

海面上昇に伴う海岸地帯の変化について

芝野 照夫

The Effect on Coastal Area with Sea Level Raise in Future

Teruo SHIBANO

Increasing atmospheric concentrations of carbon dioxide and other gases are expected to cause a global warming that could raise sea level in the next century.

Accelerated sea level raise and the effect on coastal area represent one of the most important impact as a large part of the world's population and industrial location.

In this study, based on some recent insights presented in the literature.

1. 緒言

地球規模での環境変化、とくに、大気中における二酸化炭素濃度の上昇をはじめとする各種気体の蓄積によって温室効果 (Green-house effect) が増大し、将来における地球全体の気温上昇とそれに伴う大規模な気候変動が予測され、大きな問題として取り上げられてきており、その対策として二酸化炭素の排出規制など国際的な取決め^{1), 2), 3)}が結ばれつつあるのが現状である。

この気候変動は、気温の上昇のみならず地球規模で大気を移動・変化させ、エルニーニョ現象にみられるような海水温度の広域的な変化やアフリカなどの緑地の砂漠化の現象が生じている。

気温の上昇は海水容量の熱膨張と南北両極地の氷床の融解をもたらすとともに、地球の大気移動の変化に伴う降雨分布などに大きな変化が生じさせるものと考えられる。⁴⁾

これらの現象は海面を将来にわたって上昇させると同時に、高潮などの発生頻度が高くなり、洪水氾濫災害など自然災害の発生頻度も高くなることが予想される。とくに、対象地域を海岸地帯に限定して考えるならば海面上昇に伴う相対的な陸地の沈水、すなわち、海岸侵食と海岸低地

における高潮などによる洪水氾濫災害の発生やこれら災害に対処するための膨大な経費が必要になるものといえよう。また、災害に対処するだけでなく社会的な産業、経済活動を円滑に機能させる面においても多大なる経費が必要となると予想される。

本研究では、これまでに指摘された温室効果による気温の上昇と予想される海面の上昇、さらに、海岸地帯における諸問題について検討したものである。

2. 温室効果による気温の上昇

地球を覆う大気は、太陽の放射エネルギー約 343 W m^{-2} のうち約 236 W m^{-2} を吸収し、地球、大気を暖め再び大気外へ赤外線エネルギーとして放射される。この太陽と地球の放射エネルギーが等しければ地球の平衡温度は $-19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となるが、現在の地球表面の全球平均温度は約 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ といわれ、その温度に見合ったエネルギーとして約 390 W m^{-2} の放射を行っていることになる。つまり、地球表面から放射される赤外エネルギーと地球大気外に放射されるエネルギーには約 154 W m^{-2} の差があり、この差は大気の温室効果によるもので、大気が地球表面からの放射を吸収し、再び地球に戻し、これによって現在の地球の温度が保たれているのである。大気の温室効果のうち約 90% は水蒸気、雲および二酸化炭素の作用によるもので、そのうちとくに水蒸気の作用が大きいもの

のそれ自体が気候変動の原因となることは考えられない。一方、二酸化炭素は、その濃度が 1700 年代の産業革命以前には約 275 ppm 程度であったものが、

1980 年代には 340 ppm 以上と増大し、現在もなお年約 0.4% ずつ増加している。この増加は産業革命以降の石炭、石油をはじめとする急激な化石燃料の消費量の増大に対応していることは明らかで、当然のことながら大気の温室効果の度合も増大しているものと考えられる。図-1 は、化石燃料消費による炭素の放出量とハワイ島において観測された二酸化炭素

