

高度 100km から 1,000km の大気変動と 衛星搭載加速度計によるその観測

Variations of the atmosphere between 100km and 1,000km altitude,
and their observations with satellite-borne accelerometers

齊藤 昭則

A. Saito

京都大学大学院理学研究科

Kyoto University Graduate School of Science

Email: saitoua@kugi.kyoto-u.ac.jp

Abstract:

The thermosphere is a very dynamic region with energy inputs from the lower atmosphere and the magnetosphere. Its variations are difficult to be predicted with empirical models such as the MSIS model, the IRI model, and HWM model because of its high day-to-day variability. Observational data of the neutral atmosphere higher than 100km altitude is limited because the observational technique is limited. The high accuracy measurement of satellite acceleration is expected to be a new powerful tool to study the dynamics of this thermosphere/ionosphere region. The air drag data clarify the response of the upper atmosphere to the energy input from the magnetosphere during the magnetically disturbed periods.

1. 熱圏領域の変動要因

高度 100km 以上に広がる熱圏は、太陽放射によるエネルギー流入に加え、まだ物理機構が十分に解明されていない下層大気からのエネルギー流入と、変動が激しく地域的に局在している磁気圏からのエネルギー流入があり、極めて変動の激しい大気領域である。しかしながら、地上からの観測は高度が高いため難しく、衛星観測も限られており、平均的な状態は理解されているものの、詳細な変動過程の理解は不十分である。このような熱圏大気の変動の激しさと予測の困難さを示す例としては、2000 年 7 月 15 日に X 線観測科学衛星「あすか」が高度 440km を飛翔中に磁気嵐に伴う急激な大気密度の上昇のために、姿勢が乱され、運用不能になった事があげられる[1]。これは、太陽風内の構造によって、太陽風から磁気圏へ流入したエネルギーと物質が、高緯度域熱圏へ流入し、大気を加熱する事によって熱圏大気の組成と密度の変化をもたらした結果と考えられる。

熱圏領域の変動の要因としては以下のものがあげられる。

- オーロラ粒子降下
- ジュール加熱
- 太陽 EUV/UV 加熱
- 下層大気からの潮汐波、大気重力波などの伝搬
- 熱圏内の大気重力波の発生と伝搬

これらによるエネルギーと物質の移動は全球数値シミュレーションによって再現され、その再現分解能は近年高くなってきているが、観測できる物理量が限られている事より、そのシミュレーション結果は観測的には検証されていない部分が多い。特に電波を用いて地上からの遠隔観測が容易な電離大気に比べて、中性大気は遠隔観測が光学観測か、電離大気の観測から導出するものに限られており、観測データは不十分である。

2. CHAMP 衛星搭載加速度計による変動

図1はCHAMP衛星搭載加速度計STARによって観測された衛星軌道方向の衛星加速度である[2]。実線が加速度の測定値で点線はDTM-94モデルから推定された加速度の予測値である。直線は衛星位置の磁気緯度であり右軸に示されている。特に高緯度領域において、モデルでは予測されていない小スケールかつ大きな振幅の変動が加速度計によって測定されている。この傾向は、大気抵抗が大きくなっている領域で特に顕著に見られる。中緯度域においてもモデルからのずれが大きい領域が見られ、小スケールの変動も生じている。

この観測は地磁気活動指数 K_p が5から6であり、地磁氣的に乱れた時期の観測である。このような変動

は、高緯度域熱圏への時間的にも空間的にも変動の激しい磁気圏からのエネルギー流入が生じ、超高層領域において密度変動、組成変動、中性風変動を起こした結果、衛星大気抵抗が変動したためと推定される。このような変動を経験モデルによって再現する事は不可能である。全球モデルにおいてはこのような変動が作られている事が見られるが、実際の現象の再現はまだ困難である。超高層大気物理学の立ち場からは、このような変動をもたらすエネルギー流入とそれに対する地球大気の応答の物理過程に興味があり、観測が限られている中性大気の測定データとして衛星搭載加速度計データは興味深い。

3. 超高層大気の実験モデルとその限界

熱圏・電離圏領域における実験モデルはいくつかの実験モデルが作られている。密度、組成、温度のモデルとして広く使われているモデルとしては、中性大気ではMSISモデル[3]であり、電離大気モデルとしてはIRIモデル[4]である。これらは、太陽活動度、地磁気活動度、季節、地方時、緯度、経度などで観測データを平均化した実験モデルであり、日々の変動を正確に記述できるわけではない。超高層領域における日々変動の例として、国土地理院GEONETで観測された日本上空の14時における電離圏全電子数の緯度勾配を図2に示した。2002年一年間の変動としては春と秋に大きくなり夏に小さいという季節変動が見られるが、それよりも日々の変動が大きい事が見て取れる。270日付近の減少は地磁気擾乱によるものと考えられる。日本上空の全電子数の緯度勾配は日本の低緯度側で電子密度の極大を持つ赤道異常の発達によって左右されており、この発達には太陽放射による電離大気の生成量以外に風と電

