

潮汐・高潮・波浪結合モデルによる土佐湾異常高潮の追算

Storm Surge Simulations Occurred in the Tosa Bay by Using Surge-Wave-Tide Coupled Model

金 洙列¹・安田誠宏²・間瀬 肇³

Soo Youl KIM, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

The storm surge residual of 2.35m was recorded during Typhoon Anita (T7010) at Katsurahama in the Tosa Bay. The surge could not be explained by usual meteorological forces. The inclusion of the wave-induced radiation stress was necessary. This study examined the effects of waves and tidal variations for estimating the abnormal storm surge by using a coupled model between storm surges and waves together with the tidal variations, named as the SuWAT (Surge-Wave-Tide coupled model), and clarified those effects on the storm surge.

1. はじめに

四国南岸に来襲した台風 7010 号は、高知県の桂浜で 2.35m にも及ぶ潮位偏差を記録した。外洋に面した海岸でこのような潮位偏差が生じたことはまれであり、多くの再現シミュレーションが試みられた。これまで明らかにされたところでは、気圧低下と吹き寄せのみを考慮するシミュレーションでは再現できないこと、密度成層の影響は小さいこと、波による wave setup の影響が重要であることである(山下・別宮, 1996; 柴木ら, 2001)。従来の研究における wave setup の効果は、波の推算を行って radiation stress を求めておき、高潮の運動方程式に radiation stress による応力項を導入して高潮計算を行うことで考慮する。こうした解析により、wave setup の効果が重要であることが示された。

本研究では、高潮計算と波浪計算を結合し、また同時に潮汐変動も考慮した、潮汐・高潮・波浪結合モデル(SuWAT: Surge-Wave-Tide coupled model)により、台風 7010 号による土佐湾沿岸の高潮追算を行うものであり、異常潮位偏差の再現性、その潮位偏差に及ぼす潮汐変動や波浪の影響について検討する。

2. 潮汐・高潮・波浪結合モデル

(1) 計算モデルの概要

大潮汐変動の中で、高潮による海面上昇を適切に計算しようとする、波と潮汐、高潮の相互干渉を考慮する必要がある。そこで、潮汐の影響については、予め開境界における潮汐による水位変動を与えて、計算領域の潮位変化を初期条件の影響がなくなるまで計算し、その後、

台風による気圧低下と風速を海面に作用させて、高潮の計算を行う。高潮計算モデルには、後藤・佐藤(1993)による非線形長波モデルを用いた。

高潮に対する波浪の影響については、高潮推算モデルと波浪推算モデル(SWAN: Simulating Waves Nearshore)の計算において、相互に必要なデータを互いにやり取りする双方向結合として考慮した。計算の高精度化のために計算領域をネスティングし、各計算領域を MPI (Message Passing Interface) によって並列計算するモデル開発をした(金ら, 2007)。こうした計算フローを図-1 に示した。

(2) 計算モデルの特徴

ここで、柴木ら(2001)の高潮推算モデルと比較して、SuWAT モデルの特徴を示すと、以下のようである。

- 1) 高潮の運動方程式に radiation stress 項を導入し、高潮と波浪を同時に独立に計算する。柴木らのモデル(2001)は、波浪と高潮は別々に計算する。すなわち、まず波浪推算を実施し、radiation stress の空間的な時系列データを求めておき、これを高潮推算時に取り込むことで、波の影響を考慮する。
- 2) 波浪モデルに用いる水深は、同時に計算する高潮計算結果を用いるので、常に変化している。柴木らの方法では、波浪推算において高潮の影響は考慮せず、水深は時間的に一定である。
- 3) 本推算モデルでは、高潮と波浪はデータをやり取りしている(結合している)。柴木らのモデルはカップリングは考慮していないが、特徴として、鉛直方向に 3 層に分割した連続式と運動方程式の数値計算により密度成層の効果を考慮できるようになっている。本推算モデルでは、これまでの研究により、密度成層の影響は大きくないこと、およびすべての計算領域で波浪と高潮がカップリングした計算は時間がかかることから、密度成層の影響は考慮しない。

