

日本造船技術センターの抵抗試験、自航試験の紹介

(その1 水槽水管理)

はじめに

試験水槽における抵抗試験、自航試験は、対象船舶が目標とした性能を得られるか否かを確認する手段、及び新船型を開発する手段としての試験ですが、近年では、省エネ対策の一環として、新しいタイプの舵及びフィンなどの付加物を開発する手段として利用されることも多くなっています。

抵抗試験は、決められた速度で航走する模型船の抵抗を計測し、実船を曳航するのに必要な馬力を求めるための試験です。この馬力を有効馬力EHPといいます。ただし、船舶は、プロペラの回転により推力を得て航行しており、実際に必要となる馬力は、プロペラを回転させるための馬力です。これを伝達馬力DHPといいます。伝達馬力は、自航試験によって求められます。その上で、プロペラ軸系の損失を伝達効率 η_T として考慮し、実際に機関が外部に出す馬力を求めます。これを制動馬力BHPといいます。このような過程を通して、対象船舶が目標とした性能を有しているかを知ることができます。

毎日実施されている抵抗試験、自航試験の一連の流れを図-1に示します。これは、我々計測員が本試験のために日常行っている作業をフローチャートに示した図です。日本造船技術センターでは、自動計測システムによる1航走中の多点計測などの効率化により、1日に2載荷状態の抵抗試験、自航試験を標準としています。

抵抗試験、自航試験を説明するために全体の流れを次の5つに分割し、それぞれの概要を以後数回に分けて説明します。

(1) 水槽水管理

1年間を通じて試験結果に影響が出ないように水槽水を管理することは極めて重要です。

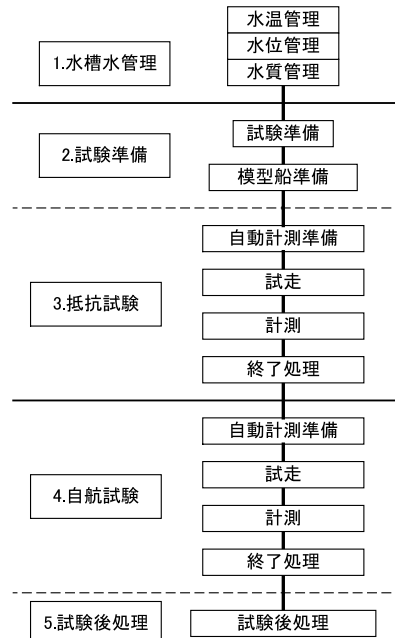


図-1 抵抗試験、自航試験の流れ

日々変化する水温・水位・水質に対応すべく、当センターが行っている管理手法について説明します。

(2) 試験準備

試験当日の朝、計測業務を行うためにすべき準備、模型船の喫水設定、及び曳引車への取付けについて説明します。

(3) 抵抗試験

当センターで用いている自動計測プログラムの概要を簡単に説明、計測の準備、計測について紹介した後、当センターが行っている解析法について説明します。

(4) 自航試験

模型プロペラを取付け、回転させた状態で試験を行う自航試験の準備、計測について説明します。

(5) 試験後処理

試験を終えた後の処理、及び水槽水の状態確認等について説明します。

1. 水槽水管理

当センターが三鷹400m水槽で試験を行う上で、最も注意を払うべきことの一つに水槽水管理があります。三鷹の400m水槽は、他の試験水槽同様、外乱要因による温度変化、水質変化、水棲生物の発生を最小限に抑えるため水槽内に太陽光が入らない構造で、長さ400m、幅18m、水深8mの曳航試験用水槽です。水量は約55,000トンで、25mプールに換算すると約120杯分あります。図-2に三鷹400m水槽の概要を示します。

水槽水管理の主たる目的とは、1年間を通じて試験結果に影響が出ないように、水槽水の環境変化を最小限に留めることです。しかしながら、過去の経験から言っても、これだけ大量の水槽水の状態を試験毎に条件が異ならないよう維持管理することは、決して容易ではありません。ここでは、管理に使用している機器や取得データを紹介して、水槽水の水温、水位及び水質の管理について説明します。

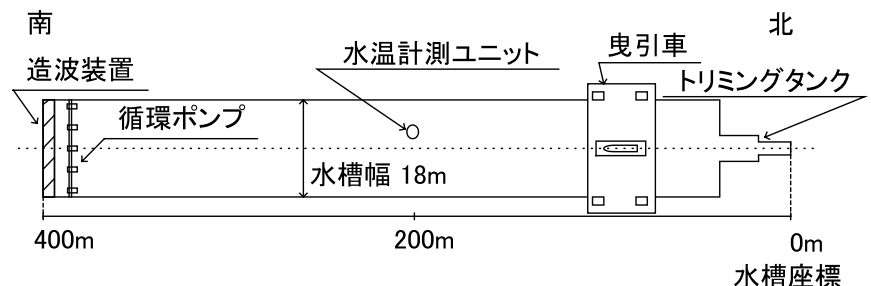


図-2 三鷹400m水槽 模式図

1-1 水温管理

船の粘性抵抗は水の粘性係数によって左右され、粘性係数は水温によって変化します。また、水面付近に深さ方向の水温勾配があると、密度にも勾配が発生し模型船の水抵抗が変化することがあります。

三鷹400m水槽では、毎朝7時になると、水槽座標200m付近に設置された水温計測ユニットが浮上し計測を始めます。本ユニットは、コンピューター制御で水面から水底に向かい一定間隔で水温を計測していき、最後は底部に着床します。

本ユニットは、水槽中心線から2.5m程度西側に位置しており、万が一作動不良で試験中に水面付近に浮いてきたとしても、模型船に正面衝突しないようになっています。図-3に水温計測ユニット装置の動作を図-4に水温計測ユニットを示します。

