

台風気象場初期値化アプリケーションによる可能最大高潮評価手法の検討

An Estimation Method for Potential Storm Surge Heights Using a New Typhoon Initialization Technique

吉野 純¹・村上智一²・小林孝輔³・安田孝志⁴

Jun YOSHINO, Tomokazu MURAKAMI, Kosuke KOBAYASHI and Takashi YASUDA

A new application of modifying initial three-dimensional typhoon meteorological fields for a mesoscale atmospheric model is developed in this study to evaluate potential storm surge heights that are likely to occur under expected global warming. The initialization technique based on the potential vorticity invertibility principal can arbitrarily control the position and intensity of typhoon in the initial atmospheric conditions, consistent with the balance wind and hydrostatic equilibrium. Preliminary numerical experiments of storm surge scenarios in Ise Bay, using a coupled atmosphere-ocean-wave model, show that the subtle difference of typhoon track causes a large impact on the spatial distribution of storm surge level.

1. はじめに

2001年のIPCC第3次報告書は、地球温暖化に伴って「熱帯低気圧の最大風速が増大する可能性が高い」と警鐘を鳴らしている。強化化する台風に伴って将来起こり得る最大の高潮、いわゆる「可能最大高潮」を評価することは、避難対策や万一破堤した場合の減災対策のためだけでなく、今後の日本各地の長期的沿岸防災対策を講ずる上で不可欠となってくる。

今日まで、高潮推算の際の台風気象場（気圧場、風速場）の推定の際には、パラメトリックな2次元台風モデル（光田ら、1997）が広く使用されてきた。気象庁ベストトラックの情報のみから、低い計算コストで実用に耐えうる精度で台風気象場を推算できるため、長らく標準的な手法として内外で用いられてきた。

また、最近では、メソ気象モデルと台風ボーガスの組み合わせにより、更に高い精度で台風気象場を推算できることが報告されている（大澤、2005）。この手法によって、台風中心から縁辺部に至るまでの広域スケールの台風気象場を高精度に推定できるようになり、高潮推算にも正の相乗効果がもたらされることも報告されている（吉野ら、2006）。

しかしながら、従来的に用いられてきた2次元台風モデルや台風ボーガスといった手法は、台風の内部構造を表現するための経験的パラメータを多く有するため、地球温暖化によって将来起こり得る台風を適切に表現できるとは限らない。これらの手法は、単に現在気候で発生

する台風を表現しているに過ぎず、必ずしも地球温暖化の下で同じ定式化で構造を表現できるものとは限らない。また、これらの手法には、台風強度（中心気圧や最大風速）を陽に入力する必要があるため、将来日本に接近・上陸する台風の最大強度を如何にして決定するのかといった任意性が残されている。これらの問題を解決し、可能最大高潮の評価をするためには、より主観的要素の少ない気象力学に基づいた台風気象場の推定手法が必要であると言えるだろう。

そこで本研究では、より現実的かつ合理的に可能最大高潮を推定することを目的として、渦位逆変換法（Davisら、1991）に基づく台風気象場初期値化アプリケーションを開発した。本研究で開発されたアプリケーションとメソ気象モデルとの併用により、地球温暖化を想定した環境場の設定の下で、将来起こりうる台風気象場の推算が可能になると期待できる。本研究では、この手法に基づき大気-海洋-波浪結合モデル（村上ら、2004）による予備的な高潮推算を行い、可能最大高潮の評価手法としての有効性について検討を行った。

2. 台風気象場初期値化アプリケーションについて

本研究では、Davisら（1991）による渦位逆変換法（potential vorticity inversion）に基づき、3次元気象場中の台風渦の中心位置や強度を任意に変更できる新しい初期値化アプリケーションを構築した。ここでは、その理論的背景について解説し、従来手法との主な相違点について議論する。

渦位逆変換法の基礎方程式系は、渦位方程式とバランス風方程式の2つから構成され、渦位の可逆性原理を利用して解が得られる。入力値となる渦位 q は、

$$q = -g(\zeta + f)(\partial\theta/\partial p) \dots\dots\dots (1)$$

で定義され、鉛直渦度と大気安定度の積で評価される地球流体の保存量の1つである（ここで、 g は重力加速度、

1 正会員 博(理) 岐阜大学助教大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
2 正会員 博(工) 豊橋技術科学大学産学官連携研究員工学部建設工学系
3 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
4 フェロー 工博 岐阜大学教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

ζ は温位面上での鉛直渦度成分, f はコリオリパラメータ, θ は温位, p は気圧である). 紙面の制約上, 以下では, 定式化の概念のみを示す. 詳細については, Davis ら (1991), または吉野ら (2003) を参照して頂きたい.

