

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—

三村 信男* ・井上 馨子**・幾世橋 慎***
泉宮 尊司****・信岡 尚道*****

1. はじめに

地球温暖化に伴って海面上昇が生じると、海岸の環境に様々な影響が生じると懸念されているが、砂浜の侵食もその一つである。これに対する予測の多くは Bruun 則に基づいている (例えば Leatherman, 1988)。著者らも Bruun 則をベースにして予測モデルを検討し、それを茨城県の砂浜に適用して、1m の海面上昇によって現存する砂浜面積の約 90% が消失するという結果を得た (三村ら, 1993)。こうした予測の確かさはモデルの妥当性にかかっているが、海面上昇が数十年オーダーで徐々に進行する現象であるため、厳密な意味で予測モデルの妥当性を検証することは難しい。そこで、本研究では、過去に生じた沿岸部の地盤沈下を相対的な海面上昇とみなして予測モデルの検証を試みた。具体的には、新潟海岸を取り上げ、昭和 30 年代から 50 年代までの約 20 数年間の地盤沈下による汀線後退を予測モデルによってどの程度再現できるかを検討した。

さらに、予測モデルを全国の海岸線に適用し、海面上昇によって日本全体でどの程度の砂浜の侵食が生じる可能性があるかを検討した。

2. 予測モデルの検証

2.1 予測モデルの概要

地球温暖化による海面上昇は地球上のあらゆる海岸に一樣に (上昇量に場所的分布はあるが) 作用するため、本研究では漂砂源や沿岸漂砂といった局地的な要因を無視する立場をとった。沿岸漂砂による地形変化がなければ、砂浜の海面上昇に対する応答は、岸沖方向の縦断地形の変化として生じる。図-1 に示すように、海面が上昇すると縦断地形は新しい水位に対する平衡地形に向かって変化するため、静的な後退以上に砂浜は侵食され、汀線が後退すると考えられる (Bruun 則)。

海浜の平衡地形に関しては種々の研究があるが、こ

では平衡縦断地形が Bruun (1962) の式(1)で表されるとした。

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

ここで、 y は汀線からの沖方向距離、 h は水深、 A は各海岸毎に定まる定数 (海浜断面係数) である。

平衡縦断地形が式(1)のように与えられれば、汀線付近で侵食された土砂量と沖側に運ばれる土砂量とが等しいとして、海面上昇による汀線の後退距離を求めることができる。これには Dean (1991) の式や著者ら (1993) の式がある。この 2 つの式は、陸上における前浜勾配の考慮に違いがあるが、汀線の後退距離の推算結果には大きな差がないことが確かめられている。ここではこれらの評価式を一括して Bruun 則モデルと呼ぶことにする。

2.2 新潟海岸における地盤沈下と海岸地形

(1) 地盤沈下と海岸侵食

Bruun 則モデルの妥当性を検討するため、地盤沈下を相対的な海面上昇ととらえて、海岸侵食との関係を検討した。対象としたのは新潟市前面の新潟海岸である。

新潟海岸は明治中期以降、場所によっては汀線が 350 m も後退するなど長く侵食に悩まされており、既に多くの調査、研究が行われている。その結果、新潟海岸における侵食は、①大河津分水の開削による信濃川の流送土砂の減少、②新潟西港の防波堤による沿岸漂砂の遮蔽、③急激な地盤沈下、の 3 つが主要な原因であると指摘されている。

このうち地盤沈下に着目すると図-2 に示すような経過をたどっている (新潟市, 1991)。水溶性天然ガスを採取するため地下水汲み上げが行われた結果、昭和 30 年以降急激な地盤沈下が発生した。昭和 48 年 9 月には天然ガ

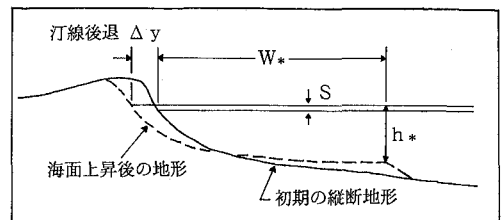


図-1 海面上昇に対する海浜縦断地形の応答

* 正 会 員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科
** 工 修 (株)三井共同建設コンサルタント
*** 学生会員 茨城大学大学院 工学研究科
**** 正 会 員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科
***** 正 会 員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

