

46. 温暖化影響評価のための高潮氾濫域の簡易推定法

SIMPLE METHOD TO PREDICT FLOODED AREAS OF STORM SURGES FOR THE ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS

白岩淳一*・三村信男**

Jun-ichi Shiraiwa, Nobuo Mimura

ABSTRACT; Damages of typhoon-induced storm surges would become more severe. As level flooding model is used in the past prediction of the flooded areas of storm surges, the areas and population at risk tend to be overestimated. In the real situation, floods meet resistance of roughness on the land such as land forms, vegetations and buildings to form a slope of the penetrating water surface. In this study, storm surges and resultant floods over the land are estimated by long wave models to examine the effects of typhoon parameters, land form, and land roughness. The conditions examined are; typhoon parameters such as central pressure, propagation speed, and incident angle to the coast line; and land parameters such as slope and roughness. A systematic relationship is obtained between the flooding distance and the parameters. This result can be used to improve the accuracy of the flooded areas for the regional and global estimates.

KEYWORDS; storm surge, flooded area, long wave model, impact assessment, climate change

1. はじめに

温暖化に伴う海面上昇によって台風の高潮災害が激化する可能性が高い。そのため、国別、アジア・太平洋地域及び全球で海面上昇と組み合わせた高潮氾濫の推定が行われてきた（たとえば、小坂慎，2002）。しかし、地域や全球を対象にした従来の高潮氾濫域推定では、レベル浸水モデルが用いられてきたため、氾濫域や影響人口が過大評価される傾向にあった。そこで本研究では、長波理論に基づいて高潮水位および遡上計算を行い、台風のパラメタ、地形・地表粗度などの条件と氾濫域の大きさとの関連を検討した。

本研究での高潮計算は従来開発されたモデルによっており、水深の深い領域では線形長波理論、水深の浅い領域では非線形長波理論を用いる。高潮計算で設定した条件は、①中心気圧が 900, 930, 960 (hPa) の 3 通り、②台風の進行速度が 10, 50, 90 (km/h) の 3 通り、③台風経路を海岸線に対して 0, 45, 90° 入射 (0° のみ 3 通り) の 5 通りである。遡上計算では台風条件、陸上勾配、陸上の粗度係数を変化させた。陸上粗度を定める市街化率を 0, 2, 10, 20% の 4 通り、陸上勾配を 1/100, 1/1000 の 2 通りに変えて計算を行い、氾濫域（遡上距離）の大きさとの関連性を検討した。

2. 高潮水位計算モデル

高潮のように波長の長い波の運動は、浅水長波理論によって表される。今回の高潮計算では既存のモデルを用いて、以下に示すように、水深の深い領域では線形長波理論を、水深の浅い領域では非線形長波理論を用いて計算を行った（後藤智明・小川由信，1982；東海大学工学部土木工学科，1997；小島，2001）。また、台風の気圧分布には、Myers の理論を用いた。

* 東北大学大学院土木工学専攻 Graduate School of Engineering, Tohoku University, ** 茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター Center for Water Environment Studies, Ibaraki University

非線形長波理論による高潮の支配方程式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u(h+\eta)) + \frac{\partial}{\partial y}(v(h+\eta)) = 0 \quad \cdots(1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right) = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho}(\tau_{xx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \quad \cdots(2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho}(\tau_{yy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right) \quad \cdots(3)$$

ここで、 M, N はそれぞれ x, y 方向の流量、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 η は水位、 h は静水深、 D は全水深、 f はコリオリ係数($=2\omega \sin \phi$, ω :地球自転の角速度、 ϕ :緯度)、 p は圧力、 A_h, A_v は水平および鉛直渦動粘性係数である。

線形長波理論による高潮の支配方程式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \cdots(4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho}(\tau_{xx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \quad \cdots(5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho}(\tau_{yy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right) \quad \cdots(6)$$

台風モデル：気圧分布は以下の Myers の式を用いた。

$$P(r) = P_c + \Delta P \cdot \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad \cdots(7)$$

ここで、 $P(r)$ は r 地点における気圧、 r は台風中心からの距離、 P_c は台風中心の気圧、 ΔP は台風の中心示度、 r_0 は台風半径である。

3. 遡上計算モデル

陸上に氾濫した高潮のような長波は、水面勾配を持って内陸に侵入していく。こうした陸上での遡上は津波や高潮を対象にして研究されてきた。氾濫水の水面勾配は、陸上の凹凸による抵抗によって変化する。もし、樹木が密生していたり、市街地の建物が密集していれば、先端付近の水面勾配は大きくなるであろう。これらの要素は流体力学的には、水流に対する粗度としてとらえることが出来る。本研究では、浅水理論による遡上計算である今村(2002)のモデルを用いて計算を行った。