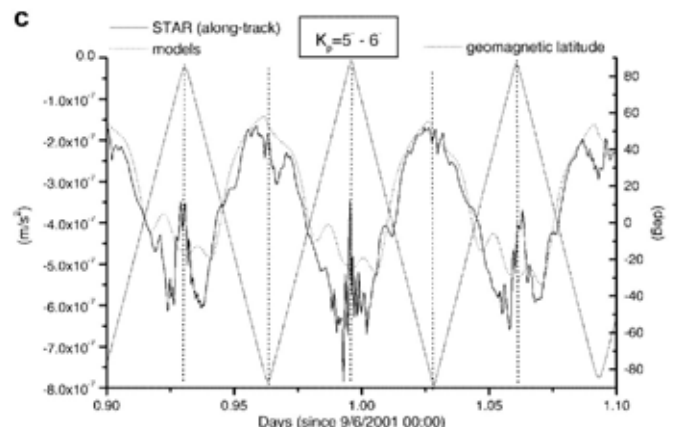


図1: CHAMP衛星搭載加速度計による衛星加速度の観測とDTM-94モデルによる予測値 [Bruinsma et al., 2003]

場による輸送過程が影響している。図2に見られるような変動からこれらの輸送過程の日々の変動が大きい事が分かる。このような中緯度における電離大気の輸送過程や生成過程の日々変動も磁気圏から高緯度域へのエネルギー流入と下層大気からのエネルギー流入によると理解されているが、このような日々の変動を起こす物理過程は十分には分かっておらず、予測は現在の所困難である。また、このような日々変動の大きさは経験モデルによる記述の限界を示している。超高層域における中性大気風のモデルとしてはHWMモデルがあげられるが[5]、やはり、平均量としては正しいが、日々の変動が大きく、ある時の風を正確に記述する事は出来ない。

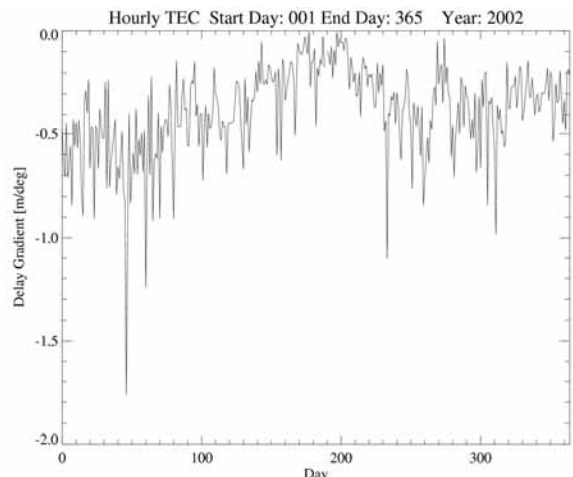


図 2: 14:00LT の GPS-TEC の緯度勾配の 2002 年一年間の変動

3. 衛星観測への期待: 超高層の「流れ」も見たい

高度 100km 以上の超高層領域は他の大気領域と異なり、磁気圏からの局在化した断続的なエネルギー入力があるため、非常に変動が激しい領域である。風速としても 400m/s スケールの風が激しく変動している。そのため、経験モデルによる平均的な描像の記述では限界がある。この領域の地上からの観測手段としては、磁場観測による電流測定、レーダーによる電場測定、光学観測によるオーロラの形状の観測や中性大気温度・風の測定などがあるが、いずれも測定できる物理量が限られ、観測領域も限定されている。その一方で近年の計算技術の進歩により、全球数値モデルは進歩し、大気変動の詳細な記述が出来るようになってきている。この数値モデルを用いる事によって、複雑に絡み合っている超高層大気の物理過程を明らかにできると期待されるが、特に中性大気に関する観測データが少ない事が問題である。衛星搭載加速度計による大気抵抗のデータは、このような中性大気の大気密度の変化を与えるため、他の地上及び衛星からの超高層大気観測手段を補うデータになると期待される。地磁気擾乱時の激しい密度変動を捉え、その変動を全球シミュレーションと比較する事によって、物理過程の理解と、超高層領域におけるエネルギーの流れを捉えられると期待される。

また、衛星への大気抵抗の変動を詳細に測定し、数値モデルを用いた予測に繋げる事が出来れば、低軌道衛星の軌道予測や大気抵抗の急増による障害への対策へも貢献できると期待される。

参考文献

- [1] <http://www.astro.isas.jaxa.jp/asca/news/article/2000/0715/>
- [2] S. Bruinsma, S. Loyer, J. M. Lemoine, F. Perosanz, D. Tamagnan, “The impact of accelerometry on CHAMP orbit determination”, *Journal of Geodesy*, 77, 86-93 DOI 10.1007/s00190-002-0304-3, 2003.

- [3] A.E. Hedin, "MSIS-86 Thermospheric Model", *J. Geophys. Res.*, 92, 4649-4662, 1987.
- [4] D. Bilitza (Ed.), *International Reference Ionosphere 1990*, Rep.90-22, Natl. Space Sci. Data Cent., Greenbelt, Md., 1990.
- [5] A.E. Hedin, E. L. Fleming, A. H. Manson, F. J. Schmidlin, S. K. Avery, R. R. Clark, S. J. Franke, G. J. Fraser, T. Tsuda, F. Vial and R. A. Vincent, Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 58, No. 13, pp. 1421-1447, 1996.