

工学博士谷一郎君の「境界層に関する流体力学的研究」に

対する授賞審査要旨

流体の流れに接した固体壁の表面には層流、あるいは乱流の薄い層が存在し、これを境界としてそれより内側のみを粘性流体と考え、その外側は理想流体と考え得るといふいわゆる境界層なるものの概念が今世紀の初めにプラントルによつて提唱されて以来、境界層に関する研究は数多く寄与せられ、それらはいわゆる近代流体力学の大きな部分を占めている。これらのうちで谷一郎君の理論的並びに実験的研究は、著名なものであり、内外の数多くの論文に引用されており、とくに世界的に有名な単行本の専門書には必ず引用されている。以下谷君の寄与した境界層に関する論文の内容を大別して項目的に略述する。

一、層流翼の着想と開発

谷君は航空力学とくに翼に関する多くの実用的研究成果を挙げているが、その一環として層流翼なるものを着想した。元來飛行機翼は平板に近く、その表面の境界層は容易に層流から乱流に遷移してしまい、表面の大部分は乱流境界層になつており、このことは一般に宿命的と考えられていた。しかるに谷君は飛行機翼における境界層は平板よりもむしろ円柱、球における流に近く、すなわち平板におけるように境界層が乱流になつてから剝離することは少なく、層流のまま剝離してのちに乱流に遷移し、それから再び固体表面に附着して、それが乱流再剝離をすることに着目し、翼の断面形状を改変して表面の圧力分布を好適にすれば、従來の通念よりさらに下流の方まで層流境界層に保

ち、しかも乱流再剥離が発生するので死水圏の縮小を招来することは可能であるべきことを推理し、よつて抵抗が少なく揚力の大きい飛行機の翼型の探求の可能性を着想した。かくして作出されたのがいわゆる層流翼である(論文1、本文末尾の論文番号による。以下同様)。この新しい考えに基づいた翼断面を系統的に設計し、東京大学航空研究所の乱れの少ない風洞で実験した結果、その優秀性能を確かめた(論文3)。さらに風洞及び飛行機実験の結果から実際の飛行機に使用する場合の抵抗の推定などについて明らかにしている(論文6)。これは第二次大戦直前からの研究であつたが、戦後判明したところによれば戦争中、米国でも全く同様な研究が行なわれ、戦後の飛行機翼断面は戦前と全く異なるものになつていた。よつて谷君の論文は国際的に高い評価を受けた。近年の飛行機で層流翼型を採用しないものは極めて稀少である。なお、論文6はNACA, Technical Memorandum, No. 1351 (1952) として米国で英訳されている。

二、層流境界層の挙動の理論的解明

谷君は前記層流翼の開発を契機として、境界層に関する基礎的研究に方向を転じ、それに従事すること二十余年、その成果はむしろさらに高い評価を受けているといえる。本項以下はその成果である。すなわち層流翼断面の研究と開発に伴つて、最初に解決する必要があるがあつた問題は与えられた翼断面のまわりの層流境界層の挙動特に厚さの発達と剥離位置を出来るだけ正確にしかも可及的簡易に計算する方法を導入することである。この境界層に関する基礎式はナヴィエ・ストークスの運動方程式であるが、その実用的解を得るには困難があつた。谷君はこれを積分して得られる運動量積分を用い、適当な近似を行なうとき境界層の厚さ(排除厚さまたは運動量厚さ)が境界層の外側の速度の

簡単な積分によつて表示されることを明らかにする近似解を得た(論文5)。この方法は、殆ど同時に京都大学の藤本武助氏、ドイツの A. Walz により、また一九四九年の英国の B. Thwaites によつて知らずに報告されている。

谷君は、更に層流境界層を出来るだけ正確に計算し、とくに剥離点を正しく推定し得る理論の導入に成功した(論文9)。(すなわち境界層の外側の速度が $U = a + bx^n$ (x は流の方向の長さ、 a 、 b 、 n は定数) で表わされる場合に、ナヴィエ・ストークス式による境界層の基礎式の蔽密解を得た(論文9及び15)。 n が1のときはすでに L. Howarth (1938) によつて解かれており、その限りにおいては、谷君が n を 2、4、8 とした場合を解析したのは、一面単なる拡張に過ぎぬかに見えるが、実際はこの論文は数少ない境界層の蔽密解に寄与したのみでなく、物理的意味で著るしい寄与をしている。すなわちいわゆるポールハウゼン・パラメータ σ が剥離位置で一定値を採るべきことが従来の定説であつたに對し、これが一定値でないこと、よつてポールハウゼン・パラメータを用いることに疑問があることを谷君は明らかにしたので、この意味からも高い評価を受けている。そこで谷君は論文12の前半および15においては、速度分布を他のパラメータ a を用いて表わし、運動量積分とエネルギー積分を使用し、 a と σ を連絡する關係を示す近似解を試みた。この解は論文5の解法の精度を一段高めたのみでなく、計算労力が少ないものとして L. Rosenhead, *Laminar Boundary Layers* (Oxford, 1963), P. 213/214 にも推奨されている。

