

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1388

集中熱容量式(スラゲ)カロリメータによる アーク加熱気流の熱流束計測

渡辺泰夫・松崎貴至・石田清道
三保和之・福井利夫・濱村修

1999年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

集中熱容量式(スラグ)カロリメータによる アーク加熱気流の熱流束計測*

渡辺 泰夫*¹ 松崎 貴至*¹ 石田 清道*¹
三保 和之*² 福井 利夫*² 濱村 修*³

Heat Flux Measurements by a Slug Calorimeter in an Arc Heated Flow *

Yasuo WATANABE *¹ Takashi MATSUZAKI *¹ Kiyomichi ISHIDA *¹
Kazuyuki MIHO *² Toshio FUKUI *² and Osamu HAMAMURA *³

ABSTRACT

This paper shows the application of a slug type calorimeter to the heat flux measurements of an arc-heated flow, and evaluates the effect of slug surface coatings with differing catalytic efficiency on measured heat flux. Metallic coatings are more catalytic and result in higher heat flux values than coating containing silica. These results are in accordance with the known order of catalytic effectiveness. Measured heat flux values agree in magnitude and lie within a factor of 1.8 of the values obtained by Gardon type calorimeters. Presumed sources of the difference are the difference in sensing areas, ambiguity of surface characteristics, and flow field nonuniformity.

Keywords : high enthalpy flow, heat transfer, catalytic effect

概 要

集中熱容量式(スラグ)カロリメータにより、750kW アーク加熱風洞気流の熱流束を計測した。銅製のスラグ表面には、種々の触媒特性のコーティングを実施し、その熱流束値への効果を調べた。熱流束値は、Cu、Ni等の金属表面で大きく、SiO等のガラス質非触媒性表面では極めて小さいことが確認され、その序列は文献値と一致した。熱流束計測値は、ガードン式カロリメータの結果とオーダーで一致し、その平均値のガードン計測値からの偏差は倍数1.8程度に収まった。この差違は、計測面積の相違、表面状態の不明確さ、流れ場の不均一等に由来すると推定される。

1. まえがき

集中熱容量式(通称スラグ式)カロリメータの750kW アーク加熱風洞気流の熱流束計測への適用について考察する。熱流束(又は熱伝達率)の計測は、宇宙往還機の

熱防壁材料の開発と評価を目的としてアーク加熱式の風洞が稼動し始めた80年代以来の最重要課題であり、種々のセンサが考案開発され適用されてきた。スラグ式カロリメータは、温度時間履歴計測を原理とし、水冷を必要としないため構造が比較的簡単であり、アーク加熱風洞の発展初期よりその計測原理が確立され、主としてよどみ点における熱流束計測に主要な役割を果たした。大電力放電で作動気体を加熱し、ノズルにより加速膨張して低密度、極超音速の高エンタルピ気流を形成するアーク加熱風洞の気流は、原子、分子、イオン等を含んだ反応性非平衡流であり、気流中に計測のために投入されたプローブ自身の表面での触媒反応による計測値への影響が無視できない。スラグ式カロリメータでは、スラグ表面

* 平成10年6月27日受付 (received, 1998)
*¹ 流体科学総合研究グループ (Fluid Science Research Center)
*² 宇宙開発事業団 (NASDA)
*³ (株)エイ・イー・エス (AES)

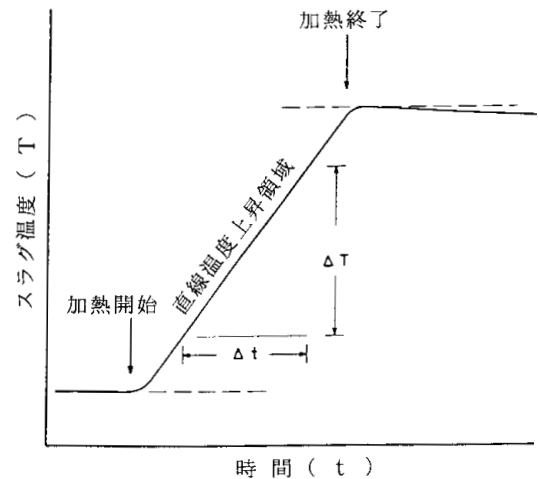
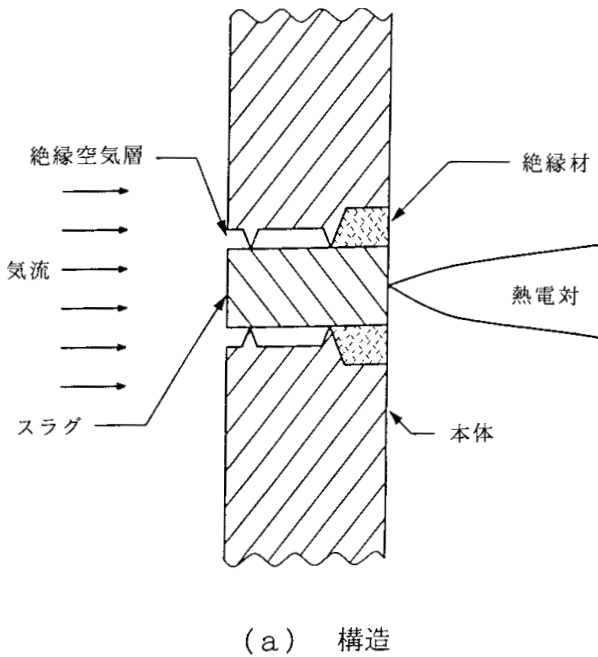


