

15. 海面上昇に対する海岸地形の応答 — 砂浜, 河口地形を中心に —

RESPONSES OF COASTAL LANDFORM TO SEA-LEVEL RISE - FOCUSING ON SANDY BEACHES AND RIVER MOUTHS -

三村信男* ・ 幾世橋 慎** ・ 川口英一***

Nobuo MIMURA Makoto Kiyohashi Eiichi Kawaguchi

ABSTRACT; Coastal landform would receive serious impacts from global warming-induced sea-level rise. The responses of these natural environment to changes in mean sea level are studied focusing on sandy beaches and river mouths. The Bruun Rule is used to evaluate the shoreline retreat and the area eroded by sea-level rise. For 30cm, 65cm and 100cm of sea-level rise, 56.6%, 81.7% and 90.3% of the currently existing sandy beaches would disappear, respectively. Even a small amount of sea-level rise may seriously exacerbate beach erosion in Japan. The transport and deposition of sediment around a river mouth are examined by a numerical model. It was found that sea-level rise would shift the positions for sedimentation upstream, and that this, in turn, increased the river surface producing higher potential for the river flooding.

KEY WORDS; coastal landform, sandy beach, river mouth, sea-level rise, impact analysis

1. はじめに

地球温暖化によって海面上昇や気候変動が生じると沿岸域の自然環境に様々な影響が生じると懸念されている。人口が集中し開発が進んでいるとはいえ、世界の海岸・沿岸域の大部分は、砂浜、砂丘、河口デルタ、湿地帯、サンゴ礁、マングローブ等の自然の地形によって占められている。これらに対して地球規模で環境変化が作用すれば、その影響は極めて大きなものになるであろう（例えば、IPCC WGII, 1990; 土木学会海岸工学委員会, 1994）。

たとえば、従来から海面上昇によって砂浜が侵食されると指摘されてきた。国や地域によっては非常に大きな国土の喪失が予測されていたり、観光・レクリエーション資源の喪失という観点から影響が心配されている。一方、河口付近では、海面上昇によって水深が増大し、流送土砂の堆積場所やパターンが変化すると指摘されている。世界の大河川の河口部には、広く低平なデルタが数多く発達している。河口デルタは、人口や産業がもっとも高密度に集中している地域であるが、同時に現在も土砂の堆積による陸地の形成という自然のプロセスが活発に続いている地域でもある。たとえば、中国南部、広東省に広がる珠江デルタでは、土砂の堆積によって1km/10年という驚くべき速度で陸地が海側に拡大している。海面上昇の結果、土砂輸

* 本論の一部は海岸工学論文集第41巻(1994)に発表されたものである。

* 茨城大学工学部都市システム工学科 Dept. of Urban and Civil Eng., Fac., of Eng., Ibaraki Univ. ** 東京電力(株) Tokyo Electric Power Co., *** 茨城大学大学院都市システム工学専攻 Dept. of Urban and Civil Eng., Graduate School of Eng., Ibaraki Univ.

送のパターンが変化し、かつ流域での降雨パターンの変化やダム建設による流量の減少が重なれば、デルタ前面での堆積パターンが大きく変化するであろう。また、植林が進めば土砂生産が減少し、珠江デルタは土砂供給の不足するデルタへと変化する可能性がある。

この他にも、サンゴ礁やマングローブの成長と存在は平均海面の変動に強く依存していることが知られている（例えば、茅根，1991）。したがって、将来の海面上昇の速度は、生態系としても重要なこれらの地形の存続を左右する要因に挙げられている。

このように海岸地形は、短期的で急激な人為的な改変圧力に加えて、長期的な気候変動に伴う環境変化に曝されている。一方、自然の地形は、これらの外力や環境条件の変化に対して、新しい形態に移行し、自らを適応させようとする作用をもっている。したがって、地形に対する影響の評価とは、こうした地形の応答をモデル化し、それによって将来の変化を予測するものになる。

海面上昇に対する応答をある程度でも定量的に予測できる対象（地形）は多くない。それには、地形の応答が場所毎に大きく異なり、一般化が難しいことも一因となっている。ここでは、それが試みられている分野として、砂浜と河口地形を取り上げモデル化の状況を紹介します。影響評価の結果を示す。

