

最近の大気災害の状況と予測可能性について

植田洋匡

要旨

平成11年9月、我が国を襲った台風9918号では、八代海の北端で高潮氾濫が起り、豊橋市とその周辺で竜巻が発生した。この台風についての調査研究を科研費（特別研究促進費）「突発災害」研究として実施した。本稿では、高潮と竜巻の状況と予測可能性についての詳細な検討を行った。その結果、高潮に関しては、高潮の頻発する八代海など超浅海域について飛躍的な予測精度の向上がみられた。竜巻については、従来予報されていなかったが、台風襲来時に竜巻の発生する可能性のある「地域」を予報できることを示した。

キーワード：竜巻、高潮、気象モデル、波浪モデル、海洋モデル、台風

1. はじめに

平成11年9月、我が国を襲った台風9918号では、熊本（牛深測候所）で最大瞬間風速66.2m/sを記録し（非公式には鹿児島県下飯村鹿島で83.9m/s）、強風による家屋の全・半壊は、1,300戸、部分損壊を含めると3万戸以上にのぼった。この台風の特徴は、強風によって高潮が発生し、八代海の北端湾奥部で高潮氾濫が起り死者12名を含む甚大な被害をもたらしたこと、また、竜巻が豊橋市とその周辺で発生し、300人以上の児童に重軽傷（その後、死者1名）を負わせたことである。

本研究は、台風に伴って発生した高潮と竜巻について、その生成、発達メカニズムと、強風による被害の発生機構の解明を目的として、科研費（特別研究促進費）「突発災害」研究（桂、2000）として実施した。まず、台風とそれに伴って発生した高潮、竜巻のデータ収集と、建物、防波堤の被害調査を実施し、データ解析からこれら大気災害と高潮災害の実体を調べた。さらに、気象数値モデルと高潮・波浪結合数値モデルをもちいて、台風の時間的な挙動と内部構造、さらには高潮、竜巻の発生、発達を再現し、それらの詳細なメカニズムを明らかにした。本稿では、高潮と竜巻の状況と予測可能性についての詳細な検討を行った。

2. 台風9918号の気象特性

台風9918号について、気象庁発表の経路をFig. 1に示す。この台風9918号は1999年9月19日09時に沖縄南海上で台風になった。8月20日9時には宮古島付近に達した後、1日停滞し、その間に985hPaから955hPaまで発達した。その後9月22日0時から進路を北東に変えて、沖縄本島、奄美大島の西を北上し、中心気圧は9月22日9時には935hPa、翌23日9時には930hPaまで低下し、大型で非常に強い台風に発達した。

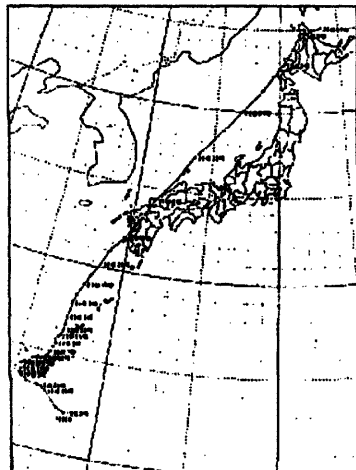


Fig. 1 Route and evolution of Typhoon 9918.

台風は沖縄本島付近で最盛期に達したが、そのときの気象レーダーのエコーは中心部から螺旋状にのびたレインバンドが分離してしまい、いわゆる“二重眼”の構造を示すようになった。このときの中心付近の地上気圧が2つの極小値を持つなど地上気象観測結果からも、2セルの構造をもっていたことが判断される。この構造は12時間程度のライフタイムをもっていた。

その後、やや勢力を弱めながら、鹿児島県の西海上を北北西に進み、24日06時には天草諸島を通過し、06時頃に熊本県北部に上陸した。そのときの勢力は中心気圧950hPa、最大風速 40ms^{-1} であった。さらに、福岡県と大分県の県境沿いに進み、一旦周防灘に出た後、同日8時頃に山口県宇部市に再上陸して、約1時間で山口県西部を縦断した。同日9時には、日本海に出て進行速度をあげ、25日2時頃に中型で並みの勢力になった。これが北海道渡島半島に再上陸し、北海道西岸を北上して、同日12時頃オホーツク海で温帯低気圧になった。

