

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1169

December 2007

局地気象モデルを用いた台風時の風場および波浪の推算

川口 浩二

河合 弘泰

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 対象台風および対象地域	5
3. 局地気象モデルによる台風時の風場推算	6
3.1 計算条件	7
3.2 計算方法	7
3.3 台風ポーガス	8
3.3 データ同化	11
3.5 検討結果	11
4. 第三世代波浪推算モデルによる台風時の波浪場推算	13
4.1 計算条件	13
4.2 検討結果	13
5. 実務（設計波算定）を想定した検討	15
5.1 計算条件	15
5.2 検討結果	15
6. 結論	17
7. あとがき	18
謝辞	18
参考文献	18

Estimation of Wind and Wave during Typhoon based on Mesoscale Model

Koji KAWAGUCHI*

Hiroyasu KAWAI**

Synopsis

This study examined estimation accuracy on numerical models of wind and waves during typhoons. By using meteorological objective analysis data GPV provided from Japan Meteorological Agency (JMA), the mesoscale model MM5 with typhoon bogus and data assimilation and the 3rd generation wave model WAM, we estimated the wind and waves with high accuracy as compared to a parametric model such as the 2D-typhoon model. Additionally, we obtained similar results by using GPV provided from National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with a coarser spatial resolution than JMA's GPV though there were some problems to be solved. Consequently, the estimation model of wind and waves in this study is applied to estimate high waves needed for computation of design wave.

Key Words: mesoscale model, typhoon bogus, data assimilation, GPV, 3rd generation wave model, wave estimation

* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

** Head, Marine Hydrodynamics and Storm Surge Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5049 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:kawaguchi@phri.go.jp

局地気象モデルを用いた台風時の風場および波浪の推算

川口 浩二*
河合 弘泰**

要 旨

気象庁から提供されている気象の客観解析値を入力気象場とし、台風ポーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによる台風時の風場の推算を行った。ついで、得られた風場を基に第三代波浪推算モデルによる波浪の推算を行った。その結果、これまで実務で用いられてきた経験的な台風モデルを基にした風場の推算方法と比べて精度の高い風場の推算が可能となり、波浪の推算精度も向上することが明らかとなった。さらに、本手法は、設計波算定業務など過去数十年前の台風を対象とするような場合にも適用可能であることも明らかにした。

キーワード：局地気象モデル，台風ポーガス，データ同化，気象の客観解析値，波浪推算

* 海洋・水工部主任研究官

** 海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5049 Fax：046-844-1274 e-mail:kawaguchi@pari.go.jp

1. はじめに

日本は、毎年のように台風が来襲・上陸する台風常襲国である。1999年の台風9918号では周防灘において、さらに、2004年には台風の上陸が相次ぎ、全国的に高波・高潮による人的・物的被害を受けた。このような高波による港湾構造物の被災原因等を把握するには、被災時の来襲波浪を正確に把握することが必要不可欠である。また、実務においては、大規模な被災直後はもちろんのこと、仮に被災を受けていなくとも定期的に設計波の見直し業務が行われており、その際には、対象海域において各年を代表とするような高波浪時の波浪情報が長期間必要となる。そのような場合、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS）に代表される波浪観測情報が有益である。NOWPHASは、国土交通省港湾局、各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所および独立行政法人港湾空港技術研究所の相互協力のもとに、1970年以降、継続して管理・運営されている日本沿岸における波浪観測情報網である。観測された波浪データは、気象庁による波浪予報に活用され海の安全に貢献するとともに、蓄積された長期間の波浪データを基にした統計解析を通じ、港湾・海岸・空港事業の計画・調査・設計・施工をはじめとした沿岸域の開発・利用・防災に幅広く活用されている。しかしながら、このような波浪観測データは、対象とする海域やその近傍において波浪観測点が存在しないためデータが無かったり、仮に波浪観測点が存在していたとしても観測機器等のトラブルなど様々な要因によって必ずしも高波浪時の波浪データが測得出来ているとは限らない。さらに、設計波算定を行う際には相当長期間の波浪観測データを基に検討することが望ましく、波浪観測データのみで設計波算定業務に活用できる程の長期間の波浪観測データが蓄積されている地点は多くない。このように様々な理由で波浪観測データが存在しない、もしくは波浪観測データが十分でない場合には、それらを補完するため波浪の数値シミュレーション（波浪推算）が実施される。

波浪推算の歴史は、不規則な海の波を有義波という単一の波高・周期を持つ波として扱い、その発生・発達に支配的な風速、吹送距離（フェッチ）、吹送時間を与条件として有義波を推算する有義波法（例えばSMB法、Bretschneider, 1952）に始まり、現在は、不規則な海の波をスペクトルという成分波の重ね合わせで表現し、風から波へのエネルギー入力、砕波や海底摩擦などによる

波のエネルギー消散、非線形相互作用による成分波間のエネルギー輸送等によって波浪のエネルギーが時空間的にどのように変化するかを数値的に解くスペクトル法が主流となっている。実務における波浪推算（スペクトル法）では、気象庁によって開発された第一世代波浪推算モデルであるMRI (Isozaki and Uji, 1973) が長年用いられてきたが、近年は、第三世代波浪推算モデルが主流となり、中でもWAM (Wave Model ; WAMDI, 1988) が広く用いられている。第三世代波浪推算モデルの最大の特徴は、非線形相互作用による成分波間のエネルギー輸送を定式化していることであり、この定式化によって、波浪の（方向）スペクトルレベルまで精度良く推算することが可能となっている（橋本ら, 1999）。

このように波浪の推算精度は波浪推算モデル自体の高度化と共に向上しているが、それ以上に波浪推算で用いる風場（海上風）の精度で決まると言っても過言ではない。日本沿岸に来襲する高波の主たる気象擾乱は台風であるが、これまで実務における台風時の風場はその簡便さなどから台風域内については台風の中心気圧と最大風速半径をパラメータとする経験的台風モデル（例えば、Myersのモデル ; Myers and Malkin, 1961）により推算されて来た。ところが、この方法では風場に及ぼす陸地の影響を考慮できないため、内湾域を対象とした波浪推算を実施する際には、観測風に基づいて風速・風向を補正したり、波浪や高潮の推算結果が観測値と合うように試行錯誤的に風場を修正してきた。また、風場に対する陸地の影響を考慮する別の方法としては、マスコンモデル (Sasaki, 1958, 1970a, 1970b ; Sherman, 1978) を用いる方法もあるが、これは経験的台風モデルで与えられる3次元の風場を初期風とし、単に数学的な連続式を満たすように風場を修正する手法であるため、ここには気象学的見地は一切なく、計算領域の取り方によっては非現実的な風場を与える場合もある。このように実務における風場推算は、その精度を少しでも高めるため様々な修正が試みられているが、精度的な制約から波浪の推算精度が十分でない場合も少なくなかった。

近年、海岸工学の分野でも、気象庁等から提供される気象の客観解析値（以下では“気象GPV” (Grid Point Value) と記す) を初期値・境界値とした数値予報モデル（局地気象モデル）によって、気象学的な観点から気象場を直接計算することが試みられている。気象GPVとは、データ対象領域全域に3次元格子を設定し、各格子点における時々刻々の気象に関する物理量（風速、気圧、気温および相対湿度など）が収録された気象に関する数値データセットである。このような気象GPVを入力気象場

とし、運動量・質量・熱・水蒸気など大気に関する支配方程式、積雲・雲微物理・放射・大気境界層・地表面過程などの大気物理過程を考慮した局地気象モデルによって推算される気象場（風場・気圧場）を波浪や高潮を推算する際の入力気象場として与えることで、精度の高い波浪や高潮の推算が可能になると報告されている（河合ら、2007；吉野ら、2006）。このように、今後は実務においても、波浪推算の際に必要な風場をこれまで用いられてきた経験的台風モデルではなく、数値予報モデルを用いて推算するようになると考えられる。

以上を踏まえ本研究では、九州北東部に位置する周防灘において高波を発生させた気象擾乱（台風）を対象に、気象庁から提供されている気象GPV（以下では“気象庁GPV”と記す）を入力気象場とした局地気象モデルによる風場の推算を行った。ついで、得られた風場を基に第三世代波浪推算モデルによる波浪の推算を実施し、同海域における波浪の推算精度を検討した。その際、実務で用いられている経験的台風モデルによる風場をマスコンモデルで修正して得られる風場（以下では“従来法”と記す）による風および波浪の推算結果との比較も行った。

さらに、設計波算定などの実務では、過去数十年程度前の気象擾乱を対象とする必要がある。ところが、後述するように、気象庁から提供されている気象GPVは近々十年程度のデータしか整備されていないため、設計波算定を目的とした場合には十分でない。そのため、設計波算定を想定し、過去50年程度の長期間のデータが整備されている気象GPV（以下では“広域気象GPV”と記す）を入力気象場とした場合についても同様の計算を行い、広域気象GPVの活用可能性についても検討した。

2. 対象台風および対象地域

本研究では、**図-2.1**に示す九州北東部に位置する周防灘を対象に風場および波浪場の推算を行った。局地気象モデルによる風場および第三世代波浪推算モデルによる波浪場の精度検証には、同対象域内の観測値を用いた。**図**に示すように同対象地域には多くの気象・海象の観測

