

多チャンネル定温度型熱線流速計の試作

A Manufacture of Multi-channel Constant-temperature Hot-wire Anemometers

孟 岩, 福西 祐, 日野幹雄

By Yan MENG, Yu FUKUNISHI, Mikio HINO

1. 序 論

流れの速度の計測は河川工学, 海岸工学, 環境工学の研究にとって欠かせない最も重要なものの一つであり, ときには流速測定の可否が現象の解明を大きく左右することもある。大気の接地境界層中の大規模渦構造, 洪水時河川の中のボイル, 海岸近くの砕波帯中の砂の巻上がりなどはその代表的な例であり, これらの現象の解明が重要であることは言うまでもない。しかし, このような現地スケールの流れの現象は殆ど乱流となっており, 統計的平均流速分布のみでは現象の解明は不十分で, 流れ場全体の瞬間像を知る必要がある。それには, 一本のプローブを順次移動して, 測定空間内のすべての点の速度を繰り返し測定する従来の計測方法が適用できなくなる。現地だけではなく, 室内でも同じで, 流れが乱流になると, その瞬間的な流速場は繰り返し測定では得られなくなり, そのため, 乱流境界層の中に存在する組織的構造の瞬間像を実験的に把握するのはきわめて困難である。乱流場の瞬間像を捉えるには多点で同時に流速測定ができるシステムを開発する必要がある。

流れの速度を測る装置として, 現在よく用いられているものは, 速度の2乗が圧力に比例することを利用してピトー管がある。しかし, この方法によって求めた流速は1分間あるいは10分間の平均流速であり, 流速が時々刻々変化する場合に, この方法ではその変化に追従できない。乱流の流れ場の瞬間像を調べるには使えない。このような場合には熱線流速計やレーザー・ドップラー流速計のように速度変動の測定できる計測器を用いる必要がある。最近, 電磁流速計, 超音波流速計の性能がかなり良くなり, 現地観測によく使用されるようになった。しかし, このような速度変動が測定できる市販の計測器は, いずれも高価なもので, 予算の少ない大学の研究室はこのような100万円以上もする装置を1台以上購入することはかなり困難である。多点同時乱流計測システムを開発するために, まず, 少ない予算で乱れの測定できる多チャンネル流速計を造らなければならない。そこで, 本研究では, 比較的製作しやすい定温度型熱線流速計を開発し, 少ない予算で24チャンネルの熱線流速計を造った(文献1)。その内容をこの報文にまとめた。

特に, この報文では大学の工学基礎で学ぶ程度の電気の知識しか持っていない者や電気回路製作について全く初心者である人でも定温度型熱線流速計を作れるように, 熱線流速計の原理から電気回路の説明・製作・チェックの仕方, また, 熱線プローブの作り方, 熱線流速計のキャリブレーションまで詳しく

く解説した。これらの内容を理解し、製作の工程に従えば、市販の高価な2成分熱線流速計が数十分の一ないし百分の一予算で、しかも1週間以内に造ることができる。また、これらの知識とノウハウを生かせば、流速計だけではなく、他の測定装置の試作にも応用できる。

2. 定温度型熱線流速計の原理

金属は、一般に温度が高くなると抵抗が大きくなる性質がある。この性質を使って流れの速度を測る装置が熱線流速計であり、図1はその概念図を示している。細いタングステン線が電流(I)により加熱され、また、流れ(U)により冷却される。その結果、タングステン線の温度つまり、タングステン線の抵抗が流速 U の変化に伴い変化する。この変化を検出すれば、流速を測ることができる。

定温度型とは熱線の温度を一定にする、つまり、熱線の抵抗を一定にする方式である。熱線の温度は、一般に電流による発熱量と流れによる放熱量とがつり合う様な温度となる。今、流れの中に置いた熱線がある流速で平衡状態にあったとする。この状態から流速が少し増加すると、熱線から失われる熱量は多くなり、熱線の温度が低下し熱線の抵抗は小さくなる。この抵抗の変化を直ちに検出して、電流を適当に増やせば発熱量が多くなり、温度が上がって抵抗を元と同じ値に保つことができる。逆に流速が減少する場合は、温度が上がって抵抗は大きくなるから、電流を適当に減らせば抵抗を一定に保つことができる。この際、抵抗のわずかな変化を検出して、それに応じて電流を加減する動作は、流速の変化以上に素早く行われなければならない。さもないと、熱線の抵抗が実際に変化してしまい、定温度法は実現できなくなってしまう。このような装置を実現するには、熱線を一辺に持つホイートストーン・ブリッジと差動増幅器を組み合わせることによって可能である。その仕組みは次の章に詳しく説明する。

今、熱線の温度を T_w 、熱線の抵抗を R_w とすると、図2に示すような直線関係つまり、

$$R_w = R_a \{1 + \alpha(T_w - T_a)\} \quad (1)$$

にある。ここに、タングステン線の温度係数 α は $4.5 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ である。流れ場の中に置かれた熱線に電流 I_L を流し、ジュール熱 $R_w I_L^2$ と流れによる放熱量が、平衡状態を保っているとすると、

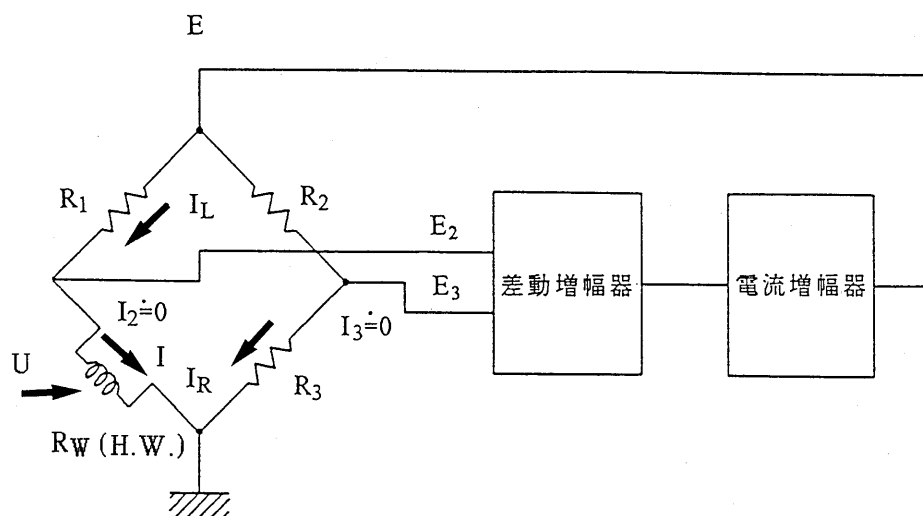


図1 熱線流速計の概念図

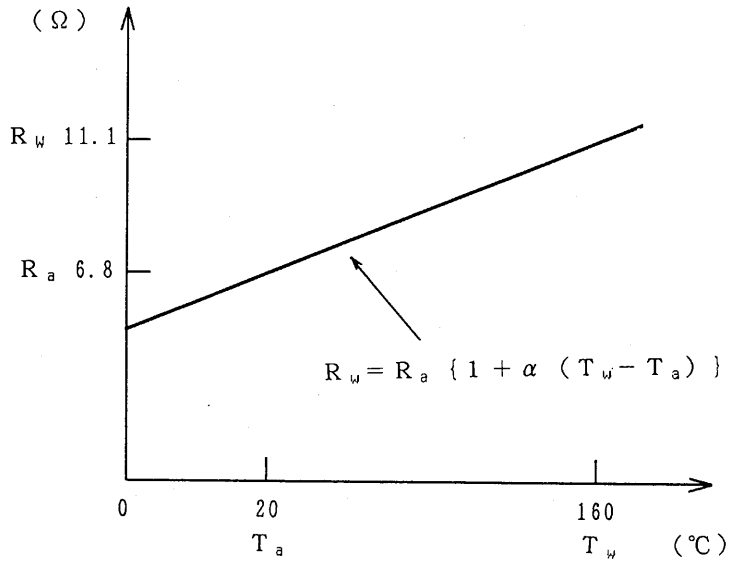


図2 温度による熱線の抵抗値の変化

$$I_L^2 R_w = (B\sqrt{U} + C)(T_w - T_a) \quad (2)$$

の関係が成り立つ。この関係は、1914年に L.V. King によって見い出され、King の法則とも言われる。ここで B と C は熱線と流れの性質等によって決まる定数である。

