

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「計測技術と高度情報処理の融合による
インテリジェント計測・解析手法の開発と応用」
研究課題「大型大気レーダー国際共同観測データ
と高解像大気大循環モデルの融合による大気階層
構造の解明」

研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年3月

研究代表者：佐藤 薫
(東京大学大学院理学系研究科 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本チームの研究は、観測もモデル実験も困難な未知といっても過言ではない領域だった中間圏を含む全中層大気の階層構造と遠隔結合を解明するため、以下の6つの研究を行った。

1. 全中性大気データ同化スキーム JAGUAR-DAS の開発
2. 高解像 JAGUAR の再現実験による中層大気階層構造変動の解明
3. 中層大気を介した南北両半球結合のメカニズム解明
4. PANSY レーダー観測データと高解像モデルを用いた南極中層大気重力波の研究
5. 大型レーダーによる乱流スペクトル計測理論とこれを適用した南極大気乱流の研究
6. その他

ここで全中層大気とは、対流圏界面(緯度により高度9~17km)から高度100kmまでの成層圏・中間圏・下部熱圏を指す。全中性大気とは対流圏と全中層大気を合わせた地上~高度100kmの大気であり、大気運動によりよく混合された、 O_2 と N_2 の混合比が1:4でほぼ一定の大気全体である。また階層構造とは、通常の気候モデルでは解像できない小スケールの重力波と解像できるロスビー波からなる連続スペクトルを構成する大気波動全てと大循環を示す。

1では、情報 Gr に実績のあるデータ同化手法4次元アンサンブル変換カルマンフィルタと低解像全中性大気大循環モデル JAGUAR を組合せた全中性大気データ同化システム JAGUAR-DAS の開発を行った。実際の作業や同化パラメータの最適化は大気科学 Gr が中心となっており、情報 Gr と議論しつつ進めた。研究期間の前半は JAGUAR-DAS の開発に費やし、後半は完成した JAGUAR-DAS を用いて約17年の長期大気解析データを作成した。

2では、1で作成した大気解析データを初期値として、重力波も表現できる高解像 JAGUAR により現実大気に発生した成層圏突然昇温現象の再現実験を行った(情報 Gr)。解析は大気科学 Gr が行い、成層圏突然昇温を発端として起こった北半球中層大気全体の大規模変動の解明を行った。大気科学 Gr により蓄積されてきた大気力学の知見をふんだんに活用し、次々と起こる重力波とロスビー波の砕波と発生に伴う角運動量の再分配が引き起こす、平均風や気温の変動を解き明かした。また、情報 Gr では南極突然昇温再現のアンサンブル実験により、影響が熱帯の対流活動に及ぶことを示して大きな反響を得た。

3では、既存の全中性大気の長期実験データの解析に基づき南北両半球結合メカニズムの新たなシナリオを提案した(大気科学 Gr)。すなわち、北極成層圏突然昇温のシグナルがいかにかに南極上部中間圏に到達するののかという問題の解明である。先行研究では対流圏起源の重力波が駆動する赤道を超える中間圏大循環の変調によるとされてきたが、本研究により結合は赤道成層圏を介すること、南半球中層大気で発生するロスビー波や重力波の寄与が大きいことが解明された。これは、1, 2を用いた研究発展の方向性を決める重要な成果ともなった。

4では、継続中の PANSY レーダー観測による対流圏・下部成層圏、中間圏の長期連続データを用いて、南極大気重力波の力学特性の解明を行った(大気科学 Gr)。独自考案のグリッドを実装した南半球高緯度域高解像モデルを補助的にを行い、各高度領域での重力波の季節特性を周波数スペクトルの形で明らかにして、どの高度域においても慣性周期(70°S で約13時間)に近い長周期重力波が運動量輸送を担うという、意外で重要な結論を得た。白夜となる極域ならではの中間圏連続観測による広帯域スペクトルは、全緯度帯においても初めての成果である。これらは気候モデルの重力波パラメタリゼーションの改良指針を与える重要な知見である。

5では、計測 Gr が大気レーダーにより受信される乱流4次元スペクトルの厳密理論を構築した。大気科学 Gr では計測 Gr と共同でこの理論を PANSY レーダーに適用することにより、南極では初となる各高度領域の乱流強度の季節変化を解明した。また、2019年南極突然昇温直後は乱流が弱まっており、重力波の鉛直伝播特性の突然昇温による変調で説明されることが分かった。

6では、大気力学理論を展開および駆使し、成層圏大循環における重力波の役割や3次元構造を明らかにした(大気科学 Gr)。また、さきがけ研究者松岡大祐氏と情報 Gr、大気科学 Gr が共同で、機械学習を用いた地形性重力波の統計的ダウンスケーリング研究を行い、世界的

