

X形熱線プローブによる二次元変動流の計測法

(昭和54年5月30日 原稿受付)

第2部 機械工学科	西	道	弘
江本建設KK	榎	枝	幸
機械工学教室	松	永	成
			徳

Simple Measurement of Two-Dimensional Nonsteady Flow
by Means of X-Hot Wire Probe

by Michihiro NISHI
Shigeyuki ENOEDA
Shigenori MATSUNAGA

Abstract

To measure both the magnitude and direction of instantaneous velocity in two-dimensional nonsteady air flow, a X type hot wire is selected, and the calibration procedure is developed. The experimental study shows that the present X-wire probe is quite suitable for the measurement of periodic flow downstream of the centrifugal impeller exit.

1. まえがき

空気流の瞬時速度の測定に対して熱線風速計は広く使用されている。気流中に挿入された一本の熱線の設定角度を変えて熱線出力電圧を順次読み取り、それら間の関係から二次元流れ場における速度の大きさ及び方向を測定する方法もみられるが、対象とする流れが時間的に変動する場合に平均量が正しく測られているという保証はない。

二次元気流中の瞬時速度ベクトルを精度よく測定するために、本研究では、2本の熱線がX形に配置されたX形プローブを点測定に近づける意図から又利用し易さも考慮して選び、これを用いた計測法について検討し、プローブ特性を実験的に明らかにした。

なお、この研究の成果は高比速度遠心羽根車出口部における変動流の解明に利用していく予定であり、時系列データとして集録するX形プローブからの出力信号を計測機処理する方式をとるために、以下に示す計測法では定温度型熱線風速計の直線化増幅器を必要としない。

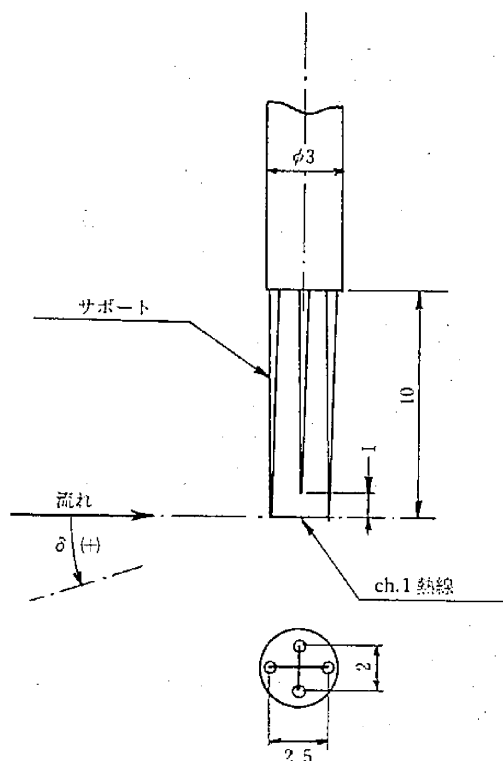
2. X形熱線プローブ

熱線プローブを流れと直交するように壁面から挿入し各時刻時刻における速度の大きさと方向を同時測定するために、2本の熱線をV字形に配置した使用例²⁾もあるが、点測定に近づけることを意図してX字形に配置する方式を採用した。使用したX形熱線プローブの形状寸法を図1に示すが、2本の5 μ クングステン線は同一平面内でX形にし得ないので、約1 mmの間隔を設けてほぼ直交するように配置されている。以下、長いサポートにはられた外側の熱線を ch.1、内側のものを ch.2 と呼ぶ。

なお、計測対象としている遠心羽根車出口部平均流れは、ピトー管を用いた測定結果によれば、そのメリジアン流線の半径方向からの傾きがあまり大きくないので、二次元流れとして取り扱えるようである。³⁾

3. X形プローブの特性表示

X形プローブの出力電圧と流速との関係を調べる。図-2は速度Vの二次元流れ場に置かれたX形熱線を示しており、0-0線より測った速度Vの方向は偏角 β を表



図一 X形熱線プローブ

わす（角度は時計回りを正にとる）。ch.1, ch.2 それぞれの熱線の法線方向と速度 V とのなす角度を α_1 および α_2 とおけば、各種角度の間には次の関係が成立つ。

$$\beta = \alpha_1 - \Delta\alpha_1 = \alpha_2 + \Delta\alpha_2 = \gamma - \gamma_0 \quad (1)$$