(1)と(2)式から $(T_w - T_a)$ の項を消去すると、

$$I_L^2 = \frac{1}{(\alpha R_a)} (B\sqrt{U} + C)(R_w - R_a) \quad (3)$$

となる。熱線の両端間の電圧を E_2 とすると、

$$E_2^2 = R_w^2 I_L^2 = \frac{1}{(\alpha R_a)} R_w^2 (B\sqrt{U} + C)(R_w - R_a) \quad (4)$$

が得られる。今、熱線流速計を定温度法により設計するものとする、つまり、熱線の抵抗 R_w は流れ

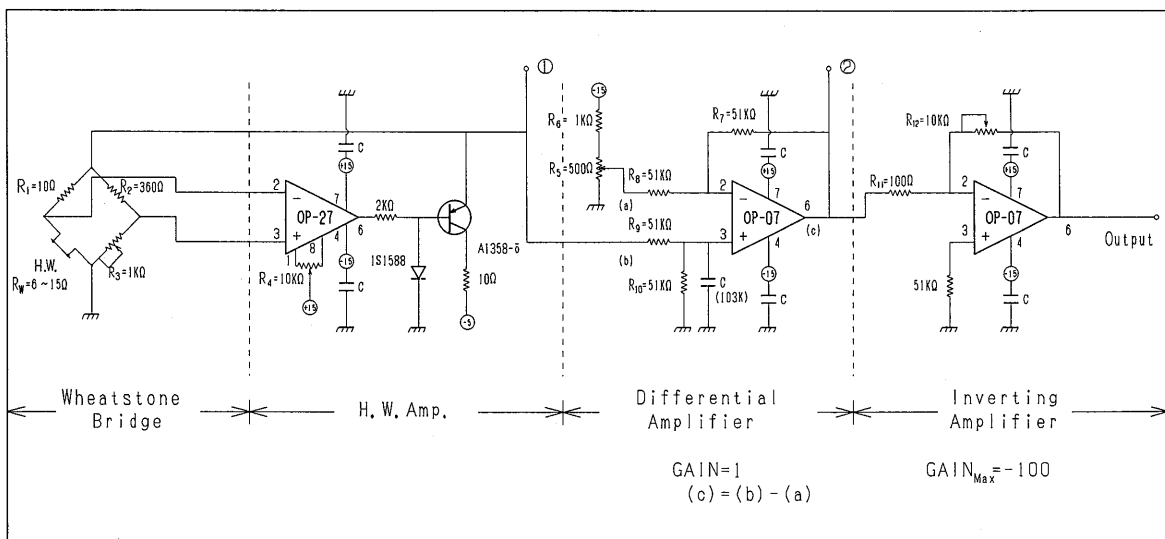


図3 定温度型熱線流速計の回路図

の速さが変わっても一定である。(4)式の中の定数をまとめると

$$E_2^2 = B\sqrt{U} + C \quad (5)$$

となる。この式は定温度流速計の基礎式で大変重要なものである。

3. オペアンプの原理と仕様

定温度型熱線流速計の回路(図3)は通常の4つの部分からなっており、その中の3つのオペアンプが中心的な役割をしている。オペアンプの動作が分かれば、この回路を理解することが容易にできるので、熱線流速計の回路を説明する前に、まず、オペアンプの原理とその仕様を簡単に紹介する。

オペアンプとは、Operational Amplifier、つまり演算増幅器の略称である。市販されているオペアンプの外形はおよそ2種類がある。トランジスタに似たものをトランジスタ型オペアンプといい、デジタルICにそっくりなものをDIP型オペアンプと呼ぶ。オペアンプを表す基本記号は三角形であり、三角

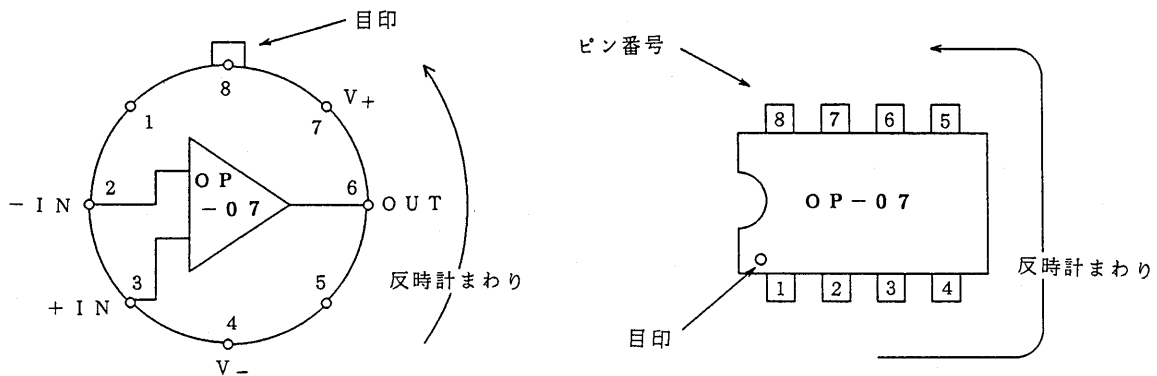
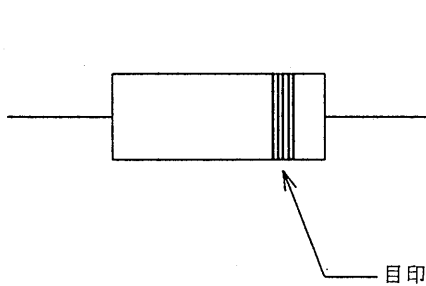
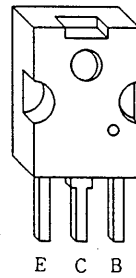


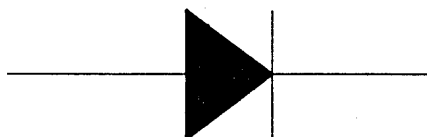
図4 ICのピン番号の見方



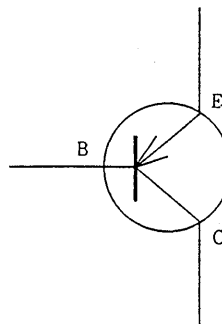
ダイオードの外形



トランジスタの外形



(a) ダイオードの外形と記号



E : エミッタ
C : エレクタ
B : ベース

(b) トランジスタの外形と記号

図5 ダイオードとトランジスタの見方

形から引き出されている線は、電源、入力、出力などの接続ピンを示している。1本1本のピンを間違いなく区別して正確に接続するためには、これらのピンに付けられた整理番号によってその識別方法を知る必要がある。幸い、ICの外形やピンの数には関係なく、ピンに番号を付ける方法が約束ごととして決められている。それは図4のように、ICを上から（メーカー、型番等が印刷された面から）見て、目印のところから反時計まわりに1番、2番……と順に番号を付けていくのである。この目印は、パッケージの一部に凸起部とか凹みがあるので、一目見ればすぐに分かる。

オペアンプを使って正確な増幅度を持った増幅回路を設計する際には、まず温度の影響が問題となる。それを完全に解決したのがネガチブ・フィードバック（負帰還）技術である。この回路技術を一口でいえば、増幅度の非常に大きいオペアンプ（一般に $10^4\sim 10^6$ となっている）の外部に2個またはそれ以上の抵抗を接続し、それらの抵抗値の比で増幅度を決めてしまう、というものである。オペアンプ増幅器は一般に－入力端子と＋入力端子があり、－入力端子に正の電圧を加えると、出力端子に負の電圧が出てくる、それと逆に、＋入力端子に正の電圧を加えると、正の電圧が出力される。図3の第4の部分を見れば分かるように、出力端子の電圧(6)が抵抗 R_{12} を通して、再び－入力端子(2)に加えられている。このように、負極性出力を正極性入力に送り出す回路方式を、ネガチブ・フィードバックと呼び、電子回路では大変重要な回路技術の一つとなっている。その詳細については文献3を参照されたい。

