

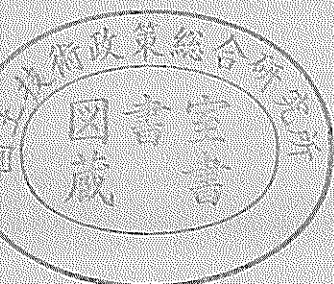
独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.2 June 2003

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 42 巻 第 2 号 (Vol. 42, No. 2), 2003 年 6 月 (June 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. グリーンベルトを用いた南太平洋地域の津波対策
..... 平石 哲也・原田 賢治 3
(Greenbelt Tsunami Prevention in South-Pacific Region
..... Tetsuya HIRAISHI, Kenji HARADA)
2. 時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波モデルの開発
..... 平山 克也・原 信彦 27
(A Simple Wave Breaking Model with Quasi-Bore Model in Time Domain
..... Katsuya HIRAYAMA, Nobuhiko HARA)
3. SCP 改良地盤における水平抵抗特性
..... 北詰 昌樹・高橋 英紀・竹村 慎治 47
(Experimental and Analytical Studies on Horizontal Resistance of Sand Compaction Pile Improved Ground
..... Masaki KITAZUME, Hidenori TAKAHASHI, Shinji TAKEMURA)
4. 粘土地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力に関する遠心載荷模型実験と解析
..... 中村 健・北詰 昌樹 73
(CENTRIFUGE MODEL TESTS AND STRESS CHARACTERISTICS ANALYSES ON VERTICAL BEARING
CAPACITY OF EMBEDDED SHALLOW FOUNDATION
..... Takeshi NAKAMURA, Masaki KITAZUME)
5. 斜め組杭式棧橋の地震時挙動に関する数値解析と耐震性能照査法の提案
横田 弘・濱田 純次・大熊 弘行・杉澤 政敏・芥川 博昭・津國 正一・佐藤 博 87
(Numerical Analysis on Dynamic Behavior of an Open Type Wharf on Coupled Raking Steel Piles During Earthquakes
... Hiroshi YOKOTA, Junji HAMADA, Hiroyuki OHKUMA, Masatoshi SUGISAWA, Hiroaki AKUTAGAWA,
Shouichi TSUKUNI, Hiroshi SATO)
6. ASR が発生したコンクリートの特性および内部鉄筋ひずみとコンクリート表面ひずみの関係
..... タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 133
(Concrete Properties and Relationship Between Surface Strain and Strain Over the Steel Bars of ASR Affected
Concrete Members
..... Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)

7. スラグセメントを用いたコンクリートの海洋環境下における長期耐久性
 …… タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 …… 155
 (Long-term Durability of Concrete Made with Slag Cements Under Marine Environment
 …… Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)
8. 久里浜湾における越波被災の要因と特性
 - ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築 -
 …… 安田 誠宏・服部 昌樹・平石 哲也・平山 克也・永井 紀彦・小川 英明 …… 193
 (Damage Cause and Characteristics of Wave Overtopping in Kurihama Bay
 -Establishment of the Estimation Method for Wave Overtopping Damage Applying NOWPHAS-
 …… Tomohiro YASUDA, Masaki HATTORI, Tetsuya HIRAIISHI, Tosihiko NAGAI, Hideaki OGAWA)
9. コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究
 - 免震コンテナクレーンの開発 -
 …… 菅野 高弘・芝草 隆博・藤原 潔・徳永 耕一・榎本 洋二・藤木 友幸 …… 221
 (Study on the Seismic Performance of Container Crane
 -Development of the Container Crane with Isolation System-
 …… Takahiro SUGANO, Takahiro SHIBAKUSA, Kiyosi FUJIWARA, Koichi TOKUNAGA, Yoji MAKIMOTO,
 Tomoyuki FUJIKI)
10. 羽田空港の地震動特性に関する研究
 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性
 …… 野津 厚・佐藤 陽子・菅野 高弘 …… 251
 (Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport
 (Second Report) Site Amplification Factors
 …… Atsushi NOZU, Yoko SATO, Takahiro SUGANO)
11. 直立部に消波構造を用いた新しい高基混成堤の開発
 - 水理特性および耐波安定性に関する実験的研究 -
 …… 下迫 健一郎・高橋 重雄 …… 285
 (Development of a New Type High Mound Composite Breakwater
 -Experimental Study on Hydraulic Characteristics and Stability against Waves-
 …… Kenichiro SHIMOSAKO, Shigeo TAKAHASHI)

久里浜湾における越波被災の要因と特性 — ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築 —

安田誠宏*・服部昌樹*・平石哲也**・
平山克也***・永井紀彦****・小川英明*****

要 旨

臨海部では、人々が快適に海に親しみ楽しむことができるような、付加価値の高い防波堤、護岸等の親水性施設が数多く建設されている。こうした臨海部における防護施設の設計には、従来より平均越波流量が許容値として用いられている。しかしながら、その推定精度は低く、実際には越波による災害が各地で発生している。さらに、護岸位置や港湾形状によって、越波による特性は大きく異なる。そのため、時間越波流量の予測式を用いて、各護岸毎に高精度な浸水予測をし、港湾施設の設計に反映させることが重要である。

越波現況を把握し、危険度を予知する手法としては、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）等の沖合波浪観測情報を用い、リアルタイムな越波予測をし、警報を発令する方法が考えられる。そこで本研究では、ナウファス波浪観測情報を入力条件として、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルを組み合わせて、より高精度な波浪変形計算をすることにより、護岸越波流量の推定を試みた。

2002年の台風来襲時に、久里浜湾内の被災護岸において越波観測を実施し、越波量の時間的な変動を計測することに成功した。この実測結果を用いることにより、今回構築した予知法の検証をしたところ、推定値は観測値とよく一致し、本手法の有用性が確認された。さらに、ブシネスクモデルの計算結果を細かく抽出することにより、港湾内の各護岸位置における越波流量の違いを詳細に求め、被災要因と特性を説明できる結果を得ることができた。

本予知法は、護岸法線の配置や形状の特性に応じた、区間毎の合理的な越波推定が可能である。さらに、沖合にナウファス観測点が設けられている他の港湾についても適用可能であり、入力条件として既往最大値や極値統計解析結果を用いることにより、越波の危険度を事前に予知し、港湾施設の設計に反映させることができる。

キーワード：時間越波流量，ナウファス，エネルギー平衡方程式法，ブシネスクモデル

*海洋・水工部波浪研究室

**海洋・水工部波浪研究室長

***海洋・水工部主任研究官

****海洋・水工部海象情報研究室長

*****海洋・水工部海象情報研究室

〒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: hiraishi@pari.go.jp

Damage Cause and Characteristics of Wave Overtopping in Kurihama Bay - Establishment of the Estimation Method for Wave Overtopping Damage Applying NOWPHAS -

Tomohiro YASUDA*
Masaki HATTORI*
Tetsuya HIRAISHI**
Katsuya HIRAYAMA***
Norihiko NAGAI****
Hideaki OGAWA*****

Synopsis

A lot of important infrastructures are built just behind the seawall line such as port and harbor facilities, airport, roads, railroads and houses. Mean wave overtopping quantity used to be applied as an acceptable value for the design of the coastal protection facilities. However, the damage actually occurs in various places because the estimation accuracy is not so high. The accuracy estimation of time varying wave overtopping quantity at seawall line should be established.

The paper proposes a new estimation method for wave overtopping damage in a harbor applying wave data observed in an offshore wave observation network NOWPHAS. In the system, the wave profile at seawall line is derived from the computation of non-linear wave transformation in shallow water. The Boussinesq equation model is applied in combination with the energy balance equation model to the numerical model. A wave overflow model is employed to obtain the overtopped water volume from the wave profile at the seawall.

The estimated wave overtopping rate is compared with the field observation data in a typhoon attack in Kurihama Bay. The good agreement between the measured and estimated wave overtopping rate demonstrates the applicability of the system to another port and harbor using highest observed wave data of NOWPHAS for practical warning and design tools.

Key Words: time varying wave overtopping quantity, NOWPHAS, energy balance equation model, Boussinesq equation model

* Researcher of Wave Division, Marine Environment and Engineering Department
** Chief of Wave Division, Marine Environment and Engineering Department
*** Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department
**** Chief of Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
***** Researcher of Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution
Phone: +81-46-8445042 Fax: +81-46-8413888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

目 次

要 旨	193
1. まえがき	197
2. 久里浜湾における越波災害	197
3. 観測対象とした台風の特徴	201
3.1 2002年の台風の特徴	201
3.2 台風0206号および0221号	201
3.3 全国港湾海洋波浪情報網ナウファス	201
3.4 波浮およびアシカ島における観測波浪	202
3.5 久里浜湾における観測潮位	202
4. 久里浜湾における越波観測	203
4.1 護岸高水準測量	203
4.2 越波流量評価手法	203
4.3 ビデオカメラによる観測	203
4.4 オンサイト越波計による観測	203
4.5 オンサイト越波計の現地適用性	204
5. 沖合波浪観測点の相関	205
5.1 波浮およびアシカ島における観測データの比較	206
5.2 エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算	208
5.3 台風時における波浮およびアシカ島の相関	208
6. 沖合波浪情報を用いた護岸越波の推定	209
6.1 ブシネスクモデルによる波浪変形計算	209
6.2 越波流量算定結果	213
6.3 越波観測結果との比較	214
7. 久里浜湾における越波特性	214
7.1 標準部の越波特性	214
7.2 隅角部における波高増大	216
7.3 期待越波流量の推定手順	217
8. 結論	218
9. あとがき	219
謝辞	219
参考文献	219
記号表	220

1. まえがき

ここ数十年間のエネルギー消費の増大に伴い、地球の温暖化が問題となっている。地球上の平均気温が上昇すれば、両極地方の氷河の融解を招くのみでなく、温度上昇による海水の膨張も加わって平均海面は上昇する。海面が次第に上昇すれば、世界の都市の多くが位置する沖積平野のかなりの部分が、いずれは人の住めない浅い海になってしまうと予想されている。短期的な問題としては、近年の台風大型化および来襲頻度の増加、集中豪雨の激化などに、地球温暖化の影響が少なからず関係しているという説がある。沿岸においては、大型化した台風の最大風速の増大、中心気圧の低下により、高潮の生じやすい状況が発生しており、越波が助長されることは十分に考えられる。

我が国の臨海部には人口・資産が集中しており、海拔1m以下の地域に居住する人口は、大都市圏を中心に475万人にも上っている。港湾施設・道路・鉄道・家屋などの重要な施設は、護岸のすぐ背後に設置されていることが多い。さらに近年では、沖合における空港建設プロジェクトがいくつも進められている。また、海岸法が改正され「公衆の海岸の適正な利用の確保」という項目が加えられたことにより、人々が快適に海に親しみ楽しむことができるような、付加価値の高い防波堤、護岸等の親水性施設が数多く建設されている。これらの施設の安全管理には、越波のリスクおよび現況を正しく把握して、施設供用の中止や護岸背後から避難する必要性の有無を適切に判断することが、管理者に強く求められている。

港湾施設の設計においては、従来より平均越波流量が許容値として用いられている。しかしながら、その推定精度は低く、実際には越波による災害が各地で発生している。さらに、護岸位置や港湾形状によって、越波の特性は大きく異なる。そのため、時間越波流量の予測式を用いて、各護岸毎に高精度な浸水予測をし、港湾施設の設計に反映させることが重要である。

越波現況を把握し、危険度を予知する手法としては、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）等の沖合波浪観測情報を用い、リアルタイムな越波リスクの予測をし、警報を発令する方法が考えられる。そこで本研究では、ナウファス波浪観測情報を入力条件として、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルを組み合わせ、より高精度な波浪変形計算をすることにより、護岸越波流量の推定を試みた。ブシネスクモデルの計算結果を細かく抽出することにより、港湾内の各護岸位置における越波特性を詳細に求めることが可能になる。

2002年の台風来襲時に、久里浜湾内において高潮が発生し、越波による浸水被害が発生した。その際、被災護岸において越波観測を実施し、越波量の時間的な変動を計測することに成功している。この実測結果を用いることにより、今回提案した予知法の検証をする。

2. 久里浜湾における越波災害

2002年に台風0206号(T0206)および0221号(T0221)が、図-1に示すような経路で来襲し、関東地方に上陸、通過した。その際、三浦半島の久里浜湾にある独立行政法人港湾空港技術研究所（以下、港空研）において、越波による浸水被害が発生した。また、2001年に台風0111号(T0111)および台風0115(T0115)が来襲した際も、同様に越波災害が発生している。

久里浜湾は東京湾口に位置しており、図-2に示したような地形である。港空研は海に面しているが、数年前までは越波による被害はほとんど起きていなかった。しかしながら、2001年と2002年と2年続けて被災しており、久里浜港において実施されている港湾整備事業および航路浚渫工事が、少なからず関係していると推測される。

T0115号時には、写真-1に示すように、港空研検潮所の護岸が越波により完全に崩壊した。T0221号時には、越波により護岸背後の裏込め土は吸い出され(写真-2左上)、道路には氾濫水によって運ばれた土砂や礫が堆積した(写真-2右上)。越波の衝撃で護岸上にあったプレハブ施設は破壊され(写真-2左下)、護岸パラペット部にも亀裂が入った(写真-2右下)。検潮所の護岸は改修がなされていたため、崩壊には至らなかったが、高潮のピーク時には護岸の余裕天端高はほとんどなくなり、写真-3のような越流状態で浸水していた。

港空研における護岸形状による被災特性の違いを検証する。図-3は港空研護岸の平面図である。また、図-4にはA工区を基準とした波向に対する護岸法線の角度を示している。各工区の延長 L 、天端高 h 、前面水深 h 、護岸法線の角度 θ および台風時の被災の有無を、表-1にまとめて示す。

久里浜湾における平常時の主波向は、A工区とD～F工区にほぼ垂直であり、これらの区間における護岸天端高は高く、現況高さ(C. D. L.)は4m以上である。これらの地点においては、ある程度波が高くても越波にまでは至らない。しかしながら、T0221号時には、D～F工区における打ち上げ高は5～6mにも達し、越波で背後施設が破壊されており、越波量もかなり多かったと考えられる。

今回、観測を実施した護岸はH-2工区にあたる。H工

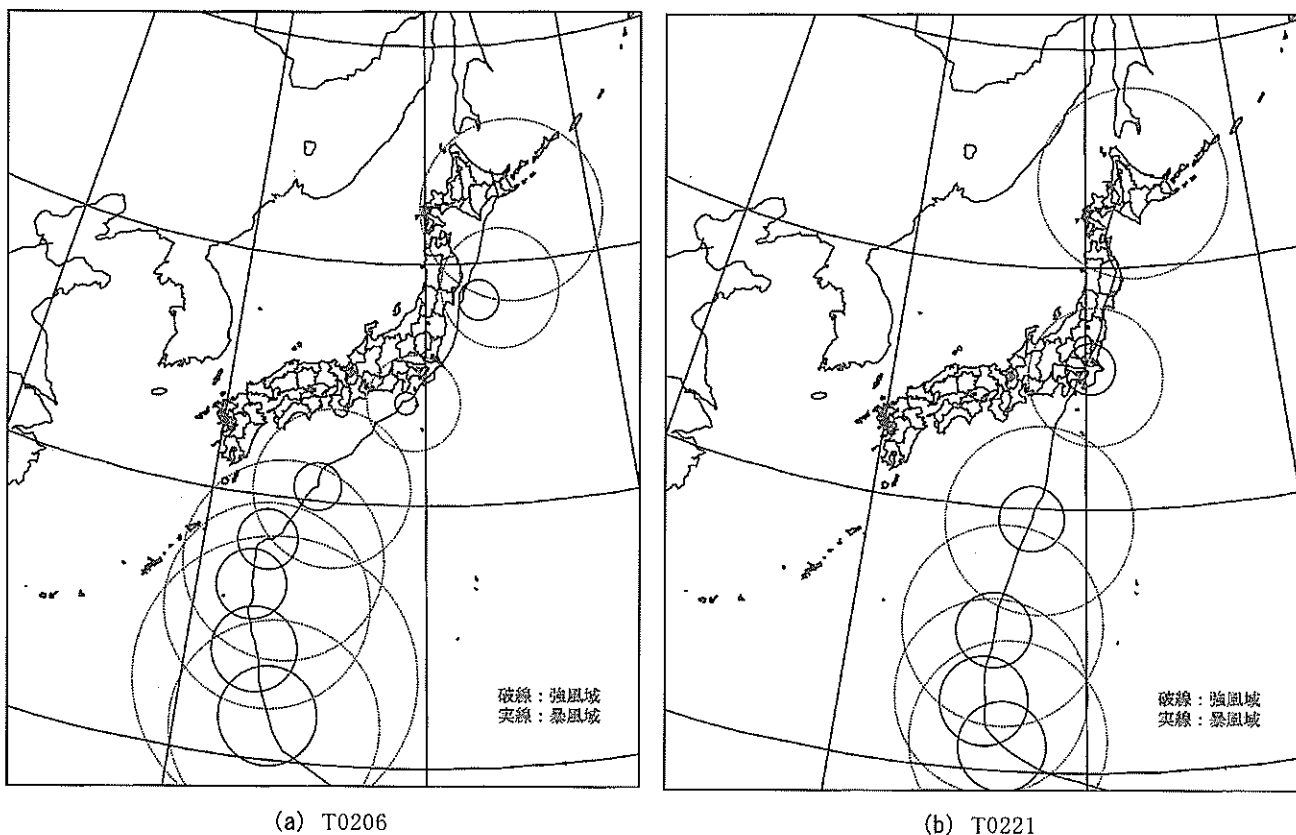


図-1 台風経路図 [気象庁発表資料より転載]

