

航走波による汀線付近の底質移動特性

CHARACTERISTIC OF SEDIMENT TRANSPORT BY BOAT WAVES IN THE VICINITY OF SHORE LINE

宇野宏司¹・八尾規子²・稲葉涼二³・辻本剛三⁴・柿木哲哉⁵
Kohji UNO, Noriko YAO, Ryoji INABA, Gozo TSUJIMOTO and Tetsuya KAKINOKI

¹正会員 博(工) 神戸高専准教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

²学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³非会員 東海旅客鉄道株式会社 関西支社 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-5-15)

⁴フェロー会員 博(工) 神戸高専教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

⁵正会員 博(工) 神戸高専准教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

To clarify the characteristic of sediment transport by boat waves in the vicinity of shore line, field observations were carried out. Study site is Omaehama beach which is located in the semi-closed water area of the northern part of Osaka Bay in Nishinomiya-city, Hyogo prefecture, JAPAN. First, Sediment traps were settled onshore, the amount of sediment deposition from one ebb tide to the next was measured at spring tide and neap one, respectively. Next, Sediment traps were settled in the vicinity of shoreline, the amount of sediment deposition every 10 minutes. In parallel these field observations, wave height, velocity of tidal current and the passage time of boats or personal watercraft were recorded. Finally, the amount of sediment transport was estimated using *Ashida-Michiue* formula with actual wave height. It is found out that the boat waves have significant implications for the sediment transport in the vicinity of shore line at Omaehama beach.

Key Words : *Omaehama beach, boat waves, Ashida-Michiue formula, wind wave*

1. はじめに

かつて大阪湾は“魚庭（なにわ）の海”，“茅渚（ちぬ）の海”と呼ばれ，その沿岸一帯は，人々が自由に立ち入ることができ，海と触れ合える身近な空間であった．しかし，戦後の防災優先の海岸整備により，自然海岸はそのほとんどが埋め立てられ，現存するものも分断化がすすんでいる．

近年，環境・防災・国際化に対する認識の高まりをうけて，日本各地で都市再生プロジェクト¹⁾が積極的に展開されるようになり，分断された自然海岸についても，これを再生・保全しようとする試みがあるが，環境改善施策の適用に必要な情報は依然として不足している．

こうした都市近郊の海岸では写真-1に示すように小型プレジャーボートを初めとする船舶の往来が盛んで，航走波(写真-1)が不規則に押し寄せている．これらの航走波は，浜辺で憩う人々の安全や快適性を脅かすほか，侵食等による地形変化が懸念され，場合によっては船舶の航行を制限するなどの措置をとる必要がある．



写真-1 御前浜沖を航行するボートとその航走波

航走波についての既往の研究は，河川を対象にしたもの²⁾⁻³⁾や，室内実験⁴⁾，数値計算⁵⁾等の報告が見受けられるものの，都市部沿岸での事例を対象にした現地調査は十分に行われていない．

