

# 大気－海洋－波浪結合モデルと数値波動水路を用いた沿岸災害予測システムの構築と高波・越波災害への適用

DEVELOPMENT OF COASTAL DISASTER PREDICTION SYSTEM WITH ATMOSPHERE-OCEAN-WAVE COUPLED MODEL AND NUMERICAL WAVE FLUME AND ITS APPLICATION TO HIGH WAVE / WAVE OVERTOPPING -INDUCED DISASTER

川崎浩司<sup>1</sup>・村上智一<sup>2</sup>・橋本孝治<sup>3</sup>

Koji KAWASAKI, Tomokazu MURAKAMI and Koji HASHIMOTO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 技術部  
(〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

The aim of the present study is to develop a coastal disaster prediction system making use of two different numerical models, namely an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model and a vertical two-dimensional numerical wave flume based on a VOF method "CADMAS-SURF" in order to estimate wave overtopping phenomena considering meteorological disturbance and its-induced wave characteristics. The validity and utility of the coupled model and the numerical wave flume were verified by comparing with the observation values. The coastal disaster prediction system developed here could become one of the useful and high-accurate tools for predicting physical phenomena in coastal area and examining countermeasures against coastal disasters.

**Key Words :** Coastal disaster prediction system, atmosphere-ocean-wave coupled model, numerical wave flume, high wave/wave overtopping-induced disaster

## 1. はじめに

高潮・高波災害などの沿岸災害を未然に防ぐには、現状の防護レベルの把握のみならず、設計外力に見合った適切な施設規模の算定等が重要である。また、減災の観点から、設計外力を越える場合の評価や将来起こり得る最大規模の被害予測等も求められている。よって、数値モデルを用いて沿岸災害における諸問題を詳細に把握し、解決するためには、風域場、海水流動場、波浪場、海面相互作用など広域な現象を精度良く計算した上で、沿岸・海洋構造部や背後地への被害予測・評価を行うことが重要である。

本研究では、強い気象擾乱やそれに伴う高潮・高波の高精度解析のみならず、沿岸構造物やその背後地への被害予測・評価を行うことのできるシステムの開発を目的とし、大気－海洋－波浪結合モデルと数値波動水路を用いた沿岸災害予測システムを構築する。そして、2005年11月30日に山形県の道路護岸で発生した高波・越波被害を対象に同システムを適用し、その有用性を検証する。

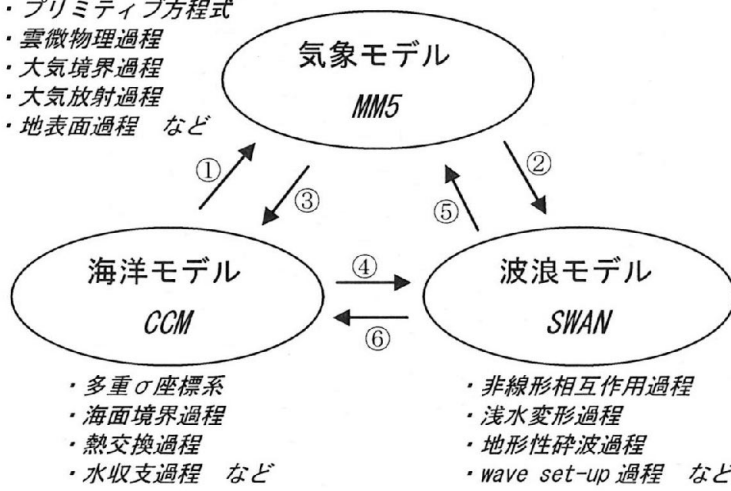
## 2. 大気－海洋－波浪結合モデルによる海象場計算

本研究で構築する高波・越波災害予測システムは、広域現象でかつ海面相互作用が重要となる風域場、海水流動場、波浪場を解析する大気－海洋－波浪結合モデルと、沿岸域の越波現象を計算する数値波動水路 CADMAS-SURF の2つのモデルから構成される。ここでは、沿岸災害予測システムにおいて基盤となる大気－海洋－波浪結合モデル<sup>1)</sup>について説明するとともに、酒田港湾事務所および酒田河川国道事務所によって観測された実測データと比較することでその精度を示す。

