



# 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。



氏名・(本籍)	瀬 良 昌 憲 (岡山県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	博ろ第92号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与の日付	平成6年3月16日
学位論文題目	現地観測に基づく河川流の乱流特性に関する研究

審査委員	主査 教授 篁 源 亮
	教授 桜井 春 輔 教授 神田 徹

### 論文内容の要旨

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、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難い。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次元の挙動を示している。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たきた。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。

第1章では、本論文の目的を述べ、主な既往の研究について概観した。また、本論文の内容について要約した。

第2章では、まず、開水路における流れを分類し、流れの様式について示した。次に、乱流の一般

的特性に関して、一般的な乱流現象と時間平均から見た乱流構造について概説した。開水路の乱流特性に関して、開水路乱流場の領域区分について定義し、開水路流れの乱流構造として、(1)外部領域での縦渦構造、(2)壁面領域での組織立った乱流構造について乱流構造の基礎的な知見について概説した。また、実際の河川の種類とその形態について簡単に述べ、河川流に関する具体的な研究分野について概説した。最後に、実際の河川流の3次元流れのパターンを分類し、本研究で対象とした流れがどのパターンに属するかを示した。

第3章では、本研究に用いた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、実河川での現地測定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。さらに、本論文で算定された各種水理条件の評価方法について概説し、本論文において求められた平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力、自己相関係数、エネルギー・スペクトルなどの乱れの特性量の算定式について示した。

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、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、河川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、現地観測された流速変動データから、平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布、4象限法による瞬間レイノルズ応力特性、エネルギー・スペクトル、自己相関係数などの乱れの分布特性諸量を求め、従来の実験室水路で得られた実験結果と比較・検討した。その結果、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り、かつ、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、河川湾曲部の流れにおいて流速の現地観測を実施し、測定された流速変動データから乱れの分布特性諸量を求め、従来の実験室水路で得られた実験結果や河川直線部において得られた測定結果と比較・検討した。その結果、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。実験室水路において得られているような湾曲の進展に伴い、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同様な特性を有することがわかった。

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り、かつ、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、橋脚後流域の流れにおける流速の現地観測を実施し、現地観測された流速変動データから乱れの分布特性諸量を求め、従来の実験室水路で得られた実験結果や河川直線部において得られた測定結果と比較・検討した。その結果、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ることがわかった。また、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 $z/H = 0.5$ 以上において乱れ強度の分布曲線から離れ大きな値をとる傾向が見られることがわかった。

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、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におけるサンプリング周波数による違いを検討した。その結果、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の分布特性を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

ことがわかった。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した。その結果、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。

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た。

## 論文審査の結果の要旨

乱流の研究において、実用に耐え得る乱流現象の規準となる長さ、時間等の完全なスケールはまだ見いだされていない。例えば大気拡散を取り扱う場合には、考えている地点における大気拡散係数の実測値が得られていないかぎり、これを完全に解明することは一般に出来ず、従ってその相似則も不明である。G.I.Taylorの提唱した積分スケールが充分でないことは戦後米国プレーリグラスにおける乱流気象観測において明らかとされている。この1940-50年代に行われた野外乱流観測にはMonin等のシベリヤ原野におけるものがあり、その成果として、Stability Lengthという著名な乱流の長さのスケールを見いだしている。しかし残念なことには、中立状態即ち温度分布のない乱流では、このスケールは $-\infty$ となってしまう欠点がある。乱流消散エネルギーより求められるスケールについてもその汎用性を認められるではいたっていない。

本研究は問題を河川乱流現象に限定して、その長さあるいは時間のスケールを見いだすことを目的として、長時間にわたる各河川の乱流速を始めとする水理量の実測並びに実験室開水路における計測乱流等との比較を行い、乱流の相似について考察を行ったものである。

本論文は8章からなる。第1章は緒論であり、水理学上からの河川の分類、これまでに行われた河川乱流研究の概要、本研究の目的と内容の概要等を序論としてまとめている。

第2章は基本となる開水路水理と乱流構造について既往の研究のレビューとその分類をしている。さらに河川工学上からの河川形態、河川構造物等による河川流の分類を行いこれらを取りまとめている。第3章以下において述べる河川乱流の実測はこの分類にもとづいて実行している。

第3章では河川乱流の実測に選択した周波数特性の高い超音波流速計を中心とする計測システムとその特性、検定方法について論じている。また河川乱流計測にともなって具体的に処理しなければならない水面勾配、径深、断面平均流速、摩擦速度等の求め方と基準の取り方を定義し、この定義に従って測量、計測、データ整理が各河川の任意実測場所においていつでも一環、継続して実行できるようにしている。

本研究では初期に行った各河川の直線部における乱流特性、その後の各河川湾曲部の乱流特性、並びに橋脚等河川構造物周辺の乱流特性について、第4、5、6章で述べ、同時に実験室開水路実験との比較も行っている。

第4、5、6章では市川、千種川、有野川、猪名川、加古川、篠山川、武庫川、下里川における実測方法と結果並びに河川形態、河川流況にもとづいた乱流の考察を水理学上の各水理並びに乱流理論と対比して行っている。第4章では主として河川直線部の流れにおける乱流について、第5章では河川湾曲部の流れにおける乱流について、第6章では河川構造物周辺特に構造物の後流における乱流を対

象とし行った実測研究について述べている。

これまでの乱流研究のマクロ的な成果すなわち平均流速，相関，流速スペクトル等々のような時間平均量の分布はスケールを別とすれば実験室で得られた結果とよく適合することを明らかにしている。

しかしこれらが無次元化した場合の基準スケールは，ばらついており，そのままでは各河川形状，形態との関連が存在しないようにみなされる。この事実にもとづいて，アナログ量としてカセットテープに保存されている計測生データのサンプリング方法から再調査をおこなっている。このことに関しては第7章において述べている。

第7章ではまず実測生データのサンプリング時間を変えて，カオスの研究でよく用いられるトラジェクトリー図を描かして各河川乱流を調べている。この結果，あるサンプリング時間を境としてこの図が変化することと，変化した図は乱流現象でよく見られる図に類似しているのに反して，もう一方は全く異なることを示している。

さらにこのことにもとづいてサンプリング時間をいろいろと変化させたデータについて，流速のエネルギースペクトルを求め，これを組み合わせてみると，これまでは各周波数におけるデータ数の違いのため不鮮明であった $5/3$ 乗則の始点が明確となり，この始点より得られる時間，あるいはこれと平均流速より求められる長さが，河川乱流の基準スケールとして用いられることを明らかにした。

第8章は結論であり，長期間にわたる河川乱流の実測によって得られた結論をここにとりまとめている。

以上のように本論文は河川乱流の相似則に関して，重要な知見を得たものとして価値ある集積であるとみとめる。

よって，学位申請者 瀬良昌憲は，博士（工学）の学位を得る資格があるものと認める。