

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1101      June 2005

2004年に来襲した台風による波浪災害事例

平山 克也

南 靖彦

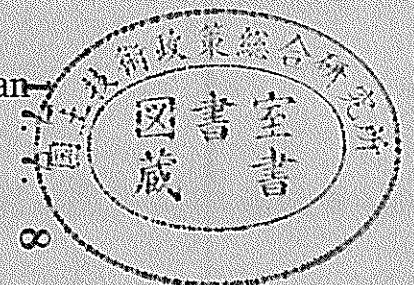
奥野 光洋

峯村 浩治

河合 弘泰

平石 哲也

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. はじめに	4
2. 調査地点における波浪特性と被災状況	4
2.1 調査地点の選定	4
2.2 長崎島原地区	6
2.3 宮崎県細島港および宮崎港	9
2.4 神戸港と関西空港	12
2.5 高知県室戸地区	18
2.6 その他	22
3. 函館港における被災防波堤周辺の波浪変形	24
3.1 函館港における調査内容	24
3.2 波浪変形計算の手法	28
3.3 波浪変形計算の結果	29
3.4 函館港における調査のまとめ	32
4. 被災の特徴と今後の課題	33
4.1 作用する波浪と潮位の関係	33
4.2 周辺地形による波浪の変形	34
5. まとめ	40
6. おわりに	41
謝辞	41
参考文献	41
記号表	42

## Case Study on Wave Disaster due to Typhoons in 2004

Katsuya HIRAYAMA\*  
Yasuhiko MINAMI\*\*  
Mitsuhiro OKUNO\*\*  
Koji MINEMURA\*\*\*  
Hiroyasu KAWAI\*  
Tetsuya HIRAISHI\*\*\*\*

### Synopsis

Large typhoons continuously landed in the west part of Japan in 2004. The typhoons caused the storm surges and waves in the wide areas spreading from the Okinawa to Hokkaido islands. The revetments, breakwaters and sea walls in the coasts and harbors suffered from the typhoons were heavily damaged mainly due to high tides and large waves. The paper describes the situation of facility damages derived from field survey. The mechanism of damages is discussed applying the non-linear wave transformation model for the representative harbors.

**Key Words:** storm surge, wave disaster, wave overtopping, coastal structure, NOWT-PARI

---

\* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

\*\* Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\*\* Trainee, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\*\*\* Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

## 2004 年に来襲した台風による波浪災害事例

平 山 克 也\*  
南 靖 彦\*\*  
奥 野 光 洋\*\*  
峯 村 浩 治\*\*\*  
河 合 弘 泰\*  
平 石 哲 也\*\*\*\*

### 要 旨

平成 16 年は、合計 10 個の台風が日本に上陸し、新潟中部地震により市街地や鉄道が破壊されるなどの異常な気象災害が頻発した年である。沿岸部では、台風 16, 18, 23 号による高潮および高波による被害が甚大であり、沖縄から北海道の全国各地の港湾・海岸で、防波堤の滑動、海岸堤防の倒壊、岸壁施設の崩落等の被災が相次いだ。本資料では、この中で、主に高波による作用によって生じたと思われる被災例を数例取り上げ、その特性を示した。

キーワード：高潮，台風による高波，港湾施設被災，波浪変形計算，現地災害調査

---

\* 海洋・水工部主任研究官  
\*\* 海洋・水工部波浪研究室  
\*\*\* 海洋・水工部波浪研究室研修生  
\*\*\*\* 海洋・水工部波浪研究室長  
〒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：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

## 1. はじめに

平成11年(1999)に八代海や周防灘沿岸に高潮被害をもたらした台風18号は記憶に新しいところであるが(河合ら, 2000, 平石ら, 2000), 平成16年(2004)には合計10個の台風が日本に上陸し, 各地で大雨, 洪水等の被害をもたらした。この中でも8月の台風16号, 9月の18号, 10月の23号は防波堤ケーソンの滑動・転倒, 護岸の崩落, 海岸堤防の倒壊等の甚大な被害を沿岸部でもたらした。これらの被災の中で, 瀬戸内海地方の広島, 香川県内での浸水被害は, 高潮による海水氾濫によるものと思われる。その他の地域における災害は, 高潮による潮位上昇時に高波が来襲したことによる構造物被災あるいは高波だけによる異常外力による被災が主な原因となっている。そこで, 本資料では, 高波が主要な被災原因となっている事例について現地調査を行い, その被災形態を調べた。次に, 潮位変化と波浪変形を考慮して被災との関係を整理した。ただし, 本資料で検討した事例は, 筆者らが直接現場にむかうことができた被災カ所のみ限定されており, 2004年の台風災害のすべてを網羅するものではない。また, 各地の対策委員会等で現在でも議論されている事例もあり, 本資料で取り上げた被災事例については, 現在の観測資料で推定できる海象条件と被災との関係を示しただけで, 必ずしも結論として明示できるものばかりではない。そこで, 本資料では, 現地の被災状況を記録するとともに, 当時の波浪状況および被災に至った過程について可能な限りの考察を加えることにより, 今後の対策検討のための一助となることを目的とした。

## 2. 調査地点における波浪・潮位の特性と被災概要

### 2.1 調査地点の選定

2004年の代表的なものとして図-2.1.1に本資料で調査対象とした台風16, 18, 23号の経路を示す。台風16, 18号はほぼ同様な経路をもち, 九州西部を縦断した後に, 日本海を高速で進み, 20数時間後に北海道に再上陸している。台風23号は, やや南よりのコースを東西に進み四国に上陸したあと, 近畿, 東海を横断している。

図-2.1.2には2004年に相次いで来襲した台風のなかで甚大な海岸・港湾被害をもたらした台風16号(T0416), 18号(T0418)および23号(T0423)に関する擾乱中の最大有義波高 $H_{1/3}$ , 対応する最高波高 $H_{max}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ の観測結果を示す。図からT0416(台風16号, 2004)およびT0418(台風18号, 2004)では, 西日本および北海道で比較的大きな波高が観測され, T0423(台風23号, 2004)では四国南岸で観測史上最大と言われる大きな波が観測されていることがわかる。

次に, NOWPHASのデータベースで整理されている高潮偏差を比較する。図-2.1.3に, 3台風での全国代表点の最高偏差を示す。台風16号および18号では, 瀬戸内海に面する高松, 広島で偏差が大きく, 高潮被害を生み出している。台風23号では高知, 室戸などの土佐湾で大きな高潮が発生しているのがわかる。図-2.1.2および図-2.1.3から, 本資料で示す海岸, 港湾施設の被害が生じた箇所では大きな高潮偏差あるいは波浪が発生したことがわかる。

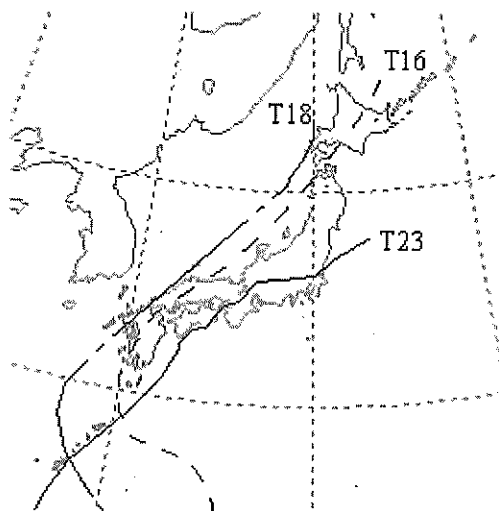


図-2.1.1 台風経路図

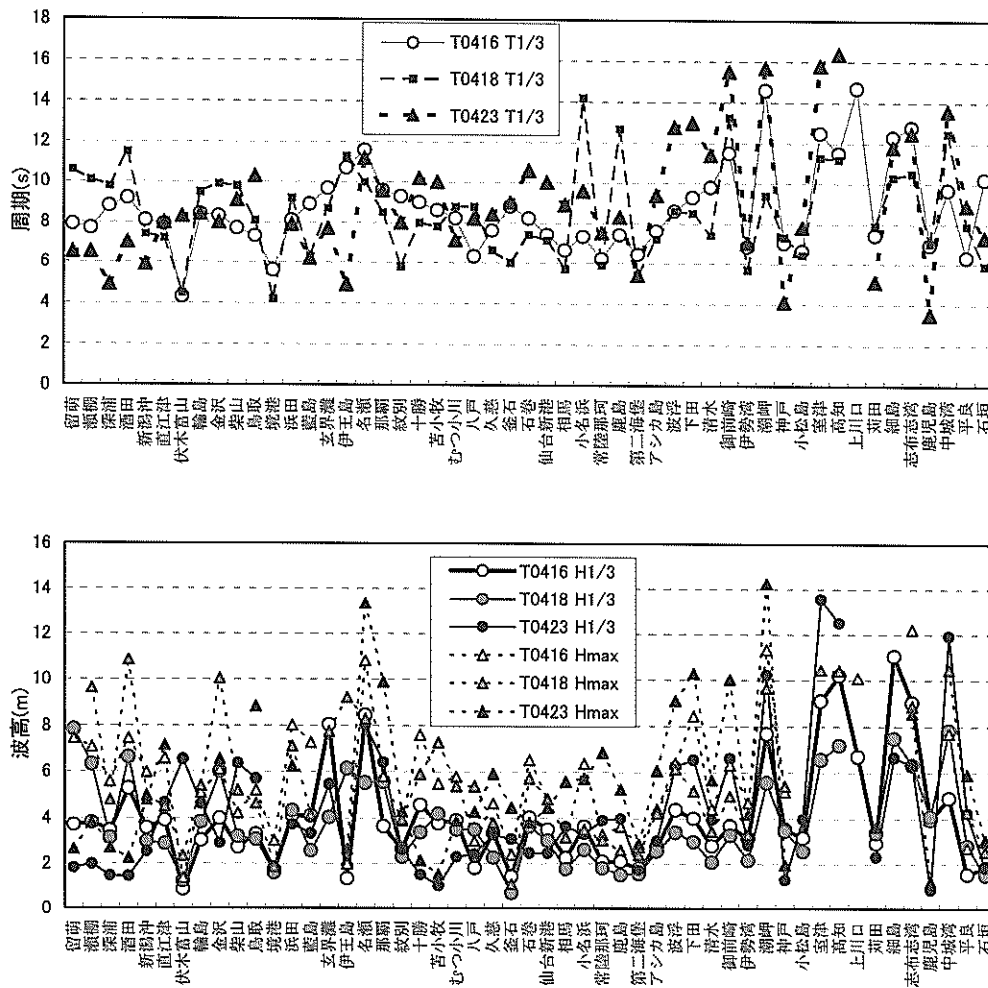


図-2.1.2 2004年台風16, 18および23号で観測された最大有義波高と対応する最高波高（上段）および対応する有義波周期（下段）

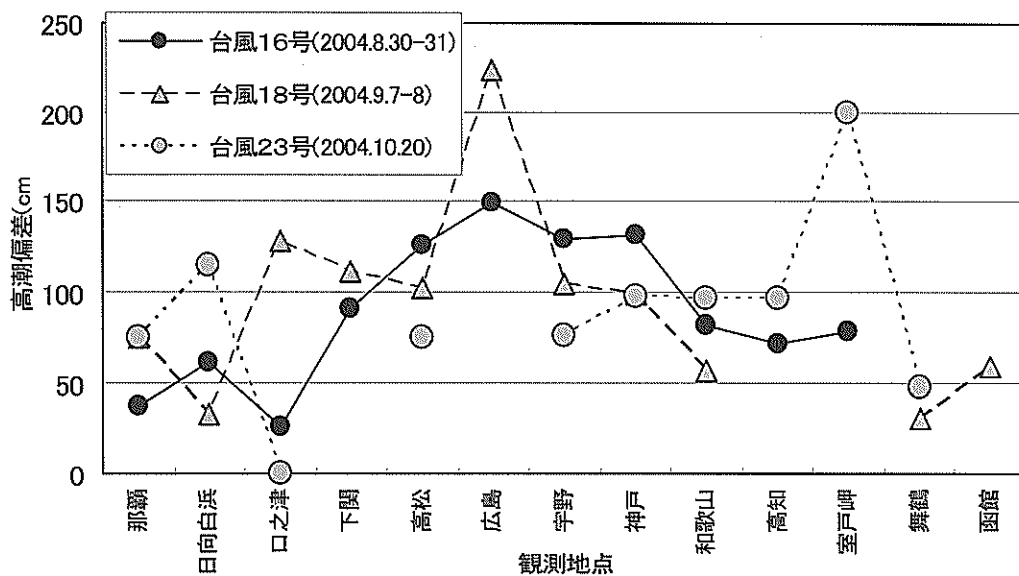


図-2.1.3 全国代表点での高潮偏差

## 2.2 長崎島原地区

### (1) 調査概要

平成16年台風16号接近時(8月30日)は大潮と重なり、道路が冠水し、建物が浸水する被害が生じた。島原市壺南地区のホテルでは庭が冠水し、前面護岸が崩壊し、背後の住宅にも水が侵入した。窓ガラスが割れる映像がテレビでも放映され、ホテルのプールは完全に水没している様子であった。被災時には台風中心は鹿児島県西方にあり、有明海ではほかに顕著な被災はなく、被災原因を調べる目的で被災2日後に現地調査を行った。また、下関港湾空港技術調査事務所、熊本港湾・空港整備事務所から熊本港での海象観測記録の提供を受けた。図-2.2.1に台風経路を示す。図-2.2.2は、有明海的位置で、図-2.2.3は島原周辺の詳細地図を示す。

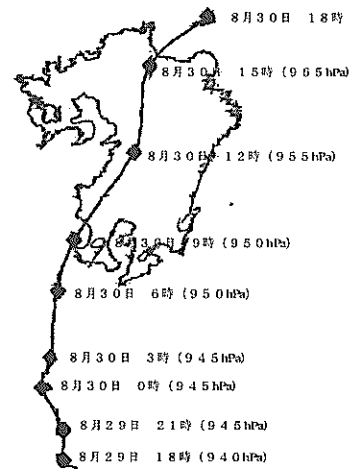


図-2.2.1 台風16号 経路図

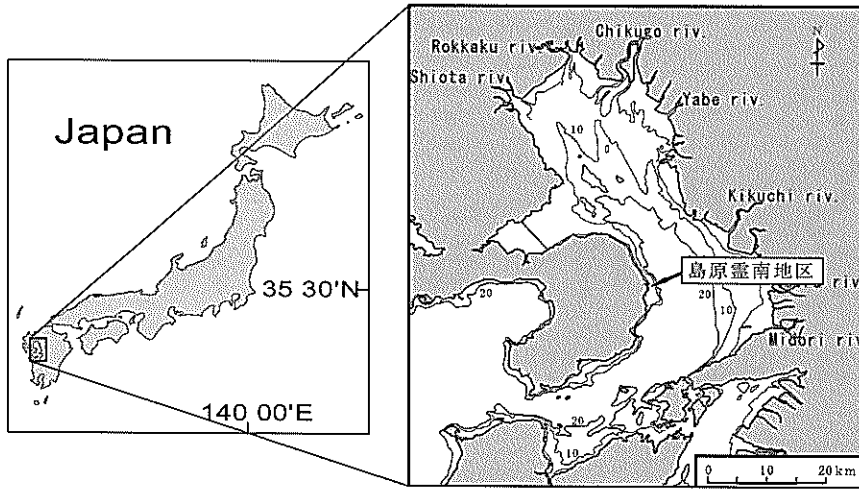


図-2.2.2 島原を含む有明海の位置

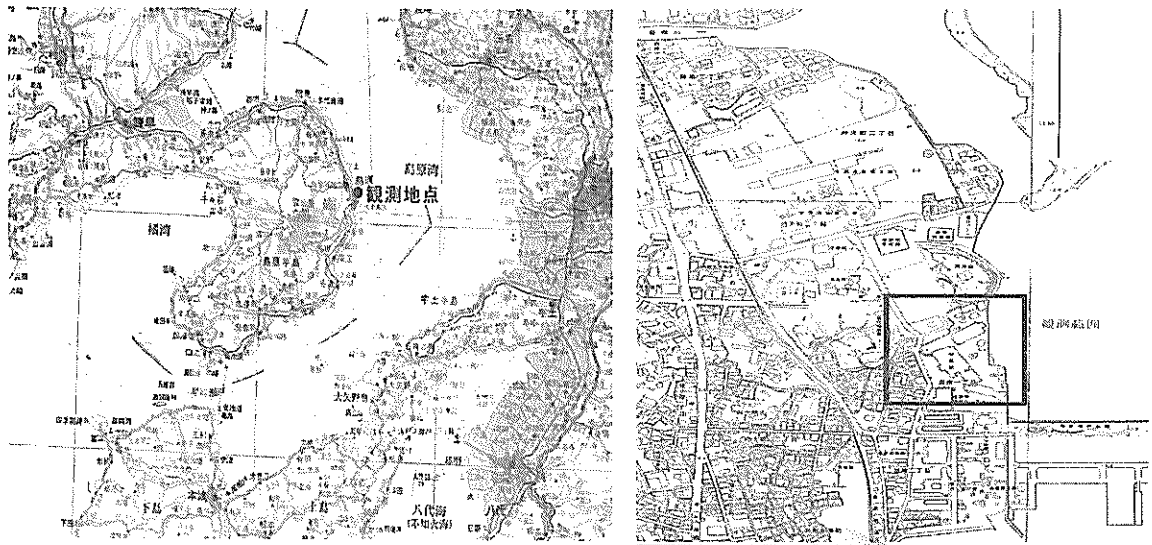


図-2.2.3 観測地点及び詳細図

## (2) 被災状況

台風 16 号による高波によってホテル周辺が波をかぶって護岸が倒壊した時間は、8 月 30 日 9:00 頃と思われる。このとき近くに待機していた長崎テレビの報道によりホテルの冠水、窓ガラスの破壊が放映された。被災したホテル（南風楼(島原市霊南町)）支配人のヒアリングによれば、7:00 頃より浸水が始まり、9:00 にピークを迎え、ホテル南側の出入り口直前まで水が来た。水面は沖の方が高いように見えた。室内には海水の流入はなかった。11:00 頃から潮が引き始めた。波は岸壁を乗り越えて、庭にある茶室(平屋)の屋根まで波をかぶっていた。同行していただいた長崎県島原振興局によれば、大潮時期には排水溝からの逆流により市街地が浸水することは度々あったようである。昨年度、排水溝に逆止弁を設置したので今回の台風では市街地の浸水はなかった。

ホテル前面護岸（霊丘公園護岸 B）は 155m 全域で被災し、特にホテルのプール前面部分は護岸本体が海中に沈んで原形を残していなかった。このほか、市民プール前面（鳥山護岸 50m）で護岸本体が崩落しプールの基礎部分が露出するなど、他の数ヶ所でも護岸被災が生じた（長浜護岸 300m）。

ホテルの背後には幅 3m の道路を挟んで民家が並んでおり、6 棟が床下浸水をした。島原市役所によれば最大浸水深は道路上 75cm である。民家住民からヒアリングを行った。平成 8 年、11 年の台風でもホテルの方から流入する海水で浸水した。嵩上げて新築した家屋もある。台風 16 号による浸水時には車の通行が完全に遮断されず、冠水した道路への通行が危険であった。そして、ヒアリングから住宅地の浸水範囲を確定した（図-2.2.4）。写真-2.2.1 に被災地区の状況を示す(9 月 1 日撮影)。

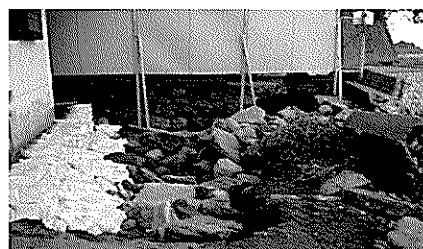
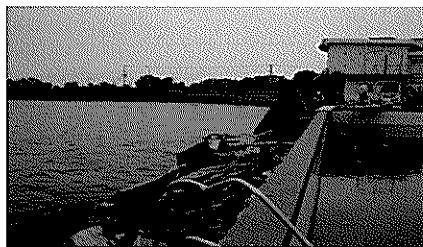


写真-2.2.1 被災護岸写真

## (3) 海象条件

被災時を 30 日 9:00 と仮定して周辺の観測記録を収集した。

長崎 9:00 11.0m/s NE

口之津 9:00 天文潮位 CDL+526cm

偏差 13cm

観測潮位 CDL+539cm

三角 9:00 偏差 10cm

観測潮位 CDL+640cm

熊本沖 波観測

8:00  $H_{max}=92\text{cm}$   $H_{1/3}=49\text{cm}$   $T_{1/3}=3.2\text{s}$  WNW

10:00  $H_{max}=99\text{cm}$   $H_{1/3}=50\text{cm}$   $T_{1/3}=2.9\text{s}$  W

最大 16:00  $H_{1/3}=161\text{cm}$  WNW

風観測 9:00 17.0m/s ENE

\*12:00 から風向きは NNW.

