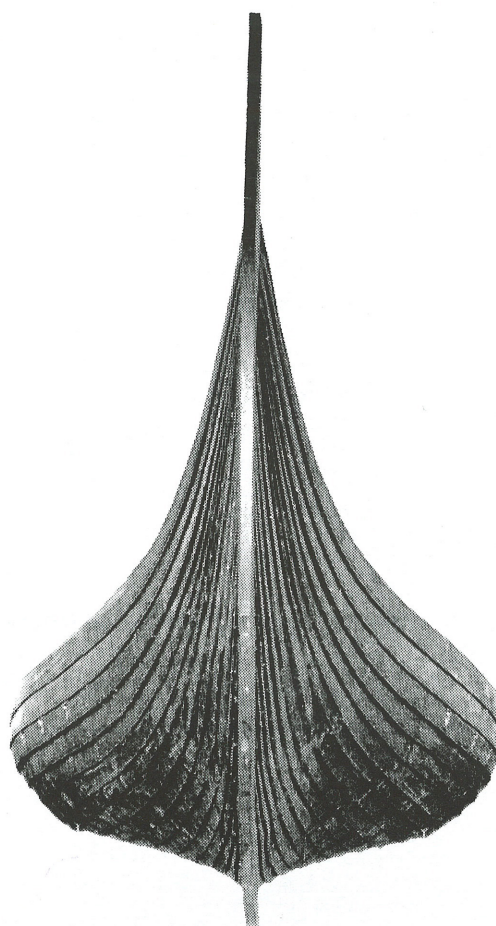


●目次●

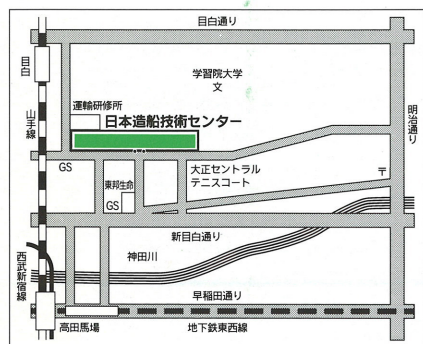
船体まわりの粘性流れについて —粘性流れに関する基礎知識—	Page 2
水槽設備の多様な活用について 新しいニーズに応える	Page 4
ウォータージェット推進装置装備船 の馬力計算について	Page 6
カオス（混沌）の一側面 決定論的現象の中のカオス	Page 8
造工中手船型研究会の活動	Page 10

バイキングシップについて



天にも昇りそうな勢いでそそり立つ細い美しい船首とそれにつながる丈夫そうな竜骨、優雅なカーブの肋骨線とおだやかな丸みをもつ船体中央断面をもつ船、これは10世紀頃を中心に活躍した北欧のバイキングが使った船の正面からみた写真です。当時においては、断突の高速と運動性能、北大西洋の荒波を越えて、グリーンランドから北米へと乗り出し得た優れた耐航性、浅い河川や湖沼を伝わって、内陸深く侵入していく浅喫水の機動性の高さにより、当時の西ヨーロッパを揺り動かし、はてはロシアの奥深く河伝いに侵入して、ロシア王国

の基礎を作り、更には黒海へと広範囲な、バイキングの大活動を可能にしたインフラがここに示すエレガントな船に他なりません。現在の船型学の面からみても、合理的な形状と優れた性能をもつ船が、長い経験の積み上げのみで生まれて来たとは実に驚きの他はありません。日頃お世話になっている肥った商船の船型も、いろいろな経験や工夫の成果ではありますが、いずれも機能優先を追求した形状には、自ずと独自の美しさが備わって来ることを感じます。造船技術センターで試験する船型は美しいと言われたいものです。



船体まわりの粘性流れについて

—粘性流れに関する基礎知識—

1. はじめに

船の性能が船の周りの流れの現象に起因することは今更言うまでもないが、その中でも水の粘性による現象は重要である。すなわち、推進性能にあっては、船の抵抗の中で、粘性に起因する成分は高い割合を占め、又、船尾の流れとプロペラ作動との関係を示す自航性能にあっては、粘性流れとの干涉そのものと言ってよい。操縦運動シミュレーションに用いられる各種の流体力学係数は、操縦運動時の船の周りの粘性流れの現象の指標であり、更にプロペラキャビテーションや起振力はプロペラが船後の粘性流れの中で作動するとき、一段と激しい様相が現れる。粘性流れの研究の歴史は、船の周りの造波現象の研究と同様に古いが、造波抵抗の分野で展開された理論や船型開発への応用に関する目覚ましい成果に比べて、何となく影が薄まった観が否めない。複雑な船体周りの非線形なナビエーストークスの方程式に支配される粘性流れを精度良く計算することの技術的困難が主因と考えるが、具体的な船型設計の場に、時間と費用において大きなコストを要求するコンピューター、高度のプログラムやマンパワー等を投入することが難しいことも一端の原因となっている。現在の船型設計においては、タイプシップ、関連する具体的な実験データおよびコスト的に見合う手法による計算データを設計者の経験や、流体力学等の知識をもとに有機的に組み合わせ、与えられた設計条件下での最適解を求めているが、今後の新しい展開を図るには限界のあることも否めない。流体力学による計算等が更に容易になると共に、計算結果の迅速な処理と新しい設計手法とを組み合わせたシステム化も追求するテーマと考えられる。しかしながら、流体力学と関連する分野に関する知識は基本として不可欠であり、特に、船の粘性抵抗（摩擦抵抗）低減が、21世紀へ向けての主要な技術テーマの一つとされている現状において、粘性流れについてreviewすることも意味があると考えられる。本稿においては、粘性流れの性質について、プラントルとテイチェンス両先生の古い教科書に従って以下紹介する。

2. 粘性流れの基本的性質

2.1 1次元の流れ

図-1に示すような流線（曲線上の各点でその曲線方向と速度方向が一致するような曲線）によってつくられる管の一端を通過する流量は一定である。これがすなわち連続の条件で、 F を流管の断面積、 ρ

を密度、 u を速度とすれば、 $\rho F u = \text{一定}$ とあらわされる。



図-1 流管

次に、図-2において、質量と加速度の積が、その部分に働く力の総和に等しいという原理が流れの中の微小部分に適用される。質量は $\rho dF ds$ 、加速度は Du/dt 、重力は $\rho g dF ds \cos \alpha$ 、圧力は $dF \{p - (p + \partial p / \partial s \cdot ds)\}$ とあらわされる。ここで加速度 Du/dt は、流れの中の各点での速度の変化 $\partial u / \partial t$ 、および、流体部分が、その運動によって他の違った速度をもつ領域に流れ込むことによる速度変化であり、場所による速度変化 $\partial u / \partial s$ と場所の変化 u の積として $u \partial u / \partial s$ であらわされる。すなわち $Du/dt = \partial u / \partial t + u \partial u / \partial s$ が加速度である。このようにして求めた式 $\partial u / \partial t + u \partial u / \partial s =$

$g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}$ が粘性のない流れの運動をあらわすオイラーの方程式である。

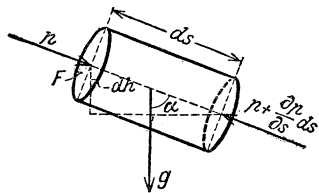


図-2 非粘性流体の一要素に働く力

流れが定常のとき $\partial u / \partial t = 0$ 、流体が均質で非圧縮性として $\rho = \text{一定}$ として流線に沿って、オイラーの式を積分すると、 $u^2 / 2 + gh + p / \rho = \text{一定}$ というベルヌイの方程式が得られる。なお、 $ds \cos \alpha = -dh$ とする。自由表面のない場合、 p を静止時の圧力との差と考え、 $u^2 / 2 + p / \rho = \text{一定}$ ともあらわされる。