### (1) 大気－海洋－波浪結合モデルの概要

大気－海洋－波浪結合モデルで使用する各々のモデルは次のとおりである。気象場の計算には、気象モデル MM5 (ペンシルベニア州立大学・米国気象研究センター)<sup>2)</sup>、海洋場の計算には村上ら<sup>3)</sup>が開発した海洋モデル CCM、波浪場の計算には波浪モ

- ・プリミティブ方程式
- ・雲微物理過程
- ・大気境界過程
- ・大気放射過程
- ・地表面過程 など



- ①; 風速, 摩擦速度, 潜熱フラックス, 顕熱フラックス, 短波放射, 長波放射, 蒸発量, 降水量, 気圧
- ②; 風速, 摩擦速度
- ③; 海面水温
- ④; 流速, 水面変位
- ⑤; 波浪による粗度高さ
- ⑥; 波齢

図-1 大気-海洋-波浪結合モデル

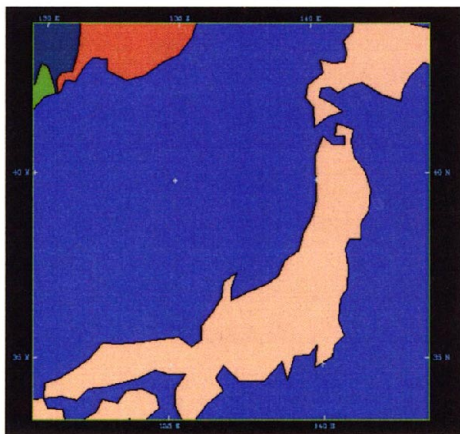


図-2 計算領域I

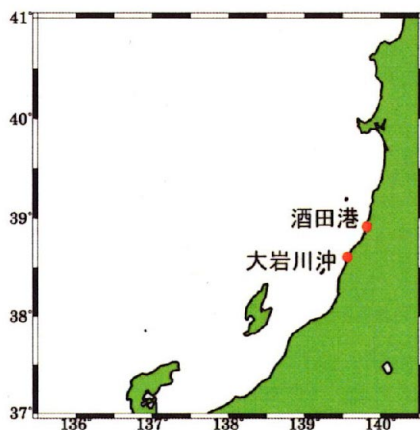


図-3 計算領域IIと観測点.

デル SWAN (デルフト工科大学<sup>4)</sup>)を用いた。

結合モデルでは、これらのモデルを独立に存在させ、それらを同時に実行し、図-1 に示す海面相互作用の変数を任意の交換時間間隔毎に交換することで構築される。各モデルは計算領域および解像度に

表-1 計算条件

気象モデル MM5	水平格子数	領域 I :79×79 領域 II :118×118
	鉛直層数	20層
	タイムステップ	領域I:45s, 領域II:15s
	水平解像度	領域I:15km, 領域II:5km
	大気境界層スキーム	Blackadar scheme
	雲物理過程	Reisner graupel scheme
	放射過程	Cloud-radiation scheme
	地表面過程	5-layer soil scheme
	初期値・境界値	気象庁メソ客観解析値 (6時間間隔, 10km格子)
海洋モデル CCM	水平格子数	138×113
	タイムステップ	10s
	水平解像度	3km
	初期値・境界値	・潮汐モデルNAO99Jb <sup>5)</sup> ・NOAA海面温度データ
波浪モデル SWAN	水平格子数	138×113
	タイムステップ	150s
	水平解像度	3km
	交換時間間隔	600s
結合モデル	計算期間	2005年11月25日12時～ 12月2日0時 (UTC)

差があることから、変数の交換は緯度経度情報を基に、一番近い格子同士のデータを交換する。その際、気象モデルにおいて陸上と海上では気象データに大きな違いがあることから、CCMおよびSWANに入力する気象データは、常に海上のデータを入力するようにプログラムを処理している。

気象モデルの計算領域は、季節風を精度良く取り扱うために、ユーラシア大陸から日本海を含めた大領域 I (図-2 参照) と、大岩川地区周辺を高解像度で扱うための小領域 II (図-3 参照) を設定し、それらの間でネスティング計算を行う。また、海洋モデルおよび波浪モデルは、計算時間短縮のために小領域 (図-3 参照) のみを計算する。その他の計算条件は、表-1 に示すとおりである。

