

Title	新旧丸子船の抵抗比較：模型による航行実験にもとづいて
Sub Title	Hydrodynamic resistance of the first- and second-generation Maruko-bune boats : a comparison based on towing tank experiments using scale models
Author	牧野, 久実(Makino, Kumi) 梅田, 直哉(Umeda, Naoya) 牧, 敦生(Maki, Atsuo)
Publisher	三田史学会
Publication year	2007
Jtitle	史学 (The historical science). Vol.76, No.1 (2007. 6) ,p.39- 55
Abstract	
Notes	論文
Genre	Journal Article
URL	http://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00100104-20070600-0039

新旧丸子船の抵抗比較

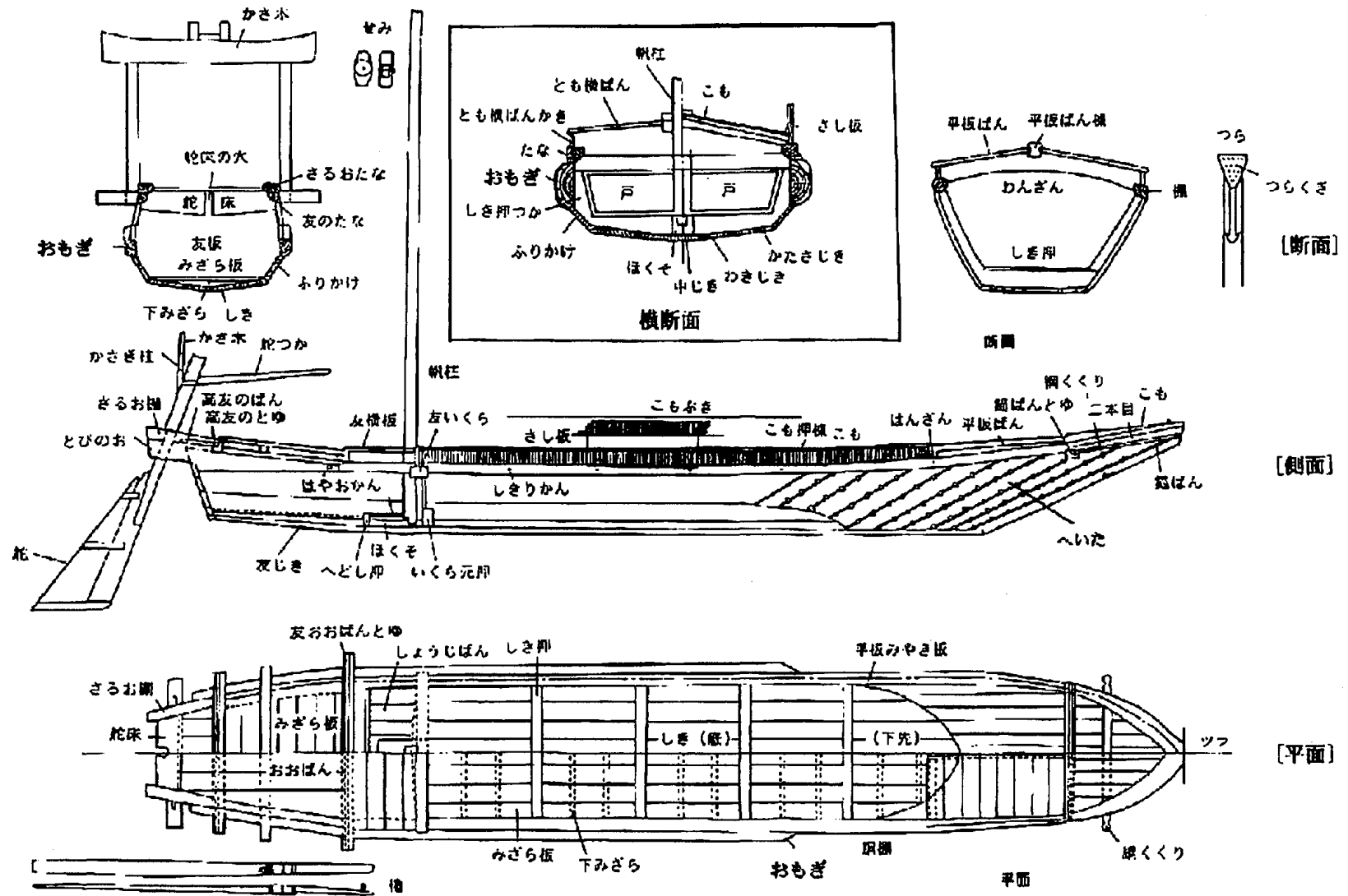
— 模型による航行実験にもとづいて —

牧野久実
梅田直哉
牧敦生

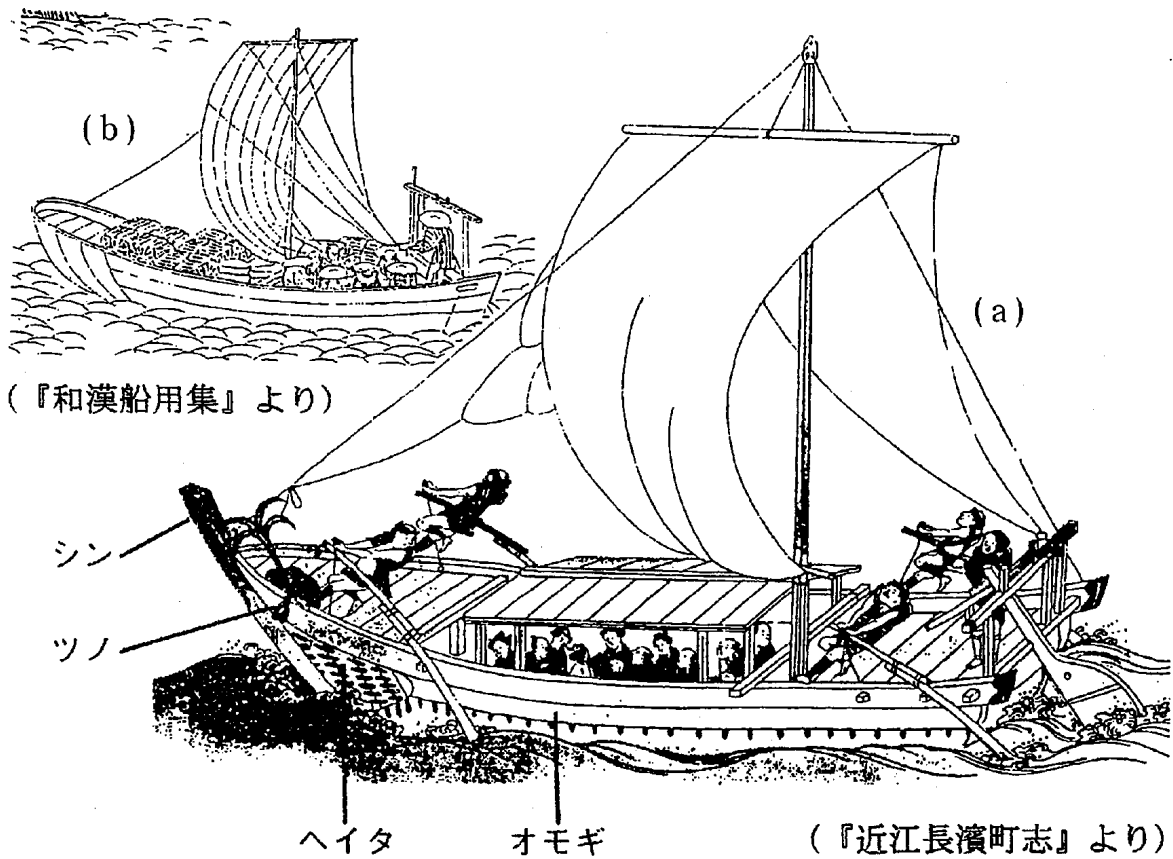
(1) 目的

丸子船は、江戸時代を中心におよそ半世紀前まで琵琶湖の輸送船として活躍していた木造の帆船である（第1図）。舷側部に杉の巨木を半裁した丸太（オモギ）が用いられていることから、丸木舟の発達型、いわゆる準構造船の一つとして位置づけられている。船大工は丸子船の舳先全体を船の「顔」とみなし、シン（水押）を鼻、綱くくりのツノの部分を目、そしてヘイタの上部に墨で描いた模様を目と呼ぶ。また、特にシンの先端部をツラ、則ち「顔」と呼ぶ。ところが、古文書に描かれた丸子船

の舳先は必ずしもこのようにシンを有するものばかりではないことが知られている。特に、『和漢船用集⁽¹⁾』では「其舟長く細く深くして、底より両側板丸くはぎ上げにて棚なし。上のはぎをおもぎと云う、水押も立板に丸くはぎ、舳は横舳にて大立横上あり。」とある（第2図—b）。史料からは、少なくとも十八世紀半ばより前には舳先の丸い丸子船が、十八世紀中頃には舳先の丸いものとシンを持つものの両方が存在し、十九世紀後半にはシンを持つ丸子船のみとなった、則ち、十八世紀から十九世紀にかけて丸子船の舳先の形が変化したということが考えられる。この点について牧野⁽²⁾は、船体にはたらく



