

汀線変化の解析解の九十九里海岸への適用と それに基づく漂砂量の諸係数の評価

APPLICATION OF THE THEORETICAL SOLUTION OF SHORELINE CHANGE TO
KUJUKURI COAST AND EVALUATION OF COEFFICIENT OF LITTORAL DRIFT

渡辺宗介¹・宇多高明²・芹沢真澄³・清野聡子⁴・三波俊郎⁵・
古池 鋼⁵

Shu-suke WATANABE, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Satoquo SEINO, Toshiro SAN-NAMI
and Kou FURUIKE

¹ 学生会員 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科 (〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

² 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

³ 正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 208 号)

⁴ 正会員 農修 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科助手 (〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

⁵ 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 208 号)

Theoretical solution of shoreline change was applied to the Kujukuri, Misawa and Fuji coasts, and the coefficient of littoral drift was evaluated and compared. Aerial photographs were read to investigate shoreline changes on the updrift side of Katakai fishery port on the Kujukuri coast, where southward littoral drift dominates. Observed shoreline changes were well explained by the theoretical solution. The same method was applied to the Misawa and Fuji coasts, and coefficient of littoral drift on each coast was compared.

Key Words: Shoreline change, theoretical solution, Katakai fishing port, Kujukuri coast

1. まえがき

一方向の卓越沿岸漂砂が防波堤や導流堤によって阻止された場合、構造物の下手側では侵食されて汀線が後退し、上手側では堆積して汀線が前進する。また、防波堤などの施設の規模が大きいと構造物下手側の波の遮蔽域では回折効果による汀線変化が重なる。これに対し、上手側では単純に沿岸漂砂移動が阻止されるのみなので、単調な汀線変化が見られる。こうした場合の汀線変化について、野田・橋本¹⁾には解析解が示されており、実測値への適用が可能である。宇多²⁾は、富士海岸の汀線変化データについてこの解析解を適用し、実測値と解析解とがかなりよい対応を示すことを明らかにした。このような検討は各地の海岸で可能と考えられるがその適用例は限られている。本研究では、新たに千葉県九十九里浜の片貝漁港周辺と、青森県の三沢漁港周辺の汀線変化を分析して実測データへの適用を行い、それぞれの海岸での漂砂量に関する諸係数値を求めた上で、解析解に含まれている係数がいかなる要素によって支配されているかについて実測データを基に分析する。

2. 九十九里海岸と片貝漁港に関する既往の研究

千葉県の九十九里海岸は図-1に示すように、太平洋に面する延長約60kmの細砂からなる砂浜海岸である。この海岸の北端には未固結の砂岩・泥岩からなる屏風ヶ浦の海食崖があり、そこからの供給土砂が九十九里浜の形成に預かってきた。また、南端には屏風ヶ浦と同様な海食崖の太東崎があり、そこからの供給土砂は北向きに流れ、これも九十九里浜の形成に役だってきた³⁾。

九十九里浜の中央部に位置する片貝漁港沖における、1990～1992年の波向別波高出現頻度を図-1に示す。また同図には1985～1986年に実施された九十九里海岸の北東端に位置する飯岡漁港沖の波浪観測の結果も示す。片貝漁港における波浪出現頻度は、SEからの波が全体の約23%、ESEが約21%と、片貝漁港周辺の海岸線に対してほぼ直角方向からの入射波が多い。しかし、片貝漁港での海岸線への法線の方がE36° Sであることを考慮すると、海岸線への法線に対して反時計回りの方向