1 正 会 員 博(工) 鳥取大学助教 工学部社会開発システム工学科

2 正 会 員 博(工) 京都大学助教 防災研究所

3 正 会 員 工博 京都大学教授 防災研究所

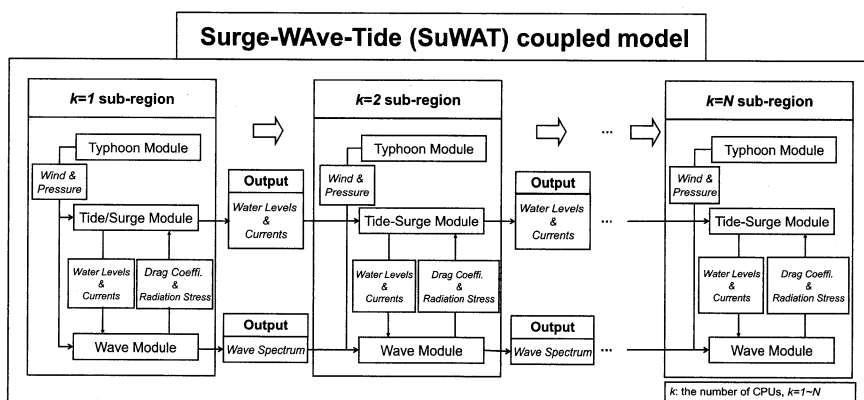
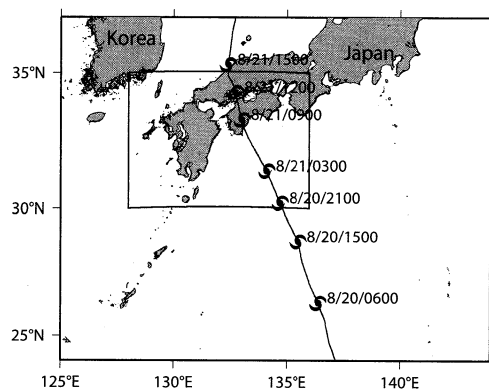
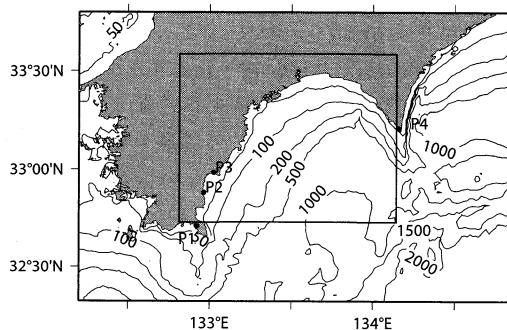


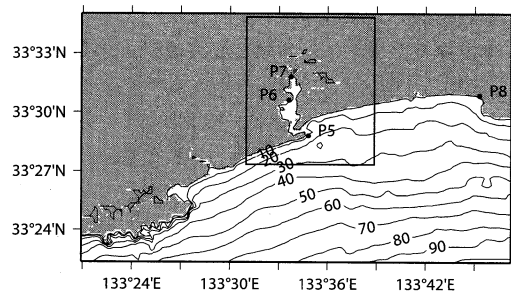
図-1 潮汐・高潮・波浪結合モデル SuWAT の計算フロー



(a) 第1 および第2 計算領域



(b) 第3 および第4 計算領域



(c) 第5 および第6 計算領域

図-2 計算領域と台風経路

表-1 計算領域の位置, 格子サイズ及び格子数

Domain No.	Computational Domain	Grid Size (m)	Num. Grid
1	125° E to 144° E 24° N to 37° N	$\Delta x, \Delta y = 12150.0$	144×122
2	128° E to 136° E 30° N to 35° N	$\Delta x, \Delta y = 4050.0$	172×108
3	132° 08' 12" E to 134° 49' 48" E 32° 19' 12" N to 33° 48' 00" N	$\Delta x, \Delta y = 1350.0$	180×114
4	132° 51' 18" E to 134° 09' 22" E 32° 47' 24" N to 33° 37' 54" N	$\Delta x, \Delta y = 450.0$	261×180
5	133° 20' 54" E to 133° 47' 13" E 33° 22' 20" N to 33° 35' 00" N	$\Delta x, \Delta y = 150.0$	270×174
6	133° 31' 00" E to 133° 38' 51" E 33° 27' 21" N to 33° 34' 50" N	$\Delta x, \Delta y = 50.0$	192×258

