

(3) 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

IMPACTS OF SEA LEVEL RISE AND GLOBAL WARMING ON THE COASTAL ZONE
AND A FRAMEWORK OF THEIR ASSESSMENT

三村信男*, 細川恭史**, 磯部雅彦***
Nobuo MIMURA*, Yasushi HOSOKAWA**, Masahiko ISOBE***

ABSTRACT; An overview is presented on the possible impacts of sea level rise and climate change induced by global warming on the coastal zones through a literature review. Several changes in physical conditions are identified as basic impacts, including inundation, exacerbation of storm surge and coastal flooding, increase in erosion, and salt water intrusion into rivers and aquifers. Serious secondary impacts are brought about by these basic changes on the socio-economic activities and natural environment. In order to give a firm basis for establishing response strategies, a framework is developed for quantitative assessment for these impacts, on the basis of understanding the mechanisms of impact occurrence by an event-tree analysis. Assessments are necessary to two primary fields, one is changes in physical external forces and the other vulnerability of socio-economic and natural systems in the coastal zone.

KEY WORDS; sea level rise, global warming, impact assessment, vulnerability, coastal zone

1. はじめに

地球規模の環境問題、とくに温暖化は、地球の自然システムと人類の生存基盤に大きな影響を与えるものとして強い関心が寄せられている。世界各国で、温暖化と気候変動・海面上昇等の将来予測、影響評価、対応戦略について検討が進められつつあり、特にその中心的な役割を担っている「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」は、昨年 (1990年) 11月の世界気候会議に最初の報告書を提出した (Houghton et al., 1990; Tegart et al., 1990; IPCC, 1990)。この報告書では、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガス (GHG) の排出が現状のまま推移すれば、21世紀には温暖化が有為なものとなり、種々の影響が現実化するという予測が示された。こうした事態に対して、GHGの排出抑制と影響への適応策との両面に対応戦略が検討されつつあるが、合理的な政策決定の基礎を与えるためには、総合的で定量的な影響評価が必要である。

著者らは海面上昇を中心に影響の実態把握と評価手法の検討を進めてきた (三村, 1990; 三村ら, 1990;

* 茨城大学工学部都市システム工学科 Department of Urban and Civil Engineering,
Ibaraki University

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室 Purification Hydraulics Laboratory,
Port and Harbor Research Institute, Ministry of Transport

*** 東京大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, University of Tokyo

Mimura et al., 1991; Hosokawa et al., 1991; 磯部ら, 1991; 三村ら, 1991)。本論文では、各国の検討結果に基づいて、改めて海面上昇と気候変動の影響の諸相を整理し、さらに影響評価の枠組みに検討を加える。

2. 温暖化と海面上昇の予測

影響評価の前に、基礎となる気温と海面の将来予測についてみておく。大気中の二酸化炭素濃度は、現在の増加割合から予測すると、2030年には1950～1960年レベルの2倍になる。その場合の気温変化は大気大循環モデル（GCM:General Circulation Model）という数値モデルなどによって予測されている。IPCC（Houghton et al., 1990）ではそれらの結果をとりまとめ、最も起こりそうな値として、10年で約0.3℃（0.2～0.5℃）の気温上昇を予測し、図-1に示すように現在に比べて2025年で1℃、2100年で3℃上昇するとしている。その結果として、10年あたり6cm（3～10cm）の海面上昇、すなわち、図-2に示すように2030年までに20cm、2100年までに65cm（30～110cm）の海面上昇があると予測している。

