

河川内における乱流特性 On Turbulence Characteristics in a River

金沢工業大学 正 員 中 川 武 夫
金沢工業大学 学生員 小 澤 誠
金沢工業大学 正 員 今 井 悟
金沢工業大学 宇 谷 彰 訓
金沢工業大学 学生員 桃 井 康 憲

1. はじめに

張糸式流速計^{1,2)}の出現によって、在来の熱線流速計、超音波流速計あるいは電磁流速計を用いる場合より、流れの三次元測定をはるかに容易に行うことが可能となった。張糸式流速計はこれまでのところ主として室内実験用として用いられてきたがこれを野外実験用として用いることが可能であることは設計当初から十分に認識されていた。

実験用開水路内での乱流測定例としては熱線式（または熱膜式）流速計によるものがいくつか報告されている³⁻⁵⁾。しかしながら、これらの測定例の大部分は主流及び水深方向の乱流速度成分の測定に限られている。一方、実河川内での乱流測定例は著者らの知る限りではほとんど報告されていないために、その乱流特性は未だ明らかではない。

本研究においては、実河川内の乱流特性を明らかにするために、張糸式流速計を用いて流れの三方向成分の同時測定を行なった。本論文ではこれらの測定結果の一部を報告するとともにすでに他の研究者によって報告されている実験用開水路内での乱流測定結果との比較検討も合わせて行なう。

2. 張糸式流速計

実験に使用した張糸式流速計の全容をFig.1に示す。張糸式流速計とは「流れの中に張り合わせてある糸は流下方向へその流速に応じた抗力を受ける」という原理に基づいて設計された流速計である。すなわち、この糸に働く抗力を速度に校正すれば糸が張り合わされている位置での流速が求められることとなる。

張糸式流速計の検知部は本体底部に張り合わされている3本の絹糸1,2および3である。各絹糸の一端は剛性支持され、他端はFig.2に示した片持ち板、厚さ0.5mmの先端に弾性支持されている。片持ち板の両面には各1枚ずつの半導体ひずみゲージ120 Ω が張ってある。また、片持ち板の材質にCFRP（比重1.7、引張弾性率20,000 kg/mm²）を用いたことおよび片持ち板の平面形状を台形とした理由は板の自重による影響を極限するためである。各絹糸の長さ、太さはそれぞれ55mm、0.1mmであり、絹糸1,2,3はそれぞれ互いに直交するx、y、z方向の速度成分を独立に検出する。絹糸1と3は同一水平面内に平行間隔が20mmとなるように張り合わせてあり、絹糸2は絹糸1,3を含む平面の下15mmの水平面に絹糸1,3とは直交する方向に張り合わせてある。

張糸式流速計の速度検出過程は流れから絹糸が受ける片持ち板の面に垂直方向の抗力をまず片持ち板自体のひずみ変位に変換し、この変位を半導体ひずみゲージを用いて電圧信号に変え、動ひずみ測定器で増幅したのちデータ、レコーダに記録するというものである。なお、各絹糸が片持ち板の面に垂直方向の抗力を選択的に検出できるのは片持ち板の厚みに対する幅の比が十分大きくなるように設計されていることによる。以上のことから明かなように、張糸式流速計で測定される流速は3本の絹糸を張った小空間における平均的な流速ということになるが、絹糸1,2,3の3つの中点の幾何学的中心を測定点と考えた。

Fig.3に張糸式流速計の速度校正結果を示した。この張糸式流速計の速度校正は超小型プロペラ流速計を用いて行なわれた。すなわち、張糸式流速計とプロペラ式流速計を実験用開水路内の一様流中に並置し、絹糸が流れから受ける抗力に対応するデータ記録紙上の出力値〔mm〕とプロペラ流速計の指示速度〔cm/s〕と

の関係を求めるというものである。このようにして、 x 、 y 、 z 方向の速度成分 $\hat{u}$ 、 $\hat{v}$ 、 $\hat{w}$ の速度校正を順次行なった。なお、図中の塗りつぶされた記号はそれぞれの負方向速度校正値を意味する。また、Range 1、Range 5、Range 10は流速計の設定感度を意味し、この値が小さいほど流速計の感度が高い。

