

シナリオに基づくリアルタイム高潮災害予測の 枠組み

BASIC CONCEPT FOR SCENARIO-BASED REAL TIME PREDICTION OF STORM SURGE DISASTERS

高橋重雄¹, 河合弘泰², 富田孝史³, 高山知司⁴

Shigeo TAKAHASHI, Hiroyasu KAWAI, Takashi, TOMITA and Tomotsuka TAKAYAMA

¹フェロー会員 工博 港湾空港技術研究所 研究主監 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 港湾空港技術研究所 海洋水理・高潮研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 港湾空港技術研究所 主席津波研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴フェロー会員 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

This paper discusses a basic concept of scenario-based real time prediction of storm surge disasters. A scenario of storm surge disaster is made which illustrates the actual disaster occurred in Suo-nada Bay, Japan by typhoon 9918. If enough number of scenarios of disasters can be made before the typhoon for all the possible cases of storm surges and waves, the disaster can be predicted. The real time prediction is closely related with the performance design of coastal defenses.

Key Words : Performance design, storm surge, real-time prediction, storm wave, coastal structures, coastal defense

1. はじめに

(1) 高潮を自ら確認する住民

近年, 台風による高潮・高波災害が増加している. 図-1は, 著者の一人が1999年の台風18号の直後に実施した災害の実態調査であった住民(漁師)の一人であり, 彼はこの護岸のパラペットの天端付近まで水位が上昇したと言っていた. また, 彼はこの護岸は非常に高く, 日常生活に不便であり, なぜこんなに高い護岸が必要なのかわからなかったが, 今回の台風でその必要性がよく分かったと言っている. 技術者の一人として, 市民にこうした防災施設の重要性を理解していただくことは大変うれしいことである. しかしながら, もしこの台風がもう少し厳しいものであったら, あるいはこの護岸が壊れていたら, 彼は死んでいたかもしれない. 彼は幸運であっただけなのかもしれない. 問題なのはこうした住民が実際には多いことである.

本当は, 我々技術者が彼に台風の進路だけでなくそれによる高潮や高波の各地における詳細な情報や, そこの防災施設の機能や安定性能の情報, そして浸水や建物

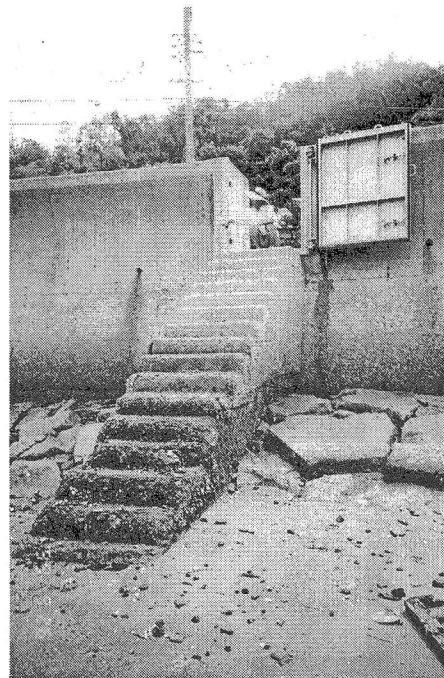


図-1 高い護岸と漁師

等の破壊あるいは人への危険性など、具体的な災害状況を予測して情報を提供する必要があったのではないかと思う。

(2) 災害の予測の必要性とシナリオ

現状では、市民は台風の進路と規模そしてそれによる高潮・高波の予報を気象庁から得ることができる。しかしながら、現状の予報による高潮や高波の情報は広い地域を対象にした情報であり、二段階の注意報と警報であるため、きめ細かい地域の情報としては十分ではない。21世紀となって技術は進歩し、予測の精度は向上しているが、予測の枠組み(体系)は旧来のままである。特に、護岸などの防災施設の災害やそれに続く住居地域の浸水など災害を事前に予測することはほとんどなされていない。そうした予測が実際に行われていれば、市民は安心して台風を待つことができ、また必要なときには適切な避難が実施できる。

