

船型学 50年 (2)

— 東大水槽との出会い —

乾 崇 夫

東京大学名誉教授

日本造船技術センター顧問



連載計画試案

前回は本シリーズ全体の構想も十分立っていないままに、“序と近況”でお茶を濁した格好になった。まず何回もつかが問題なのと、果して毎月キチンと期限までに書けるかどうか心配の種である。というも、本来の目的である研究発想の源を辿るには、文章だけでは駄目で、どうしても図(写真も含めて)が必要になるのだが、原図はほとんど残っていないので、論文集その他、印刷刊行された小さな図からイチイチ復元しなければならない。これは大変手間のかかる仕事になる。とはいっても今回から本番に入るのだから、曲りなりにも全体の見通しを立てておく必要がある。右顧左眄しているところに本誌12月号が届いた。見ると、多分高柳武男先輩の筆になると思われる編集後記の最後に、拙稿の予告と筆者についての過分な紹介記事があって、「……約1年にわたり連載される予定である」と結ばれている。ピシヤリと先手を打たれてしまったわけである。それでは、と腹をくくり、1月号から、12月号まで計12回の連載計画を立ててみたのが表2・1である。前述したような心配の種はあるけれども、幸にしているところ健康にも恵まれているので、“人生一寸先は闇”であるが、なんとかこの表の通りに進行するよう今年一杯頑張りたい。

表中、今回の第2回から第9回までが、私自身の研究体験をタイムシリーズで追っている。第10回は宮田助教授らを中心とする次世代の方々の業績紹介で、最後の2回、すなわち第11回と第12回は研究以外の大学人としての責務に関わることを、国内的なことがらと国際的なことがらとに分けて述べたいと考えている。ただ、「船型学」というと船体抵抗論と船舶推進論とに大別できるが、本シリーズは東大水槽の機能から、第10回まではほとんどが前者に絞られている。後者については、第11回のなかの学科拡充に伴う船舶高速力学講座や東大キャビテーショントンネルの新設の話に関連して、加藤洋治教授らの研究紹介をしたいと考える。

ところで、表題を含む第1頁目のレイアウトを毎回同じスタイルにして置きたかったので、前回、日経から借りた顔写真のあった表題右側のスペースへの埋め草に、ご覧のようなロゴを借用することとした。このロゴはご承知の方も多いと思うが、旧船舶工学科から(東京大学工学部)船舶海洋工学科に改称された平成元年4月1日同学科のシンボル・マークとして制定されたものである。これについては、日本造船学会誌(以下造学誌)第721号(平成元年7月)所載の「新たな展開のための学科名称変更」なる一文に次のような説明がある。

「……これは本学科の教官・職員・学生に対して公募され、投票で選ばれた原案を手直ししたものである。このマークに今回の学科名称の精神が象徴的に表わされているので、まず初めにそのコンセプトについて少し詳しく説明しておこう。デザインとしては上半分は

表2・1 「船型学50年」連載計画

回	サブタイトル	ポイント
1	古稀を迎えて	序と近況
2	東大水槽との出会い	卒業論文・制限水路影響
3	ハブロックとの出会い	大学院の頃・浅水/側壁影響
4	正しい船型条件	真の「船型学」構築を目指して
5	漸近展開	積分記号を外すと全体が見えてくる
6	眼でみる船型試験	“流れ”をみると新しい発見がある
7	波紋解析	“波”のレベルで理論を検証
8	波なし船型	急がば回れ・方法論が決めて
9	局所非線形	線形理論の落とし穴
10	新しい流れ	嬉しい次世代の創意と成果
11	研究余瀝	学科拡充と新設・学術会議ほか
12	続・研究余瀝	国際試験水槽会議ほか

Kelvin波(船舶工学を意味する)と下半分の砕波(海洋工学を意味する)を組合わせたもので、全体としてはヨットのイメージである。上下をつらぬくラインは船舶工学と海洋工学の連帯をあらわし、またその本数は流体・構造・設計という学科の基礎(共通)研究/教育の3本の柱を意味している。カラーの場合は上半分がダークブルー、下半分がライトブルーとなる。…」

