

レイノルズ先生とマッハ先生を お招きして

対談のお相手 大橋 秀雄

大橋：今日は日本機械学会会員のため、わざわざ地上までお出し下さいましてありがとうございます。私は、大学で流体力学を教えています、講義の中ではお二人のお名前が頻繁に出て参ります。これから昔の思い出話をして頂いて、流体力学の勉強がますます楽しくなるようにしたいと思います。

最初に簡単に自己紹介をお願いします。生まれた順でということですからマッハ先生から。

マッハ：私はエルンスト・マッハ (Ernst Mach) です。1838年にオーストリアのウィーンに近い小さな町（現在はチェコ領）で生まれました。父はプラハで哲学を勉強しましたが、当時はプレトン男爵の教育係をしていました。動物心理学と農学に興味を持ち、ヨーロッパに養蚕を導入するのに大いに貢献しました。母は音楽や詩を愛する芸術肌の優し

い女性で、恵まれた環境で育ったことを感謝しています。

私は小さい頃ラテン語が不得意で成績が悪く、貿易商になろうとしたり飾り棚職人になろうとしたこともありましたが、結局はウィーン大学に入って数学と物理を勉強しました。ウィーンは哲学の盛んなところで、私はここで実証主義的な考え方を身に付けました。22歳のとき電気放電に関する研究で学位を取り、その後ウィーン大学の講師を皮切りにグラーツ大学とプラハ大学で物理学の教授を勤め、58歳のとき再びウィーン大学に戻りました。64歳で引退して専ら著作にふけていましたが、1916年「物理光学の諸原理」の完成を目前にして天のお召しを受けました。78歳の誕生日の前日でした。

大橋：ありがとうございました。では続けてレイノルズ先生。

レイノルズ：オスボーン・レイノルズ (Osborne Reynolds) と申します。私はマッハ先生より4年あとの1842年に、アイルランドのベルファーストで生まれました。父は牧師をしていました。若い頃しばらく工場で働いてみましたが、どうしても勉強が続けたくなくてケンブリッジ大学で数学を勉強しました。幸運にも才能が認められて、26歳のときにマンチェスターにあるオーエンスカレッジ (Owens College, 後に Manchester 大学と合併) の教授として招かれ、当時イギリスで二つしかなかった工学の講座を担当することになりました。

ここで私は全工学部学生向けの3年間のコースを編成し教育を始めましたが、厳しいけれども興味を刺激するような講義だと学生には好評でした。

最初は大学に研究室もなく、実験は専ら自宅で行いましたが、段々と大学の設



おおはし ひでお
1931年5月10日生まれ
1954年東京大学工学部機械工学科卒業

●主として行った研究

ターボ形流体機械の動特性、特に非定常運転時の性能や流体力に関心を持ち続けた。最近、羽根車の中の二相流を異列レベルで解明する研究を始めている。

●担当講義

機械工学科で、流れ学やターボ機械を教えている。

●勤務先

東京大学 教授
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)



Osborne Reynolds



Ernst Mach

It seemed, however, to be certain if the eddies were owing to one particular cause, that integration would show the birth of eddies to depend on some definite value of

$$\frac{c\rho U}{\mu}$$

レイノルズの論文⁽¹⁾に初めて現れた無次元数。
のちにレイノルズ数と命名される。

図1

備も完備され、今では大変有名になった層流、乱流の可視化実験を始めとして、熱力学から電磁気学に至る実にさまざまな研究をしました。

1877年にはロイヤルソサイエティのフェロウに推されました。64歳になって健康上の理由で退官しましたが、私は研究者としての全生涯をマンチェスターで過ごしました。天国に引っ越したのは1912年71歳の時ですから、マッハ先生より4年早かったわけです。

大橋：ありがとうございます。我々にはレイノルズ先生の方がマッハ先生よりずっと古い世代のような先入観がありましたが、これは全くの誤りでした。と言うのは、マッハ数が現代人の生活用語になっていて、スピードの象徴として使われているからでしょう。何しろマッハ文朱という女子プロの選手がいて暴れまくってたくらいですからね。先生はこのことをご存じでしたか。

