

熱線流速計による乱流計測

Turbulent Flow Measurement with Hot-wire Anemometer

飯田明由

Akiyoshi IIDA

Abstract

Recent progress of computer technology enabled that the computational fluid dynamics became useful tools of industrial developments. Breakthroughs of the image-processing technologies also realized Particle Image Velocimetry and Particle Tracking Velocimetry. Instantaneous two-dimensional flow fields of the industrial application can be measured by these methods. As a result, CFD and Image-processing technology attract fluid dynamics researchers and engineers. On the other hand, there are few opportunities of studying the velocity-measurement technique with hot-wire anemometers and LDV. However, the classical hot-wire anemometers are useful tools for measurement of turbulence and unsteady flow fields. In this paper, the author introduces how to use hot-wire anemometers and know-how of the turbulence measurement. The experimental results obtained from the hot-wire measurement, energy spectra of isotropic turbulence, coherent structures of the boundary layer and the rectangular jet, aerodynamic sound source radiated from a circular cylinder, are also presented.

概要

コンピュータの発達により数値解析による流れの解析が製品開発などの分野でも一般的に利用されるようになってきた。また、PIV や PTV などの画像解析技術の進歩により実験・計測の分野でも技術的なブレークスルーが得られている。これらの分野は学会の講習会や講演会で取り上げられることも多く、若い技術者が技術を学習する機会が多い。一方、熱線流速計や LDV などの従来の計測機器が取り上げられることは少なくなってきている。しかし、乱流のような非定常流れの計測においては、熱線流速計は非常に優れた計測器である。本稿は熱線を利用する際のノウハウを示しながら、読者が熱線を使って計測する際の問題点等を解説する。また、円柱や噴流の測定結果やスペクトル解析結果など熱線流速計の活用事例を紹介する。

Key Words : Hot-wire Anemometer, Turbulence, Flow Measurement, Wake, Jet

1. 緒言

私たちは水や空気に囲まれて生活しているため、水や空気の性質を生活や産業に利用することが古くから行われてきている。雲の流れや汐の流れから天候や海の状態を調べることは古代から行われていたであろうし、風車や水車のような古くから利用されている流体機械においても流れの性質を上手に利用する工夫がなされている。今日、流体機械は複

雑かつ高精度になり、気象や海洋現象についても科学的な検討が進められている。

流れの支配方程式であるナビエ - ストークス方程式は非線形性が強く、一般に解析的に解くことが難しいため、実験や数値解析によって流速や圧力の値を求め、流れ場の性質を調べることが多い。実験流体力学では、流体の運動や現象を理解するために、さまざまな計測方法の開発が行われ、流れ場の測定・観測が行われている。流れ場の主な計測手法と

原稿受付日：2002年8月20日

工学院大学機械工学科 (〒192-0015 東京都八王子市中野町2665-1)

Kogakuin University, Department of Mechanical Engineering(2665-1 Nakano, Hachioji, Tokyo 192-0015, Japan)

しては、ピトー管、熱線流速計、レーザー流速計、超音波流速計、PTV (Particle Tracking Velocimetry)、PIV (Particle Image Velocimetry) などがある。また、各種の可視化手法 (シュリーレン法、水素気泡法、スモークワイヤ法) も流れを調べるために利用されている。これらの手法は対象となる流れ場の性質に合わせて使い分けられており、どの手法が最も優れたものであるということとはできないが、レーザー流速計や超音波流速計は非接触計測という利点があり、PTV や PIV は画像計測の利点を活かした面計測という点で優れている。

ピトー管や熱線流速計は、流れの中にセンサを挿入しなくてはならないという欠点があるものの、手軽に利用できるため、さまざまな流れの計測に利用されている。特に熱線流速計は周波数応答特性に優れているため乱流の計測に利用されることが多い。本稿では、この熱線流速計について簡単な解説を行う。熱線流速計に関しては詳しい解説書や論文が数多くあり⁽¹⁾⁽³⁾、筆者のような若輩者が熱線流速計について総括的に述べることは難しい。また、本会の読者や関係者の多くは実際の製品開発などで熱線流速計を利用しているであろうから、本稿に記載されている方法よりスマートな方法で計測されている場合も多いと思われる。したがって、本稿に書かれている内容は筆者の個人的な経験に基づくものであることをお断りしておきたい。その上で若い読者に対しては、少しでも参考になるように (あまり論文には記載されない) ノウハウ的なことを示したいと考えている。前半は熱線流速計の原理と実際の計測における問題点、後半は実際の流れ場の計測事例を示し、熱線を使うことによって、どのような現象を調べることができるかについて解説する。

2. 熱線流速計の特徴と問題点

2.1 熱線流速計の原理

熱線流速計の最大の長は、応答周波数とSN比が高い点である。市販の熱線流速計の応答周波数は100 kHz程度、SN比は80 dBほどである⁽¹⁾。実用上の応答周波数は熱線の熱容量もあり、これほど高くすることは難しいが、20 kHz程度であれば、特に注意しなくても十分なSN比で計測することが可能である。レーザー流速計やPIVなどでは高い周波数応答を実現するには注意深いセッティングと高価な機材を必要とするため、乱流や非定常の流れ場を手軽に測定するには熱線流速計が優れている。

熱線流速計の一例をFig.1に示す。熱線には直径1 μm から5 μm 程度のタングステン線や白金線が使用されることが多く、センサ部分以外を被服したタイプもある。熱線はプロングと呼ばれる金属製の支柱により支持されている。プロングを介して金属細線に電流を流すとジュール発熱により金属細線が加熱される。金属細線を加熱することから熱線

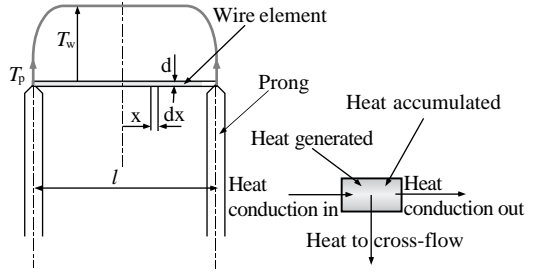


Fig.1 Schematic of hot-wire probe.

