

## 16. 21世紀におけるアジア・オセアニア沿岸の 基礎的脆弱性の推定

信岡 尚道<sup>1\*</sup>・三村 信男<sup>2</sup>・田村 誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

<sup>2</sup>茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

<sup>3</sup>茨城大学地球変動適応科学研究機関 (〒310-8512茨城県水戸市文京区2-1-1)

\* E-mail: nobuoka@mx.ibaraki.ac.jp

アジア・オセアニアの全沿岸における21世紀中の脆弱性評価を目的に、IPCC作成のSRESシナリオを基にした海面上昇と人口変動シナリオを用い、数値解析などを利用して詳細な時空間分析をおこない、潜在的な常時水没域と高潮浸水域、さらに被災人口の変動を定量的かつ時系列で推定した。それらの評価から、アジア・オセアニアが直面する可能性がある21世紀の脆弱性の特徴が、メガデルタを中心としてアジアで潜在的な水没、浸水域が増加し被災人口も増え、オセアニアでは島嶼国で中心に被災人口の割合が非常に高いこと、21世紀前半は沿岸域の自然的な人口増加が大きな問題となり同後半には海面上昇の影響も顕著に表れてくることを定量的に明らかにした。最後に経済成長の観点も含めて、脆弱性の増大に対する適応策の方向性について考察した。

**Key Words :** *Regional Vulnerability Assessment, Sea-Level Rise, Population Growth, Storm Surge*

### 1. 序論

地球温暖化、食糧不足や水資源不足と21世紀の地球規模の環境問題は深刻であり、政策者に対して問題を定量的に提示していくことが重要である。その中でアジア・オセアニアの沿岸域は、世界の熱帯低気圧のホットスポットの一つであり、高潮災害の危険性が存在している。人口が集中している低平地地帯、特にメガデルタへの影響が懸念されている<sup>1)</sup>。また太平洋の島嶼国には、海拔が2m以下のモルディヴなどが多数あり、海面上昇による水没も懸念されている<sup>1)</sup>。また、問題解決のためには、知識や技術力とともに、とくに防災に対しては経済力も重要になる。

脆弱性評価は様々な研究で実施がされているが、沿岸域の世界脆弱性評価(CZ-GVA)や地域(regional)の脆弱性評価(CZ-RVA)のような広範囲の評価研究は限られている。全球規模で本格的に評価されたものには、1993年のHoozemansら<sup>2)</sup>の報告になる。沿岸域の災害のみならず、生態系の変化や米生産量までの広分野にわたって評価しているが、当時は地球規模の環境データベースが発達していなかったためか、国単位の空間精度による個々

の積み重ねで大枠の評価しかされていない。沿岸の水災害も限られた地点の波浪と風の情報から、経験的に推定するにとどまっている。Nichollsら<sup>3)</sup>は、気候モデル出力の海面上昇量を適用するなどのHoozemansら<sup>2)</sup>の方法から若干計算手法を改良し、全球評価を行っている。一方、著者らは緯度経度60秒に分けた詳細メッシュでアジア・太平洋の評価<sup>4,5)</sup>を行っている。しかし、これらの全ての研究では潮汐と熱帯低気圧による高潮の広域分布に経験的な手法や補間手法を用いているため十分な精度を有していない。また、気候シナリオ、人口シナリオと経済シナリオの不確実性およびこれらを連携した評価も時空間的に十分とは言えない。IPCC-AR4のWG2の沿岸システムおよび低平地の分野にまとめられている知見<sup>6)</sup>でも、まだ断片的なものしかない。世界全体を概観すると、沿岸域の人口は1990年の12億人から2080年代には18億人~52億人に増加すると考えられ、海面上昇に熱帯低気圧の強大化が加わり、沿岸域の多くの場所で負の影響が発生する可能性が高いとされている。特に影響が懸念される箇所として、現気候に対しても十分な防御を有しない開発途上国と人口増加が著しいアジアのメガデルタがあげられている。具体的な予測として、海岸防御

が現在の進捗状況にしたがって続き、海面上昇による適応が無いとした場合における、平年の高潮災害を被る人口について、2020年代、2050年代、2080年代の推定結果が示されている。なかでもアジアとアフリカでは海面上昇が起こらなくても被災人口が増え、2080年代ではA2シナリオにおいてアジアでは25百万人の人々に及びその内海面上昇の影響で7百万人と推定されている。しかし、この推定も、前述のNichollsら<sup>3)</sup>の方法とほぼ同様の手法に基づくため不十分と言わざるをえない。

本論文の目的は、自然的な要因と社会的な要因を組み合わせ、21世紀の変動要因に対するアジア・オセアニアの広範囲にわたる沿岸域の水没・浸水域の拡大と水没・浸水を被る人口の変動を、緯度経度60秒メッシュによる詳細な解析をとおして定量的かつ時系列で推定することである。その中で、熱帯低気圧による高潮と潮汐については現気候を対象にして数値解析値を利用する。また海面上昇量、人口変動と経済変動についてはSRESシナリオ<sup>9)</sup>の下に推定されたものを本解析に活用する。なお、将来の自然的な変化や社会的な変動には、熱帯低気圧の変化、沿岸災害に対する防御の構築や災害を被る地域から安全な地域への移住をはじめ多くの要素が考えられる。その中で、地球温暖化により顕著に沿岸に影響が現われると考えられる要素のうち、沿岸の社会経済活動の展開に大きく左右すると考えられる、つまり脆弱性の「基礎的要素」となる、海岸防御が存在しない場合の「水没と浸水」について、SRES<sup>9)</sup>シナリオにもとづき将来の推定精度が比較的に高いと考えられる上述の海面上昇量、人口と経済を用いて解析を行う。

なお、本論文の中には具体的な国名とそれらの影響度を示している箇所があるが、アジア・オセアニアと広域を統一して扱うために使用したデータの精度は個々の国単独で詳細に評価したものよりは低く、21世紀のシナリオ自体に不確実性が含まれていることから、これから数年で実施する緊急の防災対策に利用できるほどの精度ではないことに注意が必要である。本論文の論点は、一つ一つの国単独の正確な脆弱性評価ではなく、アジア・オセアニア地域の大局的な自然的・社会的な脆弱性を、またいくつかの国を事例に「地形的、経済的な特徴による影響の現われ方」を、シナリオに従った詳細な解析を通して定量的かつ時系列で推定するところにある。