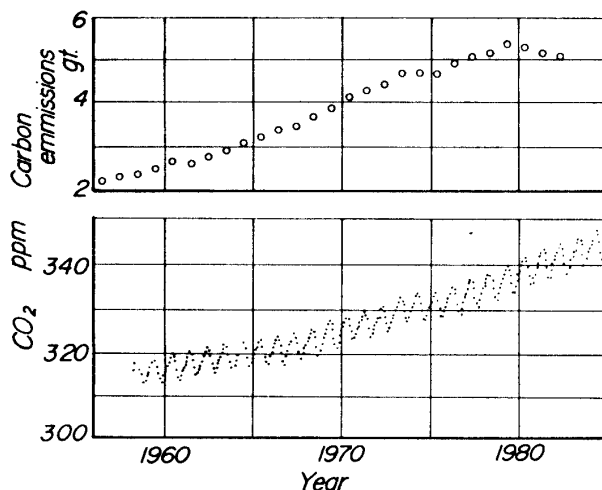


図-1 化石燃料消費放出量と CO_2 濃度の経年変化

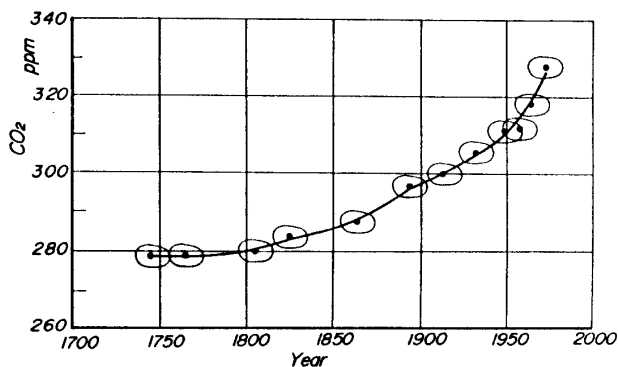


図-2 化石大気測定による CO_2 濃度の経年変化

濃度の経年変化⁵⁾を示したもので、炭素の放出量は1955年以降1980年には2倍以上と増加し、また、二酸化炭素濃度も1958年の約315ppmから340ppm程度に増加している。このように炭素の放出量の増大が大気における二酸化炭素濃度の増大として現れており、温室効果に占める割合が大きいことを示唆しているといえよう。南極大陸氷床のボーリングによって、氷の中に封じ込められている化石大気から測定された二酸化炭素濃度の経年変化⁶⁾を図-2に示すが、1800年代以降急激にその値が増加していることが明らかで、前述の化石燃料の消費量の増大を物語っていることがわかるであろう。

また、これまでの過去100年の全地球平均地上気温の上昇量は、0.3～0.7℃と推定されており、二酸化炭素濃度が現在の2倍になると予想される2030年には、平衡地上気温も2～5℃上昇すると計算されるが、海洋における緩衝効果によってその上昇量は、1.5～3.5℃になるものと予測されている。

3. 気温の上昇による海面の上昇

歴史的な海面の上昇と低下について深海の海底掘削の結果から、コアの中に含まれている浮遊性有孔虫種を使って測定した酸素同位対比($\delta^{18}O$)の永年変化⁷⁾(地質時代における海水中の ^{16}O と ^{18}O の比が極地の氷床の増大と減少を表している。)と過去の海岸線の位置から推定される海水面の永年変化を示す図-3からも、海面の低下した時代には酸素同位体比が大きくなっている。

このことは ^{18}O の濃度が低い海水ほど蒸発が促進されることから、残された海水中の ^{16}O の濃度が相対的に高くなり、 ^{18}O の濃度が低い海水は蒸発、降雪の過程を経て氷床の成長となり、その結果、 ^{18}O の濃度が高い時代ほど海面が低下することになる。すなわち、 ^{16}O の濃度が低い時代には温暖な気候が続き、氷床の融解に伴う海面が高い時代であったものといえよう。

