

定温度型熱線風速計とX型プロ - ブの製作

小杉 淳* ウドゥワゲ チンタカ** 仁尾 一義***

Making of the Constant Temperature Anemometer and X-Type Hot-Wire Probe.

ATSUSHI KOSUGI C. T. UDUWAGE KAZUYOSHI NIO

Abstract— HWA (Hot-Wire Anemometer) which most often used by turbulent measurements was advanced in digitalization by uses DSP etc. . However it's an analog type have the advantage by which the real time measurement can be done and is still used widely now. The HWA instrumentation system of the analog type which corresponded to the X-type probe that becomes necessary to measure two-component of turbulence velocity field was built. Manufactured HWA is CTA(Constant Temperature Anemometer) type, and it has the high-pass filter and the integration circuit as the operation circuit and it is applicable in various turbulent measurements. The characteristic of CTA was checked with a wind tunnel. As a result, it was confirmed that the CTA had a frequency characteristic enough for the turbulent measurement.

Key Words : Hot-Wire Anemometer, CTA, X-Probe

1. 緒言

風洞や水槽実験において速度場（風速分布や速度変動）の計測は、流体现象を解明する上で重要である。この時、特に乱流に代表されるように速い速度変動を伴う現象の測定には通常、熱線風速計（HWA : Hot Wire Anemometer）、LDV（レ - ザ - ドップラ流速計）、超音波流速計などが用いられ、また最近ではPIVやPTV（粒子像速度計測法）といった可視化した画像から一度に広い範囲の速度情報（面情報）を得る方法⁽¹⁾なども実用化されている。この中で HWA はその原理・構成⁽²⁾が比較的簡単で、取扱いも容易なことから現在でも乱流計測の主流を成している。これは気流中におかれた加熱細線からの熱伝達が、流れの関数として及ぶことができる King の法則⁽³⁾をその原理としており、演算用のアナログ IC を使用することで容易に線形化回路を構成できるため、研究機関等では自作して用いられることも多い⁽⁴⁾。しかし、近年 PC 用の A/D ボ - ドや DSP（デジタル信号処理機）が安価なものとなり、このため HWA のブリッジ回路を含むヘッドアンプのみアナログ回路で構成し、線形化器やその他信号演算処理を PC や DSP で処理させて用いることが主流になりつつある⁽⁵⁾。この方法は複雑な演算処理や HWA の自動較正、多チャンネル化などに有利であるが、高価な DSP を除きリアルタイムで流速が求められないなどの欠点もある。一方、アナログ方式の HWA は、市販品よりかなり安価にそして高精度なものを実験目的に合わせた仕様を持たせ、自作して用いることが可能である。そこで本研究では現在製作中の拡散実験用風洞の乱流特性を計測するために必要となる HWA の計測システムの製作を行

った。製作は、乱流場の 2 方向速度成分の同時計測に対応できるように X 型プロ - ブをセンサとする定温度型熱線風速計 (CTA: Constant Temperature Anemometer) と、演算処理に必要な各種付属回路について行った。また、合わせて X 型プロ - ブおよびその較正作業に必要な首振りサポ - トなどについても製作を行い、小形吹出し型風洞を用いて製作した X 型熱線風速計システムの評価を行った。

2. CTA および X 型プロ - ブによる風速測定の原理

熱線風速計は加熱した金属細線が流れの冷却作用によって電気抵抗を変える性質を利用した風速計である。このうち定温度型熱線風速計 (CTA) はこの電気抵抗を一定に保つよう（定温度）フィ - ドバック制御を行い、この時の帰還電圧 E（出力）から風速を求めるものである。この原理図を図 1 に示す。この場合、加熱線のジュール発熱と気流による放熱量の関係を表わすキングの法則から(1)式が得られ、これを電気回路で演算処理すれば CTA を構成することができる。