## (2) 大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証

図-4 および図-5 は、酒田港 (図-3 参照) における風速および風向の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。これより、計算値は、風速の変動の傾向や冬季日本海の特徴である強い西風を精度良く評価していることがわかる。このことは、本システムが観測値を取得できない海域・陸域においても図-4 および図-5 と同様の精度で風速・風向を計算できることを示唆している。

図-6 および図-7 は、大岩川沖 (図-3 参照) における有義波高・有義波周期の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。29日12時頃~30日0時頃の観測値の有義波高は、5m を超える高波浪となっていることがわかる。その時、この高波浪に伴って大岩川周辺では越波災害が発生していた。そして、計算値もこの高波浪を精度良く評価していることがわかる。また、計算値は、29日以前の低波浪も正しく評価しており、これらのことから結合モデルは、有義波高を正しく計算できるものといえる。一方、有義波周期の計算値は過小評価となっている。一般に SWAN から算定される波の周期は観測値より小さくなるのが既往の研究で指摘されており<sup>6)</sup>、ここでは計算値に 1.2 を乗じた周期を越波計算に採用した。

図-8 および図-9 は、酒田港 (図-3 参照) における有義波高・有義波周期の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。有義波高を示す図-8 より、前述の大岩川沖の有義波高の計算結果と同様に高波浪のみならず低波浪までを高い精度で再現していることがわかる。しかし、有義波周期の計算値は過小評価となっている。これは、前述した SWAN による周期算出の問題であると考えられ、今後、この問題をより詳細に検討していく必要がある。

図-10 は、酒田港 (図-3 参照) における潮位の観測値と計算値を比較したものである。これらより、計算値と観測値は、良く一致していることが示され、結合モデルは日本海の海水流動を正しく再現しているものといえる。

## 3. 数値波動水路による護岸越波計算

### (1) 数値波動水路 CADMAS-SURF の概要

本研究で用いた断面 2 次元数値波動水路 CADMAS-SURF<sup>7), 8)</sup> は、海域施設の耐波設計に適用することを目的に構築され、実務への適用が積極的に進められている数値計算モデルであり、越波・越流計算にも適している。

数値波動水路 CADMAS-SURF で使用する基礎方程式は、2 次元非圧縮性流体に対する連続方程式、ポーラスモデルに基づいて拡張された Navier-Stokes 方程式である。また、自由表面の取り扱いには汎用性の高い VOF (Volume Of Fluid) 法を採用し、