表-2 高潮推算の計算条件

Case	Input Forcing
TWPR	Tide + Wind + Pressure + Wave-Induced Radiation Stress
TWP	Tide + Wind + Pressure
OT	Only Tide
WPR	Wind + Pressure + Wave-Induced Radiation Stress
WP	Wind + Pressure

3. 台風 7010 号による土佐湾における高潮・波浪推算

(1) 土佐湾沿岸における高潮観測結果

土佐湾沿岸には検潮所が複数あり, 当時の高潮が記録された. 潮位偏差の観測値のうち, 浦戸湾口の桂浜ではこれまでの最大の値である 235cm を記録した. また, 浦戸湾内の横浜, 若松町においても潮位変動が観測されていた. そのほか, 土佐清水, 下田, 上川口, 室戸, 手結においても潮位変動が観測されていた.

(2) 高潮計算条件

図-2 に 6 段階の計算領域図を示す. 第1計算領域図においては台風 7010 号の経路, 第3及び第4計算領域図には観測点 P1~P4, 第5及び第6計算領域図には観測点 P5~P8 の位置を示す. これらの観測点 P1~P8 は, 土佐清水, 下田, 上川口, 室戸, 桂浜, 横浜, 若松町および手結である. 1 段階小さな計算領域の格子サイズは, 大きな計算領域の 1/3 になるようにした. 計算領域, メッシュサイズおよび格子数を表-1 に示した.

高潮偏差に及ぼす潮汐変動および波浪の影響を調べるために, 表-2 に示す 5 種類の数値計算を行った. 例え

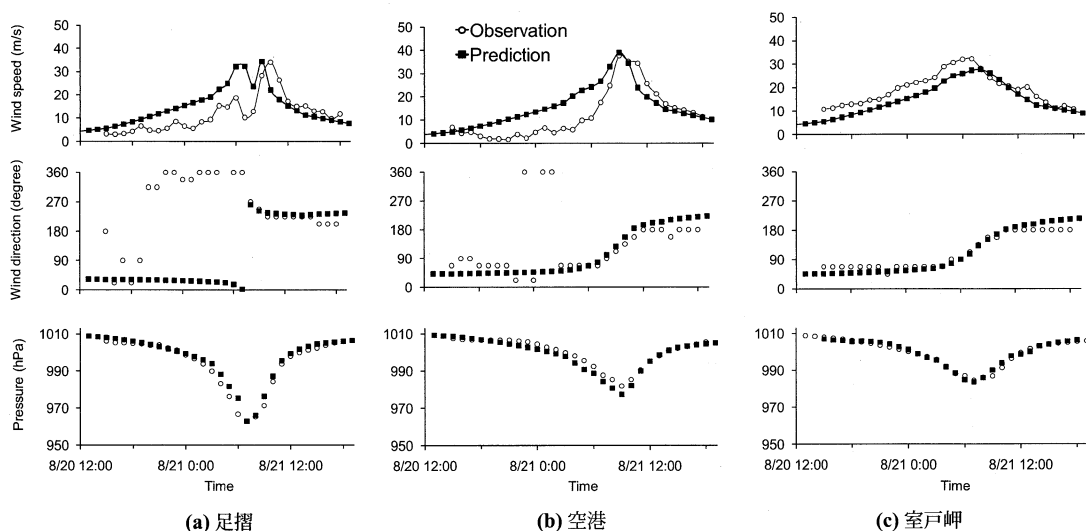
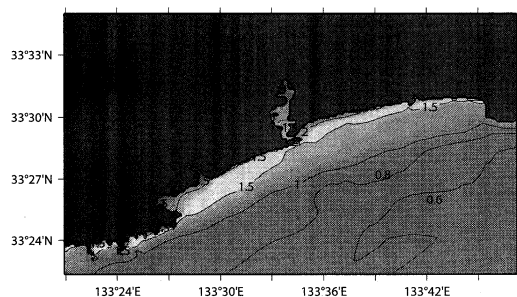
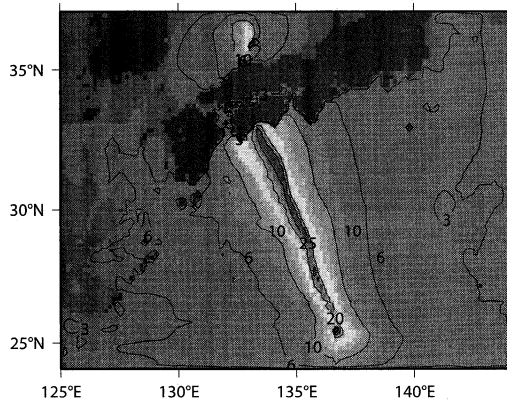


