漂砂系土砂収支把握に向けた浅海域高解像度海底地形計測の試み

Sediment budget analysis in light of high-resolution echo sounding of seabed topography

東 良慶¹·関口秀雄²·蔡 曙伍³·渡邉康司⁴

Ryoukei AZUMA, Hideo SEKIGUCHI, Seooh CHAE and Yasuji WATANABE

Coastal erosion is a long-standing serious issue in Japan and extensive lengths of coast lines have been protected with seawalls, armour units and detached breakwaters. Extreme cases of coastal protection can render sandy beaches totally isolated from otherwise available sediment-supplying systems. The authors took up Ogata Beach on the Joetsu coast as such and applied a high-resolution side scan imaging with bathymetry to it, revealing marked morphological changes underwater. What is most noteworthy is that the areas of significant erosion extended offshore beyond the so-called closure depth.

1. はじめに

わが国では過去30~40年の間に河川・海岸域におい て大規模な開発が行われ、その結果、流砂漂砂系の土砂 収支のバランスが崩れ、年間160ヘクタールの海浜面積 が消失している(田中ら,1993).しかし、漂砂と海浜 変形の実態を高解像度で把握することは依然として容易 ではなく、沿岸域の環境・防災上、重要な課題となって いる.

近年,流域の都市化や生態環境保全の進展にともない, かつては主要な漂砂源であった河川からの土砂流出や海 崖からの岩屑供給,あるいは砂丘侵食による堆積物供給 をほとんど期待できない砂浜海岸が増加している.この ような海岸においては,漂砂過程を「zero-sum process」 としてとらえる必要がある.また,イベントによる底質 の沖合流出は漂砂セルにとって持続的なsinkとなる.実 際に,本研究調査エリアである上越地域海岸においては, 関川河口(直江津港)における沖防波堤の建設,海岸保 全事業による汀線の固定化により,河川流砂系および海 岸砂丘系(図-1)からの土砂供給は期待できない.すな わち,典型的な孤立漂砂系になっている.したがって, 漂砂系土砂収支の実態把握と評価手法の確立は,砂浜海 岸保全施策上からも喫緊の課題である.

本研究では、上述に鑑み、海岸侵食に悩む実海浜とし て上越地域海岸に着目し、10年から100年オーダーの海 浜変形を予測し得る方法論を視野に入れ、高解像度の海 底地形計測法の適用を試みる.

1	正会員	博(工)	京都大学防災研究所助教
2	フェロー	工博	京都大学防災研究所教授
3			京都大学工学部地球工学科
4			(株)アーク・ジオ・サポート

2. 上越地域海岸の特徴

上越地域海岸は日本海に面し,能登半島と佐渡ヶ島に はさまれた沿岸域(新潟県地質調査業協会,2002)に展 開する延長28kmの砂浜海岸である(図-1).後背地の高 田平野は,西側を西頸城山地(妙高火山群),南東部を 東頸城丘陵(日本有数の地すべり地域)で画され,海側 は渇町砂丘とその影響を受けた潟湖系が発達している. 海岸域への主たる土砂供給ルートは関川と考えられる が,河口港であった直江津港の発展(西防波堤の沖合へ の延伸)により,現在では直江津港の東側の海域は関川 流砂系からは独立した漂砂系を構成している.当海岸の



図-1 上越地域海岸: (a) 波候特性と(b) 位置図



図-2 汀線変化評価の対象海岸域とその長期スケールの汀線位置変化(1914年から2002年までの変化)



図-3 長期スケールにおける総海浜面積の変化および汀線位 置の平均変化量(1914年当時の汀線との比較)

卓越波向はNW~NNWである(字多,1997).海岸線の 法線はその間に入るため,沿岸漂砂の方向は個々のスト ームの消長によっても変化する.また,年間を通じて, 季節的な変動の影響を受けることにも留意を要する.

3. 長期スケールにおける汀線位置の変化

汀線位置の変化を評価した海岸域は,国土地理院発行 1/25000地形図「潟町」に記載された関川の東側11.8km の範囲である.最も古い1914年版から2002年版まで計8 葉(8年代)の地形図を用いた.具体的な手順としては, 紙ベースの地形図をデジタル画像に変換し,GISにより 世界測地系平面直交座標第8系(JGD2000)にレクティ ファイ(歪曲収差補正)し,地理情報化した.その後, 各年代における汀線位置をデジタイジングし,平面位置 情報を取得した.なお,上記地理情報化過程で生じた誤 差は±8.2mである.