借用に踏切った理由はほかにもある。上半部のKelvin波が船の波のうちの線形成分を表わし、下半部の砕波は同じく船の波の非線形成分を表わすとも考えられ、かつ私の仕事の主として前者に関わっており、次世代の方々の仕事、宮田助教授(本ロゴの原案作成者でもある)命名による“自由表面衝撃波”で代表されるように、主として後者につながっているからである。序でながらタテの3本の線は研究創意における“世代から世代へのバトン・タッチ”を表わす。また、あえて3本の中身を問われれば、第1に責任感、第2に新しい発見創造への意欲、第3に常に新鮮な“自分の眼”をもつことであろうか。なお第1の責任感には、自分自身の仕事に対する責任は勿論であるが、長期的にみた次世代、次々世代への配慮と情緒(ハート)が含まれる。

東大水槽ができるまで

表2・2は東大での最終講義(昭55.2.14)のさいに用いた船型学関係の年表で、東大の船型試験水槽(以下単に東大水槽)は昭和12年に当時の平賀譲工学部長・山本武蔵教授のお骨折りと、元良信太郎所長以下三菱重工長崎造船所および同船型試験場の協力によってできた。2枚の写真は正面玄関を東南の方角から見た景観を、設立当時と40周年記念(昭52.11)の折とを比較したもので、後者に見られる胸像の主は、船舶工学科創立に貢献され、かつ現在の船舶工学第一講座(船型学)の前身である造船学第一講座(明治26年開設)の初代担任でもあられた三好晋六郎先生である。図2・1は現状の配置を示し、図中④~⑥と⑬~⑯は前回に触れた第2回東レ研究助成金(昭和136年度)を受けたことに関連し、工学部の支援もえて増築された部分である。「東京大学百年史・部局史三・工学部」(昭62.3) p.278の山本武蔵教授の見出しの部分に次の記述がある。

「…船型試験水槽が船の抵抗推進を考究する上に、必要不可欠なことは前述の通りで、試験水槽の設置は本学科の悲願であった。明治四十年以降寺野教授らによって計画されたが実現せず、

表2・2 年表(1871~1981)

西暦	日本関連	世界関連
1871(明4)		最初的水槽, W. Froude
1877(明10)	東京大学創立, 日本数学会社創立	Havelock 生, W. Froude の論文
1880(明13)	工部大学機械科にて造船学の教授開始(予科2年, 本科4年)	
1883(明16)	第1回卒業生(3名) 造船学科独立, 三好晋六郎	
1886(明19)		英海軍水槽 Haslar, R. E. Froude
1887(明20)		船の波の理論, Kelvin
1897(明30)	造船協会創立	造波抵抗理論, Michell,
1898(明31)		ワントン水槽 ミンガン大学水槽, バリ水槽
1906(明39)	船型試験水槽設置建議(造船協会)	
1908(明41)	三菱長崎船渠/浦水槽 海軍艦艇試験所・築地水槽	
1910(明43)		ベルリン水槽
1911(明44)		世界最初の風洞(Autenil フランス) 英NPL水槽 Teddington
1915(大4)	船舶研究所設立建議(造船協会, 内地造船業振興調査会)	
1921(大10)	船舶試験所調査会設置(造船協会)	
1922(大11)		ノールエー水槽(トロントヘイム)
1924(大13)	試験水槽成績発表式調査会 九大水槽	
1927(昭2)	船舶試験所水槽	
1928(昭3)	日本最初の風洞(東大航研)	
1931(昭6)	海軍技術研究所水槽	ハンブルグ水槽(高速) オランダ水槽(ワグニング)
1932(昭7)		第1回 ITTC (ハーグ)
1933(昭8)		第2回 ITTC (ロンドン)
1934(昭9)	平賀譲先生英造船学会ゴールド・ メダル受賞	
1937(昭12)	東大水槽	第4回 ITTC (ベルリン)
1941(昭16)		テラー水槽(ワントン)
1943(昭18)	三菱長崎水槽	
1963(昭38)	九大・応力研水槽	
1965(昭40)	船研 400M水槽	
1966(昭41)	I H I 水槽	
1967(昭42)	広大水槽	
1970(昭45)	東大・航海性能水槽, 阪大水槽	
1972(昭47)		Vacuum Tank (ワグニング)
1973(昭48)	明石船型研究所	
1974(昭49)	技セ・キャピテーション・タンネル	
1975(昭50)	船研・大型キャピテーション・タンネル	
1976(昭51)	NKK・津研究所	
1977(昭52)	横国大水槽	
1978(昭53)	三井・昭島研究所, 住重・平塚 研究所, 技セ・減圧・回流水槽	
1980(昭55)	東大・キャピテーション・タンネル	