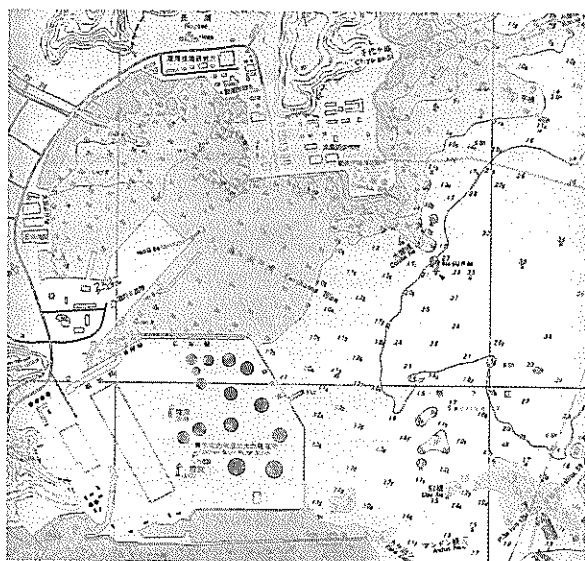


図-2 久里浜湾深淺図

区は斜め入射になるため、天端高は3.6mでやや低く設計されている。平石ら(1996)にも述べられているように、単一方向波に比べて、斜め入射波による越波流量は小さくなるはずである。しかしながら、越波による被害が頻発しているのはこの護岸である。台風時には、この護岸に向かう波もみられたし、周期も10s以上とかなり長かった。こうした問題を抱えている護岸については、より

表-1 各工区的设计諸元と被災の有無

工区	$L(m)$	$h_1(m)$	$h_2(m)$	$\theta(^{\circ})$	0206	0221
A	41.32	4.50	1.1	0	×	×
B	20.00	4.28	1.0	52.5	×	×
C	79.30	3.77	1.0	52.5	×	○
D	51.75	3.67	1.1	17.1	×	○
E	68.25	3.96	1.1	17.1	×	○
F	26.31	4.40	1.0	17.1	×	○
G	60.00	4.45	1.0	76.45	×	○
H	88.38	3.60	3.0	76.45	○	○
I	70.06	3.67	3.0	16.44	○	○
J	17.45	3.63	3.0	59.94	×	×

(C. D. L. 基準)

詳細な越波特性を検討をした上での設計が必要といえる。

G工区は隅角部であり、写真-4のように越波を低減させるための消波ブロックが一部積んである。しかしながら、T0221号時には高潮により海面がかなり高くなっていったため、消波ブロックはほとんど機能せず、逆に打ち上げ高を助長して、越波を増大させていた。その結果、コンクリート護岸法面に亀裂が入り、パラベットの一部分が剥離した。

次章以降において、越波観測結果と今回構築した予知法により、護岸の被災特性を検討する。

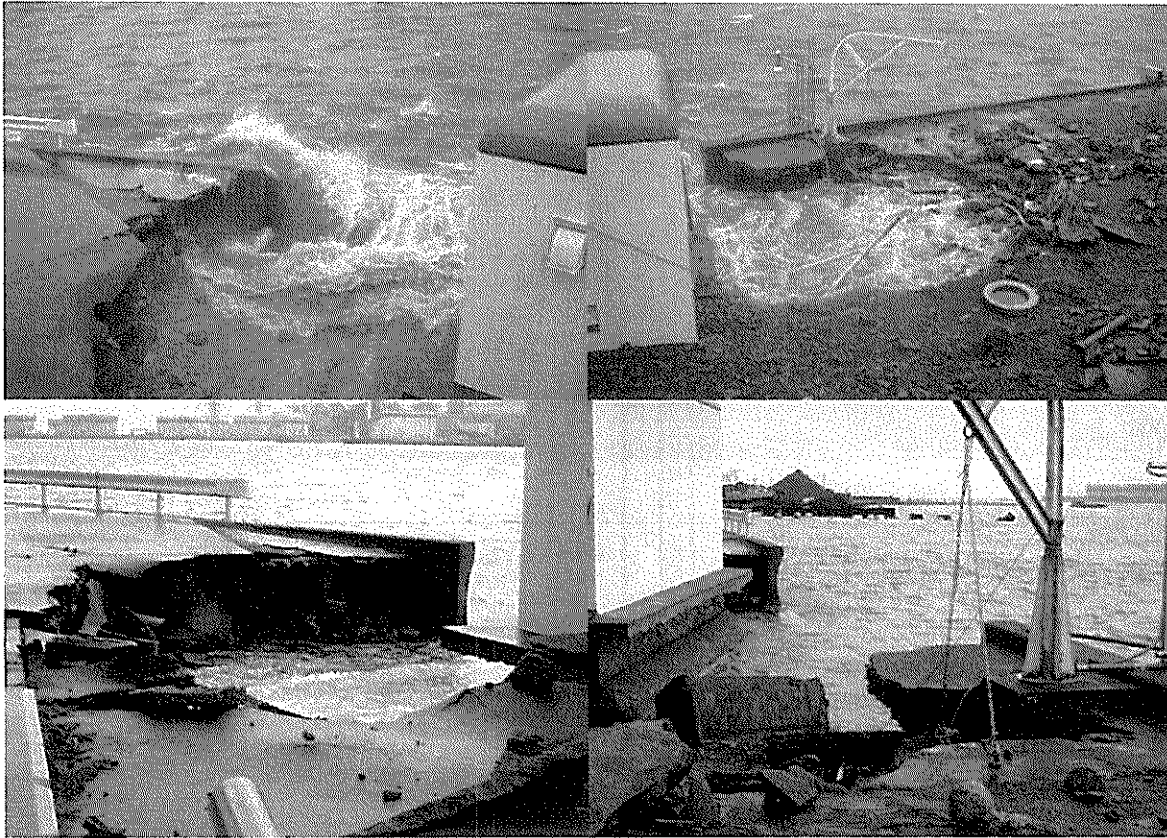


写真-1 台風0115号による被災状況（港湾空港技術研究所内）

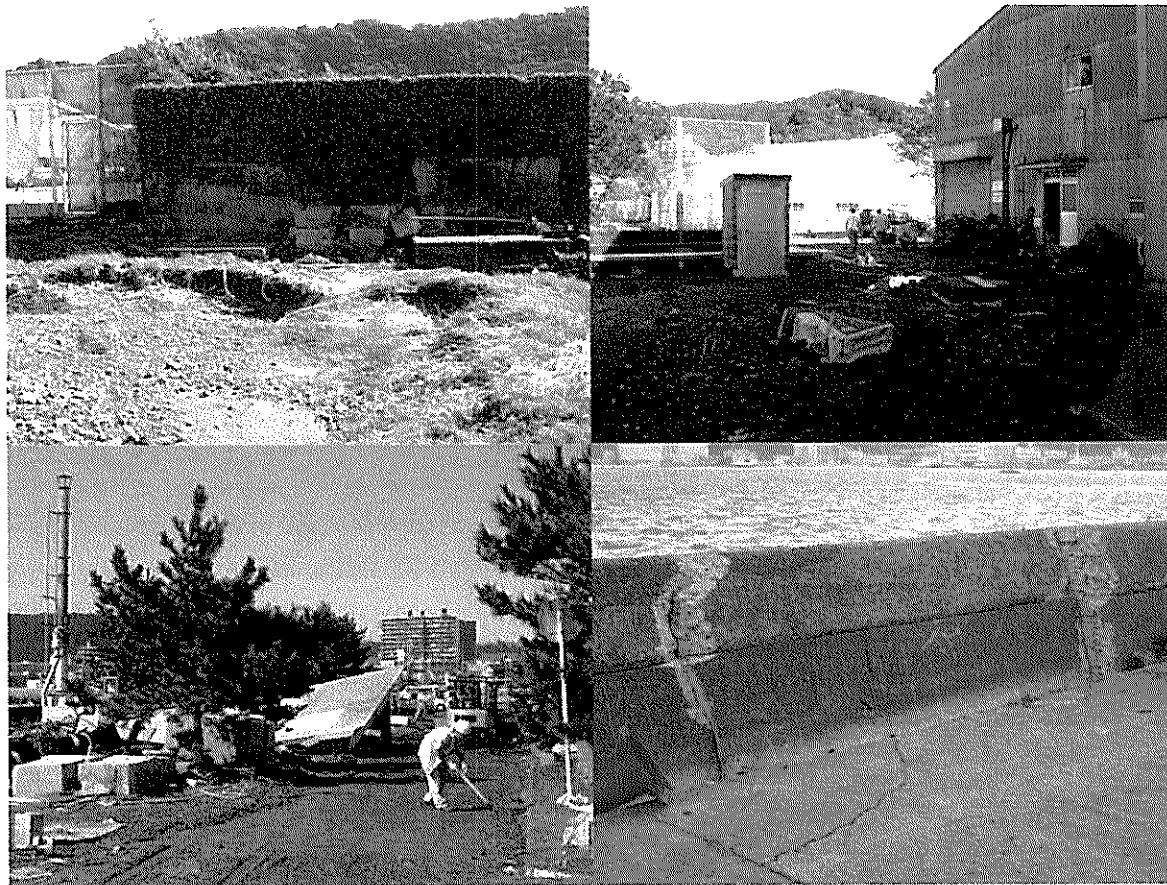


写真-2 台風0221号による被災状況（港湾空港技術研究所内）

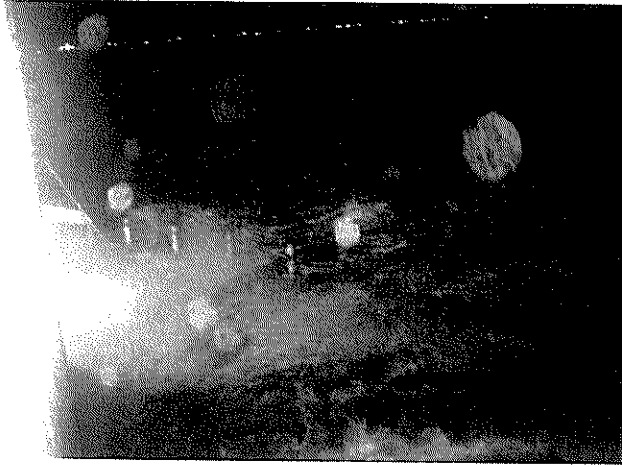


写真-3 高潮時の越流浸水状況



写真-4 隅角部 (一部ブロック積み)

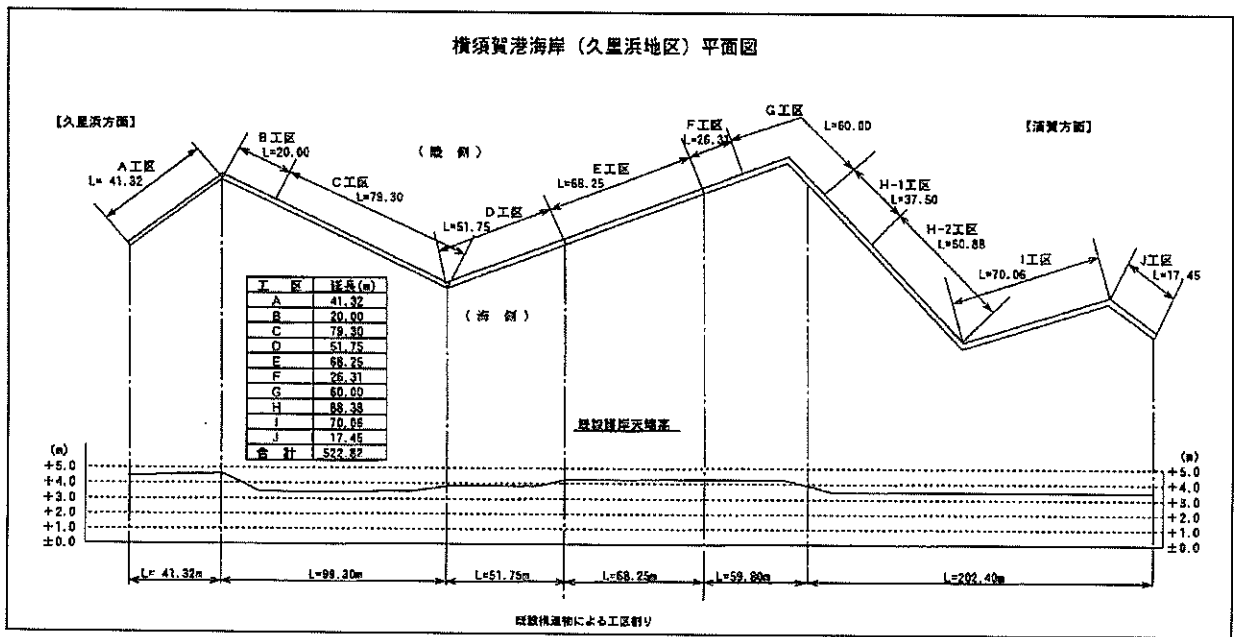


図-3 港空研護岸平面図

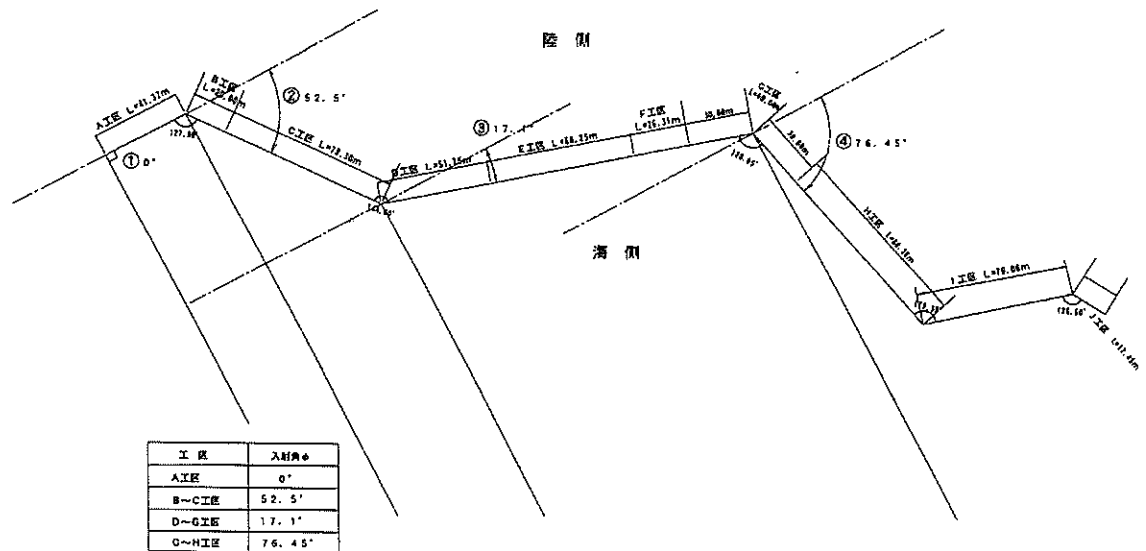


図-4 波向に対する護岸法線の角度

3. 観測の対象とした台風の特徴

3.1 2002年の台風の特徴

2002年に発生した台風は26個で、年間発生数の平均値(26.7個)とほぼ等しかった。また、上陸した台風の数も平年(2.6個)に近い、3個(第6号, 第7号, 第21号)であった。関東地方に上陸した数は3個で、1951年以降初めてであった。本土への接近数は平年(5.2個)より多い8個で、南西諸島にも平年(7.2個)よりやや多い9個であった。

発生海域の位置は東に偏り、1951年以降最も東よりの経度であった。さらに、低い緯度を西進して一生を終える台風が少なかった。これらは、2002年の夏以降本格化してきた、エルニーニョ現象による影響と考えられる。

3.2 台風0206号および0221号の特徴

台風0206号は大型で非常に強い台風で、本州南岸を勢力を維持しながらゆっくりと北東に進み、7月10日23時30分頃、伊豆大島付近を通過、11日0時30分頃、千葉県富津市付近に上陸した。その後、勢力を弱めたものの、関東・東北地方沿岸を北上し、7月11日21時頃、北海道に再上陸したのち、釧路市近海で温帯低気圧に変わった。台風の進路にあたる中部・関東・東北では、梅雨前線の影響も重なったため、各地で大雨となり、河川の増水や内水による甚大な被害が発生した。和歌山県の白浜町では、越波により臨海道路において全面通行止めの規制がなされた。東京都三宅島においては、高波と越波により護岸が倒壊する被害も発生した。

