

アークフリージェット内の振動温度計測

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

[共同研究者] 加田航太郎 (工学研究科博士前期課程機械工学専攻)

研究成果の概要

窒素アークプラズマ気流における、ノズルスロート部上流 (点 B) と超音速ノズル出口後 (点 A) の $N_2^+(1st\ Neg.)$ Band System 計測から温度を把握することで、気流特性を検定した。アークプラズマ気流のプレナム室圧力が一定の場合、ノズルスロートを通過することにより流体が不足膨張する為、振動温度 T_v は $4200 \rightarrow 2900K$ に、 T_r は $3600 \rightarrow 1200K$ に減少した。このことから気流温度の上昇にはプレナム室圧力の上昇が必要となる。振動温度 T_v と回転温度 T_r において温度差が生じたことから、流体は熱的非平衡状態であった。

今後は、電子遷移過程が $B^2\Sigma_u^+ - X_2\Sigma_g^+$ である $N_2^+(1st\ Neg.)$ Band System の輝線スペクトル観測以外から分光計測を行い、アークプラズマ風洞の気流特性を検定する必要がある。

研究分野：熱流体力学, 航空宇宙工学

キーワード：Arc heated wind tunnel, High Enthalpy Flows, Spectroscopically measurement, Ground testing

1. 研究開始当初の背景

アークプラズマ風洞は、アーク放電により放出された電子がガスをプラズマ化し、高圧・高温のエネルギー気流を作り出す風洞である。人間が排出した廃棄物を処理する際、大量の排出ガス処理や焼却灰処理といった問題が発生する。そこで、アークプラズマ気流を利用し、有害廃棄物を融解・蒸発・昇華させ無害化させることが可能である⁽¹⁾。また、宇宙分野に関しては、大気圏突入時における高温・高圧といった非常に過酷な状況を再現し、地上試験を行う目的で使用される。

2. 研究の目的

本研究では入力電力 49kW、水冷式中空電極型の Hueis 型アーク加熱風洞を用いて、窒素アークプラズマ気流の発光分光計測により、 $N_2^+(1st\ Neg.)$ Band System の振動温度 T_v と回転温度 T_r を求めた。これにより、ノズルスロート部上流と超音速ノズル出口後の励起状態と温度からアーク風洞内流れ場の気流特性の検定を目的とした。

3. 研究の方法

(1) アークヒータ

Fig.1 は、本研究で使用した Hueis 型アークプラズマ発生装置の概略図を示す。

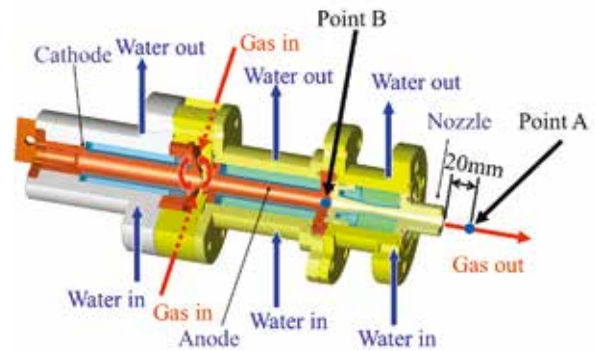


Fig.1 Schematic view of Hueis type arc heater.

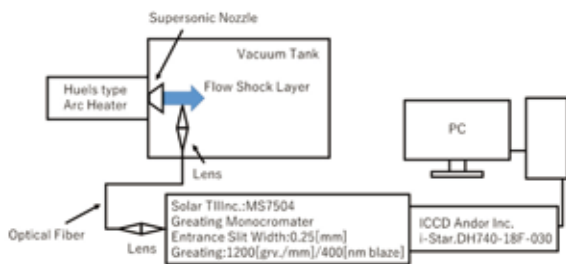
放電電流値は入力 80, 100, 120A, 作動ガスは純窒素を用いた。放電時の作動条件は、流量 0.99g/s, 点 A での測定真空タンク内圧力は約 100Pa. abs, 点 B での圧力は約 13.3Pa. abs, プレナム室圧力は 0.1213MPa. abs とした。Kn 数は 5.9×10^{-6} であることから、アークプラズマ気流は連続体として取り扱うことができる。風洞レイノルズ数は、 5.08×10^5 となる。