3. 実 験

本実験は金沢工業大学ライブラリー・センター横を流れる高橋川の中において行なわれた。Fig.4はここで用いた座標系及び高橋川測定部の水路境界条件を示した。この測定断面の川幅は17.3mであり、この断面の上・下流側、各100m程度にわたって河床は直径5～20cm程度の丸石によって敷き詰められたような状態であった。図示したように、左岸は土堤防の表面に雑草が生い繁っており、右岸はコンクリート堤防である。座標原点は左岸から9.5mの位置にある河床面上の点であり、 x 、 y 、 z 座標の正方向はそれぞれ、流下方向、左岸方向、垂直上方とする。流速測定は z 軸上の $z = 1.65 - 9.65$ cmの範囲内において、1.0 cm間隔ごと合計9点において行なわれた。張糸式流速計は各測定点ごと所定の高さとなるように支持棒を介して四脚台に固定された。各測定点においては2.5秒間の時系列データが各速度成分ごと独立に記録された。これらのアナログ・データはサンプリング周波数500 Hzでいったんデジタル化されたのち、データ処理が行なわれた。すなわち、各測定点各速度成分ごと独立に平均速度、乱れの強さ、レイノルズ応力及びエネルギー・スペクトルが求められた。

Table 1には本実験の主な水理パラメータの値を示した。ここで $\bar{U}$ は合計9つの測定点における x 方向平均速度 U の平均値である。以下の実験結果の提示にあたっては、乱れの強さ及びレイノルズ応力を無次元化するために各測定点における x 方向平均速度 U を用いた。なお、 U 以外にも $\bar{U}$ あるいは $\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{W}^2}$ （ここで V 、 W はそれぞれ各測定点における y 、 z 方向の平均速度である。）を同様の目的に用いることは可能であろうが、いずれの速度を用いても結果に本質的差異を生じないので便宜上ここでは U を採用したわけである。

4. 結 果

本章では平均速度、乱れの強さ、レイノルズ応力そしてエネルギー・スペクトルについての解析結果を別々に述べることにする。

(a) 平均速度：Fig.5には x 、 y 、 z 方向の各平均速度及びこれらの合速度の水深方向への分布を示した。なお、この図の横軸は測定点における全水深 d によって無次元化されている。 x 方向平均速度 U の分布は $z/d \approx 0.42$ 及び 0.64 において速度欠損部があるものの、全体としては放物線形の速度分布となっている。 y 方向平均速度 V は全て y の負方向すなわち右岸側を向いている。 z 方向平均速度 W は河床付近の $z/d \approx 0.13$ 以下では下方を向いているが、この高さから $z/d \approx 0.44$ までの範囲において上方を向いている。さらに、 $z/d \approx 0.44 - 0.65$ までの範囲では平均速度 W は再び下方へ向うが、 $z/d \approx 0.65$ 以上では上方へ向っている。すなわち、Fig.5に示した平均流速の合成ベクトルはわずかに右岸側を向いたまま、河床付近から下方、上方下方そして上方と順次その向きを変えることとなる。

(b) 乱れの強さ：Fig.6に x 、 y 、 z 方向の各乱れ強さ（すなわち、速度変動の2乗平均平方根を各測定点における x 方向平均速度 U で無次元化した値）の水深方向への分布を示した。また、Fig.6には既存データとの比較の便のために、 x 、 z 両方向の速度変動の2乗平均平方根を $\bar{U}$ で無次元化した値も同時に示した。各乱れの強さは図示されたように河床付近で大きく、 $z/d \approx 0.2$ から急減し、以後は水表面に近づくにつれて比較的ゆるやかな増減をくりかえすことになる。ここで注意すべきことは、乱れの強さの水深に対する依存性は x 、 y 、 z の各成分ごと異なるわけではなく、これら三成分が同様な依存性を示すということである。また、各水深における三つの乱れの強さは互いに同程度のオーダーである。すなわち、これらの間に一定の大小関係は認められない。

(c) レイノルズ応力：Fig.7には各レイノルズ応力の水深方向への分布を示した。また、この図中には既存データとの比較のために $\overline{uv}/\bar{U}^2$ も同時に示した。 $z/d \approx 0.15$ における $\overline{uv}/\bar{U}^2$ 、 $\overline{uw}/\bar{U}^2$ 、 $\overline{vw}/\bar{U}^2$ の値はそれ

ぞれ 3.66、-6.08、-2.51 と非常に大きいため、Fig.7 にはこれらの値がプロットされていないが、各レイノルズ応力は河床付近で大きく、河床から遠ざかるにつれてこの図に示されたような増減をくりかえすことになる。すなわち、これら三種類のレイノルズ応力の水深に対する依存性は各個まちまちに起こるわけではなく全てが同様な依存性を示す。また、各水深におけるこれら三種類のレイノルズ応力の絶対値は同程度のオーダーであり、これらの間に一定の大小関係は認められない。