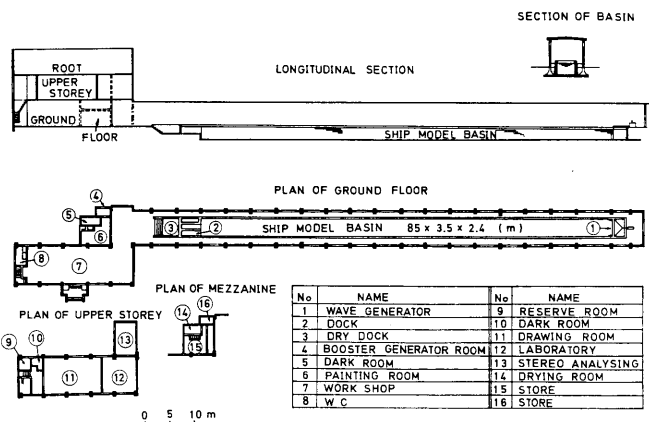


図2・1 東大水槽配置図(現在)

船の科学

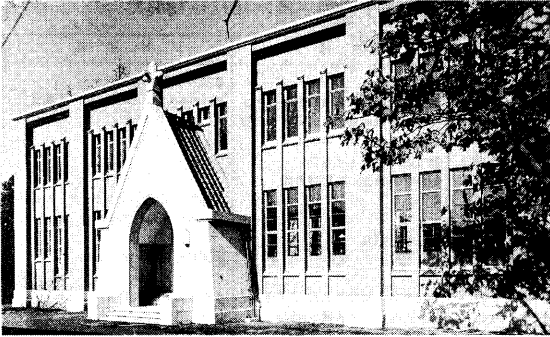


写真2・1 東大水槽（昭和12年）

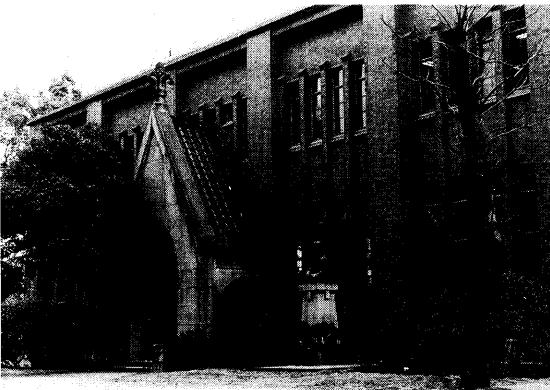


写真2・2 東大水槽（昭和52年）

昭和初期には徳川武定教授の私用極小型水槽の寄贈を受けて研究教育に当てていた。ようやく昭和12年(1937)に義勇財団海防義会の寄付申出により、ついに小型水槽が実現した。山本教授は平賀教授指揮のもとにこれを立案し、三菱重工業長崎造船所が製作据付けた。現在船型試験水槽として以前にもまして活用されている。なお設計監督は当時本学営繕課長事務取扱いを兼務中の内田祥三教授（後総長）ら建築学科がこれに当たり今にその美しい意匠を伝えている。」（下線は筆者）

