

理学博士今井功君の「航究力学への寄与」に対する授賞

審査要旨

航空力学は、航空機がその運動に際して空気から受ける力に関する事柄について研究する学問であって、流体力学の重要な応用分野の一つである。航空機の発達が航空力学の進歩に負うことは周知の事実であり、特に近年における航空機の高速化は高速気流に関する研究によって齎らされたことはいうまでもない。

今井功君は約二十年前、わが国における高速気流の理論的研究の機運を開いて以来、独創的な研究によって着々と新しい方法を発展させ、その業績は本邦のみならず海外においても高く評価されている。また、この数年来、流体の及ぼす運動体の抵抗に関して鋭意研究を進め、卓抜な理論を建設することに成功している。

次に、今井君の研究の概要を述べる。

一 高速気流の研究

高速気流が物体に当る場合の現象を数学的に取扱う方法として一九三〇年代に知られていたものは Janzen-Rayleigh の方法、Prandtl-Glauert の薄翼理論、Kármán-Tsien のホドグラフ法などであった。今井君はこれらの三方法のすべてに根本的な改良を加え、亜音速の気流の理論に関して前人未踏の境地に到達した。

(1) M² 展開法

高速気流においては、空気の圧縮性の影響の程度を表わす量としてマッハ数 M が重要である。これは、空気中を伝わる音波の速度を単位として気流の速度を表わす数である。運動体が円柱または球の場合は、その形状が特に簡単であるため、すでに一九一〇年代に Janzen と Rayleigh によって圧縮性の影響が研究されていたが、その後、見るべき発展はなかった。今井君は、彼等の方法が本質的に、 M^2 をパラメータとする逐次近似法の第一近似に他ならないことを観破し、高次近似を組織的に計算する方式を提案して、これを M^2 展開法と名づけた(一九三八年)。さらに、複素函數論を利用して、任意断面形の柱状体のまわりの流れを計算する方式を案出し(一九四〇年)、また、複素速度ポテンシャルの導入により、方法はさらに組織化され、ついに、任意断面形の柱状体に対して、物体表面の速度分布、したがって物体の受ける力を完全に数値的に計算する方法を完成した(一九四三年)。この方式が世界的に他の追随を許さぬものであることは、戦後、明らかになった。なお、最近、この方法は、風洞中にある飛行機翼、あるいはタービンの翼列などにも応用される形式に整備されている(一九五七年)。

(2) 薄翼展開法

前記の M^2 展開法は、任意の形の物体に適用できるという特長をもつ反面、マッハ数が高くなると精度が低下するという欠点がある。実用の飛行機翼はふつう厚みが薄いから、このことを利用すると、或る程度理論を簡単化することができる。Prandtl-Glauert の薄翼理論がすなわちこれである。今井君は、 M^2 展開法の場合と同様の着想により複素函數論を巧みに応用して、任意形状の薄翼の空気力学的性能を計算する方式を展開した(一九四

四年)。

この方法に基づく各種翼型の研究は最近わが国において続々行われている。今井君の研究は欧米における同様な研究より数年を先んずるもので、しかも方法の組織的かつ簡明な点で、はるかに優れている。

(3) ホドグラフ法

一九三九年頃、前記二方法とやや性格を異にする方法で、高速気流の特徴を巧みにつかんだ方式が von Kármán によつて提案され、T sien によつて実例計算がなされた。今日 Kármán-T sien のホドグラフ法として用いられる方法である。ところが、この方法には、翼に揚力が働くという實際的に最も重要な場合においては本質的に適用不可能であるという大きな欠陥があった。今井君は一般の見地からホドグラフ法の検討を試み、翼型表面の速度分布・揚力・モーメントの一般公式を見出すなど、その組織化に成功した(一九四四年)。今日、欧米において Tim の方法(一九四六年)として喧伝されるものは、実は今井君の方法と全く同等のものである。

