

回転腕木と曳船水槽

— 一八世紀の実験的流体抵抗研究に関する一考察 —

中 澤 聡

はじめに

「今日の古典力学はニュートンの『プリンキピア』をもって一挙に完成したのではなく、ベルヌーイ一族やオイラー、ダランベールら大陸の数学者たちの研究を通じて徐々に形成されていったものである」。このような認識は近年になり科学史研究者の間ではかなり共有されるに到った。これには言うまでも無く流体力学の専門家でオイラー研究者であった故クリフォード・トゥルースデルの功績が大きい。彼の著名な論文が発表されて以後、一八世紀のいわゆる合理力学 (rational mechanics) の研究に新たな関心が向けられるようになり、「ニュートン力学の解析的書き直し」というそれまでのステレオタイプにとどまらない描像が描かれつつある (Truesdell 1960)。

その際トゥルースデルはきわめて理論 (数学) 偏重の歴史観を打ち出していた。彼は次のように述べている…

優れた実験的発見が為されることがあっても、それらは今日「古典的」とされる偉大な数学的理論の発展に直接影響を及ぼすような性格のものではなかった。なぜならそれは一握りの「幾何学者」や「代数学者」によっ

て創造されたからである (Truesdell 1960, 3)。

トゥルースデルは根強い実証主義的歴史観に挑戦し、一八世紀力学史の研究の意義を強調するため敢えて意図的にこのような主張を行ったのであろう。

一八世紀の力学史に光を当てた彼の功績は高く評価されるべきだが、彼の実験軽視を額面どおりに受け取ることにはできない。このことは、彼の主要な研究対象であった一八世紀の流体理論研究の歴史が明らかに証言している。

一八世紀において水理技術上の諸問題、とりわけ流体抵抗の問題はその応用の実践的有用性から幅広い関心を集めた主題であった。ベルヌーイ一族やオイラー、ダランベール、ラグランジュら当時を代表する数学者たちは皆、形成されつつあった古典力学の概念と手法を駆使してこの問題に取り組み、流体力学という理論的研究伝統の基礎を作り上げた。一七五五年の論文でオイラーが発表した流体に関する基本方程式はその価値を失うことなく今日に至るまで受け継がれている。

しかしながら、流体力学の基本方程式はその当時何ら実践的に有用な結果をもたらさなかった。そのため流体の問題に関わる土木や造船の分野の技術者たちは、数学者たちの理論的研究の成果を部分的に取り入れつつ、それに経験的、実験的観点からの考察を加えて、実践的な指針を考案していった。ここに理論的な流体力学の研究と実践的な水理学との乖離が生じ、これら二つの分野が一定の距離を置きつつ並立するという状況が一八世紀末から一九世紀を通じて続くことになる。このような流体研究の状況は、古典力学の成立が華々しい成果をもたらした天体力学の分野と比べるときわめて対照的である。

このような一八、一九世紀の流体研究の状況を考えると、実験や技術的応用との関連を無視して数学的な理論内部でのフォーマルな発展のみに関心を向けるトゥルースデルのアプローチは不十分であるといわざるをえない。そ

れでは、流体力学の理論的發展との関連において、上記のような経験的なアプローチの役割はいかに評価できるであろうか？

物理学史家オリヴィエ・ダリゴルは、流体力学史を扱った近年の著作の中で、流体力学の歴史において応用のための実践的問題がいかに理論にインパクトを与えてきたかを描いている。彼によれば、一般に成功した理論というものは、一般理論と、理論と実践とを媒介するための中間的概念図式からなるモジュラー構造をしており、この構造が発達するに従って、理論はその適用範囲を増しより強力となる。ダリゴルは、一九世紀流体力学史からの様々な具体的事例をもとに、一般的理論を現実の具体的問題に適用する際に生ずる問題がモジュラー構造の発達を促すという事実を指摘している。理論を具体的課題に应用到ことにより生ずる難点は科学者や技術者に挑戦し、モジュラーとして機能する中間的な概念図式の開発を促すのである。理論発展に対する応用の重要性を「経験的挑戦」を提示することとして肯定的に評価し、科学研究における経験的成分の役割を再確認しようとするダリゴルの立場は、先述したトゥルースデルのラディカルな主張に比べきわめて穏当であるといえよう (Darrigol 2005, 323-325; 2008a; 2008b)。

トゥルースデルの主要な関心領域であった一八世紀の流体力学史においては、ダリゴルが扱った一九世紀に比べ、オイラーの方程式をはじめとする理論面での成果が目立つのは確かである。すでに一七世紀後半から実験的な水理学の研究伝統は存在していたが、これまでの歴史記述においてその位置づけはマージナルなものに留まっていた。しかしながら、確かにそれらの実験的研究が理論発展に直接的な影響を及ぼすことはなかったものの、ダリゴルが述べたように、それらの結果が理論に「挑戦」し、必要な概念図式の形成を促したという可能性は見逃すべきではない。このような可能性を吟味するため、本稿では次節で一八世紀の流体力学の理論的發展の流れを概説し、続く節で当時の代表的な実験水理学研究を取り上げ、その歴史的意義の再検討を提案したい。

