論文

風洞実験測定技術

Measuring Techniques in the Wind Tunnel Experiments

福西 祐*

Yu FUKUNISHI

SUMMARY

Some new techniques for the measurement in wind tunnels are presented. Hand-made micro-computer systems are used in most of our experimental works. They are used both as a data processor and an apparatus controller. We introduce how they are used in our experiments for the conditional sampling. As an apparatus controller, they are used in flow visualization experiments. They control both smoke and flood light. A multi-probe anemometer with 24 hotwires is also explained.

1. 序

私どもの佐藤研究室では平板上の乱流境界層や剥離流、噴流等の乱流の研究を風洞実験によって進めています。測定方法としては熱線風速計による風速変動の測定とスモークワイヤによって流れを可視化する方法を主に用いています。これらの測定の為に最近我々が開発し利用している装置をいくつか御紹介します。

近年のエレクトロニクスの発達のおかげで従来は困難であった測定が次々と可能になってきましたが、特に最近めざましく発達してきたマイクロプロセッサは非常に利用価値の大きい道具です。我々は熱線風速計の出力する流速のデータを条件付抽出法等によって処理するといった使い方をしていますが、この様な使い方をする為には10k

Hz以上の高速A/D変換器を持ち、そのデータをオンラインで処理できるだけの性能が計算機に要求されます。以前は我々の研究室でもPDP-11クラスのミニコンを使用していましたが、何しろ1台を大勢で使っていたので実験装置と接続しオンライン処理で長時間占有してしまうわけにはななかいきませんでした。又特殊な使い方をしたい様な場合にも、その目的の為に本体を改造したりするのは困難で、周辺装置もメーカーから購入せざるを得ないものが多い為に高くついてしまいます。そこでマイコンを利用して安価なデータ処理システムを製作し、ミニコンの奪い合いを避ける事を考えました。初期のマイクロプロセッサは処理速度が遅く我々の実験に用いるのには適していませんでしたが、数年前に16ビットのマイ

* 東京大学・工学部・境界領域研究施設

Faculty of Engineering, the University of Tokyo

(昭和58年6月30日受理)

クロプロセッサが出回る様になったのでさっそくチップを購入し、データ処理システムを製作しました。CPUにZilog社の16ビットのZ-8002を用い、我々独自のスクリーンエディタやコンパイラを搭載してプログラムの製作や修正がパソコン等よりも短時間で簡単に行なえる様になっています。設計製作に数人が数カ月かかりきりになりましたが、非常に使いやすく性能的にも我々のミニコン以上のものが出来上がりました。このマイコンシステムは内部に64 K Byte以上のメモリーやROM書き込み器等を持ち、外部にはA/D変換器、D/A変換器、熱線風速計プローブのトラバース装置、デジタルXYプロッター、8 inch フロッピーディスク、プリンター、デジタイザー等が接続しており、単独ではほとんどのデータ処理ができます。自作した装置はなんといっても中身がよくわかっているの、色々な使用法に合わせて回路の一部分を変更できたり融通がきく点が便利です。我々はこのマイコンシステムを数台製作し、1つの実験装置に1台ずつ割り当てています。そしてそれぞれに実験の目的や使い方に合わせた改造が施されています。現在我々が使っている測定装置の多くはこのマイコンシステムを応用したものとになっています。

測定装置の使用目的を知ってもらう為に我々の研究の内容を簡単に紹介します。たとえば我々の研究対象の1つである乱流境界層を例にとると、我々は平板上に発達した乱流境界層中に見られる秩序運動とよばれる現象に興味を持っています。これは1967年にklineら¹⁾によって発見されたもので、彼らはそれまでただ無秩序に乱れていると考えられていた乱流境界層底層の流れを観察しているうち、それが一定のパターンを持って乱れる事に気づきました。それは壁の近くの速度の遅い流体の塊が所々で壁から離れて行く現象でバースト現象と呼ばれています。その後の研究の結果、乱流境界層底層における乱流エネルギーの生成が

