

熱線流速計の取り扱いと3D(三次元センサー)の検定方法

大気災害研究部門

杉政 和光

1 熱線流速計とは

熱線流速計とは、1990年 Kenelly によって、一定電流により加熱された熱線を流体中に置くと、放散によって熱エネルギーが奪われ、流速の変動に応じて熱線の温度が変化すると共に電気抵抗値が変化する事を見だし、この熱伝達量を温度の形で検出し、この変化から流速を測定し得る事を提案した。この提案を1914年 L. V. King の法則として広く用いられている。

熱線流速計には、定電流型と定温度型がある。

定電流型は熱線に流す電流を一定に保つ方法で、1930年 Dryden, Kneth らにより開発された。

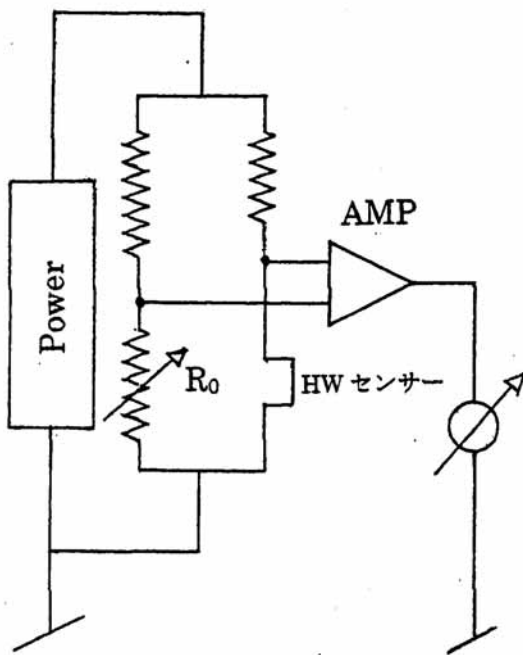


図-1 定電流型風速計の
ブロックダイヤグラム

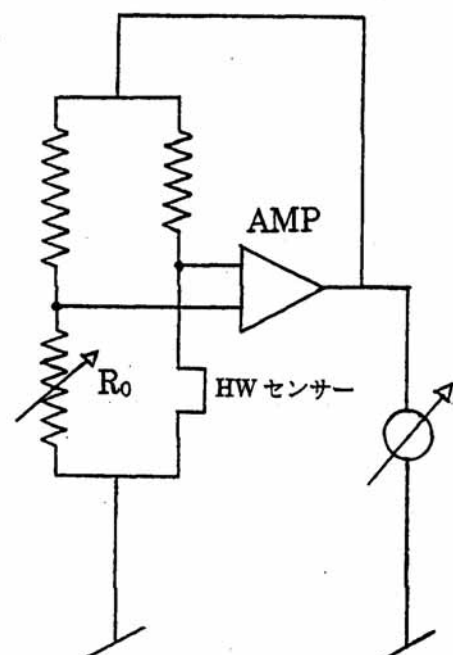


図-2 定温度型風速計の
ブロックダイヤグラム

図 1 に示すように、熱線を一边にもつブリッジを定電流回路に接続し、熱線には常に一定電流を流した状態でブリッジのバランスをとっておく、ここでブリッジの一边を構成している熱線部分を流体中に入れると、流速変動によって熱線から熱を奪われる。つまり、この定電流型は風速と共に熱線の温度(電気抵抗)、が変化する方法である。

定温度型は図 2 に示すように、熱線を一边にもつブリッジを組み、この出力を増幅器に

接続し、この増幅器の出力をブリッジに戻すことにより熱線の温度（熱線の動作抵抗）を与えられた設定温度の値に流速に関係なく一定に保つようしておく、熱線の抵抗値も一定になり、熱線を初期瀬定温度に保つように電流が流れる。この電流を測定する方法である。この方法では風速あるいは風速変動によって熱線に流れる電流が変化する。

熱線に用いられる材料は主に白金、タングステン及び白金—イリジウム等である。白金線は白金線を銀または洋銀で被覆したまま線引きして作られる。白金線は強度が小さいので主として約 80m/sec の低速の測定に用いられる。タングステン線は科学的にエッチングを施しさらに細かくして 3μ のものが制作されている。音速程度的高速気流の測定に適している。白金イリジウムは温度係数も他 2 点に比べて小さいのであまり使用されない。

