

一般座標系による河川氾濫を考慮した 台風7010号の高潮推算

NUMERICAL SIMULATION OF STORM SURGE-FLOOD COUPLING DISASTER
GENERATED BY T7010 APPLIED THE GENERAL COORDINATE SYSTEM

原信彦¹・山田正²・柴木秀之³

Nobuhiko HARA, Tadashi YAMADA and Hidenori SHIBAKI

¹正会員 工修 株式会社 エコー 沿岸デザイン本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²フェロー 工博 中央大学 理工学部 都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 工博 株式会社 エコー 沿岸デザイン本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

A storm surge-flood coupling model was developed for numerical analysis of the disaster phenomena in river and coastal areas. In the coastal area, the basic equations of storm surge model are the multi-level continuity and momentum equations integrated for each layer. The shear stresses, the pressure gradients and the radiation stresses are incorporated in the momentum equations. The wave fields are calculated by MRI wave hindcasting model. A general coordinate system can model the complex shape of a number of rivers. In the river, the basic equations of flood model are two dimensional unsteady flow ones. The new storm surge-flood coupling model is applied to the analysis of current and water level, generated by T7010, in the rivers and inundation area in the Kochi city.

Key Words : Storm surge, surge-flood coupling model, general coordinate system

1. はじめに

台風 7010 号は、四国南岸域に襲来し、足摺岬、高知、宿毛で当時観測史上最大の最大風速を観測し、太平洋側では最大級の波浪であった。高潮では、土佐湾一帯に異常な潮位偏差を記録した。高知県の桂浜では、2.35m となる潮位偏差を記録し、日本の外洋に面する沿岸において観測された高潮の中でも最大級のものである。桂浜の位置する浦戸湾は広範囲にわたり床上、床下の浸水被害となった。この異常な潮位偏差発生となる過程を明らかにするべく、再現シミュレーションが実施されている。山下・別宮 (1996) ¹⁾ は、この異常潮位が、波浪または、成層の影響によるかを検討し、波浪による Wave setup が支配的であるとしている。金ら (2008) ²⁾ は、潮汐・高潮・波浪結合モデルにより再現シミュレーションを実施し、潮汐の振幅が小さいため、波浪の影響の方が大きいとしている。柴木ら (2001) ³⁾ は、気圧低下と吹き寄せの効果に加え、密度成層、河川流入、Wave setup の効果を考慮し、再現計算を実施し、波浪による Wave setup の効果が桂浜で 1m 以上となり、密度成層の効果は、0.2m 程度としている。なお、河川流入は、高潮推算の最小格子である 50m 格子で河川を表現し、上流境界から流量を与

えている。このように、波浪の影響が支配的であることは過去の研究で述べられている。しかし、河川流の影響に関しては、十分な検討が行われていない。そこで、波浪による Wave setup の効果に加え、河川流入と浸水を考慮した推算を実施する。浦戸湾に流入する主な河川は、久万川、鏡川、国分川、舟入川、下田川の 5 河川あり、これらの河川幅は、100m 以下である。そのため、高潮推算において河川流量を考慮する場合に、一般的に用いられているデカルト座標系の計算格子間隔 (50m 程度) では、地形近似精度が低下し、河川形状を表現することが難しい。一方、地形近似精度を高めるため、河川幅に合わせた計算格子間隔とすると、膨大な格子数となり、効率的な計算を行うことができない。

本研究では、5 河川を含む浦戸湾奥部の複雑な地形を表現するために、一般化座標系の地形データ (図-1 参照) を作成する。そして、外洋域から沿岸域までの高潮推算格子と一般化座標系の河川要素を結合し、高潮と浸水を考慮した河川流を同時に行うモデルを開発する。浦戸湾を対象に台風 7010 号の再現計算を実施し、Wave setup の効果を確認するとともに、河川流量が潮位偏差に及ぼす影響を検証する。

2. 数値計算モデル

(1) 高潮推算モデル

海域で用いる高潮推算は、気圧の低下と海上風の吹き寄せによる効果に加え、Wave setup を考慮したモデルを適用する。本研究の高潮推算の基本方程式は、式(1)～(3)に示す Wave setup を考慮し、鉛直方向に積分した連続式と運動方程式である。Wave setup の効果は、運動方程式に Radiation 応力発散項で表現する。離散化は、非線形項に風上差分を用い、空間差分はスタッガード格子とし、時間差分にはリープ・フロッグ法を用いる。高潮推算の運動方程式に取り入れている Radiation 応力は、別途、浅海波浪推算により算出する。浅海波浪推算は、MRI モデルを基本とし、水深および砕波を考慮した、成分波スペクトルより、Radiation 応力を算出する。なお、砕波波高は、合田 (1970) ⁴⁾ の砕波限界波高式を用い推定する。

