

## 地球温暖化による海面上昇とバングラデッシュの洪水

柳井 浩

## 1. はじめに

地球の温暖化による海面の上昇は、あるいは50cm、あるいは3mといわれる。その時期も、数十年後とも、また、22世紀ともいわれる[1],[2],[3],[5],[6],[8]。このように予測が不確かなのも、大きな地球とそれを取り巻く大気、そして、その中での水のバランスに関する大ざっぱなモデルによる見積りに頼らざるを得ないのだから無理もない。とはいえ、程度の差こそあれ、温暖化の傾向を完全に否定することもできないし、その原因を過去2世紀にわたるエネルギーの大量消費とCO<sub>2</sub>の大量放出に求めるのも、それなりに根拠のあることのように思える。いずれにせよ、この問題の正確な把握と適切な対策を考える必要がある。

現在の時点における我々の科学的知識は限られたものではあるが、その限られた知識の中でも、この問題をさまざまな角度から照らし、それらを比較検討して、我々の理解を少しでも正しいものに近づけてゆく努力が求められよう。——いかえれば、さまざまな科学分野からのさまざまなモデルとシミュレーションの提示が望ましい。

海面上昇の問題は、低地の人々、また低地を多く持つ国々にとっては深刻である。それが現実のものとなれば、人々は居住の場所を失うばかりでなく、生産の場所である農地も失う。特に、経済的に発展途上にある国々にとってはまさに死活問題である。

バングラデッシュはそのような国の典型である。この国の約144,000km<sup>2</sup>の国土の大部分が海拔30m以下の、低く、広大な平野であり、ここにガンジス、ブラマプートラ、メグナの大河川が注ぎ込む。雨期には、上流から大量の河水が流入するばかりでなく、時として、

サイクロンによる歴大な降雨がある。さらに、サイクロンに伴う低気圧は、ベンガル湾の海面を7-10mも上昇させるといわれ、バングラデッシュの平野は水はけの悪い遊水池と化してしまう。このため、この国の国土の実に60%以上が水に覆われ、悲惨な結果をもたらすのも、歴史的に見て稀ではない。

このような所に、さらに海面上昇が追い打ちをかければ、どのようなことになるであろうか？ 筆者らは以前に、簡単な微分方程式モデルを構成し、バングラデッシュの洪水の問題について少しく考察してみたことがある[7]。本稿ではこのモデルに基づいて海面上昇の効果がどれほどのものになるのかを見積ってみた。

ところで、この問題に対しては、当然のことながら、英連邦の科学者たちも興味を持っており、Commonwealth Secretariatの報告書[3]には、1mの海面上昇があれば、バングラデッシュの国土の16%が失われるものという見積りがなされている。本研究の結果からすれば、この値は大きすぎるように見える。この数字は、報告書[3]の執筆者の1人でもあるMahtab[4]によるものということであるが、この文献には、図書館のネットワークを通じても到達できなかったので(脚注1)、どのようなモデルを用いたのか、また、水没する面積の中に、現在でも河川や沼沢である地域が含まれているのか否かも不明である。さらに、報告書[3]でも、詳細な地形図が得られないために見積りの精度に限界があるとしている。

しかし、この点は、本研究においても全く同様である。したがって、本研究も、結果の数値を主張するというよりは、見積りの方法の提案とそれに基づく見積りの例と考えて欲しい。このように、詳細な地形が得

脚注1 地球温暖化や海面上昇とその影響に関する文献は、わが国のものでだけでも数多い。多くの人々の重大関心事だからでもあろうが、中には政治的意図の見え隠れするものもある。そうでなくても、引用が多く、“孫引き”や“曾孫引き”などはましな方である。原典にたどりつき、モデルの仮定を知ることが困難なものも少なくない。

表1

乾期 (11~3月)	$5.36 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{月}$
小雨期 (4~5月)	$14.95 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{月}$
雨期 (6~10月)	$37.34 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{月}$

られないことは、洪水によって、年々地形が変化するというバングラデッシュの状況からして致し方のないことでもあろうが、人工衛星などを用いた精度の高いメッシュ・データが望まれる所でもある。

## 2. モデル

まず、詳細については論文[7]を参照していただくことにして、モデルの概要を述べておく。バングラデッシュの水位を $x(\text{m})$ 、時刻を $t$ とすると、水位の変化が

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p(t) - f(x, y)}{S(x)} \quad (1)$$