次に、オペアンプの二つ重要な性質を紹介する。この二つの性質を覚えれば、オペアンプから構成された熱線流速計回路を容易に理解することができ、また、これらの性質は他の測定装置の試作にも応用できる。

- (1) オペアンプの入力インピーダンスは非常に大きく、数千 $K\Omega$ となっている。入力端に数百 $K\Omega$ 以下の抵抗を付けた場合には入力端（－入力端子、＋入力端子）に流れる電流が非常に小さく、一般には0と見なすことができる。
- (2) オペアンプの－入力端子と＋入力端子相互間の電圧は常にほぼゼロである。この状態のことをイマジナリ・ショートといい、オペアンプの動作を理解する上で非常に大切な考え方である。その特殊な場合は＋入力端子がアースに接続されている時に、－入力端子の電圧がゼロとなり、イマジナリ・アースと呼ぶ。

4. 熱線回路の説明

定温度型熱線流速計の回路図を図3に示す。これは、ホイートストーン・ブリッジ、電流増幅回路、オフセット電圧回路、反転増幅回路からなる。その中にはホイートストーン・ブリッジと電流増幅回路が中心的な役割をしており、この二つの回路を組み合わせることによって、定温度型熱線流速計が実現できた。

4.1 反転増幅回路

早速、この二つの性質を使って回路を説明してみる。図3に示す熱線流速計回路の第4の部分は単なる反転増幅回路（inverting amplifier）であり、その増幅度は可変抵抗 R_{12} と固定抵抗 R_{11} と比となり、最大100となっている。今、－入力端子2に着目する。性質1から、2番ピンに流れる電流がほぼ0となっていることが分かる。また、性質2から2番ピンの電圧と3番ピンの電圧とは等しく、0となっている

ことが分かる。出力電圧を E_o 、入力電圧を E_i とすると、抵抗 R_{12} と抵抗 R_{11} に流れている電流はそれぞれ E_o/R_{12} と E_i/R_{11} となっている。キルヒホフの法則から、この二つの電流の和がゼロではなければならない。そのゆえ、 $E_o/E_i = -R_{12}/R_{11}$ となり、可変抵抗 R_{12} を調整すれば、任意倍率の増幅度が得られる。倍率の値は出力を受ける側の仕様によって決められる。例えば、回路からの出力を A/D 変換し、コンピュータに取り込む場合、A/D 変換器の最大入力電圧が $\pm 10V$ となっていれば、反転増幅回路の増幅度は回路の出力が $10V$ を越えないように設定すればよい。

4.2 オフセット電圧回路

次に、図 3 に示す熱線流速計回路の第 3 の部分を説明する。この回路は差動増幅回路 (differential amplifier) で、オフセット電圧 E_a を加えるために設けられている。抵抗 R_{10} のとなりのコンデンサ C_1 を無視して、まず、 $-$ 入力端子 2 と $+$ 入力端子 3 を着目する。性質 1 から、2 番ピンと 3 番ピンに流れる電流がほぼ 0 となっている。また、性質 2 から、2 番ピンの電圧 E_2 と 3 番ピンの電圧 E_3 とは同じである。出力電圧を E_c 、入力電圧をそれぞれ E_a と E_b とすると、図 3 の第 3 部間の (a), (b), (c) およびオペアンプの 2, 3 の点に注目して、次の関係、

$$\begin{aligned} \frac{E_c - E_2}{R_7} + \frac{E_a - E_2}{R_8} &= 0 \\ \frac{E_b - E_3}{R_9} + \frac{0 - E_3}{R_{10}} &= 0 \end{aligned} \tag{6}$$

が得られる。今、四つの抵抗が同じであるため、(6) 式中の E_2 と E_3 を消去すれば、 $E_c = E_b - E_a$ となる。可変抵抗 R_5 を調整すれば、任意の大きさのオフセット電圧 E_a を与えることができる。

この回路はもう一つの機能を持ち、ローパス・フィルターの役割をしている。カット周波数 f は抵抗 R_{10} とコンデンサ C_1 の値で決まり、 $f = \frac{1}{(2\pi C_1 R_{10})}$ となる。この図に示す回路の設計は A/D 変換器のサンプリング周波数が 1 KHz となる時に設定したもので、 $R_{10} = 51K\Omega$ 、 $C_1 = 10^4 pF$ としているから、カット周波数は 312Hz となる。サンプリング周波数が変われば、コンデンサ C_1 の値はそれに応じて変える必要がある。カット周波数 f はサンプリング周波数の 3 分の 1 になるように C_1 の値を変えればよい。

4.3 ホイートストーン・ブリッジ

図 3 の第 1 の部分に示しているのはホイートストーン・ブリッジで、2 個の固定抵抗 (R_1 と R_2) と 1 個の可変抵抗 R_3 、さらに熱線 H.W. から構成されている。使用にあたっては、まず動作させる熱線の抵抗 (温度) を決定する必要がある。加熱時の熱線の抵抗値 R_w と常温での抵抗 R_a との差を、 R_a で割ったものを加熱度 (Overheat ratio) といい、

$$a_w = \frac{(R_w - R_a)}{R_a} \tag{7}$$

で表す。 a_w は、一般には 0.5 ($T = 110^\circ C$) くらいにとるのが適当とされている。今、熱線回路がバランスをしているとして、 $E_2 = E_3$ と見なす。従って、

$$R_w = \frac{R_1 R_3}{R_2} \tag{8}$$

となる。そこで R_3 を適当に調整して、 R_w の値を $1.5R_d$ (つまり、 $a_w=0.5$) にすることができる。

4.4 電流増幅回路

図3の第2の部分は差動増幅器と電流増幅用トランジスタから構成される。オペアンプは、通常5 mA程度出力電流しか取り出すことができないために、熱線を充分加熱することができない。電流増幅用のトランジスタとして、A1358-O という PNP 型のものを使用した。また、トランジスタのベースに挿入したダイオード1S1588は、熱線を保護するためのもので、不注意に電源を入れたり、切ったりした場合も働く。

最後に、定温度法がどのように実現しているのかを簡単に説明する。今、熱線 (R_w) を含むホイートストーン・ブリッジと差動増幅器の組み合わせを考えてみる。ブリッジに電圧 E を加えたときに、オペアンプ (op-27) の±入力電圧を E_3 , E_2 , また、ブリッジの左側と右側に流れている電流をそれぞれ I_L , I_R とすると、オペアンプの性質1から、次の関係、

$$E_2 = I_L R_w = \frac{E}{(R_1 + R_w)} R_w = \frac{E}{(1 + R_1/R_w)} \quad (9)$$

$$E_3 = I_R R_3 = \frac{E}{(R_2 + R_3)} R_3 = \frac{E}{(1 + R_2/R_3)} \quad (10)$$

が得られる。この時注意すべきことは、 E が増加すると I_L が増加し、同時に R_w も増加する。従って、(9)式において E_2 と E とは比例関係にない。一方(10)式において、 R_2/R_3 は一定であるから、 E_3 と E とは R_2/R_3 の値を変数として、比例関係にある。今、熱線回路がバランスをしているとすると、(8)式が成り立っている。流速 U が少し大きくなると、熱線の温度つまり抵抗 R_w が下がり、 $R_1/R_w > R_2/R_3$ となる。従って、電圧 E_2 が下がる。その結果、電圧 $E (=A(E_3 - E_2))$ が上がり、熱線を通る電流 I_L も上がる。そして、熱線の温度つまり抵抗 R_w が大きくなり、(8)式が再び成立し、熱線回路が平衡状態に戻る。その詳細については文献2を参照されたい。流速 U が少し小さくなる時に、回路は逆に動作する。回路の動作は流速の変化以上に素早く行われなければならない。高い応答性を得るためには、この差動増幅回路に性能のよいオペアンプ (op-27) を使用する必要がある。

