

# 波浪・高潮推算並列結合モデルによる台風7010号の高潮推算

Effectivity of Storm Surge - Wave Hindcasting Coupling Model on Estimation of Storm Surge at T7010

三村正樹<sup>1</sup>・菊地洋二<sup>2</sup>・柴木秀之<sup>3</sup>・原 信彦<sup>4</sup>

Masaki MIMURA, Youji KIKUCHI, Hidenori SHIBAKI and Nobuhiko HARA

A surge-wave coupling model was developed for numerical analysis of the disaster phenomena in coastal areas. The basic equations of storm surge model are the continuity and momentum equations integrated. The shear stresses, the pressure gradients and the radiation stresses are taken into consideration in the momentum equations. The wave fields of a coupling model are calculated by MRI shallow water wave hindcasting model. The developed surge wave coupling model is applied to the estimation of the wave and water level, generated by T7010, in the inundation area in the Kochi city.

## 1. はじめに

高潮は、主に、「気圧の低下による吸い上げ」の効果と「風による吹き寄せ」の効果が重なって発生する。しかしながら、高知県の桂浜で2.35mとなる潮位偏差を記録した台風7010号では、上述した効果のみを考慮するシミュレーションでは潮位偏差が過小となり、再現が困難であった。この異常な潮位偏差の発生過程を明らかにするために、再現シミュレーションが実施されている。例えば、山下・別宮(1996)は、波浪のWave setupが密度成層による影響かを単層および2レイヤーモデルにより推算し、成層の影響は0.2m程度であり、波浪によるWave setupが支配的であるとしている。柴木ら(2001)は、従来の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の効果を考慮している。潮位偏差は、従来の気圧の低下による吸い上げと風による吹き寄せの効果のみのシミュレーションに比べ、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。その結果、桂浜の最大潮位偏差は、2m程度となり、観測値に近づいている。また、金ら(2008)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ている。桂浜での異常潮位を再現することができ、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。このように、台風7010号は波浪によるWave setupの効果が大きく寄与している。

そこで、本研究では、過去の研究に習い、波浪推算モデルと浸水と越波を考慮した高潮推算モデルを結合し、波浪・高潮推算並列結合モデルを開発する。そして、浦

戸湾を対象に台風7010号来襲時の地形による再現シミュレーションを実施し、異常潮位偏差の再現性を検討する。また、高知港の計画完成時の地形についても推算を実施し、防波堤がWave setupによる水位上昇に対する低減効果も確認する。

## 2. 波浪・高潮推算並列結合モデル

### (1) 波浪推算モデル

波浪推算モデルは、後述する図-3に示すように、外洋から土佐湾までの領域(5,400m~450m格子)は、デカルト座標系による第三世代のWAMモデルを用いる。WAMモデルは、単独で推算を実施し、150m格子の海域境界位置の成分波スペクトルを抽出する。

対象地区(150m~50m格子)は、浅海波浪推算に改良されたMRIモデルを用いる。風による波の発達に加え、WAMモデルにより推算された150m格子境界の成分波スペクトルを入力し推算を実施する。MRIモデルでは、合田(1990)の碎波限界波高式を用い、碎波の判定を行う。碎波限界波高と推算波高の比の2乗を成分波スペクトルに乗じることで碎波を表現する。Radiation stressは成分波スペクトルから算出する。ここで、MRIモデルは、方向分散による回折の精度がやや低いことから、対象地区の50m格子領域に関しては、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算結果を用いる。波浪変形計算は、7方位(ESE~S~WSW)、8周期(4s~18s, 2s刻み)で計算する。この結果を用い、MRIモデルの各時刻の有義波高と有義波周期を補正し、回折の精度を向上させる。なお、回折は間瀬ら(1999)のモデルを用い、碎波については、MRIモデルの方法と同様である。

