times 10^{-4} (m) \\ B_{dA} &= 3.465 \times 10^{-4} (m) \\ B_{L_{pp}} &= 1.000 \times 10^{-3} (m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{x_1} &= 1.000 \times 10^{-3} (m) \\ B_{x_2} &= 1.000 \times 10^{-3} (m) \\ B_{x_3} &= 1.000 \times 10^{-3} (m) \\ S_{dF} &= 1.422 \times 10^{-4} (m) \\ S_{dA} &= 1.238 \times 10^{-4} (m) \end{aligned}$$

$$\theta_{dF}^{dipF} = \frac{\partial(\Delta dF/L_{pp})}{\partial(dF)}$$

$$= 13.87$$

$$\theta_{dA}^{dipF} = \frac{\partial(\Delta dF/L_{pp})}{\partial(dA)}$$

$$= -5.153 \times 10^{-1}$$

$$\theta_{L_{pp}}^{dipF} = \frac{\partial(\Delta dF/L_{pp})}{\partial(L_{pp})}$$

$$= -2.409 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{x_1}^{dipF} = \frac{\partial(\Delta dF/L_{pp})}{\partial(x_1)}$$

$$= 2.382 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{x_3}^{dipF} = \frac{\partial(\Delta dF/L_{pp})}{\partial(x_3)}$$

$$= -9.193 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{dF}^{dipA} = \frac{\partial(\Delta dA/L_{pp})}{\partial(dF)}$$

$$= -1.428$$

$$\theta_{dA}^{dipA} = \frac{\partial(\Delta dA/L_{pp})}{\partial(dA)}$$

$$= 14.78$$

$$\theta_{L_{pp}}^{dipA} = \frac{\partial(\Delta dA/L_{pp})}{\partial(L_{pp})}$$

$$= -2.649 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{x_2}^{dipA} = \frac{\partial(\Delta dA/L_{pp})}{\partial(x_2)}$$

$$= -2.382 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{x_3}^{dipA} = \frac{\partial(\Delta dA/L_{pp})}{\partial(x_3)}$$

$$= 2.548 \times 10^{-3}$$

これらより、船体沈下量の不確かさ $U_{dipF}^{RSS}$ 、 $U_{dipA}^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} U_{dipF}^{RSS} &= \sqrt{(B_{dipF})^2 + (t \cdot S_{dipF})^2} \\ &= 6.238 \times 10^{-3} (\% L_{pp}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{dipA}^{RSS} &= \sqrt{(B_{dipA})^2 + (t \cdot S_{dipA})^2} \\ &= 6.327 \times 10^{-3} (\% L_{pp}) \end{aligned}$$

また、このようにして得られる船体沈下量の不確かさ区間をFig.5に示す。

### 3.6 船体平均沈下量の不確かさ

船体平均沈下量は次式で求められる。

$$\begin{aligned} (SINKAGE) &= \frac{1}{2}(\Delta dF/L_{pp} + \Delta dA/L_{pp}) \\ &= 9.119 \times 10^{-2} (\% L_{pp}) \\ &\quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

これより、船体平均沈下量には $\Delta dF/L_{pp}$ 、 $\Delta dA/L_{pp}$ からの誤差が伝播していることが分かる。したがって、船体平均沈下量の絶対正確度 $B_{sink}$ および絶対精密度 $S_{sink}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} B_{sink} &= \sqrt{(\theta_{dipF}^{sink} \cdot B_{dipF})^2 + (\theta_{dipA}^{sink} \cdot B_{dipA})^2} \\ &= 3.530 \times 10^{-3} \\ S_{sink} &= \sqrt{(\theta_{dipF}^{sink} \cdot S_{dipF})^2 + (\theta_{dipA}^{sink} \cdot S_{dipA})^2} \\ &= 1.349 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} B_{dipF} &= 4.831 \times 10^{-3} \\ B_{dipA} &= 5.145 \times 10^{-3} \\ S_{dipF} &= 1.973 \times 10^{-3} \\ S_{dipA} &= 1.841 \times 10^{-3} \\ \theta_{dipF}^{sink} &= \frac{\partial(SINKAGE)}{\partial(\Delta dF/L_{pp})} \\ &= 5.000 \times 10^{-1} \\ \theta_{dipA}^{sink} &= \frac{\partial(SINKAGE)}{\partial(\Delta dA/L_{pp})} \\ &= 5.000 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

これらより、船体平均沈下量の不確かさ $U_{sink}^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} U_{sink}^{RSS} &= \sqrt{(B_{sink})^2 + (t \cdot S_{sink})^2} \\ &= 4.443 \times 10^{-3} (\% L_{pp}) \end{aligned}$$

また、このようにして得られる船体平均沈下量の不確かさ区間を Fig.6 に示す。

### 3.7 トリムの不確かさ

トリム $\Delta T$ は次式で計算される。

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta dF}{L_{pp}} - \frac{\Delta dA}{L_{pp}} \\ &= 1.784 \times 10^{-1} (\% L_{pp}) \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

トリムには $\Delta dF/L_{pp}$ と $\Delta dA/L_{pp}$ の誤差が伝播しており、トリムの絶対正確度 $B_{\Delta T}$ および絶対精密度

$S_{\Delta T}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} B_{\Delta T} &= \sqrt{(\theta_{dipF}^{\Delta T} \cdot B_{dipF})^2 + (\theta_{dipA}^{\Delta T} \cdot B_{dipA})^2} \\ &= 7.058 \times 10^{-3} \\ S_{\Delta T} &= \sqrt{(\theta_{dipF}^{\Delta T} \cdot S_{dipF})^2 + (\theta_{dipA}^{\Delta T} \cdot S_{dipA})^2} \\ &= 2.699 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} B_{dipF} &= 4.831 \times 10^{-3} \\ B_{dipA} &= 5.145 \times 10^{-3} \\ S_{dipF} &= 1.973 \times 10^{-3} \\ S_{dipA} &= 1.841 \times 10^{-3} \\ \theta_{dipF}^{\Delta T} &= \frac{\partial(\Delta T)}{\partial(\Delta dF/L_{pp})} \\ &= 1.000 \\ \theta_{dipA}^{\Delta T} &= \frac{\partial(\Delta T)}{\partial(\Delta dA/L_{pp})} \\ &= -1.000 \end{aligned}$$

これらより、トリムの不確かさ $U_{\Delta T}^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} U_{\Delta T}^{RSS} &= \sqrt{(B_{\Delta T})^2 + (t \cdot S_{\Delta T})^2} \\ &= 8.886 \times 10^{-3} (\% L_{pp}) \end{aligned}$$

また、このようにして得られるトリムの不確かさ区間を Fig.6 に示す。

## 4. 自航試験への応用

1997年11月6日に三鷹第二船舶試験水槽にて行われた肥大船の自航試験(舵付き、 $F_n = 0.138$ 、Model Point)で得られたデータを使って具体的に説明する。ここで用いられた模型船は抵抗試験で使用したものと同一であり、主要目を Table1 に示し、不確かさの計算表を Table7 に示した。

### 4.1 計測精度

自航試験において用いた計測機器の公称精度、ヒステリシス特性、非直線性の値を Table4 に示す。データは計測機器の仕様書に記載してある値、または実験者が経験に基づき判断した値を用いた。

### 4.2 推力減少係数 $1-t$ の不確かさ

推力減少係数は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} (1-t) &= \frac{r_t \cdot \rho \cdot \nabla_m^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^2 - FD}{T_m} \\ &= 8.179 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

Table4: Errors in apparatus

	公称精度	ヒステリシス特性	非直線性
抵抗動力計	0.02 kgf	0.03 % F.S.	0.02 % F.S.
自航動力計(スラスト)	0.10 % F.S.	0.20 % F.S.	0.2 % F.S.
自航動力計(トルク)	0.10 % F.S.	0.20 % F.S.	0.2 % F.S.
翼車流速計	0.001 m/s		

まず、 $1-t$ の要素である全抵抗係数 $r_t$ 、水の密度 $\rho$ 、模型船の排水容積 $\nabla_m$ 、対水曳航速度 $V_w$ 、自航試験時の曳引力 $FD$ 、模型プロペラのスラスト $T_m$ の総括正確度および総括精密度を求め、次に $1-t$ の絶対正確度、絶対精密度および不確かさを計算する。

4.2.1 水の密度

水の密度 $\rho$ については、3.2.3節と同様に計算を行なう。  
実験時の水温 $T$ は $17.6^\circ\text{C}$ であるため、(11)式を用いると $\theta_T^\rho$ は次のように計算される。

$$\theta_T^\rho = -4.337 \times 10^{-2}$$

したがって、

$$\begin{aligned} B_\rho &= \sqrt{(\theta_T^\rho \cdot B_T)^2} \\ &= 2.169 \times 10^{-3} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4\text{)} \\ S_\rho &= \sqrt{(\theta_T^\rho \cdot S_T)^2} \\ &= 8.674 \times 10^{-4} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4\text{)} \end{aligned}$$

4.2.2 排水量

模型船の排水量 $\nabla_m$ については、模型船寸法( $L_{wl}, W, d$ )の誤差が伝播している。これら誤差要因に対応する正確度 $B$ および排水量 $\nabla_m$ の $L_{wl}$ 、 $W$ 、 $d$ に対する感度係数 $\theta_{L_{wl}}^{\nabla_m}$ 、 $\theta_W^{\nabla_m}$ 、 $\theta_d^{\nabla_m}$ は次の通りである。

$$\begin{aligned} B_{L_{wl}} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ B_W &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ B_d &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ \theta_{L_{wl}}^{\nabla_m} &= \nabla_m / L_{wl} \\ &= 4.813 \times 10^{-1} \text{ (m}^2\text{)} \\ \theta_W^{\nabla_m} &= \nabla_m / W \\ &= 2.711 \text{ (m}^2\text{)} \\ \theta_d^{\nabla_m} &= \nabla_m / d \\ &= 8.146 \text{ (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

したがって、模型船の排水量 $\nabla_m$ の絶対正確度 $B_{\nabla_m}$ は、

$$\begin{aligned} B_{\nabla_m} &= \left\{ (\theta_{L_{wl}}^{\nabla_m} \cdot B_{L_{wl}})^2 + (\theta_W^{\nabla_m} \cdot B_W)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_d^{\nabla_m} \cdot B_d)^2 \right\}^{1/2} \\ &= 8.599 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

4.2.3 対水速度

3.2.5節と同様に計算を行うと、

$$\begin{aligned} B_{V_w}^{acc} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w}^{SEE} &= SEE \\ &= 1.683 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w}^{disper} &= SE \\ &= 2.481 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned} B_{V_w} &= \sqrt{(B_{V_w}^{acc})^2} \\ &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w} &= \sqrt{(S_{V_w}^{SEE})^2 + (S_{V_w}^{disper})^2} \\ &= 2.998 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

4.2.4 抵抗試験で得られた全抵抗係数

$r_t$ の正確度 $B_{r_t}$ および精密度 $S_{r_t}$ は、3.2.8節の浸水面積 $A$ を $\nabla_m$ に置き換えることで計算できる。

$$\begin{aligned} B_{r_t} &= 1.707 \times 10^{-4} \\ S_{r_t} &= 6.137 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

