

大規模侵食時における汀線近傍の漂砂量・地形変化・波浪特性

内野 敬太*・山口 隼人**・関 克己***・水口 優****

密に設置された波高計群により観測した侵食現象の解析を行うことにより, berm 頂を含む汀線付近の砂面変動のプロセスを明らかにし, さらに, そのデータに基づき地形変化および岸沖漂砂量の特性と波浪・地形との関係を検討した。その結果, ①大規模侵食は満潮が近づく時点で起きており, 重複波成分が有意な状態で遡上域が berm 頂に到達する事により開始される。②大規模侵食時の遡上域での漂砂は沖向きで, 分布形状は岸側から沖に向かって直線的に増加し, 遡上域沖側端より沖側ではほぼ一定となる。③侵食は遡上域の緩勾配化によって終了する。開始から終了まで約 3 時間でその間に汀線付近から失われた砂の量は約 $26 \text{ m}^3/\text{m}$ (空隙率を含む体積) であった。

1. はじめに

大規模侵食に関して, 島田ら (2002, 2003) は旧観測システムのもと地形変化に及ぼす長周期波, 短周期波の役割に注目しながら台風 0111 号による大規模侵食時の波浪と地形変化について検討している。その結果, 侵食現象について, ①汀線付近の地形変化は満潮前後で生じていること, ②汀線付近の侵食は (非碎波で) 引き波を伴う長周期成分によってもたらされ, 碎波して汀線付近でエネルギーを失う短周期波は堆積に寄与していること, ③満潮直前に生じる大規模侵食の開始条件は長周期成分のパワーが短周期波成分を上回っている状態で, ④潮位が上昇することで berm 頂付近にその大きなパワーを持つ長周期成分が到達することを明らかにした。しかし, 長周期成分と風波成分の分離方法は沖波での風波成分と長周期成分の境界周波数である 0.040 Hz としており, 汀線近傍での進行波と重複波の議論という点では不十分である。また, 旧観測システムでは, 波高計間隔が広く, 設置台数が少ないため, 地形変化や遡上波の細かい変動については追えていない。

本研究では, 密に設置された波高計群により観測した 2003 年の台風 15 号による侵食現象の解析を行うことにより, berm 頂を含む汀線付近の広い範囲での砂面変動のプロセスを明らかにする。さらに, そのデータに基づき地形変化および岸沖漂砂量の特性と波浪・地形との関係を検討する。なお, 今回解析対象とする大規模侵食とは, 島田ら (2002, 2003) と同じく高波浪によって, berm が年に数回程度短時間に消滅する現象である。

2. 現地観測概要とデータ処理

(1) 現地観測概要

図-1 に示すように, 茨城県波崎海岸にある (独法) 港湾空港技術研究所 (以下港空研) の観測用棧橋に空中発

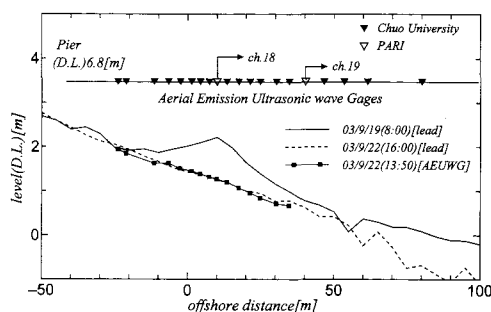


図-1 現地観測概要

射型超音波式波高計を遡上域の約 105 m 区間に岸沖方向に 20 台設置し, サンプリング周波数 5 Hz でデータを連続収録した。これは, 計測間隔を 3 m に短縮し, $x=0 \text{ m}$ 地点から岸側-24 m 地点まで計測点を増設した新観測システムである。なお岸沖方向座標の基準点は観測用棧橋の岸側端で, 沖向きを正としている。

波高計は砂面及び水面を感知可能であり, 砂面露出時には砂面鉛直位置を, 遡上波が存在する時には水面変動を無人かつ連続的に計測することが可能である。20 台のうち 2 台 (ch. 18 と ch. 19) は港空研の常設の波高計を借用したものであるために, 設置位置の順番とチャンネル番号は一致しない。このような観測システムのもと本研究では 2003 年 9 月 22 日に関東地方に接近した台風 15 号による侵食現象を対象として, 解析を行った。なお, 以下の解析に用いる天文潮位は, 鹿島港での計算天文潮位を用いている。

