

## アーク加熱風洞におけるプラズマ流の加熱・膨張過程に関する数値解析

高橋裕介<sup>1</sup>, 木原尚<sup>2</sup>, 安倍賢一<sup>2</sup><sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 九州大学Numerical simulation of heat and expansion process of plasma flows  
in arc-heated wind tunnels

by

Yusuke Takahashi, Hisashi Kihara and Ken-ichi Abe

## Abstract

Turbulent plasma flows in the Kyushu University 20 kW and the JAXA 750 kW arc-heated wind tunnels are numerically investigated for various operation conditions. These simulations are tightly coupled with calculations of the electric field and the radiation field. The flow fields in the arc-heating facilities are assumed to be in thermochemical nonequilibrium. To express thermal nonequilibrium accurately, a four-temperature model is applied in the present analysis model. The effects of radiation and turbulent transport are investigated using some recently developed models such as the three-band radiation model and the AKN low-Reynolds number  $k$ - $\epsilon$  model. The fundamental characteristics of the high-enthalpy flows (e.g., arc column and supersonic expansion) are reproduced and detailed distributions of the flow-field properties are obtained. It is quantitatively clarified that radiation and turbulence phenomena are very important in transferring heat and momentum from the high-temperature flow near the core to the cold gas region near the facility wall. By introducing a cathode sheath model, potential drop and electric currents in sheath layer are detailedly evaluated.

## 1. 緒言

アーク加熱風洞は再突入時におけるアブレータ等の熱防護システム試験やその開発に対して、これまで大きな役割を果たしてきた。アーク加熱風洞を用いた諸試験を行なうにあたって、対象としているノズル気流諸量分布を正確に理解することが、質の高い試験データを取得する上で重要な課題である。加えて、新しいアーク加熱風洞の設計を行なう際においても、風洞内部の気流の挙動を定量的に評価する必要がある。しかし、これまでその諸量分布を同定することが難しいという問題があった。なぜならば、アーク加熱風洞はコンストリクタ加熱部におけるアーク放電や、ノズル膨張部における超音速膨張等の複雑な現象を内包することから、風洞気流の計測手法が厳しく制限されるためである。その問題を解決すべく、これまで広くアーク加熱気流解析が行われてきた。しかし、個々のアークヒータの特性に合わせた解析モデルが導入されつつあるものの、統一的なモデルの提案は十分とは言えない状況であった。数値解析結果の信頼性を確保する上でも、個々の対象に対する特別なチューニングを極力排し、統一的なモデルを提案することは意義があるものと考えられる。したがって本研究の目的を、様々なアーク加熱風洞の気流に対して、数値解析を用いて詳細で信頼できる風洞気流諸量分布を明らかにすることと設定した。

本研究においては、九州大学 20kW (KUWT) 及び

JAXA 750kW アーク加熱風洞 (JXWT) を解析対象とし、流れ場の物理モデル及び解析モデルの導入・構築を行う。これらアーク加熱風洞はサイズや投入電力が大きく異なるため、内部流れ場の特性も大きく異なる。比較的小型の20kW KUWTでは、コンストリクタ加熱部における高温気体による輻射熱輸送が卓越することに加え、ノズル膨張部における化学反応や内部エネルギーモード（熱化学的非平衡性）の挙動が風洞気流の形成に対して大きな影響を与えると考えられる。また大型の750kW JXWTでは、加熱部における輻射熱輸送に加えて、乱流による熱輸送が風洞気流の挙動に大きな影響を与えると推察される。したがって、信頼できる風洞気流諸量分布を得る上で、ノズル膨張部における熱化学的非平衡性のモデル化を正確に行う必要があることに加え、コンストリクタ加熱部において精緻な輻射モデル及び乱流モデルの導入が必要である。

さらに、プラズマ粒子の非平衡的な挙動（両極性拡散）により電極壁面近傍にシーズと呼ばれる薄い層が形成される。このシーズは電圧降下を引き起こす。電圧降下に伴うシーズ内電流の発生とともに、エネルギー流束が電極壁面に入力される。結果として、その電圧降下分が流体に直接エネルギーが入らないエネルギーロスとなり得る。したがって風洞の正確なパフォーマンスを評価する上でも、シーズによる電圧降下を正しく見積もることは重要であると考えられる。