潮位 9:00 CDL+473cm(満潮)

島原 計算天文潮位

被災時(8/30 9:00) CDL+475cm 満潮

調査時(9/1 12:00) CDL+430cm 満潮位よりやや低下

## (4) 被災地区地盤高および痕跡

被災範囲の地盤高を、被災せずに残った護岸設計天端高(DL+640cm)を基準として計った。また、ホテル支配人のヒアリング（窓ガラス飛散、ポンプ換気口海水流入）と家屋の壁面での泥飛沫をもとに地盤高からの高さとして計った。なお、調査時(12:00)の海水面は、DL+470cm であり、CDL から島原港 DL への換算は島原港 DL=潮位観測基準面(CDL)+40cm として行った。すると、被災時の潮位は DL+515cm と推定される。測定値を表-2.2.1 に、地点を図-2.2.4 に示す。



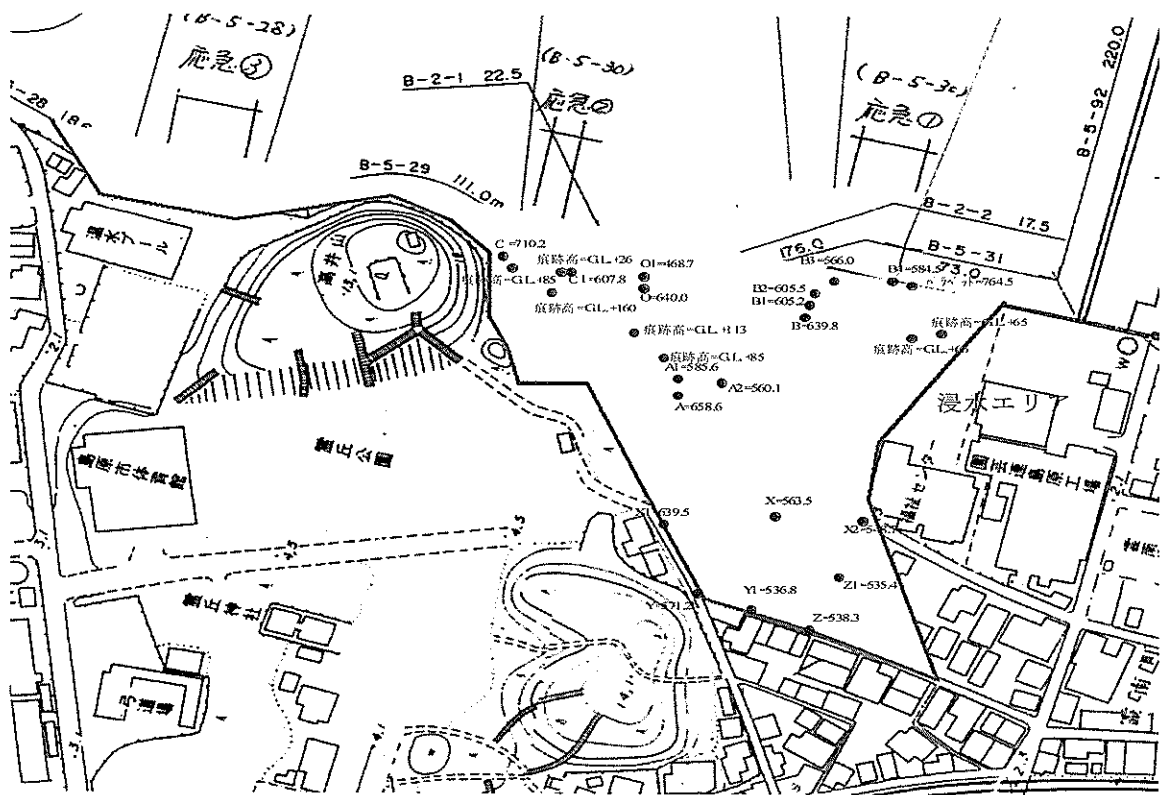


図-2.2.4 測点位置図

表-2.2.1 調査地点および痕跡高さ

測点番号	高さ(DL+) (cm)	備考	痕跡高(地盤上 cm)	痕跡根拠
A	659	南風楼北東隅		
B	640	護岸天端		
C	710	高井山護岸		
C1	608	職員寮前被災護岸	113 190 160	波で割れた窓 波が入ってきた穴 民家の泥飛沫
A1	586	ホテル地盤高	85 85	ホテル床 ホテル別館床
A2	633	ホテル南出入り口高		
B1	605	プール北被災護岸		
B2	605	同上		
B3	566	プール壁面高		
B4	585	プール壁南		
P	765	新設護岸パラペット		
X	564	ホテル背後道路	75	島原市測定
X1	640	道路北		
Y	571	道路角		
Y1	537	より背後道路		
Z	538	浸水限界		
Z1	535	南道路		
X2	549	道路南		

(5) 波の条件

島原港では波浪観測がなされていないので、被災時の波は不明である。そこで、熊本での最高風速 17m/s を用いて SMB (日本港湾協会, 1999) により、簡易的に波浪推算を実施した。島原より ENE 方向の対岸までの距離を 20km とし計算した結果、島原港沖の波浪諸元として  $H_{1/3}=1.6\text{m}$ ,  $T_{1/3}=4.5\text{s}$  が推定された。図-2.2.5 は、潮位を CDL+4.75m として、エネルギー平衡方程式 (高山ら,1991) によって計算した被災箇所周辺の波高分布である。被災護岸前面では、隅角部における入・反射波の重畳や浅水変形により波高が増大し、沖波波高 1.6m に対し最大で  $H_{1/3}=2.0\text{m}$  となっている。対象護岸の設計条件のうち設計波高は不明であるが、護岸が被災した当時は、海域で想定される高波浪のなかでもかなり大きな波が作用していたと考えられる。

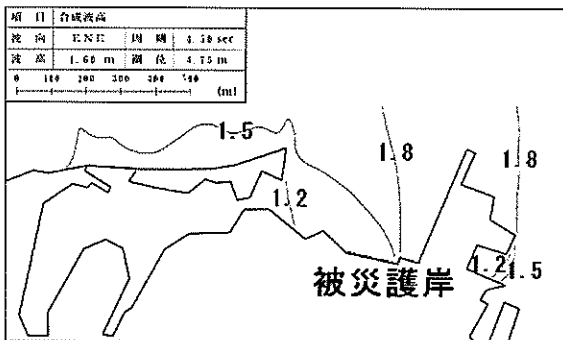


図-2.2.5 島原壺南地区周辺の波浪変形計算

2.3 宮崎県細島港および宮崎港

(1) 波浪・潮位の特徴

台風 0416 号は、8月19日にマーシャル諸島付近で発生し、8月24日15時には最も発達し、中心気圧 910hPa、中心付近最大風速 55m/s の大型で猛烈な台風である。5年ぶりに九州に上陸した台風となり、この後、速度を速めながら北北東に進み、九州を縦断し、30日16時には周防灘に抜け、30日17時に山口県へ再上陸した。宮崎県が暴風域に入ったのは、南部で30日午前3時頃、北部で30日明け方であった。また、暴風域を抜けたのは、南部が30日夕方、北部が30日宵の内であった。台風16号の進路図を図

-2.3.1に示す。

宮崎港・細島港における波浪観測は、細島港において観測波高(有義波高)・波周期・波向および潮位の観測が行われており、宮崎港では潮位観測が行われている。台風が九州に接近した8月27日から8月31日の細島・宮崎港における波浪および潮位の時間変化を図-2.3.2に示す。なお、台風再接近時では細島港の海象計が欠測となっているため、ピーク波高に対しては同時に観測されている水圧計による数値補正を行った数値で示している。これらのデータによると、8/27から8/29にかけて、台風16号は沖縄本島のはるか東海上に長く停滞していたため、九州沿岸ではうねり性の高波浪が継続して来襲していた。その後、台風16号の接近に伴い、8月30日0時から波高が徐々に上がりはじめ、12時に最大波高 11.05m に達している。また波周期については、8月27日の時点から 10s から 12s 程度の周期が継続して観測されている。一方、潮位に関しては、8月30日6時に最高潮位が観測され、それぞれの港における H.W.L. 宮崎港+2.07m、細島港+2.30m をいずれも上回る潮位となった。最高潮位時、最大波高時における観測データを表-2.3.1に示す。以下に個々の施設の被災状況を示す。

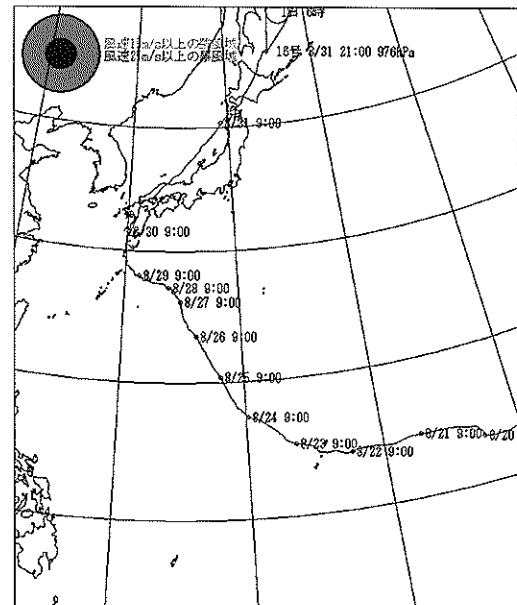


図-2.3.1 台風 0416 号進路図

(出典：国際気象海洋(株)ホームページ)

表-2.3.1 宮崎港・細島港における観測データ

日時	宮崎港	細島港			備考	
	潮位(m)	潮位(m)	波高(m)	周期(s)		波向
8月30日 6:00	+2.65	+2.67	7.64	12.7	欠測	最高潮位時
8月30日 12:00	+0.59	+0.73	11.05	12.3	欠測	最大波高時

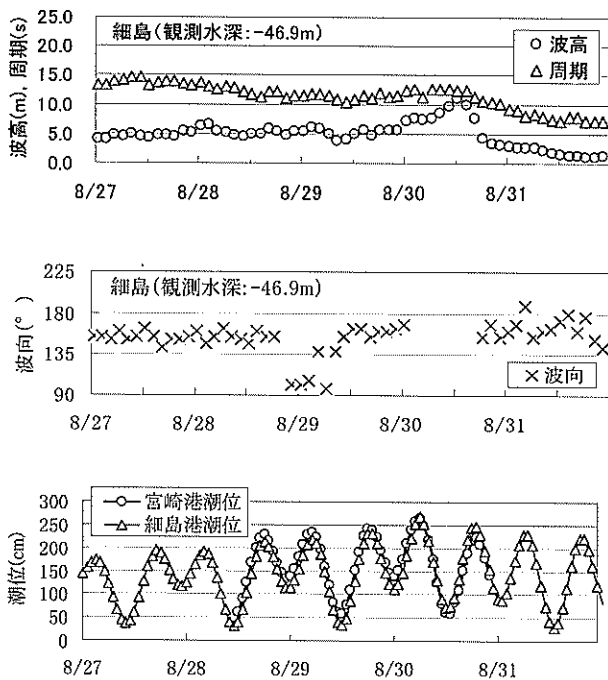


図-2.3.2 波浪・潮位の観測記録（宮崎港，細島港）

(2) イクイバエ灯台消失（細島港）

消失した沖合灯台は、現在宮崎県および宮崎港湾・空港整備事務所がそれぞれ施工中の細島港北および南沖合防波堤の、開口部付近に位置する岩礁に1956年に第十管区海上保安部が設置した鉄筋コンクリート製の“イクイバエ灯台”（写真-2.3.1および2.3.2）である。新聞報道によると灯台の消失は台風通過後の8月30日16時頃に確認されている。写真-2 からわかるように、灯台跡には現在、仮設の航路標が設置されている。宮崎港湾・空港整備事務所においては、管轄外のため灯台の構造等の詳細は把握していないとのことであったが、設置から50年近く経過しており、かなり老朽化した施設の様であった。新聞報道によれば、老朽化に伴い補修工事を行っていたようであるが、現在の細島港設計波に対応した補修が行われていたのかは未確認である。したがって、現時点では被災原因等の詳細を推定することは困難であるが、岩礁はそれほど高くなく、台風16号来襲時には相当の越波や越流がみられ、衝撃的な波力が灯台に作用していたのではないと思われる。一方、写真-2.3.3は灯台の北西に建設中の北防波堤である。現在、ケーソン4函が上部工打設前の施工断面の状態で施工されており、写真から確認されるように、上部斜面ケーソン函や80t型ドロスに目立った被災は見られなかったが、写真奥のドロスは高波浪により斜面に打ち上げられていることがわかる。



写真-2.3.1 沖合灯台消失跡前（細島港）



写真-2.3.2 沖合灯台消失跡後（細島港）

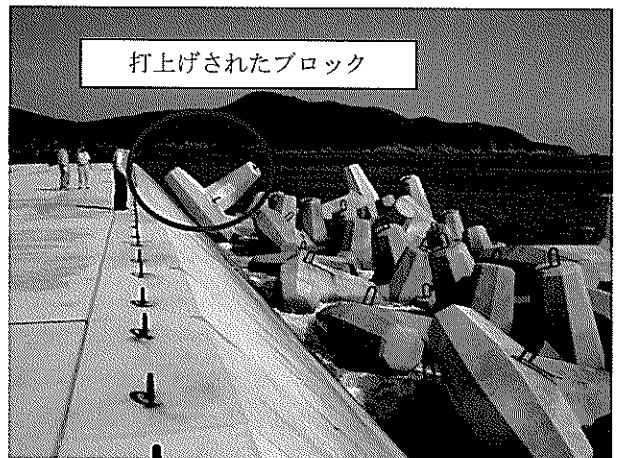


写真-2.3.3 施工中の北防波堤（細島港）

(3) コンテナバース上床版の隆起（細島港）

細島港事務所によると、台風16号による被災状況の確認中に、白浜地区の-13mコンテナバースの上部床板の陸側がバースに沿って30mの長さにわたり最大で8cm程度盛り上がっていることを確認した（写真-2.3.4）。ただし台風16号来襲以前の状況については不明である。

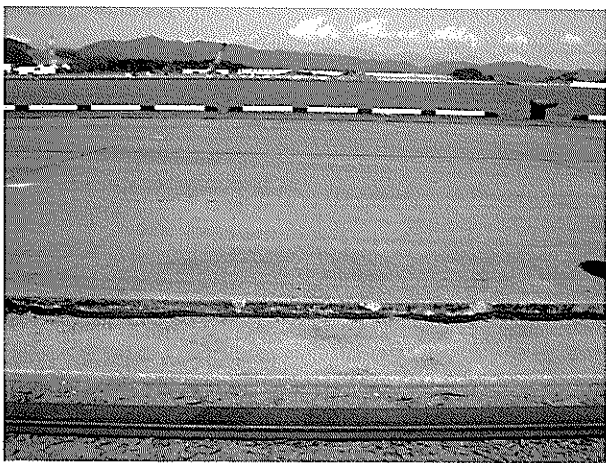


写真-2.3.4 コンテナバース被災状況（細島港）

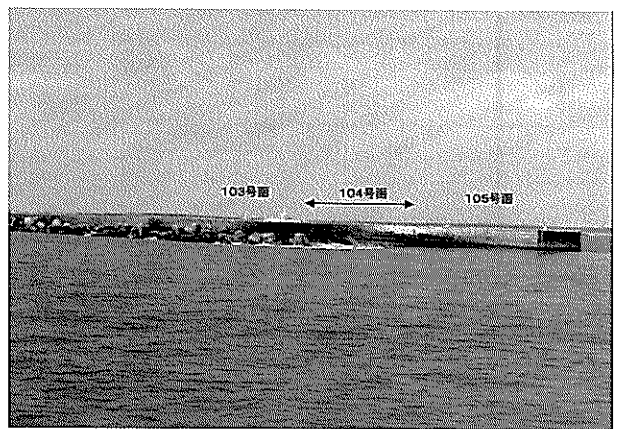


写真-2.3.6 被災後の状況（2）

(4) ケーソン壁の破壊（宮崎港）

現在、宮崎港の防波堤（南）は計画延長 2650m のうち 2485.8m が完成しており、順次、延伸工事を進めている状態であった。被災当時の防波堤堤頭部は、施工途中であったために、消波工による巻止めが行われておらず、消波工は今回被災した 104 号函ケーソンの前面まで被覆した状態であった。そして、台風 16 号通過後にケーソン壁の損傷、中詰砂の流出が確認されると共に、堤体前面の消波ブロック破損や沈下が発生していることが確認された（写真-2.3.5, 2.3.6）。図-2.3.3 に示す詳細図より、ケーソン壁が損傷したのは 104 号函の港外側側壁であり、直径 3.6m 程の穴が静水面付近に空いている。また、104 号函前面の消波ブロックは破損または沈降により水面から没しており、潮位の低い時には海上から破損した穴が目視できる状態であった（写真-2.3.7）。図-2.3.4 に縦断面図を示す。被災は堤頭部に生じており、堤の中央部ではケーソン函に対する被災は、見られなかった。

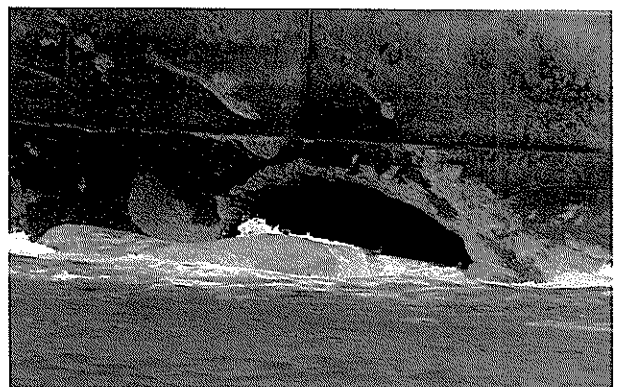


写真-2.3.7 ケーソン壁損傷の状況

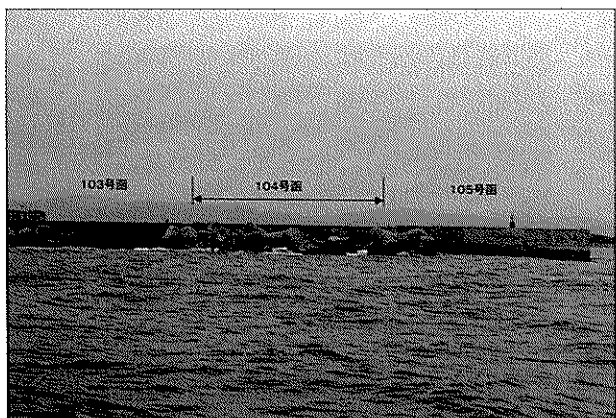


写真-2.3.5 被災前の状況（1）

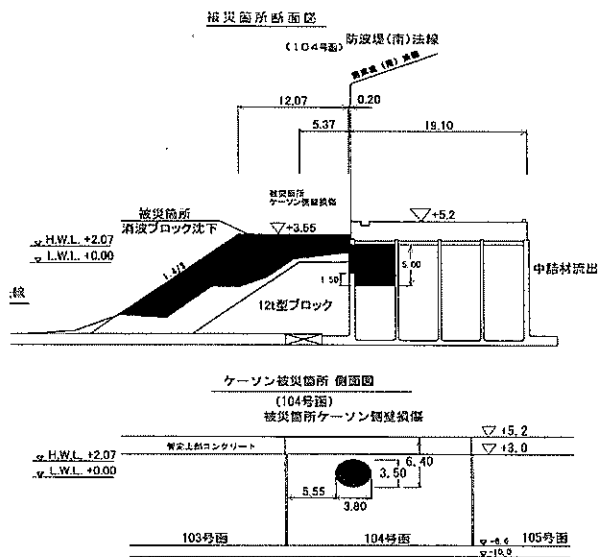


図-2.3.3 ケーソン損傷状況の詳細図

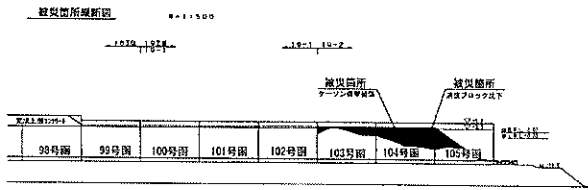


図-2.3.4 防波堤(南) 縦断図

(5) 上部パラペットの破壊 (宮崎港)

防波堤(南)堤幹部の上部パラペットの、施工目地間のある1スパンのみが完全に抜け落ちて港内側へ転落した跡(折れた鉄筋が上部工を引っ掻いたときに付いたと思われる)が残されていた(写真-2.3.8~2.3.10)。これによると、上部パラペットは一体として防波堤法面にほぼ垂直に移動したと考えられる。さらに、上部工の段差をパラペットが飛び落ちたときの痕跡から、上部工飛び出し時の初速が推定される。すなわち、段差の高さと落下痕跡までの距離をともに約1.2mとすると、上部パラペットの水平飛び出し速度は2.4m/s程度であったと思われる。



写真-2.3.8 上部パラペット被災状況(宮崎港)



写真-2.3.9 上部パラペット移動痕跡(宮崎港)



写真-2.3.10 上部パラペット落下痕跡(宮崎港)

2.4 神戸港と関西空港

(1) 調査概要

平成16年9月10日に実施した調査内容はつぎのとおりである。平成16年台風16号(8月30日)および台風18号(9月7日)によって発生した神戸市中央区新港町・海岸通付近は、高潮により1m近く冠水し、国道が遮断され、商店街が浸水する多大な被害が生じた。また、神戸港沖で稼働する大阪湾広域臨海環境整備センター(フェニックス事業)神戸廃棄物処分場の南および西護岸の被覆部が倒壊した。これらの被災要因を明らかにして抜本的な対策をとる必要がある。緊急調査を行った。ただし今回は短時間の調査であり、引き続き詳細な検討が必要である。

(2) 市街地の浸水と原因

台風18号において、7日午後3時から潮位が上がり始め、ピーク時の6時には約1.7mの浸水深が生じた(神戸新聞9/9(夕刊))。原因は海水が岸壁を越えたり、路上の雨水配水管を海水が逆流したことと考えられる。図-2.4.1に神戸新聞による浸水域と浸水状況を示す。



図-2.4.1 神戸市中央区の浸水状況と浸水範囲(台風18号来襲時,神戸新聞)

神戸港湾空港技術調査事務所では、図-2.4.2のように気象海象情報を整理して水位の関係を推察している。新港町周辺は防潮壁の整備が遅れており、護岸だけで高潮・高波を防護する。水位の関係は以下の通りである。

護岸天端高 KP+3.00 - 3.40(KP:神戸港基準面)  
 16号最高潮位 KP+2.66  
 18号最高潮位 KP+2.54  
 設計満潮位 KP+1.70  
 国道天端高 KP+2.45 - 2.50

これによると、高潮時の潮位は護岸高さを越えていないことから、冠水の主要因は下水からの逆流と考えられる。つぎに、浸水域の中心であるメリケンパークでヒアリング調査を行った。

(i) 通船だまりの船長

大潮のときは水位は岸壁の天端までくる。台風時は船は小野浜の船だまりへ避難した。係留中を岸壁上 1m までのばしてもらった。

(ii) レストラン店長

震災時に岸壁が沈下して、高さが低い。大潮の時は天端までくる。台風 16 号は南西から、18 号は南から波

潮位(神戸港)				
台風	月日	天文潮位	最高潮位	既往最大潮位
16号	8/30	1.82(2.61)	2.66(3.45)	3.21(4.00)
	8/31	1.81(2.60)	2.39(3.18)	
18号	9/7	1.56(2.35)	2.54(3.33)	2.32(4.00)

出典：天文潮位 気象庁HP  
 最高潮位 同上  
 既往最大潮位 神戸市地域防災計画(風水害等対策編)

風速(神戸港)			
台風	月日	最大風速	最大瞬間風速
16号	8/30	16(SSW)	41(SSW)
18号	9/7	16(SSW)	34(SSW)

出典：最大風速 神戸海洋気象台  
 最大瞬間風速 同上

波高(神戸港)				
台風	月日	有義波高	有義波周期	波向き
16号	8/31 2時	3.55m	7.6sec	SSW
18号	9/7 18時	3.83m	-	SSW

出典：神戸港湾事務所  
 位置 六甲アイランド沖合  
 ※ 9/7 有義波高は、観測記録最大値

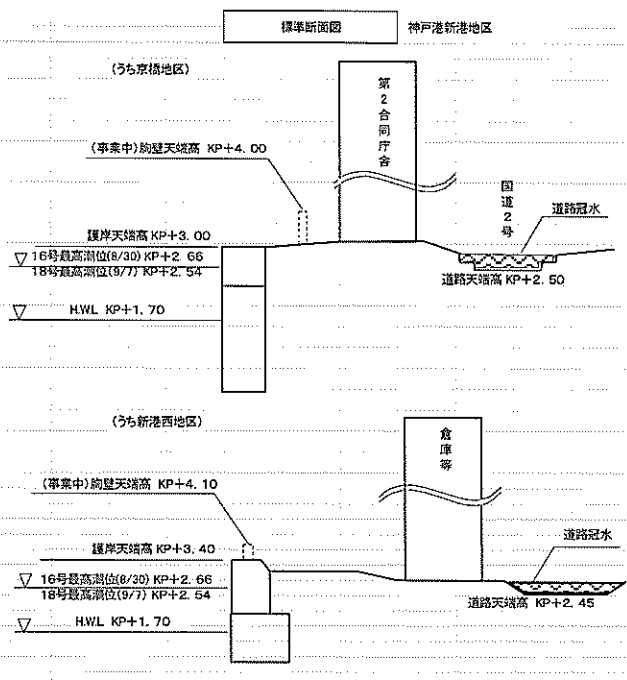


図-2.4.2 観測潮位の関係(神戸港湾空港技術調査事務所まとめ)



