

テーマ 10: ジオスペース環境

要旨

ジオスペース(人間の活動領域の一部となる地球周辺の宇宙空間)からの電磁波の伝搬や荷電粒子の降り込みにより、北極域の超高層大気及び下層大気の変動を受けることが、近年指摘されている。特に、中層・超高層大気の微量成分変動の下方伝播とオゾン濃度への影響や、北極振動の下方伝播に代表される成層圏-対流圏結合などの、上層大気から下層大気への影響が、最近多くの関心を集めている。一方、下層大気で励起された大気波動が、中層・超高層大気の熱的・力学的構造に大きな影響を与えることも明らかになってきている。また、温室効果気体の増大に伴う、中層・超高層大気の寒冷化の顕著な進行を示唆する結果も出始めている。これらの下層大気から超高層大気までの間の様々な上下結合過程の理解は、北極環境の全容を把握する上で重要であると考えられる。しかし、その定量的な影響評価はほとんど進んでいない。

太陽風、磁気圏から極域に侵入した電磁・粒子エネルギーは、中低緯度の超高層大気の変動(磁気嵐のような大規模変動を含む)を引き起こす。また、下層大気から発生した大気波動は、全球的な子午面循環の駆動

に貢献することが明らかとなっている。しかし、全球規模で起こるこのような変化の全容は未解明である。その他に、人類社会を支える重要な情報基盤整備事業の1つとして、極域超高層大気のモニタリング、電離圏擾乱現象の有効かつ確実な検出と予測に繋がる研究が必要とされている。今後数年の間には、新しい飛翔体観測や大型レーダー観測など、中層・超高層大気を含むジオスペース探査の充実が図られる予定である。この機会を逃さず、ジオスペースから超高層大気、下層大気への影響及び、それらの相互作用を評価・予測する研究体制を整備する必要がある。これらのジオスペース環境が北極環境に及ぼす影響や、両者の繋がり(プロセス)に関するキークエスションは、以下の4つにまとめられる。

- Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？
- Q2: 超高層大気は下層・中層大気に与える影響は？
- Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？
- Q4: 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入は？

まえがき

ジオスペース(Geospace)とは、多くの人工衛星や、国際宇宙ステーション、惑星探査機などが飛翔する、人間の活動領域の一部となる地球周辺の宇宙空間を表す用語である。人間の手の届かない遠方の宇宙とは区別をして、このジオスペースの環境をより深く理解するための研究や観測がなされてきている。

最近の研究によって、太陽活動や地球周辺の宇宙空間の変化が、地球の環境にも影響を与えていることが明らかにされつつある。特に、極域は太陽風や惑星間空間磁場¹⁰⁰の影響を受けやすく、様々なエネルギーが

上部から流入する領域であるため、その物理及び化学過程の詳細な理解が求められている。また、ジオスペース環境の中でも超高層大気は、下層大気で励起された大気波動¹⁰¹によるエネルギーや運動量の輸送、温室効果気体の増加等の様々な要因により、短期的、長期的な変動を示すことが明らかになりつつある。これらの上方からと下方からの影響及び、全大気圏の間の相互作用を理解することを目的とする「大気上下結合過程」の研究が、北極環境研究においてひとつの重要な課題となっている。太陽黒点の無い状態が1年以上継続する

¹⁰⁰ 惑星間空間磁場: 太陽風に伴って太陽の磁場が惑星間空間(太陽系内の惑星軌道が存在する空間)に引き出されたもの。太陽の自転により、惑星間空間磁場の磁力線は太陽から螺旋状に広がっていく。

¹⁰¹ 大気波動: 種々の大気擾乱に伴い発生する大気の波動。より局所的な大気重力波、グローバルな大気潮汐波、プラネタリー波などがあり、重力による大気の密度成層や、地球の自転に伴う角運動量の保存が復元力となり発生する。下層で発生した大気波動は、上方へ伝搬し、中間圏・熱圏領域では振幅が増大し砕波してエネルギー、運動量を放出することで、中層大気上部の子午面循環や東西風が駆動される。