という微分方程式に従うというのがこのモデルである。ここに、

$p(t)$  : 時刻 $t$ におけるバングラデッシュへの単位時間当たりの水の流入量  
(上流からの流入+降雨)

$S(x)$  : 地形-海拔 $x(\text{m})$ 以下の地域の面積、  
また、

$f(x, y)$  : バングラデッシュの水位が $x(\text{m})$ で、海面の高さが $y(\text{m})$ であるときの単位時間当たりの水の流出量

である。

これらの諸量のうち、水の流入量 $p(t)$ は年々変化するものではあるが、標準的なものとして、表1のような場合を考え、さらにサイクロン上陸時には1カ月あたりにして

$$64.88 \times 10^{10} \text{ m}^3$$

の流入量があるものとした。

また、地形 $S(x)$ としては、地図からデータをとって作った近似式

$$S(x) = \begin{cases} 2.172 \times \sqrt{x_0} \times 10^{10} (\text{m}^2) & (x \leq x_0) \\ 2.172 \times \sqrt{x} \times 10^{10} (\text{m}^2) & (x > x_0) \end{cases} \quad (2)$$

$$x_0 = 1.6$$

を用いることにした。 $x \leq x_0$ に対応する部分は、いわば常に冠水している河川、湖沼等で、これが国土の20%になるという推定に基づくものである。(脚注2) (図1)。

さらに、流出量としては

$$f(x, y) = 12.5 \times 10^{10} \times \text{sgn}(x - y) |x - y|^{0.3} \quad (3)$$

という関数を用いたが、この式の導出の詳細について

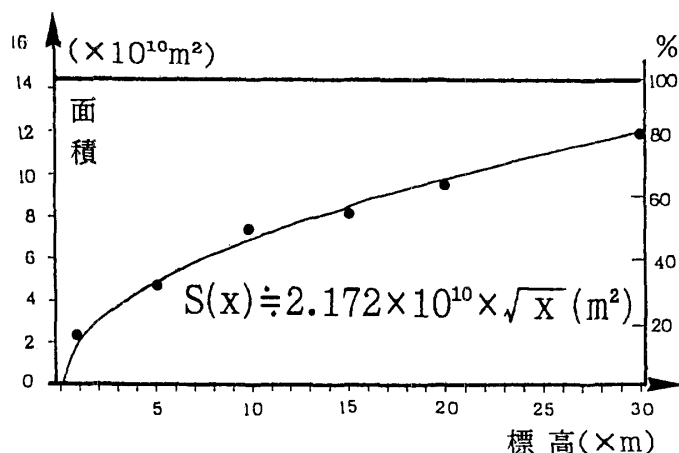


図1 バングラデッシュの地形

は論文[7]を参照されたい。

さて、海面の高さ $y$ であるが、通常はゼロ、サイクロン上陸時には7mとして、シミュレーションを試みた結果に基づいて、バングラデッシュにおける洪水とその対策について論議したのが先の論文[7]であった。本研究の問題は、この海面の高さの上昇が“定常的な”ものになる場合の影響を見積ることである。

## 3. シミュレーションとその結果

現在の海面の高さを0mとして、これが、1,2,3mと上昇した場合の冠水率(冠水した面積の国土に対する割合)の推移を2年間にわたって追跡した結果を示したのが図2および図3である(シミュレーションでは、初期条件の影響を除くため、これに先立つ2年分の追跡をしている)。図2は通常年を、図3は1年目にサイクロンの上陸を想定したものである。

これらを見れば、海面の上昇とともに冠水率が増加する様子が分かる。乾期になってようやく水の引くような標高の低い地域では、乾期の終わりにおける増加の割合がピーク時に比べて著しい。雨期における冠水率が頂点に達する頃の増分が約1.5%であるのに対し、乾期の終わりにおける増分は5~7%に達する。また、図4には第1年目の平均冠水率が図示されている。

脚注2 論文[7]では $x_0=1.0$ としたものを、ここでは、修正して $x_0=1.6$ とした。もともとこの値はモデルにおいて、常に冠水している国土の部分に対応するものであるが、現実のバングラデッシュの低地には、マングローブに覆われた海岸地帯や、潮の干満で浮き沈みする小島などが多く、確定しがたい。一方、シミュレーションでは $x_0=1.0$ とすると、 $x$ の値の小さい部分が数値解析的に極めて不安定になり、丸めの誤差を拾いやすく、海面の高さの影響を比較するのに支障を来す。それにもかかわらず、 $x_0$ は $x$ の値の大きい部分にはあまり影響がない。これが修正の理由である。