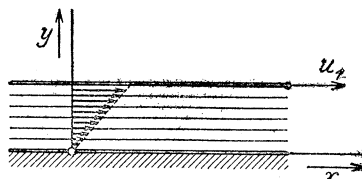


図-3 下板が静止し、上板がそれに対して運動する二つの平板間の粘性流体の速度分布

2.2 粘性について

粘性の定義は、図-3に示すように、下

の板は静止し、上の板が u という速度で平行に動く板の間にはさまれた流れを考える。ここで、流れは平板に粘着し、平板に直接付着する部分は板と同じ速度をもち、上下の板の間の速度分布は直線分布とするとき、流体には $\tau = \mu \partial u / \partial y$ という剪断応力 τ が生じる。ここで μ は粘性度という温度に著しく関係する物質常数である。これは弾性体におけるフックの法則 $\tau = G \cdot \gamma$ （ γ は角変化 $d\xi / dy$ 、なお ξ は x 方向の変形）に対応するもので、Newtonの仮定と称する。従って、我々が粘性流れと称するのは、Newtonの仮定を満たす流体を意味している。この条件を満たさない流体、例えば $\partial u / \partial y$ のべき乗に $((\partial u / \partial y)^n)$ に比例するような流れを非ニュートン流体という。又、流体は板に固着しているとしているが、板との間に滑りを作るようなことが出来れば摩擦抵抗が減少することになる。

2.3 流れの相似則

次に慣性と粘性を考慮した場合の流れの相似則について、図-4、図-5によって説明する。流れが相似であることは、2つの流れの中で相似の2点において、各々の体積要素に作用する力の間に常に同じ比例関係が成立することである。単位体積に作用する摩擦力は、

$$(\tau + \partial \tau / \partial y dy) dx dz - \tau dx dz = \partial \tau / \partial y \cdot dx dy dz$$

すなわち、単位体積あたりの粘性力は、 $\partial \tau / \partial y = \mu \partial^2 u / \partial y^2$ である。定常運動の慣性力は、単位体積あたり $\rho u \partial u / \partial x$ であるから、慣性力/粘性力 $= \rho u \partial u / \partial x / \mu \partial^2 u / \partial y^2$ が一定であることが相似となる条件である。流速 V 、半径 a の球のまわりの流れでは、 $\rho u \partial u / \partial x$ は、 $\rho V^2 / a$ に比例し、 $\mu \partial^2 u / \partial y^2$ は、 $\mu V / a^2$ に比例するから、この比は $\rho / \mu \cdot V \cdot a$ となる。この量はレイノルズ数といい、一般に R によってあらわされる無次元数である。

なお、慣性力と重力の場合は、慣性力/重力 $= \rho u \partial u / \partial x / \rho g = V^2 / ag$ というフルード数 F_n が、相似の関係を示す数値となる。以上から、粘性と慣性を考慮した場合の力学的相似は、模型の寸法を縮めれば、それだけ速度を増すことによって達成されるが、フルードの相似則では模型寸法の縮まるにつれて速度を減少させれば良い。すなわち、レイノルズの相似則とフルードの相似則を両立させることは実際上不可能である。水槽試験においては、フルードの相似則に従って、模型船の寸法と速力を決め、レイノルズの相似則は相当平板の摩擦抵抗式を用いることで処理している。

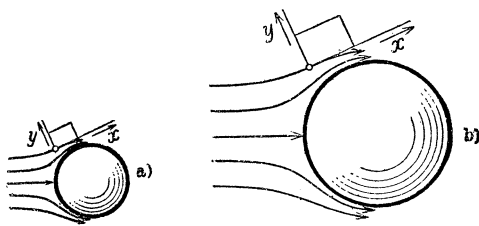


図-4 二つの異なる大きさの球の周りの流れ

2. 4 層流と乱流

粘性流れの特徴的な現象は、流れのタイプに層流と乱流の2種類があることである。すなわち、円筒の中に水を流して染料をいれて観察すると速度の遅い範囲では層をなして規則正しく流れているが、速度を増していくと突然ランダムな運動をしながら流れるようになる。前者が層流、後者が

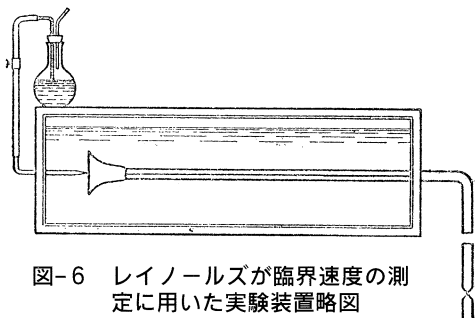


図-6 レイノルズが臨界速度の測定に用いた実験装置略図

乱流であり、層流から乱流への遷移はレイノルズ数によって決定されることがレイノルズによって示された(図-6)。更に層流から乱流に移る範囲(遷移域)の現象についても、実験的に調べられている。図-7はハーゲンの実験結果をレイノルズが整理した管内流れの抵抗係数、図-8はクエットによる実験(水を貯めた水槽から管を通して放水する際の放水速度の変化と抵抗係数の変動)を示す。なお、秩序正しく流れる層流の状態はレイノルズ数のごく小さな範囲にしか存在せず、工学的に意味のあるレイノルズ数の範囲では乱流状態が常態である。船の周りの流れは一般の船では、実船で $R=10^8 \sim 10^9$ のオーダーであり、水槽試験における大型模型船で $R=10^7$ 程度である。船の表面の流れは船首付近から層流、ついで不安定な遷移域、最後に乱流へと変化する。模型船にあっては、層流および遷移域の占める割合が実船よりも大きくなるが、これを船首にピンを立てて流れを人為的に乱して、流れを実船と同じ乱流にするという図-9および図-10に示すような工夫がなされている。乱流の状況の例を図-11に示すが、この現象が如何に複雑なものかを直感的に理解されるものと思う。しかしながら、乱流中のある一点での速度成分 U, V, W は、時間と共に変わる

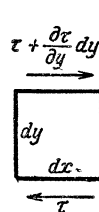


図-5 立方形の体積要素に作用する摩擦力

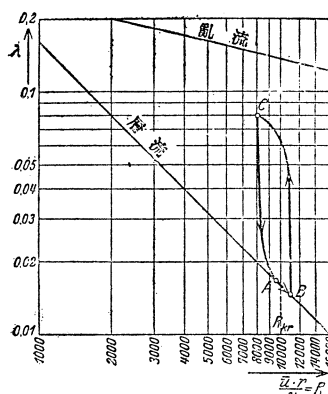


図-8 臨界状態に於ける抵抗係数の振動

ない部分 u, v, w および時間により変動する部分 u', v', w' に分けられることが経験的に判っている。すなわち、一見全く不規則で、目茶苦茶であっても、時間平均値が求められること、あるいは u', v', w' の時間的平均値が短い時間で消えるということ、これこそが乱流の本質であり、このために流れが全く不規則ということでもなくなるのである。なお、流れ計測に用いられるピトー管とマノメータの方法は装置のダンピングの為に変動する流れの時間的平均値を求めていることになる。なお、時間変動の平均値に対する大きさはブルジェルスによる空気の流れの乱れ $\pm 5\%$ 、クレーナーによる非常に大きな場合で $\pm 20\%$ 程度と報告されている。

乱流のメカニズムは非常に複雑であり、ある高名な物理学者をして自分の人生においてやり残したテーマの1つとまで言わせたものである。カオス理論の応用等近年における研究については、稿を改めて紹介したい。

3. おわりに

粘性流れの基本的性質の話は、以上でようやく19世紀の後半まで来たところである。この程度の事を書く為に、多くの先

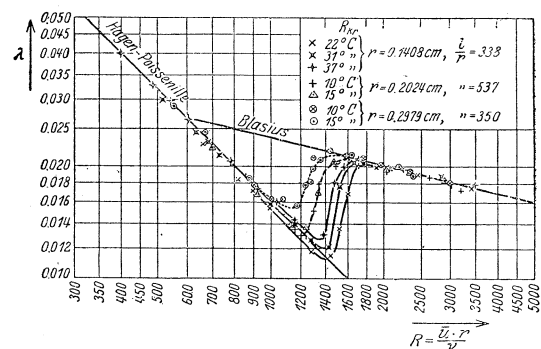


図-7 レイノルズ数の函数として表はした抵抗係数

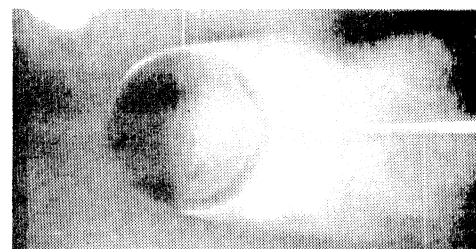


図-9 球の周りの流れ、臨界値以下 (C. ウィーゼルスベルガーに依る)

