

汀線付近の短期的・空間的な地形変化 に関する現地調査

FIELD MEASUREMENTS ON SPATIAL VARIATION OF SHORT-TERM MORPHOLOGICAL CHANGE NEAR THE SHORELINE

柳嶋慎一¹

Shin-ichi YANAGISHIMA

¹正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 主任研究官
(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Bathymetry and topography near the shoreline, offshore wave and longshore current were measured during a period from April to September in 2003; the surveyed area was 400 m in the alongshore direction and about 200 m in the cross-shore direction. Shoals and troughs formed near the shoreline at the low water level when the offshore wave energy was relatively low, and moved alongshore when the direction of the longshore current was constant.

Shoreward of the troughs, the foreshore slopes were steeper and the berm heights were higher than shoreward of the shoals. The berms were developed during neap tides with relatively low waves and the increases in the daily mean tide.

Key Words : Littoral drift, Morphological change, Shoreline, Berm, Longshore current, Tide, Field measurements

1. はじめに

豊かで美しい海辺環境の回復が望まれている。そのためには、対象海岸の漂砂特性を十分に考慮した平面形状、断面形状、底質粒径を有する高質な人工海浜、人工干潟の整備が必要である。

荒天時の急激な前浜の侵食は、前浜を越えて遡上した長周期波によって生じることが加藤・柳嶋¹⁾によって明らかにされている。

波が穏やかになり砂が沖から前浜へもどってくる堆積過程の機構は、Sonu²⁾他によって早くから検討されている。しかし、汀線付近の地形が浅海域特有の外力条件（海浜流、遡上波等）の空間分布によって、沿岸方向に様な断面形状になるとは限らないにもかかわらず、空間的な調査は少ない。その上、堆積過程における汀線付近の地形変化と外力との関係は未だに十分に分かっていない。

そこで、1～2 週間毎に空間的な地形測量を行い、得られたデータをもとに汀線付近の短期的・空間的地形変化特性と外力との関係について検討した。

2. 調査方法

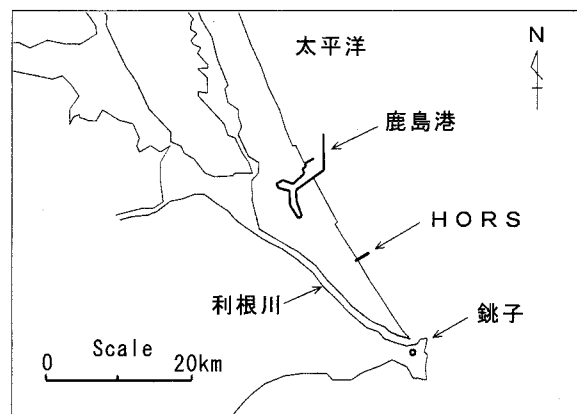


図-1 調査位置

調査は、茨城県波崎町の鹿島灘に面する砂浜海岸にある波崎海洋研究施設（以後 HORS と呼ぶ、図-1）周辺で行った。

地形測量は、図-2 に示す HORS を中心に沿岸方向 (X) 400m, 砂丘付け根から沖へ 215m の範囲 (Y) について、沿岸方向間隔 40m, 岸沖方向間隔 5m でレベル・スタッフにより実施した。高さの基準は、工事基準面 (D.L., T.P. -0.687m) である。

測量は、2003年3月から2003年9月まで、1週間～1月に1回実施した。

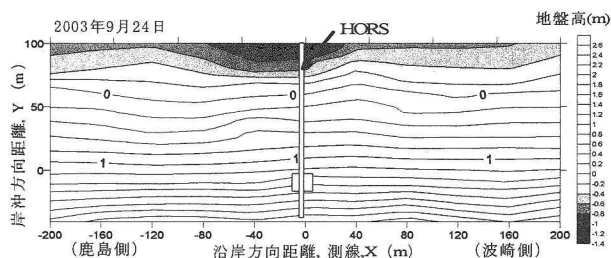


図-2 調査範囲の詳細 (2003年9月24日測量, D.L. 基準)

