

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1104 September 2005

2004年台風16号による高松の高潮浸水被害とその数値解析

富 田 孝 史
本 多 和 彦
河 合 弘 泰
熊 谷 兼 太 郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 台風0416号の特徴	4
3. 潮位記録	5
3.1 高松港	5
3.2 宇野港	5
3.3 台風来襲前の潮位偏差	5
4. 備讃瀬戸沿岸での高潮被害現地調査	6
4.1 調査方法	6
4.2 高松港周辺での高潮被害	6
4.3 坂出港での高潮被害	11
4.4 宇野港周辺での高潮被害	12
4.5 水島地区での高潮被害	13
5. 数値計算	15
5.1 台風の気圧分布と風速場	15
5.2 海水の運動	16
5.3 計算領域および再現時間	17
5.4 天文潮位変動の導入	18
5.5 高潮偏差の計算結果	18
6. あとがき	25
7. 今後の課題	26
謝辞	26
参考文献	26
記号表	27
付録	27

Field Investigation and Numerical Simulation of Storm Surge Flood by Typhoon No.0416 at Takamatsu

Takashi TOMITA*
Kazuhiko HONDA**
Hiroyasu KAWAI***
Kentaro KUMAGAI****

Synopsis

Takamatsu, Tamano and other cities were inundated by the storm surge due to Typhoon Chaba in 2004, although the typhoon was not an extremely strong and large typhoon comparing to the previous typhoons which attached Kyushu Island and the Seto Inland Sea. The combination of the storm surge and high spring tide caused high sea level along these coastal cities.

On-site investigations on the inundation indicated that seawater flowed into the land from the areas where the ground level and the height of defense structures were low, then moved to inland lower-lying areas quickly, and finally gathered the lowest area. In Takamatsu city, especially, the storm surge without high waves caused no structural damage. In Tamano city on the opposite side of the Seto Inland Sea, the high wave on the storm surge destroyed some facilities and houses in coastal areas.

The numerical simulations on the storm surge were conducted with using a popular numerical model of storm surge. Two cases in which the variation of astronomical tide was considered or not were calculated. The computed storm surge was, however, lower than the observed one in each case. To improve the accuracy of the storm surge, it is necessary to reproduce more accurately the wind field over the Seto Inland Sea. The coastal flooding in Takamatsu city due to the storm surge was also calculated with fine numerical grids of the 25m spacing. Adjusting the sea level along the coast to the observed level, the computational result on the inundation was good agreement with the actual inundation.

To minimize the loss of human lives, we have to improve regional defense level with the integration of structural and nonstructural measures. To integrate them, we can use effectively the numerical simulation to express the damage due to storm surge.

Key Words: storm surge, coastal flooding, inundation, field survey, numerical simulation, disaster prevention, disaster mitigation

* Tsunami Research Director, Tsunami Research Center

** Project Researcher, Tsunami Research Center

*** Head, Marine Hydrodynamics and Storm Surge Division, Marine Environment and Engineering Department

**** Researcher, Coastal Disaster Prevention Div., Coastal and Marine Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5052 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:tomita@pari.go.jp

2004年台風16号による高松の高潮浸水被害とその数値解析

富田 孝史*
本多 和彦**
河合 弘泰***
熊谷 兼太郎****

要 旨

2004年の台風16号は、それ以前に九州や瀬戸内海に來襲した台風と比べて強さや規模が極めて大きな特異な台風ではなかった。しかし、高松や玉野など備讃瀬戸周辺において大きな高潮被害を発生させた。これは、これらの沿岸海域において大潮の満潮に高潮が重なり、海水位が著しく高くなったためである。

高潮浸水に関する現地調査の結果、沿岸部の防護レベルの低いところから海水は流入し、内陸部の低い土地に向けて海水は速やかに移動し、低地部に湛水したために被害が発生した。特に、高松沿岸では、大きな波浪を伴わず純粋な高潮による海水位の上昇であったため、越流水は破壊的な様相を示すことはなかった。一方で、高波の作用した岡山県沿岸や香川県西部地域では、港湾や海岸の施設、住宅等の損傷が発生している。したがって、破壊的な浸水を防ぐ観点からは高波の制御が重要な課題といえる。

今回の高潮およびその浸水状況の数値計算は、平面2次元の非線形長波理論に基づいた高潮計算によく使われる数値モデルを使用して行った。海域における高潮の計算では、天文潮を考慮する場合としない場合について計算を行ったが、両方とも観測で得られた高潮偏差よりも小さな結果となった。精度向上のために瀬戸内海における風場の再現精度の向上などの検討が必要である。天文潮が瀬戸内海の高潮偏差に及ぼす影響は大きくはなかったが、瀬戸内海東部に向かうにつれて天文潮を考慮しない場合よりも考慮した場合の方が高潮偏差が小さくなる傾向が認められた。

高松を対象に最小25mの大きさの計算格子を使用して浸水計算を行った。沿岸における観測潮位に合うように平均天文潮位の補正を行うことにより、浸水計算の結果は実際の被害状況とよく一致した。また、浸水過程をより詳細に検討することが可能であることを示した。こういったシミュレーションは、地域の危険性の予測を可能とするので、地域の防災力を向上させるためのツールとしての活用が期待できる。

キーワード：高潮，浸水，現地調査，数値計算，防災

* 津波防災研究センター主席津波研究官（前海洋・水工部高潮津波研究室長）
** 津波防災研究センター特任研究官（前海洋・水工部高潮津波研究室研究官）
*** 海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長（前海洋・水工部主任研究官）
**** 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5052 Fax：046-844-1274 e-mail:tomita@pari.go.jp

1. まえがき

2004年(平成16年)は、これまでになく多くの台風が日本に上陸した年であり、それまでの上陸数の6個を大きく上回り10個となった。そして、高潮の危険地域と一般にいわれる三大湾以外の南九州、瀬戸内海、日本海、北海道の沿岸において高潮・高波被害が発生した。そのなかでも、台風16号(以下、台風0416号という)と18号は、それぞれ瀬戸内海東部と西部に大きな高潮被害を発生させた。特に台風16号では、床上および床下浸水被害にあった住家数は、香川県で21817戸、岡山県で10780戸、全国で46566戸(内閣府発表資料、平成16年9月15日19時)、さらに高松市で2名、倉敷市で1名が浸水によって亡くなる被害となった。そのため、港湾空港技術研究所では、国土交通省四国地方整備局港湾空港部及び中国地方整備局港湾空港部の協力を得て、9月1日に高松港周辺及び坂出港、9月2日に宇野港周辺、水島港及び倉敷市玉島地区において高潮被害に関する現地調査を実施した。調査の構成員および行程は付録に示す。

なお、備讃瀬戸沿岸は、2003年(平成15年)の台風10号(台風0310号)や、2004年(平成16年)の台風10号(台風0410号)の時にも高潮によって沿岸の一部が浸水しており、その度に現地調査を行ったところである。

今回の現地調査は、高潮やそれによる被害実態の把握を目的とし、痕跡高さの測量、浸水状況の聞き取りなどを行った。台風0416号による高潮被害は、高松などの沿岸都市内部にまで浸水が及んだので、浸水被害の実態が把握できるように水際近傍にとどまらずに調査を行った。

現地調査を実施することにより、備讃瀬戸を挟んで四国側の高松市と中国側の玉野市などでは、高潮被害の様相が異なることが明らかとなった。玉野側は高潮とそれに伴う高波による被害である一方、高松側ではほとんど高波が発生しておらず、純粋な高潮による浸水被害であった。このため、高潮による浸水被害の基本的な特性を把握するために、高松における高潮浸水に着目して数値シミュレーションを実施した。

本報告は、以上のような現地調査および数値計算による検討によって、高松を中心とした台風0416号による高潮被害の実態と特性を明らかにし、さらに今後の課題について検討を加えたものである。

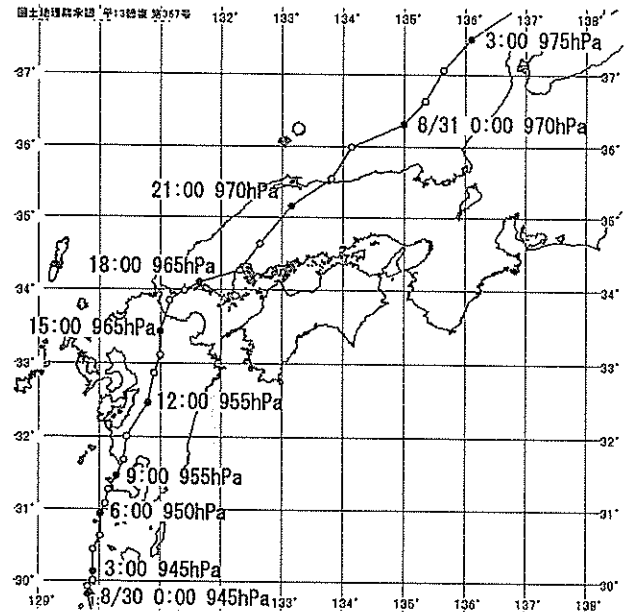


図-2.1 台風0416号の経路

2. 台風0416号の特徴

台風0416号は、8月19日21時ごろ北緯10度程度のマージナル諸島近海で発生し、26日から27日かけて北緯25度線を越え、27日以降日本の南海上でゆっくりと北西に進んで29日夜には九州の南海上で進路を北向きに変え、図-2.1に示すように8月30日10時頃に鹿児島県西部に、中心気圧955hPa、進行速度25km/hで上陸した。気象庁の観測によると、鹿児島で最も風が強かったのは8月30日3時から6時にかけてであり、5時の平均風速は23.0m/s(風向は東南東)である。鹿児島湾では最大で約0.9mの台風に伴った潮位偏差(以下、高潮偏差という)が大潮の満潮と重なって潮位はTP+2.45mに達し、鹿児島市の沿岸部が浸水した。

近年、九州や周防灘で高い高潮偏差を発生させた1991年の台風19号(台風9119号)や1999年の台風18号(台風9918号)と台風0416号を、北緯31度における中心気圧と進行速度で比較すると、台風9918号が935hPa、30km/h、台風9119号が935hPa、55km/h、台風9313号が930hPa、35km/hであるので、台風0416号は、中心気圧が高く進行速度が遅かった。

その後、台風0416号は16時頃に中心気圧965hPa、速度35km/hで周防灘を通過して17時半頃に山口県に再上陸した。下関では15:41に最大高潮偏差1.17mが発生した。その後、中国地方をほぼ横切るように台風は進行し、広島上空を通過し鳥取県から日本海へ抜けた。気象庁や海上保安庁の観測によると、この台風により瀬戸内海では1~1.5mの高潮が発生した。岡山県と香川県の沿岸では満潮

と重なり、天文潮位と高潮偏差を合わせた潮位は非常に高くなった。そのため、高松市、玉野市、倉敷市などで顕著な浸水被害が発生した。

3. 潮位記録

3.1 高松港

台風0416号来襲時に高松港で観測された潮位（気象庁確定値）を図-3.1に示す。台風0416号による最大高潮偏差は、高松における既往最大高潮偏差（1.31m、台風5115号（ルース台風）による）に匹敵する約1.3m（23時の気象庁確定値1.24m）であり、その発生時刻は大潮の満潮予定時刻の約1時間前と非常に近かった。このため、最高潮位はCDL+3.73m（TP+2.46m）となった。これは、それまでの最高潮位TP+1.94m（第二室戸台風、1961年）よりも0.52m高い値である。もし、満潮の発生時刻と一致していたならば、さらに最高潮位は約0.3m上昇する。

なお、観測潮位や痕跡高の整理において、高松港における各基準面への換算式は、

$$(\text{ODL基準の高さ}) = (\text{CDL基準の高さ}) + 0.626\text{m}$$

$$(\text{TP基準の高さ}) = (\text{CDL基準の高さ}) - 1.275\text{m}$$

を使用した。

3.2 宇野港

宇野港で観測された潮位（気象庁確定値）を図-3.2に示す。高松港と同じように、宇野港においても高潮偏差は最大で約1.3m（23時の気象庁確定値1.27m）と大きく、宇野港における既往最大高潮偏差の（1.33m、台風6523号による）と同じ水準となった。さらに、高松港と同様に高潮偏差が最大となった時刻が大潮の満潮時刻に非常に近かったため、最高潮位はCDL+3.81m（TP+2.55m）となった。これは、同年7月31日に来襲した台風0410号時の最高潮位よりも0.5m高い値である。

なお、宇野港における各基準面への換算式は、

$$(\text{ODL基準の高さ}) = (\text{CDL基準の高さ}) + 0.480\text{m}$$

$$(\text{TP基準の高さ}) = (\text{CDL基準の高さ}) - 1.265\text{m}$$

である。

3.3 台風来襲前の潮位偏差

高松港および宇野港の潮位の時間変化には、8月30日0時において0.3mの潮位偏差（観測潮位－天文潮位）が認められる。この潮位偏差は、いつ頃から始まっていたのであろうか。高松の記録を例にとり、潮位偏差の時間的な変化を示した図-3.3を見ると、この潮位偏差は台風が北緯25度を越え四国南海沖をゆっくりと北西に進んで

いた27日頃から始まっている。そして、高潮のピークが過ぎた後は潮位偏差は急速に小さくなり、若干の振動はあるもののほぼ0に収束している。

本論文では高潮浸水の現象に主眼を置いたため、こういった台風接近前の潮位偏差の成因については、これ以上の解析はしていない。しかし、例えば、高松において既往最高潮位を上回った0.52mのうちの約60%にあたる0.3mが、吸い上げや吹き寄せ効果によるいわゆる通常の高潮偏差でないとすれば、こういった異常な潮位偏差についても、詳細な解析を進めることが大切である。