### (2) 高潮推算モデル

高潮推算モデルは、鉛直積分した非線形長波方程式を使用し、気圧の低下による吸い上げと風の吹き寄せによる効果および波浪によるWave setupの効果を考慮する。

1 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 技術開発課 課長  
2 正会員 (財)沿岸技術研究センター 調査部 調査役  
3 正会員 博(工) (株)エコー 防災・水工部 部長  
4 正会員 工修 (株)エコー 防災・水工部 課長

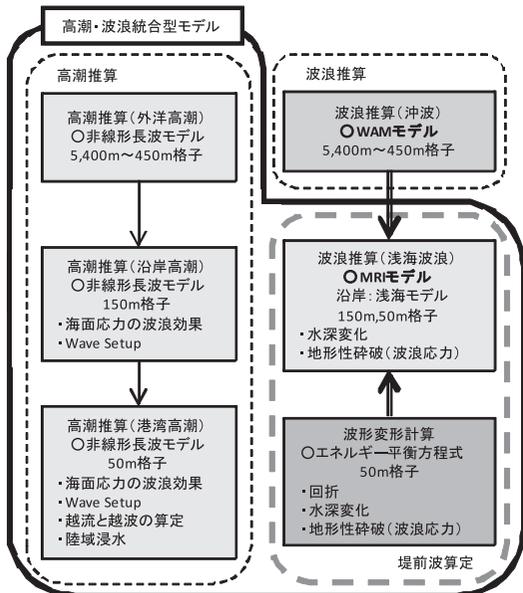


図-1 波浪・高潮推算並列結合モデルの概要

50m 格子の対象地区では、浸水計算を実施する。越波に関しては、波浪推算から得られる有義波高と有義波周期から合田（1990）の越波量算定図により算出する。

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、時間差分にはリープ・フロッグ法を用いる。

（3）波浪・高潮推算並列結合モデル

図-1は、波浪・高潮推算並列結合モデルの概要図である。高潮推算（5,400m～50m 格子）とMRIモデル（150m～50m 格子）を結合し、同時に計算する。MRIモデルから得られるRadiation stressを高潮推算に取り込み、波浪による水位上昇を考慮する。一方、高潮推算から算出される潮位偏差をMRIモデルの水深に加え、水位変動を考慮した波浪推算とする。なお、MRIモデルと高潮推算の波浪諸元および潮位偏差のやり取りは60s毎に行う。

波浪推算、高潮推算に用いる台風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）と同様に、境界層モデルとする。

3. 数値計算条件

波浪・高潮推算並列結合の計算領域は、台風7010号の経路を含んだ、図-3の範囲とする。外洋域を5,400m格子で地形近似し、対象地区の浦戸湾に向け、1：2，1：3で領域を接続する。なお、地形条件は、再現計算用の1970年当時の地形と、計画完成時の2種類とする。