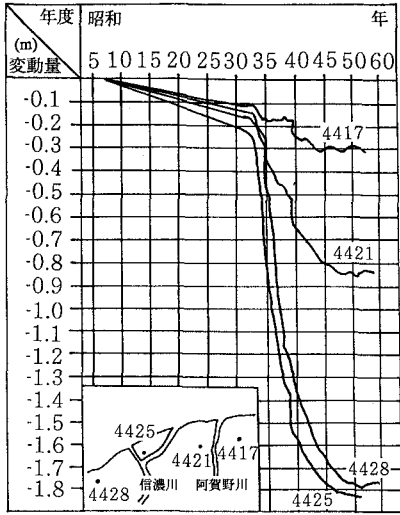


図-2 新潟における地盤沈下の経過

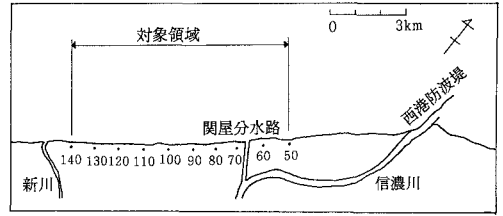


図-3 検証の対象領域

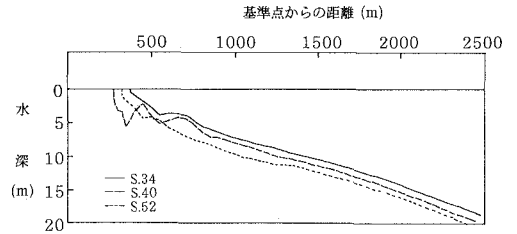


図-4 地盤沈下による縦断地形の変化 (測線 No. 50)

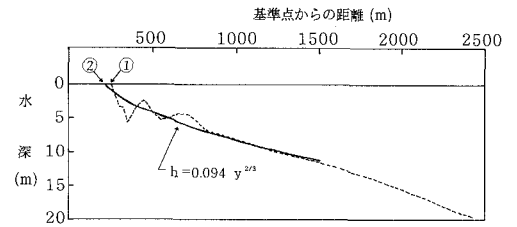


図-5 平衡地形の式の適合性 (測線 No. 50, 昭和52年)

採取のための地下水の汲み上げが全面的に規制され、地盤沈下も昭和50年以降沈静化している。この間、新潟海岸では、1.0~2.2mの地盤沈下が生じ、場所によっては100m以上の汀線の後退が生じている。

(2) 対象時期と領域

新潟海岸では建設省信濃川下流工事事務所や新潟県の手によって昭和30年以降1~2年の頻度で深浅測量が実施されてきている。本研究ではこのデータを利用したが、検証時期は、著しい地盤沈下を経験した昭和34年から昭和54年までの20年間に設定した。地点によって異なるがこの期間に最大11回の深浅測量データが利用できた。

Bruun則モデルの対象は自然の砂浜であるため、検証対象もなるべく人為的影響の少ない場所が望ましい。そこで、対象領域としては、図-3に示すように関屋分水の東側(測線 No. 50)から新川河口(測線 No. 140)までの9kmの区間をとった。関屋分水の通水は昭和47年に開始されているので、東端では海岸の人工化が進んだことになるが、対象領域に離岸堤の建設が始まったのは昭和54年以降であり、全体としては自然海岸が残されていたと判断した。

(3) 縦断地形

深浅測量は沿岸方向に100m間隔で行われているが、1km毎の測線(No. 50, 60, ..., 140)を代表測線として取り上げることにした。

図-4に測線 No. 50における縦断地形の経年変化を示す。昭和34年から52年の間に、沖合も含めて全体として下方に移動しており、広い範囲で地盤沈下が進行したことがわかる。図-5は、測線 No. 50の昭和52年の縦断地

