

# ファノー流れによる超音速アーク気流の分光温度計測

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

[共同研究者] 高木 誠 (工学部機械学科)、岩田博之 (工学部電気学科)、坂 公恭 (名古屋大学)

## 研究成果の概要

アーク加熱風洞は、耐熱材料の性能を調査する目的で、地上で大気圏突入下の模擬試験に用いられる。アーク加熱風洞は簡易的に、高エンタルピー気流を生成可能である。本研究では、流管内の空気ガス流に放電を行い、アーク加熱気流を生成した。流管内で、発生した高エンタルピー気流を管摩擦によりチョークさせ超音速まで加速した。ファノー流れによる超音速アーク気流の流量を変化させ、陽極内と風洞内の2点のスペクトルから温度を求めた。結果は、質量流量が増加するにつれて、気流の振動温度と回転温度が上昇する傾向があることが分かった。今後の課題として、電流を上げることで、同電圧で現在の限界値よりもさらに流量を上昇させて実験を行うことができると考える。流量を上昇させることで、現在の設備を用いてより高エネルギーな気流が生成できると考える。

## 研究分野：熱流体力学

キーワード：High enthalpy flow, Spectroscopic Measurement, Fanno flow, Arc heated wind tunnel

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境の保護、スペースデブリ問題、低コストを目指した SpaceX 社(米)の「Falcon9」、 「SKYLON」(欧)などの宇宙往還再使用型ロケットの研究開発が先進国のみならず新興国でも行われている。そのため再使用型ロケットや宇宙船の研究開発が急がれている現状である。宇宙機は、地球は勿論他の惑星や小惑星の大気圏に突入する際以下のような過酷な環境下に晒される。

- ・衝撃波、激点圧力、せん断層、エントロピー層
  - ・酸化、励起、電離
  - ・衝撃層内での原子や分子の分離や再結合、粘性相互
- 地上試験を行い、加熱風洞の開発及び特性評価が必要である。

### 2. 研究の目的

Fig.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。アーク加熱風洞は、高温高圧のガス流を発生させ、大気圏再突入状態を模擬した地上試験が可能となる。

本研究では超音速気流を、アーク加熱後、管摩擦によって気流をチョークさせタンク内噴出後に気流面を膨張させることによって、生成する。生成した気流をファノー流

れによる超音速アーク気流と呼ぶことにする。Fig.2 は本研究で生成した気流である。水冷式中空電極型の Huels 型アークヒータを用いて気流を生成した。ノズル出口上流及びノズル出口後の励起状態と温度から、ファノー流れによる超音速アーク気流のスペクトル分析及び流量温度特性の導出を目的とした。

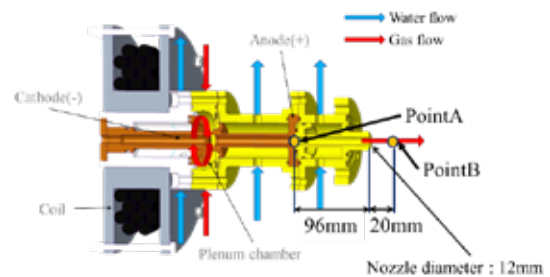


Fig.1 Schematic view of Huels type arc heater

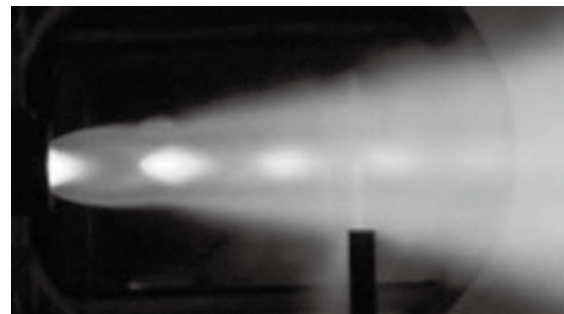


Fig.2 Photograph of supersonic arc heated Fanno flow

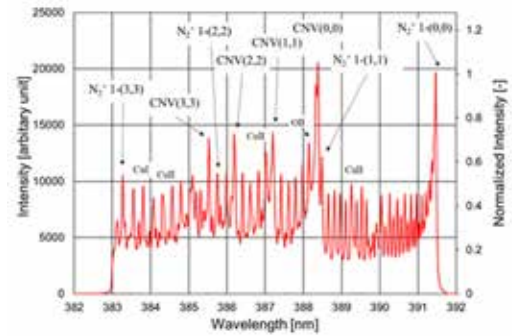
### 3. 研究の方法

アークプラズマ気流の分光計測により,  $N_2^+$  1st Negative Band System を用いて振動温度  $T_v$  と回転温度  $T_r$  を求めた. ノズル出口上流 96mm(点 A) の気流の分光計測を行った. また, ノズル出口から下流 20mm(点 B) の気流の分光計測を行った.

