



現地観測に基づく河川流の乱流特性に関する研究

瀬良, 昌憲

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1994-03-16

(Date of Publication)

2014-01-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1813

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3097036>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001813>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

現地観測に基づく河川流の
乱流特性に関する研究

平成6年1月

瀬 良 昌 憲

目 次

第1章 緒 論	1
1. 1 本論文の目的	1
1. 2 既往の研究	2
1. 3 本論文の内容	3
参考文献	5
主要記号の一覧	7
第2章 開水路の流れの分類と乱流構造	11
2. 1 開水路の流れの分類と様式	11
2. 1. 1 1次元解析	11
2. 1. 2 開水路の流れの分類	11
2. 1. 3 開水路の流れの様式	13
2. 2 乱流の一般的な特性	14
2. 2. 1 乱流現象	14
2. 2. 2 時間平均から見た乱流構造	15
2. 3 開水路の乱流特性	16
2. 3. 1 開水路乱流場の領域区分	16
2. 3. 2 開水路流れの乱流構造	16
2. 4 河川の種類と形態	17
2. 4. 1 河川の種類	17
2. 4. 2 河川の形態	17
2. 5 河川の水文量調査	18
2. 6 河川流に関する研究分野	19
2. 7 河川の3次元流れ	20
参考文献	21
第3章 計測システムと計測器の諸特性	23
3. 1 超音波流速計の測定原理	23
3. 2 超音波流速計の特徴	25
3. 3 流速計の検定結果	27

3. 4	計測システムとデータ処理システム	27
3. 5	各種水理条件の評価方法	29
3. 6	乱れの分布特性諸量	32
	参考文献	34
第4章	河川直線部における流れ特性	35
4. 1	緒言	35
4. 2	測定方法と水理条件	35
4. 2. 1	測定地点の選定	35
4. 2. 2	測定方法	36
4. 3	測定結果とその考察	51
4. 3. 1	平均流速分布	51
4. 3. 2	乱れ強度分布	59
4. 3. 3	レイノルズ応力分布	65
4. 3. 4	4象限法による瞬間レイノルズ応力特性	69
4. 3. 5	エネルギー・スペクトル	72
4. 3. 6	自己相関係数	74
4. 4	結言	76
	参考文献	78
第5章	河川湾曲部における流れ特性	81
5. 1	緒言	81
5. 2	測定方法と水理条件	81
5. 2. 1	測定地点の選定	81
5. 2. 2	測定方法	82
5. 3	測定結果とその考察	86
5. 3. 1	平均流速分布	86
5. 3. 2	2次流の理論曲線と実測値との比較	94
5. 3. 3	2次流ベクトル	96
5. 3. 4	乱れ強度分布	98
5. 4	結言	101
	参考文献	102

第6章 橋脚後流域における流れ特性	103
6.1 緒言	103
6.2 測定方法と水理条件	103
6.2.1 測定地点の選定	103
6.2.2 測定方法	103
6.3 測定結果とその考察	108
6.3.1 平均流速分布	108
6.3.2 乱れ強度分布	112
6.3.3 レイノルズ応力分布	113
6.3.4 8象限法による瞬間レイノルズ応力特性	114
6.3.5 エネルギー・スペクトル	117
6.3.6 自己相関係数	121
6.4 結言	124
参考文献	125
第7章 実河川における乱流成分のサンプリングに関する検討	127
7.1 緒言	127
7.2 時間平均化された乱れ特性	128
7.3 流速の乱流成分のトラジェクトリ的な取り扱い	128
7.4 サンプリング周波数について	132
7.4.1 流下方向と鉛直方向の乱れ速度の関係について	133
7.4.2 流下方向と横断方向の乱れ速度の関係について	137
7.5 サンプリング周波数と流路幅について	141
7.6 サンプリング周波数とエネルギー・スペクトルについて	157
7.6.1 サンプリング周波数によるエネルギー・スペクトルの比較	157
7.6.2 水理パラメータと外部スケールの関係について	161
7.6.3 サンプリング周波数の異なるエネルギー・スペクトルの合成	184
7.7 結言	186
参考文献	188
第8章 結論	189
謝辞	195

第 1 章 緒 論

1. 1 本論文の目的

河川は地形上から、山地河川、沖積地河川、感潮河川に分けられる。わが国の河川は、世界的な大河川に比べ流域面積は著しく小さく（表 2 - 1 を参照）、かつ、河川勾配は極めて急である。河川の上流部に位置する山地河川では河床は主に粒径の大きい礫から構成され、河床粗度の粒径に比べて水深の小さな流れが存在する。従来、粗面流の研究は河床粗度の粒径に比べて水深の十分大きな流れについて多くの研究がなされてきており、山地河川においてよく見受けられるような粒径の大きな礫床を有する開水路流れについての研究は数少なく、その基本的な流れ特性でさえも十分に明らかにされていると言いがたい。一方、河川工学の分野で取り扱われる流れはほとんどすべて乱流状態にあり、しかも大きい平均速度勾配をもつせん断乱流である。さらに、実河川でのその流れの挙動は 3 次元的挙動を示している（表 2 - 2 を参照）。河川湾曲部の流れ、河床粗度の流水抵抗、土砂輸送の問題、並列らせん流（縦渦）、河床波上の流れ、分・合流部の流れ、橋脚による局所洗掘など、いずれも乱流現象と密接に関係しているので、この乱流現象の解明は現在の水理学にとって最も重要な課題の一つとなっている。従来、河川の乱流現象を解明するため、まず、室内の理想的な空間形状を持つ水路、すなわち、矩形断面を有する直線開水路を用いて、定常等流状態の 2 次元開水路の流れを解明し、次に、その結果を実際の河川の流れに対して適用することが試みられてきた。しかし、従来の研究に供されている実験室水路の流れにおけるレイノルズ数の大きさは高々 $10^2 \sim 10^4$ であるのに対し、実際の河川の流れのレイノルズ数の大きさは 10^5 以上である。最近の研究によって実験室規模のレイノルズ数（ 10^4 程度）を対象とした開水路流れの 3 次元乱流構造はかなり解明されてきているが、これらの実験データや理論が高レイノルズ数を有する実河川の流れに適用でき、複雑な河川乱流を説明できるか不明である。

以上のことから、本研究では、山地での礫床河川の流れ、特に、河床粗度の粒径に比べて水深の小さな流れを対象にして、3 次元超音波流速計を用いて流速 3 方向成分の同時測定を行った。本研究の目的は以下の通りである。

（1）流れの状態を定常流で不等流の漸変流とみなして、種々の河床粗度を有する河川直線部を対象にして、このような河床粗度形態における実河川の流れ特性を把握すると共に、粗度係数の大きさの相違による流れ特性の違いを明らかにし、さらに、実験室水路において得られた流れの特性の実河川の流れへの適用性について検討する。なお、河

川の流れは正確には非定常流であるが、計測時間が5分間程度であるので定常流とみなした。

(2) 流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で平面形の影響を受ける流れの一例として、河川湾曲部を対象にして、河川湾曲部における流れ特性を把握すると共に、そのような流れの3次元的な挙動を明らかにする。さらに、河川直線部の場合と同様に、実験室水路において得られた流れの特性の実河川の流れへの適用性について検討する。

(3) 流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で河川構造物の影響を受ける流れの一例として、橋脚の後流域を対象にして、橋脚後流域における流れ特性を把握する。さらに、河川直線部の場合と同様に、実験室水路において得られた流れの特性の実河川の流れへの適用性について検討する。

(4) アナログデータのサンプリング周波数に注目して、実河川での乱れ変動をカオスのトラジェクトリ的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを検討する。

1. 2 既往の研究

実験室水路での研究は国内・国外を問わず数多くあるので、ここでは、河川における現地観測に関する既往の研究のみについて概観する。

河川の流速分布に関する現地観測は、100年以上も前から既に行われている。1883年に Stears¹⁾ は米国の河川の流速分布を測定し、河幅が狭い河川において最大流速点の降下現象を発見した。そして、1909年に Gibson²⁾ は、英国のアスペクト比の小さな河川において現地観測し、Stearsの発見した最大流速点降下現象を確認すると共に、この現象が2次流セルによって引き起こされる可能性を指摘した。以後、同様な現地観測が行われ、1938年に Keulegan³⁾ は河川の流速分布として管路流の対数則を適用できるであろうと初めて指摘した。その後、第2次世界大戦前までは、河川の乱流計測例はほとんど皆無に近かった。ところが、ホット・フィルム流速計や高精度のレーザー流速計を用いた計測により、最近ここ10年間には、実験室規模の開水路の乱流構造の概略はほぼ解明されたと考えられる。

一方、この間に国内・国外における実河川の乱流計測も数多く実施されている。以下に実河川において実施された現地観測の例のみについて概観する。

1960年代に琵琶湖疎水において石原ら⁴⁾ や余越⁵⁾ によってプロペラ流速計用いた

現場測定が実施されているが、プロペラ流速計は河川乱流の測器としては不適當であることがわかった。1967年に余越ら⁶⁾⁷⁾は新しい原理による測器として超音波流速計を開発し、宇治川で測定を行い、超音波流速計が河川乱流の測器として十分使用に耐えることを示している。同じ頃、米国のMcQuivery⁸⁾はホットフィルム流速計を用いてリオグランデ運河での現地観測を行い、流下方向の乱れ強度分布を発表している。1970年代には浅野ら⁹⁾は宇治川と淀川においてプロペラ流速計を用いて乱れ計測を行い、室内実験で得られている結果の河川乱流への適用性に関する検討を行っている。1980年代になると中川ら¹⁰⁾は流れの3次元測定を行うために開発された張糸式流速計を用いて金沢の高橋川において現地測定を行い、実河川の乱流特性を明らかにしている。さらに、吉田ら¹¹⁾は実験室での使用に限られていたレーザー・ドップラー流速計を改良して河川乱流計測専用のレーザー・ドップラー流速計を開発し、天塩川河口において現地測定を行い、乱流特性について考察を加えている。最近になって取り扱いの容易な小型の電磁流速計が開発され、国外では、Griffithら¹²⁾はミシシッピー川での測定結果を示し、さらに、Westら¹³⁾は英国の感潮河川での測定結果を示している。国内では、松岡¹⁴⁾が千曲川において、水深が河床材料の粒径の数倍以上ある礫床河川の流れの乱れ特性について報告している。辻本ら¹⁵⁾は金浦用水などにおいて境界条件が卓越的に特定できる地点を選んで乱流測定を実施している。橋津ら¹⁶⁾は琵琶湖疎水において3次元乱流計測を実施している。さらに、最近では日野ら¹⁷⁾によって、実河川の洪水流中の3次元乱流構造の測定も行われるようになった。

河川湾曲部における現地測定例では、国外において、Jackson¹⁸⁾がWabash Riverにおいて、上流側の湾曲の影響下から下流側の湾曲の影響下へと流れが遷移してゆく過程を報告している。また、Habib¹⁹⁾は英国の小さな川の湾曲部で電磁流速計を用いて流速の3方向成分測定を行い、河川乱流について考察している。

1. 3 本論文の内容

本論文は8つの章で構成される。以下に本論文の内容を各章ごとに簡単に述べる。

第1章では、本論文の目的と各研究テーマに関する既往の主な研究について概観する。

第2章では、開水路における流れを分類して示し、流れの様式について述べる。開水路流の乱流現象の基礎的な知見について簡単に述べ、時間平均から見た開水路流れの乱流構造について概説する。また、実際の河川の種類とその形態について簡単に述べ、さらに、河川流に関する具体的な研究分野について概説する。さらに、実際の河川で観察される3次元流れのパターンについて分類し、本論文で対象とした流れについて具体的に述べる。

第3章では、本研究に用いた計測器、すなわち、3次元超音波流速計の測定原理と特徴について簡単に述べる。そして、実河川での計測システムと収集されたデータの処理方法について簡単に述べる。

第4章では、流れの状態を定常流で不等流の漸変流とみなして、種々の河床粗度を有する河川直線部を対象にして、このような河床粗度形態における実河川の流れ特性を把握すると共に、粗度係数の大きさの相違による流れ特性の違いを明らかにし、さらに、従来実験室水路で得られている流れの特性の実河川の流れへの適用性について検討する。

第5章では、流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で平面形の影響を受ける流れの一例として、河川湾曲部を対象にして、実際の河川湾曲部における流れ特性を把握する。そして、河川直線部の流れ特性と比較・検討することにより、そのような流れにおける3次元的な挙動を明らかにする。

第6章では、流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で河川構造物の影響を受ける流れの一例として、橋脚の後流域を対象にして、橋脚後流域における流れ特性を把握する。そして、河川直線部の流れ特性と比べて、そのような後流域の流れ特性がどのように異なるのかを検討する。

第7章では、データ処理時のサンプリング周波数に注目して、まず、従来の平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布などの時間平均化した乱れ特性量がサンプリング周波数の違いによってどのように異なるかを検討する。次に、実河川での乱れ変動をカオスのトラジェクトリ的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを検討する。

第8章では、第4章から第7章までの主要な結果を要約し本論文の結論とする。

参考文献

- 1) Stearns, F.P.: On the currentmeter, together with a reason why the max. velocity of water flowing in an open channel is below the surface, Trans. of ASCE, Vol.12, No.216, pp.331-338, 1883.
- 2) Gibson, A.H.: On the depression of filament of max. velocity in a stream flowing through an open channel, Proc. Royal Soc. of London, Series A, Vol.82, pp.149-159, 1909.
- 3) Keulegan, G.H.: Laws of Turbulent Flow in Open Channels, J. Research, National Bureau of Standards, Vol.121, 1938.
- 4) 石原藤次郎・岩佐義朗・村本嘉雄・今本博健：乱れ計測に関する一手法について，第8回水理講演会講演集，pp. 25-30，1963.
- 5) 余越正一郎：びわ湖疎水における乱れの観測，京大防災研究所年報，第9号，pp. 513-523，1966.
- 6) 石原安雄・余越正一郎：超音波流速計による河川乱流の測定，第11回水理講演会講演集，pp. 53-59，1967.
- 7) Ishihara, Y. and Yokosi, S. : Ultrasonic Flowmeters for Measuring River Turbulence , Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol.18, Part3, No.144, pp.49-64, 1969.
- 8) McQuivey, R.S. and Richardson, E. V. : Some turbulence measurements in open-channel flow, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.95, No.1, pp.209-223, 1969.
- 9) 浅野富夫・岩佐義朗・西原 巧：河川における乱れの時間構造について，第23回水理講演会論文集，pp. 99-105，1979.
- 10) 中川武夫・小澤 誠・今井 悟・宇谷彰訓・桃井康憲：河川内における乱流特性，第28回水理講演会論文集，pp. 219-224，1984.
- 11) 吉田静男・八木史郎：河川乱流計測用 L D A の開発，第30回水理講演会論文集，pp. 541-546，1986.

- 12) Griffith and Grimwood: Turbulence Measurement Study, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.107, No.3, pp.311-326, 1981.
- 13) West, J.R., Knight, D.W. and K. Shiono : Turbulence Measurements in the Great Ouse Estuary, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.112, No.3, pp.167-180, 1986.
- 14) 松岡保正 : 砂礫河床上の乱れ, 第33回水理講演会論文集, pp. 481-485, 1989.
- 15) 辻本哲郎・北村忠紀・岡田敏治・王子義徳 : 小型電磁流速計による野外流路での乱流測定, 水工学論文集, 第35巻, pp. 333-338, 1991.
- 16) 瀬津家久・中川博次, 瀬谷和彦 : 琵琶湖疎水の3次元乱流計測, 水工学論文集, 第35巻, pp. 345-350, 1991.
- 17) 日野幹夫・孟 岩・ : 多点同時計測システムによる実河川洪水流中の3次元大規模乱流構造の測定, 水工学論文集, 第36巻, pp. 175-180, 1992.
- 18) Jacson, R.G. II .: Velocity-bed-form-texture patterns of meander bends in the lower Wabash River of Illinois and Indiana, Bulletin of the Geological Soc. America, Vol.86, pp.1511-1522, 1975.
- 19) Habib, O.A. : Turbulent Structure in a River Bend, Jour. of Hydrulic Eng., ASCE, Vol.112, No.8, 1986.

主要記号の一覧

本論文中で用いる主な記号を以下に列挙する.

- L : 特性長
- ν : 水の動粘性係数
- L_x : 積分スケール
- k_0 : L_x に対応する波数
- η : Kolmogoroffの最小渦径
- λ : Taylorの最小渦径
- R_L : $u' \cdot L_x / \nu$ で計算される値
- ε : エネルギー逸散率
- C : スペクトル定数
- k : 波数
- $S_u(k)$: 波数空間における u 方向のエネルギー・スペクトル
- V_1 : 特性速度スケール
- l_1 : 長さスケール
- V_2 : 特性速度スケール
- l_2 : 長さスケール
- L_{AB} : 超音波発信素子 A, B 間の距離
- c : 水中の音速
- V_{AB} : A から B に向かう流速
- T_A : A で発信された超音波が B に到達するのに要する時間
- T_B : B で発信された超音波が A に到達するのに要する時間
- ΔT : A から B, B から A にそれぞれ超音波が伝わる時間の差
- VT : 測定電圧値
- RG : 超音波流速計の測定レンジ
- AA : 超音波流速計の検定係数
- BB : 超音波流速計の検定係数
- z : 任意の水深
- H : 全水深
- I : 水面勾配
- R : 径深
- U_m : 断面平均流速
- U_r : 摩擦速度
- R_* : レイノルズ数
- F_r : フルード数

- n : 河床の粗度係数
 k_s : 相当粗度 (Nikuradseの粗面領域の平均流速公式の絶対粗度 k を置き換えたもので、対象とする壁面の絶対粗度をNikuradseの実験の絶対粗度に換算した場合、いくらであるかを表す。)
 X : 流下方向 (流下する方向を正とした)
 Y : 横断方向 (右岸向きを正とした)
 Z : 鉛直方向 (鉛直上方を正とした)
 u : X 方向の任意の瞬間流速
 v : Y 方向の任意の瞬間流速
 w : Z 方向の任意の瞬間流速
 U : u を時間平均した局所的な平均流速
 V : v を時間平均した局所的な平均流速
 W : w を時間平均した局所的な平均流速
 u_i : 時系列的にサンプリングされた i 番目の X 方向の瞬間流速
 v_i : 時系列的にサンプリングされた i 番目の Y 方向の瞬間流速
 w_i : 時系列的にサンプリングされた i 番目の Z 方向の瞬間流速
 U_m : 断面平均流速 (ある測定地点の鉛直線上の U の平均値)
 u' : u の乱れ速度 ($= u - U$)
 v' : v の乱れ速度 ($= v - V$)
 w' : w の乱れ速度 ($= w - W$)
 $\sqrt{u'^2}$: u の乱れ強度
 $\sqrt{v'^2}$: v の乱れ強度
 $\sqrt{w'^2}$: w の乱れ強度
 $-\overline{u'w'}$: レイノルズ応力
 $-\overline{u'v'}$: "
 $-\overline{v'w'}$: "
 ρ : 密度
 $C_u(\tau)$: 自己相関関数
 $R_u(\tau)$: 自己相関係数
 $C_{uw}(\tau)$: 相互相関関数
 $R_{uw}(\tau)$: 相互相関係数
 τ : ラグ (変動の時間的なずれ)
 $X(t)$: 流速のタイムデータ
 T : 基本周期区間

- f : 周波数
 $X(f)$: $x(t)$ の複素フーリエ成分
 $X^*(f)$: $X(f)$ の共役複素フーリエ成分
 κ : カルマン定数
 B : 流路幅
 D_1 : 橋津の乱れ強度分布式の u 方向の係数
 D_2 : 橋津の乱れ強度分布式の v 方向の係数
 D_3 : 橋津の乱れ強度分布式の w 方向の係数
 z/H : 相対水深
 H' : 4 象限区分しきい値法におけるしきい値 (hole 値とも呼ぶ)
 C_1 : 4 象限法により求められる第 1 象限 (outward interaction) の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率
 C_2 : 4 象限法により求められる第 2 象限 (ejection) の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率
 C_3 : 4 象限法により求められる第 3 象限 (inward interaction) の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率
 C_4 : 4 象限法により求められる第 4 象限 (sweep) の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率
 T_1 : 4 象限法により求められる第 1 象限 (outward interaction) の時間占有率
 T_2 : 4 象限法により求められる第 2 象限 (ejection) の時間占有率
 T_3 : 4 象限法により求められる第 3 象限 (inward interaction) の時間占有率
 T_4 : 4 象限法により求められる第 4 象限 (sweep) の時間占有率
 T_5 : 4 象限法により求められる hole 事象の時間占有率
 $S_{uu}(f)$: 流下方向のエネルギー・スペクトル
 $S_{vv}(f)$: 横断方向のエネルギー・スペクトル
 $S_{ww}(f)$: 鉛直方向のエネルギー・スペクトル
 $R_{uu}(\tau)$: 流下方向の自己相関係数
 $R_{vv}(f)$: 横断方向の自己相関係数
 $R_{ww}(f)$: 鉛直方向の自己相関係数
 θ : 河川湾曲部の湾曲角
 u_w : 円柱の 2 次元後流の流速
 U_∞ : 橋脚後流域での橋脚の影響のないと思われる流下方向の流速の平均値
 C_D : 円柱の 2 次元後流の流速分布式の抵抗係数
 D : 物体の幅
 ν_0 : 渦動粘性係数
 x : 物体からの流下方向の距離
 r_τ : レイノルズ応力の相関係数

第 2 章 開水路の流れの分類と乱流構造

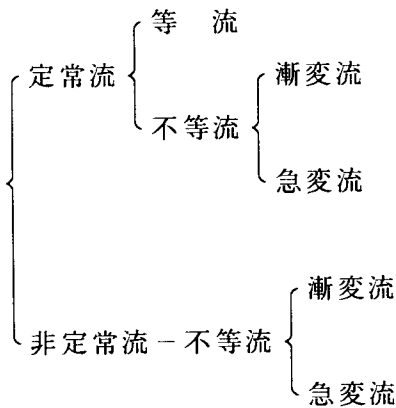
2. 1 開水路の流れの分類と様式

2. 1. 1 1次元解析

河川の流れは大気に接する自由水面を持ち、重力の作用によって流れる開水路流である。河川の長さは大河川では数百 km、数千 km におよぶのに対し、河幅や水深などの横断面形状は大河川でも数百 m、数十 m 程度であるので、河川の流れは流れ方向が支配的な流動である。したがって、河川工学で取り扱われる物理量は、河道断面内の流速分布のような局所的な状態量ではなく、物理量を断面平均操作することによって得られた平均量、あるいは平均量の流れ方向変化および時間変化である。つまり、流れ方向の巨視的な解析を対象とするところに特徴があり、流れの基礎方程式を断面内で積分して一次元的に取り扱うのが普通である。

2. 1. 2 開水路の流れの分類

流れの状態を表現する水理量は、断面平均流速 U_m 、水深 h 、径深 R 、および断面積 A である。このうち、 U_m と h は時間 t および流れ方向の距離 x の関数であり、 R と A は断面毎に h の関数で表される。 U_m あるいは h が時間的・空間的に変化するかどうかにより、開水路の流れは次のように分類される。



U_m や h が時間的に変化しない流れを定常流、洪水のように時間的に変化する流れを非

定常流と呼ぶ。河川の流れは正確には非定常流であるが、採用する時間スケールにより定常流あるいは非定常流との中間の準定常流として取り扱う。これに対して、 U_m と h が流れ方向の各断面で一様である流れを等流、河幅や勾配が流れ方向に変わるために、流量が一定でも U_m 、 h が断面ごとに変わる流れを不等流と呼ぶ。したがって、断面形や勾配が一定でない普通の河道では等流は起こらない。不等流は漸変流と急変流とに細分される。あえて細分する理由は、急変流では圧力の静水圧近似ができず、また摩擦以外のエネルギー損失が卓越するからである。しかしながら、急変部の河道区間は短く、河道全体から見ればその影響は局所的である。現実の河川の流れは両分類を組み合わせたものとなる。すなわち、次のような組み合わせとなる。

- ① 定常・等流
- ② 定常・不等流
- ③ 非定常・不等流

(a) 漸変流

漸変流における流体圧分布は、静水圧の法則によって近似される。あるいは、流線の曲がりや深さ方向の速度成分は無視される。長い流下区間を徐々に変化していく、いわゆる漸変流では単純化された仮定に基づくエネルギーあるいは運動量の次元解析法によって十分現象を表すことができる。

(b) 急変流

漸変流と対比して、注目すべき急変流の特徴は次のようである。

- ① 流れの曲率が大きいので、圧力分布を静水圧分布と仮定することができない。
- ② 比較的短い区間で、流れの状態がしばしば急変するから、漸変流で重要な役割を果たす境界面摩擦が、急変流では比較的小さく、多くの場合重要な意味を持たない。
- ③ 急激な遷移構造物のところで急変流がおこる場合には、その流れの物理的特性は流れの状態と構造物の境界形状によって基本的に規定される。
- ④ 急変流でおこる剥離帯や渦などは、流れの様相を複雑にし、流速分布を歪ます傾向がある。このような場合、流れは実際上与えられた境界面よりもむしろ一つないしはそれ以上の剥離帯によって制限される。

2. 1. 3 開水路の流れの様式

開水路の流れの状態や挙動は、基本的には流れの慣性力と粘性および重力との相対的な効果に支配される。

a) 粘性の効果

慣性に比べて粘性の効果が大いかに小さいかによって、流れは層流、乱流あるいは遷移状態となる。粘性力が慣性力に比べて大きく、流れの挙動を決めるのに重要な役割を果たすときは、流れは“層流”となる。この場合、水粒子は決まった滑らかな経路、すなわち流線上を移動し、流体の無限に薄い層がその隣の層の上を滑るように見える。一方、粘性力が慣性力に比べて小さいときは、流れは乱流となる。この場合、水粒子は滑らかでなく固定しない不規則な経路をとって移動するが、全体としては主流の方向に前進していく。慣性に比べての粘性の効果は、

$$R_v = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (2.1)$$

によって定義される“レイノルズ数”で表される。ここに、 U は流速、 L は特性長である。なお、開水路の場合、 L は水路の径深 R に等しいと考えられる。また、 ν は水の動粘性係数である。

b) 重力の効果

流れの状態に及ぼす重力の効果は、重力に対する慣性力の比によって表される。この比は“フルード数”によって与えられる。

$$F_r = U / \sqrt{g \cdot L} \quad (2.2)$$

ここに、 U は流速、 g は重力加速度、 L は特性長である。なお、開水路の場合、特性長を水理水深に等しくとるが、この水深は水路の流れの方向に直角な流水断面積を水面幅で割ったものと定義され、矩形水路では流水断面の水深に等しい。

以上のことから、開水路の流れは粘性と重力の総合効果によって、次の4つの“流れの様式”に分けられる。すなわち、

- (1) 常流—層流 ($F_r \leq 1$)
- (2) 射流—層流 ($F_r \geq 1$)
- (3) 射流—乱流 ($F_r \geq 1$)
- (4) 常流—乱流 ($F_r \leq 1$)

である。

最初の2つの様式(1)、(2)は河川水理学では一般に問題にならない。その理由は工学的問題で考えられる実際の河川の流れが普通は乱流であるからである。しかしな

がら、これらの様式は水深の非常に小さいところではしばしば起こり、“薄層流”として知られており、水理模型実験、地表流の研究およびこうした流れに対する浸食制御のような問題では重要となる。

2. 2 乱流の一般的な特性

2. 2. 1 乱流現象

我々の周囲に見られる流れは、一見静かに何の変化もなく流れているように見えても、よく観察すると、速度や圧力などが時間的・空間的に絶え間なく不規則に変動していることが多い。このような流れの状態を乱流という。

一般に、乱流は次の2点より分類される。すなわち、一つは乱れの発生原因の差異による分類であって、固体境界面の存在が支配的となる“壁面乱流(Wall Turbulence)”と固体境界面の存在が支配的とならない“自由乱流(Free turbulence)”とに分類される。例えば、境界層(boundary layer)流れ、管路流(pipe flow)、開水路流(open channel flow)などが壁面乱流に属する。また、格子乱流(grid turbulence)、噴流(jet)、重力噴流(plume)、後流(wake)などが自由乱流に属する。もう一つは、乱れの方向性と空間性によるものであって、方向性より等方性乱流と非等方性乱流とに、また空間性より一様性乱流と非一様性乱流とに分類される。すなわち、乱れの統計的特性が方向の取り方に関係しない場合を等方性乱流、空間における座標軸の取り方に関係しない場合を一様性乱流といい、そうでない場合をそれぞれ非等方性乱流、非一様性乱流という。したがって、方向性と空間性との組み合わせから乱流を分類すると、等方一様乱流、等方非一様乱流、非等方一様乱流、非等方非一様乱流の4種類になる。これら4種の乱流のうち非等方非一様乱流は最も一般的であって、実際の乱流現象の多くはこれに属する。

乱れ変動を「波動の集合体」と考えて波数空間上に展開するいわゆるスペクトル手法はTaylorらにより導入されて以来、主に等方性乱流場において非常な発展を見せた。この理論は「局所的等方性が成立しているような高波数領域では、乱れの統計的状态はカスケードダウンする粘性散逸率 ε と動粘性係数 ν によって一義的に決定される」と言うKolmogoroffの局所的等方性理論へとさらに発展された。

上述のようなスペクトル手法は乱れ変動成分の長時間の統計的平均法であり、個々の渦の時間・空間構造は長時間平均化のため埋没されて検出できない。最近の流れの可視化手法の発達に伴い、せん断乱流中にはかなり規則的で組織立った渦構造の存在が発見された。開水路乱流でも乱れ発生機構の中心である壁面領域のバースティング現象がその代表例として注目された。このような組織的な乱流構造は渦の発生・発達・合体・崩

壊などの規則的な現象を示すので、これらの現象を判別して解析できる条件付き抽出手法が考案された。

2. 2. 2 時間平均から見た乱流構造

開水路乱流場の任意の一地点での乱れ変動は種々の渦スケールから構成されている。この渦スケールを代表する特性スケールに内部スケールと外部スケールとがある。内部スケールが乱れに固有なものであるのに対し、外部スケールは水理条件や幾何条件によって変化し、実河川のように流れ場が複雑になると外部スケールがいくつも現れる。外部スケールが1種類の時、最も簡単でかつ基本的な知見を与えるので、以下では単一スペクトル構造の各小領域とそれらの特性渦スケールについて述べる。

a) 発生小領域

乱れエネルギーは平均流速とレイノルズ応力の相互作用の結果発生するから、発生小領域の特性スケールは平均流スケールすなわち乱流場全体を支配するスケール (L_x) である。 L_x に対応する波数を k_0 とすれば、 $k \sim k_0 \sim L_x^{-1}$ は最も乱れエネルギーを含んだ低波数領域に相当し、Tchen¹⁾ は $S_u(k) \sim k^{-1}$ なる -1 乗則を導いている。

b) 粘性小領域

粘性小領域において乱れエネルギーは分子粘性のために熱散逸される。本領域の特性渦スケールとして Taylor の最小渦径 λ と Kolmogoroff の最小渦径 η があり次式で定義される。

$$\lambda = (15 \cdot \nu \cdot u'^2 / \varepsilon)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (2.4)$$

ここで、 ε : エネルギー逸散率

両者が対象とする渦の働きは互いに異なっており、 λ 程度の渦が熱散逸に最も関与し、 η 程度の渦までで熱散逸はほぼ終了すると考えられる。これより、前者を前期粘性小領域、後者を後期粘性小領域と呼び、それぞれ -3 乗則²⁾、 -7 乗則³⁾ に従うとされている。

c) 慣性小領域

特性渦スケール間には、 $L_x / \lambda \sim R_L^{1/2}$ 、 $L_x / \eta \sim R_L^{3/4}$ (ここで、 $R_L = u' \cdot L_x / \nu$) が成立し、 R_L が十分大きければ発生小領域で受ける粘性作用にはほとんど左右され得ない中間的な渦が存在すると考えられる。Kolmogoroff はこの慣性小領域に局所等方性理論を展開し $-5/3$ 乗則をたてた。これは次式で表される。

$$S_u(k) = C \cdot u'^2 \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3} \quad (2.5)$$

ここで、 C : スペクトル定数 (≈ 0.5)

2. 3 開水路の乱流特性

2. 3. 1 開水路乱流場の領域区分

開水路流れが単一構造ならば次の小領域に区分できる。

(1) 壁面領域 (内部スケールで支配される内部層)

特性速度スケール V_1 および長さスケール l_1 はそれぞれ $V_1 \equiv U_f$ (摩擦速度) および $l_1 \equiv \nu / U_f$ であり, 壁法則が成立する。乱れの発生率が大きく, 組織立ったバースティングが顕著に起きる。

(2) 外部領域 (外部スケールで支配される外部層)

粘性応力や壁面特性にはほぼ独立した流れの主流部である。特性速度スケール V_2 および長さスケール l_2 はそれぞれ $V_2 \equiv U_{max}$ (最大流速) および $l_2 \equiv h$ (水深) である。この領域は, 自由水面の存在の影響を受ける自由水面領域と, この影響が無視でき, 乱れの発生率と散逸率とがほぼバランスした平衡領域とに細分できる。したがって, この平衡領域は河床特性や自由水面などの外的境界条件の影響をあまり受けず, 乱れの構造は比較的単純である。

2. 3. 2 開水路流れの乱流構造

(1) 外部領域での縦渦構造

レイノルズ数が十分大きな流れでは大半が外部領域で占められ, したがって従来から実河川で注目されてきた乱流構造は外部領域での流れを対象としたものである。

木下⁴⁾, は実河川での洪水時の航空写真を解析した結果, ボイルが流下方向に列をなした低速部と, 下降流を伴う高速部とが横断方向に水深とほぼ等しい間隔で並列して現れることを見出し, 流下方向に軸を持つ並列らせん流の存在を予測し, 室内実験でも確認している。

このような河川での縦渦の乱流運動は, 流量, 流砂量, 拡散係数, 河床形態などの評価に関係するものとして最近特に注目を集め, 種々の角度から検討されている。

(2) 壁面領域での組織立った乱流構造

壁面領域での組織立った渦であるバースティング現象の特徴について考えてみると, 時間的・空間的に不規則に発生するバースティング現象も ejection - sweep - ejection といった比較的規則的な過程を示すことや ejection および sweep によって瞬間

レイノルズ応力の大部分が発生され、乱れが生成されることなどが挙げられる。中川・瀬津は開水路乱流を対象として、種々の条件付き解析法を用いて乱れ発生機構に及ぼすバースティング事象の寄与率⁵⁾やバースティングの周期特性、空間スケール特性⁶⁾などを解明している。

2. 4 河川の種類と形態

2. 4. 1 河川の種類

河川は河川法では一級河川と二級河川に分けられている。

河川は地形上から、溪流、山地河川、沖積地河川、感潮河川に分けられる。沖積地河川の中でも勾配の急なものと、緩やかなものがあり、前者を急流河川、後者を緩流河川という。

降雨－流出の変換過程において、山地河川は山腹斜面が主たる変換の場であり、沖積地河川は河道網系が変換場である。よって、山地河川では斜面流出成分とその解析が、沖積地河川では河道（網）内での洪水追跡が重要な課題である。

感潮河川は文字どおり海域での潮汐振動を感じる河川最下流部の区間であり、この区間を感潮区間という。この区間は正に川と海との接点であるから、災害（波浪災害、高潮災害、津波災害など）も受ける、複合災害の生起場であり、しばしばその流域が人口の密集した都市域であることとも相まって、防災面で最もやっかいな河川域である。

2. 4. 2 河川の形態

河川の機能は地表に降った雨、雪などの降水を海または湖沼に流下させる働きである。そこで、それぞれの河川が地表のある定まった範囲を分担して、その範囲内の降水をそれぞれの河道によって流すことになる。この定まった範囲を河川の“流域”という。

わが国の河川は、世界的な大河川に比べ流域面積は著しく小さく（表2-1を参照）、かつ、河川勾配は極めて急である。

このような流域と河道の特性のために、潤沢な降雨に恵まれているにもかかわらず、流域の保水能の貧しさと、河道の急勾配のために、流域に降った雨は集中して短時間に流下して洪水となり、その後は急速に流量が低減して低水状態が持続するという極めて流動変動の大きい流況を呈する。

表 2 - 1 世界の大河川とわが国主要河川の比較

河 川 名	国 名	流域面積(km ²)	幹川流路延長(km)
アマゾン川	ブラジル	7,000,000	5,500
ミシシッピ-川	U S A	3,723,000	4,200
揚子江	中 国	1,872,000	5,120
利根川		16,840	322
石狩川		14,330	268
信濃川		11,900	367
淀川		8,240	75

2. 5 河川の水文量調査

人類の文明・文化は大きな河川の流域から発展・発達し、河川が人間の歴史と文化に貢献してきたことは事実であろう。我々は山間部においては水力発電に、中流部では上下水道、工業用水道に、観光に、下流部では、田畑の灌漑に、漁業に河川を利用している。しかし、しばしば河川洪水に伴う氾濫で人間生活の場を乱し、幾多の災害をもたらした。わが国では、明治29年に河川法が制定されて、治水を主体とした河川の統轄の責任体制を体系化した。昭和に入ってから河川統制という理念のもとに、治水から利水へと変わってきた。このような時代背景の中で、河川の水位や流量などの水文量の把握は、治水、利水、さらに、河川の計画や管理などの基本になる。

現在、日本における水位や流量の観測所数は建設省だけで約2500ヶ所(1983年9月、建設省河川局河川計画課資料による)にもおよんでいる。これらの観測所での観測は、普通観測、自記観測、テレメーター観測に分けられている。普通観測は、毎日定時に前1日の降水量、その時点の水位を目視により観測し記録するもので、日を単位とする定常観測であったが、観測のテレメーター化により時間を単位とする定常観測に変わりつつある。治水・利水計画を策定するには過去の洪水(流量)ハイドログラフ、長時間の低水流量の資料が不可欠である。流量観測の方法を大別すれば、①流速・断面積法、②流量測定構造物による方法、③薬品(食塩)濃度法、④水位流量曲線法がある。このうち、①は流速と断面積を測定して流量を算出する方法であるが、流速の測定法により流速計測法、浮子測法、超音波測法、あるいは、航測法などに分けられる。流速計測法で用いられている流速計には回転式流速計、電磁流速計、電磁流量計などがある。

2. 6 河川流に関する研究分野

河川の流れに関する具体的な研究分野の主なものを大まかに分類してみると、次のようになる。

(1) 流水抵抗 — — — 粗度の評価

人工粗度の抵抗（棧粗度，溝粗度，イボ粗度）

移動床流れの流水抵抗

長方形断面水路の側壁効果

波状床面上の流れ特性

植生のある開水路の抵抗則

(2) 河川構造物 — — — 流下方向急変部（水路幅急変部，方向急変部，流量変化部）

での流れ

鉛直方向急変部（勾配急変部，段上り部，段落ち部）での流れ

構造物周辺における局所洗掘現象（水平噴流による局所洗掘，橋脚による局所洗掘）

跳水型減勢工における流れ

河川分流部の流れ

河川合流部の流れ

(3) 流砂 — — — — — 砂礫の移動限界

掃流砂量（混合砂礫の掃流砂量など）

開水路における浮遊砂流

移動床の河床形態

湾曲水路の河床変動

以上のように，河川の流れに関する研究分野は多岐にわたるが，以下では急変流の一つである河川構造物周辺の流れの挙動について，もう少し詳しく述べておく。

河道や人工水路には，せき・ゲート・断面変化部・減勢池・分流工などの変化部が存在し，さらに河川の機能とは無関係な橋脚などの障害物が設けられるなど，河道の弱点を形成することも少なくない。河川に設けられた構造物周辺の流れは一般に急激な変化を示し，また複雑な三次元的性状を示すために，流れの水理的挙動を的確に表す力学的関係を明確にすることが非常に困難である。特に，流れのはく離に伴う渦の発生や乱れの発達・減衰は，機能設計上重要な役割を果たすにもかかわらず，その理論的表示や

計測が困難であるところに、現象解析やその積極的利用を阻害していた原因があった。構造物の形式が多種にわたり、また要請される機能も複雑であるために、現在までの研究は主として個々の場合の水理模型実験による考察に重点が注がれてきた。

2. 7 河川の3次元流れ

実際の河川流を取り扱う場合、流れの挙動は3次元である。河川の3次元流れのパターンは、水深規模の流れ、流路幅および平面形の影響を受ける流れ、横断形状を受ける流れ、および構造物の影響を受ける流れに分類される。以上の分類に基づいて3次元流れのパターンをまとめてみると表2-2のようになる。これらの現象は鉛直面内および平面内の流速分布とその変動に支配され、流れの蛇行、河道の形状とも密接に関係する。

表2-2 3次元流れのパターン

分類	流れのパターン
水深規模	並列らせん流（縦渦）、小規模河床波上の流れ
流路幅および平面形	中規模河床波上の流れ、河岸渦、湾曲部の流れ、分流部の流れ、合流部の流れ、拡縮部の流れ、河口流出流
横断形状	複断面水路の流れ、隅角部の流れ、河岸における湧き上がり流
構造物	橋脚の後流（カルマン渦）、落差工下流の水平軸渦、低い堰の下流側の渦流

表2-2で示された河川の3次元流れのパターンの内で、本論文で対象としたパターンは以下の通りである。

- (1) 「湾曲部の流れ」のパターンとして、第5章において、河川の単純湾曲部を対象として研究を行う。
- (2) 「橋脚の後流」のパターンとして、第6章において、河川直線部に橋脚が1本のみ設置された地点の橋脚後流域を対象として研究を行う。

参考文献

- 1) Tchen, C.M. :On the spectrum of energy in turbulent shear flow, Jour. of R.N.B.S., Vol.50, pp.51-62, 1953.
- 2) 井上栄一 : 乱れの最小乱子について, 東大理工学研究所報告, 4, pp.194-201, 1950.
- 3) Heisenberg, W. :Zur staitischen theorie der turbulenz, Zeit Phys., 124, 1948.
- 4) 木下良作 : 航空写真による洪水流の解析, その乱流構造と表面の流れかたの特性について, 日本写真測量学会誌, Vol.6, pp.1-17, 1967.
- 5) Nakagawa, H. and Nezu, I. :Prediction of the Contributions to the Reynolds Stress from the Bursting Events in Open Channel Flow, Jour. FluidMech., Vol.80, pp.99-128,1977.
- 6) 瀬津家久・中川博次 : せん断乱流のbursting現象とその物理モデル, 第22回水理講演会論文集, pp.29-36, 1978.

第3章 計測システムと計測器の諸特性

3.1 超音波流速計の測定原理

本流速計（エオソニック・エレクトロニクス社製、Model SD-10）は流速測定方法として、素子間の超音波の伝達時間の差から3方向の流速成分を求める時間差法を用いている。（超音波流速計の測定原理から言えば、他に連続波を使用して流れ方向とその逆方向の両方向の伝播時間の差を位相差として検出する位相差法、超音波パルスの伝播時間の逆数である周波数の差を検出する周波数法という方式もある。）

超音波の伝播方式はX軸、Y軸は反射式、Z軸は対向式である。すなわち、図3-1において、

L_{AB} ・・・超音波発信素子A、B間の距離

e ・・・A、Bと反射板Eとの距離AE、BEの和

θ ・・・AB、AE、BEのなす角度

とし、AからBに向かう流速を V_{AB} 、その時の音速を c とすると、 $c \gg V_{AB}$ を考慮して、Aで発信された超音波がBに到達するのに要する時間 T_A は、

$$T_A = \frac{e}{c + V_{AB} \cdot \cos \theta} = \frac{e}{c} - \frac{V_{AB} \cdot L_{AB}}{c^2} \quad (3.1)$$

Bで発信された超音波がAに到達するのに要する時間 T_B は、

$$T_B = \frac{e}{c - V_{AB} \cdot \cos \theta} = \frac{e}{c} + \frac{V_{AB} \cdot L_{AB}}{c^2} \quad (3.2)$$

よって、AからB、BからAにそれぞれ超音波が伝わる時間の差 ΔT は、

$$\Delta T = T_B - T_A = 2 \cdot V_{AB} \cdot L_{AB} / c^2 \quad (3.3)$$

で表される。上式で L_{AB} と c が既知であれば、時間差 ΔT を測定することによって、流速 V_{AB} を求めることができる。 ΔT は、A-B間、C-D間、F-G間において、1/300 secの間隔で超音波パルスを送信させて直接測定される。このようにして測定された ΔT をアナログ信号電圧に変換した後、水温その他による音速の変化を検出し、それによる自動補正を経て、流速値としてのアナログ信号電圧を出力する。

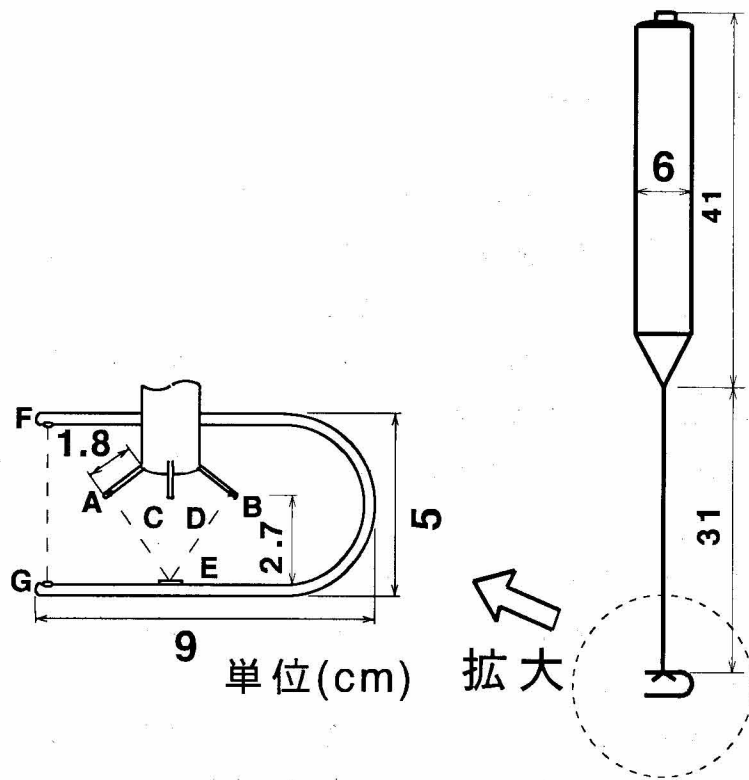


図3-1 超音波流速計

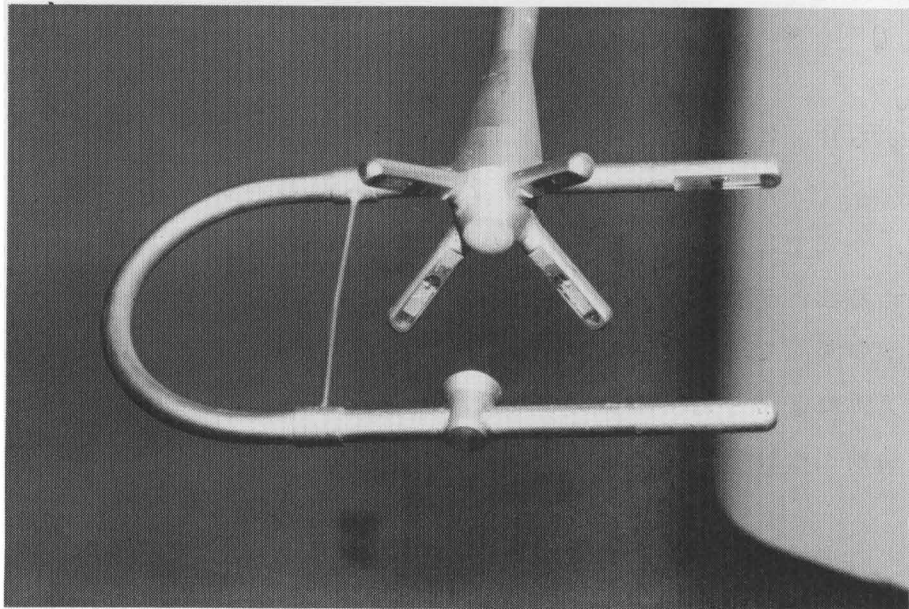


写真3-1 超音波流速計のセンサー部

3. 2 超音波流速計の特徴

実河川における流速の3方向成分に関する資料や解析結果がほとんど報告されていない理由の一つとして、実河川での流速測定、特に、乱流計測に適した計測機器が少ないことが挙げられる。現在、河川の流速測定に使用される計測器としてまず考えられるものにプロペラ流速計がある。これは取り扱いが簡単であるという長所を持つ反面、基本的には1方向のみの測定に限られ、流速変動の追従性にも問題がある。また、熱線流速計は実河川での測定となると水の汚れに対して弱く、長時間にわたる安定性が問題となる。乱流現象の解明によく利用されているレーザー・ドップラー流速計は実験室水路での使用に限られ、実河川での使用は到底不可能である。(最近では光ファイバーを用いた河川乱流計測用のプローブ型レーザー・ドップラー流速計が開発されつつあるが、価格が非常に高すぎる。)最近、屋外での計測にしばしば用いられるようになった電磁流速計があるが、流速変動が10 Hz以下の測定に限られる。これに対して、本研究で使用する超音波流速計は、流速測定のキャリブレーションが不要であること、水温変化による補正が不要であること、長時間安定性が優れていること、流速の3方向成分同時測定が可能であることなどの特長を有し、測定条件の厳しい実河川での利用が期待される。そこで、筆者は市販のプローブ型3次元超音波流速計を用いて、実河川での3方向流速の計測に対する本流速計の有用性を検証してきた¹⁾。以下に、本研究に用いた超音波流速計の主な特長について述べる。

a) 長時間安定性

静水状態において約8時間にわたり信号電圧を記録した結果の一部を図3-2に示す。この図に見られるように1時間以内の零点のドリフトはほとんどない。長時間連続して測定する場合は零点のドリフトが無視できないが、その変動は極めて緩慢であるから適時零点の調整を行えばよい。

b) 流速成分の同時測定

本流速計はX、Y、Zの順に各素子間で300 Hzの超音波パルスを発信させているので、ほぼ100 Hzまでの流速変動の3方向成分を同時測定可能である。(元々、本流速計は平均流を計測するために開発・市販されたものであったが、上記のような仕様への改造を製造メーカーへ依頼して製作された流速計である。)

c) 流速のキャリブレーション

流速と信号電圧との関係はあらかじめ検定用水槽において求めておく。本流速計は水温変化の影響も自動補正されるので、一度検定を行えばセンサー間の幾何学的形状が変化しない限り、その関係は不変であり、計測時に流速のキャリブレーションは不要である。

なお、本流速計の主なる仕様を表3-1に示す。

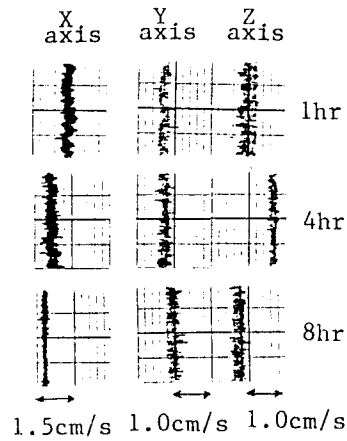


図3-2 超音波流速計の長時間安定性

表3-1 超音波流速計の仕様

	仕 様
測定可能流速レンジ	0 ~ ± 1 0 0 cm/sec
測定成分	X, Y, Z 軸
応答周波数	1 0 0 H z
精度	± 1 %
超音波発信素子の固有振動数	4 M H z
測定レンジ	1 0, 3 0, 6 0, 1 0 0 cm/sec
計測方式	時間差法
超音波伝播方式	反射式 (X, Y 軸), 対向式 (Z 軸)
音速補正方式	直接音速補正
電源	直流 1 2 ボルト × 4 個
消費電流	4 0 0 m A (+ 2 6 V) 2 5 0 m A (+ 1 2 V) 1 2 5 m A (- 2 4 V)

3. 3 流速計の検定結果

検定用水槽において行ったキャリブレーションのデータを用いて直線回帰によって求められた流速と測定電圧値との関係式は次式のようになる。

$$[\text{流速}] = AA + BB * VT * RG / 60 \quad (3.4)$$

ここで、VT：測定電圧値（ボルト），RG：超音波流速計の測定レンジ（cm/s）である。

なお、上式の検定係数AA，BBを次表に示す。

表3-2 超音波流速計の検定係数

軸	X	Y	Z
AA	0. 2 1 4 9 3	- 0. 0 7 2 1 7	0. 2 1 1 9 3
BB	5 0. 2 5 7	5 1. 0 9 4	5 4. 6 2 9

3. 4 計測システムとデータ処理システム

実河川における計測システムは図3-3に示すように、超音波流速計本体とモニターユニットから構成されている。流速計から得られる信号電圧はモニターユニット内のアンプによって増幅され出力電圧がアナログデータレコーダーに記録される。座標系は測定点の座標原点を砂礫上面に選定し、座標軸はuを流下方向（X軸），vを横断方向（Y軸），wを鉛直方向（Z軸）にとる左手系とした。流下方向，右岸方向，鉛直上向きをそれぞれ正の方向とした。流速計の流速測定点は図3-4に示すようにセンサープローブの中央部（プローブ最下端から2.5cmの位置）である。

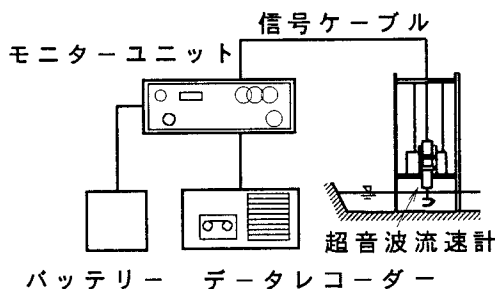


図3-3 現地観測の計測システム

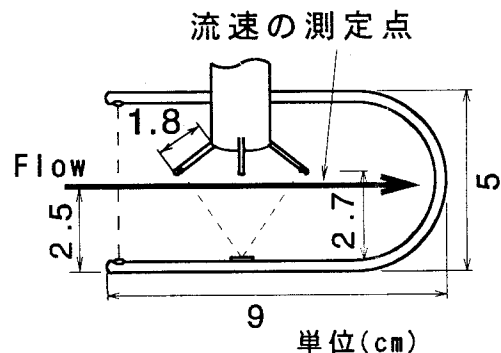


図3-4 流速の測定点

ここで、現地測定における座標軸の方向決めが非常に重要となる。すなわち、3次元の流速計の鉛直方向のZ軸は下げ振りなどで簡単に決められるが、X、Y軸の方向をどのように定めるか問題となる。一般的に考えられる方法について列記すると以下のとおりである。

- (方法1) 現地では特に方向を決めずに、データを持ち帰ってから3軸の流速から主方向を計算によって求め、その方向をX軸とし、その軸に直角な方向をY軸と定める。
- (方法2) 河岸が整備された護岸を有するとき、護岸の流下方向に対して平行に基準線を設け、測量器具のセオドライトなどを用いてその基準線に対して直角にY軸を定める。このようにY軸が決まれば、結果としてX軸は護岸の流下方向に対して平行に設置される。
- (方法3) まず、X軸を流下方向に対してほぼ平行に設置し、次にY軸方向のアナログ電圧信号をデータレコーダなどのアナログメータでモニターしながら零ボルトを中心として変動する信号の正負の振れ幅が同程度となるようにZ軸を中心に回転して微調整を行いY軸を決定する。Y軸が決まれば必然的にX軸も定まる。

本研究では対象河川によって(方法2)と(方法3)を使い分けて採用した。第4章の河川直線部の場合、(方法3)を採用し、第5章の河川湾曲部と第6章の橋脚後流域では(方法2)を採用した。(方法2)を具体的に説明すると以下ようになる。各機器の位置関係を真上から見た模式図を図3-5に示す。護岸の流下方向に対して平行に基準線を設け、セオドライトを用いてその基準線に対して90°の方向をセオドライトの望遠鏡で見通し流速計の設置台の流速計の取り付け面を見通し線に平行になるように流速計設置台をセットする。この時、同時に流速計に取り付けた水準器を用いて鉛直の確認を行う。こうして流速計の取り付け面に平行な方向がY軸となり、そして、この面に垂直な方向がX軸となる。

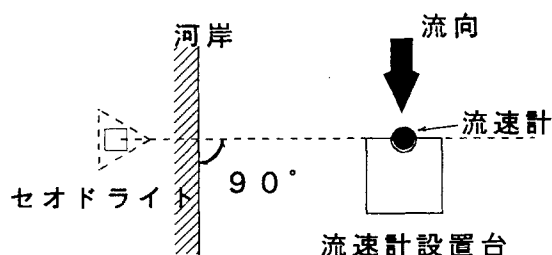


図3-5 流速計の設置方法

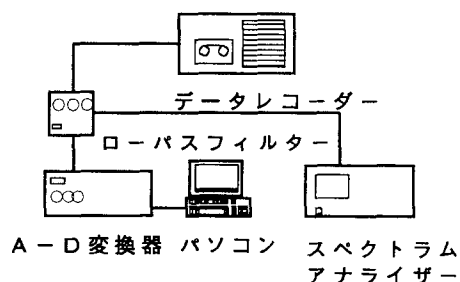


図3-6 データ処理システム

モニターユニットは、10 cm/s, 30 cm/s, 60 cm/s, 100 cm/sの流速値をフルスケール1ボルトとして出力する4つのレンジを有している。測定レンジは対象とする最大流速の大きさによって逐次変更した。電源は、現地観測における機動性の確保と、ノイズ除去のために、小型直流電源を使用した。また、測定は1ケースにつき水深方向の5～8ポイントで行い、1ポイント当たりの測定時間は約2～5分間とした。データ処理システムを図3-6に示す。現地測定においてアナログ信号電圧として得られたデータは、ローパスフィルターを通して50 Hz以上の高周波数部分を除去した後、A-D変換器によりデジタル化し、フロッピーディスクに記録する。

サンプリング周波数は第4章（直線部）、第5章（湾曲部）、第6章（橋脚後流）では100 Hzとし、第7章では、パソコンによるデータ処理時で、1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 Hzの15種類とした。スペクトラム・アナライザによるデータ処理時で、2.56 Hz, 5.12 Hz, 12.8 Hz, 25.6 Hz, 51.2 Hz, 128 Hzの6種類とした。データの個数は、第4章（直線部）、第6章（橋脚後流）では20480個とし、第5章（湾曲部）では5120個とし、第7章では200個とした。

なお、ローパスフィルターのカットオフ周波数を50 Hzとした理由は以下の通りである。すなわち、まず、スペクトラム・アナライザ（アドバンテスト製、TR-9404）を用いて、超音波流速計の応答周波数である100 Hz（アナライザでの実際の周波数は128 Hzである）でサンプリングして8回の平均化をした後に得られたエネルギー・スペクトル図から判断すると、50 Hz以上ではスペクトルの値が大きく変動しているため、エネルギー・スペクトルについて検討する周波数の範囲を50 Hz以下とする方が良いと思われる。そこで、エネルギー・スペクトルの最大周波数に対し、サンプリング定理²⁾にしたがってデータ処理時のサンプリング周波数をその2倍の100 Hzとした。

3. 5 各種水理条件の評価方法

本論文中の各種水理条件の評価方法について以下に記す。

a) 水面勾配 I

水面勾配Iを求める場合、測量誤差の影響を小さくするため特に平地河川では出来るだけ測量区間を長くとるべきである。

b) 径深 R

測点を通る横断面上において適当な間隔でその位置、水深を測定し断面積A、潤辺長sを求め、これより径深Rを算定する。

c) 断面平均流速 U_m

各測定地点において計測された鉛直線上の各ポイントにおける平均流速を平均した値である。

d) 摩擦速度 U_τ

摩擦速度 U_τ は乱れ特性値を無次元化し普遍関数表示する際に最も重要なパラメータの一つであり、正確かつ合理的な評価がなされねばならない。その評価方法はいくつもあるが今回対象としたものを記す。

①水面勾配 I による評価法

$$U_\tau = \sqrt{gRI} \quad (3.5)$$

ここで、 g : 重力加速度、 R : 径深、 I : 水面勾配

なお、水面勾配 I は 100 m 程度の区間の水面の水準測量した結果を用いる。

②対数則による評価法

平均流速が対数則を示す時、完全粗面において次式が成立する。

$$\frac{U}{U_\tau} = 8.5 + 5.75 \cdot \log_{10}(z/k_s) \quad (3.6)$$

ここで、 U : 各水深における局所的な平均流速、 k_s : 相当粗度。(定義については第1章の主要記号の一覧を参照のこと)

式(3.6)を鉛直方向の各ポイントで連立させて、 U_τ を求める。

③レイノルズ応力分布による評価法

レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ に関し、運動方程式から次式が得られる。

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_\tau^2} = \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \frac{1}{R_*} \cdot \frac{\partial U^+}{\partial z} \quad (3.7)$$

ここで、 $U^+ = U/U_\tau$ 、 $R_* = U_\tau \cdot H/\nu$ 、 z : 任意の水深、

H : 全水深、 ν : 水の動粘性係数。

R_* が十分大きければ壁面近傍を除いて $-\overline{u'w'}$ は直線分布をなすことより、

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_\tau^2} = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (3.8)$$

よって、この領域の $-\overline{u'w'}$ の実測値より U_τ を決定し得る。

さて、ここに挙げた評価法のうち、①では幾何形状から断面全体としてとらえた U_τ を求められるが、実河川において水面勾配 I や断面形状の正確な測定が難しく、今回の下里川のように測定できない場合もある。②の方法では対数分布の傾きから求めることになるが、本研究では鉛直方向の測定ポイント数が少なく、また湾曲部などでは、その分布形状からの確に U_τ を評価できるか疑問もある。③の方法の特徴はレイノルズ応力という乱れ特性値から U_τ を評価することにあるが、この場合も②と同様に測定ポイン

ト数が少ない点が問題である。ここで、各方法で求めた U_r と Manning の粗度係数の定義より求められた河床の粗度係数 n の具体的例（河川直線部の場合）を次章の表 4 - 2 にまとめて示す。求められた U_r を各ケース毎に見ると、CASE1 など 5 ケースを除いて各方法による結果の差の大きいものが半分以上になっており、中には CASE10 の②（対数則による）と③（レイノルズ応力による）のように 2 倍を超えている場合もある。禰津の実験ではレイノルズ数、フルード数、あるいは粗度が大きくなればこの差が大きくなる傾向が指摘されているが、今回の結果がこれに当てはまるものばかりとは言えないだろう。一方、同一河川の 2 ケースの U_r を比較すると、①（水面勾配による）の結果が②（対数則による）や③（レイノルズ応力による）に比べてその差が小さく、河川の幾何形状から求める場合と点計測結果から求める場合の違いが表れている。

このようにそれぞれ問題があるが、本論文では乱れの特性に注目しているので、 U_r の評価法として③（レイノルズ応力による）の方法を用いた。なお、具体的には測定されたレイノルズ応力を三角形分布が成立していると思われるポイントのデータを用いて線形回帰し、その $z = 0$ への外挿値として τ_0 を求めて U_r の値とした。

e) 実河川のレイノルズ数 R_r 。

レイノルズ数の一般式（第 2 章の式(2.1)）より、式（2. 1）の特性長 L として測定点の全水深 H をとり、流速 U として先述の c) の断面平均流速 U_m をとると、次式のようなになる。

$$R_r = U_m \cdot H / \nu \quad (3.9)$$

ここで、 ν は測定時の流水の水温に対する動粘性係数である。

f) 実河川のフルード数 F_r 。

フルード数の一般式（第 2 章の式(2.2)）より、上述のレイノルズ数と同様に、式(2.2)の特性長 L として全水深 H 、流速 U として先述の c) の断面平均流速 U_m をとると、次式のようなになる。

$$F_r = U_m / \sqrt{g \cdot H} \quad (3.10)$$

ここで、 g は重力加速度である。

g) 河床の粗度係数 n

Manning の粗度係数の定義より、

$$n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}} \cdot \frac{1}{U_m / U_r} \quad (3.11)$$

ここで、 R は先述の b) の径深であり、 g は重力加速度である。

3. 6 乱れの分布特性諸量

本研究において算定された乱れ特性量を以下に記す。

(1) 平均流速

$$U = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u_i \quad (3.12)$$

$$V = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i \quad (3.13)$$

$$W = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \quad (3.14)$$

ここに、 u_i 、 v_i 、 w_i は時系列的にサンプリングされた瞬間流速の、それぞれ x 方向（主流方向，流下方向を正）， y 方向（横断方向，右向きを正）， z 方向（鉛直方向，上向きを正）の成分， N はサンプリング個数である。

現地測定されたアナログデータ（測定時間約 2～5 分間）の内，記録の始めの部分のデータを A/D 変換して得られた瞬間流速値を算術平均して平均流速を求めた。

(2) 乱れ強度

$$\sqrt{\overline{u_i'^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (u_i - U)^2} \quad (3.15)$$

$$\sqrt{\overline{v_i'^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - V)^2} \quad (3.16)$$

$$\sqrt{\overline{w_i'^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (w_i - W)^2} \quad (3.17)$$

(3) レイノルズ応力

$$-\rho \overline{u'v'} = -\rho \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (u_i - U) \cdot (v_i - V) \quad (3.18)$$

$$-\rho \overline{v'w'} = -\rho \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - V) \cdot (w_i - W) \quad (3.19)$$

$$-\rho \overline{u'w'} = -\rho \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (u_i - U) \cdot (w_i - W) \quad (3.20)$$

ここで, ρ : 密度

(4) 自己相関係数と相互相関係数

自己相関関数 $C_u(\tau)$ の定義は

$$C_u(\tau) = \overline{u'(t) \cdot u'(t+\tau)} \quad (3.21)$$

である.

これより, 自己相関係数は次式のように表される.

$$R_u(\tau) = C_u(\tau) / C_u(0) = \overline{u'(t) \cdot u'(t+\tau)} / \overline{u'(t)^2} \quad (3.22)$$

ここで, τ はラグ (変動の時間的なずれ), $u'(t)$ は流下方向の乱れ速度である.

また, 相互相関関数 $C_{uw}(\tau)$ の定義は

$$C_{uw}(\tau) = \overline{u'(t) \cdot w'(t+\tau)} \quad (3.23)$$

である.

これより, 相互相関係数は次式のように表される.

$$R_{uw}(\tau) = C_{uw}(\tau) / \sqrt{C_u(0) \cdot C_w(0)} = \overline{u'(t) \cdot w'(t+\tau)} / (\sqrt{\overline{u'(t)^2}} \cdot \sqrt{\overline{w'(t)^2}}) \quad (3.24)$$

ここで, τ はラグ (変動の時間的なずれ), $u'(t)$ は流下方向の乱れ速度, $w'(t)$ は鉛直方向の乱れ速度である.

(5) エネルギー・スペクトル (パワースペクトル密度関数)

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow 0} \left[\frac{1}{T} X(f) \cdot X^*(f) \right] \quad (3.25)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cdot \exp(-i \cdot 2\pi f t) \cdot dt \quad (3.26)$$

$$X^*(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cdot \exp(+i \cdot 2\pi f t) \cdot dt \quad (3.27)$$

ここで, $X(t)$: 流速のタイムデータ, T : 基本周期区間, f : 周波数

$X(f)$: $x(t)$ の複素フーリエ成分,

$X^*(f)$: $X(f)$ の共役複素フーリエ成分 である.

参考文献

- 1) 瀬良昌憲・神田 徹：超音波流速計による河川流の測定，第32回水理講演会論文集，pp.353-358，1988.
- 2) 得丸英勝・添田 喬・中溝高好・秋月影雄：工学基礎講座18 計数・測定，培風館，pp.56-59，1982.