(a) 中突堤付近(9/7 18:00)



(b) メリケンパーク(9/7 18:00)

写真-2.4.1 神戸港での高潮・越波の状況(神戸海洋博物館撮影)

が来た。自動販売機の電源部が壊れた。レストラン玄関近くまで冠水し、室内へも波が吹き込んだ。早急な対策が必要。

レストラン玄関の前に3段階があり、水は、3段目の上まで来たと言われ、その高さは岸壁天端上+0.50mであった。

(iii) 神戸海洋博物館職員

博物館は浸水は無かったが、周囲は冠水した。国道は胸まで浸水していた。当時は終日監視をし写真を撮影した(写真-2.4.1)。

以上のヒアリングと浸水時の写真から、高潮来襲時の水位は岸壁天端(KP+3.00)までであり、岸壁上で波が0.5m程度あったものと考えられる。波向はSSW(8/31: $H_{1/3}=3.55\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.6\text{s}$ , 9/7: $H_{1/3}=3.83\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.5\text{s}$ )であり、港内奥まで侵入する向きであったため、波による平均水位上昇が局所的に収斂し、高潮偏差に加えて水面を上昇させ、KP+3.00程度まで実質の潮位が生じたものと考えられる。したがって、浸水の主要原因は下水管からの逆流だけでなく、護岸を越流した海水によるものが考えられる。早急な対策として下水排水の逆流防止弁、護岸背後の0.5m程度の防潮壁の設置が考えられる。

(3) 神戸沖廃棄物処分場の被災

六甲アイランド南地区の処分場は南北1600m、東西550mの管理型廃棄物埋立て処分場で平成14年より廃棄物の受け入れを開始した。平成16年4月27日の風浪において西護岸南端の一部が被災し、6月21日の台風6号により護岸被災の増長が生じた。8月31日の台風16号で西護岸(1577m)全域の被災、南護岸(550m)遮水工の被災が生じ、応急復旧中に台風18号による被災の拡大が生じた。

今後の復旧方針について京都大学嘉門教授を座長とする委員会が設置され、9月10日に現地調査と対策会議が行われた(神戸市みなと総局, 2004)。

南護岸および西護岸の波浪に対する設計条件を表-2.4.1に示す。また、これに対して暫定値での被災時の海象条件を表-2.4.2に示す。

越波量に対してはHHWLで設計がされているが、堤体の安定性はHWLで設計がなされている可能性が大きい。潮位は設計潮位以下であるが、堤体安定計算時に使用している潮位より1m以上高く、西護岸前面のブロック函や南護岸の消波ブロックが滑動や転倒で被災して、越波流量が大きくなり、護岸上部の砕石・擁壁を破壊してしまったようである。さらに擁壁転倒破壊により波が直接矢板止水壁に作用して南護岸では止水矢板が内水面側に曲げられた。幸いにも矢板は止水性を保持しており、内水面の排水を行いながら、廃棄物の投入は続けられている。写真-2.4.2は

9/10調査時での被災状況である。また、図-2.4.3は被災断面の模式図であり、被災後の状況を点線で示す。

表-2.4.1 南護岸および西護岸の設計条件

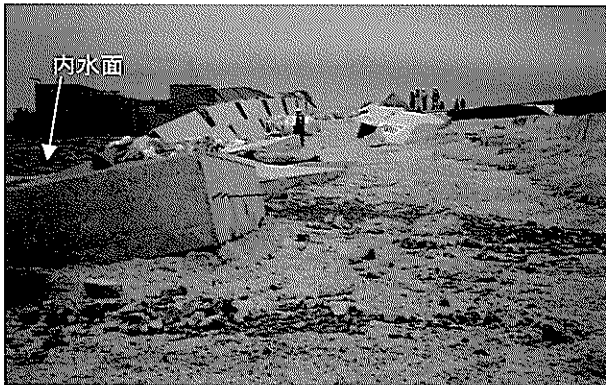
	南護岸	西護岸
設計 HHWL	KP+3.70m	KP+3.20m
設計 HWL	KP+1.70m	KP+1.70m
設計 LWL	KP+0.00m	KP+0.00m
設計 波向き	SSW	WSW
設計 波高(m)	3.70	2.90
設計 波周期(s)	7.4	6.7
備考	完成断面(50年確率波)	暫定断面(10年確率波)

表-2.4.2 被災時の海象条件

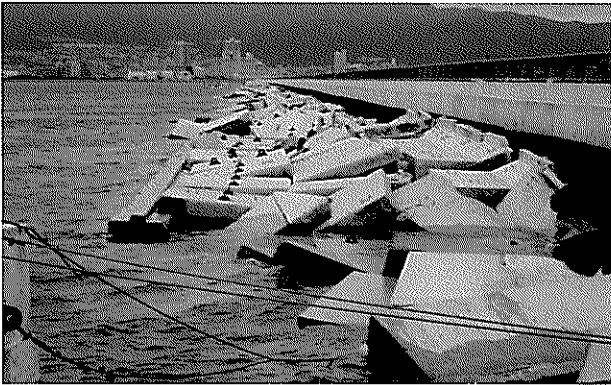
	4月27日 風浪	6月21日 台風6号	8/31 台風 16号	9/7 台風 18号
被災時(推定)	4/27 10:00	6/21 14:00	8/31 0:00-2:00	9/7 18:00
最大風速(m/s)	22.2 SSW	27.2 SSW	25.0 SSW	24.4 S
最大瞬間風速(m/s)	26.4 SSW	38.8 SSW	42.0 SSW	*****
有義波高(m)	2.7	3.4	3.6	3.84
有義波周期(s)	6.4	7.2	7.6	7.5
最大波高(m)	4.11	***	5.5	***
波向き	SW	SW	SSW	SSW
潮位(m)	KP+1.78	KP+1.61	KP+2.7	KP+2.57
被災状況	西128m	西128m	西および南全範囲	応急復旧工含む

(4) 台風16号による関西空港被災状況

関西国際空港に被害をもたらした台風16号が、関西国際空港に最も接近したのは、平成16年8月30日21時頃であり(図-2.4.4)、その時の台風の中心気圧は970hp、最大風速35m/s、進行方向は北東、進行速度45kmであった。その後、31日0時頃まで関西国際空港は風速25m/s以上の暴風円内であった。

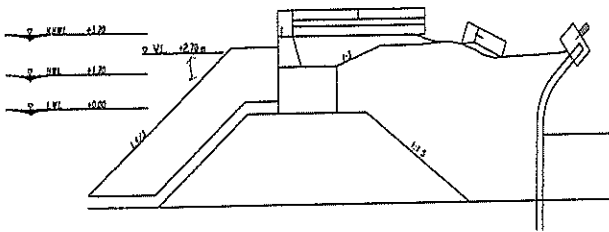


(a) 南側護岸

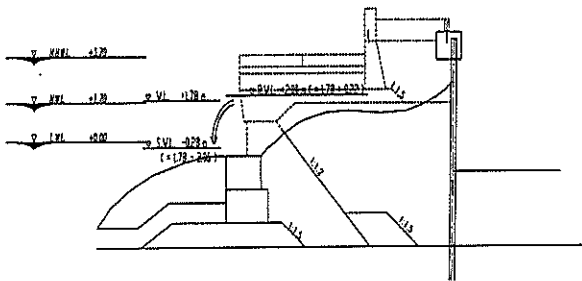


(b) 西側護岸

写真-2.4.2 六甲沖埋立処分場の護岸被災 (9/10 撮影)



(a) 南側護岸



(b) 西側護岸

図-2.4.3 被災断面の模式図 (神戸市みなと総局資料)

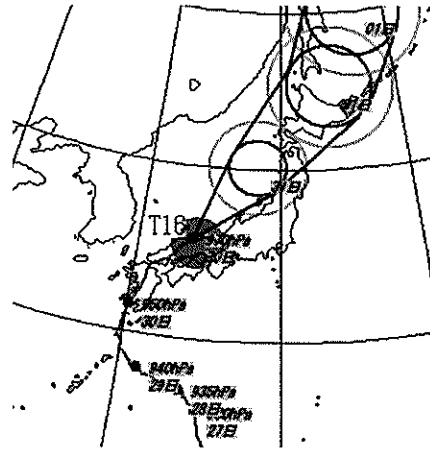


図-2.4.4 台風16号経路図 (平成16年8月30日21時)

また、関西国際空港(株)が所有する波浪観測所 MT 局 (図-2.4.5) の観測データによると、潮位、波高の推移は図-2.4.6 のようであった。潮位については、台風の接近と満潮が重なって 30 日 20 時から徐々に高くなり、30 日 21 時 20 分には最大 237cm に達し、約 100cm の潮位偏差が約 4 時間連続して観測された (30 日 22 時～31 日 1 時)。このとき関西国際空港は暴風域に入っており、気圧は正常値である 1013hPa よりも 25hPa～30hPa 低下し、また、平均風速で 25～30m/s、風向き SSE、S という風が大阪湾口から湾奥に吹き込んでいた。そのため、大阪湾において台風の気圧の低下による海面の吸い上げ効果と湾口部から湾奥部に向かって強風が吹き寄せる効果により、潮位の上昇量が大きくなったと考えられる。潮位の上昇にともない、有義波高についても 30 日 20 時 20 分 (118cm) から 20 時 40 分 (218cm) にかけて急激に 100cm 波高が上昇し、その後、図-2.4.6 に示すように有義波高 250cm 以上の波が約 6 時間 (30 日 22 時～31 日 3 時) 続いた。その間の周期は最高値で 11.1s (30 日 22 時 有義波高 346cm)、平均すると約 7～8s であった。また、台風 16 号での最大有義波高は 366cm、周期 9.4s (30 日 23 時 40 分) であり、MT 局における年最大有義波高は 1978 年に観測されて以来、最も高い値であった。

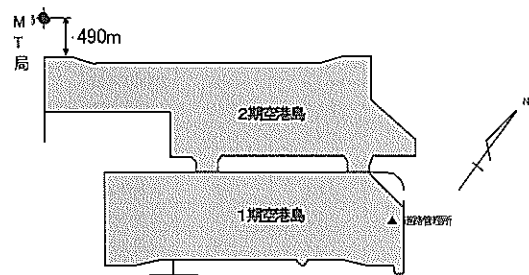


図-2.4.5 波浪観測所 MT 局 位置図



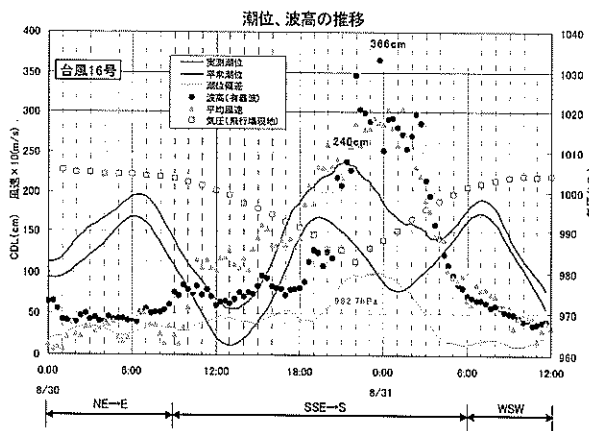


図-2.4.6 台風16号来襲時の潮位・波高・気圧・風速の推移

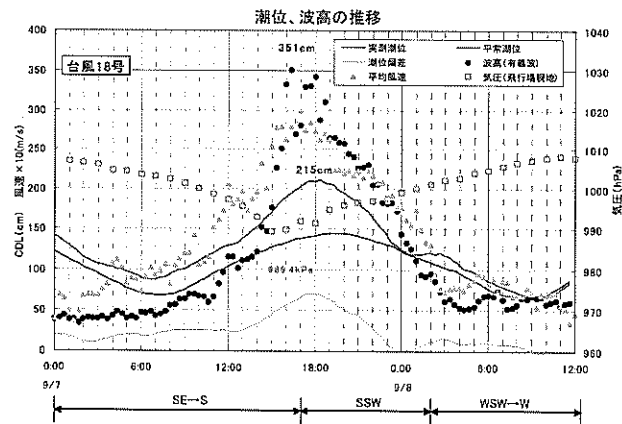


図-2.4.7 台風18号来襲時の潮位・波高・気圧・風速の推移

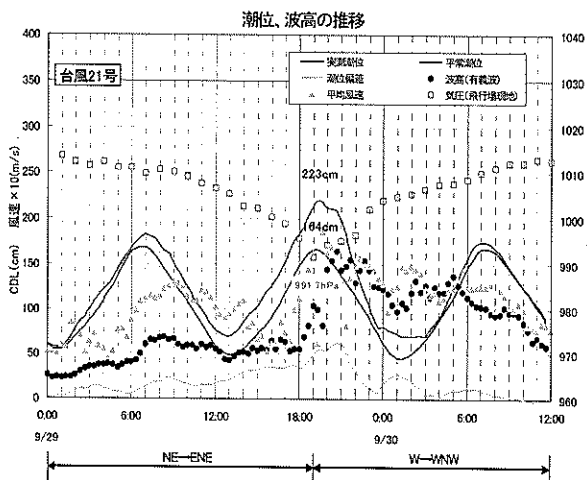


図-2.4.8 台風21号来襲時の潮位・波高・気圧・風速の推移

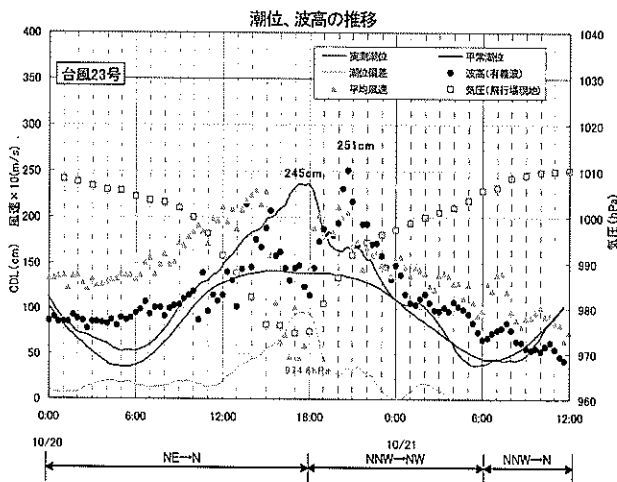


図-2.4.9 台風23号来襲時の潮位・波高・気圧・風速の推移

表-2.4.3 MT局における年最高潮位  
(1978~2004年)の比較

順位 (観測~)	順位 (開港~)	潮位 (GDL+m)	発生年	月日	発生原因
1	1	2.45	H16	10月20日	台風23号
2	2	2.40	H16	8月30日	台風16号
3	—	2.38	S54	9月30日	台風16号
4	3	2.23	H16	9月29日	台風21号
5	—	2.19	S55	10月25日	
6	4	2.16	H15	8月9日	台風10号
7	5	2.15	H16	9月7日	台風18号
8	—	2.09	H3	9月27日	台風19号
9	6	2.09	H8	8月14日	台風12号
10	—	2.02	H1	9月16日	
11	7	2.02	H9	7月26日	台風9号
12	8	2.01	H10	10月18日	台風10号

表-2.4.4 MT局における年最大有義波高  
(1978~2004年)の比較

順位 (観測~)	順位 (開港~)	波高 (m)	発生年	月日	発生原因
1	1	3.66	H16	8月30日	台風16号
2	2	3.51	H16	9月7日	台風18号
3	—	3.17	H3	9月27日	台風19号
4	—	2.95	H2	9月19日	台風19号
5	—	2.87	S58	2月18日	
6	—	2.73	S54	9月30日	台風16号
7	—	2.63	S59	1月3日	
8	3	2.63	H8	8月14日	台風12号
9	—	2.61	S53	2月28日	
10	4	2.51	H16	10月20日	台風23号
11	—	2.40	H5	12月21日	
—	—	1.64	H16	9月29日	台風21号

(5) 台風 18 号による関西空港被災状況

また、関西国際空港では台風 16 号で被災した約一週間後に台風 16 号よりも大型な台風 18 号（平成 16 年 9 月 7 日）が来襲し、台風 16 号で被災した箇所の復旧作業に支障をきたした。台風 18 号が関西国際空港に接近したとき（9 月 7 日 17 時頃）の台風を中心気圧は 950hPa、最大風速 40m/s、進行方向北東で進行速度 65km/h であった。図-2.4.7 に台風 18 号での MT 局の潮位と波高の推移を示す。

潮位の変動は台風 16 号時と比べ緩やかであり、潮位偏差も小さかった。また、最大有義波高も台風 16 号時に比べ台風 18 号では 351cm（7 日 16 時 20 分、周期 8.8s）と若干低かったが 3m を越えるような有義波高の継続時間は約 3 時間継続（7 日 16 時～19 時）し、台風 18 号時の方が長く、そのときの平均周期は 6～7s であった。

(6) 台風 21 号および 23 号による関西空港被災状況

その他、被災こそ受けなかったが、台風 21 号（平成 16 年 9 月 29 日）、23 号（平成 16 年 10 月 20 日）についても関西国際空港上空を通過した。図-2.4.8、図-2.4.9 に台風 21、23 号での MT 局の潮位と波高の推移を示す。台風 21 号、23 号では台風 16 号、18 号に比べ、台風の進路が関西国際空港の上空（真上）を通過しているため、気圧の低下による吸い上げ効果の影響により、台風 21 号では最高潮位 223cm（9 月 29 日 19 時 10 分 図-2.4.8）、台風 23 号では最高潮位 245cm（10 月 20 日 17 時 30 分 図-2.4.9）を観測している。このとき、台風 23 号では有義波高が台風 16 号、18 号、21 号とは異なる傾向（有義波高低下）を示しているのは、台風の眼が関西国際空港上空を通過したためであり、台風の眼が通過する 10 月 20 日 17 時前後は平均風速が約 5m/s であった。これに対し、台風 16 号、18 号は関西国際空港の西側（台風の東側）を通過しており（図-2.4.4）、台風自身の風と台風を移動させる周りの風が同じ方向に吹くため、図-2.4.6、図-2.4.7 に示すとおり台風接近時には平均風速が 25m/s 以上の風が約 5 時間程度連続して吹き込まれていた。

また、今年、関西国際空港を来襲した台風 16 号、18 号、21 号、23 号は、表-2.4.3 の MT 局における年最高潮位（1978～2004 年）との比較、表-2.4.4 の MT 局における年最大有義波高（1978～2004 年）との比較からもわかるように 1978～2004 年の 26 年間での潮位・最高有義波高の上位を占めている。潮位については台風 23 号が 1 位、台風 21 号が 4 位で、年最大有義波高については台風 18 号が 1 位、台風 16 号が 2 位であり、これらの歴代の上位を占める台風が 1 年で 4 度も関西国際空港に来襲したことになった。

(7) 関西空港護岸での被災実態

関西国際空港では平成 16 年 8 月 30 日に関西国際空港を来襲した台風 16 号の影響により被災を受けた。図-2.4.10 に台風 16 号における関西国際空港の被災箇所を示す。

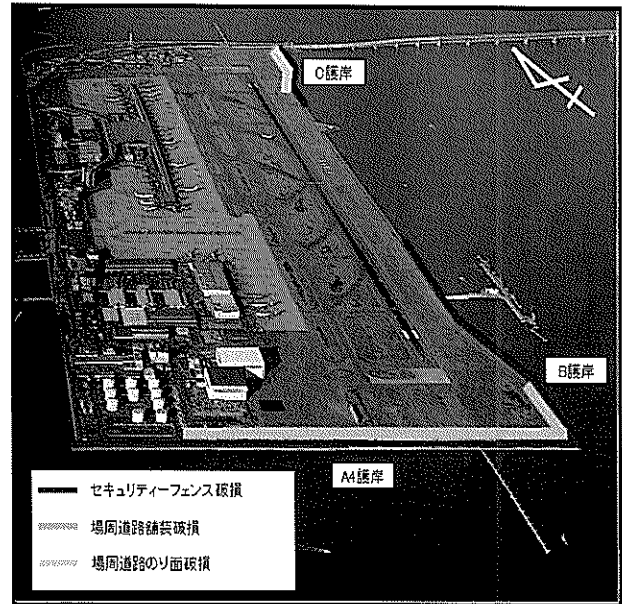


図-2.4.10 台風 16 号による関西国際空港被災箇所

被災箇所は A4 護岸、B 護岸、C 護岸であり、A4 護岸から B 護岸にかけてはセキュリティフェンスおよび場周道路舗装が破損し（写真-2.4.3、写真-2.4.4）、C 護岸では場周道路のり面が崩壊するといった被災を受けた（写真-2.4.5）。また、台風 16 号では高波浪により、越波水が空港内に入り込むといった被災も受けた。



写真-2.4.3 A4 護岸セキュリティフェンスおよび場周道路破損（平成 16 年 8 月 31 日撮影）  
（出典 関西国際空港株式会社）



写真-2.4.4 B 護岸セキュリティフェンスおよび場周道路  
破損 (平成16年8月31日撮影)  
(出典 関西国際空港株式会社)



写真-2.4.5 C 護岸場周道路のり面崩壊  
(平成16年8月31日撮影)  
(出典 関西国際空港株式会社)

## 2.5 高知県室戸地区

### (1) 調査概要

平成16年10月20日に高知県土佐清水市に上陸した台風23号により、西日本各地で土砂崩れ、河川堤防の決壊、雨水による市街地浸水等の甚大な被害が生じた。高知県室戸市では、20日午後3時頃、高波で海岸堤防の一部が倒壊し、背後の住宅が壊れ、3人の方が亡くなられ、2名が負傷するという被災が生じた。今回の調査では、学術的に被災原因を解明し、今後の対策の基礎資料を得るために、1)被災状況、2)前面および周辺の海岸地形、3)堤防破壊状況について現地で検討を行った。調査は10月25日に京都大学、国土交通省四国地方整備局と合同で実施した。

### (2) 調査参考状況

被災箇所は、室戸市菜生(なばえ)海岸で、堤防延長100mにわたって被災が生じ、そのうち30mは上部工およびパラペットが崩壊した。堤防の完成年は1967年、パラペット天端高はTP+9.8mである。設計に用いられた沖波は $H_o'=14.8m$ 、 $T=16.3s$ 、SWである。

室戸沖では、NOWPHASおよびGPS津波ブイによる波浪観測が実施され、現在、観測データの解析作業が進められている。新聞報道などでは最高波高17.79mと報告されているが、速報値である。水圧式波高計による換算値(暫定値)は表-2.5.1の通りである。

潮位について気象庁観測値を整理した(財)沿岸開発技術研究センターのCOMEINSにより表-2.5.2のように高潮偏差が記録されている。

室津において1990-2001年の観測値から年最高有義波高を整理すると表-2.5.3のようになり、台風0423号の波が近年の観測値に比較して甚大であったことがわかる。図-2.5.1に菜生海岸の位置を示す。

表-2.5.1 NOWPHASによる室津波高計の解析値(暫定値)