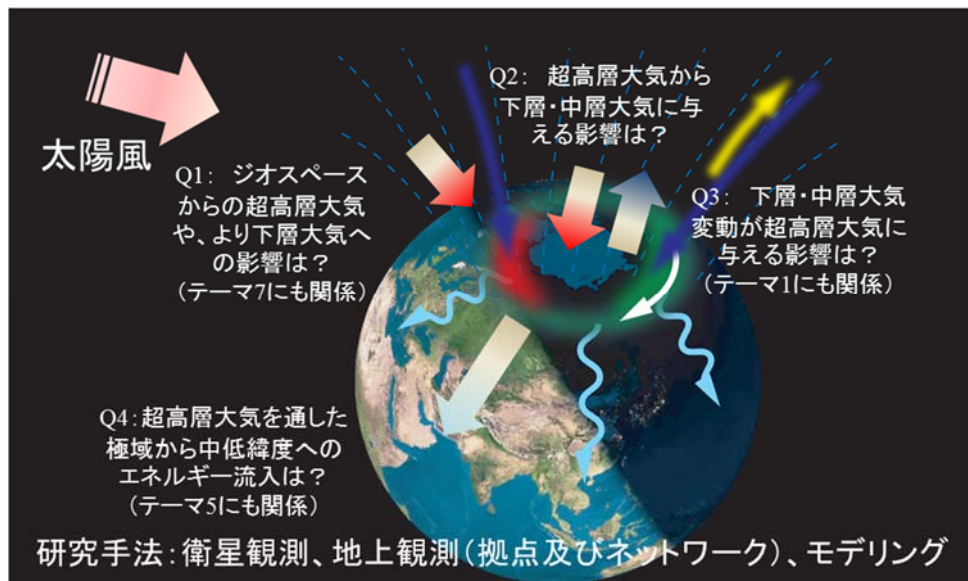


図 37 テーマ 10 の 4 つの Key Questions の関係

などの、近年報告されている太陽活動の様々な変動は、この大気上下結合過程を通じて北極環境に影響を及ぼすことが懸念され、分野を横断する融合的な研究が求められている。

また、ジオスペース環境の研究は、測位衛星に代表されるような人類の宇宙利用の発展に伴い、人工衛星の運用に必要な宇宙天気¹⁰²予報の精度向上に活用されてきている。それにより、北極域における(通信、電力、測位などの)社会基盤に対するリスクを軽減させるための実用科学としても重要になりつつある。特に、北極域の国々(例えば、ノルウェー)においては、ジオスペース環境の変化がもたらす各種の宇宙天気現象が社会的な関心事として認識されている。具体的な社会的影響については、テーマ 7「北極環境変化の社会への影響」の Q4 に記述する。

これらの太陽地球系分野の研究の多くは、国際共同研究プロジェクトとして、日本が牽引する形で進められてきている。今後数年の間には、新しい飛行体観測や大型レーダー観測など、中層・超高層大気を含むジオスペース探査の充実が、日本を中心とした国際協力の

枠組みの中で図られる予定である。この機会を逃さず、ジオスペースから超高層大気/下層大気への影響、さらに、それらの相互作用を評価、予測する研究体制を整備する必要がある。

本テーマでは、ジオスペース環境が北極環境に及ぼす影響や、両者の繋がり(プロセス)を、4つのキークエストIONに分けて説明する。まず、「Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？」では、「宇宙天気研究」をキーワードとして、太陽活動や地球周辺の宇宙空間の変化が地球環境に与える影響を中心に記述する。次に「Q2: 超高層大気の下層・中層大気に与える影響は？」では、大気微量成分の下方伝搬などを含む「大気上下結合過程」の研究を具体的に説明する。「Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？」では、温暖化に伴う中層・超高層大気の寒冷化を含む、下層から上方への影響についてまとめる。最後に「Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？」では、緯度間結合の研究の重要性を述べる。

¹⁰² 宇宙天気: 人間の活動領域が宇宙空間に広がったことから、人間生活に影響を与える天気を模して、宇宙環境またはそこで起きる変動現象を宇宙天気と呼ぶ。電磁場、放射線帯粒子、宇宙線が主な宇宙天気の現象要素である。宇宙天気変動現象に伴うエネルギーは地球磁力線に沿って極域電離圏に入り込み、超高層大気の熱構造や化学組成に影響を与える。

Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？

a. 研究の重要性と現状

太陽や銀河から飛来する高エネルギー粒子及び、地球磁場に捕捉されている放射線帯の高エネルギー粒子は、超高層大気に侵入し、中間圏以下の高度帯の電離を引き起こすなどの影響を与えることが知られている(Rishbeth and Garriott, 1969)。例えば、大規模な磁気嵐¹⁰³や太陽粒子イベント(Solar Energetic Particles: SEP)発生時には、極域において中間圏・成層圏上部オゾン減少等が起きていることが確認されている(例えば、Jackman et al., 2001)。また、近年、放射線帯電子の降り込みによっても中間圏オゾンの減少が起こる可能性が示唆されている(Rozanov et al., 2005)。しかし、これらのプロセスが中層大気に与える影響に関する定量的な評価は充分に行われていない。これらの高エネルギー粒子による空気シャワーは、特に極域周りでの航空機高度で被ばくを引き起こすため、この変動の予測と影響評価は宇宙天気研究でも重要な課題である。

ジオスペースから地球大気に流入したエネルギーは、極域超高層大気に様々な変動を引き起こすが、その過程の理解はまだ不十分である(例えば、Gray et al., 2010)。高緯度域では、オーロラ活動に伴って電離圏高度を流れる強い電流が地上において誘導電流を作りだし、送電線網やパイプライン等に障害を起こす。太陽紫外線の急増に伴う熱圏大気膨張によって、衛星の姿勢擾乱が発生し、衛星が運用停止に陥った事例も報告されている。また、電離圏における擾乱現象(電離圏嵐、プラズマバブルなど)は、近年利用が飛躍的に増大している衛星測位や、それを利用した航空機航法システムの精度と信頼性に大きな影響を与える。特に、極端宇宙天気現象と呼ばれる発生頻度が低いが大規模な現象については、観測事例が少なく定量的な評価は難しいものの、その影響がきわめて大きいこと予想される。

