

抵抗と推進の流体力学

—— 水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ ——



大阪大学名誉教授 田中 一朗
琉球大学教授 永井 實

シップ・アンド・オーシャン財団

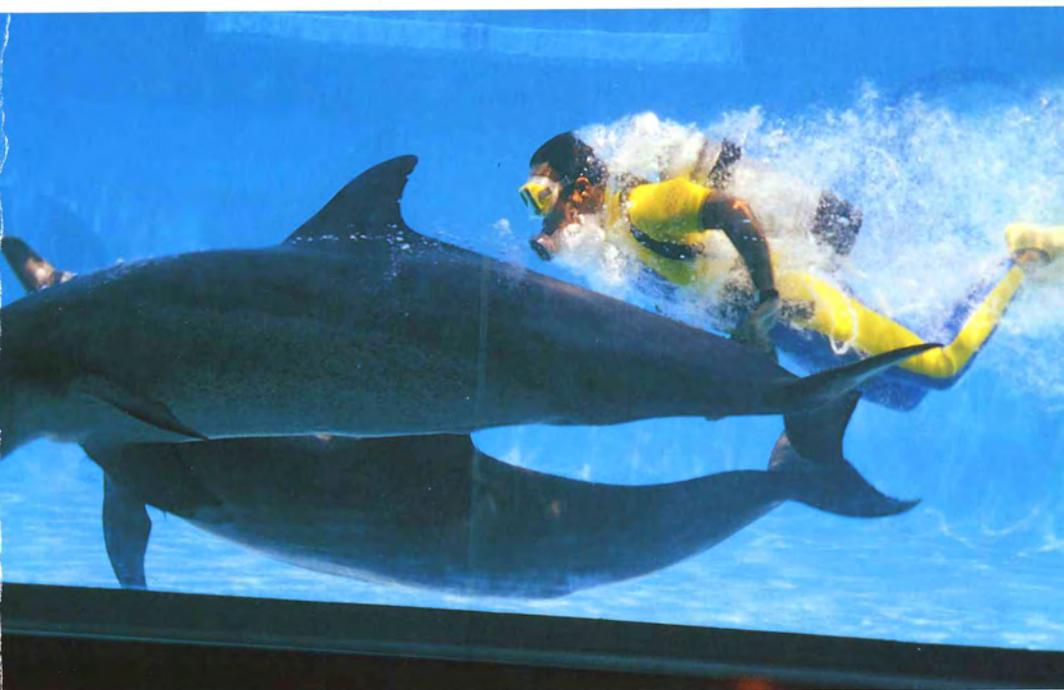
抵抗と推進の流体力学

—— 水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ ——

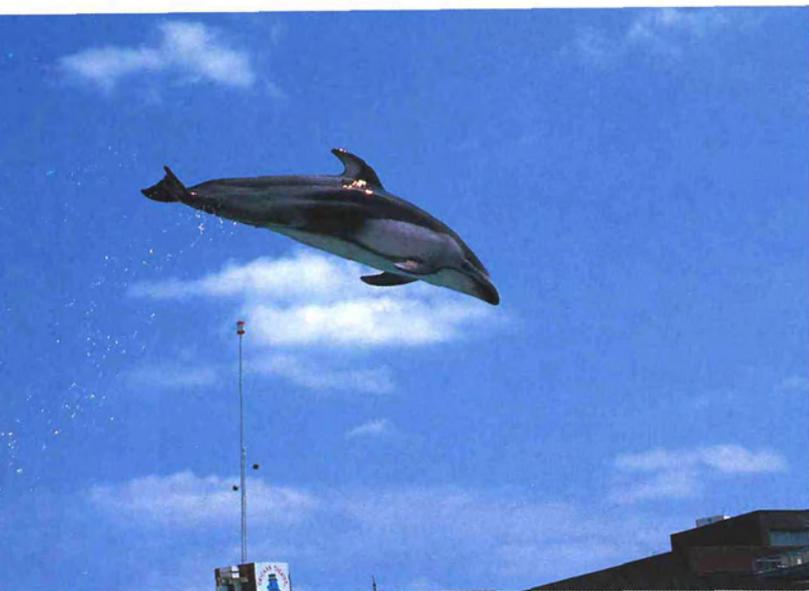
大阪大学名誉教授 田中 一朗
琉球大学教授 永井 實



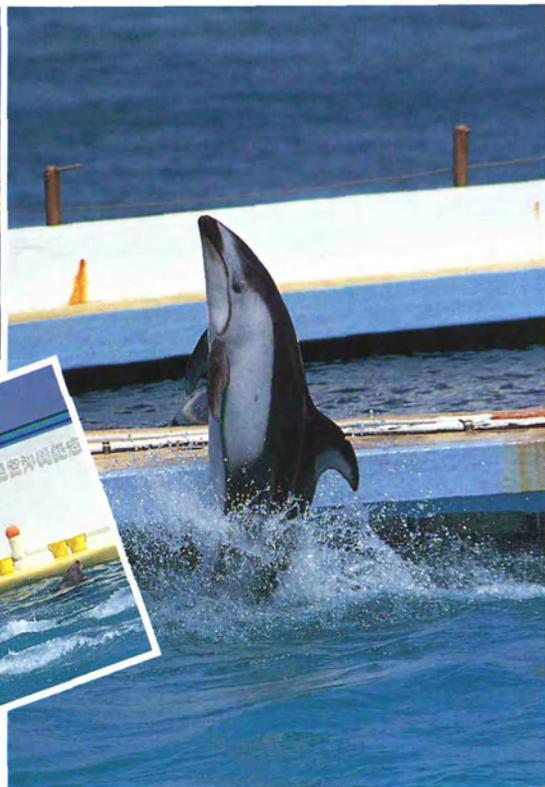
1. 遊泳するキハダ (国営沖縄記念公園, 水族館大水槽, 1996.4.9撮影)



2. イルカスタジオのミナミバンドウイルカ、クロとムク(手前) (国営沖縄記念公園, 1996.4.9撮影)



3. ジャンプするカマイルカのトッポ(オキちゃん劇場, 1996. 4. 9)

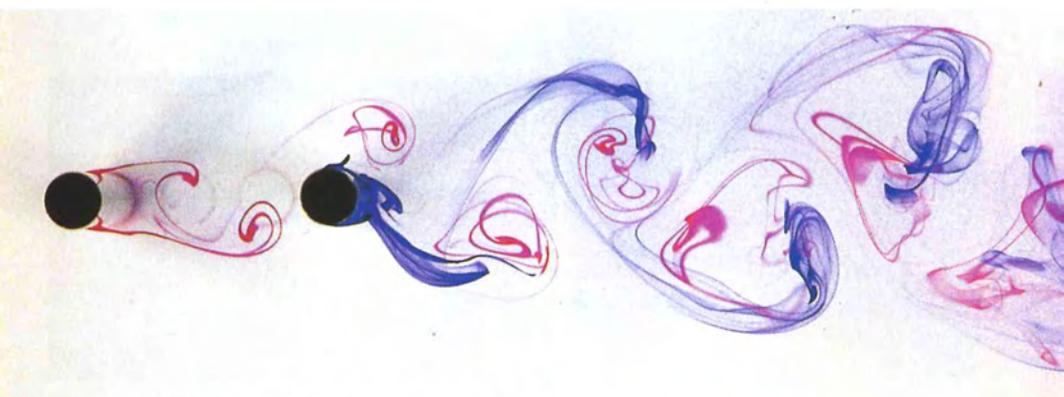


4. テイルウォーク(立ち泳ぎ)を行うカマイルカのトッポとミナミバンドウイルカのダン(手前)とボイ, 尾びれ運動のみでその体重を支えている(オキちゃん劇場, 1996. 4. 9)

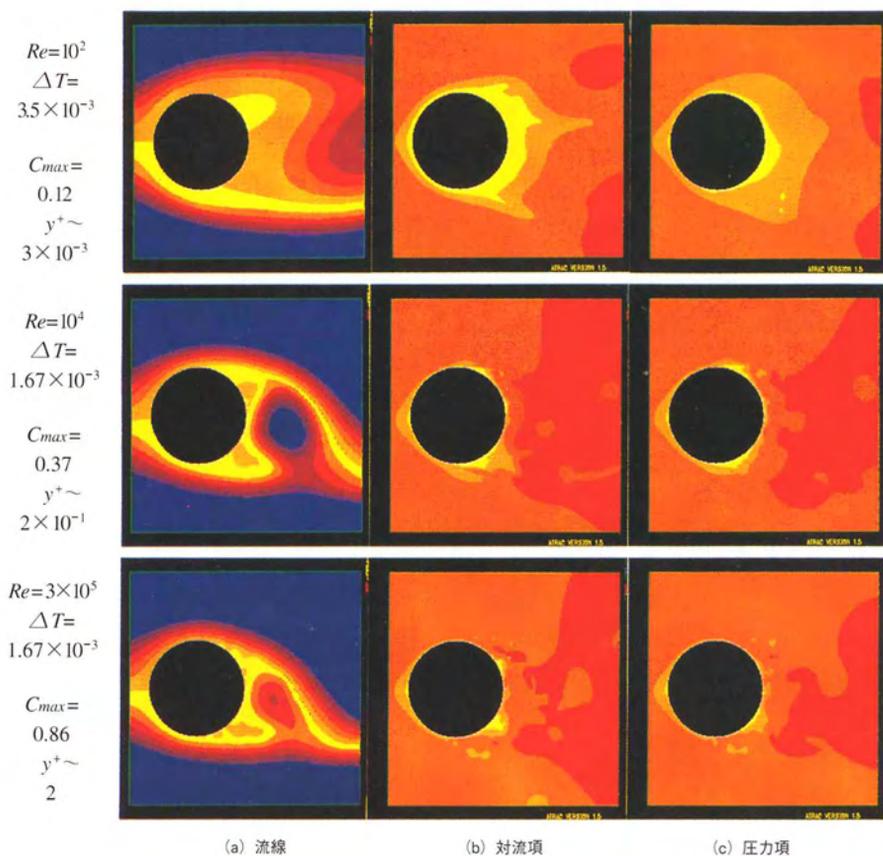
5. ミナミバンドウイルカのダン(右, 右下写真も)
とポイ(左)(オキちゃん劇場, 1996. 4. 9)



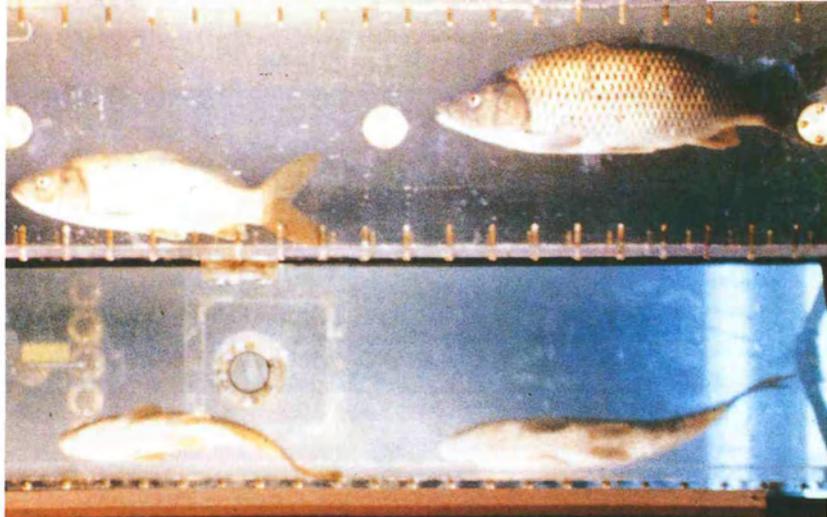
6. ジャンプするコピレゴンドウクジラのゴン(オキちゃん劇場, 1996. 4. 9)



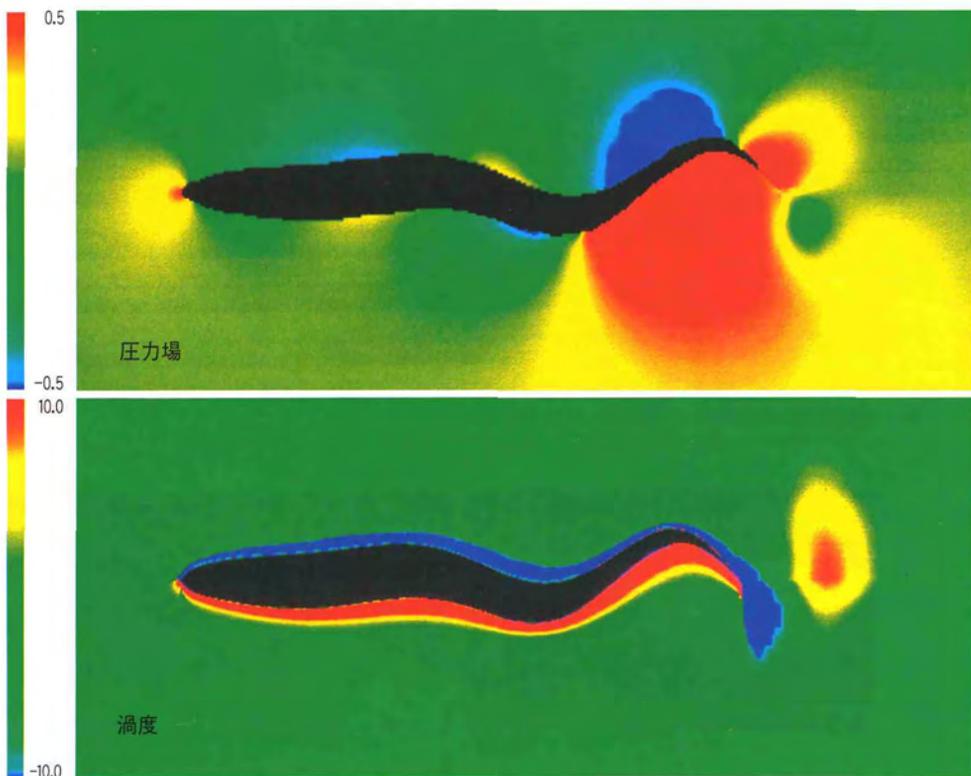
7. 流れに平行に置かれた2円柱後方のカルマン渦列 (東京大学 小林敏雄教授提供⁽¹⁾)



8. 数値計算による円柱まわりの流れ (機械技研, 松宮氏ら^[2]の好意による)



9. コイの泳運動の観察 (琉球大学小型回流水槽, 下は45°傾斜鏡による下面図, 16mmフィルム, 1979年)

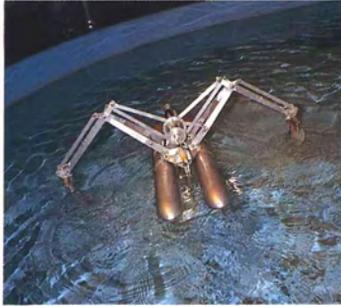


10. CFDによる魚体モデルまわりの流れ $Re=10^4$ (圧力場は赤が正圧, 青が負圧. 渦度は赤が反時計回り, 青が時計回り. 神戸商船大学 戸田保幸助教授提供³⁾)

11. 東海大学のメカニマル達⁽⁴⁾ (海洋科学博物館, 1995. 5. 19撮影)



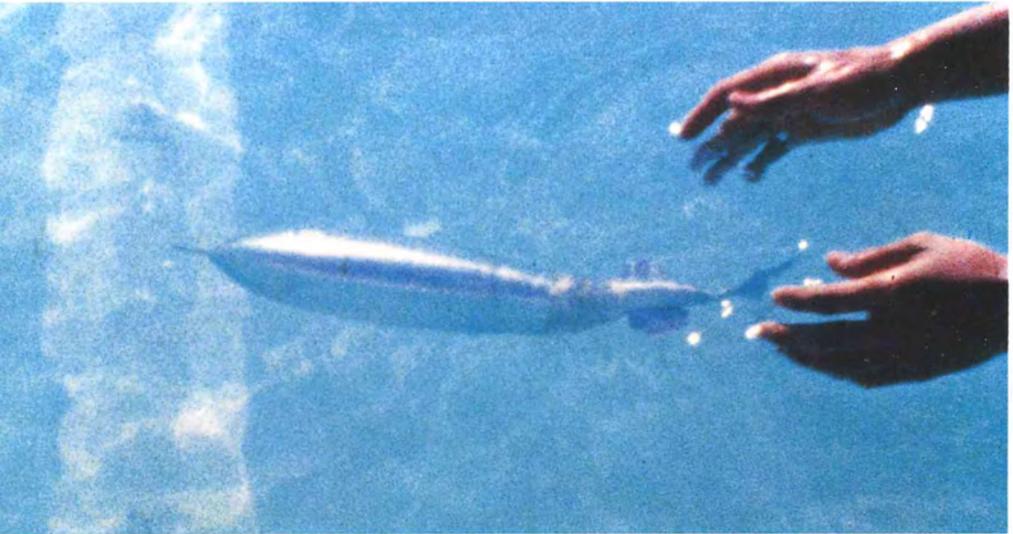
ススメダイ (全長45cm)



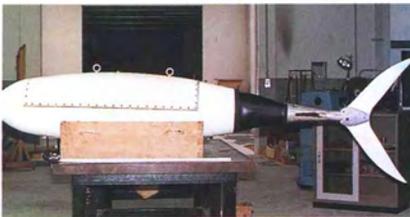
オオウデウミバシリ



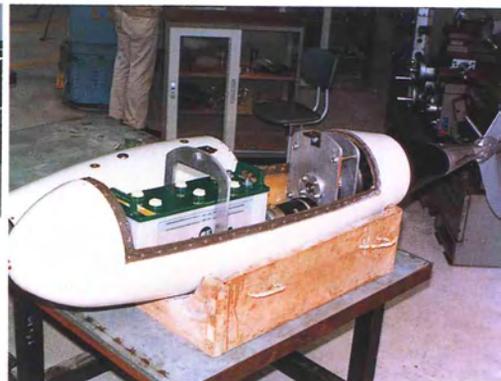
フタヒレイルカ(全長60cm)



12. 小型自動機械魚の遊泳実験 (体長39cm, 琉球大学, 1979年)

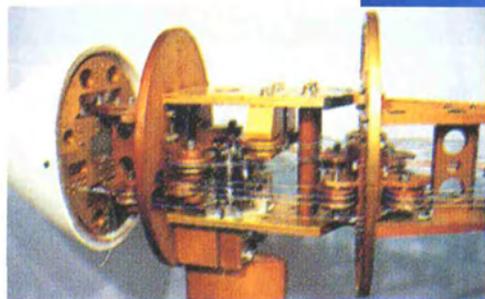
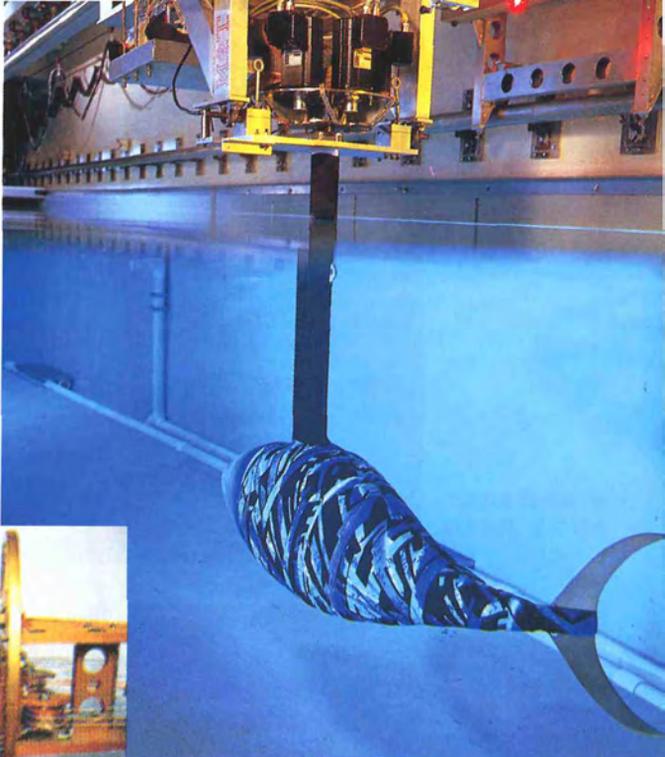


13. 大型自動機械魚 (体長232cm, 琉球大学, 1983年)





フタヒレウミバシリ



14. RoboTunaチャリー⁽⁵⁾ (体長132cm, M.I.T. トリアンタフィロ教授とサイアンティフィック・アメリカン社の好意による)





15. 振動翼推進船の実験風景(琉球大学, 1995年)



16. 振動翼推進船3号機
(琉球大学, 1996年)



17. 振動翼推進船の後流
(琉球大学, 1995年)

ごあいさつ

本書はモーターボート競走公益資金による日本財団の平成7年度補助事業として実施しました「基礎発想力高揚のための魚類運動メカニズムの研究」の結果をとりまとめたものです。

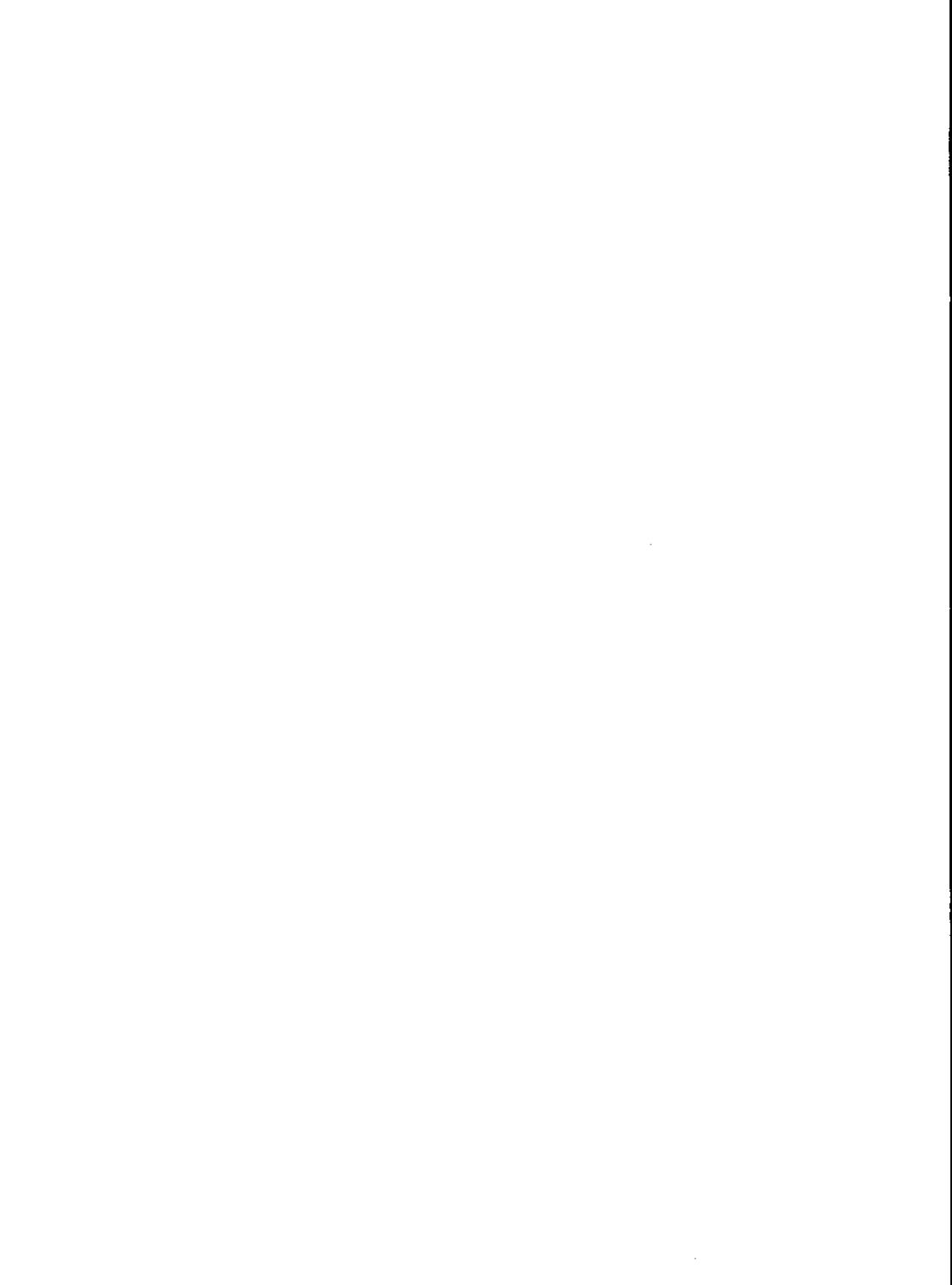
今日まで、自然界に存在する水中移動体である魚類などの生物学的動作、又、運動メカニズム等の造船技術等への適応については、数多くの研究が行われてきました。本書は、これら個々に存在している内外の研究論文等を収集、解析、評価し、この情報を盛り込みながら、水中における生物の運動メカニズム等について、技術的に体系だった記述で、学生及び若手研究者が今後学習・研究を進めて行く上での基本書となることを目的に刊行したものです。

刊行にあたっては、大阪大学田中一朗名誉教授と琉球大学永井實教授に具体的な検討と執筆をお願いしました。本書はこれら両氏のご尽力によるほか、関係各位のご協力により刊行されたのもであり、これらの方々に対し心から感謝の意を表する次第です。

本書が、これからの造船業を担う学生・研究者をはじめとする多くの方々にとって、技術開発に対する新鮮な発想力への喚起となれば幸いに思います。

1996年8月

財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団
会長 今市 憲作



目次

まえがき	1
主要記号	5
単位系と単位の換算	7
第1章 緒論	9
1.1 はじめに	9
1.2 本書で扱う魚及び水棲動物の種類とその泳ぎ方	10
1.3 魚の遊泳速度	14
1.4 抵抗と推力の意味：船の場合，魚の場合	20
1.5 周期運動を含む現象の無次元量	23
1.6 魚の泳ぎの研究の歴史	29
1.7 グレイのパラドックス	36
第2章 流体運動と抵抗の力学	39
2.1 力の認識の歴史	39
2.2 ニュートンの流体力学とその限界	40
2.3 理想流体の力学とそのパラドックス	45
2.4 実在流体の力学	53
2.4.1 ナビエ・ストークスの方程式	54
2.4.2 小さな粘性の効果	56
2.4.3 レイノルズの相似則	58
2.4.4 境界層理論	60
2.4.5 層流と乱流	63
2.4.6 数値実験と物理実験	65
2.4.7 実在流体中の翼の運動	68
第3章 推進の力学	75
3.1 推力発生の原理	75
3.2 運動量理論	76
3.3 細長物体理論 (Slender body theory)	80
3.4 振動翼推進理論	86
3.5 振動翼の特性計算	101
3.5.1 特異点分布法に基づく弾性翼の計算例	101

3.5.2	粘性流体における剛体翼の計算例	105
3.6	魚体まわりの流場と流体力の計算	107
第4章	高速遊泳能力の解明	117
4.1	次元解析	117
4.2	抵抗低減の可能性	122
4.2.1	トムズ効果	124
4.2.2	微小突起による抵抗低減：リプレットの場合	130
4.2.3	リプレットの実用例（アメリカ杯ヨットレース）	134
4.2.4	我国における最近の研究	135
4.3	淡水魚の抵抗測定と遊泳能力の観察	137
4.3.1	回流型整流水槽	137
4.3.2	供試魚の体形	139
4.3.3	抵抗係数の比較	143
4.3.4	映画による泳運動の観察	144
4.4	イルカの泳運動の観察	148
4.4.1	国営沖縄記念公園水族館	148
4.4.2	イルカの体形	150
4.4.3	イルカの泳運動	151
4.4.4	イルカの最高速度	154
4.5	淡水魚およびイルカのパワーの推定	159
第5章	船舶推進への応用と展望	169
5.1	ヘルテルらの研究	169
5.2	わが国における研究	173
5.3	琉球大学における研究	178
5.3.1	自動機械魚	178
5.3.2	振動翼推進船	187
5.4	MITの研究	195
5.5	水棲動物に学ぶ船舶設計	197
5.5.1	水棲動物の形状と船の抵抗	197
5.5.2	振動翼実船設計の試み	200
あしがき		205
参考文献		209
索引		214

まえがき

近年の科学技術の進歩は目を見張るものがあり、正に20世紀科学技術文明の棹尾をかざるにふさわしい感がある。工学、産業技術の分野でも過去には想像することさえできなかった高性能の機械、新しい装置等が出現し、我々は豊かで快適な生活を楽しむようになった。周りにはコンピュータなど文明の利器があふれ、自動車、電車、船、飛行機等の高速交通機関が日常生活に不可欠のものとなっている。

しかし、しばし自然の中にたたずみ、鳥や魚を眺めるとき我々は何を思うであろうか。鳥のように空を飛びたいと思い飛行機を実現させたのは人間の叡知であった。しかし、音もなく自由自在に空を飛ぶ鳥を見ると、人工物の世界と自然との間にはなお歴然とした差を感じざるを得ない。一方魚は正に船のお手本である。もっとも魚のように海の中を思いのままに泳ぎたいと憧れて船を作ったという表現は、船の数千年の歴史を考えると、鳥と飛行機の話とは若干感覚が異なることは否めない。しかし、素朴な意味ではやはり魚は船の一つの理想像であったのであろう。以後長い船の歴史の中で、現在ではタンカー、コンテナ船等が世界の経済を支え、更に近年はTSL(Techno-Super Liner)が新しい船舶輸送の担い手として開発されるなど、船は人間の生活に欠くことのできないものになっている。しかし、身近な自然にもどり、鯉の池を泳ぐ悠然とした姿、イルカの想像を絶する高速並びに瞬発遊泳能力、クラゲの優雅な泳ぎ等を見ると、人工の船をはるかに超越する水棲動物の遊泳にただ驚嘆する他はない。これだけ科学技術が発達、進歩した時代にあっても、我々は自然に接し、動物の運動を観察すれば、常に人工物とは異

なる、人智の及ばぬ生物の動きに感動するのである。我々は常に自然に学び、生物を手本にしなければならない。我々はもっと動物の動きを知らなければならない。

本書執筆の動機は正にこのような思いからである。著者らは、それぞれ船舶海洋工学及び機械工学の分野で流体力学の教育と研究にたずさわっているので、このような水棲動物の遊泳の秘密を流体力学の立場からあらためて考察するとともに、その工学的応用についてもまとめることを計画した。具体的には魚及びイルカ、クジラ等の哺乳動物を含む水棲動物の泳ぎについて、直進運動に焦点を絞りその抵抗、推進法、推進力発生機構等を考察してみたい。また動物の泳ぎに学び、工学的応用をさぐる第一歩として研究が進められている人工魚ないしは振動翼推進装置についても述べる。

生物は恐らく何万年、何億年も前から生息、進化し、環境に最もよく適合する形で今日生きているのであろう。従って運動効率は高く、消費エネルギーは小さい状態の下に自然と共生して生きているに違いない。それ故、水棲動物の運動をあらためて考察し、生態学的、物理学的原理を確認ないし発見することができれば、今後の造船技術、流体機械工学等に生かすことができ、将来に向けて大変有益であると考えられる。

シップ・アンド・オーシャン財団では、造船界の発展のためにはこのような考え方を具体化することが必須であるとの認識の下に、水棲動物の泳ぎの流体力学の現状と船舶を中心とする工学分野への応用について調査研究を行うことを計画・決定し、今市憲作大阪大学名誉教授を委員長とし、著者ら二人が加わった委員会が発足した。ちなみに委員会名は「基礎的発想力高揚のための魚類運動メカニズムの研究委員会」と称した。その後今市委員長の財団会長就任に伴い、作業は二人で進められ、執筆

に至ったものである。

読者対象としては、大学、学部学生及び大学院生を中心に考えたが、高校生にも、また第一線の研究者の参考にもなるよう内容と記述に配慮した。流体力学の教科書ではないので、極力数式の使用は控えたが、内容は流体力学の部類に勿論属するものである。従って必要に応じ流体力学の成書も参考にしていただきたい。

本書の内容は、上記研究委員会の討論、この分野における従来の研究のサーベイとレビュー、著者の一人永井の研究等を柱とし、それに種々肉付けをしてまとめたものになっている。まとめに際し、多数の研究者の著書、論文を参考にした。これらは巻末に一括して参考文献として掲げてあり、各著者に深い敬意と感謝を捧げる。特に今世紀この分野の学問進展の原動力となった、Sir Gray, Prof. Bainbridge, Sir Lighthill, Prof. Hertel, Prof. Wu, Prof. Webb, 谷一郎 教授, 東昭 教授, 田古里哲夫教授, 一色尚次教授の著書、論文には大きな感銘を受けたことを記して謝意を表したい。

著者らの執筆分担は次の通りである。すなわち、まえがきおよび第1章は田中、第2章と第3章から第5章の過半を永井、ただし3.5節、3.6節、4.2節および5.5節は田中、あとがきを永井が執筆した。なお、著者らは互いの語り口を尊重して、できれば著者の顔が見えるような親しみやすい文章にすることを申し合わせてあったが、恐らく読者諸氏には執筆者の違いを感じられない程に、両者は原稿を交換し、相互に推敲を行ったことはいうまでもない。

執筆にあたり多くの研究者の方々からご援助、ご助言をいただいた。マサチューセッツ工科大学トリアンタフィロ教授、機械技術研究所松宮輝主席研究官、東京大学谷口伸行助教授、東京大学加藤洋治教授、同じく

宮田秀明教授，東海大学加藤直三教授，大阪府立大学奥野武俊教授，神戸商船大学戸田保幸助教授，大阪大学鈴木博善助手の方々には，貴重な写真をはじめ多くの資料並びに情報を快くご提供いただいた。また国営沖縄記念公園水族館内田詮三館長にはイルカの運動の観察，撮影等で大変な便宜をはかっていただいた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

また文献調査，資料の整理および原稿の清書に大変助力をいただいた，大阪大学工学部船舶海洋工学科福田朋子氏，琉球大学工学部機械システム工学科大学院学生喜納芳洋君，同研究生関紅旭君に感謝する次第である。

最後に末筆ながら，本書の執筆・出版が可能になったのはすべてシップ・アンド・オーシャン財団のご高配によるものであることをここに記し，あらためて深甚なる感謝の意を表させていただく。また財団の方々の終始変らぬご援助に対し厚く御礼申し上げる次第である。

本書が，水棲動物の流体力学の理解のため，またそれからの発想による造船技術・海洋開発の新たな進展に向けていささかでも貢献するところがあれば，それは著者らのこの上なき喜びである。

平成8年（1996年）8月

田中一朗

主要記号

A	:面積または振幅	k	:バネ定数
a	:軸流干渉係数または無次元速度	L	:揚力または代表長さ
a	:加速度 (ベクトル)	l	:体長, 代表長さ
B	:幅	M, m	:質量
b	:振幅または回転方向干渉係数	m_a	:仮想質量
c	:翼弦長または波の伝播速度	N, n	:回転数, 周波数
C_D	:抗力係数 (抵抗係数)	P	:動力, 仕事率
C_L	:揚力係数	p, p_a	:圧力, 大気圧
C_M	:仮想慣性モーメント係数	Q	:流量またはトルク
C_P	:動力係数	q	:速度または動圧
C_T	:推力係数	R	:半径, アーム長または抵抗
C_{TA}	:周期平均推力係数	Re	:レイノルズ数
c_f	:摩擦抵抗係数	S	:面積
c_p	:圧力係数	s	:流線に沿う座標
D	:抵抗, 抗力または直径	St	:ストローハル数
d	:直径	St_{Sw}	:泳動ストローハル数
de	:水力等価直径	Sw	:泳動数
F	:力	Sw_R	:アーム長 R を代表長さとする泳動数
F_M	:仮想質量力	T	:力または周期
f	:周波数, 振幅または管摩擦係数	t	:時間
f	:力 (ベクトル)	U, V	:速度
f_{r}	:無次元振動数 (換算周波数)	u	:速度または速度の x 方向成分
g	:重力の加速度	u^+	:無次元速度 ($= u/u^*$)
H	:ベルヌーイ関数	u^*	:摩擦速度 ($= \sqrt{\tau_0/\rho}$)
h	:変位	v	:速度または速度の y 方向成分
J	:前進係数 (または前進常数)	v'	:速度の増加量
K_T	:推力係数	W	:重量
K_Q	:トルク係数	w	:速度の z 方向成分または相対速度

x, y, z	:距離 (座標軸)	μ	:粘性係数
y^+	:壁からの無次元距離 ($= yu^*/\nu$)	ν	:動粘性係数 (動粘度)
α, α_a	:角度または変位	ρ	:密度
β	:角度	添字	
ω, ω_0	:渦度, 角速度または 角振動数 (円周波数)	$0, \infty$:標準, プロペラ単独, 壁面または基準状態
λ	:前進率または波長	A, a	:平均または大気
τ	:応力, 摩擦応力	b	:物体, 固体
Γ, γ	:循環	f	:摩擦力
ε	:揚抗比 (C_L/C_D)	max	:最大
η	:効率, 推進効率	opt	:最適
δ	:境界層厚さまたは角度	w	:水

単位系と単位の換算

物理学および工学の分野の事象に関与する物理量を表現するには、その次元と単位系が重要である。単位系としては工学関係では昔から重力単位系（工業単位系，工学単位系ともいう）が用いられてきたが，1960年に国際単位系（Le Système International d' Unités. 世界共通の略称としてSIと表記する）が採択され，船舶海洋工学，機械工学その他多くの工学の分野でSIが使用されるようになった。従って本書でも基本的にはSIを使用することにする。ただ，従来から慣用的に使われているSI以外の単位で今も頻繁に使用される単位が船舶海洋工学にも機械工学にも存在する。例えば海里，ノットなどがそうであるが，他にも本書ではイルカの体重をいう場合，やはりSIのニュートンではなく日常用語としてのキログラムが分かり易い。また，昔の文献はほとんど重力単位系またはCGS単位系で書かれている。このようなことから，基本的にはSIを用いるが，適宜他の単位系も使用することにする。使用上の便利のために主要な物理量について比較・換算表を表1.1から表1.3に示す。

表 1.1 単位系と単位 (物理量)

	長さ (<i>L</i>)	質量 (<i>M</i>)	時間 (<i>T</i>)	力 (<i>F</i>)	圧力 (<i>p</i>)
SI単位	m メートル	kg キログラム	s	N ニュートン	Pa, N/m ² パスカル
重力単位 (MKS系)	m メートル	kgf · s ² /m	s	kgf 重量キログラム	kgf/m ²
CGS単位	cm センチメートル	g グラム	s	dyn ダイン	dyn/cm ²

	仕事 (エネルギー)	仕事率 (パワー・動力・馬力)	粘度, 粘性係数	動粘度, 動粘性係数
SI単位	J ジュール (N · m)	W ワット (J/s)	Pa · s パスカル秒	m ² /s
重力単位 (MKS系)	kgf · m	kgf · m/s メートル制馬力 (仏馬力) PS	kgf · m ²	m ² /s
CGS単位	erg エルグ	erg/s エルグ毎秒	dyn · s/cm ² ポアズ, P	cm ² /s ストークス, St

換算法

$$1\text{N} = \frac{1}{9.807} \text{kgf} \quad 1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 = \frac{1}{9.807} \text{kgf/m}^2$$

$$1\text{J} = \frac{1}{9.807} \text{kgf} \cdot \text{m} = 10^7 \text{erg} \quad 1\text{W} = \frac{1}{9.807} \text{kgf} \cdot \text{m/s} = \frac{1}{735.5} \text{PS}$$

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = \frac{1}{9.807} \text{kgf} \cdot \text{s/m}^2 \quad 1\text{St} = 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$$

$$1\text{cSt} = 10^{-2} \text{St} = 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$$

表 1.2 速度の換算表

m/s	km/hr	kt, kn, ノット (メートル制)
1	3.6	1.944
0.2778	1	0.5400
0.5144	1.852	1

表 1.3 動力の換算表

kW	kgf · m/s	PS
1	101.97	1.3596
0.009807	1	0.01333
0.7355	75	1

第1章 緒論

1.1 はじめに

池の鯉を見ていると、鯉はただだまって、しかし自由自在に水の中を泳いでいる。時には悠々と、時にはすーっと驚くほどの早さで、また時には水面上に勢いよくはね、体の全体が空中に飛び出すことさえある。このような鯉の動きに代表される魚の運動は一体どのようなメカニズムから生まれるものであろうか。あのスマートでシンプルな鯉の体からどのようにしてこのような色々な、思いのままの遊泳が可能なのであろうか。

このような素朴な、しかし自然な疑問は昔から多くの人々が抱いてきたもので、その解明のため様々な物理学あるいは生物学的研究がなされてきた。しかし、一見簡単そうに見える事柄でありながら、科学的理解は必ずしも十分ではなく、今世紀に入ってようやく動物生態・生理学以外の分野として、流体力学的研究が進むようになった。現在では魚の運動の流体力学についてかなりの知見が得られ、体系化への努力が続けられており、その成果を基礎に工学的応用も次第に試みられるようになってきた。魚の動きを模擬したロボット魚の出現も間近いことと考えられている。

本書は、このような興味深い魚の運動とその工学的応用を紹介するもので、前半部では流体力学的見地から基本原理を説明する。原理が分かれば実際に応用し、出来れば物まで作りたいと思うのは自然の成り行きであるので、後半部で具体的に船あるいは水中機械を設計、製作する試みについて紹介する。ただ、魚の動き一つ考えても、それには多くの形

態があり、直進、旋回、停止、上昇、下降などたえず種々異なる運動をしている。これらは勿論体自体の他に尾びれ、胸びれなど多くのひれの複雑な運動によりなされるものであるが、本書では最も基本的な直進運動に焦点をしばって考えることにする。

直進運動を取り扱う際に、直ちに考えられるのは抵抗と推進力の概念である。魚が泳ぐのをみて思うことは、魚は何故あれ程スムーズに、あるいは何故あれ程速く泳ぐことができるのかということである。換言すれば、魚の抵抗は一体どの位なのか、通常の物体に比べて大変小さいのではなからうか、あるいは魚の推進力は想像以上に大きいのではなからうか、もしそうだとすれば、魚の推進法のどういう所が優れているのだろうか、などの疑問である。そこで、本書では抵抗と推進という二つの問題を主題として考える。

1.2 本書で扱う魚及び水棲動物の種類とその泳ぎ方

簡単に魚と言ってもこれには勿論大変な種類がある。これからその泳ぎ方、抵抗、推進等を考えるにあたって、まず本書で対象とする魚の種類と類似の水棲動物について述べるとともに、その泳ぎ方について説明しておきたい。魚には観賞用として身近な金魚から、アジ、サバ等中間的な大きさの速い魚、体長のもっと大きいマグロ、サメのような高速回遊魚等々あげ出すときりがない位に多くの種類、形態がある。また、魚類ではなく哺乳

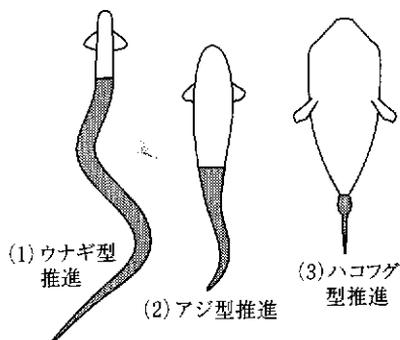


図1.1 魚の泳ぎ方の3種類
(Breder, 1928) ⁽¹⁾

類であるがクジラ目に属するクジラ（体長5m以上），イルカ（同5m以下）も魚と同様の水中遊泳を行う．一方ウナギは他の魚類とは形状が非常に異なり，全身をくねらせて上手に泳ぐ．軟体動物にはイカ，タコがあり，クラゲも優美に泳ぐ．

さて、魚の泳ぎ方は大別して次のように考えるのが普通である．

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| (1) ウナギ型 (Anguilliform) 推進 | 細長い体全体をくねらせて泳ぐ |
| (2) アジ型 (Carangiform) 推進 | 尾びれと体の後半部を使用して泳ぐ |
| (3) ハコフグ型 (Ostraciiform) 推進 | 体はほとんど使わず尾びれだけを動かして泳ぐ |

この分類と命名はBrederに依るものである⁽¹⁾．図1.1はこれを図示したもので、流体力学者が動物の運動に深くかかわる契機を作ったグレイ (Gray, J. 1891-1975) の名著 *Animal Locomotion*⁽²⁾ 中の図を基に描いたものである．勿論実際には極めて多種多様の魚、水棲動物がいるので、中間的な場合も存在することはいうまでもない．参考のため、ウナギと、最も数の多いアジ型の代表としてアジとカツオ、それにハコフグの写真を図1.2に示す．魚ではなく哺乳動物のイルカ、クジラの泳ぎは(2)の型である．水棲動物の泳ぎで他の代表的な型としては、水を後方に噴出して泳ぐイカ型推進もあるが、以下本書では通常魚の推進法である(2)を中心に流体力学的考察を行うことにする．

普通の魚の代表的な泳ぎ方を連続写真で示したものが文献(2)に種々示してある．図1.3はその一つで、コダラの泳ぎの各瞬間の形と位置を示している．その特徴として次のような点が指摘できる．

- (1) 体の前半分は余り左右に動かない．
- (2) 左右に振るのは体の後半部で尾びれ端が最も大きい．

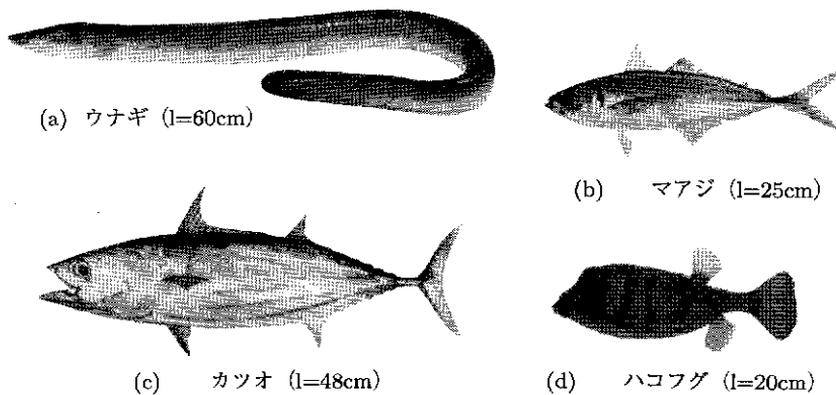


図1.2 ウナギ, マアジ (クロアジ), カツオ, ハコフグの側面写真
1: 体長 (日本産魚類大図鑑⁽³⁾より)

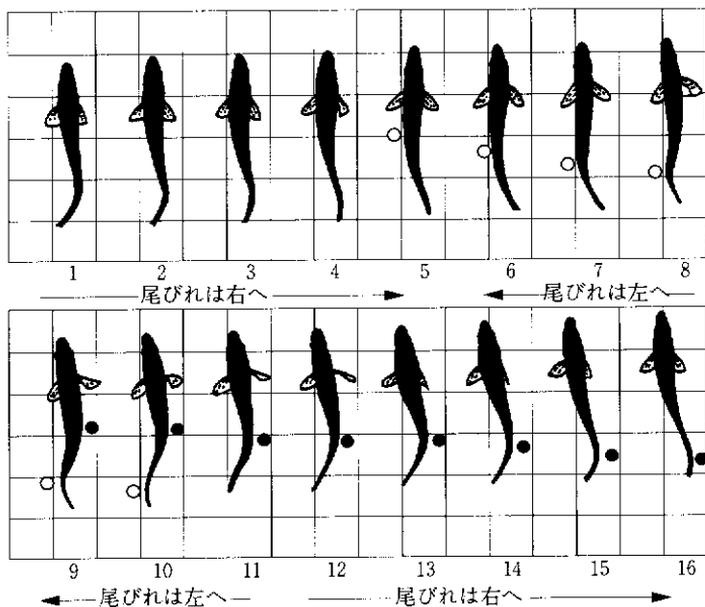


図1.3 コダラの遊泳形態 (Gray, 1968)⁽²⁾

- (3) 尾びれは左右へ振れるが、各々の運動の変わり目にすばやく方向を変え、常に後方へ水を押すような姿勢になるようにしている。(尾びれの動く方向を左、あるいは右と著者が記入した)
- (4) コダラの場合少しわかりにくいだが、注意して動きを眺めると、体を左右にくねらせる動きは波動となって頭部から尾部の方へ伝わっているのが認められる。つまり体の各部分を左右に動かす場合に前方の部分の左右動より位相が若干おくれて後方の部分が動き、これが順次後方へ伝わり、頭部から尾部への進行波を形成する。目印として最大曲率と思われる場所を●及び○印で示した。これらの点は写真のコマの横枠より下方に動いているので、波速は魚の前進速度より大きいことがわかる。

尾びれを左右（または上下）に振る振動数は早い場合は10～20 Hz（ヘルツ）にも達するので、肉眼では詳細な運動はわからないが、カメラ撮影により調べられた結果魚はこのような実に見事な運動を行っていることがわかった訳である。ウナギの場合は全長にわたりほぼ同じ振幅で体を左右に振って泳ぎ、体が細長いので進行波を前方から後方に送りながら泳ぐ様子もっとはっきりしている。そのためその泳法が(1)のウナギ型と呼ばれるわけである。一方(3)の泳ぎは体本体は動かず尾びれだけが扇子のように左右に動くもので、尾柄のところが回転軸になって扇ぐように運動する。従って一見(2)の推進法の尾びれだけ取り出したようにも思われるが、そうではない。(2)では尾びれの付け根の尾柄も前方の体の左右動により左右に動くため、回転軸部自体が左右振動を行うという構造になっている。換言すれば、(3)の方法はバネのある一つのヒンジ（関節）の回りの可撓翼のピッチングであるが、(2)は体の後半部を表現する二つあるいはもっと多く多ヒンジのシステムになっており、その先

端についている翼がピッチングをするということになる。本書の後半で、魚の推進法をとりいれた機械魚を作る試みを紹介するが、それにはこのような推進法のモデル化が基本になっているとすることができる。図1.4に多関節モデルの模式図を示す。

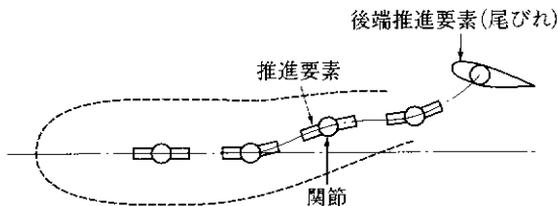


図1.4 多関節魚体モデル

1.3 魚の遊泳速度

普通の魚及びイルカ類を対象に直進運動を考えるとすれば、まず注目すべき基本量は勿論遊泳速度である。これについては観測の他に実験室での実験もあり、データ量は多いが、何しろ魚は生物であり、定常状態で計測することは中々大変である。また、計測状況も千差万別であり、工学的計測値のような精度は最初から期待する訳にはいかない。しかし多くのデータを整理すると興味ある結果が得られる。その一例を図1.5に示す⁽⁴⁾。図は永井によるもので、観測値、実験値等とともに、次元解析と抵抗相似則から得られた表面境界層が層流の場合の $U \propto l^{\frac{2}{3}}$ 及び乱流の場合の $U \propto l^{\frac{3}{4}}$ の2種の理論線と、参考として引いた $U \propto l$ の直線が示されている。ただし U は魚の速度、 l は体長である。理論線の導出については若干の説明が必要であるが、これは後述する。この図からわかることは、

- (1) 魚の遊泳速度は体長が大きい程一般に速い。ただし、体長の例えば何乗に比例するのかなどの法則性については確定していない。

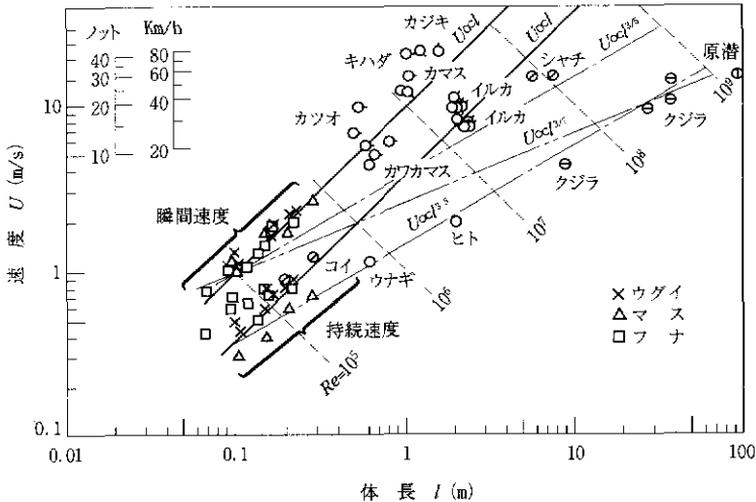


図1.5 種々の遊泳体の速度 (流体力学ハンドブック,1987) (4)

- (2) 瞬発速度と(遊泳)持続速度とは2~3倍程度の差がある。
- (3) カジキ(マグロ), イルカ, シヤチ, クジラ等の水棲動物は40ノット程度の極めて高速で泳いだというデータがある。これは水中翼船あるいは最近の高速船の速度に匹敵する。
- (4) レイノルズ数から考えて魚の表面境界層は乱流と考えられるが, その前提で計算した理論線 $U \propto l^{\frac{3}{5}}$ より速度はかなり速く, 層流としての線 $U \propto l^{\frac{3}{2}}$ さえ超えて参考線 $U \propto l$ に近いデータが多い。 $U \propto l$ の線は単なる参考線であって簡明な理論的裏付けのない関係式であるが, 水棲動物, 特にイルカ, カジキ等は流体力学の常識から考えられる速度よりなお速く泳ぐということを示すデータになっている。なおレイノルズ数は U, l , 水(海水あるいは淡水)の動粘性係数 ν から作られる無次元量であり, Re と書き, $Re = Ul/\nu$ で与えられる。これについては読者諸氏は既に熟知されていると

思うが、詳しくは流体力学の成書を見られたい。第2章でも説明する。層流、乱流についても同様に第2章で述べてある。

上記の内、特に(3),(4)については、現象が顕著であるにもかかわらず未だ詳細が不明で、種々の説が提示されているが定説は得られていない。魚の推進において最大の未知問題となっている。これは提起者の名を冠してグレイのパラドックス（背理）と呼ばれているが、これについては節をあらためて更に論じる。

