豊川河口干潟における冬季の波・流れと底質移動に関する研究

岡辺 拓巳¹・青木 勇介²・黒澤 愛子³・加藤 茂⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学大学院助教 工学研究科建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: okabe@ace.tut.ac.jp

²学生会員 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科博士前期課程建築・都市システム学専攻 (同上)

³学生会員 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科博士前期課程建築・都市システム学専攻 (同上)

⁴正会員 豊橋技術科学大学大学院准教授 工学研究科建築・都市システム学系 (同上)

本研究では、全国でも有数のアサリ稚貝の発生場所である豊川河口干潟（六条潟）を対象として、地形や冬季の波・流れの特性を現地観測の結果を基に検討した。六条潟ではメガリップルが発達している領域があり、一部ではその形状が変化していることも確認した。冬季の北西風によって来襲する波浪は、浅い干潟で大きな底面せん断応力を生じさせ、底質を輸送する強い外力となっていることを示した。また、潮汐残差流も風の影響を受けており、荒天時は南方への流れが生じることを明らかにした。干潟域での底質移動の実態については、着色砂トレーサーを用いた調査によって、その縁辺部周辺への土砂移動を明らかにした。着色砂投入地点では、時間の経過とともに底質に含まれるトレーサーの数が指数的に減少することを示した。

Key Words: tidal flat, sediment movement, colored sand, field measurement, winter monsoon

1. はじめに

愛知県産のアサリは日本国内シェアの約6割を占めており、全国的にアサリ漁獲量の減少が続く中で、三河湾は比較的安定した生産が見込める重要な生産地としての役割を担っている¹⁾。三河湾内の各漁場では、主に豊川河口干潟（六条潟）で採捕した稚貝を放流することでアサリを生産しており、その放流種苗の供給のほとんどを六条潟に依存している。一方で、貧酸素水塊の形成を背景とした青潮による稚貝の大量斃死も報告されており²⁾、継続した放流用稚貝の安定確保にリスクを抱えている。持続可能な漁業に向けた資源管理だけでなく、全国的なアサリ資源の回復・管理においても、不明な点が多い六条潟でのアサリ稚貝の発生メカニズムの解明が望まれている。この課題に対し、以前より調査や研究がなされてきており³⁾、多くの観測データや知見が蓄積されつつあるが、六条潟での稚貝発生メカニズムのすべてを紐解くことはできていない。六条潟前面における着底前の幼生の出現は春と秋頃であり²⁾、来遊量の多い秋頃の幼生は、その後の冬季の季節風で発生し、来襲する波浪の中で着底・成長して稚貝となる。このため、冬季の波や流れと稚貝の生息基盤となる干潟域の土砂環境は重要な環境因子であるが、これらに着目した調査事例は少ない。

そこで本研究では、六条潟を対象として、その沖合を含めた冬季の波・流れの特性を現地観測の結果を基

図-1 豊川河口干潟域での観測地点および測線

に検討した。また、六条潟の底質移動については、着色砂トレーサー調査を用いることで、その実態を明らかにした。

2. 対象領域と現地観測の概要

(1) 六条潟の概要

図-1に示す六条潟は、三河湾を構成する二つの湾のうち、東側にあたる渥美湾の最奥に位置した豊川河口に広がる干潟である。その周辺では臨海工業用地や港

湾の整備に伴う埋め立てが古くより行われており⁴⁾、湾内の生態系にとっても数少ない重要な干潟である。湾口は中山水道を通じて伊勢湾へ接続しており、東西に長い三河湾では冬季の季節風である強い北西風によって高波浪が生じやすく、長期的に六条潟へ来襲する。さらに、秋季には台風による高潮も高頻度で発生しており⁵⁾、六条潟は強い漂砂外力を受けやすい位置にある。本研究では、主に豊川河口左岸（南）側の領域を対象とした。

(2) 現地調査の概要

図-1に示す豊川河口域の測線および各地点において、地形測量、現地観測および着色砂トレーサー調査を行った。図中の各点における調査概要を以下に述べる。

a) 地形測量

SL.Aでは、魚群探知機の測深値および位置を記録し、水面から振動子までのオフセットおよび観測潮位を補正した。この測深は2015年3月の静穏な波浪条件下で実施した。SL.BおよびSL.Cは沿岸方向（およそ南北方向）に約500m離れており、これらの岸沖断面を計測した。この断面測量は2013年および2014年の8月の大潮干潮時に行った。測量方法は、計測時の水深が0mの位置を初期位置とし、測線に沿って沖向きに5m毎の水深および計測時刻を記録しながら進む。後に観測潮位を用いてT.P.からの値に修正することで標高を得た。これらいずれの海底縦断面ともT.P.を基準とした深さとした。

b) 波・流れの観測

Stn.Aでは、2014年10月～2015年1月における流速の鉛直分布を定点観測した。期間中の平均水深は7.5mであり、流速プロファイラを用いて海底から上方の層厚1m毎の1分間平均流速（水平2方向）を10分毎に計測した。