そこで，本研究では現地観測や数値解析を通じて，打ち寄せる航走波が汀線付近の底質移動に及ぼす影

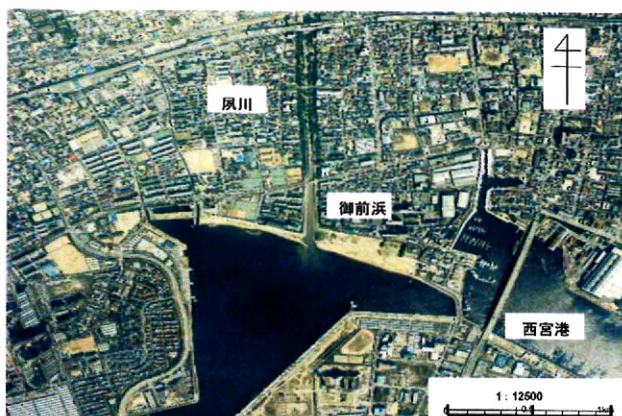


写真-2 調査地点（御前浜）

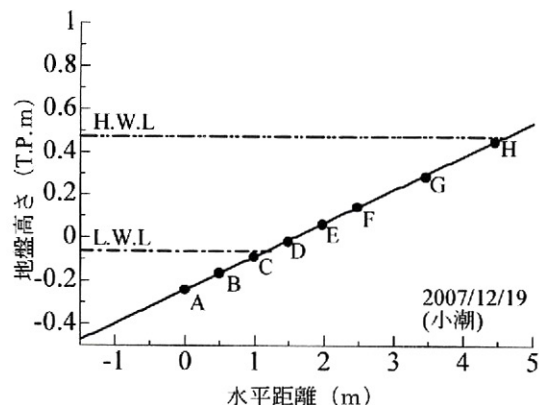
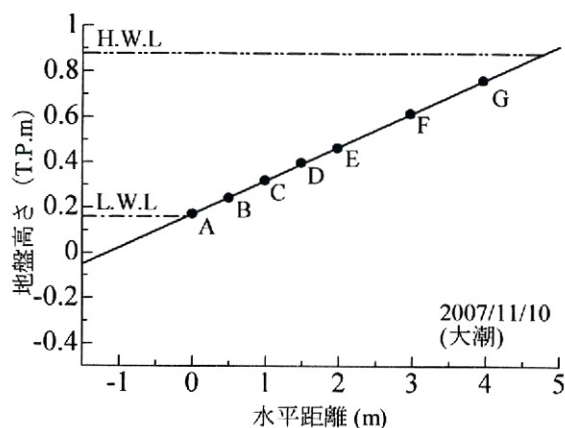


図-2 セジメントトラップ設置点

響について検討することを目的とする。

2. 岸沖方向の底質移動量把握に関する現地調査

兵庫県西宮市の御前浜（写真-2）は、大阪湾奥部の閉鎖性水域に現存する貴重な自然砂浜である。本砂浜において、潮間帯岸沖方向の底質移動量把握に関する現地調査を実施した。

(1) 調査方法

2007年11月10日（大潮，調査時刻11:00-23:00）

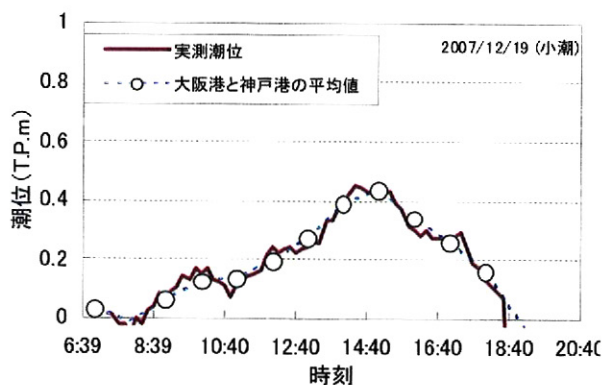
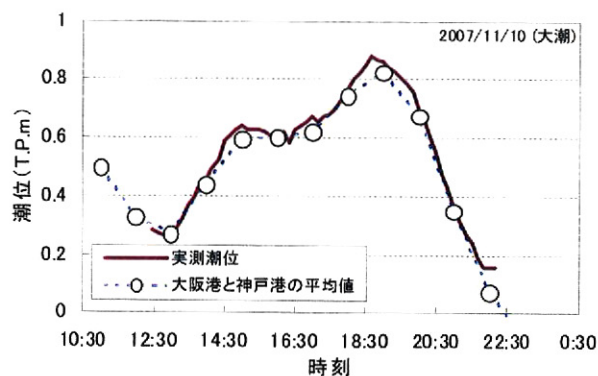


図-3 岸沖方向底質移動量調査時の水位変化

と12月19日（小潮，調査時刻8:00-20:00）のそれぞれで、当該水域において岸沖方向に0.5m間隔でセジメントトラップ（口径45mm，全高111mm）を埋設し1冠水期間に堆積した底質移動量、堆積物の粒度特性値（平均粒径，均等係数）を求めた。各調査では、電子レベル（TOPCON，DL103A）を用いて、各セジメントトラップ埋設点の地盤高さを測量した（図-2）。また、波高計（アレック電子，COMPACT-WH）と水位計（onset社，HOB0 U20）を設置し、現地の波高（測定間隔0.1秒）及び水位（測定間隔1分）の変化を把握した。水位測定値は神戸港，大阪港における気象庁観測潮位を用いてT.P.基準となるように補正した。

