

# 波向変動場で生じる漂砂大循環の発生メカニズム

## Mechanism of Development of Large-scale Circulation of Littoral Drift under Seasonally Changing Wave Direction

宇多高明<sup>1</sup>・熊田貴之<sup>2</sup>・芹沢真澄<sup>3</sup>・長山英樹<sup>4</sup>

Takaaki UDA, Takayuki KUMADA, Masumi SERIZAWA and Hideki NAGAYAMA

In the long-term basis, the direction of longshore sand transport in the shoreward zone often reverses to that in the off-shore zone. This phenomenon has been observed at many coasts. The analysis using the contour-line-change model proposed by Serizawa et al. (2002) has been carried out to investigate this phenomenon, taking the Kashinmanada coast as an example. The mechanism is explained by the development of a large-scale circulation of littoral drift due to the action of waves with different energy levels under the conditions of seasonally-changing wave directions.

### 1. ま え が き

一般に沿岸漂砂の卓越する海岸において海岸線から突出した構造物が造られると、漂砂の上手側では汀線が前進し、下手側では後退する。これは普遍的現象として知られている。しかしわが国の多くの沿岸では、湾域などを除けば、一方向の沿岸漂砂が卓越する海岸よりも波の入射方向が季節的に変動する海岸のほうが多い。このような海岸では上記特性は必ずしも成立するとは限らない。例えば、冬季には北寄り、夏季には南寄りの入射波が卓越する鹿島灘にあっては、鹿嶋海岸や波崎海岸では年平均で見るとヘッドランドの南側での堆砂量が北側より多く、これから想定される沿岸漂砂の方向と長期的な海浜変形を起こす沿岸漂砂の方向が反転し、地形変化を矛盾なく説明できないという問題がある。このように漂砂の方向が岸側と沖側で反転する可能性について、栗山・坂本(2007)は、波崎海岸における沿岸流速の長期観測データより平均沿岸漂砂量の岸沖分布を求め、岸では北向き、沖では南向き沿岸漂砂が卓越することを示した。一方、Sato(1996)も吹送流効果を取り入れることにより、卓越沿岸漂砂の方向が岸側と沖側で異なる可能性を示した。このような沿岸漂砂の岸沖での反転現象は、長期海浜変形予測を行う上で非常に重要であるが、その発生機構は未解明である。鹿島灘海岸の波浪条件を代表する鹿島港の波浪データを参照すると、この海域では冬季は高波高の波が入射するのに対し、夏季には相対的に静穏な波が長時間入射することで特徴付けられる。この場合、海浜全体を見ればほぼ安定していることから、全エネルギー

で見れば冬季・夏季では均衡している。ネットの沿岸漂砂が岸側と沖側で反転する理由にはこのような波浪特性が密接に関係していると考えられる。そこで芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いた数値計算により上記現象の解明を進める。

### 2. 既往研究に見る事例

#### (1) 片野・塩屋海岸の大聖寺川河口以北への砂の閉じ込め

宇多ら(2001)は、石川県南部に位置する海岸線延長約14kmの片野・塩屋海岸の海浜変形を調べた。この海岸は北東端を片野の岬、南西端を越前松島の岩礁によって区切られたポケットビーチであり、北端から約4kmには大聖寺川が流入している。また海岸線はほぼNWを向く。波浪特性として福井港の波浪観測結果を参照すると、この海岸では冬季はNWまたはWNWが卓越するが、そのほかの季節にはNNWの頻度も高く、また波浪エネルギーは冬季に大きくその他の時期では小さい。海岸線方向と波向の関係からNNWでは西向きの、WNWでは東向きの沿岸漂砂が生じる条件下にある。さらに、宇多らは1948年から1975、1997年までの汀線変化をもとに、大聖寺川河口の西側では経年的に汀線が後退し、東側では前進してきたことを明らかにした。汀線変化の原因として、大聖寺川河口で1994年に防波堤が伸ばされた後、冬季の高波浪時における北東方向の沿岸漂砂は防波堤先端を回り込むことができるが、他の季節に沿岸漂砂の方向が反転した場合、相対的に波高が低いため防波堤先端を漂砂が回り込みにくくなり、結果として砂が河口北東側に閉じ込められたと推定した。この事例は海岸線の変化が波向変動と密接に関係し、海浜に漂砂を一部でも阻止する施設を造ると斜め入射波のうちエネルギーレベルの高い波の入射方向と逆側へと砂が押し込まれる現象があることを示唆する。