第4章 河川直線部における流れ特性

4.1 緒言

室内の開水路における精緻な計測・解析を基にして河川の3次元的な流れの構造を解明しようとする試みは数多くなされているが、実河川における流速の3方向成分に関する資料や解析結果はほとんど報告されていない。その理由の一つとして、実河川での流速測定に適した計測機器が少ないことが挙げられる。最近になり、従来より用いられているプロペラ流速計、熱線流速計、レーザー・ドップラー流速計、電磁流速計などと比較して優れた特長（流速測定のカリブレーションが不要であること、水温変化による補正が不要であること、長時間安定性が優れていること、流速の3方向成分同時測定が可能であることなど）を有するプローブ型3次元超音波流速計が開発された。筆者らはこの超音波流速計を用いて、実河川での3方向流速の計測に対する本流速計の有用性を検証した¹⁾。よって、本研究は、河道の平面形状が直線状である河川直線部で、かつ、山地河川に多く見られるような河床が礫で構成された地点を対象にして、河川規模、河床状態等の異なる種々の実河川において流速3方向成分の同時測定を行い、その測定結果を既往の室内直線開水路における実験結果と比較することにより、実河川の河川直線部における流れの特性について明らかにすると共に、室内開水路において得られた流れの特性の実河川への適用性について検討する。

4.2 測定方法と水理条件

4.2.1 測定地点の選定

河川直線部の現地測定を実施する地点の選定条件の主なものを以下に列記する。

- 1) 流速計の測定可能な最大流速が100 cm/secであるので、測定地点の流速が100 cm/sec以下である。
- 2) 観測者が河川の中で流速計の設置および流速測定作業が可能な水深、すなわち、50 cm以下の水深である。（できるだけ多くのデータを収集するため観測者2人の手で簡単に河川中を運搬可能なように、軽量鋼製アングルで製作した流速計取り付け台を採用した。）

- 3) 流速計とモニターユニットとを結ぶ信号ケーブルの長さが約15mであるので、モニターユニット、データレコーダー、電源などを置くための折り畳み式机から測定可能な範囲は制限され、そのような設置条件を満足する地点である。(信号ケーブルの長さは信号ノイズを避けるためにこれ以上長くできない。)
- 4) 砂や礫など河床材料で構成された一様河床を有する地点を選んだ。
粒径数mm程度の砂で構成された河床のような粗度係数の小さなものから粒径数cmの礫で構成された河床のような粗度係数の大きなものまでの種々の測定地点を選んだ。
- 5) 河道はできる限り直線状である。(後述するように、実際の測定地点は必ずしもこの条件を十分満足していないものもある。)
- 6) 河幅の大きさが数メートルから数十メートルまでの種々の地点を選んだ。

4. 2. 2 測定方法

前述のような測定地点の選定条件を満足するような兵庫県下の8河川、15地点において、1989年9月から1989年11月にかけて現地観測を実施した。本研究で現地測定の対象とした地点は主に山地河川に多く見られる礫で構成された河床を有し、水深が20～40cmの地点を選んだ。特に、現地測定を実施した地点は礫の直径が水深の半分ほどもある礫床の地点が多い。データ処理において、サンプリング周波数100Hz、データ数20480個とした。

なお、測定を実施した地点を(1)河床の粗度係数、(2)流路幅、(3)河床勾配について分類すると、以下ようになる。

(1) 河床の粗度係数：n

Rグループ° (粗度：大) --- $n \geq 0.0397$ (CASE1, 4, 5, 6, 10)

R-Sグループ° (粗度：中) --- $0.0224 < n < 0.0397$ (CASE2, 8, 9, 11, 13)

Sグループ° (粗度：小) --- $n \leq 0.0224$ (CASE3, 7, 12, 14, 15)

(2) 流路幅：B

BL (流路幅：大) --- $B \geq 30\text{ m}$ (CASE1, 2, 7, 10, 11)

BM (流路幅：中) --- $10\text{ m} < B < 30\text{ m}$ (CASE5, 6, 12, 13, 14, 15)

BS (流路幅：小) --- $B \leq 10\text{ m}$ (CASE3, 4, 8, 9)

(3) 河床勾配：I

IL (勾配：大)	-----	$I \geq 1 / 300$	(CASE1, 3, 4, 12, 13)
IM (勾配：中)	-----	$1/1000 < I < 1/300$	(CASE2, 5, 6, 8, 9)
IS (勾配：小)	-----	$I \leq 1 / 1000$	(CASE7, 10, 11, 14, 15)

以下に、個々の測定地点について概要を述べる。

a) 市川 (CASE1)

兵庫県中央部を流れる一級河川で、測定地点は神崎郡大河内町のJR播但線寺前駅付近である。測定地点付近において、河道は緩く左へ湾曲しており、流路幅は31.7mである。測定地点の約50m上流には橋脚がある。河床状態は直径10～30cmの礫が敷きつまり、50cm程度のものも点在している。さらに、50m以上上流側には直径1m以上の岩も散在する。

b) 千種川 (CASE2)

兵庫県西部を流れる一級河川で、測定地点は佐用郡南光町のJR姫新線播磨徳久駅付近である。河道は直線状で、兩岸ともコンクリートで護岸されている。測定地点の約100m上流には橋脚があり、下流側約100mのところへ越流ゼキがある。流路幅は32.1mである。河床状態は直径10～20cmの礫が多く、30～40cmのものが点在している。

c) 有野川 (CASE3, 4)

六甲山に端を発する武庫川水系の支流で、測定地点は神戸市北区有野町の神戸電鉄三田線田尾寺駅の南東約400mのところである。測定地点付近において、河道は緩く左へ湾曲しており、流路幅はCASE3で2.5m、CASE4で3.1mである。両測定点間の距離は約3.1mである。CASE3の点の上流側約7mに橋脚があり、この橋脚とほぼその延長線上にある中洲によって分けられている流れの右側で測定を行った。CASE4の点の右岸寄りわずかに上流側のところに跳水が生じている。河床状態は直径5～10cmの礫が多い。また、CASE3の地点付近の右岸側約半分は大きな岩盤がむき出しになっているが、CASE3の点のごく近傍は礫床になっている。なお、測定時は落葉等の浮遊物がしばしば流れていた。

d) 猪名川 (CASE5, 6)

兵庫県東端を流れる一級河川で、測定地点は川西市の清和台住宅地から北に少し離れた谷間にある。上流側の測定点であるCASE6の上流約7mの所から勾配がやや急になっており、河道は右に湾曲している。流路幅はCASE5で14.0m、CASE6で14.9mであり、両測定点間の距離は約2.3mである。河床状態は、両測定点付近から左岸に向かって大きな岩盤が広がり、測定点近傍では岩盤上に細砂や直径3cm程度の小石が点在している。それより左岸寄りには、岩盤むき出しの部分と直径1～2mmの砂に大きく覆われた部分に分かれ、一方右岸よりは直径1～3mmの砂と直径5cm程度の礫が混在し、10～15cmのものも点在している。

e) 加古川 (1回目) (CASE7)

兵庫県東播地区を流れる一級河川で、測定地点は西脇市にある“日本へそ公園”の付近である。河道はほぼ直線状で、流路幅は35.7mである。測定地点は左岸から10.5mの位置にあり、左岸のすぐ上流側には汚水を含む小さな支流が流入しているが、流量が少なく、汚水が左岸付近に片寄っている様子から、測定地点付近への影響はないといえる。一方右岸側には下流に向かって大きな中洲がある。河床状態は、直径10cm程度のものを中心に5～20cmの礫が敷き詰まった状態である。

f) 篠山川 (CASE8, 9)

丹波地方を流れる加古川水系の支流で、測定地点は多紀郡篠山町吹上地区にある。測定地点付近で河道は右に湾曲しており、また9mほど下流側の左岸には小さな水門があって、一時的な排水の流入がある。流路幅はCASE8で9.6m、CASE9で8.0mで、両測定点間の距離は約2.1mである。河床状態は直径5cm程度のものを中心に、2～10cmの礫が敷き詰まった状態である。

g) 加古川Ⅱ (CASE10, 11)

測定地点は西脇市堀町で、1回目の地点より約2km下流側にある。河道は直線状であるが、測定地点の約10m下流側において、左岸が大きく突き出しており、流れはそれに遮られる形で右へ緩く湾曲している。2つの測点は同じ横断面上にあり、流路幅は67.9mである。河床状態は、直径10～20cmの礫が多く、3cm前後の小石と混在しているが、測定点付近では車両が入ったためか、この礫床の部分と直径1～2m

mの細砂中心の部分が縞状に分布している。

h) 武庫川 (CASE12, 13)

兵庫県東部から阪神地区へ流れる二級河川で、測定地点は神戸市北区道場町の千刈浄水場前である。河道は右へ湾曲しており、左岸にある浄水場側から支流の波豆川のものと思われるごく小さな流入が所々ある。2測点は同一横断面上にあり、流路幅は16.0mである。河床状態は、直径2～4cmの小石と10cm前後の礫が混在している状態である。

i) 下里川 (CASE14, 15)

加西市内を流れる加古川水系の支流で、測定地点は加西市東笠原町の国道372号線沿いの所である。測定地点付近において、河道はごく緩く左へ湾曲している。兩岸ともコンクリート護岸があるが水量が少なく、右岸のみ水際線が直接護岸に接していた。2測点は同一横断面上にあり、流路幅は12.2mである。河床状態は直径1～3mmの細砂が中心で、直径1～2cmの小石が散在した状態である。

図4-1-a～iに各測定地点の平面図と横断面図および現地の写真を、また、各ケースの水力条件を表4-1にまとめて示す。なお、表中の粗度係数の項目名の下に括弧書きの“粗度：大，中，小”とは、各ケースの粗度係数nの大きいものから順に大，中，小の3つの分類を示す。前章の3.5で述べた方法で求めた摩擦速度と河床の粗度係数をまとめて表4-2に示す。なお、表中の“グループ”とは、各ケースの粗度係数nの大きいものから順にR，R-S，Sの3つのグループの分類を示す。この表の“各評価法による U_{τ} の比”を見れば明らかなように、摩擦速度の評価方法の違いにより、その大きさが2倍以上異なる場合がある。

表4-1 河川直線部の水理条件

河川名	CASE	水深 H(cm)	流路幅 B(m)	B/H	水面 勾配	平均流速 U _m (cm/s)	摩擦速度 U _r (cm/s)	Re (x10 ⁴)	Fr	粗度係数 (粗度:大,中,小)	河床・河道の状態
市川	1	41.5	31.7	76	1/230	57.2	11.96	22.9	0.28	0.0551 (大)	直径10~30cmの礫, 緩く左に湾曲.
千種川	2	36.0	32.1	89	1/590	49.6	4.48	19.4	0.25	0.0243 (中)	直径10~20cmの礫, ほぼ直線状
有野川	3	33.0	2.5	7	1/210	77.6	5.34	22.7	0.43	0.0163 (小)	直径5~10cmの礫
	4	32.0	3.1	10	1/130	49.2	10.73	14.4	0.28	0.0516 (大)	緩く左に湾曲
猪名川	5	32.0	14.0	44	1/540	54.7	9.29	14.9	0.31	0.0413 (大)	岩盤上に直径3cm程度の礫と1~3mmの砂
	6	33.0	14.9	45		49.0	7.93	13.4	0.27	0.0397 (大)	右に湾曲
加古川	7	37.0	35.7	97	1/1200	55.5	4.52	18.1	0.29	0.0216 (小)	直径5~20cmの礫, ほぼ直線状
篠山川	8	29.0	9.6	33	1/540	70.1	8.31	16.5	0.42	0.0288 (中)	直径2~10cmの礫
	9	32.0	8.0	25		68.9	8.37	18.4	0.39	0.0299 (中)	少し右に湾曲
加古川 II	10	33.0	67.9	206	1/1100	43.0	7.03	13.3	0.24	0.0422 (大)	直径10~20cmの礫と1~2mmの砂が混在
	11	34.5		197		51.7	4.63	16.9	0.28	0.0231 (中)	緩く右に湾曲
武庫川	12	34.0	16.0	47	1/280	62.6	5.64	18.4	0.34	0.0224 (小)	直径2-4cmの丸石と10cm前後の礫が混在
	13	39.0		41		69.9	7.44	23.9	0.36	0.0264 (中)	右に湾曲
下里川	14	22.1	12.2	55	-	19.5	1.11	3.81	0.13	0.0137 (小)	直径1-3mmの砂の中に1-2cmの石が散在
	15	27.0		45	-	20.0	1.22	4.74	0.12	0.0147 (小)	ごく緩く左に湾曲

表4-2 河川直線部の摩擦速度 U_f と河床の粗度係数 n

河川名	CASE	①水面勾配 I より求める			②対数則分布より求める			③ $-\overline{u'w'}$ の分布より求める			各評価法による U_f の比		
		U_f (cm/s)	n	グループ	U_f (cm/s)	n	グループ	U_f (cm/s)	n	グループ	①/②	②/③	①/③
市川	1	11.62	0.0535	R	11.60	0.0534	R	11.96	0.0550	R	1.00	0.97	0.97
千種川	2	7.66	0.0415	R	5.04	0.0273	R-S	4.48	0.0243	R-S	1.52	1.13	1.71
有野川	3	8.81	0.0270	R-S	6.95	0.0213	R-S	5.34	0.0163	S	1.27	1.30	1.65
	4	11.30	0.0543	R	14.59	0.0701	R	10.73	0.0516	R	0.77	1.36	1.05
猪名川	5	5.95	0.0265	R-S	4.88	0.0217	R-S	9.29	0.0413	R	1.22	0.53	0.64
	6	6.10	0.0305	R-S	14.32	0.0716	R	7.93	0.0397	R	0.43	1.81	0.77
加古川	7	5.15	0.0246	S	8.20	0.0392	R	4.52	0.0216	S	0.63	1.81	1.14
篠山川	8	5.93	0.0206	S	9.33	0.0324	R	8.31	0.0288	R-S	0.64	1.12	0.71
	9	6.11	0.0218	S	9.62	0.0343	R	8.37	0.0299	R-S	0.64	1.15	0.73
加古川 II	10	4.96	0.0297	R-S	2.60	0.0156	S	7.03	0.0422	R	1.91	0.37	0.71
	11	4.96	0.0247	S	3.51	0.0175	S	4.63	0.0231	R-S	1.41	0.76	1.07
武庫川	12	8.74	0.0346	R	4.97	0.0197	S	5.64	0.0224	S	1.76	0.88	1.55
	13	8.74	0.0310	R-S	6.10	0.0217	R-S	7.44	0.0264	R-S	1.43	0.82	1.17
下里川	14	————	————	——	1.80	0.0222	R-S	1.11	0.0137	S	————	1.62	————
	15	————	————	——	1.29	0.0156	S	1.22	0.0147	S	————	1.06	————

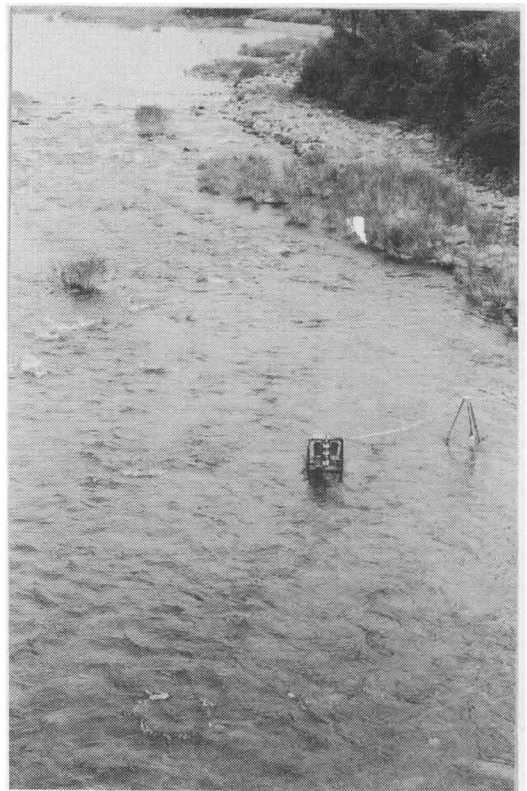
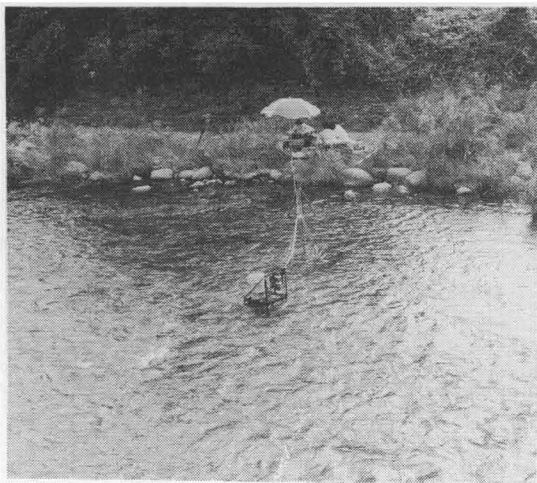
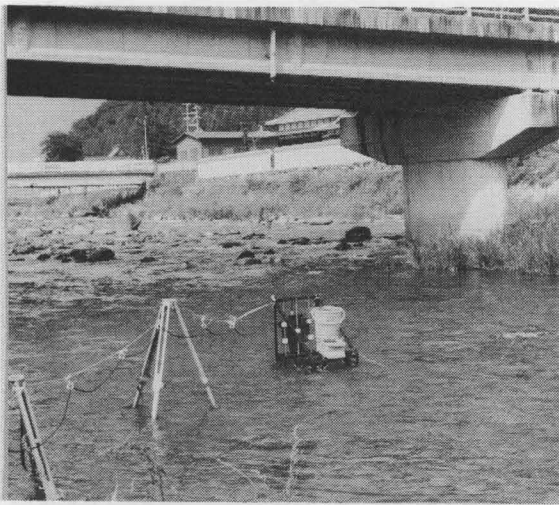
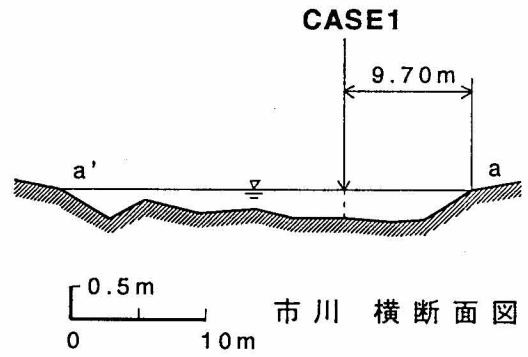
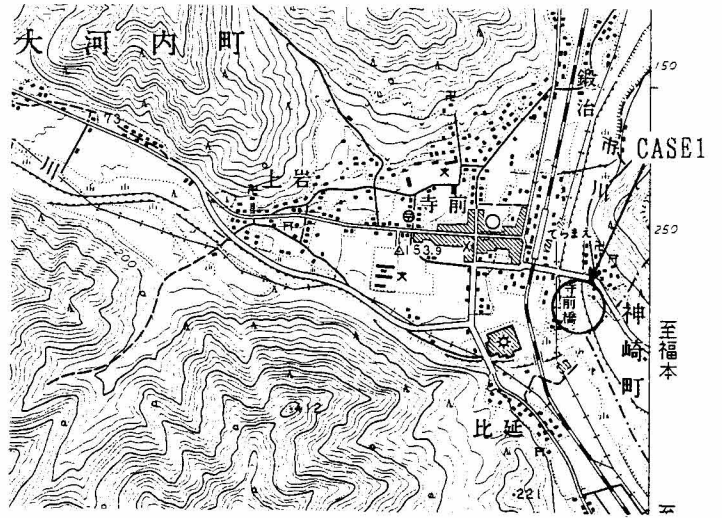
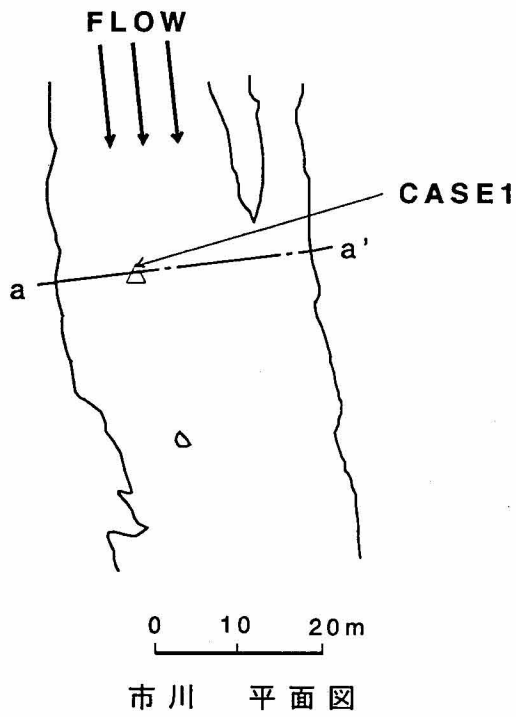
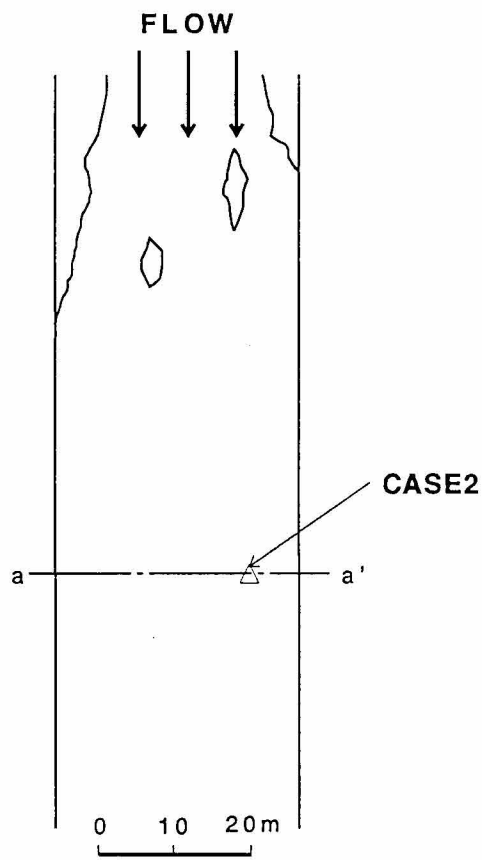
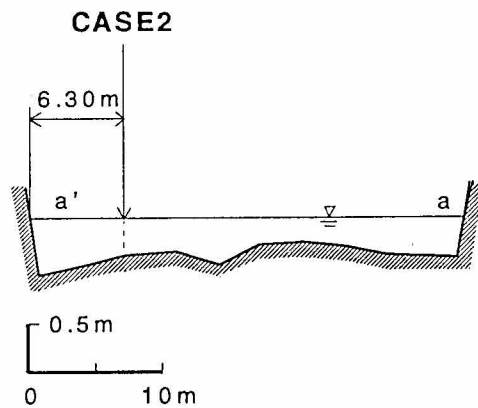


图 4 - 1 - a 市川 (CASE 1)



千種川 平面図



千種川 横断面図

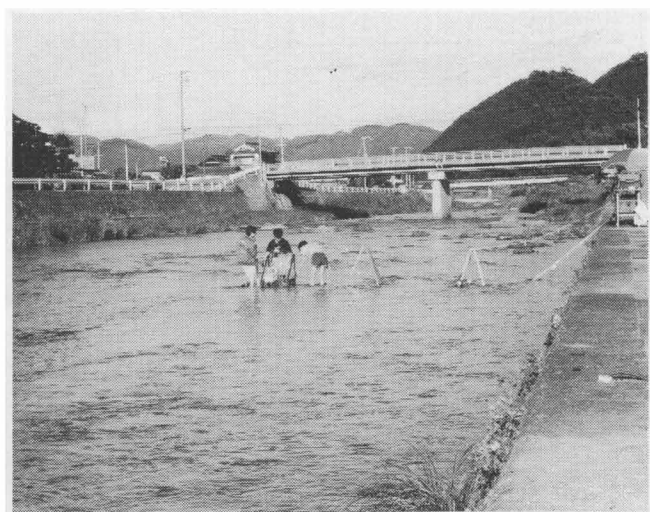
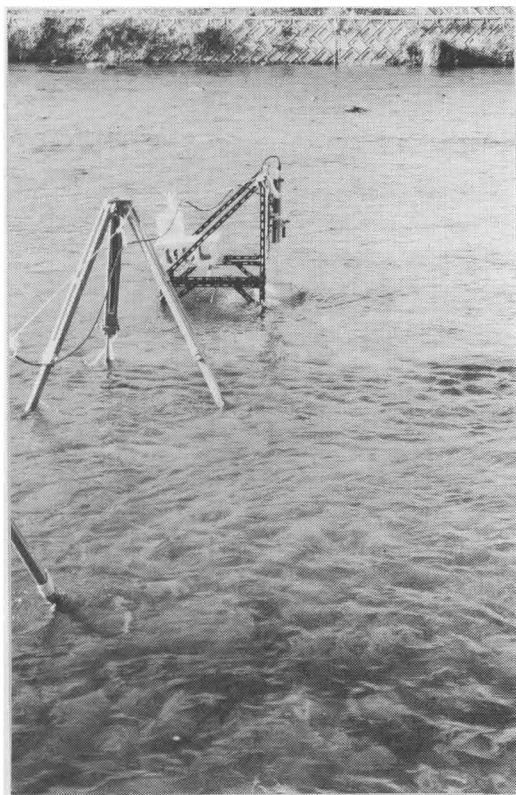


図 4 - 1 - b 千 種 川 (C A S E 2)

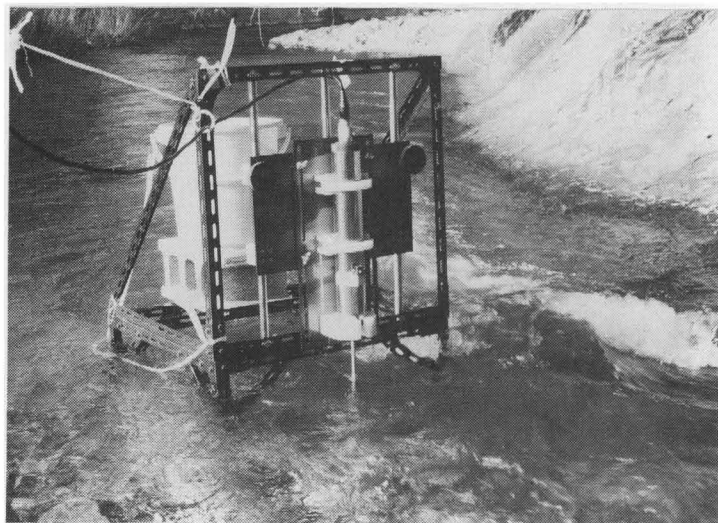
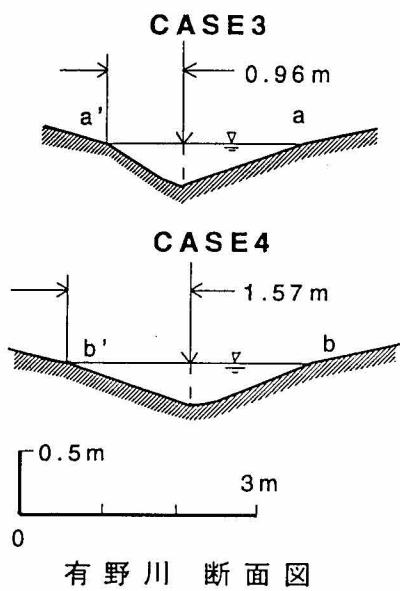
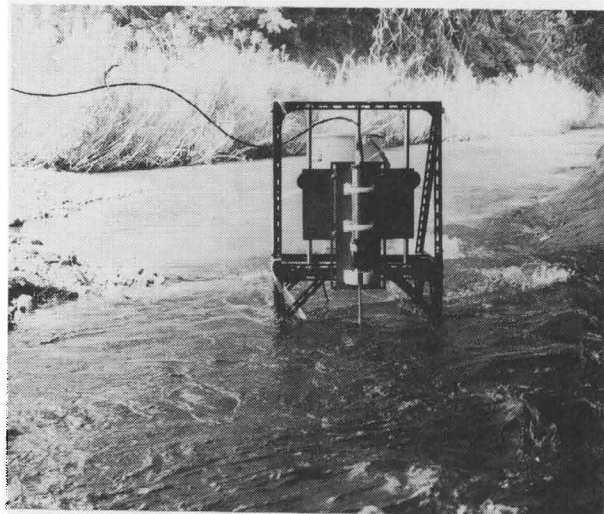
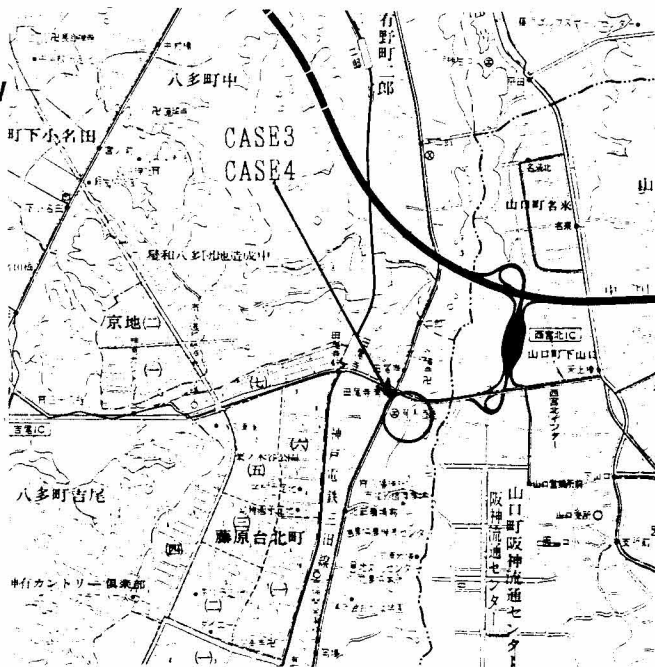
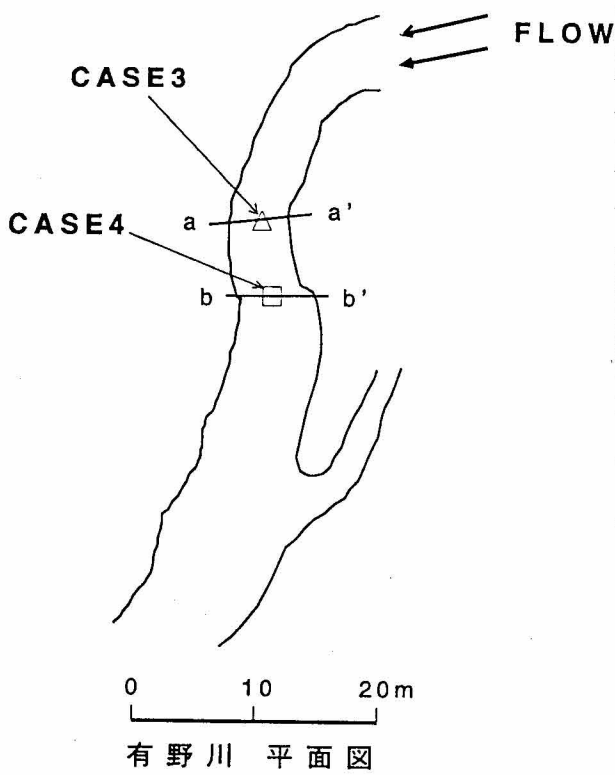
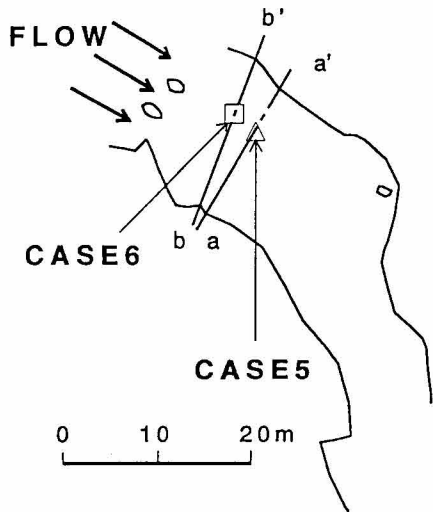
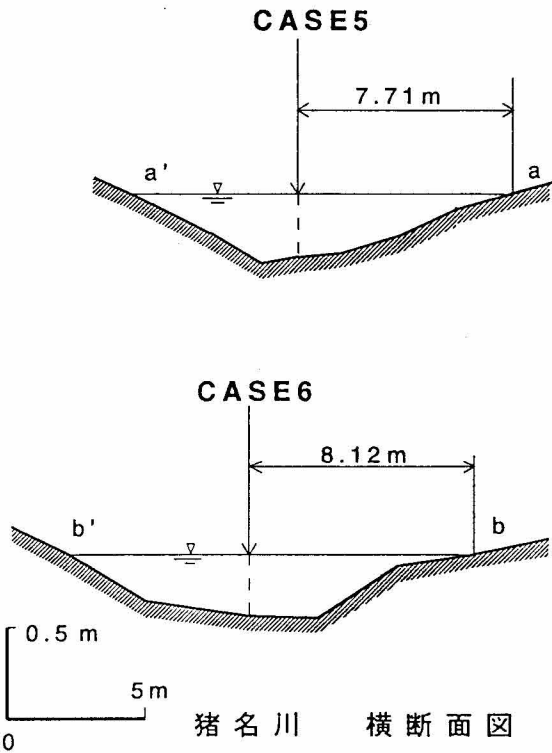
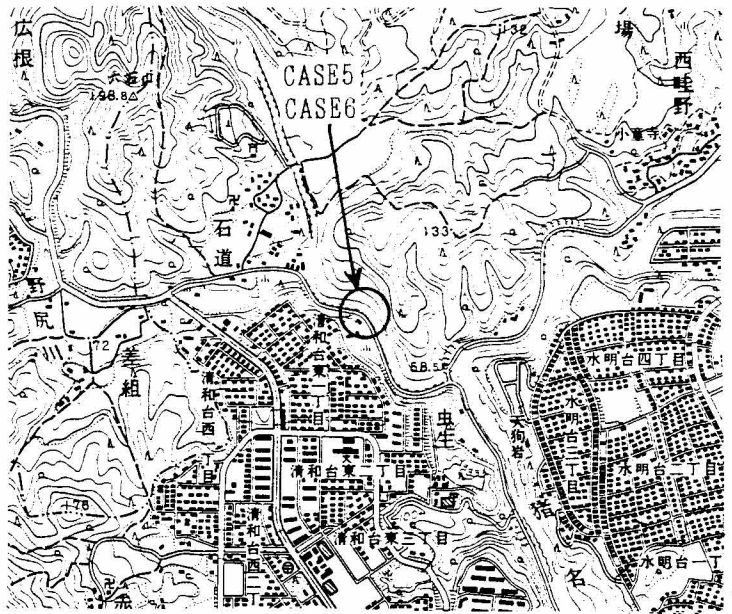


図 4 - 1 - c 有野川 (CASE3, 4)



猪名川 平面図



猪名川 横断面図

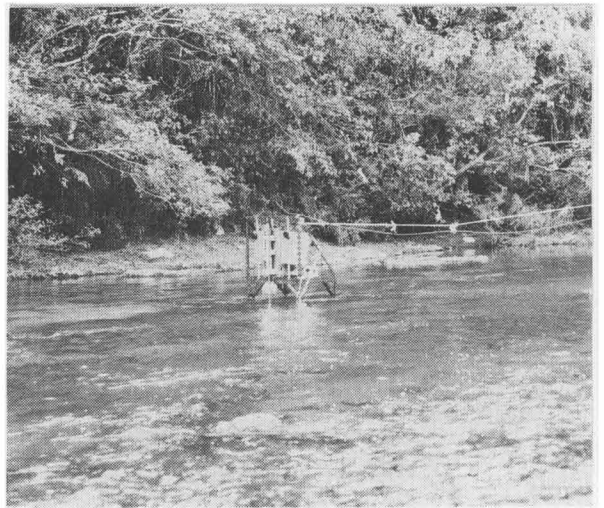
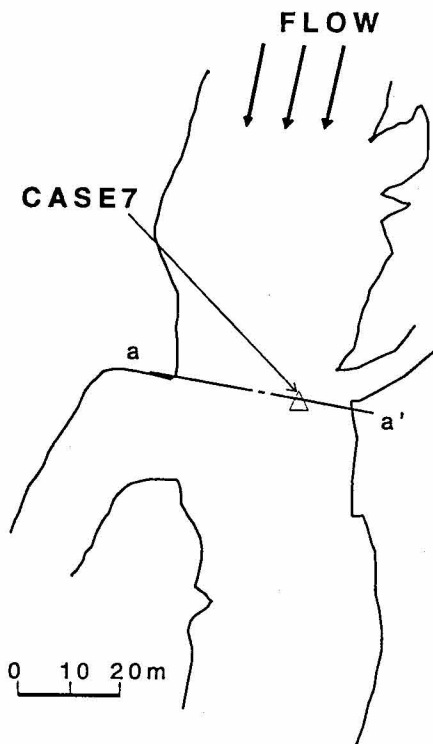
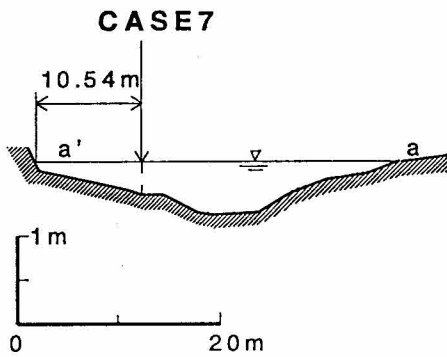
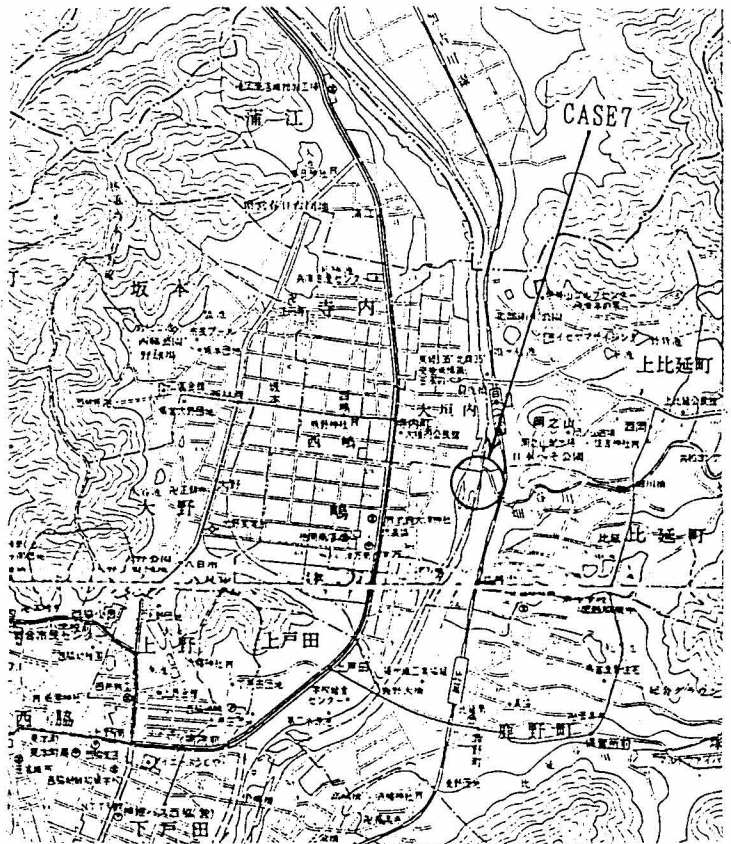


図 4 - 1 - d 猪 名 川 (CASE 5, 6)



加古川 平面図



加古川 横断面図

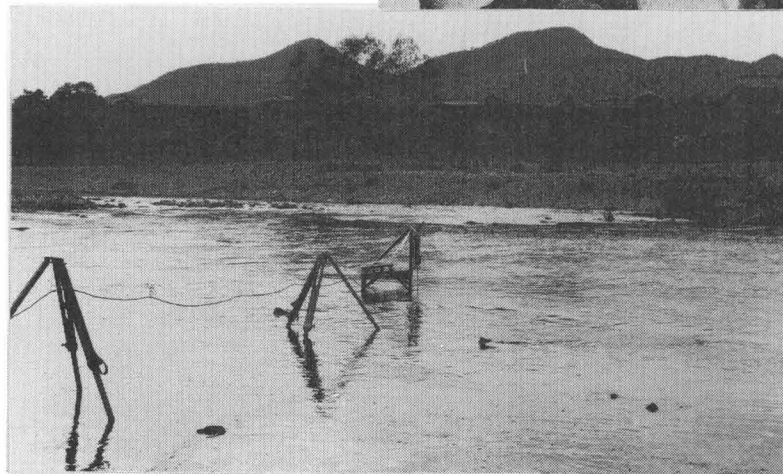
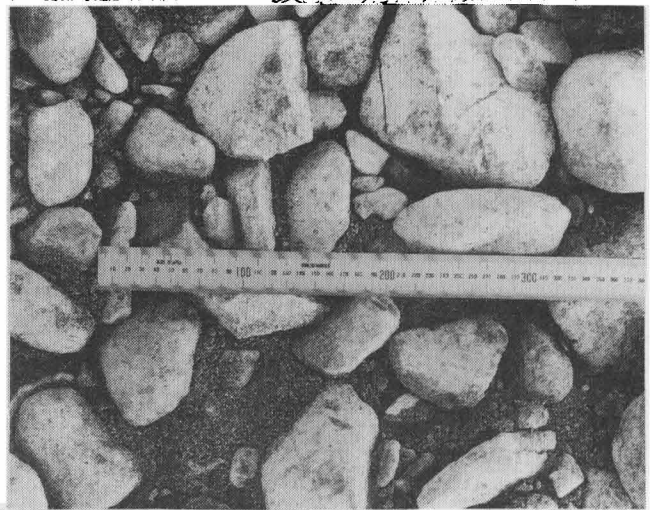
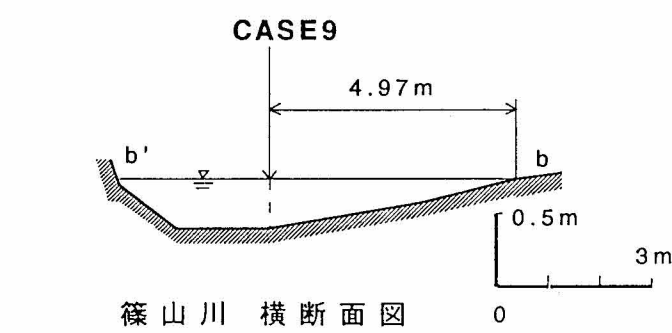
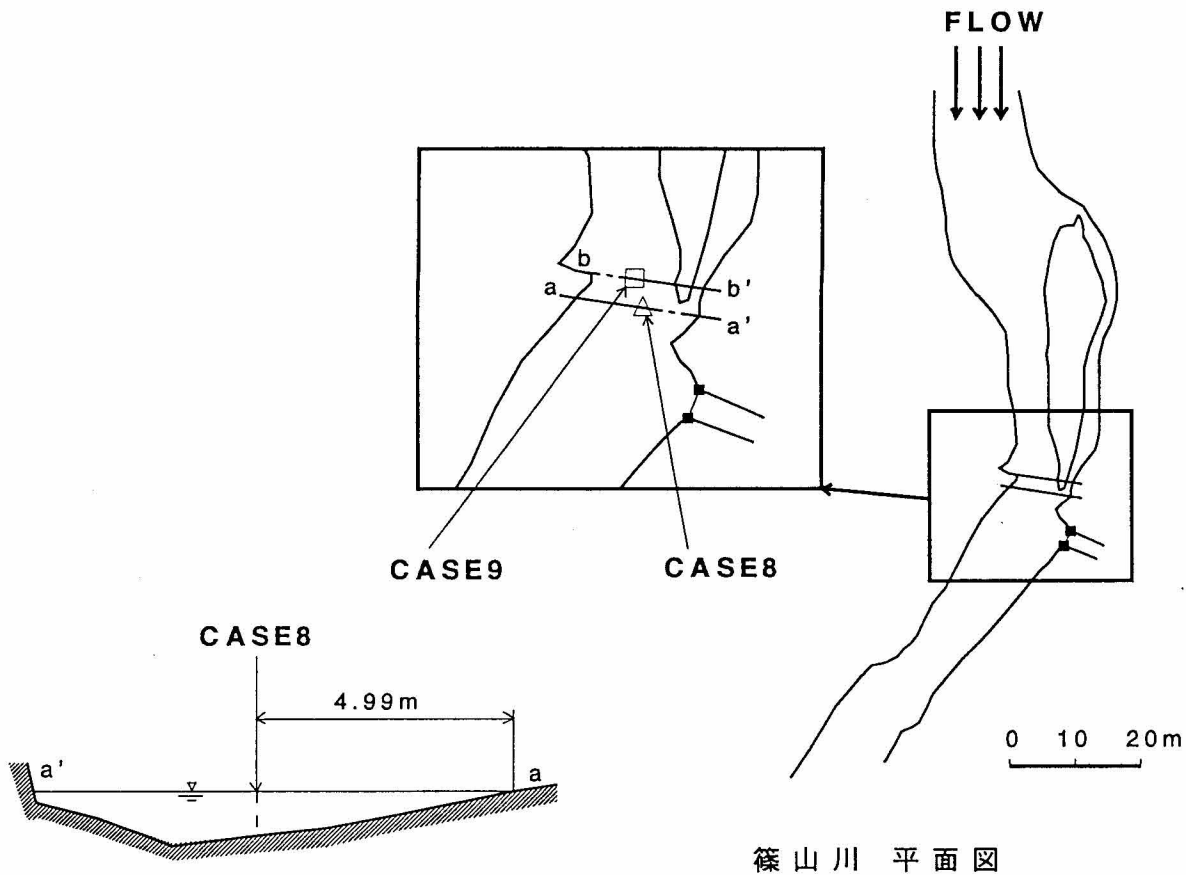


図 4 - 1 - e 加古川 (CASE 7)



篠山川 平面図

篠山川 横断面図

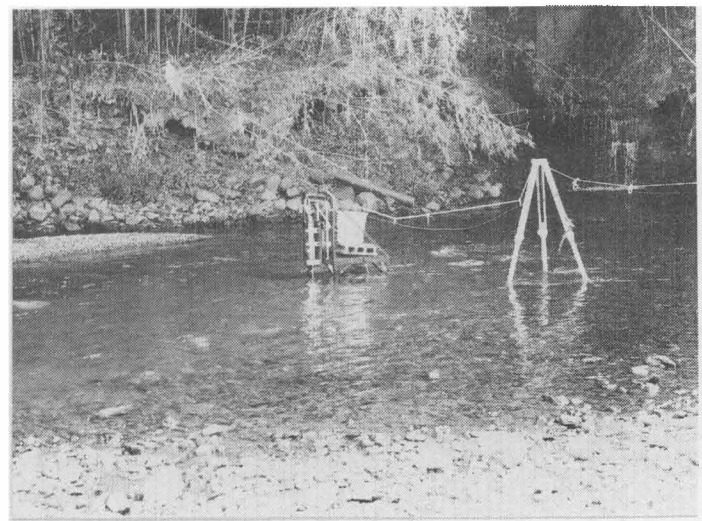
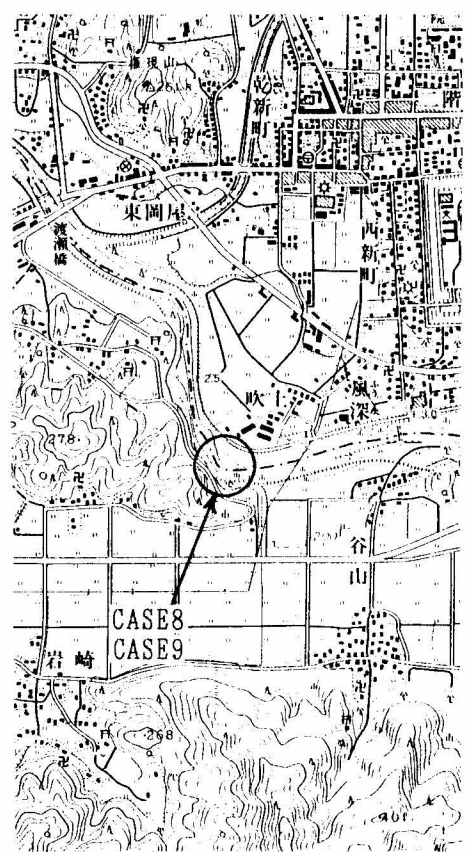
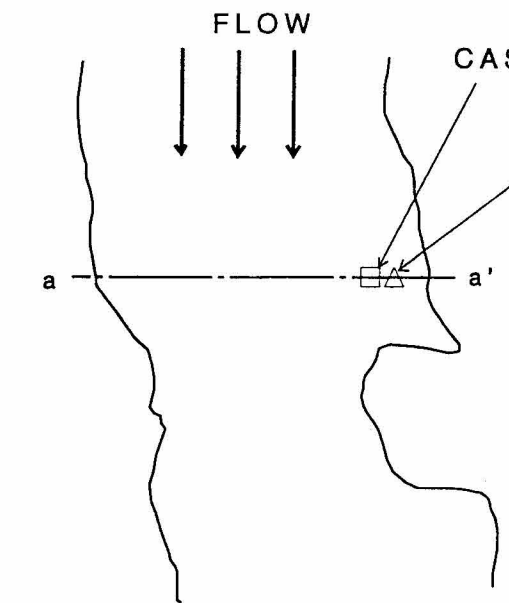
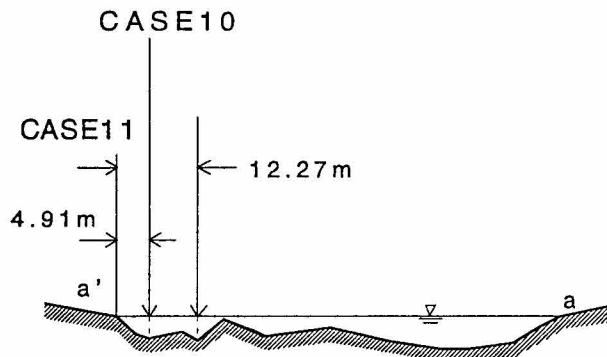


図4-1-f 篠山川 (CASE8, 9)



0 20m 加古川 II 平面図



0.5m 0 20m 加古川 II 横断面図

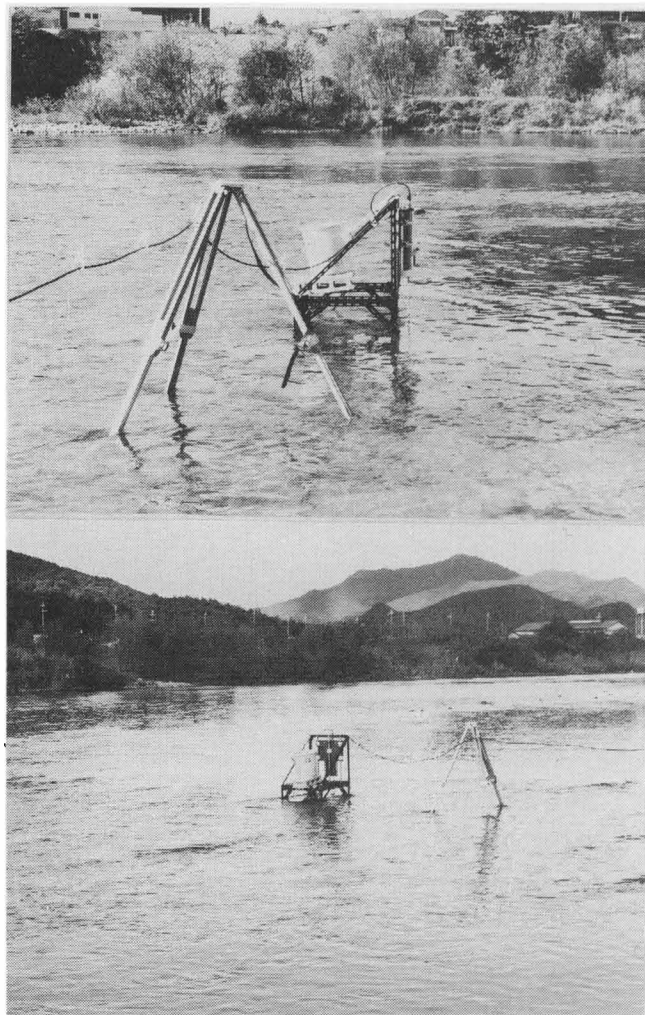
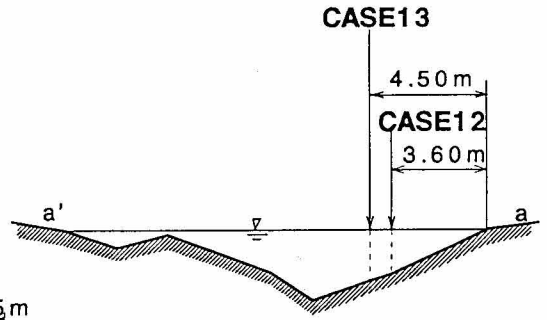
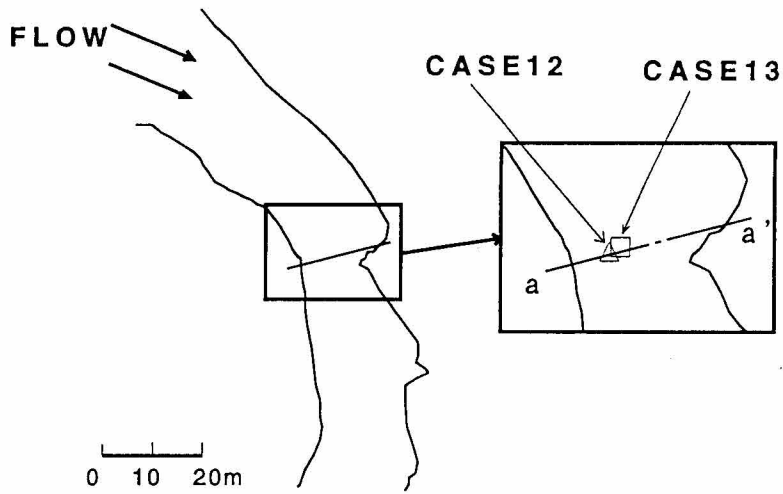


図 4 - 1 - g 加古川 II (CASE 10, 11)



武庫川 横断面図

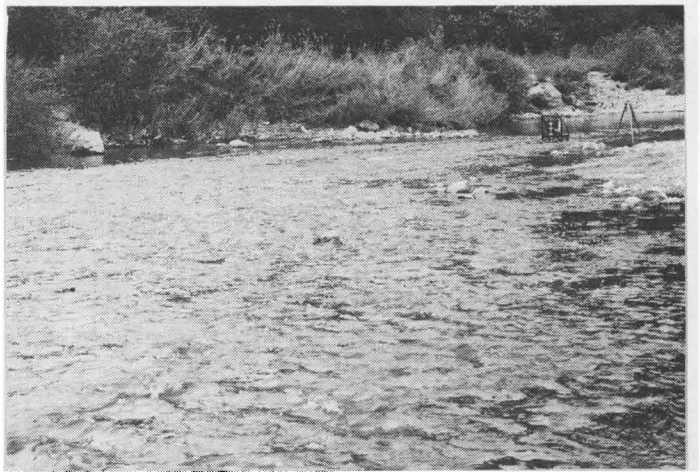
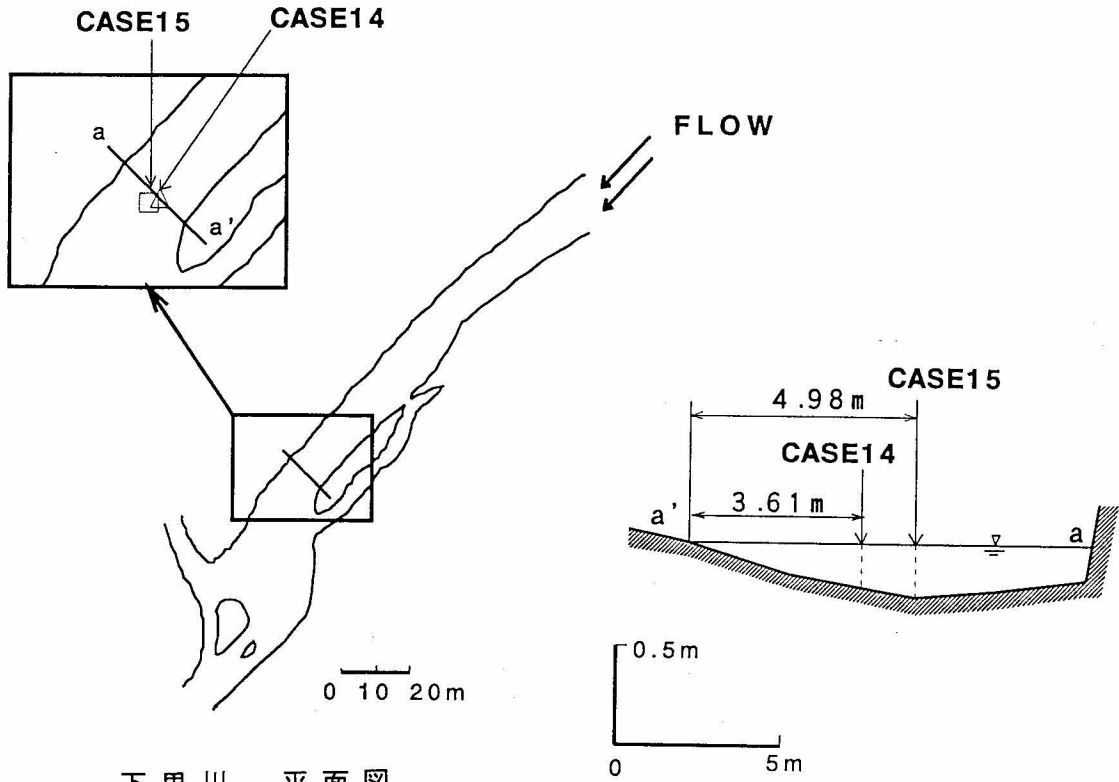


図 4 - 1 - h 武庫川 (CASE12, 13)



下里川 平面図

下里川 横断面図

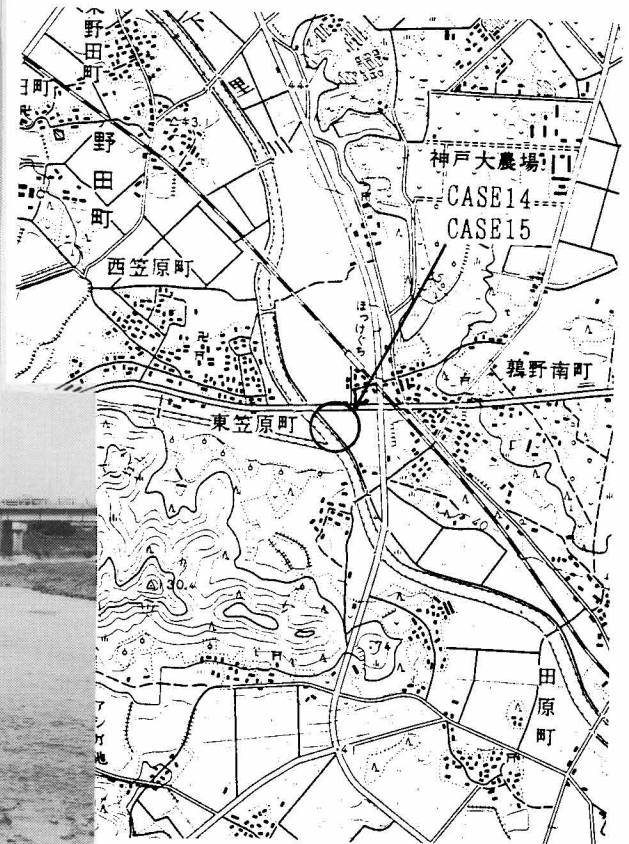
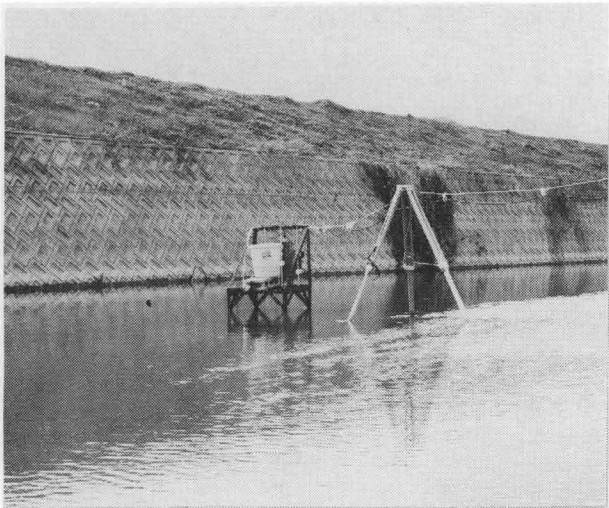


図4-1-i 下里川 (CASE14, 15)

4. 3 測定結果とその考察

4. 3. 1 平均流速分布

各測定点における瞬間流速 u , v , w を時間平均した局所的な平均流速 U , V , W の鉛直線上の分布を図 4-2 に示す. この図から明らかなように, 各水深において流下方向の平均流速 U のみ値をもち, V , W はほぼ零である. なお, v 成分の値が大きなケースが見受けられるが, これは現地観測時に流速計の設置を行う場合, センサーの v 成分の方向を主流に対して厳密な意味での直角にセットすることはほとんど不可能であるため, ある程度の大きさを持つことは避けられない. また, 流速の U 成分をレイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_f で無次元化して対数表示したものを図 4-3 に示す. この図中の実線は粗面流において平均流速分布が対数則を示す時の式 (3. 6) に相当する直線を示している. この図を見ると, CASE 1, 13, 14 などのように, $z/H = 0.3 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則が成立していると判断されるケースも存在するが, ほとんどのケースでは $z/H = 0.4$ 以下の水深において対数分布則から外れている.

ところで, 流速分布形を決める際の座標原点は研究者によって種々の方法がとられているが, 本研究では座標原点を砂礫上面に選定した. 座標原点をこのように選定した理由は以下の通りである. すなわち, 実際の河川の砂礫床を見ると, 実験室水路でのガラスビーズのようにきれいな球形をした粗度のようなものは存在せず, しかも, 粒径は様々な寸法のもものが混在しているので, 砂礫上面といえども決定する事は容易でない. さらに, 多くの測定地点では河床の縦横断面形状は実験室水路のように平坦でなく, 凹凸が局所的に非常に激しい. また, 文献 2) に示されているように, 本研究のような粗度に比べて水深の小さい流れでの原点補正量は大きくばらつくことが指摘されている. したがって, 通常, 粗面流に対して導入されるような原点補正量を実河川の流れ場に導入することは無意味であると判断して, 座標原点を現地測定地点の砂礫上面にとってデータ整理を行った.

また, 第 3 章で述べた式 (3. 6) で示される流速の対数分布則を水深方向に積分して, $U_m/U_f = 6.0 + 5.75 \log_{10}(R/k_s)$ の関係が得られる. ここに, R : 径深, U_m : 断面平均流速, k_s : 相当粗度, U_f : 摩擦速度 である. 上式から実河川の相当粗度 k_s を求めたのが表 4-3 である. 表中には表 4-2 に示された 2 種類の摩擦速度から得られた相当粗度 k_s を示している. これらの値から相当粗度 k_s は河床砂礫の粒径のみならず砂礫の置かれている状態や河床面の凹凸の程度によっても k_s の値は変化すると考えられる.

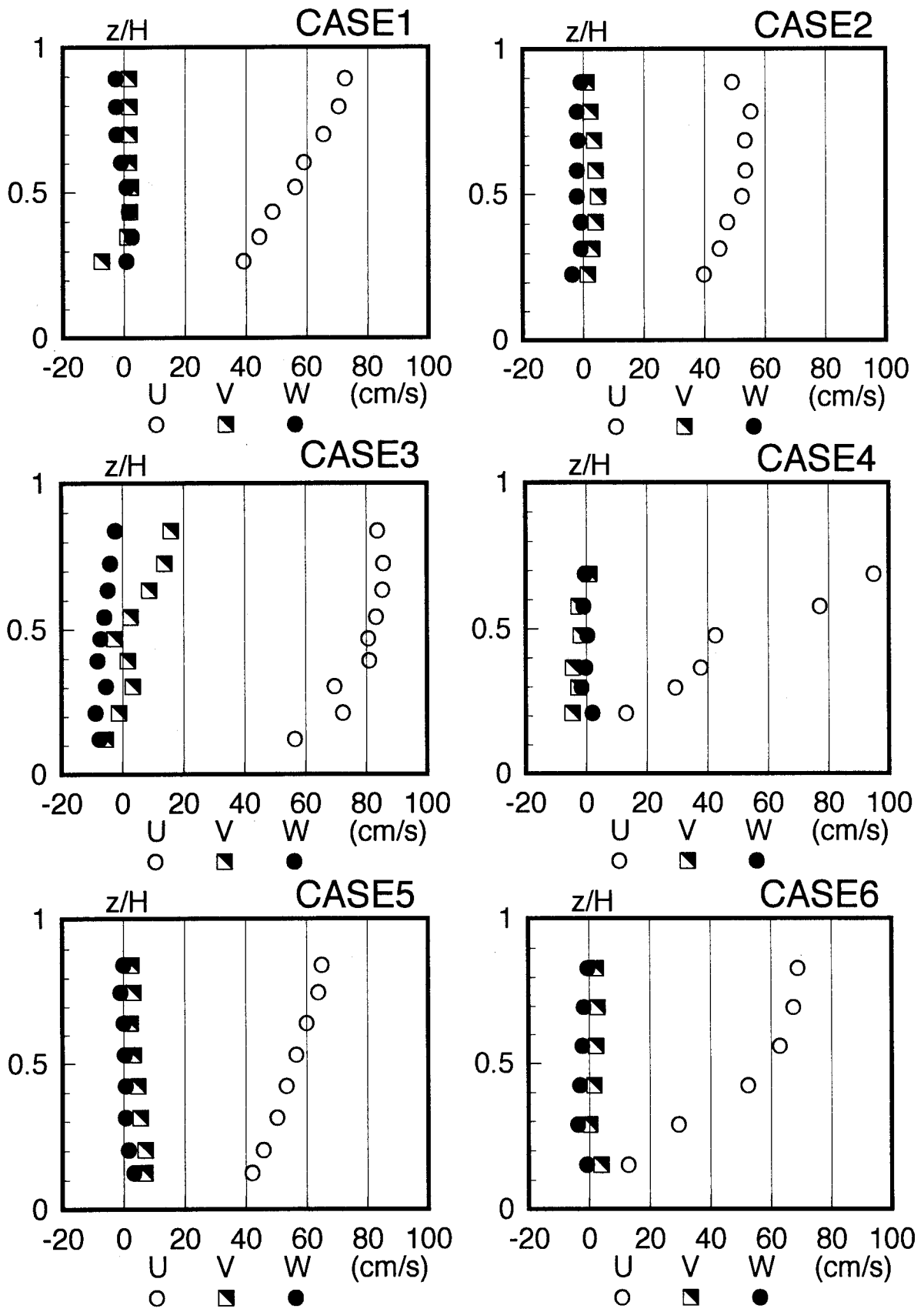


図4-2-1 河川直線部の平均流速分布

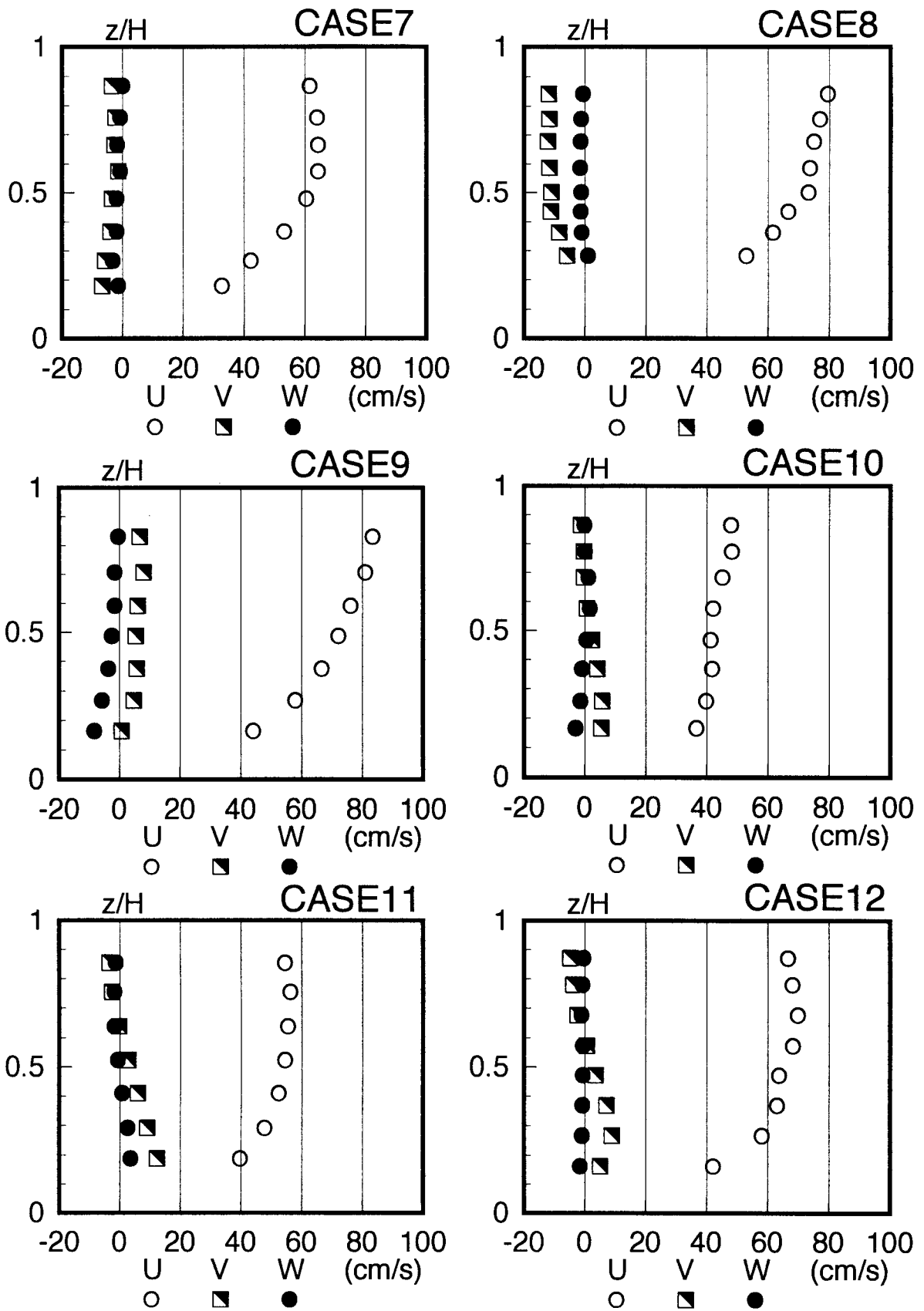


図4-2-2 河川直線部の平均流速分布

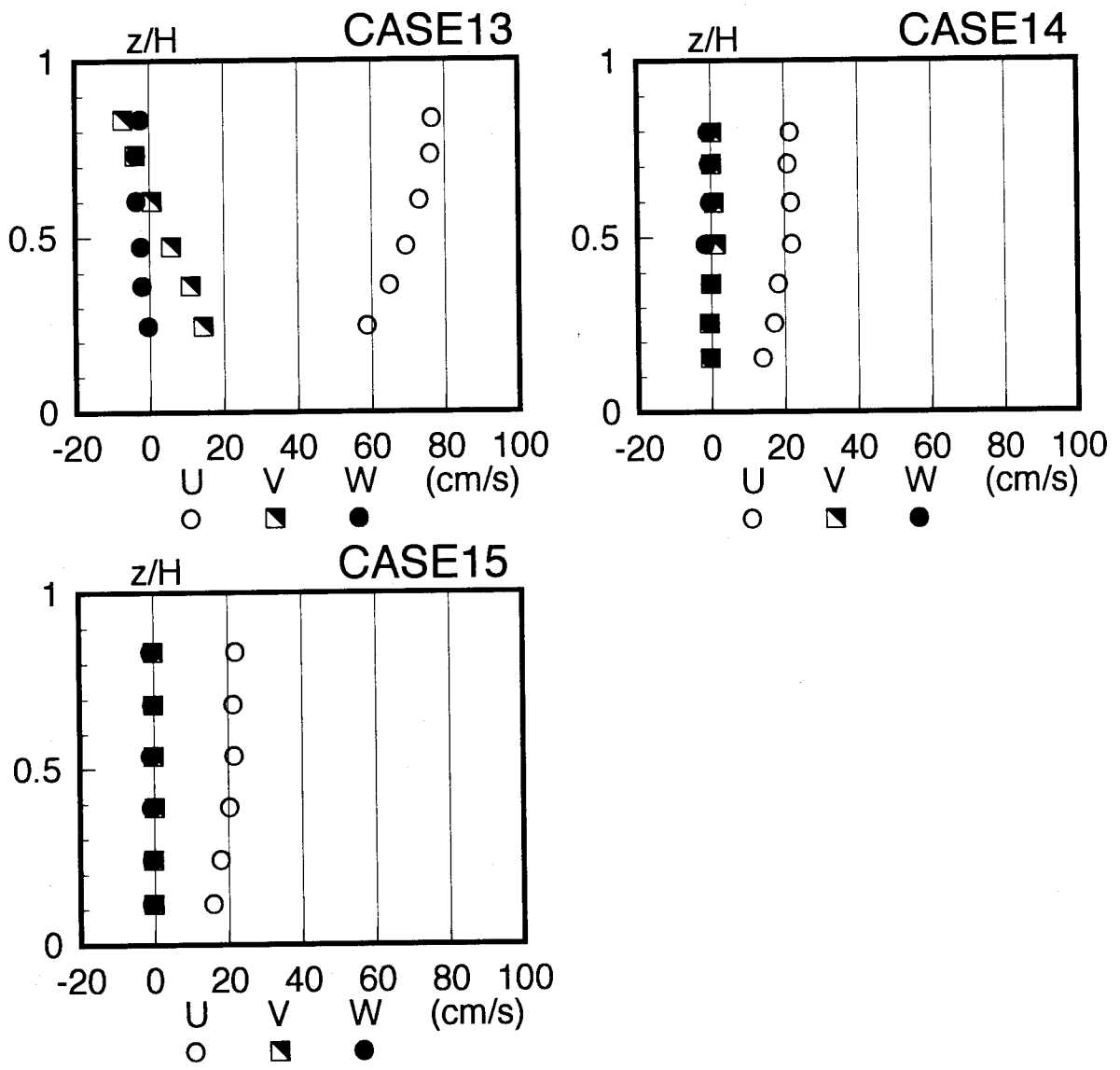


図4-2-3 河川直線部の平均流速分布

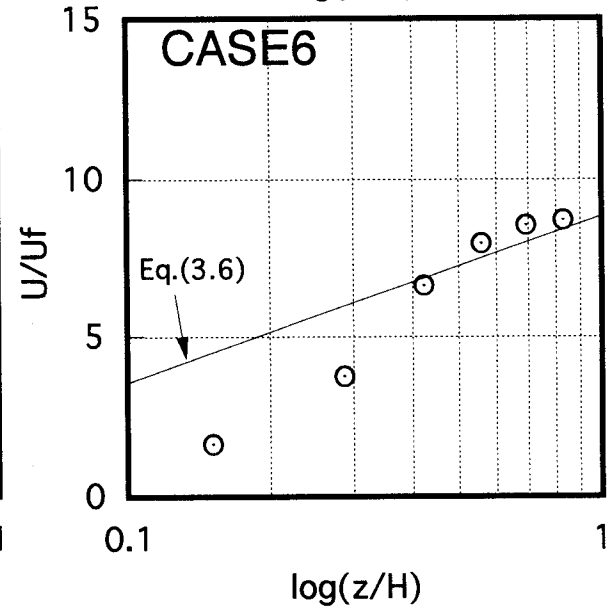
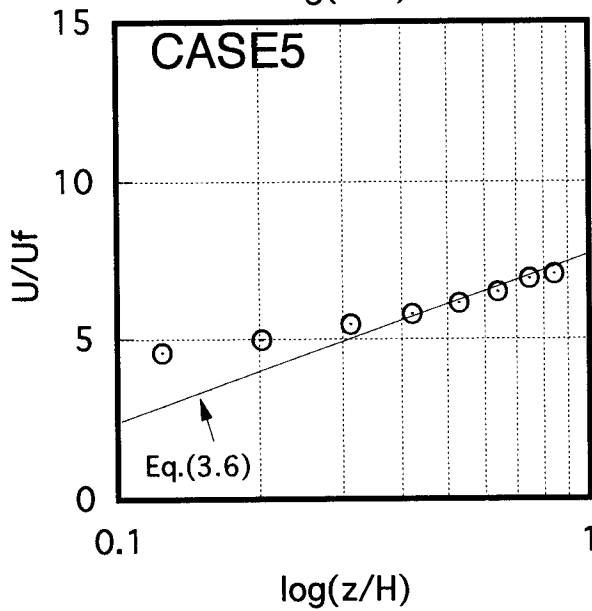
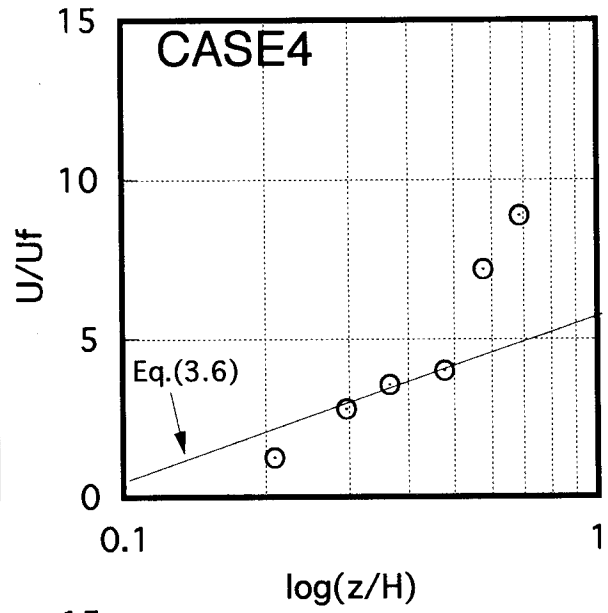
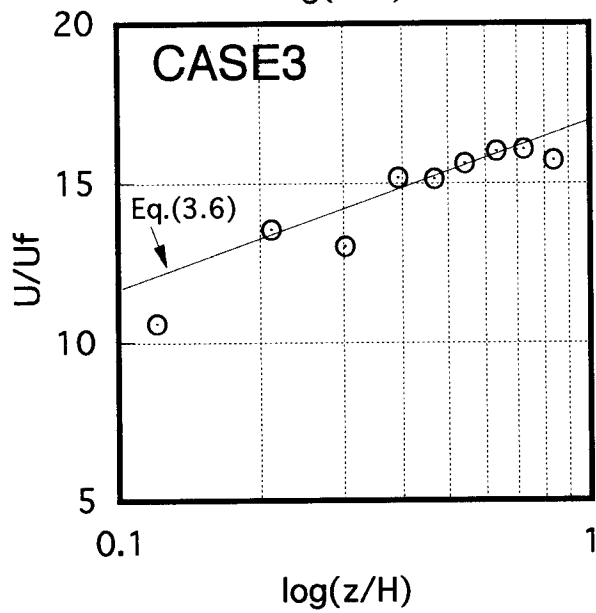
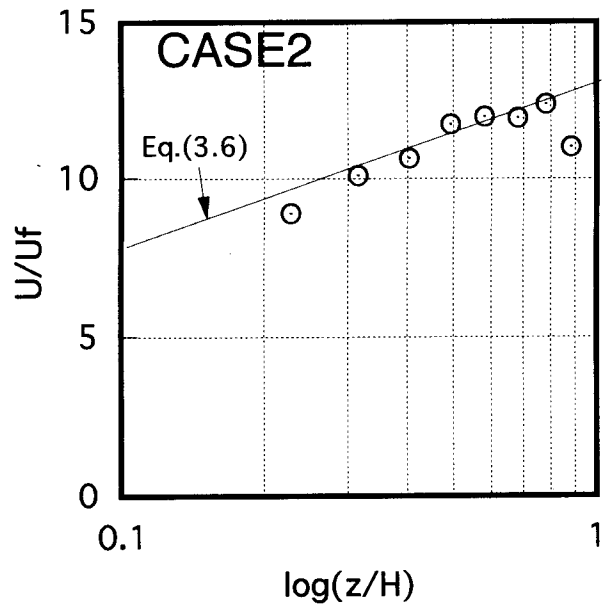
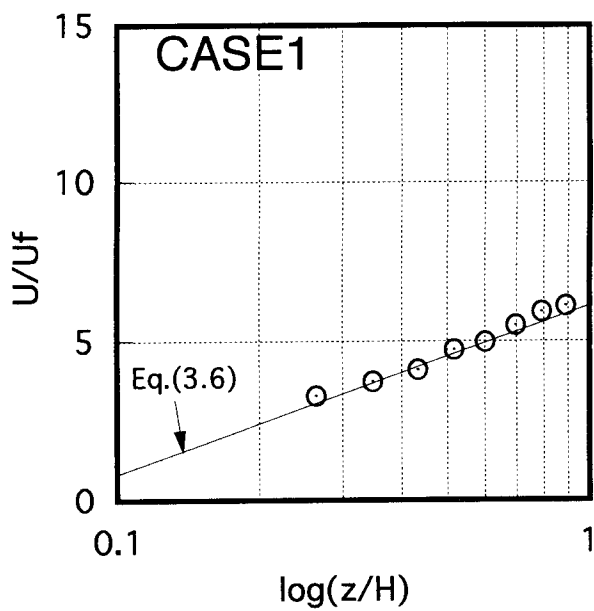