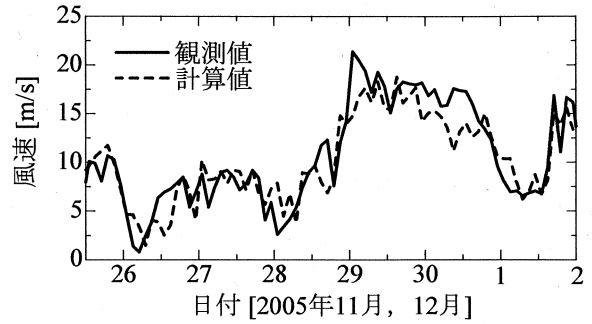


図-4 酒田港における風速の観測値と計算値の比較

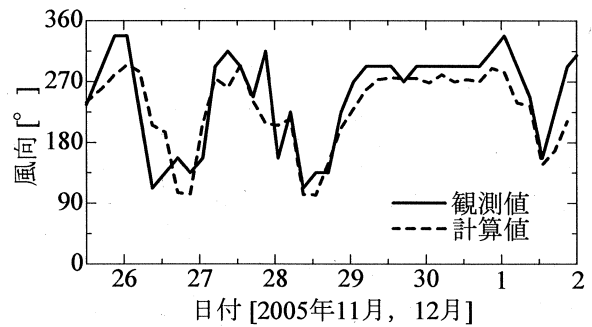


図-5 酒田港におけるの風向の観測値と計算値の比較；0° は北風，90° は東風を示す。

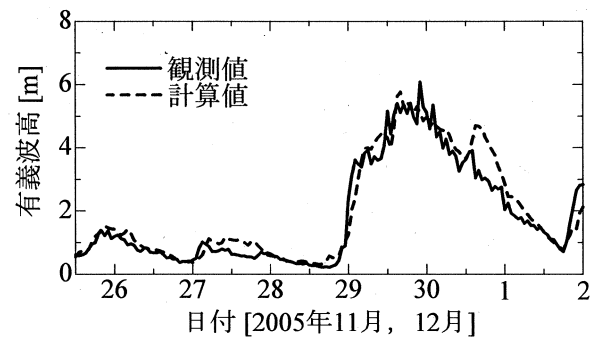


図-6 大岩川沖における有義波高の観測値と計算値の比較

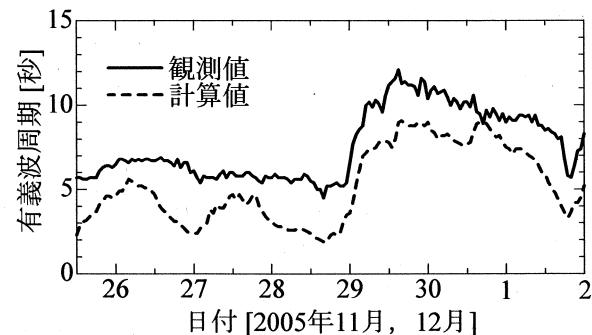


図-7 大岩川沖における有義波周期の観測値と計算値の比較

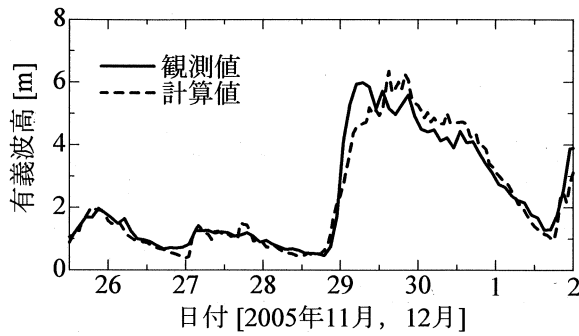


図-8 酒田港における有義波高の観測値と計算値の比較

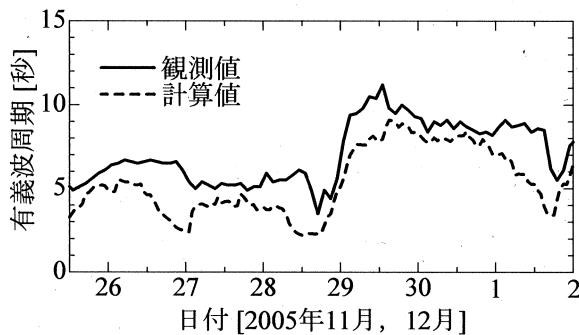


図-9 酒田港における有義波周期の観測値と計算値の比較

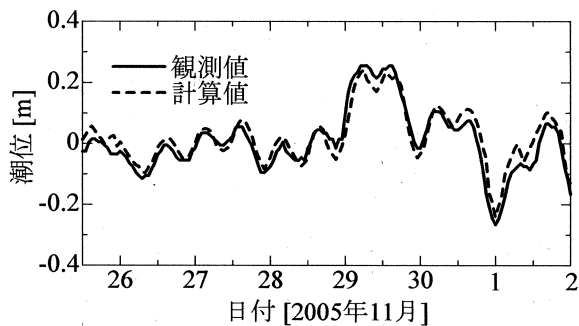


図-10 酒田港における潮位の観測値と計算値の比較

VOF 関数の移流方程式を donor-acceptor 法によって解くことにより、自由表面の動的挙動を高精度に捕獲することができる。

CADMAS-SURF による計算結果の精度検証はこれまで水理模型実験との比較が実施されており、越波現象に関しても、精度よく現象を再現できることが示されている (例えば, 7), 8), 10)。

## (2) 計算領域および計算条件

本対象領域である一般国道7号の山形県鶴岡市大岩川地区では、台風や冬季風浪等による高波浪の来襲時に道路護岸への越波が著しく、片側通行等の交通規制が度々実施されている場所である。

数値波動水路CADMAS-SURFの計算領域を図-11に示す。同図から認められるように、来襲する高波浪を減衰させることを目的に、沖合に離岸堤が、また直立護岸前面に消波工が設定されている。なお、計算では、離岸堤および消波工は多孔質体の透過性構造物としてモデル化した。