流速計という名前がつけられている。

金属細線の電気抵抗を R_w 、電流を I とすると、流速 U 、温度 T_a の流れの中に金属細線が置かれた場合の熱平衡式は以下ようになる⁽¹⁾⁽³⁾。

$$I^2 R_w = \frac{\pi d^2 c_w g \rho_w}{4} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \pi d h (T_w - T_a) \dots\dots\dots (1)$$

ここで d は熱線の直径、 c_w は熱線の比熱、 ρ_w は熱線の密度、 h は細線表面における熱伝達率である。ただし、ここでは熱線の長さ l は線径 d に比し十分長く ($l/d > 200$)、熱線上の温度分布が一樣とみなせると仮定する。

金属細線の電気抵抗は温度差に関する一次式で近似できることが知られており、

$$R_w = R \{ 1 + \beta (T_w - T_o) \} \dots\dots\dots (2)$$

と表すことができる⁽³⁾。熱線流速計には定温度型と定電流型があり、前者は細線温度 T_w を一定にし、後者は電流 I を一定に保つ方式である。電気回路としては I を一定に保つ定電流型が簡易であり、初期に開発された熱線流速計はこのタイプであるが、現在ではフィードバック制御に優れた定温度型が一般的である。定温度型では細線の温度 T_w を一定に保つように回路を構成することにより、式(1)の熱平衡式は

$$I^2 R_w = \pi d h (T_w - T_a) \dots\dots\dots (3)$$

と簡略化できる。熱線 (円柱) 周りの強制熱伝達に関する Collis と Williams⁽⁴⁾ の実験式より熱伝達率 h は、

$$\frac{\pi d h}{\lambda} = (0.24 + 0.56 Re^{0.45}) \frac{(T_w + T_a)}{2 T_a} = (A + B U^n) \frac{T_f}{T_a} \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。ここで Re は細線直径に基づくレイノルズ数、 λ は熱伝導率である。式(4)および式(2)を式(3)に代入すると、熱線の出力 $E = I R_w$ と流速 U の間に以下の関係がなり立つ⁽⁵⁾。

$$U = \{ B_d (E^2 - C_o) \}^{1/n} \dots\dots\dots (5)$$

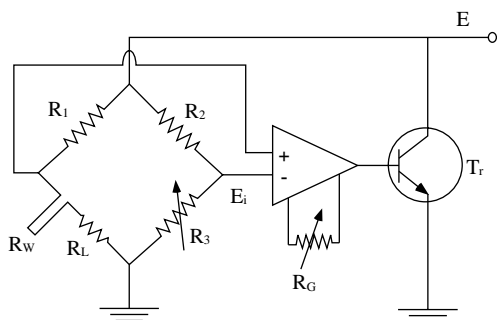


Fig.2 Constant temperature anemometer containing a Wheatstone bridge and a feedback amplifier.

ここで定数 n は一般に0.45～0.5程度の値である。

定温度型熱線流速計の基本回路をFig.2に示す。熱線はホイットストブリッジの抵抗として組み込まれているため、流速の変化に応じて熱線が冷却され、熱線の抵抗が変化する。このため、ブリッジ間に電流が流れるが、作動増幅器によりトランジスタをスイッチングし、ブリッジに加える電流を変化させ、熱線が一定温度になるようにフィードバック制御を加える。定温度型熱線流速計はフィードバック制御により応答性に優れた特性を示すが、熱線自身が閉回路を構成しているため、長いリード線を使うと発振しやすいという欠点がある。フィードバック回路の高周波における安定性を調整するため、フィードバック回路に調整機構を設け、矩形波信号に対する応答性の確認を行う必要がある。

熱線流速計は原理的に、流れ場の物性値が一定の場合は正しい流速を与え、逆に流速が一定であれば、流れ場の物性値を出力するという特徴がある²⁾。このため流速測定器としてみた場合は、測定結果は流れ場の物性値の変化に依存するため、測定結果は温度変化に左右される。また、熱線流速計は熱線が流れによって冷却されたことによって生じたブリッジの電圧変化から流速を換算するため、出力電圧と流速の関係は相対的なものであり、計測に際しては、必ず校正が必要になる。LDVやピトー管による計測のように流れ場の基本的な性質(ドップラーシフトやベルヌーイの式)を利用したものではない。この点が熱線の利用に関して最も重要な点である。筆者が企業にいたときの経験であるが、熱線のような(電気的な)計測器のほうがピトー管よりも優れており、測定精度が高いと考え、温度変化が激しい流れ場や校正が困難な流れ場で熱線を使っている例が数多く見られた。先日も、筆者の勤務する大学の研究室の学生がピトー管の計測結果を確認したいので、“熱線流速計”を貸してくださいと申し出てきた。電気回路を使った計測器のほうが正確であるという感覚が若い人に多いように思われる。もちろん、熱線流

速計は周波数応答に優れており、検査体積もピトー管に比べて小さいため、非常に優れた計測器であるが、それはピトー管や流量計などを用いて、熱線を十分に検定した上でのお話である。この校正という点については、熱線流速計が一般に広まるに従い、おろそかになっているというのが筆者の実感である。計測器メーカーが出荷時に提出した校正表をそのまま利用している例もある。校正を十分行うことができない環境(企業の実際の業務では、そういった例は少なくない)ならば、熱線よりもピトー管のほうが正確だと思ったほうがよい。熱線流速計の場合、校正を十分行えば1%程度の誤差で流れを計測することも可能であるが、校正が十分でないと10%や20%くらいエラーがでることも少なくない。ピトー管の場合、よほど乱暴な計測をしないかぎり、5%以下の誤差で流速を測定できるので、校正ができない場合は、ピトー管を使うか、ピトー管と併用するのが望ましい。筆者は新幹線の屋根上流れを熱線で計測したことがあるが、センサの破損、校正データの信頼性の確認などのため、ピトー管を併用して実験を行った。ピトー管のデータと熱線のデータを照らし合わせることで、比較的精度の高い計測が実現できた。

