

船型試験水槽での平水中抵抗計測における不確かさ評価

粉原 直人*, 白石 耕一郎*, 濱田 達也*, 藤沢 純一*,
辻本 勝*, 加藤 孝義**, 芳村 康男**, 鈴木 英之**

Uncertainty Assessment for Measuring Resistance in Calm Water in the Experimental Tank

by

SOGIHARA Naoto, SHIRAISHI Koichiro, HAMADA Tatsuya, FUJISAWA Junichi,
TSUJIMOTO Masaru, KATO Takayoshi, YOSHIMURA Yasuo and SUZUKI Hideyuki

Abstract

We have been developing an innovative water tank test system to improve the reliability of measurements, reduce design time, and develop high-performance hull forms. To develop such a test system, it is necessary to determine the accuracy of tank tests. Thus, we conducted an uncertainty assessment on the basis of repeated tests in the experimental tank at the University of Tokyo. The aim of the repeated tests is to investigate the test accuracy and obtain the data needed to improve the test accuracy. In this study, the resistance measurement in calm water was tested repeatedly using the KCS model ship. The test results were used in an uncertainty assessment, and the uncertainty of the resistance measurement in still water was analyzed. Given the results of this analysis, we propose measures to improve the accuracy of tank tests.

* 海上技術安全研究所 流体設計系, ** 東京大学大学院

原稿受付 令和2年10月20日

審査日 令和2年12月09日

目 次

1. はじめに	30
2. 不確かさ評価法	30
3. 繰り返し試験による不確かさ評価	32
3.1 繰り返し試験	32
3.2 不確かさ評価	33
3.2.1 浸水表面積に起因する不確かさ	33
3.2.2 検力計に起因する不確かさ	34
3.2.3 水温に起因する不確かさ	35
3.2.4 流速に起因する不確かさ	35
3.2.5 繰り返し試験における抵抗の標準偏差	37
3.2.6 合成標準不確かさと拡張不確かさ	37
3.3 考察	37
4. まとめ	38
参考文献	41

1. はじめに

船舶工学の分野において、実船と相似な模型を用いた水槽試験は実船性能を推定するための手段として必要不可欠なものである。従来は船型開発や数値計算法の検証を目的として試験水槽が利用されることが主であったが、試験水槽の利用価値を高めるためには、新たな計測法の開発、導入を推進し、船舶設計へのフィードバックを実現できることが望まれる¹⁾。また、試験水槽における計測の自動化は、計測の信頼性を高めるだけでなく、設計時間の短縮や、高性能船型の開発を促す「革新的水槽試験システム」の実現につながる。東京大学船型試験水槽においては、水槽試験及びCFD（Computational Fluid Dynamics）のデータを統合管理し、研究効率の向上に役立てるシステムを開発²⁾しており、革新的水槽試験システムの土台が構築されている。

海上技術安全研究所は東京大学と連携し、革新的水槽試験システムの基盤となるクラウドシステム及びデータベースのプロトタイプを開発することを目的として、共同研究「革新的水槽試験システムの基盤技術構築に関する研究」を実施している。革新的水槽試験システムの実現のためには、試験水槽における試験精度の把握が必要である。本研究では、試験精度の把握及び試験精度改善のための手がかりを得るために、東京大学船型試験水槽において KCS 模型船を用いた平水中抵抗計測の繰り返し試験を実施した。繰り返し試験結果に基づき不確かさ評価を行い、平水中抵抗計測における不確かさの要因分析を行うとともに、不確かさ評価の結果に基づいて試験精度向上のための方策について検討した結果を示す。

2. 不確かさ評価法

不確かさ評価法に関しては、アメリカ機械学会性能試験規約の基本方針に基づいた評価が各産業分野で実施され、船舶流体力学の分野においても先行研究³⁾⁴⁾がある。一方で、近年では国際標準化機構（International Organization for Standardization, ISO）が編纂した Guide to the expression of Uncertainty in Measurement（GUM）が普及しつつある。GUM が普及した経緯については西尾の解説⁵⁾に詳しく、GUM に従った不確かさ評価に関する研究例⁶⁾⁷⁾もある。本研究においても同様に、GUM の考え方に沿った国際試験水槽会議（International Towing Tank Conference, ITTC）の推奨方法を採用している。

本章では、GUMにおいて示されている不確かさ評価法の要点を示す。不確かさ評価においては、評価対象に及ぼす影響因子を列挙し、影響因子の不確かさをそれぞれ評価して合成することにより、対象の不確かさを評価することとなる。不確かさの評価に関しては、計測値の統計解析に基づく「Aタイプ評価」と、統計解析以外の手法、例えばメーカーから提出される機器の検定証書、試験施設で経験的に用いられるパラメータ等に基づく「Bタイプ評価」の2種類があり、それぞれの評価法で得られる不確かさは「標準不確かさ」と呼ばれる。