当該水域は、浜から南に向かって水面が広がっているため南寄りの風が卓越する場合は、風波の発生が予想される。そこで各調査日の風の出現状況を、西宮市大気汚染常時監視システムのデータ（観測点：甲子園浜）を用いて検証し、Bretschneider法を用いて、風波による波の打ち上げ高さについても検討することとした。

(2) 調査結果

図-3に岸沖方向底質移動量調査時の水位変化（10分平均値）を示す。大潮，小潮時とも潮位変化に加え、局所的な水位変動が見られ、航走波や風波の影響があらわれていることがわかる。

図-4に大潮，小潮時のセジメントトラップ内堆積重量と地盤高さの関係を示す。いずれの調査においても平均水面（調査時の月平均値）付近での堆積量

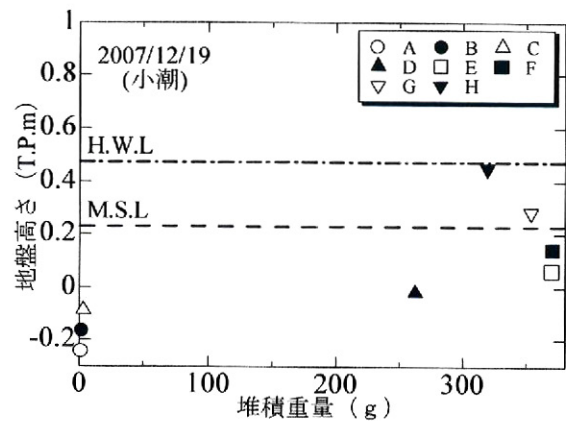
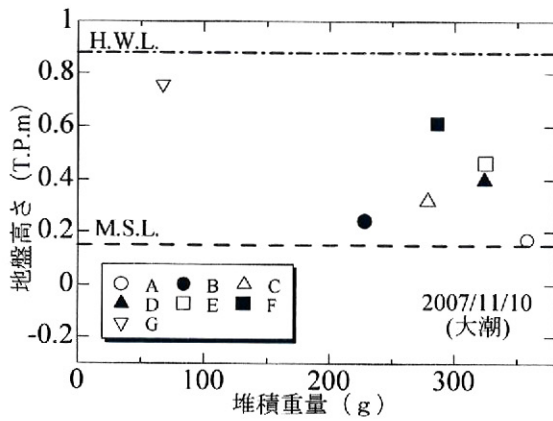