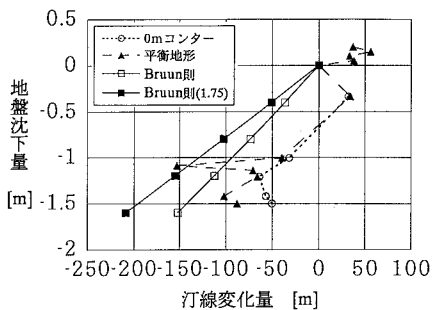
形に平衡地形の式(1)をあてはめた結果を示している。これをみると、地形変化の激しい碎波帯周辺では不一致が大きいが、汀線から移動限界水深(今回は10m、後述)までの範囲で大局的には式(1)は縦断地形をよく表している。

2.3 Bruun則モデルによる汀線後退量の推算

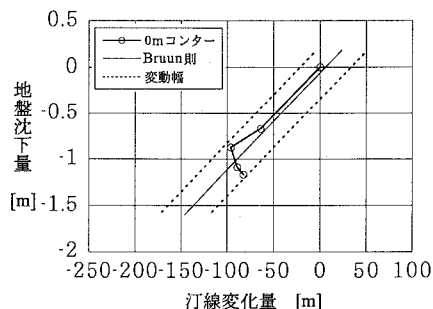
(1) 汀線後退量の比較

つぎに、汀線の後退量の実測値と推測値との比較を行う。まず、深浅測量データを用いて、汀線の経年変化を調べた。汀線としては、0mコンターの位置(図-3中の①)で与えられる実測汀線と、縦断地形に平衡地形の式(1)をあてはめたときに得られる汀線の位置(図-3中の②)、すなわち概念的な平衡地形の汀線とを用いることにした。図-6, 7に、これらの汀線位置の変化を地盤沈下の進行と対応させて示すが、どちらの汀線も地盤沈下とともに後退しているのがわかる。

上の汀線後退を検証データとして、Bruun則に基づく著者らの評価式を用いて、地盤沈下に対応する汀線の後

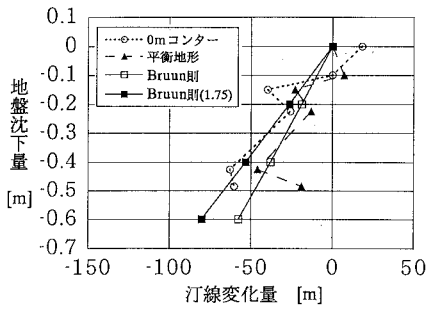


(a) 実測値と推算値の比較

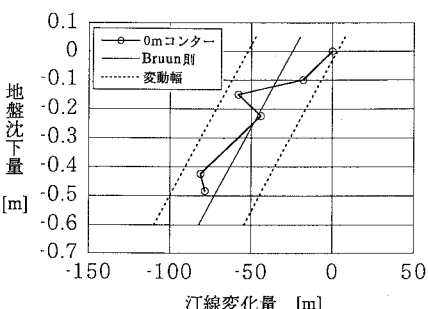


(b) 推算値のあてはめ

図-6 地盤沈下と汀線の後退量の対応 (測線 No. 50)



(a) 実測値と推算値の比較



(b) 推算値のあてはめ

図-7 地盤沈下と汀線の後退量の対応 (測線 No. 110)

の傾向がより明瞭にみてとれる。

一方、 h_* を1.75倍した場合(図中Bruun(1.75))の汀線後退量は明らかに大きく、いかに長期的現象とはいえ移動限界水深を1.75倍するのは過大評価になるようにみえる。

(2) 汀線位置の変動幅

汀線の後退量の推算は基準となる汀線の位置に大きく左右される。実測された汀線の位置は測量時の波浪条件によって、必ずしも平均的な汀線とは一致せず、むしろそれからずれている場合が多いと考えられる。そこで、汀線のこの短

期的な変動を予測に取り込むことを考えた。

平衡地形の存在を前提にすれば、平衡地形の汀線の位置が平均的な汀線の位置であり、時々の実際の汀線はこのまわりに変動していると考えられる。深浅測量データからこの変動を求め、すべての測線で比較できるように、各測線の100 cmの海面上昇による汀線の後退量(Δy_{100})で無次元化した。

$$\Delta y' = \frac{y_{mes.} - y_{eq.}}{\Delta y_{100}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $y_{mes.}$ 、 $y_{eq.}$ はそれぞれ実測汀線と平衡地形の汀線の位置である。

