



画像情報に基づく浮遊物質濃度計測と開水路凹部流れの時空間構造解析

宮本, 仁志

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-03-08

(Date of Publication)

2008-10-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2606

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002606>

※ 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。



【353】

氏名・(本籍) 宮本 仁志 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第243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14年3月8日

【学位論文題目】

画像情報に基づく浮遊物質濃度計測と

開水路凹部流れの時空間構造解析

審査委員

主査 教授 道奥 康治

教授 中山 昭彦

教授 中島 健

本論文は、画像情報を用いた開水路流れおよび浮遊物質濃度の計測法と、それより得られる流れ場の解析方法について検討を行ったものである。以下に論文内容の概要を記す。

近年、河川・湖沼・貯水池など種々の水域整備においては、その水辺に特有の生態系や景観の保全、市民の憩いの場としての水辺空間の創出など、水域のもつ多角的な環境機能を考慮した改修が積極的に取り入れられつつあり、治水・利水など従来の機能との調和がとれた整備を行うとともに、その維持や管理に対しても十分な検討を加えることが必要となっている。このような水域整備を行うための水工設計においては、流下方向の一次元的な検討のみでは不十分であるばかりでなく、面的、空間的な現象の取り扱いにおいても統計平均的な水理量のみならず、その時間的・空間的な変動特性を的確に把握し設計に反映させることが重要となる。具体的には、例えば、実河川において生態系が息づく瀬や淵、わんどなどに見られるような河道の縦横断面所変化部において、流れの場所的・経時的な変動特性や乱流構造を明らかにすることが、水環境面からも洪水制御の面からも要求される。

一方、そのような検討を行うための流体計測技術は、近年のコンピュータの発達を背景にして飛躍的な技術革新を遂げている。PIV(particle image velocimetry)・PTV(particle tracking velocimetry)など流れの画像計測法はその代表であるが、上述のような水域は一般に複雑な境界形状や自由水表面をもっており、対象とする場の境界条件や水理条件によって大きく異なる現象を呈するため、それら計測技術にさらなる検討を加えることが必要となる。また、コンピュータの強大な処理能力を用いることにより得られる物理情報は、時空間軸を独立変数とする非常に多大なデータ量となるため、その中から現象の鍵となる時空間変動特性を抽出し整理するための新たな解析手法を考究することも、環境保全を考慮した水工設計法を確立するための課題のひとつとして挙げられよう。

以上のような研究背景をもとに、本論文では、主に、河道の局所的断面変化部での流れの物理モデルとして水路床に凹部を設けた開水路流れを対象として、画像処理技術を用いた水面変動・流れ場の計測手法を開発し、それより得られる計測値から流れの乱流特性を調べるとともに、流れの時間的・空間的な主要変動成分を抽出・整理するための解析手法を検討した。また、水域の環境要素としての濁水を対象として、浮遊物質濃度の画像計測法についても検討を行った。各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、まず、研究の背景を記した。次に、研究目的を示すとともに、本論文の構成について説明を行った。

第2章では、開水路流れにおける瞬時の水面形状と流速分布を同時に計測する画像処理手法を提案した。本計測法では、同一面内で可視化された水面・流れ場の画像から、既存のPIVアルゴリズムを用いて流速を、この章で提案する水面での輝度勾配を用いた画像処理アルゴリズムにより水面高さを算出し、水面変動と流れの瞬間的・面的計測を可能としている。さらに、本計測法を適用することにより浅い凹部をもつ開水路射流の水面高さや流速分布を同時測定した。流速変動と水面変動の時空間相関解析より、主流-凹部境界の混合層における組織運動と周期的

に発生する水面変動の間にかなり強い相互関数が存在することがわかった。これらの結果より、この章で提案する水面・流速の同時画像計測法は、大きな水面変動を伴う流れの時間的・空間的な変動特性を把握する上で有用であることが確認された。

