

ノズルスロート部上流におけるアークプラズマ気流の分光計測

Spectral measurements of the arc heated nitrogen flow at upstream of the sonic throat

北川 一敬[†], 宮川 佳典^{††}, 吉川 典彦^{†††}, 保原 充[†], 毛利 元治^{††††}
Kazutaka KITAGAWA[†], Yoshinori MIYAGAWA^{††}, Norihiko YOSHIKAWA^{†††},
Michiru YASUHARA[†], Motoharu MOURI^{††††}

Abstract: Flow near the sonic throat 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. The $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ transition of $\Delta v=0$ of the N_2^+ molecule, is referred in the region of 383 to 392 nm of the N_2^+ 1st negative band system, and the $C^3\Pi_u - C^3\Pi_g$ transition of $\Delta v=1$ of the N_2 molecule, is referred in the region of 309 to 316 nm of the N_2 2nd positive band system. Spectra profiles in arc heated flow are obtained to estimate the vibrational temperature from the both bands at upstream of the nearly sonic throat. The vibrational temperatures T_v are estimated to be about 2900~3200K from average inclination line close to (0,0)-(2,2) from the N_2^+ (1st neg.), and about 3600~4300K from inclination line close to (1,0)-(4,3) from the N_2 (2nd pos.). The average rotational temperatures in an arc heated flow are obtained from the N_2^+ (1st neg.) bands, (0,0) and (1,1) of $\Delta v=0$, and from the N_2 (2nd pos.) bands, (1,0) and (2,1) of $\Delta v=1$. The rotational temperatures T_r are estimated to be about 1600~1800K from $2 < J' < 26$, and about 5900~7400K from $6 < J' < 42$ of the rotational quantum number. While the 1D stagnation temperature T_0 of the arc heated N_2 estimated by using 1D nozzle flow calculation, is about 2300~2500K.

1. はじめに

アーク加熱方式高エンタルピ風洞は高温プラズマ流(気流温度約 3000K 以上)を発生し, この高温気流により, 一瞬にして材料を融解・蒸発・昇華させる事が可能である. 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, 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である. 特に, 将来型再使用宇宙輸送機体先端近傍の激み点流れ・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に試験風洞の作動特性を知ることが必要となる.

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超音速ノズルスロート上流部において, 窒素分子イオン N_2^+ 1st Negative Band System と窒素分子 N_2 2nd Positive Band System の分光学的温度(振動温度, 回転温度)を計測し, アーク加熱気流の熱的非平衡性を調べた.

[†] 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(豊田市)

^{†††} 名古屋大学大学院工学研究科(名古屋市)

^{††††} 朝明化工機(株)(名古屋市)

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. 図1は Huels 型アークヒータの概要図を示す. 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 3.5mm 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(株)ダイデン製 49.0kW エアープラズマ切断機を改良し用いた. 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2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)製光電子増倍管 R7057(フォトマル), (株)エヌエフ回路設計ブロック製ロックインアンプ LI5640, 横河電機(株)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)製回折格子型分光器 CT-50CS(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

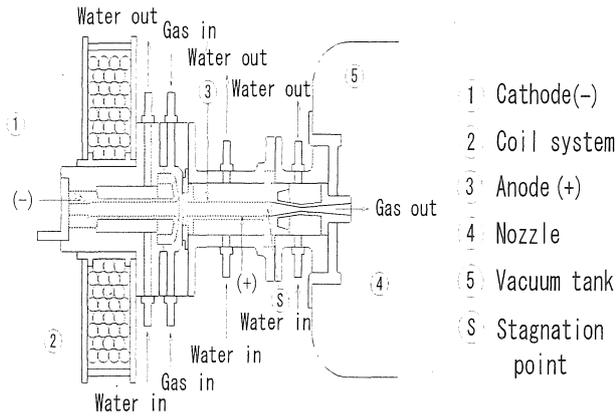


図1 Huels型アークヒータ

速度 2nm/min, サンプルレート 2ks/s, レコード長 1Mword, 測定時間 500s, フォトマル印加電圧 -1kV, ライトチョッパのチョッピング周波数は 133Hz 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, 超音速ノズルスロート部上流約 36, 78mm の 2 点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^+ 1st Negative Band System と N_2 2nd Positive Band System に注目して, 振動温度 T_v 及び回転温度 T_r を求めた.

