SRC News
No.85 October 2010
The Shipbuilding Research Centre of Japan

No. 85 ●目　次●

1　EDDI規制の現状
page 1

2　SRCのEDDIへの取組
page 2

3　酒田市旅客船について
（新定期船「とびしま」が就航）
page 4

4　新しい模型船製作法について
page 6

5　船型の数式表示について（5）
page 8

6　SRC資料室
（5）　船の主要寸法比と馬力係数
page 10

7　トピックス等
page 12

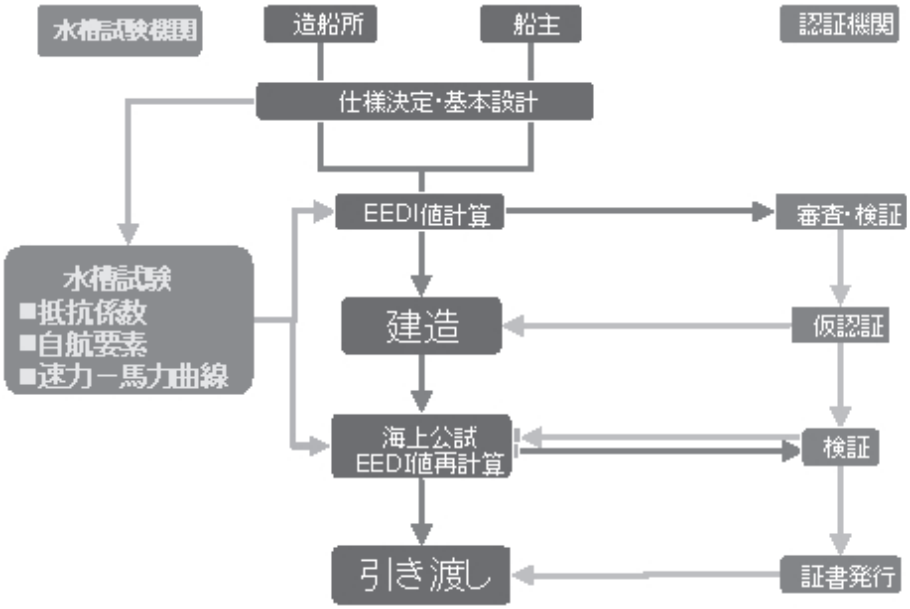
財団法人 日本造船技術センター
〒180-0003　東京都武蔵野市吉祥寺南町1丁目6番1号
吉祥寺スバルビル3階
TEL 0422-40-2820　FAX 0422-40-2827

EEDI規制の現状

EEDI（Energy Efficiency Design Index ;エネルギー効率設計指標）とは、“1トンの貨物を1マイル運ぶのに必要なCO_2のグラム数”を表します。現在、国際海事機関（IMO）において、このEEDIをメジャーとした船舶からの温室効果ガス排出規制に関する国際条約の検討が進められています。現案では、EEDI規制値を現在の平均的値（ベースライン）から15～20年程度を掛けて最大35%程度まで段階的に低減することを目指し、早ければ2013年からの発効を見込んでいます。

図は想定されるEEDI証書発行のプロセスです。建造船の基本設計が固まった段階で実施される馬力と速力の関係確定のための水槽試験結果からEEDI値を計算し、指定された認証機関がこれを検証します。最終的に、完工時の海上公試運転結果を加味し指定認証機関がEEDI値が規制値以下であることを確認し、証書が発行され、就航が認められます。

従来より当センターは、公益法人として公正な立場から水槽試験を行い、造船・海運業界をサポートしてきました。EEDI規制の中では水槽試験が重要な要素であり、EEDI規制の実施後は、より一層の公正さが求められると共に、今以上の精度、信頼性、迅速性が要求されるものと考えています。当センターではEEDI規制に対応できる体制と技術力を整えるべく、準備を進めているところです。



SRCのEEDIへの取り組み（その1　水槽試験の精度）

1．はじめに

EEDIが目的とするところは、船舶の基本性能である平水中推進性能に対し最低限の基準を設け、その基準を満たさない船舶を排除することにより、船舶から排出される温室効果ガスを削減することにあります。このためには、船舶の平水中推進性能を正確に算定する手法が欠かせません。

平水中推進性能は、従来より縮尺模型を使用した水槽試験により評価されてきました。この手法は、1870年代にウィリアム・フルード（フルード数に名を残すイギリスの造船技術者）により提案されて以来100年以上の実績を有し、今日では国際試験水槽委員会（ITTC）がとりまとめたRecommennded Procedure（推奨試験法）に準拠した試験が、各国の試験水槽で行われています。先に示したEEDI認証のプロセスでも従来の手法に倣い、水槽試験により平水中の推進性能を把握し、そこから得られる速力-馬力曲線よりEEDI値を算定することが想定されています。

本稿では、EEDI値を算定するための重要な要素である縮尺模型を使用した平水中推進性能試験について、どの程度の精度が期待できるのかを、ご紹介します。

2．水槽試験の精度

水槽試験の精度に関わる代表的な要因を以下に示します。

① 模型船の製作に基づく誤差。
② 計測器に基づく誤差。
③ 計測作業に伴う誤差。
④ 解析作業に伴う誤差。
⑤ 流体現象に基づく誤差。

以下では①の現状について紹介し、さらに②～⑤を総合してどの程度の精度が得られているのかを繰り返し試験結果より検討します。

2.1　模型船の製作精度

SRCの標準的な模型船は、長さ6～7m、木材とパラフィンの複合構造で製作されています。木材で製作した骨組みを内型に、その外側にパラフィンを鋳掛け、表面をNC切削器により成形し、最終的には手仕上げによって外形を整えています。NCを使用しているとはいえ、木材、パラフィンとも湿度、温度により変形するため、高い製作精度を望むことはできません。しかしどの程度の製作精度であるかを把握しておくことは、水槽試験を理解する上で重要なことでしょう。

Table 1は最近1年間に製作された模型船の長さと幅について、製作直後の平均的な誤差を調査した結果です。ここで示した値は、実測値と計画値の差の絶対値の、計画値に対する割合を、複数の模型船について計算し、平均したものです。

Table 1 Accuracy of model shipbuilding

	平均誤差
長さ	0.015　%Lpp
幅	0.050　%B

ITTC推奨の試験法が要求する模型船の製作誤差は、長さで0.05%Lppまたは1.0mmのどちらか大きな値以下、幅が1.0mm以下となっています。Table 1に示した長さの誤差は、この基準を充分満たしており、また模型船の平均幅は約1.0m程度であるため0.05%B=0.5mmとなり、幅方向も特に問題ないものであることが分かります。

ただし、この模型船を長期に渡って保管した場合にどのような変形が現れ、それがどの程度水槽試験結果に影響を与えるかについては調査されていません。温度、湿度による模型船変形の度合いも不