このように、図3の回路によって、定温度型の熱線流速計が実現でき、ブリッジに加えられている電圧 E を記録すれば、(11)式から流速 U を求めることができる。ただし、実際にはこの回路は発振してしまっていて使用はできない。それは、速い流速変動に対して、熱線と増幅器の応答にそれぞれ遅れが生じていることに起因する(文献2)。この発振を避けるために、オペアンプに非平衡電圧 ΔE を加える。オペアンプの1番ピンと8番ピンの間に入れた可変抵抗を調整すれば、 ΔE の値を変えられる。調整の仕方は次の章に説明する。

5. 熱線回路の試作及びチェックの仕方

5.1 熱線回路の試作

回路の製作を始めようとするとき、まず、熱線回路に使う部品を用意しなければならない。表1はそのリストを示している。その中で電源、基板、オペアンプ op-27の値段が他の部品と比べれば比較的高く、熱線流速計の製造コストは殆どこの3つの部品の価格で決まる。電気部品以外には、回路製作に使

表1 熱線回路に使う部品の一覧表

品名	仕様	数量	備考
オペアンプ	o p -27 *	1	
	o p -07	2	
ソケット	20ピン	1	
	8ピン	1	
可変抵抗	500Ω	1	オンボード用
	1KΩ	1	
	10KΩ	2	
抵抗	10Ω	2	1/4W 以上
	100Ω	1	
	360Ω	1	
	1KΩ	1	
	2KΩ	1	
	51KΩ	5	
コンデンサー	103K	1	
	104K	7	
ダイオード	1S1588	1	
トランジスタ	A1358	1	2SA型
基板	CPU-121AH	1	
電源	±15V、-5V	1	

* 入手先 : ユニترون通商、電話 : 03(3418)5571

用する15W程度のハンダゴテとヤニ入りの糸ハンダが必要となる。このほか、配線用の細いビニール電線、電線切断と被覆はがし用を兼ねたニッパー、ハンダ吸い取り器、ピンセットなどが必要である。もう一つ言っておく必要があるのは部品から出ているピンの見方である。オペアンプのピンの見方はすでに前の章に説明しており、図5はダイオードとトランジスタの見方を示している。

早速、回路を組立てみる。写真2は熱線流速計の製作品で、可変抵抗が調整しやすいところに置いている。20ピンのDIP型IC用ソケットのまん中の4ピンはコンデンサ C_1 と抵抗 R_{11} を差すために用意したもので、 C_1 と R_{11} を変えれば、ローパス・フィルターのカット周波数と反転増幅器の最大増幅率が変わる。そして、回路をチェックしやすくするために、検出①と検出②のところの2本の配線を解放のままにしておく。

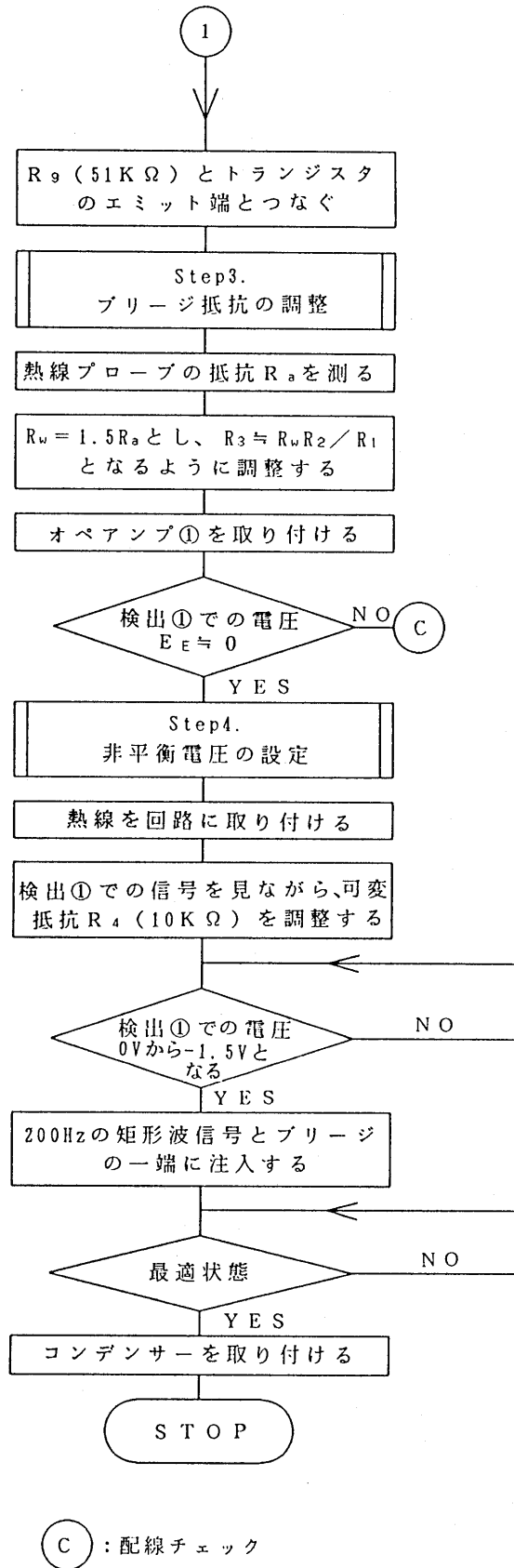
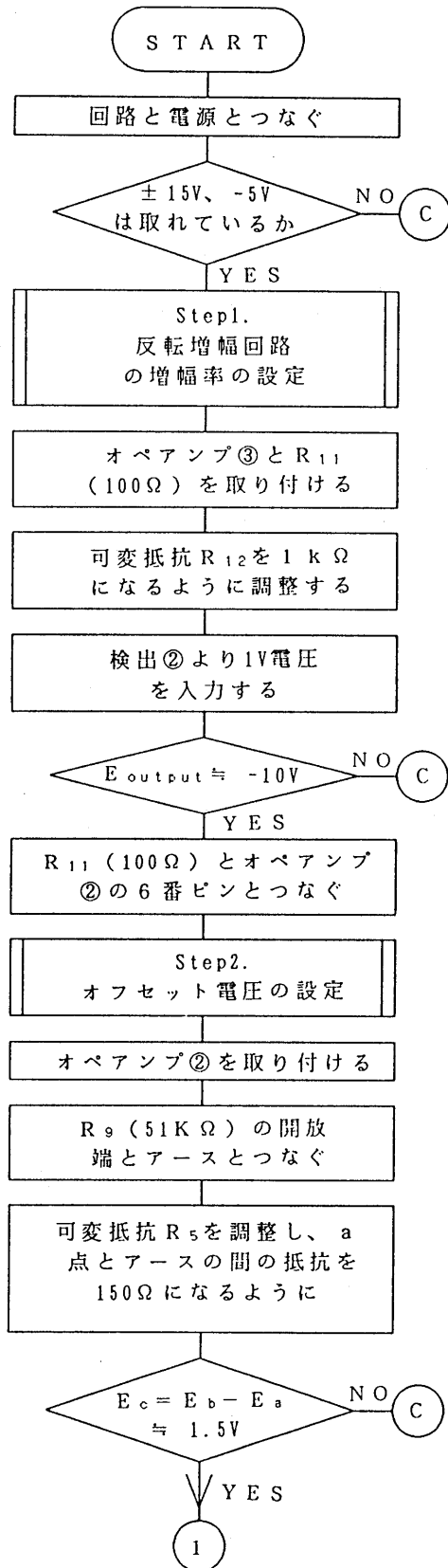