第1図 丸子船一般構造図



第2図 船首の形状に見られる2つのタイプ

抵抗を減少させるために船体形状が変化したのではないかという仮説を立てた。この仮説を検証するため、二種の舳先を有する丸子船（以下においては船首がとがった構造を有する丸子船を「シン有丸子船」とし、また丸い船首構造のものを「シン無丸子船」として区別する。）の模型を用いて船舶工学抵抗推進論の見地から検証するための航行実験を行った。⁽³⁾そして得られた模型船の抵抗より、実船抵抗を算定し、実航行速度を推定した。さらにかつての丸子船の航路であった近江塩津〜大津間と長濱〜大津間を最短距離で航行した場合における所要時間を見積もった。

(2) 方法

船の抵抗推定にあたっては、粘性による剥離流の存在のため、図面の分析に加えて模型による航行実験が現在でも不可欠である。そこで、滋賀県立琵琶湖博物館所蔵の丸子船の木製模型をもとに実験用模型を作成し、大阪大学大学院工学研究科船舶海洋試験水槽において航行実験を行なった。

今回は速力性能の実験、特に異なる舳先の形状に

及ぼす船体抵抗の比較を行なうため、船体の形状を幾何学的相似に還元した模型が必要であった。このため、百石積丸子船の十分の一の模型からシリコン製の雛形を製作し、この雛形を用いてFRP製の模型二種を作成した。FRPの積層の厚さは模型船が実験により変形しない厚さとし、帆柱位置から前方五〇〜六〇センチメートルを除いて幅方向に部材を加えて補強した。

この仕様で二艘の同じ模型を作成し、うち一艘については、舳先を丸く仕上げた。その形状は江戸時代の絵図を参考にしたため、単に丸く仕上げたに留まる。まず、船底部であるシキの最も前面の部分を基準とし、シンのある舳先部分を垂直に切断した。そこへ内側からウレタンフォームを流し込み、発泡および乾燥後に丸く削った。さらに、その上から硬化剤を混ぜたポリエステルパテを厚めに塗り、乾燥後に左右の均衡がとれるよう少しづつ研磨しながら丸く仕上げた(写真1)。

双方の模型には、積荷を最大に積載した状況を想定し、オモギの上面に喫水線を書き入れた。また、帆柱と船首の位置に曳航用治具取り付け用の厚さ約二センチメートルのデッキをとりつけた。また、船首喫水線後方五〜一〇センチメートルほどの箇所には乱流促進用鋸(スタッ

