

# 海岸での土砂動態：仙台湾海岸を例として

## Sediment Movement on Beaches: An Example on Sendai Coast

澤 本 正 樹

SAWAMOTO Masaki

### 1. はじめに

本年の夏期研修会の総合テーマは、「流域・海域の土砂環境」である。これを単純化して模式的に示したのが図-1である。海域と言う場合、洪水時の河川からの濁水がどのように拡散するかと言う問題を除けば、通常は水深 20m 程度以浅までが対象となり、ここで説明する海岸での土砂動態が最後の段階に相当する。すなわち海岸での土砂動態は、河川源流部での土砂生産、河道部での流送土砂過程、河口部での土砂輸送等の河川流域での全ての土砂動態の影響(場合によってはしわ寄せ)を受け、かつ、海岸での崖侵食などの海岸特有の過程を含み、複雑な様相を呈している。これらのうち、個々の問題点は、本研修会の他の講師により詳しく講義されている。ここではそれらの結果を海岸からの視点で見た場合にどのように解釈されるかについて、仙台湾海岸での調査結果を例示しながら説明する。

海岸での土砂動態を考える場合に特徴的なことは、その時間スケールの幅の広さである。洪水による河口テラス形成や人工構造物による海浜変形を扱う場合には洪水継続時間・時化の継続時間(数 10 時間)が対象となる。しかし、供給土砂量の観点からするとより長い間隔での洪水頻度も考えなくてはならない。また、通常、海岸侵食の問題が顕在化したときには対象海岸(数～数 10km)での土砂収支を考える。このとき考えている時間スケールは数～数 10 年である。しかし、その海岸の現在の姿をもたらしたのは、今から約 5,000 年前の縄文の海進以降の海水準の低下と沖積平野の発達が大きな背景として存在している。また、さらにさかのぼると、今から 18,000 年前の最終氷期には海面は現在より約 100m 低い時期があり、それ以降の海面上昇の過程は海底地形や海底での土砂分布にその履歴を見ることができる。

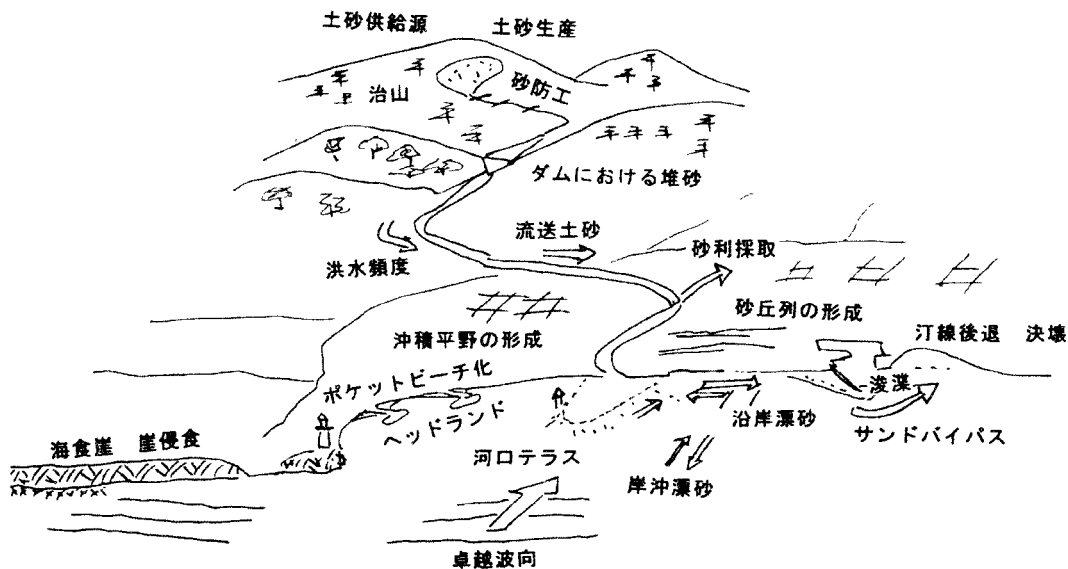
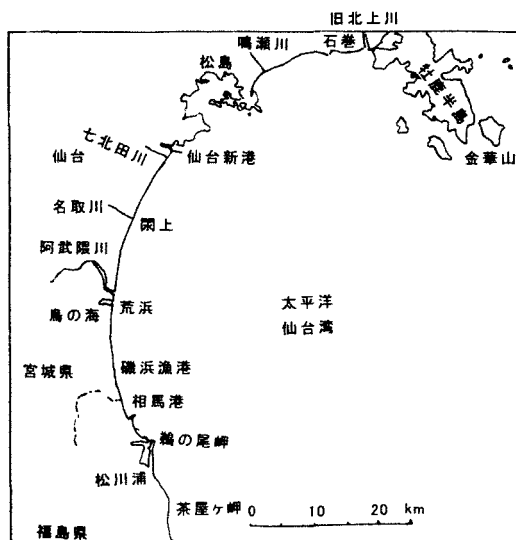


図-1 土砂動態の模式図

## 2. 仙台湾海岸の概要

仙台湾海岸は、牡鹿半島先端から石巻・松島までの北部海岸と仙台南港から福島県鶴の尾岬までの南部海岸とに分けられる。北部海岸と南部海岸は漂砂系としては独立していると考えられる。ここでは多くの調査の行われている南部海岸に話を限ることにする。

流入する主要な河川は南から一級河川阿武隈川、一級河川名取川、二級河川七北田川である。このうち名取川と七北田川の河口は往事北に大きく偏向していた。現在、その旧河道部分は井戸浦、蒲生干潟という潟となっている。南端の鶴の尾岬の南にも潟湖松川浦と太平洋とを境する砂浜がある。その南、茶屋ヶ岬より南はいわき市まで海食崖と小さな砂浜が断続的に続いている。これら河川からの供給土砂と福島県下の海食崖の侵食は後述するように、仙台湾海岸の形成に大きく関わっている。



図－2 仙台湾海岸

平均波の方向・波高は表－1に示すとおりである。南部海岸中央の荒浜では、春期・夏期はおおむね正面から来襲するがややS方向にかたより、秋期・冬期はNE方向にかたよる傾向がある。北に行くに従い冬の北東からの波が牡鹿半島による遮蔽の影響を受ける。

表－1 各地点でのエネルギー平均波

| 地 点   | 仙台港      | 荒浜沖      | 相馬港     |
|-------|----------|----------|---------|
| 波高(m) | 1.25     | 1.06     | 1.17    |
| 周期(s) | 8.5      | 9.9      | 8.6     |
| 波 向   | N 136° E | N 111° E | N 83° E |

人工構造物としては、北端の仙台南港防波堤、名取川河口右岸の関上(ゆりあげ)漁港、阿武隈川河口の南、鳥の海への入り口となる荒浜漁港防波堤、磯浜漁港、南端の相馬港防波堤と松川浦漁港防波堤が挙げられる。これら構造物により仙台湾海岸は、名取川河口以北、名取川から阿武隈川河口・鳥の海まで、阿武隈川河口・鳥の海から磯浜漁港まで、磯浜漁港以南という具合に大きく4つに分断されている。このことも土砂動態を考える上で重要である。

## 3. 今、仙台湾海岸でなにが起きているのか

仙台湾海岸は長く弧を引く豊かな海岸であったが、最近いくつかの海岸侵食の被災が生じている。主なものを表－2に示す。

表－2 最近の主な海岸災害

| 発 生 年 月     | 海 岸 名 | 原 因   | 被 災 内 容                 |
|-------------|-------|-------|-------------------------|
| 1983.8(S58) | 中浜海岸  | 台風5号  | 前浜洗掘による海岸堤防の被災(延長1195m) |
| 1987.9(S62) | 蒲崎海岸  | 台風13号 | 前浜洗掘による被災(内堤防決壊延長222m)  |
| 1991.9(H3)  | 中浜海岸  | 台風18号 | 前浜洗掘による災害(根固工沈下延長480m)  |
| "           | 蒲崎海岸  | "     | 前浜洗掘による災害(消波堤の沈下延長167m) |

ここで、中浜海岸は磯浜漁港の北、蒲崎海岸は阿武隈川河口の北にあたる。単純に考えると、中浜海岸では隣接する磯浜漁港の影響、蒲崎海岸では阿武隈川からの流出土砂の減少にその原因を帰しやすいが、実際にはより根の深い仙台湾海岸全域、さらにその南の福島県下の崖海岸にまで関わる問題であることがだんだんわかってきた。しかも、その原因は必ずしも仙台湾海岸特有のものではなく、日本各地でしばしば見られるものでもある。以下、仙台湾での海岸調査結果を例に引きながら海岸の見方について説明する。

まず、海岸線の変化から見てみよう。海岸線の変化を見るには古地図を使う方法と空中写真を使う方法がある。1945 年以前の陸軍参謀本部の地図も国土地理院より入手可能である。しかし、図版の改訂は都市部などの変化の大きい部分では頻繁に行われているが、海岸線の測量は希にしか行われぬ。例えば、今回対象としている海岸で、1945 年以前で利用できるものは、1907 年(明治 40 年)と 1928 年(昭和 3 年)のものに限られる。空中写真は 1947-48 年に米軍が日本全土の撮影を行っており、これが種々の解析の基準写真として利用できる。昭和 30 年代以降は国土地理院により定期的な撮影が行われており、地形図を利用するよりは空中写真を利用の方が好ましいと言えよう。これらは日本地図センターから入手できる。

