

B-12 海面上昇の影響の総合評価に関する研究

(4) 海面上昇の影響評価手法とその統合化に関する研究

研究代表者 建設省国土地理院 地理調査部地理第二課長 川口博行

建設省国土地理院

地理調査部 地理第二課

太田正孝・乙井康成・大西純夫・吉川正幸・
丹羽俊二・畠山裕司・山田美隆・羽生栄・
清水雅行

(委託先) 茨城大学広域水圏環境科学研究センター

三村信夫・横木裕宗

名城大学都市情報学部 大野栄治

平成9～11年度合計予算額35,830千円
(平成11年度予算額 10,845千円)

[要旨] 陸地と海水の境界部にあたる沿岸域には平地が多く、農業、漁業等の生産活動や経済活動の中心として利用されており、人口も集中している。また、沿岸域は湿地、サンゴ礁、マングローブ等の自然の生態系が多く存在しており、多様な生物の生息の場として自然環境からも重要な場所である。海面上昇が起きた場合には、沿岸域の土地の水没、高潮の危険性の増大、河川の水位上昇、河川への塩分侵入、地下水位の上昇等、多くの物理的な影響が現れることや沿岸域の様々な環境システム（自然・社会・経済）に多くの影響を与えることが指摘されている。

海面上昇や気候変動が沿岸域に及ぼす種々の影響の大きさを事前に把握し、各々の地域がとるべき対応策を検討すること（脆弱性評価）は、地球環境問題に関する今後の重要な研究課題のひとつとなっている。本研究では、影響評価の統合化の検討にあたり、アジア・太平洋地域における海面上昇に対する脆弱性評価のための支援データベースを構築して、概略の脆弱性評価を試みる。

[キーワード] シナリオ、社会経済モデル、総合影響評価

1. 序

アジア・太平洋地域は、大河川のデルタや標高の低い島嶼が分布しているため、海面上昇と気候変動の影響を最も厳しく受ける地域の1つと目されている。各国でこれらの影響を予測する調査研究が取り組まれているが、必ずしも順調に結果が得られているとはいえない。それにはいくつかの原因があるが、主要なものとしては、海面上昇、気候変動の予測精度が不十分なため、国、地域レベルでの影響評価に耐えうるシナリオが描けないこと。海岸・沿岸域には極めて多様な要素で構成される自然システムと社会経済システムが存在しているが、これら多様な構成要素に対する影響の評価手法が開発されていないこと。多くの国で標高や潮汐・波浪等の海象条件や過去

の災害の記録等基本的なデータさえ整備・管理されていないこと等である。

一方、温暖化は地球規模の環境問題であるため、影響の大きさを地球規模で求めたいという要請も当然存在しており、アジア・太平洋地域といった地域規模での影響の把握も重要である。

国土地理院では、平成2－4年度に熊本平野を対象に地盤高図を作成し、海面上昇による想定海面下地域の資産額について土地利用区分を拠り所にした算定手法を開発した。さらに、平成5－7年度には海面の上昇により地下水位が上昇するなど、土地条件の応答・影響に着目して沿岸低地の土地条件の変化を予測し、水没地域を考慮した土地利用の適正な再配分を行う手法を開発しており、この手法によりバンコク地区、新潟平野東部地区における成果を作成している。今後は、以上の成果をより高度化し、影響評価ガイドラインを作成することにより、アジア・太平洋地域の海面上昇の影響評価に結びつける必要がある。

2. 研究目的

本研究では、最終目標を海面上昇の影響の総合評価ガイドライン（マニュアル）の作成、研究対象としたタイ国における個別の影響評価成果の統合化に置き、アジア・太平洋地域の海面上昇の影響について適切な評価を行うための足がかりとすることを目的とする。

3. 研究方法

（1）海面上昇の影響の経済評価に関する研究

本研究では、海面上昇による物理的、生態的、社会的な影響を国民経済に対する影響として統一的に評価するため、被害の二重計測や計測漏れの恐れのない一般均衡理論に基づく社会経済モデルを構築するとともに、本モデルをタイ国に適応し、海面上昇による影響の経済評価（社会的被害の計測）を行う。

（2）総合的影響評価手法に関する研究

気候変動・海面上昇の影響は、きわめて多様な沿岸域の自然的、人工的システムに及ぶと考えられる。しかも、これらのシステムの状態は地域や国によっていろいろと変化に富んでいる。他方、アジア・太平洋地域では、影響評価に必要な基本的なデータが不足しているという現実もある。そのため、この地域における脆弱性評価を実行するためには、沿岸域システムの多様性やデータの欠如を視野に入れながら、共通的な影響評価手法を開発することが必要である。

そこで、本研究では、1)共通的な影響評価のガイドラインの作成（海面上昇、高潮などの外力シナリオ、データの収集・解析方法、評価モデル、結果の表示方法）、2)GISを活用した他分野の評価データとの統合化、3)ケーススタディとしてタイ国沿岸域の影響評価、を目的としている。

4. 結果・考察

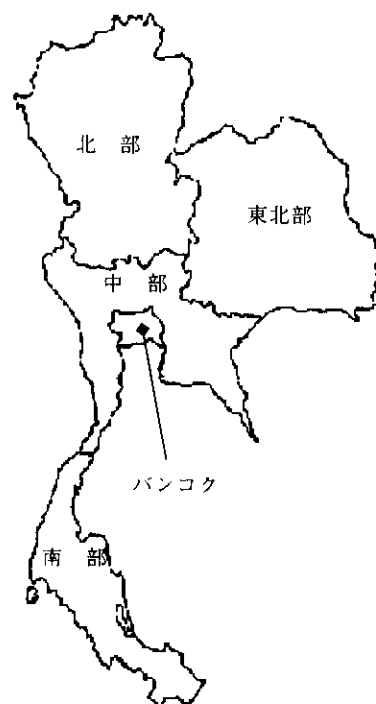
（1）社会経済モデルによる経済評価の結果

1）タイの地域区分と産業区分

タイはインドシナ半島の中央部に位置し、南にタイ湾、東にメコン川を隔ててラオス、南東にカンボジア、西にミャンマーと接している。国土はデルタ平原や山岳地帯からなり、513,115km²の広さである。

まず、タイにおける通例の地域区分に基づいて、国土を5地域に分ける（図－1）。各地域の特徴は、以下のとおりである¹⁾。

- ① バンコク都市圏：タイの首都、タイの心臓部である。
- ② 中部地域：バンコクを含む中部地域はチャオプラヤ川の中・下流に広がる沖積平野（南北 400km、東西 150km）である。ここは水田と運河が広がる穀倉地帯でもある。
- ③ 北部地域：インタノン山（海拔 2,595m）を始めとする高峰を擁する山地である。ここは盆地が点在し、灌漑水田が広がる。
- ④ 東北部地域：コラート高原を擁する台地であり、海拔 150m 程度
- ⑤ の緩い起伏が延々と続く。
- ⑥ 南部地域：マレーシアに隣接する半島である。タイ湾側には椰子の木が茂る遠浅の美しい海岸線が続く。



図－1 タイの地域区分

次に、タイの産業を 16 部門に分ける（表－1）。ここで、タイは世界の米の市場価格に重要な影響を及ぼすなど、世界有数の食料輸出国である。現在でも、農業はタイ国民の基本的な職業であり、GDP の 11%、労働力の 62%を占める。また、ダイヤモンドは主要な鉱物輸出品（輸出額の 3.3%）であるなど、タイは第一次産業を中心とする産業構造である。一方、工業部門も着実な成長を遂げ、1980～90 年代初頭には年 9.4%の経済成長率が達成された。なお、観光（サービス業）はタイの貴重な外貨取得産業である。

表－1 タイの産業区分

① 穀物・野菜	⑤ 農業サービス	⑨ 建設業	⑬ 銀行・保険・不動産
② 畜産	⑥ 加工農業	⑩ 電気・水道	⑭ 住宅オーナー
③ 漁業	⑦ 鉱業	⑪ 運輸・通信	⑮ 政府・警察
④ 林業	⑧ 製造業	⑫ 卸売・小売	⑯ サービス業

