

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.44    NO.2    June 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 2 号 (Vol. 44, No. 2), 2005 年 6 月 (June 2005)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 台風 0314 号による大韓民国馬山湾の高潮の現地調査と数値計算  
.....河合 弘泰・富田 孝史・平石 哲也・安田 誠宏..... 3  
(Field Investigation and Numerical Simulation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314  
..... Hiroyasu KAWAI, Takashi TOMITA, Tetsuya HIRAISHI, Tomohiro YASUDA)
2. 台風 0314 号の高潮による大韓民国馬山市街地での浸水に関する数値計算  
.....平石 哲也・河合 弘泰・南 靖彦・安田 誠宏 ..... 23  
(Numerical Simulation on Inundation in Masan City, Korea due to Storm Surge by Typhoon 0314  
..... Tetsuya HIRAISHI, Hiroyasu KAWAI, Yasuhiko MINAMI, Tomohiro YASUDA)
3. 非固定航路で不連続的に観測された流況データからの潮汐成分と残差流成分の分離手法について  
.....鈴木高二朗・竹田晃・橋本典明..... 39  
(Separation of Tidal and Subtidal Currents from Intermittent Currents Data measured at non-Fixed Routes  
..... Kojiro SUZUKI, Akira TAKEDA, Noriaki HASHIMOTO)
4. 管中混合固化処理地盤の強度変動と要因分析  
.....北詰昌樹・早野公敏..... 57  
(Strength Scatter and its Causes of Pneumatic Flow Mixing Treated Ground  
..... Masaki KITAZUME, Kimitoshi HAYANO)
5. 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用  
.....富田孝史・柿沼太郎..... 83  
(Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (STOC)  
..... Takashi TOMITA, Taro KAKINUMA)
6. 構造物の沈下挙動を制御する新型基礎に関する基礎的研究  
.....水谷崇亮・菊池喜昭..... 99  
(Fundamental study on a new type foundation which control settlements of a structure  
..... Taka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI)
7. 飛砂の限界摩擦速度変化特性を考慮した飛砂量推定  
.....有働恵子..... 123  
(Sand Transport Rate Estimate Considering Variation in the Threshold Wind Shear Velocity  
..... Keiko UDO)

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 2 号 (Vol. 44, No. 2), 2005年6月 (June 2005)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 台風 0314 号による大韓民国馬山湾の高潮の現地調査と数値計算  
.....河合 弘泰・富田 孝史・平石 哲也・安田 誠宏..... 3  
(Field Investigation and Numerical Simulation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314  
..... Hiroyasu KAWAI, Takashi TOMITA, Tetsuya HIRAISHI, Tomohiro YASUDA)
2. 台風 0314 号の高潮による大韓民国馬山市街地での浸水に関する数値計算  
.....平石 哲也・河合 弘泰・南 靖彦・安田 誠宏 ..... 23  
(Numerical Simulation on Inundation in Masan City, Korea due to Storm Surge by Typhoon 0314  
..... Tetsuya HIRAISHI, Hiroyasu KAWAI, Yasuhiko MINAMI, Tomohiro YASUDA)
3. 非固定航路で不連続的に観測された流況データからの潮汐成分と残差流成分の分離手法について  
.....鈴木高二朗・竹田晃・橋本典明..... 39  
(Separation of Tidal and Subtidal Currents from Intermittent Currents Data measured at non-Fixed Routes  
..... Kojiro SUZUKI, Akira TAKEDA, Noriaki HASHIMOTO)
4. 管中混合固化処理地盤の強度変動と要因分析  
.....北詰昌樹・早野公敏..... 57  
(Strength Scatter and its Causes of Pneumatic Flow Mixing Treated Ground  
..... Masaki KITAZUME, Kimitoshi HAYANO)
5. 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用  
.....富田孝史・柿沼太郎..... 83  
(Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (STOC)  
..... Takashi TOMITA, Taro KAKINUMA)
6. 構造物の沈下挙動を制御する新型基礎に関する基礎的研究  
.....水谷崇亮・菊池喜昭..... 99  
(Fundamental study on a new type foundation which control settlements of a structure  
..... Taka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI)
7. 飛砂の限界摩擦速度変化特性を考慮した飛砂量推定  
.....有働恵子..... 123  
(Sand Transport Rate Estimate Considering Variation in the Threshold Wind Shear Velocity  
..... Keiko UDO)

## 台風0314号による大韓民国馬山湾の 高潮の現地調査と数値計算

河合 弘泰\*  
富田 孝史\*\*  
平石 哲也\*\*\*  
安田 誠宏\*\*\*\*

### 要 旨

2003年の台風0314号は韓国南岸に高潮・高波を満潮時に発生させ、1959年の宮古島台風以来の海岸災害を引き起こした。特に馬山市では、西港埠頭の岸壁から約700mにわたる市街地が高潮によって浸水した。このとき馬山湾の検潮所では約2.3mの高潮偏差が観測されている。そこで、馬山湾沿岸において、浸水時の状況を住民等からヒアリングするとともに、浸水の痕跡高や建物の損傷を調査した。さらに、陸上地形の影響を考慮して海上風を推算し、波齢を考慮した海面抵抗係数を用いて、馬山湾の高潮を推算した。その結果、市街地内における浸水の痕跡の高さ、数値計算モデルによる最高潮位は、検潮記録による最高潮位と概ね一致した。また、この高潮が主として吹き寄せによって生じたものであることも明らかになった。

キーワード：台風，高潮，浸水の痕跡，高潮推算，波浪推算

---

\* 海洋・水工部主任研究官（防災評価担当）  
\*\* 津波防災研究センター主席津波研究官  
\*\*\* 海洋・水工部波浪研究室長  
\*\*\*\* 前海洋・水工部波浪研究室特別研究員（現京都大学防災研究所助手気象・水象災害研究部門）  
〒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：046-844-5049 Fax：046-844-1274 e-mail:kawai@pari.go.jp

## Field Investigation and Numerical Simulation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314

Hiroyasu KAWAI\*  
Takashi TOMITA\*\*  
Tetsuya HIRAISHI\*\*\*  
Tomohiro YASUDA\*\*\*\*

### Synopsis

The Typhoon 0314 (Maemi) in 2003 landed on the south coast of Korea, where the high waves and storm surge on an astronomical high tide induced the most severe coastal disaster in Korea since Typhoon 5914 (Sarah) in 1959. In Masan City, the urban area of more than 700m from Seo Hang Wharf was flooded by the storm surge. There was a tide station on Masan Bay and the storm surge of approximately 2.3m was recorded there. In this study, the situation of flood was heard from the affected persons, the level of inundation traces was measured, and damage of buildings were investigated. Then the storm surge was hindcasted with a numerical model considering the effect of the land on the marine surface wind and wave age dependent drag coefficient. The results show that the level of inundation traces and the maximum tidal level hindcasted by the numerical agree with the maximum tidal level observed at the tide station. The storm surge was generated mainly due to the wind-drift effect of the typhoon.

**Key Words:** typhoon, storm surge, inundation trace, storm surge simulation, wave simulation

---

\* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department  
\*\* Tsunami Research Director, Tsunami Research Center  
\*\*\* Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department  
\*\*\*\* Ex-Special Researcher, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department (Present Assistant, Climatological and Hydrological Disasters Research Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5049 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:kawai@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 高潮災害の現地調査 .....	7
2.1 馬山湾周辺の地形の特徴 .....	7
2.2 現地調査の対象地区 .....	8
2.3 各地区の浸水状況 .....	8
2.4 まとめ .....	13
3. 高潮の数値計算 .....	14
3.1 気圧と海上風の計算 .....	14
3.2 高潮偏差の計算 .....	17
3.3 高潮と天文潮を合わせた潮位の計算 .....	19
3.4 まとめ .....	20
4. 結論 .....	21
5. あとがき .....	21
謝辞 .....	21
参考文献 .....	21

1. まえがき

台風 0314 号(Maemi)は、2003 年 9 月 6 日に北緯 16 度 0 分、東経 141 度 30 分で発生した後、図-1.1(a)に示すように、9 月 11 日に宮古島を直撃した。そのときの中心気圧は 910hPa であり、暴風によって風力発電用の風車を 3 基倒壊させるなどの被害をもたらした(石原ら, 2003)。この台風はさらに、図-1.1(b)に示すように、9 月 12 日夜遅くに中心気圧 950hPa の勢力を維持したまま韓国南岸に上陸した。その時刻は大潮・満潮とほぼ重なり、韓国南岸では甚大な高潮・高波災害に見舞われた。特に馬山市(Masan)では高潮によって、わずか数十分のうちに岸壁

から約 700m にわたって浸水し、店舗やアパートの地下では溺死者の出る未曾有の災害となった(後藤・李, 2004)。一方、釜山市(Busan)の周辺では、高波で多くの港湾・海岸施設が破壊され、背後地が浸水した(高山ら, 2004)。

ところで、韓国南岸でこのような大規模な海岸災害が発生したのは、1959 年 9 月 17 日に台風 5914 号(宮古島台風, Sarah)が来襲して以来のことである。この台風が韓国南岸に接近したときの中心気圧は 945 hPa であり、台風 0314 号よりやや低かったが、図-1.1(a)で示したように台風 0314 号より東側を通った。そのため、高波による被害は甚大であったが、顕著な高潮は生じなかった。なお、台風 5915 号(伊勢湾台風, Vera)が伊勢湾に顕著な高潮を発生させたのは、そのわずか 9 日後の 9 月 26 日である。また、2003 年に続き 2004 年にも 8 月 19 日に台風 0415 号が、台風 5914 号とよく似たコースで韓国南岸に接近したが、幸い中心気圧が 975hPa と勢力が弱かったために大災害には至らなかった。

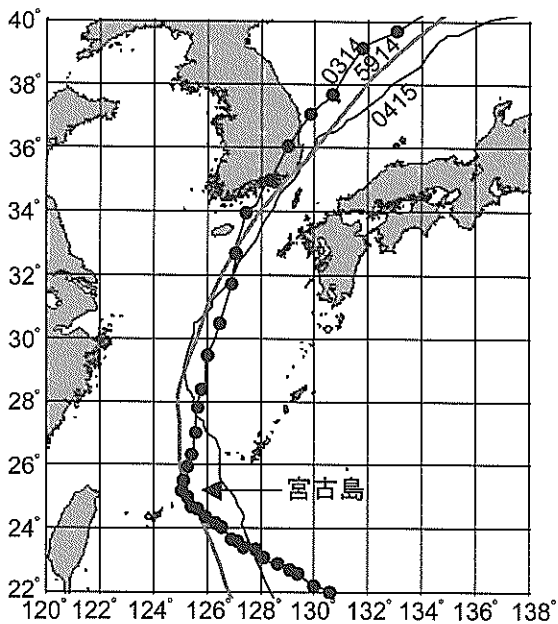
さて、馬山湾における今後の高潮防災を考えるためには、まずその外力である、台風 0314 号時の高潮の状況や発生原因を明らかにする必要がある。馬山湾には検潮所が 1 カ所あり、そこでは約 2.3m の高潮偏差を記録している。ところが、観測室の窓ガラスが割れて越波水が検潮井戸に入った可能性があるなど、その検潮記録にはやや不確かなところもある。さらに、馬山湾では定常的な波浪観測は行われておらず、台風の通過が夜間であったために、沖合の波浪を鮮明に撮影した写真やビデオがあるとは考えにくい。したがって、市街地の浸水が主として高潮と越波・打ち上げのどちらによるものであるかを特定する上で、潮位とともに重要な手がかりである波浪を直接知ることはできない。