台風7010号の再現期間は、8月20日3時から21日21時

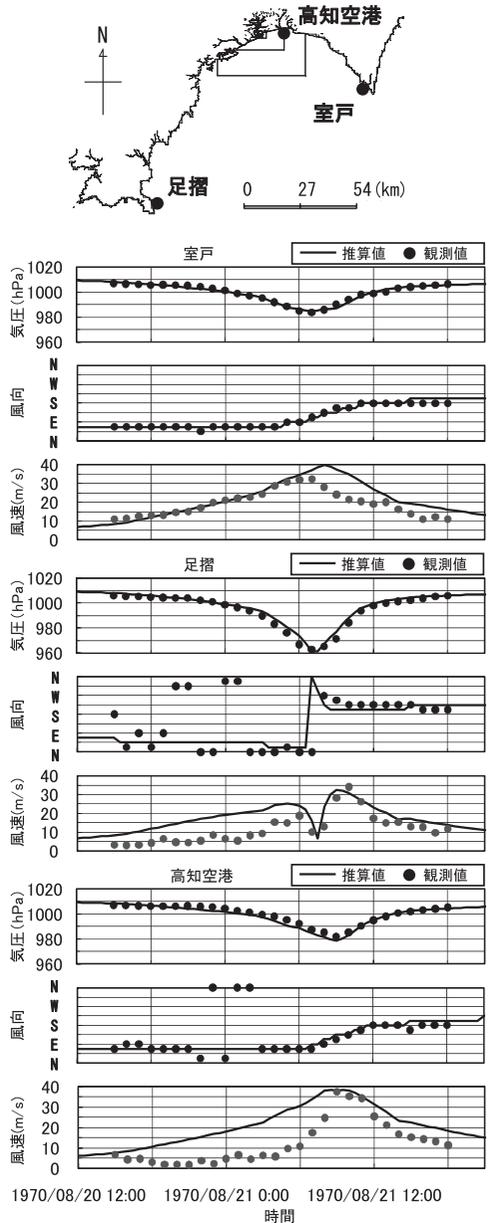


図-2 気圧および風向・風速の推算値と観測値の時系列比較

までの42時間とする。計算設定潮位は、最大潮位偏差発生時刻と満潮時刻が一致していることから、T.P.+0.8mとする。また、50m 格子の陸域の粗度係数は、国土数値情報の土地利用メッシュデータからマンニングの粗度係数を設定する。

4. 波浪・高潮推算並列結合モデルによる推算

（1）気圧、海上風の推算

気圧、海上風の推算は、推算値と観測値の整合を図る。

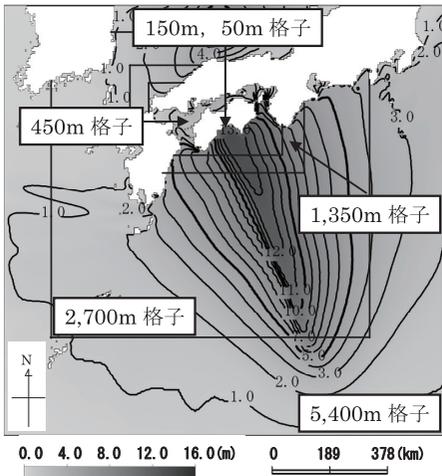


図-3 WAMモデルによる外洋域の最大有義波高平面分布

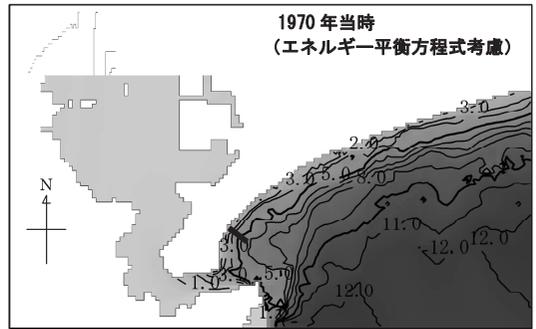
柴木ら(2001)と同様に、境界層モデルによる推算海上風の補正を行う。風速は海域全体で1.2倍とし、観測値の最大風速に近づける。風向は、土佐湾を対象に22.5°反時計回りに補正する。

図-2は、室戸、足摺、高知空港観測地点の気圧および風速、風向の推算値と観測値の時系列比較図である。ここで、Myersの気圧近似式から求める気圧は、上記3地点の観測気圧と一致するように台風パラメータの台風半径を調整している。よって、推算値と観測値は概ね一致している。風速は、観測値が陸上観測風であることから、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風の方が遅い。風向は、境界層モデルから得られる風向を、補正している。よって、台風来襲時刻前後では、1方位程度の差となり、概ね一致している。

