

26. 周防灘における高潮と温暖化の海面上昇による沿岸域への影響

IMPACTS ON THE COAST ZONE DUE TO STORM SURGE AND SEA LEVEL RISE OF GLOBAL WARMING IN THE SUO SEA

小島 治幸*, 土持 章*, 鄺 曙光*
Haruyuki KOJIMA, Akira TSUCHIMOCCHI, Shuguang YAN

ABSTRACT: 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 area and population by using the Geographic Information Systems (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起因する海面水位の上昇が起これと予測されている。地球温暖化問題に対処する国際的な組織である IPCC 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く気温変化は、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 を用いて水位上昇による沿岸域の影響を明らかにすることを目的にしている。

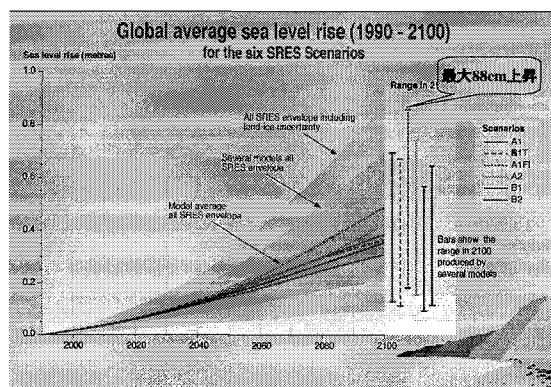


図-1 全地球的平均海面上昇量の将来予測¹⁾

九州共立大学大学院工学研究科都市システム工学専攻

Department of Civil & Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Kyoritsu University

2 研究内容

2.1 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。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \quad (2)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \quad (3)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

上式の M , N は水平 (x , y) 方向流量を、式 (2), (3) の p_0 は大気圧を、 τ_{sx} , τ_{sy} は海面せん断応力を、 τ_{bx} , τ_{by} は海底面せん断応力を表し、それぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD \\ N &= \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{sx} &= \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{bx} &= \rho_w g n^2 M \sqrt{M^2 + N^2} / D^{7/3} \\ \tau_{by} &= \rho_w g n^2 N \sqrt{M^2 + N^2} / D^{7/3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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 はマニングの粗度係数 ($=0.026$) である。台風モデルの気圧分布は Myers の式を用いて、風は傾度風の風速を用いた。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。

計算領域は、一番大きな領域（メッシュ間隔 16200m）が、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。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で参照されたい。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。

2.2 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⁶⁾。ひとつは、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、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-2 左参照）、B コース（横断方向）を T9119 の移動経路（図-2 右参照）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。高潮計算の結果から、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、日本において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。モデル台風の中心気圧値は緯度の関係式で与えた²⁾。

(C) 計算潮位

計算における潮位は、表-1 に示すように干潮位 (WL+0.00m) と平均海面 (WL+2.10m), 満潮位 (WL+3.30m) の 3 種類で、それらの値に海面上昇による 0.44m と 0.88m をそれぞれ加えた合計 9 種類の計算潮位を想定した。

3 結果と考察

3.1 台風経路と計算潮位の違いによる高潮偏差の変化

図-3 は、各コースにおいて干潮位の設定で高潮計算を行い、主要な海域におけるコース別可能最大高潮偏差を表している。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、

苅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 コースに対して可能最高海水位や可能浸水域の推算を行った。

図-4 は、伊勢湾台風の規模における A4 コースと B4 コースに対する各モニター点の計算潮位の変化と高潮偏差の関係を表している。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+2.10m の間で高潮