同様に、図中の12A、14Aおよび14Bでは圧力式波高計および電磁流速計を用いて水位変動および底部の水平2方向流速を計測した。12Aでは2012年に、14Aおよび14Bでは2014年に、両年とも冬季（10月～翌年3月）の観測を実施した。波高計はサンプリング周期 $\Delta t = 0.25$ sで毎正時より10分間（12Aおよび14A）、あるいは $\Delta t = 0.1$ sで30分毎に10分間（14B）にて計測を行った。流速計は $\Delta t = 0.5$ sで毎正時から5分間（12A）、2分間（14A）および2.5分間（14B）の観測値を取得した。海底からセンサーまでの高さは、波高計が5cm、流速計が20cm（12A地点のみ35cm）である。期間中の平均水深は、それぞれ1.7m（12A）、2.0m（14A）、1.5m（14B）であった。

図-2 豊川河口左岸側近傍の岸沖断面地形（SL.A）

c) 着色砂トレーサー調査

2014年10月に、青色着色砂（250kg、中央粒径 $d_{50} = 0.3$ mm）を14Aに投入した。着色砂は、船上より海底近傍まで先端を降ろしたステンレス製管に海水と混ぜながら投入し、可能な限り定点内に配置した。その後、周辺の13地点において投入から16, 30, 40, 47, 69, 98日後の計6回の採泥を行った。なお、この採泥地点の配置については次章にて述べる。採取した底質は乾燥後、100gを分析対象して着色砂の検出を行った。この検出には画像解析と人間の目視を組み合わせた手法を用いた。この分析方法については青木ら⁶⁾を参照されたい。六条潟上での着色砂を用いた土砂動態調査は加藤ら⁷⁾によって実施されているが、本研究では投入地点をやや沖側の干潟縁辺部（平均水深2m）としており、そこから干潟上への土砂移動と拡がりをつえる。また、分析には精度の高い着色砂検出手法を適用している点に違いがある。

3. 観測結果と考察

(1) 地形の特徴

図-2は河口から2km沖合までの岸沖断面（測線SL.A）を示したものである。図は測線を北向きに見た断面であり、測線が通過する3つの観測地点も示している。これより、河口部の干潟は岸沖方向に1km、水深はT.P.より約2mの範囲で形成されており、その勾配はおおよそ1/670である。縁辺部は勾配が1/34程度の傾斜となっており、沖側の地形へと接続される。干潟上では岸沖方向で粒径に若干の違いが見られるものの、おおよそ $d_{50} = 0.3$ mmであった。縁辺部ではさらに細かい細砂成分が主体となり、干潟域より沖側では海底が泥質で緩やかに水深が増していく。これらのことより、六条潟は地形によってその領域を比較的明瞭に区分できることがわかる。

図-3は干潟中央部の2測線（SL.BおよびSL.C）における2013年8月および1年後の岸沖断面を比較したものである。河口側（SL.B）は平坦であるのに対し、約300m南側に位置するSL.Cでは、高低差0.3～0.5m、

図-3 2013 年および 2014 年 8 月の六条潟の岸沖断面地形 (SL.B および SL.C)

図-4 六条潟中央部 (SL.C 付近) に形成されているメガリッププル (2013 年 8 月に岸側から西方を撮影)

波長約 50m のメガリッププルが形成されている。図-4 に示すように、干潟中央より南側において南西から北東方向にメガリッププルの連なりが目視によって確認できた。一方で、河口に近い SL.B 周辺では、沿岸方向に直角な複数のメガリッププルが南北方向に形成されていることを同様に確認しており、岸沖断面のみでこの干潟地形を把握することはできないことがわかった。断面の経時変化については、SL.B では地形に大きな変化は見られないのに対し、SL.C ではメガリッププルが兩年ともに存在しており、その一部は峰と谷が逆になっている。これらのことより、六条潟での夏季のメガリッププルの形成場所は空間的に変わらないものの、南部では時間的にその形状が変化することがわかった。このような変化に富んだ干潟地形はアサリの生息にとって重要であるとの指摘も多く⁸⁾、継続的なモニタリングによって地形変化の特徴を把握することが必要である。