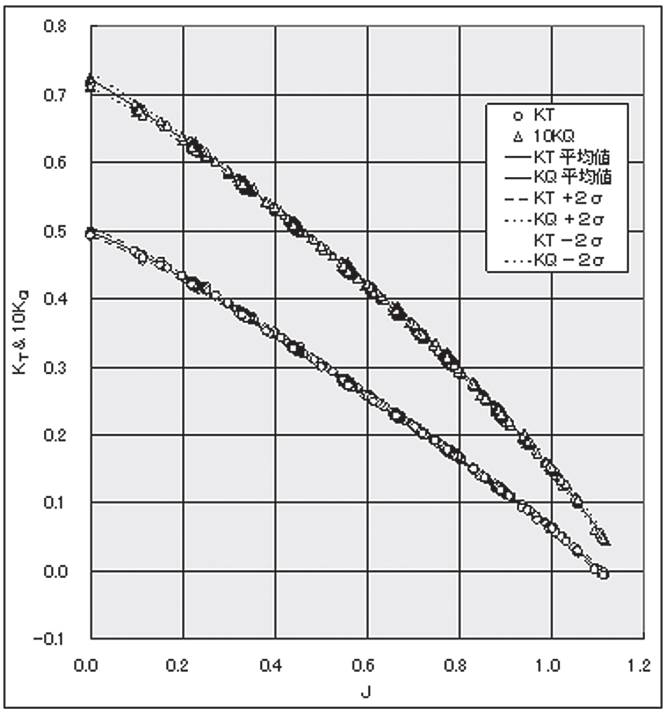


Fig.1　Repetitious accuracy of propeller open water test by the SRC's standard propeller

明です。従って当センターでは模型船は試験の都度製作することを前提とし、やむを得ず長期保管した模型船を使用する場合は、必ず再現性試験を行い、直近の試験結果をベースとして性能を検討するようにしています。

2.2　プロペラ単独特性試験の繰り返し精度

SRCでは標準プロペラを定め、依頼されたプロペラ単独特性試験（POT）を行うたびに標準プロペラによるPOTを併せて行い、POTの精度をチェックしています。

Fig.1に1988年5月から2009年8月までの標準プロペラのPOT結果をまとめて示しました。Fig.1ではスラスト係数（K_T；○）、トルク係数（K_Q；△）ともマークはほぼ重なっており、高い繰り返し精度があることが示されています。このデータより計算されたプロペラ単独特性の誤差は、K_T、K_Qでは約0.6%、プロペラ単独効率で0.5%程度となります。

2.3　抵抗・自航試験の繰り返し計測

抵抗・自航試験の繰り返し精度を評価する場合、ITTCが推奨している不確かさ解析を行うのが一つの方法です。しかしここではより厳しい評価方法として、異なる時期に行われた同一模型船、同一載貨状態の水槽試験結果を集め、その結果を比較することにより繰り返し試験精度を検討してみました。

繰り返し試験のまとめに使用した模型船は、抵抗試験では10隻（0.50 <C_B< 0.90）、14載貨状態、自航試験では9隻（0.50 <C_B< 0.90）、12載貨状態です。それぞれの載貨状態の試験間隔は、最小で51日、最大で681日、平均でも400日でした。従ってこの繰り返し試験の結果には、②～⑤の誤差の他にも、水槽の環境変化（水温、気温、湿度、etc.）に基づく誤差、模型船の経年変化による誤差なども含まれていることになります。

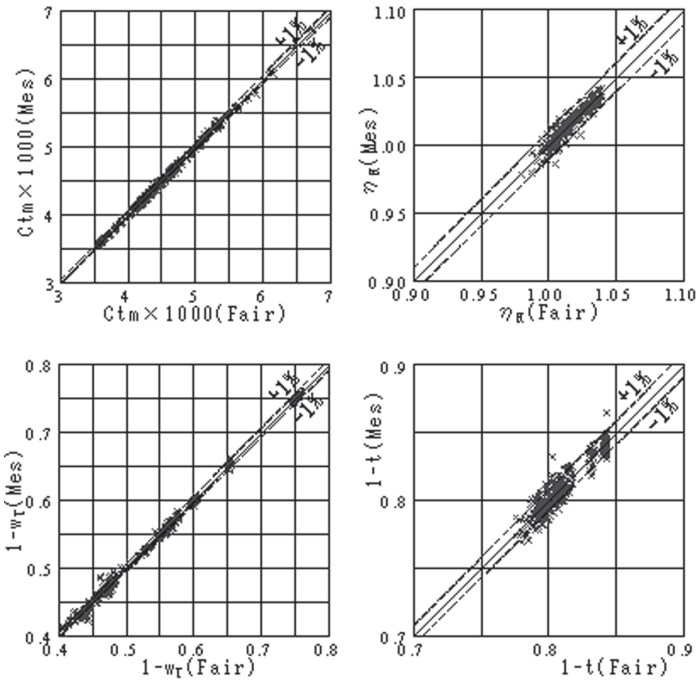


Fig.2　Repetitious accuracy of resistance test and self propulsion

繰り返し試験の解析は以下の手順によりました。

1）同一模型船、同一載貨状態で複数回行われた試験により得られる全ての計測点を用いて、フルード数（Fn）ベースの平均線を作成する。
2）この平均線上で個々の計測点（Mes）に対応する値（Fair）を求める。
3）MesとFairの差を誤差と定義する。

全抵抗係数（Ctm）、推力減少率（1-t）、有効伴流率（1-w_T）、船後プロペラ効率比（η_R）について、以上の手順で求めたMesとFairの値を比較してFig.2に示します。参考までに図中には誤差±1%の線を1点鎖線で示しました。Ctmの計算に際しては、水温を15℃とした場合の摩擦抵抗係数を用い、造波抵抗係数と形状影響係数から15℃のCtmの値を計算し、水温の影響を補正しています。自航要素（η_R、1-t、1-w_T）に関しては、特に水温の修正は行っていません。

Ctmの誤差はほぼ1%以下となっています。自航要素の誤差も大部分は1%以下ですが、一部に1%を超えるものもあります。特に1-w_Tの小さい領域での誤差が大きく、肥大度が大きい船型では船尾の流れが不安定になり、それが1-w_Tのバラツキにつながっている可能性が窺えます。

3. おわりに

以上の結果より、抵抗要素、自航要素、個々の計測精度は年間を通じてほぼ±1%程度であることが分かりました。これは計測器（抵抗動力計、自航動力計）のカタログ仕様が0.5%FSであることを考えれば、それよりやや大きい程度で、ほぼ妥当な値と考えられます。しかし、個々の計測値で±1%の誤差がある場合、そこから計算される馬力には最大数%の誤差が含まれる可能性があるということになります。多くの場合、誤差どうしがキャンセルし合い、結果として1～2%程度の誤差に留まることとなりますが、今後EEDI発効に向けて、更なる精度向上を目指すことが課題となります。

（試験センター技術部　金井　健）

新定期船「とびしま」が就航
酒田～飛島航路

1．はじめに

飛島は酒田港より北西に約39km、山形県と秋田県の県境より西に約28kmに位置する山形県唯一の島であり、周囲約10.2km、面積約2.7㎢の小さな島に300人程度の人々が生活しています。

本島は都島、渡島、分之島、鶴路島、潮島、豊島、とど島と変わり現在の飛島という名称になりました。飛島では縄文時代前期の遺物が発見されており、遺跡には北方系と南方系が混在している特徴があることから、その時代から重要な文化の交流点だったとの見方もあります。

酒田市は、酒田港と勝浦港間において定期船「ニューとびしま」を運航してきましたが、同船の船体老朽化が進んでいることや多様化する利用客のニーズに対応するため、平成19年度新造船基本計画策定及び基本設計の実施に引き続き、3ヵ年をかけて新定期船「とびしま」を建造しました。

