

水理学・流体力学を創った人々

日野 幹 雄

1. 何ぞ「水理学の歴史」か。

われわれが教養課目の一つとして人類や世界の国々の歴史を学ぶのは、祖先のこと自分の国や外国の国々の過去を知りたいという好奇心に始まり、過去から現在にいたる事柄を記録し子孫に伝えたいという欲求からでもあり、また過去における国々の間の争い・友好や誕生・滅亡あるいはまた為政者の行為を通して過去に学ぼうとするためであろう。

それではなぜ、客観的な学問の一つである水理学について歴史を考えようとするのであろうか。確かに過去のことを知りたいという好奇心も作用してはいるものの、そこには一般の歴史—国や国民や政治の歴史—を知ろうとするのとは、少し異った意味があると思う。それには「水理学」をどう考えているかということと深く関わっている。水理学には土木工学において実際に遭遇する問題に具体的な解を与えるという実用的な面と、いま一つはいくつかの基礎法則を基に一つ一つ構築された論理大系という面がある。私は特にこの「論理体系としての水理学」に強く関心をもっている。こうした点から水理学をみると必然的に歴史にもまた関心を持たざるを得ない。

われわれの頭脳は、突如として新しい何かを生み出すものではなく、その時代々々の知的レベルや関心、そしてまた社会全体のレベルや要求とも無関係ではない。一人の天才が生れるためには、それに匹敵する数人の天才がいたはずであるし、また彼らを育てた知的土壌があったはずである。

それゆえ「私の水理学の歴史」は限られた少数の人々にのみ焦点をあてながら彼らの業績を通じて考え方の進化を辿ろうとするものである。また、「水理学」そのものは客観的非個人的なものであるけれども、「水理学」を創った人々は長所も短所も持った普通の人間である。そこで、彼らにまつわるエピソードを織り込んで「水理学」「流体力学」を身近に感じさせたいと考えている。こうした点で私の水理学史は普通の科学史・技術史とも力点が多少異っている。

2. 開拓者たち

a) 万能の天才—レオナルド・ダ・ビンチ

普通ならば技術・科学の歴史は多分エジプトやギリシャあたりから始めることになるだろう。確かに古い時代にもいくつかの水力機械の発明などもあるけれども、私の「水理学の歴史」は現代の理論科学としての水理学の源流を探ることにあるから、経験主義の時代は含まれない。科学としての水理学をみると、ガリレオ・ニュートンあたりから始めるのが一般的であろうけれども、私はもう少し時代を遡らせてレオナルド・ダ・ビンチ (1452—1519) の時代から始めよう。ダビンチは現在ではモナリザなど名画を数多く遺した

1500年頃の画家としてのみ一般に知られている。しかし、彼は画や彫刻のみならず技術や医学（解剖）にも通じた万能の天才であった。事実、ミラノ公スフォルツァへの自薦文に、私は橋も架けられます、城も築けます、大砲もつくれます等々とあり、一番最後に絵も画けます、彫刻もできますと書いている。

水理学の面からみると、ダビンチは渦のスケッチを残しており、こゝに彼の鋭い観察眼が示されている。また、川の水は雨が元だというわれわれ日本人にとっては自明の理と思われる現象を、ヨーロッパの人々が永いこと川の水は地下水がめから湧き出てくると信じていた時代（水文学の誕生は1684年フランスのマリオット（1620－1684）が試験流域での降雨と流量の観測から降雨－流出の関係を確認したときに始まる）、すでにダビンチは川の水は降水によるものと考えを持っていたといわれる。その他、川の流れについての考察が多数ある。また、飛行機械についても種々考察しスケッチをのこしている。全日空のマークはダビンチのヘリコプターのスケッチを図案化したものである。

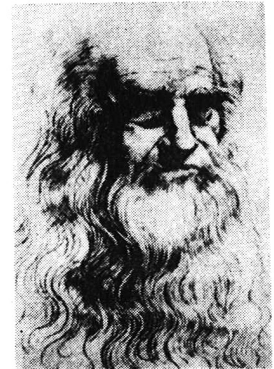


図1 ダビンチ

渦といえば、物体の後に左右交互に発生するカルマン渦についての記録はいつまで遡れるのだろうか。ポーロニヤの教会にあるダビンチよりもやゝ後であるがほぼ同時代の画家の描いた「キリストを抱く聖クリストファ」には、聖徒クリストファ（クリストファとはキリストを渡すものとの意味）の足もとから出る二列の交互のカルマン渦が画かれているということである。

b) 近代科学の夜明けーコロンブス・コペルニクス・ケプラー・ガリレオー

さて、この時代は1492年コロンブスによるアメリカ大陸の発見（もっともそれ以前にもヴァイキング達はアイスランド経由で北アメリカに達しており、またすでにベーリング海峽を渡ったモンゴル系のインデオ達が高度の文明を築いていたのであるから、アメリカ大陸の“発見”と呼ぶのはおかしいとの意見もある）に始るヨーロッパのそして科学の新しい幕あけの時代であった。コロンブスのアメリカ発見には、地球は丸いということに対する科学的確信、広い大洋を航海する航海術の発達と大型船の建造技術の進歩があり、またこうした大船団による大航海を可能にした富の蓄積が背景にある。

コロンブスによるアメリカ発見、ダビンチによる自然の観察・探究の延長上に（といっても直接の因果関係ではないが）、コペルニクス（1473－1543）の地動説（1543）、ケプラーの惑星の運行に関する法則（1609）があり、そして近代科学の祖父と位置づけられるガリレオ（1564－1642）がいる。

c) アイザック・ニュートン（Sir Issac Newton, 1642－1727）

神が人類に贈られた最高の科学者である。17世紀後半に彼の創出した力学は19世紀に電磁気学が誕生するまで物理学の世界のすべてであり、その後においてもその重要性はいさゝかも揺いではない。

近代科学的思考法はガリレオ・ガリレイ（1564－1642）に始まり彼は近代科学の祖父といわれる。奇しくもガリレオの歿年（1642）、ニュートンは英国の小村ウールズソープの小地主（ヨーマン）の子として12

