可視化と実験機器

——電気制御空気中トレーサ法*

藤田 肇**, 大木 博**

Flow Visualization Equipment for Electrically Controlled Tracer Methods in Air

Hajime FUJITA and Hiroshi OHKI

1. ま え が き

可視化を目的として流れに追従させる空気中トレーサは、空気とほぼ同じ密度を有し、対象とする流れのスケールよりも十分小さいことが必要である。また、臭気、毒性あるいは腐食性を有するものの使用はさけるべきである。このような条件から、使用できるトレーサの種類は限定される。トレーサを流れに乗せる方法として、直接注入法、化学反応法、電気制御法などがあるが、これらの特徴と基礎的事項、応用例などは文献¹⁾によくまとめられている。ここでは電気制御法(スモークワイヤ法、火花追跡法)について、機材とその選択および使用上の注意を述べ、あわせて応用例を示す。

2. スモークワイヤ法

2.1 原 理

流れの中に張った金属細線(ワイヤ)に油(鉱物油、流動パラフィンなど)を塗布すると、表面張力により小さい油滴となり、ほぼ等間隔にワイヤに付着する。このときワイヤに電流を流すと白煙が発生し、スモークシートを形成する。この煙は空気より軽く、その上昇速度は5cm/s程度である²⁾。このことからスモークワイヤ法適用風速の下限が決まる。上限については30m/s程度といわれているが、油の種類、塗布法、ワイヤの直径、流れの性質などにより異なる。高速流で使用するには対象に合致したそれぞれの工夫が必要で

ある。

スモークワイヤ法の長所は、

- 1) 高電圧電源など特別な装置が不要で、手軽である。
- 2) 気流中に張られたワイヤは細いので、流れをほとんど乱さない。
- 3) 煙の発生を電氣的に制御することにより、流脈またはタイムラインが得られる。
- 4) 二次元流れの他、三次元流れ、非定常流れにも適用できる。

短所としては、

- 1) 高速流れに適用するのは困難。
- 2) 連続的発煙ができない。

スモークワイヤ法専用の機材として市販されているものは少なく、研究者がそれぞれ自作してノウハウを得る必要があるが、以下に紹介することがそのときの参考になれば幸いである。

2.2 発煙機材

a. 油と塗布法

一般的に用いられているのは流動パラフィンを筆で塗布する方法である。この方法は、ワイヤのサポートも単純なものでよく、特別な装置も不要だが、流れの中で塗布するのが困難な場合もあり、実験に手間のかかるのが欠点である。自動塗布法としては、滴下法、ブラシまたはワイヤを動かす方法、回転体への応用では遠心力を利用する³⁾方法などがある。

滴下法は、細いチューブ、針を通じて給油する場合には粘度の低い油が必要であり、流動パラフィンと灯油を1:1で混合したもの³⁾、模型機関車の鉱物油³⁾などが用いられる。このほか、ベ

*原稿受付 昭和59年7月30日

**備日立製作所 機械研究所

ピーオイル、ひまし油と灯油の混合油なども使用可能といわれている。

滴下法では大きな油滴がワイヤに沿って下降するので風で飛散しやすく、 10m/s 以上で使うことは困難である。

b. ワイヤとサポート

ワイヤは直径 $0.1\sim0.2\text{mm}$ のニクロム、ステンレス、タングステン線などが多く用いられるが、低速流れではより細いワイヤも用いられる。ワイヤは通電時の熱膨張で伸び、たるみや振動が発生することがあり、これを防止するに十分な張力を与えるためにはステンレス線が使いやすい。

ワイヤのサポート方法は油の塗布法により異なるが、両端に電圧をかけるので、両端共他の機器から絶縁されている必要がある。

滴下法で油を塗布するためには図1で示される構造が用いられる。同図(a)はサポート部材の一部を油パイプ、タンクとして用いる。同図(b)はより簡易な方法で、細い針状チューブ(内径 $\phi 0.5\text{mm}$ のステンレスを偏平につぶしたもの)の先端をワイヤの上流側に接触しない程度に近づけて給油する³⁾。

給油はハンドポンプ(血圧計に用いられるようなもの)または電動ポンプ(例えばペリスタミニポンプ)を用いる。電動ポンプを用いると油の滴下が遠隔操作できるので便利である。ポンプを作動させると大きな油滴が次々にワイヤに沿って下降し、小さな油滴をワイヤ上に残す。ここでポンプを止め、大きな油滴の降下間隔が十分長くなり、ワイヤ上に大きな油滴の無いときを見計らって発煙する。大きな油滴があるとき発煙すると図2に示すように局所的に乱れた太い煙線が発生してしまう。

c. 電 源

発煙用直流電源の容量は使用するワイヤの電気抵抗、油の種類や風速により異なるが、電圧は $10\text{V}\sim$ 数百Vである。低い電圧から実験を始め、徐々に電圧を上げて最適値を決める。通電方法としては、コンデンサーに一時充電してから放電す