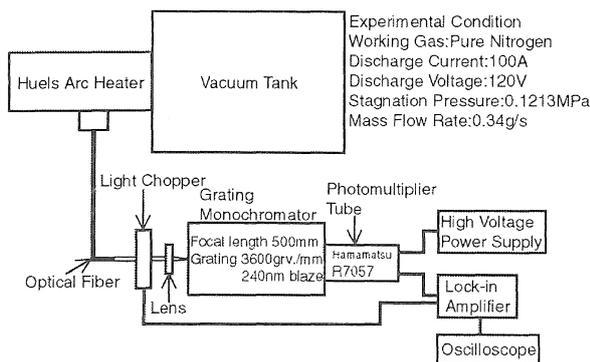


図2 分光システムの概略図

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. 1st Negative Band System は, 電子が B 軌道から X 軌道

に, 2nd Positive Band System は, 電子が C 軌道から B 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,

$$S_{v'v''} = KN_{v'}h\nu_{v'v''}A_{v'v''} \quad (6)$$

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.

$$A_{v'v''} = \frac{64\pi\nu_{v'v''}^3}{3hc^3} P(v',v'') \quad (7)$$

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(6), (7)より

$$S_{v'v''} = KN_{v'}\nu_{v'v''}^4 P(v',v'') \quad (8)$$

より高いエネルギー状態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,

$$N_{v'} \propto \exp\left(-\frac{G(v')hc}{kT_v}\right) \quad (9)$$

$G(v')$ 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,

$$G(v') = \frac{\varepsilon(v')}{hc} \cong \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) \quad (10)$$

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(9), (10)を式(8)に代入し, その対数をとれば,

$$\log_{10} \frac{S_{v'v''}\lambda_{v'v''}^4}{P(v',v'')} = -\frac{hc\omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right)}{kT_v} \log_{10}(e) + const \quad (11)$$

$hc/k = 1.4388\text{cm}^\circ\text{K}$, $\log_{10}(e) = 0.4343$ を代入すると式(11)は,

$$\log_{10} \frac{S_{v'v''}\lambda_{v'v''}^4}{P(v',v'')} = -\frac{1272}{T_v} \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) + const \quad (12)$$

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,

$$G(v') = \omega_e \left(v' + \frac{1}{2}\right) - \omega_e x_c \left(v' + \frac{1}{2}\right)^2 + \omega_e y_c \left(v' + \frac{1}{2}\right)^3 \dots \quad (13)$$

窒素では, $\omega_e=2419.84\text{cm}^{-1}$, $\omega_e x_e=23.19\text{cm}^{-1}$, $\omega_e y_e=-0.5375\text{cm}^{-1}$ ^{(10),(11)}である. $G(v')$ は, 式(9), (13)の $G(v')$ を式(8)に代入して, hc/k , $\log_{10}(e)$ の値を代入して対数をとれば良い. よって,

$$\log_{10} \frac{S_{v'v''} \lambda_{v'v''}^4}{P(v',v'')} = -\frac{0.6249}{T_v} G(v') + \text{const} \quad (14)$$

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(13)又は, 式(14)に相対強度法を適用する. 式(14)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 の関係式は以下のようになる.

$$\log_e \frac{I_{J'J''}/I_0}{(J'+J''+1)(G)^4} = B_{v'} J'(J'+1)hc/kT_r + F(T_v, T_r) \quad (15)$$

$$G = \frac{(J'+1)\exp\{-2B_{v'}(J'+1)hc/kT_r\} + J'\exp\{2B_{v'}J'hc/kT_r\}}{(2J'+1)} \quad (16)$$

$$v \equiv v_0 + 2B_{v'} + 2B_{v''}J' \quad (17)$$

式(15)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.

$$T_r = B_{v'}hc/kb \quad (18)$$

又, 振動温度が800K以上の時には,

$$\frac{(I_{J'J''})_{0,v_2}/I_0}{(J'+J''+1)v^4(G)} = \exp\{B_{\text{eff}}' J'(J'+1)hc/kT_r\} \quad (19)$$

$$I'_0 = x_c[A/(Q_r(T_r))_0[\theta] + \dots] \quad (20)$$

$$x_c = (x_a x_b)/2, A = q(0,0)\exp\{-G_0(0_1)hc/kT_v\} \quad (21)$$

$$[\theta] = \left[\sum_{J''=0,1,\dots} \{(N''_{J'+1})v''_2\}P_P + \{(N''_{J'-1})v''_1\}P_R \right] \quad (22)$$