一方、台風0221号は2002年10月1日20時頃、神奈川県川崎市に上陸した。その後、東北・北海道を足早に縦断し、各地に大きな被害をもたらした。上陸時の中心気圧は960hPaで、関東地方に上陸した台風では、戦後2番目に低い気圧であった。静岡県と千葉県では、護岸や離岸堤などの海岸保全施設が被災した。さらに、御前崎や大磯、九十九浜においては、越波による背後道路の通行規制がなされた。また、神奈川県江ノ島では、防波堤を越えた高波にさらわれて1名の方が行方不明になった。東京湾においては、台風による高潮が発生し、沿岸では越波が観測され、浸水被害が発生した。

3.3 全国港湾海洋波浪情報網ナウファス

全国港湾海洋波浪情報網ナウファス(NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)は、国土交通省と沖縄総合事務局の港湾部局が協力して観測し、港空研が集中的に処理するとともに、波浪観測年報として取りまとめを行っている波浪観測シ

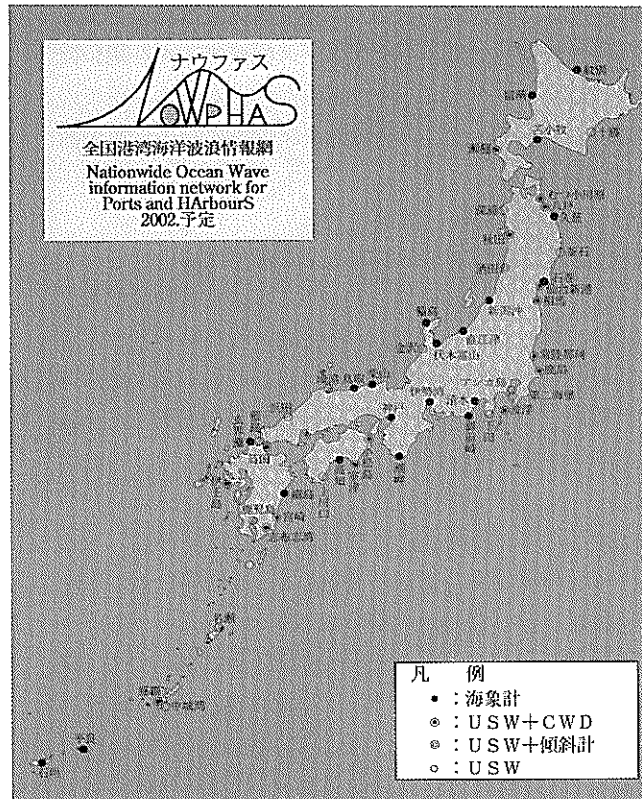


図-5 ナウファス波浪観測地点

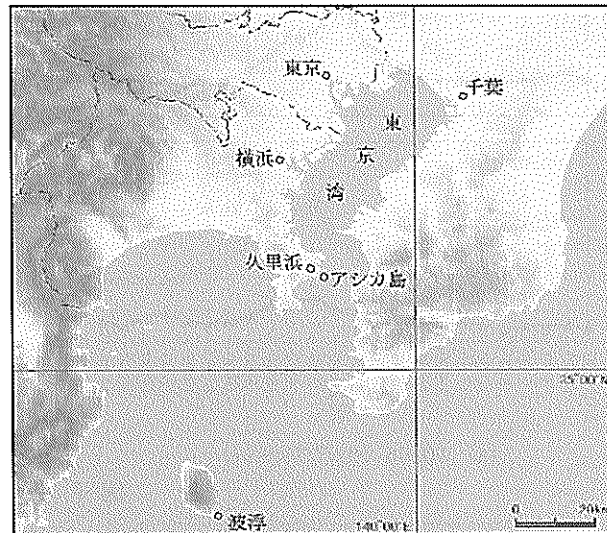


図-6 波浮およびアシカ島波浪観測点

ステムである。2002年現在、図-5に示す全国52地点において観測されている。処理解析されたデータは、各港での港湾事業における計画・設計の諸条件、および海上工事などの施工計画の作成などに利用されるとともに、海岸事業に関しても高波・高潮から暮らしを守る海岸保全施設の設計やウォーターフロントの開発に幅広く利用されている。

本研究における越波観測場所は、久里浜湾内の港空研の護岸である。波浪変形計算を行い護岸越波流量を推定

するための入力条件として、伊豆大島の波浮および久里浜沖のアシカ島におけるナウファス観測データを用いた。また、潮位データには、久里浜湾内の港空研検潮所での観測データを用いた。久里浜湾、波浮およびアシカ島観測点の位置を図-6に示す。

3.4 波浮およびアシカ島における観測波浪

検討対象とした台風は、2002年7月11日未明に千葉県富津市付近に上陸し、関東・東北地方沿岸を北上した台風0206号と、2002年10月1日20:00頃に神奈川県川崎市付近に上陸し、関東から東北・北海道地方を縦断した台風0221号である。各台風時の波浮とアシカ島における波浪観測データを図-7に示す。

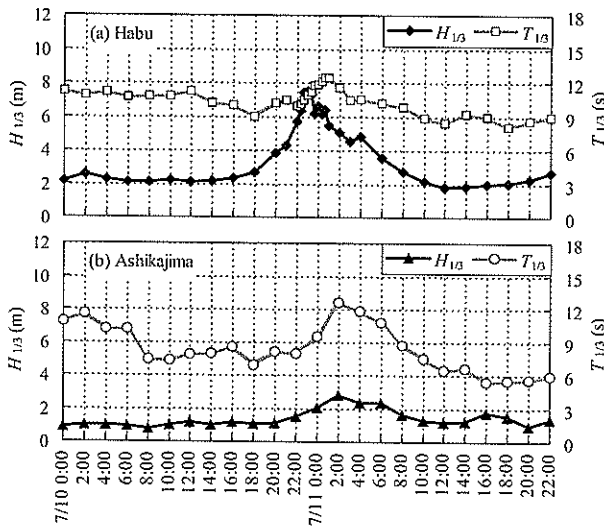
台風0206号の波浮における有義波高の最大値は、7/10の23:00に観測され、 $H_{1/3}=7.50\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.9\text{s}$ であった。アシカ島では7/11の2:00の観測値が最大であり、 $H_{1/3}=2.79\text{m}$ 、 $T_{1/3}=12.6\text{s}$ であった。台風0221号については、波浮において10/1の19:30頃ケーブルが断線してしまった

ため、観測記録は19:20までしかない。19:20以降、波高がさらに上昇した可能性もあるが、今回は19:20の $H_{1/3}=10.9\text{m}$ 、 $T_{1/3}=13.5\text{s}$ を最大値とする。また、アシカ島では10/1の22:00に、最大値 $H_{1/3}=5.64\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9.9\text{s}$ が観測された。

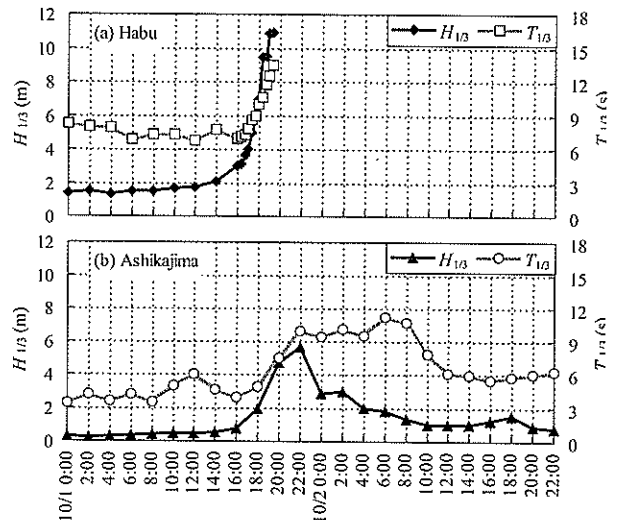
3.5 久里浜湾における観測潮位

久里浜湾の潮位観測は、港空研に設置されている検潮所で実施されている。久里浜湾における天文潮、観測潮位および高潮偏差を図-8に示す。

台風0206号および台風0221号のいずれにおいても、台風通過時の気圧低下により、大きな高潮偏差が発生している。台風0206号では、満潮に向かう0:00で偏差が0.42mで最大となり、7/11の6:00頃まで0.3m程度の高潮が継続している。台風0221号については、台風の気圧が非常に低く、観測点のすぐ近くを通過したこともあり、高潮偏差は台風0206号よりもさらに大きく、最大で0.62mにもなった。

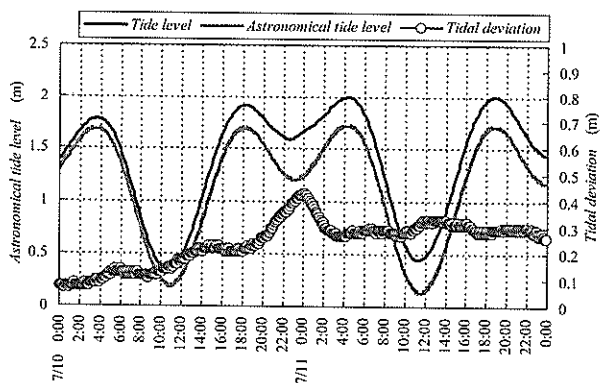


(a) T0206 (02/7/10~11)

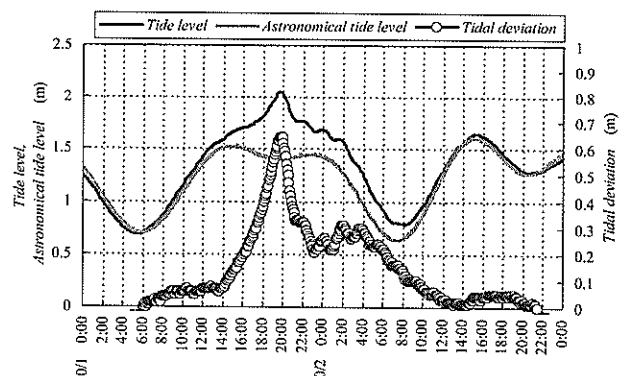


(b) T0221 (02/10/1~2)

図-7 観測波浪データ



(a) T0206 (02/7/10~11)



(b) T0221 (02/10/1~2)

図-8 久里浜湾における潮位および潮位偏差

4. 久里浜湾における越波観測

4.1 護岸高水準測量

越波観測の基礎データとして、港空研内の護岸高を調べるため、水準測量を実施した。測量結果による護岸天端高は図-9に示すとおりである。護岸高および法線方向の違いにより、①～⑫まで区分している。深浅図に基づき、護岸前面の水深、消波工の有無、岩礁による浅瀬などの地形情報も併せて記した。図中、 h_c はC. D. L.からの護岸天端高、 h はC. D. L.基準の水深をそれぞれ示している。

4.2 越波流量評価手法

護岸の余裕天端高と護岸前面の水位 η の時系列変化が求められると、平石ら(1996)にしたがって、護岸沿いの各点で次式によって越波流量を算出できる。

$$q(t) = \begin{cases} C_0 \sqrt{2g} (\eta(t) - h'_c)^{3/2} & : (\eta(t) \geq h'_c) \\ 0 & : (\eta(t) < h'_c) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 η は護岸を越流する波の高さ、 h_c は観測潮位で補正した潮位面からの護岸天端高、 t は時刻を示す。また、 C_0 は越流係数で、ここでは直立護岸に適するものとして、 $C_0=0.5$ とした。なお、斜め波による減衰効果は考慮していない。

4.3 ビデオカメラによる観測

台風0206号の観測には、デジタルビデオカメラを使用した。台風0206号来襲時の7/11、0:25～2:00頃までの約90分間、港空研検潮所前の護岸において越波観測を実施した。観測点は図-9における⑤の位置に相当する。撮影したデジタルビデオをコマ送りすることによって、護岸を越流する波の高さの時系列を記録した。観測時の越波状況を写真-5に示す。

ビデオ解析による護岸からの越波高、それから求めた1波ごとの越波量および10分間ごとの平均越波流量を、図-10に示す。これによると、1波の越波量が $2\text{m}^3/\text{m}$ を越える波が非常に多く、なかには $3\text{m}^3/\text{m}$ になるものもあった。また、平均越波流量は、観測開始から1:00過ぎまで増大し、最大値は $0.023\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ にもなった。観測期間前半の平均値は $0.018\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 、後半の平均値は $0.004\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ であった。許容越波流量の値として $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ が一般的に背後に民家が迫る護岸で採用されることを考えると、今回の越波は大きく、親水性護岸の許容越波流量よりも大きかった。

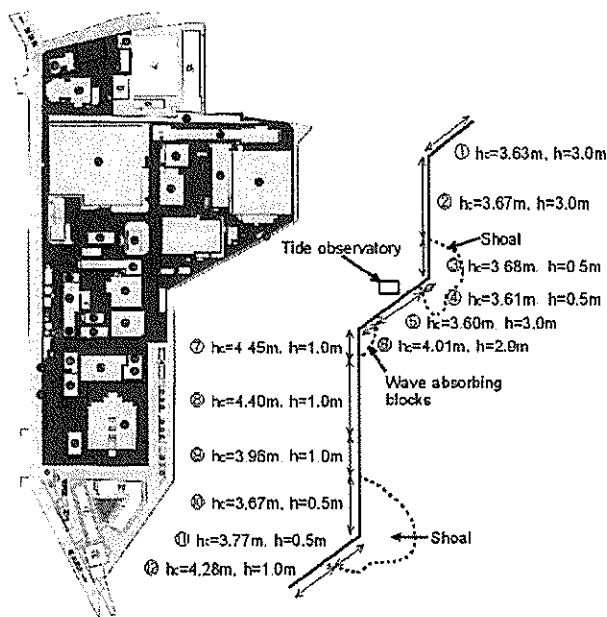


図-9 護岸天端高および前面水深



写真-5 台風0206号時の越波状況

4.4 オンサイト越波計による観測

台風0221号時には、永井ら(2002)が開発したオンサイト越波計を用いて観測を実施した。観測時の越波状況とオンサイト越波計の設置状況を写真-6に示す。

(1) 各越波観測機器の概要と越波流量算出方法

オンサイト越波計として用いた観測機器のうち、ステップ式越波計、集水槽およびビデオ撮影による観測について述べる。なお、ステップ式越波計と集水槽の設置状況は写真-6に示すとおりであり、断面図を図-11に示す。

a) ステップ式越波計

ステップ式越波計は、電極式センサーをとりつけた越波計であり、図-11の様に観測対象護岸上を越えた波が、測定桿のセンサー部に触れるのを感知し、越波高さを計測することができる装置である。台風0221号時には、護

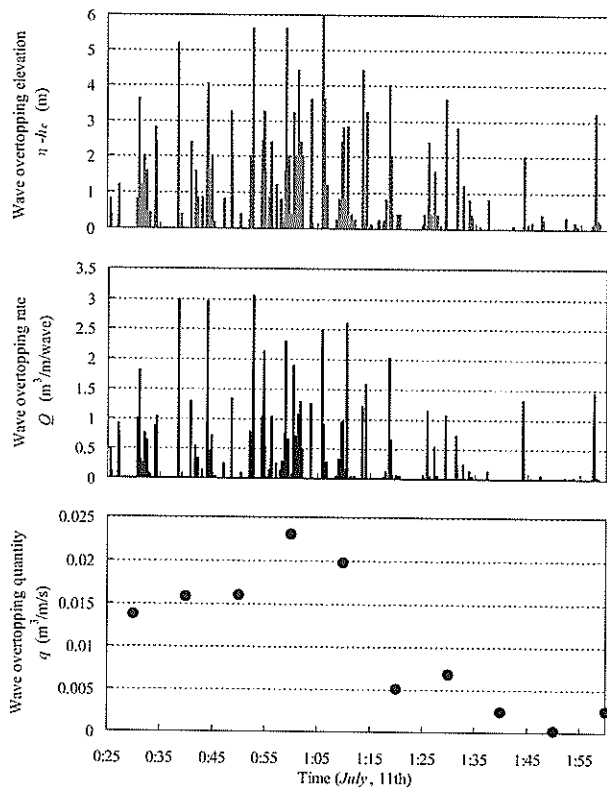


図-10 観測越波高，越波量および平均越波流量

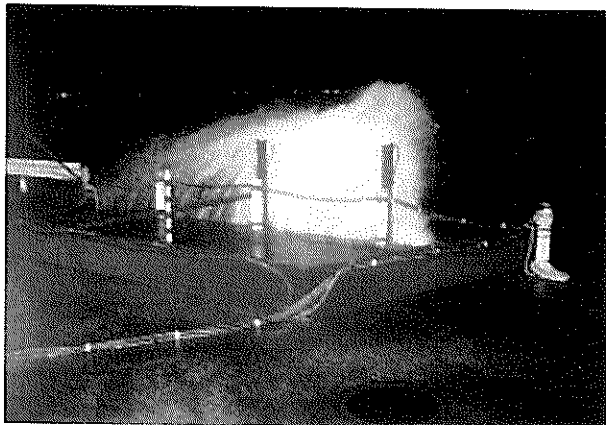


写真-6 台風0221号時の越波状況

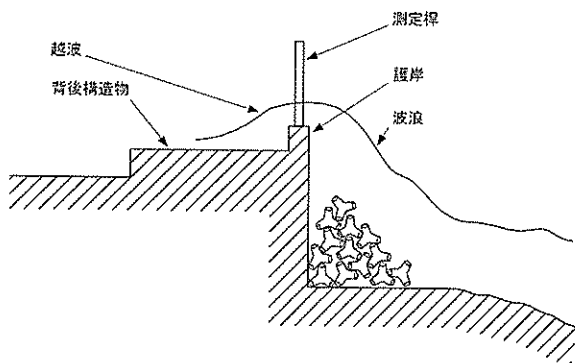


図-11 オンサイト越波計の断面図

岸法線に沿って、高さ110cmの越波計3本を2m間隔で設置した。また、センサーの計測時間間隔は0.2sである。

3本の越波計それぞれについて計測された越波高の時系列データを式(1)に代入することにより、越波流量を求めることができる。ただし、越波計の高さである110cmを越えた越波については感知できないため、今回は $\eta > 110\text{cm}$ となった場合の結果は解析対象外とした。

b) 集水槽およびビデオ撮影

集水槽は、容易に設置・撤去が可能な簡易式軽みぞ形鋼の水槽とした。写真-6に示したように、オンサイト越波計の背後に設置し、集水槽に溜まった越波量を計測するために、中央部に標尺を設けた。