1 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長  
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科  
2 正会員 博(工)(株)水圏科学コンサルタント  
3 正会員 海岸研究室(有)  
4 修(工)(財)土木研究センター河川・海岸研究部

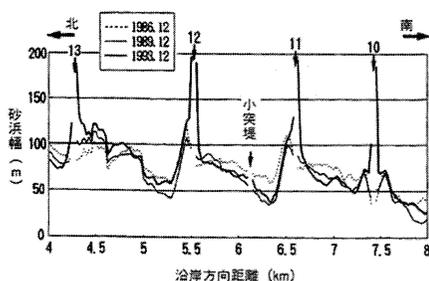


図-1 ヘッドランド(HL)周辺の1986～1993年の砂浜幅変化

(2) 鹿島・波崎海岸のヘッドランド周辺の非対称汀線の形成

宇多(1997)は、鹿島灘海岸のヘッドランド(HL)周辺の1986年から1993年までの砂浜幅の変化を図-1のように示し、各HL間の南部では汀線が後退して砂浜幅が狭く、北部では砂浜幅が広く、全体として階段状の汀線が形成されたことを示した。鹿島灘海岸では高波浪の来襲頻度は、次節で明らかにするように北側が南側より高いことを考えると、図示するHL周辺の汀線形状は波浪条件から推定される結果と逆パターンであり、あたかも北向きに沿って漂砂が卓越するように見える。鹿島港南側の波崎海岸では波崎漁港の北側に5基のHLが造られた。地形変化解析によれば、波崎漁港へと南向きに沿岸漂砂が運ばれて漁港内に大量の砂が運ばれているにもかかわらず、HL周辺では北側の汀線が南側の汀線より前進し、沿岸漂砂の方向が反転しているように見える。このようなHL周辺での汀線変化は、鹿島海岸のHLの場合と同様、漂砂の方向について大きな疑問を生じさせる。

3. 鹿島灘海岸の波向変動特性

上記問題を解明するために、鹿島灘海岸を実例として取り上げ、この海岸の波浪条件を鹿島港沖での波浪観測データを参照して調べた。図-2は、鹿島港の観測結果より16方位および波高別に波浪エネルギーフラックス比(100%が通年のエネルギーフラックスの総量を表す)を計算したものである。全波高での卓越波向はENEでありそれにNEが続く。波高3,4m以上の高波高ではNEがENEと同程度で発生している。これに対しEからは波高が低い波が高頻度で出現し、この結果全波高で見るとEの頻度も高まる。しかし16方位では、各方位を代表する方向角が各方位±11.25°と広く分解能が低いので、波向情報を的確に表せない可能性が大である。そこで波向を1°刻みとして波高別に波浪エネルギーフラックス比を求めたのが図-3である。これによれば、高波浪のピークはN64°Eにある一方、波高2m以上のランクに顕著に現れているように、N44°Eにもピークがある。すなわち1°刻みで見ると、この海岸では主な入射波は2組あり、相互に20°の差をもって冬季に卓越する波高の高いN64°Eか

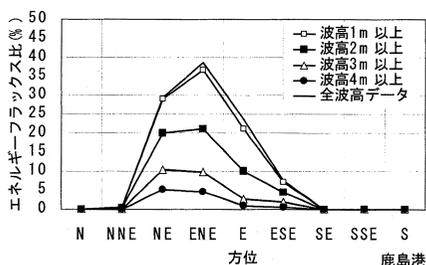


図-2 16方位および波高別に求めた波浪エネルギーフラックス比(1991～2006年)

