

地球温暖化と海岸工学

Global Warming-Related Tasks for Coastal Engineering

三 村 信 男

Nobuo MIMURA

1 はじめに

地球規模の環境問題の中には幾種類もの問題が含まれているが、海岸工学に最も深い関連を持つのは地球温暖化であろう。地球温暖化によって、台風や降雨パターンの変化といった気象の変化や海面上昇が生じると、沿岸域には様々な影響が現れると懸念されている。そのため、海岸工学の分野では、地球温暖化問題が注目され始めた当初から研究が取り組まれてきた。それを背景に、土木学会海岸工学委員会では1991年4月、「地球環境問題研究小委員会」（以後、研究小委員会と省略する）を設置して、海岸工学に関わる地球温暖化問題の研究を進めてきた。特にこの2年間は、ワーキンググループを組織して、外力としての気象・海象変化、自然・社会的影響、および対応策について検討した。

一方、国際的にも「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」を中心に沿岸域への影響評価と対応策の検討が進められてきた。また、アジア・太平洋といった地域内、あるいは2国間等様々な形で国際共同研究が取り組まれている。本稿では、「研究小委員会」（1992、1993）の成果を中心に、国内外の研究を紹介し、海岸工学と地球温暖化問題と海岸工学との関わりについてみてみたい。

2 沿岸域に対する地球温暖化の影響

地球温暖化が顕在化すれば、きわめて広範な影響が生じると考えられるが、まず最初に必要な事は、これらの影響の全体像を把握しておく事であろう。そのために、影響の連鎖を示す影響伝播図が提案されてきた（例えば、UNEP et al., 1988; 三村ら, 1991）。図2.1は磯部(1992)が整理した影響伝播図である。温暖化の第一次的な影響は、気温・水温の上昇、平均海面の上昇、台風の変化、降水の変化などの物理環境の変化として現れる。それが更により多様な自然環境、さらには人間の社会・経済活動への影響として波及することをこの図は示している。影響レベルが下位になるにつれて、砂浜の侵食や河川への塩水の侵入、社会基盤施設の機能低下など具体的な問題が登場する。当面の我々の課題は、沿岸域を対象にしてこうした影響の各ステップをどのように評価し、対策を検討するかである。

3 地球温暖化に伴う海象・気象の変化

(1) 地球規模の変化と予測

沿岸域への影響を評価するためには、まず温暖化や海面上昇などの実態と将来予測を知らなければならない。これらに関して現時点で最もコンセンサスが得られているのはIPCCの報告であろう。1990年に発表された第1次報告書(IPCC WG1, 1990)では過去の変動に関して次のように結論づけている。

- ・ 全球平均気温は過去100年間に $0.3 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 上昇した（図3.1）。
- ・ 過去100年間に平均海面は10～20cm上昇した（図3.2）
- ・ この温暖化の大きさは気候モデルによる予測結果とおおむね一致しているが、それはまた自然の変動幅と同じ規模である。従って観測された気温上昇は主としてこの自然変動によるものであるかもしれない。一方、人間活動によって引き起こされたより大きな温室効果による温暖化が、この自然変動

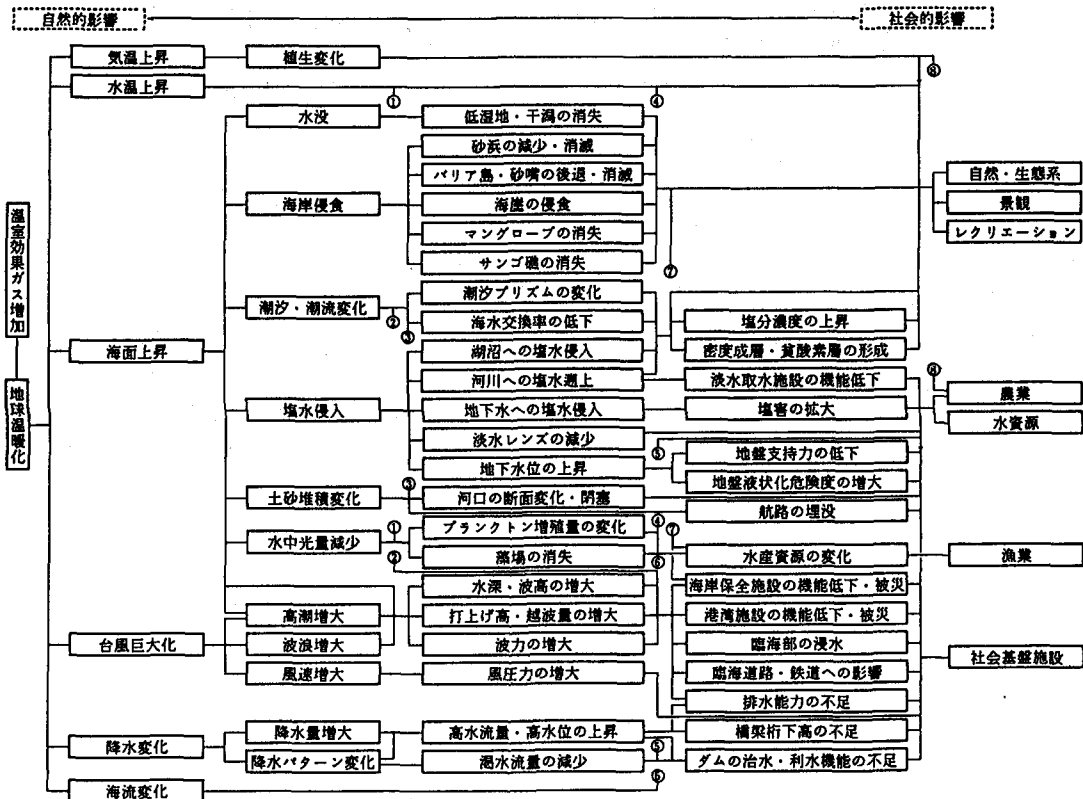


図2.1 地球温暖化の沿岸域への影響伝播図 (磯部, 1992)

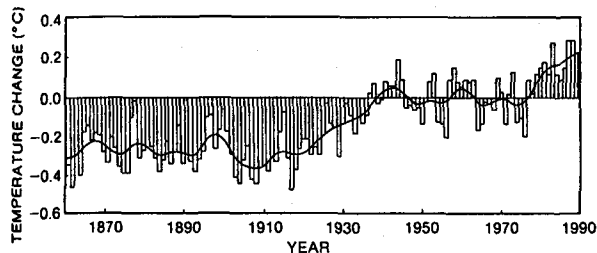


図3.1 1861-1989年の全球平均気温の変化
(IPCC WG1, 1990)