4.2.5 自航試験時の曳引力

プロペラ荷重度を数回変更して自航点を得る自航試験では、抵抗動力計により曳引力 $FD$ を計測している。 $FD$ の正確度および精密度には3.2.7節で述べている抵抗動力計の誤差が伝播しているため、それぞ

れについて要素正確度と要素精密度を示すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 B_{FD}^{acc} &= 50.0(kgf) \times 0.10 \% F.S. \\
 &= 5.000 \times 10^{-2} (kgf) \\
 B_{FD}^{digit} &= \frac{1}{2} LSB \\
 &= 2.746 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{FD}^{hys} &= 50.0(kgf) \times 0.30 \% F.S. \\
 &= 1.500 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{FD}^{line} &= 50.0(kgf) \times 0.20 \% F.S. \\
 &= 1.000 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{FD}^{SEE} &= SEE \\
 &= 3.254 \times 10^{-3} (kgf) \\
 S_{FD}^{disper} &= SE \\
 &= 4.340 \times 10^{-2} (kgf)
 \end{aligned}$$

したがって、曳引力 $FD$ の総括正確度 $B_{FD}$ および総括精密度 $S_{FD}$ は次のように計算される。

$$\begin{aligned}
 B_{FD} &= \sqrt{(B_{FD}^{acc})^2 + (B_{FD}^{digit})^2} \\
 &= 5.704 \times 10^{-2} (m/s) \\
 S_{FD} &= \sqrt{(S_{FD}^{hys})^2 + (S_{FD}^{line})^2 + (S_{FD}^{SEE})^2 + (S_{FD}^{disper})^2} \\
 &= 4.711 \times 10^{-2} (m/s)
 \end{aligned}$$

#### 4.2.6 模型プロペラのスラスト

模型船のスラスト $T_m$ については、自航動力計の公称精度およびA/D変換によるデジタルエラー、ヒステリシス特性、非直線性、また検定結果の推定標準誤差(SEE)、スラスト計測データのバラツキによる標準誤差が伝播している。これら誤差要因に対応する正確度 $B$ および精密度 $S$ は次の通りである。

$$\begin{aligned}
 B_{T_m}^{acc} &= 12.0(kgf) \times 0.10 \% F.S. \\
 &= 1.200 \times 10^{-2} (kgf) \\
 B_{T_m}^{digit} &= \frac{1}{2} LSB \\
 &= 2.832 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{T_m}^{hys} &= 12.0(kgf) \times 0.20 \% F.S. \\
 &= 2.400 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{T_m}^{line} &= 12.0(kgf) \times 0.20 \% F.S. \\
 &= 2.400 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{T_m}^{SEE} &= SEE \\
 &= 3.211 \times 10^{-4} (kgf) \\
 S_{T_m}^{disper} &= SE
 \end{aligned}$$

$$= 2.829 \times 10^{-2} (kgf)$$

したがって、スラスト $T_m$ の総括正確度 $B_{T_m}$ および総括精密度 $S_{T_m}$ は次のように計算される。

$$\begin{aligned}
 B_{T_m} &= \sqrt{(B_{T_m}^{acc})^2 + (B_{T_m}^{digit})^2} \\
 &= 3.076 \times 10^{-2} (kgf) \\
 S_{T_m} &= \sqrt{(S_{T_m}^{hys})^2 + (S_{T_m}^{line})^2 + (S_{T_m}^{SEE})^2 + (S_{T_m}^{disper})^2} \\
 &= 4.419 \times 10^{-2} (kgf)
 \end{aligned}$$

#### 4.2.7 1-tの不確かさ区間

以上により、 $r_t$ および $\rho$ 、 $\nabla_m$ 、 $V_w$ 、 $FD$ 、 $T_m$ についての正確度、精密度が得られた。したがって、1-tの絶対正確度 $B_{1-t}$ および絶対精密度 $S_{1-t}$ は次式で計算される。

$$\begin{aligned}
 B_{1-t} &= \{ (\theta_{\rho}^{1-t} \cdot B_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{1-t} \cdot B_{V_w})^2 + (\theta_{T_m}^{1-t} \cdot B_{T_m})^2 \\
 &\quad + (\theta_{\nabla_m}^{1-t} \cdot B_{\nabla_m})^2 + (\theta_{r_t}^{1-t} \cdot B_{r_t})^2 \\
 &\quad + (\theta_{FD}^{1-t} \cdot B_{FD})^2 \}^{1/2} \\
 &= 1.555 \times 10^{-2} \\
 S_{1-t} &= \{ (\theta_{\rho}^{1-t} \cdot S_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{1-t} \cdot S_{V_w})^2 + (\theta_{T_m}^{1-t} \cdot S_{T_m})^2 \\
 &\quad + (\theta_{r_t}^{1-t} \cdot S_{r_t})^2 + (\theta_{FD}^{1-t} \cdot S_{FD})^2 \}^{1/2} \\
 &= 3.951 \times 10^{-2}
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \theta_{r_t}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial r_t} = \frac{\rho \cdot \nabla_m^{2/3} \cdot V_w^2}{T_m} \\
 &= 61.57 \\
 \theta_{\rho}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial \rho} = \frac{r_t \cdot \nabla_m^{2/3} \cdot V_w^2}{T_m} \\
 &= 8.144 \times 10^{-3} \\
 \theta_{\nabla_m}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial \nabla_m} = \frac{\frac{2}{3} r_t \cdot \rho \cdot \nabla_m^{-1/3} \cdot V_w^2}{T_m} \\
 &= 1.496 \times 10^{-1} \\
 \theta_{V_w}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial V_w} = \frac{2 r_t \cdot \rho \cdot \nabla_m^{2/3} \cdot V_w}{T_m} \\
 &= 1.394 \\
 \theta_{FD}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial (FD)} = -\frac{1}{T_m} \\
 &= -1.812 \times 10^{-1} \\
 \theta_{T_m}^{1-t} &= \frac{\partial(1-t)}{\partial T_m} = \frac{-r_t \cdot \rho \cdot \nabla_m^{2/3} \cdot V_w^2}{T_m^2}
 \end{aligned}$$

$$= -1.482 \times 10^{-1}$$

これらより、 $1-t$ の不確かさ区間 $U_{1-t}^{RSS}$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} U_{1-t}^{RSS} &= \sqrt{(B_{1-t})^2 + (t \cdot S_{1-t})^2} \\ &= 8.054 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

また、このようにして得られる $1-t$ の不確かさ区間を Fig.7に示す。

#### 4.3 有効伴流係数 $1-w$ の不確かさ

有効伴流係数の平均値は次式で計算される。

$$\begin{aligned} (1-w) &= \frac{J \cdot n \cdot D}{V_w} \\ &= 4.796 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

まず、 $1-w$ の要素である模型プロペラの回転数 $n$ と直径 $D$ 、およびプロペラ前進係数 $J$ 、模型船対水速度 $V_w$ の正確度、精密度を求め、次に $1-w$ の絶対正確度 $B_{1-w}$ 、絶対精密度 $S_{1-w}$ および不確かさ区間 $U_{1-w}^{RSS}$ を計算する。

##### 4.3.1 模型プロペラの回転数

今回の実験では模型プロペラの平均回転数のみを記録していたため、実験中にどのくらいの幅で回転数変動していたか知ることができない。したがって、実験者の判断でプロペラ回転数の標準誤差を0.1(rps)とした。また、プロペラ駆動に用いた電動モータ等に不明な点が多いため、回転数制御系の公称精度による正確度は0.0(rps)とした。

$$\begin{aligned} B_n &= 0.000 \text{ (rps)} \\ S_n &= 1.000 \times 10^{-1} \text{ (rps)} \end{aligned}$$

##### 4.3.2 模型プロペラの直径

模型プロペラの直径 $D$ については詳細なデータが存在しないため、実験者の判断において製作精度を0.0001(m)とした。

$$B_D = 1.000 \times 10^{-4} \text{ (m)}$$

##### 4.3.3 模型プロペラの前進係数

模型プロペラの前進係数 $J$ は、プロペラ単独性能試験(POT)により得られた $J-K_T$ のデータに対し4次の多項式近似をした曲線を用いて求められている。したがって、 $J$ には模型プロペラのスラスト係数 $K_T$ の誤差が伝播しているため $J$ の絶対正確度および絶対精密度を計算するには $K_T$ の絶対正確度 $B_{K_T}$ および絶対精密度 $S_{K_T}$ が必要になる。ただし、ここではPOTに関する誤差については論じないことにする。

スラスト係数の正確度、精密度 スラスト係数 $K_T$ は次式で計算される。

$$K_T = \frac{T_m}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (13)$$

したがって、 $K_T$ には $K_T$ の要素であるスラスト $T_m$ 、水の密度 $\rho$ 、プロペラ回転数 $n$ 、プロペラ直径 $D$ の誤差が伝播している。

$T_m$ 、 $\rho$ 、 $n$ 、 $D$ の正確度、精密度はそれぞれ4.2節、4.3節において求められているが、改めて記すと次のようになる。

$$\begin{aligned} B_{T_m} &= 3.076 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \\ B_\rho &= 2.169 \times 10^{-3} \text{ (kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4) \\ B_n &= 0.000 \text{ (rps)} \\ B_D &= 1.000 \times 10^{-4} \text{ (m)} \\ S_{T_m} &= 4.419 \times 10^{-2} \text{ (kgf)} \\ S_\rho &= 8.674 \times 10^{-4} \text{ (kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4) \\ S_n &= 1.000 \times 10^{-1} \text{ (rps)} \end{aligned}$$

また、 $K_T$ の $T_m$ 、 $\rho$ 、 $n$ 、 $D$ に対する感度係数をそれぞれ $\theta_{T_m}^{K_T}$ 、 $\theta_\rho^{K_T}$ 、 $\theta_n^{K_T}$ 、 $\theta_D^{K_T}$ とすると、 $K_T$ の絶対正確度 $B_{K_T}$ 、絶対精密度 $S_{K_T}$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned} B_{K_T} &= \left\{ (\theta_{T_m}^{K_T} \cdot B_{T_m})^2 + (\theta_\rho^{K_T} \cdot B_\rho)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_n^{K_T} \cdot B_n)^2 + (\theta_D^{K_T} \cdot B_D)^2 \right\}^{1/2} \\ &= 1.316 \times 10^{-3} \\ S_{K_T} &= \left\{ (\theta_{T_m}^{K_T} \cdot S_{T_m})^2 + (\theta_\rho^{K_T} \cdot S_\rho)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_n^{K_T} \cdot S_n)^2 \right\}^{1/2} \\ &= 4.768 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \theta_{T_m}^{K_T} &= \frac{\partial(K_T)}{\partial T_m} = \frac{1}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \\ &= 4.068 \times 10^{-2} \\ \theta_\rho^{K_T} &= \frac{\partial(K_T)}{\partial \rho} = \frac{-T_m}{\rho^2 \cdot n^2 \cdot D^4} \\ &= -2.214 \times 10^{-3} \\ \theta_n^{K_T} &= \frac{\partial(K_T)}{\partial n} = \frac{-2T_m}{\rho \cdot n^3 \cdot D^4} \\ &= -4.416 \times 10^{-2} \\ \theta_D^{K_T} &= \frac{\partial(K_T)}{\partial D} = \frac{-4T_m}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \\ &= -4.083 \end{aligned}$$