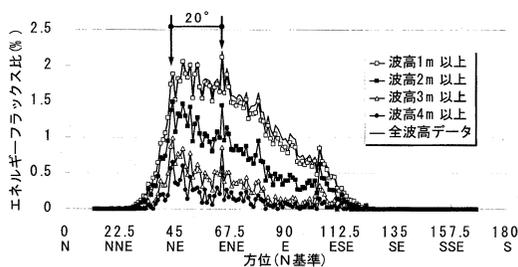


図-3 波向を1°刻みとして波高別に求めた波浪エネルギーフラックス比

らの波と、夏季を中心として波高は相対的に低いものの頻度の高いN44°Eからの波によって特徴付けられる。モデル化においては、図-2では一方向からの波を考えればよいが、図-3では波向が季節変動を有することになり、条件設定が大きく異なることになる。

4. 等深線変化モデルによる予測計算

(1) 計算条件

鹿島灘海岸のうち鹿島港以南の波崎海岸をモデルの対象とし、芹沢ら(2002)による等深線変化モデルを用いて予測計算を行った。計算対象は波崎海岸と同規模を有する仮想海岸とする。まず両端固定境界の計算区域において、鹿島港沖での実測値のように波の入射方向が季節変動を有し、冬季の波浪は波高が高いが継続時間が短く(エネルギー平均波高： $H_w=1.85m$ )、夏季の波浪は相対的に波高が低い継続時間が長く(エネルギー平均波高： $H_s=1.49m$ )、結果的に冬季エネルギー量( $E_w$ )と夏季エネルギー量( $E_s$ )が同一( $E_w=E_s$ )となる波浪条件を設定した。2時期の波浪作用時間は、冬季・夏季の総エネルギー量が等しいことから、冬季と夏季の波高の5/2乗の比( $H_w^{5/2}:H_s^{5/2}=63:37$ )に逆比例して定めた( $t_w:t_s=37:63$ )。時間表記では冬季が $t_w=135$ 日、夏季が $t_s=230$ 日となる。 $\Delta t=1hr$ なので1年間は8,760ステップであり、うち冬季が3,240ステップ、夏季が5,520ステップとなる。碎波波向は鹿島港での観測結果、±10°(2時期の角度差20°の中央値を仮定)に屈折を考慮して±4.2°とした。計算は構造物条件を変えて5ケース行った。ケース1では無施設、ケース2では海浜中央に先端水深3mの突堤を配置、

ケース3では突堤の先端水深を6mに変更, ケース4,5では海浜を3分割して3基の突堤(先端水深は3mと6m)を配置した. 表-1には計算条件を示す.

この計算において重要な点は, 波浪条件に依存して波向変動を起すと同時に, 波による地形変化の限界水深 $h_c$ とバーム高 $h_B$ を変えることである. 冬季の波浪は波高が高いので $h_c$ も大きい, 夏季は静穏なため $h_c$ は小さくなる. このような条件で波向が周期的に変化すると, 冬季には砂が移動するが夏季には移動しない場所が出てくる. 沿岸漂砂の作用のみであれば砂は往復運動し, また水深の大きな場所に落ち込んだ砂はそのまま残される. しかし本モデルでは平衡勾配と局所勾配との関係で, 冬季に砂が南端付近まで運ばれたあと, 夏季に北向きに砂が運び去られると, 沖合部の局所勾配が平衡勾配より緩やかとなって冬季には岸向きに移動することができる. この点が海浜縦断形の安定化が組み入れられている最大の特徴である. いま, 冬季の波浪作用時の $h_c$ を $h_{c1}$ , 夏季の波浪作用時の $h_c$ を $h_{c2}$ としたとき, 沿岸漂砂の一部の通過を許すかどうかにおいて, 突堤の先端水深と $h_{c1}$ ,  $h_{c2}$ との相対関係が重要となる. そこでここでは $h_{c1}=10\text{m}$ ,  $h_{c2}=6\text{m}$ とし, 突堤の先端水深は3mと6mとした. 突堤の先端水深が3mでは冬季・夏季いずれの波でも沿岸漂砂が通過可能であり, 6mでは夏季の漂砂は突堤を越えられず冬季には一部が通過可能である. 計算は波向を周期的に変動させ, 10サイクル終了後に時点での計算結果を示す.