3. 空中写真による片貝漁港周辺の汀線変化調査

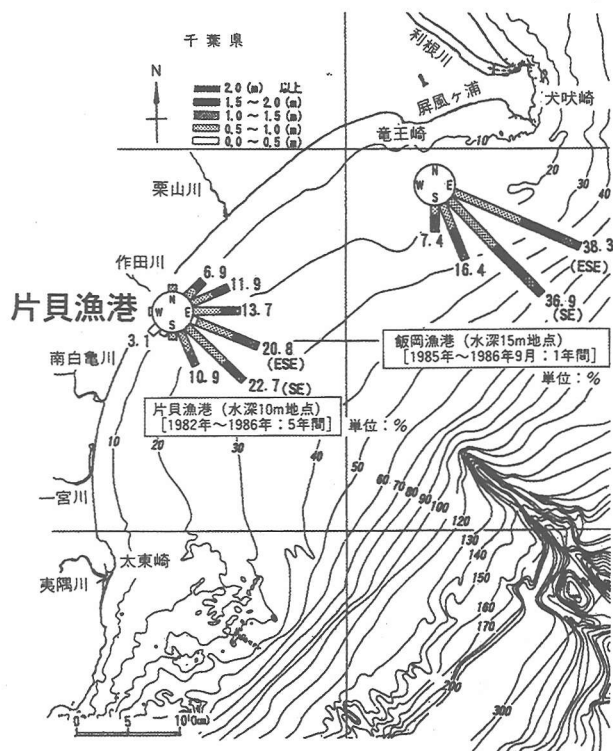


図-1 片貝漁港の位置

写真-1に示す1961年では、作田川河口の左岸側に汀線までの長さを持つ河口導流堤があり、それに沿うようにして狭い水路が開いていた。旧片貝漁港は河口の陸域を掘削して造られた典型的な河口港であったが、この当時はまだ建設途中で漁港と河口はつながっていない。この時期には海岸線に沿って幅約200mの様な砂浜が延びていた。また作田川河口では河口テラスがあるため、周辺では直線的に延びている碎波線が円弧状に突出している。

1965 年までに右岸側にも導流堤が伸ばされると同時に漁港も拡張され、漁港と河口が水路で結ばれた。写真-1に示すように、漁船が旧漁港から太平洋に出ていく際には、河口を通過する必要がある。しかし、この海岸では南向きの沿岸漂砂が卓越すると同時に緩勾配で漂砂移動が活発なために、河口に砂が堆積しやすく、航路として使用可能な水深と幅を維持するのは非常に困難で

