

No.7

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 (航空宇宙技術研究所)

三保和之 福井利夫 (宇宙開発事業団)

濱村 修 (AES)

Heat Flux Measurements in an Arc Heated Flow

Y.Watanabe,T.Matsuzaki,K.Ishida(NAL)

K.Miho,T.Fukui(NASDA)

O.Hamamura(AES)

Key Words : High Enthalpy Flows,Arc Heated Wind Tunnel

概要

熱的、化学的非平衡を伴う、アーク加熱された高エンタルピ気流中でのカロリメータによる熱流束の計測は非常に困難を伴う。気相の反応に加えて、プローブの表面状態（触媒性、放射率等）が種々の影響を及ぼす。本報告では、750 kWアーク加熱風洞で標準的に使用しているガードンゲージをセンサとして用いたガードン式カロリメータの指示値の妥当性を評価するために、アーク加熱気流計測への適用上の諸問題を検討した。計測原理の異なる熱容量式（スラグ）カロリメータの表面にNi、SiO₂等をコーティングして計測した熱流束値との比較により、ガードンゲージは表面特性等の不明確さの範囲内で妥当な結果を与えることがわかった。

1. はじめに

熱防御系材料の開発は宇宙往還機の設計の鍵を握る最重要課題であり、再突入時の機体周り空力加熱環境を長時間模擬出来るアーク加熱式風洞での機体表面防熱材の開発・評価試験の役割は極めて重要である。我が国の宇宙往還技術試験機（HOPE-X）のための防熱材評価、開発試験も現在750 kWアーク加熱風洞で進みつつある。このような耐熱材料の熱応答評価試験では、基本的な試験パラメータとしては、試験機の予定軌道に対応して、材料の熱化学的応答を支配する表面温度を決定する加熱率と澱点圧力履歴を想定して評価が進められる。一方、アーク加熱された超音速高エンタルピ気流は、解離、電離等を伴う反応性非平衡流れであり、加熱率も含めた気流特性諸量を正確に把握する必要があるが、実現される再

突入環境の模擬能力を高精度で評価するには現状計測技術では不十分な点が多い。特に、最近議論の多い防熱材料表面の触媒効果等の実験を定量的に評価・解析し設計に反映させるためには、表面反応に寄与する原子濃度・成分温度等の分子レベルの詳細データが必要となり、各種プローブやレーザー利用の新しい計測技術の開発を含めた非接触物理計測技術等の適用による多角的な実験計測と熱空気力学的解析とによる包括的な気流の特性付けが必要となる。このような気流診断技術の研究の推進、アーク加熱気流特性データの精密化により、材料試験環境条件の定量化、信頼性の向上が進み、最終的には宇宙往還機等の機体設計の効率化（過剰設計の排除）への寄与も期待される¹⁾。

加熱率（熱流束）の計測技術の開発は、アーク加熱風洞が宇宙開発のための主要設備として活発

に使用され始めた '60年代以来の最重要課題であり、その高速、高エンタルピ気流環境での主要研究項目としては、高温、高加熱流束下での時間的、空間的に分解された供試体まわりの高熱流束計測等があげられる。初期の計測においては、熱容量式（通称スラグ式）カロリメータが主要なセンサとして熱伝達と表面の触媒効果の熱伝達に及ぼす影響の評価に使用された²⁻⁴⁾。1953年に Gardon によって放射の計測用に開発された円形膜熱流束ゲージ（通称ガードンゲージ）は⁵⁾、その後対流環境への適用が行われ、その便宜性の故に各種流れ場での熱伝達計測に用いられてきている。円形膜製作技術の進歩により、アーク加熱気流のような高加熱環境下で使用可能なゲージモデルも開発提供され、多くのアーク風洞で広く使用されるようになってきている。その他、あまり一般的ではないが、同軸型カロリメータ、ヌルポイントカロリメータ、Schmidt-Boelter gage 等のアーク加熱気流への適用、解析が主として AEDC で進められている。しかし、アーク加熱風洞のような高エンタルピ超音速の厳しい気流条件下でのこれら加熱率計測用センサ、カロリメータの適用性については十分な議論は行われていない。多くのアーク風洞においては、使用するプローブ、センサ類はそれぞれ独自の方法、基準により製作、校正等が行われており、計測結果の汎用性、評価基準が明確でない。評価試験に用いる風洞の特性の相違（センサの独自性）による試験データのばらつきを統一的に比較・評価する試みとしては、アプレータの風洞試験結果の相関化を目的として、標準カロリメータとピトー管の配布により、米国内の多数のアーク加熱式風洞における気流データの比較検討 (round robin study) を実施した例がある⁶⁾。この例では、標準スラグカロリメータとピトー管による澱点加熱率と圧力を用いて試験材料の質量損失率の最適相関化評価が得られている。