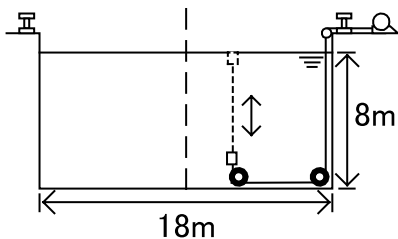


図-3 水温計測ユニットの動作

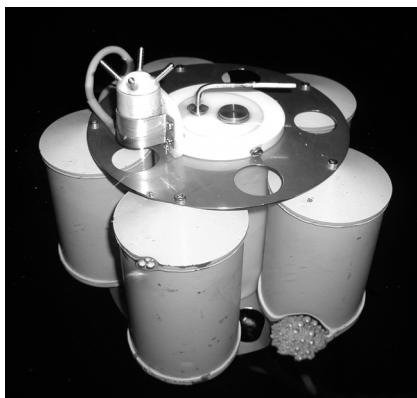


図-4 水温計測ユニット

計測結果は、図-5の様にPC画面に表示される仕組みになっています。これを確認することにより、水深方向の水温分布を把握することができます。計測例を図-6に示します。また、水深0.2mにおける水温の1年間の変化を図-7に示します。

＜2008/02/16 08:17の計測データ＞										
水深(m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
水温(℃)	10.6	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.1
水深(m)	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
水温(℃)	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
水深(m)	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325
水温(℃)	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.0	11.1	11.1	11.1
水深(m)	350	375	400	425	450	475	500	550	600	700
水温(℃)	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1

図-5 水温計測ユニット操作画面

図-7から本試験水槽では、季節によって水温は21℃から11℃まで約10℃の変化があることがわかり、試験ではこの水温の変化が影響しないようその日の水温に対応した粘性係数を用います。

水は空気に比べると熱しにくく冷めにくい性質があるため、3月に最低水温、9月に最高水温と、気温のそれと比べると幾分か遅れています。

気温が急激に変化する季節の変わり目は、水槽水の温度管理には特に気をつけなければなりません。その理由は、季節の変わり目で外気と水温との間で急激な温度差が生じることです。その影響とは、例えば、気温が急激に下がる秋～冬では、水面付近の水槽水は、気温により冷やされ、比重が重くなり水底へと沈みこれに

より図-8のように水槽内に自然の対流が起きます。この自然対流の発生が、水深方向の温度勾配（密度勾配）を小さくするので、試験に適した環境となります。

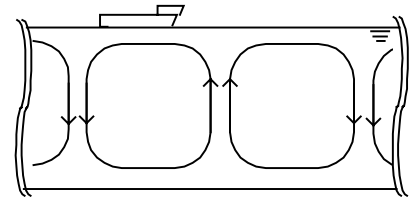


図-8 水温上下差による自然対流

しかし、逆に急激に気温が上がる春～夏では、水面付近の気温が水温よりも高くなってしまい、水面付近の水槽水は逆に温められます。これにより比重が軽くなってしまいうため、水槽水の自然対流は起こらず、大きな温度勾配（密度勾配）が生じてしまいます。そしてこれがしばしば試験結果に悪影響をもたらす原因の一つとなっています。図-6は、図-7から水温の最も高かった日と最も低かった日を選び、その日の水深方向の水温分布を示したものです。水温の高かった9月では、水面付近及び水深4m以降の温度勾配が大きく、逆に3月では水深に関係なくほぼ一定値を示します。水温均一

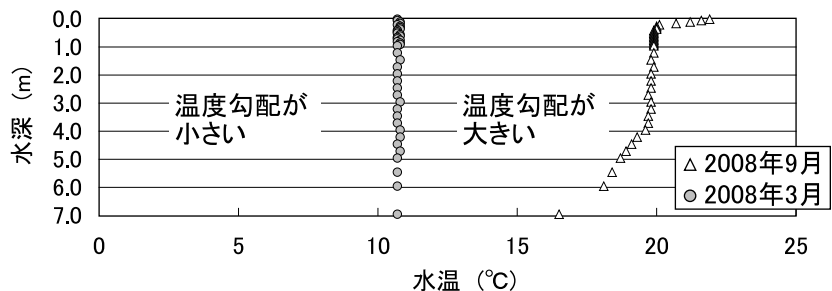


図-6 水深方向の水温変化

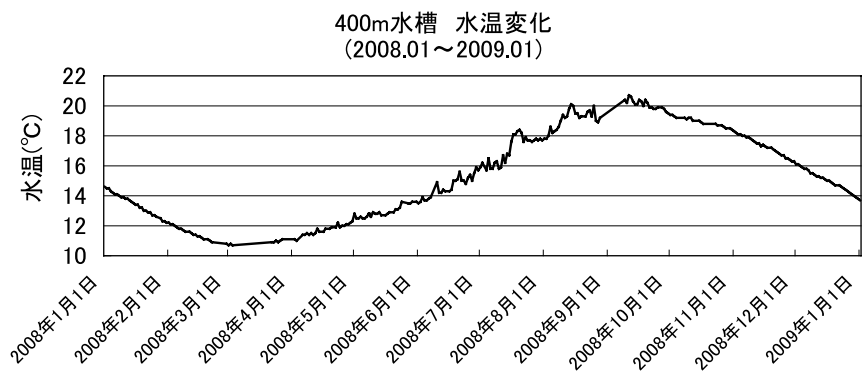


図-7 水深0.2mでの年間水温変化

化のため、当センターでは自然対流が起かない夏には、図-9に示す循環ポンプを用いて水槽水を強制的に対流させています。

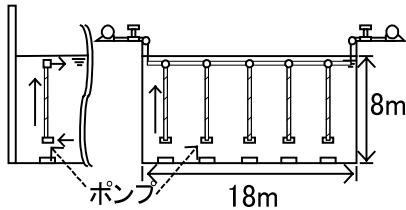


図-9 循環ポンプ装置側面図（左）及び正面図（右）

循環ポンプは、水槽座標380m付近の水底付近に5機設置されており、それぞれから水槽水面付近に取り付けられた吐き出し口まで管が延びています。このポンプは、水槽底部から比較的水温の低い水を吸い上げ、水面付近で吐き出すことにより、水槽内に強制的に対流を発生させる仕組みになっています。通常、タイマーを用いて試験を実施しない夜から翌朝にかけて運転しています。

以上の方法によって、年間を通して水槽の深さ方向水温分布（密度分布）が極力小さくなるようにしています。

1-2 水位管理

水槽では、水槽水の蒸発や漏水の影響により水位が変動します。当センターでは、水位の監視のため、超音波式波高計で水位を計測しています。水位の基準は、図-10に示すように、曳引車の計測レールから1200mm下方に水面があることとしています。

