窒素 $C^3\Pi_u$ の振動状態分布を考慮した
分光測定による $X^1\Sigma_g$ の振動温度推定法

正員 北岸 延之 (東京ガス)

正員 濱田 昌司 (京都大学)

正員 日高 邦彦 (東京大学)

Spectroscopic Estimation of Vibrational Temperature in $X^1\Sigma_g$
by Using the Vibrational State Profile of $C^3\Pi_u$ in Nitrogen MoleculesNobuyuki Kitagishi, Member (Tokyo Gas Co., Ltd), Shoji Hamada, Member (Kyoto University),
Kunihiko Hidaka, Member (The University of Tokyo)

キーワード：窒素, スペクトル, 分光, 振動温度, 振動単位

N_2 ガス中の振動温度の分光推定法は、Second Positive (0,2) (以下、SP02 と略記) 系列のスペクトルを用いる方法が知られている⁽¹⁾。この方法は、 $C^3\Pi_u$ の振動状態分布が $X^1\Sigma_g$ の振動状態分布の情報も含んでいる事を利用するものである。 $X^1\Sigma_g$ の振動温度と、SP02 系列の任意の 2 本のピーク値の強度比との較正曲線を作成し、実測の強度比から振動温度推定を行うというものであるが、2 本のピーク値の組み合わせによって推定温度の違いが大きく、また実測値が較正曲線に載らない場合もある。

ここでは、 $C^3\Pi_u$ の振動状態数分布 (振動温度) を考慮し、それを用いて振動温度推定を行う方法を提案する。この方法では、SP02 系列のスペクトルを多数利用するために、2 本の強度比による方法に比べて、より確実な推定が可能であると考えられる。

SP02 系列の遷移モデルを図 1 に示す。 $C^3\Pi_u$ への励起元としては $X^1\Sigma_g$ だけを考える。 $X^1\Sigma_g$ の振動温度 T_{vx} を決定すれば、励起レートにより図 2 のような $C^3\Pi_u$ の振動状態数分布の概略が求まる。なお、励起レートの計算法については文献 (1) に従った。電子エネルギー分布が推定振動温度に与える影響については、本実験条件 (電子密度: 10^9 cm^{-3} 程度) では最大でも 100K 程度であると考えられる⁽²⁾。

ここで、 $C^3\Pi_u$ において、振動状態数分布は励起レートによる分布に近いボルツマン分布を取ると仮定をする。この時、 $C^3\Pi_u$ の仮想的な振動単位密度 N_{cv} および振動温度 T_{vc} というものが求められる。したがって、 T_{vx} と T_{vc} の較正曲線が得られる事になる。これを図 3 に示す。この較正曲線は、その導出過程からガス温度、気圧などのパラメータには依存せず、どのような場合にも成り立つ事になる。なお、 $X^1\Sigma_g$ の振動温度が低い場合には曲線は飽和特性を示しているが、これが現在のモデルに起因するものかどうかは不明である。

ここで、振動温度を考慮した実測スペクトル強度 $I_{v'v''}$ は、上述の 仮想振動単位密度 N_{cv} を用いて次式で表わされる。

$$I_{v'v''} = g\phi_{qv}N_{cv}A_{ij}h\nu I_{rot} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 g は装置関数⁽³⁾、 ϕ_{qv} は気圧に依存したクエンチング過程を考慮するためのクエンチングファクタ⁽¹⁾、 A_{ij} はフランクコンドン係数に關係した相対遷移確率⁽⁴⁾、 h はプランク定数、 ν はスペクトルの周波数、 I_{rot} は相対回転スペクトル強度⁽⁵⁾である。

このうち、 $g, A_{ij}, h, \nu, I_{rot}$ は計算等によって既知であるので、

$$\phi_{qv}N_{cv} = \frac{I_{v'v''}}{gA_{ij}h\nu I_{rot}} \dots\dots\dots (2)$$

が各振動単位に対して求まる。クエンチングファクタ ϕ_{qv} は N_{cv} の関数であるので、結局 N_{cv} を未知数とした方程式が求まる事になる。

これを解けば N_{cv} が求められ、これから $C^3\Pi_u$ の仮想振動温度 T_{vc} を実測値から決定する事が出来る。したがって、先の較正曲線を用いて、 $X^1\Sigma_g$ の振動温度 T_{vx} を求められる。

この方法によって、気圧 0.7 Torr での負グロー中の $X^1\Sigma_g$ の振動温度および $C^3\Pi_u$ の仮想振動温度を推定した結果を図 4 に示す。これらは全て、0.1 秒の露光時間で 300 回測定を行なった場合のスペクトルの平均値による結果である。今回は、SP02, 13, 24, 35 の 4 本のスペクトルを使用した。また、2 本の強度比によって求めた結果も同時に示す。図中において、曲線でつながれている値が 4 本による結果、○、×印で記されている値が 2 本による結果である。ただし、放電電流値が 2mA 以下の時には、推定された $C^3\Pi_u$ の振

図1 SP02系列のスペクトル遷移モデル
Fig. 1. Tran model of SP02 bands spectrum

図2 C³Πᵤの振動状態数分布
Fig. 2. Vibrational distribution of C³Πᵤ

図3 T_{vx} と T_{vc} の理論関係
Fig. 3. Theoretical relation of T_{vx} and T_{vc}

動温度が2800K以下であったために、較正曲線の飽和部分にあたるため $X^1\Sigma_g$ の振動温度は得られなかった。

2本の強度比による結果は、用いる組み合わせによって推定温度の違いが大きい。4本を用いた結果では、2本に

図4 振動温度推定結果
Fig. 4. Estimate of vibrational temperature

よる推定値全体の平均的な値が出ており、推定結果として妥当であると考え。

(平成10年6月1日受付, 同10年9月30日再受付)

文 献

- (1) 西嶋・美山・常安: 電学論A, 110, 767 (1990)
- (2) 濱田: 東京大学博士論文, 71 (1991)
- (3) D.M. Phillips: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 9, 507 (1976)
- (4) W. Benesch et al.: *Astrophys. J.*, 143, 236 (1966)
- (5) 西嶋・加峯・常安: 福岡大学工学集報, 41, 33 (1988)

北 岸 延 之 (正員) 1973年1月24日生。96年3月、東京大学工学部電気工学科卒業。98年3月、東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月、(株)東京ガス入社。現在に至る。在学中は、主として放電分光の研究に従事。

濱 田 昌 司 (正員) 1965年2月13日生。87年3月京都大学工学部電子工学科卒業。92年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京電機大学工学部電気工学科助手、93年同学講師。97年9月京都大学工学研究科電気工学教室講師、現在に至る。工学博士。主として、高電圧、放電、電界計算、過渡解析に関する研究に従事。IEEE 会員。

日 高 邦 彦 (正員) 1953年4月27日生。76年3月東京大学工学部電気工学科卒業、81年3月同大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月防衛大学校、85年東京工業大学、87年東京大学、現在、同大学工学系研究科電気工学専攻教授。工学博士。主として、高電圧工学および放電現象に関する研究に従事。IEEE、放電研究グループ、静電気学会、日本科学技術史学会会員。