3. 竜巻

竜巻のうち、陸上、海上および上空に発生するものをそれぞれTornado (あるいはLandspout), waterspout, funnel aloft とよぶ。日本語での区別はない。

日本での陸上の竜巻Tornadoの発生頻度は年間約20個で、100km四方当たり0.54個/年である。これは米国の約60%である。これらの竜巻は、平均的に幅96m、全長2km、

寿命12分とされている(林ら, 1994; 新野, 1999)。

陸上の竜巻のうち、28%は台風に伴って発生しており、台風の約半数42%は竜巻を伴っている。今回の竜巻は、台風が中心が日本海上にあった午前11時頃にそこから600km以上離れた豊橋とその周辺で3個発生した。第1のものは11時5分豊橋市野依町で発生し、市街地から郊外にかけて長さ19kmに亘って時速45kmで通過した。第2のものは12時0分蒲郡市で、第3のものは12時10分小坂井市から豊川市で発生した。竜巻経路に沿って、被害は市街地で幅150~400mで発生し、郊外で幅240~770mに及んだ。重傷15名、軽傷416名、家屋全壊40棟、半壊と一部損壊はそれぞれ298棟、2343棟に達した。

数値予測のために、気象モデルとしてMMS (Pensilvania State University/ NCAR Mesoscale Meteorology Model, Dudhia, 1993; Grell 1993)、ARPS (Advanced Regional Prediction System)、RAMS (Regional-scale Atmospheric Modeling System)などのモデルが用いられた。これらはコミュニティ・モデルとして計算コードが公開されている。また、MMPM (Meso-scale Meteorology Prediction model, Sha, Kawamura and Ueda, 1991)が用いられた。これらは、運動方程式 (u, v, w -方程式) と連続の式、エネルギー方程式、水蒸気、雲粒、氷晶、雪、雨滴の収支式と乱流エネルギー方程式からなる。数値モデルはこれら11個の予測方程式から構成されている。座標系はTerrain following座標系で記述されている。これらの偏微分方程式を差分法で数値積分する。あるいは、水平方向にはスペクトル法、鉛直方向には差分法で積分する。

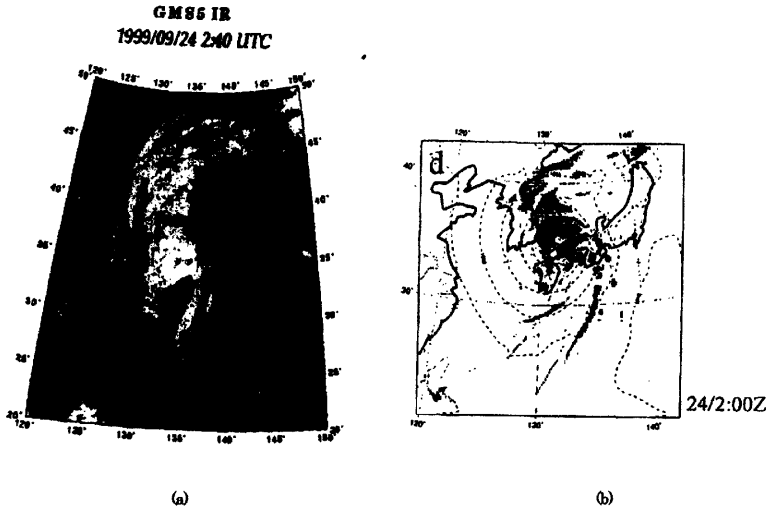


Fig.2 (a) GMS5 IR image at 02:40 and (b) distributions of the water droplet (rain water + cloud droplet) mixing ratio (shaded; 10^{-4} to 10^{-3}kg/kg) and surface pressure (dashed line for every 4hPa) at 02 UTC on 23 Sept. 1999.

