

導流堤を含む浜名湖今切口周辺地形と 漂砂移動特性

IMPACT OF JETTIES AND TOPOGRAPHICAL CONDITIONS ON
SEDIMENT TRANSPORT AROUND THE OPENING OF HAMANA-LAKE

田島芳満¹・小川裕貴²・佐藤慎司³
Yoshimitsu TAJIMA, Yuki OGAWA and Shinji SATO

¹正会員 Ph.D. 東京大学准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²学生会員 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³フェロー 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

This paper explores the characteristics of sediment transport around Imagire-guchi, the opening of Hamana-Lake. Special focus was put on the spatial distributions of tidal current velocity, which should be the primary force that causes sediment transport and resulting local sedimentation characteristics in the lake. We first performed field survey and obtained the distribution of tidal current velocity across Imagire-guchi as well as suspended sediment concentration. The measured current velocity had significant variation across the tidal flow direction and, in the east-side of the opening, time-varying velocity profile was asymmetry, i.e., the landward high-tide current velocity was larger than the ebb-tide seaward current velocity. Similar asymmetric feature was observed in the measured suspended sediment concentration. As a result, we deduced that certain amount of sand may still flow into the lake in the east-side of the opening while vice versa in the other west-side of the opening. Finally, we performed numerical analysis that surely explained the observed feature and somehow supported our deduction.

Key Words : Tidal current, sediment transport, equivalent roughness, ripples, Hamana-Lake

1. はじめに

静岡県西部に位置する浜名湖は南部の今切口で遠州灘と連絡する汽水湖である。浜名湖は遠州灘の入り江が天竜川からの土砂供給による砂州で覆われてできた淡水湖であったが、明応7年(1498年)にこの地域を襲った大地震、大津波によって砂州の一部が崩壊して今切口が形成された。それ以来、今切口の形状や開口幅、位置、水深などの特徴は遠州灘の波浪や潮流、沿岸漂砂によって絶えず変動してきたが、1953年の台風13号による被害をきっかけに、導流堤を用いた開口部の固定化事業が進められた。

今切口の固定化は、航路の安定や周辺地域の防災機能の向上などの効果をもたらしたが、その一方で今切口周辺の沿岸域や、浜名湖内の環境に多大な影響を及ぼしてきた。たとえば栗山ら¹⁾は、今切口周辺沿岸域における過去30年間分の深浅データを分析し、導流堤の固定化によって下げ潮デルタが形成され、下手側への沿岸漂砂量が減少したものの、現在ではほぼ平衡状態に達していることなどを明らかにした。また、有田ら²⁾は今切口導流堤の建設により

潮汐応答特性が恒常的に変化し、浜名湖内の海水交換率が増加したことを指摘している。

一方、浜名湖内では中州である錨瀬の形成が進み、特に最近では錨瀬の東側周辺での堆砂が顕著で、航路埋没が懸念される(図-1)。この現象は今切口が固定化したことによって湖内潮汐流の変動が小さくなり、堆積域が限定されたことに起因すると推定されるが、その直接的なメカニズムや、湖内堆砂状況の長期的予測に資するような研究は少ない。

そこで本研究では、湖内の土砂移動特性を支配する潮汐流の平面分布に焦点をあて、東西方向に非対称な湖内堆砂メカニズムの解明を試みる。これにより、導流堤や周辺地形と流れ場との関係を明らかにし、得られた知見を湖内堆積砂対策を講ずる際の一助とすることを目的とする。

本論文では、まずヒアリング調査に基づく今切口周辺環境の変遷を整理する。次に現地観測を実施し、漂砂移動の外力となる今切口周辺の波や流況の把握を試みる。最後に数値モデルによる潮流解析を行い、今切口周辺における平面流況場の形成メカニズムについて考察を加える。