(2) 分光計測

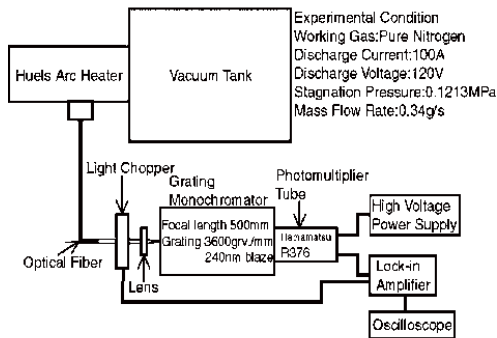
Fig. 2(a)は超音速ノズル出口後 20mm(点 A), Fig. 2(b)はノズルスロート部から上流 36mm(点 B)の発光における分光計測システムの概略図を示す。

点 A では, 真空タンク内の観測窓から, アークフリーズジェットの発光をレンズにより集光し, 分光器(Solar T11 MS7504)と ICCD 検出器(Andor i-Star DH740-18F-63)により計測を行った. 超音速ノズル出口では流体が非定常であると仮定して, 露光時間を点 B に比べ短く設定した. 計測条件は, 分光器回折格子 1200grv./mm, 露光時間 1, 5s, スリット出入射幅 50 μ m, Gain 125 とした.

点 B では, 光電子倍增管と分光器(CT-50CS)による分光計測を行った^(2,4). ノズルスロート上流の流体は亜音速であるため定常流と仮定して分光計測を行った. 計測条件は, 分光器回折格子 3600grv./mm, 分光器の自動送り速度 3.33nm/min, オシロスコープの時間軸 20s/div, サンプルレート 5ks/s, レコード長 1Mword, 測定時間 200s とし, フォトマルの印加電圧 1kV, ライトチョップのチョッピング周波数は 133Hz とした.



(a) Point A

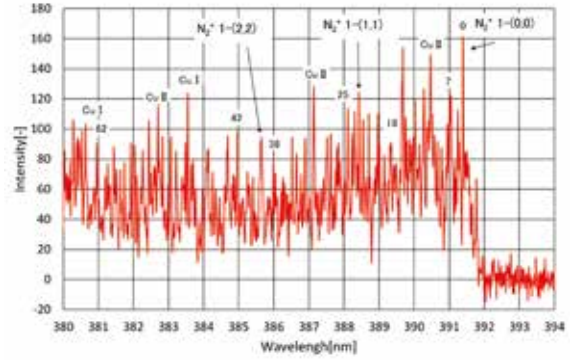


(b) Point B

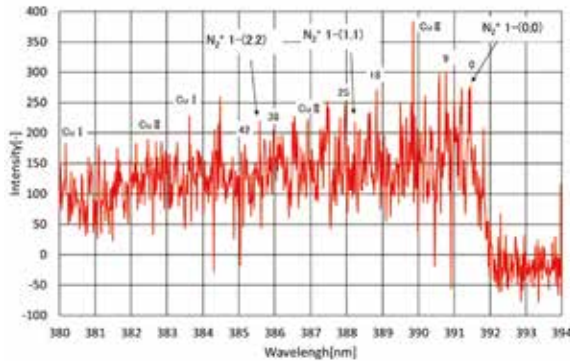
Fig.2 Experimental setup of the spectroscopic measurement system.

