

金属原子・イオン層同時観測可能な共鳴散乱ライダーの開発

江尻 省^{1,2}, 桂川 眞幸³, 津田 卓雄³, 中村 卓司^{1,2}

¹ 国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

² 総合研究大学院大学 (〒240-0193 神奈川県三浦郡葉山町)

³ 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

Development of a resonance scattering lidar for simultaneous observation of Ca and Ca⁺

Mitsumu K. EJIRI^{1,2}, Masayuki KATSURAGAWA³, Takuo TSUDA³, and Takuo NAKAMURA^{1,3}

¹ National Institute of Polar Research., 10-3 10-3, Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518

² The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI., Shonan Village, Hayama, Kanagawa 240-0193

³ The University of Electro-Communications., 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

Abstract: At a transition region between neutral atmosphere and geospace plasma (80 - 150 km), vertical substance transport process is still an open question because simultaneous measurement of neutral gas and plasma is quite difficult. To measure temporal variation in vertical density distributions of Ca and Ca⁺, as a dynamical tracer in this region, we started to develop a resonance scattering lidar system, which has an injection-locked Ti:Sapphire laser; a multi-frequency, nanosecond pulse, and a broad frequency tunability. In this presentation, we will introduce the new lidar system.

Key Words: Resonance scattering lidar, Ca atom and Ca⁺ ion, Thermosphere-Ionosphere coupling

1. はじめに

大気圏とジオスペース（地球近傍の宇宙空間）の境界領域（高度 80-150 km）は、大気が中性大気から電離大気（プラズマ）に変化する地球大気の遷移領域である。近年、人工衛星や地上レーダー、ライダーの観測により、地表付近の気象現象とジオスペースのプラズマ密度変動との関連を示す証拠が次々に報告され、地球大気と環境変動を理解するためには、中性大気が占める大気圏からプラズマ大気が占めるジオスペースまでをつなぐ大気（全地球大気）として取り扱わなければならないことが明確になってきた¹⁾。しかしこの遷移領域において、中性大気とプラズマは共に観測手段に限られる上に、主要な観測手段が、中性大気が光学観測であるのに対し、プラズマは電波観測と、大きく異なっている。そのため同一空間内の中性大気とプラズマの同時観測は極めて難しく、中性からプラズマもしくはその逆の化学変化を伴う物質の追跡が困難であることが、大気圏とジオスペースをつなぐ物質輸送過程解明の大きな障壁となっている。

この境界領域で物質輸送のトレーサーになり得る物質として、流星によって地球外から大気圏上部に供給される金属原子・イオンがある。主な供給領域は流星が燃え尽きる高度領域（90-120 km）であるが、最近の共鳴散乱ライダー観測による金属原子密度観測で、流星による供給領域より高い高度（>150 km）で金属原子の存在を確認したとする報告が相次いでいる^{2), 3)}。これらの観測結果を説明するためのシミュレーション研究では、金属原子がイオン化と中性化を繰り返しながらジオスペース内の鉛直輸送に取り込まれ、広い高度範囲を移動している可能性が示唆された⁴⁾。同一空間内の金属原子と金属イオンの密度鉛直分布を同時に観測し、その時間変化を追跡することが出来れば、境界領域の大規模な鉛直物質輸送が観測的に明らかになる可能性がある。本発表では、地上の共鳴散乱ライダー観測で唯一観測可能な金属イオンであるカルシウムイオン（Ca⁺）と中性のカルシウム原子（Ca）を同時に測定するための新しい共鳴散乱ライダーの開発計画を紹介する。

2. 金属原子・イオン同時観測共鳴散乱ライダー

共鳴散乱ライダー観測には、Ca と Ca⁺ の共鳴波長としてそれぞれ 393.5 nm と 423.8 nm を用いる。通常、一つのレーザー共振器で発振可能なレーザー光は一波長のみであるため、Ca と Ca⁺ を同時に観測するには、