CADMAS-SURFは、上述したとおり、断面2次元モデルであることから、平面的な地形の影響による波浪変形を考慮することができない。この点については今後の重要な検討課題であるが、本研究対象である大岩川地区では、これまでの現地観測により、高波浪の波向きが海岸線に対してほぼ直角方向が卓越していることを確認していることから<sup>9)</sup>、本計算では海岸線に直角方向の断面地形を計算断面とした。

表-2は本計算で使用したCADMAS-SURFに関する各種パラメータを示したものである。計算領域には、直立護岸周辺の越波現象および波浪変形を高精度かつ効率的に解析するために不等間隔格子を採用し、護岸周辺および自由表面付近で格子間隔が最も細くなるように設定した。また、基礎方程式の移流項の差分には、1次精度風上差分と2次精度中央差分の割合が0.2 : 0.8となるVP-DONOR-0.2を採用した。数値波動水路は単相流モデルであるため、TimerDoor法によるオプションを用いて、気泡の上昇および水滴の落下処理を行った。また、護岸背後直後に越波升領域を設け、越波升内のVOF関数Fの面積積分値から越波量の時系列変化を求めた。

造波条件は、結合モデルから得られた大岩川地区における有義波高5.77m、有義波周期10.92sの不規則波である。なお、前述したとおり、一般にSWANから算定される波の周期は観測値より小さくなるのが既往の研究<sup>9)</sup>で指摘されており、ここでは計算値に1.2を乗じた周期を越波計算に採用した。

## (3) 波浪・越波計算結果と考察

図-12に、沖合から道路護岸までに至る水面の空間波形の計算結果を例示する。同図から、沖合から不規則に入射する波が離岸堤の影響により激しく砕け、波高が減衰している様子が認められる。さらに、道路護岸近傍の越波状況の一例を示す図-13からわかるように、離岸堤によって波高減衰した波が水深変化の影響により前傾化し、大規模に崩れている。しかしながら、この場合、離岸堤と消波工の消波機能が不十分であったため、来襲波が打ち上げられ、越波している。このように、複雑な海底地形および海岸構造物周辺の諸現象に対する数値波動水路CADMAS-SURFの有用性が確認される。

図-14は護岸背後に設置した越波升内の越波量Qの時系列を示したものである。同図より、越波量が時間的に増加していることがわかる。また、平均越波流量を算定すると  $1.53 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$  となり、観測値<sup>9)</sup>の  $2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$  とほぼ一致していることが判明し、本システムの適用性と有用性が検証された。

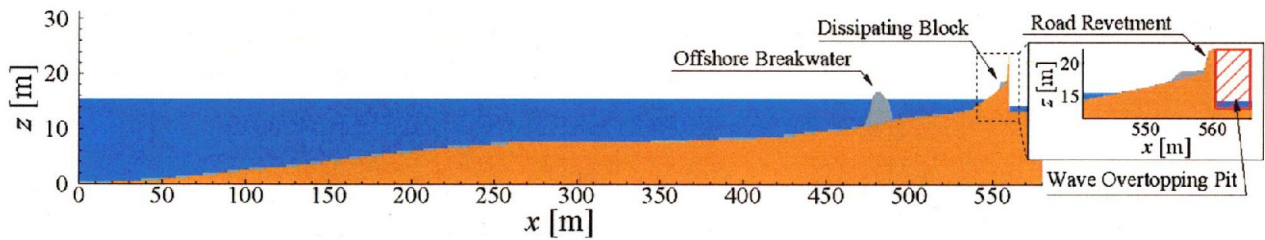


図-11 計算領域

表-2 計算条件

計算時間	時間間隔	1.0 <sup>-7</sup> ~0.05s
	終了時刻	800.0s
造波方法	造波モデル	造波境界
	造波タイプ	ストークス波/クノイド波
格子間隔	x方向	$\Delta x = 0.2\text{m} \sim 1.0\text{m}$
	z方向	$\Delta z = 0.2\text{m} \sim 0.5\text{m}$
差分スキーム	DONORパラメータ	0.2
TimerDoor法	気泡上昇量	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下
境界条件	速度・圧力	スリップ条件
	VOF関数F	フリー条件