(4) 遷音速流の研究

以上の三方法は、気流の速度が流れの各点で局所音速を超えないとき、すなわち、純亜音速の流れに対して有効である。飛行機の速度が音速に近づくと、流れの中に部分的に超音速の領域が現われる。このような流れを遷音速であるといい、その研究は理論的にも実験的にも極めて困難である。今井君は、理論物理学の他の部門、特に量子力学において用いられて来た Wentzel-Kramers-Brillouin の方法(WKB法)をはじめて流体力学の分野に導入し、遷音速流の研究に偉力を発揮することを示した(一九四九年)。その他、いわゆる Karman の遷音

速近似法則の拡張に關しても透徹した研究がある(一九五三年)。

(5) 高速気流中の物体が受ける力に關する一般定理

気流中におかれた物体に働く揚力・抵抗・モーメントは、その物体の存在のために流れに生ずる変化と密接に關係する。この關係は、低速の気流に対しては、Kutta-Joukowski の定理として見易い形に表わされている。高速気流において、この關係がどうなるかは、理論的に極めて重要な問題であるが、Glauert (一九二八年)、Bateman (一九三八年) によって部分的な解決が与えられたに過ぎなかった。今井君は自身の發展させた M 展開法を基礎として、完全な解決を与え、揚力については Kutta-Joukowski の定理が、また、力のモーメントについても低速気流の場合と同じ形の公式が成立することを証明した(一九四二年)。翌年には、薄翼展開法にもとづいて更に簡明な証明を与え、その後、物体が背後に死水領域を伴い、したがって物体に抵抗の働く場合についても美しい定理を導いている。同様の研究は戦時中歐米においても試みられたが不成功に終り、上と同様の結果を得たのは今井君に遅れること十年であった。

最近、今井君は更に M 展開法と薄翼展開法の融合を試み、亜音速の流れに關しては現在最高の精度をもつ計算方式を確立している。

以上の研究は内外の学者に高く評価され、例えば、高速気流の研究に対して一九五〇年度の朝日文化賞を授与されている。また、一九五五年、米国メリーランド大学流体力学応用数学研究所は今井君を客員教授として招聘し、その研究成果の講義を依頼した。その講義内容はメリーランド大学報告として出版されている(一九五七年)。その他、今

井君は滯米中、各地において研究成果の招待講演を行い感銘を与えた。

二 粘性流体の流れに関する研究

航空力学では主として流線形物体を対象とするので、抵抗の値は小さく、したがって、空気の粘性を無視した完全流体の力学が従来主流を占めていた。ところが、飛行機の高速度とともに抵抗のもつ役割が軽視を許さないようになり、粘性流体についての研究が次第に重要視される形勢にある。今井君はこの方面でも重要な研究を遂行している。

(1) 粘性流の一般的性質

まず特筆すべきは、物体に働く揚力・抵抗・モーメントを、物体の存在によって気流に生ずる変化に関連させて表わす公式を見出したことで、これは既述の Kutta-Joukowski の定理の粘性流への拡張に相当するものである。次に、物体を過ぎる粘性流が、粘性 O の極限において如何なる状態を呈するかという問題である。これに対して、今井君は境界層理論と死水理論を巧みに統合して、粘性 O の極限の流れが Kirchhoff 型の死水領域を伴う不連続流であることを論じた(一九五三年)。これは後述の抵抗理論に導くものである。

(2) 近似理論の改良

そもそも、粘性流を支配する Navier-Stokes の基本方程式は、数学的に取扱いの困難な非線型の偏微分方程式である。この場合、流れの状態を特徴づけるものはレイノルズ数 R で、流体の密度・流速・物体の大きさの三者の積を粘性率で割った商として定義される。遅い流れでは R 数が小さく、Navier-Stokes の方程式は近似的に

線型化することができぬ。Stokes の近似、Oseen の近似等がこれである。従来 Oseen の近似が適用できるのは、円柱・楕円柱の場合に限り、しかも、ベッセル函数・マチウ函数など複雑な高等函数を駆使することが必要であった。今井君は複素函数論を応用して新しい方法を創案し、任意断面形の柱状体について初等函数のみを用いる取扱いを可能にした(一九五四年)。更に今井君は、従来粘性流に関する研究が、レイノルズ数展開の第一近似の段階に止っていたことに着眼し、その精密化をはかり、円柱について第二近似解を求めた。物体を過ぎる粘性流の第二近似解が得られたのは、これをもって最初とする。