## 2. 物理モデル

図 1 にコンストラクタ型・セグメント型アークヒータの概略図を示す。アークヒータの主な構成は、流入部、陰極、コンストラクタ、陽極、ノズルである。流入部から流れ込む試験気体は、電極間に形成されるアーク放電により加熱を受ける。流れはノズルにおいて超音速膨張し、測定室に高エンタルピ気流を形成する。

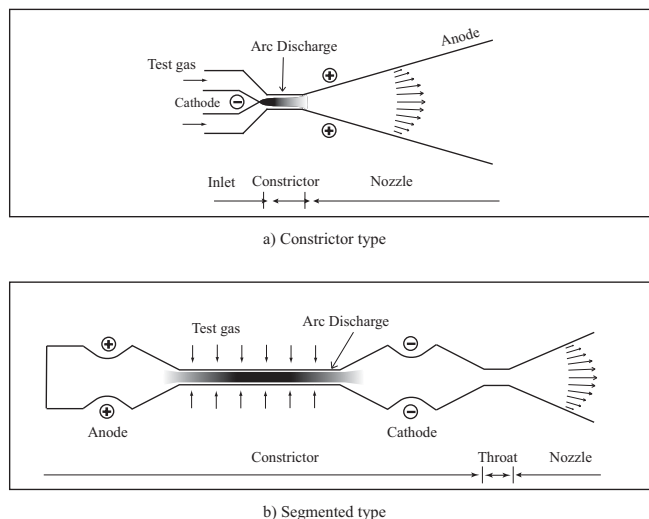


図 1: アークヒータの概略図

### 2-1. 流れ場・電場

流れ場のモデル化にあたって以下の仮定を導入する：I) 流れは定常、連続および軸対称流とする；II) 化学的非平衡流とする；III) 熱的非平衡流とし、温度を並進 ( $T_{tr}$ )、回転 ( $T_{rot}$ )、振動 ( $T_{vib}$ )、電子 (=電子励起) ( $T_e$ ) 温度の 4 温度に分離する；IV) 試験気体は窒素及び空気とする；V) 磁場の影響は無視する；VI) 輻射を考慮し、流れ場を乱流とする。

流れ場は熱化学的非平衡流に拡張した Navier-Stokes (NS) 方程式と状態方程式により記述される。NS 方程式の構成は全質量、運動量、全エネルギー、化学種質量、回転エネルギー、振動エネルギーおよび電子エネルギー保存則である。一方、電場方程式は、磁場の影響が十分小さいとし時間微分項を無視したときの Maxwell 方程式と、一般化された Ohm の法則より導かれる。ジュール加熱率は電場ベクトルと電流密度ベクトルの内積で表現され、全エネルギー及び電子エネルギー保存則に生成項として加えることで流れ場方程式との結合が行われる。

乱流の振る舞いを NS 方程式中に渦粘性モデルを導入して表す。ここでは低レイノルズ数型乱流モデルの一つである AKN モデル<sup>(1)</sup>を用いる。また、輻射輸送方程式は円筒座標系において離散化し、輻射強度および輻射熱流束を計算する。輻射輸送方程式中に現れる吸収係数および黒体放射関数は、Sakai<sup>(2)</sup>らによって開発された 3-band モデルを用いて評価する。

### 2-2. 非平衡モデル

気体の化学組成は、試験気体に窒素を用いるときは、5 化学種 ( $N_2, N_2^+, N, N^+, e^-$ )、8 化学反応を考慮する。また試験気体に空気を用いる際は、11 化学種 ( $N_2, O_2, NO, N_2^+, O_2^+, NO^+, N, O, N^+, O^+, e^-$ )、49 化学反応を考慮する。反応速度定数として、Park<sup>(3)</sup>のモデルを採用した。

内部エネルギー交換として、ここで考慮するすべてのエネルギーモード間に対してエネルギー交換モデルを導入する。さらに、重粒子衝突反応に伴う回転・振動エネルギー損失を非選択的解離モデルにより評価する。また電子衝突解離反応および電離反応による電子エネルギー損失を考慮する。なお、ここで用いたエネルギー交換モデルの参考文献は、Takahashi らの文献<sup>(4)</sup>でまとめられたものと同じである。

