

南九十九里海岸の汀線変化に対する地盤沈下の影響評価： 海浜土砂収支に基づく検討

Effect of land subsidence on shoreline changes based on coastal sediment budget at the southern Kujukuri Plain, Chiba Prefecture, Japan

小花和 宏之*・徳永 朋祥**

Hiroyuki OBANAWA and Tomochika TOKUNAGA

要旨: 千葉県南九十九里平野では水溶性天然ガス採取のための地下水揚水が行われており、地盤沈下が発生している。その最大値は、最近42年の累計で約100 cmである。また、当地域では海岸侵食も発生しており、地盤沈下の影響が懸念されている。そこで、過去の汀線変化をまとめ、海浜土砂の変化を発生させる各種要因についてその影響を評価した。その結果、汀線後退に対する地盤沈下の影響は他要因よりも大きいことが推定された。

キーワード: 地盤沈下, 汀線変化, 土砂収支, 沿岸漂砂, 九十九里海岸

1. はじめに

地下水の採取による地盤沈下の発生は世界各地で確認されており(Barends et al.¹⁾, 大津ほか²⁾など), 地下水利用における大きな問題となっている。たとえば東京の低地部の一部では、地下水採取によりこれまでに累積して4 m以上の地盤沈下が発生している(遠藤ほか³⁾)。また、これまでも多くの文献において、地盤沈下により相対的に海面が上昇して海岸が侵食されることが指摘されている(堀川⁴⁾, 三村ほか⁵⁾, 宇多⁶⁾, 星上ほか⁷⁾, 宇多ほか⁸⁾など)。

千葉県の九十九里海岸は、最近数十年間に関して海岸は侵食される傾向にあり(たとえば、日本地形学連合⁹⁾), 当地域で発生している地盤沈下との関連が懸念されている。そこで本稿では、南九十九里海

岸を対象として、過去の地盤沈下がもたらしたと考えられる汀線変化および海浜土砂変化を推定し、他の諸要因の影響との比較を実施した。

2. 調査地概要

九十九里平野は千葉県東部に位置する南北約60 km, 東西約10 kmの海岸平野であり(図1), 水溶性天然ガスおよびヨウ素の生産に起因すると考えられている地盤沈下が発生している地域である。たとえば、千葉県水準測量成果表(千葉県環境生活部水質保全課¹⁰⁾)によると、茂原市内では1969~2010年の期間で継続的に地盤沈下が発生しており、42年間で最大で100 cm近く沈下している。1975~2004年の30年間の累積地盤変動量を示す千葉県水準基標変動

* 正会員 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター, ** 非会員 東京大学 新領域創成科学研究科

図(千葉県¹¹⁾)によると、九十九里平野中央部の片貝漁港から太東崎にかけての南九十九里平野で相対的に沈下量が大きい。そこで、本研究における対象範囲は片貝漁港より南の九十九里海岸とした。



図1 調査地概要

3. 汀線変化の履歴

以下の手順に従い、南九十九里海岸における過去の汀線変化履歴を整理した。

(1) 既存の汀線変化に関するデータの収集

汀線変化に関する既存資料を表1に示す。表1中には、資料名、調査対象時期(基準年および計測年:たとえば基準年1970年、計測年1977年の場合、1970年を基準汀線として1970~1977年の汀線変化量を示す)、元データ、潮位補正実施の有無、基準線(汀線変化量の計測基準線)情報を示している。対象時期は1883~2007年、対象期間は1~100年間とデータにより様々である。元データは、地形図(1/2万、1/2.5万、1/5万)、空中写真、水準測量(断面測量)、あるいはそれらを組み合わせている。

これらのデータの中で、千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー¹²⁾は、汀線変化量を汀線に

表1 汀線変化に関する既存資料

資料名	時期		元データ	潮位補正	基準線
	基準年	計測年			
日本地形学連合 ⁹⁾	1970	1977	地形図と空中写真	記載なし	記載なし
	1983	1988 1984			
日本地形学連合 ⁹⁾	1983	1988 1993	地形図と空中写真	記載なし	記載なし
	1948	1970 1990 2002			
星上ほか ⁷⁾	1948	1970 1990 2002	空中写真	記載なし	記載なし
千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー ¹²⁾	1967	1999	空中写真	補正済み	直線(補正必要)
堀川・砂村 ¹³⁾	最近100年間	住民の概測(集落の移動?)	地形図(2万+2.5万) 地形図(5万)	記載なし	記載なし
	1883	1968			
	1903	1965			
宇多 ¹⁴⁾	1884	1947	地形図(5万)+地形図(5万) 地形図(5万)+空中写真 空中写真+空中写真	補正済み	記載なし
	1947	1974			
	1974	1984			
	1990	1991			
宇多ほか ¹⁵⁾	1990	1991	空中写真	記載なし	記載なし
	1991	1991			
	2007	2007			
千葉県土木部河川海岸課 ¹⁶⁾	1903	1944 1976 1991	地形図(5万)	記載なし	記載なし
千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー新土木研究所 ¹⁷⁾	1973	1974	水準測量による汀線測量(断面測量)	記載なし	記載なし
	1974	1974			
	(毎年)	(毎年)			
	1979	1979			
	1973	1984			

斜交する方向に計測しているため、本研究の解析には使用しなかった。また、堀川・砂村¹³⁾に関しては、汀線変化量を示す論文からのデータを正確に読み取ることが困難であったため、調査対象から外した。

(2) 汀線変化量の数値化

上記汀線変化量を示すグラフの値を読み取り、海岸沿いの各地点における各時期の汀線変化量を数値化した。

(3) 対象時期の細分化

表1に示すように、各データにより対象とする時期は様々である。そこで、各時期のデータの差分を取ることで、対象時期をできる限り細かく分割した。たとえば、日本地形学連合⁹⁾の1970~1977年の汀線変化量データから、千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー新土木研究所¹⁷⁾の1973~1977年の値を減算することで、1970~1973年の汀線変化量を求めた。なお、資料により汀線の定義が満潮汀線と干潮汀線の場合が考えられるが、各資料内で異なる定