前進係数の正確度、精密度  $J$ の $K_T$ に対する感度係数を $\theta_{K_T}^J$ とすれば、前進係数 $J$ の絶対正確度 $B_J$ および

び絶対精度度  $S_J$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} B_J &= \theta_{K_T}^J \cdot B_{K_T} \\ &= 3.365 \times 10^{-3} \\ S_J &= \theta_{K_T}^J \cdot S_{K_T} \\ &= 1.219 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \theta_{K_T}^J &= \partial J / \partial K_T \\ &= -2.557 \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

$\partial J / \partial K_T$  には  $J - K_T$  曲線 (4次の多項式近似) の  $K_T$  による微分値を用いた。

#### 4.3.4 模型船の対水速度

模型船の対水速度  $V_w$  については 4.2.3 節で既に計算されている。

$$\begin{aligned} B_{V_w} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/sec)} \\ S_{V_w} &= 2.998 \times 10^{-3} \text{ (m/sec)} \end{aligned}$$

#### 4.3.5 $1-w$ の不確かさ区間

以上により、 $n$  および、 $D$ 、 $J$ 、 $V_w$  についての正確度および精度度が得られた。したがって、 $1-w$  の絶対正確度と絶対精度度は次式で計算される。

$$\begin{aligned} B_{1-w} &= \{ (\theta_n^{1-w} \cdot B_n)^2 + (\theta_D^{1-w} \cdot B_D)^2 \\ &\quad + (\theta_J^{1-w} \cdot B_J)^2 + (\theta_{V_w}^{1-w} \cdot B_{V_w})^2 \}^{1/2} \\ &= 6.370 \times 10^{-3} \\ S_{1-w} &= \{ (\theta_n^{1-w} \cdot S_n)^2 + (\theta_J^{1-w} \cdot S_J)^2 \\ &\quad + (\theta_{V_w}^{1-w} \cdot S_{V_w})^2 \}^{1/2} \\ &= 2.352 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \theta_n^{1-w} &= \frac{\partial(1-w)}{\partial n} = \frac{J \cdot D}{V_w} \\ &= 4.716 \times 10^{-2} \\ \theta_D^{1-w} &= \frac{\partial(1-w)}{\partial D} = \frac{J \cdot n}{V_w} \\ &= 2.180 \\ \theta_J^{1-w} &= \frac{\partial(1-w)}{\partial J} = \frac{n \cdot D}{V_w} \\ &= 1.888 \\ \theta_{V_w}^{1-w} &= \frac{\partial(1-w)}{\partial V_w} = \frac{-J \cdot n \cdot D}{V_w^2} \\ &= -4.047 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

これより  $1-w$  の不確かさ  $U_{1-w}^{RSS}$  を求めると、

$$\begin{aligned} U_{1-w}^{RSS} &= \sqrt{(B_{1-w})^2 + (t \cdot S_{1-w})^2} \\ &= 4.747 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

また、このようにして得られる  $1-w$  の不確かさ区間を Fig.7 に示す。

#### 4.4 プロペラ単独効率 $\eta_o$ の不確かさ

プロペラ単独効率  $\eta_o$  の平均値は次式で計算される。

$$\begin{aligned} \eta_o &= \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q} \\ &= 3.632 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

したがって、 $\eta_o$  には  $K_T$  およびプロペラ単独性能曲線より得られる  $J$ 、 $K_Q$  の誤差が伝播している。 $\eta_o$  の絶対正確度  $B_{\eta_o}$  および絶対精度度  $S_{\eta_o}$  を求めるには、これら誤差要因の正確度と精度度が必要になるが、 $J$  と  $K_T$  については 4.3.3 節ですでに計算されているため、ここではまず  $K_Q$  の誤差を求める。

##### 4.4.1 トルク係数 $K_Q$

$K_Q$  はスラスト一致法で得られた  $J$  と、POT で得られた  $K_Q$  の近似曲線を用いて求められる。 $K_Q$  の  $J$  に対する感度係数を  $\theta_J^{K_Q}$  とすると、 $K_Q$  の絶対正確度  $B_{K_Q}$  および絶対精度度  $S_{K_Q}$  は次のように計算される。

$$\begin{aligned} B_{K_Q} &= \sqrt{(\theta_J^{K_Q} \cdot B_J)^2} \\ &= 9.732 \times 10^{-5} \\ S_{K_Q} &= \sqrt{(\theta_J^{K_Q} \cdot S_J)^2} \\ &= 3.525 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \theta_J^{K_Q} &= \partial K_Q / \partial J \\ &= -2.892 \times 10^{-2} \quad (\text{at } F_n = 0.138) \end{aligned}$$

$\partial K_Q / \partial J$  には  $K_Q - J$  曲線 (4次の多項式近似) の  $J$  による微分値を用いた。

##### 4.4.2 $\eta_o$ の不確かさ区間

これまでに得られた  $J$ 、 $K_T$ 、 $K_Q$  の正確度および精度度を用いて、 $\eta_o$  の絶対正確度と絶対精度度を計算すると、次のように求められる。

$$\begin{aligned} B_{\eta_o} &= \sqrt{(\theta_J^{\eta_o} \cdot B_J)^2 + (\theta_{K_T}^{\eta_o} \cdot B_{K_T})^2 + (\theta_{K_Q}^{\eta_o} \cdot B_{K_Q})^2} \\ &= 1.413 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\eta_o} &= \sqrt{(\theta_J^{\eta_o} \cdot S_J)^2 + (\theta_{K_T}^{\eta_o} \cdot S_{K_T})^2 + (\theta_{K_Q}^{\eta_o} \cdot S_{K_Q})^2} \\ &= 1.973 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}\theta_J^{\eta_o} &= \frac{\partial \eta_o}{\partial J} = \frac{K_T}{2\pi \cdot K_Q} \\ &= 1.429 \quad (\text{at } F_n = 0.138) \\ \theta_{K_T}^{\eta_o} &= \frac{\partial \eta_o}{\partial K_T} = \frac{J}{2\pi \cdot K_Q} \\ &= 1.617 \quad (\text{at } F_n = 0.138) \\ \theta_{K_Q}^{\eta_o} &= \frac{\partial \eta_o}{\partial K_Q} = \frac{-J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q^2} \\ &= -14.52 \quad (\text{at } F_n = 0.138)\end{aligned}$$

この  $B_{\eta_o}$ 、 $S_{\eta_o}$  を用いて  $\eta_o$  の不確かさ区間を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}U_{\eta_o}^{RSS} &= \sqrt{(B_{\eta_o})^2 + (t \cdot S_{\eta_o})^2} \\ &= 3.949 \times 10^{-2}\end{aligned}$$

また、このようにして得られる  $\eta_o$  の不確かさ区間を Fig.8 に示す。

#### 4.5 プロペラ効率比 $\eta_R$ の不確かさ

プロペラ効率比  $\eta_R$  の平均値は次式で計算される。

$$\begin{aligned}\eta_R &= \frac{T_m \cdot J \cdot D}{2\pi \cdot Q_m \cdot \eta_o} \\ &= 9.913 \times 10^{-1} \quad (\text{at } F_n = 0.138)\end{aligned}$$

したがって、誤差要因はスラスト  $T_m$ 、および前進係数  $J$ 、プロペラ直径  $D$ 、トルク  $Q_m$ 、プロペラ単独効率  $\eta_o$  である。 $Q_m$  以外の誤差要因の正確度および精密度は前節までにすべて求められているため、まず  $Q_m$  の正確度  $B_{Q_m}$  および精密度  $S_{Q_m}$  を求める。

##### 4.5.1 模型プロペラのトルク

模型プロペラのトルク  $Q_m$  には、自航動力計の公称精度およびヒステリシス、非直線性、A/D 変換に伴うデジタルエラー、検定曲線の SEE、測定値の標準誤差が伝播している。これら誤差要因に対する正確度  $B$  および精密度  $S$  は次の通りである。

$$\begin{aligned}B_{Q_m}^{acc} &= 0.5(\text{kgf}) \times 0.001\% \\ &= 5.000 \times 10^{-4} (\text{kgf} \cdot \text{m}) \\ S_{Q_m}^{hys} &= 0.5(\text{kgf}) \times 0.002\% \\ &= 1.000 \times 10^{-3} (\text{kgf} \cdot \text{m}) \\ S_{Q_m}^{line} &= 0.5(\text{kgf} \cdot \text{m}) * 0.002\% \\ &= 1.000 \times 10^{-3} (\text{kgf} \cdot \text{m}) \\ B_{Q_m}^{digit} &= \frac{1}{2} LSB \\ &= 9.717 \times 10^{-4} (\text{kgf} \cdot \text{m})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S_{Q_m}^{SEE} &= SEE \\ &= 8.475 \times 10^{-6} (\text{kgf} \cdot \text{m}) \\ S_{Q_m}^{disper} &= SE \\ &= 5.563 \times 10^{-4} (\text{kgf} \cdot \text{m})\end{aligned}$$

したがって、トルクの総括正確度  $B_{Q_m}$  および総括精密度  $S_{Q_m}$  は、次のように計算される。

$$\begin{aligned}B_{Q_m} &= \sqrt{(B_{Q_m}^{acc})^2 + (B_{Q_m}^{digit})^2} \\ &= 1.093 \times 10^{-3} (\text{kgf} \cdot \text{m}) \\ S_{Q_m} &= \left\{ (S_{Q_m}^{hys})^2 + (S_{Q_m}^{line})^2 + (S_{Q_m}^{SEE})^2 \right. \\ &\quad \left. + (S_{Q_m}^{disper})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 1.520 \times 10^{-3} (\text{kgf} \cdot \text{m})\end{aligned}$$

##### 4.5.2 $\eta_R$ の不確かさ区間

以上により、 $\eta_R$  の正確度と精密度を計算するために必要な値が得られた。 $\eta_R$  の絶対正確度  $B_{\eta_R}$  および絶対精密度  $S_{\eta_R}$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned}B_{\eta_R} &= \left\{ (\theta_{T_m}^{\eta_R} \cdot B_{T_m})^2 + (\theta_J^{\eta_R} \cdot B_J)^2 + (\theta_D^{\eta_R} \cdot B_D)^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{Q_m}^{\eta_R} \cdot B_{Q_m})^2 + (\theta_{\eta_o}^{\eta_R} \cdot B_{\eta_o})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 1.632 \times 10^{-2} \\ S_{\eta_R} &= \left\{ (\theta_{T_m}^{\eta_R} \cdot S_{T_m})^2 + (\theta_J^{\eta_R} \cdot S_J)^2 + (\theta_{Q_m}^{\eta_R} \cdot S_{Q_m})^2 \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{\eta_o}^{\eta_R} \cdot S_{\eta_o})^2 \right\}^{1/2} \\ &= 5.000 \times 10^{-2}\end{aligned}$$

この  $B_{\eta_R}$ 、 $S_{\eta_R}$  を用いて  $\eta_R$  の不確かさ区間  $U_{\eta_R}^{RSS}$  を求めると次のように計算される。

$$\begin{aligned}U_{\eta_R}^{RSS} &= \sqrt{(B_{\eta_R})^2 + (t \cdot S_{\eta_R})^2} \\ &= 1.013 \times 10^{-1}\end{aligned}$$

また、このようにして得られる  $\eta_R$  の不確かさ区間を Fig.8 に示す。

## 5. 圧力計測試験への応用

### 5.1 船体表面圧力の不確かさ

1997年11月11日に三鷹第二船舶試験水槽で行われた船体表面圧力計測試験(曳航状態、 $F_n = 0.138$ 、舵付き)において得られたデータに対し、不確かさ解析を行なった。圧力の計測点は S.S.2 より後方の両舷、合計約140点である。船体表面圧力  $P$  の誤差要因には、圧力計の公称精度に基づくかたより誤差、圧力計検定結果の推定標準誤差(SEE)、A/D 変換に伴う

Table5: Errors in pressure gauge

	フルスケール	公称精度	ヒステリシス特性
圧力計	3000mmAq	0.680mmAq	0.02 % F.S.

