

平成30年6月5日現在

機関番号：62611

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13888

研究課題名(和文) 流星エコーを用いた中間圏界面大気温度観測技術の完成

研究課題名(英文) Advanced atmospheric temperature measurement techniques using radar meteor echoes

研究代表者

堤 雅基 (Tsutsumi, Masaki)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：80280535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：流星を用いた既存の大気‘絶対’温度測定手法は、大気温度の鉛直勾配などの経験的パラメータを必要とする不完全な手法であった。これに申請者が過去に開発した‘相対’温度変動観測手法を融合させることで、流星観測単独で大気の絶対温度推定を可能とする手法を開発した。さらに、極域で観測される流星飛跡は時折異常に速く拡散することを世界で初めて見出した。非干渉性散乱レーダー観測などとの比較から、電離層電場の影響により中間圏の電子温度が大幅増大した結果であるとの結論を得た。磁気圏/電離圏が中間圏に及ぼす影響の可視化に成功した好例と言え、今後の中間圏領域の化学過程の研究などへの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Existing ‘absolute’ temperature measurement techniques in the mesopause region using radar meteor echoes need empirical atmospheric parameters such as vertical temperature gradient, which may not always be appropriate. We have developed a technique without need for additional information other than meteor radar data by combining the existence method and the ‘relative’ temperature measurement technique which we developed in 1990s. In the course of the present study, we have found for the first time that meteor trails in the polar region can diffuse much faster than usual under geomagnetically disturbed conditions. Through comparison with incoherent radar and Na temperature lidar measurements we further found that highly enhanced electron temperature was responsible for the anomalous diffusion. Such electron temperature enhancement in the polar mesosphere has not been known so far, and is expected to be useful for coupling studies between neutral and ionized atmospheres.

研究分野：大気物理学

キーワード：極域中間圏界面 大気温度 流星レーダー 電子温度 両極性拡散係数

1. 研究開始当初の背景

流星が大気中に残す電離流星飛跡を利用した電波観測は、1950年代あたりから盛んに実施され、エコーに含まれるドップラーシフトを利用した高度80-100km付近の水平風速研究に多くの実績を上げている。また、流星飛跡が散逸する過程でエコー強度が時間減衰する時定数から大気分子拡散係数(D)が推定できる。分子拡散は、大気温度(T)と密度( $\rho$ )の関数として  $D \propto T/\rho$  で表され、ここから大気温度情報を取り出す手法が複数提案されている。ただし、2つの未知数(Tと $\rho$ )に対し観測量は1つ(D)で情報不足のため、直ちに大気温度は推定できず、工夫が必要となる。一つの手法は研究代表者らが過去に開発したもので、温度の「絶対値」は諦めるが、温度の「相対」変動情報を抽出する方法である [Tsutsumi et al., 1994; 1996]。大気波動に伴う温度変動と密度変動の理論的關係から未知数を1つに減らすことに成功し、大気重力波を中心に成果を上げている。一方、絶対温度を何とか推定する手法として Hocking[1999; 2004]が提案した手法がある。こちらは足りない情報を経験モデルなどから補うものである。一定の成果はあるものの常にこの追加情報の正しさに疑問が残り、この観測精度に関わる問題は未解決のままである。

2. 研究の目的

流星エコーを利用した温度観測手法を集大成し、流星エコー観測のみで自己完結した温度観測手法の「完成」版の開発を目的とする。流星が残した電離飛跡を電波観測することで、高度80-95km域を中心とした大気分子拡散の情報が得られ、これを利用して大気温度情報を取り出す複数の手法が提案されている。昼夜・天候を問わないその手法は非常に有効な手段だが、現在提案されている大気の絶対温度観測手法には原理的な問題があり、ほかの観測機器などから温度や密度の情報を補う必要がある。本申請では流星エコー観測で同時に得られる風速情報をうまく取り込むことで、流星エコー観測単独で高度90 km付近の絶対温度測定を矛盾なく実現する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1)まず、流星レーダーの受信干渉計の校正を行い、最良の高度決定精度を行える状態とする。Tsutsumi et al [1994; 1996]の手法に基づいて求めた相対温度変動から重力波周波数領域において位置エネルギーを推定し、同時に水平風速より運動エネルギーを推定する。両エネルギーが一致するように係数である大気の浮力振動数をもとめ、そこから絶対温度推定に必要な高度方向の温度勾配を推定する。(2)極域での流星レーダーで観測される両極性拡散係数は、冬期を中心に時折、異常に増大した値が観測されることが本研究を通して初めて見出された。中性大気温度の増大に伴うものとは考えられず、中間圏プラズマ諸量

