

宇宙天気としての熱圏・電離圏変動の研究

藤原均¹、三好勉信²、陣英克³、品川裕之³、野澤悟徳⁴、小川泰信⁵、東尾奈々⁶

1. 成蹊大学 理工学部 2. 九州大学 大学院理学研究院 3. 情報通信研究機構
4. 名古屋大学 太陽地球環境研究所 5. 国立極地研究所 6. 宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

地球大気の領域は、気温の高度分布にしたがって、下方から対流圏、成層圏、中間圏、熱圏と分類される。熱圏は、およそ高度 90-100 km より上空の大気上端の領域である。太陽からの X 線や紫外線、また極地方では磁気圏から飛来する粒子の降り込みによって熱圏大気の一部は電離している。このことから、電子密度の高度分布に基づいて熱圏とオーバーラップするかたちで電離圏領域が定義されている。

熱圏・電離圏は、我々が暮らす対流圏とは大きく異なる。例えば、米国標準大気モデルによれば、高度 300 km では気圧は 8.77×10^{-8} hPa(地表面気圧の 100 億分の 1 程度)となっており極めて希薄な大気しか存在しないことがわかる。また、昼夜の気温差による気圧傾度やオーロラ現象に伴う極域加熱などによって常に数 10~数 100 m/s の風が吹く領域でもある。熱圏・電離圏は、太陽活動やオーロラ活動(地磁気活動)の影響を強く受ける一方で、近年、下層大気からの影響によっても大きく変動していることが明らかとなった。

高度から考えると、熱圏・電離圏は一般社会で言う「宇宙」であり、大気科学的には大気分子が流体としての振る舞いを示す「大気領域」でもある。この宇宙と地球大気のどちらでもある領域は、実社会との関わりでは、地上-地上間、地上-宇宙間、宇宙-宇宙間での電波通信において極めて重要な領域となっている。熱圏・電離圏の変動は Global Positioning System (GPS)による航空機や船舶の測位に極めて重大な影響を及ぼす。また、熱圏・電離圏は、低高度を周回する人工衛星の飛翔領域でもあり、磁気嵐の際に人工衛星に働く大気摩擦の増大によって人工衛星の姿勢制御を不能・困難とする可能性を有していることから、今後の高度な宇宙利用、宇宙機の運用に際して重要な領域になるものと考えられる。

2. 宇宙天気研究としての熱圏・電離圏の研究課題

高度な宇宙利用が促進されるにつれて、熱圏・電離圏の現象は宇宙天気としての重要度を増している。宇宙天気研究としての熱圏・電離圏の研究課題の例をあげると、例えば以下のようなものが考えられる。

- ・電離圏電子密度変動の予測

電離圏嵐の予測、高緯度でのオーロラ(地磁気)活動変化に伴う変動予測、低緯度でのプラズマバブルの予測、これらの変動の通信等への影響評価

- ・熱圏大気質量密度の時空間変動の理解

局所的な密度増大・減少の把握、太陽フレア・磁気嵐に際しての密度変動の理解、数値モデルによる季節変化の再現、高度 150-250 km の範囲での観測の推進と信頼度の高い統計モデルの構築、宇宙機への大気ドラッグの影響評価

- ・原子状酸素の時空間変動の理解

局所的な密度増大・減少の把握、太陽フレア・磁気嵐に際しての密度変動の理解、高度 150-250 km の範囲での観測の推進と信頼度の高い統計モデルの構築、宇宙機の表面素材への影響評価

以下では、熱圏大気質量密度の変動に関して、これまでの研究の経緯と今後の可能性について述べることとする。

3. 宇宙物体に対する熱圏大気密度の影響と大気密度計測

熱圏大気質量密度の重要性が強く認識されたのは、米国の宇宙機である Skylab の再突入時であると思われる。当時、モデルから推定した質量密度を用いた再突入の時間・軌道予測は、実際とは大きく食い違う結果となった。NORAD が 1979 年 4 月に行った予測では、再突入は 6 月 11 日から 7 月 1 日の間というものであったが、実際は 7 月 11 日であった(例えば、<http://www.ips.gov.au/Educational/> を参照)。

日本では、天文衛星の「あすか」の事故が代表的な事例としてしばしば取り上げられる。また、2011 年には米国の UARS、ドイツの ROSAT の落下が相次いで報道されたが、これらについても落下時刻、場所は直前まで不明であった。

熱圏大気質量密度の初めての計測は、人工衛星に働く大気ドラッグによる人工衛星の周回周期変化から推定したものであった(例えば、King-Hele, Nature, 1959)。現在でも、宇宙物体の軌道情報に基づいて大気質量密度を推定する試みが行われている。例えば、過去の軌道データを用いて、熱圏大気質量密度の 30 年程度のスケールでの時間変化を推定し、超高層大気の寒冷化との関係を議論している研究例もある(例えば、Keating, GRL, 2000)。

近年、高精度の加速度計を搭載した人工衛星 CHAMP(2000 年 7 月 15 日打ち上げ、2010 年 9 月 19 日ミッション終了)による熱圏大気質量密度計測は、これまでにない詳細な観測データを 10 年もの長きにわたって蓄積した(CHAMP の詳細は、http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html を参照)。図 1 は、CHAMP による磁気嵐時の高度約 400 km における熱圏大気質量密度の時空間変化の観測例(2003 年 10 月 29-31 日)を示したものであ

る(Liu et al., JGR, 2005)。磁気嵐に伴う高緯度へのエネルギー流入に伴って密度増大が起こり、それらが低緯度へと広がる様子や、局所的な密度分布が詳細に捕らえられていることがわかる。

