

# 流体計測手法の進展と流れの理解の深化について — 雑感 —

李家賢一

東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

## Impressions on Advancement of Flow Measuring Technology and Understanding of Flow Structure

by

Kenichi RINOIE

In this "Integration of EFD and CFD" organized session, I would like to make some personal discussion on the relationship between the advancement of flow measuring technology and understanding of flow structure.

### 1. はじめに

本企画セッション「EFD/CFD 融合技術」の観点からは、今後風洞実験の際に CFD 技術が活用されることは十分に意味があることだと理解している。例えば、風洞実験では時間的制約のために試験ケースが離散的にならざるを得ず、実験ケースの抜けている領域を CFD 技術の活用で、風洞実験とほぼ同時に値が求まるのであれば（使用する風洞に応じたチューニングは必要であろうが）、風洞実験する側にとって大変に有益であろう。現在は両者を同時に行うことはまだ困難であるかもしれないが、今後は確実に実現されると思われる。抵抗係数を 1 カウント以下の精度で計測することが、可能になれば、航空機の開発現場にとって大いなる益がある。また風洞実験のできない範囲（例えば風洞の限界レイノルズ数を越えた領域）において実験結果を外挿する様式で CFD 解析を行うことにも意味が十分にある。EFD/CFD 融合技術の進展が期待される所以であろう。

一方、空気力学の学術的観点から、計測技術と解析技術の進歩ならびに両者の融合技術の進展は何をもたらすのであろうか。数値解析技術について云々するのは浅学の輩である筆者には困難であるので、多少は経験を有している計測技術について考えてみたい。ここでの話は非圧縮流（低速流れ）に限る。以下では、要するに「最近のデータ量の多い計測結果と昔行われていた discrete な計測手法による結果とでは、我々の理解は何が違うのか」といった視点から個人的な意見になるが述べたい。また EFD/CFD 融合に不可欠な要素についても、学術的観点から考察を行ってみたい。

### 2. 流体計測技術の進歩

流体計測技術の進歩をたどると、19 世紀のレイノルズの乱流遷移の実験以来、流れの可視化、圧力測定、流速の測定分野で大いなる進歩を遂げてきた。流速計測分野では、ピトー管、熱線風速計、レーザードップラー流速計、PIV といった順番で、時間的にも空間的にも、より高い精度、より高い解像度、より広い領域の計測が可能になってきた。特に熱線風速計は登場以来 50 年以上経つが現在でも精度の高い乱流計測に不可欠な計測手法であり続けている。

ここで、筆者が経験してきた計測をたどってみたい。計測対象は二次元翼型周りの（特に剥離流れ）の計測である。剥離を含む流れということで、熱線風速計ではなく、当初からレーザードップラー流速計を用いて計測していた。一

次元レーザードップラー流速計 (1d-LDA) は、風洞内の 1 点における一次元成分流速を測定する（時系列計測を行うので乱れ度の計測は可能）。流速の二次元成分の計測を行うためには、同じ場所で 1d-LDA の光学系を回転させながら数回同じ計測を行う必要がある。このため 1 点の流速の計測に早くても数分から十分程度を要した（もちろん風洞流れが定常であるという前提のもとでの計測になる）。計測したデータはミニコンを使って計測 1 点毎に二次元平均流速と乱れ応力分布を求めていた。この結果をグラフ用紙に手書きでプロットしていった。結局これらの作業を行うのに 1 点あたり 10-20 分を要していた。現在ではあり得ない効率の悪い計測であったが、考える時間的猶予は十分あり、1 点計測するごとに次の計測点の結果を予測しながら作業を進めていった。例えば壁面上の速度分布を計測するために壁面に直交する方向に光学系をトラバースしていくと、どの高さで逆流が発生するか、あるいは速度分布に変曲点が生じるかを捉えながら計測が進んでいった。そうすると計測結果がまとまる前に頭のなかでは流れの様子をほとんど把握することが可能であった。二次元レーザードップラー流速計 (2d-LDA) を使用するようになり、1 点毎の計測には変わらないが光学系を回転させる必要がなくなり、1 回の測定で解が得られるようになったのはかなりの進展であったが、1 点 1 点の速度を確認しながら光学系をトラバースしていく作業には大きな変化は生じなかった。

その後、二次元 PIV を使用するようになって、状況は大きく変化した。よく知られているように二次元領域内の速度分布を瞬時に測定し、それを専用のソフトウェアで解析することによって計測終了とともに速度ベクトル分布が得られる（正確には後処理の作業が必要であり、公表できる結果を作成するには計測データ量が多いため結構な時間を要するのであるが）。以前とは異なり、二次元面内の流速分布や乱れ応力分布を短い時間で計測することが可能になり、カラーコンター表示で結果を表すことが普通になった（乱れ応力分布については PIV の時間解像度の問題もあり、慎重な扱いが必要であったが、平均流速については高い精度での計測となった）。PIV は三次元速度成分計測、時系列速度計測、三次元空間計測（トモグラフィック PIV）へと発展している訳であり、計測されるデータ量は飛躍的に増大している。この多量の計測データを処理すべくデータマイニング手法が活用されている。