図4-3-1 河川直線部の対数則分布

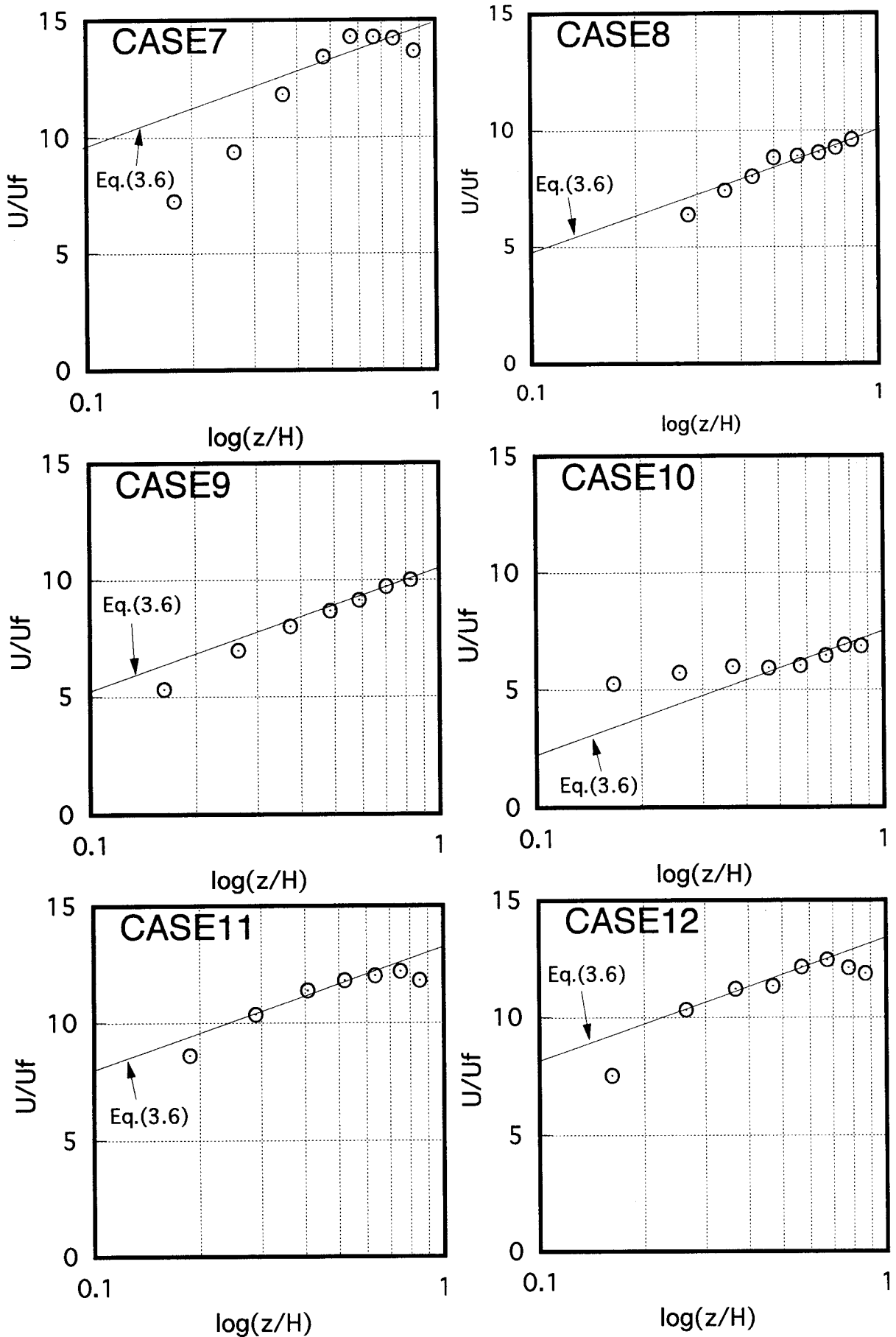


図4-3-2 河川直線部の対数則分布

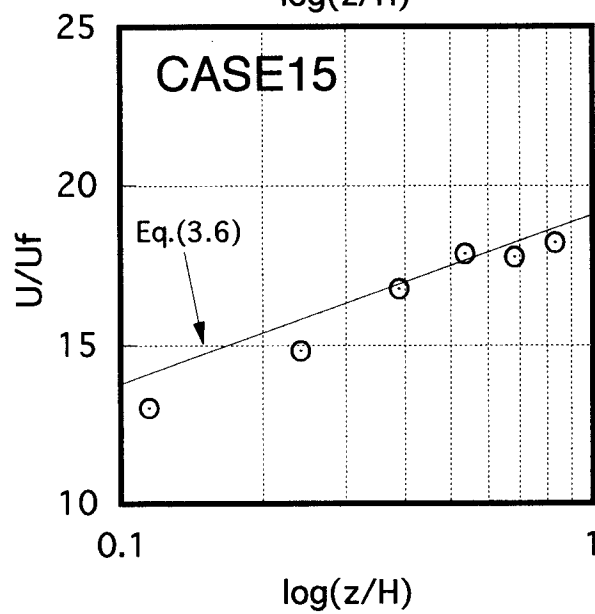
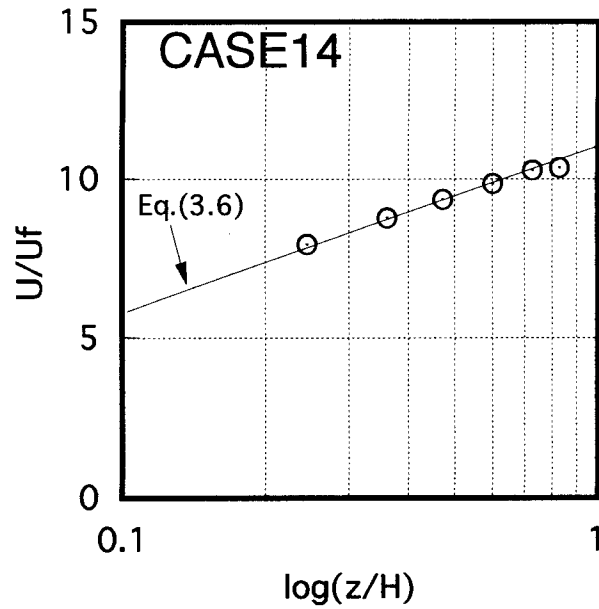
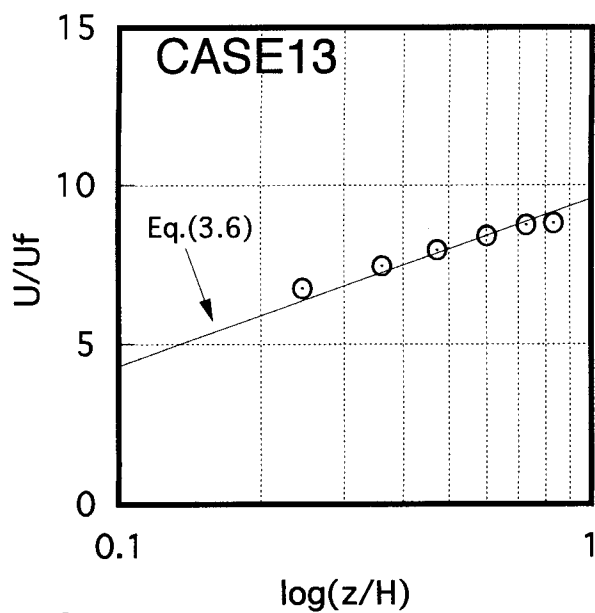


図4-3-3 河川直線部の対数則分布

表 4-3 河川直線部における相当粗度 k_s

河川名	CASE	断面平均 流速 U_m (cm/s)	径深 R (cm)	対数則分布より求める			$-\overline{u'w'}$ の分布より求める			河床の状態
				U_r (cm/s)	n	k_s (cm)	U_r (cm/s)	n	k_s (cm)	
市川	1	57.2	31.3	11.60	0.0534	48.0	11.96	0.0550	50.9	直径 10 ~ 30cm の礫
千種川	2	49.6	35.2	5.04	0.0273	7.5	4.48	0.0243	4.6	直径 10 ~ 20cm の礫
有野川	3	77.6	16.9	6.95	0.0213	2.1	5.34	0.0163	0.6	直径 5 ~ 10cm の礫
	4	49.2	16.4	14.59	0.0701	47.4	10.73	0.0516	29.0	
猪名川	5	54.7	19.4	4.88	0.0217	2.4	9.29	0.0413	20.3	直径 3cm 程度の礫 と 1 ~ 3mm の砂
	6	49.0	20.4	14.32	0.0716	57.3	7.93	0.0397	19.0	
加古川	7	55.5	32.6	8.20	0.0392	24.0	4.52	0.0216	2.6	直径 5 ~ 20cm の礫
篠山川	8	70.1	19.5	9.33	0.0324	10.7	8.31	0.0288	7.4	直径 2 ~ 10cm の礫
	9	68.9	20.7	9.62	0.0343	13.0	8.37	0.0299	8.5	
加古川 II	10	43.0	27.6	2.60	0.0156	0.4	7.03	0.0422	26.4	直径 10 ~ 20cm の礫 と 1 ~ 2mm の砂
	11	51.7	27.6	3.51	0.0175	0.8	4.63	0.0231	3.5	
武庫川	12	62.6	22.0	4.97	0.0197	1.6	5.64	0.0224	2.8	直径 2 ~ 4cm の丸石 と 10cm 前後の礫が 混在
	13	69.9	22.0	6.10	0.0217	2.5	7.44	0.0264	5.6	
下里川	14	19.5	18.6	1.80	0.0222	2.7	1.11	0.0137	0.2	直径 1 ~ 3mm の砂の 中に 1 ~ 2mm の石が 散在
	15	20.0	18.6	1.29	0.0156	0.4	1.22	0.0147	0.3	

4. 3. 2 乱れ強度分布

乱れ強度の鉛直線上の分布の一例（市川）を図4-4に示す。横軸は乱れ強度をレイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_f で無次元化している。図中の曲線は実験室水路の滑面流あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた禰津の乱れ強度分布式³⁾であり次式で表される。

$$\sqrt{u'^2} / U_f = D_1 \cdot \exp(-z/H) \quad (4.1)$$

$$\sqrt{v'^2} / U_f = D_2 \cdot \exp(-z/H) \quad (4.2)$$

$$\sqrt{w'^2} / U_f = D_3 \cdot \exp(-z/H) \quad (4.3)$$

ただし、 $D_1 = 2.30$ 、 $D_2 = 1.63$ 、 $D_3 = 1.27$ である。

図4-4で実線が式(4.1)、点線が式(4.2)、破線が式(4.3)をそれぞれ示す。

各方向成分の大小関係については筆者らの測定結果¹⁾や従来多くの結果と同様に次式の関係がある。

$$\sqrt{u'^2} > \sqrt{v'^2} > \sqrt{w'^2} \quad (4.4)$$

全ケースの乱れ強度の鉛直線上の分布を図4-4-1～3に示す。

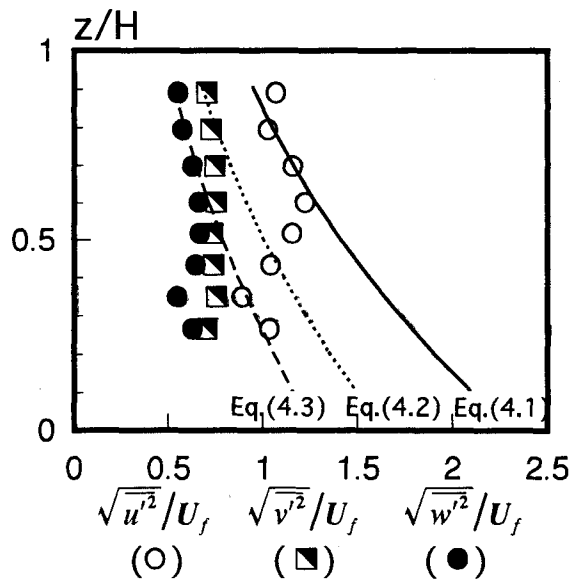


図4-4 河川直線部の乱れ強度分布の一例（市川の場合）

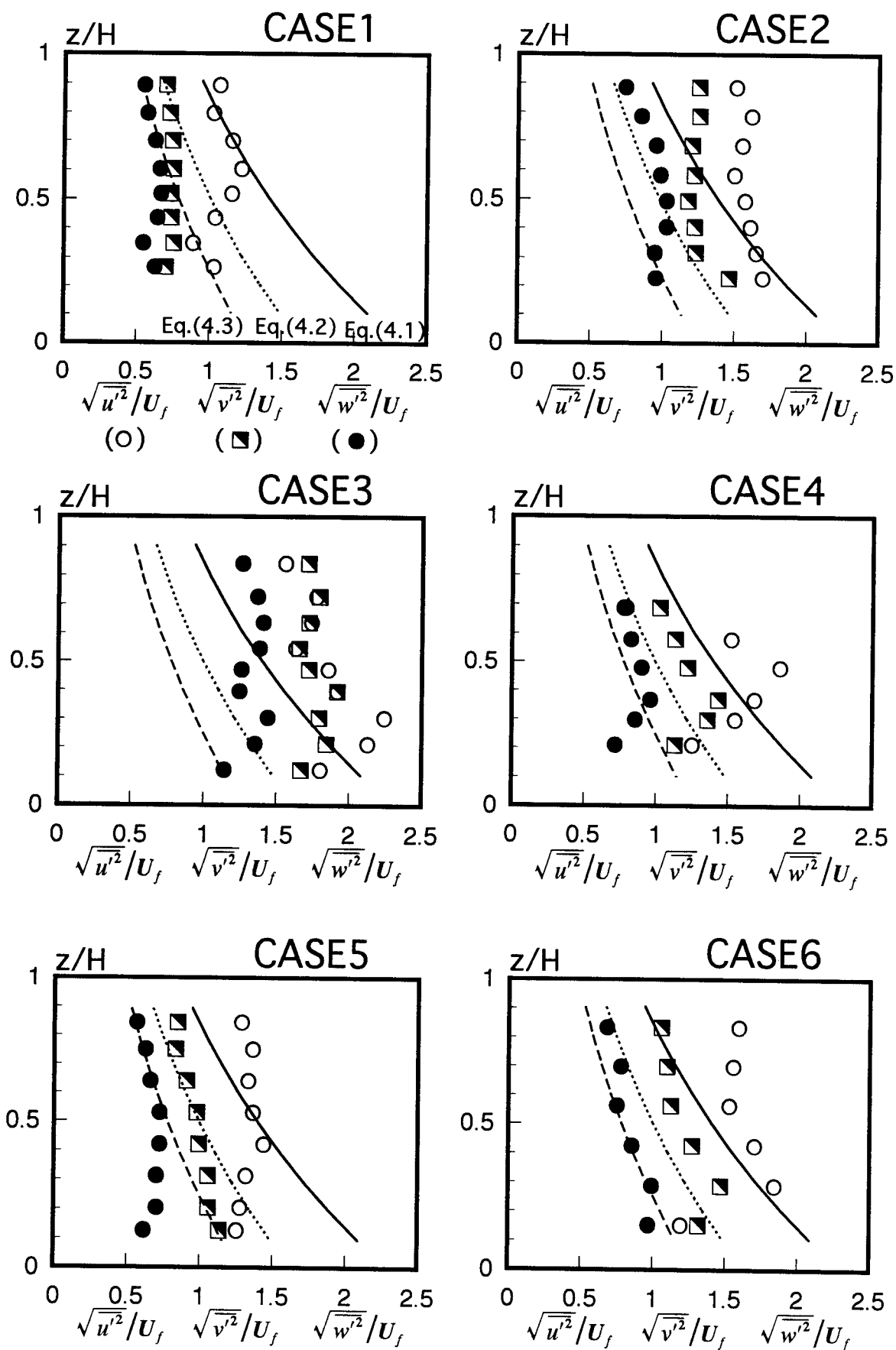


図4-4-1 河川直線部の乱れ強度分布

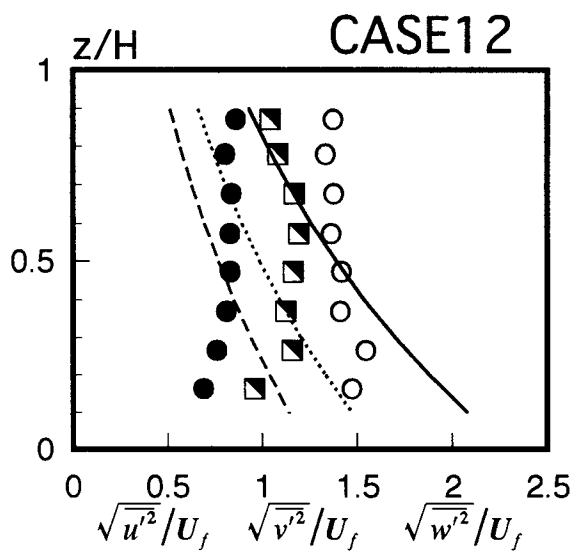
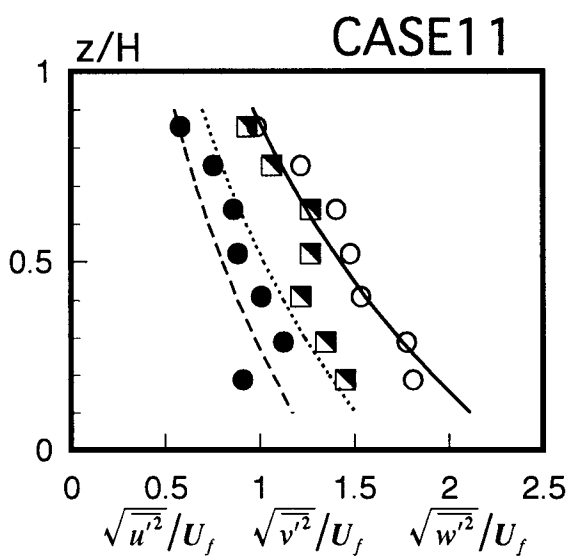
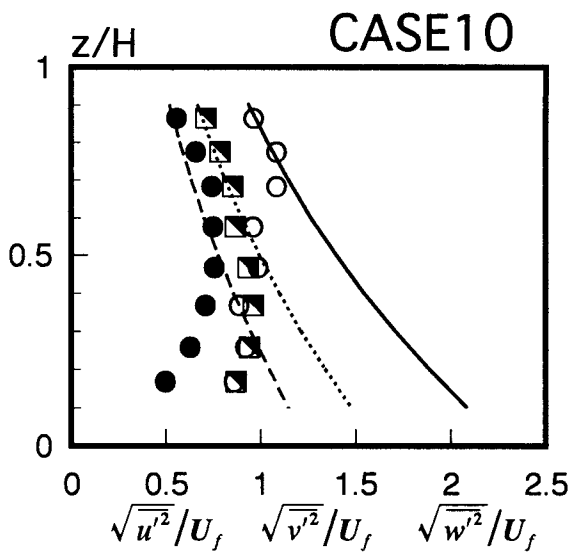
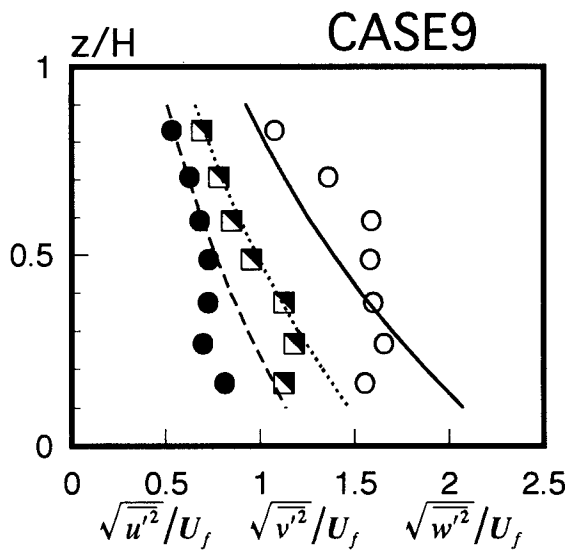
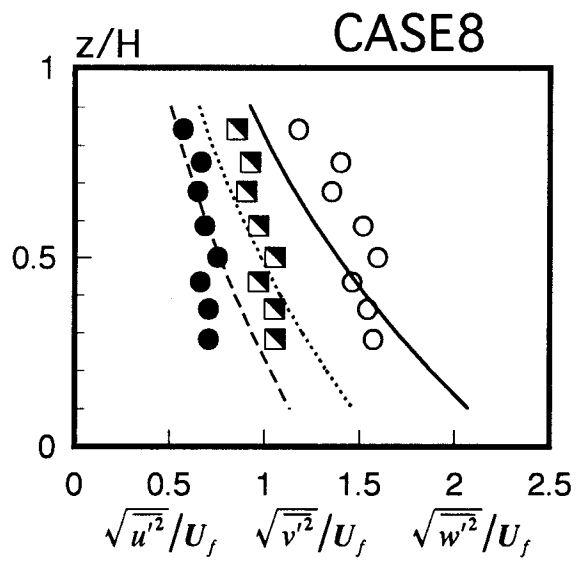
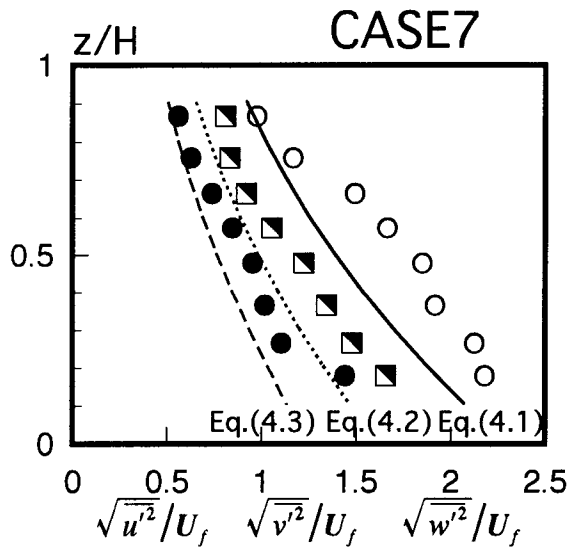


図4-4-2 河川直線部の乱れ強度分布

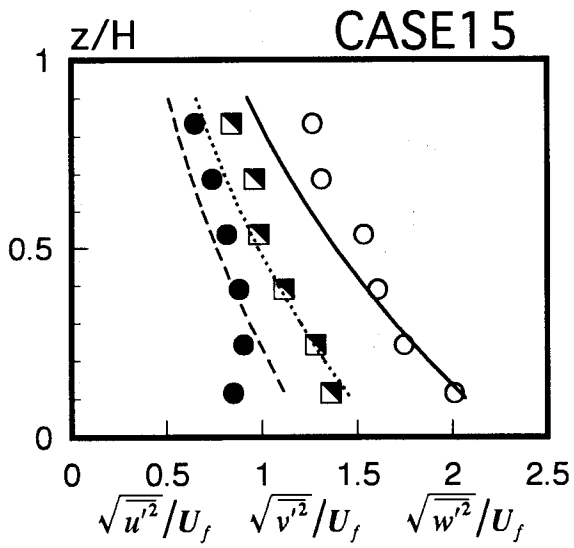
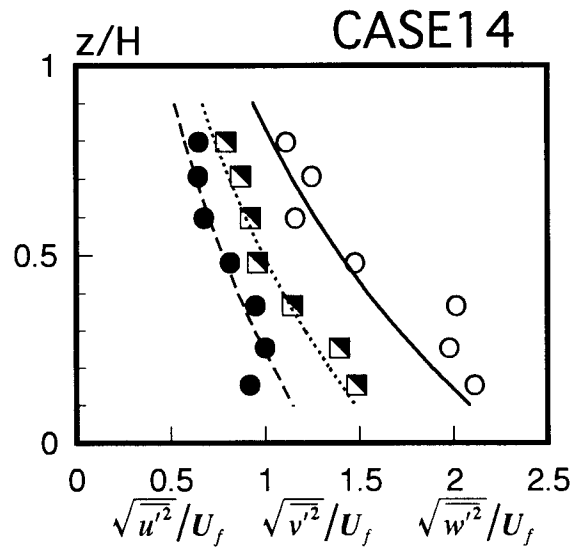
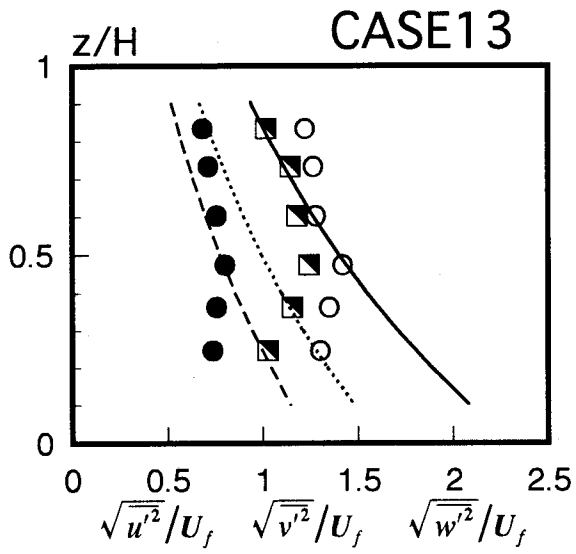
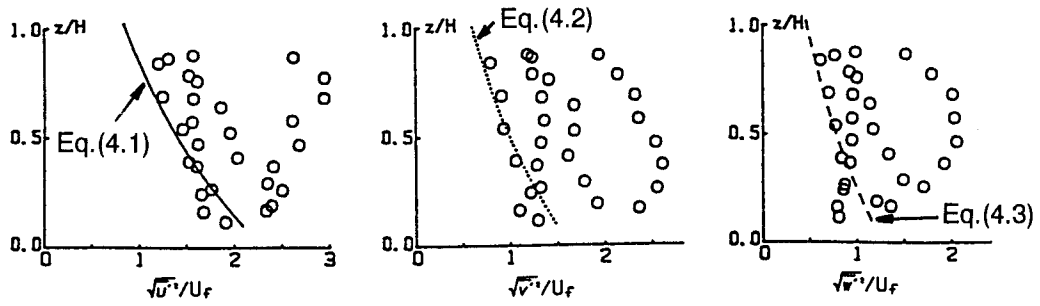


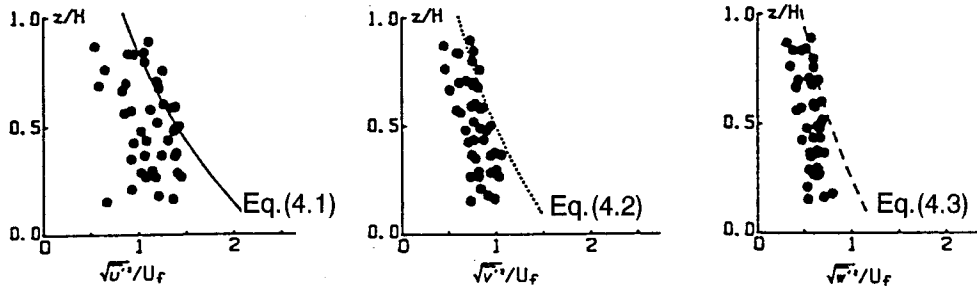
図4-4-3 河川直線部の乱れ強度分布

次に、Manningの粗度係数の定義から求めた河床の粗度係数 n の大きさによって 4. 2. 2 節で述べたように、Sグループ（粗度：小， $n \leq 0.0224$ ），Rグループ（粗度：大， $n \geq 0.0397$ ）について比較・検討を加える。S，Rグループそれぞれについて乱れ強度の鉛直線上の分布を図4-5に示す。Sグループの図を見ると、乱れ強度分布形状は禰津の分布曲線と同様の形状を示している。この理由として、Sグループの河床の粗度係数が比較的小さいため、禰津の実験室水路の実験結果と同様な特性を示したと考えられる。ところが、Rグループの図を見ると、流下方向の乱れ強度の場合、その分布形状は水面付近から $z/H=0.5$ 付近までは増加傾向にあるが、 $z/H=0.5$ より下方に向かって乱れ強度は大きくはならず逆に減少の傾向を示している。一方、他の方向成分の乱れ強度分布は $\sqrt{u'^2} / U_r$ の分布特性のような顕著な変化は見受けられない。文献2），4）にも指摘されているように河床の粗度係数が大きくなるほど河床近傍で乱れ強度が一様化されている（ $\sqrt{u'^2} / U_r$ の大きさは顕著に減少し、 $\sqrt{v'^2}$ の分布形状に近づいていく）と考えられる。最近、辻本ら⁵⁾は電磁流速計を用いた野外流路での乱流測定によって、今回の測定結果と同様な分布形状を示すことを発表している。

また、S，Rグループそれぞれについて各方向の乱れ強度の比 $\sqrt{v'^2} / \sqrt{u'^2}$ ， $\sqrt{w'^2} / \sqrt{u'^2}$ を図4-6に示す。図中の破線は禰津が示した値、 $\sqrt{v'^2} / \sqrt{u'^2} = 0.709$ ， $\sqrt{w'^2} / \sqrt{u'^2} = 0.552$ を表す。流下方向（ u 方向）と鉛直方向（ w 方向）の比 $\sqrt{w'^2} / \sqrt{u'^2}$ の図を見ると、どちらのグループの値も全水深にわたってほぼ普遍であると考えられる。一方、流下方向（ u 方向）と横断方向（ v 方向）の乱れ強度の比 $\sqrt{v'^2} / \sqrt{u'^2}$ の方の図を見ると粗度係数の小さいSグループの場合は禰津の値よりは若干大きめではあるが一定値を示している。ところが、粗度係数の大きいRグループの場合は水面から $z/H=0.5$ 付近まではほぼ一定値を示しているが、 $z/H=0.5$ より下方では禰津の示した値より右側へずれている。なお、表4-1を見ると、Sグループの場合、 $Re=3.8 \sim 18.4 \times 10^4$ ， $Fr=0.12 \sim 0.34$ ，また、Rグループの場合、 $Re=13.4 \sim 22.9 \times 10^4$ ， $Fr=0.27 \sim 0.42$ となっており、どちらのグループのレイノルズ数とフルード数についても値の変化幅は狭い範囲となっており、今回の測定データに関する限り、乱れ強度分布に対するレイノルズ数やフルード数の影響は明確には確認できない。

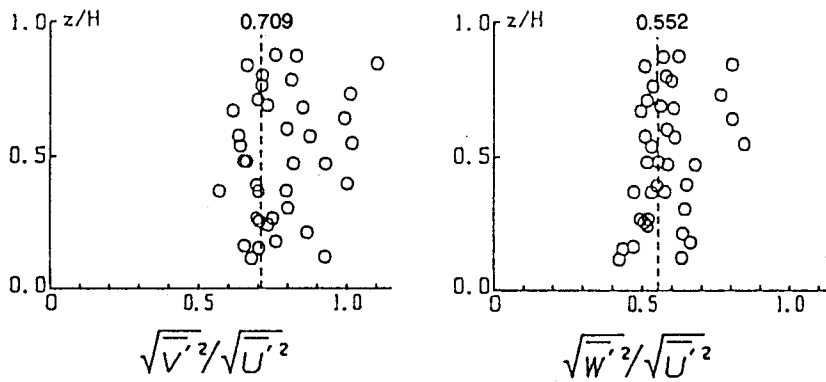


(a) Sケル-フ° (粗度：小)

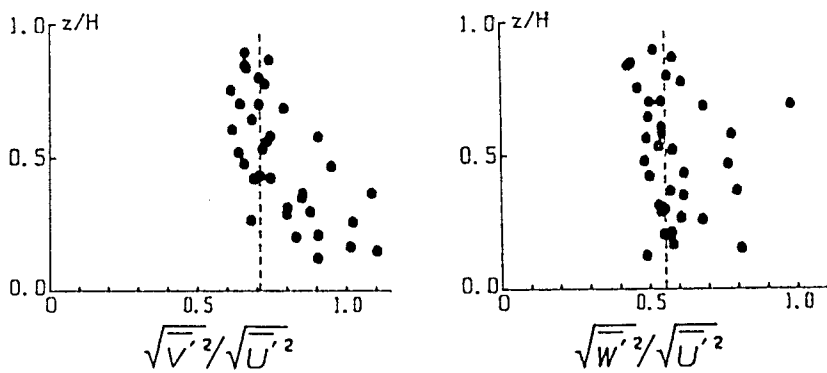


(b) Rケル-フ° (粗度：大)

図 4-5 河川直線部の粗度係数で分類した乱れ強度



(a) Sケル-フ° (粗度：小)



(b) Rケル-フ° (粗度：大)

図 4-6 河川直線部の粗度係数で分類した乱れ強度の比

4. 3. 3 レイノルズ応力分布

U_i^2 で無次元化したレイノルズ応力の鉛直線上の分布を図4-7に示す。 $-\overline{u'v'}/U_i^2$ 、 $-\overline{v'w'}/U_i^2$ については、今本らの実験室水路での結果⁶⁾では全水深にわたってほぼ0になるが、本測定結果では大きく外れ、一定の傾向を示していない。この原因のひとつとして、図4-9に示すような流速の測定領域のずれによって引き起こされたと考えられる。前節と同様に、河床の粗度係数の大きさによって分類されたS、Rグループのレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_i^2$ の鉛直線上の分布を図4-8に示す。図中の破線は次式で示される直線を示す。

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_i^2} = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (4.5)$$

河床の粗度係数の小さいSグループのデータは理論曲線の周りに広く分布しているが、河床の粗度係数の大きいRグループのデータは $z/H=0.5$ より下方でその値は明らかに減少していることがわかる。この特性は筆者らが過去に実施した測定データからも同様の結果⁷⁾が得られている。一方、その分布形状の特異さは以下のような流速計の構造にも関係していると思われる。すなわち、図4-9に示すような流速の測定領域を考えると、X方向の測定領域とZ方向の測定領域（図中の斜線部分）は空間的に若干のずれがある。このため、本流速計のプロブの規模以上のスケールの乱流成分であれば2方向の流速成分の相関を求めることができるが、より小さいスケールの乱れに対する相関の計測には精度の限界があると思われる。一方、辻本らは粗度の大きさに比べて水深が相対的に小さい礫床の実験室水路における測定から今回得られた結果と同様の結果⁴⁾を示している。文献4)で指摘されているように流れの構造が河床の粗度自身に強く影響される領域の存在が乱れ強度分布と同様にレイノルズ応力の分布特性に大きく影響を与えていると考えられる。ところで、式(4.5)は滑面流れを対象とした式であり、平均流速の鉛直成分Wがほとんど零に等しいとしてその影響を無視している。しかしながら、本研究で対象としているような実河川では流れ特性が3次元の挙動を示すことから、Wの影響は無視できないと考えられる。したがって、流れ特性が3次元の挙動を示す実河川を対象とする場合、平均流の鉛直成分の影響を考慮して流れの特性を評価する必要があると思われ、このことは今後の検討課題である。

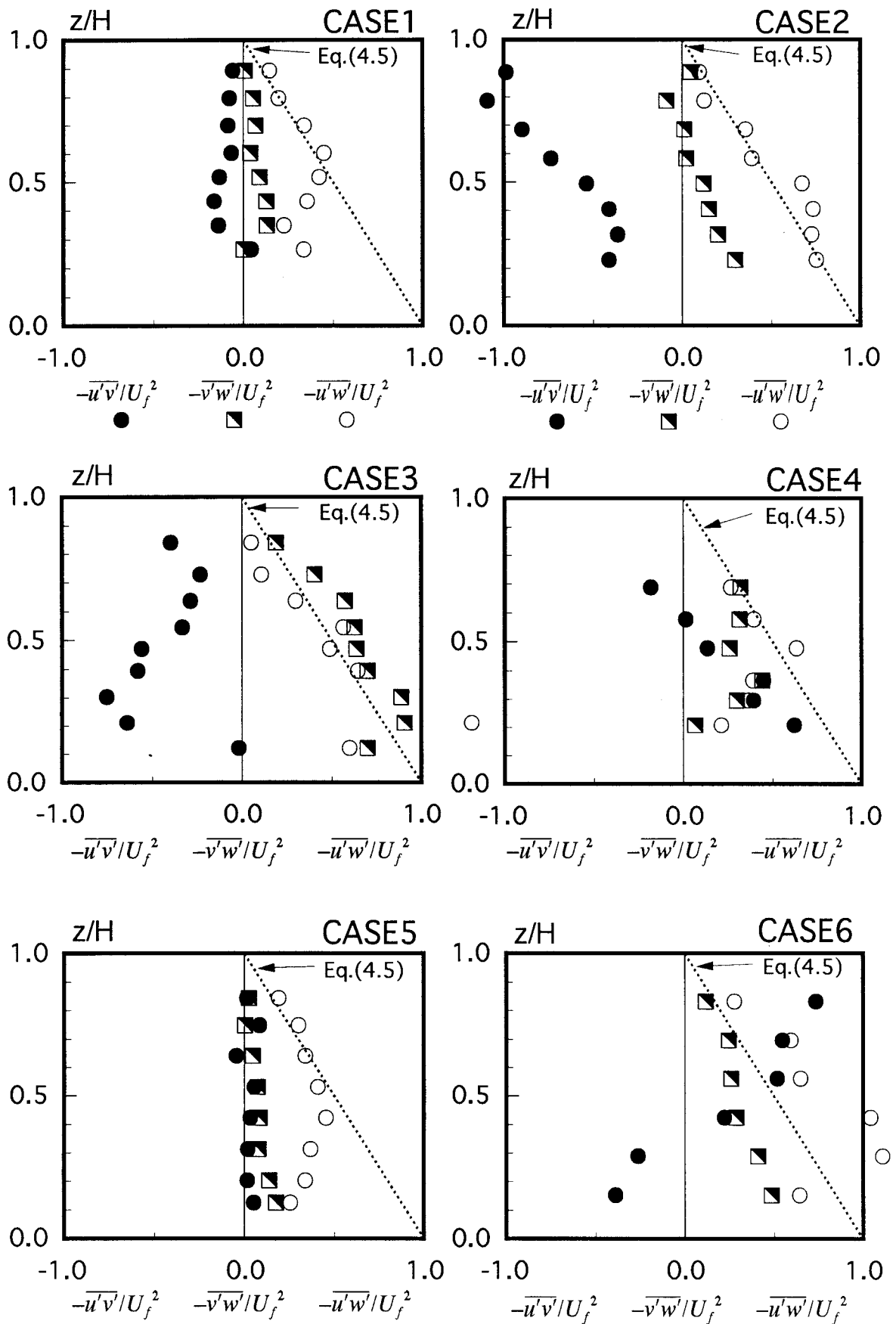


図4-7-1 河川直線部のレイノルズ応力分布

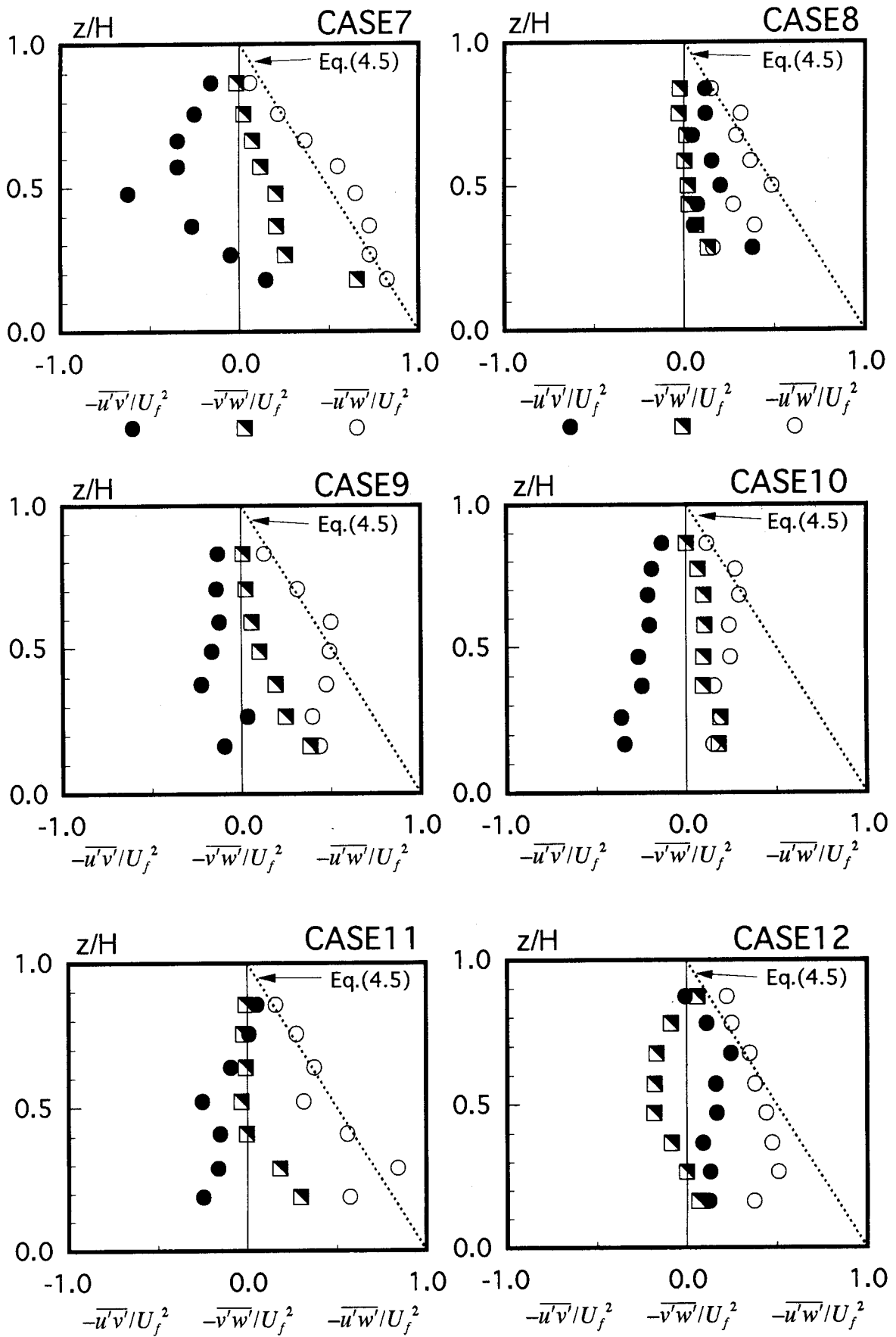


図4-7-2 河川直線部のレイノルズ応力分布

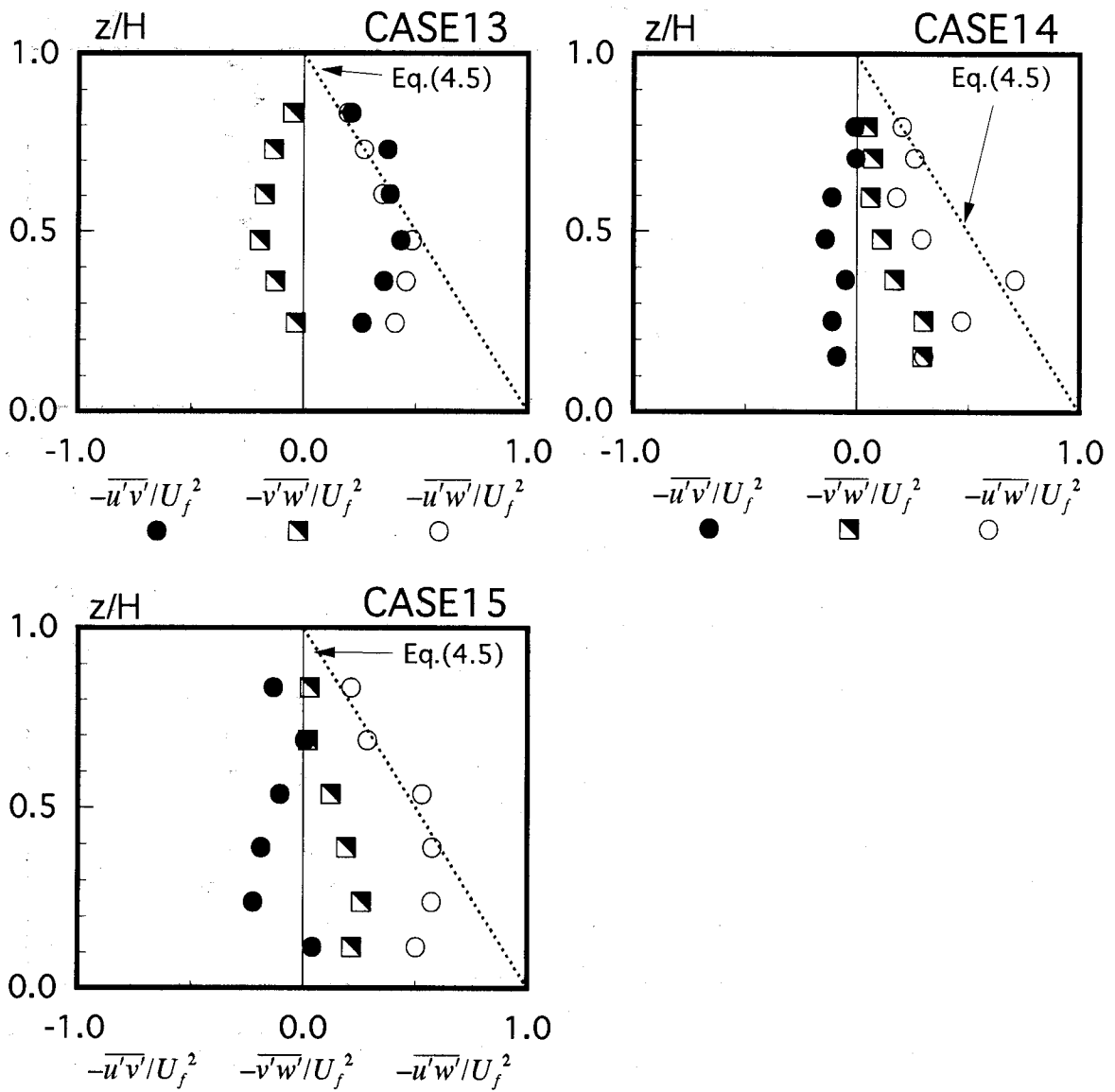


図4-7-3 河川直線部のレイノルズ応力分布

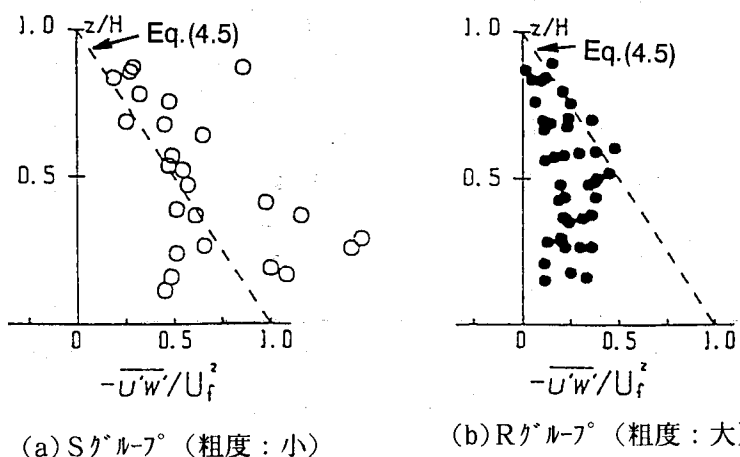


図4-8 河川直線部の粗度係数で分類したレイノルズ応力分布

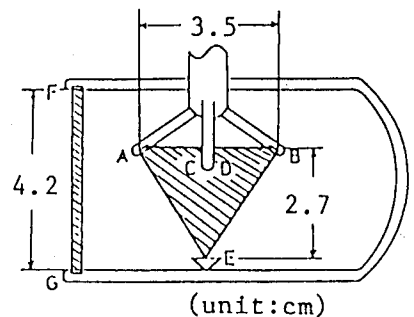


図4-9 センサープローブの測定領域

4. 3. 4 4象限法による瞬間レイノルズ応力特性

2. 2. 4で述べたように乱流中の乱れの運動に空間的、時間的に相当規則だった運動パターンを持つ組織的構造が存在することが知られているが、その中で、壁面乱流や開水路乱流においては、バースティングと呼ばれる現象がみられる。バースティングは壁面領域での規則だった渦運動であり、速度の大きい流体塊が壁面に向かって侵入し (sweep)、このため壁面近くの速度の遅い流体塊が振動しながら浮上、渦が発達し、ある限界で渦崩壊を起こして周辺流体と激しい相互作用を演じ (ejection)、再び速度の大きい流体塊が侵入すると言った一連の運動をかなり規則的に繰り返す。そして、これまでの様々な研究から、このejectionとsweepで瞬間レイノルズ応力が生成され、ここで乱れエネルギーの大半が生成されることが明らかにされてきている。

乱流中の組織的構造の解明する方法として、流れを可視化して調べる方法や流れの定量的データを測定してそれを条件付きサンプリング法によって解析する方法などがある。そこで、本節では条件付きサンプリング法のひとつである $u-w$ 平面 4象限区分しきい値法⁸⁾ (以下では4象限法と略す) を用いて、乱流中の組織的構造を探ることを試みる。なお、条件付けの方法によって、4象限法のほかに、VITA法 (Variable-Interval Time-Averaging法) などがある。

用いた方法を簡単に示す。乱れ速度 u' (流下方向) および w' (鉛直方向) で表される平面を以下に示すような領域に区分する。

第1象限 ($u' > 0, w' > 0$) = outward interaction事象

第2象限 ($u' < 0, w' > 0$) = ejection事象

第3象限 ($u' < 0, w' < 0$) = inward interaction事象

第4象限 ($u' > 0, w' < 0$) = sweep事象

そして、

$$|u'w'| = H'u'w' \quad (4.6)$$

で表されるしきい値 (hole値とも呼ぶ) H' を導入し、 H' の変化に伴うレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ への第1象限～第4象限の事象および hole 事象の5つの各事象からの寄与率 C_i を次式から算定する。

$$C_{i, H'} = \frac{1}{-\overline{u'w'}} \frac{1}{T} \int_0^T u'w' I_{i, H'}(u, w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4.7)$$

ここに、

$$I_{i, H'}(u, w) = \begin{cases} 1, & |uw| > H'u'w' \text{ で } (u, w) \text{ が } i \text{ 領域にあるとき } (i=1, 2, 3, 4) \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

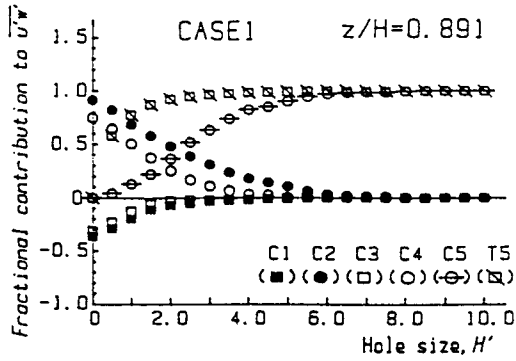
$$I_{5, H'}(u, w) = \begin{cases} 1, & |uw| \leq H'u'w' \text{ のとき} \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

また、時間占有率 T_i は、次式で表される。

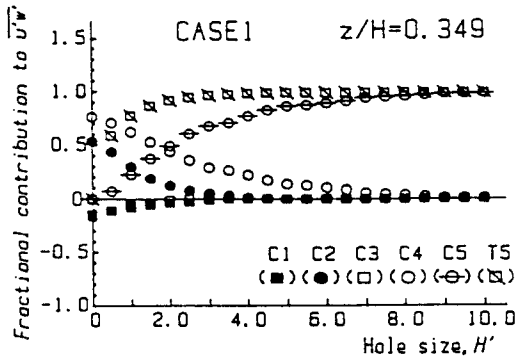
$$T_{i, H'} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{i, H'}(u, w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4.8)$$

まず、しきい値 H' を変化させた場合を考えると、4象限法により求められる各事象の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率 C_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) および hole 事象の時間占有率 T_5 の一例 (Case 1) を図 4-10 に示す。比較のために、禰津による粗面流の壁面領域での結果⁹⁾ を図 4-11 に示す。図 4-10 の (a), (b) を比較して見ると、ejection 事象の C_2 (●印), sweep 事象 C_4 (○印) に注目すると、自由水面付近と河床付近では C_2 と C_4 の大小関係が逆転している。つまり、河床付近では ejection 事象の寄与に比べ sweep 事象の寄与の方が大きくなることを示している。この結果は禰津の示した図 4-11 で見られるような壁面領域で ejection 事象と sweep 事象の大小関係が逆転するという禰津⁹⁾ の指摘と一致する。次に、 $H'=0$ の場合の各事象の寄与率 C_i と時間占有率 T_i の鉛直分布を図 4-12 に示す。比較のために、禰津による粗面流での $H'=0$ の場合の各事象の寄与率を図 4-13 に示す。全水深にわたって $C_2 > C_4$ なる関係を持つ滑面乱流の場合と異なり、河床に近づくにつれて sweep 事象の寄与が増大し、ejection 事象の寄与より大きくなることがわかった。この結果は図 4-13 に見られるような禰津の結果⁹⁾ と定性的に一致する。

なお、本節でのデータ処理においてアナログデータの A/D 変換時のサンプリング周波数は 100 Hz を採用した。ところが、前節までの乱れ強度やレイノルズ応力のような時間平均化された乱れ特性量について検討する場合にはそのサンプリング周波数の違いによる乱れの分布特性の評価に影響がないかもしれないが、本節の乱れ速度のような採用するサンプリング周波数によってその値の評価が大きく異なる可能性があるので、本節の議論はサンプリング周波数 100 Hz の場合に限って検討したので、サンプリング周波数が異なる場合の検討は今後の検討課題である。

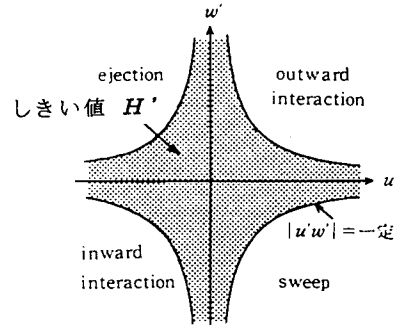


(a) 水面付近 ($z/H=0.891$)



(b) 河床付近 ($z/H=0.349$)

図 4-10 各事象の寄与率



4つの事象区分と
しきい値の表現

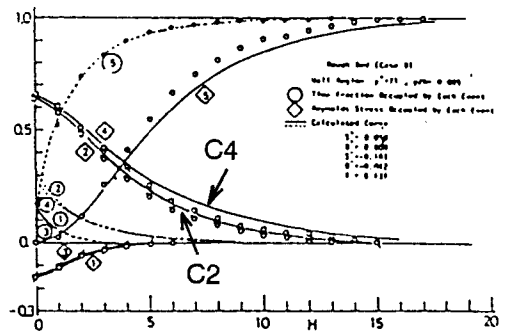


図 4-11 欄津による各事象の
寄与率 (粗面流の場合)

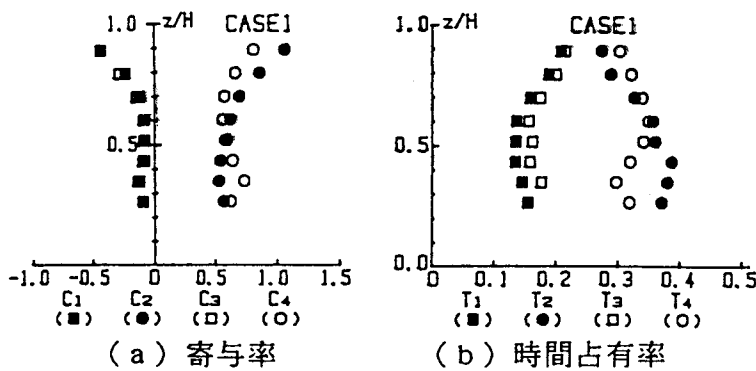


図 4-12 各事象の寄与率と時間占有率
($H'=0$)

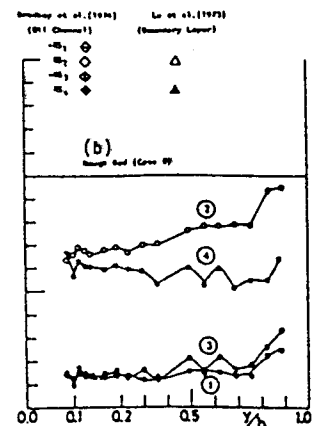


図 4-13 欄津による各事象の
寄与率 ($H'=0$)
(粗面流の場合)

4. 3. 5 エネルギー・スペクトル

まず、最初に、データ処理について述べておく。幅広い周波数領域の特性を検討するために、水深方向の3点で約30分の測定を行った8ケース(CASE 1, 2, 5, 7, 8, 10, 12, 14)について、スペクトラムアナライザー(アドバンテスト製, TR-9404)を用いてエネルギー・スペクトルを求めた。512 Hz, 51.2 Hz, 5.12 Hzの3つのサンプリング周波数を用いて、いずれもサンプリング個数を1024個とする処理を8回行い、その平均値をとった。

まず、水深方向の3点の $S_{uu}(f)$ の比較の一例として、CASE 5 を図4-14に示す。また、3方向成分 $S_{uu}(f)$, $S_{vv}(f)$, $S_{ww}(f)$ の比較の一例として、CASE 7 の $z/H=0.5$ 付近の点について図4-15に示す。なお、これらの図は、512 Hz, 51.2 Hz, 5.12 Hz の3つのサンプリング周波数を用いて求めた結果を合成したものである。

u成分のエネルギー・スペクトルを見ると、0.5 Hzから5 Hzまで $-5/3$ の傾きを持つ慣性領域と、5 Hzから15 Hzまで $-3 \sim -13/3$ の傾きを持つ粘性領域は認められる。v, w成分についても同様の結果が得られた。粘性領域の傾きは従来の研究では井上の -3 乗則¹⁰⁾が一般的であったが、今回の測定結果からも粘性領域の傾きは必ずしも -3 乗則では説明できず、最近の椿らの研究結果¹¹⁾で示されている $-13/3$ に近い値をとっている。

一方、余越は一連の研究を行い¹²⁾、河川乱流の場合でも大気乱流と同様に河幅規模の水平乱流場と水深規模の鉛直乱流場とから構成される2重構造性を示すことを指摘している。さらに、今本ら¹³⁾は実験室水路においてもスペクトルに多重構造性が認められ、水深スケールと水路幅スケールの乱れの存在が確認されたことを報告している。ところが、今回の結果から、そのような特性を見出すことはできなかった。このような結果となった原因を考えてみると、データ処理上における繰り返し数の問題が挙げられる。文献13)で述べられているように、データ処理上における繰り返し数を大きくすると $-5/3$ 乗則が成立する慣性領域が2カ所認められていたスペクトルが、一見1カ所にしか存在しないような様相を呈してしまふことがあり、繰り返し数を上げることによってスペクトルが平滑化されてしまい、その結果、多重構造性という特性が隠されてしまうことになる。文献13)では問題の繰り返し数は5回としており、本研究でのエネルギー・スペクトルを求めるために採用した繰り返し数は8回であった。この程度の繰り返し数の差で多重構造性が隠されてしまうとは考えにくいので、この点に関して、今後、検討の必要があると思われる。

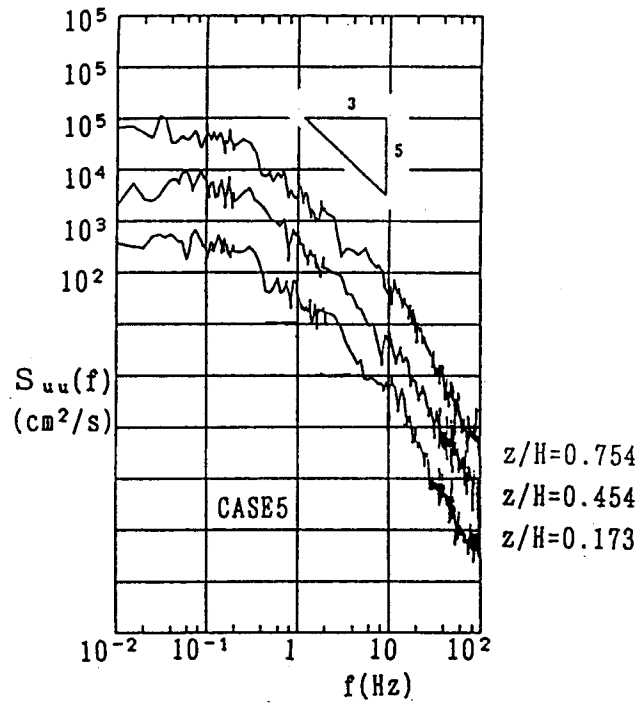


図4-14 河川直線部における流下方向のエネルギー・スペクトルの水深による比較

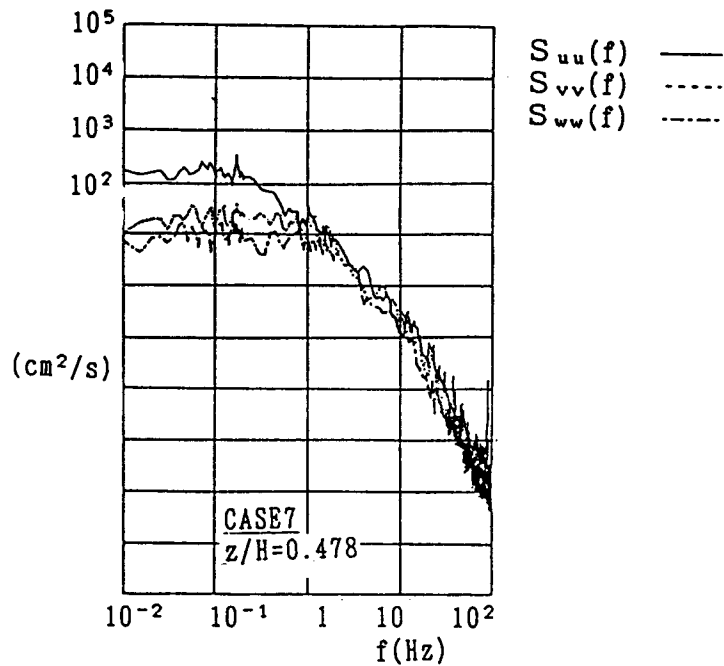
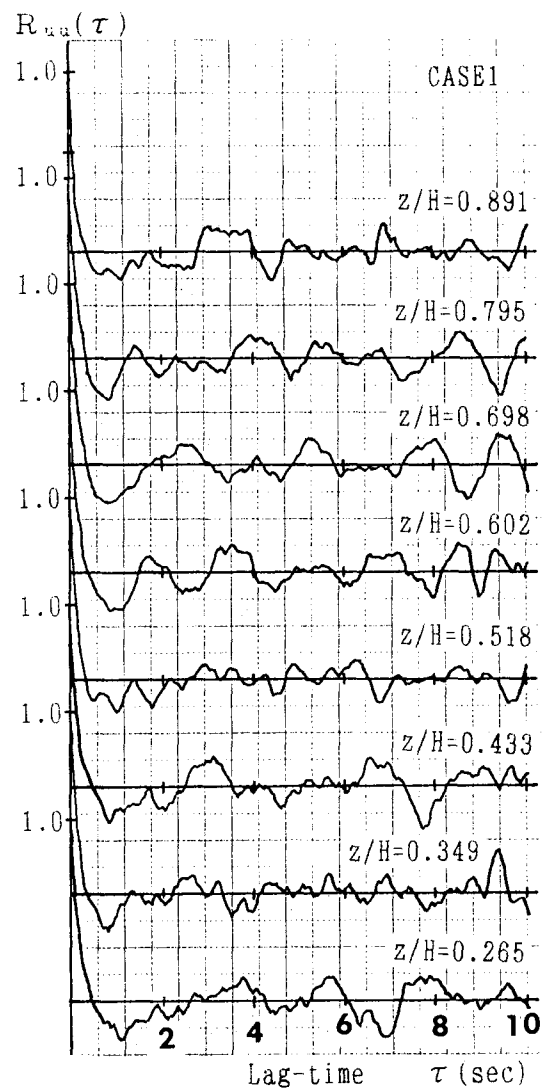


図4-15 河川直線部のエネルギー・スペクトルの3方向成分の比較

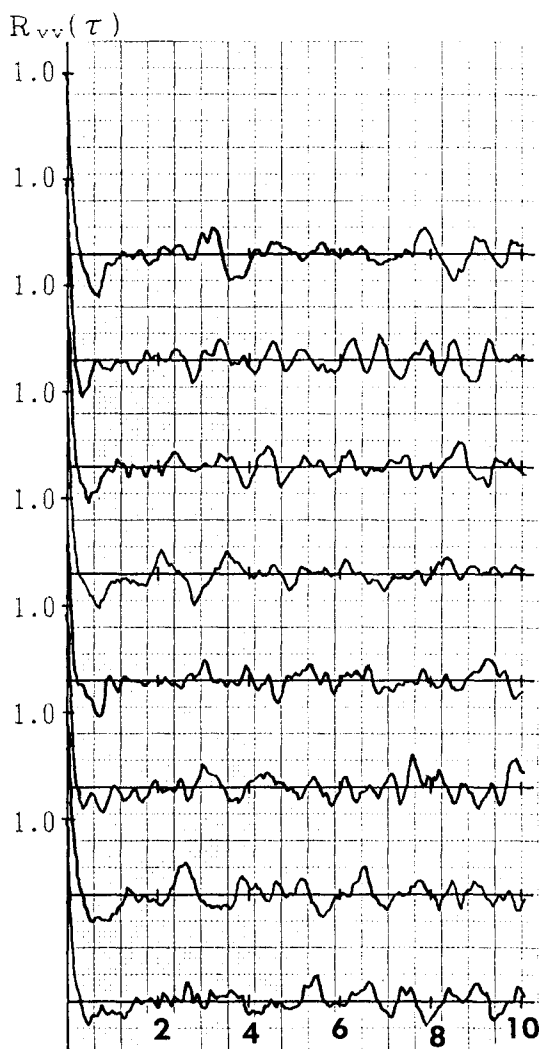
4. 3. 6 自己相関係数

本研究では流れの周期特性を見るために、流速変動成分の自己相関係数 $R(\tau)$ を求めた。その際、ローパスフィルターを通して 20 Hz 以上の高周波数分を除き、サンプリング周波数 51.2 Hz 、サンプリング個数を 1024 個とした処理を 8 回行い、その平均値をとった。CASE 1 (市川) の水深方向の各点の 3 方向成分、 $R_{uu}(\tau)$ 、 $R_{vv}(\tau)$ 、 $R_{ww}(\tau)$ の変動波形を図 4-16 に示す。この図を見ると、実験室水路などで通常観察される自己相関係数の変動波形はラグが大きくなるにつれて指数関数的に自己相関係数は減衰するはずであるが、どの方向の自己相関係数も周期的な変動波形が見られる。流下方向の $R_{uu}(\tau)$ で見るとラグで $2\sim 3$ 秒の周期で変動を繰り返している。この傾向はどの水深でも見られる。ところで、CASE 1 は市川での測定であるが、市川の測定地点の河床は大きな礫で構成された礫床河川であり、測定時の水面の様子を見ると大きく波立っていた。つまり、自己相関係数に見られるこの周期的な変動波形は水面の波の周期を示していると考えられる。言い換えれば、実河川でよく見られるような河床が大きな礫で構成された礫床河川の場合、自己相関係数の変動特性はラグが大きくなるにつれて指数関数的に減衰せず、実河川の河床形状の凹凸が激しいために水面にまでその影響が現れ、結果的に自己相関係数の周期的な変動となって現れると考えられる。

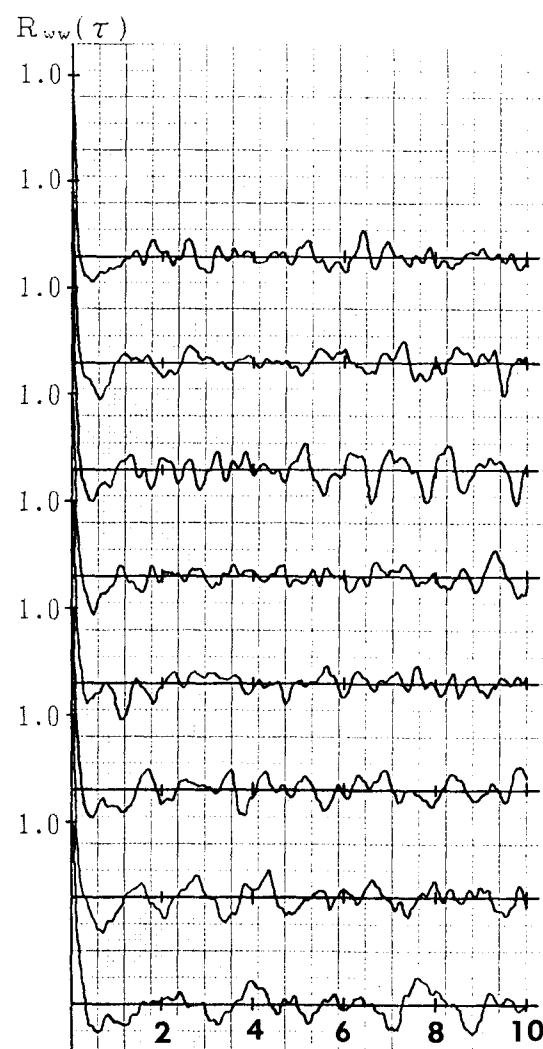
一方、横断方向の R_{vv} と鉛直方向の R_{ww} の値の減少度合いは R_{uu} のそれに比べて急激に減少している。そして、変動周期は R_{uu} のそれに比べ、かなり小さなものとなっている。



(a) $R_{uu}(\tau)$



(b) $R_{vv}(\tau)$



(c) $R_{ww}(\tau)$

図4-16 河川直線部の自己相関係数の水深による比較 (CASE 1 : 市川の場合)

4. 4 結 言

実河川の直線部における流れの特性を明らかにするために実施した流速の現地測定の結果より以下のことがわかった。

(1) 流下方向の流速分布において、相対水深 $z/H = 0.4 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則が成立することがわかった。

(2) 乱れ強度分布から、Manning の粗度係数 n の定義から求めた河床の粗度係数が比較的小さい場合（今回の測定例では $n \leq 0.0224$ ）、滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果とほぼ同様な分布特性を示す。山地河川で多く見受けられる礫床河川のような河床の粗度係数が比較的大きい場合、 $z/H=0.5$ より河床に向かって流下方向の乱れ強度の大きさが顕著に減少する。

(3) 従来のデータの整理方法で考えると、山地河川で多く見受けられる礫床河川のような河床の粗度係数が大きい場合、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_r^2$ の分布形状は河床に近づくにつれて減少する傾向を示す。

流れが3次元的な挙動を示す実河川流を対象とする場合、平均流の鉛直成分の影響を考慮して、レイノルズ応力の分布特性を評価する必要がある。

(4) データ処理時のサンプリング周波数が100 Hzの場合、 $u-w$ 平面4象限区分しきい値法を用いて瞬間レイノルズ応力の寄与率および時間占有率の分布を検討した結果、河床の粗度係数が大きい場合、水面付近と逆に河床付近では ejection 事象の寄与に比べ sweep 事象の寄与の方が大きくなることがわかった。この結果から、粗面流れにおいて、禰津が指摘した ejection 事象と sweep 事象の大小関係の逆転が確認された。

(5) エネルギー・スペクトルの傾きから、0.5 Hz から 5 Hz まで $-5/3$ の傾きを持つ慣性領域と、5 Hz から 15 Hz まで $-3 \sim -1.3/3$ の傾きを持つ粘性領域は認められる。粘性領域の傾きは従来の研究では井上の -3 乗則が一般的であったが、今回の測定結果からも粘性領域の傾きは必ずしも -3 乗則では説明できず、最近の椿らの研究結果で示されている $-1.3/3$ に近い値をとるようである。

(6) 実河川でよく見られるような河床が大きな礫で構成された礫床河川の場合、自己

相関係数の変動特性はラグが大きくなるにつれて指数関数的に減衰せず、実河川の河床形状の凹凸が激しいために水面にまでその影響が現れ、結果的に、自己相関係数の周期的な変動となって現れる。

以上、本章では河川直線部を対象として、現地観測データをまとめてみたものであるが、河床の粗度係数が $n \leq 0.0224$ の範囲の小さな値を有する河川の乱流特性は、従来の実験室水路における滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果をほぼ適用しても良いことがわかった。しかし、山地河川で多く見受けられるような水深に比べて粗度の粒径の大きな礫床河川ではその特性は大きく異なることがわかった。よって、今回現地観測を実施したような礫床河川を対象とした室内水路での測定結果がほとんど報告されていない現状では本測定結果を十分に比較検討することができないので、このような分野の研究成果の蓄積が当面の課題であると思われる。

参考文献

- 1) 瀬良昌憲・神田 徹：超音波流速計による河川流の測定，第32回水理講演会論文集，pp.353-358，1988.
- 2) Nakagawa, H., Tsujimoto, T., Shimizu, Y. and Murakami, S. : Interaction between over rough permeable bed and flow in porous medium composed materials, Proc. 3rd Int. Sym. Refined Flow Modelling & Turbulence Meas., Tokyo, IAHR, pp.627-634, 1988.
- 3) 橋津家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文報告集，No.261，pp.67-76，1977.
- 4) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦：粗度近傍の組織的流速変動場が相対水深の小さな流れの乱流構造に及ぼす影響，第33回水理講演会論文集，pp.487-492，1989.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀・岡田敏治・王子義徳：小型電磁流速計による野外流路での乱流測定，水工学論文集，第35巻，pp.333-338，1991.
- 6) 今本博健・石垣泰輔：LDVによる開水路流れの速度ベクトル計測について(1)，京大防災研究所年報第28号B-2，pp.471-486，1985.
- 7) 瀬良昌憲：河川乱流の現地観測，建設工学研究所研究報告，第31号，pp.191-209，1989.
- 8) Lu, S. S. and Willmarth W. W.:Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol.60, pp.481-511, 1973.
- 9) 橋津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学学位論文，p.33，1977.
- 10) 井上栄一：乱れの最小乱子について，東大理工学研究所報告，4，pp.194-201，1950.