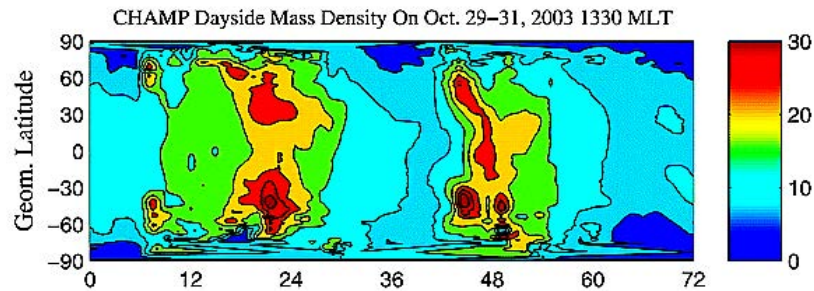


図1. CHAMPによる磁気嵐時の熱圏大気質量密度の観測例 (Liu et al., 2005)

図1の磁気嵐時におけるCHAMPの軌道に沿っての質量密度(高度400 kmでの値に換算済み)の変動を図2に示す(2003年10月29日のデータ)。図2では、質量密度が激しく変化する様子をさらに詳細に知ることが出来る。

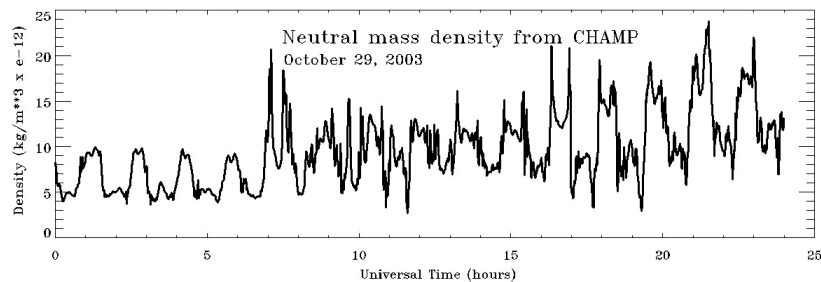


図2. 2003年10月29日における質量密度変動。CHAMPの軌道に沿っての値。

CHAMPによる観測から、高精度加速度計を搭載した人工衛星による熱圏大気質量密度の計測が極めて有効であることが示された。CHAMPでは10年間のデータの蓄積があるものの、残念ながら観測高度は400 km付近に限られている。今後、同様の衛星ミッションを様々な高度を対象として実施することが望まれる。また、超高層大気の寒冷化の問題と関連して、長期にわたって質量密度をモニターする試みも重要である。CHAMP後のミッションにより、同様の高度領域での密度計測を継続することも必要である。

4. 数値モデルを用いた熱圏・電離圏研究の試み

当研究グループでは、全大気領域を包含する大気モデルと電離圏モデルとを統合した数値モデルの開発に成功した(Jin et al., JGR, 2011)。現在、同モデルは Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy (GAIA)と名づけられ、下層大気が上

層大気に与える影響等を調べるために様々な数値シミュレーションを実施している。図3にGAIAでの計算例を示す(Miyoshi et al., JGR, 2011)。上図は高度400 kmでの熱圏大気質量密度の分布、下図は高度300 kmでの原子状酸素の混合比の分布である。

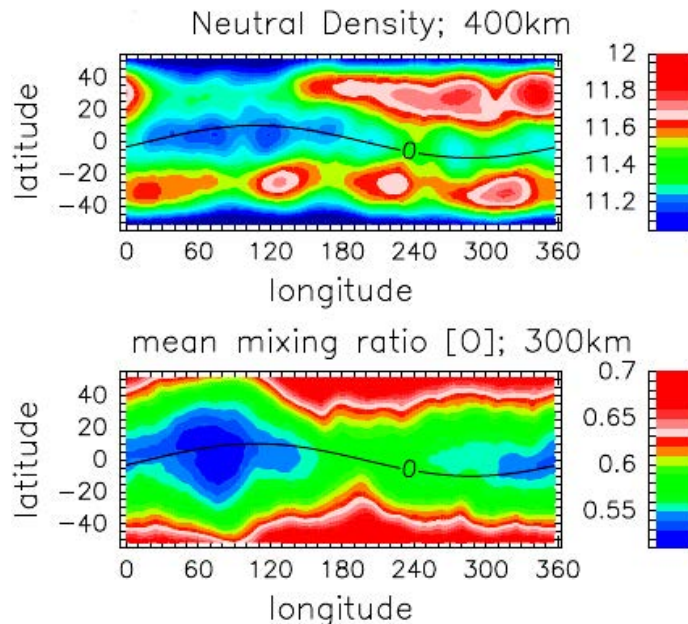


図3. GAIAによる高度400 kmでの熱圏大気質量密度の分布(上図)、高度300 kmでの原子状酸素の混合比の分布(下図)の計算例 (Miyoshi et al., 2011)。

この計算では、CHAMPによる観測結果として報告されてきた、磁気赤道をはさんでの大気質量密度のダブルピーク構造や、その南北非対称構造をよく再現している。GAIAでは、局所的な構造や、それらの時間変化、変動予測など、従来の統計モデルでは限界であった大気密度推定の実施を目指している。

5. まとめ

熱圏・電離圏領域は、宇宙空間へと飛び出す宇宙機にとっての宇宙への玄関口であると同時に、人工衛星や宇宙ステーションが飛翔する「宇宙環境」そのものでもある。さらに、地上・宇宙間での通信において電波が伝播する領域であることから、「宇宙天気」として様々な変動を捉えていく必要がある。

宇宙利用が促進されるにつれ、熱圏での大気密度変動の把握は重要な課題となりつつある。国内外の様々な観測(プロジェクト)が互いに連携し、また数値モデルによる現象の予測、将来予測のための研究を進める必要がある。