

# 伊勢湾地域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証

大澤 輝夫\*・深尾 一仁\*\*・安田 孝志\*\*\*

本研究では、伊勢湾地域を対象として地上気象要素に関するメソ気象モデルの計算精度検証を行なった。メソ気象モデルには MM 5(米国大気研究センター・ペンシルバニア州立大学)を用い、2001 年 3 月の 1 ヶ月間の気象場を、1 時間間隔、1 km 格子で再現し、名古屋、津、伊良湖の各気象官署と中部国際空港観測局(海洋タワー)での観測値と比較した。その結果、風速、風向、気圧、気温、水蒸気混合比の 1 時間値は実用レベルの精度を有し、また日射量は日積算値としてであれば実用に耐えうる精度を持つことが明らかになった。しかし、降水量については精度が悪く、改善の余地があることが示された。

## 1. はじめに

近年、海水流動モデルが内湾や沿岸域スケールの数々の計算例においてある程度の成功を収めている(例えば、EEWG, 2000)一方で、その海面の境界条件となる気象場は、一点観測による代用や理想的な場の想定、陸上観測値の空間内挿などの手法によって、比較的大雑把に与えている場合が多い。時間的にも空間的にも変動する気象場の面的な情報がこれまでほとんど存在しなかったことが、その一番の理由となっている。そんな中で、近年少しずつではあるが、メソ気象モデルを用いて海洋上の気象場を算出しようという試みがなされ始めている(灘岡ほか, 1999; 森ほか, 2000; 小林ほか, 2001; 大澤ほか, 2001)。現段階ではまだ海上風のための推算が主であるが、沿岸域における様々な現象の解明や環境の監視には、単に海上風などの力学的過程のみならず、海面における日射や長波放射、潜熱・顕熱輸送、降水・蒸発などの熱力学過程も考慮に入れる必要がある。こうした要請に答え得るのは数値計算以外に考えられず、沿岸域における気象場の算出にメソ気象モデルを用いることは必然的な方向であると考えられる。

しかしその一方で、沿岸域で必要とされる 1 km 程度の高い解像度において、メソ気象モデルがどの程度の計算精度を有するかについては、これまでまとまった報告例がなく、その将来性・発展性についてはまだ未知数な部分が多い。本研究の目的は、沿岸域や内湾での気象・海象場を精度良く再現・予測できるメソスケール大気海洋結合モデルの構築に向けて、地上気象要素に関するメソ気象モデルの計算精度を検証することにある。その第一歩として、伊勢湾周辺地域において一ヶ月間という長期にわたる高解像度気象場の再現計算を行い、周辺の観測値を用いてその計算精度についての検討を行った。

表-1 計算条件と入力データ

|              |                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------|
| 計算期間         | 2001 年 3 月 1 日~2001 年 3 月 31 日                               |
| 客観解析値        | 気象庁メソ客観解析値(6 時間間隔, 10 km 格子, 20 層)                           |
| 海面温度         | NOAA-AVHRR 海面温度データ(1 日間隔, 約 1.3 km 格子)                       |
| 鉛直格子         | 20 層(地表~100 hPa 面)                                           |
| 水平格子         | 2 領域(3 km 格子領域, 103×91 格子; 1 km 格子領域, 91×88 格子)              |
| 雲物理過程        | Reisner's mixed phase scheme (Reisner et al., 1993)          |
| 放射過程         | Dudhia's long-and short-wave radiation scheme (Dudhia, 1989) |
| 境界層過程        | MRF PBL scheme (Hong and Pan, 1996)                          |
| 地表面過程        | 5-layer soil scheme (Dudhia, 1996)                           |
| 積雲パラメタリゼーション | なし                                                           |

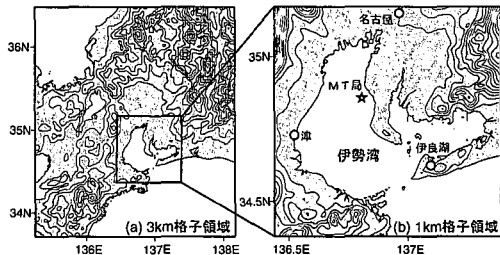


図-1 MM5 の計算領域と観測点

## 2. 計算手法

メソ気象モデルにはペンシルバニア州立大学と米国大気研究センターで開発された MM5 (Dudhia, 1993; Grell ほか, 1994) を用いた。MM5 は非静力学・圧縮性のメソスケールモデルであり、雲微物理過程や放射過程、大気境界層過程などに関する複数の物理オプションを有している。またこのモデルでは計算領域のネスティングと 4 次元データ同化を行うことができ、広域の客観解析値を一定時間間隔毎に取り込むことによって、過去の気象場の現実的な再現計算が可能となっている。