## 2. 基礎的脆弱性評価方法

### (1) 対象範囲と対象期間

対象範囲はアジア、太平洋に分類されている国と地域(付表-1)で、評価には地球表面を60秒の弧で緯度経度

に分割したものをを用いた。1つのメッシュの1辺は約2 kmである。対象期間は25年間隔で2000年から2100年までとした。

### (2) シナリオ

2000年から2100年までの21世紀の変動で考慮した3点は、SRESシナリオ<sup>9)</sup>に基づいた地球温暖化に伴う海面上昇、人口変動、経済変動である。海面上昇については、日本の気象庁気象研究所<sup>7)</sup>および東京大学気候システム研究センター等<sup>8)</sup>が全球規模の気候実験で求めた熱膨張による海面上昇値(MRI-CGCM2.3.2a, MIROC3.2)に、IPCC-AR4から読み取った2100年時点での氷雪や氷床の融解効果による増加率を乗じた値とそれらの平均を用いた(付図-1)。両モデルの結果は、世界で比較検討された海面上昇の中で上位と下位にあたる結果であったので、ここで用いる平均値は代表的な値と考えることができる。以下、特に気候モデルを特定しない場合には平均値を用いる。

人口変動と経済成長については、CIESIN<sup>10)</sup>がSRESシナリオを基に国ごとにダウンスケーリングしたものを用いた。なお対象としたSRESシナリオはA1B、A2、B1の3種類である(付図-2、付図-3)。A1シナリオ(高成長社会)は高度経済成長が21世紀半ばまで続いたあとは減少し、新技術が導入、地域間格差は縮小し一人当たりの所得格差が大幅に縮小するものであり、この中のA1Bシナリオ(調和型)は、特定のエネルギー源に過度に依存しないものである。A2シナリオ(多元化社会)は地域独立型発展社会が続き、世界の人口が増加を続ける。B1シナリオ(循環型社会)は地域間格差が縮小した世界で、A1シナリオと同様の人口変動を取り、環境持続を目指す公平な世界が促進されるものである。

### (3) 自然的入力条件

#### a) 標高

沿岸域の標高は、脆弱性評価にとって最も重要な要素の一つである。しかし、途上国を始めとしてアジア・太平洋の全域をカバーでき、数km程度の解像度を持つ地形データは限られている。本研究ではUSGSのGTOPO30を基本とした。ただし、島嶼国を始め1部の範囲では実際の標高が数100mを超えるにも関わらず、陸上と海域を判別する情報(仮の標高: 1 m)のデータしか存在しない、またデータ作成において区画ごとに解析されたためと考えられるデルタ地帯での極端な不連続面があったことなどから、次の2点に関してNASAのSRTM30のデータで代替した。

- ・両標高データの標高を比較して、SRTM30の標高の方がGTOPO30よりも20 m以上高い場合には、

SRTM30の標高を採用

- ・ SRTM30の標高がGTOPO30よりも低い場合には、SRTM30の標高を採用

#### b) 潮位

海岸線の満潮位と高潮高については、算定方法の詳細や算定した結果の精度を信岡ら<sup>11)</sup>に記してあるので、ここでは概要を説明する。潮汐については、初めに日本の気象庁と英国海軍水路部が示しているの潮位表から求めた。次にこの潮位データが存在するメッシュとその周囲5メッシュに同潮位の値を用いた。しかし、これら潮位でカバーできる沿岸は一部であるので、その他の地点では潮汐予測システム(NAO.99bとNAO.99L)<sup>12)</sup>を用いて推定した。沿岸域で計算が出来なかったメッシュについては、同予測システムで求めた0.5度メッシュ間隔の満潮位分布の値で代替した。

#### c) 高潮

熱帯低気圧による高潮については、数値計算から定めた<sup>11)</sup>。まず熱帯低気圧のベストトラックデータをもとにMyers<sup>13)</sup>の推定式から気圧分布を算定し、その気圧分布と熱帯低気圧の移動速度から求めた風速を用いて海表面摩擦<sup>14)</sup>を算定した。次にこれら算定した値を境界条件に置き、球面座標系の流量フラックス表記型の線形長波理論<sup>15)</sup>を差分法の一つADI法<sup>16)</sup>を用いて数値計算を実行して、一つの台風ごとに高潮を2分メッシュ間隔で求めた。そして各メッシュにおける、計算された期間の最高高潮を脆弱性評価に用いた。対象とした熱帯低気圧は、北西太平洋域日本の気象庁が公開しているベストトラックデータ<sup>17)</sup>、東太平洋、南太平洋、インド洋はNOAAのNational Data Center がデータ収集し取りまとめたベストトラックデータ(IBTrACS<sup>18)</sup>)を用いた。期間は、北インド洋のみはデータが存在した1972年から2007年、その他の地域では1951年～2007年である。気候モデルを用いた将来気候実験にて温暖化時の熱帯的低気圧<sup>19)</sup>も推定されているが、高潮計算に活用する方法はまだ開発されていないので、本研究では利用しなかった。なお、暴浪にともなう海岸での海面上昇、Wave set-upを考慮していないので、海浜勾配が1/50前後の勾配が急な海岸では高潮の高さは低めの結果となっている<sup>11)</sup>。

#### (4) 評価対象項目

##### a) 水没および浸水域

前項で示した海岸線の自然入力条件をもとに、レベル湛水法を用いて恒常的な水没メッシュと、一時的な浸水メッシュを求めた。水没に対しては満潮位、浸水域は満潮位と海面上昇に高潮高を加えたものを条件とした。求められた水没と浸水メッシュから各メッシュの面積を算定し、2000年の面積を基準に25年間隔で、シナリオご