(d) エネルギー・スペクトル：Fig.8 には水深 $z/d = 0.344$ における x 、 y 、 z の各速度成分 $\hat{u}$ 、 $\hat{v}$ 、 $\hat{w}$ のエネルギー・スペクトルを例示した。この図から x 方向速度成分 $\hat{u} = U + u$ のエネルギー・スペクトルは $f \simeq 13 \text{ Hz}$ において比較的顕著な極大値をもつものの全体としては周波数の増加にともなって減少する傾向が見られる。これに対して、 y 方向速度成分 $\hat{v} = V + v$ のエネルギー・スペクトルは $f \simeq 45 \text{ Hz}$ においてその最大値をもつことでも象徴されるように、低周波数帯域よりもむしろ高周波数帯域により多くのエネルギーをもっている。また、 z 方向速度成分 $\hat{w} = W + w$ のエネルギー・スペクトルは低周波数帯域においては周波数の増加にともなってエネルギーはいったん減少するが、 $f \simeq 13 \text{ Hz}$ から逆に周波数の増加にともなってエネルギーは増加し、 $f \simeq 45 \text{ Hz}$ で顕著な極大値をとる。なお、 $f \simeq 45 \text{ Hz}$ 以上の高周波数帯域においてはエネルギーは激しい増減をくりかえすものの、平均的にはほぼ一定のエネルギーを保っている。

5. 考 察

すでに指摘したように、今までに報告されている開水路内の乱流測定例³⁻⁵⁾のほとんどが実験室内のものであること、及びこれらの解析結果は x 、 z 二方向の乱れの強さ $\sqrt{\bar{u}^2}/U$ 、 $\sqrt{\bar{w}^2}/U$ 、レイノルズ応力 $\bar{uw}/U^2$ 、そしてエネルギー・スペクトルに限定されている。次に、これらの結果と本実験結果との簡単な比較検討を行うことにする。

McQuivey & Richardson³⁾ は粗面上の開水路流れの場合には x 方向の乱れの強さは z 方向の乱れの強さより常に大きく、 $z/d = 0.12$ で、それぞれ $\sqrt{\bar{u}^2}/U \simeq 0.14$ 、 $\sqrt{\bar{w}^2}/U \simeq 0.07$ となることを示した。さらに、 z/d が増加するにしたがって、これら二つの乱れの強さはほぼ線形的に減少し、 $z/d = 0.70$ で、それぞれ $\sqrt{\bar{u}^2}/U \simeq 0.09$ 、 $\sqrt{\bar{w}^2}/U \simeq 0.05$ となると報告している。これに対して、本実験の場合には Fig.6 に示したように $z/d = 0.12$ でそれぞれ $\sqrt{\bar{u}^2}/U \simeq 0.69$ 、 $\sqrt{\bar{w}^2}/U \simeq 0.29$ となり、いずれの値も実験室内における対応する値よりかなり大きいことがわかる。また、本実験の場合の x 方向と z 方向の乱れの強さの間には明確な大小関係がなく、両者は水深とは独立にほぼ同じ程度の値をとることがわかる。

McQuivey & Richardson³⁾ は粗面上の開水路流れの場合にはレイノルズ応力は河床付近で最大値をとり、 z/d が増加するにしたがってほぼ線形に減少すると報告している。これに対して本実験で求められたレイノルズ応力 $\bar{uw}/U^2$ は河床付近で最大値をとるものの z/d の増加にともなってこの値は必ずしも減少せず、Fig.7 に見られるような増減をくりかえす。

エネルギー・スペクトルに関しては McQuivey & Richardson³⁾ は粗面上の開水路流れの場合の一次元スペクトル形状は z/d の値にほとんど依存しないのみならず、低周波数帯域にエネルギーが集中し、周波数の増加にともなってエネルギーが滑めらかに減少すると述べている。また、高周波数帯域においてはこのスペクトルは周波数の -7 乗に依存して減少し、中間周波数帯域においては $-5/3$ 乗に依存して減少することを指摘している。これに対して、本実験の場合の三方向速度成分 $\hat{u}$ 、 $\hat{v}$ 、 $\hat{w}$ のエネルギー・スペクトルは、Fig.8 に示したように、いずれの場合にも周波数の増加にともなって滑らかなエネルギーの減少は起らない。また、 $\hat{u}$ 、 $\hat{w}$ のエネルギーは低周波数帯域に比較的多く集中するものの、 $\hat{v}$ のエネルギーについては低周波数帯域よりむしろ高周波数帯域に多く分布してさえいる。