当センターは基本計画策定業務、基本設計及び建造監理を実施しましたので、以下に本船の概要を紹介します。

2．基本計画

飛島島民等で構成された検討委員会や定期船建造関係部課長会議を開催して新造船建造に関する検討を行い、以下の基本計画が策定されました。

（1）船の長さは、勝浦港の港湾事情、交通バリアフリー法、旅客数及び貨物スペース等を考慮して決定する。

（2）所要時間を10分以上短縮する。

（3）船体材質は、船体重量の軽量化（速力の向上）に適したアルミニウム軽合金製とする。

（4）旅客定員230名程度確保するため船型は双胴船型を採用する。

水面上から双胴間船底部までの高さを十分とり船底衝撃緩和を図る。

（5）貨物積載重量は15t 以上とする。

（6）荷役用クレーンは岸壁に設ける。

3．船舶の概要

（1）工　程

起　　工	平成21年4月16日
進　　水	平成22年6月28日
竣　　工	平成22年7月18日

（2）主 要 目

船　　質	アルミ合金製
全　　長	39.41m
垂線間長	36.00m
幅　（型）	10.00m
深さ（型）	3.80m
満載喫水	1.52m
総トン数	253トン
航行区域	限定沿海
最高速力（4/4）	25.1ノット
航海速力	19.0ノット
最大搭載人員	238名
旅　客	230名
船　員	5名
その他	3名

（3）船体部主要機器

操舵装置	2組
電動油圧式ウインチ	2台
キャプスタン	2台
バウスラスター	2台
揚錨用ダビット	1台
冷暖房装置	2台
汚物処理装置	1台
バリアフリー設備	1式
救命・消防設備	1式
貨物スペース	1式
オーニング･ベンチ	1式

（4）機関部主要機器

操舵室操縦警報盤	2式
機関室警報操作盤	2式
主機関　高速ディーゼル機関 連続最大出力1,740 kW ／基	2基
逆転減速機 Vドライブ式マリンギャ	2基
発電機関　88.3kW（120PS）	2基
5翼固定ピッチプロペラ	2個
機動通風装置	4台
油水分離機	1台
ポンプ類	1式

（5）電気部主要機器

1）電源装置・配電装置

主発電機	100kVA	2台
変圧器	15kVA	1台
蓄電池	200Ah	4群
充電装置		1式
陸電受電箱 AC220V/150A		1式
雑用空気圧縮機		1台

2）航海灯・照明装置

航海灯類	1式
探照灯	1台
投光器	4台

3）航海計器・通信装置等

主副レーダー	各1台
GPSプロッター	1台
国際VHF無線電話装置	1台
船舶電話装置	1台
業務用陸船間連絡用無線電話	1台
船首方位伝達装置	1台
磁気コンパス	1台
船内指令装置	1式
第三種汽笛（電子ホーン）	1台
ワイヤレス送受信装置	1式
エンジンテレグラフ	1式
船内電話装置	1式
火災警報装置	1式
監視カメラ装置	1式
ワイパー（熱線入り）	5式
風向風速計	1台
テレビ装置	4台

4. 特徴

（1）高速化

船質を耐食アルミニウム合金製として船体重量の軽減化を図るとともに、過去に実施した模型船による水槽試験データに基づく検討を行った結果、試運転最大速力（4/4）において25.1ノットを記録して高速化が図られています。

（2）船首船底衝撃緩和対策

本船は、双胴間船首船底部にセンターハル（突起物）を設け、冬季の海象状況が厳しい日本海での航行時の船底衝撃緩和対策を講じています。

（3）快適性

客室は広めの通路と椅子席を採用するとともに、十分な防音・振動対策を施工して快適な居住空間を提供しています。また、遊歩甲板には十分なスペースを確保してベンチ席を設け、雄大な鳥海山や飛島の風景が楽しめるよう、観光客に対するサービス向上が図られています。

（4）交通弱者に優しい船

酒田港及び勝浦港岸壁にはバリアフリー基準に適合したタラップが設置されているとともに、船内居住区画においても客室出入り口近くにバリアフリー椅子席及び車椅子置き場を配置し、客室前方の大型テレビモニターのほか、バリアフリー椅子席の前方にもテレビを設置して交通弱者に対する配慮がなされています。また、出入り口の段差解消装置をはじめとするバリアフリー法に適合する諸設備を設け、多目的便所も設備されており、交通弱者の方々でも満足のいく船旅ができるよう配慮されています。

操舵室

客室

5. おわりに

本船の基本計画策定、基本設計・建造監理業務を進めるにあたり、常に積極的なご支援とご高配を賜りました酒田市殿、酒田市定期航路事業所殿に対し厚くお礼申し上げます。

また、瀬戸内クラフト株式会社殿が、高度な技術と誠意をもってご尽力頂いたことを付記します。

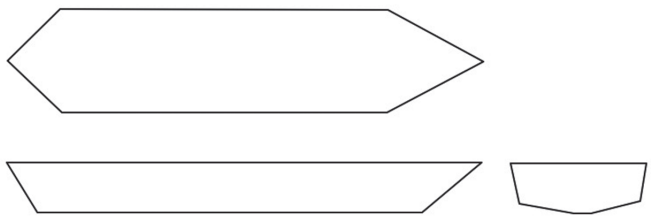
（技監　太田　悟）

新しい模型船製作法

筆者が工学部の学生だったころ、造船会社に依頼した特別講義で右に示すような演習問題が出されました。製品（立体）と図面（平面）の関係を理解する訓練として出題されたものですが、問題に取り組みながら平面だけの構成でもけっこう船らしく見えるものだなと感心した記憶があります。（いい問題なので時間のある方は挑戦してみて下さい）

以来30年近い年月を経て、この「船を平面のみで構成される多面体として捉える」という考え方が模型船製作に役立っています。以下にSRCが採用している新しい模型船製作法を紹介します。

問題：下記の図は船の形をした立体の投影図です。不足している線を補って図面を完成させなさい（但し表面は全て平面で構成されているものとします）



1．模型船工作法と課題

水槽試験用の模型船は木材、蝋（パラフィン）などの素材を加工して製作されます。SRCでは木材とパラフィンの長所を組合せた通称「パラウッド」と呼ばれる方式の模型船を主に製作しています（SRCニュースNo.66参照）。

この方式は図－1に示すように、鋳物を製造する方式と同様に釜で解かしたパラフィンを型に流し込んで作ります。但し模型船の場合、内部は空洞にするので内型と外型が必要となります。鋳物と異なるのは、精密な船体形状に仕上げるため、型から出した後、表面形状をNC切削機で正確に削り出すという方法を採ります。

外型はパラフィンが冷えて固まれば不用となりますが、内型はそのまま模型船の構造部材として機能できるように作ります（これがパラウッド方式の特徴です）。この内型はパラフィンの厚さ分だけ小さく作りますが、見た目は木製の模型船です。外型も凹凸は逆ですがやはり船の形をしています。SRCで作る模型船は殆どが大型船の縮尺模型で長さが6～7m程度あります。これらの船は全て船型が異なる上、前後部は曲面で構成されているので、模型船の内/外型を精密に作るには非常に高度な技能を必要とします。