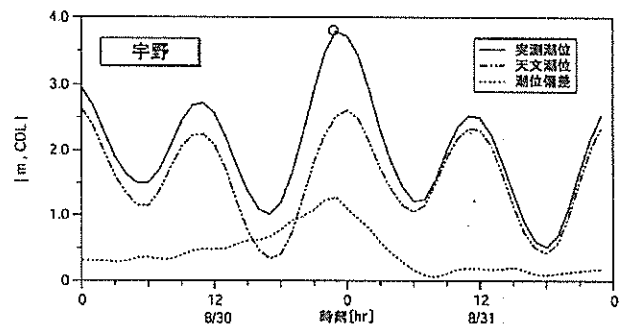
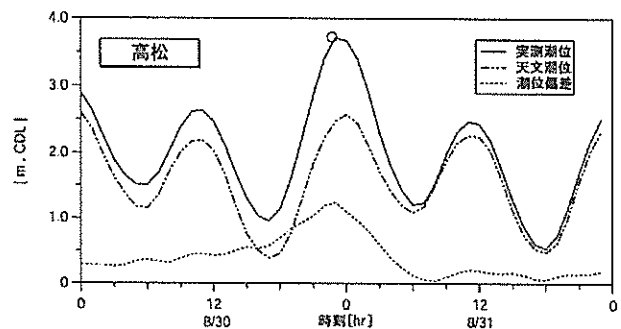


図-3.2 宇野港における観測潮位

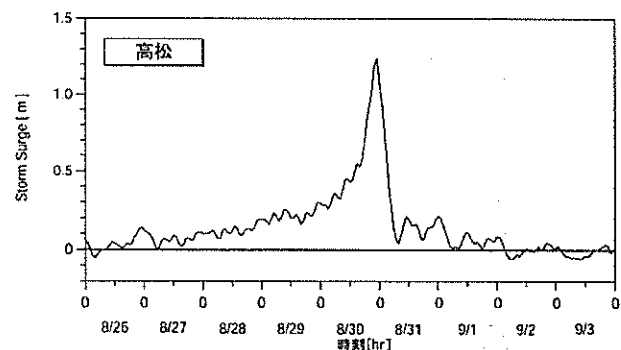


図-3.3 高松港における潮位偏差の観測値

4. 備讃瀬戸沿岸での高潮被害現地調査

4.1 調査方法

高潮による浸水の痕跡は、ハンドレベルを使用したレベル測量によって高さを測り、測量時の海面の高さを基準として整理した後、潮位補正を行った。その際の高さの基準面はCDL（潮位表基準面）とし、これ以後特に記述が無い限り高さの基準はCDLである。なお、図中の水位は測量時の潮位を表している。

4.2 高松港周辺での高潮被害

図-4.1に示す高松港周辺の6地区において、高潮の痕跡高や市街地の浸水状況の調査を行なった。聞き取り調査によると、当時の波浪は高くなかった。高松周辺では波浪観測が行われていないので、波浪は風から推定せざるをえない。表-4.1は高松における8月30～31日の気象データ（気象庁発表）である。高松では30日22時から5m/s以上の西南西から南西の風が吹いており、陸から海にかけての風となっている。このことから高松沿岸では波浪は高くない。

図-4.2に高松漁港周辺の調査地点を示す。

図-4.3は①地点の岸壁の写真とその断面図である。車止めの間に隙間があるため、この地点においては潮位が+3.1m程度に達すると浸水が発生する。しかし、今回の台風0416号では高松港において観測された最高潮位が約+3.7mであったため、浸水発生限界高さよりも海面は約0.6m高い。

①地点の周辺において高潮の痕跡が残っていた②地点の断面図を図-4.4に示す。痕跡高は+3.8mであり、高松港において観測された最高潮位とほぼ一致している。このことから、海水は岸壁を超え、この地点において道路上に深さ約0.5mの浸水をもたらした。

図-4.5は③地点の断面図である。この地点の横には新摺鉢谷川が流れている。ここでの護岸の高さは+3.9mであり、②地点での痕跡高よりも高い。すなわち、この地点からの海水の流入はなかったと推察される。

図-4.6に④地点の日新小学校における痕跡を示す。この痕跡から浸水深は0.7mと考えられる。なお、聞き取りによれば、同小学校の屋内プールでは床上程度の浸水が生じていた。なお、調査を実施した9月1日の時点では学校職員が復旧を行なっている段階であり、休校であった。

図-4.7は⑤地点にあるJR予讃線の下を通り抜ける道路を南側（内陸側）から撮影した画像である。この場所は、高潮浸水によって道路が冠水し、その中であつた自動車から1人の遺体が発見された現場である。この道路に隣接

している民家の住人への聞き取り調査および痕跡高の測定によると、道路わきの住宅の地点において深さ約1.1mの浸水があつた。この浸水深から推定すると、この道路はJR線の線路の直下まで冠水していたことになる。

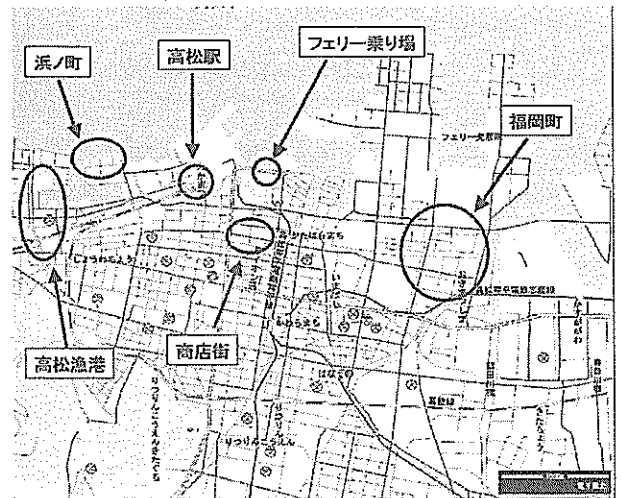


図-4.1 高松港周辺の調査対象地区

表-4.1 高松での気象観測値

年	月	日	時刻	現地気圧	海面気圧	風向	風速
			時 分	[hPa]	[hPa]		[m/s]
04	8	30	0 0	1003.6	1004.7	東南東	5.3
04	8	30	1 0	1002.6	1003.7	東南東	3.4
04	8	30	2 0	1002.3	1003.4	東	3.3
04	8	30	3 0	1001.5	1002.6	東	4.1
04	8	30	4 0	1001.3	1002.4	東	4.1
04	8	30	5 0	1001.0	1002.1	東	4.3
04	8	30	6 0	1000.3	1001.4	東南東	4.9
04	8	30	7 0	999.6	1000.7	東南東	6.4
04	8	30	8 0	999.1	1000.2	東南東	7.6
04	8	30	9 0	999.2	1000.3	東南東	8.6
04	8	30	10 0	997.9	999.0	東南東	6.8
04	8	30	11 0	996.6	997.7	東南東	7.8
04	8	30	12 0	994.7	995.8	東南東	10.3
04	8	30	13 0	993.0	994.1	東南東	9.0
04	8	30	14 0	990.6	991.7	東南東	7.7
04	8	30	15 0	988.6	989.7	東南東	7.4
04	8	30	16 0	985.9	987.0	東南東	8.6
04	8	30	17 0	982.9	984.0	東南東	11.3
04	8	30	18 0	980.3	981.4	東南東	8.6
04	8	30	19 0	977.6	978.7	東南東	9.2
04	8	30	20 0	977.0	978.1	東南東	5.6
04	8	30	21 0	978.8	979.9	南南東	4.6
04	8	30	22 0	982.5	983.6	西南西	7.5
04	8	30	23 0	986.0	987.1	南西	8.3
04	8	31	0 0	988.7	989.8	南西	12.9
04	8	31	1 0	991.4	992.5	西南西	15.5
04	8	31	2 0	993.7	994.8	西南西	9.7
04	8	31	3 0	995.8	996.9	西南西	7.9
04	8	31	4 0	997.3	998.4	西南西	7.6
04	8	31	5 0	998.9	1000.0	西南西	6.0
04	8	31	6 0	1000.3	1001.4	西南西	5.2

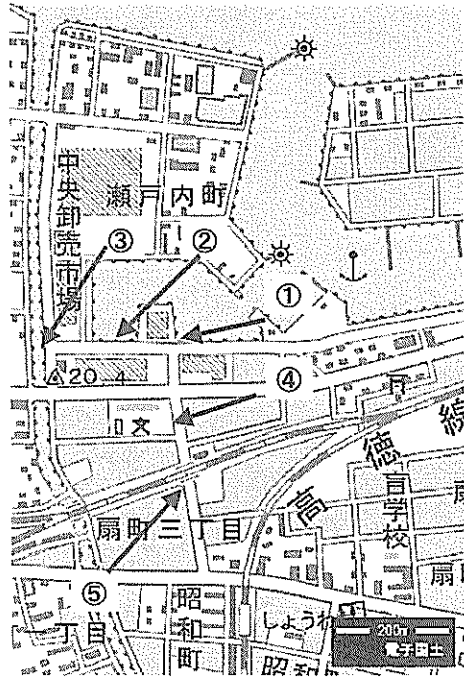


図-4.2 高松漁港周辺

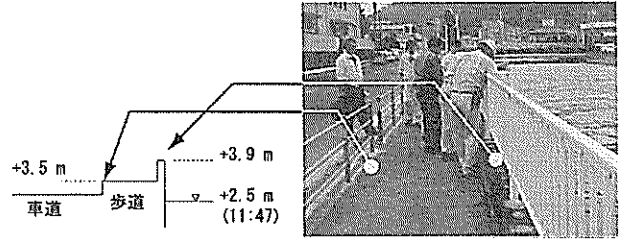


図-4.5 地点③の断面図



図-4.6 地点④（日新小学校）における痕跡

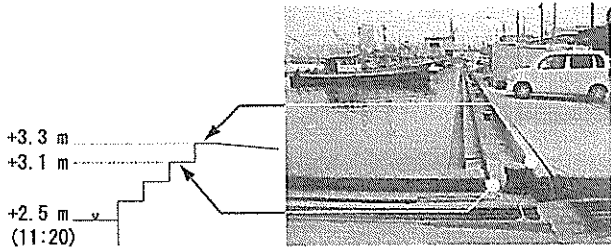


図-4.3 地点①の断面図

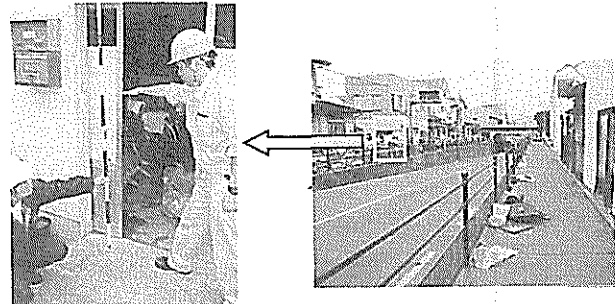


図-4.7 地点⑤における痕跡

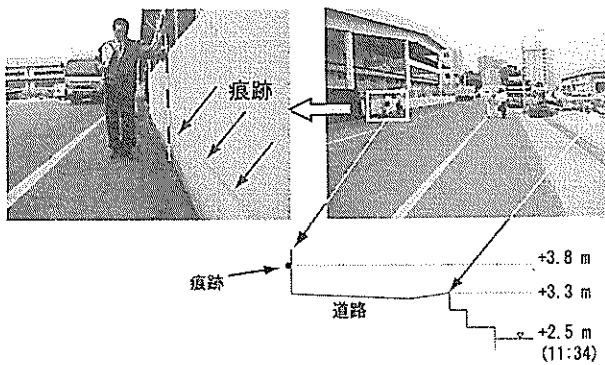


図-4.4 地点②の断面図および痕跡

図-4.8に海に面した高松市浜ノ町における調査地点の概略を示す。①、②および③は、それぞれ漁港の東側に位置する地区の東岸、北岸および西岸である。

図-4.9は①地点の断面図である。高松港で観測された最高潮位(+3.7m)と比較すると、地盤の高さは低いが、護岸の高さは+4.2mと十分な高さである。そのため、護岸を超えて海水が流入したとは考えられない。しかし、住民からの聞き取り調査によると、30日の深夜には排水口から海水が流入し、排水口の蓋が持ち上げられ移動していたとのことである。高潮が発生する危険性がある際には、排水口などの海と繋がっている箇所の管理も重要である。

図-4.10に②地点の断面図および痕跡高を示す。この地点での痕跡高は+3.6mであり、高松港で観測された最高潮位(+3.7m)とほぼ一致している。また、この地点における護岸の高さは+5.1mであり、この護岸を超えて海水が流入したとは考えられない。この地区の西側の漁港の入り口部(③地点)の様子を図-4.11および図-4.12に示す。この③地点における護岸の高さは他の地点よりも低く+3.7mであり、高松での最高潮位と比較すると同じ水準となっている。

浜ノ町での調査結果は、前面が高い護岸で防護されているにもかかわらず、周囲の一部の護岸が海面よりも低いと、そこから海水が流入し浸水することを示唆している。

図-4.13に四国フェリー乗り場の概要を示す。この地域は、台風0310号や台風0410号の際にも海水が沿岸の道路まで遡上し、恒常的に浸水している地域である。ただし、これらの台風では、高潮によって上昇した海面が岸壁を越えるのではなく、高い海面上を変動する波による浸水であった。図-4.14はフェリー乗り場の断面図を示したものである。四国フェリー営業所にあった痕跡から推定される最高潮位は+3.7mである。また、聞き取り調査による浸水位置から推定される最高潮位は+3.6mである。これらの値は、高松港で観測された最高潮位とほぼ一致している。前面の岸壁の高さは+3.0mであり、今回の高潮では海面そのものが岸壁を越え、海水が流入した。

図-4.15は高松市福岡町の概要を示したものである。この地区は周辺よりも低い土地となっているため長い時間にわたり浸水した。一方、他の地区は自然流下により排水された。図-4.16は福岡町にある四国地方整備局での浸水の痕跡を示したものである。整備局内にある水準点を基準に推定した痕跡高は+3.1mであり、高松港で観測された最高潮位(+3.7m)よりも低くなっている。

