

大気圏再突入環境模擬のためのアーク加熱風洞の環境構築と

カソードの損耗抑制について

電気・化学専攻 2181204 飯塚 翔吾

(主査：桃沢 愛 准教授 副査：京相 雅樹 教授, 桐生 昭吾 教授)

1. はじめに

2022年7月24日 JAXA によって開発された観測ロケット「S-520」RD1号機が打ち上げられたように、人類が初めて宇宙に足を踏み入れてから60年経過したが現在も様々なミッションを行なっている。

ミッションを行うにあたって使用しているロケットの開発費はおよそ2000億円で使用できる回数が一度だけの使い捨てである。そのためロケットによる宇宙輸送はコストがかさんでしまうといった問題がある。そこでスペースシャトルを代表とした再使用型宇宙往還機を使用することにより、使用回数を増やしコストを低減させることを望み30年間にわたり宇宙開発に貢献してきた。しかし実際には赤字が続いてしまい2011年7月にはスペースシャトルが引退している。その主な原因は機体表面の耐熱パネルにある。大気圏再突入の際に機体は高温にさらされるため機体を保護するために熱防御システム(TPS: Thermal Protection System)が使用されているのだが、その修理に莫大な費用がかかってしまったのである。そのため再使用型宇宙往還機によるコスト低減を図るには損耗の少ないTPSの開発が必要であると言える。

2. アーク加熱風洞

TPSの開発には地上で大気圏再突入環境の模擬が必要である。さらに、大気圏再突入環境を模擬するためには原子状酸素と高速気流の実現が必要となる。そのためTPSの加熱試験には先に述べた環境を実現することのできるアーク加熱風洞が用いられる。アーク加熱風洞とは電極間のアーク放電によるジュール加熱で電離・加熱させたプラズマをノズルで空力的に膨張・加速させ高エンタルピーの気流を生成する風洞のことである。

2.1 コンストリクタ型アーク加熱風洞

アーク加熱風洞にはいくつか種類がありコンストリクタ型はそのうちの1つである。

Fig. 1にコンストリクタの断面図を示す。これはアークの陽光柱が「コンストリクタ」と呼ばれるスロートを通りアノードに拡散的に付着させ、作動ガスの大部分をアーク領域に通過させることにより効率の向上を図ったものである。特徴として構造がシンプル故取り回しが

良く、また低電力で作動させることができるという点があり研究室レベルでプラズマ気流を生成するのに適した風洞であると言える。¹⁾

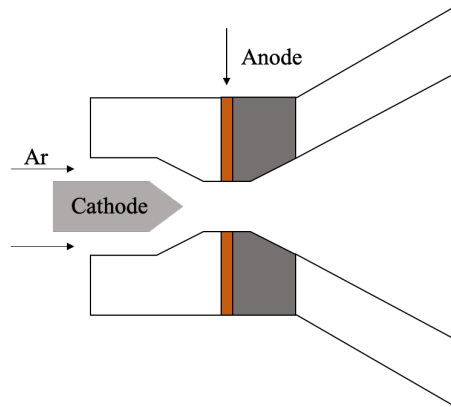


Fig.1 Constrictor cross-sectional view¹⁾

2.2 コンストリクタ型アーク加熱風洞問題点

このコンストリクタ型アーク加熱風洞はアーク放電を利用して作動させる。しかし、このアーク放電に起因して原子状酸素が発生しカソードが高温となり、作動ガスの酸素により容易に酸化されると同時に、アノードも損耗される。このアノードが損耗することによってエロージョンを起こす。電極損耗が発生するとアーク加熱風洞の作動自体を困難にさせるだけでなく、作動ガスが汚染され、その状態で TPS 材料試験を行うと、金属粒子が気流に乗り、TPS 表面に付着することで材料の表面が覆われてしまうことに加え、耐酸化性の重要な評価指針である TPS の質量増減が不明瞭になってしまう。その為電極が損耗しないように電極自体の材料を考慮したり、電極にコーティングを行うなど工夫が求められる。

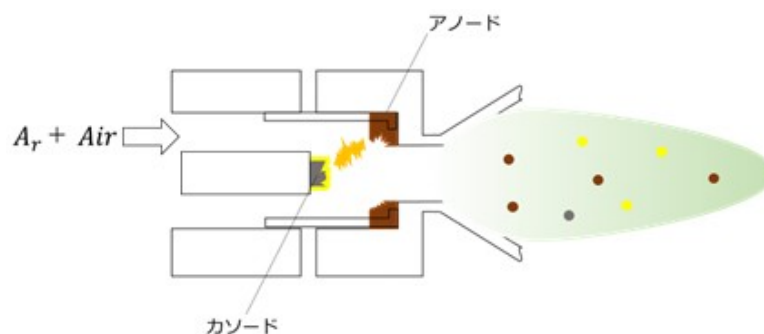


Fig.2 Image of TPS test

3. 研究目的

先述したようにアーク加熱風洞を開発することで TPS 加熱試験環境を構築することができ、TPS 開発が進むことが可能となる。また、アーク加熱風洞の小型化が成功することによ