オンサイト越波計を見渡せる背後の施設から、ビデオ撮影による観測を同時に実施した。オンサイト越波計の観測結果を検証するため、撮影した越波状況のビデオから、測定棒位置における越波のピーク高さを目視で読み取り、それをビデオ撮影(VTR)による越波高とした。

また、集水槽についても、集水槽内に貯まった水量が最大となったときに、中央部に設置した標尺高をビデオで読み取り、次式を用いて越波した波1波ごとの越波量を算出した。

$$Q = d \cdot A / \ell \tag{2}$$

ここで、 d は集水槽内の標尺高読取值(m)、 A は集水槽の面積(=17.3m²)、 ℓ は集水槽の間口長(=8m)である。

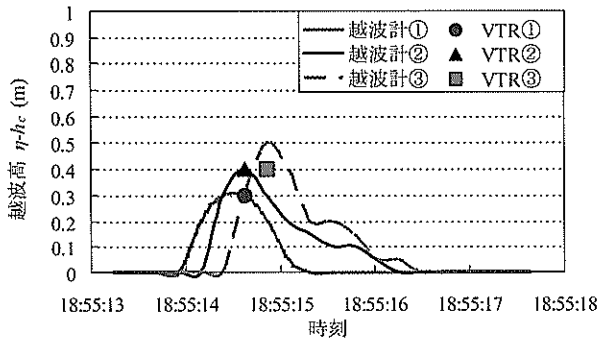
4.5 オンサイト越波計の現地適用性

(1) オンサイト越波計による観測結果

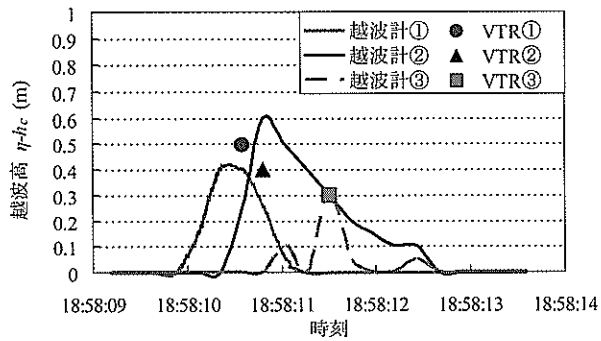
オンサイト越波計による観測結果と、ビデオ撮影および集水槽それぞれについて算出された結果を比較する。比較する項目は、測定棒位置における観測越波高、10分間ごとの平均越波流量である。比較検討の結果より、オンサイト越波計の現地適用性を評価する。

a) 観測越波高の比較

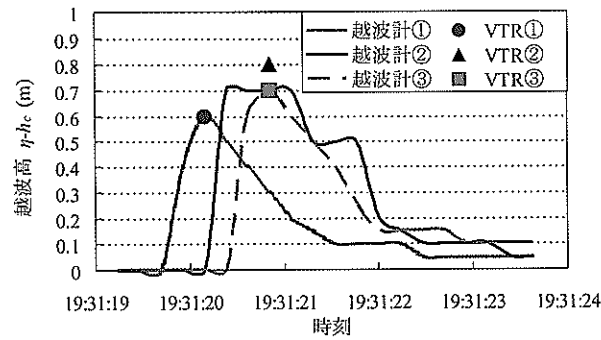
オンサイト越波計による観測越波高の変化を図-12に示す。沖側の越波計から順に①、②、③とし、VTRの値は測定棒位置におけるビデオ読み取り値である。いずれの図についても、沖側に設置した越波計から順に越波高のピークが計測されている様子がみとれる。この結果から、越波計に取り付けた電極式センサーは越波に対して確実に反応していたことがわかる。また、越波計とVTRそれぞれの越波高のピークは、時間的によく一致している。しかしながら、越波高のピーク値については、



(1) 10/1 18:55



(2) 10/1 18:58



(3) 10/1 19:31

図-12 オンサイト越波計による観測越波高

多少の誤差が生じた。これは、VTR値の読み取りの際に、純粋な越波高と飛沫部分の区別がつきにくいことや、逆に越波計の電極センサーが飛沫部分を感知してしまったことなどが要因として考えられる。

b) 観測平均越波流量の比較

オンサイト越波計による観測平均越波流量を図-13に示す。オンサイト越波計の平均越波流量は、3本の測定棒からそれぞれ求められた10分間の越波流量を平均したものである。また、図中には各測定棒で求められた越波流量の差を*印で示している。集水槽の平均越波流量は、式(2)を用いて求めた1波ごとの越波量の、10分間の平均値である。

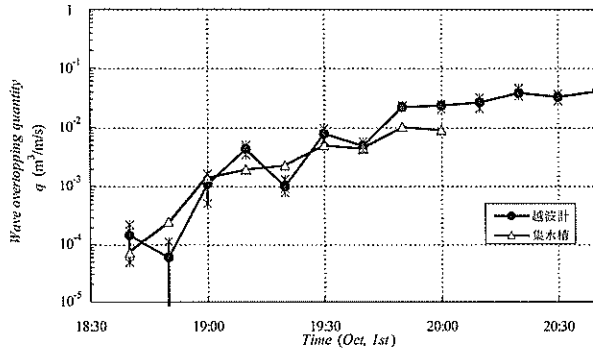


図-13 オンサイト越波計による観測平均越波流量

オンサイト越波計から得られた越波高を基に算出された越波流量と、ビデオ撮影による標尺高の目視読み取りから得られた越波流量を基に算出された集水槽の結果は、観測期間前半の越波量が小さかった時には、よく一致している。これは、飛沫による影響が少なく、センサーと目視の誤差が小さかったためと考えられる。しかしながら、越波が激しくなった後半には、飛沫による影響も大きくなり、誤差が大きく生じてしまう結果となった。なお、20:00以降は、集水槽の一部が破損して観測できなかった。

(2) オンサイト越波計の現地適用性

図-12および13からわかるように、オンサイト越波計による観測越波高、観測平均越波流量ともに、多少の誤差が生じてはいるが、他の直接的に目視で測定した結果と概ね一致している。したがって、今回の観測でオンサイト越波計の信頼性が確認され、本計測システムは現地において十分に適用可能といえる。今回解析対象から除いた、測定棒の高さを越えたものについては、波形を補完するなどのデータ処理をすれば、より正確な越波流量を求められると考えられる。これは今後の現地観測における課題である。

5. 沖合波浪観測点の相関

アシカ島での観測間隔は2時間であり、越波観測結果において最大値を示した時には、残念ながらアシカ島での波浪は観測されていなかった。たとえ両者の観測時間が一致していたとしても、アシカ島周辺の地形は浅瀬が集中しており、数値計算における入射境界とするには、地形が複雑すぎるという問題点がある。さらに、アシカ島観測点では方向スペクトルは収集されておらず、数値計算における入射波浪条件の設定は困難である。任意の波向きを設定することも可能だが、正確さに欠ける。

一方、波浮においては、海象計による20分毎の切れ目のない連続観測が行われており、波向きなどの波浪変形計算に必要なデータもすべて揃っている。また、今回のように、台風が関東地方に上陸する経路をとった場合、伊豆大島周辺海域での波向きは南となり、台風によって発達した波のエネルギーの大部分が東京湾に伝播することも十分に考えられる。こうしたことから、久里浜湾における越波観測時間に対応した波浪変形計算をする際に、入力条件を得るための手法のひとつとして、波浮の観測データを利用することが考えられる。そこで、波浮とアシカ島の相関を調べ、久里浜湾における越波を推定するために、波浮の観測データを用いることの妥当性を検討した。

5.1 波浮とアシカ島における観測データの比較

ナウファス観測データから、波浮については周期帯別および波向別の有義波高を、アシカ島については周期帯別の有義波高を、それぞれ取り出して比較する。台風0206号を図-14に、台風0221号を図-15にそれぞれ示す。なお、超音波式波高計によるデータの信頼性が低かった時間帯については、水圧式波高計によるデータ補足をしている。

図-14によると、波浮において波が発達するにつれて、8.0~9.8s、10.7~14.2sのものが、他の周期帯の有義波高に比べて、かなり大きくなっていることがわかる。さらに、16.0~25.6sの長周期成分の有義波高が急激に増大している。波向きは台風の接近時には、SSWであったものが、波高の増大と共にSに近づいており、短周期成分のものを除いて、ほぼ同じ波向きを示している。一方、アシカ島においては、有義波高の増大と共に10.7~14.2sの周期帯の波高が大きくなり、16.0~25.6sの長周期成分の増大もみられる。これは、波浮と同様の傾向である。

図-15の台風0221号については、台風が非常に速く、勢力も非常に大きかったため、波高の増大も急である。その際の波浮での周期帯別波高は、水圧式波高計による補足データによると、4.3~7.5s、8.0~9.8sおよび10.7~14.2sの周期成分のものが発達傾向にある。しかしながら、18:00以降、詳細な観測結果は得られておらず、残念ながら断定はできない。一方、アシカ島において波高が増大している時には、4.3~7.5s、10.7~14.2sの周期帯波高が比較的大きく、32.0s以上の長周期成分を除いて、いずれも同様に増大している。波向きに

ついては、接近前はSEであったものが、通過時には、台風0206号の時と同様に、波高の増大と共にSに近づいている。

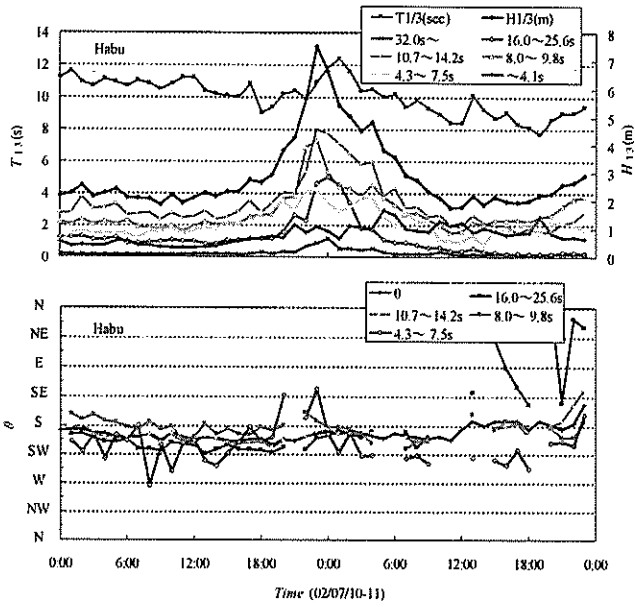
今回観測した台風だけでは、波浮での観測データが不十分で2点間の相関をはっきりと見出せなかったため、関東地方に上陸した台風として、2001年の台風0111号および0115号についても同様の検討をすることにした。これらの台風の経路は図-16に示すとおりであり、いずれの台風も全国的に大きな被害を及ぼした。特に、台風0115号によって、関東地方では海岸および港湾施設が被災し、港空研においても、今回の越波観測地点の護岸が越波により写真-1のように完全に崩壊した。これらの台風時の周期帯別および波向別の有義波高を、図-17および18に示す。

図-17に示した、台風0111号時の波浮において、波高の増大と共に、4.3~14.2sの周期帯の増大がみられ、アシカ島でも同様の傾向がみられる。その時の波向きは、SEからSに近づいており、周期帯による違いはほとんどない。また、波浮、アシカ島のいずれの観測点においても、周期16.0s以上の長周期成分の発達は見られない。

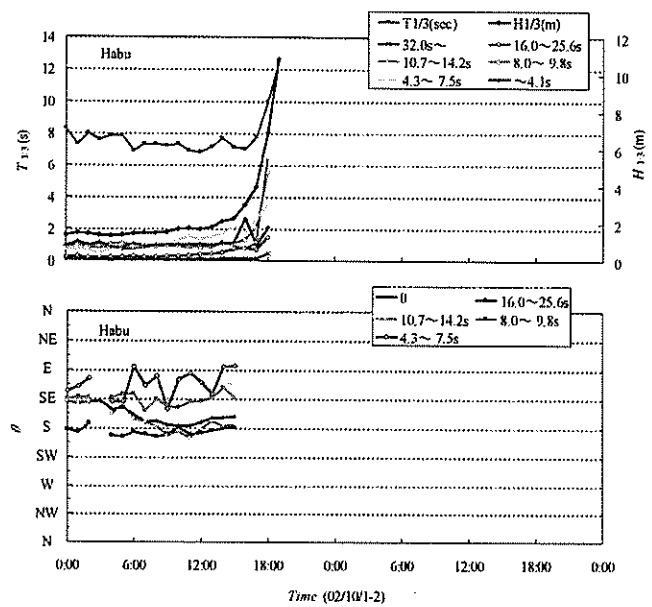
図-18の台風0115号時については、波浮では9/10の未明から5~6mの高波浪が継続的に観測され、周期帯別波高をみても、4.3~14.2sの成分が卓越している。しかしながら、アシカ島にはその影響はほとんど出しておらず、相関はほとんどみられない。その時の波向きは、図-16(b)の台風経路が北東方向に一直線であることから予想されるが、SE~SSEでほぼ一定である。その後、9/11の早朝になり、波浮における波高が増大し、波向きがSに近づくとつれ、アシカ島においても波高の増大と共に、4.3~14.2sの周期帯波高が卓越するようになり、その相関は高くなる。

これらのことから、台風が関東地方に接近もしくは通過する際には、波向きがS方向になり、波浮で発達した高波浪が東京湾口のアシカ島に到達するといえる。また、台風0221号のように非常に速い速度で通過する場合を除いては、波浮とアシカ島の観測波浪がピークをとる時刻にある一定の時間差があり、発達した周期帯についても相関がみられた。したがって、台風接近時の波向きがSの場合に限り、波浮の観測値を波浪変形計算に用いることで、アシカ島周辺の波を推定できると考えた。

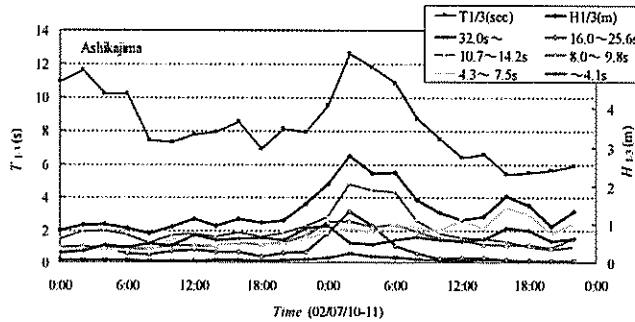
湾外の広領域において、適用可能な波浪変形計算手法としてエネルギー平衡方程式法があり、この手法を用いて波浮およびアシカ島の相関を検討する。