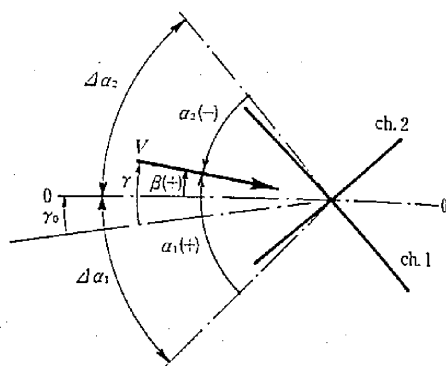
ここで、設定角度 γ_0 は流れ場の基準の方向と 0-0 線 ($\beta = 0$) とのなす角度を示し、 γ は基準の方向と流れの方向とがなす角度である。

計算機を用いたデータ処理を前提としたために、定温度型熱線風速計には直線化増幅器を設けないので、熱線出力電圧 E_1, E_2 と速度 V との関係には king の式を直接用いて取り扱うことにした。

$$E_1^2/E_{01}^2 = 1 + F_1 V^{\frac{1}{m_1}} \quad (2a)$$

$$E_2^2/E_{02}^2 = 1 + F_2 V^{\frac{1}{m_2}} \quad (2b)$$

ここで、 E_{01}, E_{02} は零風速のときの出力電圧である。 F_1 および F_2 は実験的に定められる係数であり、使用する熱線が決められ又流体温度および設定熱線温度がほぼ一定に保たれる場合、それぞれ角度 α_1 および α_2 のみの



図二 座標と記号

関数として与えられる。

Webster³⁾ によれば、熱線方向特性に関する係数 F_1, F_2 は

$$F_1/F_{10} = (\cos^2 \alpha_1 + \epsilon_1^2 \sin^2 \alpha_1)^{\frac{1}{2m_1}} \quad (3a)$$

$$F_2/F_{20} = (\cos^2 \alpha_2 + \epsilon_2^2 \sin^2 \alpha_2)^{\frac{1}{2m_2}} \quad (3b)$$

ここで、 F_{10}, F_{20} は角度 α_1 および α_2 が 0 のときの値であり、 ϵ_1, ϵ_2 は実験的に定められる定数である。

指数 m_1, m_2 はいずれも 2 に近い値であることおよび式 (3) の関係を考慮すれば、熱線出力の組合せと流れの方向とが次式により関係づけられる。

$$\frac{(E_1/E_{01})^2 - 1}{(E_2/E_{02})^2 - 1} = \frac{F_1}{F_2} = F_\beta \quad (4)$$

ここで、角度係数 F_β は偏角 β の関数である。

4. プローブの検定

4.1. 実験装置

図-3の写真はX形プローブとその検定風洞を示す。整流タンク①に取付けられたノズル②を通して62倍に増速されて大気中に噴出される空気流内に熱線プローブ③を置いて、プローブ特性は実験的に調べられる。熱線の挿入断面としてはノズル出口径 ($D=50\text{mm}$) の2倍下流の一樣流部分を選んだ。整流タンク①へ空気を送り込むターボファン入口ダンパにより 5 m/s から 50 m/s までの範囲で気流速度が変えられる。

読取精度 0.5° の分度器を有する熱線プローブ・トラバース装置④は割出盤⑤に置かれた保持台⑥に取付けられる。熱線プローブの先端が割出盤の中心に位置するよ

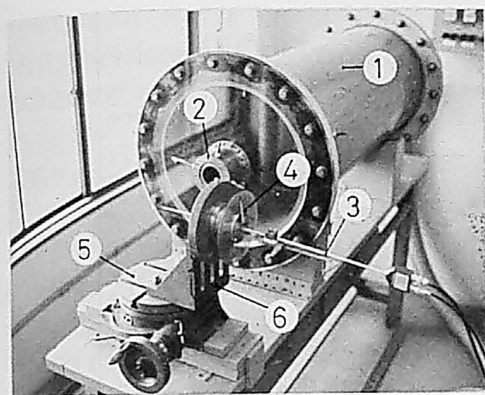


図-3 検定装置

うに、又割出盤⑤によりプローブ軸が噴流と直交するように(仰角 $\delta=0$ に相当する)調整される。その後、プローブの取付けられたトラバース装置を回転させて偏角 β をある値に設定し、熱線出力電圧を読み取り、検定実験を進めた。プローブ軸に対して流れが傾いた場合の測定精度に与える影響を調べる際は割出盤⑤により仰角 δ を変化させた。