図-3 高潮推算に用いる風・気圧時系列と観測結果の比較



(a) 潮位偏差の最大値の空間分布 (Case TWPR と Case OT の差)



(b) 有義波高の最大値の空間分布 (Case TWPR)

図-4 結合モデル SuWAT による第5領域での最大高潮偏差の空間分布および第1領域での有義波高の空間分布

ば、Case TWPR は、潮汐変動，風，気圧低下および波浪のすべてを取り入れて計算するケースであり，Case WPR は風，気圧低下，波浪を考慮したものである。この2つは高潮偏差を比較することにより，潮汐変動の影響を知ることができる。

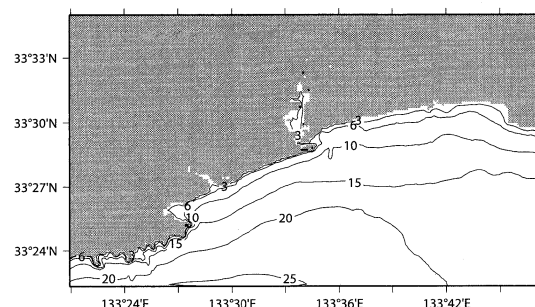


図-5 沿岸域(第5領域)での有義波高の空間分布 (Case TWPR)

高潮計算は1970年8月20日6:00から21日20:00まで行った。潮汐を考慮する計算においては，潮汐変動が定常になるまで，前もって行っておく。計算時間間隔は，潮汐・高潮計算においては1s，波浪計算においては300sとし，高潮と波の情報のやり取りは300sおきに行う。

台風モデルは，藤井・光田(1986)のそれを用いた。気圧と海上風について，観測結果と高潮・波浪計算に用いた推算結果との比較を図-3に示す。風速がピークに達する前の様子に相違が見られる。特に近傍を台風が通過した足摺において，推算結果が過大評価となっている。風速がピークを過ぎた後の両者の時間変化は良く一致している。風向に関しては，3地点とも両者は良く一致している。また，気圧低下に関しても両者は良く一致していることが確かめられた。