2. 今切口周辺地形の変遷

ここでは筆者らが浜名湖漁業協同組合で実施したヒアリング調査に基づき、今切口周辺環境の変遷を整理する。

導流堤による固定化がなされる以前、今切口では東西両岸から伸びる砂洲が変形を繰り返していた。今切口の砂洲は年間50から60m伸びており、西側の砂洲は北東方向に、東側の砂洲は南西方向に伸びていき、台風や暴風雨の度に元の長さに戻るというサイクルを繰り返していた。たとえば1944年秋に來襲した台風の後には、高潮・高波によって表浜の防潮砂堤が決壊して開口部が埋没し、浜名湖内の塩分濃度が極端に減少した。このような淡水化の進行は生態系の変化をもたらし、湖内漁業の漁獲高に大きな影響を及ぼした。沿岸には水深約2m程度の瀬が海岸線と平行に伸び、干潮時などはこの瀬が大きな航路障害となっていた。

その後の1953年9月の台風13号では、高波によって今切口の東西の自然砂州堤防が決壊し、湖口幅が1800mに達した。これにより湖内に大きな波が侵入し弁天島をはじめとする浜名湖沿岸の市町村に甚大な被害を与えた。台風13号に伴う甚大な被害を受け、災害復旧と同時に実施すべき今後の防災対策として、今切口の固定化案があげられた。この時の議論の焦点は、今切口の最適な開口幅についてであった。湖奥の漁業者はそれまでの淡水化による漁獲量の減少を経験していたこともあり、海水流入量が増える広い開口幅400mを主張した。これに対し、湖口部近く、特に弁天島周辺に居を構える人々は、荒天時における被害の低減効果が見込める狭い開口幅を要求した。両者の便益を勘案し、「浜名湖の海水交換特性を維持して漁獲高を保ちながら、災害を最小限に止めて住民を守る」折衷案として開口幅が200mと定められ、その代償措置として浚渫による潮通しを行うこととなった。

今切口の固定化工事では、1954年の着工から約15年を要して図-1に示す導流堤AおよびBが建設され、

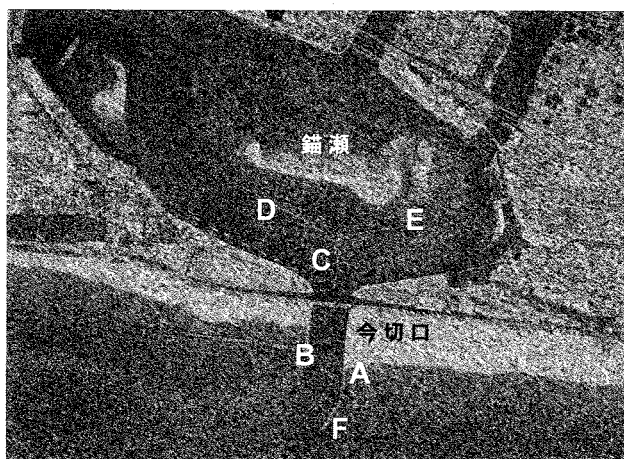


図-1 今切口周辺地形と導流堤。航空写真は2005年。
導流堤CとEの間で水深が浅くなっている。

今切口の開口幅が200mに固定された。しかしながら、今切口内部では下げ潮時に北西からの流れが卓越し、この流れが今切口の通過時に導流堤Aにぶつかって導流堤Aが度々崩壊するという問題が生じた。そのため、この北西からの下げ潮流を低減する目的で導流堤Cが1964年に施工された。

また、今切口からの下げ潮流と、遠州灘沿岸を西に流れる沿岸流が交差する今切口南部では、対流が起こりやすく漁船などの海難事故が多発していた。この対策案として、今切口沖における全長400m程度の離岸堤の建設が提案された。しかしこの案は、背後域の堆砂を促進して今切口周辺を浅くする恐れがあるとして棄却され、代替案としてそれまでの導流堤Aを延長し、導流堤Aの南に北東から南西方向に伸びる導流堤Fが新たに増設された。

現在では、今切口の水深は最深部で約10m程度と比較的安定しているものの、浜名湖内部では東側の砂の堆積による航路障害などが発生している。

3. 現地観測

今切口における沿岸方向に非対称な流れ場を定量的に把握する目的で以下に示す現地観測を実施した。

(1) 観測概要

今切口左岸の観測機器設置位置を図-2に示す。図に見られる導流堤沿いの地点Aから水路内側の矢印方向に沿って、水平発射式超音波流速計(SonTek: ARGONAUT-SL)を設置して、時々刻々変化する水平流速および水位を計測し、B地点には後方散乱式濁度計(ALEC電子: COMPACT-CLW)を設置して浮遊砂濃度を計測した。