第3章では、画像の輝度情報から浮遊物質濃度を計測する手法を検討した。まず、光の伝播特性を表現する放射伝達方程式を用いて、浮遊物質濃度場における画像輝度と浮遊物質濃度の関係を定式化した。この関係式は、濃度場での光の伝播経路上における光の減衰と多重散乱の項から構成される。次に、室内実験水槽における一様濃度場での画像輝度を用いて、その関係式に含まれる未知係数を同定し、これにより準一様濃度場を推定した。その結果、本計測法は空間的な濃度分布を計測する上で有効であることがわかった。ただし、濃度分布を有する懸濁粒子水に対しては、多重散乱項の影響評価、輝度-濃度間の計算手法、画像計測システムにおける光の制御など現行のままでは不備な点があり、将来検討しなければならない課題として提示している。

第4章では、開水路凹部の主流-凹部境界における混合層流れを対象として、ウェーブレット変換を用いた流れの解析を行った。まず、PIVによって計測された流速分布に連続ウェーブレット変換を適用することにより、凹部混合層での瞬時の流速構造を空間-波数平面におけるウェーブレット係数で表現した。その平面上でのウェーブレット係数の極値は、大規模渦に対応すると判断できる。ウェーブレット係数の極大値の位置と波数を抽出することにより、時空間平面上における大規模渦の移流速度、発生周期、空間スケールなど流れの特性が定量的に明らかになった。さらに、流速時系列にウェーブレット変換を適用することによって大規模渦の卓越周期成分の時空間軸上における挙動を抽出した。これらより大規模渦の空間スケールと時間スケールの結合確率分布が求められ、両者が正の相関関係にあることがわかった。次に、多重解像度近似(MRA; multiresolutional approximation)を適用して凹部混合層での流速時系列を周波数別の階層構造に分解し、各周波数帯における流下方向・鉛直方向の変動流速の運動エネルギー成分を定量的に評価した。各周波数帯での特性を考察した結果、運動エネルギー各方向成分は次の3つの周波数帯に概ね分類された：①低周波数と高周波数の成分間において流速変動の高い相関が検出される低周波数帯、②大規模渦など乱流の組織構造が卓越する周波数帯、③等方的で微小な乱れからなる高周波数帯。以上のように、ウェーブレット理論は、混合層の大規模渦など組織構造を解析する上で有効であることが確認された。

第5章では、第4章の検討結果を受けて、ウェーブレット理論を二次元に展開した流れの解析を行った。まず、開水路凹部流れのPIV流速値に対して多重解像度近似(MRA)を施し、低周波数帯でのトレンドと高周波数帯でのノイズを除去して流れの組織運動を構成する変動流速成分を抽出した。この変動流速が卓越する部分は、凹部混合層の外縁に沿って存在し、瞬間レイノルズ応力の卓越部分とほとんど一致する。このことより、瞬間レイノルズ応力の空間分布を凹部混合層における流れの組織運動を抽出するための水理指標とした。次に、二次元連続ウェーブレット変換を瞬間レイノルズ応力の空間分布に適用してウェーブレット係数を算出し、その極大値を介して瞬間レイノルズ応力が卓越する部分の空間構造を求めた。瞬間レイノルズ応力の卓越部は、その空間スケールによって凹部内での挙動が異なり、大きなスケールの卓越部はその空間スケール

ルを変化させながら流下方向に移流する。二次元連続ウェーブレット変換は、瞬時の流速分布から組織運動の位置と空間スケールを定量的に評価できるため、流れの非定常挙動を調べる上で有効な手法といえる。

第6章では、固有直交関数展開(POD; proper orthogonal decomposition)を用いることにより、開水路凹部流れにおける乱れの主成分分析を行った。まず、フルード数と凹部形状比を一定にして、レイノルズ数のみを系統的に変化させた水理実験を行い、レイノルズ数変化が開水路凹部における平均流速や乱流諸量など流れの構造に及ぼす影響を調べた。その結果、レイノルズ数が大きくなるとともに、凹部下流部に存在していた時間平均的な循環流が凹部全体で循環するようになり、レイノルズ応力、鉛直方向乱れ強度の最大値も凹部中央側へ移動すること、など特徴が明らかになった。次に、流速変動成分にPODを適用することによって乱れの主成分分析を試みた。得られた低次モードの流速変動成分は主に平均流速分布における循環流に起因し、次に続くモードの変動成分は主流-凹部境界の混合層での組織運動に関連すると考えられる。また、レイノルズ数の増加とともに、循環流に起因する変動成分の寄与率が大きくなり、レイノルズ数がある値で極大値をとることがわかった。以上の結果より、PODは、生成要因の異なる流速変動に関連する主成分が定量的に得られるため、主要な変動成分を抽出し分析する上で有用な手法である。

