

周防灘沿岸域における海面上昇による 浸水ポテンシャルの推算

INUNDATION POTENTIAL DUE TO STORM SURGE AND SEA LEVEL RISE
ALONG THE COASTS OF THE SUO SEA.

土持章¹・小島治幸²

Akira TSUCHIMOUCHI and Haruyuki KOJIMA

¹ 学生会員 九州共立大学大学院 工学研究科 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

² 正会員 工博 九州共立大学 工学部土木工学科 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

Global warming and its accompanying sea level rise will be serious issues in the future. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a global average sea level rise of 9cm to 88cm is projected for 1990 to 2100 and a steady increase of sea level for all of the scenarios considered is expected. In the coast regions, coast disasters caused by storm surge coupled with sea level rise are likely increased. To examine adaptation strategies against the increased coastal hazards, it is important to understand the characteristics of storm surge events. The aims of this study are to determine the most dangerous typhoon conditions in the Suo sea, to compute the maximum storm surge height, and to estimate the possible inundated areas by using GIS.

Key Words: Storm surge, numerical analysis, sea level rise, coastal flooding, GIS

1. はじめに

将来, 地球温暖化による気温変化とそれに寄因する海面水位の上昇が起こることが予測されている。全地球的にみて地球温暖化の原因とされているのは, 化石燃料使用による二酸化炭素, メタン, オゾン, 亜酸化窒素, フロンなどの排出である。地球温暖化問題に対処する国際的な組織である IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) が, 2001 年にまとめた第 3 次評価報告書¹⁾によると温室効果ガスの 6 種類の排出シナリオに基づき気温変化は, 1990 年~2100 年の間で全地球平均で 1.4℃~5.8℃の気温上昇が予想されている。海面水位の変化予測は, 図-1 に示すように 1990 年~2100 年の間で全地球平均 9cm~88cm の海面上昇が予想されている。温室効果ガスを一番抑えたシナリオでも, 他のシナリオ同様に, 海面上昇は一樣に起こる結果となっている。このため, 地球温暖化とそれに伴う海面上昇に対応するためには, 温暖化効果ガスの排出を削減する方策の他に, 適応策を検討する必要がある。

沿岸域においては, 海面上昇により海岸災害, 特に高潮災害の増大が危惧される。これに対する適応策を検討するためには, どのような台風によりどこに, どの程度の浸水が起こるのかを把握することが重要である。本研究は, 周防灘沿岸域において, 最も危険な台風条件に対して温暖化による海面上昇も

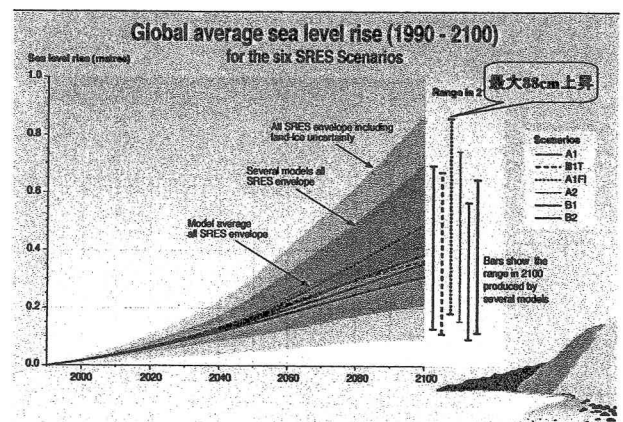


図-1 全地球的平均海面上昇量の将来予測

考慮した条件のもとで潮位を変化させて高潮数値シミュレーションを行い、予測最高海水位を明らかにするとともに GIS を用いて可能浸水域を推定することを目的にしている。