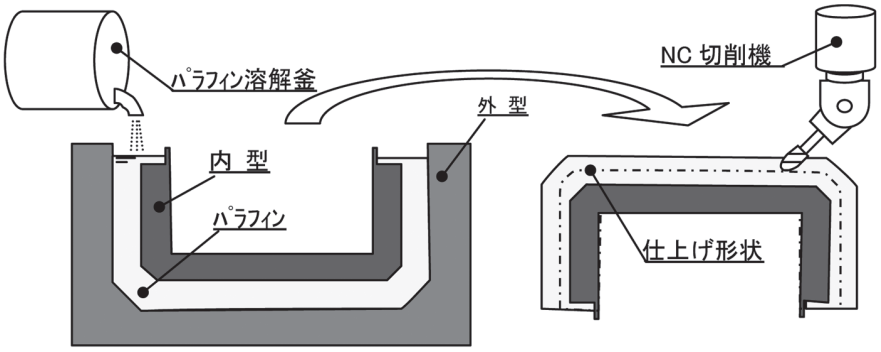
SRCでも長年ベテランの職員がこの作業に携わってきました。しかしこの分野でも世代交代の波は確実にやってきます。そこでSRCでは数年前より比較的経験の浅い職員でも作れる模型船製作法の開発に取り組んで来ました。

2．自在外型の開発

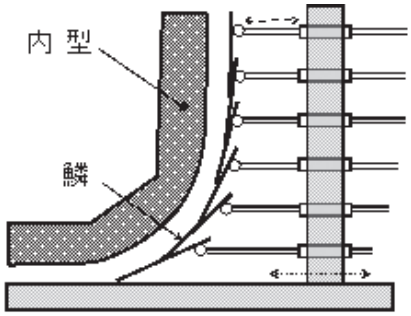
まず着手したのは外型の簡素化です。

外型はNC加工分だけ大きめに作る必要がありますが、この条件さえ満足すれば形状は大雑把でも、後はNCが仕上げてくれます。但し外型が大きすぎるとパラフィンの切削量が多くなり加工時間が長くなるので、製作工程全体で見て最も合理的な工作法が求められます。

この観点から開発されたのが自在外型です。この自在外型については既にSRCニュースNo.64の背表紙で紹介していますが、基本的発想は図2に示すように船体の曲面部を“鱗”と呼んでいる小さなステンレス製の平板を連続的に重ね合わせることにより擬似曲面を形成できるようにしたもので、船型にもよりますが入社1－2年の職員でも1人で1－2日程度でセットできます。



図－1　パラウッド模型船の製作法

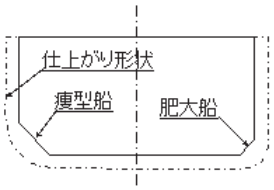


図－2　自在外型の機構

3. 内型の簡素化

次に内型についても曲面を平面の組合せで近似して工作を簡素化する工法を実用化しています。

一般の商船の船型は水線下の形状で分類すると殆どの船がコンテナ船等の痩型船とタンカー等の肥大船の2種類に大別できます。しかし中央断面は2種類ともビルジサークルの大きさが異なるだけで形状は図－2に示すように四角形の下部コーナーを45度にカットした六角形で近似できます。特に肥大船では平行部が長いので、同じ断面で船体中央部1/2L程度が製作できます。あとは船首尾の曲面の近似方法がポイントとなります。

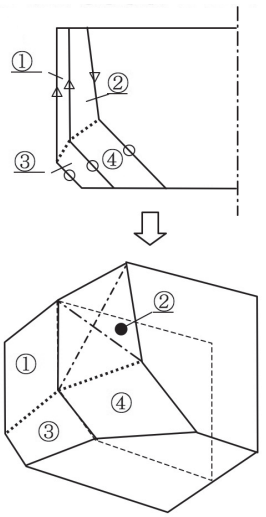


図－3　船体中央断面の多角形近似

4. 船体曲面の平面近似

1）平面近似の考え方

SRCでは標準サイズの模型船を製作する場合、通常1/20 St.（ステーション）にフレームを入れます。船体曲面を平面で近似するということは図－4のようにフレーム形状を多角形で近似し、この多角形の頂点を長さ方向に直線で結んでできる面（図中①②③④）が基本単位となります。



図－4　曲面の平面近似の考え方

この場合隣接するフレームラインが平行であれば平面①③④が貼れますが、捩れがある場合②は対角線で2分割した三角形にしないと平面が貼れません（この場合対角線をどちらにとるかで曲面の凹凸が変わります）。船首部の曲面はほぼこの考え方で近似できます。最も難しいのが船尾形状です。

2）痩型船型の船尾形状

痩型船型の船尾形状の平面近似例を図－5に示します。船尾にはシャフトスペースという特異形状が存在しますが、これを付加物として除外して考えれば、船尾の形状は類似断面が緩やかに傾斜している所謂バトックフローの船尾形状が多くあります。

3）肥大船型の船尾形状

平面近似の中で最も難しいのが肥大船型の船尾形状です。図－6に平面近似の一例を示します。

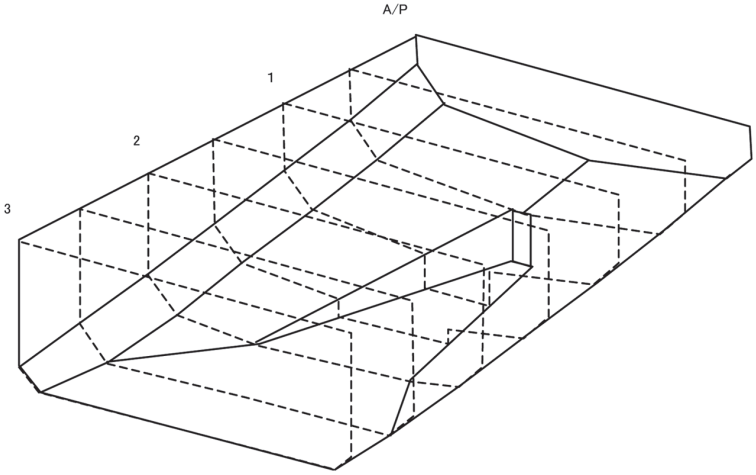
肥大船は短い長さの間にきつい捩れが入っているものが多いので三角形への分割が必要となります。この他に捩れが少ない場合に薄手の柔軟な板材で単純な捩れを入れる方法もあります。

5. 特殊模型船製作への適用

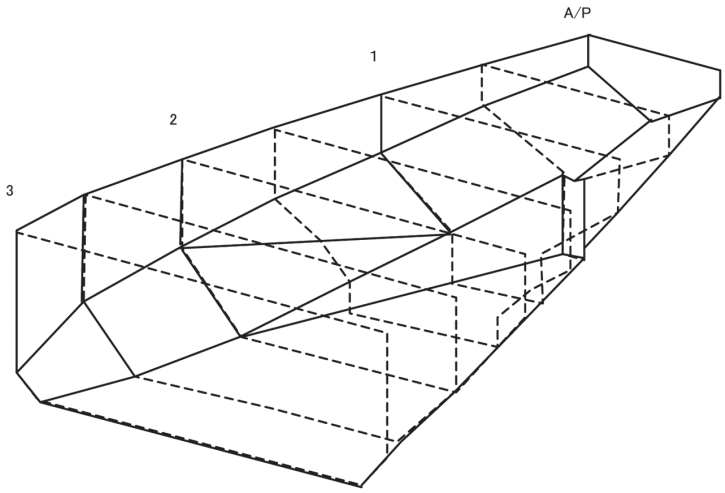
以上で紹介した製作法の当初の目的は作業の簡素化でしたが、予想以上の成果もでています。例えば内型に適用した場合には平面の構成なので厚板が使用でき非常に堅牢なものができるので、従来木船が主流だった波浪中試験やキャビテーション水槽試験用にもこの工法で作ったパラウッド式模型船が使用されています（木船は環境保護の流れからも材料の入手が困難になっています）。

