

# タイダルインレット近傍の強潮流による底質浮遊に関する研究

## Sediment Suspension due to Strong Currents around a Tidal Inlet

Syamsidik<sup>1</sup>・青木伸一<sup>2</sup>・加藤 茂<sup>3</sup>・岡辺拓巳<sup>4</sup>

SYAMSIDIK, Shin-ichi AOKI, Shigeru KATO and Takumi OKABE

Measurements of currents, waves and bottom turbidity were carried out both inside and outside the tidal inlet of Hamana Lake. Bottom water samples and underwater pictures showing sediment suspension were also taken outside the inlet under strong current conditions. Based on the field data, characteristics of tidal currents around the inlet are first described, where strong ebb tidal currents are highlighted. Some properties of bottom sediment suspension are then discussed in relation to the current and wave conditions. The bottom sediments seem to be suspended and show high turbidity as the currents and waves reach critical conditions.

### 1. はじめに

浜名湖と遠州灘を結ぶ今切口（幅200m）は、浜名湖内でのpumping modeに近い潮汐振動、湖口部の浅い水深、導流堤による水路の固定化などのために、非常に強い潮流が発生するタイダルインレット（西ら、2006）である。タイダルインレット周辺の流れやそれに伴う様々な現象については、防災面では高潮や津波の内湾への侵入（例えば、岩崎ら、1973）、環境面ではインレットを介しての物質交換（例えば、陸ら、2007）などに着目した研究が行われている。漂砂問題についても、宇多ら（2008）はインレットの強い潮流が沿岸漂砂を阻止する効果について論じている。著者ら（Syamsidikら、2007）は、浜名湖今切口沖の浅海部海底における濁度および波流れの長期観測結果から、下げ潮時にインレットから噴出する強い潮流によって高濃度の底質浮遊が発生し、これが平均的に沖向きの浮遊砂輸送フラックスを生じさせている可能性があることを示した。しかしながら、これは光学式濁度計による観測データに基づく考察であったため、より実証的な研究が必要であった。

本研究は、浜名湖今切口を対象として、種々の現地観測データをもとにインレット周辺の波・流れの特性を明らかにするとともに、インレット近傍での底質浮遊の実態をとらえることを目的に行ったものである。底質浮遊の観測については、濁度計測に加えて、海底付近から直接採水を行って浮遊砂をサンプリングし、同時に動画と静止画が撮影できるカメラを海底に設置して、砂の浮遊状況や海底の様子を画像としてとらえた。これにより、インレット沖の強潮流下で発生する底質浮遊の実態を多面的に明らかにした。

### 2. 現地観測の概要

本研究で使用する現地観測データは、表-1に示す3種類（6回）の観測により得られたものである。それぞれの計測機器の設置場所については、図-1に示す通りである。なお、図中の図中の数字は観測年を表している。

2008年7月および2009年1、2月に実施した観測では、計測機器を海底に設置して6～8時間程度データを取得

表-1 現地観測の概要

実施時期	実施場所	観測項目
2006.9-10	今切口沖 ( $h=4.8\text{m}$ )	流速分布 (Nortek-Aquadopp, 1min-ave/10min, 50cm-bin) 濁度 (Alec-Compact-CLW, 30s-ave/10min) 波高 (IO-WaveHunter-Σ, 0.5s)
2007.8-10	導流堤水路内 ( $h=6\text{m}$ )	流速分布 (Aquadopp) (1min-ave/10min)
2008.7.2 2008.7.18 2009.1.17 2009.2.28	今切口沖 ( $h=4.5\text{m} \sim 7\text{m}$ )	流速 (Alec-Compact-EM, 0.5s) 濁度 (Alec-Compact-CLW, 0.5s) 波高 (IO-HJ-401, 0.5s)

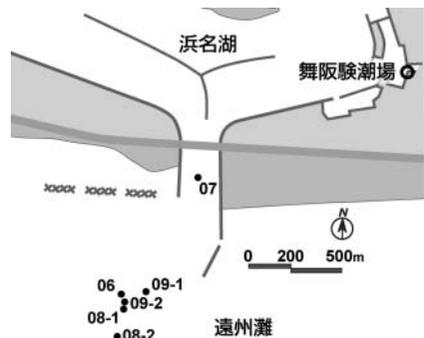


図-1 計測機設置位置

1 博(工) 豊橋技術科学大学研究員  
2 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授  
3 正会員 博(工) 豊橋技術科学大学准教授  
4 修(工) 豊橋技術科学大学産学官連携研究員