とに、増加した面積を評価に用いた。

ここで2000年を基準に増加する脆弱性について説明する。現実の海岸では、経済的に成長している国家ほど防御策として海岸堤防など護岸が施されているが、本研究ではそれらを考慮していない。したがって、絶対的な水没面積を評価基準に設けることは、自然状態での脆弱性、もしくは護岸が崩壊するなどによる「潜在的な脆弱性」を評価することになる。他方、2000年を基準に水没域の変化を求めれば、完全とは言えないが対象期間の脆弱性の変動をある程度捉えていると言える。もちろん、先進国の経済的に重要な沿岸都市では護岸にも余裕高を設けていたり、数百年に一度の異常潮位に耐えうる護岸になっているが、これについては4章の議論の中で考慮する。以下、「潜在的な水没と浸水」を単に「水没と浸水」で説明していく。

##### b) 水没および浸水人口

メッシュごとの人口分布は、CIESINのGPW ver2<sup>20)</sup>の値に、2(2)節で示した国ごとへのダウンスケーリング人口から算定した将来の変化率を乗じたものを用いた。この中には、将来的な国内での沿岸域への人口移動までは考慮していない。

水没および浸水メッシュの人口を各年で集計し、各国と地域で、シナリオごとに2000年の同人口を基準に、25年間隔で増加した人口を評価に用いた。

### 3. アジア・オセアニア沿岸の基礎的脆弱性評価結果

#### (1) アジア・オセアニア沿岸における2000年と2100年の潜在的水没域

自然状態における沿岸域の脆弱な地域を図-1に示す。図中の黄色は現在の海面高による潜在的水没域、赤色は海面上昇が51cmにおける水没域の拡大を推定した結果である。また同図の黄緑色の範囲は標高が20m以下の地点である。結果を見ると、黄色の範囲にあたる満潮位以下の標高である地域が広く存在しているのがわかる。特に、黄河デルタ、揚子江デルタ、メコンデルタやガンジス・ブラマプトラデルタなどのメガデルタで顕著である。しかし海面が51cm上昇した場合の水没域の拡大は、これらのデルタでも詳細に見ないとわからない程度である。

#### (2) アジア・オセアニアの水没域と浸水域の増加

アジアの水没域面積は、現海面高で約51万km<sup>2</sup>であるのが、海面上昇が51cmまで上昇すると約63万km<sup>2</sup>と約12万km<sup>2</sup>ほど拡大することが推定された(図-2(a))。

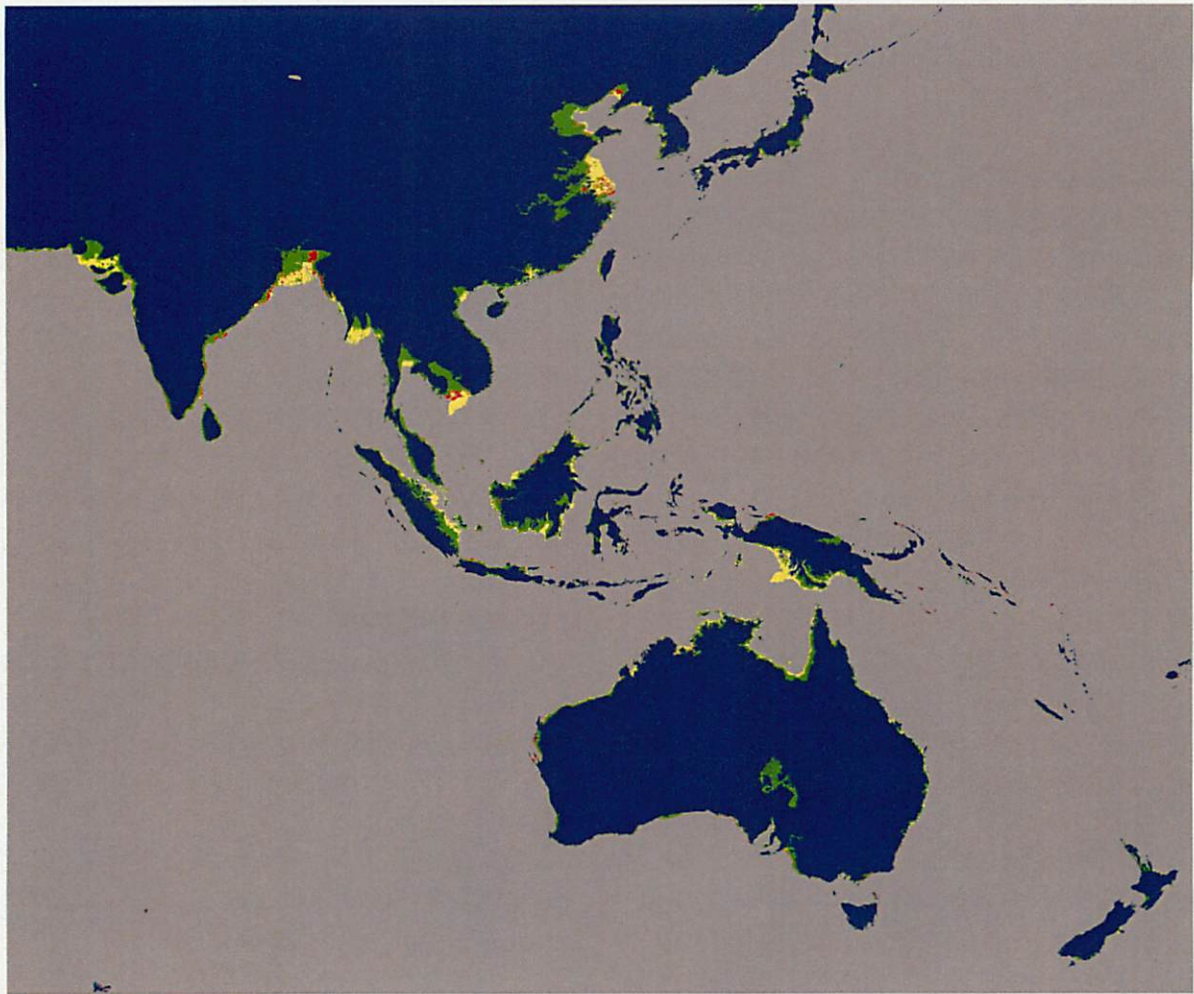


図-1 潜在的水没域(現海面高：黄色，海面上昇 51 cmによる拡大：赤色)と標高 20 m 以下（黄緑）の低平地（北緯 50 度～南緯 50 度，東経 50 度～180 度）