Aタイプ評価では、繰り返し試験により取得したデータから求められる標準偏差が使用される。船舶流体力学の分野では、時々刻々の瞬時値ではなく1回の計測で取得したデータ群から求められる平均値を取り扱うことが多い。N回の繰り返し試験により推定される標準不確かさ u_A は、N個の平均値の標準偏差 s を用いて(2-1)式で与えられる。

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (2-1)$$

なお、瞬時値を評価対象とする場合には、標準偏差をそのまま標準不確かさとして使用する。

Bタイプ評価では、誤差要因の特性を考慮して不確かさの確率分布を仮定して標準不確かさの推定を行う。例えば、偏り誤差が a の計測機器の場合、偏り誤差の範囲内における分布を仮定して、標準不確かさ u_B を(2-2)式で求める。

$$u_B = \frac{a}{d} \quad (2-2)$$

右辺分母の d は除数と呼ばれ、仮定する分布により異なる値をとる。一様分布の場合は $d = \sqrt{3}$ 、三角分布の場合は $d = \sqrt{6}$ となる。正規分布の場合は信頼区間に応じ、95%信頼区間の場合は $d = 2$ 、99.7%信頼区間の場合は $d = 3$ となる。

影響因子ごとにAタイプ評価、Bタイプ評価により標準不確かさを求めた後、これらを(2-3)式により合成し、各影響因子の標準不確かさ u_s を計算する。

$$u_s = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2-3)$$

M個の影響因子のそれぞれの標準不確かさを u_{s_i} として、合成標準不確かさ u_c を(2-4)式で求める。

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^M (c_i u_{s_i})^2} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (2-4)$$

(2-4)式右辺の c_i は感度係数と呼ばれ、入力の変化に対し出力がどの程度変化するかを示すパラメータで、各影響因子が不確かさ評価対象に及ぼす程度を示している。

(2-4)式で得られた標準不確かさはあくまで標準偏差であり、言い換えればばらつきの平均値である。計測結果の信頼性を示すためには計測値の範囲を示すことが必要である。計測値の集合を正規分布と仮定すると、全体の95%が（平均値 $\pm 2 \times$ 標準偏差）の範囲に含まれる。この考え方に基づいて、(2-5)式で定義される拡張不確かさを導入する。

$$U = k u_c \quad (2-5)$$

k は包含係数と呼ばれ、信頼区間を95%とした場合には $k=2$ であり一般的にこの値が拡張不確かさの算出の際に使用される。

3. 繰り返し試験による不確かさ評価

3.1 繰り返し試験

東京大学船型試験水槽において不確かさ評価のため繰り返し試験を行い、データを取得した。水槽の主寸法を表3-1に示す。繰り返し試験に使用した模型船はKCS船型であり、主要目を表3-2に、模型船の外観を図3-1に示す。

表 3-1 水槽主寸法

長さ	85.0m
幅	3.5m
深さ	2.4m

表 3-2 模型船主要目

垂線間長 (L_{PP})	3.0464m
船幅 (B)	0.4265m
喫水 (d_m)	0.1430m
浸水表面積 (S)	1.6719m ²
排水容積 (∇)	0.1209m ³



図 3-1 模型船外観

試験船速を1.1m/sとして、平水中抵抗試験を実施した。試験状況を図3-2に示す。繰り返し回数は16回であり、試験当日の水温は8度であった。対水流速の計測には翼車式流速計を、抵抗の計測には容量196Nの検力計を使用した。16回の計測により得られた対水流速及び抵抗を図3-3、図3-4にそれぞれ示す。これらの値は各計測で得られた時系列の平均値を示している。