汀線付近の流れは、観測栈橋に沿って、休日を除く1日1回、約20m間隔で浮き（フロート）によって観測している（詳細は、栗山・伊東³⁾参照）。

汀線付近の波形は栈橋に取り付けた空中発射式超音波波高計によって測定し、1時間毎に平均水位、長周期波の波高を計算した（加藤・柳嶋¹⁾）。

沖での波は、鹿島港沖（水深24m）で観測した。

波の遡上高さは、鹿島港で観測された有義波高・有義波周期および汀線付近の栈橋に取り付けた波高計によって得られた平均水位および長周期波の波高を用い、加藤ら⁴⁾のHORSにおける経験式によって計算した。

3. 侵食直後の汀線付近の地形

荒天時の急激な前浜の侵食は、①長周期波の遡上がバーム頂を越え（写真-1）、②バーム頂よりも陸側の窪地が遡上した海水で満たされ、③更に遡上した長周期波が沖へ戻る時の流れによって、④バーム頂付近から削り取られる、のようにして生ずる。

ここで、バーム頂高さは、沿岸方向に必ずしも同一とは限らない。そのため、②の状態においてバーム頂高さの低い地点から溜まった海水が流れ出し、その部分に溝のような洗掘が生じることもある。そして、③、④の状態が継続すると、前浜の侵食は、図-3に示すとおり前浜勾配が徐々に緩やかになりつつ進行し、3時間程で終了する。

図-2は台風0315号来襲直後の地形を示している。波の遡上高が沿岸方向に変化せず、遡上域も広範囲なため、地形は沿岸方向に一様になっている（写真-2参照）。

4. 堆積過程の干潮時汀線付近の平面地形

波が穏やかになるとともに、沖に運ばれた砂が少しずつ干潮時汀線付近に戻ってくる。

図-4は、6月18日の汀線付近地形を示している。栈橋付近に波崎側から鹿島側の斜め沖方向（北方向）に向かう舌状の浅瀬が生じている。舌状の浅瀬の鹿島側には深みが生じ、鹿島寄り斜め沖方向に伸びている。さらに1週間後の6月25日の地形を図-5に示す。図-4において栈橋付近にあった舌状の浅瀬およびその鹿島側にあった深みは、鹿島方向に移動したことが分かる。

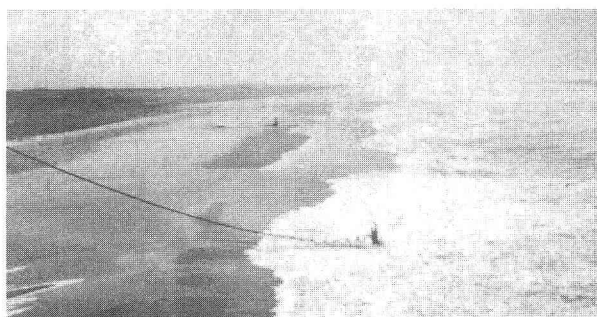


写真-1 バームを越え遡上する長周期波 (2003年9月22日, 9時22分)

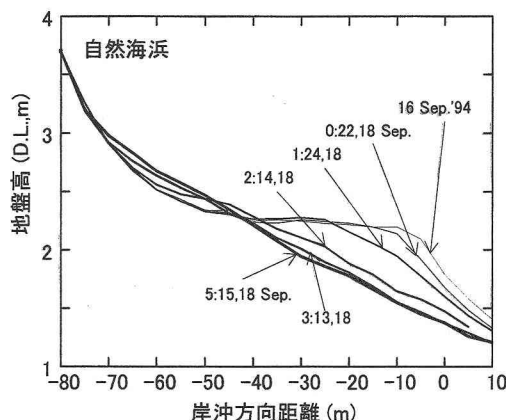


図-3 侵食時の断面地形変化例 (1994年9月, 台風15号)

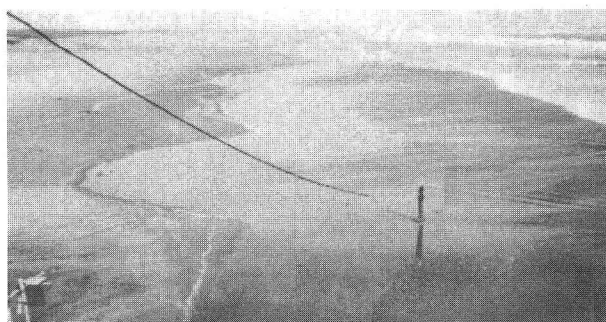


写真-2 侵食された前浜 (2003年9月23日)