遡上計算の支配方程式を以下に示す。式(8)は質量保存を表す連続式であり、式(9)は運動方程式であり、式(8)を用いて遡上水位計算を、式(9)によって流量の計算を行う。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \cdots(8)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right) + gD \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad \cdots(9)$$

家屋の影響を考慮するために、油屋・今村(2002)の合成等価粗度モデルを用いて計算を行った。合成等価粗度 n は以下のように表せる。

$$\cdots (10)$$

$D=4\text{m}$, $C_D=4$, $k=11\text{m}$ を用いて計算している.

4. 計算条件

(1) 高潮計算条件

高潮計算は、台風条件を以下のように変化させて行った。

①中心気圧を 900, 930, 960(hPa)の3通り, ②速度を 10, 50, 90(km/h)の3通り, ③経路を図1で示すように 0, 45, 90° 入射 (0° のみ3通り) の5通りを組み合わせ, 計17通りである. 海域は領域を2つに分けて計算を行い, 格子間隔をそれぞれ 2000m, 1000m とした. 海岸線は直線に設定した.

(2) 遡上計算条件

遡上計算は前述したように、台風の条件、陸上勾配、粗度を変化させて行った。今回は基本となる地表粗度を 0.050 として、①台風条件 17 通り、②市街化率を 0, 2, 10, 20% の 4 通り（合成等価粗度にして、それぞれ 0.050, 0.070, 0.125, 0.180）、③陸勾配を 1/100, 1/1000 の 2 通りを用いて計算を行い、遡上距離との関係を検討した。海岸線長は 503km で、格子間隔は 100m である。高潮水位データは線形近似し、格子間隔 100m に変換した。

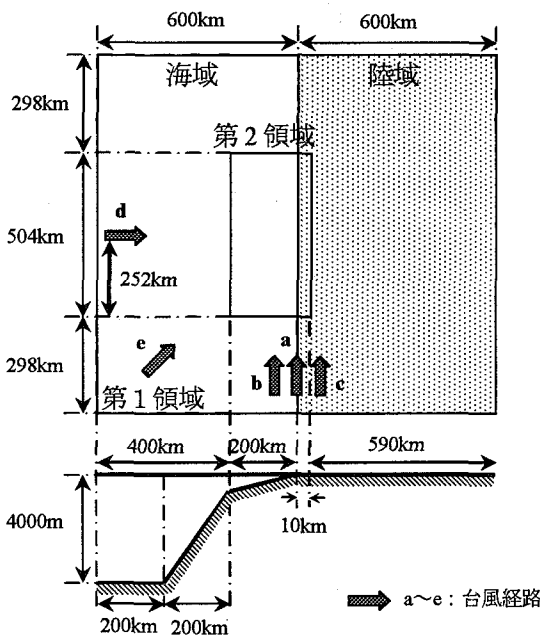


図1 高潮計算領域

5. 計算結果および考察

5.1 遡上距離の傾向

計算された氾濫水位データを用いて氾濫経時変化グラフを作成した。図2はその一例で960hPa、海岸線に45°入射した台風による氾濫域である。これらを用いて氾濫状況の検討を行い、次の結果を得た。

(1)台風の進行速度と遡上距離：進行速度が速ければ速いほど遡上距離が大きくなる。これは、台風の風速が「傾度風」+「進行速度」であることから、台風の進行速度が速いほど風速も強くなるため、風の吹き寄せ効果が大きくなるためである。

(2)入射角度と遡上距離：より垂直に近い入射をした台風がもっとも大きな遡上をもたらす。つまり、海岸線
上を進む台風は広範囲型の、海岸線に直角で入射する台風は一点集中型の高潮をもたらすことがわかる。

5.2 氾濫水面勾配の傾向

計算結果を用いて、台風速度、台風入射角度と水面勾配との関連性を調べた（図3、図4）。

(1) 台風の進行速度と水面勾配：台風の進行速度が増すにつれて水面勾配が増す。台風速度が遅い場合水面勾配に差はなく、速いほど条件ごとの水面勾配差が大きくなっている（図3）。高潮は津波と違い、水位上昇が遅い（速度の遅い台風の場合は、周期が数時間になる）ため、高潮水位の上昇率と氾濫水位の上昇率が等しい場合には、水面勾配がつきにくいと考えられる。