2. 熱線エレメントについて

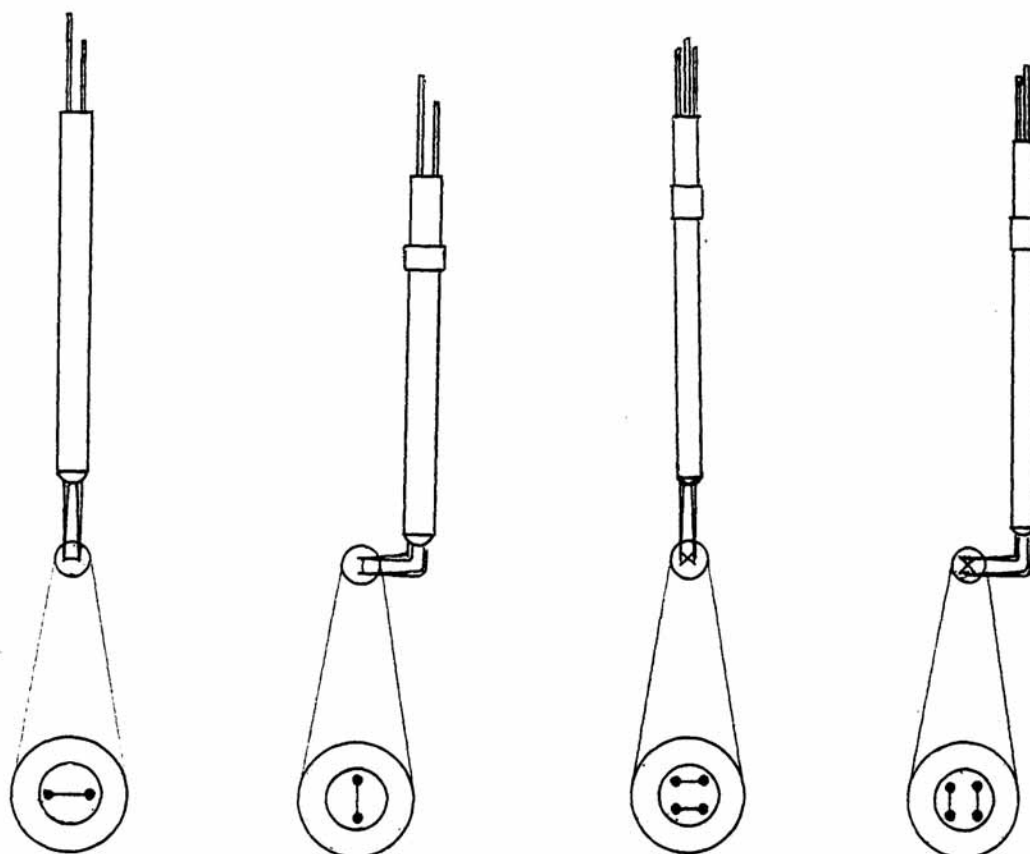
熱線エレメントは目的に応じて図 3 の様に種々の形の物がある。

標準直線プローブ
Model 0251-T5

平行流形プローブ
Model 0247R-T5

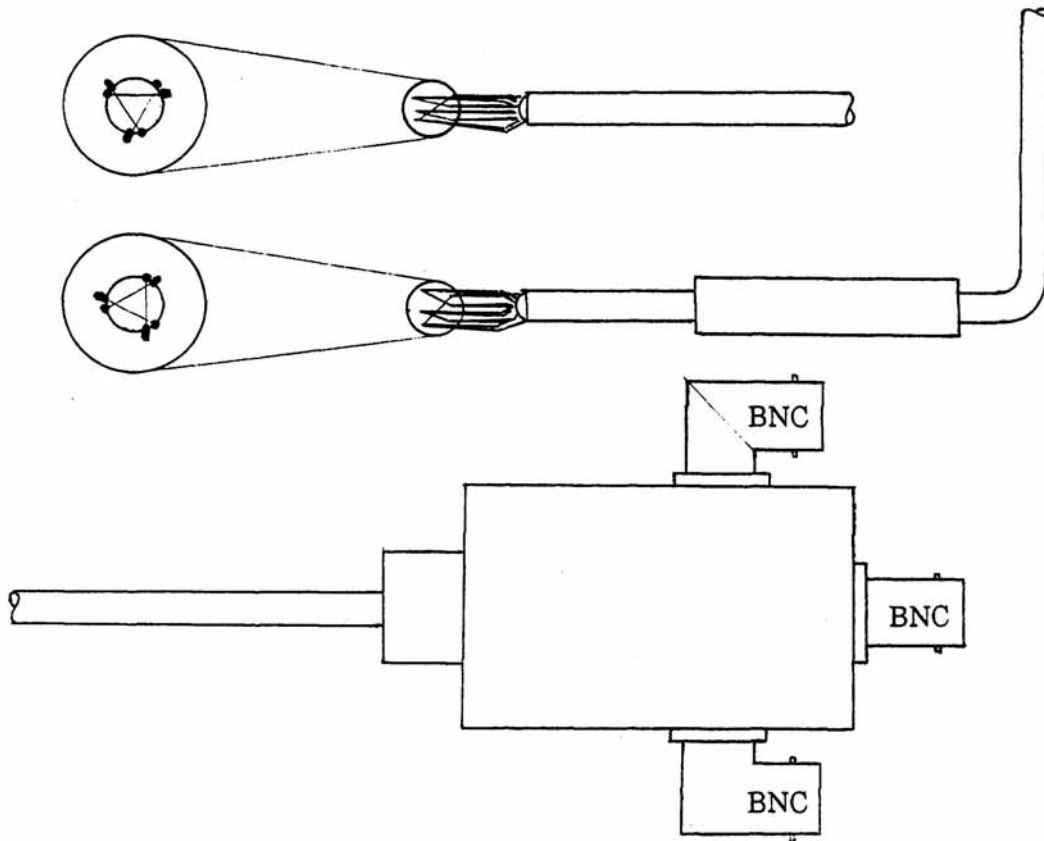
X型プローブ
Model 0252-T5

X型プローブ
Model 0295-T5



① I型プローブ

② X型プローブ



③ 3Dプローブ

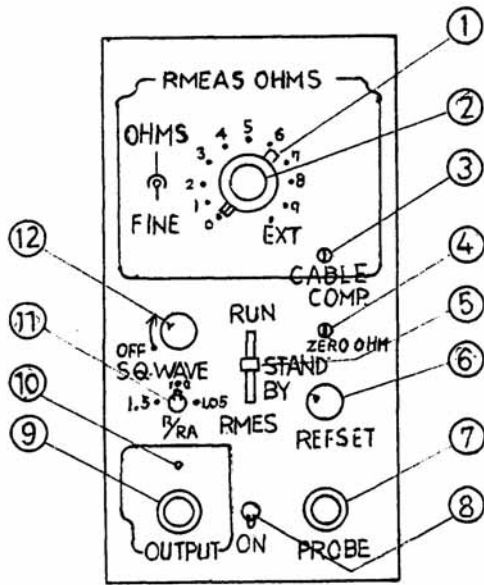
図-3 プロブセンサーの種類