図-3 には空中写真より読みとった海岸線の変化を示す。これによるといくつかの重要な地点があること

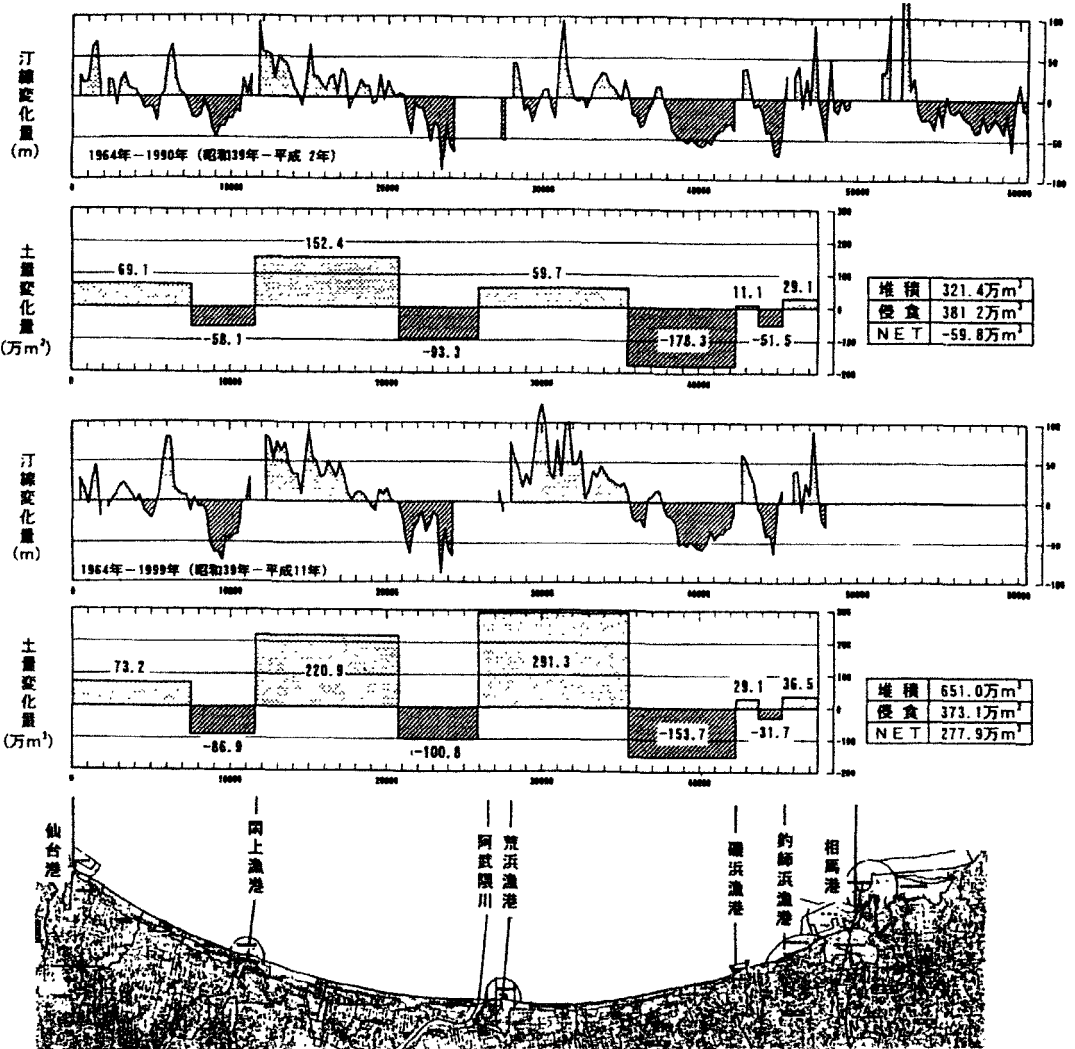


図-3 海岸線の変化 (上段1964-1990年,下段1964-1999年)

がわかる。以下、南からそれを挙げてゆく。

福島県下崖海岸から仙台湾に入る地点に鵜の尾岬と松川浦漁港がある(写真-1)。写真中央よりやや左下にあたるのが鵜の尾岬である。その上に松川浦漁港と相馬港があるが、それらの防波堤先端水深は砂の移動限界より大きい。防波堤建設前の海岸線は写真で鵜の尾岬から上に黒く撮っている部分(松林)の縁である。松川浦漁港の防波堤手前に白く三角形に見える部分は防波堤砂建設後に堆積した砂である。これが図-3の上段右端でスケールアウトしている堆積域に対応している。この部分の深浅図、および、深浅図から読みとった堆積土砂量の経年変化を図-4に示す。鵜の尾岬から左に延びる砂浜は1964-1990年では汀線の後退が見られ、大きく見た場合にはこの福島県海岸で漂砂は減少傾向にある。なのに、この地点のみ局所的に年 $16.6\text{万m}^3$ の土砂が堆積していることになる。これはどこから来た砂なのか? 結論から言うと、これは福島県下の崖海岸の侵食された土砂が北向き漂砂で運ばれ、鵜の尾岬を回り込んだところで松川浦漁港防波堤を越えられずに堆積したものである。防波堤建設前は、これだけの砂が仙台湾海岸に供給されていたことになる。この事と、この $16.6\text{万m}^3/\text{年}$ という値は仙台湾海岸の土砂動態を論じる上で重要なものである。

仙台湾海岸に入ると、磯浜漁港、荒浜漁港・阿武隈川河口、関上漁港が海岸変形の区切り点となっていることに気づく。

図-4と同様な堆積土砂量の解析結果を、図-5(a),(b),(c)に示す。磯浜漁港 $0.9\text{万m}^3/\text{yr}$ 、荒浜漁港で $3.2\text{万m}^3/\text{yr}$ 、関上漁港で $3.7\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂の堆積がみられる。松川浦漁港における堆積は福島海岸から供給されていた砂が防波堤で阻止されたと考

えることができるが、この3つの漁港の場合には一方向に動いていた漂砂が単純にせき止められて土砂の堆積が生じたと考えるだけでは、土砂動態を説明したことにはならないし、これからの対策を考える上でも役に立たない。これら構造物は、構造物建設前にはその前面を自由に行き来していた、この海岸では南北に動いていた漂砂を裁ち切り、それまで一体でバランスしていた構造物両側の海岸を別個のバランス関係に引き

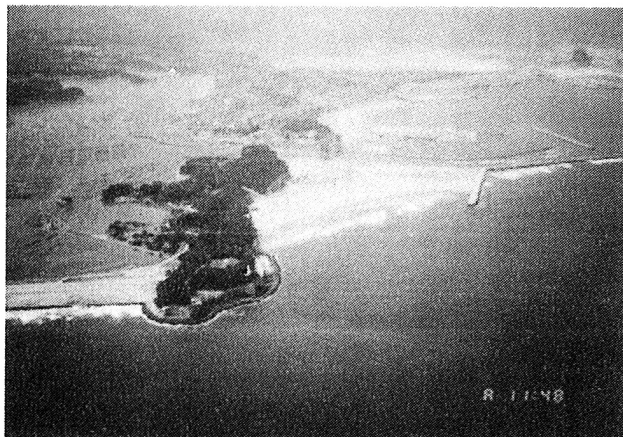


写真-1 鵜の尾岬と松川浦漁港

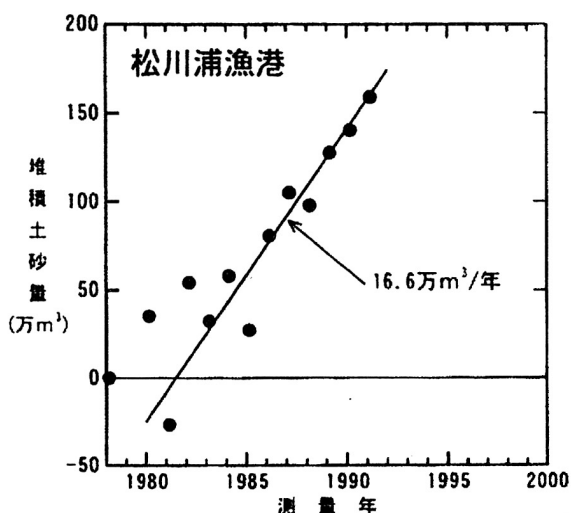
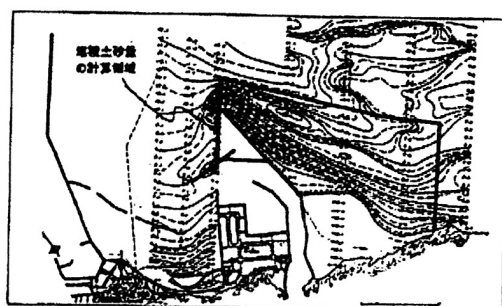
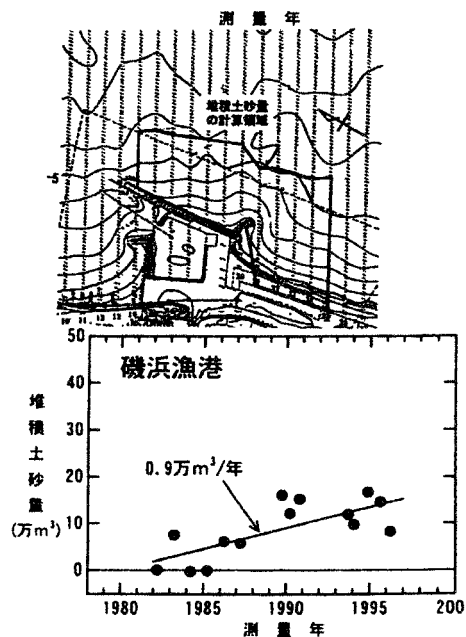
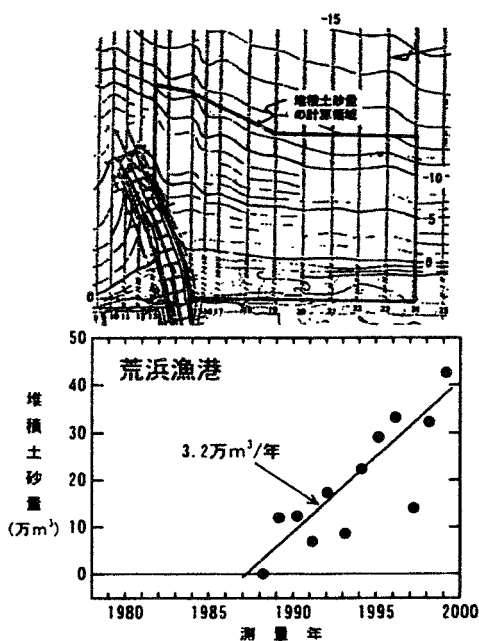


図-4 松川浦漁港における砂の堆積



(a) 磯浜漁港における土砂堆積



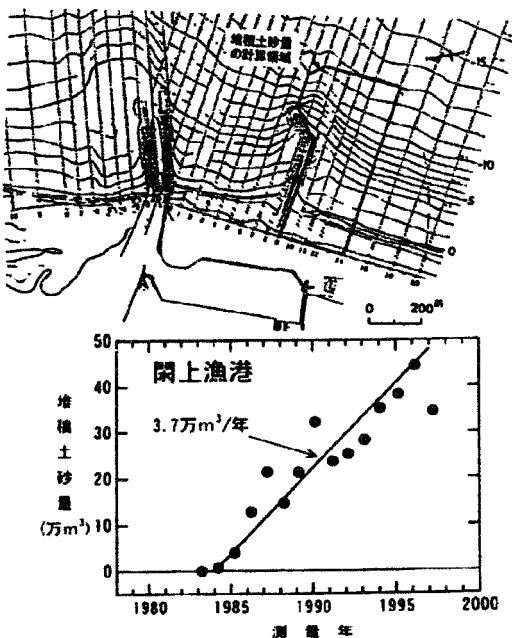
(b) 荒浜漁港における土砂堆積

図-5 大規模構造物周辺での土砂堆積

はなす効果をもたらしているのである。

結局、鵜の尾岬から仙台港までの一体でバランスしていた仙台湾海岸は、相馬から磯浜漁港まで、磯浜漁港から荒浜漁港まで、阿武隈川河口から関上漁港まで、名取川河口から仙台新港までの4つの海岸に切り離され、それらの個々の海岸が独自でバランスを保とうとしていと考えられる。ここで言うバランスとは、土砂動態というよりは海岸線形状と考えるのがよい。通常、一つの漂砂系を構成する海岸は、来襲波を真正面に見るような一つの弧状海岸となる。図-2で概観できる鵜の尾岬から仙台新港までの弧がこれに相当する。このような海岸を構造物で分断した場合、その分断された程度に従って、個々の浜は単独で弧状海岸を形成するような方向へ変形する。仙台湾海岸では、4つの部分に分断されたことにより、4つの海岸が別個の弧状海岸を形成するような方向へ変形が進むことになる。4つの弧は構造物を境とし