- 11) 椿東一郎・小松利光：成層密度噴流における乱れおよび密度変動のスペクトル特性，土木学会論文報告集，No.268，pp.63-74，1977.
- 12) 余越正一郎：水工学に関する夏期研修会講義集，A-1，1977.
- 13) 今本博健・浅野富夫・石垣泰輔・杉浦秀之：開水路流れにおける乱れのスペクトル特性について，京大防災研究所年報，No.19B，pp.262-263，1976.

第5章 河川湾曲部における流れ特性

5. 1 緒言

自然の河川では平面形状が直線的になることはほとんどなく、曲がりくねった蛇行形状を示す。このような河川湾曲部における流れ、あるいは、河床形状がどのような特性を示すかということは取水設備、水制などの河川構造物の設置、あるいは掃流砂量といったような実際的な諸問題とあいまって、河川工学上の重要な課題の一つである。

湾曲部の流速ベクトルは水表面と底面付近で方向が異なっている。すなわち、水表面付近では外岸向き、底面付近では内岸向きとなっており、この差はいわゆる2次流が存在することにより生まれる。2次流は主流が曲率を持ち、かつ上下層間で主流の速さが異なるために遠心力差が生じることによって発生する。

さて、第4章での現地測定は河川直線部を対象として行われてきた。ところが、上述したように自然の河川では平面形状が曲がりくねっていることから、本章では河川の湾曲部に注目して研究を進めることにした。

従来の理論的・実験的研究の多くは2次流の完全発達域および単純湾曲水路を対象として行われている。また、実河川の流れでは代表水深 H_0 と流路の曲率半径 r との比 H_0/r が1に比べて非常に小さい。この条件を満たし、かつ広範な資料が公開されているのはRozovskii¹⁾の例のみである。さらに、実河川においては湾曲部が連続している。

そこで、本研究では、流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で平面形の影響を受ける流れの一例として、まず、単純湾曲部を対象として、実河川の湾曲部における流れの特性について明らかにすることを目的として、3次元超音波流速計を使用して湾曲部における流速の現地測定を実施した。

5. 2 測定方法と水理条件

5. 2. 1 測定地点の選定

河川湾曲部の現地測定を実施する地点の選定条件の主なものを以下に列記する。

- 1) 第4章と同様に、測定地点の流速が100 cm/sec以下である。
- 2) 50 cm以下の水深であり、湾曲部の流路幅が一定でその全体に水流が存在している。
(実際の河川湾曲部の内岸側は堆砂により水深がかなり浅くなっている場合が多い。)
- 3) 湾曲角が30°以上続いている地点で、湾曲部の上流側の河道は十分長く、直線状である。
- 4) 湾曲部の内岸、外岸の法面はコンクリートなどできれいに護岸が整備されている。

5. 2. 2 測定方法

図5-1に示すような兵庫県下を流れる『武庫川』のJR福知山線新三田駅付近で測定を行った。その平面図を図5-2に示す。河道は右に湾曲しており、両岸はコンクリートで護岸され、河床状態は直径2~4cmの小石と10cm程度の礫が混在している。測定地点付近を上流、あるいは、下流から眺めたのが写真5-1と写真5-2である。河川中央の曲率半径は260mで、水面勾配は約1/800である。測定地点の上流の河道は100m以上にわたり直線状であり、図5-2に示すように湾曲の開始点から湾曲角 $\theta = 8.5^\circ$ の断面B-1より湾曲角 $\theta = 39.8^\circ$ のB-5までの5断面で、外岸から内側へ2.5m(○印)と5m(□印)の位置の計10点で測定を行った。湾曲角 $\theta = 8.5^\circ$ の断面B-1の外岸側の測点MU1付近での測定風景を写真5-3に示す。1991年10月~12月に第1回目の測定を行ったが、この測定期間中の降雨量が平年の雨量に比べ半分以下であったため、ほとんどの測定点で水深11~18cmとかなり浅く、所々で河床が露出しており、内岸側で特に顕著に見られた。さらに、河床の横断面形状を見ると断面B-3~5では外岸から約10m内側付近で非常に浅くなっていた。そこで、翌年の1992年7月の梅雨明け直後の水深の深い時期に追加の測定を実施した。水理条件を表5-1と表5-2を見比べてみればわかるように、CASE-MU3の場合、水深で約1.7倍の深さ、断面平均流速で約2倍の速さとなっている。現地での流速計の方向決めの方法については第3章に詳しく述べているので、ここでは省略する。座標系は測定地点の座標原点を砂礫上面にとり、座標軸は各断面においてx軸を湾曲の接線方向(u成分、流下方向を正)、y軸を横断方向(v成分、右岸方向を正)、z軸を鉛直方向(w成分、上向きを正)にとる左手系とした。水理条件を表5-1~2にまとめて示す。

また、本章におけるサンプリング周波数は100 Hzで、データ個数は5120個(評価時間5.12秒)とした。

表5-1 河川湾曲部の水理条件1 (1991. 10測定)

CASE	水深 H(cm)	流路幅 B(m)	B/H	平均流速 U _m (cm/s)	摩擦速度 U _f (cm/s)	Re (×10 ⁴)	Fr	湾曲 角(θ)
MU1	23.0	28.0	122	36.9	3.98	6.82	0.25	8.5°
MU2	11.0	28.0	255	17.0	0.77	1.54	0.16	14.2°
MU3	18.0	28.2	157	22.3	2.15	3.32	0.17	22.7°
MU4	12.0	28.0	233	25.9	1.40	2.57	0.24	31.2°
MU5	18.0	28.6	159	34.6	1.12	4.61	0.26	39.8°
MU6	18.0	28.0	156	30.5	3.18	4.41	0.23	8.5°
MU7	26.5	28.0	106	44.8	2.53	9.30	0.28	14.2°
MU8	17.0	28.2	166	24.9	2.54	3.50	0.19	22.7°
MU9	16.0	28.0	175	32.8	2.55	4.33	0.26	31.2°
MU10	15.0	28.6	159	14.8	1.08	1.79	0.12	39.8°

表5-2 河川湾曲部の水理条件2 (1992. 7測定)

CASE	水深 H(cm)	流路幅 B(m)	B/H	平均流速 U _m (cm/s)	摩擦速度 U _f (cm/s)	Re (×10 ⁴)	Fr	湾曲 角(θ)
MU3	30.5	28.8	94	44.1	3.64	15.5	0.26	22.7°
MU4	30.5	28.5	93	47.8	6.15	16.9	0.28	31.2°
MU5	34.0	28.9	85	62.2	5.06	22.4	0.34	39.8°
MU8	34.5	28.8	83	49.8	6.70	19.7	0.27	22.7°
MU9	30.5	28.5	93	61.2	6.02	21.7	0.35	31.2°

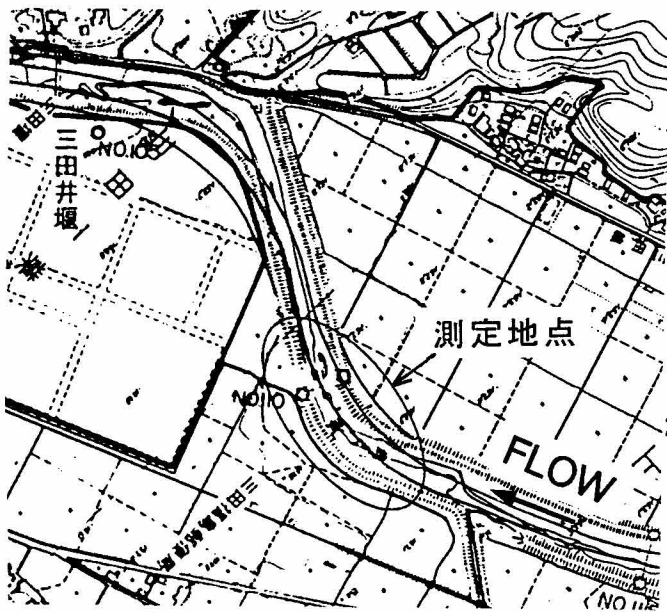


図5-1 河川湾曲部の測定地点

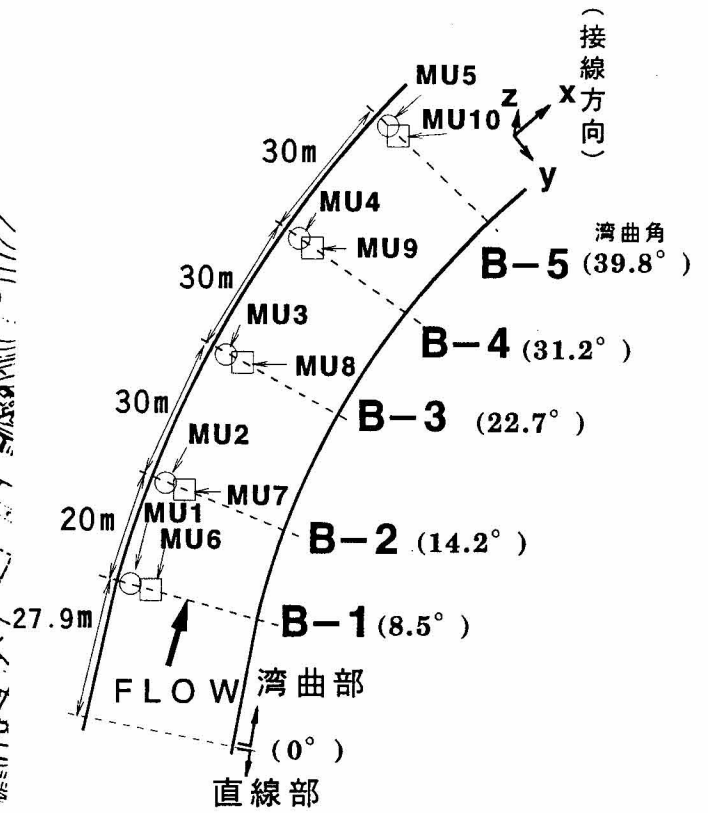


図5-2 河川湾曲部の平面図



写真5-1 上流側から見た風景 (湾曲部)



写真5-2 下流側から見た風景（湾曲部）



写真5-3 湾曲部の測定風景（MU1付近）

5. 3 測定結果とその考察

5. 3. 1 平均流速分布

局所的な平均流速 U , V , W の鉛直線上の分布を図 5-3 に示す. この図中で括弧書き内の数字は測定時期を示している. すなわち, (91) は表 5-1 に示された 1991 年のデータを示す. MU3 の V の分布形状に注目すると, その値は河床で正, 水面で負となっている. この V の分布形状から, 図 5-4 に示すような河川横断面内 ($y-z$ 平面内) で流下方向に向かって反時計方向に回転するような 2 次流が生じていること, 言い換えれば, 外岸側で下降流が生じ, 内岸側で上昇流が生じていることが推察される. この結果は実験室の湾曲水路で得られた 2 次流鉛直分布の実験結果²⁾と一致する. 一方, 同じ断面で内岸側の MU8 の場合, V の分布形状は MU3 のそれと同様な分布形状を示しているが, その値はどの水深でも負の値を示している. すなわち, MU3 に比べて外岸方向へ向かう流速成分が強いことを意味している. また, 主流速の U の鉛直分布形状に注目すると, 前章で述べた河川直線部の分布形状に比べて水面付近と河床付近でその大きさが極端に違っている. 一般的に言われているように「2 次流の原動力は主流速鉛直分布が非一様であるため生じる遠心力の不均一である」ということから, U の鉛直分布の形状のみからも 2 次流の存在が推察される.

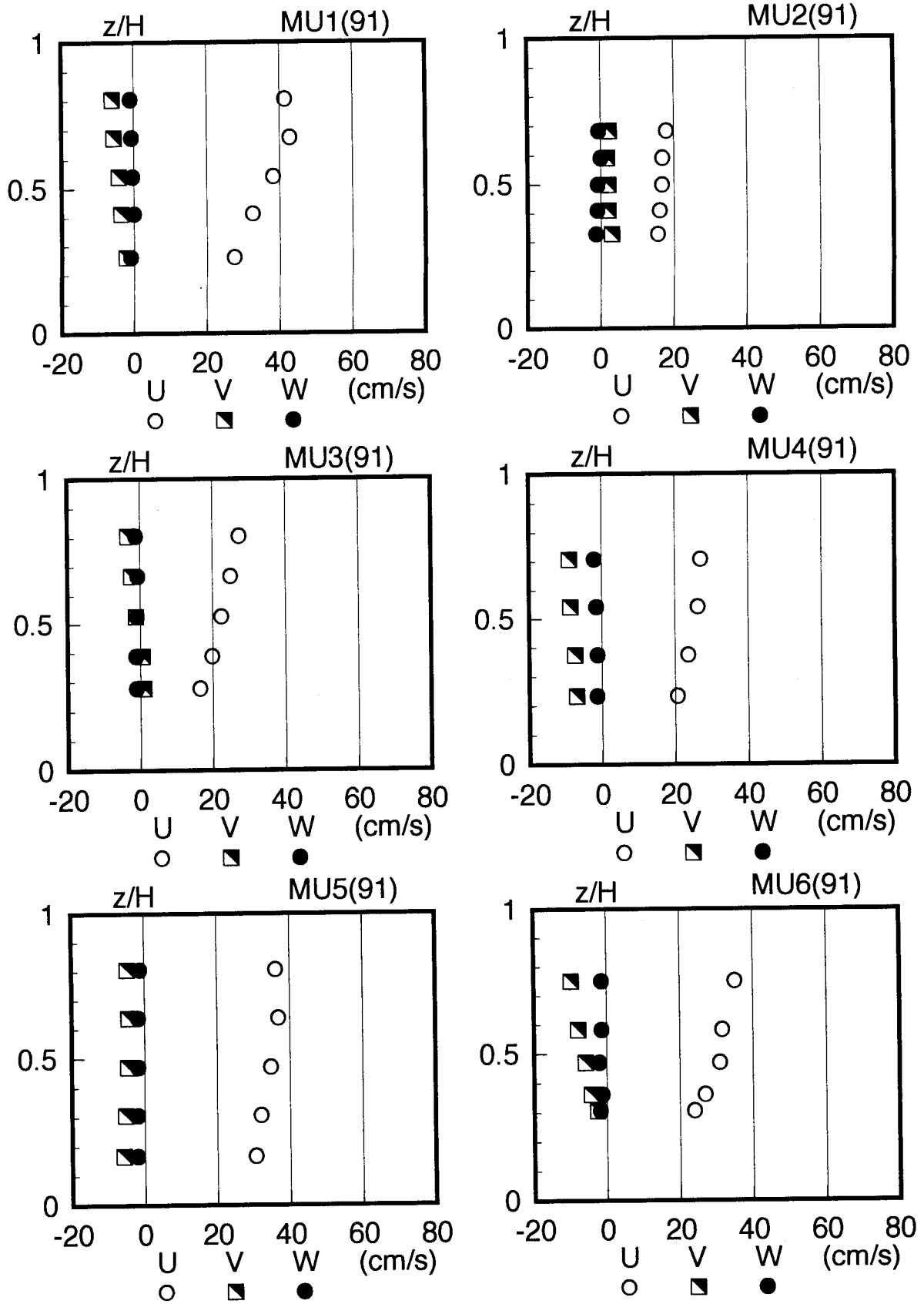


図5-3-1 河川湾曲部の平均流速分布

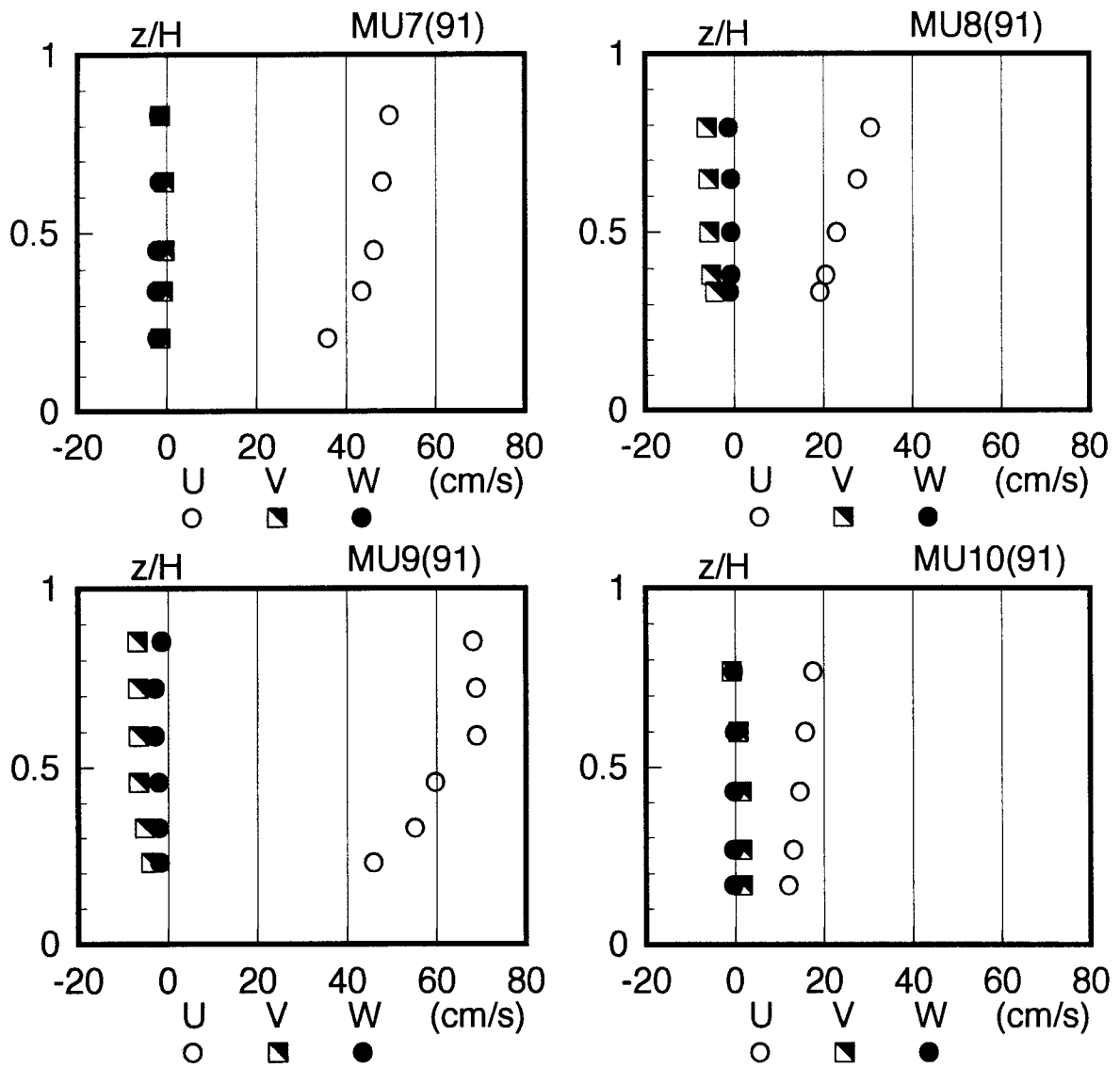


図5-3-2 河川湾曲部の平均流速分布

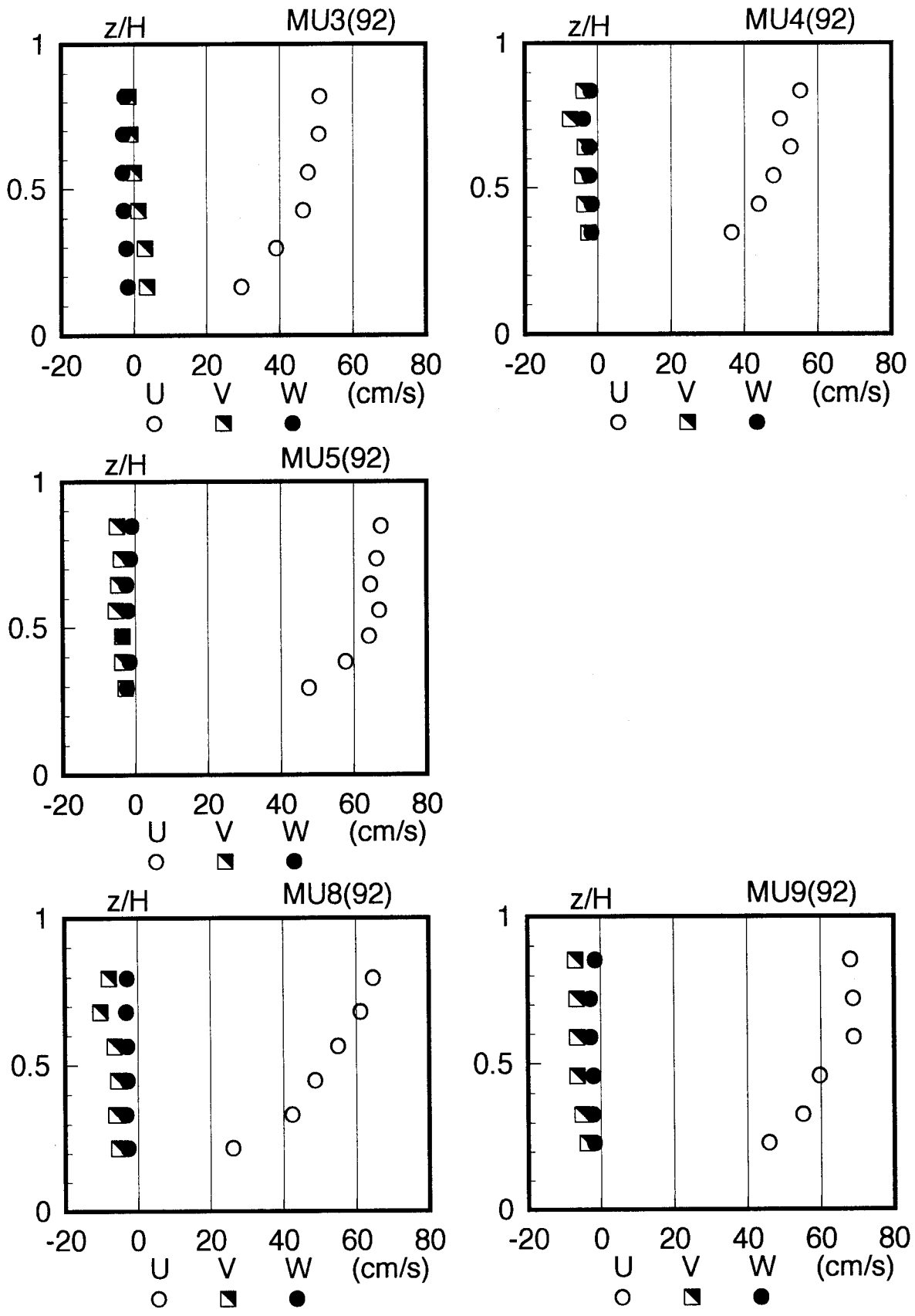


図5-3-3 河川湾曲部の平均流速分布

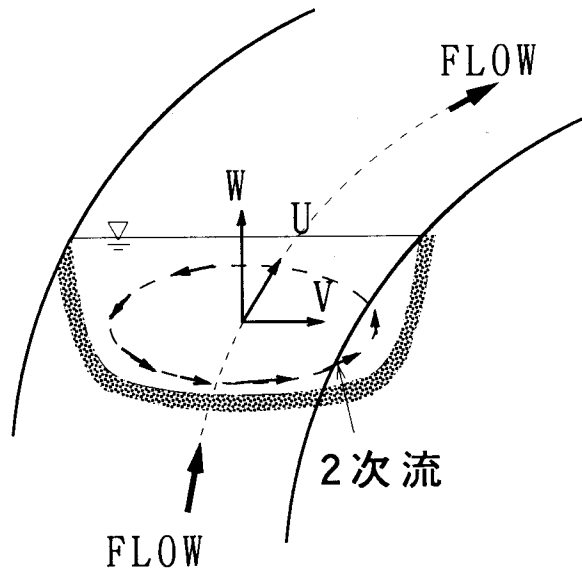


図5-4 2次流の模式図

次に、流速のU成分をレイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_* で無次元化して対数表示したものを図5-5に示す。この図中の実線は粗面流において平均流速分布が対数則を示す時の式(3.6)に相当する直線を示している。この図から、湾曲の始まり部分(MU1, MU6)では $z/H = 0.4 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則が成立していると思われる。このことは、MU1やMU6の測定地点が、まだ、湾曲の始まり部分であるため、第4章の直線部の特性と同様の特性を示すことは十分予測される。しかし、湾曲が進むにつれて、2次流のために、対数分布則が成り立たなくなること示していると思われる。

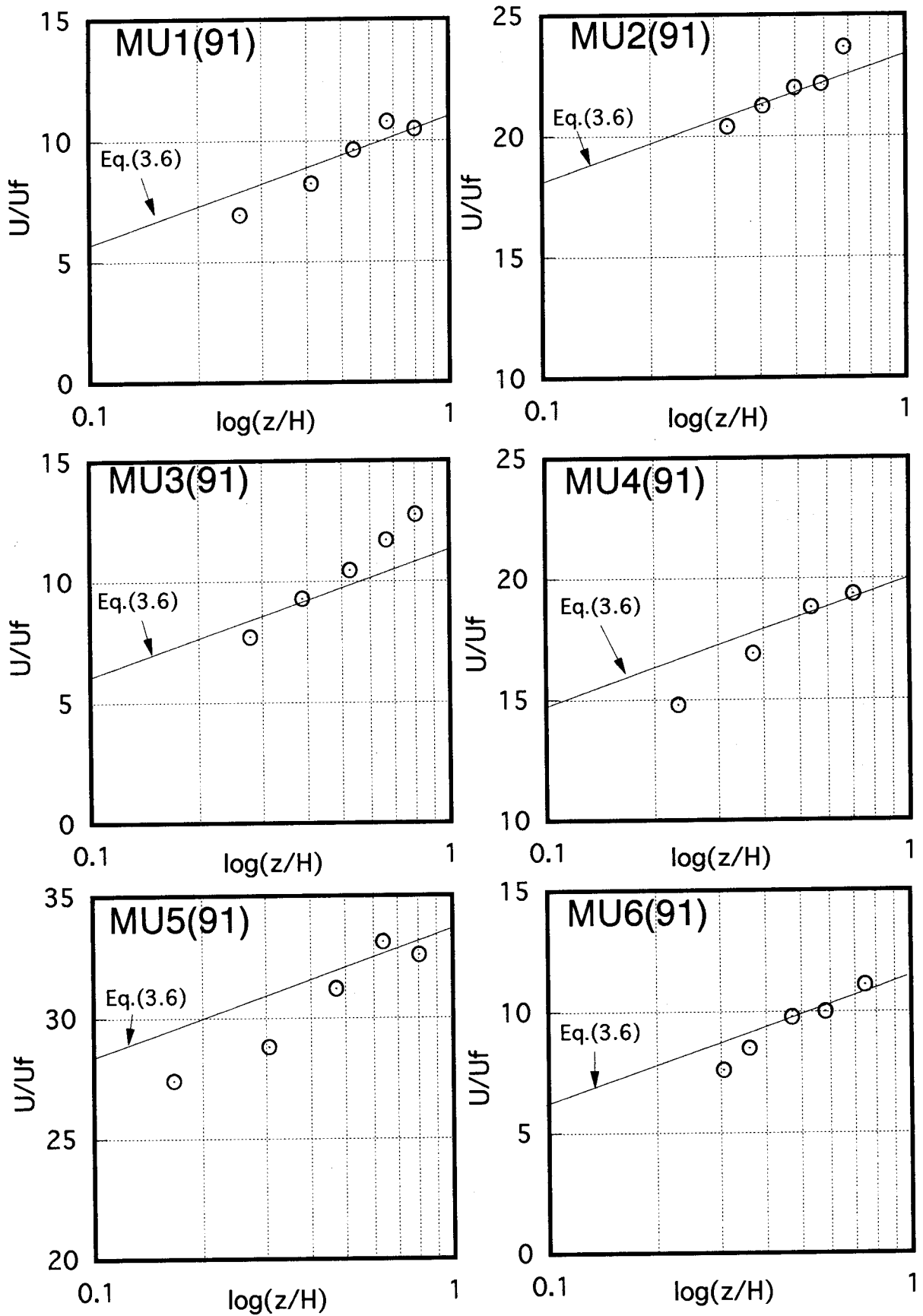


図5-5-1 河川湾曲部の対数則分布

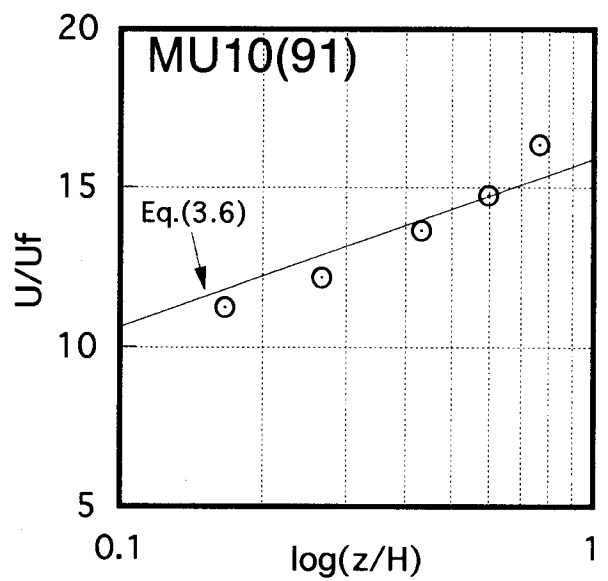
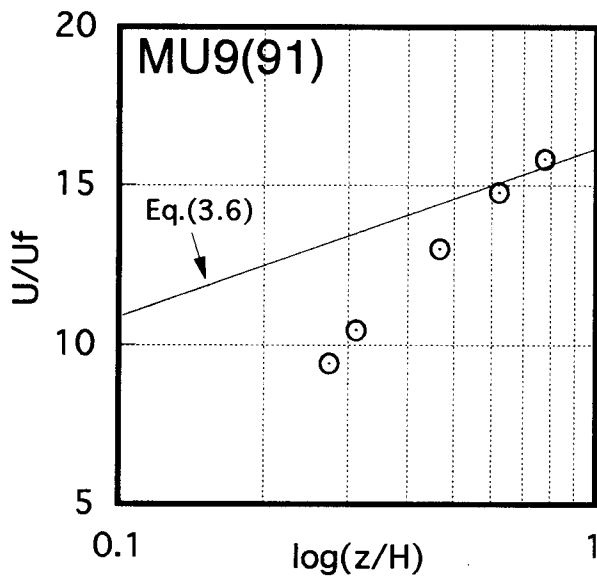
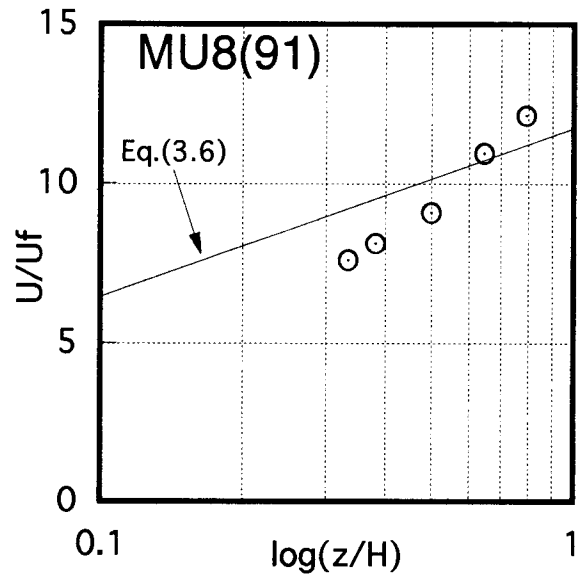
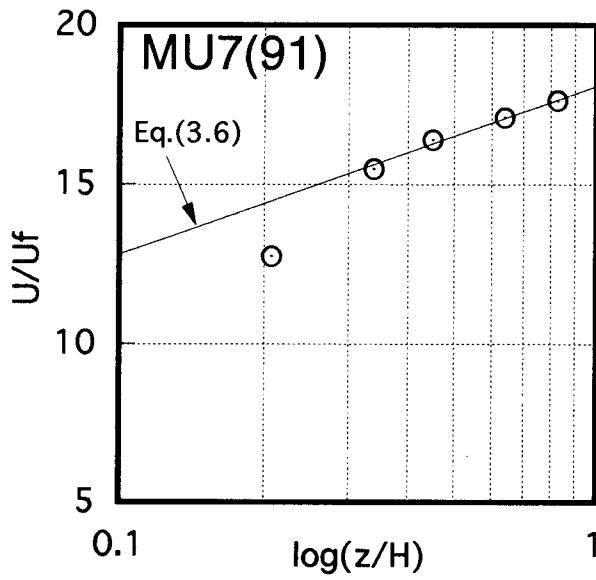


図5-5-2 河川湾曲部の対数則分布

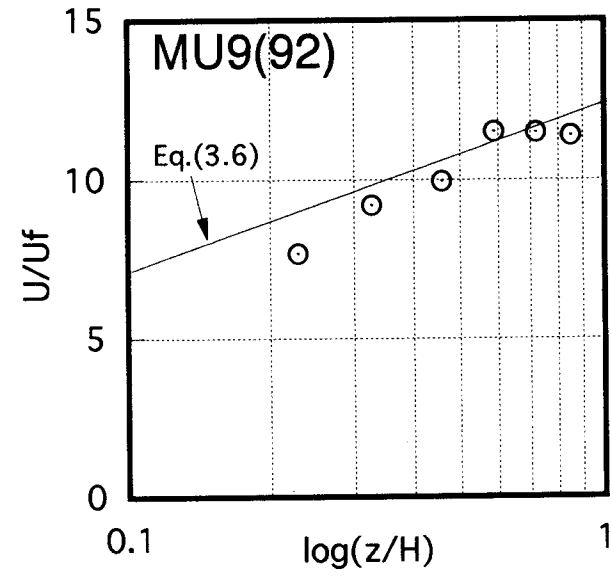
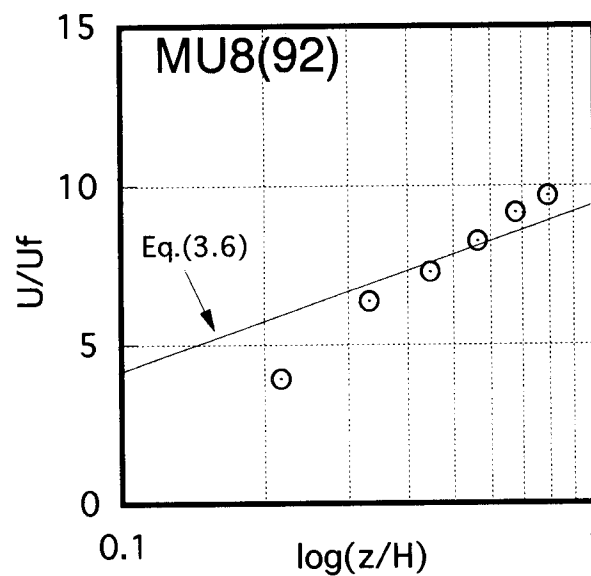
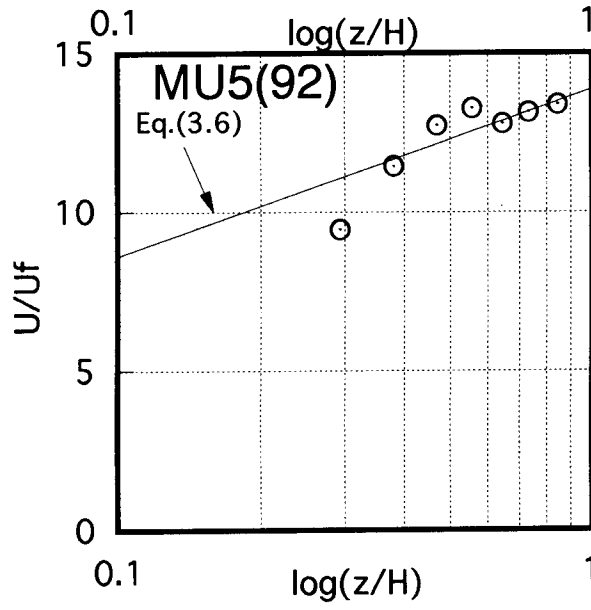
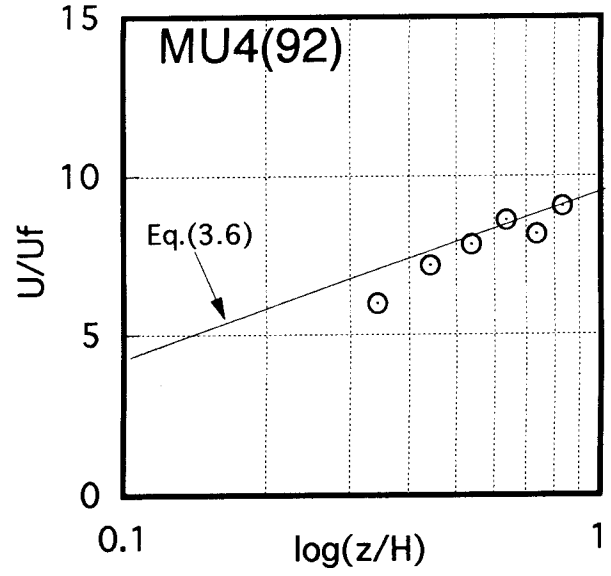
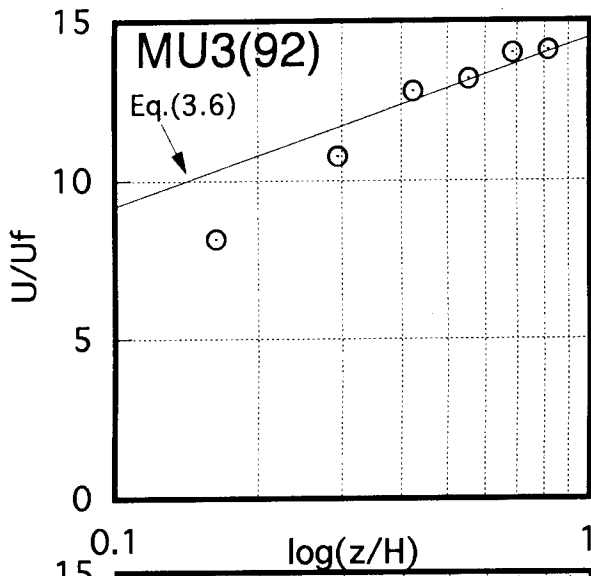


図5-5-3 河川湾曲部の対数則分布

5. 3. 2 2次流の理論曲線と実測値との比較

池田³⁾は河川湾曲部における横断方向に水深が変化する場合の2次流の横断方向流速成分（V成分）を求める式を次式のように提案している。

$$\frac{V}{U} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \frac{H}{R} \frac{1}{\kappa} \left\{ F_A\left(\frac{z}{H}\right) - \frac{1}{\kappa} \frac{U_f}{U} F_B\left(\frac{z}{H}\right) \right\} \quad (5.1)$$

ここで

$$F_A\left(\frac{z}{H}\right) = -15 \left\{ \left(\frac{z}{H}\right)^2 \log\left(\frac{z}{H}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{z}{H}\right) + \frac{15}{54} \right\}$$

$$F_B\left(\frac{z}{H}\right) = \frac{15}{2} \left\{ \left(\frac{z}{H}\right)^2 \log^2\left(\frac{z}{H}\right) - \left(\frac{z}{H}\right)^2 \log\left(\frac{z}{H}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{z}{H}\right)^2 - \frac{19}{54} \right\}$$

なお、一般の河川の場合、カルマン定数は $\kappa = 0.4$ であり、 R は測定点の曲率半径、 R_0 は湾曲河川中心線の曲率半径、 U は流下方向（湾曲部接線方向）の流速、 V は横断方向（湾曲部半径方向）の流速、 U_f は摩擦速度、 z は任意の水深、 H は全水深である。

式（5.1）を用いて、武庫川湾曲部の2次流を計算し、現地測定で得られた実測値との比較を図5-6に示す。図中で示した測点は湾曲角 $\theta = 8.5^\circ$ 、 22.7° 、

39.8° の3断面の6ポイントである。この結果をみると、分布形状は同様であるが、○印で示した実測値と比べて、実線で示した理論値は非常に小さな値となっている。このように理論値とかけ離れた結果となった原因の一つとしては、今回の測定地点が

（5.1）式の適用範囲を越えたものとなっていたのかもしれない。たとえば、曲率半径が大きく（本ケースの場合、河川中央の曲率半径は260mである。）、河川の流れが平水時で流速はそれほど大きくないために、池田の式の想定している横断方向の水深の変化はほとんど見られない状態であることから、式（5.1）の理論曲線との比較は本測定ケースの場合、不適當であった可能性がある。

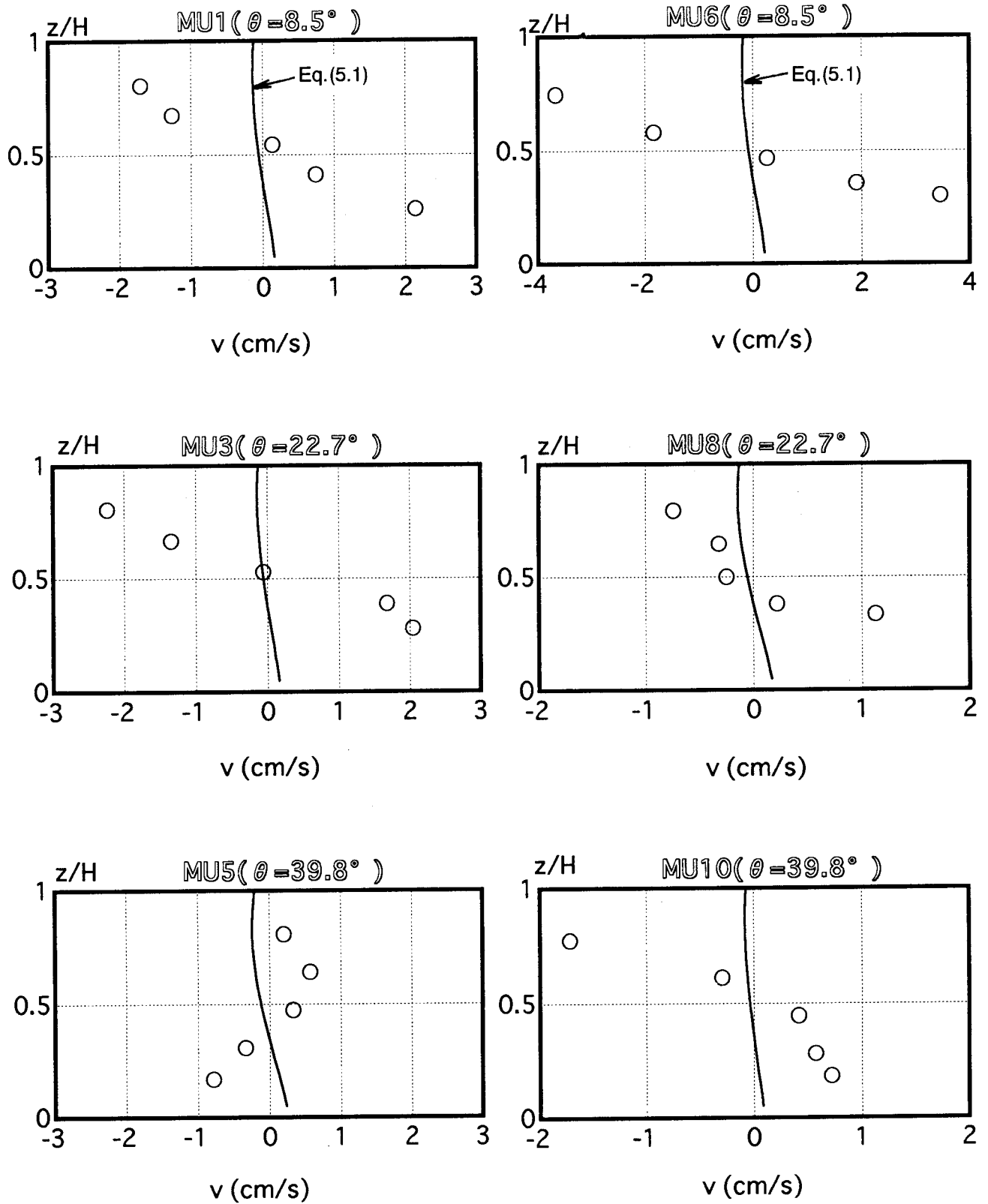
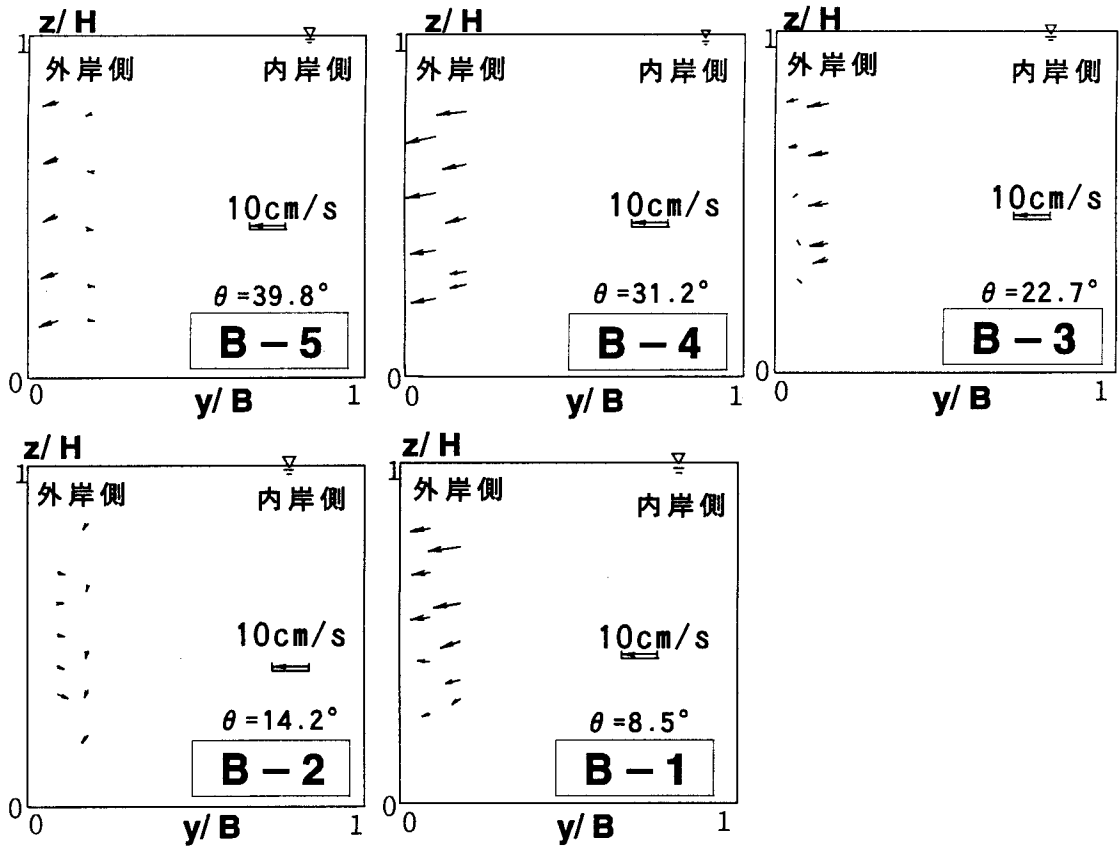


図5-6 2次流の理論曲線と実測値の比較

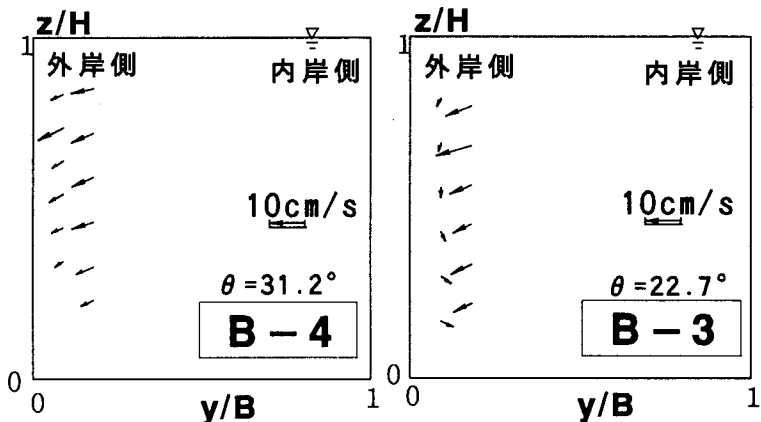
5. 3. 3 2次流ベクトル

左岸から河川中央に向かって2.5 mと5.0 mの地点で測定した各水深の平均流速から求めた各横断面内の2次流ベクトルを図5-7に示す。この図の上側2列には、1991年の断面B-1～B-5のデータを示し、断面B-1からB-5へと向かって流れ進み、湾曲が進んで行く順序に従って各断面の図を並べてある。翌年の1992年の測定時に比べ、水深が小さく、流速の遅い1991年の測定では2次流の大きさは小さいものの、全ての断面において外岸へ向かう流速ベクトルが確認された。そして、図5-7の一番下側には、1992年の断面B-3、B-4のデータについて示している。

両年の断面B-3を見比べると明らかのように、1991年の測定時にはあまりはっきりと確認できなかった外岸付近での下降流の存在がはっきりと確認できる。これらの事実は、図5-4にも示したが、一般に知られているように、湾曲部において外岸側で下降流が生じ、内岸側で上昇流が生じるという流体の挙動から十分予想されることである。一方、石川らの室内湾曲水路で得た実験結果⁴⁾によると2次流強度が湾曲角30°付近でピークをもつという指摘がある。湾曲角の違いによる2次流強度の変化を考えあわせると、この断面B-3で2次流強度が高くなっているために、他の断面に比べて、2次流による下降流がよりはっきりと確認できたと思われる。河川工学的見地からすれば、2次流による側岸付近の下降・上昇流は河床の局所の変動の主要因であるので、湾曲流路のどの断面で2次流強度が最大になるかが重要な問題であると思われる。よって、実験室水路のみならず、実河川の湾曲部においても、湾曲の進展に伴い、そのような2次流強度の変化する特性が確認できたことは意義が深いと考えられる。



(a) 1991年10月 測定



(b) 1992年7月 測定

図5-7 河川湾曲部の2次流ベクトル

5. 3. 4 乱れ強度分布

摩擦速度で無次元化した乱れ強度の鉛直線上の分布を図5-8に示す。図中の曲線は式(3.1)で示される瀬の乱れ強度分布式を示す。この図を断面B-1から順に見ていくと、湾曲の始まりのMU1では各方向成分の分布形状は河川直線部の場合と同様であるが、湾曲が進むにつれて断面B-3のMU3ではU, V成分の乱れ強度の大きさが同程度となり、水面側の乱れ強度の方が大きくなっている。石川らは湾曲水路での実験結果²⁾から2次流強度が湾曲角30°付近でピークをもったのち減少するということを指摘している。このことから、 $\theta = 22.7^\circ$ であるMU3の付近で2次流強度が高くなっているために特異な分布形状を呈したと思われる。

次に、乱れ強度の鉛直線上の分布をu, v, w成分を別々に全ケースのデータをまとめてみると図5-9(a)のようになる。この図との比較のために第4章の河川直線部において得られた測定結果を(b)図に示す。なお、(b)図の場合、河床の粗度係数は $n = 0.015 \sim 0.021$ であり、今回の測定地点の河床の粗度係数と同程度であった。(a), (b)両図を見比べると顕著な相違は見受けられない。この理由として、今回の測定地点が水深に対して曲率半径が大き過ぎるために2次流による影響が強く現れていないことが考えられる。他方、このような整理の仕方をすると、2次流強度の大きい断面が局部的であるため、このように全てのデータをまとめてしまうと2次流の影響がわかりにくくなってしまったとも考えられる。

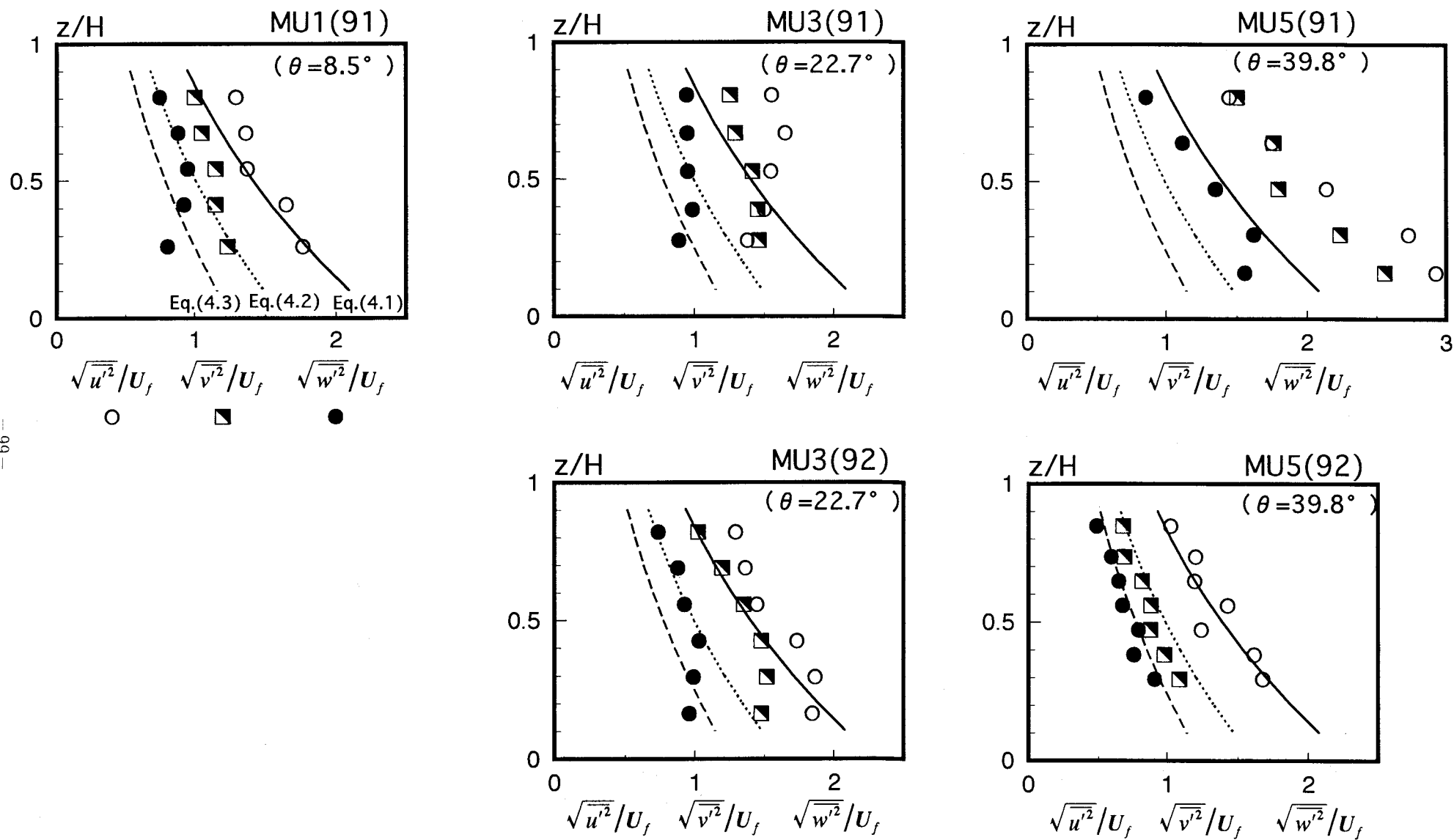
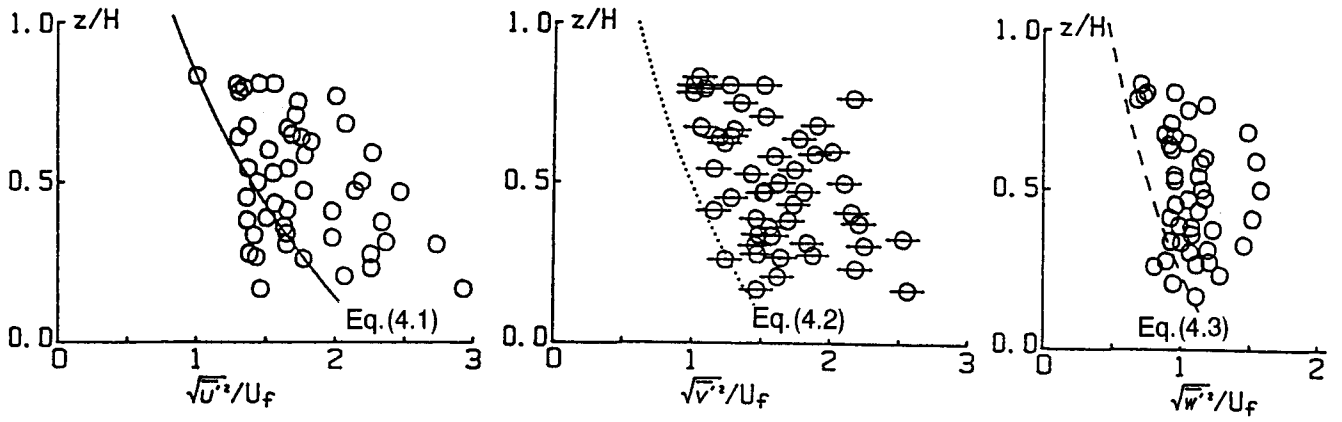
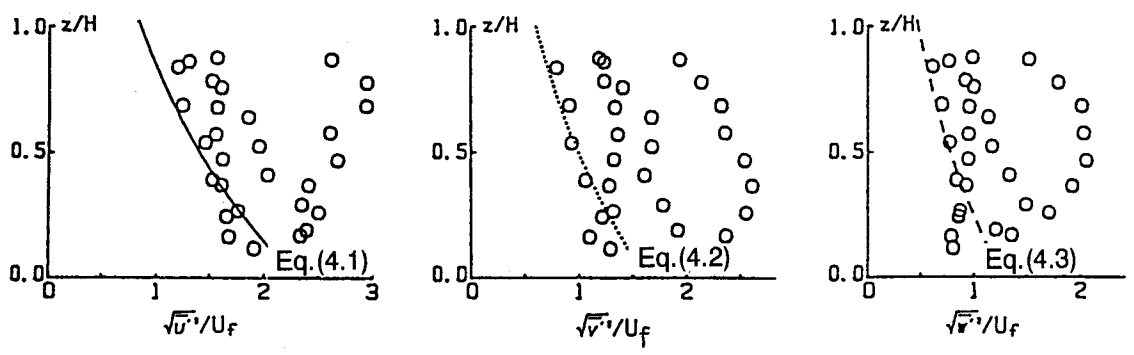


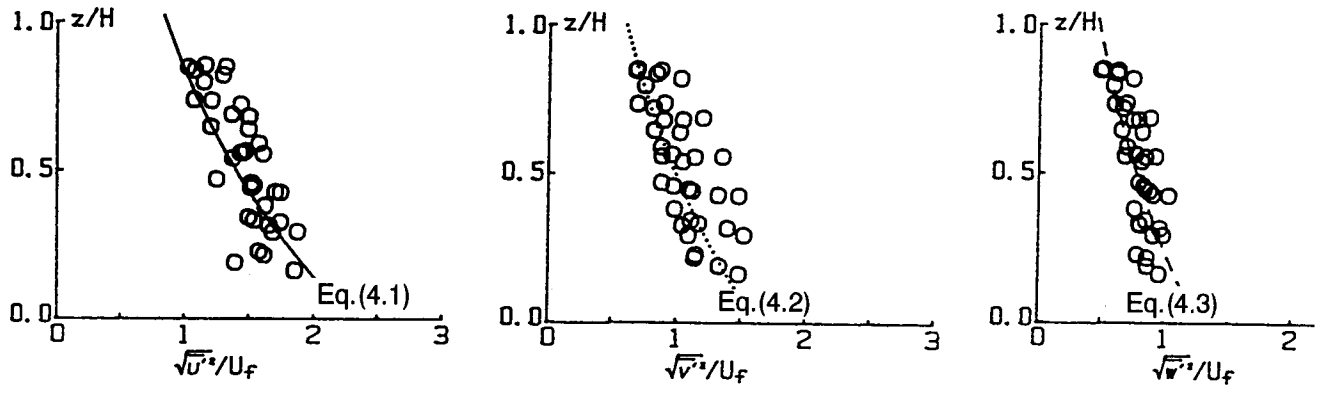
図5-8 河川湾曲部の乱れ強度分布



(a) 河川湾曲部 (1991年10月 測定)



(b) 河川直線部 (粗度: 小, 図4-5(a)を参照)



(a') 河川湾曲部 (1992年7月 測定)

図5-9 河川湾曲部における3方向に分離した乱れ強度分布

5. 4 結 言

実河川の湾曲部における流れの特性を明らかにするために実施した流速の現地測定の結果より以下のことがわかった。

- (1) 流下方向の平均流速分布における対数則分布については、湾曲の始まり部分では河川直線部と同様に対数則は $z/H = 0.4 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則は成立しているが、しかし、湾曲が進むに従い、2次流のために、対数分布則が成り立たなくなる。
- (2) 一般によく知られている湾曲部での2次流の存在が、実河川の湾曲部でも確認され、本測定ケースのように河川の曲率半径が260mと緩やかな場合においても、河川湾曲部の横断面内では外岸側で2次流による下降流が生ずることがわかった。
- (3) 実験室水路において、湾曲の進展に伴い、2次流強度がピークを迎えるという特性が実河川の湾曲部においても確認できた。
- (4) 2次流強度が最大となる湾曲角付近（本ケースでは湾曲角 22.7° 付近）で乱れ強度の鉛直線上の分布形状はU、V成分の乱れ強度の大きさが同程度となるような特異な形状となる。

以上のように実河川の湾曲部での流れの特性が明らかになったが、今回現地観測を実施した地点の曲率半径が大き過ぎたために2次流成分が非常に小さくなり、測定誤差と2次流成分の大きさが同程度になっていた可能性があるため、現地測定を実施する場合、ある程度曲率半径の小さな地点を選定する必要があると思われる。

参考文献

- 1) Rozovskii, J.L.: Flow of Water in Bends of Open Channels, Israel Program for Scientific Translations, p.233, 1961.
- 2) 玉井信行・池内幸司・山崎 晶：連続わん曲水路における流れの実験的研究，土木学会論文報告集，No. 331，pp. 83-94，1983.
- 3) 池田駿介：移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について，土木学会論文報告集，No. 229，p. 59，1974.
- 4) 石川忠晴・金 舜範：湾曲部の2次流に関する基礎的研究，土木学会論文集，第375号／Ⅱ-6，pp. 143-149，1986.