粘性係数、熱伝導係数および拡散係数は、一次 Chapman-Enskog 展開に基づき多成分・多温度に拡張した Yos の近似モデルから求める。化学種間の衝突断面積は文献<sup>(5,6)</sup>より得た。なおイオン種、電子に関しては両極性拡散を考慮している。

### 2-3. 陰極シース

本研究では陰極表面からの電子放出として、プラズマ領域からの電子流束、イオン流束、壁面から放出される熱電子、イオン種の壁面衝突により発生する二次電子、壁面に強い電場をかけたときにトンネル効果によって生じる電場電子放出を考慮した。これらの電流密度の総和が放電場の電流密度と等しいとした上で流束保存則を構成した。さらに、シース層におけるエネルギー流束バランスから電子温度を求めた。ここでは、陰極表面に到達した電子及びイオンはすべて吸収されるものと仮定している。また陰極材料の溶融、内部への熱伝導は無視をした。考慮したエネルギー流束は、電子、イオンによって輸送されるエネルギー、熱電子、二次電子、電場電子放出によって陰極表面を冷却するエネルギーとした。さらに表面からの輻射及び、プラズマ領域からの対流熱輸送とした。

## 3. 結果と考察

20kW KUWT (試験気体：窒素) において入力電流 120 A、質量流量 0.833 g/sec とし、750kW JXWT (試験気体：空気) に対しては入力電流 500 A、質量流量 12.0 g/sec の条件をベースラインケースとして設定した。

### 3-1. 実験結果との比較

20kW KUWT における風洞気流のピトー圧  $p_0$  および熱流束  $q_0$  の計算結果と実験結果<sup>(7)</sup>の比較を図 2, 3 にそれぞれ表す。また、大型アーク加熱風洞 750kW JXWT のノズル出口における質量平均エンタルピの計算結果と

実験結果<sup>(8)</sup>を図4に示す。ここで質量平均エンタルピは次で定義される： $h_{av} = \int_0^R \rho u h r dr / \int_0^R \rho u r dr$ 。

それぞれの風洞において、幅広い作動条件に対して解析値と実験値がおおむね良い一致を示す傾向にあることが示されている。したがって、本解析モデルでは風洞気流を適切に予測しているものと考えられる。

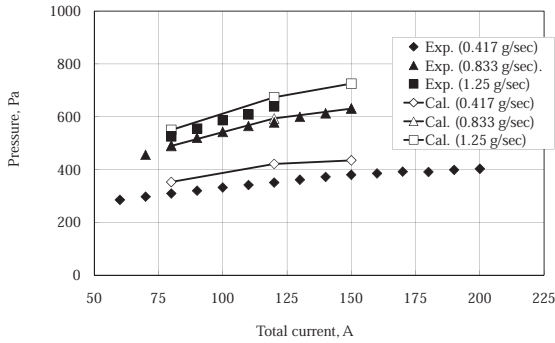


図 2: Comparison with Pitot pressure of the experimental data for 20 kW KUWT

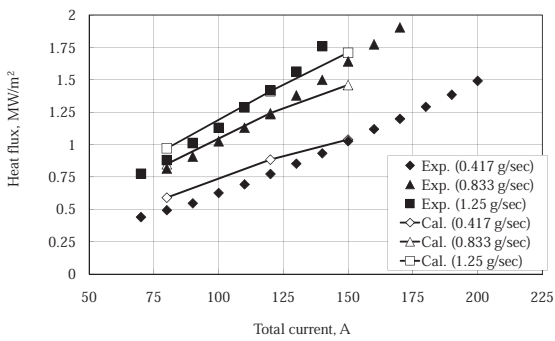


図 3: Comparison with heat flux of the experimental data for 20 kW KUWT

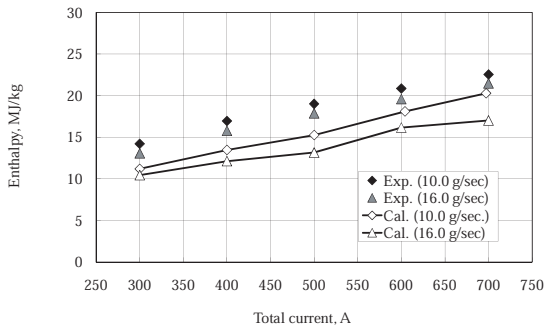


図 4: Comparison with mass-averaged enthalpy of the experimental data for 750 kW JXWT

