

海面上昇が沿岸域に及ぼす影響に関する一考察 —三重県七里御浜海岸を例にして—

STUDY ON IMPACTS OF SEA-LEVEL RISE ON COASTAL ZONE
- A CASE STUDY FOR SHICHIRI-MIHAMA COAST -

水谷法美¹・前田祐介²

Norimi MIZUTANI and Yusuke MAEDA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

This paper is intended to discuss impacts of sea-level rise, which is one of the exposures of the global warming, on coastal zone and provide fundamental data for assemble adaptation technique. Shichiri-mihama coast has been chosen as a coast of case study and present situation of the coast has been investigated. Then, impacts of sea-level rise on this coast have been discussed and evaluated. As a result, it has been found that impacts of sea-level rise are very significant and may cause sever damages. Moreover, it has been confirmed that the beach protection from erosion is very important to reduce the effects of sea level rise.

Key Words : sea level rize, Shichiri-mihama coast, wave runup, sediment transport, bed shear stress

1. 序論

長い海岸線を有し臨海部に人口や資産が集中している我が国では、海面上昇が生じた場合の影響は大きく、有効な対策が講じられなければ甚大な被害を受けることになる。現在、IPCCでも海面上昇に対する適応策やその技術について検討しつつあるが、実際に生じる現象を理解しなければ適応策は検討できない。海面上昇による具体的な影響は、三大湾を中心に、これまで生じた地盤沈下による被災とその対策を中心に検討されてきている¹⁾が、それ以外の個々の海岸で生じる事象を具体的に扱い、その定量的な評価を行った研究例は少ない。

本研究では、三重県の七里御浜海岸を例に、IPCCのbest estimateとして採用されている2100年までに65cmの上昇という予測値²⁾と、その変動幅として30~100cmを採用し、海面上昇が生じた場合、どのような現象が生じるのかを具体的に考究し、それらを簡単な手法ではあるが定量的に評価することにより、海面上昇の対応策・適応策を講じるための基礎資料を構築することを目的とする。

2. 七里御浜海岸の現状

(1) 七里御浜海岸の地形特性

七里御浜海岸は、熊野川の河口から鬼ヶ城の間に広がる延長約20kmの砂礫海岸である。この海岸では、山岳地形が海岸線近くまで迫っており、海岸線との間の狭小な陸域が生活圏の主体となっており、幹線道路・鉄道などの陸路もほぼ海岸線に沿っている。七里御浜海岸の海浜断面の特徴は、勾配急変点が存在し、前浜付近の勾配が急で沖浜勾配が緩い点である。また、勾配急変点の水深は河口より離れるほど深くなっていることが報告されている³⁾。

また、山本ら⁴⁾によると、鵜殿港の築港以前の1947年を基準とした海岸線の変化から1966年と1976年において河口部で侵食が生じている。鵜殿港の縦防波堤は1975年以降に整備が始められたので、この河口部の侵食は1977年までに行われた熊野川での土砂採取が原因と考えられている⁴⁾。鵜殿港の防波堤の建設工事は、1970年以降本格化し、特に1975年からはこれまで海岸線とほぼ並行であったものから海岸線に対しほぼ直交する方向へと延ばされ、1979年には現在とほぼ近い形となった。この鵜殿港の防波堤の整備は七里御浜海岸への供給土砂を阻止するものとなったと考えられている³⁾。七里御浜の海岸線の変化で、1985年には鵜殿港北側の侵食域は1976年

より北側に広がったのはこのためであると考えられる。この侵食は1990年以降にもやや北側へ広がっているが、人工リーフなどの対策によりおさまりつつある。

(2) 関連構造物の建設状況⁵⁾

七里御浜海岸は、図-1に示すように北端部に地方港湾である木本港が、また、南端部には同じく地方港湾である鶴殿港が位置し、その間に礫浜が約20kmにわたってつく海岸である。そして、この海岸には、上記の港湾施設をはじめとして海岸堤防、人工リーフ、河口構造物などが建設されており、これらの構造物の建設と海岸形状とは大きく関係していると考えられる。