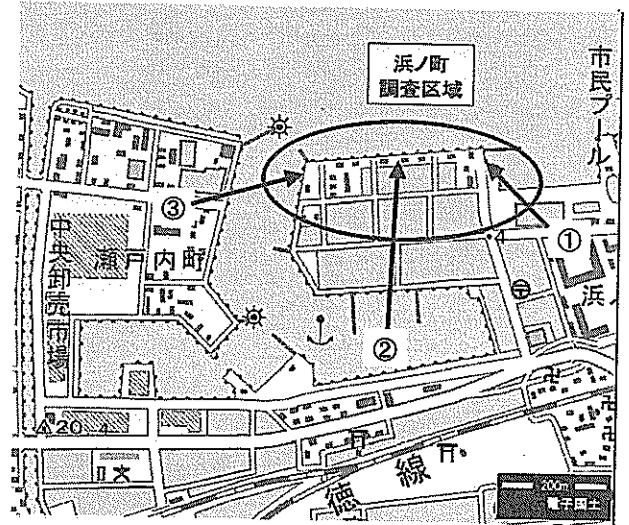


図-4.8 浜ノ町における調査地点

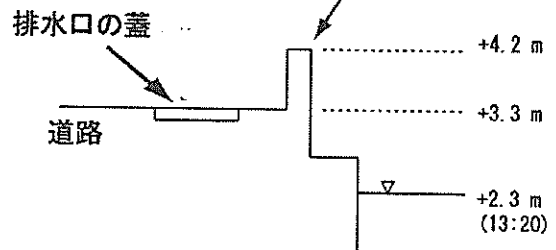
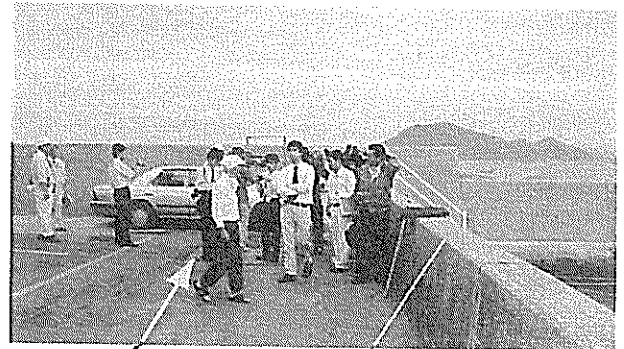


図-4.9 浜ノ町の東岸(地点①)

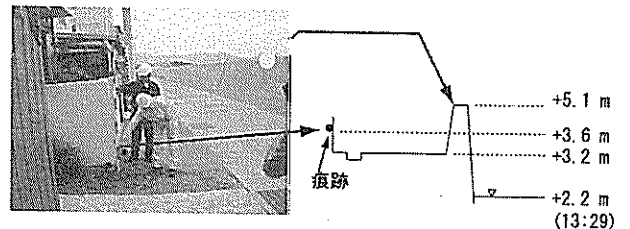


図-4.10 浜ノ町の北岸(地点②)

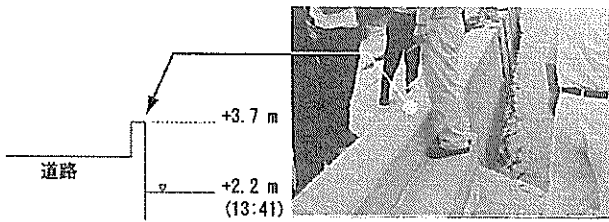


図-4.11 浜ノ町の西岸（地点③）の断面図

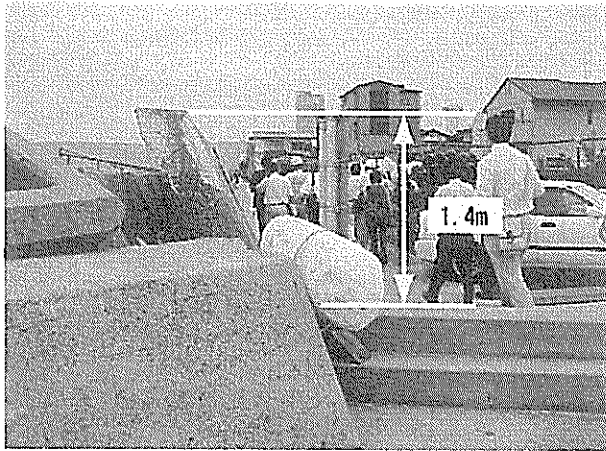


図-4.12 浜ノ町の北岸と西岸の護岸天端高の差

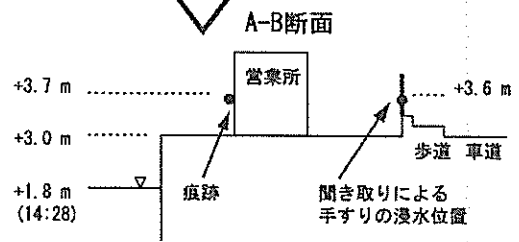
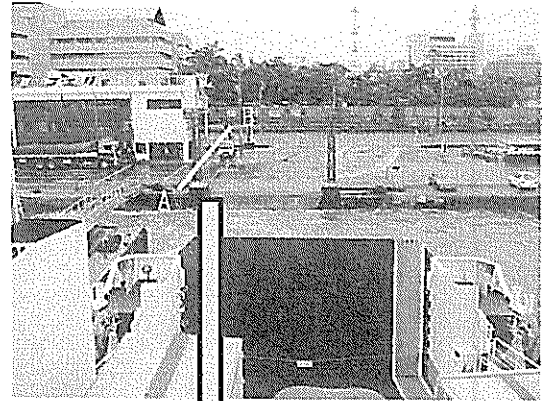


図-4.14 四国フェリー乗り場調査断面図



図-4.13 四国フェリー乗り場



図-4.15 高松市福岡町

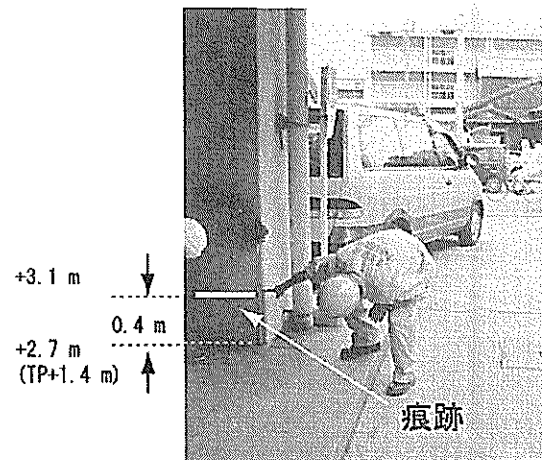


図-4.16 四国地方整備局

図-4.17に詰田川左岸における調査地点の断面図を示したものである。護岸の高さは+3.3mであり、高松港で観測された最高潮位よりも低くなっている。そのため、この地区においては、この地点からの海水の流入があったと考えられる。実際、この周辺の住民からの聞き取りによると、主に東西に走る道路を海水が流れ、川のようなことである。さらに上流で詰田川に合流する御坊川の左岸の一部も低く、徳島大学の中野 晋助教授の現地調査においても、海水流入地点と指摘されている。

図-4.18に高松駅の下を通る道路の状況を示す。このトンネルの上部には浸水の痕跡が残っており、ほぼ地下道路は水没したことがこの痕跡から推定される。これは、地下道路の浸水に対する脆弱性を示している。

フェリー乗り場から南に約600mの位置にある商店街の様子を図-4.19および図-4.20に示す。地盤高によって浸水深は異なるが、床上浸水となっている場所もある。

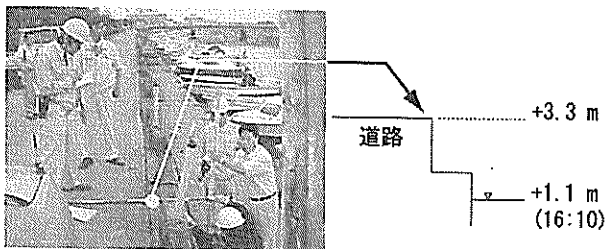


図-4.17 詰田川左岸

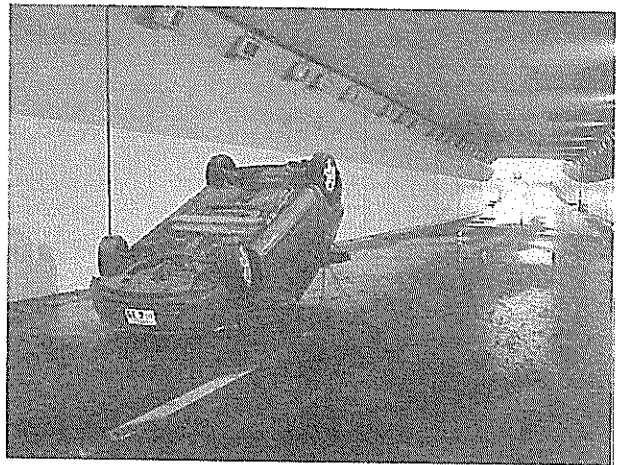


図-4.18(b) 高松駅下の道路



図-4.18(a) 高松駅下の道路



図-4.19 片原町商店街

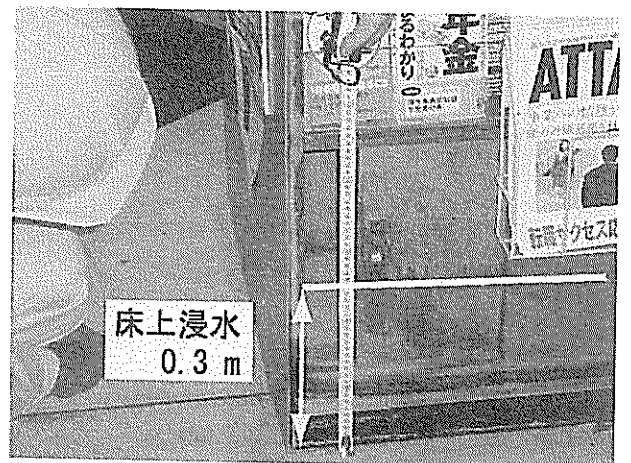


図-4.20 兵庫町商店街

4.3 坂出港での高潮被害

図-4.21に坂出港の概要を示す。左図の円の区域を拡大したものが右図であり、その中心が調査箇所である。

図-4.22に痕跡のあった日通倉庫前の断面図を示す。この地点の痕跡によって推定される最高潮位は+4.1mである。したがって、前面の道路では約0.6mの浸水深となる。

図-4.23は、前図-4.22の岸壁に接続する「せとかぜ」用栈橋の渡橋周辺の断面図を示したものである。ここでは、痕跡は見つけられなかったため、聞き取り調査から得られた浸水位置を示している。この浸水痕跡から推定

した最高潮位は+4.2mであり、浸水深は約0.7mである。ただし、浸水時には浮き栈橋が潮位により上昇していたので、痕跡のあるこの先に相当する部分の高潮時における実際の位置は測量時よりも数cm低くなる。また、波の影響により浮き栈橋の上下動もあることから、聞き取り調査による浸水位置にも数cm程度の誤差が考えられる。

これらの倉庫に残った痕跡高さの測量や聞き取り調査の結果から、台風0416号来襲時の坂出港における最高潮位は、高松港よりも高い+4.1m程度であったと推定した。

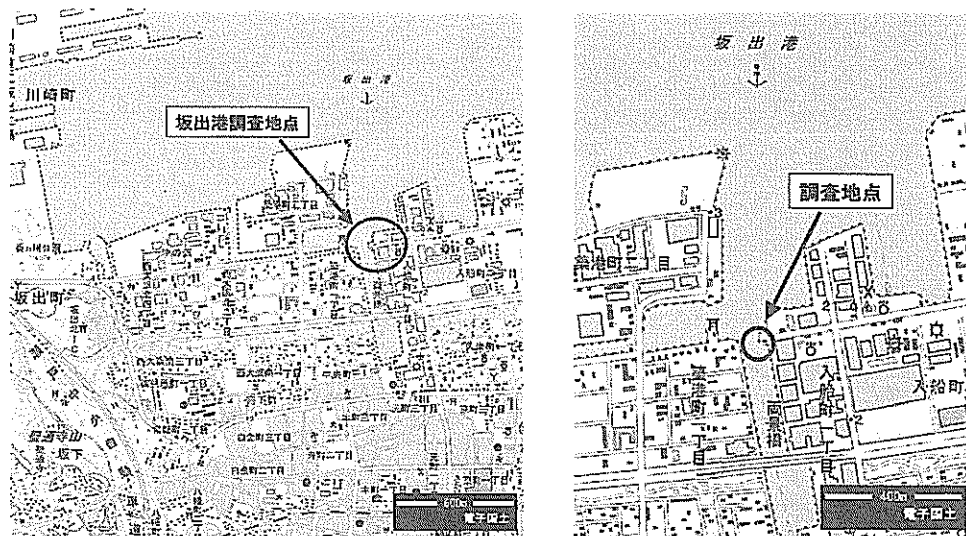


図-4.21 坂出港

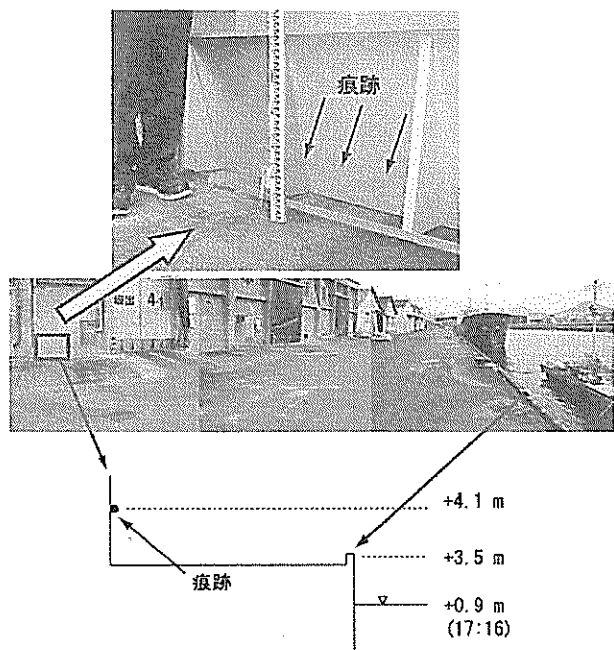


図-4.22 坂出港倉庫前

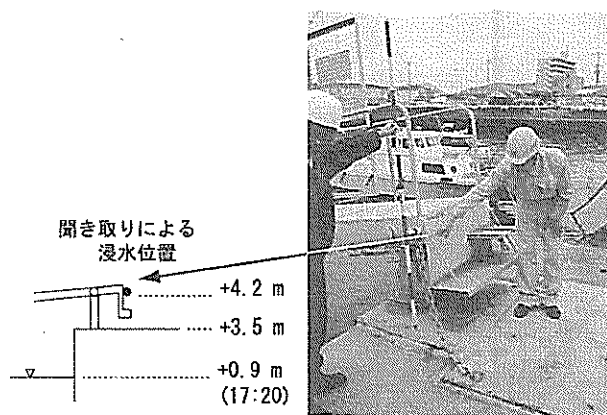


図-4.23 坂出港栈橋

4.4 宇野港周辺での高潮被害

図-4.24に宇野港周辺の概要を示す。住民への聞き取り調査によると、台風0416号による高潮が発生した際には、高松とは対照的に沿岸部では人が流されそうになるような大きな波浪による浸水が発生した。また、市役所周辺においては1m程度の浸水深であったとの証言もあった。