図6 熱線回路チェックのフローチャート

5.2 熱線回路チェックの仕方

次に、完成した熱線回路が思った通り機能するかどうかをチェックしなければならない。ここで、回路のチェックにはオシロスコープ(日立 V-422(R)-40MHz)、テスター(出力がデジタル表示)、矩形波発生器(KIKUSUI MODEL-455 FUNCTION GENERATOR)を使用する。図6は熱線回路チェックの手順をフローチャートで示している。チェックは、まず電源から始まり、 $\pm 15V$ 、 $-5V$ の電源はきちんと取れているか、そして、Step 1からStep 4まで順次に調べていく。

Step 1. 反転増幅回路の増幅率の設定

まず、オペアンプ③と R_{11} (100Ω) をソケットに取り付け、可変抵抗 R_{12} を $1\text{ k}\Omega$ になるように調整する。そして、検出②より 1 V 電圧を入力し、出力電圧をオシロスコープで調べる。 $E_{\text{output}} \approx -10V$ であれば、反転増幅回路が正常に動作していることが分かる。最後に、 R_{11} (100Ω) とオペアンプ②の6番ピンとつなぐ。

Step 2. オフセット電圧の設定

次に、オペアンプ②をソケットに取り付け、 R_9 ($51\text{K}\Omega$) の開放端とアースとつなぐ。そして、 a 点とアースの間の抵抗を 150Ω となるように、可変抵抗 R_5 を調整する。 $E_c = E_b - E_a \approx 1.5V$ となっているなら、 R_9 ($51\text{K}\Omega$) の開放端をトランジスタのエミット端につなぎかえる。

Step 3. ブリッジの調整

テスターを用いて、熱線プローブの抵抗 R_a を測る。 $R_w = 1.5R_a$ とし、 $R_3 \approx R_w R_2 / R_1$ となるように可変抵抗を調整する。そして、オペアンプ①をソケットに取り付け、検出①での電圧 $E_B \approx 0$ となっているかどうかをチェックする。

Step 4. 非平衡電圧の設定

最後に、熱線を回路に取り付け、検出①での信号を見ながら、可変抵抗 R_4 ($10\text{K}\Omega$) を調整する。検出①での電圧 0 V から $-1.5V$ となるときに、可変抵抗 R_4 の調整を一時停止し、周波数応答の矩形波によるテストを行う。流速が時間的に速く変動している場合には、熱線増幅器の周波数応答は、その変動より速くする必要がある。図7に示したように、ブリッジの一端に $10\text{K}\Omega$ をつなぎ、 1 V_{p-p} 、 200Hz 程度の矩形波信号を注入する。熱線回路の出力信号を見ながら、写真1(a)に示した状態となるように、もう一度可変抵抗 R_4 を調整する。これによって、最適の周波数応答を与える非平衡電圧 ΔE が設定されたこ

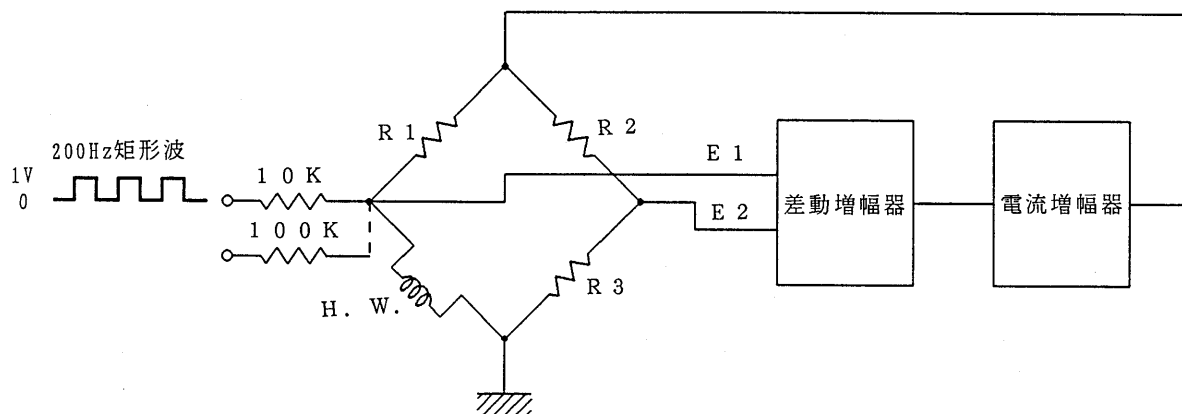
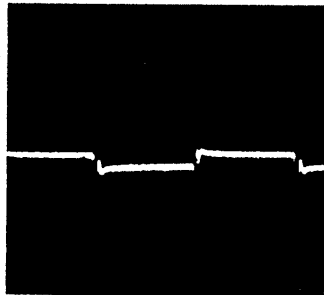
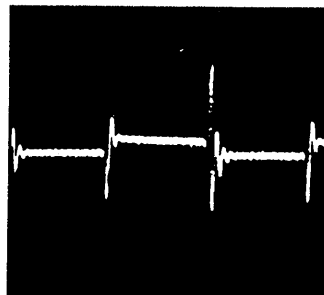


図7 周波数応答の矩形波によるテスト

(a) 最適



(b) 発振ぎみ



(c) 減衰ぎみ

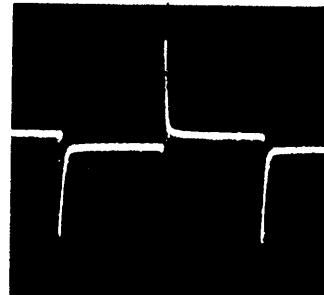


写真1 矩形波テストの波形

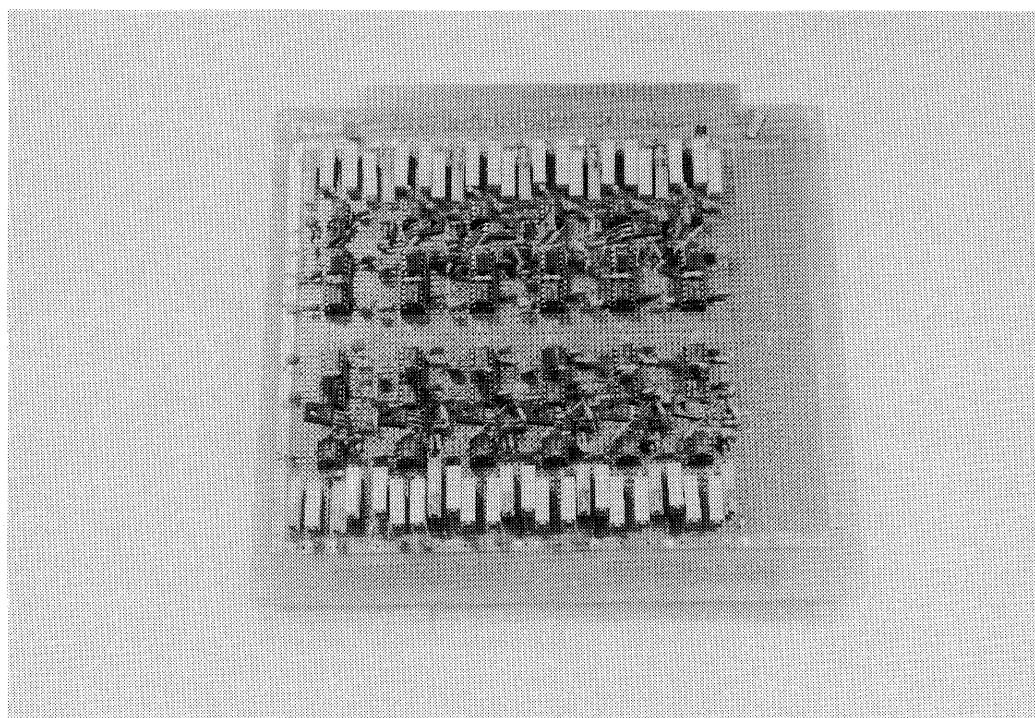


写真2 12チャンネル熱線流速計

とになる。最後に、コンデンサーをソケットに取り付けば、熱線回路ができあがる。写真2は熱線流速計の製作品で、12チャンネルの熱線回路を入っている。

6. 熱線プローブの製作

熱線プローブの基本的な形には、I型とX型のプローブの2種類がある。また、測定する流体の性質によって、熱線プローブの構造がすこし変わる。空気速度を測る時には高い応答性を得るために、極めて細い金属線を使用する。一方、水などの液体を測るときには水による抵抗力が大きいため、細い金属の代わりに、熱膜を使う。その時、熱線流速計を熱膜流速計と呼ぶ。熱膜プローブの製作はかなり難しく、簡単には作れない。しかしながら、熱膜が石英などによってコーティングされているため、壊れることもあまりない(文献4)。一方、熱線プローブは熱線に使う金属線が極めて細いため、切れることがよくある。熱線プローブは比較的作りやすいため、その作り方を簡単に紹介する。

