

大気・波浪・海洋結合モデルによる台風 9918 号の 高潮・高波の追算

金 庚 玉*・山下 隆 男**

大気・海洋間の運動量, 熱, 物質の交換には, 風波が重要な役割をする。運動量交換のモデル化には, Wave-induced stress のような風波により発生する比較的大規模な大気乱流による形状抵抗, breaker stress の定義による白波砕波減衰と吹送流への運動量交換モデル, および波齢の高い fast wave に対する波浪増幅・減衰機構の定式化が必要となる。これらの研究成果は, 波浪推算モデル, メソ気象モデル, 海洋モデルのカップラーの一部として連結数値モデルに導入することで実用化される。本研究では, MM5, WW3, POM の結合モデルを MPMD 方式で並列計算する数値計算システムを構築し, 台風 9918 による八代海・有明海および周防灘における高潮, 高波の追算を行った。

1. 緒 言

大気・海洋間の運動量, 熱, 物質の交換には, 風波が重要な役割をする。風波の発生・発達・減衰機構のモデル化には, 風波の空力学的な粗度要素, 海面抵抗係数をどのようにモデルに導入するかがポイントである。具体的には, (i) wave-induced stress のような風波により発生する比較的大規模な大気乱流による形状抵抗と wavelets による空力学的粗度特性を波齢および大気の安定度との関数で系統的に表現できる理論の構築, (ii) breaker stress 等の定義による白波砕波減衰を通しての波浪から吹送流への運動量交換モデル, および (iii) 波齢の高い fast wave に対する波浪増幅・減衰機構の定式化に関する研究が必要となる。これらの研究成果は, 実用的には, 波浪推算モデル Wave Watch III (Wave Watch III web site), メソ気象モデル MM5 (MM5 web site), 海洋モデル (POM) のカップラーの一部として連結数値モデルに導入されることになる。

本研究では, MM5, WW3, POM の結合モデルを構築し, Beowulf System の並列計算演算装置によって, これらの各モデルを結合系として並列計算する連結数値モデルを構築し, 既往の台風, 高潮, 高波の追算を行った。各モデル間の並列化には MPMD (Multiple Program Multiple Data) 方式を用いた。対象とした台風は, 9918 号であり, これによる八代海・有明海および周防灘における風域場, 波浪場, 高潮の追算を行った。

2. 数値計算システム

(1) 大気・波浪・海洋結合モデル

a) メソ気象場モデル: 米国大気研究所 (NCAR) とペンシルバニア州立大学 (PSU) で開発したメソスケール気象モデル NCAR/PSU Fifth-Generation Mesoscale Model (MM5) を用いた。入力データは, ネスティング計算領域, 土地利用・植生, 海水温データで, 陸上地形

は MM5 内蔵データを用いた。気象場のバックグラウンドデータは NCAR の全球客観解析データを用いた。第 1 計算領域では, バックグラウンドデータをボースガス台風で台風中心から半径 300 km 以内の計算領域の気流, 気圧場を修正した (Davis・Low-Nam, 1978)。3 時間毎の台風の中心の緯度・経度・中心気圧, 最大風速はベストトラックデータを与え, 最大風速半径は 100 km で, 一定とした。

b) 台風モデル: Schoemer の気圧分布を採用した光田・藤井の台風モデル (光田, 1997) を基本場として, MASCON モデル (Dickerson, 1978) により地形の効果を考慮した。これは, MM5 による地上気象場との選択によって使い分けることができる。周防灘の高波・高潮の再現計算に用い, MM5 の地上気象場を用いた場合との比較を行った。

