

架空対談

大 橋 秀 雄*

Talk in Fantasy

*Hideo Ohashi

*E-mail for correspondence: PGA02322@nifty.com

まえがき

古い話ですが、1980 年代に入ると若者の工学離れが始まりました。危機感を抱いた工学系学協会は、学生諸君に重点をおいて学会への関心を高める取り組みを始めました。日本機械学会は、毎月会員に配布する会誌を、学生諸君にも親しみやすい内容にしよう検討していましたが、結論として、メカライフという若者にターゲットを絞った小冊子を会誌とは別に発行することに決めました。1985 年 5 月に創刊号が出て以来、年 4 回の発行を続けましたが、1997 年以降は会誌の一部をメカライフ特集に当てる形で現在に続いています。

内容は、専門知識が浅くても十分理解でき、何よりも学ぶことが楽しくなる記事を集めるよう努力しました。私も執筆の依頼を受けたので、流体力学に親しみを持てるようになる記事は何かと思案しました。結局、流体を学ぶものは誰でも知っている二人の巨人、レイノルズとマッハを天国からお招きして、会員のために架空対談をしていただくことにしました。それが「豪華誌上架空対

談 レイノルズ先生とマッハ先生をお招きして」^⑦という題でメカライフ 10 号 (1987 年 12 月) に掲載されました。

その記事が出たあと、谷一郎先生から、レイノルズ数の命名に関して重要な文献の見落としがある、とご指摘を受けました。それを承けて「後日談 レイノルズ数の名付け親」^⑧を執筆し、メカライフ 13 号 (1988 年 9 月) に掲載しました。

それらの記事が出てから 30 年近く経ち、読んだ記憶がある方もめっきり少なくなりました。そこで、以上二つの記事を統合し、レイノルズ数とマッハ数の誕生に重点を置いた対談に再編してみました。この間、谷一郎先生は天国に召されてしまいましたので、先生には対談に飛び入り参加していただくことにしました。以下が、その再編誌上架空対談です。

流体力学会の 50 周年記念の回想録にメカライフ記事の焼き直しを寄稿するのは失礼かと思いましたが、古典の再演としてお許しください。

再編誌上架空対談

レイノルズ先生と
マッハ先生をお招きして

— 飛び入り参加 谷一郎先生 —

対談の進行役 大橋秀雄



Ernst Mach



Osborne Reynolds

大橋：本日は会員のため、わざわざ地上までお出ましいただき有難うございました。対談の進行役を務めさせていただきます大橋と申しますが、よろしくお願いします。

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。生まれた順ということで先ずマッハ先生から。

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、当時はブ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：有難うございました。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なくなって、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ズカレッジ(Owens College、後のVictoria University)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、厳しいけれどもやり甲斐のある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、実験は専ら自宅でやりま

したが、段々と大学の設備も完備され、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様々な研究をしました。

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才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。天国に召されたのは1912年、71才の時です。すから、マッハ先生より4年早かったわけです。

大橋：有難うございます。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。

マッハGoGoGoというカーレースのテレビアニメが流行っていますが、子供たちが熱狂していることを先生はご存知でしたか。

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GoGoGo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。

マッハ：私が生きている間は、マッハ数など聞いたことがありませんでした。ところで、どのようないきさつで、マッハ数という言葉が使われるようになったのですか？

大橋：レイノルズ数が使われるようになってから、ずっと後のことでした。1929年4月に、アッカーレット(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教授資格講演(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

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

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

図1 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.

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初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(Ludwig Prandtl, 1875-1953)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ょう。

マッハ：そうでしたか。プラントルさんの影響も大きかったのですね。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、今で言うマッハ円錐や衝撃波の存在を予言しています。マッハ数の栄誉はむしろドップラーに行っても良かったのではないですか。

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っています。

マッハ：いきさつはよく分かりました。アッカレットさんにお目にかかって、お礼を言うのが楽しみです。

大橋：ところで、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考えると、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atalog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よう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とその弟子達が使い始めたようです。プラントルはゲッチンゲン風洞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²⁾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(図1)、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³⁾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、名前が付いているのはレイノルズ数だけでした。

レイノルズ：そうですね。今度プラントルさんにお会いしたらお礼を言うておきましょう。

ここで、学会事務局に天国から電話がかかり、名誉会員の谷一郎先生から、進行役の発言に異論があると連絡がありました。そこで谷先生にも、急遽飛び入り参加していただくことにしました。



谷一郎

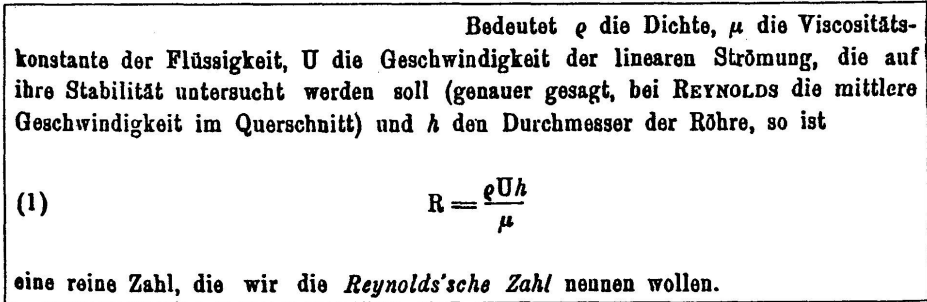


図2 ゾンマーフェルトの1908年の論文²⁾から抜粋.