マッハ：知っていますよ。近ごろは便利になって天国までテレビ電波が届くようになりました。ヘルツさんやブラウンさんが特にご機嫌です。このあいだゲーテ大先生とお会いしたときに、「ギョーテとは俺のことかとゲーテ言い」と面白がっていらしたので、私は「マックとは俺のことかとマッハ言い」とやり返しました。アメリカだったらさしずめマック文朱でしょうね。ハンバーガー屋と間違えないように、ちゃんとマッハと呼んで下さい。

大橋：日本ではマッハですからご安心下さい。

粘性も圧縮性も無い仮想的な流体を理

想流体と呼びますが、もし実際の流体が理想流体だったら、流体力学はおそらく応用数学の教科書の一節で調和関数の応用例として片付けられてしまったでしょう。流体力学を面白くしているのは粘性であり、圧縮性でもあります。その面白さがレイノルズ数とマッハ数を仲立ちとして現れるのですから、お二人はまさしく象徴的な存在です。

レイノルズ先生のことは、残念ながら流体力学を学んだ者以外には案外知られていません。しかし毎日の生活を見ると、マッハ数が問題となる高速流れよりは粘性が主役の流れが多いのですから、本当はもっとレイノルズ数が生活用語として取り込まれてもよいくらいです。例えば扇風機のカタログを見ると「性能保証レイノルズ数範囲は……」と書いてあるといった具合に。

レイノルズ：私にとっては、流体力学で最も重要な無次元数に私の名前をつけて下さったことだけで十分満足です。晩年私の名前が使われ始めたことを耳にしましたが、こんなに広く使われる様になるとは夢にも思いませんでした。一体どなたが名付け親ですか。

大橋：私も調べてみましたが、何年何月に誰がどこで命名という具合にはハッキリしませんでした。しかし確かなことは、1910年前後からドイツのゲッチンゲンで目ざましい成果を挙げ始めていたプラントル(Ludwig Prandtl, 1875-1953)とその弟子たちが使い始めたようです。プラントルはゲッチンゲン風胴の発明者として知られるように、流体力学に模型実験の手法を導入、確立した人です。相

似則の基本は無次元数ですから、重要な無次元数には名前をつける必要が生じたわけです。

レイノルズ先生は、先生の1883年の論文の中で、名前こそ無かったけれど今日で言うレイノルズ数を示され、これが管内流の層流、乱流を分けるクライテリアになることを実験的に証明されました。従ってプラントルは、迷いもなくレイノルズ数という名前を付けたものだと思います。1910年のプラントルの伝熱と流動の相似性に関する論文の中には、今日のレイノルズ数、プラントル数、ヌッセルト数などが全て出てきますが、名前が付いたのはレイノルズ数だけでした。

レイノルズ：そうですか。今度プラントルさんにお会いしたらお礼を言っておきましょう、ところでマッハ先生の場合はどうですか。

マッハ：私が生きている間は、その様な話は聞きませんでした。どうなっているんでしょう。

大橋：これはかなりハッキリしています。1929年4月にアッカレット(Jakob Ackeret, 1898-1981)がチューリッヒのスイス連邦工科大学で行った講師登用講演(Habilitaion)の中で提案しました。高速気流では流速と音速の比がいつも重要な役割を演じますが、その比には名前がなく不便でした。そこで、超音速飛翔体の前面に生じる目に見えない空気の波を始めて写真にとって下さったマッハ先生を記念してマッハ数と呼ぼうと言ったわけです。1920年代の前半には、アッカレットはゲッチンゲンでプラントルと一緒に空気力学の研究をしていましたか

ら、無次元数の重要性を十分認識していたのでしよう。

マッハ：そうでしたか。これもやはりプラントル一派の仕掛けだったのですね。ところで、移動する音源から出る音波が波面を造ることは、私よりも40年も早くドップラー (Christian Doppler, 1803-1853) が理論的に予測していました。いろいろな音源の移動に対して波面の様子を描き、今で言うマッハ円すいや衝撃波の存在を予言しています。マッハ数の名誉はむしろドップラーに行っても良かったのではありませんか。

大橋：ご謙遜恐れ入ります。そのことについてはアッカレットも十分考えたことでしょう。当時は実験よりむしろ理論が先行していたのに、先生はテプラー (August Toepler, 1836-1912) によって発明されたシュリーレン法をいち早く使って見えない波面を現実に見せて下さいました。その実践的方法論が共感を呼んだのだと思います。また当時既にドップラー効果という言葉が定着していましたので、混同を避ける意味もあったかと思えます。