本研究で用いた計算条件と入力データを表-1 に示す。入力データには、気象庁メソ客観解析値(10 km 格子)及び NOAA-AVHRR 海面温度データ(約 1.3 km 格子)を用い、6 時間毎に 4 次元データ同化を行った。メソ客

\* 正会員 博(理) 岐阜大学助手 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻  
\*\* 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  
\*\*\* 正会員 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

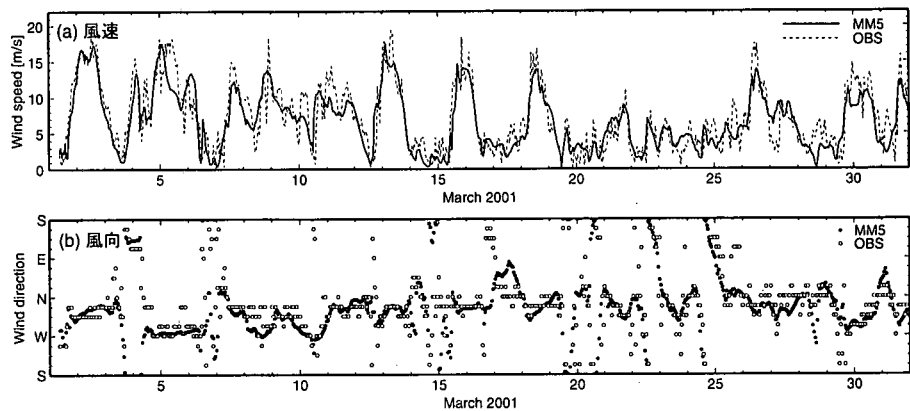


図-2 MT局での計算風と観測風の時系列

表-2 風速, 風向の計算精度

| 風速 (m/s) |          |             |            |      |
|----------|----------|-------------|------------|------|
| 観測点      | 月平均      | バイアス        | RMS 誤差     | 相関係数 |
| 名古屋      | 3.39     | 0.27 (8%)   | 1.58 (47%) | 0.75 |
| 津        | 4.69     | 0.76 (17%)  | 2.29 (49%) | 0.76 |
| 伊良湖      | 4.44     | 1.09 (25%)  | 2.22 (50%) | 0.79 |
| MT局      | 7.18     | -0.50 (-7%) | 2.39 (33%) | 0.86 |
| 風向 (deg) |          |             |            |      |
| 観測点      | 月平均      | バイアス        | RMS 誤差     | 相関係数 |
| 名古屋      | 318 (NW) | 5.43        | 54.7       | 0.93 |
| 津        | 307 (NW) | 5.17        | 58.2       | 0.85 |
| 伊良湖      | 318 (NW) | 3.39        | 54.8       | 0.92 |
| MT局      | 320 (NW) | -6.17       | 51.8       | 0.94 |

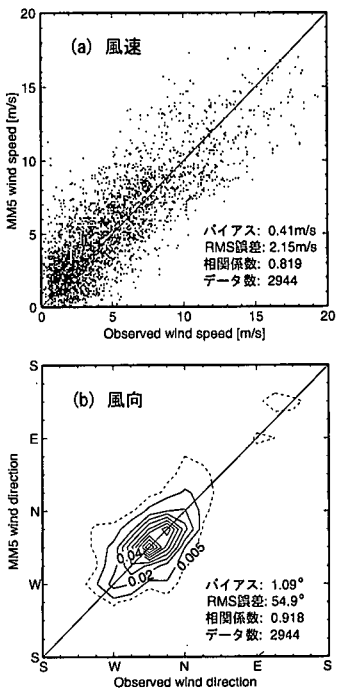


図-3 観測値と計算値の比較: (a) 風速, (b) 風向. 図 (b) 中のコンターは 16 方位毎の風向の出現確率を表す.