4.2. 指数 n_1 , n_2 の決定

(2)式に現われる指数 n_1 , n_2 を求めるために、2本の熱線をそれぞれ流れと正対するように ($\alpha_1=0$ と $\alpha_2=0$ の状態) 設置して、空気流速を変え出力電圧を調べた結果

が図-4である。内側に位置する ch. 2 熱線は ch. 1 サポートの影響を受けるために ch. 1 の結果と比べて出力電圧が低い。実験値を結ぶ実線は最小二乗法を使って求めた近似線であり、ch.1 と ch. 2 の指数 n_1 および n_2 としてそれぞれ 2.14, 2.13 が得られた。

4.3. 方向特性

熱線レイノルズ数 $Re=13$ において X 形プローブを軸回りに回転させて熱線出力電圧の方向特性を調べたが、横軸に α_1 をとって整理した実験結果を図-5に示す。ch. 2 の出力電圧は ch. 1 用サポートの後流の影響を受けるために流れに正対する位置 ($\alpha_2=0$) で低下する傾向がみられる。なお ch. 1 の流れと正対する位置および ch. 2 の場合の位置は出力電圧を測定したのち方向特性が左右対称に最も近づく角度位置として定めた。

ch. 1 熱線の方向特性とレイノルズ数の関係を調べた結果が図-6である。熱線に対する流れの傾き角度が大きいく所でレイノルズ数の違いによる差がみられるが、 $\pm 2\%$ の誤差を許すならば、約 75 度の角度域においてレイノルズ数の影響は無視し得る。ch. 2 についても同様な結果が得られた。なお、図-5からも明らかなように、ch. 2 の場合 (3b) 式による方向特性の表示は α_2 が小さいところで適用されない。

図 6 中の実線は (3a) 式で近似した ch. 1 の方向特性を示す。最小二乗法から求めた ε_1 は 0.05 である。比較のために $\varepsilon_1=0$ の場合の式を破線で同図中に記した。

