

中空電極部のアークプラズマ流の分光温度計測

Spectroscopic temperature measurements of arc heated flow in the hollow electrode arc heater

北川 一敬[†], 稲葉 一宅^{††}, 吉川 典彦^{†††}, 保原 充[†]
K. Kitagawa[†], K. Inaba^{††}, N. Yoshikawa^{†††} and M. Yasuhara[†]

Abstract: Arc heated wind tunnel facilities were produced high enthalpy flows, which are used for purposes to investigate as testing thermal protection technology of reentry flow into the earth or other planets. Huels type DC-arc heater is designed and constructed in Aichi Institute of Technology. The emission spectra in an arc heated flow are obtained to estimate the vibrational and rotational temperatures from Boltzmann plot method. The $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ transition of $\Delta v=0$ of the N_2^+ molecule, is referred in the UV region of 383 to 392 nm as the N_2^+ 1st negative band system ($N_2^+ 1-$), and the $C^3\Pi_u - C^3\Pi_g$ transition of $\Delta v=1$ of the N_2 molecule, is referred in the UV region of 309 to 316 nm of the N_2 2nd positive band system ($N_2 2+$). Average vibrational temperatures T_v are determined to be 4300~4700K from $N_2^+ 1-$ and 2800~3100K from $N_2 2+$ for air. The rotational temperature in R-branch are obtained from (0,0) and (1,1) transition of $\Delta v=0$ for the $N_2^+ 1-$. The average rotational temperature T_r of $N_2^+ 1-$ is obtained to be 3500~3800K from $2 < J' < 26$ of the rotational quantum number.

1. はじめに

スペースプレーン、カプセル等が地球外惑星大気圏再突入する場合、強い衝撃波が発生し、機体形状に依存して局所的な熱集中を生じる。そこで高温高压に耐えうる耐熱材料の開発や再突入状態の地上試験を行なっていく必要がある。従って、耐熱材料試験風洞として高温高压プラズマ気流を実現することが必要となる。高温プラズマ風洞の加熱特性の研究は、実験及びCFDによるアプローチが重要手段となる。本研究では、49kWの水冷式中空電極型のHuels型アークヒータを用いて、超音速流状態のアーク加熱気流の基礎データ取得が目的である。特に、プレナム室から超音速ノズルスロート部迄の超音速流のアークプラズマ気流(作動ガス空気及び窒素)に注目して、窒素分子及び窒素イオンの振動温度 T_v 及び回転温度 T_r を求めた。

2. 実験装置

Fig.1はHuels型アークヒータの断面図を示す。アークヒータは水冷式中空電極型、上流側電極を陰極、下流側電極を陽極、両電極は冷却効率を考慮し熱伝導率の良い無酸素銅を用いた。超音速ノズルはアークヒータ下流部に取り付け、スロート径3.5mm、設計マッハ数 $M=3.8$ となる。直流電源には高周波放電のプラズマトーチを改良し、49.0kWの入力電源とした。アークヒータ上流部の陰極ケースに電磁コイルを巻い

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科(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)

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各電極の局所的な損傷を防いでいる。Fig.2は分光計測システムの概略図を示す。分光システムは光ファイバ、ライトチョップ、集光レンズ、分光器、フォトマル、ロックインアンプ、オシロスコープより成り立っている。分光器はJasco社製回折格子型分光器CT-50CS(回折格子1200grooves/mm及び3600grooves/mm, 240nm blaze, 焦点距離500mm)である。各分子・イオンスペクトルは浜松ホトニクス社製フォトマルR7057により光電測光を行った。作動ガスには空気と純窒素(純度99.5%)を用いた。これは、空気の成分($N_2:78.07\%$, $O_2:20.95\%$, $Ar:0.93\%$, $CO_2:0.03\%$, $Ne:0.0018\%$, $He:0.00052\%$)の中で最も成分が多く、分子量、比熱比がほぼ同じ二原子分子である N_2 に着目した為である。

3. 実験方法

アーク加熱実験は真空タンク内圧力約13.3Pa、任意放電電流値(80~120A)に調整、高周波放電を開始、放電がアーク放電に移行し定常状態になった後、任意の澱み点圧力(0.1213MPa.abs)に調節した。分光計測はアーク放電が安定後、超音速ノズルスロート部上流約36mmの超音速流の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。光電測光により得られた相対発光強度は、アークプラズマ気流の入射光をライトチョップにて弱い出力の波形を増幅、ロックインアンプを用い、ローパスフィルタ(LPF)による雑音除去を行い、TTLレベルの信号に変換したもので

ある。実験条件の再現性を調べるために同じ波長域を複数測定した。

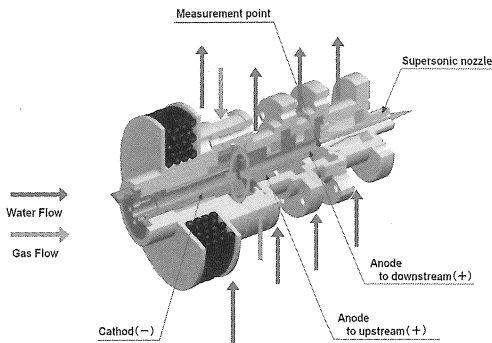


Fig.1 Schematic view of Huels type arc heater.