熱線プローブを作るために、細い熱線のサポートとなる直径0.6mmのステンレス線、エポキシ系強力接着剤(ゆっくり24時間硬化するタイプ)、ドライヤーなどが必要である。また、熱線をサポートに溶接するために、直径5 μ のタングステン線(東阪商会)、双眼実体顕微鏡(オリンパスVE-2、総合倍率20、実視野 Φ 10cm)、溶接回路に使う1000 μ Fの電解コンデンサー、80 Ω の抵抗、可変電圧器(0V~10V)を用意する必要がある。

まず、一番簡単なI型プローブを作ってみる。先を尖らせた2本の直径0.6mmのステンレス線をエポキシ系樹脂で固定する。その時、エポキシ系強力接着剤を速く反応させるため、ドライヤーを用いて加熱しながら、主剤と硬化剤を混ぜる。10分間程度を続けると、接着剤が透明になってくる。そして、加熱

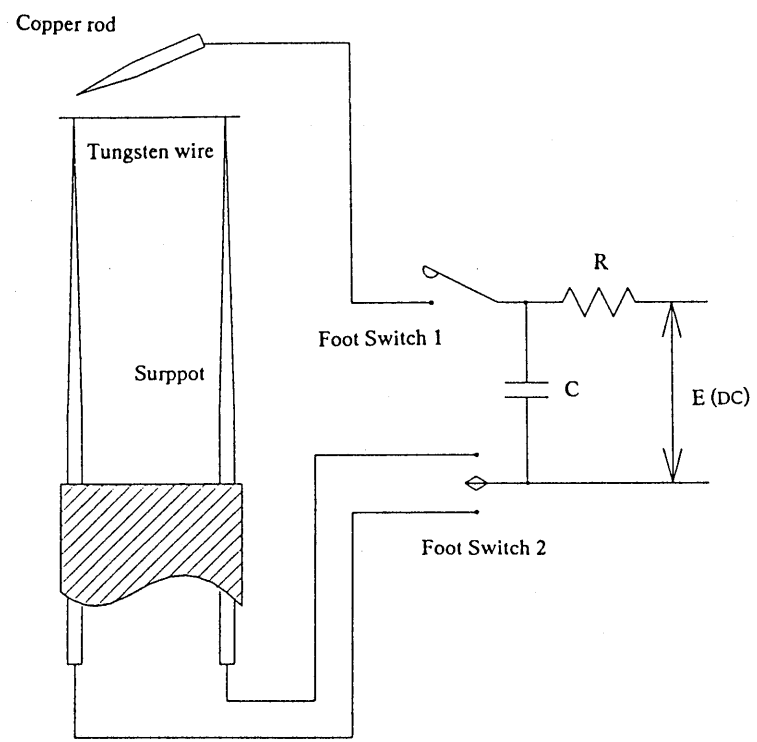


図8 熱線の溶接

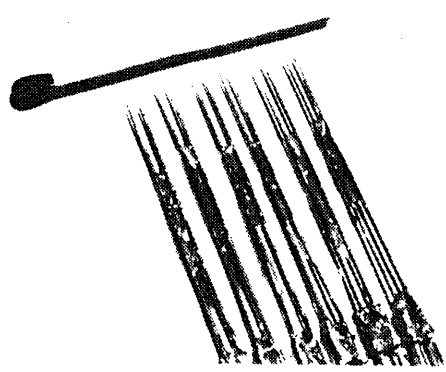


写真3 6本のX型熱線プローブからなるレイク

を停止し、2本のステンレス線を1.5mm程度を離して接着剤で固定する。24時間後、接着剤は固くなり、更に2日間放置すれば、I型プローブの支柱ができあがる。

次に、直径5 μm のタングステン線を2本の支柱の先にスポット溶接する。左手と右手はそれぞれ5 μm のタングステン線を貼っている針金と直径1 mmの先端を尖らせた銅の溶接棒をもち、そして、左足で通電用フィット・スイッチ①、右足で左右切り替え用フィット・スイッチ②をコントロールする。まず、タングステン線を1本の支柱の先に乗せ、そして、尖らせた銅棒でタングステン線を支柱の先に押し込み、フィット・スイッチ①で通電することにより溶接を行う。片側に付けたら、まだ、フィット・スイッチ②で切り替え、反対側を溶接する。熱線溶接回路は図8に示す通りである。写真3は完成した熱線プローブを示している。

7. 熱線風速計のキャリブレーション

熱線流速計からの出力は電圧であるため、それを実際の流速に換算する必要がある。熱線からの出力 E と流速 U と関係は一般に、Kingの法則に従う。従って、(5)と(9)式から、 E_2 を消去し定数をまとめると、

$$U^{1/2} = B \cdot E^2 + C \quad (11)$$

が得られる。絶対速度 U は、通常ピトー管を使って圧力差を流速に変換する方法で求める。

しかし、この方法は風速の小さい時に使えない。なぜならば、風速0.5m/s以上ではないと、(11)式が成り立たないからである。また、主流が変化しているときには、ピトー管では正しい絶対速度を求められないため、振動流のような流れ場を測定するとき、別の方法を考えなければならない。そこで、我々の研究では、レーザー・ドップラー流速計(日本科学工業製8000シリーズ、光源は出力15mW、波長6328 AのHe-Neレーザー、前方散乱方式、信号処理はトラッカー式)を用いて、熱線のキャリブレーションを行った。熱線からの出力 E と流速 U と関係を3次多項式で表し、

$$U = aE^3 + bE^2 + cE + d \quad (12)$$

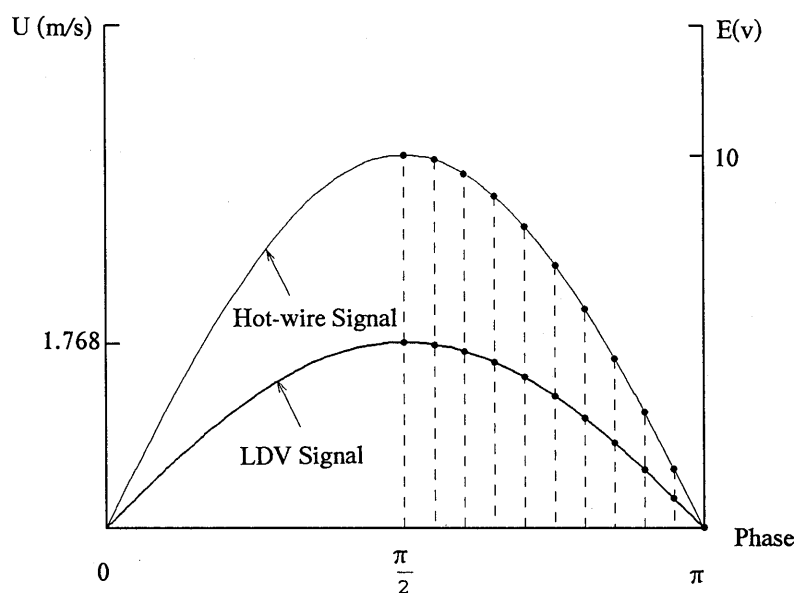


図9 レーザー流速計による熱線流速計の検定

式の中に含まれる係数は最小2乗法で決める。図9はその一つの例である。太い実線は風洞中央部の流速 U の半周期間の変化を示しており、細い実線は熱線からの出力 E を示している。黒丸は(12)式の係数を決めるときに使うデータ(11個)を示している。係数 a, b, c, d を決め、(12)式を用いて電圧 E から流速 U を求め、そして、 $U^{1/2}$ と E^2 の関係を図10に示した。この図をみて分かるように、風速が0.5m/s以上になると、 $U^{1/2}$ と E^2 とは比例関係となり、つまり、Kingの法則が成立する。なお、熱線流速計は主流速の大きさ(方向が分からない)しか測定できないため、主流速が乱れ成分と同程度の場合には平均流速を求めるときに、大きな誤差が生じる。そのため、振動流のゼロ流速付近の流速値は信頼できないことを注意すべきである。

