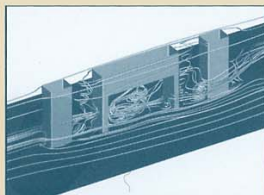


開水路乱流研究の進歩と 今後の課題

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻
梶津家久 Prof. I. Nezu

2010年12月6日 基礎水理シンポジウム、土木学会





Journal of Hydraulic Engineering

Forum

- 229 Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect
in the 21st Century
Iehisa Nezu

Technical Papers

- 247 Case Study: Model to Simulate Regional Flow in South Florida
A. M. Wasantha Lal, Randy Van Zee, and Mark Belnap
- 259 Geomorphological and Meteorological Control of Estuarine
Processes: A Three-Dimensional Modeling Analysis
*Quamrul Ahsan, Alan F. Blumberg,
Andrew J. Thuman, and Thomas W. Gallagher*
- 273 Role of Slip Velocity in the Behavior of Stratified
Multiphase Plumes
Scott A. Socolofsky and E. Eric Adams
- 283 Numerical Model of Turbidity Currents with a Deforming
Bottom Boundary
Heqing Huang, Jasim Imran, and Carlos Pirmez
- 294 Structure of Flow Upstream of Vertical Angled Screens
in Open Channels
C. Katopodis, S. A. Ead, G. Standen, and N. Rajaratnam
- 305 Design of Straight Expansive Pipe Transitions
Prabhata K. Swamee, Akhilesh Garg, and Somen Saha
- 312 Diameter and Surge Effects on Solute Transport
across Surcharged Manholes
I. Guymer, P. Dennis, R. O'Brien, and C. Saiyudthong
- 322 Simplified Model of Tractive-Force Distribution
in Closed Conduits
Siow-Yong Lim and Shu-Qing Yang

contents continue on back cover



Environmental and Water
Resources Institute

本講演は、アメリカ
土木学会 (ASCE)
論文集2005年
4月号の招待論文
を基に行ったもの
である。図面のみを
以下で掲示しても、
内容がわからない
と思われるので、ぜ
ひこの論文を讀ん
でください。

Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century

Iehisa Nezu, M.ASCE

Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyoto Univ., Kyoto 606-8501, Japan. E-mail: nezu@nezu.gee.kyoto-u.ac.jp

Introduction

In 1883, Osborne Reynolds reported experiments in real viscous pipe flows and made the seminal distinction between laminar or turbulent flow regimes, each with quite distinct flow characteristics. Early pioneering research on turbulence emanated from the Göttingen group of Ludwig Prandtl, who developed the concept of the boundary layer and proposed a mixing-length turbulence closure, and from the Cambridge group of G. I. Taylor, who provided a theoretical basis for a statistical description of turbulence, with specific results for isotropic turbulence. Important flows, such as those in open channels, boundary layers, and pipes are, however, turbulent shear flows, so the theory of isotropic turbulence cannot be directly applied to such shear flows. The concept of local isotropy, introduced by the Russian group of Kolmogoroff has proved useful in understanding these flows. These theoretical concepts will be briefly reviewed.

Experimental research in turbulent boundary-layer and pipe flows has been conducted in air flows since the 1950s using hot-wire anemometry. In contrast, most basic research on open-channel turbulence has only been conducted since the 1970s, because of difficulties in applying thermal anemometry to typical water flows in hydraulic laboratories. Since the 1980s, laser anemometry has made experimental studies in open-channel turbulence much less arduous (though still rather expensive), permitting detailed investigations of not only basic two-dimensional (2D) uniform flows, but also, more recently, unsteady and (3D) channel flows. The following highlights contributions to open-channel turbulence research, particularly those by our group at Kyoto University.

Achievements before 1970s

Importance of Shear Stress and Eddy Vorticity

Consider idealized 2D uniform open-channel flow over a smooth bed (located at $y=0$) shown in Fig. 1. The wall shear stress, τ_w and the related friction velocity U_* are then found as

$$\tau_w = \rho v \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{y=0} = \rho U_*^2 = \rho g h S_0 \quad (1)$$

where ρ =the fluid density; v the fluid molecular kinematic viscosity; h the flow depth; S_0 the energy (and also bed) slope; $\bar{u}(x,t) = U(y) + u(x,t)$ the instantaneous velocity in the streamwise (x) direction; the position vector, $\mathbf{x}=(x,y,z)$; U the time-averaged mean velocity; and u =the turbulent fluctuating velocity

about the mean (Fig. 1). As such, for real wall-bounded flows, $\tau_w \neq 0$, and the vorticity component $\omega = \Omega_z = -\partial \bar{u} / \partial y$ cannot vanish near the wall [see Eq. (23)].

For steady laminar flows in boundary layers and pipes, u and v are identically zero, and "exact" velocity profiles and friction laws were derived by Blasius and others. In contrast, prediction of mean profiles and friction in turbulent flows must confront the closure problem, to be discussed in a later section. For turbulent flows, the flow consists of eddies with a continuous spectrum of scales and is characterized by 3D vorticity fluctuating in space and time. Further, turbulence characteristics in practical shear flows are not isotropic. The largest eddy is confined by flow boundaries, e.g., the flow depth, and thus has a football-like shape, as shown in Fig. 2; whereas, the scale of the smallest eddies is constrained by the action of viscosity, by means of which they are "dissipated."