ところでマッハ先生は学生時代から実証哲学や認識論に深い興味をお持ちだっ

たと聞いていますが、これが先生の研究方法に影響を与えていましたか。

マッハ：大いにありました。私はいつも観測される事象と観測者との相互関係に深い関心を持ちました。ニュートン力学は、目前の事象にとらわれ過ぎていて、背後の見えないものに無関心過ぎると感じていました。私は漠然と相対力学なるものを考えて、それを口にしていましたが、アインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) もそのことに強い関心を示しました。1901年にアインシュタインからもらった手紙には、光栄にも「私は貴方の弟子です」と書いてありました。彼の一般相対性原理にながしかの影響を与えたのでしよう。

私の研究は、普通感覚では認識できないようなことを、何とか実験技術を工夫して観測可能にし、現象の正しい理解に近付こうとする努力の連続でした。

大橋：実験という意味では、レイノルズ先生も希代の天才でしたね。有名なパイプの層流、乱流実験の思い出をお話し頂けますか。

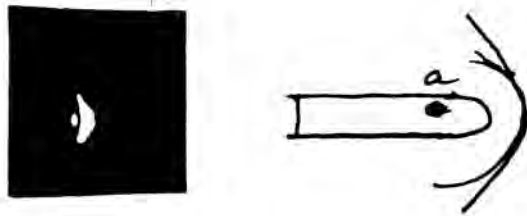
レイノルズ：今の人は私の頃に比べると夢のような計測装置に恵まれていながら、とかく数値シミュレーションに走っ

てしまうのはなぜでしょうね。何しろ昔は何も無かった。圧力をU字管マンオメータで計り、流量を堰で計るのがせいぜいでした。その点可視化は比較的容易で、インクを使った実験があればどうまく行くとは思いませんでした。ところが、時代は巡るで、新しい装いのもと可視化が複雑な流動現象の理解に欠かせない手法として再び脚光を浴びているのは嬉しい限りです。

私の代表作となった1883年の論文で、層流乱流のクライテリアとしてレイノルズ数を提案したことになっていますが、当時は層流、乱流という概念自体がまだあいまいでした。現に論文の題目も直行 (direct) 運動と湾曲 (sinuous) 運動となっています。

大橋：そうかも知れませんね。乱流が本当に不規則な変動現象だと実感として納得できたのは、熱線風速計が変動流速を捕らえ始めてからのことですね。

レイノルズ：パイプの中の流れが乱れた流れに変わることは、私よりも30年も早くドイツのハーゲン (Gotthilf Hagen, 1797-1884) が見付けています。ハーゲン・ポワズユイユの流れで有名なハーゲンです。私の功績は、流体の粘度



マッハと協力者のザルヒャーによって撮影された人類初の衝撃波像。左のシュリーレン写真では右に飛んでゆく物体の前方に帽子状の波面が見えている。右はザルヒャーがマッハに送った手紙の中のスケッチで、こちらの方がかえってよくわかる⁽⁷⁾。

図2

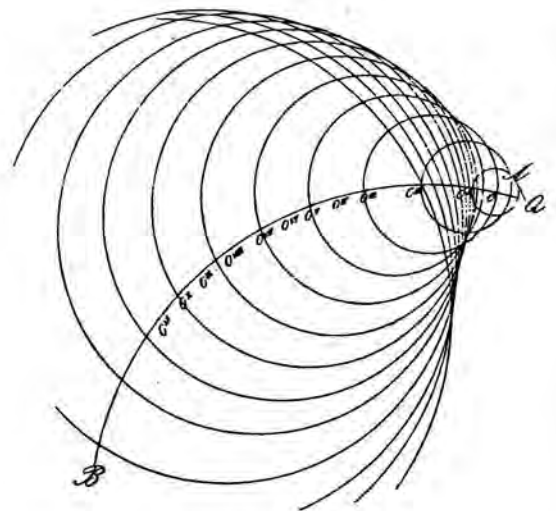


Figure 5

ドップラーが描いたいろいろな波面の一つ。このケースには、マッハ波も衝撃波も含まれている⁽⁸⁾。

図3

や流速や管径をいろいろに変えて実験し、レイノルズ数と呼ばれるようになった無次元数の重要性を指摘したことでしよう。

乱れた流れの問題は、私に大きな理論的興味を呼び起こしました。変動成分を考慮してナビエ・ストークスの運動方程式を変形し、乱流運動方程式を導きましたが、変動成分によって生ずるせん断応力がレイノルズ応力と呼ばれるようにな