月25日に生れた。しかし、半年後に父は死亡し、間もなく3才のときに母は富裕な司祭と再婚したため、彼は孤独な少年時代を送った。

ニュートンは1661年ケンブリッジ大学トリニティ・カレッジに入学し、やがて1669年10月彼の師バローにその才を認められ若くして師よりルーカス教授職を贈られその第2代目に就く。ニュートンがその生涯の偉業（万有引力、ニュートン力学、微積分学、光と色の新理論）の着想を得たのは大学卒業後わずか半年後ペスト流行のため大学が閉鎖され、故郷ウールズソープにおいて思索に耽ったわずか1年半の間の彼が24才のときのことといわれる。しかし、最近の研究によればそれに先立つ2年間の大学やカレッジの図書館での読書と思索から創造力が胎動し、故郷での孤独のうちに先人の書物から離れじっくりと推敲したとみられるようになった。当時の最尖端の哲学者であったデカルトの著作を読み刻明にノートを取っている

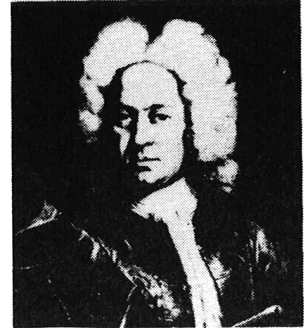


図2 ニュートン

ことがわかっている。（そう言えば2世紀のちの1905年にEinsteinがニュートンの力学像に挑んで特殊相対性理論を発表したのは26才のときである）。この1666年は、ペストの大流行と大火に打ちひしがれたロンドンの復興と当時の大国であったオランダ海軍に対して、英国海軍が勝利をおさめたことに因んで“驚異の年”といわれている。

ニュートンは論文を発表することには憶病であった。これは初めて彼が発表した光と色の理論（1672）についてのフック（フックの法則やミクログラフィア（顕微鏡観察誌、1665）により知られる）との激しい論争に原因があったといわれる。彼の力学像を集成した「プリンピキア」3巻（1687）も万有引力の法則の発見を巡るフックとの先取権論争をきっかけとして、14才年下の友人である天文学者エドモンド・ハリ（E. Halley, ハリー彗星の軌道計算で有名）の精神的財政的援助によるといわれる。このプリンピキアには彼の創始した微積分は用いられておらず、もっぱら幾何学的方法によって説明されている。おそらくは、全く新しい微積分では理解者は少ないと考えたためであろう。ドイツのライプニッツ（G. W. Leibniz）は1675年に微積分学を発見し、1684年公表したが、以後永くその先取権をめぐるニュートンと相争うこととなる。今日用いられている微積分記号はライプニッツによるものである。

ニュートンは卓抜した科学哲学者であったが、一方においてフック（光学、万有引力）やライプニッツ（微積分学）との対立・論争にも示されるようにライバルを徹底的に減さずにおかないそして怒りっぽい激しい気質の人であったといわれる。（ニュートンに関する研究が最近すゝんだのは1936年ニュートンに関する資料、自筆手稿等が競売されたことにある。例えば、その半分近くを手に入れたケインズ理論で知られる経済学者ケインズは多忙な生活の中でタクシーの中でまでも読んでニュートンの錬金術師としての面を紹介した。）

大著プリンピキアを書き上げたニュートンは一時（1693）精神的に不安定（強うつ病）になる。大作後の疲れとも、最後の錬金術師ともいわれるように物質変換の実験に用いた水銀などの有害ガスのためと

もいわれる。やがて、ニュートンは大学選出の国会議員となったり (1689, 1701), また造幣局長官 (当時最高の収入があった) を長いこと (1699~1727) 務め, また王立協会 (Royal Society) 総裁をながくその死まで続け (1703~1727), 晩年まで眼鏡も用いる必要もなく強壮な体にめぐまれ, 最後まで学問への情熱は衰えなかった。理由は不明ながら生涯独身のまゝ, 数々の名声・榮譽に包まれて1727年85才という高令で歿する。遺体は最高の儀礼をもってウエストミンスター寺院に葬られた。

「私は海辺に遊ぶ少年に過ぎず, 時折滑らかな小石や美しい貝殻を見付けては嬉々としているが, 真理の大海原は発見されぬまゝ眼前に横たわっている」というニュートンの有名な言葉は彼の死の少し前に語られたものである。

d) ダニエル・ベルヌーイ (Daniel Bernoulli, 1700~1782)

ベルヌーイ家はオランダからフランスおよびドイツ国境に近いスイス・バーゼルに移り住んだ新教徒で17世紀末から約1世紀の間にわたって8人に及ぶ第一級の数学者・科学者を輩出させた。水理学におけるエネルギー保存則であるベルヌーイの定理は, 1738年に“Hydrodynamica”を著わしたD. ベルヌーイに因んでいる。

ダニエル・ベルヌーイは数学者であった父ヨハン・ベルヌーイ (Johon Bernoulli, 1667~1748) に友人であるオイラーと共に数学の手ほどきを受けた。父ヨハンはその兄 (つまりダニエルの伯父) ヤコブ (Jacob Bernoulli 1654~1705) とともにニュートンやライプニッツ (Leibniz 1646~1716) の創始したばかりの微積分学を良く理解しその発展に務めたことで知られる。



図3 ベルヌーイ

彼はピョートル大帝の妃に招かれて20才台の7~8年をロシヤのペテルスブルク (St. Petersburg (現在のレニングラード)) のアカデミーにおいて数学の教授として過した。彼の名声を決定的にした‘Hydrodynamica’は30才台の前半のペテルスブルク滞在中に書かれ, 1738年ストラースブール (現在仏領の都市) で出版された。この著作のコピーは出版の前にペテルスブルク滞在中のオイラーと父ヨハンに送られた。この成功を見て父ヨハンは息子の名声に嫉妬し自尊心をいたく傷付けられた。彼は直ちに同じく流体の力学に関する‘Hydraulica’を書き上げたが, あたかもそれが息子のものより先に書かれたかの如くよそおうため発行の年月を実際の年 (1743) より10年も繰り上げ1732年としている。これにはペテルスブルクのオイラーあての手紙も添えられ手の込んだ細工がなされている。いずれにせよ親子とは云え, すさまじいばかりの功名心, 対抗心といわなければならない。

このような父ヨハンの反応には, 彼の数学上の業績のすべてが当時彼のパトロン (当時の常として学者は王公貴族をパトロンとして生活していた) であったフランスの数学者ロピタル (l’Hospital 1661~1704) の名で発表されたことに対する焦りと不満があったとも云われている。