2. 研究内容

(1) 数値解析法

高潮の数値計算は、次式で表される連続の式と非線形長波理論式（浅水理論式）を数値差分して解く方法を用いた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ &= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ &= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中の M , N は水平 (x, y) 方向の流量を, p_0 は大気圧を, τ_{sx} , τ_{sy} は海面せん断応力を, τ_{bx} , τ_{by} は底面せん断応力を表し, それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M &= \int_h^\eta u dz = u(h + \eta) = uD \\ N &= \int_h^\eta v dz = v(h + \eta) = vD \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2}{D^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに, u , v はそれぞれ x , y 方向の流速成分, h は静水深, η は静水深から上向きの水面偏差, f はコリオリ係数, g は重力加速度, ρ_a は空気の密度 (1.22 kg/m^3), C_D は海面の抵抗係数, (W_x, W_y) は海上 10m 高度の (x, y) 成分風速, ρ_w は海水の密度 (1030 kg/m^3), n はマンニングの粗度係数 ($=0.026$) である。台風の影響範囲における気圧分布は, Myers の式を用いて,

$$p(r) = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (5)$$

と表される。ここで, r は台風中心からの距離, $p(r)$

は地点 r における気圧, p_c は台風の中心気圧, Δp は台風の中心示度, r_0 は台風半径である。この気圧分布を仮定すると傾度風の風速は次式で与えられる。

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p r_0}{\rho_a r} \exp\left(\frac{r_0}{r}\right)} \quad (6)$$

高潮推算に用いられる海上風への変換は, 傾度風速と場の風に $0.60 \sim 0.70$ 程度の風速の低減率を乗じ, 約 30° の角度で低圧部の方向に風向を変更させることで行った。

数値計算の検証については, 小島ら²⁾の文献に記載しているのを参照されたい。また, 周防灘を対象とした高潮数値計算に関しては, 佐藤ら³⁾や河合ら^{4), 5)}の研究がある。

(2) 計算領域とモニター点の設定

計算領域は, 一番大きな領域 (メッシュ間隔 16200 m) が図-2 の上図に示すように, 北緯 24.4 度から北緯 35.7 度まで, 東経 119.5 度から 136.5 度までの範囲である。この範囲を 12 領域に分け, メッシュ間隔の最小値は 200m である。水深データは, 海図および海底地形図より読み取ったデータを用いた。