そこで本研究では、馬山湾の沿岸で浸水の痕跡高や建物の損傷状況を調査するとともに、数値計算モデルによって高潮を推算し、検潮記録の示す最高潮位は正しいか、馬山湾で一体何が起こったか、について検討を行った。

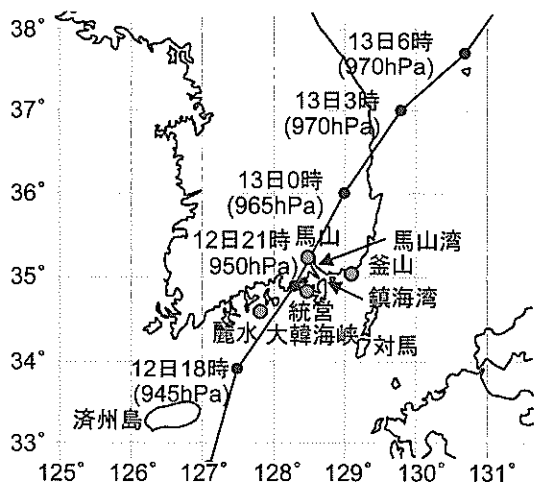
2. 高潮災害の現地調査

2.1 馬山湾周辺の地形の特徴

図-2.1 は馬山湾周辺の地形を示す。釜山広域市の西方には、大韓海峡(対馬海峡水道)に面して鎮海湾がある。その規模は東西に約 40km、南北に約 30km あり、日本の三大湾(東京湾、伊勢湾、大阪湾)のおよそ半分である。水深は湾中央部で 20m 程度あり、湾口部でも 25m を超える。湾内には多くの小島があり、海岸線が非常に入り組んでいる点が、日本の三大湾と大きく異なる特徴



(a) 台風 0314 号と類似台風のコース



(b) 台風 0314 号が韓国を通過した時刻と中心気圧

図-1.1 台風 0314 号のコース

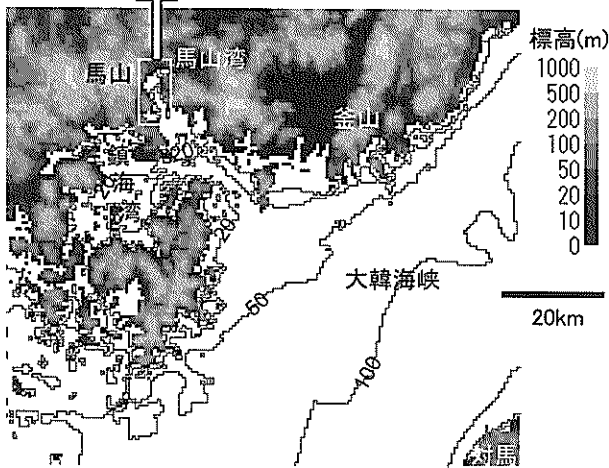
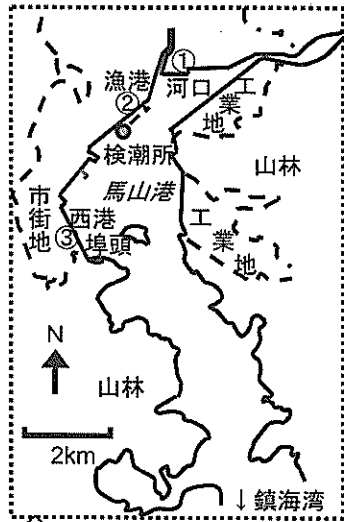


図-2.1 馬山湾周辺の地形

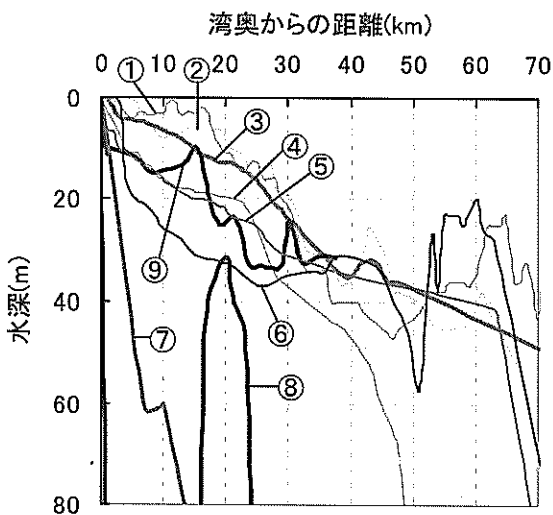


図-2.2 馬山湾・鎮海湾の縦断面(①八代海, ②有明海, ③周防灘, ④大阪湾, ⑤東京湾, ⑥伊勢湾, ⑦土佐湾, ⑧鹿児島湾, ⑨馬山湾・鎮海湾)

の一つである。また、湾を取り巻く陸地に平野はほとんどなく、標高 200~500m 程度の山々が連なっている。

馬山湾は鎮海湾の北側に位置する、南北に約 10km、東西に約 2km の細長い内湾である。海岸線は鎮海湾と同様に入り組んでおり、西港埠頭の東方には小島もある。水深は 4~10m と浅い。湾の北西岸には漁港や港湾施設があり、その背後には市街地が広がっている。検潮所は漁港の防波堤に併設されている。

図-2.2 は、馬山湾の北端から鎮海湾を経て大韓海峡に至る湾の中心線上の水深変化を、日本で顕著な高潮が発生する内湾と比較したものである。馬山湾・鎮海湾の水深は、八代海、有明海、周防灘より深いが、大阪湾や東京湾と同じくらいであり、台風の吹き寄せ効果によって顕著な高潮が発生し得る水深である。

## 2.2 現地調査の対象地区

本研究ではまず、2003 年 9 月 19 日~9 月 21 日に釜山広域市から馬山市に至る沿岸の被災状況を概略的に調査した。その上で、同年 10 月 31 日~11 月 1 日に馬山市に絞った追加調査を実施した（これらの現地調査と数値計算の概要は、河合ら、2004; 高山ら、2004; 安田ら、2004）。

これら調査の主要な対象地区は、図-2.1 の①河口付近、②漁港付近、③西港埠頭およびその背後の市街地、である。これらの地区では、浸水の状況を関係者や住民からヒアリングし、建物の損傷の程度を調べた。また、岸壁の天端高や後背地の地盤高、浸水の痕跡や証言による浸水水位をレベル測量した。これらの高さは、調査当日の天文潮位をもとに測量したものであり、その天文潮位は海上保安庁(2002)に従って、釜山港を標準港とし、潮高比を 1.56、潮時差を+15 分として推算したものである。

## 2.3 各地区の浸水状況

### (1) 河口付近の状況

図-2.3 は馬山湾の北端部の地形を示したものであり、ここには 2 本の小さな河川 A, B が流入している。本研究では A の河口付近を調査した。

写真-2.1 は図-2.3 の地点 a から、写真-2.2 は同図の地点 b から、それぞれ矢印の方向に撮影したものである。地点 a から河口をはさんだ対岸には馬山湾に沿って幹線道路があり、その縁石の一部は崩落していたが、地点 a の岸壁には損傷が見られなかった。この岸壁の直背後は中古車を販売する店舗になっており、現地調査を実施した時（被災から約 1 ヶ月半後）には岸壁の端まで商品の自動車並べられていた。この店舗の従業員によると、台風 0314 号の来襲が夜間であったため、岸壁に押し寄せ



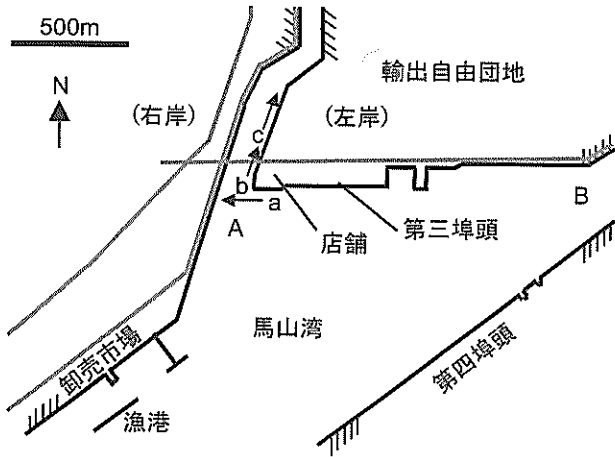


図-2.3 河口付近の地形

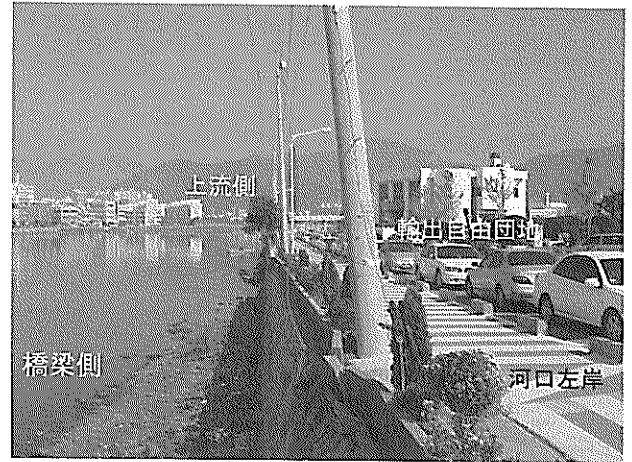


写真-2.3 輸出自由団地

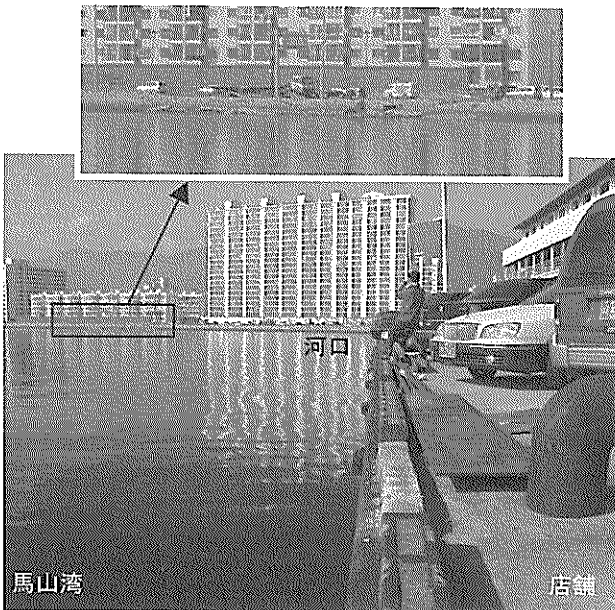


写真-2.1 馬山湾に面した岸壁と道路

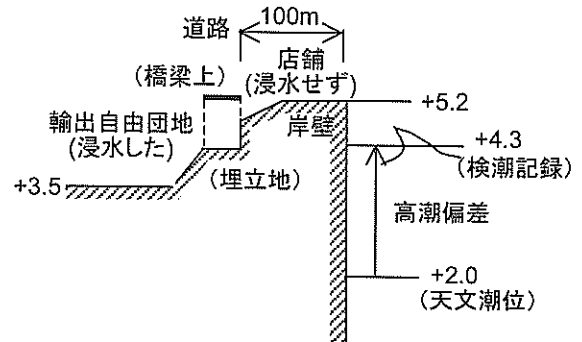


図-2.4 河口付近の地盤高と検潮記録の関係

る波の状況や、展示中の自動車に波しぶきを被ったかどうかは、誰も見ておらず、はっきりと分からないが、少なくとも高潮によって店舗の地盤が全面的に浸水することは免れた。

