

日本の中層大気研究の現状と展望

河 谷 芳 雄^{*1}・佐 藤 薫^{*2}・堀之内 武^{*3}・江 口 菜 穂^{*4}
 木 下 武 也^{*5}・高 麗 正 史^{*2}・小 林 ちあき^{*6}・坂 崎 貴 俊^{*7}
 原 田 やよい^{*6}・藤 原 正 智^{*3}・渡 辺 真 吾^{*5}・秋 吉 英 治^{*8}
 稲 飯 洋 一^{*9}・奥 井 晴 香^{*10}・黒 田 友 二^{*6}・小 新 大^{*11}
 小 玉 知 央^{*5}・小 寺 邦 彦^{*6}・菅 原 敏^{*12}・田 口 正 和^{*13}
 直 江 寛 明^{*6}・中 村 哲^{*14}・野 口 峻 佑^{*15}・廣 岡 俊 彦^{*16}
 町 田 敏 暢^{*8}・宮 崎 和 幸^{*17}・三 好 勉 信^{*15}・向 川 均^{*7}
 安 井 良 輔^{*6}・山 下 陽 介^{*8}・吉 田 康 平^{*6}・余 田 成 男^{*18}

1. 序章

本記事は、中層大気関連の過去約10年間の新たな研究の展開により進展した理解の概要を記述する。第2章では理論の発展、第3章では諸現象、第4章では観測、第5章ではデータ同化・再解析、第6章では数値モデル、第7章では成層圏の利用、第8章では国際学術団体への貢献、を取り扱い、最後に今後10~30年の将来展望について議論する。

2. 理論の発展

中層大気 of 諸現象 of 力学的理解のため、全球大気

データ等を平均流と波に分け、その相互作用を調べる研究が一般的に行われている。相互作用を記述する主たる理論は、東西平均を用いた変形オイラー平均(TEM)系と呼ばれるもので、南北鉛直断面における東西平均流と波の解析が進められてきた。1980年代以降、TEM系の3次元化が行われ、ロスビー波や重力波、不安定波など解析すべき現象に応じて様々な理論が導き出された(Takaya and Nakamura 2001; Miyahara 2006; Noda 2014等)。

一方で TEM 系には地表面付近の物質輸送や不安定波に伴う残差流を正確に記述できない問題がある。温

*1 (連絡責任著者) 北海道大学大学院地球環境科学研究科。

kawatani@ees.hokudai.ac.jp

*2 東京大学大学院理学系研究科。

*3 北海道大学大学院地球環境科学研究科。

*4 九州大学応用力学研究所。

*5 海洋研究開発機構。

*6 気象庁気象研究所。

*7 京都大学大学院理学研究科。

*8 国立環境研究所。

*9 気象庁札幌管区気象台。

*10 パース大学電子・電気工学専攻(現:東京大学大学院理学研究科)。

*11 アメリカ大気研究センター高高度観測所。

*12 宮城教育大学教育学部。

*13 愛知教育大学教育学部。

*14 気象庁。

*15 九州大学大学院理学研究科。

*16 九州大学国際宇宙惑星環境研究センター。

*17 カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所。

*18 京都大学国際高等教育院。

—2024年8月6日受領—

—2024年10月23日受理—

© 2025 日本気象学会

位面上の質量重みつき平均 (MIM) 系はこの課題を克服した方程式系であり、寒気流出に着目した解析が行われ (Iwasaki *et al.* 2014)、この3次元化も行われた (Kanno and Iwasaki 2018; Kinoshita *et al.* 2016, 2019a)。

このように波と平均流の相互作用を記述する理論は3次元化という点で大きく発展した。しかし研究が進む中、近似的に定常性の仮定が成り立つ場であっても残差鉛直流と非断熱加熱率を含む項がバランスしないことがわかった。これは東西平均の代わりに時間平均を用いたことで、停滞性擾乱に伴う流れがうまく表現できないためである。Kinoshita *et al.* (2019b) や Sato *et al.* (2022) は、3次元 TEM 系と MIM 系の残差鉛直流の違いに着目し、停滞性擾乱に伴う流れを含めた新たな3次元残差流を定義した。新たな残差流は東西平均すると TEM 系の残差流と一致、さらに残差南北流は波活動度フラックスの収束発散と一致する。新たな残差流に加えられた項は、停滞性擾乱に伴う温位面等の物質面のゆがみに伴うものと示されている。停滞性擾乱に伴う流れは MIM 系の残差水平流でも考慮すべきだが、温位座標における支配方程式、渦位の定義が気圧座標と異なることもあり、未導出である。

まとめると、波と平均流の相互作用を記述する理論の3次元化は、ほぼ完了したが、停滞性擾乱の取り扱い、それを含めた解析手法の構築は未完成の状況である。今後は成層圏突然昇温 (SSW) 等に理論を適用した研究を進めることで解析手法の完成に近づくと考えられる。

3. 諸現象

3.1 ブリュウワー・ドブソン循環

ブリュウワー・ドブソン循環 (BDC) は、低緯度域で上昇し中高緯度で下降する構造をもつラグランジュ循環である。BDCは主に赤道上部成層圏で生成されるオゾン地球全体に運んでオゾン層を維持する循環として、気候システムにおいても重要な要素の1つである。この循環は主にロスビー波により駆動されると考えられてきたが、最近の研究により重力波もその構造決定に大きな役割を果たすことが明らかになった。

BDCは輸送と混合の2つのプロセスからなるが、特に前者を近似的に記述できる TEM 系における残差子午面循環を用いた研究が進んだ。対流圏・成層圏物質交換は、BDCの強さ、すなわち、上向き質量フラックスの積分値 (これは定常な場合下向き質量フラックス

と等しい) で記述される。TEM系では、上向きの質量フラックスの積分値は、理論的に各半球での残差循環が上向きから下向きに変わる緯度 (turn-around latitude, TAL) での流線関数の値の差となる。この性質を使って、上向き質量フラックスの季節変化や年々変化、高度依存性などの解明が進められた。また、TALはBDCの構造を記述する重要なパラメータとして注目された。

TEM系における東西平均東西風に対する運動方程式 (これは自転軸周りの角運動量の保存式とも捉えられる) を用いると、流線関数に寄与する波強制を分解して評価することが可能である。この性質を使うと、重力波が表現されない粗い解像度の再解析データでも、重力波など非解像プロセスによるBDCへの寄与を診断的に推定できる。この理論的性質を用いた解析により、BDCの強さは主にプラネタリー波などのロスビー波が決定するものの、その構造 (TALの位置) には重力波の寄与が大きいことがわかった。例えば、重力波はBDCの高緯度への広がりにも寄与し、冬循環の夏半球側への張り出しも重力波によるものとわかった。このような診断解析は、再解析データを作成するうえで用いられる重力波パラメタリゼーションの評価にもつながり、パラメタリゼーションでは表現されない重力波の水平伝播の重要性等が指摘された (Sato and Hirano 2019)。

さらに、3次元残差循環の理論式が導出された (Kinoshita *et al.* 2019b; Sato *et al.* 2022)、これを再解析データに適用したBDCの3次元構造の解明も進められている。例えば、冬極に向かう冬季の深い循環は、経度方向に一様ではなく、東シベリアで強く、アメリカ大陸上空ではむしろ赤道向きであるような特徴的な構造が見えてきた。

気候モデルを用いた温暖化予測研究においては、モデルによらず共通してBDCは将来強まることが示されている (Butchart 2014)。しかし、そのメカニズムの詳細は未解明である。これはパラメタリゼーションの表現の都合で、重力波強制が過剰に与えられたとしても、ロスビー波による補償機構が働くため、BDCを加速させるための正味の波強制が変わらないという性質があるからである。つまり、BDCの加速機構における重力波とロスビー波の寄与の分離ができない。これを解決するには、より現実的な重力波作用を表現する重力波パラメタリゼーションの開発が必要であり、そのためには、上記の東西方向の運動方程式を用いた診

断的研究や、重力波観測研究、重力波解像大気大循環モデル研究を今後さらに進める必要がある。

3.2 波と渦

3.2.1 潮汐波

潮汐波（大気潮汐）は、地球の自転に伴う外部強制の周期的変化によって駆動される強制振動である。太陽の放射加熱（対流圏の水蒸気・成層圏のオゾンによる日射吸収）による熱潮汐と、月の重力による重力潮汐があるが、大気では前者が1桁大きい。近年、中・上層大気を捉えられる衛星観測、再解析データ、全大気モデルなどを用いた研究が進み、その空間構造や時間変動（日々変動・季節変化・年々変動）が明らかになってきた（Sakazaki *et al.* 2018）。これら潮汐波は、オゾンなどの微量成分や地上降水の変動に影響をおよぼすことや、それらに伴う運動量・熱輸送がMLT領域において子午面循環や平均流加速に大きな寄与をもつことが明らかとなった（Sakazaki *et al.* 2017; Yasui *et al.* 2021）。さらに、MLT領域で大振幅をとる潮汐波は小スケールの現象にとつての背景場となるため、潮汐波－重力波の相互作用も重要である（Yasui *et al.* 2018）。長期データの解析により、熱潮汐より1桁小さい重力潮汐の検出も可能となってきており、これまで知られてきた地上気圧だけでなく、地上気温や降水のシグナルも検出された（Kohyama and Wallace 2016）。最近ではSSWに伴う振幅変調など日々変動やそれらが電離層におよぼす影響なども注目を集めており、衛星データや全大気モデルを用いた研究の進展が期待される。

3.2.2 大気モード、ペケリス、赤道波

大気的自由振動（ノーマルモード）は、潮汐波（強制振動）と並んで大気力学の基本問題である。その研究の歴史は長く、理論研究としてはラプラス（Laplace）の潮汐理論にまで遡る。自由振動は、その鉛直構造（等価深度）によってラムモードとペケリスモードの2系統に分類される。但し、ペケリスモードはラムモードに比べて共鳴の度合いが小さいことなどから観測された例はなく、その存在は近年まで疑問視されてきた。

ラムモードは等価深度約10kmのものであり、（エネルギーは地表面付近に捕捉される外部波であるが）振幅は密度成層のため高度と共に指数関数的に増大する。とりわけ振幅が大きいロスビーモードやロスビー重力波モードは衛星観測などによって古くからその存在が同定され、「準2日波」、「5日波」などとして知ら

れてきた（廣岡 1987）。近年、ロスビーモードのみならず、短周期の重力波モードなど多数の自由振動モードが実在することが最新の長時間分解能データセットの解析により明らかとなった（Sakazaki and Hamilton 2020）。一方で、ロスビーモードやロスビー重力波モードが微弱ながら地上降水を伴うことや、上層で大振幅を取るモード（準2日波など）が大気大循環変動の鉛直・水平結合過程も担うこともわかってきた（Yasui *et al.* 2021）。さらにWatanabe *et al.* (2022)は、トンガの火山噴火（2022年1月）に伴う気圧波（大気自由振動と共鳴と解釈できる）の解析から、これまで知られていたラムモードに加え、ペケリスモードが実在することを見出した。

新たな観測事実が数多く得られた一方、励起源やその役割については未だ謎も多い。励起源としては、対流圏の潜熱や傾圧不安定波からのエネルギーカスケードが候補として挙がるほか、準2日波については中層大気中での傾圧／順圧不安定による励起も重要とされる（Yasui *et al.* 2021）。また超高層大気で観測される電離圏の変動周期にロスビーモードの周期と同様のものが観測されているようだが、それらとの関連も明確ではない。また、自由振動と他の大気波動（例えば、停滞波）との干渉により、大気大循環の変動を引き起こすことも指摘されているが（廣岡 1987）、その詳細は不明である。今後も着実な研究が期待される。

3.2.3 赤道波

赤道波は赤道近辺に局在化した緯度構造をもつ大気波動の総称である。実際に熱帯成層圏では、赤道ケルビン波やロスビー重力波といった赤道波が遍く存在し、QBOやSAOの駆動源の一部となっていると考えられている。このうちケルビン波は、出現する高度に対応した階層構造をもっており、下部成層圏で観測される15日程度の周期のものに加え、上部成層圏および下部中間圏では6～10日周期のもの（Fast Kelvin波）、上部中間圏および下部熱圏には2～5日周期のもの（Ultrafast Kelvin波; Chen and Miyahara 2012）が卓越することが明らかになってきた。一方、QBOに伴う西風・東風ジェットの中にそれぞれ、赤道ロスビー波・ケルビン波的な構造をもつ準停滞性擾乱が存在することもわかった（Sakazaki and Hamilton 2022）。

3.2.4 重力波

大気重力波はロスビー波と並ぶ主要な大気波動だが、時空間スケールが小さく研究が困難な現象と位置

づけられてきた。しかし、気象・気候予測モデルには必ずパラメタリゼーションとして組み込まれるように、重力波による運動量の再分配は平均場や大規模変動の力学に不可欠な要素である。この約10年の高解像度観測・モデル研究によって重力波の全球分布や季節変化、力学特性に関する理解が大きく進み、同時に重力波パラメタリゼーションの課題も明確になってきた。また、解像波としての重力波を、ロスビー波と区別なく、3次元的に解析できる理論ツールも必要となり、紙と鉛筆による研究も進められた (Kinoshita and Sato 2013; Sato *et al.* 2022)。

まず衛星の高解像度気温観測によるグローバルな重力波分布の研究が進んだ。これによれば運動量フラックスの大きさは冬季に高緯度、夏季に亜熱帯で極大となる (Geller *et al.* 2013)。温度揺らぎの位相解析によりベクトルとしての運動量フラックスも推定されている。しかし、衛星観測には検出可能な重力波スペクトル帯域が大きく制限される観測フィルター問題があり、背景場により波長が変化する重力波束を追うことは難しい。

重力波の運動量フラックスが直接計測できる大型大気レーダーは最後の空白域であった南極域に PANSY レーダーが設置されたこと (Sato *et al.* 2014) によりスパースだが各緯度域に配置されることとなった。極域の夏は極中間圏雲が存在し白夜で大気の電離が続くため数十日連続の中間圏データが得られる。これにより中間圏における重力波運動量フラックスの広帯域スペクトル特性が解明された (Sato *et al.* 2017)。

2000年頃から重力波パラメタリゼーションを使わない高解像 GCM を用いた重力波研究が行われるようになった。2006年に当時関東地方に拠点をもつ若手・中堅の中層大気研究者によるグループ研究 (Kanto プロジェクト) が始まり、海面水温やオゾンの気候値を与えた長期フリーランによる対流圏から上部中間圏までの重力波の系統的な研究が行われた (Watanabe *et al.* 2008など)。衛星観測と整合する重力波の全球分布や季節特性が得られただけでなく、重力波の間欠性や3次元伝播の特徴、QBO や SSW における役割、重力波とロスビー波の運動量収支における対等な役割が明確になった。これには重力波強制により平均場が不安定となりロスビー波の発生を促すという、それまで考えられていなかったダイナミックな共働プロセスがあることも明らかになった (Sato and Nomoto 2015; Sato *et al.* 2018; Yasui *et al.* 2018)。また、極夜ジェット構

造における重力波の水平伝播の重要性も指摘された (Sato *et al.* 2009, 2012)。これらの研究で得られた重力波の特徴は、気候モデルの低温バイアス等の改善につながる重力波パラメタリゼーションの改良に大きな示唆を与えるものである。

その後、データ同化研究の進展により (Koshin *et al.* 2020, 2022a)、初期値として利用可能な全中性大気 (地上から高度約100km までの電氣的にほぼ中性な領域の大気) の解析値が作成され、実際に発生した SSW も下部熱圏までカバーする重力波解像 GCM で再現できるようになった (Okui *et al.* 2021)。大型大気レーダーを含む中層大気レーダー網や高解像衛星による重力波観測データとの比較により、GCM の重力波再現性が高いことが確認されている。この観測とモデルの組み合わせによって、最近発見された冬季極域成層圏と夏季極域上部中間圏の気温の連動現象の解明 (ICSOM) が国際協働で進められている (Sato *et al.* 2023, 4.3節参照)。中層大気の半分の高度域を占める中間圏は、重力波の役割が特に重要であるが捉える術が限られており、長く研究不可能領域と呼ばれてきた。しかし、上記のように、この約10年で、スパースだが全球をカバーする重力波観測 (衛星、気球、レーダー) 網が整い、データ同化システムの開発により高解像 GCM による現実重力波の再現が可能となり、中間圏を丸ごと含む全中性大気の重力波研究ツールがほぼ出揃った。今後これらの研究ツールを使いこなし、重力波とロスビー波が共働する躍動的な中間圏の本格研究が始まると考えられる。中間圏の質量は対流圏の $1/1000$ に過ぎないが、地球流体力学の性質によりその影響は下方におよぶためその解明は気候予測精度向上の観点でも重要である。

3.2.5 乱流

大気微量成分の再現を行う数値モデルにおける不確実性の原因として、小スケールの乱流混合が注目されている。最近では、南極の PANSY レーダー観測により、対流圏・下部成層圏だけでなく中間圏の乱流エネルギー散逸率 (ε) の推定が行われている (Kohma *et al.* 2019)。さらに、Minamihara *et al.* (2023) では、周波数千干涉イメージング法を用いた2回の10日間連続観測の結果、Kelvin Helmholtz Billow を多数検出し、その空間スケールや寿命などの平均的な特徴を示している。2016年以降、MU レーダー (以下、MUR) と無人航空機観測の同時観測が複数回行われており、レーダー観測から ε 推定を行う関係式を検証し、新たな関

係式が提案されている (Luce *et al.* 2023).