図-6は、さらに3週間後の7月16日の地形を示している。図-5において深みが鹿島寄り斜め沖方向に伸びていたのに対し、この時深みは汀線からまっすぐ沖に向かって伸びている。

図-7は、8月11日の地形を示している。浅瀬・深みとも再び鹿島側の斜め沖方向に伸びているのが分かる。このように、深み・浅瀬の位置および形状は日々変化していたので、深みの沿岸方向発生位置（図-4の○印）を調べ、その結果を図-8に示す。ここでは、データの密な6月以降に注目し検討する。

6月初旬にX=0mにあった深みは1ヶ月の間（①）に5m/日のスピードで鹿島側に移動している。そして、鹿島側の深みの移動に伴い6月末に波崎側に新たな深みが生じた。その後、台風0315号の高波浪によっ

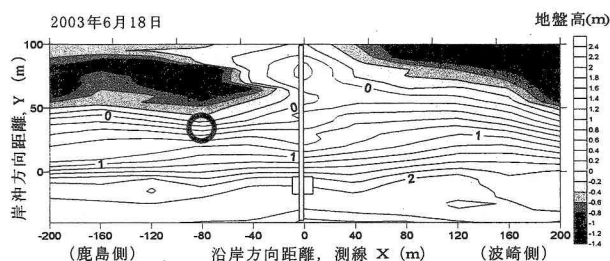


図-4 堆積過程の地形 (2003年6月18日)

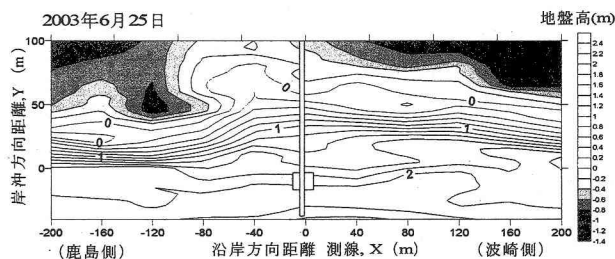


図-5 鹿島側へ移動した深みと浅瀬 (2003年6月25日)

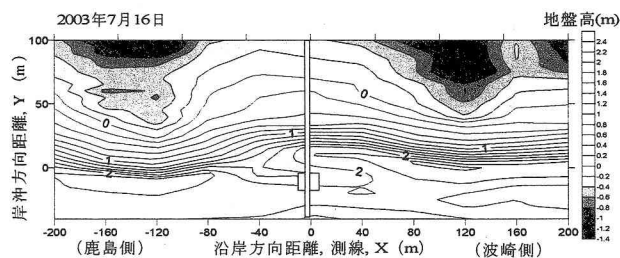


図-6 まっすぐ沖に向かう深み (2003年7月16日)

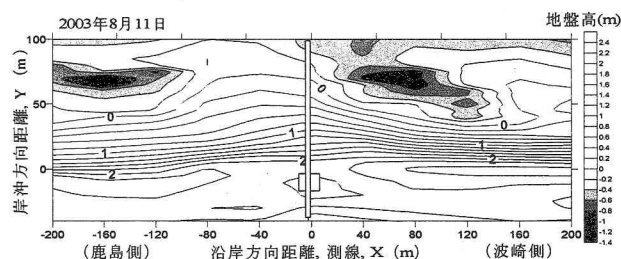


図-7 鹿島側に傾いた深みと浅瀬 (2003年8月11日)