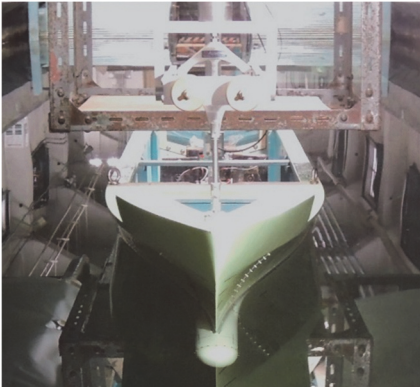


図 3-2 試験の様子

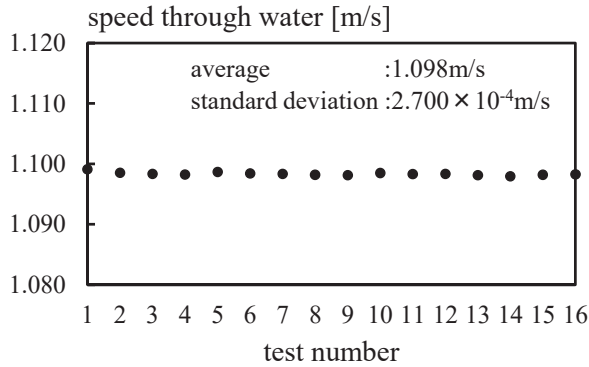


図 3-3 対水流速

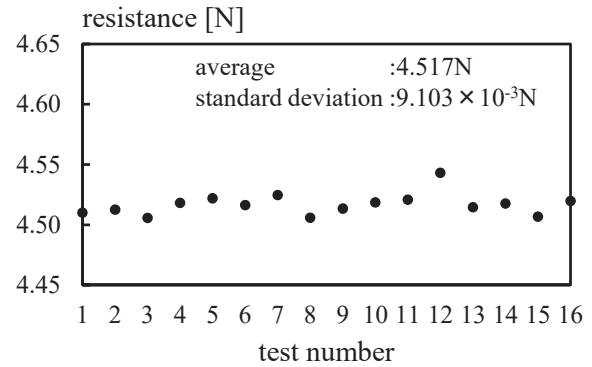


図 3-4 抵抗

3.2 不確かさ評価

繰り返し試験のデータを用い、ITTC の推奨手順⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾に従って計測した抵抗を対象に不確かさ評価を行った。ITTC の推奨手順では、抵抗計測における不確かさ因子として抵抗の標準偏差の他に、浸水表面積、検力計、水温、流速の不確かさを考慮することとなっている。因子別に不確かさを評価し、それらを合成することにより不確かさを評価できる、

抵抗 R_T の合成標準不確かさ $u'_c(R_T)$ は(3-1)式により求められる。

$$u'_c(R_T) = \sqrt{u'^2_1 + u'^2_2 + u'^2_3 + u'^2_4 + u'^2_A(R_T)} \quad (3-1)$$

ここで、 u'_1 ：浸水表面積に起因する不確かさ、

u'_2 ：検力計に起因する不確かさ、

u'_3 ：水温に起因する不確かさ、

u'_4 ：流速に起因する不確かさ、

である。また、 $u'_A(R_T)$ は繰り返し試験における抵抗の標準偏差である。

3.2.1 浸水表面積に起因する不確かさ

浸水表面積に起因する不確かさ u'_1 は、排水量に起因する不確かさ $u'(\Delta)$ を用いて(3-2)式により求める。

$$u'_1 = \frac{2}{3} u'(\Delta) \quad (3-2)$$

模型船の重量計測に使用した重量計の公称精度が不明であったため分解能に基づいて不確かさを求めた。重量計の分解能は 0.098N であるため、 $\pm 0.049N$ の偏り誤差が生じる。模型船の排水量は、排水容積から 1184.9N となる。B タイプ評価として一様分布を仮定して不確かさ $u'(\Delta)$ を計算すると(3-3)式のとおりである。

$$u'(\Delta) = \frac{0.049 \times \frac{1}{\sqrt{3}}}{1184.9} = 0.0024\% \quad (3-3)$$

(3-3)式を(3-2)式に代入することにより、浸水表面積に起因する不確かさ u'_1 が求められる。

$$u'_1 = \frac{2}{3} \cdot 0.0024 = 0.0016\% \quad (3-4)$$

重量計の分解能に基づく成分は 0.0016%と小さく、適切な容量の重量計を使用したと判断できる。なお、浸水表面積に起因する不確かさに関しては、 u'_1 のほかに模型船の製作精度や喫水調整時の読み取り誤差に基づく成分も想定される。この成分に関しては、本研究では模型船が要目通り製作され、目視により喫水が設定値に調整できたと仮定して考慮しなかった。

3.2.2 検力計に起因する不確かさ

検力計に起因する不確かさ u'_2 は、検力計の非線形性、ヒステリシスに基づく不確かさ u'_{21} と、較正結果に基づく不確かさ u'_{22} を考慮する。これらは全て B タイプ評価である。非線形性、ヒステリシスに基づく不確かさは較正結果に基づく不確かさと一部重複するが、検力計の容量が大きいことから無視できないと判断し、本研究では考慮することとした。