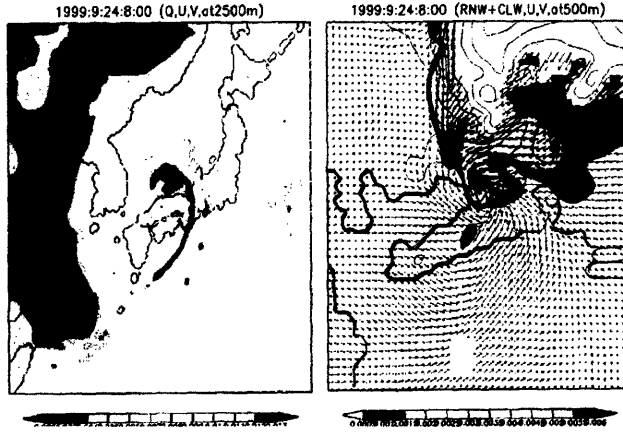


Fig.3 Distributions of the water droplet (rain water + cloud droplet) mixing ratio (shaded) and wind vector at 08:00 JST on 23 Sept. 1999

パラメタリゼーションとして、積雲対流については Grell scheme, 雲の微物理過程については Mixed-phase ice scheme, 大気境界層については Blackadar scheme, 放射過程については Cloud radiation scheme, 地中温度については Forced restore Blackadar scheme あるいは Difference method が使われている。初期条件、側面境界条件として 20km 格子の気象庁領域客観解析データを用いた。計算領域は豊橋 (34.8° N, 137.3° E) を中心とした領域で、まず広領域について水平方向 18km 間隔で 150×150 格子について計算し、さらに狭領域計算は 6km 間隔の格子点 (48×48 格子) について 2-way interactive nesting 手法により計算する。鉛直方向には、24 層に分割した。広領域計算による高度 1000m での降水粒子 (雨水+雲水) の混合比分布と地表面気圧分布を Fig. 2 に示した。図は MM5 を用いて計算した竜巻の発生直前の 23 日午前 11 時の分布である。台風の循環に伴う最も外側の雲域が竜巻の発生した豊橋に向かって南から伸びている。その内側には紀伊半島に達する雲域があり、これらが台風の中心部とその北側に大きく強い雲域を形成している。これがさらに沿海州から樺太に達する前線性の雲域に繋がっている。計算結果は静止気象衛星の赤外画像、GMS5 IR をよく再現している。

狭域計算による降水粒子と風ベクトルの分布を Fig. 3 に示した。図は高度 500m でのものである。降水域は豊橋付近からその北側に分布している。風ベクトルから、豊橋付近を中心とするメソスケールの渦が形成されていることがわかる。そこでの渦度分布を Fig. 4 に示した。豊橋付

近で渦度の集中があり、その最大値は 0.0003 sec^{-1} にまで達している。竜巻の渦度にははるかに及ばないが、数値計算により、いわゆる「メソサイクロン」が予測できた。上記のとおり、竜巻の直径はせいぜい 1km である。本計算は空間分解能 6km であり原理的に竜巻自体の予測はできないが、竜巻発生の可能性の高いメソサイクロンの形成を予測できることを示している。

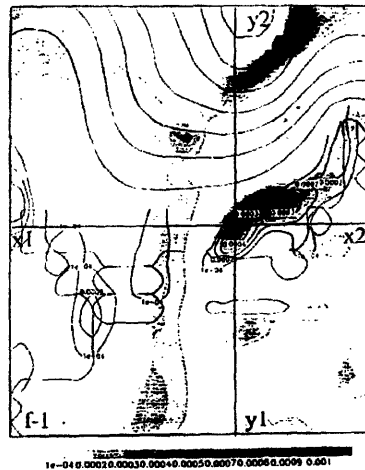


Fig. 4 Distributions of the vorticity at 08:00 JST on 23 Sept. 1999.

