

サウンディングロケットによる熱圏・中間圏大気の観測

渡部重十 (北海道情報大), 山本真行 (高知工科大), 柿並義宏 (高知工科大)
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年に日本で最初のサウンディングロケット実験が実施された (<http://www.isas.jaxa.jp/j/about/history/>). ロケットから原子上の Na を放出し Na 雲を生成した. この雲は太陽光を共鳴散乱し発光する. 地上のカメラで Na 雲を捉えることで超高層大気の風速を推定することができる. その後, Cs や Ba などの放出を 1970 年後半まで実施している (Nakamura, Kato, 1974). NASA, ISRO 等も同様の実験を 1980 年ころまで実施した (例えば, Rees 1977, Rees et al. 1979, Ledley et al. 1985). しかし, その後の実験は実施されていない. 理由は不明であるが, 地上観測の困難性と推定する風速の不確かさが原因だったのかもしれない.

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であり, デジタル化されたデータを処理することも容易である. そこで, ISRO 等との技術的な議論を経て, 原子上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). その後, 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. このロケットにもリチウム原子放出機器を搭載し, 太陽光の代わりに月光を利用した. また, TMA の放出も行うために, 2機のロケットを使用した. 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た.

2. 観測と解析手法

2013 年 7 月 20 日 23 地方時に S-310-号機から TMA を放出し, 1 時間後に S-520-号機からリチウムを放出した. TMA は上昇時の 80km~137km と下降時の 134km~62km に放出し, リチウムは下降時の 120km 以下に放出した. 両者は 1 時間離れており, 空間的には 300km ほど離れている (図 1).

上昇時と下降時に内之浦で撮像した TMA 雲を図 2 に示す. 上昇時の ϕ 構造と下降時のループは, TMA 放出高度に風速シアが存在していたことを示している.

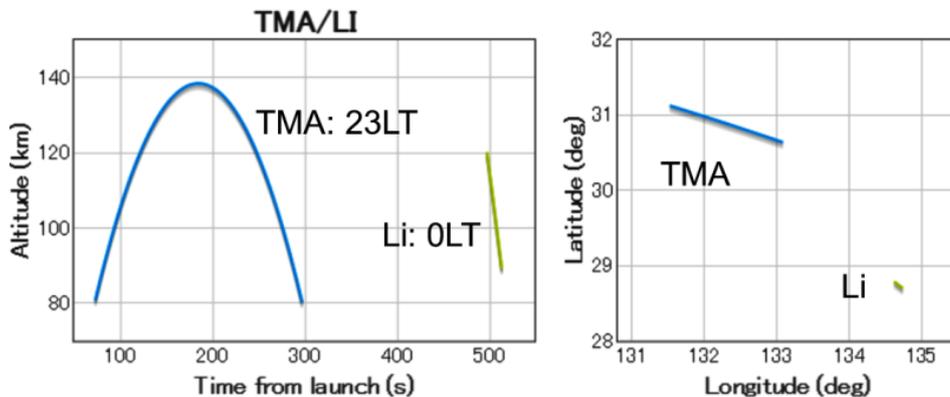


図 1. TMA とリチウムの放出高度と緯度・経度.

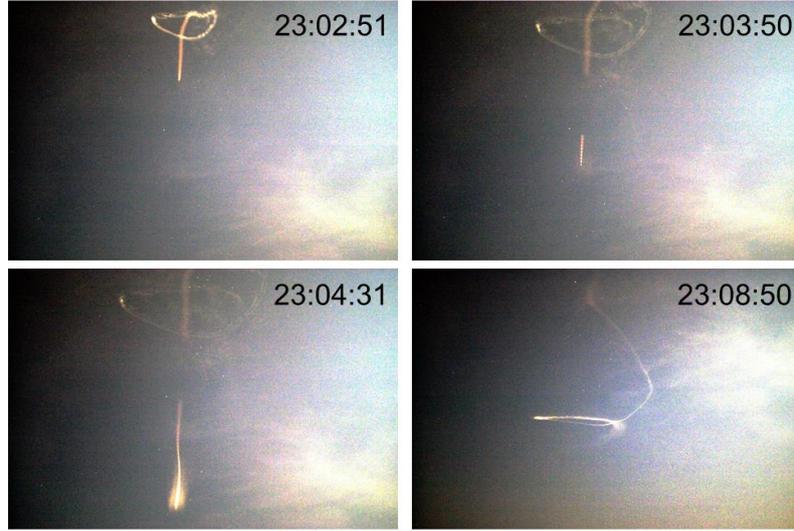


図2. 内之浦から撮像した TMA 雲

TMA やリチウム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い場合は、特徴的な構造が明瞭に見えず、三角測量の手法を利用することは困難である。TMA の長時間観測画像データを利用する場合も同様の問題が存在する。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検討した。