三、超音速における層流境界層の理論的解明

以上はすべて流の速度が音速以下の場合であるが、流速が音速を超える場合も近来問題になる。よつて谷君は音速を超えた速度範囲まで適用出来る精度の高い境界層の近似解、すなわち圧縮性と熱の出入を考慮に入れた解析の提示

を行なつた。すなわち論文7、8においてマッハ数が1より余り大きくなく精々2を超えぬものとして、非圧縮性流（マッハ数0）から摂動法による計算を行ない、層流境界層の特性に及ぼすマッハ数、熱伝達、プラントル数などの影響を明らかにした。これに反して論文12の後半においては、近似解法であるがマッハ数に制限はなく、表面熱伝達のない場合に制限されているが、プラントル数は1といくらか異なつてよいとするなど比較的緩やかな条件のもとに圧力勾配がある圧縮性流体の境界層を解析した。これによる計算は精度も十分高く、最も信頼に値する解法の一つと考えられている。(K. Stewartson, *The Theory of Laminar Boundary Layer in Compressible Fluids*, Oxford, 1964. p. 88)

四、境界層の層流から乱流への遷移機構の解明 その一

流体抵抗は、境界層が層流の場合と乱流の場合では著しく異なるので、頭書のことの問題になる。とくに圧力勾配を伴う流については境界層が層流で剥離し、それが乱流となつて表面に附着する。谷君はその機構の解明と、その発生条件について研究した（論文2、19、20及び25）。論文2においては、大迎角の翼における剥離点での境界層レイノルズ数の臨界値が円柱や球におけるものと同一と仮定して最大揚力係数のレイノルズ数による変化を理論的に誘導し、実験と大体満足すべき一致を示した。論文19においては、剥離する流の機構を明らかにする目的をもつて、後向きステップを超える流について精密な実験を行ない、とくにステップの後方に生ずる循環する流の平衡に重点をおき、この流と外側の流の混合領域に発生する乱流剪断応力を測定して平衡条件の成立を明らかにした。論文20の後半には長方形の溝を超える流に関し、また論文25には孤立した単一の突起をもつ平板に関して、それぞれ同じ趣旨の実

驗的研究を行なつてゐる。

五、境界層の層流から乱流への遷移機構の解明 その二

表面圧力の勾配のない固体のまわりの流においては、境界層が層流から乱流に遷移するに際し、不安定波動が增幅されて、三次元的変形を受ける機構に関して論文22、23、24及び26により解明を与えた。論文22、26においては境界層の厚さが主流に直角の方向に変化している場合について振動リボンで作らせた攪乱の発達を測定した。その際上流の境界層の外に数個の翼を配置して、その自由渦の作用によつて境界層の厚さに周期的変化を与え、よつて乱流の発生はこの周期的変動の弱い場合と強い場合とに従い、それぞれ境界層の厚さの最小あるいは最大の場所に起こることを明らかにし、論文23、26においてはそれぞれ凹面に沿う境界層および孤立した粗さをもつ平板の境界層の実験を行ない、これらの場合にも主流に垂直の方向に境界層厚さの変化を生ずること、そしてこの現象を経由して凹面および粗さが遷移の始めの段階に影響を及ぼすことを明らかにしている。

六、表面粗さの境界層の遷移に及ぼす機構と影響

飛行機翼として層流翼型の真価を發揮させるためには、表面の鉾をどの程度にするか、また水車やポンプの羽根は、効率を高くするためには如何なる程度まで仕上げる必要があるか、これらの問題はいずれも境界層の早期遷移を招かないような粗さの許容限度を予知することに帰着する。以前は単に粗さレイノルズ数がある臨界値を超えると遷移が起こると想像されていただけで、しかもその限界値について実験的に何等知られていなかった。論文4の研究は粗さとして針金を平板にはりつけ、圧力勾配のない風洞において境界層の速度分布を観察して遷移を観測した最初の

