

# Coupling of Neutral Atmosphere with Plasma in the Upper Atmosphere (超高層大気における大気とプラズマの結合過程について)

渡部重十 (北海道情報大), 山本真行 (高知工科大), 柿並義宏 (国立苫小牧高専)  
阿部琢美 (ISAS/JAXA), 羽生宏人 (ISAS/JAXA), 山本衛 (京大生存圏研)  
M. Larsen (クレムソン大学)

## 1. はじめに

1964年に実施した日本で最初のサウンディングロケット実験で原子状のNaをロケットから放出しNa雲を超高層大気中に生成した (<http://www.isas.jaxa.jp/j/about/history/>)。Na雲は太陽光を共鳴散乱し発光する。地上に設置したカメラでNa雲を捉えることにより超高層大気の流れを推定することができる。日本のサウンディングロケットでCsやBaなどの放出を1970年後半まで実施した (Nakamura, Kato, 1974)。NASA、ISRO等も同様の実験を1980年ころまで実施している (例えば、Rees 1977, Rees et al. 1979, Ledley et al. 1985)。

最近の高感度 CCD カメラを用いることで、原子の雲による微弱な共鳴散乱光を撮像することが可能となるだけでなく、デジタル化されたデータを処理することも容易になる。ISRO等との技術的な議論を経て、原子状のリチウムをロケットから放出する機器を製作した (Habu et al., 2013)。地上観測機器も整備し、2007年に大気とプラズマの相互作用を解明する目的で内之浦からロケットを打ち上げた。WINDs キャンペーンとして、レーダー、GPSTEC、大気光観測との共同研究を実施した (Uemoto et al. 2010, Watanabe et al. 2013)。2011年に内之浦でWINDs-2、2013年に米国との共同でDynamo実験を実施した。リチウム原子による共鳴散乱光を捉えるために、太陽光が熱圏大気に入り込んでいる夕方 (WINDs-1)、明け方 (WINDs-2)、日中 (Dynamo) に実施した。2013年にE層とF層の結合過程を調べるためのロケット実験を実施した。太陽光の代わりに月光を利用したリチウム原子雲による散乱光を世界で初めて捉えた。TMAの放出も行うために2機のロケットを使用しTMAとリチウム雲を地上と飛行機からの同時観測に成功している。

熱圏大気中に存在するプラズマ (電離層) の電離率は $10^{-4}$ 以下である。プラズマの構造と運動は熱圏大気の流れの影響を強く受けるが、逆にプラズマの構造と運動が熱圏大気の流れに影響を与えるとは考えられていなかった。Hedin, Mayr (1973) はOGO6に搭載したNeutral Mass Spectrometerにより中性大気密度が電子密度の赤道異常と同じような密度変動が磁気赤道域に存在していることを報告した。Raghavaro et al. (1991) はDE2衛星を用いて同様の構造を見出し、さらに磁気赤道上で中性大気風が強まることを発見した。しかし、これらの研究が注目を浴びることはなかった。

Maruyama et al. (2003) はRaghavaro et al. (1991) により発見された現象の物理化学的な過程を解明するために、熱圏大気と電離層プラズマの結合過程を取り入れた熱圏電離層3次元モデルを開発しRaghavaro et al. (1993) の結果を再現することに成功した。この結果は熱圏大気とプラズマがその場での衝突による直接の相互作用だけでなく磁力線に沿って下部の大気プラズマ結合が熱的効果も含めて高高度の大気とプラズマに影響を与えている可能性を指摘した。

Liu et al. (2007) はCHAMP衛星に搭載された加速度計のデータから高度400kmでの中性大気密度と東西風を推定した。Hedin, Mayr (1973)やRaghavaro et al. (1993)による観測結果を再確認しただけでなく、空間時間分布と変動、太陽活動依存性などを明らかにした。Liu et al. (2009) とWatanabe, Kondo (2011) はDE2に搭載した大気プラズマ分光器のデータでもCHAMPと同様の構造を捉えていることを明らかにした。Watanabe, Kondo (2011) は磁気赤道上での中性大気風は高度200kmから600kmにまで連続して存在していることを明らかにした。Kondo et al., (2011) はCHAMP衛星とDE2衛星の結果をモデルで再現し、熱圏大気での粘性が重要であることを明らかにした。熱圏大気の流れを引き起こしている物理的原因は波長の小さな重力波の存在である。