6. 結 論

本研究を通して得られた知見を次に要約することにする。

(a) 乱れの強さは河床付近で大きく、河床から遠ざかるにつれて急減し、以後は水表面に近づくにつれて比

較的ゆるやかな増減をくりかえす。

(b) 乱れの強さの水深に対する依存性は x 、 y 、 z の各成分ごと異なることなく、これらが全て同様な依存性を示す。

(c) 各水深における x 、 y 、 z 三方向の乱れの強さは互いに同程度のオーダーである。すなわち、これらの間に一定の大小関係は認められない。

(d) レイノルズ応力は河床付近で大きく、河床から遠ざかるに従って増減をくりかえしつつ全体としては減少する。

(e) 本文中で議論した三種類のレイノルズ応力の水深に対する依存性は各個まちまちに起こるわけではなく全てが同様な依存性を示す。また、これら三種類のレイノルズ応力の絶対値は同程度のオーダーであり、これらの間に一定の大小関係は認められない。

(f) 三方向速度成分のエネルギー・スペクトルはいずれの場合も周波数の増加にともなって滑めらかなエネルギーの減少を示さない。

7. 参考文献

- 1) Nakagawa, T. 1983 On characteristics of the water-particle velocity in a plunging breaker, J. Fluid Mech. 126, 251-268.
- 2) Nakagawa, T. 1983 A new instrument to measure three velocity components of water particles in breaking waves, J. Physics E: Sci. Inst., 16, 162-165.
- 3) McQuivey, R.S. & Richardson, E.V. 1969 Some turbulence measurements in open-channel flow, Proc. of ASCE, J. of Hydraulic Division, 95, 209-223.
- 4) Richardson, E.V. & McQuivey, R.S. 1968 Measurement of turbulence in water, Proc. of ASCE, J. of Hydraulic Division, 94, 411-430.
- 5) Resch, F.J. 1970 Hot-film turbulence measurements in water flow, Proc. of ASCE, J. of Hydraulic Division, 96, 787-800.

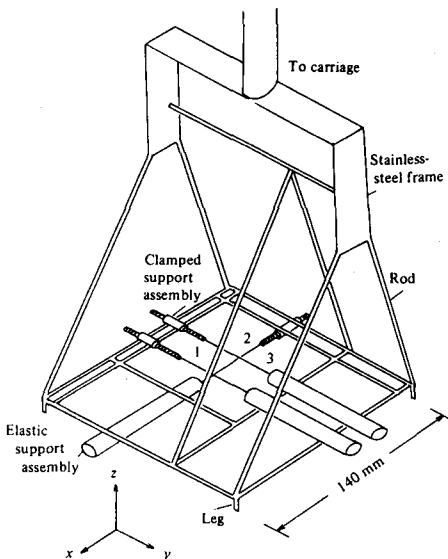


Fig.1 General view of the 'tension-thread' flowmeter.

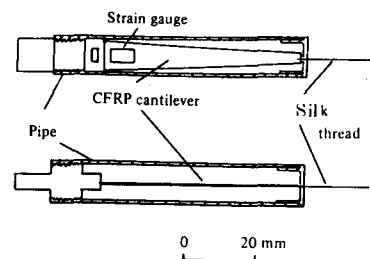


Fig.2 Cross-sections of the elastic support assembly.