毎朝午前8時に水位をコンピューターに取り込み、日々の変化を記録しています。図-11に計測結果を示します。また、目視による観測が出来るよう、水槽

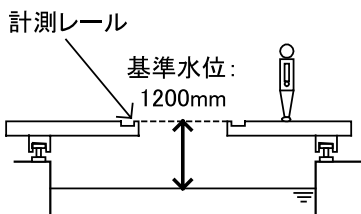


図-10 基準水位

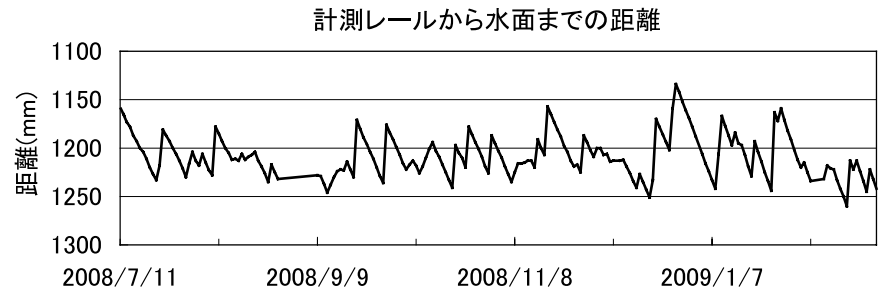


図-11 水位の計測結果

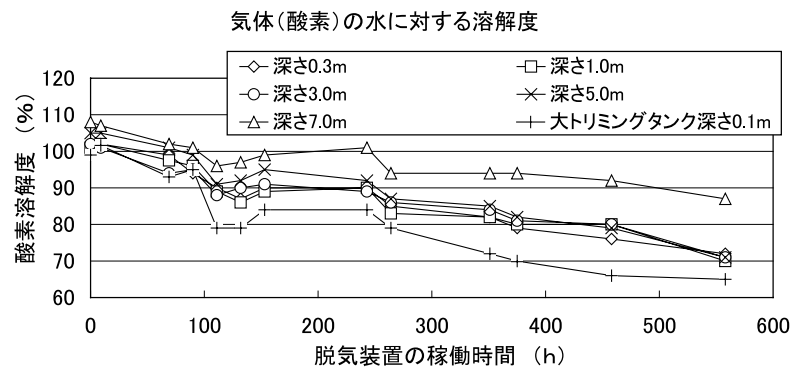


図-12 脱気装置稼働時間と酸素溶解度

トリミングタンクの北端窓に水位確認用のスケールを貼り付け、日々の水槽への給水の目安としています。

1-3 水質管理

春から夏へとうつる気温上昇期において、上昇率が大きい場合には、水槽水に溶解していた気体が遊離し、模型船表面一面に付着してしまうことがありました。この気泡が付着した状態では正常な試験が行えません。当センターでは2005年7月に水槽水中の気泡を除去するために、脱気装置を導入しました。(SRC News No.65参照) 脱気装置稼働後の酸素溶解度の変化を図-12に示します。本図に示すように、酸素溶解度は脱気装置稼働後約500時間程度でほぼ一定値となったため、抵抗試験を実施したところ、試験の再現性も確認でき、目視による観察によっても、気泡が付着していないことが確認されました。これにより、夏季でも安定して水槽試験を行えるようになりました。

また、日々水槽試験を実施しますと、模型船の起こした波が空気を巻き込んだ

り、空気中の塵や埃が水面に落ちたりすることで、水槽表面には図-13に示すような大きな気泡や汚れが一面に漂流していることがあります。

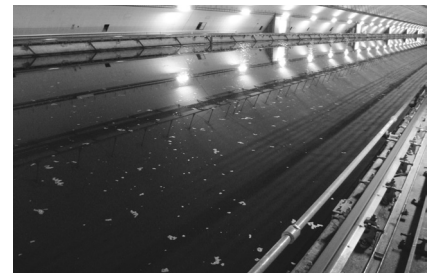


図-13 水槽水面の汚れ

このような汚れを発見したら、試験前に除去しておく必要があります。副台車に取り付けられた給水ポンプで水槽水を汲み上げ、スプレー状に水面に吹き付けることで、気泡や不純物を除去しています。

以上のように、水槽試験に影響が出ないよう水温、水位及び水質に水槽の環境を整備しておくことを心がけて毎日の試験を行っております。次回は、試験準備と抵抗試験について説明します。

(試験センター 福島寛司)

日本造船技術センターの抵抗試験、自航試験の紹介

(その2 試験準備と抵抗試験)

2. 試験準備

1日の水槽試験を行う前に実施する準備を図-14に示します。

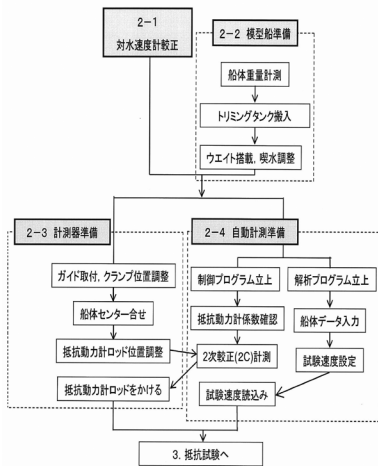


図-14 試験準備

2-1 対水速度計較正

試験水槽の水は自然対流及び定在波の影響で僅かながら流れが生じており、日々変化しています。当センターでは模型船速度にはこれらの影響を考慮し対水速度を用いています。対水速度計には翼車型 (SRCニュース第76号参照) を使用しており、試験前および試験後に較正を行います。水槽座標150mから250mの間を0.5m/sから2.5m/sまで0.5m/s刻みに同じ速度で曳引車を往復走行させ対水速度を計測します。得られた対水速度と対地速度の差の平均値を図-15のようにプロットし折線で結びます。このグラフを用いて抵抗試験、自航試験で計測された対水速度を修正し速度を導出しています。

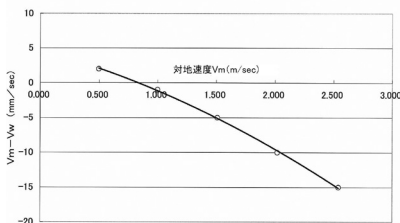


図-15 対水速度計較正結果

2-2 模型船準備

はじめに模型船の喫水を所定の載貨状態に合わせます。まず吊り秤を用いて模型船の重量を計測します。模型船には事前に自航動力計等、必要な計測器が積込まれていますのでこれらを含んだ重量が計測されます。