第6章 橋脚後流域における流れ特性

6.1 緒言

前章までに対象にしてきた河川は平面形状こそ異なるが、流れの中になんの障害物も存在しなかった。そこで、河川の流れの中に何らかの構造物が設置された場合の一例として橋脚に注目した。河川中に置かれた橋脚の後流域には一般に橋脚に接近して洗掘が生じてその下流側には堆積が生じると言われている。当然のことながら、このような橋脚後流の流れは3次元的な特性を示していると考えられる。このような橋脚後流域の流れ特性の把握のために、従来より実験室開水路において実施された実験結果^{1) - 6)}が数多く報告されている。しかし、実河川のような複雑な境界条件下の室内実験は到底できないであろう。そこで、実際の河川の橋脚後流域の流れ特性を明らかにするために、河川直線部に橋脚が1本のみ設置された地点の橋脚後流域を対象として、3次元超音波流速計を使用して流速の現地測定を実施した。

6.2 測定方法と水理条件

6.2.1 測定地点の選定

橋脚後流域の現地測定を実施する地点の選定条件の主なものを以下に列記する。

- 1) 第4章と同様に、測定地点の流速が100 cm/sec以下である。
- 2) 50 cm以下の水深であり、橋脚前後において河道は直線状であり、かつ、流路幅が一定でその全体に水流が存在している。
- 3) 橋脚は河川中央に1本のみ設置され、河岸から橋脚までの直線距離が流速計のケーブルの長さ15 mより短い。(今回の測定地点では河岸から橋脚までの直線距離が約13 mである。)

6.2.2 測定方法

測定は1990年5月～10月に図6-1に示すような兵庫県下を流れる武庫川の三

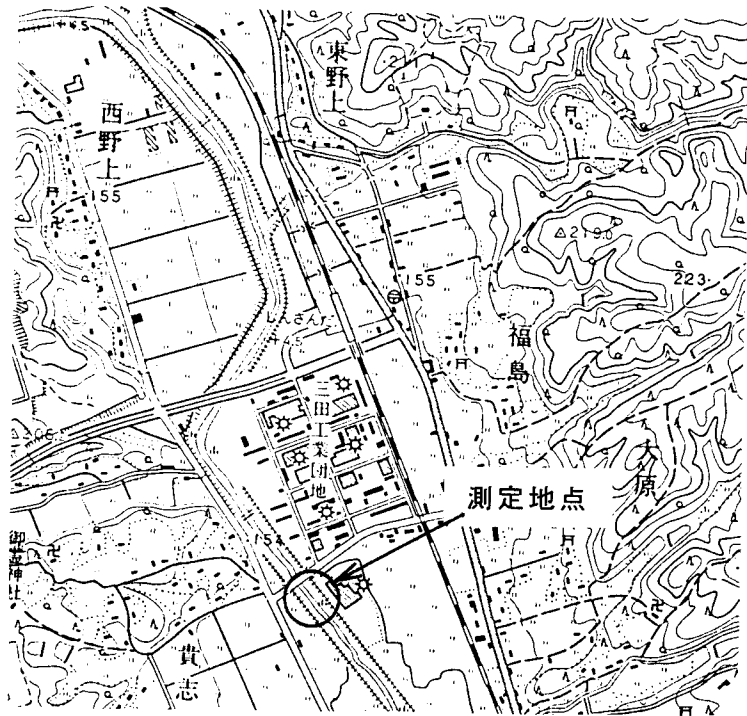


図6-1 橋脚後流域の測定地点

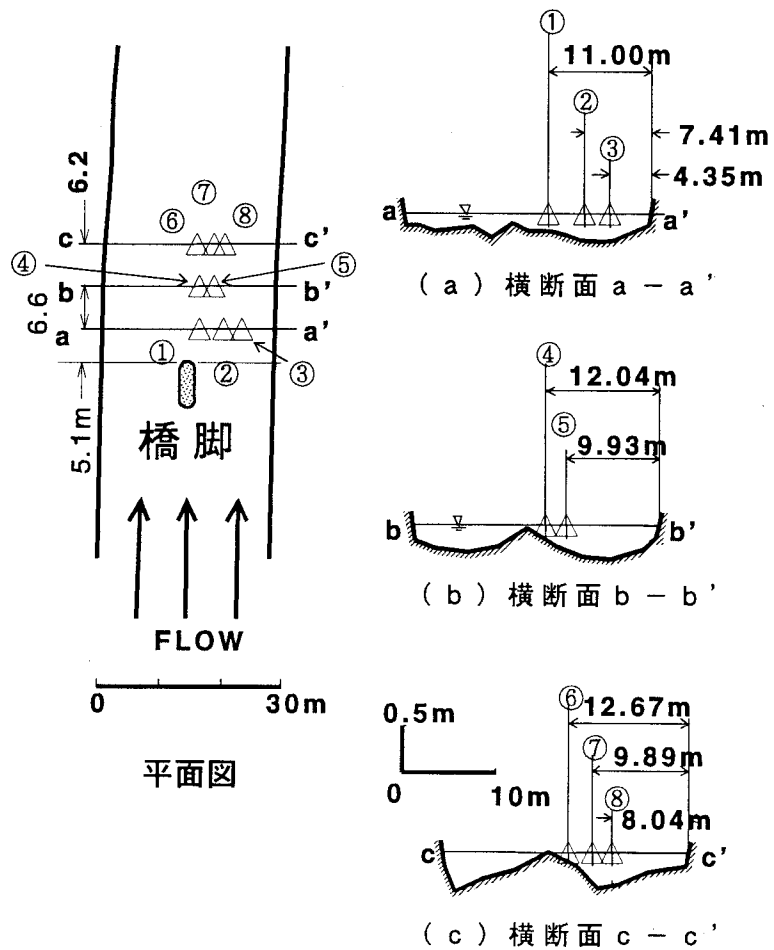


図6-2 橋脚後流域の平面図と横断面図

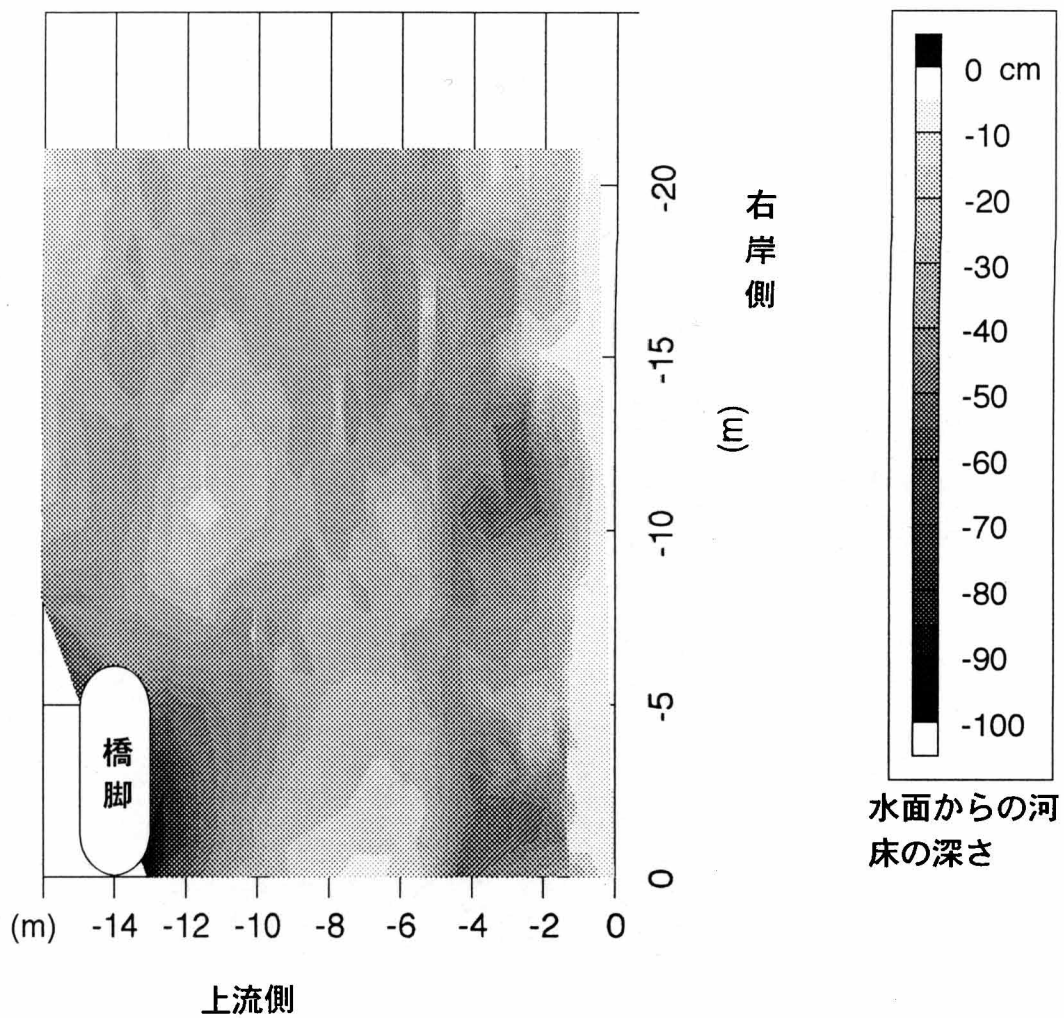
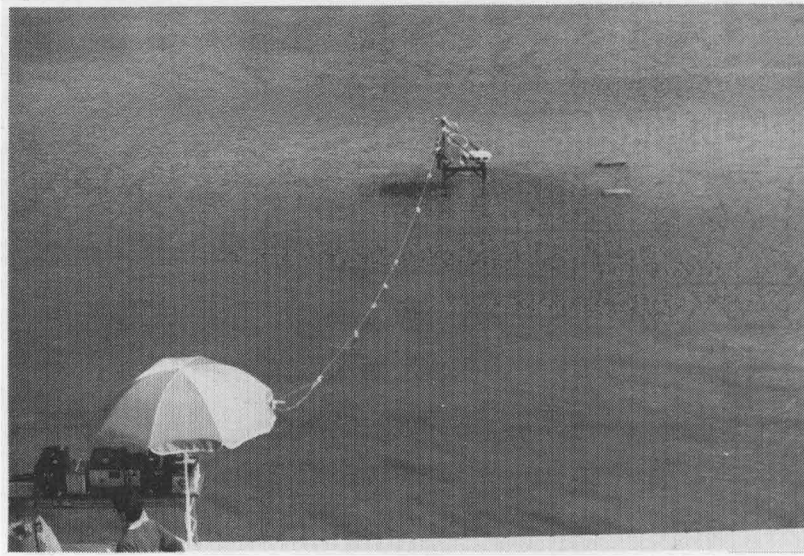


図6-3 河床の等高線図



写真6-1 橋脚後流域の測定風景



(a) 右岸から見た測定風景



(b) 上流から見た測定風景



(c) 河床粗度

写真6-2 橋脚後流域

田市内にかかる瀬戸橋の下流側，3断面，8ポイントで行った．その平面図を図6-2に示す．河道は直線状であり，両岸はコンクリートで護岸され，河川中央に橋脚が設置されている．写真6-1に橋脚付近での測定風景を示す．写真6-2(a)は右岸側から見た流速計の設置状況を示す．

右岸にセオドライトを設置し，河道に対して直角な横断線を見通して数メートル間隔で水深の読みを記録し，同様の作業を橋脚上端付近から下流30mにわたって数メートル間隔の横断面上で実施した．このようにして得られた約500ポイントの水深のデータを用いて，水面を零とした時の河床までの深さの等高線を描いたものを図6-3に示す．なお，この図において塗りつぶしパターンの濃い物ほど水深が深いことを意味している．この図より，橋脚側壁近傍が洗掘され，その下流側に砂が堆積している様子（写真6-2(b)の左端の色の変化している部分）がはっきりとわかる．砂の堆積部分以外の河床状態は写真6-2(c)に示すような直径10～20cmの礫が敷き詰まった状態である．河床の粗度係数は $n = 0.013 \sim 0.022$ である．

水理条件を表6-1にまとめて示す．また，本章におけるサンプリング周波数は100Hzで，データ個数は20480個（評価時間20.48秒）とした．

表6-1 橋脚後流域の水理条件

CASE	水深 H(cm)	流路幅 B(m)	B/H	平均流速 U _m (cm/s)	摩擦速度 U _r (cm/s)	Re ($\times 10^4$)	Fr	測定位置	
								x(m)	y(m)
A 1	27.5	26.1	95	42.1	2.21	11.2	0.26	5.1	2.3
A 2	39.5		66	39.1	3.17	15.4	0.20	5.1	5.7
A 3	45.5		57	40.8	3.57	18.4	0.19	5.1	8.1
A 4	19.5	26.1	134	25.9	2.24	4.6	0.19	11.7	1.7
A 5	34.0		78	33.4	2.41	11.0	0.18	11.7	4.0
A 6	15.8	26.1	165	24.1	1.61	3.6	0.19	17.9	1.5
A 7	39.2		67	41.0	2.19	15.5	0.19	17.9	4.0
A 8	37.5		70	43.8	2.85	15.9	0.21	17.9	5.7

なお， x:橋脚最下端からの流下方向距離， y:橋脚中心からの横断方向距離．

6. 3 測定結果とその考察

6. 3. 1 平均流速分布

局所的な平均流速 U , V , W の鉛直線上の分布を図 6-4-1 ~ 2 に示す. CASE-A 8 の分布形状を見る限り, 第 4 章で述べた河川直線部での結果と同様の分布形状を示しているが, CASE-A 4 のそれは相対水深 $z/H=0.5$ 付近で最大流速を有するような特異な分布形状を示している. このことから, この測定点付近は橋脚の後流の影響が強いのではないと思われる. 今本らの円柱側方を通過する流体は加速され河床近傍から水面までほぼ同程度の流速を持つという実験結果⁶⁾ から A 4 のポイントが上述のような加速域にあったと思われる. 次に, 流速の U 成分をレイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_r で無次元化して対数表示したものを図 6-5-1 ~ 2 に示す. この図中の実線は粗面流において平均流速分布が対数則を示す時の式 (3. 6) に相当する直線を示している. これらの図から, 橋脚後流の影響を強く受けるとされる A 3 ~ A 6 の場合, 対数分布則から外れているが, 橋脚から一番離れた A 7 や A 8 の場合, 通常の直線部での結果と同様, $z/H=0.4 \sim 0.8$ で対数分布則にしたがっていることがわかる. また, 相対水深 $z/H=0.64, 0.5, 0.35$ における A 1 ~ A 8 の流下方向の平均流速 U の分布を図 6-6 に示す. ここで, 横軸の平均流速は橋脚後流の影響のないと思われる測定地点 A 2, A 3, A 7, A 8 の流速の平均値 U_∞ で無次元化している. 図中の曲線は次式のような円柱の二次元後流の流速分布式⁷⁾ を示す.

$$u_w = U_\infty \cdot C_w \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{4} \eta^2\right) \quad (6.1)$$

$$\text{ここに, } \eta = \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu_0 \cdot x}} \cdot y, \quad C_w = \frac{C_D}{4\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{U_\infty \cdot D}{\nu_0}}$$

U_∞ : 橋脚の影響がないと思われる領域 CASE-A 2, A 3, A 7, A 8 の平均流速

C_D : 抵抗係数

D : 物体の幅

ν_0 : 渦動粘性係数

x : 物体からの流下方向の距離

である.

この図で $x/D=8.87$ の断面を見ると, CASE-A 5 の値に対して CASE-A 4 のその値は河床近傍ではほぼ同じ値となり, 相対水深 $z/H=0.5$ より上方ではかなり小さな値を示す. この結果は水面近傍において速度欠損は大きく壁面近傍では小さいという今本らの開水路流れの円柱後流域の実験結果¹⁾ と一致する. また, CASE-A 6 のポイントでは理論値と非常に良い一致をみせた.

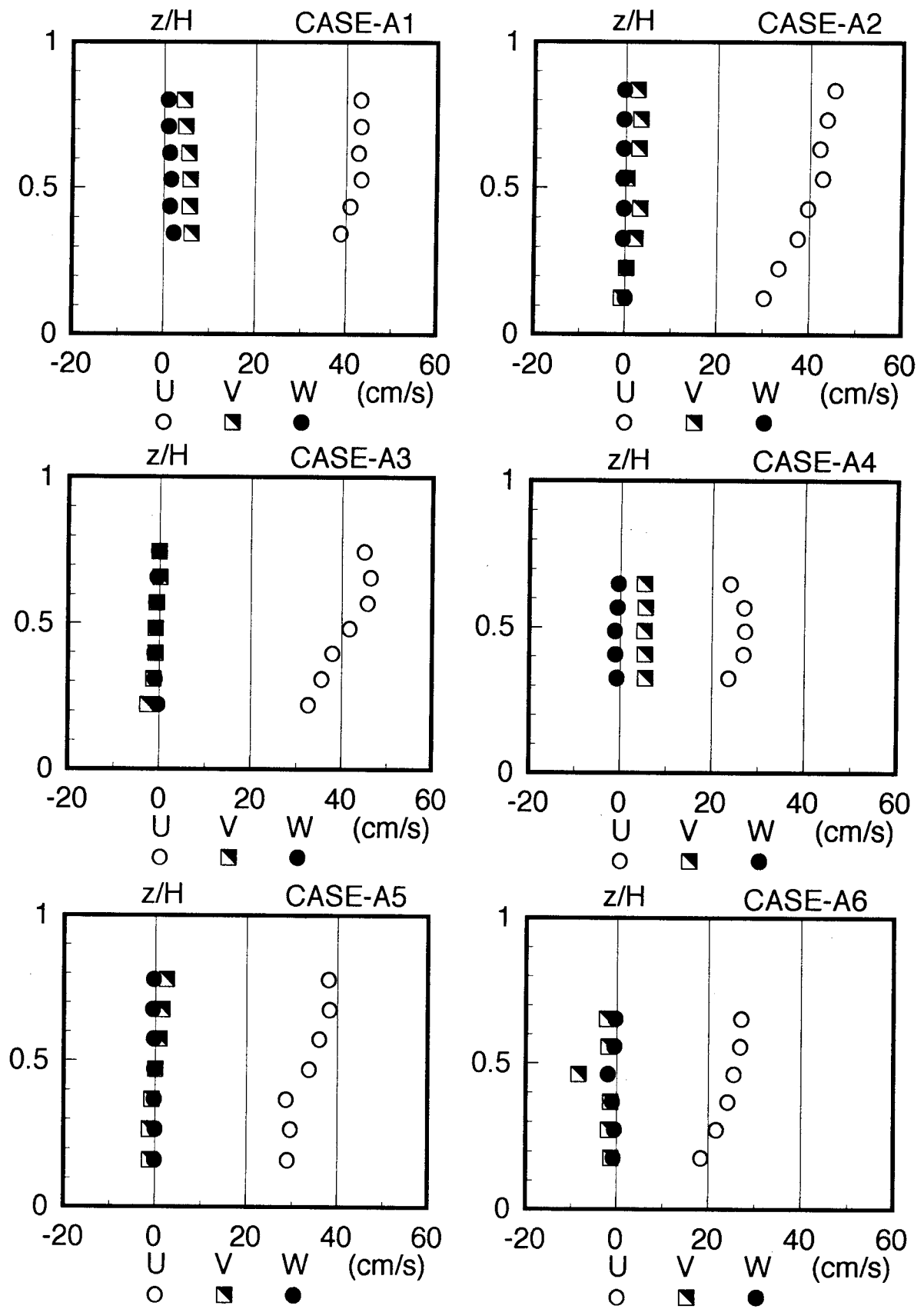


図6-4-1 橋脚後流域の平均流速分布

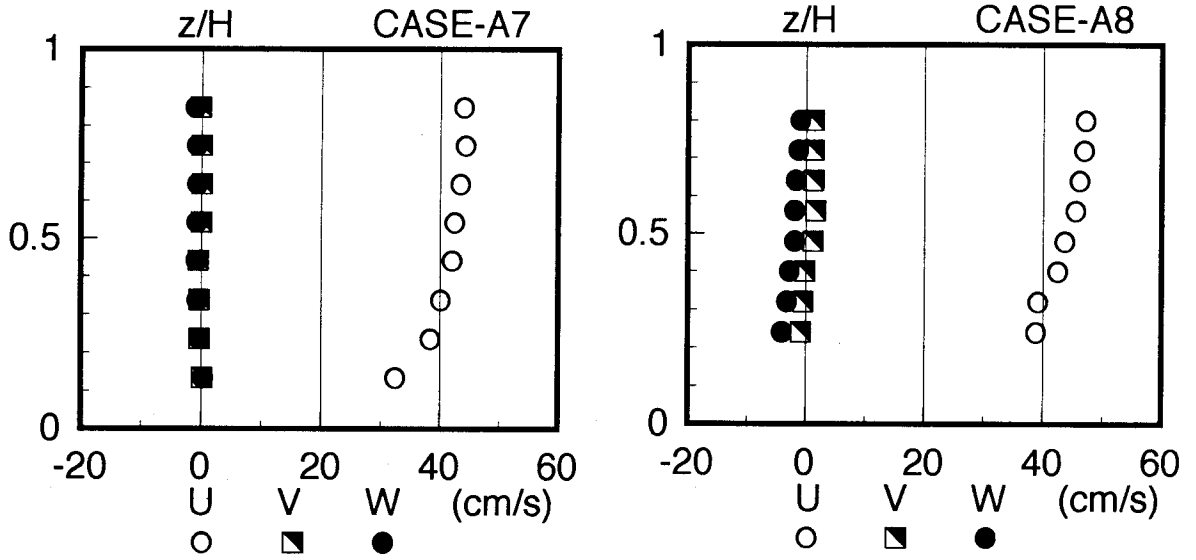


図6-4-2 橋脚後流域の平均流速分布

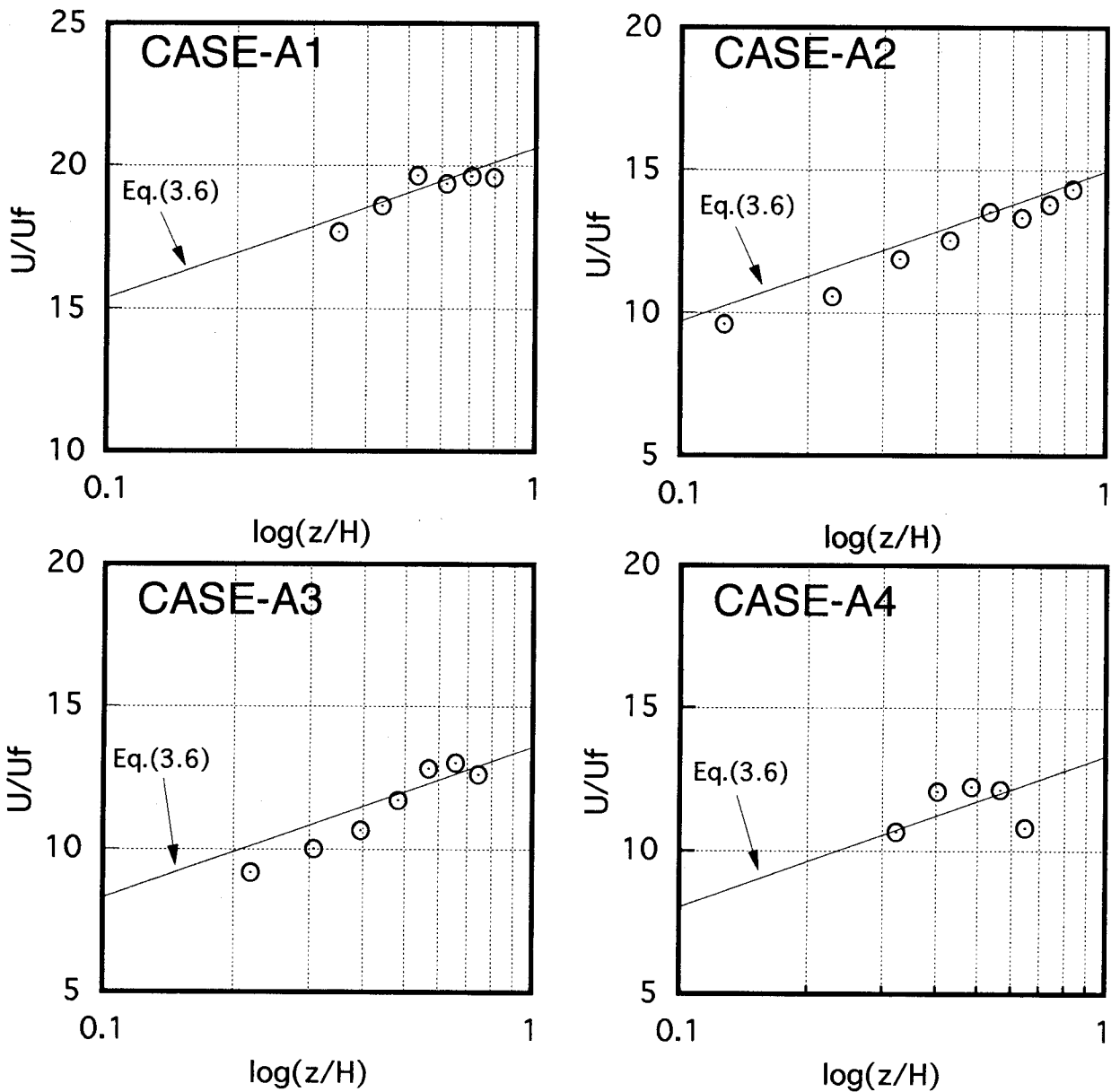


図 6-5-1 橋脚後流域の対数則分布

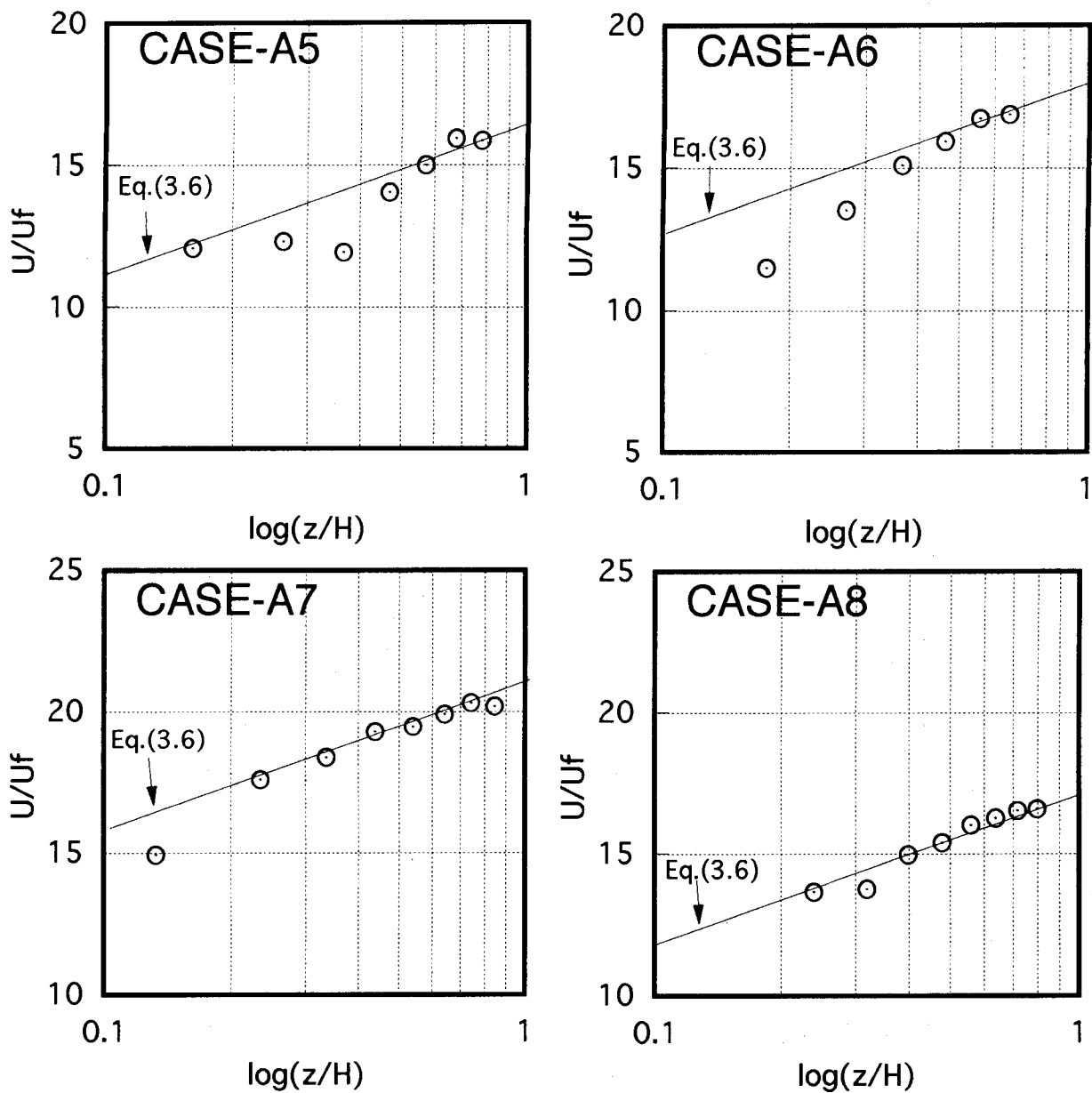


図 6-5-2 橋脚後流域の対数則分布

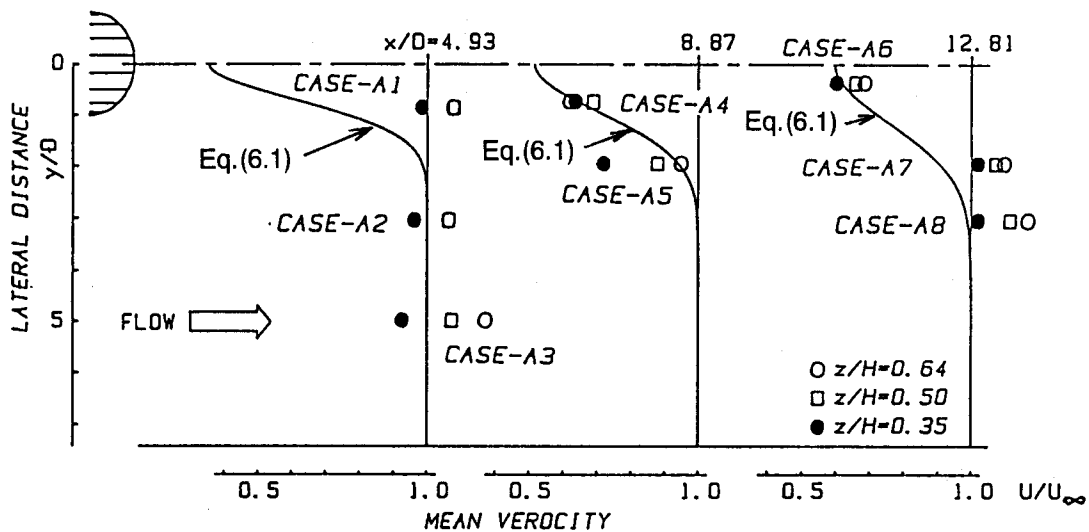


図 6-6 橋脚後流域の流速分布の比較

6. 3. 2 乱れ強度分布

レイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_f で無次元化した乱れ強度の鉛直線上の分布の一例を図6-7に示す。図中の曲線は禰津の乱れ強度分布式を示す。橋脚後流の影響の有無によって分類して示している。(b)図の分布形状は第4章で述べた比較的河床の粗度係数の小さい場合における測定結果と同様の傾向を示している。一方、(a)図の方は乱れ強度の値が流下方向と横断方向の乱れ強度がかなり大きくなっており、橋脚後流の影響が強く現れていると思われる。次に、橋脚後流の影響の有無によって分類した流下方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2} / U_f$ の分布を図6-8に示す。橋脚後流の影響のない(b)図は分布曲線に沿って分布しているが、(a)図の方は分布曲線よりも若干大きめの値となっている。

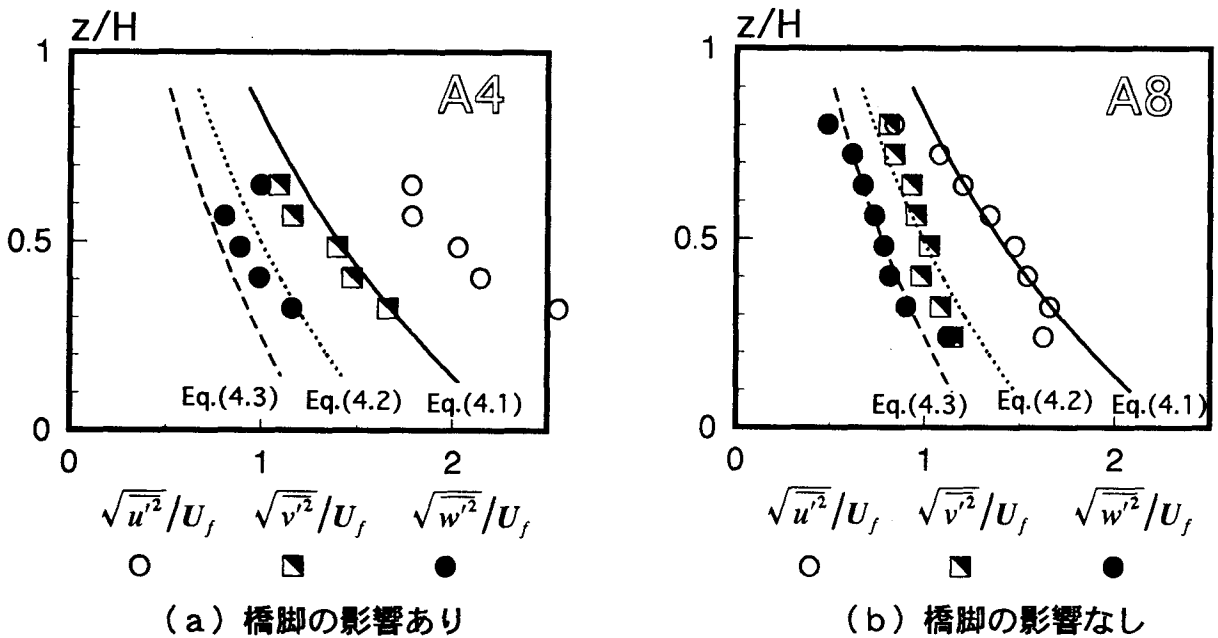


図6-7 橋脚後流域の乱れ強度分布の比較

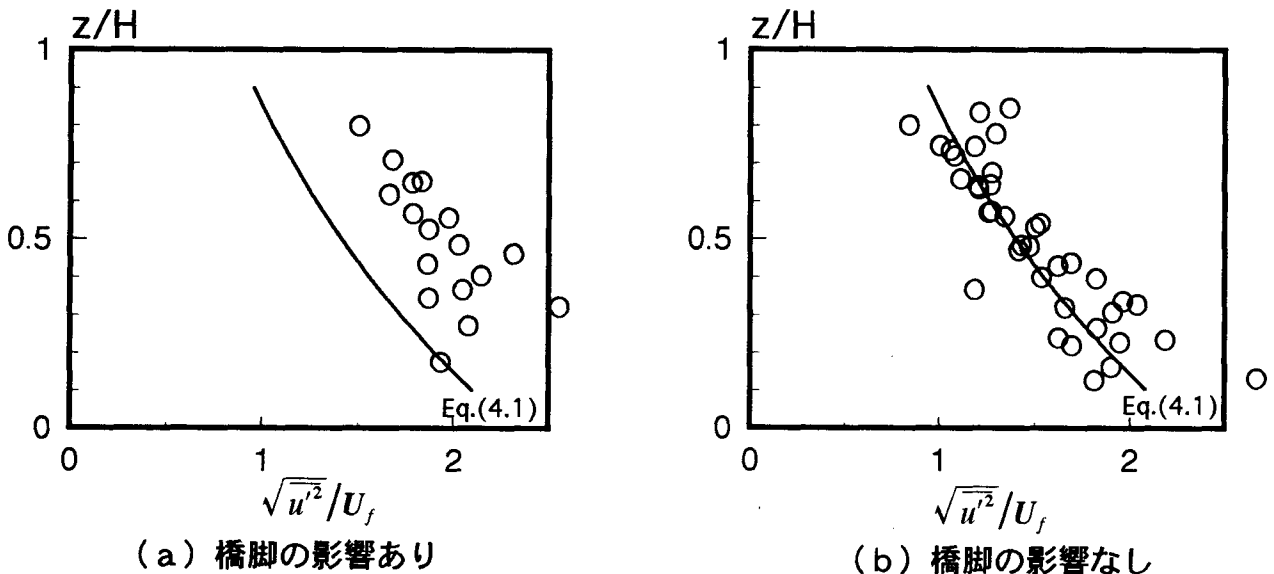


図6-8 橋脚後流域の流下方向の乱れ強度分布

6. 3. 3 レイノルズ応力分布

橋脚後流の影響の有無によって分類したレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_f^2$ の鉛直線上の分布を図6-9に示す。両図を比較してみるとその分布形状には顕著な違いは認められず、今回の数少ない測定データのみからは橋脚後流の影響は明確に確認できない。また、レイノルズ応力の相関係数を図6-10に示す。橋脚後流の影響の有無によって、■印（影響あり）と○印（影響なし）とで分類してプロットした。図中の曲線は $r_r = -\overline{u'w'}/\sqrt{u'^2} \cdot \sqrt{w'^2}$ で定義される理論曲線である。この図から明らかなように、■印のデータは理論曲線よりかなり小さな値となっており、橋脚後流の影響が現れていると思われる。

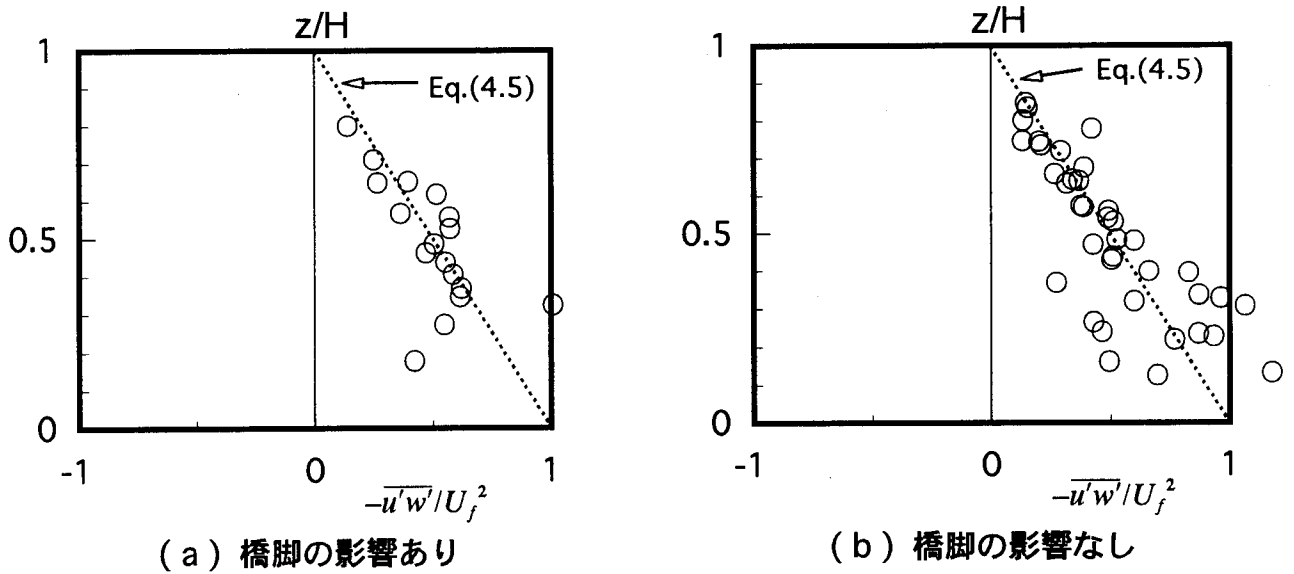


図6-9 橋脚後流域のレイノルズ応力分布 $-\overline{u'w'}/U_f^2$

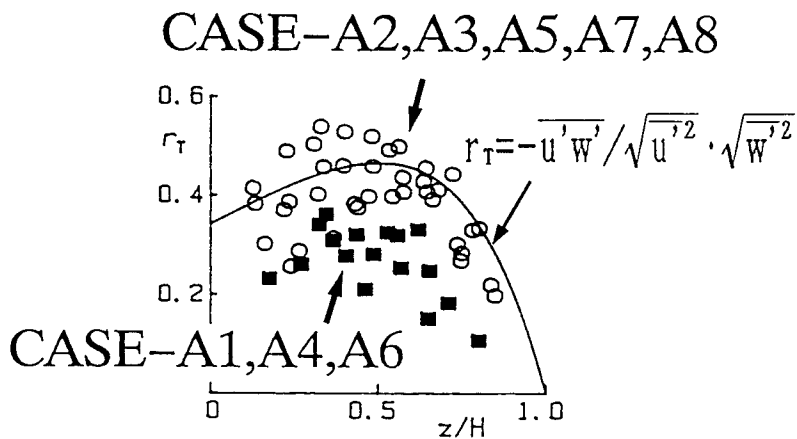


図6-10 橋脚後流域のレイノルズ応力分布の相関係数

6. 3. 4 8象限法による瞬間レイノルズ応力特性

第4章の4. 3. 4では、乱流中の組織的構造の解明する方法の一つとして、流れの定量的データを測定してそれを条件付きサンプリング法によって解析する方法のひとつである $u-w$ 平面4象限区分しきい値法を用いて、乱流中の組織的構造について明らかにした。本節でも同様に橋脚後流域の流れに対して条件付きサンプリング法の適用を試みる。

用いた方法は第4章の4. 3. 4で説明しているが、再度、簡単に述べる。なお、第4章で用いた数式も再度記述しておく。

乱れ速度 u' (流下方向) および w' (鉛直方向) で表される平面を以下に示すような領域に区分する。

第1象限 ($u' > 0, w' > 0$) = outward interaction事象

第2象限 ($u' < 0, w' > 0$) = ejection事象

第3象限 ($u' < 0, w' < 0$) = inward interaction事象

第4象限 ($u' > 0, w' < 0$) = sweep事象

そして、

$$|u'w'| = H'u'w' \quad (4.6)$$

で表されるしきい値 (hole値とも呼ぶ) H' を導入し、 H' の変化に伴うレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ への第1象限～第4象限の事象および hole 事象の5つの各事象からの寄与率 C_i を次式から算定する。

$$C_{i, H'} = \frac{1}{-\overline{u'w'}} \frac{1}{T} \int_0^T u'w' I_{i, H'}(u, w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4.7)$$

ここに、

$$I_{i, H'}(u, w) = \begin{cases} 1, & |u'w'| > H'u'w' \text{ で } (u, w) \text{ が } i \text{ 領域にあるとき } (i=1, 2, 3, 4) \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

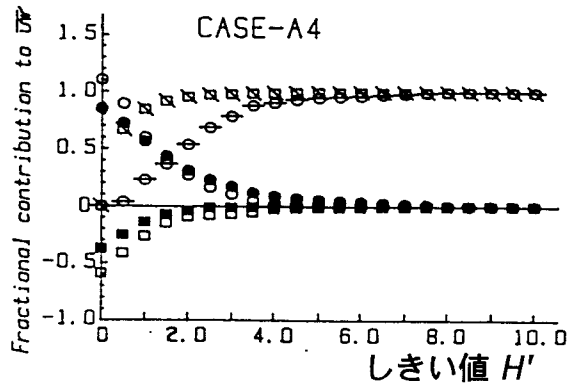
$$I_{5, H'}(u, w) = \begin{cases} 1, & |u'w'| \leq H'u'w' \text{ のとき} \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

また、時間占有率 T_i は、次式から算定する。

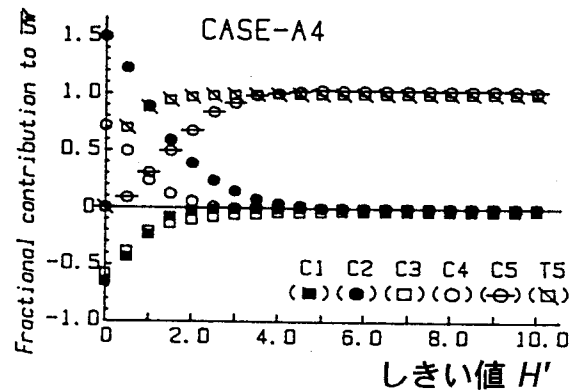
$$T_{i, H'} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{i, H'}(u, w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4.8)$$

第4章の場合は対象とする河川は直線部であることから、流れの3次元性はあまり強くない考えられるが、本研究のような橋脚後流域での流れでは流れの3次元性が強いと考えられるので、4象限法を拡張して v' の正負を考慮した $u-v-w$ 空間8象限区分しきい値法を用いて乱流中の組織的構造を探ることを試みる。8象限区分しきい値法は $u-v-w$ 空間の第1象限～第4象限の事象およびhole事象の5つの各事象に対して v' の正負を考慮して10個の事象に区分し、第4章で述べた式(4.6)～(4.8)と同様の方法で寄与率および時間占有率を算定するものである。各事象の $-\overline{u'w'}$ に対する寄与率およびhole事象の時間占有率の一例(CASE-A4)を図6-11に示す。 $v' > 0$ の領域の相対水深 $z/H=0.648$ で、河川直線部の水面付近での結果で示されているのと同様に、 $H' = 2.0$ より大きな領域では $C_2 > C_4$ の関係があるが、 $H' = 0.0$ に近づくにしたがい、その大小関係が逆転している。 H' が大きい領域では C_2 のejection事象による寄与が強いが、 H' が小さくなるにつれて C_4 のsweep事象が卓越してくることが確認された。河床付近では河川直線部の結果と同様に $C_2 < C_4$ の関係が成り立っている。次に、 $v' < 0$ の領域では、どの相対水深においても C_2 のejection事象が卓越し、しきい値 H' が変化してもこの関係に変化がないことがわかった。

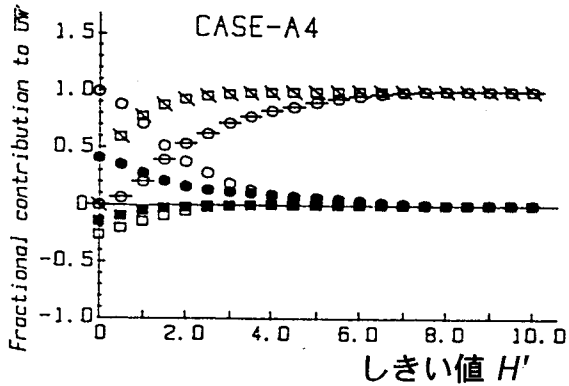
なお、第4章の4.3.4でも述べたように、本節でのデータ処理においてアナログデータのA/D変換時のサンプリング周波数は100Hzを採用した。ところが、前節までの乱れ強度やレイノルズ応力のような時間平均化された乱れ特性量について検討する場合にはそのサンプリング周波数の違いによる乱れの分布特性の評価に影響がないかもしれないが、本節の乱れ速度のような採用するサンプリング周波数によってその値の評価が大きく異なる可能性があるので、本節の議論はサンプリング周波数100Hzの場合に限って検討したので、サンプリング周波数が異なる場合の検討は今後の検討課題である。



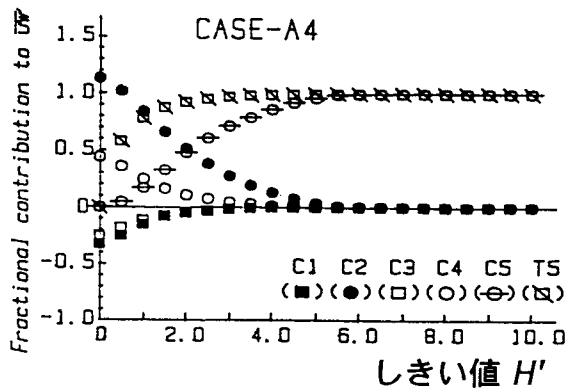
(a) $v' > 0$ ($z/H=0.648$)



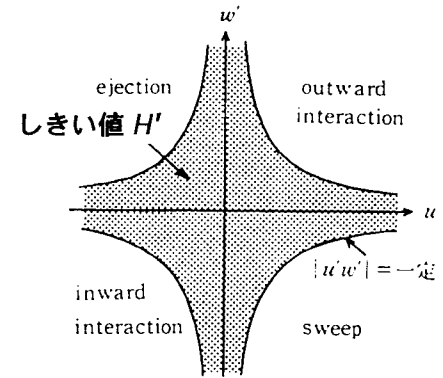
(c) $v' < 0$ ($z/H=0.648$)



(b) $v' > 0$ ($z/H=0.324$)



(d) $v' < 0$ ($z/H=0.324$)

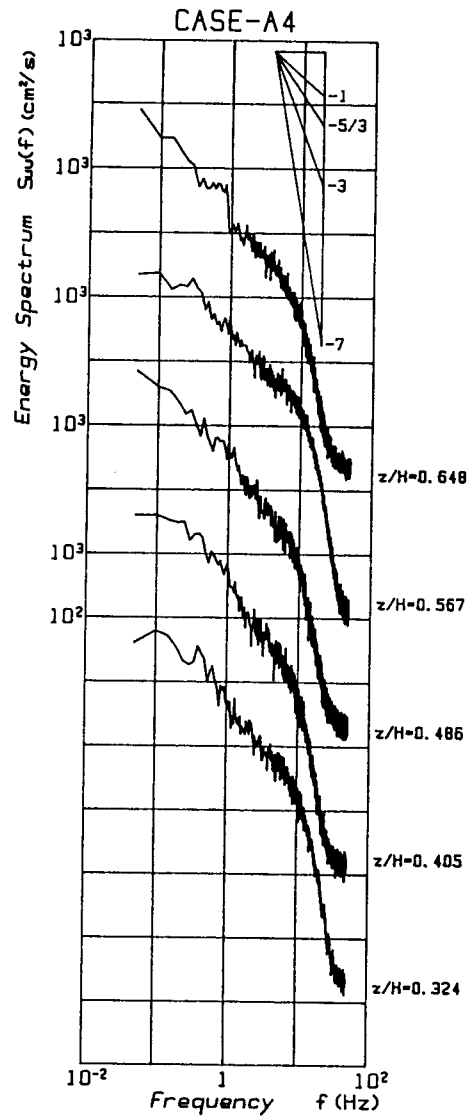


4つの事象区分と
しきい値の表現

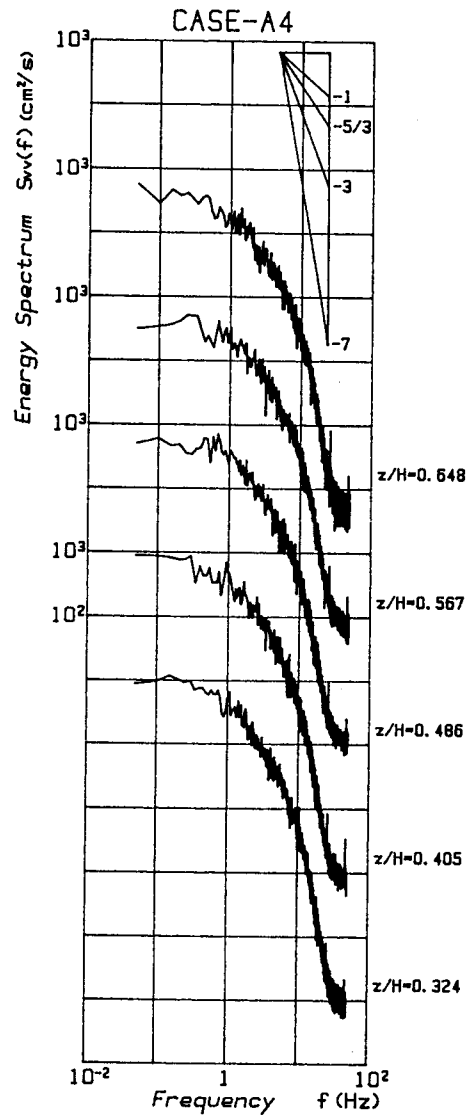
図6-11 橋脚後流域の8象限区分しきい値法によるレイノルズ応力特性

6. 3. 5 エネルギー・スペクトル

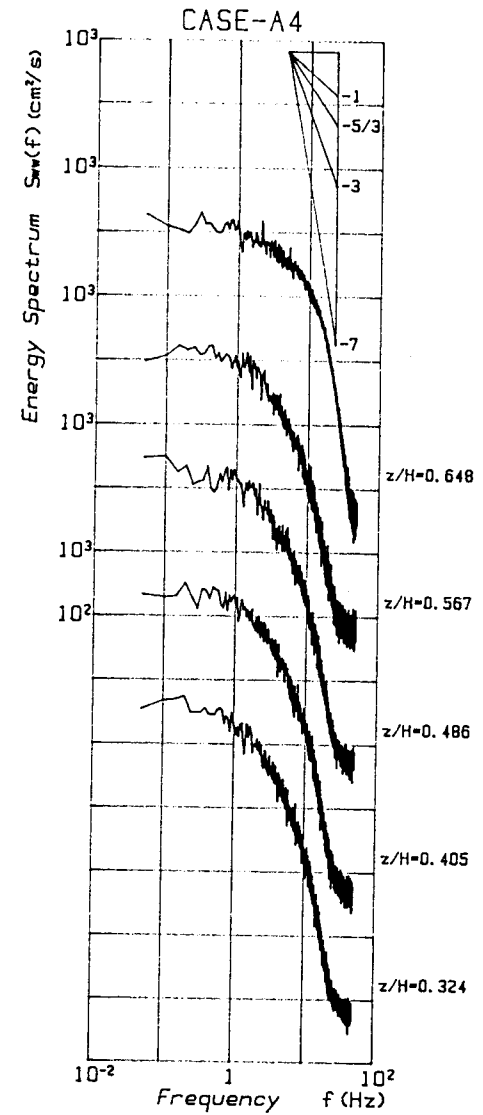
アナログデータをローパスフィルターを使って50 Hz以上の高周波数成分を除いてA/D変換した20480個のデータの中の前部の16384個を用いてパソコンを使い、FFT法により求めたスペクトルを三角フィルターにより平滑化（平滑化項数8項）してエネルギー・スペクトルを求めた。橋脚後流の影響があると思われるCASE-A4の3方向のエネルギー・スペクトルの鉛直方向の分布を図6-12に示す。そして、橋脚後流の影響のないと思われるCASE-A8のエネルギー・スペクトルの鉛直方向の分布を図6-13-1～2に示す。なお、これらの図では、横軸に周波数の対数を取り、縦軸にエネルギー・スペクトルの対数をとっている。図6-13-1は相対水深 $z/H=0.5$ より上の部分のエネルギー・スペクトルを示し、図6-13-2は相対水深 $z/H=0.5$ より下の部分のエネルギー・スペクトルを示している。両図を見比べると、エネルギー・スペクトルの大きさはCASE-A4の方が僅かに大きいものの、4.3.5の河川直線部で得られた結果同様に、エネルギー・スペクトルは0.5 Hzから5 Hzまで $-5/3$ の傾きを持つ慣性領域と、5 Hzから15 Hzまで $-3 \sim -13/3$ の傾きを持つ粘性領域の存在が認められる。よって、橋脚後流の影響によるエネルギー・スペクトルの分布特性の違いは確認できなかった。



(a) S_{uu}



(b) S_{vv}



(c) S_{ww}

図6-12 橋脚後流域のエネルギー・スペクトル (橋脚の影響あり)

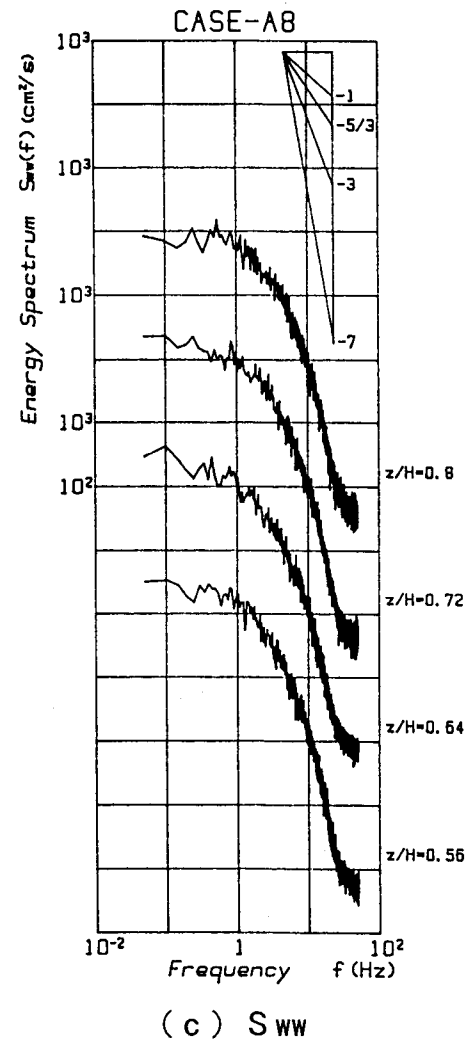
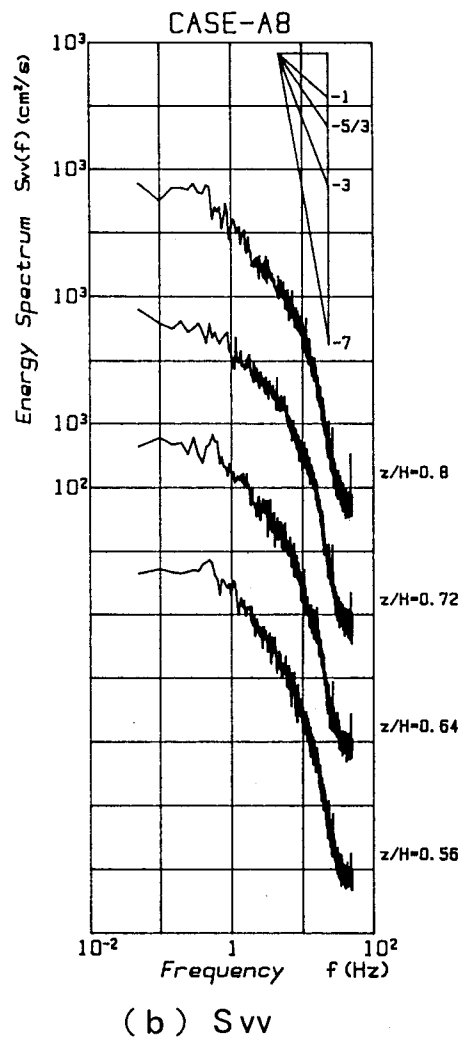
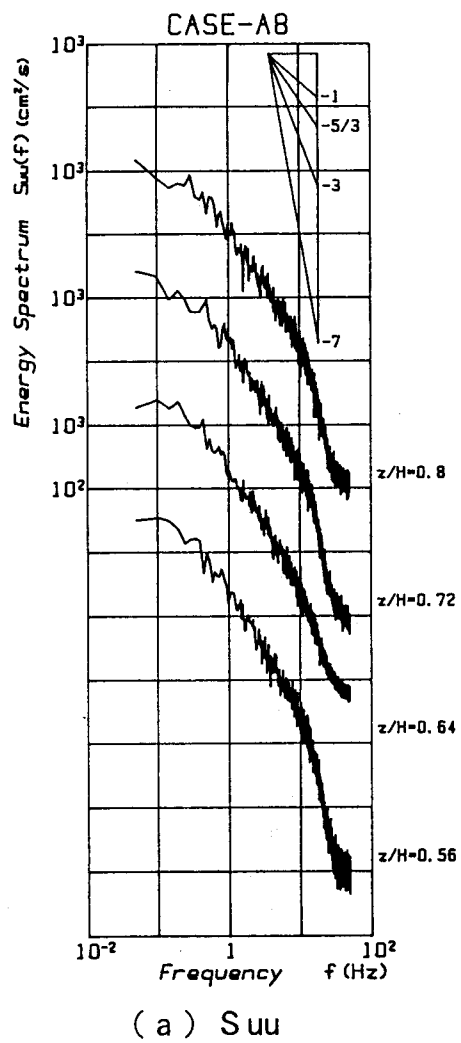
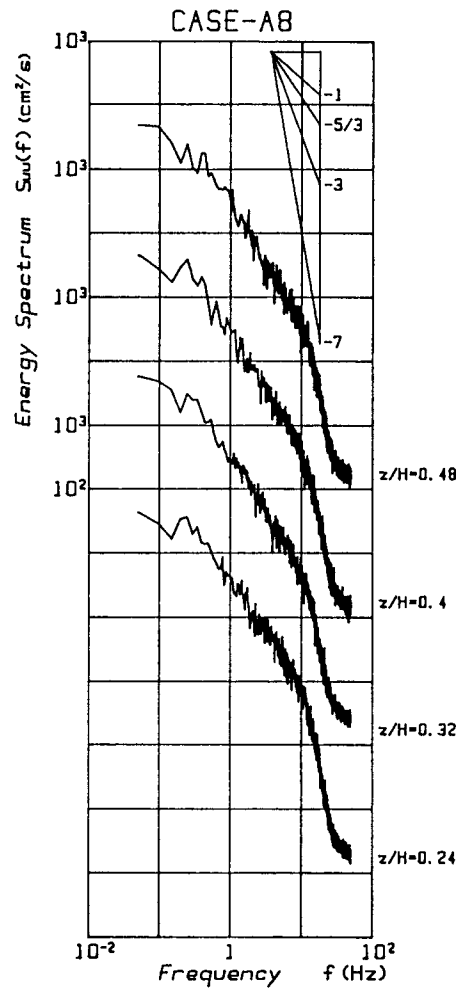
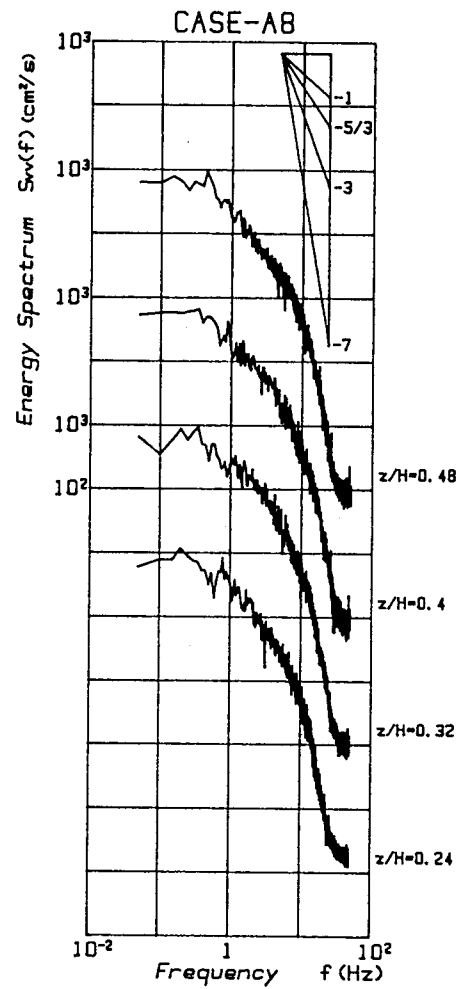


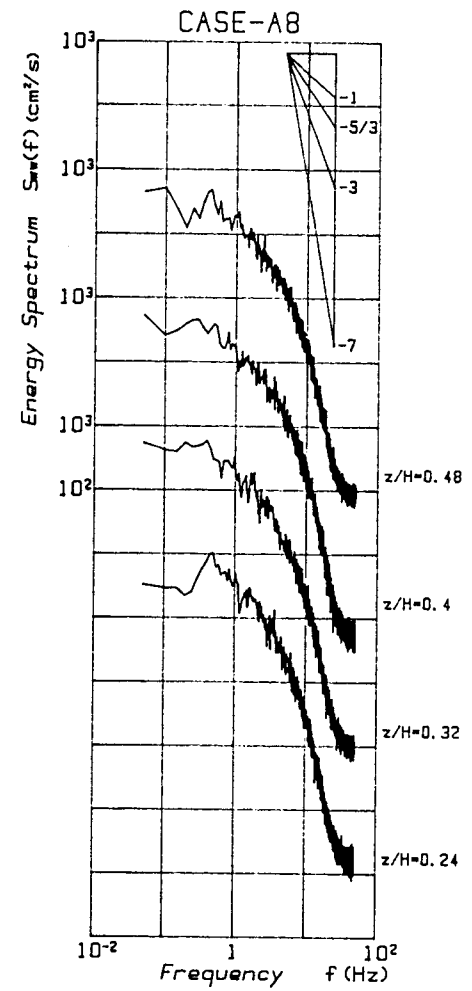
図6-13-1 橋脚後流域のエネルギー・スペクトル (橋脚の影響なし, $z/H > 0.5$ の場合)



(a) S_{uu}



(b) S_{vv}



(c) S_{ww}

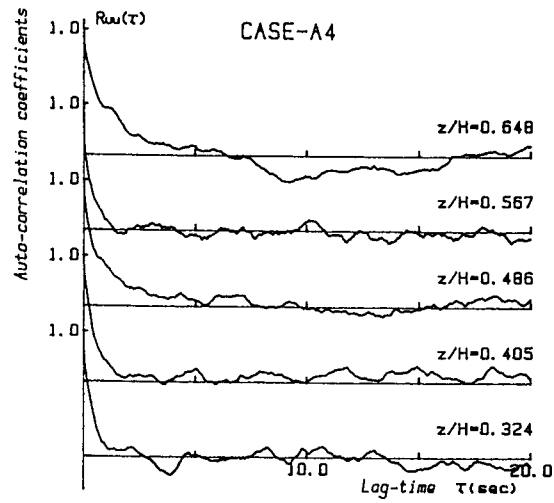
図6-13-2 橋脚後流域のエネルギー・スペクトル (橋脚の影響なし, $z/H < 0.5$ の場合)

6. 3. 6 自己相関係数

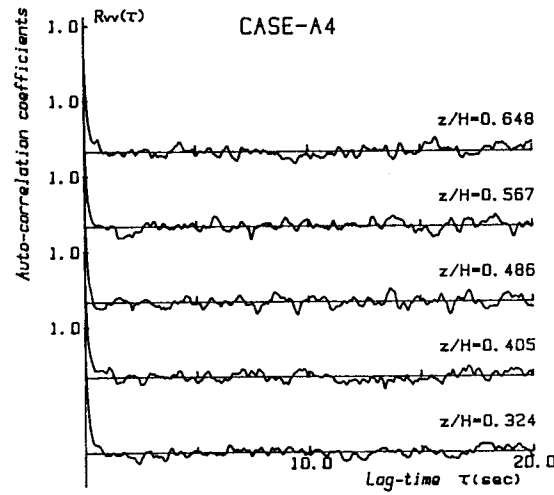
アナログデータをローパスフィルターを使って50 Hz以上の高周波数成分を除いてA/D変換した20480個のデータの中の前部の16384個を用いてパソコンを使い、自己相関係数の鉛直方向の分布を求めた。CASE-A4とCASE-A8の水深方向の各点の3方向成分、 $R_{uu}(\tau)$ 、 $R_{vv}(\tau)$ 、 $R_{ww}(\tau)$ の自己相関係数を図6-14と図6-15にそれぞれ示す。

実験室水路などで通常観察される自己相関係数の変動波形はラグが大きくなるにつれて指数関数的に自己相関係数は減衰するはずであるが、河川直線部の場合と同様に、どの方向の自己相関係数も周期的な変動波形が見られる。 $R_{uu}(\tau)$ で見ると橋脚後流の影響のないと思われるCASE-A8で4～5秒の周期で変動を繰り返している。河川直線部の市川の場合、2～3秒の周期で変動を繰り返していたので、A8の流れは市川に比べ緩やかな流れであることがわかる。横断方向の R_{vv} と鉛直方向の R_{ww} の値の減少度合いは R_{uu} のそれに比べて急激に減少している。そして、変動周期は R_{uu} のそれに比べ、かなり小さなものとなっている。一方、橋脚後流の影響を受けていると思われるCASE-A4の場合でも、河川直線部の場合と同様に、どの方向の自己相関係数も周期的な変動波形が見られる。その変動周期はCASE-A8に比べて少し長い周期を持つようである。しかし、この違いが橋脚後流の影響かどうかはわからないので今後の検討課題である。

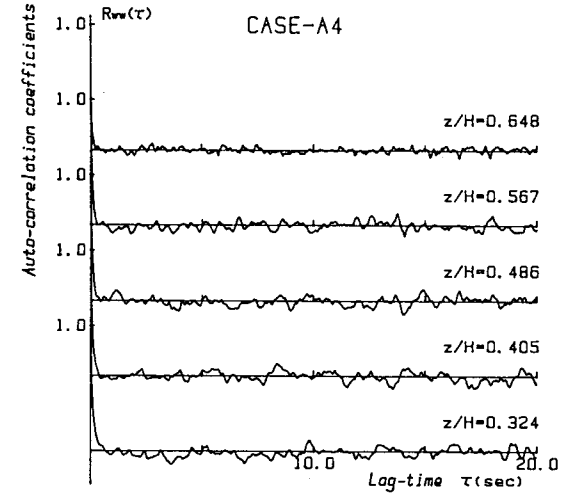
橋脚後流の影響を受けていると思われるCASE-A4の場合でも、横断方向の R_{vv} と鉛直方向の R_{ww} の値の減少度合いは R_{uu} のそれに比べて急激に減少するという傾向は河川直線部の場合と同様である。



(a) $R_{uu}(\tau)$



(b) $R_{vv}(\tau)$



(c) $R_{wv}(\tau)$

図6-14 橋脚後流域の自己相関係数の水深による比較（橋脚の影響あり，CASE-A4の場合）

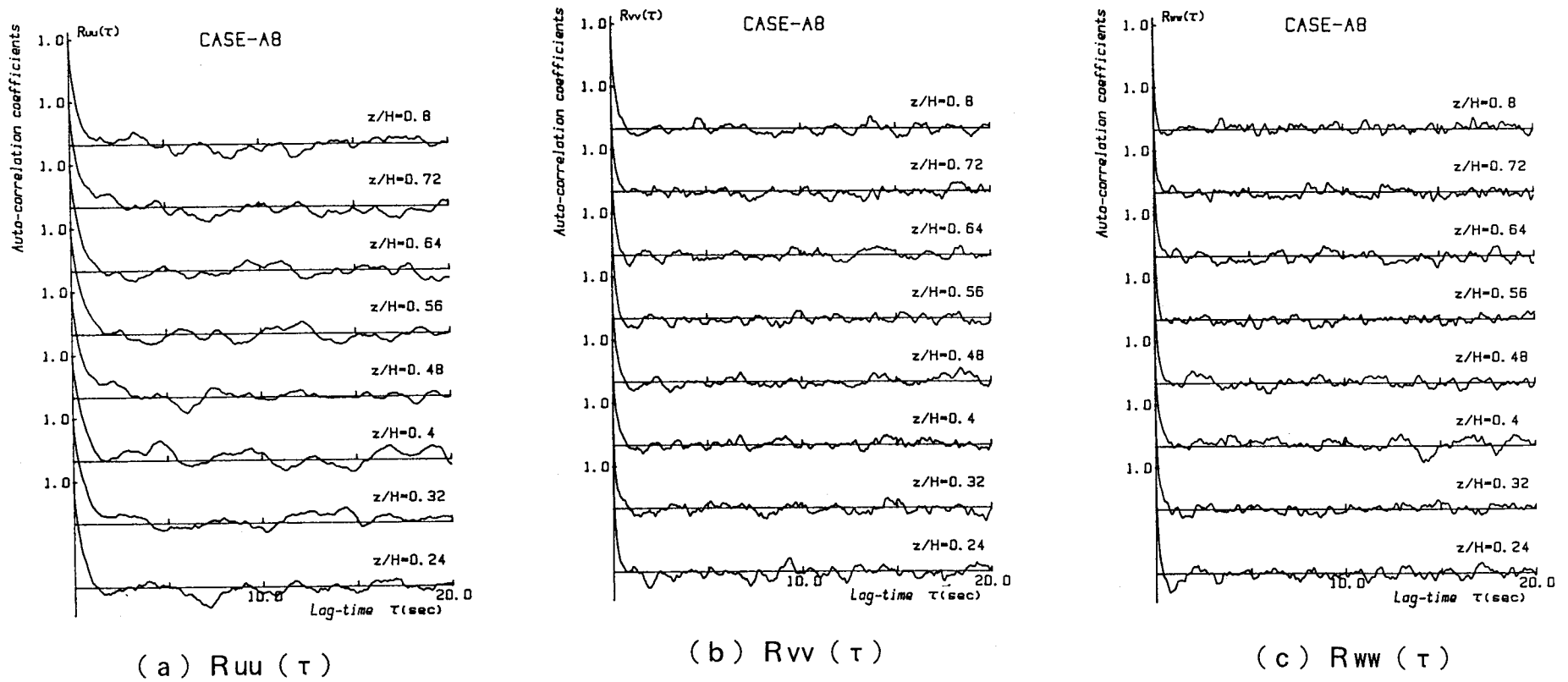


図6-15 橋脚後流域の自己相関係数の水深による比較 (橋脚の影響なし, CASE-A8の場合)

6. 4 結 言

実河川の橋脚後流域の流れ特性を明らかにするために実施した流速の現地測定結果より以下のことがわかった。

- (1) 橋脚後流域においては橋脚後流の影響による速度欠損が生じており、特に水面近傍において顕著に見られた。しかし、橋脚に最も近く後流による影響を受けると思われるポイント（CASE-A1）において速度欠損が見られず逆に加速されていることがわかった。
- (2) 乱れ強度の分布では橋脚後流の影響を受けていると思われる測点では相対水深 $z/H=0.5$ 以上において分布曲線から離れ大きな値をとる傾向がみられた。
- (3) 橋脚後流の影響の有無によって分類したレイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_r^2$ の鉛直線上の分布形状には顕著な違いは認められなかった。
- (4) データ処理時のサンプリング周波数が100 Hzの場合、 v' の正負を考慮して4象限法を拡張した8象限区分しきい値法による瞬間レイノルズ応力特性を見ると、 $v' > 0$ においてはsweep事象が $v' < 0$ においてはejection事象の寄与が大きくなる傾向を示した。また、 $v' > 0$ におけるsweep事象の卓越は河床近傍のみならず全水深に及んでいる。
- (5) エネルギー・スペクトルについては、河川直線部で得られた結果同様に、発生、粘性、慣性の三小領域の存在を確認することができ、その傾きも河川直線部のそれと同様なものであった。よって、橋脚後流によるエネルギー・スペクトルの分布特性への影響は特に認められなかった。
- (6) 自己相関係数については、河川直線部の場合と同様に、どの方向の自己相関係数も周期的な変動波形が確認された。しかし、橋脚の有無による自己相関係数の違いについては確認できなかった。

以上のように、実河川の橋脚後流域の流れ特性を明らかにしたが、今回測定したポイントの数が少なすぎたために、橋脚の後流域の形状を把握するまでに至らなかった。今後はもっと測定ポイントを多くとって現地観測を実施する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について（1），京大防災研究所年報，第26号B-2，pp.489-501，1983.
- 2) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について（2），京大防災研究所年報，第27号B-2，pp.445-454，1984.
- 3) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について（3），京大防災研究所年報，第28号B-2，pp.523-537，1985.
- 4) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について（4），京大防災研究所年報，第29号B-2，pp.523-537，1986.
- 5) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について（5），京大防災研究所年報，第30号B-2，pp.627-642，1987.
- 6) 今本博健・藤田 徹・日紫喜剛啓：円柱周辺における開水路流れの水理特性について，京大防災研究所年報，第21号B-2，pp.355-366，1978.
- 7) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，p.340，1992.