3. 計算結果

1 km 格子領域で得られた 1 時間毎の計算値を, 名古屋, 津, 伊良湖の気象官署の観測値及び, 中部国際空港海洋タワー観測局 (以後, MT 局と略記) での観測値と比較した. 各観測点の位置は図-1(b) に示されている. 検証した地上気象要素は, 風速, 風向, 気圧, 気温, 水蒸気混合比, 日射量, 降水量の 7 要素である. 以下に各要素の計算結果について述べる.

(1) 風速, 風向

風速, 風向の計算値は, モデル最下層 (高度約 6 m) と第 2 層 (同約 30 m) の値を用いて, 各観測点の風速計設置高度での値に補正した. 図-2 に海上観測点である

MT 局での風速・風向の時系列を示す. 計算された風速は観測値に比べて滑らかに変動する傾向があるが, 全体としては良く一致している. それに対して風向は, 北西季節風時の風向の再現性は比較的良いものの, 時々見られる北西風系以外の風向時には再現性は悪い. 風の計算精度をさらに詳しく見るために, 各観測点での計算風のバイアス, RMS (Root mean square) 誤差, 相関係数を表-2 に示す. この表中の月平均値は観測によるものであり, その月平均値に対するバイアス及び RMS 誤差のパーセンテージを括弧内に示している. これは後に示す

表-3 気圧、気温、水蒸気混合比の計算精度

| 気圧 (hPa)      |        |                |              |       |
|---------------|--------|----------------|--------------|-------|
| 観測点           | 月平均    | バイアス           | RMS 誤差       | 相関係数  |
| 名古屋           | 1012.5 | -0.62 (-0.06%) | 0.86 (0.08%) | 0.995 |
| 津             | 1012.7 | -0.68 (-0.07%) | 0.90 (0.10%) | 0.995 |
| 伊良湖           | 1012.3 | -0.64 (-0.06%) | 0.86 (0.09%) | 0.996 |
| 気温 (°C)       |        |                |              |       |
| 観測点           | 月平均    | バイアス           | RMS 誤差       | 相関係数  |
| 名古屋           | 8.48   | -0.43 (-5.04%) | 1.66 (20%)   | 0.94  |
| 津             | 8.52   | 0.03 (0.35%)   | 2.17 (26%)   | 0.91  |
| 伊良湖           | 8.88   | -0.02 (-0.27%) | 1.51 (17%)   | 0.93  |
| 水蒸気混合比 (g/kg) |        |                |              |       |
| 観測点           | 月平均    | バイアス           | RMS 誤差       | 相関係数  |
| 名古屋           | 4.11   | 0.52 (13%)     | 0.96 (23%)   | 0.86  |
| 津             | 4.38   | 0.44 (10%)     | 0.88 (20%)   | 0.89  |
| 伊良湖           | 4.39   | 0.83 (19%)     | 1.17 (27%)   | 0.88  |

他の気象要素に対する同様な表についてもすべて同じである。MT局における風速のバイアス、RMS誤差はそれぞれ $-0.50\text{ m/s}$  ( $-7\%$ )、 $2.39\text{ m/s}$  (33%)であり、風向についてはそれぞれ $-6.17^\circ$ 、 $51.8^\circ$ であった。陸上観測点での精度は、海上のMT局には及ばないものの、風速についてはバイアス25%以下、RMS誤差50%以下、相関係数0.75以上、風向については $6^\circ$ 以下、相関係数0.85以上に収まっている。4地点全体での風速・風向の計算精度は図-3のようになる。

4地点全体での風向のRMS誤差が $54.9^\circ$ と比較的大きな値を示しているが、この原因としては、モデル自体の要因の他に別の2つのことが考えられる。一つは、微風時の風向の不確定性である。図-2において明らかに、弱風時には、観測風向が大きく変動する傾向がある。そこで、風向が比較的安定する風速 $5\text{ m/s}$ 以上の風だけに限定してみると、風向のRMS誤差は $29.3^\circ$ 以下にまで減少することがわかった。もう一つは、観測風向がすべて16方位で記録されており、そもそも観測値自体が最大 $22.5^\circ$ の誤差を内在しているという点である。東西、南北の2成分で記録された観測値を比較対象とすれば、さらに誤差は減少するものと考えられる。