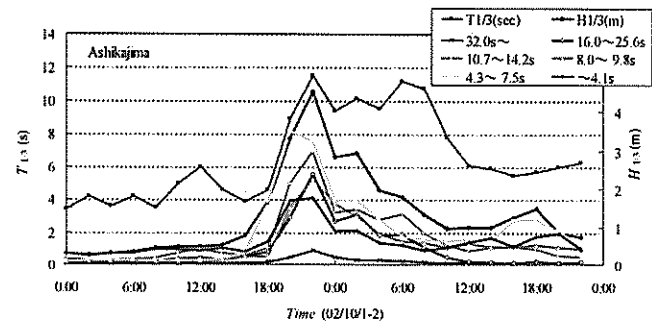
(a) 波浮における周期帯別および波向別有義波高



(a) 波浮における周期帯別および波向別有義波高



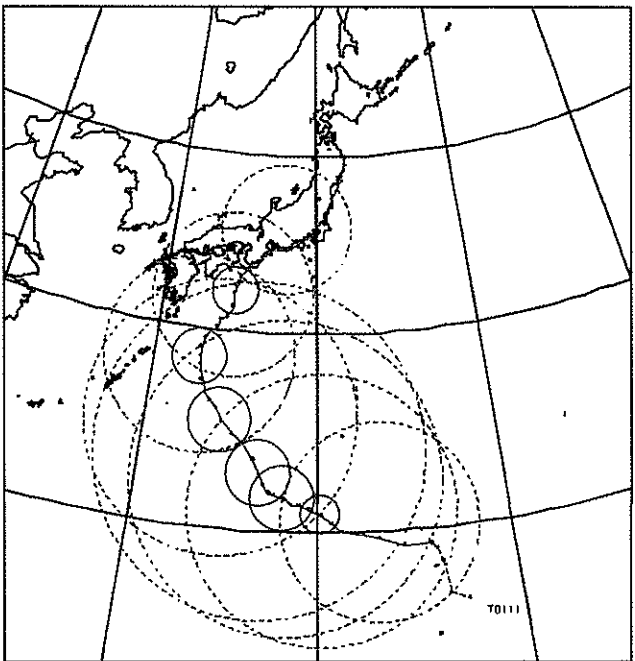
(b) アシカ島における周期帯別有義波高



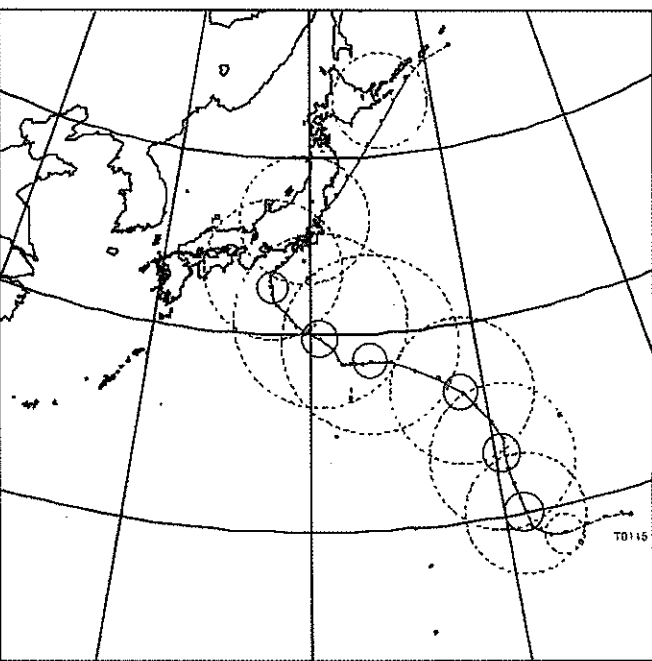
(b) アシカ島における周期帯別有義波高

図-14 台風0206号 (02/7/10~11)

図-15 台風0221号 (02/10/1~2)

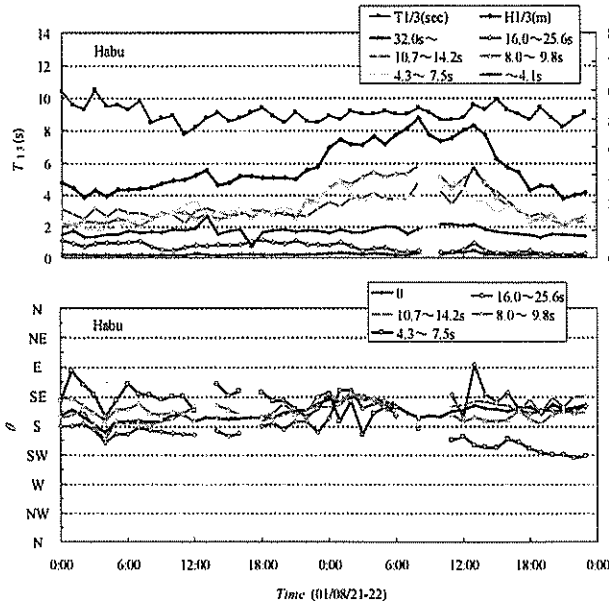


(a) T0111

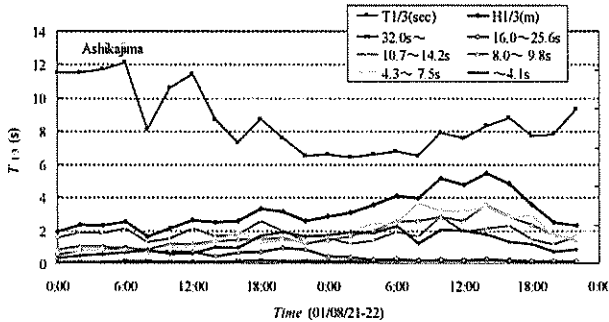


(b) T0115

図-16 台風経路図 [気象庁発表資料より転載]

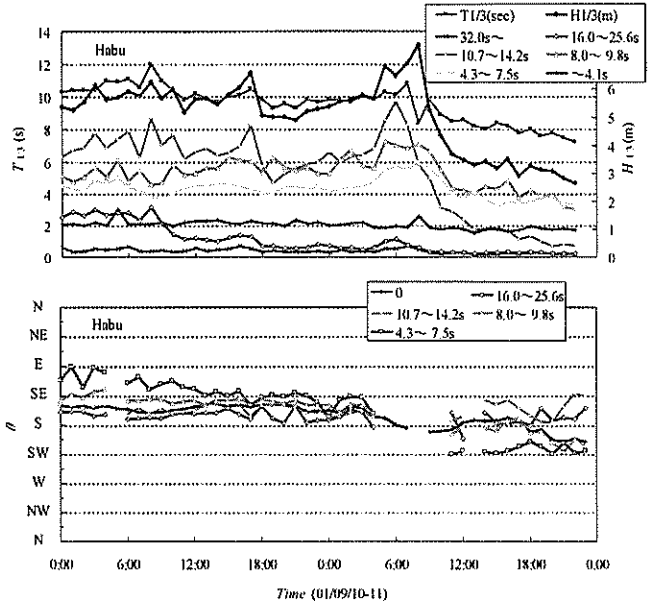


(a) 波浮における周期帯別および波向別有義波高

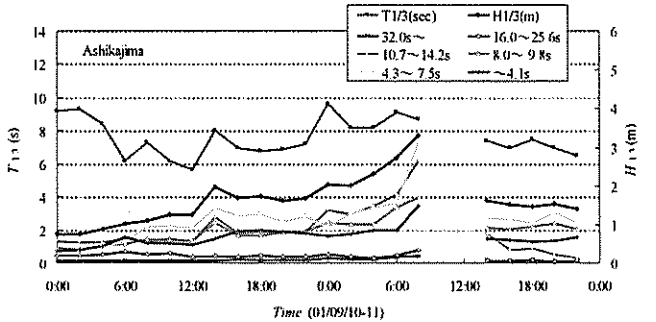


(b) アシカ島における周期帯別有義波高

図-17 台風0111号 (01/8/21~22)



(a) 波浮における周期帯別および波向別有義波高



(b) アシカ島における周期帯別有義波高

図-18 台風0115号 (01/9/10~11)

5.2 エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算

港外の波浪変形計算には、間瀬ら(1999)が提案した回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた、港湾空港技術研究所プログラムライブラリP025「波浪変形計算システムプログラム(改良版) Ver. 2.2R3」を使用する。

本プログラムは、沿岸域または浅海域における沖波が、陸域に進行する際に受ける屈折、浅水変形、回折、反射、砕波等の影響を考慮した波浪変形計算と港内波高分布計算を、統一的に計算するシステムである。沿岸域における波浪変形計算(L048P)、浅海域における不規則波の変形計算(L011P)および港内波高分布計算(L023P)から構成されており、今回は特にL048Pによる計算を行う。

水深・港形データの設定には、データベースA001「水深データ入力支援プログラム Ver. 3.0」を用いた。格子水深データ、境界条件および計算条件などの詳細な設定方法については、パソコンライブラリマニュアル(P025)(2000)を参照されたい。

5.3 台風時における波浮およびアシカ島の相関

波浮からアシカ島まで、波浪変形計算システムプログラムにより計算を行う。計算領域および格子水深データを図-19に示す。波浮からアシカ島までの領域分割数は2つであり、アシカ島周辺の格子間隔を25m、波浮周辺を50mとした。また、アシカ島周辺の領域を詳細にした場合の効果、およびネスティングによる影響を検討するために、領域分割数を6つとした場合についても同様の計算を行った。アシカ島周辺の格子間隔を10mとし、領域がひとつ大きくなるにつれ、格子間隔を倍にする必要があるため、波浮周辺では320mになる。波高、周期、波向および潮位以外の計算条件は、表-2に示すとおりである。波向きは、波浮においてSとして固定し、外領域の下辺から直角に波が入射するものとする。

波浮における観測値を入力条件として、波浪変形計算結果を、図-20に示す。これによると、ネスティングおよびアシカ島周辺の格子間隔による影響はほとんどなく、波高、周期および波向のいずれについても、計算結果は

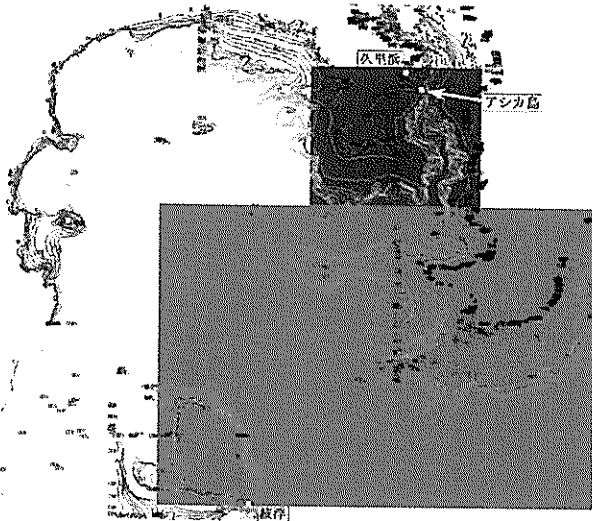


図-19 波浮～アシカ島の計算領域および格子水深データ

表-2 P025の計算条件

周波数分割数	波向分割数	範囲(°)	S_{max}
10	20	-10~+10	25

ほぼ同じ値になっている。また、波浮から久里浜湾までの直線距離は約60km、波浮におけるピーク時の観測波浪の周期は約10~12sであったことから、波浮からの波が久里浜沖に到達する所要時間は約1時間と推測できる。この推測に基づいて計算値と観測値を比較する。アシカ島での有義波高の観測値が最大であった2:00については、その1時間～1時間20分前の波浮における観測値から求めた計算結果がほぼ対応している。有義波周期についても、観測値が12.6sであったのに対して、計算結果は約12sとよい対応を示している。

また、計算結果で有義波高が最大となった、23:00頃とアシカ島での0:00の観測値の対応はあまりよくない。しかしながら、実際に久里浜湾内での波高および越波が非常に大きくなった時間帯は、0:30~1:00過ぎであり、このことを考慮に入れると、今回の推定を否定する要因とはなり得ない。また、それ以外の時間帯においては、相関はほとんどみられなかった。

5.1でも述べたように、台風の接近および通過時において、波向きがSとなる場合については、波浮とアシカ島の相関はよいといえる。また、観測値の時間的な差は、周期と距離に応じた約1時間という結果が得られた。

この結果に基づき、越波観測を開始した0:30頃の久里浜湾での波浪条件は、波浮における23:20の観測データから、越波流量の観測値が最大を示した1:00頃の久里浜湾の波浪は、波浮における0:00の観測データから、それ

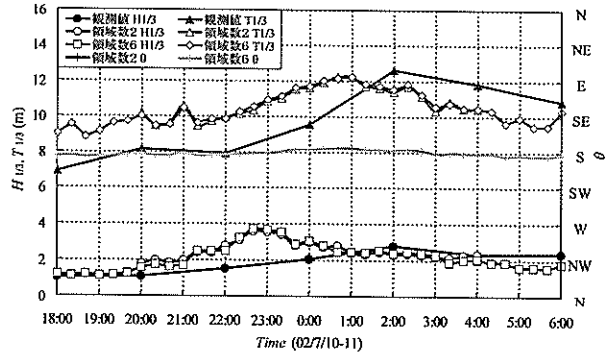


図-20 アシカ島における波浪変形計算結果と観測値の比較

表-3 P025の入射波条件

CASE	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ (°)	W.L.(m)	S_{max}
1: T0206B-2320	7.31	11.1	193	1.61	25
2: T0206B-0000	6.63	11.8	190	1.66	25
3: T0221B-1820	9.47	10.6	156	2.21	25
4: T0221B-1900	10.82	12.5	168	2.23	25

ぞれ求められると考えた。したがって、ブシネスク方程式の計算条件を求めるための、エネルギー平衡方程式の入射波条件には、表-3に示すように、T0206についてはCASE1, 2の2ケース、T0221についてはCASE3, 4の2ケースをそれぞれ選定した。

6. 沖合波浪情報を用いた護岸越波の推定

前章において、台風接近時および通過時に波向きがSと限定した場合に限り、伊豆大島の波浮とアシカ島の相関はよいことを明らかにした。そこで、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算結果を、ブシネスク方程式による波浪変形計算の入力条件とし、久里浜湾内の波浪を算定することとした。ブシネスクモデルにより求められた護岸前面での波浪の時系列変化から、港空研護岸における越波流量を推定することを試みた。

6.1 ブシネスクモデルによる波浪変形計算

(1)ブシネスク方程式による波浪変形計算プログラム
ブシネスク方程式による波浪変形計算では、浅水変形、屈折、回折、反射を考慮した、非線形の波浪変形計算が行える。また、港外から港内までを一度に計算でき、風波だけでなく長周期波の計算も可能である。このブシネスク方程式を用いた、港湾空港技術研究所プログラムライブラリP046「ブシネスク方程式による波浪変形計算システムプログラムVer. 2.0」を使用する。なお、本プ

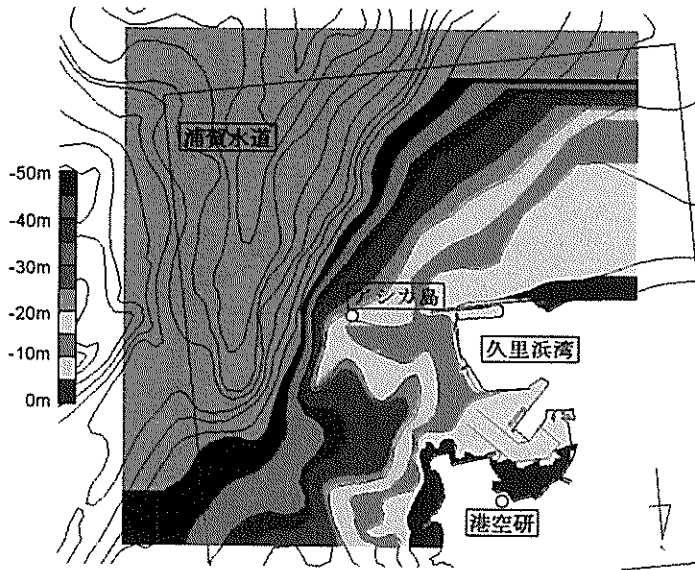


図-21 アシカ島～久里浜湾の計算領域および格子水深データ

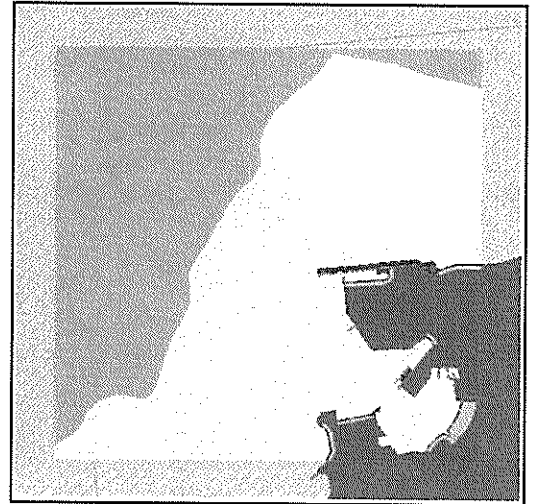


図-22 P046における境界条件

プログラムは、平山(2002)によるNOWT-PARI Ver. 4.6 β (NOnlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute) を基に作成されたものである。

(2) 計算領域の設定

ブシネスクモデルの入射境界には、波高や波向きなど、単一の波浪条件を与えなければならない。また、海底地形の影響を受けないようにするため、入射境界の水深を一定に揃えて、波向きに平行な斜面によってすり付けをする必要がある、その水深も沖波波長の1/2以上でなければならない。アシカ島周辺は地形が入り組んでおり水深も浅いため、入射境界とするにはこれらの諸条件を満たせない。したがって、久里浜湾よりやや沖の水深50m地点を入射境界とした。

