

タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定

Measurements for Three Components of Turbulent Flow with Tandem Hot Wire Probe.

村上周三*・小峯裕己*
Shuzo MURAKAMI and Hiromi KOMINE

タンデム型熱線風速計は、風向の検出が可能であり、指向性は COSINE カーブに従い、平均風速および変動風速の X, Y, Z 各方向ごとの測定が可能な風速計である。

本報では、タンデム型熱線風速計の概要、改良経過および最終的なタイプの性能について解説を行い、この風速計の応用例の一つとして、建物周辺気流に関する風洞実験結果について述べる。

序

現在、風洞実験で多用されている I 型プローブ熱線風速計やサーミスタ風速計は、風速ベクトルの絶対値のみ検出するものであり、風速が正負に変動するような領域では、1) 風向が検出できない。2) 指向性のために正しい測定が難しい。3) 出力信号の反転により、実際よりも風速が大きく表示される等、平均値・変動分ともに正しい測定を困難にしている点がいっつか指摘される。

筆者らは、このような I 型プローブやサーミスタ風速計の計測技術上の問題を解決するため、風向が感知でき、かつ、X, Y, Z 各方向ごとの平均風速および変動風速の測定が可能なタンデム型熱線風速計を試作してきた。

本報では、タンデム型熱線風速計の改良経過および最終的に製作されたタイプの性能について述べ、次にこれを用いて測定した建物周辺気流の風洞実験結果について述べる。

1. タンデム型熱線風速計の特徴

1.1 タンデム型プローブの形状

写真1にタンデム型プローブを、写真2に平行プローブを示す。タンデム型プローブは、平行プローブの2本の熱線が楕円柱の両端にくるよう、全体を接着剤で成型したものである。

1.2 タンデム型プローブの電気回路構成

図1にタンデム型プローブの出力を検出する電気回路の構成を示す。2本の熱線からの出力電圧を別々に取出す時、楕円柱表面の熱伝達率の違いにより、楕円柱前縁すなわち風上の熱線からの出力は風下側のそれより大きくなる。引算演算器は同時に入力される2本の熱線からの出力電圧 E_1, E_2 の差を求め、この電圧差 $(E_1 - E_2)$ を増幅して出力する。 $E_1 > E_2$ の時は正の電圧が、 $E_1 < E_2$ の時は負の電圧が出力されるので、どちらの熱線が風上側なのかはわかり、すなわち風向がわかり、出力の絶対値から風速の絶対値がわかる。

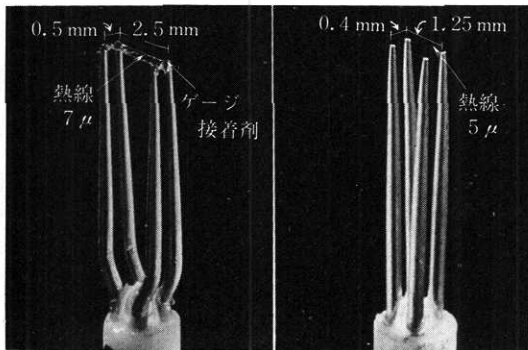


写真1 タンデム型プローブ (マーク VI)