## 2. ロケット実験による中性大気風と重力波の観測

2007年から WINDs キャンペーンとして実施した一連のロケット実験で熱圏と熱圏下部の中性大気風を測定した。すべてのロケット実験で高度 100km 付近に風速 100m/s ほどの中性風シアーが観測され高高度から見ると時計回りに回転していた。高速中性風は 40km ほどの高度領域に集中している。さらに図 1 に示すように高速中性風は鉛直波長 5km ほどの変動を伴っている。

### WINDs-2: Lithium in Thermosphere

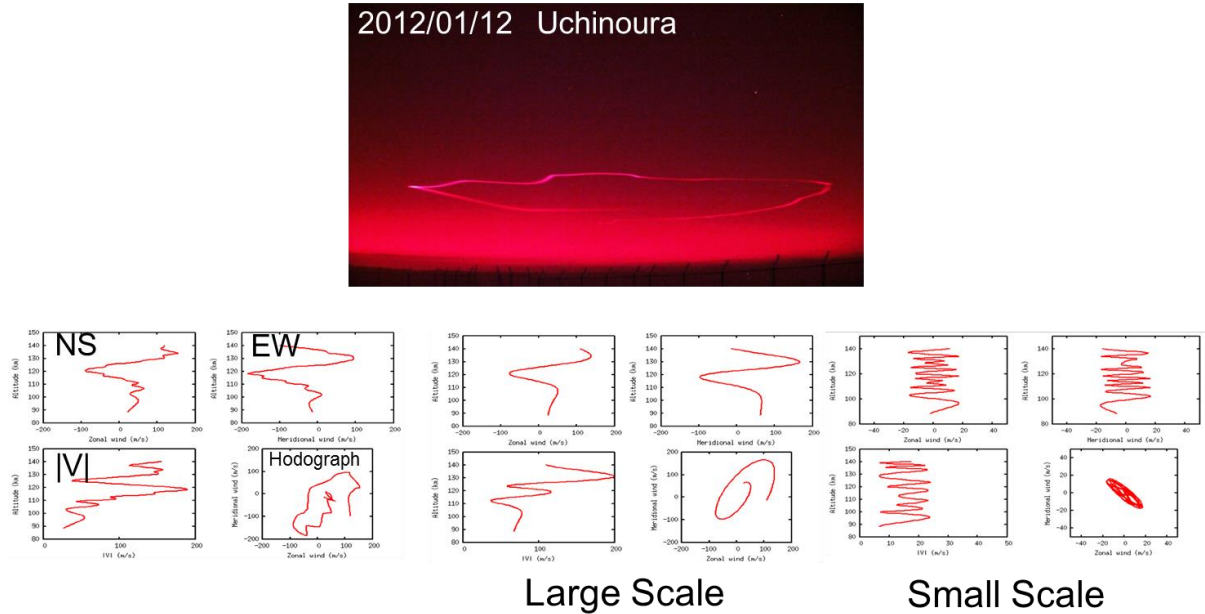


図 1. WINDs-2 ロケット実験によるリチウム雲発光。  
内之浦から撮像した TMA 雲

熱圏大気に生成した TMA や原子状雲の運動から風速を求める場合、複数観測点の画像データから三角測量の手法を用いて推定する。しかし、リチウム雲のように拡散が早く積分効果で明るい領域が現れる場合は、特徴的な構造が明瞭に見えず三角測量の手法を用いることは困難である。そこで、モデリングと観測を組み合わせることで風速を推定する手法を開発した。

中間圏や熱圏に生成した雲は、背景の大気風に流されて特徴的な雲の構造が形成されると考える。風速を以下で与え、 $u_\theta, u_\varphi$  は高度  $z$  の関数とした南北風と東西風である。

$$u_\theta(z) = u_0(z) \cos(\omega_0(z)) + \sum_{i=1}^n \left( (u_{ia} \cos(\omega_i z) \cos(\varphi_i) - u_{ib} \sin(\omega_i z) \sin(\varphi_i)) e^{-\alpha_i (z-z_{pi})^2} \right) \quad (1)$$

$$u_\varphi(z) = u_0(z) \sin(\omega_0(z)) + \sum_{i=1}^n \left( (u_{ia} \cos(\omega_i z) \sin(\varphi_i) + u_{ib} \sin(\omega_i z) \cos(\varphi_i)) e^{-\alpha_i (z-z_{pi})^2} \right) \quad (2)$$

