

発光分光法による衝突蒸気雲の圧力測定法の開発

Development of a pressure measurement method of impact-induced vapor clouds using atomic emission spectroscopy

横山 聖典 [1]; 黒澤 耕介 [1]; 杉田 精司 [1]; 関根 康人 [2]; 松井 孝典 [3]

Masanori Yokoyama[1]; Kosuke Kurosawa[1]; Seiji Sugita[1]; Yasuhito Sekine[2]; Takafumi Matsui[3]

[1] 東大・新領域・複雑理工; [2] 東大・新領域・複雑理工; [3] 東大・院・新領域

[1] Dept. of Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo; [2] Dept of Complexity Science and Engineering, Univ of Tokyo; [3] Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

はじめに

惑星の大気形成・進化の過程において、衝突蒸発現象とそれに引き続いて起こる蒸気雲中の化学反応は大きな役割を果たしてきたと考えられている。蒸気雲中の化学反応について議論する上で蒸気雲の温度・圧力などの熱力学量の理解が不可欠である。これらを測定するには、蒸気雲を非接触かつ高時間分解能で観測できる発光分光法が有効であり、発光分光法による温度測定に関しては測定法が確立されている [1]。発光分光による圧力測定に関してはシュタルク効果によって電子密度を求め、そこから圧力を推定する方法が有望であり、これまでにいくつかの研究でこの方法を用いた圧力の推定が行われてきた [2,3] が、まだ数々の問題があり、圧力測定法として確立するには至っていない。

そこで本研究では、衝突実験において容易に観測ができることが期待され、かつ自己吸収の影響をほとんど受けない輝線を用いて、発光分光法による圧力測定法を衝突蒸気雲の圧力測定法として開発すべく実験を行った。

実験

実際の衝突実験によって衝突蒸気雲を発生させるのは容易ではないため、本実験では容易に繰り返し発生させることが可能な Nd:YAG パルスレーザーによって蒸気雲を発生させる方法を取った。レーザーを照射する試料には水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を用いた。これに含まれる Ca の輝線によって温度を求めた実績があり、またこれがイオン化した Ca^+ の輝線の幅を用いることで圧力が決定できる。そして水素 (H) もまた大きなシュタルク広がりを持つ輝線を持ち、これはプラズマ科学の分野では電子密度の指標として広く用いられてきている。H の輝線はその高い励起エネルギーのために実際の衝突蒸気雲では観測することができないと予想されるが、この輝線は Ca^+ によって求めた電子密度の妥当性を検証するのに使用できる。チャンパー内は 1×10^{-3} mbar 程度の真空中に保持し、YAG パルスレーザーの出力は毎ショット 400 mJ とし、パルス幅は 13 ns である。これをレンズで直径 1.6 mm に集光することで、出力は 1.5×10^9 W/cm² となった。これは蒸気雲を発生させるのに十分なエネルギー密度である。こうして発生した蒸気雲を ICCD 付きの分光器で、露光時間を 100 ns とし、露光開始時間をずらしながら 1200 ns まで観測した。

結果

本実験では、 Ca^+ 373.69 nm の輝線と H の 486.13 nm の輝線幅を計測した。これらの輝線は下状態のエネルギー準位が高いために自己吸収がほとんど起きない。

観測されたスペクトルは「本来の輝線」と装置関数とが重ねあわされた状態である。そこで我々はローレンツ関数と装置関数を重ね合わせた輝線形を生成した。最小二乗法によって観測スペクトルに最もよく合う輝線形を求め、それを生成するローレンツ関数の幅をもって「本来の輝線」の幅とした。 Ca^+ の 373.69nm の輝線と H の 486.13nm の輝線の幅から、[4] の式を用いてそれぞれ電子密度を求めたところ、これらは誤差の範囲で一致し、時間とともにゆるやかに電子密度が減少していく様子が見られた。

また、得られた電子密度と、[1] の方法で求めた温度とをサハの熱電離式に代入することで、蒸気雲の電離度が計算でき、電離度と電子密度から原子数密度を求めることができた。そしてこの原子数密度と温度から、理想気体の状態方程式を用いることで圧力が計算できた。この圧力もまた時間とともに減少する様子が見られ、温度と圧力の間にはべき乗則 $P \propto T^{3.83}$ の関係が見られた。ここで理想気体と断熱膨張を仮定すると、指数 3.83 から求めた比熱比は 1.35 となった。この値は高解離性気体 (1.1) と単原子気体 (1.67) の値の中間に位置する。この結果と、H の輝線幅と Ca^+ の輝線幅から求めた電子密度の一致は Ca^+ から求めた電子密度、ひいては圧力が信頼できるものであることを強く示唆している。以上から、 Ca^+ 373.69 nm の輝線幅は信頼性のある衝突蒸気雲の圧力指標として利用可能であると考えられる。

[1] Sugita, S. et al. *J. Geophys. Res.*, 103, 19,427-19,441, 1998

[2] Ohno, S. et al. *LPSC XXXVI*, 2005

[3] Hamano, K. et al. *LPSC XXXIV*, 2003

[4] Griem, H. R. *New York: McGraw-Hill*, 1964