大橋：レイノルズ数の名付け親はプラントルだとする私の調査は不十分だったようで、ここでお詫びして白紙に戻させていただきます。これから谷一郎先生にも参加していただき、仕切り直しいたします。谷先生、遠路お越しいたさき、有り難うございました。

谷：1990年に天国組に加わった谷一郎（文末略歴参照）と申します。この対談には興味があったので天国から眺めていましたが、レイノルズ数の名付け親のところで、大橋さんの調査結果がどうしても納得できず、つい電話してしまいました。この話題に限って、対談に加わらせていただきます。

実は私は、カルマン渦で有名なカルマン(Theodore von Kármán, 1881-1963)と起居を共にしながら、彼の著書「Aerodynamics」⁷⁾の編集を手伝っていた時期がありました。その折に、レイノルズ数の名付け親はゾンマーフェルト(Arnold Sommerfeld, 1868-1951)だと、彼から直接聞いたことがありました。

大橋：私の調査で、なにか文献の見落としがあったのでしょうか？

谷：見落とししたのは、ゾンマーフェルトが1908年に第4回国際数学会議で発表した論文²⁾でしょう。その論文の関連部分を図2に示しますが、式(1)のRは無次元数で、式の下に、これをレイノルズ数と名付けたい(nennen wollen)とはっきり書いてあります。文献の年代による限り、レイノルズ数の名付け親は明らかにゾンマーフェルトです。ゾンマーフェルトは、滑り軸受の負荷係数であるゾンマーフェルト数、線形安定判別によく現われるOrr-Sommerfeld方程式などで工学でも極めて縁の深い方です。もともとは物理学者で、その理論物理学の教科書(Vorlesungen ueber theoretische Physik)は、今でも学生の必読書となっています。

大橋：恐れ入りました。私がプラントルの文献を調べ

た限り、1910年の論文³⁾に始めてレイノルズ数が登場してきます。明らかに逆転です。私の調査不足でした。

谷：大橋さんは、プラントルにだいぶ思い入れあるようですね。何か因縁でも？

大橋：ご存知のように、ドイツでは博士論文の指導教官を、ドクトルファーター(Doktor-Vater)と呼びます。学問上の父とでも訳しましょうか。私のドクトルファーターの一人は、境界層の研究で名高いシュリヒティング(Hermann Schlichting, 1907-1982)で、そのまたドクトルファーターがプラントルです。つまりプラントルは私のドクトルおじいさんに当たります。身びいきの気持ちが思い込みに繋がってしまい、赤面の至りです。

谷：そうでしたか。私はこのことについては、ゾンマーフェルトをよく知っているカルマンから直接聞いただけあって、特によく覚えていました。

大橋：身びいきのついでに、勝手な提案をしてよろしいでしょうか。1910年前後から、プラントルは多くの論文の中でレイノルズ数を使い、その普及に貢献しました（文末の年代順関連論文参照）。そこで、レイノルズ数の名付け親はゾンマーフェルト、育ての親はプラントルとするのはいかがでしょうか？

レイノルズ：それはいいですね。こんどゾンマーフェルトさんにお会いしたら、今日のお話を紹介して、お礼を申し上げます。

谷：これで私も納得しました。では失礼致します。
(ここで谷一郎先生ご退場)

大橋：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、背後の见えないものに無関心過ぎる感じていました。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にがしかの影響を与えたのでしょう。

私の研究は、普通の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、とにかく数値シミュレーションに走ってしまうのは何故でしょうね。何しろ昔は何も無かった。圧力をマノメータで計り、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いけませんでした。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¹⁾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ハッキリしていませんでした。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・ポワスユイユの流れで有名なハーゲンです。私の功績は、流体の粘度や流速や管径を色々に変えて実験し、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す。

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見かけの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：お二人のご業績は実に多岐多様に互っていて、語り始めたらこの対談がいつ終るか分かりません。簡単に私からまとめさせていただきますと、レイノルズ先生については、キャビテーションを実験的に再現して騒音はキャビ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定めるレイノルズの式を導いたこと、熱量拡散計を発明したことなどがあります。

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、内耳の迷路の機能の解明や、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。認識するのは貴方の責任です。

レイノルズ：私の申し上げたいことも全く同じです。レイノルズ数の育ての親のプラントルも、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、我々と同じような栄誉を受けるチャンスがあります。これは流体力学だけでなく、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、お分かりになっていません。成功を祈ります。

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

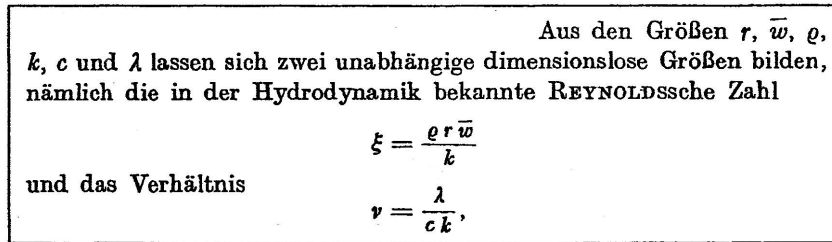


図3 プラントルの1910年の論文⁴⁾から抜粋.

