

1. まえがき

近年のレーザ流速計の進歩はすばらしく、水理・水工学の分野でも実用化の段階に入ったものと考えられる。従来からの乱流計測器である熱線・熱膜流速計に比べて、①流れ場にプローブを挿入しないから流れを攪乱しない②流速検定がまったく不要で、ドップラ周波数から流速が直接計算される など大きな利点がある。特に、水流計測では¹⁾熱膜流速計が水中に浮遊した気泡やゴミ等の付着の影響、水温変化の影響を受けやすく、またプローブの破損の心配があり、かなりの慎重さを要するのに対し、レーザ流速計にはこの欠点はなく、長時間の乱流計測を安定にしかも高精度に行うことができる。

最近、南水路流れの三次元流況の解明が注目されているが、一般にその2次流成分は主流速の数のオーダーであり、²⁾流れへの方向感度特性が検定なしで正確に求まるレーザ流速計の使用が不可欠である。筆者は、カルスルエ大学水理研究所で、南水路流れの三次元乱流構造に関する実験的研究に従事し、これに不可欠な高精度に2成分流速計測が可能なるレーザ流速計システムを開発した。本報告は、この計測システムを紹介するものである。

2. 光学系 光学系は前方散乱型と後方散乱型に大別される。前者は図-3に示すようにレーザ発光部と受光部(フォトマル)が水路を挟んで反対側にあり、強い散乱光が得られるから一般に低出力レーザ(例えば³⁾15mW He-Ne)でも十分である。一方、後者は、レーザ発光部と受光部とが同一側にあり、光学系のセットは容易でしかも水路壁が片面のみ透明であればよいから、多様な実験ができる。しかし、後方散乱光は前方散乱光に比べて $1/100 \sim 1/1000$ 倍弱く、高出力のアルゴンレーザが不可欠である。2Wの後方散乱レーザ流速計を使って噴流を計測した所、散乱光のバースト信号(図-2)のSN比は悪く、しかも発生個数が少ないため周波数トラッカを使用して、ドップラ周波数 f_0 を求めると、かなりの誤差を生じた。離散的に発生するバースト信号を個々に統計処理すれば(図-1)、計測精度はかなり向上するが、2成分計測では同時発生する2方向のバースト個数はさらに少なく、計測に長時間を要した。三次元乱流構造の解明には、計測点が多く、しかも高精度を必要とするから、後方散乱型は不適当と判断され、図-3のように前方散乱型に改定した。アルゴンレーザを青と緑の2組のビームに分光し、各組はさらに2本のビームに分光して計4本のビームはそれぞれブラッグセル(周波数シフトを行う)を通して計測点で焦点させ、2成分同時計測を行った。

3. 信号処理システム(図-1) 受光部の出力をバンド・パス・フィルターにかけると散乱粒子のバースト信号(図-2)が得られ、この周波数 f_0 を求めると、 $\tilde{u} = (\lambda/2\sin\varphi)(f_0 - f_s)$ で流速 $\tilde{u}$ が計算される(ここで、 λ はレーザの波長、 φ はビーム交叉半角、 f_s はシフト周波数)。

$f/2\pi$ 変換を用いたトラッカ法は流速波形が得られ、その利点は大いだが、バーストの発生が連続的でないとドロップアウトを起こし、高精度のデータが期待できない。単に、平均流速 $\bar{u}$ 、乱れ強度 u' など長時間乱流平均量のみを必要とされる場合は、個々のバースト信号から f_0 を求めた方がよい。本研究では、Trapezが開発したゼロクロス法³⁾と2成分計測に拡張して図-2のように行った。すなわち、バースト信号をA/D変換し(1024個)、波形を記録する。バースト判定用の2つの

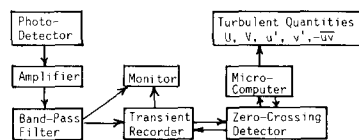


図-1 信号処理システム

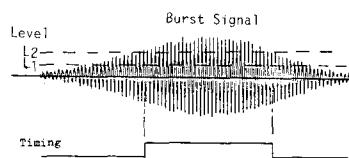


図-2 バースト信号のゼロクロス法

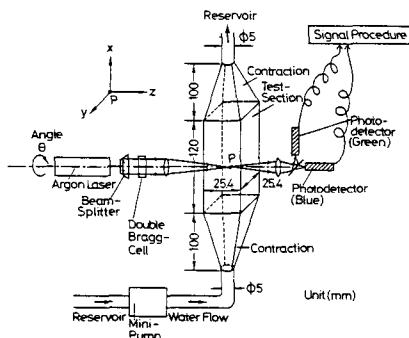


図-3 実験装置とレーザ光学系

しきい値 L_1, L_2 を設け、 L_2 を越えたときゼロクロスをカウントしてその時間経過から f_0 を求める。データのマイコンへの転送時間はバースト当たり約 0.8ms であり実時間処理ができる。ここでは、 L_1, L_2 を最大振幅のそれぞれ 25%, 50% に設けた。バースト解析個数 N は 1500 個で、そのアンサンブル平均から乱流統計量が得られた。これに等する計測時間は、散乱粒子の濃度に左右されるが、1 成分、2 成分計測でそれぞれ約 3 分間及 6 分間程度であった。