SRCでは時代のニーズに合った模型船製作を追及し続けています。

（試験センター試験部　島宗誠一）



図－5　船尾部の平面近似例（痩型船）



図－6　船尾部の平面近似例（肥大船）

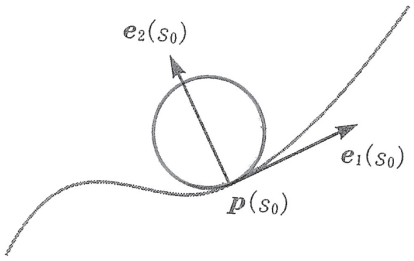
船型の数式表示について（5）

はじめに

SRC News No.82−84では、船体曲面を関数Y（x,z）で表示し、曲面幾何学特性の式を導き、曲面創生や曲率分布等の計算例を紹介しました。本稿では、測地線について、これまでの復習を含めて解説します。

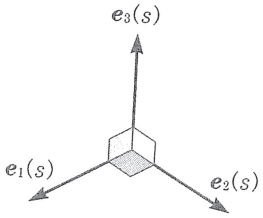
1．曲線の曲率とは？

曲線に接線を描き、直角に立てた法線上に中心を置いて曲線に接する円弧を描きます。円弧の半径の逆数が曲率です。



図−1 曲線の接線と法線

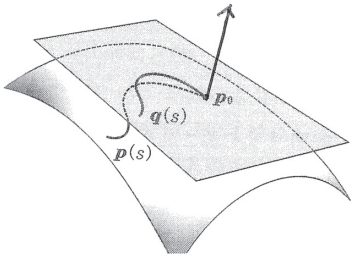
数学は「曲率は曲線の2階微分」と定義します。曲線の微分、即ち接線e1と法線e2との関係を表す式、ei, e1 = 1, e2.e2 = 1, e1.e2 = 0のうち、前2式の微分e1'e1 = 0, e2'e2 = 0は、2階微分e1'、e2'とe1、e2が直交、e2, e1と平行を意味しますので、e1' = κe2と書け、残った微分e1'.e2 + e1.e2'からe2' = −κe1となります。（e1', e2'）が曲率ベクトル、κが曲率です。空間曲線では、接線e1主法線e2に直交する従法線e3 = e1Xe2方向の捩れ率τが現れ（図−2）、e1' = κe2, e2' = −κe1 + τe3、e3' = −τe2となります。



図−2　Frenetの標構

2．曲面の基本形式

曲面の場合は、接線は接平面となり、曲面は、P(u,v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))、接平面は、（Pu, Pv）、直交する法ベクトルは、e = Pu×Pv/IPu×PvIと定義されます。ここで、Pu, Pvは、変数u, vの1階微分、Puu, Puv, Pvvは2階微分、Xは外積、・は内積、｜｜は絶対値を示します。



図−3　接平面と法ベクトル

次に、第1基本形式（Ⅰ）と第2基本形式（Ⅱ）が定義されます。

(I) = dP.dP = E dudu + 2F dudv + G dvdv

(II) = -dP.de = L dudu + 2M dudv + N dvdv

dP = Pudu + Pvdv, de = eudu + evdv

E = Pu.Pu、F = Pu.Pv、G = Pv.Pv

L = Puu.e = −Pu.eu,

M = Puv.e = −Pu.ev = Pvu.e = −Pv.eu

N = Pvv.e = −Pv.ev

（Ⅰ）式は曲面に沿う微少長さの2乗に、（Ⅱ）式は曲面に垂直方向の変位に対応し、特に、（Ⅰ）式は、1854年、27歳のリーマンが、ゲッチンゲン大学での教授就任講演で、第1基本形式に基づく幾何学を提唱した記念にリーマン計量とも呼ばれます。

3．曲面の曲率とは？

「曲面に沿う曲線P(s)の2階微分P”（s)が曲面の曲率」の定義です。

P”（s) = Pu(d^2u/ds^2) + Puu$(du/ds)^2$ + 2Puv(du/ds)(dv/ds) + Pvv$(dv/ds)^2$ + Pv(d^2v/ds^2)、Puu, Puv, Pvvを、クリストフェル記号「uuu〜「vvvを係数とする（Pu, Pv, e）の1次結合で表わすガウスの公式により書き換えます。

P”（s) = Pu(d^2u/ds^2 + 「uuu$(du/ds)^2$
+ 2「uuv(du/ds)(dv/ds)
+「vuv$(dv/ds)^2$)
+ Pv(d^2v/ds^2 + 「uvu$(du/ds)^2$
+ 2「uvv(du/ds)(dv/ds)
+「vvv$(dv/ds)^2$)
+ e(L$(du/ds)^2$ + 2M(du/ds)(dv/ds)
+ N$(dv/ds)^2$)　　----------(3-2)

接平面（Pu, Pv）成分が測地的曲率、直交ベクトルeの成分が法曲率、即ち、第2基本形式です。暫し、法曲率の復習です。

曲面上（ξ,η）で、リーマン計量に対する法曲率の最大及び最小値を求めます。

$\lambda = (L\xi^2 + 2M\zeta\eta + N\eta^2)$
$/(E\xi^2 + 2F\zeta\eta + G\eta^2)$

上式の変分 = 0として得られる方程式が解を持つための条件から導かれる式

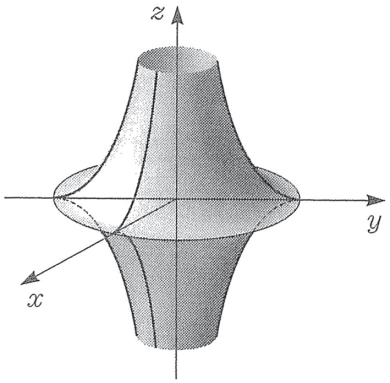
$(EG - F^2)\lambda 2 - (EN + GL - 2FM)\lambda$
$+ (LN - M^2) = 0$の解$\lambda = \kappa 1, \kappa 2$を最大、最小主曲率と呼び、それらの積をガウス曲率K、平均曲率Hと定義します。

$K = \kappa 1.\kappa 2 = (LN - M^2)/(EG - F^2)$

$H = (\kappa 1 + \kappa 2)/2 = ((EN + GL - 2FM)/2(EG - F^2)$

なお、半径aの球面のガウス曲率は、$1/a^2$、平均曲率は1/aです。

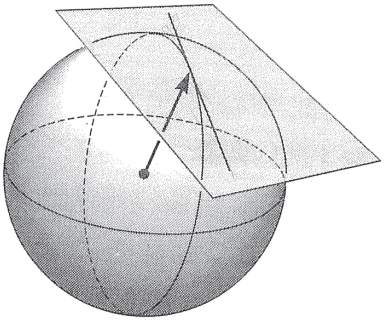
K>0は曲面が凹凸状、K<0は鞍状、K = 0は平坦を意味し、$\kappa 1 = \kappa 2$の場合は臍と呼びます。K<0の例として、図−4に擬球面を示します。ところで、曲率の式の分母、$(EG - F^2)$は正値で、凹凸等を決めるのは形式上第2基本形式ですが、実は、第一基本形式の存在が前提でした。「曲面の特性は第1基本形式により決まる。」の証明は、Theorema egregium（最も素晴らしい定理）とガウスに言わしめた数学史上の金字塔とされています。