誤差(デジタルエラー、ヒステリシス)、測定値のバラツキによる標準誤差、水の密度の誤差、また、速度の誤差に伴う偶然誤差などがある。今回の圧力計試験で用いた圧力計の仕様を Table5 に示す。

また、最終的な解析結果である圧力係数  $C_p$  は圧力  $P$  を  $\frac{1}{2}\rho V_w^2$  で無次元化したものであり、この処理によって  $\rho$ 、 $V_w$  の誤差が混入する。ここでは  $C_p$  の要素 ( $\rho$ 、 $V_w$ 、 $P$ ) の正確度と精密度を求めた後、 $C_p$  の絶対正確度  $B_{C_p}$  と絶対精密度  $S_{C_p}$  および不確かさ区間  $U_{C_p}^{RSS}$  を求めるという手順を踏む。

圧力計測は6チャンネルのスクヤニバルブを24回切り替えることにより計144点計測できるシステムを用いているが、ここでは Channel-1(以下、Ch-1) の1回目の計測値について  $C_p$  の不確かさ計算法を説明し、計算表を Table8 に示した。また、この点における  $C_p$  の平均値は  $C_p = 2.379 \times 10^{-1}$  である。

### 5.1.1 水の密度

3.2.3節で述べているように、水の密度  $\rho$  は温度  $T$  に依存する。実験時の水温は  $17.0^\circ\text{C}$  であるため、 $\theta(T)$  は(11)式により次のように計算される。

$$\theta_T^\rho = -4.339 \times 10^{-2} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4/\text{K)}$$

したがって、

$$\begin{aligned} B_\rho &= \theta_T^\rho \cdot B_T \\ &= 2.170 \times 10^{-3} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4) \\ S_\rho &= \theta_T^\rho \cdot S_T \\ &= 8.678 \times 10^{-4} \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4) \end{aligned}$$

### 5.1.2 対水速度

3.2.5節と同様に計算を行うと、

$$\begin{aligned} B_{V_w}^{acc} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w}^{SEE} &= SEE \\ &= 1.683 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w}^{dispers} &= SE \\ &= 1.392 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

したがって、

$$B_{V_w} = \sqrt{(B_{V_w}^{acc})^2}$$

(422)

$$\begin{aligned} &= 1.000 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \\ S_{V_w} &= \sqrt{(S_{V_w}^{SEE})^2 + (S_{V_w}^{dispers})^2} \\ &= 2.184 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

### 5.1.3 圧力計

圧力の計測値に含まれる誤差要因として圧力計公称精度、圧力計のヒステリシス、A/D変換時のデジタルエラー、検定時の推定標準誤差(SEE)が考えられる。公称精度、ヒステリシスのデータは圧力計の仕様書の値を用いており、Table5に示した。Ch-1の圧力計(圧力計1)の総括正確度  $B_{gauge}$  と総括精密度  $S_{gauge}$  を求めると次のようになる。

公称精度 仕様書の値から次のように決定される。

$$B_{gauge}^{acc} = 6.843 \times 10^{-1} \text{ (mmAq)}$$

ヒステリシス 使用した圧力計はフルスケール3000mmAqであるため、仕様書の値を用いると次のように計算される。

$$\begin{aligned} S_{gauge}^{hys} &= 0.02 \% F.S. = 0.02 \times 3000 \text{ mmAq} \\ &= 0.60 \text{ (mmAq)} \end{aligned}$$

デジタルエラー A/D変換による正確度  $B_{gauge}^{digit}$  は、

$$\begin{aligned} B_{gauge}^{digit} &= \frac{1}{2} LSB \\ &= 0.5 \times 0.009608 \times 16 \\ &= 7.686 \times 10^{-2} \text{ (mmAq)} \end{aligned}$$

ただし、 $1LSB = (\text{検定係数}) \times 2^4$

検定時推定標準誤差 検定データと(12)式を用いて推定標準誤差(SEE)を求めると次のように計算される。

$$S_{gauge}^{SEE} = SEE = 1.706 \times 10^{-1} \text{ (mmAq)}$$

圧力計の正確度、精密度 以上の値を用いると、圧力計に起因する総括正確度  $B_{gauge}$  および総括精密度  $S_{gauge}$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} B_{gauge} &= \sqrt{(B_{gauge}^{acc})^2 + (B_{gauge}^{digit})^2} \\ &= 6.886 \times 10^{-1} \text{ (mmAq)} \quad (\text{at Ch} - 1) \\ S_{gauge} &= \sqrt{(S_{gauge}^{hys})^2 + (S_{gauge}^{SEE})^2} \\ &= 6.238 \times 10^{-1} \text{ (mmAq)} \quad (\text{at Ch} - 1) \end{aligned}$$

5.1.4 船体表面圧力および静圧

船体表面圧力  $P_1$  および静圧  $P_2$  の測定値バラツキによる標準誤差を偶然誤差とみなし、それぞれ  $S_{P_1}$ 、 $S_{P_2}$  とすると、(2) 式より次のように求められる。

$$S_{P_1} = 9.473 \times 10^{-2} \text{ (mmAq)}$$

$$S_{P_2} = 9.435 \times 10^{-2} \text{ (mmAq)}$$

5.1.5 圧力係数  $C_p$  の不確かさ区間

以上により、圧力計および  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\rho$ 、 $V_w$  それぞれについての正確度、精密度が求められた。したがって、 $C_p$  の絶対正確度および絶対精密度は次式で計算できる。

$$B_{C_p} = \left\{ (\theta_{gauge}^{C_p} \cdot B_{gauge})^2 + (\theta_{\rho}^{C_p} \cdot B_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{C_p} \cdot B_{V_w})^2 \right\}^{1/2}$$

$$= 9.723 \times 10^{-3}$$

$$S_{C_p} = \left\{ (\theta_{gauge}^{C_p} \cdot S_{gauge})^2 + (\theta_{\rho}^{C_p} \cdot S_{\rho})^2 + (\theta_{V_w}^{C_p} \cdot S_{V_w})^2 + (\theta_{P_1}^{C_p} \cdot S_{P_1})^2 + (\theta_{P_2}^{C_p} \cdot S_{P_2})^2 \right\}^{1/2}$$

$$= 9.043 \times 10^{-3}$$

ここで、

$$\theta_{gauge}^{C_p} = \frac{\partial C_p}{\partial P_1} = \frac{0.001 \text{ g}}{\frac{1}{2} V_w^2}$$

$$= 1.411 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{P_1}^{C_p} = \frac{\partial C_p}{\partial P_1} = \frac{0.001 \text{ g}}{\frac{1}{2} V_w^2}$$

$$= 1.411 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{P_2}^{C_p} = \frac{\partial C_p}{\partial P_2} = \frac{-0.001 \text{ g}}{\frac{1}{2} V_w^2}$$

$$= -1.411 \times 10^{-2}$$

$$\theta_{\rho}^{C_p} = \frac{\partial C_p}{\partial \rho}$$

$$= 0.000$$

$$\theta_{V_w}^{C_p} = \frac{\partial C_p}{\partial V_w} = \frac{-4(P_1 - P_2)}{\rho V^3}$$

$$= -4.037 \times 10^{-1}$$

これより  $C_p$  の不確かさ区間  $U_{C_p}^{RSS}$  を求めると、

$$U_{C_p}^{RSS} = \sqrt{(B_{C_p})^2 + (t \cdot S_{C_p})^2}$$

$$= 2.053 \times 10^{-2} \text{ (at } Ch - 1, 1st)$$

また、このようにして得られる  $C_p$  の不確かさ区間を Fig.9 に示す。

6. 伴流計試験への応用

ここでは、船尾伴流を計測するために次のような手順を踏んでいる。

1. 5孔ピトー管 (以下、5孔管) と圧力計を用いて各計測点の圧力を計測
2. これに圧力計の検定係数を乗じることにより水頭を求める
3. さらに5孔管の検定係数を乗じることにより流速を求める

したがって、船尾伴流の誤差要因には、圧力計の公称精度に基づくかたより誤差、圧力計検定時の推定標準誤差 (SEE)、A/D 変換に伴う誤差 (デジタルエラー、ヒステリシス)、測定値のバラツキによる標準誤差、また、曳引車速度の誤差に伴う偶然誤差などがある。

今回の伴流計試験で用いた圧力計の仕様を Table5 に示す。

上記の要因による誤差は、計測の際まず5孔管の各管の圧力 ( $H_T, H_B, H_C, H_S, H_P$ ) に混入し、さらにそれらが伴流計測面内の流速成分 ( $V_x, V_y, V_z$ ) にまで伝播する。ここでは、これら誤差の伝播過程を明らかにし伴流 ( $V_x, V_y, V_z$ ) の不確かさ区間計算式を求める。

6.1 球形5孔ピトー管の計算式および誤差の伝播

5孔管の球形ヘッドの子午線上に配列された3孔 ( $T, C, B$ ) について適用される計算式を記せば次のようになる<sup>11)</sup>。

$$F_V = \frac{H_T - H_B}{2 \cdot H_C - H_T - H_B} \quad (14)$$

$$\beta_V = a_0 + a_1 \cdot F_V + a_2 \cdot F_V^2 + a_3 \cdot F_V^3 \quad (15)$$

$$V_V = \sqrt{\frac{2 \cdot (H_C - H_B)}{b_0 + b_1 \cdot \beta_V + b_2 \cdot \beta_V^2 + b_3 \cdot \beta_V^3}} \quad (16)$$

ここで、 $a_0, a_1, a_2, a_3$  および  $b_0, b_1, b_2, b_3$  はピトー管の検定曲線 (多項式近似) の係数を表わす。

計測した  $H_T, H_B, H_C$  を (14) 式に代入すると  $F_V$  が求められ、この  $F_V$  を (15) 式に代入すると、5孔管への垂直方向の流入角  $\beta_V$  が計算できる。また、この  $\beta_V$  を (16) 式に代入すれば、垂直方向の流入速度  $V_V$  を得ることができる。すなわち、 $H_T, H_B, H_C$  に含まれる誤差もこのように伝播していく。