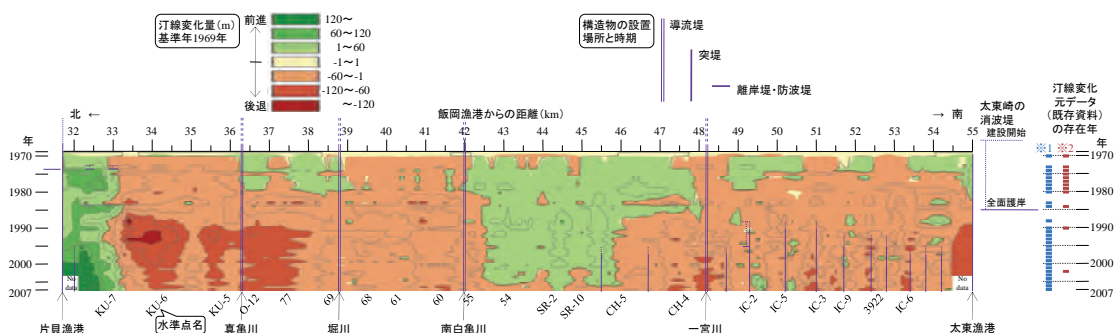


図2 汀線変化量の時空間変化を示す x-t ダイアグラム

※1 飯岡漁港からの距離が 32.2~54.4 km の範囲

※2 飯岡漁港からの距離が 31.7~32.1 km (片貝漁港近傍), 54.5~55.0 km (太東漁港近傍) の範囲

義の汀線を比較しているとは考え難いため、各資料内の汀線変化量は定義の違いによる問題は無いと考えた。ただし、満潮汀線から求めた汀線変化量に比べて干潮汀線から求めたそれはより海底勾配の緩やかな場所における変化を示すため、変化量が小さくなる可能性があり、本研究成果にはその誤差が含まれている。

また、この方法で各時期の汀線変化量を算出する場合、使用するデータセットにより、得られる結果が異なる場合がある。たとえば、1948~1990年の累積汀線変化量を求める場合、星上ほか⁷⁾の1948~1990年データを用いる場合と、星上ほか⁷⁾の1948~2002年データから宇多ほか¹⁵⁾の1990~2002年データを減算して求める二通りの方法があり、各々の算出結果が異なる。以上のような使用するデータセットの違いによって生じうる誤差、すなわち時間方向の環閉合差を詳細に検討した結果、その値は±30 m程度と見積もられた。

(4) x-t ダイアグラムによるデータ統合

(3)で求めた海岸沿いの各地点における各時期の詳細な汀線変化量を図化する。その方法として、宇多ほか¹⁵⁾が使用した x-t ダイアグラムを用いた(図2)。これは、横軸に海岸沿いの距離、縦軸に時間をとり、各場所および時間における累積の汀線変化量をプロットするものである。汀線変化の基準年、すなわち変

化量を0とみなす年は1884年まで遡ることが可能であるが、古い時期のデータは時間分解能が低い(計測期間の間隔が長い)ため、ここでは1969年を基準年とした。汀線変化データを x-t ダイアグラムにプロットし、ArcGIS上で線形補間によりラスタ化して色付けした。図中の緑色の場所が汀線の前進を示し、赤色の場所が汀線の後退を示す。また、図2の右端にこの図を作成するにあたって用いたデータの存在年を示している。片貝漁港および太東漁港に隣接する範囲は元データ数が少なく、時間分解能が低い。図中紫色の構造物の設置場所と時期については、次節で説明する。

この図は、縦軸のある時期から横軸方向に追跡すると累積汀線変化量の場所による違いを示し、横軸のある場所から縦軸方向に追跡すると累積汀線変化量の経時変化を示す。x-t ダイアグラムは、一般に用いられる表現方法、すなわち、各時期における累積汀線変化量の海岸方向の折れ線グラフを複数年重ねたり並べたりする方法と情報量は変わらないが、変化量を色で示しているために汀線の時空間変化を把握しやすいという特徴がある。

図2が示すように、最近約40年間では全体として汀線の後退が卓越していることが分かる。ただし、場所および時間により汀線の前進および後退が複雑に発生している。調査範囲内における、1969年を基準

とした最大の汀線の後退位置は、片貝漁港と真亀川
の中間地点付近において 1990 年代前半にみられた
-160 m であり、最大の汀線の前進位置は片貝漁港
南部において 2007 年にみられた 260 m である。

4. 海岸構造物の設置履歴

太東崎および南九十九里海岸における人工構造
物の設置場所および時期をまとめた(図2)。図2中
の紫色の線が海岸構造物の位置および設置時期を
示し、点線は時期が不明瞭なことを示す。構造物は
導流堤、突堤、離岸堤・防波堤の 3 種類である。た
とえば一宮川河口部の二重線は導流堤であり、1960
～1967 年(点線)のいずれかの年に建設された(砂村
¹⁸⁾、千葉県県土整備部河川環境課¹⁹⁾ことを示す。
また、太東崎の消波堤については 1966 年に建設が
開始され、徐々に延長されて 1985 年に全面護岸さ
れ、その後は現在まで全面護岸の状態が継続して
いる(町田²⁰⁾、千葉県県土整備部河川環境課¹⁹⁾ことを
示す。