てその左右(南北)で必然的に不連続となる。それが侵食になるのか堆積になるのかは、浜全体の来襲波に対する向き、すなわち局所的な卓越漂砂の向きと、その海岸での土砂供給量の多寡に左右される。仙台湾海岸の場合、図-3に見られるように磯浜漁港・荒浜漁港間、および、阿武隈川河口・関上漁港の間では、全体的に浜の砂が北によっていることが特に顕著に見られる。



(c) 関上漁港における土砂堆積

#### 4. 仙台湾海岸への土砂供給源・供給量

##### 4.1 河川からの供砂土砂

海岸への土砂供給源としては河川がもっともよく知られている。日本の多くの海岸平野は、5,000 年前の縄文の海進以降の海水準の低下に伴い、河川の洪水氾濫で沖積平野として発達してきたものである。この海岸に流入する主要な河川は阿武隈川、名取川、七北田川の3河川である。写真-2には1947年の阿武隈川河口付近の様子を示す。かつて河川が乱流し、平野を形成していった痕跡を見ることができる。これらの乱流の跡は数百年前の物で、阿武隈川の河口位置は江戸時代に入ってから現在の位置と変わっていない。この海岸平野の発達についての詳細は本研修会の松本講師の講演を参照されたい。

真野・沢本(1998)は松本の資料をもとにこの沖積平野の厚さと拡がりから、縄文の海進以降のここ5,000年間で阿武隈川から供給された土砂量は平均  $80,000 \text{ m}^3 / \text{yr}$  と推算している。これは阿武隈川河口部での沿岸漂砂量の約2倍に相当する。

河川から海岸への土砂供給は定常的に行われているわけではない。通常は、洪水時に集中的に排出される。阿武隈川は1986年に既往最大の洪水を経験している。図-6はその際に河口に形成された河口テラスを示す。a) は洪水の1ヶ月後の深浅図、b) は洪水前の深浅図との差から計算した堆積土砂の分布を示す。水深約4mの河口テラスが沖に700mほどにまで広がっている様子がわかる。下の堆積量の積分は  $400,000 \text{ m}^3$  に達する。ただ、土

砂量評価の難しいところは、この量が全て海岸に供給されたわけではないという点にある。洪水によって形成された河口テラスの土砂は、河川上流から排出された土砂とともに洪水時に河口開口部の侵食と河口砂州を侵食した砂を含んでいる。洪水後の数ヶ月ないし数年でこの河口テラスの砂のかなりの部分が岸沖漂砂により河口部の断面縮小と河口砂州に戻される。河口砂州は洪水時に大きくフラッシュされるが洪水の数ヶ月後に極大になる。洪水の大きさに従ってその極大化が顕著になるという一見奇妙な動態が観察される。言い換えると河川は河口部と河口テラスとにかなり大きな土砂ポケットを持っており、そこから両側の海岸部に出ていく過程はかなり複雑である。このポケットの容量は阿武隈川の場合、河口砂州の体積まで考えると  $1,000,000 \text{ m}^3$  を超え、長期の平均排出土砂量の数十年分に相当することになる。



写真-2 阿武隈川河口付近(1947年) 国土地理院提供

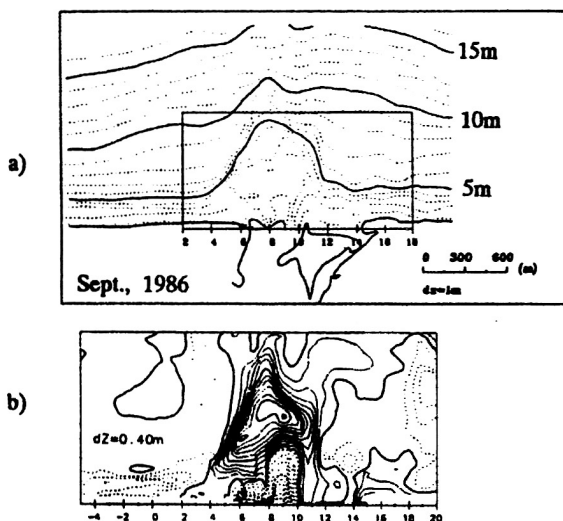


図-6 1986年8月出水による河口テラスの形成

河川から海岸への土砂供給の観点からはここ数十年での土砂量が重要である。日本の河川・海岸で言うところ、明治年間に極めて土砂供給の大きな時期があり、その後、これが減少し続けているという現実がある。これは、江戸時代に山林が厳しく管理されたのに対し、明治維新後の富国強兵策により、山林所有者のかなり自由な伐採が進み、極めて山の荒れた時期があったこと、その後、1950年代以降、治山・砂防が進み、現在、極めて土砂の出にくい環境にあるためである。

さらに、河川での土砂動態を見る場合、山地での土砂供給と流送土砂の間には、土砂の河床での堆積・侵食という時間遅れをもたらす効果を考えなければならない。真野らは洪水時の阿武隈川の濁度の測定を行っている。それによると河道に沿っての土砂輸送量は中流部の蓬萊・信夫の両ダムを通過すると跳ね上がることが観測されている。途中、土砂排出の大きな支流の合流はなく、これは本川で発生したものである。蓬萊・信夫の両ダムは発電用の低落差ダムであり、ダム堆砂量は建設当初の1938年より詳細に調べられている。両ダム合計の堆砂量の経年変化を図-7に示す。ダム建設当初から年間約100,000 m<sup>3</sup>の堆砂があり、その後、15年間ほど一定で推移し、1970年代半ばからは62,000 m<sup>3</sup>程度のペースで減り続けている。

1970年代は河川の流出形態が変わり、総降雨量に対し、ピーク流量が大きくなり出した頃に相当する。これらは河道改修ならびに上流域での砂防工事の進展が効果を顕し出したことによる。

別の観点から流送土砂を推算してみよう。図-8は1985年を起点とする流送土砂量の積算値を示す。図中、黒丸は浮遊砂量公式より各出水での流送土砂量を計算した値、白丸は河道での深浅測量結果から土砂収支を求め、それから推算した値である。この計算では1986年の最大洪水で係数の検定をしているが、その後についても、両者の間に良好な一致がみられる。これによると10年間平均で、年間200,000 m<sup>3</sup>程度の土砂が流送されていることになる。

いくつかの土砂量が推算されたが、では海岸での土砂収支を考える場合、どの値を採用したら良いのだろうか。ダムでの堆積減少率62,000 m<sup>3</sup>/yrはこの20年間で比較的安定した値である。さらに洪水時の両ダム通過後の濁度の増加を堆積減少量に換算すると67,000 m<sup>3</sup>/年と、この値に近い値が得られる。これらより、阿武隈川で中期的な平均としては62,000 m<sup>3</sup>/yr程度が出てきていると考えるのが適当であろう。

海岸から見る場合、もう一つ考えなければならないことがある。河川で扱っている土砂量は粘土・シルト

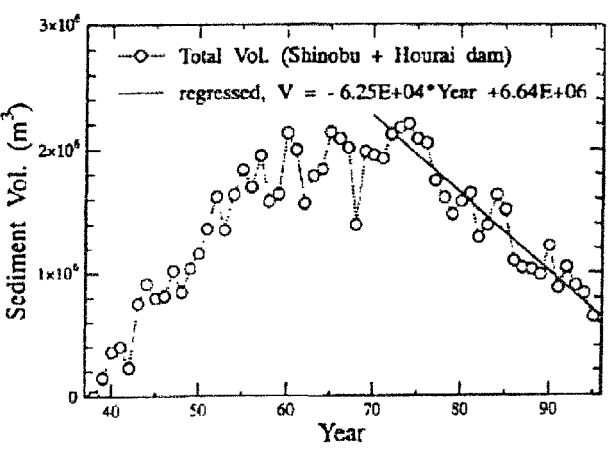


図-7 蓬萊・信夫ダム堆砂量の経年変化(真野・沢本1998)

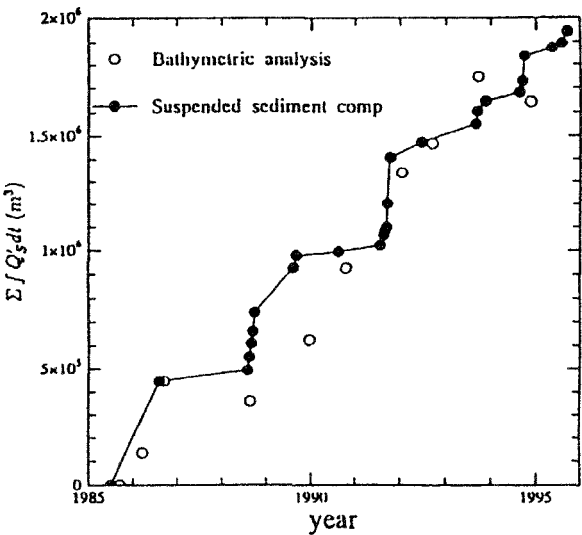


図-8 流送土砂量の積算値

・砂を全て含んだ総量である。このうち粘土・シルト分は洪水時に沖合に流され、海浜に寄与することはなく、海岸での土砂収支で問題となるのは粒径の粗い砂分のみである。図-9には真野・沢本(1998)による洪水時の濁水に含まれる土砂の粒度分布を示してある。黒丸が河口近くの岩沼、白丸が福島での値である。中央粒径はいずれも0.02mm程度で砂分は岩沼で15%程度である。これを先ほどの値に乘ずると、年間13,000 m<sup>3</sup>となる。これが現在阿武隈川から海岸に出ていく砂の量と考えられる。これは長期的に見た値の1/7程度である。また、後述の沿岸漂砂量と比べても小さな値である。言い換えると、海岸での土砂動態の議論の中で河川の役割はあまり大きくはなく、“Wave Dominated”な海岸とすることができる。