前述のように、温室効果による気温の上昇は、海水容量の膨張や大陸氷床の融解をもたらし、その結果として海面が上昇することとなるが、アメ

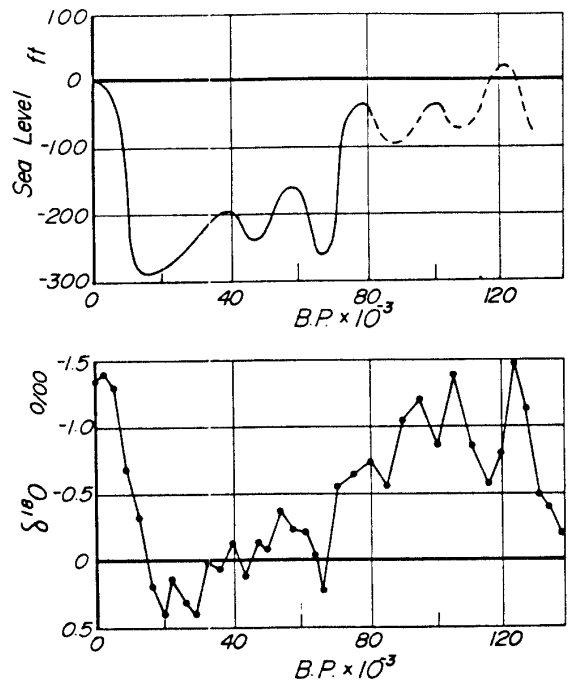


図-3 酸素同位対比および海水面の永年変化

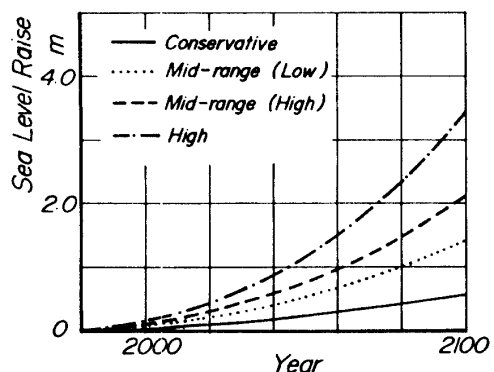


図-4 EPAによる海面上昇の予測

リカ環境保護局^{8),9)}の調査研究から二酸化炭素濃度の増大に伴う温室効果によって生じる海面上昇の経年変化を予測したものが図-4であり、二酸化炭素濃度が現在の2倍になれば気温は1.5~4.5℃と試算され、前述の値とは若干相違するもののいずれにしても気温が上昇して海面も上昇することとなる。なお、図中の各曲線は予想される気候要素に重みをつけて試算した結果であり、1980年の海面の位置を基準として2100年には約0.5~3.5m程度の海面の上昇になると予測している。

4. 災害発生の増加

海面上昇は海岸線の後退だけではなく、海岸背後低地の洪水危険度の増大や流入河川における海水の遡上による塩害などが発生すると考えられる。とくに、海岸付近の沖積低地には人口が集中し、政治・経済活動の中心となっていることから、海面上昇によって大きな影響を受ける地域であるといえよう。

海岸線の後退について、P.Bruun¹⁰⁾は海面上昇に伴って海岸侵食が生じ、それによって生産された土砂は漂砂として沿岸方向および沖方向へと輸送されるが、沿岸方向への漂砂移動がなければ沖方向への漂砂は時間的なずれがあるものの、次第に沖浜からより深海へと進み、中程度の勾配をもつ海岸では海面が1mm上昇するごとに、汀線は約0.3m後退すると指摘している。さらに、最近のアメリカ東海岸では年当たり約2mmの海面上昇があり、これによる海岸侵食量は高波浪の来襲に原因する侵食量を含めた全侵食量の20~50%にも及んでいると算定されている。

また、アメリカ環境保護局の調査によれば、海面が30cm上昇すると北アメリカの大西洋沿岸およびメキシコ湾沿岸の砂浜海岸で30m程度海岸線が後退するものと推定している。