5. 実際の汀線変化から推定した海岸侵食に 伴う土砂損失量

対象範囲全域に千葉県水準測量網が整備された、
1975～2005 年の 31 年間における、対象地域全体の
海岸侵食に伴う土砂損失量を求めた。まず、1971 年
測量の 1/5,000 国土基本図(国土地理院²¹⁾)をもとに
1971 年の汀線位置(満潮汀線)を求め、次に図 2 で
示した汀線変化量の x-t ダイアグラムをもとに 1971
～1975 年における汀線変化量を求め、両者を足し合
わせることで 1975 年の汀線位置を求めた。次に、海
浜の平衡地形を表す以下の式(1)(Bruun²²⁾²³⁾を用い
て、海岸沿いの水準点(図 3)から岸沖方向に 1975
年の海底面を示す地形縦断形を作成した。

$$h = Ay^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 h は水深、 A は海浜断面係数(海岸の各地点
に固有の定数)、 y は汀線からの沖方向距離を示す。
海浜断面係数 A は、海岸沿いの水準測量点から海
岸線に直交方向に測線を設定し、日本水路協会²⁴⁾
による詳細な海底地形図(図 3)をもとに各測線にお
ける海底地形縦断形を作成し、式(1)をあてはめて残
差の絶対値を最小化することにより求めた(表 2)。実
際の海底地形には暴浪時に形成されたトラフやバー
が存在する場合があります、単調減少関数である式(1)
ではそれらの凹凸を表現することはできない。静穏波
浪時にバーは徐々に陸側に移動してトラフを埋め、最
最終的にバームを形成する(砂村²⁵⁾)。すなわち、堆積
物の一部が陸上に移動するため、海底面の形状から
求める A の値になんらかの影響を与えることが推定さ
れる。しかし、その影響を正確に評価するために必要
な凹凸が少ない静穏時の海底地形データが不十分
なため、その検討は今後の課題としたい。

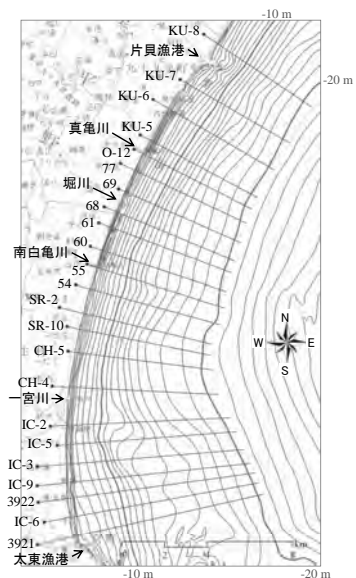


図 3 海底地形図および水準点と測線の位置

(図中の黒丸が水準点を示す。日本水路協会²⁴⁾をもとに作成。)

その後 1975 年の場合と同様に、式(1)をもとに 2005
年の海底面を示す地形縦断形を作成した。 A は主
として底質の粒径と強い関係があると指摘されてお

表 2 海浜地形パラメータおよび汀線変化量

水準点名 (飯岡漁港からの距離, km)	KU-8 (30.68)	Katakai (32.03)	KU-7 (32.97)	KU-6 (34.36)	KU-5 (35.96)	O-12 (36.65)	77 (37.46)	69 (38.57)	68 (39.52)	61 (40.23)	60 (41.35)
A (海浜断面係数)	0.068	0.065	0.065	0.070	0.073	0.073	0.075	0.077	0.080	0.080	0.080
Δy_{real} (1975~2005年における実際の汀線変化量, m)	No data	154	75	-14	-24	-79	-69	5	-10	2	-36
累積地盤変動量(=海面上昇量 S とみなす) (1975/1/1~2005/12/31, m)	-0.20	-0.27	-0.32	-0.35	-0.31	-0.30	-0.27	-0.37	-0.37	-0.35	-0.32
β (海浜の平均勾配, 百分率)	2.8	0.8	0.8	1.7	2.1	1.7	1.9	2.9	2.4	3.0	4.1
W_* (汀線から水深10 mまでの岸沖方向距離, m)	1632	1524	1739	1719	1606	1595	1595	1546	1493	1469	1382
$\Delta y_{k, \theta=1}$ (地盤沈下による動的な汀線変化量, m, バームの高さ $\theta=1$ m)	-32	-46	-56	-56	-47	-45	-40	-52	-50	-47	-42
$\Delta y_{k, \theta=5}$ (地盤沈下による動的な汀線変化量, m, バームの高さ $\theta=5$ m)	-25	-43	-52	-46	-38	-38	-33	-42	-41	-37	-33

水準点名	55 (42.11)	54 (43.10)	SR-2 (44.27)	SR-10 (44.97)	CH-5 (46.04)	CH-4 (47.64)	IC-2 (49.38)	IC-5 (50.18)	IC-3 (51.18)	IC-9 (51.93)	3922 (52.65)	IC-6 (53.49)	3921 (55.00)
A	0.081	0.079	0.079	0.080	0.081	0.076	0.079	0.075	0.066	0.060	0.055	0.054	0.052
Δy_{real}	-39	-16	0	-16	-4	-60	-3	-7	14	-3	-3	-39	No data
S	-0.43	-0.35	-0.21	-0.25	-0.32	-0.34	-0.11	-0.10	-0.33	-0.35	-0.34	-0.23	-0.20
β	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.5	1.7	1.4	1.3	1.2	1.0	1.1	1.4
W_*	1487	1478	1454	1420	1398	1560	1597	1589	1876	2221	2444	2501	2565
$\Delta y_{k, \theta=1}$	-59	-49	-29	-34	-42	-50	-15	-14	-58	-73	-80	-54	-49
$\Delta y_{k, \theta=5}$	-52	-43	-26	-31	-37	-43	-13	-12	-49	-61	-68	-45	-40

(三村ほか²⁶⁾, 対象地域および期間内に底質の粒径が大きく変わることは無いと仮定し, 上記 A の値をそのまま使用した。実際, A の値の沿岸方向の変化に注目すると, 多少のばらつきはあるものの, 調査地中央部で大きく南北両端で小さいという山なりの傾向を示している。これは, 調査範囲の南北両端からの沿岸漂砂を通じた土砂供給(次節 6.1 で後述)による, 底質粒径の連続的な変化に対応している可能性が想定される。以上の計算により求めた海浜縦断面をもとに, 各測線間の標高値を線形補間により内挿し, 1975年と2005年の海底面を示す面的標高データをラスターデータとして作成した。

ところで, 砂浜海岸には高潮時または暴浪時の波の働きによって打ち上げられた砂がたまり, その表面が陸側へわずかに傾いたバームと呼ばれる微地形が

存在する。バームは汀線位置の変化に伴って侵食あるいは堆積作用を受けるため, 海浜侵食量を求めるためにその高さを決める必要がある。調査地域で実施した航空レーザ測量成果を用いて検討したところ, バームの高さ B は海岸方向に沿ってばらつき, 各測線上で代表的な値を決めることが難しかった。そこで, 1 m および 5 m という研究地域で得られた最小値と最大値の2つの値を設定した。バームの高さとして 5 m という最大値は過大であり, おそらくバームの上部に砂丘が堆積したものと考えられる。しかし, それらの砂丘堆積物も汀線変化に伴いバームと共に侵食されることが想定されるため, 5 m の値をそのまま使用した。