その後模型船をトリミングタンクへ移動します。水槽に着水させる際、なるべく定在波が発生しないよう、クレーンの速度を微速にして作業します。そして排水量から模型船重量を差し引いた重量分のバラストウェイトを積んで排水量を合わせます。当センターでは、省力化のためにウェイト搭載器を用いる場合があります。これにより約1tonのバラストウェイトを一気に積むことが可能です。そして予めマーキングしてある船首尾及び中央の喫水線に合うようにバラストウェイトの位置を調整します。最後にマーキングからのずれを記録します。

2-3 計測器準備

模型船を曳引車に取付けた状態を図-16に示します。

曳引車を水槽座標18mまで移動させ、まずクランプで模型船を固縛します。クランプは、曳引車の加減速時に抵抗動力計に過大な負荷がかかるのを防ぐために取付けられています。

次にガイド装置を取付けます。ガイド装置は船首尾部に取付けられ、模型船の横方向変位を拘束し、且つ前後方向には力を及ぼさない構造となっています。ガ

イド装置取付け後一旦クランプを開き、下げ振りを船首尾から少し離れたところに2つずつ下ろし、船首尾両方向から模型船が曳引車の中心線に来るようにガイド装置の横方向位置を調整します。

船首尾の沈下量を計測するためのレーザー測位器は、模型船のFP及びAPのほぼ真上に設置します。測位器は計測範囲が限られているため、試験前には適切な高さ調整します。

その後、抵抗動力計の前後・上下位置の調整をします。適切な設定の目安としては、クランプを閉めた際、曳航ロッドを少し動かす余裕があるようにします。抵抗動力計には、全容量式の一分力計を使用しています。(SRCニュース第73号参照) 一分力計は、温度ドリフトを防ぐため試験前から通電し温めておきます。

抵抗試験終了後に実施する自航試験で使用する自航動力計 (SRCニュース第74号参照) も抵抗試験準備時から通電しておきます。以上の作業が終了すると、一旦抵抗動力計から曳航ロッドを外し抵抗動力計の較正を行います。試験前には、制御プログラムで動力計の0点及び二次較正計測を行い、動力計に異常がないことを確認します。その後、曳引車はスタート位置へと移動します。

2-4 自動計測準備

試験計測の一連の作業は、自動計測プログラムを用いて計測します。

自動計測プログラムは、曳引車の制御及び計測を行う制御プログラム、及び計測したデータを解析する解析プログラム

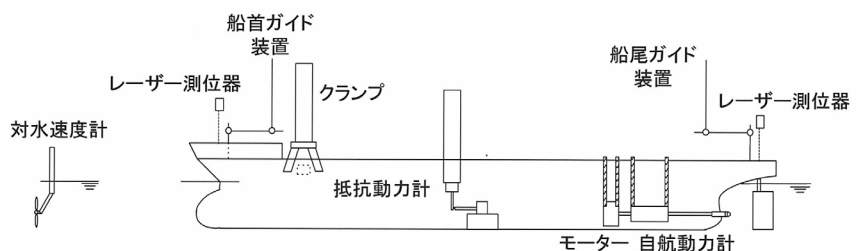


図-16 模型船取付状態

の2つから成ります。図-17に制御プログラム画面を、図-18に解析プログラム画面を示します。これら2つのプログラムを使い抵抗試験を行います。その為には最初に船体主要目等を解析プログラムに入力し、試験速度を導いておく必要があります。



図-17 制御プログラムの画面

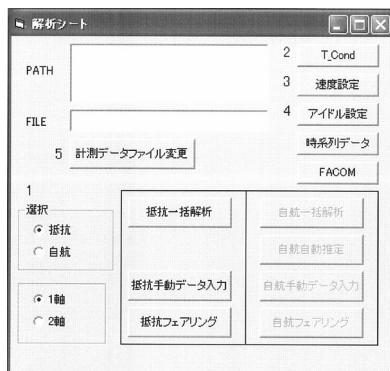


図-18 解析プログラムの画面

当センターでは主機関出力の1/4～5/4の範囲を標準の試験速度範囲として定めており、この範囲を満たすように8点、さらに3次元解析に用いる低速抵抗試験を4点、合計12点を自動設定します。

次に制御プログラムに航走速度を入力し、試験速度を確認します。この時、安全を確保するため最高速度以上の速度が入力出来ないようになっております。

試験立会の方が模型船の状態、試験速度を確認できるよう曳引車上に液晶ディスプレイの掲示板(図-19)を設置し、航走する速度を黄色で示すようにしています。

No.	Vm	Vm/Fn	Vm/Fn	Vm/Fn
1	0.242	21.50	1.851	5.00
2	0.242	21.50	1.851	5.00
3	0.274	24.51	2.110	5.00
4	0.182	14.40	1.240	5.00
5	0.255	18.27	1.573	5.00
6	0.259	23.00	1.900	5.00
7	0.250	20.00	1.667	5.00
8	0.255	18.27	1.573	5.00
9	0.103	9.14	0.767	5.00
10	0.184	16.24	1.407	5.00
11	0.225	19.99	1.721	5.00
12	0.086	7.68	0.661	5.00
13	0.118	10.59	0.912	5.00

図-19 掲示板

3. 抵抗試験

抵抗試験の手順を図-20に示します。

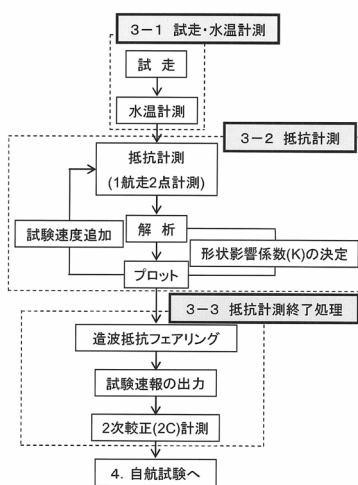


図-20 抵抗試験の手順

3-1 試走・水温計測

曳引車を水槽座標50m付近まで移動させます。模型船の波により船首船尾から模型船内に水が入る可能性が考えられる場合には、まず安全性確認の航走を行います。当日の試験の最高速度まで徐々に速度を上げていきながら乾舷の余裕を確かめます。

