

北極域流星レーダーで異常増大の観測された両極性拡散係数の考察

堤 雅基 (極地研)、小川 泰信 (極地研)、野澤 悟徳 (名古屋大 ISEE)、
Chris Hall (Arctic university of Norway)

1 はじめに

VHF 帯の流星レーダーを用いて電離流星飛跡からのエコーを観測すると、エコー強度の減衰から、両極性分子拡散係数を推定できる。電子およびイオンの温度が中性大気温度と等しいとみなせる条件下では、両極性拡散係数を中性大気温度推定に用いることができる。その導出手法が開発され、中低緯度から高緯度帯に位置する流星レーダーを用いて、上部中間圏から下部熱圏域の大気温度観測がなされてきた [e.g. Tsutsumi et al., 1994, 1996; Hocking et al., 1999, 2004]。

ところが、国立極地研究所が北極域のトロムソ (69N, 19E) およびスパールバル (78N, 16E) において実施している流星レーダー観測から、中性大気温度変動の影響とは考えにくい両極性分子拡散係数値の大幅な増大が冬期を中心に観測されることが明らかとなった。トロムソでは、EISCAT レーダー [Folkestad et al., 1983] やナトリウム温度ライダー [Nozawa et al., 2014] も運用されており、本研究ではこれらのデータを組み合わせた複合観測から、北極域上部中間圏・下部熱圏領域の中性およびプラズマ大気の振る舞いを探ることを目的とする。

2 両極性拡散係数の観測原理

惑星間空間を漂うダストが地球大気に突入して大気との摩擦で発熱して発光する現象が流星である。その熱により大気は電離され、細長い円柱状の電離流星飛跡を形成する。この飛跡は電波を強く散乱し、MF 帯から VHF 帯のレーダーによる観測ができる。電離飛跡は形成後に分子拡散により径方向に急速に拡散し、レーダーエコー強度は時間とともに指数関数的に減衰する。その減衰時定数から流星飛跡中プラズマの両極性拡散係数 D_a を推定することができる [McKinley, 1961]。 D_a は、電子及びイオンの拡散係数、さらに電子およびイオンの温度と以下のような関係を持つ。

$$D_a = \frac{\mu_e D_i + \mu_i D_e}{\mu_e + \mu_i} \approx D_i \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \quad \text{式 1}$$

ここで、 μ_e および μ_i はそれぞれ電子及びイオンの移動度、 D_e および D_i はそれぞれ電子およびイオンの拡散係数、 T_e および T_i はそれぞれ電子およびイオンの温度である。高度 110 km 程度以下においては、概ね T_e および T_i は中性大気温度 T_n に等しいと考えられ ($T_e = T_i = T_n$)、 $D_a = 2D_i$ の関係が成り立つとの仮定が流星エコー観測においてはなされてきた。さらに、分子拡散は温度の関数であることから、 D_a を上部中間圏・下部熱圏の中性大気温度情報源として利用する手法が開発され利用されている [e.g. Tsutsumi et al., 1994, 1996; Hocking et al., 1999, 2004]。Tsutsumi et al. [1996] の手法では、主に大気重力波などに伴う大気温度変動に着目し、中性大気温度 T_n と D_a の相対変動量の関係式を導いた。

$$\frac{T'_n}{T_{n0}} = \frac{1}{2} \frac{D'_a}{D_{a0}} \quad \text{式 2}$$

ここで、 T_{n0} および D_{a0} はそれぞれ中性大気温度および両極性拡散係数の時間平均値、 T'_n および D'_a はそれぞれ時間変動量である。この関係をもとに、主に中低緯度の流星エコー観測による大気重力波解析

が行われている [e.g. Nakamura et al., 1997].

3 北極域における観測結果

図 1 に静穏時におけるトロムソ流星レーダー観測の典型的な例を示す。2004 年 7 月 28-30 日に観測された 1 時間平均値の東向き風速 (上)、北向き風速 (中)、両極性拡散係数の相対変動 (下) であり、位相が時間とともに下向きに伝搬する構造が認められる。Nakamura et al. [1997] などでは報告された中低緯度の流星エコー観測結果と同様の構造であり、大気潮汐波や大気重力波に伴う風速および温度変動がとらえられていると考えられる。両極性拡散係数は 20-30% 程度の範囲で変動し、温度に変換すると 10-15% 程度 (20-30K) の変動となる。トロムソの夏期にはこのような例が多い。