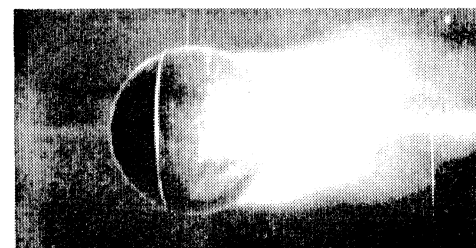


図-10 細い針金の輪をつけて臨界値以上の流れを得る (C. ウィーゼルスベルガーに依る)

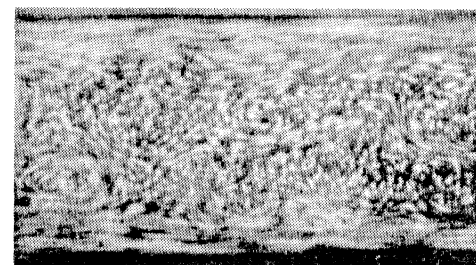


図-11 開溝中の乱流

人の100年以上にわたる地道な努力—自然の法則の理解をめざした—があることを指摘しておきたい。20世紀前半における流体力学分野の輝かしい展開は、先行する100年間の蓄積に負っている。次号では、境界層理論を中心にして紹介したい。

水槽設備の多様な活用について

新しいニーズに応える

1. はじめに

曳航水槽の本来の目的は馬力決定のための、大型模型船を用いた抵抗試験および自航試験であるが、推進性能に加えて操縦性能、耐航性能と検討すべき課題が増えるに従って、対応する試験法や試験設備が開発されて来た。造船技術センターにおいては、操縦性能に関する試験としてPMM試験、耐航性能のための造波装置をはじめとする波浪中試験用の諸装置や、更に流場計測装置、波形計測装置等を順次整備して来ている。これらの設備は大型模型船を対象に定量的に高い精度の計測を目的としていること、又、曳航水槽設備の構造、配置の関係もあって、近年におけるいろいろなニーズにフレキシブルに対応するに適しているとは言いがたい。小回りの効く対応には小型模型船を用いる回流水槽設備が適しているが、造船技術センター所有の減圧回流水槽は本来自由表面付のキャビテーションテストを目的としており、又、検討すべきテーマの多くは定量的精度をそれなりに要求し、更に流体现象を出来るだけ詳しく知ることが必要とされるケースが多い。造船技術センターにおいては、既存の2つの曳航水槽設備をいろいろなニーズにフレキシブルに対応出来るよう、各ケース毎に機能を増していくこととしている。本稿においては、第2水槽にて実施したケースをいくつか紹介する。

2. 船の周りの流れの観察と計測

曳航水槽における模型船まわりの流れの観察の実施を妨げて来た原因の一つには、水中撮影は水密容器に収めた16mmフィルムあるいはスチール写真撮影に依らざるを得ず、これら装置の扱いおよび撮影後のフィルムの処理までを含めると到底日常の業務に使えるものではなかったことにある。この事情はテレビ方式が普及した後でも変化することはなかったが、最近になって安価で、信頼性のある水中撮影装置（テレビ、カメラ等）が普及して、しかも性能も向上し、殆ど空気中で扱うような感覚で、水中撮影を行えるようになって来たことが、曳航水槽において模型船まわりの流れの観察を業務の一環として積極的に取り組むこととした理由であるが、船体まわりの流れの観察が、各種性能の評価に不可欠となっているという事情がある。図-1が、水中テレビのカメラ、照明およびスチールカメラを組み合わせた装置およびそれらを収める容器である。従前は水密容器であったが、収容する装置自体が水密であるため、単なる整流用の装置に過ぎないもので充分である。具体的な実験プロセスは、この装置で、模型船上の所定の場所を撮影して曳引車上のテレビジョンに写し出された状況を見て、流れの状況の評価することになるが、第2水槽においては例えば1m/sの速度とすれば約

180秒=3分程度の状況を継続して見ることが出来る。流れの状況は2段タフトの他に、気泡等の水を汚さないトレーサーを用いて、大型模型表面の微細な流れの現象をとらえることが出来る。回流水槽にあつては水の取換えは容易なため、トレーサーの選択に困ることはないが、簡便に水を取換えることの出来ない水槽にあつては、水質を変化させないトレーサーの選定は重要な課題である。図-2に実験装置のパーツを、又、図-3に観察例を示す。

3. 波形計測と解析

航走する模型船の後方に伝わる波形を計測し、船の造波特性を求め、更に造波抵抗を減少させるような船型改良を行う等は、従前より第1水槽に設置された波形計測装置を用いて行われてきたが、第2水槽においても同種の装置を設置し、主として小型の模型船を対象とする波形計測および船型改良を行うこととしている。図-4に高速艇の波形計測の状況を示す。波形計測結果を用いて、曳き波の小さな船型の開発に寄与している。

4. 小型模型船による船型開発のプレスタディ

船型設計の初期段階において、いろいろなアイデアやコンセプトを評価して、船型の中にとりいれることは、一般的に行われることであり、いろいろなレベル

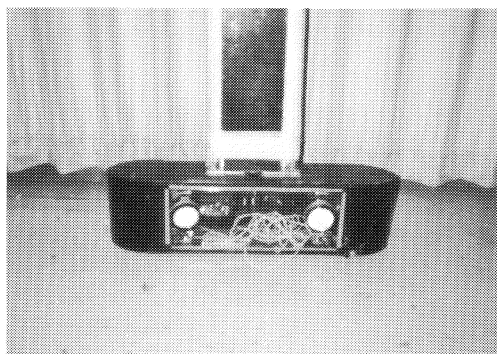


図-1 水中観察用ソーダ

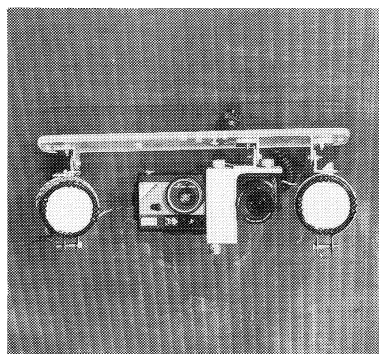


図-2-a 水中カメラ (1)

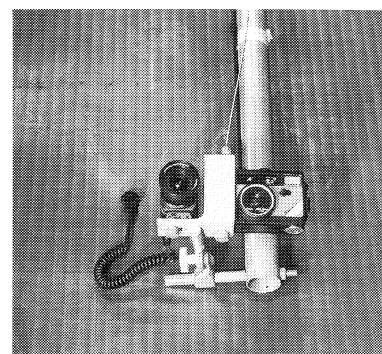


図-2-b 水中カメラ (2)

の検討が行われる。蓄積されたデータや簡単な式による計算、流体力学の理論にもとづく技術計算や水槽試験がある。特に水槽試験にあっては、その目的から短期間に結果を出すことが要求されている。小型模型を用いる回流水槽試験はこのような目的に適しているが、回流水槽には流れの場を均一に保つことや小型模型独特の粘性流れの問題に起因する精度上の難点が付随することが知られている。造船技術センターにおいては、曳航水槽の利点である試験環境の安定性と、ハンディな対応の可能な小型模型の利点を生かした試験メニューを提案し、具体的な船型改良に適用して、成果を得ている。なお、造波抵抗が全抵抗中に占める割合が高く、船型的にも粘性流れの影響の小さい小型高速艇や漁船等については既に従前より、比較的小型の模型船を使った試験で対応しているが、粘性流れ影響の無視出来ない一般専用船を対象とすることから、船長を約3 m程度とし、抵抗・自航試験の他に船体まわりの流れの観察や計測を行い、これらの結果を総合して評価することとしている。なお、試験は第2水槽にて実施することとし、模型船の製作や改造等についても、短期間の製作、多様な改造へのフレキシブルな対応への独自の工夫を取り入れている。図-5、図-6に小型模型船の製作状況および試験状況を示す。

小型模型試験の位置付けは、技術計算と同じ、プレスタディとしての比較試験としているが、実船性能との関連を無視することは出来ない。大型模型船データや実船実績との対応についても考慮する必要があること、又、性能に関する技術計算手法との組み合わせによる結果の評価等々検討を要する課題も多いが、ケースバイケースに対処して行くこととしている。

5. おわりに

大型設備から成る曳航水槽設備を顧客の多様なニーズにフレキシブルに対応するとともに、新しい技術テーマにおいて有用たらしめることが、曳航水槽に要求されている。造船技術センターにおいては、第2水槽の活用を中心テーマに据えて、積極的な対応を進めている。