文中、下線の部分が具体的に何を指すのかは、今のところ不明である。なおこの点に対応する資料として、山本武蔵先生直筆のメモ「試験水槽設置ヲ必要トスル理由」(海防義会宛文書草稿)の「試験水槽設置ニ対スル東京帝国大学ノ要望」なる項の末尾に次の文章がある。

「……斯クノ如キヲ以テ当科ハ三十年来其設置ノ要ヲ提唱シ来リシガ今ニ至ッテ尚之ガ実現ヲ見ザルハ其建設ニ莫大ノ費用ヲ要スルコトト、大学ノ制度上単一ノ学科施設ニ特ニ巨資ヲ支出スル事ノ困難ナルトガ其主因ナリ。然ルニ最近余等ノ研究ニ依レバ適当ナル寸

法ノ小型水槽ニテ充分実験研究ノ目的ヲ達シ得ル事ヲ現実ニ認知シタルヲ以テ、当科ハ一昨年大水槽主義ヲ捨テ中型水槽ヲ造ルコトヲ議シ、且其設置ノ急務タル事ヲ決議セリ。（以下略）」（下線は筆者）

なお、明治34年から大正9年まで外国人教師として本学科に招聘されたF. D. パービス氏(1850ロンドン生れ)は英海軍のHaslar水槽で初代所長R. E. フルード(W. フルードの三男)のもとで勤務の経験があり、造船協会にも水槽関係の論文2編を発表している。そのうちの“On a proposed experimental tank”(年報第6号)は明治35年11月の同協会総会で読まれ、試案として400×20×10呎の水槽(建屋共12.2万円)を提示している。ただし、これは必ずしも大学に限定したものではない。上記の寸法は東大水槽の86×3.5×2.4 m(長・巾・水深)より大きく、戦後タンカーの大型化に伴い自航試験のさいのプロペラ直径対船長比の減少傾向から、いきおい模型寸法の長大化より水槽幅の拡張要求となって改正された現行の文部省大学設置基準の100×8×3.5 mにほぼ近い。(東大を除く国立大学の水槽はほとんどこの寸法になっている)。東大より1年早い昭和11年に海軍技術研究所(目黒水槽)にプロペラ単独試験用の中水槽(102.5×3.5×2.5 m)が完成している¹⁾。東大水槽の寸法はこれに非常に近く、特に幅は共に3.5 mと一致している。この両者の寸法決定の経緯も調べる必要があるが、今回は間に合わなかった。いずれにしても、従来の大水槽主義を捨て、中水槽へと発想の転換をしたことが“悲願達成”につながった。それだけでなく、この寸法は造波抵抗の研究には最適でもあった。そして、この“発想の転換”には“平賀水槽”²⁾(大正15年60×6×4呎、のち昭和2年100呎に延長)での経験が物をいったものと思われる。

初めて見る水槽・卒業論文題目探し

生まれて初めて水槽試験の現場を見たのは、大学2年の終り頃、多分昭和17年9月のある晴れた日の午後、「船舶工学実験第一」の名目(この見学で一単位)で山本先生直々のご案内を頂き、東大水槽の中を見学したときで、そのときの印象はいまに鮮かである。東大水槽は南側の窓が大きく、明るい水面を模型船が静かに走ってゆく。その後方、左右対称に広がる波紋の幾何学的な美しさにしばしみとれた。それは多分、当時ルーティン業務になっていた海軍技研委託のシリーズ・テストであったかと思われる。

