〔研究随想〕

完全流体力学の誤謬

原　　和雄*

The fallacy of inviscid fluid dynamics

Kazuo HARA

Abstract

Inviscid fluid dynamics is a branch of fluid dynamics. Some important results from research in inviscid dynamics are the Kutta-Joukovski theorem and induced velocity due to vortex. This paper explains that, observing the photos of the vortical motion of fluid, which are shed from the airfoil tip of aircraft posted on a website, there is no induced velocity in the motion of real fluid flow. The concept of induced velocity is based on the free-vortex flow and Biot-Savart law. This paper also raises questions about the Kutta-Joukovski theorem, induced drag and winglets. Lift is caused by a curvature of the streamline which makes a pressure gradient in the flow field and it makes a lift when it is accumulated in the flow field along the passage from the far field to the surface of the wing.

Keywords： principle of local action, pseudo vector, streamwise vortex, induced velocity

1．序論

完全流体の力学は計算流体力学が発達するまで流体の運動を説明するために使われてきた．日本の多くの大学の機械系学科では流体の挙動を理解させるために流体力学の導入部で非粘性流体力学を教えている．NS 方程式の粘性項を除いて流体運動の基本を教えることは訓練として，教育の手順として妥当であろう．しかしながら非粘性流体の力学は自由渦流れ，鏡像の原理，クッタ-ジューコフスキーの定理へと続く．問題は非粘性流体力学の弊害である．非現実的な流れ場を教えることで実在流体の流れ場を誤解する手助けをしていないだろうか.

筆者は非粘性流体力学を実在流体の流れに適用することに大いに疑問を持っている．非粘性流体力学に基づいて現実の流体の運動を考えることは流れの本質を見失う危険がある．

力学は釣り合いを論ずる静力学と，力と運動の関係を考える動力学と，物体の運動の特徴を考える運動学とに分けられる．完全流体の力学は運動学に属し流体運動のパターンだけを論ずるもので，流体“力学”であるにもかかわらず理論に力が登場しないことに特徴がある．運動学の範疇に収まっていれば害はないのだが，その論理が無節操に拡張され十分条件の検証が不十分なままにいろいろな流体現象の説明に使われるのは世に害を流すことになる．

揚力は流体力学で非常に重要な概念である．これをどのように理解すべきかについては諸説がありまだ決着がついていないそうである(1)．筆者は完全流体の概念を不合理に拡張しそれを正しいと信じていることが揚力の理解を妨げていると考えている．

流体力学の教科書には完全流体の力学にほとんど触れていないものも存在する．Munson と Young と Okiishi(2) のテキストは全編が $F=Ma$ のニュートン力学で記述され理論の筋道が非常に明確である．ここの F は力，M は質量，a は加速度である．

2．非粘性流体の流れ場と問題点

2.1　自由渦の非現実性

非粘性流体の概念から生まれたものに自由渦がある．これは中心に渦度が集中し，周囲の流れ場に渦度が分布しない渦である．このため渦芯周りの循環は一定であり，中心からの距離に反比例する周方向速度分布を持つことになる．ところがこれは，周方向速度成分が半径に反比例して小さくなるとは言うものの渦が無限遠の領域まで影響を与えることを意味する．万有引力は距離の自乗に反比例するがそれでも惑星の運動を縛り付けている．これと比較すれば距離の1乗に反比例することの重大さを

* 交通機械工学科
平成25年9月12日受理

想像することができるだろう．

万有引力は何光年の彼方まで力を及ぼし銀河系と太陽系を支配している．正と負の電荷は離れていてもクーロン力と呼ばれる力を及ぼしあう．物体と物体が接触すれば作用反作用の法則に基づいた力が作用しこれがニュートンの第三法則である．流体力学で働く力は一般の力学で容認された力でなければならない．分子間力やレナードジョーンズポテンシャルで説明できてもよい．気体では分子の衝突によって力が伝えられるために分子の平均自由行程の範囲に力が及ぶ。液体では隣り合う分子の間に力が働く．これは流体力学で局所作用の原則と呼ばれており，現実に遠くへ力が及ぶとすればこの局所的な作用の累積の結果でなければならないであろう．