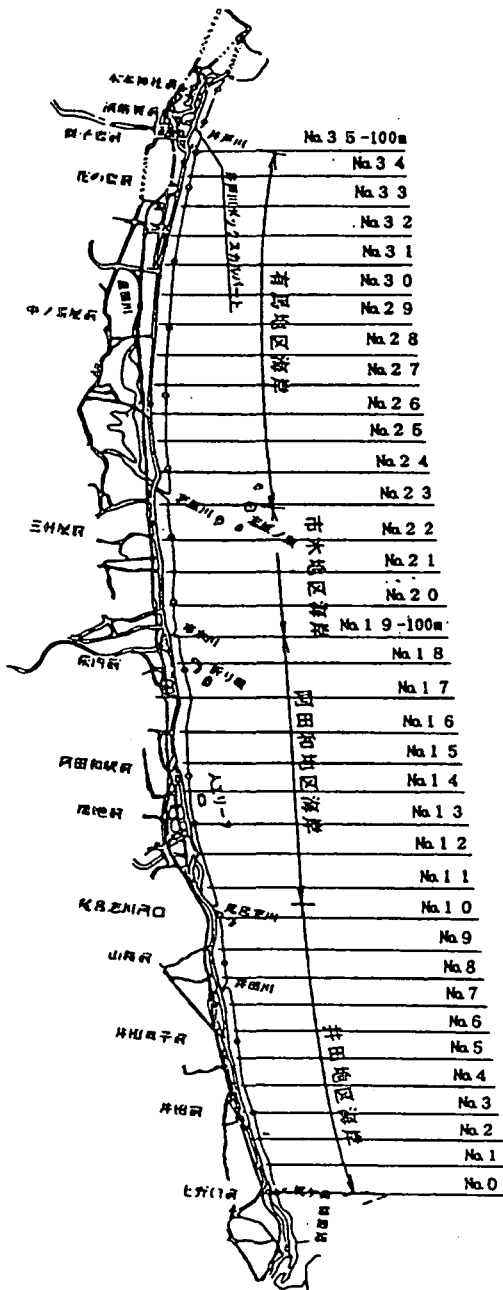


図-1 七里御浜海岸の概略

対象海岸における堤防の建設は、1959年に来襲した伊勢湾台風による被災を契機にして急速に実施されてきている。当海岸における堤防の整備の現状は、海岸総延長約20kmに対して堤防延長約10kmで全体の約50%が整備されていることになる。代表的な堤防の構造形式は三面張りコンクリート堤で、一部緩傾斜堤が整備されている。また、井田南地区では前面に消波工が設置されている。

人工リーフは、阿田和地区海岸で1987年に着工されたのを手始めにして、井田南地区海岸でも建設され、木本港及び鶴殿港では潜堤が建設されている。

鶴殿港の北部に位置する井田南地区海岸は、七里御浜海岸の中でも最も海岸侵食が著しく、1970年代後半以降、堤防前面に消波工や消波堤が設置された。これらの消波工及び消波堤は、その後の海浜砂の流出による地盤高の低下やブロックの沈下などにより、その断面は原形から変化しており、当初期待された機能を十分果たしているとはいえない状況である。

3. 海面上昇の影響とその事例計算

海面上昇は、沿岸域が単に水没することによる影響にとどまらず、海岸地形、自然生態系などの沿岸域の物理、生物システムに対して、幅広く、しかも深刻な影響を及ぼすことになるが、ここでは、いくつかの具体的な影響を取り上げ、その定量的な評価を簡単な手法を用いて行う。

(1) 波の打ち上げ高に対する影響

まず、堤防、護岸などの構造物では、海面が上昇することにより、波の打ち上げ高が増加し、それともなう波浪災害が考えられる。また、単に打ち上げ高が増大するだけではなく、堤防、護岸前面の砂浜が侵食されたり、水深が増大すること等によって、堤防、護岸への外力が大きくなり、越波や残留水位の増加による構造物の不安定を招く事になる。したがって、背後地の危険性も増すことになり、適当な対策が必要である。そのためには、波の打ち上げ高の変化を評価しておく必要がある。