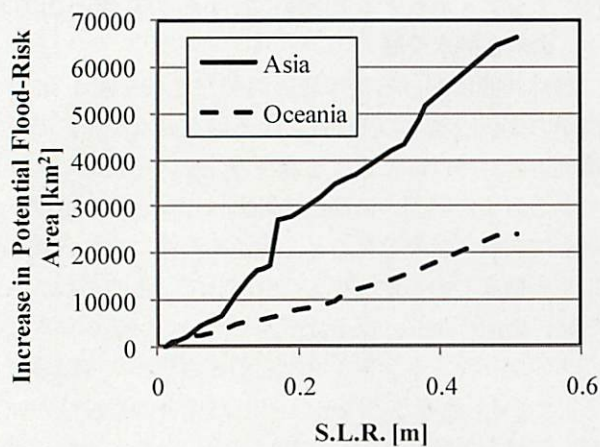


図-2(a) 海面上昇による水没域の増加(2000年基準)

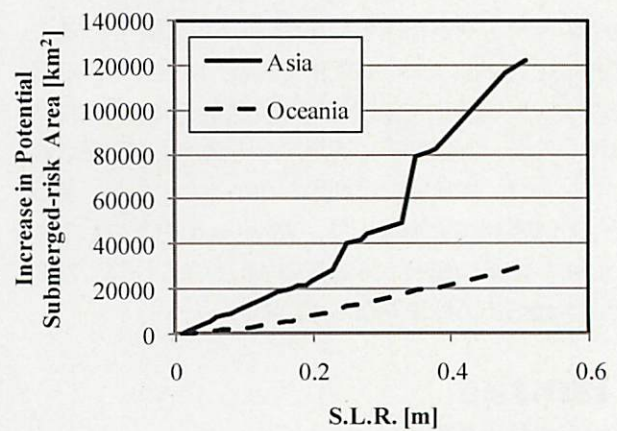


図-2(b) 海面上昇による浸水域の増加(2000年基準)

これは日本の全国土面積の約 38 万  $\text{km}^2$  の1/3に相当する面積である。オセアニアでも、約 3 万  $\text{km}^2$  ほど拡大する推定結果を得た。

アジアにおける高潮を加えた浸水域面積は、現海面高

で約 72 万  $\text{km}^2$  であるのが、海面上昇が 51 cm まで上昇すると約 79 万  $\text{km}^2$  と約 7 万  $\text{km}^2$  ほど、同オセアニアでは約 2 万 4 千  $\text{km}^2$  ほど拡大することが推定された(図-2(b))。

### (3) アジア・オセアニアの水没人口と浸水人口の増加

図-3(a)は2000年を基準とした、アジアの2100年までの水没人口の増加をシナリオ・気候モデル別に示した結果である。気候モデルが推定した海面上昇量の平均値を用いた算定では、アジアの水没域における人口が2000年時点で約2億人であるのが、21世紀中の人口増加が最も多いA2シナリオで2100年では約5億8千万人弱となり、約3億8千万人増加することが推定された。この増加には海面上昇と人口変化の両影響が含まれた結果である。このことはシナリオ別の人口成長を比較することでもわかり、2100年までも人口増加するA2シナリオでは高い値であるが、2050年頃をピークに人口が減少するA1B、B2シナリオでは影響人口の増加が抑えられる。この効果には、中国とベトナムで人口抑制される結果となった人口シナリオが大きく関係している。海面上昇と人口成長の影響への寄与は後で述べる。

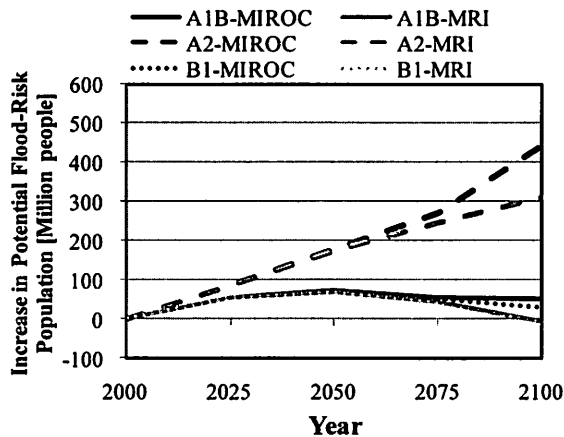


図-3(a) シナリオ別・潜在的水没人口の増加(2000年基準：アジア)

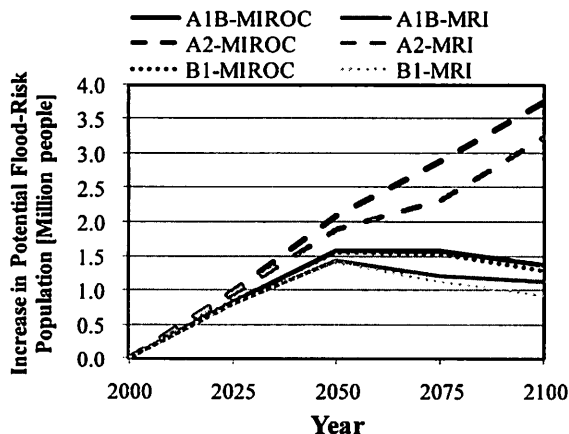


図-3(b) シナリオ別・潜在的水没人口の増加(2000年基準：オセアニア)

同オセアニア(図-3(b))も、2000年時点で約2百万人であった水没域人口が、21世紀中の人口増加が最も多いA2シナリオで2100年では約5百万人弱にまで、約3百万人増加することが推定された。