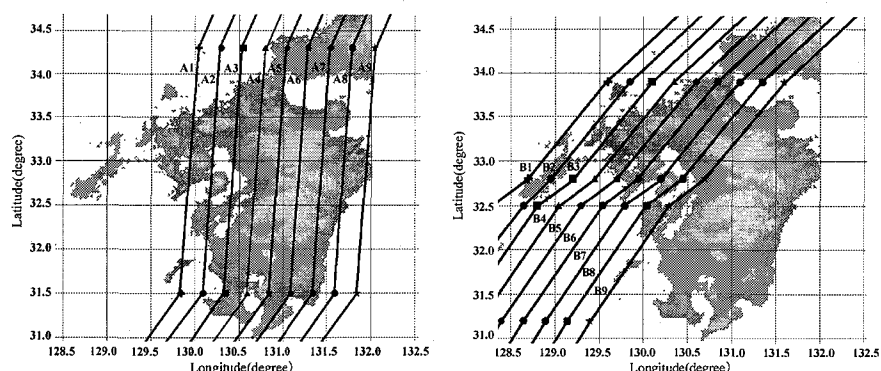


図-2 T8013 と T9119 を基準とした台風経路 A, B コース

表-1 計算潮位

計算潮位	干潮位基準(m)	平均海面基準(m)
干潮位	WL+0.00	T.P.-2.10
海面上昇(0.44m)後の干潮位	WL+0.44	T.P.-1.66
海面上昇(0.88m)後の干潮位	WL+0.88	T.P.-1.22
平均海面	WL+2.10	T.P.+0.00
海面上昇(0.44m)後の平均海面位	WL+2.54	T.P.+0.44
海面上昇(0.88m)後の平均海面位	WL+2.98	T.P.+0.88
満潮位	WL+3.30	T.P.+1.20
海面上昇(0.44m)後の満潮位	WL+3.74	T.P.+1.64
海面上昇(0.88m)後の満潮位	WL+4.18	T.P.+2.08

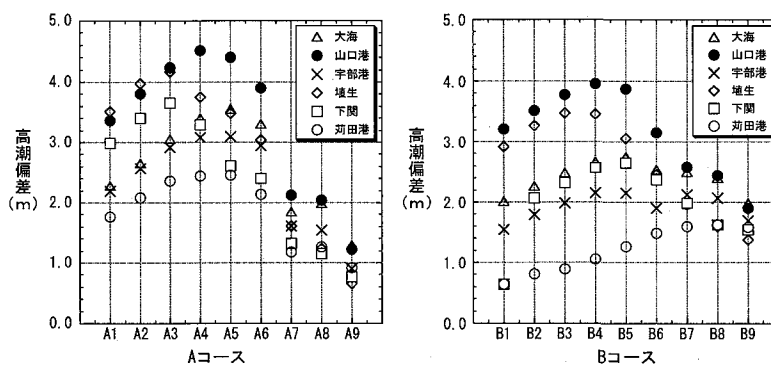


図-3 A, B コースによる可能最大高潮偏差

偏差が1m程度減少している。一方、高潮偏差が最も低い苅田港では、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。また、台風が九州地方を縦断する A4 コースより北東方向に横断する B4 コースの方が、偏差の減少率が大きい傾向が見られる。

3.2 最大高潮偏差の沿岸分布

図-5, 6 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。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。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+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苅田港では、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。周防灘西岸の最大高潮偏差は、苅田港付近で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。T9119の規模におけるA4コースとB4コースの結果は、伊勢湾台風の規模とほぼ同じような結果が得られた。

3.3 可能最高海水位の沿岸分布

図-7 は、周防灘北岸における 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。北岸は、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。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前後となり、山口港では、5.7m近い値になる。

3.4 沿岸域への影響

高潮と海面上昇による沿岸域への影響を、GISを用いて可能最高海水位の変化による市町村別の浸水面積とそこに居住する浸水被害人口を推定することにより明らかにする。浸水域は地盤高が可能海水位よりも低いところと定義し、GIS上で図