一方、本風洞の規模では試験可能な材料寸法は材料要素レベルに限定され、機体構造熱設計データの取得のため等には外国の大型アーク風洞を利

用する等の必要がありうる。このような場合には、外国風洞試験での気流条件の確認が必須であるが、上記のような理由による不明確さが避けられない。試験パラメータのうち、圧力の測定は比較的問題が少ないが、カロリメータプローブを用いて計測する加熱率の計測は問題点が多くデータの評価には慎重な検討が必要であり、センサ特性、プローブ特性、運用解析技術等についての基礎知識、経験を十分に蓄積して計測値の対応比較の信頼性確立のための基礎を確立しておく必要がある。また、耐熱材の表面磨耗率のような風洞試験データを外国の風洞で得られたデータと比較するような場合には、表面反応に寄与する原子濃度等の詳細データ等の知識も必要となる。

近年各種計測機器の発達は目覚ましく、熱伝達計測においても新しい概念に基づいた各種センサの開発適用も進んでおり、各種環境への適用性の評価も行われている^{7, 8)}。本報告では、750 kW アーク加熱風洞での気流の診断技術の開発の一環として進めている熱流束計測において、現在採用しているカロリメータの特性、適用技術等の問題点をまとめた。そのなかで最も濫用するガードンゲージをセンサとしたカロリメータ（ガードン式カロリメータ）について、特性、適用技術、実験結果等の問題点を整理し、熱容量式（スラグ）カロリメータの計測値との比較により測定値の妥当性を評価した。

2. 加熱率センサ特性

熱流束の計測に用いる温度センサは、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熱容量式（スラグ）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およ

び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、ガードンゲージ式、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。これらは基本的に気流中での冷熱壁への熱流束の計測を行うものである。防熱材料評価試験や宇宙実験等での材料表面や機体の温熱壁への熱流束評価のために、耐熱タイル等の防熱材料への埋めこみ熱電対を使用し熱伝導解析により加熱流束を求める表面加熱率計測技術も実環境適用技術として極めて重要であるが本報告には含めない。以下に上記三種類のカロリメータの計測原理、構造、特性、問題点等を述べる^{8, 9)}。

2. 1 円形膜熱流束ゲージ（ガードンゲージ）

種々の環境下での熱流束の計測に適用される汎用のゲージで、考案者の R.Gardon にちなんでガードンゲージと呼ばれる。構造は、図1の概念図に示すようにヒートシンクとして働く銅製の円筒とそれに周辺部で接するコンスタンタン円形薄膜感熱部よりなる。膜の中心には細い銅線が接続され、周辺および中心点がそれぞれ二金属の熱起電力の差による銅コンスタンタン熱電対を構成する。膜に入射吸収される熱流束は低温の周辺円筒部にむかって径方向に伝達されるため、膜内には図に示すような入射熱流束に対応した平衡温度分布が形成される。この膜中心と周辺の温度差は両熱電対により起電力の差 ΔE として検出され、実験的に求められた校正曲線を用いてこれと比例関係にある全入射熱流束 $q = K E$ に変換される。Kは校正定数である。本体温度が 228 から 508K の間に保たれば線形性は保証され、温度補正は必要でない。従って、アーク加熱気流のように高温、高加熱率環境で使用する際には、本体を一定基準温度に保ち接点の溶融を防ぐために水冷が必要となる。応答時間は膜の面積（径）の関数で $\tau = 0.0094 \times 10^{-6} D^2 s$ である。感度は $E/q = 19.3 D^2 / \delta$ で表わされる（Eは mV、qは W/m²、膜の直径 Dと厚さ δ は m）。