点があるが、波浪に関しては苅田港を、気象に関しては波浪推算には海上風が重要であること、中津・国見・瀬戸・長浜などのAMeDAS観測地点は周辺地形の影響を大きく受けている可能性が高いことなどから、沿岸部に近く、ほぼ海上風とみなせる苅田港および宇部空港の観測値を用いて精度検証を行った（**表-2.1**）。

つぎに、対象台風については、本研究では気象庁GPVを用いて気象場の計算を行うが、本データは1996年以降のデータしか整備されていないため（後述の**表-3.1**）、対象とする台風も1996年以降とせざるを得ない。加えて、気象場（風場）の推算精度の検討という観点から言えば、出来る限り多くの気象観測地点での観測データが必要である。以上を踏まえ、ここでは**表-2.2**に示す5つの台風を対象とした。なお、台風9918号については、苅田港2の風観測データが欠測していたため、苅田港1を用いて

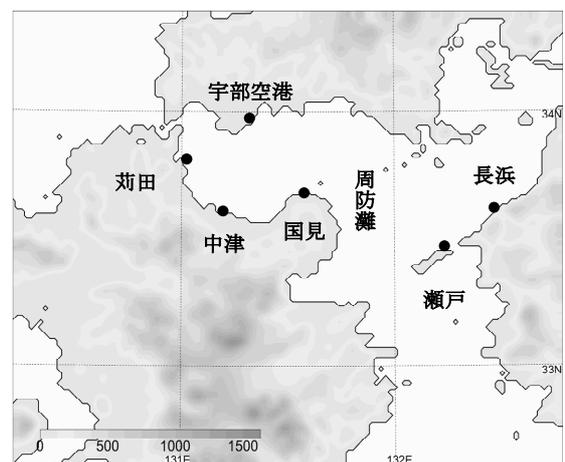


図-2.1 対象地域

表-2.1 各観測地点の諸元

	緯度	経度	観測要素	高度	提供者
苅田港1	33.82	131.00	風	30m	福岡県
苅田港2	33.80	131.08	風, 波浪	10m	国土交通省
宇部空港	33.93	131.30	風	10m	気象庁 ^{*1}

※1：気象庁ホームページ、気象庁（2000）など

表-2.2 対象台風と解析期間

台風事例	解析期間	最大有義波高（苅田）
台風9905号	1999年7月25日21時～7月27日21時	2.19m
台風9918号	1999年9月22日03時～9月24日21時	3.46m
台風0215号	2002年8月29日03時～8月31日21時	2.20m
台風0416号	2004年8月27日03時～8月31日06時	2.92m
台風0418号	2004年9月04日03時～9月07日21時	3.36m（ピーク時欠測）

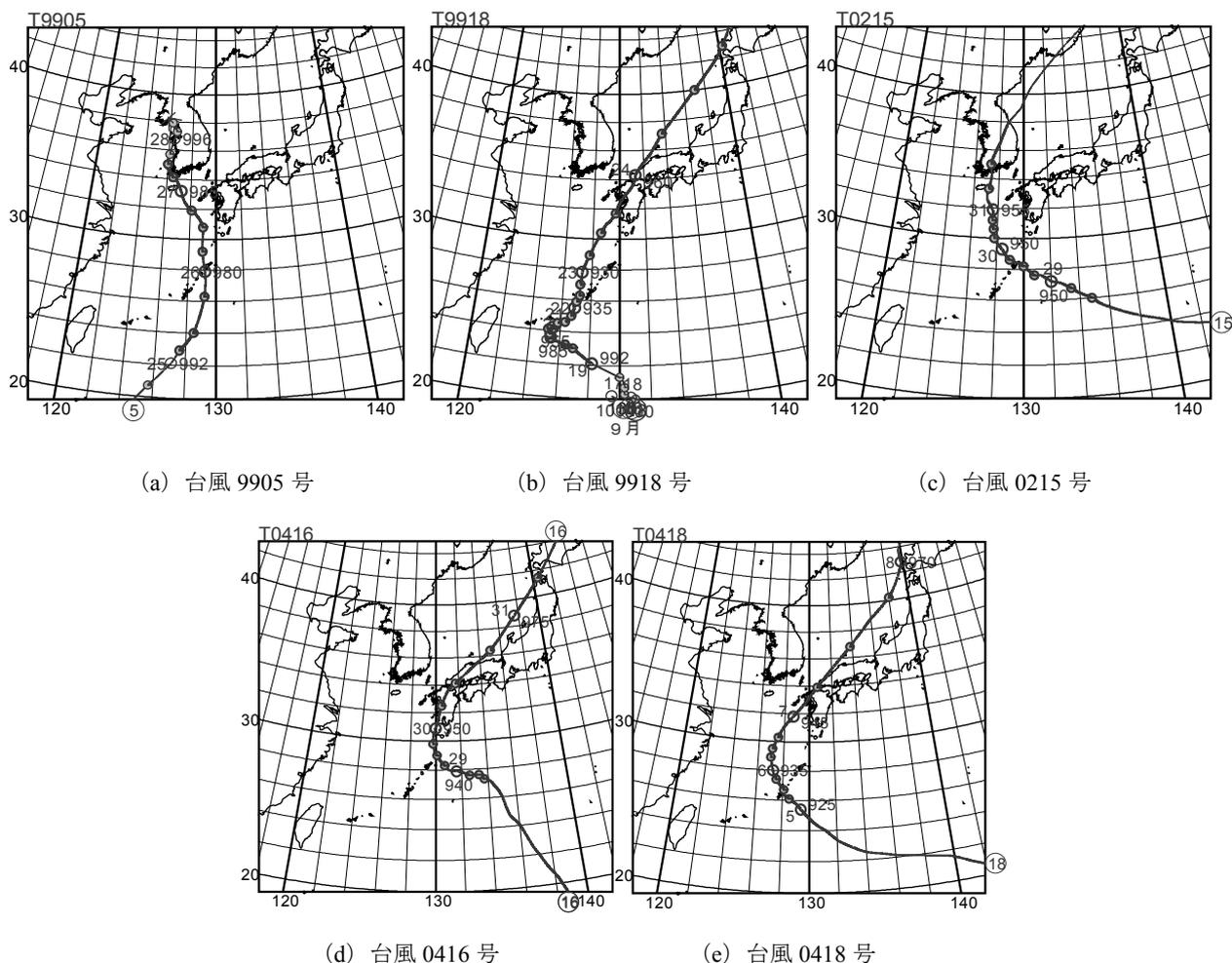


図-2.2 対象台風の台風経路

いる。また、**図-2.2**は対象台風5事例の台風経路を示している。図から分かるように、台風9918号、台風0416号および台風0418号の3つの台風は、台風は九州に上陸し、周防灘もしくはその近傍を北東方向に通過したが、台風9905号および台風0215号は、日本本土には上陸せず、九州の西の海上を北上するコースを通過している。

3. 局地気象モデルによる台風時の風場推算

本研究では、台風時を対象に気象の客観解析値である気象GPVを入力気象場として、局地気象モデルによる気象場（風場）の推算を行うが、局地気象モデルとしてはMM5（The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model）を用いた。

MM5は、米国ペンシルベニア州立大学と米国大気科学センターNCARによって共同開発された局地気象モデルであり、次のような特徴がある。

- ・非静力学、圧縮、雲解像モデルである。
- ・積雲、雲微物理、大気境界層、放射、地表面等のあらゆる大気物理過程を含む。
- ・多重ネスティング、データ同化が可能である。
- ・世界中に多くのユーザがいる、コミュニティモデルである。
- ・現業予報モデルとして多数の実績を有する。
（韓国・モンゴルなど）

局地気象モデルは、気象GPVを入力気象場として、運動方程式・質量保存則・熱の保存則・水物質に関する保存則などを基礎式とし、積雲・雲微物理・大気境界層・放射および地表面過程などの様々な大気物理過程の相互作用を考慮し、気象学的な観点から気象場を直接解く数値予報モデルである。

3.1 計算条件

本研究では、九州北東部に位置する周防灘を対象に、台風時の風場の推算を行った。図-3.1は計算領域を示している。図に示すように2つの計算領域を設定し、2 way-nestingを用いた。2 way-nestingは双方向ネスティングとも呼ばれ、通常、ネスティングは格子間隔の粗い計算領域（大領域）の計算結果を基に格子間隔の細かい計算領域（小領域）の計算を行う（1 way-nesting）が、

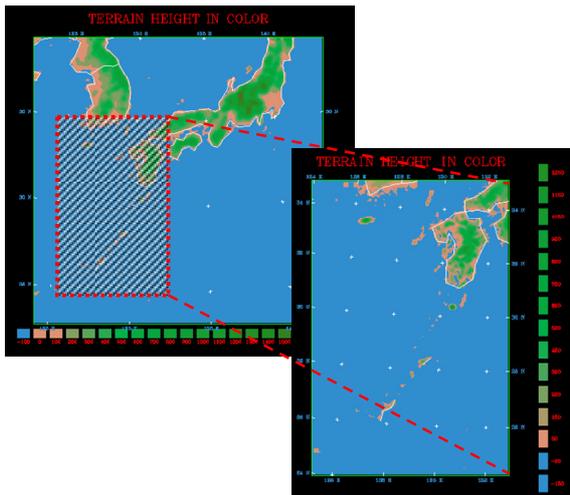


図-3.1 計算領域（大領域・小領域）

表-3.1 気象庁 GPV (RANAL) の仕様

項目	内容
対象領域	アジア域
空間解像度	20km×20km
時間解像度	12時間（1996～2001年） 6時間（2001年以降）
提供期間	1996年～現在（約10年程度）