自由渦流れ場には渦度が存在しないためにせん断作用は無く，一見するところエネルギーの消散はないように見える．しかし，流れ場には変形速度が分布するので運動エネルギーから熱エネルギーへの消散が常に起こり，この流れ場を作ることも維持することも困難なのを忘れてはならない．ここで変形速度とは速度勾配テンソルの対称部分で，始め球形であった流体塊が楕円体に変形することを意味し，変形に伴って粘性消散を伴う．

自由渦の速度場を渦巻き流れの一例として教えるのは変形速度と渦度の例題として理解しやすくふさわしい．しかし，もしかしたら存在し得るかもしれないから説明の材料としてあるいは理論に組み込んで使う，というのははなはだ疑問がある．この流れ場を実在流体の流れと関連付けて考えるのは不適当ではないだろうか．

2.2　誘起速度の非現実性

自由渦が壁の近くにあるときの流れ場を表す方法として壁と対称の位置に仮想の渦を配置することが考えられた．こうすれば壁が直線である境界条件を表現することができる．二つの渦はちょうど鏡に映した関係になるので鏡像の原理と呼ばれている．このとき渦が速度を誘起するのでお互いに影響しあって渦本体が移動すると説明される．

渦が離れた領域に速度を誘起するとすれば，渦がその領域の流体塊に何らかの力を及ぼさなければならない．湧き出しや吸い込みであれば，体積が変化する効果が垂直応力として遠方まで及んでも不思議ではない．しかし，渦の誘起速度を説明するためには旋回方向あるいは接線方向への揃断的な力が遠方に及ぶとしなければならない．これはお互いに離れた流体の粒子の間に電磁力のような遠方に伝わる力が存在することを認めることである．

短い時間間隔で発生させた二つの渦輪の追い越し現象は渦輪における誘起速度の存在を連想させる．しかしこれが誘起速度の存在を表している，とするなら誘起する力はニュートン力学のどの力なのか具体的な説明が必要であろう．

2.3　クッタ-ジューコフスキーの定理の非現実性

筆者はクッタ-ジューコフスキーの定理を物理学として認めたときに非粘性流体力学の暴走が始まったと考える．円を過ぎる非粘性の流れと自由渦流れを重ね合わせて得られた速度からベルヌイの式で円の表面の静圧を計算し面積積分して $L=\rho U\Gamma$ の表現が“定理”として教科書に書かれている．この定理は循環を持つ物体あるいは流体塊を流れが過ぎるときに揚力が働くと拡大解釈され各種の実在する粘性流れ場の説明に拡張された．たとえば以下のような論調である．境界層には渦度が分布する．境界層が乱されて渦度ベクトルが流れ方向成分を持つ領域ができたとする．この領域はある値の循環を持つので揚力が働き，主流へ乱れを運び，乱流への遷移が促進されるとの説明は散見される．

クッタ-ジューコフスキーの定理は2.1節の自由渦流れに基づいている．自由渦は無限遠まで距離に反比例する周方向速度を持つ．円柱表面の静圧は無限空間の静圧変化の影響が後述の式（4）により累積されて定まるために回転速度が過大評価されている可能性が大きい．実際の流れ場は次に示すように回転の影響は限定的である．

円柱を回転させたときに得られる揚力はマグナス効果と呼ばれている．流れ場の様子はBatchelor[3]の写真6.6.2に詳しい．この教科書には円柱の回転による循環 $\pi D^2\omega$ とクッタ-ジューコフスキーの式に現れる Γ とが対応しないと書かれている．その理由は上に述べた自由渦流れ場が実現しないからと考えられる．粘性による流れ場への影響は局所作用の原則によるために円柱の近傍と対流領域に限られる．円柱が回転すると表面付近の流体は粘性作用によって引きずられる．後流は回転のないときに比べて対称面からずれ，ずれた分だけの揚力が得られるのだろう．