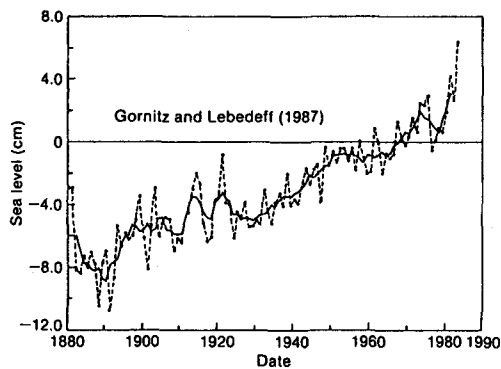


図3.2 過去100年間の平均海面の変化
(IPCC WG1, 1990)

や他の人為的な要因により相殺されているのかもしれない。

- ・温室効果が強められている事を観測により明確に検出する事は、10年あるいはそれ以上の間にはできそうもない。
- ・過去20年間に気候の変動性が増したという確証はない。

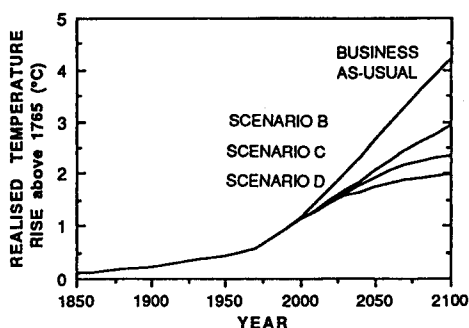


図3.3 温暖化の将来予測
(IPCC WG1, 1990)

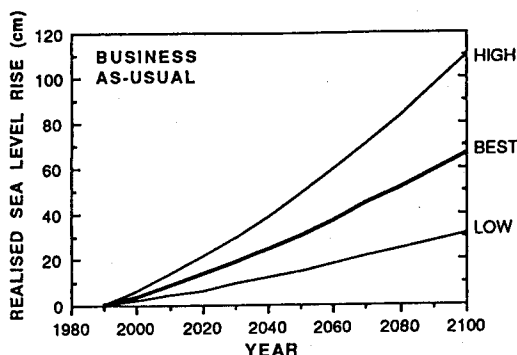


図3.4 海面上昇の予測
(IPCC WG1, 1990)

問題は、今後どのように温暖化がすすむのかということであるが、これは、今後の温室効果ガスの排出量に左右される。そこでIPCCでは、今後の温暖化・海面上昇を予測する土台として4つの排出シナリオを設定した。この中で、大気中の等価二酸化炭素濃度が今後徐々に増加し、2030年に倍増するという排出シナリオに対して、大気循環モデル(GCM)を用いた地球全体の熱収支・気候のシミュレーション等によって図3.3に示すような全球平均気温の上昇が予測されている。この結果によれば、2025年までに1℃、2100年までに3℃の平均気温の上昇があるとされる。

一方、様々な温暖化のシナリオに対して、海面上昇の推定が試みられてきた。当初非常に大きな海面上昇が予測されていたが、温暖化の予測が修正されたこともあいまって、下方に修正されてきている。それにしても、IPCC WG1(1990)の予測では、10年あたり6cm(3~10cm)の海面上昇が生じ、2030年までに20cm(10~32cm)、2100年までに65cm(30~110cm)の上昇となっている(図3.4)。2030年までの上昇量20cmのうち、海水の熱膨張によって12cm、陸上の氷河の溶解によって8cm、グリーンランドの氷床の溶解によって1cmの寄与があり、逆に南極の氷床の発達によって-1cmの負の寄与があるとされている。これは、温暖化によって降水量が増加し、降水が降雪になる南極では逆に氷床が発達して、海面を低下させる方向に作用するためである。

(2) 日本における検討

現在のところ、地域レベルの現象の予測にとってGCMの解像度は充分ではない。そのため、わが国周辺のメソスケールからミクロスケールの気候変化に対しても、GCMでは十分な精度のある結果が得られない。そこで、「研究小委員会」では歴史記録資料の解析というユニークな方法と近代における観測データの解析とを組み合わせ、地球温暖化に伴う海象・気象の変化について検討を加えた。断定的な形での結論は差し控えるべきであるとしているが、一応わかっている部分について示すと次のようになる。

気温に関しては、わが国においても過去100年間に年平均気温の上昇がみられる。この上昇には冬の最低気温の上昇の寄与が大きい。こうした結果は、山口・大福(1992)でも指摘されている。この傾向は大都市周辺で非常に顕著であることが見いだされており、グローバルな温暖化の進行と大都市周辺でのヒートアイランド現象を切り放して考えてはいけなことを示している。

降雨については、地域性が認められるものの、温暖期から寒冷期、あるいはその逆の時期で洪水災害が多発している。過去のこうした事象には数10年の周期性の存在が認められる。また、大阪をはじめ、神戸、京都や近畿地方では1900年代の総雨量の顕著な変化は認められず、どちらかといえば気温の上昇に伴って、

若干の減少傾向となっている。また、河川の流量変化や降雪については、太陽黒点と密接な関係が確認された。

台風については、温暖化によってわが国への上陸数が長期的に減少傾向にあることが認められる。発生数については顕著な傾向はなく、年間平均で25, 6個の状態が続いている。温暖化による台風上陸数の減少傾向は図3.5に示すように、江戸時代の寒冷期における台風災害の増加と符合するものである(河田, 1991)。過去四半世紀以上にわたって大きな高潮がわが国を襲っていないことや、温暖化によって中緯度帯の風系が変化することから、さらに台風の経路がどう変化しているかを検討すれば、かなり断定的な形で上陸台風の強度も小さくなっていると言えるとしている。

一方、海面水位の長期変動については、村上・山田(1991)、宇多ら(1992a)等の研究がある。図3.6に村上らによる日本沿岸の年平均海面の変動速度の分布を示す。2つの研究とも平均海面は中部～北日本の太平洋側で上昇傾向、西日本で下降傾向にあると指摘している。これらの傾向の中には、全球レベルの海面変化だけでなく、地殻変動、海流の変化、水温・気圧の変化の影響などが含まれており、日本沿岸のデータから全球平均海面の変動を検出する事は難しい。逆にいえば、我が国の局所的な海面上昇を論じる場合には、その地点に固有の他の要因を考慮に入れる事が重要であるといえる。

4 沿岸域の自然システムへの影響評価

海面上昇・気候変動の影響はそれを受けるシステムによって当然大きく異なる。基本的には、自然システムへの影響と社会基盤施設への影響という2つに大きく分けて検討すべきものであろう。このうち沿岸域の自然システムとして「研究小委員会」が視野に入れているものには次のようなものである。