一 啓蒙の科学観における流体研究の位置づけ

前述の論文で啓蒙主義の学問観における力学の位置づけを論じる際、トゥールースデルはダランベールの言葉をたびたび引用している。実際ダランベールは啓蒙主義の科学観を体现する人物であり、流体の研究を彼がどのように位置づけるかを見ることは当時影響力のあった思潮を考える上で一定の指針となると考えられる。

ダランベールによれば、算術、幾何学および力学の三学科は数学に分類され、その真理性は基礎とする諸公理の明証性によって保証されるとされた。一方これら数学的諸学科を自然研究に応用した学問は物理・数学 (physico-mathematiques) と呼ばれた。その代表は天文学と幾何光学だが、これらの学科は明証な数学的公理に加え、確実な事実に基づくそれ固有の原理 (万有引力の法則と屈折の法則) を必要とする。したがってこれらの学問は経験的事実の確実性に基づくものとされた。数学と物理・数学が精密科学とされたのに対し、実験自然学は対象とする現象があまりに複雑なため、体系化できない事実の収集にとどまる蓋然的学問とされた (D'Alembert 2000, 90-94; 107)。

本稿の関心の対象である流体研究は、ダランベールによって物理・数学に分類されていた。実験自然学との対比において物理・数学に特徴的な点は、両者とも経験に関わるのであるが、実験自然学が大量の事実という性格を持つのに対し、物理・数学においては問題となる経験事実の質が重要視されるということにある。重要なのは当該現象の本質に関わる事実であり、極端な場合、唯一回の観察でも事足りるとされた¹⁾。そして、天文学が万有引力の法則という経験から導かれた固有の原理に基づくように、流体の研究は圧力伝播の等方性、すなわちパスカルの原理に基づくこととされる (D'Alembert 1744, x: 2000, 94)。したがって流体の研究には実験自然学とは峻別される「確実な」学問の地位が与えられ、天文学、光学と並び、数学、特に合理力学を応用することによる成果が最

も期待される分野とされたのである。

以上のような認識論的前提は当時の科学研究制度の構造と相即不離の関係にあったと考えられる。例えば、パリの科学アカデミーにおいて数学研究者は実験研究者に比べて高い地位を享受していた。数学者が実験自然学の不確実性について語る時、彼らは暗黙のうちにこのような制度的ヒエラルキーを肯定することになった。一方実験家たちは低いステータスに甘んじつつも、現実の自然について数学的理論を作ることの可能性を否定することで自分たちに固有の研究領域を確保しようとした。少なくとも一八世紀半ば頃まで、このような数学者と実験家との棲み分けが両者それぞれの思惑に沿った形で維持されていた様子が観察できる (Kuhn 1976; Home 2003)。

二 流体抵抗の理論的研究

流体力学の理論的研究は一八世紀に入ってから本格化するが、流体抵抗の問題に対する力学的なアプローチはすでに一七世紀後半から始まっていた。トリチェッリの定理を証明するという問題関心のもと、パリ王立科学アカデミーの命を受けたホイヘンス、マリオットらが噴流の力や流体の抵抗に関して、主として実験的な研究を行っていた。とりわけマリオットは、抵抗は水の比重および流速の平方に比例するとし、流速 v の流れの中に静止した面積 S の平面が受ける力、あるいは同じことだが静止した水の中を速度 v で進む平面 S の受ける抵抗力は、 S を底面とし、落体が速度 V に到達するための高さ h を有する水の柱の重さに等しいと結論した (Mikhailov 1996, 214-215)。マリオットの規則によると、流れの抵抗の絶対的な尺度は比重 (密度) を ρ 、速度を v 、流体中の物体の断面積を S として $1/2 \rho v^2 S$ と表せる。

これに対し、一八世紀の流体抵抗研究の出発点となったのはニュートンの『プリンキピア』第二巻である。その中でニュートンが提示した抵抗力の絶対的な尺度に関する理論は、その後一八世紀を通じて論争の的であり続けた。

『プリンキピア』初版（一六八七年）の第二巻命題三十七で、ニュートンはオリフィス、すなわち容器に開いた開口部からの噴流（efflux）のモデルを用いて流体中の物体が受ける抵抗を理論的に求めることを試みた。噴流の速度についてはすでにトリチェッリが一六四四年に有名な法則（ $V = \sqrt{2gH}$ ）を発表していたが、ニュートンはまずトリチェッリの法則の証明に取り組んだ⁽²⁾。ニュートンは、水で満たされた容器の底面に開いたオリフィスから水を噴出させる力がオリフィスの上にある水の柱の重さに等しいと仮定し、そこから、噴流の速度 V は、水柱の高さ H の半分の高さを自由落下した物体が到達する速度に等しい（ $V = \sqrt{gH}$ ）という結果を導き出した。続いて彼は、噴流を生み出す力は噴流中に静止している物体が受ける力に等しいと考え、これに上記の結果を応用した。こうして彼は、流速 V の流れの中に静止した面積 A の平面が受ける力、あるいは同じことだが静止した水の中を速度 V で進む平面 A の受ける抵抗力は、 A を底面とし、落体が速度 V に到達するための高さの二倍の高さを有する水の柱の重さに等しいと結論した（Mikhailov 1996, 217-218）。