高潮推算、波浪推算に用いる台風 7010 号の気圧分布は、Myers の気圧近似式を用い、同心円状に近似する。海上風推算モデルは、柴木ら (2001) ³⁾ に習い、境界層モデルとする。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ & = +fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \\ & + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 η は水位変動量、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス、 f はコリオリ係数 ($f = 2 \omega \sin \phi$ 、 ω は地球自転の角速度、 ϕ は緯度)、 g は重力加速度、 D は全水深 ($D = h + \eta$ 、 h は静水深)、 ρ は海水の密度、 p_0 は圧力、 τ_s は海面せん断応力、 τ_b は底面せん断応力、 A_h は水平渦動粘性係数、 S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} は Radiation 応力である。

(2) 二次元不定流計算

浸水域を含む河川域に用いる計算は、実河川など複雑な形状の表現能力が高く、流下方向に沿って要素を比較的容易に作成することができる一般化座標系による二次元不定流計算を用いる。なお、計算モ

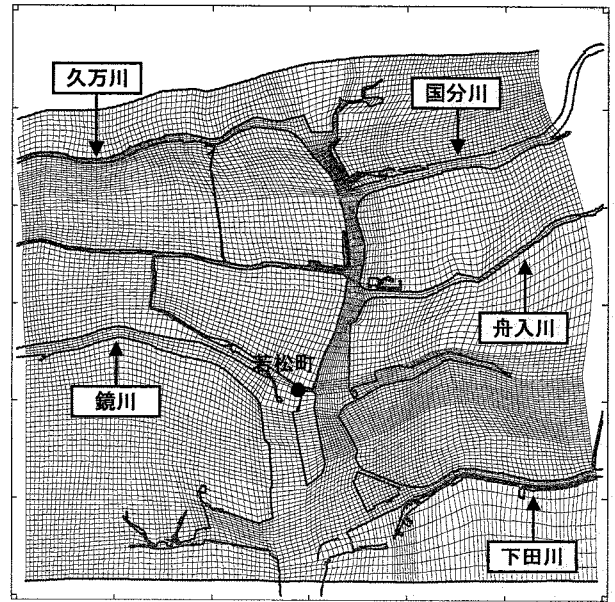


図-1 河川要素図

デルは、水理公式集例題プログラム集 (2001) ⁵⁾ に収められているプログラムを改良する。一般化座標系の基礎式は、デカルト座標系の二次元不定流計算式を、ヤコビアンを用いて座標変換したものである。数値解析法は、有限体積法とし、離散化は、非線形項に風上差分を用い、空間差分にはスタッガード格子とし、時間積分には Adams - Bashforth 法を用いる。なお、モデルの詳細は、水理公式集例題プログラム集 (2001) ⁵⁾ を参照されたい。

(3) 高潮推算と二次元不定流の同時計算

高潮推算と二次元不定流の同時計算は、原ら (2009) ⁶⁾ を基に作成する。

海域と河川の結合は、河川要素の境界から算出された流量を海域の境界部分の海域格子に与える。なお、河川要素と海域格子の間隔および個数は一致しないため、河川の境界要素から得られる流量を海域格子に分配し、流入させる。一方、海域からは、河川要素の境界部に水位を与える。河川要素に与える水位は、海域格子の近傍の値とする。

海域と河川域の同時計算に関して、高潮推算と二次元不定流計算の計算時間間隔が、2.0s と 0.05s と異なる。そのため、高潮推算の 1 ステップで、二次元不定流計算は 40 ステップ計算することとなる。

3. 計算条件

図-1 は、河川要素図であり、浦戸湾奥部の 5 河川を含む複雑な地形を一般化座標系により表現する。5 河川は、流下方向に滑らかになるように作成し、河川横断方向には、少なくとも 2～3 要素を設定する。5 河川の上流端境界に与える河川流量は、運輸省第三港湾建設局資料 ⁷⁾ に示されている鏡川の河川流量ハイドログラフを用いる。その他の河川は、来襲当時の最大流量のみの記載であるため、鏡川のハ