第7章 実河川における乱流成分の サンプリングに関する検討

7.1 緒言

開水路乱流場の任意の一地点での乱れ変動は種々の渦スケールから構成されている。この渦スケールを代表する特性スケールに内部スケールと外部スケールとがある。内部スケールが乱れに固有なものであるのに対し、外部スケールは水理条件や幾何条件によって変化し、実河川のように流れ場が複雑になると外部スケールがいくつも現れる。一方、このような外部スケールの大きいと思われる気象学の分野について考えると、大気境界層内の乱流の研究分野における石崎らの研究¹⁾では、風速変動のパワースペクトルにおける最も高い周波数で1 Hz程度、すなわち、データのサンプリング間隔で言えば1秒であり、そして、分、時間、日といったそれより長い時間スケールで議論がなされている。前章まではアナログデータをA/D変換する時のサンプリング周波数は一般的に実験室水路で行われていると同様にサンプリング周波数100 Hzとしてデータ整理を行ってきた。しかし、前章までの研究のような実河川における測定データのデータ処理に対して、100 Hzというサンプリング周波数を採用した場合、河川流の流速の乱れ変動に存在すると思われる大きな外部スケールを見い出すことはできないのではないかとこの疑問が生ずる。

さて、カオス（熱対流のLorenzの研究に始まる研究分野）的なある物理現象を“系”として捕らえた場合、その系の運動状態を記述するのに必要な“状態変数”を考える。ある時刻に系の状態が位置 x にいたとすると、この位置 x に依存するベクトル量を $f(x)$ で示せば微分方程式は $dx/dt=f(x)$ と記述され、この $f(x)$ をベクトル場と呼ぶ。時刻0において、系の状態が x_0 にあったとする。このとき、微分方程式 $dx/dt=f(x)$ を解くことで任意時刻 $t > 0$ における状態 $x(x_0, t)$ が求められる。 x_0 を初期状態、状態空間 $x(x_0, t)$ の時間に従った軌跡を“トラジェクトリ（軌道）”と呼ぶ。例えば、ある運動が振り子運動のように周期的な運動の場合、“トラジェクトリ”の形状は円形となる。そこで、河川流の流速の乱れ変動という運動に対して、カオスにおける“トラジェクトリ”的な取り扱い²⁾を試みた場合、どうなるかと考えた。

本章では、実河川で得られた流速のアナログデータのデジタル化処理時のサンプリング周波数に注目して、実河川での流速の乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを検討する。

7. 2 時間平均化された乱れ特性

前章までの平均流速分布，乱れ強度分布，レイノルズ応力分布などの乱れ特性量を算定する際，水深方向の各ポイントにおけるアナログデータを100 Hzのサンプリング周波数でA/D変換して有限なデータ個数（例えば，第4章では，20480個，評価時間20.48秒）のデジタルデータを求め，式(3.12)～式(3.14)に示したように，各特性量はデータ個数で割り算をして時間平均化を行っている．そこで，CASE1（市川）の場合を例として，アナログデータのサンプリング周波数を1 Hzとして，前章までと同様な算定法を用いて得られた結果と第4章で既に得られている結果との比較を図7-1に示す．(a)図はサンプリング周波数1 Hzのもので，(b)図は100 Hzのものである．そして，上から順に，平均流速分布，乱れ強度分布，レイノルズ応力分布を示している．なお，これらの特性量を算定するのに用いたデータの個数はそれぞれ20480個（100 Hz），200個（1 Hz）である．ここで，100 Hzに比べ1 Hzの場合にデータ個数が極端に少ないのは現地での計測時間が5分間（300秒）程度であり，1 Hzでサンプリングした場合，最大でも300個程度しかデジタルデータを抽出できないため，確実に抽出可能であろうと思われる評価時間200秒，すなわち，200個をデータ個数とした．これらの各図を見比べると明らかなように，どの図を見ても分布形状は良く一致している．よって，乱れの特性量を時間平均化した場合，データ処理時のサンプリング周波数による乱れの分布特性の違いはないと考えられる．

7. 3 流速の乱流成分のトラジェクトリ的な取り扱い²⁾

7.1で述べたように，カオス的なある物理現象を捕らえるにはそれが含まれている枠組みを“系”として捕らえねばならない．次に，その系の運動状態を記述するのに必要な変数，すなわち，“状態変数”を考える．ある時刻に系の状態が位置[x]にいたとすると，この位置[x]に依存するベクトル量をf(x)で示せば，微分方程式は

$$dx/dt = f(x) \quad (7.1)$$

と記述され，このf(x)をベクトル場と呼ぶ．ベクトル場の中には特殊な解，すなわち，以下の方程式を満たすx。

$$f(x_0) = 0 \quad (7.2)$$

があり，状態x₀に陥るとここから動くことはない．これを“平衡点”と呼ぶ．時刻0において，系の状態がx₀にあったとする．このとき微分方程式(7.1)を解くことで任意時刻t>0における状態x(x₀, t)が求められる．x₀を初期状態，状態空間x(x₀, t)の時間に従った軌跡を“トラジェクトリ（軌道）”と呼ぶ．ここで，流速のような変動波形の最も簡単な波形としてサインカーブを考えてみる．すなわち，u=sin

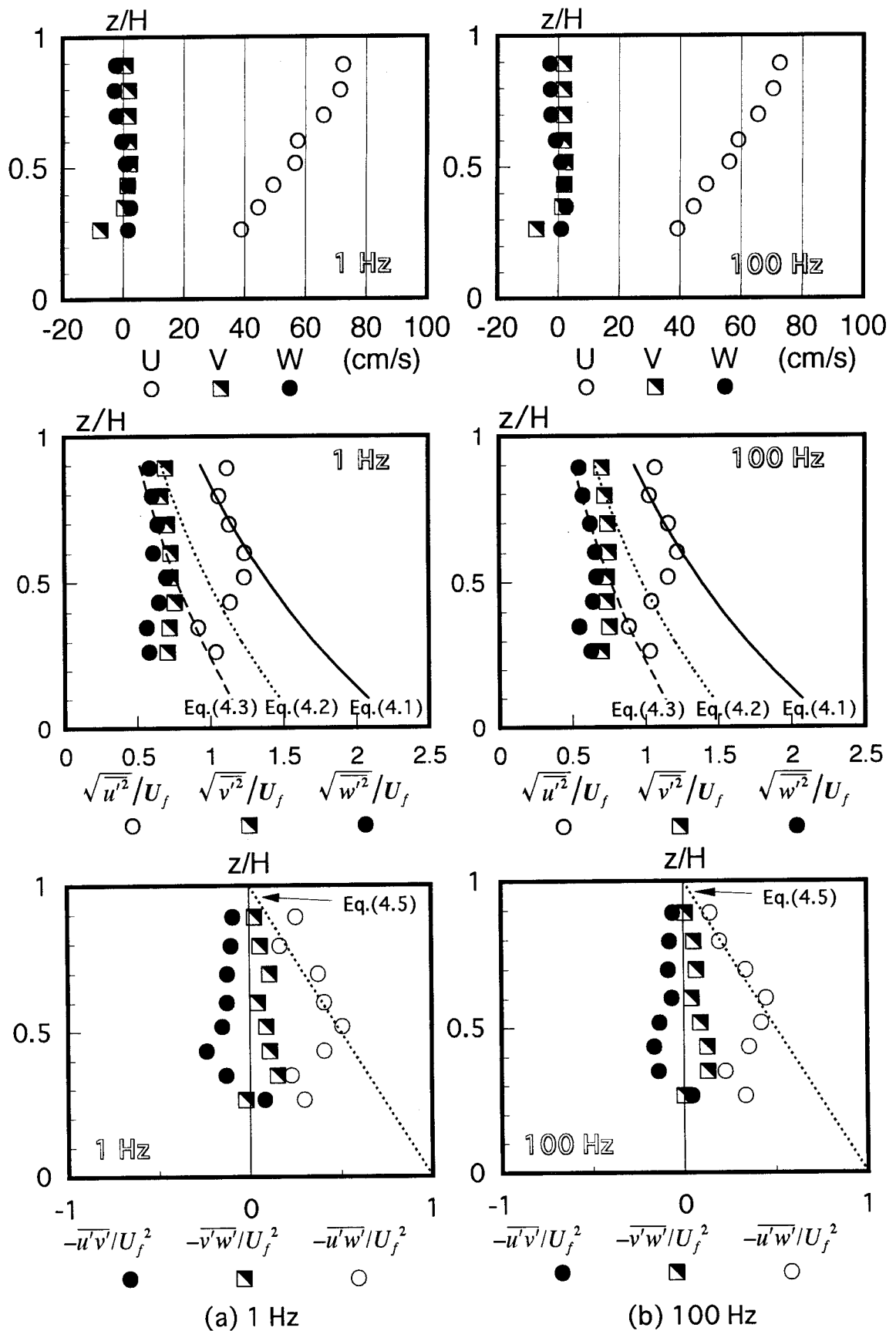


図7-1 時間平均化された乱れ特性の比較(市川の場合)

(t)という速度を持つ波を考え、そして、その速度を微分し加速度を求めると、 $du/dt = \cos(t)$ という関数が得られる。横軸に速度をとり、縦軸に加速度にとって時間 t の経過に従う軌跡を描くと図7-2に示すような“円”となる。この円はトラジェクトリ的一种であると言える。

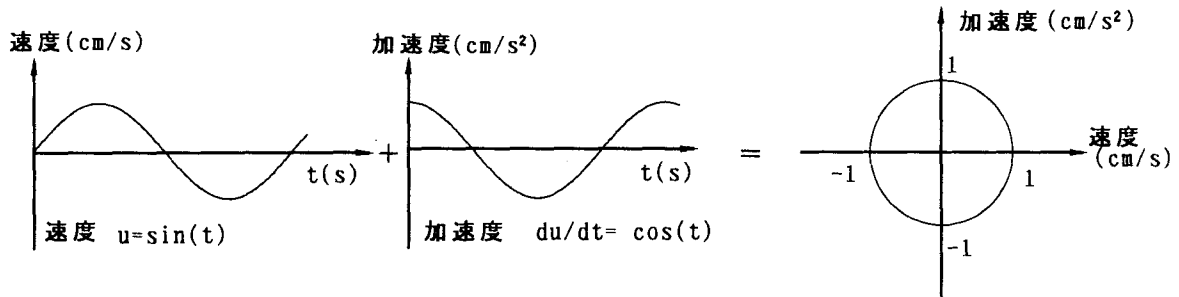


図7-2 速度と加速度の時間に従う軌跡

一方、流速の変動がサインカーブのように周期的な波形の場合、“トラジェクトリ的な取り扱い”によって軌跡は円のような“ループ”を描くと考えられるが、実際の河川流の流れは乱流であり、流速の変動は不規則であるので、その軌跡は、いわゆる、“ループ”を描かないと考えることができる。そこで、河川流の流速のアナログデータに対して、データ処理時のサンプリング周波数を極端に変化させて、“トラジェクトリ”的な軌跡を描きそれらの比較を試みる。具体的には、河川直線部の測定ケースの一つである市川の流速データを対象として、乱流場を示す各種の統計量の中から最も簡単な統計量としての流速の乱れ速度に注目し、流速の3方向成分 u' 、 v' 、 w' の内の2方向として、まず、 u' と w' の関係について検討する。相対水深 $[z/H=0.518]$ において、サンプリング周波数 1 Hz、100 Hzの場合について、横軸に流下方向の乱れ速度 u' 、縦軸に鉛直方向の乱れ速度 w' をとり、時間に従った u' と w' の関係を表す点の軌跡を描いたものが図7-3である。他の相対水深 $[z/H=0.265]$ 、 $[z/H=0.795]$ のデータについては図7-4に示す。

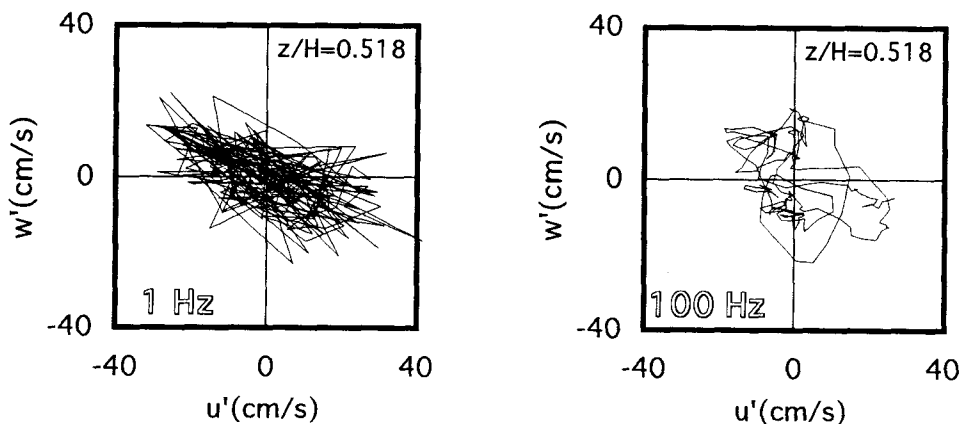


図7-3 乱れ速度 u' と w' の関係(市川の場合)

図7-3を見ると、1 Hzの場合、 u' と w' の時間に従った軌跡は負の傾きを持った軌跡を描いており、この2成分には強い相関があることがわかる。ところが、100 Hzの場合、“ループ状の軌跡”を描いている。(これらの性状は他の水深位置でも同様であることは図7-4を見れば明らかである。)これは、前述したように流れが乱流であれば、その軌跡は、いわゆる、“ループ”を描かないであろうという推測に反する。この事実は、採用するサンプリング周波数の違いによって、河川流に存在する乱流成分の特性を見誤る可能性があることを意味している。つまり、実験室水路での流速データに対して一般に用いられるようなサンプリング周波数によって、実河川での流速データをデータ処理することは不相当である可能性がある。ゆえに、本節での2ケースのみの比較ではあるが、デジタル化されたデータが元のアナログデータの有する乱流特性を正しく評価できるサンプリング周波数は1 Hzの方であると考えた。

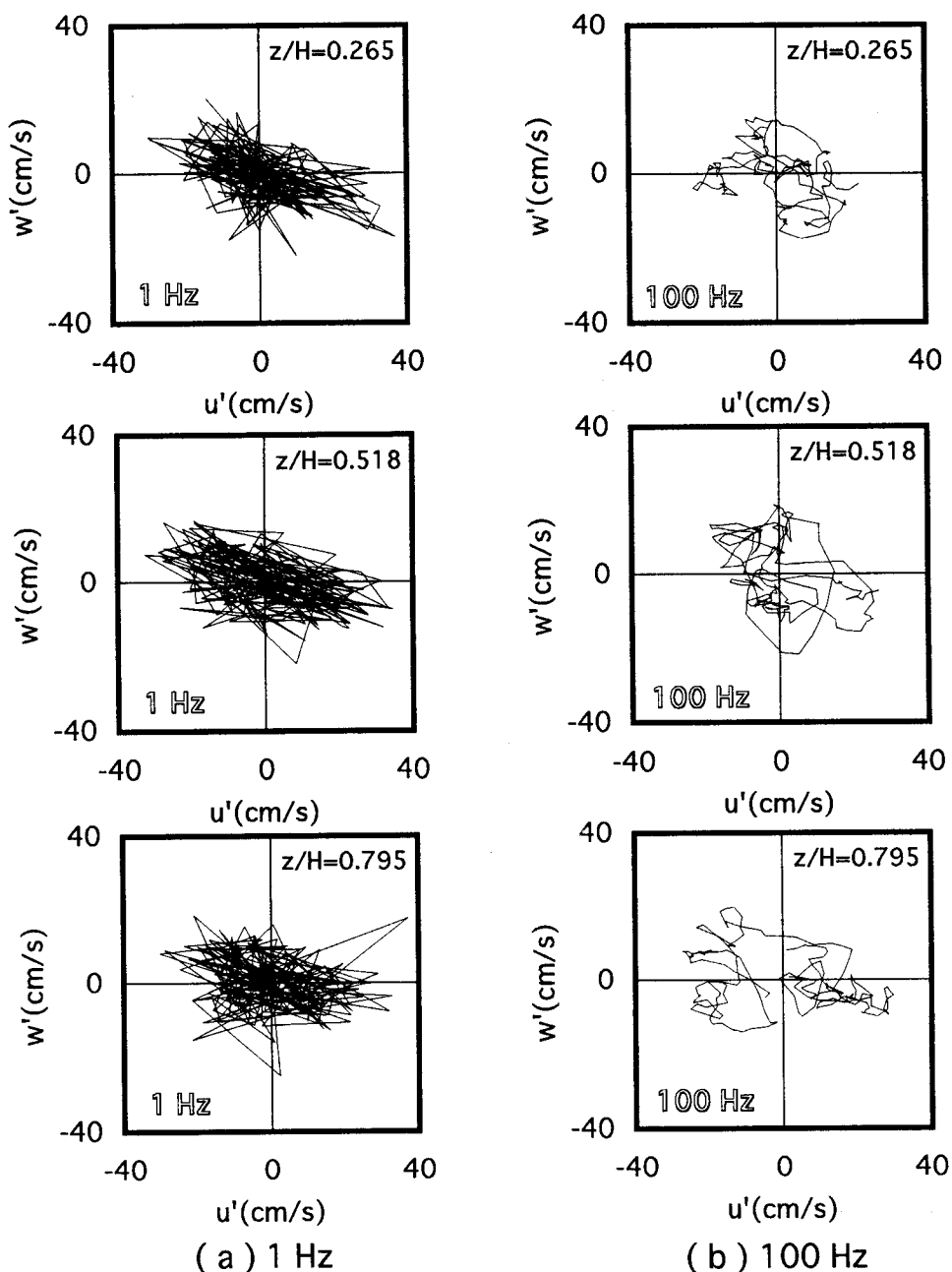


図7-4 乱れ速度 u' と w' との比較(市川の場合)

7. 4 サンプルング周波数について

図7-3, 図7-4での比較は, 流下方向の乱れ速度 u' と鉛直方向の乱れ速度 w' の関係に対するサンプルング周波数 1 Hz, 100 Hzの2ケースのみの検討であった。そこで, サンプルング周波数をもっと細かく変化させて, “トラジェクトリ” 的な軌跡の形状の変化する境目のサンプルング周波数を見い出すことを試みる。さらに, 流下方向の u' と w' の関係のみならず, 他の乱れ変動量についても同様の検討を加えてみる。具体的には, 変化させたサンプルング周波数は 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 Hzの16種類とした。

データ個数はすべてのサンプルング周波数で200個とした。

検討した乱れ変動量の関係は

- (1) 流下方向と鉛直方向の乱れ速度の関係
- (2) 流下方向と横断方向の乱れ速度の関係

の2種類とした。

ところで, 任意のサンプルング周波数に対して描かれた“トラジェクトリ” 的な軌跡の形状の違いによって, 河川流の乱流特性を正しく評価しているかどうかの判定を下すわけであるが, その判定基準について, ここに述べておく。

・判定基準について

- (1) 軌跡が, 正から負へ, あるいは, 負から正へと激しく変動し, 鋭く尖った形状から, 一部の軌跡の形状がループ状の軌跡を描き始める状態にあるかどうか。

—————>以下では, “Aタイプ” と呼ぶ。

- (2) 軌跡全体の形状が勾配を有すると判断できるかどうか。

—————>以下では, “Bタイプ” と呼ぶ。

なお, 実際の判定を行う場合は, これらの判定基準を用いて, 総合的に判断する必要がある。

7. 4. 1 流下方向と鉛直方向の乱れ速度の関係について

流下方向の乱れ速度 u' と鉛直方向の乱れ速度 w' の関係について検討する。横軸に流下方向の乱れ速度 u' 、縦軸に鉛直方向の乱れ速度 w' をとり、それらの時間に従う軌跡を描いたものの一例が図 7-5 である。本図に示したデータは相対水深 $[z/H=0.795]$ のサンプリング周波数 1 Hz と 10 Hz のデータである。この図の左図 (1 Hz) を見ると、 u' と w' の関係を表す点の軌跡は負の傾きを持つ (判定基準: B タイプ) ことは明らかである。この軌跡が負の傾きを持つことは日野の著書³⁾においても指摘されている。そして、図 7-6-1 に示すようにサンプリング周波数が高くなるにつれて、軌跡の形状が鋭くとがった形状から箱状のループを描く傾向 (判定基準: A タイプ) がサンプリング周波数 5 Hz あたりから見え始め、サンプリング周波数 10 Hz の相対水深 $[z/H=0.795]$ では負の傾きが確認できなくなっている。(判定基準: B タイプ)

よって、形状の変化するサンプリング周波数を 10 Hz と判断した。

以上のように、実河川の乱流特性を正しく評価すると思われるサンプリング周波数は 10 Hz とかなり低いことがわかった。7. 1 で述べたように乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きいと思われる気象学の分野では 1 Hz より低い周波数でパワースペクトル特性についての議論がなされている。そこで、本研究のような実河川でもエネルギー・スペクトル特性を議論する場合、従来の実験室水路などに比べ、外部スケールの大きいと思われる実河川に対しては、サンプリング周波数を今までよりかなり低くして再検討する必要がある。

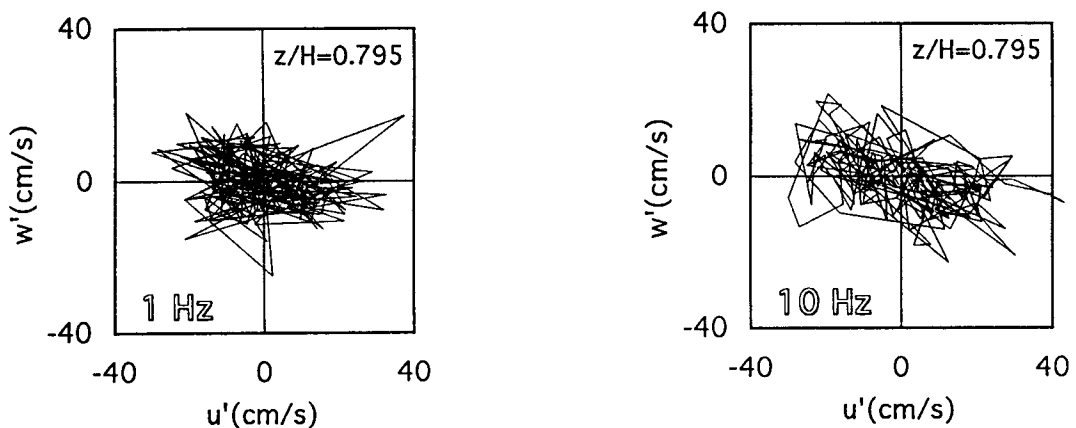


図7-5 乱れ速度 u' と w' の関係

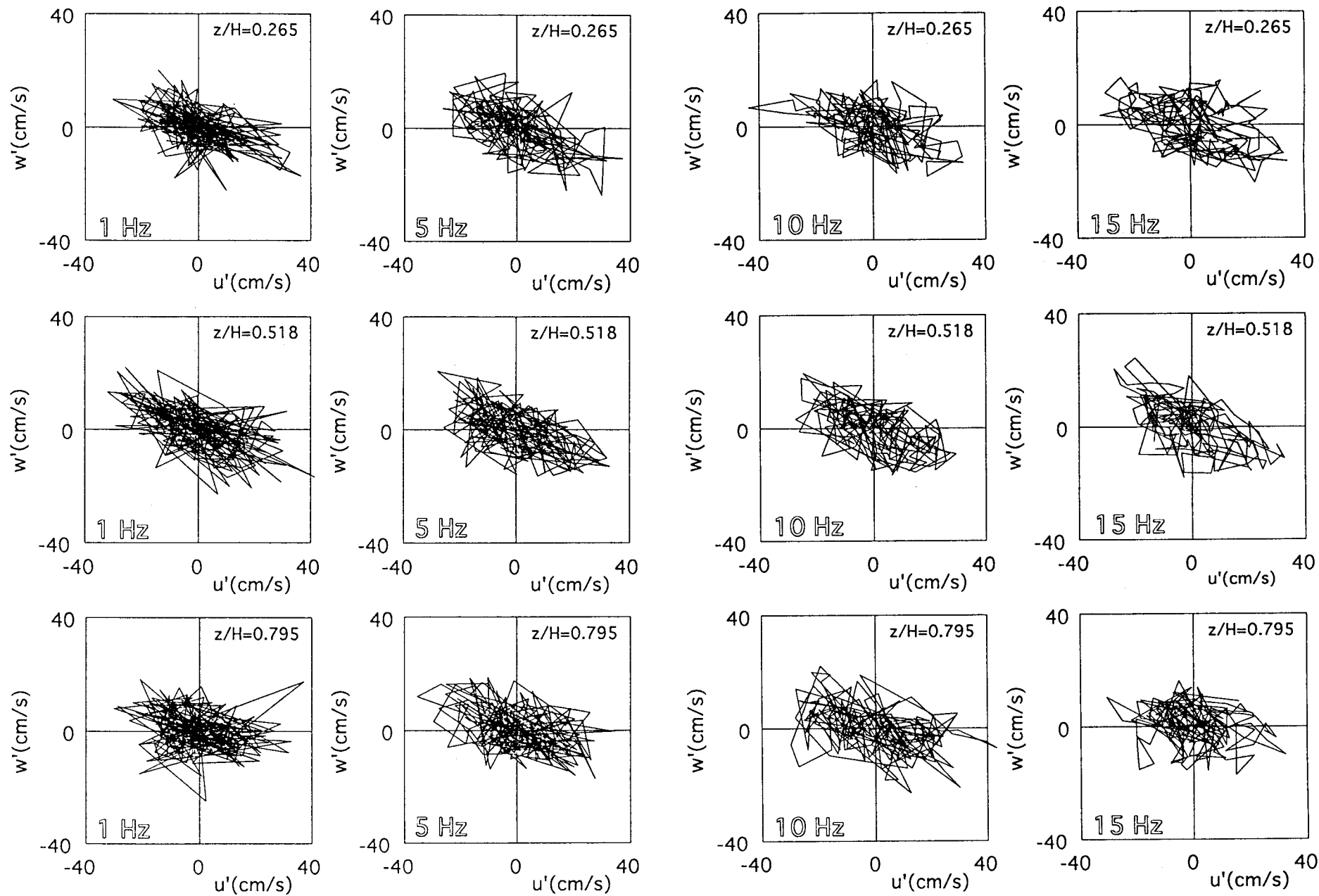


図7-6-1 乱れ速度 u' と w' の関係

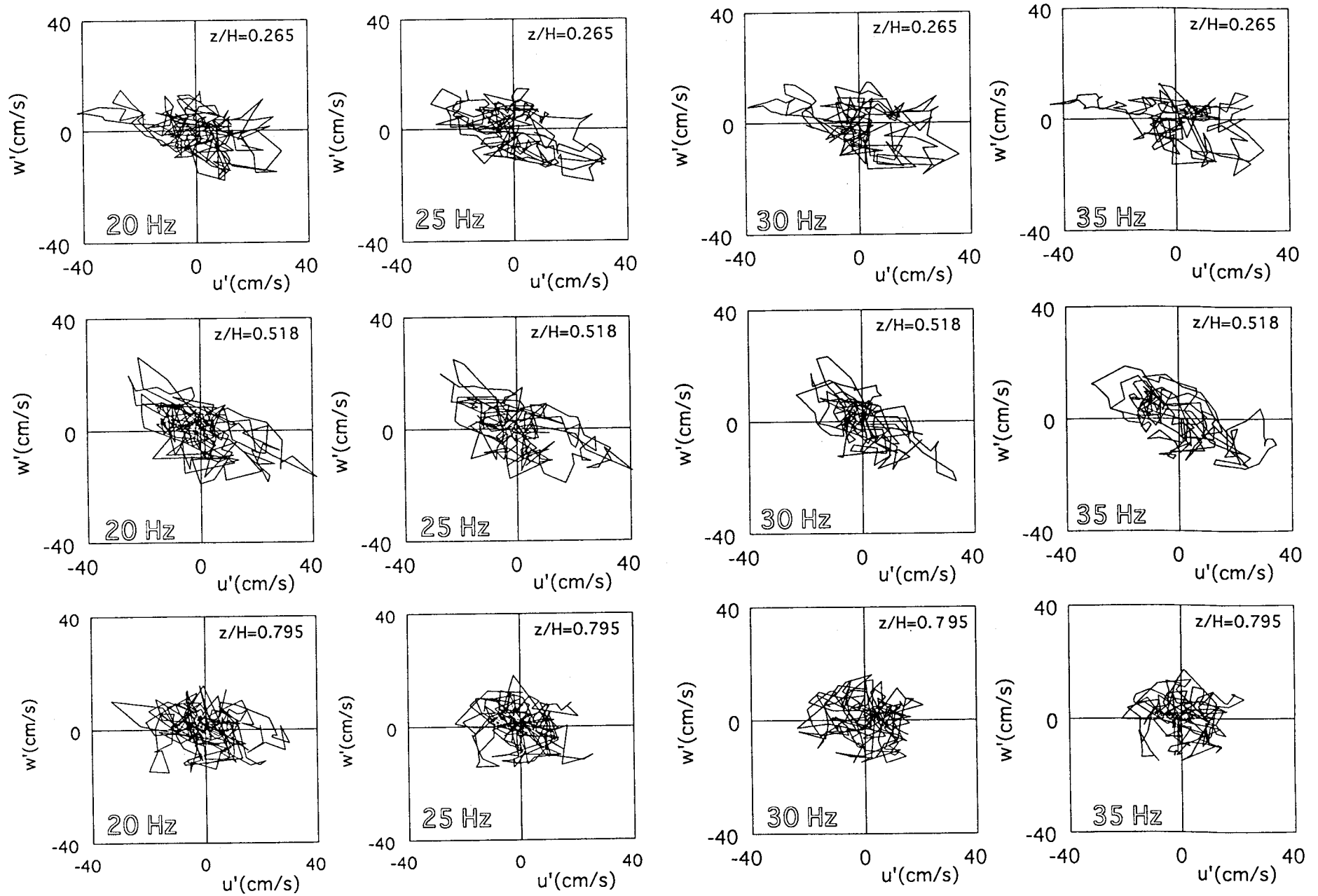


図7-6-2 乱れ速度 u' と w' の関係

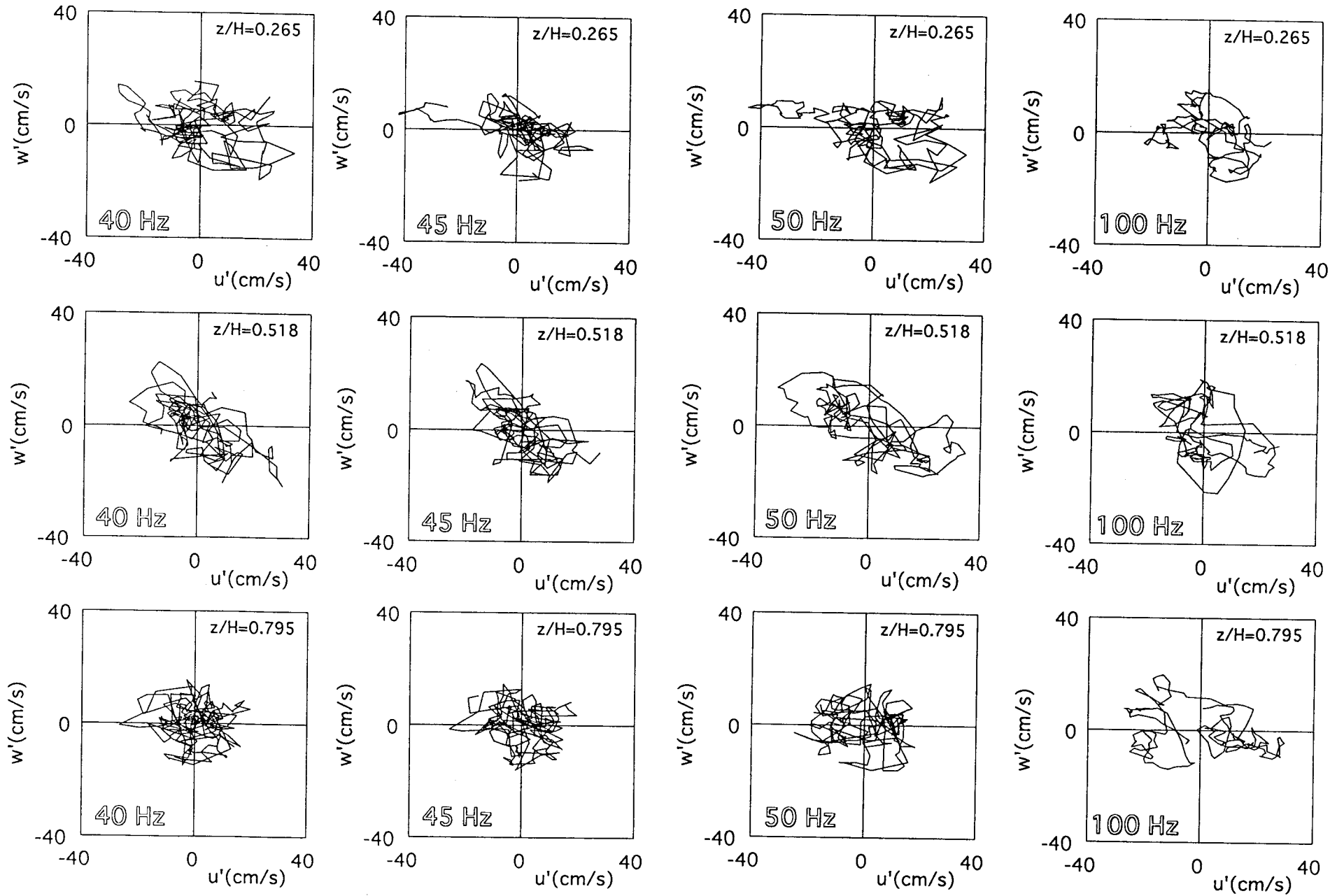


図7-6-3 乱れ速度 u' と w' の関係

7. 4. 2 流下方向と横断方向の乱れ速度の関係について

流下方向の乱れ速度 u' と横断方向の乱れ速度 v' の関係について検討する。横軸に流下方向の乱れ速度 u' 、縦軸に横断方向の乱れ速度 v' をとり、それらの時間に従う軌跡を描いたものの一例が図 7-7 である。本図に示したデータは相対水深 $[z/H=0.518]$ のサンプリング周波数 1 Hz と 10 Hz のデータである。この図の左図 (1 Hz) を見ると、前節の図 7-5 の軌跡の形状と異なり、 u' と w' の関係のようにその軌跡は負の傾きを持たないことがわかる。しかし、7. 4. 1 と同様にサンプリング周波数が高くなるにつれて、軌跡の形状が鋭くともった形状から箱状のループを描く傾向がサンプリング周波数 5 Hz あたりから見え始め、サンプリング周波数 10 Hz ではっきりと変化している。(判定基準: A タイプ) なお、他の相対水深のデータとともに種々のサンプリング周波数における乱れ速度 u' と v' の関係をまとめて図 7-8-1 ~ 3 に示す。

よって、乱れ速度 u' と w' の関係と同様に形状の変化するサンプリング周波数を 10 Hz と判断した。

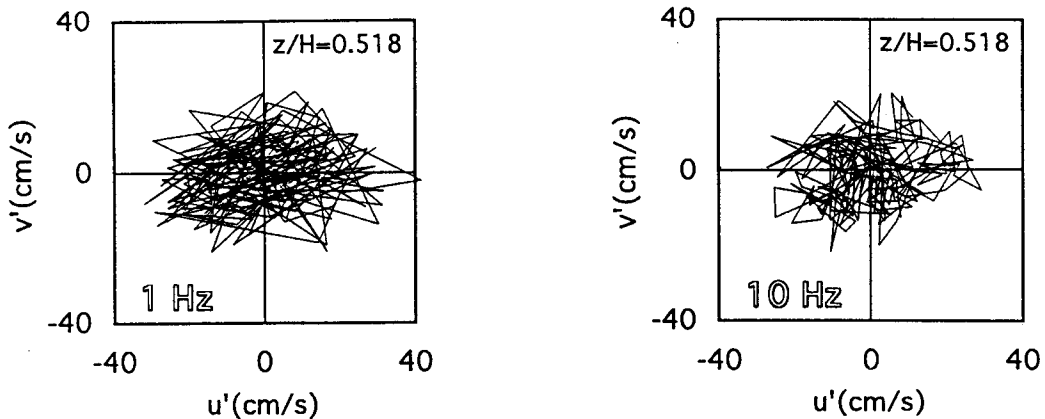


図7-7 乱れ速度 u' と v' の関係

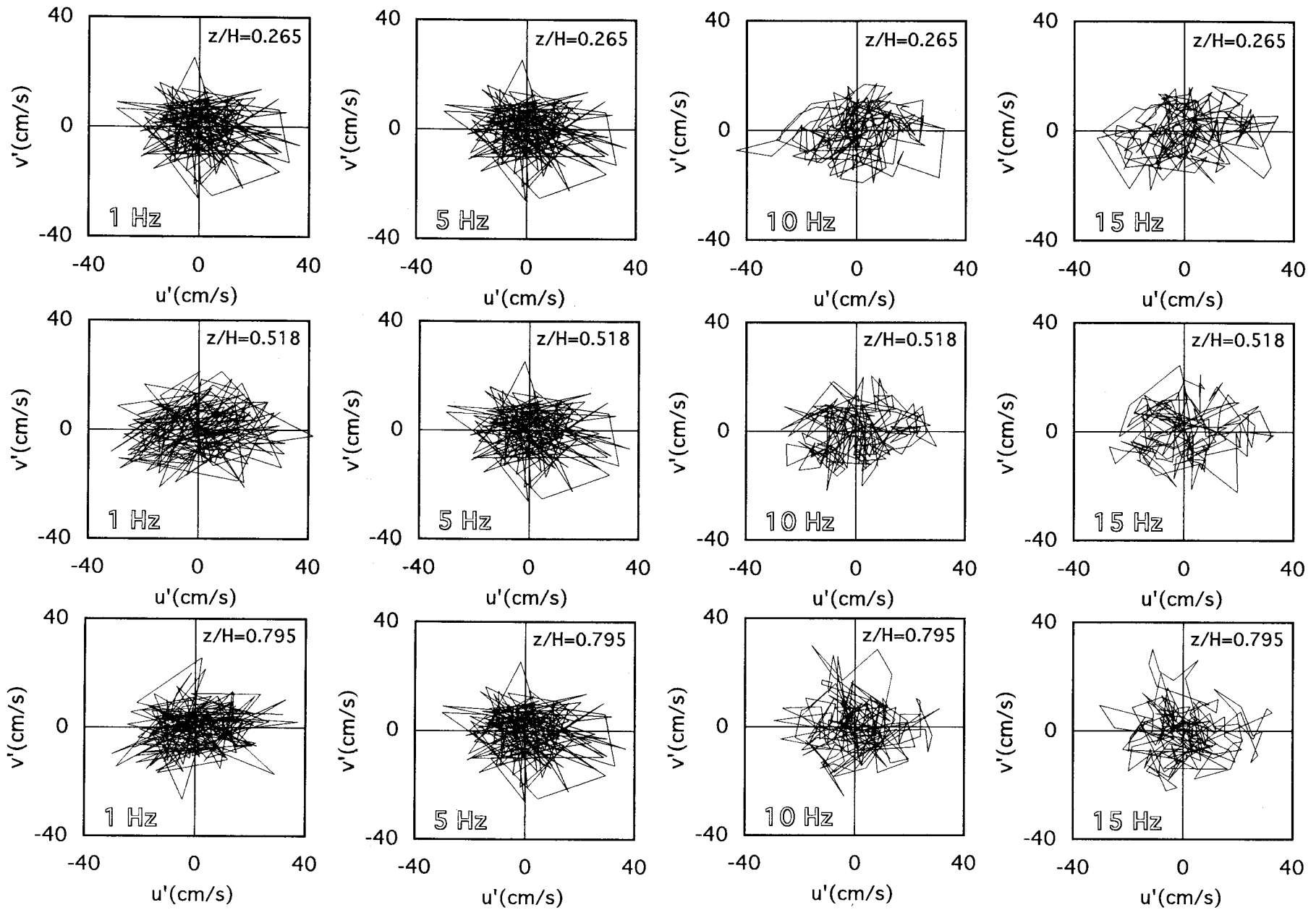


図7-8-1 乱れ速度 u' と v' の関係

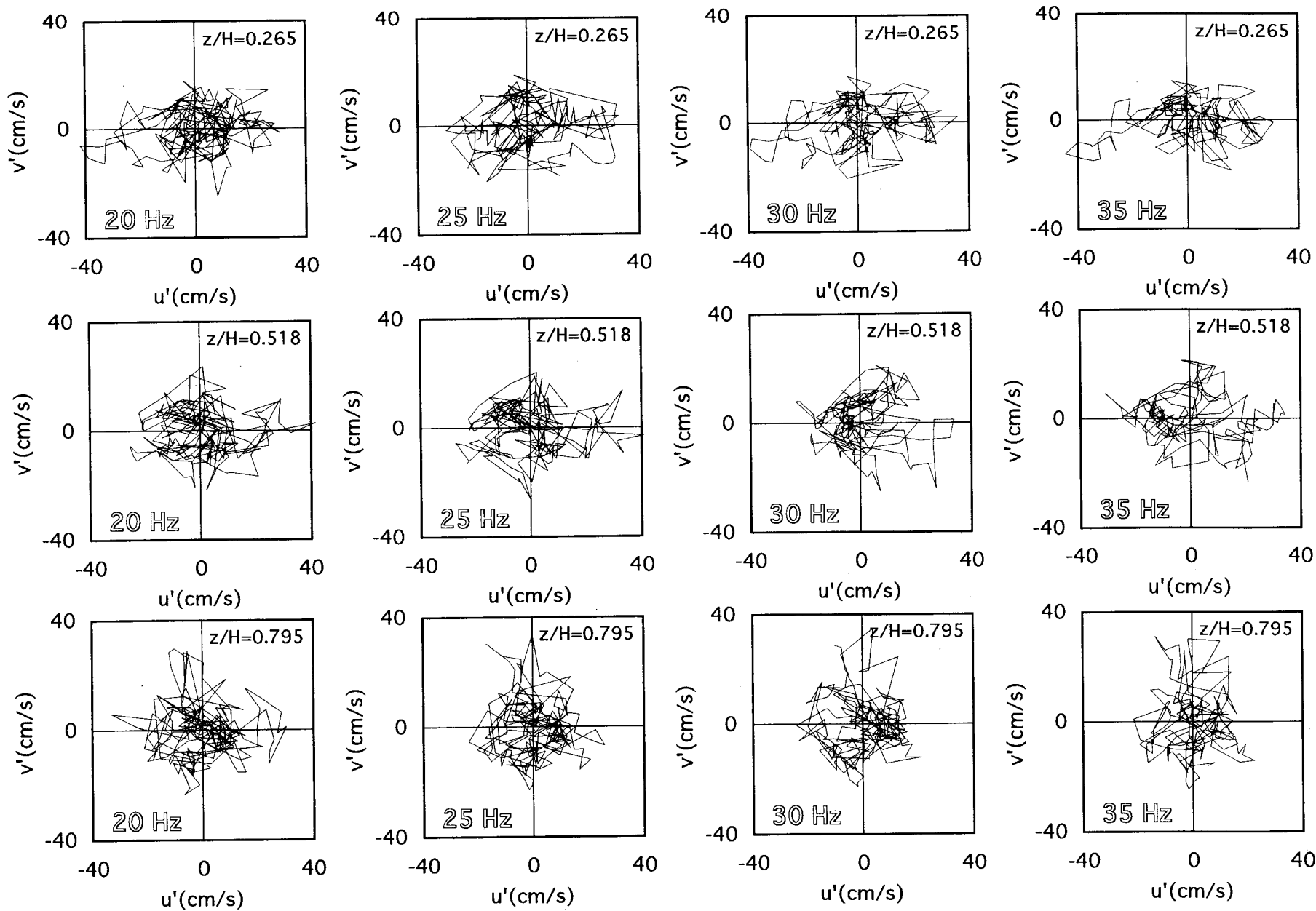


図7-8-2 乱れ速度 u' と v' の関係

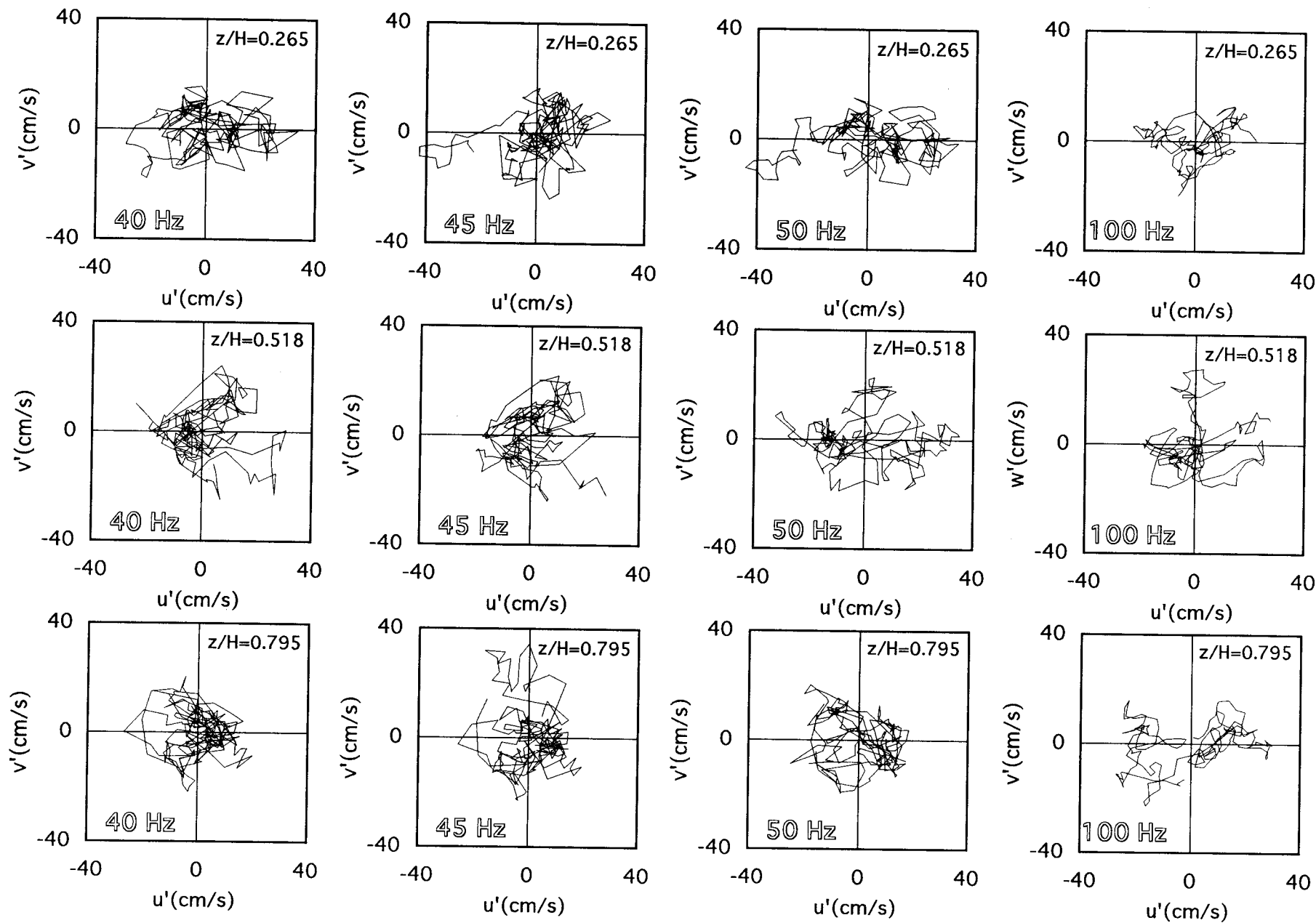


図7-8-3 乱れ速度 u' と v' の関係

7. 5 サンプル周波数と流路幅について

7. 1で述べたように、開水路乱流場の任意の一地点での乱れ変動は種々の渦スケールから構成されている。この渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールは水理条件や幾何条件によって変化することから、前節で求めたようなサンプル周波数と水理条件に何らかの対応関係があるのかどうかを検討するために、水理条件として流路幅： B に注目し、新たに、第4章の有野川（CASE 4）と武庫川（CASE 12）について、7. 4. 1と7. 4. 2と同様にして、乱れ速度 u' と w' の関係と乱れ速度 u' と v' の関係を求める。

以下に、比較したケースをまとめて列記する。

(1) 市川（CASE 1）――流路幅：大（ $B = 31.7\text{ m}$ ）

(2) 武庫川（CASE 12）――流路幅：中（ $B = 16.0\text{ m}$ ）

(3) 有野川（CASE 4）――流路幅：小（ $B = 3.1\text{ m}$ ）

さらに、上記3ケースのほかに、以下の3ケースについても、乱れ速度 u' と w' の関係を求め、上記の実河川の結果と比較する。

(4) 実験室水路（水路幅 $B = 0.5\text{ m}$ ）

(5) 他の流速計による実河川での測定結果（電磁流速計による、 $B = 28.0\text{ m}$ ）

(6) (5)の測定地点付近おける超音波流速計での測定結果（ $B = 28.0\text{ m}$ ）

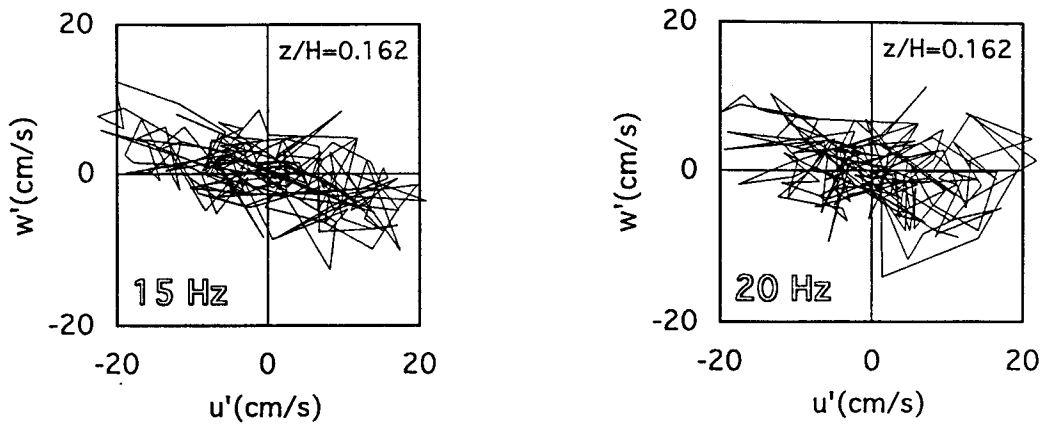
以下に、各ケース毎に順番に検討を加えていく。

(1) 流路幅：大の場合

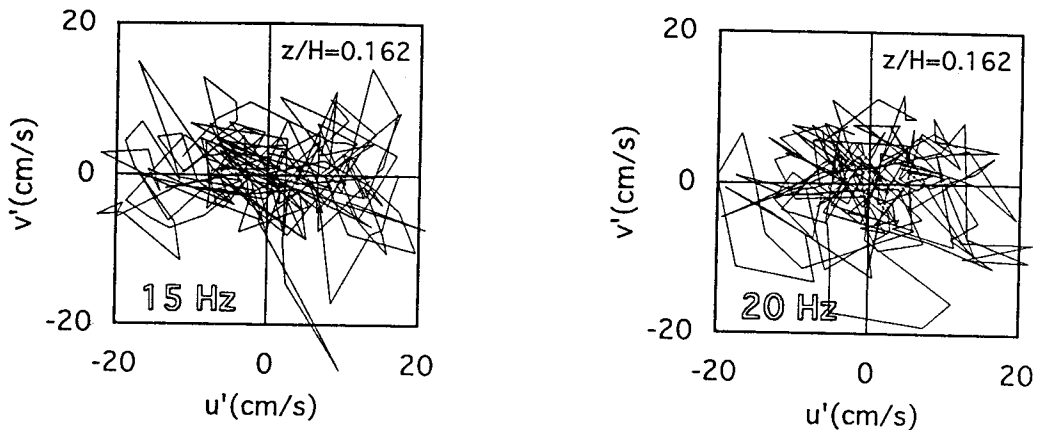
流路幅：大に属する第4章の市川（CASE 1）の場合については、既に7. 4. 1と7. 4. 2で述べたように、サンプル周波数 5 Hz と 10 Hz の間でその軌跡の形状が変化していると考え（判定基準：Aタイプ）、求めるサンプル周波数は 10 Hz とした。

(2) 流路幅：中の場合

流路幅：中に属する第4章の武庫川(CASE 12)の場合について、乱れ速度 u' と w' の関係と乱れ速度 u' と v' の関係を求めたものの一例を図7-9に示す。これらの図の内の u' と w' の関係である(a)図から判断すると、サンプリング周波数15 Hzの $z/H = 0.162$ のポイントでまだ負の傾きを確認できるが、20 Hzになるともうその傾きの確認できなくなった(判定基準：Bタイプ)ので、求めるサンプリング周波数は20 Hzとした。一方、 u' と v' の関係である(b)図から上述のような判断はできない。なお、図7-10-a~bにサンプリング周波数10 Hzから25 Hzのデータについてまとめて示す。



(a) u' と w' の関係



(b) u' と v' の関係

図7-9 乱れ速度 u' と w' , u' と v' の関係 (流路幅：中)

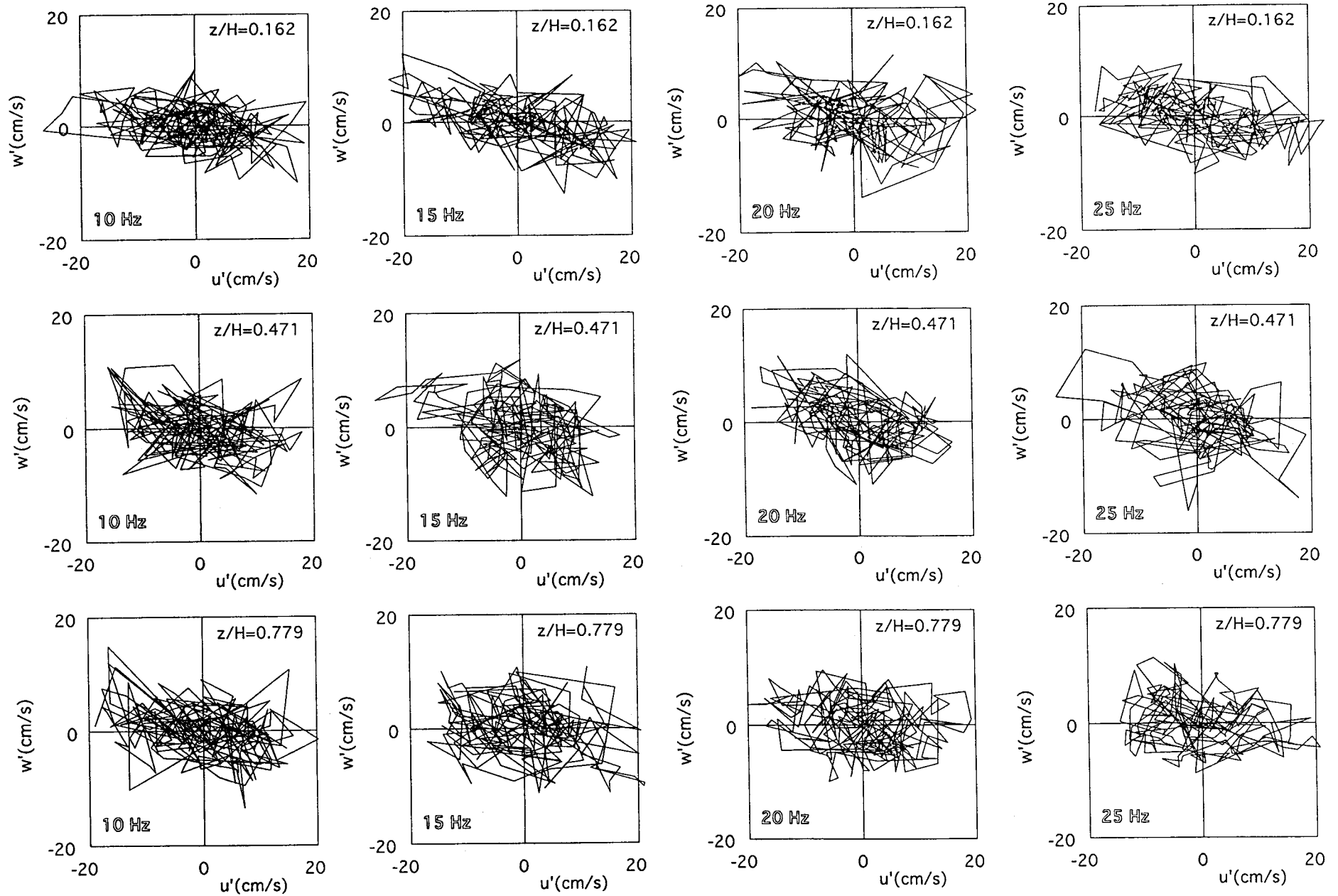


図7-10-a 乱れ速度 u' と w' の関係 (流路幅：中)

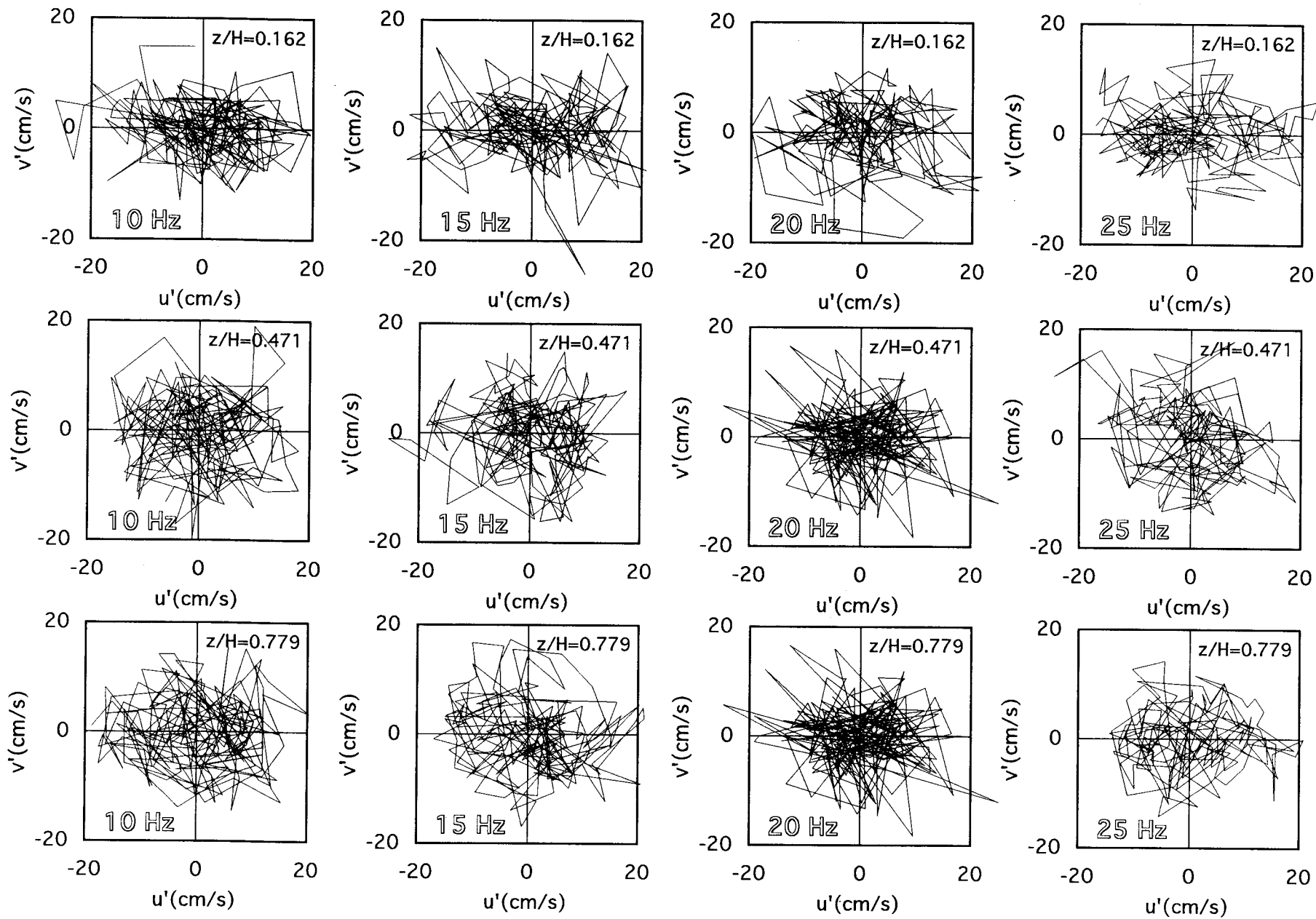
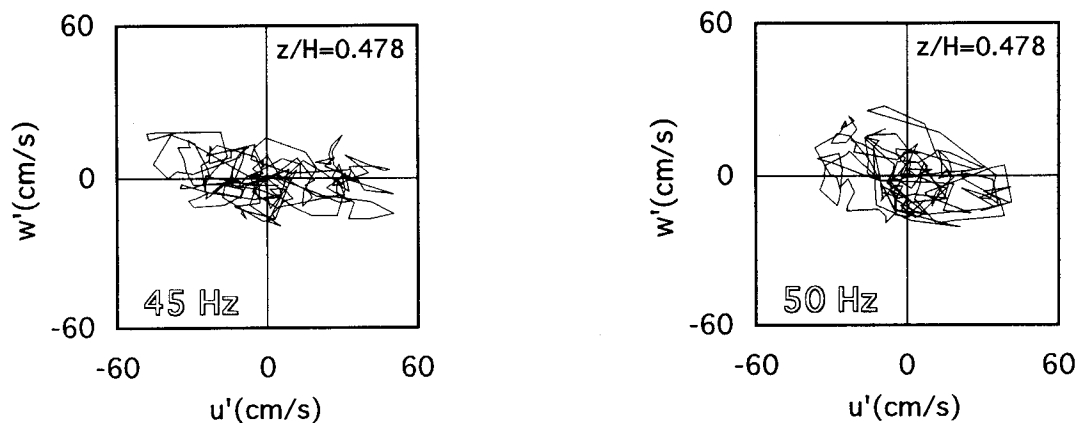


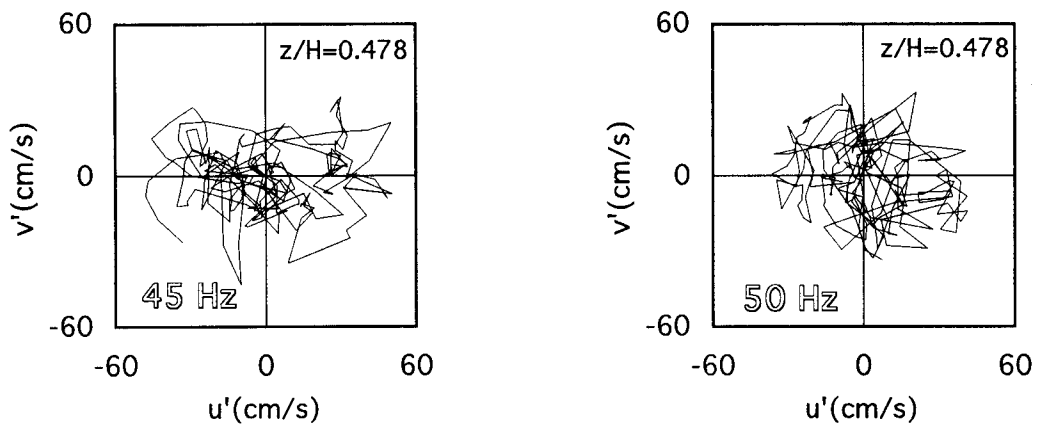
図7-10-b 乱れ速度 u' と v' の関係 (流路幅：中)

(3) 流路幅：小の場合

流路幅：小に属する第4章の有野川（CASE 4）の場合について，乱れ速度 u' と w' の関係と乱れ速度 u' と v' の関係を求めたものの一例を図7-11に示す．本ケースの場合，これらの図から判断するのはかなり難しいが， u' と w' の関係である（a）図から，相対水深の $z/H = 0.478$ の形状の傾きが45 Hzまで確認できる（判定基準：Bタイプ）として，求めるサンプリング周波数は50 Hzとした．一方， u' と v' の関係である（b）図から上述のような判断はできない．なお，図7-12-a～bにサンプリング周波数35 Hzから50 Hzのデータについてまとめて示す．



(a) u' と w' の関係



(b) u' と v' の関係

図7-11 乱れ速度 u' と w' ， u' と v' の関係（流路幅：小）

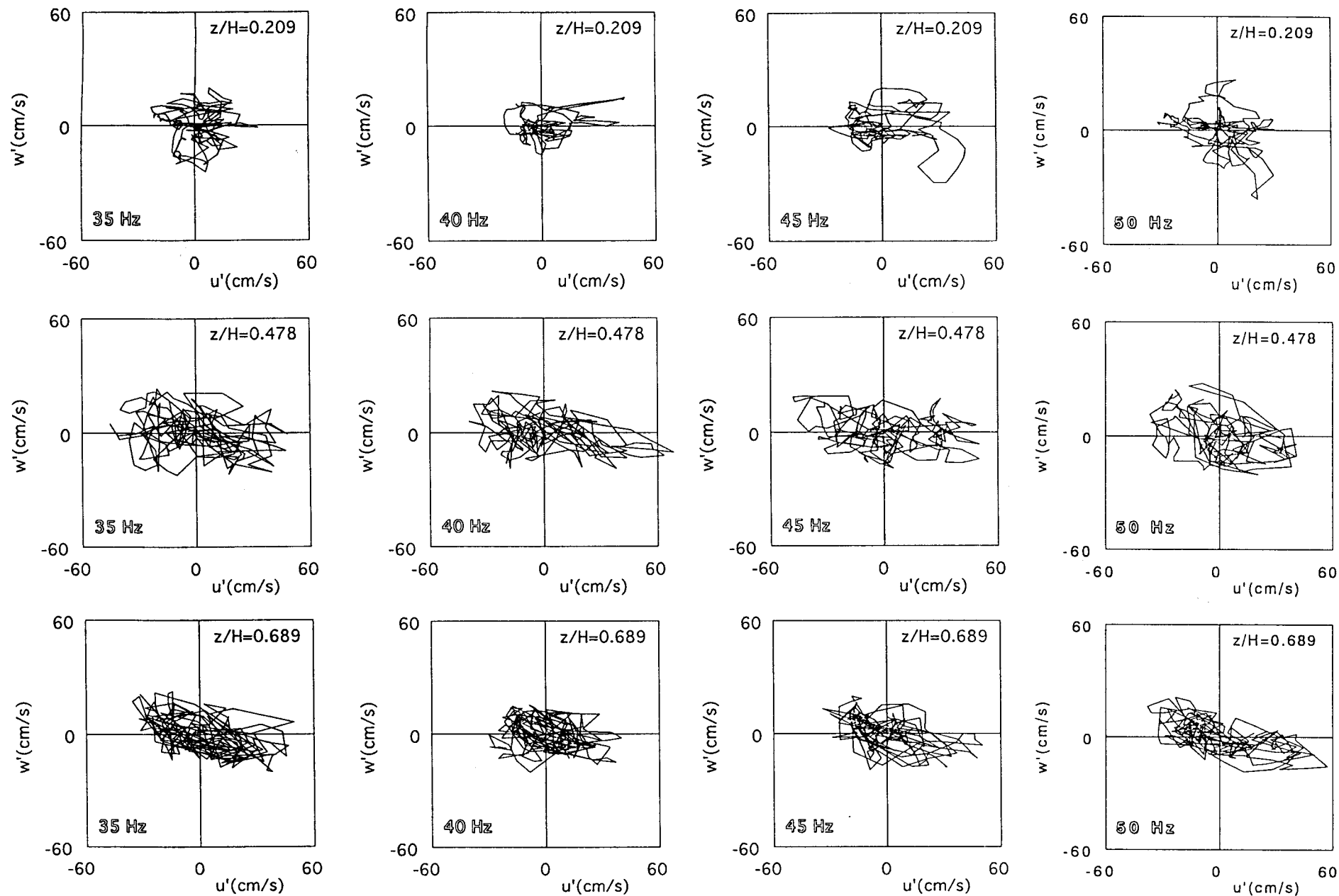


図7-12-a 乱れ速度 u' と w' の関係 (流路幅：小)

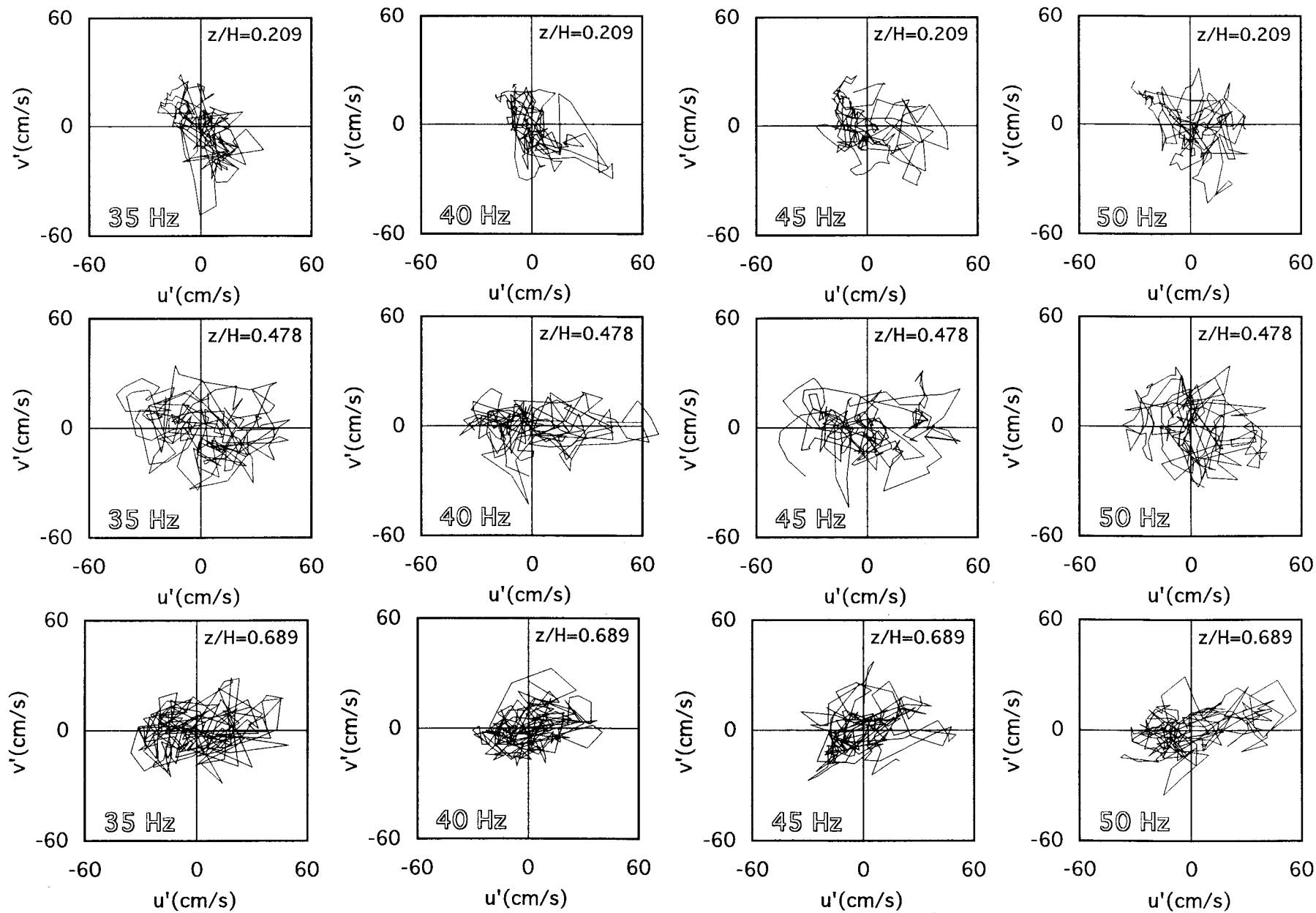
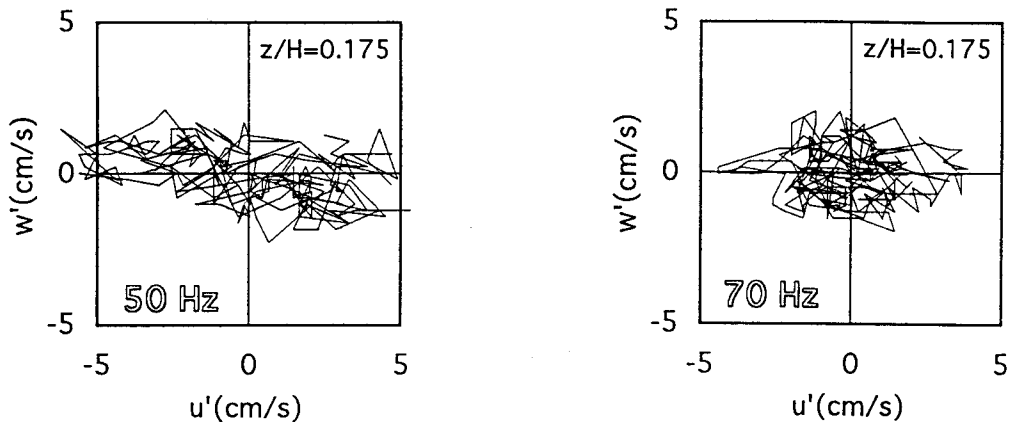


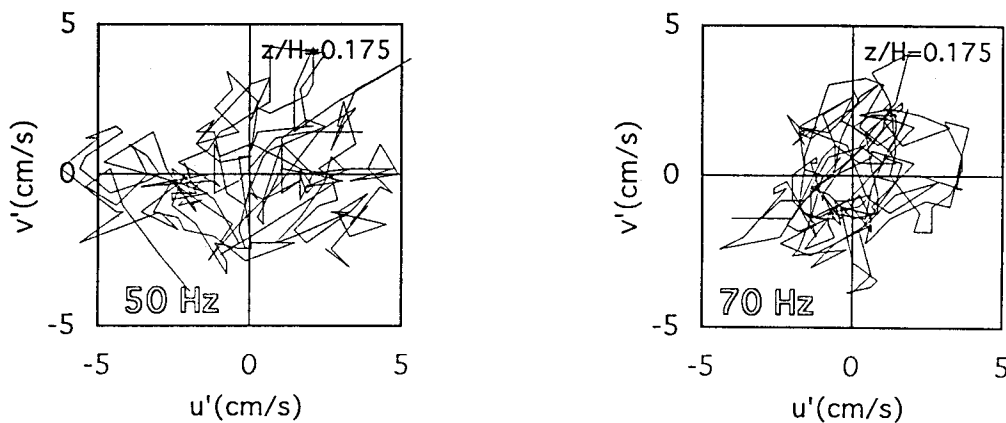
図7-12-b 乱れ速度 u' と v' の関係 (流路幅：小)

(4) 実験室水路の場合

水路幅 $B = 0.5 \text{ m}$ ，長さ 16.0 m の鋼製矩形断面直線開水路において実施した流速測定データから，乱れ速度 u' と w' の関係と乱れ速度 u' と v' の関係を求めたものの一例を図 7-13 に示す．これら場合，ほとんど判定不能に近いが，あえて判断すれば， u' と w' の関係である (a) 図から，相対水深 $z/H = 0.175$ の 50 Hz の方が u' の正負への広がりが大きく， 70 Hz のものは原点付近に集中するような傾向が見られる．そこで，求めるサンプリング周波数は 70 Hz とした．さらに， u' と v' の関係である (b) 図からも同様な傾向が判断できる．なお，図 7-14-a, -b にサンプリング周波数 50 Hz から 80 Hz のデータについてまとめて示す．