18号台風の後にはこの災害について非常に多くの調査研究が実施されている。それはあたかも実際どうして何が起こったのかという災害のシナリオを書いているのに等しい。こうしたシナリオが災害の後に書けるのであれば、事前にも書けるはずである。そうした可能性のある台風のすべてのケースについてシナリオを用意しておけば、その台風の進路と規模に応じて適切な各地の高波や高潮が把握でき、それによる被害の予測が可能となる。

(3) リアルタイム予測の枠組みの検討

本報告では高潮・高波災害のリアルタイム予測の枠組みを議論するが、このリアルタイム予測の特徴は、単に高潮や高波を予測するだけでなく、それによる施設の被災や浸水などの災害を予測するものである。ただし、災害を含めたリアルタイム予測が簡単ではないことは明白であり、また十分な予測精度をもつものにするためには、現在の技術でも十分とはいえない。しかしながら、少しでもその方向への努力を始めない限り、現状のままであり、予測の枠組みを変えることによって大きな進歩を考えるべきである。特に大きな災害が予想される東京湾などでは、その費用に対して効果が大きいと考えられ、そうした地域をモデルケースとして検討を開始することが重要である。

シナリオに基づくリアルタイム予測の実現には、

- ① シナリオのデータベースの作成法の検討
- ② リアルタイム予測方法の検討
- ③ 情報の伝達方法の検討
- ④ 関連する行政組織や法律の検討

の四つが必要である。本報告では、リアルタイム予測の枠組みを述べるが、①のシナリオデータベースと②リアルタイム予測の検討に関連した事項を中心に述べることとする。特に、防災施設の建設や管理において、必要となっている性能設計とシナリオデータベースの関係性を述べたい。予測した結果を市民に伝えること(予報)の

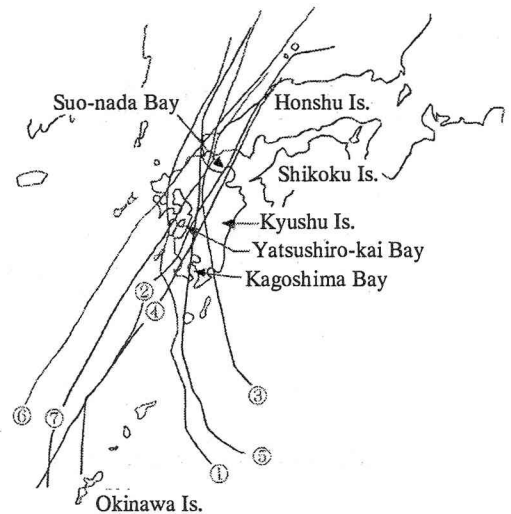


図-2 九州地区の台風のルート

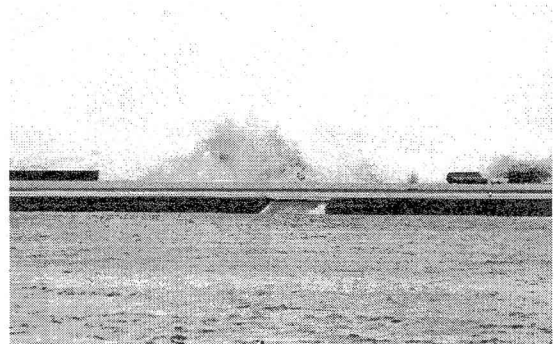


図-3 護岸の倒壊と浸水(宇部空港)

あり方については、どの情報をどう伝えるのかを含めて関連する行政組織や法律に関する検討が不可欠であり、基本的な予測の枠組みができた段階で、社会学的な視点を十分考慮して検討する必要がある。

2. 1999年の18号台風の高潮高波災害— 一つの実際のシナリオ

(1) 台風18号

図-2の⑦は台風18号のルートを他の九州地区の主要な台風のルートとともに示したものである。1999年の9月24日の朝早くこの台風は八代海を中心気圧940hPa、速度40km/hで通過した。その後北九州を縦断し周防灘を縦断している。周防灘の西海岸沿岸では高潮による潮位偏差が2から3mで設計条件程度であり、死者は出ていない。しかしながら多くの護岸が破壊されており、その背後の住居地域で浸水災害が発生している。

