

実測データを考慮した山地と河川・沿岸域の広域土砂動態・地形変化モデルの構築に関する研究

群馬大学大学院理工学府 准教授 鶴崎 賢一

概要：

本研究は、地球温暖化の影響が示唆される河川災害の頻発に対し、ダムや堰の既存施設の容量再確保の対策と、加速度的な進行が指摘される海岸侵食対策の為に、実測データを考慮した山地と河川・沿岸域の広域土砂動態・地形変化モデル：SPR-WDMPOM を構築して現地適用し、定量的精度の高い排砂計算を行うことを目的とする。本報告では、著者らが開発する沿岸土砂輸送・地形変化モデル：WDM-POM と実測データを考慮した河川の土砂供給モデル：gRSM を用い、対象地の山国川・中津干潟において、著者らの現地観測が捉えた 2017 年水害に伴う泥質化の再現計算に成功した。また、利根川上流・吾妻川流域においてタンク・モデルを用いた流出解析を行った。今後、タンク・モデルを分布型化して gRSM・WDM-POM と連結し、SPR-WDMPOM を構築する。さらに、地域シンポジウムを通じて研究成果を地元住民や行政と共有し、防災・環境対策を検討することで地域再生をはかっている。

キーワード：山地と河川・沿岸域、広域土砂動態、現地観測、数値計算、地域シンポジウム

1. 緒論

地球温暖化の影響が指摘される中、毎年のように河川災害が頻発し、そのハード・ソフト対策のより一層の拡充が叫ばれるが、ハード対策の欠点は予算・用地・時間を要することから、急速な環境変化を考えると既存設備の容量再確保も重要な対策のひとつと言える。また、温暖化の影響で加速化すると指摘される海岸侵食への対策も防災上の重要な課題であり、ダムや堰の容量再確保と海岸侵食対策の両面を解決できる「排砂」は重要な技術課題となっている。既に、富山県・黒部川の宇奈月・出し平ダムや宮崎県・耳川等では連携排砂を行っており、静岡県の大井川においても計画段階である。しかしながら、無計画な「排砂」は河川中流域での河床上昇を引き起こし、それによって氾濫を助長しかねない。それを防ぐためには、事前の「排砂シミュレーション」が重要である。「排砂シミュレーション」について、吉井・佐藤¹⁾は、河川については1次元不等流方程式と芦田・道上式、海岸については汀線変化モデルを用いて流砂・漂砂量と汀線変化を予測している。河川については RRI モデル²⁾や重枝ら³⁾のような分布型タンク・モデルによる流出モデルを用い、それに流砂量式を加えることも手法のひとつではあり、海岸については鶴崎ら⁴⁾のような準三次元モデルを用いることも手法のひとつである。しかしながら、河川中流域の河床上昇の抑制や海岸線

回復量については定量的評価が非常に重要であるものの、いずれのモデルにせよ土砂量の定量的精度にはやや難がある。それは河川も海岸も現地の土砂量評価が非常に難しく、萬矢ら⁵⁾、鶴崎ら⁶⁾のように現在進行形でその精度向上をはかる取り組みが行われている段階であることによる。

本研究では、著者らが開発を続けている「潮汐と風波を考慮した泥と砂による広域土砂動態・地形変化モデル：WDM-POM」⁴⁾と、「実測データと簡易モデルを用いた河川の土砂量算定モデル：gRSM」⁶⁾をさらに高精度化し、タンク・モデルと河道モデルによる流域土砂流出モデルを加えて「山地と河川・沿岸域の広域土砂動態・地形変化モデル：SPR-WDMPOM」を構築して、大分県の山国川と中津干潟を対象として現地適用を行い、より定量的精度の高い「総合土砂管理計画」を検討することを目的としている。