レイノルズ数が小さいので残念であるがLught[4]の図6.41に実際に回転させたときの流線の例が示されている．結局，回転の影響は円柱近くに限られるので，自由渦と重ね合わせたときと比べて物体の回転によって影響される領域が狭い速度場となる．円柱が回転するときの循環とクッタ-ジューコフスキーの循環とは対応しない．

クッタ-ジューコフスキーの定理は複素関数論の結果であり，数学的には何らかの定理と呼んでもいいかもしれないが，存在し得ない自由渦に基礎を置いており物理的には定理に値しない.世の流体工学者がクッタ-ジューコフスキーの呪縛から開放され視点を変えることを期待したい．

2.4　束縛渦と誘導抵抗の非現実性

クッタ-ジューコフスキーの定理から束縛渦の概念が

生まれたと考えられる．図１は翼を遠方から眺めた流れ場のモデルである.翼の弦長を短くすれば,翼端へ向かってスパン方向単位長さ当たりの揚力が減少する．クッタ-ジューコフスキーの定理による翼の局所的な揚力はそこで翼が保持する束縛渦の大きさに比例する．すると減少しただけの束縛渦が翼の後縁から流出しなければならない．流れ出る循環は図１の渦層となる．翼端で揚力はゼロとなるので翼端から残りすべての循環が流れ場に流出してそれが翼端渦を構成するとされる[5]．しかし束縛渦のモデルは二次元の流れ場の結果を三次元流れ場に適用するという無理を伴っている．三次元流れ場は二次元流れに比べて空間的に緩和されることを無視している．

ビオサバールの法則は電流と磁場に関するものである．この法則を流れ場に適用し，流出した渦が主翼の位置に下向きの速度を誘起するとされる．この速度場はストークスの定理を満たすために何の検証もなく実在するとされた．しかし，もし誘起するとするなら2.2節の疑問に答えてほしい．

下向き速度が誘起される結果，翼の位置で主流が下を向き，流れに垂直な力である揚力が後方に傾く．つまり，揚力が水平後ろ向きの成分を持ち，これが抗力になるとして誘導抵抗の説明がされた．アスペクト比の大きな細長い翼は抗力が小さくアスペクト比の小さな翼は抗力が大きいという現実の結果と矛盾しないことからこの作用が実在のものとして信じられ流体力学の教科書に登場する．

図１は第二次大戦でイギリスのスピットファイアーに採用された楕円翼である．翼の平面形を楕円に作れば流れ出る循環分布が誘導抵抗を極小にすることができると理論が産まれた．この理論は守屋[6]に詳しい．

翼端から流れ出る渦を弱くすれば誘導抵抗が小さくなると考えて，航空会社は航空機製造会社にウイングレットを装備した航空機を注文する．しかしビオサバールの法則が流体運動に適用できないのであれば，そもそも誘導抵抗は存在しない．

2.5　真性ベクトルと軸性ベクトル

多くの流体力学者が真性ベクトルと軸性ベクトルを区別していないことも非常に嘆かわしくまた面白い点である．渦度ベクトルは軸性ベクトルの一つである．渦度ベクトルを連ねて渦線あるいは渦糸と称し，これを流体力学的に考察しようとする研究者が存在する．彼らは渦糸でつながった２点が流体力学的に何らかの関連があるかのような議論を無条件に行う．

速度ベクトルは真性ベクトルであり，ベクトルに沿って流体粒子を運ぶ．ベクトルの下流の点には上流の物性がある時間後に到達するので二つの点は関係を持っている．

軸性ベクトルはこれに対して回転を表し，何も情報を運ばない．たとえば回転する発電機の軸は軸性ベクトルで表現されるが，その延長上に人が立ってもなんら影響は受けない．二つのベクトルは明確に区別されるべきである．軸性ベクトルは偽ベクトルとも呼ばれる．