て深みが消滅するまでの期間 (②, ③, ④), ①のように継続する明確な深みの移動は生じなかった。

次に深みの発生位置の変化と外力の関係を調べる。

図-9はこの期間の日平均エネルギーフラックスの変化を示している。深みが鹿島側に移動した時 (①) および深みの向きが鹿島側沖向きになった時 (③) のエネルギーフラックスは、2~15Kw/m/sである。そして、エネルギーフラックスが40Kw/m/sの波が来襲した直後の7月29日の地形は、浅瀬と深みがやや不明瞭になっていた。さらに、台風0315号が来襲した時 (エネルギーフラックスが300Kw/m/s) には深み・浅瀬は消滅していた (図-2参照)。このことから、浅瀬・深みの生ずる限界エネルギーフ

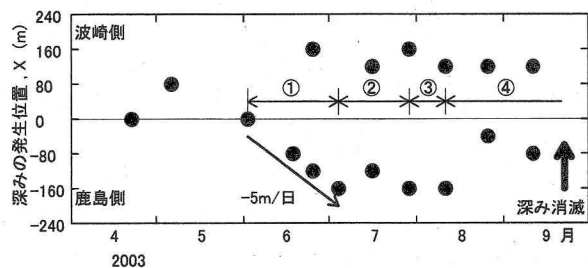


図-8 深みの発生位置の変化 (2003年)

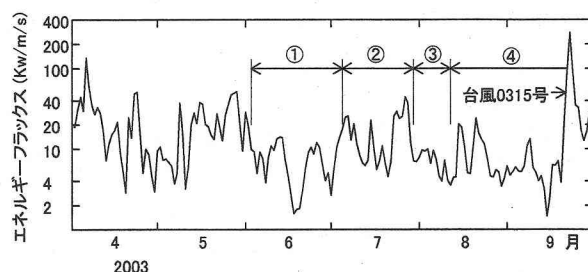


図-9 日平均エネルギーフラックスの変化 (2003年)

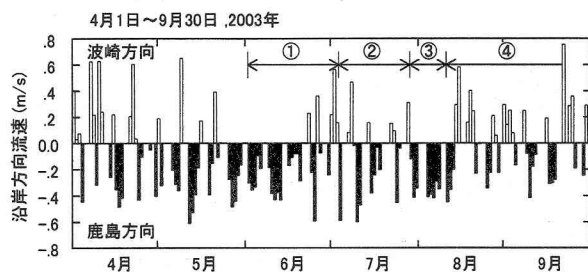


図-10 汀線付近の沿岸方向流速の変化 (2003年)

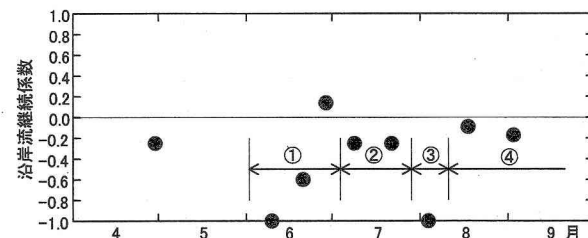


図-11 沿岸流継続係数の変化 (2003年)

ラックスは、40Kw/m/s程度と考えられる。

干潮時汀線付近の地形変化は、このように波の穏やかな時に顕著に生じることから、汀線付近よりも沖側にある砕波帯内の地形の影響は受け難いものと考えられる。このことは、加藤ら⁵⁾が示した汀線位置の短期変動予測モデルにおいて、汀線は汀線位置の履歴と沖波のエネルギーフラックスからのみ推定でき、砕波帯内の海底地形は汀線位置の変化に強い影響を及ぼさないという示唆からも裏付けられる。

図-10は、干潮時汀線付近から陸側のデータを平均した沿岸方向流速の変化を示している。図-8に示した深みの発生位置の変化に対応させると、深み

が鹿島側へ移動したのは、鹿島方向への沿岸流が継続した時(①)であることが分かる。また、③の時にも図-7に示すとおり、浅瀬・深みの方向が鹿島側冲向きになっている。一方、深みの位置がほとんど変化しないのは、沿岸流の方向が短期間に変動した時(②, ④)に対応している。そこで、沿岸流の継続性を数値的に現すことを試みる。

沿岸流継続係数は、鹿島方向に流れた時を-1、波崎方向に流れた時を1とし、対象期間の合計値を観測日数で除し求めた。その結果を図-11に示す。沿岸流継続係数が-0.6~-1.0の時に深みが鹿島方向に移動し、0.2~-0.2の範囲の時には移動しないことが分かる。