### 3-2. 流れ場

図5, 6にそれぞれ20kW KUWTおよび750kW JXWTにおける並進温度分布を示す。いずれもコンストリクタ部において軸近傍の高温（アークコラム）領域と、その

周囲を取り巻く壁近傍のコールドガス領域が現れている。また、ノズル部では気流は膨張とともに並進温度が低下することが示されている。ただし、20kW KUWTのコンストリクタ出口付近において、一旦並進温度が増加する領域（ $x = 30 \sim 40$  mm）が現れる。これはコンストリクタ部で電離したイオン種がこの領域において速やかに再結合反応を生じ、それに伴って化学エネルギーが熱エネルギーに解放されるためである。

750kW JXWTでは、コンストリクタ出口（ $x = -200$  mm）付近において並進温度分布の半径方向の勾配は大きい、スロート部入口（ $x = 0$  mm）においては半径方向分布が平滑化されていることが示されている。これは主にカソードチャンバにおいて発達した乱流の影響によるものであり、この領域においてアークコラムとコールドガスの混合が強く促進されることが、大型風洞の特徴的な点であると思われる。

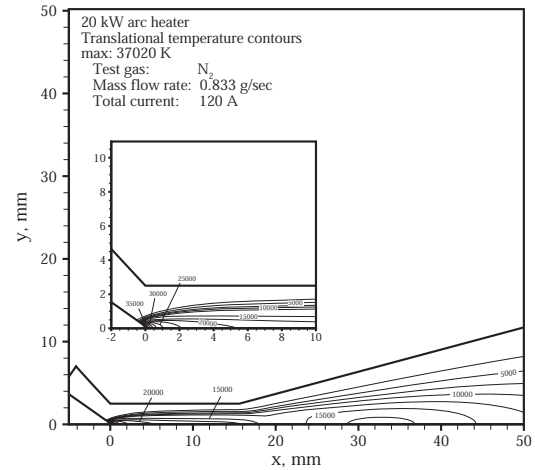


図 5: Translational temperature contours in 20 kW KUWT for the baseline case

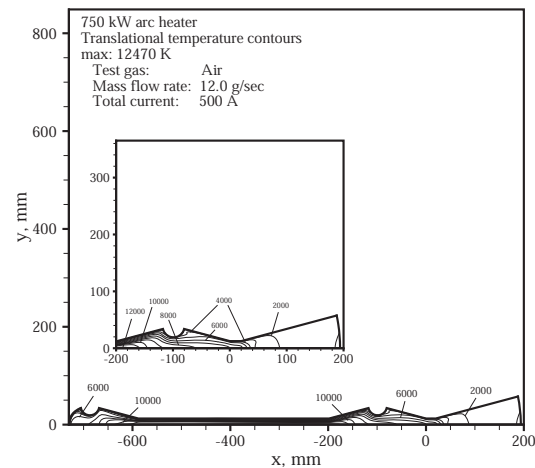


図 6: Translational temperature contours in 750 kW JXWT for the baseline case



図7, 8にそれぞれ20kW KUWTおよび750kW JXWTの中心軸上における化学種モル分率分布を示す. 20 kW KUWTのコンストリクタ加熱部において激しい解離・電離反応が生じており、化学種組成の大部分が $N^+$ ,  $e^-$ で占められている. しかし、ノズル部において緩やかな再結合反応が進み、ノズル出口における主な化学組成は $N_2$ や $N$ などの分子、解離原子となっている.

それに対して、750kW JXWTにおける加熱部では、20kW KUWTほど激しい電離反応は生じておらず、原子種とイオン種および電子が混合したアークコラムになっている. カソード近傍( $x \approx -100$  mm)より下流において、アーク放電による加熱がほぼ終了するとともに再結合反応が速やかに進む. 一方、ノズル膨張部では再結合反応がほとんど見られない. すなわち、20kW KUWTの気流に比べて、750kW JXWTにおけるノズル流は化学的凍結流の傾向となっていることが示される.