図－4　K＜0の曲面の例（疑球面）

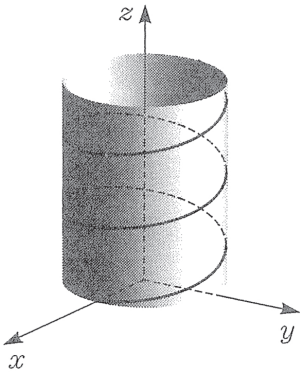
4. 測地線とは？

「曲率の接平面成分が0となる曲面上の曲線」が測地線の定義です。即ち、曲面に接する平面への投影線が直線であれば曲線は測地線です。（図－5）



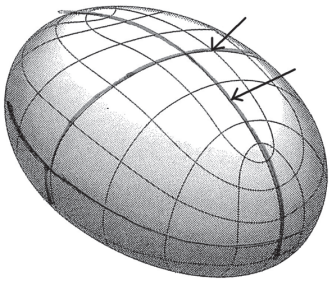
図－5　球面の測地線

例として、円柱に沿う弦巻線を示します。（図－6）。又、測地線は、曲面上の最短線でもありますが、豆科植物が、最短の弦巻線に沿って成長する様子に自然の摂理を感じます。



図－6　測地線の例（弦巻線）

楕円球面の測地線は座標軸よりなる面（x－y, y－z, z－x）との交線です。（図－7）



図－7　楕円球面

5. 測地線の計算式

直交座標（x, y, z）で、y = Y（x, z）で表される曲面に沿う曲線が測地線である条件を求めます。（3-2）式から次の連立方程式が得られます。

$d^2x/ds^2 + 2\Gamma xxx(dx/ds)^2$
$+ 2\Gamma xxz(dx/ds)(dz/ds)$
$+ \Gamma zxz(dz/ds)^2 = 0$ ----------(5-1)

$d^2z/ds^2 + \Gamma xzx(dx/ds)^2$
$+ 2\Gamma xzz(dx/ds)(dz/ds)^2$
$+ \Gamma zzz(dz/ds)^2 = 0$ ----------(5-2)

クリストフェル記号は以下の通りです。

$\Gamma xxx = YxYxx/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
$\Gamma xzx = YzYxx/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
$\Gamma xxz = YxYxz/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
$\Gamma xzz = YzYxz/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
$\Gamma zxz = YxYzz/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
$\Gamma zzz = YzYzz/(1 + Yx^2 + Yz^2)$
----------(5-3)

以上の式より、半径aの円柱に沿う弦巻線（図－6）について調べます。

弦巻線の式はx = acost, y = asint, z = bt長さsとパラメータtの関係、

$ds/dt = (a^2 + b^2)^{1/2} = c^{1/2}$より、

x = acos(s/c), y = asln(s/c), z = (b/c)s と書き換えます。クリストフェル記号は、

「$xxx = x/(a^2 - x^2)$ 以外は0となり、測地線の条件は

$d^2x/ds^2 + (x/(a^2 - x^2))(dx/ds)^2 = 0$

$d^2z/ds^2 = 0$　となり、x, zの式を代入すれば、弦巻線が測地線の条件を満たしていることが分かります。

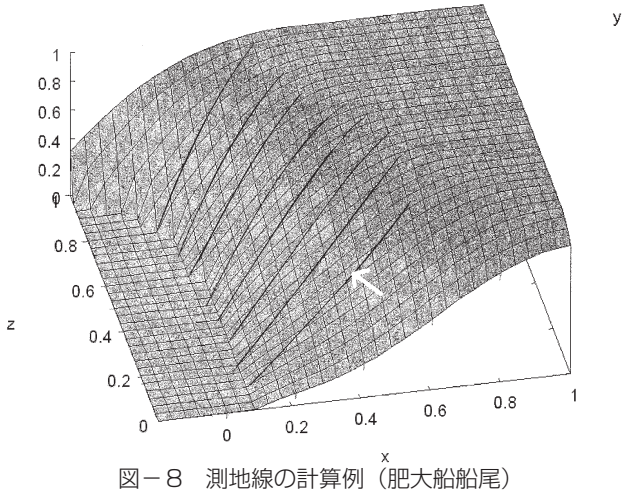
同様な方法で、球面の測地線は、赤道と子午線、楕円球面（図－7）は、座標軸の作る面と交わる3本の測地線を持つことが証明出来ます。

6. 船体曲面上の測地線

設定した曲面表示式からクリストフル記号を計算し、連立微分方程式を解いて、測地線を求めます。肥大船の船尾部曲面を対象の計算例を図－8に示します。演算の便宜上、範囲を喫水線下の曲面部に限定し、微分値が不連続或いは∞となる箇所の無い連続な曲面表示式を作りました。計算上の誤差はありますが、船尾部曲面（厳密には、船体近似曲面）の測地線が得られたと思います。

いずれの測地線も、船尾プロファイルの端から、曲面に沿って斜め上方に直線状に進み、Side Flat End Line近くで曲がり、船側平坦部に入る傾向を示し、平板ガラスを翳せば直線に見えるようです。以上の様子は、船尾粘性流場の限界流線に似ており、弦巻線に見られる様な、自然の摂理を期待したくなります。

（技術顧問　武隈克義）



図－8　測地線の計算例（肥大船船尾）

（5）船の主寸法比と馬力係数

本号では船の主寸法比を変えた場合の馬力係数の変化について紹介します。

1．馬力係数の計算

図－1は、船の長さ／幅比がL_{PP}/B = 6.0、幅／喫水比がB/d = 3.0、方形係数がC_B = 0.60、0.80の場合の推進性能です（以下、総て計画満載喫水における性能）。これは、日本造船技術センターで実施した水槽試験結果から求めた形状影響係数、造波抵抗係数、自航要素に関する回帰式により計算しました。回帰式の船型に関する説明変数は、船の長さ、幅、喫水、排水量を組み合わせた係数（レベル1、SRC News No.80の P11参照）としました。より高レベルな船型要素の影響は考慮していませんので、長さ／幅比、幅／喫水比、方形係数が与えられた場合の平均的・標準的な性能ということが出来ます。

左側の図は造波抵抗係数r_W、全抵抗係数r_{TS}、馬力係数p’で、次式で定義されます。

$$r_W = R_W / \rho \nabla^{2/3} v^2$$
$$r_{TS} = R_{TS} / \rho \nabla^{2/3} v^2 = v R_{TS} / \rho \nabla^{2/3} v^3$$
$$p' = P / \rho \nabla^{2/3} v^3$$

R_W　造波抵抗
R_{TS}　全抵抗
P　伝達馬力
ρ　水の密度
∇　排水容積
v　船速

全抵抗係数は造波抵抗係数と形状影響係数からを求めることが出来ます。回帰式により求めた形状影響係数の例を図－2に示します。

馬力係数p’は、推進係数ηから

$$p' = r_{TS} / \eta$$
$$\eta = \eta_R (1-t) \eta_O / (1-w_{TS})$$

η_R　船後プロペラ効率比
1－t　スラスト減少係数
η_O　プロペラ単独効率
$1-w_{TS}$　有効伴流係数

で求まり、よく使用されるアドミラル常数C_{ADM}とはp’ = 5.36/C_{ADM}の関係があります。自航要素（η_R、1－t、$1-w_{TS}$）は回帰式で求めましたが、その例を図－1の右側に示してあります。プロペラ単独効率は全抵抗係数と自航要素から求めたプロペラ荷重度によって決まる効率を使用しました（図－3参照）。