魚、イルカ等が泳ぐ際には尾びれ及び体の後半部を振る速さ、つまり振動周波数が遊泳速度に大きくかかわってくると思われるが、図1.5にはそれが入っていない。そこでこの点について資料を示しておきたい。Bainbridgeはケンブリッジ大学動物学教室において多くの丁寧な魚の遊泳の観察、実験を行い、種々のデータを発表している。1958年の論文⁽⁵⁾ではウグイ、マス、金魚について詳細な実験を行い、その結果を様々な角度から分析している。その中で尾びれの周波数 f （ヘルツ，Hz）と対体長比速度（毎秒体長の何倍進むか） U/l （1/sec）の関係を調べ、 U/l はほぼ f に比例するというデータを得ている。永井⁽⁶⁾はやはり回流水槽においてティラピア（図4.18に体形図）、ギンブナ、コイについて遊泳状態を側面及び下面から撮影し、その分析結果をBainbridgeのデータを含め整理した。その結果を図1.6に示す。これによると尾びれの振動数 f に比例して対体長比速度が増加することが分かる。また興味深いのは魚の種類が異なるにもかかわらず、データ点がほぼ直線上に並んでいることで、これから永井はこの線は普遍的法則を与えるとして U/l と f の比を Sw と書き、泳動数（swimming number）と名付けた。すなわち

$$Sw = \frac{U}{fl} \quad (1.1)$$

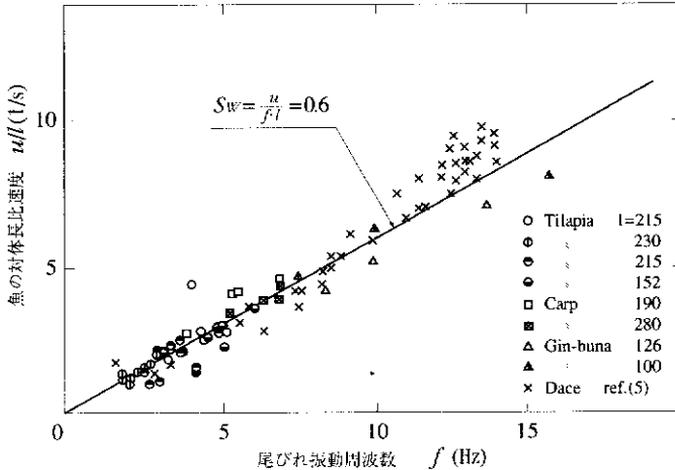


図1.6 尾びれの振動周波数と対体長比速度の関係 (永井,1979) (6)

図中 $Sw = 0.6$ の線が示してあるが、これが魚の種類を問わずほぼ平均値になっていることがわかる^{注1}。 Sw の意味を別の言葉で表現すれば、尾びれ一振り (1ビート) 当たり何体長進むかを表す。つまりこの表現は相似則を前提にした表現であり、感覚的にも分かり易い。造船学でも船長をスケールの単位とすることは時々使われる。

魚の種類、大きさにより f の範囲が異なっていることも図から知られる。生物である以上けだしこれは当然のことであろう。また、通常の定常的に遊泳する状態の f の値と瞬発的に動く場合の値は魚の種類、大きさでほぼ決まっており、それがそれぞれその魚の、その大きさの場合の持続速度と最高速度に対応していると考えられる。 f の上限については魚により異なるが毎秒10とか20のオーダーであるとされている。従っ

^{注1} 図1.6は永井の初期の論文のものである。第4章で見ると、彼はその後種毎の泳動数の違いについて論じている。

て例えば20とすると $Sw = 0.6$ として $U/l = 0.6 \times 20 = 12$ つまりこの場合は1秒間に12体長進むということになる。Bainbridgeによると⁽⁵⁾最高速度は大体10体長/秒位であるということである。ただし、これは持続時間が1秒程度で、10秒程度持続時間をとる時には速度はほぼ半減するという。

速度に関する量としてもう一つ尾びれの振幅はどうであろうか。これについても Bainbridge は貴重なデータを示している。図1.7は Bainbridge が3種の大きさ(9.0cm, 17.5cm, 24.0cm)のウグイについて調べたもので、振幅にはほぼ比例して1ビート当たりの前進距離が増加する様子が分かる。ところがデータ点でわかるように振幅はほぼ体長によって決まり、体長の1/5程度になっている。他の魚でもほぼ同様の関係が成り立つということが同じ論文で示されており、それも尾びれ振動数に無関係に成立することが明らかにされている。つまり振動数が変わっても振幅対体長比はほぼ一定の0.2であるという結果が得られている。このようなこと

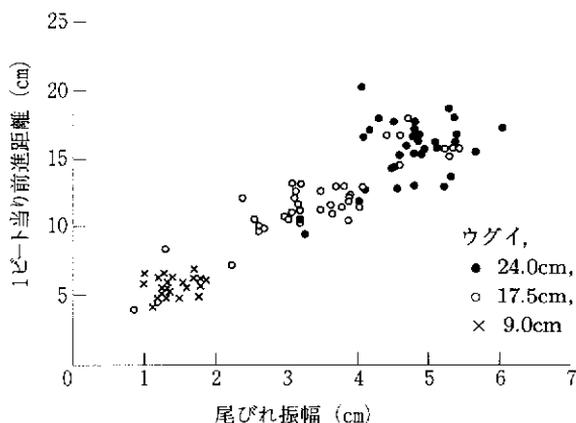


図1.7 尾びれ振幅と1ビート当たり前進距離 (Bainbridge, 1958)⁽⁵⁾

から、結局図1.5には見かけ上尾びれの振動数及び振幅がなく、体長が基本量として使用されている訳である。

最後に観察装置について述べておきたい。先に永井の観察は回流水槽で行われたと記述したが、この水槽は後章の図4.11に示してある。Bainbridgeらがケンブリッジで行った魚の観察は、後にFish Wheelと呼ばれるようになった大小二つの回転水槽で実施された。この内、大きい方の水槽の図を図1.8に示す⁽⁷⁾。昔のヨーロッパの香りのただよう絵であるが、図から知られるように水槽はモーターで中心回りに回転し、水路の中の魚が対水速度で泳ぐ様子を外から観察、写真撮影を行うようになっている。分かりにくい水路の中には魚が泳いでおり、また速度を求めるための回転計なども描かれている。

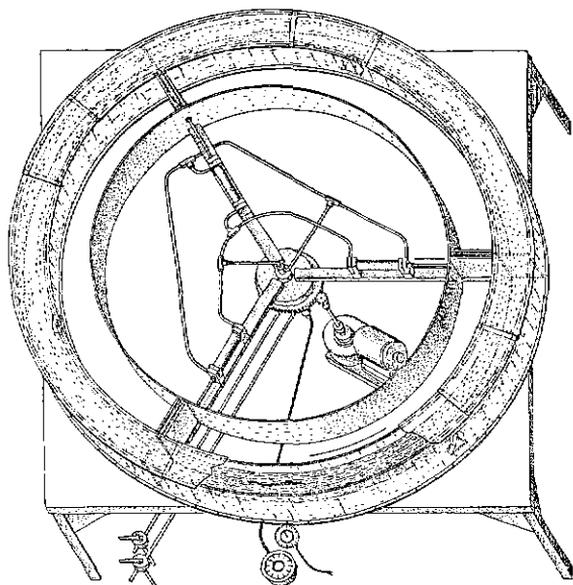


図1.8 Bainbridgeらが使った大回転水槽 (Gray, 1957) ⁽⁷⁾

1.4 抵抗と推力の意味：船の場合、魚の場合

さて、ここまで抵抗及び推力という言葉が自明のように使用してきた。しかしあらためて魚の場合を考えると、この用語には不明確なところがあることに気付く。それは一つは魚は自分の体を動かしてたえず体を変形させながら泳ぐので、対象とすべき一定の形状がないこと、もう一つは例えば一定速度で泳いでいるときには抵抗と推力は釣り合っている筈であるが、言えるのはそれだけで、抵抗と推力を分離してそれぞれの値がいくらであるかを述べるのは、魚のように体全体が抵抗を受けながら推力を出しているような場合は困難のように思われるという点である。そこで、このような疑問点についてまず考察しておく。

代表的な水上及び水中航行物体として船の場合を考えてみると、船では推進器を装備していない船体のみをまず考え、これを所望の速度で航行させるには、船体抵抗に打ち勝って前進させるために推力を与える必要があるので、推進器を船尾に装備し抵抗に等しい逆方向の推力を発生させ、船を前進させるという論法になっている。船の抵抗と何気なくいつているが、船体と推進器を分離して考えると抵抗の定義が明確であるので、造船学ではこのように抵抗を定めている訳である。従って船型の研究ではプロペラを外した船体だけの状態で試験水槽における実験あるいはコンピュータによる計算を行って抵抗を調べている。一方推力の方は推進器のみ取り出して考えれば良いので話が簡明で、船尾でプロペラを回転して推力を発生させ、その値が抵抗と同じになるという条件で最適プロペラを設計している。(船体の後端部にプロペラが密着して装備されている関係し種々の流体力学的相互干渉が船体とプロペラとの間に発生する。船の設計にはこれらについても詳細な検討が必要であるが、ここ

では立ち入らない。)

しかし魚の場合はどうであろうか。魚は船のように船体に相当する固定形状の本体がある訳ではない。またプロペラに相当する推力発生部分が画然と存在するわけでもない。もちろん、アジ、マグロなど高速の魚は主に尾びれが推進器に相当するが、これは一番推進器と本体が分かれている例であり、その上、1.2節で述べたようにこのような高速魚でも尾びれの前方の本体の一部もくねらせて泳ぐので、どこが本体でどこが推進器か区別するのは大変難しい。また、ウナギのように体全体をくねらせて泳ぐものは、本体全体が推進器にもなっており、推進器だけを分離することが不可能である。従って、一般的にいうならば、体の各部分は抵抗にもなっているが推力も発生しているということが出来る。更にこれが時間的に変動する訳であるから、船のように抵抗と推力を明確に定めるということは困難であることが直ちに理解できる。人の水泳でも同じことがいえ、泳いでいるときの抵抗と推力を別々に取り出して論じるのは極めて困難である。

それにもかかわらず、ここで魚の抵抗、推力を考えるのはどういう意味があるのであろうか。それには次のように考えれば理解できるのではなかろうか。まず抵抗であるが、例えば簡単のため魚が対称の状態でもひれも全く動かさないとすると、推力はゼロで抵抗のみ出てくる。次に、その魚の仮に前半部が動かず、後半部のみが振動し推進器として振る舞うとすると、前半の固定部は明らかに抵抗のみ発生し、後半部の運動によって、後半部自身のもつ抵抗成分と前半部の抵抗の和に等しい大きさの推力を発生すれば前進することになる。従って、もし後半部を出す推力が一定とすると、抵抗値が大きい小さいかにより魚の速さは異なる筈であるから、抵抗値の大小を考察する意味は確かに存在すること

になる。もっとも、魚体全体として両者の絶対値自体を論じることは先述のとおり難しい。しかしそれには余りこだわる必要はない。さしあたり、一つの考え方としては、前進を妨げようとする方向に働く力の成分の和を抵抗、前進方向に作用する力成分の和を推力と思えば良い。ただ、魚体は常に運動しているため、抵抗も推力も時間の関数として変動しているのが難しいところである。魚の表皮の各部分には摩擦力和圧力が作用するがそれぞれの力の前後方向成分を取り、これを全表面上で積分すればそれが魚全体にかかる力の総和になる。定常遊泳中ならこの和はゼロになる。

さて、摩擦力は余程魚の形状が曲がりくねったものにならない限り、常に後方へ向かう成分をもつので抵抗になる。一方圧力については、圧力の大きさと、その方向すなわち圧力が働く面の勾配の2要素を考えなければならない。今図1.9のように魚体表面に摩擦力和圧力が働くとする。その点の静水圧を p_0 とすると、動いているときも体の各部分で圧力 p がどこでも p_0 なら圧力抵抗はない。しかしその筈はなく p は各部で p_0 とは異なる。そこで p と p_0 の差すなわち $p - p_0$ を考える。魚を前方から見て見える面に働く $p - p_0$ がプラスなら、この部分は抵抗発生部分で、この面の勾配をかけると抵抗成分が出る。マイナスなら推力成分になる。後方から見て見える面で、 $p - p_0$ がプラスなら推力成分、マイナスなら抵抗となる。抵抗発生部分のみを積分すると抵抗成分総発生量、推力成分のみの積分が推力成分総発生量になる。

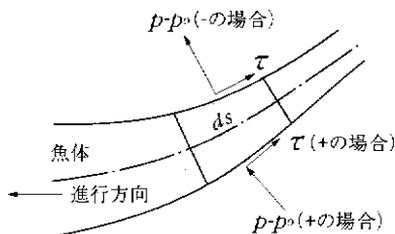


図1.9 魚体表面に作用する力

結局全体としては、その瞬間に魚体に作用する力は摩擦分が作り出す摩擦抵抗と圧力分布から出てくる抵抗成分の和が魚の前進を妨げる方向に働き、圧力分布から出てくる推力成分が魚を前進させる方向に働くことになる。従って両者の差し引きを考え、前進方向の力が残ればこのとき魚は加速される。逆に前進を妨げる力が残ると魚は減速する。差し引きがゼロであれば魚は定常運動をする。

以上のように、抵抗と推進という二つの用語は概念的には自明でも船と魚とでは差異があるので注意しなければならない。造船学では試験水槽における実験の際、プロペラのない船体のみの実験を抵抗実験（試験）、またそのような状態を抵抗状態、プロペラを装着して回転させ前進させる実験を自航試験、その状態を自航状態といている。魚に対しては適当な用語はないが、九州大学の種子田定俊名誉教授は自己推進体という用語を提案している⁽⁶⁾。

1.5 周期運動を含む現象の無次元量

(1) 水棲動物は、体をくねらせつつ前進するもの、体の後半部の主として尾びれを左右、または上下に動かして前進するもの、それに尾びれのみ動かすものの3種類に大別されることは1.2節で述べた。すなわち、体は前進直進運動の他に周期運動を行っている。このような運動はどのような量で整理すればよいのであろうか。

次元解析で知られているように、物理現象はそれにかかわる多くの有次元量から形成される幾組かの無次元量で整理するのが適当である。以下水棲動物の推進にかかわる無次元量について述べよう。

周期運動と直進運動とが含まれる現象は両者の速度の比をとるのが最も基本的である。速度の次元は長さ/時間であることを考えると、周期

運動の速度は周期運動の周波数（回数/sec）に長さの次元を掛ければよい。周波数を f ，代表長さを l と書くと周期運動の速度は fl ，もし円周波数を考え、それを ω と書けば f の代わりに $\omega = 2\pi f$ となるので、 $\omega l/2\pi$ が速度になる。周期 T を用いると $2\pi/T = \omega$ であるから l/T と書いてもよい。直進運動の方は U と書けば、求める無次元量は両者の比をとったものになる。この量は無次元振動数あるいは換算周波数 (reduced frequency) などと呼ばれる。これを f_r と書くと、 $f_r \equiv$ 周期運動速度 / 直進運動速度 $= fl/U = l/UT = \omega l/2\pi U$ 。 2π をやめて $\omega l/U$ とする場合もある。直進運動と周期運動とどちらを基本運動と見るかで分子と分母が入れかわる。通常基本運動を分母にとるのが考えやすい。

水棲動物の運動を記述する場合、どういう泳ぎ方をすると、つまり例えば尾びれをどの位動かすと、どれ位速度が出るかという見方をするなら、代表長 l を体長として分母に fl ，分子に U をとるとよい。そうすると無次元量 U/fl となるが、これは1.3節で述べた泳動数 Sw にはかならない。すなわち Sw は直進運動の速度と周期運動の比であり、無次元振動数の逆数になっている。

(2) 上では代表長として体長をとった。しかし、 f によって示される前進方向に直角な方向の周期運動の速度成分を表す代表長は、体長 l ではなくて尾びれの振幅ではないのだろうかという考えも起こる。おそらく現象的にはその方がより妥当であろう。そこで振幅を b とすれば、 fb が振動速度を代表するのであるから、二つの比は U/fb となる。前の Sw と比べると

$$Sw = \frac{U}{fb} \times \frac{b}{l}$$

となるので、 Sw とは尾びれ振幅体長比 b/l が入ってくるだけ差が出てく

る。ただ、通常の魚の運動の場合、1.3節で述べたように魚の大小、 f の大小を問わず尾びれの振幅は体長のほぼ2割、すなわち $b/l = 0.2$ で与えられるというデータが得られている。従って、魚の遊泳に関する限り現象の整理には Sw だけで十分であるということが出来る。

(3) 無次元量 U/fb についてもう少し考える。この量は形式的にはいわゆるストローハル(Strouhal)数の逆数の形になっている。これは大変興味深いことでしばらくこの辺の関係を考察してみよう。流れの中にずんぐりした形状の物体、つまり後半部がゆるやかな傾斜の流線形にはなっていない物体があるときには、ある範囲の Re で明瞭な、いわゆるKármán渦が観察される。グラビアの図7には東大小林敏雄教授提供のカラー写真を示した。また第2章図2.14にはBatchelorの著書に出ている写真を引用掲載させていただいた。これを模式的に描いたのが図1.10(a)である。一般に、流れの中にある物体から渦対が放出される時、渦対の毎秒発生数 N と代表長(通常流れに直角方向の寸法) D と流速 U とから作られ

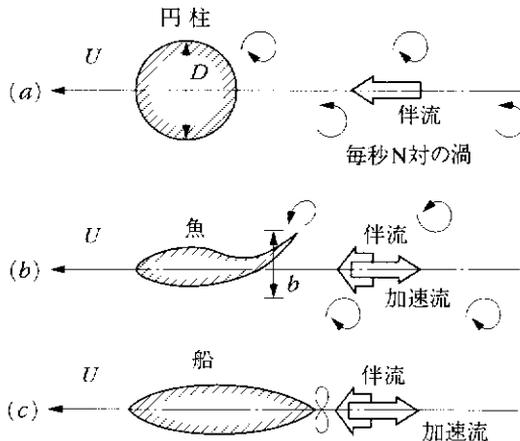


図1.10 (a),(b),(c) カルマン渦(列), 魚の後流渦(列), 船の後流の模式図

る無次元数

$$St = ND/U \quad (1.2)$$

をストローハル数と称し、ずんぐりした物体の周りの流れの特性量になっている。実験によると St はほぼ 0.2 である。

一方、魚の後流を観察すると、後流は尾びれの運動により Kármán 渦と逆回転の渦列になることが知られている。グラビアの図 17 にはこの渦が現れているのが見られる。図 1.10(b) には模式図を示した。渦の回転方向が Kármán 渦と逆になる理由は次のように考えると明かである。すなわち、(a) の場合は物体を大きい抵抗にさからって U で動かしている図であるが、抵抗の原因である物体に発生した大きい剥離渦の向きが剥離現象により図のように定まるため、それが次々と放出されて渦列になったときの渦の回転方向になっている。一方 (b) の場合は、魚が尾びれを振って推力を出して前進しておれば、水に運動量を与えて後方に押し出している筈である。これが後流でみられる加速流であり、この流れを起こすためには渦列の向きは (a) の場合とは逆向きでなければならない。すなわち魚は尾びれを振ってこのような回転の渦列を作りだしているのである。勿論、魚は尾びれの振り方一つで前進だけでなく後進、旋回、停止を行うことができるという誠に素晴らしい能力を備えている訳であるが、それぞれの運動に対応する魚の周りの流場は渦の出方、並び方で説明することができる。

さて、この二つの渦列は、ともに静止流体中に作り出されたもので、渦の回転方向がちがうだけであるから、その安定不安定は同じように定まると考えられる。そうすると (a) で考えたストローハル数の概念が (b) でもそのまま成り立つように思われるが、必ずしもそうではない。(a) では

速度成分は前進速度の U だけで、振動数は与えているわけではない。たまたまストローハル数の分子 ND が速度の次元をもつだけであって、 N は流れの性質として現れてくる量である。これに対し(b)では振動速度成分 fb は与える量であるところが異なる。

このように考えると U/fb は形式的にはストローハル数の逆数になっているが、それは次元的なことであって、内容からいえばむしろ泳動の特性を物理的に別の視点から表現しているといえよう。ただ、カルマン渦と魚の渦という二つの流場を見れば類似のものになっているということである。そこで仮に泳動ストローハル数 St_{Sw} として、

$$St_{Sw} = \frac{fb}{U} \quad (1.3)$$

と定めると、 St_{Sw} と $b/l, Sw$ の関係は

$$St_{Sw} = \frac{b}{l} \cdot \frac{1}{Sw} \quad (1.4)$$

これが仮称泳動ストローハル数、尾びれ振幅体長比、泳動数3者の関係である。簡単のため仮に $b/l = 0.2, Sw = 0.6$ とすると $St_{Sw} = 0.33$ となる。

なお、(a)と(b)の場合の後流渦構造の比較を行ったので参考のため(c)として船の場合について模式図を示しておく。船は魚と同様自航しているが、抵抗に打ち勝って進むための推力はスクリュープロペラが水を後方へ加速して押し出すことにより与えられる。従ってプロペラ後方には加速流が図のように存在し、簡単な渦理論ではこの流れはプロペラが作る渦輪の列で起こされることになるのである。

(4) 船のプロペラの場合

プロペラは通常後から見て右回りに回転する。プロペラが回っている

付近の流場はすぐ前方にある船体のため流場は一様ではなく、流速流向が3次的に場所により異なっている。従ってプロペラは1回転中に異なる流場の中を通過し、1回転後同一状態に戻る。このことからプロペラも周期運動を行っており、その周りの流場は非定常である。この作動状態のプロペラの特性を定める基本特性量は二つの代表速度の比で定まる無次元量で定められる。すなわち前進運動を表す前進速度 (speed of advance) と回転運動の比をとり、これを前進係数 (又は前進常数) J としている。前進速度は V と書き、プロペラ円へ流入する水の流速を表す。プロペラの前方に船体がなく、プロペラが単独で平 (静) 水中を進進する場合はプロペラ円内では流入速度は一様であるから問題はないが、実際は上述のとおり流入速度の大きさと方向はプロペラ円内の各場所で異なる。そこで通常船の前進方向の流速のプロペラ円内平均をとって V としている。また通常 n をプロペラの毎秒回転数、 D をプロペラ直径とし、

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1.4)$$

がこの無次元量となる。

プロペラが単独で静水中を進進する場合は流入速度は一様であるからこれはもはや周期運動という訳にはいかないが、上の無次元量は二つの代表的速度の比をとっているという意味で、プロペラの流体力学的特性を規定する最も重要な基本量であるということができる。このことから、プロペラの特性、すなわちプロペラ

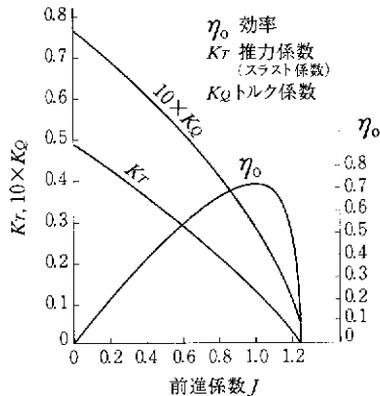


図1.11 船のスクリュー
プロペラ性能図

の推力係（常）数，トルク係（常）数，効率等はすべてこの J の関数として求められるのが普通である。図に描くには J を横軸に，他の量を縦軸にとればよい。図1.11にはプロペラ性能を表す図の一例を示した。

1.6 魚の泳ぎの研究の歴史

魚は身近な生物であるから魚の泳ぎは古くから多くの人々の関心の対象であったに違いない。ただ，そのような関心，興味が記録の形で残されている訳でもないので，研究の歴史をきちんとした形でまとめるのは不可能である。水の流れや鳥の飛翔の研究でも大きな天才ぶりを発揮したレオナルド・ダ・ヴィンチ（1452-1519）も残念ながら魚についてはほとんど見るべき記録を残していないようである。しかし調べてみると例の膨大な12巻，1200葉に及ぶアトランティコ手稿の中に1箇所“水中での泳ぎの様子を記述せよ。鳥が空中を飛行する様子がわかるだろう”と述べている⁽⁹⁾ ことを知った^{注1}。現代可視化技術流に言えば，鳥の回りの空気の流れは目で見えないが，同じような流体力学的現象である魚のまわりの流れは水の流れであるため渦など目で見ることが出来るのでそれを研究せよということであろう。流体力学観をもったレオナルド・ダ・ヴィンチらしい言葉とすることができる。

その後18世紀に入り粘性のない理想流体の流体力学が誕生し，19世紀中期に至って実際の粘性をもつ流体を取り扱う粘性流体力学が提案され，今世紀前半にいわゆる近代流体力学が体系化された。それを受けて，それまでほとんど動物学者の研究領域であった魚の泳ぎに流体力学者も急速に関心を持つようになったとすることができる。

注1 この調査には大阪大学附属図書館事務部長 湯浅富士夫 氏の多大の協力を得た。記して謝意を表す。

このような動きに決定的な動機を与えたのは既に述べたグレイである。彼はケンブリッジ大学の動物学科の教授であったが詳細緻密な動物生態観察に加えて新しく力学的考察を動物学に持ち込み、動物生態学と力学とを包含した研究を展開し、魚のみならず鳥、陸上の動物、人間まで含め生物の運動について研究した。その成果は前に述べた *Animal Locomotion*⁽²⁾ となって刊行されているが、彼の業績の中で何よりも大きなインパクトを与えたのは、イルカの、想像を超えた高速能力に対する流体力学、動物学の両方の立場からの解析であり⁽¹⁰⁾、以後グレイのパラドックスと呼ばれ、今日までまだ完全な解明には至っていない。しかし、以後イルカあるいは魚の推進の研究が急速に進展したのは実にこのパラドックスの発表によるものということができ、この意味でも、今日生物物理学、生物工学、あるいはバイオ・メカニクスと呼ばれる学問領域の先駆者といえるであろう。なおグレイは Sir の称号を与えられている。

恐らくグレイの感化を受けたと想像されるが、その頃若いケンブリッジの学徒、今はイギリスのみならず正に世界の流体力学の泰斗ライトヒル (J.Lighthill) は、多くの流体力学的考察を魚の泳ぎ、抵抗、推進について発表し^{(11),(12)}、魚の推進法の流体力学的体系化の立役者となった。現在魚類及びイルカ類の泳ぎの効率等が具体的に論じられるようになっているのは彼の研究によるところが大きい。彼は他に鳥をはじめ多くの生物の流体力学について研究し、ケンブリッジに不滅の伝統を築いている。彼も Sir を与えられ、その業績をたたえられている。

バインブリッジ (Richard Bainbridge) はケンブリッジ大学動物学研究所において1960年前後に多くの実験的研究を行い、貴重なデータを発表している。魚をはじめとする水棲動物の運動を流体力学的に考察しようとする場合、動物の運動の正確な情報が不可欠であることはいうまで

もないことである。しかし、すぐ想像されるように、水棲動物の運動状況を正確に把握することは大変困難なことである。これは勿論動物の行動であるところに一番の理由があり、古くから多くの人々によって記録が残されてはいるが、種々細かい条件も含めると、数理解析のデータとして使用できるようなものはそう多くはないようである。Bainbridgeはこのような状況を認識し、自分自身で回転水槽を作り実験的に魚の運動を調べたことは1.3節ですでに述べた通りである。これにより彼は実験動物生態学を発展させると同時に、流体力学的検討に対して重要な情報を提供した。

その他多くの動物学者を中心とする研究者が重要な貢献をしているようであるが、著者らは動物学は専門ではないので、この面からの研究史を述べることはできない。ここでは流体力学的側面から主だったその後の研究を指摘しておくにとどめる。ケンブリッジの研究からやや遅れて、アメリカでも水棲動物の研究が盛んになってきた。カリフォルニア工科大学 (Caltech) の T. Y. Wu (ウー) 教授は、1961年 Lighthill の論文とほぼ同時に魚が体をくねらせて泳ぐ推進の原理を2次元ポテンシャル流問題として流体力学の面から研究し⁽¹³⁾、アメリカ学派のさきがけになった。1974年には Caltech において魚、鳥その他生物の運動の流体力学に関するシンポジウム (Swimming and Flying in Nature) を主宰し、生物の運動の流体力学の急速な進歩に大いに貢献した。このシンポジウムには世界中から Lighthill, Bainbridge はじめ多くの流体力学者、生物学者が参加し^{註1}、その成果はシンポジウムの論文集⁽¹⁴⁾として発刊されている。その中には有益な論文が数多く発表されているが、魚のみならず哺

^{註1} 筆者の一人。田中もその時参加し、大きな感銘を受け、それ以来魚の推進には興味を持ち続けてきた。

乳類であるイルカの速度は勿論一つの関心事であった。これについては、速度の他に馬力、抵抗も計測したLangの論文⁽¹⁵⁾も興味あるもののひとつであろう。イルカは想像をはるかに超えた速度で泳ぐとされているが、アメリカ海軍の研究者であったLangは、1960年代に実施された3頭のイルカの実験で、ハイナという名の体長1.86m、体重52.7kgのマダライルカが21.4ノット(11.05m/s)の最高速度を出したと述べている。通常タンカーは15ノット位、コンテナ船は25ノット位の船速であるからこのイルカが船と並走する様子を想像するだけでも大変楽しいものである。

同じシンポジウムで論文を発表しているPaul W. Webb(ウェブ)も永年にわたりミシガン大学において動物の運動の流体力学的研究を続け、大きな成果を挙げている。彼の研究は流体力学のみならず魚類の筋肉のパワーの生理学にもわたっており、流体力学と動物生理学を包含して体系化しようと試みているように思われる。1975年にはカナダ水産研究報告として当時までの研究を総括した労作⁽¹⁶⁾を出版している。

アメリカは西海岸にスクリップス、東海岸にウッズ・ホールという二つの海洋研究所をもち、海洋研究にも大きなポテンシャルをもっているが、ウッズ・ホール研究所とマサチューセッツ工科大学(MIT)とは距離が近い関係もあって実質的に共同研究が広く行われているようである。近年MITの海洋工学科ではトリアンタフィロ(Triantafyllou)教授を中心とするグループがウッズ・ホール海洋研究所と協力して魚の運動の研究と、それに学び人工魚の製作を進めている。これについての詳細は第5章で述べるが、製作中の人工魚、愛称チャーリーの写真を快く提供してもらったので、グラビアの中に示した。

1992年イギリス、リーズ大学動物学教授R.マクニール・アレクサンダー(R. McNeill Alexander)はいわば動物学の自家イギリスの伝統を

継ぎ、見事な著書、Exploring Biomechanics, Animals in Motion⁽¹⁷⁾を書き、Grayの著書そのままに、魚を含む鳥、馬その他人間も含め広く動物の運動と生理学について近年の進歩の跡を書いている。この日本語訳は東昭教授のものが出版されており、感銘深く読むことが出来る。

ヨーロッパにおける研究の歴史を考えると、イギリスにおける研究が、上述のように実測に基礎を置く実証的なものも多く、やはり中心的であったと思われるが、他国でも多くの研究がなされたことは勿論である。例えば世界で初の実験魚水槽を作って研究を行ったのはフランスのRegnard (1893)⁽¹⁸⁾であるとBainbridgeは1958年の論文に記している。またもっと以前17世紀にイタリアのBorelliは魚の推進について現在の考え方に通じる論文を出しているとGrayは述べている⁽²⁾。またドイツのヘルテル(H. Hertel)は、1963年当時まだ関心の薄かった生物学と工学両分野を包含した著書(Structure - Form - Movement)⁽¹⁹⁾を出版した。この内容は本の書名とともにまことにユニークかつ見事で、新しい視点から生物を見つめ、工学を考えるものになっている。多くの研究論文のリストも掲載されており、魚及び水棲動物の研究の歴史をこれによって知ることが出来る。

以上、イギリスにはじまる欧米の研究状況についてごく簡単に概説したが、日本においても多くの研究が行われている。まずあげなければならないのは永年にわたり鳥、魚その他生物の流体力学に取り組み、現在も最も活発な研究者である東昭東大名誉教授の研究である。その成果は体系化されて多くの著書となって公刊されている⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。谷一郎東大名誉教授(1907 - 1990)は東大名誉教授の先達として、また日本の流体力学のリーダーとして水棲動物の抵抗と推進の研究にも大きな足跡を残した⁽²²⁾。造船関係では推進法としてスクリュープロペラがあまりにも不動の地歩

を確立してしまったので魚に学ぶ推進法の研究は、関心としてはともかく、具体的にはほとんど行われていない^{註1}。しかし抵抗という見地からは抵抗低減の可能性を求め、鹿児島大学の奈良迫教授が先駆的な研究を行い⁽²³⁾、微小進行波動を発生し得る鱗構造をもつ魚体模型を作り、抵抗実験を行い有益なデータを得た。また、田古里哲夫東大名誉教授（1927 - 1990）も多くの研究を行うとともに有益な解説を残している⁽²⁴⁾。研究の中には水棲動物の抵抗が表皮の分泌物のため極めて小さいのではないかというテーマに関連してトムズ効果の実験を回流水槽で実施したものなどがある。その他にも多くの研究者が主に抵抗低減の問題について研究を行っており、振動翼についても理論面で研究が進みつつある。これらについては後章でその一部を紹介したい。

日本の研究の性格をあえて一言でいえば、実際の魚あるいは水棲哺乳動物の地道な実測的研究が少ないというのではなからうか。この点はイギリスと比べるとかなり明確な差異が感ぜられる。日本におけるこの種のデータとしては本書の執筆者の一人永井が約20年余昔から多くの努力を重ねて自らのデータを蓄積してきた。そこで本書ではできる限りそのような、精度、計測条件等正しさもあやしさもよくわかったデータを使うことにしたい。

以上の叙述に代表される研究の足跡からみて明らかなように、魚の遊泳方法、抵抗、推進に関する流体力学的視点からの研究は、今世紀中頃からはじめて体系化へ向けて進展したとあってよい。従って歴史はそれほど長いとはいえず、体系化も未完成である。ただし、非粘性理論についていえば、二次元的取扱いではあるが線形理論は勿論のこと非線形理

^{註1} 関連の分野で、波浪エネルギーをフィンで吸収して推進に用いる研究はいろいろ行われているが、本書では扱わない。

論でも考察が進められるようになった。より具体的な紹介は第4章で行うが、簡単にいえば線形理論とは水棲動物の体が薄くて平板に近いものであり、厚みの影響が小さいこと、また体のくねり方、尾びれの振動の振幅も体長に比較して小さいことを前提とする理論であり、非線形理論は、もっと厚みのある体、振幅の大きい振動の場合にも説明できるように考察したものである。ただ、従来の手法では数理解析が極めて難しく、中々解が求まらず、動物の動きの形状、あるいは体に作用する力が求まらない場合があった。これは動物の形状が大変複雑でかつ時間的にも変動するという数学的には大変厳しい条件があるためである。

それにもかかわらず多くの非線形問題が解かれるようになったのは、いうまでもなくコンピュータ援用による数値計算によるものである。周知のように、このような手法は数値流体力学あるいは計算流体力学、略称CFD (Computational Fluid Dynamics) と呼ばれ、近年に至って理論流体力学、実験流体力学とともに流体力学の一分野を形成するようになった。非粘性問題は、考え方は古くからのものそのまま、ただ解が求められない例が多く見られた訳であるが、それが具体的に解かれるようになったのは実にCFDによるところが大きい。

しかしCFDには他にも大きい役割が控えていた。それは粘性を省略せず、実在の粘性流体の基礎方程式すなわちなビエ・ストークス (Navier - Stokes) の式をそのまま解くことであった。CFDと一口にいても今は多くの方法に分かれているが、その原点は、流場を微小要素に分割し、微分を差分に変えて基礎式を数値的に解くというものである。魚の運動と力の問題においても、近年急速にコンピュータの性能が高まったことをうけて、魚の実際の運動に即した具体的計算が行われる兆しが出てきた。これらの具体例のうち日本で最近行われた二、三の例を第3章で紹

介する。グラビアの図10には興味深いカラーの計算結果の一例を示した。

一方機械関係では、魚の動きを模擬した機械を作る試みが昔からあった。これは恐らく最初は効率とはもかく、魚の泳ぎと同じ方法で機械も動き得るのであるという単純な喜びを実現させるためであったと思われるが、次第に効率の高い、推力の大きいものが具体的に作られるようになってきた。このような研究は主として機械関係の研究者の間で進められその層も厚い。中でも特筆すべきものは東京工業大学一色尚次教授⁽²⁵⁾の永年にわたる研究である。教授のもとでは以前から魚の尾びれの運動を模した振動翼推進船の研究を精力的に行っており、高い効率、安全性等に着目した実用可能性の提言も行っているが、これは大いに評価されるべきものである。今日の機械工学関係者の研究の流れを構築した功績は大きい。また永井も以前から振動翼推進船の研究を続けている。これらの詳細は第5章で紹介する。これらの研究の目的には多くの意味があるが、一つの重要な目的は応用面にあり、いわゆるロボット魚、ロボット水中推進の実現であろう。水中殊に深海を行く運動体は、その環境上無人機であることが一つの大きな利点であり、今後海洋開発の進展が期待される中で、ロボット魚のもつ意義は極めて大きいと考えられる。

1.7 グレイのパラドックス

前節に述べた研究の歴史は概略にすぎないが、それでも一つの大きな特徴があることに読者は気付かれたと思う。それは参考文献も含めほとんど1950年代以降の研究であることである。その理由は一つの論文が投げかけた問題が契機になって流体力学者が関心を持つようになったためであり、しかも重要なことはそれがなお完全に解明されたとはいえないことである。それがグレイのパラドックスであり、前掲のように1936年

の論文⁽¹⁰⁾で発表されたもので、その内容は次のようなものであった。すなわち、彼は6～7ftのイルカが船から30ft離れて33ft/sec (20ノット)で並走(泳)したという観測に基づき、その抵抗、馬力を計算したところ、途方もない結果が得られると述べたのである。すなわち、計算は体長6ft、体重は200lb、表面積15ft²として行われ、剛体であるとする33ft/sの速度なら抵抗は Re が 10^7 程度であるので乱流として42.5lb、所要馬力は2.6h.p.となる。筋肉重量を35lbとすると1ポンド当りの筋肉馬力は0.074となり、通常の哺乳動物の筋肉馬力が0.01位であるので、イルカの筋肉は7倍も強力であることになる。一方もし層流であるとして計算すれば筋肉馬力は哺乳動物と同程度になり、この方が合理的であるとした。また体長4ft、速度25ft/sのイルカの例についても同じような結果を示している。

この内容は、筋肉のパワーの強さといい、 Re が 10^7 にもかかわらず層流なら話の辻褃が合うという点といい、いずれも通念と余りにもかけ離れているので、以後グレイのパラドックス (Gray's paradox) と呼ばれるようになった。またイルカのデータで説明されたためイルカの謎ともいわれているが、大きい魚でも同様であるとGrayは述べている。もしこれがこの通りであれば、イルカの筋肉は人間に比べて遙かに強力であるか、イルカの出す推進力は想像以上に大きいか、イルカの抵抗が桁外れに小さいか等何かこの結果を合理的に説明する要因がある筈であり、この点が解明されてはじめて背理は真理となる訳であるから、以後このパラドックスの解明に向けて多くの研究が行われ、研究が格段に進展することになったのである。その結果は、パラドックスの通りでイルカの高速度遊泳能力は不思議だが正しいという説が出る一方、背理ではなく十分に説明できるという説も出て来ている。例えばLangは前掲論文⁽¹⁵⁾の中

で速度、抵抗を計測し、抵抗は全面乱流として計算した摩擦抵抗値と同じ程度で特別小さいということはないこと、また筋肉のパワーも人間の2.5倍位になるが、それ程不合理な話ではないなどの結論を得ている。また東⁽²⁶⁾は、多くの研究結果を引用しながら、結論としてパラドックスは解消したと述べている。

このように、研究の進展とともに詳細な、精度の高いデータが蓄積され、イルカの泳ぎの数量的知識が増して来たので、現在では当初考えられていた程の神秘性は消失しつつあると考えられる。しかし、それでは解決したのかといえ、それも否というべきであろう。何故なら問題提起により浮かび上がった前述の三つの問題、すなわち(1)低抵抗、(2)高推進力、(3)高筋力 の内、少なくとも流体力学問題としての(1),(2)についてはまだ十分納得のいく解明がなされていないからである。例えばイルカの表皮には特別な仕掛けがあって抵抗が低いとか、その泳ぎは極めて高推力を発生するとかいうような事実が現在の所まだ発見されていない。勿論新しい進展はいくつか見られるが、それらは後章で説明するように、パラドックスを解決する程大きな影響力をもつものではない。一番の問題は、やはり生物がかかわる問題であるため、速度一つとってみても速度値の計測精度、持続時間にまだ問題が多い。また、速度計測と同時に抵抗と推力成分が計測できれば大変有力なデータとなるが、それが現在は不可能である。今後何か画期的な理論、実験、考察等によって背理の内容が解明され、いつの日かこのグレイの背理が正に真理発見の入り口であったと語られる日が到来することを期待したい。

第2章 流体運動と抵抗の力学

2.1 力の認識の歴史

水中または空気中を進む物体には、その進行を妨げようとする力すなわち抵抗が働くので、運動を続けるためには進行方向に作用する何らかの力すなわち推進力が必要になることはいわば自明であるように思われる。

しかし、この抵抗と推進の問題について人々が正確な認識に到達したのは実はつい最近のことであり、人類としてはその文明史数千年を経過する必要があった。

ギリシャの偉大な哲学者アリストテレス (Aristotle, B.C. 384-322) は物質は皆その生まれつきの性質=「自然」をもっており、魚が水中を泳ぎ、鳥が空を飛ぶのはそれぞれ「魚の自然」、「鳥の自然」として説明した⁽¹⁾。だが、それゆえに、例えば弓より放たれた矢がなお上方へ飛び続けることを合理的に説明することはできなかった。なぜなら、彼の世界観によれば、岩石が下方に落下し、水が低きに流れ、また火が上方に昇るのはそれぞれその「自然」であって、もしそれに逆らって、例えば石を上方へ動かす為には、必ずその原因となる力が働いている筈であった。彼は飛び続ける矢に作用し続ける力をついに発見することはなかった。誤謬ではあるがアリストテレスの苦しまぎれの結論は「空気が前方で開かれ、背後で閉じる」ためとするものであった^{注1}。

慣性の法則、力学の初歩を学んだ人なら今日では誰でも知っている法

^{注1} これに関連するが、彼はすでに真空の概念に到達しており、「自然は真空を嫌う」という有名な言葉を残している。ただし真空の存在についてはなお否定していたようだ。

則、すなわち「物体に外力が作用しなければ、その物体は等速直線運動を続ける」という正しい認識に到達するには、アリストテレスより約2000年後のガリレオ (Galileo Galilei, 1562-1642) を待たなければならなかった。ルネサンス時代後期、「地動説」が「天動説」にとって代わった時代によく、矢が飛び続けるためには、むしろ外力は不用だとの認識に

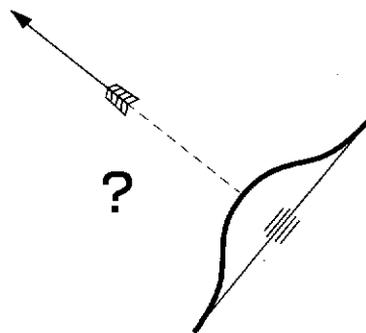


図2.1 弓より放たれた矢。自然に逆らって押し続ける力は何か？

到達したのである。例えば、渡り鳥や飛行機が一直線上を一定速度で飛行しつづける状態は、実は外力=0の状態すなわち最初に述べた抵抗と推進力がちょうど釣り合っている状態であった。後にニュートン (Isaac Newton, 1642-1727) が定式化したようにもし抵抗力が推進力を上回れば物体は減速し、逆の場合には加速する。なお、静止状態も等速直線運動の一つであることはいうまでもない。

2.2 ニュートンの流体力学とその限界

万有引力の発見者として有名なニュートンは、彼に先立つ約100年間の天文学や物理学上の諸発見を集大成し、大著「プリンキピア」(哲学の数学的原理, 1687) をまとめた。それは、実験と検証に基づく近代科学の基礎を打ち立てたもので、アリストテレス的ないわば宗教的世界観を2000年振りに検証可能な、その意味で科学的な、世界観に置き換えたものである。

ガリレオが発見した慣性の法則は運動に関する三つのニュートンの法

則の第1に掲げられた^{注1}。

運動に関するニュートンの3法則を呈示すると以下の通りである^{注2}。

$$\text{第1法則：慣性の法則 (Law of inertia)} \quad (2.1)$$

$$\text{第2法則：} \mathbf{f} = m\mathbf{a} \quad (2.2)$$

$$\text{第3法則：作用・反作用 (Action and reaction) の法則} \quad (2.3)$$

最も有名な第2法則のみ数式で表現したが、 \mathbf{f} は外力 (ベクトル)、 m は物体の質量そして \mathbf{a} は加速度 (ベクトル) である。三つの法則を良く吟味すると、これらは運動と力に関する一つの法則の三つの側面を表していることに気が付く。すなわち三者は互いに関連しており、決して独立ではありえない。例えば第2法則において $\mathbf{f} = 0$ とおけば $\mathbf{a} = 0$ すなわち慣性の法則に帰する。また作用のあるところ、必ず等量逆向きの反作用があるとする第3法則は、外力の反作用としての慣性力 ($-m\mathbf{a}$) を理解することを助け、式(2.2)を力の釣合の式

$$\mathbf{f} + (-m\mathbf{a}) = 0 \quad (2.2)'$$

に書き換える^{注3}ことを可能とする。

図2.2に一定速度で進行する飛行機に働く四つの力を図示した。この場合物体に作用する推力 T と抗力 D はちょうど釣り合い、また同時に揚力 L と重力 $W (=mg)$ が正確に打ち消し合っている。すなわち前に述べたように物体に作用する正味の力は0となるのである。なおここで面

^{注1} ガリレオの没年とニュートンの生年が同年 (1642年) であることも科学的に興味深い。

^{注2} 本書は力学の「教科書」ではないから、このように簡略ではあるが要点を押さえた記述としてある。初学者は是非適当な「教科書」で理解を深めてほしい。

^{注3} これはダランベール (後出) の原理 (D'Alembert's principle) といわれている。

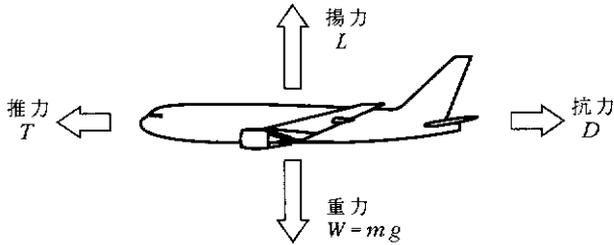


図2.2 一定速度で巡航する飛行機（または渡り鳥） $T = D$ 、 $L = W$ が成立している。 T と W は無関係であり、 $T < W$ でも差し支えない。

白いのは例えば推力と重力は互いに直角であるので力学的には無関係で、 $T < W$ でも一向に差し支えないということである。すなわち1tonの推力で10tonの飛行機を飛ばすことも可能である。

さて、ニュートンのプリンキピアはアリストテレスの世界観にとって代わる程の広さと深さをもっており、近代科学のあらゆる領域を手がけていたと言っても過言ではない。「流体力学」という概念もプリンキピアで初めて登場したし、「ニュートンの粘性法則」として知られる粘性力に関する式、今日の記述法で表示すると

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{2.4}$$

を最初に定式化したのも彼であった。

図2.3によってそれを説明する。今 x 方向に広がった2枚の平板の間に粘い流体(大抵の場合液体)を入れ、片方の平面を x 方向に運動させることを考えると、流体の粘性力に抗して平板を動かすための応力(単位面積あたりの力; N/m^2)は流体の速度 u の y 方向勾配 du/dy に比例するものである。 du/dy は一般的には場所によって異なるが、図2.3の場合は一定値となる。比例係数 μ を粘性係数(単位はパスカル・秒;

Pa・s) と呼びこれは流体の物性値である。ちなみに今日では、 μ が応力 (外力) 等によって変化しない流体をニュートン流体, そうでない流体を非ニュートン流体と呼ぶ。生物の体液や分泌物の多くは非ニュートン性が顕著であり, 1章で述べたように魚やイルカの体表分泌物またはぬめりの非ニュートン性が, 彼らの泳動抵抗を減じているのではないかという有力な説があるのである。これについては4章で詳しく述べる。

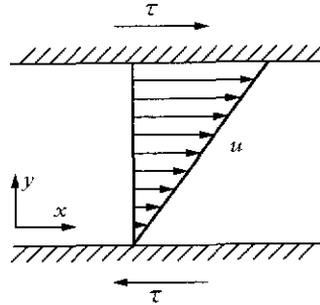


図2.3 粘性力の定義

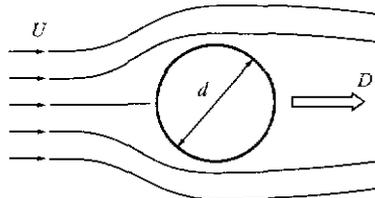
さらにニュートンは, 流体中を運動する物体に作用する抵抗力として, 物体の速度に比例する部分と速度の二乗に比例する部分があることも正しく認識していたようである。これも今日の我々の理解で言うと, 前者が粘性抵抗, 後者が圧力抵抗 (または形状抵抗) に相当する。

圧力抵抗は流体の運動量の変化に由来するものであるから, ニュートンはそれが流体の密度 ρ と速度の二乗および物体の面積 (代表長さの二乗) に比例することを正しく指摘していた。例えば, 図2.4に示す一様速度 U の流れの中におかれた直径 d の球が流体より受ける力 D は

$$D \propto \rho U^2 d^2 \quad (2.5)$$

となることを示している。

上式は現在でも利用される完全な形であるが, その比例係数については不明でニュートンはこれ以上前に

図2.4 直径 d の球の流れより受ける力

進むことはできなかつた。ニュートンは流体を構成する各粒子毎の運動を考え、抵抗の計算にあたっては粒子が衝突するときの物体表面の傾斜角が重要であると考え、事実そのような計算を多数試みているが、観察結果と一致する解を論理的に導き出すことはできなかつた。

図2.5に、ニュートンが考えた力の計算例として良く引用される、流れに傾いて置かれた平板の問題を示す⁽²⁾。平板の面積を S 、流れに対する傾斜角を α とすれば、この場合単位時間に平板に衝突する流体の質量は $\rho U S \sin \alpha$ となる。次に流体粒子は平板に衝突後平板に沿って滑らかに流出すると考える。ここで速度 U の平板に直角方向の成分 $U \sin \alpha$ は衝突によって0となり、平板に平行な成分 $U \cos \alpha$ は何ら変化しないものとする。そうすると単位時間当たりの流体の運動量の変化は $\rho U S \sin \alpha$ と $U \sin \alpha$ の積となるから、運動方程式(2.2)より板に直角に働く力 F は

$$F = \rho S U^2 \sin^2 \alpha \quad (2.6)$$

と求まる。上式は式(2.5)の特別な場合である。

式(2.6)によると F は $\sin^2 \alpha$ に比例するので α が小さくなると F はほとんど無視しうる程小さくなる。 F にさらに $\cos \alpha$ をかけると傾斜平板に働く揚力となる筈だが、驚くべきことに、実測値はニュートンの理

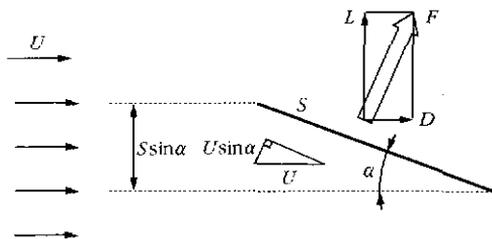


図2.5 流れに傾いて置かれた平板が流体より受ける力

論をはるかに超えるものであった。

図2.6に二次元傾斜平板にかかる無次元法線力 $F/\rho cU^2$ を示す。 c は平板の幅である。 図中曲線1がニュートンの理論式(2.6)の計算結果で、迎え角 α が小さい場合平板に働く力は $\sin^2 \alpha$ によりほとんど0となる。 図中曲線2および3は後に述べるキルヒホッフ・レイリーの死水理論および今日の揚力理論による計算結果で、これらによってようやく平板に働く

1. ニュートンの理論
2. キルヒホッフ・レイリーの死水理論
3. 今日の揚力理論

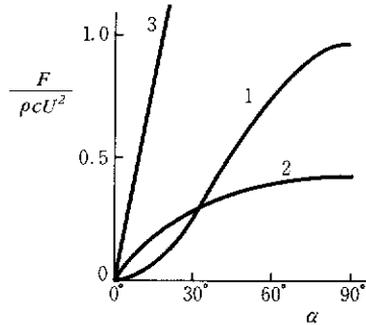


図2.6 流れに傾いて置かれた平板が流体より受ける力(法線力)⁽²⁾

大きな力を説明することができたのである。 実験観測値は α が小さい場合($< 10^\circ$)、曲線3ときわめて良く一致し、ほぼ α に比例して増加する。

2.3 理想流体の力学とそのパラドックス

ニュートンの力学法則は今日でも十分通用する正確さを有しているが、彼が考察したのは基本的には“質点の力学”であった。したがって図2.5に見たように空気や水の流れについても“質点の集合体”としての空気や水の動きを考察したといってもよい。これに対して実際の空気や水は質点の集まりではなく、切断不可能な“連続体”としての様相をより多く持っているし、アリストテレスが洞察したように「自然は真空を嫌う」として、空気や水の流れの中から真空と、その逆である、同一空間における物質の重複(流線の交差)をともに排除することが必要であった。

このように考え、ニュートンにつづく物理学者(その多くは数学者)達は、実在流体(実際の空気や水)のもっている分子性を無視し、粘性も

圧縮性もない連続体としての仮想的な流体モデルを研究の対象としたのである。このような流体を今日では理想流体 (Ideal fluid) という。理想流体の性質とその運動条件である連続の式はそれぞれ次式で表現される。

$$\text{非粘性} : \mu = 0 \quad (2.7)$$

$$\text{非圧縮性} : \rho = \text{const} \quad (2.8)$$

$$\text{連続の式} : \rho v A = \text{const} \quad (2.9)$$

連続の式中 A は流体中にとった仮想的な流路 (流管と呼ぶ) の断面積である。図 2.7 に流線と流管の定義を示す。式 (2.9) と図より明らかなようにもし流管の断面積が小さく ($A_2 < A_1$) ならば流体は加速 ($v_2 > v_1$) される。

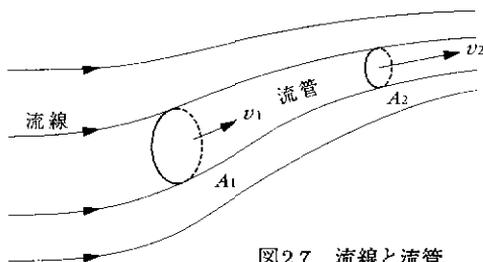


図 2.7 流線と流管

理想流体の運動方程式とエネルギー保存則はオイラー (Leonhard Euler, 1707 - 1783) とその親友ベルヌーイ (Daniel Bernoulli, 1700 - 1782) によってそれぞれ次式のように定式化された。

オイラーの運動方程式：

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s}}_{\text{加速度}} = \underbrace{-g \frac{dz}{ds} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}}_{\text{重力と圧力勾配による力}} \quad (2.10)$$

ここで s は流線に沿う座標であり, z はその高さ, g は重力の加速度である. 上式はニュートンの力学の第2法則式(2.2)を運動する流体に適用したものであり, “左辺の加速度 = 右辺の単位質量当たり力” としたものである. 左辺は又非定常加速度 $\partial v/\partial t$ と対流加速度 $v(\partial v/\partial s)$ に分けられ, 右辺は流線に沿った重力と圧力の勾配に基づく力より構成されている. 非定常加速度は文字通り流れの非定常性によってある空間の流体要素(流体粒子)が加速されることを意味するが, 対流加速度は, 図2.7の助けを借りて, 流体粒子が流れに沿って加速されることを考慮したものである.