中間圏や熱圏に生成した雲は、背景の大気の流れ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_θ, u_ϕ は高度 z の関数としての南北風と東西風である。

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

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

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

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

を求めることで風速を推定する。TMA と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。

3. 結果

TMA について、 n を 3 までとして推定した風速分布と観測との比較を図 3 に示す。図 3 上左に南北風と東西風を示す。高度 100km 付近に、 $\sim 100\text{m/s}$ の風速と風速シアが存在している。この

風は高高度から見て時計方向に回転している (図 3 上右). モデリングと観測の比較を図 3 中, 観測を図 3 下に示す. 非常によい一致が見られる. また, 観測ではさらに小さな構造が存在している. 5m/s 程度の風速変化であり, 高度方向に 2km 程度の波長になっている.

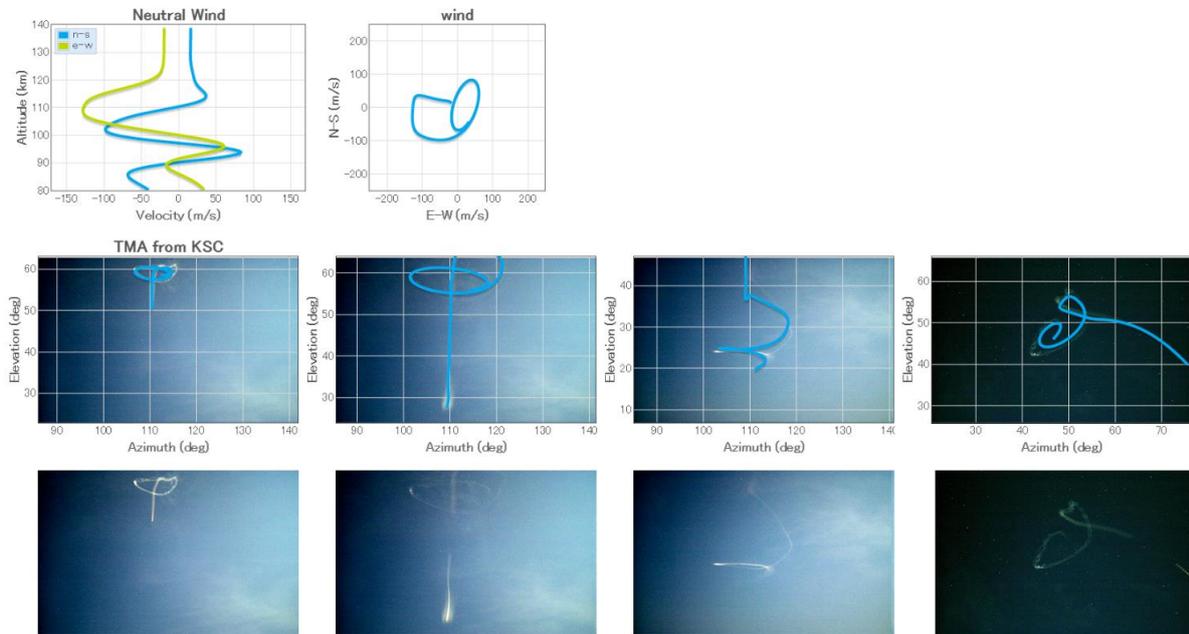


図 3. 推定した風速分布と TMA 観測との比較

モデルと TMA の比較から推定した風速分布を用いてリチウム雲との比較を行った (図 4). リチウム雲の時間変化をモデルは再現している. TMA とリチウム雲の観測時間差は 1 時間ほどあるが, この間に風速は大きく変化していなかったことを示唆している.