計測期間は地点A2006年10月3日より11月9日までの約一ヶ月間とした。観測地点は湖内側の堆砂問題が顕在化している今切口東側を対象とした。水平発射式超音波流速計では、超音波の平均発射方向に沿った任意の10地点における水平方向流速および流向を計測することが可能であるが、本調査では東側導流堤から中央に向かって約120m地点までを対象に等間隔(11.85m)で流速を計測した。今切口の水路

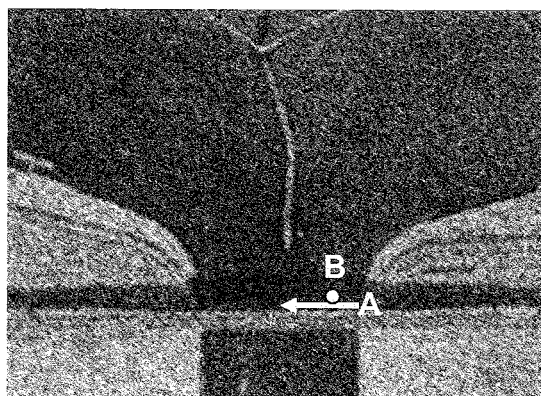


図-2 計測器の設置位置

幅は約200mで図-1の導流堤Cは水路のほぼ中央に位置するので、流速計で計測した10点のうち導流堤から最も遠かった点は、唯一導流堤Cの西側に位置していたと考えられる。濁度計設置地点の平均水深は約6mで、濁度検出面の設置高さは海底面上30cmとした。超音波流速計および濁度計の計測間隔はともに10分とし、それぞれ2分間および30秒間の計測を行いその平均値を記録した。

また、本調査と同じ時期に豊橋技術科学大学によって今切口の沖側開口部付近とそのさらに沖側の2点で波浪・流況場の観測が行われており、後述する観測結果の分析では、それらのデータの一部を用いた。

(2) 観測結果および分析

図-3に11月4日から8日までの計測期間における水位、流速、浮遊砂濃度の時系列データを示す。流速は湖内向きを正とし、図中太実線および細破線は、それぞれ導流堤から約120mおよび60m離れた地点で計測した水平流速である。図に見られるように、水位のピークと湖内向き流速の位相はほぼ一致しており、その位相差は約40分であった。浮遊砂濃度は時間変動が大きく、時々刻々の流速や水路内の波高と浮遊砂濃度を比較しても、両者に有意な相関は見られなかった。

観測期間中は有義波高1.5m程度の波が今切口沖で観測されたのに対し、水路内の波高は常時10cm程度であった。観測した波浪条件と浮遊砂濃度にも有意な相関は見られなかったことから、少なくとも本調査期間中は今切口の土砂輸送特性は波浪条件にほとんど依存していなかったことが類推できる。

また、導流堤から60m離れた地点の流速波形(図-3：細破線)を見ると、上げ潮時の湖内向き(正)流速のピークが、下げ潮時のそれを大幅に上回っていることが分かる。

このような上げ潮と下げ潮時で非対称な流況場を調査全期間で一般的に捉えるために、各計測地点で

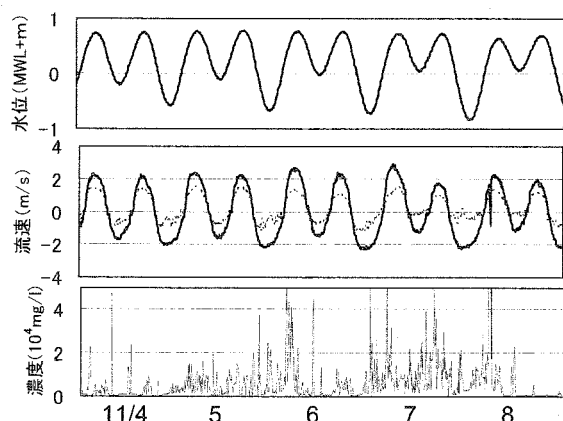


図-3 11月4日から8日までの水位、流速、浮遊砂濃度の計測値。(図中2段目のうち、太字は導流堤から100m地点、細破線は導流堤から60m地点における陸向き流速値)