3.3 季節内変動

3.3.1 成層圏突然昇温 (SSW)

季節内の時間スケールにおいて主要な変動である SSW は、BDC の強化に伴い極域成層圏の温度が急激に上昇する現象である。その実態は、冬季に形成される成層圏周極渦の大きな変形・崩壊であり、地球規模の劇的な現象として極域成層圏に限らない広範囲に影響をおよぼしていることが近年明らかになっている。

その基本的な発生・発達メカニズムは、対流圏から成層圏へと上方伝播してきた惑星規模波と平均流との相互作用であることが示され、TEM 方程式系に基づく解析により、現象の詳細な記述がなされてきた。しかしながら、実際の SSW の生起において何が決定的な引き金となるかについては意見が分かれ、特に惑星規模波の増幅過程に対流圏の現象と成層圏以高の状態がそれぞれどの程度効くのかについての評価は、しばしば難しい問題となっている。古くから注目されてきたブロッキング高気圧との統計関係から示唆されるように、全ての対流圏における惑星規模波の増幅イベントが SSW を引き起こすわけではない。このため、成層圏側が波の増幅に好都合な状態であることが想定され、波の共鳴励起、プレコンディショニング、あるいは不安定などといった文脈で説明が試みられてきた (Mukougawa *et al.* 2022)。

成層圏の内部力学に着目するこれらの見方では、惑星規模波の上方伝播・増幅は、成層圏平均流の構造の大きな変化とその後の非線形な相互作用によって規定される。この場合、SSW 生起前後にみられる惑星規模波の顕著な増幅は、極渦崩壊の一端として捉えられるため、もはや現象の原因とはみなすことができない。これら見方の違いは、SSW の予測可能性の文脈 (Noguchi *et al.* 2016) において予測成否の原因の捉え方に違いをもたらすため、強く認識されるべきである。事例間の差異も大きいため最終的な結論は出せていないが、今後も生起要因についてより一層の研究が望まれている。

一方、一口に SSW とは言っても、その時間発展挙動は多様である。上記の発生・発達メカニズムに加え、対流圏への下方影響や発生頻度の外部条件への依存性について、詳細な評価を行うにあたっては、SSW の型分類が適切になされるのが望ましく、その提案も多岐にわたる。伝統的に、崩壊時の極渦形態や強制的卓越波数に基づく分類がなされてきたが、SSW 後の平均

流の回復挙動や惑星規模波の挙動に基づく分類も提案されている (Kodera *et al.* 2016)。しかしながら、そもその SSW の定義自体にも 2010 年代に一石が投げられたように、多くの要求を満たす定義・分類法の提示は依然課題として残っている。

これまでに、国内の気象学研究者からは、基本的なメカニズムの解明から、直近の顕著事例の記載報告 (Liu *et al.* 2022) まで、多大な貢献があった。今後も、SSW に関して根幹をなす研究が進展することが期待される。

3.3.2 赤道中間圏 ISO

MLT 領域では夏至・冬至前後に約 1 か月周期の振動 (ISO) がみられる (津田 2000)。この ISO は GCM でも再現されている。Koshin *et al.* (2022b) は Aura MLS 観測の EOF 解析を行い、中高緯度 MLT 領域や冬半球成層圏にも同期した ISO が見られることを示した。JAWARA 再解析データ (Koshin *et al.* 2020, 2022a) で再現された ISO は MLS と同様の構造で、流星レーダー観測とも整合している。位相コンポジットにおける収支解析の結果、パラメタリゼーションによる重力波ドラッグの寄与が大きいことや同化インクリメントも無視できないことがわかった。これはパラメタリゼーションでも表現されない過程 (重力波の水平伝播、2 次発生、慣性不安定など) の寄与が大きいことを表す。また、南北両半球結合 (IHC) に類似する冬極成層圏と夏極中間圏の気温同期も ISO に連動していたが詳細は未解明である。MLT 領域の ISO と MJO との関係も指摘されている (Isoda *et al.* 2004)。ISO の駆動源および MJO に伴う成層圏重力波活動度、東西風分布、潮汐振幅の変動を調べることで、これらの相互作用が明らかになると考えられる。

3.3.3 MLT・成層圏界面変動

MLT 領域では、重力波・潮汐波・ロスビー波が卓越している。これらの大気波動は、波の発生・砕波・振幅の飽和により、平均場と運動量の受け渡しをしており、大気波動が駆動する子午面循環やそれに伴う断熱過程の加熱冷却は、定量的に推定されてきている。しかし大気波動は、運動エネルギーだけでなく、そのエネルギーの一部を熱として平均場 (気候場) に与えており、近年この大気波動が運ぶ熱が、MLT 領域を大きく昇温させる可能性が示唆されている (Becker 2017)。また、MLT 領域は、宇宙から太陽放射・高エネルギー粒子の降込によって加熱されており、大きなエネルギー流入のある高度域である。

MLT 領域に入ってきたエネルギーは、主に微量化学種である原子状酸素 (O), CO₂, NO, O₃等による大きな放射冷却でバランスしている (López-Puertas and Taylor 2001). これらの微量化学種は、太陽放射、高エネルギー粒子や電離大気との化学反応によって生成・消滅したり、大気循環により輸送されたりすることで、その混合比は大きく変動する。また、上部中間圏以上の高度では、分子間の衝突頻度が大きく減少するため、局所熱力学平衡が成り立たない。そのため、MLT 領域での微量化学種による放射加熱冷却率や、平均場の全球の気温分布の定量的な推定に、対流圏・成層圏で用いられてきた放射過程を適用することが難しい。しかしながら気温分布は温度風バランスを通して、大気波動を要調するため、定量的に推定することは重要である。このような MLT 領域でのエネルギー収支解析は、力学だけでなく、微量化学種の化学反応、放射、電離大気との相互作用など、多数の要因が絡み合うため、数値モデルの研究のみならず、観測 (衛星、ライダー、ロケット、レーダーなど) を増やし、JAWARA などの MLT 領域を含む大気再解析データ (5.3節参照) と組み合わせ、定量化していく必要がある。

下部熱圏領域の大気大循環に関しては、前述の下層大気起源の大気波動の影響に加えて電離大気の影響を考慮する必要が出てくる。下部熱圏では高度と共に電離大気密度が増加するため、中性大気と電離大気との衝突による運動量・エネルギー交換の影響が無視できなくなる。さらに太陽紫外線量や磁気圏から極域への高エネルギー粒子降り込み量の影響も、激しく時間変化するため、太陽活動による影響を正確に見積もる必要がある。そのため、下部熱圏領域を扱う数値モデルでは、これらの物理過程を考慮に入れた、対流圏から熱圏までを含む全大気モデル (Whole Atmosphere Model) による研究が必須である (Miyoshi and Fujiwara 2003)。下部熱圏領域のグローバルな観測は非常に難しく、SABER や ICON などによる温度・中性風観測などがあるものの、観測可能な領域・物理量は限られている。そのため、下部熱圏における大気波動のふるまいについては、未だに不明な点が多く残されている。今後、下部熱圏領域の研究推進のためには、全大気モデルの高精度化と共に、衛星観測の充実や衛星観測をモデルに組み込んだデータ同化などの進展が必要である。

3.4 QBO と SAO

QBO とは成層圏の東風と西風が約28か月の周期で交代している現象で、様々な時空間スケールをもつ大気波動によって駆動されている。QBO は熱帯～極域、対流圏～下部熱圏の広範囲の力学・化学過程に影響をおよぼしている。近年、QBO 東風位相時に MJO がより活発であることや、QBO 西風位相時に英国での洪水頻度が高いことが指摘されるなど、季節予報における QBO の重要性も認識され始め、現業季節予報モデルで QBO を表現させる試みも行われている。また CMIP モデル群においても、QBO を表現する気候モデル数は、CMIP3ではゼロ、CMIP5では5種類、CMIP6では10種類以上と、この10～20年で格段に増えている。

2000年代以降、高解像度衛星観測により重力波の全球分布がわかるようになり、衛星観測と高解像度気候モデルを組み合わせた QBO 研究が進んだ (河谷 2012)。2010年以降、地球温暖化を視野に入れた本格的な QBO 気候モデル研究が行われ始め、温暖化に伴い下部成層圏 QBO の振幅が弱まる可能性が指摘された (Kawatani *et al.* 2011, 2012; Watanabe and Kawatani 2012)。QBO 振幅の弱化は1953年以降の長期ゾンデ観測データや、当時 QBO を再現していた4種類の CMIP5モデルでも確認され (Kawatani and Hamilton 2013)、現在では QBO を表現可能な既存の気候モデルの全てで QBO 振幅の弱化傾向を示している (Butchart *et al.* 2020)。一方で、その周期変化は不確実性が大きく、統一した見解が得られていない。

QBO の再現性は再解析間でもばらつきが大きいことが示されている。地点・衛星観測データ数の増加により、1980～1990年代に比べ2000年代以降のばらつきは減少しているが、どの年代でもラジオゾンデ観測データの少ない、太平洋上の下部成層圏で相違の極大が見られる。これは、東西風のデータを直接観測できる地点の束縛が大きいことを示唆する (Kawatani *et al.* 2016)。

2015/2016年には、西風位相が下降中の高度22km付近に突如東風が形成され西風が上方伝播し始めるという、観測史上初の QBO 崩壊現象が起こった。QBO 崩壊は2019/2020年にも起こり、温暖化の影響や予測可能性についての研究も進められている (Watanabe *et al.* 2018)。

2015年から QBO 気候モデル比較国際プロジェクト (QBOi) が開始され、世界中の QBO 研究者を集めた国際共同研究が活発に行われている (Butchart *et al.*

2018). QBOi第1期(2015~2021年)では, ①気候モデルのQBO再現性評価(Bushell *et al.* 2020), ②QBOの将来変化(Richter *et al.* 2020), ③QBOを駆動する波(Holt *et al.* 2020), ④QBOテレコネクション(Anstey *et al.* 2021), ⑤QBO季節予測可能性(Stockdale *et al.* 2020), の5本のコア論文のほか, 複数の関連論文が出版された。現在は第2期に入っており, Kawatani *et al.* (2019)に基づくQBO-ENSO実験やQBOナッジング実験などが進められている。その他QBOオゾン実験なども計画中で, 今後ますます国際共同研究を通じてQBO研究が発展していくと考えられる。

新たな知見の創出や観測史上初めての現象など, QBO研究はこの10年間に大きく発展し, 2022年にはQBOに関する新知見をまとめたレビュー論文が20年ぶりに出版された(Anstey *et al.* 2022)。

半年振動(SAO)は, 成層圏と中間圏で見られる半年周期の振動で, 成層圏ではSSAO, 中間圏ではMSAOと呼ばれ, 位相は両者で逆である。SAO観測には気象ロケットが有用だが, 国際的な定常観測が終了した1990年代以降のロケット観測は熱帯地域のごくわずかな観測所で行われているのみであり, 頻度も少ない。最近では衛星による高精度な温度データから東西風を推定したSAO研究も行われている(Smith *et al.* 2017)。近年ではSAOを気象予報モデルで適切に再現することがSSWの予測に重要という指摘もされた(Gray *et al.* 2022)。しかしながら気候モデル・再解析共に観測データの束縛が小さく, SAOの再現性には大きなばらつきがあり(Smith *et al.* 2019; Kawatani *et al.* 2020), 今後の研究の発展が望まれる。

3.5 対流圏界面, 対流圏一成層圏物質交換(STE)

3.5.1 対流圏界面の定義と熱帯域でのSTE

一般的に, 対流圏と成層圏の境は気温減率による対流圏界面(lapse rate tropopause)で定義される(WMO 1957)。これは, 地上気温と低緯度対流圏の対流活動や中高緯度の総観規模・惑星規模の波活動に伴うeddy fluxによって決まる気温減率と, 成層圏の主にオゾン, 水蒸気による放射によって決まる気温減率の結果として, 気温の鉛直分布に表れる。さらにBDCによる非断熱効果も考慮する必要がある。また断熱, 非粘性を仮定した場合, 渦位(PV)による対流圏界面の定義も存在し, 力学的圏界面と称される。特に2000年代前半に熱帯対流圏界面のパラダイムシフトが起き, 対流圏的性質から成層圏的性質に徐々に遷移す

る対流圏界面遷移層(TTL/ExTL)の議論がなされた(Fueglistaler *et al.* 2009)。

STEは空気塊もしくは物質フラックスが圏界面を跨ぐことで定義され, 第一義的にはBDCにより低緯度で上昇(対流圏から成層圏へ), 高緯度で下降(成層圏から対流圏へ)する構造をもつ。より細かい時空間スケールでは, 主に中緯度ジェット付近に生じる対流圏界面褶曲(TF)によって, 中緯度と低緯度域の物質面である温位面を跨ぐ空気の交換・混合が行われている。前者が季節から数年スケールで, 後者は季節内スケールで起きていることから, 低緯度の対流圏から成層圏に流入した大気の寿命(AOA)は数年から数か月と多岐に分布する(高高度/緯度ほど年齢が高い)。また熱帯域の対流圏界面の気温によって, 氷雲の形成および成層圏に流入する水蒸気量が調節される。さらにオゾン破壊に寄与する短寿命種(ハロゲン類等)や火山噴火等によるエアロゾルは成層圏における放射収支にも影響を与えるため, これらの詳細な観測が求められている。さらに最近では, 温室効果ガス(二酸化炭素)による中層大気の寒冷化に伴う力学場への影響が示唆され, TTLにおけるSTE研究が注目されている。

3.5.2 極域のSTE

中高緯度の対流圏一成層圏の遷移領域のSTEについて, 極前線ジェット・亜熱帯ジェット付近での混合過程に注目した研究が行われている。例えば, TFに伴い成層圏起源ベリリウム-77を多く含む空気が, 地上付近で観測された例も報告されている(Itoh and Narazaki 2016)。Miyazaki *et al.* (2016)では, MIM系に基づき, 渦混合・平均子午面循環の再解析間比較を実施し, 古い再解析データのほうが, 小スケールの波による混合が大きいことを示している。これは, 旧世代の同化手法では, 同化インクリメントに伴い人工的な小スケールの構造が多く生じ, 渦混合を過大評価するためと考えられている。

3.5.3 成層圏化学過程, 数値モデルの観点でのSTE

対流圏から成層圏への物質輸送は低緯度域で卓越し, 成層圏から対流圏への輸送は中高緯度域で卓越する。対流圏から成層圏への輸送には, 赤道域の対流に伴う循環のほか, モンスーン等に伴う循環も関係し, 成層圏の大気微量成分の分布に影響をおよぼす。成層圏への水蒸気の流入のシミュレーションには, こうした循環のほかに対流圏界面付近での脱水プロセスも大

大きく影響するため、圏界面付近の鉛直分解能を細かくしたモデルが必要となってくる。

切離低気圧や深いトラフなどを伴うような発達した中緯度の低気圧は、対流圏界面高度を低下させるため、成層圏の乾燥した空気や高濃度オゾンの対流圏への流入を引き起こすことがある (Stohl *et al.* 2003). しばしば、700hPa の高度 (地上3000m 付近) まで高濃度の成層圏空気が流入できるような深い STE が起こり、地表オゾン濃度にも影響をおよぼす (Lin *et al.* 2012). こうしたプロセスには、従来の低分解能のモデルでは再現できない現象が含まれるため、14~56km の中高分解能のモデルが必要であることが、複数の分解能のモデルを比較した結果から示唆されている (Yamashita *et al.* 2017).