ここで、

$$u_0(z) = \frac{(u_{0u} + u_{0d})}{2} + \frac{(u_{0u} - u_{0d})}{2} \tanh\left(\frac{z - z_{0u}}{z_w}\right) \quad (3)$$

$$\omega_0(z) = \frac{(\omega_{0u} + \omega_{0d})}{2} + \frac{(\omega_{0u} - \omega_{0d})}{2} \tanh\left(\frac{z - z_{0w}}{z_w}\right) \quad (4)$$

である。観測データと一致するパラメータ

$$u_{0u}, u_{0d}, \omega_{0u}, \omega_{0d}, z_{0u}, z_w, u_{ia}, u_{ib}, \omega_i, \varphi_i, \alpha_i, z_{pi}$$

を求めることで風速を推定する。リチウムはロケットの軌道に沿って放出され、観測中に風速は変化していないと仮定した。また、鉛直流はゼロとした。

2013年に米国との共同実験として、Wallops 島でロケット実験（Dynamo 実験）を実施した。ロケットは 14 地方時に打ち上げ昼間のリチウム雲の変動を世界で初めて詳細に観測した。WINDs で観測したリチウム雲と同様の変動が昼間時でも観測された。

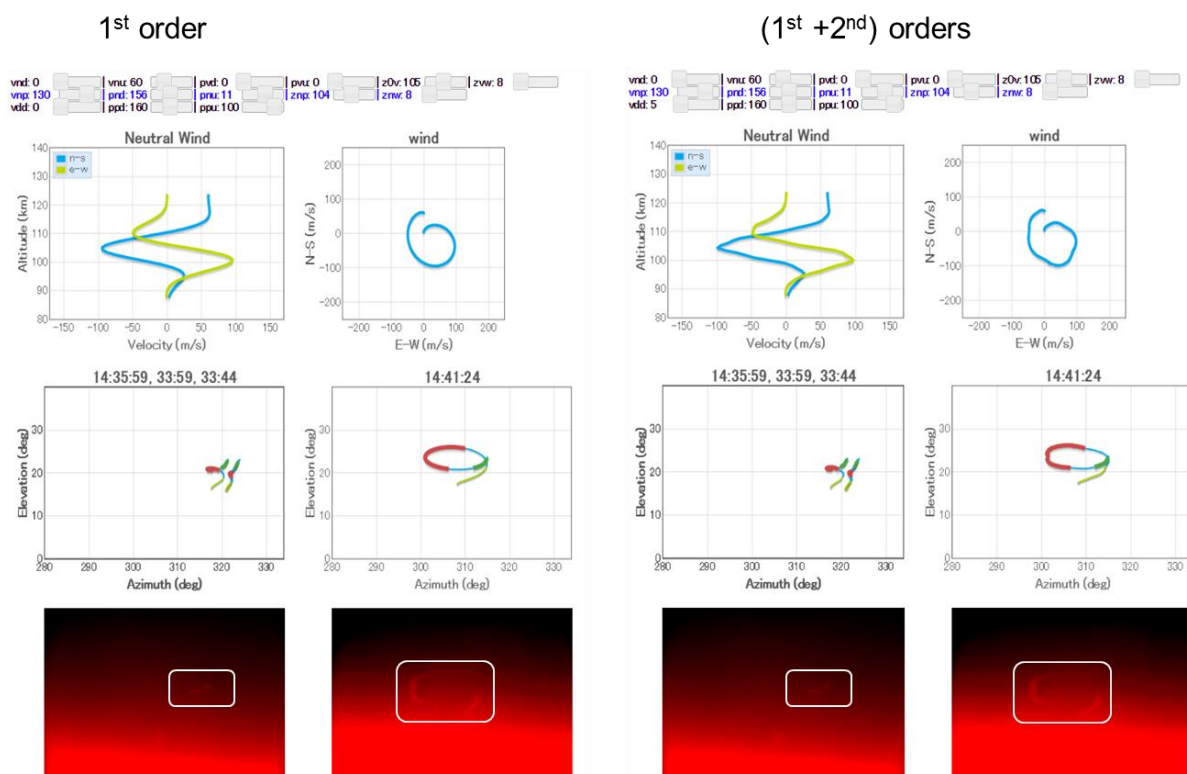


図 2. Dynamo ロケット実験によるリチウム雲発光。  
Wallops から撮像した TMA 雲

### 3. 結果

式 1,2 において  $n$  を 2 までとして推定した風速分布を図 1 と図 2 に示している。明け方 (WINDs) と昼間 (Dynamo) とともに高度 100km 付近に  $\sim 100\text{m/s}$  の中性風速と風速シアが存在している。こららの中性風は高高度から見て時計方向に回転している。下層大気のオゾン層で生成された潮汐波が熱圏大気下部にまで伝搬してきた波である。 $n$  を 1 までとした場合は小さな変動を伴う観測結果を十分に説明することができない。少なくとも  $n$  は 2 以上が必要である。モデルと観測の比較から熱圏下部大気に存在する高速中性風は鉛直波長  $5\text{km}$  ほどの変動を伴っているようである。この小さな中性大気風速の変動は  $5\text{m/s}$  程度の風速変化に対応している。熱圏下部と熱圏に存在する重力波であり、これが熱圏大気の粘性の原因であると考えられる。

### 4. まとめ

観測ロケットからのリチウム放出による中性大気風速推定を、2007 年の WINDs-1、2011 年の

WINDs-2、2013年のE-F結合について行った。2013年のロケット実験では太陽光の代わりに月光を利用してリチウム雲を数分間観測した。これは世界初の試みである。

風速を推定するのに、三角測量の手法ではなくモデリングを利用した。この手法は、リチウム雲のように特徴的な構造を持たない場合や長時間観測のTMAによる高精度風速を推定するのに有効である。

すべてのロケット実験で風速シアーが高度100km付近に存在していた。風速は高高度から見て時計方向に回転している。また、小さな構造（風速変動）が付随している。5m/s程度の風速で5kmほどの鉛直波長である。風速シアーは潮汐波によるものであり、小さな変動は大気重力波によるものとする。Larsen (2002)は高度100km付近に速度シアーが存在し変動が大きいことをTMAデータから得ている。Larsenや我々のロケット実験結果は、熱圏大気の風速分布、特に高度100km付近の熱圏下部風速分布はHWMモデルと大きく異なっていた。

### 参考文献

- 渡部重十、山本真行、柿並義宏、阿部琢美、羽生宏人、山本衛、M. Larsen、サウンディングロケットによる熱圏・中間圏大気の観測、大気圏シンポジウム、2014年  
ロケット実験の歴史：<http://www.isas.jaxa.jp/j/about/history/>
- Habu, H., M. Yamamoto, S. Watanabe, and M. F. Larsen, Rocket-borne Lithium ejection system for neutral wind measurement, pp53-62, An Introduction to Space, Instrumentation, ISBN No.: 978-4-88704-160-8, 2013