ベルヌーイの式:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{const} \quad (2.11)$$

(圧力エネルギー + 運動エネルギー + 位置エネルギー = 一定)

上式は定常運動のオイラーの運動方程式を s で積分することによってもただちに得られるが, s に沿って単位質量流体の有するエネルギーの総和は一定であるという重要な命題, すなわち “エネルギー保存則” を表現している. ベルヌーイの式は現在の流体力学においても最も重要な式で, 例えば水タンクに取り付けたノズルから流出する水の水の速度や流量はこの式によって正確に計算できるし, 1732年フランス人ピトー (Henri de Pitot, 1695 - 1771) が発明し, 現在でも航空機の速度計等に多用されているピトー管もこの原理にもとづいたものである.

さて, 理想流体の力学を任意形状の物体周りの流れに適用し, 空気抵抗を初めて合理的に説明しようとしたのは, 百科全書 (Encyclopedia) の編集者としても著名なダランベール (Jean le Rond D'Alembert, 1717 - 1783) といわれている. しかし, 十分注意深く綿密な計算を行ったにも

かかわらず、得られた結果はいずれもダランベールをひどく驚かし、落胆させるものであった。彼の著書“流体抵抗の新理論試稿”に記された結論は以下のような文章で終わっている^{注1}。

この理論は、流体抵抗を満足に説明できませんが、なぜそうなるのか、私にはわかりません。それどころか、少なくともこの理論は、非常に注意深く進めてきたにもかかわらず、多くの場合に抵抗が全くゼロである、という結果を与えるように思います。これは珍しい背理で、これからの数学者 (geometricians, 幾何学者) に説明してもらいたい問題です。

流体力学史上、最も有名なダランベールの背理 (the paradox of D'Alembert) がこれである。式 (2.10) のオイラーの運動方程式は流線に沿った一次元の運動方程式であるが、同式は2次元あるいは3次元の流れ場においても基本的に積分可能であり、当時より今日に至るまで様々な境界条件において計算されている。図2.8に2次元流れの例で円柱をよぎるような理想流体流れの解を示す。図中 (a) がその場合の流線図、(b) が円柱

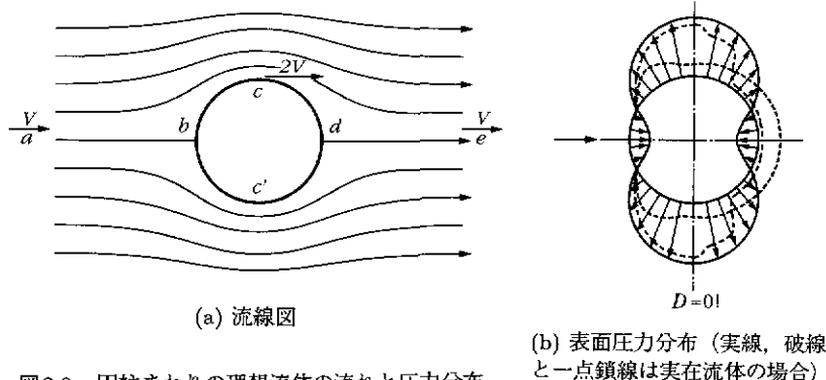


図2.8 円柱まわりの理想流体の流れと圧力分布

^{注1} 本章の各所と同様、この部分の引用もカルマン著、谷一郎訳「飛行の理論」から再引用である。ただし“数学者”の原著は geometricians であるから幾何学者がふさわしいように思われる。

表面の圧力（静圧）の分布である。

流線図の中央の流線（ $a \rightarrow e$ 、よどみ点流線と呼ぶ）に注目すると、流れはまず円柱に近寄りつつ減速し、 b 点で衝突し、速度零、圧力最大となり、二手に別れて加速され $c(c')$ 点で速度最大($2V$)、圧力最小となったのち再び減速して後方のよどみ点、 d 点で速度零、圧力最大の状態に戻る。その後さらに円柱を離れつつ次第に加速して元の速度(V)となって流れさるのである。これが数学的に厳密に得られる理想流体の流れである。この場合の圧力分布は図(b)の実線で示す分布となる。すなわち円柱の前方および後方よどみ点では圧力は正となり、円柱表面を内側へ押すように作用するが、速度が最大となる肩の部分(c, c')では大きな負圧が生じ円柱表面を外側へ引張るように作用することになる。事実この負圧については日常生活でもよく経験するところである。さて、次に円柱表面の圧力を積分すれば円柱に加わる正味の力（ベクトル）が計算できることになるが、これを実行すると、流れと圧力分布の対称性から明らかかなようにこれはちょうど零になってしまうのである。この結論は我々の日常経験とは全く相入れないものであった。この背理の原因が、理想流体モデル、特にその非粘性仮定にありそうなことはダランベールにおいてもある程度は理解されていた。しかし実在する水や空気の粘性は、計測不可能な程度に十分小さいこともまた事実であったので、理想流体モデルによる抵抗零という結論があまりにも劇的で説明不可能な現象に思えたのである。

図(b)で破線および一点鎖線で示した圧力分布は実在流体の実験で得られたものである。図より明らかかなように、実験結果は円柱の前方よどみ点付近では理想流体の圧力分布とほとんど一致するのに対し、後方よどみ点では大きく異なり、理想流体のそれとは反対に負圧になっている

ことがわかる。その結果円柱は前方より押され、後方に引かれるのであるから、当然大きな抗力を受けることになるのである。

図2.9に傾いた平板のまわりの理想流体の流れを示す。これも2次元のオイラーの運動方程式の積分解である。図2.5のニュートン流れと比較すれば、かなり現実的な流線模様のように思われる。ただしこの場合のよどみ点流線は $a \rightarrow b \rightarrow c(c') \rightarrow d \rightarrow e$ となり、図2.8の円柱の場合と同様流れは完全に閉じており上流

と下流の流線がきれいな点対称となっていることがわかる。したがってこの場合も平板表面の圧力分布を積分して平板にかかる正味の力を計算すると正確に零になることがわかるのである。

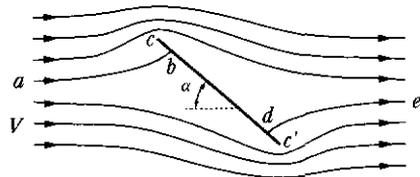


図2.9 傾いた平板のまわりの理想流体の流れ

(平板を時計方向に回転させようとするモーメントは残る。)

このように理想流体の流れ場に置かれた物体は、その形状に関わりなく全ての場合において流体から受ける力は正確に零になるという結論に到達したのであった。

理想流体モデルはそのままにダランベールのパラドックスを回避する試みとしてキルヒホッフ (G.Kirchhoff, 1824-1887) やレイリー (Lord Rayleigh, 1842-1919) によって考え出された死水領域理論がある。図2.10にその例を示す。

図2.9と比較すれば違いは明らかだが、この場合よどみ点流線 $a \rightarrow b \rightarrow c(c')$ が平板後方で閉じるのではなく、平板の両端から下流へ伸びる自由流線に沿って開いたまま流れ去るとしたものである。自由流線の間には平板との相対速度が零の死水 (dead water) 領域が存在する。死水領域

の圧力を無限遠方の静圧 p_∞ に等しいとすれば、よどみ点流線が衝突する平板前面との圧力差によって平板に大きな力が働くことを説明できる。

前出図2.6中の曲線2がこの死水理論に基づく無次元法線力の計算結果である。抵抗が常に零となるダランベールのパラドックスは免れ、又ニュートンのモデルよりもより現実的

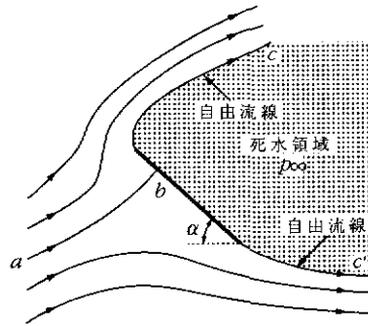


図2.10 死水領域のある平板まわりの流れ

になったが、それでも実験結果とは中々一致しない、又死水領域の幅には仮定が必要だし、それが平板後流の無限遠方まで続くとするなど、モデルとしてもかなり問題を含んでいると云わなければならない。

一方、理想流体理論に基づいて流れに直角方向に作用する力すなわち揚力を説明することに初めて成功したのは1878年のロード・レイリーであった。図2.11を使ってそれを説明しよう。同図は図2.8(a)に示した円柱まわりの一様な流れ場に循環 Γ

$$\Gamma (= \oint_c \mathbf{v} \cdot d\mathbf{s}) = 2\pi R V_\infty \quad (2.12)$$

を重ねあわせたものである。

ここで、 R は円柱の半径、 V_∞ は遠方における一様流の流速である。循環は流れ場に存在する渦の強さを示す物理量であって式(2.12)の括弧内に示したように任意の閉曲線 c 上の周方向速

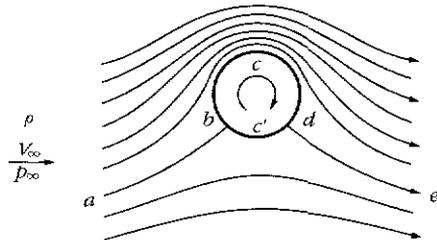


図2.11 円柱まわりの理想流体の流れに、時計まわりの循環運動を重ねた流れ

度成分 $v \cdot ds$ を一周積分することによって計算される。図の場合円柱内部に強さ $2\pi R V_\infty$ の強さの渦が存在することを意味する。そうするとこの渦による誘起速度によって円柱に近づく流れは一旦上方に吸い上げられその後下方に押し下げられることになる。流れの上向きの運動量が下向きの運動量に変化させられるので、円柱はその反作用として上向きの大きな力を受けることになる。これが揚力である。レイリーはこの揚力 L は速度ベクトル V_∞ と循環ベクトル Γ (渦芯に沿って右ネジの向き) の両者に直角であり、その強さは、ベクトル積を用いて

$$L = \rho V_\infty \times \Gamma \quad (2.13)$$

となることを証明した。揚力の発生は又ベルヌーイの式によっても説明することが可能である。図2.11のよどみ点流線 $a \rightarrow e$ で説明すると、この場合速度零、圧力最大のよどみ点 b, d は循環が無い場合に較べて円柱の下方側へ移動し、 c 点の右向き速度は $2V_\infty$ から $3V_\infty$ へ加速され、 c' 点の同じく右向き速度は $2V_\infty$ から V_∞ へ減速される。結局 c 点の負圧がきわめて大きくなるために、円柱を上向きへ吸い上げる揚力となるのである^{注1}。ただし、この場合も流線模様は左右完全に対称であるから円柱に流れ方向に作用する力すなわち抗力は零であることを注意しなければならない。すなわち抗力に関する限りダランベールの背理はなお未解決である。

図2.12に迎え角をもった翼のまわりの流れ場の模式図を示す。ほぼ今日の翼理論(揚力理論)による流線模様であり、迎え角が大きくない範囲では実験結果ともきわめて良く一致することが知られている。本図のよ

^{注1} 野球ボールのカーブやシュート及びカットされたテニスボール等の軌跡が大きく湾曲するいわゆるマグナス効果 (Magnus effect) もこの揚力のために他ならない。

どみ点流線 $a \rightarrow e$ を図2.9のそれと比較すると明らかなように、後方よどみ点 d が翼の上面より後端に移動している。クッタとジュコフスキー (Wilhelm Kutta, 1867 - 1944, and Nicolai Egorovich Joukowski, 1847 - 1921) は翼まわりの一様な流れに循環を重ね、後方よどみ点がちょうど翼後端に一致するようにその強さを決定したのである。これをクッタの条件またはクッタ・ジュコフスキーの条件と呼ぶ。すなわち進行中の翼は渦と等価であることを明らかにし、そのために大きな揚力の発生することを証明してニュートン以来の難問に最終的な結論を与えたのであった^{註1}。ただしこの場合でも翼に働く抗力は理論的には零である。

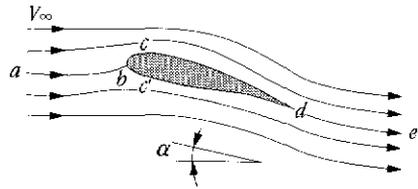


図2.12 迎え角をもった翼のまわりの流れ

2.4 実在流体の力学

理想流体モデルによっては結局物体に加わる抵抗を全く説明できないことが前節までに明らかになった。オイラーの運動方程式は積分可能であり、循環理論等を加えることによって様々な流れ場をきわめて美しく解くことには成功したが、こと抵抗に関する限り全く無力だったと言って良い。そのため実際に船の摩擦抵抗の推定やポンプ・送風機等の設計に携わる工学者達にとっては理論流体力学は全く魅力の無い科学であったと言っても過言ではない。一方、前にも述べたようにダランベールのパラドックスの第一原因が実在流体の粘性を無視した点にあること、さ

^{註1} 飛行中の翼のことを束縛渦ともいう。これに関連して、出発渦、自由渦等さらに興味深い翼理論の概念について後に述べる。

らに流体同士の内部摩擦すなわち粘性を考慮に入れた運動方程式も19世紀半ばには知られていたことも事実ではあったが、その運動方程式のあまりの複雑さのために、それが流体運動の理解に役立てられる為にはついに今世紀まで待たなければならなかったのである。

2.4.1 ナビエ・ストークスの方程式

流体の粘性^{注1}を考慮に入れた運動方程式はナビエとストークス (C. L. M. H. Navier, 1785 - 1836, and G. G. Stokes 1819 - 1903) によってそれぞれ独立に1827年と1845年に定式化され、今日では流体力学の最も基礎的な方程式としてナビエ・ストークスの方程式と呼ばれている。非圧縮性流体 ($\rho = \text{const}$) に対するナビエ・ストークスの方程式をベクトル形および x, y, z 方向の3成分に分けた形で記述するとそれぞれ以下のようになる。

$$\underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{加速度}} = \underbrace{\mathbf{K}}_{\text{外力}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{圧力勾配}} + \underbrace{\frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{v}}_{\text{粘性力}} \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

連続の式は式(2.9)と同一であるが、

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

^{注1} ただし式(2.4)で与えられるニュートン流体の粘性

と書くことができる。

式(2.14)とオイラーの運動方程式(2.10)を比較すれば左辺の加速度は全く同形、右辺の外力(式(2.10)では重力)と圧力勾配力も全く同様であり、第三項の粘性力のみ新たに加わったことがわかる。ただし、この項の存在のために、ナビエ・ストークス方程式は数学的に最も難解な非線形偏微分方程式の一つとなってしまったのである。後で見るようにスーパーコンピュータが使用できる今日においてさえ、この方程式の一般解を得ることは不可能であり、一意的な解の存在さえ疑われているのである。

右辺第三項の粘性力は粘性係数 μ に比例するので空気や水のようにそれが無視できる程に小さい流体においては、この項を無視し非粘性流体として流れ場を解いても大きな誤差は生じないように思われるのだが、その差が劇的に大きくなるのがそもそもダランベールのパラドックスの深刻さであった。

図2.13と図2.14に水槽中を右から左へ移動する円柱によって得られた実在流体の流れ場の様子を示す写真を示す。図2.13はプラントル(Ludwig Prandtl, 1875-1953)とその弟子ティーチェンスによって得られたもの⁽³⁾だが、円柱後方の流線模様が理想流体の場合とも死水領域モデルによるものとも全く異なり大きく渦をまいた流線となっていることがわかる。すなわち理想流体による予想では円柱に沿って流れていた流線が、円柱後方で壁面からはく離し、大きな渦を形成して下流に流れさっている。この渦は又、流れに対して左右交互に発生し千鳥状の配列をなして流されるこ

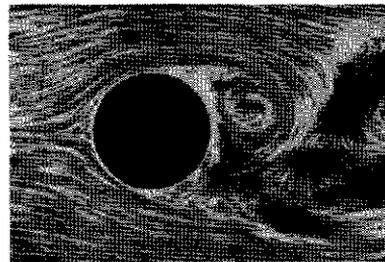


図2.13 円柱まわりの実在流体の流れ(可視化写真⁽³⁾)

とも分かったのである。図2.14は円柱後流に残された渦列をとらえている(4)。プラントルのあと一人の弟子カルマン(Theodore von Kármán, 1881 - 1963)は理論的に初めてこの渦列の安定性を証明したので以後この渦列はカルマンの渦列(Kármán's vortex street)と呼ばれるようになった。式(2.14)の積分解が存在するならば、その一つとして図2.13や図2.14の流れ場が示される筈であるが残念ながらそのような解は現在のところ存在していない。

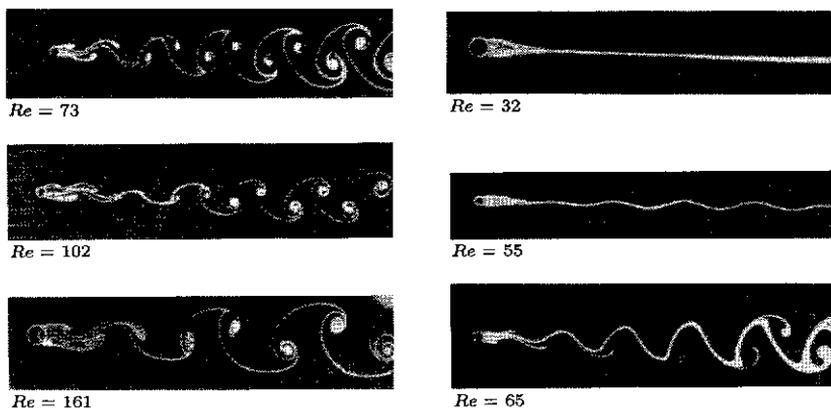


図2.14 円柱後流にできるカルマンの渦列(可視化写真⁽⁴⁾)

2.4.2 小さな粘性の効果

水や空気の無視できる程小さな粘性が何故にこのような大きな違いをもたらすのだろうか？ 実は、その答は再び実在流体の分子性にあったのである。

分子運動論を紹介するまでもなく水も空気もそれぞれ自由自在に飛び回る無数の分子の集合であると考えられている^{注1}。このような流体が固

^{注1} 常温常圧の空気において分子運動の速度は400m/sにも達する。

体である物体の近くを通過するときどのような現象が起こるだろうか？

固体も又分子または原子の集合体であるから、その分子間距離は、分子の大きさにくらべてきわめて大きく、実は水や空気の分子は自由自在に固体の内部に進入しまた飛び出してくるのである。そうすると実在流体の場合固体表面において平均的にどのような境界条件(速度条件)が満たされねばならないだろうか？ 理想流体モデルにおいてはこの点について壁に直角方向の速度成分のみ零とする境界条件で満足していたのである。壁に平行な速度成分は零とはならない。すなわち壁に対して滑る(slipする)ことを許容していた。前節に述べた理想流体力学の解の全てにおいてよどみ点流線は固体に対して相対的に滑ることを前提としていた^{注1}。

ところが実在流体の分子性を考慮するならば、流体の分子は固体内部へ自由に入出入りすることによってその平均的な運動量を失ってしまうので、固体壁面において速度の法線成分はもちろん接線方向成分も零でなければならなかった。実在流体の力学を少し詳しく学んだ人なら今日では常識的に受け入れられている概念がこの no slip の境界条件なのである^{注2}。この境界条件は粘性の大小にかかわらず、すなわち粘性がどんなに小さくても成立することに注意しなくてはならない。これを一般的に表記すると、

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_b \quad \text{at body surface} \quad (2.17)$$

となる。 \boldsymbol{v}_b は物体の速度ベクトルであり、物体表面で流体の速度はそれに一致する。すなわち例えば水棲動物がいかに大きく体をうねらせて、

^{注1} より正確に言うと、壁そのものが流線(よどみ点流線)だったのである。

^{注2} 力学の教科書では必ず登場する固体摩擦(2固体は互いにslipし、摩擦力は法線力に比例する)と流体摩擦はこの点で決定的に異なる。

いかに高速で泳いでいても常にこの条件は満たされねばならない。

2.4.3 レイノルズの相似則

式(2.14)の左辺は加速度であるから(単位質量当たりの)慣性力と等価である。この項と右辺第三項の粘性力の比を流体力学ではレイノルズ数と呼ぶ。レイノルズ数 Re は流体の密度 ρ 、粘性係数 μ 、流れの代表的な長さ L および速度 V を用いて

$$Re(=\frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}}=\frac{\rho V^2/L}{\mu V/L^2})=\frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.18)$$

と表示される。レイノルズ数は無次元量であり、流れ場の慣性力と粘性力の比によって 10^{-1} から 10^8 程度まで大きく変化する量である^{注1}。

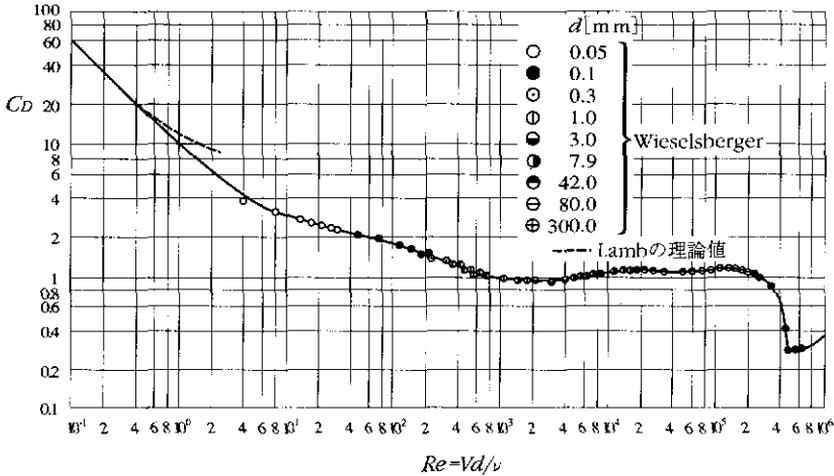
ナビエ・ストークスの式の各項を無次元化すれば次式が得られることが知られている。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{v} \quad (2.19)$$

ただし上式中の物理量は時間 t も含めて全てその代表量で無次元化されている。式(2.19)は、一般的なナビエ・ストークス方程式は右辺最終項の無次元係数 $1/Re$ のみによってその解が決定されるということを示している。言葉を換えると“境界が幾何学的に相似な流れ場は、もしそのレイノルズ数が等しければ流れ場全体が相似になる”ことを示している。これがレイノルズの相似則(Reynolds' law of similarity)である。

図2.15によりレイノルズの相似則の正しさを示す⁽⁶⁾。図は二次元円柱の加わる抗力係数を広範なレイノルズ数の範囲で示したものである。抗

^{注1} 水中遊泳を例にとると、アメーバやゾウリムシの世界では Re がきわめて小さく、クジラや船のまわりの流れではきわめて大きい。

図2.15 円柱の抵抗係数⁽⁵⁾

力係数 C_D は次式で定義される。

$$C_D \left(= \frac{\text{抵抗}}{\text{流れの動圧} \times \text{円柱の投影面積}} \right) = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 d} \quad (2.20)$$

図中丸印で示す実験点は円柱の直径を0.05mm（細線）から300mmの範囲で変化させ、流体も水槽あるいは風洞を用いて非常に低速から高速の範囲で計測されたものである。図より明らかなように全ての実験値は一本の曲線上に分布している。すなわち Re 数が与えられれば流れ場は相似となり、抵抗係数も一定値になることを証明している。何度も言うように、任意の Re 数に対するナビエ・ストークス方程式の一般解は未だ存在しておらず、わずかに Re が1より小さな領域でストークス、オゼンあるいはラム（図中破線）らによる近似理論解があるのみである。なお Re 数が 3×10^5 付近において抵抗係数が1.0程度から0.3程度にまで急減する現象が見られるが、これについては後にふれる。

2.4.4 境界層理論

式(2.19)によれば、レイノルズ数 Re が大きくなる程右辺の粘性力は他の項に較べてその影響力は小さくなることがわかる。ただし、前に見たように、レイノルズ数がいかに大きくなっても流体の分子性のために物体表面において速度は no slip の条件を満足しなければならない。プラントルはこの点に注目して物体まわりの流れを二分し、物体表面近くのごく薄い層内のみにおいて粘性の影響を考慮し、その他の主流部分については非粘性流体として取り扱うことを1904年に初めて提唱した。これがプラントルの境界層理論(Boundary layer theory)である⁽⁶⁾。境界層理論によれば、ナビエ・ストークス方程式は非常に薄い境界層の中でのみ適用すれば良いので、例えば二次元物体のまわりの流れを考えた場合、式(2.15)の3つの運動方程式の内、壁に沿った流れ方向(x 方向)の運動方程式のみ残り、他の二式は

$$\frac{\partial p}{\partial y} \doteq 0 \quad \text{および} \quad w = 0 \quad (2.21)$$

を理由として消去することが可能となる。さらに x 方向の運動方程式も

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.22)$$

のように粘性力の項が著しく簡単になることがわかった。上式が境界層方程式である。境界層内の連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.23)$$

となる。境界層の外側は理想流体のオイラーの運動方程式と連続の式から解析的に求めることが可能である。このようにして物体まわりの実在流体の流れ場は、壁表面の no slip ($u = v = 0$) と境界層外端の理想流体

流れを両境界条件として境界層方程式(2.22)を解く問題に帰着したのである^{註1}。一様流れに平行に置かれた平板上に発達する境界層について式(2.22)を最初に計算したのはプラントルの弟子の一人ブラジウス(H.Blasius)であり彼の学位論文となった。ブラジウスの解は多くの実験によってその正確さが確かめられている。

境界層理論によって初めて、難解な実在流体の流れ場が数学的に取扱い可能となり、今世紀を通じて流体力学の長足の進歩をもたらしたといえることができる。特に境界層理論発表の前年(1903年)のライト兄弟(W. Wright, 1867 - 1912, and O. Wright, 1871 - 1948)の成功に始まる航空工学の進歩には境界層理論は正に欠かせない理論であった。

ダランベールの背理も境界層理論によって、ようやくその真相が解明された。すなわちその真の原因は壁表面における no slip と境界層の発達および境界層流体の壁面からはく離であることが明らかになった。境界層内の速度は理想流体の場合の壁近くの流れに比べて著しく減速されているので、円柱後方のように、流れ方向に圧力が上昇するような逆圧力勾配($dp/dx > 0$)の場合、それに逆らって進行することができず、ついに壁から主流方向へ押し出されるのである。これが図2.13でみた円柱後方における大きなはく離流発生の原因であった。はく離流はその発生機構によって、流体の粘性係数がたとえどのように小さくても(レイノルズ数が大きくても)大きな逆圧力勾配のあるところに必ず発生すると言える。なおまた境界層のはく離は流れ方向に圧力が減少する順圧力勾配($dp/dx < 0$)においては決して発生しないということも証明可能である。図2.13の円柱前半部の流れ模様や図2.8(b)でみた実在流体のその部

^{註1} 主流から見れば境界条件となる境界層の外端は、 x 方向の速度を有し、いわば slip を認めていることになる。

分の圧力分布が理想流体の解とそれぞれ良く一致するのはこの為である。

境界層理論の重要な結論の一つとして、流体中の物体の抵抗を減ずるには、その形状を流線形形状もしくは紡錘体形状にすべきであるということが明らかになった。すなわち物体の後半部分(最大厚さの位置から後方)の形状をできるだけなだらかにしてその圧力勾配 dp/dx を小さくするということである。今世紀前半の航空工学の主要な課題の一つは、いかにして揚力が大きくかつ抗力の小さい翼形を開発するかという点にあった。一次、二次の世界大戦を通して各国はそれぞれ独自に(かつ秘密裏に)低抵抗翼形を開発していた。

図 2.16 にこのようにして開発された層流翼形とそれと全く同じ抵抗を受ける円柱(針金)とを比較して示す⁽⁷⁾。図中に示すように翼形の弦長(chord)は円柱直径の実に 167 倍、厚さ(thickness)で比較しても 35 倍もの物体が円柱と全く

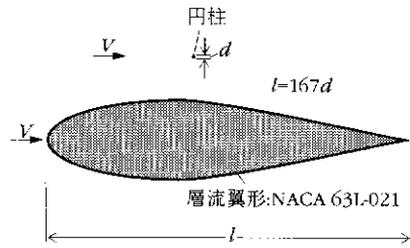


図 2.16 同じ抵抗の円柱と層流翼形⁽⁷⁾

同じ抗力しか受けないのである。これによって例えばライト兄弟らによって開発された初期複葉機に張り巡らされたワイヤーがいかに大きな抵抗の原因になっていたか、また初期複葉機がそれ故にいかに早く駆逐され今日の単葉機にとって替えられたかをただちに理解することも容易であるろう。

本書の主題である高速遊泳動物がいずれもその形状を流線形もしくは紡錘体形状としていることも全く同じ理由に基づいている。彼らは数万年もしくはそれ以上の進化によってその形状を完成させた。“魚がスーッと泳ぐ”のもその低抵抗性によってわずかの推力によって加速可能であ

り、またその比較的大きな慣性力によって簡単には減速しない様を示していると言えよう。

2.4.5 層流と乱流

境界層の理解によって実在流体の挙動はある程度把握することが可能となった。ただし、実在流体にはあと一つ避けて通れない難問が存在する。それは分子運動のレベルではなくより巨視的な流体塊の運動における層流と乱流の問題である。すなわち例えば水道管を通して一定流量、一定速度で水を流すような一見定常流($\partial v/\partial t = 0$)と思えるような流れでもその様式には層流(laminar flow)あるいは乱流(turbulent flow)と呼ぶべき2種類の流れが存在するのである。

この問題を実験的に初めて明らかにしたのは1883年英国のオズボーン・レイノルズ(Osborne Reynolds, 1842 - 1912)であった。図2.17にケンブリッジ大学に現存するレイノルズの実験装置を示す。水槽中に設置した透明なガラス管を通して種々の速度で水を流出させるというきわめて簡単な装置であるが、ガラス管入口において別途注入する着色液によって流れの様子が可視化できる。

レイノルズはこの装置によってガラス管内の平均流速 v_0 が小さい場合には着色液は拡散せず糸を引いたように流れるが、流速がある臨界値を超えると着色糸はかき消され、流体塊は互いに不規則に混じり合いながら流れることを発見したのである。レイノルズは多数の系統的な実験によってこの層流から乱流への遷移現

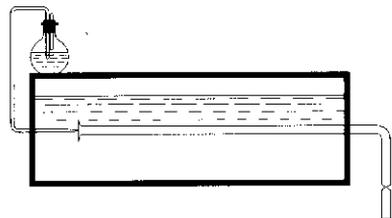


図2.17 レイノルズの実験装置
(概略図)

象が今日我々のいうレイノルズ数 $\rho v_a d / \mu$ がある臨界値（約2000）を超えることによって生じることを初めて明らかにしたのである^{注1}。

図2.18にレイノルズの実験における層流と乱流の違いを示す。層流の場合は流体粒子^{注2}が互いに混じり合わずに平行な軌跡を描いて流れるのに対し、乱流の場合は互いに混じり合って複雑に流れる様子がわかる。図中 ν は動粘度あるいは動粘性係数と呼ばれる物性値であり粘性係数 μ を流体の密度 ρ で除して得られる。例えば20℃、1気圧の水の場合 ν は $0.01\text{cm}^2/\text{s}$ の程度である。もし水道管の直径を1cm、平均流速を20cm/sとすれば、レイノルズ数はちょうど2000となり、これより直径が大きいか又は流速が早くなると流れはたちまち乱流となることを示している。

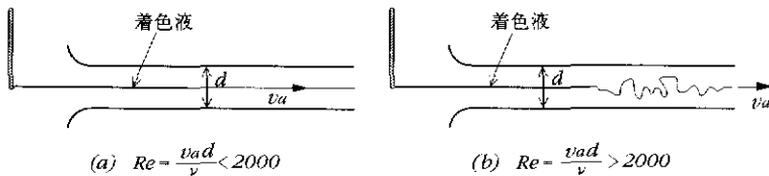


図2.18 レイノルズの実験における層流と乱流

実際我々が経験する多くの流れはレイノルズ数が 10^4 かまたはそれ以上であることが多く、ほとんどの流れは乱流と考えなければならない。式(2.14)に示した実在流体のナビエ・ストークスの方程式は流体粒子に対して成立する運動方程式であるから、層流と乱流の違いは比較しようもない程本質的に異なる流れ場（方程式の解）を与えることがわかる。すなわち層流では流線は互いにほぼ平行と考えて良いからその方向に座標

注1 レイノルズ数の命名は後のゾンマーフェルトによるものであって、レイノルズ自身はこの言葉を使用していない。

注2 流体粒子は分子ではないことに注意。分子が無数に集まった集合体であり、連続体流体としての圧力や密度が定義できる程度の塊である。それでも大気中の水や空気において直径 $1\mu\text{m}$ より小さい程度の集団である。

系の一つを選んでやると、左辺第2項の対流加速度 $(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}$ は完全に零となるかあるいは一次元オイラーの式のそれと同様に $u(\partial u/\partial x)$ の項のみ残ることになり、式(2.14)は基本的には積分可能となるのである。実際、境界層内の流れも含めて、層流流れについては今日そのほとんどが解かれているといってもよい状況にある。

一方乱流の場合は、前に述べたようにたとえ速度の時間平均値 $\bar{\mathbf{v}}$ が定常である ($\partial \bar{\mathbf{v}}/\partial t = 0$) 場合でも刻々調べると流体粒子 (塊) の速度は非定常 ($\partial \mathbf{v}/\partial t \neq 0$) であり、速度の3成分 u, v, w はそれぞれ場所 x, y, z と時間 t の関数となり、式(2.14)あるいは式(2.15)の運動方程式はどの項も無視できない。ここに本質的に乱流運動の困難さがあるのである。

現代流体力学は、乱流運動を把握解析するため、統計的方法を用いたり、渦流れモデルあるいは渦粘性係数等の概念を使用しているが、いずれも実験的または半経験的理論の域を出ていないのが実情である。

2.4.6 数値実験と物理実験

一方、最近のスーパーコンピュータの発達は、乱流モデルを用いずとも、ナビエ・ストークス方程式を直接解くことで実際にかかなり近い流れを再現できるようになった。図2.19と巻頭写真8にそのような試みの一例を示す⁽⁸⁾。図に示すように2次元円柱まわりの流れ場をO形格子 $181 \times 181 = 32761$ メッシュにわけ、円柱をよぎる一様流れについて、式(2.14)を差分化し、これを時々刻々 (時間発展的に) ダイレクトに計算したものである^{註1}。もちろん円柱表面に no slip の条件を与え、流れ場の

^{註1} 数値計算法についても、興味ある読者は是非適当な参考書によって別途学んで頂きたい。ここに紹介した計算法は三次精度風上スキーム (k-k スキーム) と呼ばれ、スーパーコンピュータ CRAYX - MP/216 を使用し、1ケース ($1Re, 1 \Delta T$) の計算に20 ~ 30h程のcpuタイムを要している。

メッシュは円柱近傍すなわち境界層領域をできるだけ細くきざむよう工夫してある。流れ場のレイノルズ数は 10^2 , 10^4 および 3×10^5 の3通りである。

計算結果は、巻頭写真8でも解るように、驚く程実際の流れを再現しているように思われる。すなわち境界層の流れが円柱後方ではく離して、

大きな渦を形成しつつ後流に流れ去る瞬間を見事にとらえており、前に図2.13でみた水槽実験による可視化写真ともよく一致しているように思われる。このようにスーパーコンピュータによる計算結果は、水槽実験や風洞実験によって得られる結果と同様に、変動流についても時々刻々と変化する様子を詳細に再現することができるので、今日では“数値実験”とよんで、水槽実験等の物理実験と同列に扱い、かつ区別している。

さて、本章の主題の一つは円柱に加わる抗力であるので、上述の数値実験によって得られる時間平均抗力係数を物理実験のそれと比較すると

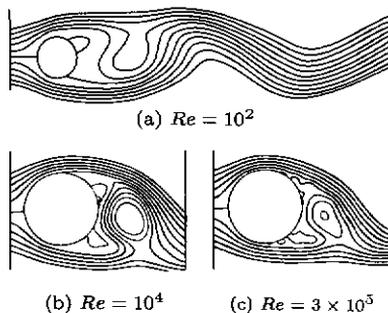


図2.19 数値実験による円柱まわりの流れ

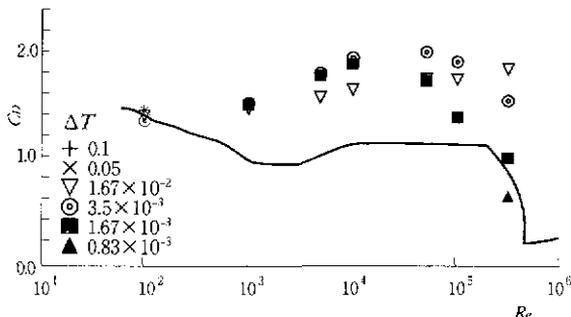


図2.20 数値実験による円柱の抗力係数（実線は物理実験）

図2.20が得られる。図の縦軸・横軸は図2.15と同じであり、図中実線は物理実験の結果である。図より、数値実験は Re 数を 10^2 より 3×10^5 まで7通りに変化させて実行したが、 Re 数が比較的に小さい場合(10^2 と 10^3)には解がよく収れんするが、大きな Re 数の場合収れんしないことがわかる。すなわち計算条件(時間のきざみ幅 ΔT)の違いによって異なる抗力を示すことがわかった。また $Re = 10^2$ の場合を例外として、それ以上の Re 数においては一般に数値実験の方が物理実験よりも高い抵抗値を示すこともわかったのである。このようにスーパーコンピュータを使った計算においてさえ、それが一つの実験と呼ばざる得ない限りでは、その結果は最終的には同じ境界条件の物理実験によって検証あるいは比較検討されなければならない^{注1}。ここでも、実在流体力学のもつ本質的な難解さが理解され、さらに流体力学における実験(実体験)の重要性が強調されるのである。

なお前にも指摘したが、図2.20(あるいは図2.15)の $Re = 3 \times 10^5$ 付近における抵抗の急減少はきわめて興味深い現象であり、実は現代流体力学は物理的にその機構をほぼ完全に解明しているといっても良い現象なのである。すなわちこのように高い Re 数になると、壁近くのごく薄い境界層の流れさえ、臨界速度に達し、境界層の流れが層流から乱流へ遷移するということが、この現象の秘密の鍵だったのである。

境界層内流れが乱流になると、流体粒子は壁に沿った一次元的な運動エネルギーの他に乱流の運動エネルギーを付与されるので、前に述べた逆圧力勾配に対する耐性がより強くなり、境界層のはく離がより遅延される。すなわち円柱後方に形成されるはく離流領域の幅が層流はく離の

^{注1} 物理実験が数値実験に勝って常に正確であるということもまた断定はできない。なぜなら、例えば円柱まわりの流れの物理実験の場合、そもそも流れが完全に2次元であるという保証はどこにもないからである。

場合に較べてかなり小さくなり、そのために抵抗係数が約1/3にまで減少していたのである。

同様の抵抗急減の現象は球をよぎる流れ場においてもやはり $Re = 3 \times 10^5$ 付近で明瞭に観察される。球の前方にトリッピングワイヤを設置し、より低いレイノルズ数において境界層を人工的に乱流に遷移させ、抵抗急減の現象を物理的に最初に証明したのは、他でもなく境界層理論の提唱者プラントルであった。これは今日では、ゴルフボールのディンプルがそれが無い滑らかなボールに比べて抵抗を大きく減少させ、その飛距離を3～5倍にも伸ばすことを知っているプレイヤーが決して少ない程に、有名な現象である^{注1}。

さらにあと一つ、管内乱流や乱流境界層を議論するときに見落としてはならない事実として、壁のごく近く、すなわち乱流境界層の下層には、なお層流流れが存在していることを指摘しておこう。固体壁が no slip である以上それに隣接する流れはまず層流であり、そしてその上に乱流境界層が存在しているのである。この層は粘性底層または層流底層と呼ばれる。管内壁の滑らかさあるいは粗さを考える場合、粗さの凹凸がこの粘性底層の厚さを超えると粗い、それ以下におさまれば“流体力学的に十分滑らか”と判定される。粘性底層については第4章“トムズ効果”の節で再度とり上げる。

2.4.7 実在流体中の翼の運動

本章の最後の話題として、実在流体中の翼の運動について考える。空中や水中を進行する翼はどのようにして揚力を獲得するのだろうか。

^{注1} これも流体力学を語る上でも、またスポーツに流体力学がいかに貢献し得たかを語る上でも貴重な話題であり、類書も多数出版されている。

図2.21に静止状態から突然動き出した翼のまわりの流れを時間を追って示す. 図(a)が翼が動き始めた瞬間の流れ場である. この流れ場は, 前節理想流体の力学で述べた傾いた平板まわりの流れ(図2.9)と一致しており, 翼のまわりに循環は存在していない. すなわち揚力も抗力も発生しない理想流体の場合と全く同じように流れるのである. 図中のA点が前方よどみ点, S点が後方よどみ点であり, 最初翼後端B点にあった粒子は, S点に向けて翼面を上流側に流れる.

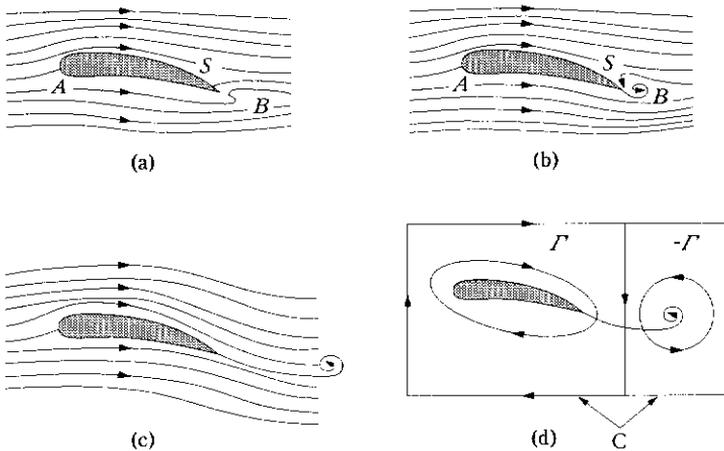


図2.21 静止状態から出発する翼まわりの流れ

図(b)は次の瞬間の流れ場である. 翼の下面にあった粒子がB点をよぎって翼上面にまわりこもうとするが, これがうまく行かずB点からはがれてしまう様子をとりえている. B点は理想流体の力学では特異点であり, 加速度無限大となるのだが, 実在流体ではそうはならない^{注1}.

次に図(c)はさらに時間の経過した流れ場である. 翼下面からの流れが

注1 “流れは急には曲がれない”と憶えるのも楽しい.

はく離れたので後流に死水域が出来るかといえばそうっていない。この場合後方よどみ点Sが下流側へ移動して翼後端に達する。すなわちこれ以降翼上面と下面に沿ってきた流れは翼後端で合流するようになる。図(a)および(b)でBS間にあった流体塊は反時計回りの渦となって下流へ押し流されている。

翼上面の流れは、BからSへ向かった流れが無くなり、代わってSからBへ向かう流れが加わったことにより、翼まわりの流れに循環が存在することになる。循環の強さ Γ は式(2.12)を計算して得られる。

図(d)に説明するように、この翼まわりに形成される循環と絶対値が厳密に等しい負の循環が、先程流れ去った渦の強さである。両渦をとり囲む閉曲線Cに沿って積分すれば、循環はちょうど0になる。すなわち翼が出発する前のそれに等しい。飛行する翼と一体の渦を束縛渦(bound vortex)、後方に取り残される渦を出発渦(starting vortex)という。

以上の現象は流れの可視化写真によっても、コンピュータシミュレーションによっても全く同じように確認する事が出来る。重要なことは、実在流体のもつ分子性あるいは粘性によって後方はく離点が翼後端に移動し、その結果循環が生じるということである。前節で見たように理想流体力学では、後方よどみ点が翼後端に一致するように数学的に循環の強さを定め(クッタの条件)、揚力を説明したが、実在流体であって初めて循環も生じるのである。

以上は2次元流れによる説明だが、有限翼幅をもった実際の翼の場合はどうなるだろうか。図2.22に飛行場を飛び立った航空機によってこれを説明しよう。

有限翼ではその左右両端から渦糸が流出し、大気中に自由渦として残されて行くが、この自由渦が飛行場に残された出発渦と図のようにつな

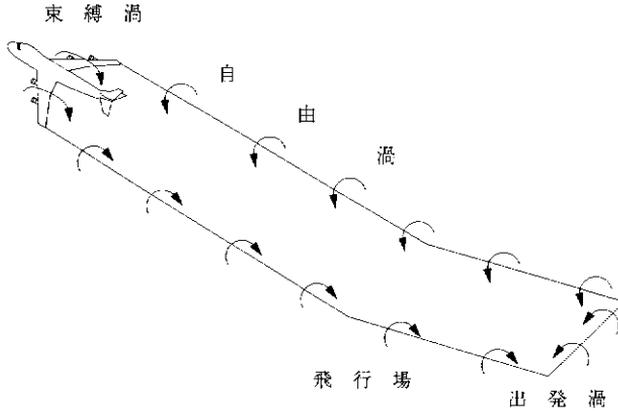


図2.22 束縛渦、出発渦および自由渦の関係

がっているのである。束縛渦と出発渦は自由渦とによって大きな渦輪を形成している。自由渦の強さも束縛渦のそれに厳密に等しい、見方を変えたと航空機の燃料は、この次々と延長される自由渦エネルギーの生成のために消費されると言うて良い。なお、渦の強さは航空機の揚力すなわち重量に比例するから、大型航空機の後流にはきわめて強い自由渦とそれによる吹き下ろし(down flow)があることが理解される^{注1}。

図2.23に翼型特性の一例を示す⁽⁹⁾。横軸には迎え角(angle of attack) α 、縦軸に揚力係数(lift coefficient) C_L 、抗力係数(drag coefficient) C_D および揚抗比 ϵ (lift - drag ratio)を示す。揚力、抗力とその係数の関係はそれぞれ

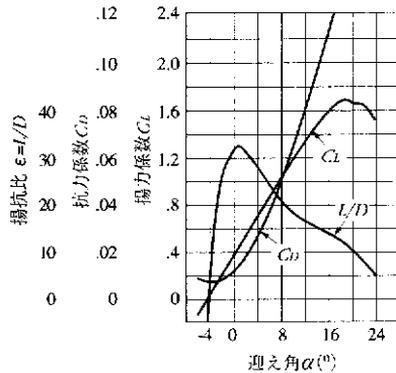


図2.23 翼の特性曲線⁽⁹⁾

^{注1} 小型機からみれば危険な乱気流の存在である。

れ次式で定義される。

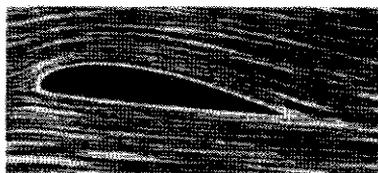
$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.24)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.25)$$

$$\varepsilon = L/D = C_L/C_D \quad (2.26)$$

上式中 A は翼の投影面積(翼弦長×翼幅)である。

図より迎え角 0° においても正の揚力係数をもつことがわかるがこれは翼がそり(camber)をもつためである。 α の小さい範囲では、 C_L はほぼ α に比例して増加するが、これはこれまでに述べた循環理論の正しさを証明している^{註1}。一方、迎え角をある角度以上に大きくすると、揚力の急減少と抗力の急上昇を引き起こすことがよく知られている。これが翼の失速(stall)であり、図では $\alpha \approx 18^\circ$ 以上でそれが認められる。図2.24に通常状態および失速状態の翼まわりの流れを示す⁽¹⁰⁾。迎え角が大きくなると翼上面における最小圧力点以降の圧力上昇勾配 dp/dx が陰しくなり、ついに境界層が翼面よりはく離してしまう。失速状態の翼まわり流れの循環は当然0に近くなるし、翼背面の「死水」領域の存在は、大きな圧力抵抗の原因となる。



(a) 通常の流れ



(b) 失速状態の流れ

図2.24 翼まわり流れの可視化写真⁽¹⁰⁾

^{註1} クッタの条件を満足するためには、循環は迎え角に比例して増加しなければならない。

なお, 図2.23によれば, 揚抗比 ϵ は比較的小さな迎え角 $\alpha \cong 1^\circ$ において最大値約32をとっている. 航空機の主翼をその巡航状態においてこの迎え角に維持すれば, 最も経済的な飛行を実現できる. すなわち最小の推進力(燃料消費)で最大の荷重を輸送することができるのである. 翼の特性として最大揚力係数に加えて最大揚抗比が特に重要であるといえよう.

以上, 本章では物体の抵抗に関連し, 最小限理解してほしい流体力学について, その歴史とパラドックス, 実在流体の物理, 数値実験と物理実験, さらに実在流体中の翼の運動について述べた. すでに流体力学の基礎を学習済みの読者にも, 本文によってあらためてこの学問の難解さとそれ故の面白さ, 奥行きの深さを知っていただければ幸いである.