山国川と中津干潟においては、80年代半ばからアサリを中心とした漁獲量の急減に見舞われ、地元住民や漁師は干潟の侵食や泥質化の影響を危惧し、それらに対する時期を同じくした耶馬溪ダムや平成大堰の建設、中津港の拡張事業の影響を懸念している。国交省も経年的な深淺測量を行ない報告書⁷⁾をまとめているが、現状、侵食・泥質化実態すら明らかになったとは言えない。そこで、山国川・中津干潟を対象フィールドとして、現地観測と数値計算によって侵食・泥質化実態と広域土砂動態の解明を行い、それ

らのデータを用いて広域土砂動態・地形変化モデルの構築し、広域的な土砂対策の検討を行う。広域モデルの一環となる流域土砂流出モデルについては、一部、群馬県・利根川上流域も対象として開発を行っている。

2. 現地観測

(1) 観測概要

図-1 に、(a) 山国川と中津干潟の位置と (b) 観測領域・測線を、(c) に利根川・五料橋の位置を示す。現地観測は、干出部は RTK-GPS を用いた地盤高測量、冠水部は D-GPS と ADCP を用いた測深を行い、干出部においては領域内の 9 点で表層採泥調査を行った。現在、柱状採泥に取り組んでいる。現地観測は出水期前後の春と秋に行われた。コロナ禍の 2021 年においては、測線 6 において、岸沖方向に詳細な底質調査を行った。採泥試料は、(国) 港湾空港技術研究所のレーザー粒度分布計 LA-690 (株) HORIBA を用いて粒度分布解析を行った。また、山国川の河口 4.0 km に位置する平成大堰における光学式濁度計による濁度データを国土交通省九州地方整備局山国川河川事務所から提供頂いた。2000-2012 年の同局別府港湾・空港事務所の深淺測量データ⁸⁾ についても提供頂いた。

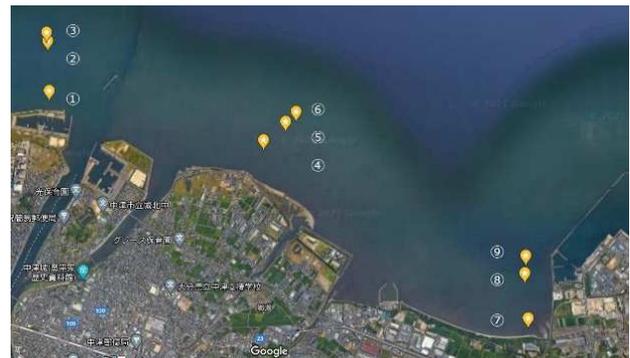
(2) 観測結果ならびに考察

図-2 に、(a) 干潟の侵食・堆積量の長期変化、(b) 2017・18 の各測点における粒度分布の変化を示す。(a) から、長期的には出水年の堆積とそれ以外の年の軽微な侵食が確認され、長期的なトレンドはあまり明瞭ではない。但し、近年では侵食・堆積量の振幅が増大している。(b) から、測点 1, 6, 8, 9 において、2017 年秋にピーク粒径がシルトに移動し、顕著な泥質化が認められた。これは同年 7 月に九州北部豪雨災害があり、それに伴う出水によって多量の泥が流出したことによるものと考えられる。しかしながら、翌春には冬季風浪によってそれらが解消された。18 年も多雨であったが、秋には位置で細砂の堆積が認められる。紙面の都合上、詳細を割愛するが、17・18 年の降雨について顕著な差異は、年最大降雨強度であり、17 年は豪雨災害によって 40.0 mm/h 以上の降雨強度が記録され、日田市では 100 mm/h 以上の値も記録した。その為、泥や砂の流出については降雨強度の影響が示唆されるが、それについては今後詳細な検討が必要である。

水害出水によっては比較的沖合いの測点において泥質化が認められるが、中津土木による調査結果⁹⁾ の再解析、あるいは著者らの踏査結果から、通年的には汀線近傍に堆泥域が形成される。図-2に、著者らの研究グループの九州大学・熊本県立大学による 21 年の底質調査データの一例を示す。調査は 6 月の出水前に行われ、図から汀線近傍で WC、



