

阿字ヶ浦海岸汀線近傍における礫出現に関する現地調査

熊谷 隆¹・横木裕宗²・三村信男³

茨城県の阿字ヶ浦海岸では、海岸侵食とともに近年汀線付近への礫の出現が問題となっている。本研究では、定期的な現地観察を行い、礫の出現と入射波エネルギーフラックスとの関係を明らかにした。また、浅海部の海底状況調査や蛍光礫トレーサー追跡調査により、岸沖・沿岸方向における礫の移動過程を明らかにした。これらの調査の結果、阿字ヶ浦海岸南部の礫は元来地盤の下層にあったものが表層砂層の侵食によって露呈したものであること、礫は高波浪ピークから4~5日後に出現すること、常時波浪時においても、礫は波の突っ込み点付近の分布帯と汀線付近を往復移動していることなどが明らかとなった。

1. はじめに

茨城県ひたちなか市の阿字ヶ浦海岸(図-1)は、海岸北部を常陸那珂港の作業基地、南部を磯崎漁港の砂防突堤に挟まれた弓形の海岸線約2.4kmの砂浜海岸である。海岸南部は海水浴場として利用され、1980年代にはシーズン中200万人を超える海水浴客で賑わっていた。しかし、常陸那珂港および東防波堤(図-1上図)の建設に伴い、海岸南部で侵食が顕著になり、遠浅の砂浜は失われた。近年では礫の出現という新たな問題が発生している。2000年夏には浜に礫が出現するようになり、2002年には海水浴客が波の力で巻き上がった礫でけがをするなどの被害が出た。これに対し、2001、2002年には海水浴シーズン前に礫の撤去と養浜が行われたが、高波浪により砂は流出し、再び礫が出現するなど解決に至るものではなかった。さらに、2002年10月には台風に伴う高波浪で階段式護岸の一部が陥没した。これを受け2003、2004年には侵食対策として離岸堤や突堤の設置や養浜が実施された。それにより一時の危機的な状況は脱したが、海岸南部の侵食傾向という根本的な問題は未だ解決されていない状況である。図-2~5は、本研究の定期観察の一環で撮影された測線No. 36付近の週上域の様子を示している。2005年の養浜後に一旦砂浜を取り戻したかに見えた(図-3)が、その後再び週上域に礫が打ち上げられるようになったり(図-4)、砂浜に戻ったりしている(図-5)様子が見て取れる。

これまでに阿字ヶ浦海岸を対象として、侵食プロセスの解明(例えば、宇多ら, 2003; 横木ら, 2003)、波浪場の計算(例えば、佐藤ら, 1999; 南ら, 2005)、養浜対策の効果(南ら, 2005)などの研究が数多く行われており、また混合粒径海岸における地形変化(例えば、田

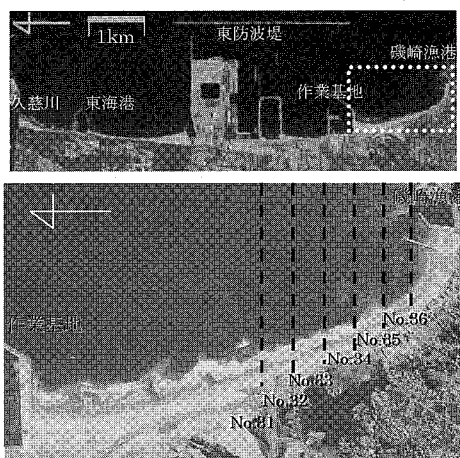


図-1 阿字ヶ浦および周辺海岸と測線位置

中ら, 2000; 土木学会, 2000) やそのモデル(例えば、熊田ら, 2004)に関する研究も数多い。しかし、汀線近傍での礫の出現・移動過程に着目した研究はほとんどない。阿字ヶ浦海岸南部は、時には礫浜、時には砂浜とその様子を変えているのが現状で、今後も海水浴場として利用していくためには礫の出現に対して適切な対策を講じる必要がある。しかし、礫の出現源や汀線近傍への出現過程、移動過程について明らかにされておらず、対策を講じる上での基本的な情報が得られていない。よって本研究では、現在海岸南部の汀線近傍で出現を繰り返している礫の出現源の特定、汀線近傍への出現・移動過程を現地調査を行って明らかにすることを目的とした。