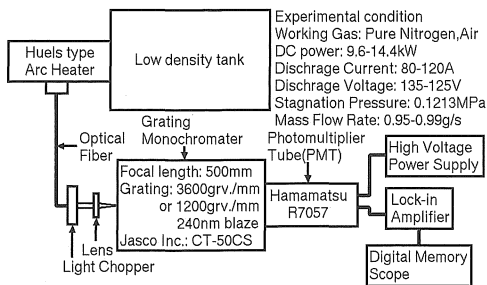


Fig.2 Experimental setup of the spectroscopic measurement system.

4. 実験結果及び考察

Fig.3 は作動ガス空気, Fig.4 は作動ガス純窒素(純度 99.5%) に対する各放電電流値 100A, 超音速ノズルスロートから上流 36mm の超音速流でのアークプラズマ流の発光分光計測結果を示す。縦軸は相対強度, 横軸は波長である。回折格子は 1200grooves/mm, 流管内のプラズマ流の発光は管軸中心においてレンズにより集光している。光電測光により得られた相対発光強度は, ロックインアンプにて感度を調節し, 発光強度比は全点で調整されているが振動回転スペクトルの発光強度比の大きさによる温度への影響は殆ど無い。

Fig.3 及び Fig.4 は計測波長域 350~400nm, $N_2^+ 1-(0,0)-(2,2)$, $N_2 2+(0,2)-(4,6)$, $N_2^+ 1-(1,0)-(4,3)$ 及び $N_2 2+(0,1)-(1,2)$ を含む。Fig.3 では $N_2^+ 1-(0,0)$ が観測されている。しかし, $N_2^+ 1-(1,1)-(2,2)$ は CNV と重なり, 同定が不可能である。空気プラズマの分光計測においては, 強い CNV が生成されている事が判る。Fig.4 では $N_2^+ 1-(0,0)-(2,2)$ の輝線スペクトルが明確に観測されている。しかし, $N_2 2+(1,3)-(4,6)$ の輝線スペクトルが弱い。また, 各分光計測結果より Cu I が観測されている。これはアークヒータの電極材料である銅の輝線スペクトルである。アーク放電により融解した銅が気体中に不純物として含まれている事を示している。

Fig.5 は作動ガス純窒素に対し, 放電電流 100A でのアーク

プラズマ流の高解像度分光計測結果の一例を示す。Fig.5 は $N_2^+ 1-(0,0)-(2,2)$ を含む計測波長域 383~392nm, 回折格子 3600grooves/mm を使用した。グラフ中には各 Band system の振動回転スペクトルを示す。Fig.5 の分光計測結果より, 振動及び回転レベルの輝線スペクトルが高解像度回折格子を用いた事により明確に分解・計測されている事が判る。

Fig.5 の分光計測結果を用いて, Boltzmann プロット法^{(1)~(5)} に基づき振動温度の推算結果を示す。各バンドでの振動温度 T_v は局所熱平衡仮定, 各エネルギー準位の分布が Boltzmann 分布に従うとし, Boltzmann プロット法から求めた。縦軸は振動エネルギー $G(v')$, 横軸は $\log_{10}(S\lambda^4/P10^{15}PS)$ である。 $N_2^+ 1-(0,0)-(2,2)$ 間での振動温度 $T_v=4223K$ となった。しかし, 計測結果より求めた T_v の平均値は $T_v=4300K$ となる。同様な方法で $N_2 2+(2,1)-(4,3)$ での振動温度 $T_v=3096K$ となり, T_v の平均値は $T_v=3100K$ となる。

Fig.5 の分光計測結果より $N_2^+ 1-\Delta v=0$ における遷移から回転温度 T_r を算出した結果である。縦軸は $\log_{10}[(J_r v' / I_0) / \{(J_r + J_r' + 1)(G) v^4\}]$, 横軸は回転量子数 $J' (J'+1)$ である。回転量子数 $2 < J' < 26$ における回転温度 $T_r=3416K$ となった。振動温度と同様に T_r の平均値は $T_r=3500K$ となる。

Fig.6 は作動ガス純窒素における $N_2^+ 1-$ から得た振動温度及び回転温度と放電電流との関係を示す。放電電流の上昇に伴い, アーク放電のジュール加熱によって振動温度が上昇している。また, Fig.6 より本研究で使用している Huels 型アークヒータのヒータプレナム室から超音速ノズルスロート部までのアーク加熱気流は, 振動温度と回転温度の差が生じているため, 熱的非平衡状態である。熱的平衡状態を保つためには, 放電距離を延長, 電源の高出力化, 電極部流管内径の変更等の工夫が必要である。