図-3- はI型プローブと言われる物で、これは熱線に垂直な方向の平均風速 U と変動成分 μ の測定に用いられるものである。図-3- はX型プローブと言われ、二本の熱線エレメントは相互に 90° で交叉するように溶接されており流れの中に設置すればそれぞれの流れの方向に対して 45° の角度で設置されるように作られている。定常流 U の方向及び3方向の変動成分 u 、 v 、 w の計測に用いられる。

3 熱線風速計の取り扱いについて

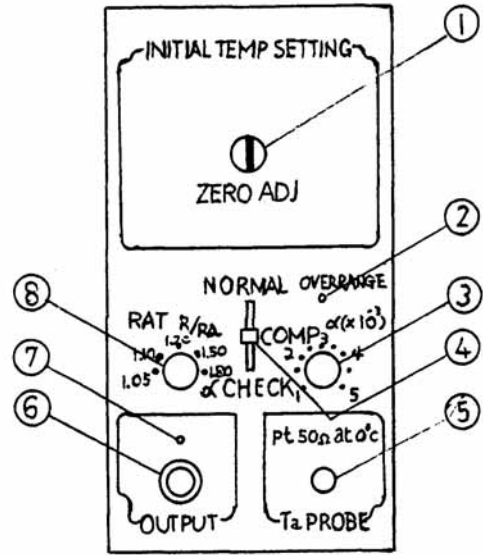
現在防災研究所構内に在る大気災害部門耐風構造分野所属の境界層風洞実験室には、簡易型CTA アネモマスター1011型図-4とリニアライザーユニット1013型図-6を電源ユニッ