図1 集中熱容量式(スラグ)カロリメータ概念図

に各種コーティングを実施して表面特性を改変することが容易であり、これを用いた上記表面触媒反応の熱流束への影響に関する実験的研究(各種表面材料の触媒効果評定)が多数行われた¹⁻³⁾。現在では、ガードンゲージのような汎用性センサの出現、発展により、実用計測での利用頻度は極めて減少したが、表面触媒効果の評価等の研究的な目的には依然として有用な測定手段である^{4,5)}。現在アーク加熱風洞で汎用されているガードンゲージは利便性の高いセンサではあるが、本来放射熱流束計測用に開発されたもので、アーク加熱気流のような厳しい対流加熱環境下での計測における適用性の議論が十分でなく、従って計測値の妥当性も保証されていない^{6,7)}。スラグ式カロリメータは、空間温度差計測より熱流束を求めるガードンゲージとは異なる計測原理に基いており、かつ校正を必要としないと言う利点もあり、その補足的計測にも有効である。本報告では、スラグ表面に種々のコーティングを施したスラグ式カロリメータにより750kWアーク加熱風洞気流の熱流束を計測し、ガードン式カロリメータの計測値との比較評価を行い熱流束値の妥当性を検討するとともに表面コーティング種類による熱流束計測値への効果を調べた。

2. 集中熱容量式(スラグ)カロリメータ計測原理

熱流束の計測に用いる温度検知用センサ(又は方法)は、その計測原理により(1)空間温度差計測方式と(2)温度時間履歴計測方式に大別される⁸⁾。(1)の方式は、既知の熱抵抗間の温度差を計測するもので、温度抵抗測定(RTD)センサや埋めこみ熱電対、Wire-Wound ゲージ

(Schmidt-Boelter gage) 円形膜熱流束(Gardon)ゲージ等がある。(2)の方式は、既知の熱容量に関して温度の時間履歴を記録するスラグ式カロリメータ、薄肉法、表面温度履歴を計測するヌルポイント、同軸型カロリメータ、薄膜法等がある。750kWアーク加熱風洞においては、熱流束計測用に(1)の方式のガードンゲージを装備したガードン式カロリメータと(2)の集中熱容量式(スラグ)およびヌルポイントカロリメータを準備している。ヌルポイントカロリメータは、原理的にはスラグ式カロリメータの改良型と考えられる。

スラグ式カロリメータは、既知の熱容量の物体(スラグ)の温度上昇の時間履歴より熱流束を決定する方式のカロリメータで、代表的な構造を図1(a)に示す。計測上の仮定として、一次元的な熱伝導が成り立つように熱的、電氣的に絶縁されたスラグの内部温度分布は一様で時間のみの関数として記述できると考える。これはスラグの熱伝導率 k が十分に大きい(またはスラグの体積が十分に小さい)との仮定と等価である。加熱開始初期の線形熱応答期間のスラグの熱の釣り合い式は、熱流束 q にたいして

$$q = (mC/A) \left(T/t \right) + q(\text{loss}) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 m 、 C 、 A 、 T はそれぞれスラグの質量、比熱、加熱表面積、温度、 t は時間である。スラグよりの伝導および放射による熱損失 $q(\text{loss})$ が無視できて、熱流束が時間的に定常かつスラグ表面で空間的に一様であれば、

$$T = T_i + (qA/mC) \quad (2)$$

が得られ、スラグの温度と加熱時間の間には線形関係が成り立つ。 T_i はスラグの初期温度である。入射熱流束が、熱伝達係数 h が一様な対流による場合には、時定数 $\tau = mC/hA$ として、

$$(T - T_i)/(T_\infty - T_i) = \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

が得られる⁹⁾。これは、スラグの温度が指数関数的に気体温度 T に近づくことを示している。スラグの厚さを L として、ピオ数 $Bi = hL/k$ が1であれば、スラグ内部熱伝導抵抗が熱伝達抵抗に比して十分小さく、物体内温度分布は一様との先述の仮定が成り立つ。一般に、 $Bi < 0.1$ であれば実用的に十分と考えられている。また、 $t/\tau > 1$ であれば、スラグの温度応答は線形で近似出来る。これより、加熱開始初期のスラグ熱応答の解析は(2)の関係を利用すればよいことになる。従って、図1(b)のような実験的に得られる温度-時間履歴曲線の直線部の勾配より加熱流束 q が求められる。

具体的な計測手順としては、スラグの寸法(表面積、厚さ)及び質量計測、裏面への熱電対の装着、カロリメータの組立、絶縁検査の後、風洞測定部回転式供試体支持装置への取付を行う。この間(試験前の保管期間も含めて)、スラグ表面の酸化、汚染等に対する十分な管理が必要である。加熱試験で得られたスラグの温度の時間履歴曲線より、過渡応答部分を除いた加熱初期直線応答部の勾配を決定し、スラグの特性諸量を用いて加熱流束を決定する。加熱終了後の冷却期間の勾配も計測することにより、スラグの熱損失の目安が得られる。損失を最低限にするためには、冷却期間の勾配を加熱時勾配の5%以下に保つのが望ましいとされている¹⁰⁾。

スラグ式カロリメータの利点は、計測原理が明快で、測定結果はスラグの材料特性とプローブ形状のみに依存して校正を必要としないこと、水冷が不要なため構造が比較的簡単で製作が容易であること、表面触媒反応特性改変のための各種コーティングの適用が容易であること等である。一方、過渡的計測を行うため、同一風洞試験での繰り返し使用が出来ないこと、スラグの裏面で温度を計測するためスラグの平均温度が測れない等の欠点がある。また、アーク加熱された高エンタルピ気流での高熱流束の計測環境は非常に厳しく、熱損失を完全に制御することは困難である。カロリメータ形状は、試験用材料模型と外形寸法を一致するように設計する必要がある。また、測定される熱流束は、スラグ表面の平均的な値となるので、試験気流のカロリメータ表面での一様性の確

認が重要である。スラグ式カロリメータに関する使用上の標準的な留意事項はASTMの規格に詳述されている¹⁰⁾。

3. アーク加熱風洞

実験は、最大入力750kWのアーク加熱風洞で行った。装置と実験配置の概略を図2に示す。アーク加熱器はセグメント式コンストリクタ型で、内径25mm、厚さ10mmの相互に電氣的に絶縁されたセグメント13枚よりなるモジュラコンストリクタパック(最大3パック)で構成されるコンストリクタ部とその両端の陰、陽両電極よりなる。全長約40cmのアーク加熱器コンストリクタ部で加熱された空気は、スロート径25mm、出口径115mm、半頂角15度のコニカルノズルにより膨張、加速され、連続排気された測定部に超音速低密度高エンタルピ気流を形成する。入力エンタルピは、電流と空気流量を変えることにより制御する。調整範囲はそれぞれ300~700A、8~20g/sで最大約25MJ/kgの総エンタルピが得られる。本風洞の一般的運転特性は文献11に報告されている。また、測定部試験気流軸方向各断面でのピトー圧、熱流束の径方向分布の一様性は検証されている⁷⁾。