(2) 護岸の破壊と背後の浸水

図-3は周防灘における埋め立て護岸の災害の例である。写真では高潮と高波によって護岸のパラ

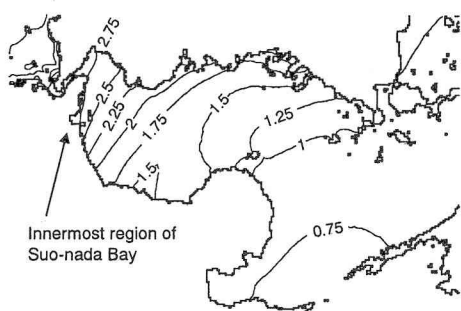


図-4 周防灘での高潮の追算結果

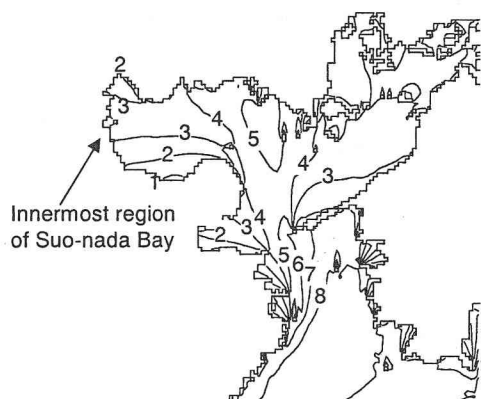


図-5 周防灘における波浪の追算結果

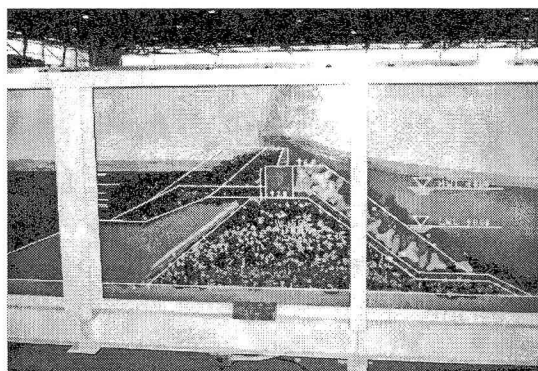


図-6 護岸の水理模型実験

ペットが倒壊している。この埋め立て地は地方空港であり、この写真は朝方出勤した技術者によってまさに台風のピーク時に取られている。台風によって空港ビルを含み全体的に浸水したこの空港は、1週間閉鎖されている。災害のシナリオは、写真に撮られたような状況を、定量的なデータとともにビジュアルに示すことができるものである。

(3) 災害調査

災害の直後から筆者らは水理模型実験や数値計算を含む災害調査を行っている。

図-4はこの台風による高潮の追算結果である。この台風による最大高潮偏差は、湾奥で2から3mであり、現地の計測結果とよく一致している。なお、ここでいう高潮偏差とは台風の高潮による潮位の上昇量であり、し

たがってそのときの潮位は天文潮位と高潮偏差を加えたものである。台風が最接近した時はほぼ満潮位であり天文潮位がT.P.上1から2mであり、合計の潮位はT.P.上3から4.5mとなり、それがこの災害の主要な原因である。

図-5は台風による高波の追算結果である。台風による最大の有義波高は3.5から4mであり、設計有義波高を超えている。これが厳しい災害の第二の要因といえよう。

図-6は護岸の破壊を検討した水理模型実験を示すものである。模型実験は非常にビジュアルで詳細な災害状況を示すことができる。海岸防災施設の被災は水理模型実験だけでなく、簡単な計算や数値シミュレーションによっても推定可能である。また、防災施設の破壊(被災)だけでなく、その結果としての越波や浸水も水理模型実験や数値計算によって検討が可能である。

この台風の災害調査結果の報告書は1年後に出版されている(港湾技研資料No. 969-974)^{1)~6)}。これはまさに防災施設の被災を含む台風の発生から浸水災害までの一連のシナリオを書いたものである。

3. シナリオに基づくリアルタイム災害予測

(1) リアルタイム予測のフロー

表-1は、高潮災害のリアルタイム予測のフローチャートである。表の左側は、台風の予報から浸水予測までの全体系を示すものである。表の右側は、そのために準備すべきシナリオである。

