

Huels 型アークヒータの改良と作動特性

Improvement and characteristic of Huels Arc Heated Wind Tunnel.

北川 一敬, 保原 充

Kazutaka KITAGAWA, Michiru YASUHARA

Abstract: Investigation of characteristic performance of a high enthalpy flow is important for designing the reentry problem of hypersonic flight vehicle and disposal of waste. A high enthalpy wind tunnel, with Huels type DC-arc heater, is improved to 54kVA(49kW) input power source and its characteristics are investigated. In the case of arc heated flow, the mass flow rate m , the stagnation pressure p_0 , the discharge current I and the voltage V are measured by experimentally by comparing these results of 27kVA(24.5kW) input power in this arc heater. The stagnation temperature T_0 was not measured, however a method of estimating it from m and p_0 with the aid of the high temperature air tables, is proposed by assuming isentropic flow. In the present experiments, the average value of stagnation temperature are evaluated about 2000K ~ 2500K. K.Kindler's graph, for the electric resistance V/I versus the similarity parameter I^2/m are plotted from the present data for air, in addition another data of Huels, Hybrid and segmented type arc heaters are compared to the present data.

1. はじめに

高温プラズマ風洞は、航空宇宙分野において大気圏再突入時における高温、高圧という過酷な条件に耐えうる耐熱材料の開発・試験や産業廃棄物の無害化処理の利用目的ため、より高いエンタルピを発生させる性能が求められている^{(1)~(9)}。

本研究では本大学の 24.5kW の水冷式 Huels 型アークヒータの入力電力を 2 倍の 49.0kW に変更し、各種作動ガス(空気及び窒素)を用いて、澱み点の圧力変化に伴う放電電流、電圧、流量などのアークヒータの高出力化の基礎特性について調べた。最後にその結果について本大学の Hybrid 型アークヒータや他の研究機関の実験データ^{(1)~(9)}と比較検討を行った。

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。

2.1 ヒュルス型アークヒータ部

本大学の Huels 型アークヒータを図 1-a~c 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。

2.2 超音速ノズル

ノズルはコン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。

2.3 電源装置系

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。

2.4 作動ガス供給系

作動ガスは高圧ボンベよりレギュレタで流量を調節しながら 2 方向ガスライナを通して空気流量 50l/min まで供給できる。今回の実験では作動ガスに空気と窒素を使用した。

2.5 排気装置系

アークヒータ下流部に真空タンクを取り付け、そのタンクに並列に 2 基の油圧回転式ポンプを接続しタンク内を真空にし、ノズルより排出されるガスは配管内を通り屋外に放出される。

2.6 分光計測部

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、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CT-25ND(回折格子3600 grooves/mm, ダブルモノクロメータ), 焦点距離250 mmである。各分子・イオンスペクトルは浜松ホトニクス株式会社製光電子増倍管R7057(フォトマル)により光電測光で行った。

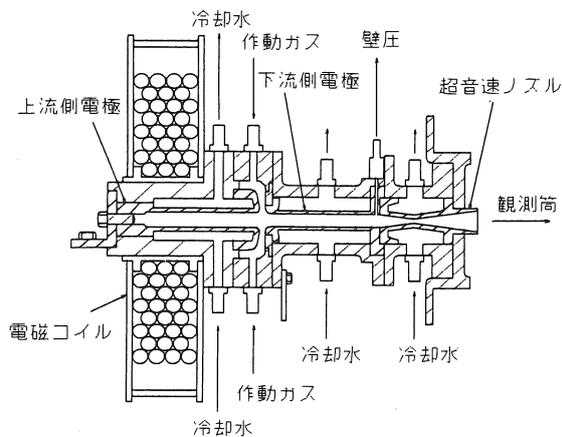


図 1-a Huels 型アークヒータ(断面図)

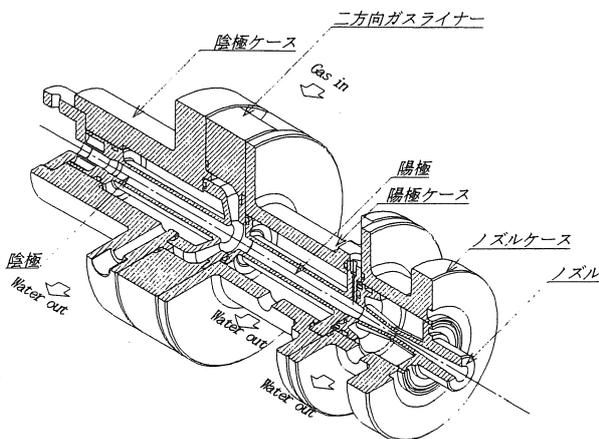


図 1-b Huels 型アークヒータ(立体図)