1975年と2005年の標高ラスターの差分を取り, 土砂損失量を計算したところ, バームの高さを 1 m としたときは $5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, バームの高さを 5 m としたときは

$4.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ という結果が得られた。以上の検討により、1975～2005年の31年間における海岸侵食に伴う土砂損失量は、 $4.9 \sim 5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定された。

6. 汀線変化に影響する要因

宇多⁶⁾およびRowley et al.²⁷⁾をもとに、砂浜海岸の典型的な侵食・堆積機構を以下にまとめる。

(1) 沿岸漂砂量・供給土砂量の変化

沖向きに突出した不透過構造物、離岸堤、大規模な防波堤の設置により、沿岸漂砂の遮断や流れの変化が発生し、構造物の周辺で侵食や堆積が生じる。また、河川からの流出土砂量の減少や海食崖の侵食対策により、海岸で侵食が発生する。

(2) 養浜・浚渫

養浜および浚渫・海砂採取が原因となって海岸にある砂礫の総量に変化し、土砂収支が崩れて堆積あるいは侵食が起きる。

(3) 地盤沈下

地盤沈下が直接的な原因で侵食が起きる。

(4) 深海への土砂流出

急深な湾に面した海岸では、漂砂の一部が海底谷を経由して深海へと流出する。

(5) 地球温暖化に伴う海水準の上昇

海水準の上昇により海岸部が水没し、さらに波による侵食が発生する。

以上の諸要因に関して、その影響程度を以下に評価する。調査対象期間は、1975～2005年の31年間とした。

6.1 南九十九里平野に流入する沿岸漂砂量

堀川・砂村¹³⁾により、九十九里海岸における沿岸漂砂の卓越方向が推定されている。その結果、海浜礫の最大礫径分布、海浜砂の粒度組成、海浜砂の重鉍物含有率、九十九里海岸を流れる河川の河口偏倚などの調査により、長期間の卓越方向として北の屏風ヶ浦から南下する流れと南の太東崎から北上

する流れが存在し、片貝漁港周辺で流れが衝突して沖に向かって流出すると推定された。その後、宇多ほか²⁸⁾により、南北沿岸漂砂の会合点が検討された。その結果、安定した汀線の法線方向から推定した卓越波の波向、および波の屈折計算の検討により、会合点は真亀川の南3.5 km地点とされた。したがって、沿岸漂砂の連続性を阻止する漁港や防波堤などの影響はあるものの、南九十九里海岸への土砂供給源として、片貝漁港を超えて流入する北からの沿岸漂砂と、太東漁港を超えて南から流入する沿岸漂砂が考えられる。

宇多ほか⁸⁾は、過去750年間の南九十九里平野全体の土砂堆積量をもとに、海岸構造物が設置される前の自然状態における対象地域全体の流入漂砂量を $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定した。さらに、南北沿岸流会合点の位置をもとに、北からの流入漂砂量を $0.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、南からの流入漂砂量を $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定した。以上の沿岸漂砂量の値は、片貝および太東漁港建設前の自然状態の値である。両漁港は1960年代後半以降順次建設・伸長されており、それにより沿岸漂砂の連続性が阻止され、対象地域への供給土砂量も減少していることが推測される。その減少割合を以下に検討する。

九十九里平野北端に位置する飯岡漁港では、1964年から漁港および防波堤の建設が始まり、東側の屏風ヶ浦からの沿岸漂砂が阻止されている。宇多ほか²⁸⁾は漁港設置前の自然状態において飯岡漁港を超えて九十九里海岸に流入する漂砂量を $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、また宇多ほか²⁹⁾は漁港建設後の値として $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定している。すなわち、漁港建設後は沿岸漂砂量が約3.5%まで激減したとされている。片貝および太東漁港は、防波堤の岸沖方向の長さが飯岡漁港のそれに比べると小規模なものの、沿岸漂砂量の減少が同様に発生したことが推定される(岸沖方向の防波堤長さは、飯岡漁港約1,000 m、片貝漁港約700 m、太東漁港約300 m)。また、佐藤ほか

³⁰⁾は宮城県大曲海岸における現地観測および海浜流計算により、突堤長と沿岸漂砂の通過率の関係を検討している。その結果、突堤長 50 m における通過率は約 70%，100 m では約 35%，150 m では約 20%，200 m では約 15%，250 m では約 10%とされている。なお、250 m より長い突堤の検討はなされていない。佐藤ほか³⁰⁾の結果をそのまま南九十九里に適用することはできないが、片貝、太東両漁港における沿岸漂砂量の大幅な減少を示唆するデータである。そこで、本研究対象地における沿岸漂砂量の正確な減少割合は不明であるが、宇多ほか²⁸⁾²⁹⁾および佐藤ほか³⁰⁾を参考に、今回は、漁港建設前の 5～20%まで減少したと仮定した。すなわち、片貝漁港を超えて流入する漂砂量は $3.5 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、太東漁港を超えて流入する漂砂量は $7.0 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、1975～2005 年の累計では、それぞれ $1.1 \sim 4.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $2.2 \sim 8.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ と推定した。

6.2 養浜・浚渫の影響

養浜に関する既存資料を以下にまとめる。千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー¹²⁾によると、1988～1992 年の期間に一宮海岸において毎年 $4,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜が行われている。また、千葉県は 2004 年度より養浜の実施に向けた調査検討を開始しており、その報告書として作成された南九十九里浜養浜計画(千葉県³¹⁾)によると、2002～2005 年の期間に南九十九里浜において合計 $17,700 \text{ m}^3$ の試験養浜が行われている。現在のところ確認できた養浜量は以上であり、1987 年以前や 1993～2001 年のデータが無い。今後も引き続き資料収集を続ける必要があるが、入手可能なデータにもとづいてまとめると、調査対象範囲における 1975～2005 年の期間の養浜量は少なくとも $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ となる。