した後、すべての機器を回収している。この際、機器による計測と同時に海底付近の状況をビデオカメラで撮影し、強潮流下での底質の挙動を観察した。さらに、2009年の2回の観測では、底面上約30cmの位置から各3回採水を行った。採水は船上からポンプを用いて、直径

10mm、長さ30mのホースで約3Lの水を採取した。機器の設置の様子を写真-1に示す。

### 3. 観測結果

#### (1) インレット内での潮流の特性

ここでは、インレット内の潮流の特性について、観測結果をもとに概観する。図-2は、2007年の導流堤水路内の観測で得られた大潮前後の期間の潮位変動を、舞阪験潮場（位置は図-1参照）の1時間毎の潮位と比較して示したものである。なお、図では、この期間の平均潮位を0として表示してある。これより、水路内では干潮位が舞阪よりもやや早く、かつ低く現われているものの、潮位変動はほぼ一致しており、大きな差は見られない。ただし、潮位の波形がやや前傾しており、下げ潮時に潮位の時間変化が大きいことがわかる。

図-3は、図-2と同じ期間に得られた流速（1分間平均流速）を3つの異なる鉛直位置（海底から0.9m、2.9m、4.9m）について示したものである。これより、大潮期には、最大流速2m/s程度の非常に強い潮流が規則的な振動を繰り返しているが、下げ潮最大時の方が大きな流速となっている。また、潮位と同様に流速波形もやや前傾しており、下げ潮時にはほとんど潮止まりがないことがわかる。潮位との対応関係を見ると、上げ潮および下げ潮の最大流速は、それぞれ満潮時および干潮時の1~2時間前に生じていることがわかる。これは、浜名湖北部の潮汐振動の位相が、湖口部に比べて2時間半程度遅れていることと関係していると思われる（有田ら、2005）。