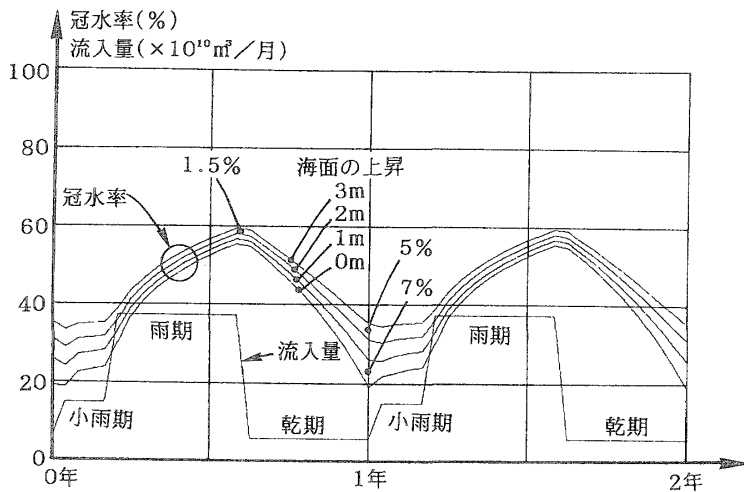


図2 冠水率の推移, サイクロンのない場合

る。この図に見るように、平均冠水率は1mの海面上昇あたり約3%増加することが見込まれる。

見方を変えれば、海面上昇1mにつき、これまで洪水に見舞われることのなかった土地は1.5%、乾期になれば何とか水が引くというような土地は5~7%失われることになる。特にサイクロン来襲後の水の“引き”の悪さは、そうでなくても著しいものであるが、海面上昇はこれに拍車をかけることになる。

また、図2および図3を比較すれば、3mの海面上昇は、通常年であっても、サイクロンの襲来とほぼ同じ効果を示すことが分かる。

#### 4. 大ざっぱな見積りととの比較

このシミュレーションによる数値結果の妥当性を評価するために、さらに別の、大ざっぱな見積りを試み、これと比較してみる。海面が $\delta(m)$ 上昇することは、大ざっぱにいて地面が $\delta(m)$ だけ沈下することと見なせよう。現時点で標高 $x(m)$ 以下の土地の面積は

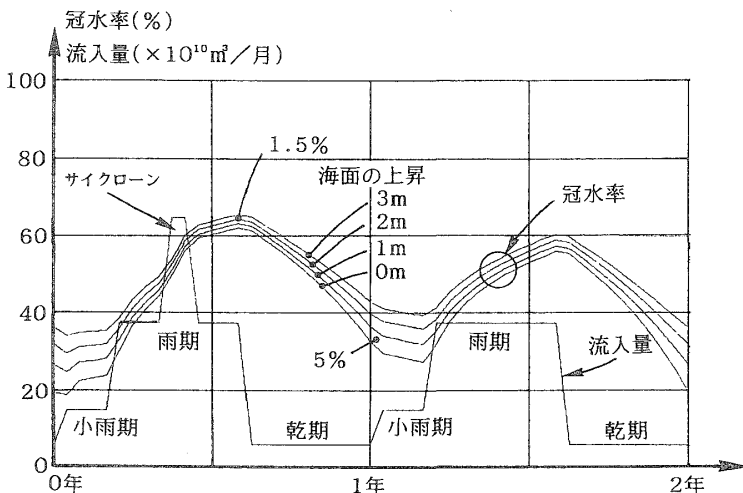


図3 冠水率の推移, サイクロンのある場合

$S(x)$ で表されるから、新しい地形を $S^*(x)$ とすれば、

$$S^*(x) = S(x + \delta) \approx S(x) + S'(x)\delta \quad (4)$$

となる。そこで、標高 $x(m)$ まで冠水すれば、冠水部分の面積は従来より $S'(x)\delta$ だけ増加することになる。(2)式の $x > x_0$ の場合についてこれを計算すれば、

$$\begin{aligned} S'(x)\delta &= \frac{2.172 \times 10^{10}}{2\sqrt{x}} \delta \\ &= \frac{(2.172 \times 10^{10})^2}{2S(x)} \delta \end{aligned} \quad (5)$$