5. 堆積過程の前浜付近の断面地形

干潮時汀線付近の地形は、穏やかな波の時に沿岸流によって時間の経過と共に変動していることが分かった。前浜付近($y = -10 \sim 20$ m付近)の地形も図-5に比べ図-6ではコンターの間隔が狭くなり、変化しているのが分かる。そこで、まず深みが継続して発生していた測線($x = 120$ m)の断面地形に注目しその変化を検討する。

図-12, 13は、浅瀬・深みが鹿島方向に移動していた時と移動していない時の断面地形変化を示して

いる。図-12において、バームは時間の経過と共に形成されているけれど、図中に(A→印)で示す6月2日から18日の間に顕著な堆積が生じている。前浜勾配は、隣の測線である $x = 80$ mと 160 mにそれぞれ深みが生じた5月6日、6月25日(図-8参照)に急になったものの、それ以外は緩く、バーム頂高さも低い(2.1m)。

浅瀬・深みが移動しなかった時の前浜勾配は7月4日以降急になり、汀線が後退しつつバーム頂高さは徐々に高くなり、2.6mになっている(図-13, ↑印)。

次に、深みがほとんど発生しなかった測線($x = 0$ m)の断面変化について検討する。

図-14, 15は、深みが鹿島方向に移動していた時と移動しなかった時の断面地形変化を示している。

この測線においても時間と共にバームは形成され、顕著な堆積は、6月18日から25日(図-14, B→印)に生じ、 $x = 120$ m測線とは時期が異なっている。前浜勾配は、深みの生じた6月2日に急になった。しかし、それ以外の時の前浜勾配は緩い。

この測線に深みは発生していないけれど、7月4日以降前浜勾配は急になるとともにバーム頂高さも高く(図-15, ↑印)になっている。ただし、その高さは2.3mであり、測線 $x = 120$ mよりも0.3m低く、汀線の後退量も測線 120 mよりも少ない。

このように干潮時汀線付近の浅瀬・深みが移動し

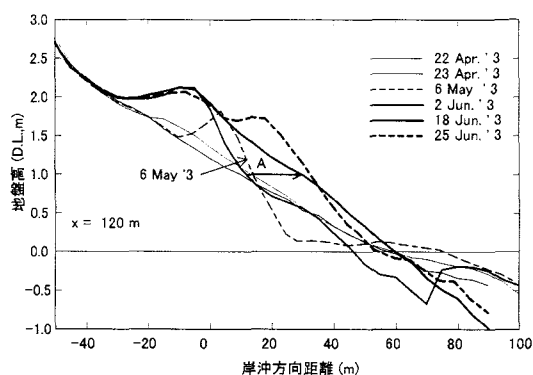


図-12 浅瀬・深みが移動していた時の断面地形変化 ($x = 120$ m)

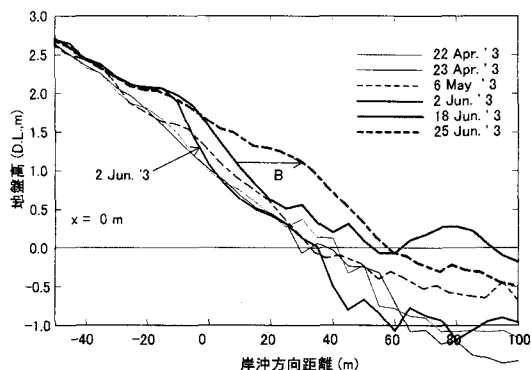


図-14 浅瀬・深みが移動していた時の断面地形変化 ($x = 0$ m)

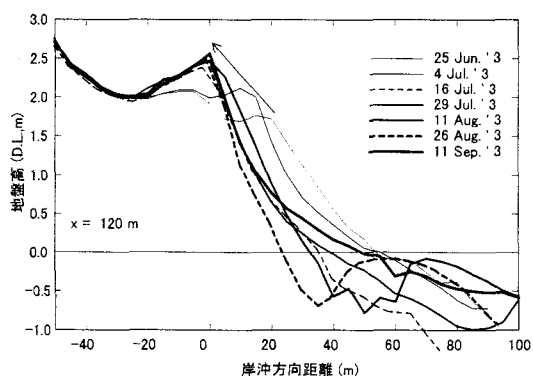


図-13 浅瀬・深みが移動しなかった時の断面地形変化 ($x = 120$ m)