2 way-nestingとは小領域の計算結果を大領域にもフィードバックさせる方法である。こうすることで、大領域の計算精度も同時に高めようとするものである。大領域は空間解像度13.5kmの計算格子からなり、主に台風を含む環境場全体を対象とすることで主に台風の移動を推算することを目的としている。一方、小領域は空間解像度4.5kmの計算格子からなり、台風全体を含む領域を覆うことで主に台風の内部構造を解像することを目的としている。

表-3.1にはMM5の入力気象場として用いた気象庁GPVの仕様を、表-3.2には計算領域の諸元とMM5で考慮されている各大気物理過程における計算オプションを示している。気象庁GPVには、全球客観解析値（GANAL）・領域客観解析値（RANAL）・メソ客観解析値（MANAL）の3種類の気象GPVが提供されているが、本研究では表に示すようにアジア域を対象とした領域客観解析値RANALを使用した。RANALは、空間解像度20km、時間解像度6時間（ただし、2001年以前は12時間）、データの収録期間は1996年～現在までの10年強のデータセットである。また、海面水温データには、Near-goosから提供されている日平均海面水温データを、さらに、後述する台風ポーガスを投入する際に必要となる時々刻々の台風情報（中心位置、気圧、強風半径）には、気象庁から発表される台風ベストトラックデータを用いた。

3.2 計算方法

本研究では、局地気象モデルで用いる入力気象場として、前述の表-3.1に示す気象庁GPV（RANAL）を用いているが、その分解能は、時間解像度6時間、空間解像度20km程度であるため、移動速度の速い台風を表現する

表-3.2 各対象領域における気象モデルの計算設定

項目	大領域	小領域
空間解像度（水平方向）	13.5 km	4.5 km
水平格子数	140×140	271×181
鉛直層	32	32
タイムステップ	30 秒	10 秒
微物理	Simple Ice	Schultz graupel microphysics scheme
積雲パラメタリゼーション	Grell cumulus scheme	none
大気境界層（PBL scheme）	Eta PBL	Eta PBL
放射（Radiation scheme）	Cloud radiation scheme	Cloud radiation scheme
地表面（Land-surface scheme）	Five-Layer soil model	Five-Layer soil model
初期・境界値	大気	気象庁 GPV (RANAL)
	海水温	Near-Goos

には必ずしも十分な解像度を有していない。そのため、計算を開始するにあたっては始めに予備的な計算を行った。

まず始めに、オリジナルの気象GPVを基に、1度、MM5を用いて時間解像度3時間と細かくした気象データを作成し、このデータに対してベストトラックデータを基に後述する台風ポーガスを投入した。その後、台風ポーガスを投入した解析値を初期・境界値あるいはデータ同化の対象となる解析値として、再度、MM5による計算を行った。

以下に、MM5による気象の計算手順とともに、その計算手順のフローを図-3.2に示す。

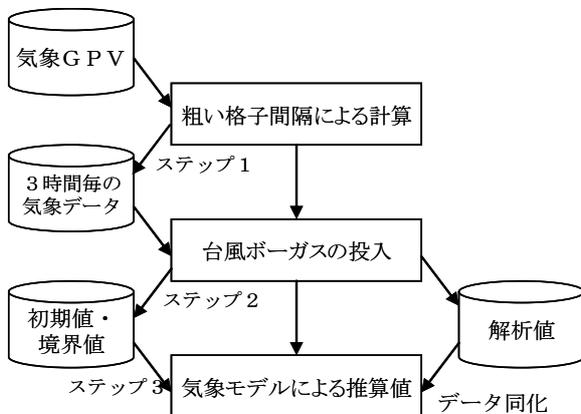


図-3.2 気象モデルによる計算手順

ステップ1：オリジナルの気象庁GPVを基に、MM5を用いて、時間解像度3時間の気象データを作成する。

ステップ2：ステップ1で作成された3時間毎の全ての気象データに対して、気象庁発表の台風ベストトラックデータを基に台風ポーガスを投入する。

ステップ3：ステップ2で作成された気象データを初期値・境界値とし、データ同化を考慮したMM5による計算を行う。

3.3 台風ポーガス

ポーガス (bogus) には、“偽物の”とか“模造の”という意味があり、「台風ポーガス」とは人工的に作成した台風の3次元構造である。台風時の風場推算では、台風をどれだけ正しく(もっともらしく)表現できるかが重要な要素となる。

本研究でMM5の入力気象場として用いる気象GPVにも当然ながら台風は表現されているが、空間解像度等の

問題から台風の位置がずれていたり、実際の台風よりも中心気圧が浅め(中心気圧が高め)に表現されているために台風域内の風速が弱めに表現されているなど、実際の台風よりも“なまった”(平滑化された)形で表現されていることが多い。このようになまった形で台風が表現されている気象GPVを用いて気象場を計算したとしても、計算開始初期の段階で既に実際よりも弱い台風を与えていることになるため、必然的に台風を過小評価することとなる。このような気象GPVに内在する台風表現の問題点を解決するため、台風ポーガスという人工的に作成した3次元の台風構造を新たに気象GPVに投入することで、元々の気象GPVで表現されているなまった台風をメリハリの効いたシャープな構造を持つ台風置き換え、より実態にあった適切な台風表現し直すのが台風ポーガス投入の目的である。

台風ポーガスは、元々のMM5にもLow-Nam and Davis (2001)による台風ポーガスを考慮できるが、本研究では、大野木・上野(1992)、大野木(1997)、上野(2000)などに詳細に記述されている気象庁台風ポーガスに準じたOhsawaら(2006)の台風ポーガスを採用した。両者の台風ポーガスの特徴としては次の通りである。Low-Nam and Davisの台風ポーガスでは、台風ポーガスとして風速分布を与え、その後、気圧傾度力とコリオリ力しか考慮していない地衡風近似の仮定の基で与えた風速分布とバランスするような気圧分布を求める。この場合、遠心力を無視した地衡風近似を仮定しているため、台風域内の最大風速(中心気圧)を合わせるために、時には非現実的な中心気圧(最大風速)を与えなければならないことが生じる。一方、Ohsawaらの台風ポーガスは、台風ポーガスとして気圧分布を与え、気圧傾度力・コリオリ力・遠心力を考慮した傾度風近似の仮定の基に気圧分布から風速分布を求めるため、より現実的な風速分布を与えることができる。しかも、気圧分布(台風の中心気圧)を直接与えるため、ベストトラックデータで提供される中心気圧をそのまま与えられるというメリットがある。

大澤(2005)によれば、台風ポーガス投入は大まかに以下のような手順で行う。

①地上気圧分布の計算

地上気圧(海面更正気圧) $P_s(r)$ を、以下に示すFujita(1952)によって与える。

$$P_s(r) = P_{\max} - \frac{\Delta P}{\sqrt{1 + (r/R_0)^2}} \quad (3.1)$$

ここで、 P_{max} は無限遠の位置での地上気圧、 R_0 は最大風速半径、 ΔP は台風中心における気圧降下量、 r は台風中心からの距離である。ここで、 P_{max} は、台風半径 R_B の円周上で平均した気圧 P_B と中心気圧 P_C を用いて次式で与えられる。

$$P_{max} = P_C + \frac{P_B - P_C}{1 - \sqrt{1 + (R_B/R_0)^2}} \quad (3.2)$$

ここで、台風半径 R_B は、風速15m/sである強風半径 R_{15} を用いて次式で与えられる。

$$R_B = R_{15} \sqrt{1 + 0.03/fR_{15}} \quad (3.3)$$

ここで f はコリオリパラメータである。ここで強風半径 R_{15} はベストトラックデータによって与えられる。また、上式で求められる台風半径 R_B は台風ボーガスの影響が及ぶ範囲を示している。

② 3次元高度場 (D 値) の計算

気象庁台風ボーガスでは、高度の D 値(台風域内の等圧面高度 Z の周辺値の偏差)の3次元軸対象構造を、解析関数を用いて記述する点に特徴がある。任意の気圧面(p 面)における台風中心から半径 r だけ離れたところの D 値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} D &= Z - Z_B \\ &= -\frac{R}{g} \int_{P_s}^P T d \ln p + \frac{R}{g} \int_{P_B}^P T_B \ln p \\ &= -\frac{R}{g} \int_{P_s}^P (T - T_B) d \ln p + \frac{R}{g} \int_{P_B}^P T_B d \ln p \end{aligned} \quad (3.4)$$

ここで、 R はガス定数、 g は重力加速度、 P_s は地上気圧、 P_B は地上気圧のリファレンス、 d は層圧、 T_B は層圧温度のリファレンス、 Z_B は高度のリファレンスである。なお、リファレンスとは台風半径の円周上で平均した値である。

③ 傾度風の計算

傾度風 V_g は、次式のようにコリオリ力、遠心力、気圧傾度力のバランスで与えられる。ここで、 r は曲率半径であり、台風中心からの距離とした。

$$V_g = \frac{1}{2} \left\{ -fr + \sqrt{f^2 r^2 - 4rg \frac{\partial Z}{\partial r}} \right\} \quad (3.5)$$