さらに、太陽活動の様々な変調が近年報告されている(例えば、Shiota et al., 2012)。特に、極小期が通常

よりも長く続き、また極大期にも黒点数があまり増えないという状況は、マウンダー極小期¹⁰⁴と類似しており、当時と同様の地球大気の寒冷化が起こるのではないかという推測もある。一方で、マウンダー極小期の寒冷化は太陽定数の変動だけでは説明できないため、その要因として中層・超高層大気を介したメカニズムがいくつか提案されている。しかし、これらのプロセスの定量的検証は、観測、モデルのいずれの面からも未だに不十分な状況である。

b. 今後の研究

ジオスペースからの高エネルギー粒子による大気(特に、極域)への影響を評価するために、超高層大気の高精度な観測と、人工衛星や地上からのレーダー、分光機器、電磁場計測機器による磁気圏、電離圏の比較観測が重要である。特に、数年後に打ち上げが予定されているジオスペース探査衛星(ERG)計画や、北欧に国際共同の枠組みによって設置される予定の次世代非干渉散乱レーダー(EISCAT_3D)計画等の新しい大型ネットワーク観測及び大型拠点観測を有効に活用することがポイントとなる。また、太陽・太陽圏・ジオスペース科学コミュニティと超高層・中層大気科学コミュニティが密に連携して、研究を進める体制を構築する必要もある。

太陽の電磁波および、高エネルギー粒子が極域の中層・超高層大気に及ぼす影響の定量的な評価とその変動予測のために、紫外線やジオスペースの高エネルギー粒子を入力とし、各高度における影響の評価を行うモデルの構築が必要である。また、極端宇宙現象と呼ばれる発生頻度は低いが大規模な現象については、過去の事例解析による影響の評価、また、物理モデルによる極端宇宙現象の再現と予測が重要となる。このように、人類社会を支える重要な情報基盤整備事業の一つとして、極域超高層大気のモニタリング、電離圏擾乱現象の有効かつ確実な検出と予測につながる研究を通信工学、航空工学などの工学分野と連携して進める必要があると考えられる。

¹⁰³ 磁気嵐: 太陽での大規模擾乱現象によって引き起こされるジオスペース最大の擾乱現象。最近では、Geospace storm(宇宙嵐、ジオスペース嵐)とも呼ばれる。このとき地球周辺の宇宙空間には大きな電流が流れ、また、宇宙放射線の量が増加する。さらに、電離圏、熱圏等の地球大気へも著しい影響が起こり、宇宙から地球へのエネルギー流入が急増する。

¹⁰⁴ マウンダー極小期: 17世紀後半に、数十年にわたって太陽に黒点がほとんど現れなかった期間。この期間、太陽活動は著しく弱く、一方、地球大気は寒冷化していたと考えられている。このため、太陽活動が地球の気候に影響を与えている可能性が示唆されている。

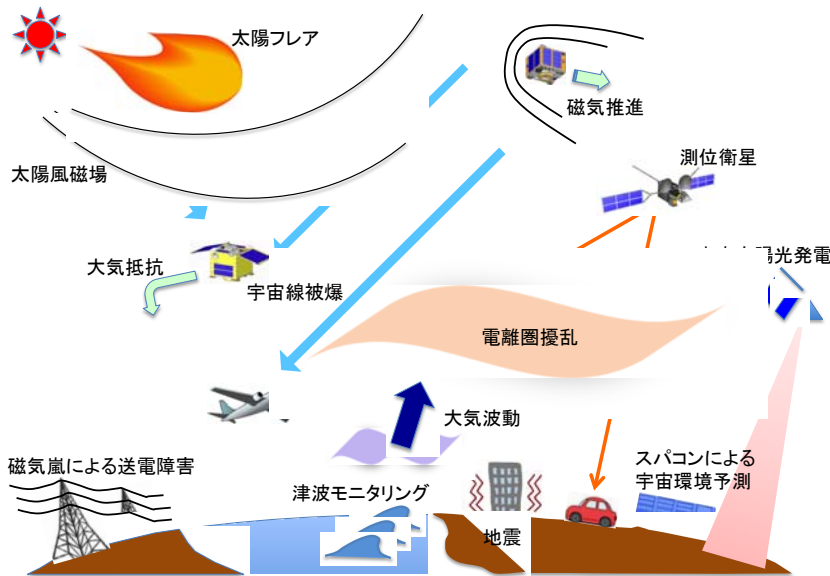
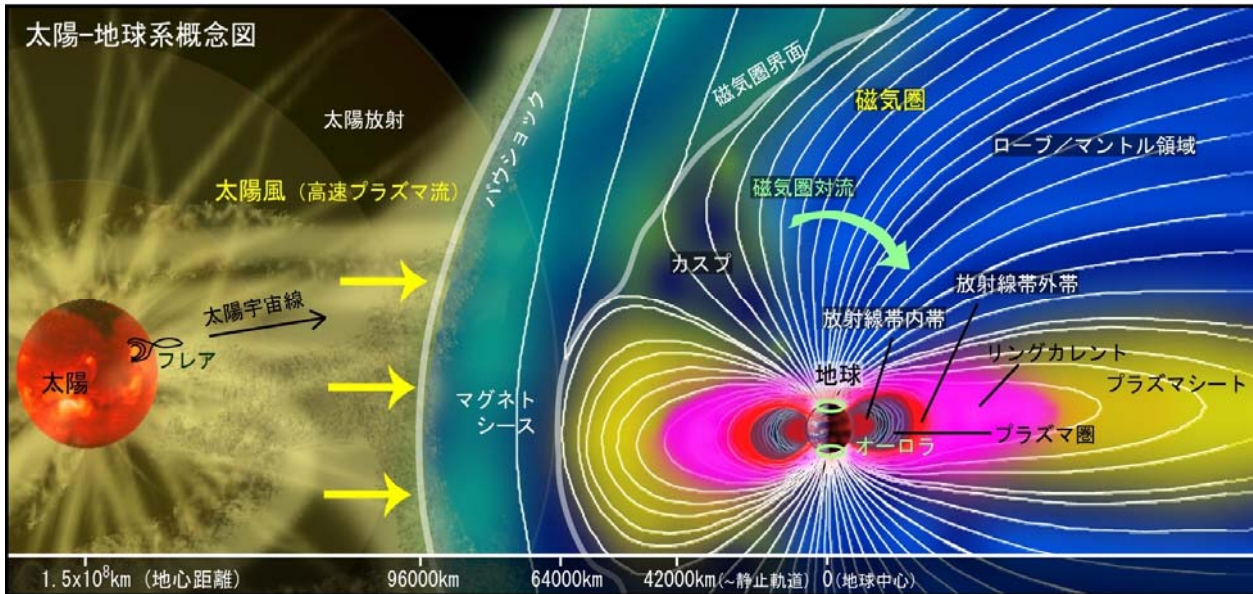