の何らかの変化が原因と考えられる。本研究の当初目的である中性大気温度推定に大きな影響があるため、プラズマ大気の調査を新たに行う事とした。トロムソの流星レーダーと併設されている、EISCATレーダーおよびナトリウム温度ライダーで観測されるプラズマ諸量と中性大気温度のデータとの比較を通して、異常増大する両極性拡散係数の原因を探る。

4. 研究成果

(1) 流星により形成された円柱状の電離飛跡は、形成後に分子拡散により径方向に急速に拡散し、その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、電子温度  $T_e$  およびイオンの温度  $T_i$  と以下のような関係を持つ。

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

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  $T_n$  に等しく ( $T_e = T_i = T_n$ )、  $D_a = 2D_i$  の関係が成り立つと考えられる。さらに、分子拡散は温度の関数であることから、  $D_a$  を中性大気温度情報源として利用できる。Tsutsumi et al. [1996]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  $D_a$  の相対変動量について以下の関係式を導いた。

$$\frac{T_n'}{T_{n0}} = \frac{1}{2} \frac{D_a'}{D_{a0}} \quad \text{式 2}$$

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。

(2) 静穏時のトロムソおよびロングイヤーピン流星レーダー観測では、風速および両極性拡散係数変動の双方で大気波動に伴うと考えられる位相が時間とともに下向き伝搬する構造が認められる。式2の関係を使って風速および温度変動からそれぞれ大気波動の運動エネルギー  $E_k$  およびポテンシャルエネルギー  $E_p$  を求めることができ、両者には以下の関係がある。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Kinetic energy} \\ E_k = \frac{1}{2} (\overline{v_e^2} + \overline{v_n^2}) \\ \text{Potential energy} \\ E_p = \frac{1}{2} \frac{g^2 T'^2}{N^2 T_0^2} \end{array} \right\} E_p = \frac{\omega^2 - f^2}{\omega^2 + f^2} E_k \quad \text{式 3}$$

ここで、  $v_e$ 、  $v_n$ 、  $N$ 、  $f$  は、それぞれ東西風速、南北風速、ブライトバイサラ振動数、重力波の周波数、慣性周波数である。ここで唯一の未知数  $N$  を、等式3が満たされるように

決めることができる。この $M$ は、流星エコーを使った大気の大気絶対温度推定に必要な鉛直温度勾配と直結する物理量である。図1に、トロムソ流星レーダーを使った、2つのエネルギーの推定例を示す。また図2に、推定された $M$ （正確にはその逆数）の季節変化を示す。人工衛星観測などから知られている $M$ の季節的振る舞いとの良い一致が見られる。本研究で開発したこの手法は、流星エコー観測のみから大気の大気絶対温度推定を原理的に可能とするもので、本研究の当初目的を達成できたと言える。同手法は中低緯度を含む世界中の流星レーダーに適用可能であり、その意義は大きい。一方、図2からは、推定された $M$ に大きなばらつきが冬期を中心に存在することも同時に見て取れる。これは、 $M$ の実際の変動に加え、以下に示す極域特有の電磁気現象に伴う推定誤差の影響が無視できないためと考えられる。そこで、本研究では、この誤差要因となる原因についても詳しく調査を行う事とした。