一方、冬期においても同様の構造が頻繁に観測されるが、両極性拡散係数においては、風速場とは明らかに異なる高度構造を示す場合のあることが本研究で初めて見出された。その例として、2012 年 1 月の 1 か月間における観測結果を図 2 に示す。風速変動には、図 1 の例と同様に下向き位相伝搬を示す構造が観測期間を通して明瞭に認められる。一方、両極性拡散係数の相対変動量 (最下段) は、高度方向に揃った増大 (赤矢印で示す) が見られ、風速変動には対応する構造は確認されない。その値は 1 時間平均値で平時の 2 倍からそれ以上におよび、個々の流星エコーから推測される瞬時値は平時の 5 倍程度に及ぶ場合も見られる。トロムソの観測では冬期の夕刻に見られることが多い。

トロムソにおいて、この観測期間にはナトリウム温度ライダーによる中性大気温度観測が行われており、その観測結果と両極性拡散係数の相対変動量の比較を図 3 に示す。赤はナトリウム温度ライダーから得られた 1 か月平均温度からの相対温度変動量を、青は両極性拡散係数から式 2 を使って推定された相対温度変動量である。全体的な変動傾向は、きわめて良い一致を示す。10 日前後の周期で変動する温度変動に加えてより短周期で変動する構造が両者で認められる。一方、両極性拡散係数から推定される値には、青枠内に示されるように突発的に大きな値を示すことがあり、これは図 2 の矢印で示される増大に対応する。ナトリウム温度ライダーの値には対応する増大は認められず、中性大気温度が増大しているのではないことが分る。

次に、2012 年 1 月において EISCAT UHF レーダーで同時観測された下部熱圏における電子温度およびイオン温度との比較を図 4 に示す。顕著な両極性拡散係数増大が観測された時間帯には、電子温度とイオン温度ともに増大が見られる傾向があり、特に電子温度において高度 100 km 以下に及ぶ下層高度まで上昇がとらえられている。高度 105-110km における電子温度とイオン温度の比 (T_e/T_i) を見積ると (図 4 の最下段)、両極性拡散係数に大きな増大の見られない時間帯では概ね 1 付近であるのに対し、増大の見られる時間帯においては比が最大 5 からそれ以上に及ぶことがうかがえる。式 1 から分るように、 T_e/T_i の増加は両極性拡散係数の増大を意味し、少なくとも定性的には観測結果と整合的である。流星エコー観測で両極性拡散係数増大が確認される下限高度 80km 付近での EISCAT レーダーによる温度導出は難しいが、図 4 で示される結果は流星エコー観測高度においても T_e/T_i が 1 よりも有意に大きくなっていることを示唆している。イオンは中性大気との十分な衝突により磁化されていないのに対し、電子はすでに磁化されて中性およびイオン温度よりも高い温度となっていることを示していると考えられる。

4 考察

Buchert et al. [2008] は、EISCAT Svalbard レーダーを使用して下部熱圏における顕著な電子温度増大現象をとらえ、電離圏電場の影響による Farley-Buneman 不安定 [Farley, 1963; Dimant and Sudan,

1995]が電子加熱の原因であろうと報告している。本研究で両極性拡散係数増大が確認される時間帯に対応して、EISCAT レーダーのイオン速度観測からは北向き電場の増大が観測されており、やはり Farley-Buneman 不安定が電子温度増大の原因である可能性が高い。

一方、高エネルギー粒子の流入や電子密度増大による影響を確認するため、Miyoshi et al. [2015]に報告された顕著なイベント時(2012年11月17日)の両極性拡散係数の振る舞いを調べた。このイベント時には、高エネルギー粒子による高度70 km程度までの顕著な電子密度増大がEISCAT レーダーにより観測されたが、流星レーダーにより観測された両極性拡散係数には有意な変化は認められなかった。また同時にEISCAT レーダーで観測された電子温度やイオン温度にも有意な増大は見られなかった。この結果は、高エネルギー粒子や電子密度増大が両極性拡散係数に直接影響するものではないことを示唆している。

以上の結果は、上層の電離圏から下層の中間圏領域におよぶ影響を明瞭にとらえる手段として流星レーダーを利用する手法開発に道を拓くものと考えられる。以下、両極性拡散係数の異常増大時における中間圏電子温度推定について簡単に考察する。