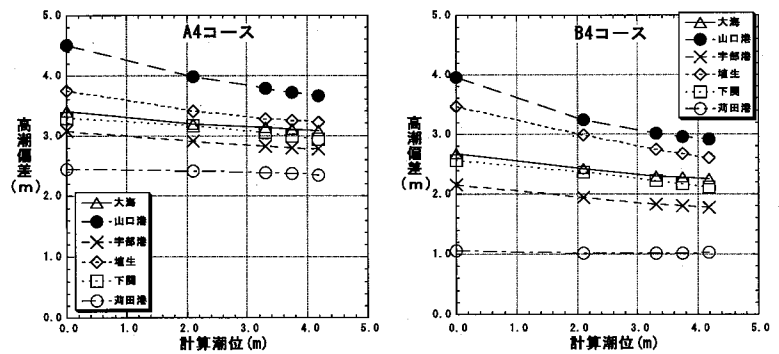


図-4 A4, B4 コースにおける各モニター点の高潮偏差

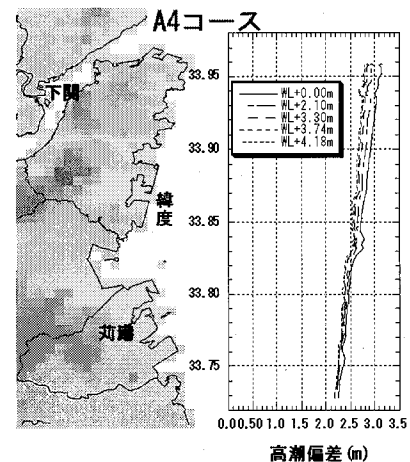


図-5 周防灘西岸の最大高潮偏差の分布

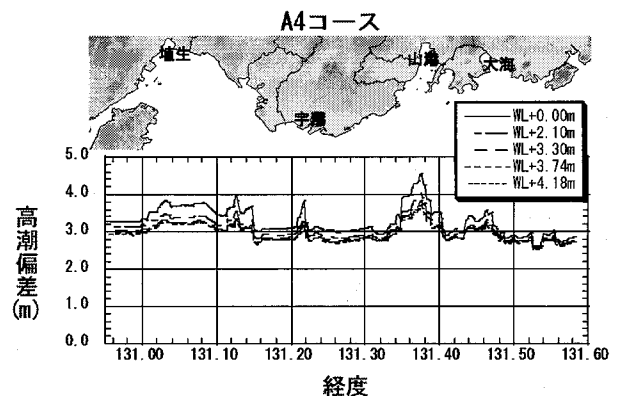


図-6 周防灘北岸の最大高潮偏差の分布(A4)

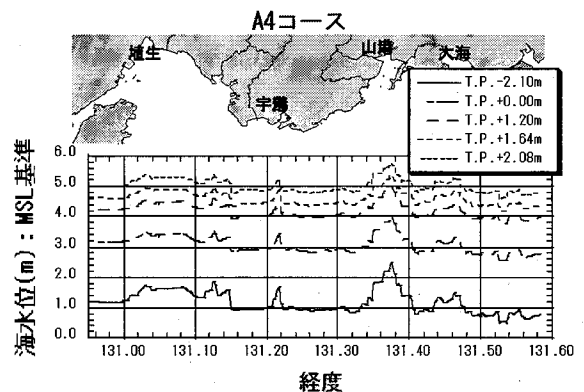


図-7 周防灘北岸の最高海水位の分布(A4)

示した一例を図-8に示す。左図は平均海面時、右図は満潮位+0.88m海面上昇時における浸水域が灰色で塗られた区域で示されている。可能海水位が上昇すると浸水域が拡大する様子が見える。これより浸水面積と浸