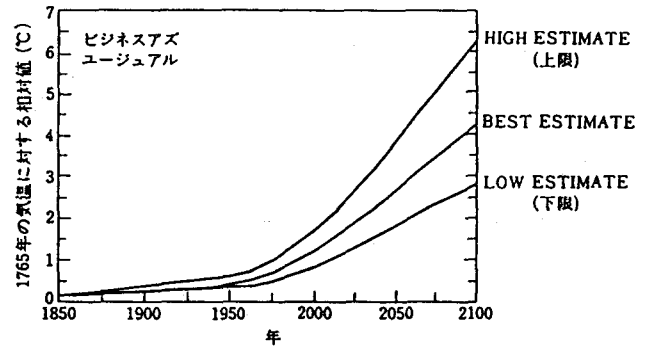


図-1 温室効果ガスの排出を規制しなかった場合（ビジネスアズユージュアル）の気温上昇の予測

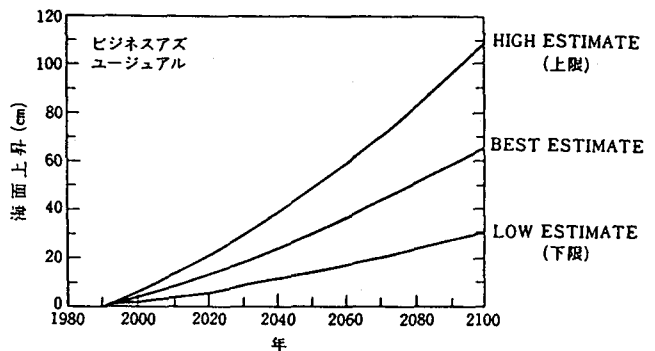


図-2 海面上昇の予測（ビジネスアズユージュアル）

3. 海面上昇・気候変動の沿岸域に対する影響の諸相

沿岸の浅海域から陸上の低地帯を含む領域、いわゆる沿岸域は、海面上昇をはじめ気候変動のもっとも厳しい影響を受ける空間の一つである。これらの影響はまず物理現象として現れるが、それには次のようなものが指摘されている。

- ① 沿岸域の湿地帯や低地帯の水没
- ② 新たな海岸侵食の発生と加速化
- ③ 海岸域での高潮、洪水の増大
- ④ 河川や地下帯水層への塩水の侵入による水資源、水質への影響
- ⑤ 潮汐の変化
- ⑥ 河口での土砂の沈降・堆積パターンの変化
- ⑦ 水中の光量の減少
- ⑧ 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量による影響

これらに伴って、広範な社会経済活動、文化、自然環境への影響が発生すると考えられる。以下では、IPCC WG2 (Tegart et al., 1990)を中心に、その中で特徴的なものをやや詳しくみてみよう。

3.1 低地帯と島国に対する脅威

社会経済的な影響の中でもっとも深刻なのは、水没によって広大な国土が失われ、高潮、高波浪に対する災害ポテンシャルが増大することである。非常に平坦な河口デルタ地帯では1 mの海面上昇で数kmの海岸線の後退が生じると危惧されている。被害を受けやすいデルタとしては、アジアではガンジス川・ブラマプトラ川（バングラデシュ）、楊子江・黄河・珠江（中国）、メコン川（ベトナム）、イラワディ川（ミャンマー）、インダス川（パキスタン）が挙げられており、この他にも、ナイル川、オリノコ川、アマゾン川、ミシシッピ川、ポー川など世界中の河川が指摘されている。1 mの海面上昇が生じるとバングラデシュの国土の17%（Commonwealth Secretariat, 1989）、エジプトの耕地の12-15%（Broadus et al., 1986）が水没するとされる。一方、小さな島国も、1 mの海面上昇によって国土の相当部分を失うと警告されている。特に、モルジブ共和国をはじめ、サンゴ礁の国々は海面上昇の影響をもっとも厳しく受けるであろう。

最近、オランダが試みた世界181ヵ国への影響評価（Rijkswaterstaat・Delft Hydraulics, 1990）によれば、約34万kmの海岸線、6400kmの都市のウォーターフロント、1万kmの砂浜、1756km²の港湾地域を防護する必要があるとされる。また、海岸の防護に要する年間経費のG N Pに対する比率を試算した結果によると、第1位はモルジブの34%、第2位はキリバチの19%で、第10位までのうち9つは島国である。

一方、先進国に対する潜在的な影響も大きい。先進工業国では沿岸域に都市機能、港湾などの物流機能、その他のインフラストラクチャーが集中し、一方、自然海岸は残された自然として貴重だからである。わが国では、現状で1200km²、人口320万人のゼロメートル地帯が1 mの海面上昇によって2900km²、人口700万人に拡大すると試算されている（建設省河川局河川計画課，1989）。また別の検討では、海岸沿いの氾濫域内の人口は約1800万人に達し、この地域内の資産額は約150兆円になろうと指摘されている（宮崎ら，1991）。アメリカ合衆国への影響評価はEPAが実施し、表-1のような防護費用の推定結果を示している（Smith・Tirpak, 1988）。