図-3 流れの観察状況

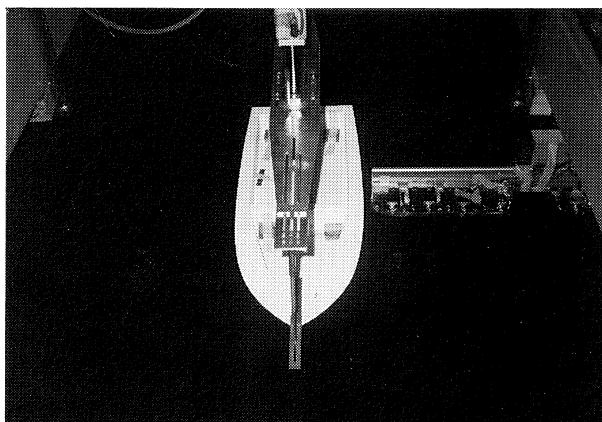


図-4 波形計測装置

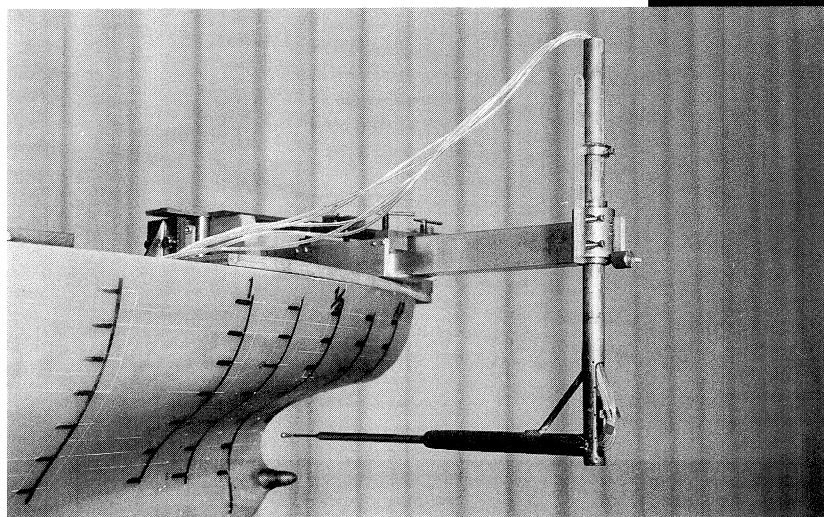


図-6 5孔ピトー管装置

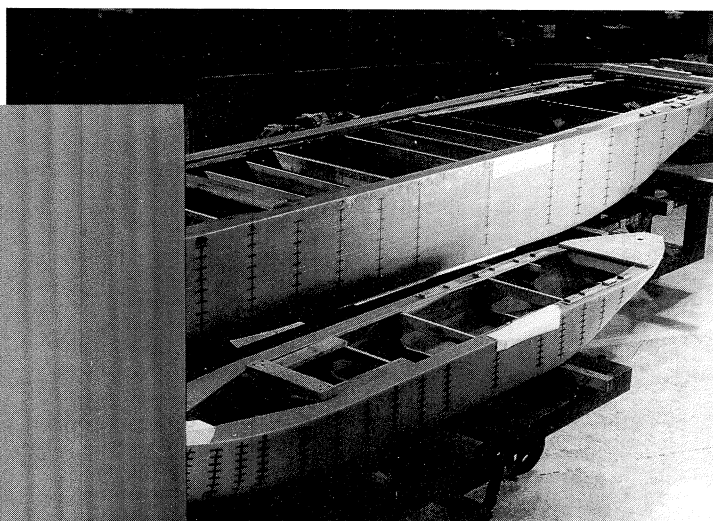


図-5 小型模型テスト

ウォータージェット推進装置装備船の馬力計算について

1. はじめに

ウォータージェット推進装置を装備する船の実船馬力を計算することは、プロペラチャートが装備され、計算手法も確立している通常型プロペラ装備船の場合に比べて、何かと不便ことが多い。

ウォータージェットの製造社の指定する全体の効率 η_a を信じ、機関馬力 BHP に η_a を掛けて求める EHP' = BHP $\times \eta_a$ と船体抵抗から求めた有効馬力 EHP とが等しくなる速力を求める程度と言っても過言ではない。ウォータージェット推進装置の特性を通常プロペラの単独特性に対応させて計算が出来れば、設計検討に大変役立つと考えられるのでそのような目的で発表されている論文⁽¹⁾の要旨を解説もあわせて以下に紹介する。

2. 馬力計算法の比較

2.1 普通プロペラの場合

船速 v_s 、抵抗 R_s および推力減少率 t 、伴流係数 w_s が与えられたとき、推力 T およびプロペラ前進速度 v_p は次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} T &= R / (1 - t) \\ v_p &= v_s \times (1 - w_s) \end{aligned} \right\} (1)$$

プロペラ直径を D_p とし、プロペラ特性のうちの $\sqrt{Kt} / J$ に対応する値を求める。

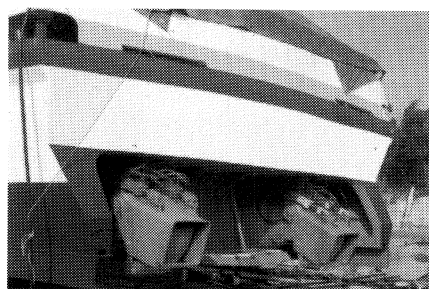
$$\sqrt{Kt} / J = \sqrt{T / \rho} / v_p \times D_p \quad (2)$$

なお、 ρ は水の密度である。

与えられたプロペラ特性曲線より、(2) 式で求めた $\sqrt{Kt} / J$ の値に対応するプロペラ効率 η_p および前進率 J を読み取り、以下のように馬力および回転数を求めることが出来る。

$$\left. \begin{aligned} BHP &= R \times v_s / (\eta \times 75) \\ \eta &= \eta_p \times \eta_r \times \eta_H \times \eta_i \\ N &= 60 \times v_p / J \times D_p \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし、 η_r は船後効率比、 η_H は船殻効



率で $(1 - t) / (1 - w_s)$ と表わす。 η_i は伝達効率である。

2.2 ウォータージェット推進装置の場合

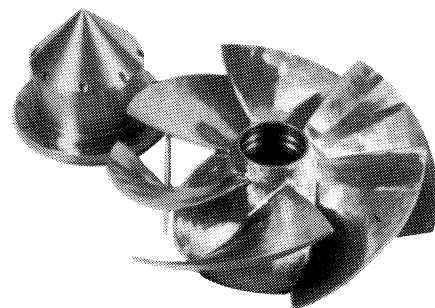
まず、基本的な量のウォータージェット推進装置と普通プロペラとの対応を決めておく。夫々の定義により対応する量は、普通プロペラの場合の、前進率 $J = v_p / n D$ 、スラスト係数 $K_T = T / \rho n^2 D_p^4$ 、プロペラ効率 $\eta_p = T v_p / 2 \pi n Q_p$ に対するウォータージェット推進装置の流量係数 $q = Q / D^2 u = Q / \pi n D^3$ 、揚程係数 $\Psi = g H_p / u^2 = g H_p / \pi^2 n^2 D^2$ 、ポンプ効率 $\eta_p = \rho g H_p Q / 2 \pi n Q_p$ がある。ただし、 v_p はプロペラ前進速度、 n はプロペラ回転数、 D_p はプロペラ直径、 T は推力、 ρ は水の密度、 Q_p はプロペラトルク、 Q は流量、 u は周速 ($= \pi n D$)、 D はポンプ直径、 H_p はポンプ揚程、 g は重力加速度である。

抵抗 R 、自航要素 t 、 w_s より、推力は $T = R / (1 - t)$ 、ポンプへの流入速度 $v_m = v_s (1 - w_s)$ が求まる。この時、流量 Q および揚程 H_p はポンプの式より、 $Q = \frac{1}{2} A_j v_m (1 + \sqrt{1 + 4 T / \rho v_m^2 A_j})$ — (3)

$$H_p = v_j^2 / 2 g \times (1 + \xi_j) - v_m^2 / 2 g \times (1 - \xi_i) + \Delta h$$

ここで、 A_j はノズル断面積、 v_j はノズル流速 ($= Q / A_j$)、 ξ_j はノズル損失、 ξ_i はインレット損失、 Δh はノズルの高さであり、これらの値から、 Q 、 H_p を求めることが出来る。