式中の G、Z₀、およびべき乗部分の 1/m は較正定数であるが、1/m については風速 15m/s 以下では経験的

$$U = \{G(E^2 - Z_0)\}^{1/m} \quad (1)$$

U : 流速 Z₀ : ゼロ調整
1/m : 2.22 G : ゲイン

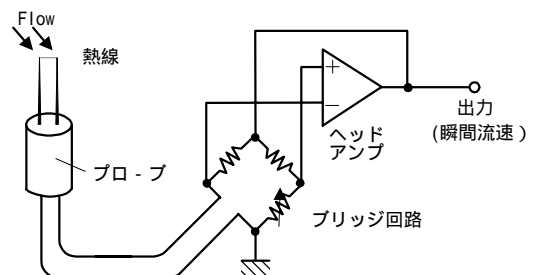


図 1. 定温度型熱線風速計の原理

* 釧路高専 機械工学科

** 山形大学 機械システム工学科 (H13 年度卒業生)

*** 出光興産株式会社 (H13 年度卒業生)

に 2.22 が実験結果と良い対応をすることが知られている⁽⁶⁾。したがってこの逆関数を与える線形化回路を通すことで瞬間流速を得ることができる。

乱流場の 2 方向速度成分を同時に計測する場合、X 型プロ - プが最も良く用いられる。X 型プロ - プは図 2 に示すように 45° に傾斜した 2 本の熱線から構成される。このとき (2) 式の演算により流れの二方向成分 (U_x, U_y) を求めることができる。

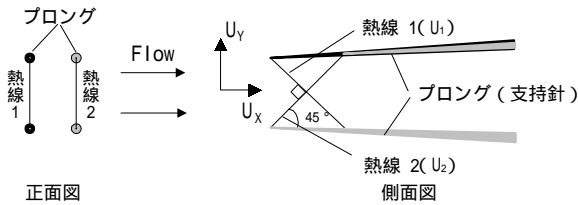


図 2 . X 型プロ - プの構成

$$U_x = \frac{U_1 + U_2}{\sqrt{2}}, \quad U_y = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{2}} \quad - (2)$$

ここで、 U_1, U_2 は各熱線からの出力 (風速) である。ただし、(2) 式は 2 本の熱線が互いに 90° で直交している場合に成立つもので、計測に際しては後述するようにプロ - プの 90° 検定を行っておく必要がある。

3 . CTA 計測システムの基本仕様

CTA とその付属回路には実験目的を考慮し以下のような仕様を持たせ製作を行った。

X 型プロ - プに対応させるため CTA は 2CH. (チャンネル) とする。低ノイズ化を図り 80dB 程度の SN 比を実現する。付属回路として次の各回路を設ける： CTA の各 CH の出力から 2 方向成分の算出を行う、加減算回路、平均風速を求める積分回路 (時定数 10, 30, 100sec)、風速の変動成分を抽出するハイパスフィルタ (カットオフ周波数 0.1, 0.01Hz)、変動成分の実効値 (RMS 値: Root Mean Square) を求める RMS 回路、プロ - プの較正作業に必要なレイノルズ応力を算出する掛算回路 (積分回路付属: 時定数 10, 30sec)。

4 . CTA の構成ならびに付属演算回路

図 3 に CTA のブロック線図を示す。CTA は、風速変化をブリッジ回路で検出し熱線の温度を一定に保つためのヘッドアンプ部と、それを線形化するためのリニアライザ部で構成されている。差動増幅器には低ノイズ OP アンプ (OP37) を使用し、リニアライザ部にも各々高精度の演算用アナログ IC を用いた。また、プロ - プの動作温度を設定する加熱比は、ブリッジ回路の一端に設けた可変抵抗でその設定を行うことができる。