計測した流速を流向(岸向きと沖向き)別に区分し、それぞれの区分で流速の自乗平均平方根(rms値)を計算した。得られた流向別の自乗平均平方根振幅 U_{rms} を図-4に示す。図より、一ヶ月間のデータから算定した流向別 U_{rms} についても、上げ潮流と下げ潮流で明らかな違いが見られ、特に今切口東側では、上げ潮時の湖内方向流速の方が下げ潮時の沖向流速よりも大きくなった。浜名湖と遠州灘海岸との接点が今切口のみであり、流入・流出量が相殺することを勘案すれば、水路西側では東側の流れを補償する沖向き流速が卓越することが推測される。この傾向は、導流堤から最も遠い10点めの流速測定結果からも見て取れる。またヒアリング調査でも下げ潮時には北西からの流れが卓越することを確認した。

次に観測時に撮影した水路内の濁度計設置地点周辺(平均水深6m)における海底面の様子を図-5に示す。図に見られるように、海底面には高さ2~5cmの砂連が形成されていることが分かった。今切口周辺部における土砂移動特性を把握するには、潮流の方向や大きさだけではなく、底面形状に依存する底面せん断応力の適切な算定が重要となる。そこで、ここでは、以下の手順で観測結果から水路内の相当粗度の推定を試みた。

1. 水路内では流下方向の流速がほぼ一様であると仮定し、水路内の沖側および湖内側の2地点における水位差 $\Delta\eta$ 、距離 Δx 、水深 h 、海水密度 ρ_s を用いて次式で底面せん断応力 τ_b を算定する。

$$\tau_b = \rho_s g h \frac{\Delta\eta}{\Delta x} \quad (1)$$

2. 定常流を仮定し、さらに対数則を用いて相当粗度と底面剪断応力、任意の底面からの高さ z における定常流流速 U の関係を次式で定義し、計測値を用いて相当粗度 k_N を推定する。

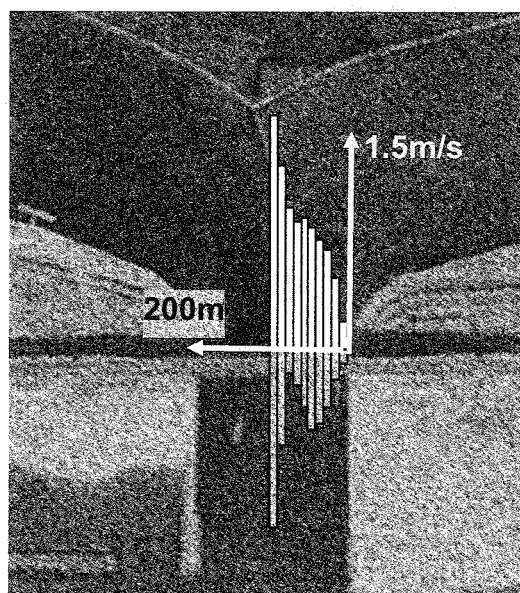


図-4 流向別自乗平均流速の水路横断方向分布

$$U = \frac{\tau_b}{\rho_s \kappa u_{*b}} \ln \frac{30z}{k_N} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_s}} \ln \frac{30z}{k_N} \quad (2)$$

ここで $\kappa=0.4$ はカルマン定数である。このようにして算定した相当粗度を、同様に推定した底面せん断応力から算定したシールズ数の関数として図-6に示す。他の項の影響を無視した概算的な推定方法ではあったが、計算した相当粗度は数cmから十数cmのオーダーとなっており、今切口の水路内に確かに砂連が発達していたことが相当粗度の観点からも類推できる。

最後に、今切口東側における岸沖方向の土砂収支特性を見積もるために、流速の時系列データを基にzero-upおよびzero-down-cross法を用いて、観測期間を一潮汐毎の上げ潮および下げ潮期間に分割し、それぞれの区間で浮遊砂濃度や水平流速、浮遊砂濃度に水平流速を乗じた浮遊砂フラックスの平均値を求め、それぞれの出現頻度をヒストグラムで表した(図-7)。