2) 社会経済モデル

ア. 社会経済モデルの仮定

本研究の社会経済モデルは上田・森杉のマクロ経済モデル^{2) 3)}を基礎として構築され、以下の仮定を置く。

- ① タイの地理的空間は、図－１の５地域に分割される。
- ② タイの産業は、表－１の１６部門に分類される。なお、各地域にすべての産業が存在する。
- ③ 経済主体は、地域間を自由に住み替える家計（労働者）と各地域に立地する産業の２主体とする。
- ④ 市場は、土地市場、労働市場、合成財市場の３市場とする。なお、各地域には失業者が存在する。
- ⑤ 労働者は、達成される効用水準の高い地域に居住する。なお、その効用水準は予算制約下での効用最大化行動の結果として得られる間接効用関数によって与えられる。
- ⑥ 各産業は、生産技術制約下で利潤最大化行動をする。また、その利潤は当該産業の全労働者に均等に配分される。

イ．労働者の行動モデル

労働者は、５地域のいずれかに居住し、１６産業のいずれかに従事あるいは失業しているものと仮定する。また、労働者は居住地域における予算制約のもとで各産業の合成財の需要をコントロールして効用を最大化し、そこから得られる間接効用水準を指標として居住地選択を行うものと仮定する。そして、この選択行動を次のように定式化する。

$$Q_j = \frac{\exp[\theta V_j]}{\sum_k \exp[\theta V_k]} \quad (1.1) \quad V_j = \alpha_1 \ln[A_j] + \alpha_2 \ln[B_j] + \alpha_{3j} \quad (1.2)$$

$$A_j = \frac{\sum_i N_j^i (W_j^i + Y_j^i)}{N_j} \quad (1.3) \quad B_j = \frac{\sum_i L_j^i R_j^i}{L_j} \quad (1.4)$$

ただし、 Q_j ：地域 j の選択確率、 θ ：ロジットパラメータ、 V_j ：地域 j の間接効用水準、 A_j ：地域 j の平均収入、 B_j ：地域 j の平均地代、 N_j^i ：地域 j ・産業 i に従事する労働者数、 N_j ：地域 j の労働者数、 W_j^i ：地域 j ・産業 i の賃金率、 Y_j^i ：地域 j ・産業 i の利潤配分、 L_j^i ：地域 j ・産業 i が使用する土地面積、 L_j ：地域 j の土地面積、 R_j^i ：地域 j ・産業 i の地代、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{3j}$ ：未知のパラメータ。なお、失業者は日雇い労働をしているものと仮定し、便宜的に 17 番目の産業に従事しているものとして扱う。

式(1.1)より、各地域の労働者数が次式で与えられる。

$$N_j = N \frac{\exp[\theta V_j]}{\sum_k \exp[\theta V_k]} \quad (2)$$

ただし、 N ：総労働者数。

式(1.1)のロジットパラメータ θ については、一般的な設定として $\theta = 1.0$ を採用する⁴⁾。また、式(1.2)のパラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{3j}$ については、経験的に $\alpha_1 = 1.0$ および $\alpha_2 = -0.5$ を採用し²⁾、式(2)より現状の労働者分布に合うように α_{3j} を地域毎に次式で設定する。

$$\alpha_{3j} = \ln\left[\frac{N_j}{N_1}\right] - \alpha_1 \ln\left[\frac{A_j}{A_1}\right] - \alpha_2 \ln\left[\frac{B_j}{B_1}\right] \quad (3)$$

なお、式(3)の各変数には現状のデータ^{5) 6) 7) 8)}を適用し、現状の社会経済状態を完全に再現できるようにする。

一方、式(1.1)はランダム効用理論に基づいて誘導されるが⁴⁾、その誘導過程で最大期待効用を示す満足度関数 S が得られる。

$$S = \frac{1}{\theta} \ln \left[\sum_k \exp[\theta V_k] \right] \quad (4)$$

ウ．産業の行動モデル

各産業は生産技術制約下で利潤最大化行動をするものと仮定し、この行動を次のように定式化する。

$$\pi_j^i = \max_{X_j^i, N_j^i, L_j^i, K_j^i} \{ P_j^i X_j^i - W_j^i N_j^i - R_j^i L_j^i - H_j^i K_j^i \} \quad (5.1)$$

$$s.t. \quad X_j^i = m_j^i N_j^{i\alpha_j^i} L_j^{i\beta_j^i} K_j^{i\gamma_j^i} \quad (5.2)$$

ただし、 π_j^i ：地域 j ・産業 i の利潤、 P_j^i ：地域 j ・産業 i の製品（合成財）の価格、 X_j^i ：地域 j ・産業 i の製品（合成財）の生産量、 N_j^i ：地域 j ・産業 i に従事する労働者数、 W_j^i ：地域 j ・産業 i の賃金率、 L_j^i ：地域 j ・産業 i が使用する土地面積、 R_j^i ：地域 j ・産業 i の地代、 H_j^i ：地域 j ・産業 i の資本レント、 K_j^i ：地域 j ・産業 i の資本投入量、 $m_j^i, \alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i$ ：未知のパラメータ。

式(5.1)(5.2)の最大化問題を解くと、以下のような合成財供給関数、労働需要関数、土地需要関数および利潤関数が得られる。

$$X_j^i = X[P_j^i, W_j^i, R_j^i, H_j^i] \quad (6.1) \quad N_j^i = N[P_j^i, W_j^i, R_j^i, H_j^i] \quad (6.2)$$

$$L_j^i = L[P_j^i, W_j^i, R_j^i, H_j^i] \quad (6.3) \quad K_j^i = K[P_j^i, W_j^i, R_j^i, H_j^i] \quad (6.4)$$

$$\pi_j^i = \pi[P_j^i, W_j^i, R_j^i, H_j^i] \quad (6.5)$$

ここで、式(6.5)の利潤関数より、次式が得られる。

$$\frac{\partial \pi_j^i}{\partial N_j^i} = P_j^i \alpha_j^i m_j^i N_j^{i\alpha_j^i-1} L_j^{i\beta_j^i} K_j^{i\gamma_j^i} - W_j^i = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial \pi_j^i}{\partial L_j^i} = P_j^i \beta_j^i m_j^i N_j^{i\alpha_j^i} L_j^{i\beta_j^i-1} K_j^{i\gamma_j^i} - R_j^i = 0 \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial \pi_j^i}{\partial K_j^i} = P_j^i \gamma_j^i m_j^i N_j^{i\alpha_j^i} L_j^{i\beta_j^i} K_j^{i\gamma_j^i-1} - H_j^i = 0 \quad (7.3)$$

式(7.1)～(7.3)および式(5.2)より、未知のパラメータ $m_j^i, \alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i$ を地域毎・産業毎に次式で与える。

$$m_j^i = \frac{X_j^i}{N_j^{\alpha_j^i} L_j^{\beta_j^i} K_j^{\gamma_j^i}} \quad (8.1)$$

$$\alpha_j^i = \frac{W_j^i N_j^i}{P_j^i X_j^i} \quad (8.2)$$

$$\beta_j^i = \frac{R_j^i L_j^i}{P_j^i X_j^i} \quad (8.3)$$

$$\gamma_j^i = \frac{H_j^i K_j^i}{P_j^i X_j^i} \quad (8.4)$$

なお、式(8.1)～(8.4)の各変数には現状のデータ^{5) 6) 7) 8)}を適用し、現状の社会経済状態を完全に再現できるようにする。

エ. 市場の条件

本研究の社会経済モデルは、以下のような市場の条件を考慮する。

$$\text{① 土地市場均衡条件：} \quad L_j = \bar{L}_j \quad (\text{土地存在量}) \quad (9.1)$$

$$\text{② 労働市場均衡条件：} \quad \sum_i N_j^i = N_j \quad (9.2)$$

$$\text{③ 合成財市場均衡条件：} \quad N_j^i Z_j^i = X_j^i \quad (9.3)$$

$$\text{④ 立地均衡条件：} \quad N_j = N \frac{\exp[\theta V_j]}{\sum_k \exp[\theta V_k]} \quad (9.4)$$