(a) 観測領域と測線



(b) 採泥地点



(c) 利根川・五料橋の位置

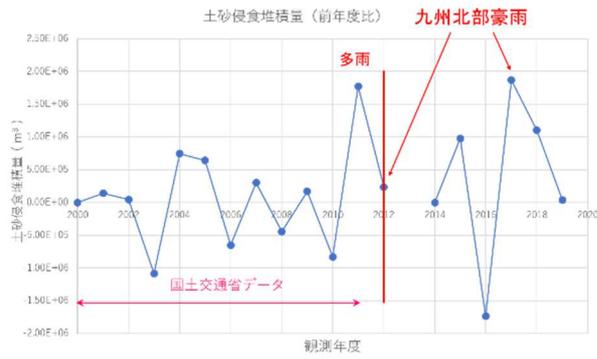
図-1 観測領域と採泥地点 (Google Mapより引用)

AVS, Chl. a 値が高く、沖に行くほど減少する逆相関のアサリの個体数の分布傾向がわかる。これは、汀線近傍で泥質化、沖合いで砂質化していることを示している。現在、粒度分布解析を行っている。

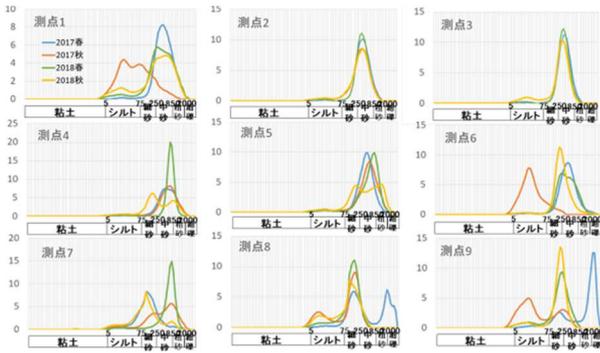
3. WDM-POM による数値計算

(1) 計算概要

WDM-POMは、内山ら⁹⁾ をベースに著者らが開発しているモデルであり、波浪場をEnergy平衡方程式、潮流・吹送流場をPOM、海浜流場をRadiation Stress Model、泥の輸送を移流拡散方程式、漂砂をBailard Model¹⁰⁾、地形変化は土砂収支式を用いて計算する準三次元広域土砂動態・地形



(a) 侵食・堆積量の経年変化



(b) 粒度分布の変化

図-2 侵食・堆積量と粒度分布の変化

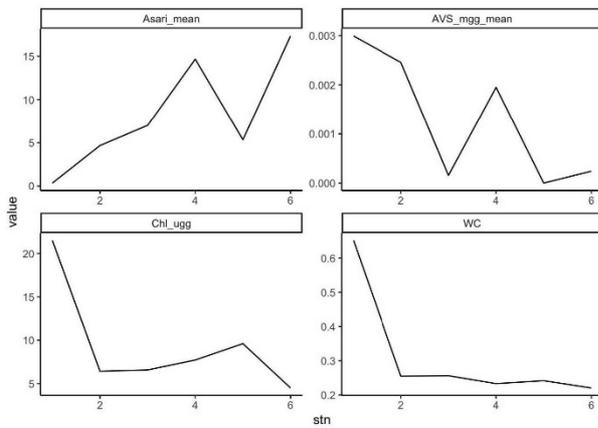


図-3 底質詳細調査結果 (九大・熊本大, 2021)