2. 砂浜に対する影響

2.1 予測モデルの概要

砂浜の変化は、一般に岸沖方向と沿岸方向の2つの方向の土砂輸送（漂砂）に起因する。地球温暖化による海面上昇は地球上のあらゆる海岸に様に（場所的に上昇量は異なるが）作用するため、多くの場合、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がとられる。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。砂浜には海岸毎に平均的な縦断地形（平衡地形）が存在すると考えられている。そのため、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）。

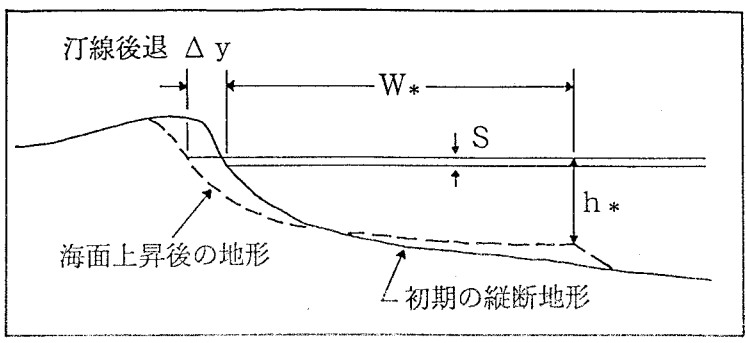


図-1 海面上昇による縦断地形の侵食

は海岸毎に平均的な縦断地形（平衡地形）が存在すると考えられている。そのため、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、ここでは平衡縦断地形がBruun(1982)の式、 $y = Ay^{2/3}$ で表されるとした。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。

平衡縦断地形がこの式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 Δy を求めることができる（Dean 1991, 三村ら 1993）。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。

Bruun則モデルを用いて汀線の後退距離を求めるためには、岸側での砂浜（バーム）の高さ、及び沖側での地形変化の終点（漂砂の移動限界）を知る必要がある。これは、従来の研究成果によって、入射波と砂の粒径が与えられれば推定することができる。

2.2 データと算定方法

三村ら（1994）は、Bruun則モデルに基づいて、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（農水省構造改善局他，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則モデルによって汀線の後退量と砂浜の侵食面積を計算し，都道府県毎に集計した．海面上昇の値としては，IPCC WGI(1990)の予測に基づいて，30, 65, 100cmの3通りのシナリオを与えた．

2.3 予測の結果

海岸侵食の予測結果を図-2, 3に示す．図-2は，全国の侵食面積率（侵食される砂浜と現存する砂浜の面積の比）を示しているが，海面上昇の影響が驚くほど大きいことがわかる．30cmの上昇でも，全国で11,775ha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）は航空写真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12,880haであった．したがって，30cm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．さらに，65cmでは81.7%，100cmの上昇では実に90.3%の砂浜が消失することになる．これらの侵食は，他の要因による海岸侵食の上に重なって生じると考えるのが自然で