計算領域および格子水深データを図-21に示す。久里浜湾内の地形と海岸構造物を確定して、図-22のような境界条件を設定する。入射境界での水深のばらつきを均し、勾配1/10のスロープによるすり付けをしている。図中灰色の部分が、沖側水深を一定に均したところである。港内の波浪に影響を与えない範囲でスポンジ層を設定している。砂浜と造波境界は無反射境界とし、消波ブロックは反射率0.4の部分反射境界とした。スポンジ層の厚さは、平山ら(2002)を参考にして決定した。

(3) 計算条件

計算条件は表-4に示すとおりである。波浮における波向をSとし、エネルギー平衡方程式法によって算出した水深50m地点における結果を、入射波条件に用いた。 θ は入射波向で、北から時計回りの角度を正としている。

CASE1および2は台風0206号についてで、波浮におけ

表-4 P046の計算条件

CASE	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	$W.L.$ (m)	S_{max}
1: T0206B-2320	4.37	11.4	187	1.69	75
2: T0206B-0000	3.83	12.0	185	1.73	75
3: T0221B-1820	3.88	9.9	185	2.00	75
4: T0221B-1900	5.46	11.8	185	2.03	75

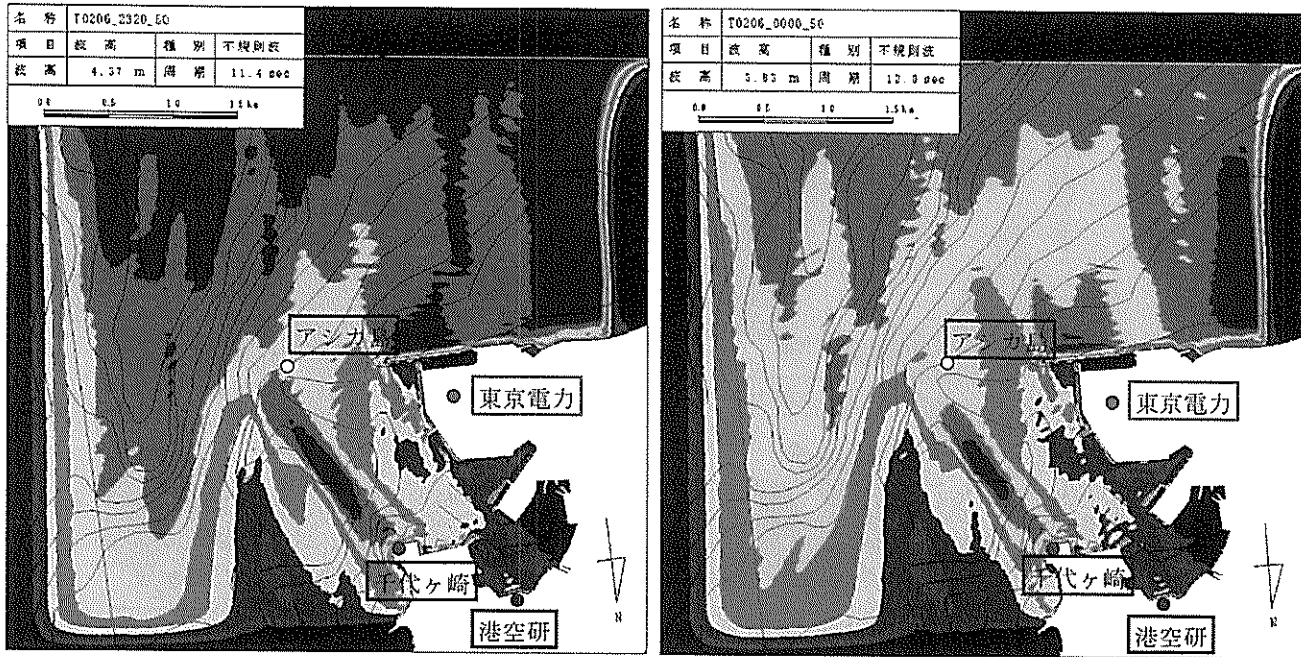
成分波数	下限周期	沖側水深	最小水深	碎波指標
500	1.0s	50m	3.0m	0.48

底面摩擦係数	時間間隔	緩造波時間	格子間隔
0.02	0.1s	25s	10m

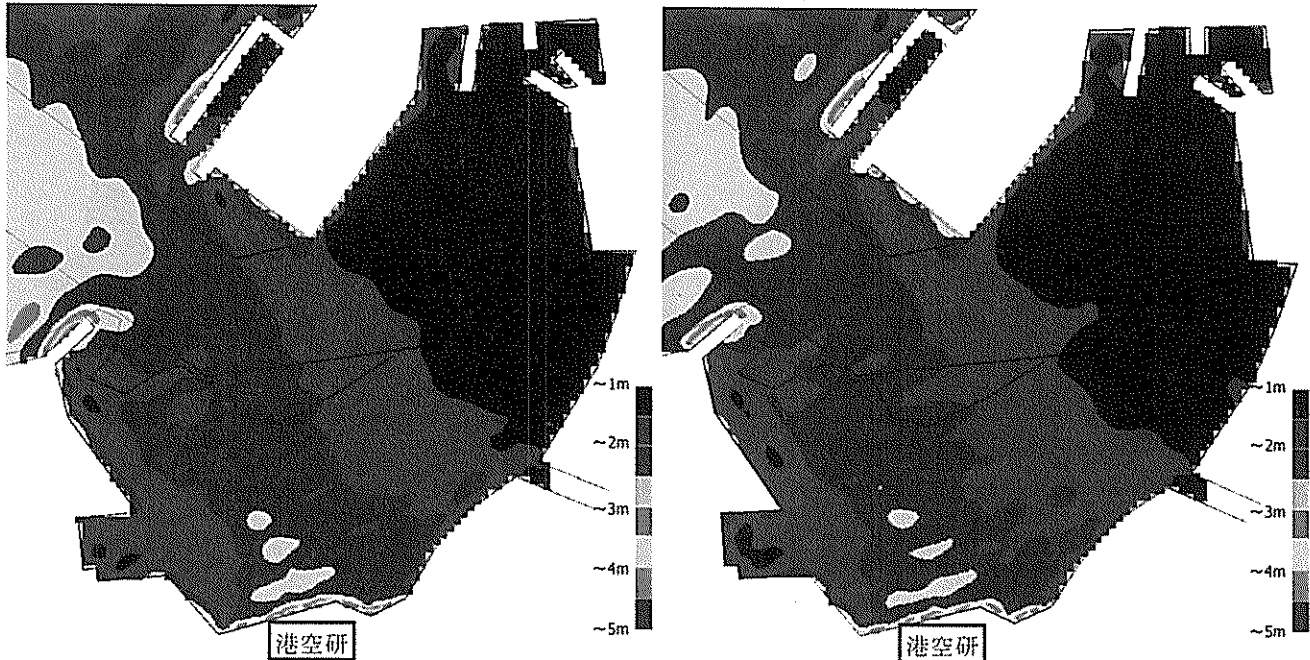
る7/10の23:20、7/11の0:00の観測結果に基づいている。前章で検討した波浮とアシカ島の時間的相関の結果より、アシカ島および久里浜湾においては、それぞれ7/11の0:20～1:00、7/11の1:00～1:40に対応しているものとした。CASE3および4は台風0221号についてであり、同様に波浮での10/1の18:20がアシカ島での19:20～20:00に、波浮での10/1の19:00がアシカ島での20:00～20:40に、それぞれ対応する。

最小水深は、観測潮位 $W.L.$ を加算した後の値で、3.0mに設定した。碎波指標は0.48、底面摩擦係数は沖側、岸側ともに同一の0.02とした。

計算の時間間隔 Δt を小さく設定する方が、計算精度はより向上するが、 Δt は周期の1/100程度必要という条件と計算時間を考慮し、0.1sとした。また、計算格子間隔 Δx は波長 L の1/10程度を目安に10mとした。



(浦賀水道～アシカ島周辺)



(久里浜湾内)

(i) CASE1 : T0206-2320

(ii) CASE2 : T0206-0000

図-23 久里浜湾における波高分布図 (T0206)

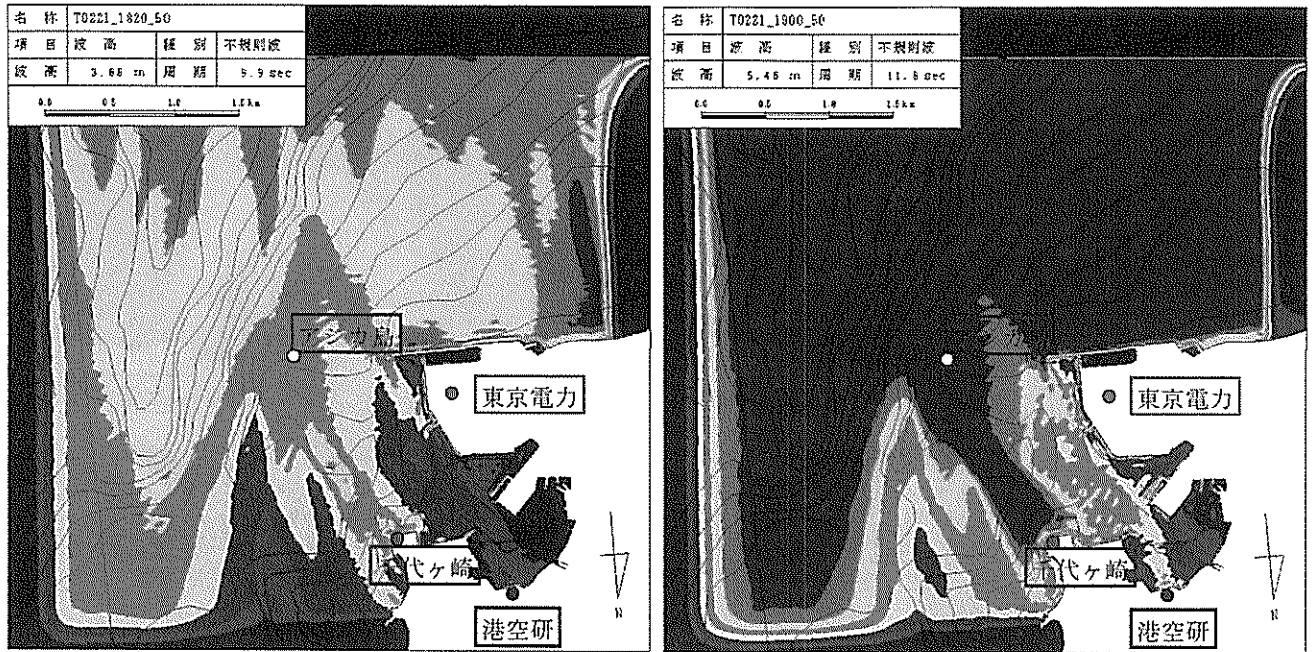
緩造波時間は、水理模型実験と同様に、入射波の振幅比を計算開始時から線形的に増幅させ、一定時間後に所定の値にするものである。周期の2～3倍程度必要という条件を目安に、25sとした。

(4) 計算結果

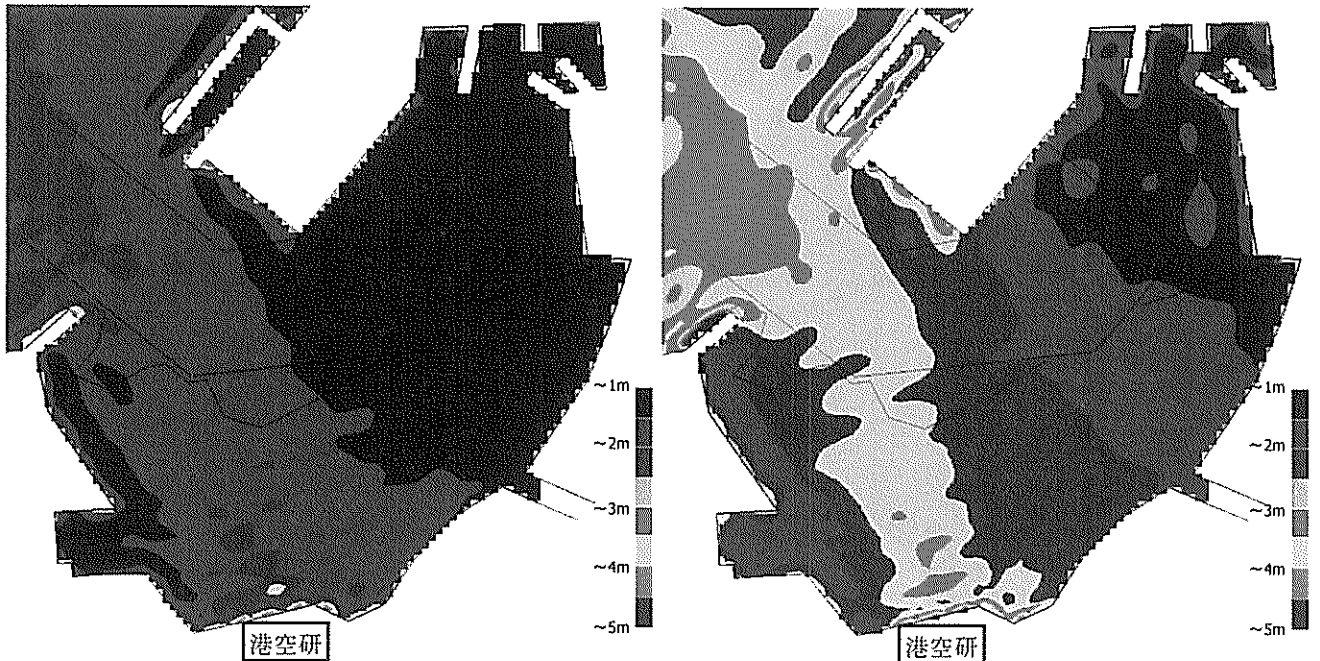
a) 台風0206号

台風0206号についてのブシネスクモデルによる久里浜

湾における有義波高分布の計算結果を、図-23に示す。上の図は、浦賀水道から久里浜湾を含む計算領域全体について示しており、下の図は、久里浜湾内について特に拡大して示したものである。左側がCASE1、右側がCASE2であり、それぞれ7/11の0:20～1:00、1:00～1:40と仮定した時間帯についての結果である。



(浦賀水道～アシカ島周辺)



(iii) CASE3 : T0221-1820

(iv) CASE4 : T0221-1900

図-24 久里浜湾における波高分布図 (T0221)

計算領域全体をみると、入射波の波高がCASE1の方が大きいため、波高が4.0～5.0mの領域がかなり広い。波高の大きさは違うが、いずれのケースでも入射した波はほぼ同様な波高分布を示しており、アシカ島周辺で浅瀬になっている辺りから波が屈折し、集中して千代ヶ崎に向かって進行している様子を再現できている。さらに、久里浜湾の東京電力発電所の東防波堤において、コンタ

ーが赤く、波高が高くなっているのがわかる。実際、台風時には、この場所における越波はかなり大きかったことが目視により観測されており、計算結果の再現性は良好といえる。