第3章 推進の力学

3.1 推力発生 の原理

前章の最初に述べたように、ギリシャの哲学者アリストテレスは、魚が水中を泳ぎ、鳥が空を飛ぶのはそれぞれ「魚の自然」、「鳥の自然」と考えたために、無生物である矢が、重力に逆らって飛び続ける為の原因を説明することが出来なかった。これはガリレオやニュートンによってようやく解決され、実は矢に働く外力は重力と空気抵抗のみであり、その為矢は次第に減速する事が証明されたのであった。

それでは、抵抗や重力に逆らって魚が泳ぎ鳥が飛び続けるのは何故だろうか？ 魚や鳥に作用している推進力はいかにして得られるのだろうかという疑問が残る。この問題に対する正しい説明もようやくニュートン力学の完成以降であり、しかも流体力学の確立によって初めてなされたということができる。

まず、ニュートン力学によって説明する。ニュートンの三つの法則は“運動と力に関する一つの法則の三つの側面を表している”と述べたが、推力発生 の説明は第2および第3の法則によることができる。すなわち魚や鳥はその体の運動によって周囲流体(水や空気)の運動に変化を与える。その大きさは式(2.2)で見たように影響を受けた流体の質量とその加速度の積 ma に等しい。一方作用反作用の法則によれば流体にそのような作用力を加えた魚や鳥は、それと正確に同じ大きさで反対向きの力を流体から受けるのである。これが推力発生 の原理である。魚はその体と尾ビレをくねらせることによって周囲流体を後方に押しやりその反作用とし

て推力を得、鳥はその翼のはばたき運動によって空気を斜め後方に押しやり、その反作用として推力と揚力を同時に得ているのである^{注1}。飛行機に働く推力と揚力については図2.2で説明したが、一定速度で飛行する鳥に働く力の場合も事情は同じである。

ただし、固体の場合と違って変形し易い流体の真の加速度(式(2.10)または式(2.14)の左辺)を正確に記述するためには、流体力学しかも実在流体力学の確立を待たなければならなかった。この問題の最終的な解答は、実在流体力学がまだ完全には解明されていないことと同程度に、まだ得られていないともいえる。

本章では、今日までにほぼ確立している範囲で、運動量理論、細長物体理論および振動翼理論を順次説明し、最後に数値流体力学(CFD)による最近の計算例を紹介する。

3.2 運動量理論

流体に加わる力は、流体の運動量の変化によっても記述することができる。すなわち、物体が発生している推力あるいは物体に作用している抗力を直接計測しなくても物体周辺に適当な大きさの空間^{注2}をとって、これを出入りする流体の運動量の変化を調べれば正確にその力を求めることができる。これが運動量理論である。

図3.1にスクリュプロペラの運動量理論を示す⁽¹⁾。スクリュプロペラは作動円板(actuator disk)として図の中央にあり、これに流入する周囲流体の相対速度を V 、流出する相対速度を $V+v$ としてある。もし、静止流体中をスクリュプロペラが移動する場合には、 V がその前進速

^{注1} もう少し解り易くするには、読者が地面を蹴って飛び上がる運動を考えてみるとよい。

^{注2} これを検査空間(control volume)という。

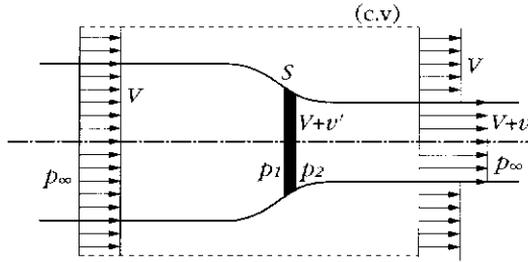


図3.1 スクリュープロペラの運動量理論

度、 v はプロペラによって引き起こされた後ろ向き流れ（ジェット）の速度とすることができる。ここで作動円板の面積を S 、これを通過する流体の速度を $V + v'$ 、円板の前面の圧力を p_1 、 p_2 、円板の影響を受けない十分上流および下流の圧力を p_∞ とすると、円板が発生している推力 T は、円板前後の圧力差によっても、検査体積を通過する流体の運動量の増加によっても、それぞれ以下のように、表すことができる。

$$T = (p_2 - p_1)S \quad (3.1)$$

$$T = \rho S(V + v') \{(V + v) - V\} \quad (3.2)$$

一方、流体の粘性および回転運動によるエネルギー損失を無視すれば、円板の上流および下流の流線に対してベルヌーイの式がそれぞれ次のように成立する。

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho(V + v')^2 \quad (3.3)$$

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho(V + v')^2 = p_\infty + \frac{1}{2}\rho(V + v)^2 \quad (3.4)$$

式(3.1)と式(3.2)より円板前後の圧力差は

$$p_2 - p_1 = \rho(V + v') \cdot v \quad (3.5)$$

又、式(3.3)と(3.4)によれば、

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho \left\{ (V + v)^2 - V^2 \right\} \quad (3.6)$$

となるので両式を連立させることにより円板通過時の流体の速度の増加量 v' は

$$v' = \frac{1}{2}v \quad (3.7)$$

となることがわかる。無次元速度

$$a = \frac{v'}{V} = \frac{v}{2V} \quad (3.8)$$

は運動量理論において重要な変数であり、軸流干涉係数と呼ばれる。

スクリュープロペラの推力係数は前進速度 V の二乗を用いて

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (3.9)$$

と定義されるが、式(3.8)までの関係を使えば、

$$C_T = 4a(1 + a) \quad (3.10)$$

となることがわかる。

次にスクリュープロペラが単位時間に流体になした仕事すなわち動力 P は、流体の運動エネルギーの増加によって表されるので、

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}\rho S (V + v') \left\{ (V + v)^2 - V^2 \right\} \\ &= \frac{1}{2}\rho S V^3 \cdot 4a(1 + a)^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

と計算される。これよりプロペラの推進効率^{注1}は、次のように求められる。

$$\eta = \frac{TV}{P} = \frac{1}{1+a} = \frac{2}{1+\sqrt{1+C_T}} \quad (3.12)$$

図3.2に軸流干渉係数 a に対する推進効率と推進係数の変化を示す。図より、 $a=0$ のとき効率100%だが推力は0である。実はプロペラは流体に対して何ら仕事をしていないが、抵抗（すなわち推力）も零であるので効率は100%となったのである。これ

より、高い推進効率を維持するためには、プロペラによる水流の加速分 v は前進速度 V に対してできるだけ小さくすることが重要であることがわかる。巡航中の良く泳ぐ魚はこの条件をうまく満足していると思われるが、船用プロペラの場合船体抵抗に打ち勝つための推力が必要とされるので、 a をむやみに小さくすることはできない。妥協的に $a=0.5$ すな

わち $v=V$ とすれば、 $C_T=3$ 、 $\eta=2/3$ が得られる。ジェットfoil等の最近の高速船は a を大きくとって高い推進力を得ようとするものだが、流体力学的効率からみると決して得策ではないことに気が付く。

上述の運動量理論によって得られる所要推力をスクリーブプロペラの所要軸トルクに結びつけるためには、翼理論が必要である。すなわちプロペラの翼を半径に沿う多数の翼素にわけ、各翼素毎に発生する循環より、回転軸を同一中心とする部分円管流毎に部分推力と部分トルクを計

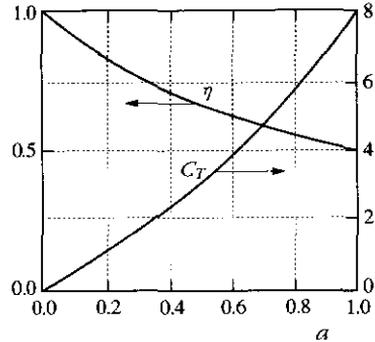


図3.2 スクリュープロペラの推進効率と推進係数（運動量理論）

注1 流体力学的な理論効率

算し、これを翼全体にわたって積分する方法をとる。これを翼素理論という。運動量理論が検査体積という大きな境界条件から流体の運動量変化をマクロに考察したのに対し、翼素理論はミクロに翼素まわりの流れを考察するといえる。しかし、翼素理論にとって運動量理論はその境界条件を決める不可欠の理論であるということはいうまでもない。

運動量・翼素組み合わせ理論はグラワート (H.Glauert) らによってほぼ完成された⁽²⁾。ベッツ (A.Betz) は、プロペラ後流の誘起回転速度を考慮に入れると式(3.12)に示した効率 η は、さらに次式により低下することを示した⁽³⁾。

$$\eta' = \eta \cdot \eta_t, \quad \eta_t = 1 - b = 1 - \frac{\lambda^2}{2C_T} \quad (3.13)$$

ただし λ は前進率で、プロペラの角速度 ω 、半径 R によって次のように定義される。

$$\lambda = \frac{V}{\omega R} \quad (3.14)$$

b は回転方向干渉係数と呼ばれる。これからもわかるように、式(3.12)に示した推進効率は与えられた推進係数と軸流干渉係数において最も大きな値を与える。実機の効率がこれを上回ることは決してないといえる。

3.3 細長物体理論 (Slender body theory)

魚や鳥の運動の場合も運動量理論は厳密に成立しているのだが、スクリュープロペラの場合と違って作動円板が想定しにくく、推力発生の機構をより動物の運動に即して記述する必要がある。

魚の運動の中でも推進効率が高いと思われるものに、頭から尾まで体全体に振動運動を起こす「ウナギ型 (anguilliform) 運動」と、体の後半

ないし1/3程度に運動を制限し，もっぱら発達した尾びれの振動運動による「アジ型 (carangiform) 運動」の二つがある．いずれもそれによって周囲流体に後ろ向きの運動量を与えその反力によって推進することは前節の議論と同じである．したがってその流体力学効率も，魚の発生している平均推力 \bar{T} (=流体による平均抗力 \bar{D})，魚の前進速度 V ，所要動力 (周囲流体になす仕事率) の平均値 \bar{P} を用いて式(3.12)と全く同形の次式で定義される．

$$\eta = \bar{T} \cdot V / \bar{P} \quad (3.15)$$

ライトヒル (Lighthill, M.J., 1924 -) は，ウナギ型推進運動に細長物体理論 (slender body theory)^{注1}を適用し以下の解析を行った^(4,5)．図3.3に体長 l の魚の頭部に原点を固定した座標系を示す．魚は xz 面を対称面として y 方向の左右振動運動を行い一定速度 V で進行している．体軸 x に沿う任意の断面 $S(x)$ の y 方向変位を $h(x,t)$ とおけば，その運動によってひき起こされる周囲流体の y 方向速度は，非定常成分と対流成分の和と

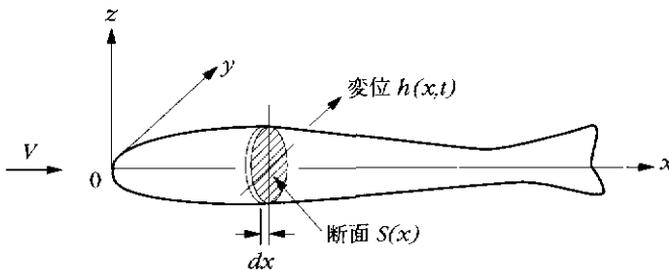


図3.3 細長物体理論による泳運動の解析

^{注1} 主流方向の長さや速度に比して，それに直角方向の長さや変動速度成分が微小となるような流れ場の理論．数理解析がかなり容易になる．

して

$$v(x, t) = \partial h / \partial t + V \partial h / \partial x \quad (3.16)$$

なる。ここで断面 S の単位長さ当たりの仮想質量^{注1}を $m_a(x)$ とすれば、断面の y 方向運動量と運動エネルギーはそれぞれ $m_a v dx$ および $(1/2)m_a v^2 dx$ となる。ゆえにこの断面の運動に必要な力は、 y 方向運動量の(実質)変化に等しい筈で

$$F = - \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) m_a v dx \quad (3.17)$$

と表される。 F に断面の変位速度 $\partial h / \partial t$ を乗じ $x = 0$ から l まで積分を行えば、魚が周囲流体に与える仕事率 $P(t)$ を、式(3.16)等も用いて、次のように計算できる。

$$\begin{aligned} P &= - \int_0^l F \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \int_0^l \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) m_a v dx \\ &= \int_0^l \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} m_a v \right\} dx - \int_0^l \frac{\partial v}{\partial t} m_a v dx \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_0^l \frac{\partial h}{\partial t} m_a v dx - \frac{1}{2} \int_0^l m_a v^2 dx \right\} + V \left[\frac{\partial h}{\partial t} m_a v \right]_0^l \quad (3.18) \end{aligned}$$

所要動力の平均値 \bar{P} は上式を時間積分することによって

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (3.19)$$

^{注1} 流体中の物体が非定常運動を行うときに周囲流体を伴って動くことになるので、その物体形状に見合った仮想質量を考えねばならない。付加質量ともいう。図3.3に示す楕円形断面 $S(x)$ の場合、長軸 (x 軸) を直径とする円柱の体積に流体の密度を乗じたものである。

のように求められる。これを実行すると式(3.18)の最後の式の第1項の平均値は明らかに零となることがわかる。さらに図3.3に示した魚の軸方向断面分布を考えると、明らかに

$$m_a(0) = 0 \quad , \quad m_a(l) \neq 0 \quad (3.20)$$

と考えられるので、最後の項も $x = l$ における値のみが残り、

$$\bar{P} = V \left\{ m_a v \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_{x=l} \quad (3.21)$$

となることがわかった。

上式の動力は、魚を前方へ進める(有効)動力 $\bar{T}V$ と、後流中に(無効に)放出される運動エネルギーにわかれるので

$$\bar{P} = \bar{T}V + \frac{1}{2} \left\{ m_a V v^2 \right\}_{x=l} \quad (3.22)$$

これより、魚の平均推力と推進効率はいずれも次式のように計算される。

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left[m_a \left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 - V^2 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 \right\} \right]_{x=l} \quad (3.23)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{v^2}{v(\partial h / \partial t)} \right\}_{x=l} \quad (3.24)$$

次に、魚体軸の運動として、

$$h = f(x)g(t - x/c) \quad (3.25)$$

のごとき進行波運動を考えよう。 $f(x)$ は進行波の体軸に沿う振幅分布であり、 c は波の伝播速度である。式(3.25)を式(3.23)と(3.24)に代入すれば、平均推力と効率はそれぞれ次式のように求められる。

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left[m_a \left\{ \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right) f^2 g'^2 - V^2 f'^2 g^2 \right\} \right]_{x=l} \quad (3.26)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left[\left\{ \left(1 - \frac{V}{c} \right)^2 f^2 g'^2 + V^2 f'^2 g^2 \right\} / \left\{ \left(1 - \frac{V}{c} \right) f^2 g'^2 \right\} \right]_{x=l} \quad (3.27)$$

上式中ダッシュは微分を意味する。上式より魚が効率よく推進するには $V/c < 1$ すなわち波速 c を前進速度 V より常に大きくとり、かつ尾端における体軸の振動振幅の勾配 $f'(l)$ が 0 となるのが望ましいことがわかる。 $f'(l) = 0$ とおけば両式は著しく簡単化されて、

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left\{ m_a f^2 g'^2 \right\}_{x=l} \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right) \quad (3.28)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V}{c} \right) \quad (3.29)$$

となる。

図 3.4 にこの場合の \bar{T}/\bar{T}_{max} と η を V/c の関数として示す。図より前進速度が 0 の場合に発生推力は最大となるが効率 (有効仕事率) は 0.5 にすぎない。また $V/c = 1$ のときに効率は 100% になるが推力 0 であることがわかる。この状態は前節の運動量理論においては図 3.2 で示した $a (= v'/V) = 0$ の状態に対応しており、有効仕事は零である。ポンプ、水車等の流体機械においては、この状態をランナウェイ (run away) 状態

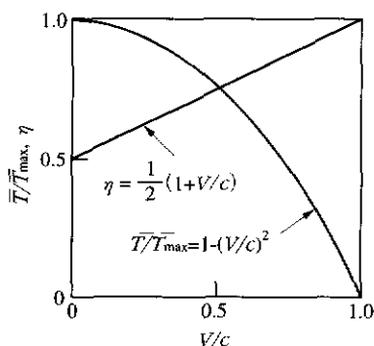


図 3.4 推力および効率と V/c の関係
[$f'(l) = 0$]

とよぶ.

妥協点として V/c を 0.8 に選べば, 効率は 90% となる. ただしこれまでの展開から明らかなように, 本理論も理想流体を仮定し, 種々の損失を無視していることから, 式 (3.29) はあくまでも上限値であることに注意しなければならない. ライトヒルはさらに, 体軸各点に加わるモーメントのバランスまで考えて, 効率の良いと思われる運動を考えた. その結果,

- (i) 体軸の運動を魚の後半部分に限定し, かつその部分の魚自身の質量は小さくとる.
- (ii) V/c を 1 に近くとり, 与えられた $\partial h/\partial t$ に対して v が大きくなるようにする. これによって後半部分の仮想質量の大きい領域でも運動量変化 (力 F) が過大にならないようにする.
- (iii) 最も大事なことは, 後半部の運動波形において, 正と負の位相が必ず一つずつ存在するようにして, 両者の角運動量反力 (angular recoil) が体軸に渡って互いにキャンセルされるようにする^{注1}.

等を明らかにした.

図 3.5 にライトヒルの論文より, 望ましいと思われる体軸の運動の例を示す. 図によれば体軸の運動は期待したように魚の後半部分に限定され, 質量および仮想質量 (つまり体高) の大きい前半部分はほとんど運動しないことがわかる.

以上の議論および計算結果は, 良く泳ぐ魚に共通した泳動運動の形を良く追認しているように思われる.

^{注1} これがうまくいかない泳ぎ方の例としては, ボウフラの泳ぎを考えてみるとよい.

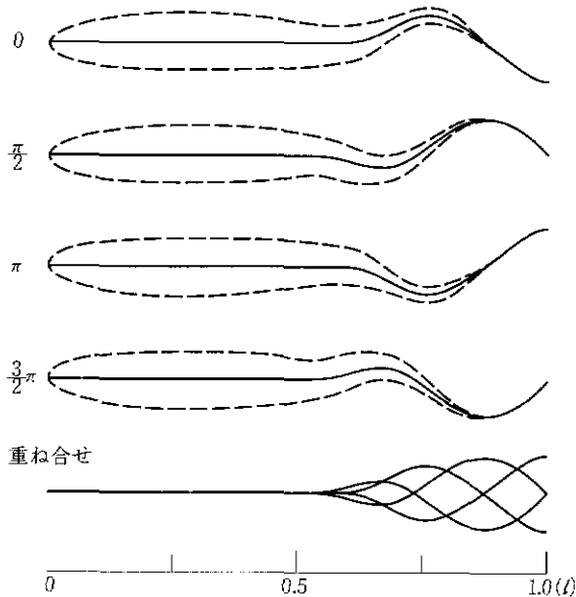


図3.5 効率の良い泳ぎ⁽⁴⁾

(体軸の動き, 位相 $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ およびそれらの重ね合わせ)

3.4 振動翼推進理論

細長物体理論によっても、魚の尾部または尾びれ ($x = l$) の運動が推進にとって極めて重要であることがわかった。この効果を徹底したものがアジ型推進運動であるといえる。ただしこの型に属する魚（アジ、サバ、マグロまたはイルカ・クジラ類、以下力学的には一括して取り扱う）の尾びれは z 方向に大きく張りだした（多くは三日月型の）高アスペクト比の翼であり、もはや細長物体仮定は成立しない。

図3.6にマカジキの尾びれについて全体形状と4点の断面形状の実測例を示す⁽⁶⁾。アスペクト比は8程度に達し、前縁・後縁共に流れに対して

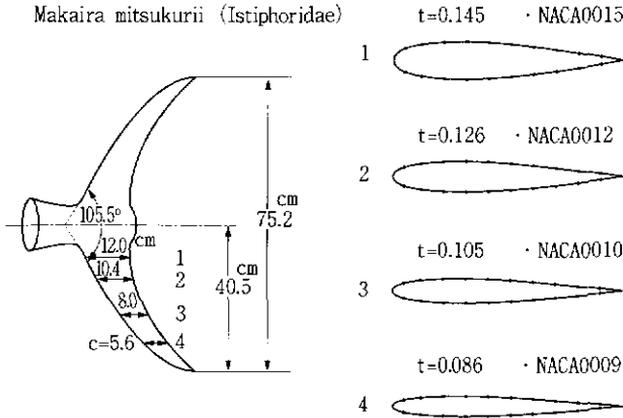


図3.6 マカジキの尾びれの形状およびその4ヶ所の断面⁽⁶⁾
 t は断面の厚み比, c は弦長, ・印はNACA翼型

後退角を有している。なお翼断面図には黒丸印でNACA4桁対称翼形を重ねているが、両者の一致は驚くほどである。このような尾びれの運動に対しては、以下に述べる振動翼理論を適用することがより現実的であると考えられるのである。

図3.7に二次元振動翼運動による推力発生原理を示す。翼は静止流体中を前進速度 U で右から左へ進行している。その際翼は進行方向に対して左右（イルカ類の場合は上下）にヒービング（heaving, 横振動）運動を行い、同時に約 $\pi/2$ の位相差でピッチング（pitching, 回転振動）運動を行う。図中に示すように、翼のヒービング速度を v とすれば速度三角形により、翼に対する相対水流の速度は w となる。この場合相対速度 w の向きは、図中破線で示す翼の軌跡の接線方向と一致する。そこでもし相対速度 w に対して翼の姿勢が、図に示すように、正の迎え角 α をもつならば、翼まわりに循環が形成され w の向きに直角に揚力 L が発生し、その進行方向成分 T が推進力となるのである。このようにして、

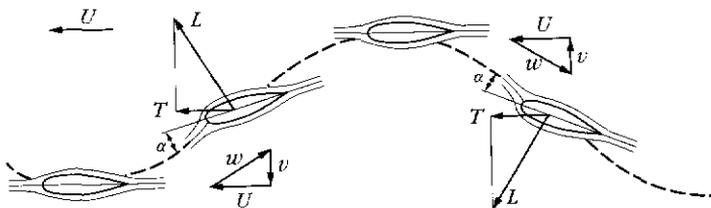


図3.7 振動翼推進の原理⁽⁵⁾ (破線は尾びれ断面の軌跡を示す)
 (v : 翼速度, w : 相対水流の速度, α : 迎え角,
 L : 揚力, T : 推力成分)

振動翼は一周期中に2度のピークをもつ推進力を発生する。

ただし、この場合、翼まわりの流れは周期的に変化し、特に循環の非定常変化に伴って後流がきわめて複雑になることは容易に推察される。すなわち、前章に述べた出発渦の形成のように、まず（クッタ・ジュコフスキーの条件によって）翼が正の循環（束縛渦）を獲得するときには後流に負の出発渦を排出し、その正の循環を減じるときにはそれを後流に放出する。次に翼が負の循環を獲得するときには後流に正の出発渦を排出し、それを減ずるときには後流へ負の循環を放出する。そしてこれを繰り返すのである^{注1}。

この非定常性は当然翼の特性にも大きく影響し、翼発生揚力が定常流れのそれと等しくなるという保証はない。理想流体（非失速）中の二次元翼でかつ変動速度 v が主流速度 V に比べて十分小さい ($v \ll V$) 場合には、テオドルセン関数等を用いる解析法⁽⁷⁾が存在するが、考えているような大振幅振動でかつはく離もありうる実在流体の流れに対しては今のところ一般的な解析方法は存在していない。

^{注1} 一周期毎に2組の渦対が形成される。このようにしてできる渦列は進行方向とは逆方向に誘起速度をもつ“逆カルマン”型になると考えられる。

むしろこのような流れ場こそ，前章で述べたコンピュータによる検討がふさわしいように思われる．事実次節で見ると，最近そのような研究成果が国内でも散見されるようになった．

工学の立場から振動翼推進機構の研究を続けてきた研究者として，国内では一色尚次（東京工業大学名誉教授）らのグループが良く知られている．一色らの解析方法は，ヒービングとピッチングを同時に行う二次元翼について，揚力および抗力については定常流れにおけるそれを用い，非定常力は仮想質量力のみを考慮に入れるというものである．

著者の一人（永井，以下の著者らは永井ら）も一色教授の教示を頂きつつ，基本的には同じ考え方でこの問題の解析を行ってきた．ただし，振動翼をより魚やイルカの尾びれの運動機構に近づけるため，振動板で連結された2点ヒンジ機構としてこれを定義したことが特徴である．

図3.8に著者らによる2点ヒンジ振動翼機構を示す⁽⁸⁾．第1ヒンジと第2ヒンジはアーム（振動板）で連結されており，振動板は第1ヒンジを中心に一定振幅で回転振動運動を行う．翼は第2ヒンジにおいてアームに

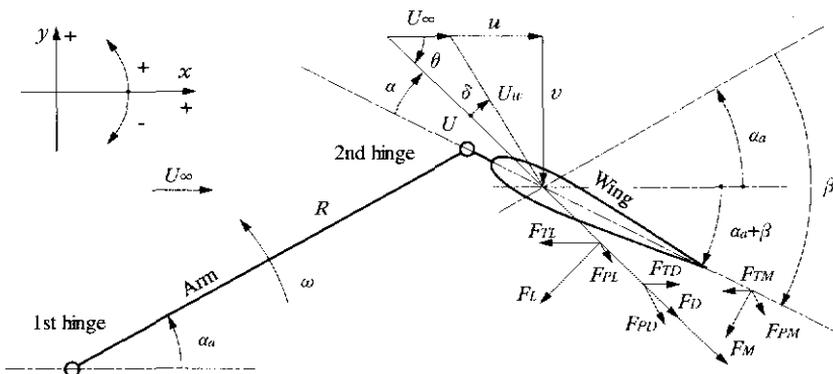


図3.8 2点ヒンジ振動翼推力発生モデル

回転自在に取り付けられており、アームの運動に追従しながら相対角度 β の回転振動運動を行う。なお第5章で詳述するように、著者らの機構はこの第2ヒンジ部にねじり巻きバネ等適当な弾性体を挿入する特徴を有している。バネは相対角度 β を常に 0° に戻すように作用するので、流体力とこのバネ反力の釣合によって翼に対する相対水流（図中 U_w で示される）に対し翼は常にある迎え角を維持することができる。

アームには第1ヒンジを中心にほぼ正弦波運動を行わせることができるので、アームの振れ角 α_a は

$$\alpha_a = A \sin(\omega_0 t) \quad (3.30)$$

と与える。ここで A は振幅、 ω_0 は角振動数で運動の周波数 f の 2π 倍である。

$$f = \omega_0 / 2\pi \quad (3.31)$$

次に翼のアームに対する振れ角 β は、前述のように流体力とバネ反力によって定まるが、流体力そのものが簡単には決定できないので、運動方程式をたててこの問題は解くことはきわめて難解ということになる^{注1}。そこで一色教授らと同様著者らも、先に適当な β を仮定して諸力を計算する方法をとっている。コンピュータによるダイレクトシミュレーションも、現在のところ入手した範囲ではすべて同じ方法によっている。図中進行速度 U_∞ を一定と仮定するのは、振動翼推進機の発生する平均推力と船体抵抗の総和がちょうど釣り合った状態を仮定したものであって物理的には問題ない。

$\alpha_a(t)$, $\beta(t)$, U_∞ , アーム長 R , $1/2$ 翼弦長 c および（定常状態にお

^{注1} 実際の魚達は、意識の有無に関わらずこれを簡単に解決しているのだが！

ける) 翼の特性 $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$ 等が与えられると, 翼に対する水流の相対速度, 加速度および諸力がすべて計算できる.

計算はかなり面倒だが, 例えば $1/4$ 翼弦長点に対する水の相対速度 $U_{1/4}$ および迎え角 $\alpha_{1/4}$ は次式のように計算される^{注1}.

$$U_{1/4}^* = \frac{U_{1/4}}{U_\infty} = \sqrt{(1 + u_{w1/4}^*)^2 + v_{w1/4}^{*2}} \quad (3.32)$$

ただし

$$\begin{aligned} u_{w1/4}^* &= -u_{1/4}^* = -\frac{u_{1/4}}{U_\infty} \\ &= A \frac{R\omega_0}{U_\infty} \sin \alpha_a \cos(\omega_0 t) \\ &\quad + A \left(\frac{h}{R} + \frac{1}{2} \frac{c}{R} \right) \frac{R\omega_0}{U_\infty} \sin(\alpha_a + \beta) \cos(\omega_0 t) \quad (3.33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{w1/4}^* &= -v_{1/4}^* = -\frac{v_{1/4}}{U_\infty} \\ &= -A \frac{R\omega_0}{U_\infty} \cos \alpha_a \cos(\omega_0 t) \\ &\quad - A \left(\frac{h}{R} + \frac{1}{2} \frac{c}{R} \right) \frac{R\omega_0}{U_\infty} \cos(\alpha_a + \beta) \cos(\omega_0 t) \\ &\quad - \left(\frac{h}{R} + \frac{1}{2} \frac{c}{R} \right) \frac{R\omega_0}{U_\infty} \frac{d\beta}{dt^*} \cos(\alpha_a + \beta) \quad (3.34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1/4} &= \theta_{1/4} - (\alpha_a + \beta) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{v_{w1/4}^*}{1 + u_{w1/4}^*} \right) - (\alpha_a + \beta) \quad (3.35) \end{aligned}$$

^{注1} この計算には大学院生でも正負の符号をうっかり間違えたりするので細心の注意を要する.

これにより、無次元揚力および抗力はそれぞれ

$$F_L^* = \frac{F_L}{\rho bc U_\infty^2} = C_L(\alpha) \left(\frac{U_{1/4}}{U_\infty} \right)^2 = C_L U_{1/4}^{*2} \quad (3.36)$$

$$F_D^* = \frac{F_D}{\rho bc U_\infty^2} = -C_D(\alpha) \left(\frac{U_{1/4}}{U_\infty} \right)^2 = -C_D U_{1/4}^{*2} \quad (3.37)$$

と計算される。

翼面に直角に働く仮想質量力 F_M は $1/2$ 翼弦点における相対水流の無次元加速度 $a_{1/2}^*$ より次のように求まる。

$$F_M^* = \frac{F_M}{\rho bc U_\infty^2} = \pi \frac{c}{R} \frac{R \omega_0}{U_\infty} a_{1/2}^* \quad (3.38)$$

ただし

$$a_{1/2}^* = \frac{d \left(U_{1/2}^* \sin \alpha_{1/2} \right)}{dt^*} \quad (3.39)$$

推力係数 C_T はこれら3無次元力の進行方向成分の和となるので、

$$C_T = C_{TL} + C_{TD} + C_{TM} \quad (3.40)$$

$$C_{TL} = F_L^* \sin \theta_{1/4}, C_{TD} = F_D^* \cos \theta_{1/4}, C_{TM} = F_M^* \sin(\alpha_a + \beta)$$

さて翼に所要の運動を与えるために必要な動力はどうなるだろうか。これは、第1ヒンジに固定した座標系から見た翼の運動を考え、上記3無次元力より定まる成分および翼の回転角加速度に由来する仮想慣性モーメント係数 C_M の和として求まる。結論だけ示すと動力係数 C_P は

$$\begin{aligned} C_P &= C_{PL} + C_{PD} + C_{PM} + C_M \\ &= F_L^* U_{w1/4}^* \sin \delta_{1/4} - F_D^* U_{w1/4}^* \cos \delta_{1/4} \\ &\quad + F_M^* U_{w1/2}^* \sin(\delta_{1/2} + \alpha_{1/2}) \end{aligned}$$

$$+ \frac{\pi}{8} \left(\frac{c}{R} \right)^3 \left(\frac{R\omega_0}{U_\infty} \right)^3 \frac{d^2}{dt^{*2}} (\alpha_a + \beta) \frac{d}{dt^*} (\alpha_a + \beta) \quad (3.41)$$

となる。翼の推進効率 η はこれまでと同様

$$\eta = \frac{\overline{C_T} \cdot U_\infty^*}{\overline{C_P}} \quad (3.42)$$

となることは言うまでもない^{注1}。

なお、上述の理論式(3.32) ~ (3.42) はいずれも無次元の形で表示されているが、式中しばしば $R\omega_0/U_\infty$ が登場することがわかる。これは第2章で述べたストローハル数 St と同様の無次元振動数であるが、その逆数は魚の遊泳能力を示す泳動数

$$Sw = U_\infty / f \cdot l \quad (3.43)$$

に相当する量と考えられる。そこで著者らは、体長 l に代わってアーム長 R を代表長さとする泳動数

$$Sw_R = \frac{U_\infty}{f \cdot R} = 2\pi \left(\frac{U_\infty}{R\omega_0} \right) \quad (3.44)$$

を新たに定義して計算結果を整理することにした。

さて著者らの計算では、 β の運動として N 次のフーリエ級数

$$\beta(\omega_0 t) = \sum_{i=1}^N \{ \beta_{ci} \cos(i\omega_0 t) + \beta_{si} \sin(i\omega_0 t) \} \quad (3.45)$$

を考え、多数通りの運動様式の中から推進効率が最大となるものを選び出す方法をとった。原理的には、考えられるすべての運動様式の中から最適運動を選び出す訳だが、ある段階 (j 次) の β に対し、

^{注1} ただし、この計算では U_∞^* は常に1となる。

$$\beta_{new}(\omega_0 t) = \beta_{old}(\omega_0 t) + \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_{ci} \cos(i\omega_0 t) + \sum_{i=1}^N \beta_{si} \sin(i\omega_0 t) \right\} \quad (3.46)$$

とする修正値 β_{ci} , β_{si} の最適値を

$$-\frac{\pi/2}{1.5^{j-1}} \leq \beta \leq \frac{\pi/2}{1.5^{j-1}} \quad (3.47)$$

の中から選び出し, β_{new} を決定する方法をとった^{注1}.

計算条件を表3.1に示す. 各値は実機のそれを基本としている. 計算に使用した平板翼の特性曲線を図3.9に, NACA0015対称翼型とその特性曲

表3.1 2点ヒンジ振動翼機構の計算条件

A	14.5 deg	アーム最大振幅
R	1m	アーム長さ (ヒンジ間距離)
b	1.3m	翼幅
c	13.75cm	1/2 翼弦長
h	5.5cm	第2ヒンジから翼前縁までの距離

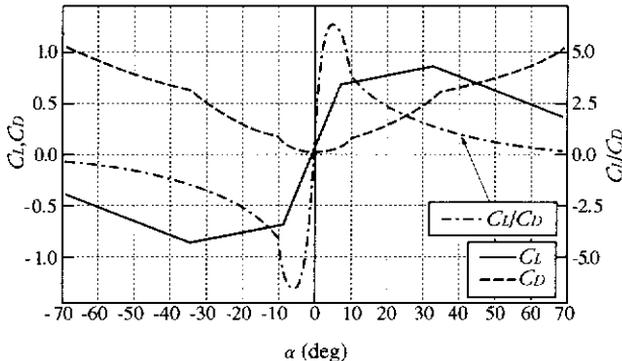


図3.9 平板翼の特性曲線 (実測値)

注1 コンピュータ (ワークステーションクラス) を使って初めて可能な方法であり, 一部の研究者の間ではコード名 “エレファント・ワールド” と呼ばれている.

線を図3.10にそれぞれ示す。両特性曲線を比較すると、NACA対称翼型の特性がかなり優れており、特に最大揚抗比において46と平板翼(6.5)の7倍にもなることがわかる。

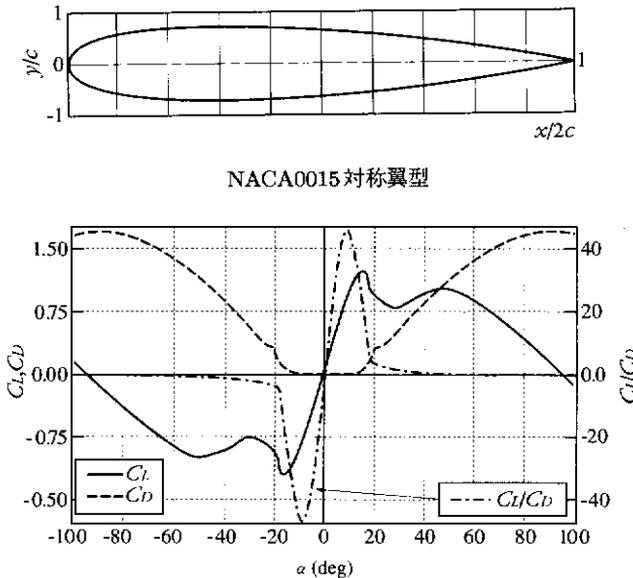


図3.10 NACA0015翼の特性曲線

図3.11に推進効率の計算結果を示す。平板翼と対称翼の両者について示す。さらに考察のために、仮想質量項を無視し、翼の揚抗力成分のみを考えた場合の計算結果も示してある。図より平板翼対称翼共に無次元速度 Sw_R が1.0以下で効率最大となり、速度を上げるにしたがってほぼ直線的に減少することがわかる。効率は対称翼の方がはるかに高く、 $Sw_R = 10$ までの範囲で80%以上の高い効率を維持している。また Sw_R が比較的小さい領域では、仮想慣性力による効率への寄与が大きく、 Sw_R の大きい領域ではその寄与はほとんどなくなることもわかった。

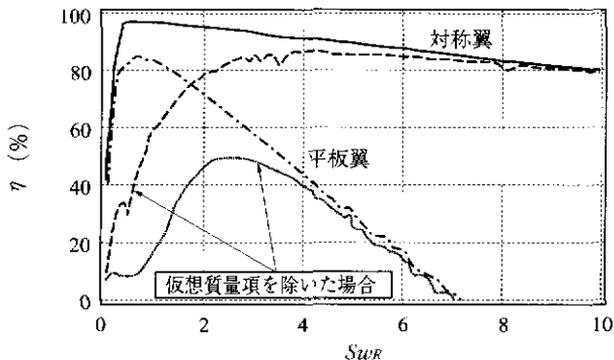
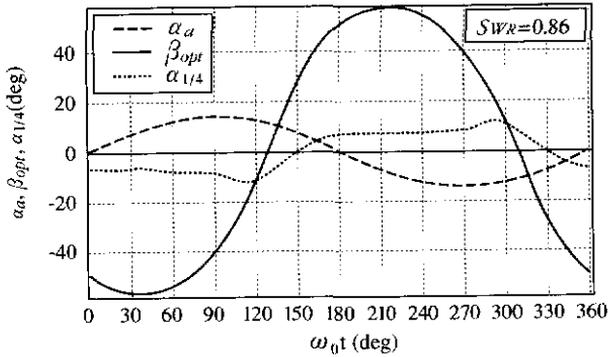


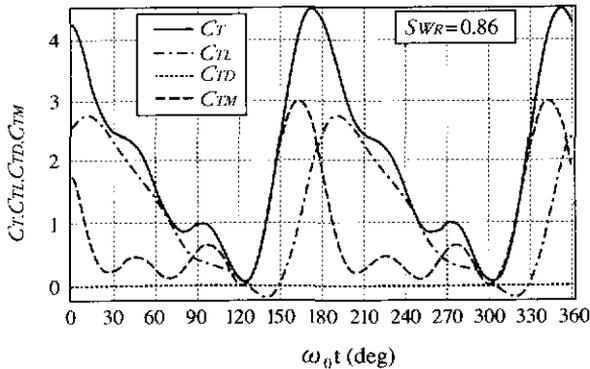
図3.11 推進効率

図3.12に対称翼で $Sw_R = 0.86$ の場合の、一周期中の各成分の変化を示す。図(a)にアームの振れ角 α_a ，翼の最適運動 β_{opt} ，翼と水流の相対迎え角 $\alpha_{1/4}$ ，図(b)に全推力係数 C_T と、その揚力、抗力および仮想質量力による各成分をそれぞれ示す。図より、 β_{opt} は通常正弦波運動に比べて最大振幅領域がやや平坦な台形型波形に近く、アーム運動に対する位相遅れは 90° より大きい 130° 程度であり、結果的に相対迎え角を 10° 以下の最大揚抗比角度の付近に維持している。推力係数 C_T は、予想通り一周中に2度大きな推力を発生する。この運動では、抗力による負の推力は小さく、仮想質量力と揚力による成分がほぼ同程度の推力を発生している。ただし、仮想質量力推力はアーム角 0° および 180° の直前にピークを有し、揚力推力はその直後にピークを有する等、興味深い挙動を知ることが出来る。

図3.13に同じく対称翼で $Sw_R = 4.0$ の場合の計算結果を示す。図(a)，(b)とも図3.12のそれと同じだが、縦軸のスケールがかなり異なることに注意が必要である。図より、このように高い速度領域においては、翼の最適運動振幅はアームの振動振幅と同程度にまで小さくなる。翼運動の位



(a) 各角度の1周期中の変化

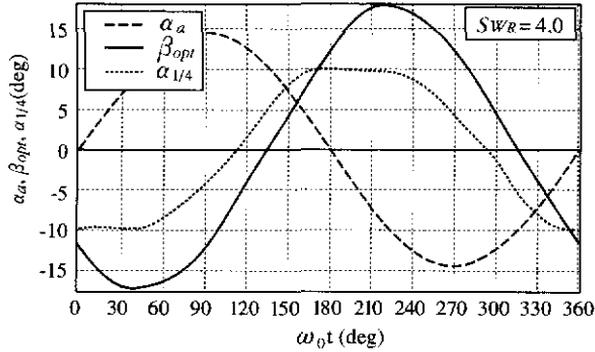


(b) 推力係数とその成分の1周期中の変化

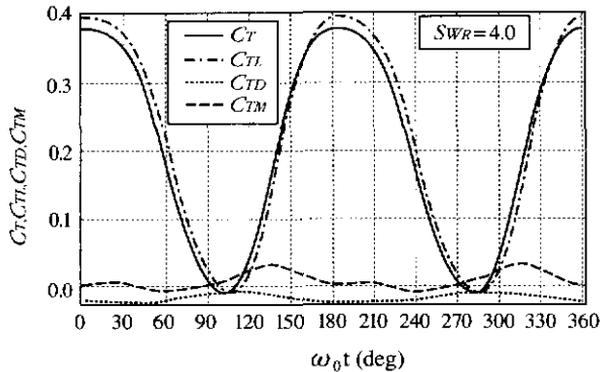
図3.12 効率の良い翼運動とその発生推力 (対称翼, $Sw_R = 0.86$)

相遅れは前図と大差はなく約 135° で $\alpha_{1/4}$ を 10° 以下に維持する。推力においては、仮想質量力と抗力成分は共に小さくかつ相殺する程度になり、推力の大部分は揚力によって占められ、そのピーク値は 0° と 180° の直後付近にあることがわかった。

図3.14に、得られた最適運動の周期平均推力係数 C_{TA} を泳動数 Sw_R



(a) 各角度の1周期中の変化



(b) 推力係数とその成分の1周期中の変化: $SWR = 4.0$

図3.13. 効率の良い翼運動とその発生推力 (対称翼, $SWR = 4.0$)

の関数として示す。平板翼と対称翼の場合を示してあるが、この図によっても対称翼の方が $SWR = 1.0$ 以上の領域においてはるかに大きな推力を発生することがわかる。両者とも最大値をもつ上に凸の曲線だが、平板翼では $SWR = 7.0$ 、対称翼では 48.0 付近で平均推力が0となるのは、その速度がランナウェイスピードになったためと考えられる。なお、図中

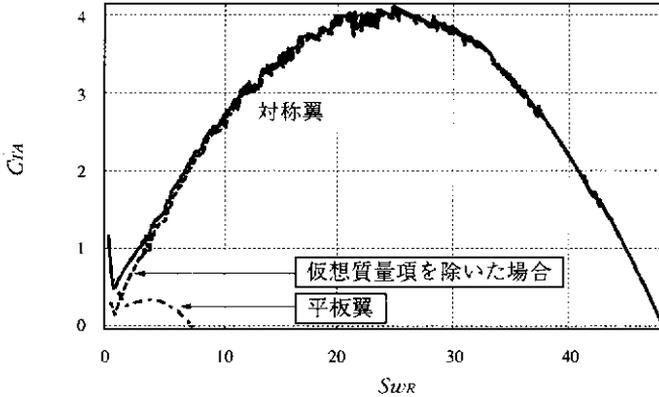


図3.14 周期平均推力係数

対称翼において、計算結果が必ずしも滑らかな曲線にならないのは、コンピュータ計算ソフトが、各 Sw_R において必ずしも最も望ましい翼運動 $\beta_{opt}(\omega t)$ に達し得なかったためと考えられる。

筆者らはこれらの計算結果から、 Sw_R の大きい領域では、翼の揚抗力特性が推力係数と推進効率をほとんど支配することに注目し、改めて、解析的にその寄与を推定することを試みた。その結果、 Sw_R の大きい領域では周期平均推力係数は

$$C_{TA} \doteq -\frac{C_D}{4\pi^2 A^2} Sw_R (Sw_R - 4A \frac{C_L}{C_D}) \quad (3.48)$$

でその最大値は

$$C_{TAmax} \doteq \frac{1}{\pi^2} \frac{C_L^2}{C_D} \quad (3.49)$$

となる。また効率は

$$\eta \doteq 1 - \frac{Sw_R}{(Sw_R)_{r.a.}} \quad (3.50)$$

となることを見出した⁽⁹⁾。ただし、

$$(Sw_R)_{r.a} = 4A \frac{C_L}{C_D} \quad (3.51)$$

は、ランナウエイスピードに相当する泳動数である。 C_{TAmax} と $(Sw_R)_{r.a}$ を支配する要素は結局翼の揚抗力特性 C_L および C_D であることが判明した。

図3.15に以上の推定結果を図示する。図によれば、振動翼推進機構の平均推力係数はランナウエイスピードの1/2速度において最大となるが、この点の効率は約50%にすぎない。効率を重視するならば、 $1/5 (Sw_R)_{r.a}$ 程度の速度で $\eta \cong 80\%$ とすることが妥当のように思われる。先述の図3.11にこれを適用すると $Sw_R = 10$ 程度となる。さらにこれを体長 l の魚の運動に適用するために魚の尾柄に当たるアーム長 R を

$$R \cong (1/3)l \quad (3.52)$$

と見積もれば、魚は泳動数

$$Sw_l = \frac{U_\infty}{f \cdot l} \cong 3 \quad (3.53)$$

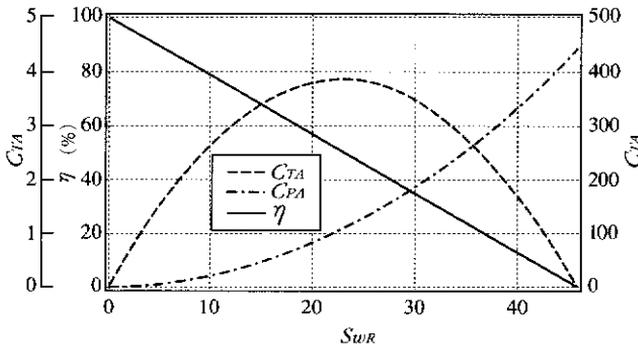


図3.15 平均推力係数と推進効率の推定 (Sw_R の大きい場合)

程度で泳いでもその流体力学的推進効率を80%程度に維持できることを示唆している。

図3.15は前節で述べた細長物体理論による図3.4に対応している。両理論を比較すれば、細長物体理論は仮想質量力のみを考察したのに対し、振動翼理論では翼の揚抗力特性を考慮に入れ、 Sw_R の大きい領域でその寄与度が決定的に大きくなることを示したといえる。両図を比較すると、ランナウェイスピードにおいて推力係数が0となるのは同じであるが、細長物体理論効率1.0に対し、振動翼理論効率は0となる。一方速度0においては、細長物体理論効率は0.5であるが、振動翼のそれは（揚力のみを考えると）100%になる等、かなり興味深い検討課題が呈示されている。

3.5 振動翼の特性計算

3.5.1 特異点分布法に基づく弾性翼の計算例

魚のように体をくねらせたり、尾びれを振ったりして前進する場合の推進力、推進効率を理論的に取り扱う考え方は前節までに述べた。本節では具体的な話として振動翼を船の推進装置として使用することを目標に、その基礎資料を得るために造船関係でもそのような研究がなされているのでそれを紹介する。技術的具体策としては体をくねらせる推進法は実現が難しいため、考えるとすればまず振動翼ということになるのが当然であるので、研究はほとんど振動翼についてであるが、その中味は剛体翼の場合と、翼の、例えば後半部が弾性を有して曲がるような弾性翼の場合が考えられる。また、計算手法としては非粘性流体として取り扱う場合と粘性流体として計算している場合とに分かれる。まず本節では非粘性流体として剛体翼と弾性翼両方の特性を比較検討した例に

ついて述べ、次節で粘性流体における剛体翼特性計算例を述べる。

東大加藤洋治教授の下では船舶の推進関係の研究をはじめ、広い分野の研究が行われているが、振動翼推進の理論的研究でも興味ある研究がなされている。ここではその二つを紹介する。

論文は2編で、第1報は工藤他(1984)⁽¹⁰⁾による弾性翼推進の線形理論、第2報は久保田他(1984)⁽¹¹⁾による同題の非線形理論で、ここでは線形理論との比較、実船への適用の可能性についても述べている。本節では、線形理論の内容を中心に述べることにする。なお、線形理論の結論は定量的には非線形理論に劣るものの、定性的には同様の結果を与えているようである。

考えている翼型は一つは剛体翼で、もう一つは剛体翼の後半部がゴムのような弾性体でできており、圧力に応じて曲がり得るようになっている弾性翼の2種である。線形理論では、翼が前進しながら上下に振動、すなわちヒービングを行い、かつ同時に弦の midpoint 回りに回転、すなわちピッチングを行っている状態を設定し、そのいずれの量もそれ程大きくないとして翼の推力、効率を計算している。流体は非粘性非圧縮としているが、後流に翼の周期運動に伴い渦が次々と放出されている状況を取り入れ、これを直線状の渦分布で代表している。翼自身も勿論束縛渦分布で表す。このようなモデルは Schwarz モデルとも言われている。

2種の翼を模式的に描いたのが図3.16、渦分布を示したのが図3.17である。翼は左右対称と

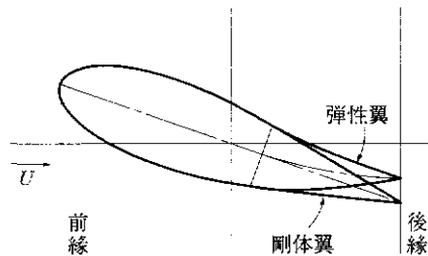
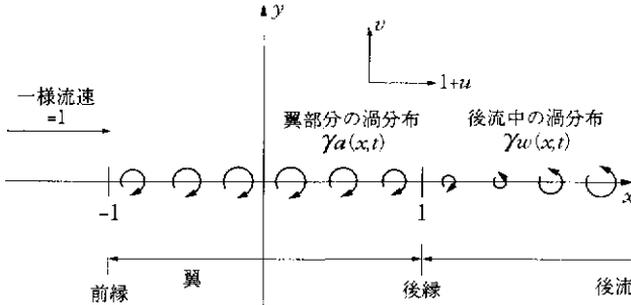


図3.16 2種の振動翼断面図(模式図)
(工藤ら⁽¹⁰⁾久保田ら⁽¹¹⁾(1984))

図3.17 Schwarzの渦分布モデル（工藤ら（1984））⁽¹⁰⁾

し、まず剛体翼が調和振動を行う場合の推力と効率を計算し、次に弾性翼について同じ量を求めて両者の比較を行っている。剛体翼としては線形理論の立場から平板翼を仮定し、翼後縁でクッタの条件が成り立つとし、非定常のベルヌーイの式を用いて翼の上下面の圧力分布を計算し、その差として得られる板に垂直方向の圧力差による力の推力方向成分と前縁推力の和として推力を求めている。非線形理論では翼の厚みを考慮し、振幅も大きい場合を考えていることは勿論である。また、効率を計算するために必要な仕事は、翼に働く力とモーメントを求め、それに速度と角速度を乗じて加えたものとして求められるので、これを実行して効率を計算している。

一方弾性翼については翼後半部が弾性変形を行うとし、その形状を未知量として、これを決定するために材料力学の2次元片持ばりの非定常振動の問題とみなし、その外力である分布荷重が同じく未知量である圧力差分布及び慣性力分布から成ると考えてその連成方程式を解いて解を求めている。その結果、弾性部分の変形と圧力差分布が求まるので、結局推力並びにトルクが計算できることになる。このような計算を、弾性部の長さ、弾性率等の材料、構造条件と、一様流速、ヒービング振幅、同

周波数，ピッチング振幅，同周波数で与えられる運動条件の種々の組み合わせに対して数値計算を行い，多くの興味ある結論を出している．詳しくは原論文を参照していただくとして，ここでは二，三の重要な結論のみ引用しておきたい．すなわち

- (1) ピッチングがヒービングに比べてほぼ90度位相遅れがあるとき効率は大きい．
- (2) その状態で剛体翼と弾性翼とを比べると後者では推力は下がるが効率は高い．
- (3) 同じ推力で比べると剛体翼より弾性翼の方が効率が低い．
- (4) 線形理論は，推力，馬力，効率を過大評価するが定性的傾向の結論は正しい．
- (5) 非線形理論に粘性及び3次元修正を適当に施すと実験値に良く合う．
- (6) 振動翼推進は実船に対しても十分実現可能である．弾性翼なら効率63%，最適化を行えば65%以上も望める．

等の興味ある結論を得ている．なお，実船への適用については第5章で再び引用する．参考のため一つの弾性率 ($\frac{E}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 120$ ，ただし E はヤング率， ρ は水の密度) の場合の弾性翼の効率と剛体翼の効率の計算値の比較を図3.18に示す．

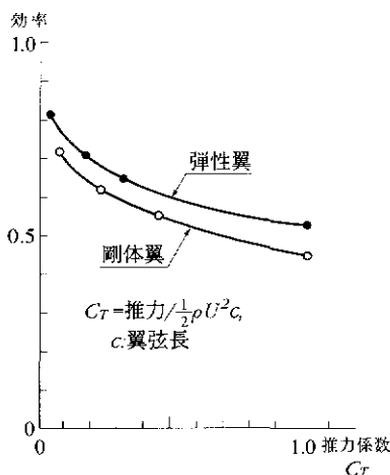


図3.18 剛体翼と弾性翼の効率比較 (久保田ら(1984))⁽¹¹⁾

ヒービング振幅/翼弦長	0.6
ピッチング振幅	15°
ピッチング位相おくれ	90°
ピッチング中心	1/4弦長点
弾性部長	後半 1/2

以上のように上述の結論は、魚の尾びれのように弾性がある屈曲可能な振動翼の方が推進器として適当であるということを示したもので、論文内容と自然の摂理とともどもに大変興味あるものといえよう。

3.5.2 粘性流体における剛体翼の計算例

CFD による計算についてはすでに1.6節で言及したが、この方法は粘性を無視せず、実際の粘性流体を対象にその運動を支配する支配方程式であるNS方程式を直接数値的に解くもので、境界条件としての物体の非定常運動もそっくりそのまま取り入れて計算する。このような計算は人の手で計算を行っていた昔、といっても20年前位までのことであるが、その頃は到底実行不可能であったが、コンピュータの驚異的進歩ではじめて近年には可能になってきている。ただ、乱流では流体粒子の時間的、空間的混合から出てくる速度、運動量、熱量等の時間的変動を正しく計算することが今でも困難であるため何等かの近似を行って計算をしているが、まだ検討すべき点が多い。しかし層流であればNS方程式を連続の式と連立させて解けばよいので実行可能である。

CFDの手法で剛体翼を計算した例は近年いくつか見られる。その一例として、広島大学茂里一紘教授の下で行われている研究を以下に紹介する。いずれも目的は振動翼推進を目指したものになっている。

Videv, Doi (土井) (1992)⁽¹²⁾ は、2次元剛体振動翼がピッチングしながら前進する場合の翼周りの流場を2次元NS方程式を解いて調査し、可視化実験とも比較し、ピッチングを含めた振動モードが効率に及ぼす影響について論じている。また、Videv, Doi, Mori (茂里) (1993)⁽¹³⁾ は、2次元剛体翼がピッチング、ヒービング、サージング(前後動)を行いながら前進する場合について前論文と同様の計算を行い、振動モードが効率

に及ぼす影響を種々論じている。結論の一つとしてヒービングのみでは効率が低いこと、ヒービングとピッチングを適当に組み合わせることにより効率が改善できること等が示されている。二つの論文は一連のもので、翼型はNACA0012, Re は $(3 \sim 5) \times 10^3$ の層流としており、計算結果を実験と比較し、良く一致することを確認しているので大変参考になる労作の論文である。結果の一例を示したのが図3.19であるが、これはヒービングとピッチングを行いつつ前進する場合の翼周りの流場を示したもので、与えた運動モードの場合には図示のように非定常はく離が発生していることが示されている。論文でははく離現象は運動モードの僅かの変化により微妙に影響されるという結論を得ており、剛体振動翼の場合、はく離の発生に基づく効率の低下という点に十分注意する必要があるという重要な示唆を与えている。