供試体模型、カロリメータプローブ等は、回転式模型支持装置に装着し、気流条件設定後気流中に急速に投入して加熱、計測等を実施する。材料加熱試験時等に供試体材料表面の温度を監視するために赤外線温度計測装置が準備されている。図2に示す発光分光分析装置は、本報告の実験には直接使用しないが、非接触で自由流および衝撃層の温度計測、気体成分の分析等を行い、気流の局所エンタルピの決定、熱流束計測結果の評価等の総合解析に用いる。

4. 実験用カロリメータプローブの製作

スラグ式カロリメータは、NASA Ames研究所のアーク加熱風洞での多数の実験に見られるように¹⁻³⁾、各試験機関がそれぞれの試験装置、試験目的に適合するように設計するため商用市販品のような一般化されたものはない。実験は大部分よどみ点プローブで行われ、形状は平頭円柱、半球円柱等である。プローブ寸法は一様気流の大きさに依存し、一般的には単体で試験されるが、大型の矩形模型のよどみ線上に六個のカロリメータを装着して同時計測を行った例もある³⁾。現在も引用される代表的なものは、図3に示すHiesterとClarkのスラグ式カロリメータであり^{12,13)}、Scott等の表面触媒特性の実験にも使用されている^{3,4)}。このカロリメータは、NASA Ames研究所で設計されたもので、無酸素銅製のスラグは表面をニッケルでメッキし、サファイアのベアリングでカロリメータのシュラウド内定位置に三点で保持され、電気

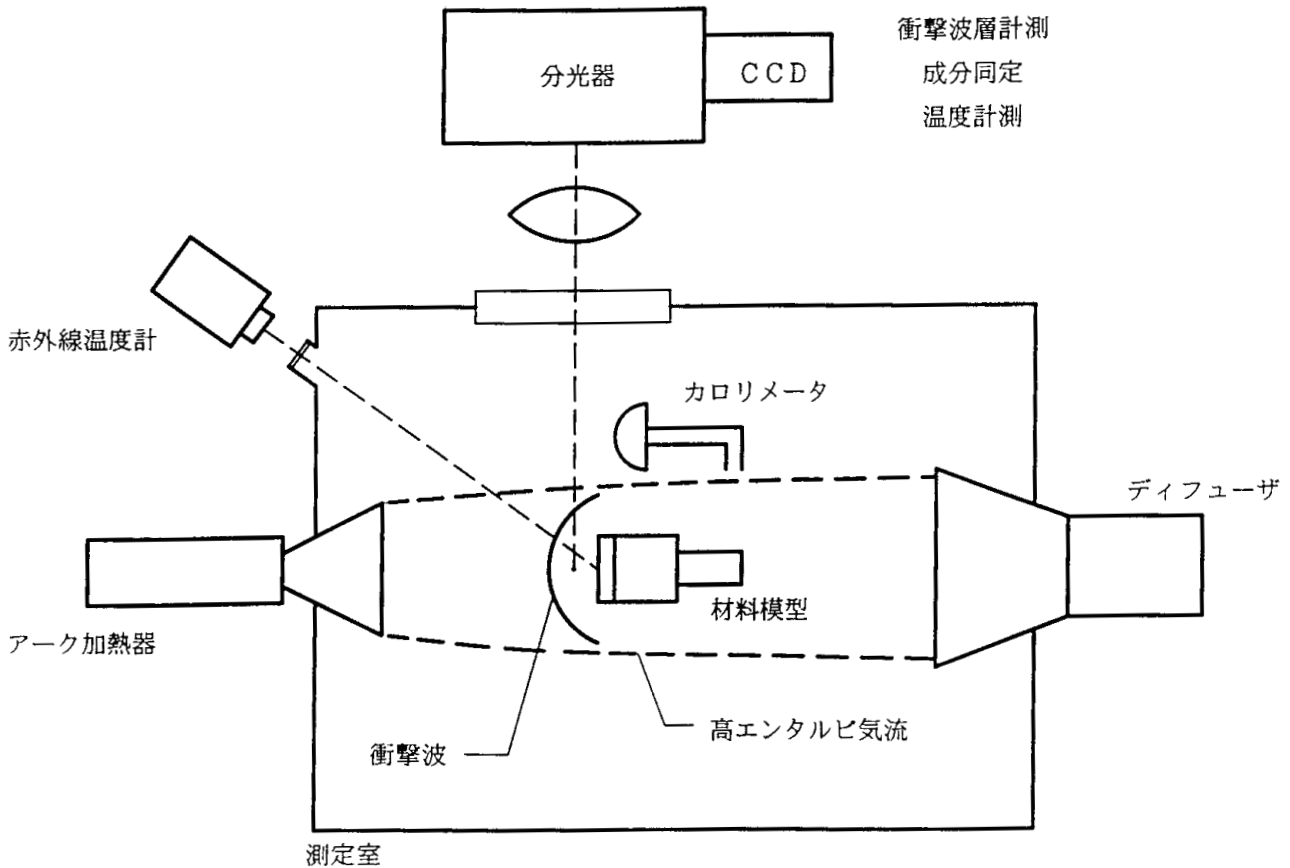


図2 アーク加熱風洞実験配置概念図

的、熱的な絶縁が保たれている。スラグの温度履歴は、底面に打込み（ピ - ンイン : peen in）された熱電対により計測される。標準的な計測（気流への曝露時間 2 ~ 3 秒）では、熱損失は毎秒当り 1 パーセント以下と見積もられている。