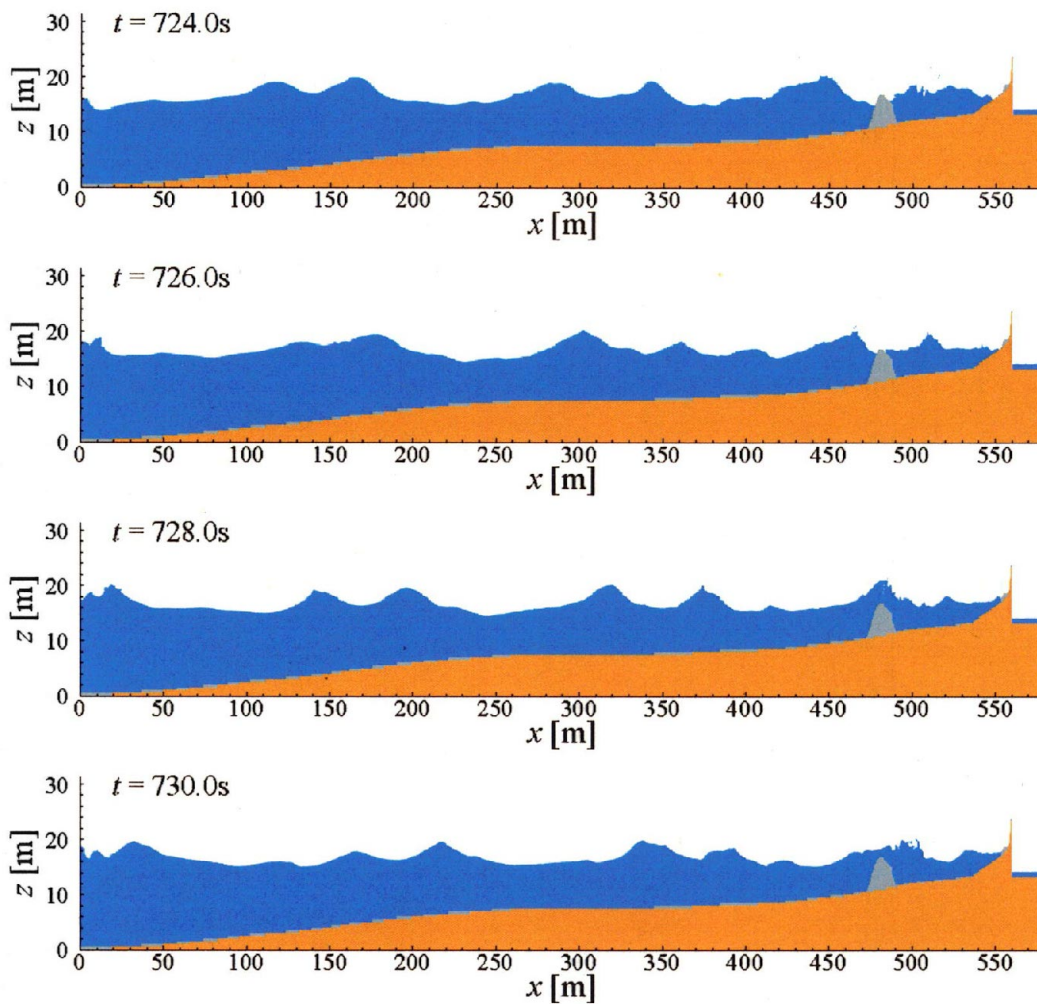


図-12 水面の空間波形

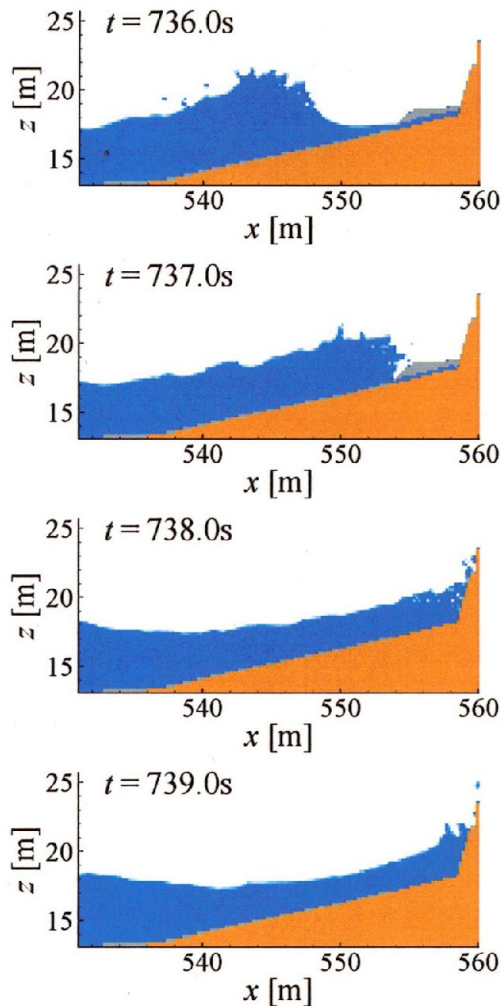


図-13 護岸周辺の越波状況

#### 4. おわりに

本研究では、沿岸防災・減災対策に寄与することを目的に、大気-海洋-波浪結合モデルと数値波動水路を組み合わせた沿岸災害予測システムを構築し、現地の高波・越波災害を対象にその有用性を検証した。また、本システムは、高波・越波のみならず台風、高潮などにも適用でき、さらに気象庁から常時配信されるRSMによるデータを初期値・境界値として利用すれば、36時間予測が可能となることから<sup>11)</sup>、沿岸災害の予測や対策に大きく貢献できるものと考えられる。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局酒田河川国道事務所より越波に関する観測結果等の貴重な資料のご提供を戴いた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。また、数値波動水路による越波計算では、名古屋大学大学院生D2・菊雅美さんの協力を得た。ここに謝意を表す。最後に、本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A) (研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046、研究課題名：異常気象が及ぼす沿岸海域物理環境場への影響を軸とした水防災環

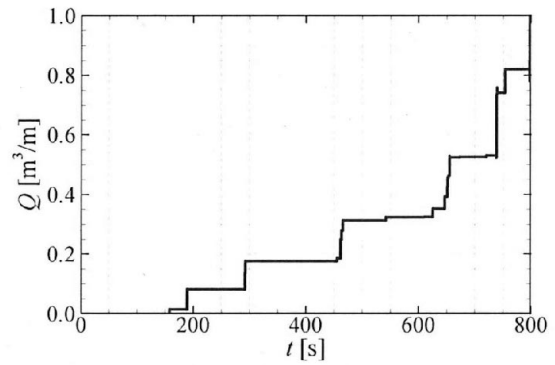


図-14 越波流量の時系列変化

境評価システムの開発) による成果であることを付記し、深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 村上智一, 川崎浩司, 山口将人, 水谷法美: 気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.103-108, 2006.
- 2) Dudhia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 121, pp.1493-1513, 1993.