図-4 セジメントトラップ内堆積重量と地盤高さとの関係

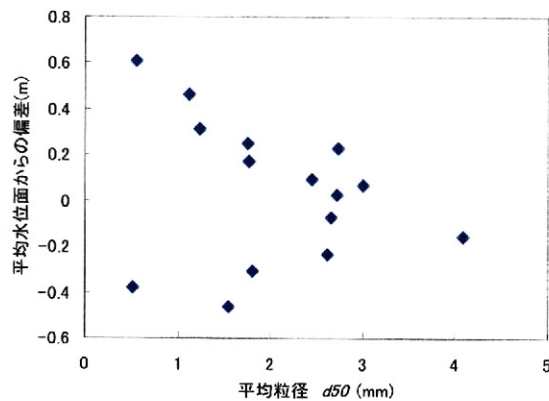


図-5 平均粒径と地盤高さとの関係

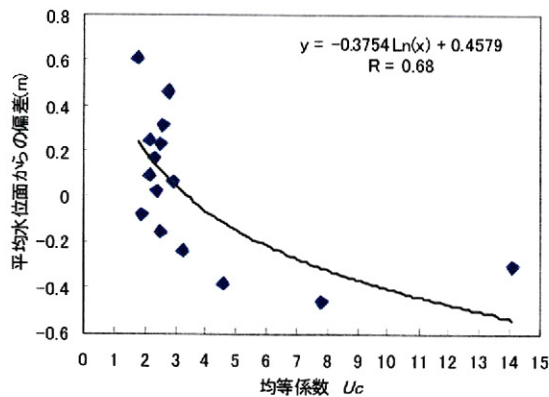


図-6 均等係数と地盤高さとの関係

が多くなっていた。著者らは吉野川河口干潟においても同様の調査を実施しているが、この時も平均水面付近の堆積量が多くなる傾向が示された⁶⁾。また、著者らは一様勾配干潟の底面にはたらくせん断応力は冠水直後と干出直前に大きくなることを理論解析から明らかにしている。これらの調査結果から、1冠水期間という時間スケールでは、上げ潮、下げ潮時とも相応に高掃流力状態となる平均水面付近で土砂移動量が多くなると考えられる。

図-5にセジメントトラップ内堆積物の平均粒径と地盤高さ（平均水位からの偏差）の関係を示す。図より平均水面に近い地点ほど、平均粒径が大きく

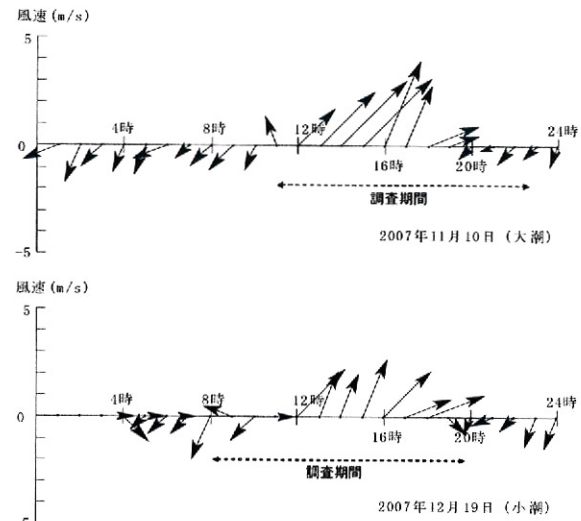


図-7 岸沖方向底質移動量調査時の風向風速の時間変化

表-1 計測データから算出した代表波

項目	最高波	1/10最大波	1/3最大波	平均
波高 (m)				
大潮	0.825	0.037	0.022	0.013
小潮	0.700	0.052	0.029	0.016
周期 (s)				
大潮	12.950	1.752	2.124	2.729
小潮	60.999	3.543	3.359	9.190

なっており、この付近で大きな底面せん断力が働いていることがわかる。

図-6に粒度分布の広がりを出す均等係数と地盤高さ（平均水位からの偏差）の関係を示す。平均水面以下の地点では、均等係数が大きくなり、広がりのある粒度分布となっている。一方、平均水面以上の遡上域では、均等係数は小さくなっており、波の作用によって粒径の均質化が起こっているといえる。

図-7に、各調査日の風向風速の時間変化を示す。いずれの調査とも日中から夕方にかけて、南寄りの風の出現が確認されており、風波の発生が予想される。そこで、Bretschneider法により水深2m、吹送距離1,150m（御前浜前面水域の長さ）、地上10m風速（大潮時3.1m/s、小潮時2.7m/s）の条件で、波の打ち

表-2 各調査期間の船舶通過総数と堆積総重量

期間	調査時間帯	通過船舶総数 (隻)	堆積量 (g)
Term-A	13:00-14:00	10	1246.2
Term-B	14:40-15:40	12	1842.7
Term-C	16:00-17:00	3	215.68
Term-D	17:20-18:20	3	75.88
Term-E	19:00-20:00	0	0