航技研においても種々の形状、構造のスラグ式カロリメータの試作、計測を行い、運用上の問題点の把握、データの蓄積を計ってきた。これらの経験を踏まえて今回製作したスラグ式カロリメータの構造を図 4 に示す。形状は平頭および半球型の二種類を製作し、データ比較評価のために材料試験模型やガードン式カロリメータと形状、寸法を一致させている。スラグ部はセラミック製のリング上の三点のみで接触支持され、リングと共に後方よりばね付きセラミックロッドにより定位置に保持されている。スラグと本体とは空気層で熱的に絶縁され、側面よりの熱損失を防いで熱伝導の一次元性を保っている。また、表面特性の不連続性の影響を避けるために、スラグと本体は同一材料（無酸素電気銅：OFHC）で作られている。気流投入時のスラグ温度の時間履歴を計測する熱電対は、K タイプで線径 0.2mm を用い、スラグ裏面に打込み方式で装着した。打込み時に、熱電対とスラグの密着性向上のため、スラグ側の受穴に粒径 1 μm の銅の

微粉末を充填した。

アーク加熱気流における熱流束の計測においては、気流中に存在する空気成分の原子のプロープ表面における再結合反応（表面触媒効果）は、表面の性質、状態に依存するので、実験に使用するスラグの加熱表面の管理は慎重に行わなければならない。表面の性質は、スラグ表面に各種材料の薄層コーティングを施すことにより改変出来るが、金属表面では大気中での酸化の進行にも注意を払う必要がある。Winkler 等の報告では¹⁴⁾、大気中に数日間放置してかすかに酸化した銅のスラグ表面への熱流束は、実験直前に十分に清浄化した表面への値と比べて、かなり減少することが示されている。このように、表面での酸化物の形成は再結合効率を下げるので、スラグ表面の管理、保管、清浄化処理の過程を定義づけしておく必要がある^{1,2)}。今回製作したスラグで特にコーティングを実施しないものについては（即ち、加工した純銅表面）トリクレンで清掃、トリクレンで超音波洗浄（5 分間）し乾燥、アセトンで超音波洗浄（5 分間）し乾燥、エタノールで超音波洗浄（5 分間）し乾燥の手順で処理後、真空パックして保管し、実験直前に開封してカロリメータに組み込み使用した。表面への薄層コーティングの実施は、薬品による表面清掃後、コーティング装置に装着し、

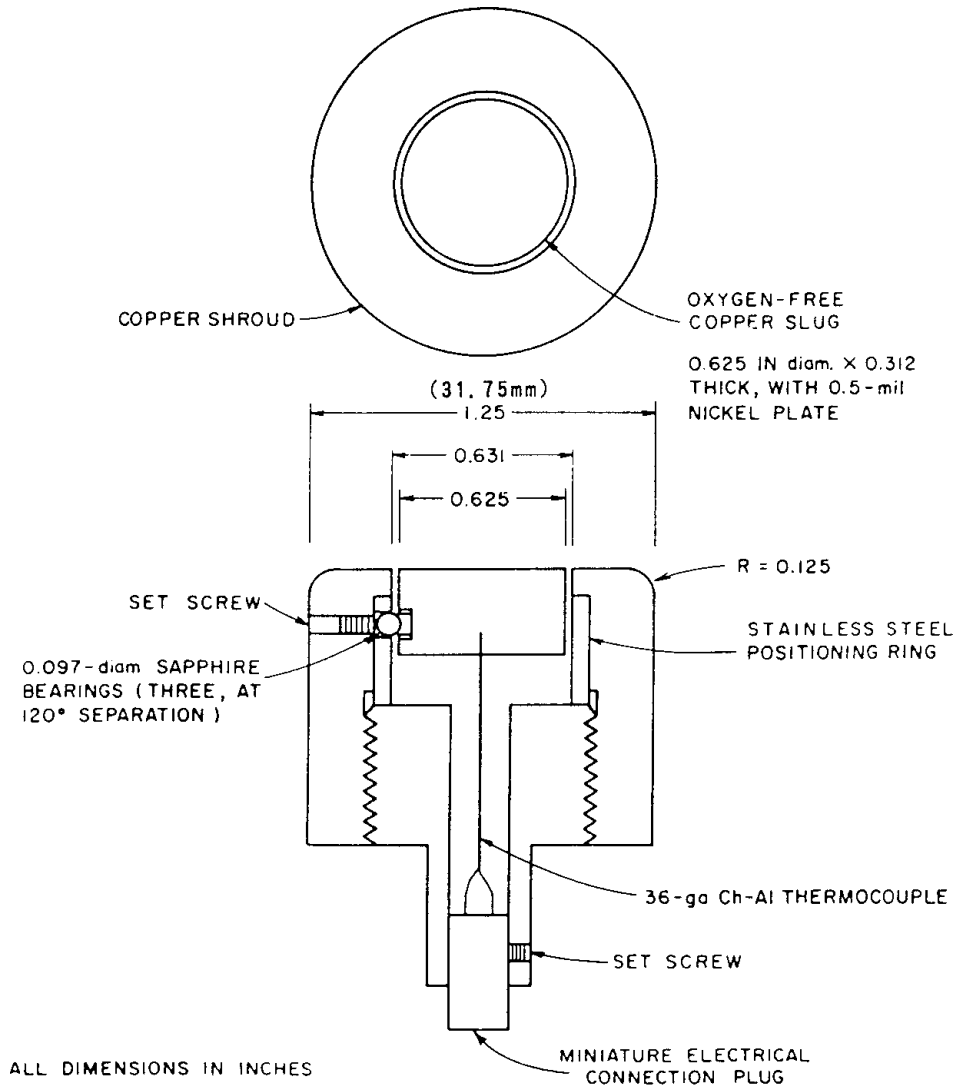


図3 代表的スラグ式カロリメータ構造図 (Hiester and Clark(文献12))