また、Schneider & Chen¹¹⁾は海面上昇が4.7mに達するとLouisianaとFloridaの1/4、DelawareとMarylandの1/8は水面下になると算定している。さらに、洪水危険度の増大については、海岸堤防などの対策工事が実施されない場合に海面が1.5m上昇すればCharlestonの1/4は水面下となり、洪水の発生確率も現在の100年に1回から10年に1回となると推定され、この洪水発生確率の増大は流入河川による洪水だけでなく、高潮災害の発生確率も高くなり、被害総額は2300万ドルから1億ドル以上にも達すると推定している。メキシコ湾岸のテキサス州ガルベトンにおける海面上昇と想定洪水氾濫区域の面積¹²⁾を示したものが図-5である。河川の計画高水の算定に用いられる100年洪水確率の氾濫原面積は、海面が約1m上昇すると160km²程度から260km²程度へと増大する。

また、海岸線付近の土地は、2m程度の海面上昇に伴って約

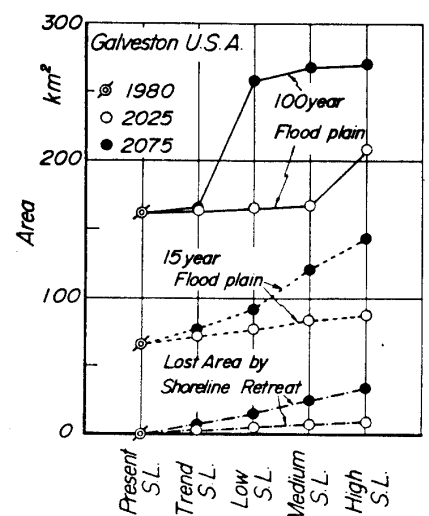


図-5 ガルベトンにおける海面上昇と洪水氾濫面積の予測

30 km²も消失する可能性があることを示している。Delft水理研究所の報告¹³⁾では、オランダ、インド洋上のモルディブ諸島およびバングラディッシュのガンジス川河口付近の低平地について、海面上昇に伴う影響を次のように指摘している。まず、オランダは北海沿いに低地が広がり、これまでの国土開発は海岸堤防の建設と干拓の歴史であり、それによって国土を広げてきたものであり、人間の活動が直接海とのかかわりのもとで行われてきたものといえよう。

オランダの北部地域は農業地帯として、南部地域はライン川の河口地帯として低地が広がり、ゾイデル海と北海の間にある島を海岸堤防によって締切り、干拓が行われ、土地利用がなされてきた。このゾイデル海は生態学的にも重要な感潮領域であるとともに、海面の上昇は塩分濃度の上昇による湖沼環境の変化や北海から来襲する高潮の影響によって国土の大半を占める低地では洪水氾濫災害の危険度が増大し、さらに、地下水への塩水の遡上をもたらし、経済活動だけではなく動植物の生態の面においても大きな影響を与えると懸念されている。

モルディブ諸島はインド洋の中央部にあり、小さな珊瑚礁の約1200の島から構成されている。島の標高は2～3m程度であって、インド洋上に発生するサイクロンの脅威にさらされている。このように標高の低い島では、海面が上昇すれば当然のことながら海面下となるといえよう。珊瑚礁から形成されている島は、珊瑚礁の生成速度が0.1～2cm/year程度といわれていることから、海面の上昇に比べて土地が相対的に低くなることとなる。すなわち、なんらかの対策を講じなければモルディブ諸島は将来的に消滅する運命にあるといえよう。

一方、ベンガル湾の湾奥でガンジス川の河口デルタに位置するバングラディッシュでは、河川、小水路などが縦横に発達したところであり、ガンジス川の運搬した土砂が堆積した低平地から構成され、また、この低平地に約8500万人が住むと同時に、世界でも有数の人口増加率

(2.6%/year)の高い国である。このガンジス川河口では強固な海岸堤防など海岸災害防止対策工の整備が十分でなく、毎年のように高潮災害が発生して数万人から十数万人単位の死者がでている。このような海岸災害防止工の整備が遅れている海岸低地において海面が上昇すると当然のことながらこれまで以上に災害が発生する可能性が高く、被災者も激増することになるであろう。