これらのヒストグラムを順に見ていくと、浮遊砂濃度には上げ潮時と下げ潮時に顕著な差異は見られないものの、比較的大きな浮遊砂濃度は上げ潮時のみ発生していることが分かる。平均水平流速については、先に示した図と同様に、今切口東側では上げ潮時の流速が卓越している様子が良く分かる。以上の結果より、土砂収支を直接規定する浮遊砂フラックスの平均値は、上げ潮時の方が下げ潮時のときよりも大きくなる。また特に大きなフラックスが生じているのは上げ潮時のみとなっていることから、浮遊砂濃度が大きくなるのは上げ潮時でかつ湖内向き流速が大きいときであることが分かり、潮流と浮遊砂濃度には相関があることも見て取れる。以上の比較より、本調査期間中の今切口東側では土砂収支

が湖内向きとなっていたことが推定できる。

4. 数値モデルによる検証

以上に整理した現地観測では、今切口における土砂輸送には潮流流が支配的であること、水路内では横断方向にも時間軸方向にも潮流が非対称性を有すること、さらに今切口東側では土砂収支が湖内向きとなり、西側ではその逆となることなどが推察できた。ここでは数値モデルに基づく潮流解析を通じて、観測した非対称な流れ場の形成メカニズムの分析を試みる。

(1) 数値解析の概要

本数値解析では、幅200mの水路内における横断方向の流速分布に着目しているために比較的高解像度での解析が要求される反面、今切口の流れ場に直接影響する流入・流出量や湖内水位変動の空間的な位相差までを正しく算定するためには、流域面積65km²の浜名湖全域を対象とした流況解析を行う必要がある。

本研究では、支配方程式に鉛直積分型の非線形長波方程式を用い、異なる大きさの正方向格子を用いた2つの計算領域(図-8)を用いた接続計算を行った。微分形式の離散化には空間方向に中央差分を、時間方向にADI法をそれぞれ用いた。

境界条件は沖側の水位変動で与え、今切口では水位と流速の位相がほぼ一致していたため、初期条件は一様平均水位で静水条件を仮定した。ただし実際には湖内と湖口では2時間程度の位相差があることが報告されているため、数値計算では対象とする潮汐流れの一潮汐前から計算をはじめた。正弦波で近似したM2分潮成分の水位変動で試計算を行ったところ、浜名湖における計算では一潮汐の助走計算を用

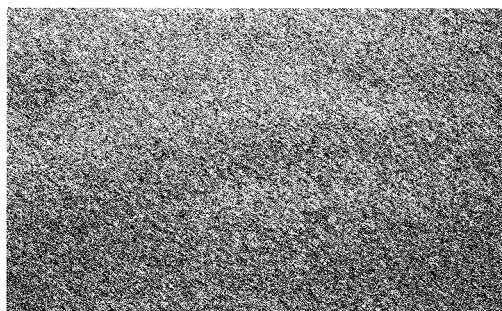


図-5 濁度計設置地点周辺の砂漣(水深6m)