(2) データ処理

今後使用する, 鉛直換算遡上波形と遡上域は以下のよう

に求め, 定義する。
遡上波の鉛直換算遡上波形を求める方法は, まず水面を感知する最も岸側の 2 点の水面変動で水面直線を算出し, その一つ岸側の 2 点でのデータから砂面直線を算出し, この 2 直線の交点を遡上波の到達位置とし, その水平方向を瞬間汀線とし, 鉛直位置を瞬間鉛直遡上位置とした。

* 学生会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
** 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
*** 学生会員 工修 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
**** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

一方、遡上域の勾配の算出にあたっては、上記の方法で求めた瞬間汀線の時系列から解析対象期間内の 60 分間の平均汀線からのずれの rms 値を求め、遡上域幅と定義した。rms 遡上域内の計測地点と、その一つ岸側と沖側の計測点を加えた計測地点での砂面高から、最小二乗法により直線近似し求めた傾きを遡上域勾配とした。地形に関しては解析対象時間内の中心の時間のものを用いた。ただし、重複波と進行波の境界周波数を考慮する際に、berm 頂を超えた遡上波が、berm 頂以岸の勾配に左右されるとは考えにくい。よって、遡上域が berm 頂を挟む場合は、berm 頂以沖の波高計区間の傾きを遡上域の勾配とした。

3. 台風 0315 号による地形変化と漂砂量分布

(1) 台風 0315 号による砂面変動

台風 0315 号により砂面変動を起こす少し前の 2003 年 9 月 18 日から砂面変動が安定する 25 日までの、各計測位置での砂面変動の時系列と、同期間での波浪条件を示したものが図-2 である。このとき 10 分毎に 10 秒間での変動が 1 cm 以下であれば砂面が露出したものと判定し、その 10 秒間の平均値を砂面高と定義した。また、実線で示したものは潮位の変動であり、砂面が欠損している時間は主として潮位の上昇によって砂面の露出が無い時間である。

波浪条件としては、この期間を通して砂面が露出しない最も岸側の波高計である ch. 16 ($x=61.4$ m) の水面変動をパワースペクトル解析を行い、風波成分、長周期波成分の 0 次モーメントを用いた。また、境界周波数は 0.040 Hz とした。波浪条件を見ると、長周期成分が 9/21

から 9/22 にかけてパワーが上昇し、9/24 まで減衰しつつも、パワーが強い状態が続くことが見て取れる。短周期成分は潮位変動に連動して変動し、水深によって波高が規定されていることが分かる。

島田ら (2003) と比較すると、波高計間隔を密にし、台数を増やしたことにより、台風 0315 号による急激な堆積 (berm の発達) から大規模侵食 (berm の消滅) に至るまでの一連のプロセスのデータを詳細に取得することができた。ただし、岸側の不動点は今回も波高計群では捉えることができなかった。図-2 を見ると有意な砂面変動は満潮のたびに起きており、干潮時には大きな砂面変動は起きていない。図中の [a]~[m] は各満潮に対応させて記号をつけたものである。まず満潮位 [d] で ch. 9 ($x=17.4$ m) 以沖で砂面低下が生じており、小さな侵食が起きている事がわかる。

その後、満潮位 [e], [f] とで berm 頂以沖で砂面低下が起き、潮位 [g] の上げ潮時 (干潮時 7:25~満潮時 15:20) に遡上域全域で急速に侵食が起きている。丁度この時、長周期成分も短周期成分もパワーのピークを迎えている。なお満潮位 [e], [f] の砂面低下時に berm 頂位置である ch. 7 ($x=7.3$ m) 以岸において berm 頂の砂面高に揃う様に砂面上昇が生じているが (9/21:13:00~9/22:9:30)、遡上波の到達は確認できず、波による砂面上昇ではなく、飛砂によるものと考えられる。また、満潮位 [i]~[m] では、砂面変動は起きていない。