ド)を打ち込んだ(写真2)。

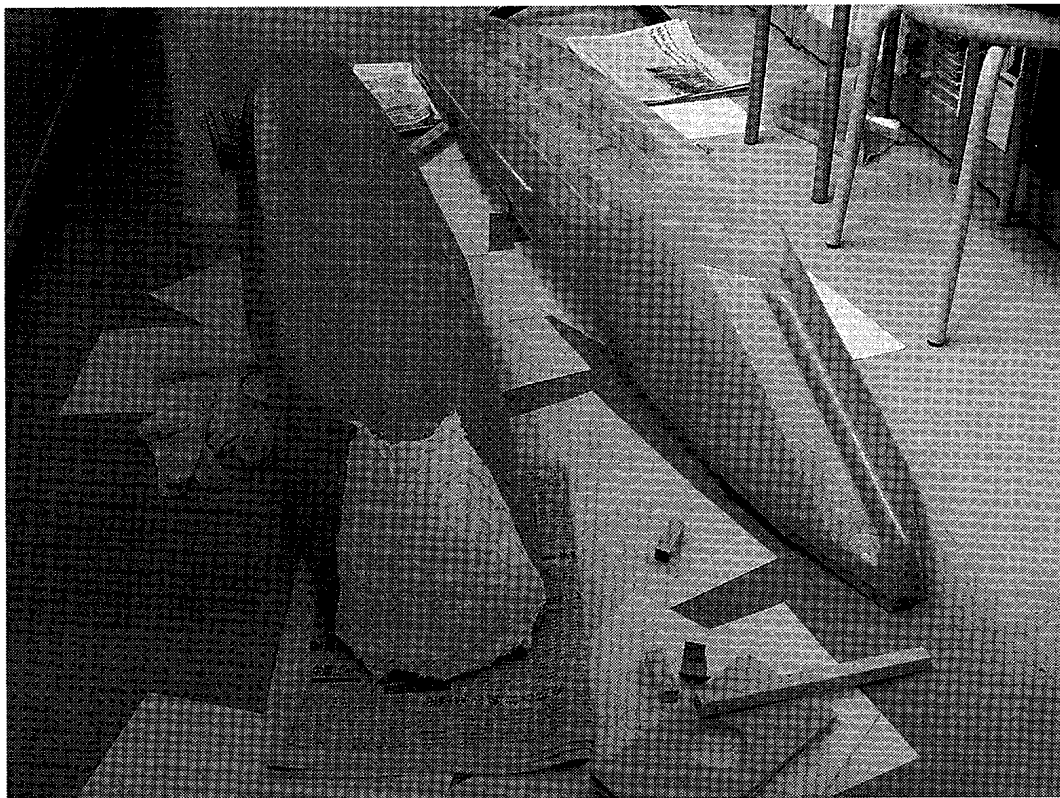


写真1 作成中の模型2種

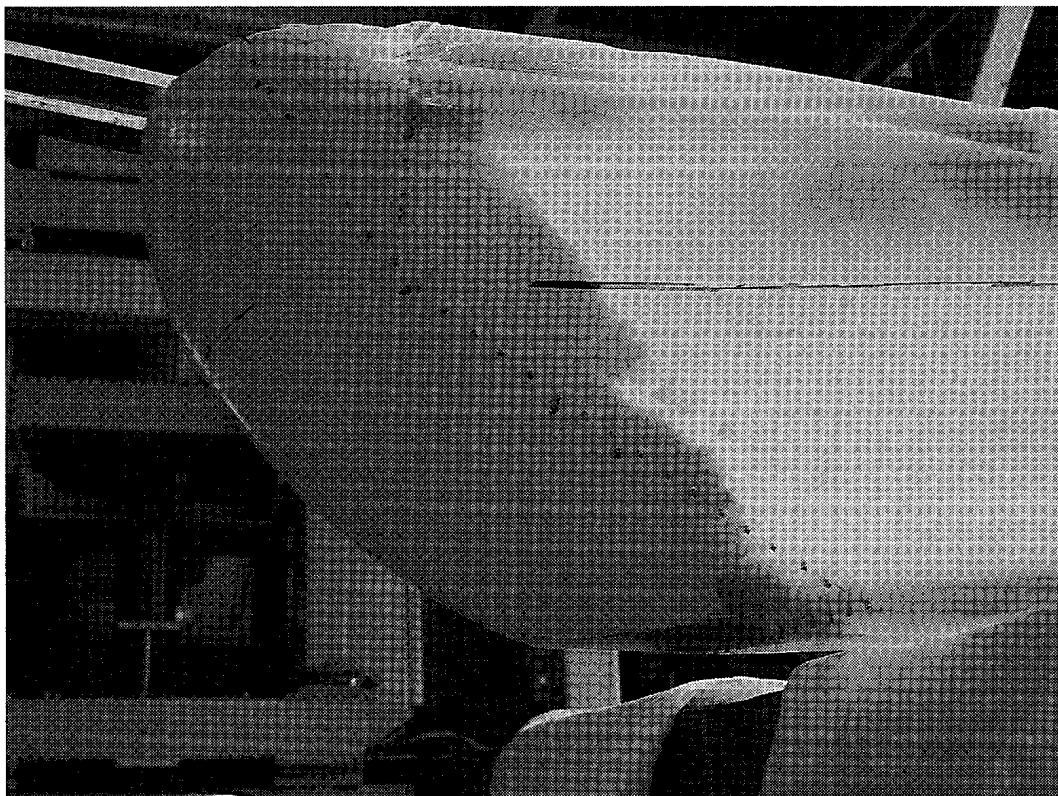


写真2 丸い舳先

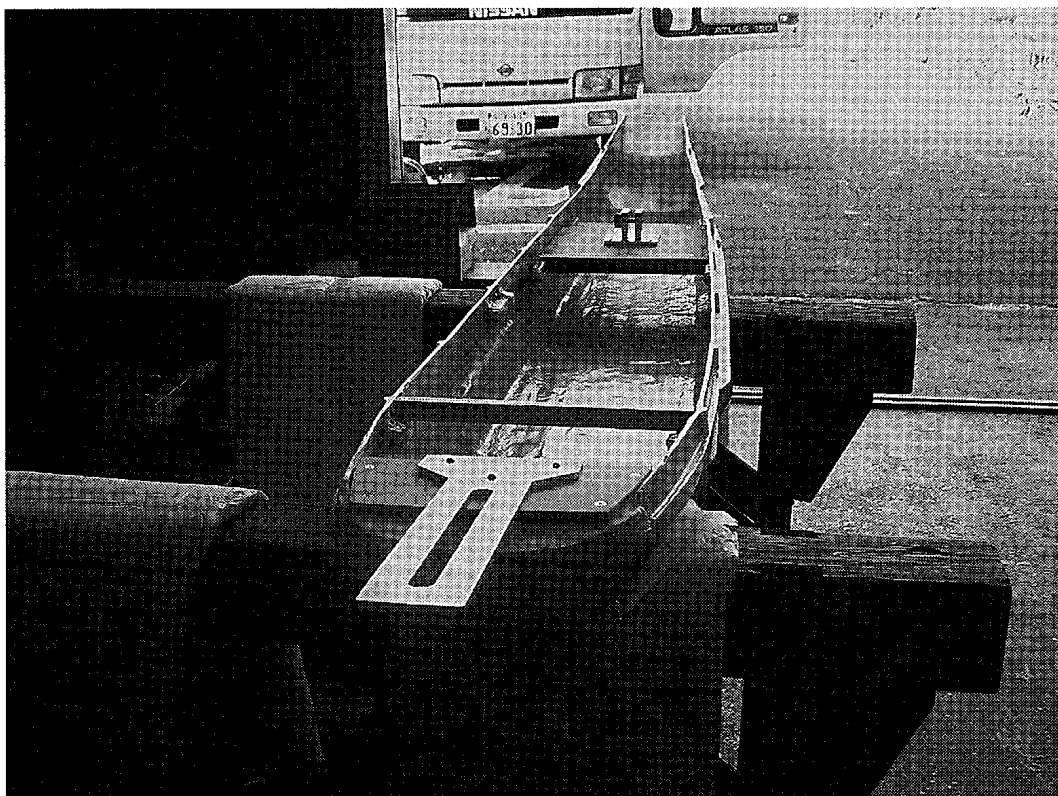


写真3 牽引具も取り付け完了

(3) 二種の丸子船の諸元

シン有丸子船とシン無丸子船の形状概念図を第4図に、模型船の要目を表1に、両丸子船の船体正面線図を第5図に示す。表1に掲げた要目に関しては、実船の図面から読み取って計算したものと、模型船から計測したデータが混在していることを付記しておく。また船体重量は指定した喫水線に合わせるように、バラスト(錘)を搭載した状態における重さである。第5図の船体正面線図において、船側部の丸いふくらみがオモギを示している。

表1 丸子船主要目

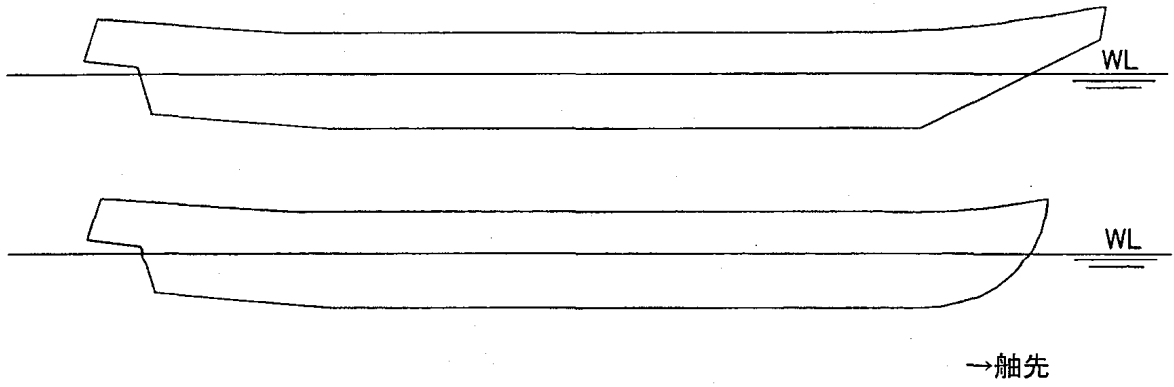
	シン有	シン無
実船水線長(m)	15.32	15.32
実船最大幅(m)	2.68	2.89
実船吃水(m)	1.06	0.959
縮尺	9.77	10.52
模型船水線長(m)	1.568	1.456
模型船吃水(m)	0.0925	0.0912
模型船浸水表面積(m ²)	0.5460	0.5303
模型船没水部体積(m ³)	0.0266	0.0250
模型船重量(kg)	26.6	25.0