a) 計算方法

打ち上げ高について考えるには、堤防前面の砂浜に対する影響も同時に考える必要がある。水位が変化すると海浜の平衡断面が変化し、それによる砂浜の侵食量が生じることになるが、本研究では、その侵食量をBruun⁶⁾の導いた式(1)を用いて求めた。

$$\Delta y = \frac{SW^*}{h^* + B} \quad (1)$$

ここで、Sは海面上昇量、 Δy は汀線の後退距離、 h^* は断面変化が生じる限界水深、 W^* は汀線から h^* までの岸沖方向距離、Bはバームの高さである。また、断面変化が生じる限界水深は、現地に置ける地形変化の沖側境界という定義から、次式に示すSwartの提案した実験に基づく推定式⁷⁾を用いた。

$$h^*/L_0 = 0.0063 \exp B \quad (2)$$

$$B = 4.347 \frac{H_0^{0.472}}{T^{0.594} d_{50}^{0.093}} \quad (3)$$

ここで、 H_0 、 L_0 は沖波の波高と波長、 T は波の周期、 d_{50} は底質の中央粒径である。

波の打ち上げ高は、海岸保全施設築造基準解説⁸⁾にしたがって求めた。すなわち、七里御浜の断面形状が複断面形状であり、また海底勾配が1/100と非常に緩やかであることから、中村らの改良仮想勾配法⁸⁾を用いて算定することにした。

ところで、上昇した打ち上げ高は、堤防前面に消波工を設置することにより減少させることができる。打ち上げ高の低下量は消波工の設置位置及び形状などにより異なるため、模型実験により検討することが望ましいとされているが、今回は次のように考える。すなわち、消波工の天端幅及び天端高が一定条件を満足する場合、堤防の所用天端高を70%まで下げられる⁸⁾ので、所定の条件を満たす消波工を設置する場合を想定し、波の打ち上げ高を消波工のない場合の0.7倍とした。

また、人工リーフを有する場合は、人工リーフの波浪減衰効果から沖波波高が小さくなり、その結果、波の打ち上げ高が減衰することになる。今回は、ある天端水深と天端幅を持つ人工リーフが設置されたと仮定し、その天端水深、天端幅と換算沖波波高、波長から波高伝達率を求めた⁷⁾。そして、この波高伝達率から求めた透過波高 H_t を新たな入射波高として、波の打ち上げ高を求めた。

b) 計算条件

七里御浜海岸において海面上昇が生じた場合を想定し、波の打ち上げ高について計算を行った。その際以下のような条件で行った。すなわち、計算に使

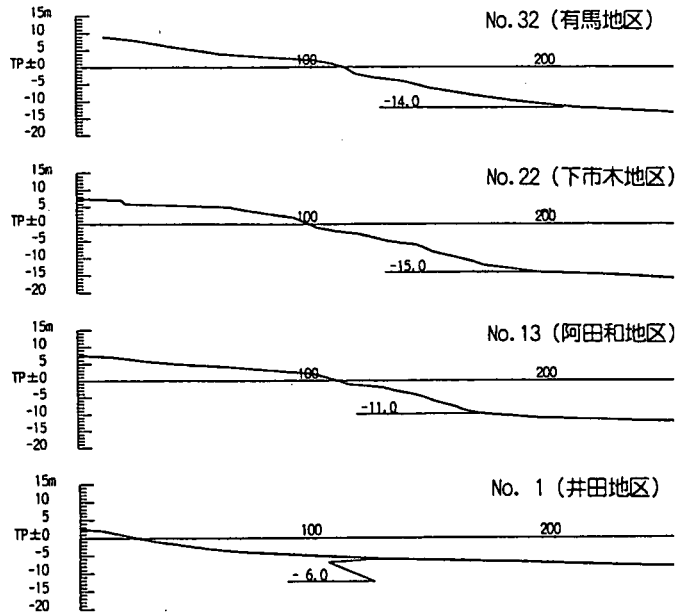


図-2 対象地区の断面図

用した海面上昇量は、IPCC²⁾の2100までの予測値である65cmを採用し、さらに変動幅を考慮して、0.30m、0.65m、1.00mの三通りとした。

汀線の後退量は、海面上昇後の平衡地形が現在の断面形と同じ地形であると仮定し、打ち上げ高の計算もその仮定のもとで行った。打ち上げ高の計算は、七里御浜海岸を井田地区、阿田和地区、下市木地区、有馬地区の4つの地域に区分し、その代表的な断面について行った。その断面形と堤防の断面形を、図-2と図-3に示す。また、各地点の浜幅、前浜、外浜勾配を図-4に示す⁵⁾。

