

澱み点付近における N_2 アークプラズマ流の分光測定

Spectroscopic measurement of plasma arc in nitrogen flow.

北川一敬, 森吉正, 吉川典彦, 保原充

Kazutaka Kitagawa*, Yoshimasa Mori**, Norihiko Yoshikawa***, Michiru Yasuhara*

Abstract In the present work is spectroscopically measured to obtain the vibrational and rotational temperature in arc heated flow of pure nitrogen. Arc heater experiments were conducted by using the Huels type arc heater at Aichi institute of technology. The $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ transition of the N_2^+ molecule, is referred in the region of 383 to 392 nm as the N_2^+ (1st negative) system. Spectra profiles in arc heated flow are obtained to estimate the vibrational temperature from the N_2^+ (1st neg.) bands at the nearly stagnation point and at sonic throat. The vibrational temperature T_v are estimated to be about 10200K \pm 1500K from inclination line (0,0) to (1,1), about 2340K \pm 500K from (1,1) to (2,2), and about 3400K \pm 500K from average inclination line close to (0,0), (1,1), (2,2), showing that the vibrational temperatures are not in equilibrium. The rotational temperature T_r is estimated to be about 1470K to 9870K from inclination line (0,0) to (1,1) in vibrational transition.

1. はじめに

アーク加熱方式とは、アーク放電により放出された電子がガスをプラズマ化する事により放電が持続し、その熱を利用して気体を加熱して高温気流を作る方法である。そこで、アーク加熱方式高エンタルピ風洞で発生される高温プラズマ流(気流温度約 3000K 以上)により、一瞬にして有害廃棄物を融解・蒸発・昇華させ無害化する事が可能である。アエロスパシアル社は注射針の処理に Huels 型アークヒータを用いている。中部電力は病院と連携して、簡単なアーク放電装置を用いて、医療廃棄物処理システムを構築している。又、プラズマカッタは産業界へ普及しつつある。航空宇宙分野に関しては、近年、欧米では経済性、環境適合性等の観点から、完全再使用型の新しい宇宙輸送システムの開発が盛んに行われてきている。そうした流れの中で、我が国でも将来型再使用宇宙輸送システムの検討が必要となる。この開発においては、機体先端近傍の澱み点流れ・境界層遷移・衝撃波-境界層干渉・衝撃波-衝撃波干渉等による空力加熱現象に対する技術課題が数多く存在する。その為、超音速飛行における高温、高圧という非常に過酷な状況に耐えうる耐熱材料や試験

機の開発の為の試験風洞の作動特性を知ることが必要となる。このような背景から本研究では、49kW の水冷式中空電極形の Huels 型アークヒータを用い、作動ガス窒素におけるアークプラズマ流の澱み点近傍の分光学的温度(振動、回転)を計測し、実験によるデータベースの構築とそのデータベースを基に、量子力学・分子動力学に基づいた分光学的計測手法の高精度化を目的にしている。

2. 実験装置

実験装置は Huels 型アークヒータ部、超音速ノズル、電源装置系、作動ガス供給系、排気装置系、冷却装置系、測定装置系、分光測定部から成っている。Huels 型アークヒータを図 1 に示す。アークヒータは水冷式、上流側電極を陰極、下流側電極を陽極とし、両電極には冷却効率を考慮して熱伝導率の高い銅を用いた。ノズルはコニカルノズルでアークヒータ下流部に取り付けた。ノズルのスロート径は 3.5 mm とし作動ガスに空気を用いた時、出口部でのマッハ数 $M=3$ を得る設計とした。電源装置には直流式大阪電機製エアープラズマ切断機を改良し用いた。今回、入力電力 24.5kW の電源装置を 2 台並列接続し 49.0kW に上昇し、放電電流を 240A まで変化させることが可能である。また、アークヒータ上流部の陰極ケースに電磁コイルを巻いて外部磁場を発生させ、ロー

* 愛知工業大学 工学部 機械工学科(豊田市)