この他の社会経済的な影響としては、農業への打撃、海浜の侵食による観光資源の消失、水利用・水質への影響、沿岸部のインフラストラクチャーへの影響と付加的な工事の必要性などが指摘されている。

3.2 湿地帯、海浜、エスチュアリなどの生態系への影響

沿岸の自然環境に対する影響としては湿地帯が注目されている。それは、湿地帯が沿岸地域の生態系と地域経済、両者にとって高い重要性を持っていると認識されているからである。すなわち、湿地帯は、鳥類、動物、魚貝類のライフサイクルの様々な段階において生息場所を提供する。同時に、陸上から排出される汚染物質のフィルター機能、海岸災害への防護機能をも果たしている。これら全ての機能を考えると、湿地帯の社会的価値は13600ドル/haに相当するという推定もある（Thurman, 1983）。

表-1 全米での海岸線の防護費用
(Smith・Tirpak, 1988; 地球温暖化影響研究会, 1990より抜粋)

	海面上昇のシナリオ			
	温暖化なし	50 cm 上昇	100 cm 上昇	200 cm 上昇
外洋に開かれた海岸				
養浜等	3.8	15~20	27~41	58~100
建物、道路等のかさ上げ	0	9~13	21~57	75~115
バリア島等で遮閉された海岸	1.0~2.4	5~13	11~33	30~101
合 計	4.8~6.2	32~43	73~111	119~309

(2100 年までの累積、単位は 1986 年時点での 10 億ドル)

湿地帯は、海面上昇の速度が小さければ、底質を捕捉・堆積させたり、陸側に移動したりして生き延びることができる。しかし、海面上昇の速度が大きいと追従できずに消滅し、さらに、護岸や堤防が建設された所では、陸側への移動が阻止されるため完全に失われる可能性が大きい。

Smith・Tirpak(1988)によれば、1mの海面上昇によって全米の湿地帯の50-82%が水没すると試算されている。しかし、構造物によって防護する海岸を都市の沿岸地域に限定すれば消失面積は29-66%に低下する。一方、オランダによって世界全体を対象に調査が行われた(Misdorp, 1990)。世界全体では73万Km²の湿地帯があり、16.5万Km²のマングローブ林がある。このうち大部分は自然状態にあり、1mの海面上昇によって失われるのは主として水没によるもので、5-10%にとどまると予想された。しかし、現在の海岸の開発ペースが続けば、消滅する湿地帯の面積も増加することになる。

この他の自然環境への影響としては、沿岸海域での栄養塩・化学物質などの物質循環の変化や生息地としての砂浜・岩礁の減少による海がめやあざらしなどの海洋動物への圧力、サンゴ礁への影響などが検討されている。

3.3 海岸線の後退をめぐる問題

現状では砂浜の後退は大部分波の作用によるものである。世界規模で考えれば、地盤沈下や人為的な開発による影響は主要な原因とは考えられない。世界全体の海岸線をみると、前進傾向にあるのは10%以下であり、後退傾向が60%、平衡状態が30%で、この分布は比較的安定している。

海面上昇は、波浪・潮汐・高潮が海浜に作用する基準面の高さを上昇させる。その結果、砂浜の侵食速度が増大すると予想される。前にも述べたが、最近オランダで行われた推定では、1mの海面上昇によって34万kmの海岸線、さらに1万kmの砂浜とレクリエーションビーチが影響を受けると判定された。この他にも、米国では、1万1千kmの砂浜のうち3千kmに保全対策が必要という研究結果もある(Smith・Tirpak, 1988)。

しかし、世界の海岸線は、砂、岩石、泥等様々な底質で形成されており、様々な植生におおわれている地域もある。これらの海岸の侵食過程は極めて多様で、海面上昇による侵食の正確な予測は難しい。