図 38 太陽-地球圏の領域とそこで発生する現象(上図)と、ジオスペース環境の乱れが社会に与える影響(下図)。図は共に、地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来(SGEPSS学会、2013年1月)より抜粋。

太陽地球系科学分野の研究者が中心となって推進している国際共同研究プロジェクト(CAWSES-II(2009～2013、太陽地球系の気候と天気)や VarSITI¹⁰⁵(2014～2018、太陽活動変動と地球への影響))では、日本がリーダーを輩出するなどしてプロジェクトを牽引している。また、日本には太陽地球系科学の世界的な研

究拠点があり、さらに北極を含む海外に観測拠点を展開中である。このような日本の優位性を活かし、今後の太陽活動の変動に対して地球大気がどのような応答を示すのかを知るために、太陽地球系科学分野からの積極的なアプローチが期待される。

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？

a. 研究の重要性と現状

下層から上層へ影響が及ぶという地球大気的基本的な性質は、高度と共に密度が減少する地球大気の成層

構造に由来している。一方で、北極振動の下方伝播に代表される成層圏-対流圏結合など、上層から下層への影響が近年多くの関心を集めている(例えば、

¹⁰⁵ VarSITI: Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI、太陽活動変動とその地球への影響)は、ICSU(国際科学会議)傘下の国際組織 SCOSTEP(太陽地球系物理学科学委員会)が2014-2018年の5年間推進する太陽地球系科学に関する国際協同研究プログラム。関連ホームページ:<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/varsiti/>

Baldwin and Dunkerton, 1999)。極域は、太陽活動に伴う電離圏、熱圏へのエネルギー注入があることから、超高層大気から下層・中層大気への影響が現れやすい領域であると考えられる。そのため、上層から下層への影響を示す観測事実を積み上げ、数値モデルを用いた研究を組み合わせることでそのメカニズムを明らかにしていくことは、特に極域下層大気の中長期時間スケールの変動を理解し、予測するために必須である。

高エネルギー降下粒子や太陽紫外線量に起因する一酸化窒素(NO)などの大気微量成分の変動が下方伝播し、成層圏でのオゾン濃度などに影響を与えることが次第に明らかになりつつある(例えば、Randall et al., 2007)。しかし、この超高層大気の変動を起源とする成層圏オゾン濃度の変動が、成層圏大気大循環、ひいては対流圏大気大循環にどの程度影響を及ぼすかについての定量的な評価は未だに行われていない。高エネルギー降下粒子や太陽紫外線量は、太陽活動度と密接に関連している。したがって、太陽活動が大気微量成分の変化を通じて成層圏や対流圏の大気大循環¹⁰⁶にどの程度影響を及ぼしているかについての定量的評価も今後の課題である。

一方で、対流圏起源のプラネタリー波が成層圏に伝搬し、成層圏大気大循環を変化させ、その変化がさらに対流圏大気大循環に影響を及ぼすことが明らかになりつつある(Plumb and Semeniuk, 2003)。しかし、対流圏起源の各種波動に伴う中間圏や熱圏での変動が、大気上下結合過程を通じて対流圏にどのような影響を及ぼすかについてはよく理解されていない。また、前述の高エネルギー降下粒子等に起因する成層圏オゾン変動が、成層圏大気大循環の変化をもたらし、対流圏大気にどのような影響を与えるかについても今後研究する必要がある。

関連して、成層圏でのオゾン濃度の減少は地表紫外線量を増加させるため、北極域在住の人々の生活にも影響を及ぼす可能性がある。オゾン減少は、成層圏におけるプラネタリー波の活動度と密接に関連しているため、対流圏—成層圏結合過程の枠組みの中で考えなければならない事象である。例えば、2011年の春には北極でもオゾンホールが発生したが、今後も同様のオゾン減少が発生するかについての予測は不十分である(例えば、Manney et al., 2011)。