(2) 計算結果

周期的に変動する波向条件のもとでの, 10サイクル目の計算終了後における冬季, 夏季の平均漂砂フラックスを図-4(a), (b)に示す. 両端が固定境界で閉ざされた系において, 冬季には全体として右向きの漂砂フラックスが生じる. この右向きの漂砂フラックスは水深の大きい場所まで起る. 一方夏季には波高が低下しているため,

表-1 計算条件

計算ケース	1: 無施設 2: ケース1の中央に突堤を設置したケース ( $h=-6\text{m}$ ) 3: ケース1の中央に突堤を設置したケース ( $h=-3\text{m}$ ) 4: ケース1の3本の突堤を設置したケース ( $h=-6\text{m}$ ) 5: ケース1の3本の突堤を設置したケース ( $h=-3\text{m}$ )
初期地形・平衡勾配	1/50
入射波条件	砕波波向(夏季) $\alpha_0=4.2^\circ$ (冬季) $\alpha_0=4.2^\circ$ ※鹿島港観測点での $\pm 10.0^\circ$ の波向に屈折考慮
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深(夏季) $h_c=6.0\text{m}$ , (冬季) $h_c=10.0\text{m}$ バーム高(夏季) $h_B=2.0\text{m}$ , (冬季) $h_B=3.3\text{m}$
境界条件	岸沖端境界: 通過漂砂量0 側方境界: 通過漂砂量0
漂砂量係数	漂砂量係数内の $A=0.5$ 小佐ブランプトン項の係数 $\zeta=0.0$ 岸沖漂砂量係数 $K_z/K_x=0.2$
安息勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算範囲	沿岸方向: $x=0\sim 16000\text{m}$ 鉛直方向: $z=5\text{m}\sim -15\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta x=400\text{m}$ , 鉛直方向 $\Delta z=1\text{m}$
計算時間間隔 $\Delta t$	$\Delta t=1\text{hr}$

沖合では漂砂は起こらず, 浅海域で集中的な左向きの沿岸漂砂が生じる. 冬季・夏季で漂砂フラックスの方向は反転するが, 漂砂帯の幅が異なり夏季のフラックスは汀線近くに集中することが注目される. 図-5は, 10サイクル目における1年間平均の等深線形状を示す. 冬季・夏季ともに砂が移動する範囲にあっては等深線には何ら変化が生じることなく, 平均では初期の等深線形状が保たれる. しかし沖合領域では, 左境界付近で等深線が後退,