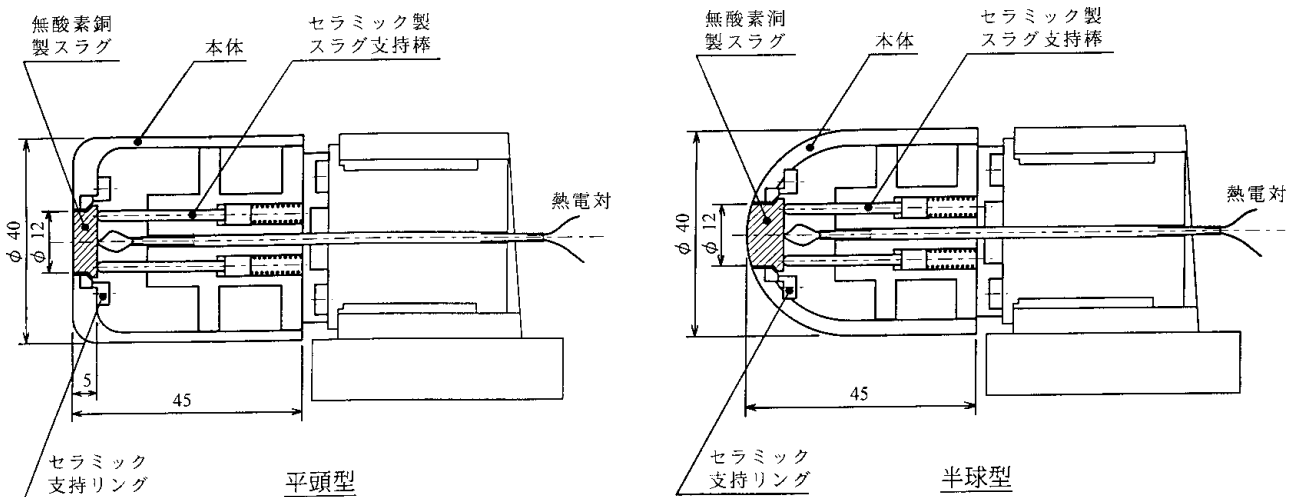


図4 NAL スラグカロリメータ組立図

十分なイオンボンバードメントにより表面清浄化後イオンプレーティングによりコーティングを行い、真空バックして保管した。

5. 実験結果と討論

スラグ式カロリメータの実験は、以下の手順で実施した。真空バック状態で保管中のスラグを開封し重量を測定する。重量測定用には、ザルトリウス製の電子式セミマイクロ天秤 (Sartorius R160P) を用い小数点4桁まで精密計測した。重量測定後、スラグ裏面に熱電対の取付(ピンイン)作業を行い、慎重に表面を清掃し、カロリメータの組立、絶縁の点検確認後回転式模型支持装置に装着する。配線と熱応答を確認して風洞測定部の排気を開始する。標準的な試験には、スラグ式カロリメータ2本と比較測定用のガードン式カロリメータを使用し、同一試験条件の気流で熱流束を計測した。

図5(a),(b)に、スラグの表面にニッケルおよび二酸化珪素コーティングを実施したスラグカロリメータの温度時間履歴計測例を示す。熱電対出力記録は、横河製オムニコーダー(ORM1200オシログラフィックレコーダ)で行い、スラグカロリメータの気流への投入直前より所定の温度で気流より脱出後の冷却時勾配までを含め記録した。温度履歴は、気流外での待機時の初期温度より気流中心位置への投入期間の遷移過程を経て加熱初期線型応答直線部が観測される。スラグの温度上昇につれての熱流束減少に対応して履歴曲線は直線よりはずれ勾配が減少していく。加熱率決定には、初期温度よりの立上がり遷移部を除き、スラグ温度200 到達時までの直線部分の勾配を使用した(図5(a)に決定した直線例を示す)。また、気流よりの脱出後の冷却時の勾配もあわせて計測し、スラグよりの熱損失を評価した。これら二例の温度履歴を比較観察すると二酸化珪素をコーティングしたスラグの温度上昇の時間勾配が著しく低いことがわかる。試験評価したスラグの表面は、銅の素地(Cu)、ニッケル(Ni)、金(Au)、炭化珪素(SiC)、二酸化珪素(SiO₂)の計5種類で、図5に示したと同様の実験温度時間履歴曲線により加熱流束を評価した。これらの表面コーティングはすべてイオンプレーティング法により実施した。

計測結果の一覧表を表1に、入力エンタルピに対する熱流束値測定結果を図6に示す。表1には、使用した各スラグの重量、加熱時、冷却時の温度勾配、計測範囲、測定熱流束値等を示した。実験は、空気流量を12g/sとして、電流値を300Aと500Aの二つの設定条件について行った。図6の横軸方向の入力エンタルピのばらつきはアーク電圧、冷却水水温測定誤差等による入力効率の変動等に由来する。

スラグ表面のコーティングには、NiおよびSiO₂をそれ

ぞれ代表的な高触媒性および低触媒性の表面として選択した^{1,2)}。Ni表面は、一般に1000 程度までの加熱には耐酸化性も良好と考えられており、高い触媒性の参照用表面として採用されている⁴⁾。今回の実験でも、Ni表面では、二組の実験条件のそれぞれの中で、ばらつきはあるが最も高い熱流束が得られた。しかし、試験後の観察では表面の黄褐色化がみられ、酸化がデータのばらつきの原因となった可能性がある。SiO₂については非常に低い熱流束値が得られ、ガラス表面の低触媒性が裏づけられた。Au表面の熱流束は、文献データから予測される通り、これらの中間的な値を示した²⁾。Cu表面では、酸化の進行が予測され、また生成される酸化物層(Cu₂O(赤色)又はCuO(黒色))の種類によっても触媒効率が異なることが報告されている⁵⁾。本実験での熱流束値はNiと同程度の値が得られている。触媒効率の評価には、表面状態の定義が必要であり、金属表面の取扱いには十分な注意を払わなければならない。SiC表面では、得られた熱流束値は十分低いが、実験後の観察で表面コーティングの飛散が見られた。コーティング層は十分に残存しており表面の変質は見られなかったがコーティング法の検討が必要であろう。