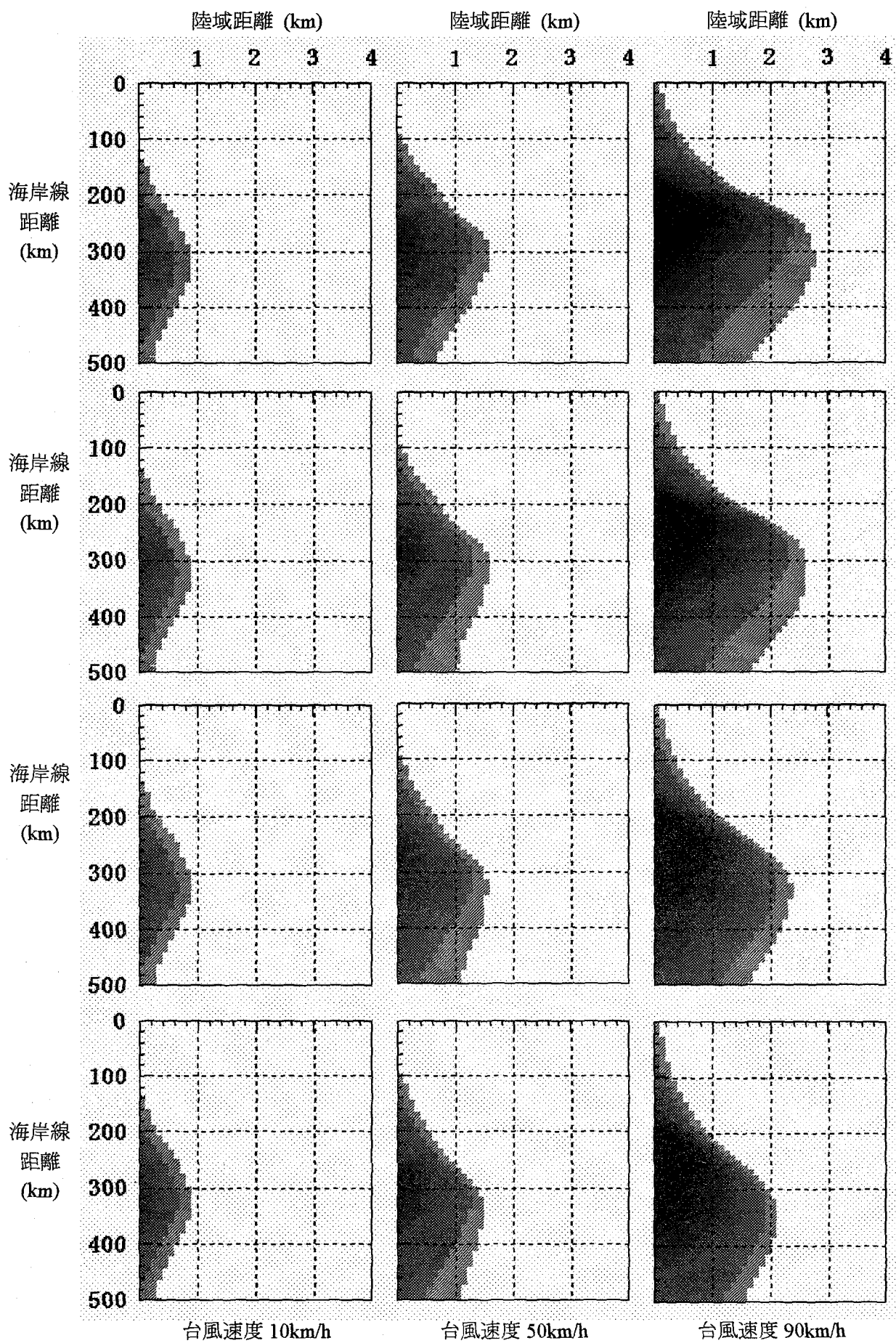
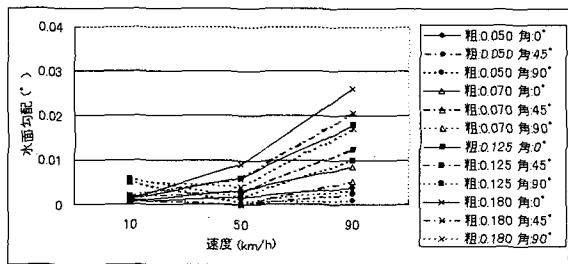
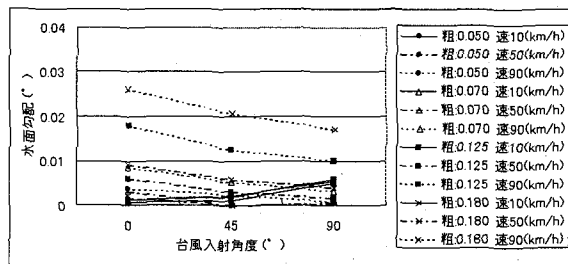