坪木ら(2000)はさらに高空分解能 500m の計算を行ってメソサイクロン中に形成される降水セル、いわゆるスーパーセルの予測可能性を検討している。ここでは、地形は含めず一様な平坦地とし、計算領域全域一様に潮岬の高層観測データを与えた基本場に対して、+4K のパブルの初期擾乱を与えたときの挙動を調べた。初期値から約 1 時間半後には初期擾乱の影響がなくなり、ほぼ準定常のスーパーセルの形成が見られた。

Fig. 5 は初期値から 2 時間 20 分後の高度 1km における鉛直速度、雨水混合比および水平速度場である。降水分布には竜巻特有のフック状の構造があり、その中心部の東側に強い上昇流域がある。水平風は上昇流の中心に向かって収束している。

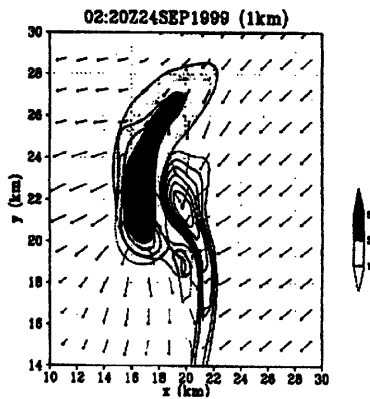


Fig.5 Distributions of vertical velocity (isopleth, msec⁻¹), water droplet mixing ratio (shade, g/kg) and horizontal wind vector at 1km level at 2hr 20min after input of initial disturbance.

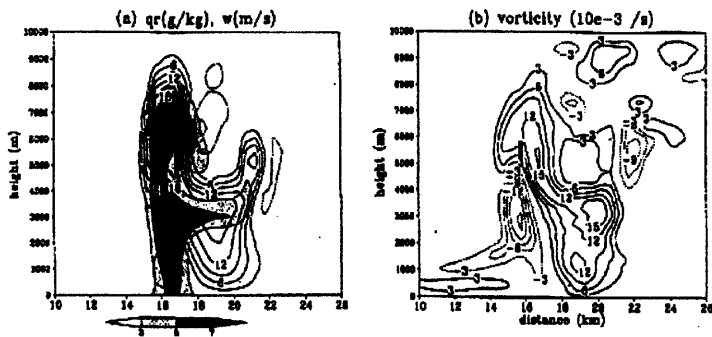


Fig.6 Distributions of (a) water droplet mixing ratio and vertical velocity and (b) vorticity in vertical direction, on the E-W vertical cross section passing through the maximum vertical velocity point at the same time as those in Fig.5.

鉛直断面を Fig. 6 に示した。混合比には明瞭なヴォー構造が見られる。そこでは鉛直流が最大になり、生成され降水 24msec⁻¹ を越える大きなものである。渦度の鉛直断面を見ると、最大上昇流に対応して、10²msec⁻¹ を越える大きな渦度がある。竜巻はこの非常に大きな渦度がそれと同じ場所にある強い鉛直流によって引き伸ばされることにより形成されると推測される。

4. 高潮

4.1 八代海の場合

台風 9918 号は 9 月 24 日午前 4 時から 6 時にかけて八代海（不知火海）の西側に沿って北上し、八代海湾奥部一体では強風による高潮、高波により広範囲に氾濫した。この湾奥部は 5km 以上に亘って、干潮時には干潟になる超浅海域（干上瀬）である。Fig. 7 に八代海の高潮痕跡高と浸水域を示す。特に、午前 6 時過ぎに同因松合では死者 12 名を含む甚大な被害をもたらした。松合での痕跡高は 4.5m に達した。

八代港における潮位記録を Fig. 8 に示す。八代港では天文満潮時の約 2 時間前の午前 6 時 3 分に最高潮位 268cm に達した。潮位偏差は 180cm であった。Fig. 7 でわかるように、八代港は松合の南南西にわずか 13km しか離れていないが最高潮位の差は 1.82m ある。

数値モデルは台風風速推定モデル、潮汐モデル、波浪モデル、高潮モデルからなる。台風風速推定モデルとして光田・藤井モデル（藤井・光田, 1986）を用いた。これは台風の経路、中心気圧、最大風速半径の観測記録から地上風速を統計的に推定するモデルである。潮汐モデルとして国立天文台の短周期海洋潮汐モデルを用いて、外洋潮位を計算した。波浪モデルとしては WAM (WAMDI, 1988) をもちいた。