表1に一覧表で示しているスラグ式カロリメータの計測データで、スラグの熱損失の目安となる加熱時と冷却時の勾配の比率は、最大21%あり、熱損失許容基準の5%より全般に大きい。今回の一連の実験では、スラグの温度応答の観察評価のために気流への曝露を長めに設定しており、到達最高温度が必要以上に高くなった。このために、冷却時には伝導損失以外に放射損失もかなり影響した可能性がある。スラグの絶縁には設計上も実験手順上も十分な配慮を行っており、また実験値で評価したピオ数は0.03程度以下となり設計要求を満たしている。スラグ内部の温度勾配検討のために、赤外線温度計によりスラグ温度と表面温度の同時計測を試みたが、現用の温度計は応答速度が遅く、曝露時間にたいして十分なサンプリングレートが得られなかった。Ni等の表面の酸化現象の検討のためにもスラグの表面の温度計測値の取得が望ましい。

以上の考察より、今回製作したスラグ式カロリメータは設計目標を満足しており、実験点数の増加、再現性の確認等に不十分な点もあるが、熱流束計測値はおおむね妥当な範囲にあると考えられる。図6において、これらスラグ式カロリメータの結果とガードン式カロリメータの計測値の比較を示す。データ点は、CuH(40半球型スラグ式カロリメータ)以外はすべて40の平頭型カロリメータの値である。前述のようにガードンゲージの対流加熱環境下での適用性については従来十分な議論がなく、アーク加熱気流のような高エンタルピ気流中での測

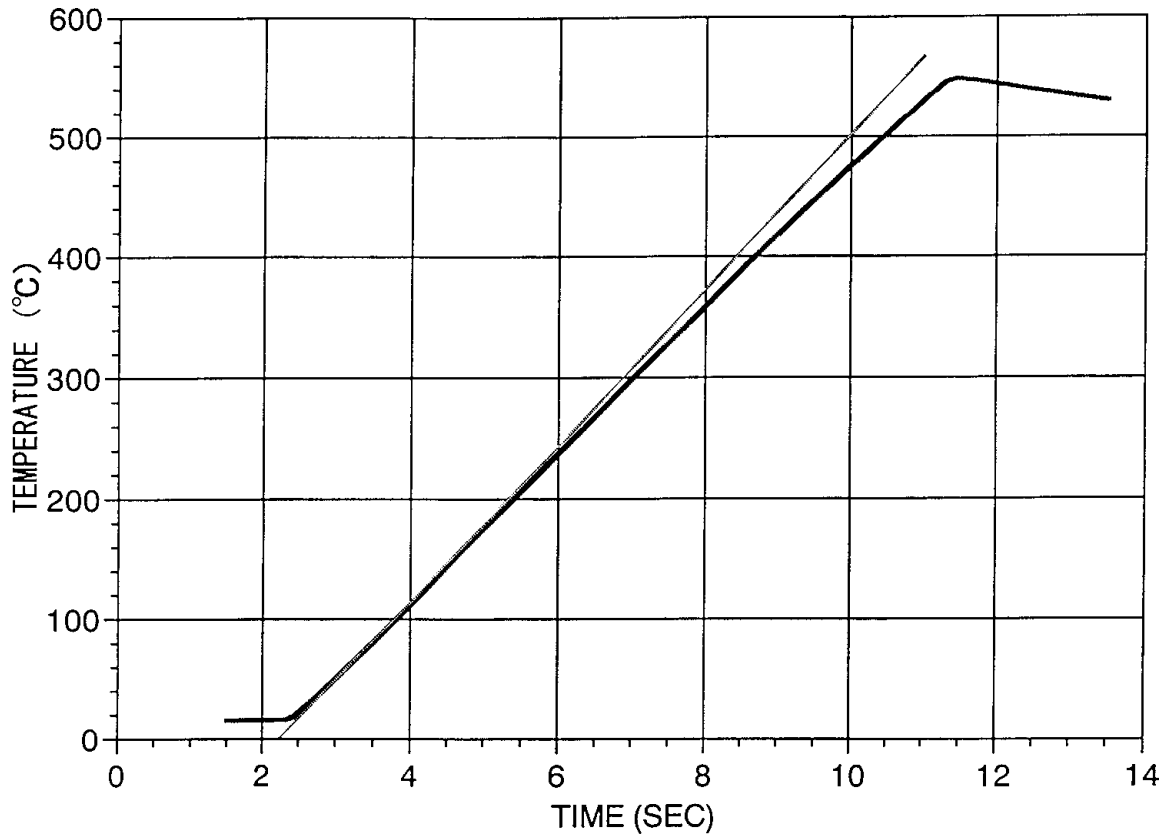


図5(a) スラグカロリメータの温度・時間履歴(ニッケル)