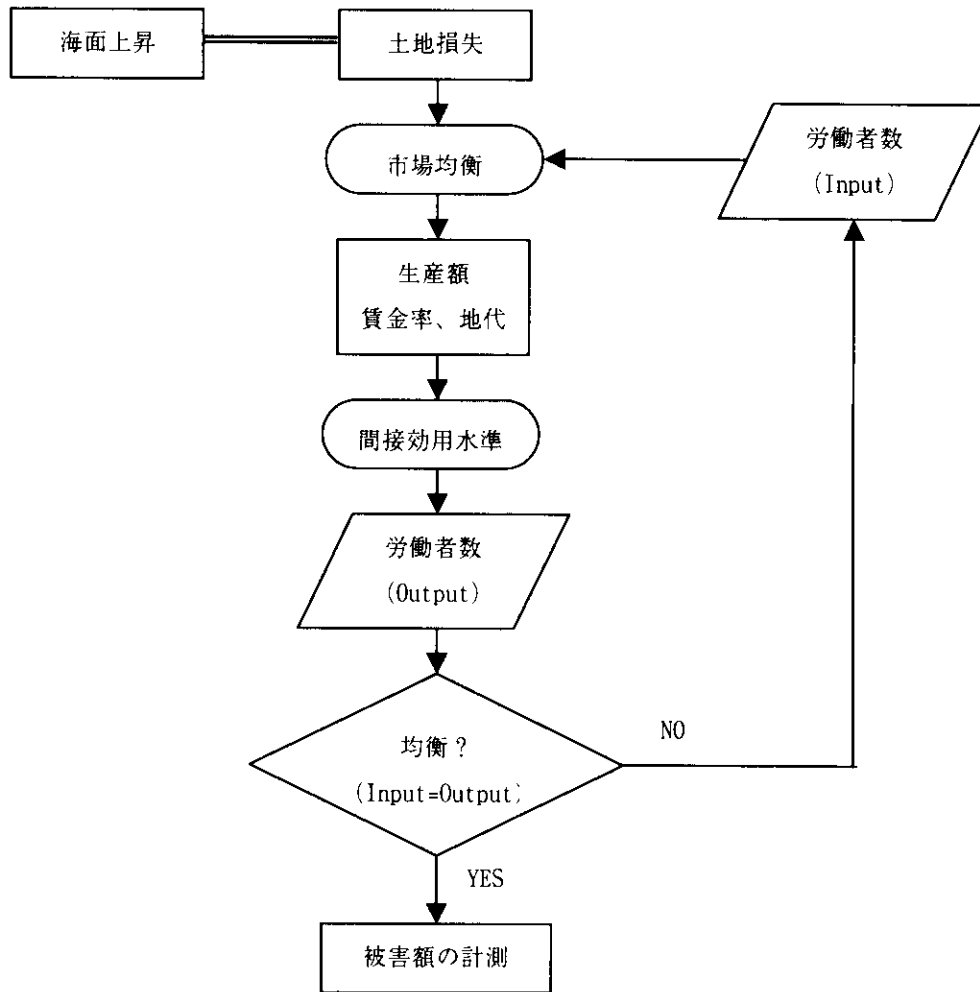
$$\text{⑤ 利潤配分条件：} \quad Y_j^i = \frac{\pi_j^i}{N_j^i} \quad (9.5)$$

オ. 海面上昇による影響の分析

本モデルでは、海面上昇によって生じる土地損失量を海面上昇の入力データとする。これを数式で表現すると次のようになる。

$$\bar{L}_j \rightarrow \bar{L}_j + d\bar{L}_j \quad (d\bar{L}_j \leq 0) \quad (10)$$

そして、これによる社会経済への影響を図－2に示す流れで分析する。



図－2 本モデルによる分析の流れ

3) 海面上昇による被害額の定義

本研究では、海面上昇による被害額について、以下の2つの方法で定義する。

- ① 生産額の減少分
- ② 社会的純被害額 SND(Social Net Damage)：海面上昇がある場合の効用水準を維持するという条件の下で、海面上昇がない場合に、海面上昇を避けるために人々が支払ってもよいと考える最大支払額で定義する。すなわち、式(4)で定義される最大期待効用水準 S に等価的偏差 EV(Equivalent Variation)の概念を適用し、海面上昇による被害を定義する。

ここで、②の定義は次式で与えられる。

$$S[V_1[W_1^a + Y_1^a - D, R_1^a], \Lambda, V_5[W_5^a + Y_5^a - D, R_5^a]] = S^b \quad (11.1)$$

$$SND = N \times D \quad (11.2)$$

ただし、 D ：海面上昇による1労働者あたりの被害額、 SND ：社会的純被害額、右上添字 a, b ：海面上昇がない場合,ある場合。

4) タイにおける海面上昇による被害額の計測

ア. 海面上昇による土地損失量の設定

海面上昇による土地損失量は、単に水没する土地面積のみならず、塩水遡上によって農作不能になる土地面積なども考慮されなければならない。しかし、塩水遡上の問題はもとより、1 mの海面上昇による水没面積を詳細に分析するための地形図でさえも入手困難である。そこで、「海面上昇が1 m上昇すると、海岸線から300mまでの内陸地域が水没する」と仮定して水没面積を計測し、これを海面上昇による土地損失量とした(表-2)。また、各地域における産業毎の土地損失量については、バンコク沿岸域の土地利用図に基づいて当該地域の土地損失量を各産業に配分した。

表-2 海面上昇による土地損失量

地 域	50cm 上昇時	100cm 上昇時
バンコク	9.000 [0.276]	18.000 [0.553]
中 部	50.985 [0.126]	101.970 [0.252]
北 部	-	-
東北部	-	-
南 部	88.980 [0.323]	177.960 [0.647]
タイ全国	148.965 [0.071]	297.930 [0.142]

注) 単位: km^2 [損失率%]

イ. 海面上昇による被害額の計測

本研究で構築した社会経済モデルを用いて海面上昇による被害額を計測した。その結果を表-3～5に示す。

表-3 海面上昇による被害額

	50cm 上昇時	100cm 上昇時
生産額の減少分	-11,463 [-0.361]	-21,777 [-0.685]
社会的純被害額	-1,906 [-0.060]	-3,780 [-0.119]

単位: 百万バーツ/年 [対 GDP(1993)比%]

表－４ 地域別の被害額（生産額の減少分）

地 域	50cm 上昇時	100cm 上昇時
バンコク	-7,062	-13,305
中 部	-5,063	-9,360
北 部	296	529
東北部	911	1,203
南 部	-545	-844
タイ全国	-11,463 [-0.361]	-21,777 [-0.685]

単位：百万バーツ/年 [対 GDP(1993)比%]

表－５ 産業別の被害額（生産額の減少分）

地 域	50cm 上昇時	100cm 上昇時
穀物・野菜	-152	-361
畜産	-51	-109
漁業	-53	-71
林業	-12	-21
農業サービス	7	3
加工農業	-116	-234
鉱業	-302	-603
製造業	-4,354	-8,355
建設業	-616	-1,071
電気・水道	-381	-751
運輸・通信	-915	-1,740
卸売・小売	-1,832	-3,489
銀行・保険・不動産	-940	-1,793
住宅オーナー	-201	-390
政府・警察	-230	-435
サービス業	-1,313	-2,358
タイ全国	-11,463 [-0.361]	-21,777 [-0.685]

単位：百万バーツ/年 [対 GDP(1993)比%]

表－３より、50cm / 100cm の海面上昇によるタイ全国の被害額は、生産額の減少分の定義では 11,463 / 21,777[百万バーツ/年]、社会的純被害額の定義では 1,906 / 3,780[百万バーツ/年]であることがわかる。また、これらを 1993 年の GDP と比較すると、それぞれ 0.361 / 0.685[%]および 0.060 / 0.119[%]の減少である。しかし、定義の違いによる被害額の違いについては理論的に明らかではなく、この説明が課題として残される。

表－４より、沿岸部（バンコク、中部、南部）では生産額が減少するが、内陸部（北部、東北部）では生産額が増加することがわかる。これは、図－３と４の比較より、生産額の増減は労働者の転入転出と関連しているものと予想される。すなわち、沿岸部では土地損失→生産性低下（生産額減少）→労働需要低下→失業者増大→労働者流出・・・という波及過程、また内陸部では労働者の流入→生産性向上（生産額増加）・・・という波及過程が考えられる。一方、各地域の被害額と土地損失量を比較すると反比例の関係が見られるが、これは現在の土地生産性（単位面積あ

