

海面上昇・気候変動による沿岸域への影響とその対応策

三村 信男*・磯部 雅彦**・灘岡 和夫***

1. はじめに

地球温暖化は、来世紀あるいはそれ以降まで地球全体の自然のシステムと人類の生存基盤に大きな変化をもたらすものとして、強い関心を集めている。そのもっとも広範で明瞭な影響は海面水位の上昇である。海面上昇の影響については、世界各国で活発な検討が始められており、一方、国際機関としても、1988年11月気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が組織され、本年11月の第2回世界気候会議に向けて報告書の作成を急いでいる。IPCCには、「科学的な知見の評価」(WG1)、「影響評価」(WG2)、「対応戦略」(WG3)の3つのワーキンググループがおかれているが、その各々で海面上昇に関するサブグループが組織され、海面上昇の予測・影響評価・対応策について検討がすすめられている。

このような事態に対して、我が国の土木工学とりわけ海岸工学の分野においても積極的に貢献することが求められている。その第一歩として、本論文では、IPCCをはじめ世界各国・国際機関等の文献をレビューし、海面上昇の影響と対応策に関する研究の現状と認識の到達点とを総合的に把握することを試みた。

なお、地球温暖化の実態やメカニズムについては、近年出版された単行本・解説書(Bolin et al., 1986; 北野, 1984; 高橋ら編, 1987; 浅井, 1988; レスター・R・ブラウン編, 1988, 1989; 気象庁編, 1989; 人類とエネルギー研究会編, 1989; 田中, 1989; 環境庁長官官房総務課編, 1990)や雑誌の特集(海洋科学特集, 1986; 科学特集, 1989; 現代化学特集, 1989; サイエンス特集, 1989; サイエンス別冊特集, 1989; ニュートン別冊特集, 1989; 松野ら, 1989; MOL 別冊, 1989)に様々な形で紹介されている。また、研究現況をとりまとめた報告書(環境庁地球温暖化問題に関する検討会, 1988, 1989; 計量計画研究所, 1989)もある。

2. 温暖化のシナリオと将来の海面上昇

温暖化とその結果生じる海面上昇については様々なレベルで不確実性があるが、IPCC WG1 (1990)によればおおよそ次のような認識が得られつつある。

- ① 温室効果は現実のもので、天然の温室効果気体によって現在の地上気温は、既に約 30°C 暖かくなっている。
- ② 主として人為的な温室効果ガスの排出によって過去100年の間に全球地上平均気温は $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 上昇している。
- ③ 過去100年の間に、海面は $1\sim 2\text{ mm/年}$ の速度で上昇したと考えられる。

問題は、将来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、4つの排出シナリオを設定し、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今後の温暖化・海面上昇を検討している。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、図-1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、2020年までに 1.8°C ($1.3\sim 2.5^{\circ}\text{C}$)、2070年までに 3.5°C ($2.4\sim 5.1^{\circ}\text{C}$) の平均気温の上昇が見込まれる。

一方、これまで、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。これらの結果をまと

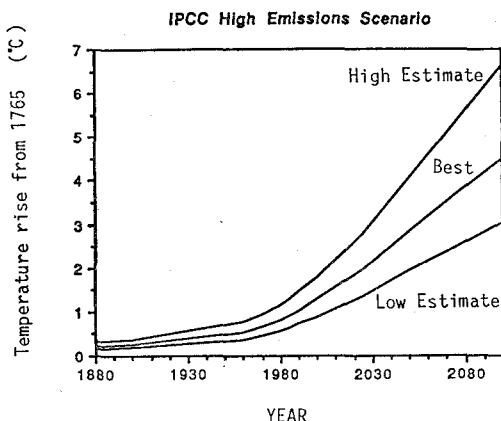


図-1 2030年に等価 CO_2 濃度が倍増する場合の温暖化の予測 (IPCC WG1, 1990)