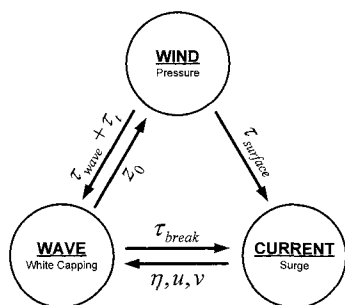
c) 波浪モデル: 米国環境予測センター NOAA の Wave Watch III (以降, WW3 と記す) は, MM5 の第 1 計算領域の海上風場から外洋波を計算し, 第 3 計算領域 (3 km 格子) からは対象海域の風波を計算する。白波砕波減衰項を介して, 海洋モデルと結合させた。

d) 海洋モデル: プリンストン大学の Princeton Ocean Model (POM) は MM5 の第 3 計算領域に適用し, 海域での流れの計算 (高潮計算) を行う。この場合, WW3 の白波砕波減衰から計算される breaker stress を通しての大気から流れへのエネルギー輸送を考慮する。密度成層は考慮していない。潮汐計算は, 国立天文台 (NAO) の潮汐主要 16 分潮の外洋潮汐 (Matsumoto ら, 2000) を MM5 の第 3 計算領域の初期値, 境界値として用いた。

以上のように, MM5, WW3, POM の結合モデルは海面せん断応力と海面での粗度要素によって結合されており, 流れの場に作用する全海面せん断応力 τ_{total} , 流れの場に直接作用する風のせん断応力 $\tau_{surface}$, 海面上での気流の乱れによるせん断応力 τ_i , 波浪が存在することによって発生する気流のせん断応力 τ_{wave} (Janssen, 1991), 白波砕波によって波浪から流れへ移行する運動量流束を表すせん断応力 τ_{break} (山下ら, 2000) の関係は図-1 のよう

* 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科

** 正 会 員 工博 京都大学助教授 防災研究所



図一1 モデルとそれを結合するせん断応力間の関係

である。図中、 η ：平均水位変動、 u, v ：海水の平均流速、 z_0 ：大気乱流場から見た海面粗度高さを示している。

本研究で用いた、これらのせん断応力は、海面上 10 m 高度での平均風速 U_{10} 、周波数 f 、波向き θ の成分波の白波砕波による波浪エネルギーフラックスの減衰率 S_{ds} 、成分波の波速 C を用いて、次式のように評価した。

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{surface}} + \tau_{\text{break}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{surface}} &= \rho_a C_D |U_{10}| U_{10}, \\ C_D &= (0.066 |U_{10}| + 0.63) 10^{-3} \\ \tau_{\text{break}} &= \iint \frac{S_{ds}(f, \theta)}{C} df d\theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 並列計算の方法

気象、波浪、海洋モデル (MM5, WW3, POM) は SPMD (Single Program Multiple Data) で並列コード化されている。SPMD により並列コード化された各モデルのプログラムはカップラーを介してデータ交換、メッセージ転送が行われ、マルチプログラムの並列計算を進行させる。カップラーは MPMD (Multiple Program Multiple Data) 法により作成し、異なる計算プログラム間の格子網内挿には moving averaging gridding method を用いた。カップラーと各モデルのマスターノードは各モデル

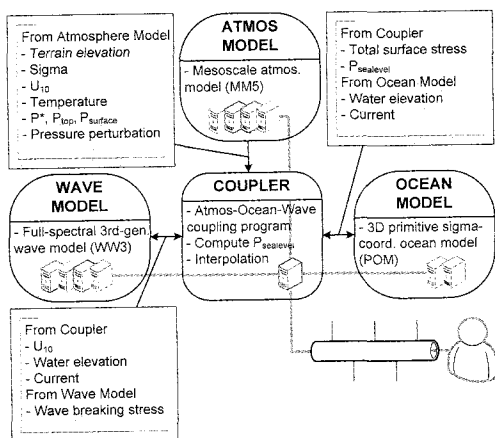
の時間ステップ毎にコミュニケーションするが、本システムでは 3 モデルの時間ステップの最小公倍数である 120 s 毎にデータ交換をするよう設計した。図一2 に、本研究で用いた結合モデルの並列計算システムの概要を示す。