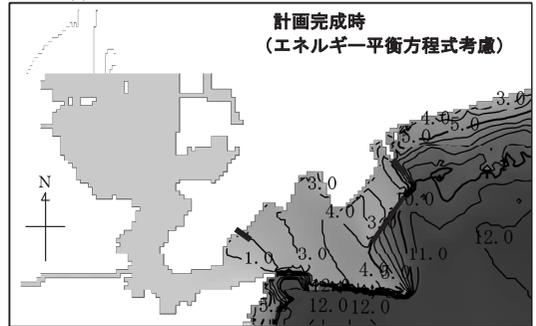
(2) 波浪推算

a) 最大有義波高平面分布

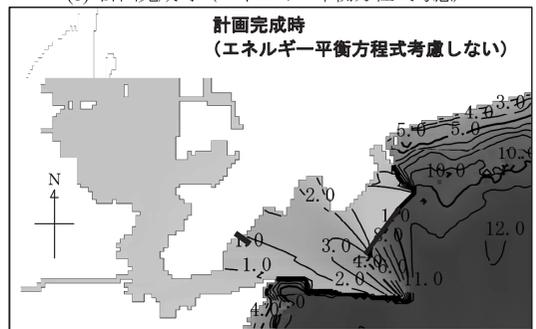
図-3は、外洋から土佐湾までの波浪推算(WAMモデル)による最大有義波高平面分布図である。外洋では最大で13m程度の波高となる。図-4は、対象地区におけるMRIモデルによる最大有義波高平面分布である。図より、沖側では、12m程度の波高が発達し、沿岸部に沿って砕波により波高の減衰が確認できる。なお、砕波水深は10m程度である。図-4(a)の1970年当時の地形では、浦戸湾湾口付近でも5m程度の最大有義波高となる。一方、図-4(b)の計画完成時の地形では、外港に建設された沖防波堤と埋立地から延びる防波堤により、港内側の波高は低く、1970年当時と比べると、5m以上低くなる。また、図-4(c)のエネルギー平衡方程式を考慮しない条件では、図-4(b)の考慮した場合に比べ、港内の波高は低い。回折域では、エネルギー平衡方程式を考慮しなければ、



(a) 1970年当時 (エネルギー平衡方程式考慮)



(b) 計画完成時 (エネルギー平衡方程式考慮)



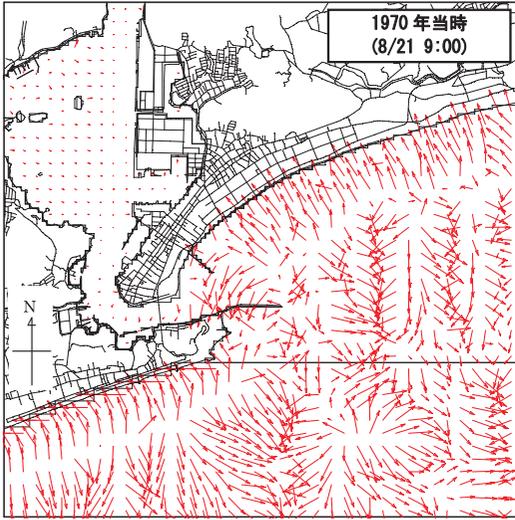
(c) 計画完成時 (エネルギー平衡方程式考慮しない)