いわゆるベルヌーイの定理にまつわるいま一つのエピソードは, 彼の著作には今日の形でのベルヌーイの定理は記されていないことである。彼自身速度水頭やピエゾ計水頭については十分良く知ってはいたが,

圧力（水頭）についての理解は十分ではなかったといわれる。今日彼ら父子の著作（原著はラテン語）を英訳で読むことができるが、微分積分の使用も十分ではなく、当時の本としては多数の画が挿入されているものの中には誤りと思われるもの（もっとも特殊な例なのであるが）もあり、ベルヌーイはベルヌーイの定理を完全には理解していなかったと評されるゆえんである。なお、Euler がいわゆる Euler の運動方程式やベルヌーイの定理の完全な誘導を発表するのはその後の1752年である。

彼は生涯ついに結婚することはなく、したがって彼の系統は絶えた。

e) レオンハルト・オイラー (Leonhard Euler 1707–1783)

スイス・バーゼルに生れ、年少時代は若干年長の友人ダニエル・ベルヌーイ（ベルヌーイの定理のベルヌーイ）とともにダニエルの父ヨハン・ベルヌーイから数学の手解きを受けた。長じて彼はペテルスブルグですでに数学教授職にあった幼な友達D. ベルヌーイによるキャサリン I 世への推挙によりペテルスブルグで物理学ついでベルヌーイの帰国後を受けて数学教授職も併任した。一時フリードリッヒ大王に招かれてベルリンのアカデミーで活躍したが、その学者生活のほとんどをロシアのペテルスブルグにおいて行った。

すさまじいまでの研究生生活による過労のためか、または酷寒のロシアの気候のゆえか、すでに28才で右眼を失い、その後二度目のロシア移転後には左眼も失った。それでも研究ペースを崩すことなく息子たちに論文の著述を手伝わせて研究発表を続けている。その論文表題だけで50ページを占めるといわれる。

彼の水理学・流体力学での業績は、代数・幾何・微積分・光学・力学など幅広いしかも第一級の数々の業績の極く一部に過ぎない。オイラー数、変分問題における Euler の微分方程式、今日グラフの理論として知られる問題（Königsburg の 7 つの橋の一度通過、いわゆる一筆書きの不可能の証明、1738）における業績は良く知られている。

オイラーはD. ベルヌーイとは違って2度の結婚をし、13人の子供をもうけている。

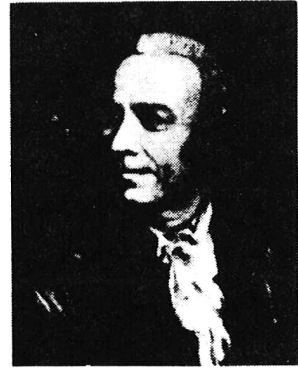


図4 オイラー

3. 19世紀の水理学・流体力学と土木技術者達

— Cauchy, Navier, Hagen, Manning, Eiffel —

土木技術者も、流体力学の成立・発展には意外に大きい貢献をしている。その代表的例として表記の5名を挙げてみた。

a) 病弱のため数学者に転向した若者—Cauchy

Augustin-Louis de Cauchy (1789–1857) は正確に云えば土木技術者ではなく、土木技術者になろうとしてなれなかった病弱青年である。話はこうである。1789年に始まるフランス大革命の成功後、列国のフランス共和制政府に対する圧力干渉はすさまじかったが、新生に意気燃えるフランスは軍事の天才ナ

ポレオンのもと近隣のヨーロッパ諸国に対して次々と勝利をおさめて行った。勝に乗るナポレオンはドーバー海峡を一気に押し渡ってイギリスをも征服しようと目論んでいた。このためには大量の兵員物質を海をわたって輸送しなければならず、港湾整備が急務であった。若いCauchyはこの戦いに工兵隊として参軍すべく、École Polytechnique (1807), École des Ponts et Chaussées (1810) に入学した。しかし、生来の病弱のため軍人にはとても無理であった。彼の教師であるLagrangeやLaplaceは逸早くCauchyの数学の才を認め、数学への転向を推めたのであった。流体力学ではポテンシャル流の理論における等角写像に関連してCauchy-Riemannの定理としてあらわれる。研究は多才で解析学を本領とし微分積分の基礎、複素関数論の主定理の証明、微分方程式の解の存在証明などの他代数学の行列式論、群論での先駆的業績、理論物理学の光学・弾性学の研究もある。Académie des Science会員 (1916), École Polytechnique 教授, Sorbonne教授を務めた。

ナポレオンの時代、ナポレオンの学問好き・学者好きもあってフランスには数々の学者とくに数学者が輩出したが(Laplace, Lagrange, Fourierなどは直接ナポレオンに引き立てられて爵位を授けられている), Cauchyもそうした時代を背景に活躍した一人である。

b) 吊橋理論の第一人者—Navier—

粘性を考慮した流体の運動方程式の最初の誘導者Navierが土木技術者であることを知らない人はかなり多い。彼は当時の最新技術であった吊橋の理論に関する第一人者であった。もちろん、吊橋そのものの歴史は古いが、これが応用力学の理論で扱われるようになるのは19世紀の初めごろからである。吊橋は長径間を渡るのに最も適したタイプの橋ではあるが、やはり河中に橋脚を立てる必要がある。完全流体の理論ではダランベールのパラドックスの教えるように橋脚に働く抗力は零になる。この現実との矛盾は粘性の無視によるものであることは明らかである。Louis Marie Henri Navier (1785—1836) は、1822年粘性の効果を考慮した流体の運動方程式に関する論文をフランス・アカデミーに提出したが、現在も昔もエンジニアが軽く見られる傾向は変わらない。永い間その論文はアカデミー会員の机の引き出しの中に眠られる(1827まで) 運命となった。そうこうしているうちに、同様の試みがCauchy (1828), Poisson (1831), St. Venant (1843) らによってなされ、1845年数学者・物理学者であったイギリスのStokesが一般的に式を導き、しかも種々の場合について具体的に解を求め、こゝに、粘性流体の理論が誕生する。

なお、Navierが自信をもってセーヌ川に架橋した吊橋(アンヴァリッド橋)は、吊橋本体や橋脚ではなく、水道管の破損による地盤弱化的ためケーブル・アンカーが滑り出し、落成をみることなく竣工を目前にして落橋してしまうという不運に見舞われる(1826・9)。こうした構造物本体ではなく附随的構造の弱点ゆえの事故は住々にしてある。同じくフランスの優美さを誇ったマルパッセ・アーチダムが近くで使用した発破によるアバット地盤のゆるみのために崩壊し、洪水が下流の町を襲い多数の死者を出し、ために設計者のコインが