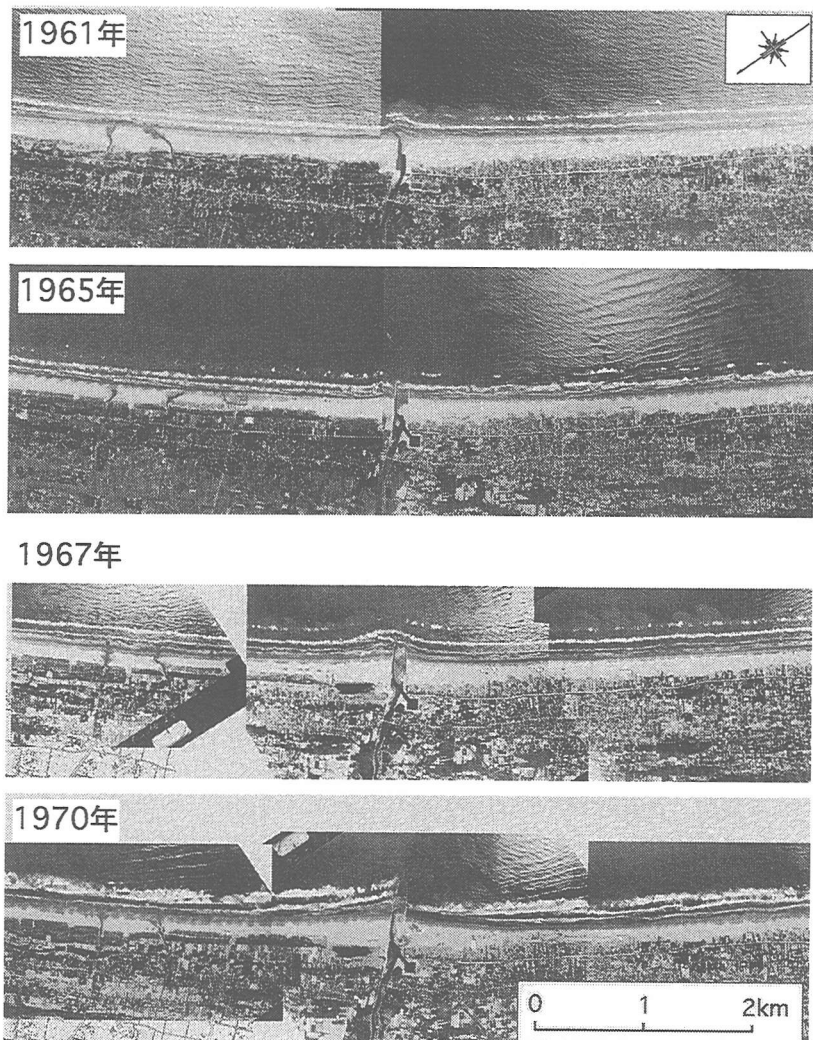


写真-1 片貝漁港周辺の空中写真（1961～1970年）

あった。このような状況下で、航路の安全を確保し、河口部への砂の流入を阻止するため、これ以降河口導流堤がさらに沖へ延長されていくことになった。

1967年には右岸導流堤がさらに延長されて約230mになったが、河口には規模の大きな河口砂州が右岸側から発達し、左岸導流堤に沿ってごく狭い水路が開いている。水路幅は最狭部で約9mと非常に狭い。導流堤の延長と合わせて河口の北側で堆砂が起こり、この結果沿岸に沿って白く見える砕波帯が河口前面で円弧状に大きく突出している。

1970年には開削により河口幅は約14mにまで拡張され、導流堤も約400mまで延長された。しかし河口には依然として規模の大きな河口砂州が残されており、航路は左岸導流堤に沿ったごく狭いものになっていた。この段階では河口の北側で2列の砕波線が見られるのに対し、河口のすぐ南側ではそれが一度途絶え1列になっている。

以上のように、漁船の航路も兼ねた作田川河口では沿岸漂砂によって砂が堆積しやすく、航路障害を頻繁に起こしていた。河口部への砂の流入を阻止する目的で延ばされた導流堤であったが、同時に周辺海浜に地形変化をもたらした。また1970年までは、いずれの場合も左岸導流堤に沿って狭い水路が開いていた。この海岸では南（写真右）向きの沿岸漂砂が発達しているから、導流堤の先端を回り込んで河口内へ流れ込んだ漂砂は右岸導流堤に沿って堆積するように考えられるが、実際には左岸導流堤がみお筋を固定し、わずかながら波の遮蔽効果を発揮するために上記の結果が得られたと推定される。

一方向に卓越した沿岸漂砂のある海岸に、防波堤などの構造物が建設されて沿岸漂砂の連続的移動が阻止されると、構造物の上手側では砂が堆積して汀線が前進し、下手側では侵食され汀線が後退する。片貝漁港周辺では南向きの沿岸漂砂が卓越しているため、導流堤が伸ばされるにしたがいその上手側、つまり北側では汀線が前進し、下手（南）側では汀線が後退した。1967年には規模が大きくなった導流堤の北側で既に堆積が始まり、このため白く見える砕波帯の凸部が導流堤の

北側に移動した。このように汀線が前進する中で、その効果を発揮するために導流堤はさらに伸ばされた。そのため1970年には北側ではさらに汀線が前進し、南側では砂の供給が減ったため汀線の後退が始まった。特に導流堤の北側では2列の砕波線が見られるのに対し、南側ではそれらが重なって見られるのは、導流堤の南側の海域では侵食により水深が増加していることを示すと考えられる。また1967年では海岸線に沿って連続的に砕波線が見られるのに対し、1970年では砕波線が導流堤先端で不連続になっている。このことは、1967年段階までは南向きの沿岸漂砂が連続的に導流堤先端を迂回して下手方向に流れていたが、導流堤長が長くなったあとは流れにくくなったことを意味している。

(2) 1973～1982年の変化

1973～1982年の空中写真を写真-2に示す。1973年には導流堤がさらに延長されて左右岸の導流堤長が約600mとなるとともに、河口では大規模な掘削が行われた。これに伴い導流堤の北側ではさらに汀線が前進し、南側では導流堤の付け根では導流堤自身による波の遮