殆どバースト現象に伴って起きている事がわかり²⁾、非常に重要な現象であるとの認識から数多くの研究が進められています。現在までの所、この現象の研究には2通りのアプローチがなされています。1つは風洞での煙線可視化法または水槽での水素気泡法など流れを可視化して直接観察する方法による研究、もう1つは熱線風速計やレーザー流速計を用いて得られた流速のデータを計算機を用いて条件付抽出法や時空間相関等の統計処理を施して調べる方法による研究です。我々の研究は主として後者の流速データの処理による方法によっています。

2. 乱流境界層中の秩序運動を制御する実験

Fig. 1 バースト現象制御の為の実験装置
Arrangement for burst control

我々がマイコンシステムを用いて行なっている実験の例として、前述しました乱流境界層のバースト現象を壁から空気を吸い込む方法で制御する実験を紹介します。Fig. 1の様に壁の中央部50x50 mmの範囲に直径1 mmの穴を5 mm間隔で千鳥状に開け、その裏側に直径250 mmのスピーカーを備え付けてあります。スピーカーを動かすと壁の穴を通して空気を吸い込んだり吹き出したりできる

しかけです。穴の部分の500mm上流にはバーストを検出する為の熱線風速計プローブを置き、又穴部の250mm下流には主流方向の速度Uと壁に垂直方向の速度Vが測定できるX型の熱線風速計プローブが置いてあります。この2本のプローブをそれぞれ検出用プローブ、サンプル用プローブと呼ぶ事にします。検出用プローブ及びサンプル用プローブからの信号はA/D変換されてマイコンシステムに取り込まれます。又スピーカーの駆動、サンプル用プローブをY、Z方向に移動させるトラバース装置もマイコンによってコントロールされます。熱線風速計の出力信号から200Hz以上の高周波成分を除去したのを見るとバースト現象は風速がゆっくりと減少していき急に回復するパターンの波形をしている事が知られています。そこでマイコンシステムは検出用プローブの出力信号を常に監視する事によりバースト現象が通過した事を検出できるわけです。バースト現象は境界層厚さの20倍以上の間は流れに乗って移動していく事が知られています。この場合境界層は56mmの厚さなので1m以上は流れ方向に移動していくわけです。そこで検出用プローブが検出したバースト現象がいつ穴部の所に到達するかおよそ見積もる事ができます。マイコンからD/A変換器、アンプを通してスピーカーを駆動して空気を壁の穴から吸い込むわけですが、スピーカーの特性等の影響でマイコンからの出力信号通りには空気を吸い込んでくれませんので(Fig. 2)、マイコン側で出力する信号を工夫しています。穴部を通過した後のバースト現象がサンプル用プローブによって捕えられるわけですが、何しろ乱流の中で起きる現象なので一つ一つのバースト現象がすべて同じ様な形をしているわけではもちろんありません。又、検出用プローブはバースト現象の中心を必ずしも捕えてはいません。そこで検出-吸い込み-サンプルという過程を200回くり返しながらサンプルした波形のアンサンブル平均を取ります。これには約10分の時間がかかりますが、これで得られるのはたった1点のデータです。バースト現象の全体像を得る為にはサンプル用プローブの位置をY、Z方向に次々と変えながら同じ事をくり返していかなければなりません。この間中計算機は常にオンラインで動いている必要があるわけですから、我々がマイコンシステムを製作した理由がおわかりになると思います。なお計測をいったん開始するとすべての点での測定が終わるまでの6時間余りの間はマイコンシステムがすべてやってくれるので我々は時々熱線が切れていないか調べていけばよい様になっています。結果の図表化もこのシステムとデジタルXYプロッターを組み合わせで行ないます。この実験で得られた結果をFig. 3~6に示します。Fig. 3が吸い込みのない時の乱れの強さの分布図、Fig. 4が吸い込みをした時の乱れの強さ、Fig. 5, Fig. 6がそれぞれ吸い込みのない時とある時のレイノルズ応力の分布です。吸い込みを行なう事によりバースト現象に伴う乱れの領域が小さくなっている事がわかります。