写真2 平行プローブ

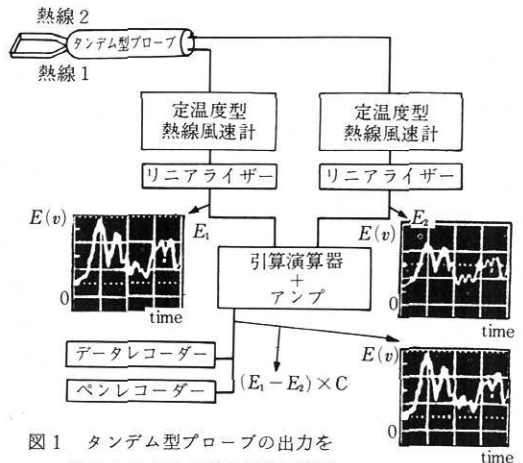


図1 タンデム型プローブの出力を検出するための電気回路の構成

*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

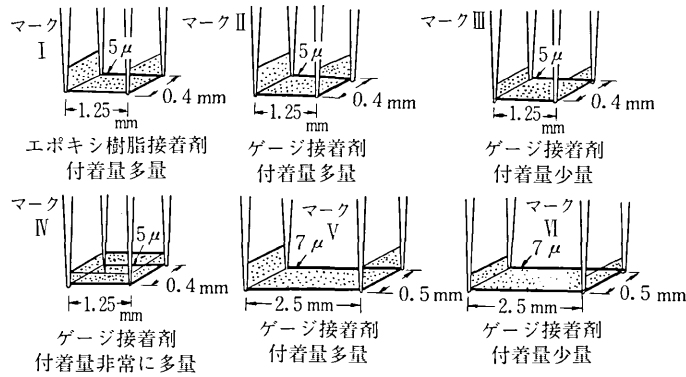


図2 試作した6種類のタンデム型プローブ

2. タンデム型熱線風速計の改良

2.1 試作したタンデム型プローブの種類

図2に、本研究で試作した6種類のタンデム型プローブの受感部の略図を示す。

マークIは、写真2に示すような市販されている平行プローブをエポキシ樹脂接着剤で成型したものである。マークII～IVもマークIと同じ平行プローブをゲージ接着剤で成型したもので、接着剤の付着量の違いによりマークII～IVに分類している。マークVおよびVIは熱線を張る針の間隔を上げた平行プローブをゲージ接着剤で成型したもので、付着量によりマークVとVIとに分けている。

なお、接着剤の膜厚は、付着量が多い時で200 μ程度、少ない時で50 μ程度である。

2.2 接着剤の改良

マークIは耐熱温度が低いエポキシ樹脂接着剤を使用しており、センサー部の加熱温度を通常の熱線プローブのその半分程度の90°C前後にししかとれないため、外気温の微小な変化に対しても較正曲線の狂いを生じる。

そこで、マークIIでは耐熱温度が200°C程度のゲージ接着剤を使用し、センサー部の加熱温度を180°C前後に設定できるようにしたところ、長期間使用しても較正曲線に狂いを生じなかった。以後、ゲージ接着剤を使用することとした。

2.3 指向性の改良

図3にマークII, IIIおよびVの平均風速 \bar{U} に関する指向性を示す。マークIIの指向性は、 $\theta = 90^\circ$ や 270° 付近における指示値が急激に変化するものであった。この原因の一つとして、熱線を張る針の間の接着剤の盛り上がりと考えられたので、接着剤の付着量を可能な限り少なくしたマークIIIを、また、付着量を反対に多くして厚い板状のセンサーにしたマークIVを試作した。マークIIIの指向性とマークIIのそれとは図3に示すように大きな変化がなく、また、マークIVの指向性は図に示していない

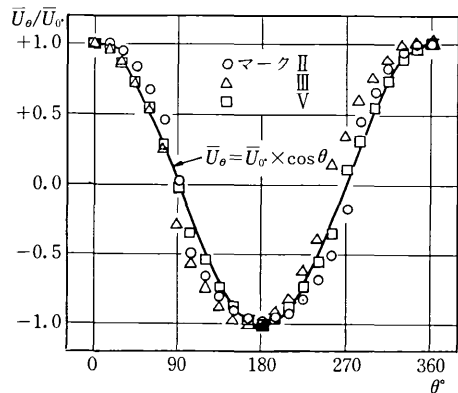


図3 指向性の比較 (一様流中におけるマークII, IIIおよびVの指向性)

いが、 $\theta = 90^\circ$ および 270° 付近の指示値の変化がかえって激しくなりマークIIのものより悪くなった。

指向性に影響を及ぼすもう一つのものとして、熱線を張る針が考えられたので、針の間隔を上げたマークVを試作し、指向性を調べたところ、図3に示すように $\bar{U}_\theta = \bar{U}_\infty \times \cos \theta$ に従う満足すべきものであった。

2.4 乱れに対する応答の改良

図4にI型プローブ、タンデム型プローブ・マークIII及びVで測定した平板境界層流の乱れの強さ $\sqrt{u'^2}/\bar{U}_\infty$ の比較を示す。