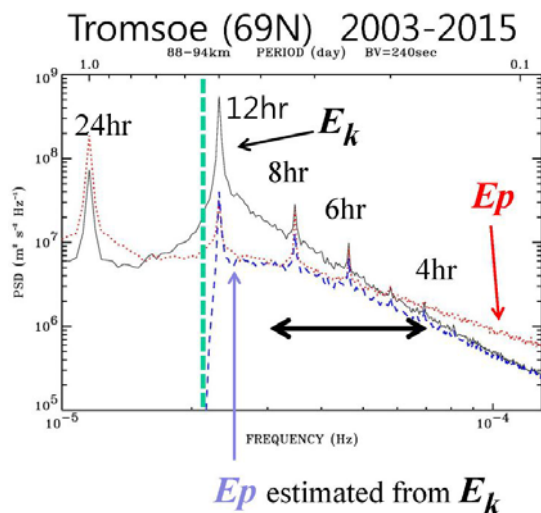


図1 推定された運動エネルギー $E_k$ および、ポテンシャルエネルギー $E_p$ の例

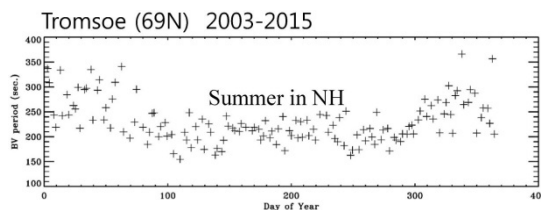


図2 推定された高度90kmにおけるブラントパイサラ周期の例

(3) 北極域において、電離層擾乱時の $D_a$ は、風速場とは明らかに異なる高度方向に揃った急激な増大を示す場合のあることが本研究で初めて見出された。トロムソでは、名古屋大学 ISEE の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、2012年1月の1ヶ月間のデータを元に $D_a$ の変動と比較したところ、全体的には両者は良い一致を示し中性大気温度変動に対応した変動が観測されていると考えられる。しかし $D_a$ に時折みられ

る大幅増大はナトリウム温度ライダー観測に対応するものが見られず、中性大気温度が増大しているのではないことが示された。

2012年1月にEISCAT UHFレーダーで同時観測された下部熱圏電子温度およびイオン温度を調べてみると、顕著な $D_a$ 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る(図3)。特に電子温度において高度100km以下に及び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( $T_e/T_i$ )を見積もると(図3の最下段)、 $D_a$ 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からそれ以上に及んでいる。式1から分るように、 $T_e/T_i$ の増加は $D_a$ 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。おそらく流星エコー観測高度においても $T_e/T_i$ が1より有意に大きくなっていると想像され、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。また、 $D_a$ 増大時には、電離層電場の増大も観測されており、Farley-Buneman不安定 [Farley, 1963; Dimant and Sudan, 1995]によって電子温度が増大したものと推定できる。熱圏が中間圏に及ぼす影響の可視化に成功した好例と言え、今後の中間圏領域の化学過程の研究などへの応用が期待できる。

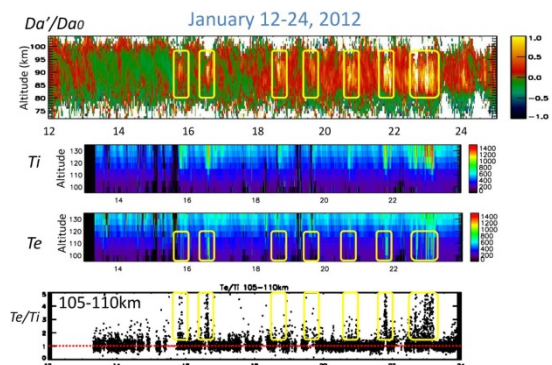


図3 2012年1月にトロムソ上空で観測された両極性拡散係数相対変動量(流星レーダー)および電子温度・イオン温度とその105-110kmにおける比(EISCAT UHFレーダー)。

(4) 上記で示したように $D_a$ 増大(電子温度増大)は、極域超高度大気中の電場や電子温度の増大を反映したものと考えられる。筆者らが北極域に展開している3台の流星レーダーのネットワーク観測(図4)から、極域中間圏界面高度における電場や電子温度の水平二次元情報を可視化する試みを行った。3台のレーダーは、南北に1000km以上にわたるネットワークを形成しており、時間分解能10分程度で水平構造解析を行うことができる。解析データからは冬期を中心に $D_a$ の異常増大が広範囲にわたってみられ、時々刻々とダ