ついでにおかしな流体力学の例を挙げよう[7]．曲がり通路の二次流れを論ずるとき，渦度ベクトルが流体によって運ばれる間に曲げられるので剛体の運動で見られるようにジャイロ効果が発生し，そのために二次流れと称する流体の二次的運動が生じると説明するものがある．剛体の回転においては回転体は一体として密接に接合されているので回転軸を空間的に回転させるとジャイロ効果が生じる．しかし，流体が回転していることを表す渦度ベクトルに沿って微小な距離だけ離れた２点間に働く力は局所作用の原則で支配されるだけの影響しかなくこれは剛体的結合状態とはかけ離れたものである．流体の運動にジャイロ効果を持ち込むことは針金流体力学とでも呼ぶべきだろう．

2.6　渦度と渦巻き流れ

渦運動の流体研究者の注目を集めてきた．このうち縦渦は速度ベクトルと渦度ベクトルがほぼ平行な流れ場で図１の翼端渦はその１種である．始めに筆者が渦流れの理解に有益だと考える式を示す．

縦渦流れの理解にはBatchelor[3]のテキスト7.1.3式,

$$\mathbf{u}\times\zeta=\mathrm{grad}\,H \qquad (1)$$

が面白い．ここにζは渦度ベクトル，$\mathbf{u}$は速度ベクトル，Hは流れの全圧である．

速度勾配テンソルから出発すれば速度場の特徴を運動学的に説明することができる．流れ場の中の任意の点$\mathbf{x}$周りに定義した相対デカルト座標系$\mathbf{X}$における速度場の時間発展は次の自律型常微分方程式で記述することができる．

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt}=\mathrm{grad}\,\mathbf{u}\cdot\mathbf{X} \qquad (2)$$

解の性質は次の固有値で知ることができる．

$$\det(\mathrm{grad}\,\mathbf{u}-\lambda\mathbf{E})=0 \qquad (3)$$

ここに$\mathbf{E}$は単位行列，λは固有値である．λのが共役複

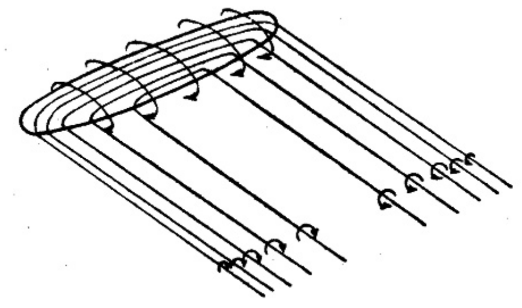

図１　束縛渦と誘導抵抗の説明図

素数のとき流れ場は **x** の周りを旋回する渦巻き流れとなる．解の代数表現は文献[8]に詳しい．単に渦度が大きいだけでは渦巻き流れとなることはなく，変形速度との相対関係で決まる．

以下にこれらの式の意味するところを例を挙げて短く解説する．工学で用いる流れ場はプレナムに接続したノズルで加速してそれぞれの用途に利用することが多い．このため流れ場に渦度が分布すれば式一に基づいて全圧の勾配が生じる．渦度が分布する領域は粘性消散の結果運動エネルギーを失った流体が集まったもので，流れ場を積極的に支配する流体の集合ではない．これは大気の流れと大きく異なる．大気の渦構造である低気圧は渦の内部で水蒸気の凝縮によりエネルギーが生成されており工学で登場する渦とは様子が違う．

縦渦の渦芯で渦度ベクトルと速度ベクトルが平行であれば式（1）のベクトル積はゼロとなり，渦芯で全圧が極値を取ることになる．もちろん工学の流れ場では極値は極小である．縦渦は全圧の等しいベルヌイ面[3]の集合であるのでベルヌイ面で作ったバウムクーヘンと例えればよいだろう．このために渦心から離れるほど全圧が大きくなり，周囲で全圧勾配がゼロでなくなる．中心以外では速度ベクトルと渦度ベクトルは平行でなく周囲ほどなす角が大きくなる．