(2) 波と流れの特性

図-5 は AMeDAS 豊橋観測所（干潟より西に 2 km 陸側）で観測された 10 分間平均風速の東方（西風）成分と、同時刻での 14A 地点における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の積の関係を示したものである。図中の実線は、次式⁹⁾を用いた浅海波の推定値より求めた。

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.30A \left[1 - \frac{1}{\{1 + 0.004(gF/U^2)^{1/2}/A\}^2} \right] \quad (1a)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U} = 1.37B \left[1 - \frac{1}{\{1 + 0.008(gF/U^2)^{1/3}/B\}^5} \right] \quad (1b)$$

図-5 風速の東向き（西風）成分に対する有義波高と有義波周期の積の関係

$$A = \tanh \left\{ 0.578 \left(\frac{gh}{U^2} \right)^{3/4} \right\} \quad (1c)$$

$$B = \tanh \left\{ 0.520 \left(\frac{gh}{U^2} \right)^{3/8} \right\} \quad (1d)$$

ここで g は重力加速度、 U は風速であり、吹送距離 F は三河湾の東西方向距離として 29 km を、水深 h は湾の平均水深として 10 m を用いた。ここでは、風速の東方成分が正の場合のみの推定を行った。これより、観測値は西風に対する波浪の増大が顕著である。冬季の風向の発生頻度は西からの強い季節風がほとんどを占めており、これによって生じた波浪が頻繁に干潟へと来襲していることがわかる。陸側から吹く東風の場合、観測地点は最も風上側に位置することになるが、風速が大きい場合は冬型の強まる時であることから、波浪も比例して高くなる傾向が見られる。推定値と比較すると、観測値は同じ風速でも $H_{1/3}T_{1/3}$ の幅が広い。これは、14A の水深が 2 m と浅いことに加え、三河湾の干満差が大潮時には約 2.5 m と大きいこと、さらには波高の増大に伴う碎波の影響も含まれることが観測される波高および周期に対して影響しているものと考えられる。しかしながら、定性的には両者は比較的一致していることから、六条潟では陸側の AMeDAS 豊橋地点での風速を基に、およそその波浪を推定することができる。三河湾での冬季の沖波については、Wilson の推定法と岸壁での観測風速を用いることで、観測波高との相関係数が約 0.87 程度の精度で推定できている事例もあり¹⁰⁾、三河湾奥における冬季西風に対する波浪は、風速を把握することで推定が可能となることがわかった。

図-6 は干潟上の 12A 地点における潮流楕円を示したものである。三河湾における主要 4 分潮 (M_2 , S_2 , O_1 , K_1) に対して解析を行った。これより、最も大きな M_2

図-6 六条渦上における潮流楕円 (12A)

図-7 六条渦上における潮汐残差流 (12A)

成分は長軸が西南西-東北東に向いており、また、同じ半日周期である S_2 成分についても、流れの大きさはやや小さいものの同様の向きとなった。一方、日周期である O_1 および K_1 成分については長軸がさらに南北(河口)方向へ傾いている。これら潮流の長軸の傾きは、豊川への入退潮流の影響によるものと考えられる。潮流の大きさについては、ここでの各分潮の潮汐の振幅に比例しており、 M_2 成分が最も大きな成分で、単一成分の流速としては最大で約 3 cm/s である。風や波で生じる流速に比べて小さいものの、潮流としては最大で 10 cm/s 未満であった。

図-7は干潟上の12A地点における潮汐残差流を示している。潮流は図-6に示した4分潮を用い、観測時間毎の平均流速よりこの合計を差し引いた。従って、波の往復流は平均することでほぼ相殺されており、平均的な流動における残差成分である。これより、潮汐残差流は南北(沿岸)方向に卓越しており、特に南方成分が最大でおよそ 20 cm/s と強く流れている。これは風況と対応しており、冬季の北西風の南方成分によって生じていると考えられる。冬季の荒天は数日間継続することから、干潟上での物質輸送に対して、この長時

図-8 六条渦沖における観測期間平均流速の鉛直分布 (Stn.A)

図-9 着色砂検出個数の平面分布(上段左より投入から16日後、40日後、下段左より69日後、98日後)