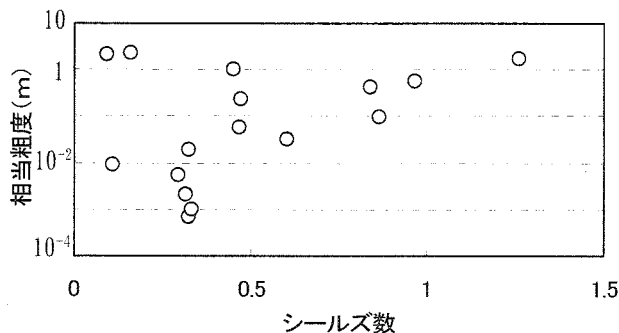


図-6 観測結果から推定した相当粗度

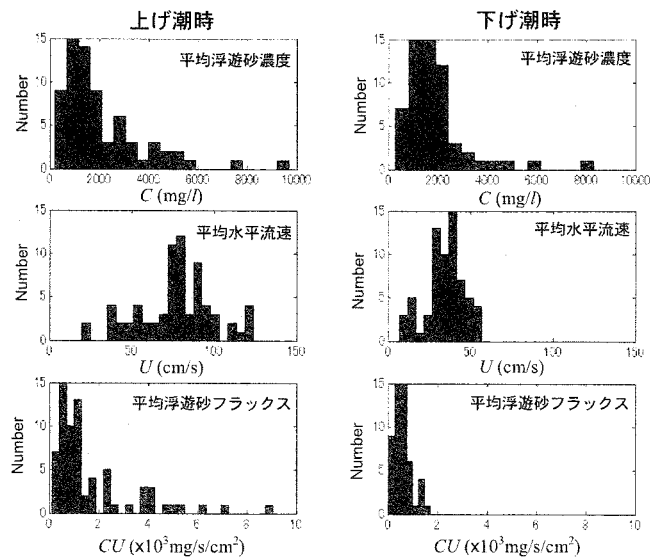


図-7 観測期間における流向別平均浮遊砂濃度、平均水平流速、平均浮遊砂フラックスのヒストグラム

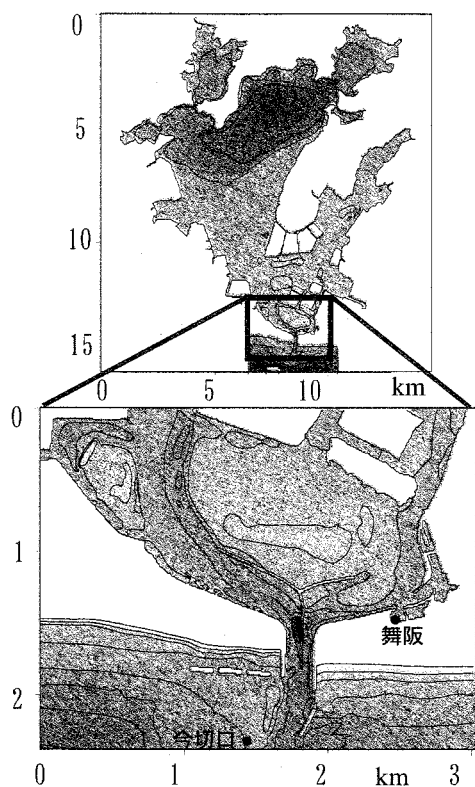


図-8 計算領域図

いればそれ以後の計算が周期定常状態となることが確認できた。

(2) 底面粗度条件

既に述べたように、今切口水路内では砂れんが観測され、底面粗度条件が水路内の流速や土砂輸送特性に大きな影響を及ぼしていることが予想される。また、湖内では航路とそれ以外の地点における水深差が大きく、浜名湖内における流況場を計算する際には、水深にあわせて適切に摩擦係数を設定する必要がある。本研究では、潮汐流を定常流で近似できると仮定し、対数則を用いて相当粗度 k_N と断面平均流速 U から底面剪断応力 τ_b を次式で算定した。

$$\tau_b = \rho_s u_{*b}^2 = \rho_s \kappa^2 U^2 / \left(\ln \frac{30h}{k_N} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

ここで u_{*b} は底面摩擦速度、 h は全水深である。

相当粗度 k_N については、まず砂れんのない状態を仮定して k_N =中央粒径(D_{50} =0.37mm)として計算を行った(Case 1)。次に砂漣上では相当粗度が砂漣高さの4倍程度になることが報告されている³⁾ので、最初のケースよりも3オーダー大きい粗度として k_N =10cmを全域で与えた計算を実施した(Case 2)。また、観測期間中の今切口の水路内の波高は常時10cm以下であったため、波による影響は無視できると考えられるものの、今切口開口部においては、波による底面剪断応力への影響も無視できない可能性がある。本研究では、上述の2ケースに加え、Case 3として沖波有義波高1.5mの波が今切口に直入射した場

合の波高分布を仮定し、Madsen⁴⁾の波・流れ共存場における底面境界層モデルを用いて底面剪断応力を計算した。ただしこのときの相当粗度は10cmとした。

(3) 計算結果

図-9に今切口開口部および舞阪地点(図-8)における平均水位からの水位変動の計算結果と実測結果を比較する。舞阪地点における潮位変動は気象庁の舞阪観測所のデータをそのまま用いた。また図-10には水平発射式超音波流速計で計測した北向き流速成分の水路内横断方向分布と計算結果を比較する。図に示した2つの流速分布は、水路内における上げ潮および下げ潮流速が極大となった11月5日17時および23時における結果である。これらの図のうち、白丸は実測値を表し、細実線、太実線、および太破線は計算値で、それぞれ、(i) k_N =0.3mmおよび(ii) k_N =10cmで波浪による影響を無視した場合、また(iii) k_N =10cmでMadsen⁴⁾の底面境界層モデルを用いて波浪の影響を考慮した場合の3ケースを示している。