2.2 熱線流速計の校正

一樣な流れ場において、ピトー管は十分な精度を有するので、ピトー管を用いれば熱線の出力を正確に校正することが可能である。空気流の場合、ピトー管は低速(流速1 m/s以下)での測定が非常に難しいが、実際にはこのような低速では、熱線もその熱容量の関係で正確な測定が難しくなるので、熱線が一般的に利用される流速(1 m/s～150 m/s程度)ではピトー管による校正が最も手軽で精度がよい。パソコンやワークステーションの冷却設計を行う場合、低速の流れ(1 m/s)を測定しなければならないことが多い。この場合、あまり加熱比が高く、熱線の温度が高いと自然対流の影響があるので、熱線の感度が多少劣化するが、加熱比(熱線の温度)を下げたほうがよい。

熱線を校正する際、実際の製品開発などでは、校正用風洞と測定現場が離れているなどの理由で、校正用風洞で熱線を検定したあとで、センサを取り外して実際の計測を行うことがある。このような状況はあまり望ましくない。使用状況において校正するのが理想であるが、それが難しい場合は、最終的な使用環境において基準流速に対する出力信号の確認を行うべきである。

校正に関してはリニアライザーをアナログで行うか、デジタル(パソコン)で行うかという問題もある。データの後処理や校正曲線の精度という面では後者が優れており、市販のほとんどの熱線流速計はパソコンで出力をリニアライズしているものと思われる。筆者も最終的な信号処理としてはパソコンを用いたリニアライズが良いと考えているが、熱線を利用する計測の多くが、乱流や非定常流を扱っていること

を考慮すると、計測時に熱線の出力をオシロスコープなどで観測する必要がある。これは1つには電気ノイズや電気的な発振の有無を確認するためであり、トラバース装置などにステッピング・モータが使用されている場合やファンの制御にインバータなどを使用している場合は、トラバース装置と熱線を電氣的に遮断する工夫が必要である。オシロスコープなどによる観察が必要なもう1つの理由は、非定常現象の測定では加工されていない一次データをオシロやペンレコーダで監視することにより、未知の現象や間欠的な現象を発見する可能性があるからである。コンピュータの中で二次加工されたデータだけでは、このような間欠的な現象や未知の現象を見逃す可能性がある。例えば、円柱のはく離せん断層の中には間欠的な不安定波動が存在する(Fig.3のスパイク状の波形⁶⁾)。このような波形はオシロスコープで波形を観察していると見つけることができる場合もあるが、コンピュータによる自動計測では見逃す可能性が高い。もちろん、Wavelet 解析⁶⁾などを利用して、間欠的な現象を捉えることも可能になっており、パソコンでリニアライズを行った場合でも、このような波形を捉えることは可能である。また、オシロスコープで観察しても、間欠波形を単なるノイズと判断することもあり、オシロスコープを見ているだけで現象を理解できるわけではない。しかし、パソコンによるブラックボックス的な処理だけでは見逃してしまう現象が多いのも事実である。著者はできるだけ信号波形を観察し、FFTやRMSメータなどによる基本的なデータ処理を行い、実験中にできるだけ現象のチェックを行うようにしている。より正確なデータを得るための補正(リニアリティの調整)や最終的な統計処理はパソコンで行うが、実験中にある程度確認を行うことが重要である。熱線が手軽に利用できる機器であること、実験中が一番、その実験に対して集中している時期であることがその理由である。特に、製品開発などの場合、現物で測定できる機会が1回だけということもあるので、アナログ的な校正(信号処理)を併用し、できるだけ測定現場で出力や現象を確認するべきである。実験データの質を向上させるためには、このような小さなことの積み重ねが重要であると考えている。

Fig.4は熱線の校正記録の一例である。熱線流速計を使用する場合は、必ず校正記録を残すように心がけるべきである。また、筆者は実験開始時と終了時にリファレンスポイントにおける出力を比較するようにしている。このリファレンス点でのデータが一致しない場合、取得した実験データを破棄することになっている⁷⁾。熱線の場合、温度ドリフトなどの影響を受けやすいので、面倒ではあるが、実験前と実験後でデータのチェックを必ず行う必要がある。温度ドリフトを避ける工夫として、冬の夜(22時から26時ごろ)に実験を行うと比較的気温が安定していて良いデータが取得できる。

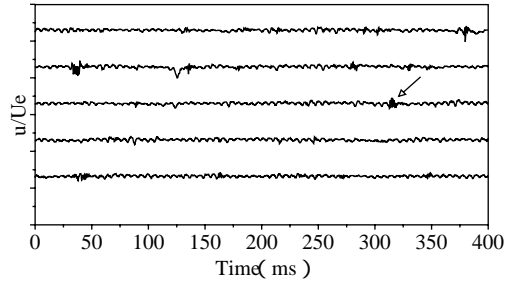


Fig.3 Velocity waveform in the wake of a circular cylinder⁶⁾.

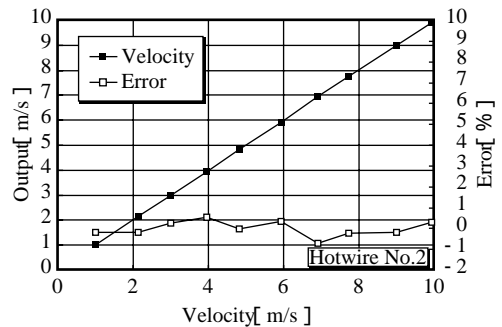


Fig.4 Linearity and error of hot-wire anemometer.

26時を過ぎると放射冷却の影響もあって気温が急激に下がる。もちろん室温が制御されている場合は問題ないが、熱線を使う場合は、温度の影響についてはできるかぎり、工夫するように心がけるべきである。

また、空気中の埃も熱線の出力低下をまねく。豊橋技術科学大学の蒔田教授の話では、先生が東大の駒場で実験されていたときよりも、豊橋のほうが(空気がきれいなので)熱線の劣化が少ないとのことである。少量の埃などの場合は超音波洗浄機による洗浄が効果的である。あまり劣化がひどく、出力特性が大幅に変化する場合は、洗浄や校正を繰り返すよりも熱線を交換したほうがよい。

2.3 多線式熱線の校正

多線式熱線流速計の場合は各センサの校正のばらつきが測定結果に影響を及ぼすので校正を行う場合は単線の場合以上に慎重に行う必要がある。市販のセンサの場合はセンサの幾何学的な配置は変更できないが、自作の場合、例えばXプローブであれば、センサの直交性を顕微鏡やスクリーンへの投射などを用いて確認する必要がある。また、校正時には必ずセンサの取り付け角度を変えて、出力特性の角度依存性を確認する必要がある。校正装置については水野⁸⁾や蒔田⁹⁾の実験を参考にされたい。Fig.5に熱線の取り付け角度調整機構付きのサポートの写真を示す。熱線流速計は