4. 高潮推算結果および潮汐変動と波浪の影響

図-4(a)および(b)は，それぞれ第5領域の潮位偏差の最大値の空間分布および第1領域の有義波高の最大値の空間分布を示したものである。これらの計算結果は，潮

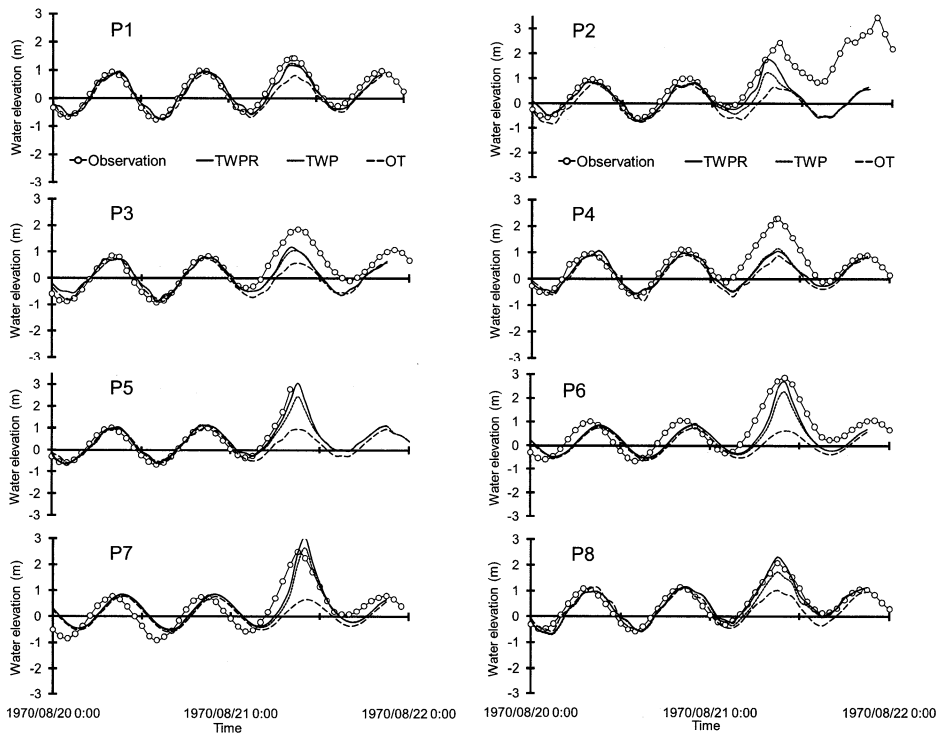


図-6 全潮位変化に関する観測結果および推算結果の比較

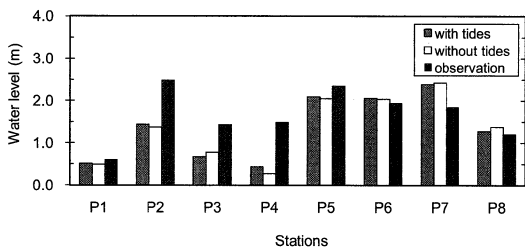


図-7 最大潮位偏差に及ぼす潮汐変動の影響

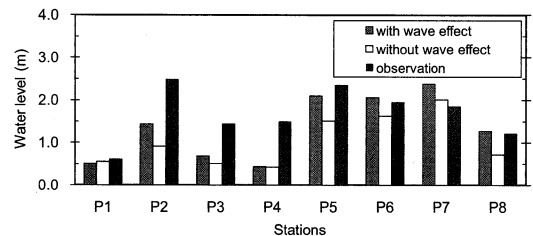


図-8 最大潮位偏差に及ぼす波浪の影響

汐変動、高潮、波浪を結合した計算結果である。有義波高は、外洋で25mを超えている。図-5は、沿岸域(第5領域)での有義波高の空間分布を示したものである。外洋で25mを超えていたものが、水深が浅くなるにつれて碎波により減少していく様子が良くわかる。

より詳細に推算結果を検討するために、図-6に8地点における潮位変化に関する観測結果と各種推算結果を示す。観測結果は○印、潮汐変動と波浪を考慮した推算結果は実線、潮汐変動を考慮するが波浪を考慮しない推算結果を点線、気象外力を用いない潮汐変動のみの計算結果を破線で示してある。

地点P1～P4は第3計算領域および第4計算領域にあり、解析解像度は1350mおよび450mと粗く、観測地点と計算結果出力点の不一致のためもあり、特に地点P2～P4で観測結果と推算結果の一致度が悪い。P2地点

においては、観測結果の精度にも問題がありそうである。その他の地点P5～P8においては、潮汐変動と波浪を考慮した推算結果は、観測結果と良く一致している。地点P5の桂浜での値も再現できている。なお、河口のP7地点では固定境界を設定したため(実際は上流に開いている)、P6とともに推算結果と実測結果の対応が少し悪くなっている。

図-7では、最大潮位偏差に及ぼす潮汐変動の影響を見るために、Case TWPRとCase WPRの推算結果、および観測結果を比較した。ここでは、波浪の影響は考慮されている。これらの結果から、潮汐変動自体がその振幅が1mとそれほど大きくないため、Case TWPRとCase WPRの推算結果はあまり変わらない。