イナミックに変化する様子が捉えられた  
(例：図5)。

$D_a$  増大は冬期にはオーロラ現象などに伴い観測され、極域中間圏がより上層からの影響を受けていることを色濃く示している証と考えられる。ここで試みた  $D_a$  の水平構造推定は世界で初めての試みである。今後、オーロライメージャー観測や SuperDARN 観測などの面的な観測手段と併せ行う事で、極域中間圏・熱圏の上下結合の定量的な理解に貢献できると考えている。

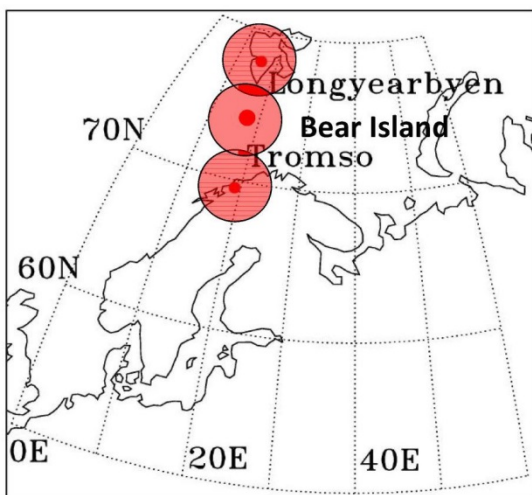


図 4：両極性拡散係数の水平構造解析に使用した3つの流星レーダー (Longyearbyen、Bear Island および Tromso) の地理的位置関係。

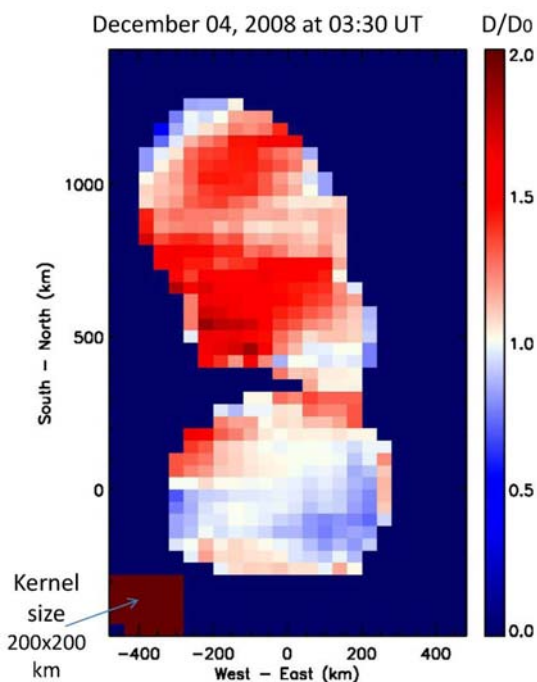


図 5：両極性拡散係数変動量 ( $D_a' / D_{a0}$ ) の水平構造の推定例 (2008年12月4日 03:30UT)。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

(雑誌論文)(計6件)

1. Chau, J. L., G. Stober, C. M. Hall, M. Tsutsumi, F. I. Laskar, and P. Hoffmann, Polar mesospheric horizontal divergence and relative vorticity measurements using multiple specular meteor radars, Radio Sci., 52, 811-828, doi:10.1002/2016RS006225, 2017.
2. He, M., J. L. Chau, G. Stober, C. M. Hall, M. Tsutsumi, and P. Hoffmann, Application of Manley Rowe relation in analyzing nonlinear interactions between planetary waves and the solar semidiurnal tide during 2009 sudden stratospheric warming event, J. Geophys. Res., 122, 10,783-10,795, 2017.
3. Laskar, F. I., J. L. Chau, J.-P. St. Maurice, G. Stober, C. M. Hall, M. Tsutsumi, J. Hoeffner, and P. Hoffmann, Experimental evidence of arctic summer mesospheric upwelling and its connection to cold summer mesopause, Geophys. Res. Lett., 44, 9151-9158, 2017.
4. Takahashi, T., K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 1212-1220, doi:10.1002/2016JA023472, 2017.
5. Holmen, S. E., Hall, C., and Tsutsumi, M., Neutral atmosphere temperature trends and variability at 90 km, 70 ° N, 19 ° E, 2003-2014, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 7853-7866, doi:10.5194/acp-16-7853-2016, 2016.
6. Fazlul I. Laskar, Jorge L. Chau, Gunter Stober, Peter, Hoffmann, Chris M. Hall, and M. Tsutsumi,

Quasi-biennial oscillation modulation of the middle and high-latitude mesospheric semidiurnal tides during August-September, Journal of Geophysical Research, 121, 4869-4879, doi:10.1002/2015JA022065, 2016.