** 愛知工業大学大学院工学研究科生産システム工学専攻

*** 名古屋大学大学院 マイクロシステム専攻(名古屋市)

レンツ力によりアーク輝点を中空電極内で回転させることにより電極の局所的な損傷を防いでいる。図 3 は分光システムの概略図を示す。分光計測部は、超音速ノズル上流の激み点付近に設置された光ファイバ、集光レンズ、分光器、浜松ホトニクス株式会社製光電子増倍管 R7057(フォトマル)、NF 社製ロックインアンプ LI5640、横河電機株式会社製デジタルスコープ DL716 により成り立っている。分光器は、日本分光株式会社製回折格子型分光器 CT50CS(回折格子 3600grooves/mm, 240nm blaze, 焦点距離 500mm)である。測定条件は、分光器の自動送り速度 2.778nm/min, オシロスコープの時間軸 20s/div, サンプルレート 2ks/s, レコード長 400kword, 測定時間 200s, フォトマル印加電圧 -1000V, ライトチョップのチョッピング周波数は 270Hz である。実験は低圧部タンク内圧力を約 13.3Pa(0.1torr)に調圧し、高周波放電を開始させ、放電がアーク放電に移行し定常状態になった後、任意の激み点圧力(0.05~0.25MPa)に調節する。アーク放電が安定したのち、超音速ノズル上流の激み点近傍にてプラズマ流の発光を光ファイバ、集光レンズにより分光器に導き、分光器の波長を自動送り装置を用い任意の波長域の光電測光を行う。実験条件の再現性を調べるために同じ波長域を数回測定した。今回、各種分子の影響を減らすために、作動ガス窒素を用い N_2 アークプラズマ流を発生し、 N_2^+ の 1st Negative Band System に注目して、 N_2^+ の振動温度 T_v 及び回転温度 T_r を求めた。

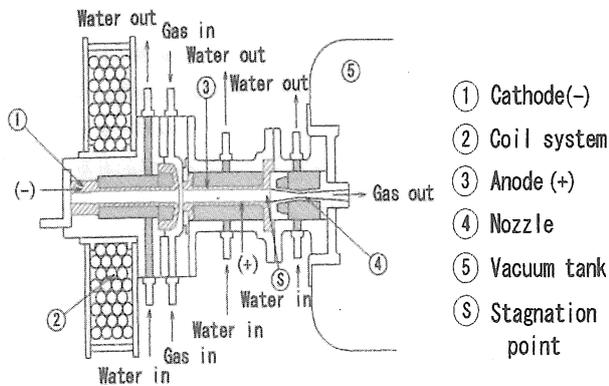


Fig. 1 Schematic view of Huels type arc heater

3. 振動温度及び回転温度

3.1 振動温度 T_v

振動温度 T_v は局所熱平衡を仮定し、各エネルギー準位の分布が Boltzmann 分布に従うとして、Boltzmann プロット法から求める事とする。 N_2^+ の 1st Negative Band System ($B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ 遷移)は、電子が B 軌道から X 軌道に遷移すると同時に振動エネルギー状態において遷移が起こる際、放射さ

れるスペクトルのグループにつけられた名称であり、ほぼ可視領域に存在する。より高いエネルギー準位 B に存在する分子の振動量子数を v' 、より低いエネルギー準位 B に存在する分子の振動量子数を v'' とする。二原子分子の振動に関しては縮退がないとすれば、スペクトル強度 $S_{v'v''}$ は、

$$S_{v'v''} = KN_v h\nu_{v'v''} A_{v'v''} \quad (1)$$

この時、分配関数 $Q_v(T_v)$ と粒子密度 N_v は、振動量子数に無関係で比例定数 K に含めた。

$$A_{v'v''} = \frac{64\pi\nu_{v'v''}^3}{3hc^3} P(v', v'') \quad (2)$$

但し、 $P(v', v'')$ は、 v' の状態から v'' の状態への相対遷移確率である。よって、スペクトル強度 $S_{v'v''}$ は、式(1), (2)より

$$S_{v'v''} = KN_v \nu_{v'v''}^4 P(v', v'') \quad (3)$$

より高いエネルギー状態 B にある分子の振動のモードについて Boltzmann 分布と仮定すると、

$$N_{v'} \propto \exp\left(-\frac{G(v')hc}{kT_v}\right) \quad (4)$$

$G(v')$ は、振動エネルギーの比である。第一近似的として、振動を調和振動と仮定すると、

$$G(v') = \frac{\varepsilon(v')}{hc} \cong \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) \quad (5)$$