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, v はR-branchにおける波数, v_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, $q(0,0)$ 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 N_2 分子, 振動温度3200Kにおける Boltzmann 分布を示す. 実験条件内において, N_2 分子は Boltzmann 分布している事が確認できる. 従って, 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 分布に従う仮定が成り立っている. 図4, 5は作動ガス窒素を用いたアークプラズマ流の N_2^+ 1st Negative Band Systemの分光測定実験結果を示す. 各図は, 超音速ノズルスロートより78mm, 36mm上流の結果である. 縦軸を発光強度, 横軸を波長としている. 測定波長域: 383~392nm, N_2^+ 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2nm/min, ライトチョップの回転周波数133Hzである. アークプラズマ流は澱み点圧力0.1213MPa, 放電電流100A, 電圧120V, 流入流量0.34g/s, タンク内圧力は計測開始時約107Pa, 計測終了時約213Paである. 又, 分光器スリット幅は入射出射共0.04mmである. ただし, 流管中心部をレンズで集光した. 図4, 5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3600grooves/mm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, Boltzmann プロット法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾から求めた. 図6は, 図4, 5の結果を用いて 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6より, (0,0)(1,1)(2,2)Bandを平衡仮定し, 求めた振動温度は, 78mm上流: T_v ≈約2900±500K, 36mm上流: T_v ≈3200±500Kである. 図7, 8は作動ガス窒素を用いたアークプラズマ流の N_2 2nd Positive Band Systemの分光測定実験結果を示す. 各図は, 超音速ノズルスロートより78mm, 36mm上流の結果である. 測定波長域: 309~317nm, N_2 2nd Positive Band Systemの(1,0)(2,1)(3,2)(4,3)Bandの4点を含んでいる. 図7, 8の振動レベル, 回転レベルの輝線スペクトルは, 図4, 5の N_2^+ 1st Negative Band Systemでの輝線スペクトルと比べて, 解像度が低下している. しかし, 振動温度, 回転温度の算出には問題はない. 図9は, 図7, 8の結果を用いて Boltzmann プロット法に基づき計算を行い, 4点のBandを平

平衡定し振動温度を求めた。振動温度は, 78mm 上流: $T_v = \text{約 } 3600 \pm 500\text{K}$, 36mm 上流: $T_v = \text{約 } 4300 \pm 500\text{K}$ であった。従って, 超音速ノズルまでの間, アークプラズマ流によりアーク加熱されるため, 下流側では振動温度が上昇していると考えられる。

図 10, 11 は N_2^+ 1st Negative Band System の基底状態 $(0,0) \rightarrow (1,1)$ へ励起状態, 図 12, 13 は N_2 2nd Positive Band System の $(1,0) \rightarrow (2,1)$ における回転温度 T_r を求めた結果である。各図は, 超音速ノズルスロートより 78mm, 36mm 上流の結果である。今回の計算では回転量子数 $2 < J < 42$ の範囲の R-branch における回転温度の計算を行なった。 N_2^+ 1st Negative Band System $(0,0) \rightarrow (1,1)$ における回転温度は, 図 10 より, 78mm 上流において, 回転量子数 $2 < J < 24$: $T_r = 1600 \pm 100\text{K}$, 回転量子数 $6 < J < 42$: $T_r = 5900 \pm 500\text{K}$, 図 11 より, 36mm 上流において, 回転量子数 $2 < J < 24$: $T_r = 1700 \pm 100\text{K}$, 回転量子数 $6 < J < 42$: $T_r = 7400 \pm 500\text{K}$ となった。 N_2 2nd Positive Band System の $(1,0) \rightarrow (2,1)$ における回転温度は, 図 12 より, 78mm 上流において, 回転量子数 $2 < J < 24$: $T_r = 1800 \pm 100\text{K}$, 回転量子数 $6 < J < 42$: $T_r = 5900 \pm 500\text{K}$, 図 13 より, 36mm 上流において, 回転量子数 $2 < J < 24$: $T_r = 1800 \pm 100\text{K}$, 回転量子数 $6 < J < 42$: $T_r = 7400 \pm 500\text{K}$ となった。従って, 超音速ノズルまでの間, アークプラズマ流によるアーク加熱の影響は低準位振動レベル間における回転温度はほぼ変わらない事わかった。また, 回転温度と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澱み点付近において強い熱的非平衡の可能性があると考えられる。