その後、計画速度について計測距離190mの1点計測で試走を行い、船首尾沈下量、船体抵抗値が計測許容量であるかどうかを確認します。

試走後の帰投中に水槽座標200m付近にて一時停止して当日の水温を計測します。曳引車から水温計を下ろし水深15cm～20cm付近の水温を計測します。当日の水温が前日と比べ大きな差がある場合は、2載貨状態目の抵抗試験時にもう一度計測します。

3-2 抵抗計測

抵抗試験、自航試験では水槽座標50mで曳引車を発進させ、1速度につき計測距離を70mに固定して計測しています。1航走中に2速度の計測を標準としており、1速度目の計測終了後に増速し、2速度目を計測します。2点目の速度は、先行する波の影響及び曳引車の制御が不安定になる可能性がある為、1点目の速度よりも必ず大きくなるように設定しています。

計測項目は、対水速度、全抵抗値、船首尾沈下量です。

帰投運転(通常0.8m/s)が終了し曳引車が停止したところで1航走終了となります。この航走終了時点で時系列データを表示するようになっています。図-21に時系列データの例を示します。

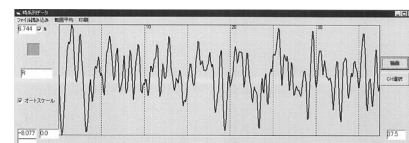


図-21 時系列データの例

この後、航走波や残流の影響を少なくするため、水槽定在波周期(90s)の2倍の間隔を空けてから次航走をスタートさせます。この間、クランプを開放して抵抗を計測していますが、この後半の抵抗計測値を我々は模型船付状態でのゼロ点、“準ゼロ点”と呼んでいます。自航動力計のコード等が模型船に力を加えていないかを確認する手段として用いています。

3-3 抵抗試験終了処理

曳引車を水槽座標18mまで移動させます。抵抗動力計に不具合が生じていないかを確認するため、ゼロ点及び二次校正値の計測を再度行い、記録します。データ確認後速やかに試験結果速報を作成します。

(試験センター 福島寛司)

日本造船技術センターの抵抗試験、自航試験の紹介

(その3 自航試験と試験終了後の処理)

4. 自航試験

自航試験の主たる目的は、船体、舵・フィンなどの付加物及びプロペラ間の相互干渉を自航要素として把握することです。抵抗試験で求めた速度と抵抗の関係、及び自航試験で得られた自航要素から伝達馬力等を計算することが出来ます。図-22に当センターで行われている自航試験の方法を示します。

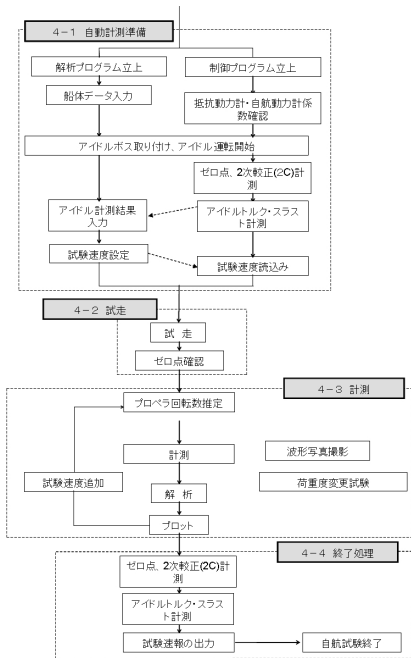


図-22 自航試験の手順

自航試験では模型プロペラを用います。これは、試験水槽が保有する多数の模型プロペラの中から依頼者が予定している実船プロペラ要目に一番近いプロペラを選択しています。さらに、アイドルトルク・スラスト計測のため模型プロペラ重量に近いアイドルボスを用意します。

4-1 自動計測準備

自航試験を行うにあたり、まず自動計測プログラムを起動します。抵抗試験から引き続いて試験する際には同じデータが使用できるので、入力作業を簡便に済

ますことが出来ます。自航試験では自航要素を求めるために模型プロペラの単独性能が必要になりますので、模型プロペラは予めプロペラ単独性能試験を行っておく必要があります。図-23にその例を示します。

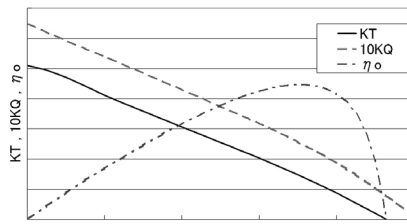


図-23 プロペラ単独性能曲線の例

自航試験を始めるに当たり、まず抵抗試験で模型船に取付けられていた罫裂ボスを外し、そして予め備えてあるプロペラシャフトを船内の自航動力計につなぎ、船外に出たシャフトの先端に水中でアイドルボスを取付けます。(図-24)

シャフトとスタンチューブの間には、水潤滑のため僅かな隙間を設けています。これにより水槽水が水圧の影響で少しづつ入ってきますが、ドレーンポンプを使って排水します。

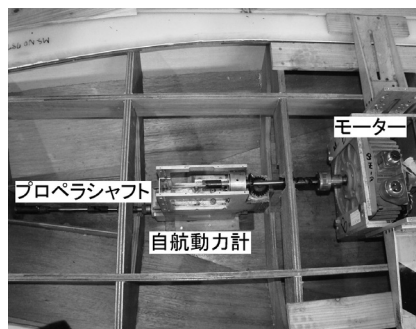


図-24 船尾側計測器配置の例

プロペラ回転方向、トルクの符号確認、回転数指令の換算係数及びトルク・スラストの換算係数などを確認します。その後、シャフトとスタンチューブとの水潤滑が充分になるまで、アイドルリング運転を数分間行います。

その後、自航動力計からシャフトを外し、5rpsで回転させた状態で自航動力計のゼロ点及び二次較正值を計測し、記録します。

次にシャフトをつなぎアイドルボスを取付け、アイドルトルク・スラストを5から15rpsの範囲で計測します。各回転数で10秒間計測しながら2rpsピッチで上げていき、15rpsまで到達したら1rps下げ、そこから2rpsピッチで下げ6rpsまで計測したら終了します。(図-25)