り、より多くの研究施設で使用することが可能となり、TPS 加熱試験のみならず、各種のセンサー特性試験など再突入環境下における開発研究が急激に進むと推測される。

先行研究¹⁾により電極損耗を抑制するためにアノードには Cu-50%Cr コーティングを施し損耗量、損耗面積が共に大きく減少することがわかった。しかし、カソードに使用されているタングステンでは損耗が激しく適さないこともわかった。そこで当研究ではカソードの新材料としてジルコニウムに着目し、アルゴン空気混合流における損耗量の少ないカソードの開発を行うことを目的とする。

4. 原理

4.1 仕事関数

仕事関数は一般的に「電子を固体内部から放出させるのに必要な最小のエネルギー」と定義される。光を振動数 ν に比例するエネルギーを持つ粒子（光子）の流れと考えたとき、光子のエネルギーは比例定数 h を用いて以下で表される。²⁾

$$\varepsilon = h\nu \quad (4.1)$$

この時、 h はプランク定数と呼ばれ、 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ という値を持つ普遍定数である。

1 個の光子が金属中の自由電子に衝突して電子が飛び出そうとすると、電子の運動エネルギーの最大値 E_{max} は

$$E_{max} = h\nu - W_0 \quad (4.2)$$

で与えられる。ここで、 $W_0 = h\nu_0$ は電子を金属の表面からたたき出すのに必要なエネルギーで、これを仕事関数と呼び単位は eV （エレクトロンボルト）を使用する。仕事関数は金属によって異なる値を持つ。

4.2 カソード

アーク放電はカソードの熱電子放出により電子が供給されるが、電流密度と温度の関係はリチャードソン・ダッシュマンの式で与えられる。

$$j_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{W_e}{kT}\right) \quad (4.3)$$

J_0 、 A 、 T 、 W_e 、 k はそれぞれ飽和放出電流密度、リチャードソン定数、カソードの表面温度、仕事関数、ボルツマン定数である。リチャードソン定数は原理的にはカソード材料によらず、式 (4.2) によって与えられる。

$$A = \frac{emk^2}{2\pi^2h^3} = 120.4 \frac{A}{\text{cm}^2\text{k}^2} \quad (4.4)$$

4.3 ジルコニウムカソード

カソード材料に求められる条件として「高融点」「低い仕事関数」「耐酸化性」が挙げられ、先行研究ではタングステンカソードが採用されていた。しかしながら、タングステンカソードでは酸化物の融点が低く、酸素雰囲気中で著しく損耗してしまい、アーク放電を維持することが出来ないということから、ジルコニウムカソードに着目した。ジルコニウムカソードはタングステンと比べ融点・熱伝導率が低く、仕事関数が高い、と単体におけるカソード物質としてはタングステンより劣っているが、ジルコニウム酸化物の融点は約 2700 °C と非常に大きいため、酸素雰囲気中で酸化物を生成しながら放電を維持することが出来る。しかし、ジルコニウム単体でアーク放電を行うとその融点の低さより、カソードが短時間で融解してしまう。このため、あらかじめカソードに表面改質を施し高融点にする必要がある。

Table.1 Tungsten Properties³⁾

	単位	W	WO ₃
融点	°C	3407	1470
仕事関数	eV	4.5	9.2

Table.2 Zirconium Properties⁴⁾

	単位	Zr	ZrO ₂	ZrN
融点	°C	2000	2700	3000
仕事関数	eV	3.36	3.96	2.92

5. 電極の表面改質

前項で述べたようにジルコニウムをカソードに用いる場合、融点を向上させるために表面改質を施す必要がある。そこで我々はジルコニウムを窒素雰囲気下に封入し窒化ジルコニウム層を生成させ表面改質を施した。本項ではその手法、結果とその考察について述べる。

5.1 実験方法

窒化処理には高周波誘導加熱炉を使用した。窒素を封入した石英管の中にジルコニウムを入れ温度のみを変化させ加熱時間を 1h に固定した。温度は 1200°C から 1600°C までは流量を固定せず、窒化温度を 100°C ずつ昇温させた。また、1350°C、1450°C、1600°C は流量を固定し窒化処理を施した。1600°C での窒化処理に関しては流量を固定した場合と固定しなかった場合の 2 通り作成した。