検力計の非線形性、ヒステリシスはメーカーの検定証書よりそれぞれ定格出力の 0.5%とした。検力計の非線形性、ヒステリシスに基づく不確かさが一様分布に従うと仮定すれば、 u'_{21} は抵抗の平均値 4.517N を用い(3-5)式の通り計算できる。

$$u'_{21} = \frac{\sqrt{\left(\frac{196 \times 0.005}{\sqrt{3} \times \sqrt{2000}}\right)^2 + \left(\frac{196 \times 0.005}{\sqrt{3} \times \sqrt{2000}}\right)^2}}{4.517} = 0.396\% \quad (3-5)$$

(3-5)式右辺の 2000 は、1 回の計測で取得するデータ数である。不確かさの評価対象が、1 回の計測における 2000 個の抵抗の平均値であるため、(2-1)式に従い $\sqrt{2000}$ で除算する必要がある。なお、評価対象が時々刻々の瞬時値である場合には $\sqrt{2000}$ で除算する必要はない。

較正結果に基づく不確かさを標準推定誤差 (Standard Estimated Error: *SEE*) から算定する。通常、検力計の較正においては検力計に与える荷重と出力電圧の関係を、原点を通る直線近似とすることが多い。このとき、*SEE* は(3-6)式で定義される。

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (m_i - K_g \cdot V_i)^2} \quad (3-6)$$

ここで、 n : 検定回数

m_i : 検力計に与える荷重

V_i : 出力電圧

K_g : 較正係数

である。今回の較正結果に(3-6)式を適用すると *SEE* は 2.544×10^{-2} N と求められた。抵抗に対する相対値として u'_{22} は(3-7)式のとおり求められる。

$$u'_{22} = \frac{2.544 \times 10^{-2}}{4.517} = 0.563\% \quad (3-7)$$

従って、検力計に起因する不確かさ u'_2 は(3-8)式のとおり計算できる。

$$u'_2 = \sqrt{u'_{21}{}^2 + u'_{22}{}^2} = 0.689\% \quad (3-8)$$

3.2.3 水温に起因する不確かさ

水温に起因する不確かさ u'_3 は(3-9)式により求める。

$$u'_3 = \frac{C_F}{C_T} \cdot \frac{0.87}{\log_{10} R_e - 2} \cdot u'(\nu) \quad (3-9)$$

ここで、 C_F ：平板摩擦抵抗係数

C_T ：全抵抗係数

R_e ：レイノルズ数

ν ：動粘性係数

である。また、 $u'(\nu)$ は動粘性係数に関する不確かさであり、水温と動粘性係数の関係式から求める。ここでは ITTC の式を利用した。

ITTC の推奨手順では、走行直前に毎回水温計測することが勧められているが、本研究では本水槽のプラクティスに則り、繰り返し試験の実施前に一度だけ計測を実施し、その値を繰り返し試験における代表水温とした。なお、一度の計測により得られる水温を代表値として使用する場合、実際の水温との差を偏り誤差として考慮する必要があるが、今回は計測データがないため今後の検討事項とした。

今回使用した水温計の分解能 1 度であるため、0.5 度の偏り誤差が生じる。分解能に起因する偏り誤差が一様分布に従うと仮定して、B タイプ評価により水温の不確かさ $u(t)$ を求めると、(3-10)式のとおりである。

$$u(t) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 2.887 \times 10^{-1} [\text{deg.}] \quad (3-10)$$

動粘性係数に関する不確かさ $u'(\nu)$ は、 $u(t)$ を用いて(3-11)式で計算する。

$$u'(\nu) = \frac{\nu(t_m + u(t)) - \nu(t_m)}{\nu(t_m)} = 8.467 \times 10^{-3} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3-11)$$

t_m は繰り返し試験実施前に計測した水温である。(3-9)式、(3-11)式より水温に起因する不確かさ u'_3 を(3-12)式のとおり計算できる。

$$u'_3 = \frac{3.903 \times 10^{-3}}{4.465 \times 10^{-3}} \cdot \frac{0.87}{\log_{10}(2.420 \times 10^6) - 2} \cdot 8.467 \times 10^{-3} = 0.147\% \quad (3-12)$$

3.2.4 流速に起因する不確かさ

流速に起因する不確かさ u'_4 は(3-13)式により求める。

$$u'_4 = 2u'(V) \quad (3-13)$$

ここで $u'(V)$ は流速に関する不確かさである。ITTC の推奨手順においては、曳引台車速度の偏り誤差を 0.1% とした解析例を示しているが、本研究では具体的な偏り誤差を把握するために、模型船を取りつけず曳引台車のみを繰り返し走行させる試験を実施し、曳引台車速度の偏り誤差を調査した。また、対水流速を使用する観点から、流速計の校正結果に基づく不確かさ、平水中抵抗の繰り返し試験における対水流速のばらつきを考慮することとした。