Fig. 2 スピーカーの応答
Speaker response

ースト現象がいつ穴部の所に到達するかおよそ見積もる事ができます。マイコンからD/A変換器、アンプを通してスピーカーを駆動して空気を壁の穴から吸い込むわけですが、スピーカーの特性等の影響でマイコンからの出力信号通りには空気を吸い込んでくれませんので(Fig. 2)、マイコン側で出力する信号を工夫しています。穴部を通過した後のバースト現象がサンプル用プローブによって捕えられるわけですが、何しろ乱流の中で起きる現象なので一つ一つのバースト現象がすべて同じ様な形をしているわけではもちろんありません。又、検出用プローブはバースト現象の中心を必ずしも捕えてはいません。そこで検出-吸い込み-サンプルという過程を200回くり返しながらサンプルした波形のアンサンブル平均を取ります。これには約10分の時間がかかりますが、これで得られるのはたった1点のデータです。バースト現象の全体像を得る為にはサンプル用プローブの位置をY、Z方向に次々と変えながら同じ事をくり返していかなければなりません。この間中計算機は常にオンラインで動いている必要があるわけですから、我々がマイコンシステムを製作した理由がおわかりになると思います。なお計測をいったん開始するとすべての点での測定が終わるまでの6時間余りの間はマイコンシステムがすべてやってくれるので我々は時々熱線が切れていないか調べていけばよい様になっています。結果の図表化もこのシステムとデジタルXYプロッターを組み合わせで行ないます。この実験で得られた結果をFig. 3~6に示します。Fig. 3が吸い込みのない時の乱れの強さの分布図、Fig. 4が吸い込みをした時の乱れの強さ、Fig. 5, Fig. 6がそれぞれ吸い込みのない時とある時のレイノルズ応力の分布です。吸い込みを行なう事によりバースト現象に伴う乱れの領域が小さくなっている事がわかります。

Fig.3 パースト現象に伴う乱れ, □平均より大 ◇平均より小
Turbulence intensity

Fig.4 吸い込み後の乱れの強さ
Turbulence intensity after suction

Fig.5 レイノルズ応力
Reynolds stress

Fig.6 吸い込み後のレイノルズ応力
Reynolds stress after suction

3. 煙線可視化装置

流れの可視化は広い流れ場が一度に捕えられる為の場合によっては非常に便利で有効な研究手段です。我々は空気の流れを扱っているのでスモークワイヤによる可視化をしますが、研究の性質上ただ漠然と写真を取っても意味がありませんので

普通は熱線風速計と組み合わせて使います。具体的には熱線風速計によって流れの中から目的とする速度変動のパターンを見つけ出し、それをスモークワイヤで可視化するという使い方です。我々の場合可視化実験を2通りの目的で使います。1つは熱線風速計と条件付抽出法による実験をする前に現象のおおよその見当を付ける事です。何と言っても可視化をすると広範な流れ場の様子が一度にわかりますので、この目的には非常に便利です。この様な使い方の場合、写真を発表する必要がないのでテレビカメラで撮りビデオテープに録画しています。画質は写真に較べ落ちますが見当を付けるだけの目的には十分です。可視化法の2つ目の使い方は条件付抽出法によって得られた結果の検証です。条件付抽出しアンサンブル平均を取る方法は非常に有効なのですが、時として落とし穴があります。³⁾ 例えば検出したものの中に複数の別々の現象が含まれている場合にもそれらすべてをいっしょにアンサンブル平均してしまう為、あたかもそれが一つの現象であるかのように見えてしまうおかしな結果が得られる場合がある事です。その簡単な例としてFig.7をあげます。

Fig.7 条件付抽出の問題点の例
An example of trouble in conditional sampling

Fig.7の左の所で渦を検出し、その渦がその後どの様に移動するかを条件付抽出法によって求めたとします。ところが渦の一部は初め上に上がってから下がり、一部は逆に初め下がってから上がる様な道筋をたどる様なものであったとすると、これを条件付抽出アンサンブル平均して得られる結果はあたかも一つの渦が上下に分裂し再び合体したかの様に見えてしまいます。これは検出方法が良くなかった為に起きる失敗の例ですが未知の現象の場合どの様な検出方法が良いのか知るよしもない事が多いわけです。そこで可視化によって平均像と一つ一つの現象を見くらべてみると、この様な誤まった解釈を防げる場合もあるわけです。