表の左側の最初に示す台風の予報、高潮・高波予測は現在も行われている。ただし、より地域的で詳細な予測が求められている。各予測対象地区の高潮や高波の予測は、そこでの防災施設(護岸等)の安定性能や防災性能(越波等)の予測のインプットデータである。

表の右側のシナリオには、予測対象地区に関する予報や予測に必要な高潮・高波のシナリオ(予測対象地区の高潮・高波を含む)やその地区の防災施設の安定性能や防災性能のシナリオ、そしてその地区の浸水災害のシナリオが示されている。

リアルタイム予測を実現するには、実際にこうしたシナリオを作る道具に関する検討を含めてさらに研究を進める必要がある。

(2) 高潮・高波のシナリオ

図-7は、周防灘付近の台風進路の例であり、こうした台風の進路や中心気圧、進行速度などを想定して数値計算を実施している。

図-8は、周防灘の苅田における高潮の算定図の例で台風の半径を90kmとしたものがある。横軸は中心深度であり、縦軸は台風速度でこの図は北向きの場合の最も厳しい高潮偏差を示している。例えば、中心気圧が965hPaで台風が速度が60km/hであれば、高潮偏差は3mと推定される。こうした算定図表が想定されるすべての台風について作られていれば、それらは高潮のシナリオのセット

表-1 対象地域に対する高潮災害のリアルタイム予測のフロー

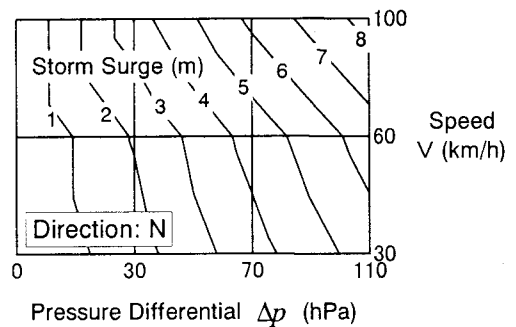
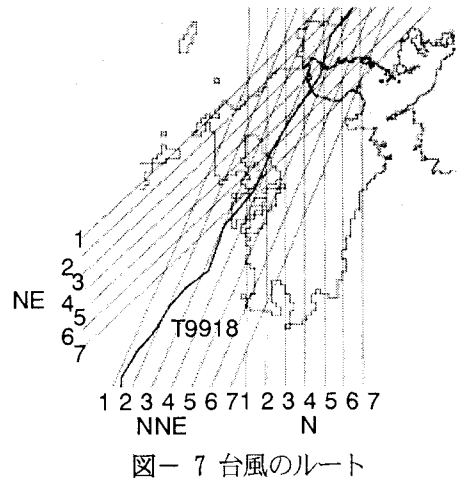
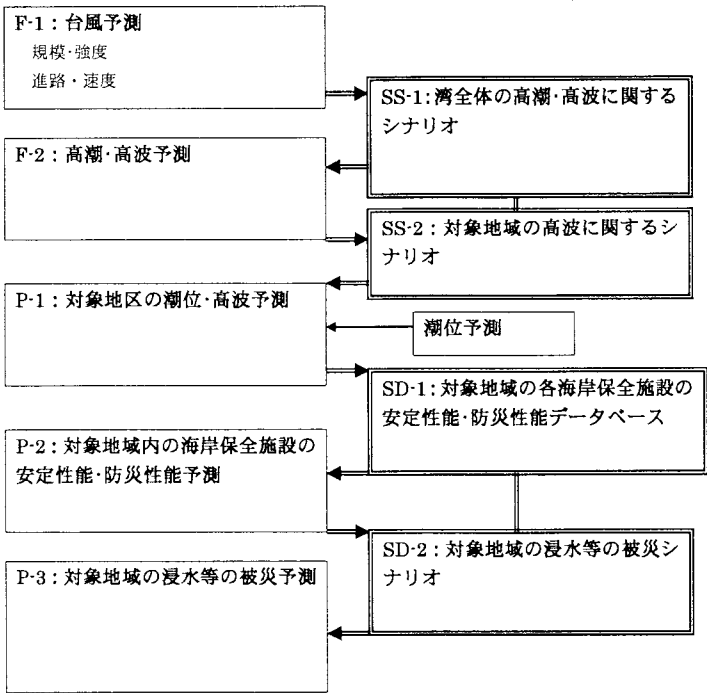