計算は、まず全ての断面において、消波工も人工リーフもないとして行い、その後消波工、人工リーフ

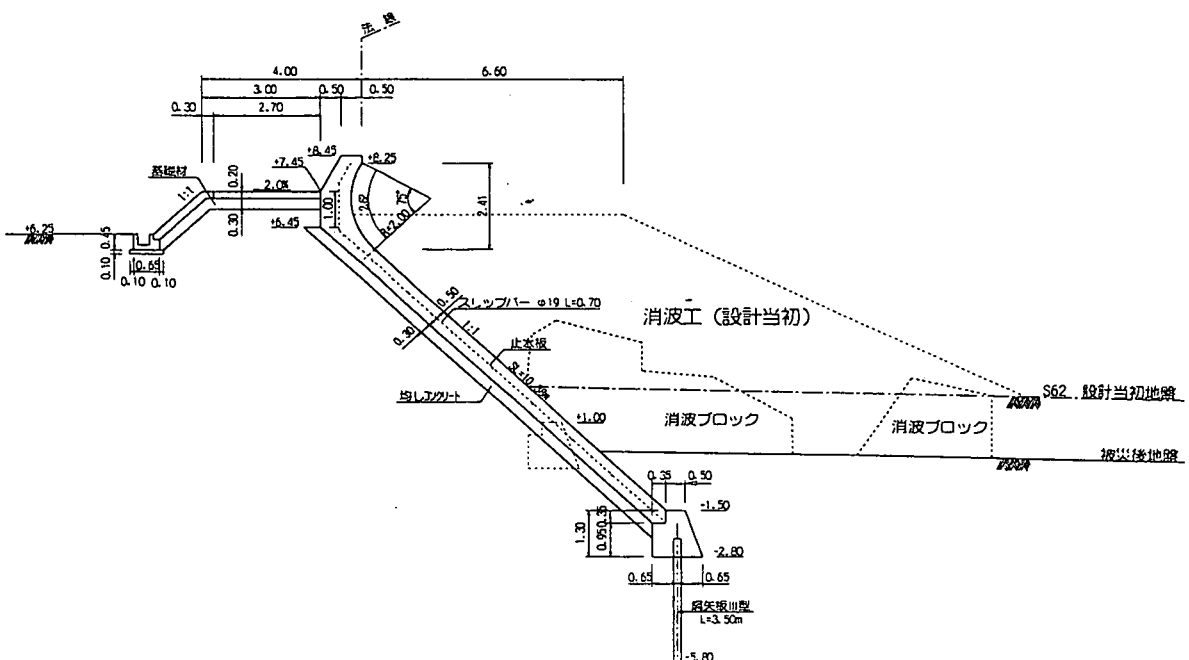


図-3 代表的な海岸堤防の断面図

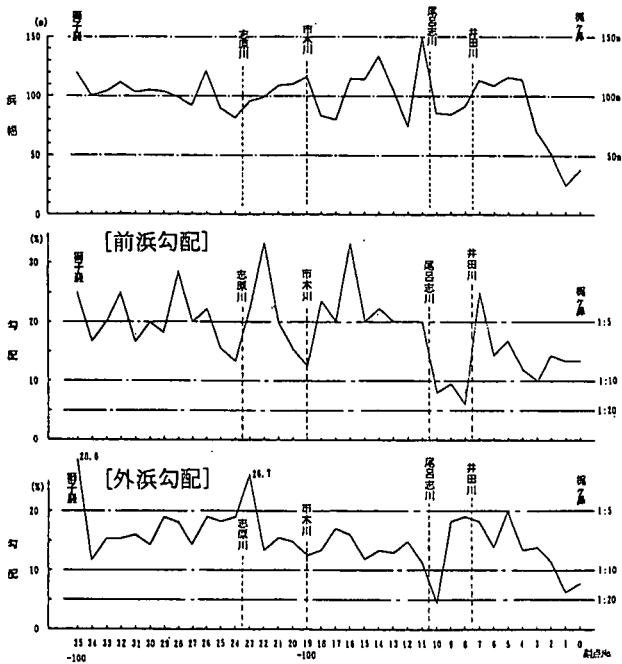


図-4 浜幅と海底勾配

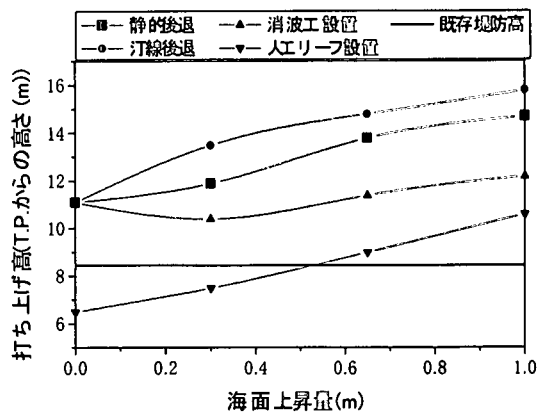
フがある場合を行った。人工リーフは、井田地区海岸のものを参考にし天端水深をT.P-2.5m, 天端幅を80mとして計算した。

波浪条件は、現在の状態から変化しないと仮定して、各地区における設計波⁵⁾ (図題に明記)を使用した。

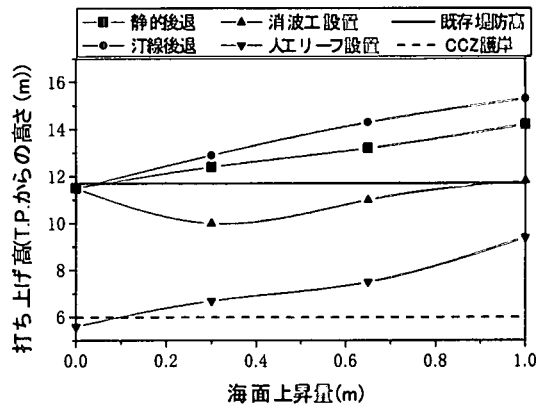
なお、井田地区では、南端から徐々に侵食域が北に向かって拡大し、侵食幅も増大している。そして、南端では海浜がほとんど消失しているのが現状である(図-4参照)。井田地区より北部に位置する阿田和地区や下市木地区では、全体的には侵食傾向であるが、近年やや回復傾向にある。有馬地区では、1966年頃には全体的に侵食されていたが、その後回復し、現在はほぼ平衡状態にある。海岸の背後には多くの人家があり、防護上重要な地区である。