この店舗の背後にある道路や輸出自由団地（自由貿易地域）と呼ばれる工業地区（写真-2.3、図-2.3の地点cから矢印の向きに撮影）は浸水した。この付近の土地は店舗のある岸壁が築造される前からあったもので、その地盤高は岸壁の天端より低い。

図-2.4は、河口の左岸における地盤高を模式的に示したものである。岸壁の天端高(CDL+5.2m)は検潮記録の最高潮位(+4.3m)より約1m高く、輸出自由団地の地盤(+3.5m)は低い。それぞれ浸水の有無の証言を裏付けている。岸壁の前面の波高は不明であるが、もし数十cmであったなら、岸壁の越波は頭著ではなく、店舗の地盤が全面的に浸水することはなかったと考えられる。

(2) 漁港付近の状況

河口から1kmほど南西には、図-2.5に示すように漁港があり、その一角には検潮所もある。



写真-2.2 河口の橋梁付近

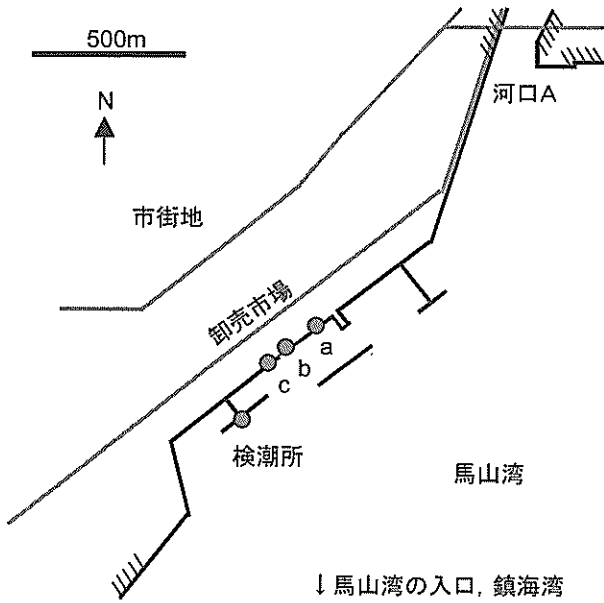
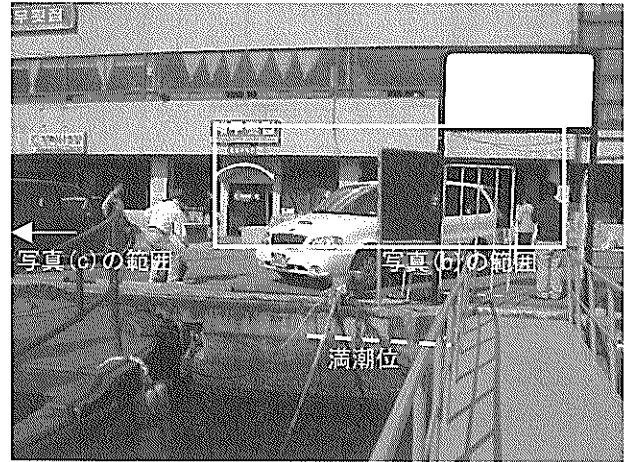
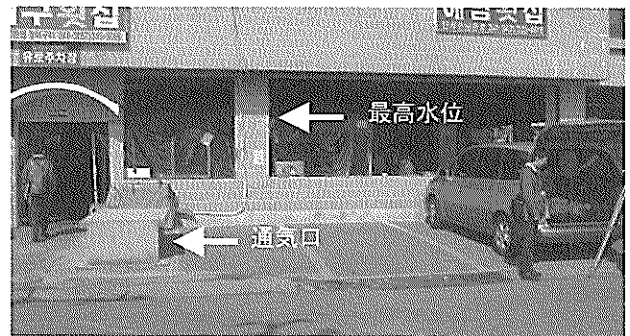


図-2.5 漁港付近の地形



(a) 岸壁と店舗の位置関係



(b) 証言に基づく最高水位

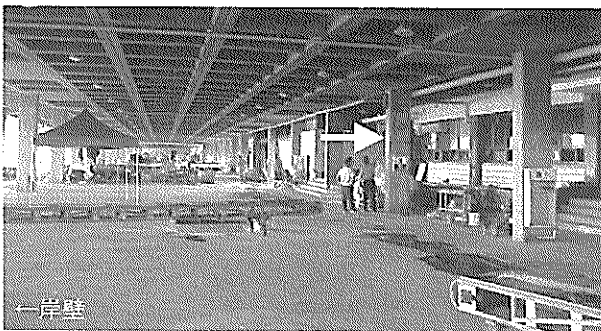
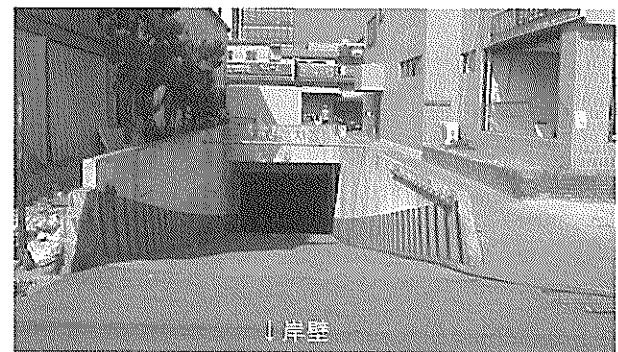


写真-2.4 漁港の物揚場



(c) 地下駐車場への斜路

写真-2.7 漁港の岸壁に面した店舗

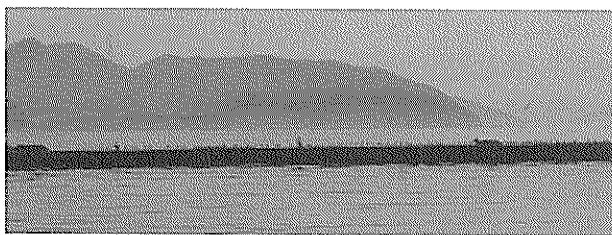


写真-2.5 漁港の防波堤

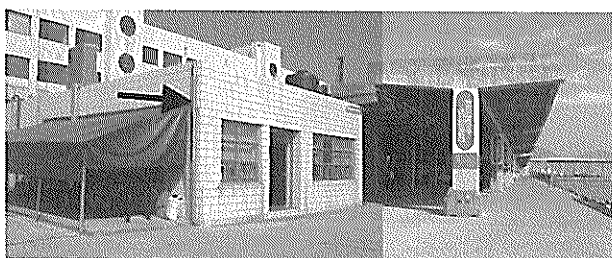


写真-2.6 漁港の事務所

地点 a にある物揚場(CDL+2.7~2.9m)では、関係者によると、写真-2.4 に矢印で示す、大人の背丈を超える高さ(+5.0m)まで浸水した。この物揚場の南東側の沖には写真-2.5 に示す防波堤がある。天端の小鳥の大きさから容易に分かるように、この防波堤の天端は低く、高潮時の波浪低減効果は小さかったと思われる。また、地点 b にある写真-2.6 の事務所でも、1階の天井(+5.5m)まで濡れた。



写真-2.8 店舗の前方の様子

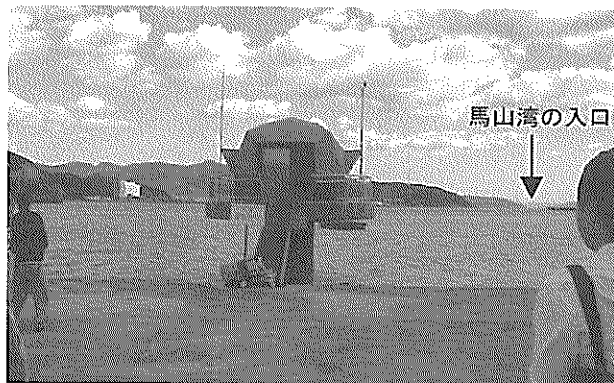


写真-2.9 検潮所

地点 c にある写真-2.7(a)の店舗（刺身料理屋）でも、従業員によると、窓ガラスが割れ、少なくとも写真-2.7(b)に矢印で示す、柱の電気メータの高さ(+5.0m)まで浸かり、1階の天井の一部も破損した。玄関の右側にある四角の突起物は地下室の通気口であり、その地下室は駐車場になっている。写真-2.7(c)はその駐車場への斜路であり、入口は岸壁の方を向いている。止水板など海水の浸入を防ぐものはなかった。地下駐車場の天井にも浸水した跡が残っていた。ところで、写真-2.7(a)に示すように、この店舗の前にある岸壁には、漁船から漏れた油が付いたと思われる黒い筋が見られる。これは概ね大潮の満潮位を示したものであると思われる。この高さから岸壁の天端までの余裕は数十 cm しかないが、ここに店舗ができてから一度も高潮で店舗が浸水したことはなかった。

写真-2.8 は写真-2.7 の店舗の前にある岸壁から南方を撮影したものであり、そこには防波堤や検潮所がある。写真-2.9 はその検潮所であり、防波堤の沖側の面に併設されている。この位置からは馬山湾の入口を望むことができる。この検潮所では、台風時に観測室に渡る階段が