第7章では、第4章で導入した多重解像度近似(MRA)と第6章での固有直交関数展開(POD)を複合的に用いることによって、PIVで得られた流速から混合層での組織構造など流れに特徴的な変動成分を効果的に抽出するハイブリッド的な解析方法(「多重解像度-固有直交関数」複合展開、またはMR-PO複合展開)を提案した。この方法は、具体的には、まず、MRAを適用することにより流速時系列を組織乱流成分など三つの階層構造に分解し、さらに、その組織乱流成分などにPODを適用することにより流れの時空間構造の主要成分を定量的に抽出するものである。このMR-PO複合展開により開水路凹部の常流・射流を解析した結果、凹部混合層における組織運動、水面変動と流速変動の相互関連など、流れの特徴的な成分の時空間階層構造が明らかになった。以上の結果より、MR-PO複合展開は流れの主要変動成分の時空間構造を解析する手法としてきわめて有効であることが確認された。

第8章では、各章で得られた結果を取りまとめ、本論文の結論とした。

氏名	宮本仁志		
論文 題目	画像情報に基づく浮遊物質濃度計測と開水路凹部流れの時空間構造解析		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	道 典 康 治
	副査	教授	中 山 昭 彦
	副査	教授	中 島 健
	副査		
			印
			印
要 旨			
<p>本論文は、画像情報を用いた開水路流における浮遊物質濃度の計測法と流速構造の解析について検討を行ったものである。</p> <p>1997年の河川法改正以来、河川の整備計画は、治水-利水-環境のバランスのとともに、生態や水質など水環境に配慮して多様な流れを創出することを基本とするようになった。生態系や水質収支が河川流に内包される静と動の微妙なバランスの上に成り立っていることが、様々な観測研究から明らかにされており、治水・利水を目的とする河道・構造物設計のためにも、また河川管理においても、これまでのように水深や流量など断面平均的な流れの情報だけで検討を行うことはできない。植物・動物の生活史や水質輸送を規定する時空間スケールを把握し、その知見を河道設計へ反映するために流れの時空間情報を抽出し流れを特徴づけるパラメータを規定する必要がある。魚介類や水生昆虫の生息は河川の堆積環境-すなわち大きな水深で流れがゆるやかな滞り構造が重要であるとされている。ここでは、急流と淵が接続する流れのモデルとして、水路床に凹部を設けた開水路急変流を対象とした。本研究では、画像計測から得られる水面変動や流速変動の時空間情報を抽出するために、新たな画像計測とデータ解析手法を開発し、河道設計への応用を提言している。</p> <p>第1章では、上述のように本研究の計画・実施に至った背景を述べ、研究の目的、これを達成するために行った本研究の構成を示している。</p> <p>第2章では、開水路流の画像情報から水面と流速を同時に計測し、解析するための新しいアルゴリズムを提唱している。河川の自浄作用を評価するためには、水面でのガス交換や水中内の乱れによる物質輸送能力を正確に把握する必要がある。流れと水面変動は相互に干渉し合う非線形性の高い水理量であるため、それぞれを個別に計測して得られる情報は河川流の動力学構造を反映したものではない。相互干渉を捉えた同時計測データこそが有意である所以である。本章では、同時計測された水面・流速情報の精度を評価し新しいデータ処理アルゴリズムを提唱した。これより、水面と大規模乱れとの相互干渉過程が動力的に解明された。水面変動と乱れの相互作用に関する本章での知見は、河川の再曝気能力を評価する上で不可欠なものであり、環境水理学的に重要な意味を有する。</p> <p>第3章では開水路流の浮遊物質計測に画像解析を応用している。河川に含まれる浮遊物質は土砂のような無機態と生体残滓など有機態浮遊物質からなっており、環境水理学的には浮遊物質濃度を時空間的に連続計測する技術の開発が求められている。ここでは、流れの輝度情報に基づく濃度分布の計測手法を開発した。光の放射伝達方程式に光の減衰と多重散乱を考慮し、輝度-濃度間の関係を与える算定式を導いた。濃度算定式に含まれる未定係数はカオリナイト混和液を用いた室内実験によって同定された。これより、混和液における多重散乱特性が明らかにされるとともに、画像情報から浮遊物質濃度を精度良く推定する手法が確立された。</p>			