図-4.25に宇高国道フェリー乗り場の断面図を示す。この周辺においては痕跡が残っていなかったが、フェリー乗り場の職員への聞き取り調査から、当時の浸水位置は図-4.25の花壇の上部であったことが分かっている。この浸水位置から推定される最高潮位は+4.0mであり、フェリー乗り場の前面にある岸壁の高さ(+3.1m)よりも高い。また、フェリー乗り場の地盤よりも背後にある住宅地などは低く、かなりの浸水深であったと考えられる。聞き取りによると、8月30日21時40分頃から浸水が始まり、22時頃には屋内まで浸水したそうである。

図-4.26は玉地区の北側にある護岸の断面図を示したものである。歩道横の護岸の大部分は+4.8m程度の高さとなっており、今回の高潮による周辺の地区の最高潮位(+4.0m程度)よりも高く、ここからの海水の流入はなかったと考えられる。しかし、図-4.26にあるように一部の護岸は+3.7mと低くなっている。そのため、この低くなっている護岸上部からの海水流入もあったと考えられる。このように、高い護岸に囲まれていたとしても一部の護岸が低くなっていると、そこから海水が流入するために浸水被害が発生する。

図-4.27に玉地区の東側の断面図を示す。この地区は地盤も低く、さらに直接海に面していることから台風0410号の際にも浸水被害があった。台風0416号による最高潮位を痕跡から推定すると+3.9mであり、前面の護岸の高さ(+3.3m)よりも0.6m高く、この地点からの海水の流入があったことが分かる。また、住民への聞き取り調査によると、波浪により海水が民家の壁を突き破って流入したそうである。また、シャッターや住宅の外壁などが破壊された箇所もあった。

宇高国道フェリーでの調査および玉地区での調査の結果では、当時の最高潮位は4.0m程度であったと推定される。しかし、宇野港で観測された最高潮位(気象庁速報値)は+3.81mであり、調査結果よりも0.2m程度低くなっている。今後、波浪の影響を含めて、原因を検討する必要がある。

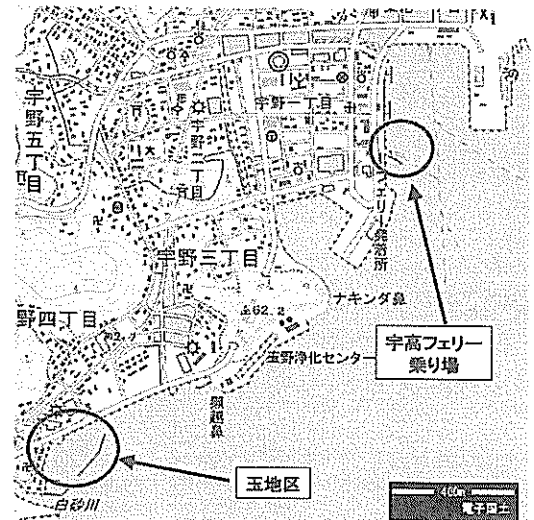


図-4.24 宇野港周辺

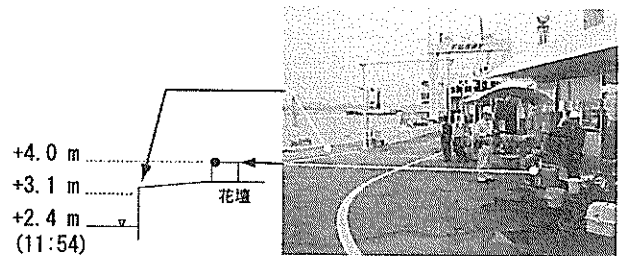


図-4.25 宇高国道フェリー乗り場

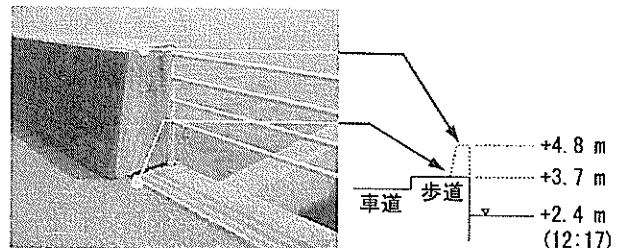


図-4.26 玉地区北側

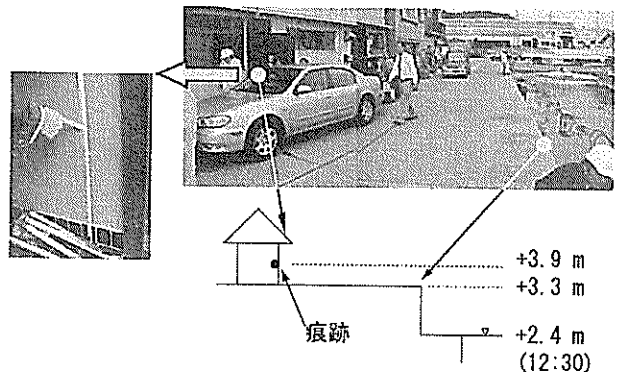


図-4.27 玉地区西側

4.5 水島地区での高潮被害

図-4.28に水島港周辺の概要を示す。勇崎漁港背後では、今回の台風0416号による浸水によって住民が1人亡くなった。

乙島西地区にはマリーナがあり、今回の高潮により船が流される被害が発生している。図-4.29はマリーナの断面図を示したものである。護岸の高さは+4.3mであり、玉島で毎時記録されている潮位記録の最高潮位+4.87m（速報値）と比較すると、浸水深は0.5m以上である。また、図-4.30（提供：中国地方整備局宇野港湾事務所）にあるように、護岸の背後の道路にまで船が流出していた。

現地調査時では、浮棧橋に大きな変形は認められなかったが、高潮直後では図-4.31（提供：中国地方整備局宇野港湾事務所）にあるように、マリーナの浮棧橋が傾いていた。高潮時にマリーナに来ていた船の所有者の話によると、図中にある黒い浮棧橋の支柱の上部（+4.9m）まで棧橋が持ち上げられていたことが分かった。写真の状況をよく説明している。

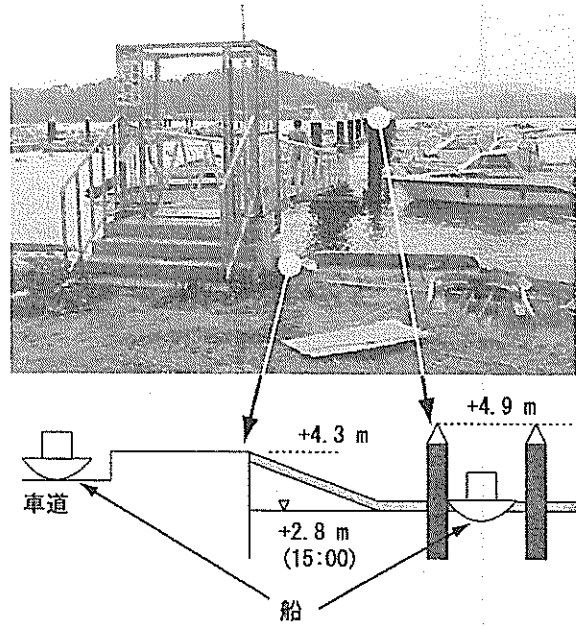


図-4.29 乙島西地区

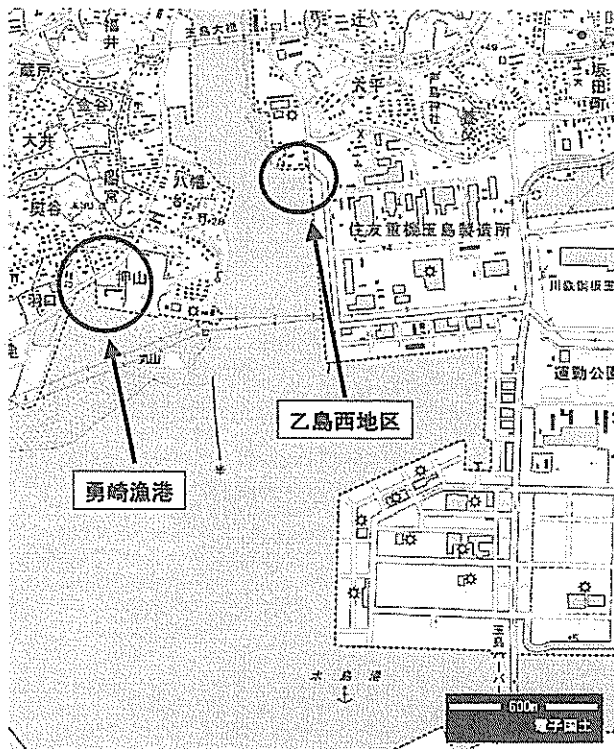


図-4.28 水島港周辺



図-4.30 被災直後の様子①



図-4.31 被災直後の様子②

図-4.32に勇崎漁港周辺の概要を示す。図中の○印が海岸堤防の被災箇所を示している。この護岸は、前面を残して中詰め土および背後のブロックが流されて被災していた。その状況を示したのが図-4.33～図-4.35である。この海岸堤防の天端高は+6.5m程度の十分な高さであり、海水面が海岸堤防の天端が越えて越流したとは考えられない。ただし、この地区には高い波浪が作用したため、越波によって海水が流入したと推察される。また、堤防の被災では、越波水塊が裏のり面をたたいたことによる外からの損傷や堤内の浸透水によって堤防の中からの損傷などが考えられるが、どちらの場合においても高波浪が影響する。

図-4.36に地点Aにおける浸水の痕跡と断面図を示す。ここでの痕跡の高さは隣接している道路から1.4mもの高さであり、かなりの浸水深である。

図-4.37は地点Bにある住宅の浸水の痕跡を調査したものを示したものである。その痕跡の高さは+3.6mである。また、住宅の玄関口の高さは地盤から0.9mの高さにあり、前面の道路からは1.4mであった。この住宅の住民への聞き取り調査によると、8月30日23時頃には住宅地に浸水が始まっており、10～20分程度と非常に短い時間に住宅の床上まで浸水したことが分かった。



図-4.32 勇崎漁港



図-4.33 復旧活動後の様子①



図-4.34 復旧活動後の様子②

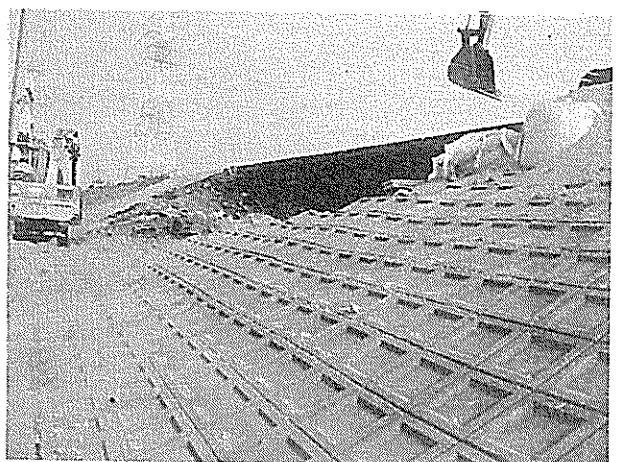


図-4.35 復旧活動の様子

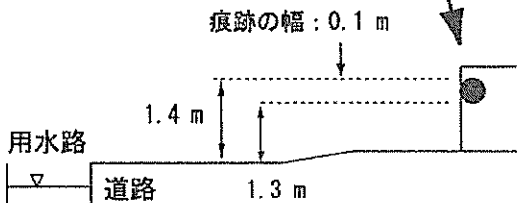


図-4.36 浸水深の調査 (地点A)

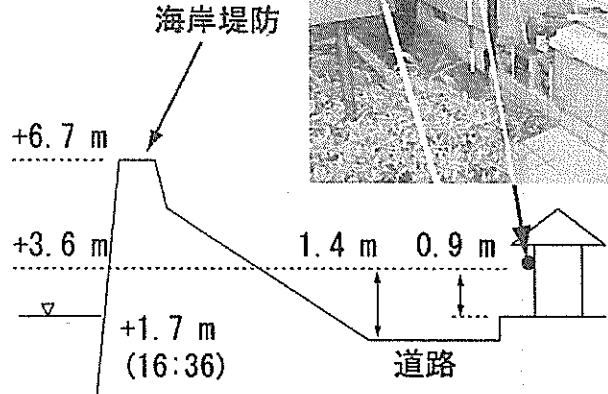


図-4.37 浸水深の調査 (地点B)

5. 数値計算

現地調査結果から、備讃瀬戸の高松側ではほとんど高波が発生しておらず、純粋な高潮による浸水被害であったことがわかった。このため、高潮による浸水被害の基本的な特性を把握できる事例であるため、高松における高潮浸水に着目して数値シミュレーションを実施した。