## (2) 気圧、気温、水蒸気混合比

ここで用いた気圧は海面補正気圧であり、また気温と水蒸気混合比(以下、混合比と略記)に関しては高度 $2\text{ m}$ の値を用いている。表-3に各観測点での計算精度を示す。名古屋での気温のバイアスがやや大きい、それを除けば、各観測点の計算精度に大きな違いは見られない。月平均値に対するRMS誤差の割合は、気圧で0.1%程度、気温で20%程度、水蒸気混合比で25%程度であり、相関係数はいずれも0.8から0.9台の値となっている。

次に、図-4に各要素毎の観測値との比較を示す。3地点全体でのRMS誤差は、気圧が $0.88\text{ hPa}$ 、気温が $1.68^\circ$ 、混合比が $1.61\text{ g/kg}$ となり、気圧、気温、混合比の順で計算精度が高い。先に示した風速、風向と比べて

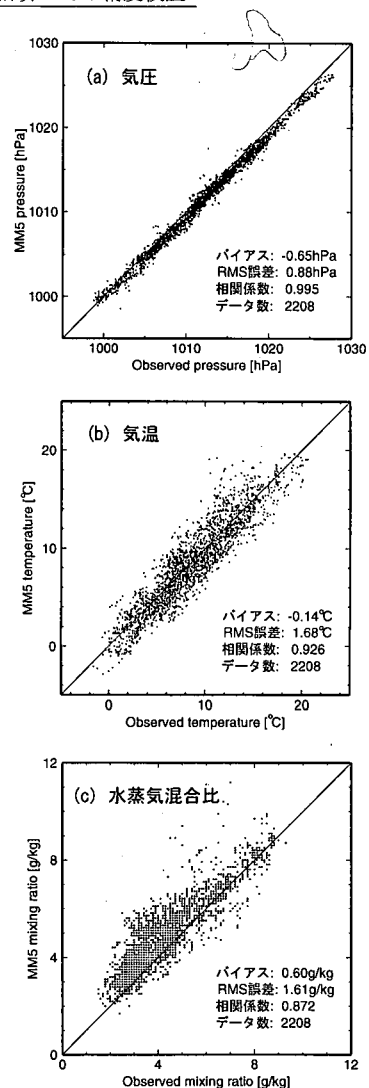


図-4 観測値と計算値の比較：(a) 気圧、(b) 気温、(c) 水蒸気混合比

も、これら3つの気象要素の計算結果は、RMS誤差が小さく安定しており、高い計算精度を有していることがわかる。また、3地点全体でのバイアスは、気圧が $-0.65\text{ hPa}$ 、気温が $-0.14^\circ$ 、混合比が $0.60\text{ g/kg}$ であり、気圧と気温のバイアスは無視できる程度のものであるが、混合比のバイアスは平均値に対する割合が10%~20%とやや大きく、過大評価気味となっている。この原因としては、モデルに与えた客観解析値や海面温度の誤差、そして各格子の土地利用状況によって一義的に決まる潜熱フラックス関係の係数の誤差など、いくつかの原因が考えられるが、はっきりしたことは現時点では不明である。

## (3) 日射量、降水量

計算領域内でルーチ的に日射量の観測が行われている気象官署は名古屋のみである。そこで、その名古屋で

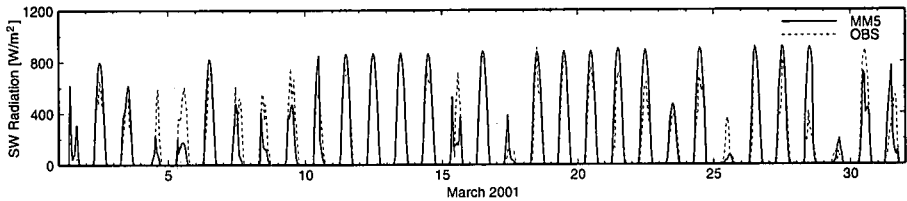


図-5 名古屋での日射量の時系列

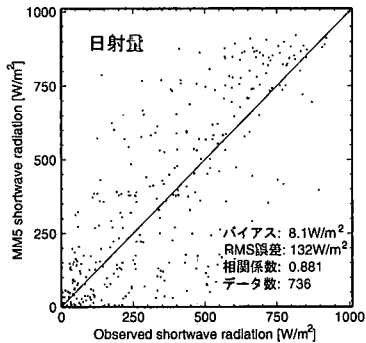


図-6 観測値と計算値の比較 (日射量)