5.2 実験結果

Table.3 と Fig.3 に窒化処理の結果を示す。これらからわかるように温度が上がるにつれて膜厚が成長し、1450℃でピークを迎えていることがわかる。また、1450℃を超えると膜厚の成長が後退することもわかった。

Table.3 Nitriding treatment conditions and film thickness

温度[°C]	膜厚[μm]	流量固定[ml/min]
1200	9.964	
1300	15.57	
1350	29.03	100
1400	32.10	
1450	82.25	100
1500	49.60	
1600	45.97	100
1600	35.95	

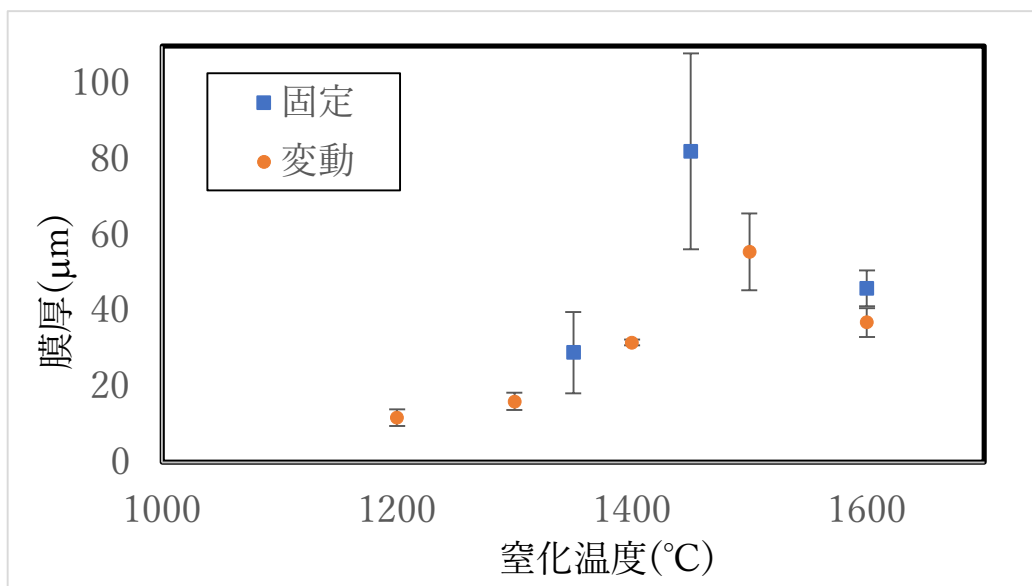


Fig.3 Film thickness and nitriding temperature

5.3 考察

1450℃まで窒化処理温度が上がるにつれて窒化層が厚くなった理由は、温度による窒素の拡散速度にあると考える。1450℃までは温度が上がるにつれて窒素の持つエネルギーが上昇し拡散速度が上がり窒化層の形成が進んだと考えられる。1450℃を超えると窒化層の成長が後退した理由に関しては融点付近であるからだと考える。

6. 点火試験

作成した窒化ジルコニウム電極と純ジルコニウム電極を使用しアーク加熱風洞を作動させ電極としての有用性を確かめた。また、膜厚が一番厚い 1450℃電極と膜厚が一番薄い 1200℃電極を使用し損耗量を比較した。

6.1 実験条件

アーク加熱風洞を構築段階から着手した為作動するか確かめる為に、まず作動ガスを Ar のみで点火試験をおこなった。その条件を Table.4 に示す。

また、Ar と空気の混合ガスでも作動するか、また純ジルコニウムと窒化ジルコニウム電極の損耗量を比較するために点火試験をおこなった。純ジルコニウムでの条件を Table.5 に示す。また窒化ジルコニウムでの条件は Table.6 と Table.7 に示す。

Table.4 Ignition test with Ar

アノード	Cu
カソード	Zr
作動ガス	Ar
電流	20
電圧	22
Ar流量[l/min]	1.8
Air流量[l/min]	-
圧力[Pa]	24
作動時間 [min]	10

Table.5 Ignition test with mixed gases

アノード	Cu
カソード	Zr
作動ガス	混合ガス
電流	20
電圧	25
Ar流量[l/min]	0.287
Air流量[l/min]	3.0
圧力[Pa]	25
作動時間 [min]	30

Table.6 Ignition test with mixed gases

アノード	Cu
カソード	ZrN(1200℃)
作動ガス	混合ガス
電流	20
電圧	35
Ar流量[l/min]	0.287
Air流量[l/min]	3.0
圧力[Pa]	29
作動時間 [min]	30