まず, 渦位方程式は, 式 (1) をジオポテンシャル Φ (静力学平衡近似) と流線関数 Ψ (風の発散成分・鉛直成分を無視) で書き直すことで,

$$q = N(\Phi, \Psi) \dots \dots \dots (2)$$

と表される (N は非線形微分演算子). この渦位方程式は, 次の非線形バランス風方程式,

$$\nabla^2 \Phi = M(\Psi) \dots \dots \dots (3)$$

と連立して解くことによって, ジオポテンシャル Φ と流線関数 Ψ の3次元分布を得ることができる (ここで M は非線形微分演算子, ∇^2 は2次元ラプラシアン演算子である). バランス風方程式は, 現象の空間スケール (ロスビー数) に依存せず, 現実大気において高い近似精度が得られることが知られている. これら式 (2) と (3) の連立偏微分方程式は楕円型方程式となるため, 側面境界条件と上部・下部境界条件を設定することで境界値問題として反復解法 (例えば, SOR 法) により解くことができる. 本研究では, 側面境界条件にはディリクレ境界を与え, また, 上部・下部境界条件には,

$$\theta = -\frac{\partial \Phi}{\partial \pi} = -f \frac{\partial \Psi}{\partial \pi} \dots \dots \dots (4)$$

で表されるノイマン境界を与えた (ここで, π はエクスター関数である). これらは静力学平衡・温度風平衡そのものである. 得られたジオポテンシャル Φ の3次元分布から, 式 (4) の静力学平衡近似により即座に温位 θ の3次元分布も得ることができる.

つまり, 気象モデルの出力値や客観解析値から計算された「渦位 q 」というただ1つの物理量 (入力値) から, この方程式系を満足する風速 (u, v), 気温 T , 温位 θ , ジオポテンシャル高度 H といった複数の物理量 (出力

値) を同時に得ることができる点がこの手法の大きな特徴である. この特性を利用することで, 渦位 q のみの改変により, その他の物理量も上記の方程式系を満たすように改変することが可能となる. 例えば, 本研究の目的である台風の中心位置や強度の改変を行う場合には, 台風近辺の正渦位の操作のみ (渦位ピークの位置や値を変える) で実現する.

上記の方程式系は, 風の発散成分・鉛直成分が非常に小さい (速度ポテンシャル $\chi \sim 0$, 鉛直 p 速度 $\omega \sim 0$) という仮定の下で成り立つが, 次の非線形バランスオメガ方程式 (5) と質量保存則 (6),

$$L(\omega) = H(\Phi, \Psi, \chi, \frac{\partial \Psi}{\partial t}) \dots \dots \dots (5)$$

$$\nabla^2 \chi = -\pi^{1-1/\kappa} \frac{\partial}{\partial \pi} (\pi^{1/\kappa-1} \omega) \dots \dots \dots (6)$$

及び, 式 (2) と (3) に対する時間微分方程式を連立して同じく境界値問題として解くことで, 風の発散成分 χ と鉛直成分 ω の3次元分布も得ることができる (ここで, L と H はともに非線形微分演算子, κ は比熱比である). ここでは, 側面境界条件は開境界とし, 上部・下部境界条件はゼロ境界とした. より精度の高い初期気象場を作成するためには, これらの方程式も一緒に解くことが望ましい. 以上の式 (2) から (6) までの閉じた方程式系により, ただ1つの物理量「渦位 q 」から, 複数の3次元気象場 (風速 (u, v, w), 気温 T , 温位 θ , ジオポテンシャル高度 H) を評価できる.