対象海域のモニター点は, 地形的に高潮災害が起こりそうな苅田港, 下関, 宇部港, 埴生, 大海, 山口港の 6 つの地点とし, 図-2 の下図に示す。

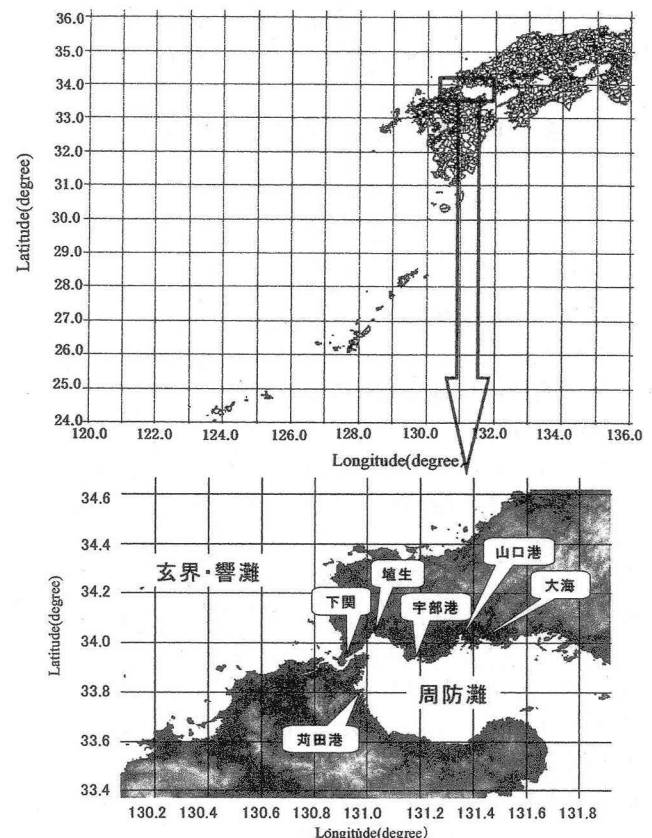


図-2 モニター点の地図

(3) モデル台風の設定

a) モデル台風コースの設定

九州地方を通過した過去の台風経路を調べると 2 つに大別できる。1 つは、図-3 に示している破線で、九州をほぼ直線的に縦断したコースである。最近では T8013 がこれに相当する。2 つめは、実線で示している九州地方を南西から北東方向に斜めに横断したコースである。最近では T9119 や T9918 がこれにあたる。

これより、モデル台風の経路は A コース(縦断方向)を T8013 の移動経路(図-4 参照)、B コース(横断方向)を T9119 の移動経路(図-5 参照)とし、各コースについてこれを中心として東西に経度を 0.25 度間隔でずらした計 9 コースとした。その結果から、調査対象海域において一番高潮災害の危険性があるコースを決定した。

b) 台風の規模

モデル台風の規模は、過去最大級の台風で高潮による被害の最も大きかった 1959 年の伊勢湾台風および最近で規模の大きかった T9119 をモデル台風の規模として選定した。伊勢湾台風の規模は、A コースでは最低中心気圧 907.6hPa、台風半径 81 km である。B コースでは最低中心気圧 916hPa、台風半径 81 km である。T9119 の規模は、A コースでは最低中心気圧 911.2hPa、台風半径 110 km である。B コースでは最低中心気圧 916hPa、台風半径 110 km である。モデル台風の中心気圧値は緯度の関係式で与えられ、計算初期位置の緯度がコースにより違うので最低中心気圧が異なる

c) 計算潮位

計算における潮位は、干潮位+0.00m (T.P.-2.10m) 平均海面 +2.10m (T.P.+0.00m)、満潮位 +3.30m (T.P.+1.20m)、+3.74m (T.P.+1.64m)、+4.18m (T.P.+2.08m) と変化させた。なお、+3.74m と +4.18m は、地球温暖化による海面上昇が、それぞれ 0.44m と 0.88m 起ったときの満潮位を想定した。