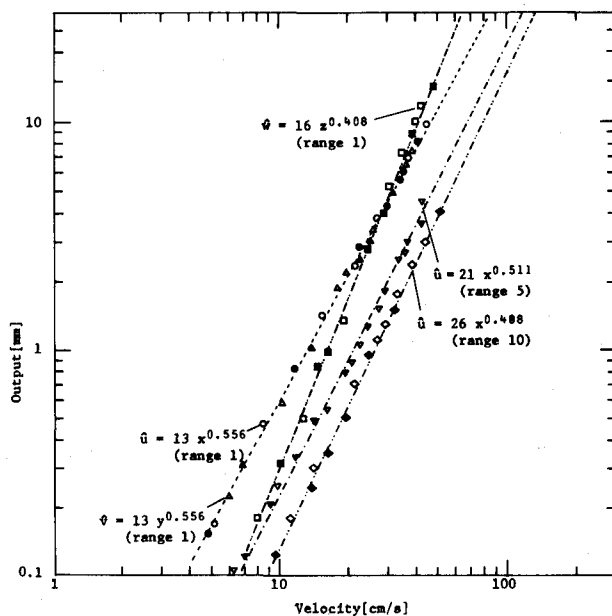


Fig.3 Velocity calibration curves

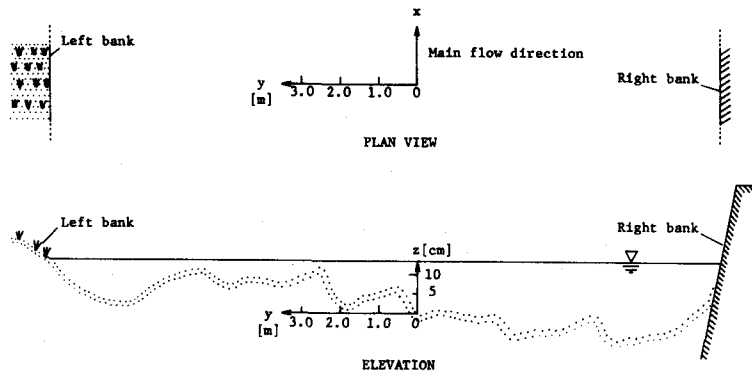


Fig.4 Definition sketch of co-ordinate system and boundary conditions of the Takahashi river

Table 1 Hydraulic parameters

Mean velocity $\bar{U}$ [cm/s]	72.9
Water depth d [cm]	13.5
Water temperature T [degree]	12.5
Kinematic viscosity ν [cm ² /s]	1.22×10^{-2}
Reynolds No. $Re = \bar{U}d/\nu$	8.06×10^4
Froude No. $Fr = \bar{U}/\sqrt{gd}$	0.63

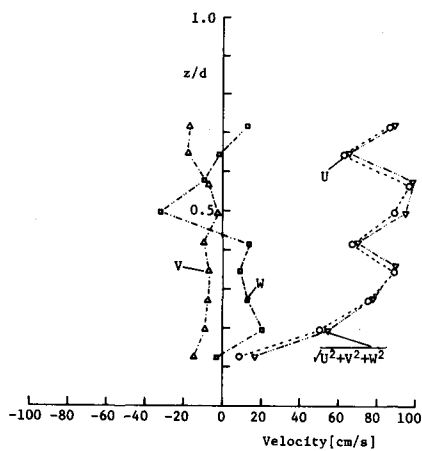


Fig.5 Mean velocity vs. normalized vertical co-ordinate z/d

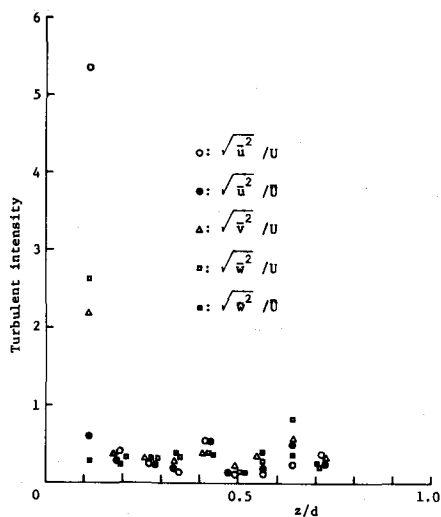


Fig.6 Turbulent intensity vs. normalized vertical co-ordinate z/d

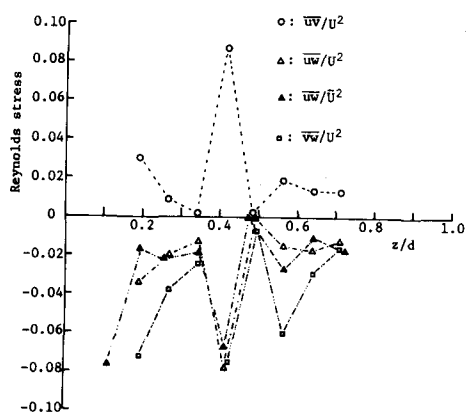


Fig.7 Reynolds stress vs. normalized vertical co-ordinate z/d

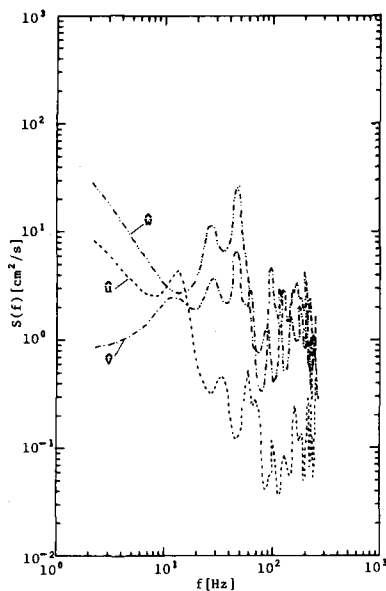


Fig.8 Power spectral density $S(f)$ vs. frequency f at $z/d=0.344$