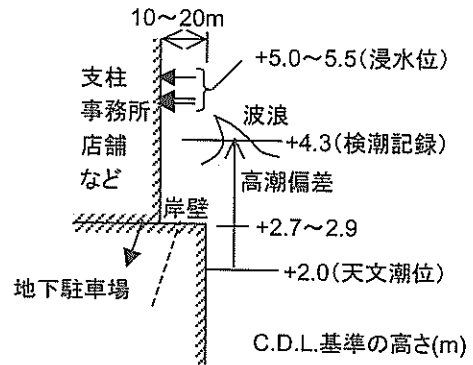


図-2.6 漁港付近の浸水位のまとめ

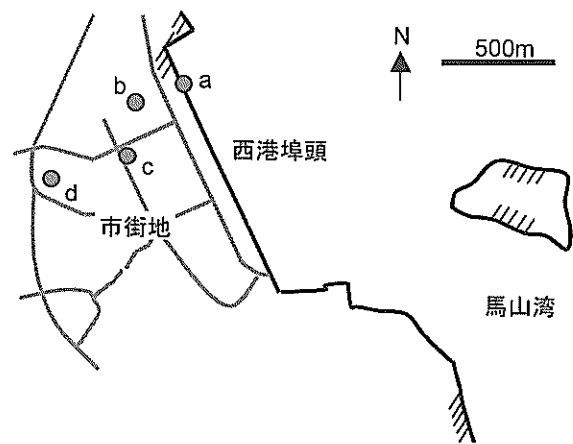


図-2.7 西港埠頭および市街地の地形

破壊され、観測室の窓ガラスが割れ、越波水が検潮井戸に入った可能性がある。

図-2.6 は、漁港周辺の岸壁の高さや浸水位をまとめたものである。ヒアリングで得られた浸水位(+5.0~5.5m)は、検潮記録による最高潮位(+4.3m)より 1m 程度高かった。図-2.1 の上段で示したように、漁港周辺は馬山湾の入口から直接見通せる位置にあるため、鎮海湾からの波浪が到達しやすく、また、馬山湾だけを考えても湾口から約 8km の吹送距離で波が発達する。さらに、漁港の防波堤は天端が低く、高潮時に波浪の低減効果は小さかったものと思われる。主として高潮によると考えられるこの浸水は、物揚場の周辺にとどまらず、背後地にも広がった。以上のことから、検潮記録よりも証言による浸水位が高くなった原因として、波による水面の揺れや、岸壁に隣接した建物によって高潮の流れが妨げられて生じた局所的な水位上昇が考えられる。

### (3) 西港埠頭および背後の市街地

図-2.7 は西港埠頭とその背後の市街地を示したものである。写真-2.10 は西港埠頭の岸壁を地点 a（天端高

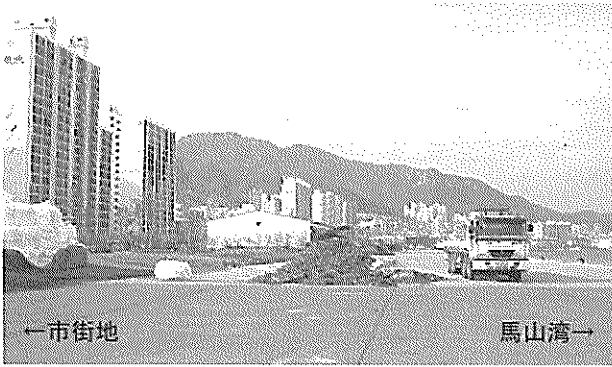


写真-2.10 西港埠頭岸壁

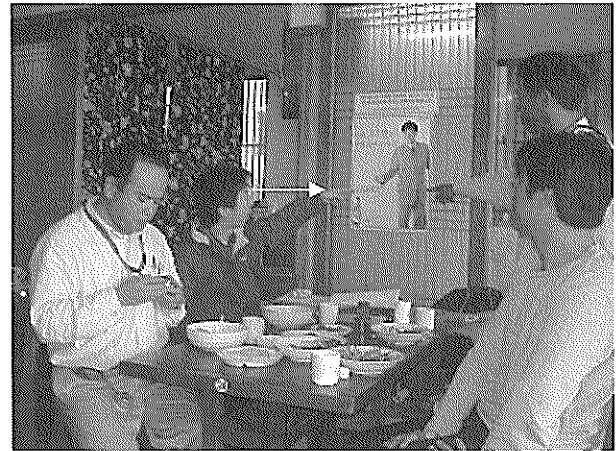


写真-2.12 食堂の浸水の痕跡

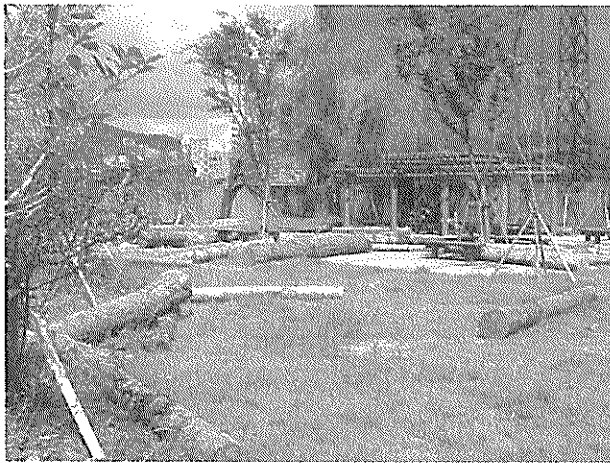


写真-2.11 高潮によって漂着した材木



写真-2.13 高層マンション群と地下駐車場入口

CDL+2.8m)で撮影したものである。埠頭の背後(写真の左側)には高さ数十cmの植栽の盛土や金網のフェンスはあるが、胸壁などの防潮施設はない。岸壁に立って市街地の中をそのまま見通せる状態になっている。市街地の地盤は、岸壁から約500mまでの範囲がほとんど平坦であり、そこから先が上り勾配になっている。

写真-2.11は西港埠頭あるいはその周辺の岸壁に露天積みされていた材木が、フェンスをなぎ倒して漂着したものである。詳細は後述するが、このような材木は市街地内の各地に流れ込み、建物などに損傷を与えた。

写真-2.12は岸壁から約250mのところを位置する中華食堂(図-2.7の地点b)であり、ガラス戸に貼られたポスターには浸水の痕跡(+4.3m)が残っている。その高さは道路の車道の地盤から1.7mもあり、大人の背丈も浸水したことが分かる。

岸壁から150~350mの平坦地内には、写真-2.13のような高層マンション群がある。守衛によると、浸水位は地盤から1.3~1.6mの高さに達した。マンション棟の間には地下駐車場が数多く設置されており、その入口には、

海の方を向いたものも逆のものもあった。

岸壁から約400m離れた平坦部の端に近いところには、テドン・シーコアという、地上が店舗と住宅、地下1階がレストラン等の店舗、地下2~4階が駐車場になっている、複合ビルがある(図-2.7の地点c)。守衛によると、「材木520本が海水とともに流入して浸水し、自動車140台が被害にあった」とのことである。写真-2.14(a)は地上1階から地下1階へ下りるエスカレータであり、その横にあるガラスに浸水の痕跡がはっきりと残っていた。写真-2.14(b)は地下駐車場への斜路の壁についた痕跡(+4.3m)である。この斜路は地下1階に達する手前で右にカーブしており、その付近のコンクリート壁には、材木または自動車の衝突によって開いたと思われる大きな穴が開いて地盤がむき出しになっていた。

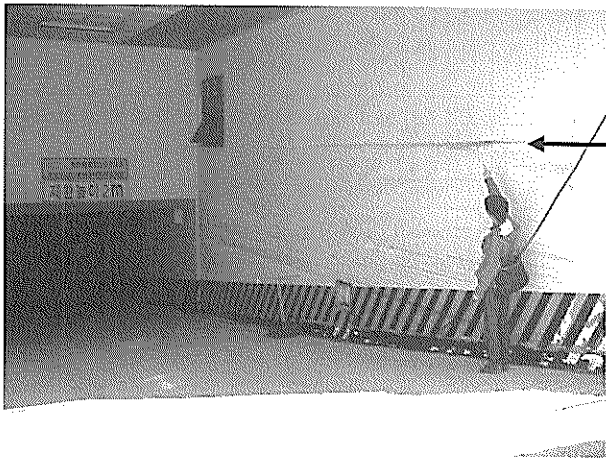
テドン・シーコアの周辺でも店舗の壁や看板などに浸水の痕跡が多く残されており、その高さは道路の地盤か



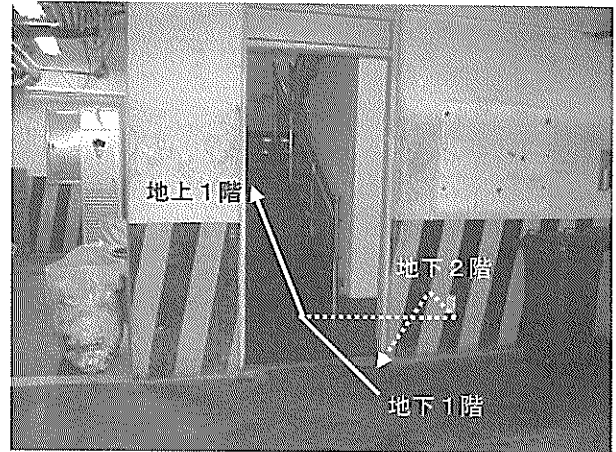
(a) 店舗1階のエスカレータ



(a) 地下1階駐車場への斜路



(b) 地下駐車場への入口  
写真-2.14 テドン・シーコア



(b) 地下1階の階段室への入口  
写真-2.15 ヘウン・プラザ

ら1.5~1.7mであった。

岸壁から約700m離れたヘウン・プラザというビル(図-2.7の地点d)では、地下3階のカラオケ施設で8名が亡くなった。この建物は、地上1階が店舗、地下1階が駐車場、地下2階が店舗(居酒屋)、地下3階が店舗(カラオケ)および電気室という構成になっている。その玄関口における痕跡はCDL +4.25mであった。地上から地下1階へは自動車用の斜路、階段、エレベータ、業務用階段でつながっており、海水は主として写真-2.15(a)に示す斜路から入ったと考えられる。「この入口に高さ0.6~0.7mの鉄製バリケードが設置されたが、大量の海水と流木が押し寄せて、地下への流入を防ぎ切れなかった」という報道もなされている。地下1階からさらに下の階へは、主として写真-2.15(b)の来客用階段から入ったものと考えられる。なお、ヘウン・プラザ周辺の地盤は西港埠頭の岸壁より1m以上高いため、浸水位は地盤から

数十cmの高さであった。

図-2.8は、西港埠頭から市街地の浸水の状況をまとめたものである。浸水の範囲は岸壁から約700mにも及んだ。岸壁から約500mの範囲では、浸水位が+4.1~4.4mであり、検潮記録による最高潮位(+4.3m)とよく一致している。この浸水位は地盤から1.4~1.65mの高さであり、これは大人の背丈に近い。また、岸壁から500~700m離れたところでは、浸水位が+3.9~4.2mとやや低くなっている。

## 2.4 まとめ

西港埠頭の背後にある市街地内では、馬山湾の波浪の影響をあまり受けていないと考えられるが、ここでは検潮記録による最高潮位とほぼ一致する浸水位が得られた。また、漁港付近のように、馬山湾の波浪を直接受ける場所では、検潮記録による最高潮位よりも高いところま