Theory of Locally Isotropic Turbulence

Large eddies are continuously transformed into smaller eddies in a cascade process, with turbulent kinetic energy being "transferred" from large to small scales. Kolmogoroff proposed a model of locally isotropic turbulence in which an intermediate "inertial" subrange exists between the largest and smallest eddies (Fig. 2). In this subrange, the process of energy transfer is independent of v and is governed solely by the rate of dissipation of turbulent kinetic energy

$$\varepsilon = v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} > 0 \quad (2)$$

where summation is taken over repeated indices. Smaller eddies have a tendency to be more isotropic, as shown in Fig. 2. The scale of the smallest turbulent eddies is given by the so-called Kolmogoroff microscale, $\eta = (v^3/\varepsilon)^{1/4}$, constructed from ε and v , since these eddies are limited by viscous dissipation into heat. Kolmogoroff derived the well-known $-5/3$ power law describing the 1D energy spectrum, $S(k_w)$ in the inertial subrange

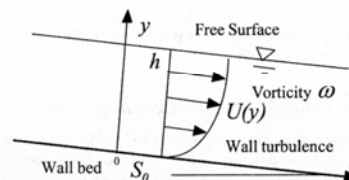


Fig. 1. Definition sketch for steady 2D uniform open-channel flow

アメリカ土木学会論文 文集2005年 4月号招待論文 Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, pp.229–246.

著作権の関係で、
土木学会での掲示
は断念します。各自
取り寄せて、読んで
ください。

本講演時に、参考資料として、
拙著：「水理学・流体力学における乱流の研究
史と研究展望」、土木学会誌3月号、1989年。
を配布しました。20年以上前の論文エッセーで
すが、内容は現在でも有効な箇所が多いと思
います。シニアになった小生ですが、学生・若
手には今後頑張ってもらいたいと思っております。
土木学会のホームページなので、以下に全文
を掲示します。ぜひ読んでください。

(学生の)皆さま

20 年前に土木学会誌に研究展望したのですが、現在でも有用と思います。

ぜひ笑読し、新しい学問を切り開いてください。 2008 年吉日。+2010 年 12 月

水理学・流体力学における乱流の研究史と研究展望

History and Prospect of Turbulence Research in Hydraulics and Fluid Mechanics

瀬 津 家 久*

Iehisa NEZU

まえがき

流れには層流と乱流とがあるが、河川・湖沼・海岸・海洋などの自然界の流れの大半は乱流といっても過言ではなく、乱流現象の解明は水理学・流体力学の中で最も重要ではあるが、しかし最も難解で現在でも解明し尽されていない魅力あふれる研究分野である。この乱流構造を解明することが流れの制御や水理構造物の合理的な設計に不可欠である。また、乱流は、運動量、エネルギー、各種の物質（土砂、汚泥、水質など）および熱（火力・原子力発電所からの温排水など）等の各種の輸送現象を支配するから、乱流特性を導入した流速分布則、流れの抵抗則、乱流拡散・分散あるいは土砂輸送則を確立することが急務であるが、現在まだ十分には発展していない。

本報告は、機械・航空工学等の分野で発展して来た気流乱流の研究に比べて水流での乱流研究が立ち遅れた理由を科学史に基づいて筆者なりに整理し、21 世紀に向けての研究展望を行ってみたい。

1. 河川技術者レオナルド・ダ・ヴィンチと武田信玄

水理学・河川工学は、古代ローマ時代の水道工事（1 世紀頃）や隋の大運河建設（605 年）に例をとるまでもなく、経験的に発展して来たが、16 世紀に今日の河川工学の「元祖」が生まれたと思われる。16 世紀は欧州ではルネッサンスの爛熟期であり、一方日本は戦国時代に相当し、この時代に天才的に活躍したレオナルド・ダ・ヴィンチ（1452～1519 年）と武田信玄（1520～1573 年）を通して水理学・河川工学の源を見てみよう。当時の日欧の文化・社会が現在よりはるかに異質であったにもかかわらず、両人の境遇や人間形成が酷似する点は驚かされる。私生児であったダ・ヴィンチは 20 才でフィレンツェの画家として父から独立し、師匠のヴェロッキオを

助けて、「キリストの洗礼」でデビューした。一方、信玄は、21 才のとき父を駿河に追放し、甲斐国守として独立したのである。ダ・ヴィンチは、30 才のとき隣国（ミラノ公国）のミラノに移住し、スフォルツァ家に仕え、「最後の晩餐」などの名画をはじめ音楽に至るまで芸術家として、また医学（解剖学）、飛行機の設計、光学、そして水理学など科学者としてその天才ぶりを発揮し、世に「ダ・ヴィンチありき」を高々に示した。一方、信玄は、35 才で川中島の激戦をくぐり抜け、甲斐・信濃を平定後、領国経営や民政に力を注ぎ、「人は情、人は城」をモットーに人材の適材適所や個性を重んじ、世に「信玄ありき」とその政治力を示した。そして、現在でも河川工学上評価の高い、暴れ川の釜無川に信玄堤を築造し、治水事業を断行した。漢学に精通していた信玄は、身をもって「水を治むる者、国を治む」を実行した日本の傑出した政治家であった。

一方、ダ・ヴィンチは、48 才のとき故郷のフィレンツェに帰り、アルノ川の河道設計や港湾工事の主任技師として活躍するが、この間に「モナリザ」を完成させるなど芸術家と土木技術者（広義には科学者）の両面で開花した真しく驚くべき天才である。ダ・ヴィンチが水流に興味をもったのは、幼児のときヴィンチ村近くで起きた強烈な竜巻による脅威が終生忘れられず、今の言葉でいえば「自然災害」の怖さを身をもって体験したからであろうと推察される。そう思って彼の残した名画をよく見ると、「モナリザ」を始めとして多くの人物画のバック（背景）に河川や湖沼が描かれており、また、素描にも「洪水」や「暴風雨」などの流れの「正確な」スケッチが多く残されており、自然を直視した彼の科学者・水理学者としての像が浮き上がるのである。これが最も端的に現われているものが図—1 に示す素描であろう。1510～15 年の間に描かれた 60 才台の素描とされ、図中の左側の石のベンチに座った老人がダヴィンチ自身の自画像として有名である。水理学史にとって特に重要なのは、同一紙葉の右側に何と「橋脚周辺の流れ」がそれも