図1 スモークワイヤサポートと滴下給油法

図2 ワイヤ上の大油滴が発煙した失敗例

る方法と、直流電源から直接定常電流を供給する方法とがある。前者は高電圧を短時間供給して濃い煙を出すため高速流に適し、後者は発煙時間を1秒のオーダーまで長くできるので、流脈を得るのに適している。また直流をパルスの断続することでタイムラインを得ることもできる。一方、交流を通電しても煙シートを得られるが、その際スライダックを使用して電圧を調整する時には絶縁について注意が必要である。

良い写真を得るには、発煙時間と、発煙から撮影までの遅延時間を最適化することが重要なので、これらは広範囲に調整できることが望ましい。

手軽に使える市販品として、管原研究所 MS-405 (25万円) があるが、電圧およびパルス幅(発煙間隔)の調整範囲が限定されているので、自分の実験に適合するか事前に確認しておくことが重要である。

図3 実験Ⅰにおけるスモークワイヤと翼の関係^{a)}

2.3 撮影機材

a. 光源

スモークワイヤの実験においては、目視により流れをよく観察することが重要である。これにはプロムライト (500W) などの連続光がよく用いられる。

(a) カメラ A

(b) カメラ B

(c) カメラ C

図5 実験Ⅰ, スモークワイヤ位置(b)^{a)} 図4 実験Ⅱにおけるスモークワイヤと翼の関係^{a)}

撮影用としてはストロボライトが一般的であり、カメラシャッターをバルブで開放にしておき、1回または数回発光させる。流れが周期的に変化する場合はトリガー信号によって多重発光させると、流脈の集合平均が得られる⁴⁾。

細長いスリット光源を得るには放電管を直列に数個並べたものが良い (例えば菅原研究所 J-6 型, JL-3A ランプハウス付, 31万円)。

安価な光源としては写真用のエレクトロニックフラッシュを用いる。

(a) カメラ A

(b) カメラ C

図6 実験Ⅰ，スモークワイヤ位置(a)³⁾

ナショナル PE 120 M は、発光時間が $1/5000$ 秒と他のものに比べると短く、数 m/s の流速に対しては十分使用できる。このフラッシュを多数使用してスリット光源を作ることができる³⁾。

b. カメラ

モータドライブ付 35mm 1 眼レフが使いやすい。レンズの焦点距離は長いほど像のゆがみが少

ないが、レンズ口径、実験室の広さにも制限される。ズームレンズ (75 mm ~ 150 mm など) が便利である。連続光で撮影する場合も考えるとシャッター速度はできるだけ速いものを備えるべきである。

2.4 三次元流れの可視化

スモークワイヤからはシート状に煙が発生する

ので、三次元流を十分理解するためにはワイヤ、モデルおよびカメラの相対位置の種々の実験が必要である。以下にその一例を示す³⁾。

三角翼の前縁に沿って一対のうずが発生する。この流れは三次元性が強く、これを可視化するために、図 3, 4 に示すような 2 種類の実験を行った。実験Ⅰはスモークワイヤは翼幅方向に平行であり、ワイヤと翼との相対位置はスモークシートが翼へ流入する位置により (a) ~ (d) の 4 ケースに分けられる。実験Ⅱではスモークワイヤは翼幅方向に直角で、ワイヤ位置は (a) ~ (c) の 3 ケースである。

図 5 は、実験Ⅰ，スモークワイヤ位置 (b) の場合の 3 方向写真を示す。前縁の中央付近をすどく回り、うずを形成する流れの様子がよく分る。図 6 は実験Ⅰ，ワイヤ位置 (a)，図 7 は実験Ⅱ，ワイヤ位置 (a) のそれぞれ 2 方向写真を示す。

(a) カメラ A

(b) カメラ B

図7 実験Ⅱ，スモークワイヤ位置(a)³⁾

図8 火花追跡法の原理

これらから、うずのコアの形成とその崩壊の様子が良く分る。このように、スモークワイヤ、モデルおよびカメラの位置の様々な組合せにより三次元流れの可視化ができるが、写真のみからでは流れの奥行きが理解できないので、目視による流れの観察が重要である。