渦度ベクトルは軸性ベクトルであるのでベクトルに沿って情報を運ばない．単純な例は平板境界層で，速度ベクトルと渦度ベクトルが直交しており，渦度ベクトルを連ねて渦構造を図示したとしても自明な価値のない結果しか得られないことがこれを示している．

さいわい縦渦においては速度ベクトルが情報を運ぶ．このために渦度ベクトルを用いて渦構造を追跡しても渦芯に沿って流れ場が変化する様子を与えると思われる．渦度ベクトルと速度ベクトルの内積はヘリシティーと呼ばれ，これを渦度と速度の絶対値で除した無次元ヘリシティーは縦渦構造の同定または抽出に使われることがある．

筆者はダクトの角部に設置した流れに平行なスリットから噴出するジェットの実験を行った[9]．流れ方向に10の断面について合計32,228点の三次元速度ベクトルと全圧をコンピューターによる自動計測によって約20時間かけて計測した．得られた流れ場を数値微分し式（3）によって固有値を計算した．

その代表的な実験結果が図2である．縦軸は全圧損失係数で値が大きいほど損失が大きい．横軸の ω は式（3）の固有値の虚数部分で値が大きいほど流体粒子が速く回転していることを表す．図中 $x/C=1.5$ は全長 C のスリットが閉じてからスリット長さの半分だけ下流の断面であることを示している．この断面では発達した縦渦が存在している．

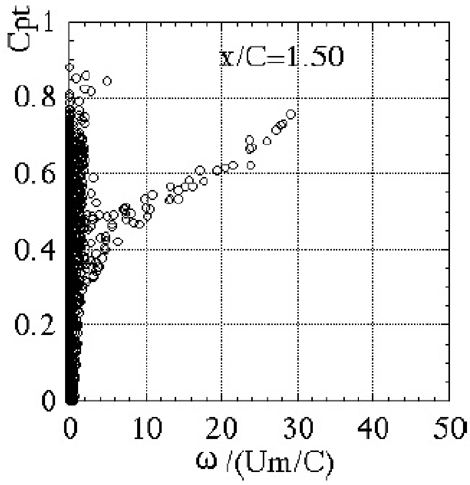

図2　全圧損失係数と角速度の相関[9]

図において原点は主流を示し損失と渦度のない流れ場を表す．全圧損失が大きく ω がゼロの点は境界層や後流である．縦渦は斜めに延びた特徴的な点の集合で表される．渦芯は全圧損失と角速度がともに大きな点で表される．渦の中心から周囲へ向かって角速度が低下するために渦芯は完全な剛体渦ではない．

剛体渦は流体が剛体のように回転するため変形速度がゼロでエネルギー消散を伴わない．このため通常の渦は中心が剛体渦的であり，周囲の旋回しない流れ場と接続するために自由渦的な流れが周囲を取り囲んでいる．この速度分布を持つ渦はランキン渦と呼ばれている．渦が周囲に速度場を誘起しないとすればストークスの定理を満たすためにランキン渦の外周には負の渦度の領域が存在しなければならない．縦渦に関しては多くの実験があるが，筆者はこれまで負の渦度の領域を報告しているものを見たことがない．負の渦度は広い領域に分布するために渦度が弱く渦芯の渦度測定に適した分解能では見逃す可能性がある．

筆者の実験には明確な負の渦度の領域が観察されたのであるが，流線追跡の結果これはジェットと壁面の干渉の結果生じたものであることが分かった．最近の詳細な数値実験において，縦渦が負の渦度の領域で囲まれている可能性を認識して計算結果を見れば研究者の判断が変わるかもしれない．