図-8には、潮位偏差の最大値に関して、Case TWPRとCase TWPの推算結果および観測結果を比較したもの

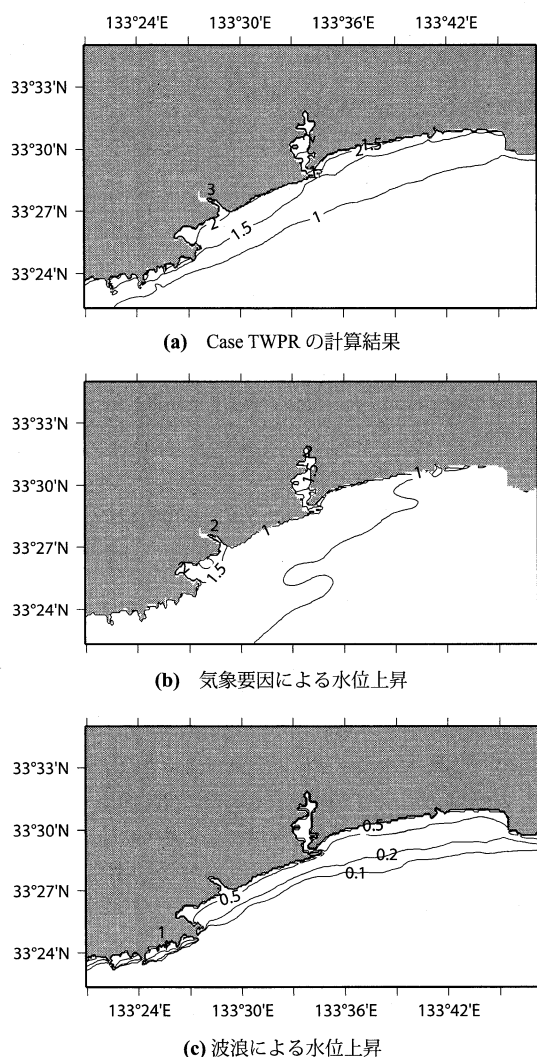


図-9 最大高潮偏差の空間分布

を示す。ここでは、潮汐変動の影響は考慮されている。地点 P1～P4 は先に述べたように観測結果が大きくなっており、推算結果とあまり一致していないが、波浪の影響を取り入れると潮位偏差が大きくなることが見られる。地点 P5～P7 においては、湾奥の地点 P7 を除いて、波浪の影響を考慮すると潮位偏差が大きくなり、観測結果と良く一致する。

図-9 に改めて、最大潮位偏差の空間分布に関する推算結果を調べる。(a) 図は Case TWPR の潮汐変動と波浪の影響が入っており、この第 5 計算領域において、観測結果と良く一致した。(b) 図では Case TWP と Case OT の結果から気象要因のみによる最大潮位偏差を示したものである。潮汐変動の影響は小さいことが今回わかったので、この推算結果は、従来の潮汐変動を考慮しない高潮推算モデルによる結果に対応する。この図から、改め

て気象要因だけでは、土佐湾において観測された最大潮位偏差を再現できないことがわかる。(c) 図は、Case TWPR と Case TWP の結果から得られる最大潮位偏差の差を求め、波浪の影響のみによる潮位偏差を求めたものである。この図によると沿岸では波浪の影響により水位が 50cm～100cm 上昇することがわかる。

5. まとめ

本研究では、潮汐・高潮・波浪結合モデル (SuWAT: Surge-Wave-Tide coupled model) により、台風 7010 号による土佐湾沿岸の高潮追算を行い、異常潮位偏差の再現性に及ぼす潮汐変動や波浪の影響について検討した。まず、本推算モデルの特徴を従来モデルと比較して示した。

高潮偏差に及ぼす潮汐変動および波浪の影響を調べるために、潮汐変動、風、気圧低下および波浪のすべてを取り入れた推算結果と、潮汐変動を入れない、あるいは、波浪の影響を入れない推算結果との相互比較、および観測結果との比較を行った。その結果、解析解像度が 1350m および 450m と粗い、大領域では観測結果と推算結果との一致度が悪かったが、最も解像度の高い計算領域においては、潮汐変動と波浪を考慮した推算結果は、観測結果と良く一致し、桂浜での異常値もほぼ再現できた。潮汐変動はその振幅が 1m とそれほど大きくないため、波浪の影響の方が重要であった。

本研究を行うに当たり、(株)エコーの柴木秀之博士には、貴重なデータやご助言をいただき、ここに感謝いたします。また、本研究は、科学研究費基盤研究 (B) (代表：山下隆男広島大学教授) 及び第 3 著者が代表の科学研究費基盤研究 (B) による研究の一部であることをここに付記し、感謝いたします。

参考文献

- 金 洙列・高山知司・安田誠宏・間瀬 肇 (2007)：高潮と波浪に及ぼす大潮汐変動の影響に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.276-280。
- 後藤智明・佐藤一央 (1993)：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港研報告，第 32 巻，第 2 号，pp.3-44。
- 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。
- 藤井 健・光田 寧 (1986)：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション，京大防災研年報，第 29 号 B-1，pp.229-239。
- 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—推算誤差は波浪か成層か？—，海岸工学論文集，第 43 巻，pp.261-265。
- SWAN: A numerical wave model for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind-, bottom-, and current conditions, Delft University of Technology, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/default.htm>.