

# 日本気象学会誌 気象集誌

(Journal of the Meteorological Society of Japan)

## 第98巻 第2号 2020年4月号 目次と要旨

### 招待論文

- Chung-Hsiung SUI・佐藤正樹・鈴木健太郎：降水効率および気候変動に対する雲放射フィードバックにおけるその役割<sup>†</sup> ..... 261-282

### 論文

- Wei CHEN・Zhaoyong GUAN・Huadong YANG・Qi XU：北半球夏季における東アジア・オーストラリアモンスーンの変動と地域気候への影響 ..... 283-297
- Jayalakshmi JANAPATI・Balaji Kumar SEELA・Pay-Liam LIN・Pao K. WANG・Chieh-Huei TSENG・K. Krishna REDDY・橋口浩之・Lei FENG・Subrata Kumar DAS・C. K. UNNIKRISHNAN：インドと台湾で観測されたインド洋と太平洋における熱帯低気圧の雨滴粒径分布特性<sup>†</sup> ..... 299-317
- 青野憲史・岩崎俊樹・佐々井崇博：台風の外側における風蒸発フィードバックが台風の発達に及ぼす効果<sup>†</sup> ..... 319-328
- 富田智彦・山浦 剛：5月の梅雨前線活動の経年変動とその6月への接続性<sup>†</sup> ..... 329-351
- 直江寛明・松本隆則・上野圭介・眞木貴史・出牛 真・竹内綾子：複数の衛星測器観測による1978-2017年のオゾン全量データのバイアス補正<sup>†</sup> ..... 353-377
- Huadong YANG・Liguang WU・Tong XIE：高解像度シミュレーションにおける熱帯低気圧の中心位置検出に関する4手法の比較 ..... 379-393
- Bjorn STEVENS・Claudia ACQUISTAPACE・Akio HANSEN・Rieke HEINZE・Carolyn KLINGER・Daniel KLOCKE・Harald RYBKA・Wiebke SCHUBOTZ・Julia WINDMILLER・Panagiotis ADAMIDIS・Ioanna ARKA・Vasileios BARLAKAS・Joachim BIERCAMP・Matthias BRUECK・Sebastian BRUNE・Stefan A. BUEHLER・Ulrike BURKHARDT・Guido CIONI・Montserrat COSTA-SURÓS・Susanne CREWELL・Traute CRÜGER・Hartwig DENEKE・Petra FRIEDERICHS・Cintia Carbajal HENKEN・Cathy HOHENEGGER・Marek JACOB・Fabian JAKUB・Norbert KALTHOFF・Martin KÖHLER・Thirza W. van LAAR・Puxi LI・Ulrich LÖHNERT・Andreas MACKE・Nils MADENACH・Bernhard MAYER・Christine NAM・Ann Kristin NAUMANN・Karsten PETERS・Stefan POLL・Johannes QUAAS・Niklas RÖBER・Nicolas ROCHETIN・Leonhard SCHECK・Vera SCHEMANN・Sabrina SCHNITT・Axel SEIFERT・Fabian SENF・Metodija SHAPKALIJEVSKI・Clemens SIMMER・Shweta SINGH・Odran SOURDEVAL・Dela SPICKERMANN・Johan STRANDGREN・Octave TESSIOT・Nikki VERCAUTEREN・Jessica VIAL・Aiko VOIGT・Günter ZÄNGL：雲と降水をシミュレートするためのラージエディモデルとストーム解像モデルの付加価値\* ..... 395-436
- 宮本佳明・西澤誠也・富田浩文：湿潤二次元 Rayleigh 対流への雲凝結核数の影響<sup>†</sup> ..... 437-453

\* 特集号『DYAMOND』

\*\* 気象集誌・SOLA 合同特集号『海大陸研究強化年：YMC』

<sup>†</sup> 和文要旨掲載論文

## 要報と質疑

Le DUC・斉藤和雄・堀田大介：正定値対称アンサンブル変換行列の対角成分卓越性について†	495-462
耿 驃・勝俣昌己・谷口京子：混合ロスビー重力波によるスマトラ南西沖の日周期降水への影響**†	463-480
学会誌「天気」の論文・解説リスト（2020年1月号・2月号）	481
英文レター誌 SOLA の論文リスト（2020年1-42）	482
気象集誌次号掲載予定論文リスト	483

.....◇.....◇.....◇.....◇.....

