

氏名	坂本 淳一 <small>きかもと じゅんいち</small>
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博乙第137号
学位授与年月日	平成28年2月3日
学位授与の要件	学位規則第4条2項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) システム設計工学系専攻
学位論文題目	現地観測に基づく河川感潮部の水理と物質輸送に関する研究
論文審査委員	主査 山口大学 教授 羽田野 袈裟義 山口大学 教授 朝位 孝二 山口大学 教授 関根 雅彦 山口大学 教授 小金井 真 山口大学 教授 加藤 泰生 宇部フロンティア大学 教授 松本 治彦

【学位論文内容の要旨】

河川感潮部は流域からの排水等が集中するため、栄養塩類の集積が多く、その結果有機物の堆積も顕著になる。特に、自流量の少ない都市河川では、流量が相対的に大きい遡上塩水によって流れが淀みやすく、有機物が堆積しやすい環境にあるといえる。このように濁質や有機物の堆積が顕著な河川感潮部では、有機物を多量に含んだ微粒子がヘドロ化し、有機物の分解による溶存酸素濃度の低下や硫酸塩還元菌の還元作用に伴う硫化水素の発生による悪臭などの問題も生じている。

本論文では、河川感潮部の水理諸量の潮汐による変化と底質移動の特性を明らかにすることを目的とし、山口県宇部市を流れる真締川を対象に現地調査を行い、河川感潮部の流れと物質輸送に関する水理的検討を行った。また、現地調査の結果をもとに物質輸送の特性を整理するとともに、一次元非定常流計算による水理諸量の評価に密度の縦断分布を加味して底面せん断応力の評価を試みた。そして、流れによる底質の巻き上げと密接に関係する濁度について、底面せん断応力及び流速との関係を考察した。

第1章では、河川感潮部の一般的な特性について述べるとともに、塩水と淡水の混合状態とその類型化、現地における水質調査、密度流場における底質の移動という観点から既往研究を整理した。そして、特に都市河川感潮部が抱える社会的問題を踏まえた本研究の背景と目的を示した。

第2章では、真締川感潮部で実施した現地調査について、塩化物イオン濃度の縦断分布特性について述べるとともに、最も下流側の調査地点 Stn. 1において実施した横断面内の測定から塩分及び濁度のフラックスを評価した。塩水と淡水は、潮位差が大きいほどその混合が強まり、縦断方向の等密度面の傾きが大きくなること、逆に潮位差の小さい場合は等密度面の傾きが水平に近い状態になることを示した。また、潮時に着目すると、上げ潮時に等密度面の傾きが大きくなり、下げ潮時に小さくなる傾向にあることを示した。Stn. 1における流速の横断分布からは、下げ潮時には全層で下流向きの流れとなるが、表層と比較して下層の塩水の流速が小さいこと、上げ潮時の塩水先端部の流速とその後続部分の流速を比較すると、前者の流速が大きく、後者の流れは停滞している状態に近いことを述べた。濁度の横断分布からは、下げ潮時から干潮にかけて全層で下流向きの流れが大きくなることで底質が巻き上げられ、また上げ潮時には比較的流速の大きい塩水先端部の通過時に底質が巻き上げられて濁度が増加すると推論した。

第3章では、底質の移動のカギを握ると考えられる底面せん断応力について、その評価方法を示した。密度変化を考慮した運動方程式から導かれた底面せん断応力の評価式に、通常の一次元非定常流計算により求めた水深、流速および水面勾配に現地調査で得られた密度分布を用いて評価した。このようにして評価した底面せん断応力の時間変動として、潮位差が大きい場合には、特に水位変動の大きい時間帯では水面勾配項に支配され、底面せん断応力を評価する地点を塩水先端部が通過するときなど、等密度線の傾きが大きい時間帯では密度勾配項の影響が大きくなることを示した。一方、潮位差が小さい場合には、水位変動量が小さいため水面勾配項が相対的に小さく、一潮汐間のほとんどの時間帯で密度勾配項が支配的であることを示した。さらに、こうして評価された底面せん断応力と底面近くの流速の実測値から渦動粘性係数を算出した。渦動粘性係数は、概ね $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ のオーダーで推移しており、既往研究の結果と概ね同程度であることを確認した。