3. 結果と考察

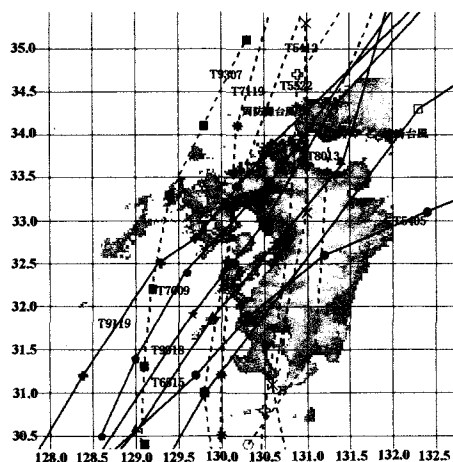


図-3 過去の台風経路

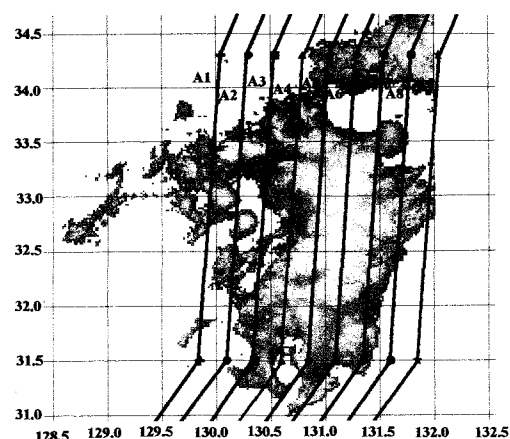


図-4 T8013 を基準とした台風経路 A コース

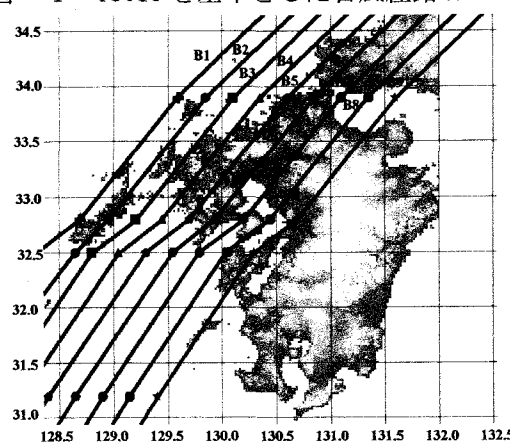


図-5 T9119 を基準とした台風経路 B コース

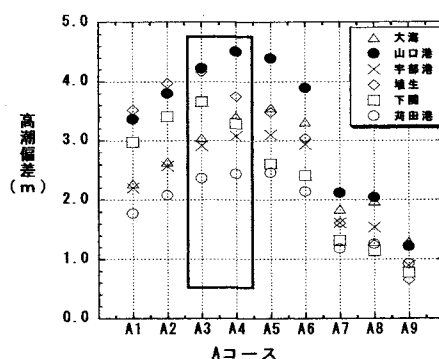


図-6 A コースによる可能最大高潮偏差

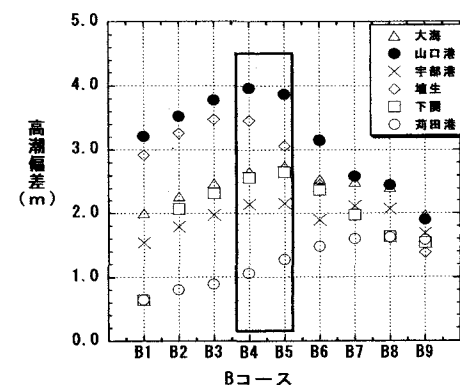


図-7 B コースによる可能最大高潮偏差

(1) 台風経路による高潮偏差

図-6, 7は、各コースにおいて干潮位の設定で高潮計算を行い、コース別可能最大高潮偏差を表わした図である。Aコースは、各モニター点の偏差値自体は異なるが、全体的に高潮偏差がA1コースから緩やかに増大し、A3あるいはA4コースで最大となり、その後急激に低下する傾向が見られる。Bコースでは、宇部港、下関、荻田港に変化の違いが見られた。Aコースでは、A3, A4コースに最大高潮偏差が現れ、Bコースでは、B4, B5コースに最大高潮偏差が現れた。また、Aコースのほうが、Bコースより最大高潮偏差が高い値になった。以後の計算では、調査海域で最も危険な台風経路であるA4コースとB4コースに対して予想最高海水位や可能浸水域の推算を行った。

(2) 計算潮位の違いによる高潮偏差の変化

図-8, 9は、伊勢湾台風の規模での各モニター点におけるA4コースとB4コースでの計算潮位の変化と高潮偏差の関係を表わした図である。九州地方を北へ縦断するA4コースと北東に横断するB4コースともに、全体的に計算潮位が上がると高潮偏差が一様に減少しているが、モニター点が位置する海域により変化の割合が異なっている。高潮偏差が一番高い山口港では、計算潮位+0.00mから計算潮位