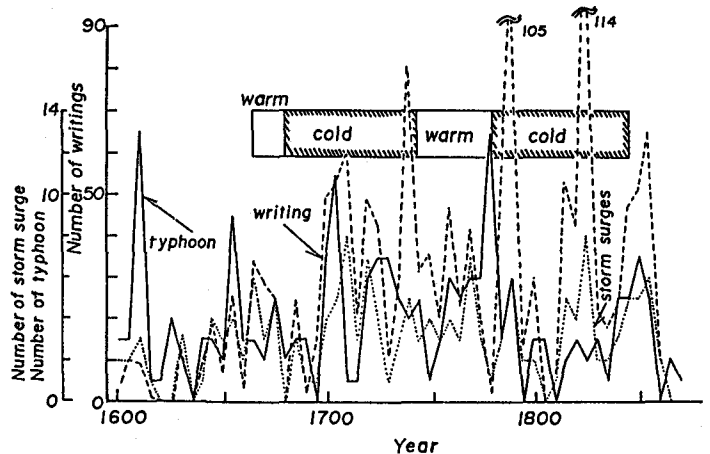


図3.5 高潮災害発生数とその文献数、および台風通過数(京都)の変化

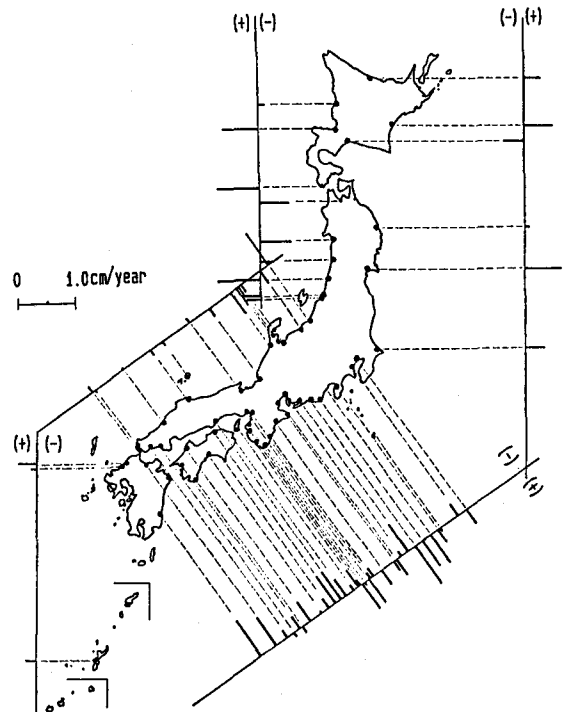


図3.6 日本沿岸の年平均海面水位の変化率 (+: 上昇, -: 下降; 村上, 1992)

- 1) 海岸地形：砂礫海岸、海崖、岩石海岸、河口、サンゴ礁、泥浜・干潟など
- 2) 水質：塩水侵入、水質悪化、エスチュアリーにおけるプランクトンの変化
- 3) 生態系：岩礁性潮間帯、干潟、塩性湿地、藻場、マングローブ林
- 4) 自然資源：国土領海、漁業資源、防災資源

これらの項目に対して、考えられる影響を抽出し、整理する作業が進められているが、以下に例を示すように定量的な評価をめざす研究に着手されている。

(1) 砂浜の侵食

砂浜の侵食の原因は基本的には、岸沖漂砂によるものと沿岸漂砂の遮断（場所的な不均一性）の2つである。それぞれの現象に対して海面上昇はどのような効果を持つのであろうか。

まず、三村ら(1993)は、検討の対象を海面上昇に対する海浜縦断地形の応答という2次元の問題に限定して、砂浜の侵食に対する海面上昇の影響を評価した。

沿岸漂砂による地形変化がないような砂浜の海面上昇に対する応答は、岸沖方向の海浜縦断地形の変化として生じる。砂浜は、海面が上昇すると上昇後の水位に対する平衡地形に向かって変化するため、水位上昇による静的な後退分以上に砂浜は侵食され、汀線が後退すると考えられる。この様な考え方から、最初に汀線の後退をモデル化したのはBruun(1962, 1988)であった。Dean(1991)は図4.1の様な地形に対して、Bruunと同様な考え方に基づいて、汀線の後退距離を求める式を導いている。

こうした評価手法を茨城県の海岸に適用し具体的な影響評価が試みられた。図4.2は、茨城沿岸の55区間に対して、1mの海面上昇量に対する後退距離を計算した結果である。ここで求められているのは、背後に護岸などが存在せず、砂浜の幅が無限にあると仮定した場合の汀線の後退距離、すなわち潜在的な後退距離である。図4.2をみると、55の区間のほとんどで100m前後の汀線の後退が生じるという結果になっている。1mの海面上昇に対する静的な汀線の後退距離は、20～40mの間にあり、海面の上昇による付加的な侵食の効果が非常に大きいことがわかる。

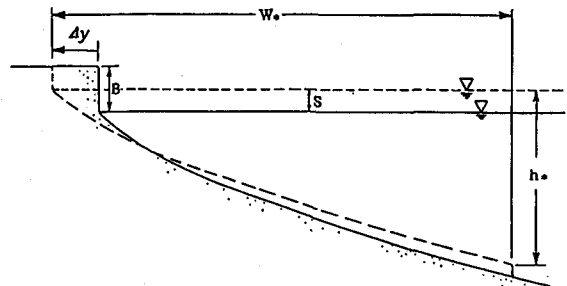


図4.1 海面上昇に対する海浜縦断地形の応答
(三村ら, 1993)

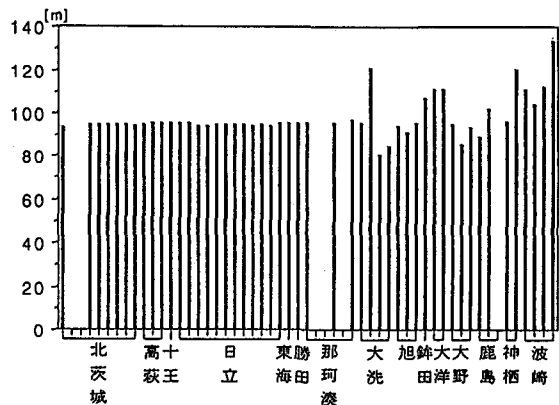


図4.2 1mの海面上昇による汀線の後退距離
(三村ら, 1993)

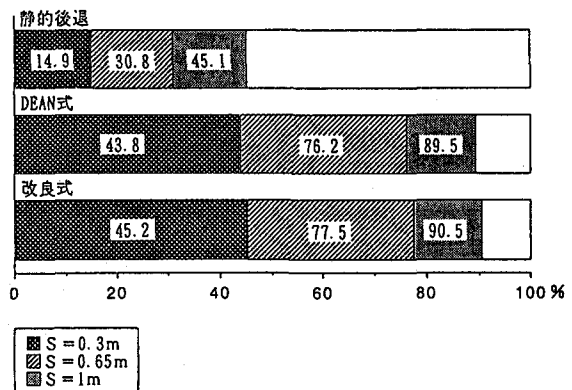


図4.3 海面上昇による砂浜の侵食面積
(三村ら, 1993)

現実には砂浜の背後に護岸や崖が存在するため、汀線は砂浜の幅以上に後退できない。こうした効果を考慮して求めた茨城県全体の侵食面積を図4.3に示す。現在茨城県全体で約5.7km²の砂浜が存在している。三村らの提案した改良式に基づく0.3, 0.65, 1.0 mの海面上昇によってそれぞれ45.2%, 77.5%, 90.5%の砂浜が消失することになる。砂浜の侵食は現在でも全国的に問題となっているが、海面上昇が実際に生じればこの問題を一挙に異なるレベルにまで深刻化させる要因になると懸念される。