このゲージの基本的な特性については、中心の

ワイヤよりの熱損失、ディスクの二次元温度分布、特性の温度依存性、応答性、ゲージの存在による温度分布の乱れ等の種々の問題点についての解析がなされている。放射/対流複合環境下での計測においては、通常放射熱源のみにより行われている校正に基づく指示値誤差、冷却系使用時のゲージとプローブ本体との温度差により誘起される誤差等の可能性が指摘されている。また、対流環境下の計測において、流れのゲージ表面への入射角に由来する指示値誤差にも十分注意を払う必要がある。これらの問題点を十分に考慮して適切なゲージを選択し、実環境での計測・解析を行わねばならない。

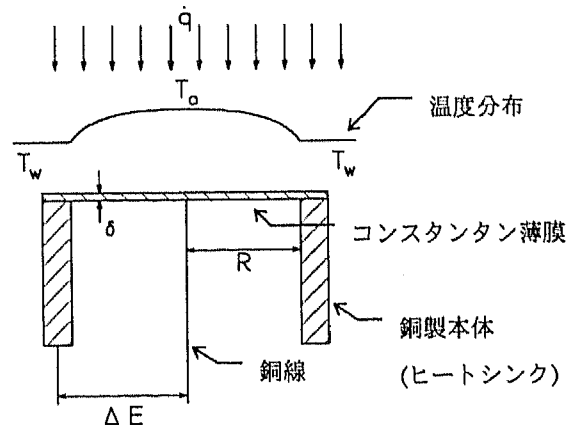


図1. 円形膜熱流束ゲージ(Gardon gage) 計測概念

2. 2 集中熱容量型（スラグ）カロリメータ

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、初期のアーク加熱気流の熱伝達計測で主として澱点における熱流束、特に表面の触媒効果の評価の計測に多用された²⁻⁴⁾。現在では、ガードンゲージのような汎用で使い勝手のよいセンサが容易に入手出来るようになり利用頻度は減っているが、上述のような表面現象の計測には有用であると思われる¹⁰⁾。代表的な構造を図2(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が十分に大き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、

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

と書ける (m 、 C 、 A はそれぞれスラグの質量、比熱、表面積)。 $q(\text{loss})$ が無視できて、熱流束が定常ならば (2) 式が得られ、

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

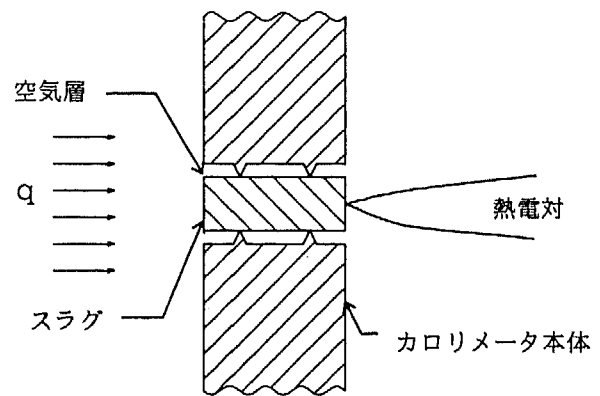
スラグの温度と加熱時間には線形関係が成り立つ。熱伝達係数 h が一様な対流熱流束の場合にも、 $t/\tau \ll 1$ (時定数 $\tau = mC/hA$) であれば同様の関係が得られる¹¹⁾。即ち、図 2 (b) のような実験的に得られる温度-時間履歴曲線の直線部の勾配より加熱流束 q が求められる。