3. 有明海・八代海での高潮シミュレーション

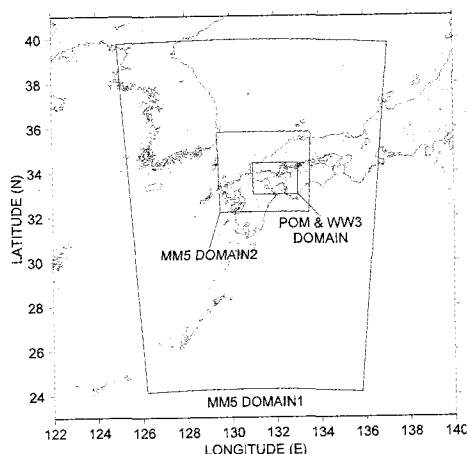
図一3 に気象場を計算する領域を示す。有明海・八代海では、3 重のネスティングを行い、最終計算領域で、高潮、波浪、気象場の結合計算を行った。図一4 に、台風のベストトラックと、これにより 3 時間毎に修正した MM5 の計算結果を示す。

八代海の高潮には、南北方向の風の特性でほぼ規定されるため、風域場に及ぼす陸上地形の影響は大きくない。そのため、光田・藤井モデルで再現した風域場による高潮計算の再現性は比較的良好である (山下・中川, 2001)。ここでは、MM5 による地上風、大気圧の再現計算を行った。八代港での風速ベクトルの観測結果と推算結果を図一5 に示したが、両者は比較的良好に対応している。さらに、図一6 には、計算領域における地上大気圧の計測結果と、MM5 による推算結果の比較を示したが、これにも気象場の再現性の良さが示されている。

この海域での高潮特性を再現するためには、極浅海域での波浪の変形 (浅水変形と白波砕波)、波浪・高潮の相互作用、さらには干潟上での移動境界条件の導入等、多くの問題が残されているが、ここでは、WW3 に組み込まれている白波砕波減衰の定式化をそのまま用いて、移動境界条件は入れずに、最小水深のみを設定した方法で計算を行った。特に八代海の湾奥の八代港周辺では、急激に水深が浅くなり、干潮時には干出する干潟領域へ接続する特異な海底地形をしており、ここでの波浪・高潮相



図一2 結合モデルの並列計算システムの概略図



図一3 台風 9918 号の MM5 による気象場の計算領域

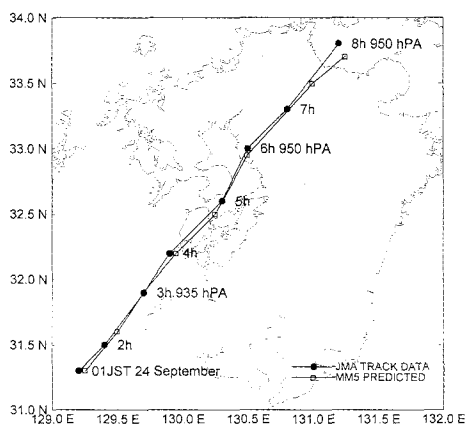


図-4 台風のベストトラックとMM5での台風中心

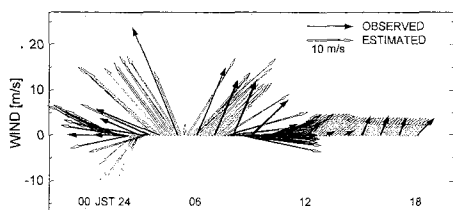


図-5 八代港における観測風速ベクトル(実線)とMM5により再現された風速ベクトルの時間変化

相互作用の再現は難しく、用いたモデルでこのような現象が十分再現できるモデルとはなっていない。しかしながら、砕波せん断応力により白波砕波減衰の効果を流れの場に移行することで、ここでの高潮がどの位増幅されるかを確認する計算を試みた。図-7に湾奥の松合地区(CM)と八代港(CY)での計算潮位、観測潮位(OY)の比較を示す。AYは天文潮位を示す。砕波せん断応力を考慮することで、災害調査で明らかにされた最大水位、TP 4.5 mに近い値(4.1 m)が得られることが示された。