従って、普通プロペラの $\sqrt{K_T} / J$ に対



応する $\sqrt{\Psi} / q$ は $D^2 \sqrt{g H_p} / Q$ により求められる。ウォータージェット推進装置特性より、流量係数ベース (q) に $\sqrt{\Psi} / q$ および η_p の特性曲線図を作成しておき、 $\sqrt{\Psi} / q$ の値より、対応する q および η_p を読み取って、馬力および回転数を以下のように求めることが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \text{回転数 } N_p &= 60 \times Q / \pi q D^3 \\ \text{馬力 BHP} &= R v_s / (\eta \times 75) \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\text{ただし、} \eta = \eta_p \times \eta_s \times \eta_H \times \eta_i \times \eta_t$$

η_s はシステム効率と称し、

$T v_m / \rho g H_p Q$ で表せる。

3. キャビテーションのチェック

ウォータージェット推進装置のキャビテーションのチェックには吸込比速度 $S = N \sqrt{Q} / (NPSH)^{3/4}$ がガイドラインを越えないことを目安としている。ただし、有効吸込揚程 NPSH は $\text{Hatm} - H_{\text{vapor}} + H_{\text{momentum}} - H_{\text{loss}} - \Delta h$ であり、 $NPSH = 10100 / \rho g + v_m^2 / 2 g \times (1 - \xi_i) - \Delta h$ である。

ガイドラインとして、以下のような値を示しておく。

キャビテーション初生 $S = 142$

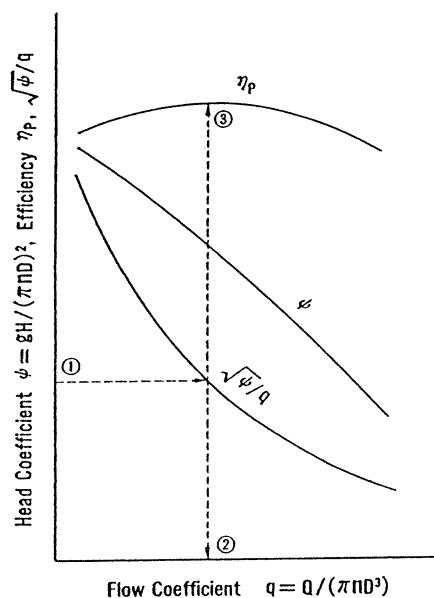
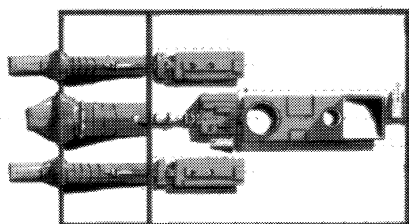
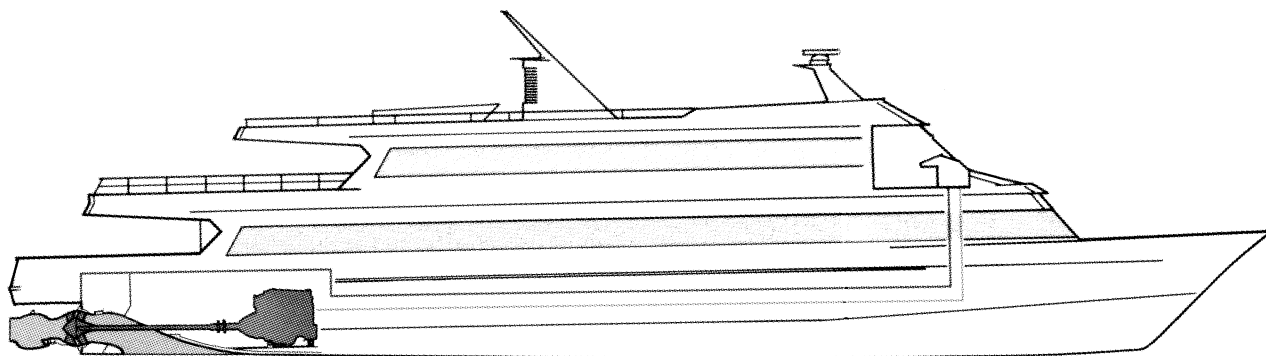
軸流限界 $S = 194$

斜流限界 $S = 239$

インデューサ付の場合の限界

$$S = 387 \sim 645$$

ただし、 n は rpm、 Q は m^3/s 、NPSH は m の単位である。



4. 計算例

台数 2
 インレット断面積 $A_i = 0.298 \text{ m}^2$
 ノズル口径 $D_j = 0.355 \text{ m}$
 ノズル面積 $A_j = 0.099 \text{ m}^2$
 ノズル損失 $\xi_j = 0.02$
 伴流率 $1 - w_s = 1.0$
 推力減少率 $1 - t = 1.0$
 船後効率化 $\eta_r = 1.0$
 海水の密度 $P = 104.52 \text{ kg s}^2 / \text{m}^4$
 重力加速度 $g = 9.807 \text{ m} / \text{s}^2$
 インペラ直径 $= 0.816 \text{ m}$
 ポンプ特性 $\psi \sim q$ 、 $\eta_p \sim q$ は与えられたとする。

$V_s = 35 \text{ knots}$
 全抵抗 15420 kg
 $\text{EHP} = 3702 \text{ ps}$
 モーメント流速 $v_m = 18.01 \text{ m/s}$
 推力 $T = 7710 \text{ kg}$
 $4T / (\rho v_m^2 A_i) = 9.196$
 流量 $Q = 3.736 \text{ m}^3 / \text{s}$
 ジェット流速 $v_j = 37.75 \text{ m/s}$
 ジェット流速比 $v_j / v_m = 2.10$
 インレット流速 $v_i = 12.54 \text{ m/s}$
 インレット流速比 $IVR = v_i / v_m = 0.696$
 インレット損失 $\xi_i = 0.250$
 インレット効率 $\eta_i = 0.750$
 ノズル高さ $\Delta h = 2.1 \text{ m}$
 ポンプ揚程 $H_p = 63.812 \text{ m}$
 流量係数 $q = Q / D^2 u = 0.147$
 揚程係数 $\psi = g H_p / u^2 = 0.430$

ポンプ回転数 $N_p = 893 \text{ rpm}$
 有効吸込み揚程 $= 20.15 \text{ m}$
 吸込み比速度 $s = 181.5$
 ポンプ効率 $\eta_p = 0.858$
 システム効率 $\eta_{sys} = 0.568$
 全推進効率 $\eta_{opc} = 7665 \text{ ps}$
 制動馬力 $\text{BHP} = 8084 \text{ ps}$
 ウォータージェット 1 台分の馬力
 $8084 / 2 = 4042 \text{ ps}$

5. おわりに

ウォータージェットの性能を普通プロペラと同じベースで評価することは、設計において重要である。本稿が多少でもお役に立てば幸いである。

なお、本稿は以下の論文をベースとしている。

Contribution to the 20th ITTC Work-shop on Waterjets.

Determination of Propulsive Performance of Waterjets in Model and Full Scale.

by T.Hoshino & E.Baba

カオス（混沌）の一側面

決定論的現象の中のカオス

1. はじめに

神は「光あれ。」と唱えて、混沌の中から、万物を創り給うたと旧約聖書の冒頭に記してある。又、不確定の時代と言われる昨今においては、混乱した状態をカオスと決めつけて手を上げる風潮もある。カオスとは何となく判ったようで判らないものであるが、少しでも判ったような気分を長びかすよう筆を執った次第である。カオス現象の説明には、川の流れにのって流れて行く木の葉が良く引合に出される。木の葉は川の流れに従いながらも、その流れて行く先々での位置を正確に予測することは出来ない。流れ始めた多くの木の葉の位置の僅かな相違は流れ下るに従って拡大して、夫々の位置の予測が不可能になること、これがカオスの性質の一つとされている。又、コインの裏表を当てたり、パチンコ台の釘の間をはねながら落下する玉の落ちていく先を推測したりする確率のからむ現象ではなく、れっきとした物理や化学の法則に決定論的に従いながらも、その現象が非線形で、初期条件に敏感であるならば容易にカオス現象が発生するとされている。その典型的な例として、単振子の強制運動の挙動が紹介されている。図-1に示す単振子の強制振動装置において、強制振動数（ Ω_F ）が単振子の固有振動数（ Ω_N ）とかなり相