4. 研究成果

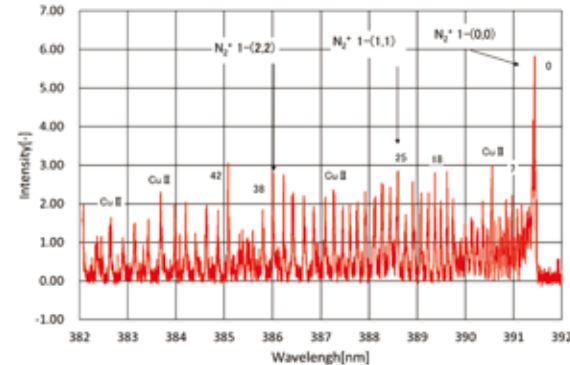
アーク風洞のプラズマ気流を波長域 380~392nm において分光計測を行った結果, 以下のようになる.



(a) Point A Exposure time 1s



(b) Point A Exposure time 5s



(c) Point B

Fig.3 Measured emission spectra showing N₂⁺(1st Neg.).

Fig. 3(a)はアークフリーズジェット流中(点 A)における露光時間 1s, Fig. 3(b)は露光時間 5s の分光計測結果を示す. 発光強度は標準光源タングステン-ハロゲンランプによって分光計測系の強度補正を行っている. N₂⁺(1st Neg.) バンドシステムの電子遷移過程 B²Σ_u⁺-X²Σ_g⁺の励起振動準位(0, 0), (1, 1), (2, 2)の輝線スペクトル観測のため, 計測波長域は 380~392nm である. これらの振動準位は励起されやすいことから, 振動温度が算出に用いた. 振動準位(0, 0), (1, 1), (2, 2)の輝線スペクトル, 振動準位(0, 0) (1, 1)間の回転準位の輝線スペクトルも観測された. 今回, 発光強度の弱い流れ場において, 分光器回折格子 1200grv./mm を用いた高解像度分光に成功した. 電極に用

いた銅が溶け出したことにより、Cu の輝線スペクトルも観測された。

Fig. 3(c)はノズルスロート上流 38mm(点 B)での分光計測結果を示す。点 B では、 $N_2^+(1st\ Neg.)$ における振動と回転の輝線スペクトルは点 A に比べて、明瞭に観測されている。これはノズルスロート部から上流の管内でのアーク放電が安定しており流体が亜音速流れであることと気流の発光強度が高い事から、回折格子 3600grv./mm を用いた高解像度分光が行えた。

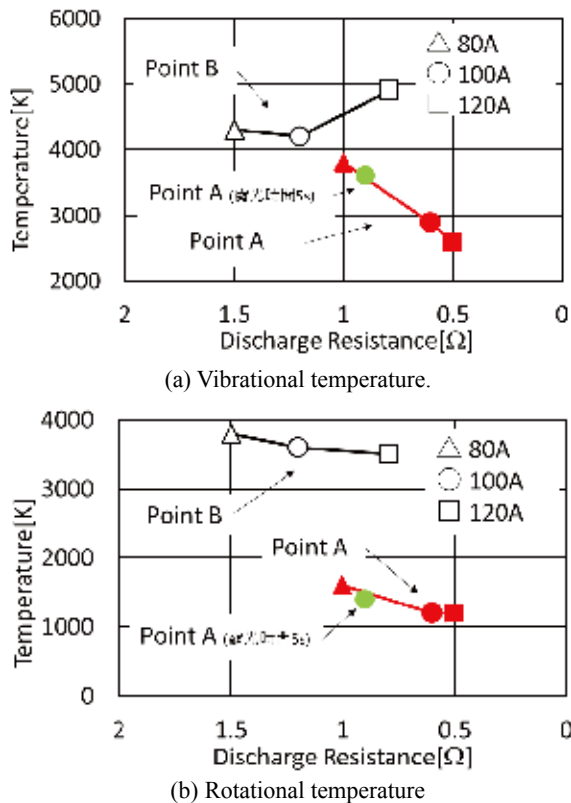


Fig.4 Temperatures versus discharge resistance.