実験として臨界値が二〇〇前後の値を得た。さらに実験を進めた結果、臨界値を与える風速、針金の直径とその位置および遷移の位置との関係を表示した(論文11)。また圧力勾配を伴う流並びに境界層外の乱が大きい場合に対しては論文13に研究してある。論文11と13の結果は多くの著書に引用されている。論文11の実験結果によると、粗さレイノルズ数がある臨界値を超えるとき、その下流で遷移が起ることはない。すなわち論文17には、粗さの下流で平均速度分布のみでなく変動速度も測定した結果、遷移レイノルズ数は風速の増加とともに、減少して最小値に達し、そのときの粗さレイノルズ数は一五〇〜三〇〇という比較的狭い範囲で一定になることを、またこの時以前の状態では剥離した境界層は層流のまま表面に復帰し、遷移はその下流で起ること、また前記最小値に達してからは剥離中に遷移が起り、乱流境界層として表面に復帰することなどを明らかにした。論文4、11、13、17の結果は総合論文21にまとめてある。

七、乱流境界層の近似計算の寄与

乱流境界層の挙動を明らかにする従来の解析には、実用上の困難があつた。谷君は乱流境界層の計算に必要な逸算積分(剪断応力と速度勾配の乗積の厚さ方向の積分)を境界層の連動量積分並びにエネルギー積分から導く可能性を証明し、新しい研究方法を提示した(論文16)。一九六七年、ドイツのA. Wals氏らの新しい解法はすでにこの方法に依存している。

八、固体表面の曲率の大きい場合、非定常流の場合の層流境界層の解析

境界層の計算の大部分においては、固体形状の曲率は極めて小で、流は定常なるものとの前提に立っている。谷君

は、曲率が大きく、これを無視出来ぬ場合を考え、論文7および8に用いた摂動計算により、境界層の速度分布その他に及ぼす曲率の影響を解析した(論文14)。また境界層の外側の速度が時間的に変化する場合は層流境界層の解を与えた(論文18)。この理論は、拡散筒の開度あるいは翼の迎角が時間的に変動する非定常流の解明に有用である。

以上要するに谷君の境界層に関する研究業績は、航空工学、機械工学、船舶工学等における流体力学に顕著なる貢献をしたものと認められる。

主要な著書及び論文目録

- 一、該当論文(左記番号は前記文中の論文番号に該当する)
 - 1) 谷一郎 境界層の層流剥離と遷移との関係に就いて 日本航空学会誌 六卷四六号 一二二頁(一九三九)
 - 2) 谷一郎 境界層の剥離に誘はれる遷移に就いて 日本航空学会誌 七卷五九号 二二九頁(一九四〇)
 - 3) I. Tani and S. Mituisi: Contributions to the Design of Aerofoils Suitable for High Speeds. Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 15 (198), 399 (1940).
 - 4) I. Tani, R. Hama, and S. Mituisi: On the Permissible Roughness in the Laminar Boundary Layer; Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 15 (199), 419 (1941).
 - 5) 谷一郎 層流剥離点の簡易計算法に就いて 東京帝国大学航空研究所彙報 一九九号 六二頁(一九四一)
 - 6) 谷一郎 境界層の遷移を後らせる翼型に就いて 東京帝国大学航空研究所報告 一九卷二五〇号 一頁(一九四三)
 - 7) 谷一郎 圧縮性流体における境界層に就いて 東京帝国大学航空研究所報告 一九卷二五一号 四九頁(一九四三)
 - 8) 谷一郎 再び圧縮性流体における境界層に就いて 東京帝国大学航空研究所報告 二二卷三二二号 四六三

頁 (一九四四)

- 9) I. Tani: On the Solution of the Laminar Boundary Layer Equations. *J. Phys. Soc. Japan*, 4 (3), 149 (1949).
- 10) I. Tani: Water Jump in the Boundary Layer. *J. Phys. Soc. Japan*, 4(4), 212 (1949).
- 11) I. Tani, F.R. Hama, and S. Mituisi: On the Effect of a Single Roughness Element on Boundary-Layer Transition. *Rep. Inst. Sci. & Technol. Univ. Tokyo*, 8 (3), 125 (1954).
- 12) I. Tani: On the Approximate Solution of the Laminar Boundary-Layer Equations. *J. Aero. Sci.*, 21 (7), 487 (1954).
- 13) I. Tani, M. Iuchi, and K. Yamamoto: Further Experiments on the Effect of a Single Roughness Element on Boundary-Layer Transition. *Rep. Inst. Sci. & Technol. Univ. Tokyo*, 8 (4) 171 (1954).
- 14) 谷一郎 境界層の速度分布の定量的な影響 (正誤) 日本機械学会誌 五七卷四二八号 五九六頁 (一九五四)
- 15) I. Tani: On the Solution of the Laminar Boundary Layer Equations. "50 Jahre Grenzschichtforschung" p. 193 (Braunschweig 1955).
- 16) I. Tani: Energy Dissipation in Turbulent Boundary Layers. *J. Aero. Sci.*, 23(6) 606 (1956).
- 17) I. Tani and H. Sato: Boundary-Layer Transition by Roughness Element. *J. Phys. Soc. Japan*, 11 (12), 1284 (1956).
- 18) I. Tani: An Example of Unsteady Laminar Boundary Layer Flow. *Rep. Aero. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 24 (2), Rep. No. 331, p. 31 (1958).
- 19) I. Tani: Experimental Investigation of Flow Separation over a Step. "Grenzschichtforschung, Symposium Freiburg 1957", p. 377 (Springer Verlag 1958).