* 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

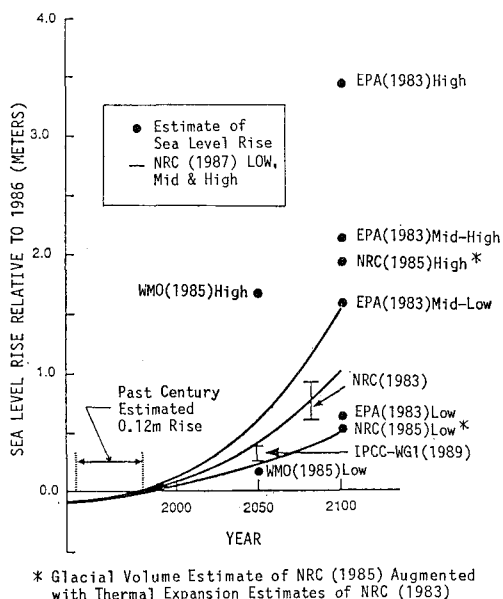


図-2 海面上昇の予測 (IPCC WG2 Section 6, 1990)

めたものを図-2に示す。これによると、当初非常に大きな海面上昇の予測がされていたものが、温暖化の予測が低目に修正されたこともあいまって、下方修正されてきている。それにしても、最近の予測 (IPCC WG1, 1990) でも、2030 年までに 20 cm (10~32 cm)、2100 年までに 65 cm (30~110 cm) の上昇が生じるとされている。2030 年までの上昇量 20 cm のうち、海水の熱膨張によって 12 cm、陸上の氷河の融解によって 8 cm、グリーンランドの氷床の融解によって 1 cm の寄与があり、逆に南極の氷床の発達によって -1 cm 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。

3. 沿岸域への影響の諸相

3.1 IPCC での検討

IPCC では、WG2 第 6 セクション (IPCC WG2 Section 6, 1990) が「世界の海洋と沿岸域」への影響評価を担当しており、WG2 第 5 セクション (IPCC WG2 Section 5, 1990) の「人間居住」の中でも海面上昇の影響が扱われている。

WG2 第 6 セクションの検討の中では、海面上昇の影響として、一次的な、物理現象として現れるものがまず抽出され、それを通して二次的・三次的に現れる社会経

済、文化、自然環境への影響が詳細に記述されている。物理的影響として挙げられているのは、次のようなものである。①海面上昇による低・湿地帯の水没、②新たな海岸侵食の発生と加速化、③海岸域での氾濫の頻度・強さの増大、④塩水侵入による水資源・水質への影響、⑤潮差の変化、河口での土砂の堆積場所の移動などの副次的影響、⑥水温上昇、台風の勢力増大などの他の気候変動現象との重畳による影響。

世界の海岸、沿岸域は、地形・地質などの自然条件も違えば、開発の程度も異なる。更に、外力である気象・海象条件の温暖化による変化も地域毎に異なると考えられる。したがって、上に述べたような海岸、沿岸域への影響もきわめて多様で、本来各地域毎に具体的に評価される必要がある。以下では、各国・各地域の検討状況を概観する。

3.2 北 米

米国は地球環境研究をリードしている国の一つであり、したがって関連する論文や報告書もかなりの数にのぼる (例えば、National Research Council, 1987; Bardach, 1988; Titus et al., 1989)。そこで、ここではその中で最も広範で体系的な内容となっている米国環境保護局 (EPA) のレポート (Smith・Tirpak, eds., 1988) を中心としてその概要を紹介する。

この報告書は、影響評価の対象が米国国内に絞られているが、報告書の基本構成を示した図-3からわかるようになりかなり包括的な評価項目が含まれている。この報告書では、全国的な影響評価 (National Studies) とは別に 4 つの地域を対象とした Regional Case Studies が詳細に行われており、それぞれの影響分析結果が政策面や技術対策も含めて述べられている。海面上昇に代表される沿岸影響については、基本的に 2100 年までに 0.5, 1.0, 2.0 m の海面上昇という 3 つのシナリオについて影響評価が多面的に行われており、海岸防御のための費用の試算も行なわれている。特に、上記の Regional Case Studies