日	時	波数	有義波高 (m)	有義波周期 (s)	最大波高 (m)	最大波周期 (s)	波向き (N度)
20	0	113	2.84	12.8	4.14	11.7	243
	2	95	4.00	13.1	5.30	12.2	243
	4	94	3.78	14.0	6.00	14.3	243
	6	92	3.96	14.2	5.21	14.8	240
	8	91	4.45	15.3	6.60	12.7	243
	10	98	4.39	14.7	6.19	14.0	245
	12	62	4.99	13.7	7.27	10.9	241
	14		13.55*	15.8			
	16		11.39*	15.3			
	18		8.06*	14.3			
	20		5.28*	14.3			
	22		4.23*	14.7			

表-2.5.2 観測潮位 (単位: cm)

日	時	天文潮位 (TP)	潮位偏差	合成潮位 (TP)	合成潮位 (DL)
10	12	58	66	124	417
10	13	52	95	147	440
10	14	44	171	215	508
10	15	37	200	237	530
10	16	34	99	133	426
10	17	35	84	119	412
10	18	41	46	87	380
10	19	50	42	92	385
10	20	58	46	104	397
10	21	62	31	93	386
10	22	60	29	89	382
10	23	51	25	76	369

表-2.5.3 これまでの最高有義波高

順位	発生期間	観測日時	波高(m)	周期(s)	波向	気象要因
1	1993年9月3日10時-9月5日2時	9月4日2時	9.45	10.9		台風9313
2	1998年10月14日12時-10月19日0時	10月18日0時	7.19	10.7	SSW	台風9810
3	1994年9月26日18時-9月30日20時	9月29日14時	7.02	14.2		台風9426
4	1999年9月21日8時-9月25日18時	9月24日12時	6.34	10.6	SSW	台風9918
5	1996年8月10日16時-8月16日0時	8月14日16時	6.32	10.3	SSW	台風9612
6	1997年6月26日16時-6月29日18時	6月28日18時	6.31	10.8		台風9708
7	1998年9月18日18時-9月25日14時	9月22日12時	6.23	13.4		台風9807
8	1990年9月16日0時-9月20日14時	9月19日10時	5.63	12.8		台風9019
9	2001年8月16日18時-8月23日8時	8月21日6時	5.60	13.6		台風0111
10	1990年8月16日12時-8月24日12時	8月22日6時	5.40	11.8		台風9012 台風9014

(3) 被災護岸

被災時の波浪および潮位の状況を暫定概算値で示すと以下のようになる。ただしこれは、本資料での試算例であり今後も引き続き検討は必要である。

沖波  $H_o'=14\text{m}$ ,  $T_o=16\text{s}$

潮位 TP+240cm

被災時の水面上護岸天端高は  $hc'=7.4\text{m}$  である。越波流量の算定図(合田, 1975)で使用するパラメータ  $hc/H_o'=0.52$  となり、越波流量  $q=0.2\text{m}^3/\text{m/s}$  以上の顕著な越波が生じていたことが推測される。

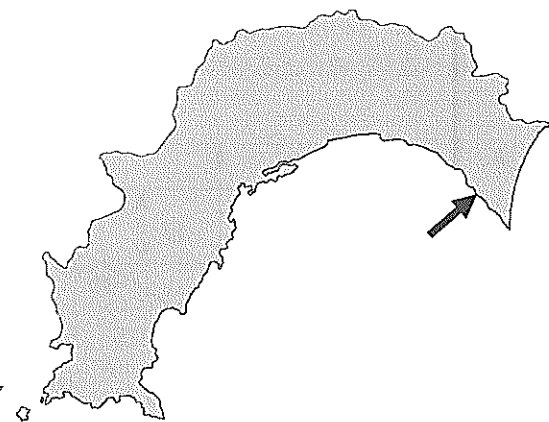


図-2.5.1 菜生海岸の位置

今回の作用波は設計値とほぼ同じであるので、堤体破壊のメカニズムは複雑であるが、砂浜の消波機能を考慮しなければ越波は許容値を超えるようになる。図-2.5.2に被災堤の断面を示す。ただし、潮位については表-2.5.2から判断した試算値である。

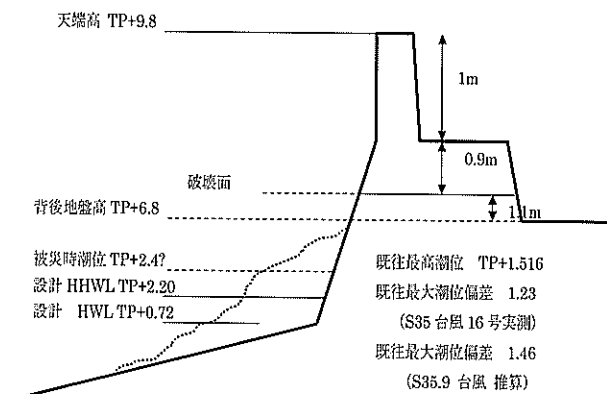


図-2.5.2 設計潮位と被災時の潮位の関係

(4) 来襲波について

沖合 1.5km の地点で NOWPHAS (永井ら, 2005) により観測された国土交通省発表の有義値は  $H_{1/3}=13.55\text{m}$ ,  $T=15.8\text{s}$  (14:00) であった。設置水深  $h=26.8\text{m}$ , 観測潮位 DL+5.08m (14:00) より実水深  $h_0=32\text{m}$ , 波向 SSW と仮定すると、例えば合田・鈴木 (1975) による方法を用いて算定される屈折係数は  $K_r=0.92$  となる。一方、水深 100m に設置された GPS 津波ブイ (永井ら, 2003) による観測有義波高  $H_{1/3}=15.0\text{m}$  を沖波波高  $H_0$  とすると、平均海底勾配 1/50 を仮定して、換算沖波波高として  $H_0'=13.8\text{m}$  が得られる。このとき  $H_{1/3}/H_0'=0.98$  から  $H_{1/3}=13.5\text{m}$  が得られ、観測波高と矛盾しないことが確認できる。したがって、被災時の換算沖波を以下のように仮定する：

$H_0'=14\text{m}$ ,  $T_0=16\text{s}$ , 潮位 TP+2.4m  
汀線付近での波による平均水位上昇+1.4m.

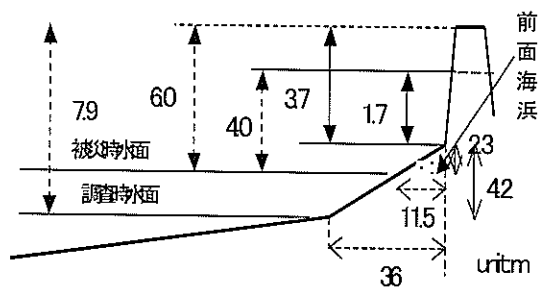


図-2.5.3 前面海岸地形

(5) 被災時の地形について

調査時 (25 日 12:00) の海岸地形が被災時と同様であったと仮定し、その簡易測量結果を図-2.5.3 に示す。また、調査時に確認した被災の様子を写真-2.5.1~2.5.4 に、パラペット被災状況のイメージ図を図-2.5.4 に示す。



写真-2.5.1 護岸および背後地の被災状況



写真-2.5.2 護岸の被災状況

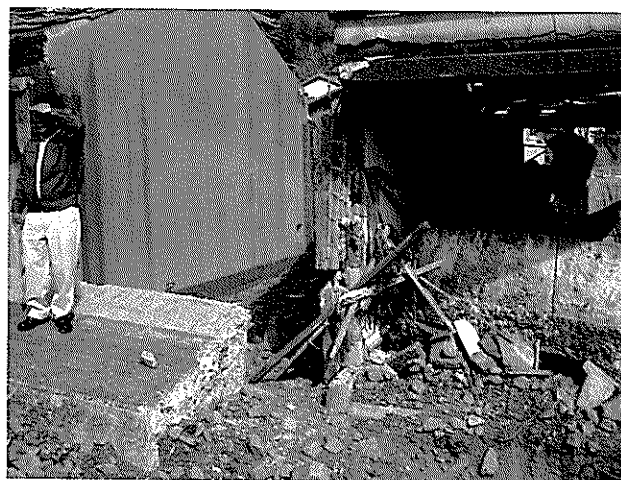


写真-2.5.3 被災した上部パラペット①



写真-2.5.4 被災した上部パラペット②

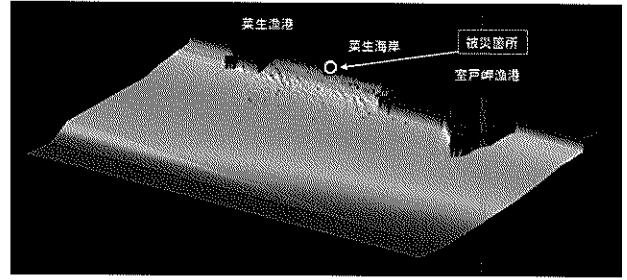


図-2.5.5 菜生海岸とその周辺海域の地形

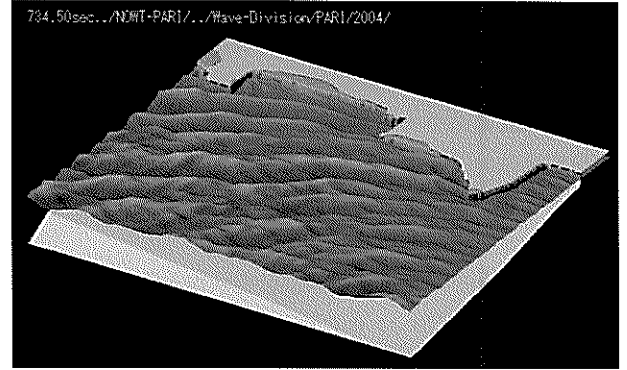
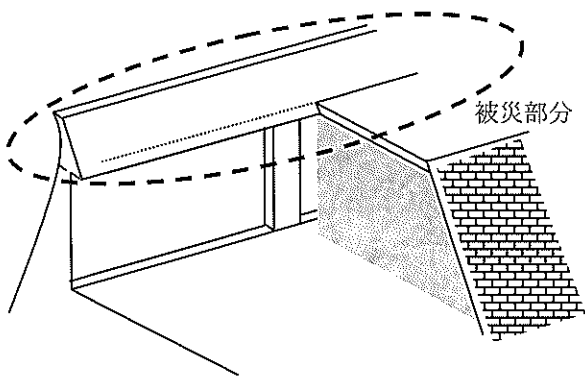
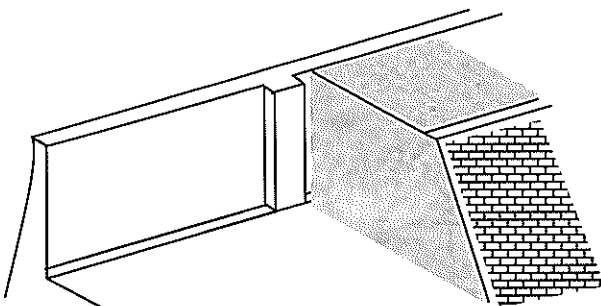


図-2.5.6 菜生海岸とその周辺への波浪伝播状況



(被災前)



(被災後)

図-2.5.4 菜生海岸護岸被災状況のイメージ図

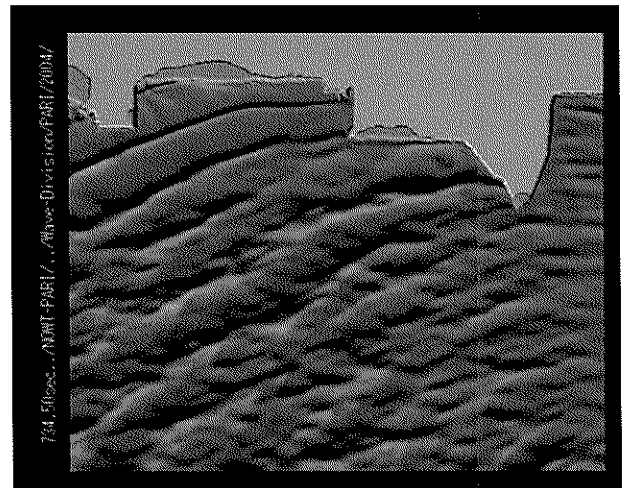


図-2.5.7 菜生海岸とその周辺の波浪変形状況

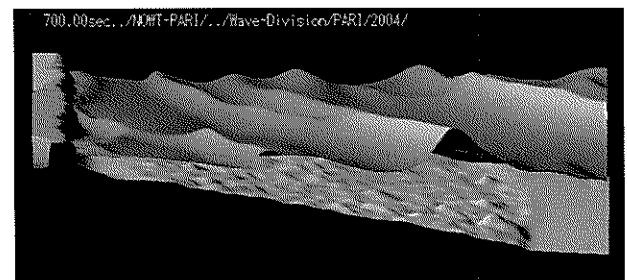


図-2.5.8 菜生海岸への波浪来襲状況

## (6) 波浪変形計算法の概要

被災時における菜生海岸周辺の波浪場を詳細に再現するために、複雑な海底地形による波の屈折・浅水変形と岬や防波堤による波の回折・反射変形を同時に算定でき、かつ、それらの波浪伝播の様子をアニメーションで確認することができる港空研版ブシネスクモデル (NOWT-PARI, 平山ら, 1998) を用いて波浪変形計算を実施した。とくに、海岸地形による砕波や汀線付近の波の遡上、および海岸堤防上の越波を客観的に算定するために、最新の NOWT-PARI を使用した。この詳細は3章で改めて示す。

計算対象とした菜生海岸とその周辺地形を図-2.5.5に示す。被災した海岸堤防前面は1/5勾配の砂浜と岩礁からなる複雑な海底地形を有している。一方、菜生海岸に隣接する室戸岬漁港および菜生漁港は、第一線防波堤の形状および天端高のみを表現し、港口部および港内の水深は無視してすべて陸地とみなした。

菜生海岸とその周辺への波浪伝播状況を図-2.5.6に示す。入射波条件は10/20 14:00にNOWPHASで観測された、有義波高 $H_{1/3}=13.55\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=15.8\text{s}$ 、波向SSWの多方向波とし、方向集中度は $S_{\text{max}}=75$ と仮定した。また、このときの潮位は室戸岬において10/20 14:39に気象庁が観測した $T, P. +2.863\text{m}$ を採用した。このときの波浪伝播状況を真上から見た図-2.5.7では、菜生海岸周辺での海底地形による波浪変形状況が確認できる。すなわち、沖から伝播した多方向波は、水深が浅くなるにつれて屈折変形して波の峰が揃った一方向波となって菜生海岸へ来襲するようすがわかる。また、菜生海岸堤防の中央付近および隣接する室戸岬漁港の護岸では、越波の痕跡が確認できる。実際、現地におけるこれらの箇所での越波による被災がみられ、それぞれ上部パラペットの崩壊や護岸内緑地の損壊が生じていた。さらに、菜生海岸への来襲波の状況に着目した図-2.5.8では、海岸で砕波して段波状になった波が海岸堤防へ直接到達し、順に斜めに反射するようすが確認できる。本計算に用いた最新のNOWT-PARIでは、越波時に真上に飛び上がる水塊までを再現することは困難であるが、実際には定常的にかんりの飛沫がみられ、最大波の来襲時には、大きな波力とともに大量の水塊が海岸堤防に打ち寄せ乗り越えたことが、これらの計算結果から容易に想像される。

## (7) 現地でのヒアリング

### 1) 菜生 (なばえ) 海岸

水産高校グラウンドより南側が被災しており、海岸にあるマンション1Fは越波で浸水している。居住者のヒアリングをまとめる；

1:00から1回波が越えた。その後、波は越えず家の前を水が流れた。2:10に大きな音とともに水が地盤よ

りも1m高い1F室内まで流れ、玄関納屋が倒壊した。雨戸(2F)まで波の飛沫が上がり、バリバリという音がした。このとき市営住宅は波をかぶっていたが雨のため判別が難しく、居住していた方も判らなかつたと思う。一度、後方の民家へ避難する動きがあったが、1名の方は家に戻って亡くなっている。端の方は外に出て波を視認していたが、他の方は室内から出ていないようである。

### 2) 室戸岬漁港

DL+14.3m (TP+12.4m) の漁港荷さばき場防波護岸を越えて波が越波し、荷さばき場や緑地のアスファルト施設ならびにログハウス等が破壊された。

## 2.6 その他

ここでは、仙台～秋田港の台風来襲時の状況をまとめる。

### (1) 仙台港調査概要

仙台港では将来向洋地区にふ頭用地を計画しているが、仙台港南西側に位置する七北田川からの流れの影響により河口周辺の波高分布が複雑になると考えられる。そこで、塩釜港湾空港事務所調査船により七北田川河口部の流れ及び、その周辺の波高分布を調査する予定であったが、台風18号の影響により船上からの調査は不可能となったため、陸上より七北田川河口部の蒲生干潟および、仙台港港内港湾施設を調査した。

### (2) 蒲生干潟付近

蒲生干潟は満潮時、海水が流入するため、干潟は浸水するが、今回の調査時は写真-2.6.1のとおり、地表が現れていた。干潟前面の海岸は遠浅であり、また、当日は台風通過の影響もあり、波の砕波する様子がよく確認出来た。なお、この地点から七北田川河口部を確認することは出来なかつた。



写真-2.6.1 蒲生干潟

(3) 仙台港概要

仙台港（仙台塩釜港・仙台港区）は昭和39年に新産業都市「仙台湾地区」の指定を受けて臨海型工業の発展拠点として同年8月に計画決定された掘込み港湾である。

平成7年には、仙台空港とともに「輸入促進地域（FAZ）」の指定を受け、本格的な外貿コンテナ埠頭である水深12mの高砂1号岸壁が供用開始し、さらに、高砂1号岸壁に隣接して水深14mの高砂2号耐震岸壁とその背後のコンテナターミナルを平成13年6月に供用開始した。現在、東北地方における国際海上コンテナターミナルの拠点として供用開始以来コンテナ貨物量は伸び続け、平成15年のコンテナ貨物量は81,346TEUであった。

(4) 仙台港港内調査状況と台風18号による影響

仙台港（中野地区）では中央航路（内港）の浚渫土砂の浮遊土の影響により中央航路（内港）の両側が埋没する傾向があると報告を受けた。これは中央航路（内港）は掘り込み式になっており、浮遊土は流れることなく中央航路（内港）両側の岸壁前面に堆積されるためと思われる。

また、写真-2.6.2は仙台港サイロ展望台から高砂コンテナターミナル方向を撮影したものであるが、向洋地区沖側は台風18号の影響もあり、白波が立っているにも関わらず、中野地区は掘り込み式の港であるため港内の静穏性が確保できていることが確認できた。

図-2.6.1は仙台港調査時（9月8日 午前10時）の台風18号の位置であり、仙台新港において観測された波浪諸元は波高1.7m、周期7.8mであった（表-2.6.1）。

仙台港は台風18号による港湾施設の被害はなかったものの、移動時に高砂コンテナターミナル背後の道路に海岸の砂が約50mにわたって約15~20cm程度堆積している箇所が確認された（仙台市では8日午前9時頃まで暴風警報が発令されていた）。

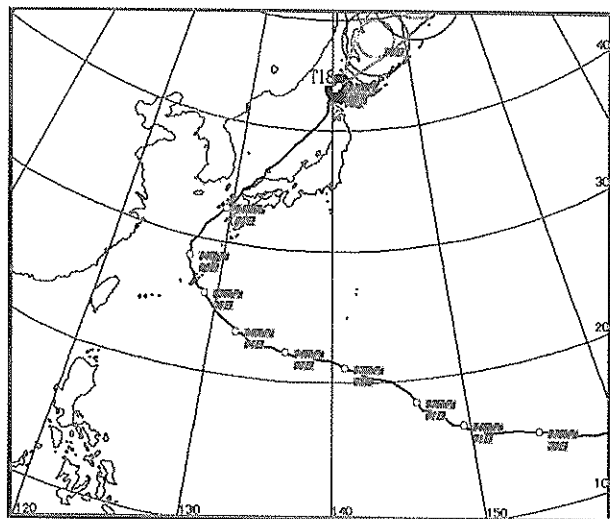


図-2.6.1 台風18号（9月8日 午前10時）経路図

表-2.6.1 台風来襲時の波の状況

2004年 9月8日

地点：仙台新港

時刻	有義波		
	波高 m	周期 s	波向き
0時	2.8	6.6	-
2時	2.8	6.8	SW
4時	3.3	7.1	WNW
6時	3	7.1	-
8時	2.1	7.3	-
10時	1.7	7.8	-
12時	1.6	7.2	W
14時	1.3	7.5	-
16時	1.3	7.7	-
18時	1.3	7.9	W
20時	1.3	8.3	-
22時	1.1	7.9	NE



写真-2.6.2 仙台港（中野地区）



### 3. 函館港における被災防波堤周辺の波浪変形

#### 3.1 函館港における調査内容

##### (1) 気象・海象状況と被害概要

平成16年9月8日未明から9日にかけて、台風18号は北海道のほぼ全域を暴風域に巻き込みながら日本海沿岸を北上し、道内各地に大きな被害をもたらした(図-3.1.1)。9月8日午前3時には函館市の西約110km(中心気圧975hpa, 最大風速30m/s)にあり、時速75km(秒速約21m)という高速で北東に進んだ。このため、台風進路の東側に当たる道内各地では猛烈な強風が吹き荒れ、午前7時45分には函館市で最大瞬間風速41.5m/s(風向SSW)を観測した。この影響で市内全域では長く停電したほか、夜景で有名な函館山ロープウェイも10日午後3時になってようやく運転を再開できたという状況であった。その後、台風18号は次第に速度を緩めながらも逆に勢力を強めながら北北東に進み、午前8時には小樽市の西約70km(中心気圧970hpa, 最大風速30m/s)に達した。その後も時速35kmで北北東に進み、午後1時に稚内市の西約70km(中心気圧965hpa, 最大風速30m/s)に達した後、午後3時には宗谷海峡で温帯低気圧に変わった。この間、午前11時すぎには札幌市で最大瞬間風速50.2m/sという記録的な暴風を観測し、市内では街路樹が倒れたり家屋の屋根が吹き飛ばされるなど、大きな被害をもたらした。このように、台風18号は暴風域を保ったまま北海道の日本海沿岸に沿って高速で通過した、近年稀にみる台風であった。

一方、この台風に伴う高波浪により、とくに日本海沿岸を中心に道内各地で防波堤や護岸の被災や越波災害が相次いだ。ここですべてを網羅することはできないが、函館港では、沖合の島防波堤(全長400m)がケーソン2函だけを残し370m以上にわたって転倒したほか、第一線の北副防波堤前面の消波ブロックが沈下するなどの被害がみられた(写真-3.1.1)。ケーソン滑動や消波ブロック沈下等の被災は奥尻島や礼文島でも発生したほか、沿岸を走る国道の数ヶ所で高波や越波による法面・路肩の洗掘や路面崩壊、落橋などの被害が生じ、道南から道北に至る交通事情に大きな影響を及ぼした。