図-8 高潮偏差の推算結果性能

(データベース)である。こうした高潮のシナリオは、同様に同じ湾内の各対象地点についても作ることができる。さらに、数値計算によって高波についてもシナリオを作成することができる。特に沖合いから変形を考慮した波の伝播計算を行えば、各護岸に入射する波など非常に詳細なシナリオも作ることができる。

高潮や高波に関する数値計算の技術は近年非常に発展している。しかしながら、局所的にも精度が高く詳細な高潮や高波の算定法が必要となっており、その研究が必要である。

(3) 高潮・高波と護岸の性能設計

表-2は、護岸の被災のフロー(主要な被災シナリオの流れ)であり、台風時の災害の進行を示すものである。護岸の安定性能を示すのは、基本的にそれぞれの潮位と高波の各レベルに対する被災(変形)のレベルの関係であり、災害のシナリオは、その関係から推定することができる。

表-3は、高波のレベルと被災の関係を示すもので、性能マトリックスと呼ばれるものである⁷⁾⁸⁾⁹⁾。防災施設の性能設計において、最も基本となるもので、横軸に再現期間で表した高波のレベルを示し、縦軸に要求される性能、この場合は安定性能(災害による変形のレベル)を示すものである。要求される安定性能は、施設の重要度によって異なり、通常のものから非常に重要なものまで考えられている。なお、表-3は一つの潮位レベルに対するものであり、基本的にはそれぞれの潮位レベルに対して、こうしたマトリックスが必要となる。

構造物がこうした設計法で設計されていれば、災害の

表-2 護岸の被災フロー

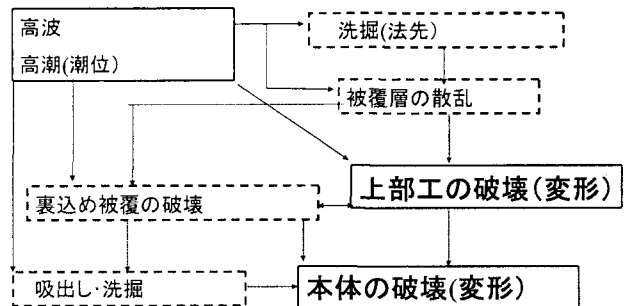


表-3 性能マトリックスの概念

性能レベル 設計レベル	施設の性能 (被害の程度)		
	小	← 大	→ 大
Ⅰ	非常に重要	重要	普通
Ⅱ			
Ⅲ			

シナリオが設計時に作られているといえる。すなわち、性能設計の概念は、災害のリアルタイム予測の一部をなすものである。ただし、既往の防災施設はこうした設計法が取られていなく、また、経年変化によって設計時の性能が保証されていない。したがって、現状での性能の評価が重要となり、表一3において、それぞれの安定性能のレベル(変形のレベル)に対応した、外力(高波)のレベルを把握することが必要となる。

なお、性能設計は新しい概念であり、設計法の確立が必要である。特に安定性に関する性能照査方法(災害の程度:変形量の照査)をさらに発展させることが重要である。変形量の照査については、2章でも述べたように水理模型実験が現状の技術として利用されているが費用と時間がかかる方法である。数値計算などのより簡単な方法の開発が必要であり、また簡易な計算による推定法の開発も必要である。

(4) 浸水災害のシナリオ

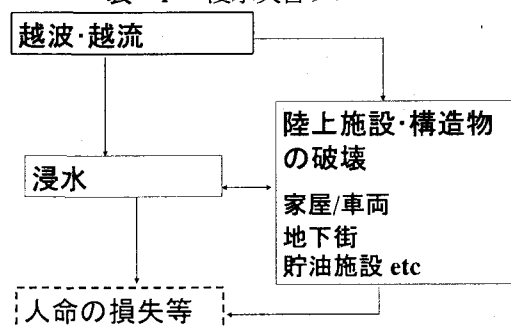
表一4は、浸水災害のフロー(主要な浸水災害の流れ)を示すものである。護岸が被災しなくても、越波による浸水が考えられるが、護岸の倒壊などが重なると大きな浸水となる危険性がある。浸水によって直接的に人がおぼれたりする危険性があり、また家屋や車などの浸水災害が発生する。特に最近では地下街の浸水の危険性が指摘されている。なお、工場の災害などによって危険物質の流出、あるいは船舶やコンテナによる二次災害についてもシナリオを検討する必要がある。これまで考えられている浸水災害のシナリオは、浸水地域を示すことが中心となったハザードマップであったが、より詳細な浸水状況を示し、それによって発生する様々な災害を示すことができる総合的なシナリオ、すなわちダイナミックなハザードマップ(動的なハザードマップ)が必要である。