2. 礫の出現源の特定

(1) 海底状況調査と水深変化の比較

2002年10月に行われた海底状況調査(茨城県常陸那珂港湾事務所, 2003)によって得られた結果(図-6)と、海底状況調査までの10年間の地形変化(図-7)を比較し、現在砂浜に出現している礫の出現源の特定を試みた。図-6より、礫は海岸南部の水深0~2mの浅水域に、砂

1 修(工) 東部ガス株式会社 茨城支社営業開発グループ
2 正会員 博(工) 茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター
3 正会員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター



図-2 養浜の様子 (2005/6/27 撮影, No.36 付近)



図-3 養浜直後の砂浜 (2005/7/16 撮影, No.36 付近)



図-4 砂浜の様子 (2005/10/20 撮影, No.36 付近)

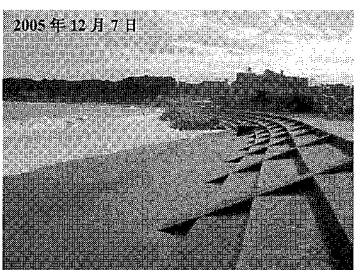


図-5 砂浜の様子 (2005/12/7 撮影, No.36 付近)

は海岸の両端に分布していることが確認できる。また、沖はほとんどが岩であることがわかる。図-7は1990年10月から、底質調査が行われた2002年10月の水深変化の分布である。図より海岸北部では1m以上の堆積が確認され、海岸南部では3~4m侵食している部分が確認できる。南ら(2005)で示された沿岸漂砂量の計算結果などによると、これは海岸南部の土砂が北部へ移動

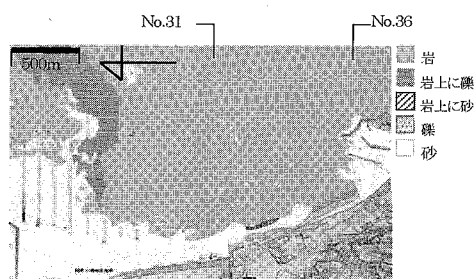


図-6 底質状況分類図 (2002年)

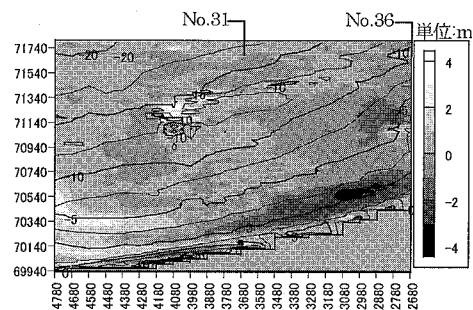


図-7 水深変化分布 (1990/10~2002/10)

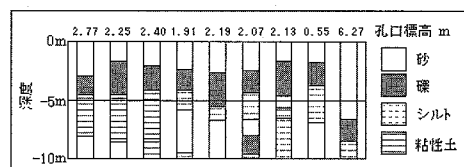


図-8 作業基地周辺の鉛直方向底質分類

したことによるものであることが分かる。

(2) 鉛直方向の底質分布

常陸那珂港建設時に行われたボーリングデータ(茨城県土木部検査指導課, 2005)より、海岸南部の地盤における礫の有無の検討を行った。実際には海岸南部の汀線付近ではボーリングは行われていなかったため、作業基地付近の汀線近傍のデータを用いた。図-8にそれらデータをまとめた図を示す。この図から砂層の下に礫層が、地表から-3~-5m程度のところに存在していることが分かる。山下ら(2003)は、粗粒砂の供給が絶たれた河口海岸では海岸が細粒化することを確認しており、それは粗・細流砂の鉛直運動機構の違いにより粗粒成分が細流成分の下層に潜り込むことによるものとしている。阿字ヶ浦海岸でも同様の現象が生じているのかについては今後詳細な検討が必要である。