ここで、 ω_e は分子の振動を調和振動と仮定した時の 1cm 当たりの振動数で、 $\omega_e = 2419.84\text{cm}^{-1}$ 、 c は光速である。式(4), (5)を式(3)に代入し、その対数をとれば

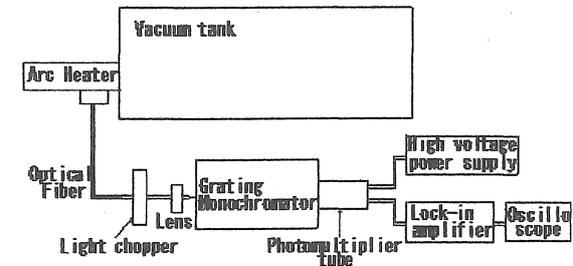


Fig. 2 Experimental setup of the spectroscopic measurement system

$$\log_{10} \frac{S_{v'v''} \lambda_{v'v''}^4}{P(v', v'')} = -\frac{hc\omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right)}{kT_v} \log_{10}(e) + const \quad (6)$$

$hc/k = 1.4388\text{cm}^\circ\text{K}$, $\log_{10}(e) = 0.4343$ を代入すると式(6)は、

$$\log_{10} \frac{S_{v'v''} \lambda_{v'v''}^4}{P(v', v'')} = -\frac{1272}{T_v} \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) + const \quad (7)$$

第一近似として、以上の方法で良い。実際には窒素の振動は調和振動ではなく、非調和振動である。この時の $G(v')$ は、

$$G(v') = \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) - \omega_e x_e \left(v' + \frac{1}{2}\right)^2 + \omega_e y_e \left(v' + \frac{1}{2}\right)^3 \dots \quad (8)$$

窒素では, $\omega_e=2419.84\text{cm}^{-1}$, $\omega_{e'}=23.19\text{cm}^{-1}$,
 $\omega_{e''}=-0.5375\text{cm}^{-1}$ (10),(11)である. $G(v')$ は, 式(4), (8)の $G(v)$
を式(3)に代入して, hdk , $\log_{10}(\theta)$ の値を代入して対数をとれ
ば良い. よって,

$$\log_{10} \frac{S_{v',v''} \lambda_{v',v''}^4}{P(v',v'')} = -\frac{0.6249}{T_v} G(v') + \text{const} \quad (9)$$

振動温度を測定するときには, 電子及び回転準位の等しい複
数のスペクトルを測定し, 式(8)又は, 式(9)に相対強度法を
適用する. 式(9)の左辺を横軸に, $G(v')$ を縦軸にとり, 測定
点間を直線近似し得られる傾きが $-1/T_v$ となり, 振動温度
 T_v が求まる.

3.2 回転温度 T_r

下部準位における振動運動におけるエネルギーは, 振動準位
 v'' が0であり基底状態での振動準位の励起が存在しないこと
により振動温度 T_v が低く, さらに気体が熱平衡状態にある
時, R-branch における発光強度比 $I_{J,J'}/I_0$, T_v と T_r の関係式
は以下ようになる.

$$\log_e \frac{I_{J,J'}/I_0}{(J'+J''+1)(G)^4} = B_{v'} J'(J'+1)hc/kT_r + F(T_v, T_r) \quad (10)$$

$$G = \frac{(J'+1) \exp\{-2B_{v'}(J'+1)hc/kT_r\} + J' \exp\{2B_{v'} J' hc/kT_r\}}{(2J'+1)} \quad (11)$$

$$\nu \equiv \nu_0 + 2B_{v'} + 2B_{v''} J' \quad (12)$$

式(10)の左辺を縦軸とし, $J'(J'+1)$ を x 軸とし, この直線の
傾き b を用いて回転温度が以下の式により求める事ができる.