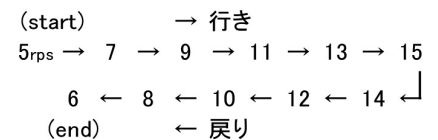


図-25 アイドルスラスト・トルク計測回転数の例

アイドル計測終了後、回転数とアイドルトルク・スラストの関係を図-26のようにプロットします。アイドルトルクは回転数によって変化しますので、フェアリングします。

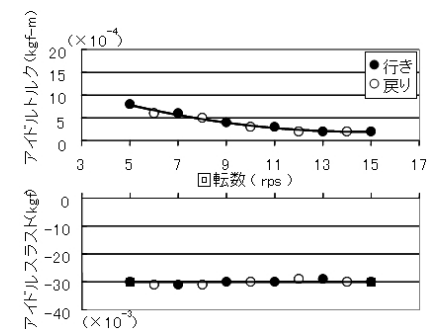


図-26 アイドルトルク・スラストの計測例

アイドルスラストは平均値を求めます。アイドルトルク・スラストはプロペラ及びプロペラシャフトの自重に起因する値であり、自航試験時のトルク・スラストからこれらの値を差引いたのが真のプロペラトルク・スラストです。

アイドル計測が終了したらアイドルボスを外し、用意した模型プロペラをとりつけた後、曳引車をスタート位置である水槽座標50mに移動させます。

4-2 試走

試走は、計画速度について計測距離190mの1点計測を行い、曳航力、トルク、スラスト及び船首尾沈下量が計測器容量の範囲内であるかどうかを確認します。その際、自航状態とするため制御プログラムからモーターに指定回転数を入力し、プロペラを回転させた状態で計測します。プロペラ回転数は、前船もしくは類似船の自航要素を入力して解析プログラムを用いて推定します。

試走後、自航動力計に負荷をかけた後のゼロ点変化を確認するため、船を一旦トリミングタンクまで戻し、ゼロ点を確認します。

4-3 計測

自航試験は、抵抗試験時の速度から低速抵抗試験速度を除いた8速度について計測します。計測項目は、対水速度、曳航力、プロペラ回転数、トルク、スラスト及び船首尾沈下量です。

基本的な計測手法は抵抗試験と同じです。ここまでは割愛しますが、異なる点としては、航走毎にプロペラ回転数を推定する必要があります。試走時は自航要素を入力して回転数を推定しましたが、2航走目からは前航走までの試験結果から推定します。

推定したプロペラ回転数が適切であったか否かを下式のLoad Factor (L) という係数で評価します。

$$L = \frac{R_{TM} - \Delta R_M}{R_{TM} - SFC}$$

ここに、 R_{TM} ：抵抗試験で計測した全抵抗、 ΔR_M ：自航試験で計測された曳航力、SFC (Skin Friction Correction)：摩擦抵抗修正量

Load Factorが1.00に近ければプロペラ回転数が適切であったこととなります。許容範囲の目標を±3% ($L=1.00 \pm$

0.03) 以内とし、計測結果がこの範囲から逸脱した際にはプロペラ回転数を調整し再度計測します。(図-27)

計画速度では、通常の計測の他に、意図的にLが5%程度大きくなるようにプロペラ回転数を少し上げた状態も計測します。これは、プロペラの荷重量が自航要素に及ぼす影響を確認するための計測で、プロペラ荷重量変更試験と言っています。

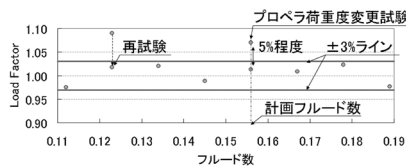


図-27 Load Factorの例

自航試験では、8速度のうち計画速度及びその両側の合計3速度において、船側波形写真を撮影しています。曳引車の床下に図-28のように3台のデジタルビデオカメラを設置し、リモコンで操作しています。3台はそれぞれ①船首付近(FP～S.S.7)、②船体中央部(S.S.7～S.S.3)、③船尾付近(S.S.3～AP)を撮影できる撮影角度にします。

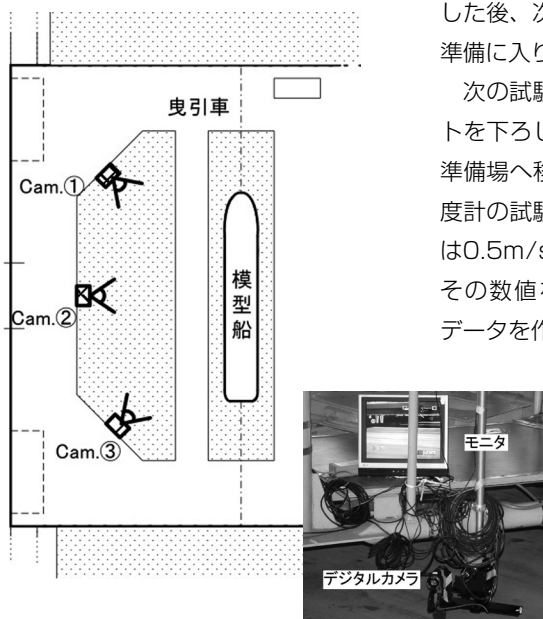


図-28 船側波形撮影位置及び装置

4-4 終了処理

試験終了後、曳引車をトリミングタンクまで移動させ、抵抗動力計及び自航動力計のゼロ点及び二次較正値を再計測します。さらに、試験中の変化を確認するためアイドルトルク・スラストを計測します。データ確認後速やかに試験結果速報を作成します。

5. 試験終了後の処理

抵抗試験、自航試験の終了後の後処理を図-29に示します。

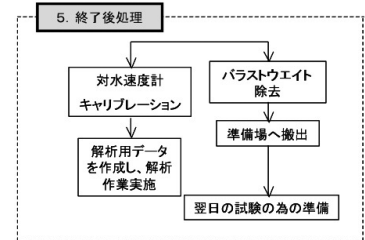


図-29 試験終了後処理の手順

模型船から、ガイド装置とクランプ及び各種計測器コード類を外し、模型船をトリミングタンクに残して曳引車を水槽座標50mの位置に進めます。

模型船は、試験後の喫水を確認し記録した後、次の試験載荷状態の抵抗試験の準備に入ります。

次の試験がない場合はバラストウエイトを下ろし、クレーンを使って模型船を準備場へ移動します。その間に、対水速度計の試験後の較正を行います。試験後は0.5m/sと1.5m/sの2速度を計測し、その数値を記録します。最後に解析用データを作成し、試験を終えます。

(試験センター 福島寛司)

日本造船技術センターの抵抗試験、自航試験の紹介 (その4)