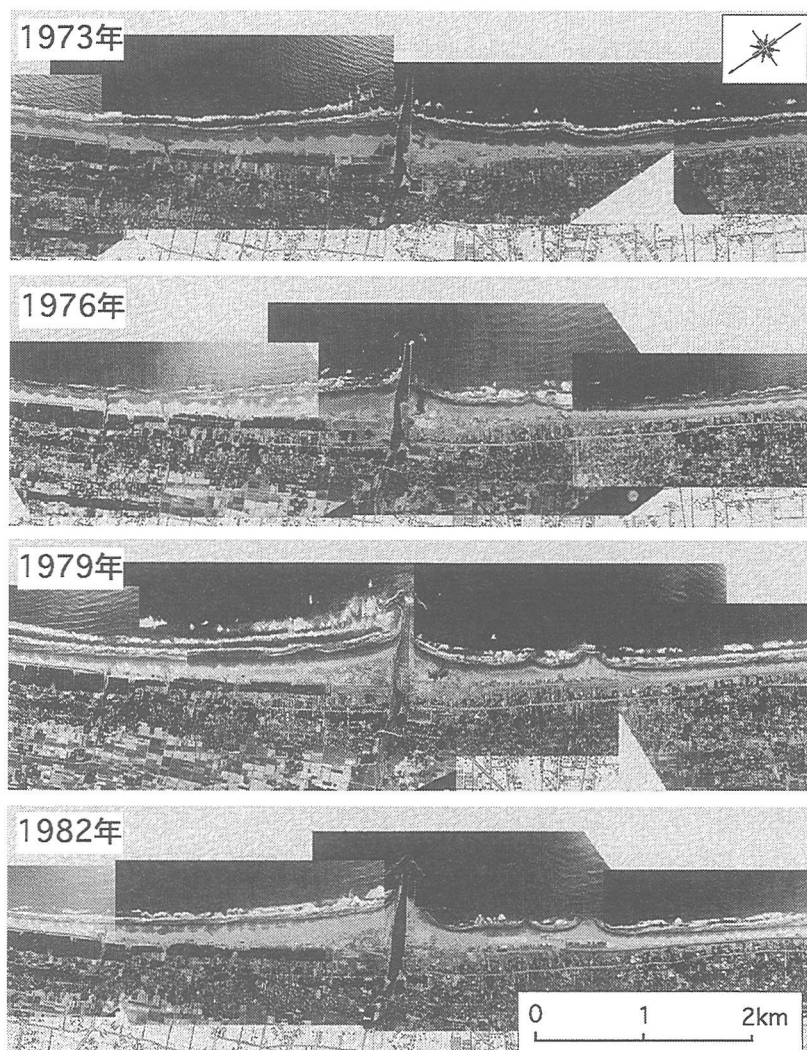


写真-2 片貝漁港周辺の空中写真（1973～1982年）

蔽効果で局所的に汀線が前進したが、導流堤から離れた場所では侵食されて汀線が凹状になった。なお、この時期の河口導流堤では先端に向けて導流堤形状が絞られているが、これは航路へ進入する漁船への波浪静穏度の向上を期待すると同時に、河川流による河口内堆積土砂のフラッシュ効果を期待したものと考えられる。

このように河口部の砂の堆積を阻止する目的で伸ばされた導流堤であったが、あまり堆砂防止効果は上がらず、河口部は慢性的な航路障害を起こしていた。そのためさらに様々な対策が試された。1976年から導流堤の先端に「ハ」の字型の防波堤が建設され、1982年には導流堤の両側に防砂突堤が建設された。

一方、導流堤の南側では侵食防止のため、1973年から2基の離岸堤が建設され始めた。2基の離岸堤のうち、南側の離岸堤両側の汀線形状を比較すると、離岸堤南側の汀線が凹んでいる。これは南向きの沿岸漂砂を離岸堤が阻止したために、その南側で汀線が後退したことを意味する。1979年には、これらの離岸堤の背後で舌状砂州が形成され、局所的に汀線が前進しているのが見て取れる。また1982年から漁港の南側では掘り込み形式で新たな漁港の建設が始められ、すでにこの段階までに既存の導流堤と平行な防波堤が建設された。