熱線に対する接着剤の付着量が少ないマークIIIがI型プローブの結果に近く、接着剤の付着量が多いマークVとI型プローブの指示値との差は大きい所で3~4%もある。

また、図5に同じ境界層流における自己相関 $R(\tau)$ 、パワースペクトル $S(f)$ に関するI型プローブとタンデム型プローブの測定結果の比較を示す。縦軸は、相関器やフーリエ変換器からの出力のままであるが、熱線の較正やデータ処理のプロセスにおける増幅や減衰のさせ方は全く同じなので、このままで比較できる。

$\sqrt{u^2}/\bar{U}_\infty$ の比較同様、マーク III は I 型プローブの結果に近く、マーク V ははるかに悪い。

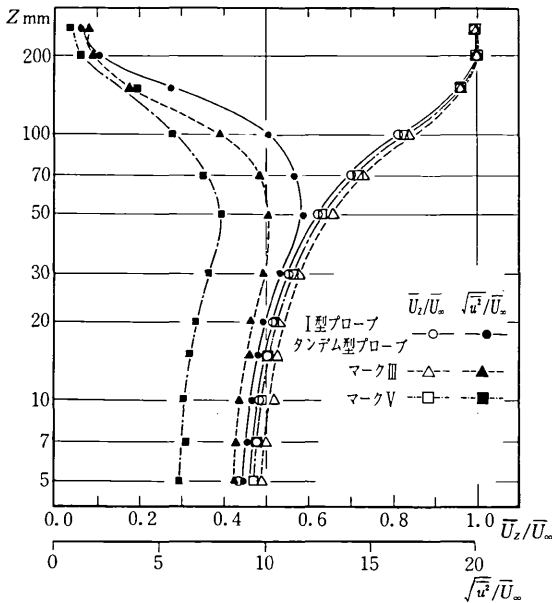
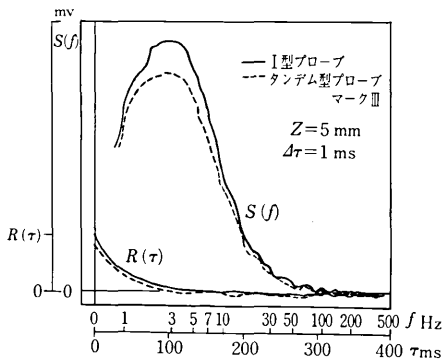
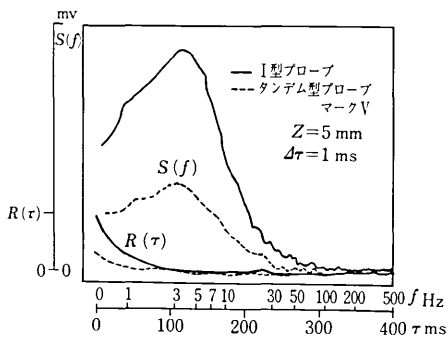


図4 乱れの強さ $\sqrt{u^2}/\bar{U}_\infty$ の比較
(境界層流において、I型プローブとタンデム型プローブ
マーク III 及び V で測定)



1) タンデム型プローブ・マーク III と I 型プローブで測定



2) タンデム型プローブ・マーク V と I 型プローブで測定

図5 境界層流における自己相関及びパワースペクトルの比較

2.5 まとめ

以上のことから、指向性については熱線を張る針の間隔を拡げたマーク V が、乱れの統計量に関する測定結果については熱線を被う接着剤の付着量が少ないマーク III が望ましいとわかった。両者の長所を合わせて、次節で述べるマーク VI を試作した。

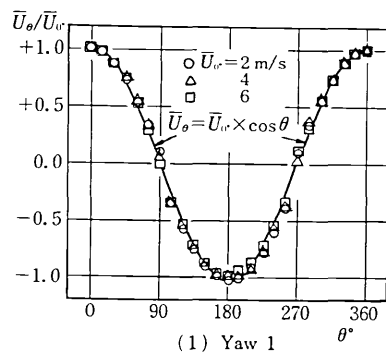
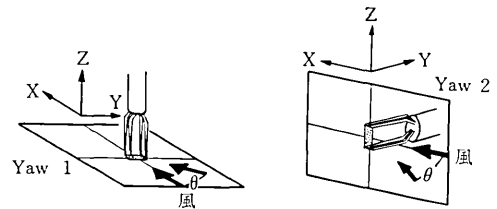
3. タンデム型プローブ・マーク VI の性能