直江津港の拡大(埋立地の造成)の影響を直接受けな い海岸域(区間No.1から48までの9.6km区間)に対して 求めた1914年から2002年までの長期汀線位置変化を図-2 に示す.この図によると,評価区間(No.1~48)全域に おいて, 汀線が後退していることがわかる. 侵食が著し い区間(No.32, 43, 44)においては,約90年間で100m 程度も汀線が後退している.

次に、区間No.1から48までの海岸域(9.6km)におけ る総海浜面積の変化および汀線位置の平均変化量を図-3 に示す. ここに、海浜面積の変化を算定した基準年は 1914年である. 1991年頃までは海浜面積が減少し, 汀線 は後退している。一方, 1991年以降は、海浜面積の減少 は停止し、概ね汀線(海岸線)は落ち着いている、これ らの結果について、上越地域海岸における海浜地形環境 の推移との関係から考察する. 関川河口における河港分 離が実施された1960年以前は、自然の砂浜海岸であった (その当時の代表的な海浜断面を後出の図-4に示す). 1960年代初頭以降,直江津港の急速な発展(西防波堤の 延伸等)に伴い海岸侵食が顕在化した.この期間(1971 年から1979年)における侵食状況(区間No.26~45の区 間(図-2))については、宇多(1997)に詳しい、その後 も海岸侵食が進行する中、上越地域海岸緊急整備事業が 実施され(1998~2005年),防潮工,汀線消波堤,離岸 堤、人工リーフ等が設置された、その結果、汀線位置は 固定化され,安定した.

当海岸地域においては、最近10年の間に既往最大有義 波高が2度更新されており、冬季風浪被害が頻発してい る(平野,2008).このことからも、地形図上には反映 されない水面下の海底地形は変化していることが推察さ れる.次節では、最近10年間の海底地形変化について検 討する.

4. 海底地形の変化

海底地形の変化を捉えるために,新潟県によって実施 された深浅測量の成果図(水深コンター図,1998,2001, 2003,2005年の4年代)を地理情報化し,水深コンター をデジタイジングすることにより,3次元の海底地形デ ータを取得した.これらのデータに対し,空間補間を行



図-4 海浜地形断面の変化(断面A-A':帝国石油第1人工島旧桟橋に沿う断面(関川から9.0km東側(図-1参照)),断面B-B':人工リーフ DS-1を横断する断面(関川より8.3km 東側(図-1参照))



図-5 3次元マルチサイドスキャンソナー(C3D)にもとづく大潟海岸の等深線図(上越市都市計画図(2008)と重合せ、図-4における断面 A-A'およびB-B'の位置を併示)

うことにより,各年代における任意断面の海底地形プロフィールを作成した.典型的な断面として断面A-A'およびB-B'を選び,それらの海底地形プロフィールの変化を図-4に示す.断面A-A'については,帝国石油第1人工島旧桟橋に沿った断面であり,1961年当時の海底地形(帝国石油資料より)を併示した(図-4(a)).1961年と比較して,後年の汀線位置が大きく後退していることがわかる.すなわち,1/25,000地形図(2002年)における汀線は,1961年当時の汀線位置から約60m後退している.図-4の断面地形を仔細に比較すると,沖合には沿岸砂州が形成されており,それが岸沖方向に移動していることも見てとれる.沿岸砂州は,深いものでT.P.-6~-8m付近に存在し,本海域の波浪エネルギーの大きさがうかがえる.

断面B-B'は人工リーフ (DS-1)を横断する断面である. 人工リーフの沖合に沿岸砂州が形成されていないことは 興味深い (図-4 (b)).