曳引台車速度の計測方法は次の通りである．進行方向にマイルポストを等間隔に 3 本設置し，曳引台車にはマイルポスト位置を検出するセンサーを設置する．センサーからマイルポストを通過した時刻が出力されるため，マイルポスト間の距離，所要時間に基づいて曳引台車速度が得られる．マイルポストをそれぞれ P1, P2, P3 とし，P1~P2 間，P2~P3 間の距離を L_{12} , L_{23} ，所要時間を T_{12} , T_{23} とし，曳引台車速度 V_{GM} を(3-14)式で求める．

$$V_{GM} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_{12}}{T_{12}} + \frac{L_{23}}{T_{23}} \right) \quad (3-14)$$

なお，(3-14)式により曳引台車速度を求める場合，厳密にはマイルポスト間の距離計測における不確かさ，曳引台車のセンサーの不確かさを考慮する必要があるが，ここではそれらを考慮していない．

図 3-5 に曳引台車の繰り返し走行試験の結果を示す．設定速度 1.1m/s に対して，繰り返し走行試験の平均速度は 1.107m/s となった．偏り誤差は最大 0.007m/s であり，これは設定速度の 0.6%に相当し，ITTC の推奨手順に記載の値より大きいことが分かる．この差が抵抗の不確かさに及ぼす影響を調べるため，まず設定速度を用いて不確かさ評価を行い，計測された曳引台車速度を用いることでどの程度改善するかを考察した．（この点については 3.3 節に詳述する．）

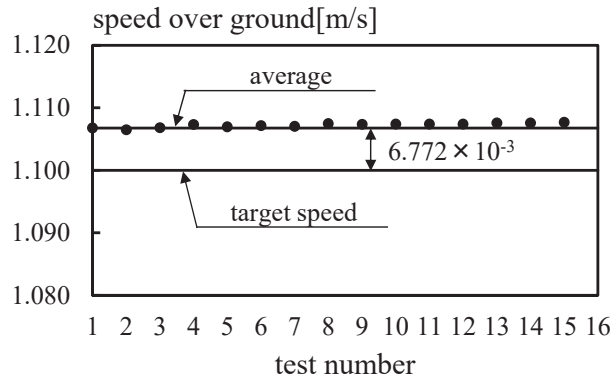


図 3-5 曳引台車の繰り返し走行試験結果

流速計の較正結果に基づく不確かさは，抵抗の場合と同様に SEE により求める．流速計の検定は，曳引台車速度を 1.0m/s, 1.2m/s, 1.4m/s とし，計測値への残留流れの影響を最小化するため水槽内を往復し，計 6 回の計測として実施した．検定結果に基づき，対水流速を出力電圧に対する線形近似として較正曲線を求める．通常の抵抗試験では曳引台車速度を計測せず設定速度を用いるため，較正に使用する速度として曳引台車の設定速度 V_{GS} を使用した．

C_1, C_2 をそれぞれ較正曲線の係数として，対水流速 V_w 及び較正曲線の SEE はそれぞれ(3-15)式，(3-16)式のとおり表現される．

$$V_w = C_1 \cdot V_i + C_2 \quad (3-15)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_i^n (V_{GS} - V_w)^2} \quad (3-16)$$

今回の較正結果に(3-16)式を適用すると SEE は $1.415 \times 10^{-3} \text{m/s}$ となる．繰り返し試験での対水流速の平均値に対する相対値として，流速計の較正結果に基づく不確かさ u'_{41} は(3-17)式のとおり求められる．

$$u'_{41} = \frac{1.415 \times 10^{-3}}{1.098} = 0.129\% \quad (3-17)$$

曳引台車の設定速度と実際の速度との間には図 3-5 に示す通り $6.772 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の偏り誤差が存在するため，対水流速にも偏り誤差が混入する．偏り誤差による不確かさ u'_{42} は，一様分布を仮定して，対水流速の平均値に対する相対値として(3-18)式のとおり求める．

$$u'_{42} = \frac{6.772 \times 10^{-3} \times \frac{1}{\sqrt{3}}}{1.098} = 0.356\% \quad (3-18)$$