さらに図-12には図-11と同じ満潮時および干潮時における今切口～弁天島周辺までの潮流の平面分布を示す。図の白黒の濃淡は流速値の大きさを表し、黒いほど流速が大きい。

図-9に見られるように、舞阪地点における水位変

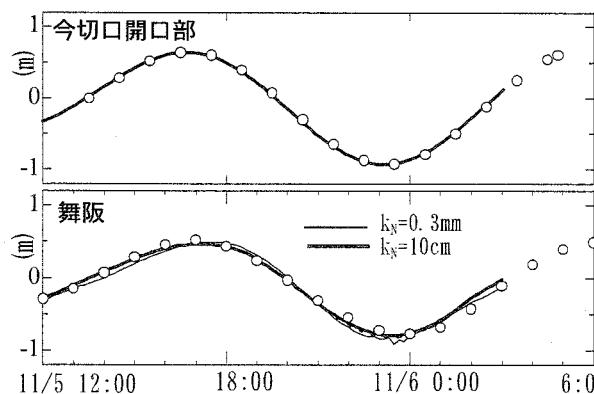


図-9 今切口開口部および舞阪における水位変動

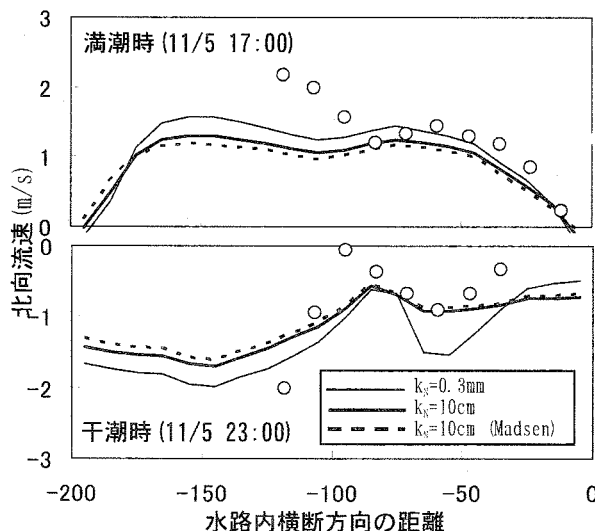


図-10 浜名湖側における岸沖方向流速の水路横断分布

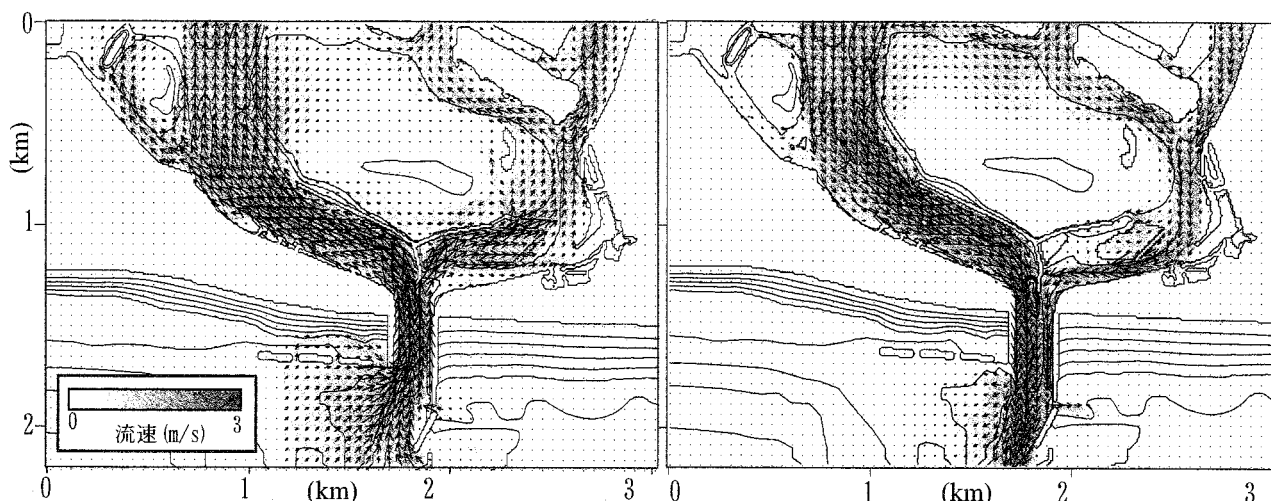


図-12 満潮時 (11/5 17:00) および干潮時 (11/5 23:00) における潮流の平面分布

動は底面粗度の違いによる影響が比較的小さく、3 ケースともに実測値をほぼ妥当に再現できている。

これに対し、水路内の流速については、粗度の違いによる影響がより顕著になり、 $k_N=0.3\text{mm}$ および $k_N=10\text{cm}$ とした場合の計算結果を比較すると流速値に $30\sim 50\text{cm/s}$ 程度の差がみられた。一方、今切口開口部における波による底面剪断応力の増加に伴う影響は比較的小さく、計算された流速値にもそれほど大きな影響は見られなかった。以上より、波浪による潮流への影響は、底面せん断応力の変化としてよりも、むしろ碎波による setup に伴う水位変化としての方が大きいと考えられるが、その定量的な評価については今後の課題である。

次に、水路横断方向の流速分布に着目すると、上げ潮時の北向き流速は水路横断方向に比較的一様に分布しているのに対して、下げ潮時には水路横断方向の変動幅が大きく計算されている。計算結果は実測値に比べて流速の変動が滑らかに計算されているものの、下げ潮時の流速が水路西側では大きく、東側では小さくなるという傾向を妥当に再現できている。図-12に見られるように、下げ潮時には浜名湖内東側の流れは水深が大きく幅の狭い航路に集中しており、明らかに東側からの流出流量は西側からのそれよりも小さくなっていることが分かる。この東西方向の流れ場の非対称な分布に対する底面粗度の影響に着目すると、図-11に示した下げ潮時の流速の変動幅は、砂れんを想定した大きな底面粗度 ($k_N=10\text{cm}$) を用いたケースの方が顕著であり、 $k_N=0.3\text{mm}$ としたケースでは水路東側の冲向き流速を過大評価してしまっていることが分かる。