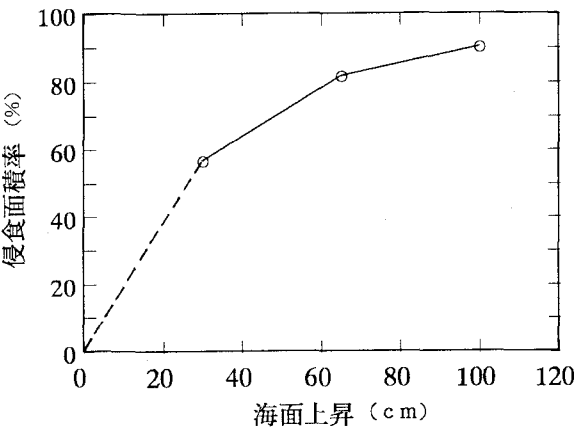


図-2 海面上昇量と侵食面積率

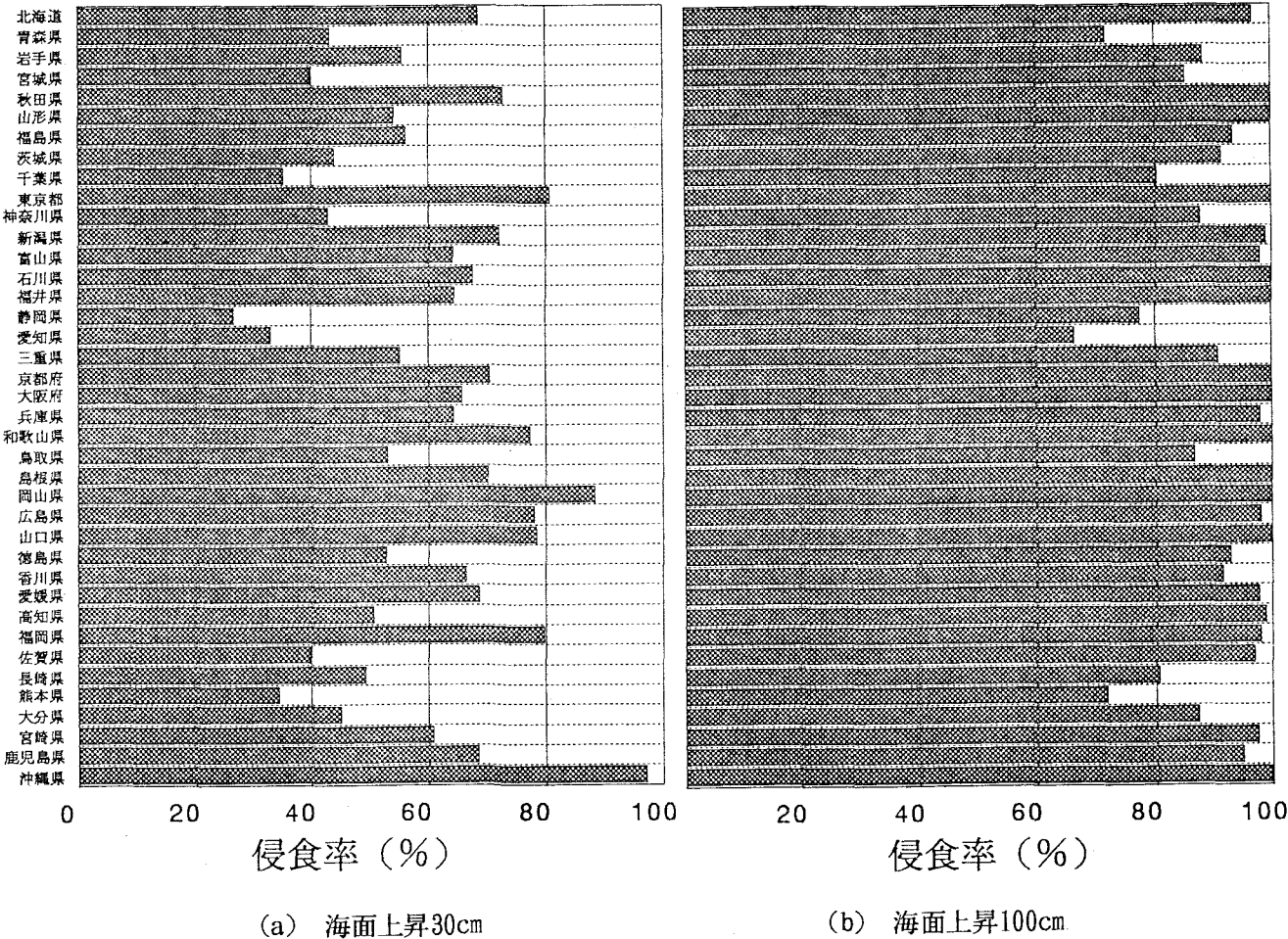


図-3 侵食面積率の都道府県分布

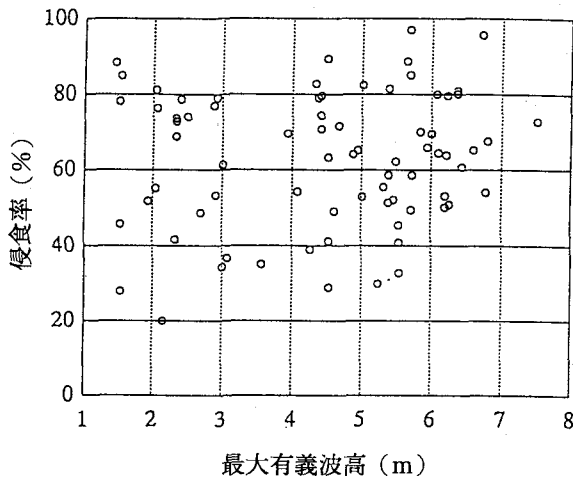


図-4 侵食率と最大有義波高の関係

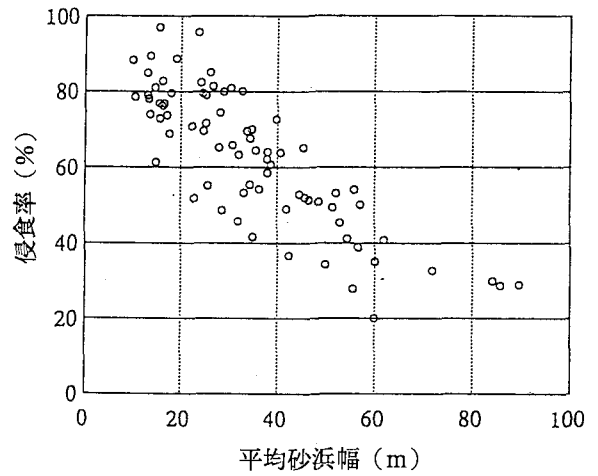


図-5 侵食率と砂浜の幅との関係

あり、既存の侵食傾向とあいまって砂浜の侵食問題は一層深刻になると懸念される。

もう一つ注目すべきことは、砂浜の侵食面積率が海面上昇の大きさに比例せず、海面上昇量が小さい範囲で急増していることである。砂浜の保全という観点からは、たとえ絶対値は小さくても海面上昇が軽視できないことを示している。

図-3には侵食面積率が都道府県毎に集計されて示されている。影響の現れ方は都道府県毎に異なるが、100cmの上昇によって、多くの都道府県でほとんど全ての砂浜を失うことになる。

図-4、5は、侵食率に関連する要因を検討したものである。最大有義波高などの入射波の条件との相関は弱く、平均砂浜幅とのみ強い相関が現れた。この結果は、同一の海面上昇量に対する汀線の後退距離は日本全国で大きな差はなく、海面上昇の進行につれて幅の狭い砂浜から順に消滅していくことを示唆している。