(3) 海底表層への礫の出現過程

東防波堤(図-1)の延伸により海岸南部から北部への漂砂が卓越した(例えば、宇多ら, 2003; 南ら, 2005)とすれば、ボーリングデータより常陸那珂港建設開始時

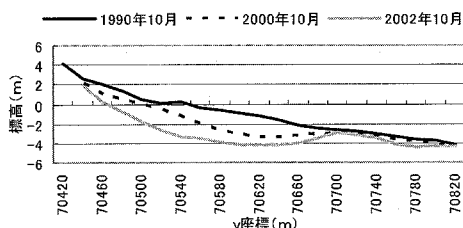


図-9 縦断地形変化 (測線 No.34)

(1989～1992年)には阿字ヶ浦海岸南部に砂層に覆われた礫層が存在しており、その後1990～2002年に4m程度侵食した領域では、表層が礫であることから、東防波堤の延伸に伴って上層の砂が北部へ移動し、下層にあった礫が海底に露呈したと考えられる。また、最も侵食が激しい領域は1990年の水深で0～1m程度であったことから碎波帯であったといえる。

測線 No. 34 の断面変化を図-9に示した。礫が汀線近傍へ出現し始めた2000年には1990年と比べ最大約2m底層が削られ水深が変化し、さらに2002年には3m以上変化して急勾配化している。急勾配化に伴って碎波位置も岸へ移動していったと考えられ、海底に露呈した礫は、その露呈範囲を広げながら岸へ移動していったと考えられる。

3. 汀線近傍への礫出現と入射波浪の関係

(1) 定期観察

2003年5月～2005年10月の期間において、2週間毎に定期観察を行い、汀線近傍における礫の有無を調査した。礫の有無は、測線 No. 31～36において2測線以上で遡上域で礫の層が確認できた時を礫有り、1測線以下の時を礫無しと判定した。2003年10月～12月における入射波エネルギーフラックスを図-10に示した。定期観察(撮影)を行った時点点を点線と日付で示し、礫有りの撮影日にのみ網掛けをして表した。図-10より礫無しの撮影日は当日のエネルギーフラックスの値が高いこと、礫有りの撮影日の数日前には高波浪が来襲していることが明らかとなった。

(2) 集中観察

礫の有無と波浪エネルギーフラックスの関係をさらに詳細に検討するため、高波浪が予測される期間に集中的に観察を行った。図-11に、2005年9月21日～10月3日の入射波浪エネルギーフラックスと礫の有無を示した。期間中、台風17号による高波浪が来襲し、その後の波高低下に伴い、砂浜全体に礫が出現した。23、24日の高波浪時には礫は遡上域に砂と混合した状態で一部確認でき、波高の低下に伴い礫が砂浜の表層全体に出現し、バームを形成した後に No. 35 付近を除いて礫が表層から

消えた。礫が消えた地点では砂浜の堆積が確認できたので、礫が移動して消えたのではなく、砂が覆ったと推測でき、一部ではそれが確認された。また、エネルギーフラックスの変化と礫の出現状況の関係は定期観察と同様の傾向を示し、礫は高波浪のピークより4～5日後に最も広範囲に出現することがわかった。

そこである時点において、4日前からその時点までの波浪エネルギーフラックスの平均値を対応させたものを4日前移動平均と呼ぶことにし、図-10、11に重ねて示した。すると撮影日におけるこの移動平均の傾きの正負が、礫の有無に関係することが分かった。