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科



図一 熟考するダ・ヴィンチの「自画像」と橋脚周辺の流れ（ヘアピン渦）のスケッチおよびその観察記録
ウィンザー王立図書館蔵（No.12579, 1510-15年の素描）

「現在の水理学・乱流の知識」に照らし合わせてもほぼ正確に描かれている点である。より専門的にいえば橋脚周辺（広義では bluff body といい、ビル風、つり橋の耐風設計、航空機、高速艇また新幹線や自動車などの高速輸送機（車）の開発などのハイテクには不可欠な解明すべき剝離現象）で発生する馬蹄型渦（ヘアピン渦ともいう）を世界で最初に可視化した者がダ・ヴィンチといてよい。図中に注釈された彼独特の鏡像文字を解読すると次のように記されている。

“(橋脚周辺の) 水面運動を観察すると、毛髪 (hairpin) に酷似している。毛髪には2つの運動があり、1つは毛髪の重さに、もう1つは毛髪のカールの向きによる。水もこのようにして渦を巻く。すなわち、1つの運動は主流に推進（移流）され、もう1つの運動は間欠的な (intermittent) 逆流によるものである”(カッコの文は筆者の加筆)。この記述は、現在の流体力学から見てもほぼ妥当であり、ニュートン力学が誕生する180年程前になされたダ・ヴィンチの思考の天才ぶりには驚嘆する。さらに注目すべき点は、渦（乱れ）を hairpin で類似させた鋭いひらめきである。後述するように、開水路乱流や境界層乱流の本質的な現象すなわち平均流から乱れを発生させて乱流状態を維持させる現象（バースト現象という）がなんと hairpin 渦モデルで表現できることが1987年実験的にも、またスーパーコンピュータをCPU時間のみで10日間以上も稼働させてナビア・ストークス (N-S) の式を直接解いた数値計算 (Direct Numerical Simulation (DNS) という) でも実証されたのである。筆者は、ダ・ヴィンチの時代を超越した鋭い科学的な直視や思考の天才にただただ驚嘆するのみである。それも、熟考する自画像の隣りにこの「乱れの研究」

を500年も昔に発表したのである。水流はフィレンチェのアルノ川との定説であるが、筆者にはダ・ヴィンチ64才のときフランソワ1世の招きで移住したフランスのロアール川ではないかと思われる。ロアール川に面した彼の住居だったクロ・リュセを先年訪ずれたとき、近くに多スパンの橋があり、晩年を素描とそのノートの整理に静かに過ごしたと伝えられる姿が目に見えたからである。

ダ・ヴィンチの死の45年後にガリレオが、また124年後にニュートンが生まれ、連続体力学（固体力学や流体力学など）の基礎であるニュートンの運動法則が誕生した。このニュートン力学の誕生（1687年）の後、流体運動の定式化がヨハン・ベルヌイやその子ダニエル・ベルヌイによってなされた。今日の水理学でよく使うベルヌイ式はダニエルが確立したものであり、彼の親友のオイラーと共に、応用数学や「完全流体」の力学の分野で多大な貢献をなしたのである。

最後に、ダ・ヴィンチ以降の乱流の研究はほとんど進展がなかった。上述のベルヌイらの対象とした流れは乱れ（渦）がないいわゆるポテンシャル流（完全流体）であった。今からほんの100年程前の1883年に英国のレイノルズがダ・ヴィンチと同様の手法、今日でいう「流れの可視化」によって流れには「層流」と「乱流」の2つのパターンがあり、それがレイノルズ数によって決まることを初めて発見したのである。

2. 20世紀の流体力学および水理学

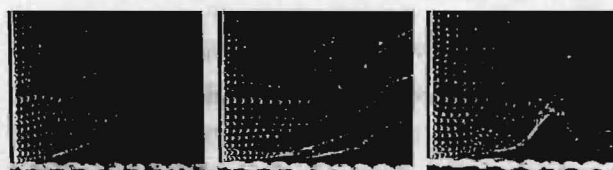
ベルヌイ、オイラーの後、ラグランジュ、ラプラス、ヘルムホルツ、シュワルツらの多くの応用数学者によってポテンシャル流理論は複素関数論を使って華麗に展開されたが、その流れは理想化されたいわゆる数学上の「完全流体」であり、粘性や渦（乱れ）がある「実在流体」とはかけ離れた机上の空論（やや言い過ぎか）であった。その最も深刻な問題が、流体機器や航空機を設計するに当たって摩擦力（推進力）をポテンシャル流理論では評価できず、まったく無力だったからである。すなわち、「ダランベールのパラドックス」として有名なように、ポテンシャル流理論では抗力が常にゼロと計算されるから、推進機の馬力等の設計が不可能であり、もっぱら実験的・経験的にそれを設計していたからである。この意味では、19世紀末まで水力学は水理学とほぼ同一視してよいであろう。なお、ポテンシャル流理論は、学問（応用数学）としてその後、ラムによって集大成され、1932

年不朽の名著である「Hydrodynamics」が出版された。ポテンシャル流理論は、応用数学や流体力学の教育として不可欠な学問であるが、もはや研究の余地は少ないと思われ、現にラムの名著以上のものはその後出版されていないようである。

20世紀初頭までの流体力学の理論（ポテンシャル流理論）と実験との深刻なギャップは、1904年プラントルによる境界層理論の発表で一気に埋められた。プラントルのいたゲッティングではカルマンをはじめ著名な研究者が続々輩出し、今日の流体力学の基礎を築いた。1930年代には、航空機の開発に欠かせない気流の乱流計測器として初めて熱線流速計が開発され、一方、カルマンやケンブリッジ大学のテラーによって乱流の等方性理論が展開された。1940年代になるとロシアのコルモゴロフによって局所等方性理論が発表され、やっと自然界のせん断乱流にも適用できる理論の緒が着いたのである。これらの乱流理論の構築に当っては、気象学者のテラー、数学者のコルモゴロフ、素粒子論のハイゼンベルグなど流体屋以外の大学者の寄与が大きいことは何を意味するのであろう。