3．写真に見る実在流体の挙動

3.1　実在流体と鏡像の原理

最近はいろいろな写真をネット閲覧できるようになった．筆者はいろいろな写真を眺めるうちに渦の鏡像の原理による誘起速度の存在が正しくないことを示す証拠を見つけた．

図3[10]は湖の上に発生した霧の上を飛行する小型機である．この写真では1対のお互いに反対方向に回転する

図3[10]　湖面に発生した霧の直上を飛行する航空機と翼端渦

翼端渦が見える．渦は雲海の表面に沿って水平に後方に伸びている．もしも渦対に誘起速度が存在するならばそれは渦芯を下向きに移動させ渦は後方では霧の中に隠れてしまうはずである．これは渦の誘起速度が存在しないことの証拠写真ではないだろうか．

図4[11]は同様の状況であるがダウンウォッシュが強調されている．翼で作られるダウンウォッシュが霧に溝を掘るが溝の深さは一定のままで深くならない点が面白い．渦による誘起速度があるならこの溝は後方ほど深くならなければならないであろう．図3と図4から渦に速度を誘起する作用がないとすれば誘導抵抗の理論はすべて崩壊する．これらの写真はクッタ-ジューコフスキーの定理ではなくプラントルの運動量理論による揚力の説明のほうが合理的であることを示唆している．

図5[12]は翼端渦と吹き降ろしと航空機が望遠レンズによって圧縮されているためにお互いの空間的な関係は明確でない．おそらく航空機は紙面の最前方に位置しており，はるか後方では吹き降ろしによって作られた雲の溝が両側から次第に埋められていく状況が分かる．

図5[12]　遠方での吹き降ろしの状況

図4[11]　湖面に発生した霧の直上を飛行する航空機と吹き降ろし

3.2　揚力流れ場の全体像

図6[13]は雲のないおそらく飽和寸前あるいは過飽和の空気中を航空機が飛行することによって空気中の水蒸気が凝縮してつくられた“雲”を示している．図3から図5は航空機によって乱された雲であるが，図6は航空機が作り出した雲であることが違っている．これは翼表面に沿って流れたせん断層あるいは翼面の境界層が変形する様子が写されていると考えるべきであろう．

この写真が示していることは次のとおりである．航空機は航空機前方の上部に位置した空気を後方では航空機の下部に移動させている．この結果，航空機の直後では翼表面のせん断層が図6にAで示す吹き降しの境界面を形作っていることが分かる．

下部に移動した空気を埋めるために航空機前方で下部に存在した空気が翼の外側を通って機体後方の上部に移

図6[13]　航空機が発生した雲によって可視化された吹き降ろしと翼端渦の形成

動しなければならない．このとき上部に移動する空気は翼端より外側の広い空間を使うことができるために上向きの移動速度はダウンウォッシュの下向きの速度に比べて小さなものですむ．結果として航空機に上向きの反力が得られる．

一連の空気の入れ替え作業によって生じたのが翼端渦である．特に機体後方Ｂにおいて左右から上昇する雲がさらに水平方向内側に移動し，翼端渦を形成する様子を良く表している．後方ではそれが巻いて航空機に相対的な座標系から見れば縦渦になる．図６は航空機が空気の“入れ替え作業”を行いながら飛行しているように見える．

3.3　ウイングレットの誤解

現代の多くの航空機にウイングレットが取り付けられている．その理由は翼端から放出される束縛渦をできるだけ拡散させ，渦の誘起速度に伴う誘導抵抗を小さくするため，と説明される．翼端にウイングレットを取り付ければ，ウイングレットの先端で圧力差がゼロになるので取り付けないときの本来の翼端部では負圧面と圧力面の間に圧力差が残る．この証拠が図７[14]である．これはウイングレットの先端から出る渦の中心が水蒸気の凝縮で可視化されたもので，ウイングレットの内側と外側に圧力差があることを示している．