### 3. 計測結果の考察について

このような状況のもとで、二次元 PIV 計測の経験に限られるが、増大したデータを実際にはどのように処理して考

察につなげてきたのかを振り返ってみたい。カラーコンター図は学会等のプレゼンテーション用には便利な表現方法ではあるが、実際にはこの図からはなかなか厳密なことを言えないのが現状であろう。以前と異なり計測しながら流れの様子を把握するのではなく、計測後にデータ処理をして初めて流れの全容がみえるようになる。しかもデータ量が多いために細かい点をすべて把握することは不可能で、全体的な傾向をつかむのが精一杯である。

以前計測した例では、二次元流速ベクトル分布が PIV 計測により得られたものの、それを結局は昔ながらの壁面に垂直方向にプロットされた速度分布に直して、境界層厚さを求め直したことがある。これによりようやく定量的な値を示した上で考察を行うことが出来た（二次元情報を得ているのに、境界層近似にデータを落としてしまっていることに注意）。今では古典的になってしまった二次元 PIV 計測でもその程度であるから、上述の三次元空間計測が今後一般的になったときは、一体どのようにデータ処理をして考察するか不安になる。データ処理により過度等を求めることが可能になったが、流体中のどの部分（空間的あるいは時間的）に着目して考察すべきかは、データ量が膨大になればなるほど困難さを増す。結局は、計測前にある程度流れの状態を把握（予測）しておいて（見当をつけておいて）、それにもとづいて注目すべき領域の目処をつけておく必要がある。ただし、こうなると昔ながらの discrete な計測手段で得られた結果を考察するのと大きな違いはなくなるかもしれない。

#### 4. 流体力学の理解とは

閑話休題、4年ほど前に「翼が揚力を発生する理由を専門家でも実は説明出来ていないのではないか」という疑問が一般書で提起されたことがあった。このことは流体力学を専門とする他の学会内で議論となり、筆者もその背景を少し調べたことがある。細かい説明は省くが、結論として、「翼が揚力を発生する理由」を最初に日本での確に説明したのは、今井功先生<sup>1)</sup>であろうということになった（啓蒙書等でこの揚力発生メカニズムをベルヌーイの定理を用いて説明されていることが多いが、実はこれでは不十分である）。最近になって同様の議論を室蘭工大の高木正平先生が文献<sup>2), 3)</sup>で詳しく説明されたとともに文献<sup>1)</sup>について言及されている。揚力の発生理由を説明するためには最新の EFD や CFD は実は全く不要で、結局は流体力学そのものの理解が役に立つということである。この点は前述の PIV 計測での経験（流体の現象を議論するためには流体力学の基本、ここでは境界層的な把握に立ち返って考えていた）と同じである。計測技術や解析技術が如何に発展しようと、現象を理解するためには、最後には流体力学の基本を理解していることが鍵になると考える。

寺田寅彦は「ルクレチウスと科学」<sup>4)</sup>の中で、科学者が持つべき要素として、数理分析能力（S 軸）、実験によって現象を系統化し帰納する能力（K 軸）そして直感能力（L 軸）の 3 軸が必要だと述べた（図 1）。ここでは S 軸が CFD、K 軸が EFD に対応する。寺田は L 軸のことを「見当を付ける」能力とも称しているが、空気力学の学術的観点からは EFD/CFD 融合技術に不可欠なのが L 軸であろうと推察される。

#### 5. おわりに

以上、まとまりのない話になってしまったが、本企画セッションの開催趣旨内に EFD/CFD 融合に関するディスカッションを行うことと書かれており、敢えて稚拙な議論をさせていただいた次第である。ご意見をいただけると幸いである。

#### 参考文献

- 1) ロゲルギスト、続物理の散歩道、岩波書店、pp.158-161、1964.
- 2) 高木正平、流線の曲がりから揚力の発生機構を説明する試み、日本航空宇宙学会誌、Vol.58, No.672, pp.30-32, 2010.
- 3) 高木正平、なぜ翼に揚力が発生するか？—ベルヌーイの定理か流線曲率の定理か—、日本機械学会誌、Vol.113, No.1097, pp.262-265, 2010.
- 4) 小宮豊隆編、寺田寅彦随筆集第二巻、岩波文庫、pp.207-262、1947.

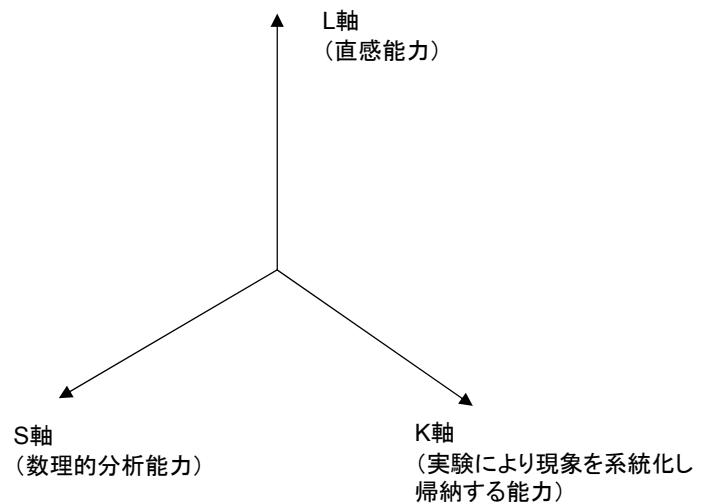


図 1 科学者が持つべき要素としての SKL 軸系