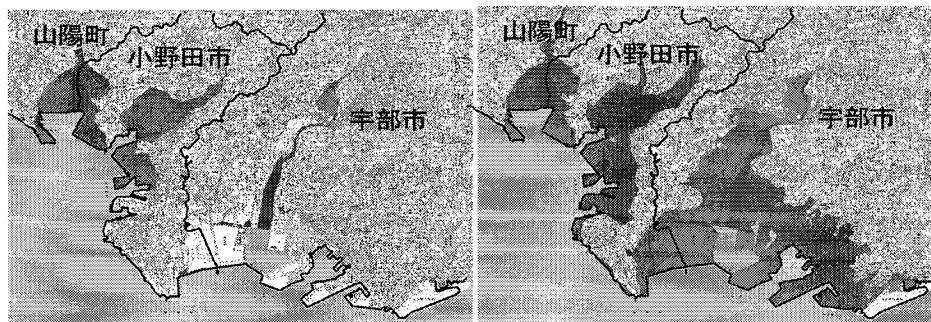


図-8 平均海面（左図）と満潮位+0.88m（右図）における可能最高海水位による浸水域の一例

水被害人口を推算した結果をそれぞれ図-9と図-10に示す。海水位が上がるにつれ、浸水面積が急激に拡大している。下関市では干潮位時の海水位(T.P+1.48m)で0.83km²となり、海面上昇後の満潮位(T.P+5.19m)では30.57km²となり、約36倍の増大となる。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21%程度の増大として現れている。また、図-10が示すように、浸水面積が拡大するとともに被害人口も増えている。下関市では、干潮位で3,645人、海面上昇後の満潮位では84,565人となり約23倍に増大する。しかし、小郡町と秋穂町は被害人口が増えていない。これは、平成12年国勢調査のデータが、小郡町と秋穂町の人口の区分が細かく取っていないため、浸水域はそれぞれの町の一部でも人口としては町全体の人口を取るようになるからである。

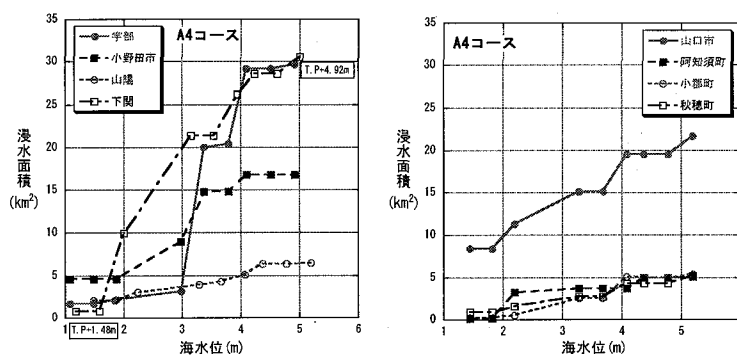


図-9 可能海水位の変化による浸水面積の変化

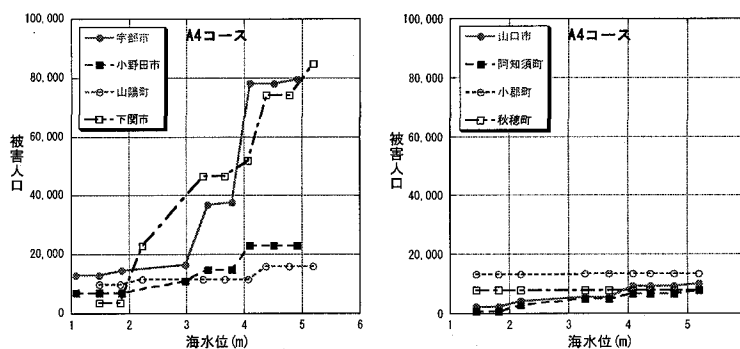


図-10 可能海水位の変化による被害人口の変化

図-11, 12は、それぞれ周防灘西岸と北岸における可能最高海水位(高潮偏差+計算潮位 T.P.+2.08m)と既存の堤防・護岸の天端高を比較した図である。地図上にある灰色でぬられたところは可能最高海水位による浸水域を、黒い線で示しているのは堤防・護岸の位置を表している。これらのデータより、堤防・護岸のない海岸の延長とその天端高が可能最高海水位よりも低い海岸の延長を危険区域の沿岸長として求め、行政区域ごとに浸水面積と浸水被害人口と一緒にまとめたものが表-2である。西岸では堤防・護