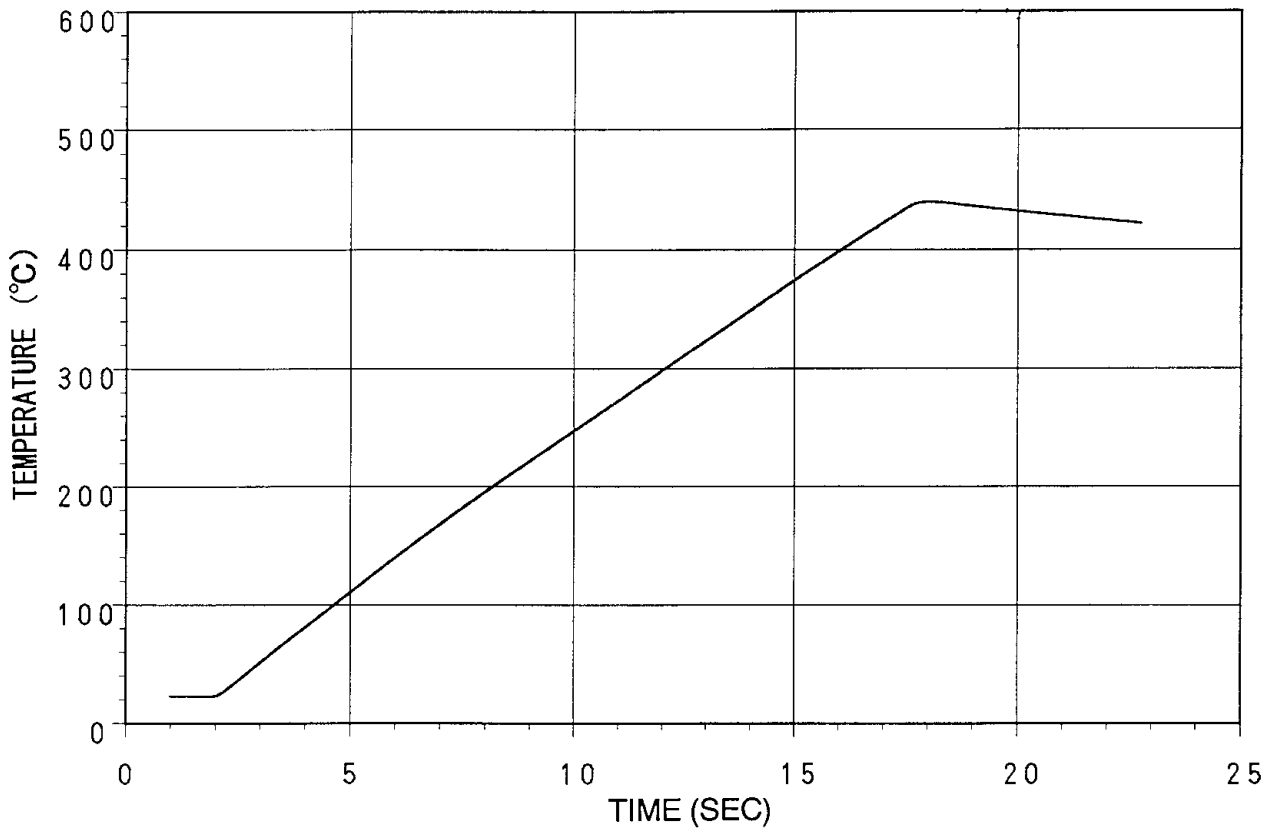


図5(b) スラグカロリメータの温度・時間履歴(二酸化珪素)

定値の妥当性が評価出来なかった。図6における計測値の比較よりガードンとスラグの熱流束計測値それぞれの平均値どうしの間はずれは最大約 1.8 倍程度以内であることがわかる。使用しているガードンゲージのセンサ面積はスラグ加熱面面積（直径 12mm）に比して非常に小さく（直径約0.5mm）局所的計測を行っていること、校正が不明なこと、表面触媒効率が不明なこと等を考慮すると、計測原理の異なるこれら二つのカロリメータの

熱流束計測値は妥当な範囲に収まっていると考えられる。以上の議論は、よどみ点での計測によるものであり、流れがゲージに角度をもって入射する場合には注意が必要である。また、使用するゲージの感度も重要な要素である⁷⁾。プローブ位置でのピトー圧、熱流束の径方向分布の均一性は実験的に確認しているが、このような均一分布の場合にもエンタルピー、流速のコアリングが存在しうるとの議論もあり¹⁵⁾、気流パラメータの計測の充実が

表1 スラグカロリメータ計測結果

Run No.	Slug No.	Slug 重量 (g)	dT/dt (°C/S)	温度範囲 (°C)	熱流束 q (MW/m ²)	最高温度	dT/dt (°C/S)	(%)	温度範囲 (°C)
333	Cu-1	5.5335	60.146	30-320	1.185	482	-7.777	13%	478-462.4
	Ni-1	5.6498	—	—	—	—	—	—	—
334	Ni-2	5.624	63.254	100-200	1.267	548	-9.355	15%	543.6-534.5
335	Au-1	5.6295	49.921	100-200	1.001	403	-3.224	6%	339.5-296.2
	SiC-1	5.62665	32.517	100-200	0.6515	—	—	—	—
336	Cu-2	5.61618	43.866	100-200	0.8773	a470	-5.173	12%	—
	SiO ₂ -1	5.47567	28.391	100-200	0.5536	a440	-4.133	15%	—
337	Cu-3H	7.21766	111.35	100-200	2.862	561	-15.39	14%	549-534
	Ni-3	5.62064	82.093	100-200	1.643	578	-17.59	21%	576-559
373	Ni-4	5.62578	41.065	100-200	0.8227	—	—	—	—
374	SiO ₂ -2	5.62857	27.626	100-200	0.5537	369	-0.47	2%	368.4-367.6