たり生産額)の違いによるものと考えられる。

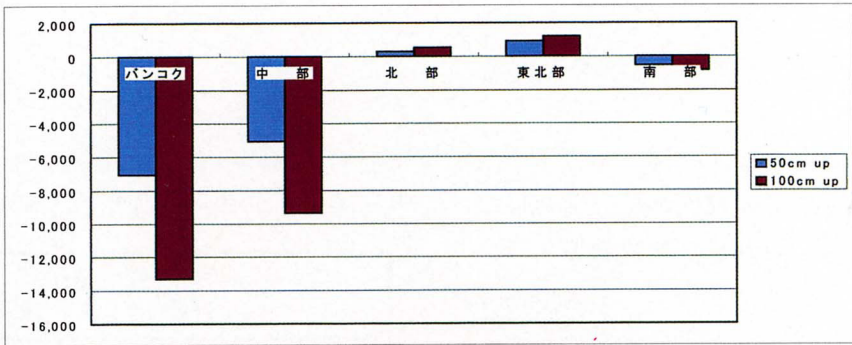
この分析結果によると、1 mの海面上昇によって約8万人の労働者が内陸部へ移動することになる。しかし、住み替え費用の問題や水上生活者の存在を考慮すると、タイにおいてこれほどの人口移動は起こらないかも知れない。これは式(1.1)(1.2)のパラメータに依存する問題である。本研究では先進国における研究蓄積に基づいてパラメータを設定したが、この問題を明らかにするためにはタイにおける労働者分布の状況を詳細に分析する必要がある。

表-5より、農業サービスを除くすべての産業において生産額が減少することがわかる。特に製造業の生産額の減少分が著しく、全体の減少分に占める割合は約38%である。これは、製造業がバンコクの沿岸部に数多く立地していることによるものと考えられる。続いて、卸売・小売、サービス業の順となっている。ここで、漁業の生産額減少と農業サービスの生産額増加については疑問である。特に漁業については、海面上昇によって漁獲高が増加することはあっても、減少することは考え難い。産業別労働者数の変化と産業別賃金率の変化(図示省略)を見ると、漁業では労働者数減少と賃金率増加が見られ、これが生産額減少の原因となっている。さらに、各地域の産業別労働者数の算出において労働者数の産業別構成比を固定したことがこの原因となっているものと考えられ、この算出方法の改善が課題として残される。

ちなみに、産業別労働者数の変化については、農業(穀物・野菜、畜産、農業サービス、加工農業)において増加が見られ、それ以外の産業では減少している。また、産業別賃金率の変化については、漁業を除くすべての産業において減少している。

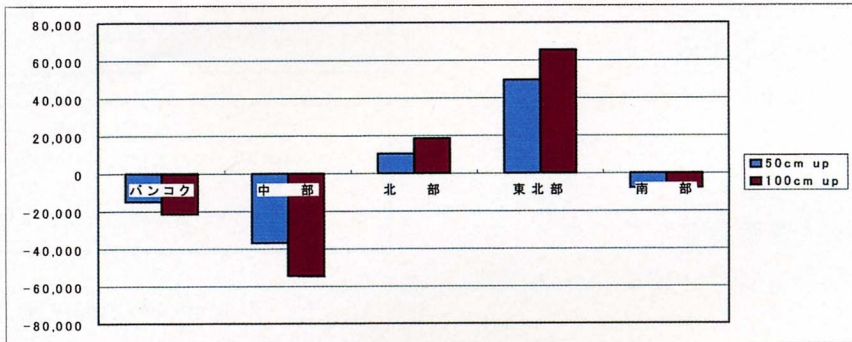
また、上述の被害額に伴って算出される種々の社会経済指標の変化を図-3~6に示す。図-3は地域別生産額の変化を示し、表-4を図示したものである。図-4は地域別労働者数の変化を示し、図-3の増減と同様の傾向を示していることがわかる。図-5は地域別賃金率の変化を示し、1 mの海面上昇ではすべての地域において減少していることがわかる。これは生産性低下による労働需要量の減少が原因であると考えられる。図-6は地域別地代の変化を示し、すべての地域において増加していることがわかる。直接的には沿岸部での土地損失による土地供給量の減少が原因であるが、内陸部においては労働者流入・生産性向上による土地需要量の増加が原因であると考えられる。

単位：百万パーツ/年



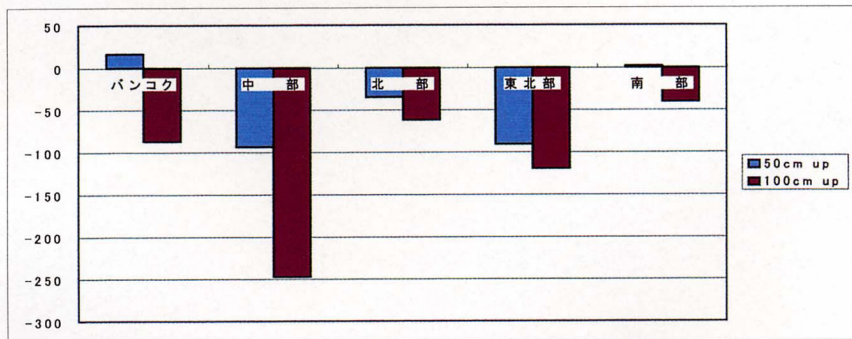
図－3 地域別生産額の変化

単位：人



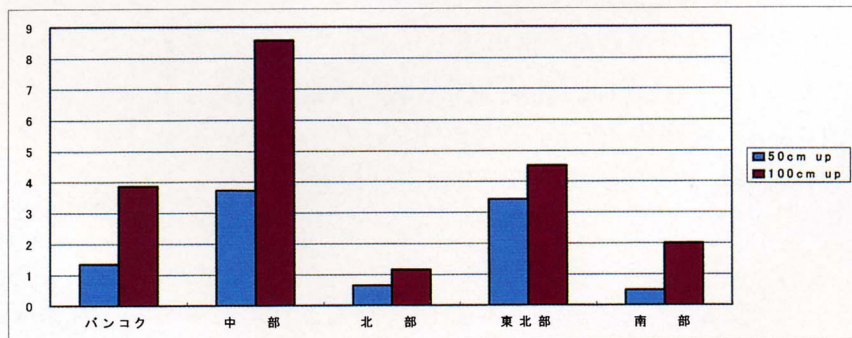
図－4 地域別労働者数の変化

単位：パーツ/年



図－5 地域別賃金率の変化

単位：パーツ/m²/年

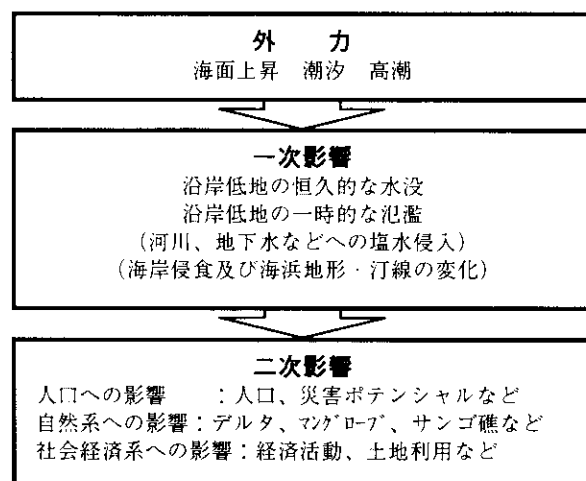


図－6 地域別地代の変化

(2) アジア・太平洋地域における総合的影響評価の結果

1) 影響評価ガイドラインの作成

本研究では、影響の伝搬を図－7に示す三段階に捉え、それぞれに評価項目および指標を設定した。主たる外力である海面水位の変化には、①平均海面の上昇、②潮汐、③高潮、④地盤沈下の四つの要素が考えられる。一次影響とは、水位変化が沿岸域に及ぼす物理的影響であり、水没や氾濫、塩水侵入、海岸侵食などが考えられる。ここでは、恒久的な水没(海面上昇＋潮汐を考慮)と一時的な氾濫(恒久的な水没に加えて高潮を考慮)を対象にした。二次影響は、一次影響域に存在する沿岸域システムが受ける影響であり、沿岸域システム(暴露系)をさらに三つ(人口、自然系、社会経済系)のサブシステムに分類した。



図－7 沿岸域への影響伝搬に関する枠組み

本研究でまとめた影響評価ガイドラインを、表－6に示す。影響評価に必要なデータは評価方法によって決まるが、表を見ると、現状では過去の動向からの類推に頼る項目が多く、影響発現のメカニズムの解明とモデル化が急務であることが分かる。