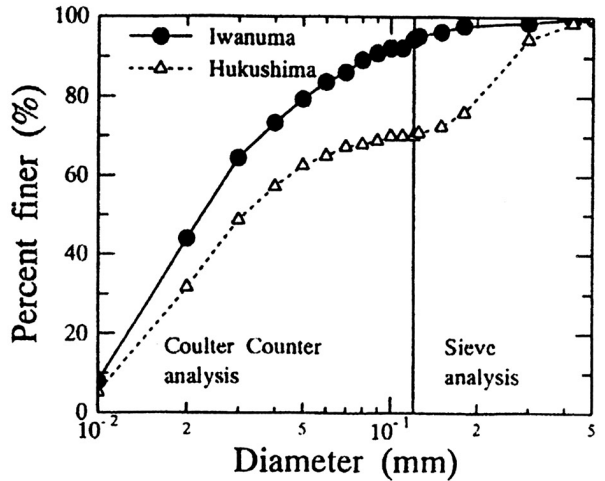


図-9 流送土砂の粒径加積曲線

河床の変動測量からは別の値も得られる。それによるとその値は少し大きくなる。名取川、七北田川についてもいろいろな面から土砂供給量の検討を行っている。河川のスケールからして当然阿武隈川よりは小さな値が得られており、海岸に対する影響はさらに小さい。これらをまとめると

阿武隈川 年間 20,000 m<sup>3</sup> 程度  
 名取川 年間 10,000 m<sup>3</sup> 以下  
 七北田川 年間 2,000 m<sup>3</sup> 程度

となる。

河川からの土砂排出を考える場合、その途中での砂利採取を無視することはできない。図-10には阿武隈川での砂利採取の経年変化を示す。破線は許可量、実線は採取実績を表している。日本の高度経済成長に合わせ1960年代の中程から急激に増加し1972年には500,000 m<sup>3</sup>/yrに至った。このような急激な砂利採取は河床低下やそれに伴う取水障害などをもたらした。1975年には特定採取制度が実施されるようになり、以降やや減少したが、それでも300,000 m<sup>3</sup>/yrを超えている。大事なことは、この量がこれまで様々な方法で推測してきた河川の土砂供給量・流送量よりもはるかに大きかったということである。河川・海岸一貫の土砂動態を理解する上で、極めて重要である。

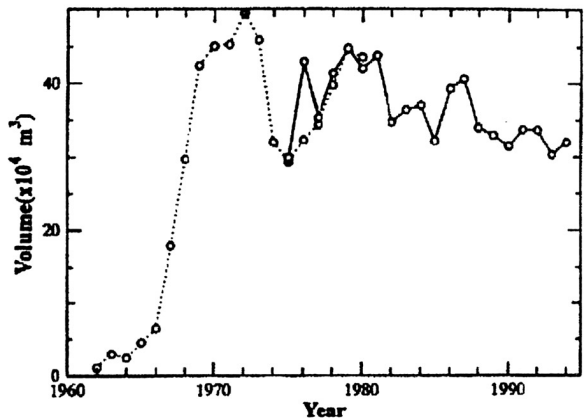


図-10 河道からの砂利採取量



写真-3 福島県熊川河口

4. 2 福島県下崖海岸侵食による土砂供給

前に述べたように松川浦漁港防波堤には年間 160,000 m<sup>3</sup> の土砂の堆積がある。これは福島県下の崖海岸の侵食からもたらされたものである。この様子をもう一度見直してみよう。

写真-3 には崖海岸の一例を示す。未固結の堆積岩の台地が海にせまり、そこに刻まれた谷筋が海に出る地点に小さな砂浜がある。崖はその基部を波に洗掘され窪みを作り、次にその上部が崩壊する。海岸の前は水深の小さな広い海食棚が形成され、沿岸漂砂を阻止するような岬なり海谷も残されていない。それ故、崩壊した土砂は沿岸漂砂で県下北半分は北に、南部は南に運びさられる、という一連のプロセスの繰り返しを続けている。近年、崖侵食に対する対策が実施されており、崖の基部に消波ブロックが設置されている箇所が増えている。

崖の侵食は、豊島ら(1973)によると、1945-1971 年の間で、崖の後退速度 1 m 内外、侵食土砂量 248,000 m<sup>3</sup>/yr 程度である。また、Mano・Suzuki(1999)の最近の調査(1963-1991)結果は表-3 にまとめてある。表中の崖番号は図-11 に示す地点である。侵食土砂量は、松川浦漁港での堆積量と比較して妥当な値であろう。崖後退は最近遅くなっているが、いまだに年1,2m あると考えられる。この後退速度  $q$  は、入射波エネルギーフラックス  $F$  と、また崖を構成する岩石の Young 率と良い相関があることが Mano ら(1999)により確かめられている。

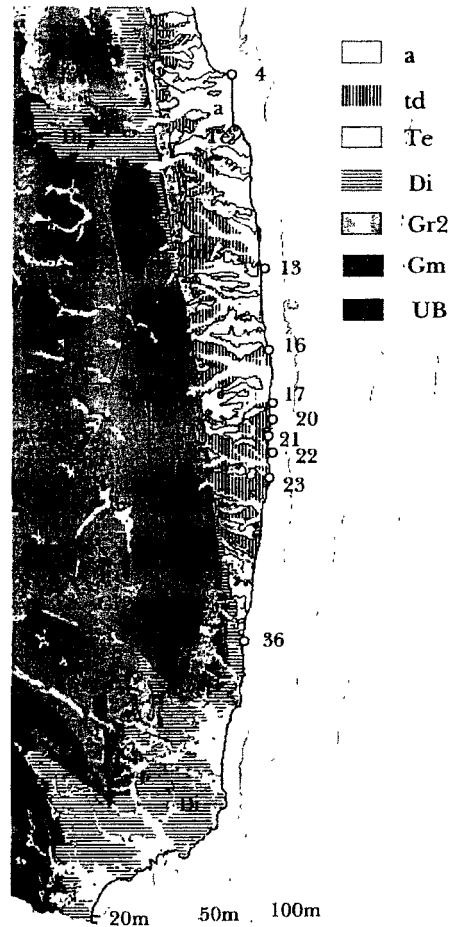


図-11 Cliff-pointの位置

表-3 侵食崖の特性

| Cliff point | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $v_p$<br>(m/s) | $E$<br>(10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> ) | $q$<br>(m/year) | $F$<br>(10 <sup>11</sup> J/year/m) | $L$<br>(m) |
|-------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|------------|
| 4           | 1240                           | 1020           | 1.08                                       | 0.35            | 1.55                               | 20         |
| 13          | 1130                           | 769            | 0.56                                       | 2.12            | 2.43                               | 18         |
| 16          | 1230                           | 795            | 0.65                                       | 1.56            | 3.44                               | 20         |
| 17          | 1130                           | 886            | 0.74                                       | 3.22            | 4.79                               | 20         |
| 20          | 1050                           | 796            | 0.56                                       | 1.86            | 2.75                               | 18         |
| 21          | 1210                           | 982            | 0.97                                       | 1.08            | 2.09                               | 20         |
| 22          | 1280                           | 929            | 0.92                                       | 0.92            | 2.81                               | 20         |
| 23          | 1110                           | 755            | 0.53                                       | 2.06            | 2.83                               | 25         |
| 36          | 1520                           | 1350           | 2.31                                       | 1.03            | 3.55                               | 30         |

$\rho$  : 岩石密度,  $v_p$  : 岩石の音波速度,  $E$  : Young 率,  $q$  : 崖の後退速度,  
 $F$  : 来襲波エネルギーフラックス,  $L$  : 崖高さ

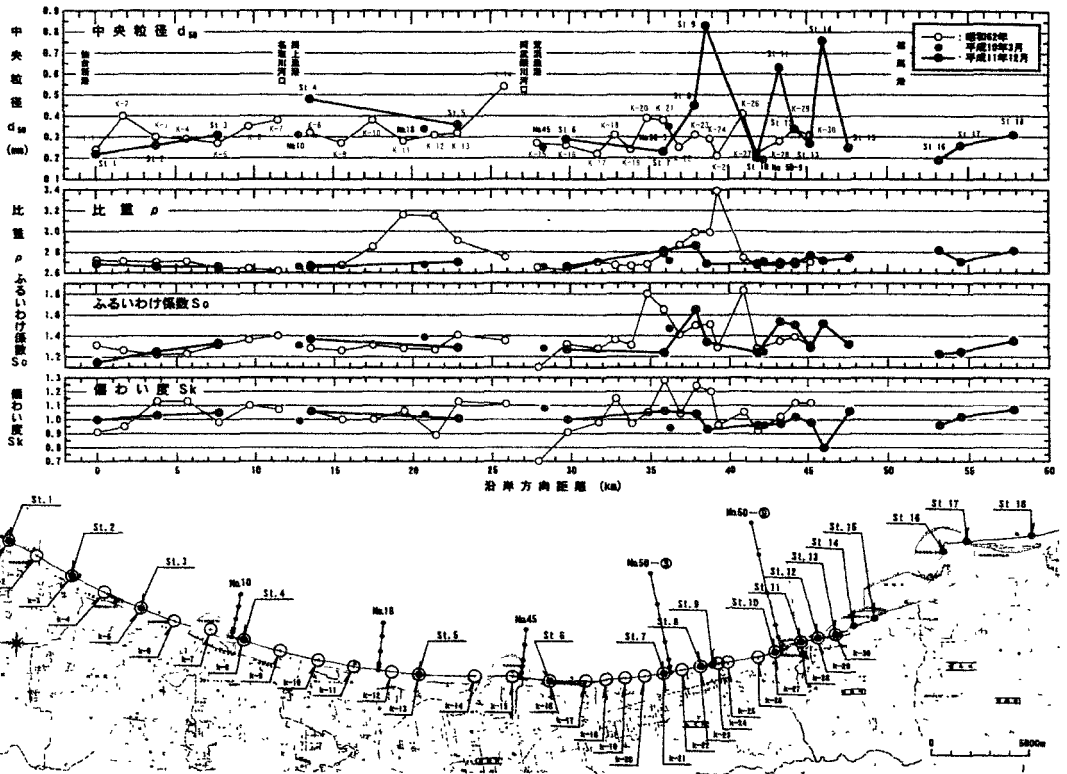


図-1 2 仙台湾海岸における汀線部の底質特性

## 5. 海岸をその砂粒から見る

海岸調査で底質調査は最も基本的な調査である。ここでは仙台湾海岸での底質調査の結果と前節の海岸変形あるいは土砂供給源との関連で見てみよう。

図-12は仙台湾海岸汀線部での底質粒径調査の例を示す。上から 50%粒径  $d_{50}$ 、比重  $\rho$ 、ふるいわけ係数  $S_o = (d_{75}/d_{25})^{1/2}$ 、偏歪度  $S_k$  である。これらの指標は土砂供給源から移動方向に一定の傾向を持つことが多い。阿武隈川河口で粒径が大きくなっていること、名取川河口から北に向かって粒径が小さくなっていることなどがその例である。ただし、それも常に明瞭に見られるわけではなく、ここの例に見られるように調査の度毎にかなり大きく変動することを認識しておく必要もある。