二台のレーザーが必要である。これまでに二台の色素レーザーを使ってこれらを同時観測した例はあるが⁵⁾、システムが複雑かつ大規模になるだけでなく、有毒な色素を使う不安定なレーザーを二台同時に調整する運用時の困難さも加わるため、現在稼働しているものはない。我々は、複数波長で同時発振可能な単一周波数・波長可変・注入同期チタンサファイア(Ti:s)レーザー⁶⁾を共鳴散乱ライダーに適用することで、安全かつ安定した固体レーザー一台でCaとCa⁺の同時観測を目指す。単一周波数・波長可変・注入同期Ti:sレーザーは、Ti:sレーザー共振器と光源であるフラッシュランプ励起Nd:YAGレーザー、および2台の種レーザーで構成される(Fig. 1)。Ca、Ca⁺の共鳴波長は、



Fig. 1 Injection-locked Ti:Sapphire pulse laser system installed at the National Institute of Polar Research.

BBO結晶の第二高調波発生によって得る。共鳴散乱信号は、口径83 cm、焦点距離6400 mmのナスマス望遠鏡で集光し、ダイクロイックミラーで分光してバンドパスフィルターで背景光を除去した後、光電子増倍管(PMT)で受信する。

二波長同時発振によるCa、Ca⁺同時観測に先立って、開発中のTi:sレーザーを用いてCa⁺の共鳴波長一波長での試験観測を行った。レーザーパルスの繰り返し50 Hzで、パルスエネルギー14 mJ、基本波出力0.7 Wを達成した。Ca⁺イオンの共鳴波長393.5 nmではパルスエネルギー6 mJ、0.3 Wの出力で。2020年1月30-31日に国立極地研究所(立川)にてCa⁺共鳴散乱ライダー観測試験を実施した結果、高度100-105 kmに発生したスボラディックCa⁺層による散乱信号を明瞭に捉えることが出来た。また、送信レーザー光の波長掃引を行うことで、このTi:sレーザーがCa⁺共鳴線のドップラープロファイルの計測を可能とする周波数精度を持つことも確認された。

3. まとめと今後の展望

大気圏とジオスペースの境界領域における、中性からプラズマもしくはその逆の化学変化を伴う物質の鉛直輸送を追跡することを目的とした、金属原子・イオン共鳴散乱ライダーの開発を始めた。地上から原子とイオンの両方が観測可能なCaとCa⁺を観測対象とし、これらの密度の鉛直分布を同一空間で同時に測定するために、CaとCa⁺の共鳴波長を同時に発振可能なレーザー開発および、散乱信号を同時に受信可能な分光光学系の製作を進めている。これまでにCa⁺単独での散乱信号受信には成功したが、もう一つのターゲットであるCaはCa⁺より密度が小さいため、レーザー出力の更なる向上が必要である。また、二波長同時発振させた場合の出力バランスや発振の安定性、波長計の絶対精度、受信光学系の効率などの向上も図り、Ca・Ca⁺同時観測の実現を目指す。

参考文献

- 1) Immel, T. J., E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson, and L. J. Paxton (2006), Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15108, doi:10.1029/2006GL026161.
- 2) Chu, X., Z. Yu, C. S. Gardner, C. Chen, and W. Fong (2011), Lidar observations of neutral Fe layers and fast gravity waves in the thermosphere (110-155 km) at McMurdo (77.8° S, 166.7° E), Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23807, doi:10.1029/2011GL050016.
- 3) Tsuda, T. T., X. Chu, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. D. Kawahara, A. S. Yukimatu, and K. Hosokawa (2015), A thermospheric Na layer event observed up to 140 km over Syowa Station (69.0°S, 39.6°E) in Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3647-3653, doi:10.1002/2015GL064101.
- 4) Chu, X., and Z. Yu (2017), Formation mechanisms of neutral Fe layers in the thermosphere at Antarctica studied with a thermosphere-ionosphere Fe/Fe⁺ (TIFe) model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 6812 - 6848, doi:10.1002/2016JA023773.
- 5) Gerding, M., Alpers, M., von Zahn, U., Rollason, R. J., and Plane, J. M. C.: Atmospheric Ca and Ca⁺ layers: Midlatitude observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 105, 27131-27146, 10.1029/2000JA900088, 2000.
- 6) Katsuragawa M. and Onose T., (2005), Dual-wavelength injection-locked pulsed laser, *Optics Letters*. Vol. 30, No.18, 2421 - . 2423.