氏名

宮本仁志

第4章では、開水路凹部のせん断流構造を抽出するためにPTV（粒子追跡法）から得られた流速情報のウェーブレット解析を行った。複雑な局所流であるため、流れのスペクトルは様々な時空間スケールから構成される。内部せん断によって生成される大規模渦は、連続ウェーブレット変換によつて的確に抽出され、大規模渦がウェーブレット係数の極値とおおよそ対応することが明らかになった。その情報に基づけば、大規模渦の発生間隔・周期、移流速度の定量評価が可能となる。さらに多重解像度近似を適用して、各周波数スケールの運動エネルギー成分を算出することに成功した。水生昆虫や魚介類の生態挙動は流速変動の時空間スケールに敏感に依存する。本章で得られた階層毎の流れの動力学的構造・統計特性の情報は河川生態系に配慮した河道設計を進めるにあたり貴重な知見を提供している。

言うまでもなく河川流の構造は三次元的であるため流れのベクトル情報を如何に整理して河道設計に取り込むかが実務レベルの課題となる。第5章では、前章において開発された多重解像度近似（MRA）とウェーブレット解析によるせん断流構造解析を二次元場に拡張し、その有用性を実証している。二次元ウェーブレット変換から得られるウェーブレット係数はレイノルズ応力の卓越領域と高い相関を有しており、秩序構造の非定常特性を検出する有効な方法であることが示された。

第6章では固有直交関数展開（POD）を用いて流れの主成分を分析した。ここでは、流れの構造におよぼすスケール効果を確認するためにレイノルズ数を変化させた実験が行われた。平均流・乱流諸量のレイノルズ数への依存性を確認した後、POD主成分分析に基づき、低次から高次モードに至る流速成分の生成要因を明らかにした。本手法を応用すれば、水質輸送を担う主要成分を抽出しその要因を同定することが可能となり、水質収支におよぼす河川の原因変動成分を特定する上で重要な情報を提供するものである。

第7章では、様々なフルード数の開水路凹部流れにMRAとPODの複合展開を適用し、流れの組織構造と水面変動との相互関係を明らかにした。その結果、水質輸送を駆動する流れエネルギーの大部分を含有する組織運動の各モードが安定な双対構造を有することが示された。同時計測された流速－水面変動を複合展開しているの、水面変動と流れの各スケールとの対応関係が明確に検出された。河川流の最大の特徴は変動する自由水面を有することにあり、水質・生態系に影響をおよぼす流れと水面間の相互作用が明らかにされたことで、河川の環境機能を考慮した河道設計が容易になる。特に、近年の河川改修で多用される常流／射流混在流れの環境機能を評価する上ではきわめて貴重な知見を得ている。

第8章は、各章の主要な成果をとりまとめるとともに、本研究の土工設計への応用について展望を述べた上で、論文全体を総括している。

ここ数年、全国の主要河川では情報ネットワークとモニタカメラの整備が進められており、画像データに基づく河川情報は日々蓄積されている。今後の河道設計にはこれら画像情報が反映され、河道を管理する方向にある。本研究で検討された各種画像計測とデータ解析手法は、こうした動向に即する有用な情報管理手法である。

以上のように、本研究は開水路の急変流構造をきわめて多角的に解析したものであり、画像情報に基づき環境に配慮した河道設計を実施する上で貴重な成果を得た価値ある業績と認める。

よって、学位申請者 宮本仁志は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。