実験に用いた両模型船の相違点は船首形状のみであり、その他の断面に関しては同一であったことを付記しておく。

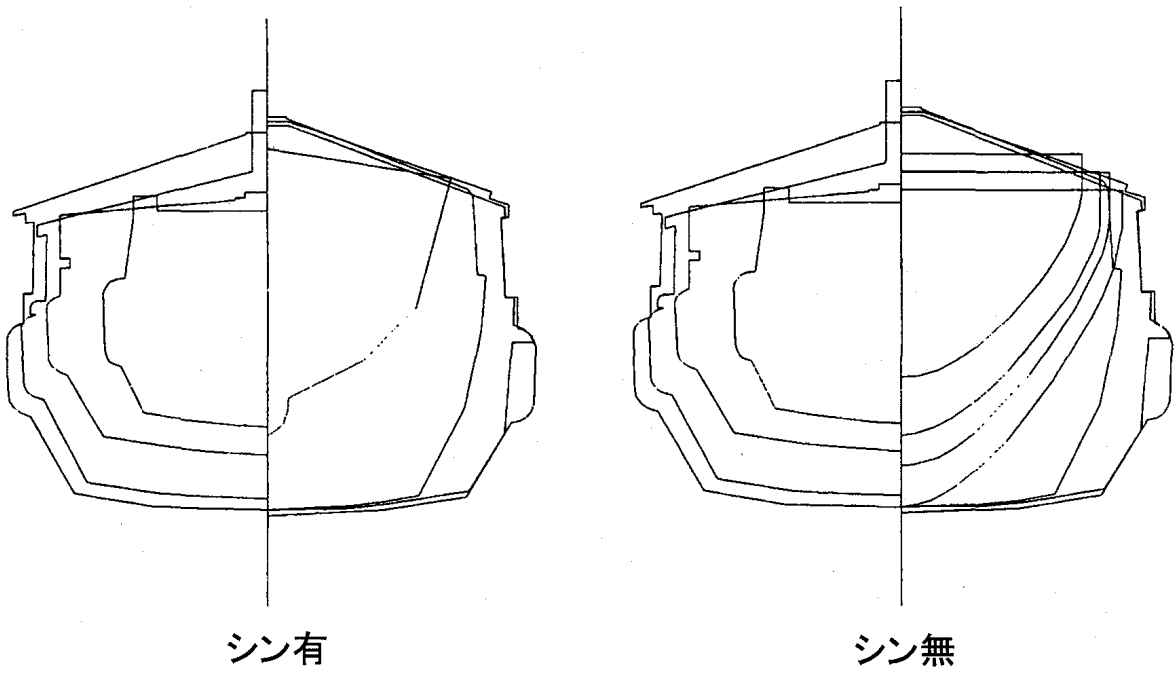
(4) 実験の経緯と造波抵抗に関する結果

実験を行なった水槽は、長さ百メートル、幅七・八メートル、水深四・三五メートルの矩形であり、最高速力毎秒三・五メートルの曳航台車を備えている。この水槽規模は今回の模型船のサイズに比べて十分に大きく、水槽の水深や幅の影響は無視できるため、琵琶湖を実船が帆走する状況を模擬できるといえる。また、速度変動の標準偏差は〇・二パーセント以下と、一定速度で航行する船の状態の再現に十分な性能である。

実験は、(1) あらかじめ模型に記入しておいた喫水線まで船体が浸水するよう、模型の内側にバラストを載せる(写真5)、(2) 模型を曳航台車に取り付ける(写真6)、(3) 模型を曳航台車により一定速度で曳引しその反力を抵抗として計測する(写真7)、という手順で行なわれた。模型と曳航台車、検力計は第6図のような仕組みで検力計に生じる歪みを電気抵抗の変化として取り出すことで船体抵抗の計測を行なった。実験では上下



第4図 舳先の形状が異なる2種の丸子船の形状概念図
(上：シン有、下：シン無)