違っている場合は、時計の振子のような規則的な周期運動を続けるが、 $\Omega_F \approx \Omega_N$ となると運動は不安定となって予測出来ないような単振子の挙動が現れる。 Ω_N が Ω_F より僅かに小さい場合は、何度かの複雑な挙動を経て、水平の円運動を含む規則的な単振子の運動に落ち着くが、 Ω_N が Ω_F より僅かに大きいといういろいろな運動モードが次々と現れていつまでも収束することがない。又、何度繰り返しても、同じ現象が現れることがないという実験結果が報告されている（図-2）。このような、単振子の運動という実に単純な現象の中に、典型的なカオス現象が潜んでいるのであり、その意味では我々の周囲はカオス現象に満ちているとも言えよう。

2. カオス現象の数値実験

非常に簡単な数式から得られる値もカオス現象を示すことがある。以下の式は、中学生でも知っている典型的な2次方程式である。

$$x_{t+1} = \lambda x_t (1 - x_t) \quad (1)$$

(1) 式において、初期値 x_0 を与えると x_1 が、次に x_1 より x_2 が求まるというもので、例えば、ある生物の種が現在の世代が、次世代では λ 倍に増える。あるいは投資 x_1 円に対し、収入が λ 倍になる等のいろいろな現象の理解に用いられている。このような簡単な数式の性質が判って来たのは、ごく最近のことであり、電子計算機の発達や計算費用が安価になったことが、その背景にある。この式をパーソナルコンピュータを使って λ の値や x の初期値をいろいろと変えて計算をしてみた。横軸を計算回数に、

縦軸を x_t として得られた結果の例を図-3から図-7に示す。すなわち λ の値によって、1つの値に収束したり、2個、4個、8個と異なる値を繰り返したり、又、全くランダムに見える数が脈絡もなく現れるようにみえる。例えば、 $\lambda = 2.5$ とすると、 x_t は 0.6 に収束する。 $\lambda = 3.2$ とすると、0.5130446 と 0.7994553 という2つの数値に収束して、この2

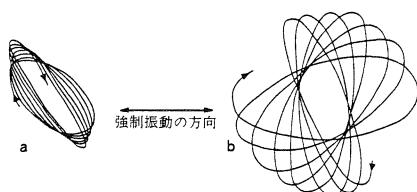
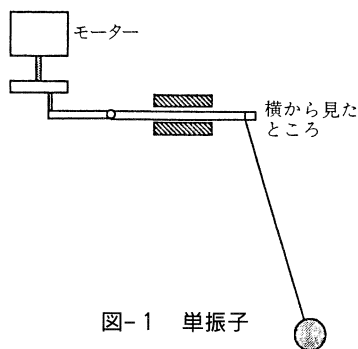


図-2 単振子の挙動

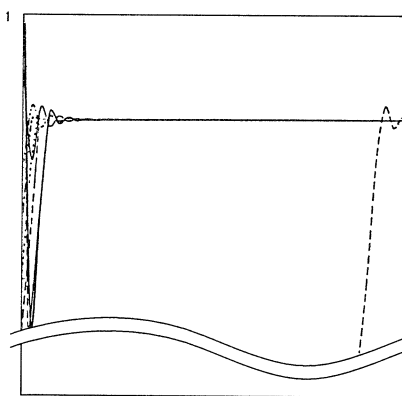


図-3 計算 (1) $\lambda = 2.5$

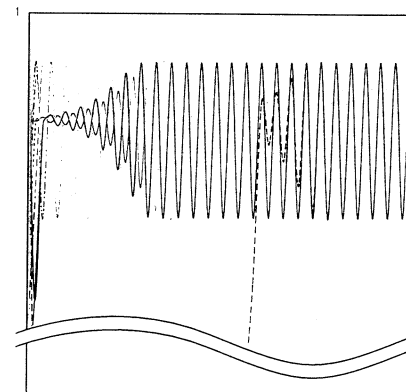


図-4 計算 (2) $\lambda = 3.3$

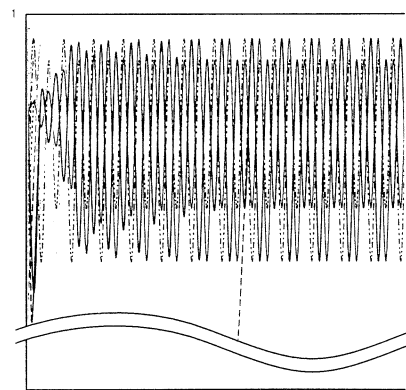


図-5 計算 (3) $\lambda = 3.5$

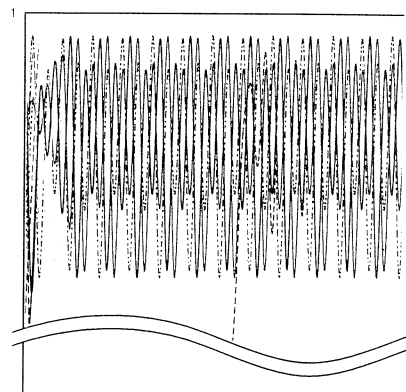


図-6 計算 (4) $\lambda = 3.55$

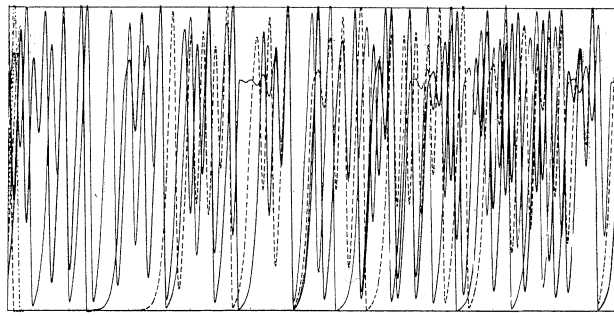


図-7 計算 (5) $\lambda = 4$

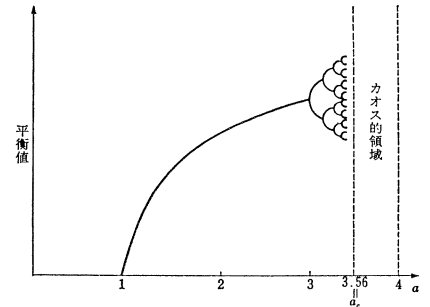


図-8 分岐ダイヤグラム

つの値を永久に繰り返す。更に $\lambda = 3.5$ とすると、0.8749971、0.3828199、0.8269407 および 0.5008839 の4個の数値に収束して、この4個の組み合わせを繰り返す(表-1)。 λ を3.9、4.0 とすると、全くランダムな値が次々に現れて来る。同じ λ で初期値を変え、僅かの初期値の差が、たちまちのうちに数百倍、数千倍という相違となってしまうことがわかる(表-2)。このように一見ランダムに見えながらも、これらの数値は間違いなく、コンピューターを使って1式より求めたものである。このような性質は既に数学者によって研究され、図-8に示されている。すなわち $\lambda < 3$ では x は1つの数値に収束し、 $3 < \lambda < 3.5699 \dots$ では、まず、先に示したような2つ、4つの数値に続いて、8、1

6と2のべき数で表される数の x の値に収束していくことが判っている。数学用語では、収束する数値の数を周期、収束した夫々の数値と λ との関係を軌道と称するが、周期が充分に大きい場合には、 2^n の周期の軌道は1つ前の 2^{n-1} の周期の軌道に対し、 λ 方向に4.66920166...倍、 x 方向に2.502908...倍すると、両者の軌道は完全に一致することが証明されている。以上のような次々と周期の増えていく性質は周期倍増の分岐、又、2つの数値はファイゲンバウム数と言われる。

コンピューターによって簡単な掛け算を繰り返すことにより、深遠なカオスの世界の一端に触れたが、このような簡単な式の中にこのような真実が潜んでいることは驚くべきことと言わざるを得ない。

3. 今後に向けて

カオス現象は決定論的法則に正しく従いながら、条件次第では一見ランダムともみえる現象が現れること、それが僅かの初期条件の違いが予測出来ないような大きな差となることを簡単な数値実験で示した。このような現象は自然現象は勿論、社会、経済現象の中にも見られるものとされており、その意味では微分方程式の定常解を求めるような工学におけるスタンスを考えなおす必要があるように思える。我々の周囲においても、永遠の課題とされる乱流現象をカオス理論により検討することが進められており、又、船の安全性についても、カオスの考えを適用する試みがなされている。今後共、このような新しい分野に関心をもち、フォローし、船型技術の新たな展開を図るべく努めたい。