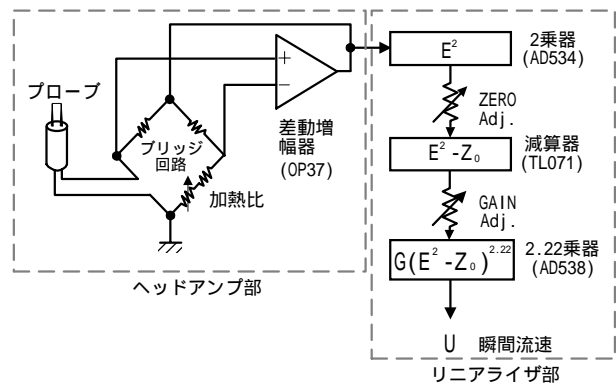


図 3 . CTA のブロック線図

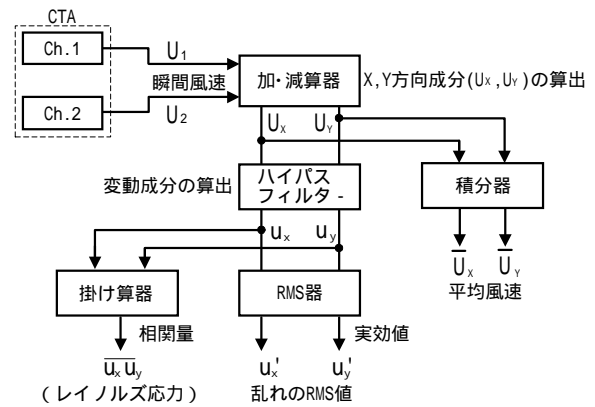


図 4 . CTA 付属回路の構成

本研究では X 型プロ - プに適用させるため CTA は 2 回路必要となり、これを次に述べる付属演算処理回路に入力することで 2 方向の乱流諸量が求められる。

図 4 に CTA 付属回路のブロック線図を示す。各 CTA からの出力はまず (2) 式の演算処理を行う加減算器に入力され速度の 2 方向成分が算出される。その後、必要に応じハイパスフィルタ - (カットオフ周波数 0.1, 0.01Hz)、積分器 (時定数 10, 30, 100sec) に入力され、速度の変動成分あるいは時間平均値を得ることができる。また、ハイパスフィルタ - の出力信号は、RMS (Root Mean Square: AD536) 器で速度変動の実効値、さらに掛算器 (AD533) でプロ - プの気流に対する平行設置作業が必要となるレイノルズ応力をそれぞれ算出できる。

以上のように構成される各回路は、低ノイズ化と安定した動作を実現させるため両面プリント基板化し、実装面積を小さく抑えて製作された。また、各回路はコネクタで着脱できる独立したユニットとなっており、回路の調整などが容易に行えるように配慮してケースへの装着を行った。

5 . X 型プロ - プの製作

熱線風速計のプロ - プには実験目的に合わせ様々な

ものが考案され用いられている。一般にプロ - プは小さいほど流れ場に与える影響が少なく空間分解能も向上する。また、熱線自体も細いほど熱容量が小さくなるため周波数特性が良く、特に乱流の高波数領域の計測などを行う上では重要な要因となる。本研究では拡散実験を行う乱流発生装置⁽⁷⁾によって形成された高乱流レイノルズ数の流れ場を把握するため、比較的高波数のスペクトルまで信頼性ある計測を行う必要がある。このため可能な限り小さなプロ - プの製作を行った。図 5 に本研究で製作した X 型プロ - プを示す。プロ - プは、熱線、ブロング、支持部から構成される。ブロングには、ピアノ線 (0.6) を研磨して尖らせたものに電導性を高めるため金メッキを施し、支持部には絶縁性の高いエポキシ樹脂を用いた。このように構成された X 型プロ - プは顕微鏡下で精密に組み立てられ、本研究では 5 μ m のタングステン線を熱線としてスポット溶接し、検査体積は 0.7 \times 0.7 \times 0.3mm³ とした。この様なプロ - プは通常サポ - トを介してトラバ - ス装置などに取付けて使用される。図 6 に製作したサポ - トを示す。本研究では激しい乱流運動でサポ - トに振動が生じないように細いパイプをトラス状に組み剛性を持たせ、さらにプロ - プの較正と設置微調整に必要な首振り機能を持たせた。首振り運動はサポ - ト下流にある角度調整ダイヤルを操作することでワイヤによる動力伝達を使い、プロ - プを流れに対し約 $\pm 60^\circ$ の範囲で動かすことができる。角度調整の精度は 0.1 $^\circ$ 以下であり再現性よく任意の角度にプロ - プを固定する