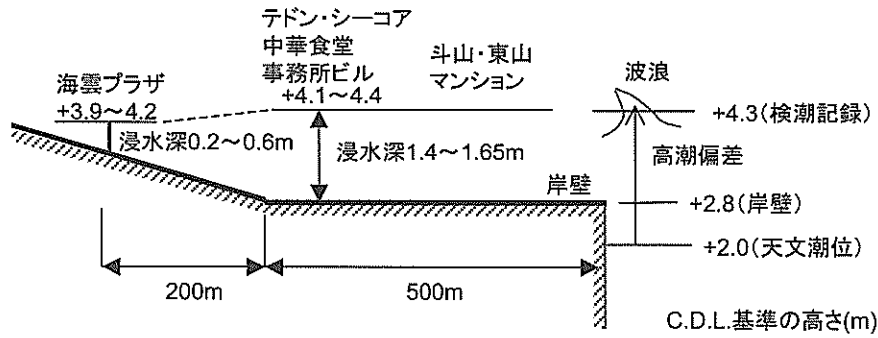


図-2.8 市街地の痕跡のまとめ

で浸水したという証言が得られた。したがって、検潮記録による最高潮位は概ね高潮の実態を表したものであると考えられる。次章では、このことを数値計算によっても検証したい。

### 3. 高潮の数値計算

#### 3.1 気圧と海上風の計算

##### (1) 気圧

台風の気圧分布には、以下に示す Myers の式 (Myers and Malkin, 1961) を仮定した。

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (3.1)$$

ここに、 $p$  は台風の中心から距離  $r$  だけ離れた点の気圧、 $p_c$  は中心気圧、 $\Delta p$  は気圧深度 ( $=1013 - p_c$ ) である。各時刻における中心の緯度および経度は、気象庁による速報値を用いた。また、 $r_0$  は最大風速半径であり、沖縄～近畿地方および韓国南岸の観測気圧から推定した。これらの値を表-3.1 に示す。ただし、9月11日9時と12時の中心気圧は実際の値ではなく、高潮計算の初期条件として徐々に台風を発生させるために用いるものである。

図-3.1 は韓国南岸の代表地点 (図-1.1(b)を参照) における気圧の経時変化を示したものであり、Myers の気圧分布でよく再現できている。

##### (2) 海上風

台風 0314 号は、図-1.1(b)で示したように、鎮海湾と馬山湾のすぐそばを通過したので、これら海域における高潮の計算では、台風の前側の比較的中心に近いところで吹く南東の風の推定が非常に重要となる。そこで、台風の中心付近の三次元構造に起因する super gradient wind を考慮することとし、中心気圧に応じた風速低減係数 (Mitsuta・Fujii, 1987) を導入した。海上風の風速  $W$  は次式によって与えられる。

表-3.1 台風 0314 号の諸元

年	月	日	時	経度 (°)	緯度 (°)	中心気圧 (hPa)	台風半径 (km)	移動速度 (km/h)
2003	9	11	9	125.1	25.2	1013	34	9
2003	9	11	12	125.2	25.5	962	35	9
2003	9	11	15	125.3	25.9	915	38	10
2003	9	11	18	125.4	26.3	920	38	15
2003	9	11	21	125.6	27.0	930	38	20
2003	9	12	0	125.7	27.8	935	39	23
2003	9	12	3	125.8	28.4	940	40	25
2003	9	12	6	126.1	29.5	945	40	30
2003	9	12	9	126.5	30.5	945	40	35
2003	9	12	12	126.9	31.7	945	45	35
2003	9	12	15	127.1	32.7	945	55	40
2003	9	12	18	127.5	33.9	945	60	40
2003	9	12	19	127.8	34.2	945	58	40
2003	9	12	20	128.0	34.5	945	57	40
2003	9	12	21	128.3	34.9	950	55	45
2003	9	12	22	128.5	35.2	960	60	45
2003	9	12	23	128.8	35.7	960	70	45
2003	9	13	0	129.0	36.0	965	85	45
2003	9	13	3	129.8	37.0	970	110	45
2003	9	13	6	130.7	37.7	970	110	45
2003	9	13	9	131.8	39.1	975	110	45
2003	9	13	12	133.1	39.7	975	110	45
2003	9	13	15	134.6	40.5	980	110	45

$$W = C_1(X) U_G \quad (3.2a)$$

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

$$\cdot \exp\left\{\left(1 - \frac{1}{k}\right) \left[1 - \left(\frac{X}{X_p}\right)^k\right]\right\} \quad (3.2b)$$

$$U_G = \frac{1}{2} \left\{ -(fr - V_T \sin \beta) + \sqrt{(fr - V_T \sin \beta)^2 + 4 \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \right\} \quad (3.2c)$$

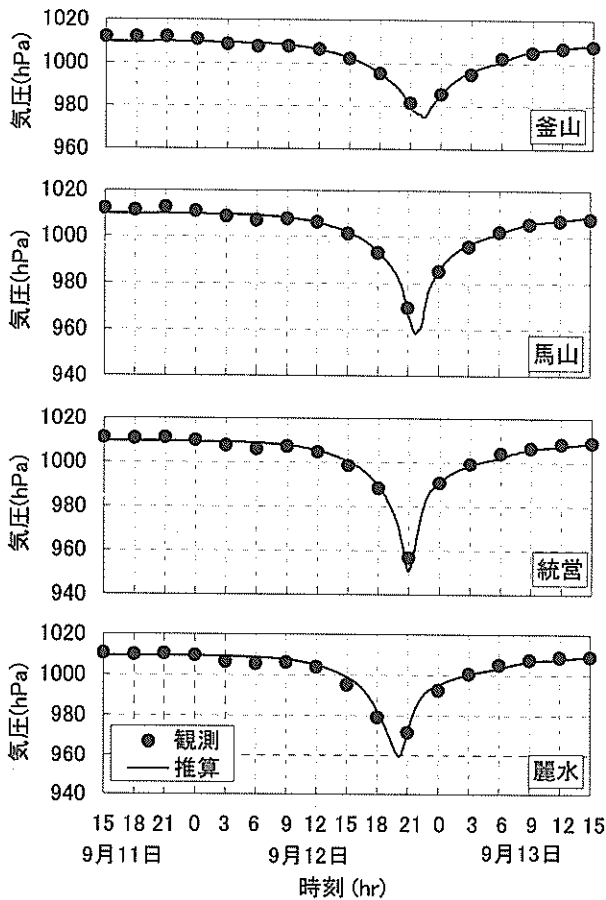


図-3.1 韓国南岸の代表地点における気圧の経時変化

$$C_1(X_p) = \frac{2}{3} \left\{ 1 + 10^{(0.0231\Delta p - 1.95)} \right\} \quad (3.2d)$$

ここに、 $X=r/r_0$ 、 $C_1(X)$ は風速低減係数、 $C_1(X_p)$ はそのピーク値、 $C_1(\infty)$ は同じく台風を中心から無限遠点における値で  $2/3$ 、 $f$ はコリオリの係数 ( $= 2\omega \sin \phi$ 、 $\omega$ :地球自転の角速度= $7.29 \times 10^{-5}$  rad/s、 $\phi$ :緯度)、 $V_T$ は台風の進行速度、 $\beta$ は台風を中心から見た方向、 $\rho_a$ は大気密度 ( $=1.22\text{kg/m}^3$ ) である。式(3.2d)では、台風が発達するほど (気圧深度  $\Delta p$  が大きくなるほど) super gradient wind が発達していると考え、風速低減係数のピーク値  $C_1(X_p)$ には大きな値を与える。逆に台風が減衰したとき (気圧深度  $\Delta p$  が小さくなったとき)には、ピーク値  $C_1(X_p)$ に無限遠点の値  $2/3$  と近い値を与えている。また、海上風の風向は、海面摩擦の影響によって、円軌道を描く自由大気の風向よりも中心側に  $30\text{deg}$  偏向しているものとする。なお、以上のような気圧と風のモデルのことを以下では「台風モデル」と称する。

さて、馬山湾や鎮海湾を取り巻く陸上地形は、図-2.1の下図で示したように非常に入り組んでおり、これによる海上風の風速や風向の変化を考慮する必要があると考

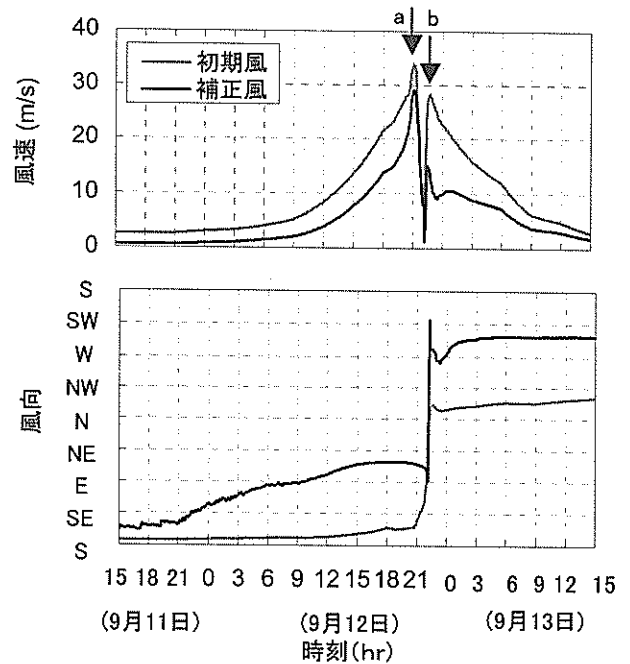


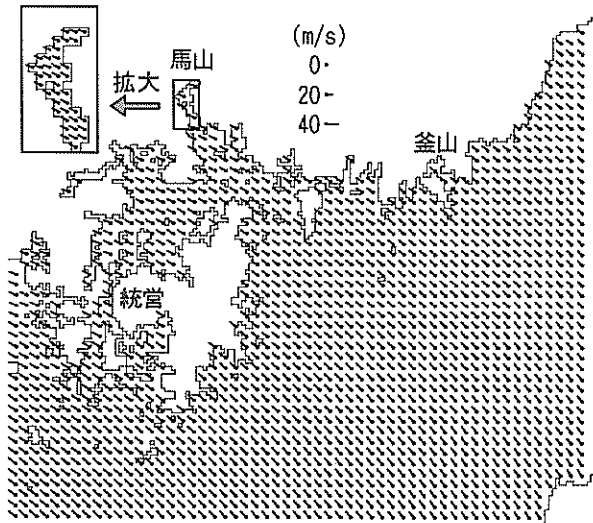
図-3.4 馬山における海上風の変化

えられる。

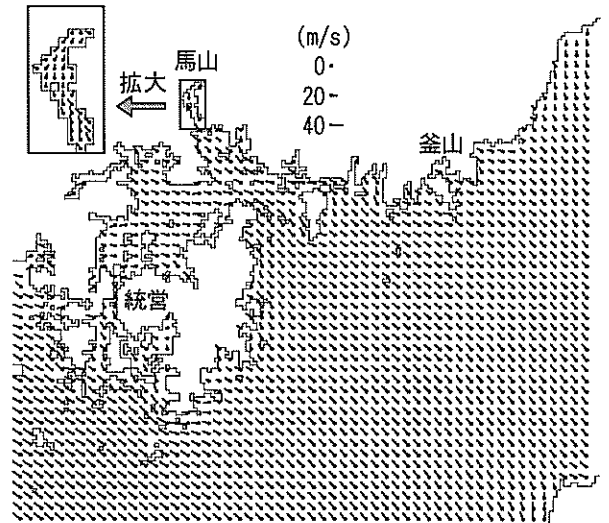
そこで、この図に示す範囲の陸上地形を、東西に  $0.6\text{km}$  間隔で 168 個、南北方向に同じく  $0.6\text{km}$  間隔で 150 個、鉛直方向には標高  $0 \sim 1,500\text{m}$  の範囲を 60 層に分割した、三次元の陸上地形データを作成した。そして、その各格子の風速・風向の初期値を台風モデルによって与え、この風場が連続式を満たすように三次元 MASCON モデル (後藤・柴木, 1993) で補正した。