ブリーに取りつけられており、サポート後部に取り付けられたワイヤーを介して、取り付け角度が簡単に変更できるようになっている。

Fig.6(a)は筆者が学生時代に測定した熱線の角度依存性の測定例である。角度特性は¹⁰⁾

$$U_{eff}^2 = (\cos^2\alpha_1 + \kappa^2\sin^2\alpha_1) \dots\dots\dots (6)$$

に近い特性が得られている。しかし、これは何度も校正と調整を行った結果であって、熱線を使いはじめた初期には

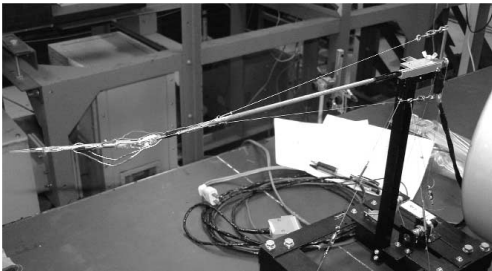


Fig.5 Photograph of hot-wire support with azimuth angle adjuster.

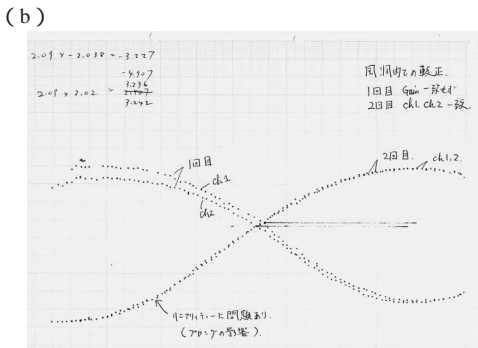
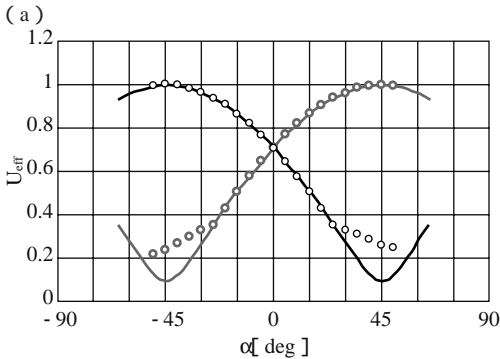


Fig.6 Examples of the direction sensitivity of hot-wire anemometer. (a) Final result (after calibration), (b) First and second attempts (not calibrated)

Fig.6(b)に示すように2つのセンサのバランスが必ずしも一致せず、丸1日以上うまくいかなかったときもあった。Xプローブの設置角度を確認する方法として、円柱の後流のレイノルズ応力を測定し、原点に対して点対称になっているかを確認することも有効である。校正が不十分であるとなかなかデータが対称にならない(各熱線のリアリティが比較的良好でも、なかなか一致しない。特にv成分は熱線出力の差から求めているため、バランスを取ることが難しい)。このような校正や確認実験を行うと熱線の限界と校正次第で非常に精密な計測ができることが実感できるので、特に熱線による実験を始めたばかりの学生は、このような実験を実際に行い、熱線の特性を把握することを薦める。他にも流速と温度の同時計測¹¹⁾や乱れによる測定精度の影響¹²⁾などの文献を参照することを推奨する。

3. 熱線流速計を用いた流れの計測例

3.1 スペクトル解析

熱線流速計の測定がほかの測定に比べ最も優れている点は、その周波数応答特性であろう。乱流のように、さまざまなスケールの渦が含まれる流れ場においては、センサの周波数応答性が非常に重要となる。PIVの空間分解能が向上したことにより、微細渦構造の測定という観点からは、必ずしも熱線流速計が優位であるとはいえなくなってきているが、熱線流速計の場合、長時間データの統計処理という点に優れていることから、乱流場の統計的なデータの取得という点では利用価値が高い。

Fig.7は熱線流速計を用いて一様等方位乱流のエネルギースペクトルを測定した結果¹³⁾である。周波数(波数)とエネ

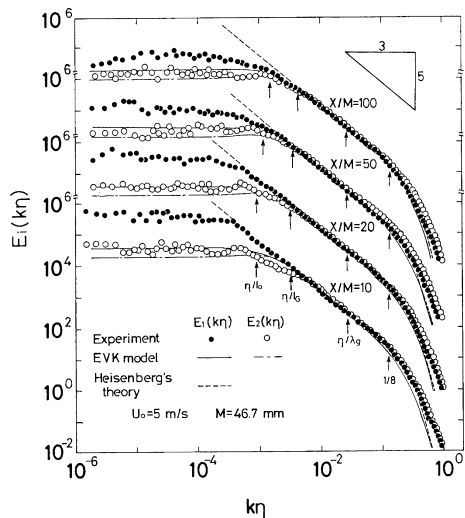


Fig.7 One-dimensional energy spectra $E_1(k)$ and $E_2(k)$ in a homogeneous isotropic turbulence.

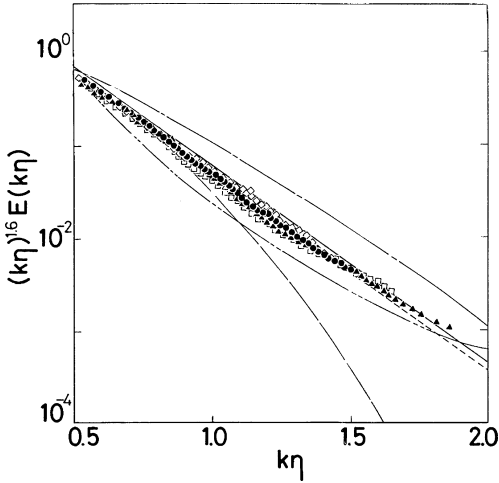


Fig.8 Energy spectra at far-dissipation region.
 Symbols : Experiment, - DNS¹⁴, EVK¹⁵,
 . . . Paδ¹⁶, - . . . Heisenberg¹⁷.