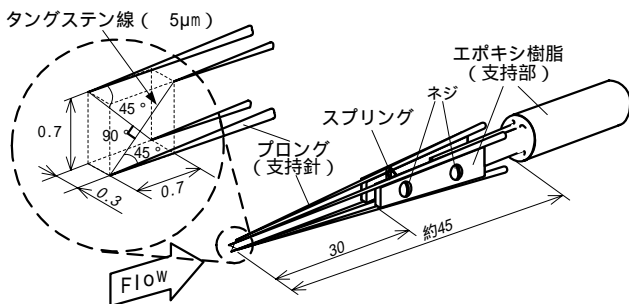


図 5 . 製作した X 型プロ - プの詳細

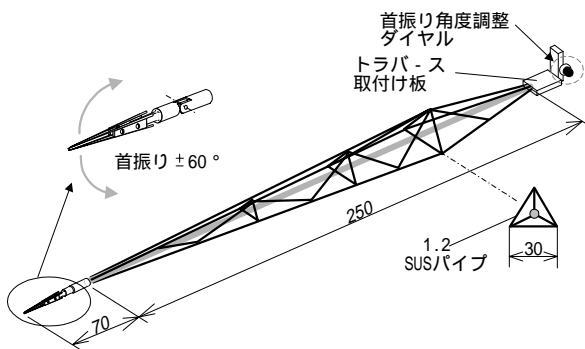


図 6 . プロ - プサポ - ト概略

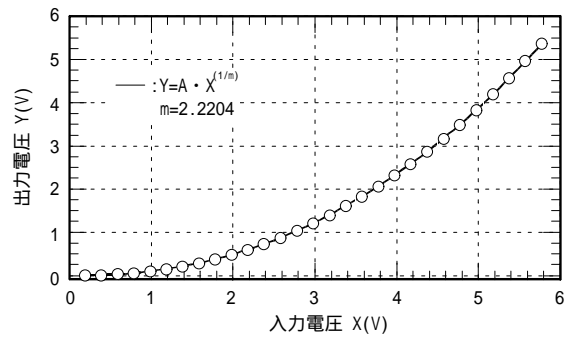


図 7 . 累乗器の入出力特性

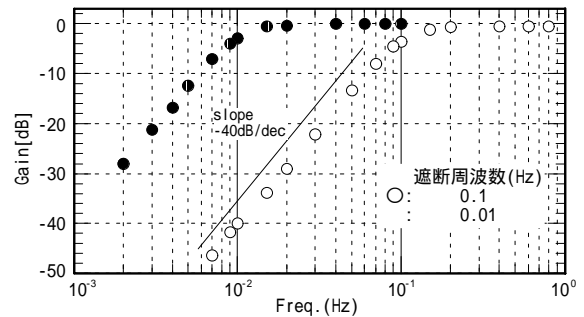


図 8 . ハイパスフィルタのゲイン線図

ことができる。

6 . X 型熱線風速計システムの評価

本研究で製作した CTA およびその付属回路が仕様通りの性能を持っているか以下の項目について評価を行った。CTA 及び付属回路の電気特性の動作確認 (フィルタ - 特性, 時定数など)、CTA のリニアリティの確認、CTA の周波数特性の確認 (周波数応答, スペクトル解析)、X 型プロ - プの 90 $^\circ$ 検定、円柱後流のレイノルズ応力の測定