4. 影響伝播図と影響評価の枠組み

4.1 影響出現のメカニズムと影響伝播図

上にみたように、これまでの検討によって影響の実態は整理、把握されつつあるというものの、定量的評価には至っていない。定量的影響評価手法を開発するためには、まず影響出現のメカニズムを体系的に把握しなければならない。本研究では、それを影響伝播図の形でまとめた。影響伝播図を構築するために、まず影響の実態をなるべく多く列挙した。それを、因果関係の連鎖でつないでいく事によってより上位の原因をたどり、個々の具体的な影響が出現するメカニズムを把握することを試みた。このように、地球温暖化・海面上昇から始まり、個々の社会経済的影響、自然環境に対する影響につながる系統樹をここでは影響伝播図と呼んでいる。

得られた影響伝播図の概要を図-3に示す。このような整理からわかる事は、影響の出現が、大局的には波浪、高潮等の外力の変化とそれにさらされる沿岸域の社会・経済システムと自然のシステムの影響され易さという2つの基本的要素をもっていることである。したがって、影響評価手法は、海象・気象変化を中心とする外力変化の予測と沿岸域の社会・経済・自然システムの評価との2つの主要部分で構成されなければならない。特に後者を、ここでは脆弱性評価(vulnerability assessment)と呼ぶことにする。脆弱性評価は、従来の自然災害研究で用いられてきた災害ポテンシャルやリスク評価と同種のものである。

4.2 海象・気象変化の評価

外力の変化の中にも図-3に示すように系統的な構造がある。海面上昇自体は物理的な現象であり、沿岸域の海象変化に対する意味は、基本的には、平均水深の増加と陸上部に対する相対的な海面位置の上昇との2つにとらえられる。そうすると、平均水深の増加からは、例えば、高潮や波浪の変化が導かれ、海面の相対的位置の上昇からは、水没や塩水の侵入が理解される。これらの海象変化は、従来海岸工学や沿岸海洋学の分野で蓄積されてきた知見や手法を用いて定量的評価が可能である。沿岸域の物理的環境、海象の変化をもたらす要因としては海面上昇だけにとどまらない。気温・水温の上昇や台風の変化等他の気候変動の影響は項目によってはより大きいことに充分注意する必要がある。こうした海象・気象の変化を評価した試みは、磯部ら(1990)、三村ら(1991)に示されている。

4.3 脆弱性評価

自然の外力が上にみたように変化したとき、どのような影響が生じるかは沿岸域の諸システムの影響され易さに関する特性による。沿岸域のシステムは、図-3に示したように、社会・経済システム（開発された海岸）と自然システム（自然海岸）とに大別できよう。

社会・経済システムの脆弱性は、海面上昇の影響が及ぶ範囲における人口、資産、産業活動、文化・レクリエーション活動等の集積度に依存する。同時に、この地域の防災システムの強さにも左右される。社会・経済システムに対する脆弱性評価は、最悪のケースの影響予測とともに、防災システムの完成度に対応した各レベルの被害予測が含まれる。さらに、将来的には海面上昇・気候変動に対して対応策を取った場合に生じる影響も考慮されなければならない。