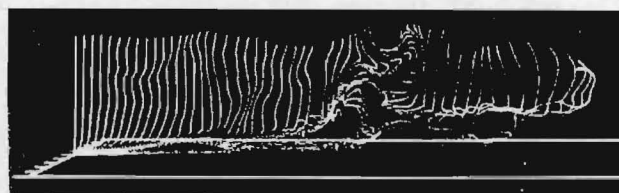
乱流の実験的研究は、風洞を用いて戦後の1950年代に米国のNACA（NASAの前身）で精力的に行われた。境界層流や管路流の乱流統計値（平均流速分布や乱れ強度あるいはレイノルズ応力など）の標準値として現在でもよく引用されるデータは、NACAで得られた実験値であり、戦後の「米国の力」と欧州における「戦争の影」を流体力学の中にも強く感じられる。1960年代になると、エレクトロニクスやコンピューターの進展により、気流の乱流計測機器やそのデータ処理器の性能が飛躍的に向上し、局所等方性理論などの統計理論を背景に、熱線流速計や圧力変換器を使って流速変動および圧力変動を点計測し、それらの変動波形のスペクトル解析や相関解析を行えば乱流のすべての内部構造は解明されるという盲信があったと筆者は考える。1960年代を「点計測（センサー計測）の黄金時代」とよくいわれるが、これは皮肉であって決して喜べない。1967年、クラインらのスタンフォード大学グループは、「乱流は文字通りランダムに乱れた流れ（したがって統計処理のみでよい）」であるという従来の常識を覆すバースト現象（図-2を参照）を境界層流で発見した。1970年代になると、バースト現象こそが境界層流など壁面せん断乱流（壁面をもち、このため速度勾配がある流れをいう）の乱れエネルギーを主流から発生させ、乱流状態を持続させている最も本質的な現象であることが発見された。また、壁面という

境界条件のない流れ（自由乱流という）である混合層や噴流（ジェット）にもバースト現象と同様な組織立った構造が1974年に相次いで発見され、この組織渦同士の合体や周囲流体の巻き込みこそが乱流拡散や物質混合の主因であることがわかった。これら、乱流の本質というべき現象は、精度の高い熱線流速計ではなく、当時定性的な、あまり価値ある計測とは考えられていなかった流れの可視化によって発見されたのは時代の皮肉であり、乱流研究の元祖である500年前のダ・ヴィンチの自然現象に対する直視にもどるべきであった。バースト現象は、水理学で取り扱う開水路乱流にも同様に存在することが筆者らによって確認された。図-2(a)~(c)は、粗面開水路乱流で水素気泡法技術を用いて筆者らによって可視化された一連のバースト現象を示すものである。河床近傍（ビー玉粗面）の低速流体が(a)で浮上し、それが(b)で3次的に振動して周囲流体と相互作用をしはじめ、(c)で激しく上層の高速流体中へと噴出して（この意味でバースト（burst=爆発）と命名された）低速流体と高速流体との激しい相互作用が行われ、乱れやレイノルズ応力が主流から発生するのである。特に重要な点は、(a)から(c)へのプロセスがほぼ周期的に発生し、また空間的にも組織立った流体塊であり（この意味で「組織乱流」とも「組織渦」とも呼ばれる）、決してランダムな運動ではない。しかし、流速計の速度信号を従来のように単純に統計処理すると、これらの有意ある変動特性が（乱流では有意どころか、その本質であった）平滑化され、1960年代の「点計測法」では発見されなかつ



(a) 浮上 (Lift-up) (b) 振動 (Oscillation) (c) エジェクション (Ejection)

(A) 水素気泡法による水路実験



(B) スーパーコンピューターによる数値シミュレーション

*) Direct Numerical Simulation

図-2 壁面乱流の最も本質的なバースト現象
(*) Kim の提供による

たのである。天才アインシュタインの子供は水理学者であり、彼は1956年すでに開水路でバーストラシきものを発見し報告したのであるが、当時の主流であった乱流の統計理論からは逸脱し、まったく日の目を見なかった。ここに、乱流に限らず、自然・社会科学の諸現象を単純に統計処理する際の怖さをかい間見る思いがする。1970年代後半から現在に至るまでの10余年間の境界層流などの乱流研究はこのバースト現象の解明に精力的に費やされたといっても過言ではないであろう。

さて、一方の水理学の20世紀における進展を見てみよう。プラントルの直弟子のカルマンは1930年にカリフォルニア工科大学の教授に就任し、米国における水理学・流体力学をはじめ構造力学の分野にも多大な影響を与え、米国の科学界を活性化させた。カルマンの所には、戦中・戦後の水理学や河川工学の発展に多大な貢献をなした若き日のアインシュタイン、パノニ、イッペン、デイリーらのそうそうたる学者が集まっており、またドイツのカールスルーエ大学に留学していたラウス青年をカルマンは呼びもどしたのである。これらの若き日のカルマン門下生の潑刺した自由な研究雰囲気が推察され、このことは後述するロンドン大学インペリアルカレッジの1970年代の若手研究者集団についてもいえることであり、「学問の斬新な発展のためには若手研究者の潑刺とした自由な発想が必要である」と筆者は提言したい。ラウスは、カルマンの影響を強く受け、1938年に名著「水工技術者のための流体力学」を出版し、経験則のみに立脚していた当時の水理・水工・河川工学に流体力学の必要性を説いた。水理学における乱流研究の重要性は上述のカルマン門下生の等しく認識する所であったが、気流に比べて水流計測の困難さから、戦前は単にピトー管による計測（それもピトー細管内の水の粘性のため気流計測に比べてはるかに精度が悪い）に終始しており、それも気流で発見されたプラントル・カルマンの平均流速の対数則分布の検討が精一ぱいであった。1957年頃イッペンはピトー管の総圧管に圧力変換器を取りつけ、乱流計測を行おうという斬新なアイデアを考え、「流速変動らしきもの」を計測して注目されたが、圧力変動と流速変動とを総圧管方式では原理的に分離できないことが示され、この試みは失敗に終わった。