### Chung-Hsiung SUI・佐藤正樹・鈴木健太郎：降水効率および気候変動に対する雲放射フィードバックにおけるその役割

Chung-Hsiung SUI, Masaki SATOH, and Kentaroh SUZUKI: Precipitation Efficiency and its Role in Cloud-Radiative Feedbacks to Climate Variability

降水効率 (PE) はある気象条件において潜在的に可能な最大降水量を評価するために有用な概念である。PE は気象学における様々な状況で利用される：例えば、単一の対流現象における激しい降水を評価するため、また積雲対流パラメタリゼーションにおけるパラメータとして、あるいは気候予測研究における雲と降水粒子の配分の決定のため等に利用されている。PE はいくつかの方法で定義されてきた。このレビューでは、初めに微視的および巨視的観点から PE の定義を

示し、観測および数値モデリング手法に基づく PE の推定値を提示する。次に、浅い雲や組織化された深い対流システムにおける雲微物理と PE に関する観測とモデリング研究をレビューすることを通じて、モデルにおける対流の表現法に関わる物理的制約や概念的フレームワークを議論する。特に、気候変動に対する雲放射フィードバックにおける PE の役割に焦点を当てる。最後に、気候予測研究における雲と降水の変化を論じるための PE の有用性について議論する。

### Jayalakshmi JANAPATI・Balaji Kumar SEELA・Pay-Liam LIN・Pao K. WANG・Chie-Huei TSENG・K. Krishna REDDY・橋口浩之・Lei FENG・Subrata Kumar DAS・C. K. UNNIKRISHNAN：インドと台湾で観測されたインド洋と太平洋における熱帯低気圧の雨滴粒径分布特性

Jayalakshmi JANAPATI, Balaji Kumar SEELA, Pay-Liam LIN, Pao K. WANG, Chie-Huei TSENG, K. Krishna REDDY, Hiroyuki HASHIGUCHI, Lei FENG, Subrata Kumar DAS, and C. K. UNNIKRISHNAN: Raindrop Size Distribution Characteristics of Indian and Pacific Ocean Tropical Cyclones Observed at India and Taiwan Sites

インドと台湾におけるディストロメーター測定から、インド洋と太平洋の熱帯低気圧 (Tropical Cyclone: TC) の雨滴粒径分布 (Raindrop Size Distribution: RSD) 特性を調べた。インド洋における5つのTC (2010-2013年) と太平洋における6つのTC (2014-2016年) が、それぞれインド南部および台湾南部に設置された Parsivel ディストロメーターによって

測定された。インド洋と太平洋における TC の RSD には顕著な違いがある。小粒径の数濃度はインド洋の TC の方が高いのに対し、中～大粒径の数濃度は太平洋の TC の方が高い。太平洋の TC の RSD は、インド洋の TC より質量加重平均径が大きく、正規化切片パラメータが小さい。降水タイプや降水強度に基づいて分類された RSD は、インド洋と太平洋の TC 間で同様

の特性を示す。インド洋と太平洋におけるレーダー-反射因子・降水強度 ( $Z-R$ ) 関係や傾斜・形状 ( $\mu-A$ ) 関係は明らかに異なることがわかった。TC の RSD の

特徴がインド洋と太平洋で異なる原因は、2つの海洋の TC における可降水量や対流活動の違いによるものであることがわかった。

### 青野憲史・岩崎俊樹・佐々井崇博：台風の外側における風蒸発フィードバックが台風の発達に及ぼす効果

Kenji AONO, Toshiki IWASAKI, and Takahiro SASAI: Wind-Evaporation Feedback Effects in Outer Regions on Tropical Cyclone Development

台風強化に対する風蒸発フィードバックの役割を調べるため、台風の外側にある弱風域（地上10mの風速が5, 10および15 $\text{ms}^{-1}$ 未満の領域）に焦点を当てた数値実験を行った。非静力学雲解像数値モデルにおける大気海洋間の交換係数のうち、水蒸気フラックスの計算に現れる地上10mの風速に下限値を導入した。この下限値を段階的に変化させる理想実験により、弱風域における過剰な海面蒸発が台風の発達に与えるインパクトを調べた。その結果、下限値を導入しない標準実験に比べ、発達期には下層（高度100m以下）の動径方向の水蒸気コントラストが減少し、成熟期（台風形成から150時間後）には台風のサイズが30~33%、強度

が5~14%、それぞれ減少した。弱風域の蒸発量の増加が外側の対流を活発化し、下層では台風内外の気圧差を減少させた。結果として、台風中心への流入および角運動量の台風中心への移流が減少し、外側の対流の強化によって壁雲内の対流が抑制され、二次循環を弱体化させ、台風の強度を弱めた。加えて、弱風域の対流はレインバンド（台風中心から半径300km内の降水帯）の発達を抑制した。以上の結果は、台風の発達には、下層での動径方向の水蒸気コントラストを強くする風蒸発フィードバックの寄与が重要であることを示唆しており、弱風域の役割を解明することで台風の発達過程がより正確に理解できると考えられる。

### 富田智彦・山浦 剛：5月の梅雨前線活動の経年変動とその6月への接続性

Tomohiko TOMITA and Tsuyoshi YAMAURA: Interannual Variability of Baiu Frontal Activity in May and its Connectivity with June