他方、宇多ら(1992b)は沿岸漂砂の卓越する海岸の地形変化を取り上げ、図4.4に示すような駿河海岸を対象に過去9,000年間における海水準の上昇による地形形成を再現し、次に、将来における沿岸漂砂量の減少や海水準の上昇に伴う海浜変形を予測した。

駿河海岸は駿河湾の西岸に位置し、小川漁港から勝間田川河口に広がる延長約18km砂れき海岸であり、中央部に流入する大井川からの土砂供給により形成された扇状地の外縁をなす。この扇状地の斜面(図4.5中の点線)を初期地形とし、過去9000年間の海面上昇の下での沿岸漂砂による海岸地形変化を計算した。その上で、今後土砂供給がないという条件下で更に海水準が40年間に1m上昇するという条件を設定し、これによる影響を調べた。

B-B'断面の時間変化を図4.5に示す。海水準が上昇する場合では、汀線後退量が10m程度大きく、-2.5mでの侵食が小さいという以外、海水準が上昇しない場合とほとんど明瞭な差はみられない。このことから40年間で1m程度の海水準の上昇では海岸侵食には余り大きな影響を与えないと判断でき、将来の海浜変形は漂砂の供給源をコントロールする国土保全や開発行為に左右されるとしている。

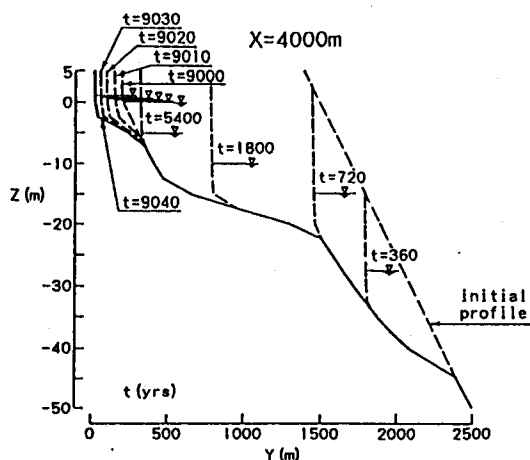


図4.5 海面上昇がある場合の断面変化
(宇多ら, 1992)

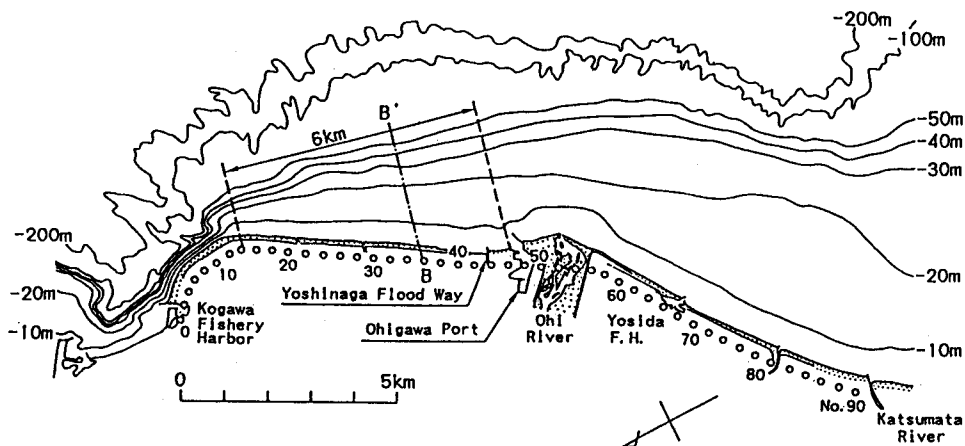


図4.4 駿河海岸の地形 (宇多ら, 1992)

(2)河川への海水の侵入

海面上昇の影響の中でしばしば指摘されるものに河川や地下の帯水層への海水の侵入があげられる。河川への侵入に対して、浅枝(1993)は次のような検討結果を示している。

河道内への海水侵入(塩水くさび)の評価法は、従来からよく用いられている成層流の方程式に適当な境界条件の下で解くことによって得られる。従って、一般的な評価が比較的容易である。この場合、成層が強混合になるか弱混合になるかの問題は残るが、これはその時点の流量等によっても変化するものであり、温暖化した場合の一般的な傾向を求める場合必ずしも全て考慮する必要はないであろう。しかも、強混合の場合には海水の侵入は妨げられるため、弱混合になると仮定して解析を行っても実際の現象がより深刻になる事はない。

塩水くさびの評価法は、いくつもの方法が提案されており、しかも、その内のいくつかは非定常な動きまで予測可能なものである。しかし、問題をシンプルにするため定常問題として解析することにし、ここでは菅(1991)の式を用いて予測を行った。

モデル的な計算条件として、河床勾配1/3000, 単位幅流量 $0.5\text{m}^2/\text{s}$ で河口水深を4.0mから0.2mずつ増加させた。河口水深4mを基準にして、河口水深の増加率と遡上距離の増加率を示したのが図4.6である。この図が示すように、河床勾配が変化しても遡上距離の増加割合はほとんど影響を受けず、遡上距離は海面上昇量に比例して大きくなる。例えば、河口水深4mの河川で海面が30cm上昇した場合には、遡上距離はこれまでの約20%増加することになる。

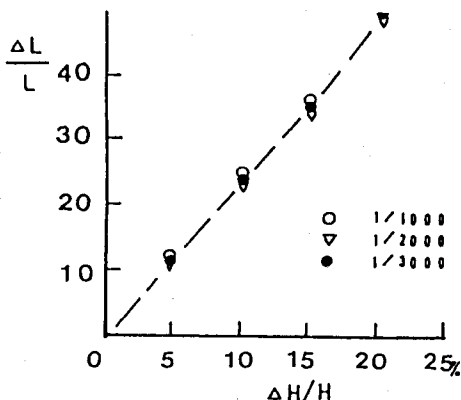


図4.6 河口水深の増加率と塩水遡上の増加率 (浅枝, 1993)

(3)プランクトン増殖量の変化

地球温暖化のより直接的な影響には、気温や水温の上昇による沿岸域の生態系の変化があげられる。水域の温度が上昇し、しかも日射量が増加すると、植物プランクトンの増殖量が増加し、水域の富栄養化をもたらす。この一連の過程において最も重要なプロセスは、植物プランクトンの増殖過程の変化である。そこで、浅枝(1993)は植物プランクトンの増殖過程のモデル化を行い、水温や日射が増加することによる変化を見積もった。

植物プランクトンの増殖に寄与する環境因子には様々なものがあるが、中でも栄養分濃度、光強度と日射時間、水温、動物プランクトンによる捕食が重要な因子と考えられる。こうした因子を含めて植物プランクトン増殖過程をモデル化し、計算した結果を図4.7に示す。