対水流速のばらつきによる不確かさ u'_{43} は，繰り返し試験により取得した 16 個のデータの標準偏差が $2.700 \times 10^{-3} \text{m/s}$ であることを踏まえ，対水流速の平均値に対する相対値として(3-19)式のとおり求める．

$$u'_{43} = \frac{2.700 \times 10^{-3}}{1.098} = 0.025\% \quad (3-19)$$

従って，流速に関する不確かさ $u'(V)$ は(3-20)式により求まり， $u'(V)$ を(3-13)式に代入して流速に起因する不確かさ u'_4 は(3-21)式のとおり求まる．

$$u'(V) = \sqrt{u'^2_{41} + u'^2_{42} + u'^2_{43}} = 0.379\% \quad (3-20)$$

$$u'_4 = 2u'(V) = 0.759\% \quad (3-21)$$

3.2.5 繰り返し試験における抵抗の標準偏差

繰り返し試験により取得した 16 個の抵抗値の標準偏差が $9.103 \times 10^{-3} \text{N}$ であることから，抵抗に対する相対量として(3-22)式のとおり求められる．

$$u'_A(R_T) = \frac{9.103 \times 10^{-3}}{4.517} = 0.202\% \quad (3-22)$$

3.2.6 合成標準不確かさと拡張不確かさ

(3-3)式，(3-8)式，(3-12)式，(3-21)式，(3-22)式を(3-1)式に代入することにより，抵抗の合成標準不確かさが求められる．

$$u'_c(R_T) = 1.05\% \quad (3-23)$$

有次元では

$$u_c(R_T) = 4.763 \times 10^{-2} \text{N} \quad (3-24)$$

となる．また，拡張不確かさは包含係数を 2 として(2-5)式より

$$U(R_T) = 9.526 \times 10^{-2} \text{N} \quad (3-25)$$

となる、

以上の評価結果をまとめると表 3-3 のとおりである。「不確かさへの寄与」は標準不確かさと感度係数の積を示している。

表 3-3 不確かさ評価結果

不確かさ 影響因子	評価方法 (要因, 根拠/タイプ)		標準不確かさ (個別)	感度 係数	不確かさへの 寄与	標準不確かさ (全体)
浸水表面積	重量計の分解能	B	0.002%	0.667	0.002%	0.002%
検力計	非線形性	B	0.280%	1	0.280%	0.689%
	ヒステリシス	B	0.280%	1	0.280%	
	較正曲線の標準推定誤差	B	0.563%	1	0.563%	
水温	水温計の分解能	B	0.847%	0.173	0.147%	0.147%
流速	較正曲線の標準推定誤差	B	0.129%	2	0.258%	0.759%
	曳引台車速度の偏り誤差	B	0.356%	2	0.712%	
	繰り返し計測	A	0.025%	2	0.049%	
抵抗	繰り返し計測	A	0.202%	1	0.202%	0.202%
合成標準不確かさ：1.05%， 拡張不確かさ：2.11%						

3.3 考察

図 3-6 に、不確かさ評価結果から要因分析を行った結果を示す。図中のパーセンテージは標準不確かさに占める各影響因子の占有率であり、「抵抗（標準偏差）」は繰り返し試験における標準偏差を表している。この結果から、流速及び検力計の影響が支配的であることが分かる。流速の不確かさにおいて支配的な成分は曳引台車速度の偏り誤差に起因するもので、この成分は曳引台車速度を設定速度で代用していることが原因である。水槽のブラクティスとして設定速度を用いる場合には、定期的に曳引台車速度を計測し、その設定速度の差を定量的に把握しておく必要がある。また、メンテナンスにより曳引台車が常に設定速度にて稼働可能な状況を確認しておくことも重要である。あるいは、今回実施したように曳引台車速度を直接計測することにより、曳引台車速度の偏り誤差を考慮する必要がなくなるため、抵抗の不確かさを軽減できる。

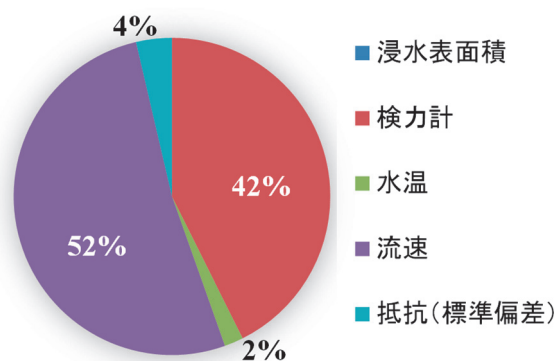


図 3-6 不確かさの要因分析

検力計に関しては、平水中抵抗の計測方法の関係上、模型船に対し容量の大きいものを選定している。これは、今回の計測では模型船を加減速させる際の慣性力を受け持つためのクランプ装置を使用しておらず、慣性力を検力計で受け持つ必要があるためである。従って、クランプ装置を導入することで容量の小さい検力計を使用することができるようになり、その結果、抵抗の不確かさを抑制することが期待される。なお、曳引台車の加速度、減速度に関しては検力計の容量を踏まえ試験前に検討済みであり、検力計に致命的な慣性力が作用しない緩やかな加減速を実現している。