ウイングレットとはいえそれなりに強度が求められ，重量増加は避けられないはずである．航空機の製作者はウイングレットを付けたほうが燃費が良くなることを数値計算で確認した上で製作しているのであろう．これは，抗力が減少すると考えた理由は間違っているが，実用的には効果があるから採用していると言うことができるだろう．

航空機の全幅に制限がなければウイングレットを水平にして翼巾を大きくすれば，単純に揚力を大きくすることができる．最近就航したボーイング787は翼端に水平なウイングレットを装着している．

図７[14]　ウイングレットから発生する渦

3.4　揚力の発生理由

揚力発生の理由については新聞の科学欄[1]に解説があるほど広く興味を集めるテーマである．完全流体を経てクッタ-ジューコフスキーの定理を学んだものにとっては，翼渦を作り出すから揚力が生じるとの説明は受け入れられるようだ．しかしこの説明はまったく直感的ではない．揚力はあくまでも力であるので，できることなら力を用いて説明すべきである．

力を生じるためには翼の表面に圧力の分布ができなければならない．表面の圧力分布は流れ場の圧力分布によって定まる．流れ場の局所的な圧力 P は次式の半径平衡条件に従う．

$$\frac{dP}{dr}=\rho\frac{u^2}{r} \qquad (4)$$

ここに r は局所的な流線の曲率で u は流速である．この式は $F{=}Ma$ そのもので流線が r の曲率を持てば流れに直角方向に圧力勾配が生まれることを表している．逆に言えば流れ場に圧力の分布があるときには流線が曲がらねばならない．

図８[15]は迎え過度を持つ対称翼周りの流れである．流線が曲率を持っていることから翼の表面の圧力が遠方の圧力より低いことが分かる．遠方から式（４）に従って圧力差を累積すれば表面に圧力分布が生まれる．これを表面に沿って積分したときに力の不釣合いが生まれ揚力となる．

翼の上面を通過する空気の流線は結果的に曲線となり，翼の後縁で流れが下向きになるために吹き降ろしと呼ばれる下降気流を作る．これが図３から図５に示された特有の流れが観察される原因である．航空機を取り囲む検査体積を定義したとき航空機を重力に逆らって支えるためには下降気流が卓越することが必須である．このとき翼のスパンを長くして大量の空気を低速で下向きに移動させればエネルギー損失を小さくすることができる．

翼が遠ざかれば空気を駆動する原因がなくなるために吹き降ろしは止む．それが図４で溝が深さを変えない理由である．

流線が曲率を持つ結果，翼の負圧面の静圧は周囲より低下し，断熱膨張によって温度が低下して水分の凝縮が生じる．結果として図７のように翼のスパンに沿った負圧面の低圧領域が可視化される．翼の下面は圧力が高くなり凝縮が起きず可視化されない．

図９[16]は衝動タービンのマッハツェンダー法による観察である．写真は等密度線を表し，翼の圧力面Ａ部の密度が大きく，ひいては圧力が高いことを示している．タービン翼列によってジェットが曲げられ式（４）にしたがって翼の圧力面Ａと負圧面Ｂに圧力差が生じ，結果

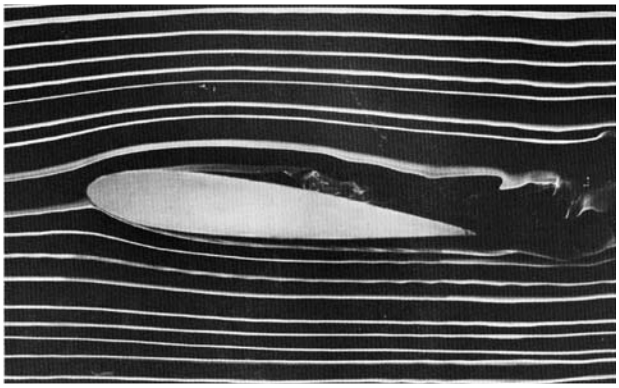

図８[15]　迎え角を持つ対称翼周りの流れ

として翼列に力が働くことが分かる．力が発生する原理は流体の曲率に基づいており航空機も流体機械も変わりがない．タービンでは力が作用した状態で翼列が移動することで流れからパワーを取り出している．