この原理を利用することで, 台風の中心位置や強度を任意に変更でき, 独自の初期気象場を作成できるように

表-1 大気-海洋-波浪結合モデルの計算設定

気象モデル	計算期間	1959年9月25日12時～9月27日00時
	初期値・境界値	ECMWF 全球再解析データ (ERA40)
	鉛直格子	23層 (地表～70hPa)
	水平格子	領域Ⅰ: 151×181(9km 格子) 領域Ⅱ: 52×52(3km 格子)
	雲物理過程	Reisner graupel scheme
	放射過程	Cloud radiation scheme
	大気境界経過程	Eta Mellor-Yamada scheme
	地表面過程	5-layer soil scheme
	標高・土地利用	USGS 5min
	4次元データ同化	なし
波浪モデル	計算期間	1959年9月25日12時～9月27日00時
	計算領域数	1領域
	水平解像度	30秒
	水平格子数	99×97 (横×縦)
海洋モデル	計算期間	1959年9月25日12時～9月27日00時
	タイムステップ	10秒
	水平解像度	30秒
	σ 座標の適用領域数	5
	各流域の層数	領域Ⅰ: 8 領域Ⅱ: 6 領域Ⅲ: 6 領域Ⅳ: 5 領域Ⅴ: 5
	境界面水深 $S(m)$	SⅠ=5, SⅡ=14, SⅢ=26, SⅣ=69
	初期値・境界値	・気候値 (関根, 1996) ・中部国際空港株式会社・愛知県企業庁による観測データ
結合モデル	交換時間間隔	10分

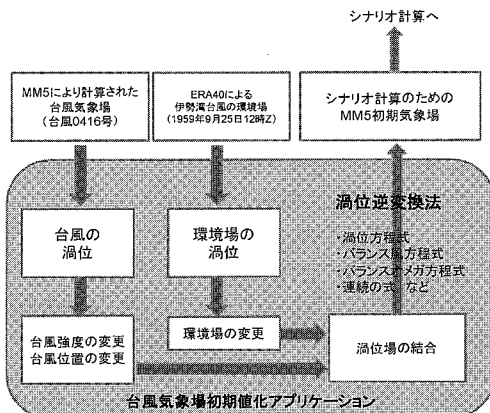


図-1 台風気象場初期値化アプリケーションの計算フロー

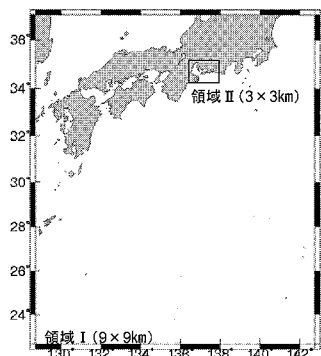


図-2 大気-海岸-波浪結合モデルの計算領域

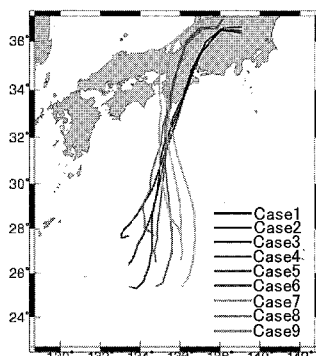


図-3 各ケース (Case1~Case9) の台風進路

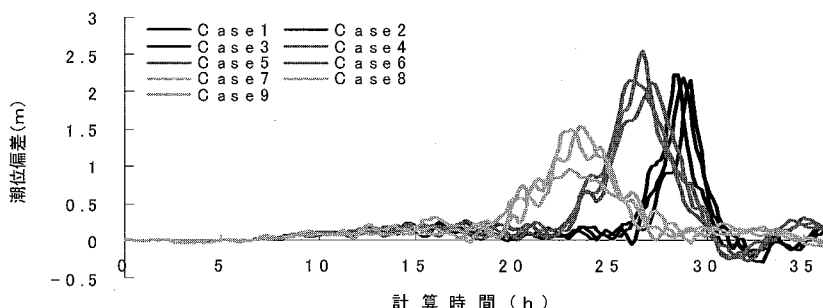


図-4 名古屋港における各ケース (Case1 ~ Case9) の潮位偏差 [m] の時系列 (36時間)