6.2 伴流速の不確かさ

$F_V$  の  $H_T, H_B, H_C$  に対する感度係数  $\theta_{H_T}^{F_V}, \theta_{H_B}^{F_V}, \theta_{H_C}^{F_V}$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
\theta_{H_T}^{F_V} &= \frac{\partial F_V}{\partial H_T} \\
&= \frac{1}{2 \cdot H_C - H_T - H_B} + \frac{H_T - H_B}{(2 \cdot H_C - H_T - H_B)^2} \\
\theta_{H_B}^{F_V} &= \frac{\partial F_V}{\partial H_B} \\
&= \frac{-1}{2 \cdot H_C - H_T - H_B} + \frac{H_T - H_B}{(2 \cdot H_C - H_T - H_B)^2} \\
\theta_{H_C}^{F_V} &= \frac{\partial F_V}{\partial H_C} \\
&= \frac{-2 \cdot (H_T - H_B)}{(2 \cdot H_C - H_T - H_B)^2}
\end{aligned}$$

この感度係数を用いると、 $H_T$ 、 $H_B$ 、 $H_C$ より伝播してきて $F_V$ に含まれる誤差はそれぞれ次のように求められる。

$$\begin{aligned}
B_{F_V}^{H_T} &= \theta_{H_T}^{F_V} \cdot B_{H_T} \\
B_{F_V}^{H_B} &= \theta_{H_B}^{F_V} \cdot B_{H_B} \\
B_{F_V}^{H_C} &= \theta_{H_C}^{F_V} \cdot B_{H_C} \\
S_{F_V}^{H_T} &= \theta_{H_T}^{F_V} \cdot S_{H_T} \\
S_{F_V}^{H_B} &= \theta_{H_B}^{F_V} \cdot S_{H_B} \\
S_{F_V}^{H_C} &= \theta_{H_C}^{F_V} \cdot S_{H_C}
\end{aligned}$$

したがって、 $F_V$ の総括正確度 $B(F_V)$ 、総括精密度 $S(F_V)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}
B_{F_V} &= \sqrt{(B_{F_V}^{H_T})^2 + (B_{F_V}^{H_B})^2 + (B_{F_V}^{H_C})^2} \\
S_{F_V} &= \sqrt{(S_{F_V}^{H_T})^2 + (S_{F_V}^{H_B})^2 + (S_{F_V}^{H_C})^2}
\end{aligned}$$

さらに、 $\beta_V$ の $F_V$ に対する感度係数を $\theta_{\beta_V}^{F_V}$ とすると、 $\beta_V$ の絶対正確度 $B_{\beta_V}$ および絶対精密度 $S_{\beta_V}$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned}
B_{\beta_V} &= \theta_{\beta_V}^{F_V} \cdot B_{F_V} \\
S_{\beta_V} &= \theta_{\beta_V}^{F_V} \cdot S_{F_V}
\end{aligned}$$

ただし、

$$\theta_{\beta_V}^{F_V} = \frac{\partial F_V}{\partial \beta_V} = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot F_V + 3 \cdot a_3 \cdot F_V^2$$

したがって、 $V_V$ の $\beta_V$ に対する感度係数を $\theta_{\beta_V}^{V_V}$ とくと、 $V_V$ の絶対正確度 $B_{V_V}$ 、絶対精密度 $S_{V_V}$ は次のように表わされる。

$$\begin{aligned}
B_{V_V} &= \theta_{\beta_V}^{V_V} \cdot B_{\beta_V} \\
S_{V_V} &= \theta_{\beta_V}^{V_V} \cdot S_{\beta_V}
\end{aligned}$$

(424)

ただし、

$$\begin{aligned}
\theta_{\beta_V}^{V_V} &= \frac{\partial V_V}{\partial \beta_V} \\
&= \frac{-\sqrt{|H_C - H_B|}(b_1 + 2 \cdot b_2 \cdot \beta_V + 3 \cdot b_3 \cdot \beta_V^2)}{\sqrt{2}(b_0 + b_1 \cdot \beta_V + b_2 \cdot \beta_V^2 + b_3 \cdot \beta_V^3)^{1.5}}
\end{aligned}$$

同様の手順で、球形ヘッドの赤道上に配置された3孔( $S, C, P$ )からも $B_{V_H}$ 、 $S_{V_H}$ が計算され、これらを用いてさらに $X, Y, Z$ 方向の流速 $V_X, V_Y, V_Z$ の絶対正確度 $B$ 、絶対精密度 $S$ が求められる。

$$\begin{aligned}
B_{V_X} &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}B_{V_{V_X}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}B_{V_{H_X}}\right)^2} \\
S_{V_X} &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}S_{V_{V_X}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}S_{V_{H_X}}\right)^2} \\
B_{V_Y} &= B_{V_H} \cdot \sin(\beta_H)/V_w \\
S_{V_Y} &= S_{V_H} \cdot \sin(\beta_H)/V_w \\
B_{V_Z} &= B_{V_V} \cdot \sin(\beta_V)/V_w \\
S_{V_Z} &= S_{V_V} \cdot \sin(\beta_V)/V_w
\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
V_{V_X} &= V_V \cdot \cos(\beta_V)/V_w \\
V_{H_X} &= V_H \cdot \cos(\beta_H)/V_w
\end{aligned}$$

以上により求められた $B_{V_X}, B_{V_Y}, B_{V_Z}, S_{V_X}, S_{V_Y}, S_{V_Z}$ より、 $V_X, V_Y, V_Z$ の不確かさ区間 $U_{V_X}^{RSS}, U_{V_Y}^{RSS}, U_{V_Z}^{RSS}$ は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
U_{V_X}^{RSS} &= \sqrt{(B_{V_X})^2 + (t \cdot S_{V_X})^2} \\
U_{V_Y}^{RSS} &= \sqrt{(B_{V_Y})^2 + (t \cdot S_{V_Y})^2} \\
U_{V_Z}^{RSS} &= \sqrt{(B_{V_Z})^2 + (t \cdot S_{V_Z})^2}
\end{aligned}$$

また、このようにして得られる伴流分布(プロペラ位置)の不確かさ区間をFig.10に示す。

## 7. 考察

抵抗試験、自航試験、船体表面圧力計測試験、伴流計測試験について、具体的な手順を示しながら不確かさ解析を行なったが、いずれも単一試験であるということと、測定値の10Hz以下の変動成分はすべて有意であるという仮定の下に解析を行なっていることにより、得られた不確かさ区間は大きな幅を有している。しかし、その不確かさの原因を明らかにすることが本解析の一つの利点であるため、各試験の主要な誤差要因について考察してみる。

## 7.1 抵抗試験

これまで述べてきた  $F_n = 0.138$  の場合では、全抵抗係数  $C_t$  の誤差は全抵抗  $R_t$  から伝播してきた誤差が 99% 以上を占めており、この  $R_t$  の誤差では測定値のバラツキによる標準誤差が大部分である。つまり、曳引車や抵抗動力計などの振動により抵抗が変動することが主要な誤差の発生源となっており、他の誤差要因はその存在が無視できるほどである。ただし、今回の抵抗計測では有意な変動成分を暫定的に 10Hz 以下としており、本来除去されるべきノイズがデータに混入している可能性がある。今後、この閾値となる周波数について検討し、 $C_t$  の不確かさ区間を改善していかなければならない。

船体沈下量の不確かさではポテンシオメータの公称精度が約 40% の割合を占めており、次いでポテンシオメータの非直線性、A/D 変換によるデジタルエラーがそれぞれ約 20% 強である。また、 $dF$ 、 $dA$  の測定値バラツキによる標準誤差の影響は、ここでは 10% 程度となっている。船体沈下量に関しては計測機器の高精度化が不確かさ区間減少の鍵となり得ることがわかった。

トリムと船体平均沈下量については船体沈下量と同じ誤差要因が同じ割合で影響している。

## 7.2 自航試験

推力減少係数  $1-t$  における主要な誤差要因は  $C_t$  と  $FD$  である。どちらの場合も抵抗が変動することによる標準誤差が主な原因であり、抵抗計測系の精度向上が  $1-t$  の不確かさ減少に効果的である。

有効伴流係数  $1-w$  ではプロペラ前進係数  $J$  の精密度が主要な誤差要因であり全体の約 96% を占めている。ただし  $J$  は、 $K_T$  と  $J-K_T$  曲線を用いて計算されるため、結局  $K_T$  の誤差の影響である。この  $K_T$  の誤差を小さくするには  $T_m$  に含まれる誤差を低く抑えることが有効であり、自航動力計の精度向上が必要となる。また、プロペラ回転数の変動による誤差も  $K_T$  に大きな影響を及ぼすため、回転数を正確に把握しておく必要がある。

プロペラ単独効率  $\eta_0$ 、プロペラ効率比  $\eta_R$  についても  $J$  が不確かさ区間の約 80% から 90% を占めており、 $T_m$  の誤差が主要な誤差要因である。

これらのことから、自航試験においては自航動力計とプロペラ回転数制御の精度向上と、生データの高周波成分の除去が不確かさ区間を小さくする上で重要である。

## 7.3 圧力計測試験

船体表面圧力には、圧力計のヒステリシス特性による誤差が最も多く混入しており、次いで圧力計の公

称精度、圧力計の検定に伴う推定標準誤差 SEE である。つまり解析結果の精度を良くするには圧力計の精度向上が有効であるが、感度の高い圧力計を使用すると計測値にノイズが混入しやすくなり、かえって精度を低下させることにもなりかねない。さらに、導圧管内部に気泡が発生した場合に行なう「水通し」作業において、圧力計に定格圧力以上の力が加わり破損する可能性もある。したがって、圧力計を選定するにはこれらのことに注意しながら、なるべく感度の高いものを選びなければならない。

## 7.4 伴流計測試験

伴流計測では、5孔管に流入した流体の圧力を半導体型圧力計で計測するが、この圧力計測データのバラツキが大きな誤差要因である。このことは、曳航状態よりも自航状態のデータのほうが一層顕著であり、プロペラ作動による流体の攪乱が原因であると考えられる。これらは、生データから [プロペラ回転数  $\times$  翼数] 以上の周波数成分を除去することにより改善できるものと思われるが、ある程度長い時間計測して平均するか、真に有意な周波数でフィルターをかけなければ、伴流の不確かさ区間を小さくすることはできない。また、圧力計測試験時と同様、高精度な圧力計を使用するには限界があり、最適な圧力計を決定するには種々の要素を考慮しなければならない。

## 8. 結言

本論では不確かさ解析を水槽試験に適用し、肥大船に対する抵抗試験および自航試験、船体表面圧力計測試験、伴流計測試験について一例を示した。

いずれの試験においても、誤差要因の一つとして処理した計測データの変動が大きかったため、これ以外の要因による不確かさ区間への影響が相対的に小さくなっており、誤差評価は困難であった。データ計測時にローパスフィルターを用いて高周波成分を除去することが、その問題を解決するための最も簡便な方法と思われるが、有意な周波数域をも取り除いてしまわないように、閾値となる周波数は慎重に決定しなければならない。