スラグカロリメータの利点は、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。

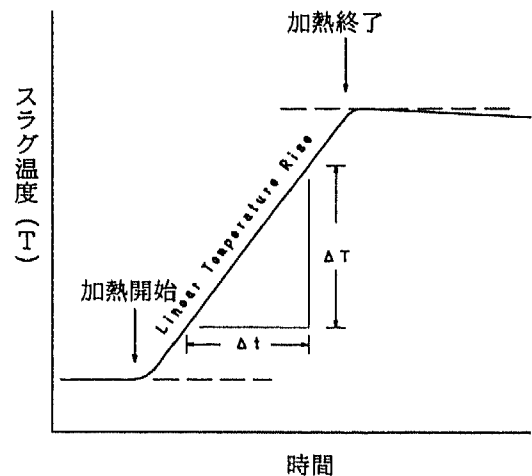
2.3 ヌルポイントカロリメータ

ヌルポイントカロリメータの計測概念を図 3 に示す。これは計測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。センサ本体の裏面より穿孔され、加熱表面より b の距離に達する半径 a の円筒形の空洞の底面 (null-point) で熱電対により温度 (T_b) を測定する。この点での温度履歴は、後方の空洞の存在が本体内への熱伝導に及ぼす補償効果により、空洞のない同一空力形状物体の表面温度 (T_s) の履歴に等しいと考えられることより、この温度履歴を用いて半無限物体の一次元熱伝導の逆問題を解析し表面の熱伝達率を求める。センサ本体は、高伝導率無酸素銅 (OFHC) 製で球頭コーンまたは半球円筒模型の淵点に埋めこんで使用される。

この形式のカロリメータはあまり一般的には使用されていないが、同軸型カロリメータ (Coaxial



(a) 構造図



(b) 温度履歴

図 2. 熱容量式 (スラグ) カロリメータ計測概念

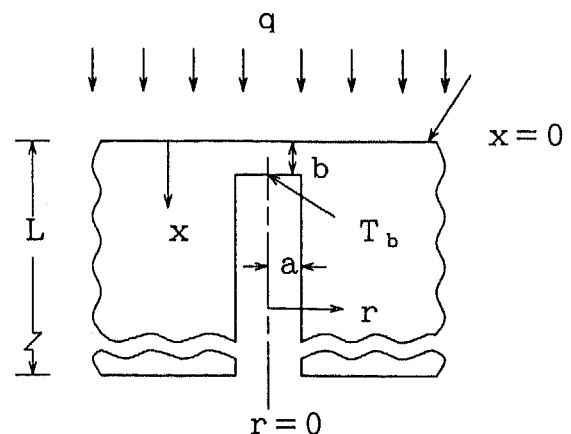


図 3. ヌルポイントカロリメータ計測概念

calorimeter) とともに A E D C のアーク加熱設備で長期にわたって利用され、詳細な特性の評価がなされている¹²⁾。本風洞においてもヌルポイントカロリメータを導入し分析評価を実施中であるが、以下の議論からは除き、結果は別の機会に報告することとする。

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 4 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ーコンストリクタバック (最大 3 バック) 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。調整範囲は夫々 300-700A、8-20g 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 13 に報告されている。

供試体模型、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。材料加熱試験では、赤外線温度計により供試材料表面の温度を監視する。

4. 実験用カロリメータプローブ

カロリメータは、材料評価試験時の加熱条件評価のために、材料供試体と形状、寸法が一致するものを使用する必要があり、試験条件にあわせて形状種類も各種準備されている。ここでは、現用のカロリメータについて、構造、形状、寸法等を述べる。ガードン式およびスラグ式カロリメータはいずれも上記回転式模型支持装置に装着される。

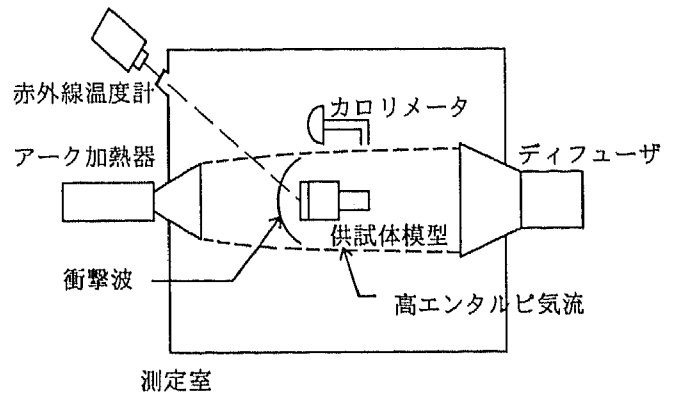


図 4. アーク加熱風洞実験配置

4.1 ガードン式カロリメータ

現用のガードンゲージ搭載型のカロリメータプローブは次の 4 種類である。

- (1) 直径 40Φ 平頭円柱型プローブ (G1) :
前面と側面にゲージを 7 個分布
- (2) 直径 40Φ 半球円柱型プローブ (G2) :
前面から側面にゲージを 5 個分布
- (3) 直径 40Φ 平頭円柱型プローブ (G3) :
澱点一点のみ
- (4) 直径 12Φ 半球円柱型プローブ (G4) :
澱点一点のみ

