

日本気象学会誌 気象集誌
(Journal of the Meteorological Society of Japan)

第91巻 第2号 2013年4月 目次と要旨

招待論文

- Juan Jose RUIZ・Manuel PULIDO・三好建正：アンサンブルデータ同化を用いたモデルの
パラメータ推定：レビュー79-99

論文

- Yang GAO・Tongwen WU・Baode CHEN・Jun WANG・Yiming LIU：中国南部に
おける2008年冬季の着氷性の雨に伴う雲微物理構造の数値シミュレーション101-117
- 山本博基・余田成男：理想化された準自転軸対称な惑星大気モデルにおけるスーパー
ローテーション強度の理論的見積もり119-141
- 折笠成宏・村上正隆・Andrew J. HEYMSFIELD：中緯度域巻雲の氷晶数濃度：
気球搭載雲粒子ゾンデ (HYVIS) による直接観測143-161
- Haiyan SHAO・Jie SONG・Hongyun MA：仮想的な広域都市化による東アジアの
夏季モンスーン循環と降水への影響に関する感度実験163-177
- 後藤大輔・森本真司・石戸谷重之・小木昭典・青木周司・中澤高清：大気中 O₂/N₂比の
高精度連続測定システムの開発と仙台市青葉山における大気観測への応用179-192
- 田中 博・関 佐和香：3次元スペクトルモデルによる線形傾圧モデルの開発とその
北極振動指数に依存した傾圧不安定問題への応用193-213
- Baojun CHEN・Jun YANG・Jiangping PU：中国東部で観測された梅雨時期の雨滴粒径
分布の統計的特性215-227

要報と質疑

- 大泉三津夫・高藪 出・石崎紀子：JRA-25境界による非静力学領域気候モデル (NHRCM)
の降積雪現象の再現性229-238
- 学会誌「天気」の論文・解説リスト (2013年1月号・2月号)239
- 英文レター誌 SOLA の論文リスト (2013年1-18)240
- 気象集誌次号掲載予定論文リスト241

.....◇.....◇.....◇.....

- Juan Jose RUIZ・Manuel PULIDO・三好建正：アンサンブルデータ同化を用いたモデルのパラメータ
推定：レビュー

Juan Jose RUIZ, Manuel PULIDO, and Takemasa MIYOSHI: Estimating Model Parameters with Ensemble-Based
Data Assimilation: A Review

数値予報モデルや地球システムモデルには通常数多
くのパラメータがあり、それらは試行錯誤の末に手動
で最適化される。一方、いくつかの研究からは、デー
タ同化技術を用いたモデルパラメータの客観的推定法

が提案されている。本論文は、それら過去の研究をレビューするとともに、アンサンブルデータ同化の応用例として、低解像度大気大循環モデル SPEEDY における時間変化するモデルパラメータ推定について紹介

する。これまでの研究同様、データ同化は複雑な地球流体のモデルでパラメータを最適推定する手法として効果的であり、パラメータの動的推定によって短期・中期気象予報が改善し得ることが示される。

Yang GAO・Tongwen WU・Baode CHEN・Jun WANG・Yiming LIU：中国南部における2008年冬季の着氷性の雨に伴う雲微物理構造の数値シミュレーション

Yang GAO, Tongwen WU, Baode CHEN, Jun WANG, and Yiming LIU: A Numerical Simulation of Microphysical Structure of Cloud Associated with the 2008 Winter Freezing Rain over Southern China

中国南部で2008年1月11日から2月4日にかけて発生した着氷性の雨の事例について、4種の微物理スキームを用いた水平格子間隔30 km Weather Research and Forecasting (WRF) シミュレーションならびに CloudSat 衛星観測を用いて雲微物理構造を調べた。108°-113°E および 25°-28°N の領域の中心で3週間も続いたこの着氷性の雨は、最近50年の中国南部においては極めて稀な事例であった。モデルの降水中心が観測に比べてやや北側にずれるものの、Lin スキームを除く他の3種の微物理スキーム (Morrison, WSM6 および Thompson) を用いた WRF シミュレーションでは、着氷性の雨の事例に伴う降水と地表面気温の時空間分布を捉えていた。この WRF シミュレーションにより、着氷性の雨の生成にあたり大気鉛直熱的構造として次に述べる特徴が重要であることが明らかになった：すなわち対流圏中層 (600-