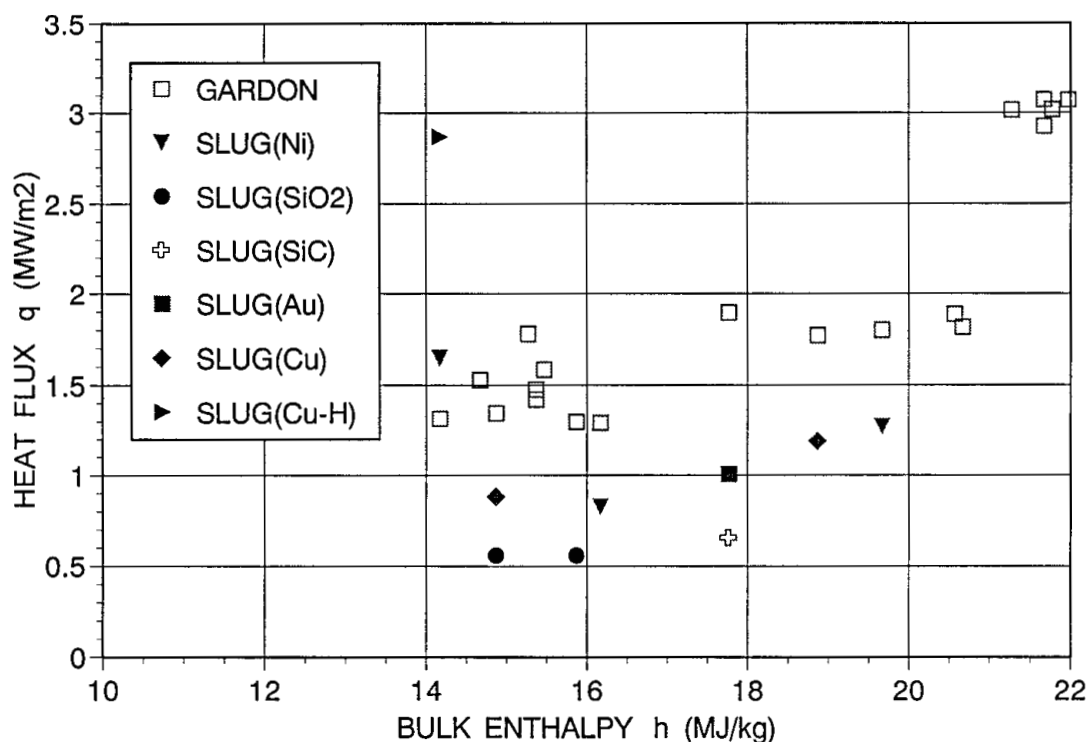


図6 熱流束計測結果（40 平頭カロリメータ）

望まれる。

6. まとめ

熱流束計測技術の検討のために集中熱容量(スラグ)式カロリメータを製作し、750kWアーク加熱風洞気流の熱流束を計測し、ガードン式カロリメータの計測値との比較により計測値の妥当性を評価した。スラグ式カロリメータの計測については、供試体(スラグ)表面の微視的管理が十分でない計測精度が大きく影響されることが指摘されている^{1, 2, 14)}。表面の管理には十分な注意を払い、計測誤差の減少に努めた。本実験により以下の知見が得られた。

- (1) 集中熱容量(スラグ)式カロリメータの設計、製作について多くの経験が得られた。また、スラグ表面の製作、管理について知見が得られ、アーク加熱気流中での運用、計測技術が確立出来た。
- (2) Ni, Au, SiO₂等のスラグ表面コーティング種類の熱流束計測値への効果を計測比較した。各表面に対応する熱流束計測の序列は、Ni ~ Cu > Au > SiC ~ SiO₂となり、報告されている表面触媒効率実験結果からの予測と一致する結果が得られた。Ni, Cuの金属系コーティング表面では酸化の影響が大きいと思われる、表面の定義付が課題である。
- (3) 異なる計測原理に基づくカロリメータ、即ち、スラグ式とガードン式カロリメータの熱流束計測値の比較によりアーク加熱気流の熱流束測定値の妥当性を評価した。ガードン式カロリメータの平均的計測値はスラグ式カロリメータの値の約1.8倍以内に収まった。それぞれの誤差要因等を考慮するとこれらの結果は妥当な範囲にあると思われる。

以上、カロリメータによる熱流束計測を計測技術的に評価したが、今後の方針としては、計測精度の一層の向上を目指して検討を進めるとともに、分光計測等による自由流、衝撃層の気流諸特性量を用いて流れ場の解析、材料表面の触媒反応係数の決定等に適用していく予定である。

7. 参考文献

- 1) Pope, R.B. : Stagnation-Point Convective Heat Transfer in Frozen Boundary Layers, AIAA J., Vol.6, No.4, April 1968, pp. 619-626.
- 2) Anderson, L.A. : Effect of Surface Catalytic Activity on Stagnation Heat-Transfer Rates, AIAA J., Vol.11, No.5, May 1973, pp. 649-656.
- 3) Scott, C.D. : Measured Catalycities of Various Candidate Space Shuttle Thermal Protection System Coatings at Low Temperatures, NASA TN D-7113, March

- 1973.
- 4) Scott, C.D. : Catalytic Recombination of Nitrogen and Oxygen on Iron-Cobalt-Chromia Spinel, AIAA-83-0585, 1983.
- 5) Stöckle, T., Auweter-Kurtz, M. and Laure, S. : Material Catalysis in High Enthalpy Air Flows, AIAA 96-1904, 1996.
- 6) Brookley, C.E., and Liller, C.A. : Convective Heat Flux Gage Measurements in Air at Flows up to 7.1 Liters/sec and Temperatures up to 540 K, ISA Paper #94-1039, Proceedings of the 40th International Instrumentation Symposium, 1994, pp. 303-316.
- 7) 渡辺泰夫、松崎貴至、石田清道、三保和之、福井利夫、濱村修 : アーク加熱気流の熱流束計測、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-38、1998、pp. 67-78.
- 8) Diller, T.E. : Advances in Heat Flux Measurements, Advances in Heat Transfer, Vol.23, Academic Press, 1993, pp. 279-368.
- 9) 望月貞成、村田章 : 伝熱工学の基礎、日新出版、1994、pp. 46-47.
- 10) ASTM Standard E457-72, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, 1995.
- 11) Watanabe, Y., Matsuzaki, T., Ishida, K., Itagaki, H., Yudate, K., and Yoshinaka, T. : Characteristics of the 750kW Arc Heated Wind Tunnel, Proceedings of the 19th ISTS Yokohama, 94-d-36, 1994.
- 12) Hiester, N.K., and Clark, C.F. : Feasibility of Standard Evaluation Procedures for Ablating Materials, NASA CR-379, Feb.1966.
- 13) Scott, C.D. : Survey of Measurements of Flow Properties in Arcjets, J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol.7, No.1, 1993, pp. 9-24.
- 14) Winkler, E.L. and Sheldahl, R.E. : Influence of Calorimeter Surface Treatment on Heat-Transfer Measurements in Arc-Heated Test Streams, AIAA J., Vol.4, No.4, April 1966, pp. 715-716.
- 15) Park, C. : Experimental Evaluation of Real-Gas Phenomena in High-Temperature Aerothermal Test Facilities : A Review, AIAA-96-2207, 1996

航空宇宙技術研究所報告1388号

平成11年6月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)40-3075 ㊦182-8522
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

©禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