変化モデルである。泥については、Krone¹¹⁾/Partheniades Model¹²⁾を用いて底面境界での沈降・巻き上げフラックスを算定し、泥の沈降速度は凝集性を考慮したBurban Model¹³⁾を用いて算定している。このモデルを用いて、2017年水害による中津干潟の泥質化についての観測結果の再現計算を行った。その際に、山国川河口の境界条件として、gRSMと下唐原における流量データを用い、山国川からの土砂供給量を算定し、観測結果の含泥率を用いて泥質濃度を算定して付与した。

gRSMは、著者らが開発している、実測値をもとにしたLQ式による浮遊砂量と、Manning式による無次元掃流力をAD

表-1 数値計算条件

		大領域	小領域	
メッシュ数	nx	146	216	
	ny	131	114	
メッシュ・サイズ	dx	450	55.66 m	
	dy	550	45.34 m	
時刻刻み	dte	1	0.1 s	
	dte	0.1	0.01 s	
		計算領域	流れ	河川流量
Run 0	大領域	潮流		
Run 1	小領域	潮流		
Run 2	小領域	潮流	海浜流	-
Run 3	小領域	潮流	海浜流	一定 (2500m ³ /s)
Run 4	小領域	潮流	海浜流	ハイドログラフ
Run 5	小領域	潮流	海浜流	ハイドログラフ 時間遅れ

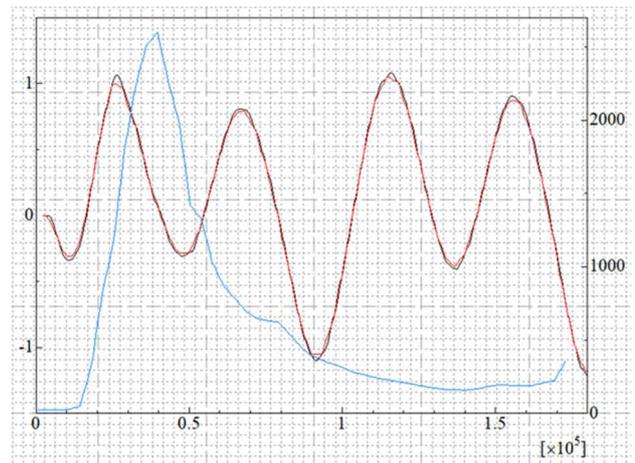


図-4 山国川河口でのハイドログラフと小領域沖側境界での潮位データ

CPによる実測値で補正した値と芦田・道上式による掃流砂量を、ADCPとRennie et al.¹⁴⁾を参考にした半実測掃流砂量で妥当性検証するモデルである。表-1に、計算条件を示す。計算は、周防灘を対象とした大領域計算と中津干潟を対象とした小領域計算を、nesting手法を用いて行った。大領域計算は500 mメッシュ、小領域計算は2017年春の観測結果を、GMTを用いて約50 mメッシュに空間補間した地形データを用いた。大領域では徳山、別府、門司の実測潮位を与え、開境界においてそれらを線形補間して与えた。また、小領域計算の沖側境界において、NOWPHAS 苅田港における波浪データを与えた。

(2) 計算結果ならびに考察

図-4に、山国川河口でのハイドログラフと小領域沖側境界での潮位データを示す。図から、出水ピーク時は下げ潮最強時と重なっていることがわかる。図-5に、Run 4におけるt=75,000sでの泥質濃度Cのlog(C)値の空間分布を示す。図中の白丸数字は現地観測における採泥地点を示す。計算においては、北西からの風波を与えているが、出水時

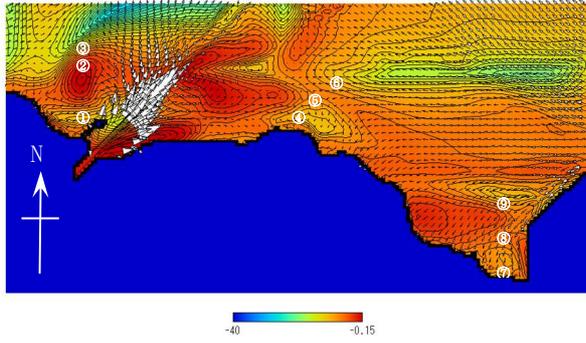


図-5 泥質濃度の空間分布 (Run 4, $t=75,000s$)