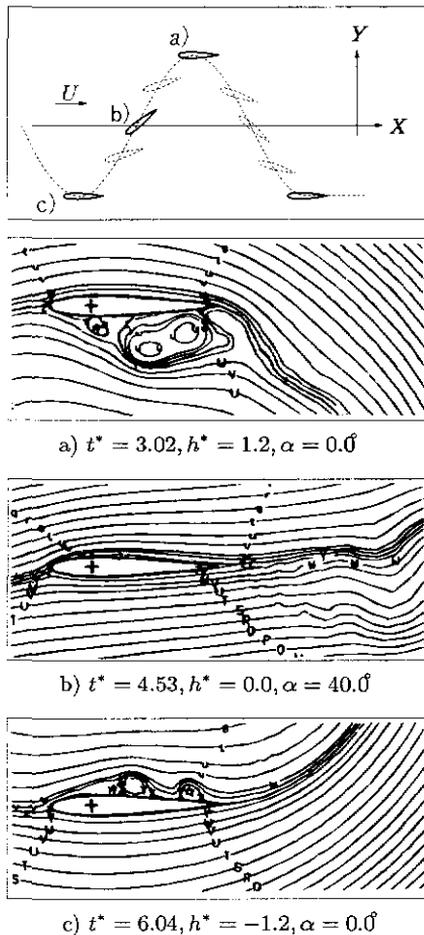


図3.19 翼固定座標系から見た流線
(Videv, Doi, Mori (1993))⁽¹³⁾

$$t^* = tU/c, \quad h^* = \text{ヒービング } h/c$$

$$\alpha: \text{翼の迎角 } (U \text{ と}), \quad fc/2U = 0.52$$

3.6 魚体まわりの流場と流体力の計算

1.4節で述べたように、魚のように自己推進運動を行う物体では、体の各部分は抵抗にもなっているが、推進力成分も同時に出している。抵抗はその部分に働く摩擦力と圧力から、また推力は恐らく圧力から出てくるものと思われるが、瞬時々々変形しながら進行する魚体の各部分についてこの両力成分を求めることは従来なされたことはない。すなわち今迄の取扱いは非粘性流体としての理論的検討であり、また実験的研究も魚体表面上及びごく近傍の流場について調べられたことがない。まして魚体の各部分に働く力の成分を計測した例は見られない。しかし、魚体のような自己推進体に働く力を求めるには結局は各部分々に働く摩擦力と圧力を求める以外に方法はなく、大変困難ではあるが、今後はこの方向に研究が進むものと考えられる。

これには二つの研究方法が考えられる。一つは実験的に求めるもので、各要素部分に作用する圧力と摩擦力を何とかして計測することが必要である。これには近年急速に進歩しているセンサーなどを利用した実験技術を活用すれば不可能ではなかろうと考えられる。しかし実際行うとすれば十分な準備が必要で、このような試みはまだなされていない。

もう一つの研究手段は、いわゆるCFDに基づく方法である。この方法の有力なことは周知であるが、今まで魚体のように変形しつつ前進する物体について計算された例は非常に少ない。ここでは最近日本において実施された3例の計算を紹介する。

東大宮田秀明教授は以前から船体周りの波動及び粘性流場等の解明を目的として、流場の支配方程式の解を直接CFDにより求める研究を進めている。その関連で、1993年 Akimoto (秋元) と Miyata (宮田) は魚

体のように時間とともに刻々変形移動していく境界をもつ流場について CFD 計算を行い発表している⁽¹⁴⁾ので、その内容を紹介する。ここでは2次元の魚体を考え、その動きを適当に仮定して与え、その周りの粘性流場を計算するとともに、魚体に働く摩擦力と圧力の総和として魚体に作用する力を求め、興味ある結果を導いている。

具体的に与えた魚の泳ぐ形状は次のようになっている。まず、魚が体を振らないときの形状はNACA0012の翼型で与えられるとし、中心軸が時間とともに次式のように動くとする。

$$\begin{aligned}
 h(x, t) &= f(x)g(x, t) & (3.54) \\
 f(x) &= 0.1[-(x-1)^2 + 1] \\
 g(x, t) &= \cos \frac{2\pi}{\lambda}(x-ct)
 \end{aligned}$$

ただし長さは体長 L で、速度は前進速度 U で、時間は L/U で無次元化し、 x が中心軸の座標で頭部は0、尾端が1、 t は時間、 λ は体の進行波運動の波長、 c はその波速である。 $c = 1.5$ 、 $\lambda = 2/3$ としたときの体軸の形状を図示したものが図3.20で、頭部は常に中心軸上にあつて振れないが、体の他の部分は横方向にくねくねと曲がっていることがわかる。分類でいえばアジ型推進モードにウナギ型の特徴がかなり入った形で、進行波運動の影響が強調されたものになっている。

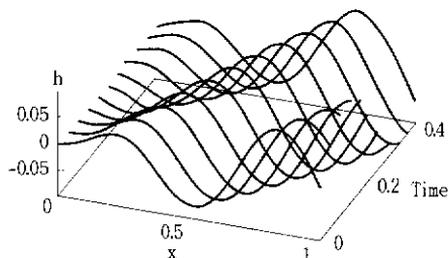


図3.20 魚体の運動形状
(Akimoto, Miyata (1993))⁽¹⁴⁾
($c = 1.5, \lambda = 2/3$ の場合)

さて、本論文ではこの移動境界をもつ流場を調べるため、

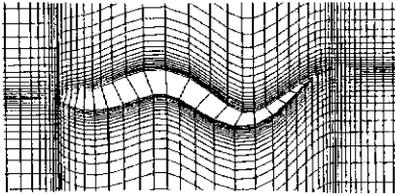


図3.21 ある瞬間の計算格子
(Akimoto, Miyata (1993))⁽¹⁴⁾
 $t = 9.0, c = 1.5,$
 $\lambda = 2/3$ の場合

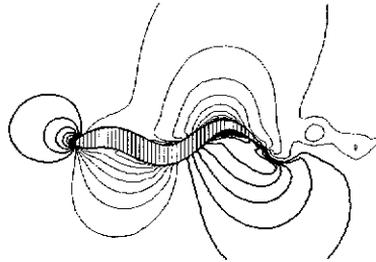


図3.22 魚体まわりの圧力分布 C_p
(Akimoto, Miyata (1993))⁽¹⁴⁾
 $t = 9.3, c = 1.5, \lambda = 2/3$ の場合
太線は正圧, 細線は負圧, 間隔0.1

NS方程式を連続の式と連立させ、有限体積法，移動格子法で解いている。計算 Re は 5×10^3 で層流とし， $\lambda = 1, 2/3$ の2状態に対し $c = 1.2 \sim 1.7$ として計算し，その結果を魚体周りの流速，圧力分布として示している。一例としてある瞬間 ($t = 9.0$) の計算格子の図を図3.21に， $t = 9.3$ における圧力係数 C_p の図を図3.22に示す。図より知られる通り，圧力の高い所が頭部岐点付近のみならず体の後半部にも出ており，この部分では圧力が推力として作用する様子が示されている。次にもう一つ別の興味深い図3.23を示す。これは x 方向の力の一周期平均 \overline{Fx} を示したもので， \overline{Fx} が+なら抵抗に，-なら推力となっていることを表す。0は推力と抵抗が釣り合っていることを表し，この場合にのみ想定した速度で定常前進をすることになる。つまり，1.2節

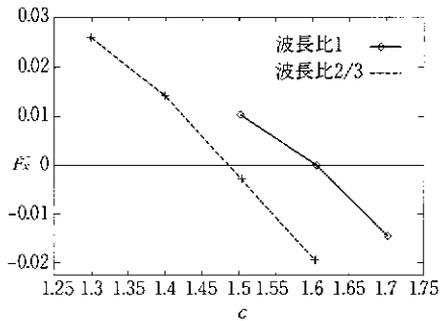


図3.23 魚体にかかる力と進行波長，波速の関係 (Akimoto, Miyata (1993))⁽¹⁴⁾

で述べたように魚が泳ぐには前進速度より速い速度の波動を頭部から尾部に向けて送ることが必要であることを量的に示したもので、 $\lambda = 1$ なら c は 1.60, $\lambda = 2/3$ なら $c = 1.47$ になることを意味する。また c の増加が推力の増大につながることもわかる。前掲図 3.20 はこの定常遊泳状態の運動モードを示したことになっている。

もう一つの例は、神戸商船大学戸田助教授のグループの計算⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾で、やはり 2次元魚体を仮定し、基本的には上記論文と同様の計算を行っている。ただ運動モードはニジマスの実際の運動に合わせたものになっており、また圧力分布の他に渦度分布、流脈線等のデータが示されているところに興味がある。

平石は体長 13.6cm から 26.0cm にわたる 4 種の大きさのニジマスの泳ぎを回流水槽で調べた⁽¹⁷⁾。計測結果の一例を図 3.24 に示す。ただし、図で体長は尾柄までとしているので全長の横軸は 1.0 より大きくなっている。この運動を行う 2次元魚体の周りの流場と力を求めるため、戸田らは $Re 1 \times 10^4$ の層流として NS 方程式を離散化し、解を求めた。座標系は

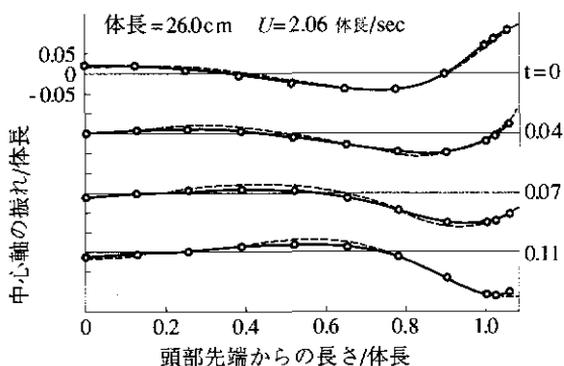


図 3.24 ニジマスの運動形状 (平石 (1981))⁽¹⁷⁾
点線は平石による数式近似

前記研究と同じく移動座標系とし、数値計算は空間的にはFA法 (Finite Analytic法)⁽¹⁸⁾、時間的には1次後退差分、圧力と速度のカップリングはSIMPLER法を採用している。魚体の形状は、運動をしていないときはNACA0010の翼型で与えられるとし、運動形状には3種モードを与えて比較計算を行っている。ここではその内、ニジマスの運動に一番忠実なモードによる計算の結果の一部を紹介する。なお、 Re が 1×10^4 というのは体長10cmのニジマスが10cm/sの速度で泳いでいる状態に対応している。実際のニジマスは、体長がもう少し大きく速度も速いようであるが、ほぼ実際を表すものと考えてよからう。

運動モードは式で書いて

$$h = 0.09448x^2 \cos[2\pi(1.6t - x)] \quad (3.55)$$

としている。ただし t は周期 T で無次元化されている。

まず翼形が固定直進状態の時の速度ベクトル計算結果は図3.25のようになる。境界層内の速度分布がきれいに表現されていることがわかる。

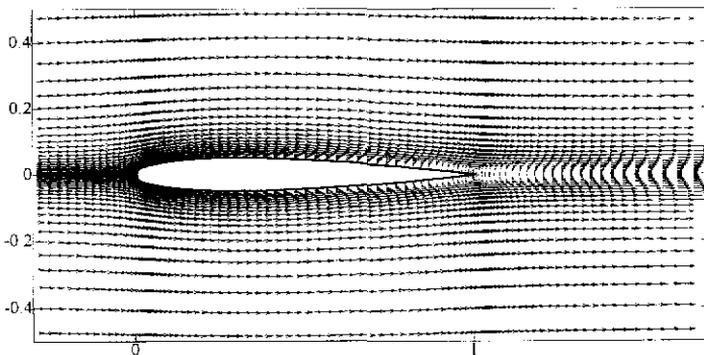


図3.25 NACA0010 翼まわりの定常流速度ベクトル計算図
(Nakaoka, Toda, 1994)⁽¹⁵⁾

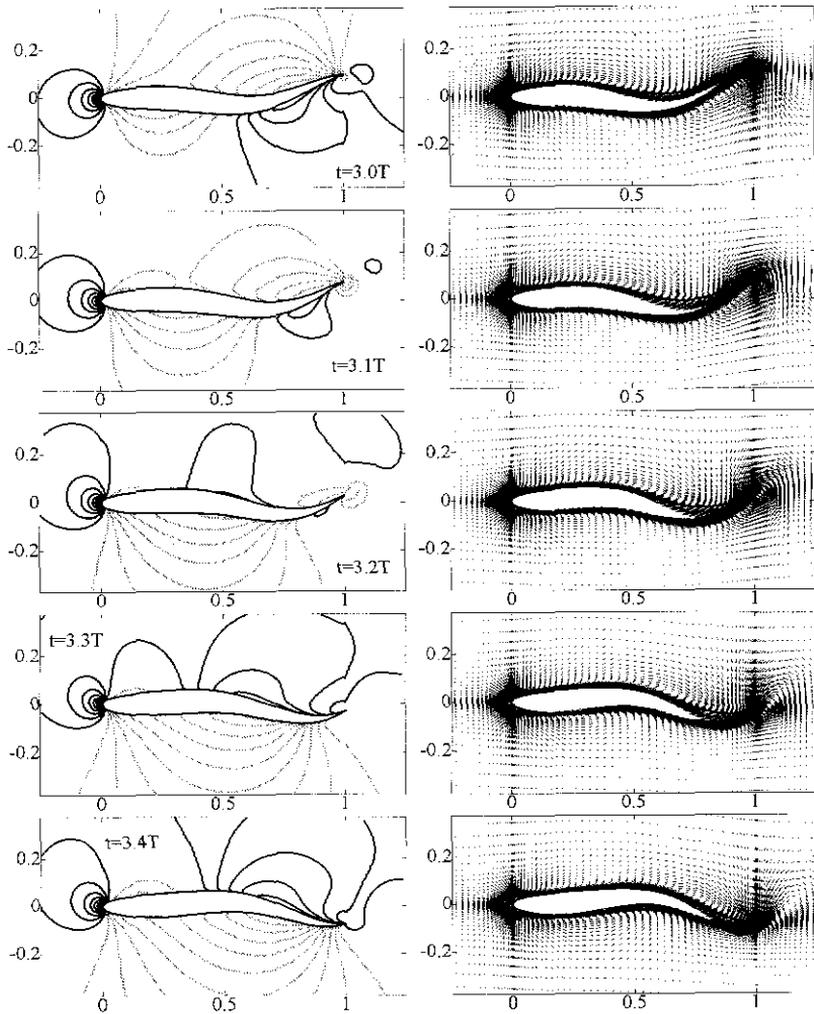


図3.26 1/4周期の間の魚体まわりの圧力、攪乱速度分布

(その1) 圧力等高線 太線：正圧0.05より0.05ごと 細線：負圧-0.05より-0.05ごと
 攪乱速度ベクトル 一様流が0.1に対応 $T=0.625$ (無次元周期)
 (Nakaoka, Toda, 1994) ⁽¹⁵⁾

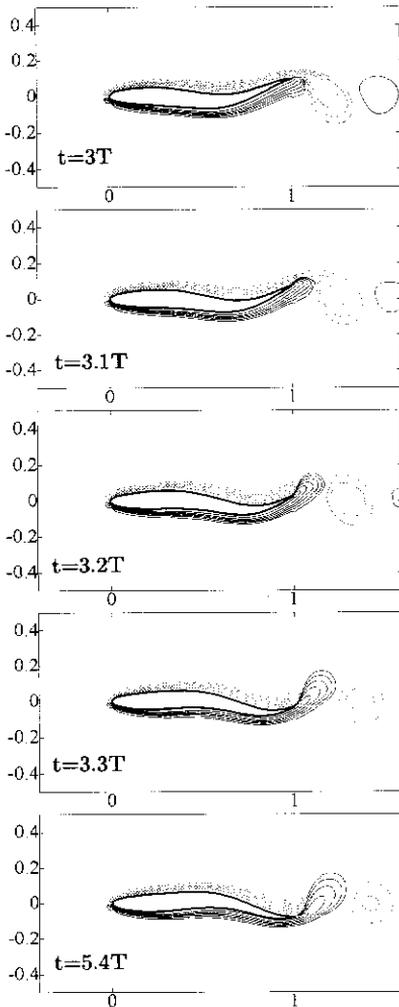


図3.26 渦度等高線
(その2) 実線：正（左周り）
点線：負（右回り）

さて、与えた運動モードに対する各瞬間の速度、圧力、渦度分布を示したのが図3.26である。図で、速度分布としては攪乱速度すなわち静止流体中を進む魚のために頭部の水が押しのけられ、尾付近の水が尾びれの動きに応じて左右に動かされる速度を示したものである。池の傍から池の魚の動きに伴う水の動きを見ていると思えばよい。尾びれの先で水が渦巻く様子が明瞭に見られる。

渦度分布は

$$\text{渦度 } \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.56)$$

の値の分布状況を記したもので、水粒子の回転（自転）角速度の2倍を示す量になっている。この正負は本論文の図では左回り（反時計回り）を正としている。従って、魚の上面の境界層内は右回りの渦度、下面は左回りの渦度で、これは予期通りであるが、図で t の経過を追うと、尾びれの運動で後端下面の左回りの渦度が次第に上方に押し出されて上面に回っていく様子が大変興味深い。その下

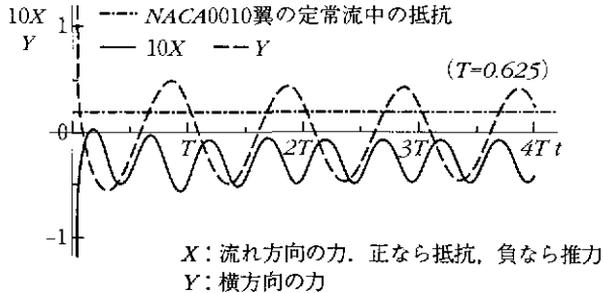


図3.27 魚体にかかる力の時間的变化 (Nakaoka, Toda, 1994) (15)

流側には上側から来た逆回りの渦度が残っており、こうして正負の渦対が渦列を作っていくことになる。

次に圧力分布を見ると、どの瞬間かということにより若干変わるが、ほとんど共通していえることは、まず第一に頭部は岐点であるから圧力は高く、抵抗になっていることである。それ以外の部分では、体の上面側の部分では後方から見える面の圧力は太線になっており、正の圧力つまり推力に、また前方から見える面の部分は負の圧力つまりここも推力になることがわかる。一方下面側の体表面でも全く同様の圧力分布になっており、結局体の両面ともどこも圧力分布は推力成分を出すようになっているという大変興味ある結果が得られている。

圧力と摩擦応力を全表面で積分して求めた前進方向の力とそれに直角方向の力を時間ベースに示したのが図3.27である。両方向の力とも時間的に変動しているが、前進方向の力は常に負、すなわち推力になっており、平均値としては魚が泳いでいないときの形状の抵抗よりも絶対値が大きいこと、すなわちこのままならどんどん加速することがわかる。現実の動きに合わせた計算であるにもかかわらず前進方向の推力が残ったのは2次元魚体による計算であるためだろうと論文の著者は述べている

が、おそらくそういうことであろう。3次元計算が行われることを期待したい。

体をくねらせて泳ぐ生物のCFDによる計算例としては他にオタマジャクシについて行った研究報告がある(Liu,1995)⁽¹⁹⁾。これも上述の論文と同様にNS方程式を解いて2次元振動翼と2次元オタマジャクシの遊泳時の流場ならびに推力,抵抗を種々の Re について求めたものである。その結果によると、体をくねらせながら泳ぐ泳法の方が剛体振動翼より推進効率が高いことが示されている。このことは既に渦分布を用いたポテンシャル流計算から得られている結論と一致するものであり、またもっと以前に一色教授が指摘しているところでもある⁽²⁰⁾。水棲動物が進化の過程でこのような貴重な結論を獲得したとすれば自然の妙には本当に感嘆させられる。

以上述べたように、CFDは魚の運動のように境界の形状が非定常に変化する場合の流れの場を知るには極めて有力な方法であり、今後計算法が進歩して3次元の場合、あるいは乱流の場合についても計算が可能になれば、従来知ることが出来なかった魚の抵抗・推進をはじめ多くの流体力学的現象の解明に役立つものと考えられる。これらは今後のテーマであり、本書の読者諸氏により見事に解決されるようになることを著者らは大いに期待している。

第4章 高速遊泳能力の解明

魚が高速で泳ぐためには、魚体表面に加わる流れの抵抗がかなり小さいか、あるいは魚の筋肉が発生するパワーがかなり大きくなければならない。なぜなら前章までに見たように、マグロの回遊（巡航）状態のように、等速直線運動を行う物体に加わる力は正味零となる筈であり、その状態で魚体に加わる抵抗力と魚体の発生する推進力がちょうど釣り合っているからである。魚の筋肉はこの推力 \times 速度すなわち抵抗 \times 速度に等しいパワー以上の動力を発生しなければならない^{注1}。

本章では水棲動物の高速遊泳能力の解明に取り組んできた多くの研究者たちの努力を後づけつつ、抵抗とパワーの両面からこの問題を考えてみる。

4.1 次元解析

最初に次元解析によって、魚の最高速度と体長の関係を推定してみる。まず良く泳ぐ魚は、マス・コイ等の小型淡水魚からイルカ・クジラ等の大型動物に至るまで相似な形状をしている事に気が付く。すなわち体形は流線形形状もしくは紡錘形で流体抵抗をかなり減少させ、推進力は発達した尾びれによる「アジ型運動」もしくは「振動翼運動」によっているところが共通した特徴といえる。そこで、これら動物の体形を互いに相似と仮定すれば、体表面面積 S と質量 m （体重は mg ）は体長 l の2乗と3乗にそれぞれ比例する。

^{注1} パワーの単位は力 \times 速度 ($N \cdot m/s = J/s$) であり、筋肉の単位時間当たり発生熱量 ($kcal/s$) と等価である。筋肉のパワー \times 効率が推進に使われる。

$$S \propto l^2, \quad m \propto l^3 \quad (4.1), (4.2)$$

魚の発生動力は筋肉量に比例し、筋肉量が体重に占める割合をこれら動物において一定とすれば、その発生パワー P は

$$P \propto m \quad (4.3)$$

次に流体抵抗は表面摩擦抵抗のみとし、摩擦抵抗係数 c_f とレイノルズ数の関係を体表面境界層の流れが層流の場合と乱流の場合に区別して表示すれば、それぞれ次の関係が成立する。

$$D = c_f \rho U^2 S / 2 \quad (4.4)$$

ただし、体表面境界層の流れが層流の場合

$$c_f \propto Re^{-1/2} = (Ul/\nu)^{-1/2} \quad (4.5)$$

乱流の場合

$$c_f \propto (Ul/\nu)^{-1/5} \quad (4.6)$$

パワーと速度の関係は前にも述べたとおり、

$$P = T \cdot U = D \cdot U \quad (4.7)$$

である。式(4.1)～(4.6)を式(4.7)に代入すると魚の最高速度と体長の関係が次のように求められる。

(i) 魚体表面境界層の流れが層流の場合:

$$U \propto l^{3/5} \quad (4.8)$$

(ii) 魚体表面境界層の流れが乱流の場合:

$$U \propto l^{3/7} \quad (4.9)$$

一般に大きな魚ほど速く泳ぐといえるが、上式によれば、その関係は比例関係ではなく、体長の0.4乗（乱流境界層）から0.6乗（層流境界層）の割合でしか増加しないということになる。

第1章の図1.5は両対数グラフにより各種遊泳体の体長と速度の関係をプロットしたのだが、図中 $U \propto l^{3/5}$ と $U \propto l^{3/7}$ の2本の直線が上述の2つの場合を示している。また図中右下りの5本の破線は体長を代表長さとしたレイノルズ数 $Re(=Ul/\nu)$ 一定の関係を示したもので、図によればほとんどのプロット点が $Re = 10^5$ から 10^9 と高いレイノルズ数領域にあることがわかる。第2章では $Re = 3 \times 10^5$ 程度以上になると平板上の境界層も乱流境界層に遷移することを述べたが、同図より体長30cm、遊泳速度1m/s程度の小型淡水魚（図中ではコイ）以上の領域では、魚体表面境界層内の流れは乱流と考えるのが妥当であろう。図によれば10m/sの速度で泳ぐ体長30mのクジラは高速で泳ぐコイやマス、フナ並の体重当たりパワーでその速度を説明することができる。

しかし、クジラと同じ速度で泳ぐ体長2m台のイルカ達の速度は、上述の相似則によってはとても説明することはできない。図によればこのイルカ達の速度は前述のコイの泳動能力との間で $U \propto l$ の関係が成立しているように思われる。カツオ、カジキ、マグロの類の報告された最高速度は、小型淡水魚の瞬間的な泳動能力とやはり $U \propto l$ の関係で結ばれている。

筆者の一人が、水棲動物の遊泳能力を計測する一つの尺度として導入した無次元の泳動数 (Swimming number)

$$Sw = U/f \cdot l \quad (4.10)$$

は、ウグイ、フナで約0.6、コイ0.7、イルカ0.8と、種毎にそれが一定であることを実験結果に基づいて報告しているが、速度が体長に比例するという観察結果は、上述の相似則によってはやはり説明できない現象といえる。グレイのパラドックスの別の表現である。

上述相似則で推定した以上の速度で遊泳する能力を力学的に説明する

ためには、おそらく次の三つの可能性しかないであろう。すなわち

- (1) 魚体表面の流体摩擦抵抗係数が式(4.5)あるいは式(4.6)よりも小さい。
- (2) 水棲動物の体重当たり発生パワーは式(4.3)が予測するように一定ではない。すなわちパワーは体長の3乗以上の割合で増加する。
- (3) アジ型運動あるいは振動翼推進運動の流体力学的効率が、大型動物になるほど上昇する。

の3点である。

あとでみるように、この問題に取り組んだ多くの研究者達はまず第一の可能性に注目して研究を行ってきた。しかし筆者の一人の実験結果によっても魚体表面の流体摩擦抵抗が乱流摩擦抵抗係数(式(4.6))のそれよりも小さくなるという結果は得られていない⁽¹⁾。

航空工学の立場から生物の飛行および泳法を多角的に研究している東京大学の東昭名誉教授(1927-)は、ラングらの観察結果⁽²⁾を引用して、イルカの体重当たり発生パワーがかなり大きい事を述べ、グレイのパラドックスは解消したと宣言している⁽³⁾。

ここでは力学の立場から、可能性(1)と(2)についてももう少し次元解析を進めておこう。まず抵抗がかなり小さい場合について、式(4.5)または式(4.6)を未知とし、他の関係はそのままとすると、パワーと抵抗、体長および抵抗係数の間には次の比例関係が成り立つことは明らかである。

$$P = D \cdot U \propto m \propto l^3 \quad (4.11)$$

$$D \propto C_f U^2 l^2 \quad (4.12)$$

両式より C_f について求めると

$$C_f \propto l/U^3 \quad (4.13)$$

の関係が得られる。ここで観察結果に基づき $U \propto l$ とすれば $C_f \propto U^{-2}$ の関係が得られる。これを抵抗係数の定義式でもある式(4.4)に代入して

$$D = C_f \rho U^2 S / 2 \propto \rho S \quad (4.14)$$

となる。すなわち魚体に加わる抵抗はその表面積のみに比例し、速度 U にはよらないということになる。物理的にありえそうな結果となった。

次に2番目の可能性として、水棲動物のパワーを未知数として体重の x 乗に比例する場合を考えよう。その際流体摩擦抵抗係数は乱流境界層を仮定して式(4.6)の関係をを用いる。すなわち

$$P = D \cdot U \propto m^x \propto l^{3x} \quad (4.15)$$

$$D \propto \left(\frac{U l}{\nu} \right)^{-\frac{1}{5}} U^2 l^2 \propto (U \cdot l)^{\frac{9}{5}} \quad (4.16)$$

上の2式より

$$U^{\frac{14}{5}} \propto l^{3x - \frac{9}{5}} \quad (4.17)$$

なる関係が得られる。ここで観察結果 $U \propto l$ を使えば $x = 23/15 \cong 1.53$ となる。すなわちパワーと体重および体長の関係は、

$$P \propto m^{1.53} \propto l^{4.6} \quad (4.18)$$

と求まる。小型淡水魚に較べて大型海洋魚もしくはイルカの筋肉が相当高性能であるとすれば、これは簡単には否定できない可能性であるかも知れない。

グレイのパラドックスが依然として存在するならば、それを説明する筆者らの考えは、おそらく前述の三つの可能性がそれぞれ部分的に少しづつ寄与することにより、全体として、観察される驚異的な遊泳能力を

達成しているに違いないとするものである。以下に個別研究事例について検討する。

4.2 抵抗低減の可能性

良く泳ぐ動物が流線形もしくは紡錘型形状をしているのはいわば自明のようにも思われるが、はたして彼らはそれ以外のいかなる方法を使って流体抵抗をさらに軽減しているのであろうか。

1960年、米国ロスアンゼルスで、クレイマー博士 (Kramer, Max O., 1903 -) はイルカの皮膚を模倣してシリコンゴムとシリコンオイルを用いた特殊な表皮を作製し、ロケット型模型に装着して海中曳航試験を行ったところ、剛体表面の場合と比較して、抵抗が最高60%も減少したという驚くべき結果を報告した⁽⁴⁾。

図4.1に特殊弾性体表皮の構造を示す。シリコンゴムは3層になっており、内層と外層は継ぎ目なしホース、その間に円柱形突起のついたゴム膜が挿入されている^{注1}。突起の間に注入するシリコンオイルの粘度を変えることによって膜全体の剛性を変化させた。

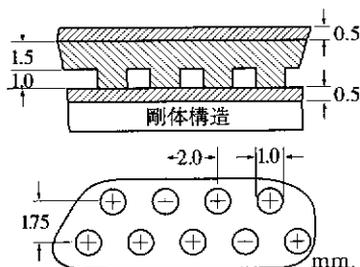


図4.1 特殊弾性体表皮の構造 (Kramerのゴム膜)

図4.2にその結果をレイノルズ数と摩擦抵抗係数によって示す。図中2本の直線は層流境界層と乱流境界層の場合の理論値で、実験点Aは剛体模型の場合である。Aのグラフより実験したレイノルズ数領域は遷移領域

^{注1} ただし突起の寸法は約1mm、全体の厚さも約3.5mmとかなり微細な構造であることに注意。

域であり、層流境界層の下流側に遷移した乱流境界層が存在する流れであることがわかる。実験点B, C, Dの順に特殊弾性膜表皮を柔らかくしてあるが、Cの場合において、明瞭な抵抗減少が認められ境界層の乱流への遷移が抑制されたと判断された。クレイマーのこの報告は世界中の研究者の注目を集め、類似の実験が多数行われたようであるが、残念ながらこれほど明瞭な結果は今日まで再現されていない。

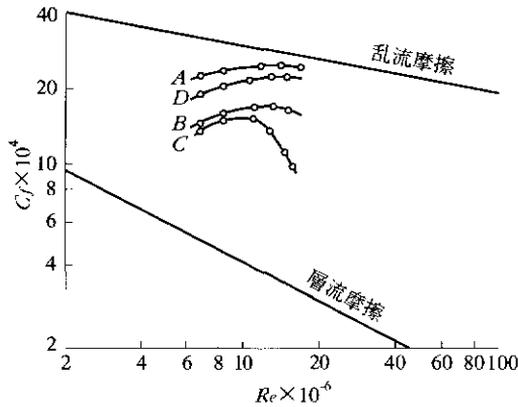


図4.2 クレイマーの実験結果
(Aは剛体, B, C, Dの順に柔らかい表皮となる)

我国では九州大学の種子田教授らが2次元平板の表面にソフランの膜を貼って曳航水槽実験を行っている^(5,6)。しかし、 $Re = 10^5 \sim 10^7$ の領域で実験を行ったが柔らかい表皮をもつ平板の抵抗係数は剛体表面のそれよりも常に大きいという結論を得た。東京大学の田古里教授らは競泳用水着について実験を行っているが、弾性繊維を混織した生地の場合もそれをできるだけ引張って平板に張り付けた状態の抵抗が、そうでない場合の抵抗よりも常に小さいと報告している⁽⁷⁾。筆者の一人もビニールの旗を回流水槽中に設置して実験を試みたが、旗の柔らかさあるいは無

束縛運動が流動抵抗を減少させるという現象は確認できなかった⁽⁸⁾。

クレイマーの結果は理論流体力学の分野でも興味をもたれ、乱流の安定性理論を用いて境界がフレキシブルな場合の微小擾乱の安定性問題が研究されたが^(9,10)、結論はやはり否定的であった。

柔らかい表皮や旗は流れによっていわば受身的にその形状を変化させる。これをパッシブコントロールと定義すれば、能動的に表面形状を変化させて流れを制御することをアクティブコントロールという。境界層内流れをアクティブコントロールすることによって抵抗低減をはかろうとする試みもある。種子田は平板表面に進行波運動を与え、境界層流れを詳細に観察している。その結果進行波の波速が主流速度より小さい場合流れは波の山の下流で剥離するが、波速が大きい場合には流れは全く剥離せず、平板下流に周期的に逆カルマン型の渦を放出すると報告している^(11,12)。浦田らも同様の実験を行っている⁽¹³⁾。

しかし、アクティブスキンの場合、上述の種子田らの実験によっても明らかのように、主流速度以上の波速で進行波運動を行う表皮は、主流を加速しそれによって推力を得ているのである。前章で述べた細長物体による推力発生機構と同じ原理であるが、今のところ推力を発生している表皮について抵抗のみを分離し測定することは不可能といわなければならない。魚のエラから排出される水流も主流を加速すると同時に境界層制御でも重要な役割を果たしていると思われるが詳細は不明である⁽¹⁴⁾。

魚体表面抵抗低減の次の可能性として、表皮分泌物の効果がある。魚体表面のヌルヌルは抵抗とどう関係するのだろうか。

4.2.1 トムズ効果

ある種の高分子物質の水溶液が真水に較べて流動抵抗がかなり低くなる

ことはトムズ効果として良く知られている。1948年、トムズ (Toms, B. A.) はポリメチルメタクリレートモノクロルベンゼン (Polymethylmethacrylate - monochlorbenzene) 溶液 (0.625 ~ 2.5 g/l) の管内流実験を行い、この溶液はモノクロルベンゼンに比べて圧力損失が著しく減少することを始めて明らかにした⁽¹⁵⁾。

図4.3は Toms の実験を H. C. Hershey および J. L. Zakin が摩擦抵抗係数 f とレイノルズ数 Re の関係に計算しなおしたものである⁽¹⁶⁾。図より、添加ポリマーの影響によって層流域の摩擦係数は増加しているものの、乱流域では通常値の約半分程度にまで減少していることが明らかである。

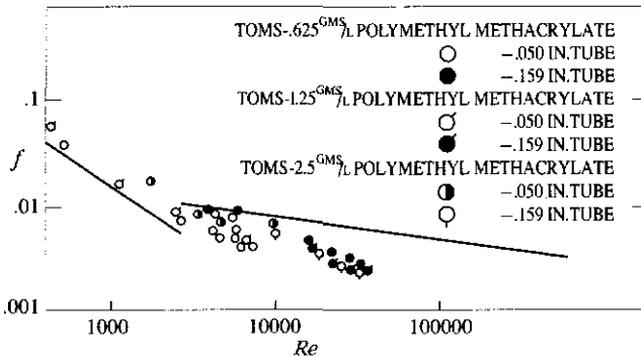


図4.3 トムズ効果 (Hershey と Zakin による⁽¹⁶⁾)

トムズ効果は研究者達を刺激し、数多くの実験が続いた。船舶流体力学分野では、まず Hoyt と Fabula⁽¹⁷⁾ が多種類のポリマー溶液中で円板を回転させ、摩擦トルクの減少を調べることによって、どのようなポリマーがトムズ効果を示すのかを調査している。それによるとポリエチレンオキサイド (Polyethylene oxide) など有効ポリマーのもつ共通な性質として、分子量がほぼ 10^6 以上であること、分子構造が直鎖状であるこ

となどが明らかになっている。

1969年、東京大学田古里哲夫教授(1927 - 1990)らは、解説「ポリマー水溶液による摩擦抵抗減少について」を日本造船学会誌に執筆し、それまでの約20年間にわたる実験的、そして理論的な研究の歩みを詳細に記述している^(18,19)。田古里教授は、自らもドジョウの皮膚分泌物のトムズ効果を確認したり、モータボートを使った実艇試験も指導する^{注1}等、日本におけるこの分野の草分けの一人であったといえよう^{注2}。

1973年、米国の二人のリン (S. C. Ling & T. Y. J. Ling) はメリーランド州チェサピーク湾 (Chesapeake Bay) に生棲する数種の魚 (ナマズ、ウナギ等を含む) からその体表面分泌物を採取し比較したところ、スモールフラットフィッシュ (Trinectes maculatus, ベラ科の魚) の分泌物グリコプロテイン (glycoprotein) がユニオン・カーバイド社製のポリエチレンオキサイド溶液 (polyethylene oxide solution, Polyox 301) と物理的性質がきわめて近いことを見だし、その両者を使ってトムズ効果を確認する実験を行った^{(20) 注3}。

実験は内径1.27cm長さ2m程度の円管内水流中に、管壁に設けた合計40個の小孔 (直径0.06cm) より、魚分泌物もしくはポリマーを流入して、管路の圧力降下を測定し、圧力降下係数よりこれら添加物による抵抗の減少を確認したものである。

図4.4にその結果を示す。実験はレイノルズ数 Re を5,500から74,000

注1 モータボートの全抵抗で最大約5%、摩擦抵抗で15～20%のトムズ効果を報告している。

注2 同解説には、田古里教授が Hoyt 氏よりもらって培養していたトムズ効果を示す単細胞藻類を、当時の東大紛争の影響下で死滅させてしまったという残念なエピソードなども記述されている。

注3 魚の分泌物 (mucus) は浅いバケツに魚を何尾も重ねて置いて自然に抽出させている。ただし、量的に限られているため多数回および多量の詳細実験用にはポリマーを使用した。

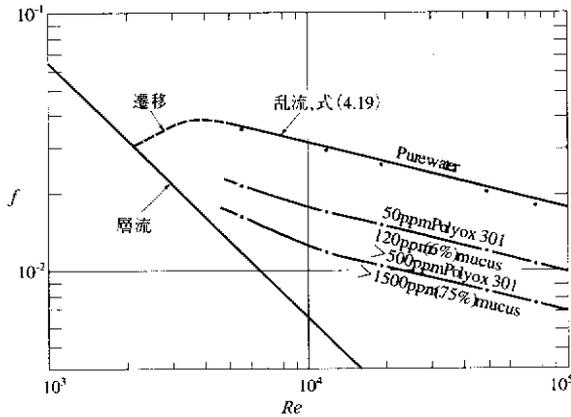


図4.4 魚分泌物とポリマー水溶液による管摩擦抵抗係数の実験結果

の範囲で5通りに変化させており，通常の管内流れでは乱流となる領域である．図中上部の曲線は真水のみを流した場合のもので，管摩擦係数はプラントルの式⁽²¹⁾

$$\sqrt{f} = 2.0 \ln (Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad (4.19)$$

にきわめて良く一致している．次の二つの曲線は管壁からの溶液注入によってポリマーでは50p.p.m.と500p.p.m.以上水溶液とした場合，魚分泌物では120p.p.m.(6%)と1500p.p.m.(75%)以上水溶液とした場合についてそれぞれ測定したものである．測定の結果それぞれ前者の場合で40%，後者の場合60%の抵抗減少を確認している．比較的low濃度の前者の場合では抵抗はポリマー濃度とともに急激に減少するが，高濃度の後者の場合ではそれ以上濃度を上げて抵抗減少率は上昇せず60%に漸近するとしている．また本実験は管壁乱流境界層の下層に存在する粘性底層^{注1}内の速度分布も計測する程に精度の高いレーザドプラ流速計を用

^{注1} または層流底層とも呼ぶ，この実験で0.1～0.5mm程度の厚さ．第2章p.68参照

いているが、それによれば低濃度ポリマー溶液による抵抗減少は粘性底層の厚さを増加させることなしに達成させるとしている。

図4.5に片対数グラフで表示した壁面近傍の速度分布を示す。縦軸 u^+ および横軸 y^+ は無次元の速度および壁からの距離であって、それぞれ次式により定義される。

$$u^+ = u/u^*, \quad y^+ = yu^*/\nu_w \quad (4.20),(4.21)$$

ただし u^* は(実測する)壁面摩擦応力 τ_0 と流体密度 ρ より次式で計算される摩擦速度であり、 ν_w は水の動粘度である。

$$u^* = \sqrt{\tau_0/\rho} \quad (4.22)$$

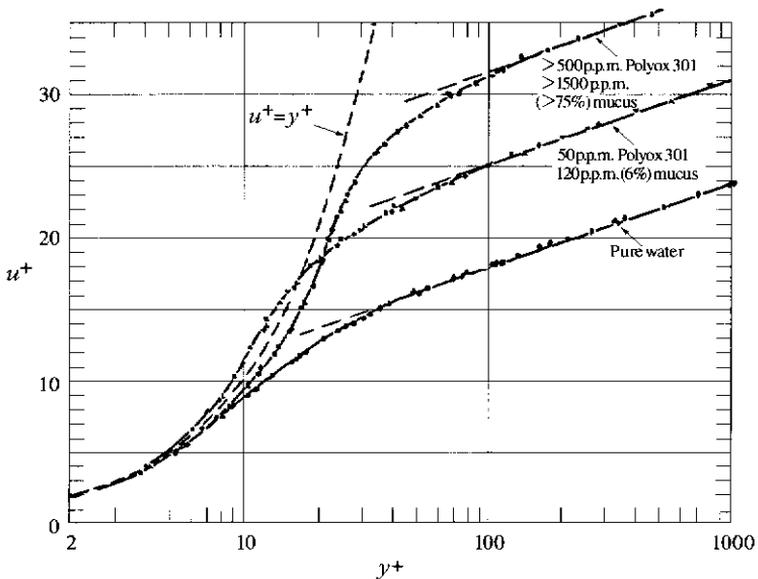


図4.5 境界層内無次元速度分布

図によれば、壁付近の速度分布は純水、低濃度ポリマー又は低濃度魚分泌物および高濃度ポリマー又は高濃度魚分泌物の三つの場合において、それぞれ、レイノルズ数の違いにかかわらず、一つの曲線状にプロットされることを示している。すなわち速度分布が自己相似 (self-similar) であり、典型的な乱流境界層構造を有しているといえる。図中壁近傍で $u^+ = y^+$ となる部分が粘性底層であり、壁から遠く離れ、 u^+ が $\ln y^+$ に比例する部分が乱流境界層である^{注1}。リンらは本図によって粘性底層の厚さを議論し、また粘性底層の外側、すなわち低濃度溶液では $y^+ = 10$ 近傍、高濃度溶液では $y^+ = 20$ 近傍に速度勾配 du^+/dy^+ が1以上となる奇妙な層 (anomalous layer) が存在することを見出した。そしてこの奇妙な層がポリマー又は魚分泌物の存在によって形成されると推論し、粘性底層の厚さ増大と共に、抵抗減少の主原因であろうと結論している。さらに彼らは粘性底層がきわめて薄くしかも速度と共にさらに薄くなることから、魚が消費すべき分泌液の拡散は速度によらずほぼ一定できわめて小量で済むであろうとしている。

リンらの推論が正しく、しかも現実のカツオやマグロが分泌物によってその泳動抵抗を60%も減少させているとすれば、同じ速度を達成するための動力は分泌物がない場合に較べ2.5分の1で済むことになり、グレイのパラドックスの溝が大きく埋められるといえる。ただし、リンらにひきつづきこの現象をさらに詳細に研究する試みあるいはその工学的応用については今のところ報告が見当たらない^{注2}。また、イルカについては残念ながらそのような分泌物の存在も効果も報告されていない。

注1 これを乱流境界層の対数分布則というプラントルの式(4.19)もこれによっている。

注2 次に述べるリプレット効果の最近の研究の高まりは、あるいはトムズ効果の再研究を促すものになるように筆者らは予感している。

4.2.2 微小突起による抵抗低減：リブレットの場合

魚の摩擦抵抗が想像以上に小さいのではないかという疑問を解くため、色々な可能性を探していくと、一つ不可思議なことに出会う。それはサメ（鮫）の場合である。よく知られているようにサメは獐猛な魚で人も襲う場合があり、極めてイメージは悪い。しかしここでは無論冷静に学問の対象として考える。サメの表皮は昔から鮫肌という言葉があるようにざらざらしている。図4.6にDinkelackerらの論文⁽²²⁾にある表皮の写真を示す。写真に見られる通り表皮には小さい山の峯のような突起が並んでおり、その峯の方向は流れの方向に向いているように見える。このサメの場合その高さは0.1mm程度、間隔も同じ位である。このような微小突起が体全体にわたって流線方向に並んでいるといういわば不思議な表皮をしている。全体の模式図を図4.7に示している。図の矢印は、その方向に細かい縦（前後）方向の突起があることを示す。（表皮上の突起

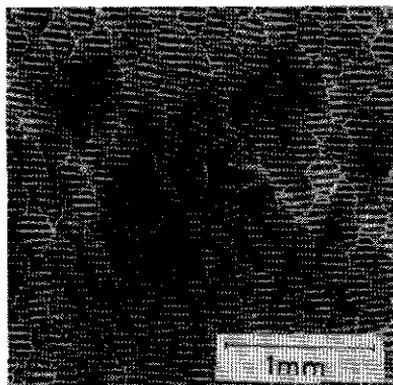


図4.6 サメの鱗の写真
(Dinkelacker ら, 1987) ⁽²²⁾

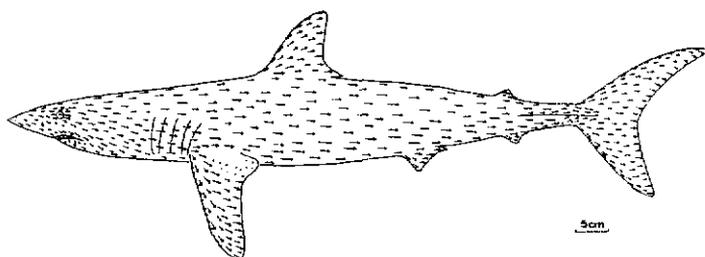


図4.7 サメの鱗の突起の方向の模式図 (Dinkelacker ら, 1987) ⁽²²⁾

の数ではない. 突起 (峯) の数はもっと多い.) 突起を流れに直角方向に切り, それをモデル化したのが図4.8である.

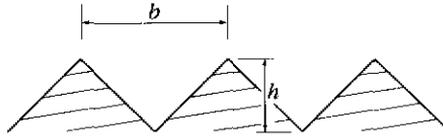


図4.8 表面の微小突起 (リブレット) の断面をモデル化した図

さてそれでは一体サメの表皮が何故このようになっているのであろうか. 普通に考えられることは, いくら小さくても, 手でさわると確かに分かる程度の突起であるから, いわゆる粗度に相当し抵抗はおそらく増加するであろう, 従ってそのような理由で突起があるのではなく, もっと別の理由, 例えば獷猛な魚であるから格闘に備えて鎧のように頑丈な表皮になっているのであろうという想像である. 後段の部分はいわば動物の生態学に属する話で本書の主題と異なるのでそれはさて置き, 前段について, その答えは意外なことになったのである. それは乱流摩擦抵抗がこれで減少するというのである. Dinkelackerらはこの表皮を模擬した表面を円管の内面に作り, その抵抗試験をしている. 円管の抵抗実験は, 前述リンらの研究と同様最も基本的な流体抵抗計測実験であり, 円管内面の摩擦抵抗が円管の上流と下流の圧力差になるので, 圧力差を精度よく計測すれば摩擦抵抗の差が求められる. その結果は図4.9に示すようになっている. これによると滑面の場合と突起をつけた場合とで抵抗の大小関係が Re の領域に応じて異なり, ある特定の Re 領域で突起のある方が抵抗が若干小さい (この例では3%程度) という結果になっている. 正確には突起の高さと間隔の関係もからんで複雑であるが, いずれにせよ, 粗度であるからには抵抗は増加こそすれ減少はしないというの

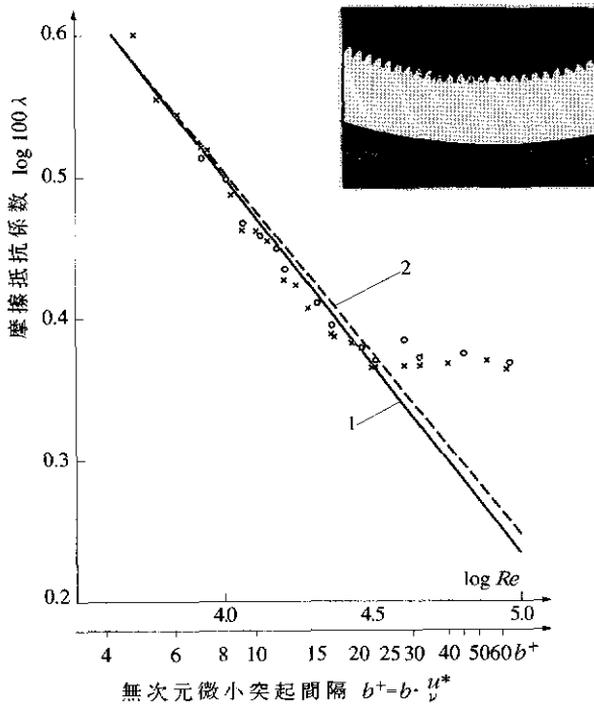


図4.9 内面に微小突起をつけた円管の抵抗 (Dinkelackerら, 1987) (22)

1:滑面円管計測値 2:滑面円管理論値 ○, ×:微小突起付計測値

が従来の通念であったから、これは大変不思議な現象である。

なお、用語であるが、突起と見ずに低い方に注目して溝 (groove) という言葉も用いられている。他に縦稜、縦峯 (longitudinal ridge), リブレット (riblet, 小肋骨, 小骨) という言葉も用いられている。日本の研究者の間ではこのような形状の突起の名称としてリブレットがよく使われるので、本節の表題にもそれを用いた。リブレット以外の形状の突起を含め一般的にいう場合には微小突起とする。

抵抗減少をもたらす突起の高さ、間隔、速度領域の関係であるが、摩

摩擦速度 u^* ($u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$, τ_0 は壁面摩擦応力) と突起間隔 b (図4.8参照) で作ったレイノルズ数と、同じく摩擦速度と突起高さ h で作ったものの両方共数十程度になる場合だけ抵抗減少がおこるというデリケートな答えになっている。この時のサメの速度は5から10m/s位になり、これは丁度、サメが何か危険を感じる時とか餌を求めるときとかのように急速に運動するときの速さに対応するといわれている。こうなると全く自然の神秘に感じいる外はない。

さて、流体力学的理由が問題である。元々この研究はNASA ラングレー研究センターで1970年頃からWalshをリーダーとするチームで研究がはじめられた様子である。これはWalshらによる多くの論文からの推察であるが、その最初の論文はWalshとWeinsteinによりAIAA Journalに1978年発表されている⁽²³⁾。そこでは流れ方向の小さい小骨付き表面 (small longitudinally ribbed surface) の流体抵抗及び熱伝達について調べられており、その研究の意図が、壁面からの乱動の発生 (バースト) の横方向の広がり幅を微小区間に制限することにより流れを制御することであったと明確に記してある。その後の研究成果は多くの論文に記され、流れ方向に沿った稜をもつ微小突起列の形状、間隔、高さ等が抵抗に及ぼす影響が詳細に調査され、現在ではほぼその全貌が明らかになったといえる。その結果上述のように条件さえ満たせば抵抗が最大8%程度減少するということがほぼ確認され、その理由も、当初の狙い通り、乱動のバーストのおこりはじめのヘアピン型 (バナナ型ともいわれる) 3次元渦糸の幅が突起によって規制された結果、乱流構造が変化して抵抗の減少が起こったと理解されている。図4.10に渦糸の構造図を文献⁽²⁴⁾から引用して示した。もっとも、このような説明は現在定説になっているが、なお研究が進行中であり、更に詳細な流場構造が明らかになることが期

待される。その一つの理由は、流れに沿って峯が続くような形の粗度だけが抵抗低減の可能性があるので、流れの方向と峯の方向が斜交するとどうなるのか、などの疑問が次々と出てくるからである。これらが正にはてしなき真理への探究につながる訳で、最近日本でこれらに関して重要な進展が見られつつある。これについてはすぐ後で述べることにする。

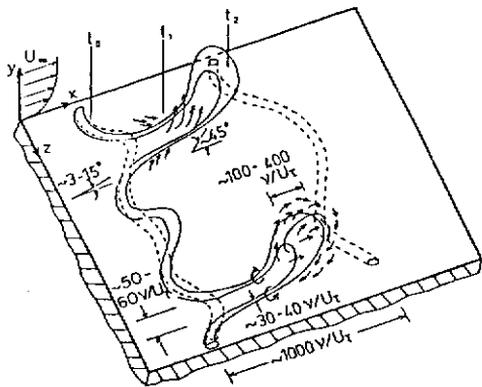


図4.10 物体表面から発生するヘアピン渦の概念図 (Wallace & Balint, 1987) ⁽²⁴⁾

4.2.3 リブレットの実用例 (アメリカ杯ヨットレース)

前節で述べた通り、リブレットは実験で最大8%程度摩擦応力が減少することが知られており、またこれが理論的にも説明できるというのが現在の状況である。しかし、実際に工業上の目的で使用された例は聞いていない。ところが実用例としては一つある。それも有名な事例になっているが、それは今や日本でも極めて関心の高いアメリカ杯ヨットレースの事例である⁽²⁵⁾。

アメリカ杯レースは第1回の1851年以來すでに145年(1996現在)の歴史を数えるが、その間終始アメリカのクラブがレースを制し、アメリカ杯は移動することはなかった。しかし1回だけ1983年にオーストラリアのクラブがハイテクを駆使して建造したAustralia IIというヨットで無敗のアメリカを破り、杯を南半球に持ち去ったということで大変なニュー

スになったのである。読者はよく覚えておられると思うが、このときオーストラリアの建造したヨットは、従来検討されてはいたものの採用した例のなかったキールにフィンを付けたもので、最大喫水の制限の下でフィン作用が向上して高性能を発揮したと言われている。この出来事はヨット船型に対する強い関心呼び、特にアメリカの名門ヨットクラブではCFDの手法の活用をはじめとして、あらためて船型の見直しを行ったようである。その結果現れたのがリプレットフィルムを全面に貼ったStars & Stripes号である。このリプレットは薄いフィルムに微細な縦溝をつけたもので、NASAと3M社の開発に依るという。ヨットに使用されたものは4～8ノット用とされ、幅12”、長さ75”、厚さ0.18mmの粘着テープ状シートで、縦溝が流向を向くように貼られたといわれている⁽²⁶⁾。リプレットによる摩擦抵抗減少のメカニズムは先述の通りであり、適当な寸法は流れの Re に密接に関係していること、また縦溝に沿うように流れることが要求されている。ヨットのように種々の姿勢をとり、また実際の海面で波を立てつつレースを行う船体で、リプレットが果たして実験室で得た通りの抵抗低減の効果を発揮するか否かについてはいろいろ考えが分かれるところであるが、いずれにせよ、結果はStars & Stripes号が勝ち、一度オーストラリアに渡った杯を再びアメリカに持ち帰ったということで一躍有名になった訳である。