間の南方への流れの寄与は小さくないと推察される。

次に、干潟の沖側での流れを概観する。図-8は河口沖(Stn.A)における流速の鉛直分布を示している。各層の流速は、観測期間(2014年10月から3か月)の平均値であり、干潮時も計測できている層までを示した。これより、表層付近では南方への流れが大きく、5mより海底側の中～底層では小さい北方流速が認められる。東方成分においては、表層でやや西向きの流れであるが、それより深い層では流速が小さい。観測データを見ると、短期的には冬型の気圧配置が強まる荒天下の季節風(西風)によって生じた 0.5 m/s を超える東方流が観測されているが、河川の影響も含まれた静穏時の西方流れによって、収支がおよそ釣り合う形となっている可能性が考えられる。

(3) 着色砂トレーサー調査と底質移動の特性

図-9は着色砂トレーサー調査で得られた干潟上での

図-10 平均流と波による底面せん断応力の関係 ((a)14A, (b)14B)

検出地点とその個数の分布を示したものである。着色砂投入点である 14A (図中×印) から南北および岸側に約 250m 間隔で 13 の格子状の採泥地点 (図中に示したドット) を設けており、そこでのサンプルから着色砂が検出された地点には○印と個数を示している。なお、図中右下は防潮堤や砂浜といった河口付近の陸上地形を示すものである。図より、投入から 16 日後には約 250m 離れた沿岸方向地点、40 日後はやや岸寄りの地点で、それぞれ 1 粒の着色砂を検出した。その後は投入点での検出個数も少なくなり、69 日後は 14A で 2 個、98 日後には岸寄りの 1 地点に 1 個の着色砂が検出された。検出された地点の全体的な分布を見ると、沿岸 (南北) 方向には投入後の早い段階で広がっており、40 日より後の検出はなかった。岸側へは 1 格子分の移動が確認されたが、さらに岸側の地点での着色砂は発見されなかった。図-2 で示したように、14A およびその南北の採泥地点は干潟の縁辺部に該当するため、この地形に沿った沿岸方向への土砂移動が生じていた可能性もある。また、岸側での検出がなかったことについては、縁辺部の着色砂を含む土砂が干潟上へ多く供給されなかったと推察することもできる。本調査では 14A の沖側に採泥地点を設けておらず、岸沖方向に着色砂がこういった割合で移動したかを把握できなかったことが今後の同様な調査における課題となった。

図-11 投入地点 (14A) における日平均波エネルギーフラックスと着色砂検出個数の経時変化

図-10 は該当期間における投入地点 (14A) および干潟上 (14B) で観測された波浪および平均流より求めた底面せん断応力の関係を示している。ここでは、中川・有路¹¹⁾に従い算出した。これより、両地点での底面せん断応力の関係は、ほぼ同じであることがわかる。また、水深が小さいため波による底面せん断応力が卓越しており、最大値では流れによるその数十倍程度の応力が作用している。この値は底質やアサリ稚貝を移動させるに十分なせん断応力であり²⁾、冬季風浪によって縁辺部も含めた浅い領域では波による強い底質輸送の外力が作用していることがわかった。

図-11 は着色砂投入地点である 14A における波エネルギーフラックス E_f と、そこでの採泥から検出された着色砂の個数の経時変化を示したものである。横軸は着色砂投入 (2014 年 10 月 29 日) からの経過日数として示してある。 E_f は同点で観測された波高・周期より算出した。また、図中の破線は着色砂検出個数の経時変化に対して指数関数で近似した曲線である。これより、 E_f は天候が周期的な変化に対応して増減を繰り返している。投入後、2 回目の荒天時 (16 日後) に採取された 14A の底質には着色砂が数多く残っていたが、その後の静穏な期間での採泥で得られた検出結果では、その存在が確認されなかった。この原因は不明であるが、その後の高波浪を経ても僅かではあるが着色砂は検出されており、その一部は 14A に残留していたものと考えられる。検出個数の減少の傾向は、破線で示したように指数関数的であり、はに検出個数が減少していくことが確認でき、投入から 2 ケ月程度でほぼ検出されなくなった。先述した底面せん断応力も含めて考えると、冬季に土砂移動が生じるポテンシャルは高く、図-9 で示したように干潟縁辺部 (着色砂投入点) の近傍ではあるが土砂の拡がりも捉えることができた。