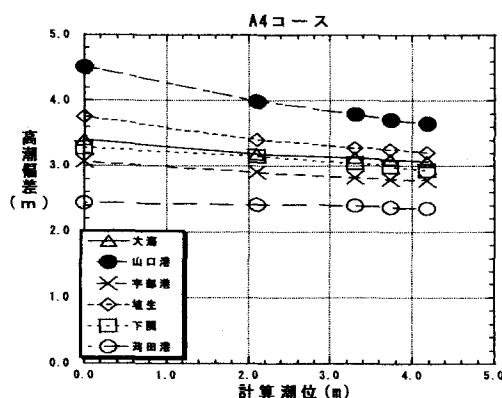


図-8 各モニター点ごとの高潮偏差

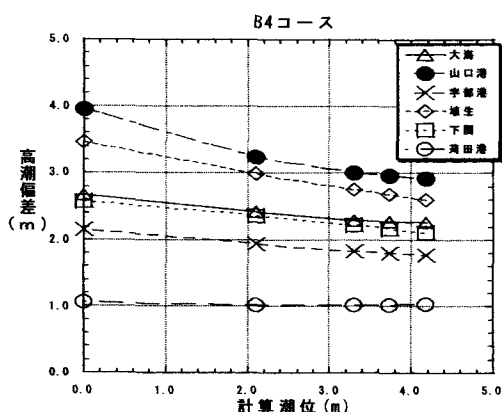


図-9 各モニター点ごとの高潮偏差

+2.10mの間で1m程度減少している。一方、高潮偏差が最も低い荻田港では、計算潮位が変化しても高潮偏差はほとんど一定であった。T9119の規模での各モニター点におけるA4コースとB4コースでの結果は、伊勢湾台風の規模と同じような結果が得られた。

(3) 最大高潮偏差の沿岸分布

図-10, 11は、それぞれ周防灘西岸と北岸におけるA4コースの各計算潮位(WL)に起こりうる最大高潮偏差の沿岸方向分布である。周防灘西岸の最大高潮偏差は、荻田港付近で2.5m弱であるのに対し、関門海峡入り口では3.0m強と北に行くほど増大し、計算潮位による高潮偏差の違いも、北に行くほど大きくなっている。周防灘北岸においては、全般的に高潮偏差は、3m前後になるが、山口港や埴生などの湾奥の地点では偏差が著しく増大している。特に、山口港ではWL+0.00m(干潮時)で4.6m付近まで増大する。

B4コースにおいては、図-12示す周防灘西岸の最大高潮偏差は、A4コースと同様に、北に行くほど増大しているが、最も大きい偏差でも2.5m程度である。図-13の周防灘北岸においては、全般的に高潮偏差は、2m前後になるが、山口港や埴生などの湾奥の地点では偏差が著しく増大し、計算潮位の違いも顕著

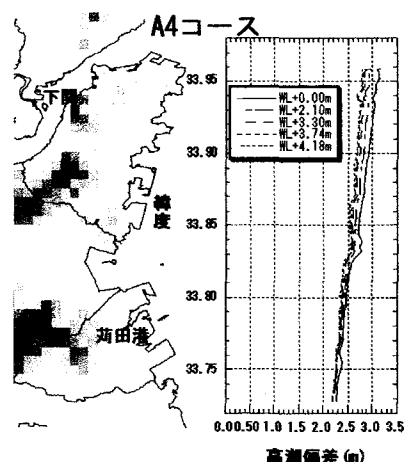


図-10 周防灘西岸における最大高潮偏差の分布(A4)

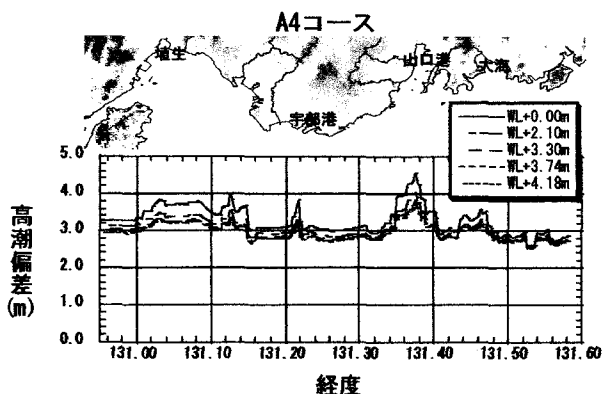


図-11 周防灘北岸における最大高潮偏差の分布(A4)