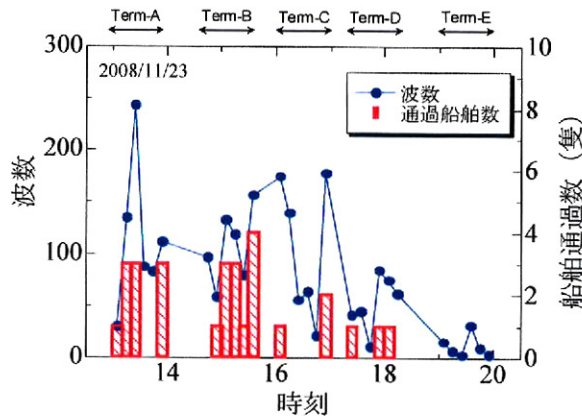


図-8 船舶通過数と波数の時間変化

上げ高さを算出したところ、大潮時で波高0.08m、周期5.1秒、小潮時で波高0.07m、周期4.2秒となった。表-1に示す全観測期間の計測データから算出した代表波と比較すると、その周期より1/3最大波に近いと考えられるが、波高については計算値の方が大きくなった。この差の原因として、計算に用いた地上10m/s風速が局所的な風の場合を捉えていない可能性があること、また御前浜前面に広がる水域は、その周囲を芦屋浜、西宮浜に囲まれているため、吹送距離が過大評価になっている可能性があることが考えられる。

3. 航走波による汀線付近の底質移動に関する現地調査

前節の現地調査では、御前浜における1冠水期間の岸沖方向底質移動量について検討した。しかし、1冠水期間という時間スケールではどのタイミングで土砂が移動したのか、またセジメントトラップ内に堆積した土砂は、航走波によるものなのかどうか分からない。そこで、汀線付近においてより短い時間間隔でのセジメントトラップ調査を実施し、汀線付近の土砂移動量を把握することにした。

(1) 調査方法

2008年11月23日（大潮、調査時刻13:00-20:00）に御前浜前面水域の一点に自記録式流速計（アレック

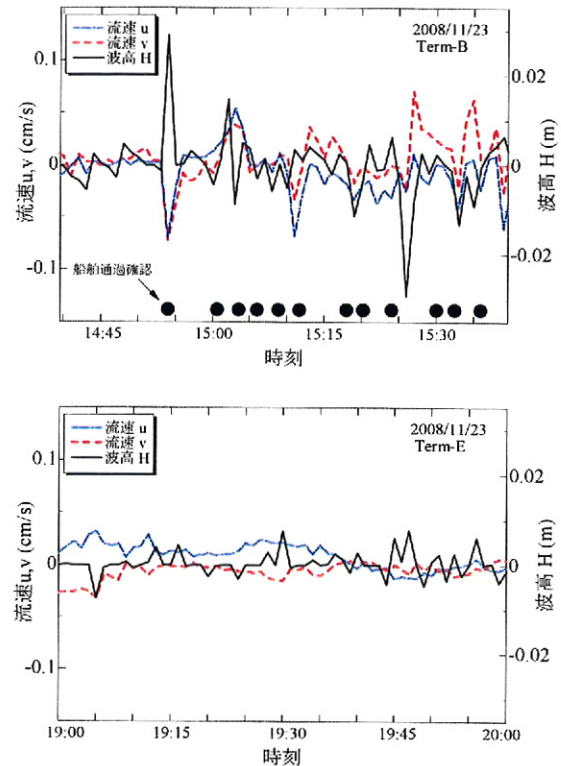


図-9 流速・波高の時間変化 (Term-B, Term-E)

ク電子、INFINITY-EM）・波高計（アレック電子、COMPACT-WH）を設置し、流速（測定間隔0.1秒）と波高（測定間隔0.25秒）の連続データを取得した。また、Term-A～Term-Eの5つの期間のそれぞれで、汀線付近には10分間隔でセジメントトラップを設置・回収し、トラップ内に堆積した土砂の重量を計測した。この時、船舶通過時刻も記録した。得られたデータをもとに、当該水域の波高・周期、航走波による波エネルギーと汀線付近の底質移動量との関係を明らかにした。