(3) エネルギーフラックスの履歴効果と礫出現の関係

以上により、礫は当日のエネルギーフラックスの値とそれまでの履歴が関係していることが分かった。そこで、礫の出現データと波浪データの両方が存在する2003年5月～2005年10月においてエネルギーフラックス(移動平均)の傾きおよび当日のエネルギーフラックスと礫出現の関係を調べた。撮影された時間から3、6、12、24、48、72、96、120、168時間前の9ケースで検証を行った。その結果対応の良かった96時間(4日間)のケースを図-12に示した。横軸に撮影時のエネルギーフラックスを、縦軸に傾きをとっている。この図から撮影時のエネルギーフラックスが $7.5 \times 10^7 \text{ N/h}$ 付近を境に礫有りと礫無しに分かれていることが分かる。礫無しで $7.5 \times 10^7 \text{ N/h}$ より小さい値を示しているのは養浜の効果である。その他のケースでは、3時間から1日までの傾きは礫の有無に関係性は見られなかったが、2日間から5日間になるにつれ、礫有りは負の傾きを示し、礫無しは正の傾きを示し、7日間になるとその関係性は弱まった。このことから、礫は高波浪の来襲後4日から5日後に出現すること、そしてこの期間の波浪履歴が礫の有無に寄与していることが明らかとなった。

(4) 汀線近傍における礫の出現過程

東海港沖で観測された入射波の波向と礫の出現を比較したところ、阿字ヶ浦海岸南部では特定の波向と礫の出現には関係性を見出せなかった。そこで、沿岸方向よりも岸沖方向の移動に着目した。岸沖方向における底質の移動方向は一般的に高波浪時に沖へ移動し、静穏時には岸へ移動することが知られている。また、移動方向は同じ波浪条件下でも底質の大きさにより異なり、粒径の大きいものは岸側、小さいものが沖側へ移動する波浪条件が存在する(吉田ら, 2002)。阿字ヶ浦海岸南部において、高波浪来襲時には礫が遡上域から岸側の表層に見られず、その後の波浪低下により礫が出現した。これは、高波浪時には wave setup による平均海面の上昇が大きくなることで遡上域が静穏時より岸寄りになり、それまで出現していた礫が砂と混合した、または混合した状態

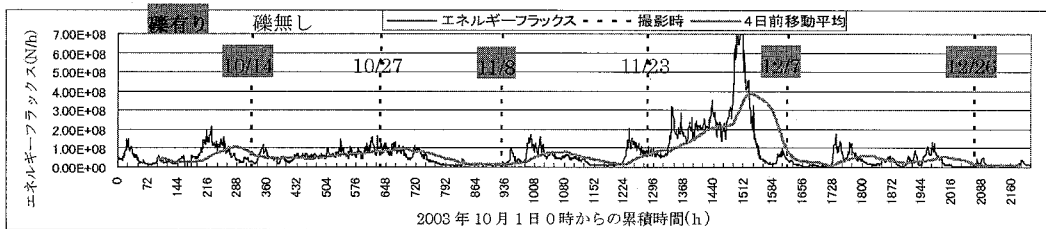


図-10 エネルギーフラックスの経時変化と礫の有無 (2003/10/1~12/31)

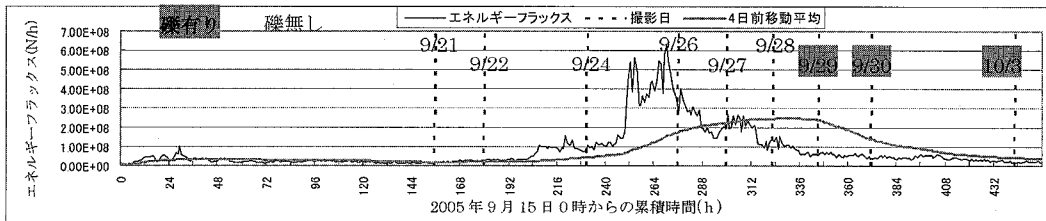


図-11 エネルギーフラックスの経時変化と礫の有無 (2005/9/15~10/3)

で沖へ移動しているために表層から見えない状態になったためと考えられる。さらにその後、ピークを過ぎて波浪が低下していくと、混合した砂礫は、移動限界（底面流速）の違いから粒径別に異なった方向に移動すると考えられ、粒径の大きい礫は押し波により岸へ、粒径の小さな砂は引き波の影響をより大きく受けて沖へ移動するようになり、wave setup による平均海面も徐々に低下していくことで海岸全体に礫が出現すると考えられる。そして、さらに波浪が低下していくと、砂も岸方向へ移動するようになり、砂が礫を覆うと考えられる。