1960年代終りに気流計測の熱線センサーを数ミクロン厚の石英で被膜し、水との電気絶縁を行う技術すなわちホット・フィルム流速計が開発され、1970年代初めにこれを使って水流の乱流計測が十分可能であることがイッペン門下生らによって示された。1975年頃からは

流速2成分が同時に計測できるX型ファイバースコープが開発され、やっと開水路乱流の研究が本格的に行えるようになった。1980年代になると、レーザー光線のドップラー効果を応用したレーザー流速計が開発・実用化され、流れの3次元計測という高精度を要する実験も行えるようになった。レーザーは、ホット・フィルムに比べて、センサーを水流に挿入しないから流れを攪乱する心配がなく、しかも流速と出力電圧（ドップラー周波数）とが理論式で定まるから流速計の速度検定をまったく必要とせず、高精度な乱流計測が行える理想的な計測器である。

このように、水流の乱流研究はここ20年間で進展して来た比較的新しい学問分野であるが、レーザー流速計の高性能化また最近では光ファイバー技術を応用したレーザー流速計も登場し、水流の乱流特性に関するデータがかなり蓄積された。その結果、境界層や管路流のデータと十分に比較・検討できる段階まで達し、開水路乱流特有な現象も発見された。

3. 水理学と流体力学との関連性

土木工学で扱う水理学の学問体系やその位置づけを明確にするために、その基礎となっている流体力学との関連性を論じてみたい。水理学（Hydraulics）と流体力学（空力学を除けば水力学（Hydrodynamics）と同意義）とはもともと同一のものであった。それがなぜ分離し、現在に至るまで両者間に溝があるのだろうか。以下は筆者個人の見解であり、もしご賛同願えるならば幸いである。プラントルの境界層理論が提案される前までは水理学も流体力学もほぼ同一視でき、工学上重要な「流れの抵抗則」が理論的に評価できないため実験や経験則に頼っていた。すなわち、ポテンシャル流理論は工学上まったく無力だったからである。しかし、境界層理論が提案され、壁面せん断応力（壁面の摩擦力）が理論的に計算できるようになった。この画期的な成果は、航空機の推進力（抵抗則）や揚力の計算また翼形状の設計に強力に活かされ、今日のジャンボ機やスペースシャトルの設計が可能になったのである。

一方、水理学は残念にもこの画期的な成果を活かすことがほとんどできなかった。ラウスを始め、米国の著名な水理学者はカルマンの影響を受けたから境界層理論は十分知っていたはずであろう。それができなかったのは、航空機や流体機器の設計という人工構造物に比べて河川・という自然現象は手に負えないほど複雑だったかも知れ

ない。あるいは、河川技術者がカルマン門下生らの水理学者とは遊離した実務優先の存在であり、「河川工学は実学であり、難しい理論は不要である……」といった雰囲気があったのではないかと推測している。前述の1938年出版のラウスの名著を見ると、そう感じるのである。少し専門的になり恐縮であるが、開水路流れは他の分野の流れとまったく等しくナビア・ストークス(N-S)式で支配されている。それは、移流項、重力項、圧力項それに粘性力項から構成される。ガウスの発散定理を用いれば、粘性項を除く他の3つの項はすべてコントロールボリューム(C-Vと略記する)内で積分すると、体積積分が面積積分に変換でき、すなわちC-Vの面(検査面という)を単位時間に通過した量(フラックスという)に変換できる。たとえば、運動量式やベルヌイ式がガウスの発散定理を用いて容易に導かれる。しかし、粘性項はガウスの定理が適用できず、フラックス表示できない。完全流体ならばこの項はゼロであり、ベルヌイ式が厳密に成立する。境界層理論以降の流体力学では単位体積当りのエネルギー逸散率 ε を定義し(運動エネルギーが熱エネルギーに散逸する割合である)、粘性項が厳密に取り扱われる。このように粘性項がフラックス表示できないのは、 ε がC-V中の流体間の内部摩擦のために発生するからであり、流体の本質である。

ε の定義式は複雑であり、「水理学」の従来の多くの教科書では ε はほとんど使われず、C-V全体で失うエネルギー損失水頭を h_L で定義し、 h_L を経験則から評価するのである。すなわち従来の水理学は、ここで初めて流体力学から離れ、実学の道を取るものと思われる。 h_L は、壁面せん断応力に起因する「摩擦損失水頭」と、流水断面や形状が急変するため起こる「形状損失水頭」に大別される。前者は、主としてマンニングの等流公式が使われ、後者は急拡大損失のみボルダ・カルノー則が使われるが、他の形状損失はまったくの実験式(経験値)であり、その内部構造は不問とするブラックボックス的な取り扱いである。マンニングは1889年マンニング公式を発表するが、この式中の粗度計数 n が次元をもっているため物理的根拠に乏しく、彼自身でさえ自分の公式に不満であったと彼の論文に記述されているが、これがちょうど100年経つ1989年の現在でさえ水理学の、いや河川工学の中心として使われているのは河川などの自然界の流れがそれだけ複雑すぎるためであろう。