第5図 丸子船の船体正面線図

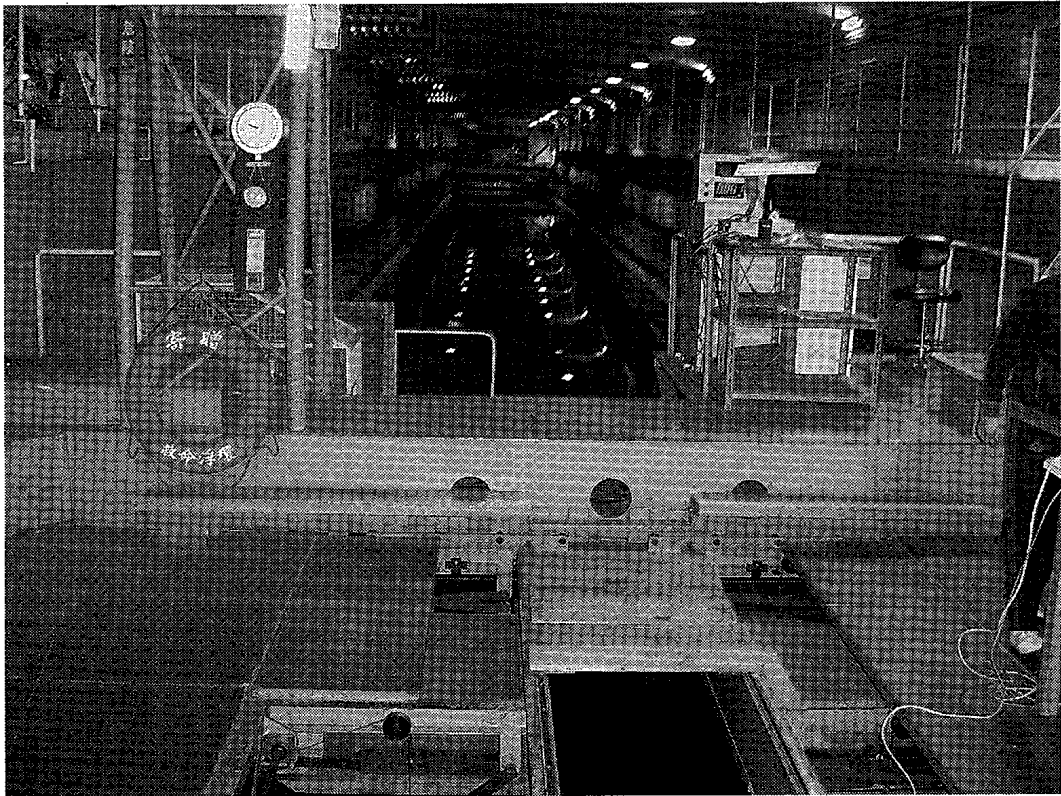


写真4 大阪大学実験水槽

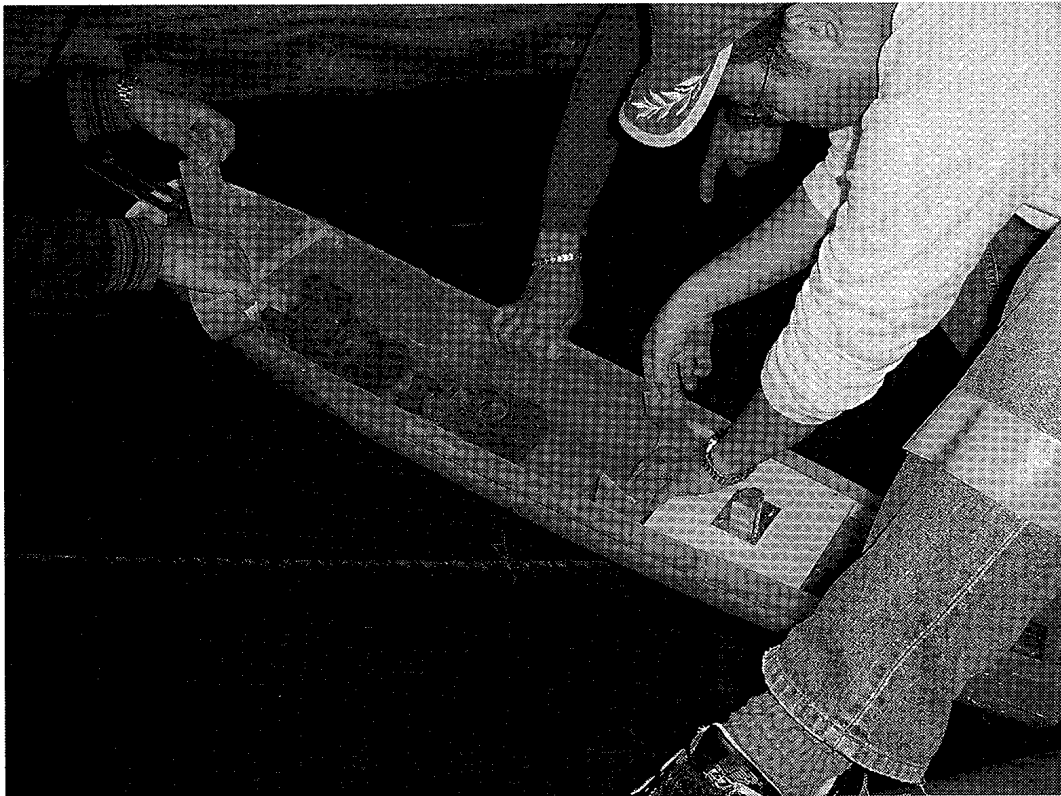


写真5 喫水線に合わせて錘を載せる

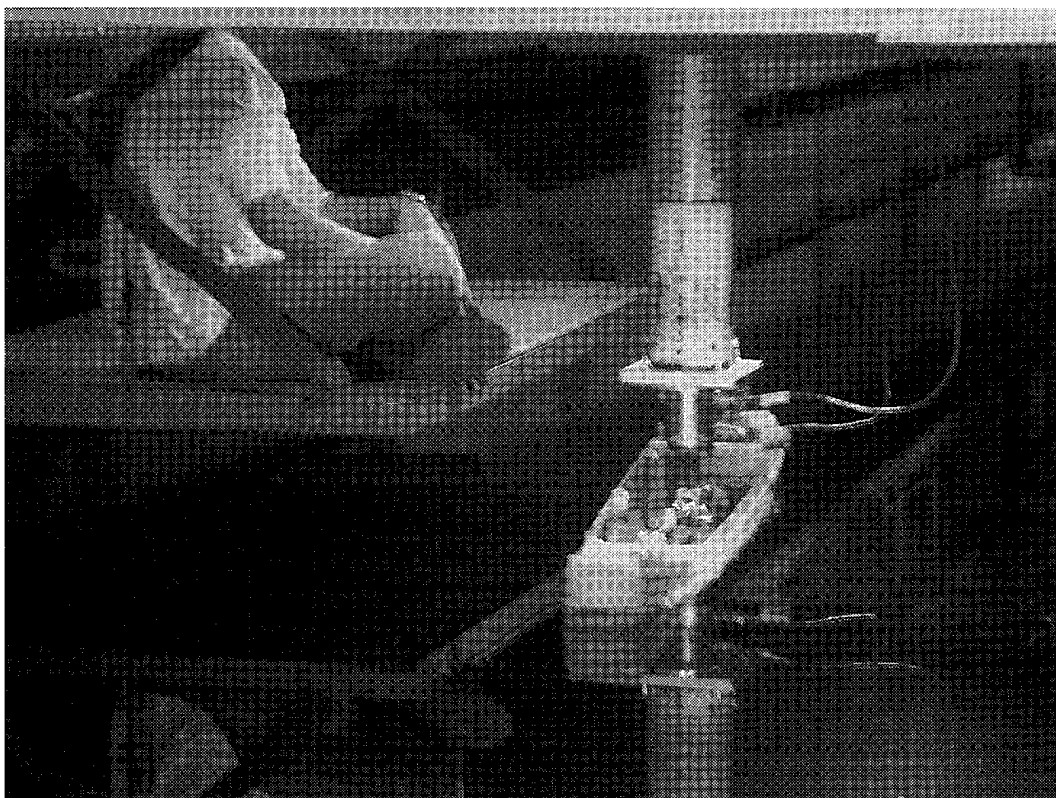
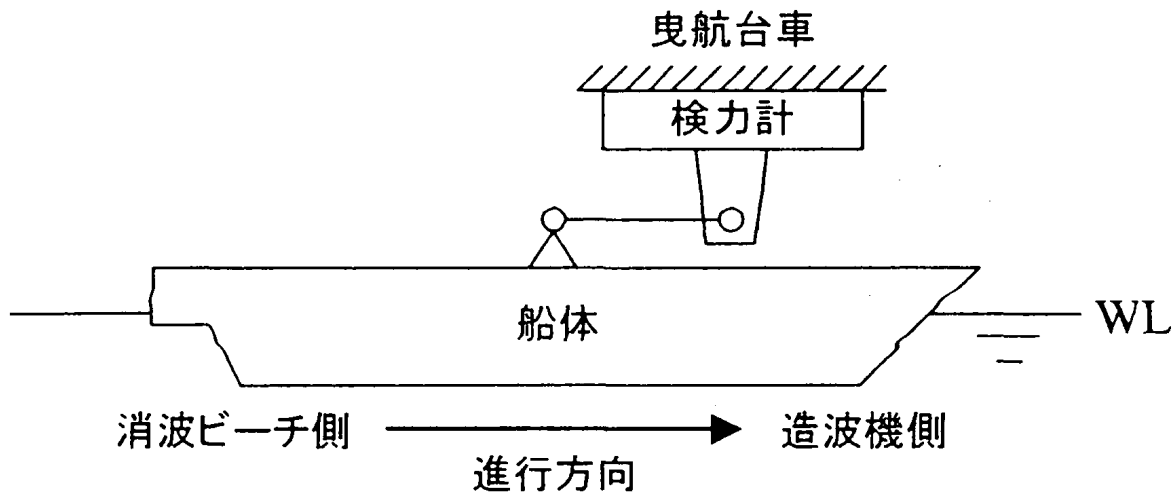