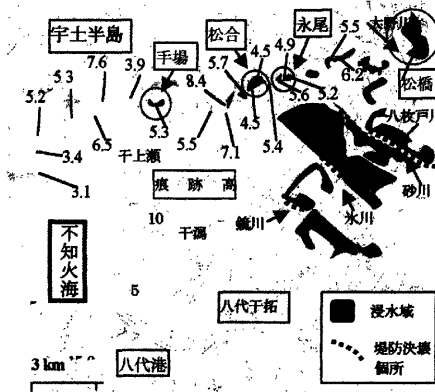


Fig.7 Trace sea level and flooded area in the northern-most part of the Yatsushiro Sea.

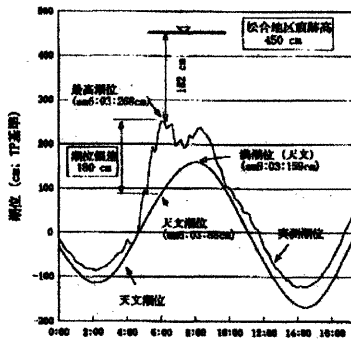


Fig.8 Sea level record ast Yatsushiro harbor.

ただし、砕波減衰項として浅水効果を考慮した非線形パラメータで近似するように修正した。高潮計算は σ 座標によるモード分割した準3次元の流れの計算コードに Mellor and Yamada (1982)の乱流モデルを組み込んだものをもちいた。海底摩擦への波浪の影響を Grant-Madsen の方法で導入し、海面でのせん断応力係数 C_d を一定値 ($C_d=0.003$) で与えた。

数値モデルによる結果と実測値の比較を Fig. 9 に示した。図中、太線は潮汐と高潮を同時計算した結果であり、細線は高潮計算結果を推算天文潮位に足し合わせた結果である。いずれの計算結果も観測潮位をよく再現している。なお、潮汐計算のみを行って推算天文潮位と比較した結果は、潮汐計算の振幅が推算潮位より $\pm 0.5m$ 小さく計算されて

いた。これについては後述する。また、Fig. 10 に、松合を含む八代海と有明海での潮汐、潮位の同時計算結果を示した。

八代海における高潮の特性として以下のようなことが明らかになった。(1) 高潮の前後のバックグラウンドの潮位 (外洋潮位) は天文潮位に比べて 30~50cm 高くなっていた。これは、今秋に発生した異常潮位成分で、対馬海流の流路変動等に起因するものではないかと考えられる。

(2) 潮位には2つのピークが発生している。第1ピークは強風による吹き寄せと気圧低下による吸い上げによるもので、いわゆる「高潮」と呼ばれる水位上昇である。第2ピークは八代海での南北方向の副振動である。すなわち、湾奥部への吹き寄せと吸い上げで八代海北端で発生した「高潮」が外力の弱体化により自由進行波となり、八代海を南下し南端で反射して再度北上した長波成分であると考えられる。数値シミュレーションではこの振動現象が明瞭に再現されている。(3) 数値シミュレーション結果は観測値より若干大きめの振幅で振動をしている。(4) 松合地区では痕跡高さが TP4. 5m であることが示されているが、計算で再現された最大潮位は 3. 8m で、両者には依然 0. 8m の差がある。この差は、極浅海域の高潮に固有の現象なのか、波浪による海面上昇 (wave set-up) なのか、海岸構造物等による局所的な水位上昇なのか、いまだ不明である。

いずれにしても、極浅海域の高潮には波浪の影響を取り込む必要がある。海面 (波浪) を通しての大気から海水への運動量の輸送機構を、深海域から極浅海域での砕波による平均海面の高まり (wave set-up) まで、統一的に表示するモデルが必要である。