850 hPa) の気温が氷点を上回ることで、そして対流圏下層 (850 hPa より下) の気温が氷点を下回ることである。また、1月11日から2月4日にわたり雲構造と着氷過程の時間進化も WRF でよく再現された。この時間進化は次の二つのフェーズに分けることができる：(a) 2008年1月20日から26日にかけて豊富な液相水が700 hPa より下層に見られ、(b) 1月26日から2月1日には液相と固相の水が共存し大気柱全体にわたり混合相の雲があり、とくに上層で固相水が、下層で液相水が支配的であった。このような雲構造の変化は、着氷性の雨をもたらす典型的な氷相メカニズムを表しており、その一例が2008年1月28日に湖南省で見られている。さらに湖南省における CloudSat 観測を用いた検証の結果、WRF モデルは固相水量を過大評価するものの、地表面付近の温暖層と再凍結層を捉えていることが分かった。

山本博基・余田成男：理想化された準自転軸対称な惑星大気モデルにおけるスーパーローテーション強度の理論的見積もり

Hiroki YAMAMOTO and Shigeo YODEN: Theoretical Estimation of the Superrotation Strength in an Idealized Quasi-Axisymmetric Model of Planetary Atmospheres

惑星大気の赤道スーパーローテーションの強度を、回転半球上の乾燥ブシネスク流体のプリミティブ方程式系を東西平均した準自転軸対称な系をもとに、理論的に見積もった。放射による加熱・冷却は、ニュートン加熱・冷却で与え、非軸対称擾乱による運動量輸送は渦拡散で与えた。ただし、水平渦拡散は鉛直渦拡散よりも非常に強いと仮定した。この系では、子午面循環と水平渦拡散により角運動量が赤道上空に供給されるため、スーパーローテーションが生成・維持される。この機構は、ギアラシメカニズムと呼ばれてお

り、金星大気スーパーローテーションの仮説のひとつである。基礎方程式系から、スーパーローテーションの強度を表す無次元量に関する5次方程式を導出し、その唯一の正の解をスーパーローテーション強度の理論的見積もりとした。この見積もりが依存する外部パラメータは、外部熱ロスビー数、放射緩和時間と鉛直拡散の緩和時間の比、水平と鉛直それぞれの拡散の緩和時間の幾何平均と自転周期の比、の3つの無次元パラメータに集約することができる。また、各解で卓越する力学的平衡状態は、旋衡風平衡、地衡風平衡、水

平拡散平衡, それぞれに対して, 赤道・極温度差がほぼ放射対流平衡温度場の差で維持されている状態と熱の移流により著しく減少した状態があり, 計6種類であることを示し, そのパラメータ依存性を求めた。

その後, 基礎方程式系を離散化した数値モデルを用いて, 時間発展計算を行い, 何桁にも及ぶ広いパラメータ範囲で, 定常あるいは統計的平衡状態の数値解

を得た。数値解から計算したスーパーローテーション強度と上述の理論的見積もりを比較したところ, 相対誤差は50%未満であった。これは, スーパーローテーション強度が外部パラメータに依存して5桁程度変化したことと比べて非常に小さく, 理論モデルの妥当性を示している。

折笠成宏・村上正隆・Andrew J. HEYMSFIELD: 中緯度域巻雲の氷晶数濃度: 気球搭載雲粒子ゾンデ (HYVIS) による直接観測

Narihiro ORIKASA, Masataka MURAKAMI, and Andrew J. HEYMSFIELD: Ice Crystal Concentration in Mid-latitude Cirrus Clouds: In Situ Measurements with the Balloonborne Hydrometeor Videosonde (HYVIS)

本論文は, 小さい氷晶 (100 μm 以下) を精度良く測定できる利点を持つ気球搭載雲粒子ゾンデ (HYVIS) によって測定された中緯度域巻雲の氷晶数濃度について述べる。観測された巻雲は概して, 総観規模の低気圧に伴う温暖前線と停滞前線と関連した事例であり, 1994~2007年の観測期間につくばから飛揚した37回のデータセットより成る。他の航空機用測器との室内比較実験に基づき, HYVIS を用いて測定された氷晶数濃度は10~30 μm の粒径範囲で未だ大きいファクター2~3の不確実性で測定される。測定値の信頼性は観測された粒径分布やパーセルモデルで計算された氷晶数濃度からも支持される。

氷晶の鉛直分布は, 雲頂温度 $-33\sim-72^{\circ}\text{C}$, 雲底温度 $-3\sim-49^{\circ}\text{C}$ に及ぶ範囲の雲から得られた。氷晶数濃度の値は $10^{-1}\sim 10^2$ 個/Lのオーダーに分布した。数濃度の中央値は温度や鉛直位置に因らず, 典型的には数十個/L程度であった。雲頂付近で数濃度が最大と

なる事例は時々あったが, 雲底付近で最大となる事例もあった。雲底付近は昇華蒸発域に通常あたるので, 昇華過程による氷晶の断片化によって数濃度が増加する可能性があることが示唆される。