導流堤の北側での汀線変化は、導流堤が約600mまで伸ばされた1973年以降著しくなり、1982年までに防波堤の付け根での汀線前進量は約260mに達した。また導流堤の北側区域で導流堤が大きく伸ばされる前の1965年と比較して、汀線が前進した区域は北側約2.7kmに及んだ。

(3) 1985～1997年の変化

1985～1997年の空中写真を写真-3に示す。1985年には漁港南側での新たな施設の整備が進み、コの字型の泊地が完成した。この段階では、1982年までに新たに航路を造るために伸ばされた防波堤と、旧導流堤間の河川とは連結していなかったが、1991年には旧左岸導流堤の基部が取り壊されそこで河川と連結した。

1994年には「ハ」の字型防波堤のうち北側の部分が延長されて防波堤の遮蔽効果が上がったために、コの字型泊地の海側を守る護岸の基部に砂が堆積して三角形の前浜が形成された。1997年にはハの字型防波堤の北側部分がさらに延長され、遮蔽域が南側に大きく広がった。これに合わせて、コの字型泊地の外側に新たに三角形の砂浜が形成された。この間の堆積土砂は、この海岸での卓越漂砂である南向きの沿岸漂砂によって運ばれたのではなく、波の遮蔽効果によって南側の海岸で発生した局所的な北向き沿岸漂砂によって運ばれたものと考えられる。さらに、1997年には作田川河口の南約700mに突堤が建設された。

以上のように、漁船の航路確保のために伸ばされた導流堤や防波堤により沿岸漂砂の移動が阻止されたため、その上手側では堆積により汀線が大きく前進し、下手側では侵食により汀線が後退したために離岸堤や突堤が設置された。これにより1961年にはほぼ直線状であった汀線は1997年現在では非常に凹凸に富んだ汀線形状になった。