トに一体化した熱線風速計が在る。



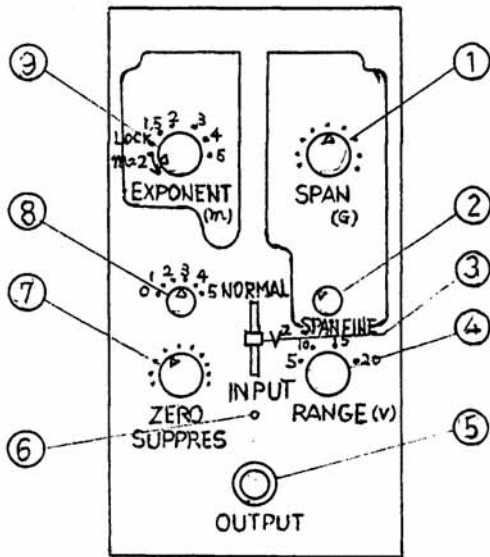
CTA アネモマスター 1011

図-4

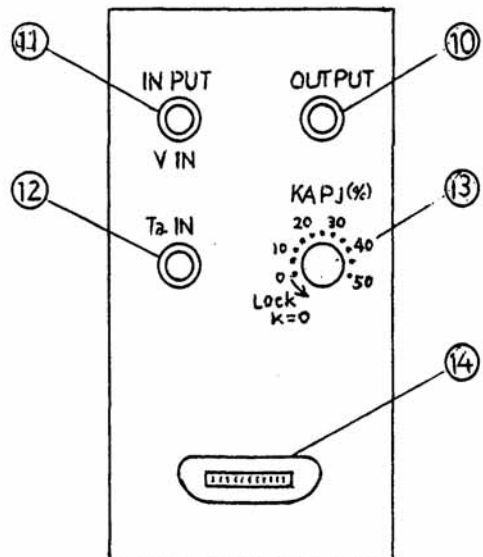


測温ユニット 1020

図-5



表パネル



裏パネル

図-6 リニアライザー 1013

この風速計の電源を入れる前にCTA—1011型(図-4)の、①のRMEAS OHMS(プローブ抵抗の設定用つまみ)を0Ω、②のRMEAS FINE(微調整つまみ)を反時計方向いっぱい、③のCABLE COMP.(プローブのリード線の補償ネジ)を約3mm程度奥に入れた状態、⑤のレバースイッチ(測定・待機・抵抗測)をSTANDBY(待機)に、⑥のREFSET(アンプの入力バイアスを調整するつまみ)を反時計方向いっぱい、⑪のR/Raスイッチ(プローブの動作抵抗を設定するスイッチを1.0に⑫SQ WAVE(応答性を測定するときに用いるスイッチを反時計方向いっぱい)にロック位置にする。これらを確認してから電源を入れる。つまりダイヤルつまみが反時計方向いっぱいになっていることを確認する。

次に⑦のPROBEジャックに測定コード、そしてサポートをつなぎその先にショートプローブを接続する。⑤のレバースイッチをRMEASにする。⑥のREFSETを時計方向に回し、OUTPUTを約2vにする。RMEASスイッチをON-OFFして、OUTPUTの電圧が2vで変化しなくなるようにZERO OHMを可変して何度もON-OFFを繰り返す。安定するとショートプローブから熱線プローブに取り換えて、被測定流体中に設定する。①のRMEAS OHMS及び②のRMEAS FINEを可変して、RMEASスイッチをON-OFFしても、OUTPUTの電圧が変化しなくなる値を設定する。⑪のR/Raスイッチを、被測定流体が空気だから1.5に倒す。⑥のREFSETを15vに設定する。⑤のレバースイッチをRUNにして測定状態になる。この時風が吹いていなくても出力電圧は0vにはならない。これはセンサーの熱が空气中に奪われるためである。風速が増してくるとセンサーを常に一定温度に保とうとする為により出力電圧も増してくる。この出力は非直線である。これを直線化するのにリニアライザーユニットという装置がある。

風洞内の気流温度が変化するために温度補償が必要である、そこで測温ユニット1020を用いる。図5参照。この測温プローブは、常温付近で、流体温度がゆっくりと変化する場合補償をしてくれる。センサーは、ガラス封入した白金線をステンレスパイプでガードしてある。このプローブを出来るだけ測温プローブの近くに取り付け、背面にあるOUTPUTからリニアライザーユニット1013型の背面にあるTa INに接続する。④のレバースイッチをαCHECKにして流速測定プローブの抵抗の温度係数 αv から α の値を計算してつまみで設定するがここでは説明を省略する。次に⑧のOVER HEATING RATIO/Raのつまみを1.5に設定する。④のレバースイッチをCOMPにして①のZERO ADJのネジを0.0vになるように調整する。