このニュートンの結論は明らかにトリチェッリの法則と矛盾し、また当時の実験データとも齟齬があったため、発表後すぐさま批判的となった。このためニュートンは第二版（一七一三年）以降、噴流の速度をトリチェッリの法則に合致するよう修正し、また噴流の収縮（vena contracta）に留意して、噴流を生み出す力は容器内の水の高さの約半分の水頭に相当すると結論した。したがって水の抵抗力は初版のもの（の四分の一となる（Mikhailov 1996, 222））。またニュートンは平面が流れに対して斜めにおかれた場合、抵抗力は入射角の正弦の平方（ $\sin^2\theta$ ）に比例するとした。ニュートン以後ヴァリニオン、ヨハン・ベルヌーイ、J・ヘルマンらがそれぞれトリチェッリの法則の理論的証明を試み、流体抵抗の尺度を提案したが、これらは皆粒子の衝突モデルに基づいており、係数の違いこそあれ、基本的にはマリオットの実用公式と同様のものであった（Mikhailov 1996, 225-229）。

これらの理論に対し、平面に当たる噴流の衝撃力と、流れの中に置かれた平面が受ける抵抗力の間の本質的な違

いを指摘したのがダニエル・ベルヌーイである。彼は、前者の場合、平面に当たった噴流は平面と垂直な運動の成分を失い、最終的には平面と平行に流れるのに対し、後者の場合、流れは平面の後ろに回りこんで衝撃に対し平面を支える圧力が生まれることを指摘した (Dugas 1955, 310-311; Saint-Venant 1887, 22-29)。その後、ダニエル・ベルヌーイの指摘を受ける形で、自由な粒子の衝突のモデルで流体抵抗を考えるのではなく、物体表面の圧力を考察してより厳密に抵抗を求めるアプローチが登場することになる。

しかしながらこの方向での研究は、理論の実践的有用性に関する当初の楽観的期待を裏切る皮肉な結果をもたらすこととなった。物体表面の圧力を考察して解析的な解を得ることは一般的に極めて困難であり、計算の容易な対称的な流線を仮定すると、その結果はことごとく抵抗力ゼロという非現実的な解を与えたのである。

一八世紀解析学の巨人オイラーはすでに一七四五年の段階で直観的な考察からこの結果が任意の形状の物体について成り立つことを見越していた。彼はその原因が完全流体の仮定にあることを指摘し、現実の流体の場合には物体後方の流線の寄与を無視できると仮定したが、その十分な根拠を示すことはできなかった (Euler 1745, Kap. 2, Satz 1, Anmerkung 3; Darrigol 2002, 98-99)。続く著作『船の科学』(Scientia Navalis, 1749) におけるこの理論は放棄され、マリオット以来の実用公式が用いられた (Saint-Venant 1887, 22-29; Ferreira 2007, 135-138)。その後オイラーは一七五五年に流体運動を記述する基礎方程式を提出し、そのことにより流体力学の体系化に大いに寄与したが、その彼も、実践上指針となるような抵抗の値を見出すためには、マリオット以来の実用公式に戻るしかなかったことになる。

一方ダランベールはオイラーが巧妙に回避した問題をより真剣に受け止めた。彼は一七五二年に出版した『流体抵抗の新理論に関する試論』の中で本格的にこの問題に取り組み、非圧縮性の定常流の中にある物体に働く抵抗力の計算を試みた。流れの場を確定し、物体表面上の任意の点での圧力が決まれば、それを物体表面に沿って積分し

て抵抗力を求めることが出来る。ダランベールは非圧縮性流体の軸対称な流れに関する連続の法則と渦なしの条件を定式化し、級数展開によってこれらの境界条件を満たす解を求めようとしたが、その方法はあまりに煩雑であったため、その計算を実行し、実験結果と比べることは困難である(このことを認めざるを得なかった (D'Alembert 1752, 30-79; Truesdell 1954, III-III; Darrigol 2005, 20-22))。

その後ダランベールは一七六八年の論文「幾何学者に提起された流体の抵抗に関するパラドクス」で再びこの問題を取り上げ、前後左右が対称な物体の周りの流れを考察した。この場合流れの速度場は物体の前面と背面で同じになるため、流れによる圧力は物体の前後で完全に相殺され、物体に働く抵抗力はゼロになるという一見常識に反するような結論が導かれる。完全流体中を等速度で進む物体に働く抵抗力はゼロになるというこの結果は、以後、いわゆるダランベールのパラドクスとして知られるようになる。この論考においてダランベールはこの難題の解決を来るべき世代の幾何学者たちの手に委ねざるをえなかった (D'Alembert 1768; Darrigol 2002, 98-99; 2005, 19-23)。合理力学の当初の野心的目論見はパラドクスに逢着し、実践的有用性という観点において一定の挫折を味わうこととなった。

三 流体抵抗の実験的研究

流体抵抗に関する理論的研究がパラドクスに逢着する一方で、砲術、造船などの実践的な技術に従事する専門家たちは流体抵抗の法則を見出すため様々な実験的研究を行っていた。