6. 抵抗試験結果の解析

今回は日本造船技術センターで行われている抵抗試験結果・自航試験結果の解析法について説明します。抵抗試験では、全抵抗 R_{TM} 、対水速度 V_W 、船首尾沈下量を計測していますが、全抵抗と対水速度の2つから実船の有効馬力EHPを求めます。

6-1 抵抗成分の分離

模型船と実船では、レイノルズ数の違いにより粘性抵抗が異なりますので、実船抵抗を推定するためには、模型船の抵抗を成分に分ける必要があります。それには大別して2種類の方法があり、それぞれ2次元外挿法、3次元外挿法と呼ばれています。2次元外挿法では全抵抗を摩擦抵抗と剰余抵抗の2つに、3次元外挿法では摩擦抵抗と形状抵抗と造波抵抗の3つに分離します。図-30に抵抗成分の分離例を示します。

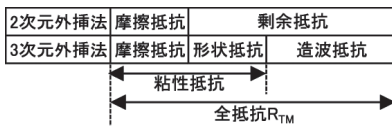


図-30 抵抗成分の分離例

R_{TM} は(1)(2)式により無次元化し、全抵抗係数とします。(1)と(2)は無次元化の分母が異なるだけです。

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_M \cdot V_M^2} \quad \dots (1)$$

$$r_{TM} = \frac{R_{TM}}{\rho \cdot \nabla_M^{2/3} \cdot V_M^2} \quad \dots (2)$$

ここに ∇_M :模型船の排水量

S_M :模型船の浸水表面積

2次元外挿法では、(3)(4)式のように抵抗成分を分離します。

$$C_{TM} = C_{FM} + C_R \quad \dots (3)$$

$$r_{TM} = r_{FM} + r_R \quad \dots (4)$$

C_{FM} は模型船の摩擦抵抗係数であり、模型船と浸水表面積および長さの等しい平板の同速度における抵抗の係数です。

摩擦抵抗係数としては様々な方法が考案されていますが、当センターではシェーンヘルの摩擦抵抗算式を標準としています。 C_R 、 r_R を剰余抵抗係数と呼んでいます。このフルード数ベースの例を図-31に示します。

$$\text{フルード数 } Fn = \frac{V_W}{\sqrt{g \cdot L_{dwl}}} \quad \dots (5)$$

ここに L_{dwl} :満載状態時の水線長

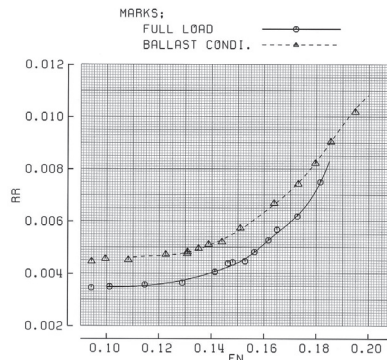


図-31 剰余抵抗係数 (r_R)

3次元外挿法では、次式のように分離します。

$$C_{TM} = (1 + K)C_{FM} + C_W \quad \dots (6)$$

$$r_{TM} = (1 + K)r_{FM} + r_W \quad \dots (7)$$

3次元外挿法が2次元外挿法と異なる点は、形状影響係数 K を考慮するところにあります。

K は船型の三次元性による粘性抵抗への影響を表しており、 $K \cdot C_{FM}$ が形状抵抗となります。当センターではフルード数が0.10程度の低速域では造波抵抗が小さく全抵抗は(8)式で表せると仮定して、 K を図-32のように求めます。

$$C_{TM} = (1 + K)C_{FM} \quad \dots (8)$$

(6)式で $C_W=0$ とした式

この K の値を用いて(7)式から得られた造波抵抗係数を図-33に示します。

6-2 有効馬力の推定

有効馬力とは、実船の抵抗と速度の積で実船を曳航するのに必要な馬力を表します。これを試験結果から推定するためには、まず次式を用いて実船の全抵抗係

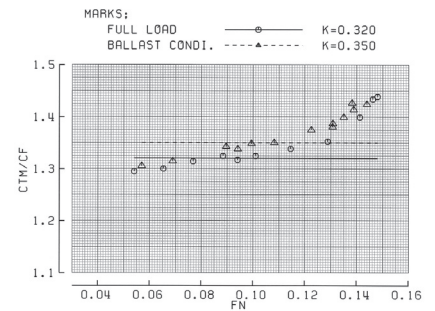


図-32 低速抵抗試験結果

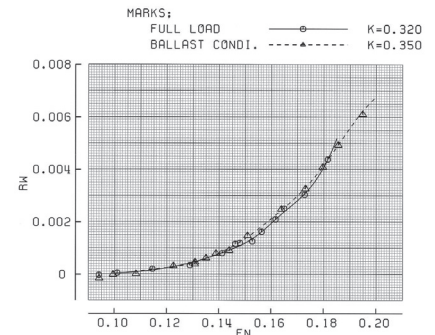


図-33 造波抵抗係数 (r_W)

数を推定します。

$$C_{TS} = (1 + K)C_{FS} + C_W + \Delta C_F \quad \dots (9)$$

$$r_{TS} = (1 + K)r_{FS} + r_W + \Delta r_F \quad \dots (10)$$

C_{FS} は実船の摩擦抵抗係数であり、 C_{FM} 同様に求めます。 C_W は幾何学的に相似な船であれば尺度影響が無いと仮定しています。 ΔC_F は表面粗度修正係数ですが、模型試験結果と実船の試運転結果の違いから求めます。当センターでは(11)式を標準としています。

$$\Delta C_F \cdot 10^3 = 0.0018 \cdot \left(\frac{K_S}{L}\right) Rn^{0.75} + 10\%_L + 0.03 \left(\frac{B}{d}\right) - 0.13 \quad \dots (11)$$

ここに K_S :表面粗度 (0.00015m)