今回は、繰り返し試験を行なうことの時間的・経済的制約や、計測データの有意な変動成分について十分な見解を得ていないなどの理由で、単一試験の不確かさ解析を行なうにとどめたが、ITTC<sup>1)</sup> でも採り上げられている「繰り返し試験」における不確かさ区間の推定についても今後検討する予定である。

また、今回解析対象とした誤差要因以外にもレールの起伏、計測系全体の動的特性、A/D ボードのヒステリシス特性、静振の影響、また対水流速計を用いなければ水槽水の残流や水槽壁影響等さまざまな

要因が考えられる。今後、詳細な誤差評価を行なうためには、これらも考慮していく必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) W.C.Lin et al. : 19th ITTC Proceedings Vol.1(1990)、p.578~604
- 2) 日本機械学会誌：計測の不確かさ、米国機械学会性能試験規約、丸善(1987)
- 3) 茂里 一紘 他：不確かさ解析とその抵抗試験への応用、第18回JSPC (1989)
- 4) 姫野洋司 他：抵抗試験における不確かさ解析の応用、関西造船協会誌第214号(1990)、p.39~47
- 5) 西尾 茂 他：不確かさ解析の抵抗・自航試験への応用、関西造船協会誌第216号(1991)、p.51~64
- 6) 笠原 良和：推進性能試験法、推進性能研究委員会第5回シンポジウム(1993)、p.122~132
- 7) 鈴木 敏夫 他：抵抗試験の不確かさ解析、試験水槽委員会第2回委員会総会資料(1999)
- 8) 山崎 禎昭 他：水槽試験の精度、水槽試験委員会第一部会シンポジウム「船型開発と水槽試験」(1983)、p.69~97
- 9) P・G・ホーエル著：初等統計学(第4版)、培風館(1981)
- 10) 西山 哲男著：流体力学(I)、日刊工業新聞社
- 11) 菅井 信夫 他：球型5孔ピトー管の特性に関する若干の考察、船舶技術研究所報告第21巻第6号(1984)、p.345~356

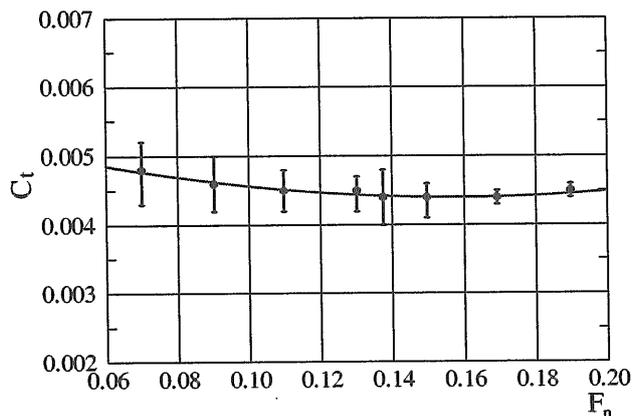


Fig.3: Uncertainty of total resistance coefficient  $C_t$

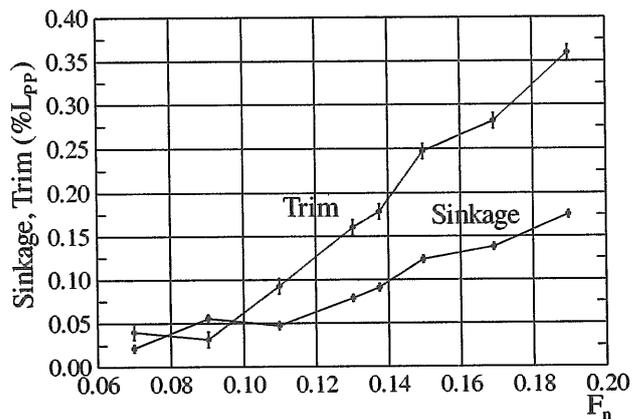


Fig.6: Uncertainty of mean sinkage and trim

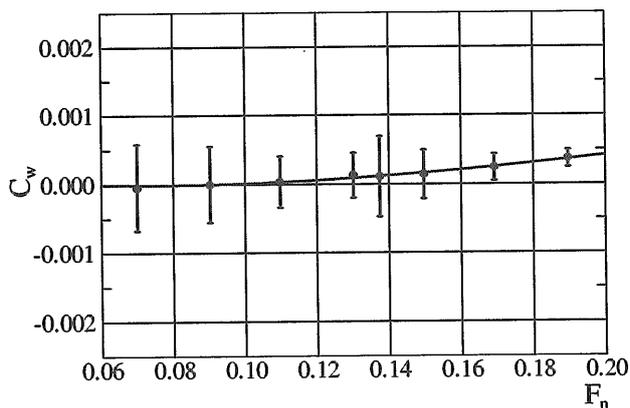


Fig.4: Uncertainty of wave making resistance coefficient  $C_w$

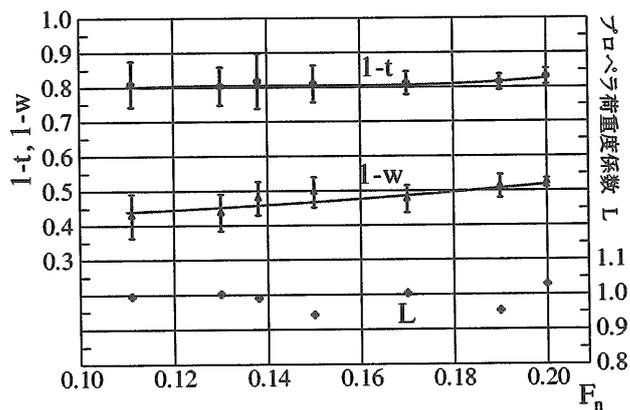


Fig.7: Uncertainty of  $1 - t$  and  $1 - w$

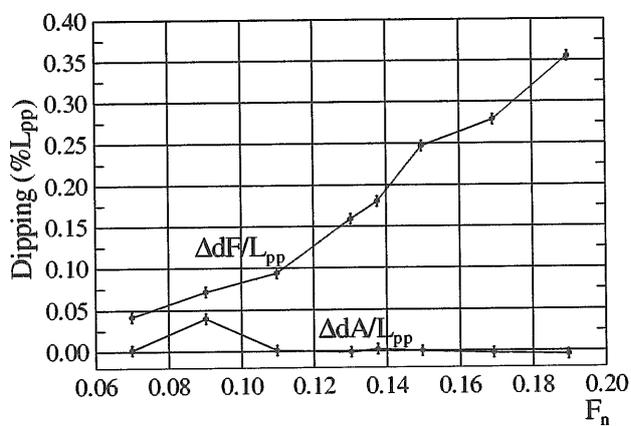


Fig.5: Uncertainty of dipping

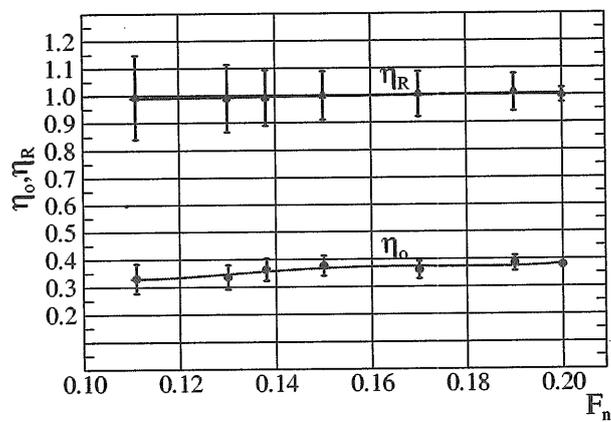


Fig.8: Uncertainty of  $\eta_o$  and  $\eta_R$

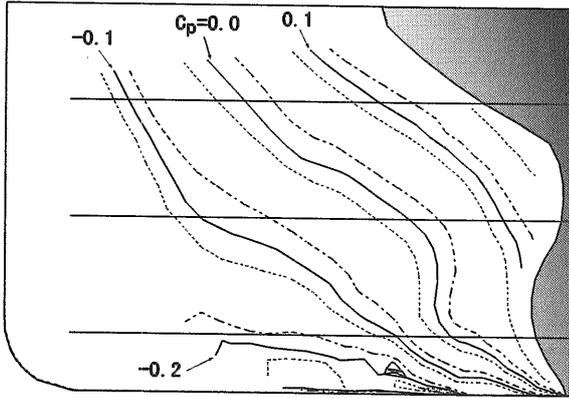


Fig.9: Uncertainty of pressure coefficient  $C_p$

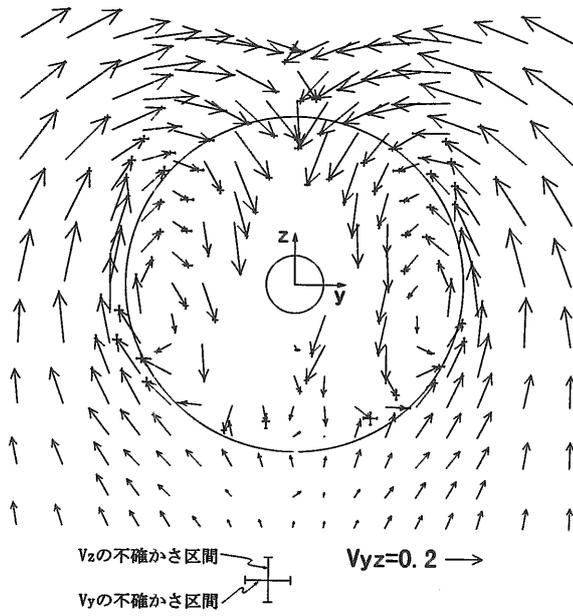


Fig.10: Uncertainty of wake distribution (yz-plane)