式1を電子温度について解くと、

$$T_e \approx T_i \left(\frac{D_a}{D_i} - 1 \right) \quad \text{式3}$$

ここで、中間圏において以下の仮定が成り立つ場合、

- 1) D_a 増大時および前後でイオン組成の変化はない
- 2) D_a 増大時でもイオンは中性大気との衝突が十分でまだ磁化しておらず ($T_i = T_n$)
 D_a 増大前後の D_{a0} を用いて D_i を近似できる ($D_i = D_{a0}/2$)

D_a 増大時の電子温度 T_e を以下のように推定可能性である。

$$T_e \approx T_n \left(2 \frac{D_a}{D_{a0}} - 1 \right) \quad \text{式4}$$

中性大気温度 $T_n = 200\text{K}$ で、 D_a が通常値 D_{a0} の2倍に観測される場合は、 $T_e = 600\text{K}$ と推定される。

5 まとめ

トロムソ流星レーダーを用いて、極域の流星レーダーで観測される上部中間から下部熱圏域の両極性拡散係数が、冬期を中心に異常増大を示すことを初めて見出した。その原因について、同時観測された中性大気温度(ナトリウムライダー)や電子・イオン温度観測およびイオン速度(EISCAT レーダー)のデータと比較して考察した。電離圏電場増大に伴う電子温度増大が原因であると推察される。今後、極域の電離圏から中間圏に至る上層から下層への大気上下結合研究手段として、さらに検討を進める。

参考文献

- Buchert, S. C., T. Tsuda, R. Fujii and S. Nozawa (2008), The Pedersen current carried by electrons: a non-linear response of the ionosphere to magnetospheric forcing, *Ann. Geophys.*, 26, 2837-2844.
- Dimant, Y. S. and R. N. Sudan (1995), Kinetic theory of the Farley-Buneman instability in the E region of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 100, 14,605-14,623.
- Farley, D. T. (1963), A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the

- ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 68, 6083-6097.
- Folkestad, K., T. Hagfors, and S. Westerlund (1983), EISCAT: An updated description of technical characteristics and operational capabilities, *Radio Sci.*, 18, 867-879.
- Forbes, J. M., M. J. Jarvis, S. E. Palo, X. Zhang, Y. I. Portnyagin, and N. A. Makarov (2001), Electric fields and meteor radar wind measurements near 95 km over South Pole, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, 15, 1- 10.
- Fujii, R., S. Nozawa, S. C. Buchert, N. Matuura, and A. Brekke (1998), The motion of ions in the auroral ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 20,685-20,695.
- Hocking, W. K. (1999), Temperatures using radar-meteor decay times, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3297-3330.
- McKinley, D. W. R. (1961), *Meteor Science and Engineering*, McGraw-Hill, New York
- Y. Miyoshi et al. (2015), Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations, *J. Geophys. Res.*, 120, 10.1002/2014JA020690.
- Nakamura, T., et al. (1997), Studies of the MLT region using the MU radar and simultaneous observations with OH spectrometer and other optical instruments, *Adv. Space Res.*, 19, 643- 652.
- Nozawa, S., T. D. Kawahara, N. Saito, C. M. Hall, T. T. Tsuda, T. Kawabata, S. Wada, A. Brekke, T. Takahashi, H. Fujiwara, Y. Ogawa, and R. Fujii (2014), Variations of the neutral temperature and sodium density between 80 and 107 km above Tromso during the winter of 2010-2011 by a new solid-state sodium lidar, 119, 441-451, doi:10.1002/2013JA019520.
- Tsutsumi, M., T. Tsuda, T. Nakamura, and S. Fukao (1994), Temperature fluctuations near the mesopause inferred from meteor observations with the middle and upper atmosphere radar, *Radio Sci.*, 29, 599- 610.
- Tsutsumi, M., T. Tsuda, T. Nakamura, and S. Fukao (1996), Wind velocity and temperature fluctuations due to a 2-day wave observed with radio meteor echoes, *J. Geophys. Res.*, s101, 9425- 9432.