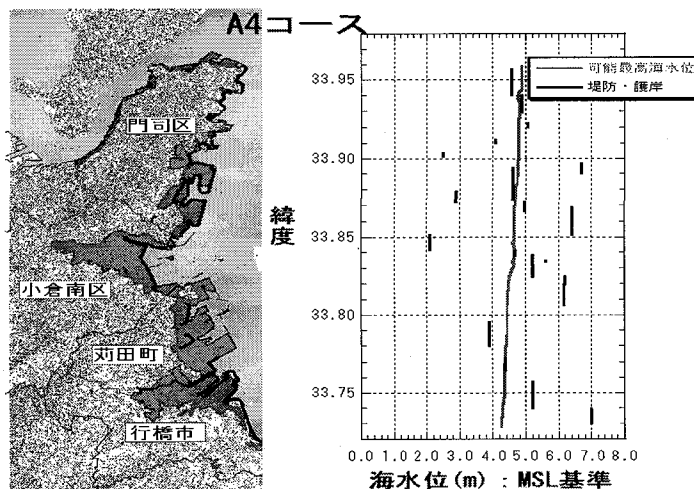


図-11 西岸の堤防・護岸と可能最高海水位の比較

岸の天端高が可能最高海水位より高いところが多いが、北岸では逆に低いところが多い。特に、下関から宇部にかけて危険区域の沿岸長は山陽町の約 16km から宇部市の約 47km と長く、この間の推定浸水面積は約 83km² となり、浸水被害人口にいたっては 20 万人以上に達する可能性がある。

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 0.88 m まで高くすると、対象海域の高潮偏差自体は減少する傾向にある。台風が九州を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る。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、海面上昇後の高潮偏差を加えた可能最高海水位は 5m 前後となる。市町村別での浸水面積では、干潮位から満潮位と海水位が高くなると急激に拡大し、下関市では海面上昇後において 30.6 km² まで達する。被害人口は、下関市、宇部市などで急激な増大が見られ、最大でそれぞれ約 8.4 万人と 7.9 万人に達すると推定される。可能最高海水位と堤防・護岸の天端高を比較すると天端高の方が低い海岸が多くあり、危険地域を明らかにすることができた。高潮数値計算と GIS を組み合わせたシステムは、可能最高水位やそれによる浸水面積、被害人口などの有用なデータを求めることができるため、どこにどのような適応策を適用すべきかを検討する上で有効である。

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, the Third Assessment Report, 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, 2002
- 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.
- 6) 土持章, 小島治幸: 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, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.677-682, 2004.

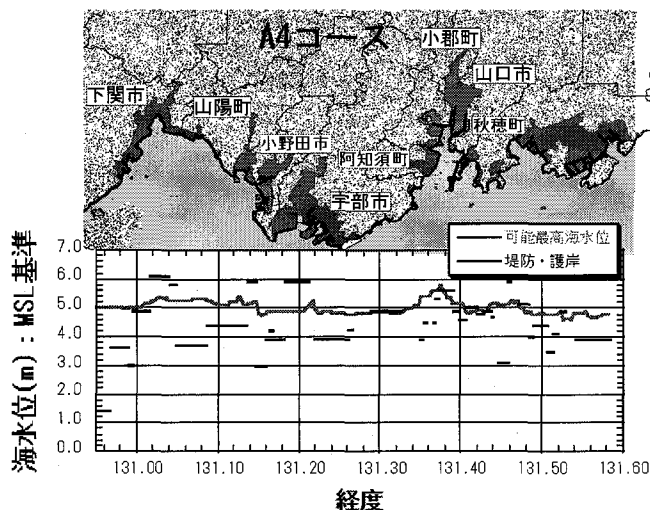


図-12 北岸の堤防・護岸と可能最高海水位の比較

表-2 行政区域における高潮災害のポテンシャル

地域	危険区域の沿岸長(m)	浸水面積 (km ²)	浸水被害人口
門司区・小倉南区	31,461.7	25.4	60,786
苅田町	19,404.6	15.3	24,163
行橋市	908.8	12.2	31,487
下関市	24,873.8	30.6	84,565
山陽町	16,121.3	6.4	15,918
小野田市	19,072.6	16.8	22,946
宇部市	46,618.4	29.6	79,436
阿知須町	6,050.5	5.1	7,679
山口市	11,157.9	21.7	10,102
秋穂町	65,086.4	5.2	7,941