20km 地点や 40km 地点に通常の岩石の比重より大きな値があるが、これは砂中の砂鉄が波により集積している地点である。現地へ行くと真っ黒にタールを流したような浜になっている。より詳細に見るには

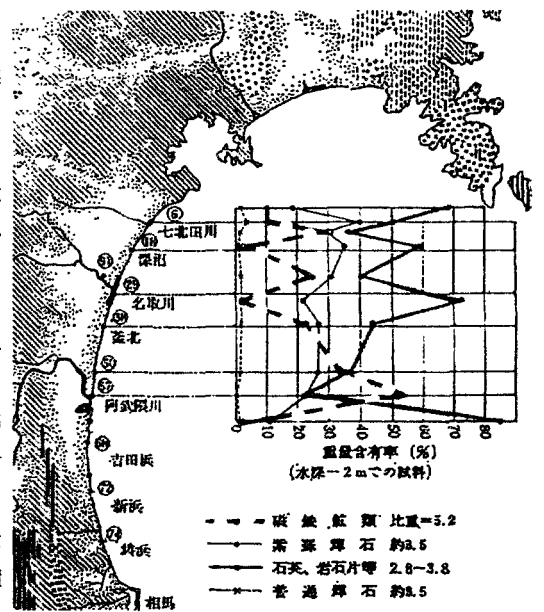


図-1 3 重鉱物含有率の分布

鉱物分析が有効である。図-13 にはその一例を示す。阿武隈川河口のすぐ南では石英質の砂であるが、阿武隈川河口で比重 5.2 の磁鉄鉱が急激に増加し、さらに北に行くとまた磁鉄鉱が減り石英質が回復している様子を読むことができる。これは磁鉄鉱が阿武隈川河口から海岸に供給され、北向き漂砂で運ばれるうちに失われていくということを反映している。

鉱物成分の違いは砂の色にも反映される。Sawamoto ら(1994)は砂の色のスペクトルの変化から砂の供給源を探る方法等を、この仙台湾海岸を例にして検討している。砂の色は測定波長の反射率を成分の強さとするベクトル値として表すことができる。その値をそのまま使うと煩雑なので主成分分析で情報を集約する。図-14 にその結果を示す。色のスペクトルと言っても、全波長が独立に情報を持つわけではなく、第1主成分：明るさ(78%)、第2主成分：色調(14%)、第3主成分：赤み度(2.4%)、で表現しうる。図-15 にはこの主成分の沿岸方向分布を示す。第1主成分(明るさ)では、阿武隈川河口の北に極めて暗い部分があることがわかる。これは前述の比重の大きな地点、磁鉄鉱の多い部分に相当する。この部分は第2成分で見ると各波長が均等になる無色の領域にもなっている。また、阿武隈川河口の南に比較的明るい砂が存在する。七北田川河口の北には第2,3成分で特徴的な砂が存在していることもわかる。

図-16 には阿武隈川・名取川・七北田川河口内およびさらに南の砂がどの程度の割合で混合しているかを計算した結果を示す。各河口が砂の供給源として一つの区切りとなっていること、七北田川の成分がほとんどないことなどが明瞭に読みとれる。

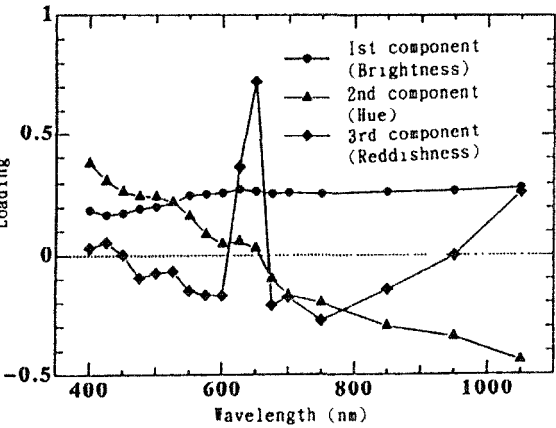


図-14 砂の色の主成分ベクトル

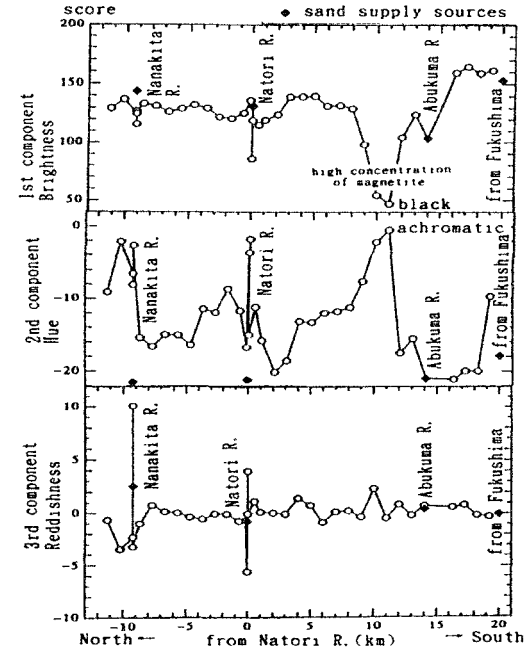


図-15 色の各種成分の沿岸分布

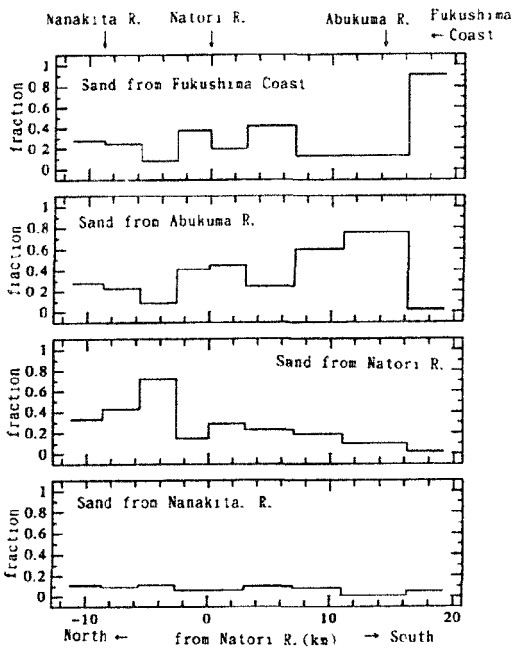


図-16 色による供給源推定

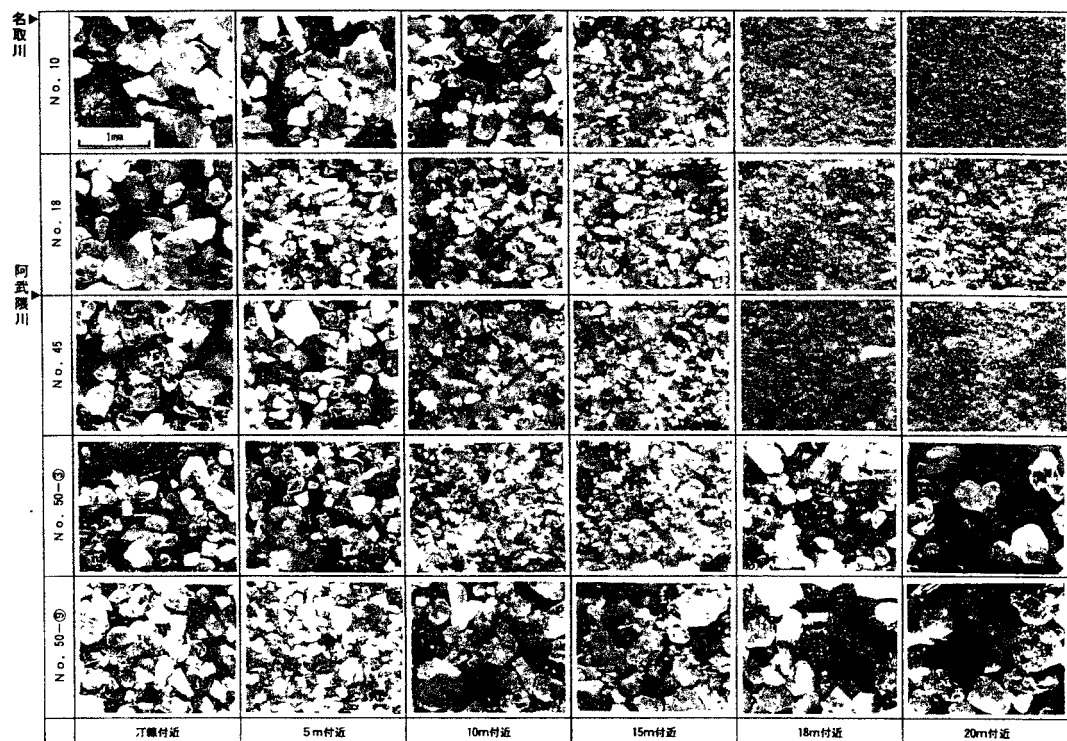


写真-4 底質のサンプル

写真-4には底質のサンプルを示す。縦方向は、名取川河口から阿武隈川河口を経て、磯浜漁港近くまでの沿岸方向、横方向は汀線付近から水深5mおきに20mまでのマトリックスになっている。

通常の底質調査は汀線付近のみで行われるが、岸沖方向を考えるとさらに複雑となる。特にこの仙台湾沿岸では一見奇妙な粒径分布が見られる。と言うのは、砂浜海岸において沿岸漂砂・岸沖漂砂で縦断面がよく変化するのは、波による砂の移動限界水深より浅い範囲である。その値は8ないし10mと記憶しておくが良い。粒径も砕波点より沖に向かうに従って次第に小さくなる。移動限界水深より深い沿岸部の海底では洪水時河口から浮遊状態で排出された粒径の小さなシルト・粘土等の濁質がゆっくりと堆積し、海底表面を覆っているというのが通常見られるパターンである。仙台湾海岸でも名取川河口沖、阿武隈川河口沖などの北部海岸では沖にシルトの堆積が見られる。

ところが上の写真の下2段に見られるように、磯浜近くでは沖に向かうに従って粒径が大きくなり、水深15mから20mにかけて0.8mm程度の粗い砂が広く分布している。これらの砂は波によって動くことはできない大きさであり、基盤岩層の谷筋を埋める形で存在している。これらの砂がこの部分に堆積した過程は不明であるが、少なくとも現在の地形・土砂供給・波浪条件では説明することができない。松本(2001)の仙台湾の発達の講義にあるように、5,000年前の縄文の海進よりさらにさかのぼりと、最終氷期海水準が100m以上下がっていた時期がある。その後氷期終了にともなう温暖化で現在の水深100mあたりの標高から順次海岸地形を形成しつつ縄文の海進まで海水準が上昇してきた。これらの砂もその過程の中で今の位置にもたらされ、取り残された名残であるものと推測される。