図-8は汀線の無次元変動幅の分布を示したものである。ばらつきはあるものの分布は正規分布的であり、 $\Delta y'$ の分散を汀線の変動幅の代表量と考えてよいであろう。

図-6, 7(b)中にこの汀線の変動幅がいられているが、実測汀線とBruun則モデルによる推算値との差は変動幅の中に入っている。また、全測線について、無次元化した汀線の実測後退量とBruun則モデルによる推算値とを比較したものが図-9である。この図を見ると、変動幅を考慮すれば地盤沈下にもなって生じる汀線の後退がBruun則モデルで極めてよく評価できることがわかる。

なお、沿岸漂砂の寄与も検討したが、対象期間におけ

退量を計算した。測線毎の地盤沈下の時系列は、国土地理院の実測結果によって与えた。著者らのBruun則モデルで、汀線の後退量を計算するためには、侵食される陸上の地形(バームの高さと前浜勾配)と移動限界水深を知る必要がある。しかし、対象期間内の地形実測値は入手できなかったため、現時点での測量結果と砂村らの研究(Sunamura, 1984; 武田・砂村, 1983)を勘案して、全測線でバームの高さは2.0 m、前浜勾配は0.056に固定した。新潟海岸における移動限界水深 h_* は7~8 mといわれている。しかし、長期的な地形変化には相対的に大きな波が寄与すると考え、年平均最大有義波を用いてHallermeir(1978)の式で h_* を計算することにし、 $h_* = 10$ mと設定した。さらに、Nichollsら(1993)はこの値を1.75倍して用いることを提案している。そこで、 $h_* = 17.5$ mとした推算も行った。

こうして求めたBruun則モデルによる汀線位置を図-6, 7に示す。図中(a)では、実測汀線とBruun則モデルによる推算値($h_* = 10$ m)は、基準点が異なるために互いにずれているようにみえるが、傾きを見ると両者はよく一致している。図-6, 7(b)は、0 mコンターの汀線とBruun則の推算結果とがなるべく一致するように基準点の位置を移動させて重ねたものであるが、上

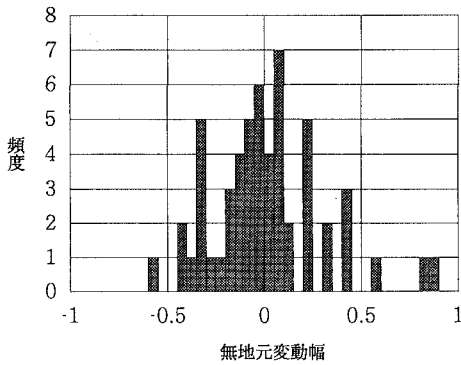


図-8 汀線の無地元変動幅の分布

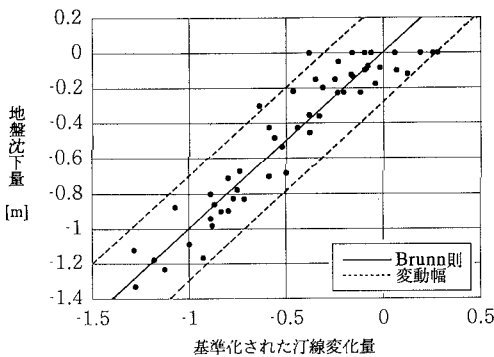


図-9 Bruun 則モデルによる汀線後退量の適合性

る汀線後退は主として地盤沈下によって生じたものであると考えられた。

3. 全国規模の侵食量の予測

3.1 算定方法

上の結果に基づいて、海面上昇による全国規模の侵食量の予測を試みた。

全国規模で算定するためには全国で整ったデータが必要である。そのため、海岸4省庁が実施したアンケート調査(農林省構造改善局他, 1990)で得られた海岸諸条件のデータセットを利用した。この中では、全国9,688の海岸毎に、砂浜の延長、幅、平均海底勾配、沖波の条件などが与えられている。このデータおよび沿岸波浪観測年報(運輸省港研)等から波浪条件を求め、海岸毎に移動限界水深やバームの高さを算定した上で、Bruun 則モデルによる侵食量を計算し、都道府県毎に集計した。海面上昇の値としては、IPCC WG I (1990)の予測に基づいて、30, 65, 100 cmの3通りのシナリオを与えた。