梅雨前線は、通常5月に西部北太平洋に形成される。本研究は、1979年から2014年（36年間）の客観解析データを使用し5月の梅雨前線活動の経年変動を調査した。まず熱帯からの暖かく湿った南風の季節的な強化が、気候学的大規模準定在前線としての梅雨前線を5月に形成する。この熱帯からの暖かく湿った南風の強弱は、5月の梅雨前線活動の経年変動をも制御する。台湾を中心とした偏差的な大規模大気循環は、西太平洋における赤道ケルビン-ロスビー波束から北西に伝播する湿潤ロスビー波と解釈されるが、この東部において南風偏差の強弱を制御する。この赤道ケルビン-ロスビー波束は、赤道季節内振動と同定され、インド洋から西太平洋へと赤道域を東方伝播する。

5月の梅雨前線活動の経年変動は、エルニーニョ／

南方振動 (ENSO) の3-4年周期変動とは異なり約2年の周期の変動傾向をとる。この2年周期の変動傾向は、熱帯太平洋における海面水温偏差の東西に広がる三極分布と、これにともなう偏差的なウォーカー循環によって特徴付けられる。この偏差的な環境は、赤道ケルビン-ロスビー波束の崩壊を西部熱帯太平洋に制限し、続く湿潤ロスビー波の北西伝播を熱帯西部北太平洋に誘導する。ENSOは6月の梅雨前線中央部付近の経年変動を制御するが、この2年周期の変動傾向は、季節内振動の位相の反転と共に、梅雨前線西部における5月の経年変動と6月中旬までの経年変動に現れる。本研究は5月の梅雨前線活動の経年変動の予測因子として4月のインド洋における赤道季節内振動の活動度を提案する。

## 直江寛明・松本隆則・上野圭介・眞木貴史・出牛 真・竹内綾子：複数の衛星測器観測による1978-2017年のオゾン全量データのバイアス補正

Hiroaki NAOE, Takanori MATSUMOTO, Keisuke UENO, Takashi MAKI, Makoto DEUSHI, and Ayako TAKEUCHI: Bias Correction of Multi-Sensor Total Column Ozone Satellite Data for 1978-2017

この研究では、利用可能な20種類の Level 2 衛星観測オゾン全量 (TCO) データを40年間 (1978-2017) 分取得し、結合 TCO データセットを作成する。20種類の個々の TCO データセットと結合した TCO データは、ドブソンとブリューワー分光光度計による地上観測に対して補正を行う。ここでは2種類のバイアス補正法を用いる：時間方向に線形単回帰を行う補正法と、時間、太陽天頂角、オゾンの有効温度を説明変数とした線形重回帰による補正法である。全ての衛星データセットで地上観測との差は2-3%の範囲にある。しかし、Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)/Earth Probe で校正が劣化した期間のデータや、NOAA が提供している Ozone Mapping and Profiling Suite (OMPS) の観測初期のデータは品質が劣化していることがわかった。一方、NASA 提供の OMPS データと地上観測との差は極めて安定している。Global Ozone Monitoring Experiment/MetOp-

A and -B では、アルゴリズム更新時に地上観測との差に不連続があり、約8 DU に達している。20種の衛星観測データを各グリッドで平均して作成した結合 TCO データセットについて、重回帰を用いた補正法による TCO のトレンドと補正なしのそれとを比較すると一般的に低緯度で正になるが、これは前者においてオゾンの有効温度が低い地域で、正の補正がなされるからである。重回帰を用いた補正法によるトレンドには明瞭な季節依存性と緯度依存性がみられるが、時間だけの単回帰による補正法の結果に季節依存性と緯度依存性はみられない。結合 TCO データセットの平均平方二乗差は、補正前の8.6DU から、単回帰と重回帰による補正後いずれにおいても8.4DU へ減少している。したがって、我々のバイアス補正法を用いた結合 TCO データセットは、時間方向に一様かつ高分解能であり、トレンド解析および長期再解析への同化データとして適している。

## 宮本佳明・西澤誠也・富田浩文：湿潤二次元 Rayleigh 対流への雲凝結核数の影響

Yoshiaki MIYAMOTO, Seiya NISHIZAWA, and Hirofumi TOMITA: Impacts of Number of Cloud Condensation Nuclei on Two-Dimensional Moist Rayleigh Convection

湿潤 Rayleigh 対流に対する雲凝結核の数濃度 (CCN) 及び他の熱力学変数の影響を調べた。この目的のため、二次元のブジネスク流体に相変化・降水過程を含む一連の雲物理を解く数値モデルを構築した。実験の結果、CCN 数の影響は、計算の最初に出現する対流にのみ現れ、そのあとの準定常状態では影響が少ないことが示された。これは、最初に現れる対流は、パーセル理論のように背景の循環に支配される対流ではなく、一方で準定常状態になると不安定成層が作る循環に伴う対流になると考えられる。