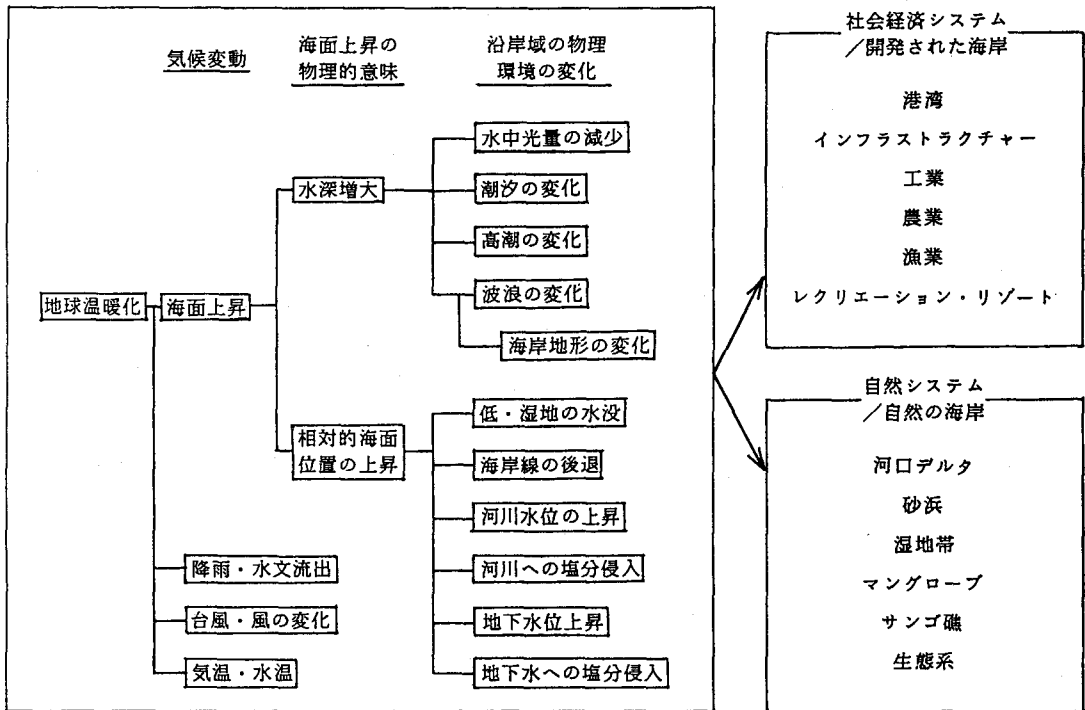


図-3 海面上昇の影響伝播図

一方、自然システムも種類に応じて固有の影響出現メカニズムを持っている。例えば、サンゴ礁では先端部の水深が増大することによって、潟湖（ラグーン）に高波浪が侵入するようになり、侵食が進むと懸念されるし、マングローブでは帯状の樹種分布があるため、いったん最前面の樹種が枯死すると一挙に侵食が進む可能性がある（藤原，1991）。

脆弱性評価では、このように沿岸域の資源と価値を総合的に対象とするとともに、各システムの固有の特性に応じた評価を行う必要がある。現在IPCC WG3では、オランダを議長国にしてアメリカ、オーストラリア、日本等が参加し、発展途上国を中心に世界30ヵ国を対象にした脆弱性評価プロジェクトが進行中である。このプロジェクトは、共通の手法、共通の評価基準を用いて海面上昇・気候変動の沿岸影響を評価しようというものである。図-4にそのフローチャートを示すが、上に述べたように社会経済システム、自然システムの両者を検討するものになっている。こうした取り組みの中から、地球温暖化の影響に対する共通認識が形成され、さらに総合的な影響評価手法が開発されると期待される。

5. 結語

本論文では、地球温暖化による海面上昇と海象・気象変化に着目し、沿岸域に対する影響の諸相を整理した。さらに、個々の影響が出現するメカニズムの把握の基本的な考え方と影響評価手法の枠組みを示した。これらの中では、これまで蓄積された海岸工学や防災工学の知識が有効な部分があれば、我々にとって全く新しく挑戦しなければならない部分もある。地域的には、もっとも大きな影響が予想されるのがアジア・太平洋・インド洋地域であり様々な形での協力が求められている。これらの要請に応えるためにも、我々の視野を広げ、総合的な影響評価手法の開発に進む必要がある。