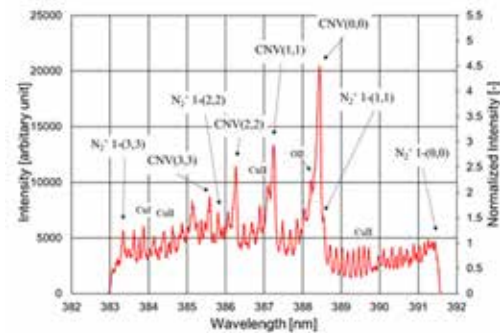
### 4. 研究成果

アーク加熱気流を波長域 382~392nm において分光計測を行い, 以下の結果を得た. 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. Fig.3(a),(b)においてそれぞれの発光強度を比較するため, 各条件における  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動基底準位(0,0)の輝線スペクトルを基準として無次元化した. 無次元化した値を Fig.3(a),(b)の第二軸に示す. 以降はこの第二軸に表した発光強度比に従って考察を行う.

Fig.3(a)は点 A, Fig.3(b)は点 B での分光計測結果例を示す.  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動準位(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の輝線スペクトルが観測された. また, Cu の輝線スペクトルが観測され, 電極の銅が溶け出していることが分かる. その他に, CN violet band(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の輝線スペクトルが観測できる. これは作動ガスに空気を用いているため, 空気中の二酸化炭素と窒素が反応したものと, テフロン分子式は  $(C_2F_4)_n$  であり, 炭素が含有されているため, テフロンが溶けだして空気中の窒素と反応したものが励起されている可能性がある. Fig.3(a)では,  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動基底準位(0,0)に対して, 励起された  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動準位(1,1),(2,2),(3,3)の発光強度比は 0.6 程度であることが分かる. 各振動準位間の回転準位の輝線スペクトルは発光強度比 0.4~0.6 程度で観測された. Fig.3(b)では,  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動基底準位(0,0)に対して, 励起された振動準位(1,1),(2,2),(3,3)の発光強度比は 1.0~1.5 程度であることが分かる. 各振動準位間の回転準位の輝線スペクトルは発光強度比 0.8~1.2 程度で観測された.



(a) at Point A



(b) at Point B

Fig.3 Measured emission spectra showing  $N_2^+$ (1st neg.)

Fig.3(a),(b)において,  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動準位(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の輝線スペクトルが観測された. これらの振動準位は励起されやすく, これを用いることで振動温度が算出できる.

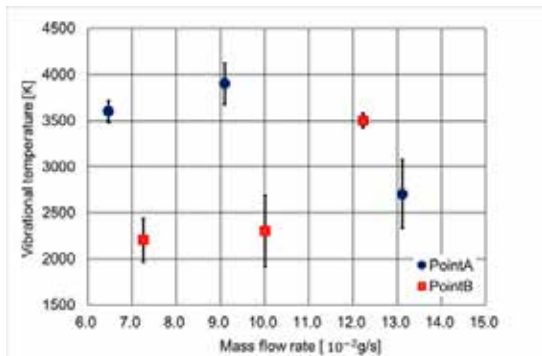
Fig.4(a)は  $N_2^+$  1st Negative Band System を用いて算出した振動温度  $T_v$ , Fig.4(b)は回転温度  $T_r$  を示す. 振動温度  $T_v$  は  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の 4 点の波長強度から局所熱平衡を仮定し, Boltzmann プロット法から求めた. 回転温度  $T_r$  は輝線スペクトルを計測し Boltzmann 平衡を用いることにより求めた. 回転量子数は  $10 < J < 40$  とした. 回転温度  $T_r$  は  $N_2^+$  1st Negative Band,  $\Delta v = 0$  における基底状態(0,0) → (1,1)への励起状態から回転温度  $T_r$  を求めた. 実験条件の再現性を調べるため, 振動温度  $T_v$  と回転温度  $T_r$  の算出をそれぞれ 5 回行い, 標準偏差を導出した. Fig.4(a)(b)のエラーバーに導出した標準偏差を示す.