図5 ナビエ

自殺したことを記憶している方も多であろう。

輝かしい Navier の生涯にとってこの事故は耐え難い汚点であり、51才で亡くなるまで、このことを気にしていたという。

c) 名誉をのがした下水道技師—Hagen—

現在ヨーロッパの都市を訪ねる人は誰でもみごとにゆったりと設計された清潔な街並みに感心するであろう。もっともパリの犬のフンを除けば。しかし、こうした街並みは19世紀に入って以来整備されたもので、中世のヨーロッパ都市の不潔さは現在からは想像もできないくらいであったらしい。水留りを馬車が走る、窓からは掃除のバケツの水が捨てられる（だから男性は女性と歩くととき窓際を歩くエチケツであった）、ぬかるみもひどく足駄のようなものを付けて歩く人もいた。当然ながら疫病はしょっちゅう蔓延した。しかし、やがて経験から下水道を整備し清潔にすることの必要性がわかり18世紀の終り頃から徐々にしかも大規模な下水道網が完備されてゆく。フランス革命後間もなくの時代ユーゴーの“あゝ無情”の中で警官に追われたジャン・バルジャンが下水道を逃げるどころや、第2次大戦直後のウィーンでオーソン・ウエルズの扮する“第3の男”がやはり立派な下水道を逃げ回るシーンを思い浮かべるが良いだろう。（ウィーン下水道はやゝ遅れ19世紀末市街地整備とともに行われている）。もっともペストやコレラが細菌によるものであることは19世紀後半になってドイツの医者コッホ（1876）、フランスの化学者パスツール（1877）によって発見され、これ以後伝染病の予防は急速にすすむ。

ところで、こうした19世紀前半に下水道網設計の仕事を通じて管路の抵抗則および流れの状態の区分—今日でいう層流と乱流—についての仕事を残したのがドイツの *Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen* (1797—1884) である。彼は層流管路の抵抗則を *Poiseuille* (1841) と独立にしかも2年早く（1839）見出しているし、ずっと後に *Reynolds* (1883) の行った層流と乱流の区別や遷移域での間欠交代現象を実験的に見出している。いわば、*Poiseuille* と *Reynolds* 2人分の仕事をしたわけであるが、彼の名はほとんど忘れ去られている。“Hagenの業績は不当に扱われている。もっと評価すべきではないだろうか”と最近谷一郎は述べているが、同様のことを *Prandtl* (1934) も書き残している。

では、これほどの仕事が忘れられかけているのはなぜだろうか。Hagenの論文があまり広く読まれていないプロシャの雑誌 *Poggendorffs Annalen* (1839) に、しかも特殊なプロシャの度量衡（プロシャ・オンス、パリ・インチ）で記されているのもその一因らしい。しかし、いま一つには同国人の仕事の評価しないというドイツの後進性にあるのではないだろうか。イギリスの *Maxwell* と共に統計力学の創始者である *Boltzmann* を自殺にまで追い込む旧守派の頑迷さ、物理学に新世界を開いた *Einstein* を追放する偏狭さと共通のものがあるのではないだろうか。

d) 幸運な親分—マニング—

かつての水理学、とくに水路の抵抗則でもある平均流速公式には、数々の実験式が列んでいた。これらの式は混合距離理論に基づく *Karman-Prandtl* 公式の出現により、次々に姿を消して行った。こうした中であって、経験式でありながら依然としてテキストに残り、今後も消えることは無いであろう公式が、マニングの平均流速公式である。この式には幾重にも幸運がつきまとっている。まず、アイルランドの人

Robert Manning (1816—1897) がこの式の提案者であることは間違いないとしても、実はそれよりずっと以前に同型の公式の提案者がいたのである。フランスの Philippe Gaspard Gauckler (1826—1905, 1868) と G. L. Hagen (1876, Chowによる; 1881, Biswasによる) である。情報の伝達の十分でない時代としては止むを得ないことであろう。(そう言えば、遺伝の法則のメンデルの名前も危い所で忘れ去られる所であった。19世紀最後の年、1900年フランスのドフリースをはじめ3名の学者が独立に遺伝の法則を(再)発見した。数十年も前の1865年、オーストリアの片田舎のしかも学者ではなく修道僧であったメンデルの論文など人々の記憶には無かったのも当然で、ドフリースはその初稿ではメンデルの発見に言及していない。しかし、メンデルにとって幸いなことに、この論文に気付いていた一人のドイツの学者の指摘により、彼の名は不朽のものとして歴史に残った。)



図6 マニング

しかも、マニングはこの式の提案の後すぐこの式を(次元的に正しくないことや $2/3$ 乗の計算がわずらわしいとの理由で)撤回し、より複雑な式に変えている。こうした事情にもかかわらずこの公式にマニングの名が付いているのはフランスのフラマン (A. Flamant) が1891年に彼のテキスト (*Mécanique appliquée—hydraulique*) にこの公式をマニングによるとして紹介し、W. WillcocksとR. Holtが1899年にこの式をマニングの公式と呼び、この習慣がR. B. Buckleyにより1911年引継がれたことにある。その後(1923)、スイスのA. Stricklerは粗度係数 n の代りに路床材料の粗さ径 d そのものを用いた式の提案を行っており、国によってはマニング式をGauckler—Stricklerの式と、今日では呼んでいるところもある。マニング式はその次元の点は別として理論的裏付けが得られていることは良く知られている。

マニングの式が広く承認されるようになったのは1933年Lindquistが世界動力会議第2回スカンジナビア部会に提案して以来であり、それは1936年ワシントンで開かれた第3回世界動力会議で最終的に recommend されてからである。

Manningは親分肌の技術者で、Office of Public Worksの主任技師として数々の排水・舟行・港湾工事に担わり、またアイルランドの土木学会長も務めた。

e) 風のがしの名人—Eiffel—

エッフェル塔はすべての人が知っている。しかし、エッフェル塔がEiffelという人の名に因んでいることを知る人は多くはない。ましてやGustave Eiffel (1832—1923) が元来は橋梁設計者、それも橋梁設計の天才であったこと、アメリカのシンボルである自由の女神を中から支える鉄鋼の骨組の設計者であること、そして流体力学の中に風洞技術を確立した人であることを知る人は少ない。