リニアライザーユニット1013型について、図6参照。⑨のEXPONENT(m)(演算指数を可変するつまみ)をLOCK(m=2)の位置にしておく。⑧の2nd compmp(%) (低速域の補償を行うつまみ)を左方向いっぱい、0の位置に。裏パネルの⑬のKADJ(%) (二次の温度補償をするつまみ)をLOCK K=0の位置にしておく。先ほどのCTANEMOMETERのうらパネルから出力コードを、このユニットの裏パネルのINPUT VINに接続し風速0(m/sec)時の入力電圧 V_0 を入力する。③のレバースイッチ(OUTPUT出力を選択するつまみ)をV2(中間演算値を出力する)にして、OUTPUTの電圧が0.0vになるように⑦のZERO SUPPRES(風速が0m/secの時入力電圧 V_0 を0vにシフトするつまみ)を調整する。このつまみは反時計回りに回すと+側になり、時計方向に回すと-側になる。0.00vと安定するまで行う。安定すれ

ば、実験に必要な 最大風速を風洞内に出し、裏パネルの V IN よりその時の入力電圧 V max を入力する。③のレバースイッチを NORMAL (最終演算値を出力する) にして、OUT PUT の電圧が 10.00v に成るように①の SPAN(出力電圧のスパンの粗調節ツマミ)および②の SPAN FINE (微調整ツマミ) を調整する。これらの操作はお互いに影響するので、風速を 0m/sec にしたり、最大風速にしたりして何度となく繰り返し、入出力特性グラフが直線化するまで行う。これが熱線風速計の調整のしかたである。

I 型の場合には一体化した熱線風速計 (電源ユニット、CTA-1011 型、リニアライザーユニット 1013 型) と測温ユニット 1020、を上に述べた方法で調整すればよい。

X 型プローブの場合にはセンサーが二本あるのでもう一台熱線風速計がいる。これも同様に調整すれば良い。

4 3D (三次元センサー) の検定について

3D (三次元センサー) の場合には、センサーが三本あるので三台熱線風速計が必要になる。測温ユニットについては共通で用いている。温度設定については、温度抵抗係数 α の値が必要である。温度抵抗係数 α は、物質値で白金の場合 3.9×10^{-3} になる。しかし結晶状態や歪等により若干変化する。温度抵抗係数 α を求める為に式①を用いる。

$$\alpha_{0.100} = \frac{(R_{100} - R_0)}{(R_0 - R_{int})} \div 100 \quad \text{--- ①}$$

例えば Model1299-BN-20 のプローブの場合、それぞれ三本のセンサーの温度係数を下の表に示す。

Fragile sensors			TSI		
Probe Model 1299bn-20		Serial 952131	Rref.no.155438		
sensor no	proberes at 0°C R	R100-R Ω	Recom-mended oper.res.R, P, Ω	Recom-mended oper.Temp., Top, °C	Internal Probe Res Rint Ω
1	5.77	1.62	9.82	250	0.32
2	5.36	1.37	8.79	250	0.33
3	5.36	1.49	9.09	250	0.33

表-1 Model1299-BN-20 の温度係数

式-1 にそれぞれを代入して

センサー①の温度抵抗係数 α は

$$\alpha_{0.100} = \frac{1.62}{5.77 - 0.32} \div 100 = 2.97 \times 10^{-3}$$

センサー②の温度抵抗係数 α は

$$\alpha_{0.100} = \frac{1.37}{5.36 - 0.33} \div 100 = 2.72 \times 10^{-3}$$

センサー③の温度抵抗係数 α は

$$\alpha_{0.100} = \frac{1.49}{5.36 - 0.33} \div 100 = 2.96 \times 10^{-3}$$

$\alpha = 2.72 \sim 2.97 \times 10^{-3}$ を得る。この α の値を温度補償ユニット (図-5) のスイッチ④を α CHECK にして③のダイヤルを、求めた α の値を平均して 2.88 の値にする。④のスイッチを NORMAL にしておく。