図-3.2 は初期風として与えた台風モデルの海上風、図-3.3 は三次元 MASCON モデルで補正した海上風の分布を、それぞれ代表的な時刻について示したものである (風は●印から線が延びる方向に吹いている。いわゆる「吹き流し」)。(a)は台風が韓国南岸に上陸する前であり、鎮海湾の入口から馬山湾に向かって風が吹き込んでいる。馬山湾では、初期風は北西を向いているが、補正風は湾に沿った向きになっている。(b)は台風が統營の西北西まで進行した時であり、鎮海湾や馬山湾では(a)の時刻より強い風が吹いている。(c)は台風が馬山湾のそばを通過した後であり、補正風では馬山湾から陸上地形に沿って大韓海峡に出ていく風場が再現されている。

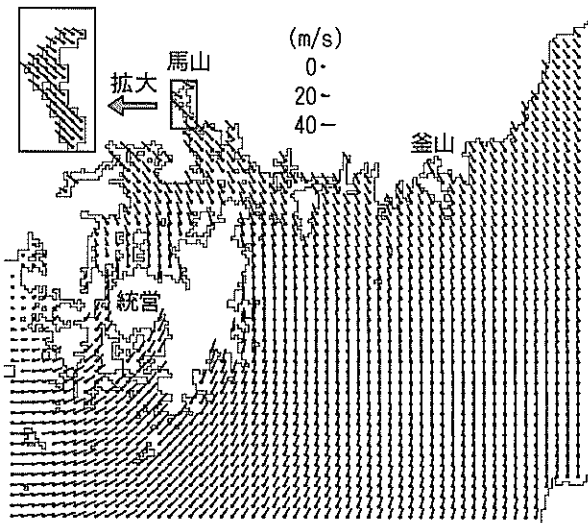
図-3.4 は馬山湾の海上風の経時変化を、初期風と補正風で比較したものである。補正風の風速は初期風に比べ、台風接近時のピーク (図の a) では大差ないが、通過後のピーク (b) は半分程度になった。すなわち、馬山湾の奥から大韓海峡に向かう吹き返しが弱くなった。



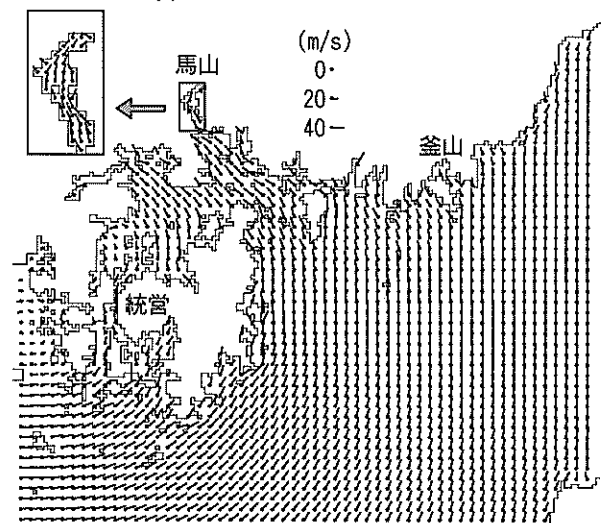
(a) 2003年9月12日18時



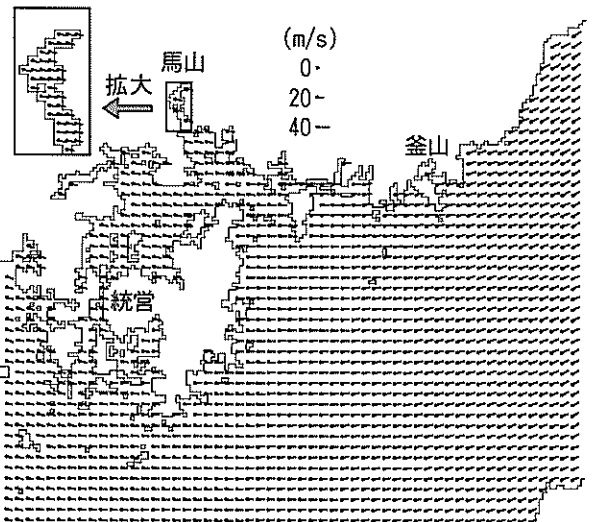
(a) 2003年9月12日18時



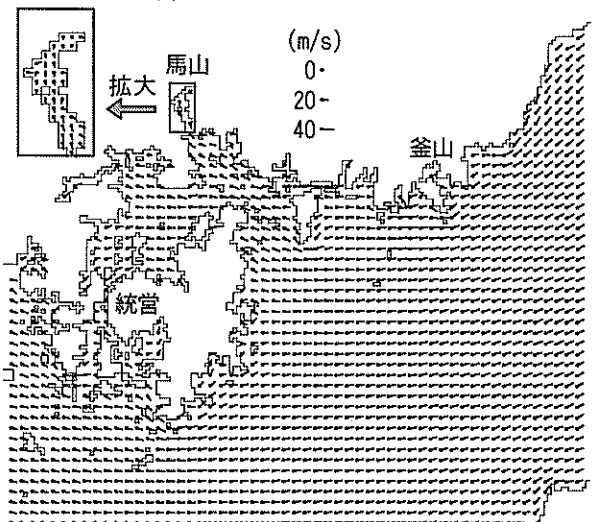
(b) 2003年9月12日21時



(b) 2003年9月12日21時



(c) 2003年9月13日0時



(c) 2003年9月13日0時

図-3.2 台風モデルによる初期の海上風の分布

図-3.3 MASCONモデルで補正した海上風の分布



### 3.2 高潮偏差の計算

#### (1) 流れの運動方程式

流れは単層の非線形長波方程式に基づく数値計算モデルで計算した。その基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.4a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) \\ = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.4b)$$

ここに、 $t$ は時刻、 $M$ 、 $N$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の流量フラックス、 $D$ は全水深（=静水深 $h$ +高潮偏差 $\eta$ ）、 $\rho_w$ は海水の密度、 $p_0$ は海面気圧、 $A_h$ は水平渦動粘性係数である。また、 $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$ は $x$ 、 $y$ 方向の海面せん断応力、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ は $x$ 、 $y$ 方向の底面せん断応力であり、それぞれ以下のように与えた。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3.5a)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3.5b)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.6a)$$

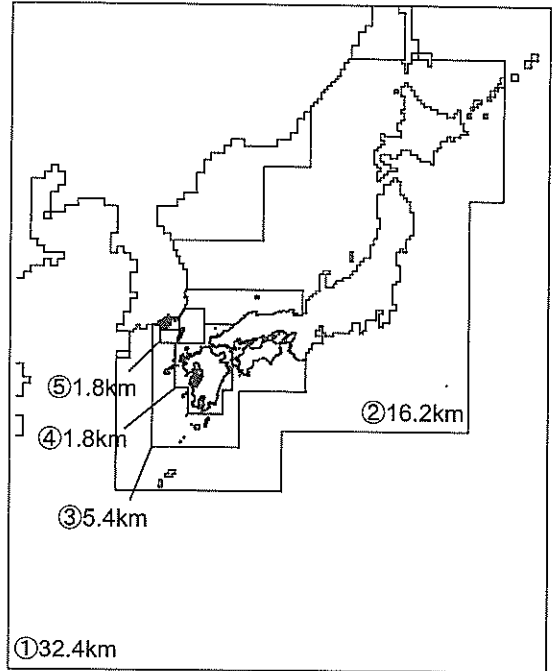
$$\tau_{by} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.6b)$$

ここに、 $W_x$ 、 $W_y$ は海上風速 $W$ の $x$ 、 $y$ 成分、 $n$ はManingの粗度係数である。また、 $C_D$ は海面抵抗係数であり、本多・光易(1980)による式を用いた。

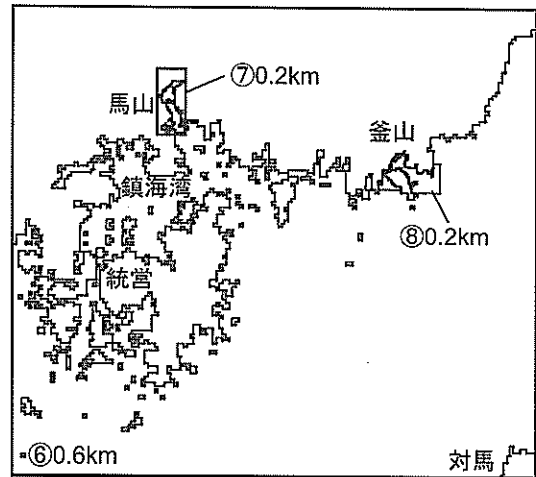
$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (3.7)$$

高潮の数値計算では一般に、天文潮による水位変化や流れを無視し、高潮偏差だけを計算する方法がとられている。本研究でもまずはこの方法で計算した。

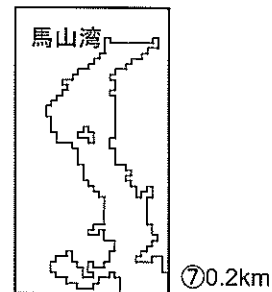
計算領域の構成を図-3.5に示す。第1領域は日本列島や韓半島の周辺海域を含み、その格子間隔は32.4kmである。この内部に細かな格子間隔の計算領域を接続し、鎮海湾や釜山広域市の周辺を0.6km間隔、馬山湾と釜山港の周辺には0.2km間隔の計算格子を配置した。時間差分は3sとした。