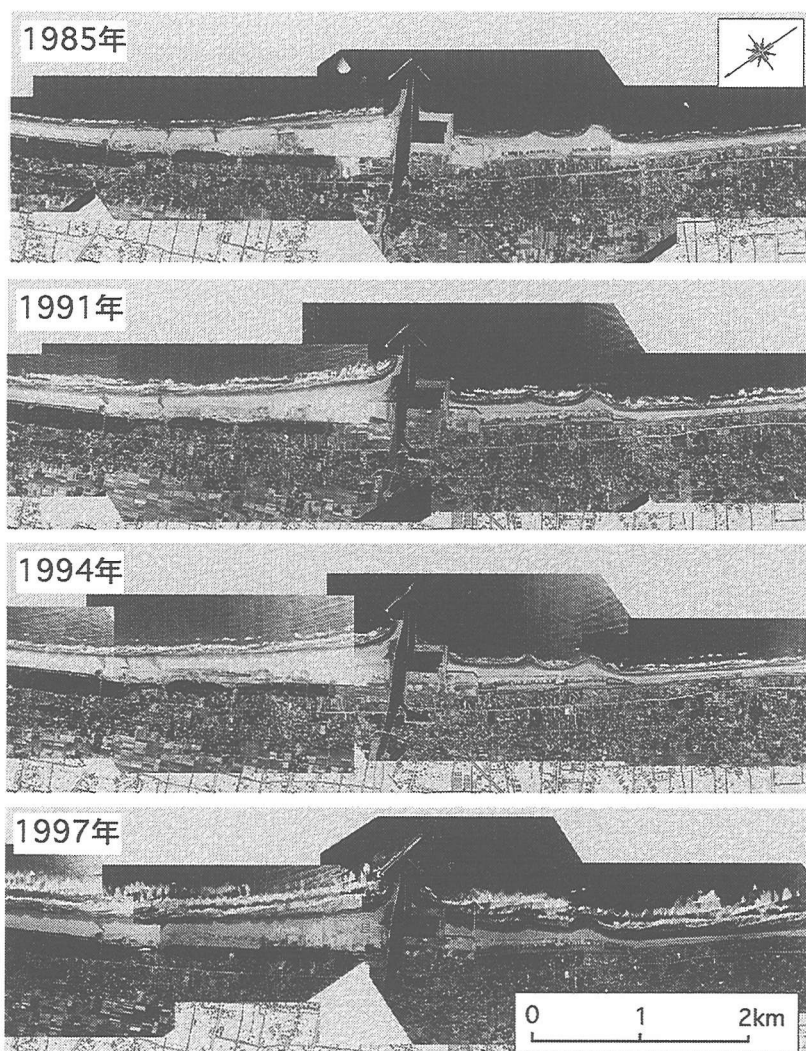


写真-3 片貝漁港周辺の空中写真（1985～1997年）

4. 汀線変化の分析

片貝漁港周辺の海浜地形のうち、防波堤南側の遮蔽域では掘り込み形式で新たな泊地の整備が行われるとともに、離岸堤や突堤の建設も行われたため複雑な地形変化が生じたが、北側区域では比較的単純な条件で地形変化が生じている。そこで防波堤北側での汀線変化を定量的に分析することにする。まず図-2に示すように、旧漁港の北端を原点に取って北向きに基線を定め、基線上に0.5kmおきに8測点を設けた。次に、写真1, 2, 3より、基線から汀線までの冲向き距離と、基線から防波堤(導流堤)先端までの冲向き距離を読みとった。ただし1961年は河口部に局所的に砂が堆積しており、これを基準とするとその影響が顕著に残されることから、1965年を基準とした汀線変化量を算出した。

1965年を基準とした汀線変化を図-3に示す。これによると、漁港の防波堤に最も近接する地点1における汀線変化量が最も大きく、32年間で332m前進したことが分かる。また、前進速度は防波堤を伸ばし始めた当初は大きかったが、徐々に小さくなっていく傾向が見られる。地点1における汀線の平均前進速度は10.4m/yrであった。防波堤から北側に離れるにしたがい汀線変化量は小さくなり、防波堤から約3.7km離れた地点8では汀線はほとんど変化していない。このことから、片貝漁港の防波堤による砂の堆積区間は、漁港から約3kmまでであると言える。

5. 汀線変化の解析解との比較および漂砂量の諸係数の比較

一方向に卓越した沿岸漂砂のある直線状の海岸に、沿岸漂砂を阻止する防波堤や突堤が造られた場合の海岸線変化の解析解は野田・橋本¹⁾に示されているように、式(1)で与えられる。

$$y(x,t) = \frac{\tan \alpha_o}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{4A_o t} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4A_o t}\right) - x\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4A_o t}}\right) \right]$$
(1)

ここに、xは突堤位置を原点として沿岸方向にとった座標、tは時間、 α_o は初期碎波角、 erfc は誤差関数である。 A_o は、沿岸漂砂量Qを碎波角 α_b と係数Fを用いて

$$Q = F \cdot \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad \text{.....(2)}$$

と表し、漂砂の移動高をhとすると、 $A_o = F/h$ で与えられる。

式(1)においてx=0のとき、

$$y(0,t) = \frac{\tan \alpha_o}{\sqrt{\pi}} \sqrt{4A_o t} = a\sqrt{t} \quad \text{.....(3)}$$

が成立する。ここで片貝漁港北側の汀線変化データが

この関係を満足するかどうか調べてみる。

片貝漁港の導流堤に原点を置いて北向きに x 軸を定め、汀線位置が式(1)で与えられるとする。いま片貝漁港の防波堤を横切る沿岸漂砂量を0としたとき、式(3)によれば防波堤付近では汀線変化量が時間の平方根に比例することになる。そこで漁港北側の防波堤に最も近い地点1における汀線変化量と時間の関係を図-4に示す。これによると、回帰直線の相関係数は0.98であり、実測値は解析解と非常に適合性が良い。また、回帰係数は59.6であるから、式(3)との比較により次式が得られる。

$$a = \frac{\tan \alpha_o}{\sqrt{\pi}} \sqrt{4A_o} = 59.6 \quad \text{.....(4)}$$