全体を通しての台風 0315 号による侵食の特徴は、満潮をむかえるごとに遡上域沖側から徐々に砂面低下が起き、満潮 [g] 時に berm 頂位置 ($x=7.3$ m) で砂面低下が起こると同時に遡上域全体で大規模な侵食が起きている

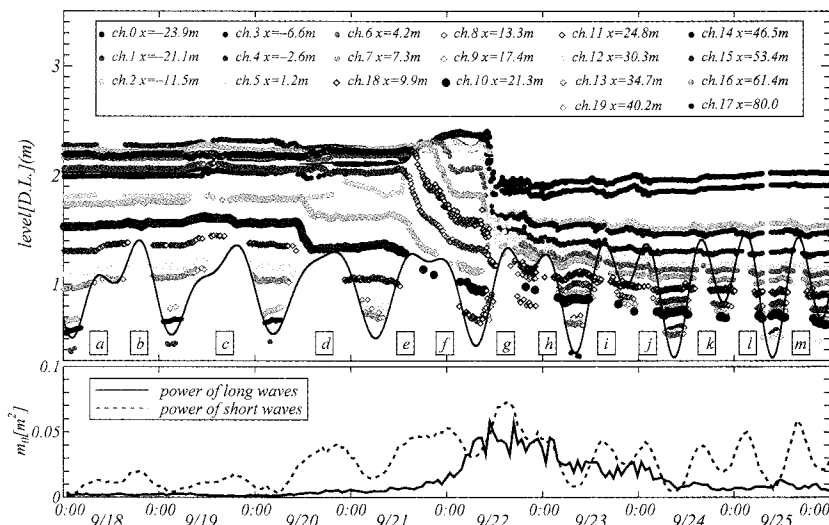


図-2 台風 0315 号における砂面変動時系列と波浪条件

ことが上げられる。

(2) 大規模侵食とその形態

ここでは2003年9月22日の大規模侵食が起きる8時間に注目して解析を行った。図-3は砂面計のデータを断面地形の1時間平均の時間変化に直したものである。図-2から明らかなように、侵食は上げ潮時に起きており、潮位の上昇に伴い berm 頂沖側から砂面低下が始まるが、最初の段階では急な前浜勾配を維持した形で汀線が後退する。遡上波が berm 頂に到達すると berm 頂より岸側も侵食されて berm が全体として消滅することになり、最終的に緩やかな勾配の直線遡上域が形成されて侵食は終了する。その間、約3時間(9:50~12:50)で、berm 頂地点では0.88mの砂面低下が起り、汀線付近からは単位幅あたり約26m³の砂が失われている。

(3) 大規模侵食時の岸沖漂砂量分布

10分毎に算出した砂面高から、1時間平均の砂面高を求め、砂の連続式から単位時間当たりの岸沖(空隙率を含む体積)漂砂量 Q_x を算出したものが図-4である。なお、岸向きの漂砂量を正とした。今回の観測においては岸側の砂面高の不動点が捉えられていないため、港空研の定常観測における地形測量の結果より $x=-45$ m 地点を不動点とし岸側の境界条件とした。図-4において、各対象時間で rms 遡上域内と考えられる地点の印を大きく示した。

汀線後退開始時には少量ながら岸向きの漂砂となるが、これは図-3に見るように後浜のくぼみ付近での飛砂による堆積である。急激な砂面低下時には遡上域全域で沖向き漂砂となり、その時の漂砂量の分布は遡上域岸側端からほぼ直線的に増加し、遡上域の沖側端で一定の値を取るようになる。このことは、遡上域の沖側端より沖側では砂面変動が無いことを意味している。

大規模侵食の前後を通じて、棧橋座標 $x=21.3$ m 地点(ch.10)付近で砂面変動が殆ど無い(図-3参照)。図-4を見ても ch.10 より沖側では常に漂砂量分布において水平