(a) 日本列島および朝鮮半島の周辺



(b) 鎮海湾から釜山周辺



(c) 馬山湾

図-3.5 高潮の計算領域

(2) 最大高潮偏差の分布

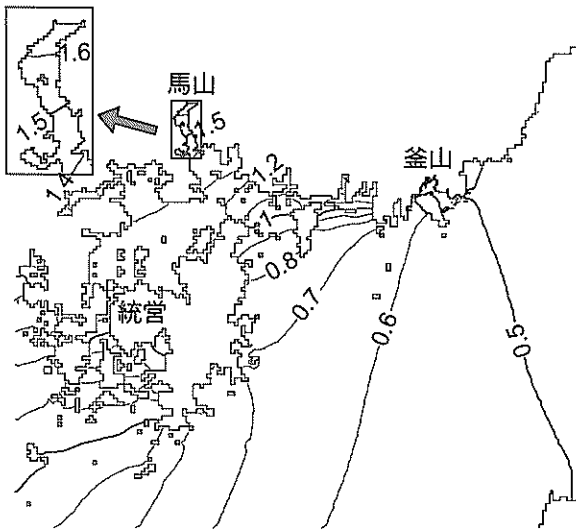
前項(1)に記した方法で推算した最大高潮偏差の分布を図-3.6(a)に示し、経時変化を図-3.7に「推算(C<sub>D</sub>: 本多・光易)」として細い実線で示す。釜山では推算によって約0.6mの最大高潮偏差が得られており、この値は観測による約0.7mに近い。一方、馬山では約1.6mの最大高潮偏差が得られたが、この値は観測による約2.3mを大きく下回った。釜山が大韓海峡のそばにあるのに対し、馬山は長い内湾の奥にあるので、馬山湾の高潮を正確に計算するためには、特に吹き寄せの効果を正確に見積もる必要があると考えられる。

ところで、海面抵抗係数は式(3.7)で示したように、ま

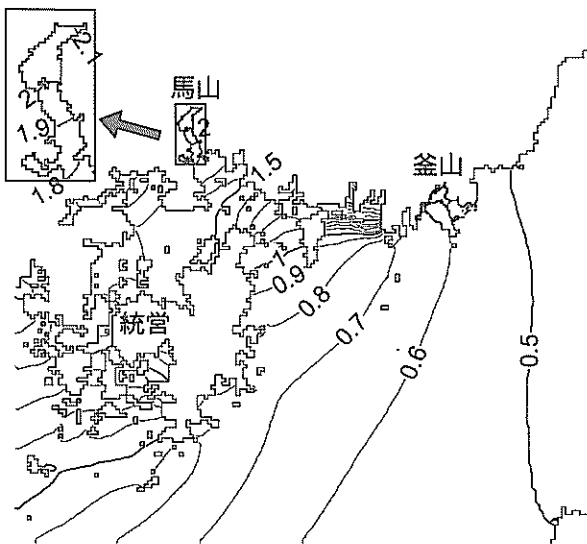
ず風速によって大きく変化するが、さらに細かく言うと、同じ風場でも波齢の若い波ほど大きな値になることが知られている。馬山湾や鎮海湾は曲がりくねって小島も多いため、波齢の若い状態になりやすいと考えられる。そこで、第三世代波浪推算モデルWAM(The WAMDI Group, 1988)のcycle 4を用いて波浪を推算し、その中で使われているJanssen(1989)の海面抵抗係数を用いて高潮を推算した。波浪推算の格子間隔は0.6km、時間差分は20s、エネルギーの発達限界のモデルにはHersbach-Janssen(1999)の式を用いた。このような方法は八代海の波浪推算で既に試みられている(河合ら; 2003a, 2003b)。さらに、波浪スペクトルの方向分割数もデフォルト値の倍以上の32に増やした。

Janssenの海面抵抗係数C<sub>D</sub>を導入して推算した最大高潮偏差の分布を図-3.6(b)に、経時変化を図-3.7に示す。釜山では、本多・光易の海面抵抗係数を用いた場合とほとんど変わっていない。一方、馬山では、観測値に近い約2.1mの最大高潮偏差が得られた。ピーク(図-3.7のb)もそれに続くリサージェンス(c)も検潮記録とよく一致している。本多・光易の海面抵抗係数を用いた場合に比べ、ピークは高くなかったが、リサージェンスの振幅はあまり大きくなっていない。

ところで、観測値にはピークの半日前(図のaの部分)にマイナスの偏差が生じている。しかし、数値計算では



(a) 本多・光易の海面抵抗係数を用いた場合



(b) Janssenの海面抵抗係数を用いた場合

図-3.6 最大高潮偏差の分布

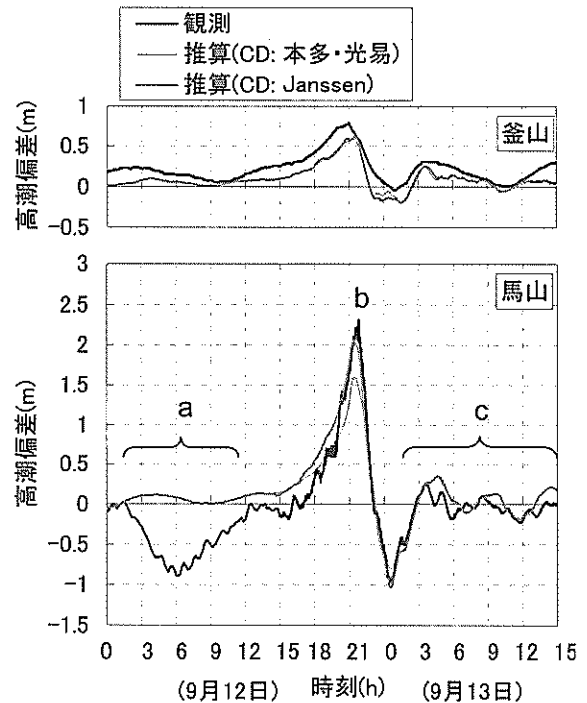


図-3.7 高潮偏差の経時変化

このような偏差は現れず、少なくとも台風による気圧変化や風に直接起因した現象ではないと考えられる。次に、台風の前に停滞前線が通過し、降雨による河川水の流入もあったが、これらに起因する偏差とも考えにくい。したがって、潮位観測に何らかのトラブルがあったのではないと思われる。

(3) 馬山湾の高潮の発生原因

高潮は一般に、気圧低下による海面の吸い上げと、強風による吹き寄せによって生じることが知られている。そこで、式(3.4a)、(3.4b)の流れの運動方程式において、海面せん断応力を無視し、海面気圧の変化だけによって生じる偏差を計算してみた。図-3.8はその結果を示した

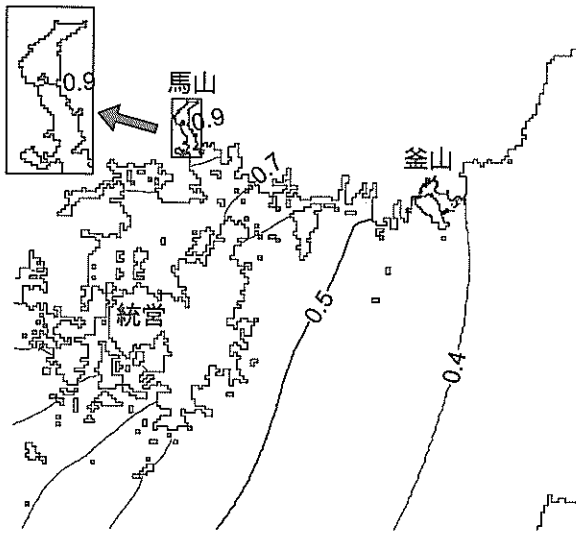


図-3.8 気圧寄与分の最大値の分布

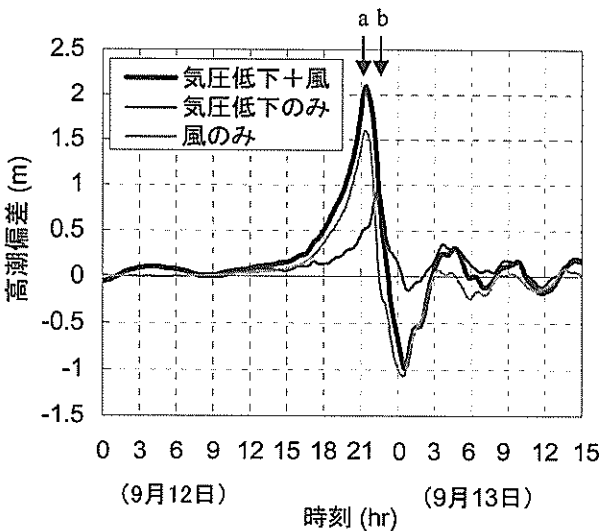


図-3.9 気圧寄与分と風寄与分の経時変化

ものであり、馬山湾では約 0.9m の偏差が得られた。気圧低下による静的な海面の吸い上げが 1hPa につき約 1cm であることは広く知られているが、推算で得られた馬山の最低気圧は 958hPa であるので、静的なつり合いの約 1.7 倍の偏差が生じたことになる。このようなことは珍しいことではなく、日本の八代海でも湾奥に位置する不知火では、台風 9918 号時の気圧低下で静的なつり合いの約 2.0 倍の偏差が生じている (河合ら, 2000a, 2000b)。

馬山における、気圧低下による偏差と風による偏差の経時変化を図-3.9 に示す。風による偏差が最大となる時刻 (図中の a) の方が早く、このときに気圧低下も含めた全体としての偏差も最大になっている。この時刻に台風の中心は、図-3.10 に示すように、馬山湾の南西に位置し、強い南東風によって鎮海湾や馬山湾に海水が吹き寄せられた。気圧低下による偏差が最大となるのはその 1 時間ほど後のことで、台風の中心はすでに馬山湾の北東に抜けている。この時刻には鎮海湾や馬山湾の風向は逆転し、風による偏差はゼロに近くなっている。

3.3 高潮と天文潮を合わせた潮位の計算

前節 3.2 では天文潮位を無視し高潮偏差分のみを計算したが、検潮記録や痕跡高を潮位の絶対値として議論するためには、高潮と天文潮を合わせた計算が必要である。

そこで、図-3.11 に示すように、鎮海湾の入口から少し離れたところに線境界を設け、この線上の計算格子に時々刻々と変化する天文潮位を与えることで、計算領域内に天文潮位を再現した。線境界における潮位は、海洋潮汐予測モデル NAO99b モデル (Matsumoto et al., 2000)