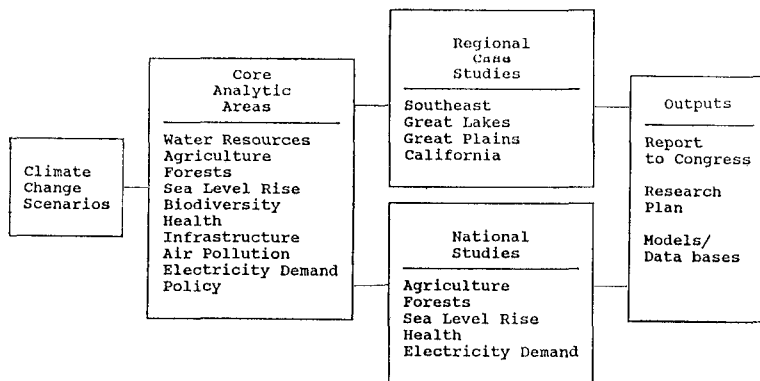


図-3 EPA における影響評価の枠組み (Smith・Tirpak, eds., 1988)

の中の五大湖を対象とした例では、温暖化や降水量の変化といった複合的気象要因による湖の水質や水量等への影響評価がなされており、ユニークな内容となっている。

同じ EPA 関係のレポートである Titus (ed., 1988) は、米国南部に主として見られる低湿地帯を対象とした影響評価を詳細に行ったものである。これについては、上記の EAP の報告書にも盛り込まれているが、いずれにしても海面上昇に対する低湿地帯の生態系の追従速度が一つの大きな不確定要素となっているようである。

北米では、カナダでも 1978 年に Canadian Climate Program が組織されるなど、早くから気候変動の問題の検討が着手され、現在では、各地域毎に影響評価が行なわれている。その結果は、Climate Change Digest (CCD) として発表されている（例えば、Minister of the Environment, 1987; Lane et al., 1988; Stokes, 1988）。

3.3 ユーロッパ

ヨーロッパでは、オランダが精力的に海面上昇の影響評価と対策・政策決定について検討を行っている。1986 年にはデルフトにおいて海面上昇の社会的影響に関するワークショップ (ISOS [Impact of Sea Level Rise on Society] Workshop) が開かれ、オランダを含む世界主要地域における海面上昇の影響の検討がなされている。その結果はまず Wind (ed., 1987) にとりまとめられるとともに、それに続いて United Nations Environment Programme・Government of the Netherlands (1988) および Schröder (1988) にも報告が出されている。

これらを通じて、まず、もっとも海面上昇の影響を受けると考えられる地域の中での特徴的な代表として、オランダ、バングラデシュ、およびモルジブを取り上げ、物理、経済、社会、政策など含めたケーススタディを行っている。

また、最終的な政策決定における影響解析の位置づけを明らかにした上で、チャートを用いて海面上昇の関連事項の因果関係を整理している。ここで海面上昇の影響として主に取り上げられているのは、陸地への海水の直接的侵入、海岸侵食、干潟の消失と水産資源の再生産問題、塩水の河川遡上と淡水資源問題、地下水への塩水の浸透、それらの結果としての農業・工業・住宅・社会基盤施設の問題、海岸・河川の水位上昇と洪水問題・構造物への被害、レクリエーション施設の被害、などである。

さらに、簡単ではあるが定量的な影響評価モデルを作成し、試算を行っている。図-4 はそのモデルの構造を示したものである。海面上昇や経済成長などについては未だに不確定な要素が多いので、シナリオとして仮定するものとし、それらにともなう影響について解析を行うというものである。

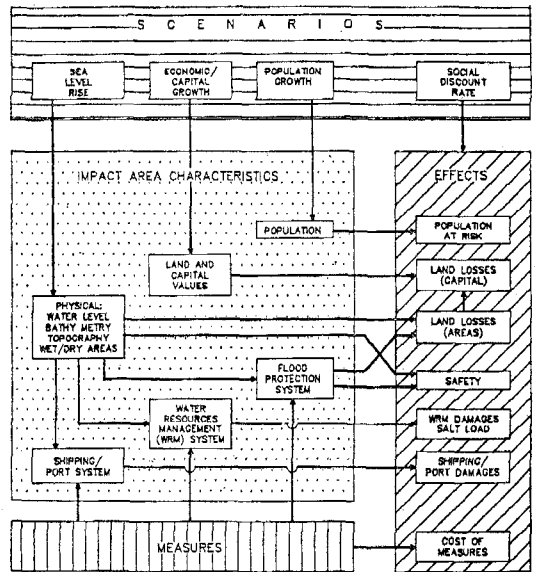


図-4 社会に対する海面上昇の影響評価のモデル (Wind, ed., 1987)