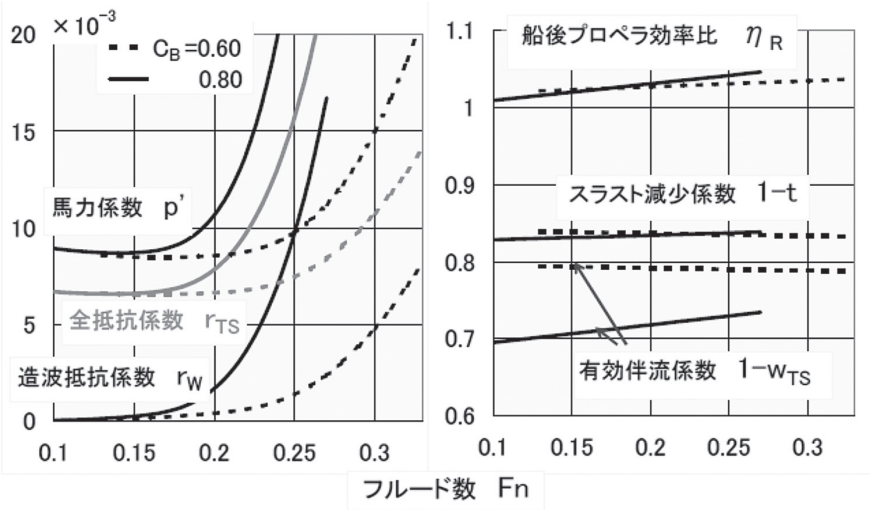
2．主寸法比を変えた場合の馬力係数

図－4に船の長さ／幅比、幅／喫水比、方形係数を変えた場合の馬力係数の例を示します。長さ／幅比、幅／喫水比を変えた場合は、方形係数がC_B = 0.60、0.80の二つの例を示します。

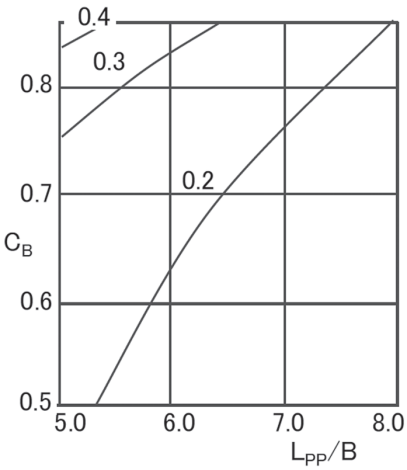
計算に用いた回帰式を作成するために使用したデータの主寸法比（計画満載喫水）の分布を図－5に□印で示しますが、図－4における長さ／幅比等の範囲はこの分布に基づいて決めました（●印）。

幅／喫水比と方形係数が共に小さい領域にはデータがあまりありません。長さ／幅比がL_{PP}/B = 5.6～6.4、幅／喫水比がB/d<2.75、方形係数がC_B>0.8の領域のデータが多くなっています。また、総じてC_B>0.8のデータが多くなっています。これらには、日本で建造されてきた船種の特徴が反映されています。

図－4の上段の図をみると、長さ／幅比が馬力係数に及ぼす影響は小さいことが分かります。ただし、このことは、長さ／幅比を変えても所要馬力や経済性が変わらない、ということを意味しません。船の長さと速力を同じにして、また図に示したように幅／喫水比も同じにして、



図－1　L_{PP}/B = 6.0 B/d = 3.0 C_B = 0.60, 0.80の船型の推進性能（L_{PP} = 200m）



図－2　形状影響係数K（B/d = 3.0）

長さ／幅比L_{PP}/Bを変えた場合、船の排水量△はL_{PP}/Bの二乗に逆比例します。他方、馬力係数p’の違いは小さいので所要馬力Pは馬力係数の分母の$\nabla^{2/3}$に比例します。結局、排水量当りの所用馬力はL_{PP}/Bの2/3乗に比例します。

$$\triangle \propto (L_{PP}/B)^{-2}$$

$$P \propto \triangle^{2/3} \propto (L_{PP}/B)^{-4/3}$$

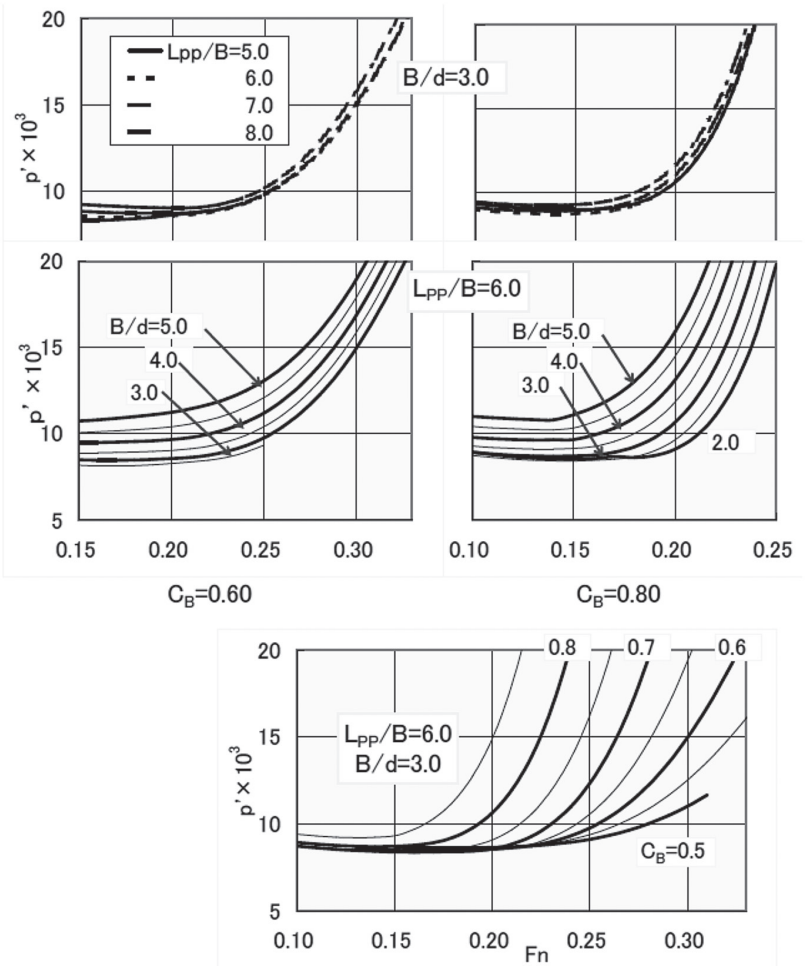
$$\therefore P / \triangle \propto (L_{PP}/B)^{2/3}$$

中段の図をみると、幅／喫水比を大きくすると馬力係数が大きくなることが分かります。$C_B = 0.60$の痩せ型船型の場合には、上下に平行移動したような形で変化していますが、$C_B = 0.80$の肥大船型の場合には、中高速領域での増大が顕著になっています。