5 - 1 . 各回路の動作確認

プロ - プを接続しない状態で、各回路の電気的特性を調べた。実験にはファンクションジェネレータ (FG) を使用し、適当な直流電圧あるいは正弦波を各回路へ入力し、マルチメータなどを使用して出力特性を求めた。その結果の一部として図 7 に CTA リニアライザ部分の累乗器 (2.22 乗器) の入出力特性を、図 8 にハイパスフィルタのゲイン線図を示した。累乗器にはリアルタイムアナログ演算器 (AD538) を使用したが、図 7 からわかるように指数 2.22 に一致する良好な結果が得られていることがわかる。ハイパスフィルタの仕様は 2 次のバタワ - ス型とし、遮断周波数は 0.1 と 0.01Hz とした。ともに設定した周波数位置で利得の低下が始まり、またその勾配は -40dB/dec と 2 次の逓減率となっており、仕様通りのフィルタとなっていることが確認された。

5 - 2 . CTA の動作特性

次に気流中に設置したプロ - プを CTA に接続した状

態で特性の評価を行った。図 9 に実験の概要を示す。実験には断面 150mm² 長さ 300mm の測定部を有する小形の吹出型風洞 (乱れ強度 1%以下) を使用し、プロブには自作の I 型もしくは X 型プロブ (5 μ m、タングステン) を用いた。計測はノズル下流 200mm の測定断面中央で行い、CTA からの出力信号はマルチメータまたは FFT アナライザなどに入力され、評価に必要な各データを求めた。

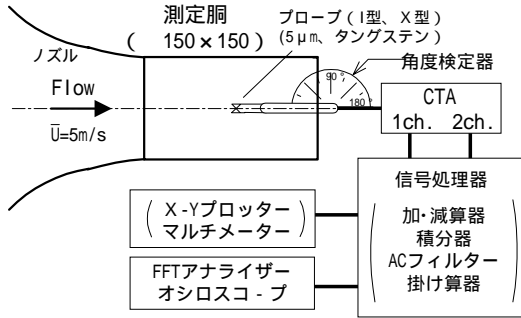


図 9. 実験装置概略

(a)CTA の周波数応答：本研究で製作した CTA の周波数応答はヘッドアンプのオフセット (非平衡電圧) の設定により調整することができる。このヘッドアンプ部は微分回路を成しており、このためこの部分の矩形波入力に対する出力波形からその応答性を判断することができる。実験は風速 5m/s のもとで、ヘッドアンプ部のブリッジの一端に 1kHz(1Vp-p)の矩形波を入力し、出力 (微分波形) が発振を起こさない範囲で出来るだけ鋭く落込む様にオフセットの設定を行った。図 10(a) に矩形波入力に対する応答波形を示す。この時の時定数は出力ピク値が 63%に逓減するまでの時間として求められ、これより $f_c=1/2$ として周波数応答の目安となるカットオフ周波数が得られる。計測の結果、はおおよそ 9 μ sec で、これよりカットオフ周波数は 17.5kHz と見積られ、十分早い速度変動まで計測可能であることが確認された。