スモークワイヤーによる可視化の方法は2通りに分けられます。一つはスモークワイヤーから長く尾を引く煙を出すやり方で、もう一つは短い間だけ煙を出し線状の煙を作るやり方です。長く尾を引く煙による写真は見ばえが良く広範な流れ場の写真が取れるのでそれなりにいいのですが、そこに写っているのが流跡線であって流線ではない事に十分注意する必要があります。特に煙が渦巻き状に見えるからと言って渦がそこに存在すると考えてしまう誤ちはおかしがちで危険です。長く尾を引く煙を出す為にはスモークワイヤーに100 μ m程度以上の太めの白金線を使い、交流で加熱すると簡単です。線状の短い煙を出す場合は特に発煙してからフラッシュが発光するまでの時間を短くすれば白金線と煙との距離がほぼ流速を反映したものになっているので、瞬間的な流速分布が求められます。この場合広範な流れ場の情報が必要な時はスモークワイヤーを何本も張る事になります。この様な線状の煙を出す方法は、大きなコンデンサーに電荷をためておきそれを直流として白金線に流します。

我々は煙線可視化装置をマイコンでコントロールしたいと考え、その装置を製作しました。⁴⁾電源は20000 μ Fのコンデンサーを130V程度まで

充電して置いたものを用います。連続的に電流を流す場合は100V3A程度まで電流が取れます。この電源とスモークワイヤーとの間の回路をトランジスターで制御するわけですが、この部分が2段になっていて一つが予熱の為に制限された電流だけをスモークワイヤーに流す回路、もう一つが全電流を流してしまう回路です。さらにこれとは別にフラッシュの発光を制御する回路もあります。これらはすべてマイコンからの信号で制御されますので色々な煙を発生させる事が簡単にできます。スモークワイヤーとして直径50 μ m、長さ30cmの白金線を用い、それに流動パラフィンを塗ります。流動パラフィンの代わりにベビーオイルや機械油も良い様です。スモークワイヤーに電流を流しても流動パラフィンの温度が上がるのに時間がかかるので煙は初め薄くしだいに濃くなります。これを防ぐ為にはワイヤーに流す電流を増やせば良いわけですが、むやみに電流を増やすとワイヤーが熱膨張して振動したり切れたりする事もあります。そこであらかじめ予熱回路を使ってスモークワイヤーの温度を発煙寸前にまで上げて置く様にすると、少ない電流でもきれいに発煙させる事ができます。しかし、あまり早くから予熱すると流動パラフィンがスモークワイヤー上で粒状になり、スモークワイヤー上の位置によって煙に濃淡が出て縞状の煙になってしまいます。短い時間発煙させて線状の煙が欲しい場合これは好ましくありませんが、逆に長く尾を引く様な煙を発生させる時にはこれを利用すると流跡線がはっきりして良い結果が得られます。

我々はこの装置を用いてバースト現象を可視化する実験を行ないました。我々は熱線風速計を用いた実験の結果、条件付抽出アンサンブル平均によって得られた速度変動成分u, v, wのベクトル図の中に一对の渦状の流れを見つけました。この事からバースト現象是一对の渦を伴っている可能性が出てきました。しかし平均像に渦状の流れが

現われたからといって個々のバースト現象がその様になっているとは限りません。それは検出に前述したような問題があるかも知れないからです。そこでこの点を確認する為可視化実験を行ないました。我々はバースト現象の中に境界層全体にわたる様な大規模のものが存在している事を以前の実験で発見していましたので、⁵⁾この様な大規模

Fig. 8 可視化実験の装置配置図
Arrangement for Smokewire visualization

Fig. 9 スモークワイヤのタイムチャート
Time-chart of smoke-wire apparatus

なものを可視化する事にしました。Fig. 8は実験装置の配置図です。上流にバースト現象検出用の熱線風速計ブローブが置いてあり、スモークワイヤは100 mm下流にあります。Fig. 9が実験のタイムチャートです。熱線風速計ブローブが速度の低い塊としてバーストを検出すると10 ms 後スモークワイヤの予熱が始まり、さらに5 ms 後1.5 msの間約5 Aの電流がスモークワイヤに通電され1本目の煙が出ます。さらに10 ms ごとに1.5