(2) 調査結果

表-2に各調査期間の船舶通過総数と堆積総重量を示す。また、図-8に船舶通過数と波数の時間変化を示す。調査期間中、船舶の航行が最も多かったのはTerm-B（14:40-15:40）で、12隻もの小型プレジャーボート等の船舶の通過が確認した。また、この時に汀線付近の底質移動量も最大となっていた。一方、Term-E（19:00-20:00）では船舶の航行は全く確認されず、セジメントトラップ内の堆積土砂の存在は確認されなかった。

図-9にTerm-B, Term-Eでの流速・波高（いずれも1秒平均値）の時間変化を示す。ここで、流速u成分は沿岸方向（東方を正）、v成分（北方を正）は岸沖方向の流速を示す。波高については潮汐による水位変動分を除去している。Term-Bでは、船舶の航行時に波高、流速ともに大きく乱れ、航走波が到達している様子がわかる。流速成分で比較すると、u成分よりもv成分の方が影響を受けやすく、岸沖方向

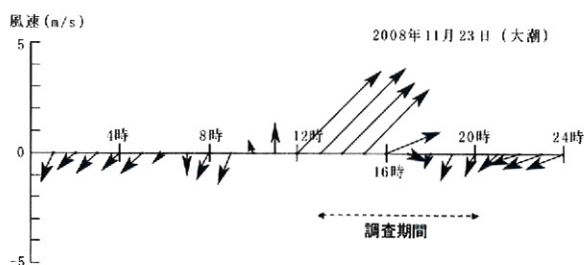


図-10 航走波による汀線付近の底質移動に関する現地調査時の風の出現状況

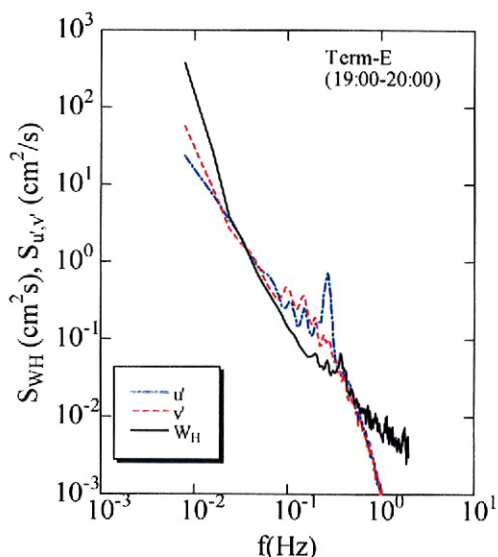
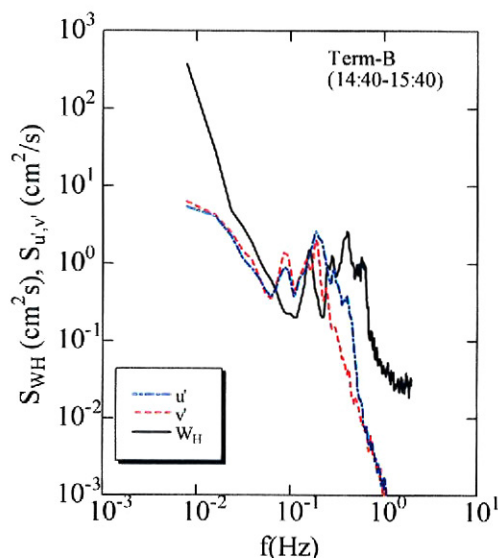


図-11 波高・流速の周波数スペクトル

の流れの乱れが卓越していることがわかった。一方、船舶の航行が全く確認されなかったTerm-Eでは、流速、波高ともに変動が小さくなる傾向が伺える。また、流速成分で比較すると、u成分がやや大きく、沿岸方向の流れが卓越することがわかった。