ルギーレベルは無次元化されているが、実際の周波数範囲は 0.01 Hz から 10 kHz で周波数範囲は 6 桁に及ぶ。低周波数の測定を行うには、長時間のデータサンプリングが必要になるが、熱線流速計の場合(温度管理などが十分可能であれば)は比較的簡単に低周波数域の測定が可能である。

一方、Fig.8 は高周波数域に相当する遠散逸領域におけるエネルギースペクトルの測定結果¹³)である。乱流の最小渦スケールであるコルモゴロフ渦に近いスケールのエネルギー分布を示したものである。理論解析では遠散逸領域におけるスペクトル分布を求めることが重要¹⁴⁾⁽¹⁷⁾であり、熱線流速計によって得られたデータを用いてスペクトル分布の検証が行われている。

3.2 多点同時計測

熱線流速計の欠点の 1 つは点計測であるという点である。PIV のように流れ場全体の構造を熱線で捉えることは難しい。しかし、境界層計測などでは、複数の熱線を同時に使用することにより、流れの構造を捉える試みが古くから行われている。Fig.9 は境界層計測に使用されている、くし型プローブの一例である¹⁸)。蒔田と西沢¹⁸⁾⁽²¹⁾は I 型熱線を 16 ch 並べたくし型プローブおよび 32ch の X 型プローブを用いて乱流境界層の構造を調べている。Fig.10 は乱流境界層内に発生した乱流斑点の瞬間像である²¹)。くし型プローブにより乱流斑点の発達過程が詳細に調べられている。熱線流速計で多点同時計測を行う場合、センサの検査体積が流れに影響を与えるという問題はあるものの、現実的な予算の範囲内でセンサおよび計測器を作ることができることが利点である。例えば 2 成分 LDV を 16 ch 用意して同様な計測を行うことは不可能ではないにしても、あまり実用的ではない(LDV で

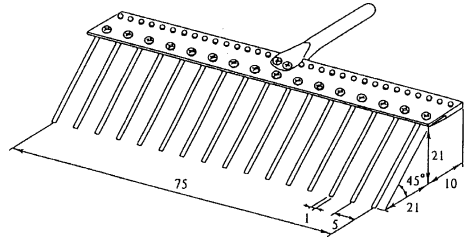


Fig.9 16-channel rake probe for measurement of turbulent boundary layer⁽²¹⁾.

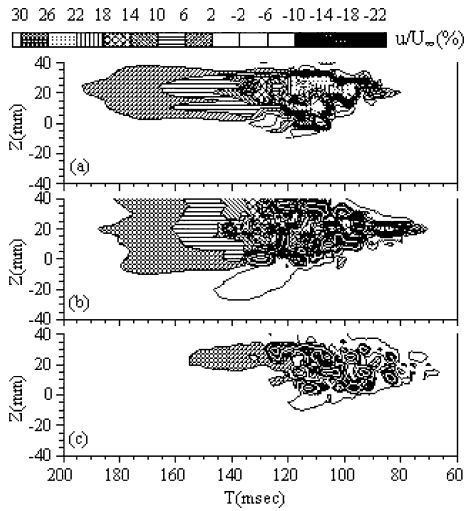


Fig.10 Contours of instantaneous velocity perturbation of single spot in turbulent boundary layer.
 (a) $Y/\delta = 0.2$, (b) $Y/\delta = 0.4$, (c) $Y/\delta = 0.7$ ²⁰⁾.

は光の干渉の問題があり、境界層内部を多点計測することは難しい)熱線の場合、周波数解析や長時間データを計測し、統計処理を行うことが容易であることから、数値解析や PIV によって得られたデータと熱線流速計によって得られたデータを補完することによって、現象をより明らかにすることができる。熱線流速計の利点や欠点を考慮しながらデータを取得することにより新たな知見を得ることが期待できる。

3.3 条件付抽出法

乱流のように一見不規則な変動に見える現象の中に規則性や構造的な存在することが知られており、乱流の研究では、その構造を明らかにすることが重要な課題になっている。条件付き抽出法あるいは位相平均法と呼ばれる統計処理手法は、現象の中に潜む構造を抽出するため、流れ場の周期変動や初期かく乱に見られる周期変動に着目し、周期変動の各位相を基準として(アンサンプル)平均を行い、不規則変動の中から規則構造を抽出する方法である。この方法は熱線流速計に限定した統計処理手法ではないが、乱流の組織構造

が着目された当時、熱線流速計が計測の主流だったこと、前述したように熱線流速計は点計測が主体であったこともあり、その欠点を補うため、熱線流速計での計測例が多い。条件付き抽出法を行うことにより、流れ場の各測定点において、別々の時刻に測定されたデータ群から、特定の位相条件における流れ場全体の構造を抽出することができる。この場合、平均化処理により乱雑成分は取り除かれてしまうが、流れ場全体の構造を支配する大規模組織構造が明らかになる。乱雑成分の特性は乱流強度などの時間平均情報を元に検討し、乱流強度の大小と組織構造との相関関係について調べることにより、乱雑成分の寄与についても明らかにすることができる。Fig.11は円柱後流(レイノルズ数 4×10^4)の流れ場の速度ベクトルを条件付き抽出法により計測した例である⁽⁷⁾。図中の粒子群は数値解析によって得られたトレーサ粒子の分布である。実験によって得られた速度ベクトル場と数値解析による結果を比較することにより数値解析の精度検証に役立っている。

この事例では円柱表面(前方よみ点から60度)に設置した表面圧力センサの信号をリファレンス・シグナルとして位相平均を行い、円柱後流における約600点の測定ポイントのデータからベクトル図を作成した。使用した熱線流速計は後述する渦度プローブであり、主流方向速度成分と鉛直速度成分を同時に計測した。この測定における問題点は一般的な熱線流速計では逆流が検知できないため、円柱直下のデータが取得できない点である。

熱線流速計で逆流を正確に測定する方法としてフライング・ホット・ワイヤ法がある。これは熱線流速計を機械的に一定速度で移動させ、逆流領域においても特定のバイアス速度を与え、熱線に対して、どの方向から流れがくるかを人工的に制御する方法である。測定後にバイアス速度を差し引くことで測定点の流速を検出する。この方法で最も有

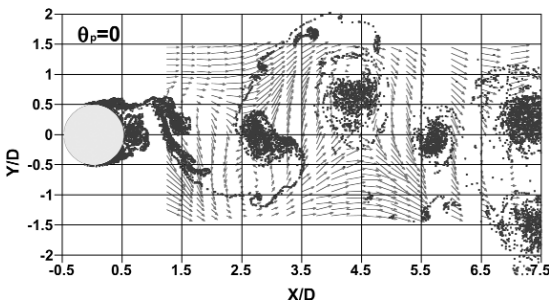


Fig.11 Flow pattern around a circular cylinder at $Re = 4 \times 10^4$: Velocity vectors measured by a conditional sampling method.
: Vorticity distribution calculated by the advanced vortex method.