次に高潮による浸水人口の増加を示したアジアの結果が図-4(a)、オセアニアの結果が図-4(b)である。2000年時点でアジアでは3億5千万人、オセアニアでは約260万人の影響人口から、それぞれ5億人と350万人の増加である。水没人口の増加に比べ、浸水人口の増加の方がより大きくなっていること、気候モデルによる差が小さいことがわかる。他方、シナリオによる傾向の違いは水没人口と浸水人口で同じになっていると言える。

次に浸水人口の増加が、地域の総人口に占める割合を求め、また人口変動と海面上昇の要因別に分離することも試みた。後者は人口を2000年時点に固定しても増加する浸水人口を、海面上昇が要因でおこる増加として、

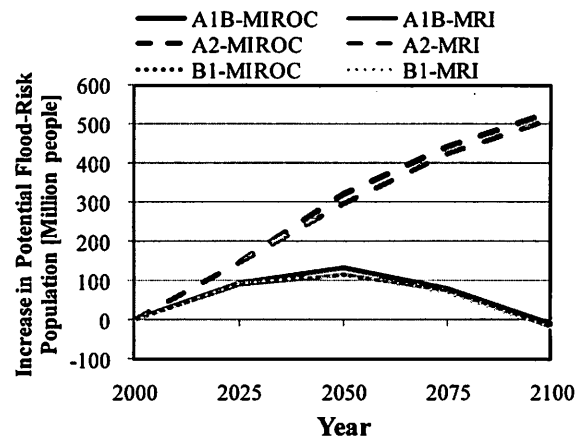


図-4(a) シナリオ別・潜在的浸水人口の増加(2000年基準：アジア)

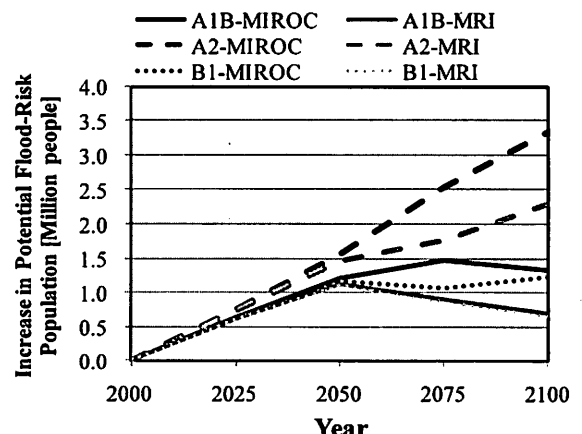


図-4(b) シナリオ別・潜在的浸水人口の増加(2000年基準：オセアニア)

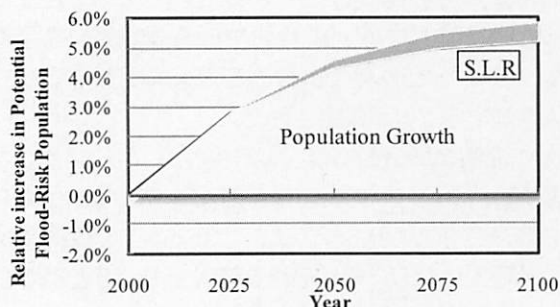


図-5(a) アジアにおける要因別の相対的な潜在的浸水人口の増加 (A2シナリオ)

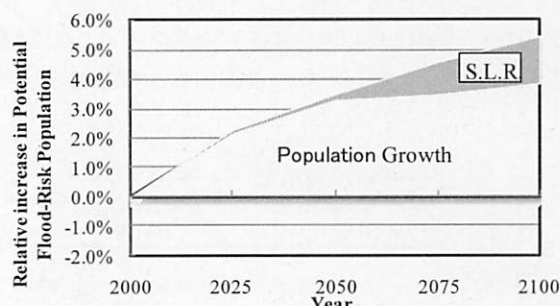


図-5(b) オセアニアにおける要因別の相対的な潜在的浸水人口の増加 (A2シナリオ)

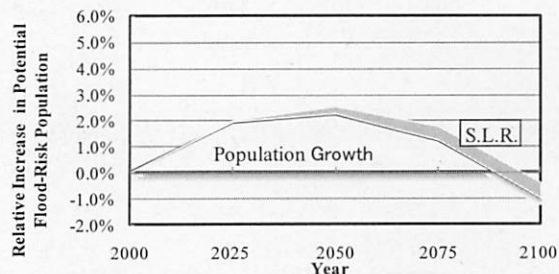


図-5(c) アジアにおける要因別の相対的な潜在的浸水人口の増加 (A1Bシナリオ)

それ以外を人口変動が要因として求めた。結果の例として、図-5(a) にA2シナリオによるアジアの浸水人口、図-5(b) にオセアニアの浸水人口を示す。縦軸には各地域の総人口で除した浸水人口の相対増加を取っている。オセアニアの浸水増加人口の割合がアジアと同程度であることがわかる。アジアでは、人口増加の要因が潜在的浸水人口の増加に大きく寄与している。オセアニアでは、21世紀後半で海面上昇の影響がアジアに比べれば大きく

なっているが、やはり人口増加が大きな要因となる推定結果となった。将来の人口が2050年をピークに減る場合の結果として、A1Bシナリオによる結果を図-5(c)に示す。アジアでは、2100年ころには2000年より総人口が減少することにもない浸水人口も低下する効果と、海面上昇により浸水人口が増加する効果で相殺されている

#### (4) 強く影響を受ける国々

影響の取り上げ方を検討する目的で、2つの視点から強い影響を受ける国と算定された結果を、A2シナリオの2100年の結果を用いて示していく。なお、ここで示す各国の値は地域 (region) の脆弱性評価によるものであり、2章で示した統一のデータを用いて計算されたものである。したがって、複数の国間の相対的な量の大小を示すことには適しているが、1つの国単独での脆弱性評価を実施した場合に比べればその国においての結果の精度は高くない場合があることに注意を要する。また、ツバルなどの極小の島嶼国は60分の弧とした緯度経度メッシュでは表現できないため、結果に含まれていないことにも注意を要する。