函館市海岸町に設置された気象庁潮位計では、午前8時に今回の台風接近による潮位の最大値:T.P.+49cmを観測した(図-3.1.2)。同時刻における天文潮位との比較から、台風18号による函館沿岸の最大高潮偏差は58cm程度(午前7時と午前8時に観測)であったと考えられる。一方、函館の西、日本海に面した松前沿岸で観測された波浪の毎時記録(函館海洋気象台による松前沿岸波浪計)をみると、午前5時に最大波高6.15m、有義波高3.65m、有義波周期7.4s

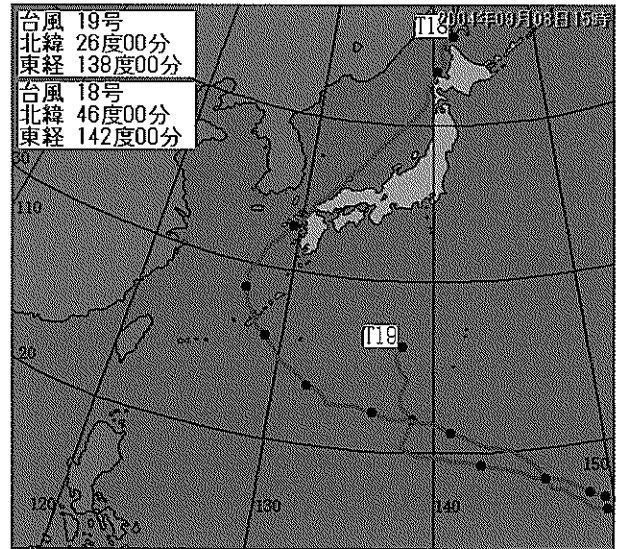


図-3.1.1 台風0418号経路図  
(財)日本気象協会ホームページより転載)

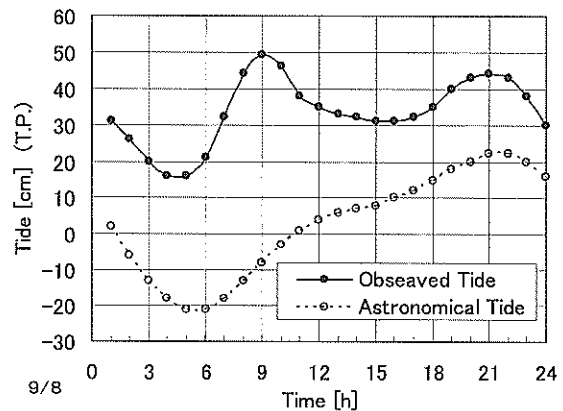


図-3.1.2 函館沿岸での潮位観測記録(H16.9.8)  
(気象庁ホームページ上のデータをグラフ化)

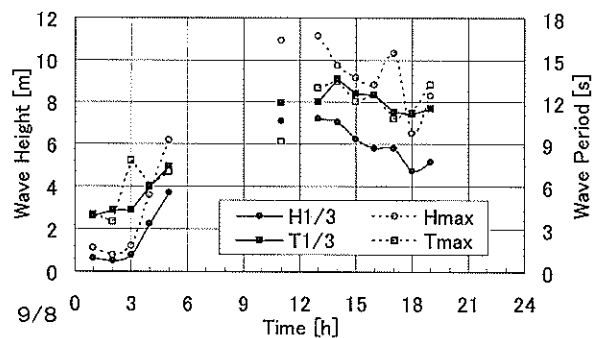


図-3.1.3 松前沿岸での波浪観測記録(H16.9.8)  
(函館海洋気象台ホームページ上のデータをグラフ化)

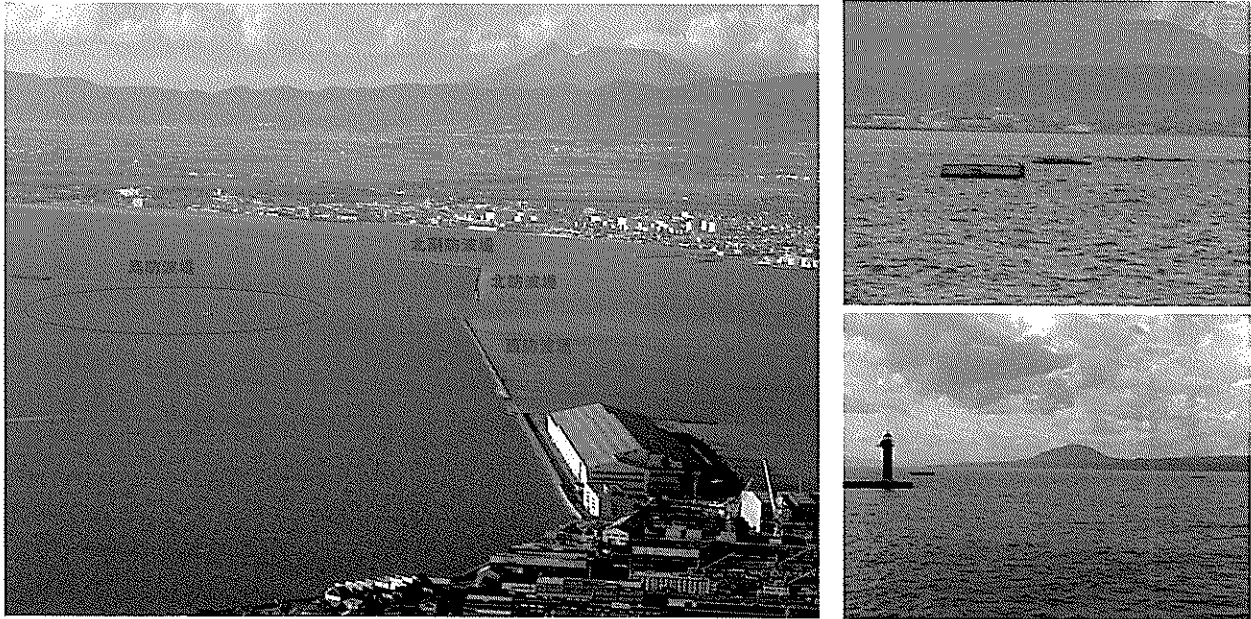


写真-3.1.1 函館港の港湾施設配置 (平成 16 年 9 月 10 日撮影)

を観測した。しかし残念ながら、台風が最接近した午前 8 時を含む 5 時間分は欠測となり、ようやく午前 11 時になって最大波高 10.92m, 有義波高 7.07m, 有義波周期 11.9s が観測された (図-3.1.3)。近傍の函館市では午前 8 時前に最大瞬間風速を観測し、かつ同時刻に最大潮位を観測したことから推測すると、台風 18 号による松前沿岸での最高波は、午前 8 時前後に出現したのではないと思われる。さらに、最高波出現時刻から 2~3 時間を経過した減衰期に当たる午前 11 時でもなお 7m を超える有義波高が観測されたことから、ピーク時には、あるいは既往最大波高を上回るような波高が出現した可能性も十分に考えられる。また、津軽海峡に面した函館港沖でも、日本海を見通せる SW 方向から台風が来襲したことを考えると、日本海側の松前沿岸で観測された高波浪がほとんど減衰せずに津軽海峡に侵入するとともに十分長いフェッチによって波が発達し、午前 9 時前後には松前沿岸と同程度の高波浪が出現したものと推測される。

ところで、函館海洋気象台ホームページ上の記載によると、松前沿岸波浪計には海底設置型の超音波式波高計が用いられているようである。そのため、海面に白波が立つ高波浪時には超音波による海面の捕捉が困難となり、欠測したと考えられる。ちなみに、同様に超音波式波高計を用いて全国 54 箇所で行っている全国港湾海洋波浪情報網; NOWPHAS では、伝達関数に工夫を凝らした水圧式波高計を併用し、超音波式波高計欠測時のデータ補完を行っている。北海道地区では苫小牧港、留萌港、瀬棚港、紋別港、十勝港に設置されているが、残念ながら函館港では未整備

であった。

なお、これらの観測記録はいずれも Web 上で公開されており、インターネットを通じて誰でも自由に閲覧することが可能である。

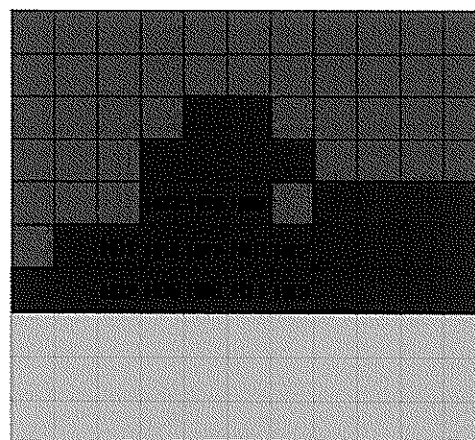
#### (2) 函館港沖の波浪推算結果

上述のように、函館港に台風が最接近した 9 月 8 日午前の高波浪を観測値から得ることはできない。このような場合、近年では、第三世代の波浪推算手法として発展著しい WAM による波浪推算結果を代用することが広く行われている。そこで本研究では、(独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理研究室 (橋本典明室長) において開発が進められている波の非線形相互作用を含めた WAM を適用して、函館港沖を含む津軽海峡とその周辺の波浪推算を実施した。なお、実際の計算作業は海洋水理研究室にて実施され、本研究では提供いただいた推算結果をそのまま掲載させていただいた。したがって、波浪推算の詳細については、例えば橋本ら (2005) をご参照いただければ幸いである。

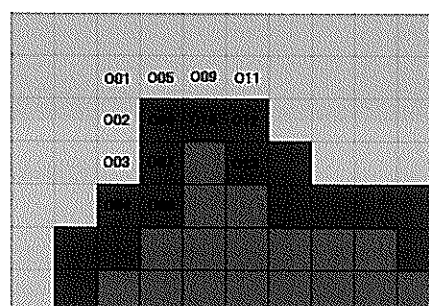
WAM による波浪推算は、我が国全域とその周辺海域を比較的粗い格子でカバーした大領域から計算対象とする海域へ向けて、ネスティング手法を用いて徐々に領域と格子を小さくした水深・地形データセットに対して実施される。津軽海峡およびその周辺海域を対象とした小領域メッシュ図を図-3.1.4 に示す。格子サイズは約 3km 四方である。図中、□①で囲ったところが函館港付近であり、函館港沖の波浪推算地点は H10 と記した計算格子とした。なお、□②で囲ったところは津軽海峡を挟んで函館港の対岸に位置する大間港付近である。



(a) 小領域メッシュ図



(b) ①函館港付近



(c) ②大間港付近

図-3.1.4 WAMによる計算領域(津軽海峡)

函館港沖の波浪推算地点(格子番号:H10)で推定された9月8日0時から23時までの有義波高,有義波周期および主波向の変化を図-3.1.5に示す.台風18号が日本海沿岸を北上するにつれて,有義波高,有義波周期ともに次第に増加し,午前8時から9時にかけて最大となっていることがわかる.これは,函館で観測された最大瞬間風速および最大潮位の生起時刻から先述のように推定した最高波の出現時刻とよく一致している.なお,WAMにより推定された午前9時における函館港沖の有義波高は6.68m,有義波周期は10.88sであった.さらに,函館港から定期便を運行している東日本フェリー(株)では,午前10時05分には島防波堤の転倒を確認していることから,島防波堤に被害をもたらした主な外力は,おそらく午前9時前後に出現した高波浪であったと考えられる.

一方,主波向はSからWよりへと次第に変化し,最高波が観測された午前9時にはSWとなっている.ここで,図-3.1.4(a)からもわかるように,函館港沖からみてSW方向はちょうど津軽海峡を抜けて日本海が見通せる方向である.つまり,函館港にSWよりの風が吹き込む場合には,津軽海峡に沿って十分長いフェッチが存在することになる.さらに,日本海から侵入する波向SWの波は,函館湾口ならびに

函館港に向かってまっすぐ進み,日本海側の松前沿岸で観測された高波浪(図-3.1.3)がほぼそのまま到達したのではないかと考えられる.図-3.1.1で示したように,台風18号は津軽海峡に向かって日本海をまっすぐ北東に進み,さらに津軽海峡の手前では北北東に進路を変えて日本海沿岸に沿って進んだため,これらの条件がちょうど重なり,函館港沖でこれほどの高波浪の出現が推定されたのではないかと考えられる.

### (3) 大間港における波浪観測記録との相関

青森県大間港は,津軽海峡を隔てて函館港の対岸にあたり,下北半島の先端に位置する(図-3.1.9).また,隣接する大間崎付近には大間原子力発電所があり,その沖合で水深-17.5mの地点には超音波式波高計と水圧式波高計が設置されている(図-3.1.10).この地点では電源開発(株)が波浪の年次観測を行っており,台風18号が大間港に接近した9月8日も毎正時の波浪記録が得られている.この地点で観測された有義波高,有義波周期および主波向の変化を図-3.1.7に示す.ここで,水面変動データは通常,超音波式波高計で得られたものが採用されているが,欠測となった午前7時以降は,水圧式波高計で得た水圧変動を通常のフーリエ変換による伝達関数を用いて推定している.一方,

函館港沖と合わせて行ったWAMによる波浪推算で得られた、大間港沖の波浪の時間変化を図-3.1.6に示す。ここで、大間港沖の波浪推算地点は図-3.1.4(c)でO07と記した計算格子である。

これら、大間港沖で得られた波浪観測記録とWAMによる推算結果とを比較すると、有義波高、有義波周期とも全体的に推算値のほうが大きくなっているものの、最高値の生起時刻などは比較的良好に一致している。また主波向きは、高波浪が来襲した午前6時以降では両者はほぼ一致しており、ともに津軽海峡の長軸に沿って日本海を見通せるSW~WSW方向の波が卓越していることがわかる。ただし、午前6時よりも前に大間港沖で観測された主波向きはW~WNW方向であり、かつ波高、周期ともに小さいことなどから、この時間帯での大間港沖の来襲波は津軽海峡内で発生した波浪が卓越していたと考えられる。また、大間港で観測された潮位記録(図-3.1.8)によると、午前10時に最高潮位T.P.+96cmを観測していたことがわかる。なお、図には合わせて、近傍の下北での天文潮位を記載しているが、対象地点は太平洋に面しており、津軽海峡に面した大間港とは潮位の出現特性が異なることが予想されるため、この図から大間港での潮位偏差を得ることはできない。

つぎに、WAMによる波浪推算で得られた函館港沖と大間港沖の波浪の時間変化(図-3.1.5および図-3.1.6)に着目して、台風18号による波浪の出現特性に対する両者の相関について整理する。ピーク波高は、函館港沖では午前8時から9時の間、大間港沖では午前10時頃に出現しており(つまりタイムラグは1時間から1時間半程度と考えられる)、ともに有義値で6.7m前後と推定されている。また、有義波周期の時間変動も有義波高のものと同様な変動特性を示し、ともに11s前後と推算されたピーク周期の生起時刻には約1時間のタイムラグがみられる。一方、主波向の時間変動は、台風の来襲とともにSよりからWよりへと変化する傾向は同様にみられるものの、函館港沖に比べ大間港沖では、16方位のうちほぼ1方位分だけ全体的にW方向へシフトしていることが特徴である。

図-3.1.4などから函館港と大間港の地理的な位置関係を読み取ると、函館港から日本海を見通せる方向はほぼSW方向であるのに対し、大間港から日本海を見通せる方向はほぼWSW方向である。これらは両港湾における高波浪出現時の波向とよく一致している。このことから、大間港におけるピーク波高とピーク周期の出現時刻が、函館港のものに比べ1時間から1時間半のタイムラグが生じた原因を推測することができる。すなわち、津軽海峡の日本海側開口部からみて台風がSW方向の位置に到達したときには、SW方向よりの波が津軽海峡に沿って函館港に直入射し、台風がWSW

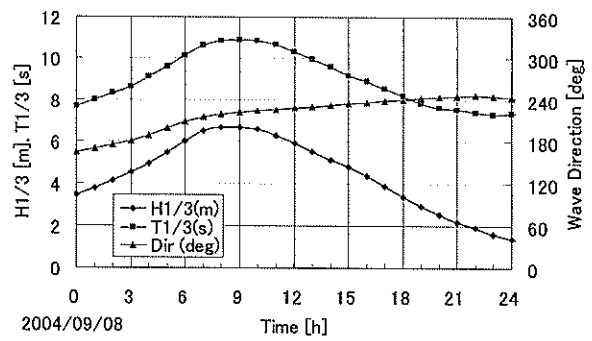


図-3.1.5 函館港沖の波浪推算結果 (H16.9.8)

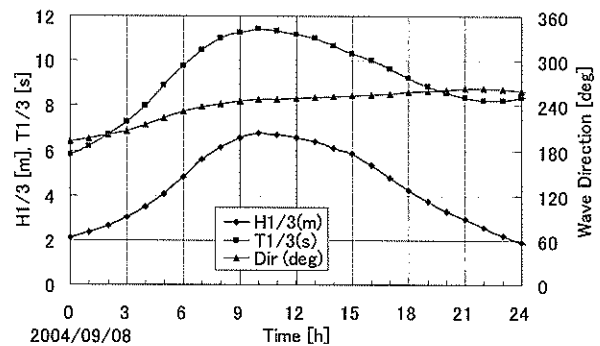


図-3.1.6 大間港沖の波浪推算結果 (H16.9.8)

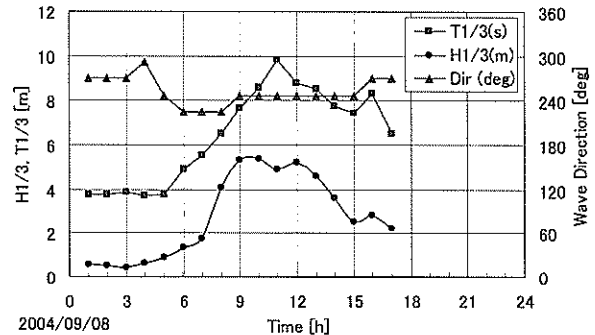


図-3.1.7 大間港沖の波浪観測記録 (H16.9.8)  
(波浪観測は電源開発(株)による)

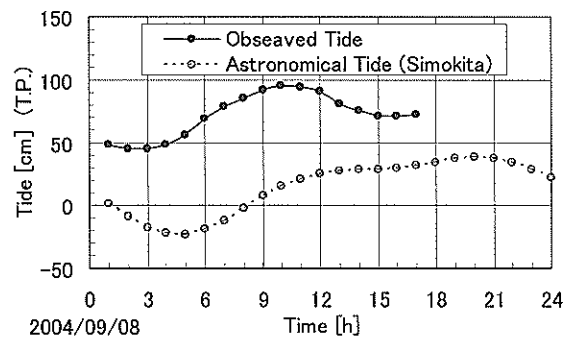


図-3.1.8 大間港の潮位観測記録 (H16.9.8)  
(潮位観測は電源開発(株)による)

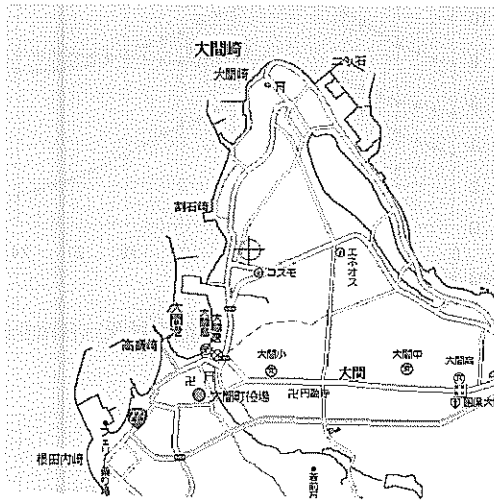


図-3.1.9 青森県大間港の位置  
(Yahoo!地図情報(縮尺 1/21000)による)

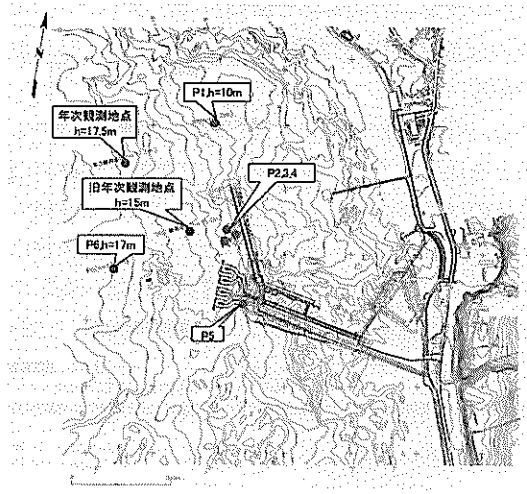


図-3.1.10 大間港波浪観測地点  
(電源開発(株)による資料から抜粋)

方向の位置に到達したときにはWSW方向よりの波が大間港に直入射したと考えられる。実際に台風18号の経路図をみると、8日午前1時には函館港からみてSW方向にあり、午前2時には大間港からみてWSW方向にあったことが確認できる。そして、この間のタイムラグは、ピーク波浪の出現時刻の差とほぼ同等の1時間である。

### 3.2 波浪変形計算の手法

#### (1) 波浪変形計算法の概要

台風18号による函館港島防波堤の被災原因を探るためには、まず島防波堤に作用した波浪外力を明らかにする必要がある。そこで、被災時における島防波堤周辺の波浪場を詳細に再現するために、複雑な海底地形による波の屈折・浅水変形と岬や防波堤による波の回折・反射変形を同時に算定でき、かつ、それらの波浪伝播の様子をアニメーションで確認することができる港空研版ブシネスクモデル(NOWT-PARI, 図-3.2.1) (平山ら, 1998)を用いて波浪変形計算を実施した。とくに、消波ブロック被覆堤による任意の波反射を客観的に算定するとともに、砕波に対する計算精度を向上させ、低天端の防波堤上の越波とその背後での伝達波の発生をも取り扱えるよう、NOWT-PARIのバージョンは最新のものを使用した。すなわち本研究で用いた計算モデルは、すでに港湾設計の実務において豊富な適用実績を有するNOWT-PARI, Ver4.6β(港空研ライブラリ; P046)に対して、①消波工構造を客観的にモデル化し入射波に応じて自動的に適切な反射波を算定できる透水層モデル(平山・平石, 2001)と、②砕波による乱れエネルギーの生成量の評価に時間発展型のBoreモデルを適用した、乱流モデ

ルに基づく砕波モデル(平山・平石, 2004a)、および、③波の遡上による汀線移動や海底面の露出を許容する遡上モデル(平山・平石, 2004a, 2004b)を加えたものである。とくに②③は、斜面上の波の遡上変形はもちろん、護岸を越波した水塊による背後地の浸水状況や、防波堤・護岸前面の重複波やリーフ地形に襲撃する高波浪による海底面の干上がり現象なども安定かつ適切な算定を可能とすることが大いに期待されている。ただし、これまでに平面波浪場へ適用した事例は非常に少なく、計算精度の検証は断面水路で得られた実験データを用いて行っているのみである。その意味では、本研究で行う平面的な波浪変形計算は試算的な意味合いも否定できない。これらの境界処理法の平面2次元波浪場への拡張方法や、現地観測データあるいは平面水槽で得られた実験データに対する計算精度の検証結果などについては、別途、機会を改めて報告する予定である。一方、平山・上原(2002)は、①を平面2次元波浪場へ適用して平面実験結果に対する計算精度を検証し、複雑な海底地形を有する港内外の有義波高分布がよく再現できることを確認している。