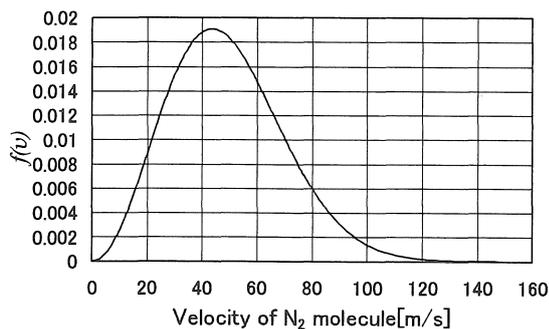


図 3 N_2 分子, 振動温度 3200K におけるボルツマン分布

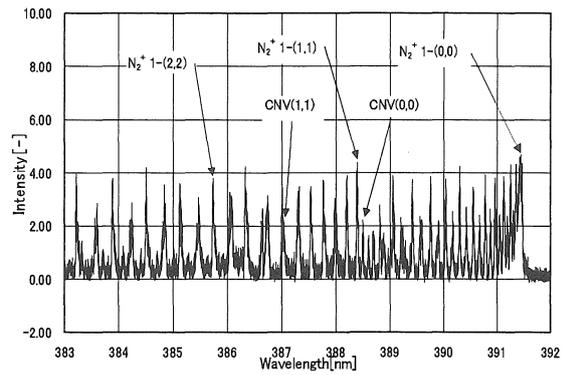


図 4 N_2^+ 1st Neg. 波長域 78mm 上流の分光測定結果

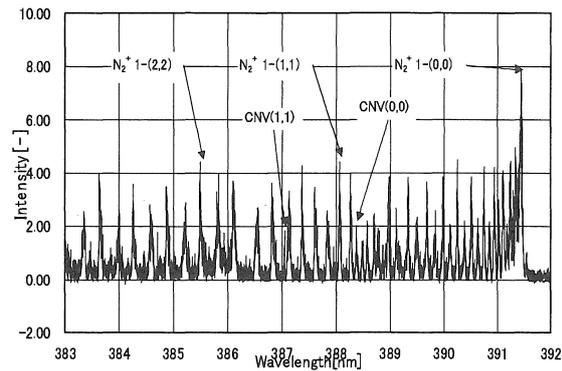


図 5 N_2^+ 1st Neg. 波長域 36mm 上流の分光測定結果

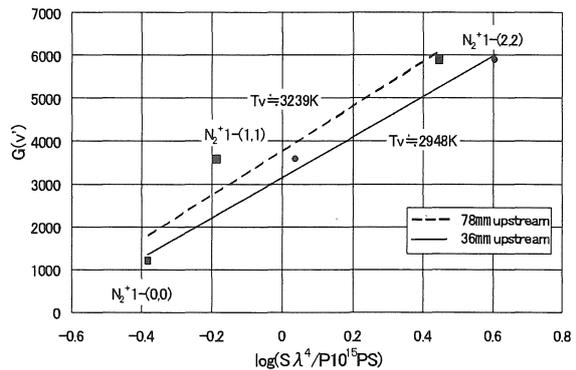


図 6 Boltzmann プロット法による N_2^+ 1st Neg. 波長域での振動温度 T_v 解析結果