フランスは1870—71年普法(プロシヤ—フランス)戦争の敗北を国内産業の育成で挽回しようとした。その手段としてフランス革命100周年を記念しパリ万博を1889年に開催することを計画し、その目玉として

高さ300mの鉄の塔を計画したのであった。これに選ばれたのが数々の設計を手掛け“橋梁設計の天才”といわれたEiffelである。時に彼は50才を越え、設計者として円熟の境にあった。Eiffelは組立方式を導入し、わずか2年間でこれを完成してしまう。Eiffelは1923年91才でその生涯を閉じるが、かなり晩年まで地上276mの四層に自室をもち、ここで仕事を続けた。

Eiffelがあれだけの高層建造物を比較的少ない材料で作上げたのは、風を避ける・逃す工夫をしたからである。塔の完成後、Eiffelは風圧の研究を本格的にすべくエッフェル塔の下に今日ではエッフェル型といわれる風胴を作っている。良く知られるように風胴にはエッフェル型とゲッチンゲン型がある。前者は環境風胴、後者は航空風胴である。

さて、風胴の発明者は誰であろうか。1903年ライト兄弟は有人飛行に初めて成功するが、これは決して素人のまぐれではない。彼らは自転車修理業の傍らエンジンやプロペラや翼形について実験を重ねており、扇風機を使った“風胴”で好ましい翼形の実験もしている。とすれば、これはもちろん1903年以前である。風胴の発明者はライト兄弟かあるいはEiffelか、自転車屋か橋屋か、あるいはまた別人であろうか。

一説によるとイギリスのPhillips (1884)らしい。もっともこれはスチーム・インジェクターで駆動するものであった。本式風胴ということならばEiffelの名を挙げて良いであろう。この研究により1913年彼はスミソニアン協会からラングレー賞を贈られている。これはライト兄弟と同じ時期有人飛行機に挑戦していたアメリカの天文学者・物理学者ラングレー教授を記念して設けられた賞である。もっともライト兄弟と同じ1903年に助手の操縦するラングレー機はカタパルトでポトマック河上に打ち出されたが、あわれ河に墜落し、人類初飛行の栄誉を逃してしまっているのだが。

4. 現代流体力学の創始者達—Reynolds, Prandtl, Karman—

a) レイノルズとその時代

レイノルズ (1842—1912, 英) は、層流と乱流の区別・レイノルズ数の定義と限界レイノルズ数の確定・レイノルズ応力の概念の導入により、流体力学に不朽の業績を残し、20世紀に入って早々に始まる現代流体力学（物理的観点に立っての現実の流体現象の合理的な解明）のいわば祖父ともいべき役割を果たした。レイノルズの研究は単に乱流の発生・抵抗則に止まらず、キャビテーション、潤滑、熱伝導、蒸気機関、さらに相似律を考慮した河口潮汐や船舶の模型実験も行うなど広い範囲にわたっている。

レイノルズはまた英国での二人目のそしてマンチェスターでは最初の大学工学部の教授の席を占めた人としても記憶さるべきである。というのは当時においては未だ工学の地位は低く、大学の学部としては認められることは少なかった。イギリスに工学部教授の席がいち早く設けられたことは、イギリスが産業革命の発生地であり、こ

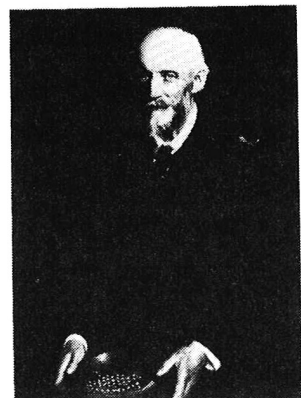


図7 レイノルズ

の時代世界の工場であったことに関連するであろう。レイノルズはケンブリッジ大学で数学を修め、1867年卒業後1年間を設計実務に携わったのち、弱冠26才で1868年マンチェスター・オーエンス・カレッジの初代工学部教授に招かれた。彼は1877年王立協会の会員に、1883年にI. C. E (Institution of Civil Engineers) の会員に選ばれている。

この時代、つまり19世紀後半のイギリス科学界は正に百花繚乱の観があった。まずこの時代の花形科学である電磁気学ではMaxwellがFaradayの場の考え方に基づいて電磁波の基礎方程式を提出し、またドイツのBoltzmannにより引き継がれることになる統計物理学の開拓を行っていた。流体力学ではStokesが粘性流体の基礎方程式(1845)から種々の流体運動(球の沈降、波、振動流など)の理論解を次々に求め、Kelvin卿は流体力学(渦定理)のみならず、熱力学(絶対温度記号 $^{\circ}\text{K}$ は彼の名に由来する)、海底電信の特許取得などと幅広い活動を行っていた。また、若いRayleigh卿も地中海のヨット上で病気の療養をしながら「Theory of Sound」vol. I, IIをひっさげてさっそうと登場し、乱流の発生について微小振幅波の方法を提案した。彼の熱対流の理論は大陸移動説の今日のプレート・テクトニクスーのdriving forceを説明するものである。さらに、革命とも云える位の衝撃と論争を巻き起すことになるダーウィンの「種の起原」の発表は1859年である。

b) ルードウィヒ・プラントル (Ludwig Prandtl, 1875–1953)

プラントルは1875年大学教授の子としてミュンヘンに生れ、機械工学を修め、弾性学の問題で博士号を受けた。しかし、機械工場で実務に携って、流性力学における理論と実際の差異の大きさを痛感し、これを埋める必要性を強く感じた。1901年彼はハノーヴァーの工科大学に移り研究生活のスタートを切る。

1904年8月のハイデルベルクにおいて第3回国際数学学会が開催され、こゝにPrandtlは今日境界層理論として知られる流体運動に関する非線型微分方程式の解法に関する新しい考え方の提案を含む流体力学に関する論文を提出した。しかし、彼の論文には誰一人注目しなかった。否、たった一人の数学者ケッテンゲン大学のFelix Kleinを除いては。彼は後に会議の主旨を十分理解していなかったので不十分な論文であったと述懐している。(この論文は極く薄いものでNACA (NASAの前身) の英訳もある)。KleinはPrandtlの論文の重要さ漸新さを直ちに認め、わずか20才台の青年をいきなりゲッテンゲン大学教授、応用力学研究所所長(もっとも最初はほんの小さな研究所にすぎなかったが)に任じた。