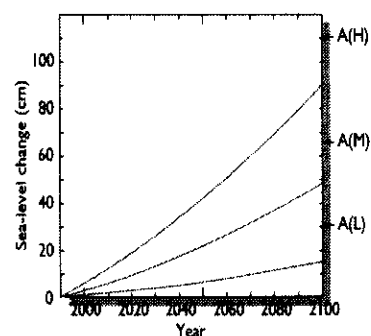
最終的に外力のシナリオと各暴露系への影響を統合することが必要となるが、それは、一次影響や二次影響の影響量を重ね合わせるにより算出される。このような重ね合わせには、GISを用いるのが有効である。

2) 外力のシナリオとGISを活用した影響評価の統合化

ア. 外力のシナリオ

ア) 海面上昇

図－8にIPCC第二次評価報告書による平均海面の上昇シナリオを示した。これは、温室効果ガス排出シナリオ(IS92a)に基づいて温暖化が起きた場合の海面上昇量予測であり、2100年においては最小値15cm、最適値48cm、最大値90cmを示している。これを参考に本報告は2100年の平均海面上昇値を1mと設定した。



図－8 IS92aによる海面上昇予測

表一6 影響評価方法

影響/暴露系	暴露系のデータ	シナリオ項目 (外力・社会条件)	評価方法
砂浜 (侵食)	砂浜の分布、延長、幅 砂の粒径 地形 (縦断形状、砂丘の有無) 前面の状況 (サンゴ礁、マンクローブの有無)	相対的海面上昇 (海面上昇+地盤沈下) 入射波浪	Brunn 則 $y=f(S, h_a, W_a, B, d_{50})$ ここで、 y :汀線の後退距離、 S :海面上昇量、 h_a :砂の移動限界水深、 W :汀線から移動限界水深までの距離、 B :バームの高さ、 d :砂の中央粒径。 *Brunn 則は、開放性の海岸でのみ適用可能で、サンゴ礁などの背後の砂浜には適用できない。
海岸侵食	現在の海岸侵食の状況 護岸条件 海岸地形 (地形図) 土地利用 植生の分布 河川運搬物質の量、変化	相対的海面上昇 (海面上昇+地盤沈下) 堆積物供給量の変化 (上流域におけるダム建設)	(影響発生 of シナリオ) 海面上昇→堆積物供給量の変化 (上流域におけるダム建設) →場の条件→海岸線の変化 (評価の方法) 海岸侵食の進行を総合的に評価 (過去の傾向からの類推など)
高潮	現在の高潮常襲地域・被害可能地域 護岸条件 後背地の地形 (地形図) 土地利用、植生の分布 地盤沈下の進行状況	相対的海面上昇 (海面上昇+地盤沈下) 将来のサイクロン・高潮の変化	(影響発生 of シナリオ) 海面上昇+地盤沈下→サイクロンの来襲+場の条件→高潮の被害 (評価の方法) 高潮被害地域の変化に関する総合的評価 (過去の傾向からの類推)
水害	現在の水害常襲地域・湛水可能地域 微地形・地盤高 (地形図) 土地利用 植生地盤沈下の進行状況の分布	相対的海面上昇 (海面上昇+地盤沈下) 将来のサイクロン・モンスーンの変化	(影響発生 of シナリオ) 海面上昇+地盤沈下→洪水の発生+場の条件→水害 (評価の方法) 水害常襲地域の変化に関する総合的評価 (過去の傾向からの類推)

塩害	現在の塩害常襲地域 地盤高（地形図） 土地利用 地盤沈下の進行状況	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下） 将来の降雨の変化	（影響発生メカニズム） 海面上昇＋地盤沈下→地下水の塩水化＋塩の条件→塩害の発生 （評価の方法） 塩害常襲地域の变化に関する総合的評価（過去の傾向からの類 推）
海跡潮	1) 自然条件 地形要素（砂丘、浜堤、後背湿 地、テラ、湖岸湿地、低位段丘 など）、標高（地形図）、植生の 分布 2) 社会・経済条件 土地利用 インフラ施設（港湾、リフト施 設、灌漑用水門、同運河など）	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下）	（影響発生メカニズム） 海面上昇＋塩分濃度の上昇→養殖業へのシフト、灌漑計画、淡 水化計画など （評価の方法） 自然条件、社会・経済条件によるタイプ分け 各タイプ毎に、海面上昇と塩分濃度増大の影響を評価
湿地帯	湿地帯の分布（面積） 種類 維持機構、土砂の流入・堆積速 度	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下） 潮位・潮差、波浪	底質捕捉で維持するタイプ 生物作用で維持するタイプ それぞれのメカニズムに基づいて判定
マングローブ生態系全体	マングローブ林の分布（面積、森林 幅） 群落立地の地形場 森林動態 土砂流入の様式・速度 マングローブ植生による土砂捕 足・堆積	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下、上昇速 度） 潮位・潮差 森林利用の形態、法整備 コンセンサスの有無	マングローブ生態系全体の移動可能性を、沿岸低地（1m以下）の有 無、規模、隣接地の土地利用等で判定）
群落	有機物蓄積機構・速度 土地利用（マングローブ林、隣接地） 地盤高（地形図）		群落レベルの変化： 海面上昇影響の程度とタイプ＝地盤高の変化量、レベル 変化量/変化レベル＝海面上昇-地盤上昇量

サコグ礁	サコグ礁の分布 面積 種類	海面上昇 水温変化 水質	過去の海水準上昇への追従からの類推 白化現象の発生の有無が重要
災害ポテンシャル 水没 氾濫	地形図（標高） 沿岸地域の深浅図（水深） 海岸沿いの護岸の有無、護岸高 人口分布 資産分布 過去の高潮・氾濫域の記録	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下） 潮位差 サイクロンの強さ・規模・経路・頻度	設定水位＞標高 この中の人口、資産、インフラ施設
総合的脆弱性	海岸の庶蔽条件 自然の防波機能、人工護岸の有無 人口密度 土地利用 標高（地形図）	相対的海面上昇 （海面上昇＋地盤沈下、上昇速度） 気候要素（サイクロン、降雨など）	1. 標高 2. 海岸の庶蔽、防護の程度 3. 人口密度、土地利用の密度 を組み合わせて、脆弱性指標を構築し、地理情報システム（GIS）で判定
経済活動	地域別産業別就業人口 地域別産業別面積 地域別産業別生産額 地域別産業別賃金率 地域別産業別地代 地域間産業連関表	左記データの時系列変化	経済的影響予測モデル 海面上昇の有無両状態における経済状態の予測結果の比較による評価
産業・社会活動	産業分類図または土地利用図 海面上昇による水没・氾濫予想 地域	相対的海面上昇の時系列変化 （海面上昇＋地盤沈下、速度） 産業分布（土地利用）の時系列変化	海面上昇の有無両状態における産業・社会活動の予測結果の比較による評価

イ) 潮汐

海上保安庁水路部発行の潮汐表を用いて、アジア太平洋の海岸線に沿って潮汐振幅のデジタルデータを作成した。入力データは、アジア太平洋全域 1852 地点の潮汐観測データであり、海岸線に沿った線形補間によって、海岸線メッシュ（緯度経度 1 分×1 分）毎の潮汐振幅を算定した。

ウ) 高潮

沿岸域に対する高潮の影響はさわめて大きい。高潮の原因は、台風による海面の吸い上げ作用と海水の吹き寄せ(wind set-up)作用である。高潮の発生時には wave set-up も生ずるが本研究では考慮していない。

各地点における高潮偏差の計算方法は式(12)に従った。海面の吸い上げ効果は右边第一項に含まれ、吹き寄せ効果及び海浜地形の効果は右边第二項に表現されている。

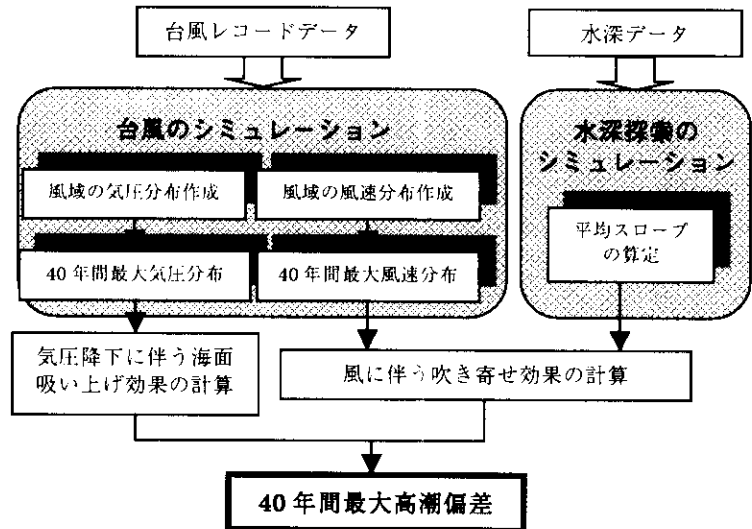


図-9 高潮偏差の推算フロー

$$SS_{RP} = 0.991 \cdot \Delta P_{RP} + \frac{k \cdot U_{RP}^2}{10^3 \cdot S} \ln \frac{h_0}{h'} \quad (12)$$