$$T_r = B_{v'} hc / kb \quad (13)$$

又, 振動温度が 800K 以上の時には,

$$\frac{(I_{J,J'})_{0,v_2} / I_0}{(J'+J''+1)\nu^4(G)} = \exp\{B_{\text{eff}}' J'(J'+1)hc/kT_r\} \quad (14)$$

$$I_0 = x_c [A/(Q_r(T_r))_0 [\theta] + \dots] \quad (15)$$

$$x_c = (x_a x_b) / 2, A = q(0_1, 0) \exp\{-G_0(0_1)hc/kT_v\} \quad (16)$$

$$[\theta] = \left[\sum_{J'=0,1,\dots} \{(N''_{J'+1})v''_2\} P_P + \{(N''_{J'-1})v''_1\} P_R \right] \quad (17)$$

となり, 回転温度が近似的に算出される. ここで, J' は上部
準位での回転量子数, J'' は下部準位での回転量子数, T_r は回
転温度, ν は R-branch における波数, ν_0 は (0,0)band にお
ける波数, B_{eff}' は平均回転定数, $(Q_r(T_r))_0$ は, $v=0$ の時の回
転温度の和, $q(0_1, 0)$ は 2 つの電子状態である振動レベル $v=0_1$
と $v=0$ の間での遷移についての Frank-Condon 因子, $N''_{J'+1}$
は窒素分子の基底状態の回転レベルで数えられた $(J'+1)$ での
分子数, P_P は, P-branch における回転遷移確率, P_R は,
R-branch における回転遷移確率である.

4. 分光測定結果及び考察

図3は作動ガス窒素を用いた激み点付近でのアークプラズ
マ流の分光測定実験結果を示す. グラフは縦軸を発光強度,
横軸を波長としている. 測定波長域: 383~392nm, N₂⁺の
1st Negative Band System の(0,0)(1,1)(2,2)Band の3点を
含んでいる. 計測条件は, 自動送り速度 2.78nm/min, ライ
トチョップの回転周波数 270Hz である. アークプラズマ流
の放電電流 100A, 電圧 140V, 流入流量 0.79g/s, タンク内
圧力は計測開始時約 107Pa, 計測終了時約 213Pa, 分光器ス
リット幅は入射射出共 0.04mm である. ただし, 激み点流管
内をレンズで集光することが不可能なため平均光で測定し
た. 図3より, 振動レベル, 回転レベルの輝線スペクトルが
非常にシャープに観測されている. 従って, 分光器焦点距離
500mm, 回折格子 3600mm/grooves を有していれば, 振動
レベル及び回転レベルの波長分解が可能である.

振動温度 T_v は局所熱平衡を仮定し, 各エネルギー準位の分
布が Boltzmann 分布に従うとして, Boltzmann プロット法
¹⁴⁾から求めた. 図4は, 図3の値を用いて Boltzmann プロ
ット法に基づき計算を行ったもので, 各点間の直線の傾きよ
り振動温度 T_v を求めた. 図3より, (0,0)(1,1)(2,2)Band を
平衡仮定し, 求めた振動温度は, $T_v=3387\text{K}\pm 500\text{K}$ である.
2つのバンド域において局所平衡仮定し, (0,0)(1,1)Band 間
より求めた振動温度は $T_v=10177\text{K}\pm 1500\text{K}$, (1,1)(2,2) Band
間より求めた振動温度は $T_v=2338\text{K}\pm 500\text{K}$ となった.
(0,0)(1,1)Band 間において, 他の振動温度 T_v よりも高い結果
が得られた. これは, N₂⁺イオンが受け取るエネルギーの励起
確率が高いために, 基底状態(0,0)→(1,1)へ励起がされやす
くなり, (1,1)→基底状態(0,0)への遷移も振動レベルが低いた
めに起こりやすいと考えられる. 又, 2つのバンド域間での
平衡仮定による Boltzmann 法により求めた振動温度が異
なることより, アークプラズマ流は超音速ノズル上流の激み点
付近において非平衡の可能性があると考えられる.