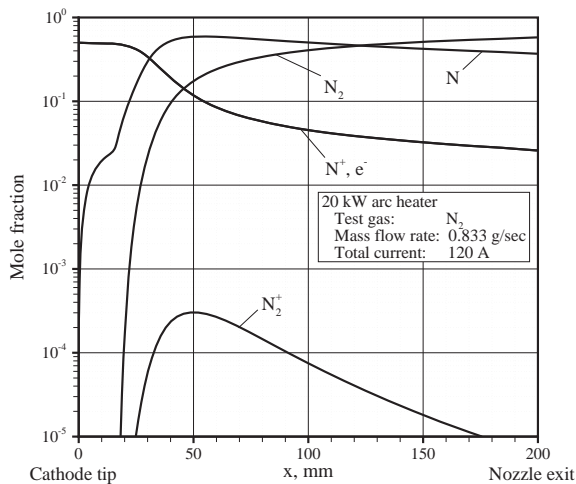


図7: Axial profile of mole fraction along the center axis in 20 kW KUWT

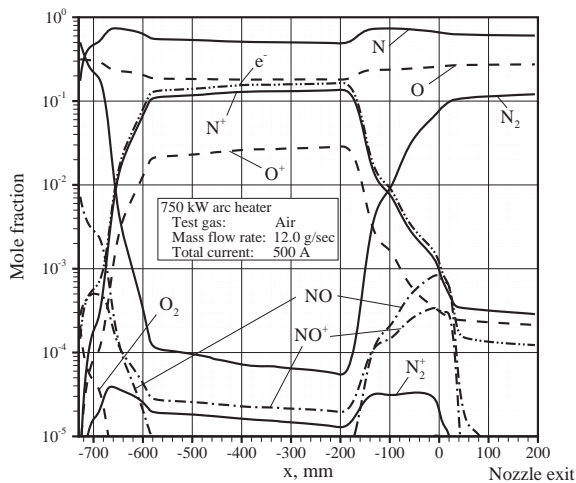


図8: Axial profile of mole fraction along the center axis in 750 kW JXWT

20kW KUWT および 750kW JXWT のノズル出口における半径方向温度分布およびエンタルピー分布を図9, 10に示す. 20kW KUWTでは、各温度がノズル出口においてそれぞれ明確に分離しており、強い熱的非平衡性が現れている. 化学的凍結流を仮定したAbeら<sup>(9)</sup>による同風洞ノズル部の解析結果と比べると、本解析ではノズル出口における並進および回転温度が大きく評価される傾向にある. 前述の通り、ノズル部において再結合反応が進むことで化学エネルギーから熱エネルギーへの変換が生じる. したがって、膨張過程においても再結合反応が進むような20kW KUWTのケースでは、ノズル部でも流れが比較的高い温度を維持することが可能であると考えられる. 一方、750kW JXWTのノズル流では再結合反応があまり生じないために、膨張に伴う温度低下は凍結流膨張のものと同様になっている. これらのことから、アーク加熱気流の形成に対して、ノズル部における化学反応の果たす役割は大きく、無視できないことが示される.