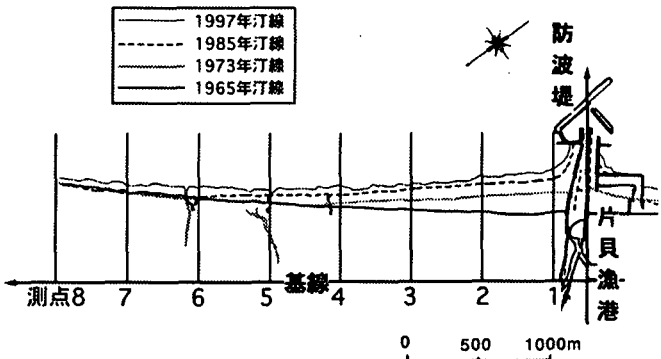


図-2 片貝漁港北部に定めた基線と測点

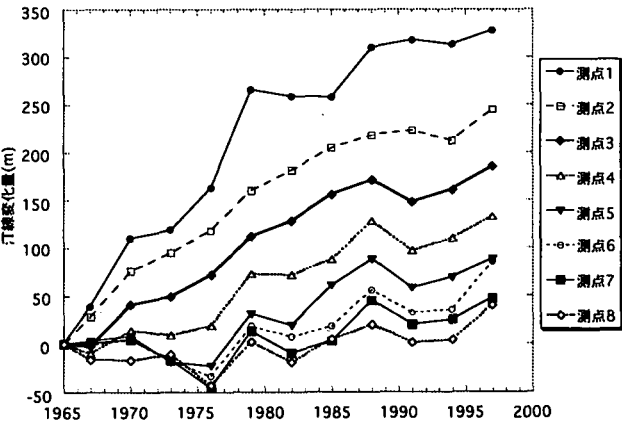


図-3 1965年を基準とした汀線変化量

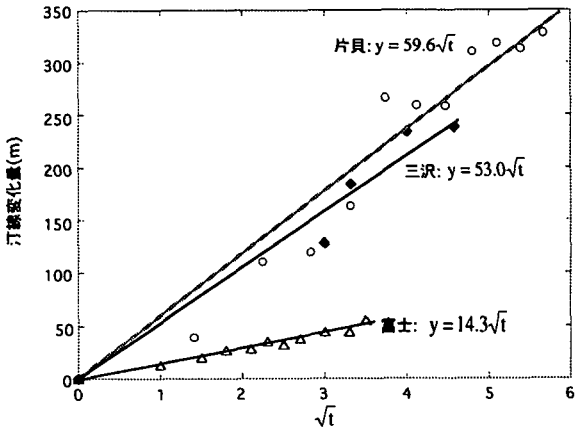


図-4 地点1における汀線変化量の経時変化

表-1 片貝, 三沢, 富士海岸の比較

	a	α_0	$A_0(m^2/yr)$	$h(m)$	$F(m^3/yr)$	$Q(m^3/yr)$	海底勾配
片貝海岸	59.6	7°	1.9×10^5	11	2.0×10^6	2.5×10^5	1/180
三沢海岸	53.0	8°	1.1×10^5	11	1.2×10^6	1.7×10^5	1/90
富士海岸	14.3	5°	2.1×10^4	13.3	2.8×10^5	2.4×10^4	1/10