図5は図3の基底状態(0,0)→(1,1)へ励起状態における回転
温度 T_r を求めた結果である. 回転量子数 $J' < 7$ の時, 急激に
回転温度 T_r は低くなる為に, 今回の計算では回転量子数 4
 $< J' < 42$ の範囲で回転温度の計算を行なった. $J' < 26$ では
 $T_r=1474\text{K}$, $28 < J' < 42$ の範囲では $T_r=9831\text{K}$, $4 < J' < 42$
の範囲では 7374K となった. 従って, 振動温度と同様に同
じ励起状態においても回転温度が異なることより, アークプ
ラズマ流は超音速ノズル上流の激み点付近において強い非
平衡の可能性があると考えられる.

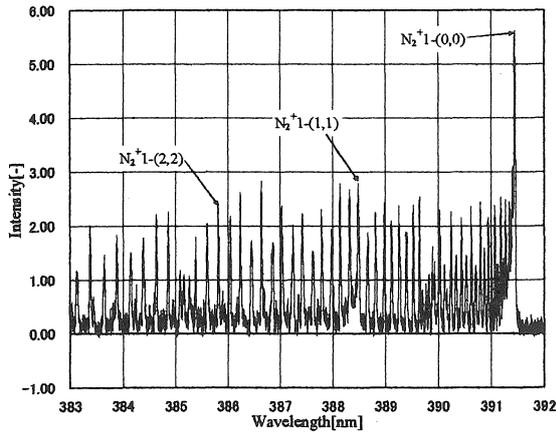


Fig. 3 Measured vibrational spectra showing $N_2^+(1st\ neg.)$ at the stagnation point.

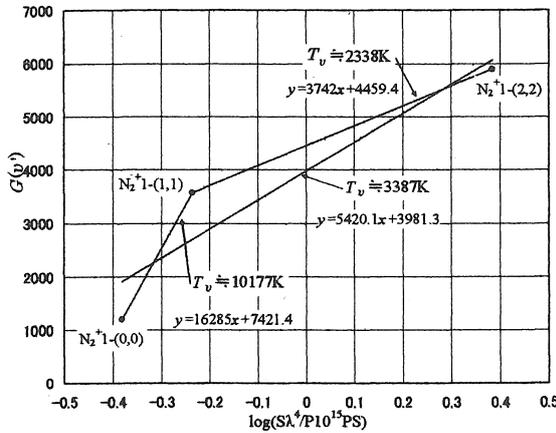


Fig. 4 Boltzmann plot of $N_2^+(1st\ neg.)$ vibrational level from N_2 plasma arc at the stagnation point

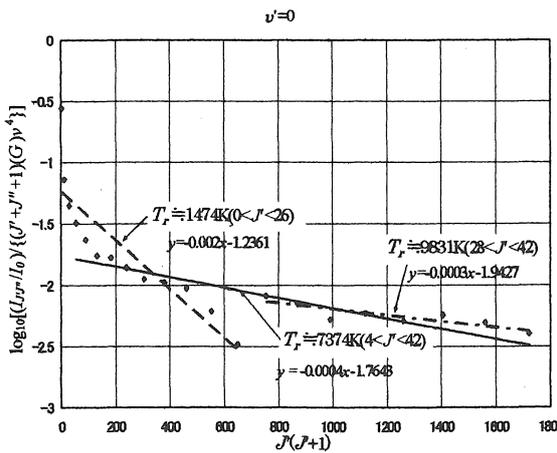


Fig. 5 $N_2^+(1st\ neg.)$ rotational level from N_2 plasma arc at the stagnation point