Prandtlの境界層の考え方により実際に問題が解かれたのは、それから数年後1908年のBlasiusによる平板に沿う境界層の論文においてである。時あたかも1903年12月米国のライト兄弟が人類初の動力有人飛行に成功し、航空機の発達と流体力学の発展とは車の両輪の如く相補って進行し始めた時代であった。

Prandtlはこの他翼理論、乱流の混合距離理論等数々の業績を残している。コンピューターが高性能化



図8 プラントル

したために最近盛んになりつゝある乱流モデルについても、すでに1940年代乱れ速度と乱れスケールによる2パラメーターモデルを提出しており、Prandtlの死後30年も経て評価され実用されるに至った。このことでも、いかに彼が時代の先を歩んでいたかわかる。

Prandtlのもう一つの業績は彼自身が巨峰であったのみではなくKarman, Blasius, Tollmien, Schlichting等々数々の人脈を生み出したことである。

Prandtlの学問の特質は、物理現象を鋭い洞察により理解する天才的な直感力と巧みに本質をついた単純化を行い、これを比較的簡単な数学形式に表わす才能にあり、この点は主としてKarmanに色濃く引き継がれている。Prandtlの使う数学の手段や技巧には限度があり、協力者や弟子達には難しい数学を駆使する点で彼を凌ぐものも少なかった。Prandtlの友人の一人が彼を評したように「Prandtlは式を解くことなしに答のわかった人」である。この評は彼の特質を云い得ている。

しかし、巨人Prandtlと云えども、無誤謬の人ではなかった。その一例とし、平板に沿う境界層の層流から乱流への遷移問題についての最初の勝利であるTollmien-Schlichting波で知られるSchlichtingの語るところによれば、彼が3年間も手廻しの計算機をまわし続けている間もプラントルはその成功を疑問視していたとのことである。また、Karman渦の発見も元はと云えばプラントルの指導でヒーメンツ(Hicmentz)が行っていた円柱からの境界層の剝離の実験にある。この実験ではどうしても円柱が振動するのをプラントルは円柱の仕上げの精度の悪さにあると(今日からみれば見当違いの見方で)手直しに時間を費している間に、当時プラントルの助手をしていたカルマン(1911)は師の先を越して、それ自体に特有の現象として解析をすゝめてしまった。

歴史にもしという仮定は無意味であるが、それにしても“もしプラントルがいなかったならば、現代の流体力学はどうなっていたらうか?”という疑問に誘い込まれる。プラントルはそれほどの巨人である。

c) 現象解析の魔術師—カルマン—

水理学や流体力学に関する分野においてTheodor von Kármán(1881—1963)ほど個人名を付けられた式や係数をもつ人は少ないのではなかようか。例を挙げると、

- 物体後流中のカルマン渦列。
- 乱流流速分布の対数則に関するカルマン定数。
- 境界層に関するカルマンの運動量方程式。
- 混合距離についてのカルマンの力学的相似理論。
- 射流の衝撃波についてのカルマンの公式。

などである。

カルマンは1881年5月11日ハンガリーのブダペストで生れた。1902年ブダペスト工科大学機械工学科を卒業、1906年ゲッチンゲン大学に留学、プラントルから親しく薫陶を受け、その後の研究活動に決定的な影響を受けた。1908年材料力学に関する研究では学位を



図9 カルマン

け、1912年アーヘン工科大学教授に迎えられ、新設の航空研究所所長に任命された。第一次大戦には将校としてオーストリア、ハンガリー航空隊のために働いた。1930年カリフォルニア工科大学に移りグッゲンハイム航空研究所所長に就任した。

カルマンの研究業績は流体力学にとどまらず応用数学・物理学・材料力学・振動学・熱および燃焼と極めて広く、中でもカルマン渦列の安定 (1911)、摩擦抵抗の理論 (1921)、乱流速度分布の力学的相似 (1930)、乱流統計理論 (1938)、殻構造の弾性安定 (1939)、超音速相似則 (1947)、滑水体の力学 (19??) が著名である。

カルマンの研究の特色は、それまで全く説明の与えられなかった現象に、新しい概念を提示し、数学的に美しく、見通しの効く単純な形式を与えること、あるいは複雑な工学的問題から物理的要素を見出し合理的で簡単な近似解法を展開するところにある。

Karman 渦にまつわるエピソードを一つ話そう。Karman 渦の発見と理論は、Prandtl の命を受けたヒューメンツの円柱境界層の剝離の実験にあることはすでに述べた。ところで、国際応用力学会議の席上一度ならず、1926年のチューリッヒ、1930年のストックホルムで、ベナル・セル (浅いパンを下から一様に熱する時に生じる六角形の対流細胞) の発見者ベナルは、その渦については私の方が先に発見したと優先権を主張した。これに対し、Karman は“ベルリンとロンドンでカルマン街 (street に引掛けている) と呼ばれるものが、パリでアンリ・ベルナル街と呼ばれることに賛成します”とやんわりとやり返したという。

第2次世界大戦の直前、アメリカでタコマ橋の落橋があった。この橋は架橋中から揺れがひどくファッカーソン教授はシネカメラを準備して観察に余念がなかった。揺れ始めから腹を見せて海中に落下するタコマ橋 (タコマ・ナローズ) のフィルムを今日見ることが出来るのはファッカーソンのお陰である。この事故後、調査委員会が作られファッカーソンや設計者のアンマンと共にカルマンもその一人となった。もっとも、Karman は落橋を Karman 渦との共鳴として片付けているけれども、現在ではカルマン渦との共鳴よりは、ねじりフラッターが落橋原因という結論である。

また、こんな話もある。アメリカに移ってからの Karman は航空力学の第一人者として世界中から引張り尻であった。長い留守の間彼の2人の弟子が構造力学のある問題を解決して、帰国した Karman に意気揚揚と報告した。それを聞いた Karman はあゝこの問題なら前に解いているよと自分のノートであったか論文とかを見せたので、弟子達は赤面してしまったという。そしてあれほどの多忙さのうち、いつ研究をしているのか不思議だったということである。