検力計の容量と繰り返し試験における抵抗の標準偏差の関係に関して、Sogihara et al.は船長4.7mの自動車運搬船模型を用いた平水中抵抗計測に関する繰り返し試験⁷⁾を実施し、海上技術安全研究所の水槽間における不確かさの比較を行っている。400m水槽、実海域再現水槽で使用された検力計の容量はそれぞれ50N、100Nであり、繰り返し試験における標準偏差の結果は図3-7の通りである。水槽間の曳航装置のばね係数の違いや、水槽内の残留流れの影響も想定されるが、50Nの検力計を使用した場合の方が100Nの検力計を使用した場合より抵抗の標準偏差が30%程度小さく、容量の小さい検力計を使用することが抵抗の計測における不確かさを低減する手段として有効と判断できる。

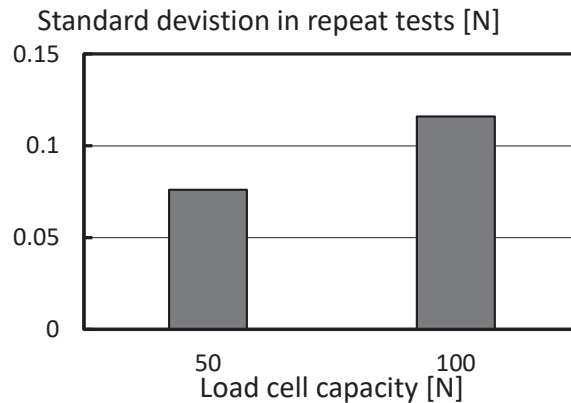


図3-7 繰り返し試験における抵抗の標準偏差

このほか、検力計の非線形性、ヒステリシスについてはメーカーの検定証書に記載の値に代えて、試験前に実施した検定結果から得られる値を用いることで、不確かさの低減及び精確な不確かさ評価の実施が期待できる。

水温に関しては、図3-6から水温の影響が抵抗（標準偏差）の半分程度であることが分かる。今回使用した水温計の分解能は1度であり、抵抗試験時の水温計測に供するには分解能が粗い。ITTCの推奨手順においては、分解能として0.1度は必要とされており、より分解能の優れた水温計を導入することにより、水温の影響を低減することが可能となる。

以上の考察を踏まえ、3.2節での不確かさ評価において以下の変更を行い、再度不確かさ評価を行った。

- ・対水流速計の検定において、曳引台車速度として設定値ではなく計測値 V_{GM} を使用
- ・検力計の非線形性、ヒステリシスについては、試験前の検定結果から得られる値を使用

曳引台車速度として計測値を使用することにより、設定値と計測値の偏差を無視することができる。このため、(3-18)式に示す u'_{42} は0となる。検力計については、検定により得られた非線形性、ヒステリシスはそれぞれ0.1%、0.015%であり、検定証書に記載の値より小さい。このとき、非線形性、ヒステリシスに基づく不確かさ u'_{21} は(3-26)式により計算できる。

$$u'_{21} = \frac{\sqrt{\left(\frac{196 \times 0.001}{\sqrt{3} \times \sqrt{2000}}\right)^2 + \left(\frac{196 \times 0.00015}{\sqrt{3} \times \sqrt{2000}}\right)^2}}{4.517} = 0.057\% \quad (3-26)$$

不確かさを再評価した結果を表3-4に示す。合成標準不確かさは0.67%、拡張不確かさは1.35%となり、不確かさが改善されたことが定量的に判断できる。図3-8は各影響因子の不確かさへの影響を示したもので、縦軸は表3-3、表3-4の「標準不確かさ（全体）」を2乗した値であり、総和の平方根が合成不確かさとなる。図3-8から、流速、検力計の成分が減少していることが分かる。

表 3-4 不確かさの再評価結果

不確かさ 影響因子	評価方法 (要因, 根拠/タイプ)		標準不確かさ (個別)	感度 係数	不確かさへの 寄与	標準不確かさ (全体)
浸水表面積	重量計の分解能	B	0.002%	0.667	0.002%	0.002%
検力計	非線形性	B	0.056%	1	0.056%	0.566%
	ヒステリシス	B	0.008%	1	0.008%	
	較正曲線の標準推定誤差	B	0.563%	1	0.563%	
水温	水温計の分解能	B	0.847%	0.173	0.147%	0.147%
流速	較正曲線の標準推定誤差	B	0.131%	2	0.261%	0.266%
	曳引台車速度の偏り誤差	B	0.000%	2	0.000%	
	繰り返し計測	A	0.025%	2	0.049%	
抵抗	繰り返し計測	A	0.202%	1	0.202%	0.202%