第4章では、第3章で評価した底面せん断応力 (Stn. 1~2間) と、第2章で述べた Stn. 1における流速及び濁度の現地調査結果との相互関係を考察した。また、前後する2時刻の濁度の変化量と底面せん断応力及び流速との関係も考察した。底面せん断応力と流速の間には、概ね正の相関があり、第3章で示した底面せん断応力の評価方法の妥当性が示唆された。また、上げ潮時と下げ潮時と比較すると、流速の絶対値が同じ場合、上げ潮時の方が下げ潮時よりも底面せん断応力が大きい。これは、上げ潮時の方が底面近くの速度勾配が大きいため、底面せん断応力が大きい値を示すものと推論した。底面せん断応力と濁度の関係では、底面せん断応力の絶対値が大きくなるにつれて濁度も大きくなり、また下げ潮時の方が、濁度が大きいことを述べた。これは、下げ潮時に水深がある程度小さくなり、かつ断面平均流速が大きくなると、底質の巻き上げが活発になり、また巻き上げられた底質が沈降しにくくなるためと推論した。2時刻間の濁度の変化量については、下げ潮時に増加、上げ潮時に減少傾向であった。この理由として、下げ潮時は水深の低下と流速の増大により、底質の巻き上げが時間とともに増加すること、上げ潮時は塩水先端部の通過時に巻き上げられた底質が、後続の定常状態に近い流れの中で次第に沈降することによるものと推論した。

第5章では、本研究の成果を要約して総括するとともに、今後の研究の発展・改善のための課題と方向性について述べた。

【論文審査結果の要旨】

河川感潮部は、流域の末端に位置し上流域からの排水が集中するため、栄養塩類が集積し有機物が堆積しやすい環境にある。そして有機物を多量に含む微粒子がヘドロ化し、有機物の分解による水中溶存酸素濃度の低下や硫酸還元菌の還元作用に伴う硫化水素発生がもたらす悪臭などの問題も生じている。河川感潮部の水質・底質環境の有効な改善策を見出すためには、河川感潮部全域にわたる流れと塩分分布の構造および物質輸送の実態を把握すること、ならびに底質移動を支配する底面せん断力の見積もりが不可欠である。しかしながら、河川感潮部は上流からの河川流と潮汐により繰り返される海水の侵入・退出の流れが合成された複雑な流れを形成し、密度効果と非定常流という取扱いの難しさのため、上記の目的に叶うように流れ場を統一的に取扱う水理学的方法が未だ確立されていない。

本研究は、河川感潮部における水理諸量の潮汐による変化と底質移動の特性を明らかにし感潮部の環境改善に繋がる資料を得ることを目的として、真締川 (流路延長 8.3km, 流域面積 20.4km²) を対象に現地調査を行い、河川感潮部の流れと物質輸送に関する水理学的検討を行なった。真締川は感潮区間が 1km 程度と短く感潮域のほぼ全域をカバーする観測が比較的容易な川として選んだ。

まず、河川感潮部の一般的な水理特性を検討し、塩水・淡水の混合状態とその類型化、現地における水質調査、密度流場における底質の移動という観点から既往研究を整理した。

次いで、真締川感潮部の現地調査で塩化物イオン濃度、濁度、流速の1潮汐間の計測を大潮から小潮にわたり合計 17 回にわたって行い、調査対象区間の感潮河川としての性質を整理した。塩分の分布特性と

して、潮位差が大きいほど塩水と淡水の混合が強くなり、等密度面の縦断方向（流下方向）の傾きが急であることを確認した。また、潮時との関係では、上げ潮時には下げ潮時に比べて等密度面の傾きが急であることを確認した。流速については、下げ潮時には全層で下流向きの流れであるが塩分が濃い下層の流れは上層の流れより遅いこと、そして上げ潮時には塩水先端部が通過するときは流速が大きい但其後は遅い流れであることを確認した。濁度の計測から、全層下流向きの流れとなる下げ潮時には比較的長時間にわたって底質が巻き上げられて濁度が上昇するが、上げ潮時には塩水遡上の先端部が通過するときに比較的速い流れで底質が巻き上げられて濁度が増加することを確認した。また、塩分・流速・濁度の縦断分布・横断分布の潮汐による変化の特性を調べ、塩分と濁度の輸送量を上流向き・下流向きに区別して見積もり、その潮汐による変動特性を調べた。