図 5 は Larsen (2002) が TMA 放出により求めた風速分布とその時の HWM モデルを示している. TMA から求めた風速は, 高度 100km 付近に大きな変動が存在しているが HWM モデルでは見られない. 図 5 右は, 2007 年の WINDs-1, 2011 年の WINDs-2, 2013 年の TMA とリチウムから推定した風速である. Larsen(2002)の結果と同様の風速変動 (風速シア) が高度 100km 付近に存在している.

E-F Region Coupling: 2013/7/20 at Uchinoura Lithium from airplane at 13 km altitude (OLT)

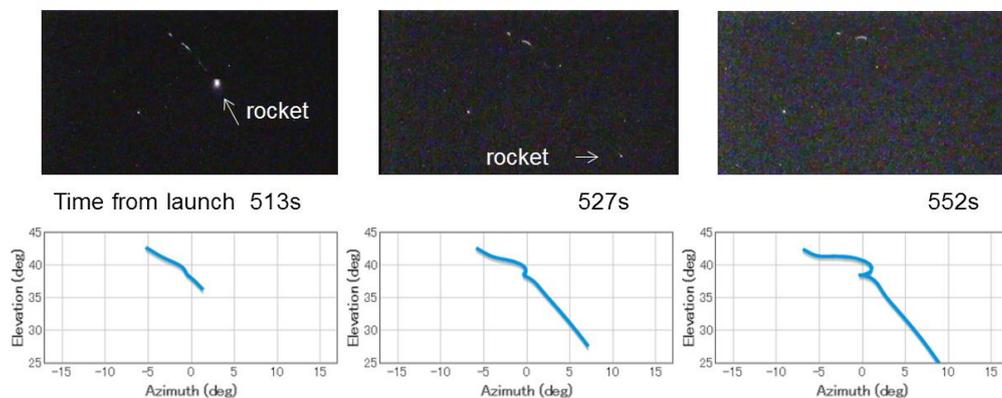


図 4. リチウム雲とモデリングとの比較

Winds in the mesosphere and lower thermosphere

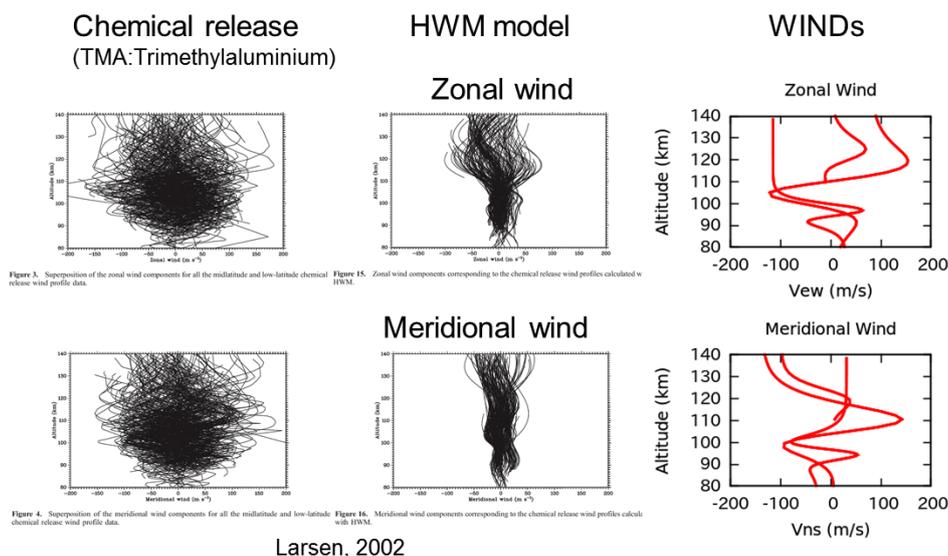


図 5. TMA, HWM, WINDs キャンペーンによる風速分布

4. まとめ

観測ロケットからのリチウム放出による風速推定を、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アが高度 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、小さな構造が付随している。5m/s 程度の風速で 2km ほどの高度波長である。風速シアア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考えられる。これらの風速分布は HWM モデルと大きく異なっていた。

参考文献

- ロケット実験の歴史 : <http://www.isas.jaxa.jp/about/history/>
- H. Habu, 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
- 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.,
- 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., 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