付録1：谷一郎（1907-1990）略歴

東京生まれ，1930年東京帝国大学工学部航空学科卒．同大学航空研究所を中心として，生涯を流体力学及び航空力学の研究と教育に捧げる．1968年東京大学名誉教授．日本学士院賞，マルコ・ポーロ賞，プラントル賞など受賞多数．著書に，流体を学ぶものの必読書だった「流れ学」岩波書店，「飛行の理論」岩波書店などがある．日本流体力学会の創設に尽力し，同会名誉会員．

付録2：年代順に並べたレイノルズ数関連論文

1. 1908年：ゾンマーフェルトが，文献²⁾でレイノルズ数を命名した．
2. 1909年：プラントルは，飛行船の模型実験に関する講演³⁾の中で，レイノルズが導いた相似則が模型と実機との対応の基本となることをはっきり述べているが，レイノルズ数という言葉が出そうで出てこない．
3. 1910年：プラントルは伝熱と流体抵抗の相関を示した論文⁴⁾の中で，レイノルズ数を始めて使った．図3にその関連部分のコピーを示すが， ξ が問題のレイノルズ数， ν は後ほどプラントル数と呼ばれる無次元数の逆数である． ξ については，流体力学(Hydrodynamik)では周知のレイノルズ数と述べてあり，当時既にこれが当り前に使われていたかの印象すら受ける．
4. 1912年：プラントルの弟子ブラジウス(H. Blasius)は，流体摩擦の相似則に関する論文⁵⁾の中で，レイノルズ数を使っているのみならず，横軸にレイノルズ数をとって実験結果を整理した史上初の図も載せている．図中ではヌッセルトの実験結果がレイノルズ数に対して再プロットされている．
5. 1913年：自然科学事典⁶⁾の流体運動の章をプラントルが執筆しているが，そこではレイノルズ数が今日の教科書と同じ程度に頻繁に現われてくる．

付録3：執筆に当たり参考にした図書，文献

- a. Rouse, H. and Ince, S.: History of Hydraulics, (Dover, 1957)
同訳本，高橋，鈴木訳：水理学史，(鹿島研究所出版会，1974)．
- b. Reichenbach, H.: Contributions of Ernst Mach to Fluid Mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15 (1983) 1-28.
- c. Rott, N.: Jakob Ackeret and the History of Mach Number, *Ann. Rev.*

Fluid Mech., 17 (1985) 1-9.

- d. Tollmien, W.ほか3名：Ludwig Prandtl Gesammelte Abhandlungen, Teil 1-3, (Springer, 1961).
- e. Mach, E. and Salcher, P.: *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien*, 95 (1887) 764.
- f. von Karman, Th.: Aerodynamics, (Ithaca, 1954).
または 谷一郎訳 飛行の理論，(岩波，1956).
- g. 谷一郎：フォン・カルマン生誕百年，科学，51-5 (1981) 323-328.
- h. 谷一郎：研究ノート；フルード数，レイノルズ数，マッハ数，プラントル数，ながれ，3-4 (1971) 1-6.

引用文献

- 1) Reynolds, O.: *Philosophical Trans. Roy. Soc.*, 174 (1883), 935.
- 2) Sommerfeld, A.: Ein Beitrag zur hydrodynamischen Erklärung der turbulenten Flüssigkeitsbewegungen, *Atti 4. del Congr. internat. dei Mat. Rome*, III (1908) 116-124.
- 3) Prandtl, L.: Die Bedeutung von Modellversuchen fuer die Luftschiffahrt und Flugtechnik, *VDI Zeitschr.*, 53 (1909) 1711-1719.
- 4) Prandtl, L.: Eine Beziehung zwischen Waermeaustausch und Stroemungs-widerstand der Fluessigkeiten, *Phys. Zeitschr.*, 11 (1910) 1072-1078.
- 5) Blasius, H.: Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgaengen, *VDI Zeitschr.*, 56 (1912) 639-643.
- 6) Prandtl, L.: *Fluessigkeitsbewegungen*, Handwoerterbuch der Naturwissenschaften, IV (Fischer, 1913) 101-140.
- 7) 大橋秀雄：レイノルズ先生とマッハ先生をお招きして，メカライフ 10号，(日本機械学会，1987) 42-46.
- 8) 大橋秀雄：レイノルズ数の名付け親，メカライフ 13号，(日本機械学会，1988) 48-49.