図-10に本調査時の風の出現状況を示す。前節の現地調査と同様に、日中から夕方にかけて、陸向きの

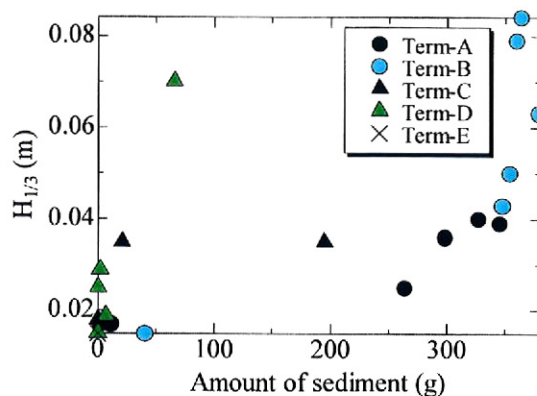


図-12 底質移動量と有義波高

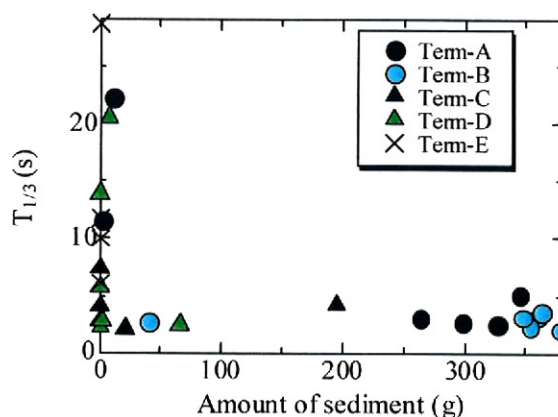


図-13 底質移動量と有義波周期

南西風が連吹しており、観測期間中は風波の発生が考えられる。地上10m風速4.5mとして、前節に示したBretschneider法を適用したところ、波高0.12mの風波が発生するものと算定された。しかし、現地で計測された各観測期間の有義波高は0.01～0.08mとなっており、実際には風波はそれほど発達していなかったものと考えられる。

図-11にTerm-B, Term-Eでの波高・流速の周波数スペクトルを示す。船舶の航行が確認されたTerm-Bでは、波高・流速ともに複数のピークを示しており、風波だけでなく、船舶の規模や航行速度等の違いにより周期の異なる航走波が存在することがわかる。一方、船舶の航行が全く確認されなかったTerm-Eにおいては、u'成分で $f=0.26\text{Hz}$ の極大値が検出されたものの、波高やv'成分については顕著なスペクトルは検出されなかった。

図-12に各期間の底質移動量と有義波高の関係、図-13に底質移動量と有義周期の関係を示す。有義波高と汀線付近の底質移動量には正の相関が認められ、波高が大きいほど汀線付近の底質移動量は大きくなることがわかる。一方、10秒以下の有義波周期については、底質移動量が多い場合とそうでない場合がある。10秒以下の波には、航走波と風波の両方の可能性が考えられるが、両者の区別は容易ではない。しかし、セジメントトラップ内への土砂の堆積が確認されたのは、いずれも船舶の航行が認められ