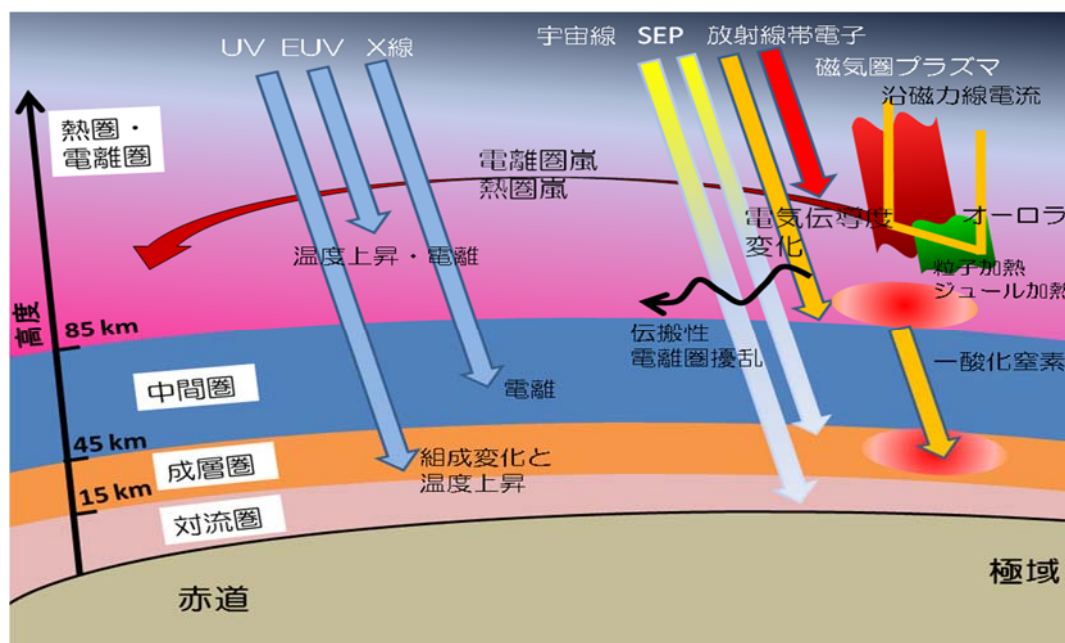


図 39 太陽から地球電離圏・大気圏への影響。地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 (SGEPSS 学会、2013 年)の図を一部改編。

¹⁰⁶ 大気大循環: 大気大循環とは、地球規模の大気の流れのことである。赤道域と極域間の受け取る太陽放射エネルギーの差により生じる温度差を解消するために起こる循環である。加えて、中層大気や超高層大気領域では、鉛直方向に伝播する大気波動の影響によっても、地球規模の循環が生じる。

b. 今後の研究

高緯度域における高エネルギー粒子降下に伴う大気微量成分の変動を調べるには、高緯度域での大型レーダーによる拠点観測や、中層・超高層大気の大気組成、温度、風速などの測定が可能な各種測器による地上ネットワーク観測が重要である。特に、EISCAT_3Dレーダーの様な大型の観測機器を用いた精密な観測や、グローバルな大気変動を調べるための地上多点観測ネットワークの拡充が、定量的な理解を深める上で必須である。さらにこれらの地上観測と、中層大気から熱圏・電離圏高度における大気、プラズマの衛星観測とを組み合わせることが、個々の観測機器に由来する仮定を減らし、本質の理解に到達するために必須となってくる。

超高層大気は下層・中層大気に与える影響を調べるためには、数値モデルによる定量的理解が重要であ

る。また、超高層大気は、下層・中層大気のどの領域まで、どの程度の影響を与えるのかを理解するには、熱圏、電離圏を含まないモデル、中間圏以上を含まないモデル、逆に熱圏、電離圏までを含むモデルなど、高度領域の異なる様々なモデルによる総合的な検証、理解が必要である。モデルの高度領域の高高度化は世界的な流れであり、国内でも対流圏から熱圏・電離圏を含むモデル(GAIA モデル)(例えば、Jin et al., 2011)が開発されているが、今後はその更なる高精度化が重要となる。また、オゾン減少をはじめとする光化学過程を考慮するには、対流圏から中間圏、熱圏までを高度範囲とする光化学反応過程を含んだモデルを開発し、かつその高精度化を行う必要がある。日本の太陽地球系科学の研究コミュニティは、下層大気と超高層大気との結合過程に大きな関心を持っており、前述の観測およびモデル研究を積極的に進めつつある状況である。

Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？

a. 研究の重要性と現状

温室効果気体の増大に伴い対流圏では温暖化が進んでいるが、中層・超高層大気では地上・衛星観測やモデル計算などから寒冷化の進行を示す結果が得られている(例えば、Roble and Dickinson, 1989)。温暖化に伴う中層・超高層大気の寒冷化は、大気密度の小さいこの領域においてより顕著に表れる。例えば、二酸化炭素の増大に伴う赤外放射冷却の増加(寒冷化)とメタンの増加に伴う中間圏界面付近での水蒸気の増加は、北極域における極中間圏雲やこれに伴う中間圏の特徴的なレーダーエコー(PMSE、MSE)の発生頻度増加や、極域からより低い緯度への中間圏雲の発生領域の拡大(図 40 参照)をもたらしており、下層大気温暖化の指標と考えられている。したがって、これらの現象を観測することで、温暖化による中層・超高層大気の変化がどの程度まで進んでいるかを調べる事が可能である。しかし、中層・超高層大気分野では長期にわたって取得されているデータが極めて限られていることから、数10年スケールの長期変動の研究はまさに始まったばかりの状態である。特に、人類活動の活発な北極域と、

その真逆である南極域との両極比較研究を実施することは、温暖化に伴う寒冷化のプロセスを理解及び特定する上で非常に重要であると言える。

北極域では2000年以降、北極温暖化の増幅によって海面、地表面気温の上昇が大きくなっている。これは北極振動指数¹⁰⁷が負になった場合、その空間パターンを強化する可能性があり、冬季には、成層圏突然昇温¹⁰⁸に代表されるような擾乱の増加にも繋がる可能性がある(例えば、Turner et al., 2007)。また、この成層圏突然昇温の兆候は、成層圏での変動に先立って中間圏から下部熱圏の大気循環に顕著に現れることが、近年の観測・数値シミュレーションから明らかになりつつある。成層圏突然昇温による中層大気の変動は、下層大気から伝搬してくる大気波動を変調し、低緯度の熱圏、電離圏にも変動をもたらしていることが観測されている(例えば、Chau et al., 2012)。これらの原因としては、プラネタリー波、大気重力波など全球規模で起こる大気波動の変動が考えられているが、その全容は未解明のままである。このため、気象学が対象とする下層大気から超高層大気を含む全ての大気領域を結んだ地球大気の

¹⁰⁷ AO index: 北半球(通常は20° N以北)対流圏(1000hPaや500hPa)高度場の主成分分析から求めた第1主成分ベクトルを、指数を求めたい日や月の高度場に射影して得られる値。正負の指数はそれぞれ北極域低圧部の強化・弱さを表す。詳しくはURL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html 参照。

¹⁰⁸ 成層圏突然昇温: 冬季極域成層圏において、短期間で急激に温度上昇が起こる現象。北極域では非常にポピュラーな現象であるが、南極域ではめったに発生しない。世界気象機関(WMO)の定義では、1週間以内に25K以上温度が上昇し、10hPaあるいはそれ以下の高度領域で帯状平均した温度が緯度60度より極側に向かって増大する現象を指す。



図 40 超高層大気と地球温暖化や気候変動との関わり(左図。地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 (SGEPSS 学会、2013 年 1 月)より)と、パリ上空で撮影された中間圏雲(右図。http://www.spaceweather.com/nlcs/gallery2009_page12.htm より。)

全体像の理解という新たな視点での研究が必要となってきた。そのような研究を進展させることより、例えば、北極域で頻発する成層圏突然昇温の発生を予測することも将来可能になるものと期待される。

さらに、近年の GPS 観測網の発達により、地震後に発生した津波や台風、ハリケーンなどによって励起された大気波動が電離圏にまで伝わり、電離圏のプラズマ密度を変調することが明らかになってきた (Tsugawa et al., 2011)。この結果は、地表面・海面変動が超高層大気に影響を与え得ることを示すものであり、ダイナミックに変動する地球の姿を映し出すとともに、電離圏研究が津波の到来予測など防災科学として発展する可能性を新たに示している。

b. 今後の研究

地球温暖化に伴う中層・超高層大気変動は、鉛直方向の大気温度構造の変化、北極域での擾乱、下層からの大気波動伝搬の変調などを通して全球に影響を及ぼす。長期的なデータ取得が始まったばかりのこの領域では、まず地上・衛星観測、モデル計算を今後も継続的に進めていくことが最も重要である。北極域では経度方向に広がるネットワーク観測の充実が切望されており、現在観測機器が設置されているアラスカ、カナダ、北欧の観測拠点を継続的に運用し、EISCAT_3D レーダーや SuperDARN レーダー、AMISR など大型観測拠点との連携をさらに強めていくことが必須である。特に、観測点がほとんどないロシアとの連携を検討することが必要と考えられる。また、観測方法の限られる中層・超高層大気研究においては、モデル計算をさらに充実

させていくことも重要である。

研究の方向性としては、大気領域間を結びつける重要なプロセスとして、様々な大気波動を理解することがこれまで以上に求められている。下層大気で励起された大気波動がどのように伝搬し、どこで散逸するか、また、大気波動の散逸に伴って発生すると考えられる乱流や二次的に励起される大気波動の特性について、全球規模で理解する必要がある。特に中層大気の乱流は、上層に位置する熱圏の構造にも強く影響する可能性があることから、重要な研究課題である。また、地球大気に満ち満ちている大気波動がどのように電離圏プラズマの構造を変調するか、さらに、どのように電離圏擾乱を誘起するかという点も今後解明を進めるべき課題である。電離圏擾乱の特性を理解し、その発生を予測することは、衛星測位や通信などの、電離圏を伝播路とする電波を利用する社会基盤にとっても大きな意義を持つ。