数値計算では、高潮浸水の原因となる沿岸における高潮を台風モデルに基づく気圧場や風の場の計算から始まり、平面2次元の海洋流動モデルの外力としてその気圧や風の時間的および空間的变化をあたえて、高潮偏差の時々刻々の変化を計算し、計算を分離することなく連続して陸上の浸水計算を行った。

5.1 台風の気圧分布と風速場

台風の気圧分布は同心円と仮定し、次式に示すMyersの分布を与えた。

$$p(r) = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (5.1)$$

ここで、 $p(r)$ は台風の中心から距離 r [m]だけ離れた点の気圧[hPa]、 p_c は台風の中心気圧[hPa]、 Δp は1013hPaを基準とした気圧深度[hPa]、 r_0 は台風半径[m]を表している。高潮計算に用いた台風の中心位置および台風半径を表-5.1に示す。これらの値のうち、台風の中心の緯度、経度、

気圧は気象庁の発表の値である。一方、台風の半径は、それぞれの時刻において観測された数ヶ所の気圧の観測値から式(5.1)を用いて逆算して求めた値の平均値である。なお、8月28日3時以前の気圧深度は0hPaから60hPaまで徐々に変化しているが、高潮の追算において台風が存在しない計算上の初期状態から実際の気圧や風場に穏やかに近づけるための仮想的な値であり、実際の値とは異なる。

従来の風速場のモデルでは、台風の気圧勾配に起因する傾度風と、台風自体の移動によって生じる場の風とを分けて考えている。傾度風は、台風の気圧勾配と遠心力およびコリオリ力の静的な釣り合いから求め、これに経験的な低減係数を乗じて海上における風速を求める。自由大気と比較して海上風の風向は台風の中心に向かって30~40deg偏向している。一方、場の風の場合は、台風の進行速度と経験的な低減係数等を用いて海上風を求める。そして、これら傾度風および場の風のそれぞれの海上風をベクトル合成して風速場を求めた。

しかし、台風の中心付近では、風速場の三次元構造に起因して、海上風の風速が自由大気の風速に近いがそれ以上になることが知られており、この風はスーパー・グラディエント・ウィンド (SGW) と呼ばれている。このSGWを考慮した海上風 W の風速を表わす式として、次式が提案されている。

表-5.1 海上風の推算に用いた台風0416号の諸元

年	月	日	時	分	経度 [deg]	緯度 [deg]	気圧深度 [hPa]	台風半径 [km]	移動速度 [km/h]
04	8	26	0	0	135.00	26.08	0	100	0.00
04	8	27	9	0	135.00	26.08	0	100	12.45
04	8	27	15	0	134.50	26.58	20	100	12.45
04	8	27	21	0	134.33	26.83	40	100	5.39
04	8	28	3	0	134.17	27.08	60	100	5.38
04	8	28	9	0	133.92	27.17	78	95	4.41
04	8	28	15	0	133.58	27.42	78	100	7.19
04	8	28	21	0	132.92	27.58	73	100	11.37
04	8	29	3	0	132.08	27.83	73	100	14.45
04	8	29	9	0	131.33	28.08	73	105	13.13
04	8	29	12	0	130.83	28.42	73	100	20.49
04	8	29	15	0	130.42	28.83	73	110	20.52
04	8	29	18	0	130.08	29.00	73	105	12.48
04	8	29	21	0	130.08	29.33	73	100	12.33
04	8	30	0	0	129.83	29.83	68	105	20.20
04	8	30	1	0	129.83	29.92	68	110	13.93
04	8	30	2	0	129.92	30.00	68	115	13.39
04	8	30	3	0	129.92	30.17	68	115	22.61
04	8	30	4	0	129.92	30.50	68	110	25.25
04	8	30	5	0	130.00	30.67	68	110	28.32
04	8	30	6	0	130.00	30.92	63	120	22.68
04	8	30	7	0	130.08	31.08	63	115	25.58
04	8	30	8	0	130.17	31.33	58	130	24.44
04	8	30	9	0	130.33	31.50	58	120	24.48
04	8	30	10	0	130.42	31.67	58	120	27.45
04	8	30	11	0	130.50	32.00	58	120	40.61
04	8	30	12	0	130.83	32.50	58	125	46.49
04	8	30	13	0	130.92	32.83	53	140	46.51
04	8	30	14	0	131.00	33.17	53	145	37.58
04	8	30	15	0	131.00	33.50	48	175	38.34
04	8	30	16	0	131.17	33.83	48	175	35.57
04	8	30	17	0	131.42	34.00	48	175	31.51
04	8	30	18	0	131.67	34.08	48	160	40.57
04	8	30	19	0	132.33	34.33	43	180	46.74
04	8	30	20	0	132.67	34.67	43	180	62.45
04	8	30	21	0	133.17	35.17	43	180	65.40
04	8	30	22	0	133.83	35.58	43	175	67.79
04	8	30	23	0	134.17	36.00	43	170	71.65
04	8	31	0	0	135.00	36.33	43	170	62.14
04	8	31	1	0	135.33	36.67	43	170	62.03
04	8	31	2	0	135.67	37.08	43	170	55.57
04	8	31	3	0	136.17	37.50	38	200	70.55
04	8	31	4	0	136.92	38.08	38	200	68.41
04	8	31	5	0	137.08	38.50	38	220	66.07
04	8	31	6	0	137.58	38.83	38	210	54.22
04	8	31	7	0	138.08	39.17	38	190	57.01
04	8	31	10	0	139.83	40.92	38	240	60.00

$$W = C_1(X)U_G \quad (5.2a)$$

$$C_1(X) = C_1(\infty) + [C_1(X_p) + C_1(\infty)] \left(\frac{X}{X_p} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[\left(1 - \frac{1}{k} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X_p} \right)^k \right\} \right] \quad (5.2b)$$

$$U_G = \frac{1}{2} \left[- (fr - V_T \sin \beta) + \sqrt{(fr - V_T \sin \beta)^2 + 4 \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \right] \quad (5.2c)$$

ここで、 $X=r/r_0$ 、 $C_1(X)$ は風速低減係数、 f はコリオリの係数($=2\omega \sin \varphi$ 、 φ :緯度[rad]、 ω :地球の自転の角速度 $=7.29 \times 10^{-5}$ [rad/s])、 $k=2.5$ 、 V_T は台風の移動速度、 ρ_a は大気密度($=1.22$ [kg/m³])、 β は台風の進行方向からみた角度を表わす。この風速低減係数 $C_1(X)$ は $X=X_p$ で最大値 $C_1(X_p)$ となる関数であり、その最大値については様々なものが提案されている。本研究では、河合ら(2003)にならい、次式で表わされる台風の気圧深度 Δp も考慮したMitsuta and Fujii(1987)のモデルを用いた。

$$C_1(X) = \frac{2}{3} \left[1 + 10^{(0.0231\Delta p - 1.95)} \right] \quad (5.3)$$

このSGWは、自由大気風の追算に関して、傾度風と場の風をベクトル合成する従来の方法とは違い、式(5.2c)の U_G は台風の移動を考慮した座標系における気圧勾配、遠心力およびコリオリ力の釣り合いから直接求めている。

5.2 海水の運動

気圧低下に伴う海面の吸い上げや、強風による吹き寄せで生じる海水の運動に関して、次式で示す単層の非線形長波方程式を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (5.5a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (5.5b)$$

ここで、 η は高潮偏差、 t は時間、 x と y は水平方向の座標、 z は鉛直方向の座標(静水面は $z=0$ 、海底は $z=-h$)、 D は全水深($=h+\eta$)、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密

度, A_h は水平渦動粘性係数, p_0 は海面における気圧であり, 式(5.1)の $p(r)$ に対応している. また, M および N はそれぞれ x および y 方向の流量フラックスであり, 次式で定義される.

$$M = \int_h^0 u dz \quad (5.6a)$$

$$N = \int_h^0 v dz \quad (5.6a)$$

ここで, u および v はそれぞれ水深 z における x および y 方向の流速である. また, τ_{sx} および τ_{sy} はそれぞれ x および y 方向の海面せん断応力であり, τ_{bx} および τ_{by} はそれぞれ x および y 方向の底面せん断応力である. これらは, それぞれ次式として与えた.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5.7a)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5.7b)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5.8a)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5.8b)$$

ここで, W_x および W_y はそれぞれ海上風速 W の x および y 成分, n は Manning の粗度係数である. また, C_D は海面抵抗係数を表わし, 本多・光易(1980)によると次式によって与えられる.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (5.9)$$

これらの方程式を, 空間差分には staggered 格子を用い, 時間差分には leap-frog 法を用いて離散化し, 数値計算を行なった.

5.3 計算領域および再現時間

追算にあたっては, 図-5.1および表-5.2に示す計算領域を設定した. 日本列島の南半分を含む一辺約 1500 km の矩形領域を第1領域として 12150 m の格子間隔で再現し, その内部に, 4050 m, 1350 m, 450 m, 150 m, 50 m, 25 m の格子間隔の計算領域をネスティングしたものである. また, 計算にあたっては, 各格子における土地利用を考慮し, Manning の粗度係数を 0.020~0.040 の範囲で与えた.

一方, 時間間隔に関しては, 次式で表わされる差分スキームの安定条件を満たすように $\Delta t = 1.0$ と設定した.

$$\Delta t < \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh_{\max}}} \quad (5.10)$$

ここで, Δs は各計算領域の格子間隔, h_{\max} は各計算領域での最大水深を表わす.

高潮の再現時間に関しては, 表-5.1にあるように8月27日9時から潮位偏差がピークを過ぎて数時間後の8月31日10時までとした. ただし, 後述するように天文潮を考慮した計算を行なうにあたっては, 天文潮を起動させたときに生じる短周期の振動を抑えるため十分な時間が必要である. このため, さらに時間を加えて8月26日0時から計算を行なっている.

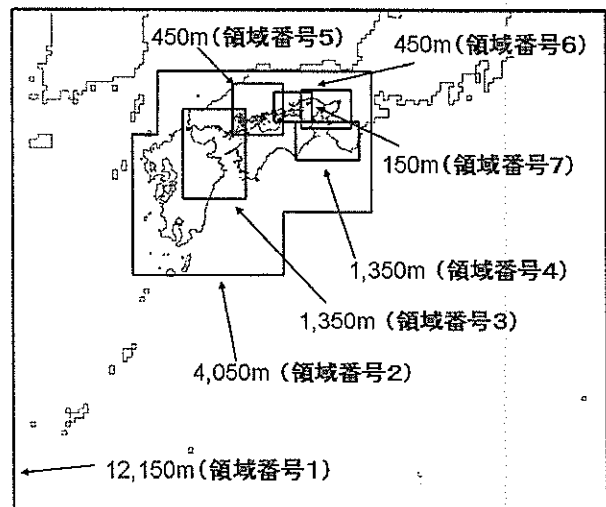


図-5.1(a) 計算領域 (広領域)

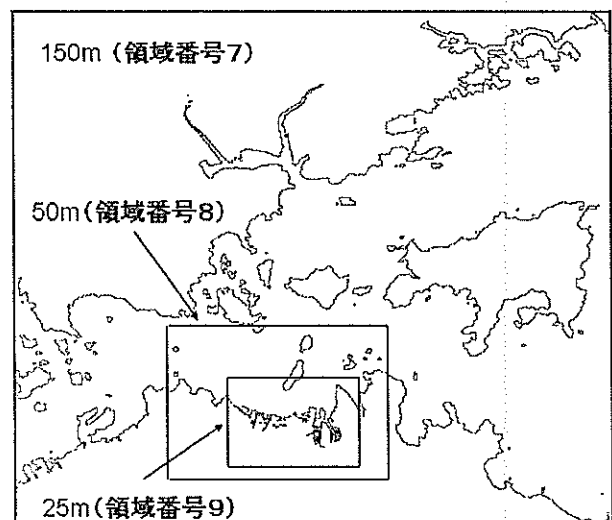


図-5.1(b) 計算領域 (高松周辺)

表-5.2 計算領域と計算格子

領域番号	格子数(東西×南北)	格子間隔
1	142 × 120	12150
2	168 × 147	4050
3	147 × 153	1350
4	126 × 69	1350
5	387 × 213	450
6	240 × 186	450
7	390 × 384	150
8	390 × 285	50
9	560 × 278	25

5.4 天文潮位変動の導入

天文潮は、一般的には高潮推算に重ね合わせる事ができる。このため、後述するように天文潮を考慮せずに平均潮位を基準として高潮偏差の計算を最初に行った。しかし、高松などの備讃瀬戸沿岸では、観測潮位から計算した高潮偏差と数値モデルで計算した高潮偏差は一致しなかった。このため、この差異に及ぼす天文潮の影響、具体的には天文潮による水位や流動の変化の影響を検討するために、河合ら(2003)と同様の手法で天文潮を考慮した計算を行なった。

まず、天文潮のみの変化について示す。図-5.1に示した格子間隔 1350 m の計算領域の外側境界のうち、響灘、豊後水道および紀伊水道の海域に位置している境界に、天文潮による水位の時間変動を与え、1350 m よりも小さい格子間隔の計算領域内に天文潮を発生させた。この境界に与える天文潮の計算には、Matsumoto et al.(2000)による潮汐予測システムであるNAO.99Jbモデルを用いた。このモデルでは、TOPEX/POSEIDON海面高度計データから解析された潮汐に日本沿岸の検潮データを同化して天文潮を算出する。

しかし、この方法で発生させた潮汐は、備讃地域における調和定数から直接計算した天文潮よりも振幅が大きく、位相が遅れた。この差異の検討は重要であるかもしれないが、本論文では、浸水計算に主眼を置いたため、精緻な検証は行わず、対象としている高松における高潮が発生した起時での天文潮を合わせることを行った。具体的には、線境界で与える天文潮による水位の時間変化の振幅に0.735を乗じ、位相に関しては50分だけ早めた。これらの補正によって、天文潮位は図-5.2のようになり、高松および宇野での調和定数から直接計算した天文潮位に重なった。なお、ここでは、潮位の基準面はTPとした。