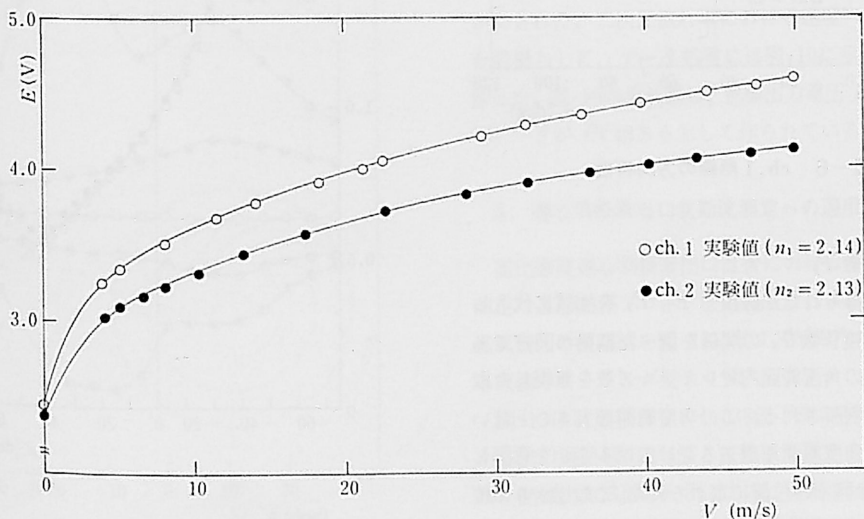


図-4 風速と出力電圧

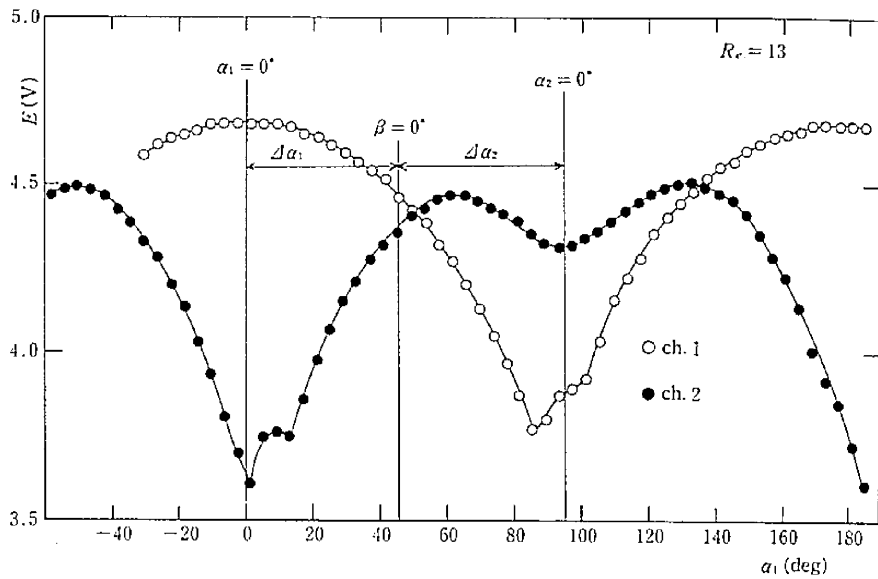


図-5 偏角と出力電圧

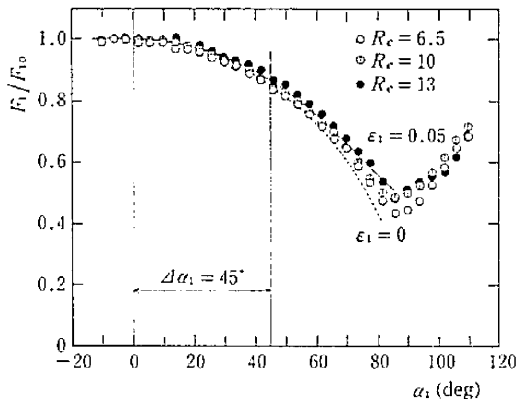
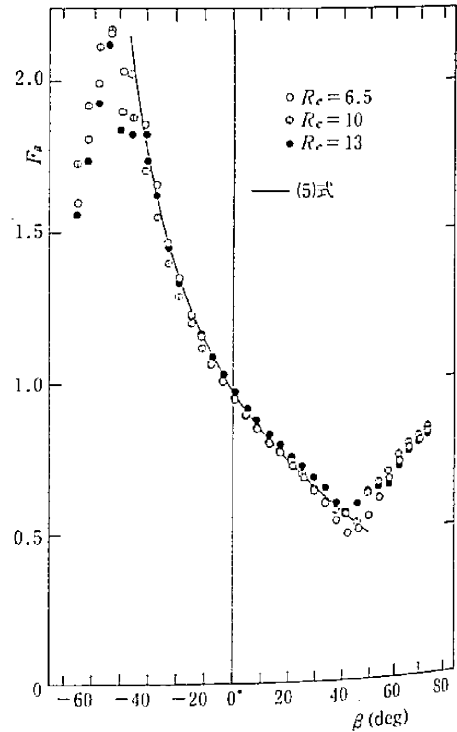


図-6 ch.1 熱線の方角特性

4.4. 角度係数 F_β

検定実験で得られた熱線出力 E_1 , E_2 を(4)式に代入して偏角 β と角度係数 F_β の関係を調べた結果が図-7である。約 ± 30 度の角度範囲内でレイノルズ数を無視した取扱いが可能と判断される。この角度範囲は大きいとはいえないので、角度範囲を出来るだけ広げることを意図して偏角 $\beta = 0$ は図示の位置に定められた。この $\beta = 0$ の位置は、プローブの設定角度 γ_0 が実測時必要となるために、トラバース装置に付属された分度器の目盛と関係づ

図-7 角度係数 F_β の較正曲線

けられている。

F_β は, (3)式を(4)式に代入して得られる関係に基づき, 次式で近似する。

$$F_\beta = g_1 \sqrt{\frac{1+g_2\beta}{1+g_3\beta}} \quad (5)$$

ここで, β は度で表わされる。実験値より $g_1=0.97$, $g_2=-0.01$ および $g_3=0.02$ が求まった。この実験式を图中に実線で示す。

実測時X形熱線出力電圧より F_β が定まれば, (5)式を変形した次式にその値を代入することから偏角 β が求められる。

$$\beta = \frac{(F_\beta/g_1)^2 - 1}{g_3(F_\beta/g_1)^2 - g_2} \quad (6)$$

4.5. F_β に対する仰角の影響

仰角 $\delta=0$ の場合には熱線出力 E_1, E_2 を(6)式に代入して速度の方向を正しく求め得るが, 流れがプローブ軸に対してある傾きをなしていると, 角度の測定誤差引いては速度誤差につながる恐れが予想される。それ故, 5種類の偏角を選んでそれぞれの角度に設定し, 仰角 δ を