また将来、成層圏オゾン回復と BDC の強化が複合した場合に、成層圏から対流圏へのオゾン流入量の増加がいくつかのモデルで予測されている (Hegglin and Shepherd 2009).

3.5.4 航空機等現場観測や輸送モデルの観点での STE

航空機やラジオゾンデによる TTL/ExTL における大気微量成分の観測は、成層圏/対流圏間の大気輸送や混合過程の理解に貢献してきた (Pan *et al.* 2004). 近年の観測では、化学的寿命が大きく異なる化学種を同時観測することで、STE 過程やそれに関連する化学過程がより詳細に議論されている。さらにこのような観測結果は、渦位や後方流跡線など独立な解析手法と組み合わせることで、相互に信頼性を担保しながら STE に関する議論を進めることを可能とする (Inai *et al.* 2019).

成層圏への水蒸気輸送で特に重要と考えられる北半球冬季の熱帯西部太平洋域では、気球観測 (SOWER/Pacific) や航空機観測 (ATTREX/CONTRAST/CAST) が実施されてきた。最近では、夏季アジアモンスーンに伴う STE について関心が高まっており、インドネパール域や東アジア域における航空機観測 (StratoClim や ACCLIP) が実施されてきた。加えて、民間航空便を活用した継続的な観測 (CONTRAIL/CARIBIC) は、STE の季節変動や経年変動の理解 (Sawa *et al.* 2015) や、化学輸送モデルとの組み合わせによる化学過程も含めた STE の定量的な議論 (Bisht *et al.* 2021) に貢献している。

キャンペーン観測は計画から実施まで数年から10年単位の時間を要する。CONTRAIL など継続的な観測

データの活用や、過去のキャンペーンデータを解像度や精度が向上したより最近の客観解析データやモデルを用いて再度解析することも、今後10年の観測的研究の方向性として重要であると考えられる。

3.6 遠隔結合

3.6.1 対流圏—中層大気結合

1950年代以来、ゾンデ、ロケット、人工衛星による新観測事実の集積と大気波動力学理論の開拓により、中層大気科学が生まれ飛躍的に発展してきた。当時より対流圏—中層大気結合の3大テーマは、対流圏で励起された惑星規模ロスビー波の上方伝播と平均流との相互作用に伴う冬季周極渦崩壊現象すなわち「成層圏突然昇温現象 SSW」、熱帯域大気波動の上方伝播と相互作用による赤道域成層圏平均帯状流の「準2年周期変動 QBO」、および小規模大気重力波の砕波・散逸による南北両半球を跨いだ「中間圏界面弱風層」であった (Andrews *et al.* 1987).

1990年代になり成層圏が対流圏に影響をおよぼするという新視点が生まれたが、中高緯度域での大気波動に駆動される平均子午面循環のダウンワード・コントロール (Haynes *et al.* 1991) の理論が先駆けとなり、STE の認識が一変した (Holton *et al.* 1995). 従来、圏界面の畳み込みなど総観規模・小規模現象として捉えられていた物質交換過程を、惑星規模の非断熱子午面循環の枠組みで捉えることとなり、水蒸気やオゾンの輸送・交換過程の認識が革新した (今は先駆的研究者名を冠した BDC として知られている) (STE に関する日米セミナー気象集誌特集号 (Yoden *et al.* 2002) を参考).

成層圏が中高緯度の対流圏に与える力学的な影響については過去20年余りにわたり精力的に研究され、その結果、日周変動から長期的な気候変化までの幅広い時間スケールで同様の力学メカニズムが働いていることがわかってきた (Kidston *et al.* 2015). 渦位保存則と力学量インバージョンに基づいて基本的力学過程の理解が深まり、今日では中・長期の気象予報や気候変動予測の技術向上にも寄与している。他方、成層圏が熱帯対流圏に与える影響の科学的理解は未だ限定的である。そこでは湿潤対流とその多階層にわたる組織化と多重時間変動が基本的な力学過程であり、中高緯度で得た知見は役立たない。熱帯域での成層圏—対流圏結合には、成層圏から対流圏への力学的・熱力学的効果の伝達と、対流圏応答を増幅させる対流圏内フィードバックの両方が必要である。熱帯域での湿潤対流と

その組織化、多階層連結におよぼす成層圏影響を系統的にとらえて理解する研究が進展している (Haynes *et al.* 2021)。

3.6.2 緯度を跨ぐ遠隔作用

本節では、成層圏現象により緯度や対流圏と成層圏の圏を跨いだ遠隔影響 STC について記述する。

短・中期的な STC として、2000年以前では、主にオゾンホールや SSW による中・高緯度の対流圏気象場への影響の議論が活発であった (3.3.1節参照)。2000年以降、成層圏の水蒸気増加の原因究明のための STE の議論を背景に、TTL (Fueglistaler *et al.* 2009) の概念が誕生すると同時に、熱帯域での STC の議論が盛んになった。SSW は数日程度の短期現象のため因果関係を得やすいが、TTL 内の諸パラメータの高時間、鉛直分解能の観測が難しく、未だ TTL 内の STC を明確に解釈できていない。一方で内部変動の大きい積雲対流活動から SSW の影響を取り出すのが困難であったが、近年では数値モデル実験によってサンプル数を稼ぐことで SSW による STC の影響を取り出す研究が進められている (Noguchi *et al.* 2020; Yoshida and Mizuta 2021)。

長期的現象による STC として、QBO による高緯度並びに対流圏への影響が挙げられる。QBO の東西風位相差により、高緯度から低緯度に向かう惑星波の伝播特性が変化し、成層圏極渦およびその下方の中高緯度地表大気に影響をおよぼす。一方で QBO の東 (西) 風位相時における赤道域下部成層圏の上昇 (下降) 流偏差が、MJO を含む熱帯域の積雲対流活動におよぼす影響は未だ明らかではない。さらに観測で見られる QBO と MJO の STC 関係は、数値モデルでは MJO の STC シグナルが既に与えられている可能性のある観測初期値を用いた季節予測実験以外にロバストな再現例がなく、数値モデルに QBO と MJO の STC を起こすための過程が欠けている可能性が指摘されている。最近では、対流圏の背景場の違い (季節や経年変化) に着目した研究もなされている。

上述の SSW および QBO の STC はそれぞれの発生緯度帯の直下の対流圏気象場に影響を与えるだけでなく、BDC の強弱、惑星波の子午面伝播を介して、遠方の対流圏内の気象場を変化させるという共通点がある。BDC の予測、すなわち、対流圏中緯度から成層圏へ伝播する惑星波や赤道域での重力波の予測が BDC 変調を介した STC ならびに STE 解明の要と言える。そのため、上述した TTL 内の観測の充実を介した

TTL/ExTL の精細な力学場の再現、さらに惑星波や重力波といった波の再現が可能な全球規模の数値モデルの開発が急がれる。

3.6.3 極域雪氷圏

北極域は北極温暖化増幅として知られるように、気候変動の影響を最も受けやすい地域である (Meredith *et al.* 2019)。極域の雪氷圏は近年の温暖化進行に伴い大きく変容しており、その変化がもたらす影響について北極のみではなく中・低緯度への遠隔影響が議論されている。

冬季成層圏への影響については、2000年頃からシベリアの積雪変動、2000年代後半頃からは急激に減少した北極海の海水変動との関連が研究されてきた。北極海の海水減少と、そこからの水蒸気供給に伴う秋のシベリアの積雪の増加が、海陸の温度コントラストを強めることで気候学的惑星波が強化され、成層圏へ伝播しやすい状況が生じる一連のプロセスが提示されている (Cohen *et al.* 2014)。

北極海の海水減少を生じる直接的な要因の1つとして、春から夏の北極海への水蒸気流入に伴う下向き長波放射の増加が指摘されている (Kapsch *et al.* 2013)。冬季の SSW とそれに続く持続的な負の AO/NAM パターンに伴うヨーロッパ・シベリアの多雪がその後の北極海への水蒸気流入へ関与している可能性もある。負の AO/NAM パターンは中緯度から北極への熱輸送を強化する側面ももつ。

このような熱水循環のフィードバック過程は、陸域や海洋のメモリ効果によって増幅されることが示唆されている (Nakamura *et al.* 2019)。対流圏と比べて長い時間スケールをもつ冬季成層圏の変動は、循環サイクルの季節を繋ぐ役割の一端を担う重要な過程である。一方で、外部強制としての雪氷圏の影響の正確な評価には課題が残る。例えば将来の海水変化に対する成層圏対流圏循環の応答は、QBO 位相といった背景場や、モデルの渦強制フィードバックの強さに対する依存性が示されており、異なる条件下での感度の評価は重要な課題である。

3.6.4 南北両半球結合

最近の研究により、SSW が発生すると、その影響が夏半球 MLT に高温偏差として現れることが報告されており、南北両半球結合 (IHC) と呼ばれる。IHC のメカニズムは、SSW に伴い、重力波強制 (平均風加速ももたらすため重力波ドラッグとは呼ばないことにする) が駆動・維持している上部中間圏の子午面循環の

構造や強さが変わり、夏半球 MLT の低温を維持する上昇流が弱まるためと考えられている。Körnich and Becker (2010) は、SSW により冬半球上部中間圏の重力波強制が弱体化し、赤道中間圏の高温・夏半球中間圏東西風の変化を通して、夏半球上部中間圏の重力波強制も弱体化し、上部中間圏の子午面循環がグローバルに弱体化するというシナリオを提唱した。一方で Yasui *et al.* (2021) は、SSW 時に中層大気ハドレー循環の強化によって赤道成層圏に低温偏差・夏半球中間圏に東風偏差が現れ、対流圏起源の重力波だけでなく 2 次重力波による強制変化が起こり、また、順圧・傾圧不安定の強化による準 2 日波の増大とこれによる強制の変化も加わって、夏半球 MLT が高温偏差になることを明らかにした。Smith *et al.* (2020) では、SSW に伴って運動量バランスを満たすように生じる過渡的な循環が夏半球中間圏に高温偏差をもたらすとしている。さらに、準 2 日波強制の増大については赤道成層圏界面の慣性不安定との関連も指摘する研究もある。

上記のように IHC をもたらす過程が複数提案されているが、それぞれの過程の働く場所やタイミング、季節性を明らかにするためには重力波を陽に扱う研究が必要である。重力波パラメタリゼーションでは、中層大気において重要性が認識されるようになった重力波の水平伝播や、重力波の 2 次発生が表現できない問題がある。ところが、重力波の研究には高分解能観測、高解像モデルが必要とされる上、MLT 領域は観測・モデル共に研究手段が限られることから、その解明は極めて難しい現実があった。このような背景から、2016年に SCOSTEP の公式プロジェクトの 1 つとして国際共同研究 Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM) が立ち上がった (Sato *et al.* 2023)。ICSOM は下記の 3 つの要素からなる。

- ① 中間圏観測可能なレーダーの観測網を構築し、国際協同観測の実施により、北極 SSW や極渦強化現象 (VI) 前後の重力波変化を捉える。
- ② 全中性大気データ同化システムを開発し長期再解析データを作成する。
- ③ ② の長期再解析データを初期値として全中性大気重力波解像 GCM による再現を行う。

この 3 つの要素の組み合わせにより、現実の冬極成層圏から夏極上部中間圏に至る結合過程の重力波を陽に扱う力学解明が目標とされた。① の国際協同観測は、北半球冬の 2015/16 年から 2021/22 年までの合計

7 回実施され、5 回の SSW と 2 つの VI 現象が捉えられた。② については大気再解析データ JAWARA (5.3 節) を参照のこと。③ では 7 回全ての ICSOM 共同観測に対する再現実験が、JAWARA を初期値とし重力波パラメタリゼーションを使用しない T639L340 (鉛直グリッド間隔 300m) の JAGUAR を用いて行われた (Okui *et al.* 2021)。これらの研究により、Yasui *et al.* (2021) で示された準 2 日波の役割に加え、南極での昇温につなぐ最後の過程として極域重力波の中間圏での波強制の重要性が示唆された。

南半球起点の IHC の解析事例は少ない。Koshin and Sato (2024) では 18 年間の JAWARA データに Yasui *et al.* (2021) の手法を用いて南半球冬季成層圏昇温の統計解析を行い、北半球起点事例と似たメカニズムが働くことを示した。一方、南半球の昇温極大は中緯度にあること、8~9 月には応答が弱いなど北半球起点事例とは異なる特徴も指摘された。IHC に伴う潮汐の変動と電離圏との相互作用や、子午面構造が似ている赤道 MLT 領域の ISO との関係など、IHC の視点からのさらなる研究が必要である。

3.6.5 季節内および季節予報における成層圏の役割

成層圏・対流圏結合の理解の進展と、数値予報モデルにおける成層圏表現の改善は、特に寒候期の季節内・季節 (subseasonal-to-seasonal) 予報に新たな可能性をもたらしつつある (Scaife *et al.* 2022)。

中高緯度成層圏循環の季節内予報に関する研究の多くが SSW を対象としている。予報モデルにおける成層圏循環の再現性が改善されるに従い、SSW の予測可能性に関する研究は 2000 年代中頃から急速に進展した (Mukougawa and Hirooka 2004; Tripathi *et al.* 2015)。最新の季節内予報モデルでは、実際に発現した SSW 事例の予測可能期間、すなわちリードタイムは、平均すると約 2 週間程度である一方、事例間で大きく異なる (Baldwin *et al.* 2021)。今後、SSW の予測精度が、対流圏における惑星波強制と成層圏循環の再現性にどの程度依存するのか定量的に明らかにする研究が必要である。

SSW に代表される成層圏極渦変動は、対流圏循環にも下方影響し、成層圏極渦変動のピークの数週間後に一部地域における地表面付近の気象要素の予報スキルが向上することが示されている (Domeisen *et al.* 2020)。最近では、予報モデル中の成層圏の状態を、実際の SSW が発現した状態と気候学的状態に対して

別々にナッジングして予報実験を行い、SSW が対流圏循環や地表面気象要素の季節内予報におよぼす影響を調査するプロジェクト (Hitchcock *et al.* 2022) が進行中である。

一方、成層圏極渦変動には ENSO や QBO などの外部要因も影響をおよぼすことが知られている。また、最近の予報モデルでは ENSO や QBO の季節予報スキルが高いため、もし予報モデルが外部要因の影響を正しく表現するのであれば、成層圏極渦変動やその下方影響の季節予報可能性も十分期待できる (Scaife *et al.* 2022)。冬季北大西洋振動の高い季節予報スキルは、このような下方影響の反映かもしれない (Scaife *et al.* 2016)。ENSO や QBO 以外にも、インド洋ダイポールモード現象、北極海の海水面積や、ユーラシア大陸の積雪なども極渦に影響する可能性がある (Scaife *et al.* 2022)。ただし、予報モデルにおいて、それらの要因が極渦におよぼす影響の再現性が低いため、下方影響の季節予報スキルが悪化している可能性がある (Scaife and Smith 2018)。

3.7 成層圏の気候変動

成層圏の気候 (主に温度場、循環場、オゾン等の組成) に数年以上の変動を与える外部強制過程には、QBO、ENSO などの大気海洋相互作用現象、太陽11年周期変動、火山噴火、温室効果ガスやオゾン層破壊物質の長期変化などがある。成層圏の長期変化を観測データから分析する際には、それぞれの指標の時系列データを説明変数とした線形重回帰計算を行う手法がしばしば採られる。この手法には、どの指標を説明変数に考慮すれば十分かという問題がある。また、各指標の独立性を仮定することになるため、実在する指標間の相関関係 (例えば QBO と ENSO) を分析できない問題もある。一方、気候モデルや化学気候モデルを用いた数値実験ではそういった相互作用の分析も可能となるが、そもそも観測の再現にまだ課題がある。以下では冒頭にあげた各過程について、研究・理解の現状と将来展望について述べる。