3. 作動特性実験方法

実験は低圧部タンク内圧力を約 13.3Pa(0.1torr), 激み点圧力を 0.05~0.25MPa の間で調整する。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、実験条件に合わせて電流を 80~240A の間で変化させ、作動ガス供給流量をレギュレタにより変化させて一定の放電電流下で任意に激み点圧力から、放電電圧、流入流量、

真空タンク内圧力を測定した。

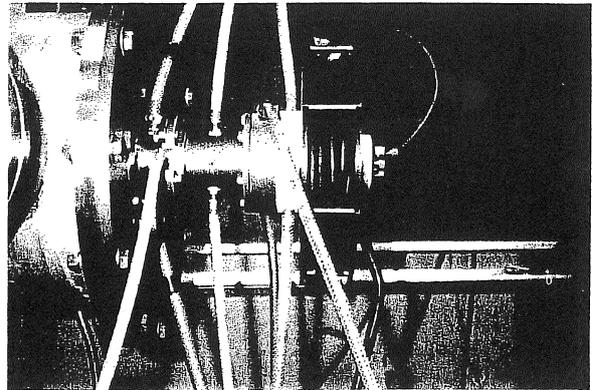


図 1-c Huels 型アークヒータ(写真)

4. 作動特性実験結果及び考察

作動特性実験の作動ガス空気による測定結果は NBS(米国連邦基準局)の Hilsenrath etc.の平衡高温空気表⁽⁴⁾を元に無放電時の温度及び放電時と無放電時の作動ガスの質量流量比を使用した。作動ガス窒素による測定結果は、放電時と無放電時の作動ガス質量流量の比を利用して激み点における温度推算を行った。

図 2 は Huels 型アークヒータの作動特性実験の実験結果である、作動ガス空気による激み点圧力と平均激み点推算温度との関係を示す。入力電力 24.5kW(1 台接続)と 49.0kW(2 台並列接続)における違いを調べるために一定放電電流 100A~120A 下での作動特性について実験を行った。図 2 より入力電力の違いによる作動特性の変化はほぼ見られない。図 3 は、作動ガス窒素による激み点圧力と平均激み点推算温度との関係を示す。図 3 より図 2 の時と同様に入力電力の違いによる作動特性の変化は殆ど無いと考えられる。並列 2 台接続による電源の損失やリップルの影響は殆どないことが解った。

図 4 は放電電流 80A~240A の作動ガス空気の作動特性実験を行い、その激み点圧力と推算温度との関係を示す。電源入力電力を 2 倍に増加させたために、最大放電電流値が 120A から 240A に増加したため、この範囲において実験を行うことができた。図 4 より激み点推算温度は全体的に 0.15MPa 付近まで増加し、最大値を取り、その後約 200K 程度減少する。最大激み点推算温度は放電電流 120A の時に、約 2400K を示している。さらに、放電電流値が 120A を超えると激み点推算温度が下がり始める。これは、質量流量の増加によりアーク放電から得られるエンタルピが減少す

るためであると考えられる。

図5はK.Kindler^[6]による電気的特性による相似性の結果を示す。相似関係はアークヒーターの測定結果の放電電圧 V 、放電電流 I 、作動ガスの質量流量 m とした時、放電抵抗 V/I を I^2/m に対して対数プロットするとその装置の規模によらずほぼ一定の線上に乗ることが知られている。結果には既知の各研究機関のアークヒーターのデータとともに示す。図5より Huels 型アークヒーター 電力 49.0kW における値は 24.5kW の時のほぼ延長線を示し、その抵抗値は減少していき、さらに他のアークヒーターと相似性があると推測することができる。Hybrid 型アークヒーターの激み点推算温度は約 3000K を得られ、放電抵抗値は高い値を示している。K.Kindler のグラフの関係を $V/I=C(I^2/m)^{-\alpha}$ と仮定すると、Huels 型アークヒーターでは $\alpha=0.69\sim 0.74$ 、Hybrid 型アークヒーターでは $\alpha=0.54\sim 0.61$ 、Segmented-Constrictor 型アークヒーターでは $\alpha=0.42\sim 0.59$ となった。