イギリスの工兵技師ベンジャミン・ロビンスは一七三〇年代に弾道学に関心をもち、ベルヌーイらの理論的研究の応用を試みた。ガリレオ以来砲弾の空気抵抗は無視できると広く考えられていたが、ロビンスは実際には空気抵抗が相当に砲弾の射程を左右する重要な要素であることを示し、その大きさを測定するため回転腕木 (rotating

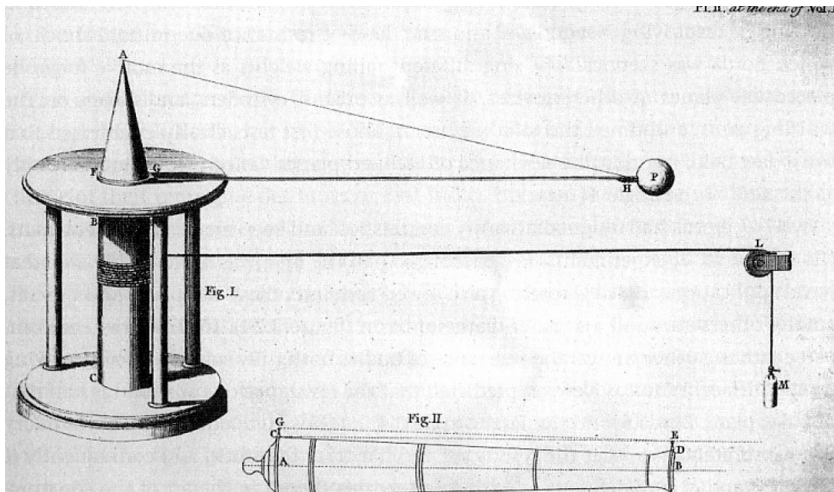


図 1

arm, whirling arm) と呼ばれる装置を考案した (図 1)。この装置は重りの落下を動力として回転する垂直軸とそれに取り付けられた長さ約一・三メートルの水平の腕木から成り、腕木の先には砲弾に似せた球を取り付けられた。実験に当たっては重り M を落下させ、回転速度が一樣になったところで重りに働く重力と空気抵抗がつり合ったと見なし、一回転にかかる時間から腕木の先端にある球 P の速度 v を計算した。回転時間は当時一般的であった振り子ではなくストップウォッチで測った。続いて球 P がない状態での腕木の抵抗を求めるため、 P をはずした腕木を様々な重りで動かし、速度 v で回転させる重量 m を見出した。腕木の長さを l 、回転軸の半径を r とすると、速度 v で動く球 P に働く空気抵抗 R は $R = \frac{1}{2} \rho v^2 \pi (M - m)$ と表わせる。この装置を用いた一七四六年の実験によりロビンスは抵抗が速度の平方に比例するという法則を検証したが、その結果は彼の没後一七六一年に出版された数学历文集の中で公表された (Robins 1761, 200-217; Steele 1994)。

ロビンスが空気抵抗を研究するため用いた回転腕木は、その後ジャン・シャルル・ド・ボルダによる流体抵抗の研究でも採用された。最初に行われた一七六三年の実験では、まず

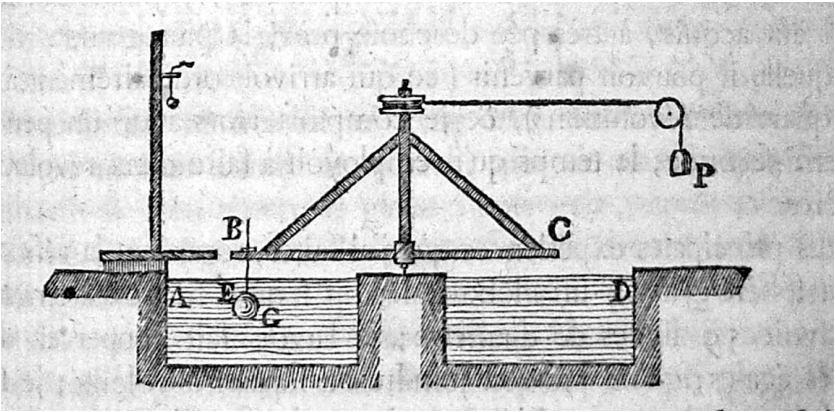


図 2

水平の回転軸を持った腕木に三種類の面積の板を取り付けて回転の時間を計り、空気の抵抗力を計算した。その結果彼は抵抗力は速度の平方にほぼ比例するが、抵抗の大きさの絶対値に関しては、測定値は実用公式が与えるものの約 $\frac{5}{16}$ であることを見出した。また実験によれば板に対して斜めの流れの抵抗は $\sin^2\theta$ ではなく $\sin\theta$ に比例するが、ボルダはこれを一般化することを避けた (Borda 1763; Dugas 1955, 311; Ferrero 2007, 160)。

続く一七六七年の研究では、ロビンスのものと同様、軸が垂直の回転腕木を用いて水の抵抗力を測定した (図 2)。その際、空気についてすでに検証したことに加え、円板が受ける抵抗と、それと同じ直径の球が受ける抵抗との比は、ニュートンが述べた二：一ではなく、五：二になるとボルダは結論した (Borda 1767; Dugas 1955, 312-313; Ferrero 2007, 160)。