c) 計算結果

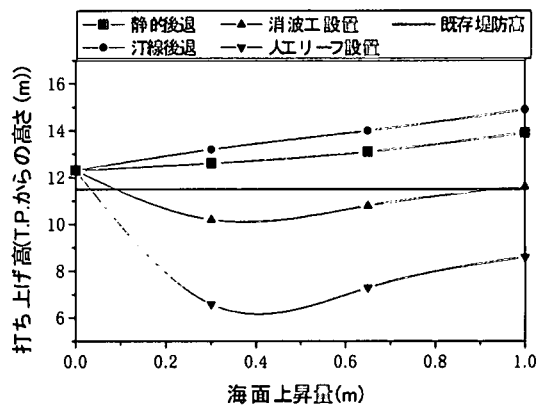
それぞれの海岸における計算結果を図-6に示す。いずれの場所においても打ち上げ高は海面の上昇量よりもかなり大きくなっていることが分かる。すなわち、海面が上昇したことに加えて、波の碎波位置が岸側に近くなったこと、砂浜が減少したことが影響し、波の打ち上げ高が海面上昇量0.65mに対して極端なところでは、図-5(a)に示すように、約4m近く打ち上げ高の上昇が生じる。また、1mの上昇を考えると打ち上げ高は約5mもの上昇になる。このような状況では、人工リーフを設置し、作用波の低減を行ったと仮定した場合でも、打ち上げ高が現状の堤防天端高に対してぎりぎりの高さか、場所によっては天端高が不足する。この海岸では堤防のすぐ後ろまで人家や道路、鉄道などが迫っており、かなり大規模な対策を講じなければ莫大な被害が出るような事態が起こりうる事が予想される。この計算では汀線の位置は海面上昇の影響以外では変化しないとして行っているが、実際には海岸侵食が進んでお