久里浜湾内についての拡大図をみると、いずれのケースにおいても、湾口から進入した波浪は、港空研の護岸に向かって進行していることがわかる。この図からは、

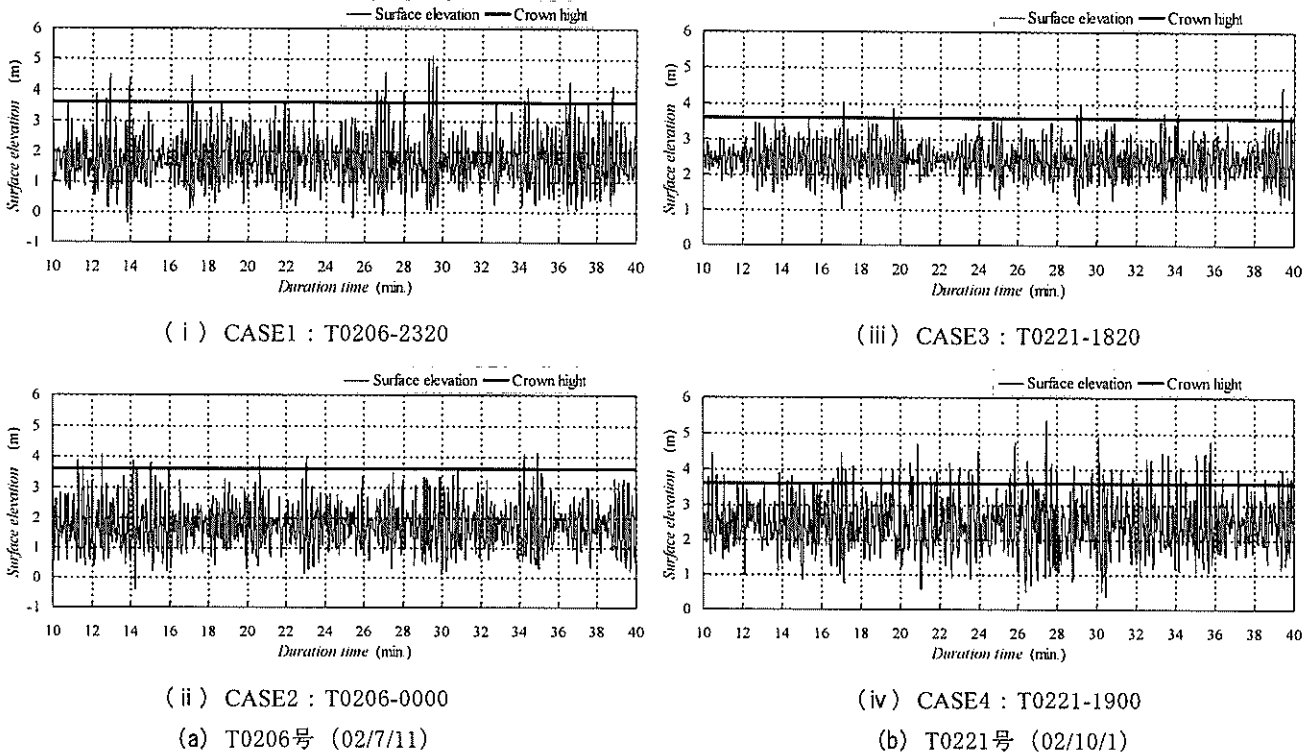


図-25 越波観測点前面における水位の時系列変化

CASE1と2の違いはあまりみられないが、いずれの時間帯でも、護岸前面で波高が高くなっている。航路浚渫工事が実施されたことにより、湾口部から進入した大きな波浪は、浅水変形の影響をほとんど受けずに、港空研前面へ到達していると考えられる。その一方で、フェリー埠頭のある湾西側は静穏であった。

b) 台風0221号

図-24は、ブシネスクモデルによる有義波高分布の計算結果を、台風0221号について示したものである。図-23と同様に、上の図は浦賀水道から久里浜湾を含む計算領域全体図で、下の図は久里浜湾内の拡大図である。CASE3が10/1の19:20～20:00、CASE4が10/1の20:00～20:40の時間帯に、それぞれ対応している。

CASE3についてはCASE2より波高はやや小さいが、ほぼ同様の波高分布を示しており、アシカ島周辺の浅瀬から屈折して、千代ヶ崎に波が向かっているのがわかる。久里浜湾内でも、フェリー乗り場の湾西側より、港空研のある湾東側の方が波高は大きい。しかしながら、有義波高は3m以下でそれほど大きくない。

CASE4は入射波高がかなり大きいので、進行波の伝播の様子は湾外ではあまりはっきりとはみられない。久里浜湾では東京電力発電所の東防波堤において、波高が非常に高くなっている。また、久里浜湾内を拡大した図において、湾口から港空研護岸に向かう波向に沿って波

高が大きい。波のエネルギーがほとんど減衰することなく、湾口部より真っ直ぐ到達していることがわかる。波高は約3mで非常に高い。護岸前面での波高はさらに高く、4m以上にもなっており、越波が激しかったこともうまく再現できそうである。越波流量の検討は次節で行う。

6.2 越波流量算定結果

越波観測点の護岸前面における水位の時系列変化の計算結果を、図-25(a)および(b)に示す。有義波高はCASE1が $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、CASE2が $H_{1/3}=2.7\text{m}$ 、CASE3が $H_{1/3}=1.8\text{m}$ 、CASE4が $H_{1/3}=3.1\text{m}$ であった。また、図中の太線は、護岸高測量結果に基づく護岸の水面上の天端高を示しており、基本水準面からは3.60mである。これより大きい波は、護岸を越波したとみなすことができる。計算で求められた水位 η の時系列変化を式(1)に代入することで、越波流量を求める。

越波観測点における平均越波流量は、台風0206号についてのCASE1では $q_{\text{ave}}=0.014\text{m}^3/\text{m/s}$ 、CASE2で $q_{\text{ave}}=0.002\text{m}^3/\text{m/s}$ であった。また、台風0221号についてのCASE3では $q_{\text{ave}}=0.003\text{m}^3/\text{m/s}$ 、CASE4では $q_{\text{ave}}=0.068\text{m}^3/\text{m/s}$ であった。

水位変動の最大値をみると、台風0206号ではCASE1で、台風0221号ではCASE4で、それぞれ5mを越えていた。その結果、これらのケースでの越波流量の計算結果

が大きくなったと考えられる。

6.3 越波観測結果との比較

(1) 台風0206号

台風0206号について、図-10に示したビデオカメラによる観測結果と比較する。ここで、CASE1の計算結果については0:30~1:10の観測結果を、CASE2については1:10~2:00の観測結果をそれぞれ比較対象とした。その結果を表-5に示す。これによるとCASE1の入射波高が大きかったケースについては、計算値による越波流量の方が若干小さいが、ほぼよい一致を示している。入射波高が小さいCASE2では、計算結果と観測結果の誤差はやや大きくなる。

いずれのケースにおいても、観測値の方が大きかった理由として考えられるのは、ビデオ解析において護岸を越流する波の高さを決める際に、飛沫の部分を含んでしまったこと、実際には港空研の沖にある防波堤を越えた伝達波が到達していたが、数値計算には伝達波の発生まで考慮されないことなどが挙げられる。特に、波高が小さいCASE2においては、飛沫の影響が多に出たために、観測値との違いがより顕著に現れたのではないかと考えている。

表-5 越波流量の算定値と観測値の比較 (T0206)

CASE	q_{cal} (m ³ /m/s)	q_{obs} (m ³ /m/s)	q_{cal}/q_{obs}
1: T0206B-2320	0.0139	0.0177	0.78
2: T0206B-0000	0.0023	0.0034	0.67

(2) 台風0221号

台風0221号については、図-12に示したオンサイト越波計による観測結果と比較したものを表-6に示す。ここで、CASE3については19:00~19:40、CASE4では20:00~20:40の越波流量の平均値を比較対象としている。

CASE3については、オンサイト越波計による観測結果との違いはそれほど小さくなく、実際の越波状況に近い結果が得られた。それに対して、CASE4では観測値が計算値に比べてかなり小さく、約半分になっている。この原因は、オンサイト越波計の測定可能越波高にある。今回使用した測定桿の高さは110cmであり、それを越えた波については計測できていない。したがって、合計の越波流量も必然的に小さくなってしまふ。実際、CASE4の時間帯では、越波高は4~5m以上になっており、測定桿の測定限界を超えたために、観測値と計算値の誤差は大きくなってしまった。

表-6 越波流量の算定値と観測値の比較 (T0221)

CASE	q_{cal} (m ³ /m/s)	q_{obs} (m ³ /m/s)	q_{cal}/q_{obs}
3: T0221B-1820	0.0028	0.0038	0.73
4: T0221B-1900	0.0675	0.0322	2.09

(3) 推定結果の妥当性

今回検討した2つの台風について、越波流量の算定値と観測値を図-26にまとめて示す。これによると、CASE4を除いて、観測値の方が計算値より若干大きい、ほぼ等しくなった。これまで、オーダーの推定までしかなされていなかった越波推定において、本手法による推定値の誤差は極めて小さいといえる。したがって、計算値の再現性は非常によく、港湾における越波による浸水危険度の推定において、今回構築した手法が有効であることを明らかにすることができた。

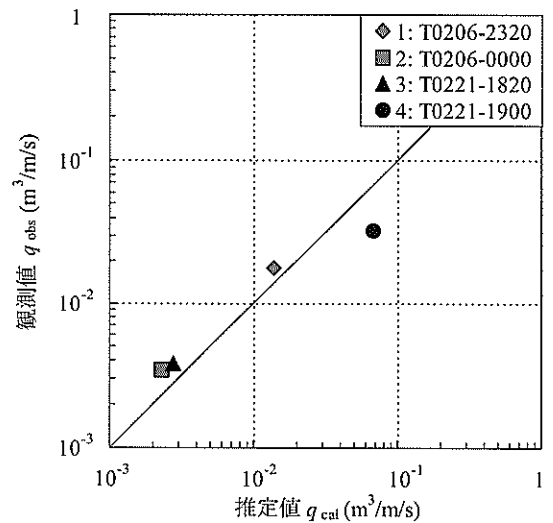


図-26 越波流量の算定値と観測値の比較

7. 久里浜湾における越波特性

越波流量の算定点を護岸沿いに細かく設け、表-1にとりまとめた被災状況と照らし合わせるにより、久里浜湾の港空研における各護岸の被災特性を検討する。出力点①~⑫は図-9に対応しており、越波観測点は⑤に相当する。標準部と隅角部で越波特性は大きく異なるため、①~⑤を区間Ⅰ(標準部)、⑥~⑦を区間Ⅱ(隅角部)、⑧~⑫を区間Ⅲ(標準部)とした。標準部の区間ⅠおよびⅢについては7.1節に、隅角部の区間Ⅱについては7.2節にそれぞれ述べる。

7.1 標準部の越波特性

標準部における護岸天端高、前面有義波高および平均

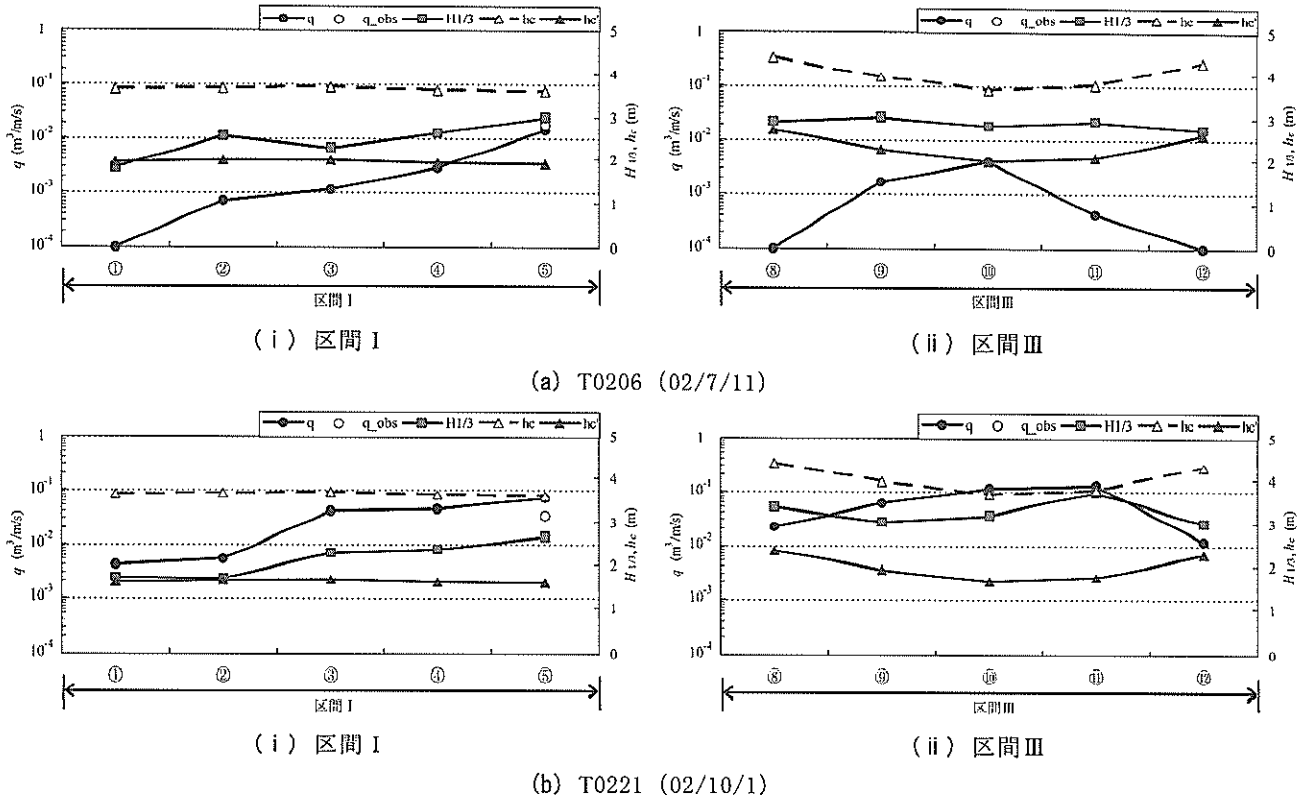


図-27 港空研護岸における有義波高，護岸天端高および平均越波流量

越波流量を図-27(a)および(b)に示した。ブシネスクモデルにより求められた平均越波流量を q ，観測越波流量を q_{obs} ，護岸天端高 h に潮位で補正した値を h' として図示している。

台風0206号時に著者らが観測した結果によると，越波観測点である区間Ⅰの⑤付近で大きな越波が起きていた。越流水の衝撃により，背後施設のシャッターが壊された。また，区間Ⅲの⑨～⑩においては，波は高かったが大きく打ち上がる程度であり，背後地の被害はほとんどなかった。

一方，台風0221号時の観測結果によると，台風0206号時と同様に，区間Ⅰの⑤付近での越波がかなり大きかった。しかし，それ以上に区間Ⅲの⑧～⑩の方で大きな越波がみられた。被災状況は，③～⑤ではガードレールと

カーブミラーが越波により曲げられ，護岸の裏込め土が吸い出された。背後施設のシャッターやドアも被害を受けた。⑦～⑩の背後では，越波した波の衝撃力により護岸上のプレハブ小屋が破壊され，浸水によって道路が水浸しになり，通行が困難な状態になっていた。

港湾の施設の技術上の基準(1999)における構造的強度からみた被災限界の越波流量は，合田(1970)によって既往の被災事例から推測されている(表-7参照)。また，背後地の許容越波流量は，その利用状況，重要度によって異なって設定される。永井ら(1964)は規則波による実験結果から，表-8に示す許容越波流量を提示している。

以下において，計算結果と被害状況を照らし合わせる。図-27(a)の台風0206号時，地点⑤での越波流量の計算結果は $0.01\text{m}^3/\text{m/s}$ 以上で，背後地の重要度を高く設定した

表-7 被災限界の越波流量

種別	被覆工	越波流量(m ³ /m/s)
護岸	背後舗装済み	0.2
	背後舗装なし	0.05
堤防	コンクリート三面巻き	0.05
	天端舗装・裏法未施工	0.02
	天端舗装なし	0.005以下

表-8 背後地の重要度からみた許容越波流量(m³/m/s)

背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入により重大な被害が予想される地区	0.01程度
その他の重要な地区	0.02程度
その他の地区	0.02~0.06

表-1 (再掲) 各工区の設計諸元と被災の有無

工区	L(m)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	θ(°)	0206	0221
A	41.32	4.50	1.1	0	×	×
B	20.00	4.28	1.0	52.5	×	×
C	79.30	3.77	1.0	52.5	×	○
D	51.75	3.67	1.1	17.1	×	○
E	68.25	3.96	1.1	17.1	×	○
F	26.31	4.40	1.0	17.1	×	○
G	60.00	4.45	1.0	76.45	×	○
H	88.38	3.60	3.0	76.45	○	○
I	70.06	3.67	3.0	16.44	○	○
J	17.45	3.63	3.0	59.94	×	×

(C. D. L. 基準)

場合の許容越波流量を越えていた。それ以外の地点では、背後地の被災は観測されておらず、計算結果も0.002m³/m/s以下で、許容越波流量より小さかった。越波流量が大きかった区間Ⅰの⑥付近は、表-1に示した区間HおよびⅠに対応しており、被災状況と一致している。

一方、図-27(b)の台風0221号時については、③~⑤における越波流量が0.05~0.06m³/m/sとかなり大きくなった。観測時の波浪および越波が台風0206号より激しく、被害規模も大きかったことを考えると、妥当な結果といえる。背後が舗装されていない箇所において裏込め土が吸い出しを受けており、表-7の被災限界とも一致している。⑩および⑪ではそれをさらに上回る0.1m³/m/s以上になっており、越波によって護岸背後の建物が破壊されたという被害状況に対応した計算結果といえる。

このように、今回構築した手法により、同じ港湾であっても、台風の経路や大きさの違いによって被災する護

岸の位置が異なることを、うまく再現することができた。従来の方法に比べて、護岸の配置や形状に応じて、区間毎に細かく越波特性を推定することが可能であり、港湾施設の設計において有用な手法と考える。

7.2 隅角部における波高増大

一般に、構造物の隅角部においては、一直線状の護岸に比べて、入射波と反射波の干渉によって、重複波の波高が大きくなるがよく知られており、実験的にも確かめられている(鴻上ら, 1972)。実際、台風0221号時に護岸の隅角部である区間Ⅱの⑥~⑦において、波は非常に高く、越波も激しくなり、護岸の上部工に亀裂が入ってパラペット上部が剥離する被害が起きた。

港空研護岸の隅角部には、パラペット下端部まで消波工が設置されている(すなわち、パラペット前面には消波工がない)。消波工の天端高はC. D. L. 基準で+2.3mであり、台風0221号時の高潮による潮位は2.0mであった。高橋ら(2000)が述べているように、消波工が上部工のパラペット下端部までしか設置されていない不完全消波の状態では、今回のケースのような高潮・高波が作用すると、消波工がない場合よりも越波流量は増大し、衝撃的な波力が作用する。被災状況からみても、台風0221号時には、消波工なしの場合よりも大きい越波が生じていた可能性が高い。