最後に、X型熱線プローブの検定方法について説明する。X型熱線プローブを用いて、速度成分 u, v の測定するときには、設定した角度がわずかに偏角していると、主流に垂直な流速成分 v の測定精度に大きく影響する。今、図11に示すように、Xプローブが α 偏角していると仮定する。それぞれのワイヤの拾う流速 u_1, u_2 と u, v との関係は次のように、

$$u_1 = u \sin(45^\circ - \alpha) + v \cos(45^\circ - \alpha) \tag{13}$$

$$u_2 = u \sin(45^\circ + \alpha) - v \cos(45^\circ + \alpha) \tag{14}$$

となる。加法定理を用いた後、 α は小さいとして $\sin\alpha$ 及び $\cos\alpha$ をテイラー展開の第1項で近似すると

$$u_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \{u(1 - \alpha) + v(1 + \alpha)\} \tag{15}$$

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \{u(1 + \alpha) - v(1 - \alpha)\} \tag{16}$$

となる。従って

$$u = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \alpha^2)} \{(u_1 + u_2) - \alpha(u_1 - u_2)\} \tag{17}$$

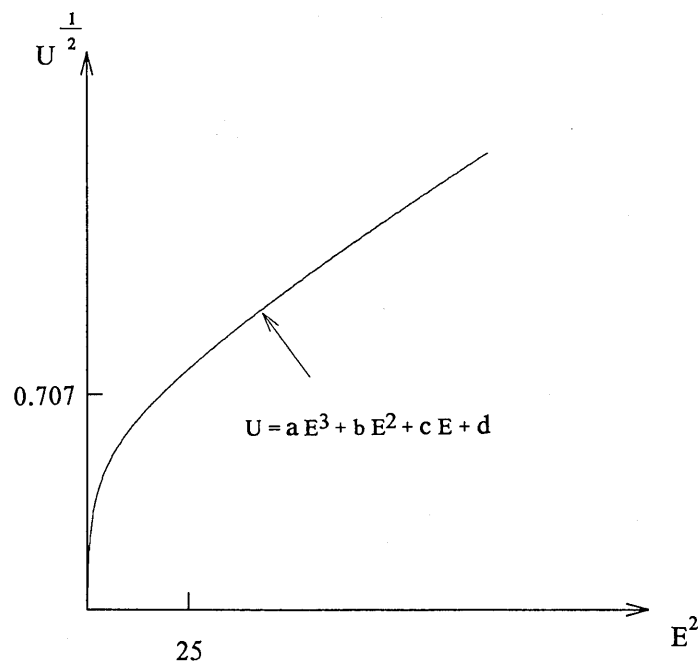


図10 熱線回路の出力の2乗 E^2 と流速の平方根 $U^{1/2}$ の関係

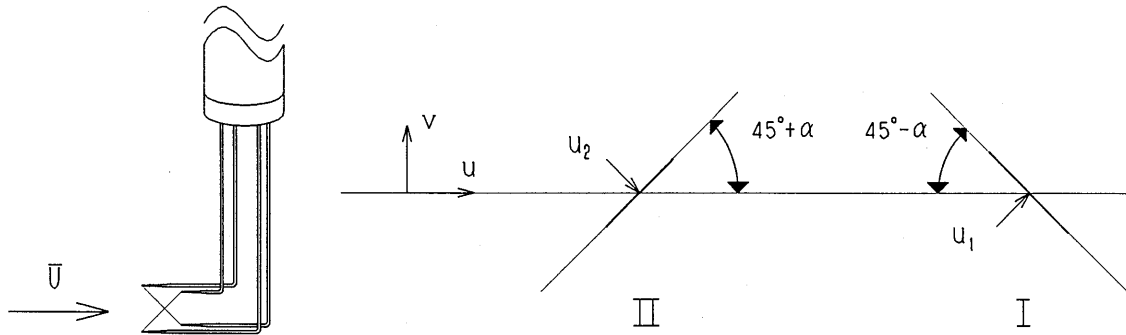


図 11 X 型熱線プローブによる速度成分 u , v の測定

$$v = \frac{1}{\sqrt{2(1+\alpha^2)}} \{(u_1 - u_2) + \alpha(u_1 + u_2)\} \quad (18)$$

となる。実験では 0.5° 程度の偏角は避けられないため、上式の α を $-1^\circ \sim 1^\circ$ の間で小刻みに与え、 v の平均値が最もゼロに近い値を取るときの α を実際の偏角とし計算を行い、わずかな偏角 α による測定誤差を補正する。このような補正を行わない場合には、 $\alpha=0$ として式(17)と(18)を使えばよい。但しこの場合には $\bar{v} \neq 0$ となり、変動分を求める際には \bar{v} を差し引く必要がある。