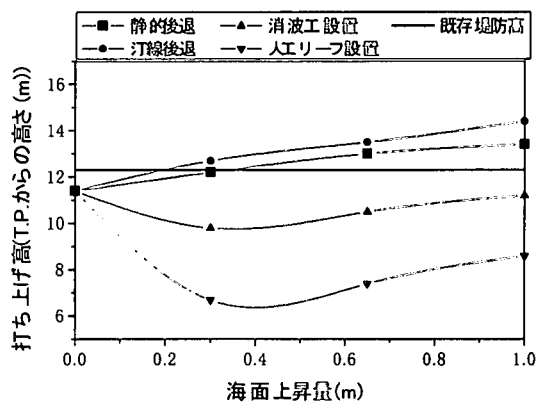
(a) 井田地区 ($H_0'=10.9\text{m}$, $T=15.1\text{s}$)



(b) 阿田和地区 ($H_0'=10.9\text{m}$, $T=15.1\text{s}$)



(c) 下市木地区 ($H_0'=10.6\text{m}$, $T=15.0\text{s}$)



(d) 有馬地区 ($H_0'=9.6\text{m}$, $T=13.6\text{s}$)

図-5 打ち上げ高の変化

り、この影響を含めると打ち上げ高の増大はこれ以上のものになると考えられる。このため、対策を講じる際には全ての海岸で一律に考えるのではなく、それぞれの場所で影響がどれくらいのものになるか算定を行い、その上で検討することが非常に重要であると言える。

ところで、場所の違いに着目すると、井田地区の打ち上げ高が非常に大きくなっていて、阿田和地区、下市木地区と北に行くほど小さくなる傾向がある。これは、砂浜の状況の違いが大きな原因であると考えられる。つまり、対象海岸では南端から侵食が進んでいるため、最も南の井田地区は砂浜が非常に狭く、逆に北端の有馬地区では比較的広い浜幅を保っている。また、海面上昇の砂浜への影響も、井田地区では、上昇量0.65mに対して砂浜が全て消失してしまい堤防前面水深が約1mになるのに比べ、有馬地区では、汀線後退量が約13m（浜幅約100m）であった。このため、井田地区は波の打ち上げ高は非常に高くなり、また波が直接堤防に当たることになり波力が増大し非常に危険になることが考えられる。

逆に、海面上昇の影響を最小限にとどめるためには海浜の保全が極めて重要であることがここから指摘できる。

(2) 沿岸漂砂量の影響

海面上昇が生じると砂浜の侵食が激しくなることが考えられる。砂浜の侵食は主に波の作用によって生じるが、海面上昇によって作用波の特性が変化すると、海浜の侵食が激化したり、新たに侵食傾向に転じる海岸が生じる可能性がある。すなわち、単に海面の上昇による汀線の後退以上に海岸は侵食されることになる。また、波の遡上高が変化し、遡上域が広がることによって沿岸漂砂量の沿岸方向分布のバランスが崩れ、新たな海岸侵食が発生する可能性もある。また、波高の増大などによって沿岸漂砂量が増大し漂砂量のバランスが崩れる事も考えられる。

ここでは、これらの効果のうち、沿岸漂砂量の変化を考える。沿岸漂砂量式は、Komar・Inman⁹⁾による式(4)を取りあげた。

$$Q = \frac{0.358(Ec_g)_b}{\gamma_s} \sin 2\alpha_b \quad (4)$$

ここで、Qは沿岸漂砂量、Eは波の単位面積あたりのエネルギー、 C_g は波の群速度、 γ_s は単位面積あたりの砂の水中重量、 α_b は砕波の波峰線と汀線とのなす角度で、添字 $_b$ は砕波点の値を示す。