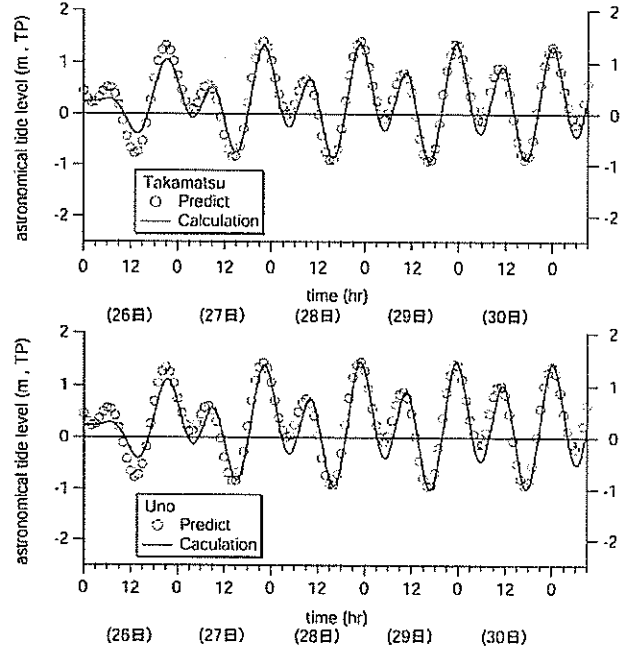


図-5.2 天文潮位

5.5 高潮偏差の計算結果

(1) 最小格子間隔による計算結果の相違

河合ら(2005)が行なった台風0416号を対象とした高潮の追算では、今回使用した計算モデルと同一であるが、計算領域の設定の仕方や最小計算格子の大きさが異なる。特に、河合らは最小格子間隔を600mとしたが、本研究では陸上における浸水計算を行なうため、最小格子間隔を更に細かい25mとした。

こういった計算格子の大きさが高潮偏差に影響を及ぼすことがわかっている。例えば、台風0310号による高松や宇野での高潮の数値計算では、備讃瀬戸における計算格子の大きさを5.4km、1.8kmおよび0.6kmと小さくすることで計算された高潮偏差は大きくなった(富田・河合, 2004)。そこで、今回の高松沿岸における25mの格子間隔の大きさが、高潮の結果にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、高松沿岸の計算格子の大きさを25mにした場合と600mにした場合とで計算結果を比較した。なお、ここでは計算領域および計算格子による違いを検証することを目的としたので、天文潮は考慮していない。

高松、宇野および松山における高潮偏差の計算結果と観測値を図-5.3に示す。高松においては、25mの格子サイズを用いた場合の方が10cm程度小さい最大高潮偏差になった。また、備讃瀬戸に25m格子の計算領域を配置した影響は松山には現れていない。

しかし、観測結果と比較した場合、高松および宇野に

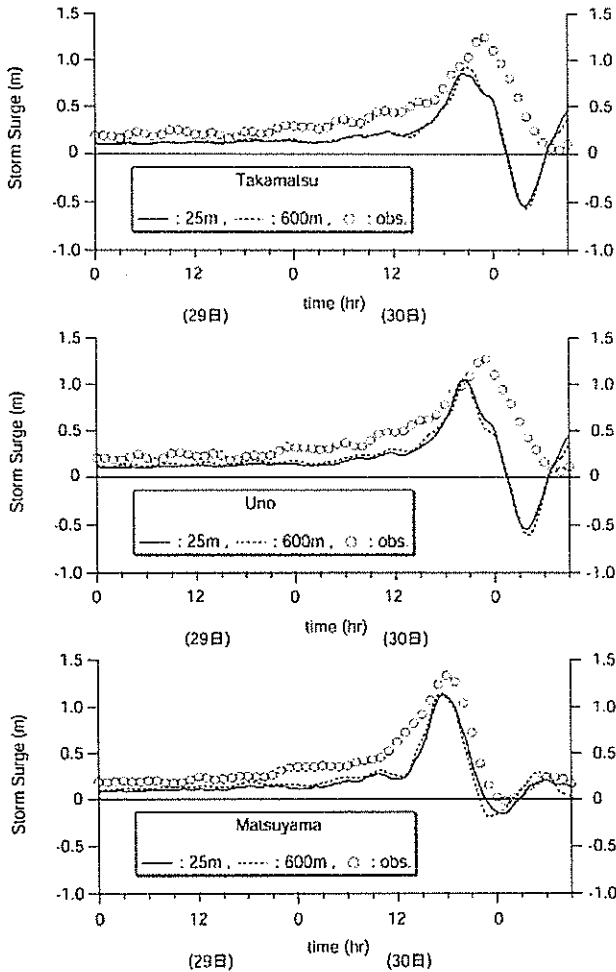


図-5.3 高潮偏差

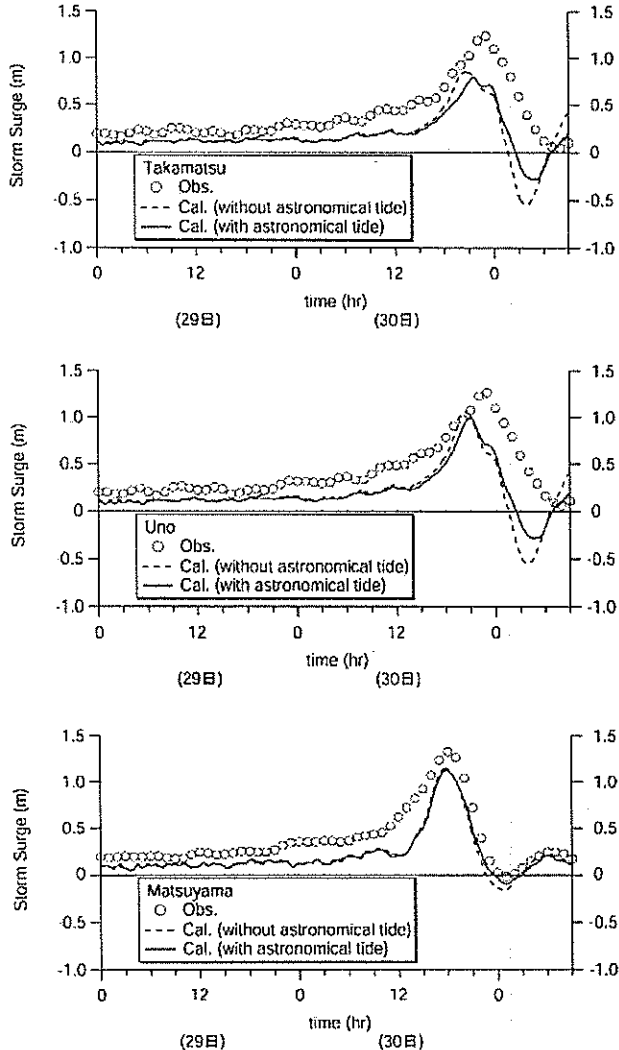


図-5.4 高潮偏差

おける高潮偏差の計算結果は25mの計算格子サイズを使っても600mの格子サイズを使っても観測値よりも小さい。さらに、松山においても同様に小さい。高潮偏差が最大となる起時に着目すると、松山では計算結果は観測値とほぼ同時刻であるが、高松および宇野では、計算格子の大きさによらず計算結果の方が観測結果よりも起時が早い。

以上のことから、高松沿岸に25mの小さな計算格子の計算領域を配置したことにより高潮偏差の大きさは、若干小さくなるのがわかった。しかし、この差異以上に高松における高潮偏差の計算結果と観測結果との差異は大きく、最大値の発生時刻が観測結果よりも早くなる傾向が認められた。

- (2) 天文潮位の変動の有無による計算結果の相違
- 高潮偏差において計算結果と観測結果との差異に及ぼす天文潮の影響を検討した。
- 高松、宇野、松山および神戸における高潮偏差の計算

結果と観測結果を図-5.4に示す。図中、実線は天文潮を導入した計算結果、破線は天文潮を考慮しない計算結果を表わしている。

高松および宇野においては、天文潮を考慮していない計算結果よりも考慮した計算結果の方が、高潮偏差が最大となる起時が観測値に近づく傾向にある。ただし、それでも観測結果よりも早い。また、高潮偏差の最大値は、

天文潮を考慮しない計算結果よりも考慮することによりわずかに小さくなっている。一方、高潮偏差がピークを過ぎた後の高潮偏差の変動は、天文潮を考慮することにより小さく抑えられている。

松山においては、天文潮の有無による計算結果の差異は認められない。観測結果と比較すると計算結果における高潮偏差の大きさは小さいが、これは台風接近前の29日の時点から計算結果は小さく、この差異が最大高潮偏差における差異に影響を及ぼしている。最大高潮偏差の発生時刻は観測結果にほぼ等しいことから、台風接近前の潮位偏差を正しく推定できれば、松山における高潮偏差は観測結果により近いものとなる。

神戸では、天文潮の有無によらず、高松と同様に高潮偏差が最大となる時刻は計算結果が観測値よりも早くなっている。一方、高潮偏差の最大値に関しては、天文潮を考慮した場合が、考慮しない場合よりもさらに小さくなった。

以上における検討から、松山では、天文潮が高潮偏差に及ぼす影響はほとんどないが、高松・宇野においては天文潮を考慮しない場合よりも考慮することによって最大高潮偏差はより小さくなることが判明した。すなわち、天文潮を考慮することによって、観測結果からより一層離れた結果になってしまった。一方で、高潮ピーク後の負の高潮偏差の発生は小さく抑えられた。

天文潮によりこういった現象が発生した理由を探るために、図-5.5に、瀬戸内海における高潮偏差の時空間的な変化、図-5.6に天文潮位の変動に伴う潮流の時空間的な変化を示す。なお、先の検討では最大高潮偏差の発生時刻は計算結果のほうが観測結果よりも早かったが、こ

この検討ではその時刻の差の調整は行っていない。しかしながら、図-5.4における天文潮を考慮した計算の場合と同じように潮流と高潮偏差の図に示した時刻は一致している。図-5.5では台風の東進にともなって、計算上の30日18時から22時にかけて高潮偏差のピークは瀬戸内海を西から東に伝播している。その際には風は西や南西から吹くことになる。特に高潮偏差のピークが燈灘を東向きに流れる21時から23時の間では、潮流は風向きと同じ西から東への流れとなっている。すなわち、西から吹く風と潮流が同方向であることは吹き寄せ効果を減少させることになり、高潮偏差は小さくなる、さらに上げ潮による水深の増大も、高潮偏差の低下を引き起こす。この現象は干潮時において顕著に現れている。高松の31日3～6時の干潮に向かう東向きに流れる引き潮時に、それと同方向に風が吹くために冲向きの吹き寄せ効果が減少し高潮の減少の程度を小さくしている。このため、天文潮を考慮することにより負の高潮の発生が抑えられた。すなわち、天文潮による潮流と風の向きが高潮偏差に影響を及ぼしている。

さて、高潮偏差の計算結果を見ると、21時頃に燈灘から備讃瀬戸への伝播する高潮が顕著でない、このときには、潮流は備讃瀬戸を西向きに流れており、高潮偏差の伝播を阻害したたのではないかと思われる。

以上のように、天文潮の有無に拘わらず、高松における高潮偏差の計算結果は観測値よりも小さく、また、最大となる起時も観測値よりも早くなる傾向に変わりはない。今後の計算結果の改善に関しては、後述する7. 今後の課題においてとりまとめることとする。