大気大循環の変動や全球規模の変動を捉える上で、中低緯度、南極との連携も強めていく必要がある。特に、大型大気レーダー (PANSY)、ライダー、MF レーダー等の観測機器が充実している南極昭和基地と、日本の有する北極域の各拠点観測との継続的な連携および、両極比較に重点をおいた研究は、地球温暖化に伴う中層・超高層大気寒冷化のプロセスを理解・特定し、予測を行っていく上で非常に重要である。

日本はそのような研究を進めるための基盤 (拠点及びネットワーク観測) を計画・整備しつつあり、研究の発展に対する国際的な期待が大きい。

Q4: 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入は？

a. 研究の重要性と現状

太陽風から地球磁気圏を介して超高層大気へ侵入するプラズマや電磁場変動のエネルギーは、地球の磁力線が集まる極域に主に侵入する。この侵入したプラズマ・電磁エネルギーは、ジュール加熱やローレンツ力を通じて超高層大気を加熱し変動させる。これらの力学変動は、大気波動として中低緯度に伝搬していく。また、加熱に伴う大気組成の変化は物質輸送として中低緯度に広がっていく。さらに、極域に侵入した電磁場変動は、電離圏内をダクト伝搬する地磁気脈動や電離圏-地上の間をダクト伝搬する電場変動として低緯度に伝わる。これらの諸過程を通して、太陽風、磁気圏から極域に侵入した電磁エネルギーは、中低緯度の超高層大気の変動を引き起こしている。その代表例として、電離圏での電子密度が異常に増大、減少する正相、負相の電離圏嵐や、電場の侵入によって誘起される赤道域の電離圏不安定などが挙げられる。これらの現象は、衛星-地上間の通信や GNSS 衛星を用いた測位に大きな影響を与えるために重要である。しかし、これらのエネルギー、物質の中低緯度への伝搬過程の全体像を観測的に把握することは現状では難しく、また、モデル化においても電磁場変動と中性大気の力学変動を下層、

上層の境界条件も含めて解くことは難しい(例えば、Schunk and Nagy, 2000)。

一方で、下層大気において発生した大気波動は、中間圏界面付近で散逸して運動量を放出することにより、全球的な子午面循環を駆動することが明らかになっているが、その効果の正確な定量化(パラメータ化)が将来予測の精度を上げるための課題になっている。また、この運動量放出によって発生する二次的な波動や、中間圏で散逸しなかった波動が熱圏に侵入し、電離圏の変動を地球規模で引き起こしていることが最近の研究から明らかになっている(例えば、Vadas and Crowley, 2010)。これらの過程は、数時間スケールの大気重力波から数日スケールのプラネタリー波まで、広く発生していることが分かってきている。また、これらのプロセスは極域をその駆動源として、中低緯度にその影響が伝わっていくことが知られている。Q3 でも触れたように、近年の観測では、北極域成層圏で冬季に起こる突然昇温の影響が、北極上空だけでなく、遠く離れた赤道域電離圏や南半球の中間圏に現れることが明らかになっている。この原因として、大気波動の伝搬と運動量輸送が有力とされており、その全容解明に向けて多くの研究者が取り組んでいる。また、電離圏で頻繁に観測される伝

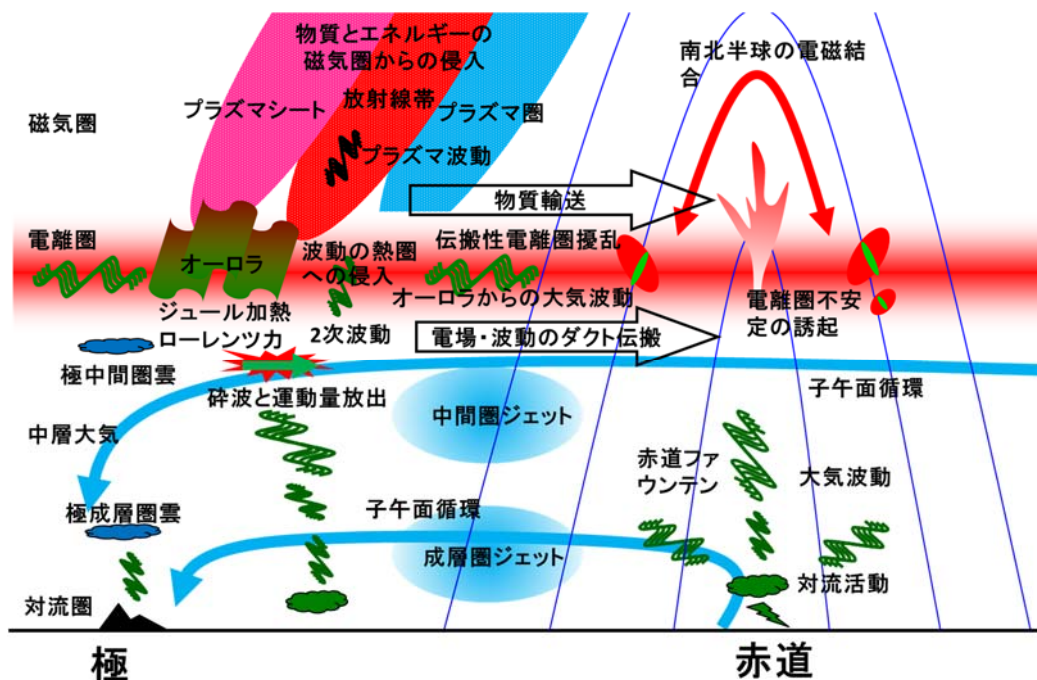


図 41 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入と関連現象の模式図

搬性電離圏擾乱は、下層大気やオーロラ帯からやってきた大気波動と、電磁場変動に左右される電離圏のプラズマ不安定の両者が成因と考えられており、両者を切り分ける研究が必要である（例えば、Makela and Otsuka, 2012）。