msずつ通電されて2本目、3本目の煙が出て、最後の通電の8.5 ms後にフラッシュが光ります。もちろんこの時間間隔はマイコン側のプログラムを変えるだけで簡単に設定を変えられます。Photo. 1, 2がスモークワイヤを $Y = 45 \text{ mm}$ に置いた時の写真で、Photo. 3, 4が $Y = 24 \text{ mm}$ の写真です。これらを見ると大体予想された所に一對の渦らしいものが写っており、熱線風速計で測定した結果と一致しているのでこの渦対の存在をどうやら信用しても良いだろうと言う結論が出ました。

Photo. 1, 2 バーストの渦対の写真 $Y = 45 \text{ mm}$
Vortex pair of burst $Y = 45 \text{ mm}$

Photo.3,4 バーストの渦対の写真 $Y = 24\text{ mm}$
Vortex pair of burst $Y = 24\text{ mm}$

4. マルチプローブ

熱線風速計と組み合わせた煙線可視化法による研究は広範な場の情報が得られる点では良いのですが、欠点もいくつかあります。

その一つは写真の解釈に主観が入りやすい事です。熱線風速計で得られるデータに較べると一目瞭然でわかりやすいのですが、それだけに落とし穴にひっかかりやすくなります。普通何十枚もの写真を撮りその中から良いものを2, 3枚選んで発表しますが、この選び出す過程で自分に都合の良いものを無意識に選んでしまう危険があります。特に乱流を可視化した写真だと数多く撮ったものの中には自分にとって都合の良さそうな所に渦が

見えているものが必ず何枚か含まれています。別の欠点としては統計量を出にくい点があげられます。例えばバースト現象の写真を撮影すると瞬間的な風速分布が得られるわけですが、その風速分布のデータを数多く集めてアンサンブル平均を求めるのはかなり手間のかかる作業になります。写真を撮る代わりにビデオテープに撮り、それを計算機で画像処理して統計量を出せば処理は簡単になりますが、統計量を出せる程の回数撮影をくり返す手間は変わりません。又、煙の位置から風速を読み取る際にかなりの誤差が見込まれますので精度はあまり良くありません。可視化実験の結果から乱れの強さや微分量等の定量的な情報を得るのは多くの場合困難です。

広範な場の情報を必要としていしかも統計量も求めたいとなると熱線風速計を多数同時に流れの中に置いた実験が望まれます。

そこでその試みとしてFig.10のプローブを作りました。⁶⁾

先端を尖らせた直径0.6mmの鋼鉄の支柱を5mmの間隔で平面上に25本平行に並べ、その先端にウォーラストン線をわたして半田付けし、支柱の中間の部分を約1mmずつ溶解して直径 $5\mu\text{m}$ の白金ロジウムが露出させました。これで24本の熱線風速計プローブが5mm間隔で並んでいるのと等価です。普通は1本の熱線に2本支柱があります

Fig.10 マルチプローブ
"Multi-probe"

Fig. 11 配線図
Multi-probe circuit

が、プローブをこの様にする事で支柱の本数を減らし、流れへの影響を少しでも減らそうとしているわけです。しかしこのプローブの形では定温度型の熱線風速計として使う事はできません。そこでこのプローブをFig. 11の様に配線しました。回路の両端には常に一定の電圧がかかっています。22Ωの固定抵抗の両端の電位差 ΔE_{01} よりその時の電流値Iが求められます。風速と電流によって熱線の温度すなわち抵抗値が異なりますから、あらかじめそれぞれの熱線について電位差 ΔE と電流値Iと風速Uとの関係を予備実験によって求め、マイコンシステムにデータとして記憶させて置きます。そうすれば電位差 $\Delta E_{01}, \Delta E_1, \dots, \Delta E_{24}$ を測定する事によって簡単に $U_1, \dots, U_{24}$ が求められます。このマルチプローブからの信号をマイコンシステムに取り込む為Fig. 12の様な構成のシステムを作りました。マルチプローブからの信号は差動増幅器を通りサンプル&ホールドで全チャンネル同時にラッチされます。そしてマ