一方各国の造船技師たちは、抵抗の少ない船体の形状を研究するため、早くからいわゆる曳船水槽を用いた実験を行っていた。曳船水槽実験では水槽内に浮かべた船体模型に綱を結びつけ、それを一定の力で引いて、様々な形状の模型の速力を比較した。一定の動力を得るため、たいていは滑車を通した綱に重りを結びつけ、それが落下する力を用いた (Ferrero 2007, 151-158)。

これらは具体的な船型の優劣を直接比較するような実践志向の実験であったが、より理論的な関心に基づく実験として特筆すべきはフランス海軍の軍港ロリアンの司令官テヴナー伯 (Antoine-Jean Marie, comte de Thevenard) が行った曳船水槽実験である。ボルダの一七六三年の実験を知り興味を抱いたテヴナー伯は一七六八年にボルダがロリアンを訪れた際彼から研究の最新の結果を聞き、自ら実験を行うことを決意した。海軍とフランス東インド会社の協力を得た彼は同年、長さ約七〇メートル、幅約四メートルで水深約三メートルの実験用水路の建設を実現させた。テヴナー伯と二人の助手は足掛け四年かけて様々な形状の立体について実験を行い、水上を航行する物体の方が水中を航行するものより大きな抵抗を受けること、物体が水中を航行する深さは抵抗に影響しないことなど、いくつかの興味深い結果を得た (Ferraro 2007, 161-164)。

テヴナー伯の実験は当時としては極めて大規模な曳船水槽実験であったが、その完全な結果は一八〇〇年まで公開されず、一般には知られていなかった。一方、一八世紀末に最もよく知られ、影響力のあった曳船水槽実験は一七七五年にボシュラが行ったものである。この実験が行われた背景には、かねてより進行中であったピカルディー運河の計画があった。これは北フランスのピカルディー地方とフランドルとを結ぶ地下運河を掘削するという計画で、この運河には通商路としての役割の他、戦時においてイギリスが支配する沿岸航路を通らずにオランダからの物資を輸送する内陸水運のルートという戦略上の役割も期待されていた。地下水路自体は技術的に見て特に新奇なものではなかったが、この計画には冬季の水量を維持するため地下水を利用するという革新的な手法が採用されていた。しかしながら着工以来工期は遅れ、トンネル内を吹く強い風や狭さなどの欠点が指摘されてきた (Redondi 1997, 149-151)。

一七七四年八月気鋭の経済学者であるテュルギーが財務総監に任命されると、彼は友人のコンドルセにピカルディー運河計画の調査を依頼した。コンドルセは調査委員会のメンバーとして水理実験の専門家であるボシュと、流体理

論の権威であるダランベールを推薦し、一七七五年三月七日ダランベール、コンドルセ、ボッシュユの三名は、「交易のための運河について理論的かつ実験的な研究を遂行するため」の委員に任命された。実験は一七七五年の七月から九月にかけてパリの陸軍学校 (Ecole Militaire) の敷地で行われ、その結果は『流体の抵抗に関する新実験』 [Nouvelles expériences sur la résistance des fluides (1777)] として出版された。

この実験報告の冒頭でボッシュユは、流体抵抗の研究の有用性に関するお決まりの文句を述べた後、数学者たちによる理論的取り組みに触れ、その現状を

彼らを与えた解のいくつかは大変単純で、実行の容易な計算しか必要としないという利点を有しているが、それらは流体と浮体との作用と反作用を不完全にしか表わしていない。他のものは流体の諸性質により直接的に基づいているが、それらが導くのは複雑で数値に直すのが困難な諸公式であり、それゆえ実践には全く無益である。

と総括している。ボッシュユは、テュルゴーより内陸水運の問題に関する諮問を受けた際、流体抵抗に関する実験研究を行うことを提案したのはダランベールであったとしている。しかし実際に実験を指揮したのはボッシュユであった。続いて彼は模型実験を行うに当たっての自身の方法論を開陳する。後の模型実験の発展との関連で興味を引くのは、縮尺効果に関する彼の見解である…

経験によりただちに検証されない理論は実践において役に立たない、実験は実物大で [en grand] 行われなければならない、小規模の実験は何も教えないなどとはしばしば言われる。しかしながら、これらの点

で真実である格率を自信満々に述べ立てる人々の大部分は、与えられた主題において、必要な、または有益な実験の選択を行ったり、実験を実施するのに適当な大きさを定めるよう求められると、当惑するであろう。…自然学の対象において求められるのは現象の大まかな流れを見いだすことのみであり、それに計算の精密さを求めるわけではないので、実験はできる限り大きな規模で行うべきであるということは少し考えればわかる。しかしながら、ある理論の基礎を置くべき精密な結果を得たいとしたら？ かなり大きな規模での実験はもはやその利点を持たない。というのも、それらの実験が、多くの類似した観察結果の間に存する顕著な差異を消し去るほど正確に、繰り返し、様々な条件の下で行われることはほとんどないのであるから、このやり方にしたがう場合、信頼に値する少数の事実を見出すためにはかなりの時間と労力、費用を使うことになるだろう。規模が小さすぎる実験には別の欠点があるが、それもまた有害である。それらの実験は結果をゆがめ、変質させるのであり、それらの実験は諸原理を混同し、計算も原因を突き止める助けにはならない。これら二つの暗礁の間にとるべき中庸の道がある。すなわち精度を保つ限度を超えることなく、結果を明確にできる十分大きな規模で実験を行うことである。これこそ幾何学を適用できるような実験を導くべき原理である。以前私は、拙著『流体力学』の実験の部においてこの規則に従うよう務めた。その規則は流体の抵抗に関する我々の実験においても同様に基礎となった (Bossut et al. 1777, 4-5)。