図-4 MRIモデルによる対象地区の最大有義波高平面分布

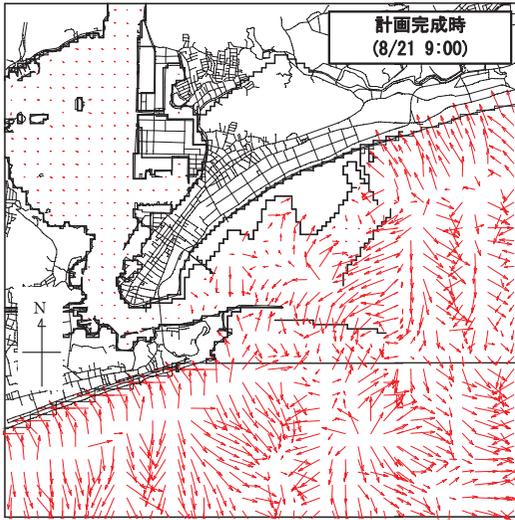
ば、越波流量を過小に評価される場合もある。

b) Radiation stress 発散項ベクトル分布

図-5は、外洋に面する沿岸域における高潮の最盛期である21日9時のRadiation stress発散項ベクトル分布図である。図-5(a)の1970年当時の地形では、浦戸湾湾口を含む沿岸域付近のベクトルは岸方向である。これにより沿岸域での水位上昇が算出される。それに対し、図-5(b)の計画完成時の地形では、港内のRadiation stress発散項ベクトルは、1970年当時の地形に比べ小さい。これは、砕波帯の外側に建設された沖防波堤に伴い、波浪場が変化したため、Radiation stress発散項ベクトルの分布状況も変化したことによるものである。したがって、港内で



(a) 1970年当時



(b) 計画完成時

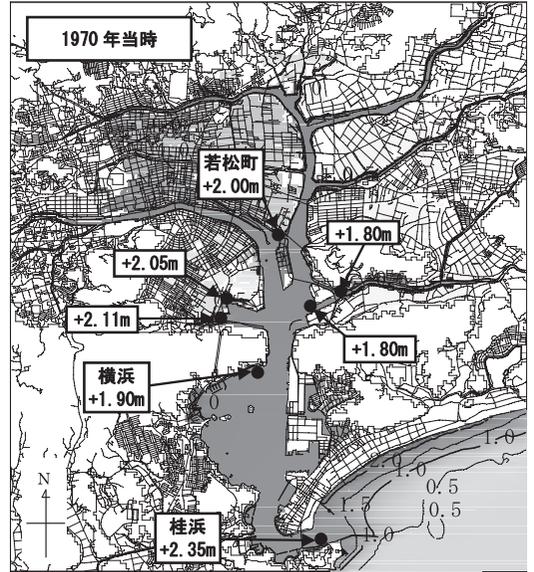
図-5 Radiation stress発散項ベクトル分布

のWave setupによる水位上昇量は、Radiation stress発散項ベクトルが小さくなったため、1970年当時に比べ減少することが推測できる。

(3) 高潮推算

a) 最大潮位偏差平面分布

図-6は、波浪・高潮推算並列結合モデルによる、最大潮位偏差平面分布である。なお、図-6(a)の1970年当時の地形での最大潮位偏差平面分布図に示す数値は、運輸省第三港湾建設局資料(1970)に示されている潮位図からの観測潮位の値である。1970年当時の地形での最大潮位偏差はWave setupを考慮することにより、砕波帯から沿岸域までの範囲で急激な水位上昇が生じ、浦戸湾湾口



(a) 1970年当時



(b) 計画完成時

図-6 最大潮位偏差平面分布図

部では、2m程度となる。ただし、推算値と観測値を比較すると、0.2m程度推算値の方が低い結果となる。また、柴木ら(2001)では、気圧の低下による吸い上げと、風の吹き寄せのみ考慮した推算を実施している。浦戸湾湾口での最大潮位偏差は、1m程度となる。したがって、本モデルによるとWave setupによる水位上昇量は、0.8m程度となり、最大潮位偏差の半分程度がWave setupの効果によるものであることが確認できる。図-6(b)の計画完