なった。従来用いられてきた台風ボーガス手法と比較すると、本手法の利点は、1) 気温、ジオポテンシャル高度、風向・風速といった複数の物理量を「渦位」という1つのスカラー量へと帰着させ、その渦位に対して改変を加えた後に逆変換を施すので、容易に初期気象場を制御できる、2) 渦位場に人工的な改変を加えても物理的整合性 (バランス風平衡・静力学平衡) を維持した不連続のない気象場を作成できる、3) 台風内の気圧分布形 (例えば、Myers の式等) を仮定する必要がなく、台風周辺的环境場の状態を加味したより現実的な台風気象場を作成できる、4) 偏西風の影響を受けやすい本州付近の台風でも非軸対称的な台風気象場を表現できる (非軸対称ボーガスを埋め込む必要がない)、5) 地球温暖化の下での台風環境場の変化を反映させることができる、等が挙げられる。従来手法と比較して、極めて近似や不整合の少ない現実的かつ合理的な手法であると言える。

本研究で開発された初期値化アプリケーションは、メソ気象モデル PSU/NCAR MM5 (Dudhia, 1993) での使用を想定しており、作成された初期気象場データはそのままの形で入力できるようデータフォーマットの統一がなされている。

3. 数値計算の概要

本研究では、前述の新しく開発した台風気象場初期値

化アプリケーションにより、予備の実験として、中心位置を複数変えた台風気象場を作成し、それらを初期値条件として伊勢湾を対象とした想定高潮実験を行った。

ここでは、台風気象場初期値化アプリケーションを図-1の流れて実行した。まず、ECMWF 全球再解析データ (ERA40) の伊勢湾台風時のデータ (1959 年 9 月 25 日 12 時) により計算された渦位場 (以降、環境場渦位) に、予めメソ気象モデル PSU/NCAR MM5 を用いて計算された台風 0416 号近傍の渦位 (以降、台風渦位) を埋め込むことで、渦位逆変換法により 3 次元台風気象場の解析を行った。台風渦位は、中心から 600 km 四方のみが抽出され、そのまま環境場渦位の中に組み込まれた。このような処理は、ERA40 の空間解像度が 2.5 度メッシュと非常に粗く、台風の中心付近のシャープな構造を解像できていないことを補うためのものであり、本手法ならではのユニークな処理である。本論文では、台風の進路の違いに着目した想定実験を行うため、ここでは特に台風渦位の大きさ (台風強度) は変更せず、伊勢湾台風の強度と台風 0416 号の強度がほぼ同じ (中心気圧 930 hPa) となる時刻 (2004 年 8 月 27 日 12 時) の台風渦位を環境場渦位にそのまま埋め込み、初期気象場の解析を行った。台風渦位の位置は、東経 134.8 度、北緯 26.5 度に中心を置き、更に、そこを中心として 300 km 四方の正方領域内の異なる 8 地点に台風中心を基盤目状に設定して、計 9

ケースの台風進路の違いによる想定高潮実験を行った。

高潮計算のために使用した数値モデルは、村上ら(2004)により開発された大気-海洋-波浪結合モデルであり、現実の高潮事例を高精度に再現できる実績のある数値モデルである(吉野ら, 2006)。このモデルの詳細については、村上ら(2004)や吉野ら(2006)を参照されたい。個々のモデル設定については、表-1に整理して示した。また、計算領域については図-2に示した。大気モデルでは領域I(9 km メッシュ)と領域II(3 km メッシュ)の双方向ネスティング計算が行われ、海洋モデル・波浪モデルは領域IIのみで計算が行われた。

4. 計算結果

台風気象場初期値化アプリケーションにより紀伊半島南方に異なる計9つの台風中心位置を設定し、それぞれ36時間の想定高潮計算を行った(Case1 ~ Case9)。これによって、設定した環境場(伊勢湾台風時の環境場)で起こりうる最悪の高潮シナリオを計り知ることができる。

図-3は、計算された全ケースの36時間台風進路を示している。これらから、おおよそ3種類の上陸パターンに分類することが出来る。9つのうち初期に中心付近に配置されたケース(Case4, Case5, Case6; 濃灰色)は、潮岬付近で上陸し紀伊半島の中心付近を通過するコースとなった(以降、紀伊半島上陸ケースとよぶ)。初期に西側より配置されたケース(Case1, Case2, Case3; 黒色)は、紀伊半島東岸をかすめ伊勢湾を直撃するコースとなった(以降、伊勢湾直撃ケースとよぶ)。また、初期に東側より配置されたケース(Case7, Case8, Case9; 薄灰色)は、紀伊半島西岸をかすめ大阪湾を直撃するコースとなった(以降、大阪湾直撃ケースとよぶ)。