まず、潜在的な浸水を被る人口の絶対数の増加(2000年基準)が大きい上位10カ国を表-1に示す。中国、バングラデシュ、ベトナムなどメガデルタ・メガシティを抱える国々が大きな影響を受けることがわかる。次に国内総人口で同人口増加を除した、相対的な人口増加(2000年基準)が大きい上位10カ国を表-2に示す。これは国内で影響を受ける人口率が高い国といえ、モルディブやトンガなど島嶼国も上位にあがっている。地域全体の問題としては絶対的な総数で議論すればよいが、国ごとの問題としては、相対的な影響率で検討することも重要である。

表-1 潜在的浸水人口の増加に関する上位10カ国

| No | Country Name | Increase in Flood-Risk Population(million) |
|----|--------------|--------------------------------------------|
| 1  | CHINA        | 158                                        |
| 2  | BANGLADESH   | 116                                        |
| 3  | VIETNAM      | 77                                         |
| 4  | INDIA        | 60                                         |
| 5  | INDONESIA    | 32                                         |
| 6  | MYANMAR      | 17                                         |
| 7  | THAILAND     | 13                                         |
| 8  | PHILIPPINES  | 12                                         |
| 9  | IRAQ         | 6                                          |
| 10 | MALAYSIA     | 5                                          |

表-2 相対的な潜在的浸水人口の増加に関する上位10カ国  
(ツバルなど小国は評価システムに考慮されていない)

| No | Country Name     | Relative Increase in Flood-Risk Population |
|----|------------------|--------------------------------------------|
| 1  | MALDIVES         | 60%                                        |
| 2  | TONGA            | 39%                                        |
| 3  | BANGLADESH       | 34%                                        |
| 4  | MACAU            | 34%                                        |
| 5  | SINGAPORE        | 31%                                        |
| 6  | VIETNAM          | 30%                                        |
| 7  | BRUNEI           | 22%                                        |
| 8  | FRENCH POLYNESIA | 19%                                        |
| 9  | BAHRAIN          | 17%                                        |
| 10 | MYANMAR          | 16%                                        |

#### 4. 人口増減と経済成長の考察

ある国の経済力は、災害に対する防御力、言い換えれば気候変動に対する適応策を講じる上で重要である。本章ではGDPを考慮して、脆弱性について考察を行う。対象とする国は、前章の4節で挙げた強い影響を受ける国のうち、絶対的な影響も相対的な影響も大きかったバングラデシュ（BA）、影響率が大きかったモルディヴ（MA）、影響率が高い中で経済力のあるシンガポール（SI）の3カ国とした。

図-6は横軸に、前章4節と同様に浸水人口増加数を国の総人口で除した影響率、縦軸に国民一人あたりのGDPを取ったものである。図の右下ほど潜在的な影響率が高いがそれに適応する経済力が低く危険であり、逆に左上は安全であることの概略を示したものである。横軸の0%は2000年の基準値であり、それから25年後ごとにシンボルを付加しており、国民一人当たりのGDPは2100年まで増加するので線上を順に辿ること年代もわかるものである。

Nichollsら<sup>9)</sup>は、海岸の防御シナリオとして、国民一人当たりのGDPが600から2400ドルの場合は中位の防護、2400～5000ドルで高位の防御、5000ドル以上で高度な防御が可能との推察に基づいたシナリオを設定して脆弱性の評価を行っている。図中にもこれら2400ドルと5000ドルのレベルに線を引いている。

シンガポールは既に国民一人あたりのGDPが10000ドルを超えており、防御能力をすでに保持していると考えられる。バングラデシュにおいてA2シナリオでは、2075年まで中位の防御しかできなく海面上昇が進行すれ

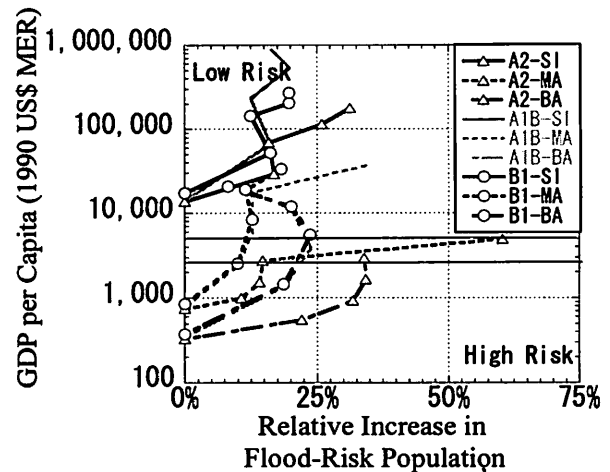


図-6 3ヶ国の相対的な潜在的浸水人口の増加と国民一人当たりのGDPの関係（SI-Singapore, BA-Bangladesh, MA-Maldives）

ば、バングラデシュ国民の30%を超える人々が高潮による浸水の影響を受ける可能性が21世紀の間、続くと考えられる。モルディヴでも2075年まで十分な適応策を保持できないまま海面上昇による影響に対応しなければならないと推定された。他方、A1シナリオでは2075年以降、B1シナリオでは2050年を超えるとモルディヴやバングラデシュでも適応策を取り始めることができるとの推定結果となった。

以上のことから察するに、海面上昇が起こるとしてもそれが顕著になるまえに、人口増加により途上国を中心に沿岸域での浸水の危険度が現在よりも高くなる。その一つの例が、2007年にバングラデシュを襲ったサイクロンSidrによる被害であるともいえる。したがって、賢い適応策としては、21世紀前半は人口増加に対応でき、21世紀後半には海面上昇に適応できる対策であろう。ただし、経済成長が極端に抑制される方策を取ると、上述のA2シナリオにおけるモルディヴやバングラデシュのように、沿岸の災害に対する適応策の導入を遅らすことになりかねないので注意する必要がある。

これらの点からも、A1シナリオグループのように、地域間の格差を縮小し技術交流も活発に行う政策や、それに化石燃料の排出も抑制するB1シナリオが適切と考えられる。ただし、人口変動がシナリオ通りに進まなければ、A1シナリオやB1シナリオでも21世紀末には海面上昇によりアジア・オセアニアの沿岸域で浸水被害の危険性が増加するとも考えられ、不確実性の考慮も必要である。