- Hedin, A. E., and H. G. Mayr (1973), Magnetic control of the near equatorial neutral thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 78, 1688–1691
- Kondo, T., A. D. Richmond, H. Liu, J. Lei, and S. Watanabe, On the formation of a fast thermospheric zonal wind at the magnetic dip equator, *J. Geophys. Res.*, VOL. 38, L10101, doi:10.1029/2011GL047255, 2011
- Larsen, M.F., Winds and shears in the mesosphere and lower thermosphere: Results from four decades of chemical release wind measurements, *J. geophys. Res.*, VOL. 107, NO. A8, 1215, 10.1029/2001JA000218, 2002
- Ledley, B. G., et al., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1985
- Nakamura, J., Kato, S., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1974
- Maruyama, N., and S. Watanabe, T. J. Fuller-Rowell, Dynamic and energetic coupling in the equatorial ionosphere and thermosphere, *J. Geophys. Res.*, VOL. 108, NO. A11, 1396, doi:10.1029/2002JA009599, 2003
- Raghavarao, R., L. E. Wharton, N. W. Spencer, H. G. Mayr, and L. H. Brace (1991), An equatorial temperature and wind anomaly (ETWA), *Geophys. Res. Lett.*, 18(9), 1193–1196
- Rees, D., *J. Geophys. Res.*, 1977.
- Rees, D., et al., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1979.
- Uemoto, J., Takayuki Ono, Tomohisa Yamada, Tomonori Suzuki, Masa-Yuki, Yamamoto, Shigeto Watanabe, Atsushi Kumamoto, and Masahide Iizima, Impact of lithium releases on ionospheric electron density observed by impedance probe during WIND campaign, *Earth Planets Space*, 62, 589–597, 2010
- Watanabe, S., and T. Kondo (2011), Ionosphere - thermosphere coupling in the low latitude region, in *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*, Springer, Berlin.
- Watanabe, S., T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, WINDs Campaign - Ion-Neutral Coupling in the Thermosphere -, *International Symposium on Space Technology and Science*, 2013, [http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2013-m-20.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-20.pdf)