5. 分光計測及び方法

5.1 分光計測

分光実験は超音速ノズル上流の激み点付近の振動温度を測定し、各種作動ガスによる激み点温度推算方法について検証する目的で行った。分光計測は、激み点にてプラズマ流の発光を光ファイバー集光レンズにより分光器に導き分光を行う。特に、 N_2^+ の 1st Negative Band System に注目して、 N_2^+ の振動温度 T_v を求めた。測定条件は、分光器の送り速度 0.834nm/min、時間軸 10s/div、記録長 200kword、測定時間 100s、フォトマル印加電圧 1000V である。

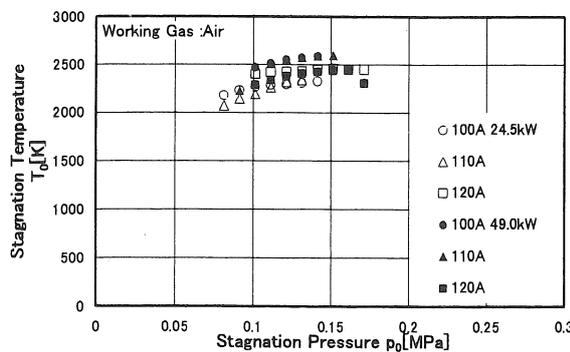


図2 作動ガス空気による激み点圧力と平均激み点推算温度との関係

5.2 振動温度 T_v

本研究において、振動温度 T_v は局所熱平衡を仮定し、各エネルギー準位への分布が Boltzmann 分布に従うとして、Boltzmann プロット法から求め

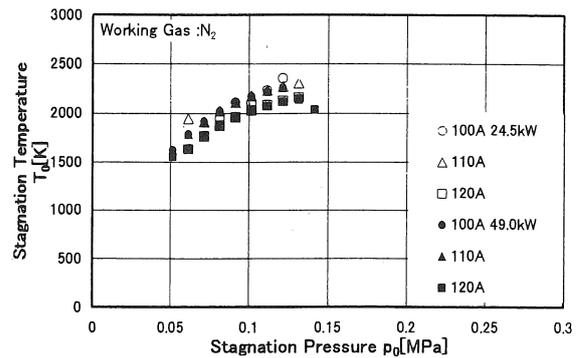


図3 作動ガス窒素による激み点圧力と平均激み点推算温度

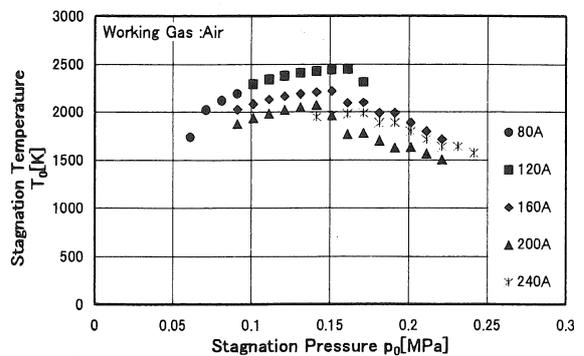


図4 放電電流 80A~240A の作動ガス空気による激み点圧力と平均激み点推算温度との関係

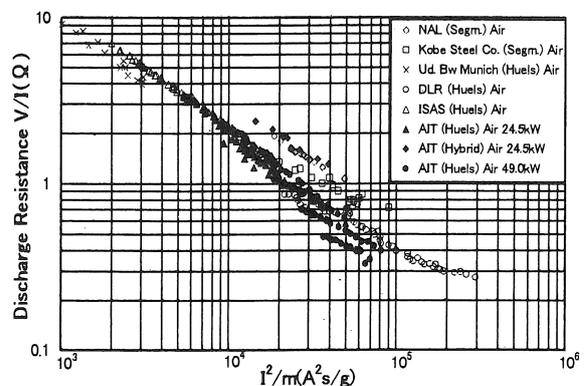


図5 加熱装置のアーク抵抗と I^2/m の関係 (m :加熱ガス質量流量)

る。特に N_2^+ の 1st Negative Band System に注目して、 N_2^+ の振動温度 T_v を求めた。1st Negative Band System 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のを考慮すれば、スペクトル強

度 $S_{\nu',\nu''}$ は,

$$S_{\nu',\nu''} = KN_{\nu'}h\nu_{\nu',\nu''}A_{\nu',\nu''} \quad (1)$$

この時, 分配関数 $Q_A(T)$ と, 粒子密度 N_A は, 振動量子数に無関係で, 比例定数 K に含めた.