3.1 形状

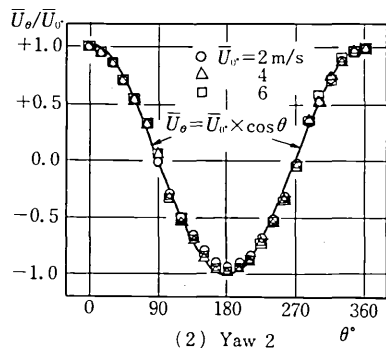
タンデム型プローブ・マーク VI の形状は写真 1 に示すもので、2 節で述べた開発経過より、熱線を張る針の間隔を拡げ、接着剤の付着量をできる限り少なくしたものである。熱線の太さは 0.7μ 、熱線の長さ 2.5 mm 、2 本の熱線の間隔 0.5 mm で、ゲージ接着剤を用いて全体が楕円形状に成型されている。

3.2 平均風速 \bar{U} に関する指向性

図 6 に一様流中において、図中に示す Yaw 1, Yaw 2 の設置法により求めた平均風速 \bar{U} に関する指向性を示す。



(1) Yaw 1



(2) Yaw 2

図6 一様流中における平均風速 \bar{U} に関する指向性。

風速の大小に関係なく、 $\bar{U}_\theta = \bar{U}_0 \times \cos \theta$ に従う指向性を示す。

また、建物後流の乱れの大きな流れにおける指向性を図7に示す。一様流中の場合に比べ、指示値が多少バラついているが、乱れが大きな流れにおいても、指向性は $\bar{U}_\theta = \bar{U}_0 \times \cos \theta$ に従う。

3.3 瞬間風速 U に関する指向性

図8にYawにおける入射角 θ が異なる2本のタンデム型プロブからの出力の比較を示す。境界層流中のごく近い位置に2本のタンデム型プロブを並べ、片方は $\theta = 0^\circ$ に固定し、他方は $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ \dots$ と順次回転させ、 $\theta = 0^\circ$ と各々の角度について、同時刻の信号を比較したものである。主流に対して θ だけ回転しているプロブの出力は、D.C. アンプにより $1/\cos \theta$ 倍だけ増幅して記録した。

全くの同一ポイントではないため、わずかの差はあるが、ほぼ一致しているとみなされ、瞬間風速 U についても $U_\theta = U_0 \times \cos \theta$ に従う指向性を示す。

3.4 変動風速の測定

① u, v, w の乱れの強さに関する測定結果

図9に回転プロブとタンデム型プロブで測定した境界層流における u, v, w の乱れの強さの比較を示す。タンデム型プロブでは、Yaw1の $\theta = 0^\circ$ により $\sqrt{u^2}$ を、 $\theta = 90^\circ$ により $\sqrt{v^2}$ を、またYaw2の $\theta = 90^\circ$ により $\sqrt{w^2}$ を測定した。

タンデム型プロブと回転プロブの間には、大きい所で2%の差があるが、熱線による v と w の測定はどのような方法を用いても誤差をとめないがちであり、今回のタンデム型プロブの測定結果は一応満足すべきものであると考える。

② 自己相関 $R(\tau)$ 、パワースペクトル $S(f)$ の測定結果

図10にI型プロブとタンデム型プロブで測定した境界層流における、瞬間風速 U に関する $R(\tau)$ と $S(f)$ の測定結果を示す。縦軸は相関器やフーリエ変換器から