8. 乱流場の多点同時測定

ここで、本多チャンネル定温度型熱線流速計を用いて乱流場を測定した例を簡単に説明する。詳しい

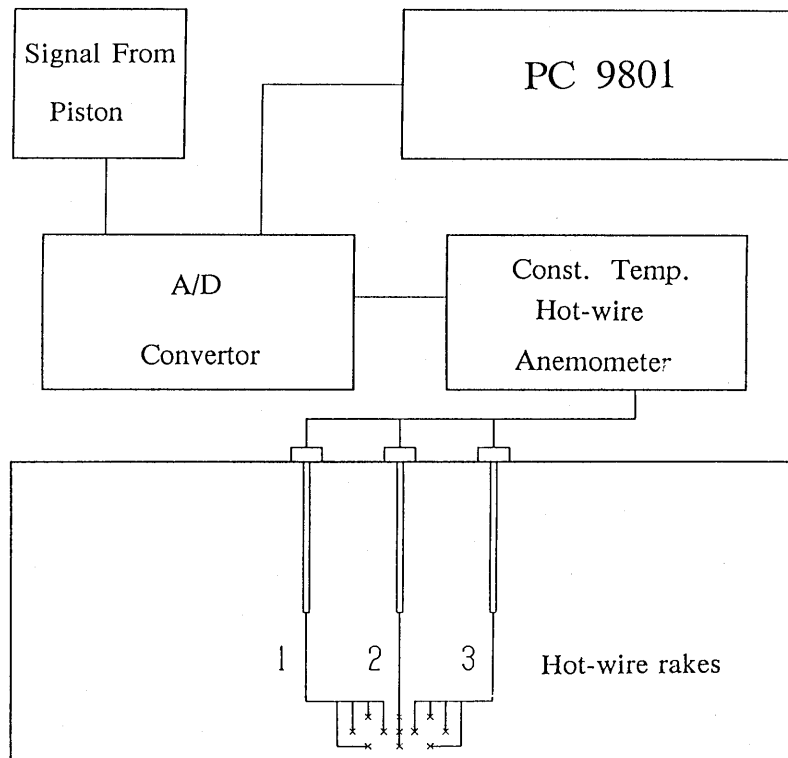


図 12 プローブの配置図

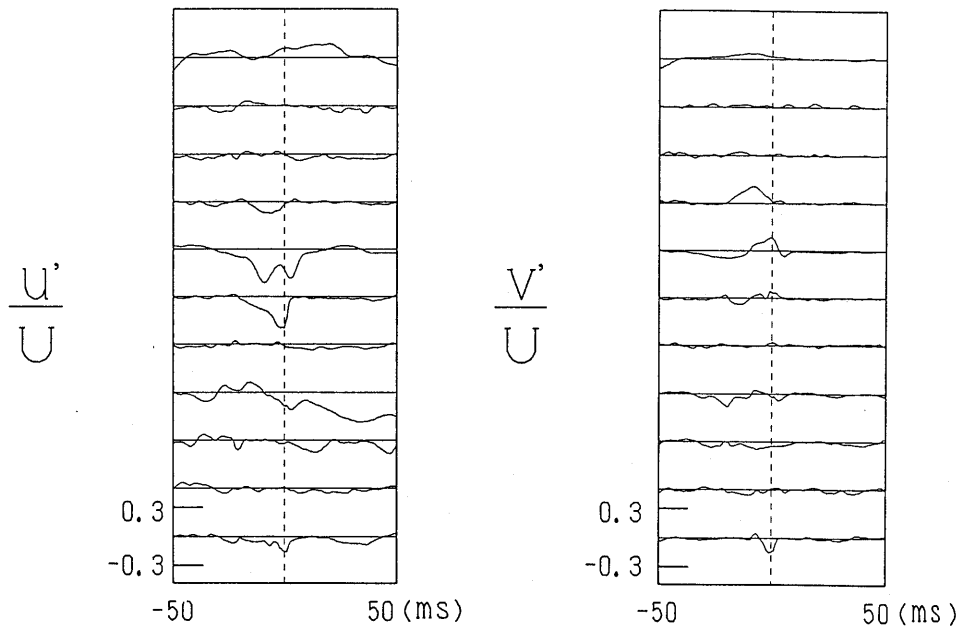


図13 速度変動 u , v の時系列データ

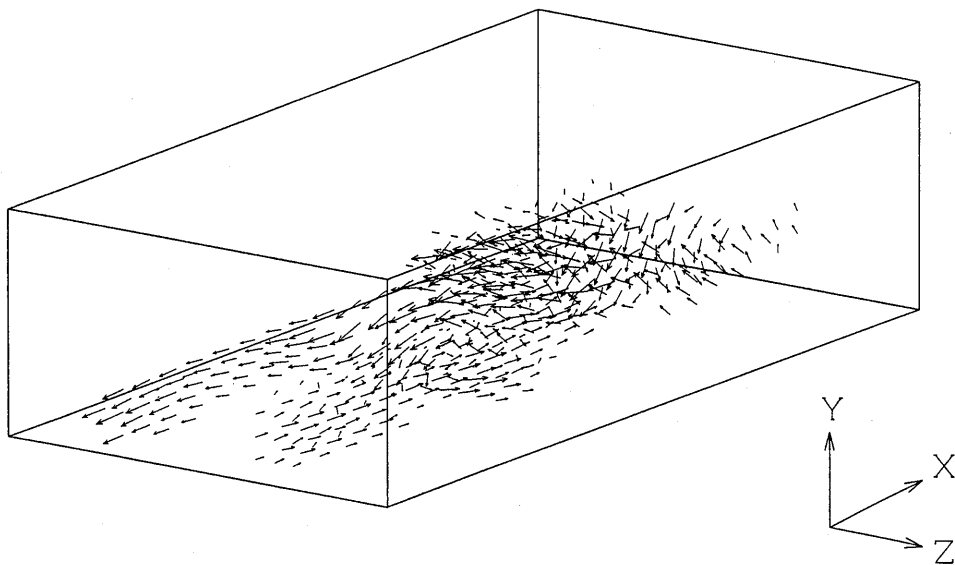


図14 速度変動 u , v , w の3次元ベクトル図

内容は文献5を参照されたい。11本のX型熱線プローブを図12に示したように主流に垂直な面内に配置し、速度 U , V を連続測定する。中央部の1本のプローブは detector probe として設置し、大きいレイノルズ応力のピークを検出した時に、検出時点の前後それぞれ50ms ずつのデータを収集する。図13はその一つの例であり、11本の熱線プローブから得られた速度変動 u , v を示している。縦の点線は大きなレイノルズ応力が検出された瞬間を表している。図13に示している11点での速度変動 u , v のデータから3次元空間内の速度変動 u , v , w を求めるために、まず、Taylor の渦凍結仮説を用いて、速度変動 u , v の時系列を検出点の前後それぞれ50mm ずつの空間に変換する。そして、それぞれのYZ面内の11点での実験データからその断面内の速度変動 u , v を内挿する。内挿方法としては仮想荷重法(virtual plate/load)を用いた。最後に、MASCON モデルを用いてもう一つ速度成分 w を推定する。図14は11本のプ

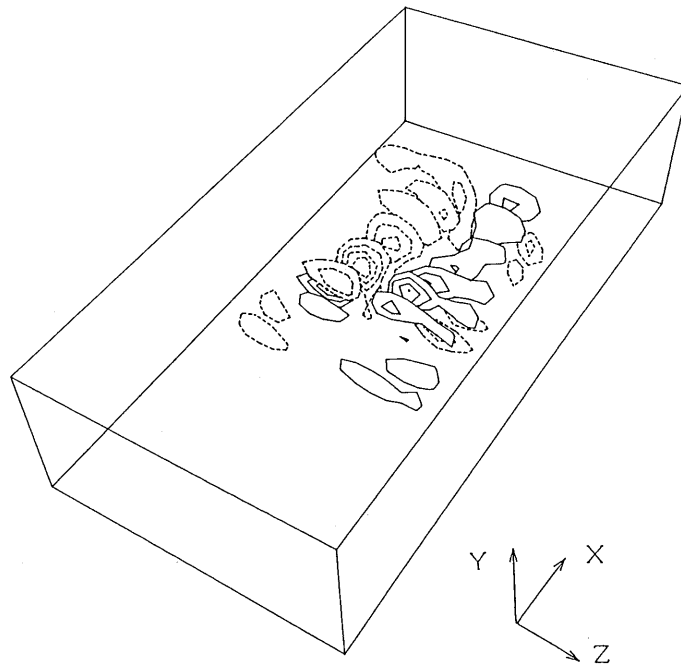


図15 渦度成分 ω_x の立体コンター図

ローブから得られた速度変動 u, v から推定した瞬間的な速度変動の空間分布を示している。また、これらの速度データから渦度成分 ω_x を求めた。図15はその空間分布を示しており、この図を見て分かるように、乱流場の中に発生した大きなレイノルズ応力はこのような一対渦構造によって作られている。

9. おわりに

以上述べたように、多チャンネル定温度型熱線流速計の試作によって、市販の2成分熱線流速計1台の十分の一程度で24チャンネル定温度型流速計の回路を造ることができ、これにより多数の流速計を風洞の中に設置し、乱流場の多点同時測定を可能にした。このシステムは室内実験にはもちろん、これを現地用のプローブをとり付ければ、河川にも、海にも、大気にも使える。このような多点同時乱流計測システムは室内または現地での様々な乱流現象の解明に大いに役に立つと信じている。

参考文献

- 1) 孟 岩：東京工業大学修士論文，1989.
- 2) 高木正平，齊藤博之助，齊藤隆雄：定温度型熱線風速計の試作，トランジスタ技術，Aug. 1977，265-276.
- 3) 白土義男：オペアンプ回路の手ほどき，日本放送出版協会.
- 4) 竹中俊夫（編）：流体測定法，日本機械学会.
- 5) 孟 岩・村山雅昭・日野幹雄：3次元組織的乱流構造の瞬間像を推定する試み，水工学論文集第35巻，513-518，1991.