Fig. 12 データ収集装置のブロック図
Block diagram of the data acquisition system

マルチプレクサーで切り換えながら順次 A/D 変換されマイコンに読み込まれます。この作業の速度を上げる為にマルチプレクサーと A/D 変換器は 2 組同時に働き、1 ms ごとに全チャンネルの読み込みができるだけの速度を持っています。

このマルチプローブを乱流境界層の外層の $Y = 0.86\delta$ の位置に置き、データを取ってみました。このあたりは乱流部と非乱流部が入り混じって存在している間欠領域になっています。この領域では乱流バルジと呼ばれる乱流の塊が所々で外の非乱流部の中へと突き出している為に流れが間欠的に乱流になったり非乱流になったりしています。乱流バルジの中は回りの非乱流の流れと比較して速度が低い事が知られており、⁷⁾この事を利用して乱流バルジを検出する事ができます。マルチプローブの真中付近の熱線が乱流バルジ検出用に用いました。そしてそこでの流速が平均流速の 90% 以下まで変動した瞬間 ($T=0$) の前後の $Y=0.86\delta$ の面内の速度場の様子が Fig. 13, 14 です。

Taylor の凍結仮説により、この図を流れが左から右へ向かう XY 平面内の流れと見たてる事もできます。数字は平均流速からの変動分をパーセントで表わしたもので、正負とも 10% 以上のものは 9% に置き換えてあります。中央の丸印が検出点を表わしています。Fig. 13 ではほぼ乱流バルジの中央で検出できていますが、Fig. 14 は端の方を検出してしまっています。この様にして検出されたものを 50 集めてそのアンサンブル平均をとると Fig. 15 の様な図が得られます。Fig. 15 だけ見れば乱流バルジの中央をうまく検出できている様に見えますが、平均しているものの中には Fig. 14 の様なものも含まれている事に注意しなければなりません。

Fig. 13 マルチプローブでとらえた乱流バルジ
Turbulent bulge

Fig. 14 マルチプローブでとらえた乱流バルジ
Turbulent bulge

Fig. 15 乱流バルジのアンサンブル平均
Ensemble average of turbulent bulges

5. あとがき

我々の行なっている実験とその実験装置について紹介しました。我々の計算機が自作である点を大いに利用して、製作した測定装置に合わせてインターフェイスや計算機本体までも改造しているので、計算機や測定装置の性能をフルに導き出したデータ処理システムになっています。我々の研究は条件付抽出法を用いて乱流中からあるパターンを持った秩序運動を見つけ出してそれを調べるのが主題であり、可視化等はそれを確認する為の補助的な手段です。しかしながらそれは重要な手続きでおろそかにして置くととんでもない失敗に繋がりがかねません。マルチプローブは両方の機能を兼ねていて非常に便利なものなのですが、白金抵抗線が切れやすい上にプローブに白金線を張るのに熟練が必要な点に難があります。もちろんUだけでなくV, Wを測定しなければならない時には使用できません。簡単な紹介になりましたが、これらの測定器が何らかの参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. & Runstadler, P. W.
The structure of turbulent boundary layer
J. Fluid Mech. vol 30, p 741-773
(1967)
- 2) Kim, H. T., Kline, S. J. & Reynolds, W. C.
The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer
J. Fluid Mech. vol 50, p 133-1600
(1971)
- 3) 福西 祐
条件付抽出の問題点
特定研究「乱流現象の解明と制御」研究成果報告集 p 25 (1981)

- 4) 福西 祐, 佐藤 浩

乱流境界層中の秩序運動の空間的構造
第14回乱流シンポジウム研究成果報告集
p 74 (1982)

- 5) Fukunishi, Y & Takagi, S

The relation between bursts and intermittent region in the turbulent boundary layer,
Proc. First Asian congress of fluid mechanics, Indian Institute of Science, Bangalore, A15 (1980)

- 6) 福西 祐

乱流境界層中の秩序運動検出法の検討
特定研究「乱流現象の解明と制御」研究成果報告集 p 62 (1982)

- 7) Kaplan, R. E. & Laufer, J.

Proc. 12th Int. Cong. Appl. Mech.,
Stanford Univ. Springer p 236 (1969)