Fig.7 は作動ガス空気及び純窒素における各バンドから得た T_v と放電電流との関係を示す。窒素プラズマ気流の T_v は, N_2 分子 $T_v=3000\sim 3300K$, 空気プラズマ気流の T_v は窒素プラズマ気流に比べて低く $T_v=2800\sim 3100K$ となった。空気には窒素以外に酸素, アルゴン等の分子, イオン等が混在しているため, 純窒素と比べ, 温度上昇の変化に影響していると考えられる。

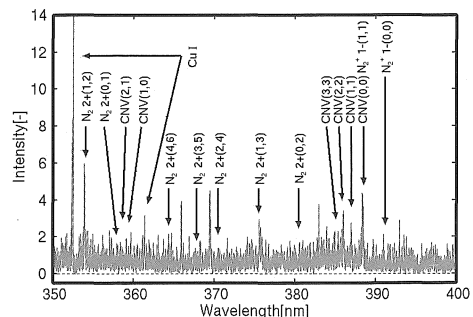


Fig.3 Measured emission spectra of arc heated air in the plenum region.

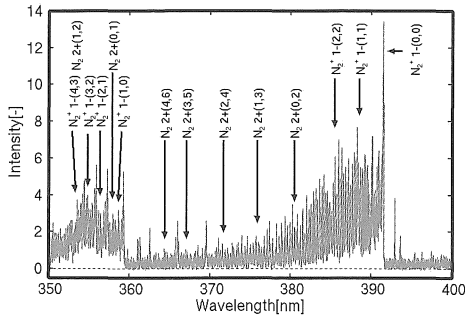


Fig.4 Measured emission spectra of N_2 plasma arc in the plenum region.

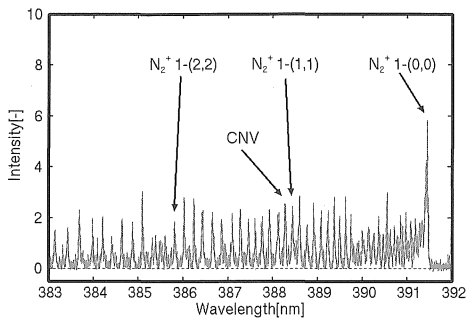


Fig.5 Measured vibrational and rotational emission spectra showing N_2^+ 1- band system from N_2 plasma arc in the plenum region.

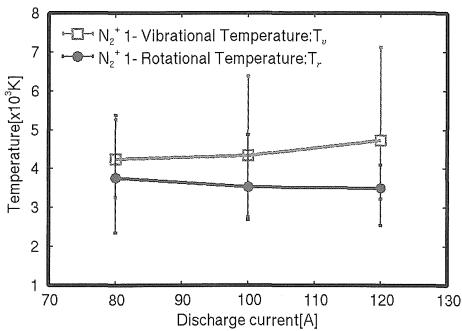


Fig.6 Temperature versus discharge current (N_2^+ 1-).

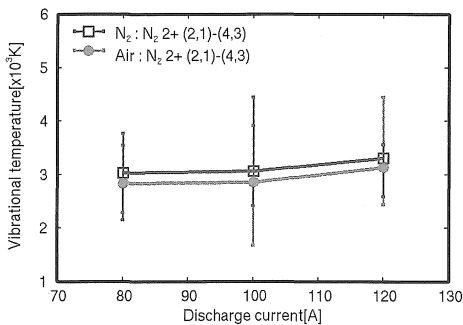


Fig.7 Vibrational temperature versus discharge current (N_2 2+).

5. まとめ

本研究では、作動ガス空気及び純窒素(純度 99.5%)を用いて、Huels 型アークヒータのプレナム室から超音速ノズルスロートまでのアークプラズマ気流の分光計測を行い、以下の結果を得た。

(1) N_2^+ 1st Negative Band System

Boltzmann プロット法により求めた振動温度 $T_v \approx 4300 \sim 4700K$, N_2^+ 1- $\Delta v=0$ における遷移より R-branch について求めた回転温度 $T_r \approx 3500 \sim 3800K$ となった。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熱的非平衡の可能性があると示された。

(2) N_2 2nd Positive Band System

作動ガス純窒素による分光計測結果から、Boltzmann プロット法による振動温度 $T_v \approx 3000 \sim 3300K$ となった。また、純窒素と同じ波長域の分光計測を行い、作動ガス空気との振動温度の比較を行った。窒素プラズマ気流の温度に比べ低い温度となった。これは、空気に含まれている各分子、イオン等による影響によって、純窒素より低い温度となると考えられる。

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^+ , Astrophysical Journal, vol. 118, 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^+ , J. 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, JTHT, 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, AFOSR TN 60-499, 1961.