風洞実験室での実態配線図を図 7 に示す。

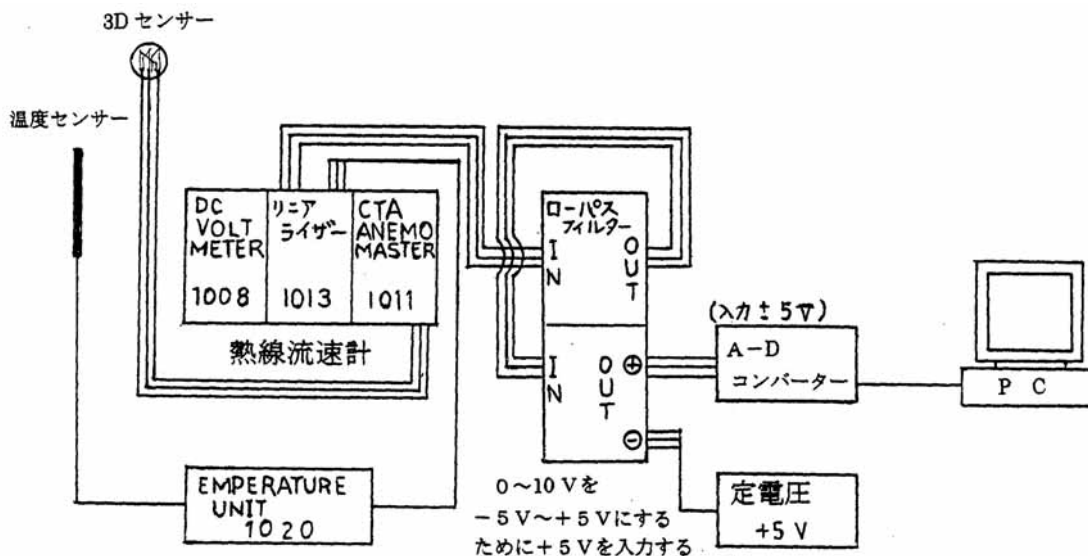


図-7 実態配線図

まず測定コードの設定抵抗を測定する為に I 型、X 型プローブの場合には、サポートにショートプローブを取り付けて測定するけれども、3D プローブの場合にはセンサーの取り外しが出来ないので、それぞれ設定に合ったサポート、ここでは表-1 の $R_{int} \Omega$ の値、センサー①では 0.32Ω 、②では 0.33Ω ③では 0.33Ω に近いサポートにショートプローブを取り付けて、CTA-1011 型の ZERO OHM で三体共コード補正をしておかなければならない。調整が終われば 3D プローブを取り付ける。

2D (三次元センサー) プローブのトラバース装置への取り付けには、図 8 のようにトラバース装置に、同じ研究室の羽野淳介技術課長製作のプローブ取り付け装置、真鍮のパイプ $15 \phi \text{mm}$ と真鍮ブロック $30 \times 30 \times 40.50 \text{mm}$ の組み合わせによって取り付けられる。その装置に 3D プローブを取り付ける。ここでは図-8 のように取り付けした 3D-L 型プローブを示している。