3.2 予測の結果

海岸侵食の予測結果を表-1に示す。表には全国集計と共に、都道府県毎の集計も示されている。また、海面

上昇による影響は、30, 65, 100 cmの上昇量毎に、単純な水没によって失われる面積(水没面積)、侵食面積、現存の砂浜面積に対する侵食面積の割合(侵食率)で示してある。

この表より、海面上昇の影響が驚くほど大きいことがわかる。田中ら(1993)と同じく沖縄県を除いて考えると、30 cmの上昇でも、全国で10,810 haの砂浜が侵食され、それは現存している砂浜の56.6%に相当する。田中ら(1993)は5万分の1地形図を用いて明治以来の海岸侵食量を推計したが、その推定値は全国で12,539 haであった。したがって、30 cmの海面上昇だけで明治から昭和末までの間に生じた侵食に相当する影響が生じることになる。更に、65 cmでは81.7%、100 cmの上昇では実に90.3%の砂浜が消失することになる。影響の現れ方は都道府県毎に異なり、65 cmの上昇でほとんど全ての砂浜を失うところも多い。

茨城県に対する前回(三村ら, 1993)の予測結果は、侵食率が3レベルの海面上昇に対してそれぞれ、43.8, 76.2, 89.5%となっていた。今回の算定では波浪データを全国77の沿岸区分を単位に与えているにもかかわらず結果の値は極めて近い。このことから、今回の予測評価結果は全体的には海面上昇による砂浜の侵食量に対してよい目安を与えているといえよう。

4. まとめ

本研究では、地盤沈下を相対的な海面上昇ととらえることによって、Bruun 則モデルの妥当性の検証を試みた。新潟海岸の地盤沈下にこのモデルをあてはめて算定される汀線の後退量が、実際に生じた汀線の後退量と良く一致することを確かめた。この結果を受けて、Bruun 則モデルによって全国規模の侵食の予測を試みたところ、30 cmの海面上昇でも約11,000 ha(現存の砂浜の56.6%)の侵食が生じるという結果を得た。この面積は、明治以降昭和53年までの70年間の侵食面積に匹敵するものであり、改めて海面上昇の影響に注意を喚起する結果である。

本研究を進めるにあたり、建設省信濃川下流工事事務所、海岸4省庁、愛媛大学山口正隆教授からデータを提供していただき、通産省地質調査所磯部一洋室長には新潟海岸についてご教授をうけた。また、本研究は海岸工学委員会地球環境委員会での研究を継続したものである。関係の方々から心からの謝意を表す。

参考文献

武田一郎・砂村継夫(1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 254-258.
 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.