気温が 3°C 温暖化すると、植物プランクトンのブルージング時期が、温暖化前に比べて約2ヶ月早く現れるという結果になった。初夏に気温が上昇すると、上層と下層の密度差が増加し、栄養分

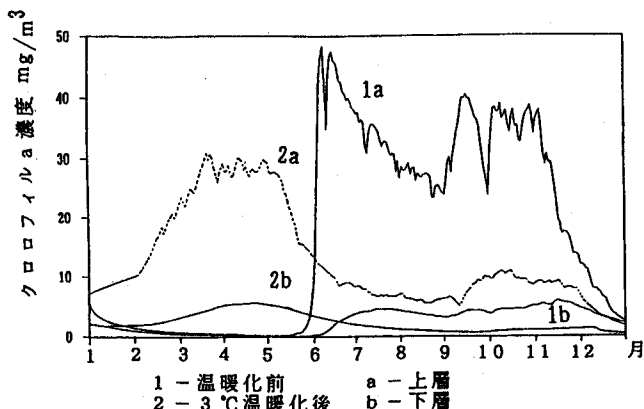


図4.7 温暖化前後の植物プランクトン(クロロフィル)濃度の月変化(浅枝, 1993)

の沈降速度が減少する。栄養分が上層に停滞し日射を吸収することにより、植物プランクトンが増加する。この時、栄養分は飽和状態を保つので、温暖化前にはブルーミングが5月中旬に急激に発生している。その後、栄養分の供給が不足するので、植物プランクトンは減少する。夏の間、日射の増加により深い位置まで日射が到達するようになり、深い位置に存在する豊富な栄養分が利用できるようになるので8月下旬になると再びブルーミングが発生する。そして日射、気温、栄養分の減少により、植物プランクトンは減少する。3℃の温暖化により、春のブルーミングが5月中旬から3月初旬に早まり、秋のブルーミングは8月下旬から9月中旬に遅まる。しかし、時期的に日射が少ないので栄養素は飽和を維持できず、ブルーミングは温暖化前と比較して穏やかである。

このように、温暖化は植物プランクトン濃度の季節変化を減少、均一化させる。水温が上昇すると特に春、秋における植物プランクトンの増殖に大きな影響を及ぼすことがわかった。

沿岸域にはこの他に干潟、湿地帯、藻場、サンゴ礁、マングローブ林など貴重な生態系が存在している。これらに対する影響は定性的な指摘にとどまっている。これらに対する影響を把握するためには、我々の視野を広げた新しい分野の研究が必要である。

5 沿岸域の社会基盤システムへの影響評価

日本の沿岸域には、極めて高い密度で人口や資産、経済活動が集中しており、これらを防護し、支えるために多種多様な社会基盤施設が建設されている。海面上昇や気候変動の影響は、こうした人工システムの上にも現れることになる。「研究小委員会」では港（港湾、漁港・水産施設、専用港湾）、湾岸交通、人工島・埋立地、沿岸農業、高潮・津波防災、内水排除・下水道システム、海岸保全施設、レクリエーションなど多面的な社会・経済活動を取り上げて影響の抽出と影響評価手法の検討を行っている。この中で、浸水、越波、打ち上げ高の増大、波力の増大、栈橋等の揚圧力の増大、地盤の支持力低下などの社会基盤施設に対する直接的な影響項目の多くは、現在の知見や設計指針で評価できる。以下に具体的な例を見てみよう。

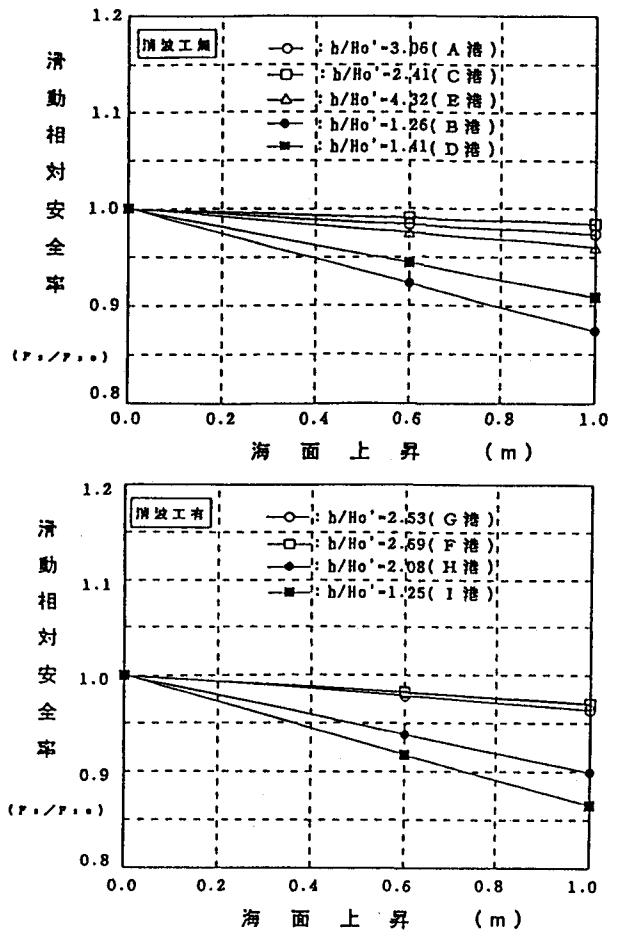


図5.1 海面上昇による防波堤の滑動安全率
(山元・加藤ら, 1993)

(1)防波堤

海面上昇に伴う水深の増加、波高増大や、台風巨大化に伴う波高増大、高潮増大はいずれも、港内静穏度の低下に代表される防波堤機能の低下と、防波堤そのものの安定性の低下に関連づけられる。山元・加藤ら(1993)は、我が国防波堤の代表的な構造形式であるケーソン式混成堤を取り上げ、9例の防波堤を対象として定量的評価を試みた。

安定性の検討としては、堤体の滑動、転倒、支持力を対象にして、海面上昇量=0.6m、1.0mの場合の影響を現行設計法(日本港湾協会、1989)に基づいて試算した。この中で海面上昇の影響は、水深増大によって堤体に作用する浮力の増加(抵抗力の減少)と水深増大による設計波力の変化(波浪変形による堤体前面の波の変化とそれにとりあう設計波力の変化)として考慮されている。

滑動に対する安定検討結果を図5.1に示す。図は初期条件における滑動・転倒の安全率と海面上昇時の安全率との比(相対安全率)を各港別に示している。検討の結果、以下の様な傾向が把握された。

- 1)海面上昇によって滑動安全率は低下するが、その影響の度合いは、防波堤の設計条件のひとつである相対水深(水深と換算沖波の比)の違いによって異なる。
- 2)相対水深が2前後より小さい場合、いわゆる砕波帯にある防波堤ほど、海面上昇の影響を大きく受け、1m海面が上昇したとき滑動安全率は10から13%程度低下する。

