

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

作動ガス Air のアークプラズマ流の N_2^+ First negative band system において、ノズルスロート部上流 36mm(点 A)と超音速ノズル出口後 20mm(点 B)で分光計測を行い、気流特性を検定した。プレナム室圧力一定の場合、放電電流の上昇は、放電抵抗が減少しアーク放電し易い条件となるため、振動温度 T_v は、アークプラズマ気流がノズルスロート部上流 (点 A) から超音速ノズル (点 B) へ流れると、不足膨張により T_v は 3700→3500K に下がった。温度を上げるためには、プレナム室の圧力の上昇と中空電極間距離の増加が必要とされる。

今後の課題として、アークプラズマ風洞の気流特性検定には他原子、分子の各バンド輝線スペクトルによる温度計測の必要性がある。

研究分野：熱流体力学

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⁽¹⁾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⁽²⁾。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 Huels 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^+ First negative system($B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$)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

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

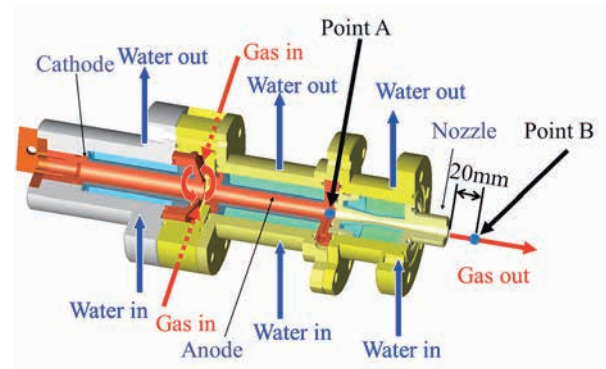
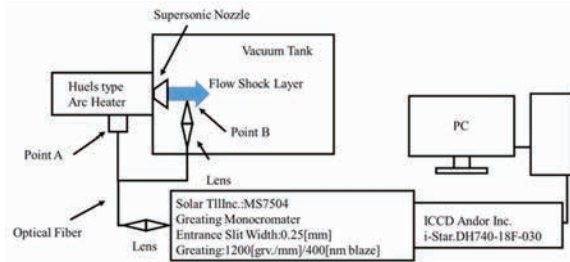


図 1 Schematic view of Huels type arc heater.

放電電流値は入力 80, 100, 120A、作動ガスは Air を用いた。放電時の作動条件は、流量 0.99g/s、点 A での圧力は約 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。風洞レイノルズ数は、 5.08×10^5 、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。

(2) 分光計測

図2はノズルスロート部から上流36mm(点A)と、超音速ノズル出口後20mm(点B)で発光分光計測を行い、その分光システムの概略図を示す。発光したアークフリージェット内をレンズにより集光、分光器(Solar TII MS7504)へ導きICCD検出器(Andor i-Star DH740-18F-63)へ取り込んだ。気流が超音速であることから非定常と仮定して、露光時間を点Bに比べ長く設定した。計測条件は、点A, B共に露光時間1.0s, スリット入出射幅10 μ m, Gain125とした。



(a) Point A

図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 350~394[nm]において分光計測を行った。

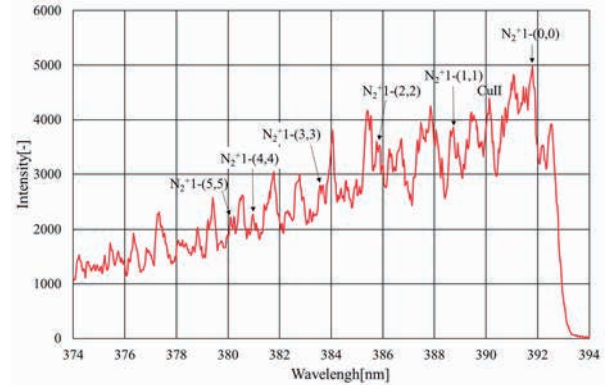
図3(a)は点Aでの分光計測結果を示す。発光強度は標準光源により分光計測の強度補正を行い規格化した。点Aにおいて、 N_2^+ First negative system($B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$)の振動準位(0,0),(1,1),(2,2),(3,3),(4,4),(5,5)の輝線スペクトル^(3,4)が観測され、振動温度が算出できる可能性がある。これは分光器回折格子 600grv./mmを使用したため、 N_2 以外の元素を含むAirにおいて励起状態(1,1)~(5,5)の分光ができたと考えられる。Cuの輝線スペクトルも観測されたことから、電極の銅が溶け出している。各振動準位間の回転準位の輝線スペクトルは観測されなかった。

図3(b)は点Bでの分光計測結果を示す。点Bは点Aに比べ、S/N比が良好に検出された。点Bは非平衡流れのため、発光強度が減衰すると考えられるため、分光器回折格子 1200grv./mmを用いた。このため、各振動準位間の回転準位の輝線スペクトルが観測された。

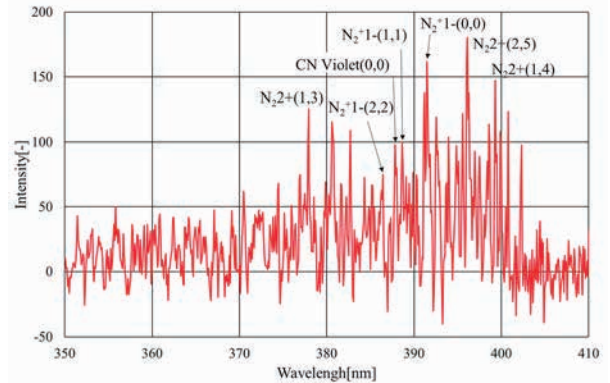
図3(c)はAir比較をするため、作動ガス純窒素の点Aでの分光計測結果を示す。分光器回折格子は、2400grv./mmを用いた。ただし、Gainは1である。