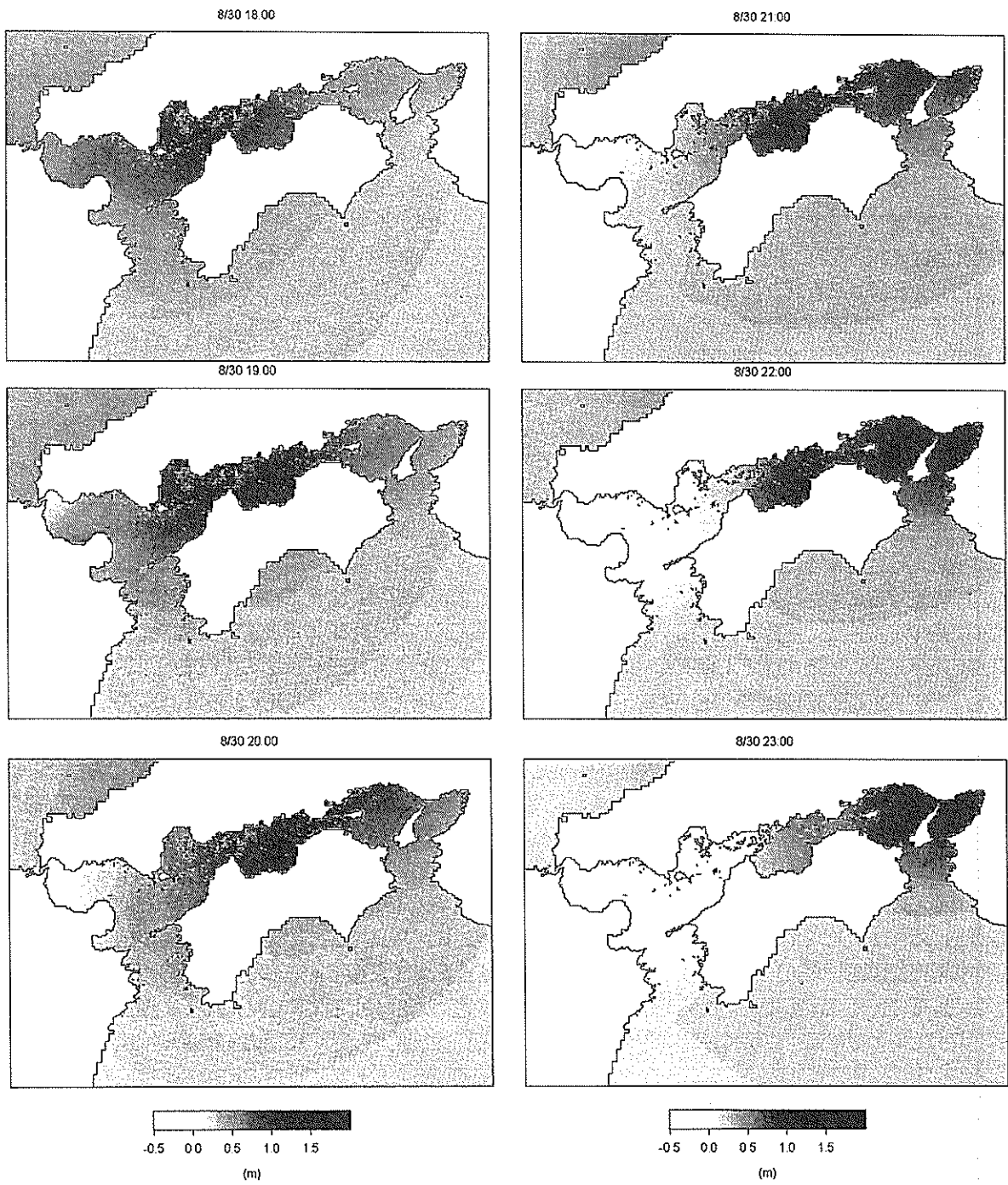


図-5.5 高潮偏差の時空間変化

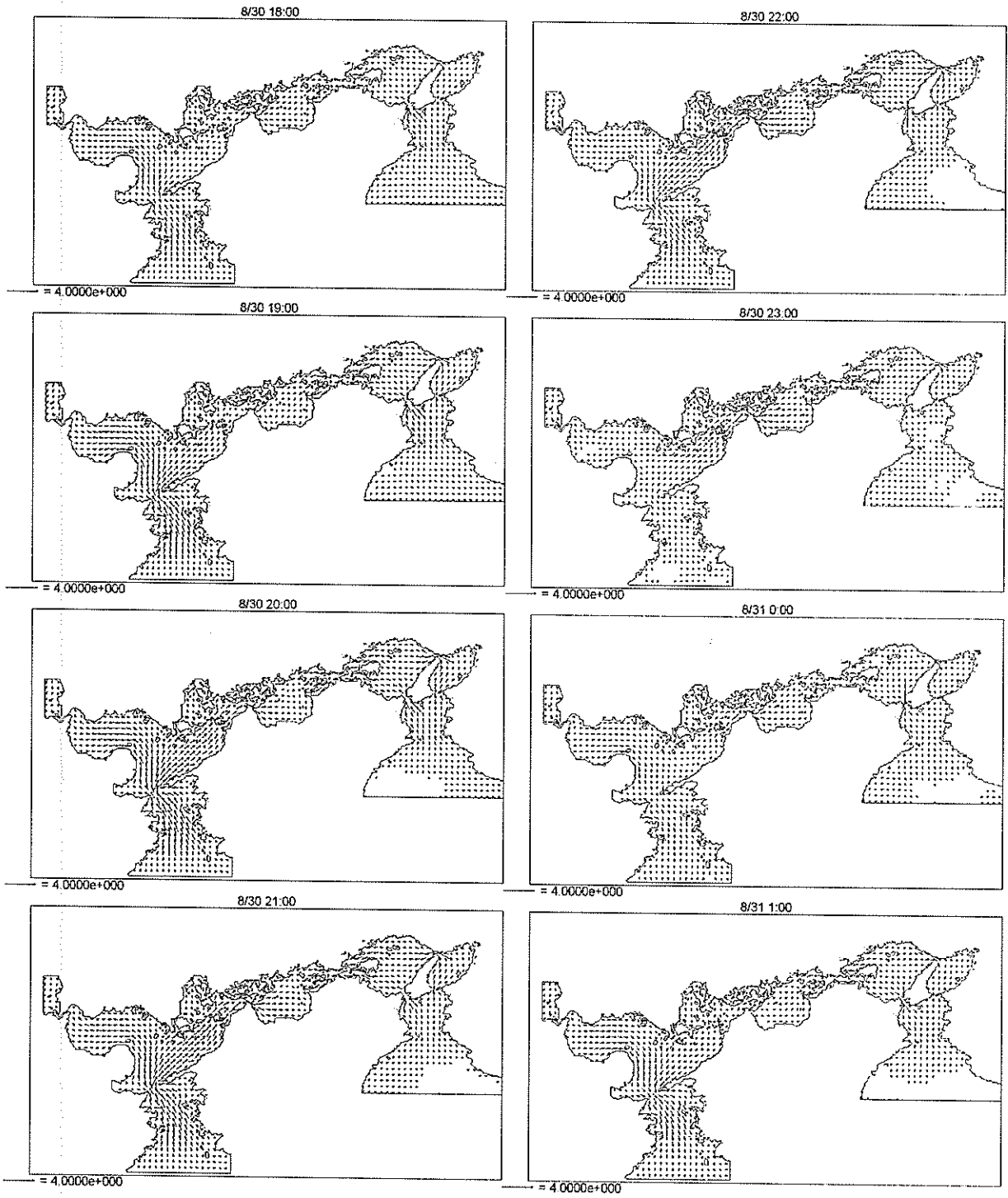


図-5.6 天文潮による潮流の時空間変化

(3) 高松における浸水計算

最小計算格子サイズの違いや天文潮位の変動の有無によらず、高松における高潮偏差の計算結果は観測値よりも小さい値となり、また、高潮偏差が最大となる時刻が実際よりも早くなる傾向が見られた。一方、浸水の発生は潮位が護岸等を超えることによって起こる。つまり、ある閾値を超えるかどうかによって、浸水範囲や浸水深等の計算結果は大きく変わってしまう。そのため、図-5.7に示すように高松における潮位の計算結果が実測値と一致していないことから、このまま高松市街地の浸水計算を行なうことはできない。

そこで、本研究では、高松での最大潮位の計算結果が観測値と一致するような平均潮位を試計算から求め、さらに最大潮位の発生時刻の差異を無くすために計算開始時刻の調整を行ったうえで、求めた平均潮位のもとで高潮偏差の計算を行って、高松市街地における浸水計算を行った。また、市街地における土地利用に関しては、それに対応する Manning の粗度係数を与えて再現した。

図-5.8に計算から得られた最大浸水深の分布を示す。これは、及川(2005)の住民へのアンケート調査に基づいた浸水状況や高松市が発表している浸水状況図(図-5.9)と比較した結果、公表されている浸水面積11km²に対して、計算結果において浸水の有無の閾値を1cmとした場合の浸水面積は12.9km²、閾値を10cmとした場合では11.6km²となり、浸水面積においては良好な計算結果を得ることができた。

さらに、この比較結果から、平坦な地域における浸水では、計算上の浸水の有無を判定する閾値の設定も重要であることが分かった。これは計算格子の大きさにも依存する問題であり、今後の検討課題である。

また、最大浸水深は、沿岸部ではなく内陸部で発生している。これは、沿岸から流入した海水が地盤の低い所へと流れ込んで、低地に貯まったこと意味しており、沿岸低地の危険性を表している。

浸水深の分布に関する時系列変化を図-5.10に示す。まず、高潮により上昇した海水位よりも低い護岸や堤防等を有している沿岸部や河川部の一部から浸水が開始している。例えば、図が煩雑になるため場所の表示はここではしないが、現地調査において海岸に沿って高い防潮壁があった浜ノ町では、そういった高い防護施設のない背後の海に面した側から流入している。全体的にみて沿岸から流入した海水は内陸部に広がり、地盤の低い土地へ流れ込んでいる。

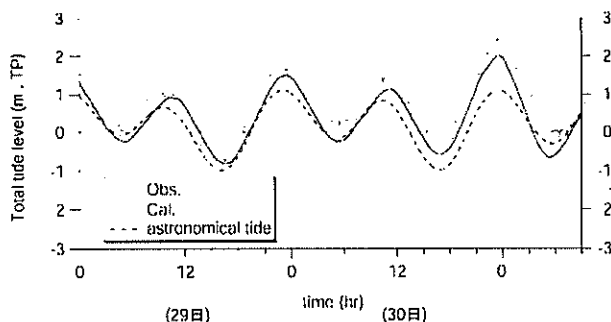


図-5.7 高松における合成潮位

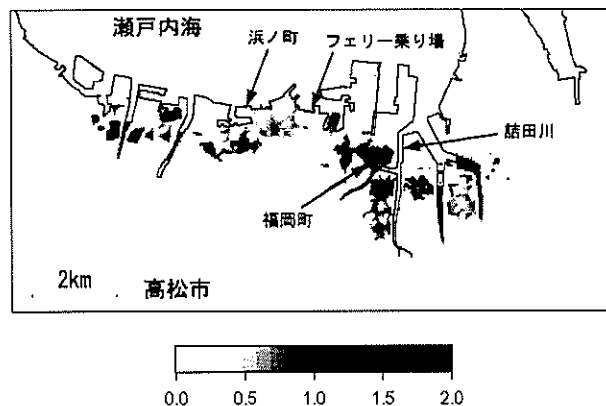


図-5.8 最大浸水深

(浸水深の表示は、標高が 0m 以上の地点を対象としたため、河川内で標高が0m以上の場所は浸水として表示されている)

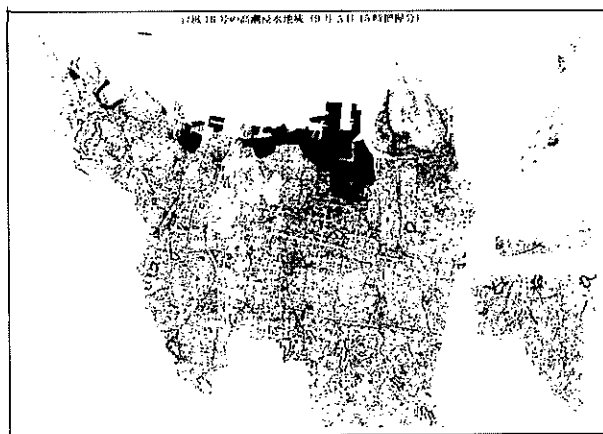


図-5.9 浸水状況図

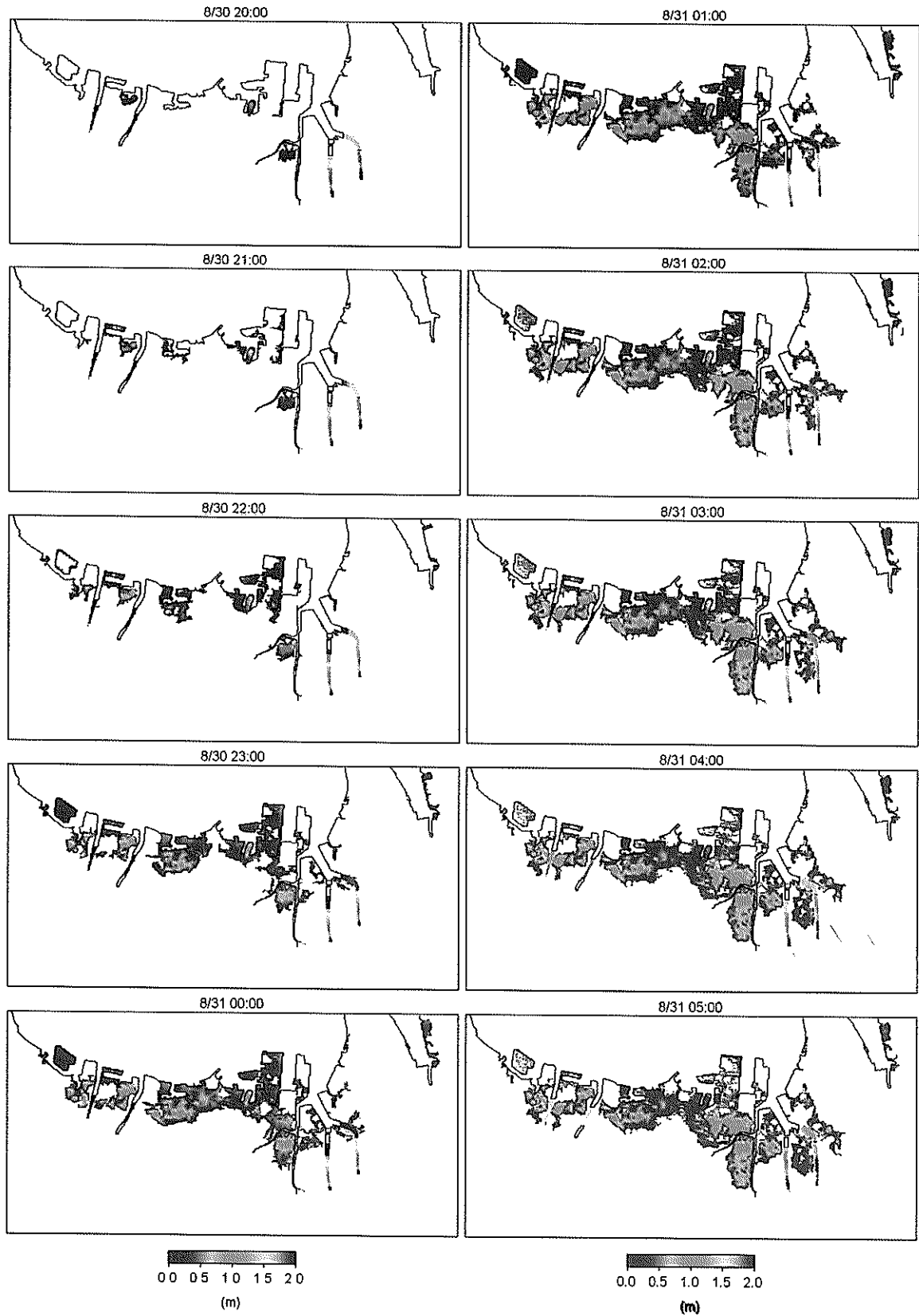
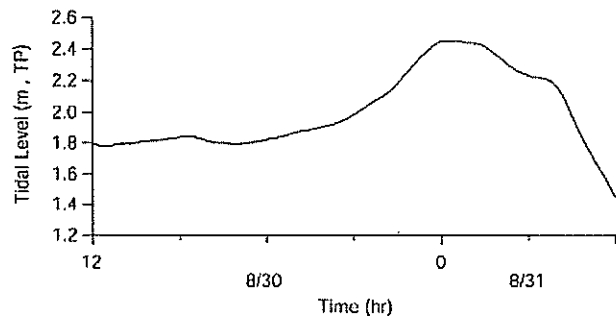