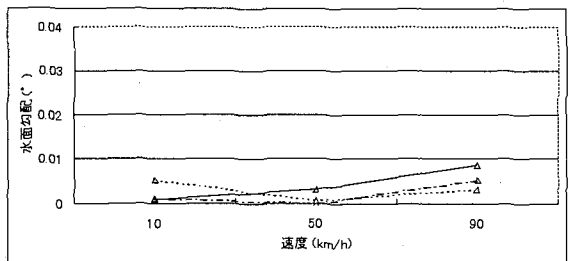
図 2 氾濫水位の変化グラフ (台風中心気圧 : 960hPa, 経路 : e)
(上から粗度係数 0.050, 0.070, 0.125, 0.180)



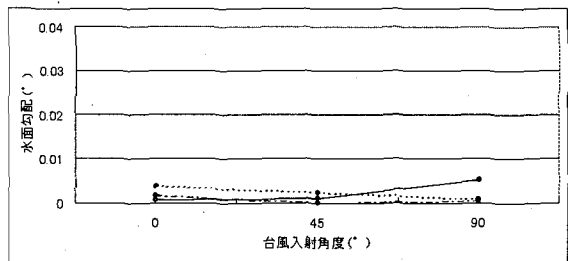
全ケース



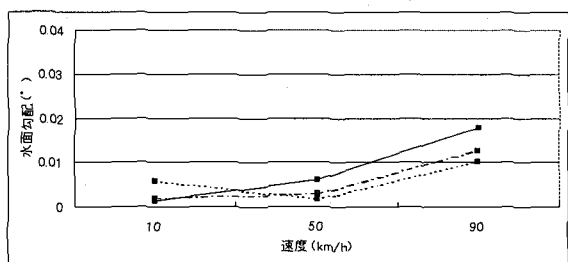
全ケース



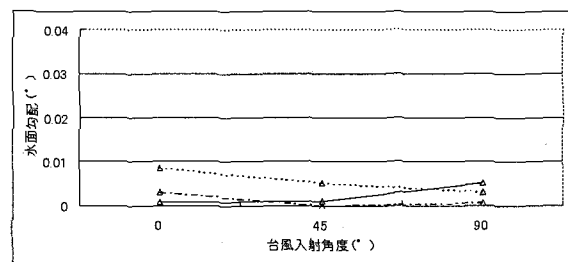
粗度係数 0.050



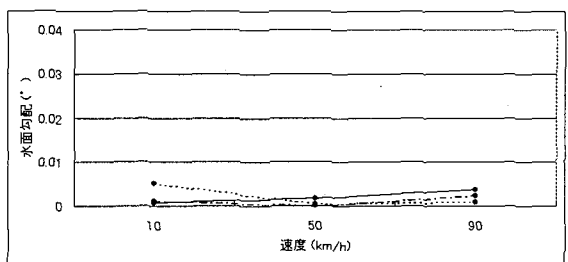
粗度係数 0.050



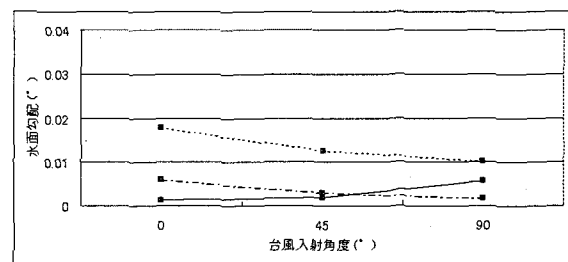
粗度係数 0.070



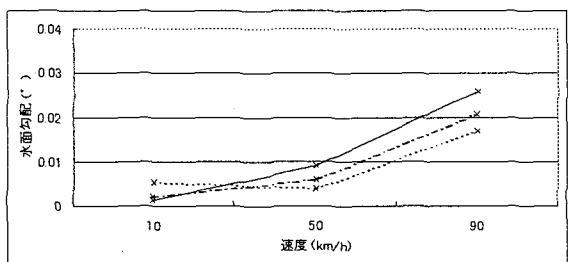
粗度係数 0.070



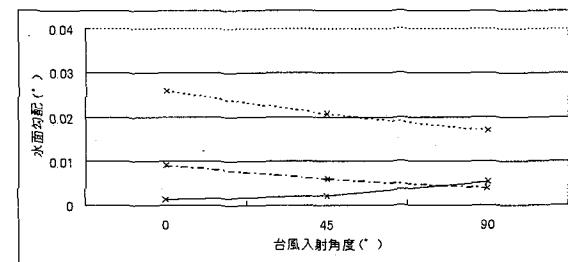
粗度係数 0.125



粗度係数 0.125



粗度係数 0.180



粗度係数 0.180

図3 台風進行速度と水面勾配の関係 (960hPa)

図4 台風入射角度と水面勾配の関係 (960hPa)

(2)台風の入射角と水面勾配：台風の入射角が垂直に近づくにつれて、水面勾配は小さくなっている（図 4）。これは、台風の入射角が垂直に近いほど、外力を受ける時間が長いためであると考えられる。すなわち、垂直に入射する台風は、一地点に外力を与え続けるため、陸上の氾濫に対して十分必要な時間を与えることになる。

(3)陸上勾配と水面勾配：陸勾配が大きいと水面勾配は生じない。陸上の勾配が大きいと氾濫が完了するまでの時間が短い。そのため、陸の勾配が急であると水面勾配は生じにくいことになる。以上のように、水面勾配と高潮の要因との間に相関が見いだされた。

こうして求められた氾濫水面勾配 θ を用い、高潮水位 Z に対する遡上距離 X を算定することができる。

$$X = \frac{Z - HZ}{\tan \theta} \quad \cdots (11)$$

ここで、 HZ は静水深(標高)である。

6. 結 論