これらの進路パターン毎に計算結果を比較すると、潮位偏差や地上気象要素の時間変化の傾向は大きく異なっていることが明らかとなった。まず、名古屋港における潮位偏差の時系列(図-4)を比較すると、紀伊半島上陸ケース(Case5が極大を示した)で最も大きな潮位偏差のピークとなることが見て取れる。伊勢湾直撃ケースで

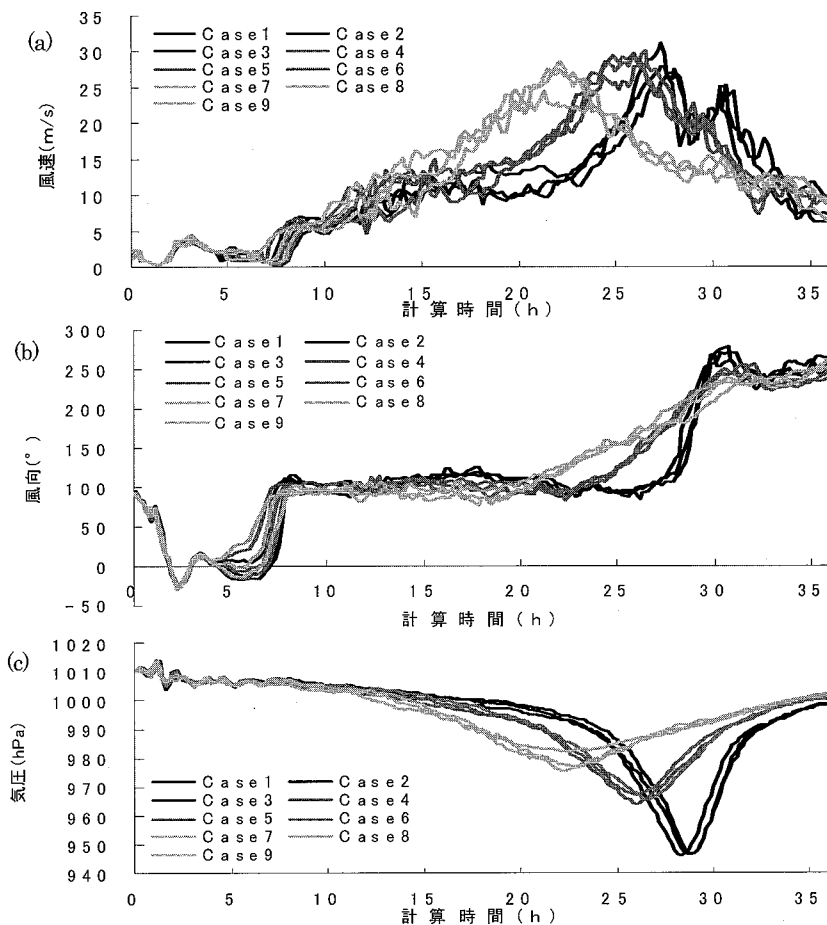


図-5 名古屋港における各ケース (Case1 ~ Case9) の地上気象要素の時系列 (36時間)
(a) 風速 [m/s], (b) 風向 [°], (c) 海面更正気圧 [hPa]

も比較的大きなピークとなり、紀伊半島上陸ケースに比べ急激な変化を示している。また、このケースでは台風通過直後に負の潮位偏差となっている。大阪湾直撃ケースでは、それほど大きなピークを示さなかったが、長時間にわたって高潮位偏差を持続していた。

次に、名古屋港における地上気象要素（風速、風向、気圧）の時系列（図-5）を進路パターン毎に比較すると、上記の微妙な進路の違いによって地上気象要素の変化に大きな違いが生じることが分かる。高潮の駆動力である地上気象場に相違が生じたために、潮位偏差（図-4）にも差が生じたと考えられる。