ここでは、砕波せん断応力を付加する方法を検討した。このモデルは、大気乱流場、波浪場および海水流動場 (高潮) の3つのモデルを結合するもので、これらの相互作用を以下のように考えるモデルである。大気乱流場は、波浪場の状態変化を海面による粗度効果として影響を受け、逆に波浪場は大気乱流からのエネルギー供給をうける。高波・高潮時にはこの相互作用は大きく、刻々変化する。つぎに、波浪場は第3世代の波浪推算モデル (WAM) を使い、砕波によるエネルギー散逸機構に水深の影響を考慮する。この散逸エネルギー S_{dk} が砕波による海面への仕事率であると考え、砕波せん断応力 $\tau_{nk} = S_{dk} / C$ を求める。この方法で、水深が浅くなると波高 (波形勾配) が増加し、砕波率が上がり、沿岸部で吹送流が強くなる機構をモデルに導入する。

3.2 広島湾内の場合

高潮の計算結果と宇品で観測された潮位偏差との比較では、推算値は、9月24日の6:00頃までは海面の上昇はほとんどなく、それ以降少しづつ上昇し始め、9:00頃から

急激に上昇し、11:00にピークを迎え、少し下がって、13:00頃に少し上昇し、それ以降急激に減衰している。ピーク時での潮位偏差は1.5m近くに達している。一方、計算ではほとんど水位上昇が見られなかった。6:00までに観測値は既に0.3~0.5m海面が上昇している。これは前述の外洋潮位の上昇分である。それ以降9:00まで徐々に上昇し、9:00頃から急激に上昇し、計算値と同様に11:00に最大の潮位偏差になり、それ以降急激に減衰している。最大値は、2.1mで、計算値より約60cm高くなっている。潮位偏差のピーク以降での観測値の下降は計算値より急激である。高潮が発生していないと考えられる6:00以前において、観測値が既に天文潮より0.3~0.5m高くなっていることを考えると、瀬戸内海全体に異常潮位によって0.3~0.5mの水位上昇があったものと予想させる。今回の高潮では、潮位偏差の最大値の発生時刻と天文満潮位の時刻が2時間程度ずれていたために最高潮位がCDL上4.71mで済んだが、満潮位と重なっていたとしたら、さらに70cm程度上昇したことが考えられ、浸水域はさらに広がったと推測される。

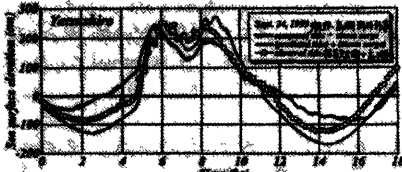


Fig. 9 Prediction and observation results of sea level at Yatsushiro harbor on 24 Sept. 1999.

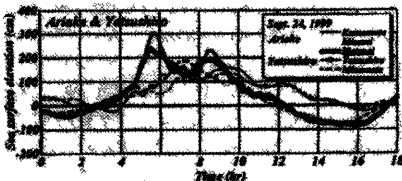


Fig. 10 Predicted results of sea level at observation sites around the Yatsushiro Sea and the Ariake Sea on 24 Sept. 1999.

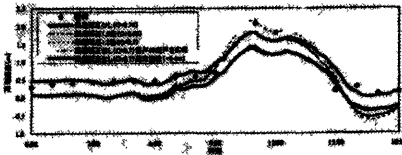


Fig. 11 Comparison of predicted results and observation at Ushina on 24 Sept. 1999.

4. おわりに

平成11年9月、わが国を襲った台風9918号について、台風に伴って発生した高潮と竜巻の状況を調べ、その予測可能性を検討した。

竜巻については、従来その発生は予報されていなかった。しかし、竜巻の生成、発達する可能性の高いメソサイクロンの発生とその強度の数値予測は可能であることが示された。このことは、少なくとも台風襲来時の竜巻については、竜巻の可能性のある「地域」を予報できることを示している。なお、竜巻自体の数値予測には、竜巻直径の1/10程度、数10mの空間分解能での数値計算が必要であり、現状の計算機能力では現実の予報は難しい。

高潮に関しては、深い海域については高い予測精度が得られた。ただし、波高については予測精度は不十分であった。八代海など超浅海域の予測についてはなお多くの問題点を抱えている。