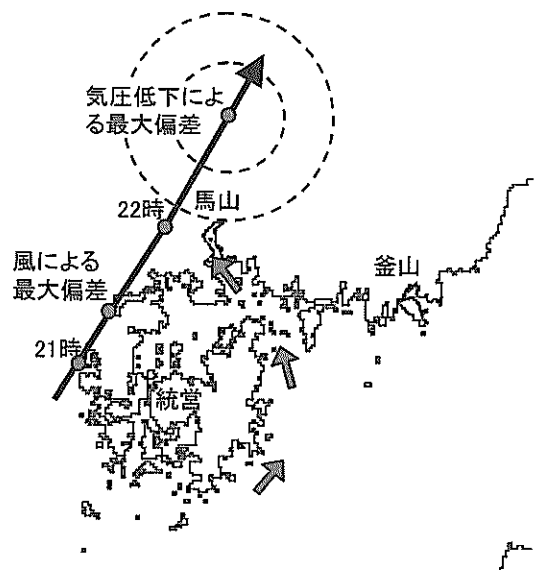


図-3.10 最大偏差時の台風の位置

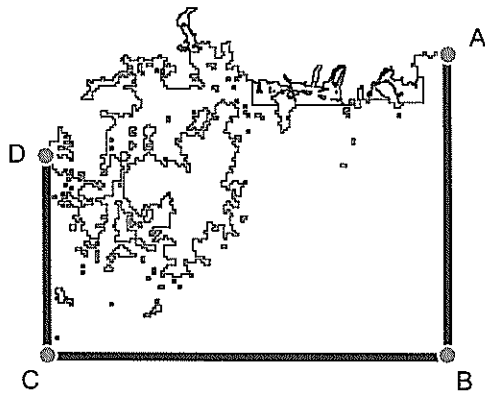


図-3.11 天文潮を入射させる線境界

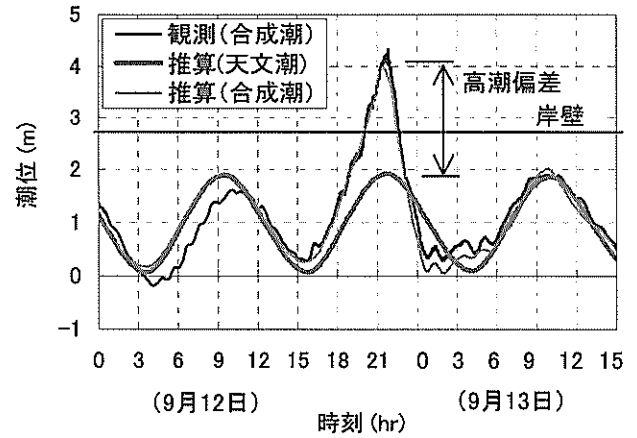


図-3.13 馬山における潮位の経時変化

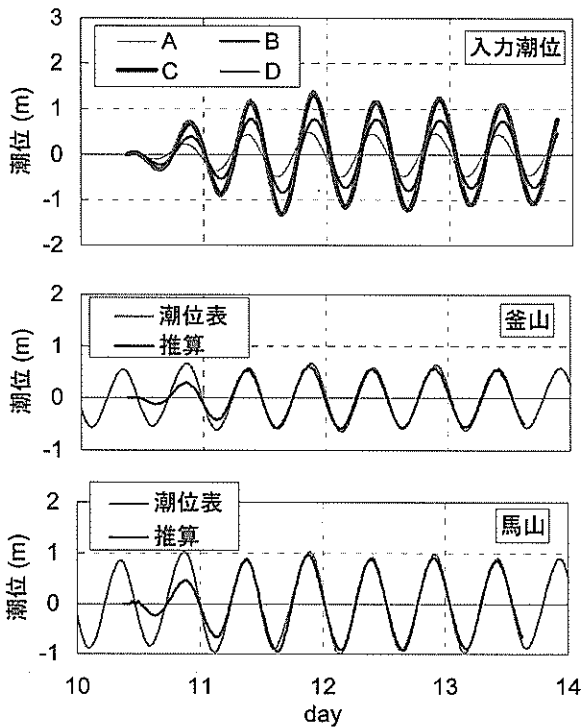


図-3.12 天文潮位の再現性

で与えた。地点 A~D で与えた潮位を図-3.12 の上段に示す。同図の中・下段に示すように、釜山や馬山では、潮汐表に掲載された天文潮位を精度良く再現している。

次に、図-3.11 に示した線境界で天文潮位と高潮偏差を合わせた潮位を与え、この領域内の潮位を計算した。図-3.13 は、このような方法で推算した馬山の潮位を観測値と比較したものである。台風来襲前の9月12日4時~11時を除けば観測潮位に近い推算潮位が得られており、最高潮位も観測値のCDL+4.3mに対して+4.0mになっている。

図-3.14 は、数値計算によって得られた、馬山湾の代

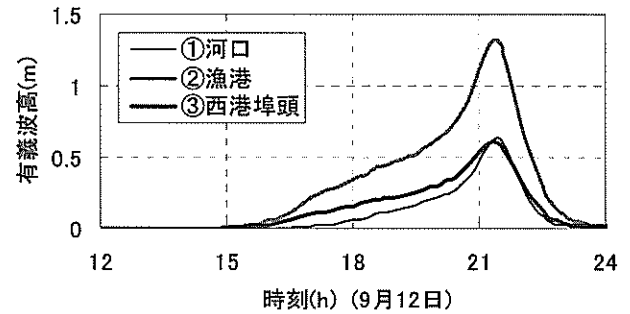


図-3.14 馬山湾の北西岸における有義波高の経時変化

表地点における有義波高の経時変化を示す。ただし、波浪推算において防波堤は考慮していないので、この値は厳密に言うと防波堤の沖側の入射波高になる。しかし、防波堤の天端は低く、高潮時に波浪の低減効果は小さかったものと考えられる。河口、漁港、西港埠頭の中では、馬山湾の入口から見通せる漁港で最も有義波高が高く、島や海岸線によって遮蔽される河口や西港埠頭では低い。最大有義波高の起時は21時20分頃であると考えられ、図-3.13に示した最高潮位の起時(推算では21時20分、観測では21時50分)とほぼ同時である。

### 3.4 まとめ

数値計算によって得られた潮位の経時変化は、台風来襲前の一部の時間帯を除くと、検潮記録とほぼ一致した。また、最高潮位も、波浪による水面の揺れが少ないと考えられる市街地内の浸水位とほぼ一致している。したがって、馬山湾では概ね検潮記録が示すような高潮が発生したものと考えられる。

さらに、最高潮位とほぼ同時刻に最大となったと考えられる有義波高は漁港付近で高く、この結果はこの地区

で検潮記録の最高潮位より 1m ほど高くまで水に浸かったことの裏付けの一つにもなる。

#### 4. 結論

本研究では、台風 0314 号による馬山湾沿岸の高潮の浸水について現地調査を行うとともに、数値計算によっても高潮偏差や潮位を推算した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 波による水面の揺れが少ないと考えられる市街地内で得られた浸水の痕跡の高さ、数値計算モデルによる最高潮位は、検潮記録による最高潮位と概ね一致した。したがって、概ね検潮記録の示す高潮が実際に発生したと考えられる。
- ② この高潮偏差は主として、台風が馬山湾に最接近する前に、台風の眼の前方で吹く南東風が海水を鎮海湾、馬山湾に吹き寄せることによって生じたものである。
- ③ 漁港付近では、検潮記録の最高潮位より 1m 程度高いところまで水に浸かったという証言が得られた。これは波による水面の揺れなどを含んだ高さであると思われる。

また、台風 0314 号で馬山市が未曾有の高潮災害に見舞われた原因としては、以下のことが考えられる。

- ① 台風 0314 号の勢力が非常に強かった。また、この台風による高潮偏差と波高のピークは、天文潮の満潮とほぼ重なった。
- ② 岸壁と市街地の間に防潮施設がなく、岸壁に野積みされていた木材とともに、大量の海水が市街地へ流入した。市街地の地盤高は岸壁の天端高と大差なく、駐車場など地下室も多かった。地上の数十 cm の浸水でも地下室の浸水を招いた。
- ③ 少なくとも馬山湾が開港して以来、顕著な高潮災害の経験はなかった。

#### 5. あとがき

本研究では、数値計算モデルによって台風 0314 号の馬山湾や鎮海湾の高潮を推算し、馬山の高潮を概ね再現することができた。ただし、高潮偏差のピークはやや小さく、より精度の良い計算ができるように、海上風の推算法などを改良していく必要がある。

また、馬山湾や鎮海湾の西側にもこれらと似たような、水深が浅く海岸線が複雑に入り組んだ内湾が続いている。台風 0314 号以外の台風や他の海域についても高潮計算

を行い、韓国南岸の高潮に対する危険度を調べる必要がある。

これらのことを今後の課題としたい。

(2005年2月10日受付)

#### 謝辞

本研究では 2 回の現地調査を実施しており、被災地の皆様から高潮や波浪の状況について貴重なご証言をいただき、痕跡高の測量にもご理解をいただいた。また、1 回目の現地調査では、韓国海洋大専科工科大学副教授の金度三氏、三星物産建設部門技術本部の姜閔求氏、2 回目の現地調査では、株式会社フジタ技術センターの永瀬恭一氏、韓国海洋研究院の姜始桓氏、鄭遠武氏、白元大氏、金昌一氏をはじめ多くの方々にご助力いただいた。さらに、本研究の一部は、京都大学防災研究所特定共同研究「都市域における氾濫災害危険度評価法の研究開発（代表者：高山知司教授）」によるものである。以上のことをここに記して、被災地の早期のご復興をお祈りするとともに、関係各位に謝意を表したい。

#### 参考文献

- 石原 孟・山口 敦・藤野陽三(2003)：2003 年台風 14 号による風力発電施設の被害とシミュレーションによる強風の推定，土木学会誌，Vol.88，No.12，pp.45-48.
- 海上保安庁(2002)：平成 15 年潮汐表第 2 巻太平洋及びインド洋，339p.
- 河合弘泰・平石哲也・佐藤孝夫・大川郁夫(2000a)：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.
- 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男(2000b)：台風 9918 号による高潮の現地調査と追算，港湾技研資料，No.971，43p.
- 河合弘泰・川口浩二・橋本典明(2003a)：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・川口浩二・橋本典明(2003b)：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.
- 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.

- 後藤恵之輔・李 成林(2004): 2003年9月台風14号による韓国南部災害, 土木学会誌, vol.89, No.3, pp.55-58.
- 後藤智明・柴木秀之(1993): 陸上地形の影響を考慮した海上風推算, 港湾技術研究所報告, vol.32, No.3, pp.65-97.
- 高山知司・雨森洋司・金 泰民・間瀬 肇・姜 閔求・河合弘泰(2004): 台風0314号による釜山沿岸の高潮・高波災害, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1371-1375.
- 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.
- 安田誠宏・平石哲也・河合弘泰・永瀬恭一(2004): 韓国南部馬山市における高潮浸水被害現地調査と地下水解析, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1366-1370.
- Janssen, P.A.E.M. (1989): Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, *Journal of Physical Oceanography*, vol.19, pp.745-754.
- Hersbach, H. and P.A.E.M. Janssen (1999): Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model (WAM), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.16, pp.884-892.
- Matsumoto, K, Takanezawa, T. and Ooe, M (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*, 56, pp.567-581.
- Myers, V. A. and Malkin, W. (1961): Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U. S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- Mitsuta, Y. and T. Fujii (1987): Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol.37, Part 4, No.329, pp.169-185.
- The WAMDI Group (1988): The WAM model - A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.18, pp.1775-1810.