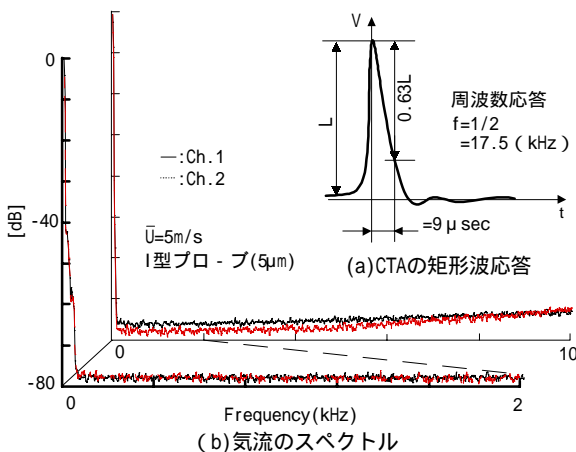


図 10. CTA の周波数特性

(b)CTA の周波数特性：CTA の SN 比およびノイズ特性を確認するため風洞気流のスペクトル解析を行った。図 10(b)に風洞気流の速度変動を FFT 解析して得られたスペクトルを示す。図は 0~10kHz と、その一部を拡大した 0~2kHz の 2 つのレンジで表している。CTA の各 CH.とも低周波から高周波数までフラットなノイズ特性を持ち、電源ノイズなど特定周波数の卓越成分も見られない。但し、高周波側でわずかにノイズレベルの増加が認められるが、サンプリング周波数のほぼ全域に渡って、約 75dB の高い SN 比が実現できており、製作した CTA が良好な周波数特性を持つことが確認できた。

5 - 3 . X プロブの評価

前述したように(2)式の演算から X 型プロブを使って速度の 2 方向成分を正確に求めるには、2 つの熱線が 90 $^\circ$ で直交していることと、さらに流れに対し完全に平行に設置することが要求される。実験に際しては各 CH.とも熱線の加熱比の設定および校正作業を厳密に行い、高いリニアリティを十分確立した状態でを行った。

(a)プロブの 90 $^\circ$ 検定：製作した X 型プロブの熱線 2 本が正確に 90 $^\circ$ を成しているか検定を行った。実験は前述した風洞測定胴中で、角度調整器 (精度 0.1 $^\circ$) に取付けたプロブを傾けながら CTA からの出力を求めた。このとき風洞壁の影響を除くため、常にプロブ先端が測定断面中央になるように行った。図 11 に角度検定の結果を示す。横軸はプロブの流れに対する迎え角であり、縦軸は各熱線の最大出力 (U_{max}) で無次元化した CTA からの出力 (平均風速) である。X 型プロブの各熱線は各々の熱線が主流に対して直角になった場合 ($\pm 45^\circ$ 傾けた状態) にその出力が最大となる。この時のプロブ角度を θ とし、これをそれぞれの熱線について求め、2 つのピク位置の差が 90 $^\circ$ であれば 2 本の熱線が完全に直行していると言える。本検定の結果は約 91 $^\circ$ であり、高精度の乱流計測で要求される $90 \pm 0.5^\circ$ を満足することは出