均質核形成による巻雲発生初期の数値シミュレーションから得られた氷晶の数濃度と, 本研究で測定された数濃度を比較した結果, 大きい差が認められた。ただし測定された数濃度には, 二次氷晶, 重力沈降, 乱流混合のような一次氷晶以外の物理過程の影響が含まれている。また, 比較的暖かい温度域 (-25°C 以上) での不均質核形成による先行研究の式のような強い温度依存性は, 本研究で測定された数濃度ではどの温度域にも見当たらなかった。 -40°C 以下における不均質核形成による最近の数値モデル研究との比較を示し, 観測された巻雲で起きたと考えられる核形成メカニズムを議論する。

Haiyan SHAO・Jie SONG・Hongyun MA: 仮想的な広域都市化による東アジアの夏季モンスーン循環と降水への影響に関する感度実験

Haiyan SHAO, Jie SONG, and Hongyun MA: Sensitivity of the East Asian Summer Monsoon Circulation and Precipitation to an Idealized Large-Scale Urban Expansion

水平解像度60 kmの領域気候モデル (RegCM3) を使用し, 東アジアを都市化した仮想実験を行い, 中国の夏季モンスーンに伴う降水に対する最大影響を推定した。地表面被覆の都市化による熱力学および水文学的影響を捉えるために, 陸面スキームに新たなバルク

都市パラメタリゼーションを導入した。広範囲で自然被覆状態を高密度の都市被覆に変化させるシミュレーションを9年分実施したところ, モンスーン期初頭に中国東部で南西風が強化した。7月から8月にかけて強化された南西風は中国北部に移動し, 長江流域以南

では南西風の弱化が見られた。7・8月には中国南部で大幅な降水量の減少がみられ、その多くが対流性降水の弱化によるものであった。これは、中国南部における南西風の弱化に伴う水蒸気供給の減少、長江流域付近での収束弱化、対流圏下層での対流不安定の弱化、そして不透水性の人工陸面からの蒸発散量減少を伴っていた。一方で、都市域の西および北西での南西風強化に伴い、中国北部では穏やかに降水量が増加し

た。中国南部における南西風速と降水量の変化はモンスーンが弱い年により顕著であった。これは、地域の気候に対する広範囲での集中的な都市化の影響が東アジアモンスーンの弱いフェーズで顕在化することを示唆している。都市化率を低下させると、風と降水の変化は見られるものの変化の及ぶ範囲と大きさは遙減された。

後藤大輔・森本真司・石戸谷重之・小木昭典・青木周司・中澤高貴：大気中 O_2/N_2 比の高精度連続測定システムの開発と仙台市青葉山における大気観測への応用

Disuke GOTO, Shinji MORIMOTO, Shigeyuki ISHIDOYA, Akinori OGI, Shuji AOKI, and Takakiyo NAKAZAWA: Development of a High Precision Continuous Measurement System for the Atmospheric O_2/N_2 Ratio and Its Application at Aobayama, Sendai, Japan

全球炭素循環の理解の向上を目的として、燃料セル O_2 分析計を利用した大気中 O_2 濃度 (O_2/N_2 比) の高精度連続測定システムを開発した。測定の高精度化のために、分析計へ導入する大気試料や標準ガスの圧力変動を ± 0.005 Pa の範囲で一定に制御し、分析計内部を $32.0 \pm 0.1^\circ C$ に安定化した。同一試料の繰返し分析の精度は24分間の測定で ± 1.4 per meg (1σ) であり、大気中 O_2/N_2 比の極めて小さな時空間変動の高精度連続測定を可能にした。 O_2/N_2 比測定の基準となる標準ガスは、特別に設計した水トラップを用いて露点温度 $-80^\circ C$ 以下に除湿した大気を高圧シリンダーに充填し、その O_2 量を調整することにより新たに製造

した。製造した5本の標準ガスの O_2/N_2 比を定期的に検定し、各標準ガスの値は現在まで570日間以上にわたって明確な変化傾向を示すこともなく安定していることを確認した。本観測システムには、大気中の CO_2 濃度を同時測定するために非分散型赤外分析計も組込んだ。 CO_2 濃度の分析精度は ± 0.03 ppm (1σ) である。本システムを用いて、2007年2月から仙台市郊外の青葉山で大気中 O_2/N_2 比の系統的な観測を開始した。得られた観測結果から、 O_2/N_2 比の季節変化や日変化のみならず、陸上生物活動や人間活動に起因した数時間から数日規模の短周期の変動が明瞭に捉えられた。

田中 博・関 佐和香：3次元スペクトルモデルによる線形傾圧モデルの開発とその北極振動指数に依存した傾圧不安定問題への応用

Hiroshi L. TANAKA and Sawaka SEKI: Development of a Three-Dimensional Spectral Linear Baroclinic Model and its Application to the Baroclinic Instability Associated with Positive and Negative Arctic Oscillation Indices