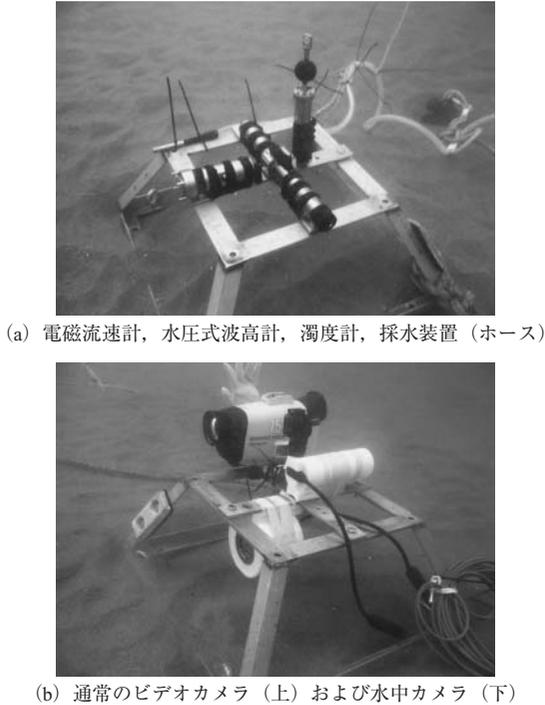


写真-1 海底に設置した計測機器の状況

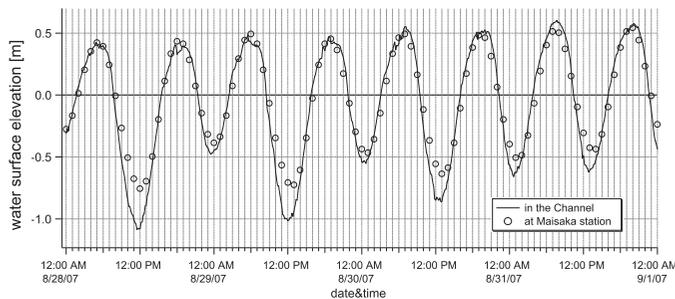


図-2 潮位変動の比較（導流堤水路内と舞阪験潮場）

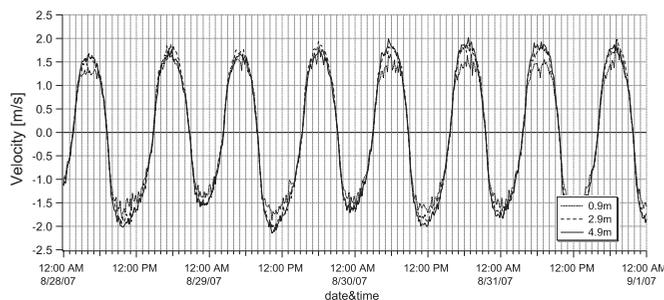


図-3 導流堤水路内での流速変動

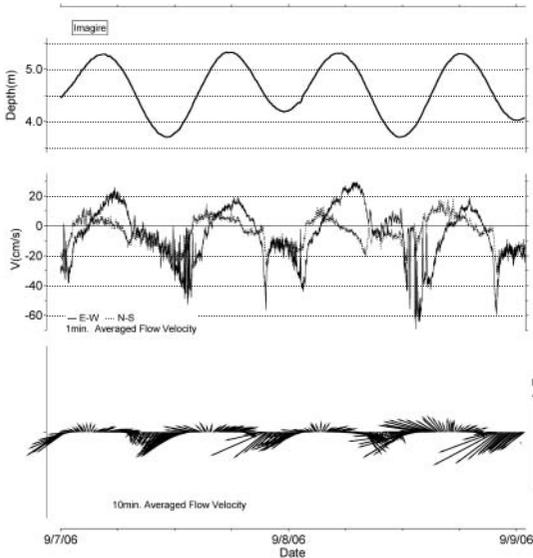


図-4 今切口沖合での潮位変動，流速成分の変動

鉛直方向での流れの違いについては、底部付近では流速がやや小さくなっているものの、顕著な鉛直構造は見られない。機器設置時等に数回CTD観測を行っているが、インレット近傍では密度（塩分）の鉛直構造もほとんどみられなかった。

(2) インレット沖での潮流の特性

次に、今切口沖合での流れの特性について、2006年の連続観測データを用いて考察する。図-4は、観測位置（図-1の06地点）における大潮期の潮位変動（水深）、底部で観測された東西方向（E-W）および南北方向（N-S）流速、およびこれらをもとに描いた流れのベクトル図を示したものである。ただし、流速は1分平均値を、流れのベクトルは10分平均値から求めたものをプロットしている。これより、インレット沖合では、底部でも数10cm/sオーダーの強い流れが観測されており、かつ下げ潮時には非常に変動の大きい複雑な流れ場となっていることがわかる。また平均的な流れの方向は、下げ潮時には東側の沖合導流堤の影響を受けて、南西方向を向く流れとなっている。

(3) 浮遊砂の発生特性

ここでは、機器による計測と同時に実施した水中ビデオカメラ撮影の映像から、現地海底での浮遊砂の発生特性について考察する。ビデオカメラは、主に下げ潮時の流速が大きくなり、濁度（浮遊砂）が顕著に発生する場合の映像を取得することを目的とした。また、カメラの設置が濁度の発生に影響しないよう、流れの下流側から上流側の撮影を行った。なお、現地の底質の中央粒径は0.25mm程度である。