表-1 ロジスティック写像計算例(1)
 λ と初期値を変えた場合

n	① $\lambda = 2.5$		② $\lambda = 3.2$		③ $\lambda = 3.5$	
0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5
1	0.4	0.525	0.768	0.800	0.84	0.875
2	0.6	0.6234375	0.5701632	0.512	0.4704	0.3828125
3	0.6	0.5869074	0.7842468	0.799392	0.8719334	0.8269348
4	0.6	0.6061174	0.5414520	0.512896	0.3908292	0.5008976
5	0.6	0.5968476	0.7945015	0.7994765	0.8332859	0.8749970
6		0.6015512	0.5224603	0.5130042	0.4862216	0.3828202
7		0.5992182	0.7983856	0.7994588	0.8743355	0.8269410
8		0.6003892	0.5150912	0.5130381	0.3845551	0.5008835
9		0.5998050	0.7992712	0.7994559	0.8283536	0.8749972
10		0.6000973	0.5133975	0.5130436	0.4976436	0.3828197
11		0.599512	0.7994254	0.7994554	0.8749804	0.8269407
12		0.600243	0.5131021	0.5130446	0.3828636	0.5008842
13		0.599877	0.7994505	0.7994554	0.8269766	0.8749972
14		0.6000060	0.5130539	0.5130446	0.5008019	0.3828197
15		0.5999968	0.7994546	0.7994554	0.8749976	0.8269405
16		0.6000014	0.5130461		0.3828185	0.5008843
17		0.5999991	0.7994552		0.8269396	0.8749970
18		0.6000003	0.5130448		0.5008865	0.3828201
19		0.5999998	0.7994553		0.8749971	0.8269410
20		0.6000000	0.5130448		0.3828199	0.5008834
21		0.6000000	0.7994554		0.8269407	0.8749972
22			0.5130446		0.5008839	0.3828196
23			0.7994553		0.8749971	0.8269405
24			0.5130447		0.3828200	0.5008846
25			0.7994554		0.8269408	0.8749972
26			0.5130445		0.5008838	0.3828197
27			0.7994553		0.8749971	0.8269406
28			0.5130447		0.3828199	0.5008841
29			0.7994553		0.8269408	0.8749971
30			0.5130446		0.5008839	0.3828200
31					0.8269409	
32					0.5008836	

表-2 ロジスティック写像計算例(2)
 λ と初期値を変えた場合

n	$\lambda = 3.9$				$\lambda = 4.0$	
0	0.50	0.51	0.501	0.5001	0.40	0.4001
1	0.975	0.97461	0.9749961	0.9749999	0.96	0.9600799
2	0.0950625	0.0965068	0.0950769	0.0450626	0.1536	0.1533057
3	0.3354999	0.3400536	0.3355453	0.3355002	0.5200281	0.5192122
4	0.8694648	0.8752268	0.8695231	0.8694652	0.9983953	0.9985234
5	0.4426332	0.4258987	0.4424653	0.4426321	0.0064084	0.0058976
6	0.9621652	0.9535850	0.9620900	0.9621647	0.0254693	0.0234512
7	0.1419728	0.1726165	0.1422438	0.1419746	0.0992824	0.0916049
8	0.4750843	0.5569981	0.4758409	0.4750894	0.3577015	0.3328537
9	0.9725787	0.9623296	0.9727236	0.9725798	0.9190134	0.8882483
10	0.1040104	0.1413801	0.1034759	0.1040062	0.2977110	0.3970526
11	0.3634497	0.4734278	0.3617976	0.3634367	0.8363165	0.9576071
12	0.9022806	0.9722461	0.9005103	0.9022667	0.5475647	0.1623826
13	0.3438641	0.1052358	0.3494068	0.3439075	0.9909503	0.5440577
14	0.8799241	0.3672287	0.8865545	0.8799769	0.0358703	0.9922356
15	0.4120648	0.9062498	0.3922448	0.4119081	0.1383363	0.0308163
16	0.9448428	0.3313482	0.9297163	0.9447352	0.4767974	0.1194666
17	0.2032478	0.8640705	0.2548411	0.2036213	0.9978464	0.4207773
18	0.6315587	0.4580653	0.7405987	0.6324226	0.0085956	0.9748950
19	0.9075000	0.9681416	0.7492377	0.9066104	0.0340472	0.0978988
20	0.3273806	0.1202893	0.7327341	0.3302049	0.1315519	0.3532584
21	0.8587899	405.3535倍		0.8625614	0.4569839	0.9138676
22	0.4729521			0.4623419	0.9925983	0.3148543
23	0.9721468			0.9494692	0.0293874	0.8628841
24	0.1056018			0.1130531	0.1140951	0.4732603
25	0.3683552			0.3910611	0.4043096	0.9971398
26	0.5219736	227.059倍		0.928716		
27	0.9716807			0.2581899		
28	0.1073174			0.7469586		
29	0.	639.64111倍				
30	0.					

Case ① ② ③
周 期 1 2 4

造工中手船型研究会の活動について

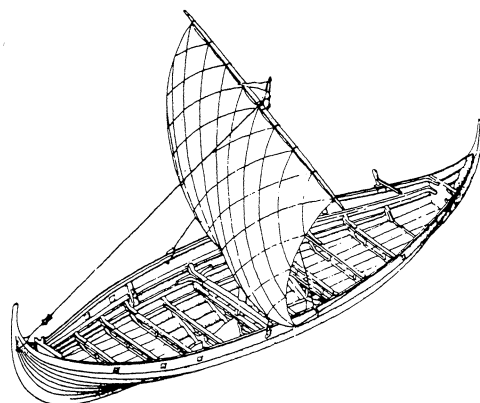
Ship Hydrodynamic Research Committee、通称HRCは、主要な造工中手各社と造船技術センターがメンバーとなり、船型に関する技術ポテンシャルの向上をめざす研究会であり、各社共通の技術課題のリリースを協力して進めて来ている。基本的なテーマとしては、各社の船型設計のペースとなる主要な船種に関する船型性能データの整備、設計ツールとなる理論計算ソフトの開発および利用手引きの整備、重要テーマに関係する基礎研究等があり、時代のニーズに対応して、適切なテーマを選定し、内容を審議して、具体的な研究の展開を図って来ている。基本的な船型データの蓄積を重点指向して、推進性能試験を次々と実施した時代から、ランキンソース法等の性能推定プログラムや基礎研究に重点を置いた時期、新しく開発されたPDプロペラシステムにより設計されたプロペラの評価等

参加各社にとり、技術ポテンシャルを支える柱となっている。

最近においては、IMOの暫定基準発効に端を発する操縦性能評価に関する研究が進められており、有用な成果が期待されている。

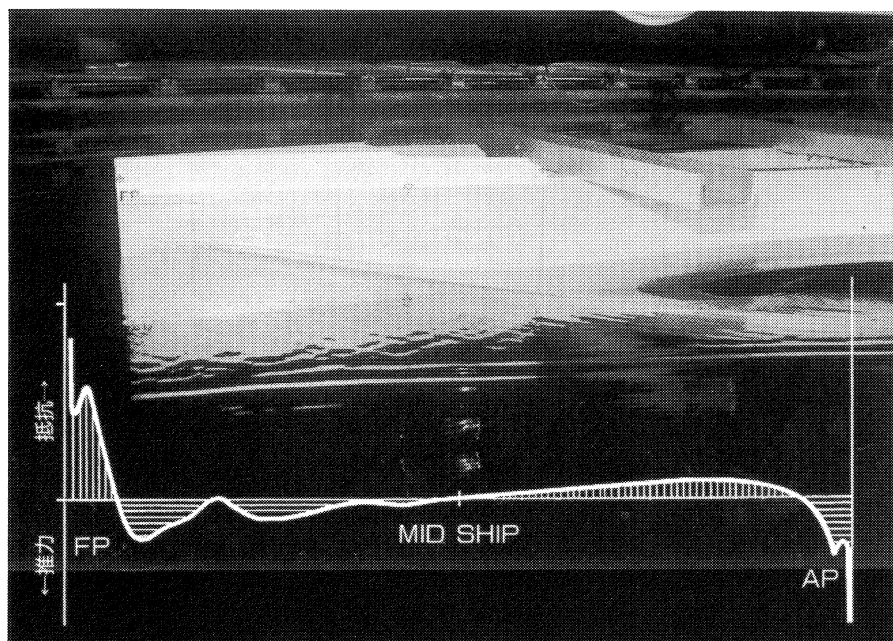
なお、運営は委員会方式により行われ、委員長および事務局を造船技術センターが担当し、年4～6回の委員会において、計画の審議と結果のフォロー、評価が行われる。各社メンバーは基本設計課長又は係長クラスを主とし、必要に応じて、部長あるいは担当者クラスが出席することがある。新しい技術課題については、大学の先生や公的機関の専門家をお招きしてご指導頂くこととしている。