こうした浸水シナリオに必要な、防災施設の防災性能(護岸の越波量などの施設の機能に関する性能を防災性能と呼ぶ)のマトリックスは、表一3安定性能のマトリックスと基本的に同じであり、各設計レベルに応じた防災性能の要求水準(各高波のレベルに応じた越波量など)によって決めることができる。ただし、やはり現状の防災施設は性能設計に基づいていなく、既存の施設については表一3のようなマトリックスに基づいて性能照査する必要がある。

越波量など防災性能については、現在の水理模型実験で性能を照査することができる。また、主要な形式の護岸に対して、越波量を算定する図表も作られている。さらに、数値計算による越波量の計算も行われるようになってきている。ただし、護岸が被災によって変形した場合の越波用の推定方法などについてさらに検討が必要である。なお、より詳細な浸水状況を示すシナリオとするためには、より高度な浸水数値計算法の開発を含めて、さらなる研究が不可欠である。

なお、現在のハザードマップは、一つの設計対象条件に対する、一つのシナリオである。市民に的確に情報を

表一4 浸水災害フロー



伝えるためには、この一つのシナリオだけでは不十分であることは言うまでもない。また単に浸水深を示すだけでは不十分であり、上述したような動的なハザードマップを複数用意することが重要である。複数の動的ハザードマップとは、防災性能に関する性能マトリックスにほかならない。

(5) 予測手法の信頼性の検討

リアルタイム予測を実用化するためには、予測手法の信頼性に関する確率論的な検討が不可欠である。特に、実用化するために最低限の信頼性の水準をどこに設定するかが大きな問題となり、これについては技術者だけでなく、社会学者の参加を得て検討することが必要である。また、こうした検討によって、このシステムにおいて最もクリティカルなパスがどこにあるのか、どの部分を改善するとよりよいシステムになるのかが明確になる。また、この予測システムと台風の統計的な性質を利用したシミュレーションによって、将来の災害の危険性の定量的評価ができるようになり、それによって効率的な対策を行政・市民が具体的に考えることができる。

(6) 高潮・高波のモニタリング

リアルタイム予測の信頼性を高める効果的な手段としては、高潮・高波のモニタリングがある。すでに、潮位や波高の観測データがリアルタイムで把握できるようになっている。こうしたデータによって予測を修正していくことによってより精度の高いリアルタイム予測が可能となる。ただし、現状の観測地点の数は不十分であり、台風時のデータの信頼性についてさらに改善が必要である。

4. おわりに

最近、我が国では本土に上陸する台風の数が著しく増加しており、こうしたリアルタイム予測技術の必要性はますます高まっている。特に台風の発生が従来の傾向と異なっており、従来の予測を超える異常な高潮・高波災害も懸念される。台風による高潮・高波災害のリアルタイム予測は、市民の安全・安心にとって非常に重要であり、また、防災施設の改善など総合的な防災対策を考えるためにも不可欠である。ただし、リアルタイム予測を実用化するためには、そのツールの格段の進歩が重要で

あり、科学者や技術者の協力が必要となっている。また、社会学者との協力によって、より利用しやすく現実的なシステムにする必要がある。

すでに述べたように、リアルタイム予測は防災施設の性能設計の概念を含むものである。すべての高潮・高波に対する防災施設に性能設計が適用されれば、災害のシナリオをつくることが可能となり、リアルタイム予測はより容易となる。すなわち、リアルタイム予測と性能設計は表裏一体の関係にあるといえよう。すなわち、新しい時代の防災として、防災施設の性能設計とそれに基づくリアルタイム予測が必要であると筆者らは考えている。