に大いに注目された。2021年10月に松岡氏を主たる共同研究者とする機械学習 Gr を立ち上げ、非地形性重力波の統計的ダウンスケーリングにおける課題を明確化できた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 重力波も含む全中性大気の再現実験による成層圏突然昇温に伴う大気階層構造の大規模変動解明

概要: 全中性大気をカバーする高解像モデル JAGUAR を用いて、大型レーダー観測網国際共同観測で捉えた 2019 年 1 月の北極成層圏突然大昇温イベントの再現実験を行った。これは、本 CREST で開発したデータ同化システム JAGUAR-DAS による全中性大気推定値を初期値に用いることで実現できた。現実の全中性大気重力波を含む高解像再現は世界で初めての試みである。突然昇温前後で中間圏大規模逆転層や、成層圏界面急上昇現象が見られ、いずれもロスビー波と重力波の共働作用によるものであり、中でもロスビー波は中層大気中で発生していたなど、大気階層構造としても大規模な変動であったことが分かった。

2. 南北両半球結合の新しいメカニズムの提唱

概要: 冬半球極域成層圏の気温と夏半球極域上部中間圏の気温に正相関があることが最近の研究で見えられた。そのメカニズムは、対流圏起源の重力波の上向き伝播が変化し、これにより上部中間圏の大循環の強さが変わることによって冬半球から夏半球に及ぶと考えられてきた。本研究では、全大気長期再現実験データを用いて詳しい解析を行ったところ、その結合経路は、上部成層圏であること、また、中層大気中のロスビー波や重力波の発生が大きな役割を果たすことが明らかとなった。

3. 長期大気再解析データを用いた成層圏大循環の特徴と重力波の役割の解明

概要: 公開されている 4 種類の長期大気再解析データを用いて、成層圏・下部中間圏の物質循環に関する研究を行った。これまで定常が仮定できる夏や冬のみが調べられてきたが、本研究では大気力学理論を駆使することで、春と秋の物質循環の特徴や成因について明らかにすることができた。本研究によって、気候予測モデルに用いられる重力波パラメタリゼーションにおける問題点が顕わになり、気候予測の精度改善につながる、具体的な指針を示すことができた。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 4次元アンサンブルカルマンフィルタ法による全中性大気データ同化システムの開発

概要: 中間圏は観測が難しく、気候モデルも届かない未知領域である。最近、中間圏を介した南北両半球の気候結合が存在し、重力波変動によるメカニズムが提案されているが、観測的証拠はなく、かつ、定量的に検証するための長期全球推定値データは存在していない。本研究では 4 次元アンサンブルカルマンフィルタ法を用いたデータ同化システムを開発し、17 年にわたる中間圏全体も含む全大気推定値データの作成に成功した。

2. 機械学習による大気重力波の統計的ダウンスケーリングの研究

概要: 同研究領域の「さきがけ」研究者である松岡大祐氏との共同研究として、機械学習を用いて大規模な気象場から小規模な重力波を含む空間詳細な気象場を統計的に導くダウンスケーリングの研究開発を行った。テスト領域として北海道周辺に注目し、主に大振幅の地形性重力波を含む気象場を得ることに成功した。本手法は微細な空間構造を持つ様々な極端気象現象の予報への応用が期待される。

3. 大気レーダーのスペクトル観測理論とデブロードニングアルゴリズム

概要: 大気レーダーの受信信号と乱流特性の間に成立する厳密な観測方程式を見だし、観測データから大気乱流による風速の分散を正確に導出する手法を構築することに成功した。

また、この観測方程式を解く計算アルゴリズムを構築し、これまで困難であった非対称なビームパターンを有する PANSY レーダーなどにおいても大気乱流の強度を高精度に推定できることを数値シミュレーションで示した。

<代表的な論文>

1. Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki, and S. Watanabe (2020), An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere. *Geoscientific Model Development*, **13**, 3145-3177. doi:10.5194/gmd-13-3145-2020.

概要: 衛星観測も地上観測もスパースな中間圏を含む全中性大気の詳細なデータ同化研究は世界の中でも 2~3 の研究機関で行われているのみである。これらの研究機関の研究で用いられている変分法に対し、計算機資源的に有利な 4 次元アンサンブルカルマンフィルター法を用いたデータ同化システム JAGUAR-DAS の開発を行った。中間圏を含む全中性大気の推定値作成に対し、調節可能な各同化パラメータについて最適値を求めた。

2. Okui, H., K. Sato, D. Koshin, and S. Watanabe (2021), Formation of a mesospheric inversion layer and the subsequent elevated stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in 2018/19. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, in press. <https://doi.org/10.1029/2021JD034681>

概要: 全中性大気をカバーする高解像モデル JAGUAR を用いて、大型レーダー観測網国際共同観測で捉えた 2019 年 1 月の北極成層圏突然大昇温イベントの再現実験を行った。これは、本 CREST で開発したデータ同化システム JAGUAR-DAS による全中性大気推定値を初期値に用いることで実現できた。突然昇温前後で中間圏大規模逆転層や、成層圏界面急上昇現象が見られ、いずれもロスビー波と重力波の共働作用によるものであり、中でもロスビー波は中層大気中で発生していたなど、大気階層構造としても大規模な変動であったことが分かった。

3. Yasui, R., K. Sato and Y. Miyoshi (2021), Roles of Rossby waves, Rossby-gravity waves, and gravity waves generated in the middle atmosphere for interhemispheric coupling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, in press.