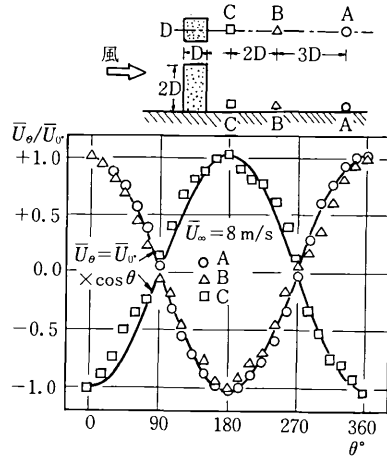


図7 乱れの大きな流れにおける平均風速 \bar{U} に関する指向性

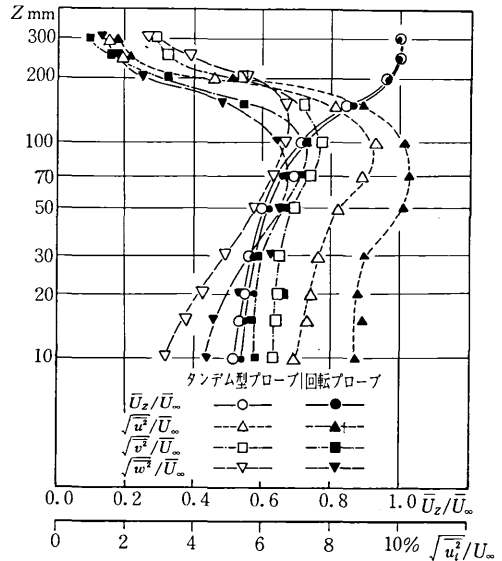


図9 乱れの強さ $\sqrt{u^2}/\bar{U}_\infty, \sqrt{v^2}/\bar{U}_\infty, \sqrt{w^2}/\bar{U}_\infty$ の比較 (境界層流において、回転プロブとタンデム型プロブ・マークVIで測定)

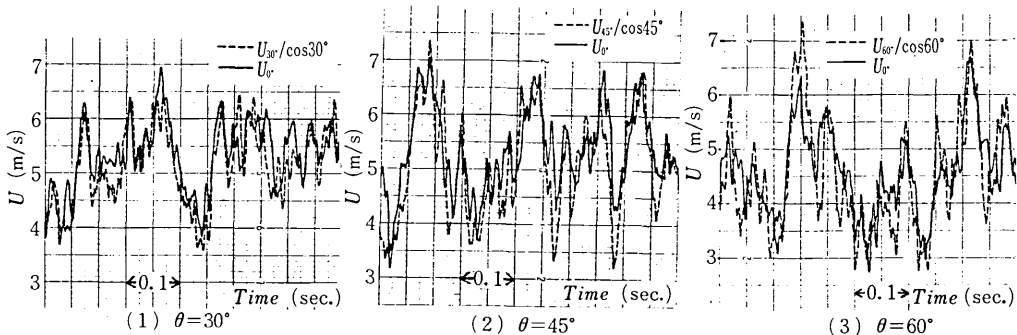


図8 2本のタンデム型プロブからの出力の比較 一入射角 θ が異なる場合一

の出方のままであるが、前述のように熱線の較正やデータ処理の仕方は全く同じにしているのので、このままで比較ができる。両者の結果は非常によく一致している。

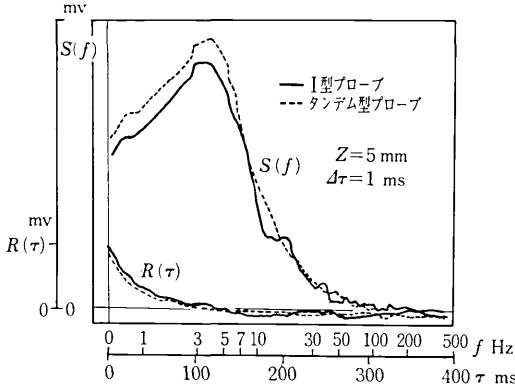


図10 境界層流における自己相関とパワースペクトルの比較 (I型プローブとタンデム型プローブ・マークVIで測定)