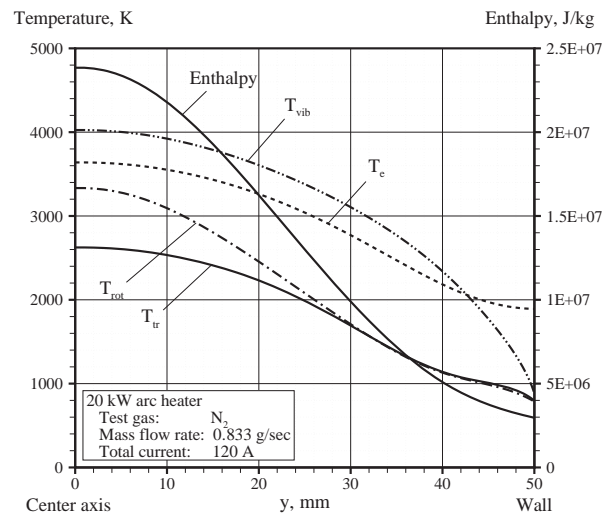


図9: Radial profile of temperatures and enthalpy at the nozzle exit in 20 kW KUWT

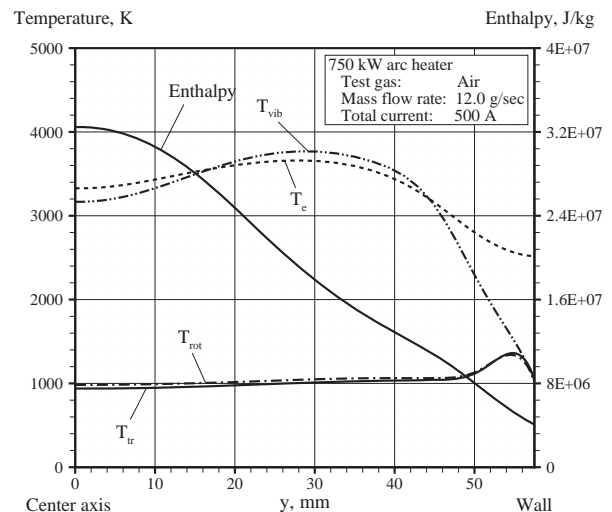


図10: Radial profile of temperatures and enthalpy at the nozzle exit in 750 kW JXWT

### 3-3. 輻射・乱流熱輸送

図11は20kW KUWTにおける輻射熱流束の分布である。コンストリクタ部のアークコラム領域からコールドガス及び壁面へのエネルギー輸送が、極めて強い輻射によって担われることが示されている。なお、ここでは図示していないが、20kW KUWTは比較的的小型であることからレイノルズ数が小さく、乱流の役割は弱い。

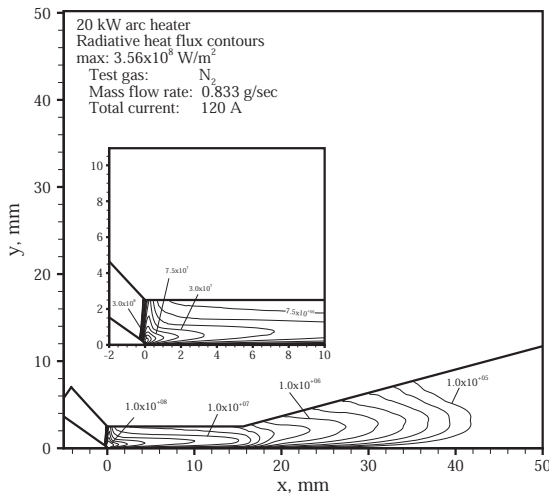


図11: Radiative heat flux contours in 20 kW KUWT for the baseline case

750kW アーク加熱風洞のコンストリクタ出口およびスロート入口における熱流束と並進温度の半径方向分布を図12および図13に示す。高温領域の存在するコンストリクタ出口において輻射熱流束は大きく、対流熱流束とおおよそ同じ高さのピークを持っている。一方で、気体の温度が10000Kを下回るにつれて輻射の影響が小さくなるため、スロート入口において輻射熱流束は小さくなっている。したがって、この領域の熱輸送はほぼ対流熱流束が大部分を担っていると言える、その中でも乱流熱流束の影響が大きいことが確認できる。

### 3-4. 陰極シースによる電圧降下

図14に20kW KUWTにおけるアーク電圧の実験値および解析値(シースモデルを考慮したケース・していないケース)の比較を示す。ここで、アーク電圧は陰極と陽極間の電位差で定義している。シースモデル無しの場合では、15-20V程アーク電圧の実験値を過少予測していたが、シースモデルを導入することで様々な運転条件に対して実験結果との一致が改善されていることが示されている。次に750kW JXWTにおけるアーク電圧の実験値および解析値のシースモデル有り・無しの比較を図15に示す。20kW KUWTのケースと同様にシースモデルの導入によって、アーク電圧予測値の改善が図られ、実験値と良い一致を示す。ただし、入力電流( $I$ )が低く、流入質