5. 海岸地帯の変化と対策

わが国沿岸部のうち海岸堤防など海岸災害に対処可能な施設が施工されているのは海岸線総延長の約25%であり、とくに、東京、大阪、新潟、および伊勢湾沿岸のように、かつて工業用

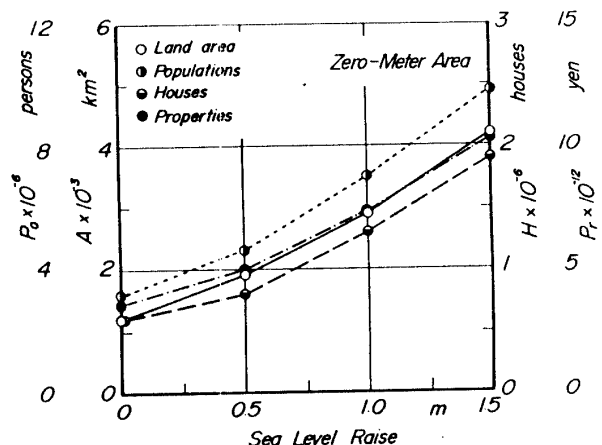


図-6 海面上昇によるゼロメートル地帯の面積と人口の増加

水などを地下水から大量に取水していた地域では地盤沈下が生じ、海面より低い土地が広がっている。このため海岸線は強固な海岸堤防によって保全されているのが現状であり、将来にわたる海面の上昇には海岸堤防の嵩上げや現在海岸堤防の前面に積まれている消波工の重量の増大などの問題とともに、砂浜海岸では海浜の維持のために養浜などを行わなければならないであろう。図-6は建設省¹⁴⁾によって算定された、わが国における海面上昇に伴うゼロメートル地帯面積の増大と居住人口、家屋数、資産を示したもので、海面が1.5m上昇するとそれぞれ現在の3倍以上のものとなるのが明かで、高潮や洪水による氾濫が生じれば被災規模が大幅に増大することが予想されると同時に、それを防止するための対策工も大規模になり、対策費に膨大な経費がかかるものといえよう。例えば、図-7のように海岸堤防についても港湾や主要な背後地のある内海域においては、現在の堤防天端高を約2mから3mも嵩上げする必要があり、それに伴って港湾施設の改善、背後地の整備など大きな問題となることは明らかである。一方、前出のアメリカ・テキサス州ガルベストンにおける予測される海面上昇に対する経済的影響を示したものが図-8である。海面上昇を考慮しなければ考慮した約3倍以上の影響を被り、とくに、海面上昇量を大きく見積った場合の2075年に約2.4m海面が上昇するとした時には、最大約18億ドルにもなると予想されている。さらに、アメリカ、ニュージャージー州の大西洋岸に広がるロングビーチ海岸¹⁵⁾は、約18kmの長い沿岸に砂堆が続き、東側は大西洋、西側にも内水面の広がった海岸保養地として有名な景勝の地であり、海に面した砂丘地に数多くの別荘などが並んでいる。これまでもロングビーチ海岸にはハリケーンの来襲による高波浪が来襲して、家屋の倒壊などの災害が発生するとともに家屋の構造をピロティー構造に改造されてきている。しかし、海面の上昇に伴って砂丘地前面の海浜が侵食され、家屋の倒壊のみならず砂堆の消失も懸念されているのが現状である。そのための対策として図-9に示すように、砂堆の嵩上げや後退や砂堆の大西洋側に面した前面と後面に海岸堤防を築造して海面上昇に伴う災害から保全する対策を講じない場合と講じた場合の比較として提案されている。