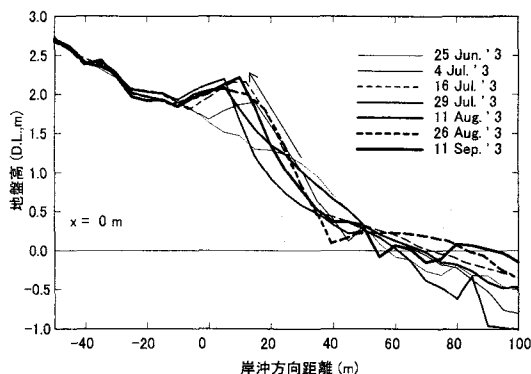


図-15 浅瀬・深みが移動しなかった時の断面地形変化 ($x = 0$ m)

ている時とそうでない時の違いによって前浜勾配およびバーム頂高さが異なっている。この違いは、前浜へ入射する波の違いにあると考えられる。つまり、浅瀬・深みが鹿島側へ移動する時、浅瀬は鹿島側の斜め沖方向に伸び（図-4参照）、波は波崎側から斜め入射していた。そして、前浜での波は、それよりも沖側の勾配が緩く一様なため崩れ寄せ波砕波が生じ小さかった。そのため、前浜勾配は緩く、バーム頂高さも低くなったものと考えられる。一方、浅瀬・深みが移動しない時の深みはまっすぐに沖に向かうとともに、前浜付近まで深みがせまっていた（図-6参照）。波は、干潮時には調査範囲よりも沖側で砕波するけれど、満潮時になると砕波せず大きな波高のまま入射し、前浜法尻付近で巻き波砕波し、勢いよくバームに遡上していた。その結果、前浜勾配は急になり、バーム頂高さも高くなったものと考えられる。

加藤・柳嶋¹⁾が観測したバーム形成事例に比べ今回のバーム頂高さはその変動が大きい。これは、波の遡上高さが変化したためと考えられるので、測線毎のバーム頂高さと $x=0\text{m}$ における波の遡上高さを調べ、その結果を図-16に示す。

バーム頂高さは、同じ日のデータでも測線によってバラツキがあり、最大 0.5m の違いがある。これは、測線毎に干潮時汀線付近の地形が異なり、前浜に入射する波が同一でないためと考えられる。各測線の平均的なバーム頂高さは、波の遡上高さにほぼ一致し、6月25日に一時的に低くなるものの5月6日から7月29日の間に 1.7m から 2.4m に上昇し、その後はほとんど変化しない。詳細に見ると8月以降、波の遡上高がバーム頂高さよりも低いにもかかわらずバーム頂高さは僅かに変化している。この地盤高の変化は、飛砂が原因である。

図-17はバーム頂位置の岸沖変化を示している。バーム頂位置も測線毎にバラツキがあり、最大 30m の違いがある。バーム頂位置が最も岸に接近したのは6月2～18日の間で、直後の6月25日には逆に最も沖側に移動し、その後徐々に岸側へ移動し、7月16日以降は安定している。

バーム頂高さとバーム頂位置は相互に変動しており、堆積・侵食の判定が難しい。そこで、L.W.L. 0m よりも高い範囲の断面土量を計算し、4月22日を基準にした変化量を図-18に示す。

測線毎のバラツキが生じているものの、断面土量は4月22日から7月4日に向かい増加し（堆積）その後9月に台風0315号が来襲するまでの期間（C、D）変化は小さい。堆積が最も顕著に生じたのは、6月2日から25日の間（A、B）である。

次に断面土量変化と外力の関係について検討するため図-19に再度、日平均エネルギーフラックスの変化を示す。データが密にある6月2日以降に注目すると、堆積が顕著に生じた期間のエネルギーフラックスは、 $2\sim 15\text{Kw/m/s}$ で小さい（A、B）。Cの期間は波がやや大きく、 40Kw/m/s の波が来襲した直後の7月29日に少し侵食が生じた。そして、波が穏やかに