(2)海岸保全施設の機能と安定性

海面上昇の影響を検討すべき、もう1つの重要な構造物は海岸保全施設であろう。ここでは宇多・小俣(1991)の検討を紹介する。

浅海域における波浪変形は水深変化と密接な関係を有するから、海面上昇は海岸構造物に作用する波浪の条件自体を変化させてしまう。つまり、従来沖合いで砕波していた波は、水深が深くなると構造物近辺まであまりエネルギーを失うことなくしに到達するようになり、その結果として構造物への打ち上げ高や越波量、さらには構造物に作用する波力の増大を招くことになる。このように、海面上昇は単に平均水面を平行移動させるという種類の問題ではなく、構造物の機能や安定性を著しく低下させる深刻な問題となる。

堤防・護岸への最も重大な影響は、波の打ち上げ高が高くなる事によって堤防・護岸の高さが不足する事である。海面上昇分に応じて計画高潮位が増し、これに加えて堤脚位置での水深の増加にとりあう打ち上げ高の増加分を加えた分だけ堤防高を高くする必要がある。表5.1に示すように、宇多・小俣は2つのモデルケースを計算している。表中のケース①②はそれぞれ外洋砂浜と内湾岸壁という異なる条件・形式のものであるが、いずれも1mの海面上昇に対して3倍前後の高さのかさ上げを必要とするという結果になっており、改めて影響の大きさが確認できる。

この他にも、離岸堤や人工リーフ、消波工ではブロックの重量が不足するようになり、突堤では捕砂効率が減少する事態が起こると指摘されている。

表5.1 海面上昇に伴ううち上げ高と堤防のかさ上げ高の変化
(宇多・小俣, 1991)

(3)高潮の危険性

高潮の危険性の増大は、海面上昇の影響の中でも最も厳しいものの1つである。とくに現在でも低平な大都市では、充分検討しておく課題であろう。筒井・磯部(1992)は、東京湾を対象として高潮の数値シミュレーションを試みた。

図5.2は、現状の海水面において伊勢湾台

モデルケース		海面上昇量 Δh (m)			
		0	0.5	1.0	1.5
ケース①	うちあげ高 (m)	2.2	2.9	4.0	4.8
	堤防かさ上げ高 (m)	0	1.2	2.8	4.1
ケース②	うちあげ高 (m)	8.0	9.5	10.5	11.5
	堤防かさ上げ高 (m)	0	2.0	3.5	5.0

風級の気圧深度70mbの標準台風が来襲した場合と、65cmの海面上昇後において気圧深度85mbの巨大台風が来襲した場合の高潮偏差を比較したものである。計算結果からみると、東京湾においては海面上昇量に加え、気圧深度1mbの増大毎に3cm強の高潮偏差の増大が起こる。

東京湾沿岸の最高水位を比較するため、現在の平均海面に海面上昇、満潮位の上昇量、高潮偏差を加え、更に仮の値として波高を加えたものが図5.3である。図中AからJは横浜から木更津に至る東京湾沿岸を表している。海面上昇と高潮偏差の増大により、現状より1m以上上昇するのに加え、波浪を含めると1.5m程度にもなる。しかし、もし台風が現状と同じならば、最高水位は海面上昇分の65cmあるいはそれ以下の上昇となる。したがって、地球温暖化に伴う台風の変化には充分に注意する必要がある

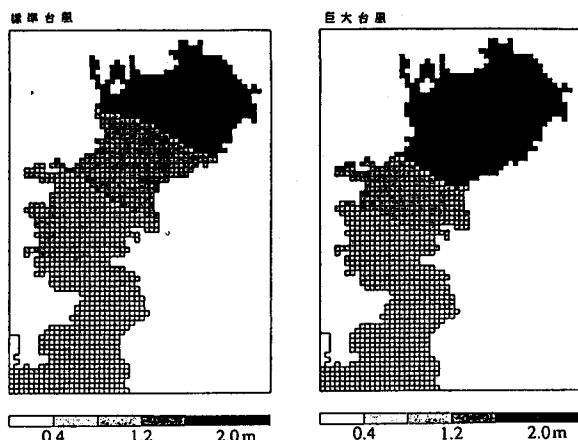


図5.2 海面上昇と台風巨大化が起こった場合の高潮偏差の変化（筒井・磯部，1992）

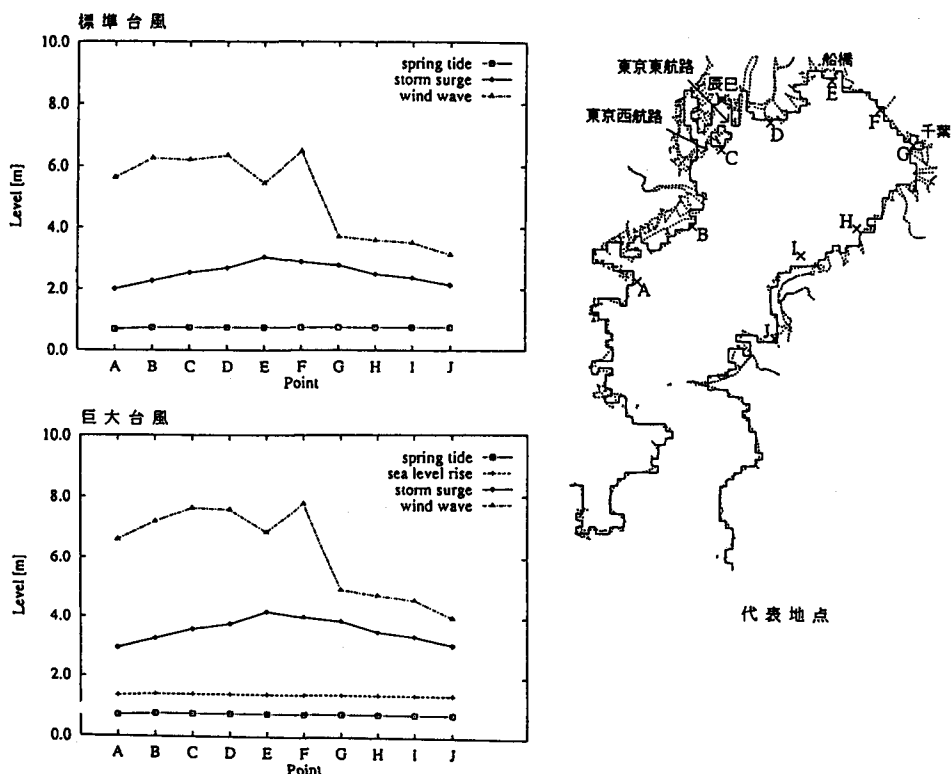


図5.3 海面上昇と台風巨大化が起こった場合の最高水位の変化（筒井・磯部，1992）

上記の最高水位では外郭堤防から越波が起こるが、これを定量的に求め、陸上での氾濫を平面2次モデルで数値シミュレーションした研究も実施されている（松井ら、1992）。この中では台風の規模は現状と同じにされており、65cmの海面上昇分にほぼ相応した50cmの天端のかさ上げが最低限必要となると指摘されている。