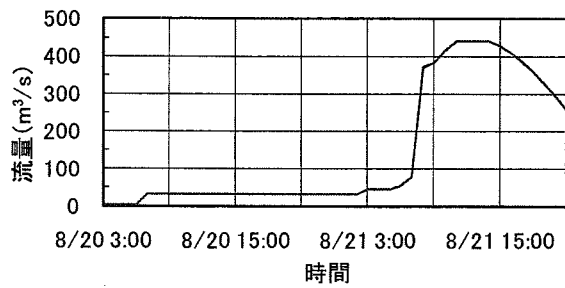


図-2 鏡川の河川流量ハイドログラフ

表-1 台風7010号来襲時の各河川の最大流量

河川名	最大流量 (m³/s)
国分川	510
久万川	210
舟入川	40
鏡川	440
下田川	100

イドログラフを基に、各河川の最大流量と鏡川の最大流量との比により作成する。図-2 は、台風 7010 号来襲時の鏡川のハイドログラフであり、表-1 に台風 7010 号来襲時の各河川の最大流量を示す。なお、国分川と久万川の流量は、合流したものとなっている。そのため、両者の計画洪水流量から比を求め、その比から両河川の最大流量を設定している。

河川流量は、21 日 8 時に流量増加し、同日 11 時にピーク流量となり、その流量は 3 時間継続する。

高潮推算に用いる計算範囲は、台風 7010 号の経路を含む広域を 5,400m 格子で地形近似し、対象とする浦戸湾へ向け、1:2あるいは1:3で領域を接続し、四国全域を 1,350m 格子で地形近似する。浦戸湾内の河川要素との接続領域は、50m 格子とする。

台風 7010 号の再現期間は、8 月 20 日 3 時から揺れ戻しが完了する 21 日 21 時までの 42 時間とする。計算設定潮位は、高潮による最大潮位偏差が満潮時刻と一致していることから、T.P.+0.8m とする。また、陸域の粗度係数は、平面二次元計算の場合、土地利用状況により粗度係数を設定することが考えられ、一般的な方法の一つであるが、1970 年当時の土地利用状況を正確に再現することが困難なため、浸水域を含む全域で、マンニングの粗度係数を 0.025 とする。

4. 台風 7010 号の再現計算

(1) 気圧・海上風の推算

境界層モデルによる推算値と後述する観測値を時系列的に比較すると、台風来襲時の推算の風速が遅い。風向は観測値と比べると、台風来襲から通過に掛けて、概ね 2 方位程度の差が生じる。そこで、観測値と一致するように、境界層モデルより得られる