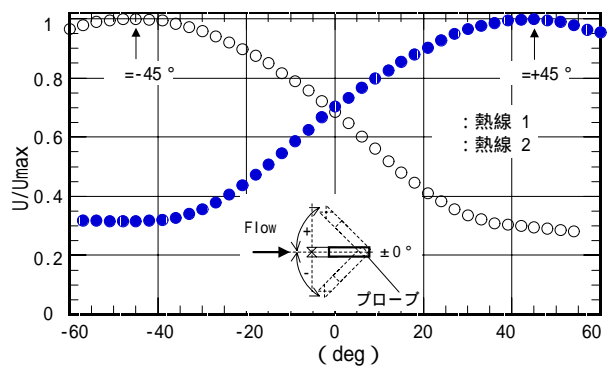


図 11. X 型プロブの角度検定曲線

来なかったが、通常の市販品と同程度かそれ以上のレベルにはあり、十分計測に用いることができることが確認できた。

(b)円柱後流レイノルズ応力の測定：X型プロ - プの90°検定の結果が良ければ、プロ - プを流れ場の計測に用いることができるが、この時プロ - プが流れに完全に平行になるように風洞内に設定する必要がある。このための確認を円柱後流のレイノルズ応力分布の対象性から判断することができる。まず、各熱線のピ - ク位置で較正作業を行い、その後サポートの首振装置を使って2つのCTAからの出力が同じになるところを探し、 $\theta = 0^\circ$ としてプロ - プを固定した。実験は測定断面中央に設置した直径 $D=9.5\text{mm}$ の円柱下流4Dの位置で、トラバ - ス装置を使用してY方向に点計測を行った。図12に各熱線の速度変動(u_1, u_2)から求めた乱れ強度分布($u_1/U, u_2/U$)を示す。ピ - ク値にわずかな差が見られるが、分布の形そのものにはほとんど違いは認められない。これは前述したように2本の熱線の交差角が90°となっていなかったことや、較正作業のわずかなズレなどがその原因と考えられる。また、図13には速度変動の2方向成分(u_x, u_y)から算出されたレイノルズ応力($\overline{u_x u_y}$)の分布を示した。図12で明らかなようにピ - ク値に若干の差があるため、レイノルズ応力の分布の対称性にもわずかな違い

が見られる。しかしその差は小さく、このことは高次の相関量などを求めることが要求される乱流計測で、少なくとも2次の相関量まで精度良く計測できることを保証するものである。

6. 結論

定温度型熱線風速計とX型プロ - プの製作を行い以下の結論を得た。

1. CTA および各付属回路は仕様通りの動作が確認され、X型プロ - プに対応したCTA計測システムを構築できた。
2. CTAの周波数応答は約17.5kHzで、スペクトルには電源ノイズなど卓越した周波数成分がなく高いSN比(約75dB)を持つことがわかった。
3. 製作したX型プロ - プの90°検定の結果は1°程度のズレが認められたが、円中後流のレイノルズ応力分布の対称性にはそれほど大きな違いはなく、本実験室で予定している乱流計測に使用できることが確認できた。

参考文献

- (1)たとえば笠木ら編著 流体実験ハンドブック, 朝倉書店, (1997)
- (2)Bruun, H.H., HOT-WIRE ANRMOMETRY Oxford Sci. Publ. (1995)
- (3)King, L.V., Phil. Trans. Roy. Soc. A214,373 (1914)
- (4)蒔田秀治, 流れの計測, 12-16, 3 (1995)
- (5)Steinhilber, R. & Wagner, P. M., Exp. in Fluids, 17, 302 (1994)
- (6)Collis, D. C. & Williams, M.J., J. Fluid Mech., 6, 357 (1959)
- (7)蒔田ら他3名 機論, B53-495, 3180 (1987)

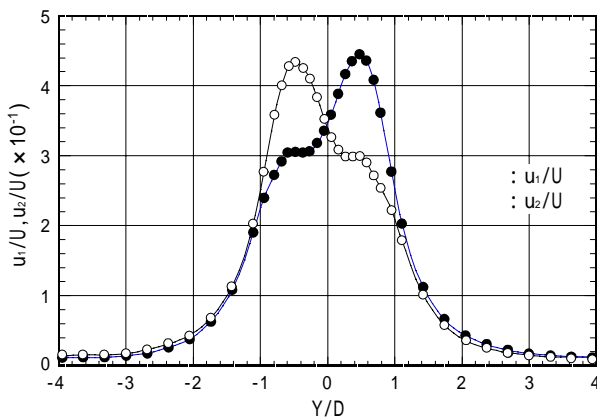


図12. 円中後流の乱れ強度分布

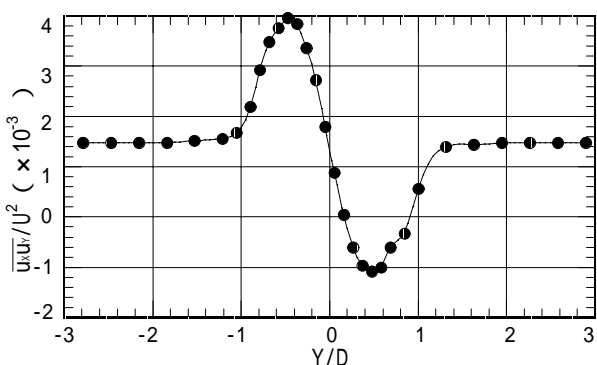


図13. 円柱後流のレイノルズ応力