4. 礫の移動過程に関する現地調査

(1) 底質状況調査

次に、礫の分布やその移動を詳細に観察するための現地調査を行った。2005年9月20日に沿岸方向800m（測線No. 36~No. 33）、岸沖方向は汀線付近から水深1.5m程度までの範囲で、海底表層を目視や簡単な掘削などにより砂礫の状態を判別した。当日の有義波高は約0.7mで静穏状態であった。

満潮時の遡上域で掘削を行った結果、地表（砂層）から50cm程度の深さで5~10cm大の礫と1~2mm程度の砂が混在しているのを確認した。また海底では、礫は波の突っ込み点付近（水深1m前後）に岸沖方向1~3m程度の幅で沿岸方向に分布していた。常に礫が表面に露呈している地点では、碎波による乱れで浮遊状態で移動しており、海水浴場としてはかなり危険な状態であることが確認された。このような帯状の礫帯が存在するのは碎波形式が巻き波碎波であることが起因していると考えられる。巻き波碎波は狭い範囲でエネルギーが

発散されるため底質への影響が強く、粒径の小さな砂は留まることができず粒径の大きな礫が表層を構成していると考えられる。

(2) 蛍光礫トレーサー追跡

2005年11月3日に、礫の詳細な移動過程を調査するため、予め海岸から採取し着色した礫（粒径：5~10cm）を現地海岸に投入し、その移動方向を観察した。礫は3色に色分けしたもの100個をそれぞれ沖（当日の碎波点より沖、水深約1m）、遡上域、バーム頂付近に投入した。観測は投入後0、1.5、3、4、5、6時間後、その後は1日間隔で計4日間行った。遡上域に投入した礫は投入後1時間程度でほぼ全て沖へ移動した。沖へ移動した礫は波の突っ込み点付近で往復運動を繰り返し、投入後3時間で再び遡上域へ出現した。碎波点より沖側へ投入した礫は投入後4時間で遡上域に出現した。いずれの場合も遡上域に再出現した礫は数個であった。小野ら（1997）によれば、礫は高波浪時に間欠的に移動することが確認されているが、本調査では、平常時の波浪条件下でも礫は波の突っ込み点付近にある礫帯と遡上域を往復するように移動していることが確認された。

また、1日毎の蛍光礫の観察より礫が沿岸方向を北へ移動していることが確認され、移動量は蛍光礫投入1日後には投入位置から沿岸方向約20m、2日後には約30m、3日後には約50m、4日後には100mであった。沿岸方向への移動距離は波高の増大に伴って大きくなっていることが明らかになった。なお、この期間に東海港沖で観測された入射波の平均波向は東から東南東方向であり、入射波浪の沿岸方向成分によって移動したと考えられる。

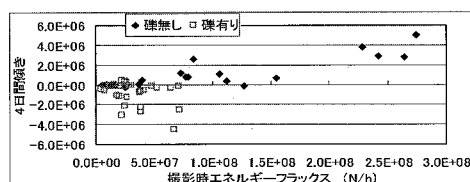


図-12 礫の有無と波浪の関係 (2003/5~2005/10)

(3) 波の突っ込み点から遡上域までの移動過程

底質調査では、波の突っ込み点付近の礫が波の突っ込みの際に瞬間的に浮遊状態となることが観察された。このことから、波の突っ込み点付近から遡上域までの岸沖方向の移動過程は以下のものであったと考えられる。瞬間的に浮遊状態となった礫は、岸向き流により礫の分布帯から抜け出して砂面上へと移動する。その後、沖向き流により砂面を転がりながら沖へ移動する。この時、元の礫帯まで戻らない場合に、その後の岸向きの振動流で砂面を転がり岸方向へ移動したと考えられ、この過程を繰り返した結果が遡上域への出現であると考えられる。