本研究では3次元スペクトルモデルに基づいた線形傾圧モデル (LBM) の開発を行い、さまざまな東西非一様基本場における線形不安定解について調べた。初めに基本場が帯状平均気候値の場合、過去の研究で調べられている Charney モードが総観規模に、そして南北に双極構造を持つ双極 Charney モードがプラネタリー波領域に最大不安定解として現れる。基本場が東西にも変化する場合、これらの傾圧不安定解は局

在する傾圧性により変形されることを理論解として明らかにした。基本場が東西南北に変化する順圧大気に対しては、最大順圧不安定解として北極振動の構造を持つ定在解が得られた。LBM の固有解は、静止大気における3次元ノーマルモードを任意の3次元基本場における固有解に拡張したものである。

このLBMの応用として、本研究では北極振動と傾圧波動の間の相互作用の3次元構造の解明を行った。

北極振動指数が正のときと負のときの3次元基本場をLBMに与えると、傾圧波動の構造が変化し、相互作用には地域性が見られた。特に、北極振動指数が正のときに西風ジェットがダブルジェットとなる大西洋域で、強い正のフィードバックが生じた。北極振動指数が負のときには、亜熱帯ジェットの強化により総観規模のCharneyモードが太平洋と大西洋の双方で増幅し、渦運動量フラックスがジェットの北側で収束する

構造になり、亜熱帯ジェットを北上させる一方で寒帯ジェットを弱体化した。本研究により、北極振動指数が正負に振れると、傾圧不安定波の構造と渦運動量輸送特性が、単一ジェットとなる太平洋とダブルジェットとなる大西洋で異なる応答を示すものの、結果として北極振動をさらに強化する正のフィードバックをもたらすことが示された。

Baojun CHEN・Jun YANG・Jiangping PU：中国東部で観測された梅雨時期の雨滴粒径分布の統計的特性

Baojun CHEN, Jun YANG, and Jiangping PU: Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution in the Meiyu Season Observed in Eastern China

2009–2011年に中国東部（南京）の地上観測点で取得されたディストロメータのデータを用いて、梅雨時期の雨滴粒径分布（DSD）の特性を調べた。観測されたDSDスペクトルを対流性と層状性降雨の二つのタイプに分類した。規格化DSDの切片パラメータの対数（ $\log_{10}N_w$ ）と雨滴粒径の質量荷重平均（ D_m ）の頻度分布は、対流性・層状性のいずれについても、それぞれ負および正の歪度を示している。歪度の絶対値は層状性より対流性の方が大きく、それは $\log_{10}N_w$ の

分布でより顕著である。 $\log_{10}N_w$ と D_m の平均値は対流性降雨についてそれぞれ3.80と1.71 mmであり、層状性降雨については3.45と1.30 mmである。DSDガンマ分布の形状（ μ ）と傾き（ λ ）の関係や、レーダ反射因子（ Z ）と降雨強度（ R ）の関係についても、対流性降雨について導出する。本研究で得られた Z - R 関係式は $Z=368R^{1.21}$ である。これら統計パラメータの解釈、および過去の研究との相違点と類似点を生み出す要因についても議論する。

大泉三津夫・高藪 出・石崎紀子：JRA-25境界による非静力学領域気候モデル（NHRCM）の降積雪現象の再現性

Mitsuo OHIZUMI, Izuru TAKAYABU, and Noriko ISHIZAKI: Reproducibility of Snow by a Non-Hydrostatic Regional Climate Model (NHRCM) nested in JRA-25

水平解像度20 kmの領域気候モデルNHRCMをJRA-25にネストして1985年～2004年冬季（12～3月）の雪氷に関する現在気候再現実験を行った。アメダス観測値から、月平均積雪深、月平均地上気温、月降水量、月降雪量、の4要素を推定してモデル再現値の検証を行った。その結果、(1) モデルによって計算された地上気温には、東北地方太平洋側で1°C程度の低温バイアス、日本海側に1–2°C程の高温バイアスが存在する、(2) 月降水量と月降雪量は観測の3割程度、積雪深は4割と小さく、日本海側で北海道から中

国地方にかけて大きな負バイアス、北海道東部から東北の太平洋側でやや小さめの正バイアスであり、(3) 500 m以上の高度ではこれら3要素のバイアスが減少する、ことが分かった。また、(4) 冬季の地上気温の頻度分布に観測とモデルの両方で2つの極大ピークが存在することが分かった。さらに、NHRCMによる力学的ダウンスケールを適用できない場合のために、領域・高度範囲別にモデル計算値から降雪量と積雪深を予測する統計学的回帰式を導いた。