ここで、観測結果のある八代港および松合地区での潮位偏差と数値計算による偏差を、砕波せん断応力を考慮しなかった場合(点線)と考慮した場合(実線と破線)とで、比較して示した(図-8)。図中、実線は、波浪計算において高潮・潮流による水位変化と流速成分を波浪計算に取り込んだ計算結果で、破線は波浪計算に高潮・潮流の影響を入れない場合の計算結果である。波浪・高潮相互作用を完全に入れた計算では、高潮が若干小さくなっている。これは、波浪・高潮相互作用計算では、屈折・浅水変形のため、湾内浅水域での波高増幅が小さくなっているためである。

また、図-9には、松合地区の計算点での海面せん断応力 τ_{surface} (点線)と波浪と流れの相互作用を入れない場合の砕波せん断応力を考慮した全応力 $\tau_{\text{surface}} + \tau_{\text{break}}$ (破

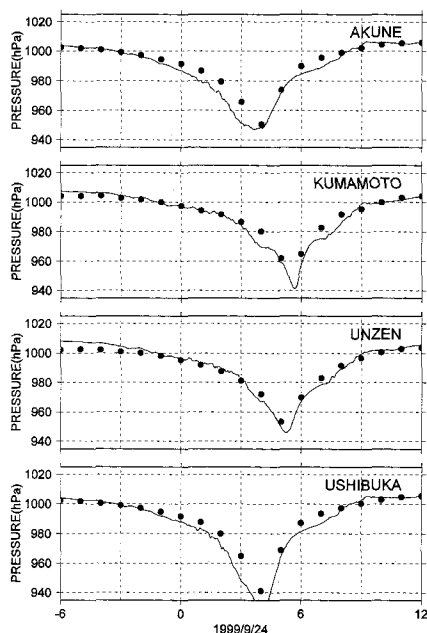


図-6 MM5により再現された気圧場の再現性

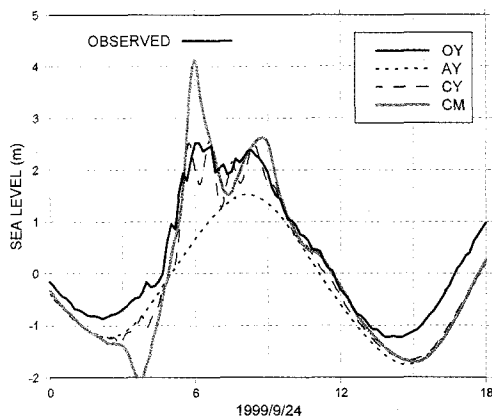
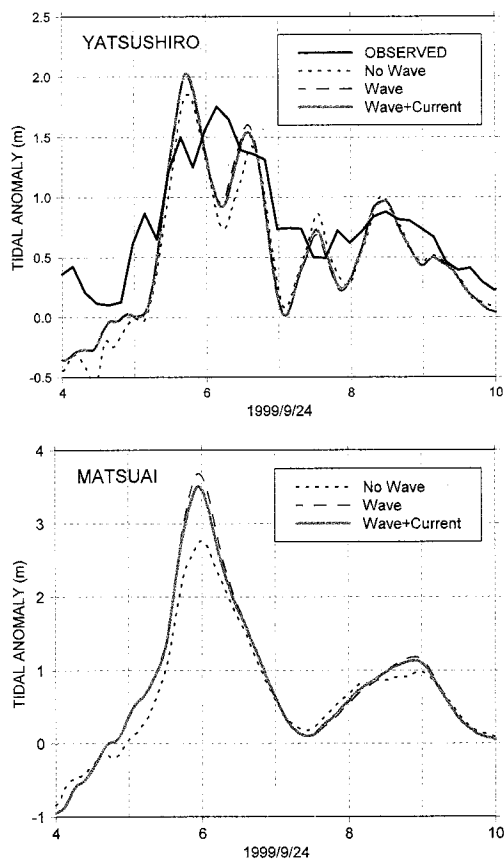