ボッシュは無限に広がる流体中での抵抗に関する先行研究として、回転腕木を用いたボルダの実験とテヴナー伯がロリアンで行った曳船水槽実験を挙げ、狭い水路に関するものとしてはフランクリンが行った実験を挙げる。ただしフランクリンの実験は大雑把で定性的なものであり、自分たちの実験のオリジナリティーは「幅の狭い水路での水の抵抗の精密な尺度やその抵抗と無限の流体中で見られる抵抗との比」を求めることにであると主張した。

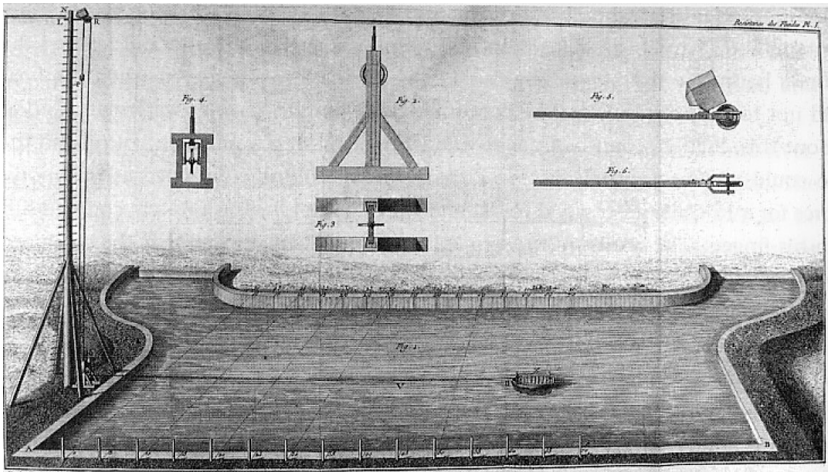


図 3

実験は陸軍学校の敷地内に設置された長さ一〇〇ピエ（約三〇m）、幅五二ピエ（約一八m）、最大水深六ピエ半（約二m）のプールを用いて行われた（図3）。その際ボシュはモンジュ、ルジャンドルら同校に勤める数学教官の協力を得ることができた（Bossut et al. 1777, 3-4）。実験に当たっては滑車を通した綱で船体模型と重りを結びつけ、落下する重りの力で模型を航行させた。一定の力で引かれた模型の運動が等速度になったとき、模型が受けている抵抗の大きさは重りの重量に等しい。そこで、一定区間ごとに模型が航行するのにかかった時間を周期半秒の振り子で計測し、一回の試行ごとに測定結果を表にまとめた。ボシュは測定結果を比較し、最後の二〇ピエに関しては模型がほぼ等速度運動していると見なして、そのときの速度と重りの重量を比較した（Bossut et al. 1777, 133-137）。

プール全体を無限に広がる開水域に見立てて約二〇〇回の試行を行った後、プール内に幅と深さが変えられる水路を設け、開水路内の抵抗の実験を行った。実験には二二の異なる形状の船体模型を用い、合計約二九三回の試行を行った。

これらの実験の結果、ボシュは抵抗が速度の平方と流体が当たる平面の面積にほぼ比例することを認め、流れが平面に垂直

である場合、マリオット以来の実用公式は流体抵抗の大きさを測る尺度と見なせると結論付けた。ただし、斜めの流れの場合には、抵抗は入射角の正弦にもその平方にも比例しないと、これに関しては実用公式は不十分で、これによって最小抵抗曲線を見出すこともできないと述べた (Bossut et al. 1777, 174-176)。

流体抵抗の絶対的な大きさを求めるに当たって、ボシュは滑車の軸にかかる摩擦力と模型の水上部分の空気抵抗を考慮して修正を行った。摩擦力の見積もりに当たっては、滑車の綱の両端に等しい重量をかけてつり合わせ、平衡を破るのに必要な力を求めた。これを様々な重量の組について行い、摩擦力は軸にかかる総重量の約五分の一になると見積もった。この軸にかかる摩擦を見積もる手法こそは、ボシュがメジエールでのテキストとして執筆した『機械学・力学概論』[*Traité élémentaire de mécanique et de dynamique, appliqué principalement aux mouvements des machines* (1763)]において、自らのオリジナルな貢献と見なしていた研究であった (中村 2001, 11)⁽³⁰⁾。

四 結論

一八世紀の学問体系において流体の研究はいわゆる物理・数学的研究に分類され、世紀の前半には、天文学、光学と並び、数学、特に合理力学を応用することによる成果を最も期待された分野であった。とりわけ流体の抵抗を支配する法則を理論的に導くことは、弾道学、造船、土木など実践的分野への応用の重要性から、特に関心を集めた主題であった。