QBO は熱帯域に2次的な子午面循環を伴っており、さらに中高緯度地域にまで遠隔影響を与えている (3.4, 3.6節参照)。全球大気再解析データは QBO の空間構造を把握する上で不可欠なデータセットであるが、ラジオゾンデによる風観測データが QBO の“再現”に非常に重要であることがわかっている (SPARC 2022, Chapter 9)。前衛星時代 (1978年以前) の再解析データにおける QBO には未だ課題があ

るので、将来にわたり熱帯のゾンデ観測が複数地点で十分な高度 (10~5 hPa) まで継続されるよう関連各国に常に働きかけ続ける必要がある。また、近年 QBO が大きく乱れる現象が複数回生じており (3.4節参照)、これらが成層圏の長期変動の分析に与える影響についても評価する必要がある。

ENSO に対する成層圏気温の応答や下部成層圏オゾンの応答についての過去の研究では Nino3.4 海域の海面水温偏差が ENSO 指標に用いられているが、実際には ENSO には複数の異なるタイプが存在している。また複数年にわたるラニーニャ現象の発生が最近の25年間に集中していることが知られている。こういった ENSO の複雑な性格やその長期変化に対して成層圏・中間圏はどう応答してきているか、ENSO に対するオゾン層の応答とそのメカニズムはどうなっているか。これらの問題はまだ十分には解明されていないと思われる。

太陽活動の11年周期変動に伴い、太陽定数 (Total Solar Irradiance, TSI) は0.1%程度、成層圏における紫外線量は6%程度、地上における銀河宇宙線量は10%程度変動する。太陽活動と気候の関係についての最近の研究の進展や課題については、Baldwin *et al.* (2019) や Kuroda *et al.* (2022) にまとめられている。

太陽活動と成層圏の関係で最も顕著なものは、紫外線量の変動に伴う上部成層圏のオゾン変動であり、気候モデルでよく再現されている。一方で、北極成層圏が高温となる事例は太陽活動極大期かつ QBO 西風位相の年の晩冬に多く見られるが、SSW の発生頻度にも関連して、気候モデルによる再現が不十分であるという課題がある。また、TSI の非常に小さい変動がどのような増幅メカニズムにより地表気温に影響を与えるか、という議論において、海面水温・蒸発・雲形成過程を通して ENSO やウォーカー循環に影響がおよぶというボトムアップメカニズムと、紫外線と高エネルギー粒子降り込みの変動を通して成層圏気温・オゾン濃度と惑星波活動が変わり対流圏へ影響するというトップダウンメカニズムとが提唱されている。

これらのうち、後者については太陽活動と北大西洋振動の関係の再現性について、最近の気候モデルでかなりよく再現されるようになってきている。一方、全球大気再解析データを用いて太陽活動に伴う大気変動を解析する際、予報モデルに太陽活動の周期変動を与えている再解析とそうでない再解析とで特に成層圏界面付近の応答の出方が異なる可能性がある。将来のす

すべての再解析において、太陽活動の周期変動を取り入れる必要がある。なお、太陽からの突発的な高エネルギー粒子（陽子や電子）の地球大気への降り込みに対する中層大気の気温やオゾン層への影響については、近年、化学気候モデルを用いた多アンサンブルメンバー実験を行い大気の内変動の状態で分類することにより明確に把握することができるようになってきた。

気候に顕著な影響を与える火山噴火は、熱帯に位置する火山で成層圏に直接噴煙が到達するような大規模なものである (Baldwin *et al.* 2019)。噴火にともない生成する硫酸エアロゾルにより、成層圏は太陽近赤外線と上向き地球放射の吸収量増加により昇温する一方、地表気温は太陽放射量の減少により低温化する。1991年のフィリピンのピナトゥポ山の噴火の事例を実効性の証拠として、成層圏エアロゾル注入が、温暖化を一時的に軽減し二酸化炭素削減のための時間を稼ぐためのジオエンジニアリング・気候介入の一手法として提案され、気候モデル実験による評価研究が進められてきている (第7章参照)。2022年1月にはフンガ・トンガ=フンガ・ハアパイ海底火山が噴火した。噴火直後には大気中に様々な大気波動が観測された (Watanabe *et al.* 2022)。この噴火では成層圏の硫酸エアロゾル増大量は地表気温を顕著に変化させうるほどの量ではなかったものの、成層圏に多量の水蒸気が注入されたという点で観測史上前代未聞の事象となった。この多量の水蒸気により成層圏の寒冷化が観測されている。

成層圏は少なくとも1980年代前半より顕著な長期寒冷化傾向を示している。これは二酸化炭素の増大とオゾン層破壊に伴う放射収支の変化によるものである。化学気候モデルによる解析によると、1979~1997年の期間における下部成層圏の気温低下はオゾン量の低下によるところが大きい。今後のオゾン層回復とともに、二酸化炭素増加の寄与がより顕著になっていくと思われる。成層圏の子午面循環は、温暖化の進行に伴い加速することが多くの気候モデルにより予測されているが、現在利用可能な各種観測データには種々の限界があるため、循環強化の観測的証拠を得ることは未だに容易ではない。

オゾン層破壊物質はモントリオール議定書とその改正により、おおむね順調に排出削減されてきている。これにより特に上部成層圏ではオゾン層の回復傾向が見え始めている。また、オゾン層破壊物質は強力な温室効果物質でもあるため、モントリオール議定書が温

暖化軽減の重要な一翼を担ってきたことも判明している。オゾン層破壊物質のうち、近年代替フロンとして利用が増加し大気中の濃度が年々増加している HFC に関しては、化学的にオゾン層を破壊することはないが温暖化を引き起こして中層大気へも影響をおよぼすことがわかっている。HFC が今後規制されずに大気中へ放出され続けた場合、低緯度の上部対流圏/下部成層圏の気温上昇、BDC の強化、ハドレー循環の弱まりが起こることが2次元や3次元モデルによって示されている。さらに、2010年代には東アジアの国から予期せぬフロン排出が観測されたり、2010年代後半以降には北半球高緯度地域やオーストラリアの森林火災起源のエアロゾルが成層圏内に頻繁に侵入する事象が発生していたり、2022年にはトンガ噴火による予期せぬ成層圏水蒸気の急増が起こったりと、オゾン層に大きな影響を与える新しい事象が生じている。また、前述したように気候介入の一案として成層圏エアロゾル注入が提案されたりもしている。したがって、オゾン層とそれに関わる物質の継続的な監視や研究が必要である。

成層圏の水蒸気は、成層圏・対流圏の気温や循環に影響をおよぼす重要な因子である。現在の3次元モデルの多くは下部成層圏で水蒸気量の過多となっており、このモデルバイアスの程度が気温や循環におよぼす影響は、温暖化による変化と同程度の可能性がある。従って輸送スキームの改良などによりこのバイアスが是正されることが望ましい。

中層大気における力学場・熱力学場と組成濃度・分布は、輸送過程や放射過程を通して互いに強く相互作用している。様々な時間スケールにおける中層大気の組成の変化と力学場・熱力学場の変化を、両者の結合した問題として考えていくことが重要である。また、化学気候モデルを用いてあえて極端な状態（例えばオゾン層なし）を作り出し、大気の場合がどのようになるか分析することも、現実大気の様々な変化を理解する上で役立つかもしれないし、また、上記のような結合問題を理解する上で有益であると思われる。

3.8 極成層圏雲・極中間圏雲

極域下部成層圏で冬季に極端に気温が低下すると、極成層圏雲 (PSC) が形成される。PSC 表面での不均一反応により塩素原子が活性化され、成層圏オゾンの破壊反応が促進される。Kohma and Sato (2013) では、対流圏界面付近の雲と PSC の同時出現機構を明らかにした。Nakajima *et al.* (2016) では、CALIPSO 衛

星搭載雲ライダーで観測されたPSC組成、および、その雲粒上での塩素活性化反応について調べ、硝酸三水和物を含むPSC生成時に必ずしも氷粒子は存在せず、さらに、PSCに遭遇した空気内において急激に塩素の活性化が進むことを示した。また、Nakajima *et al.* (2020) は、南極昭和基地での観測と複数の衛星観測を用いて、極渦内でのPSC上の不均一反応と、NO_xを多く含む空気の輸送の両方の重要性を示した。

夏季の高緯度の中間圏界面付近は地球大気で最も低温となっており、氷粒子を主成分とするPMCが出現する。2015年に初めて北海道でもPMCが観測された(Suzuki *et al.* 2016)。近年では、Aeronomy of Ice Mesosphere衛星に基づき、その全球分布・季節性のみならず、PMCの空間構造に注目した研究が行われている。

4. 観測

4.1 微量成分観測

日本では大気球を用いて成層圏の大気を採取するクライオサンプリング実験がおよそ40年前から継続されており、主に温室効果気体やその関連成分、オゾン破壊物質(ODS)などの長寿命種の気体成分の観測が行われている。この大型気球実験は、国内の研究者とJAXA宇宙科学研究所大気球実験グループの共同によって継続されている。気球実験は国内だけではなく、北極、南極、赤道などでも実施されている(Sugawara *et al.* 2018)。1つのサンプルで分析される成分が極めて多いため、得られる成果も多岐にわたる。特に、CO₂やSF₆などの安定な成分は、成層圏の大気年齢(AOA)の推定に利用されており、地球温暖化とBDCの盛衰に関する議論において重要な役割をはたしている。メタンや一酸化二窒素などの同位体比・アイソトポマーなどを計測することで、濃度だけでは知り得ない複数の消滅過程の定量的な分離などに威力を発揮する。成層圏大気重力分離の発見も気球実験の大きな成果であり(Ishidoya *et al.* 2013)、大気年齢とともにBDCの強弱の指標になることが期待されている。これらの研究には、大気試料の質が極めて高く、変質がないことに加え、超高精度分析が不可欠であり、日本のグループのみが観測可能である成分が多い。日本の成層圏大気サンプリングは世界的にみても貴重な実験であり、今後も技術的な改善を加えながら、継承していく必要がある。

4.2 PANSY, EAR, MUR

大型大気レーダーは、日本が国際的に優位な技術をもつ測器であり、鉛直風を含む風の3次元ベクトルの鉛直プロファイルの高い時間・高度分解能で観測できる。1984年に「MUR」が滋賀県信楽町で稼働を開始して以来、大気重力波や対流等の小規模現象と大規模現象との関連等に関する研究が行われてきた(Tsuda 2014)。「赤道大気レーダー(EAR)」は2001年に実現し、対流圏・電離圏の研究に積極的に利用されてきた(Fukao 2006)。加えて現在、赤道成層圏・中間圏も観測可能な「赤道MUレーダー(EMU)」構想が進んでいる。赤道域では、大規模現象でも温度風平衡が成り立たないため、風の観測は特に重要である。南極は、最後の大型大気レーダー観測空白域と位置づけられ、これを埋める計画としてIUGG等複数の国際学術組織の提言が出され、必要電力の大幅削減など数々の技術的革新により「PANSYレーダー」が実現した(Sato *et al.* 2014)。2012年より南極対流圏・成層圏の、2015年からは中間圏も含む定常観測が実施されている。夏に白夜となることを生かした、中間圏の50日以上連続観測を達成するなど極域ならではの研究観測もなされている。極域固有の雲(PSC・PMC)、宇宙から降り込む高エネルギー粒子の中性大気への影響等の解明が進展しつつある。

PANSYレーダーが実現されたことで、スパースだがグローバルな大型大気レーダー網が完成した。この大型大気レーダー網を生かし、中層大気を介した南北両半球結合の鍵となる重力波の全球変動を捉える国際協同観測ICSOMが日本主導で行われている(Sato *et al.* 2023)。ICSOMは、データ同化、高解像大気大循環モデルと組み合わせた国際共同研究プロジェクトとして位置づけられている(3.2.4節、3.6.4節参照)。

4.3 今後の観測計画

ICSOMを嚆矢とする大型大気レーダー観測網による国際共同研究は、全中性大気長期再解析データ(JAWARA)や、これを初期値に用いた高解像大気大循環モデルによる現実重力波の再現実験などと組み合わせ、特に未解明部分の多い中間圏・下部熱圏を含む全中性大気の様々な側面からの定量的研究が大きく進展すると考えられる。

PANSYレーダーは3期にわたり南極重点研究観測6か年計画の1つとして位置づけられている。南極観測事業の特殊性から、2015年10月から開始された全群観測は太陽活動11年周期1周期分を含む2027年9月ま

での12年の時限付きで実施される。2023年度からは共同利用枠が設けられている。

EARはMURやPANSYレーダーに比べて送信出力が1/10であり機能面でも劣るため、これらと同等の赤道MUレーダー(EMU)の新設が計画されている。EMUを主要設備の1つとする「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」(Tsuda *et al.* 2016)は、日本学術会議(2023)の「マスタープラン重点大型研究計画」に選定され、「未来の学術振興構想(2023年版)」にも掲載されている。

スーパープレッシャー気球は等密度面を長期間(長ければ100日以上)浮遊できる気球である。大気科学分野では主に重力波観測に利用され、重力波の間欠性や運動量輸送に関する多くの成果を挙げ、現在もCNES(フランス国立宇宙研究センター)を中心とした国際共同チームにより熱帯でのスーパープレッシャー気球観測(Stratéo-2)が実施されている。日本はこれまで気球の開発で後れを取っていたが、独自のスーパープレッシャー気球の開発に成功し、南極での重力波観測を開始している(Loadwave)(Tomikawa *et al.* 2023)。PANSYレーダーとの協同による重力波研究の推進が期待される。

一般のラジオゾンデ観測の到達高度は、下部成層圏に限られ、ロケットゾンデを用いた定常観測が終了して以降、成層圏上層の風速・風向の直接観測は行われていない。そこで、より高高度に到達するラジオゾンデの観測方法を確立すべく大型ゴム気球を用いた観測が試験的に行われている(Kinoshita *et al.* 2022)。この研究では地上から高度40kmを超える鉛直分解能の高い風速・風向・温度データの取得に成功し、重力波活動の解析が進められている。成層圏上層の観測を充実させるため、今後、国内外の複数地点において定常観測化するのが重要である。

中層大気研究において衛星も主要な観測手段の1つである。オゾン層の長期トレンド、STE過程の詳細な機構、大規模火山噴火や海洋起源のハロゲン化学種の成層圏化学・放射・力学場への影響を長期的な視点で観測する必要がある。また重力波を再現可能な高鉛直分解能な全中性大気モデルの開発が急がれる中、その検証のために特に成層圏内の風速の情報が重要と考えられる。今後10年間、米国のSTRATOS計画、欧州のAltiusが打ち上げを予定しており、オゾンを中心とした成層圏内の微量成分観測をリードすると思われる。国内では中層大気の大気・温度場と微量成分場の日周期

成分を含めて高精度で明らかにすることを目的とした超伝導サブミリ波リム放射サウンダSMILES-2や、高鉛直分解能データにより中層大気内の圏間の相互作用や化学過程を定量的に明らかにする高層大気FTS衛星観測ミッションが計画されている。

5. データ同化・再解析

5.1 成層圏再解析比較プロジェクトS-RIP

全球大気再解析は、過去数十年分のデータ同化計算を行って作成される気候プロダクトであり、数値予報モデルによる予測値と観測値を用いて、最適な大気場を推定するデータ同化システムを用いて作成されている。作成されたデータは、気象や気候のプロセス研究、気候モデルの検証などに使用されてきている。再解析データは、中層大気研究においてもきわめて重要な、観測と数値予報モデルのハイブリッドデータである。