4. 風洞実験による建物周辺気流の測定

4.1 測定概要

測定部断面 1.8×1.2 m、長さ 9.8 m の境界層型風洞に、図11に示すような模型を設置し、模型周辺の風速を測定した。

図6中に示すYaw 1によりタンデム型プローブをX、Y方向に向けてU、Vの測定を、Yaw 2によりZ方向に向けてWを測定した。なお、測定点はX、Y、Z方向を

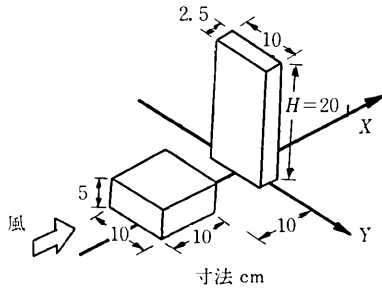


図11 模型の設置状況

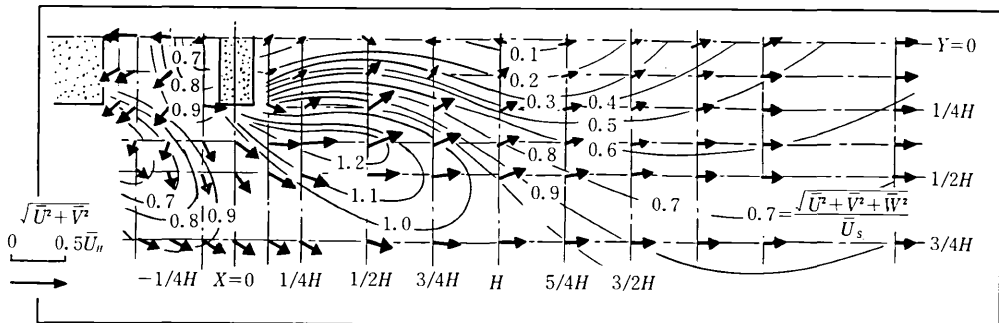


図13 地表面近くの、水平断面内における風速ベクトル $(\bar{U} + \bar{V})$ ($Z = 1/40H$ におけるもの) (図中の数字は、 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ を合成した風速の模型設置前の同じ点における風速 \bar{U}_s に対する割合を示したものである。)

$1/4 H (= 50 \text{ m/m})$ 間隔に格子状に分割し、これらの交点を測定点とした。ただし、建物近傍ではさらに細かく分割した。模型がない時の垂直風速分布および乱れの強さの分布は図12に示すようなものである。

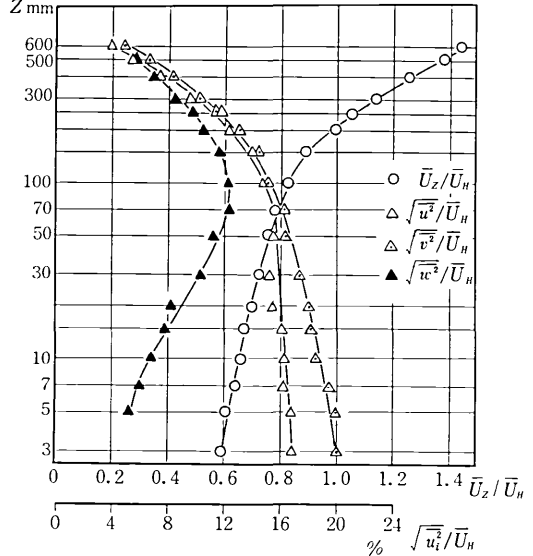


図12 模型がない時の垂直風速分布

4.2 測定結果

① 平均風速と風向の分布について

地表面近くの水平面における平均風速および風向をベクトル $(\bar{U} + \bar{V})$ で表示したものを図13に示す；また、模型中心軸を含む鉛直面における平均風速および風向をベクトル $(\bar{U} + \bar{W})$ で表示したものを図14に示す。図中の等風速比線は $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ を合成した風速の模型設置前の同じ点における風速 \bar{U}_s に対する割合を示したものである。

これらの図より、高層模型の風上側壁面の下降流が低層模型風背面に向かって吹いており、この部分では $\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{W}^2} / \bar{U}_s$ が0.99と模型が無い時の風速とはほぼ等しい風が吹いており、模型の風下におけるものとしては非常に大きいことが判る。また、この部分では全体的