5. 高解像度海底地形計測

本研究では、マルチアングル広帯域測深サイドスキャ ンソナー(Multi-Angle Swath Bathymetry Side Scan Sonar (Kraeutner ら, 2002),製品名C3D,米国Benthos社製) を用いて、2008年7月27~30日に空間連続的で高分解能 な海底地形計測を実施した.C3Dは、従来のマルチビー ム測深器と比較して測深幅が大きく、浅海域の海底地形 計測を効果的に実施できる(海洋調査技術学会編集委員 会,1993).また、測深機能とサイドスキャン(音響画 像撮影)機能とを兼ね備えていることも特徴である.計 測システム構成は、測深機としてC3D,モーションセン サー及びジャイロセンサーとしてOctans,GPSとして StarFireを使用した。

上記の計測システムにより得られた計測成果は,2m格 子の3次元座標データ群である(水深の計測精度は10cm 程度).水深0.5m間隔の等深線を図-5に示す.同図より 得られた結果を以下に列挙する.

- 人工リーフ(DS-1およびKF-1)の沖合(水深8m線より沖)に、湾入状の海底地形(侵食域)が形成されている。
- 2) 京大観測桟橋(K)の沖合に,大規模な弓形砂州地形 (堆積域)が存在する.
- 3) 人工リーフ周辺 (DS-1, KF-1~3) において, 局所 的な地形変化 (洗掘) が生じている.

当海岸域においては従来,波浪による地形変化の限界 水深の値は8mとみなされてきた(字多,1997).しかし, 本調査結果によると,水深8m以深においても堆積物輸 送が生じ,地形が変化していることがわかる(図-5).

最近10年間の海底地形変化を精査するため、測線C-C' ~G-G'(5測線、図-5に併示)における、C3D計測 (2008)および深浅測量(1998)による海底地形プロフ



図-6 C3D計測による高解像度データと深浅測量成果(1998年) に基づく海底地形断面の比較;(a):弓状砂州地形を縦断 する測線C-C',(b):人工リーフ(DS-1)を縦断する測線D-D',(c):人工リーフ(KF-1)を縦断する測線E-E',(d):人 エリーフ(KF-2, KF-3)の間を縦断する測線F-F',(e):突 堤と人工リーフ(KF-2)の間を縦断する測線G-G'

ィールを比較した(図-6).測線の選定に当たっては,深 浅測量において詳細な測深が実施されている測線を選定 した.図-6より得られた結果を以下に列挙する.

- ○測線C-C'(図-6(a)):1998年当時に存在した沿岸砂 州が消失(大規模侵食),沖合に大規模な堆積地形 (弓状砂州地形の先端部(図-5))が形成されている.
- ○測線D-D'(図-6 (b)):人工リーフ (DS-1)の沖合に おいて、広範囲に侵食が生じ、水深10m以深でも地形 変化が見られる (図-5における湾入状侵食域).
- ○測線E-E'(図-6(c)):人工リーフ(KF-1)設置前の 1998年当時は沿岸砂州が観察されるが、2008年には消 失しており、沖合においては、広範囲で侵食傾向が見 られる。
- ○測線F-F'(図-6(d)):汀線付近においては、局所的 な洗掘が顕著である。沖合では地形変化は見られない。
- ○測線G-G'(図-6(e)):突堤近くの測線である.輸送 された堆積物がトラップされ、沖合で堆積地形が観察 される.

2008年現在では、当海岸域の汀線は異型ブロック積消 波堤や直立防潮護岸等により保全整備がなされ、往時に 比べて波浪反射率がかなり増大していることが推察され る.また、近年、当海岸域には厳しい冬季風浪が来襲し ている。例えば、2003年12月20日には既往最大有義波 高H_{1/3}=9.24mが観測されている。これらの要因が相乗し、 いわゆる地形変化限界水深の以深でも堆積物輸送を生じ させ、大規模な地形変化を引き起こしたことが推察され る.海岸構造物周りの局所的な洗掘の発生にも留意し たい.

6. 大規模地形変化と土砂移動収支のかかわり

前節までに、当海岸域では1991年頃以降は海岸保全事 業の進展に伴い汀線が安定したように見える一方、水面 下においては大規模な地形変化が生じていることを示し た.本節では漂砂系の土砂収支の観点から、ボックスモ デルに基づいて堆積物移動量を算定した.