(4) 遡上域から岸沖方向への移動過程

蛍光礫トレーサーでは、遡上域が砂面の場合、礫は遡上波により岸沖方向に転がるように移動し、礫面の場合は周りの礫の抵抗を受け、ほぼ移動しないことが観察された。また、波の突っ込み点から遡上域へ移動してきた礫は、再び波の突っ込み点へ移動するか、より岸側へ移動してバームに取り込まれることが確認された。同じ外力を受ける礫が岸沖方向へ異なった動きをする要因は、礫の形状の違いであると考えられ、例えば球形の礫は、遡上域の斜面上を自重で沖向きに転がり、楕円形で平らな礫と比べるとその移動過程が異なることが現地で確認できた。しかし、現地調査では同一の礫が岸沖方向に往復していることが観察された。これは個々の礫の形状による違いでは説明できないことから、1つの礫が持つ形状特性の違いによるものであると考えられる。岸沖方向の投影面積は同じであっても、流れの向きに対する形状の違いにより、遡上波の流線の乱れ方に違いが生じると考えられる。沖向きの流れよりも岸向きの流れに対して大きな流線の乱れを生じさせるような場合、1波長の波の作用で正味岸向きへ移動すると考えられる。

5. 結 論

本研究では、阿字ヶ浦海岸汀線近傍における礫の出現源・過程を明らかにするために現地調査を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- ・海岸南部の汀線近傍に出現している礫は、地盤の下層にあったものが、表層の砂層が侵食により剥がされたため露出したと考えられる。

- ・礫の出現・消滅には、海岸への入射波のエネルギーフラックスとその4日前移動平均の傾きが関係している。高波浪のピークより4~5日後に遡上域に礫が出現することが分かった。これは、入射波エネルギーが低下する過程で砂と礫の移動方向が異なるため、礫が露出したり砂に埋没したりしていると考えられる。
- ・礫は常時波浪においても、波の突っ込み点付近から遡上域を往復するように移動し、同時に入射波エネルギーの沿岸成分の方向にも移動していた。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、茨城県常陸那珂港湾事務所には深浅測量、底質調査および波浪データをご提供頂きました。(財)茨城県建設技術管理センターには地盤情報システムに関して便宜を図って頂きました。また、日本原子力発電株式会社から波浪データをご提供頂きました。図面作成には茨城大学大学院理工学研究科の佐藤大作氏にご助力頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 茨城県常陸那珂港湾事務所(2003)：平成14年度阿字ヶ浦海岸海底状況調査委託報告書，pp. 10-15。
- 茨城県土木部検査指導課(2005)：茨城県地盤情報システム（データ検索システム），CD-ROM，No. 27。
- 宇多高明・清野聡子・熊田貴之・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎(2003)：波の遮蔽構造物建設に起因して阿字ヶ浦・那珂海岸で進みつつある大規模侵食，海洋開発論文集，第19巻，pp. 363-368。
- 小野正順・出口一郎・荒木進歩(1997)：礫浜上の礫の変形に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp. 526-530。
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁(2004)：粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデル，海岸工学論文集，第51巻，pp. 441-445。
- 佐藤孝夫・八木橋貢・黒木敬司・片野明良・栗山善昭(1999)：沖合大規模構造物による海浜変形，海岸工学論文集，第46巻，pp. 621-625。
- 田中正博・井上亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺晃・池野正明・清水隆夫(2000)：2粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出，海岸工学論文集，第47巻，pp. 551-555。
- 土木学会(2000)：「海岸施設設計便覧」2000年版，pp. 329-353。
- 南陽介・横木裕宗・三村信男(2005)：沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した海岸線変化モデルの構築と阿字ヶ浦海岸への適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 541-545。
- 山下隆男・林健太郎・朴柱昱(2003)：底質粒径の時空間変化を考慮した海浜変形予測について，海岸工学論文集，第50巻，pp. 541-545。
- 横木裕宗・南陽介・信岡尚道(2003)：阿字ヶ浦海岸における最近の急激な海岸侵食の実体解明，海岸工学論文集，第50巻，pp. 526-530。
- 吉田英治・荒木進歩・出口一郎・池田智大(2002)：混合砂礫海岸における底質の分級と断面変形，海岸工学論文集，第49巻，pp. 461-465。