なお、リプレットを船体表面に貼ることは以後アメリカ杯では禁止されているそうである。

4.2.4 我国における最近の研究

1988年、谷は約50年前のNikuradseの砂粗度を用いた円管流実験データを丹念に整理し直すことにより、表面に分布する微小な粗さすなわち

上述の微少突起によって抵抗が減少する可能性を改めて提唱している⁽²⁷⁾。その粗さはもちろん乱流境界層の粘性底層内 $y^+ \leq 5$ に埋没してしまう程度のものであり、これまで見てきたように、流体力学的には十分滑らかと見なされてきたものである。

Stars & Stripes 号の成功や谷の提唱に刺激され、最近国内でもリプレットの効果を確認する報告が続いている。大坂ら⁽²⁸⁾と小濱ら⁽²⁹⁾は網状の粗面を用いて、粗さレイノルズ数 $Re_k \cong 2.0$ で摩擦抵抗係数が2～5%減少することを確認した。小濱はさらに、リプレット内に形成される微小空間が壁付近の低速流塊を閉じこめ、馬蹄型縦渦対により持ち上げられることを阻害し、結果として乱流エネルギー生成の原因であるバースト（イジェクション）を弱めているのではないかと推測している。さらに、高田ら⁽³⁰⁾は円管内壁に微小な植毛を施した所、管内抵抗が大幅に減少したという驚くべき結果を報告している。

以上見てきたように、リプレットの効果は前節のトムズ効果と同様、壁付近のきわめて微細な構造において、まだ我々がほとんど把握していない流体力学の現象に支配されているように思われる。理想流体力学と実在流体力学の違いすなわち壁面における slip と no slip の違いが、流体の分子性を考えることによって始めて明らかになったように、乱流境界層の摩擦抵抗減少という一見摩訶不思議なこの現象も、再び流体の分子性を考えることによって理解され得ることを示唆しているように思われる。ただしこの場合の分子性はたとえば水分子 H_2O の単体レベルのそれではなく、それらが無数に集めた流体塊のレベル、流体力学でいうところの流体粒子を念頭に置くべきであろう^{註1}。トムズ効果を示すポリマーの分子量が100万(10^6)程度と H_2O （分子量18）に比べて巨大であること

^{註1} “流体粒子”については第2章，p.64でも述べた。

はこの意味で示唆的である。

船舶の摩擦抵抗が船底の塗装状態や藻の発生等表面のわずかな変化、さらには海水の状態によってさえかなり影響されることは、造船学会あるいは業界において積年の難題であった。リンらが指摘した粘性底層近くの恐らく分子量 10^6 程度のスケールを持った、奇妙な層 (anomalous layer) 内で現象を支配するドラマが繰り広げられているのであれば、近代科学は早晩そのメカニズムをも明らかにするであろう。

不可知論^{注1}には立たない著者らは、この方面の研究が今後さらに進展し、グレイのパラドックス解明に寄与することを期待している。

4.3 淡水魚の抵抗測定と遊泳能力の観察

4.3.1 回流型整流水槽

琉球大学工学部では小型淡水魚の泳動抵抗や遊泳能力を直接観察すべく、そのための小型の回流型整流水槽を実験室内に製作設置した。

図4.11に同回流水槽を示す。本装置は大気開放した給水槽①と集水

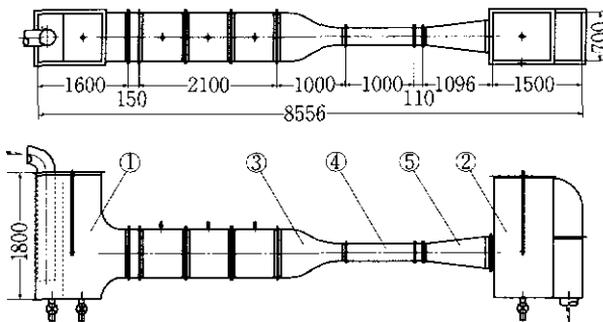


図4.11 小型の回流型整流水槽 (琉球大学)

^{注1} 人は客観的な実在 (宇宙の真理) について何一つ確実には認識し得ないとする哲学上の立場

槽②の間を助走部，ノズル③，測定部④およびディフューザ⑤で連結した構造で，測定部断面における速度分布ができるだけ一様になるように工夫してある．地下水槽より斜流ポンプによって汲み上げられた水は回流水槽を通過した後，集水槽を経て再び地下水槽へ戻される．測定部は断面 $210 \times 210 \text{ mm}^2$ ，長さ 1000 mm の透明アクリル板製で内部の流れが良く観察できるようにしてある．バルブ操作により測定部流速は $0 \sim 2.3 \text{ m/s}$ の範囲で可変である．

図 4.12 に抵抗測定用に製作した曳航型抵抗検出器を示す．原理は片持ち梁構造で，梁下部の板バネ①に貼付した歪ゲージ②により抵抗に比例した歪量を計測するものである．検出器は供試体の上流に位置するため，それによる流れの攪乱の影響を極力押さえるためにカバー形状を流線形とした．また供試体を曳航する糸⑥が伝える力のうち流れ方向成分のみを検出するために，互いに滑動できる二重のパイプを使用するなど工夫を凝らしている．流れ方向の力（抵抗）は動歪測定器によって電気信号に変えられオシログラフにより記録された．

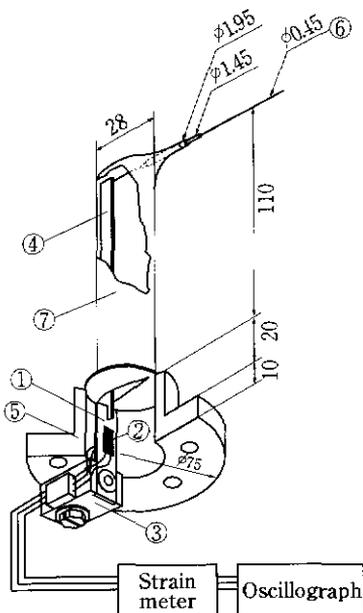


図 4.12 曳航型抵抗検出器

図 4.13 に抵抗測定中のコイの様子を示す．この実験の最初の頃は魚市場で求めた数種の海水魚（タイ・マチ・サンマ等）および麻酔を施した淡水魚を用いて測定を試みたがいずれも良質なデータは得られなかった．そ

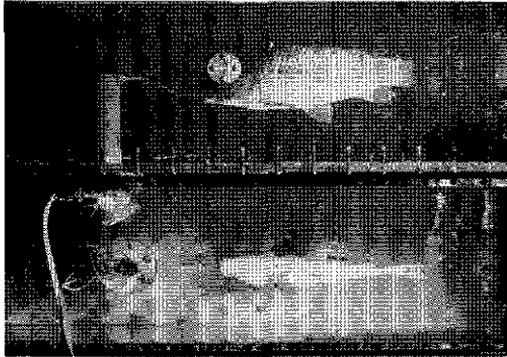


図4.13 抵抗測定中のコイ，水流中で無泳動状態の曳航力を抵抗とした

れは死魚または麻酔魚の場合，姿勢制御がうまく出来ず，流速の増加とともにたちまち揺動または回転を始め大きくばらついたデータしか得られなかったからである．写真に示す活魚の場合自ら姿勢制御を行うので，安定したデータが得られるようになった．ただし，魚体抵抗として採用するデータは，当然，供試魚が無泳動状態にあることを確認して採取した場合のものである．

4.3.2 供試魚の体形

供試魚の抵抗係数を決定するためには，まずその体長，断面積，表面積等体形を正確に把握しなければならない．著者らは体形のスケッチから始めた．図4.14および図4.15にコイとティラピア^{注1}のスライド撮影例を示す．それぞれ上面図，側面図の2枚を示した．又図4.16にコイの体形のスケッチ例を示す．次に魚の頭部より適当に（1～2cm毎）に区分した各断面を楕円形とみなしてスケッチより得られる長径 a ，短径 b よ

^{注1} ティラピアはアフリカ原産の淡水魚で最近是国内でも温泉等を利用して養殖されている．沖縄へは戦後食料用に移入され，河川で普通に見られる程に繁殖している．

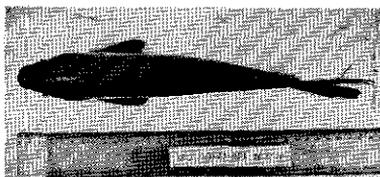


図4.14 コイのスライド撮影例
(No.20, $l = 28.6\text{cm}$)



図4.15 ティラピアのスライド撮影例
(No.3, $l = 23.4\text{cm}$)

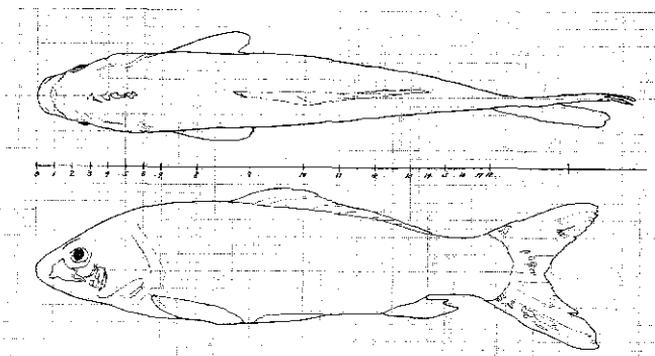


図4.16 コイの体形のスケッチ例 ($l = 28.6\text{cm}$)

り断面積 $A = \pi ab/4$ および周長 l を計算した^{注1}。さらに求めた楕円形を流体力学的に等価と考えられる円形に変換するための水力等価直径 de を次式によって計算した。

$$\text{等価直径 } de = \frac{4 \times \text{流れの断面積 } A}{\text{ぬれ線長さ } l} = \frac{\pi ab}{l} \quad (4.23)$$

^{注1} 周長の計算にはコンピュータが必要。

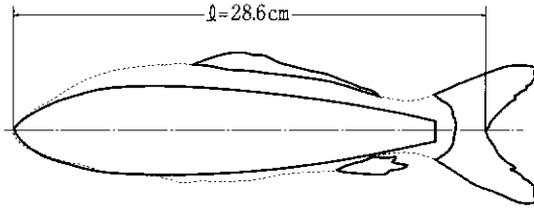


図4.17 コイの体形図 (実線は等価紡錘体)

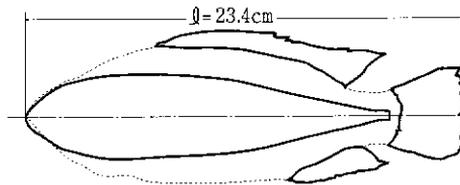


図4.18 ティラピアの体形図 (実線は等価紡錘体)

図4.17および図4.18にこのようにして求めた、コイおよびティラピアの体形図の例をそれぞれ示す。図中破線で示す輪郭が実際の胴体（長径 a ）の形状で、実線が計算で求めた水力等価直径の分布曲線である。すなわち実線は供試魚と流体力学的に等価な軸対称物体（紡錘体）の輪郭である。

供試魚の表面積 S は等価紡錘体の表面積に背びれ、尻びれおよび尾びれの表面積を加えて次式のように算出した。

$$S = \pi \int_0^l d e dx + S_1 + S_2 + S_3 \quad (4.24)$$

表4.1に供試魚22尾の計測結果を一覧表にして示す。表はティラピア、コイの順にまた体長の小さい順に並べてある。重量 W は実測値である。表より最大等価直径 $d_{e_{\max}}$ と体長の比の平均値は種によらず、

$$d_{e_{\max}}/l \doteq 0.21 \quad (4.25)$$

となることがわかった。これは後述するようにはほぼ尾びれの振動振幅に一致する。また体長の3乗と体重の比は

$$\text{ティラピア: } l^3/W \cong 60\text{cm}^3/\text{g} \quad (4.26)$$

$$\text{コイ: } l^3/W \cong 55\text{cm}^3/\text{g} \quad (4.27)$$

と両者に1割程度の差があることが認められた^{注1}。

表4.1 供試魚の体形

No	種	体長 l[cm]	最大等価直径 de _{max} [cm]	体表面積 S[cm ²]	最大面積 S _{ab} [cm ²]	重量 W[g]	S/l ²	de _{max} /l	l ³ /W [cm ³ /g]
1	ティラピア	21.3	4.27	230.13	16.38		0.507	0.200	
2	〃	23.2	5.94	322.73	30.61		0.600	0.256	
3	〃	23.4	4.56	261.42	18.96		0.477	0.195	
4	〃	23.8	4.77	352.03	21.04	223.1	0.621	0.200	60.43
5	〃	24.4	4.78	283.62	20.98		0.476	0.196	
6	〃	27.7	6.16	401.07	33.37	351.2	0.523	0.222	60.52
7	マゴイ	12.2	2.52	87.69	5.47	34.5	0.589	0.207	52.63
8	ニシキゴイ	17.0				122.2			40.24
9	〃	17.5	4.04	188.57	13.47	114.2	0.616	0.231	46.93
10	マゴイ	18.5				123.0			51.48
11	〃	18.8	4.02	186.17	14.19		0.527	0.214	
12	〃	19.5				134.3			55.21
13	〃	19.8				134.4			57.76
14	〃	19.9	4.10	211.16	14.27	132.5	0.533	0.206	59.48
15	〃	25.7							
16	〃	27.5				316.0			65.81
17	〃	27.7	6.25	423.15	32.30	458.1	0.551	0.226	46.40
18	〃	27.9	6.02	490.15	30.10	388.9	0.630	0.216	55.84
19	ニシキゴイ	28.0				480.2			45.71
20	マゴイ	28.6	5.31	396.68	23.81		0.485	0.186	
21	〃	36.2	7.00		43.51	842.2		0.193	56.33
22	〃	40.0				1109.0			57.71

注1 あくまで平均値であることに注意。なお例えば正方形物体ではこの値は1cm³/gとなるので、数値は魚の細長度 (slenderness) の指標と考えられる。

4.3.3 抵抗係数の比較

図4.19に回流水槽によって得られた魚の摩擦抵抗係数を示す。横軸は体長を代表長さとするレイノルズ数，縦軸は次式で計算した。

$$C_{fD} = \frac{D}{1/2\rho U^2 S} \quad (4.28)$$

ただし、 S は式(4.24)による魚の全表面積である。図中●印はコイ，□印はティラピア，△は次章で述べる機械魚の測定結果である。コイに較べてティラピアの計測レイノルズ数範囲が狭いのは，低レイノルズ数(低流速)領域では供試魚が尾びれと体を振動させることが多くなり中々安定したデータが得られなかったこと，および高レイノルズ数(高流速)領域では姿勢制御が困難となり，体が回転を始め測定不能となったためである。これはコイに比べ，ティラピアの胴体断面形状がより長軸の長い楕円形状であったためと考えられる。そのためティラピアの計測値は，一定の流速範囲毎に，計測値の平均値と分散を同時に示してある。

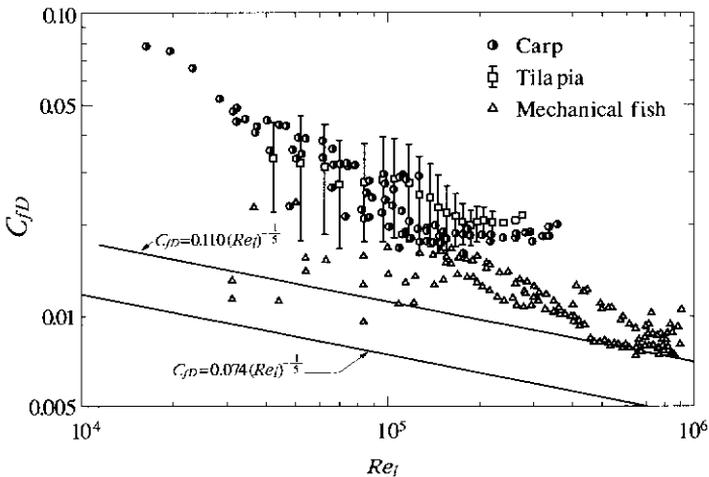


図4.19 回流水槽によって得られた魚の表面摩擦係数

図によれば、コイもティラピアも $Re = 2 \times 10^5$ 程度までは C_{fD} が Re と共に減少する右下がり傾向を示すが、それを過ぎると $C_{fD} \doteq 0.02$ のほぼ一定値になることがわかる。コイの計測値はティラピアの平均計測値よりも下側に分布している場合が多く特に高レイノルズ数領域で両者の抵抗に有意差があるようにも思われるが、本実験の範囲では断定できない。ただし金属表面を有する機械魚の場合、明らかにコイ、ティラピアより低い抵抗係数を示しており、特に高レイノルズ数領域でそれは顕著になっており、 $Re = 10^6$ 付近において $C_{fD} = 0.008$ 程度にまで減少することがわかった。

図中下部の直線は第2章で述べた平板の摩擦抵抗係数で、乱流境界層の場合の半経験式である。同式によれば $Re = 2 \times 10^5$ のとき $C_{fD} = 0.0064$ となるが、コイやティラピアの計測値はその約3倍になることがわかる。平板抵抗と紡錘体抵抗を直接比較することには疑問も残るだろうが、機械魚との比較においても、生きた魚に加わる流体抵抗が、剛体のそれを下回るという事実は本実験の範囲で確認できなかった^{注1}。

ただし、レイノルズ数が 10^7 以上に達するサメやイルカ的高速遊泳時の抵抗については、前章で述べたリプレットの効果等が未解明であり、この問題はなお研究が残されていると言わなければならない。

4.3.4 映画による泳運動の観察

琉球大学では次に、回流水槽を用いて淡水魚の泳動を直接詳細観察することを試みた。表4.1に示したコイとティラピアのほぼ全てについて実験を行った。実験は回流水槽測定部に数尾の魚を入れて自由に泳がせて

^{注1} 前述の東⁽³⁾も著書らのこのデータ及びライトヒルの見解⁽³¹⁾を引用して、本文と同様の結論を導いている。

おき、測定部流速を段階的に上昇させて映画撮影を行ったものである。供試魚は著者らの期待通りに流れに逆らって上流側へ良く泳ぐことがわかった^{注1}。巻頭写真9は16mmフィルムに撮影された映画の一コマである。同写真より解るように、測定部下方に45°傾斜した鏡を設置し、供試魚体軸の動きも同時に撮影できるよう工夫してある。撮影は毎秒48コマの高速撮りで行った。

図4.20にコイの泳運動の1周期分を示す。図はフィルムを4コマおきに並べたもので1周期は約0.6secの場合である。このときの相対流速すなわち遊泳速度は45.90cm/sであり、体軸進行波運動の波速は60.66cm/sと計測された。流速と波速の比

$$u/c = 0.757 \quad (4.29)$$

を前章の細長物体理論における効率式(3.29)に代入すると、

$$\eta = 0.88 \quad (4.30)$$

となり、計測値と同理論の整合性は高いように思われる。

図4.21は同じ映画より、コイの背筋の運動を1コマ毎にとって重ね合わせたものである。本図によって、

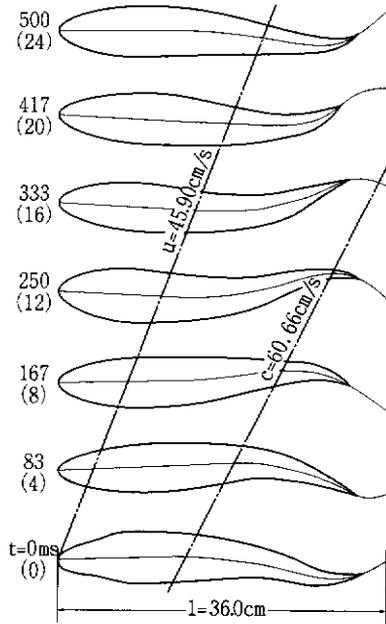


図4.20 コイの泳運動の1周期
($u = 45.90\text{cm/s}$, $f \doteq 1.7\text{Hz}$)

^{注1} 測定部上流側には整流格子，下流側は金網によって魚の逃亡は阻止される。

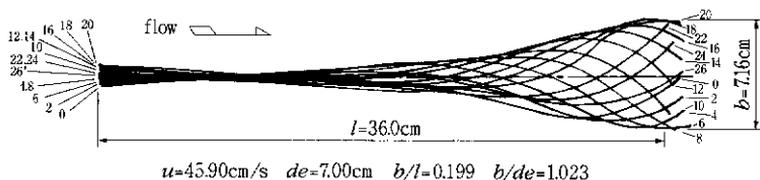


図4.21 コイの背筋の1コマ (1/48秒) 毎の重ね合わせ

- (i) 尾びれの振動振幅は体長のほぼ20%であり、ウグイ、マス等によるBainbridgeの観察結果⁽³²⁾と一致する。
- (ii) 胴体の最大水力等価直径と尾びれの振動振幅は同程度である。
($b/de = 1.023$)
- (iii) 体軸の運動が体の後半部分に集中し、後端における振動振幅の勾配がほぼ零になるのは、ライトヒルが予想した効率の良い細長物体運動のそれと良く一致する。
- (iv) 観察によれば、泳運動中供試魚の先端部(口吻)もわずかに左右に振動する。

等が明らかになった。

図4.22にコイの泳動速度，図4.23にティラピアの泳動速度を，それぞれ横軸に尾びれの振動周波数，縦軸に体長比速度をとって示す。供試魚の体長はコイの場合12～40cm，ティラピアで21～28cmの範囲で変化しているが，実験結果は体長に関係なく体長比速度によって整理できることがわかった。さらに，計測値はかなりばらついているものの，その平均値はほぼ原点を通る直線で近似できるように思われる^{注1}。平均直線からのずれは，振動周波数が大きい程すなわち速度が大きい程顕著であ

^{注1} この点についてBainbridgeは負の y 切片すなわち尾びれを振動しても速度を有しない場合があると報告しているが，その根拠は定かではない。

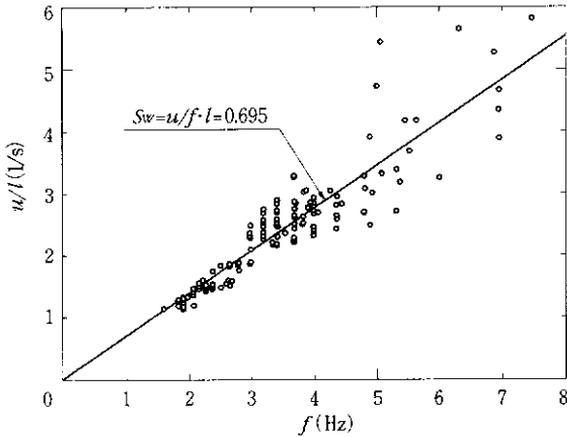


図4.22 コイの泳動速度 (体長 $l = 12 \sim 40\text{cm}$)

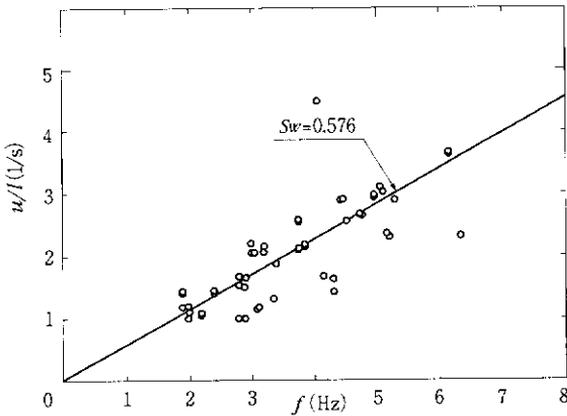


図4.23 ティラピアの泳動速度 (体長 $l = 21 \sim 28\text{cm}$)

るが、これはこの領域の泳運動の非定常性による。すなわち水流に抗して魚が加速運動をしているときには u/l を小さく、又水流に抗しきれず魚が減速している場合には u/l の計測値を大きくしたためと考えられる。

二つの図によってこの2種の淡水魚の無次元遊泳速度すなわち泳動数

(Swimming number) はそれぞれ

$$\left. \begin{array}{l} \text{コイ:} \\ \text{ティラピア:} \end{array} \quad Sw = \frac{u}{f \cdot l} = \begin{array}{l} 0.695 \\ 0.576 \end{array} \right\} \quad (4.31)$$

となることがわかった。泳動数は両図の平均直線の勾配として定義されるが、泳運動に即して説明すると「尾びれ運動の1周期によって進行する距離の対体長比」ということになる。実験した範囲で Sw は種毎に一定であるように思われるので、著者は Sw によってその種の遊泳能力が表示されると考えた。

Bainbridge の論文⁽³²⁾ によれば3種の淡水魚が、大振幅高速運動を行う場合の $u/(f \cdot l)$ の平均値としてそれぞれ次の数値を示している。

$$\left. \begin{array}{l} \text{ウグイ (dace, } f > 5): \\ \text{マ ス (trout, } f > 5): \\ \text{フ ナ (goldfish, } f > 3): \end{array} \quad u/(f \cdot l) = \begin{array}{l} 0.63 \\ 0.62 \\ 0.61 \end{array} \right\} \quad (4.32)$$

著者らの結果と比較すると、上記3種の魚はティラピアよりやや遊泳能力が優れているが、コイのそれに較べると有意に低いということができる。コイはその他の淡水魚に較べて10%以上の高い遊泳能力を有するよう思われる^{注1}。

4.4 イルカの泳運動の観察

4.4.1 国営沖縄記念公園水族館

沖縄県では1975年(昭和50年)国際海洋博覧会が開催された。博覧会場は国頭郡本部(もとぶ)町の海岸地帯に約77haを造成して建設され

^{注1} コイの遊泳能力が高いのは日本人なら誰でも納得しそうであるが、後述の渡辺譲氏によればLighthillは「英国ではコイは鈍い魚(dull fish)と呼ばれる」と話している。

た。博覧会終了後はその全敷地が国営沖縄記念公園として整備され、水族館、植物館(熱帯ドリームセンター)、アクアポリス等を主要設備として運営し今日に至っている。水族館に付属するオキちゃん劇場とイルカスタジオは、イルカの泳運動を研究する筆者らに絶好の観察フィールドを提供してくれた。

図4.24と図4.25にオキちゃん劇場とイルカスタジオの様子をそれぞれ示す。オキちゃん劇場は長径25m、短径15mの楕円形水槽で水深4m、イルカスタジオは直径14mの円形水槽で水深3mである。両施設は導管(兼イルカの通路)で連結されている。また両施設と水族館大水槽の海水は毎時300tonの割合で新鮮な海水と常に交換されている。図4.25でわかるようにイルカスタジオ水槽の観客席側は幅8mの平板壁面となっており、壁面にはめ込まれた幅7m、高さ1.8mの透明アクリル板により水中のイルカの泳運動が良く観察できるようになっている。

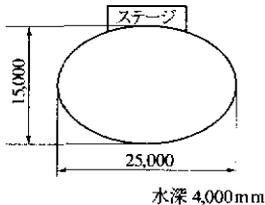
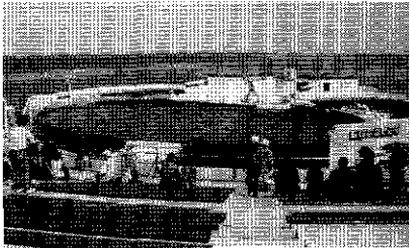


図4.24 オキちゃん劇場とその形状・寸法

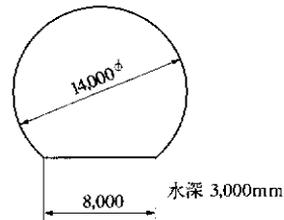
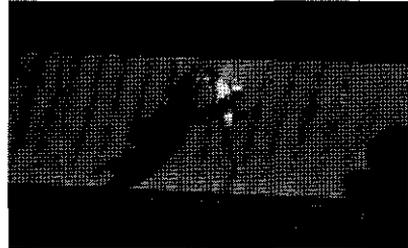


図4.25 イルカスタジオとその形状・寸法

4.4.2 イルカの体形

表4.2に観察したミナミバンドウイルカ、バンドウイルカ、オキゴンドウクジラおよびカマイルカの体形諸量を示す。表4.1と同じく体長の順に整理した。表中例えばミナミバンドウイルカのオキ(1)、オキ(2)とあるのは、(1)が1979年6月現在の体長、体重であるのに対し、(2)は1995年11月現在のそれである。特にオキの場合この16年間に身長は24cm、体重で59kg増加したことになる^{注1}。

表よりミナミバンドウイルカの体形指標である l^3/W の平均値は88.7 cm^3/g になることがわかった。前節で示したティラピアの60、コイの

表4.2 イルカの体形 (沖縄記念公園水族館)

No	種	愛称	性	体長 l[cm]	重量 W[kg]	l^3/W [cm^3/g]	
1	カマイルカ	モト	♀	200	89	89.89	
2	<i>Lagenorhynchus obliquidens</i>	トッポ	♂	202	96	85.86	
3	ミナミバンドウイルカ	パル	♀	206	102	85.70	
4		オキ(1)	♀	209	114	80.08	
5		クロ(1)	♂	225	130	87.62	
6		ボイ(1)	♂	230	138	88.17	
7		ボイ(2)	♂	235	168	77.25	
8		<i>Tursiops truncatus aduncas</i>	オキ(2)	♀	233	173	73.12
9			ムク(1)	♂	236	120	109.54
10			ダン(1)	♂	237	148	89.95
11			ダン(2)	♂	258	202	85.02
12			クロ(2)	♂	258	171	100.43
13		ムク(2)	♂	259	175	99.28	
14	バンドウイルカ	トク	♀	262	218	82.50	
15	<i>Tursiops truncatus gilli</i>	シロ(1)	♂	277	264	80.51	
16	オキゴンドウクジラ	ビー	♂	347	483	86.51	
17	<i>Pseudorca crassidens</i>	ゴン	♀	361	483	97.40	

*愛称のあとの(1)は1979年6月現在、(2)および注無しは1995年11月現在のもの。

注1 オキちゃん劇場のオキは当時子イルカだったこのイルカの愛称に由来する。

55cm³/gと比較すれば、筆者らの予想に反してイルカはより細長(slender)であることがわかった。個体数は少ないが、バンドウイルカ81.5, オキゴンドウクジラ92.0, およびカマイルカの88.0cm³/g等はミナミバンドウイルカのそれに前後しており、このクラスの大きさの海洋哺乳類の仲間(鯨・イルカ類)はほぼ互いに相似な体形を獲得していると考えられる。

4.4.3 イルカの泳運動

図4.26は16mmフィルムで撮影(48コマ/秒)したイルカの泳運動の1周期分を5コマ毎にスケッチしたものである^{注1}。この場合、図中に示すように遊泳速度は2.4m/s, 1周期は0.708secであった。体長 $l=2.3\text{m}$ を用いると、泳動数は $Sw = 0.74$ と計算される。なおコイの場合と同様に体中心軸(側線)の進行波運動波速を決定しようとしたが、その運動が上下対称ではないため、容易に決定することができなかった。

図4.27に同じ運動の1周期分の体中心軸の動きを3コマ(1/16秒)毎に重ね合わせて示す。本図によってイルカの泳運動は淡水魚のそれとは大きく異なり、

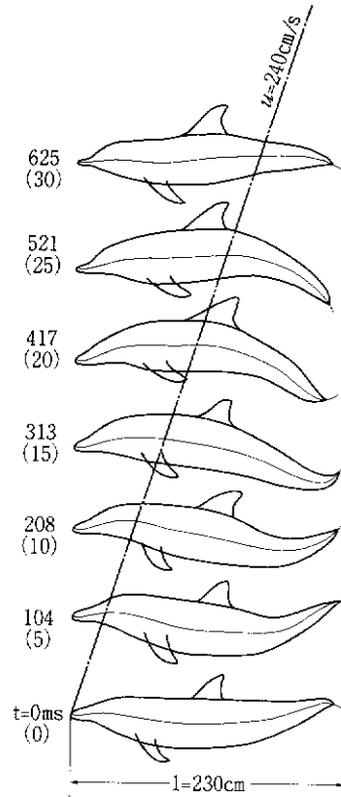


図4.26 イルカの泳運動の1周期
($u = 2.4\text{m/s}$, $f = 1.41\text{Hz}$)

^{注1} イルカスタジオで撮影。実際は腹を上にする背泳であったが、見やすくするため、正常姿勢にして表示した。

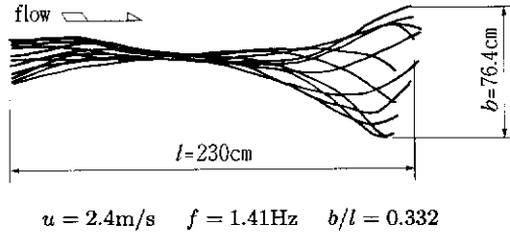


図4.27 イルカの体中心軸の3コマ (1/16秒) 毎の重ね合わせ

- (i) 体中心軸および尾びれの振動が上下対称ではない。
- (ii) 体後半部の振動振幅勾配が魚に比べてかなり急である。
- (iii) 尾びれの振動振幅は体長の33%に達し、魚に比べてかなり大きい。
- (iv) 体中心軸の振動は胴体の最大断面積近傍を節とする一次モード振動であり、頭部の振幅も比較的に大きい^{註1}。

などの特徴が観察される。

進化論的には、イルカ類はいったん陸上に上がった歴史をもつ哺乳類であり、骨格的にも魚類とはかなり異なるために上のような泳法の差が出たと説明できるが、細長物体理論でライトヒルが推奨した効率の良い運動でないことは明かである。

著者らはこのイルカの運動をむしろ振動翼推進運動の典型と理解している。すなわち、細長い魚のように体全体で推力を発生するのではなく、尾びれのヒービングアンドピッチング運動で推力のほとんどすべてを発生しているととらえている。イルカ胴体のほぼ背びれより後方にある部分は、尾びれにヒービング運動を与えるアームと考えて良いのではなからうか^{註2}。グラビア写真5や6からもわかるように、このアーム部分は

^{註1} ヒトのバタフライに例えると1ビート泳法に相当すると思われる。

^{註2} アームあるいは振動板については前章第3.4節を参照。

上下運動に対して抵抗の小さい板状になっており、また振動翼である尾びれはアーム板に対して直角に取り付けられていることがわかる。

なお、イルカの胸びれは哺乳類の手が進化したもので内部に骨格を有するが、背びれおよび尾びれの翼部分には骨格が存在しないことも注目に値する。イルカ・クジラ類はその進化の過程において高速遊泳の必要に迫られ、独自に筋肉組織を発達させ、大きな背びれと翼型尾びれを骨格無しに獲得したといえる。背びれおよび尾びれの断面形状がいずれも流体力学的に高性能の対称翼型であることはいうまでもない。

図4.28にイルカスタジオで撮影された映画より、尾びれ振動数と体長比速度の関係を示す。観察した個体数と回数が限定されているので、図4.22に示したコイの場合に較べてデータ数はかなり少ないが、本図によってもイルカの泳動速度はほぼその体長と尾びれの振動周波数に比例することがわかった。図中ほぼ同じ比速度において周波数の違う計測点が何組かあるのは、同一個体同一運動において、進行速度はほぼ一定であるにもかかわらず尾びれの振動周期が変化することを示している。逆にいうと、イルカ達は尾びれの振動周期を絶えず変化させながら一定速度を維持しているのかも知れない。本図によってミナミバンドウイルカの遊泳能力を示す泳動数は、

$$Sw = 0.818 \quad (4.33)$$

と特定された。この値はフナやティラピアの約0.6、コイの約0.7に比べ

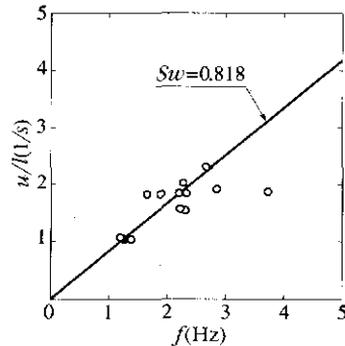


図4.28 イルカの泳動速度
(イルカスタジオ)

てさらに有意に大きく、予想通りイルカ類の高い遊泳能力を示したものと見える。

4.4.4 イルカの最高速度

イルカスタジオの観察に続き、著者らはオキちゃん劇場におけるイルカの種々のジャンプを撮影し解析した。

図4.29にイルカのバー越えジャンプ時の連続スケッチを示す。図は毎秒48コマで撮影した映画より10コマ(208ms)毎にスケッチしたものである。体長2.3m、体重138kgのイルカ(ポイ(1))で重心の到達高さは2.73mと測定した。ジャンプ時のイルカの最高速度は水中から飛び出す時のそれと考えられるが、その計算方法として、(1)到達高さ h による($v_0 = \sqrt{2gh}$)、(2)滞空時間 T による($v_0 = gT/2$)、および(3)体長をスケールとして水面から体長が抜け出す時間を計る、の3方法が考えられる。著者らは3通りの計算を全て試み3者の相違は最大10%程度になることを確かめた。その上で第3番目の体長をスケールとする方法が最も確からしく思えたのでそれを採用することにした。図の場合、本方法によ

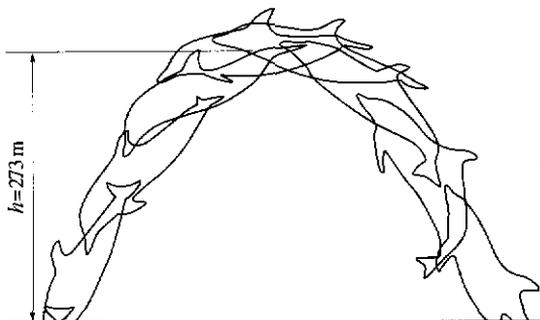


図4.29 イルカのバー越えジャンプ ($l = 2.30\text{m}$, $W = 138\text{kg}$)

る速度が最も小さくなったが6.50m/sと判定した。体長比速度 u/l は2.83となる。

図4.30は、体長2.77m、体重264kgのイルカ（シロ）のハイジャンプを前図と同様の方法でスケッチしたものである。この場合、水中から飛び出す瞬間は撮影できていないが、重心の到達高さ4.52mより計算できる初速度は9.41m/sになることがわかった。体長比速度 u/l は3.40にも達する。

本書第1章で紹介したようにLangは体長1.86mのマダライルカ（*Stenella attenuata*）の最高速度を11.05 m/s(21.5kn)と記録している⁽³³⁾。また伝聞によれば、外洋のイルカは30 kn(15.4m/s)又はそれ以上の速度で泳ぐといわれている^{注1}。著者らが水族館職員の方々にできるだけ高いハイジャンプ等特別の演技をお願いしたのは、ジャンプの際の脱出速度によって何とか伝聞に近い最高速度を記録しようとしたものであった。しかし、結果は上述のシロのハイジャンプ時の脱出速度9.41m/sが最も早い推定記録で、期待に反して10m/sを越えるデータは得られなかった。

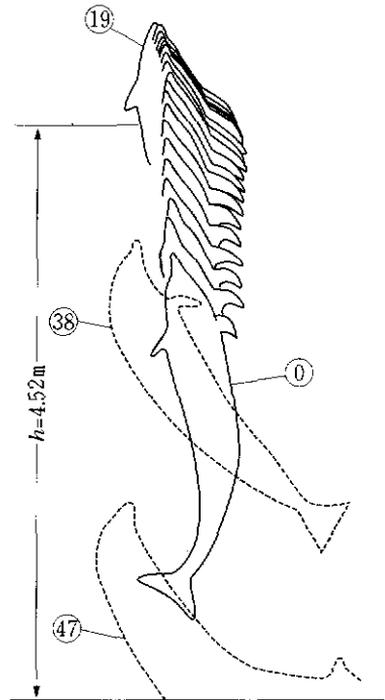


図4.30 イルカのハイジャンプ
($l = 2.77\text{m}$, $W = 264\text{kg}$)

^{注1} 30kn以上の速度は現状では伝聞でしかないと言われている。ただし、ギネスブックは、1958年10月12日東太平洋で体長6～8mのシャチ（雄）が時速55.5km(30kn, 15.4m/s)で泳ぐのが観察されたと記載している⁽³⁴⁾。

今回、本書出版の企画が動き始めたときから、著者らの興味は当然イルカの最高速度にあったので、沖縄記念公園水族館を約15年振りにたずね、諸資料を収集することにした。田中・永井の両著者、琉球大学照屋功助手、同大学院生（喜納君と中井君）、学部生（原田君と吉嶺君）及びシップアンドオーシャン財団福井義人部長と菊地由美子氏の計9名による水族館訪問が実現したのは1995年11月23日と24日の両日であった。1975年の国際海洋博覧会当時より同館を指導し、例えばジンベエザメの世界最長飼育記録等数々の記録を残してきた、内田詮三館長、長崎佑飼育室次長を始め職員の方々は、15年前と変わらず著者らの研究に理解を示され、心よく取材に応じて下さった^{注1}。著者らの驚きの一つは、“オキちゃん”がその身長・体重を大きく伸ばしたことと共に、イルカ達の大半が20年間の長きに渡って現役を続けていることだった。内田館長によれば、長期に渡り演技のレベルを維持することが最も難しいとのことである。見た限り、その面でも同水族館の飼育技術は世界最高水準にあるように思われた。

表4.3に今回得られたイルカの遊泳能力を示す。イルカスタジオにおけるもので演者はミナミバンドウイルカのクロとムクである。今回はすべてビデオテープによる記録と解析で、速度はイルカの体長をスケールとし定点を通過する所要時間から計算する方法に統一した。ジャンプ時の速度と周波数は水面から脱出する際のそれである。

本表により今回イルカの平均泳動数は背泳運動で0.79、ジャンプ時に0.88となった。全8回の演技の平均は0.81で、図4.28に示した平均泳動数0.818とよく一致する。すなわち、イルカの泳能力及び著者らの計測

^{注1} 11月24日は休館日にもかかわらず対応され、著者らの注文に応じて、再び特別の演技を披露して下さい。

表4.3 イルカの遊泳能力 (イルカスタジオ, 1995)

No.	イルカ	演技	速度 U (m/s)	U/l	f (Hz)	Sw
1	クロ (2)	背泳	4.46	1.73	2.01	0.86
2	$l=2.58$ (m)		3.56	1.37	2.07	0.67
3			3.20	1.24	1.88	0.66
4	ムク (2)	背泳	5.17	2.00	2.26	0.88
5	$l=2.59$ (m)		4.50	1.74	2.10	0.83
6			4.33	1.67	2.07	0.81
平均			4.20	1.63	2.07	0.79
7	クロ (2)	ジャンプ	7.74	3.00	3.17	0.95
8	ムク (2)	ジャンプ	7.35	2.83	3.44	0.82
平均			7.55	2.92	3.31	0.88

技術共にその再現性が確認された。ただし今回の新たな知見は、ジャンプ時すなわち高振動周波数時の泳動数がかなり高いということである。図4.28では高周波数時のそれはかなり低く全体の平均値を落としていた。撮影方法の違いによると思われるが、今回のビデオ撮影の方により信頼性があるとすれば、イルカ達は3Hz以上の高い周波数領域まで、少なくとも0.82程度の高い泳動数を維持しているといえる。当然のことだがマグロ、カツオ等も含めて彼らの最高速度は、その最大周波数とその時の泳動数によって決定される^{注1}。

次に表4.4に、オキちゃん劇場でビデオカメラにより記録されたイルカ達の最高速度を示す。速度の判定方法は前表と同じであり、いずれも水面から脱出する際の移動速度である。多数回の記録の中から各個体毎に最も早い速度を表に掲げた。表中シロのみ1979年の採取データで、前述ハイジャンプ時の推定最高速度である^{注2}。

表より明らかなように、今回も10m/sを越える最高速度は得られず

^{注1} ギネスブックによるシャチ($l \approx 7m$)の最高速度15.4m/sは $Sw = 0.82$ として $f = 2.7\text{Hz}$ となる。もし Sw が小さければ、 f をより大きくしなければならない。

^{注2} バンドウイルカのシロは惜しくも1983年に他界した。

表4.4 イルカの最高速度（オキちゃん劇場，1995）

イルカ	体長 l (m)	演技	速度 (m/s)	U/l	推定周波数 (Hz), ($Sw=0.82$)
モト	2.00	ハイジャンプ	8.57	4.29	5.23
トップ	2.02	スクリュージャンプ	8.99	4.45	5.43
トク	2.62	ボウジャンプ	7.74	2.95	3.60
シロ*	2.77	ハイジャンプ	9.41	3.40	4.14
ゴン	3.61	ハイジャンプ	7.47	2.07	2.44

*シロは1979年のデータ

8.99m/sが最高であった。しかし、カマイルカのトップによるこの記録こそ、今回の大収穫だったといえることができる。すなわち体長約2mと最も小さなこのイルカ（pacific white-sided dolphin, 表紙絵参照）の最高速度は体長比で4.45にも達するのである。泳動数を0.82と（高目に）仮定してもその推定周波数は5.43Hzと計算される。実はカマイルカはかなり早いという伝聞は以前からあったのであるが、少なくとも著者らがこの種を記録したのは今回がはじめてであった^{注1}。

読者もただちに気付くと思うが、もし他の種のイルカ達もカマイルカと同様に最高5Hzの振動周波数を達成できるのであれば、その時の速度は優に10m/sを越えるであろう。すなわち表中のシロ（バンドウイルカ、 $l = 2.77\text{m}$ ）とゴン（オキゴンドウクジラ、 3.61m ）にこれを適用すると、11.4m/sと14.8m/sがそれぞれ推定されるのである。

今回の調査であと一つ気付いたことを付記すると、イルカスタジオとイルカ劇場の大きさの違いは、その深さのみでなく広さもイルカ達の最大脱出速度に影響しているらしいということである。表4.3と表4.4の比較ではその違いは明瞭ではないが、イルカ劇場では、より高いジャンプ

^{注1} カマイルカの2頭は前回調査のあと1979年と84年に搬入され、訓練の後仲間に加わっている。今回の秘かな取材目標の一つであった。

を要求される程彼らはより長時間、長距離の助走を行っていることに気が付く。“スクリュージャンプ”を要求されたトッポは、観客にすれば一体何処から飛び出すのか解らなくなる程助走距離と時間をかけた後、突然、舞台全体を使うような軌跡を描いて飛行するのである（グラビア写真参照）。助走距離に関するこの観察が当を得ているのであれば、体長に比べて最も広い舞台を与えられたカマイルカの最高速度、及び上述の最高速度に関する推論も十分その根拠があるといえよう。

4.5 淡水魚およびイルカのパワーの推定

それでは本章の最後の課題として、淡水魚およびイルカのパワーを推定することを試みよう。

まず淡水魚に加わる流動抵抗は図4.19で見たように剛体表面を有する物体に較べて低いという現象は認められなかった。そこでまず体長28cm 体重390gfのコイを一つのサンプルとしてその抵抗およびパワーを次のように推定する。表4.5に典型的なコイの体形を示す。このコイが最高速度に近い状態で泳ぐ場合の速度として、図4.22より尾びれの振動周波数を5Hz、泳動数 $Sw = 0.7$ とすれば

$$u = Sw \times f \times l = 0.7 \times 5 \times 0.28 = 0.98 \text{ m/s} \quad (4.34)$$

が得られる。体長比速度 u/l は3.5、この時のレイノルズ数は

表4.5 典型的なコイの体形

体長 $l = 28 \text{ cm}$	体重 $W = 390 \text{ gf}$
胴体最大断面積	$S_{ab} = 30.0 \text{ cm}^2$
同上長径, 短径	$a = 7.5 \text{ cm}, b = 5.1 \text{ cm}$
同上等価直径	$de = 6.0 \text{ cm}$
体表面積 (ひれを含む)	$S = 490 \text{ cm}^2$
$l^3/W = 56 \text{ cm}^3/\text{gf}$	$S/W^{2/3} = 9.18 \text{ (cm, gf)}$

$$Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu} = 2.74 \times 10^5 \quad (4.35)$$

である。そこで図4.19によればこのときの摩擦抵抗係数およびコイに加わる流体抵抗はそれぞれ

$$c_f = 0.0179 \quad , \quad D = 43 \text{ gf} \quad (4.36)$$

と読みとれる^{注1}。そうすると同コイが推進のために消費すべきパワーおよび体重当たりのそれは効率を100%として

$$P = D \cdot u = 0.413\text{W}(42.1 \text{ gf} \cdot \text{m/s}) \quad (4.37)$$

$$P/W = \frac{0.413}{0.390} = 1.06 \frac{\text{W}}{\text{kgf}} = 0.108 \text{ m/s} \quad (4.38)$$

とそれぞれ決定される。後のために、式(4.35)と(4.36)より乱流境界層を考え c_f と Re の関係を計算すると次式が得られる。

$$c_f = 0.219 Re_l^{-\frac{1}{5}} \quad (4.39)$$

上の数字を少し平滑化すると、コイは約0.5Wの消費パワーで約1m/sの高速度遊泳を達成するといえる。コイの消費熱量から筋肉力への変換効率および泳動効率等を考慮してもコイの体重当たり消費熱量を2.0W/kgf程度と見積もれば、上述の遊泳速度は十分達成可能と考えられる。

後述するようにヒトやイヌの体重当たり発生パワーはおおよそ10W/kgf(1.02m/s)といわれているので、コイにはまだ十分の余裕があるといえる。コイについてはグレイのパラドックスは存在しない。

^{注1} 抵抗は実験曲線からも直接求められるが、測定誤差を考慮して $43 \pm 2 \text{ gf}$ と推定した。

次に典型的なイルカの体形として、体長2.3m、体重138kgfを採用しよう。表4.6にその他の諸元も併せてそれを示す。前にも述べたように、本表と表4.5の l^3/W を比較するとコイよりもイルカの方がよりスマートであることがわかる。そこで実測していないイルカの体表面積を推定するのに、 l^2 に比例するとせず $W^{2/3}$ に比例すると考える方法を採用した。すなわち表中のイルカの表面積 S はコイの $S/W^{2/3}$ の値より計算により求めたものである^{注1}。

さて、前節で見たようにイルカの泳動数はほぼ0.82と推定することができるが、その到達最高速度は7m/sから10m/sの範囲で観察結果もバラついている。そこで、ここではモデルイルカの尾びれの振動周波数が4.0Hz($u = 7.54\text{m/s}$, $u/l = 3.28$)と、5.0Hz($u = 9.43\text{m/s}$, $u/l = 4.1$)の場合の二通りについてイルカのパワーを推定することにした。

表4.6 典型的なイルカの体形とパワーの推定

体長 $l = 2.3 \text{ m}$,	体重 $W = 138 \text{ kgf}$	
$l^3/W = 88.2 \text{ cm}^3/\text{gf}$		
体表面積の推定値 $S = 2.45 \text{ m}^2$ ($S/W^{2/3} = 9.18$ より計算)		
泳動数 $Sw = 0.82$		
尾びれ周波数 f	4 Hz	5 Hz
速度 u	7.54 m/s	9.43 m/s
レイノルズ数 Re_l	1.73×10^7	2.17×10^7
摩擦抵抗係数 c_f $c_f = 0.219(Re_l)^{-1/2}$	7.81×10^{-3}	7.44×10^{-3}
抵抗 D	52.9 kgf	82.7 kgf
推進動力 P	3.91 kW	7.64 kW
体重当たりパワー P/W	28.3 W/kgf 2.89 m/s	55.4 W/kgf 5.65 m/s

^{注1} 結論との関係でいえば、イルカの体重当たりパワーを過大評価しない措置といえる。

表4.6にはその計算結果も示してある。表によれば、イルカの最高速度近傍のレイノルズ数は 2×10^7 程度、摩擦抵抗係数は $0.007 \sim 0.008$ の程度であり、全流体抵抗は $50 \sim 80 \text{ kgf}$ になると推定される。さらに泳動のための消費パワーは 3.9 kW と 7.6 kW にも達することがわかる。速度がそれぞれ 7.54 m/s と 9.43 m/s で 1.25 倍の差であるのに対し、所用パワーの比が 1.95 倍にも拡大するのは、パワーが速度の3乗に比例するからに他ならない。

次に二つの速度の場合について体重当たりパワーを見るとそれぞれ 28.3 W/kgf (2.89 m/s) および 55.4 W/kgf (5.65 m/s) なる推定値が得られた。これは前述のコイの場合に較べて、 27 倍から 52 倍ものきわめて大きな値ということになる。文献(2)のLangらは体長 $1.86 \sim 2.09 \text{ m}$ 、体重 $52.7 \sim 91 \text{ kg}$ の、モデルイルカより一回り小さい、3頭のイルカについて観察を行いそのパワーを $250 \sim 461 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$ ($2.5 \sim 4.5 \text{ kW}$) と推定している。そこでその平均体重を 90 kgf とすれば体重当たりパワーは $2.8 \sim 5.1 \text{ m/s}$ となるので著者らの推定値との間に大きな違いはない。

生理科学の書によればヒトの体重当たり発生パワーは約 1.0 m/s (9.8 W/kgf) とされている。例えば体重 60 kg のスポーツ選手に一生懸命ペダルをこいでもらって発電機の発生電力からパワーを推定すると約 500 W が平均的な最高出力とされている。谷⁽³⁵⁾はヒトでも瞬間的には全身を使って1馬力 (736 W) は出るとの推論を紹介している。この二つの出力より体重当たりパワーを計算すると 0.85 m/s (8.3 W/kgf) および 1.25 m/s (12.3 W/kgf) が得られる^{註1}。

註1 谷はこれらの値をさらに 0.4 で割ることにより、筋肉当たりの最大出力を 3.0 m/s としているので注意。体重当たり最大パワーは $0.6 \sim 1.2 \text{ m/s}$ の間としている。

ヒトの出力を検証するために、永井は琉球大学工学部ビルの外階段を使って学生に全力でかけ昇るという実験を試みてもらったところ、身長 177 cm、体重 74 kg の男子学生（23才）で最高 589 W の値を得ている。すなわちイルカと同様哺乳動物であるヒトの場合その最高出力を高々 750W と見積もることは決して過小評価ではないと考えられる^{注1}。

表 4.4 に示したモデルイルカが 7.5m/s で泳ぐことはほとんど間違いなく、しかもこの程度の速度であれば1分間程度の持続も十分可能と考えられるが、その体重当たりパワー 2.89m/s はヒトのそれに比べて3倍近く高いといわなければならない。すなわち、グレイのパラドックスはやはり未解決であるといえよう。第1章の図 1.5 に見たようにイルカやマグロ、カジキの類は推定値以上の高速を実現しているように見える。しかし、パラドックスはいずれにせよ解決されるべきものとの信念に基づけば、解決に至る道はやはり次の2点、すなわち