図 5 に (1) の平頭円柱型プローブ (G1) の構造を示す。G1 (G2) の側面に装着したゲージは、前面装備のものに比してより高感度のものを使用している。使用ゲージはいずれも Thermogage 社製で、冷却はプローブ本体の水冷を共用している。G1 には圧力分布を同時に計測するための圧力孔 4 点も配置されている。図 6 に示す G3 のゲージは Hycal 社製の水冷型である。G4 は気流内の加熱率分布計測用プローブで、使用ゲージは Medtherm 社製である。各使用ゲージは、納入時に放射熱源を用いて校正され感度校正曲線が提供されている。図 7 に G1 の澱点中心のゲージ (T1) の校正曲線を示す。計測された出力電圧は、これに従って熱流束に変換する。表 1 にこれらの特性をまとめた。今回の実験では G2 のカロリメータは使用せず、また澱点データのみを評価した。

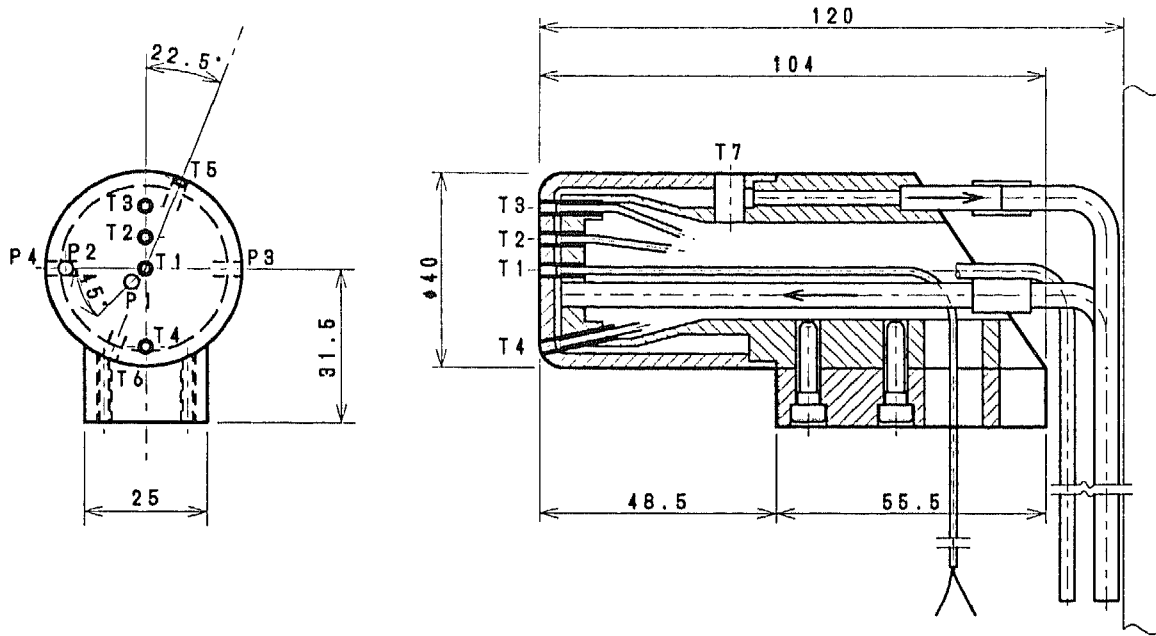


図5. ガードン式カロリメータプローブ (G1)