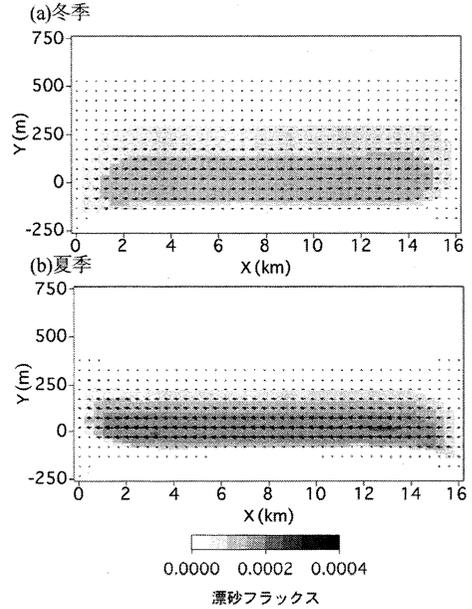


図-4 10サイクル目における冬季・夏季の平均漂砂フラックス

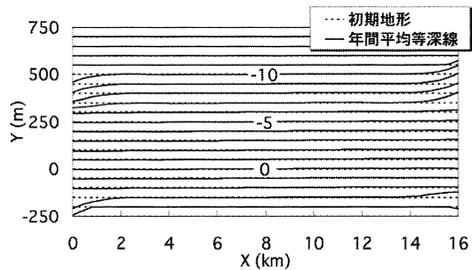


図-5 10サイクル目における1年間平均の等深線形状

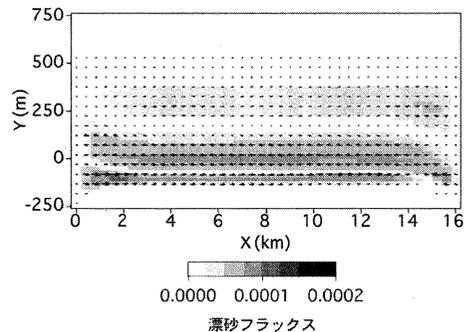


図-6 10サイクル目における年間の平均漂砂フラックス

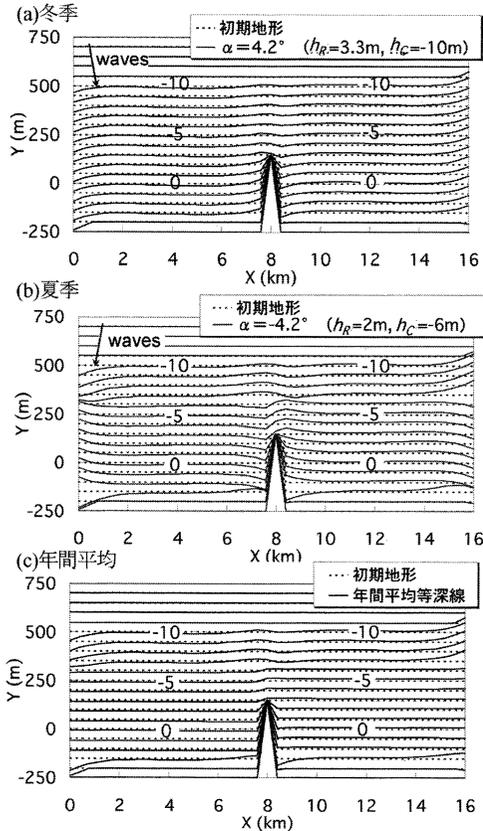


図-7 先端水深3mの突堤が海浜中央に造られた条件での海浜変形予測結果

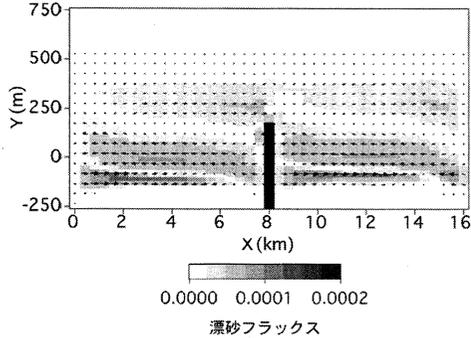


図-8 10サイクル目における漂砂フラックスの年間平均値

右境界付近で前進という変化が起こる。このような等深線形状に対応する10サイクル目における年間の平均漂砂フラックスが図-6である。汀線付近では左向きの漂砂フラックスであるが、沖合では右向きとなって全体として漂砂循環が起こる。なお、波の打ち上げ領域のうち、標高の高い部分では右向きの漂砂フラックスが起きているが、これは冬季の $h_{R1}$ が大きく、夏季の $h_{R2}$ は小さいため、 $h_{R1}$ と $h_{R2}$ の間では冬季の波の作用の効果のみが現れたことによる。