(a) u' と w' の関係



(b) u' と v' の関係

図7-13 乱れ速度 u' と w' ， u' と v' の関係 (実験室水路)

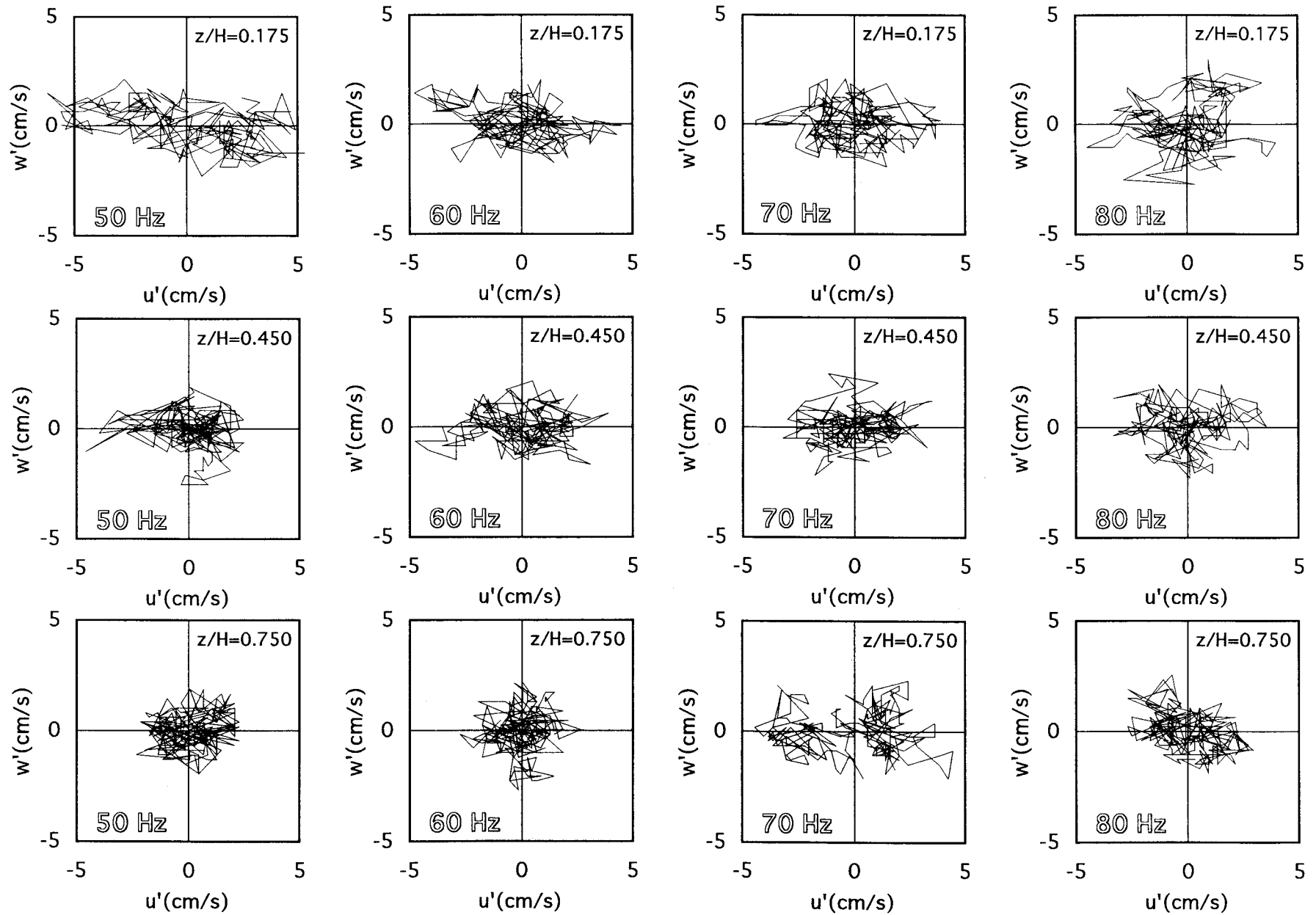


図7-14-a 乱れ速度 u' と w' の関係 (実験室水路)

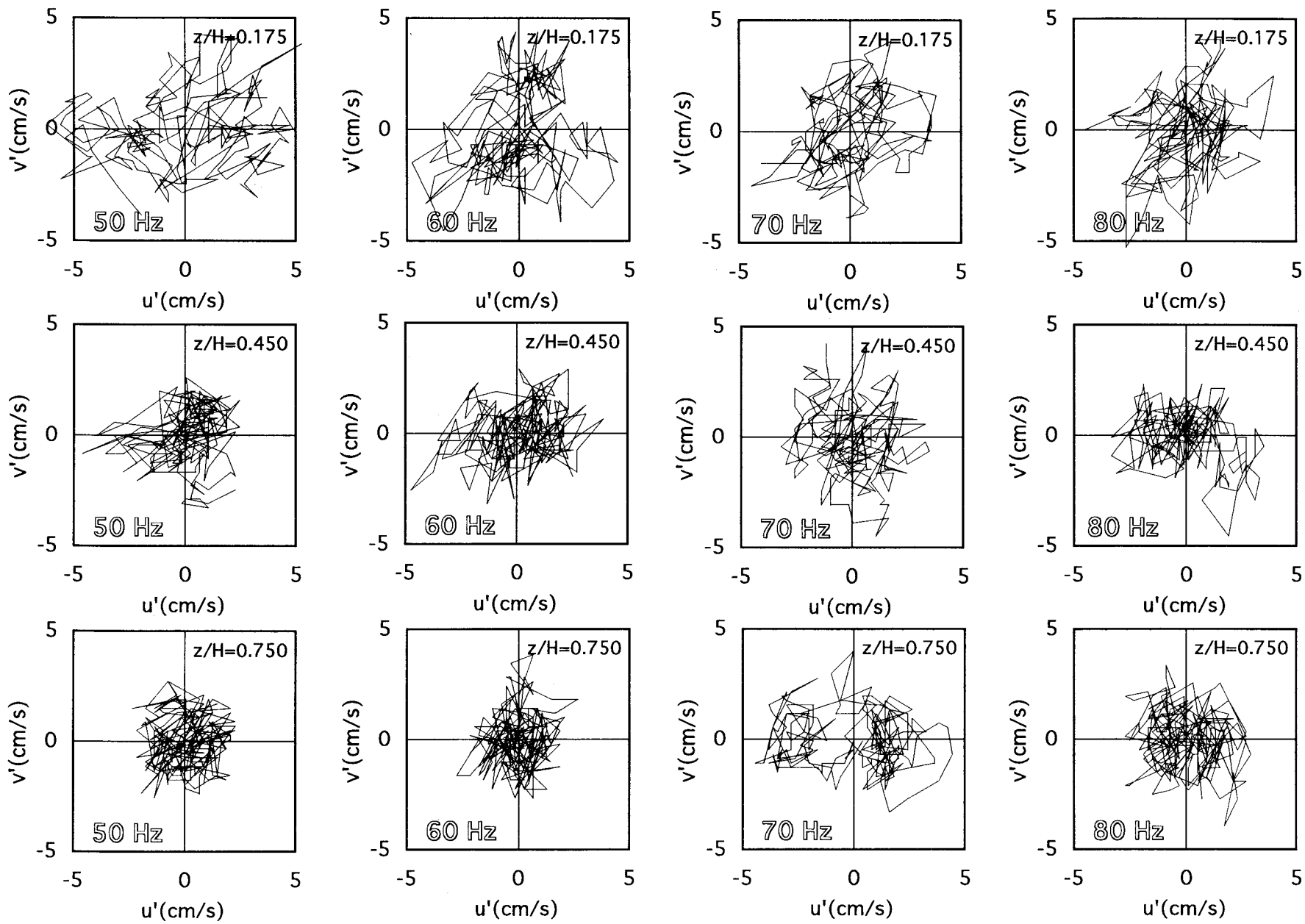


図7-14-b 乱れ速度 u' と v' の関係 (実験室水路)

(5) 他の流速計による実河川での測定の場合

流速変動の最大応答周波数が10 Hzの電磁センサー直径7 mmの2成分電磁流速計を用いて、流路幅 $B = 28.0$ mの武庫川湾曲部において実施した流速測定データから、乱れ速度 u' と w' の関係を求めたものの一例を図7-15に示す。この場合、流速計の最大応答周波数が10 Hzであるので、サンプリング周波数10 Hzまでしか図を求めていないが、これらの図から判断すると、明らかに、サンプリング周波数1 Hzと5 Hzの間で、その軌跡の形状が変化していると判断される。(判定基準:Aタイプ)よって、求めるサンプリング周波数は5 Hzとした。なお、図7-16にサンプリング周波数1 Hzから10 Hzのデータについてまとめて示す。

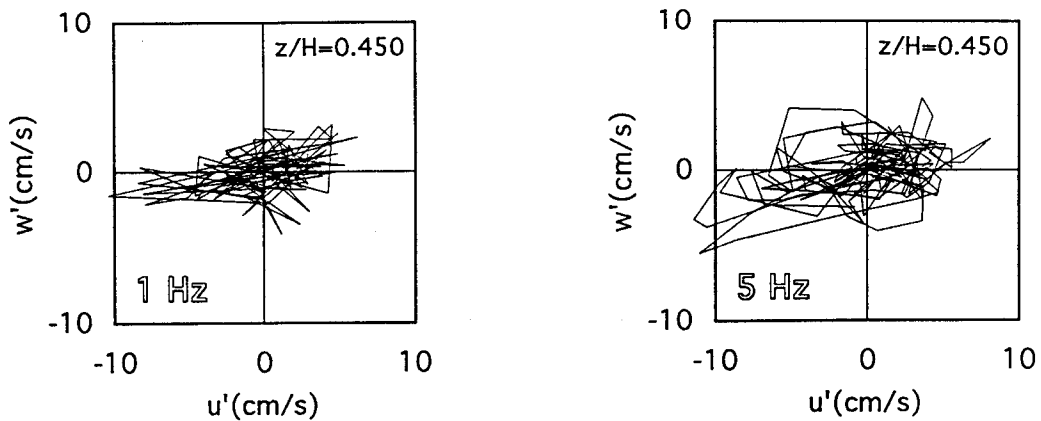


図7-15 乱れ速度 u' と w' の関係 (武庫川:電磁流速計)

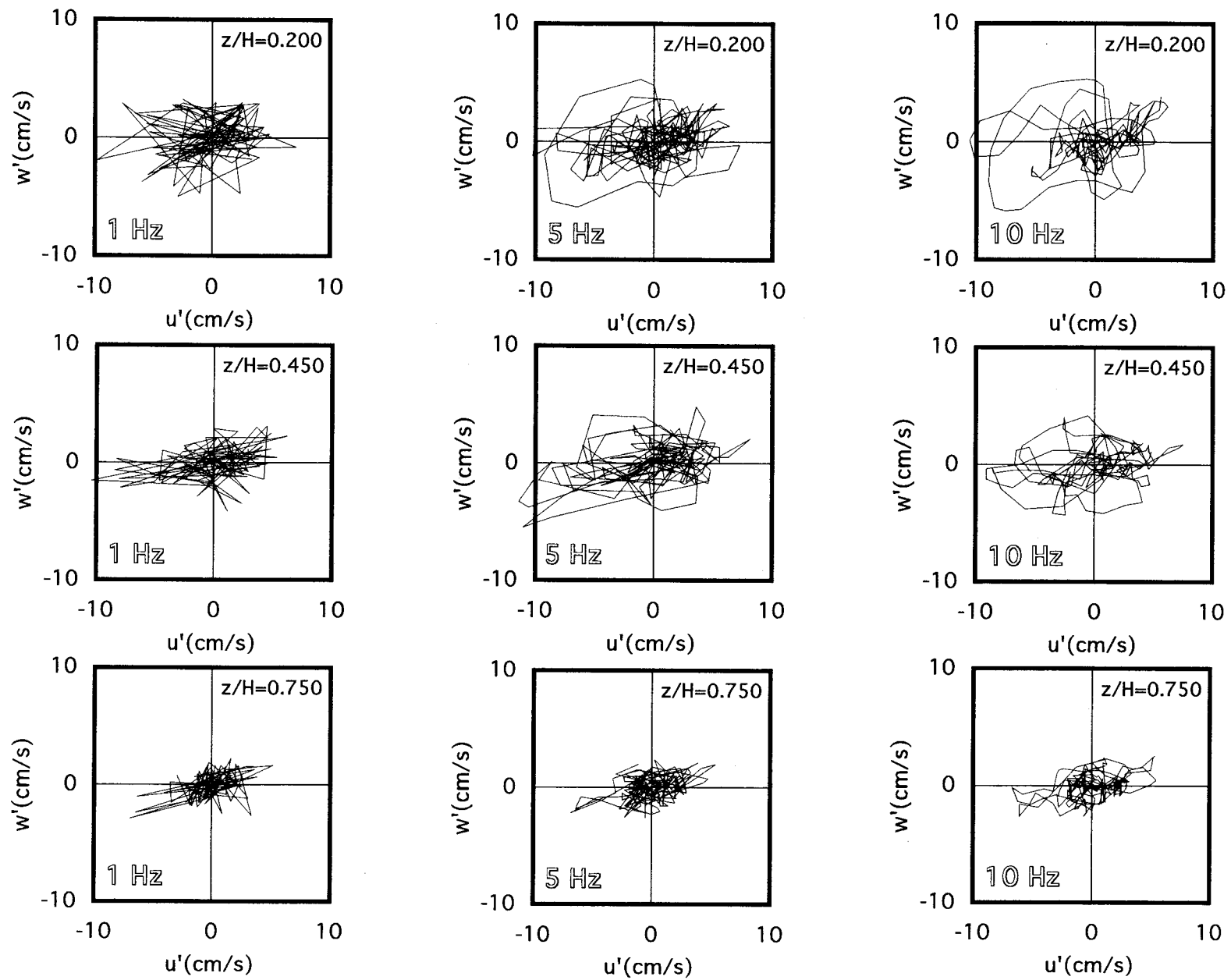


図7-16 乱れ速度 u' と w' の関係 (武庫川：電磁流速計)

(6) (5)と同じ測定地点付近における超音波流速計による測定の場合

超音波流速計を用いて(5)と同じ場所の武庫川において実施した流速測定データから、乱れ速度 u' と w' の関係を求めたものが図7-17である。これらの図から判断すると、判定基準A：タイプによりサンプリング周波数5 Hzと10 Hzの間でその軌跡の形状が変化していると判断される。よって、求めるサンプリング周波数は10 Hzとした。このように、異なる流速計を用いても、軌跡の形状から判断したサンプリング周波数にはほとんど違いがないことがわかる。

なお、図7-18にサンプリング周波数1 Hzから15 Hzのデータについてまとめて示す。

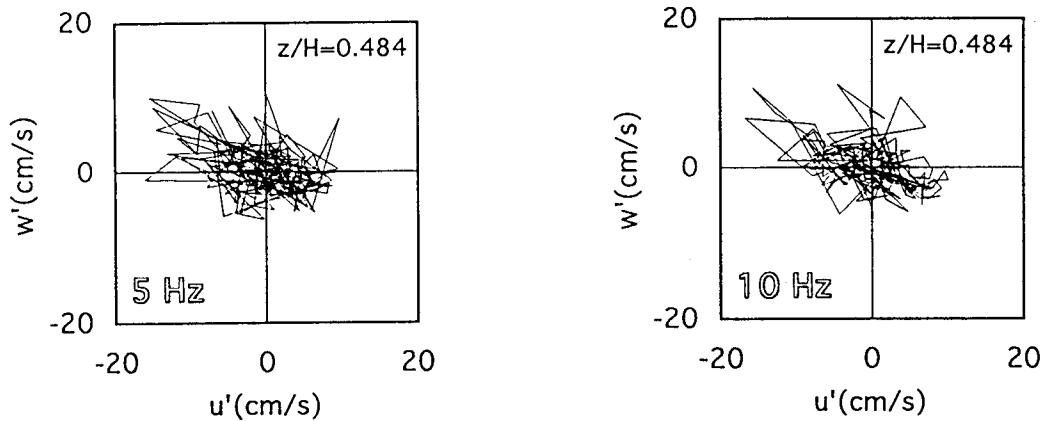


図7-17 乱れ速度 u' と w' の関係 (武庫川：超音波流速計)

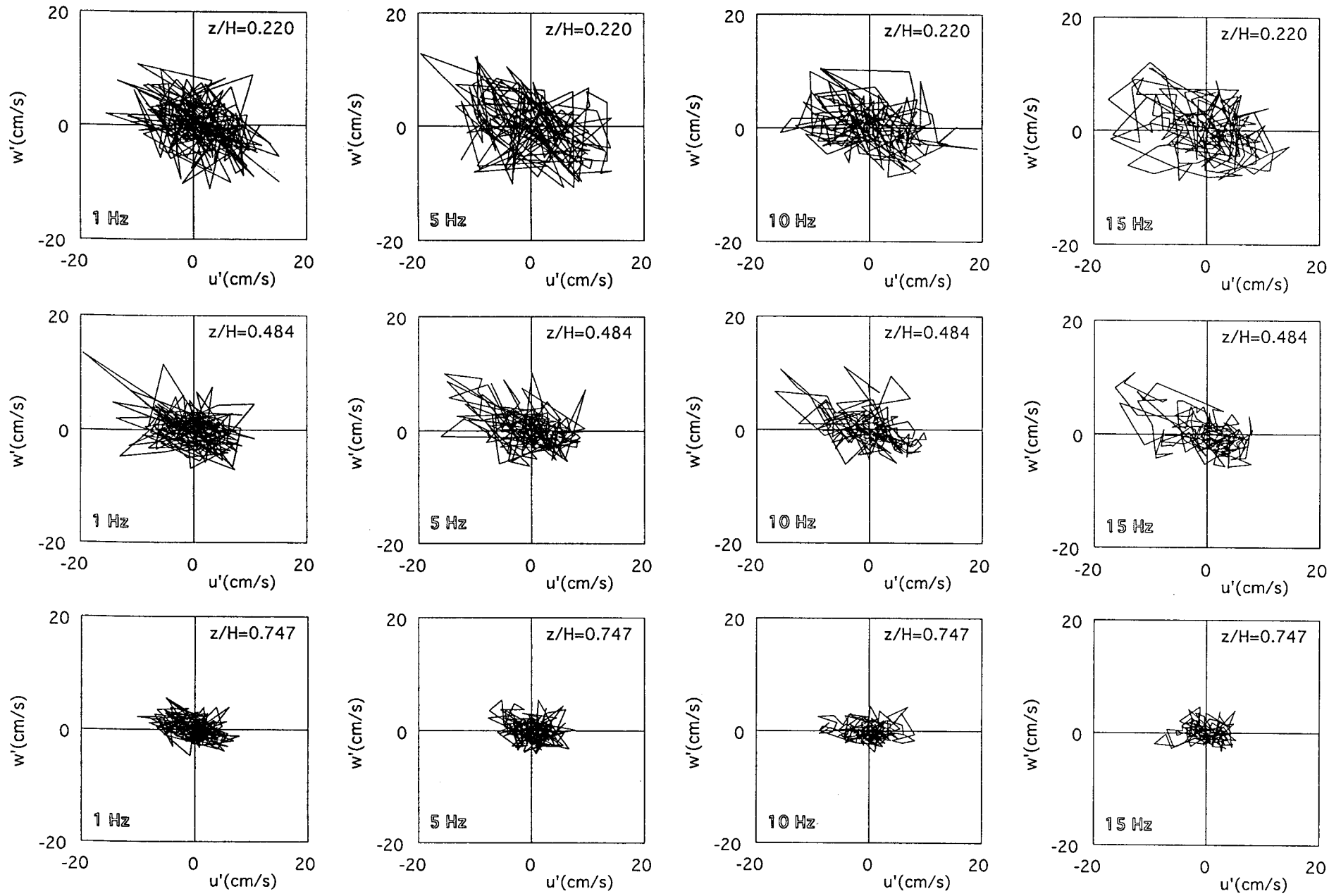


図7-18 乱れ速度 u' と w' の関係 (武庫川：超音波流速計)

以上の6ケースの結果を表にまとめると、表7-1のようになる。この表中の時間のスケールは乱れ速度 u' と w' の関係から求めたサンプリング周波数の逆数をとったものである。これらの値から、縦軸に流路幅を、横軸に時間のスケールをとり、図示したものが図7-19である。なお、図中の（大）、（中）、（小）は流路幅の大きさの大、中、小の分類を示している。

この図から、流路幅という河川の規模を表す水理パラメータと今回得られた時間のスケールとの間には強い相関が認められる。言い換えれば、乱流場に存在する渦スケールを評価する時間のスケールが大きいということはその渦スケールも大きいことを意味すると考えられる。このことから、実河川における流路幅という長さのスケールとその乱流場に存在する渦スケールを代表する外部スケールに比例的な関係があると考えられ、今回得られた時間のスケールの大きさが大きいほどその乱流場に存在する外部スケールは大きいと考えられる。

次に、図7-19と同じ時間のスケールを用いて、縦軸にレイノルズ応力の分布から求めた摩擦速度 U_r をとり、それらの関係を図示したものが図7-20である。この図を見れば明らかなように、武庫川湾曲部での超音波流速計と電磁流速計による測定データはその他のデータから大きく外れており、摩擦速度と求められた時間のスケールには流路幅と時間のスケールのような比例的な関係は認められない。このことから、河床の粗さを表す水理パラメータである摩擦速度が時間のスケール、言い換えれば、その乱流場に存在する渦スケールを代表する外部スケールと何らかの関係を示すとは考え難いと思われる。さらに、今回実施した現地での測定ケースの流路幅と水深の比 B/H を見ると10以上となっており、水深に比べて流路幅の大きい実河川の場合、乱流場に存在する外部スケールは図7-19に示されたように、流路幅のような水理パラメータと強い相関を有すると考えられる。

表7-1 時間のスケールと流路幅および摩擦速度

ケース	サンプリング 周波数	時間のスケール(sec)	流路幅 B (m)	摩擦速度 U_r (cm/s)	B/H
市川（流路幅：大）	10 Hz	0.100	31.7	11.96	7.6
武庫川（流路幅：中）	20 Hz	0.050	16.0	5.64	4.7
有野川（流路幅：小）	50 Hz	0.020	3.1	3.10	1.0
実験室水路	70 Hz	0.014	0.5	1.50	2.5
武庫川湾曲部 （電磁流速計による）	5 Hz	0.200	28.0	1.10	15.5
” （超音波流速計による）	10 Hz	0.100	28.0	3.50	18.6

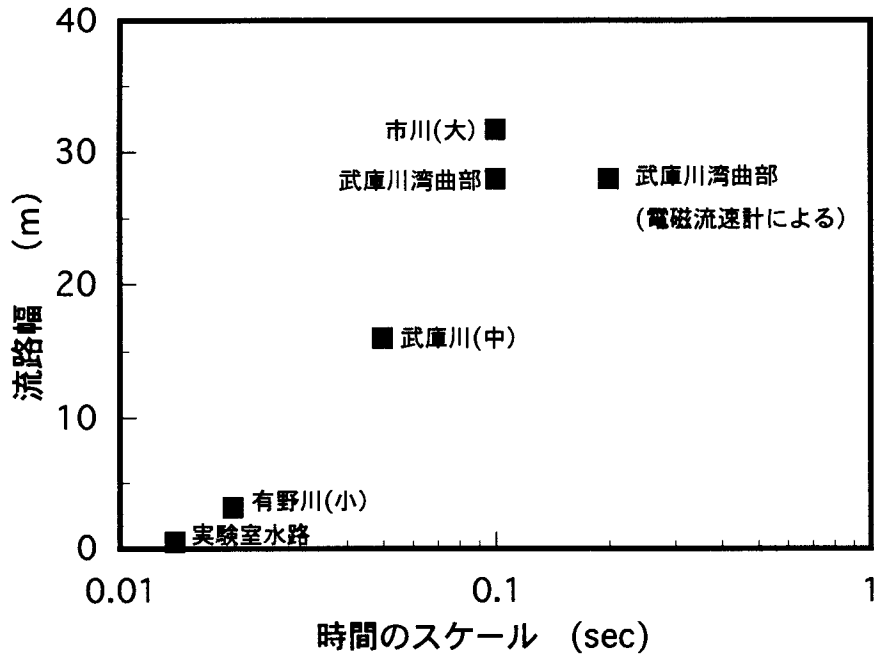


図7-19 時間のスケールと流路幅の関係

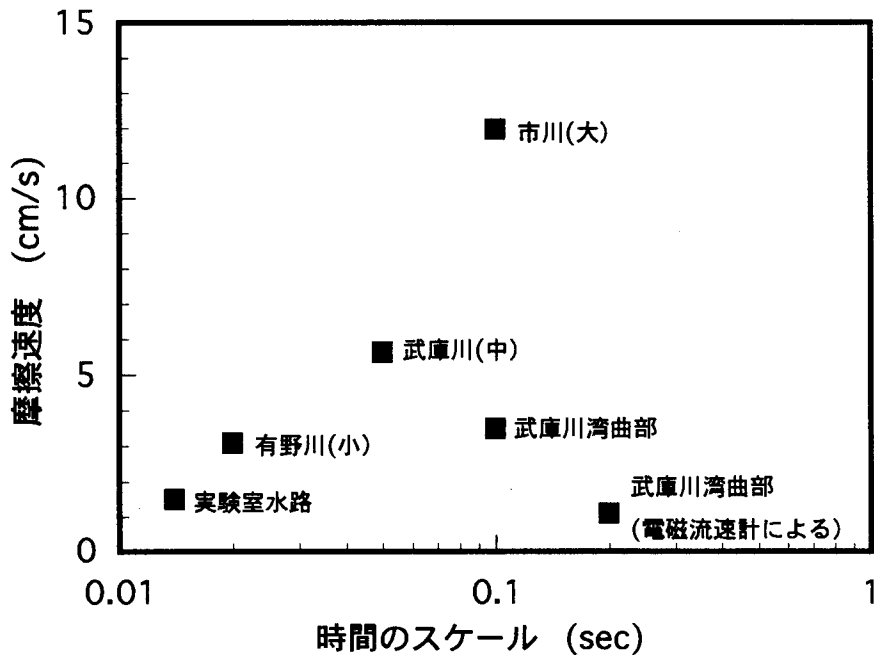


図7-20 時間のスケールと摩擦速度の関係

7. 6 サンプリング周波数とエネルギー・スペクトルについて

前節では、実河川での乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、流速の乱れ変動特性を正しく評価するサンプリング周波数がどのような大きさであるかを検討したが、今回用いた手法は乱れ変動成分の描く“トラジェクトリ”という軌跡の形状変化を人間の目で判断するという方法を採用しているため、あいまいさが残る。その上、軌跡の形状変化点のサンプリング周波数を正確に求めるためには、さらに、きめ細かなサンプリング周波数で同様の作業を繰り返す必要がある。そこで、上述の手法で求められたサンプリング周波数を基準にして、エネルギー・スペクトルの分布より、乱れエネルギーの高いところからエネルギーの散逸の開始点を検出してその周波数から実河川の乱流場に存在する外部スケールを求め、前節において得られた流路幅とスケールの関係の定量的な検討を行う。

7. 6. 1 サンプリング周波数によるエネルギー・スペクトルの比較

まず、最初に、サンプリング周波数の違いによるエネルギー・スペクトル特性の変化を調べるために、サンプリング周波数 5.12 Hz, 25.6 Hz, 128 Hz の 3 種類について流下方向のエネルギー・スペクトル S_{uu} を求める。データ処理にはスペクトラムアナライザを用いて、サンプリング個数を 1024 個とする処理を 10 回以上行い、その平均値を求めた。対象とした河川は前節までに議論を重ねてきた流路幅の大、中、小のケース、すなわち、市川、武庫川、有野川のケースである。それぞれのエネルギー・スペクトルを図 7-21-1~3 に示す。市川のケースを見ると、エネルギー・スペクトルの分布の傾きが水平となる領域がサンプリング周波数 128 Hz (右側の図) では確認できないが、サンプリング周波数 25.6 Hz (中央の図) では、その存在がぼんやりと確認でき、サンプリング周波数 5.12 Hz の場合にはっきりと確認できる。武庫川のケースを見ると、市川の場合と同様の結果が得られている。これら 3 枚の図のサンプリング周波数 5.12 Hz の図に注目して見ると、エネルギー・スペクトル分布の傾きが水平の領域からエネルギー・スペクトルが減少し始める位置が流路幅の大きなケースの方が低周波数側にあることがわかる。

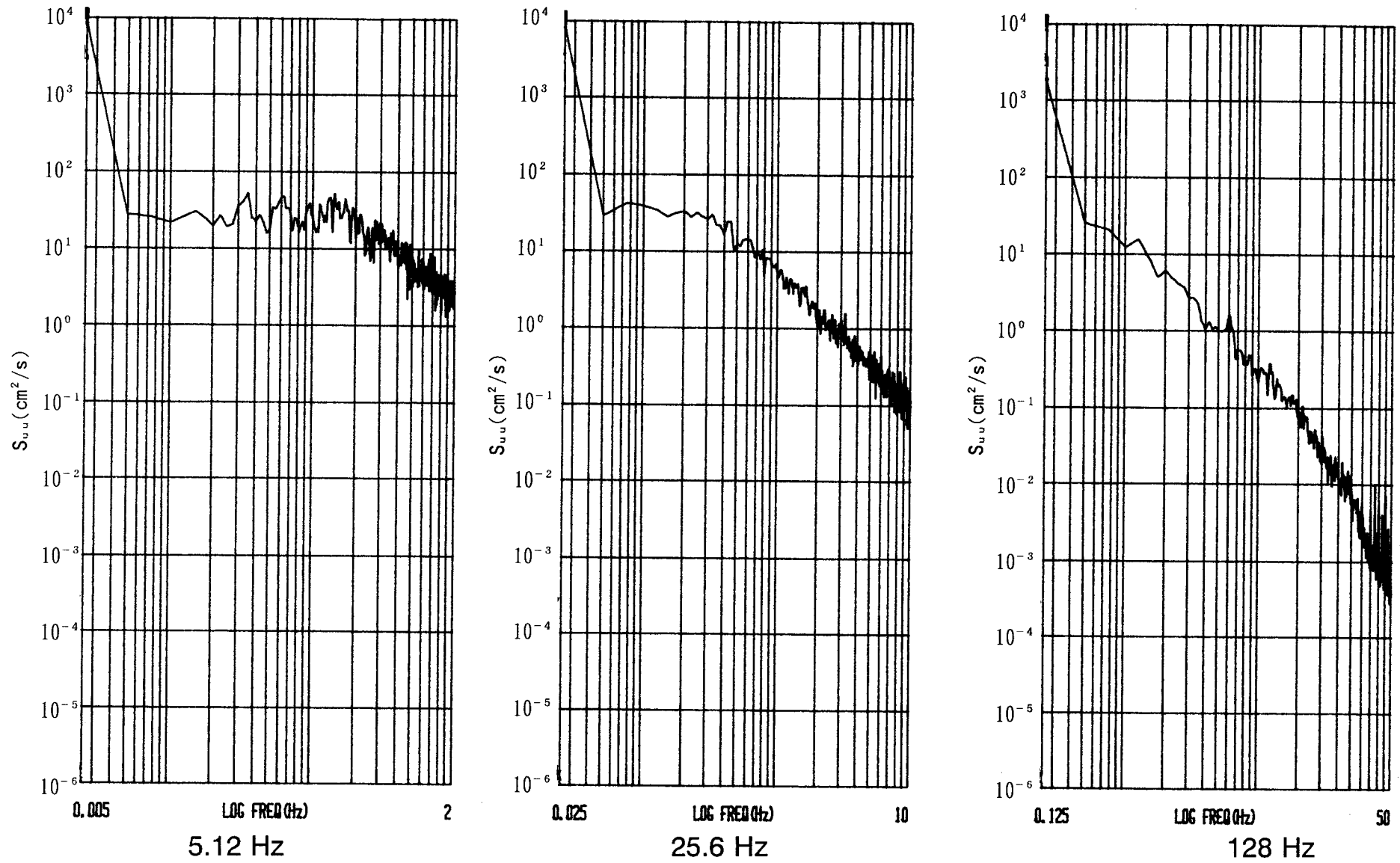


図7-21-1 サンプリング周波数によるエネルギー・スペクトルの比較 (市川, 流路幅: 大)

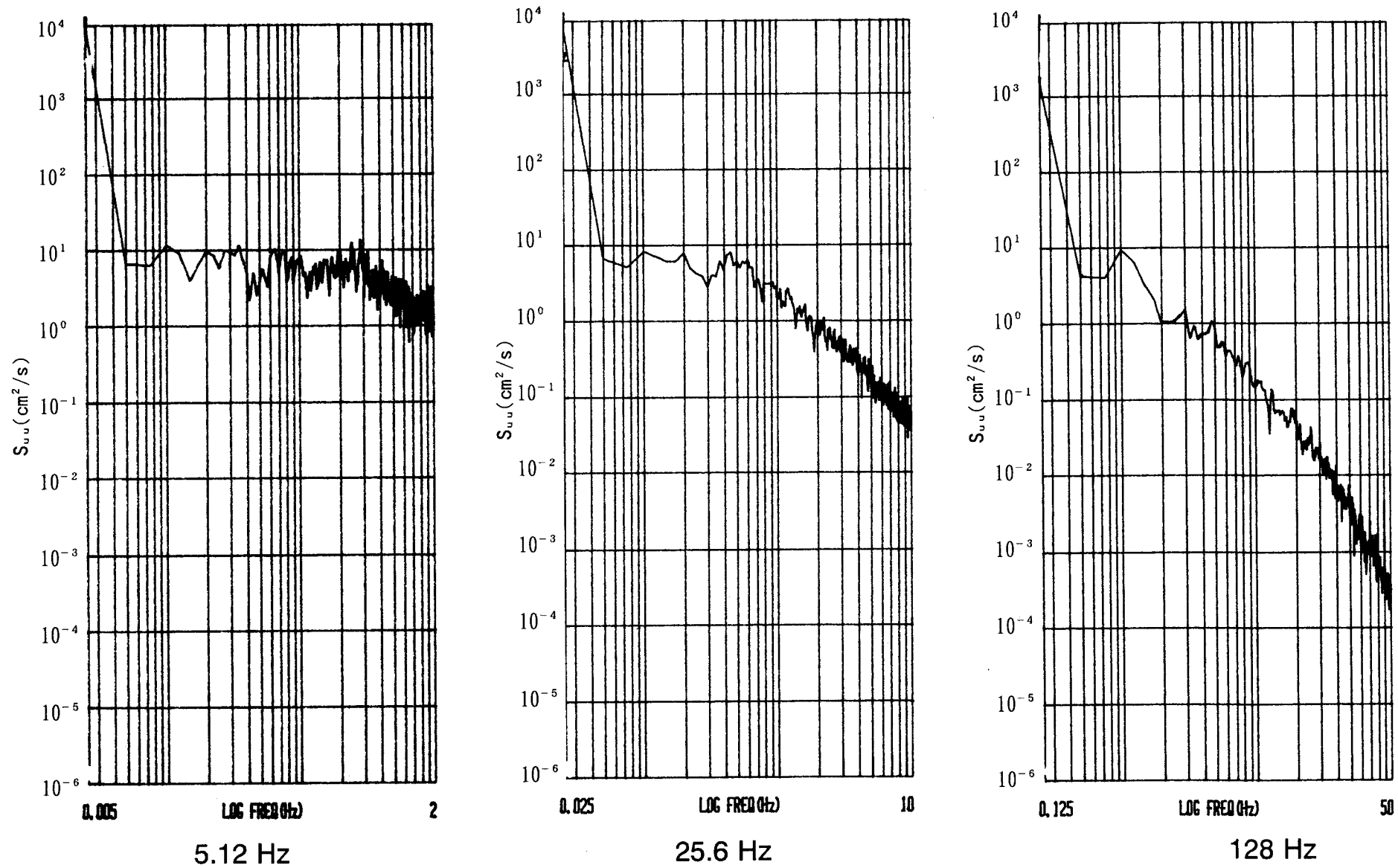


図7-21-2 サンプル周波数によるエネルギー・スペクトルの比較 (武庫川, 流路幅: 中)

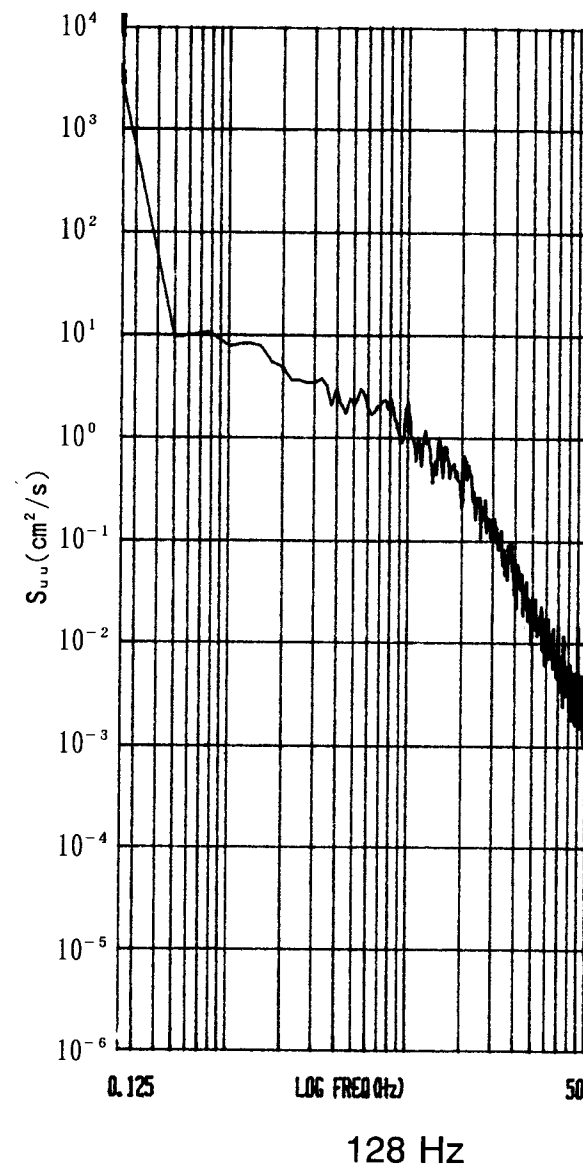
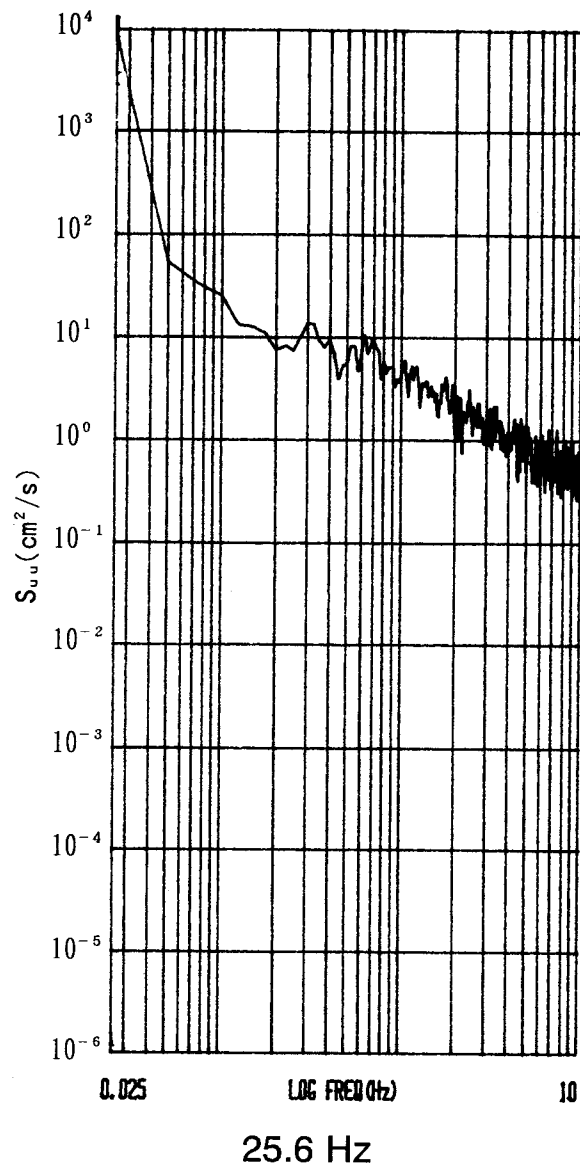
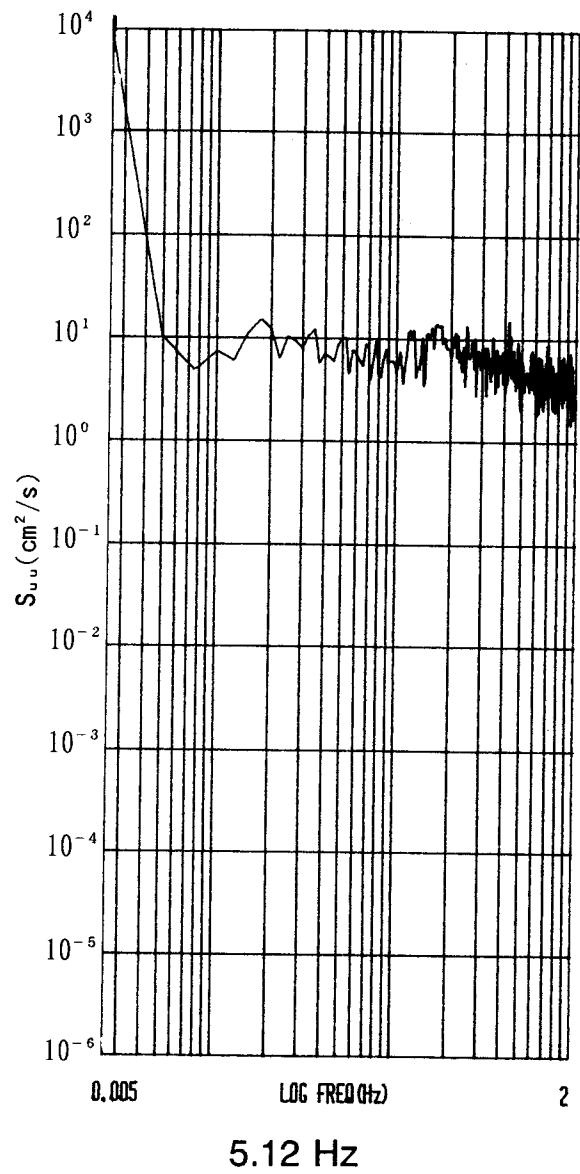


図7-21-3 サンプル周波数によるエネルギー・スペクトルの比較 (有野川, 流路幅: 小)

7. 6. 2 水理パラメータと外部スケールの関係について

前節のエネルギー・スペクトルの傾きの変化する周波数の大きさが種々の実河川でどのような違いがあるのかを調べるため、種々の実河川でエネルギー・スペクトルを求める。本節で対象とした河川は第4章の河川直線部の測定ケースの中で、次のような条件を満足するものとした。すなわち、5.12 Hz のサンプリング周波数でデータ個数を8192個（測定時間で言えば、1600秒、エネルギー・スペクトルを求める際に8回の平均化が可能である）以上とることができるような長時間の観測記録の残っている測定ケースとした。

このような条件を満足するような測定ケースは加古川、千種川、市川、武庫川、猪名川、篠山川、有野川の7河川の相対水深 $z/H = 0.2, 0.5, 0.75$ 付近での測定の21ケースであった。なお、一般に、河川の主流の鉛直流速分布の中で最大流速点は相対水深 $z/H = 0.8$ 付近であることが知られており、今回の測定ケース $z/H = 0.75$ の位置は正に最大流速点に相当している。また、これらの測定ケース以外に、比較のために、実験室水路の場合についてもエネルギー・スペクトルを求めた。

以下に各ケースについて順番に述べていく。

(1) 加古川の場合

加古川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：大に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-22である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数5 Hzから10 Hzの間で軌跡が、正から負へ、あるいは、負から正へと激しく変動し、鋭く尖った形状から、一部の軌跡の形状がループ状の軌跡を描き始める状態にある、いわゆる、“Aタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は10 Hzとなる。そして、この10 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は5.12 Hz であるので、加古川の場合、サンプリング周波数5.12 Hz でエネルギー・スペクトルを求めてみた。その結果を図7-23に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、高周波数側の傾きを持つ領域のスペクトルの値の中心線とスペクトル値の水平線との交点を求めるという簡単な作図により求める周波数は0.14 Hz であることがわかる。同様にして、(b)では0.20 Hz、(c)では0.60 Hzとなる。以上のように、周波数が得られたので、周波数の逆数をとることにより、時間を算出し、その値を時間の外部スケールとした。つまり、(a) 7.14 sec、(b) 5.00 sec、(c) 1.67 secとそれぞれ算出される。

さらに、各水深における局所の平均流速を得られた周波数で割り算すれば長さの次元をもつ平均流速による外部スケールが得られる。同様にして、河川の摩擦速度を得られた周波数で割り算すれば摩擦速度による外部スケールが得られる。

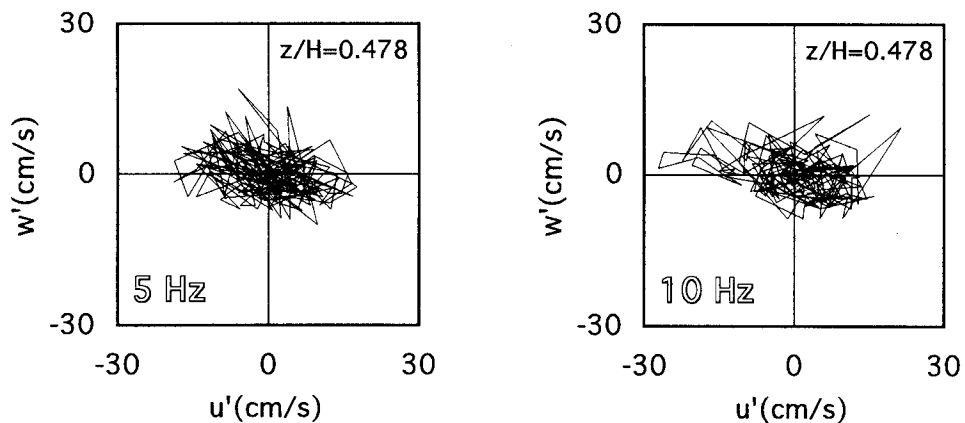
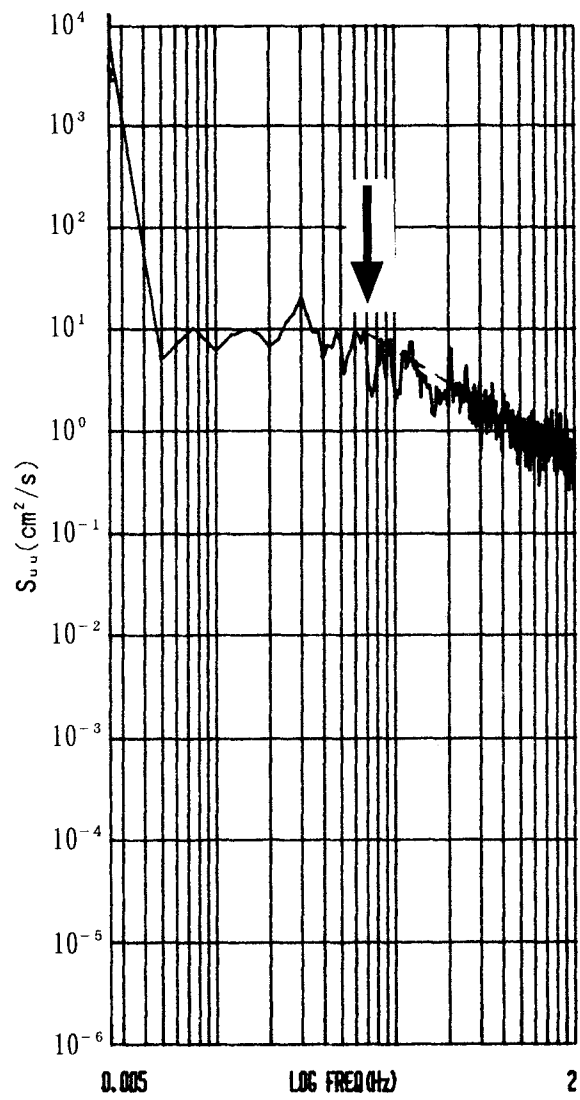
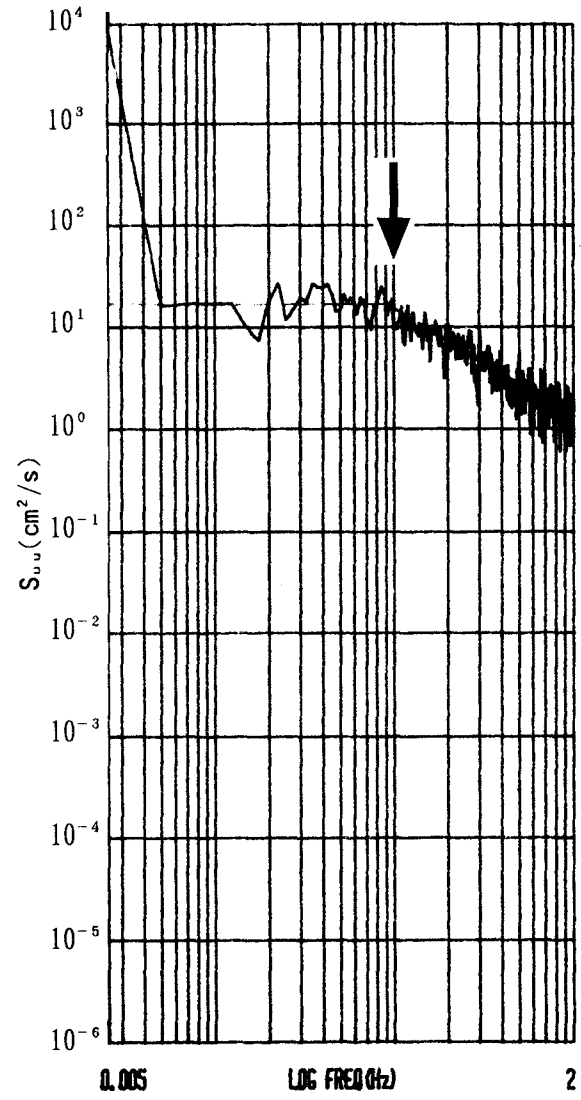


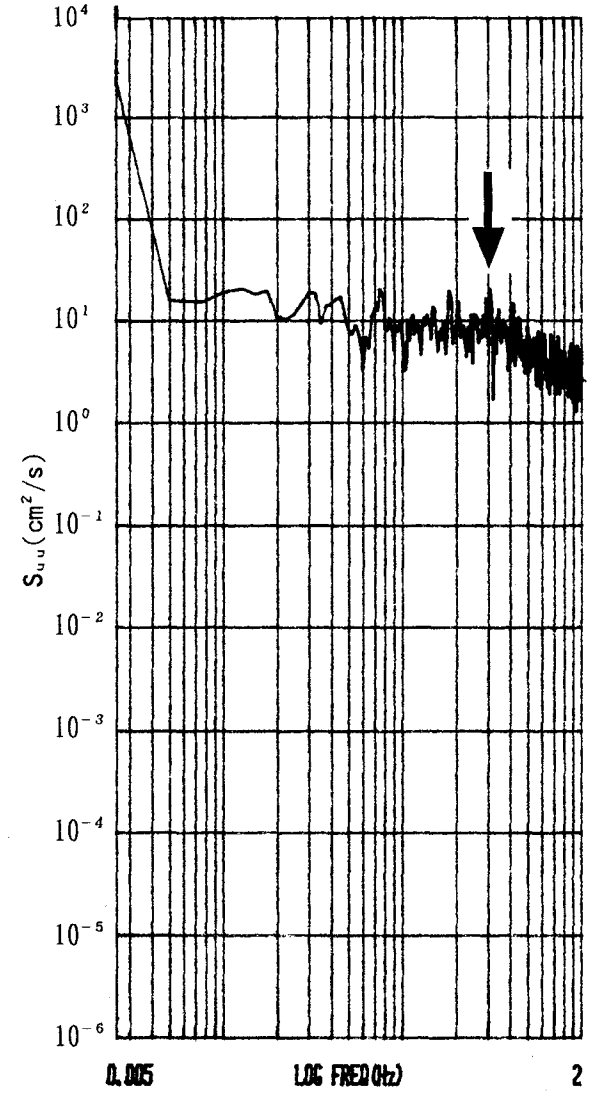
図7-22 乱れ速度 u' と w' の関係
(加古川, 流路幅: 大)



(a) $z/H=0.759$



(b) $z/H=0.478$



(c) $z/H=0.178$

図7-23 各水深のエネルギー・スペクトル (加古川, 流路幅: 大)

(2) 千種川の場合

千種川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：大に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-24である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数5 Hzから10 Hzの間で軌跡が、正から負へ、あるいは、負から正へと激しく変動し、鋭く尖った形状から、一部の軌跡の形状がループ状の軌跡を描き始める状態にある、いわゆる、“Aタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は10 Hzとなる。そして、この10 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は5.12 Hz であるので、サンプリング周波数5.12 Hz でエネルギー・スペクトルを求める。その結果を図7-25に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、上述の簡単な作図により求める周波数は0.22 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.20 Hz、(c)では0.30 Hzとなる。

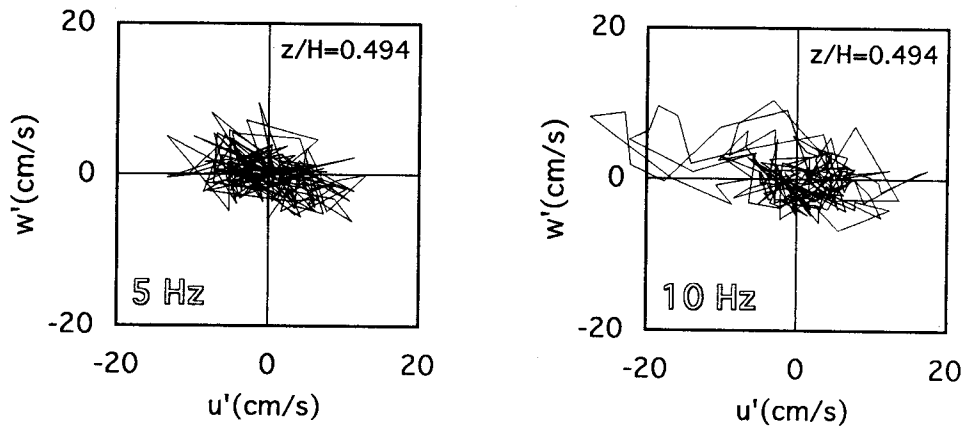


図7-24 乱れ速度 u' と w' の関係
(千種川，流路幅：大)

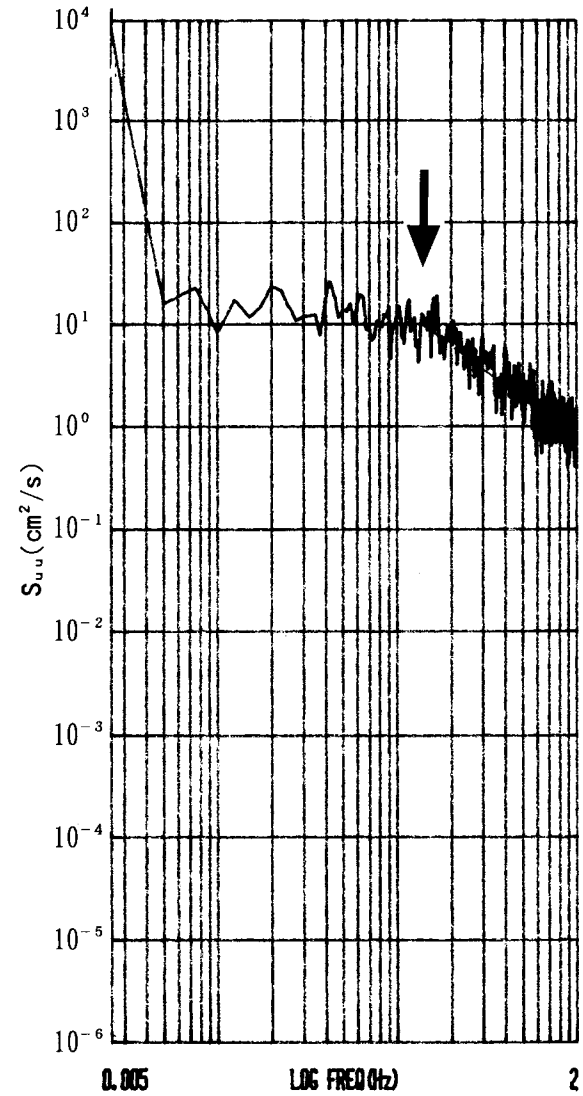
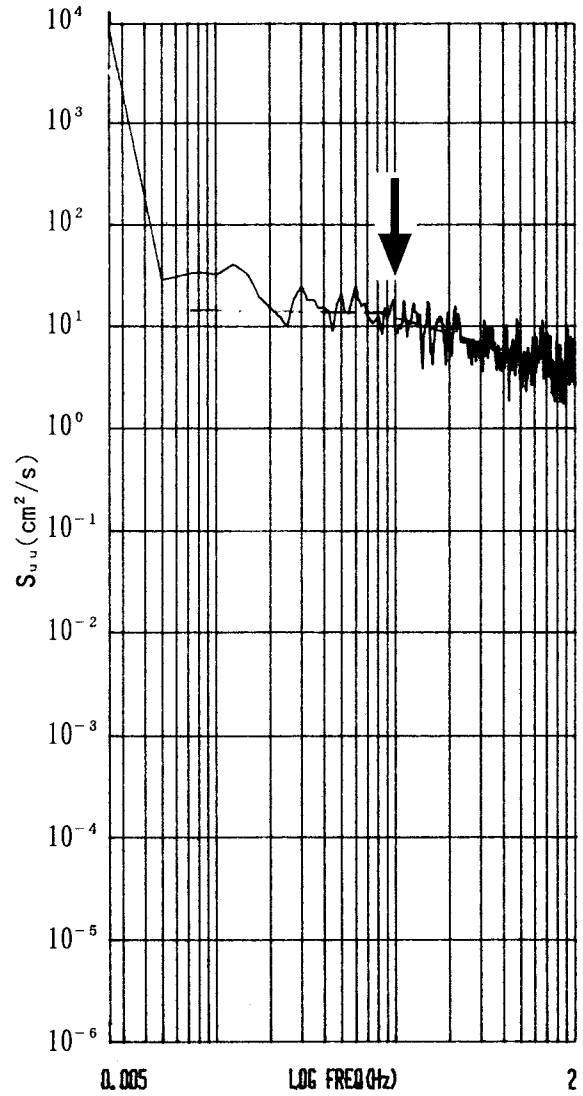
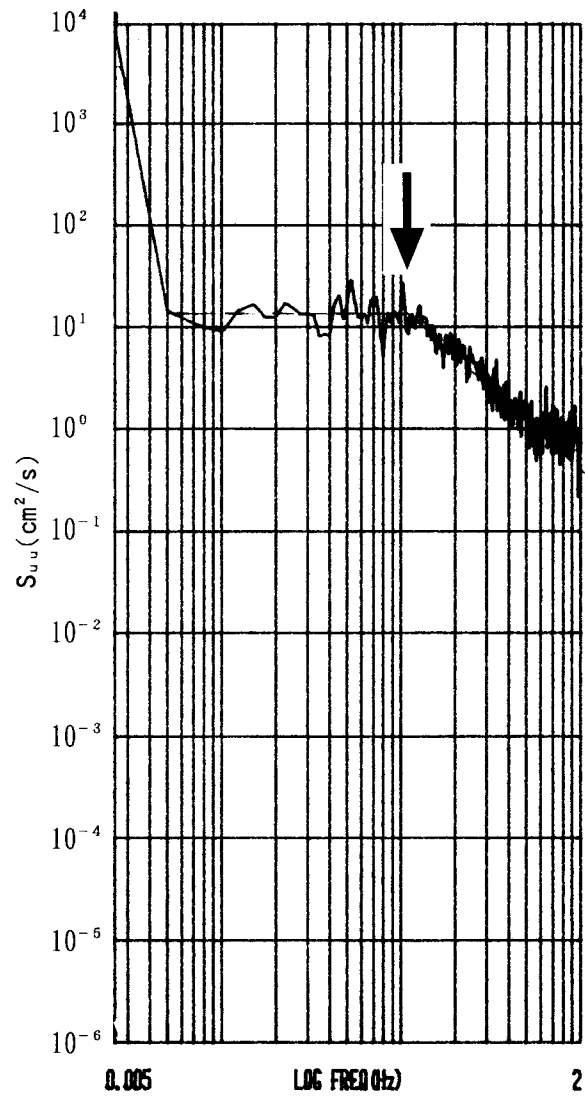


図7-25 各水深のエネルギー・スペクトル (千種川, 流路幅: 大)

(3) 市川の場合

市川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：大に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-26である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数5 Hzから10 Hzの間で軌跡が、正から負へ、あるいは、負から正へと激しく変動し、鋭く尖った形状から、一部の軌跡の形状がループ状の軌跡を描き始める状態にある、いわゆる、“Aタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は10 Hzとなる。そして、この10 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は5.12 Hz であるので、サンプリング周波数5.12 Hz でエネルギー・スペクトルを求める。その結果を図7-27に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、上述の簡単な作図により求める周波数は0.22 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.20 Hz、(c)では0.30 Hzとなる。

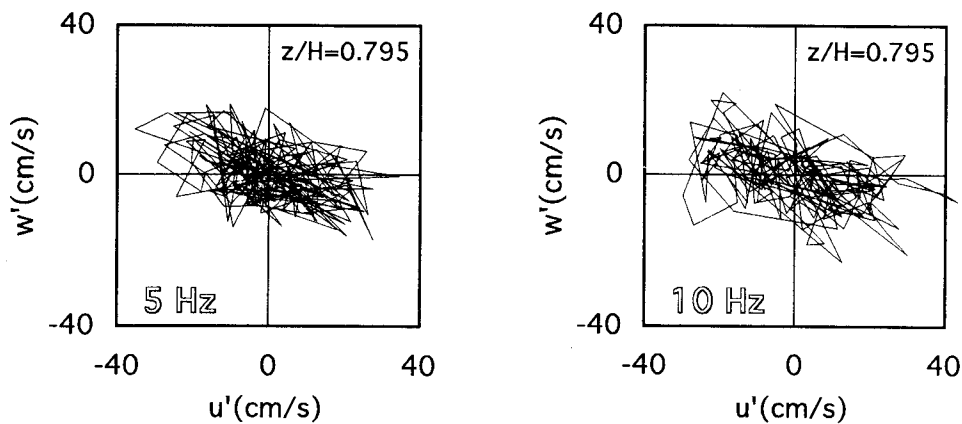
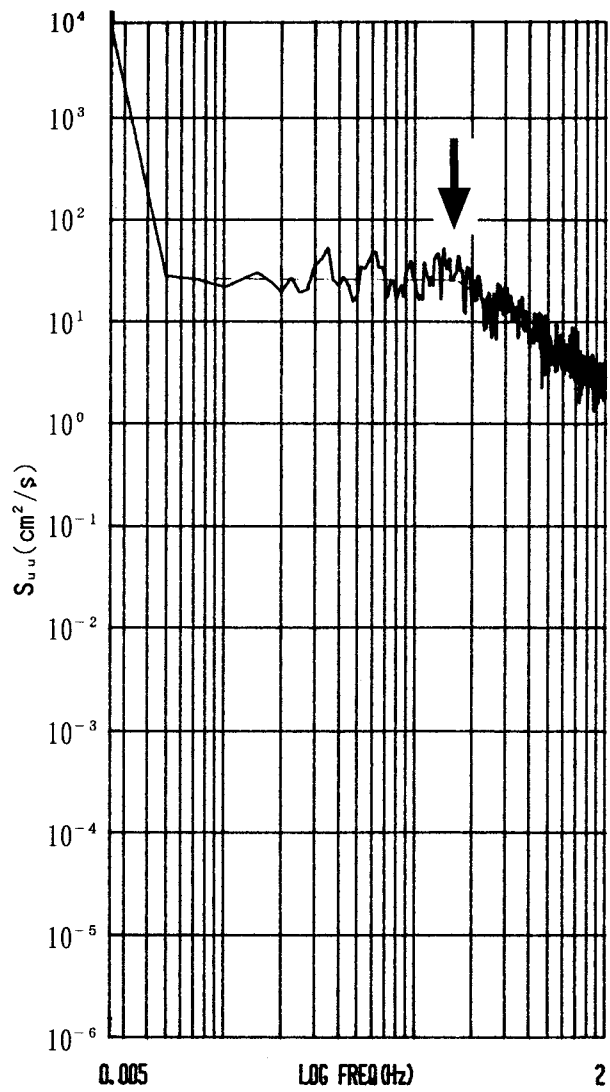
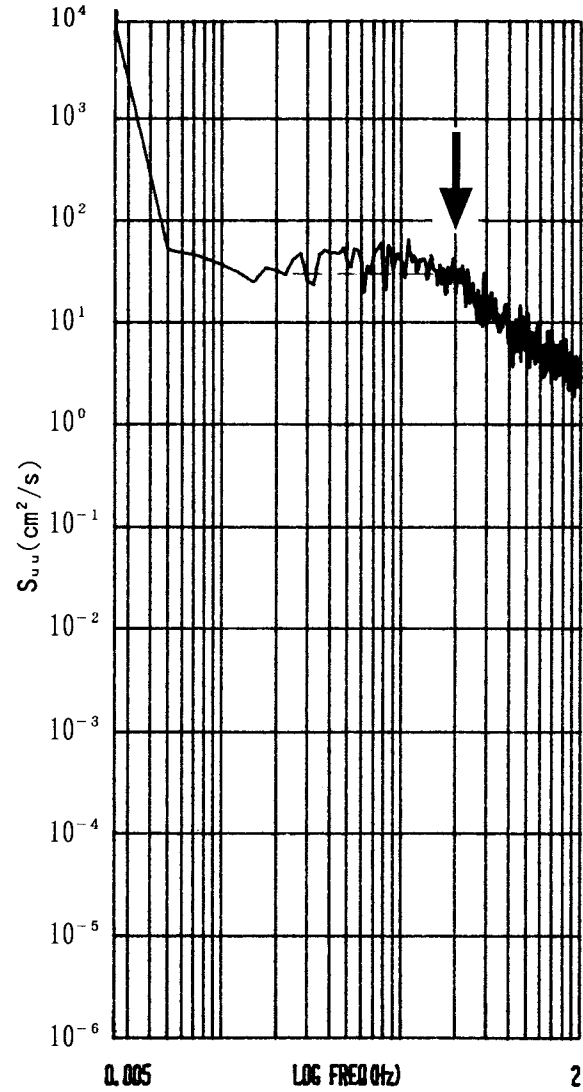


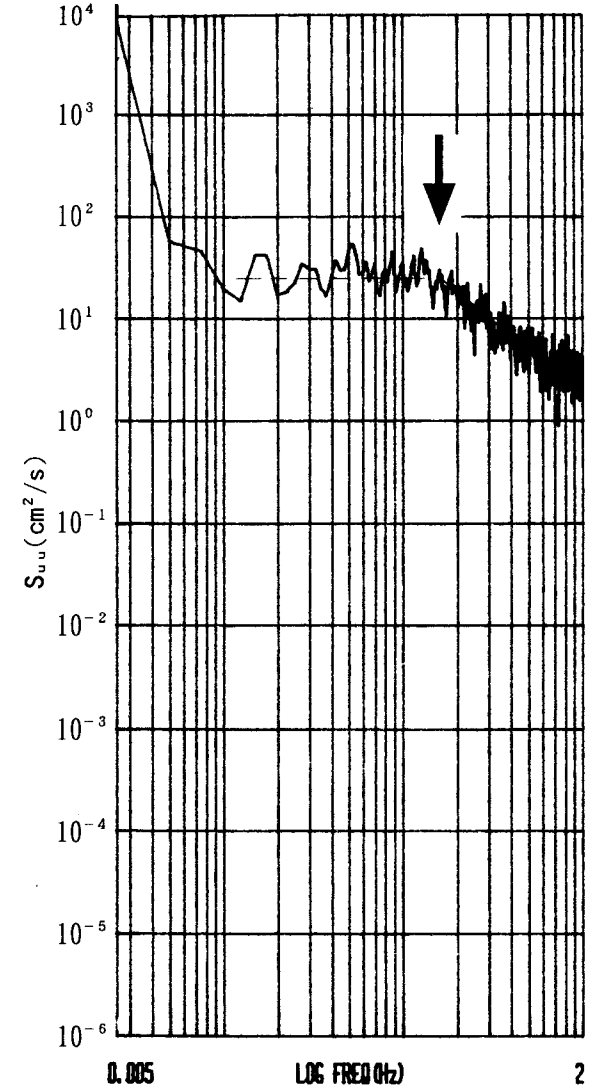
図7-26 乱れ速度 u' と w' の関係
(市川, 流路幅: 大)



(a) $z/H=0.795$



(b) $z/H=0.518$



(c) $z/H=0.265$

図7-27 各水深のエネルギー・スペクトル (市川, 流路幅: 大)

(4) 武庫川の場合

武庫川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：中に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-28である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数15 Hzから20 Hzの間で軌跡が、軌跡全体の形状が勾配を有すると判断できるかどうかという、いわゆる、“Bタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は10 Hzとなる。そして、この20 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は12.8 Hz であるので、サンプリング周波数 12.8 Hz でエネルギー・スペクトルを求める。その結果を図7-29に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、上述の簡単な作図により求める周波数は0.22 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.20 Hz、(c)では0.30 Hzとなる。

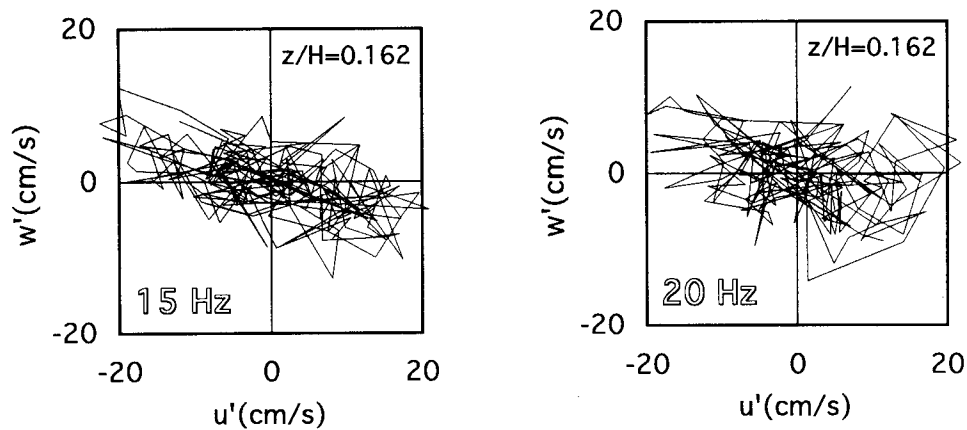


図7-28 乱れ速度 u' と w' の関係
(武庫川，流路幅：中)