図-7 松合地区と八代港での計算潮位、観測潮位の比較

線)と、相互作用を入れた場合のそれ(実線)の大きさを示した。これより、松合地区では、砕波せん断応力 τ_{break} の影響がかなり大きく、波浪と流れの相互作用を入ると波浪エネルギーの集中が抑えられ、波浪変形に流れの効果を入れない場合のほうが、 τ_{break} を大きく見積もることがわかる。

4. 周防灘での高潮シミュレーション

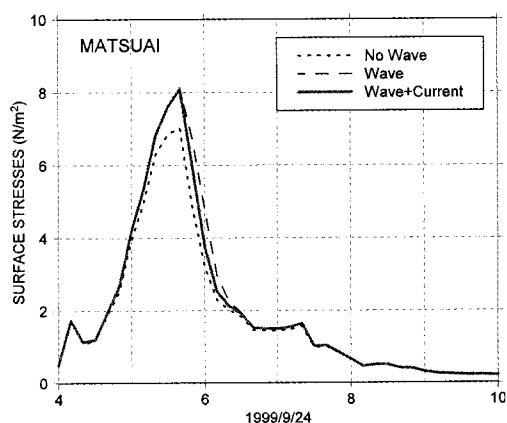
周防灘の高潮、高波の計算には海上の風域場に与える陸上地形の影響の大きさが議論となる。ここでは、簡易台風モデルを基礎データとして、これに MASCON モデルを適用した風速場、気圧場の計算結果、および MM5 に



図—8 砕波せん断応力の計算潮位偏差への影響。破線：波浪・流れの相互作用を入れない場合、実線：波浪と流れの相互作用計算、点線：波浪の影響(砕波せん断応力)を考慮しない結果、八代港の濃い実線は観測潮位。

よる気象場の計算結果との相違が高潮の及ぼす影響を検討した。図—10 に、2つのモデルで計算された台風の風速場、気圧場の比較、さらに図—11 に、それにより計算される広島港での高潮の推算結果を示す。これより、MASCON モデルを用いた場合では高潮が若干小さめに再現されるが、MM5 により計算された地上気圧、風速場を用いた計算では、広島港での観測潮位がほぼ完全に再現できていることがわかる。なお、広島港付近の海域では、砕波せん断応力が增大する地形要素がないため、砕波せん断応力は無視でき、波浪が高潮の計算結果に顕著な影響を及ぼすことはない。

MM5 を気象モデルとして計算した結合モデルで再現される波浪場から求めた、有義波高の最大値の平面分布は、図—12 に示すようである。図—3 の最大計算領域で外洋波浪を計算し、最小領域で外洋から進入する波浪エネルギーを境界条件として与えた。周防灘中央部の国東半島先端部や、山口県の徳山、下松の沖合いでは 6 m を超える高波浪が再現されている。外洋からの進入波浪エネ



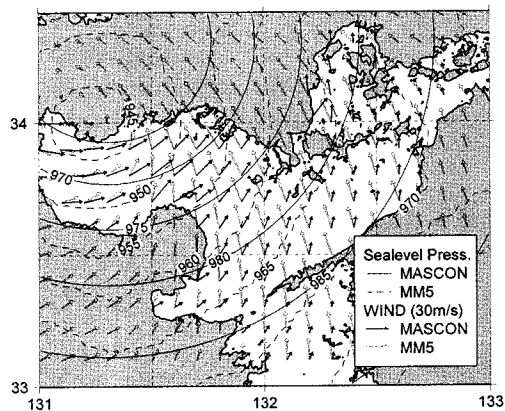
図—9 松合地区の計算点における海面せん断応力

ルギーを考慮しない場合には、国東半島先端海域で若干波高が小さくなるが、海域全体での差は小さい。この計算結果の観測データとの比較は行っていないが、周防灘中央部でもかなりの高波浪が発生する可能性がある。

5. 結 語

並列コード化された気象、波浪、海洋モデル (MM5, WW3, POM) を MPMD 法により並列計算するシステムを構築し、完全相互作用系としての高潮・高波、メソ気象場の数値シミュレーションを行った。その結果得られた主な成果は以下のである。