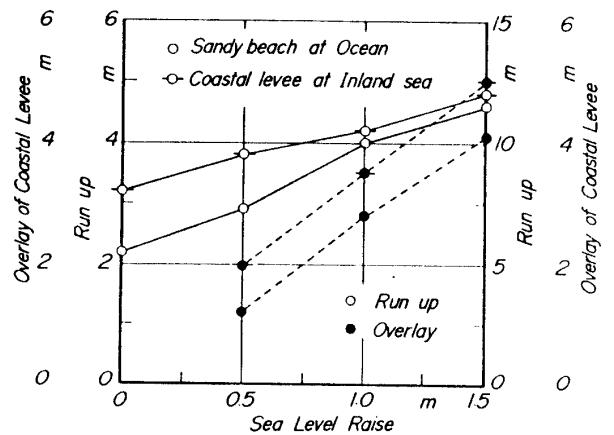


図-7 海面上昇に伴う海岸堤防の嵩上げ

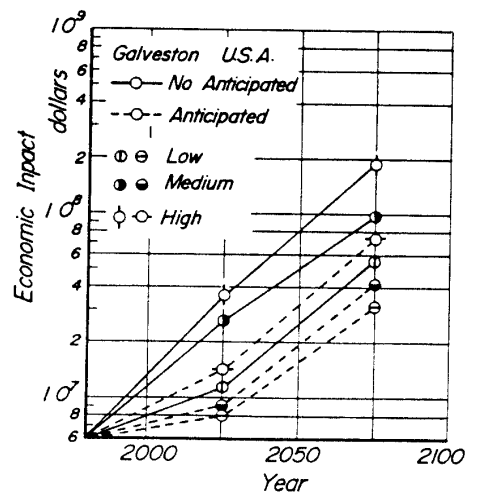


図-8 ガルベストンにおける海面上昇と経済的影響

また、これらの対策について保全工法が取られない場合に対する各工法のコストを示したものが図-10である。このうち砂堆全体を嵩上げする場合には、海面上昇の初期に多量の養浜工を実施しなければならないために海面上昇に伴う損失額以上のコストが掛かることとなるが、海面上昇量が大きくなっても損失額の約 50~70 % 程度ですむと示している。

一方、砂堆を海岸から後退させて保全する工法は、いずれの工法に比べても損失額に対する経費が安価になることを示しており、海面上昇が約 0.6m 以上になっても損失額の 20% 程度におさまることを示している。これは図-9 から明らかなように砂堆全体の嵩上げには家屋も同時に嵩上げなどの改築をおこなう必要があるため、非常に高額な経費が必要になる。しかし、砂堆を後退させて地域を保全する場合には低地の家屋は嵩上げする必要があるものの、砂堆の後面に造成された土地に新しい家屋が建設され、そこから保全工を補うための経費が生みだせることなどによってコストを低く抑えることが可能となるが、これまで海に面していた家屋は取り壊しの対象となり、放棄しなければならない。

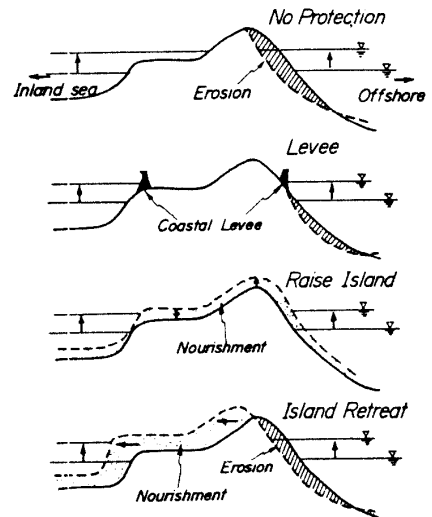


図-9 ロングビーチにおける海岸保全工法

6. 結 語

将来にわたって予測される地球の温暖化に伴って、わが国のみならず世界各地においても大きな影響を受けるものと考えられる。とくに、海面高度の低い地域では海面の上昇が最大約 3.5~5m にも達すると予測されており、海岸堤防の築造や土地の地盤嵩上げを行わなければ海面下となってしまうこととなる。