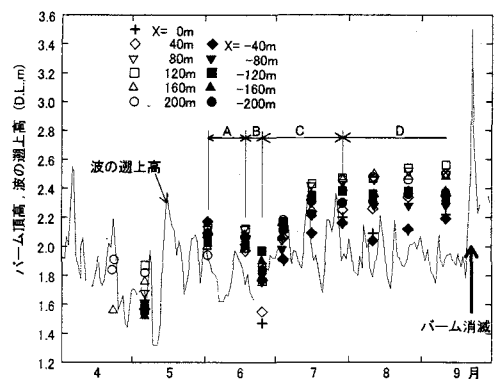


図-16 バーム頂高さの変化

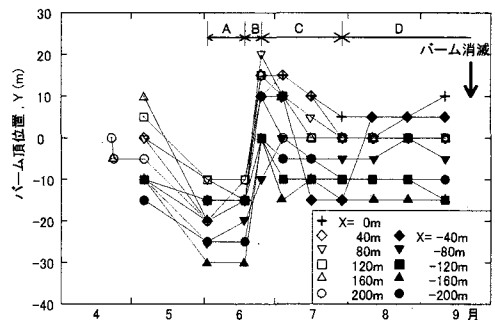


図-17 バーム頂位置の岸沖変化

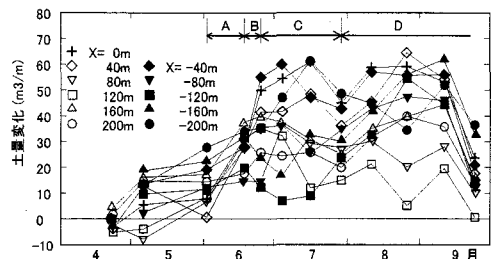


図-18 L.W.L. 0m 以上の断面土量の変化

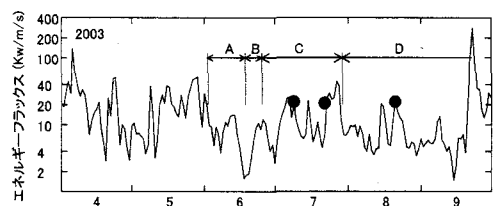


図-19 日平均エネルギーフラックスの変化

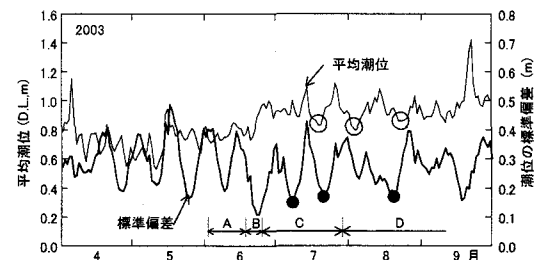


図-20 日平均水位および水位標準偏差の変化

なったDの期間の始に再び堆積が生じた。しかし、A、B期間と同程度のエネルギーフラックスの日がC、D期間にもあるにもかかわらず、後者の期間で顕著な堆積が生じていない。これは、エネルギーフラックス以外の要因が存在するためと考えられる。

そこで、汀線付近の日平均水位および水位の標準偏差を調べ、その結果を図-20に示す。

日平均水位は、5月中旬から7月中旬に向かって0.5mから1mに上昇している。その後、日平均水位は変動を繰り返すものの平均的には1mで変わらない。一方、水位の標準偏差は、14日周期で変動しているが、5月下旬から7月上旬に偏差が小さくなり、6月18日から25日(B)に極小になっている。つまり、前浜の堆積が生じた期間は、平均水位が上昇する時期(A、B)に一致し、水位の標準偏差の小さい(小潮時)時(B)に顕著な堆積が生じることが分かる。

小潮時に堆積が促進されるのは、堆積を促進する波が1日を通じほぼ同一の水位の状態、継続的に入射するためと考えられる。また、平均水位の上昇期に堆積が進行するのは、前述した水位、波浪状態で堆積した砂が、平均水位の上昇とともにさらに高い位置へ運ばれていくためと考えられる。