戦前の水理学が、ラウス等の一部の先覚者を除いて低迷し、マンニングの粗度係数 n を評価する複雑な実験式を作ることに終始したことは実学とはいえ何とも虚しさ

を禁じ得ない。流体力学や乱流理論で最も重要な物理量は実は先述の乱れの熱逸散率 ε である。平均流規模の最大渦が平均流からエネルギーを摂取して(この現象が図-2のバーストであった)、次から次へと小さなスケールの渦にこのエネルギーを伝達し(これをカスケード過程という)、粘性が直接効く最小渦までエネルギーが伝達されると、これが粘性作用で熱へと変換するのである。この一連のプロセスがいわゆる乱流現象そのものであり、伝達されるエネルギーこそが最終的に熱に変わる ε に他ならないからである。河川技術者が n の値を求めるのに翻弄されている間に、コロモゴロフは上述のカスケード過程に ε を導入して局所等方性理論を構築し、有名なスペクトルの $-5/3$ 乗則を導き、戦後のせん断乱流の研究に先鞭をつけたのである。また、次章で述べる数値流体力学の分野で1つの確固たる地位を築いた、水理学の分野でも最近人気のある k - ε 乱流モデルは、乱れエネルギー k と逸散率 ε を導入して、従来やはり経験的に与えていた渦動粘性係数を準理論的にN-S式の中で閉じらせて流れを数値計算する手法であり、 ε がいかに重要なパラメーターであるかご理解いただこう。

4. 数値流体力学の誕生

コンピュータの発展、特にスーパーコンピュータの開発によって乱流の数値計算がここ20年間で可能になってきた。乱流の数値計算手法には、(1)多方程式モデル、(2)Large Eddy Simulation (LES)、および(3)Direct Numerical Simulation (DNS)とがある。(1)は流体力学に裏付けられた乱流の完全なモデル化、(2)は計算格子以上の大規模渦(組織渦となることが多い)はN-S式の直接計算であるが、計算格子以下の微小渦(先述のように熱逸散率 ε に関与している渦)は乱流のモデル化であり、(3)になって初めてモデル化のないN-S式の直接計算が行われる。しかし、(1)から(3)の順に計算量は飛躍的に増大し、工学的・実用的には(1)の多方程式モデルの開発・適用が現状である。ところが、(2)特に(3)は、乱流の基礎研究には非常に強力な武器であり、図-2に示したバースト現象に代表される組織渦の解明には不可欠なものになりつつあり、また、(1)や(2)で用いられる乱流モデルを同定する際にもきわめて有用である。

工学的計算手法となった多方程式モデルの中でも先述の k - ε モデルは比較的汎用性があり、その標準型はほぼ確立された。 k - ε モデルは、英国のインペリアル・カ

レッジの30才前半の若手研究グループが1970年代に流体機器内の流れとその熱輸送を数値予測する目的で精力的に開発した。1980年代になって、その開発に携わり、帰国してカールスルーエ大学の教授に迎えられた Rodi が境界層や管路流に比べてはるかに複雑な境界条件をもつ開水路流れに適用し、蛇行流（遠心力による2次流が強いため、直線水路の3次元流れより計算がはるかに容易である）、温排水、ダム越流などの平均流速の分布特性を合理的に予測することに成功した。筆者らは、最近、日独国際共同研究を行い、 $k-\varepsilon$ モデルの新しい計算スキームを開発して、従来 $k-\varepsilon$ モデルの適用が最も悪かった逆流を伴うステップ剥離流（河川用語では「段落ち流れ」あるいは「落差工」という）を非常に高精度（5%以内の誤差）に数値計算することに成功し、エネルギーの形状損失の内部構造を準理論的に解明しつつある。

一方、Moin と Kim は、1982年 LES 法を開拓し、スーパーコンピューターを駆使して世界で初めてバースト現象を再現し、数値流体力学上、画期的な業績を残した。特に、2. で述べたように「古典的な統計理論」から逸脱したバースト現象の存在自体を認めようとしなかった保守的な理論家を駆逐するには十分であった。しかし、壁面乱流の組織渦であるバースト現象を定性的にはこの LES 法でよく再現できたが、定量的には組織渦のスケールが実験値より約2.5倍も大きく計算されることが次第に判明し、現行の LES モデルに根本的な欠陥があることが示唆された。この原因究明のために、Kim らは、1987年とうとう乱流モデルをいっさい使わず N-S 式を直接解く計算手法すなわち DNS 法を開発し、レイノルズ数 $Re=3300$ の管路乱流を CRAY-XMP スーパーコンピューターを実に10日間以上（250 CPU hours）稼働させて計算し、想像以上に多くの、実験では得られなかった知見をも（実験で得られるデータには定量的にも一致した）与え、きわめて貴重なデータベースを作ったことは賞賛に値し、米国 NASA の研究レベルの高さが改めて認識させられる。

図-2(B) は、この Kim らの DNS の結果をコンピューターグラフィックスしたものであり、(A) の開水路乱流で実測されたバースト現象を実によく再現している。図-3 は、等渦度面のグラフィックスであり、バースト運動がヘアピン（hairpin）渦で表現できるという従来の仮説がみごとに N-S 式を使って実証され、その発達過程がこの DNS によって初めて解明された意義は大きい。また、この渦の挙動は、図-1 に示した500年前のダ・ヴィンチのヘアピンとよく似ているではないか。特

