

GCM シミュレーション・レーダー観測 による熱圏温度構造の研究

藤原 均 (東北大理)・三好 勉信(九大理)・陣 英克(NICT)・品川 裕之(NICT)・寺田 香織
(東北大理)・野澤 悟徳(名大理)・前田 佐和子(京都女子大)・小川 泰信(極地研)

はじめに

近年の衛星・レーダー観測の結果は、従来考えられていた以上にダイナミカルに変動し、また高温の大気領域が極冠熱圏領域に形成されていることを示唆している。極冠域での温度分布を知り、熱源(エネルギー収支)を理解することがこの領域での大気の基本構造や基本的な物理過程を理解する上で不可欠であるが、大気温度の観測例や観測に基づく大気加熱率の推定例は極めて少ない。特に上部熱圏での中性大気温度の観測例は少なく、多くは光学観測に基づくことから、昼間や夏季極冠域での中性温度観測は現状ではほぼ不可能に近い。

一方、低緯度では、真夜中の温度極大(midnight temperature maximum: MTM)は良く知られた熱圏特有の温度構造である。MTMと同様に、質量密度の極大(midnight density maximum: MDM)、大気光の増光現象が知られているが、これらの振る舞いを統一的に説明可能な物理機構は今のところ提出されていない。例えば、MTMには顕著な太陽活動依存性はないという結果があるが(Faivre et al., 2005)、MDMの出現する時間(位相)には太陽活動依存性があるとしている研究もある(Arduini et al., 1997)。さらに、赤道異常 (Equatorial Ionization Anomaly: EIA) 周辺での中性大気質量密度の2コブ構造 (double-hump structure または Equatorial neutral Mass Anomaly: EMA) が発見された(Liu et al., 2005)。しかしながら、ここでの温度構造、風速分布の詳細はわかっていないほか、2コブ構造の成因も不明なままである。

このように、(磁気嵐などの激しい擾乱時ではなく)通常の熱圏温度・風速・密度分布に関して、熱圏大気の基本構造とも言うべき全体像や成因などに関して不明な点がいまだに多く残されたままである。我々のグループでは、上記課題のうち、極冠域での温度構造やエネルギー収支を理解するために、GCM シミュレーションと EISCAT Svalbard レーダー観測による研究を開始している。

1. 極冠熱圏領域の観測例

これまでの地上、衛星観測からオーロラ帯 (またはオーロラオーバル) で様々な擾乱現象が存在することが知られているほか、極冠域熱圏・電離圏においても様々な擾乱現象が観測されている。Innis and Conde (2001)は、Dynamics Explorer 2 による鉛直風観測データの統計解析から、極冠域全域での(小規模)大気重力波の活動度を示した。彼らの解析結果で興味深いのは、オーロラオーバルの低緯度側では大気重力波の活動度は大きくないが、オーロラオーバルで囲まれた極冠域では大気重力波起源の変動が至る所で見られる点である。Lühr らはカスプ領域での沿磁力線電流の増大とそれに伴う大気加熱が原因と考えられる大気質量密度の増大を CHAMP 衛星による中性大気質量密度、磁場(沿磁力線電流)観測から示した(Lühr et al., 2004)。極冠域での中性大気温度の観測では、例えば Killeen らのファブリーペロー干渉計による光学観測がある(Killen et al., 1995)。Killeen らは酸素原子 630 nm 発光の観測から、太陽活動極小、極大期の冬季上部熱圏での温度日変化を示した(極小期には温度日変化は極めてわずかであるが、極大期には顕著となる)。

2. GCM シミュレーション

従来、主に中層大気力学の研究に使われてきた九州大学 GCM の上端高度を熱圏上端にまで拡張し、世界初となる地表面から大気上端までを含んだ GCM が開発された(Miyoshi and Fujiwara, 2003)。この GCM は下層から上層大気にいたる大気変動を記述可能であり、近年話題となっている対流圏起源の電離圏変動にかかわる中性大気擾乱の数値シミュレーションに成功している(例えば、Miyoshi and Fujiwara, 2006, 2009; Fujiwara and Miyoshi, 2009)。

この GCM を用いた数値シミュレーションによれば、極域へのエネルギー流入量を同様にした場合、極冠域での熱圏温度日変化は、太陽活動極小期では夏季に比べ冬季に顕著となることが予測されている。また、下層大気に起源を持つと考えられる大気擾乱が極冠域での温度変化を複雑なものとしている可能性が示された(Fujiwara and Miyoshi, 2010)。

3. EISCAT Svalbard レーダー観測

これまでの観測から示されている極冠域での上部熱圏変動や、GCM シミュレーションから予測される温度変動、及びそれらの成因を理解するために、極冠域からオーロラ帯にかけての観測が可能な EISCAT Svalbard radar (ESR)観測データの解析を実施している。特に、2007 年から 2008 年にかけての International Polar Year (IPY)観測データは、太陽活動が極めて低調な期間の貴重なデータセットであり、熱圏・電離圏における大気の基本状態を理解する上で極めて有効と考えられる。