ったことは後で聞きました。

大橋：お二人のご業績は多岐多様に亘っていて、語り始めたらこの対談がいつ終わるか分かりません。簡単に私からまとめて紹介させて頂きましょう。レイノルズ先生については、キャピテーションを実験的に再現して騒音はキャピティの崩壊に原因することを最初に示したこと、滑り軸受の油膜圧力分布をきめるレイノルズ方程式を導いたことなどが挙げ

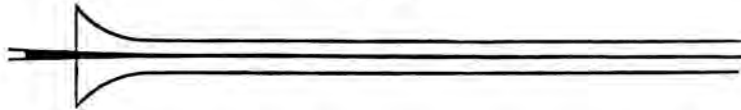
られますが、多段タービンポンプや高速疲労試験機のように新しい機械を發明された功績も偉大です。

マッハ先生の方は、高速気流に関する数々の研究のほか、アインシュタインによって名付けられたマッハの原理が有名です。これは、目前で観測されているどんな小さな事象も、全宇宙を支配する法則の一部に外ならないという深遠なもので、振子を見れば地球の自転を見抜かな

The general results were as follows :—

(1.) When the velocities were sufficiently low, the streak of colour extended in a beautiful straight line through the tube, fig. 3.

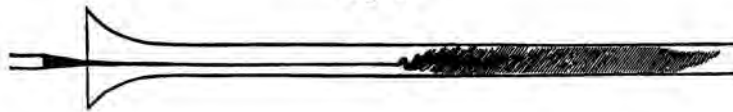
Fig. 3.



(2.) If the water in the tank had not quite settled to rest, at sufficiently low velocities, the streak would shift about the tube, but there was no appearance of sinuosity.

(3.) As the velocity was increased by small stages, at some point in the tube, always at a considerable distance from the trumpet or intake, the colour band would all at once mix up with the surrounding water, and fill the rest of the tube with a mass of coloured water, as in fig. 4.

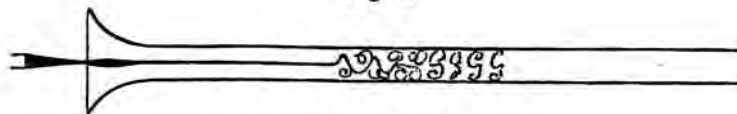
Fig. 4.



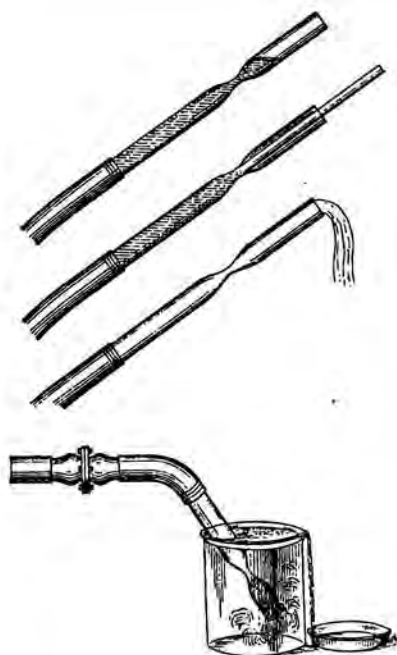
Any increase in the velocity caused the point of break down to approach the trumpet, but with no velocities that were tried did it reach this.

On viewing the tube by the light of an electric spark, the mass of colour resolved itself into a mass of more or less distinct curls, showing eddies, as in fig. 5.

Fig. 5.