#### (2) 計算条件の設定

計算対象とした函館港とその周辺海域の地形を図-3.2.2に示す。函館港はその形状から「巴(ともえ)港」とも呼ばれ、函館市街が立地するトンボロ地形の先端にある函館山の遮蔽効果によって、函館港は天然の良港となっている。現在の函館港は、函館山の先端からトンボロに沿って延びる西防波堤と北防波堤によって形成され、第一航路は両防波堤の開口部に設定されている。今回被災した島防波堤は、開口部から港内へ侵入する波を遮蔽するために、第一航路

に沿って設置されている。函館港は、津軽海峡に対して南西に開いた函館湾の湾奥に位置し、南西よりの沖波は函館港に直接来襲する恐れがある。島防波堤の法線方向は南西方向に対してほぼ垂直であることから、島防波堤は南西よりの沖波が港内に侵入することを防ぐために設置されたものと推測される。

島防波堤が転倒被災した時刻やそのときの沖波諸元を正確に知ることはできないが、先述のように、函館港潮位計および松前沿岸波浪計による観測記録や、8日午前10時過ぎにはすでに転倒していたとの証言、さらにWAMによる波浪推算結果などを考慮すると、被災時刻は波高と周期、潮位がともに最大となる午前9時頃であり、そのときの波浪諸元は表-3.2.1のようであったと推測される。そこで、波浪変形計算ではこれらを沖波条件として設定した。

NOWT-PARIによる計算対象領域はちょうど図-3.2.2で示した、岸沖(SW-NE)方向:8km×沿岸(NW-SE)方向:7kmの範囲である。また、計算格子の大きさは10m×10mとした。ここで、沖側境界の位置は、先述のWANによる函館港沖波浪推算地点(H10)近傍で、かつ海底地形による波浪変形があまり生じない入射水深となるように設定した。

被災前の島防波堤の天端高は、ケーソン法肩でT.P.+2.0m、最大T.P.+2.1mであった。しかしながら、10mごとに離散化した水深データでケーソン断面を詳細に再現することはできないため、ケーソン天端高は一律T.P.+2.1mとした。なお、西防波堤および北防波堤の天端高が不明であったため、本研究では、これらの天端高も便宜上、島防波堤と同じくT.P.+2.1mと設定した。また、その他の防波堤および護岸・陸地は一律にT.P.+5.0mとした。ところで、計算対象とした

午前9時の潮位はT.P.+0.49mであるので、静水面からの天端余裕高は1.6m余りしかなく、かなり低い。仮に、島防波堤に対して波高3m程度の波が入射した場合には、一部は越波および砕波して、島防波堤前面と背面にそれぞれ部分反射波と越波伝達波が形成されると考えられる。とくに、島防波堤周辺の波浪場を詳細に検討する際にはこれらを無視することはできない。そこで本研究では、乱流モデルに基づく砕波モデルと、海底面の露出を許容する遡上モデルを備えたNOWT-PARIの最新バージョンを試験的に適用し、従来から算定可能であった波の回折、反射、屈折、浅水変形に加え、低天端の防波堤上の砕波および越波とその背後で発生する伝達波の算定を試みた。

### 3.3 波浪変形計算の結果

#### (1) 函館港周辺の波浪伝播特性

最新のNOWT-PARIを用いて計算された、台風18号による高波浪来襲時の函館港周辺の有義波高分布を図-3.3.1に示す。主波向SWの多方向波が来襲する場合において函館山南東側では、周辺に比べ波高が約7割程度にまで減少している海域が存在していることがわかる。これは、図-3.2.2に示した函館港周辺の海底地形からも推測されるように、函館山によって南よりの成分波が遮蔽されるとともに、函館山周辺の浅瀬によって南西よりの成分波の一部は屈折・砕波し、この海域に伝播する成分波が減少するためであると考えられる。波高が7割程度にまで減少すると、波エネルギーは元の約半分になっていると考えられる。したがって、この海域に到達する成分波数は、南よりの成分波を中心に元の半数程度にまで減少していると推測される。

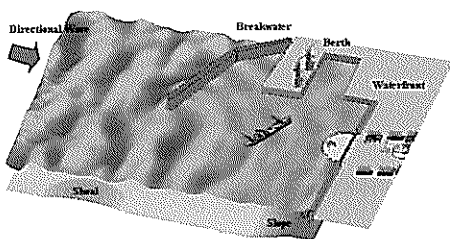


図-3.2.1 NOWT-PARIによる計算イメージ

表-3.2.1 島防波堤被災時の沖波条件

2004/09/08 09:00 函館港沖		
沖波諸元	有義波高: $H_{1/2}$ [m]	6.68
	有義波周期: $T_{1/2}$ [s]	10.88
	主波向き: $Dir$	SW (北から221.7度)
	方向集中度: $S_{max}$	75
	成分波数: $N$	512
	入射水深: $h_I$ [m]	49.89
潮位 T.P. [m]		0.49

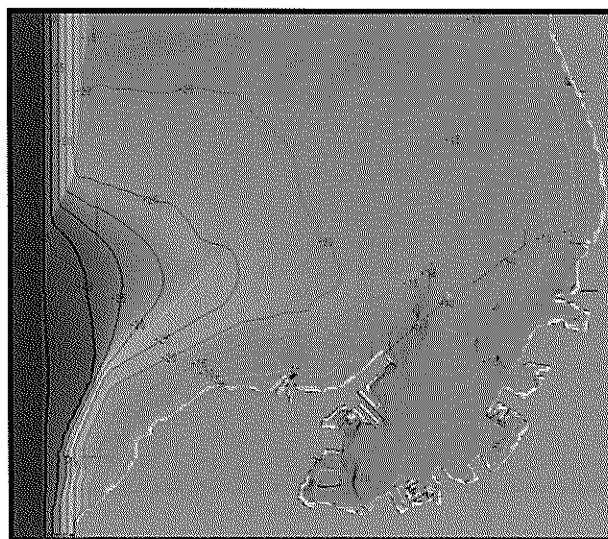


図-3.2.2 函館港とその周辺海域の地形

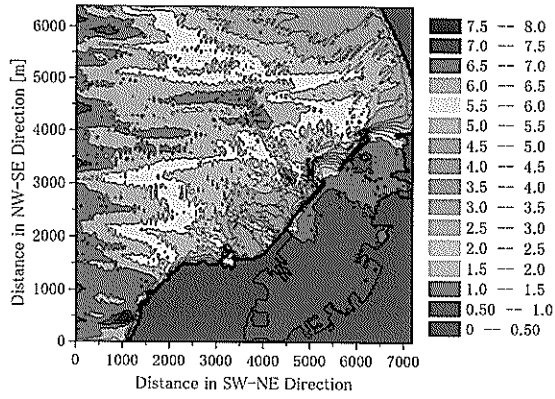


図-3.3.1 函館港周辺の有義波高分布

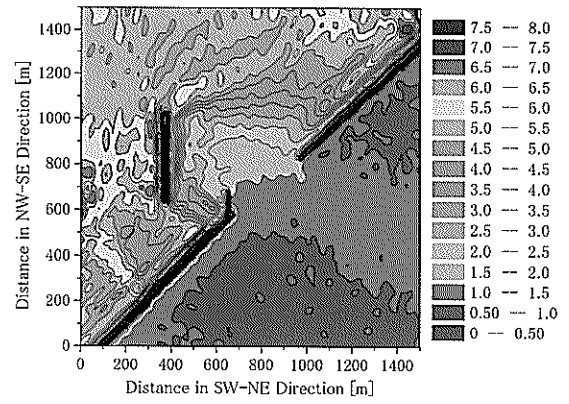


図-3.3.4 島防波堤周辺の有義波高分布

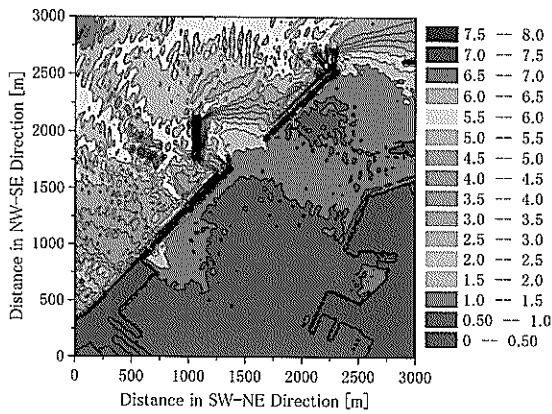


図-3.3.2 函館港港口部の有義波高分布

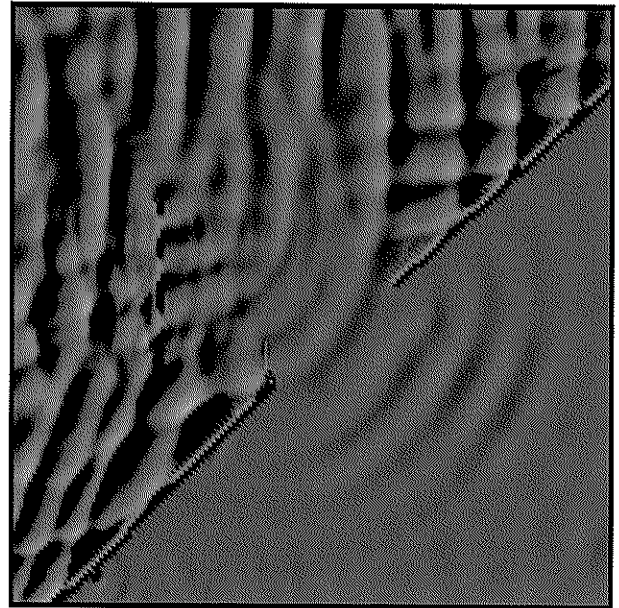


図-3.3.5 島防波堤周辺の水面波形（計算開始 777.5s 後）

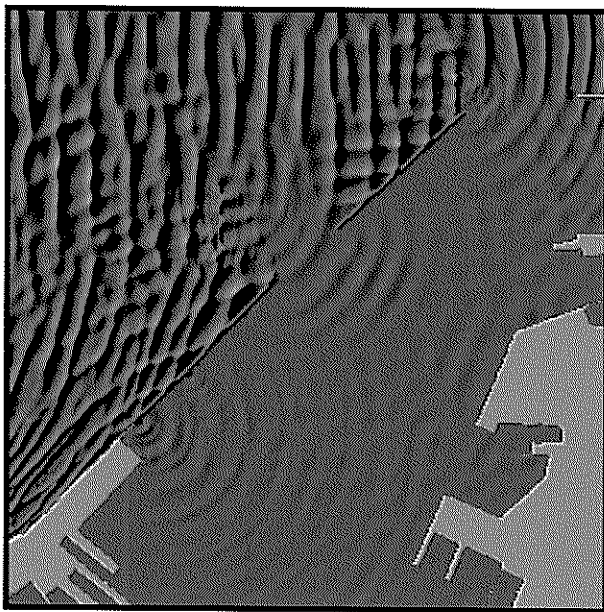


図-3.3.3 函館港港口部の水面波形（計算開始 777.5s 後）

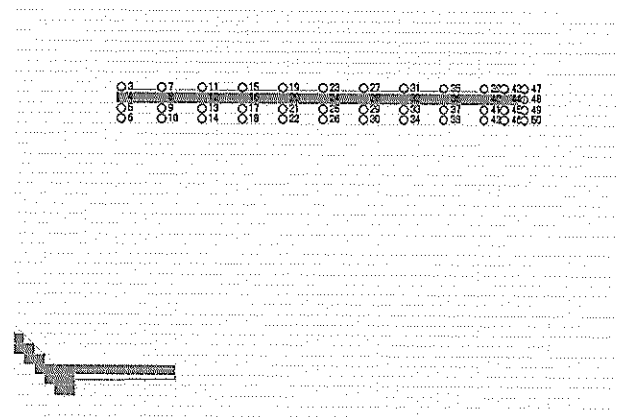


図-3.3.6 島防波堤周辺の水位変動計測地点

一方、その海域よりもさらに南東側で波高の高い海域が見られるのは、浅水変形による波高増大によるものと考えられる。したがって、その岸側で波高が次第に減少しているのは、波が進行するのに従い碎波減衰が生じているためと考えられる。なお、計算領域北側（図-3.3.1では右上）の境界付近で波高の低い領域が見られるのは、この領域が多方向波の有効造波領域から外れていることが主な原因である。この海域まで有効造波領域とするためには、入射境界と計算領域をさらに北西側へ拡張しなければならない。これは、多方向波の伝播計算を実施する場合には、とくによく認識しておかなければならない事項である。

図-3.3.2は、図-3.3.1で示した有義波高分布を港口部を中心に拡大表示したものである。また図-3.3.3は、図-3.3.2と同じ海域で、計算開始777.5s後にみられた水面波形のスナップショットである。図-3.3.3をみると、西防波堤およ

び北防波堤の前面では、沖からの入射波と壁面での反射波が重畳し三角波が形成されていることがよくわかる。また、沖波の主波向に対してほぼ垂直な島防波堤の前面では、沖からの入射波と壁面からの反射波による重複波に西防波堤からの反射波が重畳していることがわかる。その結果、島防波堤前面の海域では波高が非常に高くなっていることが図-3.3.2からも確認できる。なお、現地ではこれらの防波堤前面の消波は実施されていないため、数値計算においても防波堤前面は直立壁による完全反射境界とした。

一方、沖波に対して遮蔽域となる島防波堤の背後では、両堤頭部からの回折波に加え、西防波堤からの反射波と天端を乗り越えて背後に落下する越波水塊によって発生する伝達波が重畳し、とくに島防波堤直背後で比較的波高が高い海域が見受けられる。また、西防波堤の背後でも越波水塊によって同心円状の伝達波が発生していることが確認で

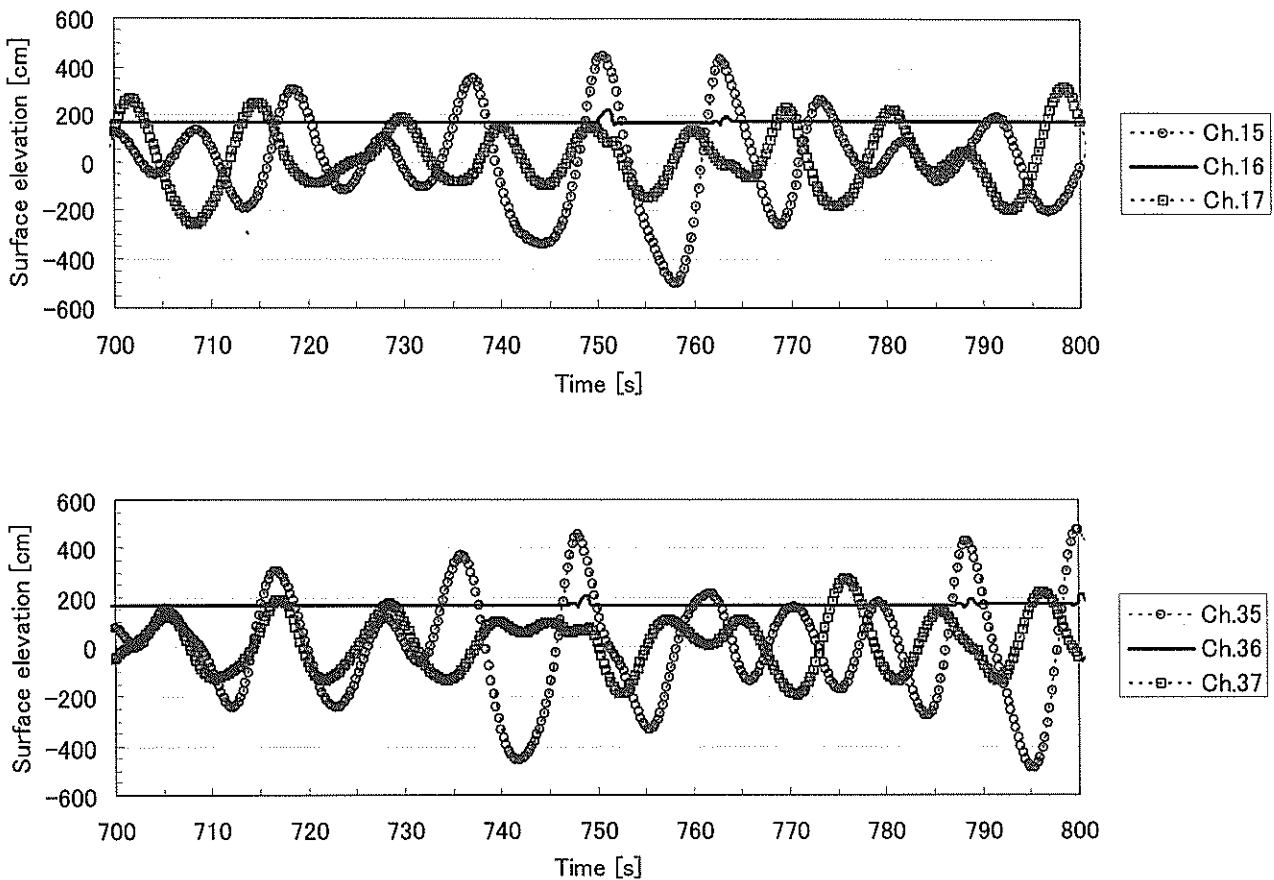


図-3.3.7 島防波堤前後および天端上の水位変動（上；南東端から約120mの測線，下；南東端から約320mの測線）



きる。なお、図-3.3.3でみる限り、西防波堤の背後において、入射波の波峰線に比べて少し防波堤法線の向きに偏向した、直線的な波峰線を有する越波伝達波は確認できない。これは、高潮偏差を加えた8日午前9時の潮位は朔望平均満潮位 (T.P.+1.05m) にも満たず、西防波堤に到達した斜め波が順に連続して越波するほどではなかったためと考えられる。

#### (2) 島防波堤周辺の波浪伝播特性

図-3.3.4は、図-3.3.1あるいは図-3.3.2で示した有義波高分布を島防波堤を中心に拡大表示したものである。また図-3.3.5は、図-3.3.4と同じ海域で、計算開始777.5s後にみられた水面波形のスナップショットである。これらの図からも島防波堤周辺の波浪伝播特性を考察することはもちろん可能であるが、連続した時刻における水面波形を並べたアニメーションで波の動きを観察することにより、さらに具体的なイメージを抱くことができる。実は、図-3.3.5と先に示した図-3.3.3はともに、現地スケールで数十秒間のアニメーションのある1コマを抜き出したものであった。これらによると、島防波堤の前面では、沖波とその反射波により形成される重複波に西防波堤からの反射波が重畳し、これらの位相が揃ったときには瞬間的に水面が大きく上昇または下降する様子が確認できた。また、島防波堤の背後では、両端部からの回折波に越波伝達波と西防波堤からの反射波が重畳する様子が観察されたが、とくに西防波堤からの反射波による水位変動が目立った。この波はちょうど島防波堤の背後壁面にほぼ沿う方向に伝播するため、西防波堤から離れるほど、島防波堤背後で沿い波(ステム波)が発達しているようであった。図-3.3.4において、島防波堤の直背後の海域で波高が高くなっているのはこのためである。また、島防波堤の南東側背後で波高が高い海域が見られるのは、西防波堤およびそれに続く西副防波堤による隅角部前面で、沖波および南東端からの回折波と隅角部防波堤による反射波とが重畳するためである。

つぎに、図-3.3.6に示す地点で水位変動を計測し、島防波堤前後および天端上の測点からなる1測線ごとにグラフ化したものを図-3.3.7に示す。島防波堤前面に位置するCh.15およびCh.35では、沖波による重複波と西防波堤からの反射波が重畳し、ある時刻には $\pm 4 \sim \pm 5$ m程度の非常に大きな振幅となっていることがわかる。また、天端上に位置するCh.16およびCh.36では、前面で高い水位が出現した直後に有為な水位変動が観察される。これは越波時における越流水深に相当するものである。さらに、島防波堤直背後に位置するCh.17およびCh.37では、島防波堤端部からの回折波に加えて、側方から西防波堤からの反射波が入射するために、これらの地点でも平均して約 $\pm 2$ m前後の水面変動

が観察される。これに加えて、Ch.16およびCh.36で得られた波形記録で越波が確認される場合には、その直後にCh.17およびCh.37での波形記録にも越波伝達波と思われる波形が現れていることがわかる。この定量的な妥当性の評価は平面模型実験あるいは現地観測による検証を待たなければならぬが、少なくとも砕波モデルと遡上モデルを備えた最新のNOWT-PARIによって、定性的な越波現象および越波による伝達波の発生が表現できていると考えられる。

#### 3.4 函館港における調査のまとめ

平成16年9月8日未明から9日にかけて北海道のほぼ全域を暴風域に巻き込みながら日本海沿岸を北上した台風18号は、道内の各地に大きな被害をもたらした。函館港では、8日午前9時に49cmの潮位偏差を観測するとともに、WAMによる波浪推算では同時刻に有義波高6.68m、有義波周期10.88s、主波向SWの最高波が推定されており、これらの波浪外力により島防波堤の9割以上が転倒するなど、甚大な被害が生じた。函館港から見てSW方向はちょうど津軽海峡を通して日本海を見通せる方向であるため、今回の台風により函館港に襲撃した高波浪は、日本海から直接侵入した、あるいは十分長いフェッチにより津軽海峡内で発生した波であったと推測される。また、津軽海峡を挟んで対岸に位置する青森県大間港でも、函館港に遅れること1時間後の午前10時に有義波高6.75m、有義波周期11.4s、主波向WSWの最高波が推定されている。大間港から津軽海峡を通して日本海を見通せる方向はWSWであることから、大間港に襲撃した高波浪は、函館港からみてSW方向にあった台風が、1時間後には大間港からみてWSW方向に移動したために発生したと考えることができる。

台風18号で被災した島防波堤に作用した波浪外力を明らかにするために、新たに砕波モデルと遡上モデルを組み込んだ最新のブシネスクモデル(NOWT-PARI)を用いて、ピーク波浪時の函館港における波浪変形計算を実施した。計算で得られた水面波形のアニメーションおよび時間波形の出力結果から、島防波堤前面の海域では、沖からの入射波と壁面からの反射波による重複波に西防波堤からの反射波が重畳して、 $\pm 4 \sim \pm 5$ m程度の非常に大きな振幅が生じることが確認された。また、沖波に対して遮蔽域となる島防波堤背後の海域でも、壁面に沿うように入射する西防波堤からの反射波と島防波堤天端上の越波による伝達波が重畳し、平均して $\pm 2$ m程度の振幅が生じていることが確認された。さらに、最新のNOWT-PARIでは少なくとも定性的に、防波堤上の越波とその背後の伝達波の発生を表現できることが確認された。

#### 4. 被災の特徴と今後の課題

2章で観察した各地の被災は、海象や地盤の条件が複雑な要因となって生じており、簡単に被災メカニズムを明らかにすることはできない。ここでは、被災形態から各地の被災を大きく2つに大別して、それぞれの類似点をまとめ、今後の調査課題を考察した。

##### 4.1 作用する波浪と潮位の関係

###### (1) 長崎島原地区

ホテル前面の護岸(霊丘公園護岸 B)を例として、被災の特徴を考察する。被災時の島原地区の海象条件を推定した。なお、風条件は島原振興局の情報に基づき、波条件はSMBの概算結果によった。