3.4 オセアニア

オセアニアでは、オーストラリアとニュージーランドが積極的な取り組みを行なっている。オーストラリアは早くから温暖化・海面上昇の影響評価に着手し、50 人以上の研究者・行政担当者らの参加によって成果を取りまとめている (Pearman, ed., 1988)。オーストラリアは、熱帯から温帯に位置しており、海岸の地形・特性もサンゴ礁・マングローブ林から、エスチュアリ・砂浜まで多様性に富んでいる。それを反映して Pearman (ed., 1988) では、水没、海岸侵食、高潮による災害、湿地帯・サンゴ礁への影響等多面的な形で海面上昇の影響が述べられている。

一方、ニュージーランドにおいても 1988 年 The New Zealand Climate Change Program が設立され、3つのグループに分かれて地球温暖化のニュージーランドに対する影響評価と対策の検討を行なっている。その最初の活動報告が Ministry for the Environment (1988) にまとめられている。

3.5 アジア・太平洋・インド洋地域

アジア・太平洋・インド洋地域は、海面上昇の影響をもっとも強く受けると予想される地域である。この地域には、ガンジス川 (バングラデシュ)、メコン川 (ベトナム)、黄河・揚子江 (中国) といった大河川の三角洲やマングローブ林 (東南アジア)、サンゴ礁の島国など、海面上昇に対してもっとも脆弱と考えられる海岸が集中している。表-1 には、IPCC WG2 Section 6 (1990) がとりまとめた海岸防御に要する費用の GNP に対する比率の大きい国々が示されている。この表中の数字は、注

表-1 GNP に対する海岸防衛費用の比率
(IPCC WG2 Section 6, 1990)

No.	Country or Territory	Annual Cost as % of GNP
1	Maldives	34.33
2	Kiribati	18.79
3	Tuvalu	14.14
4	Tokelau	11.11
5	Anguilla	10.31
6	Guinea-Bissau	8.15
7	Turks and Caicos	8.10
8	Marshall Island	7.24
9	Cocos (Keeling) Isl.	5.82
10	Seychelles	5.51
11	Falkland Island	4.75
12	French Guiana	2.96
13	Belize	2.93
14	Papua New Guinea	2.78
15	Bahamas, The	2.67
16	Liberia	2.66
17	Gambia, The	2.64
18	Mozambique	2.48
19	St. Chr. & Nevis	2.33
20	Niue	2.18
21	Guyana	2.12
22	Suriname	1.94
23	Sierra Leone	1.86
24	Aruba	1.85
25	Pitcairn Island	1.71
26	Fiji	1.53
27	Sao Tome and Pr.	1.46
28	Nauru	1.25
29	British Virgin Isl.	1.24
30	Tonga	1.14

*This estimate does not represent the total cost of sea level rise, only the cost of erecting shore protection structures.

にも述べられている通り、内陸部を守るために海岸堤防を建設・維持するために要する費用だけをとったもので、その他の対応策・被害による出費は含まれていない。この表の中で、多大な出費を強いられる国の大部分は太平洋・インド洋のサンゴ礁国である。

しかし、こうした地域における海面上昇の影響評価と対策を継続して検討した研究成果は、今回のサーベイでは見つからなかった。いくつかの国際会議での country report と UNEP Regional Seas Program (例えば、Pernetta et al., 1989) や South Pacific Regional Environment Programme (1989) の活動があるものの、この地域の危険性を考えると現在の研究態勢は不十分であると考えられる。

3.6 日 本

我が国におけるこの問題への取り組みは、着手されつつある段階である。海面上昇に対する影響評価としては、日本環境衛生センター(1989)、建設省河川局河川計画課(1989)、竹下(1989)、農林水産省(1989)、みなとの

防災特集(1990)等がある。この中では主として、海岸・港湾構造物の建設・かさ上げに要する費用といった点から検討がされているにすぎない。

4. 海面上昇への対応策

各国で、既に海面上昇に対してどのような対応策がありうるのかという検討が始まっており、IPCC WG3 Coastal Zone Management (CZM) Subgroup (1990) でも検討がすすめられている。これまでの検討の結果、海面上昇への対応は、次の3つの基本的考え方に整理されている。

① 構造物による沿岸域の防衛 (protection)