先行研究で見られたように、雲物理を含むことで運動エネルギーが減少し、上昇流と下降流の間隔が広がることが示された。この結果は CCN 数には依存しない。運動エネルギーの減少は、上層で凝結・下層で蒸発が生じることで流体が静的に安定化したためと考えられる。

底面の温度・温度勾配・水蒸気混合比・CCN を系統的に変化させた実験を行った結果、温度勾配が大きいほど雲物理の影響は顕著になり、過飽和度が上がるほど対流セルの数が減少した。

## Le DUC・斉藤和雄・堀田大介：正定値対称アンサンブル変換行列の対角成分卓越性について

Le DUC, Kazuo SAITO, and Daisuke HOTTA: An Explanation for the Diagonally Predominant Property of the Positive Symmetric Ensemble Transform Matrix

アンサンブル変換カルマンフィルタ (ETKF) では第一推定値の摂動を線形変換することで解析値の摂動を生成する。この線形変換を表現する行列をアンサンブル変換行列 (ETM) と呼ぶ。全ての妥当な ETM はアンサンブル空間における解析誤差共分散の行列平方根でかつアンサンブル平均を保存するものである必要がある。ETKF では ETM として正定値対称平方根 (主平方根)  $T^*$  を用いる。この選択は、 $T^*$  が全ての妥当な ETM の中で恒等行列  $I$  との差のプロベニウスノルムが最小のものであるという性質から正当化される。このノルム最小性とは別に、 $T^*$  にはその対角成分の大きさが非対角成分と比べ1桁以上大きいという性質 (対角成分卓越性と呼ぶ) があるが、これまで経験的にしか知られていなかった。

本稿では  $T^*$  の対角成分卓越性を説明するためにまず  $T^*$  のノルム最小性の厳密な証明を与える。この性質は ETKF における ETM の選び方に正当性を与える

重要な性質であるが、これまでデータ同化研究の文脈では厳密な証明が与えられていなかった。次に、この証明における議論をスカラー行列全体 ( $I$  の任意の定数倍) に拡張することで、 $T^*$  がスカラー行列  $D$  と密行列  $P$  の和に分解でき  $D$  と  $P$  のフロベニウスノルムがそれぞれ  $T^*$  の固有値の平均と標準偏差に比例することを示す。これらのノルムは通常、大きく異なることはないが、 $P$  の非零要素の数がメンバー数の2乗に比例するのに対し、 $D$  のそれはメンバー数だけであることから、 $P$  と  $D$  の各要素の大きさに大きな差が生じる。対角成分卓越性は経験的な性質であり全ての  $T^*$  が自動的に持つ数学的な性質ではない。対角成分卓越性を満たさない  $T^*$  は存在するが、そのためには観測空間のすべてのモードで背景誤差が観測誤差より2桁以上大きいという非現実的な条件が必要となるため、実用上、対角成分卓越性を満たさない  $T^*$  はほとんど発現しない。

## 耿 驃・勝俣昌己・谷口京子：混合ロスビー重力波によるスマトラ南西沖の日周期降水への影響

Biao GENG, Masaki KATSUMATA, and Kyoko TANIGUCHI: Modulation of the Diurnal Cycle of Precipitation near the Southwestern Coast of Sumatra by Mixed Rossby-Gravity Waves

スマトラ南西部沿岸域における日周期降水に対する混合ロスビー重力波 (MRGW) の影響について、海大陸研究強化年 (YMC) パイロット集中観測期間中の例を解析した。使用データは、2015年11月24日から12月13日にかけて研究船「みらい」により南緯4.1度、東経101.9度で観測された海上気象、ラジオゾンデ、Cバンド偏波レーダーのデータと全球客観解析データである。日降水量と風の場合は対応しつつ数日の周期で変動していた。風の変動は観測サイトを通過したMRGWに対応しており、MRGWに伴う陸風偏差 (海風偏差) が観測サイトの上空で支配的な時、陸上と海

上における日周期降水活動と降水量が大幅に強化 (抑制) されていた。また、MRGWに伴う陸風偏差の卓越期間中には、大規模な下層収束・上層発散、より強い海風及び冷たい陸風が観測された。一方、MRGWに関連した風況にかかわらず、降水の日周期は類似した位相と伝播パターンを持ち、規則的に発達・衰退する海陸風循環を伴っていた。解析結果は、海と陸のコントラストによる局地収束が日降水サイクルそのものを引き起こす一方、MRGWが大規模な環境場と局地的な海陸風循環の強度を変動させて日周期対流と降水の振幅に大きな影響を及ぼすことを示唆している。