続いて(12)(13)式から実船の全抵抗係数 R_{TS} 、有効馬力を推定します。

$$R_{TS} = C_{TS} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_S \cdot V_S^2 \quad \dots (12)$$

$$= r_{TS} \cdot \rho \cdot \nabla_S^{2/3} \cdot V_S^2 \quad \dots (13)$$

$$EHP = R_{TS} \cdot V_S \quad \dots (13)$$

ここに S_S :実船の浸水表面積

V_S :実船速度

∇_S :実船の排水量

図-34に有効馬力の例を示します。

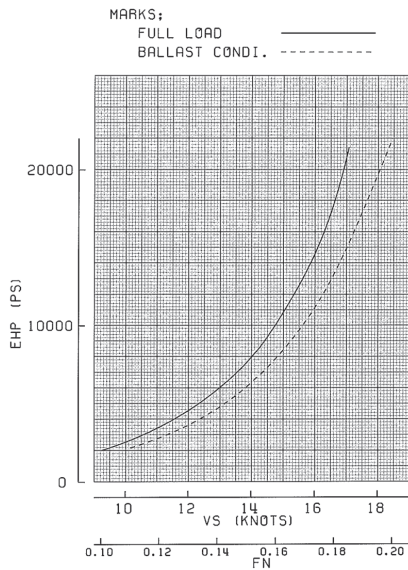


図-34 有効馬力の例

7. 自航試験結果の解析

続いて自航試験の解析について説明します。自航試験中に計測する項目は、曳航力F、対水速度V_w、プロペラスラストT_M、プロペラトルクQ_M、プロペラ回転数n_M、船首尾沈下量です。このうち船首尾沈下量以外の値と抵抗試験結果を用いて実船の制動馬力BHPを求めます。

自航要素とはプロペラと船体との干渉を表す値であり、スラスト減少係数1-t、有効伴流係数1-w_T、船後プロペラ効率比η_Rの3つからなります。

まず(14)式より1-tを求めます。

$$1-t = \frac{R_{TM} - F}{T_M} \quad \dots(14)$$

次に模型船の有効伴流係数1-w_{TM}を求めます。そのために(15)式よりスラスト係数を求めます。

$$K_T = \frac{T_M}{\rho n_M^2 D_M^4} \quad \dots(15)$$

ここにD_M:模型プロペラの直径

図-35に示すように模型プロペラの単独性能曲線からこのK_Tに対応するJ'の値を求めます。このJ'を用いて(16)式より1-w_{TM}を求めます。

$$1-w_{TM} = \frac{V_a}{V_M} = \frac{J' \cdot n_M \cdot D_M}{V_M} \quad \dots(16)$$

ここにV_a:プロペラの有効前進速度

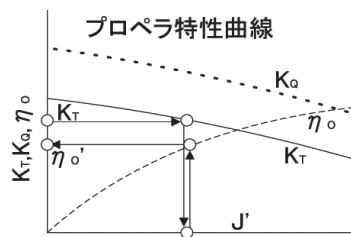


図-35 J'、η₀'の算定例

最後にη_Rを求めますが、先ほど求めたJ'でのプロペラ単独効率η₀をη₀'として、(17)式よりη_Rを求めます。

$$\eta_R = \frac{D_M \cdot J' \cdot T_M}{2\pi \cdot Q_M \cdot \eta_0'} \quad \dots(17)$$

これらをフルード数ベースにまとめ、図-36に示します。

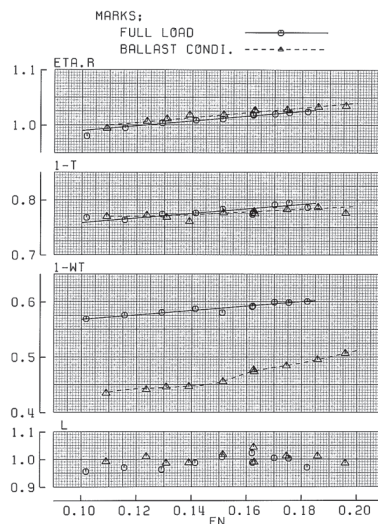


図-36 自航要素
(上からη_R、1-t、1-w_{TM}、L)

本図には下式によるLも示しています。(SRCニュース第81号参照)

$$L = \frac{R_{TM} - F}{R_{TM} - SFC} \quad \dots(18)$$

SFC (Skin Friction Correction) とは、実船と模型船の摩擦抵抗の差で、(6)(7)式と(9)(10)式との違いに対応します。

8. 制動馬力の推定

以上のデータを元に実船のBHPを推定します。

まず模型船の有効伴流係数を実船の値1-w_{TS}に換算します。当センターでは、矢崎のチャートによる(1-w_{TS})/(1-w_{TM})を標準としています。

$$1-w_{TS} = \left(\frac{1-w_{TS}}{1-w_{TM}} \right) (1-w_{TM}) \quad (19)$$

η_R、1-tは尺度影響が無いと考えて模型試験結果をそのまま使用しています。

最後に実船装備予定プロペラの単独性能からプロペラ単独効率η_{0S}を求めて実船の推進係数ηを(20)式により求めます。

$$\eta = \frac{1-t}{1-w_{TS}} \cdot \eta_{0S} \cdot \eta_R \quad \dots(20)$$

次に伝達馬力DHP、制動馬力BHPを(21)、(22)式より推定します。

$$DHP = \frac{EHP}{\eta} \quad \dots(21)$$

$$BHP = DHP \cdot \eta_T \quad \dots(22)$$

ここにη_T:伝達効率

図-37に制動馬力等の例を示します。

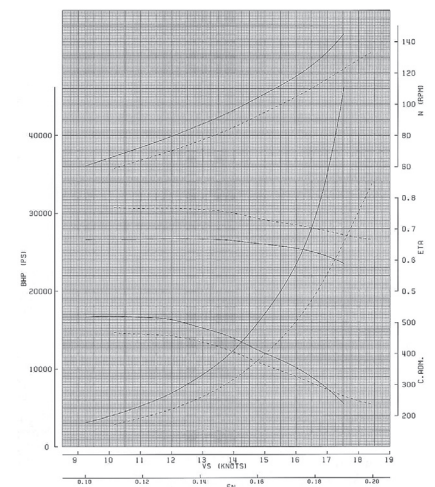


図-37 制動馬力等

本図には、下式によるアドミラルティ係数も示してあります。

$$C_{adm} = \frac{V_S^3 \cdot \Delta_S^{2/3}}{DHP} \quad \dots(23)$$

ここにV_S:実船の速力 (kt)

Δ_S:実船の排水量 (ton)

DHP:伝達馬力 (PS)

以上計4回にわたり当センターの抵抗試験・自航試験を紹介させていただきました。読者の皆様が、水槽試験に少しでも興味を持っていただけたら幸いです。

(試験センター 福島寛司)