九十九里沿岸での近年の浚渫量(星上ほか⁷⁾)によると、1975～2005 年の期間における総浚渫量は $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ と見積られる。ただし、浚渫が行われた

具体的な場所、すなわち河川に関しては河道内なのか河口付近の海底なのか、片貝漁港に関しては北側(屏風ヶ浦側)と南側(太東崎側)のどちらなのかは不明である。また、浚渫土砂の処理方法も沖捨てや養浜などが混在している。したがって、上記値のどの程度が実際に汀線変化に影響しているのかは不明であり、今後さらに詳細に調査する必要がある。

6.3 地盤沈下の影響

6.3.1 地盤沈下と海岸地形変化の関係

地盤沈下による汀線変化への影響を定量的に評価するために、本研究では、地盤沈下によって発生すると想定される海浜地形変化を相殺するのに必要な土砂量、あるいは汀線を維持するために必要な土砂量を、地盤沈下影響相殺必要土砂量と定義する。

地盤沈下により相対的に海面が上昇すると、その上昇量に応じて陸地が海面下に水没するため汀線が後退する。海岸の物質移動が汀線に垂直方向のみ、すなわち沿岸漂砂が無く岸沖漂砂のみ存在すると仮定し、さらに単純に海底を砂礫の移動がない固定床と仮定すると、海岸の地形勾配から汀線後退量を評価することができる(図 4 の点 a から点 b)。本稿ではこれを静的汀線変化と呼称する。ところで、海浜部分が波浪で移動しやすい未固結物質で構成されている場合、海底の平衡地形は入射波高と砂の粒径によって決定されと考えられる(Dean³³⁾、磯部³²⁾)。したがって、波高と粒径が変わらなければ、点 b に汀線が移動した場合にも、平衡地形に向けて地形変化

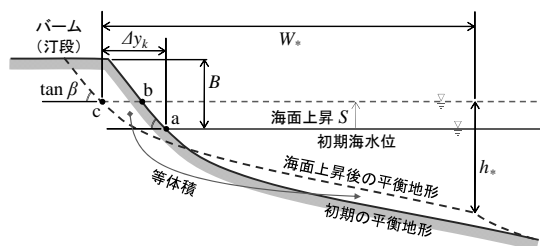


図 4 海面上昇による海岸侵食

(三村ほか²⁶⁾ および磯部³²⁾ をもとに作成)

が継続する。そのため、岸側の砂が沖に運ばれて、その侵食量と同量の砂が海底に堆積する。やがて点 c まで侵食が進んだところで平衡地形となり、侵食が止まる。この結果、点 a にあった海岸線は点 c まで後退することになる。本稿ではこれを動的汀線変化と呼ぶ。すなわち、海浜の平衡地形および断面内での砂の収支を考慮すると、地盤沈下による汀線後退量は静的汀線後退量よりも大きくなる。

三村ほか²⁶⁾により、以下のような動的汀線後退量を求める式が示されている。

$$\frac{3}{5}AW_*^{2/3} - \frac{3}{5}A(W_* - \Delta y_k)^{2/3} - SW_* + B\Delta y_k + \frac{0.5S^2 - SB}{\tan \beta} = 0 \quad (2)$$

ここで、 W_* は汀線から h_* (断面変化が生じる限界水深、すなわち波による地形変化の限界水深)までの岸沖方向距離、 Δy_k は汀線の動的後退距離、 S は海面上昇量、 B はバームの高さ、 $\tan \beta$ は海浜の平均勾配である(h , A , y は式(1)を参照)。式(2)は、海浜の平衡地形が式(1)で表わされると仮定し、2次元断面で考えた時に侵食土砂量と堆積土砂量が等しくなる、という条件下で求められる式である。海面の相対的変化という意味では海面上昇と地盤沈下は同様の現象と考えられるので、本稿では、海面上昇量を地盤沈下量とみなして式(2)をもとに動的汀線後退量を算出する。

一般に、砂浜の変化は岸沖方向と沿岸方向の2方向の土砂輸送(漂砂)に起因する(三村³⁴⁾)。したがって、岸沖方向の砂移動のみを考慮した式(2)は現実の地形変化を正確に表していない可能性がある。しかし本節の目的は、地盤沈下のみを原因とする汀線変化成分の抽出であるため、沿岸漂砂に起因する地形変化の影響を含まない式(2)を使用することが適切であると考えられる。

6.3.2 地盤沈下による海岸地形変化量の推定

宇多ほか²⁸⁾によると h_* の推定方法は以下の2種類である。①平面等深線形状から推定：一般に、波によ

る地形変化の限界水深より浅い区域の等深線は海岸線とほぼ平行になる。仮に限界水深以浅の海底において等高線が沖向きに大きく突出している(あるいは凹んでいる)場合、沿岸漂砂の作用によって、その突出(凹み)地形は均されてしまうためである。②時間的に繰り返行われた海浜縦断測量から推定：海底の地形変化が発生するのは限界水深以浅である。調査地において①の方法を用いて検討すると、図3の海底地形図が示すように水深11m以浅の等深線がほぼ海岸線に平行であり、 h_* の値は11m以浅と見積もられる。また②の方法を用いた例として、宇多ほか²⁸⁾は h_* の値を9mと見積もっている。以上2つの推定値をもとに、本研究では調査地における h_* を10mと推定した。 W_* の値は、図3の海底地形図をもとに求めた。

以上のパラメータおよび式(2)を用いて算出した動的汀線変化量 Δy_k を表2に示す。動的汀線変化量の最大値は水準点3922における-80m(バームの高さを1mとした場合)、最小値は水準点IC-5における-12m(バームの高さを5mとした場合)であった。

次に、地盤沈下影響相殺必要土砂量を求める。計算手順は5章で用いた2時期の標高ラスタの差分を計算する方法と同様である。ただし、地盤沈下の影響を評価するために、1975~2005年の期間における汀線の後退量を、実測値 Δy_{real} ではなく動的汀線変化量 Δy_k とした。その結果、1975~2005年の31年間における地盤沈下影響相殺必要土砂量は、バームの高さを1mとしたときは $9.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、バームの高さを5mとしたときは $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定された。