表-4 日射量、降水量の計算精度

| 日積算日射量 (kWh/m²) |      |              |              |      |
|-----------------|------|--------------|--------------|------|
| 観測点             | 月平均  | バイアス         | RMS 誤差       | 相関係数 |
| 名古屋             | 3.94 | 0.19 (4.9%)  | 1.38 (35%)   | 0.77 |
| 日降水量 (mm)       |      |              |              |      |
| 観測点             | 月平均  | バイアス         | RMS 誤差       | 相関係数 |
| 名古屋             | 1.94 | 0.36 (19%)   | 5.64 (291%)  | 0.36 |
| 津               | 2.40 | 1.18 (49%)   | 10.22 (426%) | 0.27 |
| 伊良湖             | 2.52 | -0.75 (-30%) | 7.05 (280%)  | 0.44 |

の1時間毎の日射量の時系列を図-5に示す。晴天日の日中の日射量は800~900 W/m²程度にまで上昇する一方、昼天時や雨天時には厚い雲の影響により日射量が減少している様子が見てとれる。計算値は、3月10日から14日頃までの晴天日や3月17日や29日の雨天日のように、観測値をうまく再現できている期間もあるが、3月4日頃から10日頃にかけての期間のように、誤差が非常に大きくなる期間も見られる。

観測値と計算値の散布図を図-6に示す。見かけ以上に相関係数が高い値を示しているのは、夜間の0 W/m²データも含めた統計処理をしているからである。この図から、日射量の計算精度が前述の他の気象要素の計算精度と比べて明らかに劣っていることがわかる。131 W/m²という大きな値を示すRMS誤差は、月平均日射量の80%近くに及び、定量的な利用に対しては誤差が大きすぎる。そこで時間解像度を1日に落とし、日積算日射量としての精度を検証してみた(表-4)。バイアス自体は191 Wh/m² (4.9%)と非常に小さく、また日積算値とすることでRMS誤差も35%まで減少することがわかる。

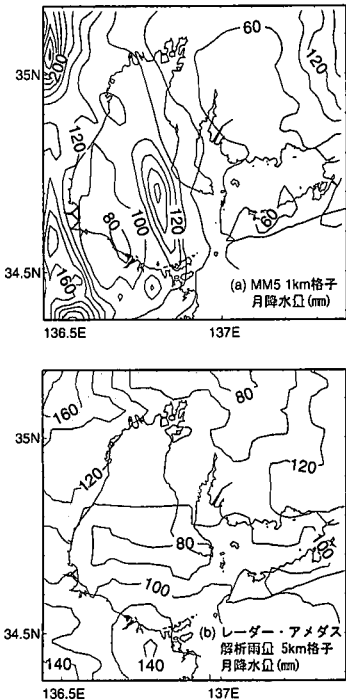


図-7 月降水量分布の比較。(a) 計算値と (b) 観測値

従って、日変化より長いスケールの変動を解析対象とするのであれば、実用的に使えるレベルにあると言える。

日射量の計算誤差が大きくなる最大の原因は、モデルの中での雲の再現精度の悪さによるものであり、降水量についてはさらにその影響が大きく現れる。表-4では、日射量と同じく、降水量も日積算して(日降水量に換算して)観測値と比較しているが、それでもバイアス、RMS誤差、相関係数、いずれの値も今回対象とした7要素の中で最も悪い。そこで、さらに降水量計算値を月降水量へと換算し、その空間分布を気象庁レーダー・アメダス解析雨量データと比較してみた(図-7)。レーダー・アメダス解析雨量データとは、レーダーによって推定された密な降水分布をアメダス雨量で較正し、緯度0.05°、経度0.0625°間隔(約5 km格子)でメッシュ化した1時間降水量データである。解像度の面で5倍の違いはあるが、両者とも三重県や愛知県の各山間部で大きな値が見られるなど、広い目で見た空間パターンにはいくつかの類似

点がある。しかし、伊勢湾中央部の降水分布の大きな差を典型として全体的に誤差が大きく、1 km 格子という高い解像度で計算された降水量を定量的に利用するにはまだまだ精度が低いと言わざるを得ない。月降水量でさえこのような精度であるので、それ以下の時間分解能を持つ計算値の定量的利用にはほど遠い状況である。