戦時下の短縮授業で、われわれの年次は1年半で2年までの科目を終え、3年次はまるまる1年あった。昭和

17年も10月に入ると、各自が卒業計画設計の対象船を決めることと、卒業論文（実験は2人1組）のパートナーと題目探しで忙しくなる。当時、卒業論文のテーマはまず学生が自主的に考え、これを指導教官に提示、その上で決まる立前になっていた。現在は諸般の事情でなかなか実行できないが、このやり方は学生の自主性と創意を伸ばすのに大変有効な制度であったと思われる。筆者は流流に興味があったので、迷うことなく水槽での卒論を選び、ラグビー部の主将であった和田稔君と組んで、題目探しに取掛った。その頃教室を挙げて大陸河川・運河用船舶の研究に打ち込んでおり、水槽も「浅水時の実験のみ」という制約が加えられた。図書室で“浅水影響”に関する文献を調べると、「船体抵抗」に関する論文は山ほどあるが、「伴流に対する浅水影響」を取扱ったものは皆無であった。そこで、これを木下昌雄先生（当時助教授）に持って行ったところ、OKが出た。もっとも筆者自身はまだ次に述べるKreitner³⁾の理論があることは何も知らず、常識通りプロペラ位置での伴流しか頭になかった。木下先生は勿論Kreitner理論をご存知で、まず原論文を読むこと、船体中央部付近での船側伴流の測定が大事、との判断から、4名2組（もう1組は中西哲一郎・山内保文両君）で当たるよう配慮された。“伴流”に思いが行った動機は、「船舶工学特別講義」中の出淵異教授（第2工学部、本務は海軍技研造船研究部長）による「高速艦船ノ船殻効率ニ就イテ」で、先生の学位論文と思われる伴流（特に排水伴流）についての詳しい資料を頂いたりしたことが関係している。

制限水路影響

制限水路とは図2・2の如く、水深 h と水路幅 b とが同時に制約されている水路を指し、水槽で浅水時の実験を仮底でなく実底でやる場合に相当する。Kreitnerの理論というのはこのような水路を船が航行する場合の断面平均流速や船体の沈下(浮上)を取扱った簡単な1次元理論である。特徴は1次元理論ではあるが、ベルヌーイの定理に含まれる速度の自乗の項を省略せずにそのままり入れているので、一種の非線形理論になっている点で、そのため、次回に述べる線形造波抵抗理論では説明できない面を効果的に説明できるところが面白い。仮定としては船は十分長い中央平行部をもち、トリムはないものとし、水面の沈下(上昇)分だけ船体も平行的に上下する

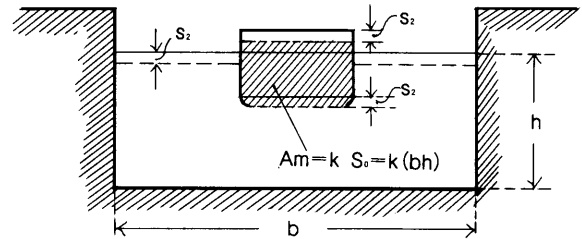


図2・2 制限水路断面図

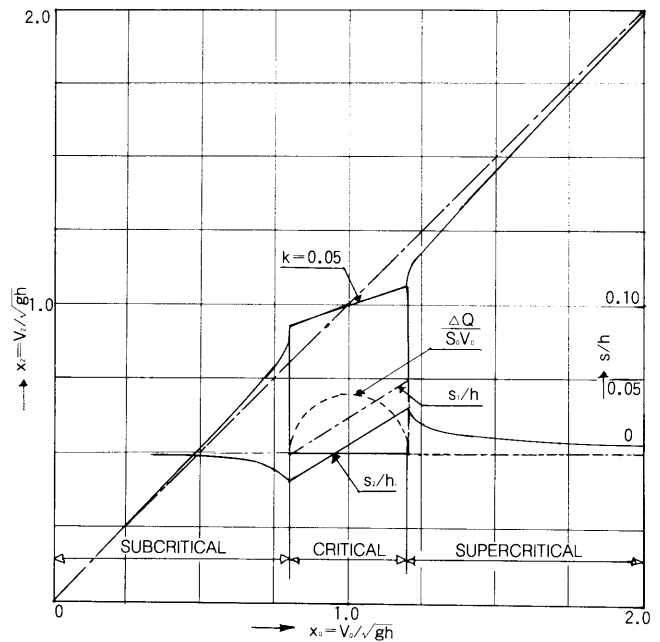


図2・3 制限水路の速度3領域 (Kreitner)