しかしながら一八世紀の半ばを過ぎる頃までには、当初の目論見に反し、流体抵抗の問題の理論的研究から実践上有用な結果を得ることは極めて困難であることが明らかとなった。流れの連続性と圧力伝播の等方性が流体の振る舞いの特徴付ける原理として把握され、流体運動を記述する基礎方程式がオイラーにより提出されたにもかかわらず、流体抵抗の問題は理論的アプローチをことごとく寄せ付けなかったのである。当時最も厳密と考えられた解

析的手法による研究は抵抗ゼロというパラドクスに逢着し、実践上いくらかでも有意な指針を得るためには、マリOTT以来の実用公式に立ち戻るしかなかった。こうして、理論的な流体力学研究と、実践的、経験的な水理学研究の二つの伝統が乖離するという、一八、一九世紀の流体研究に特徴的な状況が生ずることになる。

一八世紀後半以降、流体抵抗の研究を主導したのは実験的アプローチであり、その担い手となったのはもっぱら上記の実践的応用分野の専門家たちであった。そこで用いられた実験手法には以前から実践的技術の諸分野で用いられていたものもあったが、研究の主眼は、具体的な技術上の指針を与えることから、測定された量の間の関係を一般的に規定する規則性を確立することへと微妙に移行していった。例えば造船技師たちは船体設計の指針とするため早い時期から曳船水槽実験を行っていたが、ボシユラはそれを流体抵抗の絶対的尺度を確立するため用いようとした。ボシユラによる一七七五年の曳船水槽実験は当時の実験水理学研究を代表するものの一つである。

このような研究の進展はگرانベールの「物理・数学」としての流体研究の位置づけを動揺させ、その再定義を不可避のものとした。理論研究と実験研究の乖離とは、とりもなおさず実験的なアプローチがデイシプリンとして一定の自立性を勝ち得たことを示唆している。流体抵抗の実用公式の位置づけはそのことを典型的に示す例であるといえる。

流体抵抗の実用公式 *1769's* は、ボルダやボシユラの実験研究を通じて、実践上一定の存在意義を認められる経験則として確立された。自由な粒子の衝突のモデルに基づく以上、この公式は当時の基準からしてもはや理論的に厳密とは言えなかったが、一八世紀を通じてその手法を洗練させた実験水理学の伝統はそれを実践的な観点から正当化したのであった。

実用公式のこのような位置づけを理解するに当たっても「はじめに」で述べた物理理論のモジュラー構造というダリゴルの考え方は導きの糸を与える。ダリゴルによれば、物理学のある理論体系は一般的に根本原理とそれから

派生する様々な概念図式からなるモジュラー構造をしている。その構造の中では派生的な概念図式もそれぞれが一定の独立性を持ったサブ理論ないしモジュールとして振舞うことができる。ダリゴルの挙げる例によれば、流体力学の理論においてナヴィエ・ストークス方程式は根本理論であり、境界層理論は一つのモジュール（ダリゴルの用語で言えば近似モジュール）である。理論体系内の各モジュールは根本理論と適合的でなければならぬが、後者から前者を導出する過程は一般的には厳密ではない。したがって還元主義的立場は理論発展の実態に即していない。根本理論から現象を説明する様々な結果がアプリオリに導かれるように見えるのは事後的なことであり、実際の歴史においては、個々の具体的で実践的な問題と取り組む中で、研究者がモジュールとして機能する概念図式を発展させることが理論発展にとって不可欠であるとダリゴルは指摘する（Darrigol 2008a; 2008b）。

このような意味で、流体抵抗の実用公式は一八世紀の流体抵抗研究において一つのモジュールとして機能する概念図式であったと言えよう。確かにこの公式はオイラーの基礎方程式からは導けないが、自由粒子の衝突のモデルは古典力学のより一般的な枠組みから厳密でない仕方でも導くことができた。さらにこの公式を検証するための実験は、一定範囲内の速度に関して、水や空気の抵抗が密度、および速度の平方にほぼ比例することを示したが、そのことは縮尺効果の可能性を示唆し、一九世紀におこなわれる粘性流体の抵抗に関する研究に対して一つの指針を提供した。

以上本稿では一八世紀の流体抵抗研究における実験的アプローチの位置づけの再検討を試みた。ここで提示したものはまだ素描にとどまっているが、今後の研究の方向性としては、回転腕木や曳船水槽などの実験装置の発展や、縮尺効果などの実験手法、解釈をめぐる議論の流れを跡付けるといふ作業が考えられる。また本稿では主としてよく知られているフランスの事例を扱ったが、イタリアには一七世紀末以来「水量学」(hydrometria)の名で知られる独自の水理学の研究伝統があり、オランダには伝統的な治水の専門家集団が存在した。今後の課題として、この