になる。B4 コースにおいても、この海域では山口港がWL+0.00mで4m付近まで達し、偏差がもっとも増大する地点である。

(4) 可能最高海水位の沿岸分布

図-14, 15 は、それぞれ周防灘西岸と北岸における A4 コースに対する計算潮位(WL)に算定した高潮偏差を加えた可能最高海水位の沿岸方向分布である。海水位の結果は、平均海面(MSL)を基準として示している。西岸、北岸とも干潮位(T.P. -2.10m)から満潮位(T.P. +1.20m)までに急激に最高海水位が増大する。潮位自体は3.30m増加するが、海水位は3m程度の増加になっている。海面上昇が起こった後の最高海水位は、海面上昇量程度の増加にとどまっている。西岸では北緯 33.96 度近くで、最高海水位が最も高くなり、約 5m の値になる。周防灘北岸においては、経度ごとの海水位変化の傾向は、ほぼ同じである。海面上昇後の満潮位(T.P. +2.08m)では、全般的に最高海水位は 5m 程度となり、湾奥の地点である山口港では、5.7m 近い値になっている。

(5) 可能浸水域

図-16, 17, 18 は、海水位が異常に高くなる 3 地域における満潮位(左図)と海面上昇(+0.88m)が起った後の満潮位(右図)に対する A4 コースの高潮による可能浸水域を GIS で表わした結果で、黒くぬ

られたところが浸水域を表わしている。最高海水位は場合的に変化している所以对象地域における平均的な水位を求め、地盤高がその水位以下のところを可能浸水域とした。その様にして求めた浸水域の面積を各水位ごとに示したのが図-19 で、上図に A4 コース、下図に B4 コースを示している。ただし、護岸や堤防は考慮されていない。門司港周辺(図-16)の満潮位では、可能浸水域はほとんどが埋立地で冠水面積が 1,105 k m² となり、海面上昇後では、冠水面積が 1,260 k m² と約 14% 増大する。埴生周辺(図-17)は、満潮位、海面上昇位ともに下関市から山陽町にかけて広範囲な浸水が見られる。満潮位では、冠水面積が 4,447 k m² となり、海面上昇後では、4,584 k m² と約 3% の増大にとどまっている。山口港周辺(図-18)でも湾奥の山口市と小郡町でかなりの内陸部まで広範囲な浸水が見られる。満潮位では冠水面積が 4,849 k m² となり、海面上昇後では 5,484 k m² となり約 13% の増大となる。

図-19 が示すように、埴生周辺と山口港周辺は、海水位が上がるにつれ、冠水面積が急激に拡大しているが、門司周辺では、それ程の急激な拡大はみられない。また、浸水面積の急激な拡大は、干潮位から満潮位の間で起っており、海面上昇による影響は浸水面積の最大 14% 程度の増大として現れている。

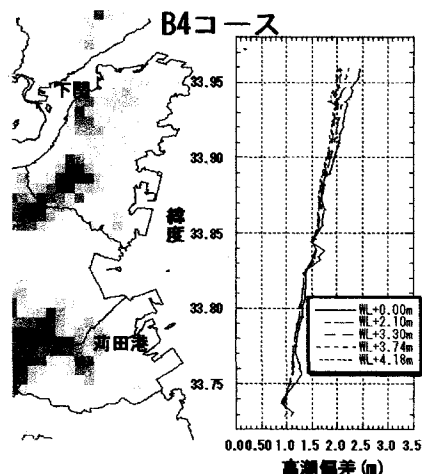


図-12 周防灘西岸における最大高潮偏差の分布(B4)

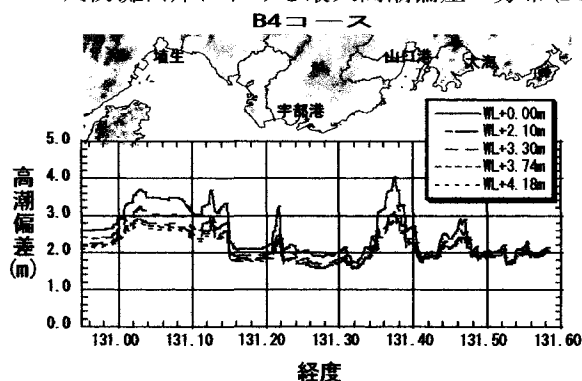


図-13 周防灘北岸における最大高潮偏差の分布(B4)