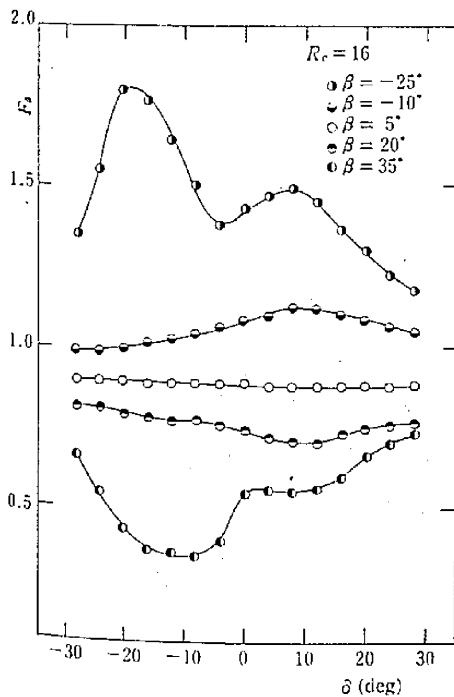


図-8 仰角 δ と角度係数 F_β の関係

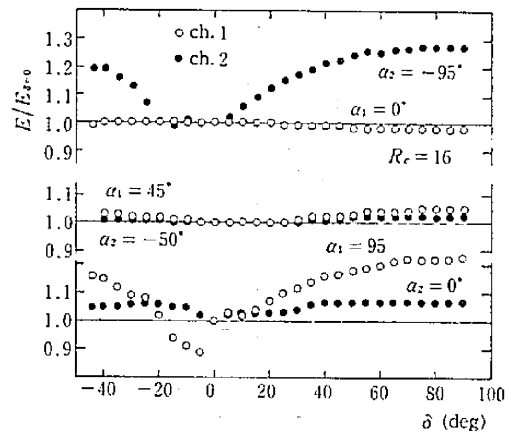


図-9 仰角と出力電圧

変えていった場合の F_β に与える影響を調べた。その結果を示す図-8によれば, 角度係数 F_β に及ぼす仰角 δ の影響は β が零に近い値をとるとき無視される。

ch. 1 および ch. 2 出力電圧の仰角に対する方向特性を示す図-9によれば, 流れと正対するように配置された熱線は仰角の影響を殆んど受けないが, もう一方の熱線は仰角 $\delta=0$ でほぼ流れに沿って置かれることになり δ の変化に敏感である。熱線出力が法線方向速度成分によることから, 二本の熱線を流れと45度程度の角度に設定すれば, 熱線出力に及ぼす仰角の影響を低減できる。

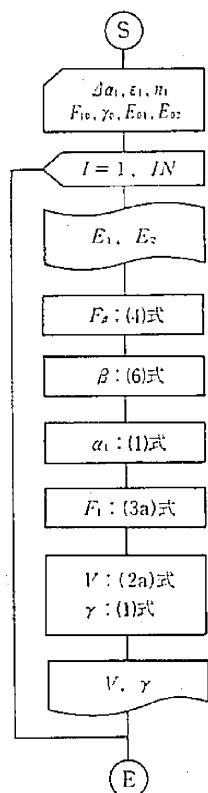
4.6. データ処理法

以上の検定実験によりX形熱線プローブの特性が明らかにされた。二次元流れ場における速度ベクトルの測定を前提として, データ処理には図-10に示される手順を採った。図-10の流れ図は, 熱線出力電圧 E_1, E_2 の時系列データが 1N 組あるとして作られている。

5. 遠心羽根車出口変動流測定への適用

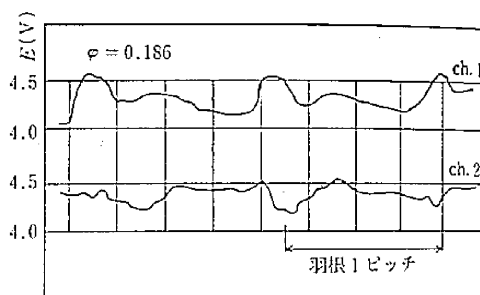
高比速度遠心羽根車出口直後における周期的変動流の測定にX形熱線プローブを適用した。実験に用いた遠心送風機³⁾の概略図を図-11に示す。熱線プローブは羽根車車板側のケーシング壁より挿入した。