(4)沿岸域の脆弱性評価

個々の社会基盤施設に対する検討とともに、地球温暖化にともなう諸現象のうち、特に海面上昇が社会経済活動に対してどの程度の潜在的影響力を持つものかを把握することも重要である。松井ら(1992)は、日本全体の海岸を対象に、ある設定した水位以下の地盤高の土地の面積・人口・資産がどれくらいに及ぶかを算定した。

まず、対象とする代表的な海水位として平均海水位、満潮時の海水位、および異常時（高潮または津波来襲時）における最高海水位（満潮位＋偏差＋波高の10%）をとりあげ、沿岸域別にそれらの値を設定した。海面上昇後の設定水位はそれらに海面上昇分を加えたものである。そして、国土数値情報を用いてそれらの設定水位以下の土地の面積、人口、および資産を算出した。

図5.4は、全国の1mごとの標高値以下の土地の面積、人口、および資産をプロットしたものである。いずれもT.P.2mから4m付近の勾配が急になっており、この標高付近での海水面変動の影響が大きいことがわかる。表5.2は、設定した各水位以下の土地の面積、人口、および資産を示す。特に、現状の朔望平均満潮位において水面下となる面積が861km²、人口が200万人、資産が54兆円であるのに対し、1mの海面上昇により面積が2.7倍の2,339km²、人口が2倍以上の410万人、資産が2倍の109兆円になることがわかる。これは全国面積の0.6%、人口の3%、資産の4%である。この数字は、人為的に防護すべき土地が海面上昇の結果大きく広がり、潜在的な影響が相当大きいことを示している。

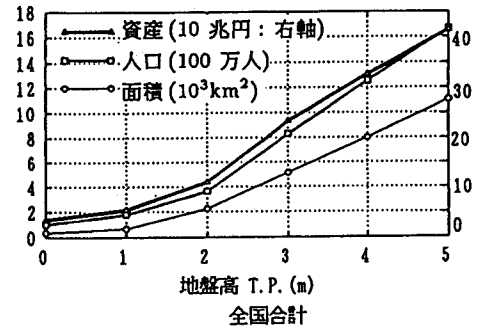


図5.4 各標高値以下の土地の面積、人口、資産（松井ら、1992）

表5.2 設定水位以下の土地の面積（km²）、人口（万人）、資産（兆円）（松井ら、1992）

6 沿岸影響に対する対応策

地球温暖化や海面上昇の問題は、将来の予測に様々な不確実性を残している。こうした不確実性の存在下で、いかなる立場でどのような対応策を考えるべきであろうか。

「研究小委員会」ではこれに対して、短期的で従来技術の延長上での対応策と、長期的な対応策の2本立てで検討を行った。

短期的な対応策として用い

	現 状			0.3m上昇		
	面積	人口	資産	面積	人口	資産
平均海面時	364	102	34	411	114	37
満潮時	861	200	54	1192	252	68
台風または津波発生時	6268	1174	288	6662	1230	302

	0.5m上昇			1.0m上昇		
	面積	人口	資産	面積	人口	資産
平均海面時	521	140	44	679	178	53
満潮時	1412	286	77	2339	410	109
台風または津波発生時	7583	1358	333	8893	1542	378

表5.3 沿岸域の自然環境・自然資源に対する対策技術のチェックリス

影響項目	ハードな技術										ソフトな技術				新技術	タイムスケール
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	a	b	c	d		
砂礫海岸	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	M
砂浜機能の消失	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○		
構造物堤脚水深の増大	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
浜断面の変化	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○		
離岸方向漂砂の増大	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○		
沿岸漂砂量の変化	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○		
土砂供給量の変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	○	
泥浜・干潟	-	-	-	○	○	-	-	○	-	○	○	-	○	○	○	S
河川流出土砂量の変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	○	
波浪の変化	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
生物相の変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	
干潟の減少・消滅	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	
生物の内陸への移動	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○		
塩性湿地・藻場・マングローブ林	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	S
濁度発生による水中光量の減少	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○		
土壌の流出	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○		
高潮の危険性の増大	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○		
陸側への移動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	
漁業資源	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	M
海水温の上昇により魚や海の生態地が移動する	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	
有用種の魚類の分布や再生産性の変化	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	

うる固有の技術には、以下に示すようにハードな技術とソフトな技術があげられる。

1) ハードな技術の例

- a. 海岸堤防，防潮堤，時には防潮水門，内水排除システムも併設。
- b. 護岸。
- c. 突堤・緩傾斜堤。
- d. 離岸堤・潜堤・浮防波堤。
- e. 既存の構造物のかさ上げ，消波ブロック付設，消波機能の改善。
- f. インフラストラクチャーの改修，栈橋，埠頭，道路のかさ上げ，内水排除システムの改修，種々の施設の移設等。
- g. 防潮水門，防潮堰。
- h. 塩水楔上防止用の堰，河川においてはロックとダム。地下水への塩水侵入に対しては地下ダムの建設や淡水の充填。
- i. 地盤の改良工作。
- j. 航路・港内の浚渫，河床の浚渫。

2) ソフトな技術の例

- a. 砂浜の造成・保全.
- c. 湿地帯・マングローブの創出.
- d. 海岸防護のために、人工海藻、人工リーフ・魚礁の建設、サンゴ礁の回復、海藻の植林、海洋汚染からのサンゴ礁の保護等.

これらの対応技術を、影響項目に対するチェックリストの形にしたのが表5.3である。こうした整理によって、地球温暖化や海面上昇という新しい事態に対して我々の保持している技術の有効性が評価できる。社会基盤施設への影響のほとんどはハードな技術によって技術的には対応可能である一方、自然システム等も含めて沿岸域を保全するソフトな技術は相対的に未開発であるといえる。

長期的な対応策は、技術的なものだけに限られない。ゾーニングや沿岸域管理計画といった計画論的なものや、沿岸域における施設の設計・計画基準の見直しなども含まれる。こうした課題は従来の海岸工学の枠を超えており、長期的な対応策の検討には多くの課題が残されている。

7 国際的な研究の動向

(1) IPCCの主導による活動

IPCCは、1990年に地球温暖化に関する第1次評価報告書（IPCC WG1, WG2, WG3, いずれも1990）を発表し、世界に強い衝撃を与えた。その後、1992年6月の地球サミットにむけて第1次評価報告書のup-dateに取り組んだ。IPCCの中では、海面上昇や気象変化の沿岸影響については、第3作業部会の沿岸域管理サブグループ（CZMS, 1992年末の作業部会の再編にともなって新第2作業部会のサブグループBに統合・再編）を中心に検討されてきた。CZMSは、1992年6月の地球サミットにむけて、世界規模での「沿岸域の脆弱性評価」を行うよう呼びかけた。