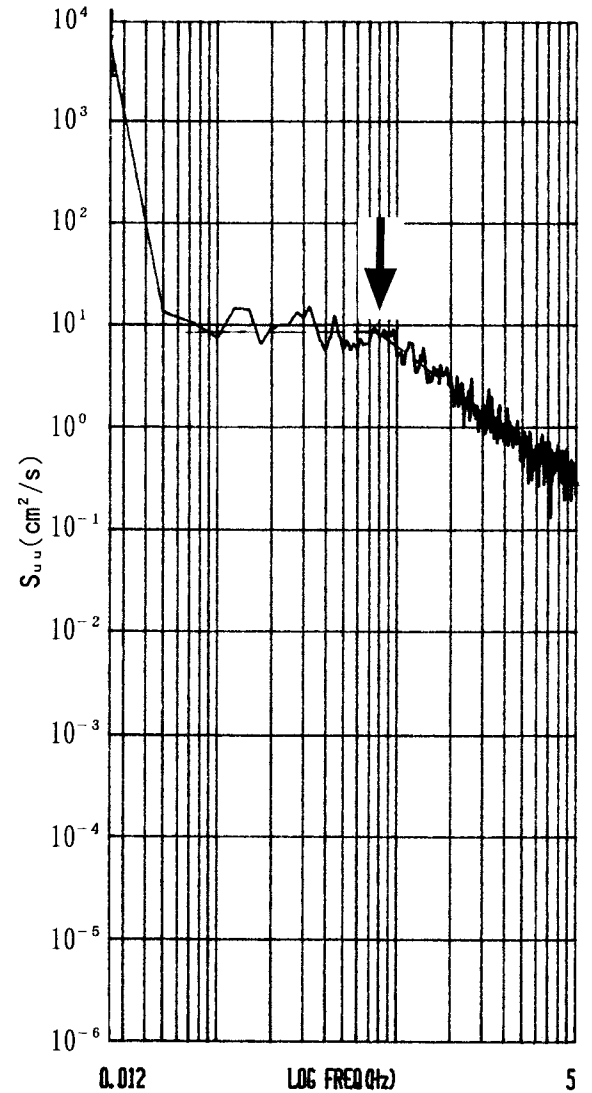
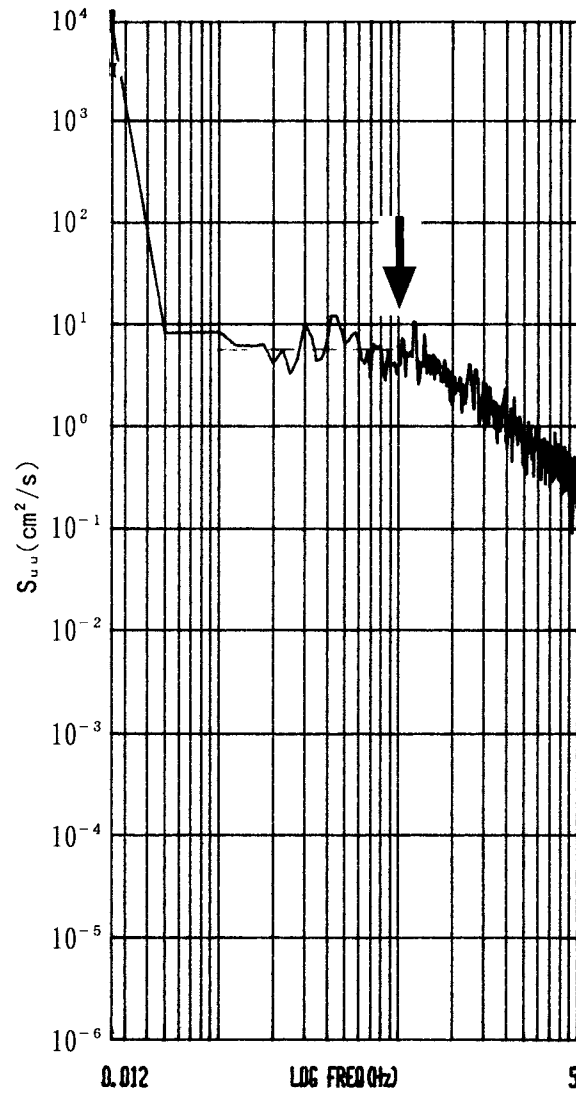
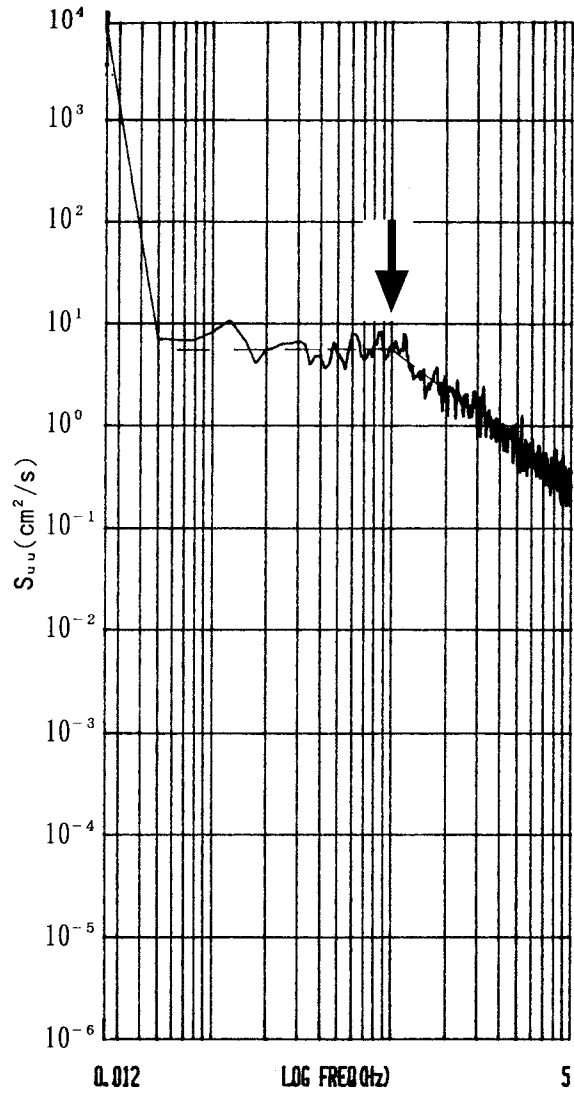


図7-29 各水深のエネルギー・スペクトル (武庫川, 流路幅: 中)

(5) 猪名川の場合

猪名川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：中に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-30である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数10 Hzから15 Hzの間で軌跡が、軌跡全体の形状が勾配を有すると判断できるかどうかという、いわゆる、“Bタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は15 Hzとなる。そして、この15 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は12.8 Hz であるので、サンプリング周波数12.8 Hz でエネルギー・スペクトルを求めたところ、スペクトルの傾きが水平になる領域が存在しなくなった。そこで、サンプリング周波数を一つレンジを下げて、5.12 Hz でエネルギー・スペクトルを求めた。その結果を図7-31に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、簡単な作図により求める周波数は0.18 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.16 Hz、(c)では0.18 Hzとなる。

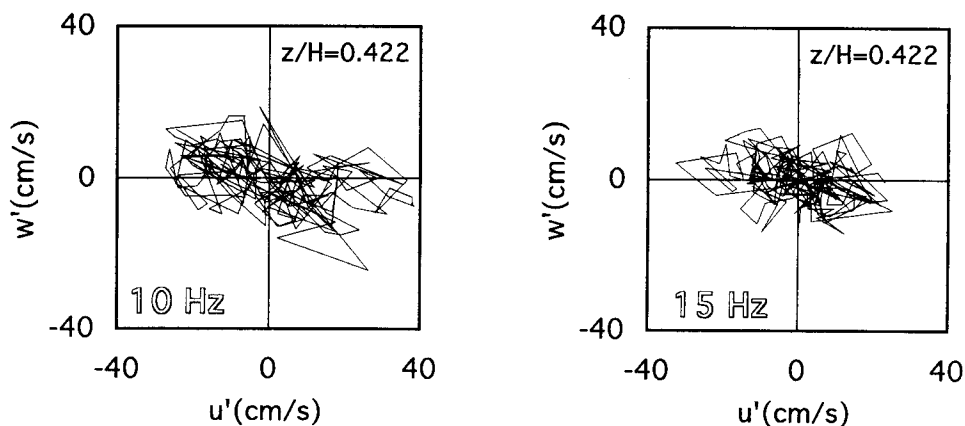
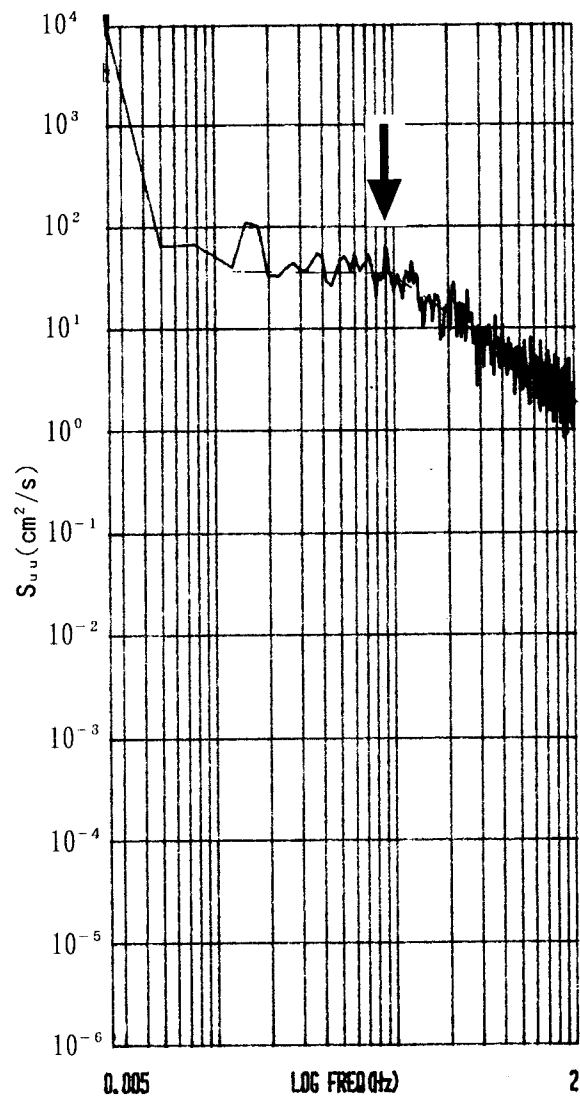
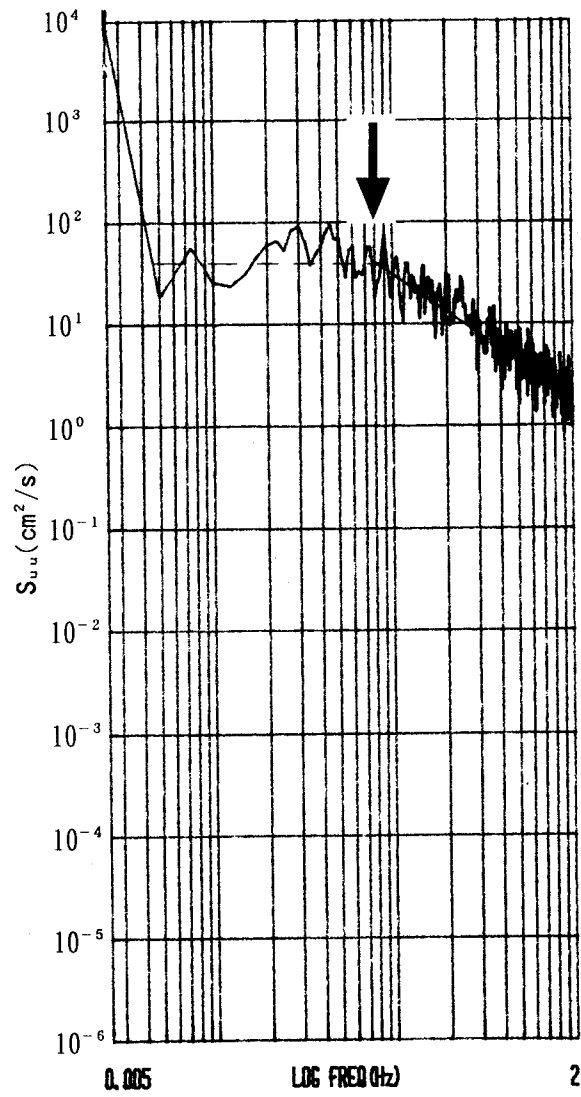


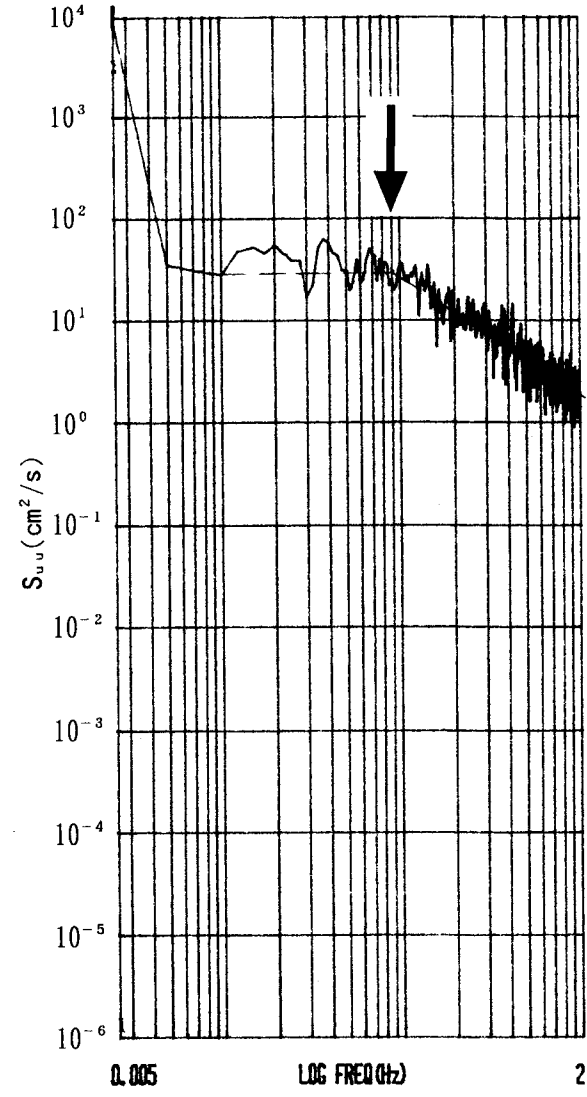
図7-30 乱れ速度 u' と w' の関係
(猪名川, 流路幅：中)



(a) $z/H=0.750$



(b) $z/H=0.422$



(c) $z/H=0.125$

図7-31 各水深のエネルギー・スペクトル (猪名川, 流路幅: 中)

(6) 篠山川の場合

篠山川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：中に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-32である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数15 Hzから20 Hzの間で軌跡が、軌跡全体の形状が勾配を有すると判断できるかどうかという、いわゆる、“Bタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は20 Hzとなる。そして、この20 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は12.8 Hz であるので、武庫川の場合、サンプリング周波数12.8 Hzでエネルギー・スペクトルを求める。その結果を図7-33に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、簡単な作図により求める周波数は0.40 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.30 Hz、(c)では0.35 Hzとなる。

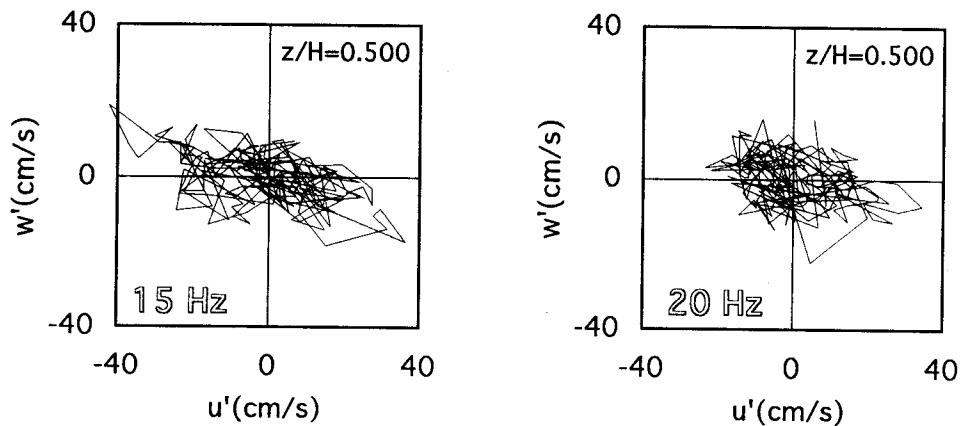


図7-32 乱れ速度 u' と w' の関係
(篠山川, 流路幅：中)

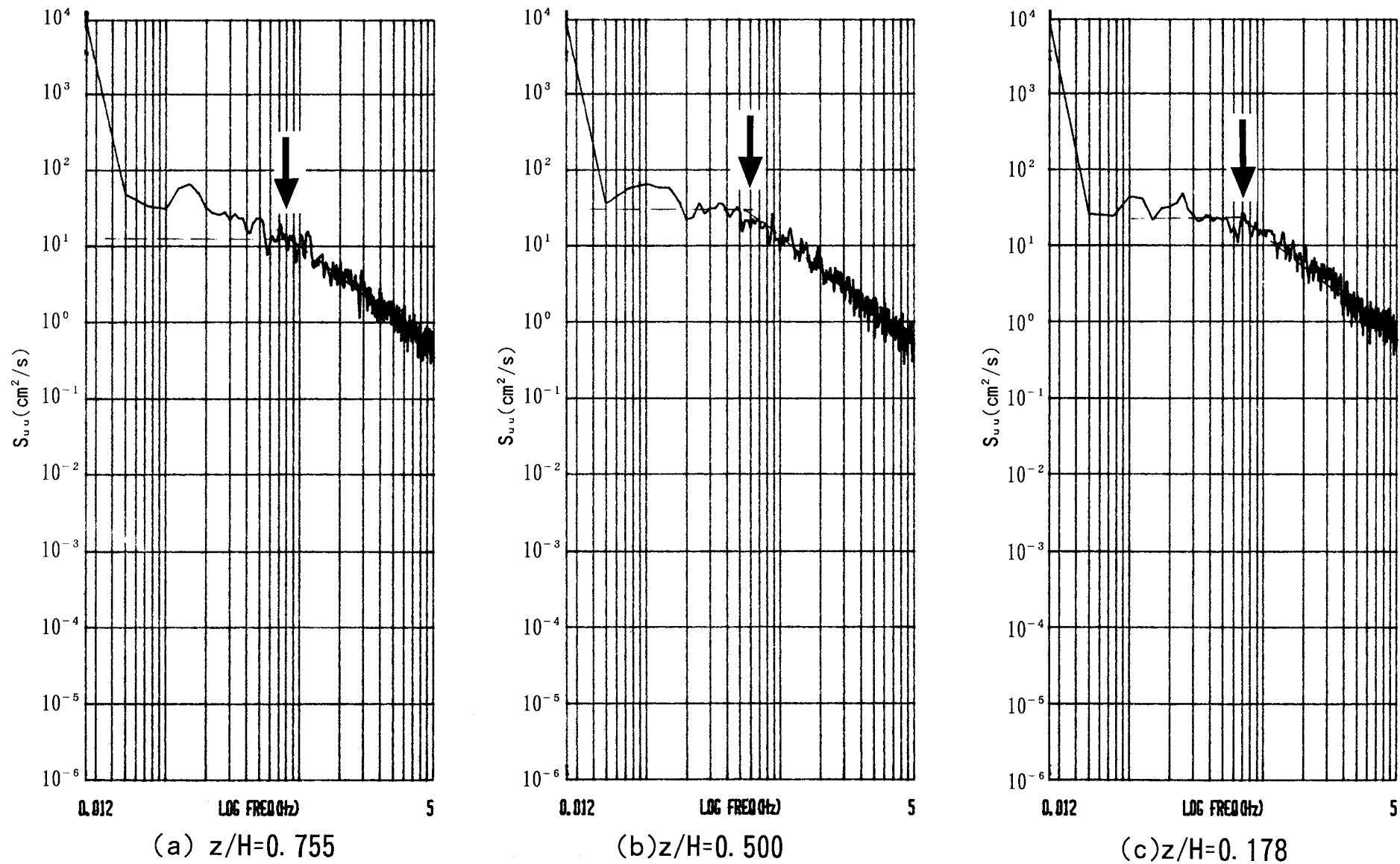


図7-33 各水深のエネルギー・スペクトル (篠山川, 流路幅: 中)

(7) 有野川の場合

有野川の測定ケースは、流路幅で分類すると、流路幅：小に属する測定データである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を定めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-34である。7.4の判定基準に従い判断すると、サンプリング周波数45 Hzから50 Hzの間で軌跡が、軌跡全体の形状が勾配を有すると判断できるかどうかという、いわゆる、“Bタイプ”の判定基準により求めるサンプリング周波数は50 Hzとなる。そして、この50 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は25.6 Hzであるので、サンプリング周波数25.6 Hzでエネルギー・スペクトルを求めたところ、図7-21-3においても示した通り、スペクトルの傾きが水平になる領域が存在しなくなった。そこで、サンプリング周波数を一つレンジを下げて、12.8 Hzでエネルギー・スペクトルを求めた。その結果を図7-35に示す。なお、エネルギー・スペクトルの算出に対してデータ個数1024個で10回の平均化を行った。最大流速点の(a)の場合、簡単な作図により求める周波数は0.40 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では0.30 Hz、(c)では0.35 Hzとなる。

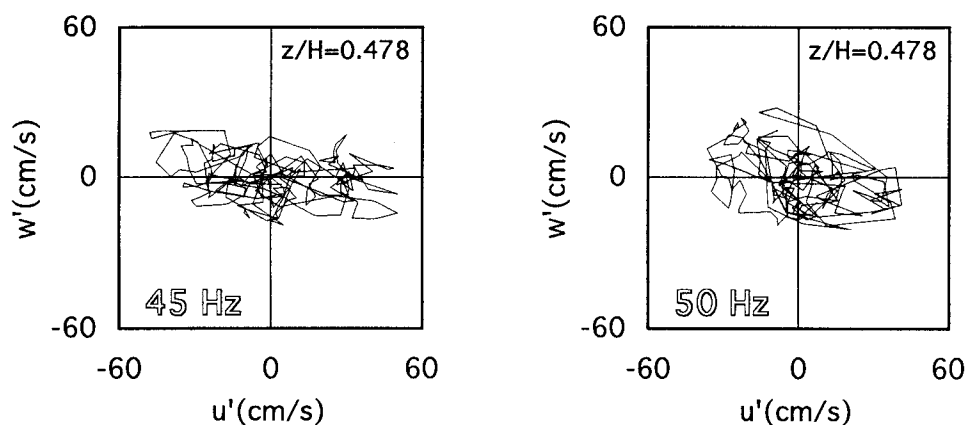


図7-34 乱れ速度 u' と w' の関係
(有野川，流路幅：小)

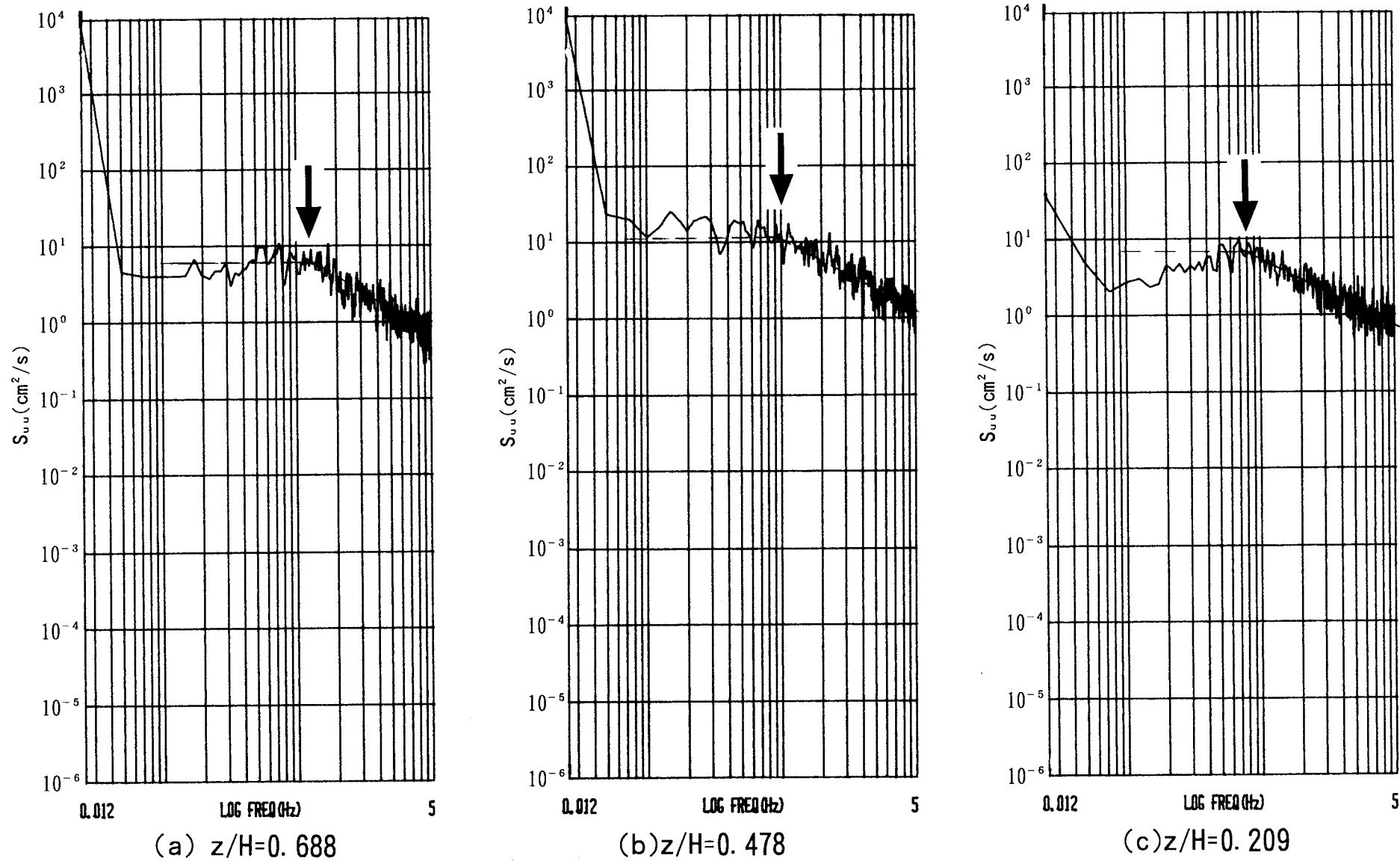


図7-35 各水深のエネルギー・スペクトル (有野川, 流路幅: 小)

(8) 実験室水路の場合

実験室水路の測定ケースは、実河川の測定データと比較するためのデータである。エネルギー・スペクトルを求めるための基準となるサンプリング周波数を決めるため、7.4と同様に“トラジェクトリ”的な軌跡を描いてみる。すなわち、乱れ速度 u' と w' の関係について調べたものが図7-36である。この場合判定はかなり難しく、50 Hzの方が u' の正負への広がりが大きく、 u' の正負への広がり収縮してきたサンプリング周波数70 Hzを求めるサンプリング周波数と判断した。そして、この70 Hzより低いサンプリング周波数でスペクトラムアナライザにおいて設定できるサンプリング周波数は51.2 Hzであるので、サンプリング周波数51.2 Hzでエネルギー・スペクトルを求めたものを図7-37に示す。最大流速点の(a)の場合、簡単な作図により求める周波数は2.0 Hzであることがわかる。同様にして、(b)では2.0 Hz、(c)では2.0 Hzとなる。

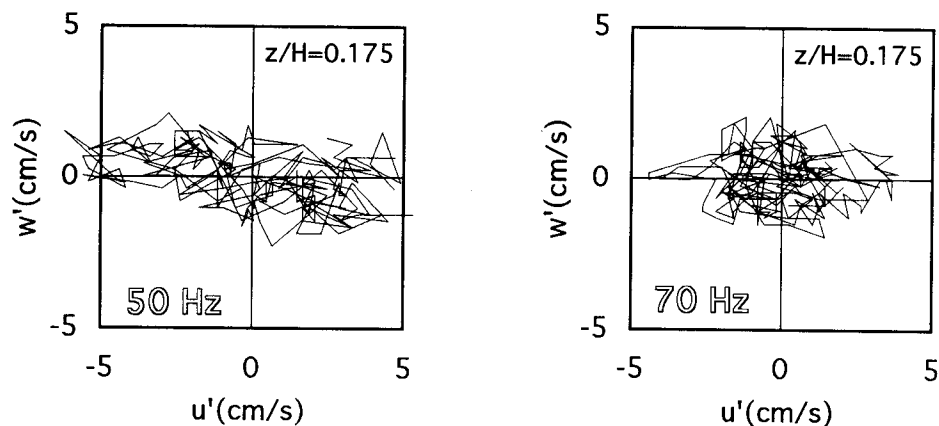
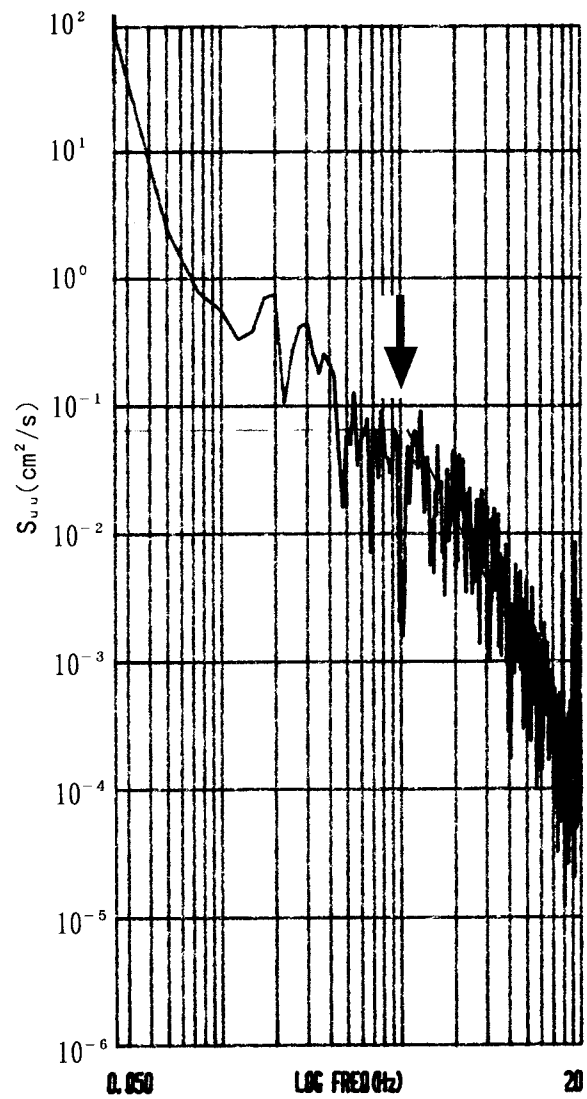
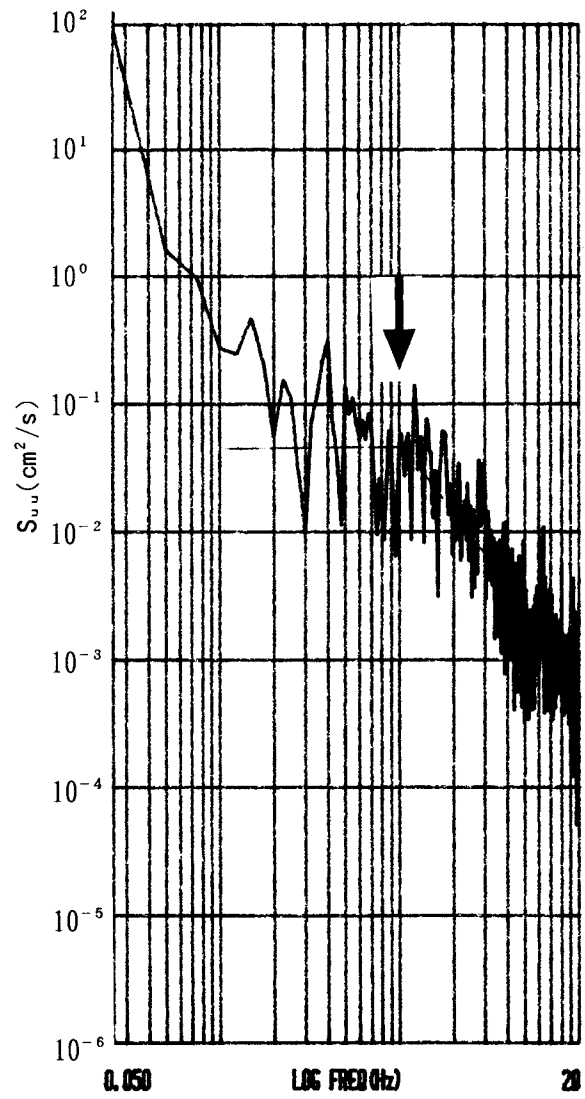


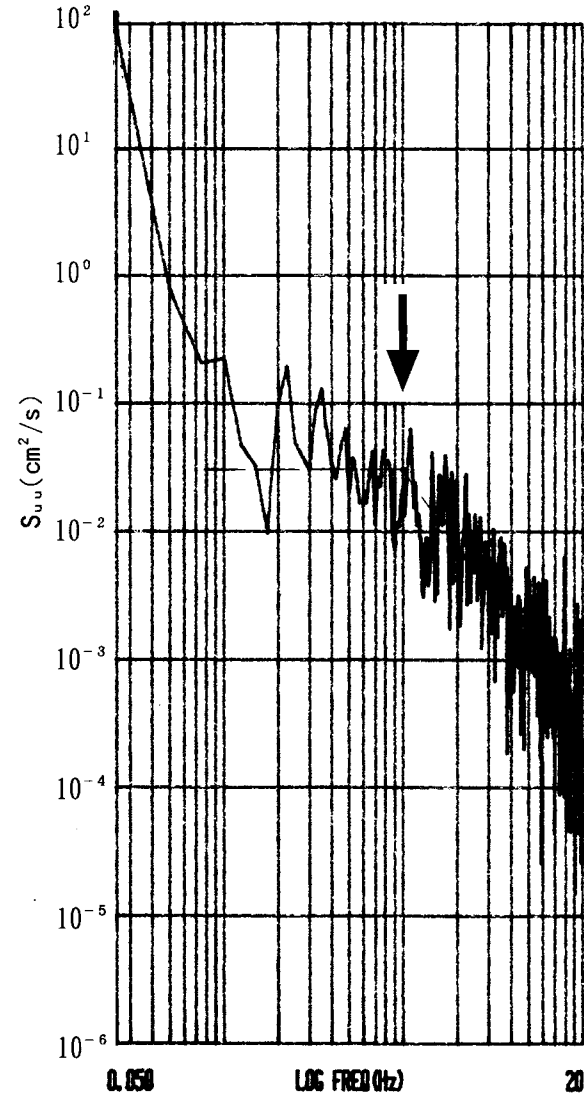
図7-36 乱れ速度 u' と w' の関係 (実験室水路)



(a) $z/H=0.750$



(b) $z/H=0.450$



(c) $z/H=0.175$

図7-37 各水深のエネルギー・スペクトル (実験室)

以上の8ケースについて、得られた結果をまとめると、表7-2のようになる。この表中の時間のスケールは乱れ速度 u' と w' の関係から求めたサンプリング周波数の逆数をとったものである。この表の値から、横軸に時間のスケールをとり、縦軸に流路幅をとって相対水深毎にプロットしたものが図7-38である。最大流速点付近ではプロットされたデータ点の分布は右上がりの分布形状を示している。 $z/H=0.5$ 付近ではデータ点のばらつきは大きいものの最大流速点付近と同様に右上がりの分布形状を示している。ところが、河床付近では上述の2つの相対水深のケースのような傾向は見られない。次に、図7-38の縦軸の流路幅の代わりに摩擦速度をとり時間のスケールとの関係を示したものが図7-39である。この図を見ると、どの相対水深においてもデータ点の分布は右上がりの分布形状を示し、特に、河床付近のデータは時間のスケールと摩擦速度という水理パラメータとの間にははっきりとした相関関係が見られる。このことは摩擦速度が河床の粗さを表す水理パラメータであるために、このような特性を示したと思われる。

また、得られた周波数に各相対水深における平均流速を掛けて長さの次元を持つ外部スケールを求めたものも表7-2に示しているが、横軸に平均流速による外部スケールをとり、縦軸に流路幅をとり、相対水深ごとにプロットしたものが図7-40である。最大流速点付近ではデータ点のばらつきは大きいものの図7-38と同様にプロットされたデータ点の分布は右上がりの分布形状を示していると考えられる。 $z/H=0.5$ 付近ではデータ点のばらつきが大きく平均流速による外部スケールと流路幅の間には相関があるとは考えにくい。河床付近では明らかにこれらの量には相関がないと考えられる。

さらに、得られた周波数に各河川の摩擦速度を掛けて長さの次元を持つ外部スケールを求めたものも表7-2に示しているが、横軸に摩擦速度による外部スケールをとり、縦軸に流路幅をとって相対水深毎にプロットしたものが図7-41である。これらの図の場合、データ点のばらつきが大きく、どの相対水深についても平均流速による外部スケールと流路幅の間には相関があるとは考えにくい。

以上の結果から、7.5節でも指摘したとおり、実河川の乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールとしての外部スケール（時間のスケール、平均流速によるスケール）が河川の規模を表す水理パラメータの一つである流路幅と強い相関を有することがわかった。さらに、今回の測定地点の水深の大きさを見ると、30~40cmとほとんど同じ程度の大きさであることから、今回対象とした河床粗度に比べて水深の小さい実河川、見方を変えれば、水深に比べて流路幅が10倍以上あるような実河川では乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールは水深のような鉛直方向の長さよりも流路幅のような横断方向の長さで強い相関を有すると考えられる。

表7-2-1 外部スケールの比較（最大流速点付近）

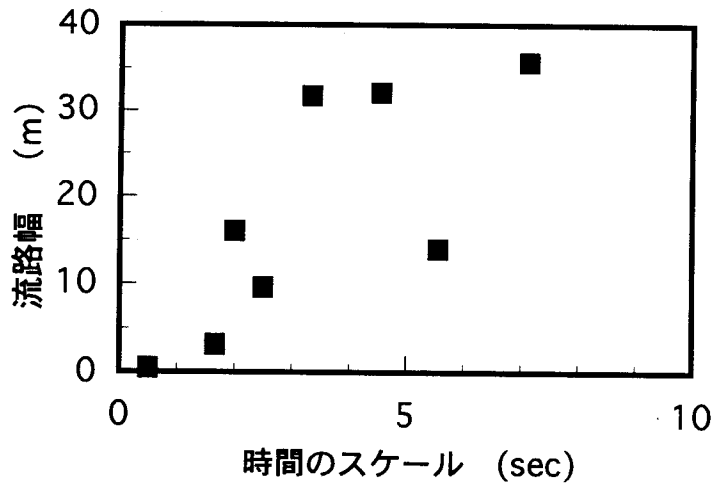
河川名	流路幅 B (m)	水深 H (cm)	摩擦 速度 (cm/s)	平均 流速 (cm/s)	z/H	周波数 (Hz)	時間の スケール (sec)	平均流速 のスケール (cm)	摩擦速度 のスケール (cm)
加古川	35.7	37.0	4.52	55.5	0.759	0.14	7.14	396	32.3
千種川	32.1	36.0	4.48	55.4	0.785	0.22	4.55	252	20.4
市川	31.7	41.5	11.96	70.6	0.795	0.30	3.33	235	39.9
武庫川	16.0	34.0	5.64	68.2	0.779	0.50	2.00	136	11.3
猪名川	14.0	32.0	9.29	64.0	0.750	0.18	5.56	356	51.6
篠山川	9.6	29.0	8.31	77.0	0.755	0.40	2.50	193	20.8
有野川	3.1	32.0	3.10	95.1	0.688	0.60	1.67	159	5.2
実験室	0.5	20.0	0.86	16.0	0.750	2.00	0.50	8	0.4

表7-2-2 外部スケールの比較（z/H=0.5付近）

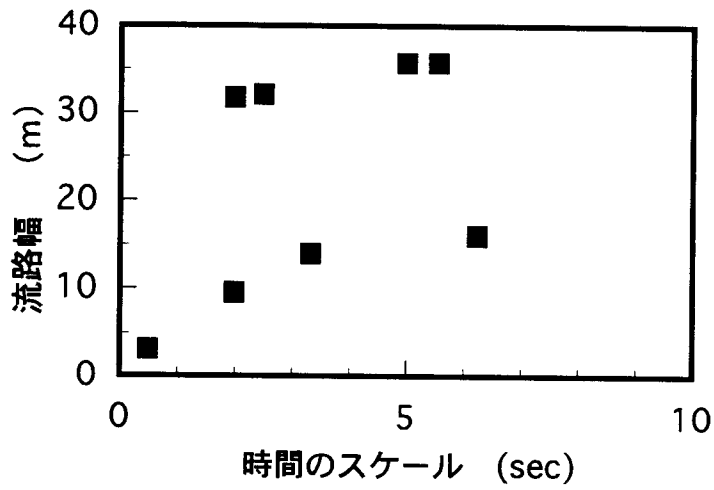
河川名	流路幅 B (m)	水深 H (cm)	摩擦 速度 (cm/s)	平均 流速 (cm/s)	z/H	周波数 (Hz)	時間の スケール (sec)	平均流速 のスケール (cm)	摩擦速度 のスケール (cm)
加古川	35.7	37.0	4.52	60.6	0.478	0.20	5.00	303	22.6
千種川	32.1	36.0	4.48	52.5	0.494	0.18	5.56	292	24.9
市川	31.7	41.5	11.96	56.3	0.518	0.40	2.50	141	29.9
武庫川	16.0	34.0	5.64	63.8	0.471	0.50	2.00	128	11.3
猪名川	14.0	32.0	9.29	53.4	0.422	0.16	6.25	334	58.1
篠山川	9.6	29.0	8.31	73.3	0.500	0.30	3.33	244	27.7
有野川	3.1	32.0	3.10	42.6	0.478	0.50	2.00	85	6.2
実験室	0.5	20.0	0.86	16.0	0.450	2.00	0.50	8	0.4

表7-2-3 外部スケールの比較（河床付近）

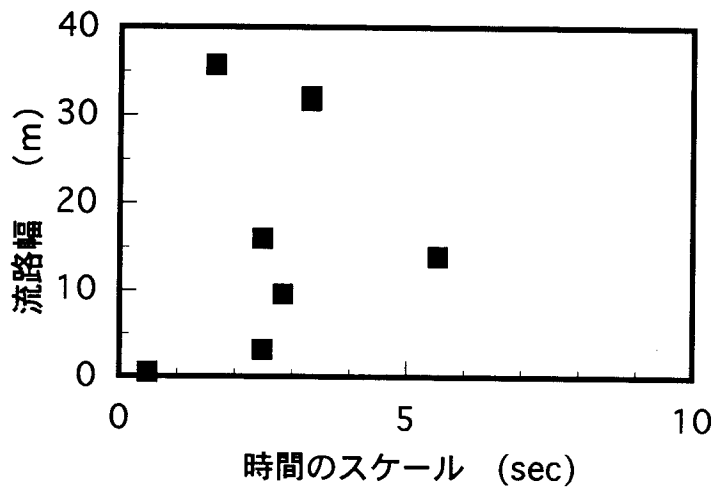
河川名	流路幅 B (m)	水深 H (cm)	摩擦 速度 (cm/s)	平均 流速 (cm/s)	z/H	周波数 (Hz)	時間の スケール (sec)	平均流速 のスケール (cm)	摩擦速度 のスケール (cm)
加古川	35.7	37.0	4.52	32.8	0.178	0.60	1.67	55	7.5
千種川	32.1	36.0	4.48	39.8	0.228	0.30	3.33	133	14.9
市川	31.7	41.5	11.96	39.3	0.265	0.30	3.33	131	39.9
武庫川	16.0	34.0	5.64	42.2	0.162	0.40	2.50	106	14.1
猪名川	14.0	32.0	9.29	42.2	0.125	0.18	5.56	234	51.6
篠山川	9.6	29.0	8.31	53.1	0.283	0.35	2.86	152	23.7
有野川	3.1	32.0	3.10	13.1	0.209	0.40	2.50	33	7.8
実験室	0.5	20.0	0.86	16.0	0.175	2.00	0.50	8	0.4



(a) 最大流速点付近

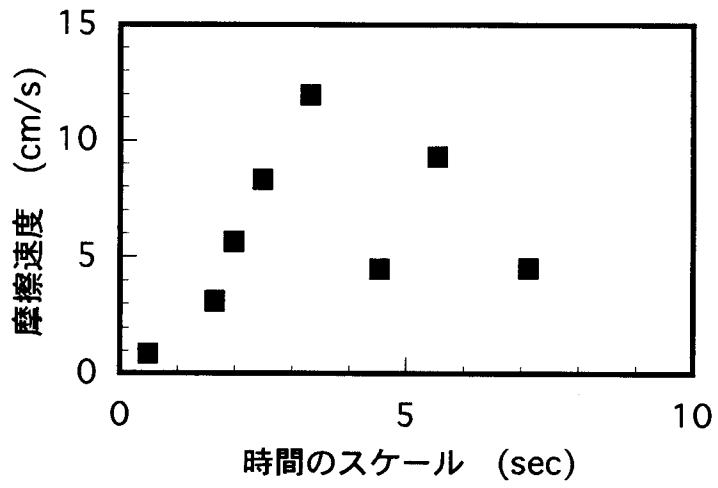


(b) $z/H=0.5$ 付近

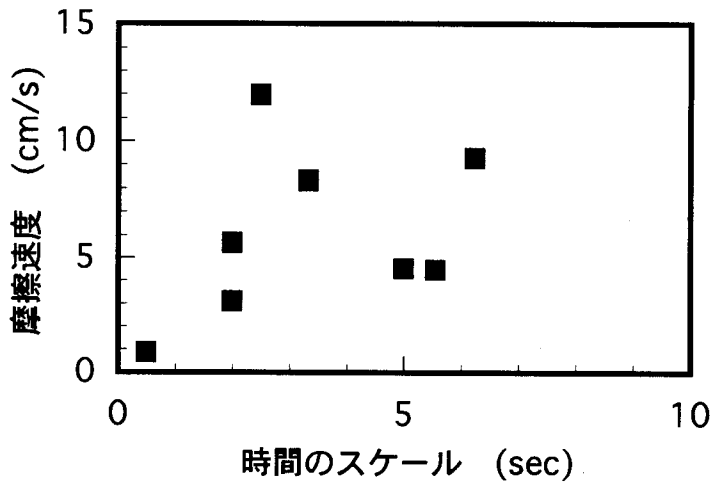


(c) 河床付近

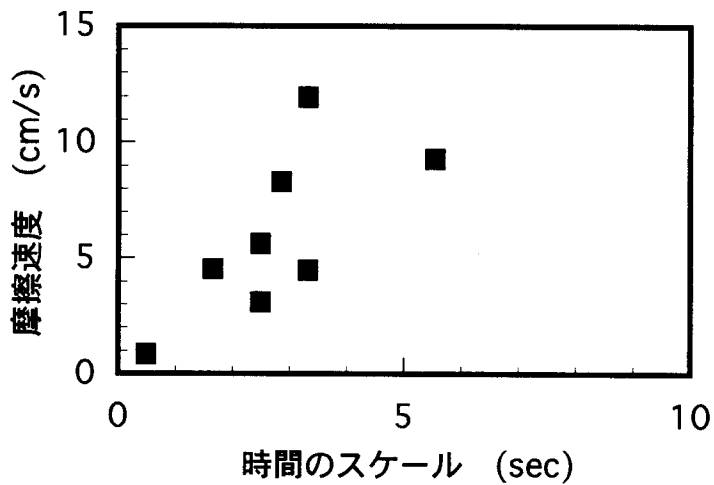
図7-38 時間のスケールと流路幅の関係



(a) 最大流速点付近

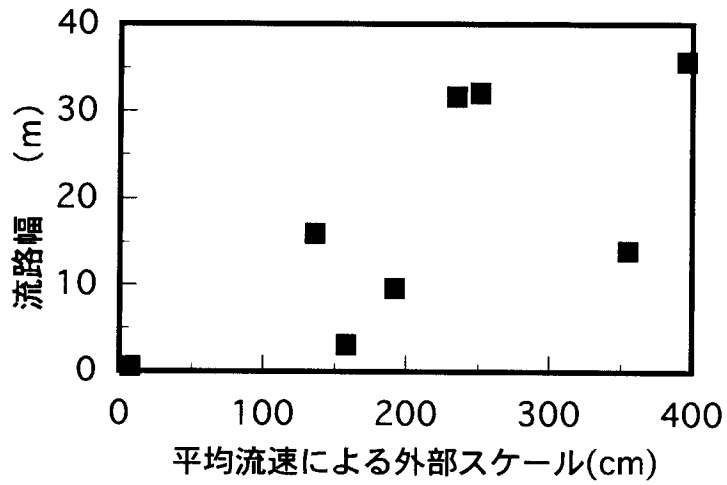


(b) $z/H=0.5$ 付近

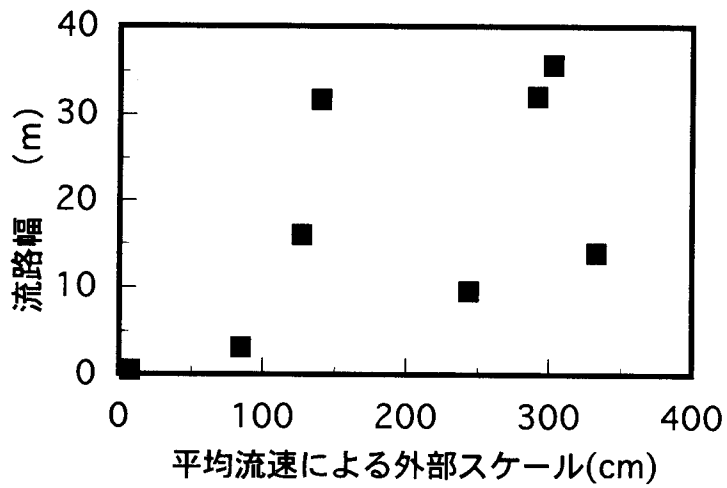


(c) 河床付近

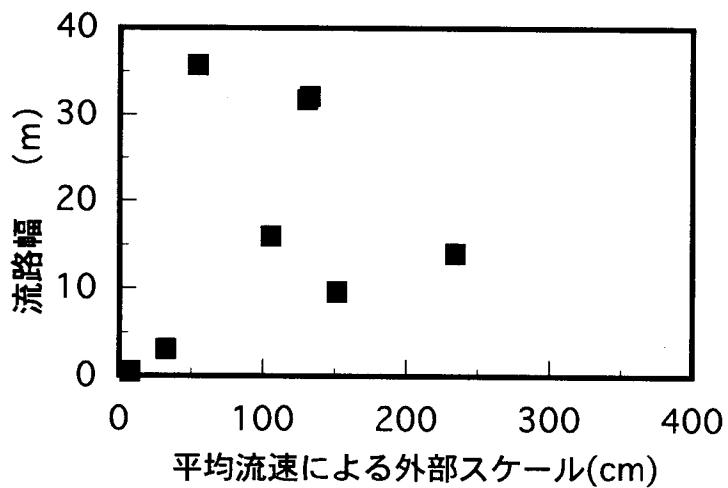
図7-39 時間のスケールと摩擦速度の関係



(a) 最大流速点付近

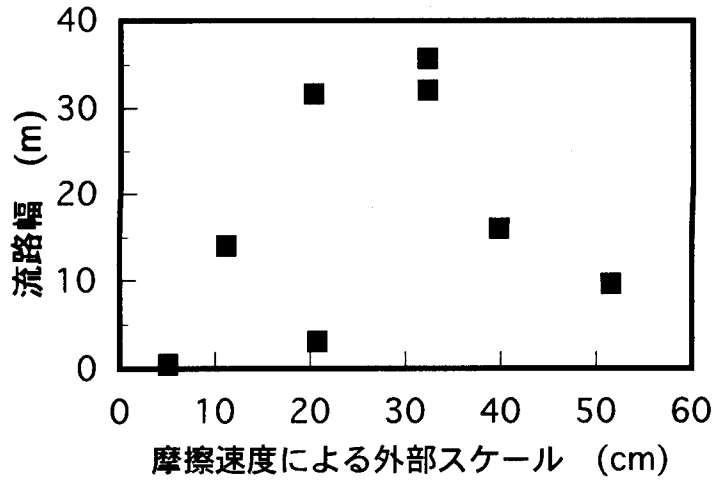


(b) $z/H=0.5$ 付近

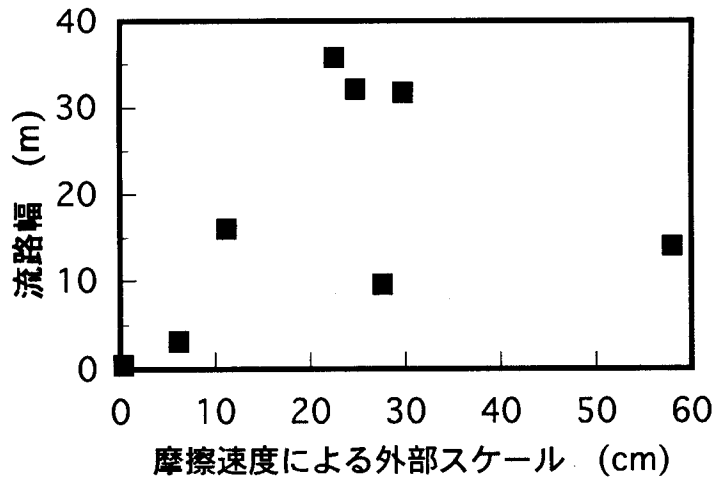


(c) 河床付近

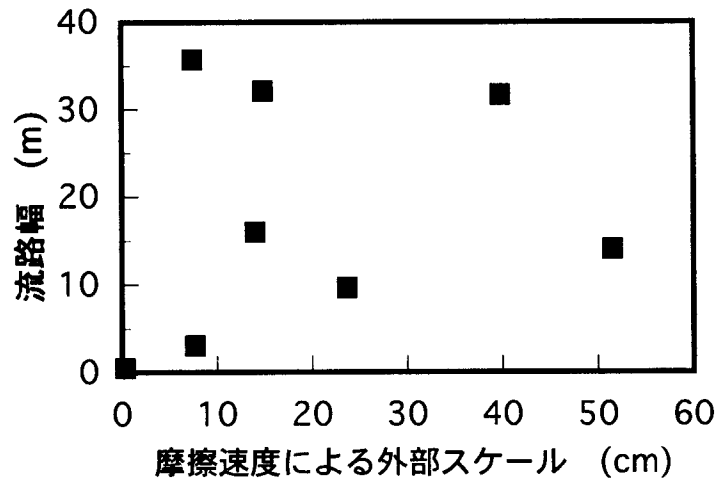
図7-40 平均流速による外部スケールと流路幅の関係



(a) 最大流速点付近



(b) $z/H=0.5$ 付近



(c) 河床付近

図7-41 摩擦速度による外部スケールと流路幅の関係

7. 6. 3 サンプリング周波数の異なるエネルギー・スペクトルの合成

前節ではエネルギー・スペクトルの分布から乱れエネルギーの高いところからエネルギーの散逸し始める点の周波数から各種スケールを算出したが、求められた周波数の領域はエネルギー・スペクトルにおける発生領域から普遍的な傾きである慣性領域の $-5/3$ の傾きに至るまでの傾きの変化する領域である。また、第4章の4. 3. 5の結果から慣性領域の始まる周波数は0. 5 Hz付近で、サンプリング周波数5. 12 Hzで得られる最大の周波数は2 Hzであり、エネルギー・スペクトルの傾きの変化点の検出に使用した高周波数側の傾きが慣性領域に存在するかどうか不明確である。もし、傾きの変化点の検出時に採用した高周波数側の傾きが $-5/3$ よりも緩やかであったならば求める周波数は低い目の値となり、時間のスケールは大きめに評価されてしまう。したがって、傾きの変化点を検出するための高周波数側の傾きは普遍的な傾きと考えられる慣性領域の傾き $-5/3$ を示す直線とその傾きがゼロである発生領域の水平線との交点の周波数を傾きの変化点の周波数とする方がより普遍的であると思われる。そこで、市川の最大流速点付近のケースを例にとり、慣性領域の傾きを得るため、5. 12 Hzのサンプリング周波数だけでなく、25. 6 Hz、128 Hzのサンプリング周波数によってエネルギー・スペクトルを求め、サンプリング周波数5. 12 Hzで得られるエネルギー・スペクトルの最大周波数2 Hzの後ろに、サンプリング周波数25. 6 Hzで得られるエネルギー・スペクトルの2 Hzからそのサンプリング周波数で得られる最大周波数10 Hzまでの領域を貼り付け、さらに、サンプリング周波数128 Hzで得られるエネルギー・スペクトルの10 Hzからそのサンプリング周波数で得られる最大周波数50 Hzまでの領域を張り付けて3種類のサンプリング周波数から一つのエネルギー・スペクトルの図を合成したものが、図7-42である。この図から、 $-5/3$ の傾きを有する慣性領域がはっきりと確認でき、 $-5/3$ の傾きを示す領域の直線と発生領域の水平線との交点を求めると、0. 4 Hzとなる。前節で求めた周波数が0. 3 Hzであったので、得られた値は少し高い周波数であることがわかる。しかし、全ての測定ケースで同様に高周波数側へその値がシフトするのであれば、前節で得られた各種水理パラメータと外部スケールの関係は定性的に変化しないと言える。

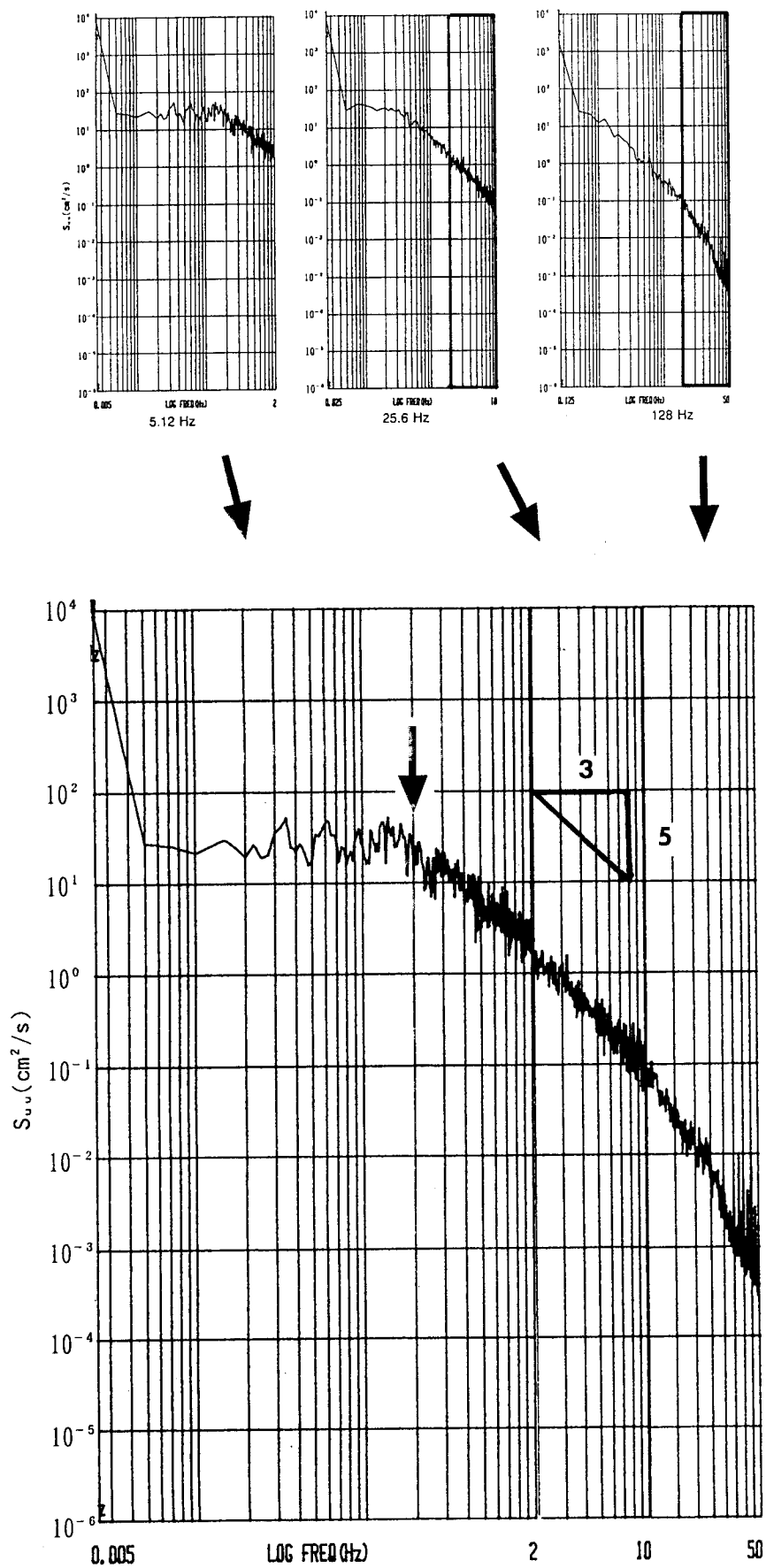


図7-42 3種類のサンプリング周波数 (5.12, 25.6, 128Hz) のエネルギー・スペクトルの合成図

7. 7 結 言

本章では、実河川で得られた流速のアナログデータのデジタル化処理時のサンプリング周波数に注目して、実河川での流速の乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) 従来の平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布などの時間平均化された乱れの分布特性の把握を目的とする場合、データ処理時のサンプリング周波数による乱れの分布特性の違いはないと考えられる。
- (2) 乱流成分を有する流速のアナログデータから任意のサンプリング周波数でA/D変換されたデジタルデータが元のアナログデータの有する乱流特性を正しく評価しているかどうかを判定する尺度として、“トラジェクトリ”的な時間に従った軌跡の形状の変化点を用いることが有効であることがわかった。
- (3) (2)の手法を実河川に適用し、求められたサンプリング周波数から実河川の乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールとしての外部スケール(時間のスケール)が河川の規模を表す水理パラメータの一つである流路幅と強い相関を有することがわかった。
- (4) (2)の手法で求められたサンプリング周波数を基準にして、エネルギー・スペクトルの分布を求め、分布形状から乱れエネルギーの高いところからエネルギーの散逸の開始点を検出して、その周波数から実河川の乱流場に存在する外部スケールを求めるという手法は主観的な判定による“トラジェクトリ”的な時間に従った軌跡の形状の変化点を求める方法のあいまいさを補うために有効な手段となることがわかった。
- (5) 今回対象とした河床粗度に比べて水深の小さい実河川、見方を変えれば、水深に比べて流路幅が10倍以上あるような実河川では乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールは水深のような鉛直方向の長さよりも流路幅のような横断方向の長さとの強い相関を有することがわかった。

最後に、本研究を進める上で障害となった問題点について2, 3述べておく。

まず、実河川での流速の乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱い、軌跡の描く形状の変化を人間の目で判断するという方法を採用しているため、人間の主観的な要素が入りやすいので、今回採用したエネルギー・スペクトルの分布形状の変化点の検出という方法も一手法であるが、もっと客観的な判定方法の確立が必要であると思われる。また、実河川のエネルギー・スペクトルの分布には低周波数側の分布が必要であることがわかったが、今回得られた流速データの測定時間が短すぎるために十分な平均化が行えなかった。よって、今後の現地観測の際には、より長時間の流速データの収集が必要であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 石崎澆雄・光田 寧・花房龍男：風速変動の長周期成分について，京大防災研究所年報，No.11，A，pp.489-497，1968.
- 2) 合原一幸 編：カオス，サイエンス社，p.161，1990.
- 3) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，pp.296-297，1992.

第 8 章 結 論

本論文では、山地河川の河床が礫で構成された地点を主に対象にして、河川規模、河道形状、河床状態等の境界条件の異なる種々の実河川において 3 次元超音波流速計を用い流速 3 方向成分の同時測定を行い、流速データを収集し、従来より数多く行われている室内の実験結果と対比することにより、実際の河川流における時間平均化された乱れの分布特性を明らかにした。さらに、実河川で得られた流速のアナログデータのデジタル化処理時のサンプリング周波数に注目して、実河川での流速の乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを明らかにした。以下に各章で得られた結果をまとめて結論とする。

第 1 章では、本論文の目的を述べ、河川の現地観測に関する既往の研究について概観した。さらに、本論文の内容について概説した。

第 2 章では、開水路における流れを分類して示し、流れの様式について述べた。開水路流の乱流現象の基礎的な知見について簡単に述べ、時間平均から見た開水路流れの乱流構造について概説した。また、実際の河川の種類とその形態について簡単に述べ、さらに、河川流の 3 次元流れのパターンを分類し、本論文で対象とした流れのパターンを示した。

第 3 章では、本研究に用いた計測器、すなわち、3 次元超音波流速計の測定原理と特徴について簡単に述べた。そして、実河川での計測システムと収集されたデータの処理方法について簡単に述べた。

第 4 章では、河道の平面形状が直線状の地点を選んで超音波流速計を用いて流速を現地測定し、その測定結果を既往の室内直線開水路における実験結果と比較することに

より、実河川の直線部における流れの特性について以下のことがわかった。

- (1) 流下方向の流速分布において、相対水深 $z/H = 0.4 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則が成立することがわかった。
- (2) 乱れ強度分布から、Manning の粗度係数 n の定義から求めた河床の粗度係数が比較的小さい場合（今回の測定例では $n \leq 0.0224$ ）、滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果とほぼ同様な分布特性を示す。山地河川で多く見受けられる礫床河川のような河床の粗度係数が比較的大きい場合、 $z/H=0.5$ より河床に向かって流下方向の乱れ強度の大きさが顕著に減少する。
- (3) 従来のデータの整理方法で考えると、山地河川で多く見受けられる礫床河川のような河床の粗度係数が大きい場合、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_r^2$ の分布形状は河床に近づくにつれて減少する傾向を示す。
流れが3次元的な挙動を示す実河川流を対象とする場合、平均流の鉛直成分の影響を考慮して、レイノルズ応力の分布特性を評価する必要がある。
- (4) データ処理時のサンプリング周波数が 100 Hz の場合、 $u-w$ 平面4象限区分しきい値法を用いて瞬間レイノルズ応力の寄与率および時間占有率の分布を検討した結果、河床の粗度係数が大きい場合、水面付近と逆に河床付近ではejection事象の寄与に比べ sweep事象の寄与の方が大きくなることがわかった。この結果から、粗面流れにおいて、禰津が指摘した ejection 事象と sweep事象の大小関係の逆転が確認された。
- (5) エネルギー・スペクトルの傾きから、 0.5 Hz から 5 Hz まで $-5/3$ の傾きを持つ慣性領域と、 5 Hz から 15 Hz まで $-3 \sim -13/3$ の傾きを持つ粘性領域は認められる。粘性領域の傾きは従来の研究では井上の -3 乗則が一般的であったが、今回の測定結果からも粘性領域の傾きは必ずしも -3 乗則では説明できず、最近の椿らの研究結果で示されている $-13/3$ に近い値をとるようである。
- (6) 実河川でよく見られるような河床が大きな礫で構成された礫床河川の場合、自己相関係数の変動特性はラグが大きくなるにつれて指数関数的に減衰せず、実河川の河床形状の凹凸が激しいために水面にまでその影響が現れ、結果的に、自己相関係数の周期的な変動となって現れる。

以上のことから、河床の粗度係数が $n \leq 0.0224$ の範囲の小さな値を有する河川の乱流特性は、従来の実験室水路における滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果をほぼ適用しても良いことがわかった。しかし、山地河川で多く見受けられるような水深に比べて粗度の粒径の大きな礫床河川ではその特性は大きく異なることがわかった。

第5章では、流れの状態が定常流で不等流の急変流に属する流れであって、河川の3次元流れのパターンの中で平面形の影響を受ける流れの一例として、単純湾曲部に注目し、河川の湾曲部における流速の現地測定を実施した。その測定結果を既往の室内湾曲開水路での実験結果と比較・検討して、実河川の湾曲部における流れの特性について以下のことがわかった。

- (1) 流下方向の平均流速分布における対数則分布については、湾曲の始まり部分では河川直線部と同様に対数則は $z/H = 0.4 \sim 0.8$ の範囲で対数分布則は成立しているが、しかし、湾曲が進むに従い、2次流のために、対数分布則が成り立たなくなる。
- (2) 一般によく知られている湾曲部での2次流の存在が、実河川の湾曲部でも確認され、本測定ケースのように河川の曲率半径が260mと緩やかな場合においても、河川湾曲部の横断面内では外岸側で2次流による下降流が生ずることがわかった。
- (3) 実験室水路において、湾曲の進展に伴い、2次流強度がピークを迎えるという特性が実河川の湾曲部においても確認できた。
- (4) 2次流強度が最大となる湾曲角付近（本ケースでは湾曲角 22.7° 付近）で乱れ強度の鉛直線上の分布形状はU、V成分の乱れ強度の大きさが同程度となるような特異な形状となる。

第6章では、構造物の影響を受ける流れに属する流れのパターンの一つである橋脚後流域を対象にして流速を現地測定し、橋脚後流域における流れの特性について以下のことがわかった。

- (1) 橋脚後流域においては橋脚後流の影響による速度欠損が生じており、特に水面近

傍において顕著に見られた。しかし、橋脚に最も近く後流による影響を受けると思われる測点（CASE-A 1）において速度欠損が見られず逆に加速されていることがわかった。

- (2) 乱れ強度の分布では橋脚後流の影響を受けていると思われる測点では相対水深 $z/H=0.5$ 以上において分布曲線から離れ大きな値をとる傾向がみられた。
- (3) 橋脚後流の影響の有無によって分類したレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_i^2$ の鉛直線上の分布形状には顕著な違いは認められなかった。
- (4) データ処理時のサンプリング周波数が100 Hzの場合、 v' の正負を考慮して4象限法を拡張した8象限区分しきい値法による瞬間レイノルズ応力特性を見ると、 $v' > 0$ においてはsweep事象が $v' < 0$ においてはejection事象の寄与が大きくなる傾向を示した。また、 $v' > 0$ におけるsweep事象の卓越は河床近傍のみならず全水深に及んでいる。
- (5) エネルギー・スペクトルについては、河川直線部で得られた結果同様に、発生、粘性、慣性の三小領域の存在を確認することができ、その傾きも河川直線部のそれと同様なものであった。よって、橋脚後流によるエネルギー・スペクトルの分布特性への影響は特に認められなかった。
- (6) 自己相関係数については、河川直線部の場合と同様に、どの方向の自己相関係数も周期的な変動波形が確認された。しかし、橋脚の有無による自己相関係数の違いについては確認できなかった。

以上の第4章から第6章までは、実河川における現地観測の測定結果をまとめたものであるが、今回対象としたような水深が50 cm未満の浅い実河川の乱流特性に大きな影響を与える要因は河床の粗度係数であることがわかった。たとえ河川の平面形状が多少湾曲していても、極端に言えば、橋脚後流域から少し離れれば、河床の粗度係数がある程度小さな値を有する（今回の場合、 $n \leq 0.0224$ ）河川ならば、その乱流特性は従来の実験室水路における滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果を適用しても良いが、山地河川で多く見受けられるような河床の粗度係数の大きな河川ではその特性は大きく異なることがわかった。

第7章では、実河川で得られた流速のアナログデータのデジタル化処理時のサンプリング周波数に注目して、実河川での乱れ変動をカオスの“トラジェクトリ”的な現象として取り扱うという新しい試みを適用し、実河川の乱流場に存在する種々の渦スケールを代表する特性スケールである外部スケールの大きさを求め、実河川においてそのスケールの大きさを決定づける水理パラメータがいかなるものかを検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) 従来の平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布などの時間平均化された乱れの分布特性の把握を目的とする場合、データ処理時のサンプリング周波数による乱れの分布特性の違いはないと考えられる。
- (2) 乱流成分を有する流速のアナログデータから任意のサンプリング周波数でA/D変換されたデジタルデータが元のアナログデータの有する乱流特性を正しく評価しているかどうかを判定する尺度として、“トラジェクトリ”的な時間に従った軌跡の形状の変化点を用いることが有効であることがわかった。
- (3) (2)の手法を実河川に適用し、求められたサンプリング周波数から実河川の乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールとしての外部スケール(時間のスケール)が河川の規模を表す水理パラメータの一つである流路幅と強い相関を有することがわかった。
- (4) (2)の手法で求められたサンプリング周波数を基準にして、エネルギー・スペクトルの分布を求め、分布形状から乱れエネルギーの高いところからエネルギーの散逸の開始点を検出して、その周波数から実河川の乱流場に存在する外部スケールを求めるという手法は主観的な判定による“トラジェクトリ”的な時間に従った軌跡の形状の変化点を求める方法のあいまいさを補うために有効な手段となることがわかった。
- (5) 今回対象とした河床粗度に比べて水深の小さい実河川、見方を変えれば、水深に比べて流路幅が10倍以上あるような実河川では乱流場に存在する渦スケールを代表する特性スケールは水深のような鉛直方向の長さよりも流路幅のような横断方向の長さとの強い相関を有することがわかった。

以上のように、第7章で行った実河川での流速の乱れ変動をカオスの“トラジェクト

リ”的な現象として取り扱うという新しい試みはまだ研究がスタートしたばかりであるので、本論文での考察には不備な点が多いと思われるが、今後の研究の発展が期待できる研究分野であると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始適切な御指導、御教示を賜った神戸大学工学部、篁源亮教授に深甚の謝意を表します。また、本論文をまとめるにあたり有益な御助言を頂いた神戸大学工学部、神田 徹 教授、櫻井春輔 教授に深く感謝の意を表します。

平素より様々な御指導、御助言を頂いた神戸大学工学部 道奥康治 助教授には深く感謝の意を表します。また、現地測定をはじめ、多大な御協力を頂いた神戸大学工学部土木工学科卒業生、黒岡浩平（中国電力）、川崎哲人（竹中土木）、山下 敏（CSK）、久保田泰史（熊谷組）の諸氏に心から感謝の意を表します。

最後に、著者の研究生活を支えてくれている妻 晴子に感謝します。