ただしこれらの推定値は、海面上昇による汀線変化を対象とした式(2)を用いており、水準点における地盤沈下が海底面でも一様に発生していることを仮定している。現実の状況を考えてと揚水井が存在するのは陸上のみであり、地盤沈下量は沖方向に向かって減衰すると考えられる。この減衰には様々な要因が影響すると考えられ、正確な値は不明である。そこ

で、陸上における地盤沈下量の水平方向の減衰率、すなわちある2地点間における地盤沈下量の差を2地点間の水平距離で除算した値を調べた。1975～2004年の30年間の累積地盤変動量を示した千葉県水準基標変動図(千葉県¹¹⁾)において、地盤沈下発生域と非発生域の境界部における沈下量の減衰率を調べると、 $-0.20 \sim -0.10 \text{ m}/1,000 \text{ m}$ 程度であった。本項の調査対象地における1975～2005年の平均累積地盤変動量すなわち S の平均は -0.29 m 、また、汀線から水深10mまでの平均距離すなわち W_* の平均は1,703mである。これらのデータから、水深10mの地点あたりで地盤沈下量がほぼ0まで減衰していると推定される。以上の考察に基づき、①地盤沈下量が陸上から海底まで一様、②地盤沈下量が水準点から沖方向に向かって水平距離に比例して減少し水深10mで0になる、という2つの条件下で、調査範囲における平均的な形状(A, S, β, W_* の平均値)の海浜縦断面を用いて地盤沈下に対応した動的平衡地形を計算し、断面図における海浜侵食量(面積)を算出して比較した。その結果、②の侵食量は①の36%になった。以上より、1975～2005年の期間における、地盤沈下量が沖方向に向かって減衰する効果を加味した地盤沈下影響相殺必要土砂量は、 $3.2 \sim 3.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定される。

6.3.3 パラメータの感度分析

以上の推定において、各パラメータが計算結果に及ぼす影響を評価するために、以下の手順で感度分析を行った。まず、各パラメータの変化幅は表2における最小および最大値、すなわち調査対象範囲内における各値のばらつきとした。次に、調査範囲内における平均的な形状(A, S, β, W_*, B の平均値)の海浜縦断面を基準として、各パラメータを一つずつ変化させ、動的汀線変化量 Δy_k および地盤沈下影響相殺必要土砂量を計算した。前章と同様に、地盤沈下量が沖方向に向かって減衰する効果も加味した。結果を図5に示す。各パラメータの変化割合は、 S, β, B が

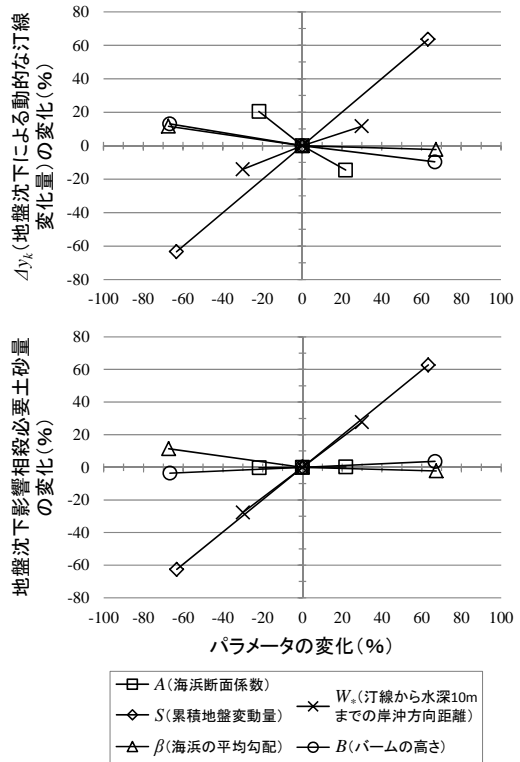


図5 パラメータの感度分析

$\pm 65 \sim 70\%$ 程度と相対的に大きく、 A, W_* が $\pm 20 \sim 30\%$ 程度と小さい。それらパラメータの変化による影響は、 Δy_k に関しては S の影響が $\pm 65\%$ 程度と相対的に大きく、その他の A, β, W_*, B の影響は $\pm 10 \sim 20\%$ 程度と小さい。また、地盤沈下影響相殺必要土砂量に関しては、 S の影響が $\pm 65\%$ 程度と相対的に大きく、 W_* の影響が $\pm 30\%$ 程度とやや大きく、その他の A, β, B の影響はおおよそ $\pm 10\%$ 未満と小さい。

以上まとめると、調査範囲内での場所によるばらつきを各パラメータの変化幅と仮定した場合、動的汀線変化量 Δy_k および地盤沈下影響相殺必要土砂量ともに、累積地盤沈下量 S の変化による影響が大きく、計算結果は $\pm 65\%$ 程度の幅で変化する。

6.3.4 近年の地盤沈下速度低下の影響

千葉県と天然ガス採取企業間で締結された地盤沈下防止協定(昭和48年締結、2010年細目協定改定、九十九里地域地盤沈下対策協議会³⁵⁾)により、

海岸線から500 m以内の区域および標高5 m未満の区域において、代替井以外の新規天然ガス井戸の掘削はできないものとされている。おそらくその効果もあり、調査対象範囲すなわち海岸沿いの地盤変動速度の平均値は、1975～2005年は-9.4 mm/yrであるのに対し、2006～2010年は-6.0 mm/yrと約60%まで抑制されている。そこで以下に、近年の地盤沈下速度低下の影響を検討する。

調査範囲における平均的な形状(A, β, W*, Bの平均値)の海浜縦断形を対象として、地盤変動速度を-9.4 mm/yrと-6.0 mm/yrとして、海岸地形変化を計算した。6.3.2と同様に、地盤沈下量が沖方向に向かって減衰する効果も加味した。その結果、動的汀線変化量 Δy_k は-1.5 m/yr から-0.9 m/yr と約60%まで減少し、地盤沈下影響相殺必要土砂量は8.2 m³/m から5.4 m³/m と約65%まで減少したと推定された。