## 5. 結論

アジア・オセアニア沿岸域における 21 世紀の基本的な脆弱性として SRES シナリオに基づく海面上昇と人口増加による水没、浸水域の増加とそれらを被る人口の増加を、60 分緯度経度メッシュで詳細に解析を進め、定量的に示した。温室効果ガスの排出シナリオにより海面上昇量が異なるが、最悪のシナリオの一つである A2 シナリオで 2100 年に海面が 51cm 上昇した場合には、アジア・オセアニア沿岸を合わせた水没面積と高潮による浸水面積は、それぞれ約 15 万 km<sup>2</sup> と約 94 万 km<sup>2</sup> 拡大する推定結果となった。同影響を被る人口については、それぞれ 3 億 8 千万人と 3 億 5 千万人の増加と大きな影響を引き起こす推定結果となった。被災人口が多い地域はメガデルタ地帯である。また、影響を受ける人口の割合が大きい国には、島嶼国も上位にあがることを定量的に示した。

影響を被る人口の増加には、海面上昇と人口増加の要因が含まれているが、その割合を求めたところ、人口が増加しつづける A2 シナリオでは、人口増加が主要因であり、21 世紀後半になると海面上昇の影響も顕著になることを示した。

沿岸域が受ける影響要因が 21 世紀の前半が人口増加で後半になると海面上昇であるならば、まず人口増加に対応できる沿岸域の防災や管理が必要であり、その対策が後の温暖化・海面上昇の対策にも繋がっていくことが賢い適応策といえる。同様に各国独自の力でも地球環境変化に対する適応策を実施していく上では、途上国の経済成長が特に 21 世紀前半で重要であることも定量的に示した。

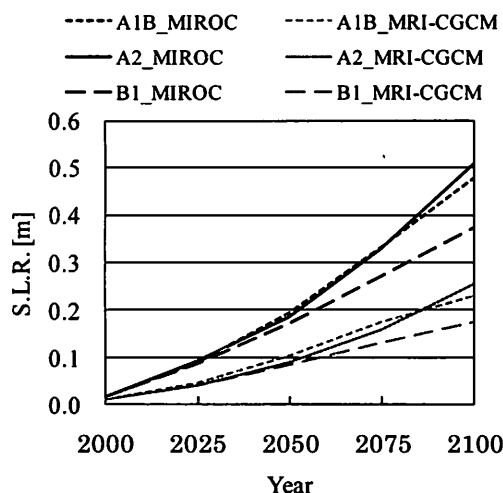
ただし、人口増加や海面上昇のシナリオは、経済や社会状況に依存するため、国際社会の状況で変化する不確実なものであり、それによる影響を受ける沿岸域の人口も不確実性の残る推定結果も得られた。こうした、不確実性は残存するものの、緩和策も含まれているシナリオの全ての結果で負の影響が現われた。地球温暖化を完全に阻止できない限り緩和策とともに適応策を、地球温暖化を阻止できるとしても人口増加に対する適応策を考える必要があると言える。この適応策は、計画から実施まで相当の年月がかかること、そのための費用も非常に大きなものになることは、現気候に対しての日本の海岸防衛基準が未だに目標を完全に達成していないことから十分に考えられる。わずか 1 世紀の間に顕著になる可能性がある現在の地球温暖化・環境問題が、難しいが避けられない緊急の課題に挙げられる理由の一つである。このことから今後、たとえより確実性の高い予測が示される前であっても、緩和策を取りながら、この不確実な推定状況の中でも現れる負の影響、脆弱性の増加を回避していく適応策を、それに要する支出を可能とする経済成長を含めて、見出していくことが必要である。

謝辞：本研究は環境省の「地球環境研究総合推進費 (S-4：温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響評価に関する研究)、代表：三村信男(茨城大学)」と、文部科学省の「21世紀気候変動予測革新プログラム、プログラム統括：文部科学省参与：松野太郎、西岡秀三」の支援により実施された研究成果の一部である。

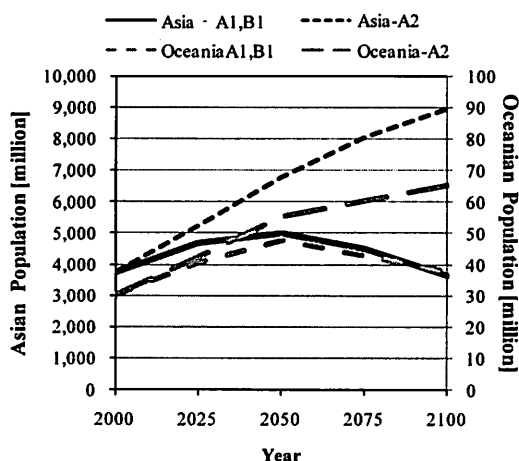
## 付録

付表-1 対象国一覧

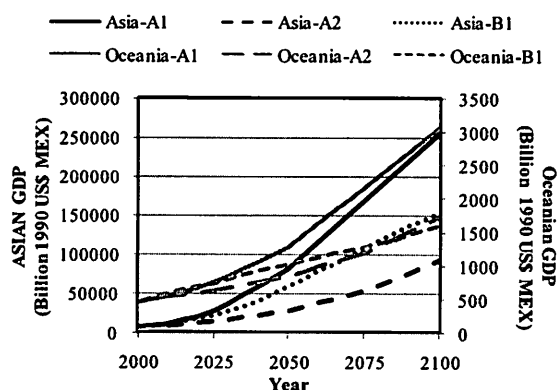
| アジア      |             |          |              |
|----------|-------------|----------|--------------|
| アゼルバイジャン | キルギスタン      | バーレーン    | ラオス人民民主共和国   |
| アフガニスタン  | クウェート       | パキスタン    | レバノン         |
| アラブ首長国連邦 | グルジア        | バングラデシュ  |              |
| アルメニア    | サウジアラビア     | フィリピン    | オセアニア        |
| イエメン     | シリア         | ブータン     | オーストラリア      |
| イスラエル    | シンガポール      | ブルネイ     | サモア          |
| イラク      | スリランカ       | ベトナム     | キリバス         |
| イラン      | タイ          | ベラルーシ共和国 | ケルゲレン諸島（仏領）  |
| インド      | 大韓民国        | 香港       | ソロモン諸島       |
| インドネシア   | 台湾          | マカオ      | タヒチ（仏領ポリネシア） |
| ウクライナ    | タジキスタン      | マリアナ諸島   | トンガ          |
| ウズベキスタン  | 中国          | マレーシア    | ニューカレドニア     |
| オマーン     | 朝鮮民主主義人民共和国 | ミャンマー    | ニュージーランド     |
| パレスチナ    | トルクメニスタン    | モルディブ    | バヌアツ         |
| カザフスタン   | トルコ         | モルドバ     | パプア・ニューギニア   |
| カタール     | 日本          | モンゴル     | フィジー         |
| カンボジア    | ネパール        | ヨルダン     |              |