人口の密集地、経済活動の集積した地域、貴重な資源のある地域は構造物を構築することによって守る必要がある。この対応策は、さらに、hard (海岸堤防、防潮堤、河口ぜき等) と soft (養浜、砂丘の再生、湿地帯・マングローブの再生等) とに分けられる。

② 順応 (accommodation)

海面上昇を受容しつつ、海岸の利用を継続するという方策で、建物の基礎のかさ上げ、塩水が混入した水の利用などがその例である。この方策は、海岸を利用し続けるという利点があるが、逆に自然災害への脆弱性は増すことになり、台風の警報システムなど災害への対策が不可欠である。

③ 海岸の放棄と撤退 (retreat)

危険の大きい海岸地域とこの地域内の資産を放棄し、内陸に撤退するというもので、住民の移住も含まれる。計画的な撤退と台風などの被災によって撤退を余儀なくされる場合とが考えられる。最悪の場合には、一つの地域全体、一つの島全体の放棄によって、国境を越えた「環境難民」の発生もありうると思慮されている。一方、沿岸の生態系の陸側への移動を保障するため意図的に撤退策がとられる場合もある。

これらの対応策がとられた場合、その結果として、自然環境、経済、社会・文化、法律・社会制度といった広い範囲に及ぶ新たな問題が生じると考えられる。そのため、IPCC WG3 CZM Subgroup の検討結果では、海面上昇の影響とそれへの対応、さらには対応策の生み出す新たな問題までも視野に入れた中長期的な沿岸域管理計画の必要性が強調されている。

5. 結 語

本論文では、IPCC を中心にした国際機関と世界各国の海面上昇の影響評価と対応策の検討の現状を紹介してきた。各国の検討の到達点には大きな落差がみられる。特に、もっとも強く影響を受けると予想されるアジア・太平洋・インド洋地域では検討は始まっていないか、緒

についた段階である。我が国も、現時点では立ち遅れているグループにはいるが、自らが3.4万kmという長い海岸線を有する国であり、かつアジアに位置していることを考えると我が国自身の海岸とアジア太平洋諸国とを視野にいった研究を急速に強める必要がある。