3. 河口地形に対する影響

3.1 検討の方法

河口デルタの消長は極めて複雑なプロセスであり、直ちに現実のデルタに対する影響評価に取り組むのは難しい。そこで、実験室スケールの単純な現象を対象に、モデル的な検

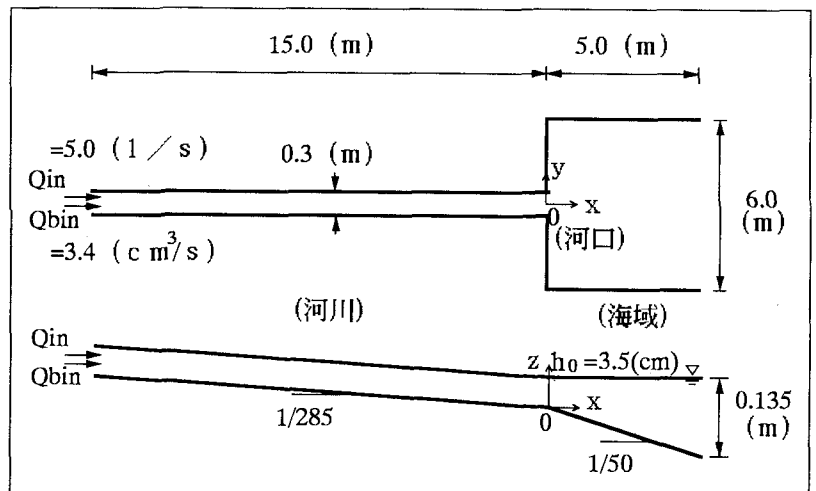


図-6 河口部の計算領域

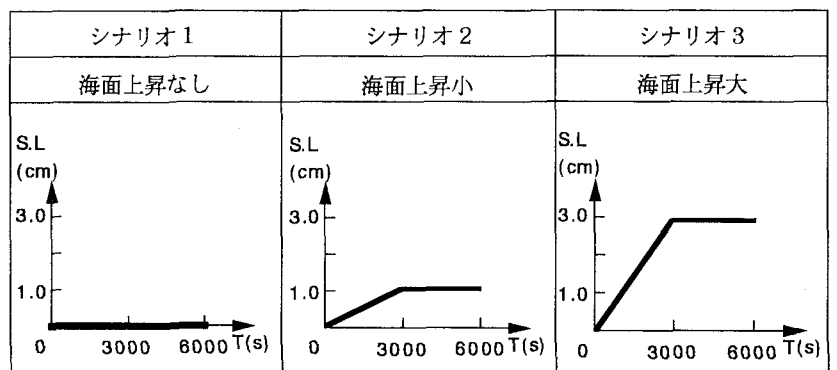


図-7 海面上昇のシナリオ

討を試みた。

澤井ら(1993; 沈, 1993)は、河床変動予測モデルを開発しているが、実験室スケールの河口堆積実験と比較することによってモデルの信頼性が確かめられている。そこで本研究では、澤井らの開発した2次元浅水モデルによる河床変動計算を適用して、海面上昇が河口地形に与える影響の検討を行った。

計算を行う領域として図-6のような川と海からなる河口周辺の有限領域を設定した。基礎方程式としては、澤井らに従い、流れの計算には水深方向に平均化した連続式と運動方程式を用い、送流砂量の計算には流線方向、直交方向の掃流砂成分、浮遊砂成分を別々に求める方式を用いた。また、地形変化の計算に用いる流砂の連続式としては、河床勾配が急になりすぎないように重力の効果を考慮して修正したものを用いた。

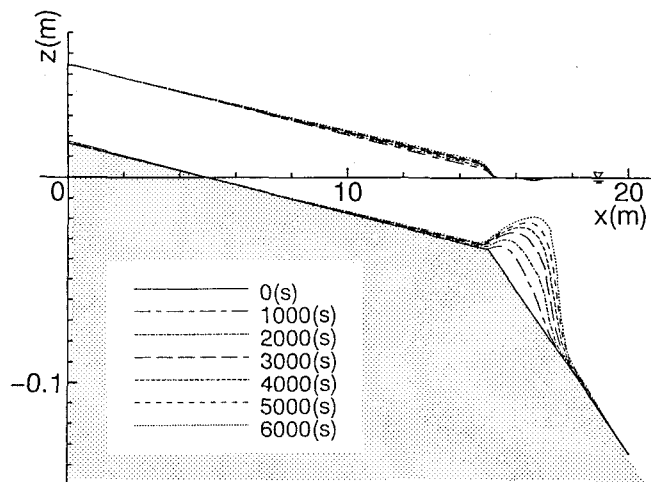
これらの方程式を差分化して、数値計算を行った。海面上昇が河口地形に与える影響を検討するため、計算条件として図-7のような海面水位変化のシナリオを設定した。数値計算によって、これらのシナリオ毎に、どのように砂が堆積していくかを計算した。

3.2 計算の結果

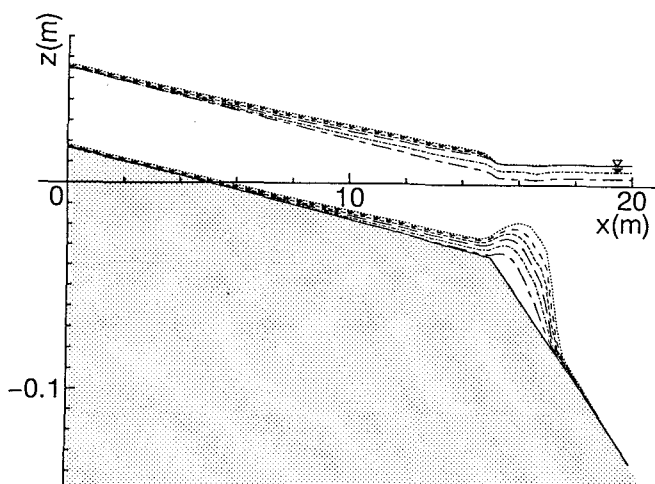
図-8に、河道の中心軸に沿った縦断地形の時間変化を示す。

図-8(a)は、シナリオ1、つまり海面上昇がない場合の結果であるが、時間経過に伴い、河口部に河口テラスが形成されていく様子がわかる。河口テラスは時間とともに岸沖方向と水深方向に規模を拡大していくが、河口テラスの岸沖方向の長さがある一定の長さに近づくとつれ、岸沖方向への伸びの速度が次第に遅くなる。それと並行して、河口テラスは沿岸方向に幅を広げていく。海面上昇がない場合、砂の堆積はもっぱら河口から沖で生じ、河道では砂の堆積はごくわずかにすぎない。