Fig.4(a)より, 質量流量 0.6~1.2mg/s の時, 点 A に対して点 B の温度が 1000K 以上下がっていることが分かる. これは気流がタンク内に放出された後に起きる膨張過程でのエネルギーの分散が原因であると考えられる. 質量流量 1.23mg/s の振動温度が 2700K で質量流量 1.31mg/s の振動温度よりも低い理由として, 放電が不安定なため熱的非

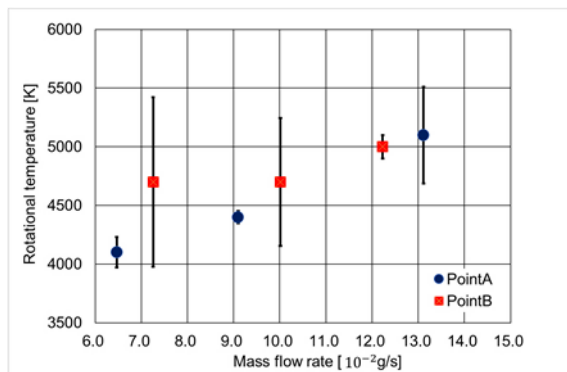
平衡性が高く、振動温度が低く算出されたと考えられる。

Fig.4(b)より質量流量 0.6~1.2mg/s の時、点 B の気流の回転温度 (4700K) が、点 A の気流の回転温度 (4100K,4400K) よりも大きくなっている。この理由として、点 B 全体のスペクトルは点 A のスペクトルに対して先鋭化しており、分子の相互作用が失われているため、算出した温度が個々の分子の状態の影響を受けていると考えられる。これにより Fig.4 点 A の標準偏差が大きくなっている。このことから、今回推算した温度よりも実際の点 A の回転温度が低い可能性がある。点 B の回転温度の差は 100K で大きな差はみられない。

Fig.4(a)から質量流量を増やすと僅かではあるが振動温度  $T_v$  は上昇、Fig.4(b)から回転温度  $T_r$  は上昇する傾向が見られた。回転温度は衝突によるエネルギー変換効率がよく、強い熱的非平衡においても熱的平衡となりやすいため、気流の温度にほぼ等しいと考えられる。また、各流量では振動温度  $T_v$  は回転温度  $T_r$  より温度が低く、熱的非平衡状態であった。



(a) Vibrational temperature



(b) Rotational temperature

Fig.4 Temperatures versus Mass flow rate

研究成果を要約すると以下ようになる。

本研究では、アーク加熱後、管摩擦によって気流をチョークさせ、タンク内噴出後に気流面を膨張させることによ

て超音速気流を生成した。生成した空気アークプラズマ気流の  $N_2^+$  1st Negative Band System において、ノズル出口から上流 96mm(点 A)とノズル出口から下流 20mm(点 B)で分光計測を行った。今回、アーク加熱気流を波長域 382~392nm において高解像度分光に成功した。その結果を以下に示す。

(1)Fig.3 のスペクトルで  $N_2^+$  1st Negative Band  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$  の振動準位(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の輝線スペクトル、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。CN violet band(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)の輝線スペクトルが観測された。

(2)点 B のスペクトルの特徴として、バンドヘッドが鋭い。これは気流が膨張することにより超音速に達しているため、並進速度分布の分散が少なくなっている。これにより分子間における衝突等の相互作用が失われることで分子の特徴がスペクトルに詳細に現れている。

(3)振動温度  $T_v$  と回転温度  $T_r$  は、アークプラズマ流が点 B から点 A へ流れると、不足膨張により  $T_v$  は質量流量 0.6mg/s~7.3mg/s の時 3600K→2200K に、質量流量 0.9mg/s~10.0mg/s の時 3900K→2300K に下がった。質量流量 12.2mg/s~13.1mg/s の時、振動温度は 2700K→3500K で上昇したが、これは点 A 分光時の気流が不安定であったためである。 $T_r$  は質量流量 0.6mg/s~7.3mg/s の時 4100K→4700K で温度が上昇、質量流量 0.9mg/s~10.0mg/s の時 4400K→4700K で温度が上昇した。これは気流が超音速である為分子相互作用が少なく各振動準位間の回転準位の輝線スペクトルが明瞭に観測されず、点 B の温度が高く算出されてしまった。質量流量 12.2mg/s~13.1mg/s の時、回転温度は 5100K→5000K で 100K の差であった。

(4)各流量では振動温度  $T_v$  は回転温度  $T_r$  より温度が低く、熱的非平衡状態であった。質量流量を増やすと振動温度  $T_v$  と回転温度  $T_r$  が大きくなる傾向を示した。

今後の課題として、流量を増加させると入力電力が上昇し、本装置の定格電圧 200V に達して放電が持続不可能になる。そこで、電流を上げることで、同電圧で現在の限界値よりもさらに流量を上昇させて実験を行うことができると考える。流量を上昇させることで、現在の設備を用いてより高エネルギーな気流が生成できると考える。