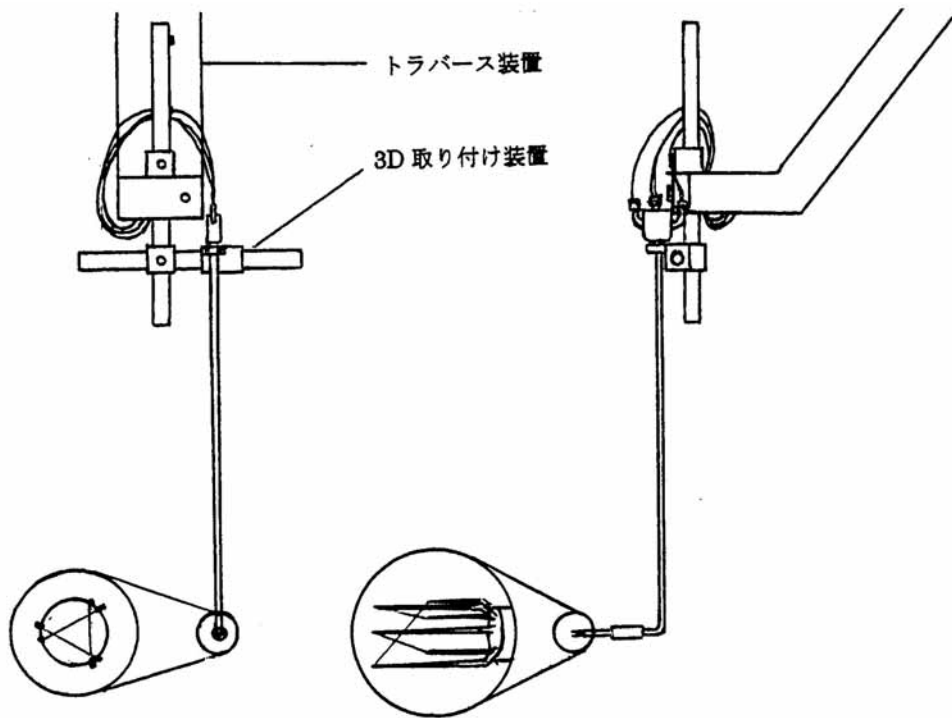


図-8 3D-L型プローブの取り付け

センサーのリニアリティーを得るために、例えば風洞実験風速を 7m/sec で測定するとき、風洞風速を2~3割多めに、ここでは 10m/sec に設定しておき、この時の最大風速を 10Volt にすればその時の、風洞風速の値がそのまま風速の値として読み取ることが出来る。まず熱線三本がそれぞれ同じようにリニアリティーに成るよう、図-6の理に荒いザー1013型の⑦ZERO SUPPRES を調整するために、レバースイッチ③を V^2 にする。風速 0m/sec 時の CTA-1011 型の出力電圧を入力し、OUTPUT 出力が 0Volt になるように⑦ZERO SUPPRES を可変する。レバースイッチ③を V^2 から NORMAL にして、最大風速この場合 10m/sec にして、その時の V_{max} の値を入力し、その OUTPUT 出力が 10Volt になるように SPAN ①、SPAN FINE②を調整する。この時 0Volt の値が多少ずれるので風速を 0m/sec にして再度繰り返す。

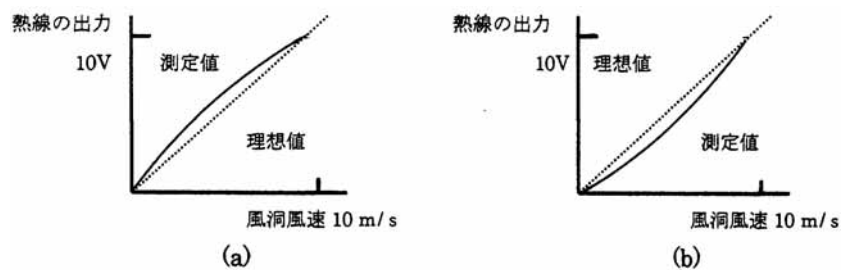
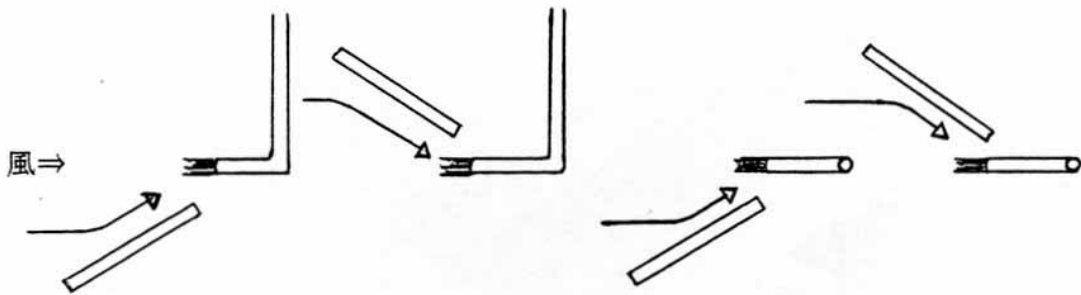


図-9 入出力特性のグラフ

風速 $0 \sim$ 最大風速まで風洞の回転数を数段階に分けてその時の出力電圧と風速を測定

し、入出力特性をグラフに表し、直線になっているかどうかを調べる。

図 9 (a) のように理想値よりも上になった場合⑨の EXPONENT (m) の値を大きくする。
 (b) のように下側になった場合 m の値を小さくする。そして理想の直線性が得られるまで何度となく風洞風速を上げ下げして調整し、直線化されたことを確認してからプローブの指向特性を調べておく。まずそれぞれの熱線がどの方向から風を受けているかを調べるために、熱線の近くへボードを近づけて、図 10 のように強制的に風向を変えてセンサーに風をあてて出力を調べておく。



上向きの風 下向きの風 左向きの風 右向きの風

図-10 センサーの風向を調べる

u	v	w	u'/u	v'/v	w'/w
1	0	0	0	0	0
2	1.224	0.001	0.003	0.0025	0.0021
3	1.321	0.452	0.241	0.0133	0.0132
4	1.124	-0.764	0.185	0.0175	0.0209
5	1.21	-0.161	-0.738	0.0114	0.0065
6	1.221	0.043	0.756	0.0102	0.009
7	1.22	0.001	0.002	0.0014	0.0019