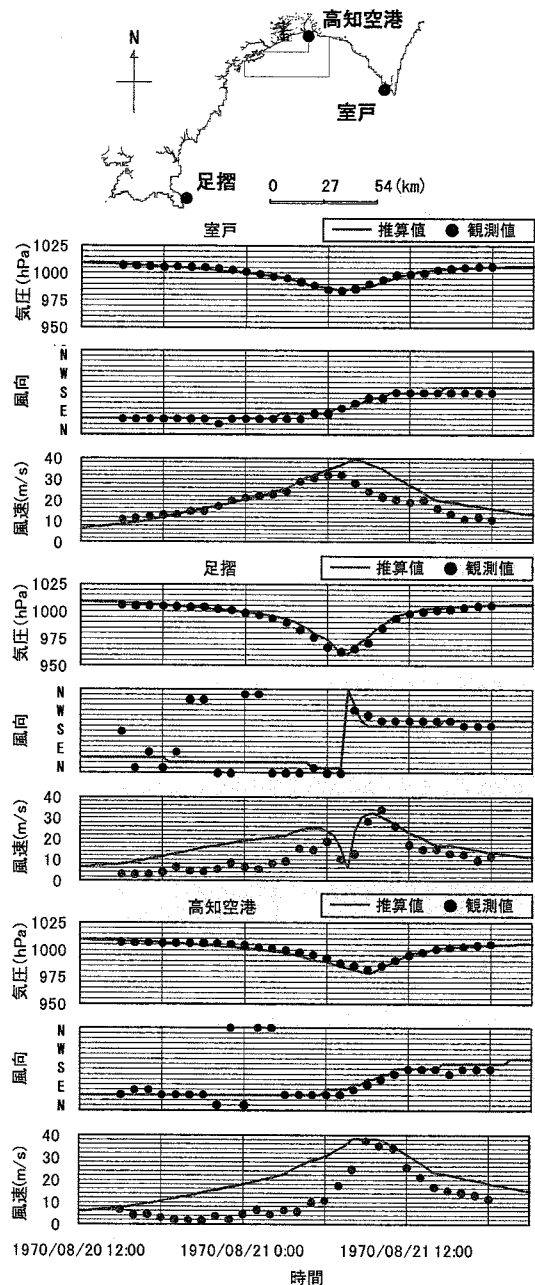


図-3 気圧および風向・風速の推算値と観測値の時系列比較図と観測位置図

推算風を補正する。風速は海域全体で、1.2 倍とし、観測値の最大風速に近づける。風向に関しては、対象海域において、22.5° 反時計回りに補正する。図-3 は、室戸、足摺、高知空港観測地点における、気圧および風向・風速の推算値と観測値の時系列比較図である。代表地点は、柴木ら (2001)³⁾ に観測値が示されており、そのデータを本論文でも取り入れる。なお、気圧・海上風推算に用いる台風半径は、3 地点の観測気圧と一致するように調整している。

気圧は、最低気圧となる前の時刻 (21 日 3~6 時) で、足摺はやや推算値の気圧が高く、高知空港では、低い傾向にあるものの、推算値と観測値は概ね一致している。風向は、境界層モデルの風向を補

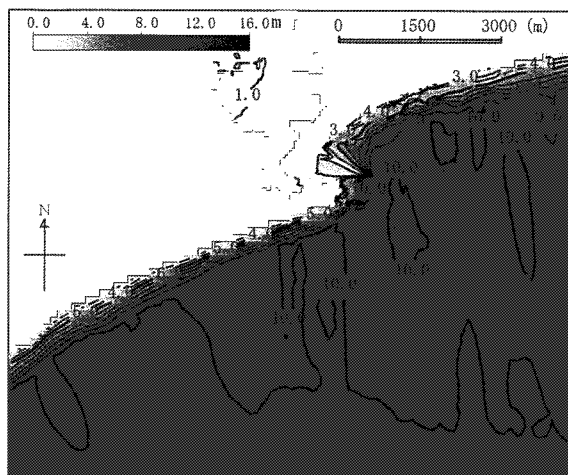


図-4 波浪推算による最大有義波高平面分布

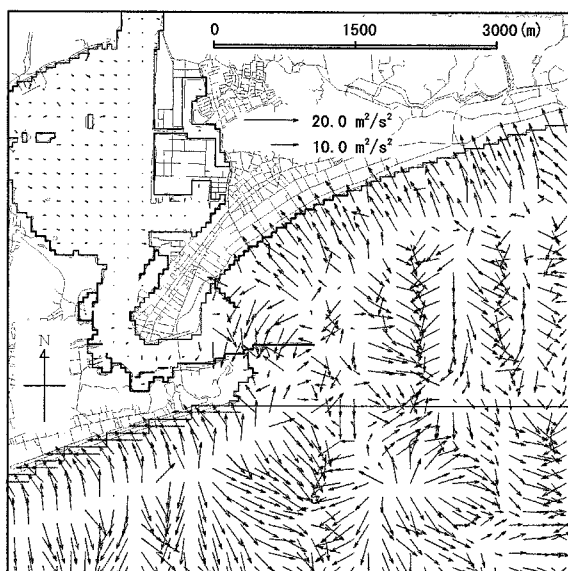


図-5 Radiation応力勾配ベクトル分布

表-2 高潮推算ケース一覧

Case No	推算条件
Case 1	高潮推算のみ
Case 2	高潮推算に波浪考慮
Case 3	高潮推算に波浪考慮, 河川流考慮

正したことにより、台風来襲時刻は1方位程度の差であり、概ね一致している。風速は、海上推算風と陸上観測風の比較であることから、推算値の方が速い。室戸について、推算値の最大発生時刻が観測値のそれより、2時間程度遅く、他の地点に比べ、時系列的に一致していない。これは、気圧分布をMyersの気圧近似式を用いて、同心円状の気圧分布としているため、推算値の最低気圧となる時刻が観測値に比べ遅い。その結果、推算値の最大値が発生する時刻が遅くなり、観測値と時間の差が生じている。また、観測風は、陸上地形の影響を受け、必ずしも推算値と一致しない。例えば、