Table.7 Ignition test with mixed gases

アノード	Cu
カソード	ZrN(1450℃)
作動ガス	混合ガス
電流	20
電圧	30
Ar流量[l/min]	0.287
Air流量[l/min]	3.0
圧力[Pa]	27
作動時間 [min]	30

6.2 実験結果

Table.8 に作動ガスアルゴンのみでの実験結果を示す。また混合ガスでの実験結果は純ジルコニウムの結果を Table.9 に、窒化ジルコニウムの結果は 1200℃を Table.10 に 1450℃を Table.11 に示す。

これらの結果からジルコニウムをカソードに使用してもアーク加熱風洞を作動させることが可能であることがわかった。また、アノードの損耗量とカソードの損耗量の合計であるエロージョン量が一番少ない電極が窒化ジルコニウム 1200℃であることがわかった。そのためカソードの電極材料には 1200℃で窒化させた窒化ジルコニウム電極が適していることがわかった。

Table.8 Amount of loss in Ar flow

実験前アノード質量[g]	8.3709
実験後アノード質量[g]	8.3654
損耗量[g]	0.0055
実験前カソード質量[g]	1.0471
実験後カソード質量[g]	0.9973
損耗量[g]	0.0498

Table.9 Losses in mixed flow of Zr cathode

実験前アノード質量[g]	7.3401
実験後アノード質量[g]	7.3144
損耗量[g]	0.0257
実験前カソード質量[g]	1.0476
実験後カソード質量[g]	1.0432
損耗量[g]	0.0044

Table.10 Losses in mixed flow of ZrN (1200℃)

実験前アノード質量[g]	7.3241
実験後アノード質量[g]	7.3233
損耗量[g]	0.0008
実験前カソード質量[g]	1.0446
実験後カソード質量[g]	1.0415
損耗量[g]	0.0031

Table.11 Losses in mixed flow of ZrN(1450℃)

実験前アノード質量[g]	7.3541
実験後アノード質量[g]	7.2472
損耗量[g]	0.1069
実験前カソード質量[g]	1.1193
実験後カソード質量[g]	1.1225
損耗量[g]	-0.0032

6.3 考察

窒化ジルコニウム電極における膜厚の厚さは薄い方がエロージョンの量が少なかった理由として考えられるものに電気伝導率に関係していると考えられる。窒化ジルコニウム電極はジルコニウムの表面に窒化層が析出している。窒化ジルコニウムの電気伝導率はジルコニウム単体と比べて 10 分の 1 以下になるためこの窒化層が厚い 1450℃電極の方が 1200℃と比べて抵抗が大きくなり瞬間的にかかる電圧も高くなり損耗につながったと考える。また、純ジルコニウム電極と比べて窒化ジルコニウム電極 1200℃の方がエロージョン量が少なかった理由として仕事関数の差が挙げられる。純ジルコニウムに比べて窒化ジルコニウムの方が仕事関数は低いため電圧も高くなり損耗が抑制できたと考える。

7. 結言

本研究では、カソードの新材料としてジルコニウムに着目し、アルゴン空気混合流における損耗量の少ないカソードの開発について述べた。また、高周波誘導加熱炉を用いてカソー

ドに窒化処理を施し、温度と膜厚の関係を評価し 1450°Cまでは温度が上がるにつれて膜厚が成長し 1450°Cを超えると膜厚の成長が抑制されることがわかった。

窒化ジルコニウムと純ジルコニウムを使った点火試験では純ジルコニウム、窒化ジルコニウムともに混合ガスで点火することができたことからジルコニウムをアーク加熱風洞の電極材として使用することが可能であることがわかった。中でも 1200°Cで窒化させた窒化ジルコニウムカソードが一番エロージョンの量も少なくすることができることがわかった。

参考文献

- [1] 佐野宗一郎, “酸化混合ガスにより作動するアーク加熱風洞の電極損耗およびその抑制法について”, 東京大学修士論文, 2017.
- [2] 栗木恭一, 荒川義博 “電気推進ロケット入門”, 東京大学出版
- [3] J. A. Sillero, D. Ortega, E. Muñoz-Serrano, E. Casado, “An experimental study of thoriaated tungsten cathodes operating at different current intensities in an atmospheric-pressure plasma torch,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, 2010, 43 (18), pp.185204.
- [4] K.Tanaka, T.Nomura, A.Momozawa, K.Komurasaki, Y.Arakawa, ”Effect of surface nitriding of Zirconium cathode on arc-heated wind tunnel,” *Journal of IAPS*, vol.18(1), 2010, pp.16-22