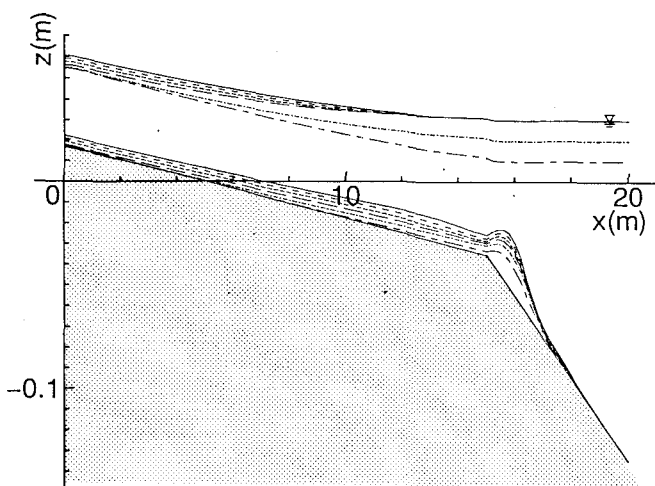
図-8(b), (c)は、それぞれ海面上昇(速度小, 大)を考慮したケースである。海面が時間経過に伴い徐々に上昇していくと、河川下流の水面が背水効果によって上昇していき、それとともに



(a) シナリオ1 (海面上昇なし)



(b) シナリオ2 (海面上昇小)



(c) シナリオ3 (海面上昇大)

図-8 海面上昇に伴う河口地形の時間変化

に、河道内に砂が堆積していく。海面上昇は、砂の堆積領域を上流側に移動させることがわかる。海面上昇後、河川内で砂の堆積が生じたことによって河川の水位が上昇し、さらに上流に水位の上昇、砂の堆積が波及していく。

河口部には河口テラスが形成されていくが、砂が河川に堆積するため、シナリオ1に比べると河口テラスの規模が小さく、河口テラスの頂点は陸側へ移動する傾向がみられる。

海面上昇速度が大きいと上で述べたシナリオ2の結果はさらに強調される。とくに重要な点は、砂の堆積地点が河道深く上流側に移動し、河床全体に砂が堆積することである。それによってさらに河川の水面が押し上げられ、結果として相当上流まで水位の上昇が伝わっている。洪水に対するデルタの災害ポテンシャルを増大させるものとして、十分注意すべき点であろう。

4. まとめ

本論では、海面上昇に対する海岸地形の応答の予測に関して報告した。とくに、砂浜への影響に対しては、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、30cmの海面上昇でも11,000ha以上（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。また、河口デルタに対しては数値計算によって、モデル的な検討を行った。小スケールとはいえ、複雑な現象の一端を示しえたと考えられる。海岸地形への影響評価のためには、地形の応答自体の理解が不可欠である。最近の地形学の研究成果、地形の応答のメカニズムの解明の成果を取り込みながらさらに研究を進めたい。

ここで述べた研究成果を得る上で、海岸4省庁の方々、愛媛大学山口正隆教授にはデータを提供して頂き、また、摂南大学澤井健二教授には文献と共に計算法をご教授頂いた。心から感謝の意を表したい。

参考文献

- 茅根 創（1991）：完新世海面変動とサンゴ礁，地学雑誌，Vol.100，No.6，pp.1019-1026.
- 澤井健二・沈建華（1993）：潮汐貯水池を用いた河口堆積制御に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp.729-736.
- 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.
- 沈建華（1993）：潮汐貯水池を用いた河口堆積制御に関する研究，京都大学修士論文.
- 土木学会海岸工学委員会（1994）：地球温暖化の沿岸影響－海面上昇・気候変動の実態・影響・対応戦略.
- 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，336p
- 三村信男・幾世橋慎・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.
- 三村信男・井上馨子・幾世橋慎・泉宮尊司・信岡尚道（1994）：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，第41巻，pp.1161-1165.
- 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.
- IPCC WGI (1990) : Climate Change - The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press.
- IPCC WGII (1990) : Climate Change - The IPCC Impacts Assessment, Australian Government Publishing Service.