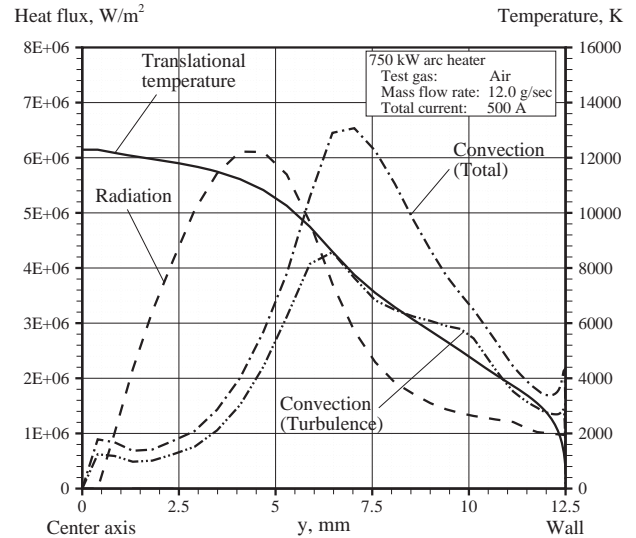


図12: Radial profiles of heat fluxes and temperature in 750 kW JXWT for the baseline case at the constrictor exit ( $x = -200$  mm)

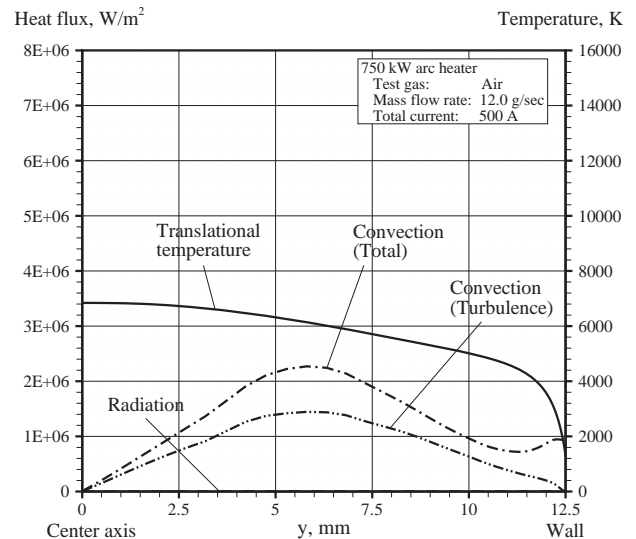


図13: Radial profiles of heat fluxes and temperature in 750 kW JXWT for the baseline case at the throat inlet ( $x = 0$  mm)

量流量( $\dot{m}$ )が大きいケースでは実験値とのずれが大きい。電極上のアーク付着点における放電の三次元的挙動も含めて、さらなる調査が必要であるものと推察される。

## 4. 結論

九州大学20kW, (KUWT)及びJAXA 750kW (JXWT)アーク加熱風洞を対象に、熱化学的非平衡流と電場を連成させた数値解析コードを開発した。さらに、高精度の輻射モデル・乱流モデルを導入し、アーク加熱気流における輻射・乱流による熱輸送の詳細な調査・検討を行い、解析モデルの高精度化を行った。