1990年代に登場したNCEP-NCAR R1とNCEP-DOE R2に続き、2000年代にはERA-40とERA-Interim、JRA-25/JCDASとJRA-55、MERRA、CFSRなどが登場してきた。いずれも様々な(多くの場合共通の)大気観測データを、各再解析実施機関の数値予報・同化モデルに同化したグリッドデータである。全球大気場のグリッドデータが容易に利用可能になったことは、大気科学において大きなインパクトであった。一方で、同じ診断量について、異なる再解析データが少しずつ異なる結果を示すことはすぐに明らかになった。

再解析間の違いを系統的に調査・報告するため、SPARCでは2011年から準備を始め、2013年よりSPARC Reanalysis Intercomparison Project(S-RIP)を開始した。S-RIPでは、再解析実施機関とも密な協力関係を築きつつ、100名近くの参加者により様々な領域・診断量についての分析がなされ、多くの査読付き論文が出版され、最終的に2022年1月に最終報告書を完成・出版した(SPARC 2022)。その重要なメッセージは以下の7点である：(1)より最近の再解析データの方が以前のものよりもよい。(2)多くの診断量においてNCEP-NCAR R1とNCEP-DOE R2は適切でなく基本的にはもう使用すべきではない。(3)衛星データを使用しない再解析(JRA-55Cや1978年以前の再解析)も多くの診断量において有用であることが分かったが注意深い検証が常に必要である。(4)再解析データを用いた研究では可能な限り複数の再解析データを用いるべきである。(5)すべての再解析で、

時系列に非一様性が見られる。再解析データにみられるトレンドや気候状態のシフトについては注意深い検証と正当化が必要である。(6) 鉛直方向に変化の大きい診断量に関わる研究ではモデルレベルデータを使用すべきである。(7) 一様化された観測データとその継続が再解析の実施にも評価にも非常に大事である。

S-RIP 最終報告書出版後、S-RIP のフェーズ 2 (A-RIP) の計画の議論が始まっている。フェーズ 1 では ERA5 については一部の章にて一部の診断量についてしか評価できていない。一方、2022年12月には日本気象庁の新たな全球大気再解析データ JRA-3Q が公開され始めた。また、複数の化学(組成)再解析データ(5.4節参照)が複数利用可能になってきており比較・評価をする機は熟している。さらに、気候変動に関わるような対流圏内の諸過程、上部中間圏の評価についても A-RIP で新たに取り組む計画となっている。

5.2 JRA-55, JRA-3Q

日本の全球大気長期再解析として、JRA-25が2000年代に実施され、その後第2次長期再解析 JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015; Harada *et al.* 2016)、最近ではさらに後継の第3次長期再解析 JRA-3Q (Kosaka *et al.* 2024) が実施されてきた。これらは気象庁で行う気候系監視や異常気象分析業務、季節予報業務等の基盤データとなっている。

JRA-55は2009年12月時点の現業数値予報システム(以下、現業システム)に基づいたデータ同化システムを用いて実施されたが、JRA-3Q では2018年12月時点の現業システムに基づいたシステムが用いられた。この間の気象庁スーパーコンピュータシステムの更新に伴う資源増強や技術開発により、データ同化で利用する全球モデルの上端は0.1hPa から0.01hPa に引き上げられ、中間圏までが含まれるようになった。モデル上端の引き上げは鉛直層数の増強と共に行われたが、その目的は、予報モデルの上部境界での大気波動の反射を防ぐための緩和層をより上層へ配置し、成層圏・対流圏における人為的な処理の影響を軽減することや、モデル上端が低いため利用できなかった上層に感度をもつチャンネルの衛星観測データを上端の引き上げにより有効利用することだった。いずれも大気全域の大気波動の鉛直構造や鉛直伝播表現の向上への寄与と、それらを介した数値予報の精度向上が期待され更新された。また、モデルの各種物理過程の改良も多数行われ、中層大気に関わる変更としては、長波放射スキームの改良、非地形性重力波抵抗スキームの導入

が行われたほか、強制データとしてのオゾン分布データの更新等が行われた。

高性能なデータ同化システムで一貫して作成する再解析ではあるが、データ同化に利用する観測システムは時代によって変遷し、再解析プロダクトにはその影響が反映され、見かけの変化が生じる場合がある。成層圏気温に関して、JRA-55では、1950年代末から1960年代にかけて上部成層圏の気温が上昇する不自然な変動が見られた。これはこの期間の観測が非常に少なかったこととデータ同化に用いた予報モデルの成層圏の低温バイアスにより生じていると考えられている。成層圏水蒸気に関しても JRA-55には70年代と2003年以降に不自然な増加がみられたが、JRA-55の予報モデルの対流圏中層の乾燥バイアスと背景誤差共分散による比湿インクリメントの鉛直伝播が関連していたと考えられている。このような不自然な変動は長期間にわたる再解析を行う際の課題の1つである。

JRA-3Q では、予報モデルの成層圏の低温バイアスが低減し、対流圏中層の乾燥バイアスも減少したため、上記の不自然な変動は解消された。一方、成層圏の全球平均気温偏差の長周期変動の振幅は衛星観測に基づく成層圏気温プロダクトと比べて小さい。これは、JRA-3Q の予報モデルにおいて火山性エアロゾル、太陽定数、成層圏水蒸気量の年々変動が考慮されていないことに加えて、観測が豊富な時代に適するように作成された同化システムの背景誤差共分散を観測の少ない過去に適用したことにより、観測データがモデルの誤差を十分に修正できていないことが原因であると考えられる。成層圏気温や水蒸気の変動の再現性向上には、予報モデルの高度化とともに、観測システムの変遷に応じた背景誤差共分散の最適化が必要と考えられる。

大気長期再解析は気候データセットとしての役割を担うため今後「地球システムモデル」を意識した開発が進められていくであろう。中層大気の先進的な研究成果が現業システムや全球長期再解析に活用され、それが中層大気研究のさらなる発展に寄与することが期待される。

5.3 JAGUAR-DAS, JAWARA

現業機関で作成されている全球再解析データは、近年では中部中間圏までの研究活用を対象としているが、さらに上の MLT 領域も含む中層大気全体をカバーするデータ同化システムの開発がいくつかの研究機関で行われている。日本においても、国際共同研究

プロジェクト ICSOM (3.6.4節参照) の一環として、研究者ベースで、地上から下部熱圏までをカバーする GCM である JAGUAR の中解像度 (T42) 版に LETKF を組み合わせたデータ同化システム JAGUAR-DAS が開発された (Koshin *et al.* 2020, 2022a). JAGUAR-DAS では、観測データとして従来型の地上観測、高層観測等を含むデータセット NCEP PREPBUFR に加えて、観測衛星 Aura MLS, TIMED SABER の気温, DMSP SSMIS の輝度温度が用いられている。

対流圏・成層圏に比べて MLT 領域のモデルは予報精度が十分でないことが知られているため、データ同化システムにおける各種パラメータを対流圏や成層圏下部を対象とする従来のシステムよりも観測値の比重を上げるよう調整し、潮汐の振幅が現実的となるよう数値拡散の形状や強さに工夫がなされている。また、同化インクリメントを少しずつ加える IAU の適用により、不自然な擾乱発生を軽減している。得られた解析値は独立なレーダー観測で検証されており、中層大気データ同化プロダクトの国際比較研究により、他と遜色のない品質であることが確認されている (McCormack *et al.* 2021)。

JAGUAR-DAS を用いて、Aura MLS の観測開始 (2004年) 以降20年以上の長期再解析データ JAWARA (Koshin *et al.* 2025) が作成されており、現在もなおアップデート中である。JAWARA は、現在のところ MLT 領域を含む唯一の長期大気再解析データと位置づけられる。MLT 領域と上下に位置する電離圏や上部対流圏～成層圏との結合、MLT 領域を介した南北両半球結合研究など幅広い研究に活用可能である。すでに、MLT 領域の ISO (3.3.2節参照) や南半球冬季の IHC (3.6.4節参照)、中層大気のノーマルモード (Sekido *et al.* 2024) 等の研究に用いられている。また、JAWARA は MLT 領域を含む高解像度 GCM による再現実験の初期値としても用いられ、重力波を含む中層大気階層構造の視点からのエネルギー・運動量収支の定量的な解析が行われている (3.2.4節参照)。

5.4 大気微量成分データ同化

大気微量成分の分布変動とその要因を調べるために、化学輸送モデルなどの数値モデルが利用されているが、依然として不確実性が存在する。各種観測からは濃度分布に関する情報が蓄積されているが、精度・時空間サンプリング・物質などに制約がある。データ同化では、地上データや衛星観測と、モデルなどによ

る先験情報を、それらの誤差や特徴を考慮した上で統合し、もっとも確からしい場と時空間分布を推定する。大気微量成分のデータ同化には大きく分けて2種類ある。1つ目は、数値天気予報 (NWP) システムの一部として、天気予報および気象解析を改善することを目的としており、2つ目は、詳細な化学プロセスを含む化学モデルを用いて、化学天気予報や大気微量成分解析の改善を対象としている。

中層大気の大気微量成分を対象としたデータ同化では、紫外線の前報と解析を改善すること、中層大気の放射バランスを理解すること、さらにはオゾンホール回復に着目したモニタリングを目的としている。対流圏の大気微量成分を対象としたシステムでは、オゾンやエアロゾルなどの短寿命気候汚染物質を対象にして、大気汚染診断や予報の初期値を改善することを目的としている。最新のシステムの多くでは、EnKF と 4D-VAR が利用されている。

大気微量成分のデータ同化は、気象データ同化と同様に初期値を改善することに加えて、不完全な反応係数の修正、BDCの過大評価などに起因する輸送によるエラーの改善、観測網の最適化などに利用されている。本格的な衛星観測が開始された2000年代前半以降の20年余りを対象とした再解析データセットも作成されており、第1世代が2010年代中盤に実現し、近年は第2世代のデータが開発されており (Inness *et al.* 2019; Miyazaki *et al.* 2020)、幅広い研究で利用されている。MLS による衛星観測データを統合することで、中層大気の大気微量成分の4次元構造に特化した再解析も実施されている (Errera *et al.* 2019)。様々な大気微量成分のデータセットと大気力学・気象場のデータ同化と併せて利用することで、中層大気の化学・放射・力学過程のさらなる理解に役立つことが期待できる。

6. 数値モデル

中層大気研究を助けるツールとして、様々な種類・階層の数値モデルが提案・開発され、活用されてきた。1970年代～1990年代には、1次元や2次元の数値モデルが中層大気の力学現象や大気組成と放射過程の研究に盛んに用いられた (松野・島崎 1981)。1次元数値モデルはベケリス自由振動モードの等価深度の推定、2次元数値モデルは組織化された対流システムと QBO の相互作用の研究など、最近も活躍している。

21世紀に入って以降、計算機システムが飛躍的な発

展を遂げた昨今では、中層大気の研究用途だけではなく現業予報においても3次元GCMに中層大気が含まれることは当然になっており、海洋GCMや海水モデルを結合した全球気候モデルは季節予報から気候変動予測まで幅広い用途で用いられている。大気化学過程を含んだ化学気候モデルは、1990年代までは成層圏オゾンを取り巻く窒素酸化物系、水酸化物系、ハロゲン系を中心としていたものが、21世紀以降にはエアロゾルを含む様々な対流圏の大気汚染物質を含むように拡張され、新しい観測衛星プロジェクトの立案ならびに観測キャンペーンに欠かせない存在になったほか、観測データを同化した大気組成再解析プロダクトの作成にも用いられている。

こうした時代の流れのなかで、中層大気大循環の形成・維持に重要な役割を果たす重力波の多くを陽に表現できる高解像度GCMと、1990年代後半から21世紀初頭にかけて開発された非地形性・重力波パラメタリゼーション(GWP)の両者が果たした役割は特筆すべきである(Geller *et al.* 2013)。それ以前に用いられていたGCMでは、サブ・グリッド・スケールの非地形性重力波の影響を表現し得なかったため、冬季の極夜ジェットが観測に比べて強く変形しにくく、最終昇温(冬から春にかけて生じる極渦の崩壊)の時期が遅くなるとともに、極域成層圏が低温となる「cold pole バイアス」が大きな問題となっていた。関連して、化学気候モデルを用いて南極オゾンホール再現を行う際には、オゾンホールが深まり過ぎ、かつ春から夏にかけて持続し過ぎるバイアスに悩まされた。また、重力波が駆動するQBOや、中間圏界面付近の弱風層を再現できなかったため、GCMを用いてそれらを研究する際には、観測データをナッジングするか、レイリー摩擦で無理やり東西風を弱めるといった工夫を必要としていた。

海外では、GCMの水平解像度を上げることによってGCMが陽に解像する重力波に水平波長が短い成分が新たに加わる結果、それらがもたらす波と平均流との相互作用によって極向きの循環が強化され、極渦周辺での下降流と断熱加熱が強化されて、cold pole バイアスが改善されることが報告されていた。日本の研究グループは、GCMの中に現れる重力波の性質や役割にフォーカスした研究を展開するうえで、重力波が伝播する途上での性質の変化や平均流との相互作用を正しく表現するために、鉛直解像度の向上を重視した。Sato *et al.* (1999) は、重力波解像GCMを用いた水感

星実験の結果から、大気中で慣性周期に近い周期をもった重力波が卓越することや、慣性周期の長い低緯度域から比較的長周期の重力波が中高緯度域に伝播することなどを見出した。Takahashi (1996) は、鉛直解像度500mのGCMを用い、かつ、モデルが表現し得る最小スケールに近い波のスペクトルをリッチにする調整を施すことにより、初めてQBO状の振動を再現することに成功した。これらの歴史的な背景のもとで、Watanabe *et al.* (2008) は、水平解像度約60km、鉛直解像度300mの重力波解像GCMを開発し、GWPに頼らずに、モデル中で陽に表現された重力波によって生成されたQBO状振動と中間圏界面弱風層を含み、cold pole バイアスが解消されたシミュレーションに初めて成功した。Kanto プロジェクト (3.2.4節参照) では、このモデルを用いて、QBOを駆動する赤道波や重力波の性質や3次元分布について詳細な分析が行われたほか、重力波が極夜ジェットの強風軸に向かうように斜め上方に伝播する性質をもち、それが中間圏界面弱風層の子午面構造を形成するうえで重要な意味をもつこと、それがGWPの改善に重要な示唆を与えることが指摘された(渡辺・河谷 2018)。

一方、低解像度のGCMでは表現できない、サブ・グリッド・スケールの重力波の効果を近似的に表現するGWPの開発と普及により、低コストでQBOや中間圏界面弱風層や現実的な強さの極夜ジェットが再現できるようになったことも重要な進展である。GWPは、地形性重力波を対象とするものと、対流や前線や流れの場の不安定などから生まれる非地形性重力波を対象とするものと大別される。前者は亜熱帯ジェットと極夜ジェットとの間の弱風層の再現に重要なことが知られており1990年代に普及が進んだのに対して、後者は重力波の鉛直スペクトルの高度変化に着目した手法が1990年代後半に提案されたことを契機に普及が始まった。日本では気象庁気象研究所の化学気候モデルが非地形性GWPをいち早く導入してQBOの再現に成功するとともに、QBOによるオゾン濃度の変調が紫外線加熱の変調を通じてQBO周期を長くしようとする作用があることを報告した(Shibata and Deushi 2005)。このようにGCMの発展に寄与してきた一方で、既存のGWPにはいくつかの重要な欠点があることが指摘されており、その改良に関する研究も進められている。GWPを含むGCMのパラメタリゼーションについては、機械学習を含むアプローチから様々な新しい手法が提案されており、近い将来に目覚ましい進

展があるものと期待される。

国際プロジェクトへの貢献について述べる。CMIPでは、回を重ねるごとに中層大気を含むモデルの割合が増加し、モデル内部でQBOを再現するモデルも増えている。日本からは気象庁気象研究所およびMIROCグループのモデルが継続的に参加しており、SPARCの研究者を中心に、成層圏の極夜ジェット、SSW、BDC、赤道波といった、中層大気現象の再現性評価や、地球温暖化に伴う変化の推定などが行われてきた。CMIP6では、TEM系の運動量収支の診断に必要な帯状平均場や渦フラックス等の変数の提供を呼びかけ、多数のモデルを通じた評価を試みた。現状においては、いずれのモデルも様々なバイアスを抱えているため、例えば「極夜ジェットが地球温暖化に伴い強まるのか？弱まるのか？」といった基本的な問いに対して、モデル間でコンセンサスが得られていない。