[学会発表](計 12 件)

1. Tsutsumi, M., Atmospheric gravity wave study based on meteor temperature, New Features in the Meteor Radar Observations and Applications for Space Research (ISSI team meeting), Bern, Jan. 2018.
2. Tsutsumi, M., Y. Ogawa, S. Nozawa, and C. M. Hall, Anomalous ambipolar diffusion observed using meteor radars in northern high latitudes, New Features in the Meteor Radar Observations and Applications for Space Research (ISSI team meeting), Bern, Jan. 2018.
3. Ogawa, Y., Y. Miyoshi, K. Shiokawa, K. Hosokawa, S. Oyama, A. Kero, S. Nozawa, K. Seki, Y. Tanaka, T. Sakanoi, I. Shinohara, Y. Miyashita, R. Fujii, H. Miyaoka, A. Kadokura, K. Asamura, Y. Katoh, Y. Kasahara, H. Kojima, A. Matsuoka, S. Kurita, S. Matsuda, T. Mitani and the ERG - EISCAT joint project team, Coordinated Arase (ERG) satellite and EISCAT radar observations, The 142nd SGPSS meeting, Kyoto University, 16 October, 2017.
4. (招待講演) Tsutsumi, M., Introduction to Atmospheric Radar Studies in the Polar Regions, Annual General Meeting of AFoPS 2017, Shanghai, Sep. 2017.
5. Tsutsumi, M., Y. Ogawa, S. Nozawa, and C. M. Hall, Anomalous ambipolar diffusion observed using meteor radars in northern high latitudes, The

15th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, NIPR, May 2017.

6. Ogawa, Y., S. Nozawa, M. Tsutsumi, and I. Haggstrom, D- and E-region ion temperature measured with EISCAT radar facility, The 18th EISCAT symposium, NIPR, Tokyo, 2017 年 5 月 27 日
7. (招待講演) 小川泰信、極域電離圏イオン上昇流と流出、2016 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「太陽惑星系宇宙プラズマ中の重イオンに関する研究集会」2017 年 3 月 8 日
8. (招待講演) 堤雅基、小川泰信、野澤悟徳、Chris Hall、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、第 30 回大気圏シンポジウム、2016 年 12 月 05 日、JAXA 宇宙科学研究所
9. 堤雅基、小川泰信、野澤悟徳、Chris Hall、北極域の流星レーダーにより観測される両極性拡散係数の異常増大、地球電磁気・地球惑星圏学会第 140 回総会・講演、2016 年 11 月 21 日、福岡市九州大学伊都キャンパス
10. (招待講演) 堤雅基、大気レーダー入門、「MTI 研究集会」「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」合同研究集会 2016 年 8 月 29 日
11. (招待講演) Y. Ogawa, Long-term variations and trends in the polar ionosphere and thermosphere, The first VarSITI general symposium, Albena, Bulgaria, June 6, 2016.
12. Masaki Tsutsumi, Atmospheric gravity wave study based on meteor temperature, Multistatic meteor radar workshop, IAP, Kuhlungsborn, Germany, 31 May-2 June, 2016.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

受賞：  
地球電磁気・地球惑星圏学会 田中館賞  
野澤 悟徳、EISCAT レーダー及び Na ライダ  
ー観測による極域上部中間圏・下部熱圏変  
動の研究、平成 29 年 5 月 22 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堤 雅基 (TSUTSUMI, Masaki)  
国立極地研究所・研究教育系・教授  
研究者番号：80280535

### (2) 研究分担者

野澤悟徳 (Nozawa, Satonori)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授  
研究者番号：60212130

### (3) 連携研究者

小川泰信 (OGAWA, Yasunobu)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号：00362210