④ 台風の非対称性の付加

ここまでで作成した台風ボーガスは軸対象なボーガスであるが、実際の台風は必ずしも軸対象であると限らないため、何かしらの形で非対称性を考慮する必要がある。気象庁台風ボーガスでは非対称成分を気象GPVのゲス値(第一推定値)から抽出する。

まず始めに、気象GPVのゲス値(第一推定値)で表現されている台風中心(以下では“ゲス中心”と記す)を特定し、各等圧面についてゲス中心から距離毎に方位角平均高度 Z_{gs} を計算する。非対象成分を含むボーガスの高度 Z_b は、ゲス値の高度を Z_g 、これまでに作成された軸対象ボーガスの高度を Z_{bs} とすれば次式のようになる。

$$Z_b = Z_{bs} + (Z_g - Z_{gs}) \quad (3.6)$$

ここで右辺第二項の括弧で括った部分が高度場の非対称成分である。上式は、気象GPVのゲス値(第一推定値)から、ここまでで作成した軸対象成分を除去した残りを非対称成分とし、その非対称成分を右辺第一項の軸対象台風ボーガスに付加することを示している。また、風速場も同様に、各等圧面についてゲス中心から距離毎に方位角平均風速 V_{gs} を計算し、ゲス値の風速を V_g 、これまでに作成された軸対象ボーガスの風速を V_{bs} とすれば、非対象成分を含むボーガスの風速 V_b は次式で求められる。

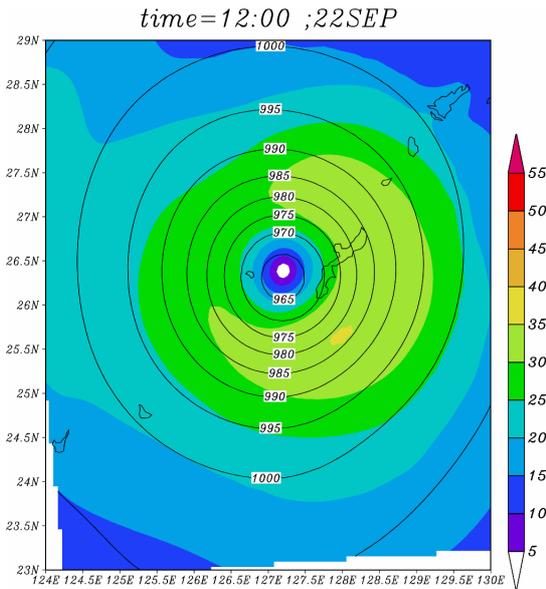
$$V_b = V_{bs} + (V_g - V_{gs}) \quad (3.7)$$

⑤ 台風ボーガスの投入

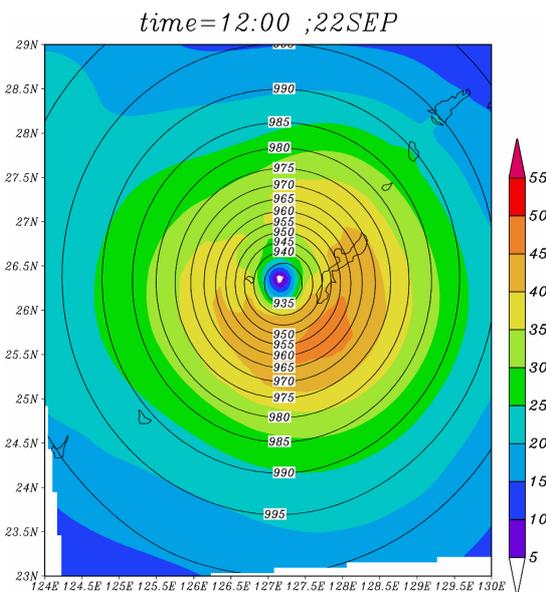
台風ボーガスでゲス値を修正する領域は円形であり、その半径を台風半径とする。台風半径内で台風ボーガスをゲス値に投入する際には、以下に示すクレスマン関数による重み付けを用いて行う。

$$W = \left(\frac{R_b^2 - r^2}{R_b^2 + r^2} \right)^2 \quad (3.8)$$

ここで、 R_b は式(3.3)で求められる台風半径であり W はボーガスの重みを表している。また、台風半径内の任意の物理量 a は添え字 g および b を、それぞれボーガス投入前およびボーガス投入後とすると次式で求められる。



(a) 台風ボーガス投入前



(b) 台風ボーガス投入後

図-3.3 台風域内の風速および気圧分布

$$\alpha = W\alpha_b + (1 - W)\alpha_g \quad (3.9)$$

すなわち、重み W は台風中心($r=0$)で1、台風半径 R_B で0となり、台風中心から離れるに従って台風ボーガスの効果が弱まり、台風半径 R_B ではガス値と一致する。

図-3.3は、台風9918号を例に台風ボーガス投入前後における台風域内の気圧分布と風速分布を示したものである。また、図-3.4は、同じく台風ボーガス投入前後にお

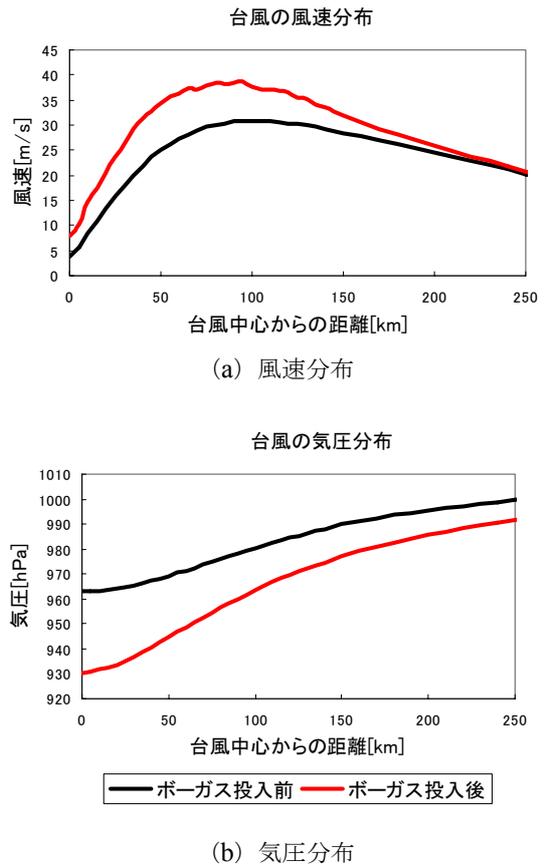


図-3.4 台風ボーガス投入前後における台風中心からの距離と風速および気圧分布

ける台風中心からの距離と風速および気圧の関係を示したものである。これらの図から分かるように、風速については、最大風速半径(76km)で、台風ボーガス投入後の風速は40m/sであり、台風ボーガス投入前の風速30m/sと比べると約10m/s程度大きくなっていることが分かる。さらに、台風ボーガス投入前の風速分布は台風中心の南東部分が最も大きかったが、台風ボーガス投入後は台風域内の風速が全体的に大きくなり、その非対称性も表現されていることが分かる。また、台風ボーガスを投入することで、台風域内の等圧線の間隔が密になっており、気圧の空間変化が大きくなっていることが分かる。さらに、気圧深度については、台風ボーガス投入前は気象庁ベストトラックの気圧深度(930hPa)と比較して、30hPa程度も気圧が高く、台風中心付近はなべ底型の緩やかな気圧傾度であったが、台風ボーガス投入後は台風中心の気圧深度はベストトラックと同程度となっていることが分かる。

このように台風ポーガスを投入することで、元々の気象GPVで表現されている台風と比べて、台風域内の気圧は低く、風速も強く表現されるようになり、メリハリの効いたシャープな台風構造が表現できることが分かる。

3.4 データ同化

「データ同化」とは、解析値や観測値の情報を数値予報モデルに反映（同化）させ、より精度の高い推算を行う処理である。台風は中心部に強風域が集中しており、風向・風速は台風中心部との距離、相対的位置に依存する。数値予報モデルでは、一般的に推算時間が経つに連れて、推算値の台風中心は観測値の台風中心から次第に外れていくため、データ同化を行うことで、台風進路の推算精度を向上させることが期待できる。

本研究ではナッジングというデータ同化手法を用いた。ナッジングは、タイムステップ毎に解析値や観測値の持つ有効な情報を外力として与える連続同化手法であり、オーストラリア気象研究センター（BMRC）の熱帯解析予報システム（TAPS）などで現業運用されている。通常、データ同化の対象となるデータには、観測値や数値モデルによる解析値を用いるが、前者を観測値ナッジング、後者を解析値ナッジングという。本研究では、波浪推算を行う際に必要な海上風の面的な観測値がそもそも存在しないことなどから、前述の3.2で作成される台風ポーガスを投入した3時間毎の気象データをデータ同化の対象データとする解析値ナッジングを用いた。これは3時間毎に与えられる台風ポーガスを投入した気象データがその時刻における最も確からしい気象場の解析値と捉え、データ同化によって、局地気象モデルによって推算される気象場との誤差を3時間毎に修正することを意味している。次式に解析値ナッジングの式を示す。

$$\frac{\partial \alpha_i(x,t)}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G \cdot [\alpha_{ia}(x,t) - \alpha_i(x,t)] \quad (3.10)$$