写真-2は、ビデオカメラで撮影された海底付近の様子

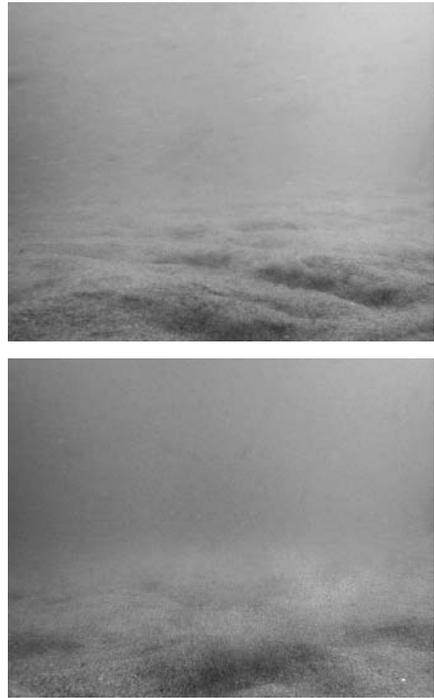


写真-2 ビデオカメラで撮影された底部での浮遊状況

（静止画像）である。今回用いた水中ビデオカメラは動画と静止画像を同時に撮影することができる機能を有している。静止画像は30秒ごとの撮影であるため、ある瞬間の状況しか把握できないが、動画は浮遊砂の発生（巻き上がり）から移動、拡散に至る過程が捉えられており、現地での浮遊砂の状況を把握することが可能であった。得られた動画から以下のことが確認できた。

- ・観測期間中、有義波高が1mに満たない小さな波浪条件であったにもかかわらず、底質の浮遊が活発に生じている。
- ・浮遊砂は、最初、海底面の起伏と流れの変化が引き金となって発生するが、発生した直後は海底面近傍に漂っている。
- ・その後、更なる流れの変化によって上層へ運ばれ、拡散していく。
- ・また、海底面からの浮遊砂の舞い上がりは、空間的に一様ではなく、上記のように海底面の起伏などの有無によって浮遊砂の空間分布にも変化が生じている。
- ・動画および静止画像で確認する限り、かなり大きな粒径の砂も巻き上がりや移動を繰り返していた。

今回、海底付近での浮遊砂の発生や底質の移動状況を動画として取得することができたが、動画や静止画像は解像度が十分でなかったため、画像解析等により定量的な解析を行うことは困難であった。しかし、計測ポイント付近の海底の状況を映像で確認することができたことは、以下

に述べる波流れや濁度の観測データおよび浮遊砂のサンプリングデータなどを考察する上で非常に有用であった。

(4) 流速, 底部せん断力と濁度の関係

図-5は, 2009年2月28日に実施した現地観測における波浪条件および水深, 濁度, 平均流速の経時変化を示している。濁度と平均流速は5分平均値を用いており, 流速は潮流成分に相当すると考えられる。

観測は満潮から干潮までの約1/4潮汐の間に実施され, 観測期間中, 下げ潮による平均水面の低下に伴い, 観測地点での波高は徐々に増大した。また, 流速も流向の反転後, 短時間で流速が増大し, それとともに濁度も次第