7月下旬から8月の日平均水位は、7月上旬よりも低くなる時(図-20、○印)がある。その結果、前浜への砂の移動が減少または無くなり、堆積は進行しなかったものと判断される。また、7、8月の小潮時(図-20、●印)には、やや大きな波が来襲した(図-19、●印)。そのためこの時には逆に小潮時に侵食が生じたものと考えられる。

次に、小潮時に堆積が促進されることを別のデータで確認する。

図-21上段は、加藤ら⁵⁾の示した汀線位置の変化である。汀線(D.L.+1.4m)は波の穏やかな時に0.6m/日のスピードで前進している(図中破線)。ただし、詳細に検討すると汀線の前進スピードは0.6m/日より明らかに速い時が何回か生じている。

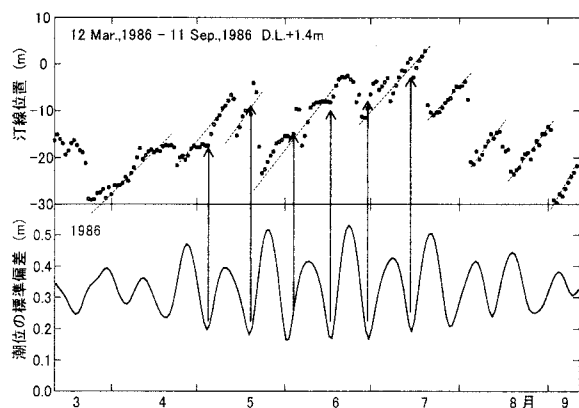


図-21 D.L.+1.4m汀線の岸沖変化(加藤ら⁵⁾)と推算潮位の標準偏差

図-21下段は、同一期間の推算潮位から求めた潮位の標準偏差を示している。

潮位の標準偏差が小さい小潮時に、汀線の前進スピードが0.6m/日よりも速くなっているのが分かる(図中↑印)。このことから小潮時に前浜の堆積が促進されることが確認される。

6. おわりに

得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- ①浅瀬と深みは、穏やかな波が(日平均エネルギーフラックス 2~15Kw/m/s)継続したときに干潮時汀線付近に形成され、継続する一方向への沿岸流によって移動する(5m/日)。しかし、沿岸流の向きが短期的に変動すると深み・浅瀬の位置は移動しない。
- ②前浜のバームは、浅瀬・深みの発生とともに形成される。深み部分背後の前浜勾配は急で、バーム頂高さは高い。一方、浅瀬部分背後の前浜勾配は緩く、バーム頂高さは低い。つまり、前浜の地形は、干潮時汀線付近の地形変化に対応し、時間的にも空間的にも変化する。
- ③バーム形成は、汀線付近の日平均水位が上昇中で、小潮時の波が穏やかな(日平均エネルギーフラックス2~15Kw/m/s)時に顕著に進行する。

今回の調査により、汀線付近の時・空間的地形変化特性は明らかになった。しかし、深みの発生機構は不明であり、今後の課題である。

謝辞：本研究のとりまとめにあたっては、栗山善昭漂砂研究室長から有益な助言を頂いた。鹿島港の波浪データは、国土交通省関東地方整備局鹿島港湾空港事務所および当所海洋・水工部海象情報研究室から提供していただいた。汀線測量においては、(株)エコーの伊東啓勝氏および漂砂研究室メンバーの協力をいただいた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤一正・柳嶋慎一：長周期波によるバームの侵食，土木学会論文集，No. 452/II-20，pp. 41-50.，1992.
- 2) Choulet J. Sonu：Collective Movement of Sediment in Littoral Environment，Proc. 11th Coastal Eng. Conf.，ASCE，pp. 373-400.，1968.
- 3) 栗山善昭・伊東啓勝：波崎海洋研究施設で観測された沿岸流の卓越方向の岸沖分布，海岸工学論文集，第51巻，pp. 146-150.，2004.
- 4) 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良：荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に注目した現地観測—，海岸工学論文集，第36巻，pp. 354-358.，1989.
- 5) 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児：汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み，港研報告，第26巻，第2号，pp. 63-96.，1987.