カルマンはまた仲々チャメツ気のある人でもあった。飛行機の座席によく「御意見うかがいカード」が入っている。ある時カルマンは退屈まぎれに、このカードに塔乗機の性能についての意見を書いて出したところ、次のような社長名の返事が届いたそうである。

“カルマンさん。貴方の御意見大変ありがとうございます。しかし当社の飛行機は最高の教授、技術者により設計され、テストされたものです。どうか御安心の上、今後も御利用下さい”。カルマンはこの手紙を大変喜んだそうである。カルマン先生でも、カルマン教授でも、カルマン博士でもなく、カルマンさん (Mr. Karman) と呼び掛けられている点が大変気に入っていたそうである。われわれならどうするだろうか。航空学の第一人者の余裕を示すエピソードではないだろうか。

また多数の弟子を育てたこともカルマンの業績に挙げられる。それは航空力学の狭い分野に限らない。第2次大戦前後および以後世界の水理学のリーダーとなったMITのIppen, Iowa大学のRouseはカリフォルニア工科大学時代のカルマンの薫陶を受けたことは良く知られている。彼らの現象を単純化し本質を掴み出すというやり方こそ、正にPrandtl-Karmanの直伝である。

カルマンは第二次大戦前、昭和の初年代に川西航空機の紹きで来日し、あれこれサジェッションをして帰っている。お偉方や芸者と並んだこのときの写真が残されている。この時代、日本の航空工業も未だ未だ幼稚で、カルマンはいさゝか失望して帰ったようである。しかし、この航空機工業における後進国の日本が間もなく、名機中の名機といわれる“零戦”を生み出すとはカルマンは思いもよらなかったであろう。

5. 水理学・流体力学の体系化

著作の面から、流体力学や水理学の出来事を年代順に挙げてみると、1930年代から1940年にかけての、つまり第二次大戦直前までの時代の、古い学問から新しい学問への脱皮・比較的急激な学問の進歩・体系化の跡がたどれるように思われる。

- 1930 Forchheimer : Hydraulik.
- 1932 Lamb : Hydrodynamics, 6 edition.
- 1932 Bakhmeteff : Hydraulics of Open Channels, McGraw-Hill.
- 1933 物部 長穂 : 水理学, 岩波。
- 1936 本間 仁 : 水理学, 工業図書(株)。
- 1937 伊藤 剛 : 水理学, アルス。
- 1938 浅野 好 : 開水路の水理, 常磐書房。
- 1938 Rouse, H. : Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers.
- 1938 Goldstein, S. : Recent Developments in Fluid Dynamics, Clarendon Press, Oxford.
- 1940 友近 晋 : 流体力学, 共立出版。

a) 古典流体力学から現代流体力学へ—LambとGoldstein—

この時代、まずLambは完全流体に関するポテンシャル理論を中心とする多くの論文成果をまとめ、第6版としてその最終版を発行した。この本には新しい時代の花形理論となりつつあった境界層理論についてはほんの少し触れられているだけであり、その後の流体力学を中心となる乱流についてはほとんど述べられてはいない。しかし、これらについてLambは無関心であったのではない。第6版の完成後、彼は“私は老人であり間もなく天国に招かれるであろう。そのとき天界の隅からも気に掛る2つの点がある。一つは電気量子力学であり、もう一つは乱流である。私は前者については楽観的であるが、後者については悲観的である”と語ったといわれる。時あた

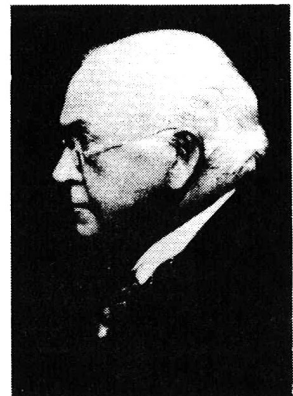


図10 ラム

かも Heisenberg の行列力学, Schrödinger の波動力学が発表され, 量子力学の世界が洋々として開けつゝある時代であった。そして Lamb の予言は正に適中したのであった。

この Lamb の本の刊行後わずか数年後 1938 年には当時流体力学の世界を大きく変えつゝあった境界層理論, 乱流の混合距離理論を中心とし, また豊富な実験結果についての物理的につつまんだ記述も盛り込んだ二巻の大著 *Modern Developments in Fluid Mechanics* が, 弱冠 30 才そこそこの Gololstein の指揮のもとに集成刊行された。これが与えたインパクトは当時いかに大きかったかとも思われる。しかし, 一方国によってはこの内容を十分に理解しうる層は未だそう厚くはなかったかもしれない。この本は戦後昭和 30 年代の始め, 未だ物資も情報も少かった時代われわれ大学院のテキストとしても用いられ, しかもなお十分の新しさを持っていた。というよりも, 若い研究者はこれをスタート台として勉学に邁進したものであった。

b) 亡命外交官—Bakhmeteff

水理学の特色を一言で表わすとすれば, 流れを一次元化し, エネルギー原理および運動量原理の適用により, 簡潔に解を導くことにあると云える。

その典型的例として, 広頂堰上の流れの Bélanger (1850) —Böss (1919) の定理 (比エネルギー一定のもとでの最大流量, 流量一定のもとでの最小比エネルギー状態) と跳水現象の比力則 (Bresse, 1860) を挙げることができる。この 2 の例を狭い意味での流体力学的方法による正攻法で解こうとしてもとても出来るものでない。しかし, 水理学的手法では教科書で習うように, いともあっさりとしかも簡単な形の式として解が求まってしまふ。比エネルギーの概念が Bakhmeteff により提出されたのは 1912 年で, これによって古典的水理学が一応成立したと云って良いであろう。

Bakhmeteff はケレンスキー政権下にアメリカ大使として赴任した。しかし, そのまゝアメリカに亡命した。そして, 他の多くの亡命ロシア人らの生活のためにマッチ工場の経営にもあたった。こうした多端な雑務の中にあつて, 比エネルギー概念を初めとする重要な論文が次々に発表され, また *Hydraulics of Open Channels* (McGraw-Hill, 1932) も出版された。

若い諸君の中には, アメリカ合衆国はずっと以前から世界の政治・経済上の大国, 科学の最先進国であったように感じている人も少なくないようであるが, アメリカの科学がヨーロッパに追い着き出すのがこの頃からである。したがって, それより以前の 1903 年ライト兄弟による人類初飛行のニュースもヨーロッパではほとんど問題にされなかったし, 実際ライト兄弟が彼らのフライヤー号でヨーロッパの空をデモンストレーション・フライトを行ったのは 1910 年になってからである。