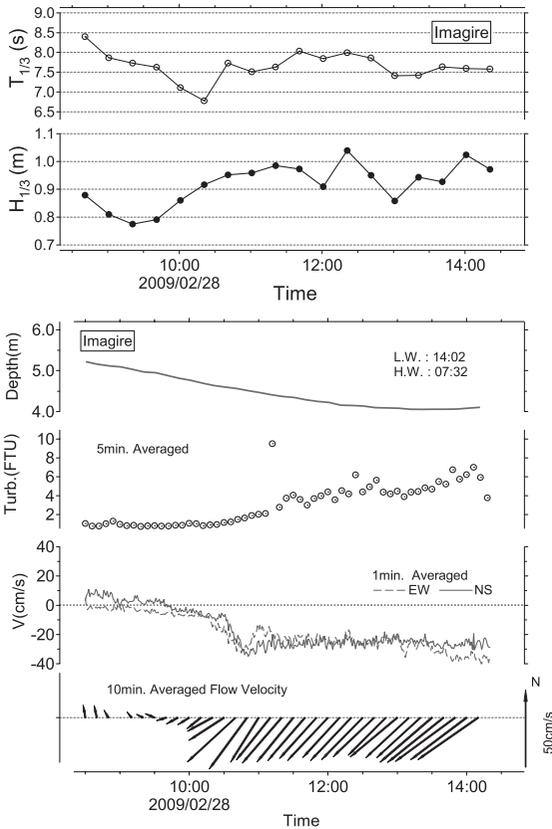


図-5 観測期間中の波浪条件と水深, 濁度, 流れの経時変化

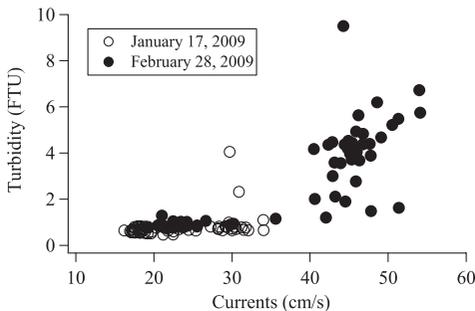
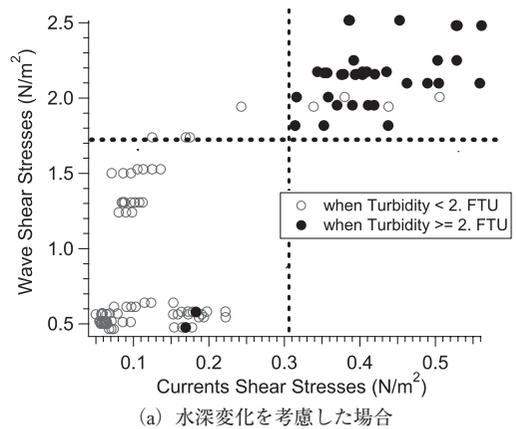
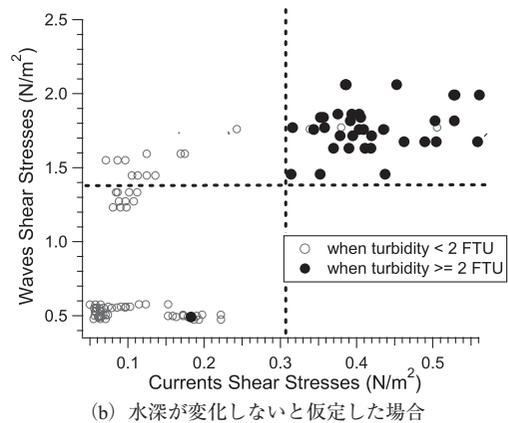


図-6 潮流流速と濁度の関係

に増加していることが分かる。図-6は, 上記の観測データと2009年1月17日のデータについて, 潮流流速と濁度の関係を調べた図であるが, 濁度の発生は流速が0.4m/sを超えると顕著に増大し, 濁度の発生には閾値が存在することが示された。また, 濁度の発生に及ぼす流れと波の影響を見るために, 潮流流速による海底面でのせん断応力を横軸にとり, 同時刻にほぼ対応する有義波高の波の流速振幅によるせん断応力 (Soulsby, 1997) を縦軸にとってプロットしたものが図-7である。(a)は潮汐による水深変化(図-5の水深変化)を考慮して波によるせん断応力を計算した場合であり, (b)は潮汐による水深変化の影響を見るために, 水深を一定と仮定して波によるせん断応力を計算した場合である。図中, 高濁度のケースを●で示して区別している。水深の変化を考慮した場合には, 潮流によるせん断応力と波によるせん断応力の両方が大きな場合に高濁度が発生しており, 波によるせん断応力についても, 図-6で示したような高濁度発生のための閾値が存在することが示唆される。一方, (b)の水深を一定と仮定した場合には, 閾値が不明瞭になっており, 波によるせん断応力の閾値は潮汐による水深変化