- (1) 八代海での高潮には砕波せん断応力が極めて重要な影響を及ぼし、高潮偏差の推算値で、それぞれ約 3.7 m と 2.7 m となり、約 1 m 差異を発生させる。これにより、松合地区での現地調査の最大遡上高、TP+4.5 m に近い値、4.1 m を再現することができた。
- (2) 八代海湾奥での高潮の計算では、波浪と流れ (高



図—10 MASCON モデルと MM5 とで計算された気象場

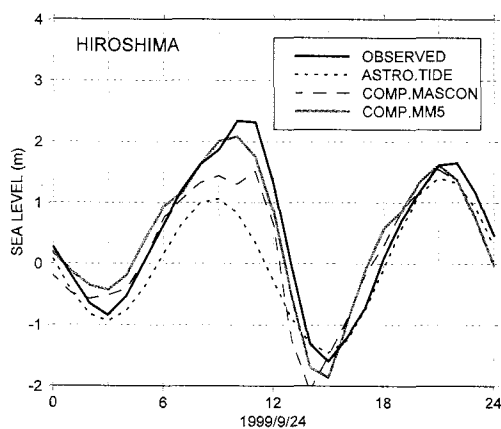


図-11 MASCON モデルと MM5 とで計算された気象場で計算された高潮と観測結果との比較 (広島)

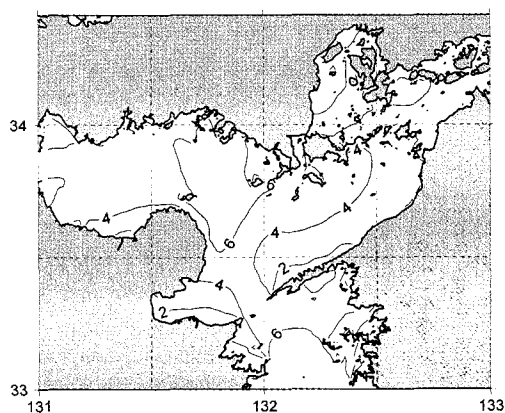


図-12 WW3 で計算された最大波高分布

潮および潮流)の相互作用(屈折特性)を入れた場合には、これを入れない計算値よりも小さい高潮偏差が計算された。

(3) 周防灘の海上風場の再現には周辺地形や気象場の

変化の影響が重要であるが、MASCON モデルにより修正した風域場の地形の影響は大きくなく、推算される高潮には顕著な差異を発生させない。MM5 により再現した気象場により計算した高潮は観測結果(広島港)をほぼ完全に再現した。

(4) 台風 9918 号による周防灘中央海域の推算波高はかなり高く、有義波の最大値が 6 m を超える波高が計算された。しかし、広島港付近の海域では、砕波せん断応力の高潮への影響は小さく、無視できるオーダーである。

なお、本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)、研究代表者 山下隆男、課題番号:14350266)、研究の一部として行われた。

参考文献

- 光田 寧 (1997): 台風による風災害の予測について, 京都大学防災研究所年報, 第 40 号 A.
- 山下隆男・路 明・楠原 弘 (2000): 砕波による海面せん断応力を導入した吹送流の数値モデル, 海岸工学論文集, 47, 121-125.
- 山下隆男・中川勇樹 (2001): 白波砕波せん断応力を考慮した波浪・高潮結合モデルによる台風 9918 号による八代海の高潮の再現, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 291-295.
- Davis, C. and Low-Nam, S. (2001): The NCAR-AFWA Tropical Cyclone Bogussing Scheme, Report for Air Force Weather Agency.
- Dickerson, M. H. (1978): MASCON-mass consistent atmospheric flux model for regions with complex terrain. J. Appl. Meteor., Vol. 17, pp. 241-253.
- Janssen, P.A.E.M. (1991): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. J. Phys. Oceanogr., 21, 1631-1642.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, 56, 567-581.
- MM5 web site: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>
- NOAA, WAVE WATCH III web site: http://polar.wwb.noaa.gov/waves/main_int.html