## 6. 波と漂砂量・海岸地形

波によって砂が移動する現象あるいは移動する砂そのものを漂砂という。その実態は、地形変動解析、土砂収支解析、蛍光砂調査などから把握する。また、漂砂量の予測には、与えられた地形での来襲波の屈折計算、砕波点の評価、漂砂量公式の適用といった演繹的なアプローチが可能である。港湾や突堤建設によって引き起こされる地形変形には、このような演繹的なアプローチでの3次元解析が可能である。その場合、重要となる時間スケールは1つの時化程度と考えてよい。一方、長期的な侵食傾向の評価などではもっと単純化した沿岸漂砂の解析が行われる。よく使われる One-Line-Model などがこれに相当する。

漂砂はその方向から、概念的に沿岸漂砂と岸沖漂砂とに分けられる。しかし、この二つは、交互あるいは並行して海浜変動を引き起こし、実態は複雑である。図-17にその一例を示す。これは名取川河口導流堤砂岸から 1,250 m 地点での汀線位置を空中写真から読みとったものを経時的に表したものである。長期的には年 1m 程度の汀線の後退がみられる。これは長期的な来襲波の統計的性質から決まる沿岸漂砂のトレンドでもたらされたものである。このトレンド

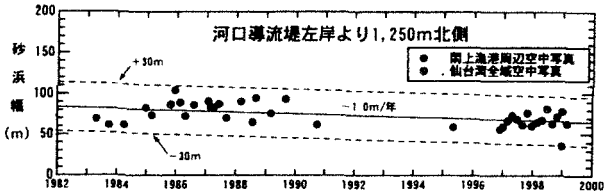


図-1 7 海浜変動の一例

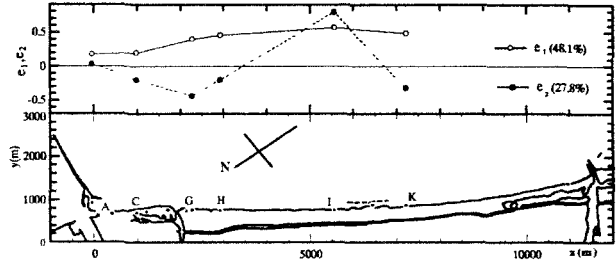


図-1 8 名取川河口・仙台新港間の経験的固有関数

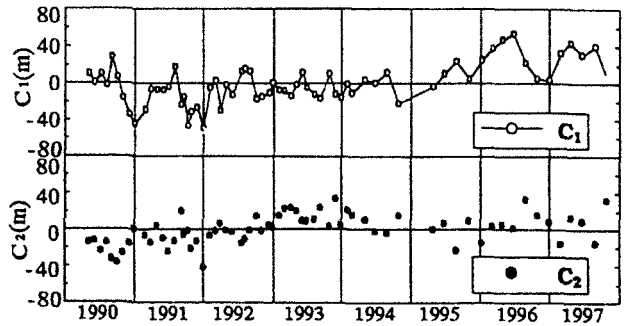


図-1 9 固有関数のScore

ドの上に振幅 40cm 程度の変動が重畳している。これは来襲波の方向・強さに応じて、砂が岸沖に変動したり、あるいは漂砂系の中で左右(ここでは南北)に行き来していることに相当している。

田中ら(森・田中 1998, 永澤・田中 2000)は、このような海浜の変動をこの地点の含まれる名取川河口から仙台新港までの海岸線について、主成分分析の一つである経験的固有関数展開法を用いて解析している。図-18,19はその結果の一例である。この海岸線の変動は図-18に示されるように固有関数の上位2つで、75%まで説明することができる。そのスコアは図-19のように時間的な変動をする。第1の固有関数の沿岸方向に全て同符号であり、海岸線全てにわたって汀線が前進・後退する変動の成分を表している。物理的には、この関数のスコアが正の時には沖から砂が上がることを、負になる時には逆に沖に砂が移動することを意味している。第2の固有関数は、浜の中央と浜の右端(北端)で正、それ以外では負となっている。浜の中央は離岸堤の設置された仙台市深沼海岸である。この関数のスコアが正になる時には沿岸漂砂により離岸堤背後に砂が入り込み、また、北端に砂が集まる。負の時にはその逆の動きがあることを意味している。

このスコアの変動は来襲波と関係する。第1の固有関数のスコアの大きさは来襲波のエネルギーフラックスと負の相関が、第2の固有関数のスコアの変動は来襲波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分と正の相関が認められている。

漂砂量を算定する際、沿岸漂砂量は Komar and Inman(1970)の式がよく用いられる。一日程度の時間スケールの現象に対してはその妥当性がよく検討されている。一方、海浜変形解析・予測の場合には、数～数十年程度の時間スケールの現象となる。この場合、代表的な波をその時間長にわたり海浜にあて、沿岸漂砂量を計算する。ここに一日程度の計算とは別の問題が生じてくる。一つには、平均波を用いて来襲波のエネルギー流束の沿岸方向成分を計算するには現在の 16 方位の表現では粗すぎることであり、もう一つには、沿岸漂砂量公式が非線形であるので、代表波として単純に平均波を用いると誤差を生じることである。

真野・Hasanudin・沢本(1996)は、仙台湾海岸関上での波の経日データ data と沿岸漂砂量式とを解析し、沿岸漂砂量式に単純な算術平均波高、算術平均周期を用いる際の平均波向きの取り方と漂砂量係数について提案している。図-20 はこの方法で

定義した平均波向きを用いて計算した沿岸方向波エネルギー流束と日々の波から計算した波エネルギー流束の年間平均値の比較を示す。両者はよく一致しており、平均波向きとして沿岸漂砂量式の非線形性から定義したものをを用いればよいことがわかる。図-21 は関上漁港防波堤の伸延で阻止した沿岸漂砂を汀線の前進から評価し、その累積値を縦軸に、上述の波エネルギーの沿岸方向成分の累積値を横軸にとり、両者の相関を示したものである。両者が直線関係にあれば Komar・Inman の漂砂量公式の適用性が良好であることを意味している。1988 年の値のみやや外れるが全般的に両者の関係は一本の直線で表すことができる。これより漂砂量公式中の係数  $K$  を求めると  $K=0.030$  という値となる。これは Komar・Inman が当初に提案した値 0.77 より大分小さく、また渡辺ら(1992)が局所算定式の数値解析結果から提案している値 0.04 ~ 0.23 よりも小さな値となっている。

岸沖漂砂の場合、沿岸漂砂の場合ほど長期にわたるトレンドは見られないが数年規模での岸向き漂砂が卓越することが観察される場合がある。図-22 は阿武隈川の河口砂州の面積・開口幅の変動と河川

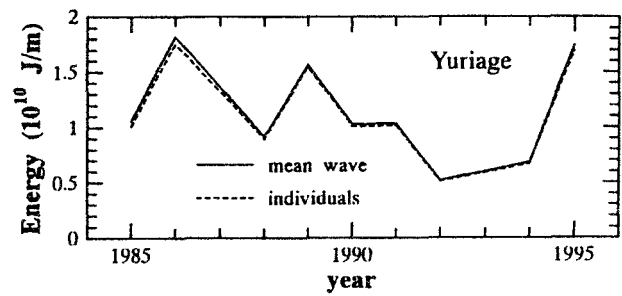


図-20 波エネルギー流束の沿岸方向成分：平均波と個々の波

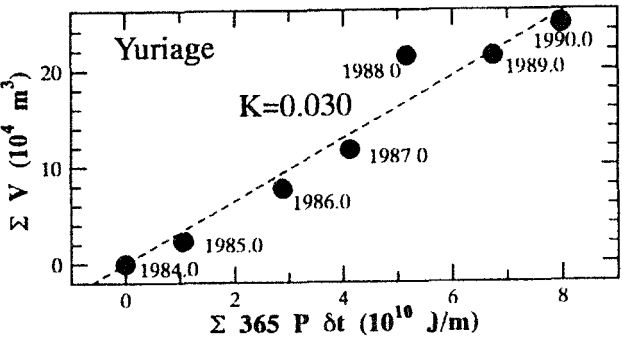


図-21 漂砂量係数：関上での例

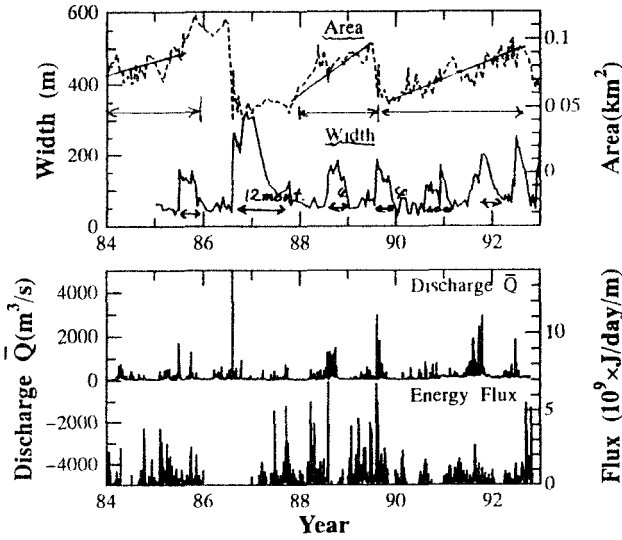


図-22 阿武隈川河口砂州の回復と波のエネルギー流束

流量・来襲波エネルギー流束の岸沖成分を示している。これによると河口砂州は洪水時にフラッシュされ、河口開口幅が大きくなるとともに砂州面積が縮小する。その後、数十ヶ月の時間スケールで砂州面積が回復してゆく。この回復速度は波エネルギー流束の岸沖方向成分と良い相関がある。すなわち、洪水時に沖に運ばれ河口テラスを形成した砂は、洪水終了後の平穏時に波エネルギー流束に比例する割合で岸に戻ってくる。現地で碎波の様子を観察すると、沿岸砂州の存在に伴う碎波点が次第に岸に近づき、数日のうちに沿岸砂州が浜に乗り上げ、一挙に数十mの汀線の前進が起こる。このように中期的時間規模で浜を見たときに、波の平穏時に浜が回復していく現象は鹿島灘海岸における加藤ら(1987)の報告にも見られる。

岸沖漂砂にともなう地形の変化は現地海岸でも観察できる。写真-5は暴浪後の阿武隈川河口砂州海側汀線を撮したものである。波による侵食で汀線付近の砂が沖に運び去られると、写真のような浜崖が発生する。侵食された部分では縦断面が下に凸の削り取られた地形となる。沖に運び去られた砂はその部分で上向きに凸の沿岸砂州地形となるが、その位置や規模は碎波の具合などから推測できる。沖に堆積した砂の山は、波がおさまると次第に岸に上がってくる。写真-6はそのような砂がまさに岸に乗り上げる際の写真である。堆積部は上向きに凸の地形を保ったまま岸に近づき、