本研究では、高潮水位計算モデルおよび遡上計算モデルを用いて高潮氾濫計算を行い、台風・地形・地表粗度との関連性を検討した。高潮計算で設定した条件は、中心気圧、台風の進行速度、台風の海岸線に対する入射角度である。遡上計算では台風条件、陸上勾配、陸上の粗度係数（市街化率）を変化させ、氾濫域（遡上距離）の大きさとの関連性を検討した。主要な結論は、以下の通りである。

- 1) 台風の進行速度が速いほど遡上距離が大きくなる。
- 2) 台風の入射角が海岸線に垂直に近づくほど高潮の遡上距離が大きい。
- 3) 台風の進行速度が増すにつれて水面勾配が増す。台風速度が遅ければ、他の条件による水面勾配の差がなく、速いほど条件ごとの水面勾配差が大きくなる。
- 4) 台風の入射角が垂直に近づくにつれて、水面勾配は小さくなる。
- 5) 陸勾配が大きいと水面勾配は生じない。

これらの結果を系統的に図にまとめたことによって、水面勾配が高潮氾濫に及ぼす要因と相関があることを確認し、より現実的な高潮氾濫域を推定する根拠が得られた。また、簡便に高潮水位から最大遡上距離を算定することが可能になった。今後、この成果を、国別、アジア・太平洋地域及び全球で海面上昇と組み合わせた高潮氾濫の予測に生かしていきたい。

本研究を行うにあたり、東北大学土木工学専攻今村文彦教授、九州共立大学土木工学科小島治幸教授には計算法を教えて頂き計算プログラムを提供して頂いた。また、本研究は高橋産業経済財団研究助成（三村信男）で実施された。これらのご援助に対して心から感謝する。

参考文献

- 1) 油屋貴子・今村文彦（2002）：合成等価粗度モデルを用いた津波シミュレーションの提案，海岸工学論文集，第 49 巻，pp276-280
- 2) 小坂慎（2002）：海面上昇・異常気象の地球規模脆弱性評価，茨城大学修士学位論文
- 3) 小島治幸（2001）：多層レベルモデルによる津波・高潮計算プログラム，SURGE10B.FOR，189p
- 4) 後藤智明・小川由信（1982）：Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法，東北大学土木工学科資料，68p
- 5) 総合科学技術会議環境担当議員，内閣府政策統括官(科学技術製作担当) 共編（2003）：地球温暖化研究の最前線，財務省印刷局 発行，141p.
- 6) 東海大学工学部土木工学科（1997）：津波・高潮数値計算プログラム・マニュアル，東海大学工学部土木工学科資料，50p