表-2 センサーの風向の測定結果

①風速 0

②一様流

⑦一様流

⑧風速 0

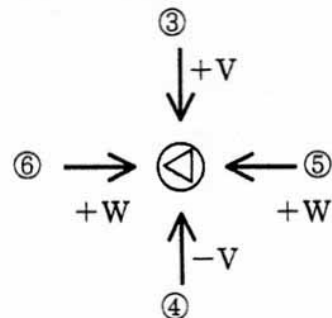


図-11 センサーの出力の方向

表一2はその時の測定したデータで、 u ：一様流（ここではデータの測定回数）、 v ：横方向から受ける風、 w ：上下方向からの風、 u/u ：風速成分の乱れ、 v/v ：横方向の成分の乱れ、 w/w ：上下方向の乱れの成分である。図一11は3Dセンサーの出力方向成分の結果を図示した物である。この図ではV成分とW成分が入れ変わっているのでデータを取る時に変換して取る必要がある。

次にプローブを図一12に示すようにX軸回転、風上側、風下側にそれぞれ $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 置きに 90° まで測定する。またY軸回転も風上に向かって左、右に同じ様に 90° まで測定する。またY軸回転も風上に向かって左、右に同じ様に 90° まで測定する。Z軸方向（水平方向）に $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 置きに 360° 回転させて測定をしておく。

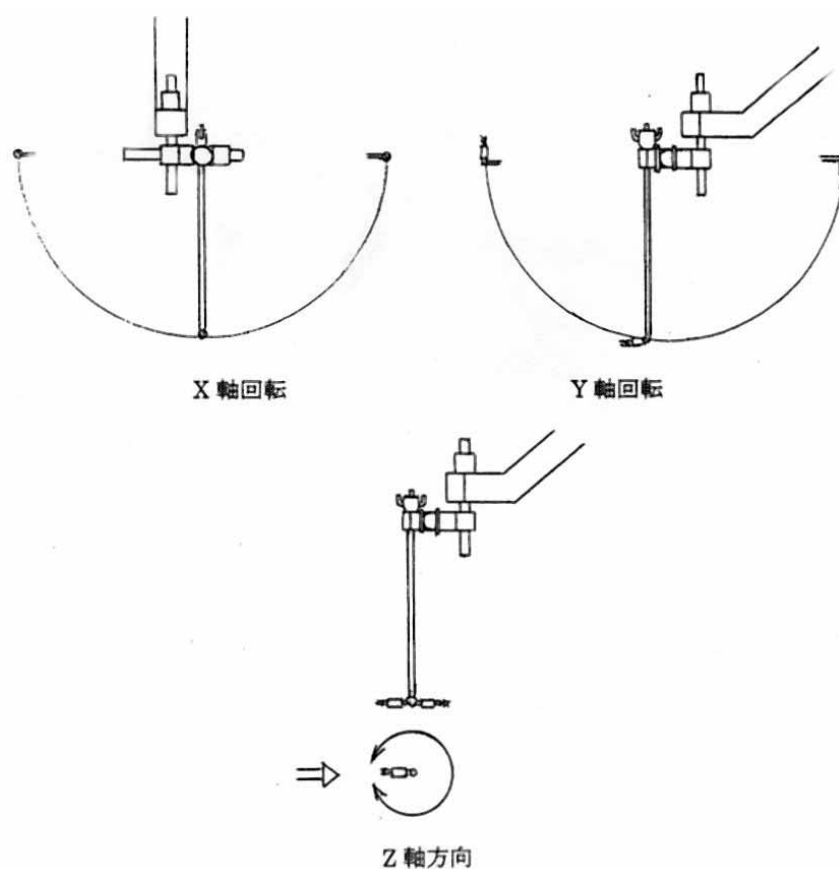


図-12 3Dセンサーのもつ風向特性を調べる

この特性を一度調べておくと熱線が切断されるまで使用できる。ただし、使用するたびに熱線の直線化の検定は必要である。

【参考文献】 日本科学工業（KANOMAX）熱線流速計取り扱い説明書

この特性を一度調べておくと熱線が切断されるまで使用できる。ただし、使用するたびに熱線の直線化の検定は必要である。

【参考文献】 日本科学工業（KANOMAX）熱線流速計取り扱い説明書