SPARC主導のCCMValは、化学気候モデルのモデル相互比較とプロセス・ベースの評価を目的として行われた。日本から東京大学気候システム研究センター(現大気海洋研究所)・国立環境研究所と気象庁気象研究所のモデルが参加し、WMO/UNEPオゾン層破壊の科学アセスメントにも大きく貢献した。CCMValおよびCCMVal2では、それぞれ世界の10および15程度の化学気候モデルが参加して、ODSと温室効果ガス濃度の将来シナリオに沿ったオゾン層の将来予測実験が行われた。中層大気のような様々なプロセスを経てオゾン量がODSだけでなく温室効果ガスによっても大きく影響されること、それによって、将来、オゾン層破壊物質の規制によって南北両半球の低中高緯度でそれぞれ回復時期の異なるオゾン層の将来変化が予想される。後継のプロジェクトCCMIでは、対流圏化学の研究コミュニティも加わり、成層圏オゾン・対流圏オゾンを軸に他の大気微量成分も含めた気候変動との関連の研究を強化している。化学気候モデルの高解像度化や中層大気と対流圏の物理・化学プロセスの精緻化をさらに進め、微量成分濃度変化と海洋変動も含めた気候変動研究に発展していくものと思われる。

中間圏界面よりも高いモデル上端をもつモデルも開発されてきた。5.3節で紹介されたJAGUAR(Watanabe and Miyahara 2009)は、地表から高度110km付近までの諸現象を扱う。中層大気は対流圏のみならず超高層大気(熱圏・電離圏)の循環と深く結びついていることが明らかとなった。そのため、対流圏から熱圏・電離圏上端までを含む大気圏—電離圏結合モデル

GAIAが開発され(Jin *et al.* 2011)、対流圏・中層大気起源の大気波動が、熱圏循環、さらには電離圏のプラズマ密度におよぼす影響に関する研究が活発に行われてきた(Miyoshi *et al.* 2018)。一方、磁気圏からのエネルギー降り込みや太陽からの極端紫外線/紫外線により熱圏で生成される一酸化窒素などの大気微量成分は、中層大気に輸送され、オゾン濃度に影響する可能性が示されており、超高層大気の中層大気ひいては対流圏の気候におよぼす影響の定量的な見積りに関する研究が進行中である。さらに、電離圏プラズマは、磁気圏プラズマと深く結びついているので、熱圏・電離圏循環のより正確な再現のためには磁気圏との相互作用過程を含むモデルが必要となっており、大気圏—電離圏—磁気圏結合モデルの開発が期待されている。

全球非静力学モデルを用いた中層大気シミュレーションの試みとしては、重力波解像に近い水平解像度14km、鉛直解像度500mでモデル上端を80kmにしたNICAMを1か月積分した例がある。最近では、水平解像度2.5km前後の全球非静力学モデルを用いた「ストーム解像」DYAMONDシミュレーションで表れた3次元風速のスペクトルを、熱帯上部対流圏の航空機観測と比較した例も報告されている。現在のところ、水平風速に関しては観測に近いスペクトル分布が得られるものの、鉛直風については風速が大きく不足している。近い将来に、個々の対流や大きなスケールの3次元乱流を陽に表現できる100m解像度の全球非静力学モデルによる全球LESが実現できれば、重力波や乱流を含んだ中層大気の階層構造の全容解明への大きな一助になるものと期待される。

全球3次元モデルで陽に取り扱えない小さなスケールの現象に目を向けると、領域非静力学気象モデルを用いた挑戦的な研究が行われている。Horinouchi(2004)は、対流から生成する同心円あるいは円弧状の重力波が上部中間圏・下部熱圏にまで伝播して砕波する際に、周囲の酸素原子等に作用して生じる大気光の変調パターンを再現した。Kohma *et al.* (2024)は、昭和基地周辺で発生した地形性重力波の伝播・散逸と乱流生成の様子を詳細にシミュレーションし、大型大気レーダーで観測された大気重力波の振幅などの波のパラメータを再現し、さらにレーダーで強い乱流層が観測された高度領域において小スケールの渦構造が現れることを示した。重力波の砕波に伴う乱流生成は、第7章で紹介する成層圏の利用においても重要なプロ

セスであり、今後も新しい観測とともに発展が期待されるモデリング分野である。

7. 成層圏の利用

7.1 成層圏プラットフォーム

成層圏の商業的利用に関しては、わが国では大型の飛行船を用いて通信や画像モニタリング等のサービス提供を目指したミレニアムプロジェクト「成層圏プラットフォーム」(総務省 2006)以降は目立った動きがなかったが、2024年より、海洋状況把握に必要な機動性や長期航行性能の獲得に欠かせない太陽電池パネル開発、気象・海況の観測・予測に役立てるためのセンシング技術の中核とした研究開発が経済安全保障重要技術育成プログラムのもとで始まろうとしている(ただし、日本独自の機体開発は行わず海外製の機体を使うことが想定されている)。

海外では、2010年代から2020年代初頭にかけて、発展途上国や僻地を対象として米国 Loon 社による成層圏高高度気球を用いた4G通信の提供が行われた。近年、日本の通信事業者を主体として高高度固定翼無人航空機を新たなプラットフォームとする現代版の成層圏プラットフォーム(HAPS)が準備されており、改めて成層圏の風環境に注目が集まりつつある(D'Oliveira *et al.* 2016)。ここで「高高度」が指すのは高度約16~22kmの下部成層圏のことであり、ジェット旅客機の巡航高度である9~12kmに比べて高いため、便宜上そう呼ばれている。この高度領域は、中緯度帯では、冬季には亜熱帯ジェットと極夜ジェットの間の鞍部に、夏季には亜熱帯ジェットの上端付近に相当し、他の高度に比べて水平風速が小さい下部成層圏弱風層に相当する。

地上のある地域に対して通信や画像モニタリングといったサービスを安定的に提供するためには、成層圏プラットフォームを無風の領域に配置して定点の周囲を周回飛行させるのが理想的であるが、実際には上記の弱風層は重力波の碎波による乱流生成の舞台でもあり、機体の破損による落下事故や、揺動によるサービス品質の低下等への対策が必要になる。また、SSWにともなって、平時に比べて強い風が吹くことによって、成層圏プラットフォームがはるか風下に流されてしまう点にも対策を必要とする。これらの課題については佐藤ほか(1993)が30年ほど前に指摘しているが、下部成層圏弱風層の重力波、乱流強度、強風の実態把握や予測に関しては今なお課題が多い。成層圏プ

ラットフォーム事業との連携を通じて、新しい観測研究や数値シミュレーション研究が進展することが期待される。

7.2 気候介入と成層圏ジオエンジニアリング

従来の温室効果ガス排出削減政策(緩和策)や、気候変動への適応策とならんで、地球温暖化による危機的状況を軽減・回避するための方策として、人為的な気候介入(Climature Intervention(気候改変, 気候工学, 地球工学, ジオエンジニアリング等の呼び名をもつが、近年はこう呼ばれる例が増えている))の必要性に関する議論が高まっている。21世紀以降、英米のアカデミーや米国連邦議会や国連環境計画等による公的レポートが相次いで公開され、米国気象学会や米国地球物理学連合も研究ならびにコミュニティの積極的な関与を推奨する立場を表明している。

気候介入に使われる技術として、CCSやDACに代表されるCDR技術や、成層圏エアロゾル注入(SAI)に代表されるSRM技術に注目が集まっている(杉山2021)。本稿では、SRMはSAIを含むSRM技術全般を指し、SAIは成層圏エアロゾル注入を指すものとして、使い分けを行う。

SAIは、大規模な火山噴火が引き起こす成層圏硫酸エアロゾルの増加と、それが太陽放射の一部を宇宙へ反射することで生じる地表面の冷却という自然現象を模倣するアイデアである。こうした方法を用いた気候介入の是非については、様々な立場の個人や集団が賛否両論を唱えている。極端な意見をもつ人もいるが、現在のところ「気候モデルや地球システムモデルを用いたシミュレーション研究を中心に、ガバナンスや倫理的な観点も含めて、慎重かつバランスの取れた議論を通じて便益やリスクに関する理解を深めよう」というスタンスで関わっている比較的穏健な人々が主流派を形成している。

SAIを含むSRMシミュレーション研究の国際枠組みであるGeoMIPは2010年に始まった。様々なシナリオが提案され、主にCMIP5~CMIP6世代の気候モデルや地球システムモデルが参加して、様々な角度から評価が行われてきた。現在(2024年10月時点)までに120編超の関連論文が出版され、IPCCの第5次、第6次の評価報告書に引用されたのははじめ、2022年版のWMO/UNEPオゾン層破壊の科学アセスメントにSAIの章が新設されるなど、大きな影響力をもつに至っている。以下では、Visoni *et al.* (2023)のレビュー等を参考に、これまでに得られた知見や課題を

概観する。

- SRM を大規模実施すれば急速（数か月～数年のうち）に地上気温を低下させ得る。海氷、氷床、永久凍土の保全や、地球温暖化に伴う極端現象の発生を減らす効果が期待できる。ただし、SRM に頼るにしても、ティッピング・エレメント等、既に不可逆的な変化が生じ始めた現象を停止させることはできないため、手遅れにならない段階で実施する必要がある。
 - SRM は地球温暖化の影響を軽減し得るが、世界各地の影響を完全にキャンセルすることはできない。例えば、温室効果ガス濃度が上昇し続けるのに対して、SRM を用いて全球平均気温を一定に保とうとすると、低緯度の降水量が減り続けるトレンドが現れる。また、地上気温や降水量の変化には様々な要因によって非一様なパターンが生じる。こうした副作用は、水資源が減る地域などを作り出し、新たな格差や紛争を生むリスクになり得る（ただし、地球温暖化による危険な変化も、非一様に現れるので、SRM がリスクをもつばら助長するわけではない）。
 - SAI は、PSC 上の不均一化学反応の増加を通じて、南極オゾンホール回復を大幅に遅らせる可能性が高い。一方、中・低緯度では、いくつかの効果が互いに相殺するため、オゾン全量で見た場合には、極端な増減は生じない可能性がある。
 - SAI は、硫酸エアロゾルの生成・成長・輸送過程に大きな不確実性をもつ。また、エアロゾルの赤外線吸収により成層圏が加熱され、それが成層圏だけでなく対流圏の循環も変えるという副作用をもつ。現状では、シミュレーション結果のばらつきが大きく、副作用の定量化が不十分である。
 - 副作用の大きさは、航空機等を用いて成層圏に人工的に注入する亜硫酸ガスないし硫酸エアロゾルの量に依存する。もしも SRM の目的として課す地上気温の冷却が小さくて済むならば、SRM の副作用も小さくなる。また、注入する緯度帯や高度をシミュレーションに基づいて戦略的にデザインすることも、SRM の副作用の低減に役立つ可能性がある。
- さらに、SRM に頼り切りになって従来の温暖化対策が進まない「モラル・ハザード」に陥るリスクや、途中で SRM を中断した場合に急激な温暖化が生じる「ターミネーション・ショック」のリスク、「将来、どのような背景のもとでどのような主体がどのように SRM の目標を決めるのか？」等々、ガバナンスに関

する問題点も盛んに議論されている。

今後、SAI の実現に向けて世界が動いていくか否かは、まったく不透明であるが、上に述べたような科学的知見のギャップ・不確実さを埋めるためには、屋外実験の実施と、それに基づいたシミュレーションの高度化は避けて通れないステップだと見なされている。例えば気候に影響をおよぼさないレベルの微量の水や炭酸カルシウムを成層圏で撒いて、その時間発展について観測を行う屋外実験プロジェクトがハーバード大学で提案されたが、現地住民等を含んで慎重な議論を重ねた結果、計画は中止された。また、SRM を実施した際に、その効果や副作用を、気候システムの大きな自然変動の中から明瞭に抽出するための観測システムならびに解析手法を整えることも容易ではないと見なされている。

近年の大きな動きとしては、米国において国立科学財団や海洋大気庁等を通じて、様々な観測研究プロジェクトやシミュレーション研究プロジェクト等に気候介入に関する大型予算が付けられ始めたことが挙げられる。日本の研究者も既に様々な立場でそれらに関わっている例もある。日本気象学会や日本地球惑星科学連合においても、気候介入に関してどのような立場を示すのか、検討すべき時期に差し掛かっていると言えよう。

8. 国際学術団体への貢献

中層大気研究の国際コミュニティに対して、日本の研究者が果たしてきた役割は歴史的に見ても大きい。WCRP のコアプロジェクトの1つである SPARC (2024年から APARC へと名称変更) は活発に国際共同研究を推進しているが、その科学運営委員として、また SPARC が主催する研究プロジェクトのリーダーや参加研究者として、近年活躍が著しい(例えば、重力波を扱う Gravity waves, QBO の国際共同研究を行う QBOi, 熱帯の対流活動と成層圏を扱う SATIO-TCS, 再解析の相互比較を行う S-RIP をリード)。IAMAS 傘下の国際中層大気委員会や国際オゾン委員会のメンバーにも継続的に日本の研究者が入っている。SCOSTEP にも複数の研究者が参加し、大気波動を介した上下結合の研究などを推進している。

9. まとめ

以上、詳しく述べたように、過去約10年を振り返ると、中層大気に関する多くの観測・モデル・長期再解

析等を用いたプロセス研究や統計的研究が実施されその知見が深まると共に、数日～数か月スケールやより長期の気候変動に対する中層大気役割の理解が大きく進展した。また、気候介入に関する成層圏研究は本格化する兆しがあり、近い将来の成層圏の産業利用も計画されるなど、中層大気研究の重要性が増している。今後の10～30年の課題として、新たな理論を用いた解析手法の確立、重力波から惑星規模波、大循環に至るシームレスな中層大気現象のスケール間相互作用・上下結合といった「全大氣的」視点からの研究、グローバルな風や大気微量成分などの衛星観測の推進、地上からのレーダーや気球を用いた高解像観測の強化、データ同化や高精度数値モデルの継続的な開発などが挙げられる。最後に、今後数十年にわたり中層大気研究を支える学生、若手研究者の活躍にも期待する。

略語一覧

4D-VAR : four-dimensional variational method 4次元変分法
 ACCLIP : Asian Summer Monsoon Chemical & CLimate Impact Project
 AO : Arctic Oscillation 北極振動
 AOA : Age Of Air (成層圏の) 大気年齢
 APARC : Atmospheric Processes And their Role in Climate 大気圏の諸過程とその気候影響 (WCRPのSPARC後継プロジェクト)
 A-RIP : APARC Reanalysis Intercomparison Project 成層圏再解析比較プロジェクトフェイズ2
 ATTREX : Airborne Tropical Tropopause Experiment
 Aura : Earth Observation System-Aura 地球観測衛星の1つ
 BDC : Brewer-Dobson Circulation ブリュワー・ドブソン循環
 CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations 地球観測衛星の1つ
 CARIBIC : Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container
 CAST : Co-ordinated Airborne Studies in the Tropics
 CCMi : Chemistry Climate Model Initiative 化学気候モデルイニシアティブ
 CCMVal : Chemistry Climate Model Validation 化学気候モデル検証
 CCS : Carbon dioxide Capture and Storage 二酸化炭素回収・貯留
 CDR : Carbon Dioxide Removal 二酸化炭素除去
 CFSR : Climate Forecast System Reanalysis 気候予測シ