(a) 水深変化を考慮した場合



(b) 水深が変化しないと仮定した場合

図-7 高濁度発生に及ぼす流れによるせん断応力と波によるせん断応力の影響

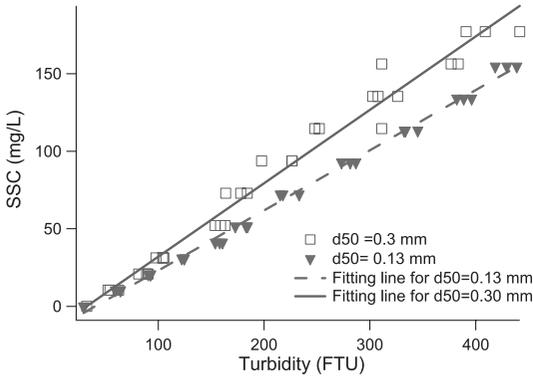


図-8 実験室で得られた濁度と浮遊砂濃度の関係

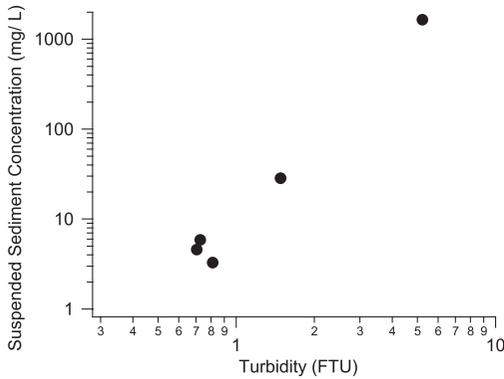


図-9 濁度計と採水サンプルから得られた現地での濁度と浮遊砂濃度の関係

によってもたらされていることがわかる。すなわち、タイダルインレット周辺での底質浮遊は、強い潮流によるせん断応力と、潮位（水深）変化の影響を受ける波浪によるせん断応力の両方に影響されており、結果として潮汐の影響が非常に大きいことが示された。

(5) 濁度と浮遊砂濃度の関係

図-8は、実験室において濁度と浮遊砂濃度の関係を調べた結果である。これより、濁度と浮遊砂濃度は線形的な関係を有しており、濁度から浮遊砂濃度を推定することは可能である。しかし、粒径によってその傾きは異なり、同じ濃度に対して $d_{50}=0.13\text{mm}$ の砂を含む濁水は $d_{50}=0.3\text{mm}$ の砂から成る濁水に比べて、1.5倍程度の濁度を示している点には注意が必要である。図-9は観測時に採水したサンプルを分析して求めた浮遊砂濃度と、対応する時刻での濁度の関係を示している。実験室で得られたデータでは線形関係が確認できたが、現地データでは低濃度と高濃度が極端に現われて両者は線形関係にはならず、図に示すように、むしろ両者の対数値に線形関係が見られた。現地での濁度と浮遊砂濃度との対応関係については、サンプリング方法の問題もあるため、さらに検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、代表的なタイダルインレットである浜名湖今切口内外で実施した観測結果をもとに、インレット周辺での潮流の特性を明らかにした。さらに、インレット沖合海底での底質の浮遊について、濁度計による計測、採水、ビデオ撮影を併用することにより、その実態把握を試みた。

本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) 導流堤水路内では、大潮時には2m/s程度の非常に大きな潮流が発生している。特に、下げ潮時に強い流れとなっている。
- (2) 今切口沖合では、導流堤の影響で、下げ潮時に南西方向に強い複雑な流れが生じている。
- (3) 水中ビデオカメラを用いることで、海底付近での浮遊砂の発生・変動状況を直接把握することができた。
- (4) 小さな波浪条件においても、海底付近では浮遊砂は頻繁に発生している。
- (5) タイダルインレット周辺での底質浮遊は、直接的（流れによるせん断応力）にも間接的（水深変化に伴う波によるせん断応力の変化）にも、潮汐の影響を大きく受けている。
- (6) 実験室で得られた濁度と浮遊砂濃度の対応は線形関係であったが、現地得られた濁度計と採水サンプルのデータでは、両者の対数値に線形関係が見られた。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」（代表：青木伸一、豊橋技術科学大学）の関連研究として実施されたことをここに記します。

参考文献

有田 守・青木伸一・片岡三枝子（2005）：浜名湖今切口の固定化による湖内の潮汐と海水交換特性の変化，海岸工学論文集，第52巻，pp.201-205。  
 岩崎敏夫・真野 明・長谷川明・前原隆生（1973）：長周期波による矩形湾内の振動と湾口条件，第20回海岸工学講演会論文集，pp.167-172。  
 宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・石川仁憲（2008）：ebb tidal deltaの地形変化予測と沖への土砂損失防止策の検討，海岸工学論文集，第55巻，pp.626-630。  
 西隆一郎・N. C. Kraus・川森 晃（2006）：インレットの形状特性に関する基礎的研究，海洋開発論文集，第22巻，pp. 927-932。  
 陸真姫・青木伸一・大谷 聡・奥村和皓（2007）：狭水路で連結された湖における密度成層下の湖水流動と物質交換特性について，海岸工学論文集，第54巻，pp.981-985。  
 Soulsby, R. (1997): Dynamic of marine sands, Thomas Telford Publ., 45 p.  
 Syamsidik・青木伸一・加藤 茂（2007）：河口沖合での潮流と浮遊砂フラックスの特性に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp.601-605。