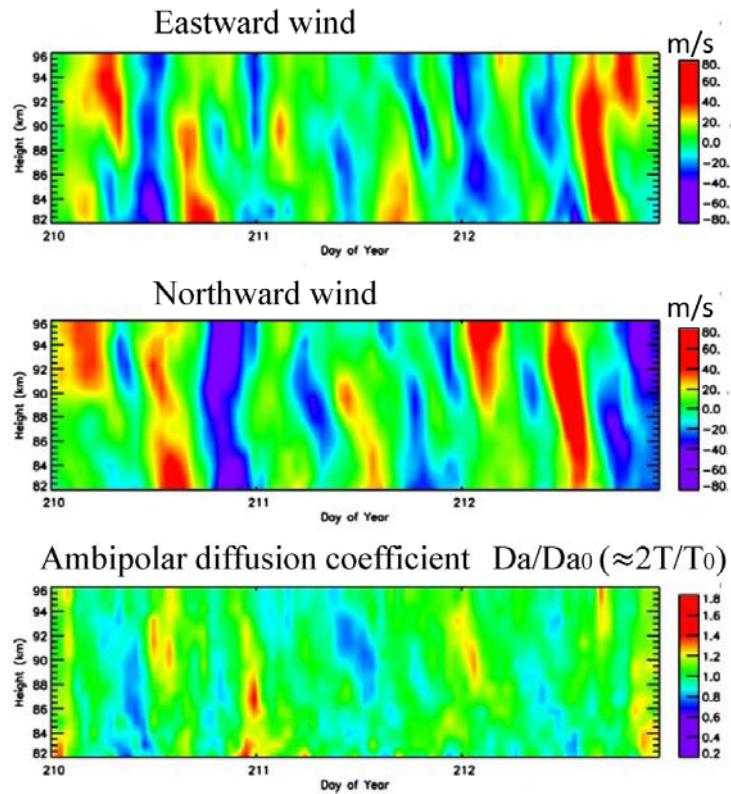


図1 2004年7月28-30日に、トロムソにおいて流星レーダーで観測された東向き風速（上）、北向き風速（中）および両極性拡散係数の相対変動量（下）。相対変動量は、高度ごとに求めた3日間の時間平均値との比。本図を含み、すべての図で相対変動量はリニア表示。

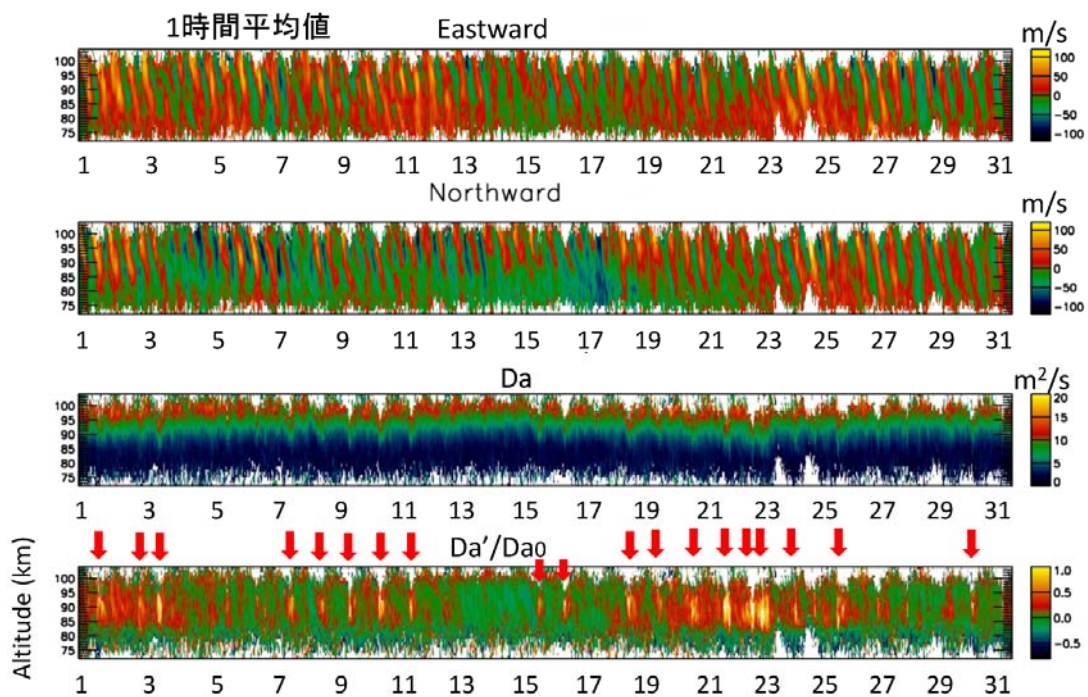


図2 2012年1月の1か月間に、トロムソ流星レーダーで観測された東向き風速（最上段）、北向き風速（2段目）、両極性拡散係数（3段目）、および両極性拡散係数の相対変動量（最下段）。両極性拡散係数にのみ見られる異常増大現象を赤矢印で示す。