高知空港の時系列では、台風来襲前の風（E系）は、陸上地形の影響により観測値の方が遅い。観測設置位置により、陸上の影響を受ける風向は異なり、一般的に観測値の方が遅くなる。

(2) MRIによる浅海波浪推算

Radiation 応力を算出する波浪推算は、MRIモデルとする。計算範囲、領域構成および計算格子間隔は高潮推算と同様である。Radiation 応力を算出する領域は、四国全域の1,350m格子範囲とする。図-4はMRIモデルによる最大有義波高の平面分布であり、図-5は外洋に面する沿岸域における21日9時のRadiation 応力勾配ベクトル分布である。水深を考慮することで、屈折および浅水変形の影響により、波高分布に空間的な差が生じる。沖合で10m程度の波高であるのに対し、外洋に面する海岸線では、3～4m程度の波高となる。地形の影響により砕波していることが確認できる。また、波浪推算では、方向分散による回折の効果があり、桂浜の東に位置する防波堤により、回折の効果を確認できる。

図-4および図-5より、砕波水深は水深10～15mである。これより浅い水深では、岸に向かうRadiation 応力勾配ベクトルとなり、深い海域では、冲向きとなる。岸向きのRadiation 応力勾配ベクトルにより、Wave setupによる水位上昇が算出される。

(3) 高潮推算と二次元不定流の同時計算

波浪推算により計算されたRadiation 応力を用い、高潮推算と二次元不定流の同時計算を行う。再現精度の確認のため、高潮推算のみ、波浪を考慮した高潮推算も実施する。表-2に、推算のケースを示す。ここで、全てのケースで海上風推算は、風向・風速の補正を行った境界層モデルを用いる。

a) 最大潮位偏差および最大浸水深

図-6は、3ケースの最大潮位偏差平面分布である。なお、Case 1に示す数値は、運輸省第三港湾建設局資料⁷⁾に示されている潮位図からの抜粋で、推算値の基準と一致させた値である。図-7は、Case 3の河川要素範囲の最大潮位偏差および最大浸水深平面分布である。Case 1では、気圧の低下と、吹き寄せによる影響のみの効果である。そのため、外洋に面する沿岸域の潮位偏差は、Case 2, Case 3に比べ低く、その差は0.8m程度となる。浦戸湾内では、1.0m程度の差である。一方、Case 2, Case 3は、Wave setupを考慮することにより、砕波帯から沿岸までの範囲で、急激な水位上昇が生じる。2m程度の潮位偏差となり、桂浜で観測されている最大潮位偏差の2.35mに近い値となる。この急激な水位上昇により、浦戸湾内の潮位偏差も高くなる。したがって、Wave setupによる影響は、最大潮位偏差で1.0m程度と見積もることができ、観測値と同程度となる。Case 2とCase 3を比較すると、横浜