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

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

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

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,

$$N(\nu') \propto \exp\left(-\frac{G(\nu')hc}{kT_{\nu'}}\right) \quad (4)$$

$G(\nu')$ 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,

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

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

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

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

$$\log_{10} \frac{S_{\nu',\nu''}\lambda_{\nu',\nu''}^4}{P(\nu',\nu'')} = -\frac{1272}{T} \omega_e\left(\nu'+\frac{1}{2}\right) + const \quad (7)$$

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 $G(\nu)$ は,

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

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. $G(\nu)$ は, 相対遷移確率 $P(\nu',\nu'')$ と共に, 表 1 に示す. この $G(\nu)$ を用いる場合は, 式(4), (8)の $G(\nu)$ を式(3)に代入して, hck , $\log_{10}(e)$ の値を代入して対数をとれば良い. よって,

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

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(7)又は, 式(8)に相対強度法を適用し, これをグラフの縦軸に, また $G(\nu)$ をグラフの横軸にとりプロットし, プロットを直線近似して得られる傾きが $-1/T_{\nu'}$ となり, 振動温度 $T_{\nu'}$ が求まる.

6. 分光測定結果及び考察

実験では, N_2 アークプラズマ流における N_2^+ の 1st Negative Band System の (0-0)Band(波長 391.44nm) と (1-1)Band(波長 388.43nm) と (2-2)Band(波長 385.79nm) の測定を行った. 測定条件は, 分光器の送り速度 0.834nm/min, 時間軸 10s/div, 記録長 200kword, 測定時間 100s, フォトマル印加電圧 1000V である. 実験条件は, プラズマ放電状態で電流 100A, 電圧 130V, 澱み点圧力 0.00MPa, 流入流量 33l/min の状態でタンク内圧力は 1.5torr であった.

図 6 は N_2^+ の (0-0)Band(波長 391.44nm) の分光測定結果, 図 7 は N_2^+ の (1-1)Band(波長 388.43nm) の分光測定結果, 図 8 は N_2^+ の (2-2)Band(波長 385.79nm) の分光測定結果を示す. 分光測定結果から, (0-0)Band と (1-1)Band と (2-2)Band の相対スペクトル強度 S を取ると比は 1:0.611:0.481 となった. この比から式(A-9)を用いてスペクトル強度 $S_{\nu',\nu''}$, 波長 $\lambda_{\nu',\nu''}$, 相対遷移確率 $P(\nu',\nu'')$ からエネルギー比 $G(\nu)$ からグラフの傾きを求めた. ここで光電子増倍管相対感度 PS は定数である. 図 7 はエネルギー比 $G(\nu)$ と式の左辺の直線の傾きを示す. 図 7 より, (0-0)Band と (1-1)Band と (2-2)Band の 3 点による振動温度は $T_{\nu'}=4157\text{K}$ となった. (0-0)Band と (1-1)Band の 2 点では $T_{\nu'}=3002\text{K}$, (1-1)Band と (2-2)Band の 2 点では $T_{\nu'}=8638\text{K}$ となった. 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非平衡性の可能性が示された.