ブシネスクモデルによって護岸前面の波高変化を正確に再現するために、実際的水深と等しくなるように計算条件を設定した。ただし、計算の都合上、最小水深を別途設定する必要がある。3.0m(=C. D. L. 1.0m+潮位2.0m)とした。しかし、消波工なしの条件(反射率 $\mu=1.0$)では、隅角部における著しい波高増大が生じたため、計算が収束しなかった。一方で、護岸が消波工で完全に被覆されているとして反射率 $\mu=0.4$ を与えると、波高および越波流量は小さく算定された。この理由は、消波工の効果をやや過大に評価したためと考えられる。そこで、不完全消波の状態における越波流量を算定することを試みた。最小水深を5.0mとし、反射率 μ を1.0にして再計算をした。その結果、7.1で述べた標準部の区間ⅠおよびⅢとの接点における推定波高は、ほぼ一致する値が得られたが、隅角部(区間Ⅱ)における波高増大を十分に再現できなかった。

この問題を解決するため、隅角部の波高増大を検討した小舟ら(1976)の研究成果を用いることとした。隅角部における波高増大率 K を図-28に示す。隅角部の主堤とハネ堤のなす角度 β が120°のケースについて、主堤の反射率 μ_1 が1.0で、ハネ堤の反射率 μ_2 を1.0と0.3にした場

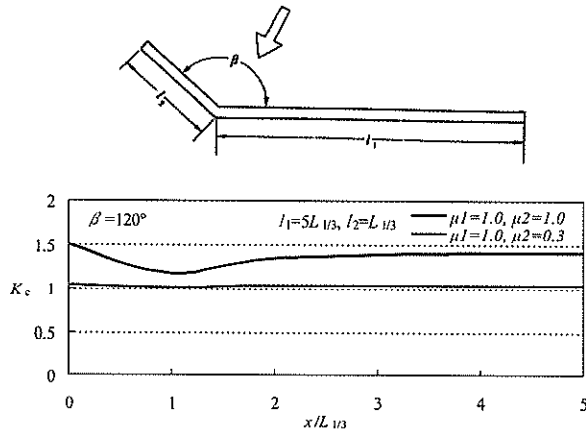
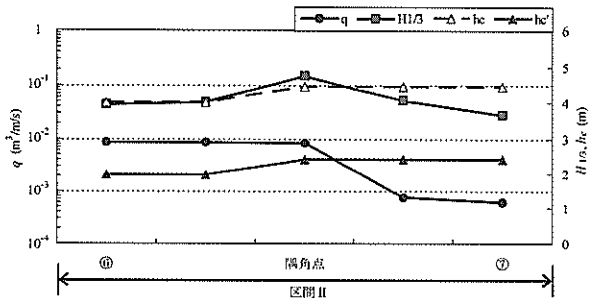
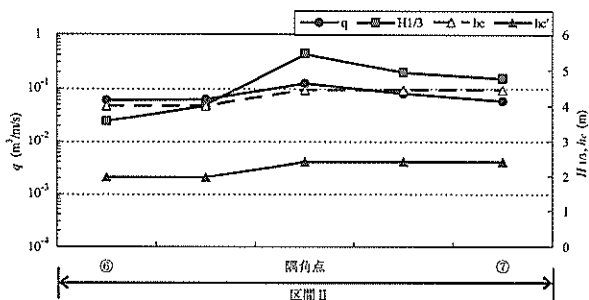


図-28 隅角部における波高増大率



(a) T0206 (02/7/11)



(b) T0221 (02/10/1)

図-29 隅角部における有義波高および平均越波流量

合の2通りである。これによると、ハネ堤の反射率が1.0の場合、隅角部の波高は1.5倍になる。隅角点から法線方向に1波長離れたところでは1.0に近づくが、2波長以上離れたら1.3~1.4倍に増大する。一方、ハネ堤の反射率を0.3に抑えることによって、隅角部の波高増大はほとんどなくなることが示されている。

上記したブシネスクモデルによる再計算結果に、隅角部における波高増大を考慮して、港空研護岸の有義波高を推定した。図-29に有義波高および平均越波流量の推定値を示す。⑦側が図-28の模式図における主堤にあたり、⑥側がハネ堤にあたる。⑦側と⑥側の護岸がなす隅角部の角度 β は 120° であり、⑦側堤の反射率 μ_1 、⑥側堤の反射率 μ_2 は、共に1.0を採用した。すなわち、ブシネ

スクモデルで最小水深3.0mかつ不完全消波状態を再現する代わりに、近似的ではあるが、最小水深5.0mで消波工なし反射率1.0の状態に小舟らによる補正を加味することとした。

T0206号とT0221号のいずれの場合でも、隅角部では波高増大が顕著であった。越波流量は、T0206号時に、⑦側堤よりも⑥側堤の方が大きく、約 $0.01\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ になった。T0221号時には、隅角点が区間Ⅱの中で最大値を示し、 $0.12\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ という結果が得られた。先に述べたように、隅角点においては非常に大きな越波が観測され、護岸が破壊され背後地が浸水する被害が生じた。残念ながら隅角部での実測値は得られていないが、今回の計算結果から上記の被害状況を推察できる。

以上のように、小舟らによる隅角部の波高増大率を適用することにより、隅角部においても実際の越波状況や被害規模を細かく推測することが可能になった。港湾の施設の技術上の基準において、波高に関して隅角部の影響は考慮するように定められているが、越波についてもこの方法を適用することによって検討でき、その有用性は高いと考えられる。また、消波工が機能し、反射率を0.4以下に抑えることができれば、隅角部の影響を考慮する必要はない。しかしながら、今回のように消波工の天端高が充分でない不完全消波の場合には、隅角部の影響が大きく現れてしまい、越波流量も大きくなる。したがって、隅角部において波高増大を低減し、越波を抑止するためには、消波工によって護岸を完全に被覆することが重要といえる。

7.3 期待越波流量の推定手順

本節では、今回構築した護岸の期待越波流量を推定して護岸改修計画を立案する方法について、その手順を整理して記す。作業手順のフローチャートを図-30に示す。

(1) 入力波浪条件

入力する波浪条件には、一般的に極値統計解析を行って得られた、50年もしくは100年確率波が用いられる。今回のように、異常時における越波災害を再現するためには、ナウファスによる波浪観測結果を入力条件として使用してもよいと考えられる。実際、台風0221号時に波浮で観測された有義波高の最大値は $H_{10} = 10.9\text{m}$ で、極値統計解析による波浮港の100年確率波 $H_{100} = 9.68\text{m}$ (合田ら、1998)よりも大きかった。

(2) 港外波浪変形計算

沖合波浪観測点が検討対象としている港湾から離れている場合には、本稿のように回折を考慮したエネルギー平衡方程式法(プログラムライブラリP025)を用いて

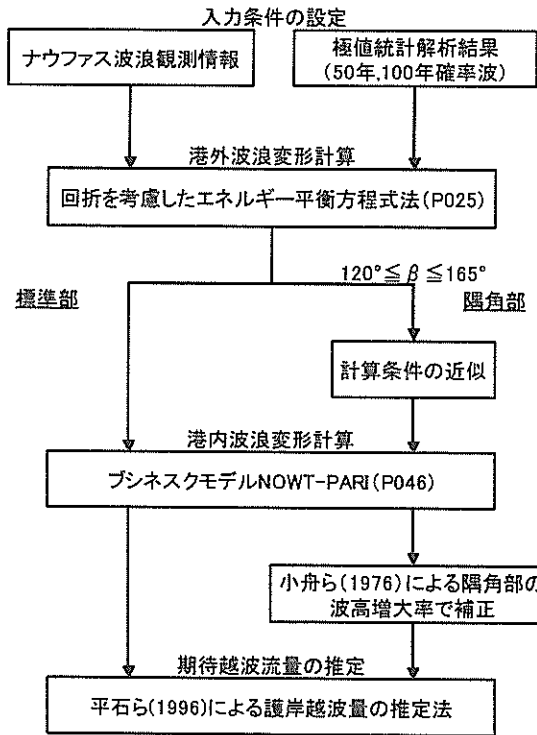


図-30 期待越波流量の推定のフローチャート

表-9 隅角部の角度に対する波高増大率

反射率 μ	角度 $\beta(^{\circ})$	$(K_r)_0$ 隅角点	$(K_r)_1$		
			$l/L_0=1$	$=2$	>4
1.0	120	1.50	1.17	1.35	1.41
	135	1.35	1.15	1.35	1.35
	150	1.20	1.13	1.23	1.23
	165	1.10	1.07	1.07	1.07

港外の波浪変形計算を行う方法や、WAMを始めとする高精度な波浪推算モデルを用いる方法がある。これらの結果を、ブシネスクモデルNOWT-PARI（プログラムライブラリP046）の入力条件として用いる。波浪観測結果がブシネスクモデルの入力条件に直接適用できる場合には、港外波浪変形計算を特に必要としない。

(3) 港内波浪変形計算

ブシネスクモデルを用いて港内の波浪変形計算を行うにあたり、護岸の対象法線延長を標準部と隅角部に分ける。すなわち、2つの護岸法線のなす角度が $120^\circ \leq \beta \leq 165^\circ$ の場合には隅角部とし、それ以外の箇所は標準部として取り扱う。

a) 標準部の推定計算

標準部についての区間区分は、同一法線延長上で、天端高および前面水深が等しく連続していれば、同じ区間としてよい。計算格子サイズに合わせて細かく区切るこ

とも可能であるが、1波長を目安とすればよい。

ブシネスクモデルの計算格子サイズ Δx は波長 L の1/10程度とし、最小水深は実際の水深に潮位で補正した値を用いる。また、消波工によって完全に被覆された箇所の反射率 μ は0.4と設定する。目標反射率に対する境界条件の設定方法については、平山ら(2002)に詳しく述べられているので参照されたい。

ブシネスクモデルによって波浪変形計算を行い、護岸前面における波高の時系列変化を推定する。

b) 隅角部の近似推定計算

隅角部とする区間は、隅角点から両側に1波長分である。1波長のうちでも、波高の増大率が変化するので、隅角部においては細かく推定点を設けることが望ましい。隅角部においては、水深が浅すぎるとブシネスクモデルによる計算が収束しないため、最小水深を若干深く設定し、近似的な解析を行う必要がある。

波高の時系列変化を推定するには、小舟ら(1976)が提案した波高増大率で補正する必要がある。護岸の反射率 μ を1.0とした場合の波高増大率を表-9に例示する。ブシネスクモデルによる計算結果に、隅角部の角度 β および隅角点からの距離 l に応じた係数を掛けることによって、隅角部における前面波高の時系列変化を推定することができる。

完全消波の場合には標準部と同様の計算により、ある程度の精度で推定が可能である。ただし、不完全消波状態における推定にあたっては、計算条件の設定を慎重に検討する必要がある。

(4) 期待越波流量の推定

平石ら(1996)による護岸越波流量の推定式(式(1))に、算出された水位の時系列変化と護岸の天端高を代入すると、期待越波流量の推定値が得られる。設計においては、期待越波流量が表-7および8に示した許容越波流量以下になるように天端高を設定することにより、区間毎の特性に応じた合理的な護岸の設計が可能になる。

8. 結論

本研究では、台風来襲時に被災護岸において越波観測を実施し、時間的な変動を計測することに成功した。また、ナウファス波浪観測情報を入力条件として、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルを組み合わせ、より高精度な波浪変形計算をすることにより、護岸越波流量の詳細な推定を試みた。さらに、本予知法による推定値と観測値を比較することにより、その有用性を検討し、現場への適用方法についての提案を行った。主要な

結論を以下に記す。

- 1) 台風0206号についてのビデオ観測による結果では、10分毎の平均越波流量の最大値は $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ を越え、親水性護岸の許容越波流量よりも大きかった。
- 2) 台風0221号についてのオンサイト越波計による結果と直接目視により観測した結果とを比較し、オンサイト越波計の現地適用性を確認した。
- 3) 波浮およびアシカ島波浪観測点の相関を検討した結果、台風接近時および通過時に波向きがS方向になる場合には相関はよく、時間的な差は周期と距離に応じることを明らかにした。
- 4) ブシネスクモデルを用い、港湾内の護岸前面での波浪を求め、越波流量を推定した結果、観測値とよく一致した。
- 5) 構築した予知法は、護岸法線の配置や形状の違いに応じて、区間毎に合理的な越波の推定が可能であり、港湾施設の設計において有益な手法のひとつと考える。

9. あとがき

本予知法は、沖合にナウファス観測点が設けられている他の港湾についても適用可能であり、入力条件としてナウファスの既往最大値や極値統計解析結果などを用いることにより、越波の危険度を事前に予知し、港湾施設の設計に反映させることができる。さらに、ナウファス波浪情報とリアルタイム気象情報とを統合させた全国的な情報ネットワークシステムに、越波による危険度情報を付加し、システムの完成度を高めることも可能である。
(2003年2月14日受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、(財)沿岸開発技術研究センター額田恭史氏には、ナウファス波浪観測情報データの抽出および提供に関して、多大なご尽力をいただいた。協和商工(株)清水康男氏には、オンサイト越波計による観測およびデータ整理に関して、ご協力をいただいた。海洋・水工部波浪研究室夏期実習生、宮原喬志氏には、護岸高水準測量およびビデオ観測結果の解析にご協力いただき、辰巳大介氏には、エネルギー平衡方程式法ならびにブシネスクモデルによる試計算をしていただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。また、本研究に対する貴重なご意見を賜った、海洋・水工部長口田 登氏、海洋水理研究室長橋本典明氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安部隆二・石本敬志(1998): 道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 676-680.
- 鴻上雄三・藤木信之・堤 敏郎・上原泰正(1972): 防波堤屈曲部付近の波高・波圧分布, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 345-349.
- 合田良実(1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第4号, pp. 3-42.
- 合田良実・小長谷 修・永井紀彦(1998): 極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 211-215.
- 港湾技術研究所(2000): パソコンライブラリ(P025), 波浪変形計算システムプログラム(改良版)(Ver. 2.2~), 168p.
- 港湾空港技術研究所(2003): パソコンライブラリ(P046), ブシネスク方程式による波浪変形計算システムプログラム(Ver. 2.0~), (印刷中)。
- 小舟浩治・大里睦男(1976): 防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 15, No. 2, pp. 55-76.
- 菅原一晃・永井紀彦・平石哲也・清水康男(2002): 簡易かつ安価なオンサイト海象観測システムの構築をめざして, 第29回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 252-253.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗(2000): 台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技研資料, No. 973, 50p.
- 田中良男・平石哲也(2001): 回折を考慮したエネルギー平衡方程式による波浪変形計算の適用性の検討, 港湾技研資料, No. 1000, 19p.
- 永井莊七朗・高田 彰(1964): 海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 279-286.
- 永井紀彦・横井博志・鈴木善光(2000): 沿岸気象海象情報配信システムによる波浪予測, 第49回理論応用力学講演会講演集, pp. 93-94.
- 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・清水康男(2002): オンサイト越波計の開発について, 海洋調査技術学会第14回研究成果発表会講演要旨集, pp. 20-21.
- 西村一男・入江 功(1972): 防波護岸の越波に関する現地観測(第1報), 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.

- 日本港湾協会(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），運輸省港湾局監修，pp. 72-138.
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴弘・金澤 剛・榎本達也(1996)：護岸越波量における波の多方向性の影響，港湾技術研究所報告，Vol. 35，No. 1，pp. 39-64.
- 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，港湾空港技術研究所資料，No. 1036，162p.
- 平山克也・平石哲也(2002)：ブシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性，海岸工学論文集，第49巻，pp. 676-680.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江 功(1973)：防波護岸の越波に関する現地観測（第2報），第20回海岸工学講演会論文集，pp. 113-118.
- 間瀬 肇・高山知司・国富將嗣・三島豊秋(1999)：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 628/II-48，pp. 177-187.

記号表

A	集水槽の面積 (m^2)
C_0	越流係数
d	集水槽内の水深 (m)
h	水深 (m)
h_c	護岸天端高 (m)
$H_{1/3}$	有義波高 (m)
H_n	n 年確率波 (m)
K_c	波高増大率
ℓ	集水槽の間口長 (m)
L	波長 (m)
q	越波流量 ($m^3/m/s$)
q_{cal}	推定越波流量 ($m^3/m/s$)
q_{obs}	観測越波流量 ($m^3/m/s$)
Q	越波量 (m^3)
$T_{1/3}$	有義波周期 (s)
$W.L.$	潮位 (m)
Δt	計算時間間隔 (s)
Δx	計算格子間隔 (m)
η	静水面からの水位 (m)
β	主堤とハネ堤のなす角度 ($^\circ$)
μ	主堤の反射率
μ_h	ハネ堤の反射率
θ	波向 ($^\circ$)