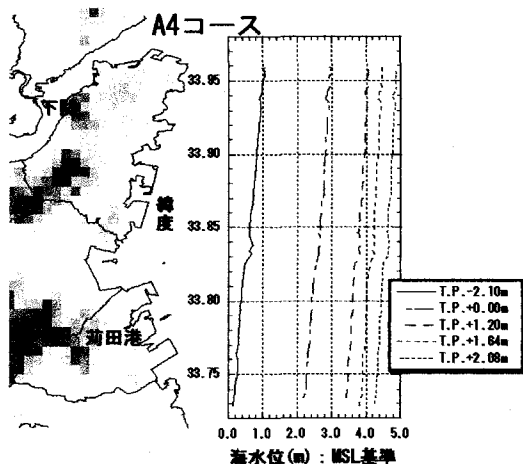


図-14 周防灘西岸における最高海水位の分布(A4)

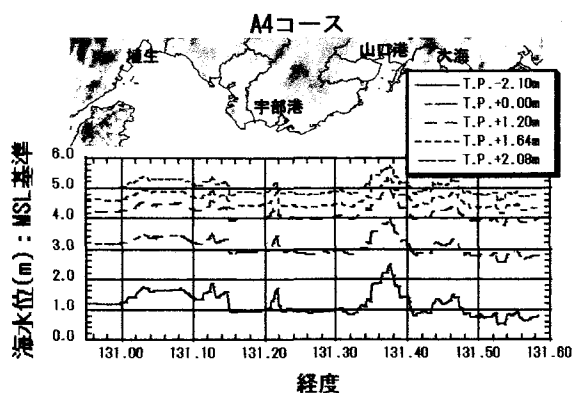


図-15 周防灘北岸における最高海水位の分布(A4)

4. あとがき

周防灘の沿岸を調査対象として高潮計算を行い、高潮偏差の最も増大する台風経路を特定した。その台風経路を用いて、計算潮位を干潮位から満潮位+海面上昇量0.88mまで高くすると、対象海域の高潮偏差は減少する傾向にある。台風が縦断するコースよりも、北東方向に横断するコースのほうが減少する傾向が顕著であり、山口港では干潮時と満潮時で約1mの違いが算出された。周防灘北岸の沿岸では、高潮により全般的に約3mの偏差が生じ、山口港や埴生などの奥湾では、4m前後まで増大する。海面上昇後の高潮偏差を加えた可能最高海水位は、5m前後となり山口港で最大5.7mまで達する可能性がある。高潮における可能浸水域は干潮位から満潮位と水位が高くなると急激に拡大し、山口港周辺では海面上昇後において約5,500km²まで達する。

今後は、市町村単位での浸水可能面積や人口等の詳細な影響評価を行うとともに、これらの結果をふまえて特定の沿岸においてどのような適応策が考えうるかを検討することが課題である。なお、本研究は科学研究基盤研究(A)(NO.14209003 代表者 茨城大学三村信男教授)の助成を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) IPCC : Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 881pp.,2001.
- 2) 小島治幸, 藤井寿人 : 周防灘と玄界・響灘沿岸の高潮特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.227-232, 2001.
- 3) 佐藤孝夫, 山本悟, 橋本典明, 平石哲也, 北澤壮介, 松島健滋, 大川郁夫 : 周防灘海域における台風9918号による高潮災害及び危険度判定手法について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.316-320, 2000.
- 4) 河合弘泰, 平石哲也, 佐藤孝夫, 大川郁夫 : 台風9918号による九州沿岸と瀬戸内海西部の高潮の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.321-325, 2000.
- 5) 河合弘泰, 川口浩二, 橋本典明 : 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築と台風9918号を例とした追算, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.296-300, 2003.