参 考 文 献

- 浅井富雄 (1988): 気候変動——異常気象・長期変動の謎を探る——, 東京堂出版, 202 p.
- 海洋科学特集 (1986): 気候変動と海洋, 海洋科学, 通巻191号, 海洋出版, 321 p.
- 科学特集 (1989): 変容する地球大気, 科学, Vol. 59, No. 9, 岩波書店, pp. 561~633.
- 環境庁地球温暖化問題に関する検討会 (1988): 地球温暖化問題に関する検討会 第1回中間報告, 27 p.
- 環境庁地球温暖化問題に関する検討会 (影響評価分科会) (対策分科会) (1989): 地球温暖化問題に関する検討分科会 第1回中間報告, 116 p.
- 環境庁長官官房総務課編 (1990): 地球環境キーワード辞典, 中央法規, 155 p.
- 気象庁編 (1989): 異常気象レポート '89—近年における世界の異常気象と気候変動, 433 p.
- 北野 康 (1984): 地球環境の科学, 裳華房, 237 p.
- 計量計画研究所 (1989): 地球温暖化が及ぼす影響評価 予備調査, 169 p.
- 建設省河川局河川計画課 (1989): 地球環境問題に関する河川行政上の課題——「地球環境問題検討委員会」中間報告について——, 17 p.
- 現代化学特集 (1989): 人間活動と地球の温暖化, 現代化学, No. 224, 東京化学同人, 72 p.
- サイエンス特集 (1989): 地球を守る, サイエンス, Vol. 19, No. 11, 日経サイエンス社, 142 p.
- サイエンス別冊特集 (1989): 破壊される地球環境, 日経サイエンス社, 101 p.
- 人類とエネルギー研究会編 (1989): 地球環境と人間, 財団法人省エネルギーセンター, 299 p.
- 高橋浩一郎・岡本和人編 (1987): 21世紀の地球環境, 気候と生物圏の未来, NHK ブックス, 225 p.
- 竹下正俊 (1989): 地球環境問題と沿岸開発——海面上昇による影響——, Coastal Development, No. 11, (財)沿岸開発技術センター, pp. 87~95.
- 田中正之 (1989): 温暖化する地球, 読売新聞社, 227 p.
- 日本環境衛生センター (1989): 地球温暖化問題への対策に関するスクリーニング調査結果報告書 (建設環境, 土木工学), 10 p.
- ニュートン別冊特集 (1989): 地球クライシス, 人類に未来はあるか?, 教育社, 241 p.
- 農林水産省 (1989): 気候変動と農林水産業に関する研究会, 中間報告, 73 p.
- 松野太郎・新田 勉 (1989): 異常気象レポート '89 今年の日本は曇くなる?, ニュートン, Vol. 9, No. 5, pp. 36~51.
- みなとの防災特集 (1990): 地球温暖化と海面水位上昇, みなとの防災, 第105号, 港湾海岸防災協議会, pp. 1~34.
- MOL 別冊 (1989): 地球環境問題と保全対策, オーム社, 180 p.
- レスター・R・ブラウン編・本田幸雄 監訳 (1988): 地球白書 2000年・人間と環境への提言, ダイヤモンド社, 364 p.
- レスター・R・ブラウン編・松下和夫 監訳 (1989): 地球白書 '88~'89 環境危機と人類の選択, ダイヤモンド社, 336 p.
- Bardach, J. E. (1988): Coastal Zone Activities and Sea Level Rise, Working Paper, East-West Center, Honolulu, 33 p.
- Bolin, B., B. R. Döös, J. Jäger and R. A. Warrick (eds.) (1986): The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems, SCOPE, 29, John Wiley, Chichester, 541 p.
- IPCC WG1 (1990): Policymakers Summary of the Scientific Assessment of Climate Change, 27 p.
- IPCC WG2 Section 6 (1990): World Ocean and Coastal Zones, pp. 6-1~6-30.
- IPCC WG2 Section 5 (1990): Likely Impacts of Climate Change on Human Settlement, the Energy, Transport and Industrial Sectors, Human Health and Air Quality, and Likely Impacts of Changes in UV-B, 42 p.
- IPCC WG3 Coastal Zone Management Subgroup (1990): Adaptive Responses and Policy Implications of Sea Level Rise and Other Coastal Impacts of Global Climate Change, 49 p.
- Lane, P. and Associates Limited (1988): Preliminary Study of the Possible Impacts of a One Metre Rise in Sea Level at Charlottetown, Prince Edward Island, Summary of a Report, CCD 88-02.
- Minister of the Environment (1987): Canadian Climate Impacts Program, CCD 87-01.
- Ministry For The Environment (1988): Climate Change, The New Zealand Response, Proceeding of a Workshop Held in Wellington, March 29-30, 1988, 264 p.
- National Research Council (1987): Responding to Change in Sea-level: Engineering Implications, National Academy Press, Washington, D.C., 148 p.
- Pearman, G. I. (1989): Greenhouse, Planning for Climate Change, E. J. Brill, 227 p.
- Pernetta, J. and G. Sestini (1989): The Maldives and the Impact of Expected Climatic Changes, UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 104, 84 p.
- Schröder, P. C. (1988): Sea-Level Rise, A selective retrospective, Delft Hydraulics Laboratory.
- Smith, J. and D. Tirpak (eds.) (1988): The Potential Effects of Global Climate Change on the United States, U.S. Environmental Protection Agency.
- Stokes, P. (1988): Socio-Economic Assessment of the Physical and Ecological Impacts of Climate Change on the Marine Environment of the Atlantic Region of Canada-Phase 1, CCD 88-07.
- South Pacific Regional Environment Programme (1989): SPC/UNEP/ASPEI Intergovernmental Meeting on Climatic Change and Sea Level Rise in the South Pacific, 73 p.
- Titus, J. G. (ed.) (1988): Greenhouse Effect, Sea-level Rise, and Coastal Wetlands, U.S. Environment Protection Agency.
- Titus, J. G. and M. Greene (1989): An Overview of the Nationwide Impacts of Global Climate Change on the United States, Appendix B: Sea-level Rise, U.S. Environmental Protection Agency.
- 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.
- Wind, H. G. (ed.) (1987): Impact of Sea Level Rise on Society, A. A. Balkema, Rotterdam, 190 p.