海岸構造物の性能設計については、すでに多くの研究者によって議論がなされている^{10)~17)}。また、港湾技術研究所(当時)で実施された International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st century でも集中的に議論されている¹⁸⁾。

2004年12月26日には、インド洋地震津波が発生し、多くの人命が失われた。津波災害も高潮災害と似ているところが多く、こうしたリアルタイム予測が必要であり、特に災害を予測することが重要である。ただし、台風による高潮災害の場合は、予測する時間的な余裕が大きいこと、また災害が想定されているところが高度に利用されている大都市であることを考慮すると、まず高潮災害から検討する必要がある。

この論文は、2005年の1月に開かれた International Conference on Monitoring and Prediction of Water-Related Disasters を一部修正し、日本語に書き改めたものである。

謝辞：この論文をとりまとめるにあたり、気象庁気象研究所の藤谷徳之助所長や榊原均台風研究部長、国土技術政策総合研究所の小田勝也沿岸防災研究室長や福濱方哉海岸研究室長、京都大学防災研究所の林春男教授、沿岸技術研究センターの巽保夫常務ほか多くの方々のご意見を参考にしている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男：台風9918号による高潮の現地調査と追算，港湾技研資料，No. 971，43p.，2000.
- 2) 永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏：台風9918号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性，港湾技研資料，No. 969，48p.，2000.
- 3) 橋本典明・真期俊行・吉松みゆき：波浪推算法による台風9918号の異常波浪の再現計算，港湾技研資料，No. 970，33p.，2000.
- 4) 平石哲也・平山克也・河合弘泰：台風9918号による越波災害に関する一考察，港湾技研資料，No. 972，19p.，2000.
- 5) 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗：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. 973，19p.，2000.

- 6) 柳嶋慎一・加藤一正・岩淵哲治・猿田光隆・平戸誠一郎・堀 謙吾：台風9918号による虹ヶ浜海岸の高潮災害，港湾技研資料，No. 972，19p.，2000.
- 7) SEAC0: Vision 2000 - Performance-based seismic engineering of bridges, 1995.
- 8) 高橋重雄・河合弘泰・高山知司：1999年の台風18号による災害と今後の高潮・高波対策について—高潮対策施設の性能照査と性能設計—，土木学会誌，Vol. 85，10月号，pp. 67-70，2000.
- 9) 高橋重雄：海域施設の性能設計の考え方と適用，土木学会海岸工学委員会，水工学シリーズ03-B-1，B-1-1~B-1-22，2000.
- 10) Van der Meer, J. W.: Stability of breakwater armor layers—Design formulae, Coastal Eng, 11, pp. 219-239, 1987.
- 11) 高山知司・藤井 久：信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討，港研報告，第30巻，第4号，pp. 35-64，1991.
- 12) Melby, J. A. and Kobayasi, N.: Damage progression on breakwaters, Proc. 26th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1884-1897, 1998.
- 13) Oumeraci, H., Allsop, N. W. H., De Groot, M. B., Crouch, R. S., and Vrijling, J. K.: Probabilistic design methods for vertical breakwaters, Proc. of Coastal Structures'99, pp. 585-594, 1999.
- 14) Vrijling, J. K., Vorrtman, H. G., Burcharth, H. F., and Sorensen, J. D.: Design philosophy for a vertical breakwater, Proc. of Coastal Structures '99, pp. 631-635, 1999.
- 15) Goda, Y. and Takagi, H.: A reliability design method for caisson breakwaters with optimal wave heights, C. E. J., 42(4), pp. 357-387, 2000.
- 16) Hanzawa, M., Yamagata, N., Nishihara, T., Umezaki, Y., Tanaka, Y., Takahashi, S. and Tomiyasu, R.: Performance of seawalls against wave overtopping and damage, Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering, in press, 2004.
- 17) Shimosako, K. and Takahashi, S.: Application of reliability design method for coastal structures—expected sliding distance method of composite breakwaters, Proc. of Coastal Structures '99, pp. 363-371, 1999.
- 18) Takahashi, S., Shimosako, K., and M. Hanzawa: Performance design for maritime structures and its application to vertical breakwaters, Proceedings of International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century (ADMS21), PHRI, pp. 63-75, 2001.