既に述べたように、浜名湖における錨瀬の東側周辺では浅水域が広く、流れが水深の大きな航路部に集中する傾向があった。これは浅水域における底面摩擦係数の増大に伴う影響によるものであり、底面粗度を大きく見積もることによって、観測した流速平面分布の東西方向の非対称性がより妥当に再現で

きている。

5. おわりに

浜名湖今切口周辺における土砂輸送特性に支配的な潮汐流の調査を実施した。今切口水路内では横断方向に流れが非対称であり、特に今切口東側では土砂収支が湖内向きとなり、浜名湖内東側の堆砂に影響を及ぼしていることが確認された。数値モデルを用いて浜名湖全域を対象とした潮流解析を実施したところ、観測した水路横断方向に非対称な流れは浅水域で増加する底面摩擦抵抗が多大な影響を及ぼしていることなどが確認された。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (B)、課題番号15360261、研究代表者：佐藤慎司) の補助を受けました。また現地ヒアリング調査では浜名漁業協同組合の益井氏、内山氏にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 栗山善昭, 内山雄介, 中村聡志, 永江友和: 導流堤を有する浜名湖今切口周辺海岸の地形変化, 土木学会論文集, No. 726/II-62, pp. 109-120, 2003.
- 2) 有田守, 青木伸一, 片岡三枝子: 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, 2005.
- 3) Wikramanayake, P.N. and Madsen, O.S.: Calculation of movable bed friction factors, Technical Report DACW-39-88-K-0047, Coastal Engineering Research Center USACE, 150p, 1991.
- 4) Madsen, O.S.: Wave-current bottom boundary layer flows, Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng., pp. 384-398, 1994.