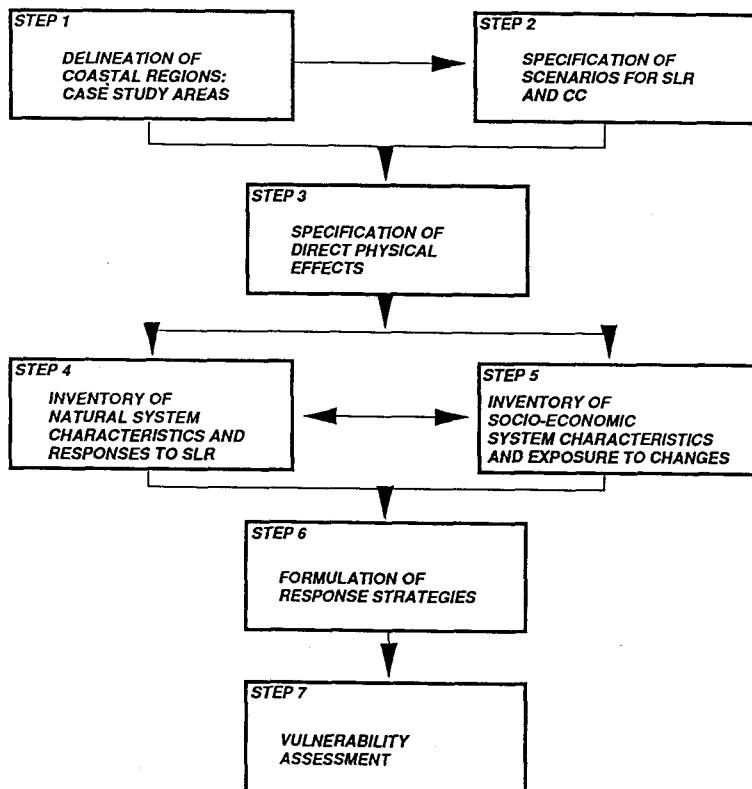


図-4 脆弱性評価のフローチャート

本研究を進めるにあたり、「海面水位の上昇等による臨海部の社会経済活動への影響とその対策に関する調査委員会」(財)沿岸開発技術研究センター)における議論は極めて有益であった。また、関和美、藤原正憲、矢内勝浩(茨城大学学生)の3氏には熱心に協力していただいた。心からの謝意を表する。

参考文献

- 磯部雅彦・三村信男・灘岡和夫(1991): 地球温暖化による海面上昇・海象変化と海岸への影響評価, 第6回 環境工学講演会講演論文集, 日本学会会議, pp. 1-6.
- 建設省河川局河川計画科(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―.
- 藤原正憲(1991): アジア地域における地球温暖化と海面上昇の影響評価, 平成2年度茨城大学都市システム工学科卒業論文, 200p.
- 地球温暖化影響研究会(編)(1990): 地球温暖化による社会影響―米国EPAレポート抄訳, 技報堂出版, 332p.
- 三村信男(1990): 温暖化による海面上昇の影響評価と課題, 土木学会 第45回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 714-715.
- 三村信男・磯部雅彦・灘岡和夫(1990): 海面上昇・気候変動による沿岸域への影響とその対応策, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 863-867.
- 三村信男・磯部雅彦・細川恭史・灘岡和夫(1991): 地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価, 海岸工学論文集, 第38巻(印刷中)。
- 宮崎祥一・遠山憲二(1991): 地球温暖化に伴う海面水位の上昇が臨海部に及ぼす影響に関する研究, 環境システム研究, Vol. 4.
- Broadus, J.M., J.D. Millman, S.F. Edwards, D.G. Aubery and F. Gable(1986): Rising sea level and damaging of rivers: possible effects in Egypt and Bangladesh, In: Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate, J.G. Titus(ed.), US EPA and UNEP.
- Commonwealth Secretariat(1989): Climate Change: Meeting the Challenge, Report by a Commonwealth Group of Experts, London, UK.
- Hosokawa, Y. and K. Minami(1991): Nationwide cost for bank raise against sea level rise - case study for Japanese port and harbor area -, Proc. Intl. Conf. on Climatic Impacts on the Environment and Society(in press).
- Houghton, J. T., G. J. Ephraums(eds)(1990): Climate change-The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, 365p.
- IPCC(1990): Climate Change-The IPCC Response Strategies, Island Press, 272p.
- Mimura, N., M. Isobe and K. Nadaoka(1991): Impacts of sea level rise and a framework of their assessment, Proc. Intl. Conf. on Climatic Impacts on the Environment and Society(in press).
- Misdorp, R. (1990): Strategies for adopting to the greenhouse effect: A global survey of coastal wetlands, The Netherlands, Rijkswaterstaat, Note No. GWW-90.008.
- Rijkswaterstaat and Delft Hydraulics(1990): A worldwide cost estimate of basic coastal defence measures, Paper by Dutch Delegation to IPCC-CZM Workshop.
- Smith, J. and D. Tirpak(eds)(1988): The Potential Effects of Global Climate Change on the United States, US Environmental Protection Agency.
- Tegart, W. J. McG., G. W. Sheldon and D. C. Griffiths(eds)(1990): Climate Change-The IPCC Impacts Assessment, Australian Government Publishing Service.
- Thurman, H. V. (1983): Essentials of Oceanography, Charles E. Merrill, Columbus, Ohio.