以上のように、台風、竜巻や高潮、高波などのメソスケールの異常気象海象現象は甚大な被害をもたらしている。台風、高潮については時間発展を合理的に追跡できたものの満足する精度が得られないことがわかった。また、竜巻については「発生可能性」の高い地域（高渦度の地域）を指摘できたものの、もう一步の精度向上が必要であることがわかった。精度向上のために、現在、数値モデルの計算格子の細分化が図られている。しかし、モデルに含まれる物理過程のパラメタリゼーションはまだ不完全である。

予測の精度向上のためには、まず、気象モデルと海象モデルを統合し、モデルの統合による予測精度の向上を図る必要がある。すなわち、時々刻々の大気と海洋の相互作用を取り込んだ予測が必要である。これは、大気から海面への運動量の輸送が波浪や海流を駆動し、逆に海面から大気への顕熱や水蒸気（潜熱）輸送が大気運動のドライビングフォースになっているためである。特に、うねりを伴う高波浪時には運動量輸送と熱、水蒸気の輸送にはアナロジーが成立しないことは明らかになってきており、「強風時の大気海洋相互作用」の解明とそれのモデリングにより気象モデルと海象モデルを繋ぐインターフェイスを構築し、両モデルを統合した「気象海象総合モデル」を構築する必要がある。

一方、被害を最小限に食い止めるためには、災害を自治体レベルできめ細かく予測して対応措置をとる必要がある。最近、複数台のパソコンによる高速分散処理が可能で安価な計算システムが市販されている。並列計算と高速演算に適したスキームとコンパイラの改良を行って、局地的な災害の予測が可能な「地域密着型気象海象予報システム」を構築し、自治体レベルできめ細かく予測して対

応措置をとっていく必要がある。

謝 辞

本研究は平成 11 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）の支援を受けて、「台風 9918 号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する研究」（課題番号：11800014、代表 桂 順治）として実施したものである。科研費の補助ならびに共同研究のメンバー諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 桂 順治(2000): 台風 9918 号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する研究、平成 11 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）研究成果報告書、pp.296.
- 坪木和久、武田喬雄、取藤、榎原篤志、神谷信彦(2000): 台風外縁部雲帯内で発生した 1999 年 9 月 24 日の東海地方の竜巻とその親雲、「台風 9918 号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する研究」平成 11 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）研究成果報告書 pp.221-232.
- 新野 宏(1999): 竜巻のなぞに迫る、*パリティ*, 14, 61-65.
- 林 泰一、光田 寧、岩田 徹：日本における竜巻の統計的性質、京都大学防災研究所年報、第 37 号 B-1, 1994, pp.57-66.
- 藤井 健、光田 寧(1986)：台風の確率モデルによる強風のシミュレーション、*日本風工学会誌*, 28, 1-12.
- Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR Mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.
- Grell, G.A., Dudhia, J. and Stauffer, D.R. (1993): A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). Ncar Technical Note, NCAR/TN-398+1A, pp.117.
- Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 775-851.
- Sha, W., Kawamura, T. and Ueda, H. (1991): A numerical study on sea/land breezes as a gravity current --Kelvin-Helmholtz billows and inland penetration of sea-breeze front--, *J. Atmos. Sci.*, 48, 1649-1665.
- WAMDI Group (1988): The WAM model: the third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanography*, 17, 1150-1775.

Recent Atmospheric Disasters and their Predictability

Hiomasa UEDA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Synopsis

In September 1999, the Typhoon 9918 attacked Japan Islands and flooding due to high tide occurred in the northern-most part of the Yatsushiro Sea and tornadoes were caused in Toyohashi City and its surroundings. Investigation of this typhoon was performed under the program of 'Unforeseen Disaster' supported by Ministry of Education and Culture. In this paper, state of the tornado and high tide were examined in detail and their predictability was discussed. As for the high tide, prediction accuracy was refined significantly for extremely shallow sea with large ebb tide beach, such as the Yatsushiro Sea. For tornado, although it has not been forecasted, the areas with high possibility of the tornado attack was found to be predicted.

Keywords: Tornado, Tide, Meteorological model, Wave model, Ocean model, typhoon