ここで、 $\alpha_i(x,t)$ は予報変数であり、風、気温、湿度などである。 F は予報式で予報変数に変化を与える全ての物理過程を含み、時間・場所などに依存して変化する。右辺第2項はナッジング項であり、[] で示されている予測値と解析値との差を外力として加える。 G はナッジング係数と呼ばれる推算値を解析値への程度近づけるかを定める係数であり、ナッジング係数 G を大きくすればするほど、データ同化対象データとの差違が小さくなるように修正されるが、解析値の精度と計算値の精度のバランス、解析値の時間密度に依存する。

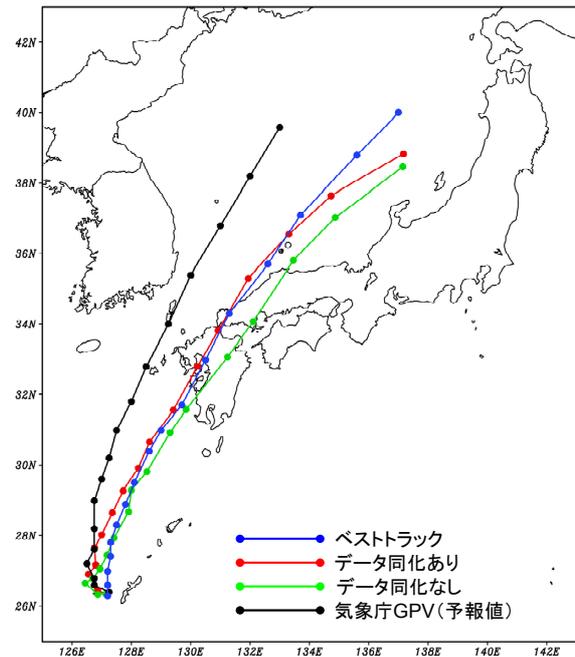


図-3.5 台風経路図（台風9918号）

図-3.5は、台風9918号を例に、データ同化を考慮した場合と考慮しない場合の台風経路を、台風ベストトラックデータの経路と一緒に図示したものである。なお、図中には、気象庁GPV（RSM）の予報値の経路も図示している。なお、ここでは台風ポーガスは投入している。図から分かるように、データ同化を行わなかった場合は、周防灘周辺ではベストトラックから東に大きく外れ、100km以上の誤差が生じていた。一方、データ同化を考慮することで台風経路が西に修正され、ベストトラックとの進路推算誤差が約40kmとなり、データ同化を行わなかった場合と比較して台風の進路誤差が改善されていることが分かる。

3.5 検討結果

図-3.6は、台風9918号を例に、台風中心が周防灘を通過した前後について、台風ポーガスおよびデータ同化を考慮した場合としない場合の局地気象モデルによる風場の推算結果を示したものである。なお、図には、観測値、台風モデルのみによる結果および従来法による結果も併せて示している。図から、台風モデルのみの場合は、進行方向の東側に強風域が存在し、台風中心と最大風速を結ぶ線に軸対象となっていることが分かる。また、マスコンモデルを用いた従来法では陸地の影響が考慮され、陸地の上で風速が弱くなっており、周防灘や有明海などの内湾において風向が修正されていることが分かる。一方、台風ポーガスおよびデータ同化を考慮していない局

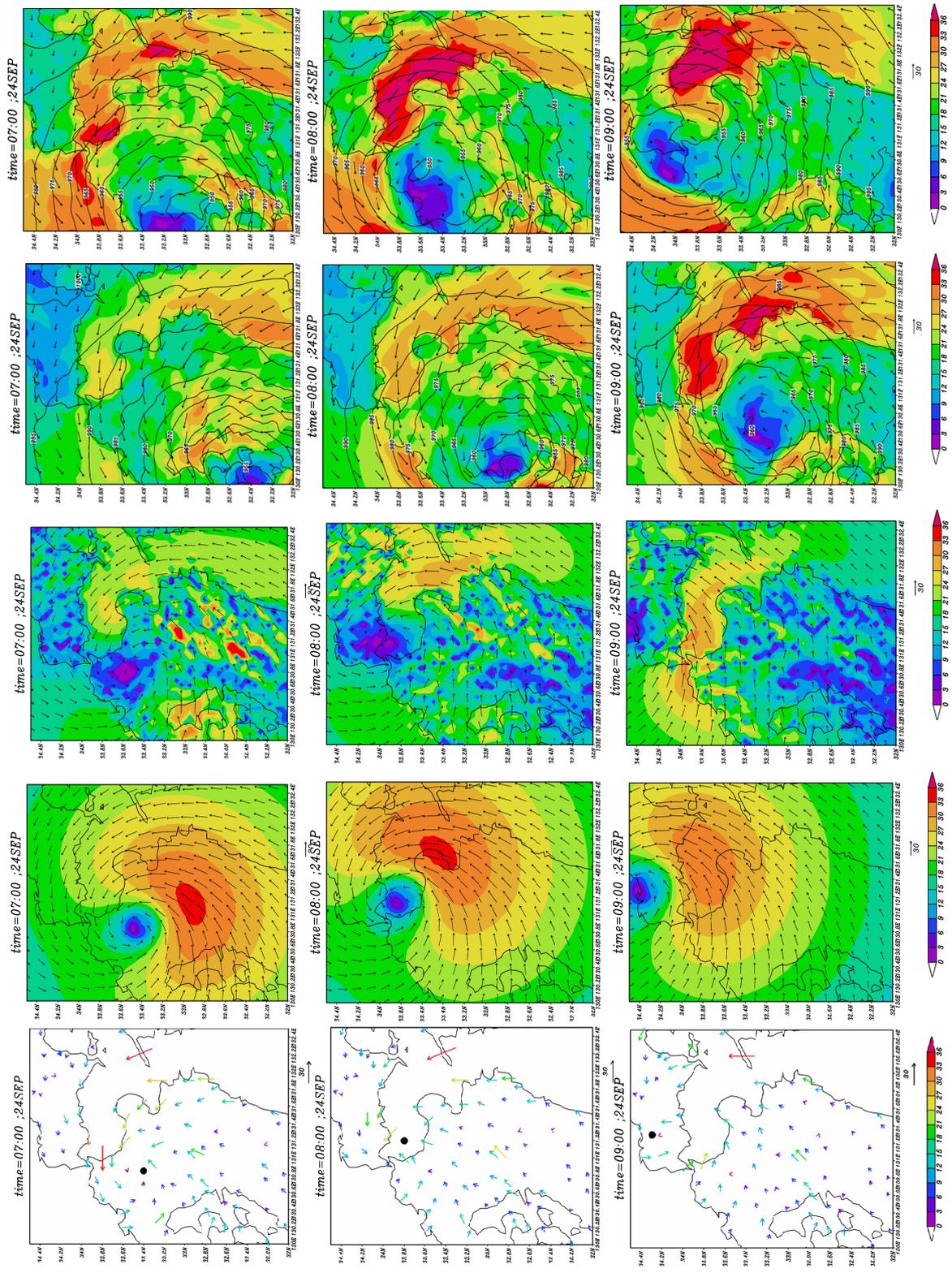


図-3.6 局地気象モデルによる風場推算結果（台風9918号，1998年9月24日7:00～9:00）
 （左から，観測値（●は台風中心），従来法，局地気象モデル（台風ボーガスおよびデータ同化は考慮しない），局地気象モデル（同左考慮））

地気象モデルの結果は、陸地で風速が弱く、従来法と比べると海上で風速が強くなっている。しかしながら、台風中心位置は同時刻の観測値や台風モデルで見られる台風中心よりも南西に位置している。次に、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルの結果は、台風ボーガスを投入することで台風域内の気圧は低く、風速が強めに推算されていることから、考慮していない場合と比べて海上の風速が大きくなっていることが分かる。また、台風中心位置については、データ同化を考慮することで台風位置が修正され、観測値や台風モデルで見られる台風中心に近づいていることが分かる。

図-3.7は、同じく台風9918号を対象に、荻田および宇部空港における局地気象モデルによる風場の時系列を示したものである。図から分かるように、従来法による最大風速は観測値のそれをかなり過小評価し、その発生時刻もずれている。一方、局地気象モデルによる最大風速は観測値との再現性が高く、同じ局地気象モデルの結果でも、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した場合の方が観測値の再現性が高いことが分かる。さらに、観測値に着目すると、9/24の8:00頃前後で風速がいったん弱まっていることから、この時刻前後に台風中心が周防灘を通過したと考えられるが、観測値によると台風中心通過後よりも台風通過前に、より強い風速が観測されていることが分かる。これは台風前面に強風域があったことを示している。このような台風通過前の強い風速を推算できたのは局地気象モデルの結果だけである。また、宇部空港の結果では、9/24の9:00以降については観測値が