さらに $S(x)$ を国土全体の面積で割った冠水率を

$$w(x) = \frac{S(x)}{14.4 \times 10^{10}} \quad (6)$$

とすれば、 $\delta(m)$ の海面上昇に対する冠水率の増加は

$$w'(x)\delta = \frac{1}{2} \left( \frac{2.172}{14.4} \right)^2 \frac{1}{w(x)} \delta \quad (7)$$

となり、これをグラフに画いたのが図5である。すなわちこの図で、現在の海面の高さにおける、ある時期の冠水率を横軸にみれば、それが、1mの海面上昇の結果どのくらい上昇するのかを読みとることができる。その値を見れば、図2および図3のそれに充分近い値になっており、同じ地形データに基づくという条件のもとではあるが、シミュレーションの結果を傍らから支持しているものと考えられる。それと同時に、多量の水の流入と降雨とともに、扁平なバングラデッシュの土地の形状が問題に大きく影響していることもよく分かるであろう。

#### 5. おわりに

くりかえすが、海面上昇の予測は不確かなものである。バングラデッシュの地形に関するデータの精度も低い。また、本稿のモデルも大ざっぱなものである。特に、海面上昇が気候そのものに与える影響が考慮されていない。海面上昇によって、降雨量やサイクロンの発生率の増減などが影響を受けることも十分に考えられることである。しかし、その見積りが得られれば、それを、このモデルに取り入れることは可能である。他の分野からの研究がまたれる所である。

ともあれ、本稿のシミュレーションの結果だけでも、海面上昇が現実のものとなったと

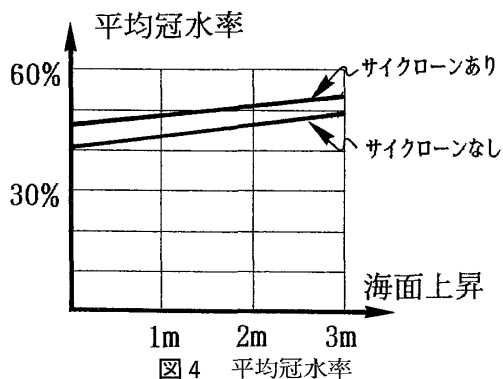


図4 平均冠水率

きの事態の深刻さを想像するには充分であろう。

なお本研究は、研究部会「広域インフラストラクチャーとOR」（主査：高森 寛教授）の研究の一環として行ったものである。この問題について一緒に討議して下さった部会の方々、また、この部会を支援して頂いている日本 GIF 研究財団に感謝の意を表します。

#### 文献

- [1] Hoffman, J.S. "Projecting future sea level rise: methodology, estimates to the year 2100, and research needs" U.S. Environmental Protection Agency, 1983
- [2] "Glaciers, Ice sheets, and sea level: effect of CO<sub>2</sub>-induced climate change" Report of a workshop held in Seattle, Washington, Sept. 13-15,

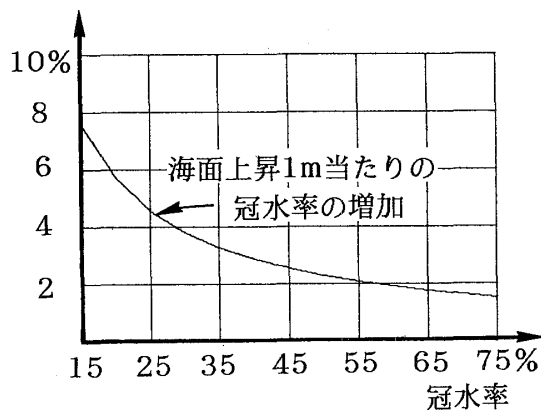


図5 冠水率とその増加

1984", U.S. Dept of Energy

- [3] Commonwealth Secretariat "Climate Change: Meeting the Challenge" Report by a Commonwealth Group of Experts, 1989, London, UK.
- [4] Mahtab, F.U. "Effect of Climate Change and Sea Level Rise on Bangladesh" Report for Commonwealth Secretariat 1989
- [5] IPCC 第2作業部会編集, 西岡 秀三監訳「地球温暖化の影響予測」, 中央法規, 1992
- [6] Titus, J.G. & V.K. Narayanan "The probability of Sea Level Rise" U.S. Protection Agency, 1995
- [7] 山重裕之, 柳井 浩「バングラデッシュの洪水に関する微分方程式モデル」オペレーションズ・リサーチ, 1996年4月号, pp.222-227
- [8] 佐和 隆光「地球温暖化を防ぐ」岩波新書, 1997