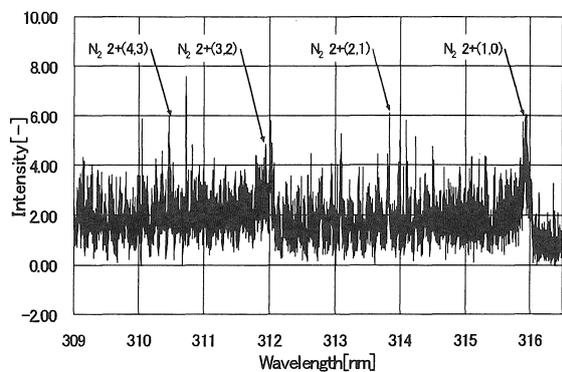
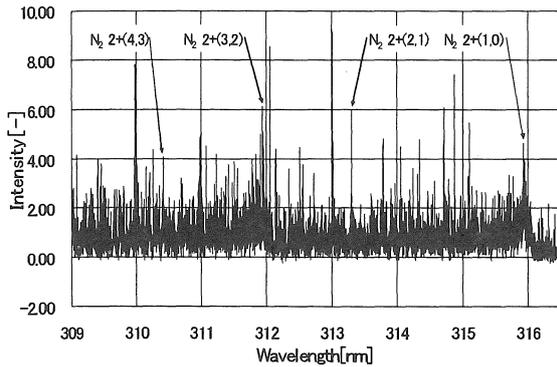
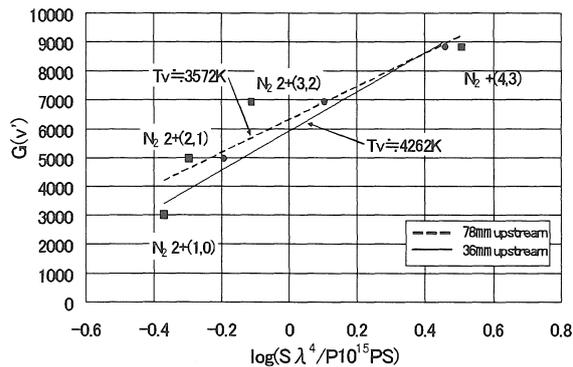
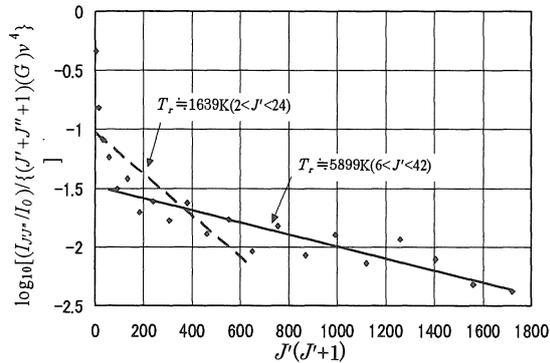
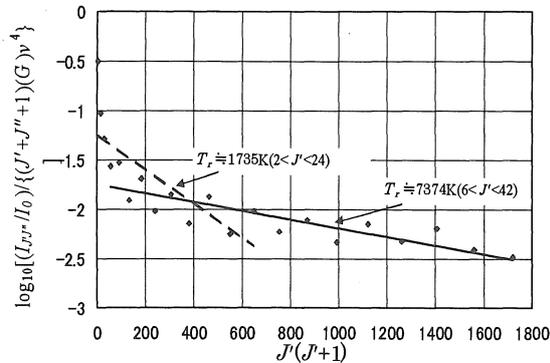
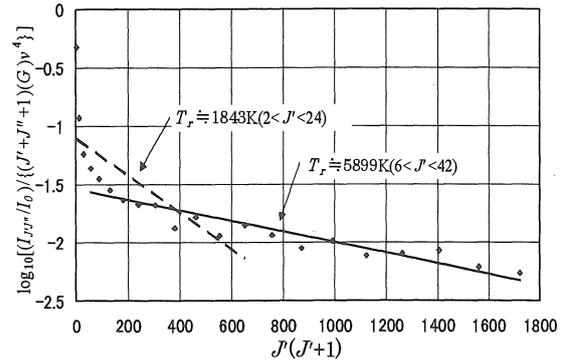
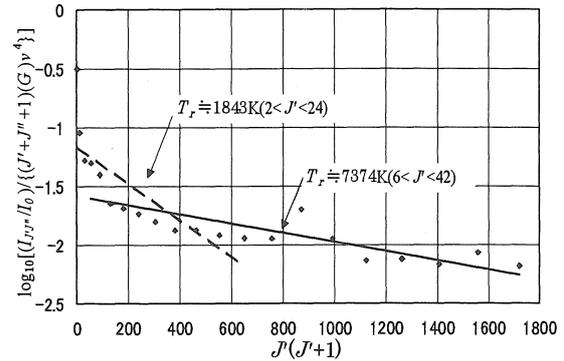