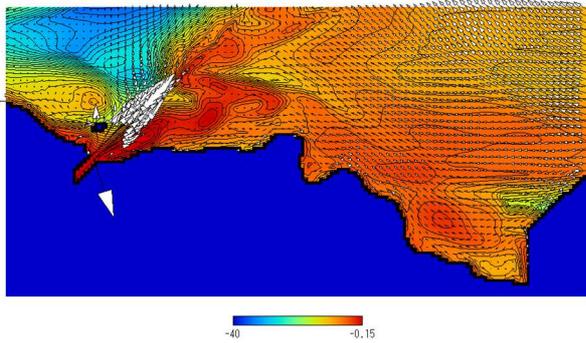


図-6 泥質濃度の空間分布 (Run 3, $t=30,000s$)

は波高が 0.5 m 以下と小さく、従って南東向き of 海浜流はあまり大きくはない。しかしながら、南西向き of やや弱い上げ潮と北東向き of 強い下げ潮によるほぼ東向き of 潮汐残差流によって、河口から出水した濁水は沖向きに流出しながらさらに東向きに流される。その結果、現地観測結果として示された採泥地点 1, 6, 8, 9 のやや沖側での泥質化については定性的には再現されていることがわかる。その時間はほぼ一日程度であることもわかる。

図-6 に、Run 3 における $t=75,000s$ での泥質濃度 C の $\log(C)$ 値の空間分布を示す。河川流量を一定値で与えると、図-5 と比較して流れ場・泥質濃度の空間分布が大きく異なることがわかる。とくに上げ潮が、安定的な河川出水に阻害されて西向きに流れず、河口西側沖での泥質濃度が極端に低くなることがわかる。従って、当然ではあるが、河川境界ではハイドログラフで流量・土砂量を付与しないと、河口外での土砂動態が大きく異なることがわかる。

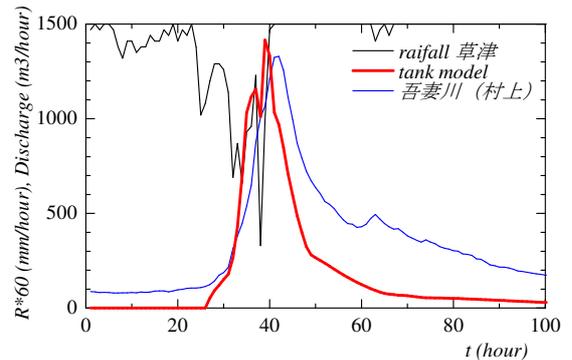
4. SPR-WDPOM による数値計算

(1) 計算概要

「山地と河川・沿岸域の広域土砂動態・地形変化モデル: SPR-WDPOM」は、现阶段ではまだ構築中ではあるが、3. で示したように、WDM-POM と gRSM については現地適用とその計算結果の検証がなされた。広域モデルの一環となる流



(a) 吾妻川位置図 (Google Map より引用)



(b) タンク・モデルによる流出解析

図-6 吾妻川におけるタンク・モデルによる流出解析

域流出モデルについては、分布型タンク・モデルの使用を予定しており、现阶段では、4 段タンク・モデル単体で利根川上流・吾妻川流域での流出解析を行った。現在、gRSM と連携して土砂流出解析を行っている。著者らは利根川上流域のボトル・ネックに位置する群馬県・八斗島/五料橋においても経年的に現地観測を行っており、広域的な土砂動態の検討とモデル開発や検証に必要な流量・土砂量データを蓄積している。

(2) SPR-WDPOM の構築

図-6 に、草津でのハイエトグラフを入力として、タンク・モデルの出力結果を、やや下流に位置する村上水位観測所におけるハイドログラフと比較した結果を示す。図から、減水期にやや一致精度を欠くが、それ以外では、ピーク流量も含めて計算結果と実測ハイドログラフは良好に一致することがわかる。

図-6 の結果と gRSM を用いて流域からの土砂流出量を算定する。上流域を小流域に分割し、各小流域に複数のタンク・モデルを適用した分布型モデルを構築する。その上で河道モデルを用いて小流域を連結し、流域土砂流出モデルを構築する。最後に WDM-POM と連結して SPR-WDPOM を構築し、再び山国川と中津干潟に現地適用して耶馬溪ダムや平成大堰の排砂、それによる干潟の泥質化対策の検討を行う予定である。