写真6 模型船を曳航台車に設置



写真7 航行実験中の舳先の様子



第6図 船体抵抗の計測の仕組み

揺れと縦揺れは自由とし、左右揺れと横揺れは拘束されていた。模型は、本来、推進力の着力点である帆の中心で曳航するべきであるが、ここでは実験設備の制約から甲板高さの帆柱位置で曳航した。今回の速力範囲では、曳航点の高さの影響は小さいと考えられる。曳航台車は模型を曳航することになった元の位置に戻し、波が静まるのを待ってから速度を変えた次の実験を行なう。このため、一時間に三本の曳航を行い、それぞれについて二つの異なる速度で測定を行なった。この作業を四日間かけて2種の模型について行った。

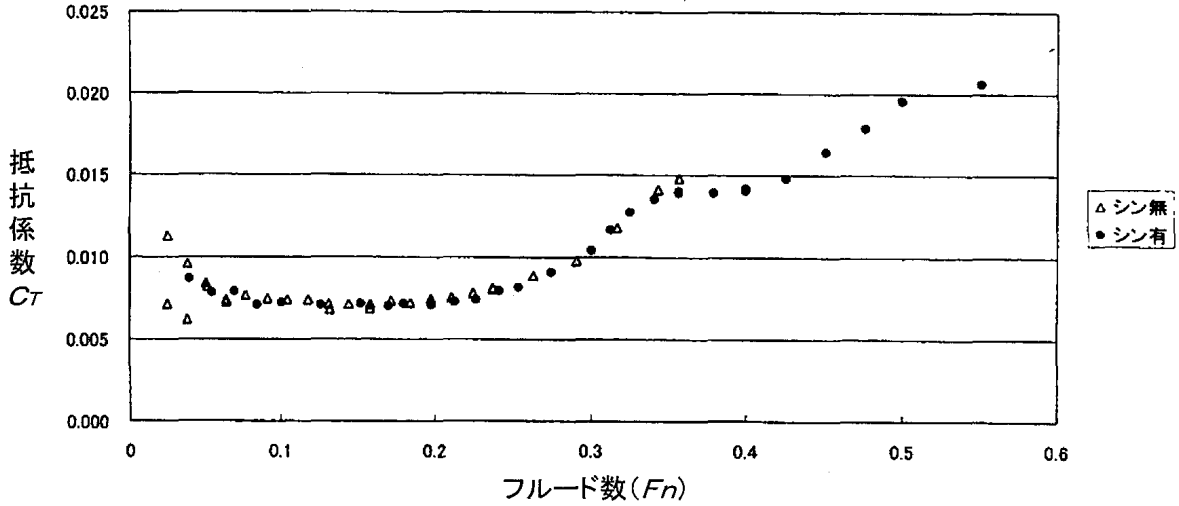
抵抗試験結果は第7図に示したとおりであった。横軸の無次元値、フルード数と縦軸の無次元値、抵抗係数の定義は図中の(1)式、(2)式に従う。

模型試験は、シン無模型船がフルード数0・三五六まで、シン無模型船がフルード数0・五五までを行った。この理由は、シン無丸子船はフルード数0・三五六の時点で、船首で造った波が船首端の高さを越えてしまったため、これ以上の速度域における実験は現実的でないと判断したためである。それに比して、シン有模型船は極めて高い速度域まで船首造波が船首の高さを越えることは無かった。このような高い速度域は、実際の帆走にお

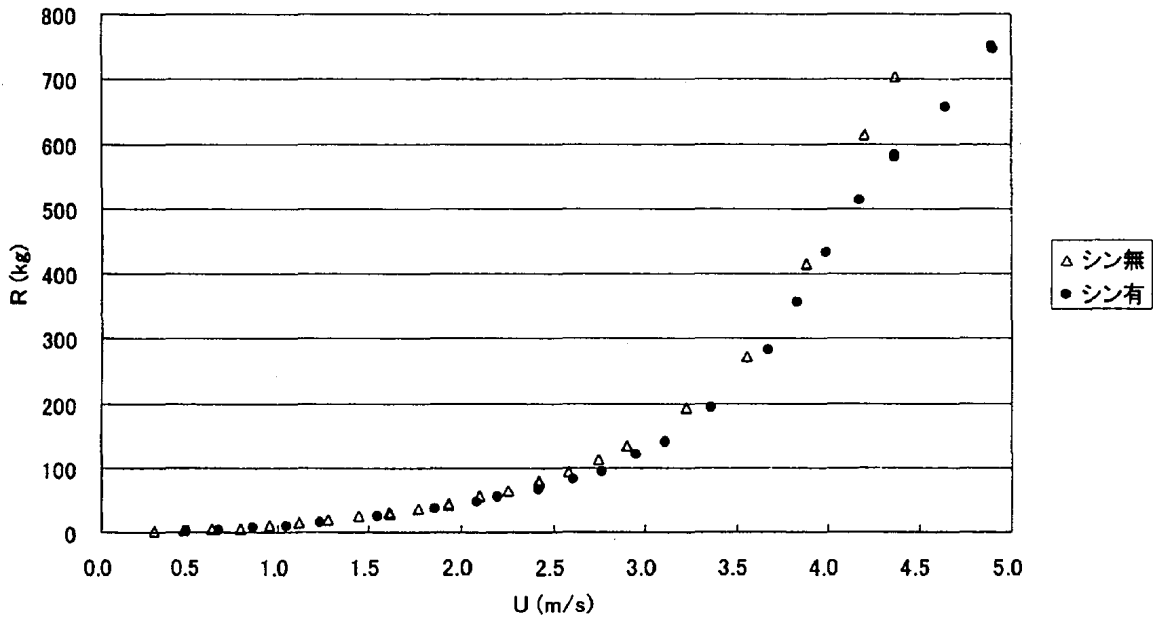
$$(1) \quad Fn = \frac{U}{\sqrt{L \cdot g}}$$

$$(2) \quad C_T = \frac{R}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S}$$

U : 船速
 L : 水線長
 g : 重力加速度
 R : 船体抵抗
 ρ : 水の密度
 S : 浸水表面積



第7図 模型船の抵抗



第8図 実船抵抗

いては実現しがたいが、少なくとも両者の航行可能な速力域の差を実証することができたのではないかと考えられる。

また、得られた模型試験結果を用いて実船の抵抗を算定した結果が第8図である。船舶の抵抗は重力すなわち造波と水の粘性の影響を受けており、それぞれがフルード数、レイノルズ数と呼ばれる無次元数に依存する。ここでは、フルード数を同一とする状態で模型実験を行い、レイノルズ数の影響を計算により修正した。具体的には三次元外挿法を用いて行った。ここからは両船の船体抵抗に大きな差があることが読み取れる。そしてとりわけ速い船速域においてその差が大きくなることから、造波抵抗に違いがあることが結論づけられたといえる。

(5) 実船航行速度と輸送所要時間の比較

かつて野本⁽⁴⁾らが菱垣廻船「浪華丸」に関して行った、帆に働く力に関する風洞試験結果を用い、往時の丸子船が琵琶湖を航行していた際の航行速力を推定する。今回は追風の状況のみを考慮し、斜めからの風による横流れ