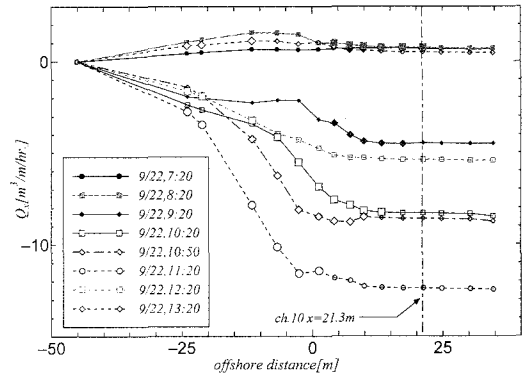


図-4 大規模侵食時の岸沖方向の漂砂量分布

勾配である。そこで、以下 ch.10 ($x=21.3$ m) を通過した漂砂量は遡上域から失われる砂の量と定義する。なお、最大沖向き漂砂量は時間当たり 12.5 m³/m に達している。なお、島田ら(2003)においては砂量を空隙を除いた体積で表現しているが、本論分は空隙を含んだ体積を用いている。

4. 侵食開始、および終了条件

(1) 遡上域の勾配による波浪特性の変化

図-5は大規模侵食前後で鉛直換算遡上波と各解析対象時間において砂面が露出しない最も岸側の波高計での水面変動とでクロススペクトル解析を行い、位相差を求めたものである。

図-5の位相差を見ると、侵食前から侵食後にかけて、重複波構造を成す周波数帯が狭くなることが分かる。侵食開始前では $f < 0.030$ Hz では0又は π の値を取り、重複波構造をしているが、侵食終了後では、重複波構造を成すのが $f < 0.005$ Hz となっている。これは、berm が消滅することの為に、遡上域が緩勾配化することによるものと言える。

(2) 大規模侵食における侵食開始条件・終了条件

漂砂量と波浪・地形の関係を示したものが図-6である。図中上段には入射波浪の特性である汀線での鉛直換

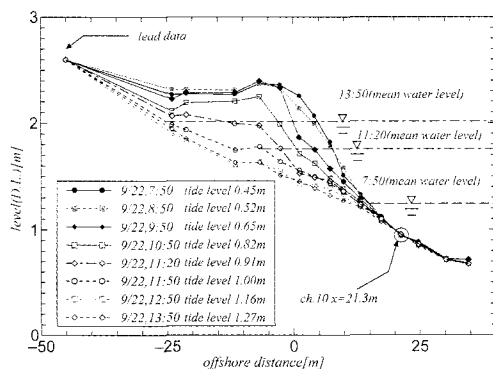


図-3 大規模侵食時の断面地形の変化

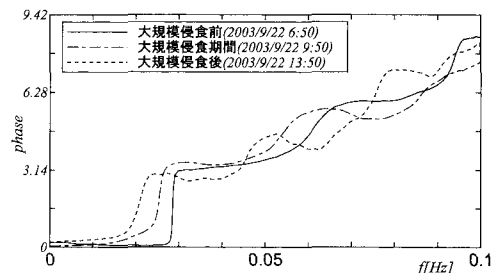


図-5 鉛直換算遡上波と砂面が露出しない最も岸側の波高計での水面変動との位相差

算遡上波形のパワースペクトルにおいて、重複波成分と進行波成分のエネルギーの指標となる m_0 の大きさを示す。ここで、 m_{0b} は鉛直換算遡上波に含まれる進行波性の周波数帯の 0 次モーメント、 m_{0s} は鉛直換算遡上波に含まれる重複波性の周波数帯の 0 次モーメント、 m_{0t} は鉛直換算遡上波全体の 0 次モーメントである。

重複波成分と進行波成分の分離にあたっては、遡上域の勾配および入射波浪の変化に伴う重複波と進行波の境界周波数 f_c の変化を考慮した。境界周波数の決定方法については関ら (2004) に詳しい。

中段、下段は、重複波と進行波の境界周波数 f_c 、解析対象時間を中心とする 1 時間毎での岸沖漂砂量と遡上域勾配である。薄い色で表したものは、図-4 の時間間隔に対応する漂砂量である。岸沖漂砂量においては前節で述べたように、ch. 10 ($x=21.3$ m) を通過する漂砂量を遡上域に出入りする体積と考え用いた。

図-6 で、6:50 から 8:20 にかけて岸向きの漂砂量が出ているが、これは 3 章で述べたように直接遡上波に伴う漂砂ではない。

波浪条件 (各成分の m_0) の変化に注目して見る。侵食が起きる以前と沖向き漂砂量が高い期間 (9:50~11:50) を比較しても極端に各成分の m_0 が大きくなることは無く、 m_{0t} はむしろ小さくなる傾向がある。