図-12は羽根車外径の1.038倍下流の半径位置で車板から出口通路幅の1/4深さに熱線を設定したときに得られた熱線出力波形の一例である。X形プローブに及ぼす流れの三次元性の影響をなるべく受けないようにするため, プローブはおおよそ平均流れの方向に設定した。

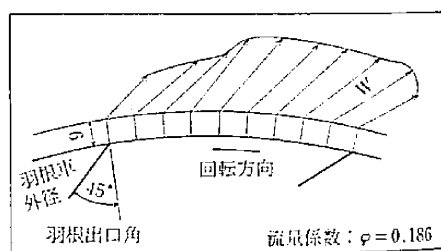


図一10 データ処理の
手順

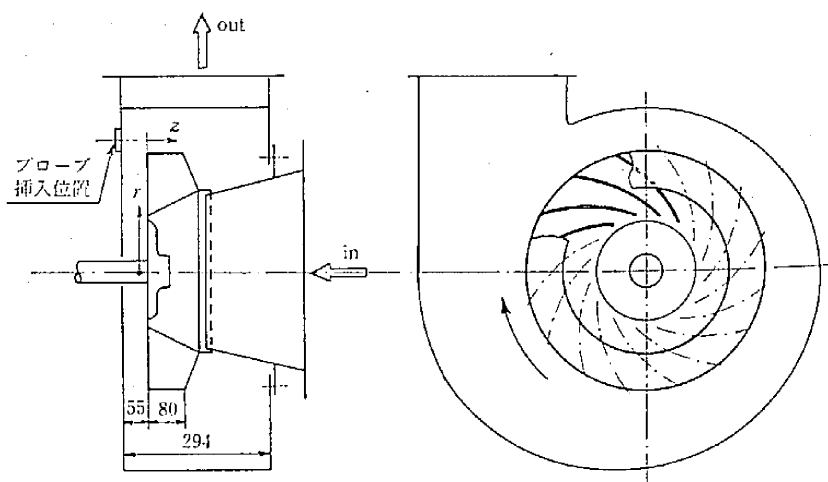
速度455 (rpm, $m^2/min, m$) の羽根車の場合、羽根間流れ
出口部流れの絶対速度ベクトルを求め、羽根車周速を
用いて羽根1ピッチに相当する区間の相対速度分布を算
出した。その結果を図-13に示す。1ピッチ間の相対速度
の流出角はほぼ一定値を保っており、したがって良好に
流動状態が測られていると判断される。実験に供した比



図一12 出力波形



図一13 遠心羽根車下流の相対速度分布



図一11 供試遠心送風機

この実測データを図-10の手順に従って処理し、羽根車のウェークの部分はジェット部に比べて小さく、測定半径位置ではかなり一様化された流れに達しているようである。

6. むすび

X形熱線プローブを用いた変動流の計測法に関する実験的研究により以下の事が明らかとなった。

- (1) X形プローブを不平衡方式で使用する場合、 ± 30 度までの二次元変動流の計測が可能である。
- (2) X形熱線の2つの出力がほぼ等しくなるようにプローブを設定するならば、三次元流れであっても速度の大きさを正しく測定できる。
- (3) 遠心羽根車出口変動流の測定結果は妥当なものと判断され、プローブの有用性が確認できた。

終りに、本研究の遂行にあたり色々とお助け言していただいた本学石橋治生助教授、塚本寛助教授に対し、又実験に協力してくれた当時卒論生の富永博芳、福田耕博両君に対して深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Rose, W. G., Symposium on Measurement in Unsteady Flow, (1962), 85, ASME.
- 2) Senoo, Y., Ishida, M., Proc. 2nd Int. JSME Symposium, 2 (1972), 61.
- 3) 松永・西・榎枝, 日機論叢, No. 784-11 (昭53-11), 80.
- 4) Hinze, J. O., Turbulence, (1959), 73, McGraw-Hill Co.
- 5) Webster, C. A. G., J. Fluid Mech., 13-2 (1962), 307.
- 6) Dean, Jr., R. C., Senoo, Y., Trans. ASME-D, 82 (1960), 563.