ナトリウムライダー T'/T_0 (T_0 月平均)
 流星レーダー $\frac{1}{2} Da'/Da_0$ (D_0 月平均)

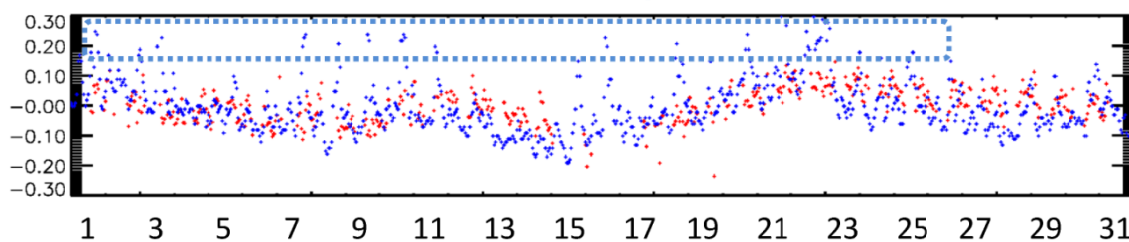


図3 2012年1月にトロムソ上空高度90kmにおいて観測された1時間値の中性大気温度相対変動量(ナトリウム温度ライダー)および両極性拡散係数相対変動量(流星レーダー)。

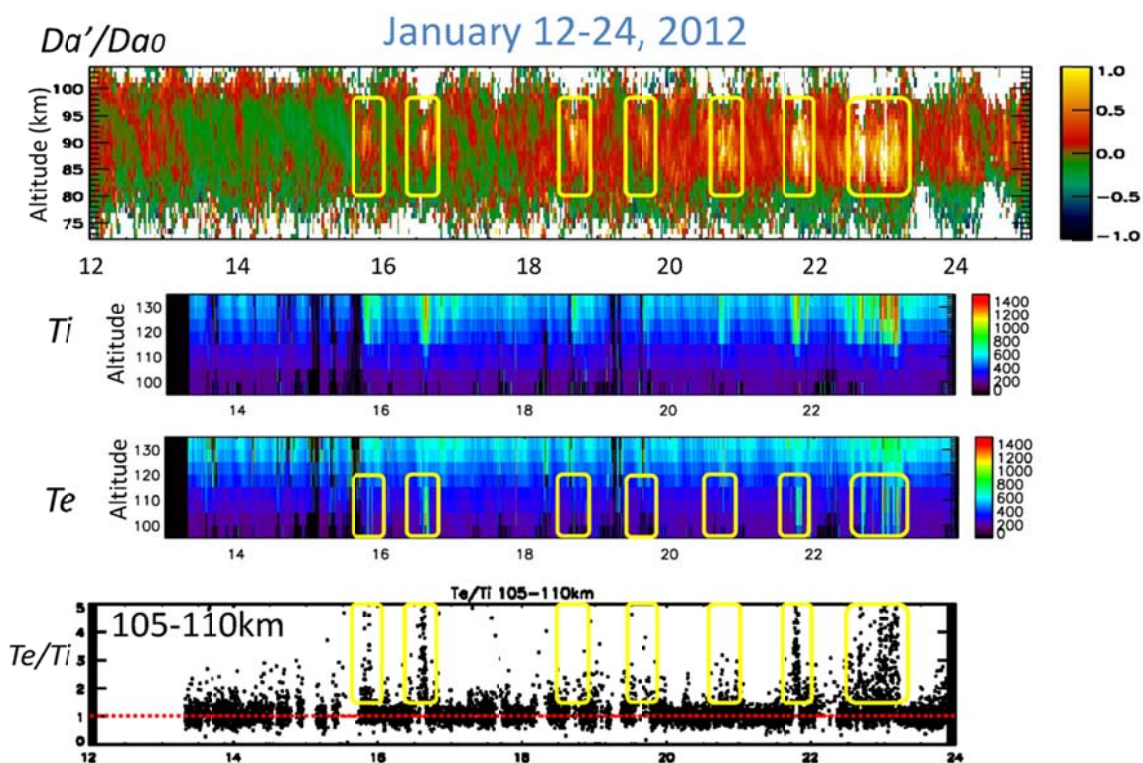


図4 2012年1月にトロムソ上空で観測された両極性拡散係数相対変動量(流星レーダー)、および電子温度・イオン温度とその105-110kmにおける比(EISCAT UHFレーダー)。