ステム再解析
 CMIP : Coupled Model Inter-comparison Project 結合モデル相互比較計画
 CONTRAIL : Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner
 CONTRAST : Convective Transport of Active Species in the Tropics
 DAC : Direct Air Capture 二酸化炭素直接空気回収
 DMSP : Defense Meteorological Satellite Program 米国防衛気象衛星計画
 DOE : Department of Energy 米国エネルギー省
 DYAMOND : DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains 非静力学領域でモデリングされた大気大循環の力学
 EAR : Equatorial Atmosphere Radar 赤道大気レーダー
 ECMWF : the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期気象予報センター
 EMU : Equatorial Middle and Upper Atmosphere Radar 赤道 MU レーダー
 EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブルカルマンフィルタ
 ENSO : El Niño-Southern Oscillation エルニーニョ南方振動
 ERA : ECMWF re-analysis ECMWF 再解析データ
 ERA-40 : ECMWF re-analysis-40 years ECMWF40年再解析データ
 ERA5 : ECMWF re-analysis v5 ECMWF 再解析データバージョン5
 ERA-Interim : ECMWF re-analysis-Interim ECMWF 再解析データ (ERA-40からの暫定的な改良データ)
 ExTL : Extratropical Transition Layer 熱帯外対流圏界面遷移層
 GAIA : Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy
 GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル
 GeoMIP : Geoenineering Model Intercomparison Project 気候工学モデル相互比較計画
 GWP : Gravity Wave Parameterization 重力波パラメタリゼーション
 HAPS : High Altitude Platform Station 成層圏プラットフォーム
 HFC : hydrofluorocarbon ハイドロフルオロカーボン
 HRDI : High Resolution Doppler Imager 高分解能ドップラーイメージャ
 IAMAS : International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences 国際気象学大気科学協会
 ICON : Ionospheric Connection Explorer, Explorer-96 電離層および熱圏観測衛星
 ICSOM : Interhemispheric Coupling Study by Observa-

- tions and Modeling 観測およびモデルによる南北両半球結合研究
- IHC : Inter-Hemispheric Coupling 南北半球間結合
- IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
- ISO : Intra-Seasonal Oscillation 季節内振動
- IUGG : The International Union of Geodesy and Geophysics 国際測地学・地球物理学連合
- JAGUAR : Japanese Atmospheric GCM for Upper Atmosphere Research 全中性大気大循環モデル
- JAGUAR-DAS : JAGUAR Data Assimilation System JAGUAR データ同化システム
- JAWARA : JAGUAR Data Assimilation System Whole neutral Atmosphere Reanalysis JAGUAR-DAS により生成された全中性大気再解析データ
- JRA-25/JCDAS : Japanese 25-year Reanalysis and JMA Climate Data Assimilation System 長期再解析 (JRA-25) と気象庁気候データ同化システム, JRA-25は気象庁と電力中央研究所の共同実施
- JRA-3Q : Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century 気象庁第3次長期再解析
- JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis 気象庁55年長期再解析
- JRA-55C : JRA-55 using Conventional data only 気象庁55年長期再解析, 従来型観測データのみ使用
- LES : Large Eddy Simulation
- LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
- LODEWAVE : Long-Duration Balloon Experiment of Gravity WAVE over Antarctica 南極重力波のスーパープレッシャー気球観測
- MCB : Marine Cloud Brightening 海上の雲の白色化
- MERRA : Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
- MIM : Mass-weighted Isentropic Mean 温位面上の質量重み付き平均
- MIROC : Model for Interdisciplinary Research On Climate 東大大気海洋研究所, 国立環境研究所, 海洋研究開発機構等が開発した全球気候モデル
- MJO : Madden Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動
- MLS : Microwave Limb Sounder マイクロ波リムサウンダ
- MLT : Mesosphere and Lower Thermosphere 中間圏および下部熱圏
- MST/IS : Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter 中間圏・成層圏・対流圏/非干渉散乱
- MUR : Middle and Upper atmosphere Radar MU レーダー
- NAM : Northern Annular Mode 北極環状モード
- NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国国立大気研究センター
- NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター
- NCEP-DOE R2 : NCEP/DOE Reanalysis II NCEP/DOE 再解析2
- NCEP-NCAR R1 : NCEP-NCAR Reanalysis I NCEP-NCAR 再解析1
- NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正20面体格子大気モデル
- NWP : Numerical Weather Prediction 数値天気予報
- ODS : Ozone Depleting Substance オゾン破壊物質
- PANSY : Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar 南極昭和基地大型大気レーダー計画
- PMC : Polar Mesospheric Cloud 極中間圏雲
- PSC : Polar Stratospheric Cloud 極成層圏雲
- PV : Potential Vorticity 渦位
- QBO : Quasi-Biennial Oscillation 準2年振動
- Q2DW : Quasi-2 Day Wave 準2日周期波
- SABER : The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry 衛星搭載広帯域放射計
- SAI : Stratospheric Aerosol Injection 成層圏エアロゾル注入
- SAO : Semi-Annual Oscillation 半年振動
- SATIO-TCS : Stratospheric And Tropospheric Influences On Tropical Convective Systems
- SCOSTEP : Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics 太陽地球系物理学・科学委員会
- SOWER/Pacific : Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission
- SPARC : Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate 成層圏対流圏過程とその気候における役割 (WCRP のプロジェクト)
- S-RIP : SPARC Reanalysis Intercomparison Project 成層圏再解析比較プロジェクト
- SRM : Solar Radiation Modification 太陽放射改変
- SSMIS : Special Sensor Microwave Imager/Sounder マイクロ波イメージャサウンダ
- SSW : Sudden Stratospheric Warming 成層圏突然昇温
- STC : Stratosphere-Troposphere (Dynamical) Coupling processes 成層圏-対流圏力学的結合過程
- STE : Stratosphere-Troposphere Exchange 成層圏-対流圏間の物質交換
- Stratoclim : Stratospheric and upper tropospheric processes for better climate predictions
- TAL : Turn-around latitude
- TEM : Transformed Eulerian-Mean 変形オイラー平均
- TF : tropopause folding 対流圏界面褶曲

TIMED : Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics 地球観測衛星の1つ
 TSI : Total Solar Irradiance 太陽定数
 TTL : Tropical Transition Layer 熱帯対流圏界面遷移層
 UNEP : United Nations Environment Programme 国連環境計画
 VI : Vortex Intensification 極渦強化
 WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関

参 考 文 献

- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press, 489pp.
- Anstey, J. A. *et al.*, 2021: Teleconnections of the quasi-biennial oscillation in a multi-model ensemble of QBO resolving models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.4048.
- Anstey, J. A., S. M. Osprey, J. Alexander, M. P. Baldwin, N. Butchart, L. Gray, Y. Kawatani, P. A. Newman and J. H. Richter, 2022: The Quasi-Biennial Oscillation: Impacts, Processes, and Projections. *Nat. Rev. Earth Environ.*, doi:10.1038/s43017-022-00323-7.
- Baldwin, M. P. *et al.*, 2019: 100 years of progress in understanding the stratosphere and mesosphere. *Meteorol. Monogr.*, 59, 27.1-27.62.
- Baldwin, M. P. *et al.* 2021: Sudden Stratospheric Warmings. *Rev. Geophys.*, 59, doi:10.1029/2020RG000708.
- Becker, E., 2017: Mean-flow effects of thermal tides in the mesosphere and lower thermosphere. *J. Atmos. Sci.*, 74, 2043-2063.
- Bisht, J. S. H. *et al.*, 2021: Seasonal variations of SF₆, CO₂, CH₄ and N₂O in the UT/LS region due to emissions, transport and chemistry. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, doi:10.1029/2020JD033541.
- Bushell, A. C. *et al.*, 2020: Evaluation of the Quasi-Biennial Oscillation in global climate models for the SPARC QBO-initiative. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3765.
- Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, 52, doi:10.1002/2013RG000448.
- Butchart, N. *et al.*, 2018: Overview of experiment design and comparison of models participating in the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi) *Geosci. Model Dev.*, 11, 1009-1032, doi:10.5194/gmd-11-1009-2018.
- Butchart, N., J. A. Anstey, Y. Kawatani, S. M. Osprey, J. H. Richter and T. Wu, 2020: QBO changes in CMIP6 climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 47, doi:10.1029/2019GL086903.
- Chen, Y.-W. and S. Miyahara, 2012: Analysis of fast and ultrafast Kelvin waves simulated by the Kyushu-GCM. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 80, 1-11.
- Cohen, J. *et al.*, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.*, 7, doi:10.1038/ngeo2234.
- D'Oliveira, F. A., F. C. Lourenço de Melo and T. C. Devezas, 2016: High-altitude platforms - Present situation and technology trends. *J. Aero. Tech. Man.*, 8, 249-262.
- Domeisen, D. I. V. *et al.*, 2020: The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 2. Predictability arising from stratosphere-troposphere coupling. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, doi:10.1029/2019JD030923.
- Errera, Q. *et al.*, 2019: Technical note: reanalysis of Aura MLS chemical observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 13647-13679, doi:10.5194/acp-19-13647-2019.
- Fueglistaler, S. *et al.*, 2009: Tropical tropopause layer. *Rev. Geophys.*, 47, RG1004, doi:10.1029/2008RG000267.
- Fukao, S., 2006: Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA): A project overview. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84A, 1-18, doi:10.2151/jmsj.84A.1.
- Geller, M. A. *et al.*, 2013: A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models. *J. Climate*, 26, 6383-6405, doi:10.1175/JCLI-D-12-00545.1.
- Gray, L. J., M. Lu, J. B. Brown, J. R. Knight and M. B. Andrews, 2022: Mechanisms of influence of the Semi-Annual Oscillation on stratospheric sudden warmings. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 148, doi:10.1002/qj.4256.
- Harada, Y., H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2016: The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 269-302, doi:10.2151/jmsj.2016-015.
- Haynes, P. H. *et al.*, 1991: On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. *J. Atmos. Sci.*, 48, 651-678.
- Haynes, P. H. *et al.*, 2021: The influence of the stratosphere on the tropical troposphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, 803-845, doi:10.2151/jmsj.2021-040.
- Hegglin, M. I. and T. G. Shepherd, 2009: Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nat. Geosci.*, 2, 687-691, doi:10.1038/ngeo604.
- 廣岡俊彦, 1987: 大気中のプラネタリー・ロスビー波. 気

- 象研究ノート, (156), 93-127.
- Hitchcock, P. *et al.*, 2022: Stratospheric Nudging And Predictable Surface Impacts (SNAPSI): A protocol for investigating the role of stratospheric polar vortex disturbances in subseasonal to seasonal forecasts. *Geosci. Model Dev.*, **15**, 5073-5092, doi:10.5194/gmd-15-5073-2022.
- Holt, L. *et al.*, 2020: An evaluation of tropical waves and wave forcing of the QBO in the QBOi models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3827.
- Holton, J. R. *et al.*, 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Horinouchi, T., 2004: Simulated breaking of convectively generated mesoscale gravity waves and airglow modulation. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **66**, 755-767.
- Inai, Y. *et al.*, 2019: Seasonal characteristics of chemical and dynamical transport into the extratropical upper troposphere and lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 7073-7103, doi:10.5194/acp-19-7073-2019.
- Inness, A. *et al.*, 2019: The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 3515-3556, doi:10.5194/acp-19-3515-2019.
- Ishidoya, S., S. Sugawara, S. Morimoto, S. Aoki, T. Nakazawa, H. Honda and S. Murayama, 2013: Gravitational separation in the stratosphere - a new indicator of atmospheric circulation. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 8787-8796, doi:10.5194/acp-13-8787-2013.
- Isoda, F., T. Tsuda, T. Nakamura, R. A. Vincent, I. M. Reid, E. Achmad, A. Sadewo and A. Nuryanto, 2004: Intraseasonal oscillations of the zonal wind near the mesopause observed with medium-frequency and meteor radars in the tropics. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **109**, D21108, doi:10.1029/2003JD003378.
- Itoh, H. and Y. Narazaki, 2016: Fast descent routes from within or near the stratosphere to the surface at Fukuoka, Japan, studied using ⁷Be measurements and trajectory calculations. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6241-6261, doi:10.5194/acp-16-6241-2016.
- Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie and K. Takaya, 2014: Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2230-2243, doi:10.1175/JAS-D-13-058.1.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara and H. Shinagawa, 2011: Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **113**, doi:10.1029/2008JA013301.
- Kanno, Y. and T. Iwasaki, 2018: Three dimensional structure of mass-weighted isentropic time mean meridional circulations. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 2029-2047, doi:10.1175/JAS-D-17-0154.1.
- Kapsch, M.-L., R. G. Graversen and M. Tjernström, 2013: Springtime atmospheric energy transport and the control of Arctic summer sea-ice extent. *Nat. Clim. Change*, **3**, 744-748, doi:10.1038/nclimate1884.
- 河谷芳雄, 2012: 赤道準2年振動における赤道波と慣性内部重力波の役割—2011年度山本正野論文賞受賞記念講演—. *天気*, **59**, 807-825.
- Kawatani, Y. and K. Hamilton, 2013: Weakened stratospheric quasi-biennial oscillation driven by increased tropical mean upwelling. *Nature*, **497**, 478-481, doi:10.1038/nature12140.
- Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, 2011: The quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 265-283, doi:10.1175/2010JAS3623.1.
- Kawatani, Y., K. Hamilton and A. Noda, 2012: The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1734-1749, doi:10.1175/JAS-D-11-0265.1.
- Kawatani, Y., K. Hamilton, K. Miyazaki, M. Fujiwara and J. Anstey, 2016: Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalysis. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6681-6699, doi:10.5194/acp-16-6681-2016.
- Kawatani, Y., K. Hamilton, K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe and K. Kikuchi, 2019: ENSO modulation of the QBO: Results from MIROC models with and without non-orographic gravity wave parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 3893-3917, doi:10.1175/JAS-D-19-0163.1.
- Kawatani, Y., T. Hirooka, K. Hamilton, A. K. Smith and M. Fujiwara, 2020: Representation of the equatorial stratospheric semiannual oscillation in global atmospheric reanalyses. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, doi:10.5194/acp-20-9115-2020.
- Kidston, J. *et al.*, 2015: Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nat. Geosci.* **8**, 433-440, doi:10.1038/ngeo2424.
- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013: A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1577-1602, doi:10.1175/JAS-D-12-0137.1.
- Kinoshita, T., T. Iwasaki and K. Sato, 2016: A formulation of three dimensional wave activity flux describing wave propagation on the mass-weighted isentropic time mean equation. *SOLA*, **12**, 198-202, doi:10.2151/sola.2016-040.
- Kinoshita, T., K. Takaya and T. Iwasaki, 2019a: On the three dimensional mass-weighted isentropic time mean equation for Rossby waves. *SOLA*, **15**, 193-197,