表2 各係数の値

ρ (kg s ² /m ⁴)	101.78
ρ_A (kg s ² /m ⁴)	0.125
C_D	1.2
S_s (m ²)	32.44

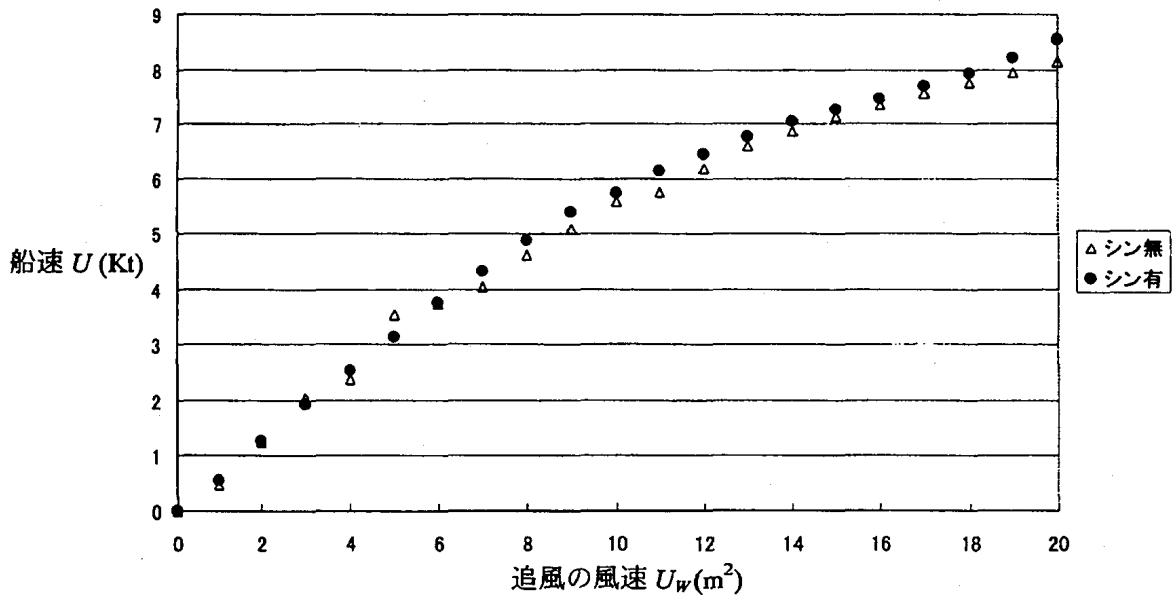
$$(3) \quad f(U) = R(U) - \frac{1}{2} \rho_A C_D (U - U_w)^2 S_s = 0$$

ρ_A : 空気の密度
 C_D : 帆の抗力係数(野本地2000より)
 S_s (m²) : 帆の面積

表3 比較に用いた値(上)と計算結果(下)

近江塩津—大津	63.8km			
長濱—大津	57.5km			
風速	8 m/s			
	近江塩津—大津		長濱—大津	
	シン無	シン有	シン無	シン有
所要時間	7時間28分	7時間3分	6時間43分	6時間22分
両丸子船間の距離	3.56km		2.99km	

等の現象に関する考慮は行わない。ここでの計算は定められた風速下における航行速力を計算する。従って、表2—(3)式に示される関数が0を中心とする定められた数値誤差内に落ち着くように、反復法の一つであるニュートン法を用いて船速に関する計算を行う。計算に用い



第9図 実航行速度

た値は表3に、またこの手法を用いて得られた結果は第9図に示したとおりである。今回は上記の如く追風のみを検討を行ったが、実際の帆走においては、斜め後方より風を受ける際に最も速度が大きくなる傾向があるため、両船の造波抵抗の差がさらに広がり、速度に一層の差が生じることが考えられる。

往時の丸子船は、北前船で敦賀など日本海側の港湾まで輸送されてきた積荷を、塩津街道を経由して近江塩津まで陸送した後、この地から大津までの湖上輸送を担っていたとされている。従って、両船が近江塩津—大津、および早舟の運行されていた区間である、長濱—大津の輸送に必要とした時間を比較することを考える。計算では常時定められた風速であるとの仮定のもと、両船の所要時間を計算した。さらに、両丸子船が同時に近江塩津もしくは長濱を出発した後、シンを有する丸子船が先に大津に入港したときにおける両船間の距離を算出した。比較に用いた値を表3—上に、計算結果を表3—下に示す。

(6) 実験結果の総括

かつて琵琶湖を航走していた丸子船について、シンの

有無という差異を持つ二種類の模型船に対する抵抗試験を行い実船抵抗の推定を行った。その結果、両船は船首部の形状の相違により大きな造波抵抗が生じていることが分かり、また実験中の視察により航行可能な速力域に關しても決定的な差が生じていることを確認した。また、得られた実船抵抗を用い、琵琶湖を帆走した場合における船速を計算した。その結果、シンを有する船は風速が大きい領域においてより良い帆走性能を示し、冒頭に記した牧野が提唱する、シンの形状が移り変わった理由に対する仮説が裏付けられた。すなわち同時刻に両船が出港した場合、両船間の距離が時間と共に大きくなるため、現代人の様な厳格な測時手段を有していなかった時代であっても、シンを有する丸子船が、速力に劣る丸い船首形状の丸子船に取って代わったことが推察される。

(7) 考察

一六七二年に下関と瀬戸内海を經由して日本海と大阪を結ぶ西廻り航路が開通したことで、それまでの琵琶湖を經由していた湖上の輸送量は次第に減少した。十七世紀末頃の最盛期には、千数百艘の丸子船が活躍していたといわれる⁽⁵⁾。それらの丸子船は所属の浦（湊）ごとに船

株（浦株）に加入していた。こうした船株は丸子船に対する税を確実に徴収するために一六九〇年頃に設置されたと考えられている⁽⁶⁾。『神田神社文書』『湖水絵図ならびに浦々船株覚』によると、琵琶湖周辺の全五八の浦で九六六の船株が記載されており、とりわけ多く有していたのは、大津の一五〇株、塩津の一二〇株で、今津の九五株、海津の八六株、船木南浜と横江浜の七五株、大浦の七四株であった⁽⁷⁾。ところが、一七五一年の坂本浦の由緒書である『谷寿夫家文書』では「丸船（丸子船）株十式艘の処、只今二代わり艀船八艘所持仕り候」（幕府からは十二艘と定められているが、困窮のために荷物運送用の丸子船を維持することが出来なくなり、かわりにやむなく艀船で荷物を輸送している）とあり、『神田神社文書』でも「近年困窮仕る共、今ハ丸船代わりの艀船」と同様の記述がなされている⁽⁸⁾。これらから、西廻り航路の開通以後の、諸浦が困窮し丸子船を維持しきれなくなつた状況が見て取れる。特に、北国から敦賀や小浜、塩津、大浦、今津といった湖北の湊を通じて琵琶湖經由で大津に回送される荷物は激減し、深刻な打撃をこうむつた。これに対し、敦賀く琵琶湖の新輸送路開発に着目し敦賀と塩津を運河で結ぶ計画が出されるなど、琵琶湖の水運