風 15m/s NE  
 潮位 天文潮位 DL+500(護岸設計満潮位)  
 合成潮位 DL+515  
 偏差 15cm は三角、口之津の値から見て妥当。  
 沖波 有義波高 1.5m 最大波高 約 3m  
 有義波周期 5s  
 波向きは特定できないが風向とヒアリングから NE ~ENE とする。

護岸天端高は、DL+640cm であるが、調査時には高さ45cmのパラペット部分はほとんど崩落していた。また、マウンド捨て石は移動し、北側に集まっていた。捨て石の直径は60cmである。被災時推定潮位は護岸天端高より低い。テレビ映像などではプールの壁面が水没していたことから、海面はホテル地盤上まで上がっていたと思われる。地盤上の痕跡高は護岸近くの波影響が大きい区域で平均+154cm、ホテル壁面で+85cmであり、地盤上で平均して1m程度の高さの波が作用していたと思われる。図-4.1.1に浸水イメージ図を示す。

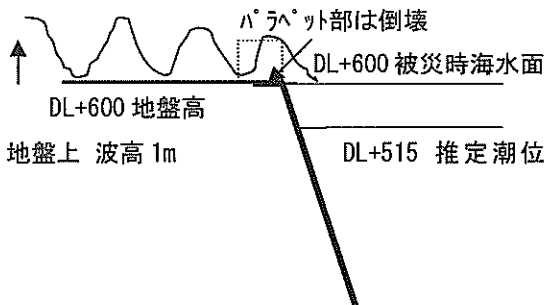


図-4.1.1 浸水イメージ図

推定潮位と被災時海水面との差85cmは、波による平均水位上昇と内港霊南地区北護岸との隅角部で形成する閉鎖海面での副振動(海水塊の多重反射で生じる海面上昇)の影響によるものと推定でき、ブシネスクモデル(平山, 2002)などの非線形波浪計算で検討することが推奨できる。また、沖有義波高は1.5mであり、これは地盤上での非線形性の影響で波の峰の正の部分の高さが増大したものと考えられる。なお、最大波高はさらに大きくなるので茶室の飛沫状況も説明できる。北護岸からの波の反射波についての詳細は不明である。しかし被覆石が北側へ流されていることを考慮すると、護岸による反射波の影響を否定することはできない。なお、図-4.1.2には被災断面を示す。

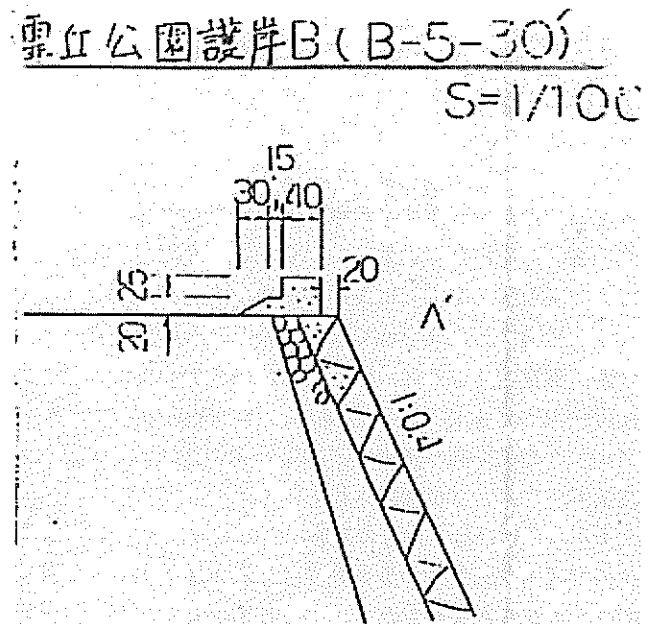


図-4.1.2 護岸設計断面図

###### (2) 神戸沖廃棄物処分場

対策委員会では、応急対策として、被災面上のグラベル材被覆(西護岸)、水中コンクリート打設による止水性の確保(南護岸)、消波ブロックの投入(南護岸)が承認された。なお、恒久的な対策としては、設計波高の見直し、堤体安定計算に使う潮位の見直し、護岸嵩上げ、消波ブロック重量修正などが議論されている。課題のひとつとして以下のことがあげられる。

恒久的な対策として、以下の提案を行う。

###### 1) 南護岸について

越波流量から設定される護岸天端高は KP+6.0 であると考えられ、護岸の前面天端高をできれば KP+6.0 まで嵩上げし、消波ブロックで十分被覆する。隅角部は波除堤機能を果たすように消波層を厚くすることが重要である。

ロ) 西護岸について

被災要因として護岸ブロックの滑動が推測されている。水位上昇による浮力が作用していたので有れば波向きは関係しないので、斜め入射の南よりの波も被災要因となる。原型復旧してブロック式護岸にしても滑動安全性が低いので、使用に制限を受けるが消波ブロック被覆層で矢板護岸を防護することが適切と考えられる。被覆ブロックの重量は新しい設計波に対応するものとし、離岸堤方式として矢板に接触させず自立層とする。

今後は、設計時の潮位について、高潮偏差を加えた潮位での構造計算を提唱していく必要がある。

(3) 関西空港の護岸

護岸の設計条件と台風16号,18号での波浪観測結果を比較検討する。表-4.1.1に台風16, 18, 21, 23号通過時のMT局で観測された暫定海象データの最大値を示す。

A4護岸は設計潮位がC.D.L+3.2mであり、護岸の設計天端高はC.D.L+6.0mであるが、台風16号時に観測された潮位2.4m、波高約3m近くの波に対しては、セキュリティフェンス倒壊のほか、越波による護岸背後水たたきや場周道路舗装破壊などの被害が発生している。この原因のひとつとしては、関西国際空港では長期的な沈下の進行により消波ブロックや護岸天端高が低くなっていることが挙げられる。関西国際空港(株)によると、台風16号時の護岸背後水たたきの被災状況や台風18号時の各護岸の越波状況を見ても、消波ブロックの天端高や護岸の天端高が高いところは比較的越波量が小さいことが確認されている。

また、台風16号、18号の来襲により、有義波高が3m台を連続で観測された時の最大波高は5.5mを越えており、瞬間的に大きな波が来襲したことにより被災したことも考えられる。

このような波が護岸に作用する場合、先述の宮崎港でみ

られたような、消波ブロックの沈下やケーソン壁の損傷等の恐れがあるが、関西国際空港ではそのような被害はなかった。一般に、水面付近に位置している消波ブロックほど波浪によって動揺を受けやすいと考えられるが、関西国際空港護岸においてA4護岸の消波ブロックの積上高はH.W.L+1.6mより低くなっているため、台風16, 18号来襲時のように潮位が2m越えている場合、A4護岸の消波ブロックは約1m程度浸水した状態となっており、波浪による衝撃波圧力が受けにくい状態であったと考えられる。

4.2 周辺地形による波浪の変形

第2章の事例の中で、細島港、宮崎港、函館港などは地形により波浪エネルギーが集中したことが被災要因と考えられる。これらを波浪変形計算結果とともに考察する。

(1) 細島港 (イクイバエ灯台消失)

新聞報道によると灯台の消失は8月30日の16時頃に確認されている。よって、細島港で観測された波浪データから、台風再接近時で最も高波高が観測された8月30日12:00における波浪場の再現計算を行う。再現計算に用いる同時刻の観測データは、有義波高 11.05m、有義波周期 12.3s、潮位 0.60m である。波向に関しては観測データが欠測であるため、接近時刻前後の波向から SSE と設定した。また、台風時において強い風が一方から吹き寄せている状況から方向集中度が比較的高かったことが予想されるため  $S_{max}=150$  とした。そして、消失した灯台の西では、宮崎県が施工する北防波堤(総延長 450m)のうち、北側4箇所(施工延長 110m)が、上部工パラペットが未施工の状態ですでに施工されている。台風16号の通過後、防波堤に消波工として設置されている 80t 型ドロスが堤体斜面上に移動していることが確認されたが、これは、台風16号の来襲に伴う高波によるものと推測している。

表-4.1.1 台風16,18,21,23号通過時のMT局における暫定海象データ(最大値)

	台風16号	台風18号	台風21号	台風23号
最高波高Hmax	558cm 8月30日23時40分	588cm 9月7日18時00分	331cm 9月29日20時40分	458cm 10月20日15時20分
有義波高H1/3	366cm 8月30日23時40分	351cm 9月7日16時20分	164cm 9月29日20時40分	251cm 10月20日20時40分
周期	9.4s 8月30日23時40分	8.8s 9月7日16時20分	9月29日20時40分	10月20日20時40分
潮位	240cm 8月30日21時16分	215cm 9月7日18時21分	223cm 9月29日19時09分	245cm 10月20日17時32分
風速(10分間平均)	30.5m 風向SSW 8月31日0時20分	30.0m 風向SSW 9月7日17時00分	18.6m 風向SW 9月29日19時40分	23.0m 風向NE 10月20日14時20分

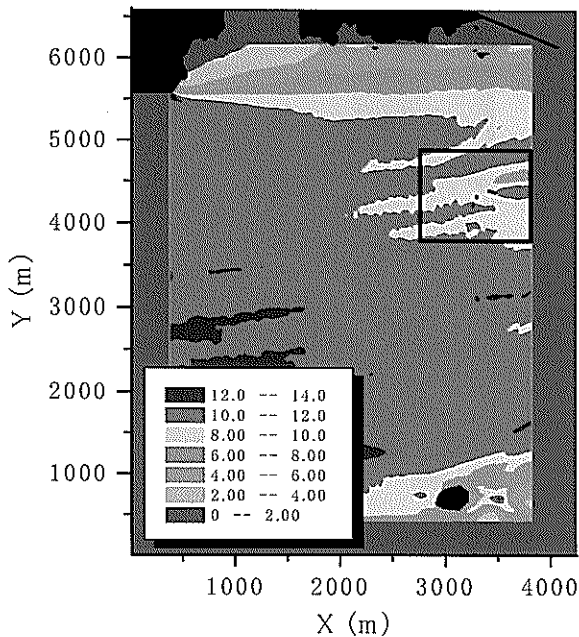


図-4.2.1 波高分布（細島港沖合）

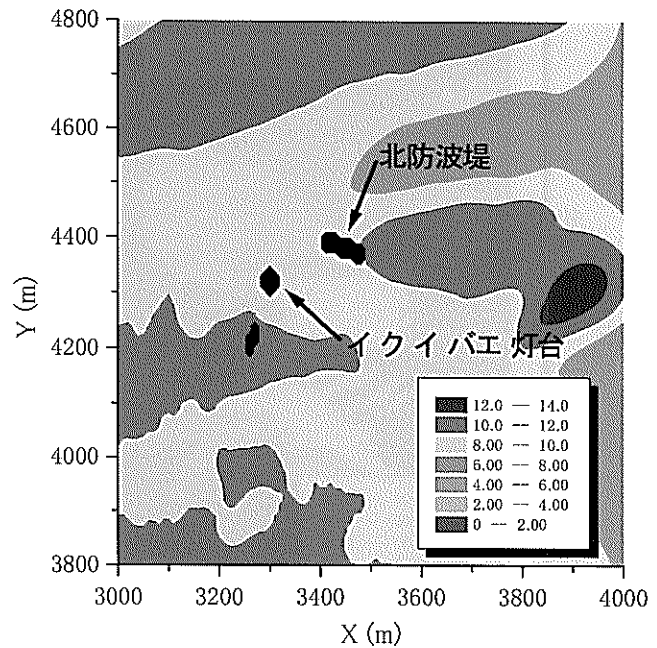


図-4.2.2 有義波高分布（イクイバエ灯台周辺）

北防波堤周辺では台風来襲時に消波ブロック移動限界波高相当の高波浪が来襲していたものと考えられ、この波浪場の状況を数値解析により再現し、北防波堤前面でブロックの移動限界波高相当の波高を確認することで、イクイバエ灯台付近に来襲したと思われる波浪状況を推定する。波浪状況の再現には、エネルギー平衡方程式とブシネスクモデルを併用した。沖合から灯台周辺まではエネルギー平衡方程式により算定し、灯台周辺海域に対してはブシネスクモデルを用いることとした。なお、ブシネスクモデルの入射波条件はエネルギー平衡方程式により求められた波高値からブシネスクモデルの入射境界位置にあたる地点の波浪を抽出し使用した。ブシネスクモデルで解析された細島港沖合の波高分布を図-4.2.1に、灯台周辺の波高分布を図-4.2.2にそれぞれ示す。80t型ドロスの移動限界波高を、安定数(KD=20)を用いたハドソン式により概算すると10m～11mとなり、ブシネスクモデルにより求められた北防波堤前面の波高値とほぼ一致するため、台風接近時での波高分布は、これに近い状態であったと考えられる。一方、図-4.2.2に示すように、このときのイクイバエ灯台前面におけるブシネスクモデルによる解析結果は有義波高10m程度となっており、この高波浪による波力が灯台を消失させたものと推測される。

#### (2) 細島港（コンテナバース上床版の隆起）

台風16号との関係を検討するため、ブシネスクモデルによる波浪場解析を実施した。解析ケースとして、台風来襲直前の高潮位(D.L.+2.67m)が観測された8月30日6時と、高波浪時である8月30日12時の2ケースを行った。なお、波向に関しては、観測による波向が欠測となっているため観測風向と同じ波向とし、構造物からの反射は完全反射として解析した。それぞれの有義波高の平面分布を図-4.2.3と図-4.2.4に示す。実際のコンテナバースは直立消波構造を採用しているため、バース前面では波浪の減衰効果が見込まれるが、本解析では完全反射としているため、港内の波高値は現地よりも過大に評価した値となる。しかしながら、数値解析における白浜地区への波浪伝播の様子を観察すると、むしろ港口部を形成している余島防波堤からの回折波成分が大きく影響し、沖波波高の1割から2割程度が回折波高として伝播することが確認できる。したがって、今回の台風16号のような沖波波高が10mを越える波浪に対しては、1m～2mくらいの港内波高が伝播してくることになり、台風来襲時にはかなり港内が荒れていたことが予想される。

ここで、コンテナバースの岸壁天端高が+3.3mであるのに対し、最高潮位時(8月30日6:00)には潮位+2.76mに達し、このとき波高1m程度の波が来襲して、岸壁天端高

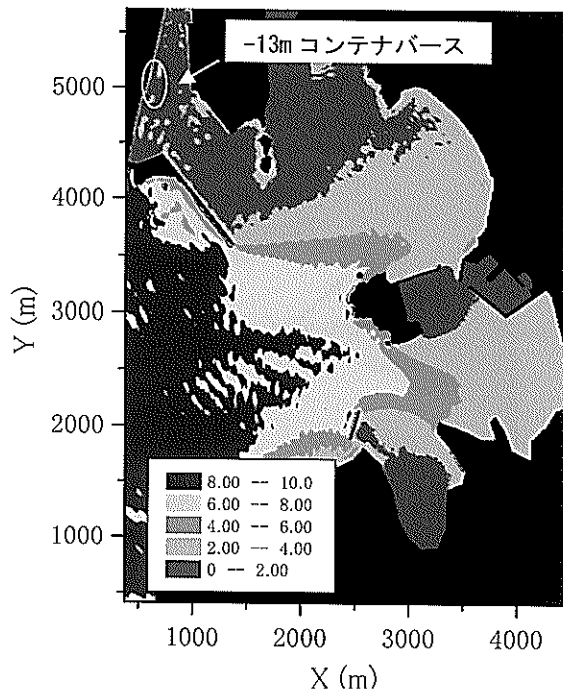


図-4.2.3 高潮位時の波高分布 (8/30 6:00, WL=+2.67m)

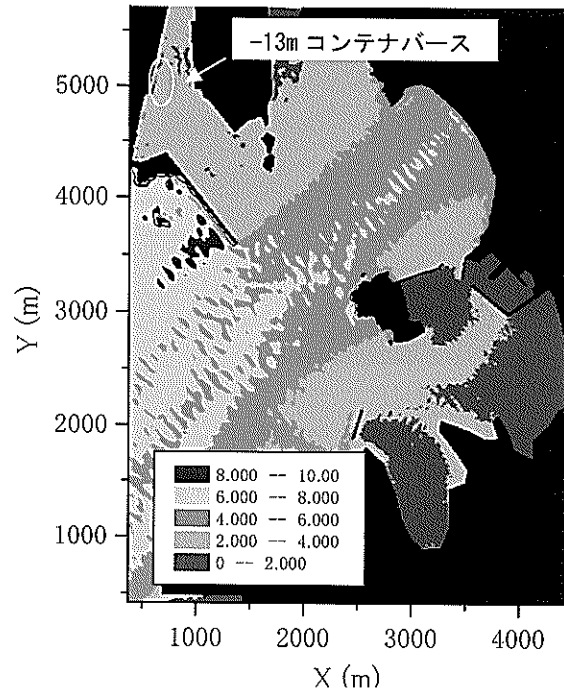


図-4.2.4 高波浪時の波高分布 (8/30 12:00 WL=+0.70m)

と同等な高さの水位変動が生じていたことが予想される。また最高波高時 (8月30日12:00) では、潮位は+0.70m程度と低かったものの、港口部での波高は3m程度に達し、岸壁構造物には大きな波浪外力が作用していた可能性がある。コンテナバースの上部床板が盛り上がるという被災原因を考察する上で、これらは有力な候補と考えられる。ただし、白浜地区の港内波高を詳細に算定するためには、主要な構造物による反射率を考慮した計算を行う必要がある。

### (3) 宮崎港 (ケーソン壁の破壊)

宮崎港湾・空港整備事務所のまとめによる防波堤 (南) ケーソン壁の被災原因は次のようである。「今回の台風16号に伴う高波浪が長時間に渡って作用したことにより、防波堤の消波ブロック (テトラポッド80t型) が動揺してケーソンに衝突し、ケーソン壁を損傷させるとともに、消波ブロックも沈下する被災が生じたものである。」

一般に、水面付近の消波ブロックほど波浪によって動揺しやすいことを考えると、今回被災した防波堤先端付近の104号ケーソン函前面の消波ブロック被覆高は、ケーソン壁破壊当時、潮位面とほぼ同レベルであったのではないかと推測される。実際、宮崎港では8月30日6時に+2.65mが観測されており、被災箇所のケーソン堤前面の消波工の被覆天端高がDL+3.55mまでの暫定断面 (写真-4.2.1) であったために、水面に比較的近い状態であったことが推測

される。さらに、施工途中で暫定的に堤頭部となっている105号ケーソン函の周囲は当然ながら消波されていないため、104号ケーソン函前面の消波ブロックは施工後間もないこともあり、ブロック同士のかみ合わせ等も十分でなかったと推測される。

ここで、台風接近当時における波浪状況の再現計算をブシネスクモデルを用いて実施した。波浪条件は、細島港における波浪観測データに基づき、最大波高時である8月30日12時の諸元 (波高11.05m, 周期12.3s) を用いた。また、被災時の観測風データにおいて最大風速時の風向がSEもしくはESEだったことを参考に、波向SSEとして解析を行った。数値計算では防波堤前面に部分反射境界を配置し、消波ブロックの反射率0.4を実現するエネルギー吸収帯を被災前の平面図を参考に104号函前面まで配置した。

ブシネスクモデルで算定された、全計算領域における有義波高分布を図-4.2.5に示す。また図-4.2.6は、ケーソン側壁が損傷した堤頭部周辺を拡大して示したものである。これによると、堤頭部付近では回折効果による波高増大がみられ、特に直立壁となっている防波堤先端部の堤体近傍では最高で有義波高14mに達している。なお、このとき作用した周期12.3sの波に対する波長は約110m程度であった (防波堤基礎マウンドの天端水深10m)。現地において堤頭部から3函目までの消波ブロックの損傷が激しく、特に

2 箇目の側壁が損傷したことは、半無限堤の周りで波が回折するとき「堤頭部から 1 波長以内の地点で堤幹部よりも波力が増大する」という伊藤ら (1971) の報告に合致する。

また、被災後の潜水調査によりマウンド部の損傷はほとんど見られなかったことから、消波ブロックの沈下は、消波ブロックの破壊による空隙率の減少 (写真-4.2.2) と、乱積みされた消波ブロック間のかみ合わせの向上による締め固め等が原因と考えられる。

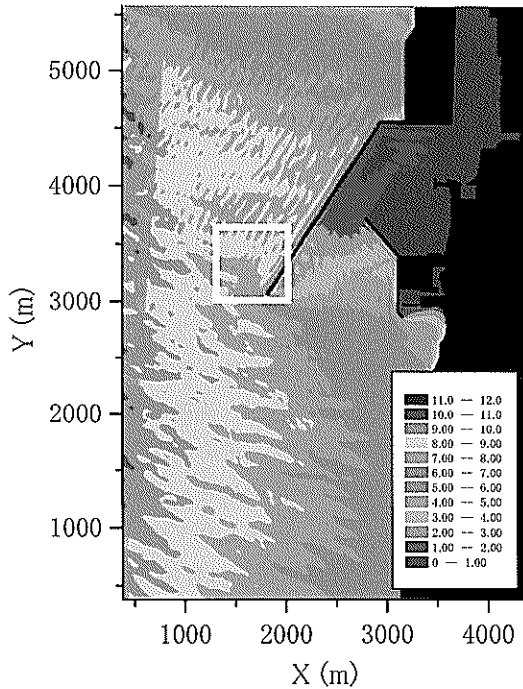


図-4.2.5 有義波高分布 (宮崎港全域)

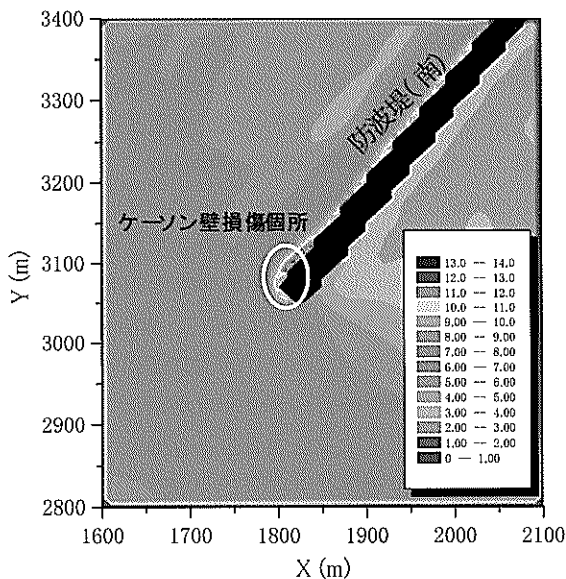


図-4.2.6 有義波高分布 (防波堤堤頭部周辺)



写真-4.2.1 消波ブロック被覆高 (宮崎港)



写真-4.2.2 消波ブロック破壊状況 (宮崎港)

(4)宮崎港 (上部パラペットの破壊)