次に、潮汐の影響により流速や密度の縦断分布が時間的に変化する河川感潮域の底質輸送を規定する底面せん断応力の評価法を提案した。従来の感潮部の底面せん断応力の評価方法は、底面近くの密な速度分布の測定が必要であるため、感潮域の全域にわたる底面せん断応力の把握には多大な労力を必要とし、冒頭で述べた河川感潮域の水質環境改善のための資料を得ることは事実上不可能である。一方、水理学の基礎方程式から、河川感潮域の底面せん断応力は、加速度項、水面勾配項、縦断方向の密度勾配項により規定されることが示される。底面せん断応力の評価式において、加速度項は加速度・水深の積、水面勾配項は水面勾配・水深の積、密度勾配項は密度勾配・（水深）²の積を含むが、河川感潮部では潮汐の影響により水深・流速・水面勾配が時間的・場所的に変化するため、各項の評価には工夫を要する。この研究では上記の各項を現地観測結果と比較的簡単な数値計算を通して評価することにより底面せん断応力を見積もる方法を提案している。まず、通常の一次元非定常流の計算により水深と流速の時・空間分布のデータを求め、その結果から加速度と水面勾配を求め、そして密度の縦断分布の測定結果を加味して運動方程式中の各項すなわち加速度項、水面勾配項、密度勾配項の時・空間の値を調べた。一次元非定常流計算は、潮止め堰地点を上流端として河口を下流端として設定し、上流端の境界条件に河川固有流量そして下流端の境界条件に潮位記録から求まる水深を用いた。その結果、前3日間以上無降雨で河川流量が平常流量であった日の測定について、一貫して加速度項が他の項に比べて小さいことを見出し、河川感潮部の底面せん断応力が水面勾配項と密度勾配項だけで見積もられることを示した。この評価方法では、河川の流量データと潮位データがあれば河道に沿う複数地点で塩分の鉛直分布を同時刻で計測するだけでよく、底面近くの密な流速分布の測定を要するこれまでの底面せん断応力の評価方法に比べて著しい省力化が可能である。種々の潮位差の条件に対して調べた結果、底面せん断応力に対して、大潮時には水面勾配項、そして小潮時には密度勾配項が支配的であることを見出した。本方法で見積もられた底面せん断応力と流速の水深方向分布から渦動粘性係数を評価した結果、渦動粘性係数は従来の研究とほぼ同じ $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ 程度の値となった。

最後に、上で述べた底面せん断応力の評価結果と底面付近の濁度・流速との関係を調べた。その結果、正負の値をとるせん断応力の評価結果と流速の間には小潮時から大潮時までのデータを通して概ね正の相関があり、本提案の底面せん断応力の評価法の妥当性が示唆された。また、上げ潮と下げ潮と比較すると、流速の絶対値が同じ場合、底面せん断応力は上げ潮時が下げ潮時に比べて大きい値を示した。これに関して、上げ潮時は下げ潮時に比べて底面近くの速度勾配が大きいこと、底面せん断応力が大きいと推論した。底面せん断応力と濁度の関係では、底面せん断応力の絶対値が大きいほど濁度が大きいことを確認した。

公聴会および審査会における主な質問内容は、観測日の前の降雨の影響に関するもの、現地の環境改善に向けた取組への結び付けに関するもの、底面せん断力と流速の関係に関するもの、観測日の潮位差の大小の定義に関するもの、底面せん断力の評価方法の適用条件、提案された底面せん断力の評価方法と従来の方法の比較に関するものであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容ならびに審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 計4編、参考論文 計0編）

関連論文

- 1) 松本治彦・坂本淳一・天野卓三・隈崎博一：都市河川感潮部の水質と物質輸送の現地観測，水工学論文集，第42巻，pp. 799-804, 1998.
- 2) 坂本淳一・松本治彦・羽田野袈裟義・天野卓三：河川感潮部の底面せん断応力の評価に関する研究，環境工学研究論文集，第45巻，pp. 51-58, 2008.
- 3) 坂本淳一・松本治彦・羽田野袈裟義・天野卓三・光延清伸：河川感潮部における底面せん断応力と濁度の関係，水工学論文集，第55巻，pp. S_1591-S_1596, 2011.
- 4) 坂本淳一・松本治彦・羽田野袈裟義・朝位孝二・天野卓三：河川感潮部における物理量の分布と濁度の性状について，土木学会論文集 B1, Vol. 70, No. 3, pp. 82-93, 2014.