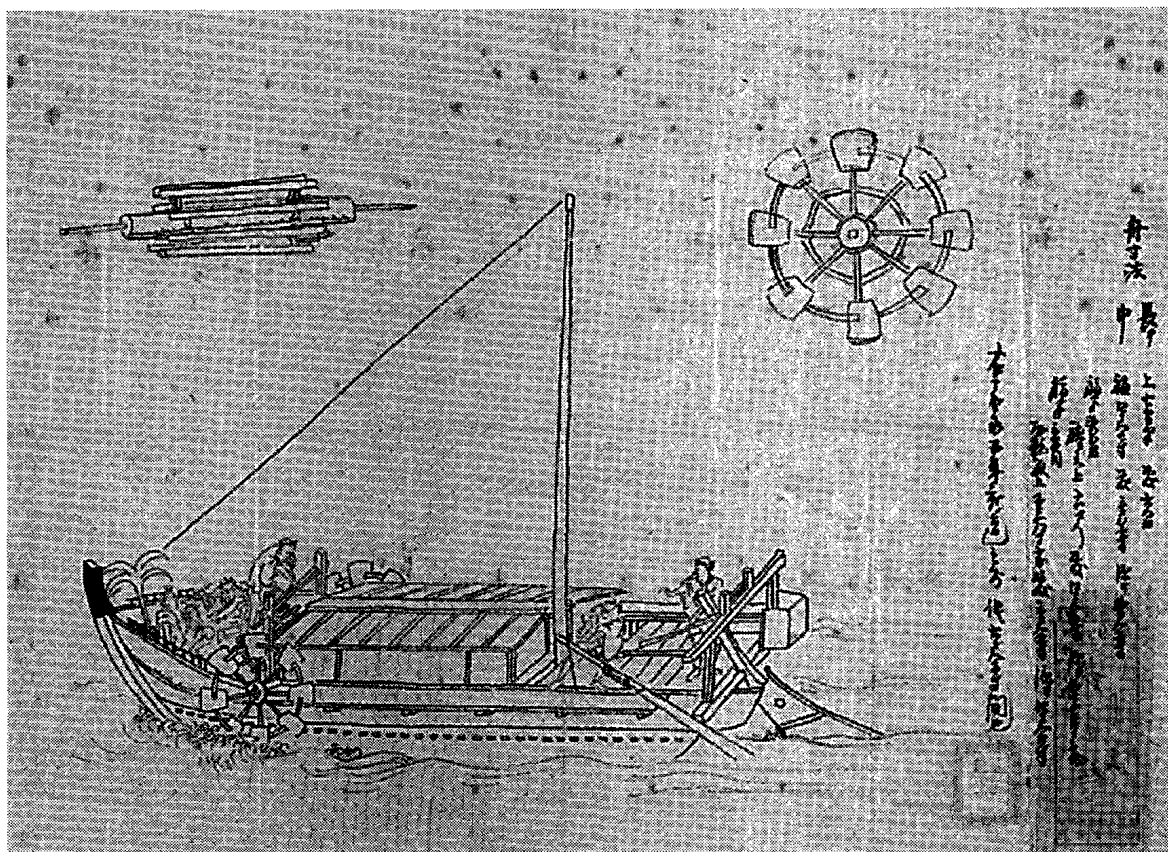
を復活させようという試みがなされたが、結局現地の農民や輸送業者の反対により実現はしなかった。しかし、同様の提案はその後もとを絶たなかった。これらを見ていくと、琵琶湖經由の水運の衰退とともに、貨物の輸送ルートの新たな開発や琵琶湖における新たな水運の役割への模索という動きが感じられる。丸子船の形態の变化はまさにこうした琵琶湖水運の衰退を背景として起こった現象といえる。その背景として、西廻り航路において活躍した弁才船やそれ以前から存在していた関船を起源とする早舟の影響についてはすでに牧野が別稿にて記した。⁽¹⁰⁾ここでは、丸子船の形態の変化の過渡期と言えるかもしれない早舟の利用について追記しておきたい。

山県岐鳳の絵には「長濱湊毎日出舟 大津乗場彦根他家 早舟之解」と解説が記されている。オモギやヘイタ作りの様子から一見して明らかに丸子船であるが、実際には「早舟（早船）」と呼ばれている（第2図―a）。この船は、一八四一年（天保十二年）五月二十六日に長濱―大津間で彦根藩内のみの旅客を運ぶために開通した船で、午後六時に長濱を出航して、翌日午前六時に大津へ到着する定期船であった。「従来早船は小丸子形なりしを、明治元年四月一艘を作り替へ初めて小早造りに改め、

二年三月又一艘を小早船に造り替へ、小早船作りの船は僅に二艘なりき」（早船文書、重要事件記録、役用日記、在藩中日記⁽¹¹⁾）。また、早船は「急用にて押切り急ぎ漕ぎゆく船なり⁽¹²⁾」で「船頭は最も巧者なるものを撰び、下手なるものを乗舟せしめざる規程を設けたり⁽¹³⁾」、則ち、速度を上げるために波を切りながら漕ぎゆく船で、御すのが難しかったために技術にたけた船頭を選ばなければならなかったという。

また、『北村源十郎家文書⁽¹⁴⁾』によると、米原湊では一八〇七年⁽¹⁵⁾に、松原・長濱湊では一八四九年⁽¹⁶⁾に、それぞれ押切早船の就航が許可されたと記されている。押切早船はその後さらに改造され、木製の車輪を舳先の両側に取り付けた車早船（第10図）と変化した。車輪は水車のようなもので、水主（かこ）が車軸を足で踏むことで動く。この仕組みによって、風の力や方向に関わらず、目的とする方向に進むことができた。車早船については、計画当初はその実効性に船仲間が疑問を持っていたが、実際に走行させたところ、順調に運行したとされている⁽¹⁷⁾。

これらの資料は、丸子船を改造して早船を作り、その後さらに速度を増すために車輪も追加したこと、そしてその目的が、湖北の諸浦と大津という限定した航路にお



第10図 車早船の図
(滋賀大学経済学部附属資料館 1999 p. 12より)

いて、物資ではなく人を運ぶための定期船の就航であったことを示している。丸子船は水運の主役から退いたものの、新たに客船としての役割を持つようになったものでは無いだろうか。今回の実験結果は、こうした社会的背景と合致するものである。

註

- (1) 金沢兼光 一七六一『和漢船用集』(所収一九四四 住田正一(編解題)『和漢船用集』巖松堂書店 東京)。
- (2) 牧野久実 二〇〇四「丸子船の舳先の形状について」『史学』第七三巻 第二・三号。
- (3) 実験は、滋賀県立琵琶湖博物館牧野久実と大阪大学大学院工学研究科梅田直哉の共同研究として2006年10月30日から11月2日に行なわれた。模型の作成指導および航行実験の準備については同大学船舶海洋工学部門の大西啓二技術専門職員から、また、実験とデータ編集には同大学院生の中村真也氏からそれぞれ協力を得た。
- (4) 野本謙作、増山豊、桜井晃 二〇〇〇「復元菱垣廻船「浪華丸」の帆走性能」『関西造船協会誌』第二三四号。
- (5) 『木村忠之家文書』『百艘船万留帳』新修大津市史 近世後期 第四卷 一九八一年 二二二頁。

- (6) 前掲 二二五頁。
- (7) 前掲 二二三頁。
- (8) 前掲 二二六頁。
- (9) 一六六九年、京都の田中四郎左衛門による。『山本計一文書』。
- (10) 前掲。
- (11) 『長濱町志』第二卷四一頁。十四〜十六行目。
- (12) 前掲一行目。
- (13) 前掲十一行目〜十二行目。
- (14) 滋賀大学経済学部附属史料館 平成十一年度企画展「江戸時代の米原湊」、一九九九。
- (15) 前掲 十一頁。
- (16) 前掲 十四頁。
- (17) 一八四〇年『車早船発起二付一札綴』前掲 十一頁。