遅い流れの逆の極限、すなわちレイノルズ数 R が無限大の場合は境界層理論の活躍する舞台であるが、境界層理論を一步進めた高次近似が正しい意味で見出されたのは、今井君による半無限長の平板に沿う流れの研究が最初である(一九五七年)。

このように、今井君が Oseen の近似(R 小)と境界層理論(R 大)の両者について高次近似を求めようとしたのは、実に、レイノルズ数の全領域にわたって解を求めようという野心的な意図に発するもので、次に述べる抵抗理論の建設により、この意図はほぼ達成されたものと考えられる。

(3) 流体抵抗の理論

流体中を運動する物体が受ける抵抗を理論的に見出すには、まず基礎方程式を解いて流れを決定することが必要である。前述のように、従来なされたのは、 $R \downarrow 0$ 、 $R \downarrow \infty$ という両極端であった。しかし、たとえ基礎方程式が R のすべての値について完全に解けたとしても、その解が果して現実の流れを与えるかという点、答は否定

的である。すなわち、 R 数の大きい場合には流れは時間的空間的に複雑に変動し、乱流現象を呈するからである。このように、流体抵抗の理論の確立には二つの段階——層流解を見出すことと乱流状態を考慮すること——を経なければならぬ。

今井君は、まず、任意の R 数に対する層流解を、 $R \rightarrow \infty$ に対する解からの第二近似として求めるという着想を得た。既述の Kirchhoff 型の死水を伴う流れがその第一近似で、これに境界層理論と、自身の発展させた粘性流に関する揚力・抵抗の公式を適用して、任意物体の任意 R 数における抵抗を与える公式を導き出した。中間領域の R 数に対して抵抗の理論値を求めるには、現在極めて労力の多い数値計算を実行する必要があるが、そのような計算の行われた唯一の例である円柱については、上述の公式は美事な結果を与えるのである。したがって、理論の第一段階は成功を収めたものと考えられる。

次に、現実の乱流においては、運動量の輸送が活発に行われるため、流体の粘性は見掛上増加する。この事情を考慮して、有効レイノルズ数 R^* なる概念を導入し、種々の流れについて実験的に見出された数十程度の値を R^* として用い、前記の層流解に対する公式を適用するという方法を提唱した。この方法を円柱・平板に應用して得られる結果は実験値と満足すべき一致を示す。こうして、物体に及ぼす流体の抵抗を純理論的に求めようという、流体力学における最重要な問題の一つは、ここに解決の端緒を得たといえることができる。

三 その他の業績

高速気流と粘性流の理論は今井君の最も力を注いだ領域であるが、その他の航空力学の分野における貢献として

逸することのできないものは任意翼型の理論である(一九四二年)。これは守屋富次郎博士によって創案され、わが国で広く用いられた方法に改良を加えたもので、これを用いてなされた NACA 翼型の詳しい解析は注目に値する(一九五〇年)。

なお、高速気流の研究に利用された WKB 法は今井君によって著しく精密化され(一九四八年)、更に理論物理学の他の分野に逆輸出された。すなわち、今井君自身によって電磁波の回折(一九五四年)、境界層内の熱伝達(一九五八年)の研究に応用されたほか、Kuhn などによって金属の理論に応用されている。この方面の研究においても内外の視聴をあつめたことは、一九五五年米國ミシガン大学で開催された URSI (國際電波科学連合) 電磁波シンポジウムに特利講演者として招待されたことから窺えよう。

四 要 約

以上述べたように、今井君の研究は、高速気流および粘性流の両者に対して極めて独創的な着想を導入し、かつ組織的にその構想を發展させたもので、それらの分野に壯麗な体系を築き上げたといふことができる。航空力学に貢献するところ絶大なるものがあることは勿論であるが、さらに広く数理物理学に対する寄与も少なくないと考えられる。