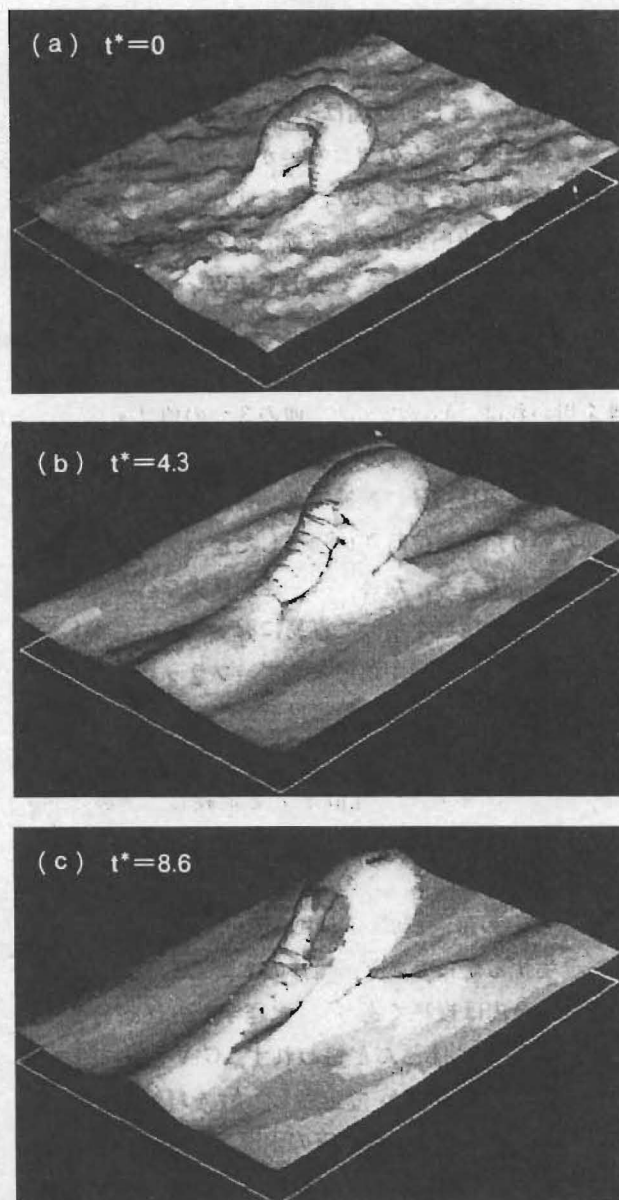
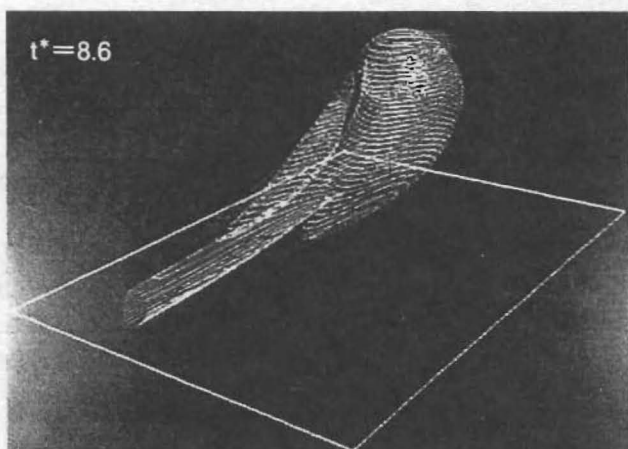


図-3 バースト現象のヘアピン渦の発達過程（Kim の提供による）

$t^* \equiv tU_{\max}/h$ （ここで、 h =水深、 $U_{\max}$ =最大流速）は無次元時刻を示す。

に、渦度変動を実測することは現在でも非常に困難なことを考えると、図-3の重要さがご理解していただけると思う。最後に、図-4 は、ヘアピンの先端がちょうど水面に達したときの瞬間レイノルズ応力のコンターを示すものである。白、青、緑、黄の順でレイノルズ応力は減少するコンター面であり、赤が負の応力を示す。瞬間レイノルズ応力は「乱れの発生」と同義であり、ヘアピンの頭中で最も乱れが発生し（図-2(c) に対応する）、ヘアピンの脚部の直上では負の乱れすなわち乱れエネルギーが平均流へと還流する現象も実測値通り予測されており、きわめて重要な乱流物理の本質に迫る結果である。



図—4 ヘアピン渦で生成されるレイノルズ応力のコンター図 (Kim の提供による)
(図中の赤は負の応力、黄、緑、青、白の順で正の応力が増加する)

5. 21 世紀に向けての水理学・流体力学の果たす役割

今後の水理学は、再び流体力学へと接近し、融合するのではないかと、あえて区別する必要はないと私が必ずや近い将来来ると筆者は思う。もしそうでなければ戦前の水理学と同様に低迷し、2 度と流体力学へ接近できないであろうし、基礎科学の仲間には入れないであろう。バーストなどの組織構造 (Coherent Structure) の研究も 4. で述べた数値計算手法の開発も流体力学では 1970 年代以降の新しい未開拓の分野であり、現在ならば水理学はこれに迫ることができると思うからである。

今後の水理学をも含めた流体力学の研究展望は、レイノルズ数 Re が大きな流れの乱流挙動特に組織渦 (筆者はこれを地球規模程度の大規模乱流 (Geophysical Large-scale Turbulence (GLT) と最近命名した) の物理機構の解明であると考えている。数値流体力学は 4. で述べたようにやっと $Re=3300$ の乱流の直接計算 (DNS) が可能となったが、自然界の流れの Re 数は $10^6 \sim 10^7$ 程度であり、これを数値計算することは超スーパーコンピュータが出現しない限り不可能に近いかも知れない。しかし、昨今注目されている地球温暖化機構の解明とその防御 (2030 年頃には CO_2 濃度が、化石燃料の消費が今のままだと産業革命前の値の約 2 倍となり、 CO_2 の温室効果で地球の平均気温が約 $4^\circ C$ 上昇する (北極圏では $10^\circ C$ 以上も上昇する) ことが数値流体力学の 1 種である大気大循環モデル (General Circulation Model (GCM)) を使って気象学者によって数値予測され、地

球の砂漠化や海面上昇など地球規模で起こりつつある環境変化が人類の生存を脅かすものと心配されている) には水理学・流体力学の知識特に GLT の知見が多大な貢献を果たすものと筆者は思う。現行の GCM モデルにはまだ多くの欠陥があるといわれている。その最大な欠陥は CO_2 が河川・湖沼・海洋などの Geophysical Flows に吸収される割合が現在不明であり、GLT や密度躍層が果たす役割が未解明である点であろう。GLT に及ぼす地球の自転に伴うコリオリ力の影響評価や現在でも 3 カ月以上の長期な気候の変動に大きな影響をもたらす極まわりのジェット気流の大きなうねり、すなわち GLT の解明が 21 世紀に向けての大きな研究プロジェクトになろう。また、GLT は、各種の水文現象や酸性雨の発生メカニズムを解決する鍵が内在しているだろう。土木工学が関与する河川・湖沼・海岸・海洋での GLT の解明には実験や野外観測と数値計算の両面からのアプローチが必要であり、しかも地球規模で起こる現象を対象とするから国際共同研究が不可欠であろう。