付図-1 海面上昇シナリオ (GCM結果<sup>6)</sup>) を元に独自の方法で換算)



付図-2 人口シナリオ (CIESINのダウンスケール結果<sup>7)</sup> を元に独自の方法で集計)



付図-3 GDPシナリオ (CIESINのダウンスケール結果<sup>8)</sup> を元に独自の集計)

## 参考文献

- 1) IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and vulnerability, 2007
- 2) Hoozemans, F.M.J., M. Marchand and H.A. Pennekamp: A Global Vulnerability Assessment, Sea-Level Rise, Second Revised Edition, Delft hydraulics, 184p., 1993.
- 3) Robert J. Nicholls, Frank M.J. Hoozemans and Marcel Marchand: Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses, *Global Environmental Change*, 9, S89-S87, 1999.
- 4) Mimura N.: Distribution of Vulnerability and Adaptation in the Asia and Pacific Region, *Global Change and Asia Pacific Coast*, pp.21-26, 2000.
- 5) Hisamichi Nouboka, Nobuo Mimura and Naoki Fukuhara: Vulnerability Assessment for Sea-Level Rise in the Asia and Pacific region, *Asian and Pacific Coasts (APAC) 2007*, pp.770-771, 2007.
- 6) IPCC (Nebojsa, N and Rob S ed.): Special Report on Emission Scenarios, Cambridge University Press, 612p., 2000.
- 7) Yukimoto, S. and Noda, A.: Improvements of the Meteorological Research Institute Global Ocean-Atmosphere Coupled GCM (MRI-CGCM2) and Its Climate Sensitivity, *CGER's Supercomputer Activity Reports*, Vol.10, CGER-1054-2002, CGER/NIES, pp.37-44, 2001.
- 8) Hasumi H., and Emori E.: K-1 Coupled GCM (MIROC) Description, K-1 Technical Report, CCSR/NIES/FRCGC, 2004.
- 9) Center for International Earth Science Information Network (CIESIN): Country-level Population and Downscaled Projections based on the B2 Scenario, 1990-2100, 2002. [digital version]. Palisades, NY: CIESIN, Columbia University. Available at <http://www.ciesin.columbia.edu/datasets/downscaled> (2009-01 参照).
- 10) Center for International Earth Science Information Network (CIESIN): Country-level GDP and downscaled projections for the SRES A1, A2, B1, and B2 marker scenarios, 1990-2100, 2002. [digital version]. Palisades, NY: CIESIN, Columbia University. Available at <http://www.ciesin.columbia.edu/datasets/downscaled> (2009-01 参照).
- 11) 信岡尚道: 熱帯低気圧による世界の高潮分布と沿岸域の脆弱性評価, 海岸工学論文集, 投稿中.
- 12) Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe: Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581, 2000. Nao99B
- 13) Myers, V.A. Characteristics of United State hurricanes Pertinent to levee design for Lake Okeechobee, Florida, Hydroment. Rep. No.32, *U.S. Dept. of Commerce, Weather Bureau*, Washington, D.C., 106pp.
- 14) 本多忠夫・光易恒: 水面に及ぼす風的作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93., 1980.
- 15) 例えば, 後藤智明: 遠地津波の外洋伝搬計算, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.1, pp.3-19, 1991.
- 16) 例えば, 高橋亮一, 棚町芳弘: 差分法, 計算力学と CAE シリーズ, 培風館, 323p., 1991.

- 17) Japan Meteorological: Tropical Cyclone Information, Analysis Archive  
<http://www.jma.go.jp/ec/typh/> (2008-10 参照)
  - 18) NOAA: International Best Track Archive for Climate Stewardship, (IBTrACS), <http://www.ndbc.noaa.gov/oa/ibtracs> (2009-01 参照)
  - 19) 例えば, Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki and A. Noda : Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20-km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 259-276, 2006.
  - 20) GPW ver.2 (CIESIN) : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw> (2004-06 参照)
- (2009. 3. 9 受付)  
(2009. 6. 3 受理)

## Projection on Basic Vulnerability in the 21st Century along Asian and Oceanian Coastal Zone

Hisamichi NOBUOKA<sup>1</sup>, Nobuo MIMURA<sup>2</sup> and Makoto TAMURA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University

<sup>2</sup>Center for Water Environmental Studies, Ibaraki University

<sup>3</sup>Institute for Global Change Adaptation Science, Ibaraki University

In this study, potential submergence areas and flood areas due to sea-level rise and storm surge along all coasts in Asia and Oceania were projected between the year of 2000 to 2100 at 25 years interval for a basic assessment of vulnerability. A numerical simulation and an ocean tide model were employed to calculate the storm surge heights and astronomical tide level along the coast in the high resolution in 60-arc seconds. Sea-level rise calculated by general circulation model of atmospheres according to SRES scenarios was employed for one of the impacts. The increase of potential affected populations was also calculated in these affected areas including natural population growth according to SRES scenarios. These calculated quantitative results showed that the increase in the affected population in Asia and Oceania will become over 350 million people. Natural population growth in first half of the 21st century will increase in the affected population much more than sea-level rise. The 'wise adaptation' against the increase impacts of population growth and sea-level rise were discussed in consideration to global economic growth.