アメリカが世界のリーダー権を握るのは, 第一次世界大戦では中立を守りながらも連合側の武器庫となり世界の富を集め, また戦後処理においてウィルソン大統領が活躍して以後である。1933 年ヒットラーが政権を獲ってからのユダヤ系科学者の追放政策がこれに輪を掛けた。追放をうけて自由の国アメリカに遁れた多数の科学者達は, その後のアメリカを世界一の科学先進国としたのである。これらの追放ユダヤ系学者は, 皮肉にも “ヒットラーのアメリカに対する最大の贈り物” となった。また, ある批評家は “二度の大戦が, ヨーロッパの繁栄と優位を破壊した” といっている。

c) 経験水理学から現代水理学へ

— 物部と本間およびRouse —

本来経験の学問といっても良かった水理学の一大集成が物部長穂の「水理学」(昭8, 1933)である。物部は多才な学者で「水理学」の大成者であると同時に「地震学の祖」とも云われる。地震時に煙突が上から1/3の所で折れることの理論は彼による。物部は内務省(今日の建設・警察・自治などを合わせた強大な権力をもつ省)土木研究所の所長であると同時に東大教授も兼ねていた。土木研究所には世界各国の最新の技術雑誌が購入され、彼はその中から新しい公式を次々とカードに写し取り、彼自らの導いた式(N. M. と式の後に明記されている)とともにこの大著を完成した。このときの年齢は40才少々。最も脂の乗り切った頃であったろう。この作業を補佐した本間によれば、原稿には時々秋田弁が混っており、これを訂正しなければならなかったそうである。そういえば物部は、秋田県神宮寺(駅名として現在もある)の神官の家の出身である。物部はこの本の定価を低くおさえることを書店側に強く要求したとのことである。自身の式に(N. M.)と記号を付したとともに、彼のこの本に対する自身のほどをうかがわせる。

この本は正に百科全書的内容となっている。今日の眼からみると種々のケースについてわずらわしいほどに式や数値や図表が並んでいる。この本の内容そのものは現在には生きていないが、しかし、この本で物部は水理学の包括すべき内容を整理し、章や節分けの見本を完成したと云えるであろう。(もっとも、水文学における流出率のように相変らず物部本から引用されるものもある)。

そうして、物部の古典的集成作業を補佐した本間によって、5年とは経ずして全く新しい姿の「現代水理学」(論理大系としての水理学)の基本形が誕生するのは皮肉でもある。本間は卒業後駒込にあった土木研究所に奏職したが、そこから週に何回かは東大・理学部の数学の講義の聴講をつづけており、一方、フランスのBoussinesqの流れを汲む流体力学にも親しんだ。こうした背景のもとに記念すべき「水理学」が生れた。このとき、本間は未だ30才に過ぎない。もっとも、当時のこととて売れるのは年に5、6冊という状態で、一年間の土木工学科の大学生数7~8千人という今日とはなんとという層の厚さの違いであろうか。

歴史は偶然を作る。この本間の本の刊行の1年後、これと同じような思想から編まれた書“Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers”がアメリカのHanter Rouseにより出された。しかも、Rouseもまたほゞ30才である。もっとも、具体的な内容は違って、本間の本がより数学的であり、Rouseのものは流体力学の新しい成果(境界層、乱流)を採り入れているが。もちろん、彼らは互に相知っているはずもなかった。彼らが相会するのは1953年IAHRのミネソタ会議の時である。

5. 戦後の水理学

この項については講演時に述べる。

6. 水理学の将来

最近、私は“水理学の将来”について2回ほど質問を受けた。(一回は電研での講演の後で。もう一度は今年の水理講演会の閉会時に。)このときの言葉をもう一度繰り返して、本講の結びとしたい。

私には「水理学の未来」について語る資格はない。水理学の未来は若い諸君が作るべきものである。そして諸君には十分その力はある。それは、なにも水理学に限ったことではない。若い世代を育てるのに失敗した国は衰える。古い歴史を繙くまでもなく、われわれの身近かにその例を見ることができるではないか。

【出典について】

本講は私が折にふれて読んだ本からのエピソードや関係者から直接耳にした話をあれこれ綴り合わせた作文が主である。Rouse & Inceの“History of Hydraulics” (1957), A. K. Biswasの“History of Hydrology” (North-Holland, 1970) やKarman (谷沢)「飛行の理論」, 鳥尾永康「ニュートン」(岩波, 1979) や本講執筆中に発行された倉田保雄「エッフェル塔ものがたり」なども参考にしたが。したがって、今となっては正確なメモを取っているわけではないので、原典を思い出すことも確かめることも出来ないものが多い。年号や事実関係に多少の記憶違いもあるかもしれないが、本講の主旨は最初に述べたように、個々の事柄ではなく、水理学・流体力学の理論体系が順次形成されてゆく道筋を辿ることであるので、この点お許しを頂きたいし、またこれを機会に今後はメモを正確に残すよう心掛けたい。

表-1

1500	コロンブス (1492)		
	ダヴィンチ		
1600	コペルニクス (1543)		
	ケプラー (1609)	Torricelli	(1608-1647/1644)
	ガリレオ (1642) 死	Pascal	(1623-1662/1647)
	(ニュートン (1642) 生)	Pitot	(1695-1771/1732)
1700	ニュートン (1666) 驚異の年	Bernoulli	(1700-1783/1738)
	(ニュートン (1727) 死)	Euler	(1707-1783/1755)
	ワット (1765) <ニュコメン		
	フランス革命 (1789)	Lagrange	(1736-1813/1781)
1800		Navier	(1785-1836/1822)
	スチブンソン (1814) <トレビシック	Hagen	
	ファラデー (1831) 電磁誘導	Poiseuille	
	ダーウィン (1859)	Stokes	(1819-1903/1845)
	メンデル (1865)	Helmholtz	(1821-1894/1868)
	マックスウェル (1879)	Kelvin	
1900	プランク (1900) 量子仮説	Reynolds	(1842-1912/1883)
	アインシュタイン (1905) 相対性理論	Boussinesq	
		Prandtl	(1875-1953/1904)
		Taylor	(1886-1975/1921)
		Karman	(1881-1963/1911)