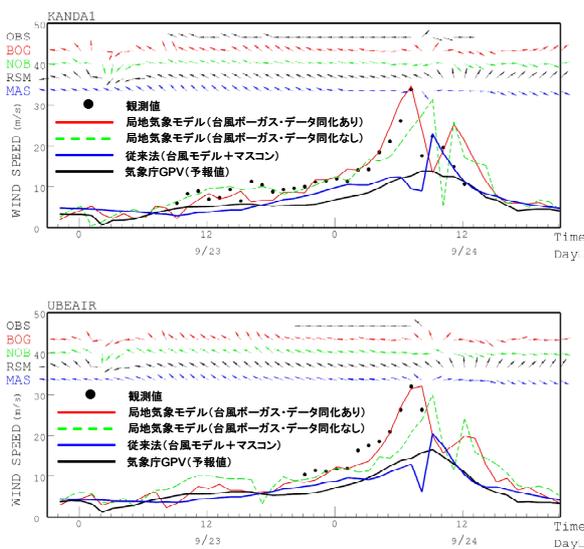


図-3.7 局地気象モデルによる風場の時系列
(台風 9918 号, 上から, 荻田港・宇部空港)

欠測のため何とも言えないが、荻田港と同様に、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによる結果が観測値の再現性が最も高いことが分かる。

このように、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによる風場は従来法による風場と比べて、その推算精度が高いことが分かった。

4. 第三世代波浪推算モデルによる台風時の波浪場推算

前章では、台風9918号を基に、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによる風場推算を行った結果、従来法の風場推算と比べて精度の高い風場の推算が可能であることが明らかとなった。

ここでは、局地気象モデルで推算された風場を基に、同海域における第三世代波浪推算モデルによる波浪推算について検討する。

4.1 計算条件

本研究では、K.Hasselmannらが中心となったWAMDIグループが開発した第三世代波浪推算モデルのWAM(Wave Model)を用いた。WAMに限らず第三世代波浪推算モデルの最大の特徴は、波浪を構成するスペクトルの成分波間のエネルギーの授受(非線形エネルギー輸送)が定式化されていることである。その結果、単なる波高・周期だけでなく、方向スペクトルレベルまで精度良く推算することが可能になっている。なお、WAMの詳細については、WAMDI(1988)や橋本ら(1999)などを参照されたい。

図-4.1に計算領域を、表-4.1に各計算領域および計算条件を示す。波浪の計算は、南西諸島を含むような広領域の計算から始め、中領域、小領域とネスティングによって、最終的には周防灘海域の計算を行っている。

4.2 検討結果

図-4.2は、台風9918号を例に、従来法と局地気象モデルによる風場推算と得られた風場を用いた波浪推算結果を荻田港における観測値と比較したものである。図から、これまでも述べたように、局地気象モデルによって精度の高い風場の推算が可能となり、その風場を入力値とした波浪の推算精度も向上していることが分かる。また、

表-4.2は、台風5事例について、従来法および局地気象モデルの風場を用いた波浪の推算結果(最大有義波高とその発生時刻)を観測値と比較したものである。表中には各ケースの時系列結果を基にした相関解析結果(1次

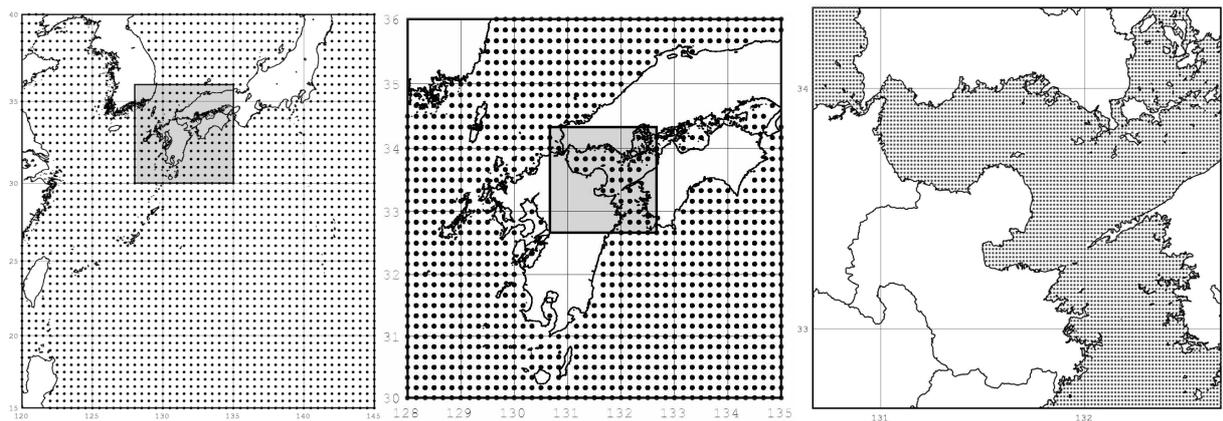


図-4.1 計算領域（左から広領域，中領域，狭領域）

表-4.1 計算条件

	広領域	中領域	狭領域
計算範囲	N 20°~40° E 120°~145°	N 30°~36° E 128°~135°	N 32°40'~34°20' E 130°40'~132°40'
格子数	61×41	43×37	121×101
格子間隔	30' (約 50km)	10' (約 17km)	1' (約 1.7km)
周波数分割数	35 成分 (0.04177248Hz~1.06718953Hz : $f(1) \times 1.10^{(i-1)}$)		
周期成分	35 成分 (約 24 秒~0.9 秒)		
方向分割数	16 成分		

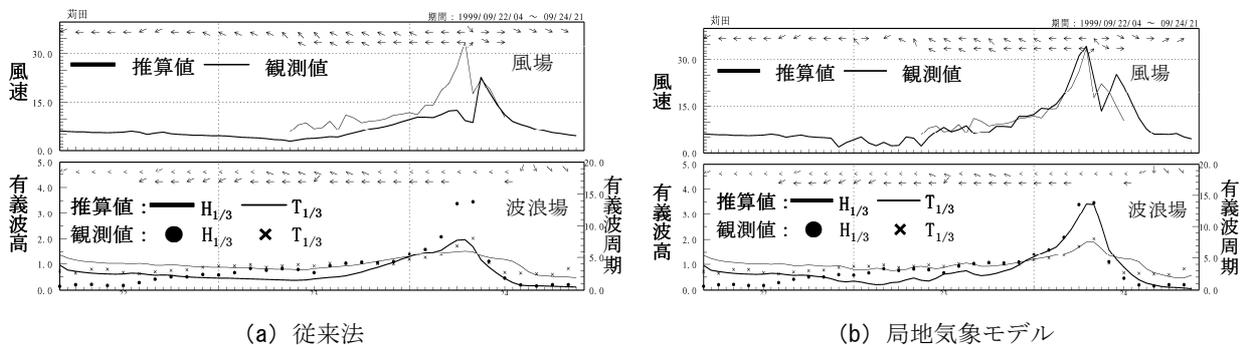


図-4.2 風場および波浪場の推算結果（台風 9918 号）

回帰式の傾き（回帰係数） a および相関係数 R も併せて表記している。なお，推算結果についても最大有義波高の値とその発生時刻を示しているが，その発生時刻が観測値における最大有義波高が観測された時刻から4時間以上離れていたものについては，括弧書きで観測におけるピーク時刻の推算値も明記している。表から分かるように，相関解析結果を見ると局地気象モデルによる結果の方が回帰係数・相関係数共に1に近く，従来法に比べて観測値との相関が高いことが分かる。一方，港湾構造物の設計波算定の際などに重要となる最大有義波高についてみると，従来法では観測値に対して過小評価の傾向があり，観測値の最大有義波高との差が1m程度以上ある

ことが分かる。一方，局地気象モデルでは台風0416号で1m程度と他の事例と比べてやや過大評価の傾向が強いが，これを除くと観測値との誤差は最大でも0.4m程度と従来法と比べて小さく，局地気象モデルによる風場を用いることで波浪の推算精度も改善されていることが分かる。しかし，最大有義波高の起時の差については局地気象モデルの方が大きいケースも見られる。これは，従来法の台風経路（中心位置）はベストトラックデータと完全に一致するが，局地気象モデルの場合はデータ同化を行うものの，基本的にはモデル自身による推算によって決定されるため，生じる台風経路誤差によって最大有義波高の起時時刻に影響が出たものと考えられる。

表-4.2 推算値と観測値の比較（荊田港）

(a) 従来法による推算結果

	最大有義波高(m)及び起時		a/R
	観測値	推算値	
台風 9905号	2.19 7/27 6h	0.73 7/27 4h	0.42 0.28
台風 9918号	3.46 9/24 8h	1.97 9/24 7h	0.66 0.84
台風 0215号	2.20 8/31 2h	1.25 8/30 6h (0.85 8/31 2h)	0.60 -0.29
台風 0416号	2.92 8/30 14h	1.67 8/30 13h	0.76 0.52
台風 0418号	3.36 9/7 12h	1.90 9/7 11h	0.73 0.74

(b) 局地気象モデルによる推算結果

	最大有義波高(m)及び起時		a/R
	観測値	推算値	
台風 9905号	2.19 7/27 6h	1.83 7/27 10h (1.67 7/27 6h)	1.01 0.65
台風 9918号	3.46 9/24 8h	3.41 09/24 7h	0.90 0.90
台風 0215号	2.20 8/31 2h	2.62 8/31 14h (1.94 8/31 2h)	1.25 0.83
台風 0416号	2.92 8/30 14h	3.98 8/30 12h	1.20 0.76
台風 0418号	3.36 9/7 12h	3.82 9/7 10h	1.16 0.80