ここで、 $k=4.8 \times 10^{-2}$ 、 S :平均海底勾配、 h' :高潮偏差を求める水深 (5m)、 h_0 :吹き寄せが始まる水深、である。

高潮偏差の推算フローを図-9に示す。本研究では、高潮偏差の推算に台風の観測データ(World-Wide Consolidated Tropical Cyclone Data Set)と水深データ(etopo5)を利用した。この台風観測データは、台風強度の指標としては最大風速の情報だけで、中心気圧や台風の規模に関する情報は含まれていない。そのため、高潮偏差の推算のためには、台風モデルを用いて最大風速から気圧分布や風速分布を作成する必要がある。

台風内部の風は、気圧傾度によって生ずる傾度風が主体で、風速は台風内の気圧分布から計算することができる。気圧分布は、Meyer の式を用いて推定した。この気圧傾度によって生じる傾度風の風速分布は、台風中心の緯度、中心と外側との気圧差、台風中心からはほぼ最大風速までの距離、が決まれば求められる。傾度風と海上風(中心対称風)との間の関係(風速比、等圧接線となす角)は、緯度や気圧配置、気温・水温の温度差などによって異なり、統計的解析から一定の関係が提案されている。

一方、実際の台風は時速数十 km で移動するので、風速分布もこの影響を受ける。台風の移動によって生ずる風の成分は「場の風」と呼ばれる。台風による高潮や台風内の波の計算では

①場の風は台風の進行方向と同じ方向に吹く、②場の風の速度は傾度風速及び台風の進行速度に比例する、③場の風の最大速度と台風の進行速度との比は 1 よりも小さいある定数である、といった仮定を置いて取り扱われる。本研究でもこれに準じて場の風を与えた。

これらのシミュレーションで作成された台風観測点及び経路、接近頻度、接近継続時間、40 年間最大風速・気圧、高潮偏差の分布をそれぞれ図－10～14に示す。

イ. 影響評価の GIS による統合

GIS によって統合した恒久的な水没及び一時的な氾濫域(40 年間最大)の分布を図－15に示す。恒久的な水没域に関しては、ニューギニア島南部の河口デルタ地帯、ベトナムのメコン川デルタ地帯などにおいて広範囲に影響を受けることが分かる。また、高潮の影響も考慮した一時的な氾濫域に関しては、特にバングラデシュや中国沿岸域(上海、長江口付近など)に影響が大きいことが分かる。満潮位以下の面積はアジア太平洋全域で約 31 万 km²(全陸地面積の 0.46%)、1m の海面上昇による恒久的な水没域は約 62 万 km²(0.92%)、さらに一時的な氾濫域(40 年間最大)は約 85 万 km²(1.27%)と推定された。

また、恒久的な水没域と一時的な氾濫域の面積及び総面積に対する国別の比率を表－7にまとめた。特に高潮の影響を考慮しない時と考慮した時の違いに着目すると、中国(10 倍程度)やタイ(5 倍程度)、バングラデシュ(3 倍程度)で大きい。バングラデシュでは高潮氾濫域が国土の 1/3 にも及ぶ。

表－7 国別の恒久的な水没域・一時的な氾濫域面積とその割合及び影響を受ける人口

国名	一次影響面積				影響人口			
	恒久的な水没域		一時的な氾濫域		恒久的な水没域		一時的な氾濫域	
中国	11,000	[0.1%]	100,000	[1.1%]	8,300,000	[0.7%]	79,000,000	[6.2%]
ベトナム	31,000	[8.7%]	48,000	[13.6%]	15,000,000	[21.1%]	27,000,000	[38.0%]
バングラデシュ	16,000	[12.7%]	46,000	[35.6%]	17,000,000	[14.2%]	50,000,000	[42.2%]
カンボジア	500	[0.3%]	6,400	[3.6%]	42,000	[0.5%]	1,500,000	[16.1%]
台湾	1,000	[2.8%]	2,200	[5.9%]	2,100,000	[9.4%]	4,000,000	[18.0%]
タイ	2,800	[0.5%]	13,000	[2.6%]	440,000	[0.8%]	9,600,000	[17.1%]
日本	7,800	[2.1%]	9,500	[2.6%]	5,000,000	[4.0%]	6,900,000	[5.6%]

* 一次影響面積の単位は[km²]、影響人口の単位は[人]でそれぞれおよその算定結果を示す

3) タイに対するケーススタディ

ア. 評価に用いたデータ

THAILAND on a DISC はタイ環境研究所 (Thailand Environment Institute) が作成した Arc/Info、Arc View 形式の GIS データであり、タイ全土をカバーしている。データは、UTM 座標系、準拠楕円体は Everest、測地座標系は INDIAN を用いている。データの精度は 1/25 万程