5. 地域シンポジウム「中津アカデミア」



図-7 「中津アカデミア」での著者の講演の様子
(NPO 法人「水辺に遊ぶ会」提供)

これまでの知見や今後の方針、山国川と中津干潟の将来像、またそれ以外の個々の地域課題について、地域シンポジウム「中津アカデミア」において、研究発表とパネル・ディスカッションを通して地元住民や行政と情報共有を行った。本シンポジウムは地域 NPO 法人「水辺に遊ぶ会」主催であり、2021 年度は 12 月 19 日（日）9:30～16:30 に開催された。今回が 5 回目の開催であったが、毎回、多くの地元住民や行政職員が参加し、山国川や中津干潟に対する地域住民の関心の高さが伺えた。参加大学は、日本文理大学・水産大学校・群馬大学であり、行政は中津市、国土交通省九州地方整備局山国川河川事務所と、多くの地域市民や漁民であった。図-7 に、著者の講演時の様子を示す。地域シンポジウムを介して地域住民や行政とコンセンサスを得て、そこで話し合われた干潟の将来像を踏まえて保全対策を検討・遂行すること、そしてそれが実際に干潟の侵食・泥質化を防ぎ、アサリを中心とした水産業の回復に繋がれば、実態を伴う非常に有効な地域再生策となると考えられる。

6. 結 論

ダムや堰の容量再確保と海岸線回復を可能とする「排砂」に必要な不可欠な「排砂シミュレーション」の為に「山地と河川・沿岸域を含む広域土砂動態・地形変化モデル」を構築している。現段階ではその最終段階であり、現時点での主な結論は以下のとおりである。

- ① 対象フィールドとする山国川と中津干潟において深淺測量と採泥調査による現地観測を行ってきた。国交省の既往データも踏まえて、長期的には出水年の堆積とそれ以外の年の軽微な侵食、近年では侵食・堆積の振幅が増大していることがわかった。

- ② 2017, 18 年春・秋の粒度分布変化から、2017 年の九州北部豪雨災害に伴う出水によって 4/9 点で顕著な泥質化が認められた。そして、泥質化は翌春には解消された。
- ③ 18 年も多雨であったが、数測点において細砂が堆積した。17 年との顕著な差異は、時間降雨強度の顕著な差異であったことから、降雨強度と流出底質粒径の関係が示唆された。
- ④ 著者らが開発している WDM-POM と gRSM を用いた 2017 出水による泥質化の再現計算は、定性的には良好に観測結果と一致した。現在、定量的検証を行っている。
- ⑤ 流域土砂流出モデル構築の諸段階として、利根川上流吾妻川流域において 4 段タンク・モデルを用いた流出解析を行った。その結果、減水期の再現性にまだ難があるが、実測のハイドログラフをある程度再現できている。

現在、gRSM と連携し、また分布型とした上で河道モデルを加えることで流域土砂流出モデルを構築している。そして WDM-POM と連結して広域土砂動態・地形変化モデル:SPR-WDM-POM を構築し、山国川・中津干潟に再適用して耶馬溪ダム・平成大堰の排砂とそれによる中津干潟の泥質化抑制対策の検討を行っていく予定である。アサリ幼生の定着と生育には「粗砂」が必要であることは指摘されており、慶野ら¹⁵⁾によれば、波当たりの弱い泥質化はとくに冬季の大型個体の潜砂行動による斃死を招くことが指摘されている。それ故に、2017 年水害についても翌春には解消されたとしても、それがアサリにとっては危機的であった可能性が高い。事実、浜口¹⁶⁾は、堆泥もアサリの個体数減少のひとつの重要な要因であると指摘している。従って、泥質化対策と粗砂の確保はアサリの漁獲量回復にも大きな寄与をすると考えられる。そこで、「排砂」によるダムや堰の容量再確保と干潟の泥質化抑制は、問題となっているアサリの漁獲量の回復に繋がるものでもある。