#### 4. 考 察

気象庁観測データを用いてモデル計算精度を検証する際には、モデルへの入力として用いた客観解析値自体に、その観測データが同化されていないかどうかを注意する必要がある。気象庁予報部(2000)によれば、本研究で用いたメソ客観解析値には、地上気象官署で観測された地上風、気圧、気温、湿度がデータ同化されているとの記述がある。しかしながら、メソ客観解析値の生データを見る限り、すべての地上気象官署、あるいはすべての気象要素について上記のデータ同化が行なわれている訳ではないと思われる。ウィンドプロファイラーのある名古屋での地上風と、すべての地点での気圧値にははっきりとデータ同化の形跡が見てとれるが、その他についてはデータ同化の程度が弱い、あるいは同化されていないかのどちらかであると考えられる。

表-2において、名古屋の風速・風向の計算精度が比較的良好なのは、こうした客観解析値へのデータ同化の影響であると考えられる。また、図-4及び表-3示した気圧に関する今回の計算精度検証の結果は、計算領域内の任意の点での結果に比べて多少良い結果になっている可能性はある。ただし、気圧は空間一様性が高く、同一時刻の名古屋、津、伊良湖3地点の観測値を比べても高々1, 2 hPa 程度である。従って、気圧の RMS 誤差が全体として 0.9 hPa 程度あることを考えれば、任意地点での計算精度が表-3の結果とそれほど極端に違ってくることはないものと考えられる。

#### 5. 結 論

メソ気象モデル MM5 に、10 km 格子の気象庁メソ客観解析値、約 1.3 km 格子の NOAA 海面温度データを組み合わせることで、空間解像度 1 km、時間解像度 1 時間の高解像度計算において、風速、風向、気圧、気温、水蒸気混合比は実用的に使えるレベルで算出可能なことが明らかになった。また、日射量は、日積算日射量としてならば、定量的議論が可能なレベルとなる。大気海洋間の相互作用で考慮すべき海面応力、気圧勾配、日射・長波放射、潜熱・顕熱輸送、降水・蒸発の 8 つのうち、下向き長波放射、降水以外の物理量は、モデル内において上記の気象要素と海面温度より算出されるため、ある

程度の精度が期待できることになる。

降水量については、現時点ではモデルの計算精度が悪く、実用的な利用には降水スキームの大幅な改善が必要である。また、下向き長波放射の計算精度については、観測値がないために今回は検証はできなかった。

**謝辞:** 中部国際空港海上観測局 (MT 局) の観測データは、愛知県企業庁及び中部国際空港株式会社よりご提供頂いた。また本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤 (B) (2) 13555141, 若手研究 (B) (2) 14750426 及び平成 14 年度 (財) 中部電力基礎技術研究所研究助成金 R-13231 による成果であり、ここに併せて謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志 (2001): メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第 48 巻, 281-285.
- 気象庁予報部 (2000): 新しい数値解析予報システム, 数値予報課報告・別冊第 47 号, 143 p.
- 小林智尚・足立忠行・水谷英朗・安田孝志 (2001): 大気・波浪・海洋相互結合モデルの構築, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 221-225.
- 灘岡和夫・吉野忠和・二瓶泰雄 (1999): 高度化した沿岸流動数値計算法を用いた原油流出シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 461-465.
- 森 信人・平口博丸・筒井純一 (2000): 気象モデルを用いた波浪推算の高精度化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 261-265.
- Dudhia, J. (1989): Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model, J. Atmos. Sci., Vol. 46, pp. 3077-3107.
- 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., Vol. 121, pp. 1493-1513.
- Dudhia, J. (1996): A multi-layer soil temperature model for MM5, Sixth Annual PSU/NCAR Mesoscale Model User's Workshop, Boulder, CO, pp. 49-50.
- EEWG (土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会 Estuarine Engineering Working Group) (2000): エスチュアリー・エンジニアリングの体系化に関する研究, 土木学会, 216 p.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer (1994): A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Tech. Note TN-398+1A, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 p.
- Hong, S.-Y. and H. L. Pan (1996): Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, Mon. Wea. Rev., Vol. 124, pp. 2322-2339.
- Reisner, J., R. T. Bruintjes and R. J. Rasmussen (1993): Preliminary comparisons between MM5NCAR/Penn State model generated icing forecasts and observations, Fifth Int. Conf. on Aviation Weather Systems, Amer. Meteor. Soc., Vienna, VA, pp. 65-69.