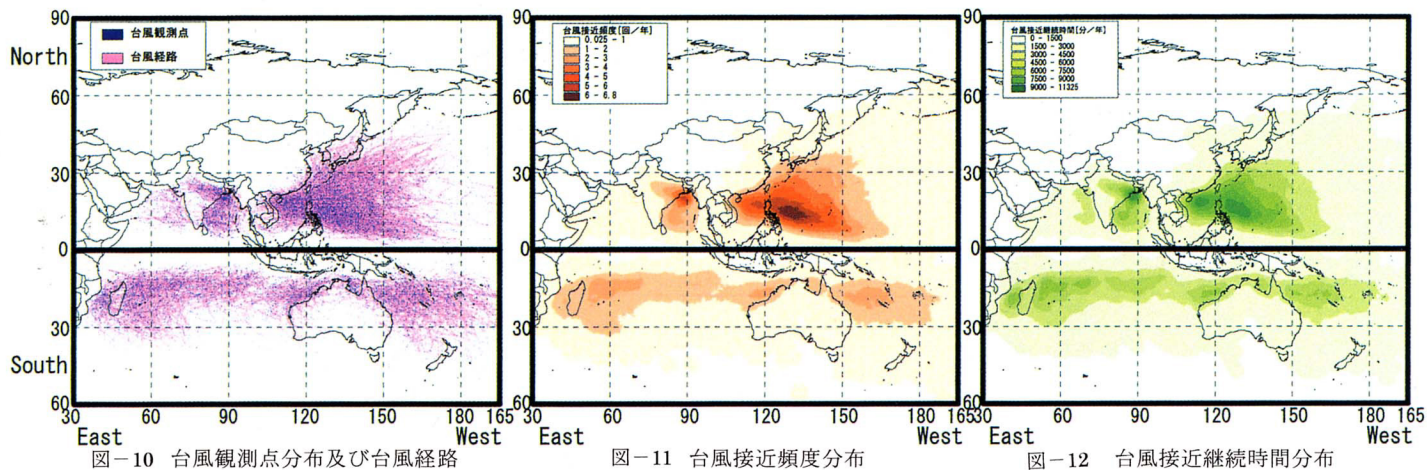


図-10 台風観測点分布及び台風経路

図-11 台風接近頻度分布

図-12 台風接近継続時間分布

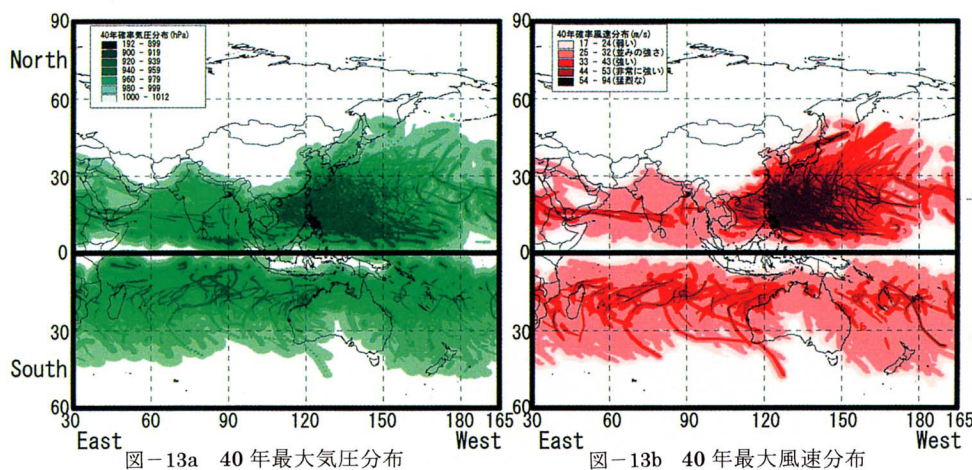


図-13a 40年最大気圧分布

図-13b 40年最大風速分布

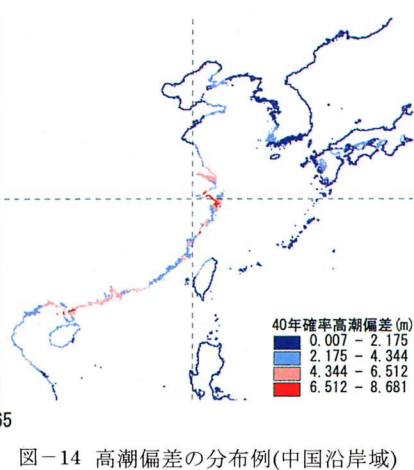


図-14 高潮偏差の分布例(中国沿岸域)

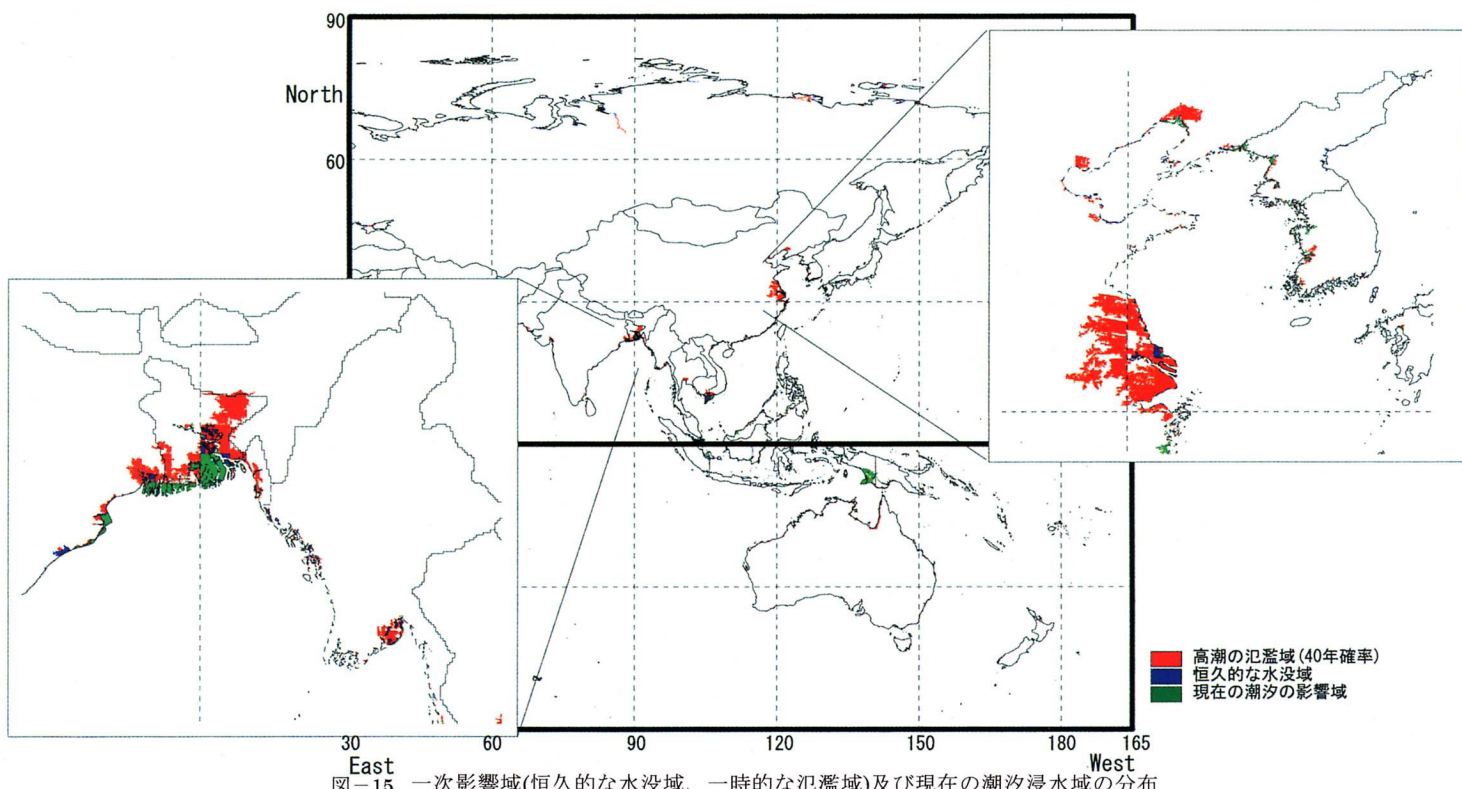


図-15 一次影響域(恒久的な水没域、一時的な氾濫域)及び現在の潮汐浸水域の分布

度である（一部 1/50 万の精度のものもある。）本データは中央部、東部、北東部、北部、南部の 5 つの地域に分割されており、タイ全体レベルで評価するにも、地域レベルで評価するにも使用できる。

データは行政区域、農業、環境、森林、地質、インフラ施設、社会経済、地形、水の 9 つの要素（テーマ）から作られている。データの内容を以下の図－16 に記す。



図－16 データ内容

イ. タイへの影響評価

ア) 恒久的な水没（海面上昇 1m+潮汐）の影響

① 影響面積（図-17）

海面上昇により水没を受けるタンボン(町)は274あり、影響面積は約 2,400km²となる。これは、タイ全土の面積（約 51.3 万 km²）の 0.47%にあたる。タイにおいて水没は少ないが、マレー半島南部のパタニ地方やアンダマン海側に比較的広くみられる。

② 自然系（湿地帯）への影響（図-18）

タイにおける海面上昇により影響を受ける湿地帯 14 ヶ所あり、影響面積は約 300km²となる。そのうち一番影響面積の大きい湿地帯は Krabi 湾に存在し、約 70km²が影響範囲に含まれる。

③ 影響人口（図-19）

人口データはタンボン単位で与えられていたため、各タンボンの人口密度に影響面積を掛け合わせて影響人口を求めた。水没の危険にさらされる人口は約 33 万人という結果になった。比較的影響人口の多い地域はアンダマン海側にみられ、一番多かったタンボンは Ko Libong で約 3 万人となった。

④ 土地利用

水没域における土地利用は 28 項目が該当した。そのうち影響面積の大きい上位 10 項目を図-20に示す。

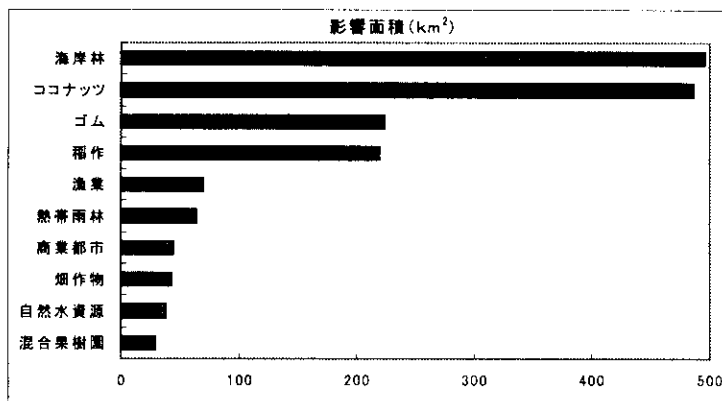


図-20 土地利用別影響面積

⑤ 鉄道

水没域を通過する鉄道を検索した結果、影響を受ける鉄道はタイ湾西側に 4 本あった。将来使用できなくなる可能性のある鉄道の長さは約 60km におよぶが実際の水没域に含まれる部分はその半分である。