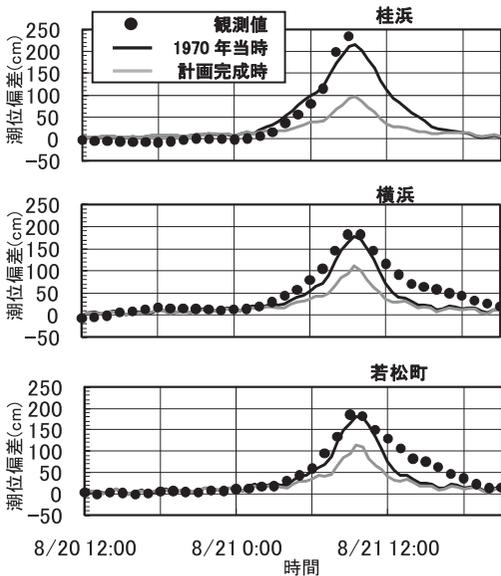


図-7 推算値と観測値の潮位偏差時系列図

成時の地形では, Radiation stress 発散項ベクトルが1970年当時の地形に比べ小さい. 港内でのWave setupによる水位上昇が減少し, 浦戸湾湾口付近の最大潮位偏差は, 1.2m程度となる. 結果として湾奥の最大潮位偏差も低い値となることと, 計画完成時の構造物天端高となるため, 浸水は, 桂浜の対岸の外港地区埋立地の一部のみとなる. なお, この浸水は, 越波によるものである.

#### b) 潮位偏差時系列

図-7は, 桂浜, 横浜, 若松町における推算値と観測値の潮位偏差時系列図である. 1970年当時の地形において, 台風来襲前から最大潮位偏差となる時刻までは, 3地点ともに, 観測値と一致している. 最大潮位偏差発生時刻については, 時刻的には一致しているが, 最大潮位偏差は, 0.2m程度推算値の方が低い. 台風通過後については, 観測値よりも推算値の方が急激に潮位偏差は低下し, 時系列的に一致しない. 最大潮位偏差や, 台風通過後の時系列については, 本研究では考慮していない河川流量や密度成層などをモデルとして取り入れれば, より観測値に近づくと考えられる. また, 計画完成時の地形について, 最大潮位偏差は, 1m程度であり, 1970年当時の地形と比べると, 0.8m程度低い.

### 5. おわりに

波浪推算モデルと浸水と越波を考慮した高潮推算モデルを結合し, 波浪・高潮推算並列結合モデルを開発した. このモデルを用い, 浦戸湾を対象に台風7010号来襲時の地形による再現シミュレーションを実施し, 異常潮位偏差の再現性を検討するとともに, 高知港の計画完成時の

地形についても推算を実施した.

以下に成果をまとめる.

- ①波浪推算と高潮推算モデルを結合した. これより, 波浪推算は, 潮位偏差による水深変化を考慮することができた. 高潮推算は, 各時刻の波浪諸元およびRadiation stressを取り入れ, 波浪による水位上昇を考慮するとともに, 越流だけでなく越波流量を考慮した浸水計算が可能となった.
- ②既往研究にあるように, 台風7010号の潮位偏差の再現には, Wave setupの効果が寄与しており, 本推算でも確認できた.
- ③計画完成時の地形で, 台風7010号を推算した結果, 防波堤が波を遮ることにより, 浦戸湾湾口の波浪場が変化した. これにより, Radiation stress発散項ベクトルが1970年当時の地形に比べ小さくなった. よって, Wave setupによる水位上昇は低くなり, 防波堤がWave setupによる水位上昇に対して低減効果もあることを確認した.

波浪・高潮推算並列結合モデルは, 入力条件を設定すれば, 推算プログラムが作成され, 推算が実施される対話型のシステムとして開発され, 高松港湾空港技術調査事務所所有の「防災総合数値解析システム」に取り入れられている.

今後の研究は, 波浪と高潮の結合モデルに河川流量や密度成層, 潮汐などを考慮し, より実際の物理現象に近いモデル改良を検討していきたい.

**謝辞:** 本研究は, 平成18年度から21年度にかけて, 「防災総合数値解析システム構築検討委員会」(委員長: 村上仁士 徳島大学名誉教授) において検討された成果の一部を活用したものであり, 上記検討会の村上委員長はじめ関係者には長期にわたり懇切なご指導を頂いた. ここに深く謝意を表します.

#### 参考文献

- 運輸省第三港湾建設局 (1970): 台風10号による高知港被害調査報告 第一報, 34p.
- 金 洙列・安田誠宏・間瀬 肇 (2008): 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.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333p.
- 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次 (2001): 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.
- 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モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 628 II-48, pp. 177-187.
- 山下隆男・別宮 功 (1996): 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.