3. 火花追跡法

3.1 原理

図8に示すように、流れの中に電極を置き、これに高圧、高周波電圧パルスを加えると、電極間の放電によりイオン化された空気の経路がつけられ、これがタイムライントレサとなって下流に流される。イオン化された空気の電気抵抗は非常に小さく、 $0.1 \sim 1 \text{ ms}$ 程度存続する。この間に次の電圧パルスが加えられると、放電は電気抵抗の小さいイオン化された空気経路を通じて行われ、経路が明るく輝く。このように次々と放電が行われて、タイムラインを得ることができる。

火花追跡法の長所は、

- 1) 気流内に入れる電極は細いので流れの場を乱さない。
- 2) 流れやモデル、機器をよごさない。
- 3) 火花自身が明るいので照明が不要。

図9 電極の形状

- 4) 非定常流れ、高速流れにも適用できる。

短所としては、

- 1) 放電がイオン化された経路を通らず短絡することがあり、流れを正確に示さないことがある。特に壁面付近の観測が難しい。
- 2) 高電圧、高周波パルス電源を必要とする。高電圧を導くコード、接続部の絶縁を完全にしないと放電が起ってしまう。

火花追跡法の機材はスモークワイヤ法よりも種類が少なく、適切なものの選択はそれほど困難ではない。

3.2 機材

電極は図9に示すような針状、線状、面状電極とその組合せがある。材料は通常タングステン線を用い、直径は $20 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 程度の範囲から適切なものを選ぶ。細すぎると放電時に溶断する。タングstenは硬くてもろいので加工時は注意を要する。

高周波電源は通常市販品を用いる。菅原研究所ではPG-305 B (295万円)、PG-400 (650万円)、MM-305 AA (780万円) の3機種がある。PG-305 B は簡易型であり、電極間隔は 1 cm 程度までの小規模な流れにしか用いられない。PG-400 はパルス電圧が 125 kVp 一定であり、亜音速領域用である。MM-305 AA はパルス電圧が $20 \text{ kVp} \sim 250 \text{ kVp}$ までステップ状に可変であり、音速域の流れにも適する。

3.3 回転羽根車内部流れへの応用⁵⁾

回転している羽根車の羽根間流れを定量的に測

定するにはピトー管などのプローブを羽根車と一諸に回転させるか、レーザ流速計を用いる必要があるが、いずれの方法も準備と測定に大変時間がかかる。一方、火花追跡法では一連の放電により、主流に関する多くの情報が短時間で得られる。

回転羽根車内の火花列を静止系から観察、撮影するには回転像を静止させる必要がある。この目的のためには、回転直角プリズムを利用した Image Derotator (スイス Elomag 社) が用いられる。この動作原理を図10に示す。直角プリズムを通して観察した物体とその像は、同図(a)に示すようにプリズム軸 $X-X'$ に関して軸対称の関係となる。したがって同図(b)で物体が回転した場合、プリズムをその半分の角度だけ回転させると像は常に静止していることになる。これを実現するためには、羽根車とプリズムの回転軸を高精度(軸間ずれ $10\mu\text{m}$, 方向10秒程度)で一致させなければならない。同様な回転プリズムは菅原研究所でもストロボローテータという商品名で製作している。

回転羽根車に取付けた電極へ高電圧パルスを提供するにはスリップリングを用いる。この場合、静止側の電極の先端は針状にしておき、回転側電極(リング)との間に $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 程度のギャップをもたせると、接触、摩擦によるトラブルをさけることができ、給電にも支障はない。

図11は遠心羽根車内部流れ可視化の例である。

図10 Image Derotator の動作原理⁵⁾

図11 遠心羽根車内部流れの例⁵⁾

文 献

- 1) 浅沼 (編), 流れの可視化ハンドブック (昭52), 169-313, 朝倉書店
- 2) 松村, 大野, 金子, 葉山, 平行回転円板間の不安定流れの可視化, 流れの可視化, 2-6 (昭57-7), 581-586
- 3) 藤田, 高田, 佐藤, ファンブレードモデルとしての三角翼の研究, 機械学会論文集, 50-450 B (昭59-2), 513-519
- 4) Y. Oshima, N. Izutsu, K. Oshima and K. Kuwahara, Autorotation of an Elliptic Airfoil, AIAA Pap. 83-0130 (1983)
- 5) 大木, 吉永, 提, 回転している遠心羽根車内の流れ, 流れの可視化, 3-11 (昭58-10) 330-337