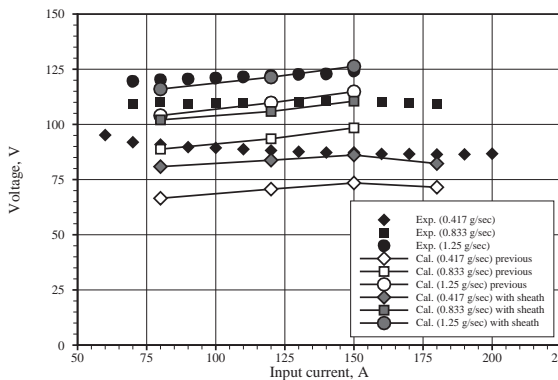


図 14: Comparison of arc voltage for 20 kW KUWT

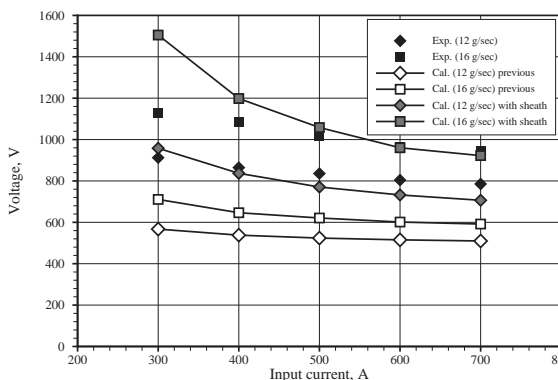


図 15: Comparison of arc voltage for 750 kW JXWT

各風洞のコンストリクタ部において、強い加熱とともに解離・電離反応が速やかに進むとともに、中心軸近傍に高温領域が生じ、その周囲を取り巻く比較的低温のコールドガス領域が形成されることが確認された。ノズル部においては超音速膨張とともに各温度が低下し、加熱部において解離・電離した化学種の再結合反応が進むことを明らかにした。特に20kW KUWTでは、ノズル膨張部において原子種やイオン種の再結合反応が非常に重要な役割を担うことがわかった。

20kW KUWTの加熱部において、風洞加熱部における放射の役割を定量的に明らかにした。放射による熱輸送はコンストリクタ放電部において非常に大きく、一方でノズル膨張部において膨張による温度低下と共に急激に減衰することが示された。また、750kW, JXWTのような大型アーク加熱風洞内部における乱流熱輸送と放射熱輸送の挙動を明らかにした。コンストリクタ放電部において放射と乱流による熱輸送が大きな役割を担うことが示された。さらに、温度が低下し放射の影響が小さくなるスロート部において、乱流が支配的な役割を担うことを示した。したがって、風洞における熱損失や熱効率や正確に見積もる上で、放射や乱流を適切に予測する必要があることが明らかになった。

さらに、それぞれのアーク加熱風洞に対して陰極壁面

近傍におけるシースモデルを構築し、その電圧降下を評価した。アーク電圧の実験値と解析値の比較において、本研究におけるシースモデルを導入することで、幅広い作動条件に対して良い一致を示す傾向になることが明らかになった。

#### 謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費の助成を受けてなされたものである。また本研究では主に九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用した。

#### 参考文献

- (1) K. Abe, T. Kondoh, and Y. Nagano. "A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching Flows - I. Flow Field Calculations". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 1, pp. 139-151, 1994.
- (2) T. Sakai. "Computational Simulation of High-Enthalpy Arc Heater Flows". *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 21, No. 1, pp. 77-85, Jan.-Mar. 2007.
- (3) C. Park. *Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics*. Wiley, New York, 1990.
- (4) Y. Takahashi, H. Kihara, and K. Abe. "Turbulence and Radiation Behaviours in Large-Scale Arc Heaters". *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 8, p. 085203, 2011.
- (5) R. N. Gupta, J. M. Yos, R. A. Thompson, and K.-P. Lee. "A Review of Reaction Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11-Species Air Model for Chemical and Thermal Nonequilibrium Calculations to 30000 K". *NASA RP-1232*, Aug. 1990.
- (6) M. Fertig, A. Dohr, and H.-H. Frühauf. "Transport Coefficients for High-Temperature Nonequilibrium Air Flows". *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 15, No. 2, pp. 148-156, April-June 2001.
- (7) Y. Watanabe, K. Ishida, and H. Shirai. "Spectroscopic Analysis of NO Band Emissions from Arc-Heated Air Flows in a 750 kW Arc-Heated Wind Tunnel". NAL TR-1417, National Aerospace Laboratory, Chofu, Japan, 2000.
- (8) T. Matsuzaki, K. Ishida, Y. Watanabe, K. Miho, H. Itagaki, and T. Yoshinaka. "Constructions and Characteristics of the 750 kW Arc Heated Wind Tunnel". NAL TM-760, National Aerospace Laboratory, Chofu, Japan, 2001.
- (9) K. Abe, T. Kameyama, H. Kihara, M. Nishida, K. Ito, and H. Tanno. "Computation and Experiment of Nonequilibrium Nozzle Flow of Arc-heated Air". *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 19, No. 4, pp. 428-434, 2005.