b. 今後の研究

中性大気変動と電磁場変動が複雑に絡み合った超高層大気における緯度間結合を理解していくためには、まず、この領域を駆動する上で鍵となる極域と赤道域において大気の上下結合を計測する大型大気レーダーなどの拠点観測と、アジア、アフリカ、アメリカの主要な3つの子午面において緯度方向に展開されている地上多点ネットワーク観測を活用することが重要である。特に極域では、プラズマ大気の複雑な時空間変動を観測するために、高時間分解能で3次元の観測が行える EISCAT_3D などの大型レーダーによる拠点観測が必須になる。また、子午面方向の地上多点ネットワーク観測では、高感度大気光カメラ、GNSS 受信器群、フアブリ・ペロー干渉計、流星レーダー、大型短波レーダー、磁力計等を組み合わせ、複数高度における電磁場変動と中性大気変動を同時に多点で観測することが必要である。また、大気潮汐やプラネタリー波は経度方向に構造を持つため、極域を中心として経度方向にリング上に観測点を展開することも重要である。これらの地上からのリモートセンシング観測を、電離圏高度の人工衛星による大気・プラズマの直接観測や広範囲をカバーできる人工衛星からの撮像観測と組み合わせて、グローバルな大気結合を測定することが必須である。日本の研究コミュニティは、地上多点ネットワーク観測や拠点観測、人工衛星観測の経験を豊富に有しており、将来の観測整備や拡張を通じて、緯度間結合の研究を、国際協力の枠組みの中で中心となって推進する役割を担っている。

モデル開発においては、地表面から熱圏、電離圏までを統一して解くことができる全大気圏モデルが、日本で先導して開発されてきた(例えば、Jin et al., 2011)。しかし、大気大循環の重要な駆動源である大気重力波を陽に¹⁰⁹生成できる空間解像度は有しない。また、太陽

風や磁気圏から侵入する電磁エネルギーとの電気的な結合過程も十分には含まれていない。これらの物理過程を今後、全大気圏モデルに含めていく必要がある。これらに加え、上記の地上・衛星観測のデータをモデルに取り込むために、データ同化の手法を取り入れていくことも検討しなければならない。また、長期かつ稠密な観測網が存在する地上磁場観測データを有効に活かすために、地上磁場観測と熱圏電離圏モデリングから計算された磁場変動の比較研究を実施する必要がある。

¹⁰⁹ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

北極環境研究の長期構想
(Long-term Plan for Arctic Environmental Research)

北極環境研究コンソーシアム
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)

2014年9月 発行
2015年3月 改訂

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
国立極地研究所 内

E-mail: jcar-office@nipr.ac.jp

ホームページ <http://www.jcar.org/>

北極環境研究の長期構想

目次

巻頭言	i
1章 報告書で目指すこと	2
2章 背景と内容	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化	4
4章 北極環境研究の歴史	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ	9
テーマ1：地球温暖化の北極域増幅	9
Q1：下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？	10
Q2：陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？	12
Q3：季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？	14
Q4：雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？	16
Q5：北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？	17
テーマ2：海氷減少のメカニズムと影響	19
Q1：風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？	20
Q2：海氷の熱的減少はどのように進むのか？	21
Q3：海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？	23
Q4：海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？	23
10～20年後を見据えた戦略	24
テーマ3：物質循環と生態系変化	30
Q1：大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？	31
Q2：陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	34
Q3：陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？	36
Q4：海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	38
テーマ4：氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環	42
Q1：氷床・氷河の変化は加速するか？	42
Q2：永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？	46
Q3：北極域の降積雪はどう変化しているか？	48
Q4：環北極陸域の水文過程はどう変化するか？	50
テーマ5：北極・全球相互作用	53
Q1：＜大気の影響について＞ 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？	54
Q2：＜海洋の影響について＞ 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？ ...	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？	93
【ボックス 2】生物多様性とは？	93
【ボックス 3】学名の不一致問題	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ	105
テーマ 10 : ジオスペース環境	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化 していったか？	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺 大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	124
【ボックス 8】 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？	133
8章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング	136
海洋圏モニタリング	137
雪氷圏モニタリング	140
【ボックス 9】 氷河質量収支の観測	142
大気圏モニタリング	143
陸域圏モニタリング	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状	161
【ボックス 10】 データ同化技術の解説	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備	169
9章 研究基盤の整備	173
砕氷観測船	173
衛星観測	175
航空機	177
海外の研究・観測拠点	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム	181
人材育成	183
研究推進体制	185

	分野別研究機器等	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209