また、わが国をはじめ世界の主要都市はいずれも海岸部に位置しており、政治・社会および経済的にも海面上昇に伴う直接的な損失以上に二次的な損失を受けることとなる。

海面上昇に対する海岸施設の築造に際しては、これまで高潮・海岸侵食対策として海岸堤防などが各地に建設され、改修のつど設計外力の見直しが計られてきており、この設計外力の見直しにあわせて、潮位の算定値に海面上昇の効果を考慮すれば対応可能といえよう。また、洪水氾濫に対処するためには、河川堤防の改修だけではなく、内水排除施設の拡充と土地条件にみあった土地利用の強化およびその規制が最大の課題となるであろう。

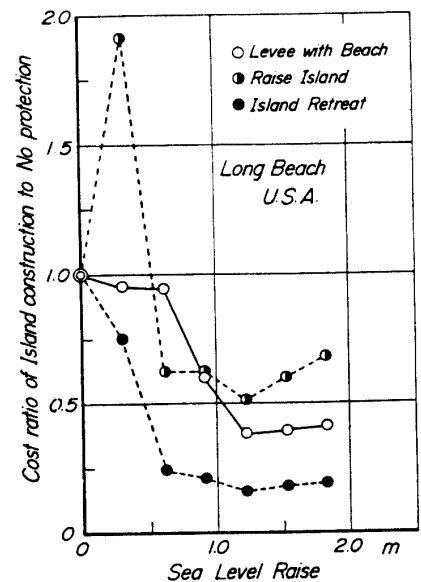


図-10 ロングビーチにおける保全工法別コスト

参 考 文 献

- 1) Intergovernmental Panel Climate Change : Policymakers Summary of the Potential Impacts of Climate Change, Report from Working Group II to IPCC,1990.P.46.
- 2) 気象庁編：異常気象レポート'89, 大蔵省印刷局, 1989,P.433.
- 3) 海野英明：国際的取組みの現状, 土木学会誌別冊増刊, Vol.75,No.4,1990,pp.97~99.
- 4) 野田 彰：地球温暖化に起因する気象・水文特性の変化の長期予測, 土木学会誌別冊増刊, Vol.75,No.4,1990,pp.11~14.
- 5) C.D.Keeling : Atmospheric Carbon Dioxide Variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii,Tellus, X X VIII,6,1976,pp.538~551.
- 6) Netfel,A.,H.Oeschger,J.Schwander,B.stouffer & R.Zumbruun : Ice Core Sample Measurements give Atmospheric CO₂ Content during the Past 40,000 Years,Nature, 295,1982,pp.220~223.
- 7) 斉藤常正：大西洋地域の第四紀気候 - CLIMP計画の成果を中心として -, 科学, Vol.47, No.10,1977,pp.592~601.
- 8) J.S.Hoffman : Projecting Future Sea Level Rise,Methodology,Estimates to the year 2100 and Research Need,U.S.Environmental Protection Agency,1983.
- 9) Barth,M.C.& J.G.Titus : Greenhouse Effect and Sea Level Rise,Van Nostrand Reinhold Company,1984.P.325.
- 10) P.Bruun : Sea Level Rise as a Casuse of Shore Erosion,Proc.ASCE,WW1,1962, pp.117~130.
- 11) Schneider,S.H. & R.S.Chen : Carbon Dioxide Warming and Coastline Flooding -Physical Factors and Climatic Inpact-,Annual Review of Energy 8,1980, PP.107~140,
- 12) J.G.Titus & M.C.Barth : Greenhouse Effect and Sea Level Rise - An Overview of the Causes and Effect of Sea Level Rise,Van Nostrand Reinhold Company,1984, pp.1~56.
- 13) H.G.Wind: Impact of Sea Level Rise on Society,A.A.Balkema Publishers,1987, P.191.
- 14) 山田俊郎：地球環境問題“河川行政”, 土木学会誌別冊増刊, Vol.75,No.4,1990, pp.85~88.
- 15) J.G.Titus : Greenhouse Effect,Sea Level Rise,and Barrier Islands:Case Study of LongBeach Island,New Jersey,Coastal Management Vol.18,1990,pp.65~90.

(平成2年12月5日 受理)