5. 実務（設計波算定）を想定した検討

これまでは気象庁から提供されている気象GPVを入力気象場とし、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによって推算される風場を用いることで、従来法と比べて精度の高い風場および波浪場の推算が可能になることを示した。実務で波浪推算を実施する目的の1つは、設計波算定の際に必要な高波浪時の波浪情報を入手することである。このような場合、相当長期間（30年とか50年）の気象擾乱を対象とすることが望ましいが、これまでに使用した気象庁GPV（RANAL）は、前述の表-3.1に示したように、1996年以降～現在までの高々10年程度のデータしか提供されていないため、設計波算定業務を目的とする場合は不十分である。そのため本章では、設計波算定を想定した検討を行った。

表-5.1 広域気象 GPV の仕様

項目	内容
対象領域	全球
空間解像度	2.5度（約250km）×2.5度
時間解像度	6時間
提供期間	1948年～現在（約60年程度）

5.1 計算条件

前述したように気象庁GPVは、1996年以降～現在までの高々10年程度のデータしか提供されていないため、設計波算定業務を目的とする場合は不十分である。そのため、設計波算定を想定し、過去数十年という長期間に遡ってデータ提供が可能な広域気象GPVを入力気象場として、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルによる風場推算を行った。

ここで使用した広域気象GPVは、アメリカ大気気象局発行の全球客観再解析データであり、その仕様を表-5.1に示す。表から分かるように、データの提供期間は1948年以降～現在までの約60年程度であるため、設計波算定を想定した場合でも十分長期間のデータセットである。しかしながら、その空間解像度が2.5度（約250km）と、前述の気象庁GPV（RANAL）の20kmと比べて10倍以上も粗く、この空間解像度の粗さによって、台風の規模や位置が正しく表現できていない、陸地（地形）の再現性や気象場の及ぼす陸地の影響が十分でないなどの弊害があると考えられる。

5.2 検討結果

図-5.1は、広域気象GPVを入力気象場とした局地気象モデルによる台風9918号の台風経路を、前述の気象庁GPVを入力気象場とした結果および台風ベストトラックデータの台風経路と共に示したものである。図から分かるように、広域気象GPVを用いた局地気象モデルの結果は、沖縄西海上から奄美大島西海上にかけては、ベストトラックによる台風位置と比較的よく一致していたが、奄美大島西海上から北側においては次第に差がみられるようになり、台風経路としてはベストトラックデータよりも西側のコースを通る結果となった。

図-5.2は、前述の図-4.2と同様に台風9918号を例に、広域気象GPVを入力気象場とした荊田での風場と波浪場の推算結果を観測値とともに比較したものである。図から分かるように、最大風速は過小評価し、その発生時刻も観測値とずれていることが分かる。また、波浪についても、風場と対応して、最大有義波高を過小評価し、そ

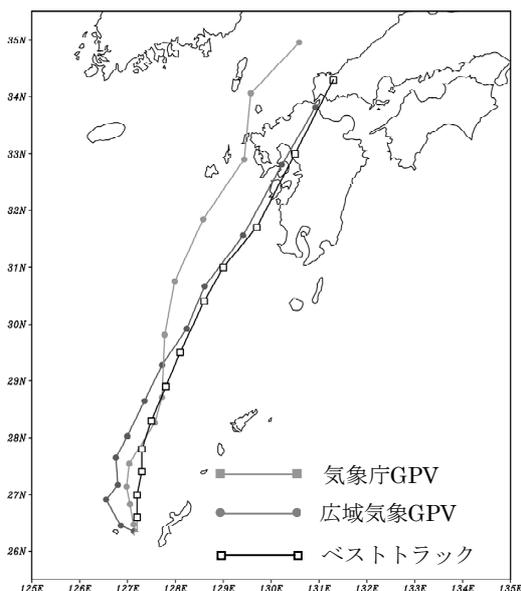


図-5.1 広域気象 GPV を用いた台風経路 (台風 9918 号)

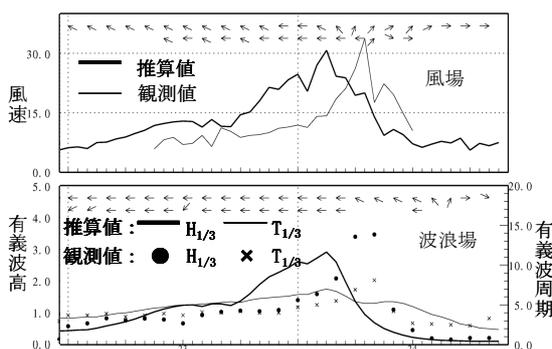


図-5.2 広域気象 GPV を用いた風場および波浪場の推算結果 (台風 9918 号)

の発生時刻もずれていることが分かる。しかし、図-4.2 (a) の従来法の風場を用いた結果と比較すれば、最大有義波高の発生時刻のずれは大きいものの観測値との対応が良い。しかしながら、図-4.2 (b) の気象庁GPVを用いた局地気象モデルの結果と比べると精度的には十分でない。そこで、以下の修正を行った。

①台風ボーガスおよびデータ同化の間隔の修正

これまでの検討では、ベストトラックデータの時間間隔にあわせて台風ボーガスおよびデータ同化の間隔も3時間としていた。ところが、一般的に数値モデルは積分期間が長くなるほど誤差が蓄積されて大きくなるため、台風ボーガスおよびデータ同化の間隔を3時間から1時間と短くした。そのため、前述の3.2のステップ1で作成する気象データも1時間間隔とした。そ

の際、台風ボーガス投入の際に必要なベストトラックデータについては、3時間毎の台風情報から内挿し、便宜的に1時間毎のベストトラックデータを作成し、その情報に基づいて台風ボーガスを投入した。

②ナッジング係数の修正

前述の3.4に記した通り、本研究では、ナッジングというデータ同化手法を用いて、局地気象モデルによる推算値と台風ボーガスを投入した気象データ（以下では“同化対象データ”と記す）の差が小さくするような計算を行っている。その際、どの程度、推算値を同化対象データに近づけるかを決定する指標がナッジング係数である。ここでは、その値を大きくすることでデータ同化の効果を強め、台風の進路誤差の軽減を図った。

③気象データの作成時の修正

本研究では、第一段階として空間解像度の粗いオリジナルの気象GPVを基に細かい空間解像度の気象データを作成しているが（前述3.2のステップ1）、特に広域気象GPVの場合、元々の気象データの空間解像度が相当粗いため、前述3.2のステップ1で作成される気象データに台風および台風を取り巻く気象場の特徴が十分に表現されていない場合がある。そのため、広域気象GPVを入力気象場とする場合に限り、前述3.2のステップ1の際にも台風ボーガスを投入した計算を行った。つまり、前述の3.2におけるステップ1および2の計2回、台風ボーガスを投入したということである。

図-5.3および5.4は、上記①～③の修正を行った後の台風経路と苜田における風場と波浪場の推算結果である。図から分かるように、台風経路については、図-5.1と比べて東に修正されベストトラックデータに近づいていることが分かる。さらに、苜田における風および波浪の時系列をみても、図-5.2と比較して観測値との対応が良く、改善されていることが分かる。

表-5.2は、台風5事例について、気象庁GPVおよび広域気象GPVを入力気象場とした局地気象モデルによる風場を用いた波浪推算結果を示したものである。ここでは、前者には上記修正①を、後者には上記修正①～③を施している。表から分かるように、台風0215号が他のケースと比べてやや過大評価の傾向があるものの、観測値の最大有義波高を良好に再現できている。さらに、気象庁GPVと広域気象GPVの両者を比べても同程度に推算できていることが分かる。さらに、気象庁GPVの場合についても、

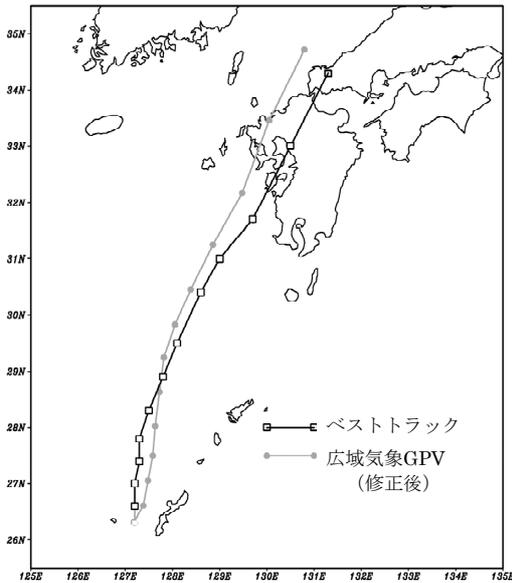


図-5.3 広域気象 GPV を用いた台風経路 (台風 9918 号; 修正後)

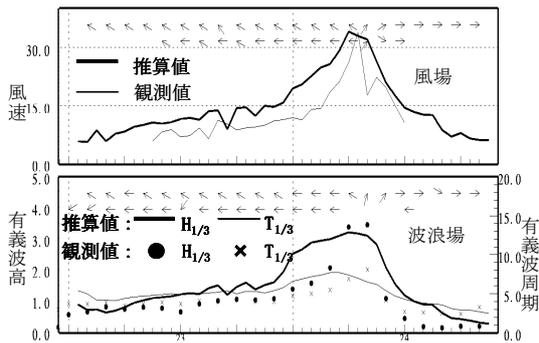


図-5.4 広域気象 GPV を用いた風場および波浪場の推算結果 (台風 9918 号; 修正後)