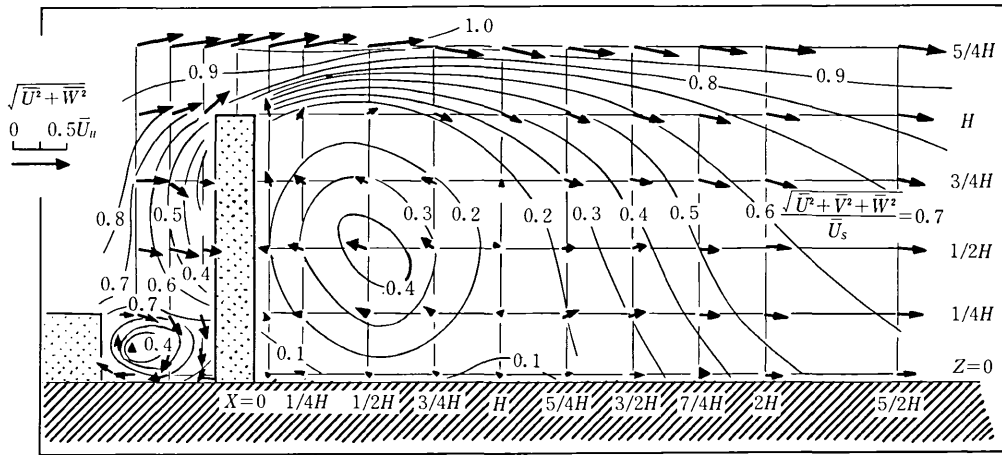


図14 模型中心軸を含む鉛直断面内における風速ベクトル($\bar{U}+\bar{W}$) ($Y=0$ におけるもの)

に \bar{W} が大きくなっている。高層模型の斜め前方では \bar{U} より \bar{V} が大きく、ほぼ Y 方向に風が吹いている。

模型周辺の流れの大まかなパターンとして、高層模型と低層模型の間での鉛直断面内の回転流、高層建物風下での水平断面内および鉛直断面内の回転流が挙げられる。

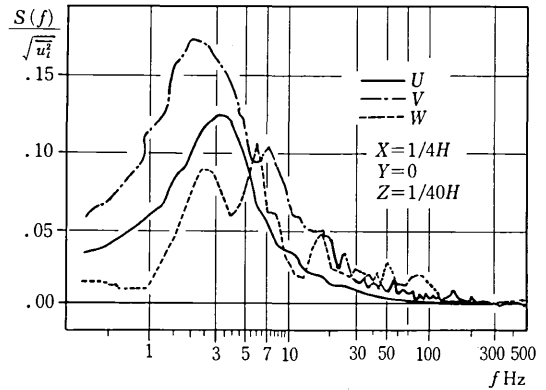
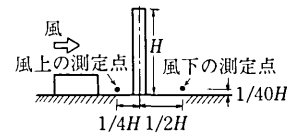
② 自己相関 $R(\tau)$ について

高層模型風下における U, V, W の自己相関 $R(\tau)$ を図15に示す。測定点は模型中心軸上にあり、流れの対称性より V が正負に変動して $\bar{V}=0$ となるような所である。 V の自己相関は、上述の流れの状況を反映しており、その変動には明瞭な周期性が認められる。

③ パワースペクトル $S(f)$ について

図16に高層建物の風上と風下におけるパワースペクトル $S(f)$ を示す。測定点は図中に示すが、風下については $R(\tau)$ の測定点と同一の点である。

(2) に示すように、建物風下での V のパワースペクトルは約8Hzのところにシャープなピークがみられる。試みに、 $f=8\text{Hz}$, $\ell=0.1\text{m}$, $\bar{U}_{H/2}=5.4\text{m/s}$ を St



(1) 風上におけるパワースペクトル
($X=-1/4H, Y=0, Z=1/40H$)

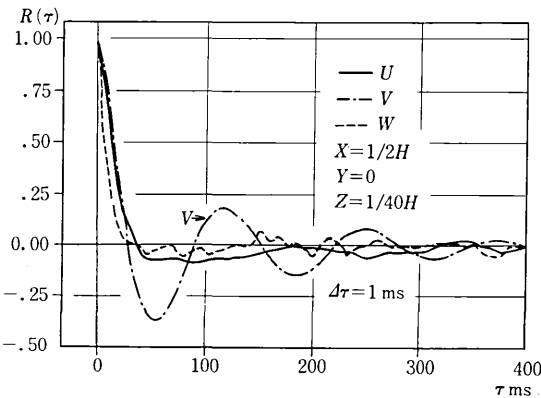
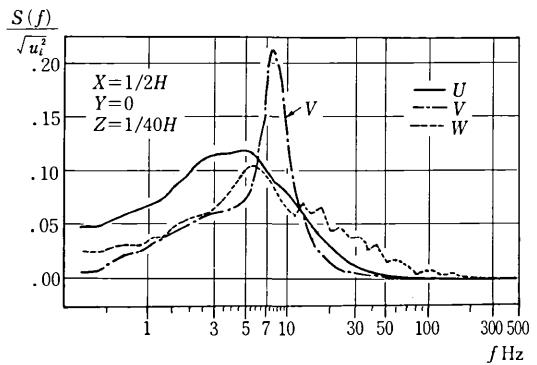