一方、遡上波に含まれる重複波の比率は、侵食開始前から大規模侵食時にかけて大きな変化が無いものの、侵食終了時 (12:50~13:50) には、極端に小さくなるのが分かる。これは、berm が消滅したことにより、遡上域が緩勾配化し、重複波モードを取る入射波成分が減少するためだと言える。

以上のことから、重複波成分が有意な状態でかつ潮位上昇に伴い遡上域が berm 頂位置に近づくことと侵食が開始するという事が言えよう。さらに、侵食の終了も潮位、波浪条件といった外的な要因の変化によるものではなく、地形変化に伴う緩勾配化の結果、大部分の周波数帯

の入射波が碎波し、エネルギーを失うことにより平衡状態に達することが確認された。

(3) 前後の満潮との比較による侵食開始条件・終了条件の検討

これまでに、侵食が起きる条件として berm が十分に発達して急勾配な遡上域が形成されているところに、重複波成分が有意な状態で遡上波が作用することにより、侵食が開始することを述べた。ここでは、条件が整わなかった時に侵食が起きない状況について検討する。

以下、今回侵食が起きた満潮の前後の満潮を取り上げる。解析対象時間は 1 時間毎である。

図-7 は、大規模侵食前の潮位 [e] の上げ潮時 (干潮 6:00, 満潮 15:20) について示したものである。なお、この図においては飛砂の影響を除くため、不動点を $x=7.3$ m とした。この期間では、遡上域の勾配は最大で $\tan \beta = 0.092$ と急勾配で、berm は十分に発達している。つまり、地形側から見ると侵食開始条件を満たしている。そこで、遡上波の m_0 を見ると、 m_{0t} に含まれる m_{0s} の比率は十分高くかつ、遡上波の先端は berm 頂に掛かって、しかし、遡上波自身のパワーが小さく小規模な侵食を開始した所で潮位が低下し、大規模侵食に至らなかったと考えられる。

一方、図-8 は大規模侵食後の潮位 [i] の上げ潮時 (干潮 7:55, 満潮 15:30) の状況を示したものである。潮位が上昇するに伴い、遡上域が移動するものの遡上域の勾配に変化が無い。berm の侵食により地形が緩勾配化し、前浜が岸沖方向に広い範囲で直線状になっていることに対応している。この期間、特に 11:50 以降の遡上波全体のパワーとしては大規模侵食期間と比較しても十分に発達しており、重複波成分もかなり大きい。比率としての重複波成分は図-6 と比較すると小さい。すなわち、地形が遡上波に対し平衡状態であるため、この期間も侵食 (急