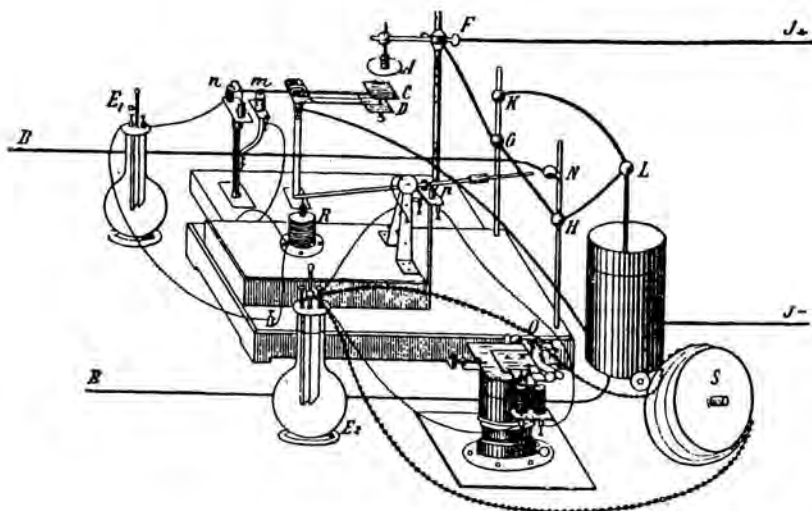


あらゆる流体力学の教科書に引用されているレイノルズの実験結果。1883年のオリジナル論文⁽⁶⁾から。上は層流、中は乱流。下は乱流をスパーク光源で観察した結果で、細かい渦 (eddy) の集まりであることを見抜いている。



レイノルズによるキャピテーション実験。ガラス管の途中に設けた絞り部でキャピティを観察した。

図5



マッハが使ったシュリーレン光源用の遅延発光装置。手回し発電機でライデン瓶を充電し、飛翔体の通過をトリガーにしてスパーク発光させた。遅延の調節に苦勞している。

図6

ければならないという恐ろしい洞察力を要求する原理です。そのほか、内耳の迷路の機能や、視覚におけるマッハバンドの発見など生理学にも重要な貢献をされました。

ところでこの辺で、現代の学生や研究者、技術者に対して何かアドバイスがございましたらお願い致します。先ずマッハ先生から。

マッハ：専門に深化するのもある程度は必要ですが、最近はそれが行き過ぎている様に思えます。いつまでも発展力、創造力を失いたくないと思ったら、自然万般に対する関心を広く抱き続けて、フレッシュな感受性を磨いて下さい。貴方の目の前に全宇宙があります。網膜に写る映像は、そのままではただ消えて行くだけですが、心の眼で注意深く捕らえることによって初めて認識されます。認識は貴方の責任です。

レイノルズ：私の申し上げたいことも全く同じです。

レイノルズ数の名付け親のプラントルも、プラントル数の名のもとに生き続けることになりました。皆さん方も、例えばかつての電磁流体力学のように前人未踏の領域に飛び込んで新しい流体力学を創造すれば、我々と同じような榮譽を受けるチャンスがあります。これは流体力学だけの話ではなく、あらゆる分野で共通です。昔と違ってもうそんな未開の領域は残っていないとお考えの方は、貴方がどんなにチャンスに恵まれた時代に生きているかお分りになっていません。成功を祈ります。

大橋：ありがとうございました。今日のお話で勇気が湧いてきました。一同頑張ります。

参考資料

- (1) Rouse, H. and Ince, S., History of Hydraulics, (1957), Dover.
同上訳本、高橋、鈴木訳、水理学史、(1974)、鹿島研究所出版会。
- (2) Reichenbach, H., Contributions of Ernst Mach to Fluid Mechanics, Ann. Rev. Fluid Mech. (1983), 15, 1-28.
- (3) Rott, N., Jakob Ackeret and the History of Mach Number, Ann. Rev. Fluid Mech. (1985), 17, 1-9.
- (4) Tollmien, W. ほか3名, Ludwig Prandtl Gesammelte Abhandlungen, Teil 1-3, (1961), Springer.
- (5) Von Karman, Th., Aerodynamics, 1954, Ithaca.
- (6) Reynolds, O., Philosophical Trans. Roy. Soc. (1883), Vol.174, pp.935.
- (7) Mach, E. and Salcher, P., Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, (1887), Vol.95, pp.764.
- (8) Doppler, C., Abhandl. der Boehmisch. Gesel. der Wiss., (1847), Vol.5.