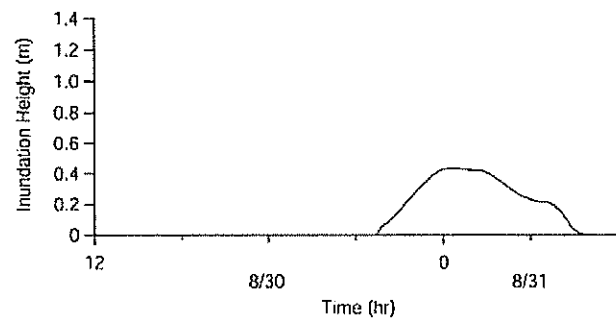
図-5.10 浸水の広がり様子

浸水深の時間的な変化を図-5.11から検討する。海岸に面した場所では、潮位の変動に同調して浸水深も変化するが、内陸の地盤高の低い場所では、潮位のピークから遅れて浸水深が上昇し、自然排水やポンプ等に強制排水がなければある浸水深を保ったままとなる。

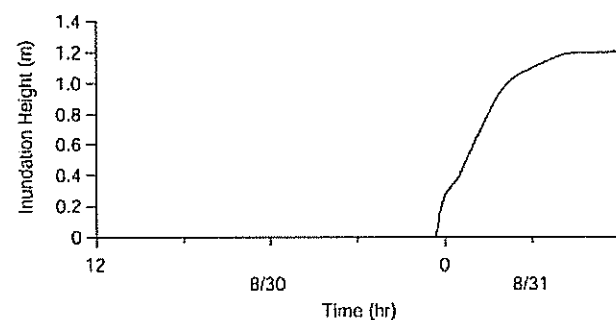
このように、海において潮位が下がり始めても内陸部の低地ではタイムラグをもって浸水深は増大するという低地特有の危険性があることを、詳細な浸水計算から示すことができた。



(a) 潮位の変化



(b) 海岸近傍の浸水深の変化（四国フェリー乗り場近傍）



(c) 内陸の低地における浸水深の変化（福岡町内）

図-5.11 浸水深の時間的な変化

6. あとがき

台風0416号による高潮被害に関して、備讃瀬戸周辺で行った現地調査の結果、および高松における高潮浸水に関する数値計算の結果を中心に述べた。以下にその内容を簡単にとりまとめる。

・高潮の概況

台風0416号は、それ以前の台風と比べて強さや規模が極めて大きな特異な台風ではなかった。しかし、本報告に記したように高松市、玉野、倉敷において高潮被害を発生させただけでなく、神戸においても高潮による浸水を発生させた。観測潮位において、既往最高値を更新したのは、主に香川県、岡山県、兵庫県西部の沿岸である。これは、これらの海域において大潮の満潮に高潮が重なったためである。一方、瀬戸内海西部に向かうほど高潮のピーク発生時刻と満潮位の発生時刻がずれたため、瀬戸内海西部沿岸では台風0416号による最大潮位が既往最大潮位を超えることは無かった。

・高潮被害の特徴

台風0416号による備讃瀬戸周辺の浸水被害の主たる原因は、上述した理由により海水位が極めて高くなったことである。

現地調査の結果、沿岸部の防護レベルの低いところから海水は流入し、内陸部の低い土地に向けて海水は速やかに移動し、低地部の排水機能が十分でない場合には湛水するという被害が発生した。特に、大きな波浪を伴わず純粋な高潮による海水位の上昇によって浸水被害が発生した高松では、越流水は破壊的な様相を示すことはなかった。一方で、高波の作用した岡山県沿岸や香川県西部地域では、港湾や海岸の施設、住宅等の損傷が発生した。したがって、破壊的な浸水を防ぐ観点からは高波の制御が重要な課題といえる。

・数値シミュレーション

海域における高潮の計算においては、天文潮位の変動を考慮する場合としない場合について計算を行ったが、両方とも観測で得られた潮位変化よりも小さな高潮偏差を算出する結果となった。後述するようにさらに検討が必要である。

天文潮が瀬戸内海の高潮偏差に及ぼす影響は大きく無かったが、東部に向かうにつれて天文潮を考慮しない場合よりも高潮偏差が小さくなる傾向が認められた。

高松の浸水被害に着目して、最小25mの計算格子を使用

して浸水計算を行った。沿岸における観測潮位に合うように平均潮位の補正を行うことにより、高潮による浸水計算の結果は実際の被害状況とよく一致した。さらに、沿岸の低い場所から海水は流入し、内陸のさらに低い土地に流れ込んで貯まってしまおうという沿岸低地の浸水に対する危険性を計算結果として示すことができた。

7. 今後の課題

・研究上の課題

今回の報告において、海域における高潮推算が必ずしも十分でない。計算された高潮偏差は、観測された高潮偏差よりも瀬戸内海のほぼ全域で小さめであり、特に備讃瀬戸の東側では、数10cm小さかった。

これを改善するためには、例えば、河合ら(2004)が導入しているように風の場の再現精度を向上させる必要がある。すなわち、瀬戸内海は中国山地と四国山地に挟まれた海域であり、この海域を台風が通過すると、東西に長い瀬戸内海に沿った風が強く吹くようになる。台風0416号のように瀬戸内海の北側を横切るように進行した場合には、台風が通過した後に瀬戸内海を西風が吹き、これにより瀬戸内海東部では高潮が高くなると考えられる。

また、中国地方の瀬戸内海沿岸における高潮被害を検討するためには、波浪推算が不可欠である。特に、施設被害や、局所的な浸水を議論するためには詳細な計算が必要である。

今回の高潮が直接的な原因となった人的損失は、高松市で2名、倉敷市で1名であった。気象庁による台風情報が台風上陸のかなり前から発表され、さらに気象庁や海上保安庁などからリアルタイムに観測潮位も発表されているので、こういった情報をうまく避難に活用できるよう期待される。

来襲してくる台風による高潮情報を伝達するだけでなく、事前に高潮や高波によりどのような被害が発生するのかを予測し、住民に地域の危険性や安全性を理解してもらうことも実際の避難行動を引き出すためには大切であると思われる。事前の予測においては、に記されているように複数レベルの高潮について浸水の危険性を予測すると効果があると思われる。

また、台風が四国の南方洋上にあったころから、潮位偏差が上昇し始めており、高松では30日0時で30cmに達し、この値は最大高潮偏差の60%を占めた。より精緻な高潮予測や浸水計算を行うためには、こういった異常な潮位偏差についても解析を進める必要がある。

・防災力の向上

上述したように人的損失を0にするためには避難することが最も基本であるが、経済的な損失を極力軽減することも必要である。さらには避難しなくてもよい安全な街づくりもある。そのような地域の総合的な防災力を向上させることが不可欠である。

まず、地域において被害を軽減するための防護施設の設計に使用する外力レベル(例えば、潮位レベルなど)を決定する。この外力レベルは、既往最高潮位にとる場合、数値計算により想定される最大規模の潮位にとる場合など、地域の状況により幾つか考え方がある。ただし、いずれの場合をとったとしても、浸水等に対する防護性能の評価と、その外力レベルの再現年数などのリスク情報を提示することが大切である。さらに、高橋ら(2003)にも記されているように、こういった施設設計のための性能評価に加えて、対象地域において想定される最大級の外力レベルについても検討をして発生する被害を予測し、そういったものが発生したとしても人的被害を最小にするために情報発信や避難誘導等のソフト的な対策を整備する必要がある。そういった被害の予測や対応策の検討を行う際には、浸水の広がり方等の危険性を提示可能な数値計算が有効なツールとなる。

(2005年5月13日受付)

謝辞

最後に、現地調査の実施、資料収集にあたり四国地方整備局港湾空港部海洋環境海岸課、高松港湾・空港整備事務所、高松港湾空港技術調査事務所、中国地方整備局港湾空港部海洋環境海岸課および宇野港湾事務所の皆様にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 及川 康 (2005) : 平成16年8月台風16号接近による 高松での高潮災害に関する実態調査 調査報告書, pp.3-15.
- 海上保安庁 (2003) : 平成15年度潮汐表第1巻日本及び付近, 書誌781号, pp.393-394.
- 河合弘泰・川口浩二・橋本典明 (2003) : 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, 港湾空港技術研究所報告第42巻, 第3号, pp.85-110.
- 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男 (2000) : 台風9918号による高潮の現地調査と追算, 港湾技研資料, No.971.
- 河合弘泰・富田孝史・平石哲也・金 度三・姜 閔求

(2004) : 台風0314号による大韓民国馬山湾の高潮追算と現地調査, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1361-1365.

河合弘泰・柿沼太郎・本多和彦・富田孝史 (2005) : 2004年の台風と高潮の特徴, 港湾空港技術研究所資料, 印刷中

高橋重雄・富田孝史・河合弘泰 (2003) : 性能設計の高潮対策施設への適用に関する基本的な考え方, 港湾空港技術研究所資料, No.1042, 27p.

富田孝史・河合弘泰 (2004) : 台風来襲時における高潮即時予測の制度と課題, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.671-676.

本多忠夫・光易 恒 (1980) : 水面に及ぼす風の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.

Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000) : 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, No.56, pp.567-581.

Mitsuta, Y. and T. Fujii (1987) : Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.37, Part4, No.329, pp.169-185.

- Δp : 気圧深度
- r : 台風の中心からの距離
- r_0 : Myers の気圧分布における強風半径
- Δs : 各計算領域における格子間隔
- t : 時間
- Δt : 時間間隔
- u : x 方向の流速成分
- U_G : 自由大気の風速
- v : y 方向の流速成分
- V_t : 台風の移動速度
- W : 風速
- W_x : x 方向の風速成分
- W_y : y 方向の風速成分
- x : 水平方向にとつた座標系
- X : 台風の中心からの無次元距離(= r/r_0)
- X_p : 風速低減係数を最大とする X
- y : 水平方向にとつた座標系
- z : 鉛直方向にとつた座標系
- β : 台風の進行方向からみた角度
- η : 潮位偏差
- ρ_a : 大気密度
- ρ_w : 海水密度
- τ_{bx} : x 方向の底面せん断応力成分
- τ_{by} : y 方向の底面せん断応力成分
- τ_{sx} : x 方向の海面せん断応力成分
- τ_{sy} : y 方向の海面せん断応力成分

記号表

- A_h : 水平渦動粘性係数
- C_D : 海面抵抗係数
- $C_l(X)$: 風速低減係数
- $C_l(X_p)$: 風速低減係数の最大値
- $C_l(\infty)$: 無限遠での風速低減係数
- D : 全水深 (= $h + \eta$)
- d : 浸水深
- f : コリオリの係数
- g : 重力加速度
- h : 水深
- h_{max} : 各計算領域における最大水深
- M : x 方向の流量フラックス
- N : y 方向の流量フラックス
- n : Manning の粗度係数
- $p(r)$: 気圧
- p_0 : 海面での大気圧
- p_c : 台風の中心気圧

付録 調査日程および概要

9月1日 (水) 高松港周辺および坂出港

構成員:

- | | |
|-------|--|
| 富田孝史 | 港湾空港技術研究所海洋・水工部高潮津波研究室長(現 津波防災研究センター津波主席研究官) |
| 本多和彦 | 港湾空港技術研究所海洋・水工部高潮津波研究室研究官(現 津波防災研究センター特任研究官) |
| 熊谷兼太郎 | 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室研究官 |
| 芦田義則 | 四国地方整備局港湾空港部長 |
| 香川泰良 | 四国地方整備局港湾空港部海洋環境・海岸課長 |
| 大西章裕 | 四国地方整備局港湾空港部総務室 |
| 桑島隆一 | 四国地方整備局高松港湾・空港整備事務 |

所長
三野真治 四国地方整備局高松港湾・空港整備事務所工務課長
下元幸夫 四国地方整備局高松技術調査事務所前任建設管理官
小銭貴一郎 四国地方整備局高松技術調査事務所調査課調査第一係長

午後：水島港事務所到着
玉島地区周辺調査
勇崎地区調査

行程：

午前：四国地方整備局（番町）到着
高松漁港周辺調査
午後：浜ノ町の調査
市道サンポート地下道（高松駅下）調査
四国フェリー乗り場調査
四国地方整備局（福岡町）調査
詰田川調査
坂出港調査

9月2日（木）宇野港周辺および玉島地区周辺

構成員：

富田孝史 港湾空港技術研究所海洋・水工部高潮津波研究室長（現 津波防災研究センター津波主席研究官）
本多和彦 港湾空港技術研究所海洋・水工部高潮津波研究室研究官（現 津波防災研究センター特任研究官）
熊谷兼太郎 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室研究官
香川泰良 四国地方整備局港湾空港部海洋環境・海岸課長（高松のみにおいて同行）
鈴木純夫 中国地方整備局副局長
西田芳浩 中国地方整備局港湾空港部海洋環境・海岸課長
島崎正寛 中国地方整備局宇野港湾事務所工務課長
出路康夫 中国地方整備局宇野港湾事務所前任建設管理官
小野史博 中国地方整備局宇野港湾事務所工務課第一工務係長

行程：

午前：兵庫町商店街および片原町商店街調査
高松港出発
宇野港湾事務所到着
宇高国道フェリー乗り場（宇野）調査
玉地区調査

港湾空港技術研究所資料 No.1104

2005.9

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 有限会社つばさ印刷技研

Copyright © (2005) by PARI

All rights reserved. No Part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。