ものとする。あとは連続の条件とベルヌーイの定理だけで、船速 V_0 と船体中央位置の水路断面内平均相対流速 V_2 との間に3次方程式が導かれ、その実根の有無により、図2・3に示すような速度の3領域が出てくる。図は、 $k = A_m / S_0 = 0.05$ の場合である。（ここに A_m = 中央横断面積、 $S_0 = bh$ = 水路断面積）。また横軸 $x_0 = V_0 / \sqrt{gh}$ は水深ベースのフルード数で、 $x_0 = 1$ はマッハ1に対応する。Sub c.では $x_2 > x_0$ 、 $s < 0$ （沈下）、Super c.ではその逆で、中間のCrit.では実根がない。ということは全流量 $Q_0 = V_0 S_0$ の一部は船側を通過できず、図2・4に示す如く船首前方に溜り、有限波高の孤立波として船速より速い速度で伝播する。ために流れは非定常となり、一方船尾では逆に水面の低下を来し、両々相俟って大きなトリムと著しい抵抗増加をきたす。

実験は揚子江連絡船興亜丸(97.5m)の2.5m模型を用い、 $h = 0.25, 0.40, 0.60$ mの3種の水深で実施した。

船の科学

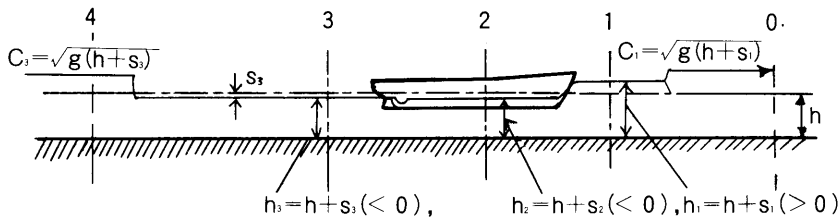


図 2・4
制限水路側面図
(危険速度)

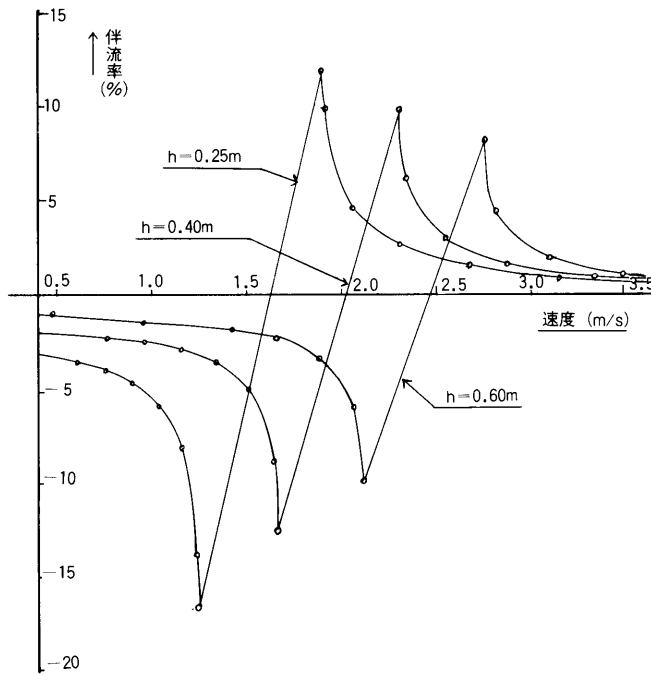


図 2・5 各水深における船側伴流率 (Kreitner)

図 2・5 は各水深に対する船側伴流率の Kreitner 理論値を、図 2・6 はピトー管による船側伴流計測値と船体沈下量および全抵抗を $h = 0.25\text{m}$ の場合につき示し、図 2・7 は翼車式流速計によるプロペラ位置の伴流計測値とトリムを $h = 0.60\text{m}$ に対して示した。Kreitner の簡単な理論が船側伴流と船体沈下に関し、予想外によく合うこと、船尾伴流にはトリムの影響が大きく入ることがわかる。