- 3) 村上智一, 安田孝志, 大澤輝夫: 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 $\sigma$ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.366-370, 2004.
- 4) Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C.: The SWAN wave model for shallow water, *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng.*, Vol. 1, pp. 668-676, 1996.
- 5) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional around Japan, *J. Oceanography*, Vol. 56, pp.567-581, 2000.
- 6) 間瀬 肇, 安田誠宏, Tracey H. T., 辻尾大樹: 富山湾沿岸に災害をもたらした2008年2月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.156-160, 2008.
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p, 2001.
- 8) 財団法人沿岸技術研究センター: 沿岸技術ライブラリーNo.30 CADMAS-SURF 実務計算事例集~数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書~, 368p, 2008.
- 9) 今村文彦・川崎浩司・永井紀彦・平山克也・清水勝義・橋本孝治: 道路護岸の越波に関する予測手法の現地への適用, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1111-1116, 2007.
- 10) 川崎浩司, 菊 雅美, 笹田泰雄, 眞栄里和也, 内間安治, 嶋田 宏, 五味久昭, 三浦健悟, 柴田哲郎: 海底地形と護岸形状が及ぼす規則波/不規則波動場での海岸護岸の越波特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.831-835, 2008.
- 11) 深尾一仁, 大澤輝夫, 西部隆一郎, 橋本潤, 橋本篤, 安田孝志: MM5を用いた局地気象予測の可能性に関する検討, 日本気象学会秋季大会講演予講集, p.417, 2003.