6.4 海底谷への土砂損失

急深な湾に面した海岸では、漂砂の一部が海底谷を経由して深海へと流出する。宇多ほか³⁶⁾によれば、海底谷への土砂損失の可能性は海底谷の岸端水深と地形変化の限界水深との大小関係により区分される。すなわち、岸端水深が地形変化の限界水深より浅い場合海底谷への土砂流出が生じ、沿岸漂砂量の欠損が起こるため汀線の後退が生じるとされており、その事例として駿河湾(宇多ほか³⁷⁾)、富山湾

(粕谷ほか³⁸⁾)等がある。

九十九里海岸においては、片貝漁港沖に片貝海底谷が存在しているが、海岸からは30 km以上離れており、また海底谷の岸端水深は約100 mであり、九十九里海岸における地形変化の限界水深である水深10 m(6.3.2を参照)に比べてはるかに深い。したがって、研究対象地域において海底谷への土砂損失はほぼ無いと推定される。

6.5 温暖化による海水準変動の影響

日本周辺の海域ごとの海面水位変化(気象庁³⁹⁾)によると、1975～2005年の期間において、九十九里海岸が含まれる関東～東海海域では、5 cm程度の変動はあるものの明確な上昇あるいは下降の傾向は示していない。すなわち、長期的な海面上昇あるいは下降傾向は認められないため、汀線変化への影響は考慮しなくてもよいと考えられる。

7. 汀線変化に対する各要因の影響の比較およびまとめ

南九十九里海岸の土砂収支に関する以上の検討結果を図6にまとめる。土砂供給すなわち汀線を前進させる要因としては図中 No.1(1), 1(2)の沿岸漂砂(合計 $3.3 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^6$ m³)と2(1)の養浜(詳細は不明、少なくとも 3.8×10^4 m³以上)が挙げられ、一方、土砂侵食すなわち汀線を後退させる要因としては2(2)の浚渫(詳細は不明)、3の地盤沈下($3.2 \sim 3.5 \times$



図6 南九十九里海岸の海浜土砂量に対する各要因の影響

10^6 m^3), 4の海底谷への土砂損失(ほぼ無し), 5の温暖化による海水準上昇(ほぼ無し)が挙げられる。No.1~5 を全て合計すると $1.9\sim 3.2\times 10^6 \text{ m}^3$ の侵食量となり, 実際の土砂損失量($4.9\sim 5.2\times 10^6 \text{ m}^3$)と同オーダーの値の概算値となっている。両値の違いの原因としては, 実際の汀線変化量を求める際に含まれる誤差や, 各種要因の影響を推定する際に含まれる誤差, 今回詳細な土砂量を推定することができなかった養浜および浚渫量が可能性として考えられる。なお, 地域全体としては地盤が沈下しているものの, 汀線の前進(堆積)が起きている場所も存在する理由は, 沿岸漂砂や人工構造物の影響だと考えられる。

以上の考察により, 千葉県南九十九里海岸の汀線後退に対する地盤沈下の影響は他要因よりも大きいことが推定された。

謝辞

本研究は, 天然ガス鉱業会京葉天然ガス協議会(環境委員会)と東京大学の産学共同研究“地圏開発における持続可能性の考え方の構築と地域環境問題への対応技術の開発”の研究成果の一部である。関係各社および東京大学の関係者の方々には, 多くの有益なご意見および貴重な資料をいただいた。千葉県長生土木事務所の方々には貴重な資料をいただいた。匿名の査読者には有意義なご指摘を数多くいただいた。ここに心から感謝の意を表します。

引用・参考文献

- 1) Barends, F.B.J., Steedman, R.S. and Schroot, B.M.: Environmental effects of land subsidence induced by gas withdrawal along the Ravenna Coast Part I: Available information. in *Land Subsidence* edited by Barends, F.B.J., Carbognin, L., Gambolati, G. and Steedman, R.S., Millpress, pp. 137-152, 2005.
- 2) 大津宏康・Phienweij, N.・Supawiwat, N.・高橋健二・泉 裕昭: バンコクにおける地下水揚水量の不確実性を考慮した地盤沈下推定, 土木学会論文集 F, Vol.62, pp.25-40, 2006.
- 3) 遠藤 毅・川島眞一・川合将文: 東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史, 応用地質, Vol.42, pp.74-87, 2001.
- 4) 堀川清司: 新編海岸工学, 東京大学出版会, 384pp., 1991.
- 5) 三村信男・井上馨子・幾世橋慎・泉宮尊司・信岡尚道: 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2) —予測モデルの妥当性の検証と全国規模の評価—, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.1161-1165, 1994.
- 6) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, 442pp., 1997.
- 7) 星上幸良・小林昭男・宇多 高明・熊田貴之: 近世における九十九里浜の形成と変形, 沿岸域学会誌, Vol.17, No.3, pp.47-56, 2005.
- 8) 宇多高明・古池 鋼・三波俊郎・芹沢真澄: 海食崖に続く堆積性弧状海岸線の形成とその変形予測, 地形, Vol.30, pp.331-348, 2009.
- 9) 日本地形学連合: 地形学から工学への提言, 古今書院, 162pp., 1996.
- 10) 千葉県環境生活部水質保全課: 千葉県水準測量成果表[基準日昭和45年2月~基準日平成22年1月1日], 1970~2010.
- 11) 千葉県: 千葉県水準基標変動図(30年間変動量図)(10万分の1), 内外地図株式会社, 2005.
- 12) 千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー: 平成11年度県単海岸調査委託(サンドリサイクル業務計画作成)業務報告書, 203pp., 2000.
- 13) 堀川清司・砂村継夫: 千葉県九十九里海岸における漂砂の卓越方向に関する研究, 第18回海岸工学講演会論文集, pp.417-422, 1971.
- 14) 宇多高明: 九十九里海岸における過去6000年