5. まとめ

本研究では、アークヒータの激み点付近のアークプラズマ流の分光計測について、作動ガス窒素のアークプラズマ流の $N_2^+ B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ (1st Negative Band System)の分光計測を行い、以下の結果を得た。分光器焦点距離 500mm, 回折格子 3600mm/grooves を用いる事により、非常にシャープな振動スペクトル, 回転スペクトルの輝線スペクトルが観測した。 N_2 アークプラズマ流における(0,0)Band(波長 391.44nm), (1,1)Band(波長 388.43nm), (2,2)Band(波長 385.79nm)のイオンスペクトルから, (0,0)(1,1)(2,2)Bandの平衡仮定により, 振動温度は $T_v=3387K\pm 500K$, (0,0)(1,1)Band間の局所平衡仮定により, $T_v=10177K\pm 1500K$, (1,1)(2,2)Band間の局所平衡仮定により, $T_v=2338K\pm 500K$ となった。回転量子数 $4 < J < 42$ の範囲で回転温度の計算を行なった。 $J < 26$ では $T_r=1474K$, $28 < J < 42$ の範囲では $T_r=9831K$, $4 < J < 42$ の範囲では $7374K$ となった。振動温度及び回転温度からアークプラズマ流が激み点付近において非平衡の可能性が示された。

今後は N_2 及び N_2^+ の 2nd Positive Band System ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ 遷移) や N_2^+ の 1st Negative Band System の高量子数での量子力学的振動温度 T_v 及び回転温度 T_r の精密なスペクトル計測を行う必要がある。

参考文献

- 1) M. Hinada, Y. Inatani, T. Yamada, K. Hiraki: An Arc Heated High Enthalpy Test Facility for Thermal Protection Studies, ISAS Rep. No.664, ISAS, Japan, 1996.
- 2) M. Yasuhara, K. Kitagawa, M. Suzuki, H. Yamada: Similarity Study of Operating Characteristics of Arc Heated Wind Tunnel, Proc. Int. Conference on Fluid Engineering, Tokyo, Japan, Vol.III, pp.1479-1483, 1997.
- 3) Y. Watanabe, T. Matsuzaki, K. Ishida, H. Itagaki, K. Yudate, T. Yoshinaka: Characteristics of the 750kw Arc Heated Wind Tunnel, Proc.9th Int. Sympo. on Space Technology and Science, ISTS 94-d-36, 1994.
- 4) S. Tagashira, T. Oda, M. Mitsuda, T. Washida, T. Shin, K. Ago, T.J. Stahl: On the Characteristics of a Segmented-Constricted Arc Heater, Preprint 27th Conference on Fluid Dynamics, Japan Soc. for Aeron. & Space Sci, 1995.
- 5) K. Kindler: The Arc Heated Wind Tunnel (LBK) of DLR, DLR, Cologne, 1989.
- 6) J. Hilsenrath, M. Klein, H.W. Wolley: Tables of Thermodynamics Properties of Air including Dissociation and Ionization from 1500K to 15000K, AEDC-TR-59-20, 1959.
- 7) E.P. Muntz, E.P.: Measurement of rotational temperature, vibrational temperature, and molecule concentration, in non-radiating flow of low density nitrogen, Institute of Aero physics University of Toronto, UTIA Report No.71, AFSOR TN 60-499, 1961.
- 8) F. Robben, L. Talbot: Some measurements of rotational temperatures in a low density wind tunnel using electron

beam fluorescence, Institute of engineering research University of California Berkeley, California, Report No. AS-65-5, 1965

9) W.R. Jarman, P.A. Fraser, R.W. Nicholls: Vibrational transition probabilities of diatomic molecules: collected results N₂, N₂⁺, NO, O₂⁺, Transition probabilities, pp228-233, 1953.

10) Huber, K.P. and Herzberg, G., "Molecular spectra and molecular structure, IV Constants of diatomic molecules", pp426-427, 1979.

11) G. Herzberg: Molecular Spectra and Molecular Structure, I. Spectra of Diatomic Molecules, 2nd Ed, D.Van

Nostrand Co., Princeton, NJ, 1950.

12) G. Herzberg: Molecular Spectra and Molecular Structure, IV. Constants of Diatomic Molecules, D.Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1979.

13) K. Kitagawa, Y. Mori, N. Yoshikawa, M. Yasuhara: Characteristics of High Efficiency Arc Heated Wind Tunnel, Proc.23rd Int. Sympo. on Space Technology and Science, ISTS 2002-e-54p, 2002.

(受理 平成 15 年 4 月 30 日)