河川・海洋にもバースト現象が存在することがすでに報告され、バーストの発生周期は水深と主流速など流れの主流条件 (外部変数という) に支配されていることが定説になっていた。しかし、最近の高レイノルズ数での風洞実験によると、バースト周期は流体の動粘性係数および壁面せん断応力で決まる摩擦速度 (流体の特性で決まるから内部変数という) で支配されるとの新しい見解が提案され、乱流研究の中で少なからず混乱が起きている。バースト周期の内部・外部依存性というきわめて重要な課題を解決することが流体力学の発展の上で避けて通れない研究であろう。また、これは上述した地球の温暖化や酸性雨をはじめ各種の水文・環境変動に重大な影響を及ぼすと考えられる GLT を解明する基礎研究でもあり、国際社会の強いニーズでもあろう。筆者らは、図—3 のヘアピン同士の群体化 (Agglomeration) に着目して、乱流 (GLT) は単一のヘアピンとそれが群体化した巨大ヘアピンそれに主流規模の大スケール渦とから構成されるという「乱れの 3 重構造的仮説 (Triple Structure of Turbulence)」を最近提唱し、これを実証すべき野外観測をも含めた各種の実験および計算を国際共同研究したく思っている。欧州では高レイノルズ数での GLT の解明のために EC 諸国が巨大風洞を建設しようとする動向にあり、1990 年から開始される国際防災 10 年 (IDNDR) や国連環境計画 (UNEP) を含めて今後地球規模で起こる諸現象の解明に国際共同研究がいっそう重要となろう。この動向は、国際水理学会 (IAHR) や国

際応用力学連合 (IUTAM) ででの主要な研究テーマが「乱流」という基礎研究に置かれている点にも反映されており、水理学・流体力学が果たす役割は大きいものと考えられる。

あとがき

乱流は、「水理学」と「流体力学」とをジョイントするきわめて重要な研究分野である。なぜなら、自然界の流れの大半は乱流であり、各種の輸送現象を支配し、また環境を変化させたり制御したりするから人間活動にも密接に関与するからである。本報告で筆者が主張したかった第2の点は、流体力学をも含めた科学の根本原理・法則の開拓にかかわった重要な理論的・実験的研究をした例が日本には少ないことである。このことは、有限要素法など構造力学等の数値計算と同様に、4.で紹介したように、コンピューターが日米より若干劣っていた欧州は知恵を働かせて多方程式モデルを構築し、一方、コンピューターの進んでいた米国では少々強引ではあったがLESやDNSを開発し、予想外に大きな収穫を得たのである。残念ながらこの分野でも日本人による独創的

研究はきわめて少なかったといわざるを得ない。

「日本の科学は欧米からもはや学ぶ所がない」と豪語する一部の研究者がいる。果してほんとうだろうか？ 筆者は、「独創なくして日本の未来はない」と主張する西澤潤一東北大学教授の独創開発論に深く共鳴する者だが、21世紀がほんとうに日本の時代ならば、日本人は進んで独創的研究、基礎的研究をすべきであり、また、若手研究者がこれを行える環境作りをすることが文部省をはじめ各種の学協会のご長老の先生方の責務ではないかと思う。スーパーコンピューターの開発で最先端を行う日本、欧米で開発された基本原理を上手に利用して成長した経済大国の日本が、今度は世界に向けて恩返しする番であり、地球規模で起こりつつある恐ろしい環境変化の機構解明に貢献できるまたとない機会である。青く美しい地球を取りもどすために土木工学分野を始め、各分野で独創的な基礎研究を行うよう切磋琢磨するとともに、21世紀を担う学生諸君への真摯な教育が今こそ求められているときではないかと提言し、むすびとする。

最後に、貴重なデータを提供してくれたNASA Ames研究所の乱流物理研究室長 Dr. J. Kim に謝意を表します。
(1988.8.22・受付)

★技術士第二次試験は①必須科目、②選択科目＝経験問題、
③選択科目＝専門技術問題が出題されます。
(書名上の番号は、上記問題の収録を示したものです)

63年度試験問題解答例収録／4月上旬発売 ①②③

技術士第二次試験の解答例

〔建設・水道部門〕 B6判・定価4,600円・送料450円

技術士第二次試験〔建設・水道部門〕①②

必須科目・選択＝経験問題の解答例

(15年間の問題と解答例収録) B6判・定価3,600円・送料450円

技術士第二次試験〔建設部門〕③

選択科目＝専門技術問題の解答例

(14年間の問題と解答例収録) B6判・定価3,700円・送料450円

技術士第二次試験の解答例と添削指導

〔建設・水道部門〕①②③ A5判・定価7,900円・送料650円

近代図書

〒162 新宿区新小川町4-17 ☎03(268)8771
郵便振替 東京4-23801 FAX03(268)8774

最新版4月上旬発売！

技術士第一次試験の 〔建設部門〕 解答例

B6判・定価3,000円・送料450円

1級 (新刊)

土木施工管理技術検定 模擬試験講座

A5判・定価2,500円・送料650円

■試験の出題問題、練習・予想問題を
組み合わせた模擬試験を中心にして、
最小の努力と時間で合格できる新し
いシステム。

1級土木工事技術者試験 問題の解き方

B6判・定価3,500円・送料450円

■学科試験を解くために必要な基礎知
識と過去の出題問題の解説・解答が
各章毎に執筆されている。