Fig. 4(a)は $N_2^+(1st\ Neg.)$ Band System における振動温度 T_v , Fig. 4(b)は回転温度 T_r での各放電状態 (80, 100, 120A) 下での結果を示す^(2,3)。振動温度 T_v は $N_2^+(1st\ Neg.)$ Band System の (0, 0), (1, 1), (2, 2) の 3 点の波長強度から局所熱平衡を仮定し、各点は Boltzmann プロット法から求めた^(4~10)。回転温度 T_r は輝線スペクトルを計測し Boltzmann 平衡を用いることにより求めた。回転量子数は $2 < J' < 26$ とした。回転温度 T_r $N_2^+(1st\ Neg.)$, $\Delta v=0$ における基底状態 (0, 0) \rightarrow (1, 1) への励起状態から回転温度 T_r を求めた。

Fig. 4(a)の振動温度 T_v について、点 A では、放電電流

80→120A に上昇すると振動温度 T_v と放電抵抗は減少し、点 B においても同様に、放電電流 80→100A では振動温度 T_v と放電抵抗が減少した。点 B から点 A の振動温度 T_v は 4200→2900K に減少している。点 B では、中空電極管内の放電状態から亜音速の流体がアーク気柱からエンタルピーを吸収するため、温度が高くなる。点 A では、流体が超音速ノズル出口から過膨張し、非平衡状態となる事から温度が下がる。よって、点 A の振動温度 T_v が点 B よりも低くなる。

Fig. 4(b)の回転温度 T_r について、放電電流が 80→120A へ上昇すると、両点とも温度は減少した。点 A では振動温度と同様に気体の過膨張により、ノズルを介していない点 B よりも T_r は 3600→1200K に減少している。

両図から、放電電流が上がると風洞の放電抵抗が 1.0→0.5 Ω に下がり、アーク放電し易い条件となり、温度が減少したと考えられる。放電抵抗の上昇が、気流温度を上昇させる。よって、プレナム室の圧力を上昇させる必要がある。

点 A と点 B 共に、振動温度 T_v は回転温度 T_r と比べ高い温度となり、熱的非平衡状態であった。点 A の振動温度 T_v と回転温度 T_r の差は 1200~1700K となり、非平衡状態は点 B よりも大きい。

5. 参考文献

(1) https://www.chuden.co.jp/resource/corporate/news_80_N08_009.pdf, 中部電力ウェブサイト医療廃棄物溶融装置の開発
 (2) 宮川他 3 名, Hue1s 型アークヒータの激み点付近におけるプラズマ気流の分光計測, 日本流体学会年会講演論文集 pp. 366-367, 2004.
 (3) 稲葉他 3 名, 中空電極部のアークプラズマ流の分光温度計測, 愛知工業大学総合技術研究所研究報告 pp.107-109, 2007.
 (4) 北川他 3 名, Characteristics of High efficiency Arc Heated Wind Tunnel, ISTS 2002-e-54p pp.1302-1307
 (5) Damian L. Kokkin, George B. Bacskay, Timothy W. Schmidt. 「Oscillator strengths and radiative lifetimes for C2 :Swan,Ballik-Ramsay,Phillips,and d3 Πg ←c 3 + Σu systems」. 2007.
 (6) George R.Harrison. 「MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY WAVELENGTH TABLES」. pp.70-117, 1969.
 (7) R.W.B.Pearse , A.G.Gaydon . 「The identification of molecular spectra」. pp.75-78, pp168-177. Chapman & Hall LTD, 1950. (8) 近藤利雄. 「プラズマジェットの分光学的温度測定」. pp.12-17. 名古屋大学工学部 航空学科卒業論文, 1969. (9) J.Hilsentrath, M.Klein, H.W.Woolley. 「Tables of Thermodynamic Properties of Air Including Dissociation and Ionization From 1,500 to 15,000K」, pp.10-12, pp.38-64, AEDC-TR59-20, 1059.
 (10) 森岡茂樹. 「気体力学」. pp.134-140. 朝倉書店 1982.