- 20) I. Tani, M. Iuchi, and H. Komoda: Experimental Investigation of Flow Separation Associated with a Step or a Groove. Rep. Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, 27 (4), Rep. No. 364, p. 119 (1961).
 - 21) I. Tani: Effect of Two-Dimensional and Isolated Roughness on Laminar Flow. "Boundary Layer and Flow Control", p. 637 (Pergamon Press 1961).
 - 22) I. Tani and H. Komoda: Boundary-Layer Transition in the Presence of Stream-Wise Vortices. J. Aerospace Sci., 29 (4), 440 (1962).
 - 23) I. Tani: Production of Longitudinal Vortices in the Boundary Layer along a Concave Wall. J. Geophys. Res., 67 (8), 3075 (1962).
 - 24) I. Tani, H. Komoda, Y. Komatsu, and M. Iuchi: Boundary-Layer Transition by Isolated Roughness. Rep. Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, 28(7), Rep. No. 375, p. 129 (1962).
 - 25) I. Tani: Low-Speed Flows Involving Bubble Separations. "Progress in Aeronautical Sciences" 5, 70 (Pergamon Press 1964).
 - 26) I. Tani: Review of Some Experimental Results on Boundary-Layer Transition. Phys. Fluids, Supplementary Volume (1967).
- 上記以外の論文(三十一論文)中一〇論文のみ挙ぐる
- 27) 谷一郎 竹田建二 三石智 乱れの減衰に関する予備実験 東京帝国大学航空研究所彙報 一一三三号 一三五頁 (一九四一)
 - 28) I. Tani and Y. Kobashi: Experimental Studies on Compound Jets. Proc. 1st Japan Nat. Congr. for App. Mech., p. 465 (1951).
 - 29) I. Tani: Steady Flow of Conducting Fluids in Channels Under Transverse Magnetic Fields, With Consideration of Hall Effect. J. Aerospace Sci., 29(3), 297 (1962).

- 30) I. Tani and Y. Komatsu: Impingement of Round Jet on a Flat Surface. Proc. 11th Inter. Congr. of App. Mech., p. 672, 1964 (Springer Verlag 1966).
- 31) I. Tani: On the Approximate Calculation of the Lift of a Biplane. J. Soc. Mech. Eng. Japan, 35 (6), 125 (1931).
- 32) M. Sanuki and I. Tani: The Wall Interference of a Wind Tunnel of Elliptic Cross-Section. Proc. Phys-Math. Soc. Japan. Series 3, 14 (10), 592 (1932).
- 33) I. Tani: A Simple Method of Calculating the Induced Velocity of a Monoplane Wing. Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 9(3), Rep. No. 111, p. 65 (1934).
- 34) I. Tani, M. Taima, and S. Simidu: The Effect of Ground on the Aerodynamic Characteristics of a Monoplane Wing. Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 13 (2), Rep. No. 156, p. 23 (1937).
- 35) I. Tani, H. Iokawa, and M. Taima: Further Studies of the Ground Effect on the Aerodynamic Characteristics of an Aeroplane, With Special Reference to Tail Moment. Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 13(4), Rep. No. 158, p. 117 (1937).
- 36) I. Tani: A Simple Method of Calculating the Aerodynamic Characteristics of a Monoplane Wing. Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 15 (11), Rep. No. 197, p. 309 (1940).

その他一一編

三、著書

- 応用流体力学 岩波講座 物理学V C (一九四〇)
- 流体力学 上巻 理想流体の力学 岩波書店 (一九四四)
- 乱流理論(応用力学選書 一) 克誠堂出版株式会社 (一九五〇)
- 流れ学 (岩波全書 一三六) 岩波書店 (一九五一)

粘性流体の理論 岩波講座現代応用数学B7d (一九五七)
飛行の原理 (岩波新書 五七〇) 岩波書店 (一九六五)