この脆弱性評価では、7つのステップからなる共通手法（Common Methodology）が開発され、共通の基準の下で海面上昇・気候変動の影響を評価することが試みられた。1992年3月に開催されたベネズエラワークショップの時点で脆弱性評価の結果を発表したのは以下の諸国と地域であった。

- 1) アジア：日本、中国、インド、バングラデシュ
- 2) 太平洋・インド洋：モルジブ、トンガ、マーシャル諸島、キリバス、仏領モーレア、オーストラリア
- 3) 南北アメリカ：アメリカ合衆国、メキシコ、ベネズエラ、ガイアナ、ベルー、ウルグアイ、アルゼンチン、アンティグア島、ネービス島
- 4) ヨーロッパ：オランダ、フランス、ポーランド
- 5) アフリカ：エジプト、ナイジェリア、セネガル

この脆弱性評価の中で、衛星リモートセンシングの利用や小型航空機によるビデオ画像を用いたマッピングなど新しい評価支援技術が開発された。また、こうした取り組みによって、各国毎に従来より精度の高い影響の見積りが得られた。こうした成果は、IPCC CZMS(1992)に詳しい。

IPCCでは、現在、1995年に第2次評価報告書を出す計画を進めており、これに向けて、各国の研究を集結しようとしている。

(2) アジア・太平洋地域における活動

アジア地域では、地球温暖化・海面上昇問題への取り組みが立ち遅れていた。しかし、現在は、日本も

含めたいいくつかの先進国の援助もあって、各国で総合的な温暖化の影響評価と対応策の検討が進められている。

1991年にはアジア開発銀行の援助で2年間の組織的な調査研究が着手されたが、それへの参加国は、パキスタン、インド、スリランカ、バングラデシュ、インドネシア、タイ、マレーシア、フィリピン、ベトナム、中国である。この研究の中には海面上昇・気候変動の沿岸影響に関する研究も含まれており、アジア地域では、ここに来て、一斉に各国で研究が開始されたという観がある。

一方、太平洋地域では、海面上昇が標高の低い小さな島国に大きな打撃を与えると懸念されたことから、早くから影響評価に取り組まれた。しかし、この地域では、詳細な標高データ、潮汐、高潮、波浪等のデータ、など基本的なデータが欠如しており、また、島国に特有な社会的歴史的な背景があることから、こうした地域に対して有効な研究方法の開発が必要とされている。

8 おわりに

本稿では、国内外における海岸工学に関わる地球温暖化・海面上昇の研究の状況について報告し、温暖化と海面上昇の実態や影響評価に関する研究の到達点を明らかにした。温暖化や海面上昇の将来予測には不確定な問題が多く残されている反面、もし将来こうした事態が現実化すれば、広範な分野で相当深刻な影響が生じるということが分かる。海岸工学の従来の発展の経緯からして、社会基盤施設に対する影響の評価は相当程度可能である。その一方で、沿岸域の自然システムについてはまだ我々にとって未知の領域になっているものが多い。今後、これらを含めて沿岸域の全環境を視野に入れる方向で研究を進める必要がある。

それと同時に、このようにして蓄積されつつある成果と力量を国際的な活動とリンクさせ、国際共同研究の分野でも積極的な役割を果たすことも重要な課題である。

(謝辞)

本稿をまとめる上で、海岸工学委員会「地球環境研究小委員会」での2年間の研究と討論が下敷きになっている。メンバーの方々や関係者の方々に心から謝意を表する。また、ここで挙げた研究の他にも、様々な場所で多くの研究成果が発表されているが、紙面の都合で全てを紹介できなかったことにご容赦をお願いしたい。

参考文献

- 浅枝 隆 (1993) : 4.2水質, 「海岸工学に関わる地球規模環境問題」に関わる調査・研究報告書 (印刷中)
- 磯部雅彦 (1992) : 地球温暖化の海岸への影響と対応策, 海岸, Vol. 32, No. 2, pp. 2-9.
- 宇多高明・小俣 篤 (1991) : 海岸保全に及ぼす海面上昇の影響, 土木技術資料, 33-8, pp. 62-65.
- 宇多高明・伊藤弘之・大谷靖朗 (1992a) : 日本沿岸における1955年以降の海水準変動, 海岸論文集, 第39巻, pp. 1021-1025.
- 宇多高明・山本幸次・岡本俊策・河野茂樹 (1992b) : 駿河海岸の過去9,000年間における海浜変形の再現計算と将来予測, 海岸論文集, 第39巻, pp. 426-430.
- 河田恵昭 (1991) : 台風特性に及ぼす長期的な気温変化の影響, 海岸論文集, 第38巻, pp. 381-385.
- 菅 和利 (1991) : 定常塩水くさびの一次元解析, 芝浦工大研究報告, 第35巻, 1号, pp. 83-90.
- 土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会 (1992) : 「海岸工学に関わる地球規模環境問題」に関する調査・研究 中間報告書, 152p.
- 土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会 (1993) : 「海岸工学に関わる地球規模環境問題」に

関する調査・研究報告書（印刷中）。

筒井純一・磯部雅彦（1992）：地球温暖化後の東京湾における高潮の予測，日本沿岸会議論文集，No. 4，pp. 9-19.

日本港湾協会編（1989）：港湾施設の技術上の基準・同解説。

松井貞二郎・立石英機・磯部雅彦・渡辺 晃・三村信男・柴崎亮介（1992）：海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測，海岸論文集，第39巻，pp. 1031-1035.

三村信男・細川恭史・磯部雅彦（1991）：海面上昇・地球温暖化の沿岸域への影響の諸相と影響評価の枠組み，環境システム研究，Vol. 19，pp. 22-27.

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（投稿中）

村上和男・山田邦明（1992）：我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因，海岸論文集，第39巻，pp. 1026-1030.

山口正隆・大福 学（1992）：わが国における気象要素の長期変動および周期性の解析，海岸論文集，第39巻，pp. 1016-1020.

山元登嗣典・加藤雅也・宮井真一郎（1993）：4.1防波堤への影響解析，「海岸工学に関わる地球規模環境問題」に関わる調査・研究報告書（印刷中）。

Bruun, P. (1962) : Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div, ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.

Bruun, P. (1988) : The Bruun Rule of erosion by sea level rise: A discussion of large-scale two- and three-dimensional usages, J. Coastal Research, 4, pp. 627-648.

Dean, R.G. (1991) : Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, J. Coastal Research, 7(1), pp. 53-84.

IPCC WG1 (1990) : Climate Change-The IPCC Scientific Assessment, Cambridge Univ. Press, 365p.

IPCC WG2 (1990) : Climate Change-The IPCC Impacts Assessment, Australian Government Publishing Service.

IPCC WG3 (1990) : Climate Change-The IPCC Response Strategies, Island Press, 273p.

IPCC CZMS (1992) : Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea.

United Nations Environment Programme and Government of the Netherlands (1988) : Impact of Sea Level Rise on Society, A Case Study for Netherlands, Delft Hydraulics Laboratory.