なぜ流線に曲率が生じるかは問題ではない．四角い，あるいは丸い棒を流れに直角に置けばもちろん揚力は生じない．小さな抗力で流れを合理的に曲げることのできる形状を鳥類は遺伝子の突然変異の積み重ねによって，人類はオットー・リリエンタールに見られるように鳥類を真似て経験的に見つけたと言うべきではないだろうか．

４．結論

筆者はウェブサイトに誘起速度が作用しないことを示す渦対の写真を見つけた．渦対が相互に力を及ぼさないと考えることは流体力学の局所作用の原則に合致している．これが正しいとすれば鏡像の原理，クッタ - ジューコフスキーの定理，誘導抵抗の考えなどが次々と否定される．

それでは翼が揚力を持つ理由は何か．揚力は力であるので力が生まれる原因を直感的に説明しなければならない．流線が曲率を持つと空間的に圧力勾配が生じる．流体力学ではこれを半径平衡条件と呼んでいる．空間的に圧力勾配を積分すれば場の二つの地点の間の圧力差となる．これを翼の表面に沿って積分したときに力の不釣合いが生まれれば揚力となる．

力が発生する原理は流体機械でもまったく同じで流線に曲率があるためである．流体機械の流れを観察すると翼と力のやり取りをする部分で流線が必ず曲率を持っている．

流線が曲率を持てば全体の流線が曲がらなければならない．この結果，翼の後方では吹き降しが生ずる．

流体力学者も他の分野の技術者と同様 $F=Ma$ に忠実でなければならない．世の流体工学者がクッタ―ジューコフスキーの定理の呪縛から開放され視点を変えることを期待したい．

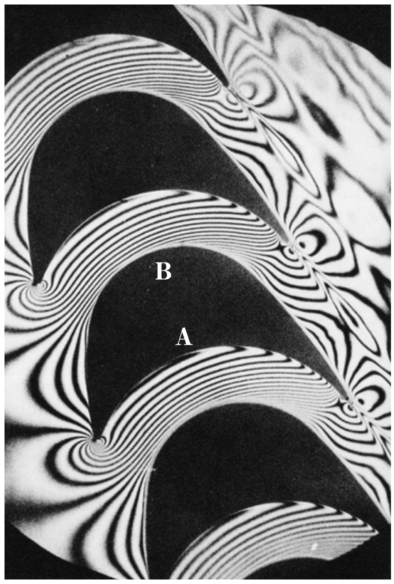

図９[16]　衝動タービンの等密度線

参考文献

1）日本経済新聞　飛行機が飛ぶ原理は？　2009. 11. 08日付
2）Munson, Young, Okiishi Fundamentals of Fluid Mechanics
3）Batchlor　橋本英典他訳　入門流体力学　1972年　東京電機大学出版局
4）Lught　渦—自然の渦と工学における渦
5）今井功　流体力学（前編）　1984年　裳華房
6）守屋富次郎　空気力学序論　1970年　培風館
7）妹尾泰利　内部流れと流体機械　1980年　養賢堂
8）甘利俊一，金谷健一　線形代数　1997年　講談社
9）原和雄　隔壁からの漏れ流れによって形成される縦渦と壁面の干渉　日本機械学会論文集　B 編69巻, 681号 p. 1059～1066（平成15年）
10）http://www.efluids.com:8080/efluids/gallery/gallery_pages/citation_1.jsp
11）http://media.efluids.com/galleries/all?medium＝186
12）http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/Morris_4. jsp
13）http://www.airteamimages.com/lightbox.php?lbid＝444
14）http://www.airteamimages.com/93385. html
15）Milton Van Dyke, An Album of Fluid Motion, THE PARABOLIC PRESS Stanford California, 1997
16）日本機械学会編　写真集　流れ　1984年　丸善