計算領域内に沿岸漂砂を阻止する施設がなければ図-6

のように砂は領域全体で循環するのみである。しかし計算領域に突堤や離岸堤など漂砂に影響を及ぼす施設が造られると、漂砂フラックスに大きな変化が生じる。図-7(a), (b), (c)は、先端水深3mの突堤が海浜中央に造られた条件での海浜変形予測の結果であり、それぞれ冬季、夏季、年間平均の等深線形状を示す。冬季には右向きの漂砂が生じ、漂砂の一部は突堤の先端沖を通過して右側領域に流れ込む。この時同時に突堤左側面では等深線が前進し、右側面では等深線の後退が起き、突堤先端沖では等深線の蛇行現象が起こる。夏季になると図-7(a)と逆の変化が起こるが、浅海域に漂砂フラックスが集中するため突堤側面での等深線の変化や突堤沖での等深線の蛇行が顕著となる。年間平均の等深線形状では、汀線付近の等深線は変化がないように見えるが、詳細に調べると汀線付近の等深線は突堤を中心として右半面では左半面よりも前進している。図-8は、図-7(c)に対応する10サイクル目における漂砂フラックスの年間平均値である。突堤がない場合の漂砂フラックス(図-6)と同様漂砂循環が生じるが、突堤設置に伴ってセルが二分割され、2組の時計回りの漂砂循環が生じた。

図-9(a), (b), (c)は突堤の設置基数を3基に増やした上で波向変動を有する入射波を作用させた場合の漂砂フラックスの分布である。3基の突堤の設置により冬季には各区間において右向きの漂砂フラックスとなり、夏季は狭い区域に集中した左向きフラックスが生じる。この結果、10サイクル目における年間平均の漂砂フラックスは図-9(c)のように突堤で区切られた区域でそれぞれ時計回りの漂砂フラックスが生じる。

以上のように突堤の設置基数を増加させると、突堤間において年間平均の漂砂フラックスはいずれの場合にも循環系をなし、それぞれのセルの規模が小さくなる。ここで注目されるのは、図-7(c)にも一部示したように、強い波の入射方向から見て突堤などの施設の下手側に位置する海浜では年間平均で汀線が前進し、施設の上手側では平均的に後退することである。

図-10(a)は、先端水深3mの突堤が中央に設置された場合の10サイクル目における冬季、夏季、年間平均汀線を示す。突堤の両側では汀線が周期的に変動するが、年間平均汀線が突堤の右側領域で前進している。突堤長を伸ばし、先端水深を2倍にすると、年間平均汀線の前進量が大きくなる。これは突堤の先端水深が増加することにより、冬季の右向きの漂砂の阻止能率が向上したことによる。一方、図-10(c)は図-10(a)の場合と突堤長は同一であるが、突堤の基数が3倍となっている。この条件下では両端部の汀線位置のずれが益々増大している。図-10(d)は、先端水深6mの突堤を3基設置した場合の冬季、夏季、年間平均の汀線形状である。汀線は季節的変動を有するが、年間平均汀線は右向きに階段状となっており、