今後共、メンバー各社の技術の一端を支え、発展を図るべく、積極的な活動を展開して行きたい。



船舶整備公団研究発表会にて講演

船舶整備公団が実施している研究の成果発表会が、平成8年10月18日、消防会館会議場にて開催された。講演テーマの中で、新しい19GT型旅客艇の開発につき、船型計画から性能評価の範囲を同公団に協力して説明を行った。すなわち、従前の船長に関する規制がはずされたJCLルールの適用を前提として、新しいタイプの高速旅客艇の計画において実施した既存データの分析、主要目の選定、客室内の配置の比較検討、機関室高さの主機との関係および重量等に関する検討を総合し、速力22ノットの性能達成を目標として、具体的な線図設計と模型船による水槽試験を実施して、既存船に比べて顕著な性能向上の得られたことを報告した。なお、データとしては、通常の抵抗、自航試験結果の他に、プロペラ位置伴流分布、船体表面上の流れのパタンの観察が行われていることを付け加えた。更に具体的な詳細設計、船価見積りおよび運航採算評価が引き続いて進められており、その成果の待たれるところである。



分割模型試験

戦後の物価の優等生は卵であるという見方が一般には定着しているようである。昭和30年（1955年）の物価統計によれば、豆腐1丁が14円、米1kgが85円、卵1個が12円というから、この40年間に豆腐と米はそれぞれ7倍近く値上がりしたのに対し、卵は現在でも20円を切る程度だから50%値上がりしたに過ぎない。

なる程、卵は物価の優等生といわれる所以（ゆえん）である。

卵の値段が上がらなかったのは、生産規模の拡大と、卵をよく生む鶏の開発及び飼育技術の開発にあったといわれている。

現在の鶏は、身動きして余分なエネルギーを消耗しないよう、薄暗い鶏舎で一羽ずつが格子で仕切られて延々と並べられた上、ベルトコンベアーで運ばれてくる餌を飛ばさないよう嘴（くちばし）の先端は切られ、隣同志の鶏が鶏冠（とさか）を突つき会わぬよう鶏冠も切られ、ホルモン剤の入った高カロリー餌で飼育されている。そして少しでも産卵率が下がるとブロイラーに回されるが、この時に取り除かれた羽は、加工されて再び飼料に使われるのである。このような話を聞くと、誰も「鶏に生まれないで良かった」と思うであろう。

しかし、鶏の開発も飼育技術も飼料も全て米国生まれであるため、日本の生産事業者は毎年のように米国から新しい雛（ひな）と飼料を購入させられているのである。何のことはない、物価の優等生を支えて来たのは大部分が米国の技術なのだ。

ところで、卵以上に素晴らしい物価の優等生がいる。それが造船である。オイルショックの直前に最高値となったトン数当たりの船価はその後低迷、失礼！多

分、造船業界の懸命な合理化と努力によって、ここ40年間、価格を維持し続けているのは皆さんの方がよくご存じだと思う。

しかも卵と決定的に違うのは生産合理化のための技術の大部分は日本生まれであり、中身の薄くなった卵と違って中身も濃くなっているのである。

製造業の代表、乗用車でさえ、中身が濃くなったとは言え国産車の価格は同期間に3倍近くになっているのである。造船業は労働集約型産業であることと、顧客の要求に応じて一品毎に製造されるオーダーメイドであるという点でよく建設業と比較され、事実、非常に似た産業であると思っている。

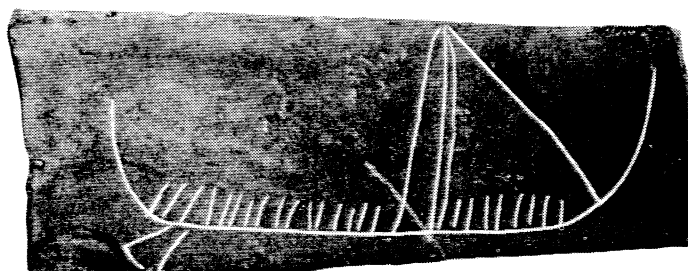
ところが、日本の造船業界は世界一の労働賃金を支払いながら、労賃が日本の3分の1程度と言われる韓国の造船業よりも強い競争力を有しているのである。かたや、建設業は全く国際競争力がない。全く同じ仕様で建物を造ると、米国や韓国では日本の半額以下で出来るという。勿論土地代抜き価格だ。

造船業界の景気はフライパン景気だという人もいる。「底ばかりで一寸上がってもすぐ落ちてしまう」からだそうだが、努力の結晶、造船業界は胸を張ろう！物価の優等生は造船なのだから。

編集後記

秋も深まり、北の山では既に降雪が始まっています。造船界の様子は同型船の連続建造が続いており、低船価とは言えそれなりの業績が新聞には報告されていますが、各社の合理化努力の成果であり敬意を表します。さて、このような時にこそ次の時代への充電が必要です。造船技術センターにあっても、従来からの技術のキープは勿論必要ですが、いろいろな分野への展開をめざしております。その一端を紹介する意味で、カオスの話をごく簡単に、又、古い話で恐縮ですがブラントル、ティーチェンス両先生の教科書によって、粘性流体力学の基礎の復習をしてみました。船体の摩擦抵抗の減少が21世紀の技術開発の重要なテーマとなっておりますが、その為には粘性流れの基本に立ち返ると共に、乱流現象や界面の物理等の新しい考え方を導入していく必要があると考えます。又、設計における最適化手法に遺伝的メカニズムの応用が試みられておりますが、船型やプロペラの設計にも応用し得るのではないかと考えております。思いの丈だけで、必ずしも実力の伴わぬ状況ではありますが、21世紀をめざし職員一同頑張りま

すので宜しくお願い致します。（K. T）



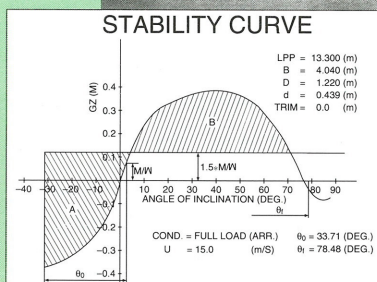
新造船と復原性



船名 第十一八平丸

船主	鈴木 篤幸
造船所	守屋造船所
竣工	平成8年7月
総トン数	14トン
航行区域	限定沿海
主要寸法(m)	長さ × 幅 × 深さ 13.30 4.04 1.22
主機	連続最大出力 495PS 回転数 2,100rpm 基数 1基
最大速力	23 ノット
旅客定員	28名

千葉県鴨川市吉浦沖合いを主漁場とする遊漁兼用船である。本船は風圧側面積が大きいにもかかわらず、設計等に創意工夫がなされ、重心降下も図られ安定した性能を有している。



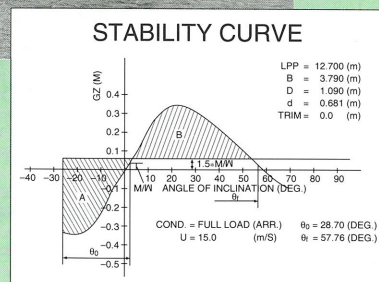
第十一八平丸の復原力曲線と判定図

船名 はやかわ丸

船主	早川 松栄
造船所	(有) 瀬賀造船
竣工	平成8年7月
総トン数	11トン
航行区域	限定沿海
主要寸法(m)	長さ × 幅 × 深さ 12.70 3.79 1.09
主機	連続最大出力 690PS 回転数 2,200rpm 基数 1基
最大速力	20 ノット
旅客定員	31名



新潟県三島郡寺泊町を母港とし、佐渡海峡沿岸を主漁場とする遊漁船である。本船は船幅が若干狭いが、風圧側面積を小さくする等の工夫がなされており、安定した性能を示している。



はやかわ丸の復原力曲線と判定図

申込みの受付

試験等の申込み、問合せは当センター企画室までお願いします。

〒171 東京都豊島区目白1-3-8

TEL 03-3971-0266 FAX 03-3971-0269

財団法人 日本造船技術センター (SRC)