具体的には、人工リーフ(DS-1)の沖合に形成された 湾入状侵食地形(図-5)を対象とした算定エリア(1) (岸沖方向:450m,沿岸方向:1400m),および観測桟橋 (K)の沖合に形成された弓状堆積地形(図-5)を対象と した算定エリア(2)(岸沖方向:450m,沿岸方向: 700m)の2つの土砂収支評価エリアを設定した(図-7). C3D計測(2008)および深浅測量(1998)による3次元 海底地形データをGISに適用し、各評価エリアにおける 算定基準面(T.P.-12m)より上部の土砂体積を求めた. 各エリアにおいて、算定された土砂体積の差をとると、 1998年から2008年までの10年間における土砂移動量が 判明する.これらの解析結果をまとめ、表-1に示す.



図-7 漂砂系土砂収支を評価する土砂収支解析ボックス

表-1 土砂移動収支の解析結果

	算定エリア(1)	算定エリア(2)
	$(450m \times 1400m)$	$(450m \times 700m)$
深浅測量(1998)における	254	145
土砂体積 (×104m3)		
C3D 計測(2008)における	218	131
土砂体積 (×104m3)		
堆積物変化量	-36	-14
$(\times 10^4 m^3)$		

その結果,湾入状侵食地形を対象とした算定エリア (1)においては,10年間で36×10⁴m³の土砂が消失して いる.言い換えると,海底地形が平均的に約0.6m低下し ている.一方,弓状堆積地形を対象とした算定エリア (2)においては,14×10⁴m³の土砂が消失している(平 均的に海底面が約0.4m低下).

7. 結論

上越地域海岸において,関川の東側11.8km区間を汀線 位置変化の評価区間に設定し,1914年から2002年までの 長期スケールにおける海浜面積および平均汀線位置変化 を推算した.さらに,海底地形を高解像度で計測するた め、3次元マルチサイドスキャンソナー(C3D)を適用 し,海底における大規模土砂移動の実態を把握した.そ の結果得られた海底地形データをGIS解析することによ り,暴浪イベントと深く係る土砂移動収支を評価した. 得られた主要な結論は以下の通りである.

1) 1/25000地形図にもとづく汀線位置変化の評価を行い、 長期スケールの海岸侵食の傾向を明らかにした。当海 岸域においては、1991年頃までは汀線の後退が顕著で あり、1914年当時の汀線位置と比較すると、平均的に 約60m後退している。1991年以降は侵食対策のために 実施された一連の海岸保全事業により、汀線が固定化 (安定) している.

- 2) 3次元マルチサイドスキャンソナー(C3D)に基づいて、海底地形変化を詳細に把握することができた.特に、直立護岸(防潮堤)の前面の人工リーフ付近の局所的侵食が顕著であることは、海岸保全の視点からも注意を要する.
- 3)当海岸域においては、波浪による地形変化限界水深である8mよりも深いエリアにおいて、大規模な湾入 侵食地形および弓状堆積地形が形成されている。
- 4)上記の大規模土砂移動の所産である海底地形に関して、土砂移動収支解析を実施した.高分解能地形計測 を実施した延長2.1kmの区間において、過去10年間で 50×10⁴m³に及ぶ土砂が消失している.その行方(fate)の解明は今後の調査の大きな課題である.

謝辞:本研究を実施するにあたり,新潟県上越地域振興 局治水課の関係各位より,深浅測量成果図等の貴重な資 料をご教示いただきました.潮位情報等の直江津港に関 連した情報につきましては,新潟県上越地域振興局直江 津港湾事務所 久保田彩美氏にご教示いただきました.こ こに深甚なる謝意を表します.

参考文献

宇多高明(1997):日本の海岸侵食、山海堂, pp. 141-149. 海洋調査技術学会編集委員会(1993):海洋調査フロンティ ア-海を計測する-,海洋調査技術学会, pp. 41-62.

- 田中茂信,小荒井衛,深沢 満(1993):地形図の比較によ る全国の海岸線変化,海岸工学論文集,第40巻, pp. 416-420.
- 新潟県地質調査業協会(2002):新潟県地盤図説明書, pp. 11-12.
- 平野幸生(2008) : 直江津・大潟海岸における海岸保全事業 の変換~Sand has will~, 第27回大潟海岸に学ぶ, 講演資 料, 108p.
- Kraeutner, P. H. and Charbonneau, B. (2002): Multi-angle swath bathymetry sidescan quantitative performance analysis, proc. OCEANS 2002 IEEE/MTS, Vol.4, pp.2253-2263.