合成標準不確かさ：0.67%， 拡張不確かさ：1.35%

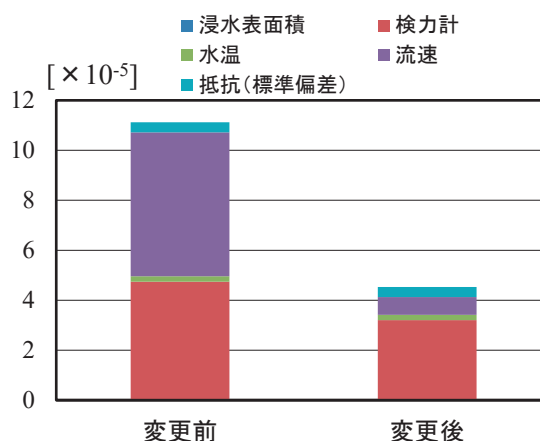


図 3-8 各影響因子の不確かさへの影響

以上の検討を踏まえると、東京大学船型試験水槽において平水中抵抗計測を不確かさの観点から高精度化するために実施すべき事項を列挙すると以下の通りとなる。

- ・ 対地船速：解析において設定速度ではなく計測された速度を使用する。設定速度を使用する場合には、曳引台車を適切にメンテナンスし、設定速度にて曳引台車が走行していることを確認したうえで使用する。
- ・ 検力計：容量の小さい検力計の導入が効果的であり、これを実現するため加減速による慣性力を受け持つクランプ装置を導入する。検力計の検定時には較正係数を求めるだけでなく、非線形性、ヒステリシスを明確にし、検定仕様書に記載の値と比較を行う。
- ・ 水温計：分解能の優れた水温計を導入する。

4. まとめ

本研究では、水槽試験における計測の信頼性を高め、設計時間の短縮や高性能船型の開発を促す「革新的水槽試験システムの構築」を念頭に、東京大学船舶試験水槽において KCS 模型船を用いた平水中抵抗計測に関する繰り返し試験を行い、ITTC の推奨手順に従って不確かさ評価を行った。

不確かさ評価の結果，平水中抵抗の不確かさにおいて，流速及び検力計に起因する不確かさが主要であることが判明した．流速に関しては，曳引台車の設定速度と実際の速度との間に0.6%程度の偏り誤差があり，これが大きく影響していることが確認できた．また，平水中抵抗の計測においてクランプ装置を使用しないため容量の大きい検力計を使用せざるを得ず，このことが抵抗の不確かさの増大に寄与していることが分かった．以上のことから，平水中抵抗の不確かさを低減させるためには，適切に水槽施設をメンテナンスすること，及び適切な計測装置を導入することが必要であることが明らかになった．

参考文献

- 1) 下田春人，川島英幹，一ノ瀬康雄，辻本勝：水槽試験技術のスマート化，海上技術安全研究所報告，第19巻第4号（2019），pp.17-24.
- 2) 和中真之介，稗方和夫，満行泰河，大和裕幸：水槽試験・CFDデータ統合管理システムの開発，日本船舶海洋工学会論文集，第28号（2018），pp.181-188.
- 3) 姫野洋司，西尾茂，高松健一郎：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），pp.39-47.
- 4) 西尾茂，姫野洋司，高松健一郎：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），pp.51-64.
- 5) 西尾茂：計測における不確かさの評価と表現，日本船舶海洋工学会推進性能研究会シンポジウムテキスト，水槽試験の現状と展望（2010），pp.77-94.
- 6) Park, D. M., Lee, J., and Kim, Y.: Uncertainty analysis for added resistance experiment of KVLCC2 ship, Ocean Engineering, Vol. 95, pp.143-156, 2015.
- 7) N. Sogihara, M. Tsujimoto, R. Fukasawa, T. Hamada: Uncertainty Analysis for Measurement of Added Resistance in Short Regular Waves: Its Application and Evaluation, Ocean Engineering, Vol. 216, 2020.
- 8) International Towing Tank Conference -Recommended Procedures and Guidelines: General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests, 7.5-02-02-02, 2014.
- 9) International Towing Tank Conference -Recommended Procedures and Guidelines: Example for Uncertainty Analysis of Resistance Tests in Towing Tanks, 7.5-02-02-02.1, 2014.
- 10) International Towing Tank Conference -Recommended Procedures and Guidelines: Practical Guide for Uncertainty Analysis of Resistance Measurement in Routine Tests, 7.5-02-02-02.2, 2014.