Table6: Calculation sheet for resistance test

Fn(true)= 0.138		舵付き		1997-11-06							
Parameter (mean value)	Error Source	bias(B)/ precision(S)	Error		Sensitivity	Error components			Uncertainty		
			(+)	(-)		Bias(+)	Bias(-)	precision	(+)	(-)	
$\rho$ (kg s <sup>-2</sup> /m <sup>4</sup> ) 101.447	T(°C) 17.600	最小目盛/2 読取り誤差	B	5.000E-02	-5.000E-02	-4.337E-02	-2.169E-03	2.169E-03	-8.674E-04	2.777E-03	-2.777E-03
			S	2.000E-02		-4.337E-02	2.169E-03	-2.169E-03	8.674E-04		
A (m <sup>2</sup> ) 14.3736	Lwl (m) W (m) d (m)	製作精度 経年変化 経年変化 経年変化	B	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		3.357E-02	-3.357E-02
			B	1.000E-03	-1.000E-03	1.879E+00	1.879E-03	-1.879E-03			
			B	1.000E-03	-1.000E-03	1.058E+01	1.058E-02	-1.058E-02			
			B	1.000E-03	-1.000E-03	3.180E+01	3.180E-02	-3.180E-02	0.000E+00		
Vw (m/s) 1.1787		流速計公称精度 流速計検定SEE 計測バラツキ	B	1.000E-03	-1.000E-03	1.000E+00	1.000E-03	-1.000E-03		4.844E-03	-4.844E-03
			S	1.683E-03		1.000E+00			1.683E-03		
Fn 0.1375	Vwl (m/s) 7.650E+00		B	1.000E-03	-1.000E-03	1.154E-01	1.154E-04	-1.154E-04		5.591E-04	-5.591E-04
			S	2.370E-03		1.154E-01			2.735E-04		
Rt (kg) 4.562E+00	Rt (kg) Fn	検力計公称精度 A/D変換1/2LSB 検力計非直線性 検力計ヒステリシス 検力計検定SEE 計測バラツキ	B	5.000E-02	-5.000E-02	1.000E+00	5.000E-02	-5.000E-02		4.188E-01	-4.188E-01
			S	2.746E-02	-2.746E-02	1.000E+00	2.746E-02	-2.746E-02			
Ct 4.504E-03	Rt (kg) $\rho$ (kg s <sup>-2</sup> /m <sup>4</sup> ) Vw (m/s) A		B	5.749E-02	-5.749E-02	9.872E-04	5.675E-05	-5.675E-05		4.149E-04	-4.149E-04
			S	2.073E-01		9.872E-04			2.046E-04		
dF (m) 1.306E-02	トリム計公称精度 A/D変換1/2LSB トリム計非直線性 トリム計検定SEE 計測バラツキ		B	2.827E-04	-2.827E-04	1.000E+00	2.827E-04	-2.827E-04		4.495E-04	-4.495E-04
			S	2.031E-04	-2.031E-04	1.000E+00	2.031E-04	-2.031E-04			
dA (m) 1.396E-03	トリム計公称精度 A/D変換1/2LSB トリム計非直線性 トリム計検定SEE 計測バラツキ		B	2.827E-04	-2.827E-04	1.000E+00	2.827E-04	-2.827E-04		4.259E-04	-4.259E-04
			S	2.004E-04	-2.004E-04	1.000E+00	2.004E-04	-2.004E-04			
$\Delta dF/Lpp$ (%Lpp) 1.804E-01	dF (m) dA (m)		B	3.481E-04	-3.481E-04	1.387E+01	4.828E-03	-4.828E-03		6.238E-03	-6.238E-03
			S	1.422E-04		1.387E+01			1.972E-03		
Lpp(m) 7.489E+00	L <sub>pp</sub> (m) x1 (m) x3 (m)	経年変化 経年変化 経年変化	B	3.465E-04	-3.465E-04	-5.153E-01	-1.786E-04	1.786E-04		6.238E-03	-6.238E-03
			S	1.238E-04		-5.153E-01			-6.379E-05		
$\Delta dA/Lpp$ (%Lpp) 1.984E-03	dF (m) dA (m)		B	3.481E-04	-3.481E-04	-1.428E+00	-4.971E-04	4.971E-04		6.327E-03	-6.327E-03
			S	1.422E-04		-1.428E+00			-2.031E-04		
Lpp(m) 7.489E+00	L <sub>pp</sub> (m) x2 (m) x3 (m)	経年変化 経年変化 経年変化	B	3.465E-04	-3.465E-04	1.478E+01	5.121E-03	-5.121E-03		6.327E-03	-6.327E-03
			S	1.238E-04		1.478E+01			1.830E-03		
Sinkage (%Lpp) 9.119E-02	$\Delta dF/Lpp$ $\Delta dA/Lpp$		B	4.831E-03	4.831E-03	5.000E-01	2.416E-03	2.416E-03		4.443E-03	-4.443E-03
			S	1.973E-03		5.000E-01			9.865E-04		
			B	5.145E-03	5.145E-03	5.000E-01	2.573E-03	2.573E-03		4.443E-03	-4.443E-03
			S	1.841E-03		5.000E-01			9.205E-04		
			B				3.530E-03	-3.530E-03			
			S								

(次項へつづく)

(前項からのつづき)

Trim by the head (%Lpp) <u>1.784E-01</u>	$\Delta dF/Lpp$		B S	4.831E-03 1.973E-03	4.831E-03	1.000E+00 1.000E+00	4.831E-03	4.831E-03	1.973E-03			
	$\Delta dA/Lpp$		B S	5.145E-03 1.841E-03	5.145E-03	-1.000E+00 -1.000E+00	-5.145E-03 7.058E-03	-5.145E-03 -7.058E-03	-1.841E-03 2.699E-03	8.886E-03	-8.886E-03	
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s) 1.067E-06	T(°C) 17.600	最小目盛/2 読取り誤差	B S	5.000E-02 2.000E-02	-5.000E-02	-2.283E-08 -2.283E-08	-1.142E-09 1.142E-09	1.142E-09 -1.142E-09	-4.566E-10 4.566E-10	1.462E-09	-1.462E-09	
<u>Rn</u> 8.453E+06	Vw (m/s) 1.179E+00	製作精度 経年劣化	B S	1.000E-03 2.370E-03	-1.000E-03	7.170E+06 7.170E+06	7.170E+03 -7.170E+03		1.699E+04			
			B B	0.000E+00 1.000E-03	0.000E+00 -1.000E-03	1.000E+00 1.105E+06	0.000E+00 1.105E+03	0.000E+00 -1.105E+03				
			B S	1.142E-09 4.566E-10	-1.142E-09	-7.922E+12 -7.922E+12	-9.047E+03 9.047E+03	9.047E+03 -3.617E+03	1.160E+04 1.160E+04	1.737E+04	3.663E+04	-3.663E+04
<u>Cf_0</u> 3.021E-03	Rn		B S	1.160E+04 1.737E+04	1.160E+04	-1.341E-10 -1.341E-10	-1.556E-06 1.556E-06	-1.556E-06 -1.556E-06	-2.329E-06 2.329E-06	4.911E-06	-4.911E-06	
<u>K</u> 4.909E-01	Ct		B S	5.822E-05 2.054E-04	-5.822E-05	3.310E+02 3.310E+02	1.927E-02 -1.927E-02	-1.927E-02	6.799E-02			
<u>K(true)</u> 4.254E-01	Cf_0		B S	1.556E-06 2.329E-06	-1.556E-06	-4.935E+02 -4.935E+02	-7.679E-04 1.929E-02	7.679E-04 -1.929E-02	-1.149E-03 6.800E-02	1.374E-01	-1.374E-01	
<u>Cw</u> 1.979E-04	Ct		B S	5.822E-05 2.054E-04	-5.822E-05	1.000E+00 1.000E+00	5.822E-05 -5.822E-05	-5.822E-05	2.054E-04			
			B S	1.556E-06 2.329E-06	-1.556E-06	-1.491E+00 -1.491E+00	-2.320E-06 2.320E-06	2.320E-06		-3.473E-06		
			B S	4.087E-02 5.902E-02	-4.087E-02	-3.021E-03 -3.021E-03	-1.235E-04 1.235E-04	1.235E-04	1.365E-04 -1.365E-04	-1.783E-04 2.720E-04	5.609E-04	-5.609E-04

Table7: Calculation sheet for self-propulsion test

Fn(true)= 0.138		舵付き	MP	1997-11-06			Error components			Uncertainty			
Parameter (mean value)	Error Source		bias(B)/ precision(S)	Error		Sensitivity	Bias(+)	Bias(-)	precision	(+)		(-)	
				(+)	(-)					(+)	(-)		
$\rho$ (kg·sec <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )freshW. 101.447	T(°C) 17.600	最小自盛/2 読取り誤差	B	5.000E-02	-5.000E-02	-4.337E-02	-2.168E-03	2.168E-03					
			S	2.000E-02		-4.337E-02	2.168E-03	-2.168E-03	-8.674E-04	8.674E-04	2.777E-03	-2.777E-03	
A (m <sup>2</sup> ) 14.3736	Lwl (m) W (m) d (m)	製作精度 経年変化 経年変化 経年変化	B	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00					
Lwl (m) 7.650E+00			B	1.000E-03	-1.000E-03	1.879E+00	1.879E-03	-1.879E-03					
W (m) 1.358E+00			B	1.000E-03	-1.000E-03	1.058E+01	1.058E-02	-1.058E-02					
d (m) 4.520E-01			B	1.000E-03	-1.000E-03	3.180E+01	3.180E-02	-3.180E-02	0.000E+00	3.357E-02	-3.357E-02	3.357E-02	-3.357E-02
$\nabla$ m(m <sup>3</sup> ) 3.682E+00	Lwl (m) W (m) d (m)	製作精度 経年変化 経年変化 経年変化	B	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00					
			B	1.000E-03	-1.000E-03	4.813E-01	4.813E-04	-4.813E-04					
			B	1.000E-03	-1.000E-03	2.711E+00	2.711E-03	-2.711E-03					
			B	1.000E-03	-1.000E-03	8.146E+00	8.146E-03	-8.146E-03	0.000E+00	8.599E-03	-8.599E-03	8.599E-03	-8.599E-03
Vw (m/s) 1.1853		流速計公称精度 流速計検定SEE 計測バラツキ	B	1.000E-03	-1.000E-03	1.000E+00	1.000E-03	-1.000E-03					
			S	1.683E-03		1.000E+00	1.000E-03	-1.000E-03	1.683E-03				
			S	2.481E-03		1.000E+00	1.000E-03	-1.000E-03	2.481E-03	2.998E-03		6.079E-03	-6.079E-03
D (m) 0.2200		製作精度	B	1.000E-04	-1.000E-04	1.000E+00	1.000E-04	-1.000E-04	0.000E+00	1.000E-04	-1.000E-04	1.000E-04	-1.000E-04
Fn 0.1383	Vw (m/s) Lwl (m) Lpp(m) 7.489E+00		B	1.000E-03	-1.000E-03	1.154E-01	1.154E-04	-1.154E-04					
		S	2.998E-03		1.154E-01	1.154E-04	-1.154E-04	3.460E-04					
		S	1.000E-03		-9.212E-04	1.154E-04	-1.154E-04	-9.212E-07	3.460E-04		7.016E-04	-7.016E-04	
曳航時のRt(kg) 4.562E+00	Rt (kg) Fn	検力計公称精度 A/D変換1/2LSB 検力計非直線性 検力計ヒステリシス 検力計検定SEE 計測バラツキ	B	5.000E-02	-5.000E-02	1.000E+00	5.000E-02	-5.000E-02					
			S	2.746E-02	-2.746E-02	1.000E+00	2.746E-02	-2.746E-02					
			S	1.000E-02		1.000E+00	1.000E-02		1.000E-02				
			S	1.500E-02		1.000E+00	1.500E-02		1.500E-02				
			S	3.254E-03		1.000E+00	3.254E-03		3.254E-03				
			S	2.058E-01		1.000E+00	2.058E-01		2.058E-01				
			S	1.157E-04	-1.157E-04	6.174E+01	7.143E-03	-7.143E-03	1.689E-02			4.186E-01	-4.186E-01
			S	2.735E-04		6.174E+01	5.749E-02	-5.749E-02	2.073E-01				
自航時のFD(kg) 4.600E-02	FD (kg)	検力計公称精度 A/D変換1/2LSB 検力計非直線性 検力計ヒステリシス 検力計検定SEE 計測バラツキ	B	5.000E-02	-5.000E-02	1.000E+00	5.000E-02	-5.000E-02					
			S	2.746E-02	-2.746E-02	1.000E+00	2.746E-02	-2.746E-02					
			S	1.000E-02		1.000E+00	1.000E-02		1.000E-02				
			S	1.500E-02		1.000E+00	1.500E-02		1.500E-02				
			S	3.254E-03		1.000E+00	3.254E-03		3.254E-03				
			S	4.340E-02		1.000E+00	4.340E-02		4.340E-02				
			S			1.000E+00	5.704E-02	-5.704E-02	4.711E-02			1.101E-01	-1.101E-01
			S			1.000E+00							
曳航時 $r_t$ ( $\rho \nabla^{2/3}/V^2$ ) 1.342E-02	Rt (kg) $\rho$ (kg·sec <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ) Vw (m/s) $\nabla$ m		B	5.749E-02	-5.749E-02	2.942E-03	1.692E-04	-1.692E-04					
		S	2.073E-01		2.942E-03	2.073E-01		6.100E-04					
		B	2.168E-03	-2.168E-03	-1.323E-04	-2.869E-07	2.869E-07						
		B	8.674E-04		-1.323E-04	-2.265E-05	2.265E-05						
		B	1.000E-03	-1.000E-03	-2.265E-02	-2.265E-05	2.265E-05						
		S	2.998E-03		-2.265E-02	-5.354E-06	5.354E-06						
		S	8.599E-03	8.599E-03	-6.226E-04	-5.354E-06	5.354E-06						
		S	0.000E+00		-6.226E-04	1.708E-04	-1.708E-04	0.000E+00	6.137E-04		1.239E-03	-1.239E-03	
Tm(kg) 5.520E+00	Tm(kg)	動力計公称精度 A/D変換1/2LSB 動力計非直線性 動力計ヒステリシス 動力計検定SEE 計測バラツキ	B	1.200E-02	-1.200E-02	1.000E+00	1.200E-02	-1.200E-02					
			B	2.832E-02	-2.832E-02	1.000E+00	2.832E-02	-2.832E-02					
			S	2.400E-02		1.000E+00			2.400E-02				
			S	2.400E-02		1.000E+00			2.400E-02				
			S	3.211E-04		1.000E+00			3.211E-04				
			S	2.829E-02		1.000E+00			2.829E-02				
		S			1.000E+00	3.076E-02	-3.076E-02	4.419E-02			9.358E-02	-9.358E-02	
Qm(kg·m) 1.364E-01	Qm(kg·m)	動力計公称精度 A/D変換1/2LSB 動力計非直線性 動力計ヒステリシス 動力計検定SEE 計測バラツキ	B	5.000E-04	-5.000E-04	1.000E+00	5.000E-04	-5.000E-04					
			B	9.717E-04	-9.717E-04	1.000E+00	9.717E-04	-9.717E-04					
			S	1.000E-03		1.000E+00			1.000E-03				
			S	1.000E-03		1.000E+00			1.000E-03				
			S	8.475E-06		1.000E+00			8.475E-06				
			S	5.563E-04		1.000E+00			5.563E-04				
		S			1.000E+00	1.093E-03	-1.093E-03	1.520E-03			3.231E-03	-3.231E-03	