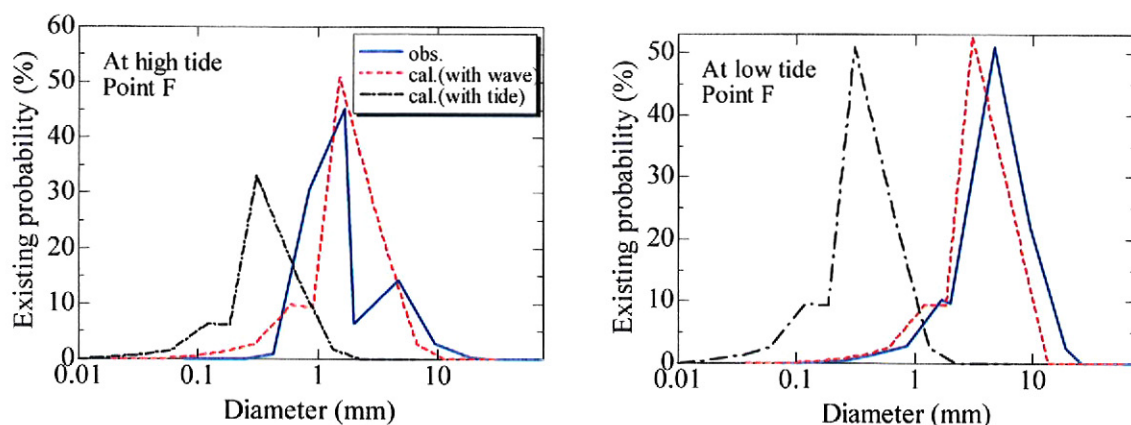


図-14 1冠水期間底質移動量の算定結果

た時間帯であった。この目視結果から、10秒以下の有義波周期について、底質移動量が多い場合は航走波の直接の到達によるものと考えられる。一方、そうでない場合については、風波や対岸で反射減衰した航走波の到達等が考えられる。

3. 波高データを用いた1冠水期間底質移動量の算定

(1) 解析方法

御前浜の底質は非粘着性であることから、本研究では掃流砂式のみを適用することとした。前々節の現地観測で得られた波高と水位のそれぞれの時系列データを用いて摩擦速度を評価し、粒径別無次元掃流力を求め、 $\tau_{*j} \geq \tau_{*cj}$ の場合に芦田・道上式を用いて粒径別掃流砂量 q_{bj} の算定した。再現性の検証にあたっては同節のセジメントトラップ調査の結果を用いることとした。

(2) 解析結果

図-14に、大潮、小潮それぞれでの1冠水期間底質移動量の算定結果を示す。潮汐のみを考慮した場合は、大潮、小潮とも実際よりも細かい粒度の砂の移動量が卓越する結果となった。一方、航走波を含む波高データを用いた計算では、大潮、小潮ともに、観測結果とほぼ同じ程度のピーク粒径が得られ、また分布形も良好な結果となっている。しかし、堆積重量については現時点では十分な再現結果が得られていない。その理由として、計算では同一粒度、同一密度としているが、現地では図-5で示したように様々な粒径の砂が存在すること、また砂以外にも例えば貝殻の破片等が堆積物のかなりの割合を占めることもあり、粒子の密度の設定が難しいことが挙げられる。このように定量的な評価には課題を残すものの、定性的評価には掃流砂理論を適用することができることがわかった。

4. まとめ

都市部の閉鎖性水域に位置する兵庫県西宮市の御前浜において、汀線付近の底質移動に関する現地調査並びに1冠水期間の底質移動量算定に係る数値計算を実施した。その結果、本砂浜は航走波の影響を強く受け、汀線の底質は絶えず変動していることがわかった。また、船舶の航行が無い時間帯は、風波による底質の打ち上げも生じていると予想されるが、その移動量は航走波によるものと比較してはるかに小さいことがわかった。また、底質移動量の岸沖方向分布は平均水面付近で最大となることが明らかにされた。

今回の現地観測では、局所的な風の計測が行えていないため、風による水面変動が流速変動や底質移動にどのように寄与しているのかを明らかにするには至らなかった。今後、局所的な風場の計測を実施し、これらのことについても検討したい。

謝辞

現地調査時の風向風速データについては、西宮市環境監視グループよりご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 都市再生本部：http://www.toshisaisci.go.jp/index.html
- 2) 福岡捷二，甲村謙友，渡邊明英，三浦央晴：船が造るエネルギーの波を減衰させる河岸ヨシ原の効果，水工学論文集，第36号，PP.713-716，1992。
- 3) 福岡捷二，仲本吉宏，細川真也，泊宏，京才俊則：歌道におけるタンカーの造る航走波の特性と離岸堤による河岸防護効果，水工学論文集，第46号，PP.445-450，1992。
- 4) 倉田克彦，小田一紀，平井住夫：浅海水路中の航走波の特性及び繫留船舶に及ぼすその影響，海岸工学論文集，第30巻，PP.598-602，1983。
- 5) 航走波の碎波を考慮した数値計算と最大波高算定方法，海岸工学論文集，第52巻，PP.36-40，2005。
- 6) 宇野宏司，中野晋，古川忠司：河口干潟および砂州の底質移動に及ぼす潮汐流の効果，河川技術論文集，第9巻，pp.281-286，2003。