前述の表-4.2 (b) の結果と比較して分かるように、台風0416号のケースにおいて最大有義波高で1 m程度の過大評価であったものが、本章で検討した修正①の結果、その推算精度が向上していることが分かる。

以上から、広域気象GPVを入力気象場とした場合でも気象庁GPVと同程度の推算が可能であると考えられ、本手法は設計波算定など過去数十年に遡るような台風擾乱に対しても適用可能であると言える。

6. 結論

本研究では、九州北東部に位置する周防灘において高波を発生させた5つの台風を対象に、気象庁から提供されている気象GPVを入力気象場とした局地気象モデルによ

表-5.2 各風場による波浪推算結果 (台風 5 事例)
(a : 回帰係数, R : 相関係数)

(a) 気象庁 GPV

	最大有義波高 (m) / 起 時		最大有義波高との差 (m)	a/R
	観測値	推算値		
台風 9905 号	2.19 7/27 6h	2.43/7/27 12h (2.35/7/27 6h)	0.24 (0.16)	1.30 0.61
台風 9918 号	3.46 9/24 8h	3.23/9/24 8h	-0.23	1.01 0.88
台風 0215 号	2.20 8/31 2h	2.91/8/31 11h (2.42/8/31 2h)	0.71 (0.22)	1.42 0.84
台風 0416 号	2.92 8/30 14h	3.14/8/30 12h	0.22	1.27 0.82
台風 0418 号	3.36 9/7 12h	3.20/9/7 10h	-0.16	1.35 0.89

(b) 広域気象 GPV

	最大有義波高 (m) / 起 時		最大有義波高との差 (m)	a/R
	観測値	推算値		
台風 9905 号	2.19 7/27 6h	2.61/7/27 12h (2.35/7/27 6h)	0.42 (0.16)	1.32 0.59
台風 9918 号	3.46 9/24 8h	3.22/9/24 6h	-0.24	1.20 0.89
台風 0215 号	2.20 8/31 2h	2.63/8/30 16,22h (2.41/8/31 2h)	0.43 (0.21)	1.51 0.09
台風 0416 号	2.92 8/30 14h	3.03/8/30 12,13h	0.11	1.11 0.82
台風 0418 号	3.36 9/7 12h	3.20/9/7 11h	-0.16	1.40 0.86

る風場の推算を行った。ついで、得られた風場を用いて第三世代波浪推算モデルによる波浪の推算を実施し、同海域における波浪の推算精度を検討した。さらに、設計波算定などの実務を想定した場合についての検討も行った結果、以下のことが明らかとなった

①気象庁から提供されている気象GPV (気象庁GPV)

を入力気象場とし、台風ポーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルで得られる風場は、これまで広く実務で用いられてきた経験的台風モデルに基づく手法 (従来法) で推算される風場と比較して精度が高い。

②局地気象モデルで得られる風場を入力値とした波浪推算結果は従来法による風場を用いた場合よりも精度が高い。

③設計波算定業務などの実務を想定し、長期間のデータ提供が可能な広域気象GPVを用いて同様の検討を行った結果、従来法による風場の結果と比べて観測値の再現性は高く、また、気象庁GPVと同程度で推算できることから、広域気象GPVも十分活用できる。

以上の結果から、波浪推算に用いる台風時の風場の推算方法として、気象GPVを入力気象場とした局地気象モデルによる風場の推算が有用であることを示すことが出来た。また、実際の実務（設計波算定業務）を想定して、本手法を検討した結果、過去数十年前の台風擾乱に対しても、適用可能であることを示すことが出来た。

7. あとがき

本研究の結論でも述べたように、気象GPVを入力気象場とし、台風ボーガスおよびデータ同化を考慮した局地気象モデルを用いることで、台風時の風場および波浪の推算精度の向上が図れること、さらに第5章では、設計波算定という実務を想定した検討を行い、本研究における計算手法の有用性を示すことが出来た。しかしながら、局地気象モデルによる台風時の風場推算は台風域内の風場の再現性に加え、対象としている地点に対し台風がどのようなコースを通るかが風場および波浪場の推算結果に影響するため、台風経路に着目した更なる精度向上を行うことが重要である。さらに、今回は台風に限定した検討である。我が国の場合、設計波算定業務で対象となる主な気象擾乱は台風であるが、台風以外の気象擾乱（例えば、低気圧や冬型気圧配置など）の取扱いについても別途検討が必要である。一方、精度とは別に、本研究の手法が実務で広く普及するためには、計算時間・計算コストの問題がある。計算時間については今後の計算機の計算能力の向上に期待したいが、計算コストについては、必要な時に利用できるよう計算結果をデータベースとして保存しておくことで、有効的に活用出来るのではないかと考えている。

本研究では、タイトルにあるように局地気象モデルによる風場推算を中心に検討してきたため、これまで実務で広く用いてきた経験的台風モデルに基づく風場推算（従来法）については特に触れて来なかった。冒頭で述べたように、従来法による風場推算については、現時点

で精度的な制約があることが否めないが、局地気象モデルと比べて簡便な手法であるため、計算時間・計算コストの面において相当優位であることは間違いない。そのため、例えば、確率台風モデル（橋本ら、2005；河合ら、2006a, 2006b）に基づいて何百・何千ケースにも及ぶ仮想的な台風を対象に波浪や高潮の推算を行う際の風場、台風接近時における波浪予測に必要な予測の風場、被災直後に実施する波浪推算に必要な風場、想定された台風（例えば、伊勢湾台風など）を任意の台風経路で走らせた場合の風場などは、従来法による風場推算を用いることが現実的であると考えている。このように、実務における風場推算法としては、要求される精度、検討や計算に費やすことが出来る時間（期間）、対象とする台風のケース数などによって、従来法と局地気象モデルによる風場推算法を使い分けるのが現実的であると考えている。

(2007年8月13日受付)

謝辞

本研究は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所からの受託研究において実施したものである。九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所調査課の村永 努 課長をはじめ調査課の皆様には大変お世話になりました。また、本研究の実施にあたっては、財団法人日本気象協会支社の松浦邦明氏・中野俊夫氏にもご協力頂きました。さらに、大澤輝夫 准教授（神戸大学海事科学研究科）には台風ボーガスプログラムをご提供を頂きました。ここに心より謝意を表します。

参考文献

- 上野 充 (2000) : 数値モデルによる台風予報, 気象研究ノート (第3章), 第197号, pp.131-286.
- 大野木和敏 (1997) : 台風ボーガス, 数値予報課報告・別冊第34号, 気象庁予報部, pp.52-61.
- 大野木和敏・上野 充 (1992) : 台風ボーガスデータの改良, 研究時報, 第44巻, 気象庁, pp.247-269.
- 大澤輝夫 (2005) : MM5用台風ボーガスツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証, 月刊海洋, 号外42号, pp.178-185.
- 河合弘泰・川口浩二 (2007) : 内湾の高潮推算への台風ボーガスと局地気象モデルの適用性, 港湾空港技術研究所報告, Vol.48, No.3. 44p.
- 河合弘泰・橋本典明 (2006a) : 確率台風モデルの構築とそれを用いた高潮の出現確率分布の試算, 港湾空港技術研究所資料, No.1122, 27p.
- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明 (2006b) : 確率台風モデ

- ルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1271-1275.
- 気象庁 (2000) : 台風18号高潮災害調査報告, 気象庁技術報告, 第122号.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999) : 第三世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, Vol.38, No.4. 47p.
- 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明 (2005) : 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1221-1225.
- 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田孝志 (2006) : 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1276-1280.
- Bretschneider, C.L. (1952) : The generation and decay of wind waves in deep water, *Trans. AGU*, Vol.33, No.3, pp.381-389.
- Fujita, T. (1952) : Rep. Met. Lab., Kyushu Inst. Tech., Vol.2, No.1-2.
- Isozaki, I. and T. Uji (1973) : Numerical prediction of ocean waves., *Papers in Meteor. and Geophys.*, Vol.24, pp.207-231.
- Low-Nam, S. and Davis, C. (2001) : Development of Tropical Cyclone Bogussing Scheme for the MM5 system National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado.
- Myers, V. A. and Malkin, W. (1961) : Some properties of hurricane wind fields as deduced from trajectories, U. S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- Ohsawa, T., T. Nakano, K. Matsuura and K. Hayashi (2006) : Introduction of a JMA-type typhoon bogus scheme into MM5 to improve hindcasting of coastal sea surface winds, The Forth International Symposium on Computational Wind Engineering, *Journal of Wind Engineering*, Vol.31, No.3, pp.193-196.
- Sasaki, Y. (1958) : An objective analysis based on the variational method., *J. Meteor. Soc. Japan.*, 36, pp.77-88.
- Sasaki, Y. (1970a) : Some basic formalisms in numerical variational analysis., *Mon. Wea. Rev.*, 98, pp875-883.
- Sasaki, Y. (1970b) : Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by longwave equations and a low-pass filter., *Mon. Wea. Rev.*, 98, pp.884-899.
- Sherman, C.A. (1978) : A mass-consistent model for wind fields over complex terrain., *J. Appl. Meteor.*, 17, pp.312-319.
- The WAMDI Group (1988) : The WAM model - A third generation ocean wave prediction model., *J.Phys. Oceanogr.*, 18, pp.1775-1810.

港湾空港技術研究所資料 No.1169

2007. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 ポートサイド印刷

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。