Airと比較すると、輝線スペクトルは純窒素のほうが明瞭

に観測されている。これはAirには N_2 以外の元素が含まれており、分子の回転運動がそれぞれ異なるため輝線スペクトルが影響し合い、明瞭な発光分光を妨げているからと考えられる。



(a) Point A



(b) Point B

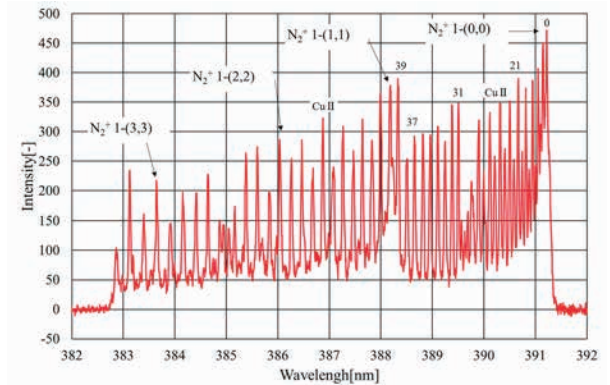
(c) Point A consisting of N_2 gas

図3 Measured emission spectra at N_2^+ First negative band system.

図4は N_2^+ (1st Neg.) Band Systemにおける振動温度 T_v での実験結果を、各温度と放電抵抗についてプロットしたものである^(5,6)。振動温度 T_v は N_2^+ First negative 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⁽⁷⁻¹²⁾。図4

の作動ガス Air の振動温度 T_v について、点 A では、放電電流 80→100A に上昇すると振動温度 T_v は減少し、点 B においても同様に、放電電流 80→120A で振動温度 T_v は減少した。放電電流が上昇すると、放電抵抗が 1.25→0.83A に下がりアーク放電し易い状態となると考えられる。点 A は点 B より振動温度 T_v は約 600K 高くなる。これはノズルスロート上流部の中空電極管内の放電状態では、亜音速の気流がアーク気柱からエンタルピを吸収する。点 B では、流体が超音速ノズルを通過し不足膨張噴流として噴出する際にエネルギーを奪われ、温度が下がる為、点 A の振動温度 T_v が点 B よりも高くなる。点 A において、作動ガス Air は純窒素に比べ振動温度 T_v が約 1000K 低くなった。これは N_2 以外の元素が含まれており、アーク放電する際にエンタルピを吸収されたと考えられる。また点 A の Air では 120A において温度が上昇し、純窒素では 80A において温度が低くなった。これは振動温度の誤差が±300K あり、放電電流 80A の分光結果のみ、低い温度となった可能性がある。

放電抵抗の上昇が、気流温度を上昇させる。よって、プレナム室の圧力の上昇と中空電極間距離を増加させる必要がある。

両図から、点 B について振動温度 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。

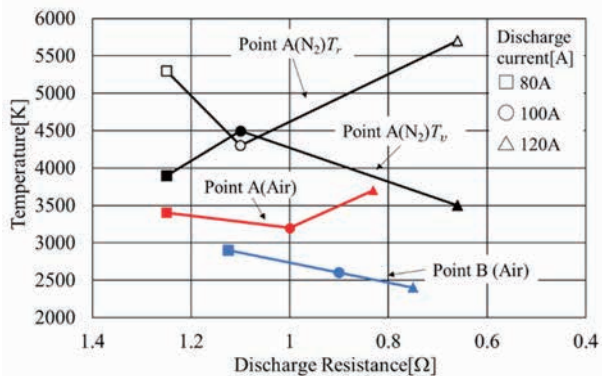


図 4 Temperatures versus discharge resistance.

5. 参考文献

- (1) 松崎貴至, 石田清道, 渡辺泰夫. 750kW アーク加熱風洞の構造と動作特性, 航空宇宙技術研究所資料 (760), pp.1-30, 2001-10
- (2) https://www.chuden.co.jp/resource/corporate/news_80_N08009.pdf, 中部電力ウェブサイト 医療廃棄物溶融装置の開発
- (3) J. J. Camacho, J. M. L. Poyato, L. Diaz and M. Santos, "Optical emission studies of nitrogen plasma generated by IR CO₂ laser pulses", pp.4573-4590, 2007.
- (4) W. R. Jarman, P. A. Fraser, and R. W. Nicholls, "Vibrational

Transition Probabilities of Diatomic Molecules: Collected Results N_2, N_2^+, NO, O_2^+ , pp.228-233, 1953.

(5) 宮川他 3 名, 「Huels 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.

(6) 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.

(7) D. L. Kokkin, G. B. Bacskay, T. W. Schmidt, "Oscillator strengths and radiative lifetimes for C_2 : Swan, Ballik-Ramsay, Phillips, and $d^3\Pi_g \leftarrow c^3\Sigma_u$ systems", 2007.

(8) G. R. Harrison, "Massachusetts Institute of Technology Wavelength Tables", pp.70-117, 1969.

(9) R. W. B. Pears, A. G. Gaydon, "The identification of molecular spectra", pp.75-78, pp.168-177, Chapman & Hall LTD, 1950.

(10) 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.

(11) J. Hilsentraph, M. Klein and 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, 1959.

(12) 森岡茂樹, 「気体力学」. pp.134-140. 朝倉書店 1982.