表-1 海面上昇による全国規模の侵食量の予測

	海岸線延長 (km)	砂浜延長 (km)	砂浜面積 (ha)	海面上昇量s=0.3m			海面上昇量s=0.65m			海面上昇量s=1.0m			明治～昭和 侵食面積 (ha)
				水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	
全国計	31,642	5,508	19,113	6,294	10,810	56.6	11,049	15,611	81.7	13,824	17,267	90.3	12,539
北海道	3,023	1,489	4,398	1,721	3,015	68.6	2,974	4,051	92.1	3,667	4,255	96.8	4,534
青森県	730	276	1,250	397	539	43.1	663	745	59.6	846	897	71.8	676
岩手県	713	37	137	34	76	55.5	66	108	78.5	85	121	88.2	21
宮城県	864	91	492	132	196	39.8	256	345	70.2	340	419	85.2	68
秋田県	264	128	507	235	369	72.8	431	498	98.2	493	507	100.0	447
山形県	133	38	215	106	116	54.1	205	213	99.1	213	215	100.0	84
福島県	153	63	246	91	138	56.1	148	206	83.6	179	230	93.4	259
茨城県	179	115	671	173	295	44.0	298	507	75.6	403	614	91.4	300
千葉県	476	147	964	241	339	35.2	460	623	64.6	592	774	80.3	315
東京都	585	27	83	27	67	80.7	54	82	98.5	68	83	100.0	0
神奈川県	430	62	334	102	143	42.8	179	254	75.9	223	293	87.7	62
新潟県	598	217	647	262	467	72.1	437	612	94.6	529	640	99.0	847
富山県	152	31	118	27	76	64.2	47	115	97.3	59	116	97.9	305
石川県	597	146	504	253	341	67.6	407	490	97.1	468	504	99.9	384
福井県	433	52	191	53	123	64.4	97	180	94.6	124	191	100.0	56
静岡県	517	151	1,404	259	372	26.5	545	757	53.9	768	1,087	77.4	327
愛知県	660	124	621	167	205	33.0	278	343	55.2	337	412	66.3	298
三重県	1,089	134	399	166	220	55.1	274	323	80.8	325	362	90.7	196
京都府	302	40	126	38	89	70.5	70	123	98.2	89	126	100.0	49
大阪府	187	15	31	5	20	65.6	10	29	95.4	15	31	100.0	20
兵庫県	778	95	175	70	113	64.3	114	158	90.0	147	172	98.0	635
和歌山県	667	51	152	53	117	77.2	96	149	98.2	115	152	100.0	38
鳥取県	161	68	355	75	188	53.0	157	285	80.4	206	307	86.5	137
島根県	1,032	100	323	107	227	70.2	205	318	98.5	274	323	99.9	51
岡山県	581	53	52	36	46	88.4	45	52	100.0	50	52	100.0	165
広島県	1,123	118	157	51	122	78.1	92	147	94.2	119	154	98.1	40
山口県	1,551	153	269	126	211	78.4	193	259	96.4	228	269	99.9	191
徳島県	436	47	171	42	90	52.7	77	142	83.0	100	158	92.8	233
香川県	791	205	377	110	250	66.4	191	323	85.6	239	345	91.4	61
愛媛県	1,544	196	322	137	221	68.7	218	298	92.5	264	315	97.7	296
高知県	709	82	408	98	206	50.6	177	358	87.9	236	403	98.8	114
福岡県	687	118	271	145	216	79.6	214	258	95.2	242	266	97.9	189
佐賀県	290	11	51	14	20	39.8	28	40	79.3	40	49	96.8	39
長崎県	4,389	154	517	103	254	49.2	199	366	70.9	272	416	80.5	85
熊本県	993	37	175	53	60	34.4	94	106	60.6	118	125	71.7	17
大分県	723	85	309	110	139	45.1	178	227	73.5	221	269	87.2	356
宮崎県	347	125	479	138	291	60.8	249	437	91.2	323	468	97.5	170
鹿児島県	2,761	426	1,212	336	831	68.5	619	1,081	89.2	807	1,150	94.9	474
沖縄県	1,713	705	1,085	883	1,052	97.0	1,030	1,080	99.5	1,060	1,083	99.8	341

* 全国計は沖縄県を除いた数値である。

新潟市 (1991): 新潟市史 資料編 12 自然, 367 p.
 農水省構造改善局・農水省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局 (1990): 全国海岸域保全利用計画調査報告書, 336 p.
 三村信男・幾世橋真・井上馨子 (1993): 砂浜に対する海面上昇の影響評価, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 1046-1050.
 Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div, ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.
 Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, J. Coastal Research, 7 (1), pp. 53-84.
 Hallermeier, R. J. (1981): A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, Coastal Engineering, 4, pp. 253-277.
 IPCC WG1 (1990): Climate Change—The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, 365 p.
 Leatherman, S. P. (1988): National Assessment of Beach Nourishment Requirements Associated with Accelerated Sea-Level Rise, US EPA Report, 74 p.
 Nicholls, R. J. (1993): Coastal evolution and accelerated sea-level rise, Large Scale Coastal Behavior '93, 'usgs, pp. 137-140.
 Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slope, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.