計算を行うにあたり、式(4)の漂砂量式に直接海面上昇の影響を直接考慮することは困難であるため、海面上昇の影響、およびその原因である温暖化の影響によって波高が増大すると仮定してその影響を考察した。波高の変化量は現在の値より10%、20%、30%増大した場合についてそれぞれ計算を行った。なお、波高以外の条件は変化しないものとした。計算に使用した波浪条件は、 $H_0'=1.5m$ 、 $T=8.5s$ とした。

計算結果を図-6に示す。波高が増大するにしたがって沿岸漂砂量が増大する。このことより、この海岸への土砂供給源（主に熊野川からの流送土砂）からの土砂量が変化しないと仮定しても、海岸侵食が激化していくことが容易に予想される。海面上昇の影響で海岸が後退することと合わせて考えると、海浜の消失はかなり大きくなると考えられる。

(3) 河川への影響

河口への海面上昇の直接的な影響としては、海水面に対する相対的な陸地の高度が減少し、氾濫域が増大することが考えられる。河口の水位上昇に伴い、河口流水断面積、入退潮量が増大したり、その結果、河口流動形態が変化し塩水くさびの遡上距離が増大し、河川内の塩分濃度が増大すると考えられる。

また、河口水位の上昇に伴い河道内水位が上昇する。その上昇量は河川の場所によって違い河口に近いほど大きく、離れるにしたがって小さくなると推測される。そのため河川の勾配が緩やかになり、流速が小さくなって土砂の供給量が減少することが考えられる。

七里御浜海岸の南端に位置し、同海岸の漂砂の供給源である熊野川において海面上昇が起きた場合を想定し、流速と掃流力の変化について簡単な計算を行った。計算は、以下の式¹⁰⁾を使用した。ただし、海面が上昇した場合に、海面水位と河川水位とが一对一对応すること、河川の断面を台形で近似できること、河川の流量は現在と変化しないとする（雨量は変化しないとする）こと、を仮定して計算を行った。

$$Q = Av = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$A = h(b + mh), \quad R = \frac{1 + \frac{mh}{b}}{1 + 2\sqrt{1 + m^2} \frac{h}{b}} \quad (6)$$

$$\tau_0 = whl \quad (7)$$

なお、Q：計画高水流量（=19,000 m³/s）、v：平均流速、 τ_0 ：底面せん断力、w：水の単位体積重量、I：河川勾配（=1/950）、n：粗度係数（=0.030）、

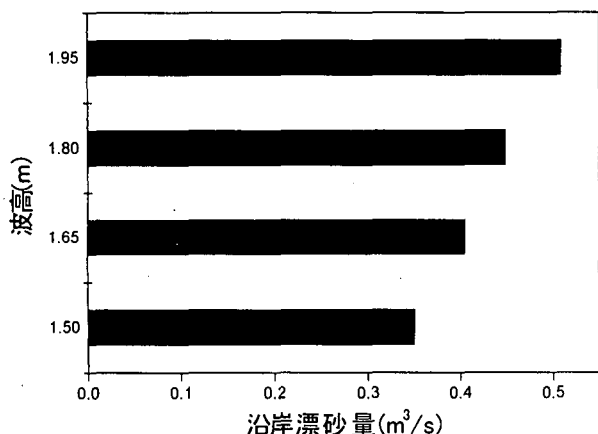


図-6 沿岸漂砂量の変化

b : 川幅 (=185m) , h : 水深 (=14.3m) , m : 側面勾配の逆数 (=4) , である。

計算結果を図-7に示す。海面が上昇するにしたがって流速が減少する。さらに流速が減少するために河川の掃流力も減少することがわかる。すなわち、海岸への供給土砂の減少が生じ、これにともなって海岸の侵食が助長されることが考えられる。また、流掃土砂の減少は、河床高の増大をも示唆し、したがって河川氾濫の危険性をも増大させる可能性も示す結果と考えられる。

河川への影響としては、これ以外にも河口砂州の水没の可能性も考えられ、その結果、河川堤防への波あたりが強くなり、局所洗掘や越波等の問題が発生する可能性が考えられる。また、汽水域の変化によって、漁業資源も影響を受けること等も予想される。