(次項へつづく)

(前項からのつづき)

KT $2.246E-01$ n(rps) $1.017E+01$	Tm(kg) $\rho$ (kg s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ) D(m) n(rps)	公称精度 計測バラツキ	B	3.076E-02	-3.076E-02	4.068E-02	1.251E-03	-1.251E-03				
			S	4.419E-02		4.068E-02			1.798E-03			
			B	2.168E-03	-2.168E-03	-2.214E-03	-4.800E-06	4.800E-06				
			S	8.674E-04		-2.214E-03			-1.920E-06			
			B	1.000E-04	-1.000E-04	-4.083E+00	-4.083E-04	4.083E-04				
			S	0.000E+00	0.000E+00	-4.416E-02	0.000E+00	0.000E+00				
			S	1.000E-01		-4.416E-02	1.316E-03	-1.316E-03	4.768E-03	9.627E-03	-9.627E-03	
KQ $2.502E-02$ ↑ Kq-Jの近似曲線 係数使用(pot)	J		B	3.366E-03	-3.366E-03	↓ 係数使用 -2.892E-02	-9.735E-05	9.735E-05				
			S	1.219E-02		-2.892E-02	9.735E-05	-9.735E-05	3.526E-04	7.119E-04	-7.119E-04	
J $2.541E-01$ ↑ J-Ktの近似曲線 係数使用(pot)	Kt		B	1.316E-03	-1.316E-03	↓ 係数使用 -2.557E+00	-3.366E-03	3.366E-03				
			S	4.768E-03		-2.557E+00	3.366E-03	-3.366E-03	1.219E-02	2.462E-02	-2.462E-02	
$\eta_0$ $3.632E-01$	J		B	3.366E-03	-3.366E-03	1.429E+00	4.811E-03	-4.811E-03				
			S	1.219E-02		1.429E+00			1.743E-02			
	KT		B	1.316E-03	-1.316E-03	1.617E+00	2.129E-03	-2.129E-03				
			S	4.768E-03		1.617E+00			7.712E-03			
	KQ		B	9.735E-05	-9.735E-05	-1.451E+01	-1.413E-03	1.413E-03				
			S	3.526E-04		-1.451E+01	1.413E-03	-1.413E-03	1.973E-02	3.949E-02	-3.949E-02	
$\eta_R$ $9.915E-01$	Tm		B	3.076E-02	-3.076E-02	1.796E-01	5.525E-03	-5.525E-03				
			S	4.419E-02		1.796E-01			7.937E-03			
	J		B	3.366E-03	-3.366E-03	3.901E+00	1.313E-02	-1.313E-02				
			S	1.219E-02		3.901E+00			4.758E-02			
	D		B	1.000E-04	-1.000E-04	4.507E+00	4.507E-04	-4.507E-04				
			S	1.093E-03	-1.093E-03	-7.269E+00	-7.945E-03	7.945E-03				
Qm		B	1.520E-03		-7.269E+00			-1.105E-02				
		S	1.413E-03	-1.413E-03	-3.724E-01	-5.262E-04	5.262E-04					
ηo		B	1.973E-02		-3.724E-01	1.633E-02	-1.633E-02					
		S						5.003E-02	1.014E-01	-1.014E-01		
1-t $8.181E-01$	Ct		B	1.708E-04	-1.708E-04	6.157E+01	1.051E-02	-1.051E-02				
			S	6.137E-04		6.157E+01			3.779E-02			
	ρ	∇m(m <sup>3</sup> )		B	2.168E-03	-2.168E-03	8.147E-03	1.767E-05	-1.767E-05			
				S	8.674E-04		8.147E-03			7.066E-06		
	Vw			B	8.599E-03	8.599E-03	1.496E-01	1.287E-03	1.287E-03			
				S	0.000E+00		1.496E-01			0.000E+00		
Tm			B	1.000E-03	-1.000E-03	1.394E+00	1.394E-03	-1.394E-03				
			S	2.998E-03		1.394E+00			4.181E-03			
FD			B	3.076E-02	-3.076E-02	-1.482E-01	-4.559E-03	4.559E-03				
			S	4.419E-02		-1.482E-01	-1.033E-02	1.033E-02				
			S	5.704E-02	-5.704E-02	-1.812E-01	1.555E-02	-1.555E-02	-8.534E-03	8.053E-02	-8.053E-02	
			S	4.711E-02		-1.812E-01			3.951E-02			
1-Wt $4.797E-01$	J		B	3.366E-03	-3.366E-03	1.888E+00	6.355E-03	-6.355E-03				
			S	1.219E-02		1.888E+00			2.302E-02			
	n			B	0.000E+00	0.000E+00	4.717E-02	0.000E+00	0.000E+00			
				S	1.000E-01		4.717E-02			4.717E-03		
	D			B	1.000E-04	-1.000E-04	2.180E+00	2.180E-04	-2.180E-04			
				S	1.000E-03	-1.000E-03	-4.047E-01	-4.047E-04	4.047E-04			
Vw			B	2.998E-03		-4.047E-01	6.371E-03	-6.371E-03				
			S						2.353E-02	4.749E-02	-4.749E-02	

Table8: Calculation sheet for surface pressure measurement

Fn(true)= 0.138		舵付き・曳航		1997-11-11							
Parameter (mean value)	Error Source	bias(B)/ precision(S)	Error		Sensitivity	Error components			Uncertainty		
			(+)	(-)		Bias(+)	Bias(-)	precision	(+)	(-)	
$\rho$ (kg·sec <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ) 101.473	T(°C) 17.000	最小目盛/2 読取り誤差	B	5.000E-02	-5.000E-02	-4.339E-02	-2.170E-03	2.170E-03			
			S	2.000E-02		-4.339E-02					
Vw (m/s) 1.1787		流速計公称精度 流速計検定SEE 計測バツキ	B	1.000E-03	-1.000E-03	1.000E+00	1.000E-03	-1.000E-03			
			S	1.683E-03		1.000E+00			1.683E-03		
Fn 0.1375	Vw (m/s) Lpp(m) 7.489E+00		B	1.000E-03	-1.000E-03	1.167E-01	1.167E-04	-1.167E-04			
			S	2.184E-03		1.167E-01			2.548E-04		
圧力計1(mm)		圧力計公称精度(mm) A/D変換1/2LSB(mm) ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	7.686E-02	-7.686E-02	1.000E+00	7.686E-02	-7.686E-02			
圧力計2(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	6.629E-02	-6.629E-02	1.000E+00	6.629E-02	-6.629E-02			
圧力計3(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	6.844E-02	-6.844E-02	1.000E+00	6.844E-02	-6.844E-02			
圧力計4(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	7.262E-02	-7.262E-02	1.000E+00	7.262E-02	-7.262E-02			
圧力計5(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	7.113E-02	-7.113E-02	1.000E+00	7.113E-02	-7.113E-02			
圧力計6(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	9.544E-02	-9.544E-02	1.000E+00	9.544E-02	-9.544E-02			
圧力計7(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	1.002E-01	-1.002E-01	1.000E+00	1.002E-01	-1.002E-01			
圧力計8(mm)		圧力計公称精度 A/D変換1/2LSB ヒステリシス 検定SEE	B	6.843E-01	-6.843E-01	1.000E+00	6.843E-01	-6.843E-01			
			S	9.760E-02	-9.760E-02	1.000E+00	9.760E-02	-9.760E-02			
Cp 圧力孔1ch-1 2.379E-01	表面圧(mm) 1.668E+01 静圧(mm) -1.826E-01 表面圧-静圧(mm) 1.687E+01	圧力計1(mm) 表面圧計測/バツキ(mm) 静圧計測/バツキ(mm) 流速Vw(m/s) $\rho$ (kg·sec <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )	B	6.886E-01	6.886E-01	1.411E-02	9.714E-03	9.714E-03	8.800E-03		
			S	6.238E-01		1.411E-02			8.800E-03		
Cp 圧力孔1ch-2 2.418E-01	表面圧 1.684E+01 静圧 -2.009E-01	圧力計1 表面圧計測/バツキ 静圧計測/バツキ 流速Vw 密度 $\rho$	B	6.886E-01	6.886E-01	1.411E-02	9.714E-03	9.714E-03	8.800E-03		
			S	6.238E-01		1.411E-02			8.800E-03		