√作りかえた図

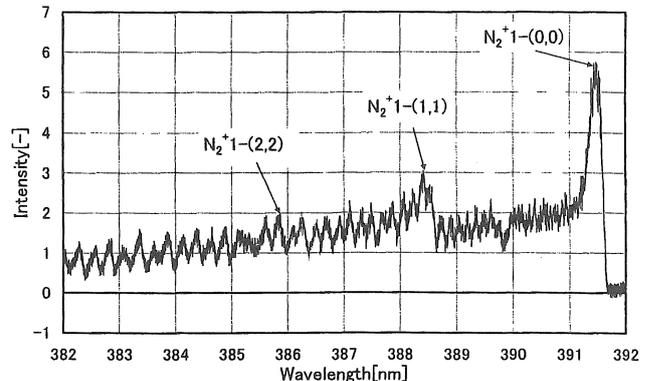


図 6 N_2^+ の分光測定結果

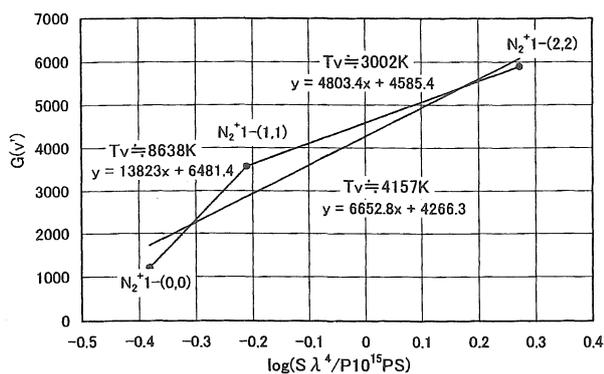


図7 エネルギー比 $G(v)$ と式の左辺の直線の傾き

7. まとめ

本研究では、Huels 型アークヒーターの入力電力を従来の2倍 49.0kW に変更したことにより、入力電力 24.5kW(1台接続)と 49.0kW(2台並列接続)における違いを調べるため、各種作動ガス(空気、窒素)における作動特性実験と入力電力の増加に伴い増加した最大放電電流値 240A までの作動特性実験を行い、以下の結果が得られた。

激み点推算温度は放電電流 120A、約 2400K になる。さらに、放電電流値が 120A を超えると激み点推算温度は減少し、質量流量の増加によりアーク放電から得られるエンタルピーが減少するためである。

K.Kindler によるアークヒーター間の相似関係は、入力電力が2倍の増加に対しても、従来のアークヒーターと相似性があることが解かった。相似性グラフにおいて Hybrid 型アークヒーターの抵抗値は Segmented-Constrictor 型アークヒーターをほぼ同じの高い値を示し、その激み点推算温度は約 3000K を示す。K.Kindler のグラフの関係を $V/I=C(I^2/m)^{-\alpha}$ と仮定すると、Huels 型アークヒーターでは $\alpha=0.69\sim 0.74$ 、Hybrid 型アークヒーターでは $\alpha=0.54\sim 0.61$ 、Segmented-Constrictor 型アークヒーターでは $\alpha=0.42\sim 0.59$ となった。

分光測定により、 N_2^+ アークプラズマ流における N_2^+ 1st Negative Band System の(0-0)Band(波長 391.44nm)と(1-1)Band(波長 388.43nm)と(2-2)Band(波長 385.79nm)のスペクトルから、局所平衡を仮定して振動温度を求め、3点による振動温度は $T_v=4157K$ 、(0-0)Bandと(1-1)Bandの2点から $T_v=3002K$ 、(1-1)Bandと(2-2)Bandの2点から $T_v=8638K$ となった。アークプラズマ流が激み点付近において非平衡性の可能性が示された。実験より求めた作動ガス窒素の激み点推算温度は約 2200K となった。

今後の風洞設計、性能向上に大きく資すると考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺泰夫, 松崎貴至, 板垣春昭, 長谷川清一: 750kW アーク加熱風洞の基本特性, 第26回流体力学講演会講演集, 日本航空宇宙学会ほか, 1994, pp.113-116
- 2) 稲谷芳文, 長谷川清一, 小松智祝: 世界のアーク加熱器を用いた設備の現状と今後, 第26回流体力学講演会講演集, 1994, pp.101-104
- 3) M. Hinada, Y. Inatani, T. Yamada, K. Hiraki: An Arc-Heated High Enthalpy Test Facility for Thermal Protection Studies, The Institute of Space and Astronautical Science, 1996, Report No.664, p.6.
- 4) J. Hilsenrath, M. KLEIN, H. W. Woolley: Tables of Thermodynamic Properties of Air Including Dissociation and Ionization, National Bureau of Standards, pp.38-64
- 5) 田頭成能, 織田 剛, 満田正彦, 鷲田孝史, 進俊彦, 吾郷健二, Stahl, T.J.: 風洞用アークヒーターの諸特性, 第26回流体力学講演会講演集, 日本航空宇宙学会ほか, 1994, pp.109-112
- 6) 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, 1997, Vol.III, pp.1479-1483
- 7) D. D. Baals, W. R. Corliss: Wind Tunnels of NASA, NASA Washington, D.C., 1981, pp.95-96.
- 8) 保原 充, 水谷 充: アーク加熱風洞の方法について, 日本航空宇宙学会誌, 1995, Vol.43, No.499, pp.441-445
- 9) L. Spitzer: Physics of Fully Ionized Gases, Interscience Publishers, N.Y., 1956.
- 10) G. Herzberg: Molecular Spectra and Molecular Structure, I. Spectra of Diatomic Molecules, 2nd Ed, D.Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1950.
- 11) G. Herzberg: Molecular Spectra and Molecular Structure, IV. Constants of Diatomic Molecules, D.Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1979.

(受理 平成14年4月10日)