図 7 N_2 2nd Pos. 波長域 78mm 上流の分光測定結果

図 8 N₂ 2nd Pos. 波長域 36mm 上流の分光測定結果図 9 Boltzmann プロット法による
N₂ 2nd Pos. 波長域での振動温度 T_v 解析結果図 10 N₂⁺ 1st Neg. 78mm 上流での
回転温度 T_r 解析結果図 11 N₂⁺ 1st Neg. 36mm 上流での
回転温度 T_r 解析結果図 12 N₂ 2nd Pos. 78mm 上流での
回転温度 T_r 解析結果図 13 N₂ 2nd Pos. 36mm 上流での
回転温度 T_r 解析結果

5. まとめ

本研究では、アークヒータの澱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) 及び $N_2 C^3\Pi_u - C^3\Pi_g$ (2nd Positive Band System) の分光計測を行い、以下の結果を得た。

N_2 アークプラズマ流における分光計測結果から、 N_2^+ 1st Negative Band System より得られた振動温度 T_v は、(0,0)(1,1)(2,2)Band の平衡仮定により、78mm 上流 $T_v = 2900K \pm 500K$ 、36mm 上流 $T_v = 3200K \pm 500K$ となった。 N_2 2nd Positive Band System より得られた振動温度 T_v は、(1,0)(2,1)(3,2)(4,3)Band の平衡仮定により、78mm 上流 $T_v = 3600K \pm 500K$ 、36mm 上流 $T_v = 4300K \pm 500K$ となった。 N_2^+ 1st Negative Band System $\Delta v = 0$ における基底状態(0,0)→(1,1)への励起状態より R-branch について求めた回転温度 T_r は、78mm 上流: 回転量子数 $2 < J' < 24$, $T_r = 1600K \pm 100K$, 回転量子数 $6 < J' < 42$, $T_r = 5900K \pm 500K$, 36mm 上流: 回転量子数 $2 < J' < 24$, $T_r = 1700K \pm 100K$, 回転量子数 $6 < J' < 42$, $T_r = 7400K \pm 500K$ となった。 N_2 2nd Positive Band System $\Delta v = 1$ における(1,0)→(2,1)への励起状態より R-branch について求めた回転温度 T_r は、78mm 上流: 回転量子数 $2 < J' < 24$, $T_r = 1800K \pm 100K$, 回転量子数 $6 < J' < 42$, $T_r = 5900K \pm 500K$, 36mm 上流: 回転量子数 $2 < J' < 24$, $T_r = 1800K \pm 100K$, 回転量子数 $6 < J' < 42$,

$T_r=7400\text{K}\pm 500\text{K}$ となった。 N_2^+ 1st Neg. $\Delta v=0$ と N_2 2nd Pos. $\Delta v=1$ より得られた回転温度はほぼ同じ温度なる事が分かった。 振動温度及び回転温度の結果からアークプラズマ流がノズルスロート上流においても、流れの熱的非平衡の可能性がある事が示された。

謝辞 本研究は愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト研究の助成を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Jarman, W.R., Fraser, P.A. and Nicholls, R.W.: Vibrational transition probabilities of diatomic molecules: collected results N_2 , N_2^+ , NO , O_2^+ , Transition probabilities, pp.228-233, 1953.
- [2] Herzberg, G.: Molecular Spectra and Molecular Structure, IV. Constants of Diatomic Molecules, D. Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1979.
- [3] Nicholls, R.W.: Franck-Condon Factors to High Vibrational Quantum Numbers I: N_2 and N_2^+ , Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry, Vol. 65A, No.5, pp.451-459, 1961.
- [4] Scott, C.D., Black, H.E., Arepalli, S. and Akundi, M.A.: Techniques for Estimating Rotational and Vibrational temperatures in Nitrogen Arc Jet Flow, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 12, No.4, pp.457-464, 1998.
- [5] 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.
- [6] Robben, F. and 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.
- [7] Donohue, J.M., Fletcher, D. G. and Park, C. S.: Emission Spectral Measurements in the Plenum of an Arc-jet Wind Tunnel, AIAA Paper 98-2946, 1998.
- [8] Rob, M. A. and Mack, L. H: Characterization of Plenum Spectra in an Arcjet Wind Tunnel, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 11, No.3, pp.339-345, 1997.
- [9] Geimer, R., Batdorf, J., Gillins, R. and Leatherman, G.: The use of arc plasma technology for waste treatment applications, AIAA 95-0249, 1995.
- [10] Sakai, T. and Olejniczak, J: Improvements in a Navier-StokesCode for Arc Heater Flows, AIAA 2003-3782, 2003.

(受理 平成16年4月30日)