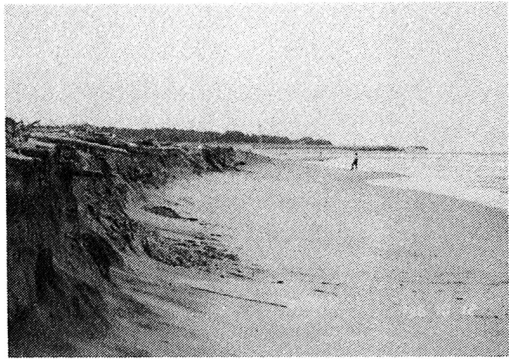


写真-5 侵食による浜崖の形成

それが揚陸する形で汀線が前進する。この写真撮影の数日後には汀線は一気に50mほど前進するのが観察された。

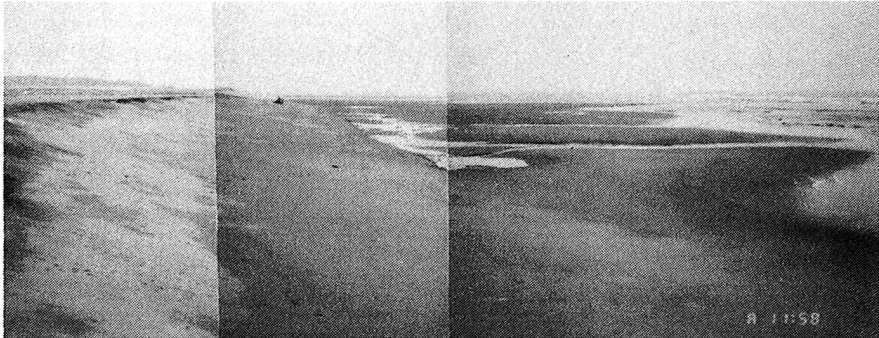


写真-6 沿岸砂州の揚陸：岸向き漂砂による汀線の前進

侵食部で下向きに凸、堆積部で上向きに凸となるのは沿岸漂砂のアンバランスによる侵食・堆積でも見られる。その場合、より大規模、すなわち、汀線から砂の移動限界水深にまでのスケールでこの地形がみられる。図-23にその例を示す。堆積海岸は前述の関上漁港南の汀線の前進のみられる部分、侵食海岸は磯浜漁港北の砂浜が消えてしまった部分である。

このようなことから、侵食性海岸に何らかの対策を施して堆積性あるいは安定した海滨に戻そうとする場合、右図水面下の実線と破線との差を砂で埋め尽くすまでは、対策の効果は汀線には目に見える形では表れないので、性急に対策の成否を判断すべきではないということに留意する必要がある。

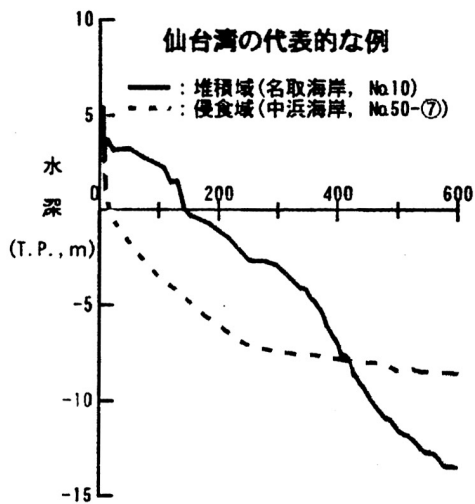


図-23 侵食海岸と堆積海岸(宇多1992)

## 7. 仙台湾海岸の土砂収支

これまでの議論と抜けていた部分を加えて仙台湾海岸の土砂収支を数えてみよう。

### ・汀線変化による土砂変化量

汀線変化から評価した土砂の増減は表4のようにまとめられる。これは汀線の増減に移動水深を8mとして乗算した値である。この方法だと汀線が防波堤まで後退するとそれ以上の侵食が評価されないことになるのと、堆積と侵食の境目では前頁に述べたように縦断地形に違いがあることを留意の上でこの値を見る必要がある。

表－4 区間毎の堆積・侵食量評価

|            | 堆 積 域                         | 侵 食 域                         | ネ ッ ト                           |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 仙台新港－閑上漁港  | 約 20,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 30,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 10,000 m <sup>3</sup> /yr. 侵食 |
| 閑上漁港－阿武隈川  | 約 60,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 30,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 30,000 m <sup>3</sup> /yr. 堆積 |
| 阿武隈川－磯浜漁港  | 約 40,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 60,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 20,000 m <sup>3</sup> /yr. 侵食 |
| 磯浜漁港－釣師浜漁港 | 約 10,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 20,000 m <sup>3</sup> /yr.  | 約 20,000 m <sup>3</sup> /yr. 侵食 |
| 釣師浜漁港－相馬港  | 約 10,000 m <sup>3</sup> /yr.  | － － － －                       | 約 10,000 m <sup>3</sup> /yr. 堆積 |
| 総 計        | 約 140,000 m <sup>3</sup> /yr. | 約 140,000 m <sup>3</sup> /yr. | ほぼバランス                          |

### ・沖合への堆積量

沖合への堆積量はより長期的な視点から評価する。仙台新港・阿武隈川河口間沖合で最表層の砂の堆積量は概算2億m<sup>3</sup>となる。この成立年代を過去5,000年と考えると年間40,000m<sup>3</sup>。汀線の変化を考慮して、約80,000m<sup>3</sup>/yr.と推定されている。

### ・福島県崖海岸からの供給土砂量

松川浦漁港建設後の汀線変化から、漁港建設前に仙台湾海岸に入ってきていた土砂量は約170,000m<sup>3</sup>/yr.程度である。この値は極めて信頼性があると判断できる。現時点でこの土砂が松川浦漁港・相馬港防波堤を回り込んで仙台湾海岸に入り込むことは期待できないが、福島県下の崖侵食は完全に止まったわけではなく、毎年1～2m程度の海食崖の後退があり、松川浦防波堤南で長期的には徐々に地形変化をもたらすことになる。

### ・河川からの供給

仙台湾海岸に土砂供給をする可能性のある河川は、一級河川：阿武隈川・名取川と二級河川七北田川の3河川である。これらの河床変動計算より、ここ数十年の土砂供給量は次のように推定される。

阿武隈川 20,000 m<sup>3</sup>/yr.    名取川 10,000 m<sup>3</sup>/yr.    七北田川 2,000 m<sup>3</sup>/yr.

### ・漁港による浚渫土砂量

沿岸の4漁港(閑上漁港、荒浜漁港、磯浜漁港、釣師浜漁港)では維持浚渫が行われている。これらは年平均では20,000m<sup>3</sup>程度となっている。量的には他の収支量と同等の規模であり、全体の収支からすると無視することはできない。浚渫した土砂はこれまでは他に利用され、漂砂下手の浜に戻されることがなかったが、今後は、次節に述べるサンドバイパスとからめ、浜全域のバランスに役立つ利用システムを確立する必要がある。

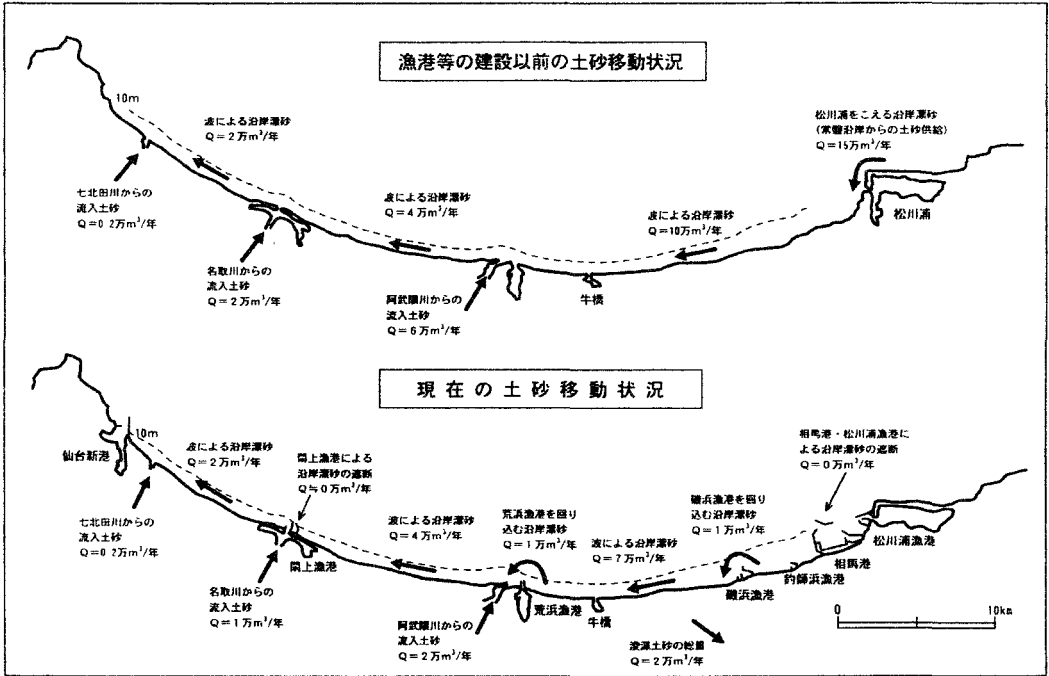
・沿岸漂砂量

表－5 各種の沿岸漂砂量推定

沿岸漂砂の算定はいくつかの方法がある。それらをまとめたものが表－5である。第1列は前述の漂砂量係数  $K=0.03$  を用いたもの、第2列は漁港での堆積量から評価した値、第3列はこれまでの地形変化を説明するために行ったシミュレーションによる検証値である。漁港堆積量は防波堤先端水深がそれほど大きくないので、防波堤先端を回り込む土砂量だけ小さな評価となっている。いずれにしろ南から北へ向かうに従って、 $100,000 \text{ m}^3/\text{yr}$  程度の値から  $10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$  をわりこむ値に減少していると考えて良いであろう。

|       | 漂砂量公式                           | 漁港での堆積                         | 汀線変化検証                                                                          |
|-------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 仙台新港  |                                 |                                | $10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                                  |
| －関上漁港 |                                 |                                | $\sim 20,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                             |
| 深沼海岸  | $1,000 \text{ m}^3/\text{yr}$   |                                |                                                                                 |
| 名取海岸  | $40,000 \text{ m}^3/\text{yr}$  |                                |                                                                                 |
| 関上漁港  |                                 | $40,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ |                                                                                 |
| 関上漁港  |                                 |                                | $20,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                                  |
| －荒浜漁港 |                                 |                                | $\sim 40,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                             |
| 岩沼海岸  | $60,000 \text{ m}^3/\text{yr}$  |                                |                                                                                 |
| 荒浜漁港  |                                 | $30,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ |                                                                                 |
| 吉田浜   | $40,000 \text{ m}^3/\text{yr}$  |                                |                                                                                 |
| 荒浜漁港  |                                 |                                | $40,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                                  |
| －磯浜漁港 |                                 |                                | $\sim 70,000 \text{ m}^3/\text{yr}$                                             |
|       |                                 |                                | 漁港建設前<br>$50,000 \text{ m}^3/\text{yr}$<br>$\sim 100,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ |
| 山元海岸  | $130,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ |                                |                                                                                 |
| 磯浜漁港  |                                 | $10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ |                                                                                 |