- (1) イルカやカジキの表皮もしくは泳動運動時の流体抵抗は、剛体表皮もしくは無泳動曳航実験で得られる値よりも小さい。
- (2) イルカやカジキの体重当たり発生パワーはヒトの3倍以上で 3 ~ 5m/s が可能

のいずれかということになる。

問題を再整理するために図 4.31 を作成した。図は、縦軸、横軸共に図 1.5 と同一であるが、観測値として、表 4.5 と表 4.6 に示した典型的なコイとイルカ、シロナガスクジラおよびバショウカジキの4例のみを示した。図中実線は、上の議論とは逆に動物の体重当たり発生パワーを全て 1.0m/s(9.8 W/kgf) と先に限定した上で計算した速度の推定値である。すなわち、動物の体型を全てイルカ（およびコイ）と相似とし、

^{注1} 750 W は、しかし、1馬力に相当することも忘れてはならない。

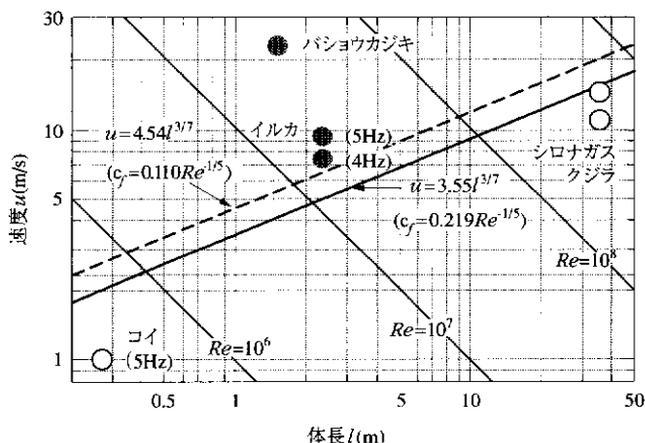


図4.31 速度と体長の関係。実線と破線は体長当たりパワーを $9.8\text{W/kgf}(1.0\text{m/s})$ と仮定した場合の推定最大速度

$$\left. \begin{aligned} l^3/W &= 88.2\text{cm}^3/\text{g}, S/W^{2/3} = 9.18(\text{cm}, \text{g}) \\ c_f &= 0.219(Re_l)^{-1/5}, P = \frac{1}{2}c_f\rho u^3S \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

の諸関係および

$$P = 9.8 \left(\frac{\text{W}}{\text{kgf}} \right) \times W(\text{kgf}) = 9.8 W(\text{W}) \quad (4.41)$$

より、 u と l の関係を

$$u = 3.55l^{3/7} \quad (4.42)$$

と求めたものである。イルカの体表面境界層を乱流境界層と考えているので図1.5と同じく $u \propto l^{3/7}$ の関係が成立している。

図より推定値と観察値の比較を行うと、先に見たようにコイの観測値およびシロナガスクジラのそれは、推定値より小さく、まだパワー的に

余裕があるといえるが、イルカとバショウカジキの速度は、予想速度よりも約1.5倍またはそれ以上に速いと言わなければならない。

なお、図中破線は、摩擦抵抗係数として式(4.40)のそれに代えて、図4.19に示した剛体表皮模型の抵抗係数

$$c_f = 0.110Re_l^{-\frac{1}{5}} \quad (4.43)$$

とした場合の速度の推定値

$$u = 4.54l^{\frac{3}{7}} \quad (4.44)$$

を示したものである。剛体表面を想定することによって、予想速度は3割程度増加するが、これによってもなおイルカおよびバショウカジキの観測値を説明することはできない。

以上、本章の結論として著者らは改めてグレイのパラドックスが未解明であることを表明する。今後の研究として、非常に困難だが、高速遊泳状態における水棲動物表皮の低抵抗性の証明、あるいはきわめて高い体重当たり発生パワーの証明の二つの課題が共に残されているといえよう。

谷は、魚について筋肉当たり6～7 m/sのパワーが可能かと自問し、「ある人々は魚の筋肉が人間に比べて数倍のパワーを出すのであったら、それに従って熱の発生も酸素の摂取も激しくなり、心臓や血管に過重の負担が加わることになろうと心配する」と述べ、その可能性を否定しているように見える。ところが、著者らはこれに関連して、高速遊泳直後のカツオが火傷を負うほどに加熱されているらしいという驚くべき情報を入手し、それについて調べたのでその顛末を以下に紹介しておこう。

国営沖縄記念公園水族館魚類主任の照屋秀司氏は、毎年水族館展示用

のカツオやマグロを採取するために、近在のカツオ船に同乗しているが最近そのときの模様を次のように記述している^{注1}。

水しぶきとともに海面が踊りだしてきた。カツオはそこまできているのだ。船首ではまず最初のカツオが釣れる。すると一齐に竿が上下に動きはじめ、甲板にカツオが飛び込んでくる。いや、空から降ってくるという表現が正しいかもしれない。

もちろん水族館の飼育係は、全員ヘルメット着用の完全武装である。カツオの体表は手で触っただけでも火傷(やけど)のようにただれ、甲板で暴れたカツオの尾びれは数日後にはぼろぼろになってしまう。

高速で泳ぐカツオにとって尾びれの傷は致命傷だ。揺れる船に体を合わせ、足を踏ん張り、甲板に落ちる前にカツオの体表を傷つけない特製のビニールかごでキャッチして水槽に入れなければいけない。

「カツオの体表は…火傷のようにただれ」の文章が本書編修中の著者らに興奮と熱い議論をまき起こしたことはいうまでもない。だが照屋氏にこのことを直接確認するのに3ヶ月もかかってしまった。本年7月によろやく電話連絡のとれた永井に同氏曰く、「それは少し誤解を与えたようですね、実際に触れないほど熱いということはありません」とのことだった。いささか拍子抜けである。それでも漁獲中のカツオの体温について次のような貴重な文献情報⁽³⁶⁾を紹介して頂いた。すなわち「いわゆる冷血動物である魚の体温は一般に、環境水温の上下0.5℃の範囲にあるといわれている。しかし赤身魚類ではしばしば水温よりも高い体温をもつことが報告される」、「マグロ類では漁獲時に体温が30℃近辺にあり、死後に海水温まで冷却するのに数時間を要する^{注2}」また「ソウダガツオでも漁獲時の数十秒の苦悶の間に体温が10℃ほど上昇することが

注1 同氏が沖縄タイムスコラム「唐獅子」に連載中の文章の一部である(1996.4.5付紙)。やや長くなるが初ガツオ漁の臨場感も味わっていただきたい。

注2 傍点は著者。文献(36)にはその時の海水温として10℃と16℃の2例が図示されている。同図によれば数時間とは5時間以上である。

観察される」等である。体温の急上昇は血合肉による解糖反応の急激な進行に由来すると推定されている。また「最近のマサバやイワシの研究において、遊泳中に活発に動かす尾部のほうが胴部よりも血合肉が発達し、しかもMb（ミオグロビン）含量が高いことが証明されている」のである。

谷の予想には反するが、照屋氏の鋭い観察力と文章によって、推進機としての尾びれの重要性を再確認し、またエンジンとしての魚体のきわめて高いパワーを予感するのは著者らのみであろうか。

なお、本章では“テイルウォーク”時に見られるイルカの驚異的な尾びれ発生推力（グラビア写真4参照）も一つの重要な根拠としてイルカのパワーを推定する予定であったが、残念ながら時間の制限により筆がそこまでは進まなかった。著者のみならず、読者にとっても今後解明すべき魅力ある課題と思われるので、念のためここに付記する。

第5章 船舶推進への応用と展望

魚やイルカがきわめて高速で泳ぐという現象は、これまでに見てきたように当然多くの技術者、研究者達の注目を集めてきたが、魚のような推進方法を船の推進に利用するという考えは、かならずしも古くからあった訳ではない。

古代の帆以外の船の推進方法は、西洋ではオールやパドルであったし、東洋では櫂であり櫓であった^{注1}。蒸気原動機の出現以降は人力によるオールに代わって、まず外輪車が、そしてスクリュープロペラが船舶推進の主力として交替・君臨し、今日に至っているといえよう。魚のような推進方法の利用は、恐らくその力学的理解の難しさのために20世紀近代流体力学の確立を待たなければ、人々の視野に入ってこなかったように思われる^{注2}。しかしようやくここ数十年、理論のみならず具体的応用として魚の尾びれのような推進器をもつ装置を製作することが各所で試みられるようになった。本章では5.1節から5.4節でまずそれらを紹介する。最後の5.5節では水棲動物の泳ぎが実際の船舶の設計とどのようにかかわっているかについて、抵抗関連の話と振動翼推進の設計の試みについて述べる。

5.1 ヘルテルらの研究

1930年代から1960年代にかけて、ドイツとヨーロッパの航空技術史

注¹ 著者らは和船の櫓こそ“揚力利用型推進器”であり、その点で魚の泳ぎに最も近いと考えている。

注² 第2章の冒頭で述べたように、アリストテレスによれば魚が泳ぐのは「魚の自然」であった。

に輝かしい足跡を残したハインリッヒ・ヘルテル (Heinrich Hertel) は生物学と工学の協調の必要性を説き、自ら「構造、形および運動」という名著⁽¹⁾を世に問うている。同書は多数の観察写真を駆使して、植物や動物の形や機能が工学的にいかにかつ巧妙な役割を果たしているか、昆虫やコウモリの驚異的な飛行性能、そして魚やイルカの高速遊泳能力等をあますところなく伝えており、出版後30年を経た今日でも、研究者に変わらぬ新鮮さで訴え続けている。

魚の推進についてはグレイやペインブリッジおよびWuらの研究にも当然言及しており、抵抗と推進の問題として本書が取り扱おうとすることがらに全て関与しているといっても過言ではない。そしてヘルテルは魚の高速遊泳における尾びれの役割を正當に評価していた。

図5.1と図5.2に、ヘルテルらが観察したニジマスの体形とその尾びれの運動の観察結果を示す。図5.2によれば、尾びれは魚体の右から左への直線運動にともなって片振幅約23mmのヒービング運動(図中では曲げ)を行い、それに72°の位相遅れで尾びれが片振幅40°のピッチング運動(図中ではねじり)を行っていることを示している。相対水流によって尾びれに働く揚力が魚を推進させると正しく指摘している。

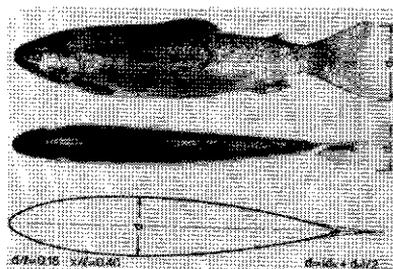


図5.1 ニジマスの体形、写真と等価紡錘体(Hertel⁽¹⁾)

図5.3に同じくニジマスのスタート時の尾びれの運動を解析した興味深い図を示す。図によれば魚は体全体を使って尾びれに大きなS字型の運動を与えているが、各瞬間の尾びれに対する相対水流(図中破線で示

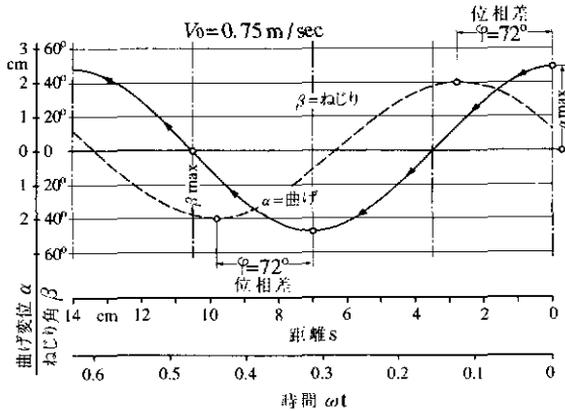


図5.2 ニジマスの尾びれの運動, ヒービングとピッチング (Hertel⁽¹⁾)

す)は尾びれに揚力を発生させ, その揚力は常に魚の進行方向を向いていることを見事に証明している。本図を注意深く見れば, 尾びれを進行方向に対し左側へ振る場合と右へ振る場合では翼(尾びれ)まわりに形成される循環の向きが反対になることにも気づく。

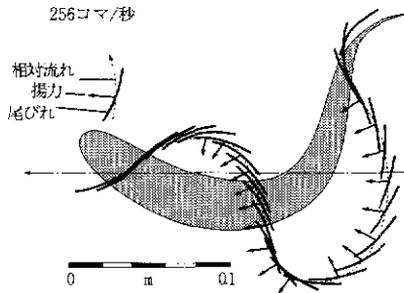


図5.3 ニジマスのスタート時の尾びれの運動, 尾びれは常に推力を発生している。(Hertel⁽¹⁾)

図5.4にヘルテルらが製作した“振動板推進実験船”TUB-TUB-1

を示す^{註1}。図中1が薄鉄板の振動板である。“振動翼”ではないが, 振動板先端部にストロークシャフト(図中2)とツイストシャフト(同3)によってヒービングとピッチング運動を与えると, 振動板上に下流へ伝播

^{註1} 本船名の由来を著者らは独語のTechnik Und Biologie an der Technischen Universitaet Berlin - 1 (ベルリン工科大学工学と生物学科1号)と誇らしく述べている。

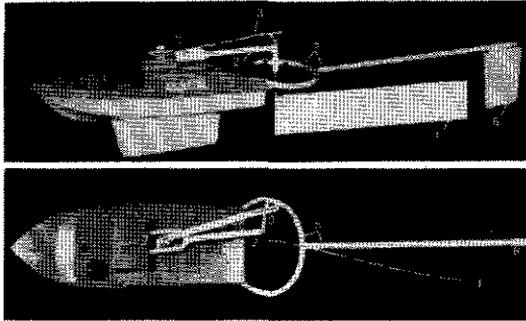


図5.4 振動板推進実験船TUB-TUB-1(Hertel⁽¹⁾)

進行波運動が発生し、下流に押しやられる水の反作用としての推力を得ることができるのである^{注1}。

TUB-TUB-1はきわめて良好な成績をおさめたのでTUB-TUB-3まで製作された。図5.5にその性能試験結果を示す。図より振動板にはあたかもウナギや海ヘビがそうするような進行波運動が生じていることがわかる。T. Y. Wuはこのときの推進効率を50% - 60%と見積もっている。TUB-TUBは魚の運動を船の推進に利用したおそらく世界で最初の試みであろうと著者らは考えている。

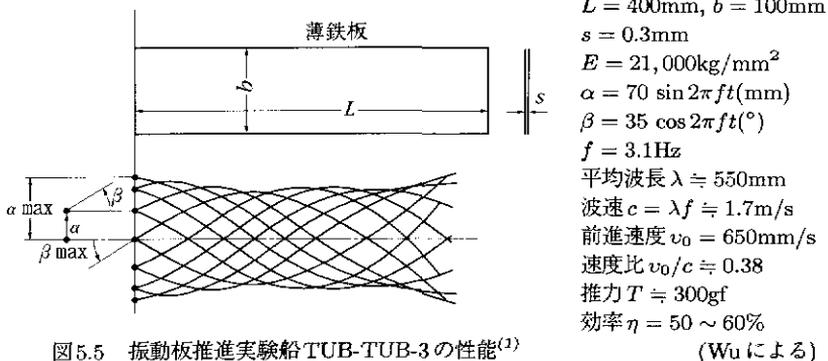


図5.5 振動板推進実験船TUB-TUB-3の性能⁽¹⁾

(Wuによる)

注1 推力発生のおきみは第2章細長物体理論で述べた通り。

ヘルテルは、同書でTUB-TUBの記述の後に、「このような実験を積み重ねることによって、従来のように“推進効率”のみをきり離して議論するのではなく、“抵抗と推進のメカニズムが相互に絡み合った”問題を扱うことができるようになり、将来“グレイのパラドックスの解決”と題する章が記述されることになるだろう」ときわめて示唆に富んだ文章を残している。すなわち、魚の運動を魚体抵抗と推進効率とに分けて議論するところにそもそもグレイのパラドックスの発生理由があるとするものである。

おそらくこれと同じ議論の上で、T. Y. Wuも魚のように動く模型を製作して回流水槽中に設置し、流動抵抗の測定や模型まわりの流れ場の観察を行っているが、定量的なデータは公表されていない^{注1}。図5.6にその実験の様子を示す。



図5.6 振動板後流の可視化実験
(左がWu教授)

5.2 わが国における研究

魚の高速遊泳能力を解明するための研究はわが国でも谷一郎東京大学名誉教授の解説につづいて、流体物理学の分野では、種子田、田古里、奈良迫、東、神部等枚挙にいとまらない程に多くの研究者が比較的早くから理論的、実験的な研究を行い、またすぐれた解説を残してきている。その代表的な研究成果については、すでに第1章および前章までに紹介した。

^{注1} 永井が1984年、カリフォルニア工科大学に在外研究員として滞在したときには、Wu先生と研究室の興味はすでに他のテーマたとえばソリトン（孤立波）に移っていた。

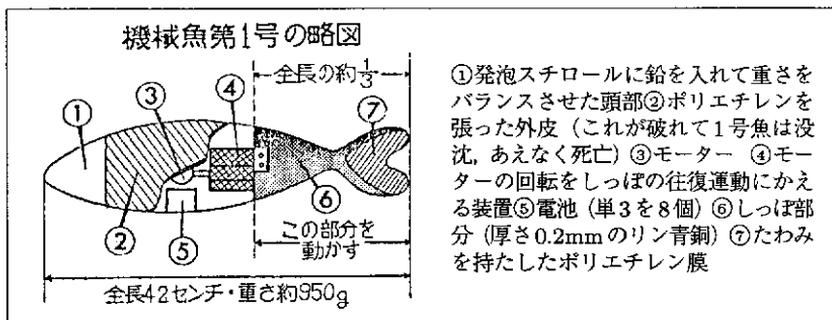


図5.7 通産省工業技術院（渡辺 譲氏）による機械魚，（毎日新聞1976.4.7.）

一方、魚のような推進方法は工学的にもきわめて魅力的なテーマであることから、一色尚次東京工業大学名誉教授らの先駆的な試みを始め多くの工学的研究が存在している。以下に機械魚あるいは魚ひれ型船用推進機の代表的製作例を示す。

図5.7に通産省工業技術院機械技術研究所渡辺 譲氏による機械魚を示す。渡辺氏は制御工学の専門家であるが、コイの運動に魅せられて、図のようなロボットを作り上げた。全長42cmの魚体は銅板とプラスチックよりできており、直流モータによって尾びれを振動させる仕組みである。本機械魚は研究所前庭のプールをコイのように泳いだと記録されている^{注1}。工学的に魚の運動を解明しようとする動きが通産省工業技術院で始まったという点で当時かなり注目を集めた。

早稲田大学の土屋教授らは、ハコフグを模倣した二次元の模型を製作し、その運動を実験的に解析している⁽²⁾。図5.8に同模型を示す。模型は頭部、胴体部および尾びれの3部分より構成されており、それぞれ相対運動が可能な構造となっている。実験では、胴体部に対して

^{注1} 渡辺氏はその記録映画を持って単身ヨーロッパへ渡り、ケンブリッジ大学ライトヒル教授との会見を果たしている。

- (1) 頭部と尾びれが同位相の横振動,
- (2) 胴部が尾びれに対し $\pi/2$ 進んだ横振動, および
- (3) 尾びれのみ横振動

の三種類の運動を与えて, 力の計測等を行った. その結果, 速度, 発生推力, 仕事率においては様式(1)の場合が最も大となるが, 効率においては様式(3)が良かったと報告している.

一色教授は, 早くからスクリューに代わる船外機用推進器に尾びれ型機構を応用することを考案してきた.

図5.9は同教授による初期オタマジャクシ型機械魚である⁽³⁾. また図5.10に船外機スクリュー部に置換された振動尾びれの構想図を示す⁽⁴⁾. オタマジャクシ型模型の体長はかなり小さいが, ゴム動力と弾性尾びれによって上手に泳動することを確認している. 船外機型尾びれは, スクリュー

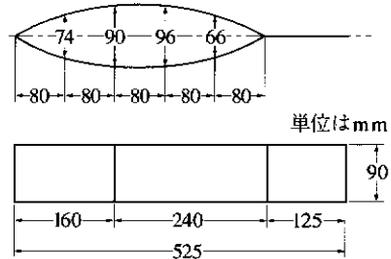


図5.8 早稲田大学土屋教授らによる二次元魚模型, ハコフグ型



図5.9 一色教授による初期オタマジャクシ型モデル, ゴム動力と弾性尾びれによって駆動した⁽³⁾.

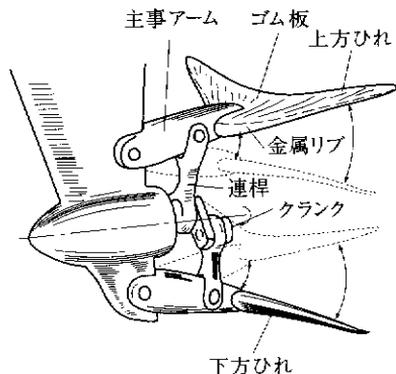


図5.10 船外機スクリュー部に置換された振動尾びれの構想図 (一色⁽⁴⁾)

用回転軸にとりつけたクランクにより尾びれ支持アームに振動運動を与え、ゴム板製尾びれの弾性力によって推進力を得る構造となっている。ただし、クランク軸回転数が高速でありかつ支持アームの振動振幅もかなり小さく限定されるために、期待した程の推力は得られなかったようである。

以上2つの推進機構は、図5.7に示した渡辺の機械魚と同様、いずれも尾びれの弾性力に頼って推力を得ることを特徴としているといえる。ゴム板等翼材質の可撓性にのみ推力発生を期待するのであれば、その材質の選択、とくに疲労破壊強度が決定的に重要であると述べている。

一色教授とその門下生森川裕久氏は次に、二次元剛体水平翼に機構的にヒービングアンドピッチング運動を与える本格的な振動翼推進船の開発に成功した。図5.11と図5.12にその機構図と航走中の写真を示す^{(5) 注1}。

試運転の結果最高速度は2m/s程度に達し、平均推進効率 $は65 \pm 10\%$ できわめて高いと報告している。平均推進効率が小型モーターボートのそれ(約40%)よりも高くなる一つの理由として、船底板による振動水平翼の鏡像効果を挙げている。

一色教授は船用振動翼推進機開発の意義として、

- (1) 低速でも推進効率が高く省エネルギー性がある。

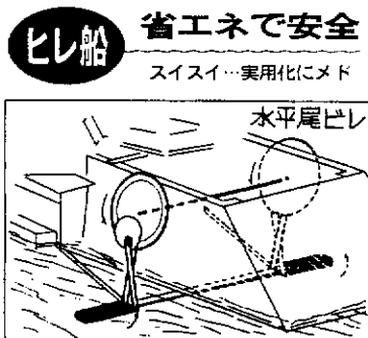


図5.11 二次元剛体水平振動翼推進船機構図、省エネで安全な「フィンシップ」と報道された。

(朝日新聞1982.7.10)

注1 安全で高効率の新しい船フィンシップの出現として、これもマスコミに大きくとり上げられた。図5.11は朝日新聞による。森川氏は現在信州大学助教授。

- (2) 安全で、小型ボートに見られる漁網や網の巻き込み、生物や遊泳者に対する危険性が少ない。

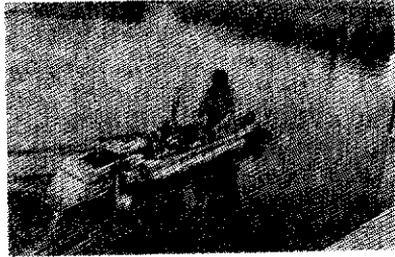


図5.12 航走中の振動翼推進船「フィンシップ」⁽⁵⁾

等を強調している。また「安全性の増大と環境の保全、生物学的な視野による工学の見直し」、「そもそもあまりにもメカニカルに進みすぎた機

械技術を、再び原点へ回帰させる」意義などを常々強調しておられるが、前述ベルリン工科大学において「工学と生物学科」を創設したヘルテル教授とその思想において相通ずるものが多いと云えよう^{注1}。また一色教授は、「かつてペリは浦賀を訪ねたとき、和船の八丁櫓が楽々と高速を出すのに驚嘆した」という興味深いエピソードも併せて紹介している。

早大、東京工業大の研究以降でも我国の各大学では、魚型推進方法を工学的に研究応用しようとする試みは多い。神戸大学の蔦原らは蝶類の羽ばたき運動に由来するWeis-Fogh機構型の振動翼機構を考案し、小型船模型への応用を試みている⁽⁶⁾。また三重大学の清水は生物模倣機械として小魚機械魚の製作を試み、振動翼推進機構の特性を実験的にあきらかにしようとしている⁽⁷⁾。東京工業大学の中島は「屈曲型水中推進機構の最適運動」について理論的・実験的な研究を精力的に続けている⁽⁸⁾。

東海大学の加藤は、方向変化など魚の泳運動の制御に注目して胸びれの運動を実験的に解析し、同時に操縦性の高い自動機械魚の構築をめざして基礎的な研究を積み上げてきている⁽⁹⁾。1995年3月、本書編集の一

注1 一色教授の人柄に永井は全幅の信頼と敬意を抱いているが、当時たまたま東京の学会でお会いした時に「永井さん、フィンシップの効率は60%も出たよ!」とまるでわがことのように喜んでおられたことを昨日のことのように憶えている。

貫として筆者らは加藤直三教授を東海大学海洋学部（清水市）を訪ね、同教授らの研究とあわせて、同大学付属海洋科学博物館において公開展示されている数々の海中生物ロボット“メカニマル”達⁽¹⁰⁾を直接見学するという貴重な機会を得ることができた。巻頭写真11に示したススメダイ等はその一部である。著者の記憶が正しければ、このススメダイ達は1975年沖縄国際海洋博覧会を契機に開発されている。

5.3 琉球大学における研究

永井は1972年琉球大学への赴任以来^{註1}、谷一郎の解説、Kramerの実験結果等に触発されて、水棲動物の高速遊泳能力の解明に興味を抱き、前章で紹介した「柔物体の抵抗に関する実験的研究」を手始めに様々な角度からこの問題にとりくんできた。

5.3.1 自動機械魚

図5.13に1978年同大学において初めて製作された小型自動機械魚の概要を示す。機械魚外殻は頭部、胴体部、尾部および尾びれよりなり、それぞれアルミニウム塊および板より製作した。頭部と胴体殻は空洞で内部にバッテリー、モータおよびスコッチヨーク機構などを収容し、ネジによって密封結合される。胴体部と尾部、尾部と尾びれの間には2点のヒンジが存在し、それぞれ相対回転運動を許容している。胴体部と尾部の間は厚さ1mmのシリコンゴム膜（図中4）によって水封され、また尾部と尾びれの連結部にはつまきバネ（図中12）を挿入して、両者の相対回転角度を減ずるように支持してある。バネによる尾びれの弾性支持は

^{註1} 1972年5月15日沖縄県の施政権が米国より日本へ返還され、琉球政府立琉球大学も国立琉球大学へ移管されたが、永井はその直前に故郷の大学へ赴任した。

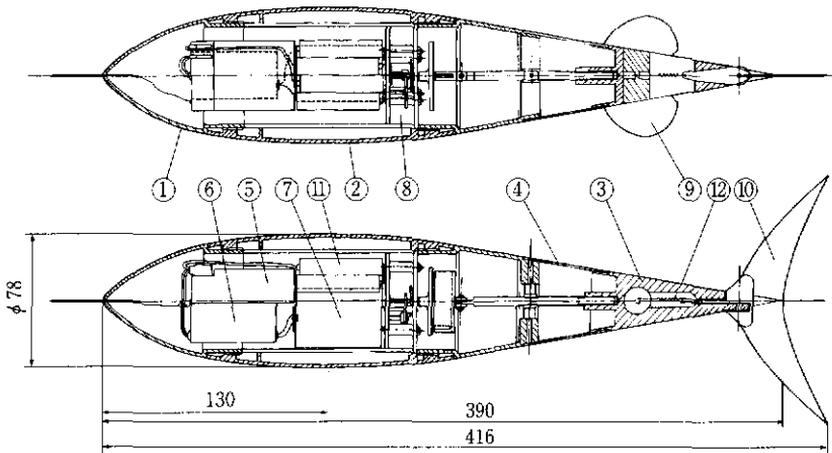


図5.13 小型自動機械魚 (琉球大学, 1978年)

本機構の特徴をなすものであり⁽¹¹⁾, その推力発生機構の詳細は, 3.4節「振動翼推進理論」においてすでに述べた。

図5.13より明らかなように, 本機械魚の体形および尾びれはマグロのそれをモデルとしている。寸法は全長416mm (体長390mm), 最大直径78mmでほぼコイなみの大きさといえよう。尾部と尾びれの振動周波数すなわち直流モータの回転数は水上よりラジオコントロールによって制御される。本機械魚を製作した意図は, これまでに再三強調してきたように「既知の推進力を有する魚」を手にするることによって始めて, 抵抗力と推進力の発生メカニズムが相互に絡みあった「自己推進運動物体」研究の難解さが回避されると考えたからに他ならない^{注1}。

図5.14に小型回流水槽と8mmカメラによって得られた小型機械魚の

^{注1} 本小型機械魚が設計通り製作できたのは, 琉球大学工学部付属工作工場の技術力もさることながら当時学部4年生であった池宮力, 大田邦夫, 中地弘昭の三君 (現在いづれも沖繩電力 (株) 勤務) なかんづく大田君の工作能力によるところが大きかった。

泳運動約1周期分のスケッチを示す。1周期は約0.2秒($f \approx 5\text{Hz}$)であり、前進速度約120cm/sを示した場合のものである。図中一点鎖線の勾配がこのときの速度に相当する。本図と前章の図4.20を比較すれば、機械魚はコイにほぼ類似した運動によって前進運動を獲得していることがわかる。ただしよく見ると頭部と胴体の中心線は進行方向に対してコイの場合以上に変動しており、両者間の背びれの有無の差が影響したように思われる。なお尾部の両サイドに装着した半月板はスタビライザであり、機械魚の直線運動の維持に効果のあることがわかった。

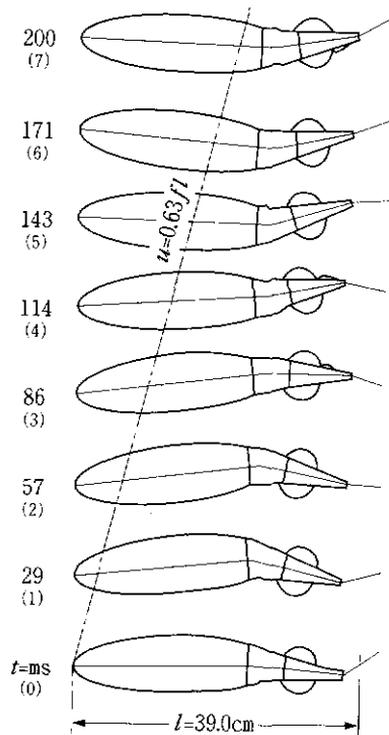


図5.14 小型自動機械魚の泳運動 ($u \approx 1.2\text{m/s}$, $u/l \approx 3.1$ $f \approx 5\text{Hz}$)

図5.15に小型機械魚の体長比速度と尾びれの振動周波数の関係を示す。

本実験は競泳用静水プールにおいて機械魚を自由に遊泳させた状態で行った。振動周波数の制御はラジオコントロールによった。図(a)は尾びれ取付部つまきバネのバネ定数 $k = 0.78\text{gf/mm}$ のもので、使用したバネの中では最も軟らかいバネの場合である。図によればこの場合、振動周波数 $f = 2.8\text{Hz}$ において最も早い体長比速度 $u/l = 1.25$ を記録しているが、 f を上げるとともに u/l は緩やかに減少し最大周波数 $f = 6.34\text{Hz}$ においては $u/l = 0.78$ となることがわかった。すなわちコイやイルカの場合

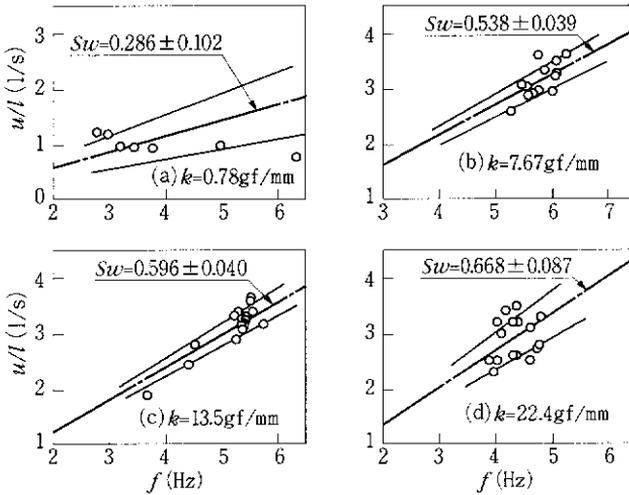


図5.15 小型自動機械魚の体長比速度と尾びれの振動周波数 (k はバネ定数)

合とは異なり、振動周波数を上げてても進行速度は増加しない。これは他の場合と比較すれば明らかのように、この場合のバネ定数が過小で、尾びれに加わる流体力がバネの復元力を凌駕し、流れに対する翼の相対迎え角を有効な範囲に維持できなかった為と説明される。ちなみに、装置よりつまきバネを除去した場合 ($k = 0$) の実験も試みたが、その場合機械魚は若干後進することを確認している。

図5.15(b)は $k = 7.67 \text{ gf/mm}$ の場合のものである。振動周波数5.3 Hz ~ 6.3 Hzの範囲で計13回の実験を行っている。この場合は前図と違って進行速度は周波数にほぼ比例して増加することが認められる。ただし実験点にはかなりのばらつきもあるので、最小二乗法により平均勾配すなわち泳動数 Sw とその分散を求め図中に表示した。この場合平均泳動数は $Sw = 0.538 \pm 0.039$ である。

図5.15(c) 及び (d) はさらにバネ定数を大きくした場合 ($k = 13.5$

gf/mm) 及び最も強いバネの場合($k = 22.4$ gf/mm)の場合である。図(c)では $f = 3.7 \sim 5.75$ Hzと比較的広い周波数範囲で安定したデータが得られ、泳動数のばらつきも小さく $Sw = 0.596 \pm 0.040$ と求められた。図(d)の最も強いバネの場合、データが得られた周波数範囲はせまかつデータのばらつきが相対的に大きくなることが明らかである。ただしこの場合の平均泳動数は $Sw = 0.668 \pm 0.087$ と実験の範囲では最も高い値を記録した。5 Hz以上の実験データが得られなかったのは、恐らく翼と相対水流の平均迎え角が過大となり流体反力が増加するため、供試電動モータの回転数をそれ以上には上げられなかった為と説明される。

図5.16は、上のようにして得られた平均泳動数とその分散を、横軸にバネ定数 k をとって示したものである。つまきバネは合計7種類の強さのものを入手して実験に供した^{注1}。図より明らかなように、本小型機械魚はバネ定数が強い程高い泳動数を示すことがわかった。バネ定数を過

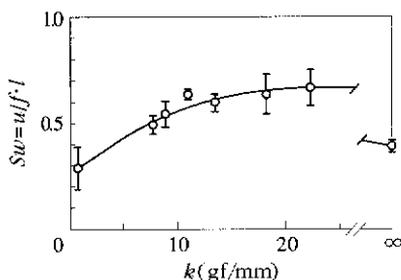


図5.16 バネ定数が泳動数に与える影響 (小型自動機械魚)

大にとると、最大可能振動周波数のみならず平均泳動数においても低下することが期待されたが、実験の範囲ではそれを確認することはできなかった。図の右端 $k = \infty$ のデータは参考までに尾びれを尾部に固定した場合のもので、案の定平均泳動数 $Sw = 0.40$ にとどまった。この場合、胴体と尾部間の1点ヒンジによる運動となるが、恐らくアルミニウム板尾びれの弾性によってその推力を得ていると思われる。

注1 ボールペンシルの中にあるつまきバネ等、前述の大田君は部品調達においても天才だった。

次に著者らは本小型機械魚の泳動効率を計算することを試みた。すなわち、まず本機械魚を小型回流水槽で曳航した場合の速度と抵抗の関係を別途求めておく^{注1}。又、小型機械魚のバッテリー、モータ、減速歯車およびスコッチヨーク機構部分を取り出し、スコッチヨーク機構の円板部にブレーキシューを設置し、プロニー法により、円板回転数 f Hz とトルク T gf·cm を同時に計測しその関係を求めた。次に実験結果より、各バネ定数毎に最大可能振動周波数 f_{\max} がわかっているのので、これに平均泳動数と体長を乗ずることによって平均最大速度 u_{\max} を求める。 f_{\max} と u_{\max} よりそれぞれその時の所用トルク T と所用曳航力 D が前に求めた関係式より計算できるので、その時の効率 η を次式によって求めた。

$$\eta = \frac{D \cdot u_{\max}}{2\pi f_{\max} T} \quad (5.1)$$

分子の D には本来機械魚が自己推進しているときの抵抗を用いるべきだが、それは知りようもないので無泳動状態の曳航力 D を使用したものである。又分母はスコッチヨーク機構円板部の定常（定トルク、定角速度）状態出力であって、実際に振動翼が水になした仕事率ではないことも注意が必要である。

図5.17にこのようにして求めた小型機械魚のバネ定数毎の効率を示す。図より $k = 20$ gf/mm 以上の固いバネを用いると、泳動数は上昇するものの、効率的には低い値をとることがわかった。これは前にも述べたよ

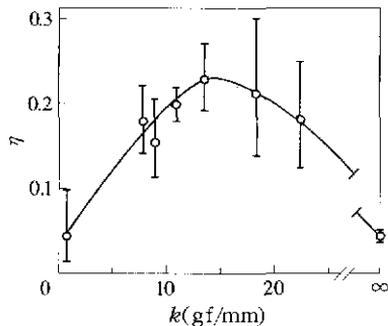


図5.17 バネ定数による効率の変化
(小型自動機械魚)

^{注1} 抵抗測定法については前章4.3節で述べた。

うに、固いバネの場合最大可能周波数が5 Hz 以下にとどまり、したがって最大速度も低下したためである。なお観察した全実験点について効率を計算してあるので、平均値からの偏差は泳動数の場合以上に広がっていることがわかる。本図によって本機械魚はバネ定数 $k = 13.5 \text{ gf/mm}$ の場合に最も高い平均効率0.23を示すことがわかった。

以上、体長39cmの本小型機械魚は振動周波数約5 Hzにおいて最大泳動数0.668、遊泳速度約130 cm/sを達成することができた。この遊泳能力はイルカ($Sw = 0.818$)やコイ(0.695)のそれには達しないがマス(0.62)やウグイ(0.63)のそれを上回っていることがわかった。ただし最大平均効率は約23%であり、驚く程高くもないことがわかった。すなわち、スコッチヨーク機構から尾びれに運動を伝える振動部の動力伝達効率を0.5程度と低めに見積もっても尾びれの流体効率は高々50%であり、決して高くはない。この効率によってあるいはグレイのパラドックス解明の手がかりが得られないかと期待したのだがそれは果たせなかった。そもそも前章で述べたように、小型淡水魚の場合体重から予想されるパワーの方に余裕があつて観測される程度の最高速度では、パラドックスの入り込む条件は存在していなかったのかも知れない。

本小型機械魚の研究成果は1982年11月アリゾナ州フェニックスで開かれたアメリカ機械学会(ASME)冬季例会で公表したところ⁽¹²⁾、地元の新聞社アリゾナ・リパブリックが永井へのインタビュー記事を掲載したために、はからずも多く学会参加者の注目を集めるところとなった。後述のMIT教授Triantafyllouもその一人であったように思われる。参考のため、当時の記事を図5.18に示す。「自然法則はある種の魚達にその速度で泳ぐことを許していない。しかし彼らはそのような法則を聞いてもいないから、もちろんすごい早さで泳いでいる」という書き出しで始ま



Experts study why some fish swim faster than fact

By Clark Hodge
Republic Science Writer

Nature's laws say some fish cannot swim as fast as they do. The fish haven't heard this, so they swim very fast indeed.

A Japanese scientist said Thursday that tuna slip along at 50 mph. Dolphins and whales, marine mammals, can outrun nuclear submarines.

Friction drag and the limits of muscle power, Dr. Mitsuru Nagai pointed out, should preclude such speeds. Why they do not remains uncertain, he said.

But, he said he and other engineers at the University of

the Republic of Okinawa think they now know a way to fish out — by building mechanical fish.

Nagai believes the man-made swimware should give them "a known or measurable propulsion power" from which they can calculate drag forces.

He explained the experiments for the American Society of Mechanical Engineers, which ends its annual five-day winter meeting today at Phoenix Civic Plaza.

His artificial fish propel themselves the same way real fish move — by flapping their tails. A tiny electric motor, powered by a toy battery, operates the tails with a yoke.

A spring connects the tails and tail fins, allowing the

fins to automatically adjust to the flow.

His team, Nagai said, now is constructing its second radio-controlled device, which will be 8 feet long. Like an earlier, smaller model, it will be fabricated from aluminum.

Nagai said the first mechanical fish swims almost as well as carp — and more efficiently than flaps or trout.

The efficiency of swimming is determined by relating speed to body length. However, a number of fish and aquatic animals exceed the theoretical limit, Nagai said.

He measured the swimming speeds of a number of species by filming them in a glass water tunnel.

図5.18 ASME ミーティングにおける永井へのインタビュー記事
(アリゾナ・リパブリック, 1982.11.19)

る Hodge 記者のこのインタビュー記事は、当日の新聞で唯一 ASME ミーティングに触れたもので、まるで ASME の広告塔になったような感じがした。もちろん悪い気もしなかった。

図5.19 は小型自動機械魚について製作された大型機械魚の概要である。小型魚がラジオコントロール方式であったのに対し、今回は船舶固定有線式とし、より定量的なデータが採取できることを期待した。図5.13 との比較からも明らかなように、大型魚もマグロの体形を参考にしたので小型魚とほぼ相似の外形形状を有する。ただし体長2316mm 最大直径440mm とほぼイルカ並みの大きさとなったので各部毎に大きな設計変更を必要としている。胴体部とハッチは FRP 製であり、尾部はアルミニウム塊より加工成形した。胴体部と尾部をつなぐ可撓外皮には厚さ 3mm のゴム膜を使用した。主駆動装置は自動車用スタータモータ (約 7 kVA, 軸動力約 5 kW) と同バッテリー装置 (24V, 120Ah) であり、モータ出力軸回転数を歯車にて 1/10 に減速しスコッチヨーク機構を駆動させた。

本大型機械魚はハッチにとりつけたストラットにより洋上船 (二人乗り) に固定され、船上からの操作 (電流制御) により、船を推進させつ

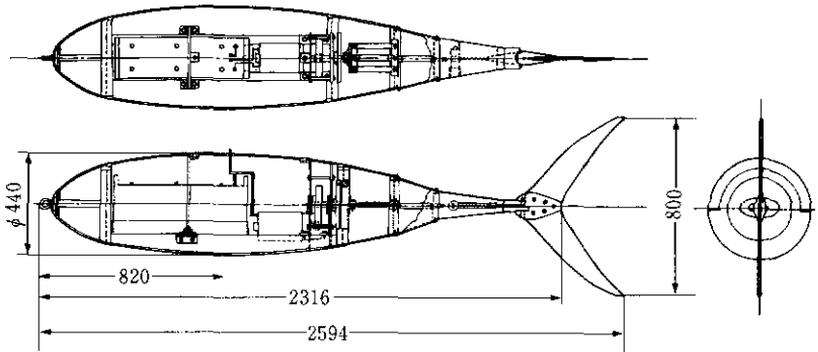


図5.19 大型機械魚（琉球大学，1980年）

つ，電圧，電流，推進力，船速等諸量を測定する方法をとった．図5.20に同実験状態のイラストを示す．

著者らの期待通り本大型機械魚は洋上船を推進させることには成功したが，その最大船速は1.5 m/s，泳動数で約0.40にとどまり，技術的に多くの課題を残した．船速が出なかったのは，歯車減速比が過小であり，モーターが設計回転数に比べかなり低い回転数領域でしか作動できなかったためであり，結果的に振動翼周波数を上げられずその性能を発揮させることができなかった．歯車装置が固定減速比であり，変速装置を備えていなかったことも上記欠点に対する改善策を困難にした．また当初設計による直径25mmの鋼製振動アームの第1ヒンジ部における切損（疲労破壊だった．これは設計見直しに

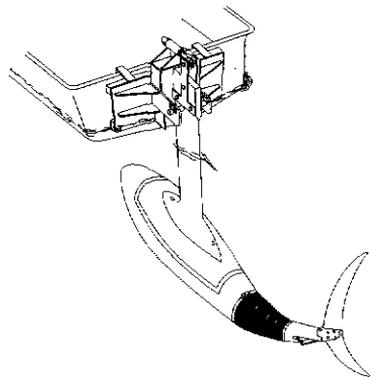


図5.20 大型機械魚の洋上実験イラスト 機械魚のストラットに加わる推力は上方のロードセル（荷重変換器）により計測される．

より、切損個所の強度を増加させることによって解決)、ハッチ接合部等からの度重なる漏水等、本機械魚は琉球大学チームに数々の技術的難題を提供すると共に多くの教訓を与えてくれた。

5.3.2 振動翼推進船

次に著者らがとり組んだのは、振動翼推進機構をより定量的に試験すると共に、船用推進機としての実用可能性を実証することを目的とした振動翼推進船の設計と製作であった。先に述べた一色教授らの水平翼上下振動型フィンシップの成功も当然視野に入っていたが、同チームと協調しながらスクリュープロペラに代わる新しい船用推進機を開発・提案することを意図したものである^{註1}。もちろん試験船による定量的なデータの積み重ねは、平行して進める振動翼推進理論との比較検討を可能にしてくれる。

図5.21に振動翼推進船1号機の概要を示す。手製の小型ボート上に、オートバイ用ガソリンエンジン(193cc, 13 PS)を搭載し、その出力軸回転数をチェーンにより減速したのち、偏心円板カムとカム受け装置による新しいスコッチヨーク機構によって船底の振動アームに回転振動運動を与える。なお、図より見てとれるように、本船のエンジンおよび主駆動機構は、回転振動主軸外筒と一体となって船上で回転可能の構造となっている。すなわち本機構はエンジンごと左右に回転し、ラダーの機能も兼備している。船体前方下部にはセンターボードを設置し、ヨーイング(船首揺)を防止した。本実験船の成果は1989年ソウルで開催されたISOPE(International Society of Ocean and Polar Engineering)国際会議において公表された⁽¹³⁾。最高船速は1.12 m/sであった。

^{註1} 見方を変えればしばらくグレイのパラドックス解明からは離れることを意味する。

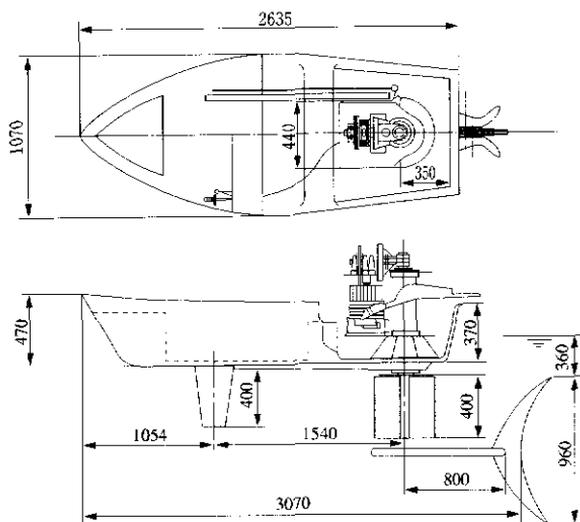


図5.21 振動翼推進船1号機 (琉球大学, 1988年)

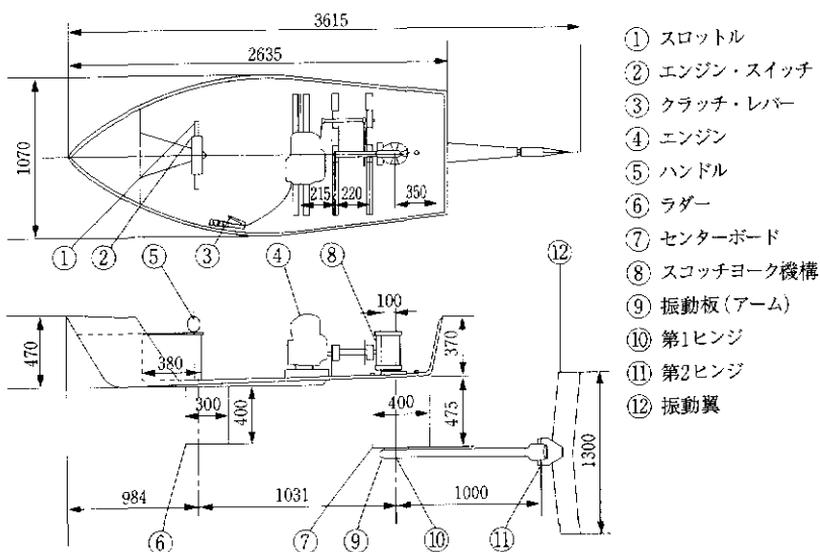


図5.22 振動翼推進船2号機 (琉球大学, 1993年)

図5.22に振動翼推進船2号機の概要を示す。2号機船体は1号機と同じだが、スコッチヨーク機構の改良、エンジンからのラダー機能の切り離し等各所に重要な改良を施してある。これらによって機構全体の軽量化および低重心化を達成した。また前方センターボードに回転軸を設け、ラダー機能を付与したことも大きな特徴といえる^{注1}。

図5.23に改良スコッチヨーク機構、図5.24にねじりつるまきバネ2個を組み込んだ第2ヒンジ部翼取付け金具、図5.25に実験に供した平板翼翼型とその揚抗力特性図を示す。揚抗力特性は約1/3の縮尺模型について風洞実験により求めた。本平板翼の特性はすでに第3章図3.9に示し

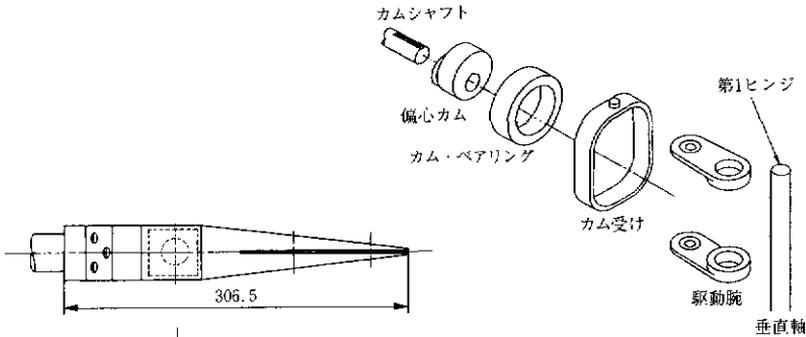


図5.23 スコッチヨーク機構

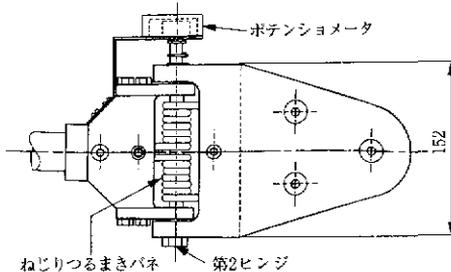


図5.24 ねじりつるまきバネ2個を組み込んだ第2ヒンジ部翼取付け金具

注1 前方センターボードにラダー機能を持たせるアイデアは、後述の人力振動翼船の議論の中から生まれた。

たものと同じである。2号機はまた、ポテンシオメータ2個を振動アーム回転軸および第2ヒンジ部に装着することによって運転中の振動アームの振れ角 α_a および振動アームに対する翼の振れ角 β を同時に計測し記録することが可能になった。これによってねじりつるまきバネ弾性、エンジン回転数などを種々変化させたときの諸量の定量的評価および数値計算結果との比較検討が可能になったのである。本研究成果は1995年日本機械学会流体工学部門講演会において公表され、本年96年5月同学会論文集に採択された⁽¹⁴⁾ 注1。

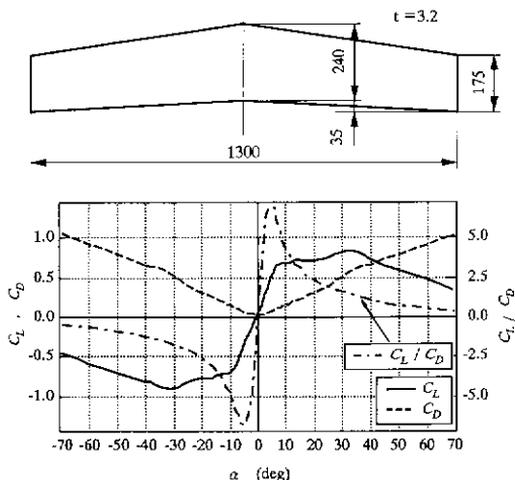


図5.25 供試平板翼とその揚抗力特性($Re = 1.26 \times 10^5$)

図5.26 に計測結果の一例を示す。周波数1.47Hz、船速約1.2m/sで定常走行状態における振動板および振動翼の振れ角 α_a および β の時間変化である。図より、振動板はほぼ設計通りの振幅で正弦波運動を行い、翼もほぼ一定振幅、一定周波数で振動板に追従して振動していることがわ

注1 巻頭写真15と17は本2号機の実験時に得られたものである。

かる. 図 5.26 の α_a , β の 1 周期分を拡大し, それらと船速 U_∞ によって決定される 1/4 翼弦点相対迎え角 α_e の変化を図 5.27 に示す. これより翼は振動板に対して約 116° 位相が遅れていること, および相対迎え角はかなり歪んだ台形波に近い周期関数で, その位相は翼よりもさらに遅れることが確認できる. 相対迎え角の変化が台形波形状に近づくことは決して不都合ではなく, 第3章の理論で明らかにしたように, 振動翼は最適迎え角状態をできるだけ長く維持した方が発生推力を大きくするといえる.