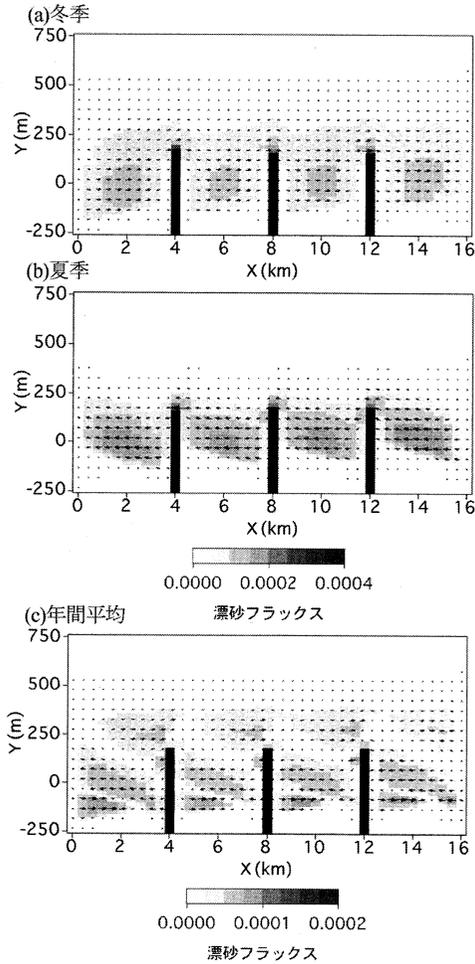


図-9 突堤が3基の条件下での漂砂フラックスの分布

各突堤の右側の汀線が左側より前進するという結果となった。このような汀線の突堤を挟んだ非対称性は図-1に示した鹿島海岸のヘッドランド周辺の汀線の非対称性をうまく説明している。

5. 結論

図-10(d)に典型例を示したように、階段状に並んだ汀線形状の観察に基づいて、汀線が前進している側から汀線後退側へと沿岸漂砂が卓越するという一般的な認識は常に成立するとは限らないことが結論される。波向が変動する場においては、漂砂フラックスは循環系をなすものであり、ネットの漂砂の卓越はない。それを汀線形状の非対称性のみから判断すると間違った結論に達することを示している。しかも突堤の基数を増加させるか、あるいは突堤を伸ばして沿岸漂砂の阻止能力を向上させればさせるほど汀線の非対称性が増すという現象が起こることは注意すべき重要な点と考えられる。ここで対象とした鹿島灘海岸と全く同様な波向変動を有する海岸は多

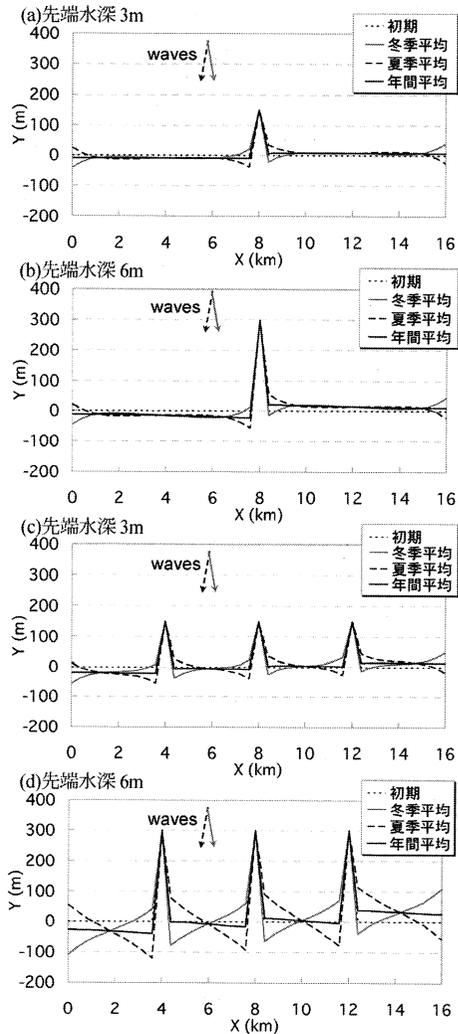


図-10 10サイクル目における冬季, 夏季, 年間平均汀線

数あり, その一つに石川海岸がある. そのでも本研究の結果が適用可能と考えられる.

参考文献

宇多高明・古池 鋼・芹沢真澄・三波俊郎・清野聡子・渡辺宗介 (2001) : 石川県片野・塩屋海岸の海浜・砂丘地の変遷とその変形機構, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.565-570.  
 宇多高明・山本 学・三波俊郎・古池 鋼・星上幸良・石川仁憲 (2007) : 福井県浜住海岸の侵食実態と離岸堤群の漂砂制御効果, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.561-565.  
 宇多高明 (1997) : 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p.442.  
 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.496-500.  
 栗山善昭・坂本 光 (2007) : 長期間平均の沿岸漂砂量の岸沖分布, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.696-700.  
 Sato, S. (1996) : Effect of winds and breaking waves on large-scale coastal currents developed by winter storms in Japan Sea, Coastal Eng. in Japan, Vol. 39, No.2, pp.129-144.