図 2・7 で、トリムが大きくなると Kreitner 理論値が実測伴流率と大きく喰い違っている。通常の船舶では排水伴流はフルード数に無関係に一定とされているが、それはトリムが小さいという前提がかくされているのであって、なんらかの原因で、トリムが大きく変わると、この常識は通用しなくなる。これを厳密に取扱うことは大変困難なので、近似的に 2 次元楕円柱および 3 次元回転楕円体について、プロペラ相当位置での伴流値と迎角との

関係を求め、それによって補正を加えた結果をも示してある。補正前のものに比し、実測値にかなり近づいてくることが判る。いずれにしても、Kreitner の理論の実験的検証を第一の目的とすれば、船尾伴流よりもトリムの影響の少ない船側伴流から入るべきであることは当然の理であって、船尾伴流はその次の段階のテーマとなる。ところで、前述の Kreitner の論文は理論だけで、実験は全くやっていない。またそれ以後も、この理論の検証を目的とした実験報告は、私共が調べた範囲では皆無であった。この意味では、私共 4 名 2 組の卒論はそれなりの意義があったと思われるし、なかでも、いち早く船尾伴流だけでなく、船側伴流の重要性に着眼され、その計測班をアレンジされた木下先生のすぐれた指導性と、十分な準備のもと厄介なピトー管を駆使して、これを成功させた中西・山内組の功績は大きいと思われる。ただ実用という見地からいうと、河川あるいは運河を航行する船が critical あるいは super c. のような高速で走ること

は極めて稀で、私共はどちらかという実用よりも理論的興味に強く惹かれていたことは事実である。それはそれとして、戦時下で、しかもまだ学生の身でありながら、完成間もないピカピカの立派な水槽をわが物のように思う存分使わせて頂き、熱心な指導教官のもと、多数の職員の協力をえつつ、毎日感激にひたりながら、実験と計算に明け暮れたあの頃は、いま思い出しても青春のもっとも充実したひとときであった。眼の前で、毎日見る現象が、他所では滅多に見られない典型的な非線形現象であり、しかも、その複雑な現象が、いとも簡単な 1 次元理論で、定性的のみならず、なかば定量的にも説明される理論の有効性への驚きは、学生生活最後の年としてえがたい体験であり、収穫であった。

話は飛ぶが、ずっと後年になって、国際会議のついでに欧州のある水槽を訪れたとき、はしなくもこの制限水路影響をポンチ絵にした面白いものを見たことがある。それは 3 枚 1 組になっていて、両岸に 1 頭づつ、2 頭の

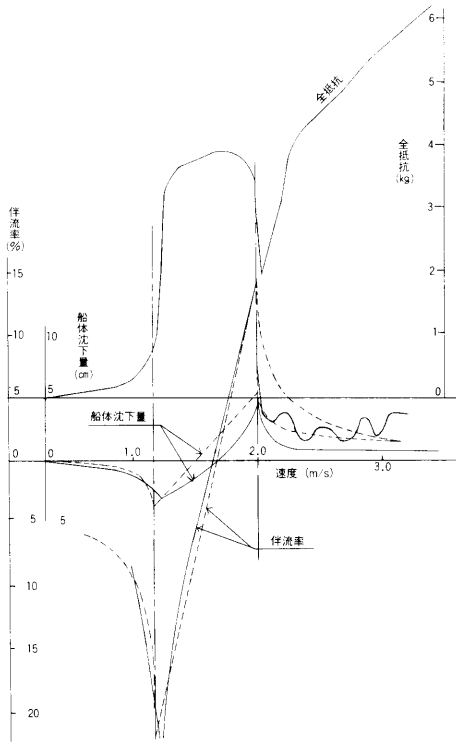


図 2・6 船側伴流と船体沈下量 (h=0.25 m)