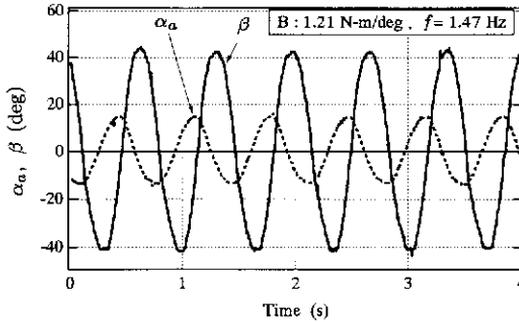


図 5.26 振動アームと振動翼の角変位

図 5.27 の諸量の時間変化と一樣船速 U_∞ および図 5.25 の翼特性を使えば, 振動翼推進理論を適用することによって, 翼に加わる揚力, 抗力および仮想質量による力の進行方向成分 F_{TL} , F_{TD} , F_{TM} とそれらの合計としての推力 F_T を計算することができる. その結果を図 5.28 に示す. 図によれば, 周期中抗力成分は常に負の推力を与えるが, 揚力と仮想質量力の成分は大部分が正の推力となり, 合力 F_T はほぼ全区間において正となることがわかる. ただし, 本計測状態においては位相によって揚力 (図中点線) と仮想質量力 (同太破線) の寄与度が微妙に異なり, きわめて興味深い変化を示している. ちなみに, 理論的にも実験的にも, 低船速

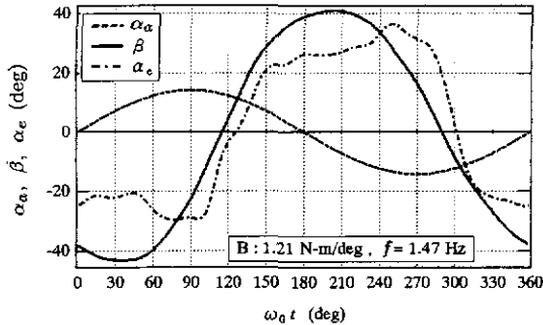


図5.27 振動アーム，振動翼およびそれらより計算した相対水流迎え角の変化

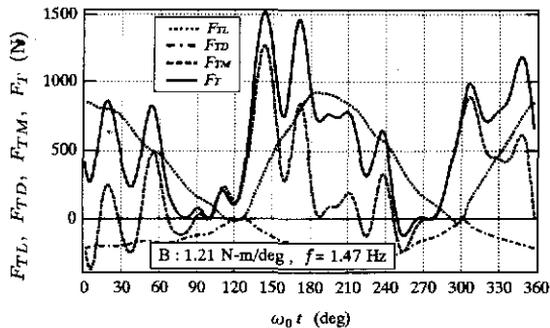


図5.28 各成分推力と合計推力の変化（計算結果）

(低泳動数)においては仮想質量力が，高船速（高泳動数）においては揚力がより大きな寄与をすることが確かめられている。

図5.29にねじりつるまきバネのバネ定数をパラメータとして振動周波数 f と船速 U_∞ の関係を示す。実線は各バネ毎の実験値を3次曲線で近似したものである。図より最も柔らかいバネAの場合，周波数0.5Hzにおける船速は最も高いが，約1Hz以上で船速は頭打ちとなり，高々0.85m/sにとどまることがわかった。どのバネでも周波数の増加とともに船速は当初ほぼ直線的に増加するが，やがてその増加率を減少させる。バネ定数

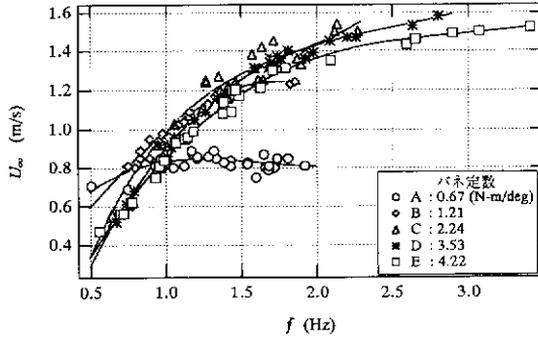


図5.29 振動翼周波数と船速

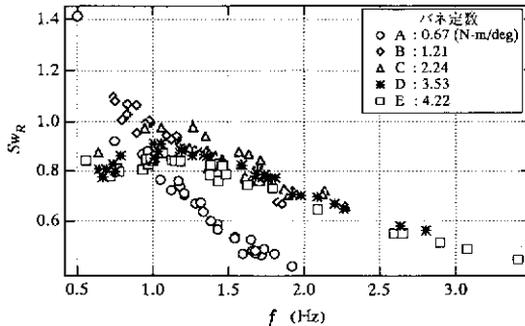


図5.30 泳動数と振動翼周波数

が大きい程最大船速は一般に大きくなるが、本実験の範囲では、バネD($k = 3.53 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{deg}$)、周波数2.8Hzにおいて最高船速1.58m/sを記録した。

図5.30に振動アーム長を代表長さとする泳動数 $Sw_R = U_\infty / f \cdot R$ と振動周波数 f の関係を示す。前章で見たようにコイやティラピア等の遊泳速度が尾びれの振動周波数に比例するという事は、泳動数が一定であることを意味するが、本図によれば試作振動翼機構においては、高い周波数領域において泳動数は単調に減少することがわかった。ただし最も硬いバネE($k = 4.22 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{deg}$)のデータをみると、 $f = 0.5 \sim 1.5\text{Hz}$ の

範囲で、ほぼ一定の泳動数(≈ 0.8)を保ちその後減少に転じていることがわかる。前節図5.15で見たように、小型機械魚においては硬いバネの場合高周波数において泳動数が低下することはなかった。

図5.31は横軸にねじりつるまきバネ定数をとり、各振動周波数毎に船速をプロットしたものである。本図によっても、低周波数においては軟らかいバネが、高周波数になると硬いバネがより高い船速を達成することがわかる。ただし図からも明らかなように、 $k \approx 6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{deg}$ の最も硬いバネの場合2 Hz以上の振動周波数でシステムを駆動することはできなかった。これは恐らくエンジンの出力によるものと考えられる。より高い船速を得るためには、硬いバネに対してはより強力なエンジンを用意しなければならないのだろうか、詳細は今のところ不明である。それともイルカやマグロは速度や周波数に応じて尾部のバネ定数(筋肉力)を変化させているのだろうか？

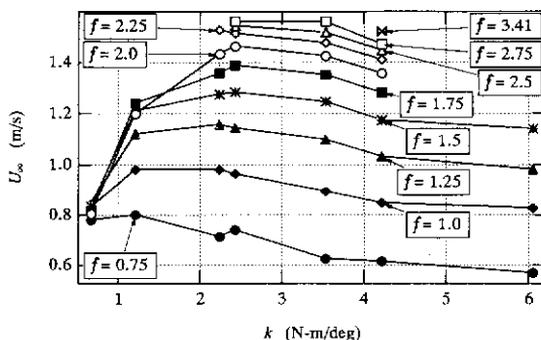


図5.31 船速とねじりつるまきバネ定数

以上、いずれにせよ著者らは、振動翼推進船の試作によって、振動翼機構の有用性を実証するとともに、同機構の興味ある諸特性を定量的に把握し得るようになったといえる。また振動翼としては安易に平板を用

いるべきではなく、できるだけ揚抗比の高い対称翼形を使うべきであることは、理論と実験の両面で明らかになった。琉球大学では現在これまでの研究成果の上に、より軽い船体と対称翼形振動翼を採用した振動翼推進船3号機の製作にとりくんでいる。なお同大学ではまた、人力による振動翼推進船の開発にもとりくんでいることを付記しておこう⁽¹⁵⁾。それは人の足による往復振動運動が振動翼駆動に最も適していると思われるからであり、本来人力の500 W程度のパワーがあれば、振動翼機構によりローボートやカヌーに代わる新しいレジャー用ボートの提供が可能と考えているからである。

5.4 MITの研究

1995年1月号アメリカ機械学会誌(Mechanical Engineering)の最終ページを飾ったトピック記事(input output)のタイトルには“*Robotic Fish Gotta Swim, Too*” (ロボット魚も泳いだぜ!)の文字が踊っていた。MIT (マサチューセッツ工科大学) の Triantafyllou 教授率いるチームが全長52インチ(1320mm)の Robotic Tuna (ロボットマグロ) チャーリーの開発に成功したというものである。記事によれば Michael Triantafyllou 教授は円柱後方に形成される渦(すなわちカルマン渦)とそれによる振動を研究していた約3年前にチャーリー製作を思いついたという^{注1}。教授は魚の後方に形成される渦はカルマン渦と類似だが、魚の渦の場合、円柱の場合のように抵抗の原因となるのではなく、下流方向への誘起速度によって推力を発生すると正しく指摘している。

図5.32に Robo Tuna チャーリーの構造図を示す⁽¹⁶⁾。図より明らかな

^{注1} 永井は1992年8月に Triantafyllou 教授より私信をもらい、研究交流の誘いととも
に5ft (60インチ)の機械魚製作にとりかかっていることを知らされていた。

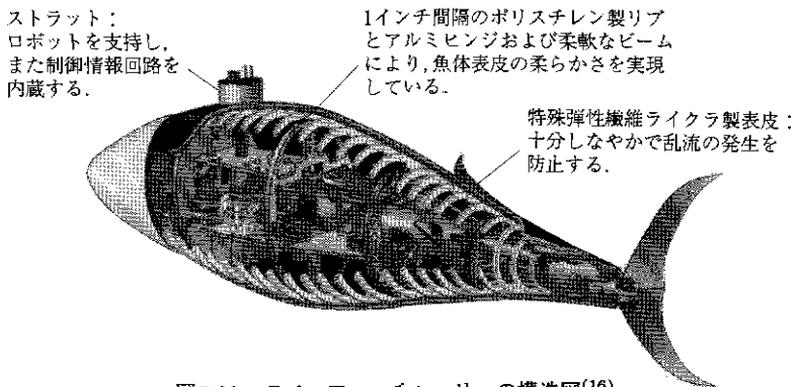


図5.32 Robo Tuna チャーリーの構造図⁽¹⁶⁾

ようにチャーリーの構造は、永井らの機械魚とは異なり、より実際のマグロのそれに近いといえる。チャーリーはアルミニウム製背骨を有し、背骨は8個のリンクとヒンジよりなり、6個のブラシレスサーボモータ（主モータは2PS）により駆動制御される仕組みである。すなわち多関節であって、尾びれを含む各パーツの相対運動が6個のモータとベルト装置により独立に制御し得る構造となっている。また1インチ間隔のポリスチレン製リブ（肋骨）はフレキシブルなビームによって連結されており、さらにその外表面を特殊弾性繊維ライクラ(Lycra)によって覆ったものである。ライクラ使用の理由はやはり抵抗減少を期待したものである。

巻頭写真14でわかるように、チャーリーは今のところストラットによって電車で吊るされ、MITの実験水槽内を泳動または曳航され、実験に供せられている段階のようである。詳しい性能データはまだ公表されていないようだが、上述記事によれば約2 m/s 程度の速度を達成したとしている^{註1}。

^{註1} 目標は Bluefin tuna のそれにあわせて約20 m/s (40ノット) としている。チャーリーの達成速度が条件こそ違え永井らの機械魚や振動翼推進船の速度とオーダーが一致することは興味深い。

MIT チームはチャーリーを第1号機として今後さらに大小様々な機械魚を製作し、今世紀末には全長15フィート(4.5m)の海底探査用ロボットを建造する計画のようである。たまたま本書編集中にチャーリー製造のニュースに遭遇した著者らは、早速 Triantafyllou 教授と連絡をとり、また出版社 Scientific American 社の了解も得て巻頭写真にチャーリーのカラーコピーを加えることができた。

5.5 水棲動物に学ぶ船舶設計

船舶においては、抵抗と推進という両用語の概念と定義が確立しているのに対し、魚及び水棲生物の場合はかなり異なる事情があることはすでに前章までに述べた通りである。従って船舶の設計に関し水棲動物に学びその知識を生かそうという試みにおいても、水棲動物の特徴をとらえてそれを船舶の立場から利用できるように変形、加工して使うということになる。そのような場合、造船技術者の発想に従えばおそらくまず全体の船の形状、続いて局所的な抵抗要素各論、ついで推進器に対する応用ということに分類して考えることになるであろう。本当は最初に述べたように我々はもっと柔軟な見方を魚から学んでいる訳であるから、このような分類にこだわる必要はないが、便宜上ここではこの方向で考える。そうすると、抵抗要素各論と書いた部分は、例えば剛体表皮ではなく弾性表皮ではどうかとか、分泌物の低減効果はどうかというようなことであり、これはすでに第4章で述べた通りであるので、以下では残りの2項目について考えておくことにする。

5.5.1 水棲動物の形状と船の抵抗

水棲動物の中で本書で中心的に述べた高速遊泳魚の形状はまことに優

美な流線形をしており、これは正に抵抗最小の形状に他ならない。図1.2に示したアジ、カツオなどの形状は文字通り流線形になっている。これらは側面形状であるが、その他にも流線形の形状を表現するには色々な表現法があり、例えば魚体は体の断面は楕円に似ているので、水力学でいう等価水力直径の概念を利用するのも一つの方法である。第4章の図4.17にはこの方法でコイの形を表したが、これも一つの流線形になっている。ところがこのような形は没水航行する潜水艦、潜水船には参考となるが、大部分の船舶では水上航行する関係上造波現象を伴うので、これと共に発生する造波抵抗を極力低減する必要があり、そのため船型はいわゆる紡錘形からは随分異なって来る。特に船首水線付近が薄く尖っているのが特徴であることは読者諸氏ご存じの通りである。また船尾にもプロペラがつくが、これが没水船なら船体軸心に装備されるので紡錘形のままで良いが、普通的水上船ではそうではないので、この辺も変わって来ることはいうまでもない。いずれにせよ、これらについては魚に学ぶというより魚には見られない人工物の特徴であるので、ここでは議論はこの辺でとどめることにする。ただ、参考のため船舶の内代表として造波の小さいタンカーと造波抵抗がかなりあるコンテナ船の2種類の線図の概略と横断面積曲線（横切面積曲線ともいう）^{注1}を図5.33と図5.34に示す。横断面積曲線は魚に対する図4.17の等価直径を2乗した曲線と比べればよい（なお、船では船首を右に書くのが慣例である）。タンカーの方は造波現象が小さいので船首も割合丸くなっているが、コンテナ船はスピードが早いので造波上の考慮から面積曲線の形状が異なることが分かる。潜水艦についていえば、いわゆる涙滴型(tear-drop type)になっており、最小抵抗の形状が採用されていることはよく知られている。

^{注1} 常用漢字制定以前は横截（おうせつ）面積曲線というのが普通であった。

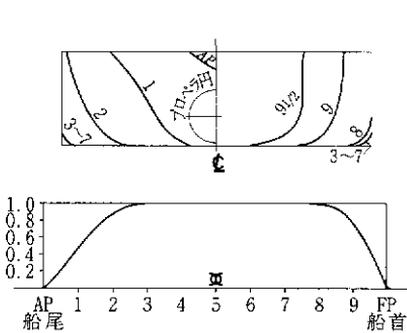


図5.33 タンカーの線図と横断面積曲線

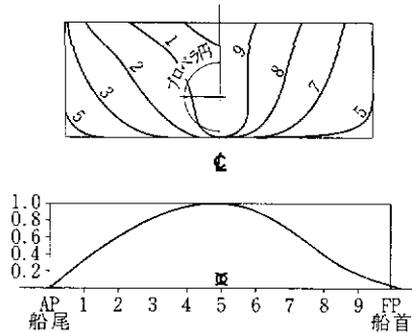


図5.34 コンテナ船の線図と横断面積曲線

以上抵抗関係について水棲動物と船型のかかわりを述べたが、本小節を終わるにあたり、イギリス造船設計者に伝わる愛すべき話を紹介する。

1950年イギリス、ハスラー海軍試験水槽の長であったR. W. L. Gawn (ゴーンまたはガウン) 氏はある講演会で“魚の推進と船型設計”という題目の講演を行ったが、その中で次のように述べている⁽¹⁷⁾。

Such shapes are known as streamline.

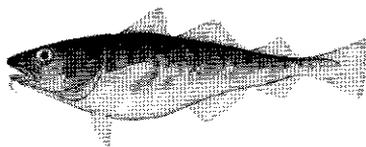
— 中略 —

The descriptive expression “cod’s head and mackerel tail” is time honoured by naval architects.

このような形は流線形として知られている。

“タラの頭とサバの尻尾”という表現は古くからの造船屋の価値ある伝承である。

要するに船首はタラの頭のような形に、船尾はサバの尾のようにとすることで、後は読者の想像におまかせする。魚が身近な存在であり、魚を想いつつ悠々と船の線図を引いていた昔の設計者の様子を想像していただきたい。参考のため、タラとサバがどんな形をしているのかあらため



(a) マダラ (Pacific cod)
体長 75cm



(c) マサバ (Chub mackerel)
体長 40cm



(b) タイセイヨウダラ (Atlantic cod)
体長 45~120cm



(d) スコンベール・スコンブルス
(Atlantic mackerel)
体長 55cm

図5.35 タラとサバの側面図⁽¹⁸⁾

て跳めるため側面写真を図5.35に示す。タラにもサバにも多くの種類があり、それぞれ形が違うことは他の魚と同様である。ここでは、我々が通常見る日本近海のもの、つまりマダラおよびマサバと、それからこの話は元々イギリスの人達の話であるという意味で、イギリス付近で見られる種類、つまり Atlantic cod および Atlantic mackerel と呼ばれるものを示す。形状が少々違うことなどを楽しみたい。

5.5.2 振動翼実船設計の試み

前節までは自動機械魚の製作の試みについて紹介した。本節では振動翼推進機構を採用した実船があれば紹介する順序であるが、残念ながらそれは現在まで実現していない。この理由は一言でいえばまだ基礎的研究が不十分ということであろう。振動翼推進の研究内容としては理論解析の部分が一番進んでいると考えられるが、実船に採用するための応用研究の部分は、振動翼そのものの詳細設計に加えて、何より問題なのが

主機の種類と馬力伝達機構，振動翼駆動機構等であり，これらについての研究が必要である．また一足飛びに実船という訳にもいかないので，まず小型の実験艇を建造して実際起こる種々の問題を検討しなければならないと考えられる．これらは今後まずとりかかるべき問題であろう．

しかし，理論的には実船設計のレベルにまで検討した論文が発表されているのでそれを紹介する．それは3.5.1節で述べた弾性翼の線形，非線形理論の応用として文献(11)の中で久保田，工藤らにより検討された例である．そこでは具体的に船長が27mの小型船と300mの巨大船の2隻を想定し，図5.36に示すように左右に振動する振動翼を垂直に2枚配置したもの一枚の上下振動翼を水平に配置したものの2種類について理論計算を行っている．小型船に対しては両配置方式について，巨大船に対しては水平式についてのみ計算を行い，その結果垂直配置は振動板のアスペクト比が小さいので効率が悪いことが確かめられている．そこでここでは効率の点ですぐれた水平型の結果のみを紹介する．

考え方は，船体の抵抗を見積もり，その値に等しい大きさの推力を出すための振動翼の寸法，効率等を定める．ただし，前提として振動翼のピッチング振幅は 15° ，ヒービング振幅は弦長 C の0.6倍としている．設計は剛体翼と弾性翼に対して行われているが，ここでは効率がより高い

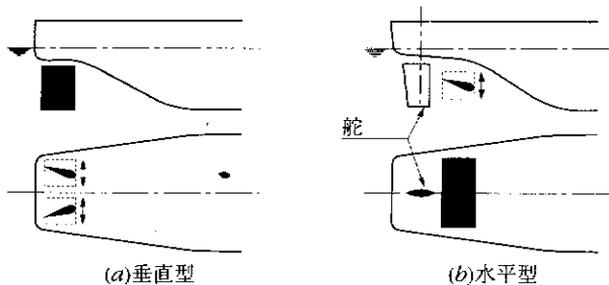


図5.36 振動翼推進船概念図(久保田ら)(第3章(11))

表5.1 振動翼推進船試設計例 (久保田ら(第3章(11)))

船長	300m
船幅	54.5m
喫水	17.825m
排水量	240,000ton
船速	13kt
有効馬力 EHP (= 抵抗 × 船速)	11,250PS
振動翼 水平一枚, 弾性翼	
翼幅	40m
翼弦長 C	8.0m
アスペクト比	5
翼型	NACA63A015
剛体部分の長さ	0.5C
前縁からのピッチング中心までの距離	0.25C
弾性部分の弾性率 E	$2.7 \times 10^6 \text{N/m}^2$
ヒービング振幅	4.8m
ピッチング振幅	15°
振動数	0.15 1/s
伝達馬力 DHP	18,000PS
効率 EHP/DHP	0.63

弾性翼の場合について、結果の一部を原論文から抜粋して示すと表5.1の通りである。

表で注目すべきは効率が0.63と高い点である。これには近似的ではあるが粘性修正を施してあり、また翼端から出る自由渦に基づく3次元修正も加えた結果であるので、実用的には大いに有望ということが出来る。効率が高い理由の一つは、アスペクト比が大きいので3次元修正量が少ないためで、これが本推進法の利点の一つである。アスペクト比が大きいことと表裏一体で、振動翼推進のもつ一番の利点は、振動翼を船幅一杯に配置できることであるといってもよい。スクリュープロペラの場合はその直径は船の喫水よりも大きくはならない。しかし一般に船幅は喫

水より大きく、2倍以上ある。殊に船がタンカーのように巨大化すると港湾、水道、海峡等では水深が限られているので自然に船の喫水も上限があり、巨大化によるメリットを活用するためにはいきおい船幅を増加させることになるので、傾向としては船幅喫水比は更に大きくなりがちである。前掲図5.33にはタンカーの線図が示してあるが、これからわかるようにプロペラの面積は船の横断面積の数分の一しかない。従ってもし振動翼推進を採用するとし、振動翼を船幅一杯にとると、プロペラに比べて少なくとも幅方向に面積は数倍に広がる。水深方向には簡単のためプロペラと同一の水深の水を加速しうるとすると、結局幅が広がった分だけ水を加速する領域が広がり、推進器を通過する水の質量がそれだけ増大する。第3章で述べたように、運動量理論によると同一推力を出すには質量が大であれば、それだけ水の加速は小さくてよいため、その分効率が上がる。図3.2で a が例えばプロペラの場合0.5とすると $\eta = 0.67$ となる。振動翼とプロペラの面積比が仮に控え目に3とすると、振動翼推進なら $a = 0.17$, $\eta = 0.85$ と一挙に上昇する。これは非常に単純な運動量理論による比較であるが、これ位効率に差が出るとすれば、このメリットは大いに生かす必要がある。

もう一つの利点は伴流利得である。プロペラの場合プロペラ円内を通過せずその外側を流れ去っていた伴流があり、その部分が持っているエネルギーを回収することが不可能であったが、振動翼では幅が大きいいためほとんどの伴流がこの推進器を通過する。このため伴流利得を生み出す水の量は少なくともプロペラの場合よりは大きい。

このように考えてくると振動翼推進は中々魅力的な推進法であり、今後もっと研究を進める必要があると考えられる。ただし、利点のみならず欠点も勿論存在するので、その検討も十分に行うことが重要であろう。

例えば上に述べた効率には翼を振動させる駆動装置の馬力が含まれていないが、振動翼の場合はスクリュープロペラと異なり上下往復動周期運動であるので現在のようなプロペラシャフトを回転させる機構の場合であれば回転運動をこれに変える機構が必要であり、この分が現在の機構に追加されることになる。従ってこの部分の効率損失をどの程度おさえるかが一つの重要なポイントになる。この他実船化のためには種々機構並びに構造上の検討が必須になることはいうまでもない。また性能関係でも、推力の時間変動の問題、推力の外に横力（この例では上下方向の変動力）が発生する問題などがすぐ検討を要する点であり、その他波浪中の性能並びに強度上の問題等具体的には多くの検討、調査項目が存在する。これらはすべて今後の課題である。

以上見てきたように、魚の高速遊泳能力解明の研究は、抵抗と推進にかかわる多方面の努力を積み重ねながら、ついに振動翼推進機構の工学的応用あるいは実用魚形ロボットと実験船建造の段階にまでさしかかってきたように思われる。グレイのパラドックスがたとえ未解明とはいえ、たとえば上述MITのRobo Tunaが世界の研究者、技術者を刺激し、その動きを一層早めるであろうことは、火を見るよりも明らかであろう。

Hertel教授がTUB-TUB-1に託し、一色教授が自然界との調和を求めた正にその線上において、21世紀初頭にはカツオのようにあるいはイルカのように水中を自由自在に遊泳するロボット魚や高速振動翼推進船等が出現し、あわせて海洋交通・輸送の新展開と海中探査・海洋開発の本格化に象徴される海洋文化の新しい時代がきり開かれていくものと著者らは確信している。

あとがき

シップ・アンド・オーシャン財団（以下SOF）より電話を頂いたのは2年前の1994年9月14日、ちょうど琉球大学工学部の定例教授会の最中であり、まず伝言で用件を伺ったと記憶している。内容は財団理事今市憲作大阪大学名誉教授のご指名で、魚の運動に関する研究会を始めたいから近々上京せよとのことだった。今市先生とは先生が大阪大学工学部教授の頃よりおつきあいを頂いており、15年程前には本学の集中講義を約一週間お願いしたこともあって大変懐かしく又嬉しい思いがした。同年10月4日SOF会議室において「造船工学講演会—魚の推進—」が開催され、共著者の田中が「魚の抵抗と推進」、永井が「振動翼推進機構について」を演題に各々1時間程度講演した。当日は謝敷宗登理事長、元良誠三理事（東大名誉教授）を始め、各理事および民間企業等関係者の方々にお集まり頂いた。

以上の経過の後、平成6,7年度のSOF事業として「基礎的発想力高揚のための魚類運動メカニズムの研究委員会」が今市（委員長）、田中、永井の3名を委員としてスタートした。ただし、まえがきにも書いたように、平成7年夏以降は今市委員長のSOF会長就任に伴い、田中委員長以下2名だけの委員会となった。委員会の趣旨はやや長いその名称に尽くされているが、SOFとして基礎的な研究調査活動を行い、将来の造船工学の一つの指針となるような蓄積をなしたい。できれば研究成果を一冊の本にとりまとめ、この分野における系統だった技術書として世に問うと共に、これからの造船界を担う学生、若手技術者の新鮮な発想力の喚起を促し、もって我国造船界の活性化に寄与したいというものであった。

今市先生の闊達な会議のリードや鋭い課題呈示に触発されて、またもともと水棲動物の抵抗と推進の問題に多少の関わりをもちながら、何時かはこの分野の奥深さについて何らかの解説書（田中）あるいは入門流体力学的な書（永井）を著したいと考えていた著者らは、一も二もなくその方針に賛同し本日までの足かけ3ヶ年の活動を共にすることになった。

研究活動の中心は平成7年度で、東海大学海洋学部(95/5/19)と国営沖縄記念公園水族館(95/11/23~24)への計2回の現地出張調査、のべ7回の研究委員会が開催された。平成8年度は専ら本書出版の編集委員会としてSOF会議室において、計5回の会議を開催した。

本書執筆者は、当初の3名に造船工学や生物工学の専門家を若干加えるとしても、できるだけ少人数とし著者の語り口がわかるような親しみ易い書にしようという方針だったが、結果的に2名のみによる執筆となった。しかし少人数執筆の利点はその欠点をはるかに上回るものだったといえよう。前半の3委員による研究会から、後半の2名による調査編集作業の最後の段階まで、常に濃密な意見交換と又ときには激しい討論がなされたといえる。今市会長を別としても田中、永井の両著者が造船工学と機械工学に分かれていたことは討論の幅を広げると共に、会議の度に互いに何か新しい知見を得るといふ利点をもたらした。

結果的に本書は、田中による第1章「緒論」および第5章最終節「水棲動物に学ぶ船舶設計」によって、本研究分野の幅広く周到な解説および将来の指針という大枠が与えられ、また永井による第2章「流体運動と抵抗の力学」により入門流体力学の一面を加えることによって、単なる技術書にとどまらずより一般的な啓蒙書になり得たと自負している。第3章後半から第5章前半が本書のいわば技術的全体であるが、両著者の知り得る範囲で国内外に渡るこの分野の全ての研究（史）を網羅したつも

りである。しかし本文中にも書いたが、例えば乱流境界層における抵抗低減の話題は本書執筆中においても著者らの知見はより新しくなったし、今後さらに活発になると予想される。その意味で著者らにはなおいくつかの新しい研究の萌芽について見落としがあるかもしれない。

永井は、約20年間にわたって琉球大学で少しずつ積み重ねてきた研究成果を、本書によって始めてまとまった活字にするという願ってもない機会を与えられた。同時に彼は、彼が早い段階で提唱していた無次元数（泳動数、 Sw ）が田中によって評価され、その適切な解説が与えられたことをそれ以上に喜んでいることを正直に付記しておきたい。実際今市、田中の両名誉教授こそ、永井にとっては研究を通じて知ることができたかけがえのない先達であり、又この分野の今後の研究を大いに鼓舞して下さった師であるといっても過言ではない。本文にも書いたように「グレイのパラドックス」は未解明である。しかし、今後一層の学際的そして世代を受継いだ研究が展開されるならば早晚「背理は新しい真理になる」であろうことが、本書編集を通じて得られた両著者共通の確信でもあった。

本書が参考にしたグレイ教授、谷一郎教授ら大先達の著書に対する、また今回カラー写真等貴重な資料を提供して下さった国内外の研究者に対する感謝の意はすでにまえがきに述べられている。著者らはさらに加えて、本書編集の為の情報検索等にご協力を頂いた東北大学小濱泰昭教授、東京工業大学中島求助手、琉球大学天久和正助手および琉球大学附属図書館伊佐牧子の諸氏に心より謝意を表する。本書の中心課題であるイルカおよびカツオの最高速度に関する研究では、沖縄記念公園水族館内田詮三館長、長崎崎次長および照屋秀司主任をはじめ職員の方々の協力がなければ一步も前に進むことができなかつたであろうことは言うまでも

ない。ここにあらためて衷心より御礼申し上げる。

幸い本書は財団職員と出版社の方々の努力によって、表紙、巻頭グラビア写真共々つい手に取って読みたくなるような美しい装丁に仕上げた。本書がともあれ多数の読者を得、編集発行者の意図通り、今後の本研究分野発展への一石となり、あわせてわが国造船界の活性化にわずかでも寄与できることを心より願っている。

1996年8月13日

大学の研究室にて

永井 實

参考文献

巻頭写真

- (1) 日本機械学会編, 写真集流れ, (1984-3), 丸善.
- (2) 松宮輝他3名, 第2章の(8)に同じ.
- (3) 戸田保幸, 第3章の(15), (16)を参照.
- (4) 佐藤猛, 第5章の(10)に同じ.
- (5) Triantafyllou, M. s., Triantafyllou, G. S., 第5章の(16)に同じ.

第1章

- (1) Breder, C. M., *Zoologica*, 4-5 (1926), N. Y. Zoological Society, 159-297.
- (2) Gray, J., *Animal Locomotion*(1968) Weidenfeld & Nicolson, London, 479pp.
- (3) 益田一他4人編, 日本産魚類大図鑑, 東海大学出版会, (1984-12).
- (4) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック(1987-6)丸善, 761.
- (5) Bainbridge, R., *J. Exp. Biol.*, **35**(1958)109-133.
- (6) 永井實, *Nagare*, **10-4**(1979)47-55.
- (7) Gray, J., *Scientific American*, **197**, 2(1957-8)48-54.
- (8) 種子田定俊, *Nagare*, **10-2**(1987.10)10-16.
- (9) ラディスラオ・レティ編集, 小野健一他10人訳, 知られざるレオナルド, 岩波書店(1975)の中の補遺, レオナルドの言葉, p.296.
- (10) Gray, J., *J. Exp. Biol.*, **13**(1936), 192-199.
- (11) Lighthill, J., *J. Fluid Mech.*, **9**(1960), 305-317.
- (12) Lighthill, J., *Annual Review of Fluid Mech.*, **1**(1969), 413-446.
- (13) Wu, T. Y., *J. Fluid Mech.*, **10**(1961), 321-344.
- (14) Wu, T. Y., Brokaw, C. J., Brennen, C. (ed.), *Swimming and Flying in nature*(1974)Plenum Press, N. Y. & London.
- (15) Lang, T. G., *Swimming and Flying in Nature*, **2**(1974), 553-572.
- (16) Webb, P. W., *Hydrodynamics and Energetics of Fish Propulsion*(1975), Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada.
- (17) McNeil Alexander, R., *Exploring Biomechanics-Animals in Motion*, Freeman & Co., N. Y. (1992); 日本語版, 生物と運動 (東昭訳) 日経サイエンス社(1992).

- (18) Bainbridge(1958)⁽⁵⁾からの引用, Regnard, P., *C. R. Soc. Biol.*, Paris, **9**-5(1893)81-83.
- (19) Hertel, H., *Structure-Form-Movement*, Reinhold Publishing Corporation, N. Y. (1966).
- (20) 東昭, 生物・その素晴らしい動き, 共立出版(1986-11).
- (21) Azuma, A., *The Biokinetics of Flying and Swimming*, Springer-Verlag(1992).
- (22) 谷一郎, 科学, **34**-9(1964-9), 471-476.
- (23) 奈良迫嘉一, 西部造船会会報, **44**(1972), 1-23; **45**(1972), 1-15.
- (24) 田古里哲夫, 芦立勲, 日本造船学会誌, **478**(1969-4), 1-10; **479**(1969-5), 15-26.
- (25) 一色尚次, 森川裕久, 日本造船学会誌, **642**(1982-12), 2-9.
- (26) 東昭, 日本航空宇宙学会誌, **33**(1985), 617-625.

第2章

- (1) バナール, 鎮目恭夫訳, 歴史における科学, (1970-5), みすず書房, 120.
- (2) フォン・カルマン, 谷一郎訳, 飛行の理論, (1967-2), 岩波書房.
- (3) Prandtl, L., *J. Roy. Aero. Soc.*, **31**-730(1927); パチェラー, 橋本・松信他訳, 入門流体力学, (1972-4), 東京電機大学出版.
- (4) Homann, F., *Forsch. Ing. - Wes.*, **7**-1(1936); パチェラー, (3)に同じ.
- (5) Wieselsberger, C., *Z. Flugtech., Motorluftschiffahrt*, **5**-142(1914); 富田幸雄, 水力学, (1989-10), 実教出版, 155.
- (6) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th ed., (1979), McGraw Hill, 127.
- (7) Schlichting, H., (6)に同じ, 38.
- (8) 松宮輝他3名, 日本機械学会論文集 (B編), **59**-566(1993-10), 2937.
- (9) Abbott, I. H. and Doenhoff, A. E., *Theory of Wing Sections*, (1958-6), Dover, 3.
- (10) Schlichting, H., (6)に同じ, 37.

第3章

- (1) 日本造船学会, 船舶工学便覧 (第1分冊), (1982-7), 624.
- (2) Glauert, H., *The Elements of Air-foils and Airscrew Theory*, (1947), 139.
- (3) Betz, A., *Z. F. M.*, 11(1920), 105.

- (4) Lighthill, J., *J. Fluid Mech.*, **9**(1960), 305-317.
- (5) 日本流体力学学会, 流体力学ハンドブック, (1987-7), 丸善, 758.
- (6) 神部勉, 日本航空宇宙学会誌, **25**-277(1977-2), 53.
- (7) 日本機械学会, 機械工学便覧, **A5**(1987), 116.
- (8) 永井實他3名, 日本機械学会論文集 (B編), **62**-593(1996-1), 200.
- (9) 中井哲朗, 振動翼推進機構の研究, 琉球大学修士論文, (1996-3).
- (10) 工藤達郎他3名, 日本造船学会論文集, **156**(1984-12), 82-91.
- (11) 久保田晃弘他3名, 日本造船学会論文集, **156**(1984-12), 92-101.
- (12) Videv, Todor A., Doi, Y., 日本造船学会論文集, **172**(1992), 165-174.
- (13) Videv, Todor A., Doi, Y. and Mori, K., 日本造船学会論文集, **174**(1993), 55-70.
- (14) Akimoto, H., Miyata, H., *Proc. 5th Int'l. Symp. on CFD-Sendai*, **I**(1993), 13-18.
- (15) Nakaoka, T., Toda, Y., *Proc. 4th Int'l. Offshore and Polar Engg. Conf.*, (1994), 530-538
- (16) Toda, Y., Tsutsumi, Y., *Proc. 3rd Symp. on Nonlinear and Free Surface Flows*, Hiroshima(1994-12).
- (17) 平石智徳, 第60回回流水槽懇談会(1981).
- (18) 戸田保幸, ミニ解説, The Finite Analytic Method, 日本造船学会誌, **760**(1992-10), 798.
- (19) Liu, H., 日本造船学会論文集, **178**(1995), 101-112.
- (20) 一色尚次, 森川裕久, 第1章(25)と同じ.

第4章

- (1) Nagai, M., et al., *Advances in Bioengineering*, ASME(1982), 56.
- (2) Lang, T. G., *Swimming and Flying in Nature*, Vol. 2, ed. by Wu, T. Y. (1974), Plenum Press, N. Y., 553.
- (3) 東昭, 日本航空宇宙学会誌, **33**-382(1985-11), 617.
- (4) Kramer, M. O., *ASNE Journal*, **72**(1960-2), 25.
- (5) 種子田定俊, 本地弘之, 九州大学応力研究所報, **26**(1967), 85-98.
- (6) 種子田定俊, 本地弘之, 九州大学応力研究所報, **27**(1967), 25-30.

- (7) 田古里哲夫, 回流水槽セミナーテキスト(1985-12), 回流水槽懇談会, 181-198.
- (8) 永井・真栄田・新里, 琉球大学理工学部紀要工学編, **10**(1975), 91.
- (9) Benjamin, T. B., *J. Fluid Mech.*, **9**(1960), 513.
- (10) Landahl, M. T., *J. Fluid Mech.*, **13**(1962), 609.
- (11) 種子田定俊, 友成義成, 九州大学応力研所報, **39**(1973), 57-65.
- (12) 種子田定俊他3名, 九州大学応力研所報, **39**(1973), 67-75.
- (13) 浦田瑛三, 竹中俊夫, 日本機械学会講演論文集, **740-6**(1974-4), 145.
- (14) 奈良迫嘉一, 鹿児島大学水産学部紀要, **25-2**(1976), 51.
- (15) Toms, A. B., *Proc. 1st. Int. Rheol. Congr.*, Vol. **2**(1949), North Holland Pub. Co. Amsterdam.
- (16) Hershey, H. C., and Zakin, J. L., *I & EC Fund.*, **6-3**(1967).
- (17) Hoyt, J. W., and Fabula, A. G., *ONR-Shipsmodelltanken Fifth Symp. on Naval Hydrodynamics* (1964), Bergen, Norway.
- (18) 田古里哲夫, 芦立勲, 日本造船学会誌, **478**(1969-4), 151.
- (19) 田古里哲夫, 芦立勲, 日本造船学会誌, **479**(1969-5), 211.
- (20) Ling, S. C., and Ling, T. Y., *J. Fluid Mech.*, **65-3**(1974), 499.
- (21) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th ed., (1979), McGraw Hill, 578.
- (22) Dinkelacker, A., et al., *Proc. IUTAM Symp.*, Bangalore, India(1987)109-120.
- (23) Walsch, M. J. and Weinstein, L. M., *AIAA Jour.*, **17-7**(1979-7)770-771.
- (24) Wallace, J. M. and Balint, J. L., *Proc. IUTAM Symp.*, Bangalore, India(1987)134.
- (25) 増山豊, 日本造船学会誌, **710**(1988-8)9-22.
- (26) 田古里哲夫, 第83回回流水槽懇談会(1987).
- (27) Tani, I., *Proc. Japan Acad.*, **64-B**(1988), pp21-24.
- (28) 西茂夫, 大坂英夫, 日本機械学会論文集 (B編), **60-574**, (1994-6), 113-120.
- (29) 小栗英美, 小濱泰昭, 日本機械学会論文集 (B編), **62-597**(1996-5), 76-83.
- (30) 高田・京極・中原, 日本機械学会講演論文集, **940-53**(1994), 109.
- (31) Lighthill, M. J., *Proc. Royal Soc. Lond.*, B. **179**(1971), 125.
- (32) Bainbridge, R., *J. Exp. Biol.*, **35**(1958), 109.
- (33) Lang, T. G., (2)に同じ, 566.

- (34) Guinness Book of Records, 1995, Guinness Pub., 28.
- (35) 谷一郎, 科学, **34**-9(1964-9), 471-476.
- (36) 東京水産大学編, マグロ—その生産から消費まで(1992-8), 成山堂書店, 155.

第5章

- (1) Hertel, 第1章の(19)に同じ.
- (2) 土屋喜一他2名, 第5回動物の運動セミナー資料, (1977-5), 1-14.
- (3) 一色尚次, 金属, **44**-11(1974), 61.
- (4) 一色尚次, 金属, **46**-12(1974), 65.
- (5) 一色尚次, 森川裕久, 日本造船学会誌, **642**(1982-12), 684.
- (6) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K., *J. Fluids Engrg.*(Trans. ASME), **116**(1994-6), 278-286.
- (7) 清水・鎌田・秋元, 日本機械学会講演論文集, **963**-1(1996-3), 169-170.
- (8) 中島求, ターボ機械, **23**-8(1995-4), 475.
- (9) 加藤直三, 古嶋意範, 第13回海洋工学シンポジウム前刷集, (1995-7), 日本造船学会, 109.
- (10) 佐藤猛, 関西造船協会誌“らん”, 第13号(1993-10), 19-23.
- (11) 永井實, 魚ひれ型水中推進装置, 特許1275556号, (1985-7), 特許庁.
- (12) Nagai, M., Maeda, G. and Irabe, K., 第4章(1)に同じ.
- (13) Nagai, M., Teruya, I. and Isaka, K., *Proc. 1st Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp.* (1990-6), 417.
- (14) 永井・照屋・中井, 日本機械学会論文集 (B編), **62**-597(1996-5), 177.
- (15) 永井他3名, 琉球大学工学部紀要, 第42号(1991-9), 19.
- (16) Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., *Scientific American*, **272**-3(1995-3), 64-70.
- (17) Gawn, R. W. L., *Shipbuilding and Shipping Record* (1950), 658-662.
- (18) 阿部宗明監修, 原色魚類大図鑑, 北隆館(1987-7).

索引

- ISOPE, 187
- Akimoto, H. (秋元博路), 107
- アクティブコントロール, 124
- アジ型 (推進) 運動, 11, 81, 86, 108, 117, 120
- アスペクト比, 86, 202
- 東昭, 33, 38, 120
- 圧縮性 (非 —), 54
- アーム, 89, 100, 186
- アメリカ杯ヨットレース, 134
- アリストテレス (Aristotle, B. C.), 39, 45, 75
- アリゾナ・リパブリック, 184
- アレクサンダー (Alexander, R. McN.), 32
- 一色尚次, 36, 89, 174-177, 187, 204
- イルカスタジオ, 149, 156, 158
- Wu, T. Y., 31, 170, 172, 173
- Webb, P. W., 32
- Walsch, M. J., 133
- 渦
- , 29, 52, 55, 66, 70, 102
 - 糸, 133
 - 度 (分布), 110, 113, 114
 - 理論, 27, 53
 - 自由 —, 71
 - 出発 —, 70, 71, 88
 - 束縛 —, 70, 71
- 馬蹄 —, 136
- ウナギ型 (推進) 運動, 11, 80, 108
- 浦田瑛三, 124
- 運動エネルギー, 68, 78, 82, 83
- 運動量理論, 76, 78, 80, 203
- ASME, 184, 185
- 泳動数, 16, 17, 24, 27, 93, 97, 100, 119, 148, 153, 160, 186, 192, 193
- NACA, 87, 94, 106, 108, 111, 133
- エネルギー保存則, 47
- M. I. T., 32, 195
- オイラー
- (Euler, L.), 46
 - の運動方程式, 46-48, 50, 53, 55
- 横断面積曲線, 198
- 大坂英夫, 136
- オキちゃん劇場, 149, 157
- 権, 169
- 回転水槽, 19, 31
- 回転方向干渉係数, 80
- 回流水槽, 16, 19, 34, 110, 123, 137
- 外輪車, 169
- 角運動量, 85
- 仮想慣性モーメント, 92
- 仮想慣性力, 95

仮想質量, 82, 85, 89, 92, 95-97, 101,

191, 192

加速度

—, 41, 46, 54, 55, 58, 76

対流 —, 47, 65

非定常 —, 47

無次元 —, 92

加藤直三, 177

加藤洋治, 102

ガリレオ (Galileo Galilei), 40

カルマン

— (Kármán, von T.), 26, 48, 56

— 渦, 25-27, 56, 195

逆 — 型渦列, 88, 124

換算周波数, 24

慣性力, 41, 58, 63, 103

神部勉, 173

管摩擦係数, 127

機械魚 (ロボット魚), 144, 174-180,

183, 195, 196

ギネスブック, 155, 157

奇妙な層, 129, 137

境界層

—, 60, 67, 113, 123

— のはく離, 61, 62, 66

— 理論, 60-62, 68

魚体まわりの流場, 107

キルヒホッフ

— (Kirchhoff, G.), 50

— ・レイリーの死水理論, 45

クッタ

— (Kutta, W.), 53

— ジュコフスキーの条件, 70, 88,
103

工藤達郎, 102, 201

久保田晃弘, 102, 201

グラワート (Glauert, H.), 80

グレイ

— (Gray, J.), 11, 30, 170

— のパラドックス, 16, 30, 36-38,
119

クレイマー (Kramer, M. O.), 122-124

弦 (弦長), 62, 90, 92, 102, 191, 201

検査空間, 76

抗力

—, 40, 41, 43, 50, 52, 53, 62, 66,
67, 71, 72, 76, 89, 117, 179,
191

— 係数, 59, 71

無次元 —, 92

小濱泰昭, 136

小林敏雄, 25

Gawn, R. W. L., 199

コンテナ船, 32, 198

コンピュータ

—, 20, 35, 89, 94, 99, 105

— シミュレーション, 70, 90

スーパー —, 55, 65-67

細長物体理論, 81, 86, 101, 145, 152

- Zakin, J. L., 125
- 作動円板, 76, 80
- 作用反作用の法則, 41, 75
- 軸流干渉係数, 78-80
- 次元解析, 14, 23, 117
- 自航試験, 23
- 自航状態, 23
- 自己推進運動, 107, 179
- 自己推進体, 23
- 自己相似, 129
- 実在流体
- (粘性流体), 45, 49, 53, 55-57, 61-64, 70, 73, 88
 - 力学, 53, 67, 76, 136
- 失速, 72
- 清水幸丸, 177
- 周波数 (振動数)
- , 16, 19, 24, 146, 153, 156, 179, 180, 184, 186, 192-194
 - 無次元 —, 24, 93
- 柔物体, 178
- ジュコフスキー (Joukowski, N. E.), 53
- Schwarz モデル, 102
- 循環
- , 51, 52, 70, 79, 87, 88, 171
 - 理論, 53, 72
- 進行波, 13, 34, 83, 108, 124, 145, 151, 172
- 振動翼
- , 34, 88, 89, 101, 102, 171, 183, 191, 194, 200, 201, 203, 204
 - 推進運動, 152
 - 推進機構, 89, 90, 100, 176, 177
 - 推進船, 36, 176, 187, 189, 194-196
 - 推進理論, 179, 187, 191
 - 理論, 87, 101
 - , 105
 - 2点ヒンジ — 機構, 89
- 推進 (推力)
- , 10, 20-23, 30, 33, 39, 40, 75, 81, 83, 84, 86, 88, 117
 - 器, 20, 21
 - 係数, 79, 80, 99
 - 効率, 79, 80, 83, 93, 95
 - 法, 10, 11, 14, 30, 34, 169, 202
- 数値実験, 65-67
- 数値流体力学 (CFD), 35, 76, 105, 107, 108, 115, 135
- スクリュープロペラ, 27, 34, 76, 78, 79, 169, 176, 202
- スコッチヨーク機構, 178, 183-185, 187, 189
- ストークス (Stokes, G. G.), 54
- ストラット, 185, 196
- ストローハル数, 25-27, 93
- 滑り
- (slip), 57, 136
 - 無し (no slip), 57, 60, 61, 66, 68, 136

線形理論

—, 35, 102, 103

非 —, 35, 102, 103

前進係数 (前進常数), 28

前進速度, 28

センターボード, 189

層流

—, 63-65, 105

— 境界層, 122

— 底層, 68

ダイレクトシミュレーション, 90

高田ら, 136

田古里哲夫, 34, 123, 126

谷一郎, 33, 48, 135, 136, 162, 165, 167,

173

種子田定俊, 23, 123, 124, 173

ダランベール

—, 47

— の原理, 41

— の背理 (パラドックス), 48, 53,

55, 61

タンカー, 32, 198, 203

薦原道久, 177

土屋喜一, 174

抵抗

—, 10, 20-23, 39

— 係数, 59, 60, 118, 139, 143,

165

— 検出器, 138

— 実験, 23, 34, 131

— 状態, 23

ティーチェンス, 55

Dinkelacker, A., 130, 131

テオドルセン関数, 88

Doi, Y. (土井康明), 105

動力 (パワー), 78, 81-83, 92, 117, 129

動力係数, 92

特異点分布法, 101

戸田保幸, 110

トムズ

— (Toms, B. A.), 125

— 効果, 124, 125, 136

トリアンタフィロ (Triantafyllou, M.),

32, 184, 195, 197

トリッピングワイヤ, 68

中島求, 177

ナビエ

— (Navier, C. L. M. H.), 54

— ・ストークスの方程式, 35, 54,

55, 58, 64

奈良迫嘉一, 34, 173

日本機械学会, 190

日本造船学会, 126

ニュートン

— (Newton, I.), 40

— の3法則, 41

— の粘性法則, 42

— 流体 (非 — 流体), 43

ねじりつるまきバネ, 189, 192, 194

粘性

動 — 係数, 15

—, 49

— 係数, 42

— 底層, 68

— 流体力学, 29

— 力, 54, 55, 60

ハコフグ型 (推進) 運動, 11

Hershey, H. C., 125

バースト, 133, 136

旗, 123, 124

パッシブコントロール, 124

Batchelor, 25

八丁槽, 177

バネ, 178, 180, 182, 192, 194

バネ定数, 180-183, 192

バネ反力, 90

はばたき運動, 76

パワー (動力), 32, 37, 117-121, 159,
160, 162-165, 167, 184, 195

微小突起 (リブレット), 130, 132-136

Videv, T. A., 105

ピッチング (pitching), 87

ピトー (Pitot, H.), 47

ピトー管, 47

ヒービング (heaving), 87

Fabula, A. G., 125

フィンシップ, 176, 177, 187

不可知論, 137

ブラジウス (Blasius, H.), 61

プラントル

— (Prandtl, L.), 55, 68

— の境界層理論, 60

— の式, 127

フーリエ級数, 93

Breder, C. M., 11

プロニー法, 183

分泌物, 34, 43, 124, 126, 127, 129, 197

ヘアピン型渦, 133

壁面摩擦応力, 128, 133

ベッツ (Betz, A.), 80

ヘルテル (Hertel, H.), 33, 170, 173, 177,
204

ベルヌーイ

— (Bernoulli, D.), 46

— の式 (定理), 47, 52, 77

Bainbridge, R., 16, 18, 19, 30, 31, 33,
146, 148

Hoyt, J. W., 125, 126

ポリマー, 125, 127-129, 136

Borelli, 33

宮田秀明, 107

迎え角

相対 —, 96, 181, 191

—, 45, 52, 71, 72, 90, 91, 182

茂里一紘, 105

森川裕久, 176

ヨーイング, 187

揚抗比, 71

揚力

—, 41, 51, 52

— 係数, 71

— 理論, 45, 52

翼 (翼形)

運動量・ — 素理論, 80

対称 —, 94-96, 98, 153, 195

平板 —, 94, 95, 98, 103, 189

—, 52, 62

— 素理論, 80

— の運動, 69

— 理論, 52, 79

よどみ点

—, 49, 52, 53, 69, 70

— 流線, 49, 50, 52, 53

ライト兄弟, 61, 62

ライトヒル (Lighthill, M. J.), 30, 81, 148,
152, 174

ラダー (舵), 187, 189

Lang, T. G., 32, 37, 155, 162

ランナウェイ, 85, 98, 100, 101

乱流

—, 63

— 境界層, 68, 122, 129, 136

理想流体

—, 46, 49, 50

— 力学, 29, 136

リブレット (微小突起), 130, 132-136

Liu, H., 115

流管, 46

流線

—, 46

— 形, 25, 62, 65

流体要素 (粒子), 47

リン (Ling, S. C. & Ling, T. Y. J.),
126, 129, 131, 137

レイノルズ

— (Reynolds, O.), 63

— 数, 15, 58, 64, 119

— の相似則, 58

レイノルズ数, 133, 144

レイリー (Lord Rayleigh), 50-52

レオナルド・ダ・ヴィンチ, 29

Regnard, P., 33

槽, 169

ロボット魚 (機械魚), 9, 36

Weis-Fogh 機構, 177

Weinstein, L. M., 133

渡辺 謙, 148, 174, 176

著者紹介

田中一朗 (たなか いちろう) 1931年神戸生まれ

大阪大学名誉教授。大阪大学工学部造船学科1953年卒業，続いて同大学院修士・博士課程を修了，以後工学部において造船学，船舶海洋工学の教育・研究に従事。1973年工学部教授，1993年大阪大学附属図書館長。1995年退官。専門分野は船舶粘性流体力学。1963年～65年アメリカ，ステイーブンス工科大学客員研究員。日本造船学会功労員。造船技術賞（吉識賞）受賞。関西造船協会前会長。



永井 寶 (ながい みのもる) 1944年那覇生まれ

琉球大学工学部教授。九州大学工学部機械工学科1967年卒業，続いて同大学院修士・博士課程を修了。学位論文は「擬似衝撃波に関する研究」。1972年琉球大学講師，1987年より現職。琉球大学への赴任以来，魚の泳動，振動翼推進機構および風力エネルギーの有効利用に関する研究等に従事，1984～85年カリフォルニア工科大学，ユニバーシティ・カレッジ・オブ・ロンドン客員研究員。日本風力エネルギー協会理事，発明協会沖縄支部理事等もつとめる。



抵抗と推進の流体力学「水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ」

平成8年9月30日 発行

発行者 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団

〒105 東京都港区虎ノ門1丁目15番16号

電話 (03)3502-1890 FAX (03)3502-2033

印刷 株式会社 扇興社

ISBN 4-916148-00-2 © 1996 SHIP & OCEAN FOUNDATION