名な実験にCantwellら⁽²²⁾の円柱後流の測定実験がある。フライング・ホットワイヤを実際に行うかはともかく、熱線流速計の特性を知る上で、一度は目を通したほうがよい論文である。

3.4 多線式流速計

市販されている熱線流速計はIプローブと呼ばれる単線式のもの、Xプローブと呼ばれる2本の熱線をX字型に組み合わせたものが一般的である。Iプローブは流れの主流方向の計測に、Xプローブは主流とそれに直交する成分の計測に用いられる。熱線を3本あるいは4本以上組み合わせると、速度の3成分や渦度を測定するプローブ⁽³⁾もあり、市販されているものもある。校正が大変なこと、熱線の維持管理が大変なので、一般的とは言えないかもしれないが、原理的にはそれほど難しいものではないので、速度の3成分測定などが必要な場合は、これらのプローブを使用するとよい。測定原理や熱線の配置は文献(1)~(3)に詳しく記載されている。

ここでは著者らが開発した4線式の熱線渦度センサの実例を示す⁽⁷⁾。円柱後流や二次元噴流の計測(主流方向をX軸、円柱や噴流のスパン方向をZ軸とし、XとZに直交する軸をY軸とする)では渦度 ω_z の性質が重要となることが多い。そこで熱線流速計を組み合わせると渦度 ω_z の測定を試みる。渦度 ω_z は

$$\omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \Omega_1 + \Omega_2 \dots \dots \dots (7)$$

と表せるので主流方向成分 u のY方向微分とY方向速度成分 v のX方向微分を求めればよい。そこでFig.12(a)に示すように主流方向測定用のI型熱線2本をY軸方向に微小間隔 Δ だけ離して平行に設置し、2本の熱線の出力 u_1, u_2 の差分をとり、これを空間微分 Ω_1 とみなす。

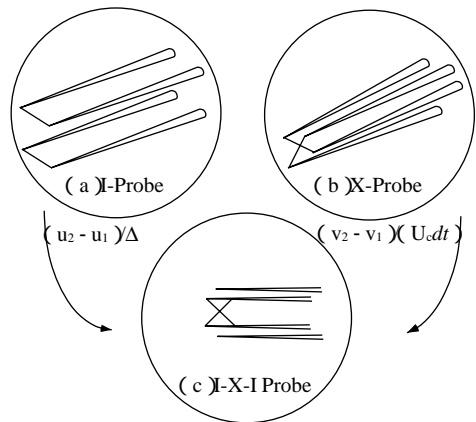


Fig.12 Principle of vorticity measurement by using multi hot-wire probes.

$$\Omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{u_2 - u_1}{\Delta} \dots\dots\dots (8)$$

Y方向の空間微分を行うことはセンサの加工・製造上の問題を除けば、それほど困難ではないが、X方向の空間微分は熱線流速計を用いる場合、根本的な問題となる。すなわち、センサを測定空間内に挿入するため、X軸方向に2本のセンサを配置すると、前方のセンサの後流が流れを乱し、正確な測定が困難になる。この問題は熱線流速計を用いた乱流計測における欠点の1つであり、速度変動の空間相関測定などの障害となっている。熱線流速計を用いた計測において、この問題を回避する方法としては、条件付き抽出法による計測およびテイラーの凍結仮説を用いた空間微分の時間微分への変換があげられる。条件付き抽出法は速度変動の瞬間値の計測には適さないため、ここではテイラーの凍結仮説を用いる。

テイラーの凍結仮説³⁾を用いることにより、流れ方向の微分は時間微分に置き換えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} = -U_c \frac{\partial}{\partial x} \dots\dots\dots (9)$$

ここで U_c は渦の移動速度である。したがって、Fig.12(b)に示すX型熱線流速計を用いて速度成分 v の時系列データを測定することにより、流れ方向の微分を求めることができる。

式(8)および(9)から、2本のI型プローブとX型プローブの4本の熱線をFig.12(c)に示すように組み合わせたI-X-I型熱線渦度プローブを用いて、Z軸周りの渦度 ω_z の測定が可能である。

$$\omega_z = -\frac{1}{U_c} \frac{v_2 - v_1}{dt} = -\frac{u_2 - u_1}{\Delta} \dots\dots\dots (10)$$

Fig.13に実際に作成した渦度プローブを示す。金属細線には直径5 μ mの白金メッキ・タングステン線を使用した。熱線の長さは、平行I型プローブが1mm、X型プローブが1.4mmである。細線径に対して熱線の長さを、それぞれ200倍、280倍とし、熱線からブロングへの熱の流れによる熱線の時

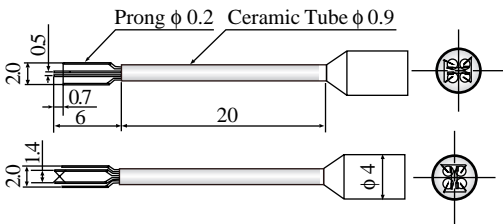


Fig.13 Vorticity probe⁽⁷⁾.