被災した上部パラペット前面の消波ブロックの状況は写真-4.2.3~4.2.5 のようであった。写真-4.2.3 をみると、衝突した消波ブロック (A) の脚の破壊は見られないことから、この消波ブロックは上部パラペットの消失と同時にまたは消失後に壁面に衝突したものと推測される。また写真-4.2.4 では、壁面に衝突した消波ブロック (A) の他の脚は港外側から力を受けて根元から折れ、そのすぐ沖側には角が磨り減った他の消波ブロック (B) が見える。さらに写真-4.2.5 では、壁に衝突した消波ブロック (A) の折れた脚が接していたと思われる消波ブロック (C) の表面に、消波ブロック (A) が壁側に移動したと思われる痕跡が残されていることがわかる。これらのことから上部パラペットの被災メカニズムについて次のような仮説が考えられる。つまり、台風 16 号によって来襲した高波浪により消波ブロック B が壁面側へ動き、消波ブロック A は高波浪と消波ブロック B の衝突を受けて消波ブロック C を傷つけながら壁面へ衝突し、1 つの脚は折れ、1 つの脚は勢いよく

上部パラペットに衝突した。さらに、その衝撃力と高波浪による衝撃波力を受けた上部パラペットは、“だるま落とし”のように港内側へはじき飛ばされ、写真-2.3.8~2.3.10のような痕跡を残して港内側へ落下したと思われる。

なお上記の推測は、現時点で物理現象に基づく数値的な根拠はない。今後、来襲波の諸元や砕波や越波水塊による衝撃力などの推定、および鉄筋の腐食による上部パラペットの耐波力の減少や施工後10年以上を経過した消波ブロック

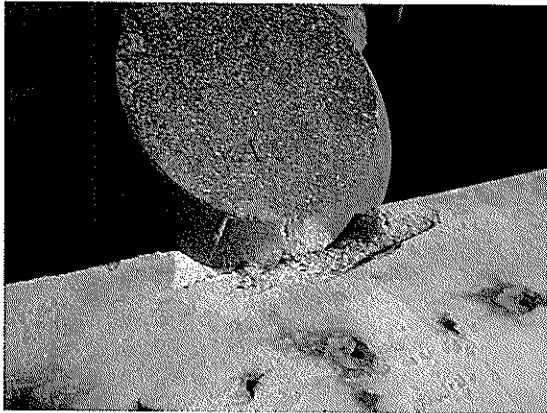


写真-4.2.3 消波ブロックの衝突 (宮崎港)

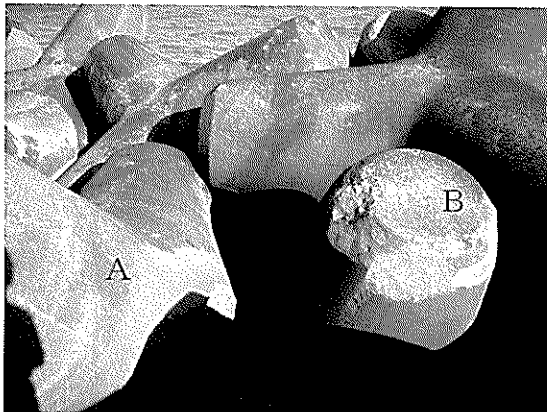


写真-4.2.4 消波ブロック移動痕跡1 (宮崎港)

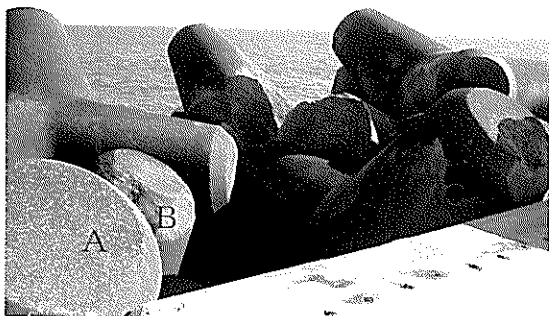


写真-4.2.5 消波ブロック移動痕跡2 (宮崎港)

ック被覆工の締め固まり具合と動きやすさの関係などの整理を行い、被災メカニズムの検証を行う必要があると考えられる。

#### (5) 函館地区での波浪変形からの考察

3.3節で述べたように、全長400mのうち9割以上に当たる370mでケーソンの転倒被災が生じた函館港島防波堤前後の海域では、主波向SWの沖波が来襲した場合には、西防波堤による反射波と低天端の島防波堤上の越波による伝達波の影響により、島防波堤直背後の沖波に対する遮蔽域でも、ピーク時には平均して±2m程度の水面変動が生じていたことが推定された。このとき島防波堤前面では、設計波を大きく上回る高波浪に西防波堤からの反射波が重畳し、ある時刻には水面変動の振幅が±4~±5m程度に達することもあった。

函館開発建設部ホームページに掲載されている函館港島防波堤の被災状況を図-4.2.7に示す。図-4.2.7(a)で示したケーソン転倒状況のうち、赤で塗られたケーソンは被災後も転倒せずに残ったものを示している。2番のケーソンは根固めブロックの飛散状況から港内側へ倒れる寸前であったことが確認されている。ところが、両側のケーソンは完全に転倒しているにもかかわらず、その間にある19番のケーソンだけは根固めブロックを含めほとんど被災していないことは注目に値する。また、被災したブロックのほとんどは港内側へ転倒しているのに対し、14, 15, 16番のケーソンは港外側へ転倒していることなども特徴的である。図-4.2.7(b)で示したマルチビームによる海底探査結果は、これらの被災状況を立体的に捉える上で非常に有効である。

ほぼ同様な構造を有する全長400mの直線的な防波堤でこのように多様な被災が生じた原因は、その直接的な外力として作用した島防波堤周辺の波浪場の違いによるものと考えられる。そこで、これらの発生メカニズムを解明するために、NOWT-PARIを用いて算定した被災当時のある時刻における島防波堤周辺の水面波形を図-4.2.8に示す。図-4.2.8(a)の時刻には、島防波堤の北西端側から南東側へ順に前面水位が高くなり、島防波堤ケーソンにはそれぞれ岸向きの波力が作用し、順に港内側へ転倒したと推測される。また、それより1.5s後の図-4.2.8(b)の時刻では、前面水位の高まりが南東側へ移動するのとは逆に、背面水位は西防波堤からの反射波が伝播するにつれて南東側から北西側へ順に高まり、島防波堤中央部よりも少し南東側ですれ違うように変化している。このとき前面と背面との水位差は小さくなるので、この地点での岸向きの波力は周囲に比べ小さくなっていると考えられる。つまり、この地点がちょうど転倒被災を免れた19番ケーソンの設置位置であったと考えられる。一方、図-4.2.8(c)の時刻では、島防波堤の前

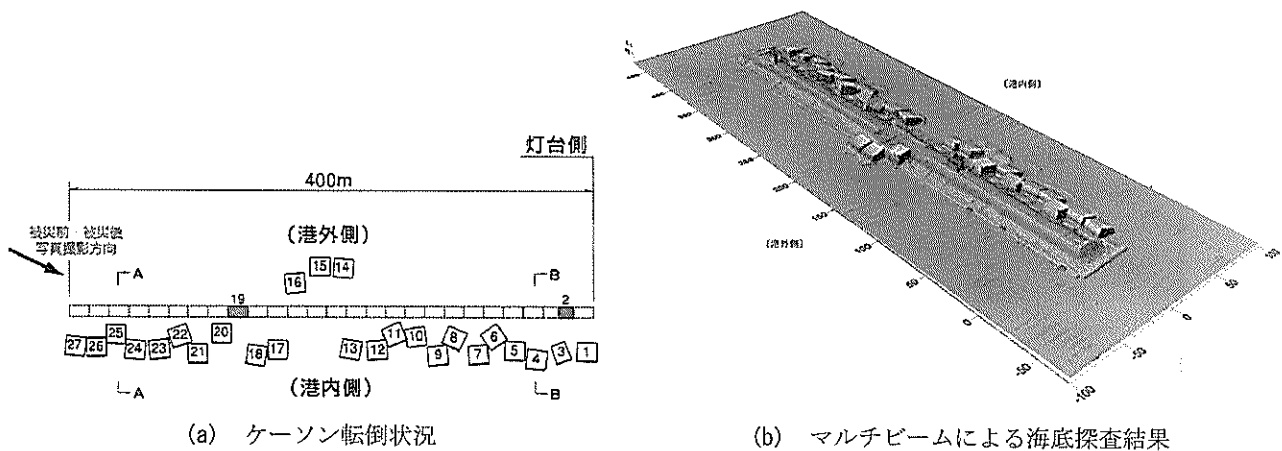


図-4.2.7 台風18号による島防波堤被災状況  
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部HPより転載)

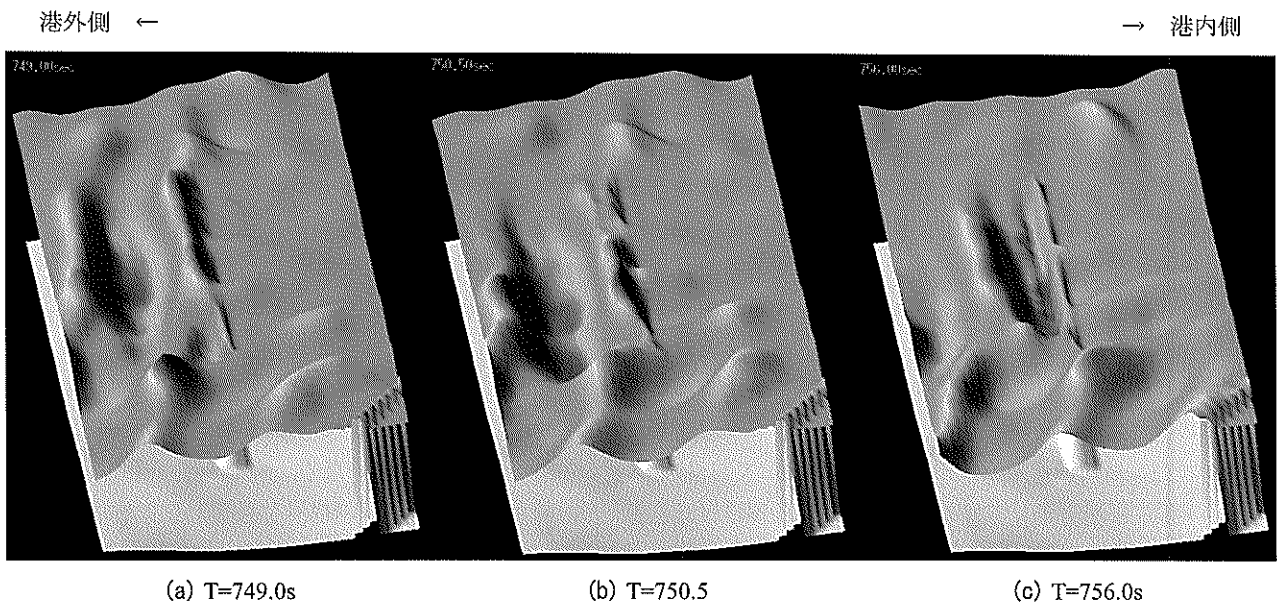


図-4.2.8 NOWT-PARIで算定した島防波堤周辺の水面波形

面水位はほぼ一様に低くなっているのに対し、背面水位は島防波堤中央付近と南東端付近で相対的に高くなっている。つまり、これらの位置のケーソンには沖向きの波力が生じていると推測され、14, 15, 16番ケーソンは港内側へ転倒した他のケーソンよりも先にこのとき港外側へ転倒したものと推測される。

以上が、島防波堤周辺における被災当時の水面波形の出現特性を算定して推測した、ケーソン転倒被災に対する仮説である。この仮説を証明するためには、ケーソンが転倒するために必要な波浪外力を予め算定しておき、実際にそれを上回る波浪外力が作用するような波浪場が出現してい

たかを波浪変形計算で検証すればよい。しかしながら、波浪外力によるケーソン被災は、同程度の波が繰り返し作用するよりはむしろ、最大波が1波から数波連続して作用したときに発生すると考えられるため、波群中の最大波の発生確率をどう扱うかは難しいところである。少なくとも位相平均型の波浪変形計算法ではこれを直接取り扱うことはできないため、NOWT-PARIなどの位相分解型の波浪変形計算によってさまざまな波群に対する、あるいは長時間の出現波浪を計算し、統計的に確からしい最大波を算出して検証することが望ましい。



## (6) 葉生海岸での被災

作用波力の算定には砕波後の汀線近傍の海岸堤防に作用する波力式が必要であるが、不規則波に対する知見は不十分である。そこで、築造基準に用いられている富永・久津見式を準用し、現地調査で得られた図-4.2.9に示す概略値を用いて波力計算を行う（土木学会，2000）。

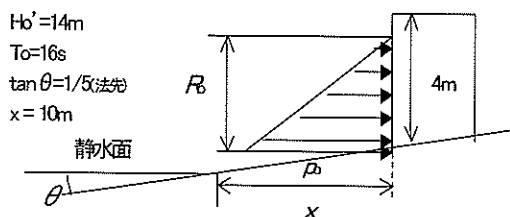


図-4.2.9 被災時の波作用模式図

$$p = 1.8 \rho_0 g \tan \theta \left[ (H_o' L_o)^{1/2} - x \right] \quad (1)$$

$$R = 1.7 \tan \theta \left[ (H_o' L_o)^{1/2} - x \right]$$

ここで、 $L_o=399\text{m}$ 、 $H_o'=14\text{m}$ 、 $x=10\text{m}$ より、それぞれ  $R_o=22\text{m}$ 、 $p_o=229\text{kN/m}^2$ が得られる。 $R_o$ の高さは護岸高さと比較して大きく、堤防には $p_o$ が一様に作用していると近似できる。さらに、破断面より上部の2mに作用した波浪荷重が被災の主な要因と考えると、作用力は、 $P=500\text{kN/m}$ と概算できる。一方、コンクリート面のせん断耐力は、コンクリートの許容せん断強度  $6\text{kgf/cm}^2$ と幅  $62\text{cm}$ から  $P'=365\text{kN/m}$ と推定できる。したがって、パラペット背後の中詰め土砂による抵抗がなければパラペット接合面でのせん断破壊の可能性は高い。

現場において破断面を観察すると白く石灰化しており、破断面はすでに隙間が生じ水分が侵入していたのではないかと推定できる。ただし、鉄筋（直径10mm）の引き抜き抵抗が働き、パラペットは鉄筋の引き抜き抵抗で支持されていた可能性もある。また、現場では鉄筋が引き抜かれて折れ曲がっており、パラペットの転倒により堤体の後部に欠けた跡も存在していることから、引き抜き抵抗を考慮した方がよいと指摘された。鉄筋は、直径10mmの丸鋼棒が50cmピッチで施工時の継ぎ手として挿入されており、被災箇所では、引き抜かれて折れた鉄筋が見られた。一方、せん断で切断された鉄筋は見られなかった。この場合には118kN/m程度で引き抜きと転倒が生じる可能性がある。パラペットが被災したときには、鉄筋の引き抜き抵抗あるいはコンクリートのせん断抵抗が働き、波の作用力に抵抗していたものと予想できる。したがって、堤防の上部が波作用に対して安定するためには内部の中詰め砂や上部工の抵抗が十分働く必要があり、それらが越波の作用や経年変化

による中詰め砂の沈下によって抵抗力が小さくなると、異常な外力によって破壊されてしまう。ただし、堤体内部の検査は近年ようやく注目されており、これまで十分な調査はされていない（山田ら，2004）。今後は、海岸堤防のメンテナンス手法も含め、総合的な検査が必要である。

なお、対策としては、以下のようなことが提案できる：

- ・鉄板や補強材によって、堤防の本体およびパラペット部の一体化を進める。
- ・内部の空洞化が進んでいる箇所には、盛り土を再充填し、締め固めを十分行う。
- ・作用波力低減を計るため、離岸堤や消波ブロックの設置を行う。

## 5. まとめ

本調査では、2004年波浪災害に関する波浪外力と被災概要について取りまとめを行った。特に各地で甚大な被害をもたらした、台風16号、18号および23号について、各地における被災概要とその特徴を現地観測と数値計算により明らかにした。そして、これにより得られた知見の範囲内で考え得る、今後の調査課題を取りまとめた。

本調査における各地の被災状況は以下のとおりである。

### (イ) 長崎島原地区

台風16号の接近時に大潮と重なったことにより、護岸が崩壊し、背後の道路や建物に浸水する被害が生じた。被災時の海水面は推定でDL+600cmと予測される。有義波高は1.6m程度と推測されるが、地盤上では非線形性の影響で水位が上がり地上で100cm程の水位変動が生じた。島原港では現地観測を行っていないため、海象条件は推定値である。今後は、副振動計算と波浪推算を実施することが望ましい。

### (ロ) 細島・宮崎地区

細島港では、鉄筋コンクリート製のイクイバエ灯台が台風16号通過時の高波により消失する被害が生じた。また、防波堤においても、80t型ドロスがケーソン斜面上に打ち上げられる被害が生じた。また宮崎港では、防波堤のケーソン壁の破壊、消波ブロックの破損沈下が確認された。これは、施工中の暫定防波堤断面に設計波相当の高波が作用したためと考えられる。

### (ハ) 神戸・関空地区

神戸地区では、台風16号・18号によって発生した高潮により道路が1mほど冠水したほか、神戸港沖の防波堤の被覆部被害が生じた。これは、堤体の安定性をH.W.Lで設計がなされているため、堤体安定計算時に使用されている潮位よ

り1m以上高い高潮が発生したためと考えられる。関空地区においては、台風16号での護岸セキュリティフェンスおよび3カ所の護岸において、場周道路の破損が確認された。これは、観測史上最大級の高波が来襲したことが原因と考えられる。

#### (二)室戸・菜生地区

台風23号の上陸に伴い、室戸市菜生海岸では堤防延長100mに渡って被災が生じ、うち30mは上部工およびパラペットが崩壊した。堤防の上部が波作用に対して安定するためには、内部の中詰め砂や上部工の抵抗が十分働く必要があり、このとき、越波や経年変化による劣化を考慮しておくことが重要である。

#### (ホ)函館地区

函館港では、台風18号の通過時に全長400mの防波堤において、370mでケーソンの転倒被災が生じた。これは、設計波を大きく上回る高波浪に西防波堤からの反射波が重畳したことが原因と考えられる。

## 6. おわりに

我が国は災害列島と呼ばれるほど、数多くの自然災害に見舞われており、人命と社会資本を自然災害から守ることは国家事業としても重要である。台風13号や伊勢湾台風を契機に発展した海岸工学は、当初は防護のみを目的としていたが、現在は、防護だけでなく環境と利用に主眼をおいた海岸管理に活用される学問となっている。海岸空間の利用が促進されると、沿岸域に人と資産がますます集中するので、ひとたび高波によって護岸や堤防が破壊されたり越波や越流が生じると、人命や家屋が受ける被害の程度は非常に大きなものになってしまう。したがって高波による被災メカニズムを明らかにし、高度な推定を実施することは、ますます重要になる。

構造物の破壊メカニズムを明らかにし適切な対策を図るためには、構造物に作用する波力を正確に計算する必要がある。すでに合田式による設計がなされているものの、複雑な前面の地形や消波工の形状によって発生する衝撃砕波力の推定、構造物背後の地盤内に残る残留水面の挙動、時間的な打ち上げや越波の変化など研究が端緒についたばかりの分野があり、今後も精力的な研究が必要である。

(2005年3月10日受付)

## 謝辞

現地調査については、以下の皆様にお世話になった。また地方の土木事務所関係の皆様にもご支援頂いた。ここに多大な感謝をします。また、同所調整官高橋重雄博士には、被災調査での被災調査での現地検査、取りまとめ方針についてご支持頂いた。

国土交通省九州地方整備局長崎港湾・空港事務所 企画調整課 平野隆幸 殿

国土交通省九州地方整備局下関港湾・空港技術調査事務所 設計室 片山勝徳 殿

国土交通省近畿地方整備局神戸港湾・空港技術調査事務所 菅谷幹夫 殿

国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所 菅沼史典 殿

高知県室戸土木事務所 野村慎一郎 殿

関西国際空港株式会社施設整備本部工務部 西田一彦 殿

## 参考文献

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, 港湾空港研資料, No.971, 43p.

合田良実・岸良安治・神山 豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的検討, 港研報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44.

合田良実・鈴木康正(1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港研資料, No.230, 45p.

神戸市みなと総局(2004): 神戸沖埋立処分場護岸断面検討会 第2回検討会資料.

高山知司・池田直太・平石哲也(2001): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp.21-67.

土木学会(2000): 海岸施設設計便覧, 土木学会, pp.90.

永井紀彦・里見 茂(2005): 2004年に発生した異常波の観測結果, 港空研資料(印刷中).

永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信(2003): GPSブイによる沖波の波浪・津波・潮位観測, 海講論文集, 第50巻, pp.1411-1415.

日本港湾協会(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp.85-93.

橋本典明・鈴木勝之・永井紀彦(2005): 2004年に発生した台風に伴う高波の波浪推算, 港空研資料(印刷中).

平山克也・上原 功・永松宏一・平石哲也(1998): 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学

論文集, 第 45 卷, pp.161-165.

平石哲也・平山克也・河合弘泰 (2000) : 台風 9918 号による越波災害に関する一考察, 港空研資料, No.972, 19p.

平山克也・平石哲也 (2001) : ブシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発, 港湾技術研究所報告, 第 40 巻, 第 1 号, pp.3-30.

平山克也・上原 功 (2002) : 消波構造物に作用する波浪の消波機構を考慮した港内波浪変形計算, 海講論文集, 第 49 巻, pp.671-675.

平山克也 (2002) : 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港研資料, No.1036, 162p.

平山克也・平石哲也 (2004a) : ブシネスクモデルに適した砕波減衰モデル導入のための一考察, 海洋開発論文集, 第 29 巻, pp.851-856.

平山克也・平石哲也 (2004b) : ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性, 海講論文集, 第 51 巻, pp.11-15.

山田哲也・永見敏美・石谷俊彦・山本修司・前田邦彦・山重光 (2004) : 海岸施設の変状連鎖に対する定量的な点検手法の提案, 海講論文集, 第 51 巻, pp.1336-1340.

#### 記号表

$H_0$	: 沖波波高
$T_0$	: 沖波周期
$S_{max}$	: 方向集中度
$Dir$	: 波向
$N$	: 成分波数
$h_l$	: 入射境界水深
$H_{1/3}$	: 有義波高
$T_{1/3}$	: 有義波周期
$H_{max}$	: 最大波高
$T_{max}$	: 最大周期
$H_0'$	: 換算沖波波高
$H.H.W.L.$	: 既往最大潮位
$H.W.L.$	: 朔望平均満潮位
$L.W.L.$	: 朔望平均干潮位
$C.D.L.$	: 港湾工事基準面
$D.L.$	: 基本水準面
$T.P.$	: 東京湾平均海面
$K.P.$	: 神戸港修築工事基準面
$GL$	: 地盤面高
$h$	: 構造物設置水深
$h_0$	: 実水深
$hc$	: 護岸天端高
$q$	: 護岸越波流量
$\tan\theta$	: 法面勾配
$p$	: 水平波力強度
$P$	: 水平波力合力
$R$	: 波力作用高
$\rho_0$	: 流体密度
$g$	: 重力加速度
$L_0$	: 沖波波長
$x$	: 護岸前面からの距離

港湾空港技術研究所資料 No. 1101

2005. 6

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 昭和情報プロセス株式会社

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。