- doi:10.2151/sola.2019-035.
- Kinoshita, T., K. Sato, K. Ishijima, M. Takigawa and Y. Yamashita, 2019b: Formulation of three-dimensional quasi-residual mean flow balanced with diabatic heating rate and potential vorticity flux. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 851–863, doi:10.1175/JAS-D-18-0085.1.
- Kinoshita, T., S.-Y. Ogino, J. Suzuki, R. Shiroyaka, T. Sugidachi, K. Shimizu and M. H. Hitchman, 2022: Toward standard radiosonde observations of waves and the mean state in the 30–40-km altitude range using 3-kg balloons. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **39**, 849–860, doi:10.1175/JTECH-D-21-0011.1.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kodera, K., H. Mukougawa, P. Maury, M. Ueda and C. Claud, 2016: Absorbing and reflecting sudden stratospheric warming events and their relationship with tropospheric circulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 80–94, doi:10.1002/2015JD023359.
- Kohma, M. and K. Sato, 2013: Simultaneous occurrence of polar stratospheric clouds and upper-tropospheric clouds caused by blocking anticyclones in the Southern Hemisphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 3849–3864.
- Kohma, M., K. Sato, Y. Tomikawa, K. Nishimura and T. Sato, 2019: Estimate of turbulent energy dissipation rate from the VHF radar and radiosonde observations in the Antarctic. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 2976–2993.
- Kohma, M., K. Sato, D. C. Fritts and T. S. Lund, 2024: Numerical simulation of orographic gravity waves observed over Syowa Station: Wave propagation and breaking in the troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **129**, e2023JD039425.
- Kohyama, T. and J. M. Wallace, 2016: Rainfall variations induced by the lunar gravitational atmospheric tide and their implications for the relationship between tropical rainfall and humidity. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 918–923.
- Körnich, H. and E. Becker, 2010: A simple model for the interhemispheric coupling of the middle atmosphere circulation. *Adv. Space Res.*, **45**, 661–668, doi:10.1016/j.asr.2009.11.001.
- Kosaka, Y. *et al.*, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109, doi:10.2151/jmsj.2024-004.
- Koshin, D. and K. Sato, 2024: Characteristics and mechanism of interhemispheric coupling in Austral winter revealed by long-term reanalysis data for the whole middle atmosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **129**, e2023JD039687, doi:10.1029/2023JD039687.
- Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki and S. Watanabe, 2020: An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 7, 3145–3177.
- Koshin, D., K. Sato, M. Kohma and S. Watanabe, 2022a: An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere. *Geosci. Model Dev.*, **15**, 5, 2293–2307.
- Koshin, D., M. Kohma and K. Sato, 2022b: Characteristics of the intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere region revealed by satellite observation and global analysis by the JAGUAR data assimilation system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, 16, e2022JD036816, doi:10.1029/2022JD036816.
- Koshin, D., K. Sato, S. Watanabe and K. Miyazaki, 2025: The JAGUAR-DAS whole neutral atmosphere reanalysis: JAWARA. *Prog. Earth Planet Sci.*, **12**(1), doi:10.1186/s40645-024-00674-3.
- Kuroda, Y., K. Kodera, K. Yoshida, S. Yukimoto and L. Gray, 2022: Influence of the solar cycle on the North Atlantic Oscillation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD035519.
- Lin, M. *et al.*, 2012: Springtime high surface ozone events over the western United States: Quantifying the role of stratospheric intrusions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, D00V22, doi:10.1029/2012JD018151.
- Liu, G., T. Hirooka, N. Eguchi and K. Krüger, 2022: Dynamical evolution of a minor sudden stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2019. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 3493–3505.
- López-Puertas, M. and F. W. Taylor, 2001: Non-LTE radiative transfer in the atmosphere. *Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics*, **3**, World Scientific, 504pp.
- Luce, H., L. Kantha, H. Hashiguchi, D. Lawrence, A. Doddi, T. Mixa and M. Yabuki, 2023: Turbulence kinetic energy dissipation rate: assessment of radar models from comparisons between 1.3GHz wind profiler radar (WPR) and DataHawk UAV measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3561–3580.
- 松野太郎, 島崎達夫, 1981: 成層圏と中間圏の大気. 大気科学講座 3, 東京大学出版会, 279pp.
- McCormack, J. P. *et al.*, 2021: Intercomparison of middle atmospheric meteorological analyses for the Northern Hemisphere winter 2009–2010. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**,

- 17577-17605, doi:10.5194/acp-21-17577-2021.
- Meredith, M. *et al.*, 2019: Polar regions. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (H.-O. Pörtner, *et al.* eds.), Cambridge Univ. Press, 203-320, doi:10.1017/9781009157964.005.
- Minamihara, Y., K. Sato and M. Tsutsumi, 2023: Kelvin-Helmholtz billows in the troposphere and lower stratosphere detected by the PANSY radar at Syowa station in the Antarctic. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2022JD036866, doi:10.1029/2022JD036866.
- Miyahara, S., 2006: A three dimensional wave activity flux applicable to inertio-gravity waves. *SOLA*, **2**, 108-111, doi:10.2151/sola.2006-028.
- Miyazaki, K. *et al.*, 2016: Inter-comparison of stratospheric mean-meridional circulation and eddy mixing among six reanalysis data sets. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6131-6152, doi:10.5194/acp-16-6131-2016.
- Miyazaki, K. *et al.*, 2020: Updated tropospheric chemistry reanalysis and emission estimates, TCR-2, for 2005-2018. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 2223-2259, doi:10.5194/essd-12-2223-2020.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2003: Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017695.
- Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, 2018: Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **123**, 2141-2155.
- Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2004: Predictability of stratospheric sudden warming: A case study for 1998/99 winter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1764-1776, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1764:POSSWA>2.0.CO;2.
- Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda and R. Mizuta, 2022: On the existence of the predictability barrier in the wintertime stratospheric polar vortex: Intercomparison of two stratospheric sudden warmings in 2009 and 2010 winters. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 965-978.
- Nakajima, H. *et al.*, 2016: Polar stratospheric cloud evolution and chlorine activation measured by CALIPSO and MLS, and modeled by ATLAS. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 3311-3325.
- Nakajima, H. *et al.*, 2020: Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica, in 2007 and 2011. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 1043-1074.
- Nakamura, T. *et al.*, 2019: Memory effects of Eurasian land processes cause enhanced cooling in response to sea ice loss. *Nat. Commun.* **10**, 5111, doi:10.1038/s41467-019-13124-2.
- 日本学術会議, 2023: 未来の学術振興構想 (2023年版). <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-t353-3.pdf> (2025.2.12閲覧).
- Noda, A., 2014: Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 411-431, doi:10.2151/jmsj.2014-501.
- Noguchi, S., H. Mukougawa, Y. Kuroda, R. Mizuta, S. Yabu and H. Yoshimura, 2016: Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 3388-3404.
- Noguchi, S., Y. Kuroda, K. Kodera and S. Watanabe, 2020: Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088743, doi:10.1029/2020GL088743.
- 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. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2021JD034681, doi:10.1029/2021JD034681.
- Pan, L. L. *et al.*, 2004: Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **109**, D23103, doi:10.1029/2004JD004982.
- Richter, J. H. *et al.*, 2020: Response of the quasi-biennial oscillation to a warming climate in global climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3749.
- Sakazaki T. and K. Hamilton, 2020: An array of ringing global free modes discovered in tropical surface pressure data. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2519-2539.
- Sakazaki, T. and K. Hamilton, 2022: Discovery of quasi-stationary equatorial waves trapped in stratospheric QBO westerly and easterly jets. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD035670, doi:10.1029/2021JD035670.
- Sakazaki, T., K. Hamilton, C. Zhang and Y. Wang, 2017: Is there a stratospheric pacemaker controlling the daily cycle of tropical rainfall? *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 1998-2006.
- Sakazaki, T., M. Fujiwara and M. Shiotani, 2018: Representation of solar tides in the stratosphere and lower mesosphere in state-of-the-art reanalyses and in satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 1437-1456.
- Sato, K. and S. Hirano 2019: The climatology of Brewer-Dobson circulation and the contribution of gravity waves. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 4517-4539, doi:10.5194/acp-19-4517-2019.

- Sato, K. and M. Nomoto, 2015: Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3609–3624, doi:10.1175/JAS-D-15-0046.1.
- 佐藤 亨, 佐藤 薫, 賀谷信幸, 松本 紘, 1993: MU レーダーによる下部成層圏風速の観測—成層圏無線中継システムのための環境評価—. *日本航空宇宙学会誌*, **41**, 351–358.
- Sato, K., T. Kumakura and M. Takahashi, 1999: Gravity waves appearing in a high-resolution GCM simulation. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1005–1018.
- Sato, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki and M. Takahashi, 2009: On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19801, doi:10.1029/2009GL039908.
- Sato, K., S. Tateno, S. Watanabe and Y. Kawatani, 2012: Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle atmosphere general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1378–1396, doi:10.1175/JAS-D-11-0101.1.
- Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi and T. Yamanouchi, 2014: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **118**, 2–15, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.022.
- Sato, K., M. Kohma, M. Tsutsumi and T. Sato 2017: Frequency spectra and vertical profiles of wind fluctuations in the summer Antarctic mesosphere revealed by MST radar observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 3–19, doi:10.1002/2016JD025834.
- Sato, K., R. Yasui and Y. Miyoshi, 2018: The momentum budget in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. Part I: Contributions of different wave types and in situ generation of Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3613–3633.
- Sato, K., T. Kinoshita, Y. Matsushita and M. Kohma, 2022: A new three-dimensional residual flow theory and its application to Brewer–Dobson circulation in the middle and upper stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 429–448, doi:10.1175/JAS-D-21-009401.
- Sato, K. *et al.*, 2023: Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM): Concept, campaigns, and initial results. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2022JD038249, doi:10.1029/2022JD038249.
- Sawa, Y. *et al.*, 2015: Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, doi:10.1002/2014GL02734.
- Scaife, A. A. and D. Smith, 2018: A signal-to-noise paradox in climate science. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **1**, 28, doi:10.1038/s41612-018-0038-4.
- Scaife, A. A. *et al.*, 2016: Seasonal winter forecasts and the stratosphere. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 51–56, doi:10.1002/asl.598.
- Scaife, A. A. *et al.*, 2022: Long-range prediction and the stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, doi:10.5194/acp-22-2601-2022.
- Sekido, H., K. Sato, H. Okui, D. Koshin and T. Hirooka, 2024: A study of zonal wavenumber 1 Rossby-gravity wave using long-term reanalysis data for the whole neutral atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, doi:0.2151/jmsj.2024-029.
- Shibata, K. and M. Deushi, 2005: Radiative effect of ozone on the quasi-biennial oscillation in the equatorial stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24802, doi:10.1029/2005GL023433.
- Smith, A. K., R. R. Garcia, A. C. Moss and N. J. Mitchell, 2017: The semiannual oscillation of the tropical zonal wind in the middle atmosphere derived from satellite geopotential height retrievals. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 2413–2425, doi:10.1175/JAS-D-17-0067.1.
- Smith, A. K. *et al.*, 2019: The equatorial stratospheric semiannual oscillation and time-mean winds in QBOi models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3690.
- Smith, A. K. *et al.*, 2020: Interhemispheric coupling mechanisms in the middle atmosphere of WACCM6. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 1101–1118, doi:10.1175/JAS-D-19-0253.1.
- 総務省, 2006: 成層圏プラットフォーム研究開発に関する評価取りまとめ結果. https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/seisoken/pdf/060119_si_3_3.pdf (2025. 2. 12閲覧).
- SPARC, 2022: SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) Final Report (M. Fujiwara *et al.*, eds.). SPARC Report No. 10, WCRP-6/2021, 612 pp, doi:10.17874/800dee57d13.
- Stockdale, T. N. *et al.*, 2020: Prediction of the quasi-biennial oscillation with a multi-model ensemble of QBO-resolving models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3919.
- Stohl, A. *et al.*, 2003: Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STAC-CATO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 8516, doi:10.1029/2002JD002490.
- Sugawara, S. *et al.*, 2018: Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 1819–1833, doi:10.5194/acp-18-1819-2018.
- 杉山昌広, 2021: 気候を操作する 温暖化対策の危険な

- 「最終手段」. KADOKAWA, 240pp.
- Suzuki, H., K. Sakanoi, N. Nishitani, N., T. Ogawa, M. K. Ejiri, M. Kubota, T. Kinoshita, Y. Murayama and Y. Fujiyoshi, 2016: First imaging and identification of a noctilucent cloud from multiple sites in Hokkaido (43.2–44.4°N), Japan. *Earth Planets Space*, **68**, 182, doi:10.1186/s40623-016-0562-6.
- Takahashi, M., 1996: Simulation of the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation using a general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 661–664.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608–627.
- Tomikawa, Y. *et al.*, 2023: LODEWAVE (Long-Duration Balloon Experiment of Gravity WAVE over Antarctica). *J. Evol. Space Act.*, **1**, 14, doi:10.57350/jesa.14.
- Tripathi, O. P. *et al.*, 2015: The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 987–1003, doi:10.1002/qj.2432.
- 津田敏隆, 2000: 中層大気・熱圏下部における長周期波動の観測. *天気*, **47**, 419–432–26.
- Tsuda, T., 2014: Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation. *Proc. Jpn. Acad., Series B*, **90**, 12–27, doi:10.2183/pjab.90.12.
- Tsuda, T. *et al.*, 2016: A proposal on the study of solar-terrestrial coupling processes with atmospheric radars and ground-based observation network. *Radio Sci.*, **51**, 1587–1599, doi:10.1002/2016RS006035.
- Visioni, D. *et al.*, 2023: Opinion: The scientific and community-building roles of the Geoengineering Model Inter-comparison Project (GeoMIP) – past, present, and future. *Atmos. Chem. Phys.*, **23**, 5149–5176.
- Watanabe, S. and Y. Kawatani, 2012: Sensitivity of the QBO to mean tropical upwelling under a changing climate simulated by an Earth system model. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **90A**, 351–360, doi:10.2151/jmsj.2012-A20.
- 渡辺真吾, 河谷芳雄, 2018: 重力波解像モデルを用いた中層大気大循環の研究—2017年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **65**, 3–26.
- Watanabe, S. and S. Miyahara, 2009: Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **114**, D0711, doi:10.1029/2008JD011218.
- Watanabe, S., Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi and K. Sato, 2008: General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D12110, doi:10.1029/2008JD010026.
- Watanabe, S., K. Hamilton, S. Osprey, Y. Kawatani and E. Nishimoto, 2018: First successful hindcasts of the 2016 disruption of the stratospheric quasibiennial oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1602–1610, doi:10.1002/2017GL076406.
- Watanabe, S., K. Hamilton, T. Sakazaki and M. Nakano, 2022: First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: Evidence from the 2022 Tonga eruption and from global reanalysis data. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 3027–3043.
- WMO, 1957: Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, **6**, 136.
- Yamashita, Y. *et al.*, 2017: Resolution dependency of numerically simulated stratosphere-to-troposphere transport associated with mid-latitude closed cyclones in early spring around Japan. *SOLA*, **13**, 186–191, doi:10.2151/sola.2017-034.
- Yasui, R., K. Sato and Y. Miyoshi, 2018: The momentum budget in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. Part II: The In situ generation of gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3635–3651.
- 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. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 3867–3888.
- Yoden, S., M. Taguchi and Y. Naito, 2002: Numerical studies on time variations of the troposphere-stratosphere coupled system. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **80**, 811–830.
- Yoshida, K. and R. Mizuta, 2021: Do sudden stratospheric warmings boost convective activity in the tropics? *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL093688, doi:10.1029/2021GL093688.

Current Status and Future Prospects of Middle Atmosphere Research in Japan

Yoshio KAWATANI^{*1}, Kaoru SATO^{*2}, Takeshi HORINOUCI^{*3}, Naho EGUCHI^{*4},
Takenari KINOSHITA^{*5}, Masashi KOHMA^{*2}, Chiaki KOBAYASHI^{*6},
Takatoshi SAKAZAKI^{*7}, Yayoi HARADA^{*5}, Masatomo FUJIWARA^{*3},
Shingo WATANABE^{*5}, Hideharu AKIYOSHI^{*8}, Yoichi INAI^{*9}, Haruka OKUI^{*10},
Yuhji KURODA^{*6}, Dai KOSHIN^{*11}, Chihiro KODAMA^{*5}, Kunihiro KODERA^{*6},
Satoshi SUGAWARA^{*12}, Masakazu TAGUCHI^{*13}, Hiroaki NAOE^{*6},
Tetsu NAKAMURA^{*14}, Shunsuke NOGUCHI^{*15}, Toshihiko HIROOKA^{*16},
Toshinobu MACHIDA^{*8}, Kazuyuki MIYAZAKI^{*17}, Yasunobu MIYOSHI^{*15},
Hitoshi MUKOUGAWA^{*7}, Ryosuke YASUI^{*6}, Yosuke YAMASHITA^{*8},
Kohei YOSHIDA^{*6} and Shigeo YODEN^{*18}

^{*1} (*corresponding author*) Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University.
E-mail: kawatani@ees.hokudai.ac.jp

^{*2} Graduate School of Science, The University of Tokyo.

^{*3} Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University.

^{*4} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

^{*5} Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

^{*6} Meteorological Research Institute.

^{*7} Graduate School of Science, Kyoto University.

^{*8} National Institute for Environmental Studies.

^{*9} Sapporo Regional Headquarters, Japan Meteorological Agency.

^{*10} Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Bath. (*Present Affiliation* : Graduate School of Science, The University of Tokyo)

^{*11} High Altitude Observatory, NSF National Center for Atmospheric Research.

^{*12} Faculty of Education, Miyagi University of Education.

^{*13} Faculty of Education, Aichi University of Education.

^{*14} Japan Meteorological Agency.

^{*15} Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University.

^{*16} International Research Center for Space Weather Science and Planetary Environmental Science, Kyushu University.

^{*17} Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

^{*18} Institute for Liberal Arts and Sciences, Kyoto University.

(Received 6 August 2024 ; Accepted 23 October 2024)