定数の遅れを抑えた。

製作した渦度プローブの性能を評価するため、Fig.14に示す二次元噴流風洞を用いて渦度場の計測を行った。実験

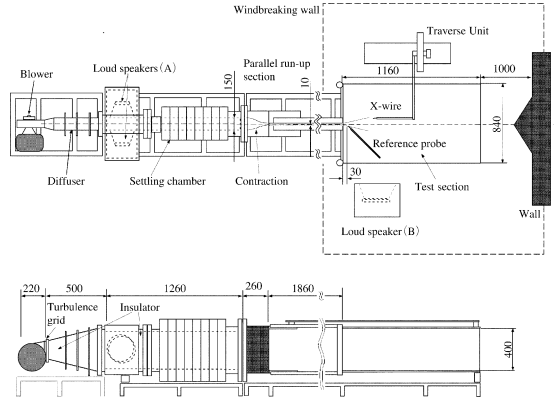


Fig.14 Schematic of two-dimensional wind tunnel for rectangular jet⁽²³⁾.

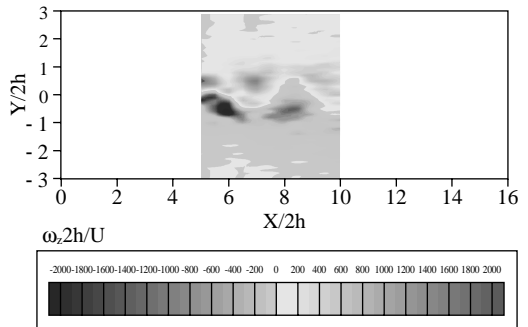


Fig.15 Contour of ensemble-averaged vorticity in two-dimensional rectangular jet (vorticity probe)

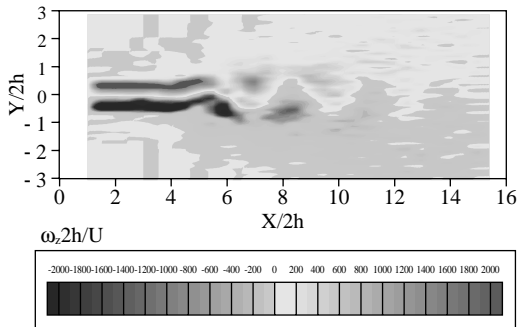


Fig.16 Contour of ensemble-averaged vorticity in two-dimensional rectangular jet(X-probe⁽²³⁾).

条件を安定化させるため、噴流を音波によって励起し、強い非対称配列の渦列を形成させた⁽²³⁾。Fig.15は渦度プローブによる測定結果、Fig.16は比較のために通常のXプローブを用いて条件付き抽出法によって位相平均渦度を求めた結果(測定領域 X軸方向150 mm, Y軸方向60 mm, 測定点145 × 60)である⁽²³⁾。

渦度プローブによる測定結果と条件付き抽出法による結果は全体的によく一致している。ここで、渦の移動速度 U_c は二次元噴流の場合、0.8U程度と言われており、本研究でも $U_c = 0.8U$ として計算した。一方、Fossら⁽²⁴⁾は U_c として測定位置における瞬間流速を用いている。 U_c に瞬間流速を用いるとリアルタイム処理が行えるという利点があるので、測定中に流れ場を監視する場合は、 U_c に瞬間流速を用いて流れの状態を大まかに観察した。渦度プローブによる計測結果と位相平均渦度の計測結果を比較した結果、測定誤差は測定領域全域において10%以内であり、渦度が集中している領域では5%以下であった。 $y/2h = \pm 1$ 上の渦度の測定誤差を下流方向に調べた結果、渦スケールがプローブに比べ大きな $x/2h = 6.5$ 付近では測定誤差が比較的小さくなる。したがって、測定誤差は渦のスケールに依存することがわかる。

テイラーの凍結仮説は基本的にはせん断乱流中において成立しないため、空間微分を時間微分に置き換えること自体に問題があること、渦の移動速度を客観的に決定することが難しいなどの問題がある。しかし、本研究で対象にしている二次元噴流や円柱の後流では、渦度に対するY方向微分の寄与が、X方向微分の寄与に比べ大きいため、テイラーの凍結仮説を用いたために生じる誤差が比較的小さいようである。

条件付き抽出法から求めた渦度との比較結果から、開発した渦度プローブの測定誤差は最大でも10%程度と考えられる。熱線のリニアリティの不確かさに伴う誤差が数%あることを考えれば、テイラーの凍結仮説を用いても、比較的精度の高い計測が可能であることがわかる。平均渦度場の測定精度という点では位相平均法のほうが優れているが、渦度プローブを用いることにより渦度の瞬時値や渦度ベクトルを計測することが可能となる。次節に示す空力音の研究などにおいては渦度の瞬時値が重要となることから、渦度プローブは空力音解析において重要なツールである。

3.5 空力騒音解析への応用

熱線流速計を用いて円柱後流や噴流、境界層などの流れ場の測定例を示してきたが、最後に熱線流速計を用いて空力音源を計測した事例を示す。低マッハ数の流れの中に物体が置かれた場合の空力音の予測手法としてLighthill-Curleの手法が一般に用いられている⁽²⁵⁾が、この手法は空力音が物体表面の圧力変動の時間変化に起因するとしてモデルのため、流れ場と音の関係を明らかにしにくいという問題点がある。そこで、空力音の真の音源である渦度の非定常運動を計

測し、空力音との関係を調べた。Howe⁽²⁶⁾によれば低マッハ数流れの中に円柱がおかれた場合の空力音は以下の式によって表される。

$$P_a(x, t) \approx \frac{-\rho_0 x_i \partial}{4\pi a |x|^2 \partial t} \int_V (\omega \times u)(y, t - |x|/a) \cdot \nabla Y_i dy \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 P_a は音圧、 a は音速、 ω は渦度、 u は速度、 ρ_a は媒質の密度である。また、 Y_i は円柱を横切る非圧縮流れの速度ポテンシャル、

$$Y_i = y_i \left(1 + \frac{d^2}{4\sqrt{y_1^2 + y_2^2}} \right) \quad i=1, 2; Y_3 = y_3, \dots\dots\dots (12)$$