図-24 は上記全てを過去と現在に分けて総括したものである。各値の精度に精粗の違いがあるが大まかな姿は再現できているだろう。



図－24 仙台湾海岸土砂収支：過去と現在

## 8. どういう対策が有効か

こまごま述べてきたが仙台湾海岸の土砂動態は要約すると以下のようになる。

- ・仙台湾海岸は 5000 年前の縄文の海進以降阿武隈川からの排出土砂と福島県崖海岸から供給される土砂により汀線が前進し、仙台平野を形成してきた。
- ・少なくとも 17 世紀初頭頃より阿武隈川河口は現在の位置にあり、大きな汀線の前進は見られていない。この間、福島県崖海岸から供給される土砂が北向き漂砂で北上しながら一部は沖合に堆積していった。これらが動的平衡を保ち、鶴の尾崎から現在の仙台南港までの長大な 1 つの円弧型の砂浜海岸を形成していた。
- ・ここ数十年の変化は 2 つの面から仙台湾海岸に影響を与えている。  
一つには、河川上流部の治山・砂防で排出土砂が減少したこと、崖海岸の侵食防止工の進展で福島海岸からの土砂供給が減少したことである。  
もう一つは、人工的構造物(漁港の建設)により、一つの長大な円弧が、4 つの円弧の連なりに分断されたことである。また、南端の松川浦漁港・相馬港防波堤により福島県からの土砂供給は当分の間全く期待できない。
- ・これらの影響により、以前と同等の土砂供給の上に成り立つ動的平衡は成り立たなくなっている。また、分断された砂浜は個々の浜が来襲波に対して安定な形状になろうとして形を変えつつある。そのことが分断された各部分海岸の北端での堆積、南端での侵食を引き起こしている。しかし、浜を分断している構造物は長大な 1 つの浜の両端の岬のように十分な大きさはなく、個々が安定な形状に落ち着くことはない。

以下、対策について考え方を整理してみよう。

### ◎ 土砂問題は土砂発生源(河川源流部・海食崖等)から海岸まで一貫して考える。

これは今回の研修会のテーマでもあり、今後ますますこの考え方が重要になってくる。ただ、治山・砂防が進み、河道改修が進み、海食崖の侵食対策が進むことは、それが海岸にとっていかに影響が大きくても、十分な社会的要請に基づいて行われており、むげに否定できるものではない。一応はこれらのことを前提にして考えていく必要がある。

また、理念ばかりでは効果が出てこない。河川・海岸からの土砂一貫管理の方策としては、

- ・長期的には、ダムに堆積した土砂を以下に下流・海岸まで流下させるかの技術の開発が必要である。
- ・行政的には河川での砂利採取の抑制が必要である。この量が土砂収支・土砂環境で考慮している他の量に比べて、極めて大きなものであることを忘れてはならない。
- ・土砂循環系を阻害している場合、例えば松川浦漁港南のこれからの土砂堆積など、は浅瀬・サンドパイパスにより本来の土砂循環系に乗せ直すことが必要である。

### ◎ 砂浜は重要である。

1999 年に海岸法が改正され、2000 年から施行されるようになった。これにより従前の「防護」に加え、「利用」、「環境」の視点が適正に事業に反映されなければならなくなった。砂浜海岸は単に守るべき土地であるばかりでなく、豊かな生態系を支える場、人々のリクリエーションや休息の場、漁業資源の維持などに不可欠の場である。これらに手を防護にし、利用にし、手を加える場合には人々の納得しうるものであることが必要である。

新海岸法では、必要に応じて砂浜を海岸保全施設として指定することとなっている。砂浜が海岸保全施設であるということは、それが守るべきものに止まらず、より能動的な機能を有していることを海岸事業の中

で認めたことである。具体的には、砂浜がその種々の機能を発揮するために適正の規模(浜幅・長さ)を維持することも重要である。例えば、砂浜がなくなることが問題であることは言うまでもないが、さらに大きすぎないことも需要である。汀線が前進しすぎることは、しばしばそれに隣接する漁港・小港湾の航路埋没などを引き起こす。さらに漁港維持のための浚渫土砂が海岸から運び去られる場合には、土砂収支に影響が生じる。

また、海岸侵食に対しては住民・行政ともに神経質であるが、汀線の前進に対しては問題視することが少なかった。広く堆積した砂浜は、しばらくすると植生が育ち、新しい利用可能な土地となる。しかし、これも天から与えられた恵みではなく、本来その土砂が供給されたいた漂砂下手の土砂バランスを破壊して成り立ったものであることを認識すべきである。

具体的には

- ・砂浜の幅を変動許容範囲を定め、それを維持する。
- ・通常、50m 程度の幅があると植生が生えてくるのでこの程度が最低限の幅となる。
- ・最大幅をどの程度に押さえるかは個々の場合による。
- ・沿岸漂砂を阻止するような位置の漁港の口を維持する場合には漂砂上手の砂浜を建設前の汀線位置と漁港防波堤の位置を勘案して決めるべきである。
- ・仙台湾海岸では閑上、荒浜、磯浜の各漁港の南側汀線の最大許容前進量を決め、それを越えて堆積する場合には、漂砂上手に防砂堤を設置することと、堆積した砂を上手に戻すか、下手にサンドバイパスするかの方策が好ましい。
- ・閉じた漂砂系の砂浜の端に漁港防波堤を設ける場合は、隣接する浜の砂を漁港内に引き込むことがしばしばある。このような場合、当初より防砂堤を組み込んだ防波堤配置を考慮すべきである。

#### ◎ 動的平衡から静的平衡へ。

旧来のように仙台湾海岸全体の動的平衡を維持することは不可能である。これは土砂供給量が減少していることと、浜が分断されていることの2点による。新たな平衡・安定状態が自然に成り立つのを待つことは、海岸線の防護・利用・環境のいずれの観点からもあまりに損失が大きく許されない。

現在考えられる方策としては、人工的ヘッドランドにより砂浜をより小さな区分に分け、分けられた個々の浜での安定をはかることであろう。これは侵食被害の大きい箇所のみを考えるのではなく、堆積の大きな部分の制御も考えながら進めるべきである。また、すでに砂浜の消えてしまった部分については、サンドバイパスで適切な浜幅を初めに養浜し、養浜砂の流出防止工などを併用する。

#### ◎ 保全施設の複合利用

海岸事業は、4省庁の管轄に分かれている。すなわち、港湾部分、漁港部分、干拓地等の海岸、その他、が異なる行政方針・手法で海岸管理・事業を行ってきた。いわゆる縦割り行政である。最近、これらが4省庁合意に基づいて海岸事業を進める機運が進んできたことは喜ばしいことである。これにより一つの事業のしわ寄せが他の海岸に及ばない等の配慮が浸透して行くであろう。さらに進めて、海岸保全施設である離岸堤や人工リーフと漁業振興のための藻場の造成をからめる事業や、航路維持のための浚渫をサンドバイパス・養浜とからめる事業など、1つの対策にいくつかの効果を持たせることを進めていくべきであろう。

海岸への土砂供給が減少していること、ここ数十年の間になんらかの構造物が海岸に設けられたことは、仙台湾海岸に限らず、日本のほとんどの海岸でごく当たり前に観察されることである。それゆえ、ここで考えた仙台湾海岸での対策は日本の海岸で広く適用しうるものでもあろう。

## 引用文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児「短期汀線変動のモデル化の試み」海岸工学講演会論文集, Vol.34, pp.297-301, 1987.
- 建設省東北地方建設局・宮城県土木部「仙台湾沿岸技術調査委員会報告書」73PP, 2000.12.
- Komar P.D. and Inman D. "Longshore Sand Transport on Beaches", *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, No.30, pp.5914--5927, 1970.
- 松本秀明「仙台平野の発達について」2001年度(第37回)水工学に関する夏期研修会講義集, B-1, 2001.
- 真野明「海食崖の浸食特性—福島海岸の例—」2001年度(第37回)水工学に関する夏期研修会講義集, B-2, 2001.
- 真野明・Hasanudin M.・沢本正樹「沿岸漂砂量公式に用いる年平均代表波」, 海洋開発論文集, Vol.12, pp.55--59, 1996.
- 真野明・沢本正樹「阿武隈川の土砂排出速度」京大防災研年報, Vol.41, B-2, 353-365, 1998.
- Mano A. and Suzuki S. "Erosion Characteristics of Sea Cliff in the Fukushima Coast", *Coastal Engineering Journal*, Vol.41, No.1, pp.43-63, 1999.
- 森俊哉・田中仁「岸沖・沿岸漂砂に起因する汀線変動の解析」海岸工学論文集, Vol.45, 551-555, 1998.
- 永澤豪・田中仁「等深線距離を用いた三次元経験的固有関数展開による仙台湾海岸海浜変形解析」海岸工学論文集, Vol.47, 621-625, 2000.
- Sawamoto M., Nagao M. and Sato M. "Utilization of Sand Color Information for Estimation of Sediment Supply on Beaches", *Coastal Engineering in Japan*, Vol.37, No.2, 189—199, 1994.
- 豊島修・奥田光男・武藤徳一「福島県海岸の侵食と海岸特性について」海岸工学講演会論文集, Vol.20, pp.507-512, 1973.
- 宇多高明「現場に役立つ海岸工学(その3)」雑誌海岸 Vol.32, No.2, pp.58--68, 1992.

## 参考書

### ・仙台湾海岸に関する資料

- 建設省東北地方建設局・宮城県土木部「仙台湾沿岸技術検討委員会報告書」161PP, 1993.9.
- 建設省東北地方建設局・宮城県土木部「仙台湾沿岸技術調査委員会報告書」73PP, 2000.12.
- 宮城県「仙台湾海浜地域保全計画(学術報告書)」145PP, 1999.3.

### ・海岸保全などに関する基礎的・一般的参考書

- 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編「漂砂環境の創造に向けて」土木学会, 359pp., 1998.
- 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編「海岸波動」土木学会, 520pp., 1994.
- 水理委員会水理公式集改訂小委員会編「水理公式集」土木学会, 713pp., 1999.
- 宇多高明「長大な海岸における漂砂制御」2000年度(第36回)水工学に関する夏期研修会講義集, B-6-1--20, 2000.8.