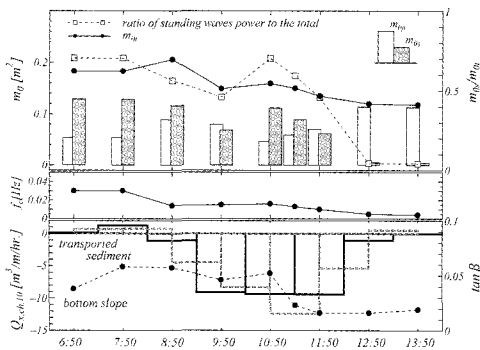


図-6 大規模侵食時の漂砂量と波浪・地形の関係

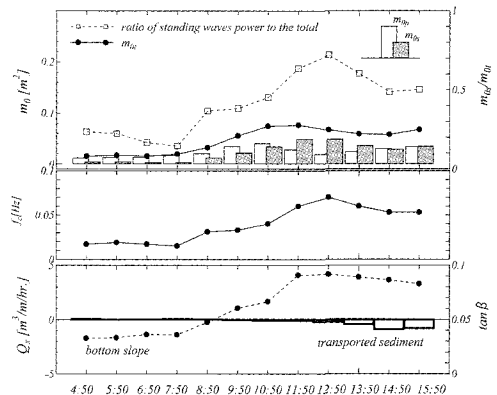


図-7 潮位 [e] の上げ潮時における波浪・地形と漂砂量の関係

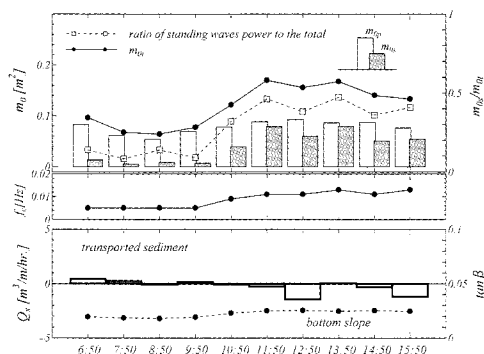


図-8 潮位①の上げ潮時における波浪・地形と漂砂量の関係

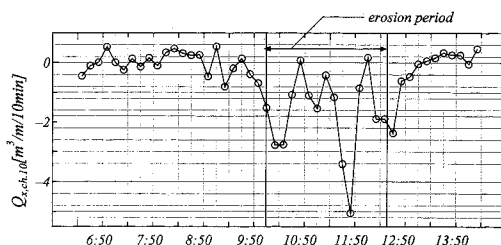


図-9 大規模侵食時の10分毎の漂砂量

いる。

6. おわりに

本研究によって得られた主要な結論は以下の通りである。①大規模侵食は上げ潮時満潮近くで起きており (berm 付近での勾配が急なためにできる)、重複波成分が有意な状態で、遡上域が berm 頂に到達する事により開始される。②大規模侵食時の遡上域での漂砂は冲向きで、分布形状は岸側で直線的に増加、遡上域沖側端より沖側ではほぼ一定となる。またその最大値は、空隙を含む体積漂砂量にして $12.5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{hr}$ に達する。③侵食は遡上域の緩勾配化によって重複波成分の周波数帯が狭くなり、そのパワーが減少することにより終了する。開始から終了まで約3時間でその間に汀線付近から失われた砂の量は約 $26 \text{ m}^3/\text{m}$ であった。④侵食の量的な議論において時間スケールの取り方に注意が必要である。

謝辞：独立行政法人港湾空港技術研究所、漂砂研究室の関係者の皆様に積極的にご協力頂いている。特に柳嶋慎一さんを初めとする波崎勤務の方々には、観測システムの点検、維持にご協力頂いている。

参考文献

- 島田玄太・関 克己・野原威一郎・小栗保二・関本恒浩・水口 優 (2002): 汀線近傍におけるストーム時大規模侵食の現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 586-590.
- 島田玄太・内野敬太・関 克己・水口 優 (2003): 高波浪時における汀線近傍の地形変化に及ぼす長周期波と短周期波の役割, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 531-535.
- 関 克己・水口 優 (2004): 自然海浜における長周期波の重複波構造と反射特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 131-135.

激な冲向き漂砂)は起きていないと考えられる。

以上の検討からも、4. (2) より明らかにした侵食開始条件、および終了条件の妥当性が示されたものとする。

5. 大規模侵食期間の岸沖漂砂量と時間スケールの取り方について

前章で示した図-6の期間の漂砂量を10分毎に求めたものが図-9である。図-6では、遡上域の勾配の変化に伴い境界周波数が変化する為、 m_{0s} は変化しないものの m_{0p} 、 m_{0s} の関係は各時間とも変化している。しかし、9:50、10:50、11:50における1時間の漂砂量はほぼ同じである。これは、1時間の波浪状況、漂砂現象を平均的に示し議論したものであり、その限界があらわれていると考えられる。すなわち、図-9を見て分かるように、10分毎の漂砂量では大きな変動がある。大規模侵食期間でも漂砂量が無い時間帯が見られ、かつ急激な冲向き漂砂を起こしている時間は数十分であり、それも連続的に起きてはいない。これは、遡上波が漂砂・地形変化に及ぼす効果は平均的では無いことを示している。この時間スケールで見ると、10分間での最大冲向き漂砂量は $5.05 \text{ m}^3/\text{m}/10 \text{ min}$ に達する。

島田ら (2002) は、侵食中の全ての遡上波が砂面を低下させるのではなく、侵食期間に襲撃する数波の遡上波にのみ大規模に砂面低下が生じることを示している。これらのことから、個々の侵食のメカニズムに迫るには、個々の遡上波による漂砂量の議論も必要な事を示唆して