図15 高層模型風下における自己相関
($X=1/2H, Y=0, Z=1/40H$ におけるもの)



(2) 風下におけるパワースペクトル
($X=1/2H, Y=0, Z=1/40H$)

図16 高層模型の風上と風下におけるパワースペクトル

$= fL/\bar{U}$ に代入してストローハル数を求めると 0.15 となり、既往の報告⁴⁾と一致する。

5. ま と め

今回開発したタンデム型プローブの性能は次の通りである。

- ① 指向性については、平均値・瞬間値共に $\cos \theta$ で充分正確に表示される。
- ② Yaw 1, Yaw 2 の方法で回転することにより、 $U \cdot V \cdot W$ 及び $u \cdot v \cdot w$ を相当に高い精度で測定することが可能である。
- また、建物周辺気流の測定結果については以下のように言える。
- ③ 高層建物風下では $X = H$ 付近を中心として、水平断面内および鉛直断面内に回転流が形成される。高層建物と低層建物の間では、下降流のため鉛直断面内に回転流が形成される。
- ⑤ 高層建物近傍では、 \bar{U} よりも \bar{V} や \bar{W} の方が卓越する領域がある。
- ⑥ 高層建物風上と風下のパワースペクトルの形状はかなり異なり、特に風下の V については 8 Hz での明瞭な周期性が特徴的である。

お わ り に

本研究のプローブ試作にあたって、(株)ハヤカワ計測研究所各位からご協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。(1978年6月13日受理)

記 号

- U, V, W ; 瞬間風速, m/s, $U = \bar{U} + u$ $V = \bar{V} + v$
 $W = \bar{W} + w$
- $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$; 模型周辺で測定した平均風速, m/s
- u, v, w ; 変動成分, m/s
- \bar{U}_θ ; 入射角 θ で風が吹く時の風速計からの出力, m/s
- \bar{U}_{0° ; 風が熱線に直角に吹く時の風速計からの出力, m/s
- \bar{U}_z ; 境界層流中の風洞床上 Z における風速, m/s
- \bar{U}_H ; 模型設置前の風洞床上 H における風速, m/s
- \bar{U}_s ; 模型設置前, U を測定した点と同じ点における風速, m/s
- \bar{U}_∞ ; 境界層外の自由風速, m/s
- $R(\tau)$; 自己相関係数
- $S(f)/\sqrt{u_i^2}$; パワースペクトル, 1/Hz
- H ; 高層建物高さ, mm ここでは $H = 200$
- f ; 周波数, Hz
- Z ; 風洞床上の高さ, mm
- τ ; ラグ・タイム, ms

参 考 文 献

- 1) 浅沼・山川・早川：タンデム熱線型の燃料流量計について、日本機械学会誌。73巻, 617号, 1970。
- 2) 溝田・田島：熱線による非定常流域の流速測定法, 九州大学応用力学研究所報。45号, 昭和51。
- 3) 村上・小峯：タンデム型プローブ熱線風速計の試作と改良, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭和53。
- 4) 藤本武助：流体力学, 養賢堂。

次 号 予 告 (9 月 号)

研 究 解 説

非平衡化学反応系におけるゆらぎの効果..... { 岩 元 和 敏
妹 尾 学

研 究 速 報

抵抗焼結法によるボロン繊維強化アルミニウム複合材料の作製..... { 明 智 清 明
一機械的性質に関して一 原 善 四郎

B 繊維-Al 複合抵抗焼結材の組織と B-Al 界面 { 明 智 清 明
原 善 四郎

都市河川の汚濁回復に関する研究 { 鈴 木 基 之
一野川水質サンプルの藻類生産力一 川 島 博 之

面内二軸荷重下の疲労き裂成長の破壊力学的研究 (第一報) { 北 川 英 夫
一高サイクル二軸荷重疲労試験機の開発一 岡 井 村 城 良 治
結 大 松 平 原 諱 昭 男

ペイナイト鋼板積層による打抜き型の高精度化..... { 中 川 威 雄
鈴 木 清

砂のランダム繰返し入力に対する応力~歪関係のモデル化について (1) { 龍 岡 文 夫
福 島 伸 二