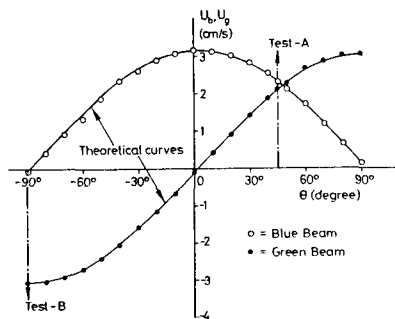
4. 実験装置 以上の光学系及び信号処理システムの妥当性を検討するため、図・3 に示す $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 断面の小型管路流を用いて実験を行った。レーザビーム面は光軸 (Z 軸) のまわりに回転でき、流れへの方向感度特性が詳細にチェックされた。

5. 実験結果 (1) 方向特性 計測点 P を管中央軸上に正確にセットし、光軸を $\theta = 10^\circ$ ずつ回転させ、青及び緑のビームの f_0 から流速 U_b, U_g がそれぞれ求められ、図・4 に示した。又、 Y 軸の流速 U_{bu}, U_{gv} は、 $U_b = U \cos \theta + V \sin \theta, U_g = U \sin \theta - V \cos \theta$ (1) と表わされ、図・4 に示すように実験値と式 (1) はよく一致する。周波数シフタを使用しているから、ゼロ流速及び負流速も正確に計測され、注目される。 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の 4 角度計測から、 U, V の平均値は $U = 3.09\%$, $V = 0.93\%$, その相対誤差はそれぞれ 4%, 9% であった。図・5 に乱流変動の rms 値を示す。管中央軸上ではレイノルズ数 Re はゼロだから、 $u'_b = \sqrt{U^2 \cos^2 \theta + V^2 \sin^2 \theta}, u'_g = \sqrt{U^2 \sin^2 \theta + V^2 \cos^2 \theta}$ (2) となり、図・5 に示した。図・4 に比べてバラつきが若干大きい、式 (2) はよく実験値と一致する。同様に 4 角度計測から、 $u' = 0.725\%$, $v' = 0.675\%$, 相対誤差はそれぞれ 5%, 3% であった。

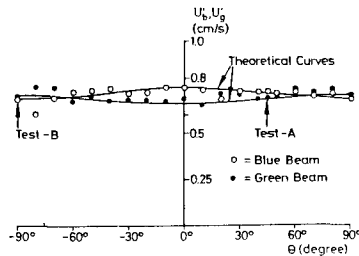
(2) 流速分布の計測例 $\theta = 45^\circ$ (テスト A), $\theta = -90^\circ$ (テスト B) にセットして $y = 1 \text{ mm}$ 間隔ごとに流速分布を計測した。図・6 に (U, V) の分布を示す。レイノルズ数 $Re = 800$ の未発達の変移流れであり、理論解と比較できないが、両テストともほぼ同じ結果である。しかし、 u, v を参考にすると、テスト A の方がよりバラつきが小さかった。これは、テスト A では $U_b \approx U_g$ となり、 f_0 が両ビームでほぼ等しく、図・1 の信号処理の調節が良好であるが、テスト B では $V = -U_b \approx 0$ となり、周波数シフタのわずかなドリフトを受けやすいためである。また、Z 軸方向に計測点を移動すると (テスト C), $\bar{u}, \bar{w}$ が求められる。以上から得られた u, v, w を図・7 に、レイノルズ数を図・8 にそれぞれ示す。境界層厚 δ を最大流速の 99% にすれば $y < \delta$ で $u' > w' > v'$ の壁面近流の特性、 $y > \delta$ のコア部で $u' \approx w' \approx v'$ の等方性乱流の特性が見られる。本実験のビーム交叉点の計測体積は $\Delta x = \Delta y = 0.13 \text{ mm}, \Delta z = 1.5 \text{ mm}$ であり、テスト C の結果がバラつくのは Δz がかなり大きく点計測できないためと考えられる。

6. あとがき 本実験では低流速のチェックに限られたが、 f_0 を調節すれば 1% 以上の高流速でも同精度で計測でき、3 次元乱流場の計測が可能となった。

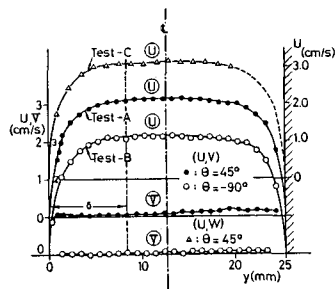
参考文献 1) 津波, 乱流場の計測懇談会, 1982, 2) Nezu, Nakagawa, ASCE, J. Hydr. Eng. PP. 173-193, 1984. 3) Tropaa, SFB 90/ME/152, Univ. of Karlsruhe, 1980.



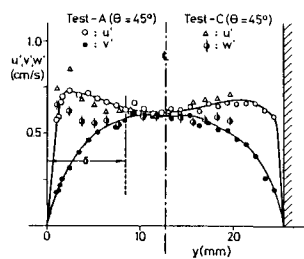
図・4 平均流速の方向感度特性



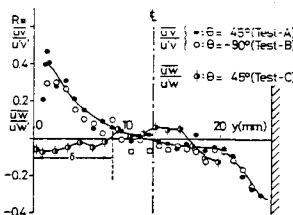
図・5 乱流強度の方向感度特性



図・6 平均流速分布の計測例



図・7 乱流強度分布



図・8 レイノルズ数分布