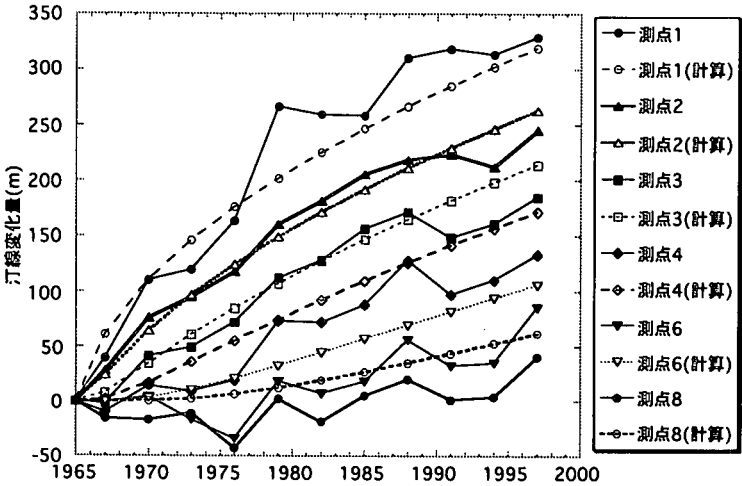


図-5 汀線変化の解析解と実測値の比較

筆者ら⁵⁾は、同様に青森県の三沢漁港周辺の海浜変形について分析し、北向きの沿岸漂砂が三沢漁港の防波堤により阻止されたことによって、防波堤の南側で三角形に前浜が広がったことを明らかにした。いまその結果を同じく図-4に示した。また、宇多²⁾は、富士川からの流出土砂が東向きに移動・堆積して形成された富士海岸の昭和放水路東側の区域について同様な検討を行っているので、そのデータも図-4に合わせて示す。これによると、三沢海岸では $a=53.0$ （相関係数0.98）であって、片貝漁港周辺と非常に近い値である。また富士海岸においては14.3と、片貝漁港や三沢海岸で得られた値の1/4程度の値となった。

式(4)では α_0 と A_0 が未知数であるが、 α_0 は人工構造物によって沿岸漂砂が阻止される前の汀線形状と、沿岸漂砂が阻止された後に形成された安定な汀線形状から求められる。そこで、片貝漁港にあっては写真-1~3に示した1970年~1997年に撮影された10枚の空中写真からそれぞれ α_0 を求めその平均値を使った。三沢漁港と富士海岸でも同様に α_0 を求めると表-1となる。これらより、式(4)から A_0 を逆算した結果が表-1である。さらに表-1にはそれぞれの海岸の海底勾配を示す。 A_0 は、単位深さ当たりの沿岸漂砂量を表しているが、緩勾配の片貝海岸や三沢海岸では A_0 が大きく、急勾配の富士海岸では小さいという特徴がある。片貝海岸や三沢海岸では海底勾配が緩いと同時に汀線付近は細砂で構成されている。これに対して富士海岸では礫浜であって、細砂の

海岸と比較して土砂の移動し易さは低い。これらによって上記の違いが現れたと考えられる。

式(1)は、任意時刻、任意点の汀線変化を与える。そこで、上述の値を用いて片貝漁港北側の各地点の汀線変化を計算し、実測値と比較した。結果を図-5に示す。計算結果は実測値とかなりよい一致を示す。

三沢海岸と富士海岸では漂砂の移動高 h が表-1のように与えられる。そこで $A_0 = F/h$ の関係から F を求めて同じく表-1に示す。さらに海岸線に施設がない段階での沿岸漂砂量は、式(2)で $\alpha_b = \alpha_0$ と置けば、初期状態での沿岸漂砂量 Q が表-1のように計算される。片貝漁港周辺において、宇多ら⁴⁾は海浜縦断形の変化より波による地形変化の限界水深 h_c が約9m、前浜上で顕著な地形変化が見られなくなる限界の高さが約2mであることを明らかにしている。漂砂の移動高は約11mと見積もることができる。したがって片貝漁港周辺での初期状態における沿岸漂砂量 Q は $2.5 \times 10^5 m^3/yr$ と推定できる。この値は宇多ら⁴⁾が推定した地質学的時間スケールから見た沿岸漂砂量約 $1.2 \times 10^5 m^3/yr$ と比較して約2倍となっているが、オーダー的には間違いのない値を示している。

6. あとがき

本研究では、数年単位で撮影された空中写真を用いて沿岸漂砂量に関するいくつかの係数を算出する方法を示した。空中写真に写された汀線形状は、時々刻々の波浪変化の影響を全て積分した形で得られるものであるがゆえに、漂砂の境界条件が大きく変化しない条件下においては、汀線の長期的変動予測にかなり高い精度で応用が可能である。また、波浪データがなくても地形変動予測が可能である点が特徴である。

参考文献

1) 野田英明・橋本 宏 (1981): 漂砂と海岸保全施設, 技報堂, pp.87-97.
2) 宇多高明 (1997): 沿岸漂砂の卓越する海岸における暗渠型放水路吐口の設計上の留意点, 海洋開発論文集, Vol.13, pp.627-632.
3) 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, p.442.
4) 宇多高明・高田 修・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼 (2000): 九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.686-690.
5) 渡辺宗介・清野聡子・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼 (2000): 青森県三沢漁港周辺の海浜変形と今後の海岸保全, 海洋開発論文集, Vol.16, pp.607-611.