ように多様な一八世紀水理学研究の見取り図を描くことも視野に入れておきたい。

一次文献

- Borda, Jean-Charles de. 1763. 'Expériences sur la résistance des fluides', *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (1763): 358–376.
- Borda, Jean-Charles de. 1767. 'Expériences sur la résistance des fluides', *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (1767): 495–503.
- Bossut et al. 1777. *Nouvelles expériences sur la résistance des fluides*. Paris.
- D'Alembert, Jean le Rond. 1744. *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*. Paris.
- D'Alembert, Jean le Rond. 1752. *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*. Paris.
- D'Alembert, Jean le Rond. 1768. 'Paradoxe proposé aux géomètres sur la résistance des fluides' in *Opuscules mathématiques*, vol. 5, 34th memoir: 132–138.
- D'Alembert, Jean le Rond. 2000. *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*. Paris.
- Euler, Leonhard. 1745. *Neue Grundsätze der Artillerie, aus dem englischen des Herrn Benjamin Robins übersetzt und mit vielen Anmerkungen versehen*. Berlin in *Opera omnia*, ser. 2, vol. 14 (Lausanne, 1922).
- Robins, Benjamin. 1761. *Mathematical Tracts of the Late Benjamin Robins*. London.
- 二次文献
- Darrigol, Olivier. 2002. 'Between hydrodynamics and elasticity theory: The first five births of the Navier-Stokes equation', *Archive for History of Exact Sciences*, 56 (2002): 95–150.
- Darrigol, Olivier. 2005. *Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. Oxford: Oxford University Press.
- Darrigol, Olivier. 2008a. 'The modular structure of physical theories', *Synthese* 162 (2008): 195–223.
- Darrigol, Olivier. 2008b. 'Empirical challenges and concept formation in the history of hydrodynamics', *Centaurus*, 50 (2008): 214–232.
- Dugas, René. 1955. *A History of Mechanics*. trans. by J. R. Maddox. Neuchâtel: Grifion.
- Ferreiro, Larrrie D. 2007. *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution, 1600–1800*. Cambridge MA: The MIT Press.

- Gilmor, C. Stewart. 1971. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton: Princeton University Press.
- Hankins, Thomas L. 1970. *Jean d'Alembert: Science and the Enlightenment*. Oxford: Clarendon Press.
- Home, R. W. 1985. 'The notion of experimental physics in early eighteenth-century France', in *Changes and Progress in Modern Science*, ed. by Joseph C. Pitt. Dordrecht: D. Reidel.
- Home, R. W. 2003. 'Mechanics and experimental Physics', in *The Cambridge History of Science*, vol. 4, Eighteenth-Century Science, ed. by Roy Porter. Cambridge: Cambridge University Press: 354-374.
- Kuhn, Thomas S. 1976. 'Mathematical versus experimental traditions in the development of physical science', *Journal of Interdisciplinary History*, 7 (1976), 1-31. (我孫十・佐野訳『本質的緊張』(みすず書房 一九八七年) 所収)
- Maffioli, C. S. 1994. *Out of Galileo: The Science of Waters 1628-1718*. Rotterdam: Erasmus Publishing.
- Mikhailov, Gleb K. 1996. 'Early studies on the outflow of water from vessels and Daniel Bernoulli's *exercitationes quaedam mathematicae*' in *Die Werke von Daniel Bernoulli* Band 1. Basel: Birkhauser: 199-255.
- Redondi, Pietro. 1997. 'Along the water: The genius and the theory', in *The Civil Engineering of Canals and Railways before 1850*, ed. by Mike Chrimes. Aldershot: Ashgate: 143-176.
- Rouse, H. & Ince, S. 1957. *History of Hydraulics*. Ann Arbor: Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Saint-Venant, Adhémar Barré de. 1887. *Résistance des fluides: Considérations historiques, physiques et pratiques relatives au problème de l'action dynamique mutuelle d'un fluide et d'un solide, dans l'état de permanence supposé acquis par leurs mouvements*. Paris.
- Smith, George E. 1998. 'Newton's study of fluid mechanics', *International Journal of Engineering Science* 36 (1998): 1377-1390.
- Steele, Brett D. 1994. 'Muskets and pendulums: Benjamin Robins, Leonhard Euler, and the ballistics revolution', *Technology and Culture* 35 (1994): 348-382.
- Truesdell, Clifford. 1954. 'Rational fluid mechanics, 1657-1765', in L. Euler, *Opera Omnia*, ser. 2, vol. 12 (Lausanne, 1954): IX-CXXXV.
- Truesdell, Clifford. 1960. 'A program toward rediscovering the rational mechanics of the Age of Reason', *Archive for History of Exact Sciences*, 1 (1960): 3-36.
- 隠岐さや香 二〇〇八。「十八世紀パリ王立科学アカデミーと『有用な科学』の追及：理想の学者像と道具的専門性の狭間で」東

京大学大学院総合文化研究科博士学位論文、二〇〇八。

中村征樹 二〇〇一。「フランス革命と技師の『近代』…書き換えられる技術的実践の『正統性』」、『年報 科学・技術・社会』第十卷 (2001): 1-31.

註

- (1) ダランベールは統計的な議論を自然研究に持ち込むことに対し極めて批判的であった。Cf. 隠岐 (2008, chap. 6).
- (2) トリチェッリの定理は当時、「水面から h の深さに開けられたオリフィスから水が流出する速度は、 h の高さを自由落下した物体が到達する速度に等しい」と表現されていた。
- (3) 摩擦に関して当時の代表的な研究であったアモントンの理論では摩擦力は垂直抗力の約三分の一とされていた。一八世紀の摩擦研究については (Gillmor 1971, 118-125) で概観が与えられている。