まず、風速の時系列（図-5(a)）を見ると、進路が伊勢湾により近いケースほどより大きな風速のピークを示している。しかし、伊勢湾直撃ケースでは、潮位偏差のピーク時には逆に風速は極小となっており、台風の眼の中に入っているものと推測できる。一方で、紀伊半島上陸ケースでは、潮位偏差のピークと風速のピークが一致しており、強風が長く卓越しやすい状況にあった。大阪湾直撃ケースでは、より長く強風が卓越しているが、風速のピークはそれほど大きくない。

次に、風向の時系列（図-5(b)）を見ると、進路が伊勢湾により近いケースほど急激に風向が変化していることが見て取れる。大阪湾直撃ケースや紀伊半島上陸ケースでは、南よりの強風が長く卓越することで、伊勢湾内に大量の海水が流入していると考えられる。一方、伊勢湾直撃ケースでは、南より強風の卓越時間は短く、台風通過と共に瞬時に西よりの風へと変化し、海水は湾外へと流出するものと推測される。

最後に、気圧の時系列（図-5(c)）を見ると、台風中心との距離に応じた変化を示している。つまり、伊勢湾直撃ケースは、他のケースと比べて気圧低下量が極めて大きく、気圧による吸い上げ効果が発達しやすい環境にあったと考えられる。

以上の結果より、伊勢湾直撃ケースでは、気圧による吸い上げの効果がより卓越し、紀伊半島直撃ケースでは、風による吹き寄せ効果がより卓越することで、潮位偏差がピークとなったと結論づけられた。つまり、台風が直撃すれば必ず潮位偏差が高くなるとは限らず、最悪の高潮シナリオとは、台風の進路・強度や周辺の海岸地形等の状況に応じて大きく異なってくる可能性があると言える。今後、地球温暖化により台風強度が増大することで、想定される可能最大高潮は、現在気候のそれとは大きく異なってくる可能性がある。今後、本研究で構築された台風初期値化アプリケーションにより地球温暖化を想定した高潮計算を多数実施することで、日本各地の可能最大高潮を早急に見積もる必要がある。

5. 結 語

本研究では、地球温暖化を想定し、日本各地で将来起こりうる可能最大高潮を評価することを目的として、メソ気象モデルの初期気象場を任意に改変できる新しい初期値化アプリケーションを開発した。また、予備的なシナリオ想定実験を伊勢湾を対象として行うことで、本評価手法の有用性について検討を行った。

構築された台風気象場初期値化アプリケーションは、Davisら(1991)による渦位逆変換法に基づいており、3次元気象場中の台風渦の位置や強度を任意に変更できる。地球温暖化を想定した環境場を設定し、多数の進路で高潮計算のための気象場を作成することができるため、今後、これを活用することで日本各地の沿岸部における可能最大高潮を精度よく評価できるようになるものと期待される。

この台風気象場初期値化アプリケーションにより作成された台風気象場を初期場として、大気-海洋-波浪結合モデル(村上ら, 2004)による予備的な想定高潮計算を行い、計算結果の比較・考察を行った。台風の微妙な進路の相違が、湾内における潮位偏差や地上気象要素の時空間変動に大きな影響を与えることが示された。今後、この初期値化アプリケーションと大気-海洋-波浪結合モデルを併用し、地球温暖化を想定した台風環境場や海面温度を設定することで、これまでになく現実的で合理的な可能最大高潮の評価に繋がるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)17740306、及び、基盤研究(B)(2)18360236による成果であることをここに付記する。

参 考 文 献

- 大澤輝夫(2005): MM5用台風ボーガス導入ツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証, 月刊海洋, 第42巻, pp. 178-185.
- 光田 寧・藤井 健(1997): 台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係, 京都大学防災研究所年報, 第40号, pp. 165-172.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004): 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 366-370.
- 吉野 純・石川裕彦・植田洋臣(2003): Piecewise Potential Vorticity Inversionを用いた中緯度帯における台風9918号の衰弱・再発達過程に関する診断的解析, 京都大学防災研究所年報, 46B, pp. 423-442.
- 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.
- Davis, C. A. and K. A. Emanuel (1991): Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis, Mon. Wea. Rev., 119, pp. 1929-1953.
- Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon. Wea. Rev., 121, pp. 1493-1513.