イオン温度は熱圏温度変動と関係の深い電離圏パラメータである。イオン温度と中性大気温度との間には近似的に以下の関係が成り立つ(例えば、Schunk and Nagy, 2000)。

$$\begin{aligned} T_i &\approx T_n + \frac{m_n}{3k_B} (\mathbf{V}_i - \mathbf{U}_n)^2 \\ &= T_n + \frac{m_n}{3k_B} \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} - \mathbf{U}_n \right)^2 \end{aligned}$$

T_i はイオン温度、 T_n は中性大気温度、 m_n は中性大気分子質量、 k_B はボルツマン定数、 $\mathbf{V}_i$ はイオン速度、 $\mathbf{U}_n$ は中性大気速度(風速)、 $\mathbf{E}$ は極域電場、 $\mathbf{B}$ は地球磁場である。上式によれば、右辺第二項の加熱によってイオン温度と中性温度との違いが生じることがわかる。ESR で観測されたイオン温度は、電離圏経験モデルである International Reference Ionosphere (IRI) モデル (Bilitza and Reinisch, 2008) の値に比べ大きな季節変動、また日変化を示している。一方、中性大気の実験モデルである NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) による熱圏大気温度と IRI イオン温度との間にも極冠域(ESR サイト)で約 250 K の温度差が存在している。ESR データの更なる解析から、イオン温度変動、イオン温度・中性温度差を説明可能な極冠域での加熱源、エネルギー輸送機構について理解することが今後の課題である。

4. まとめ

熱圏・電離圏の基本構造を理解するために GCM シミュレーションと EISCAT Svalbard radar (ESR)観測データの解析を開始している。

GCM シミュレーションから、極域へのエネルギー流入量を同様にした場合、極冠域の熱圏温度日変化は、太陽活動極小期では夏季に比べ冬季に顕著となることが予測される。また、下層大気に起源を持つと考えられる大気擾乱が極冠域での上部熱圏温度変化を複雑なものとしている可能性が示されている。

International Polar Year (IPY)の ESR 観測データ(2007 年～2008 年)を用いて、太陽活動極小期におけるイオン温度の季節・日変化を調べた。ESR で観測されたイオン温度は、電離圏経験モデルの International Reference Ionosphere (IRI)の値に比べ大きな季節・日変化を示した。このようなイオン温度変化は、極冠域での加熱源・エネルギー輸送機構の存在を示唆している。

参考文献

- Arduini, C., G. Laneve, F. A. Herrero (1997), Local time and altitude variation of equatorial thermospheric midnight density maximum (MDM): San Marco drag balance measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 377-380.
- Bilitza, D., and B.W. Reinisch (2008), International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Adv. Space Res.*, 42, 599-609.
- Faivre, M., J. W. Meriwether, C. G. Fesen, and M. A. Biondi (2006), Climatology of the midnight temperature maximum phenomenon at Arequipa, Peru, *J. Geophys. Res.*, 111, A06302, doi:10.1029/2005JA011321.
- Fujiwara, H., and Y. Miyoshi (2009), Global structure of large-scale disturbances in the thermosphere produced by effects from the upper and lower regions: simulations by a whole atmosphere GCM, *Earth Planets Space*, 61, 463-470.
- Fujiwara, H., and Y. Miyoshi (2010), Morphological features and variations of temperature in the upper thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, *Annales Geophysicae*, 25, 427-437.
- Innis, J. L., and M. Conde (2001), Thermospheric vertical wind activity maps derived from Dynamics Explorer2 WATS observations, *Geophys Res Lett*, 28(20), 3847, doi:10.1029/2001GL013704.
- Killeen, T. L., Y.-I. Won, R. J. Niciejewski, and A. G. Burns (1995), Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic field dependences, *J. Geophys. Res.*, 100, 21327. 21342.
- Liu, H., H. Lühr, V. Henize, W. Köhler (2005), Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP, *J. Geophys. Res.*, 110, A04301, doi:10.1029/2004JA010741, 2005.
- Lühr, H., M. Rother, W. Köhler, P. Ritter, and L. Grunwaldt (2004), Thermospheric up-welling in the cusp region: Evidence from CHAMP observations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06805, doi:10.1029/2003GL019314..
- 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, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695.
- Miyoshi, Y., and H. Fujiwara (2006), Excitation mechanism of intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 111, D14108, doi:10.1029/2005JD006993.
- Miyoshi, Y., and H. Fujiwara (2009), Gravity waves in the equatorial thermosphere and their relation to the lower atmospheric variability, *Earth Planets Space*, 61, 471-478.
- Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin (2002), NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107, 1468, doi:10.1029/2002JA009430.
- Schunk, R. W., and A. F. Nagy (2000), *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, 554pp, Cambridge University Press.