これ以外にも、湿地、干潟などにも影響が生じると考えられる。

(3) その他の影響

ある固定点に着目した場合、海面上昇により水深が増加すると、その点における砕波波高もそれに伴って増加することになる。したがって、砕波の影響をうけるような海岸保全施設に対しては、作用外力が増大することになる。したがって、消波ブロックの重量不足やそれともなうブロックの散乱等の被害が生じたり、構造物の機能が低下し、伝達波高も増加することが考えられる。

また、潜堤や人工リーフでは海面上昇による天端水深の増大がその機能を大きく変化さす。天端水深の増大によって、消波機能の低下、伝達波高の増大によって背後施設に対する外力が増加することになる。

これら以外にも海面上昇の影響は多数挙げられるが、その影響を定量的に評価するには至っておらず、今後ひきつづき検討を加える所存である。

5. 結論

本研究では、海面上昇の及ぼす影響について、七里御浜海岸を例にして考察してきた。以下、本研究で得られた主要な結論を要約する。

- 1) 海面上昇による波の打ち上げ高の上昇は、単に水位の上昇分だけではなく、海岸侵食などの影響ではるかに大きくなり、それともなうて構造物の安全性も低くなる。
- 2) 沿岸漂砂量は、海面上昇の影響により増大することになる。したがって海岸侵食は激化することが考えられる。
- 3) 海面上昇の河川への影響は、流量が変化しないとすると流速、掃流力が減少し、そのため流送土砂量が減少することになる。よって、海岸侵食が助長されると考えられる。
- 4) 海面上昇の影響は一定のものではなく、地域の

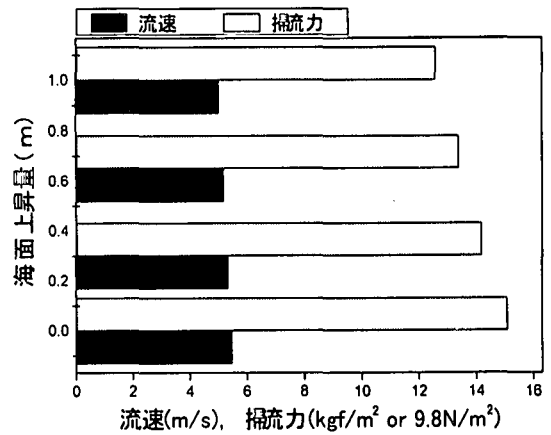


図-7 流速と掃流力の変化

地形特性などによって異なる。

- 5) 海面上昇の影響は、いずれも海岸の消失を助長させる性質を持っており、海面上昇の影響を最小限にとどめるには、海岸保全は極めて重要である。

謝辞：本研究を行うに当たり、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)）（代表者 茨城大学 三村信男教授）より補助を得た。また、本研究では三重県七里御浜侵食対策検討会の資料を多数使用させていただいた。ご協力いただいた関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会：地球温暖化の沿岸影響，土木学会，pp.62～140，1994。
- 2) Houghton, J.T. and Ephraums, G.J. : Climate Change - The IPCC scientific Assessment, Cambridge University Press, 1990.
- 3) 宇多高明・後藤康長・山本幸次：三重県七里御浜海岸の海浜変形機構に関する一考察，海岸工学論文集，第39巻，pp.351～355，1992。
- 4) 山本幸次・佐藤楨司・野口賢二・宮野正実：熊野川を土砂供給源とする海岸の海浜変形と砂礫層厚，海岸工学論文集，第46巻，pp.666～670，1999。
- 5) 三重県：七里御浜海岸侵食対策検討会資料，1999。
- 6) Bruun, P. : The Bruun Rule of erosion by sea level rise: A discussion of large-scale two and three-dimensional usages, J. Coastal Research, No.4, pp.627-648, 1988.
- 7) Swart, D.H. : A schematization of onshore offshore transport, Proc. of 15th CEC, 1974.
- 8) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：海底海岸保全施設築造基準解説，全国海岸協会，pp.83～240，1987。
- 9) Komer, P.D. and Inman, D.L. : Longshore sand transport on beaches, J. Geophysical Research, Vol.75, No.30, 1970.
- 10) 椿東一郎：水理学 I，森北出版，pp.143～145，1973。