- 間の海浜形成と近年の海浜変形との関係，地形，Vol.10，pp.343-355，1989.
- 15) 宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・星上幸良・長山英樹：南九十九里浜の侵食と堆積の実態，海洋開発論文集，Vol.24，pp.1321-1326，2008.
- 16) 千葉県土木部河川海岸課：千葉の海岸，48pp.，1996.
- 17) 千葉県長生土木事務所・株式会社アイ・エヌ・エー新土木研究所：昭和 59 年度南九十九里1号海岸調査報告書，1985.
- 18) 砂村継夫：関東地方の海岸環境の変化，西川治監修，氷見山幸夫・新井 正・太田 勇・久保幸夫・田村俊和・野上道男・村山祐司・寄藤 昂編：アトラス 日本列島の環境変化，朝倉書店，pp.110-111，1995.
- 19) 千葉県県土整備部河川環境課：千葉東沿岸海岸保全基本計画(平成 15 年 8 月策定)，2003.
<http://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/keikaku/kendoseibi/higashi-mokuji/index.html> [Cited 2013/5/27]
- 20) 町田 洋：九十九里海岸における人工構造物の地形に及ぼす影響について，筑波大学第一学群自然学類地球科学専攻 平成 2 年度卒業論文，64pp.，1990.
- 21) 国土地理院：1:5,000 国土基本図，IX-LF 73，74，83，93，IX-MF 02，12，22，32，42，昭和 46 年測量.
- 22) Bruun, P.: Sea-level rise as a cause of shore erosion, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol.88, pp.117-130, 1962.
- 23) Bruun, P.: The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two- and three-dimensional usages, Journal of Coastal Research, Vol.4, pp.627-648, 1988.
- 24) 日本水路協会：海底地形デジタルデータ M7001 Ver.2.0 関東南部，2006.
- 25) 砂村継夫：海岸地形．土木学会編：海岸施設設計便覧[2000 年版]，丸善，pp.119-124，2000.
- 26) 三村信男・幾世橋慎・井上馨子：砂浜に対する海面上昇の影響評価，海岸工学論文集，Vol.40，pp.1046-1050，1993.
- 27) Rowley, R.J., Kostelnick, J.C., Braaten, D., Li, X. and Meisel, J.: Risk of rising sea level to population and land area, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol.88, pp.105-107, 2007.
- 28) 宇多高明・高田 修・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼：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，Vol.47，pp.686-690，2000.
- 29) 宇多高明・酒井和也・清野聡子・星上幸良：飯岡漁港南防波堤の延伸に伴う漂砂上手側での砂浜形成と環境変化，海洋開発論文集，Vol.26，pp.1071-1076，2010.
- 30) 佐藤慎司・山本幸次・和田一範・伊澤武仁・大谷靖郎・橋本 新：大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂観測と海浜変形予測，海岸工学論文集，Vol.45，pp.556-560，1998.
- 31) 千葉県：南九十九里浜養浜計画，59pp.，2009.
- 32) 磯部雅彦：気候変動の海岸への影響と適応策，河川，Vol.1，pp.35-40，2008.
- 33) Dean, R.G.: Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, Journal of Coastal Research, Vol.7, pp.53-84, 1991.
- 34) 三村信男：アジアにおける海面上昇の海岸への影響，月刊 地球，Vol.19，pp.540-544，1997.
- 35) 九十九里地域地盤沈下対策協議会：天然ガス採取の現状と地盤沈下の防止対策 平成23年版，136pp.，2012.
- 36) 宇多高明・山本幸次・板橋直樹：拡張された等深線変化モデルによる海底谷周辺における海

浜地形変化予測，海岸工学論文集，Vol.40，
pp.391-395，1993.

- 37) 宇多高明・小俣 篤・堤 博志・吉村敏明：深海
への土砂流出実態の現地調査，第33回海岸工
学講演会論文集，pp.277-281，1986.
- 38) 粕谷晋一・宇多高明・布施勝義・二俣 秀・山本
幸次：下新川海岸の生地鼻周辺の海浜変形特
性，海岸工学論文集，Vol.40，pp.431-435，1993.
- 39) 気象庁：日本周辺の1960年以降の海域ごとの
海面水位変化，2009. http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/sl_area/sl_rgtrend.html [Cited
2013/5/27].

著者紹介



小花和 宏之（正会員）

千葉大学環境リモートセンシング研究センター
（千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33），
昭和49年生まれ，平成17年4月筑
波大学大学院生命環境科学研究科卒，
同年8月東京大学勤務（空間情報科
学研究センター，新領域創成科学研究科），
平成22年12月より現職（特任助教），
博士（理学），日本地形学連合会員。
E-mail: obanawa@faculty.chiba-u.jp



徳永 朋祥（非会員）

東京大学大学院新領域創成科学研究
科（千葉県柏市柏の葉 5-1-5），昭
和42年生まれ，平成3年3月東京大
学大学院理学系研究科卒，同年4月
東京大学工学部資源開発工学科勤務，
平成7年4月東京大学大学院工学系
研究科勤務，平成9年8月ウイスコ
ンシン大学地質学地球物理学教室勤
務，平成17年4月東京大学大学院新
領域創成科学研究科勤務，現在同大
学教授，博士（工学），日本応用地質学
会，日本地下水学会会員。
E-mail: tokunaga@k.u-tokyo.ac.jp

Effect of land subsidence on shoreline changes based on coastal sediment budget at the southern Kujukuri Plain, Chiba Prefecture, Japan

Hiroyuki OBANAWA and Tomochika TOKUNAGA

ABSTRACT : Because of the industrial withdrawals of dissolved methane and groundwater, land subsidence has been occurring at the southern Kujukuri Plain in Chiba Prefecture, Japan, with the maximum value of accumulated subsidence of *ca.* 100 cm in the last 42 years. At the same time, beach erosion of the area has been observed. Therefore, it is concerned that continuous land subsidence has caused and will cause further beach erosion. Judging from sediment budget of the beach sand in the study area as a whole during the period from 1975 to 2005, land subsidence has had greater effect on beach erosion than other factors such as sand discharge into submarine canyon or sea-level rise caused by global warming.

KEYWORDS : *land subsidence, shoreline change, sediment budget, longshore sand transport, Kujukuri coast*