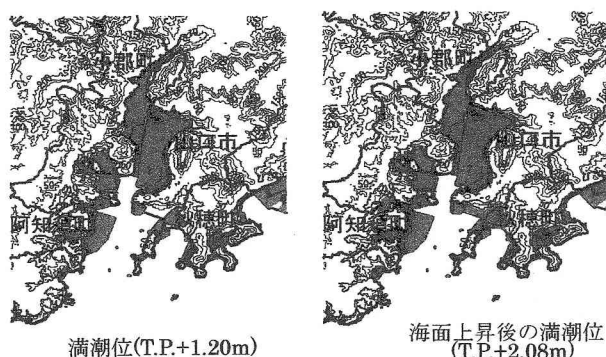


図-18 山口港周辺における高潮による可能浸水域

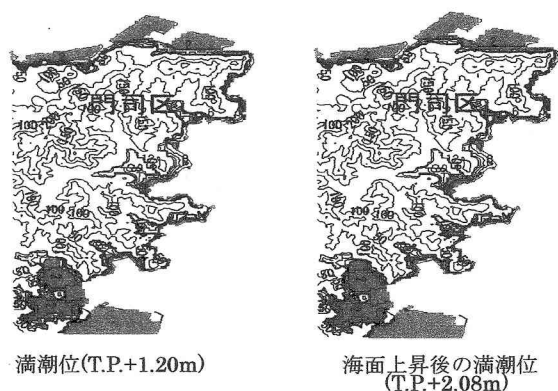


図-16 門司港周辺における高潮による可能浸水域

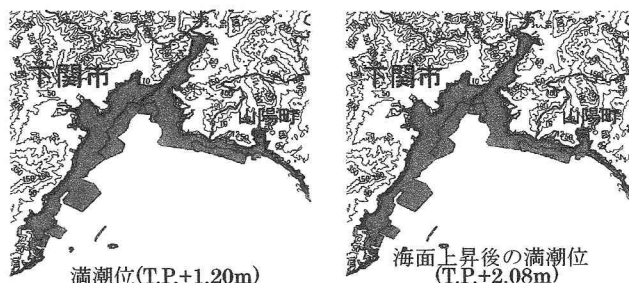


図-17 埴生周辺における高潮による可能浸水域

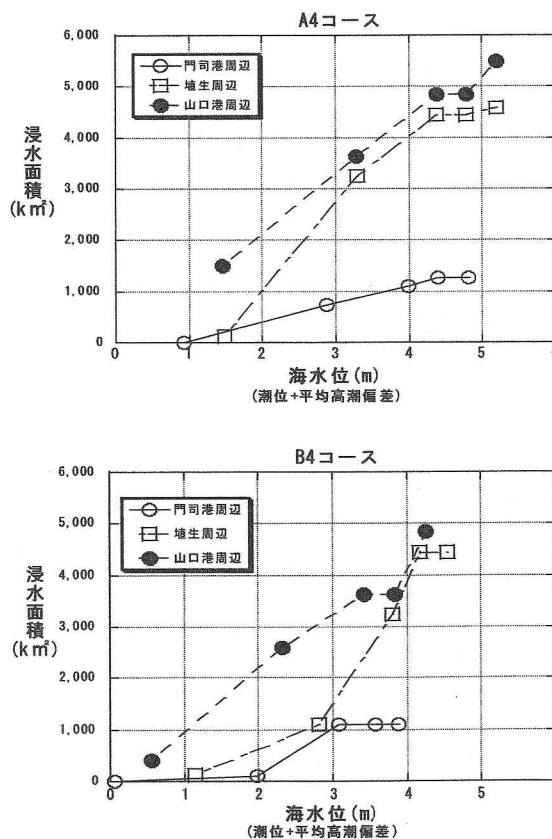


図-19 高潮による可能浸水面積