地域シンポジウムを含めた本研究の取り組みは、ここまで山国川と中津干潟、あるいは利根川上流域を対象フィールドとしているが、そこである程度の成果が検証されれば、同じ課題を抱えるフィールドは全国・全世界に数多く存在することから、今後、本研究手法を広域に展開し、山地と河川・沿岸域の土砂問題の解決の一助としていく。

謝辞

本研究の遂行は、JICE 国土技術研究センター研究開発助成（第 20002 号）の助成を受けて行われた。国土交通省九

州地方整備局山国川河川事務所ならびに別府港湾・空港整備事務所には、観測許可ならびに観測データの提供を頂いた。NPO 法人「水辺に遊ぶ会」には多くの助言や地域シンポジウムの「中津アカデミア」を開催頂いた。また、(国)港湾空港技術研究所には、底質粒度分析や採水試料のSS分析において多大な助力を頂いた。九州大学・日本文理大学・鹿児島大学・熊本県立大学・山口大学には研究計画や現地観測において多大な助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉井拓也, 佐藤慎司, 天竜川・遠州灘流砂系における広域土砂動態の解明と将来予測, 土木学会論文集 B, Vol.66, No. 1, 1-18, 2010.
- 2) 佐山敬洋, 岩見洋一, 降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用, (財) 土木研究センター土木技術資料 56-6, 18-21, 2014.
- 3) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 森山拓士: 河川合流部周辺での流れと河床変動の平面 2 次元解析, pp.793-798, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, 2009.
- 4) 鶴崎賢一, 栗山善昭, 坂本光: 潮流と海浜流による干潟の地形変化に関する数値計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, pp.466-470, 土木学会, 2009.
- 5) 萬矢敦啓, 岡田将治, 菅野裕也, 深見和彦, 大平一典: 実河川における掃流砂量の計測手法に関する一提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), No.67, No.4, pp.L1171-L1176, 2011.
- 6) 鶴崎賢一, 加藤貴俊, 池畑義人, 実測データと簡易モデルを用いた河川の土砂量算定モデルの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第 77 巻 2 号, L595-L600, 2021, ISBN-L:2185-467X.
- 7) 国土交通省九州地方整備局別府空港・港湾整備事務所: 中津港海域環境管理検討調査報告書, pp.1-151, 2013.
- 8) 平成 17 年度環境モニタリング調査業務計画書, 大分県中津土木事務所, 2005.
- 9) Yusuke Uchiyama, Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats, *Report of the Port and Airport Research Institute*, Vol. 44, No.1, 2005.
- 10) Bailard, J. A., An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach., *Jour. Geophys. Res.*, Vol.86, No. C11, 10938-10954, 1981.
- 11) Krone, R.B., Flume study of the transport of sediment in estuarial processes., Final Report, Hydraulic Eng. Lab. And Sanitary Eng. Res. Lab., University of California, USA., 1962.
- 13) Partheniades, E., Estuarine sediment dynamics and shoaling processes, In Herbick, J.(ed.), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, 3, 985-1071, 1992.
- 14) Burbank, P. Y., Xu, Y. and McNeil, J., Settling speeds of flocs in fresh water and seawater., *Jour. Geophys. Res.*, Vol.95, No. C10, 18213-18220, 1990.
- 15) Rennie, C. D., Millar, R. G. and Church, M. A.: Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *Jour. Hydraul. Eng.*, Vol. 128, pp.473-483, 2002.
- 16) 慶野英生, 杉山清泉, 西沢正, 鈴木輝明: 冬季波浪時におけるアサリの潜砂行動とエネルギー消費過程に関する実験的研究, 水産工学 *Fisheries Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp.1-7, 2005.
- 17) 浜口昌巳, 一次生産の変化と有用種の関係 (二枚貝), 水圏センター研報, 第 34 号, 33-47, 2011.