馬がロープにつながっている河舟を汗を流しつつ、上流へと曳いて行く図になっていて、最初がsubc.,が真中がcrit.,最後がsuperc.に対応しており、そのときどきの馬の表情で、抵抗の大小を巧に表現してあるのであった。

平賀総長逝く

昭和18年2月17日、卒論がピークに達しようとする頃、前年来喉頭結核で体調を崩しておられた平賀譲総長が遂に逝去された。前年12月20日に病をおして総長再選を受けられて、わずか2ヶ月足らず、満65歳の誕生日まで19日を残すのみであった。2月23日午後、葬儀委員長寺沢寛一総長事務取扱のもと、大講堂で大学葬が行われた。多くの弔辞のなかには、全学在学生代表としてクラスメートの穂積重範君のそれがあった。同君は東大船舶工学科を明治43年に卒業された穂積律之助海軍造船少将のご長男で、お父上の跡を継ぎ、入学すると直ぐ海軍委託学生の試験を首席で合格され、卒業計画もお父上の道を追って潜水艦を選び、ついに将来を嘱望されていた。しかし運命はときにまことに非情で、昭和20年6月22日の空襲により呉工廠内で防空壕が直撃弾を受け、惜しくも亡く

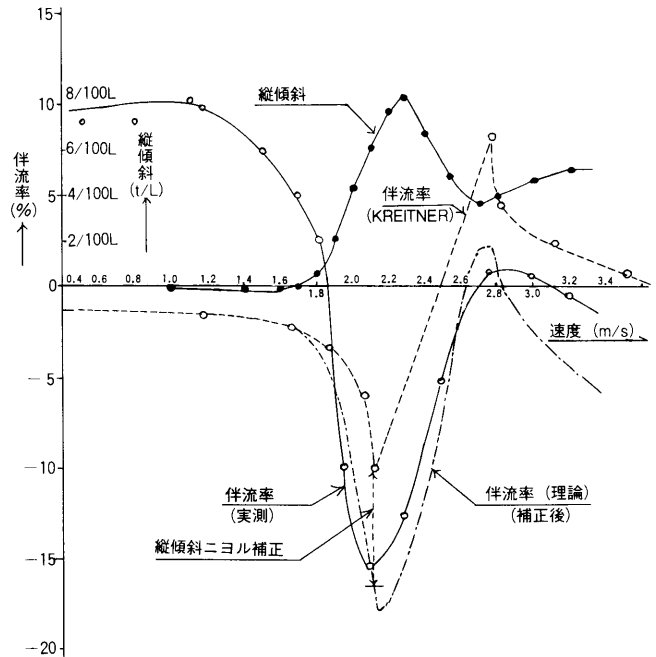


図 2・7 船尾伴流と縦傾斜量 (h=0.60 m)

なられた。新婚2ヶ月足らずのことであった。そして昭和16年4月共に入学した30名のクラスのうち最初で最後の戦争犠牲者でもあった。

平賀総長といえば、私共の1年上の内藤初穂氏の力作「軍艦総長・平賀譲」(文芸春秋社、昭和62・11)がある。前述の大学葬の記述もこれに依ったのであるが、昭和16年4月入学から、同18年9月卒業までの2年半は、日に日に軍の圧力が大学にのしかかってきた時期で、平賀総長以下、諸先生方がどれほどこれに対抗され、苦勞されたか、当時学生であったわれわれは「親の心子知らず」のたとえ通り、ほとんど知らずに過ごした。今にして、内藤先輩の著述や「百年史」をひもとくと、ただただ頭が下がるばかりである。

【参考文献】

- 1) 竹沢誠二：本邦試験水槽発達小史(II), 造学誌604号 (昭54.10)
- 2) 平賀 譲：小試験水槽に就て, 造船協会会報40号 (昭2.4)
- 3) Kreitner, J.: Über den Schiffswiderstand auf beschränktem Wasser, Werft・Rederee・Hafen (1934)