である。

式(11)および式(12)より円柱後流の渦度分布から空力音源の分布を計算することが可能である。

Fig.17に渦度分布から得られた音源分布を示す⁽²⁷⁾。 $X/D = 1.5, Y/D = \pm 0.4$ 付近に強い音源が観察される。この図から円柱の直後のはく離せん断層自体が音源である可能性は小さい。これは、はく離せん断層内の渦度の集中領域では、渦のスケールが小さく、位相平均処理をした場合、渦層はほぼ定常な状態とみなされるため、時間微分項の影響により、渦層から発生する空力音の寄与が小さいためと考えられる。このことから、大規模渦からの音の放射は、はく離せん断層の強い渦層が不安定になり、カルマン渦として巻き上がるにより発生すると考えられる。測定結果によれば円柱から発生する空力音のほとんど(約80%)は、はく離せん断層が巻き上がりカルマン渦を形成する領域において発生している⁽⁷⁾。したがって、円柱から発生する空力音を低減するには、はく離せん断層の強度を弱めること、カルマン

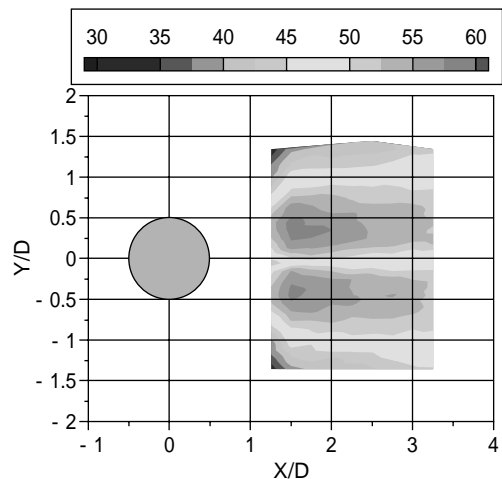


Fig.17 Distribution of dipole sound source radiated from a circular cylinder.

渦の形成位置を下流側にすることが効果的であると考えられる。

渦度と空力音の直接関連測定による音源分布測定結果もほぼ同じ結果を示すことを確認している⁷⁾。

4. 結 言

熱線流速計を使った計測の問題点や測定ノウハウを示すとともに、熱線流速計を用いた乱流計測や空力音解析の一例を紹介した。著者は主に乱流の非定常計測を中心に研究を進めてきたが、近年では数値解析による研究にも取り組んでいる。数値解析では流れ場の空間構造や瞬時値を得ることが容易であるが、スペクトル解析や統計处理的(特に長時間のデータ処理)が難しい。一方、熱線流速計ではこれらの処理は比較的容易である。また、空間構造を捉えることが難しいとしても、ある特定の点におけるデータの信頼性や流れ場の中に潜む不思議な(予想もしない)現象を発見するといった面では熱線流速計のような古典的な計測ツールが活躍する場面がまだまだ多いように思われる。特に実験流体力学の最も重要な点は現象の発見にあると著者は考えている。実験も数値解析も乱流現象を理解するための手段であって、熱線流速計もそのための1つのツールである。各種の実験方法・数値解析手法には各々長所もあれば短所もある。それぞれの利点を活かすことで新たな現象を発見することが大切である。本稿が若い研究者が熱線流速計を使うきっかけや利用の際の参考になれば幸いである。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、豊橋技術科学大学 蒔田秀治教授、同関下信正博士に熱線流速計の写真などの資料を提供していただいた。また、航空技術研究所西沢 啓博士には境界層測定に関する資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 笠木他編集, 流体実験ハンドブック 第5章, 朝倉書店 (1997)
- (2) J. O. Hinze, Turbulence, McGraw-Hill (1975)
- (3) H. H. Bruun, Hot wire anemometry, Oxford Univ. Press (1995)
- (4) D. C. Collis and M. J. Williams, *J. Fluid Mech.*, 6 p.357

- (1959)
- (5) L. V. King, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 214A, p.373 (1914)
- (6) 大田黒・飯田 第22回「境界層遷移の解明と制御」研究会(航技研SP37)
- (7) A. Iida, T. Otaguro, C. Kato and S. Shimode, JSME International Journal B, Vol.42, No.4, pp.596-604 (1999)
- (8) A. Mizuno and T. Ito, Proc. Fourth Asian Congress of Fluid Mechanics, VI-G5 (1989)
- (9) 蒔田, 日本機械学会講習会, 流れの計測技術の基礎と応用(930-74) pp.21-30 (1993)
- (10) H. H. Bruun, *DISA Information* 22 p.5 (1975)
- (11) 蒔田他2名, 機論B 58-545, p.90 (1992)
- (12) 長野, 田川, 機論B 54-503, p.1642 (1988)
- (13) 蒔田, 飯田, 機論B 56-522, p.342 (1990)
- (14) S. Kida and Y. Murakami, *Phys. Fluids*, 30-7 p.203 (1987)
- (15) R. J. Driscoll and L. A. Kennedy, *Phys. Fluids*, 26-5, p.1228 (1983)
- (16) Y. H. Pao, *Phys. Fluids*, 8 p.1063 (1965)
- (17) W. Z. Heisenberg, *Physik*, 124 p.628 (1948)
- (18) 蒔田, 西沢, 機論B 64-627, p.3682 (1998)
- (19) 蒔田, 西沢, 機論B 65-630, p.573 (1999)
- (20) 蒔田, 西沢, 機論B 65-632, p.1283 (1998)
- (21) H. Makita and K. Nishizawa, *J. Turbulence* 2 p.012 (2001)
- (22) B. Cantwell and D. Coles, *J. Fluid Mech.* 136 pp.321-374 (1983)
- (23) 蒔田, 大谷, 石角, 機論B 54-504 pp.1938-1945 (1987)
- (24) J. F. Foss and J. M. Wallace, *Advance in Fluid Mechanics Measurements.*, Springer pp.263-321 (1989)
- (25) A. Iida, T. Otaguro, C. Kato and H. Fujita, Proc. FLU-COME'97 Vol.1, pp.126-131 (1997)
- (26) M. S. Howe, "Acoustics of fluid-structure interactions," Cambridge University Press (1998)
- (27) A. Iida, A. Mizuno and C. Kato, 8th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, AIAA 2002-2572.

執筆紹介



飯田 明由 Akiyoshi IIDA
工学院大学機械工学科助教授
1989年豊橋技術科学大学修士了。97年学位取得(博士(工学))。89年より、日立製作所機械研究所において新幹線の空力騒音低減に関する研究に従事し、2001年4月より現職。熱線流速計を用いた乱流計測・空力音解析により日本機械学会論文賞(1989, 1998)受賞。