概要: 下部成層圏のみ大気再解析データをナジング法により同化させた全大気モデルの長期再現実験データを用いて、北極成層圏突然昇温と南極上部中間圏の結合過程を詳しく解析した。この南北両半球結合は、先行研究で考えられていたような上部中間圏ではなく、上部成層圏を介することが明らかとなった。中でも、南半球低緯度でのロスビー波の発生がより頻繁となることが重要であり、その作用により変化した東西平均場が重力波の上向き伝播を変調する事で結合が起こる事が明らかとなった。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「大気科学」グループ

研究代表者: 佐藤 薫 (東京大学大学院理学系研究科 教授)

研究項目

- ・大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明

② 「計測」グループ (2018年4月～)

主たる共同研究者: 西村 耕司 (京大大学生存圏研究所 准教授)

研究項目

- ・大気レーダーによる乱流4次元スペクトル計測と散乱空間構造可視化技術の開発

③ 「情報」グループ (2018年4月～)

主たる共同研究者: 渡辺 真吾 (海洋研究開発機構地球環境部門 センター長代理)

研究項目

- ・衛星&レーダー観測データを用いた全球中層大気・化学組成データ同化システムの開発

④ 「機械学習」グループ (2021年10月～)

主たる共同研究者: 松岡 大祐 (海洋研究開発機構付加価値情報創生部門 副主任研究員)

研究項目

- ・機械学習を用いた非地形性重力波のダウンスケーリング

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・国際気候研究計画(WCRP, World Climate Research Programme)の成層圏・対流圏の諸過程と気候影響プロジェクト(SPARC, Stratosphere-troposphere Processes and their Role in Climate)のアクティビティの1つである、中間圏・下部熱圏を含む全中層大気の詳細データ同化研究チーム DAWG に所属し(研究代表者佐藤、大気科学グループ RA 小新、情報グループ主たる共同研究者渡辺)、国際比較研究に参加した。現在、世界で全中層大気の詳細データ同化研究を行っているのは米国海軍研究所、米国大気科学研究センターと本研究グループである。他のデータ同化プロダクトと比較して、本研究で開発したデータ同化システムによる大気解析データは、遜色のなく質の高いデータであることが確認された。
- ・同じく WCRP/SPARC の重力波研究チーム(研究代表者佐藤は 2019 年まで共同リーダー)、FISAPS(乱流等小規模構造の研究チーム)(大気科学グループ高麗が参加)、QBOi チーム(赤道成層圏準 2 年周期振動モデル比較研究。情報グループの主たる共同研究者の渡辺が参加)の中で、国際協同研究に参加している。
- ・研究代表者佐藤は、SPARC の SSG(Science Steering Group)メンバーを長年務め、2018 年 10 月には 4 年に 1 回の総会を日本に招致し(アジア初)31 か国 382 名の参加を得た。この会議では本 CREST の研究内容にて、大気科学グループ RA だった澁谷が若手研究者賞(10 人のうちの 1 人。アジア人では唯一)を受賞するなど、国際的ビジビリティを高めることにつながった。研究代表者佐藤は 2022 年 3~4 月に開催の WCRP/SPARC の重力波シンポジウムの共同主催者も務めている。
- ・研究代表者佐藤が PI を務める南北両半球結合に関する国際共同プロジェクト ICSOM(Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modeling)は、ISC(国際学術会議)の科学計画 SCOSTEP(Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics)の公式研究プロジェクトの 1 つとして位置づけられ活動を行っている。
- ・国内的には、日本気象学会が中心となるが、加えて日本地球惑星科学連合の連合大会にて、毎年 SPARC のセッションを開催している。この大会は、気象学分野だけでなく、宇宙科学や

大気化学の研究者も多く参加するため、本チームの成果を広め連携をするのに効果的である。日本気象学会からは、学生優秀発表賞である松野賞を、RA の小新、南原、奥井が、日本地球惑星科学連合の連合大会では、学生優秀発表賞を RA の澁谷、南原がそれぞれ受賞した。

- 関連する国際会議でも積極的に発表した。招待講演の依頼も多数受けた。
- 計測グループは信号処理関連の学会には積極的に参加するだけでなく、大気科学関係の学会でも新たな計測手法の宣伝として積極的に発表を行っている。
- 研究代表者佐藤は、日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会 SPARC 小委員会委員長 (2014～) として国内の中層大気研究者のネットワーク形成・維持の仕事を行っている。