4. おわりに

本研究では、豊川河口干潟 (六条潟) 域を対象とし、その沖合を含めた冬季の波・流れの特性について現地

観測の結果を基に検討した。また、六条潟における底質移動について、着色砂トレーサー調査を用いてその実態を明らかにした。

六条潟の地形については、南部において沿岸方向に対して斜めに発達したメガリップルが存在しており、その形状は1年で変化している部分もあった。他の場所にもその存在を確認しており、比較的变化に富んだ地形であることがわかった。冬季の波は、季節風で強まる東向き（西風）成分の風速の大きさに対応しており、理論的な推算式を用いることでおよそその海象が推定できることを示した。六条潟での潮流は半日周期の流速が大きく、流向は河川への入退潮の影響を受けていることを示した。一方で、平均的な流れにおける潮汐残差流は風の影響が強く、冬型が強まった荒天時には南向きへ継続した残差流が生じることがわかった。また、強い季節風は沖合の表層で大きな流速を生じさせるが、長期的に平均すると全層での流れの収支はほぼ釣り合っている。着色砂調査では、トレーサー投入後の拡がり方を空間的に明らかにし、冬季の干潟域での土砂移動の実態を把握した。水深の小さい縁辺部から干潟上での底面せん断応力は波動で生じる成分が強く、冬季の干潟域での底質輸送の要因となっていることを示した。一方で縁辺部に投入した着色砂は汀線近傍では検出されないことや、投入点での検出個数の減少が波エネルギーフラックスの経時変化で説明することが難しいことについては、今後明らかにすべき課題である。

謝辞： 本研究の一部は三井物産環境基金からの助成により実施された。また、六条潟における現地観測には愛知県水産試験場の関係諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省大臣官房統計部: 平成 23 年漁業・養殖業生産統計年報, 農林統計協会, 2013.
- 2) 蒲原 聡, 山田 智, 和久光靖, 曾根亮太, 岩田靖宏: 三河湾六条潟におけるアサリ着底初期稚貝の動態, 愛知県水産試験場研究報告, 第 18 号, pp.13-20, 2013.
- 3) 柳橋茂昭: アサリ幼生の着底場選択性と三河湾における分布量, 水産工学, 29 巻, 1 号, pp.55-59, 1992.
- 4) 青山裕晃: 三河湾における海岸線の変遷と漁場環境, 愛知県水産試験場研究報告, 第 7 号, pp.7-12, 2000.
- 5) 青木伸一, 乾 智一: 三河湾における高潮の特性に関する一考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I.231-I.235, 2013.
- 6) 青木勇介, 岡辺拓巳, 黒澤愛子, 加藤 茂: 画像解析と目視の利点を活かした着色砂検出手法の構築, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, 2015 (印刷中).
- 7) Kato, S., Okabe, T., Aoki, Y., and Kamohara, S.: Field measurement of sand movement on river-mouth tidal flat using color sand tracing, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), sediment.61. doi:http://dx.doi.org/10.9753/icce.v34.sediment.61, 2014.
- 8) 秋山吉寛, 齊藤 肇, 南部亮元, 田中良男, 桑原久実: 三重県松名瀬の砂質干潟におけるアサリの空間分布と生息環境, 応用生態工学, Vol. 14, No. 1, pp.21-34, 2011.
- 9) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, p.86, 1991.
- 10) 本間彰洋: 三河港における風および波浪の特性と係留船舶の動揺に関する研究, 豊橋技術科学大学平成 19 年度修士論文, pp.13-19, 2008.
- 11) 中川康之, 有路隆一: 台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 49, No. 2, pp.107-122, 2010.

(2015. 3. 18 受付)

FIELD MEASUREMENTS OF WAVES, CURRENTS AND SAND MOVEMENT OVER AN ESTUARINE TIDAL FLAT DURING WINTER

Takumi OKABE, Yusuke AOKI, Aiko KUROSAWA and Shigeru KATO

Field observations of waves, current and sand movement were conducted on the tidal flat which is located at Toyo River estuary, to grasp their characteristics during winter monsoon. Bathymetric surveys were also conducted over the tidal flat. The surveys revealed the formation of mega ripples in some areas and the change of their shapes in one year. Field observations made clear that waves induced by northwestern winter monsoon generated strong bottom shear stresses which can move bottom materials in the shallow region and tidal residual currents affected by stormy wind were generated in the southerly direction. The characteristics of sand movement over the tidal flat were identified using the colored sand tracing experiment. The reason that no colored sand was found near a shoreline and it was difficult to explain the relationship between the colored sand movement and wave energy fluxes could not make clear. However it was confirmed that the number of colored sand which was found in bottom material samples was decreased exponentially at the input location.