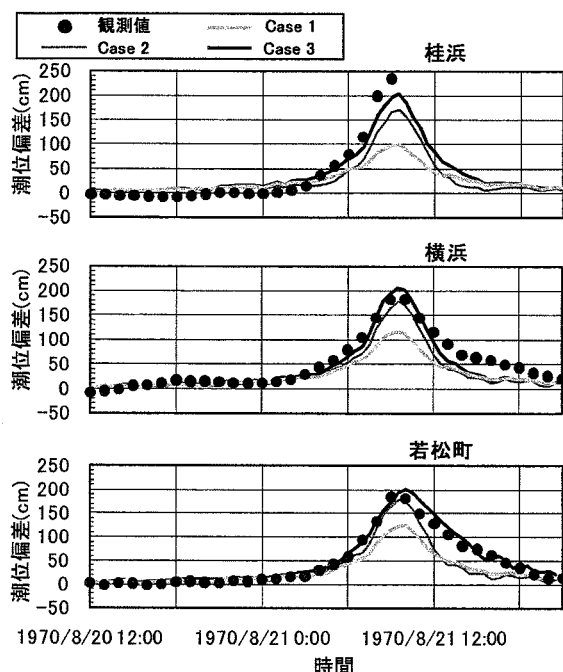


図-8 推算値と観測値の潮位偏差の時系列比較

0.3m 程度高くなり、より観測値に近づく。3 地点ともに台風来襲までの潮位偏差の上昇が観測値とほぼ一致する。河川流量は、21 日 8 時から流量が急激に増加し、浦戸湾内へ流入する。高潮による海域からの水位の上昇と重なることで、浦戸湾内の水位が Case 2 に比べ高くなる。台風通過後は、高潮による影響は次第に小さくなる。しかし、河川流量はピーク流量が 3 時間継続される。よって、Case 3 の潮位偏差の低下は Case 2 より遅くなり、時系列的にも観測値に近づく。浦戸湾湾奥に位置する若松町でその傾向が強い。

c) 流速の比較

図-9 は、21 日 16 時の Case 3 の流速ベクトル分布である。台風通過後の流速に関して、河川流量を考慮していない Case 2 では、流速は遅く、0.1～0.2m/s 程度である。一方、Case 3 では、各河川の上流境界に流量を与えていることから、浦戸湾内への流速が確認できる。河川流量を考慮することで、台風通過後の水位が急激に下がることがなくなり、観測値の時系列と一致する。

5. おわりに

台風 7010 号による異常潮位の再現計算に関して、浦戸湾を対象に実施した。推算は、波浪による Wave setup を考慮した高潮推算と、一般化座標系による二次元不定流計算の結合モデルにより実施した。以下に成果をまとめる。

①海域のデカルト座標系と浸水域を含む河川域を一般化座標系の接続を行い、効率的かつ合理的に浸水計算を含め高潮と河川流の同時計算を実施することができた。

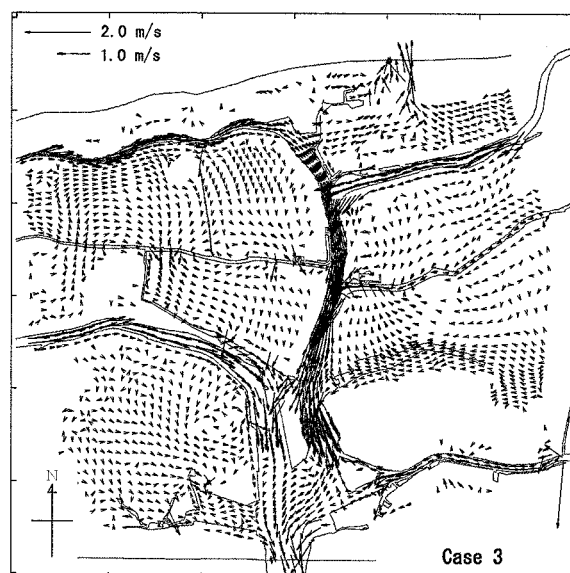


図-9 流速ベクトル分布 (21日16時)

- ②既往研究にあるように、浦戸湾周辺における台風 7010 号の潮位偏差を再現するには、波浪による Wave setup の効果が大きく寄与し、高潮推算のみのケースと比べると、1 m 上高くなり、観測値との再現性が向上することが確認できた。
- ③流下方向に沿って河川要素を設定することができ、一般化座標系による二次元不定流計算を用いることで、デカルト座標系に比べ滑らかな河川流計算を実施することができた。その結果、河川流量を考慮しない場合に比べ、浦戸湾内での最大潮位偏差が 0.3m 程度高くなり、より観測値に近い値となった。
- ④河川流量を考慮することにより、最大潮位偏差だけでなく、特に、若松町において、台風通過後の時系列が観測値とほぼ一致する結果となった。

参考文献

- 1) 山下隆男, 別宮功: 台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.261-265, 1996.
- 2) 金洙列, 安田誠宏, 間瀬肇: 潮汐・高潮・波浪結合モデルによる土佐湾異常高潮の追算, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.321-325, 2008.
- 3) 柴木秀之, 加藤史訓, 山田浩次: 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.286-290, 2001.
- 4) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp.39-49, 1970.
- 5) 土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会水理公式集例題プログラム集編集委員会: 水理公式集 例題プログラム集 (平成 13 年度版), 39p, 2001.
- 6) 原信彦, 山田正, 柴木秀之: 一般座標系による河川分流を考慮した高潮・洪水同時生起の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.246-250, 2009.
- 7) 運輸省第三港湾建設局: 台風 10 号による高知港被害調査報告 第一報, 34p, 1970.