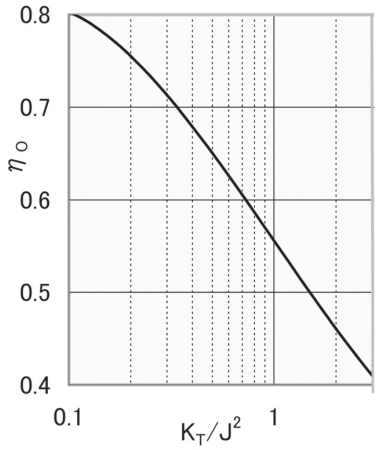
下段の図をみると、方形係数を大きくすると馬力係数が大きくなることが分かります。ただし、この大きくなる度合いはフルード数によって異なります。たとえば、フルード数が$Fn < 0.15$の低速領域では、方形係数が馬力係数に及ぼす影響はほとんどありませんが、馬力係数が大きくなり始めるフルード数が方形係数を大きくするに伴い低速側に移動しますので、より高速の領域では方形係数の大きい肥大船型の馬力係数が顕著に大きくなり、経済性が劣化します。

次回は、図－1の右図に例を示した自航要素について、主寸法比の影響を紹介します。

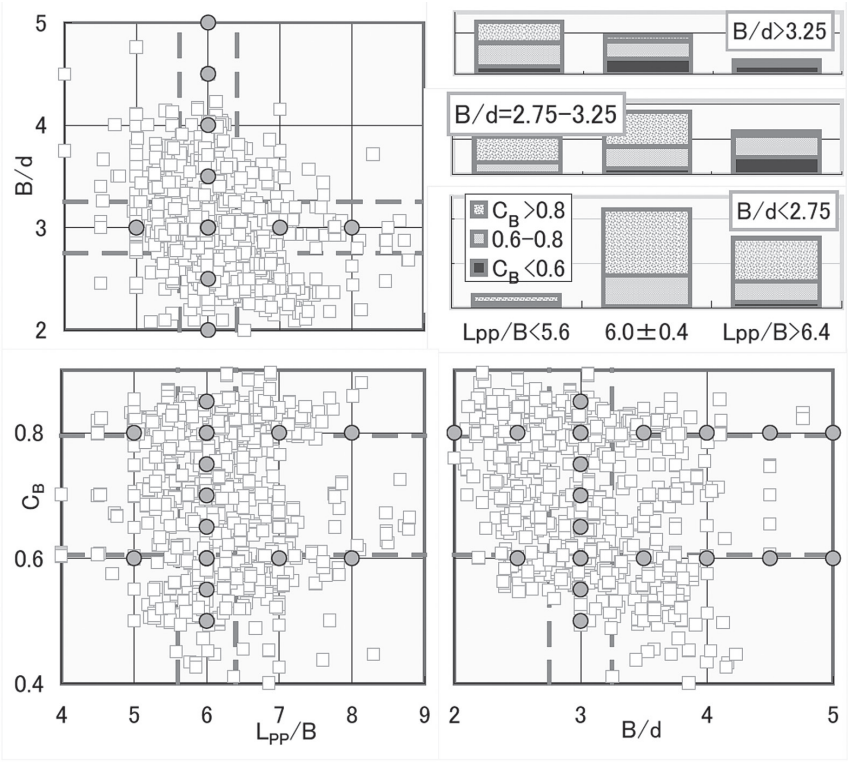
（技術顧問　佐藤和範）



図－４　主寸法比を変えたときの馬力係数（L_{PP} = 200m）



図－３　プロペラ単独効率（$a_E/Z = 0.1$）

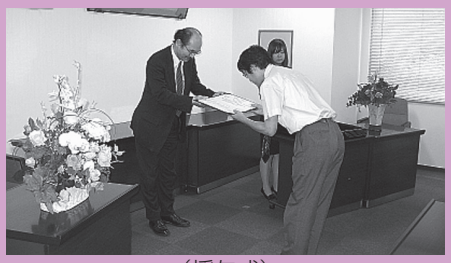


図－５　回帰式作成に使用した船型の主寸法比の分布

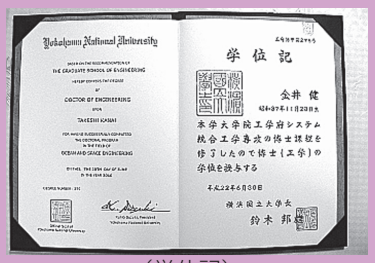
当センター技術部長代理 金井 健　博士号取得

当財団の試験センター技術部長代理金井健が、このたび、国立大学法人横浜国立大学大学院工学府博士課程後期を終了し、博士号を取得しました。

博士論文は「ニューラルネットワークを利用した船舶の推進性能推定」です。本研究の成果はSRC船型設計システム（SRC　Tips）の性能推定プログラムに反映される予定です。



（授与式）



（学位記）

■安全推進委員会

当センターでは、平成22年4月に、安全推進委員会を発足させ、職員の健康と安全についての活動を進め、作業現場の整理整頓、工作機器の保守点検等を実施し、15,000時間無事故記録を達成、継続中です。

安全標語（無事故記録）

編集後記

本紙の「SRC資料室」では、船型と推進性能の関係についての分析結果を累次報告している。4月号の報告によれば、船舶の推進性能は1970年代から今日までの40年間に約20%改善したという（CB=0.8の場合）。先達のご努力の賜である。

前述の改善は船舶の静水中性能についてであるが、いうまでもなく、船舶は静水中だけを航行する訳ではない。荒天中の航海では、まず速力を維持するために主機の出力を上げ、出力が上限に達した後なお厳しい荒天であれば、上限出力を維持しながらも速力は漸次低下することになる。

荒天中に航海速力をどの程度維持するかの判断は、現状ではシーマージンの設定に反映されている。シーマージンは、通常は常用出力の15～20%とする場合が多いが、定時性を重視する船舶については25%といった高い値を採用する場合もある。これら、高いシーマージンを取る船舶は、荒天時にも比較的よく速力を維持することができるが、主機出力が大きくなる分、荒天時の燃料消費量が増加する。定時性と省燃費のどちらを優先するかは、とりあえずは船主の経営判断の問題であり、技術者が正解の値を提案する段階にはなっていない。

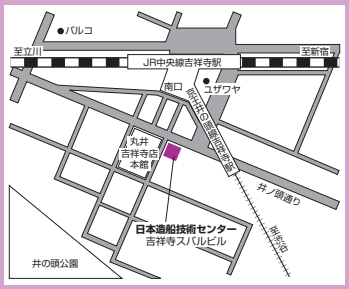
しかしながら、シーマージンは船舶の性能と燃料消費量に係わる重要な要素である。昨今、船舶のから排出される温室効果ガスについての議論が盛んであるが、議論が精緻になればなるほど、実海域性能の評価方法やシーマージンの合理的な設定方法の確立が望まれる。（K.M）

申し込みの受付

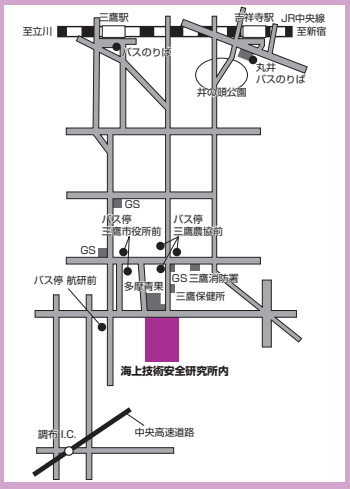
試験等の申し込み、問い合わせは下記までご連絡をお願いいたします。

〒180-0003　東京都武蔵野市吉祥寺南町1丁目6番1号
吉祥寺スバルビル3階
TEL　0422－40－2820
TEL　0422－24－3861（三鷹）

本　部（吉祥寺）



試験水槽



SRC

Shipbuilding Research Centre of Japan

財団法人　日本造船技術センター

http://www.srcj.or.jp