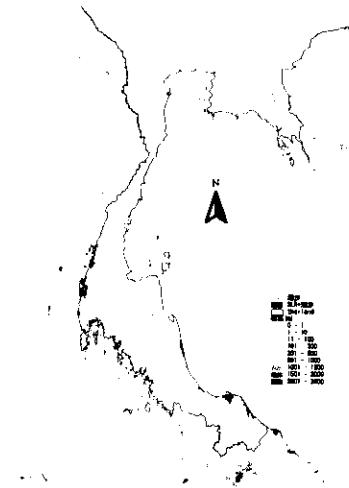


図-17 影響面積

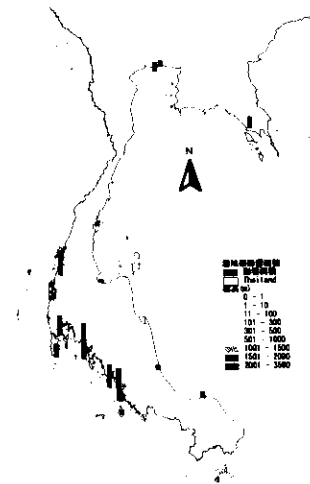


図-18 影響を受ける湿地帯面積

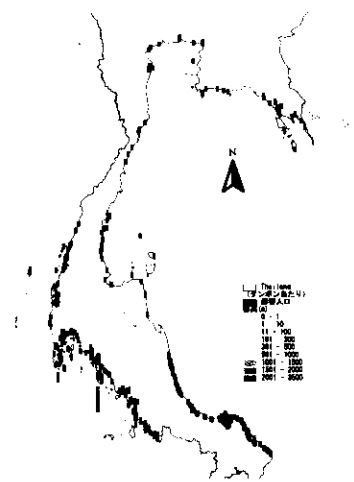


図-19 影響人口

イ. 高潮による一時的な氾濫を含めた影響

① 影響面積（図－21）

高潮を考慮した氾濫面積は 12,000km² となり、単純な水没と比較すると浸水域は約 5 倍に広がっている。その 6 割程度が首都バンコクを含むチャオプラヤデルタ域に集中している。その他にもスラートターニー、パークパナンなど高潮の影響はタイ湾側に顕著にみられる。

② 自然系（湿地帯）への影響（図－22）

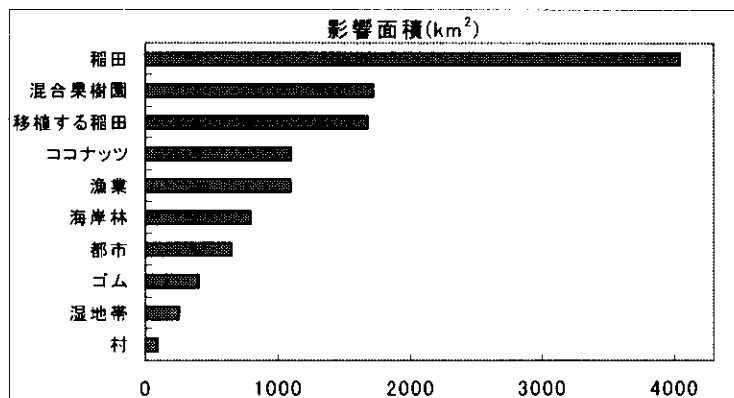
高潮により影響を受ける湿地帯は 16 ケ所あり、影響面積は約 6000km² と単純な水没に比べ約 20 倍になる。なかでも南中央平野で約 5000km² と湿地帯の影響のほとんどを占めている。

③ 影響人口（図－23）

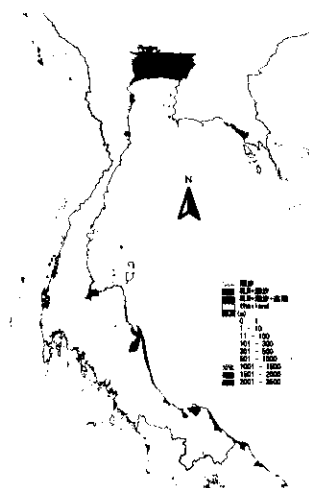
影響人口は約 390 万人と単純な水没と比較して 10 倍以上にもなる。最も影響の多かった Samrong Nu では影響人口が約 54,000 人となった。しかし、影響を受ける 909 タンボンのうち、157 の人口データが無く、そのうち 154 タンボンがチャオプラヤデルタの都市部であるため、さらに多くの人口が氾濫の危険にさらされることになる。

④ 土地利用

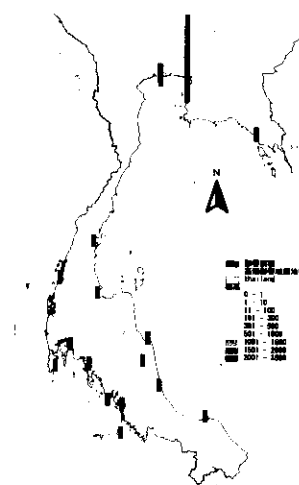
水没域における土地利用は 34 項目が該当した。そのうち影響面積の大きい上位 10 項目の土地利用を図－24 に示す。



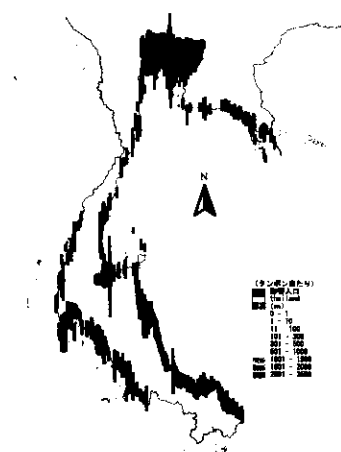
図－24 土地利用別影響面積



図－21 影響面積



図－22 影響を受ける湿地帯面積



図－23 影響人口

5. 本研究により得られた成果

(1) 海面上昇の影響の経済評価に関する研究

海面上昇による影響を分析するための社会経済モデルを構築し、タイにおける海面上昇による被害額の計測を行った。その結果、50cm / 100cmの海面上昇によるタイ全国の被害額は、生産額の減少分の定義では11,463 / 21,777[百万バーツ/年]、社会的純被害額の定義では1,906 / 3,780[百万バーツ/年]であり、またこれらを1993年のGDPと比較するとそれぞれ0.361 / 0.685[%]および0.060 / 0.119[%]の減少であることがわかった。しかし、定義の違いによる被害額の違いについては理論的に明らかではなく、この解明が課題として残される。

また、本研究による経済評価は、海面上昇の有無両場合における社会経済状態の予測結果の比較を基本としているが、今回は単年度予測かつ現在予測にとどまった。将来予測のためには時系列的な社会経済状態のシナリオを設定する必要がある、この点についても今後の課題としたい。

(2) 総合的影響評価手法に関する研究

地球環境情報を収集するとともに、そのためのデータベースを構築し、広域的な総合的影響手法を開発した。本手法をアジア・太平洋地域に適用して一次影響及び二次影響を予測し、影響量を定量的に算定した。

6. 参考文献

- 1) タイの辞典, 同朋舎出版, 1993.
- 2) Ueda, T., Morisugi, H. and Asma, S.: A Macroeconomic Model for Damage Evaluation of Sea Level Rise for Developing Countries, Proceedings of Infrastructure Planning, No.19(1), pp.375-378, 1996.
- 3) Morisugi, H., Ueda, T., Asma, S., Asano, T. and Muto, S.: A Macroeconomic Model for Damage Evaluation of Sea Level Rise for Developing Countries - A Case Study of Bangladesh -, Paper presented at International Symposium on Economic and Political Dynamics and Sustainable Development in Asia: Infrastructure as Complex Systems, 1997.
- 4) 土木学会土木計画学研究委員会：非集計行動モデルの理論と実際, 土木学会, 1995.
- 5) INTERNATIONAL INPUT-OUTPUT TABLE THAILAND-JAPAN 1990, Institute of Developing Economies, 1996.
- 6) REPORT OF THE LABOR FORCE SURVEY WHOLE KINGDOM (ROUND 3) AUGUST 1995, National Statistical Office.
- 7) REPORT OF THE 1994 INDUSTRIAL SURVEY WHOLE KINGDOM, National Statistical Office.
- 8) THAILAND IN FIGURES 1997-1998, Alpha Research Co.,Ltd., 1998.

〔国際共同研究等の状況〕

タイ国カセサート大学、アジア工科大学院等の協力により、現地研究者との情報・意見交換をはかりながら研究を進めている。

〔研究成果の発表状況〕

（１）論文発表

海岸・沿岸域システムに対する地球環境変動の総合的影響評価、土木学会、1999