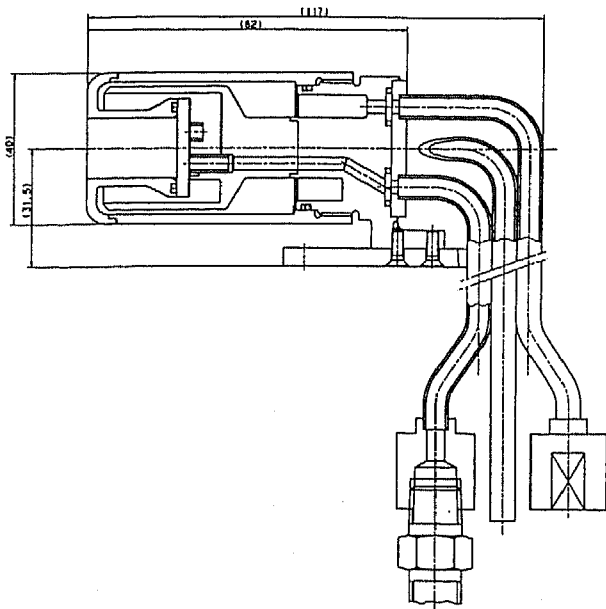


図6. ガードン式カロリメータプローブ (G3)

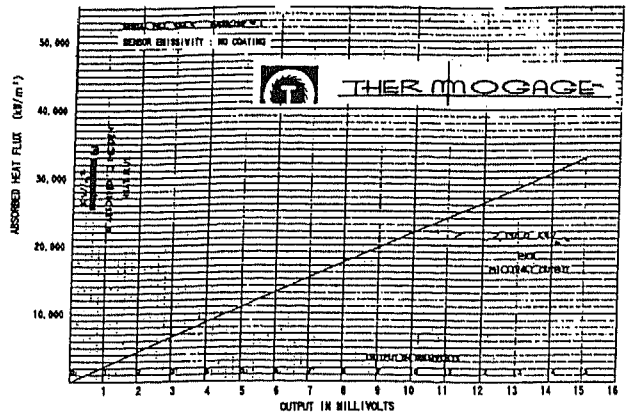


図7. ガードンゲージ校正曲線 (G1)

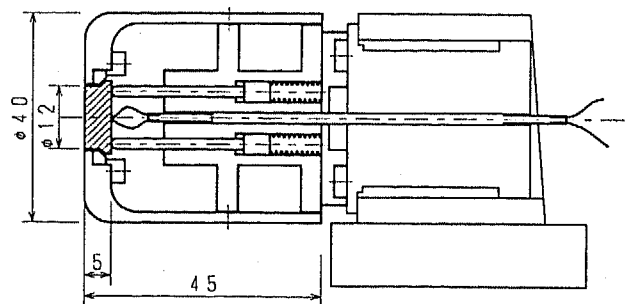


図8. スラグ式カロリメータ組立図

表1. ガードン式カロリメータ特性

カロリメータ	G 1	G 2	G 3	G 4
型式	φ 4 0 平頭円柱	φ 4 0 半球円柱	φ 4 0 平頭円柱	φ 1 2 半球円柱
ゲージ配置	分布 (7 箇所)	分布 (5 箇所)	澱点	澱点
澱点ゲージモデル	Thermogage 1000-92	Thermogage 2000-60	Hy-Cal C-1312-A-500 (水冷式)	Medtherm 120-21191
感度 (MW/m ²)/mV output	2. 1 9 0 (澱点)	0. 9 1 (澱点)	0. 6 2 4	3. 1 7 0
ゲージ半径 R	0. 0 1 0"	0. 0 1 0"	——	——
ゲージ厚 δ	——	1 MIL	——	——
応答時間	2 0 ms		5 0 ms	
校正用コティング 放射率	NO COATING	0.82 (emissivity)	0.89 (absorptivity)	0.92 (absorptivity)

表2. 熱流束値比較

	カロリメータ	G 1	G 3	SLUG (Ni-coating)
1	q (MW/m ²)	1. 7 6 5	1. 8 9	1. 2 6 7
2	q (MW/m ²)	——	1. 3 1	1. 6 4 3
	q _m /q _r	1. 0 1 4 ~ 1. 0 0 3 6 (T _∞ =1000~3000°K)		

4. 2 スラグ式カロリメータ

平頭円柱型スラグ式カロリメータの構造を図 8 に示す。形状は平頭および半球型の二種類を制作し、データ比較評価のためにガードン式と形状を一致させている。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保持されている。この構造により、スラグと本体とは空気層で熱的に絶縁され、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。スラグ裏面には熱電対が装着され、気流投入時の温度の時間履歴を計測する。

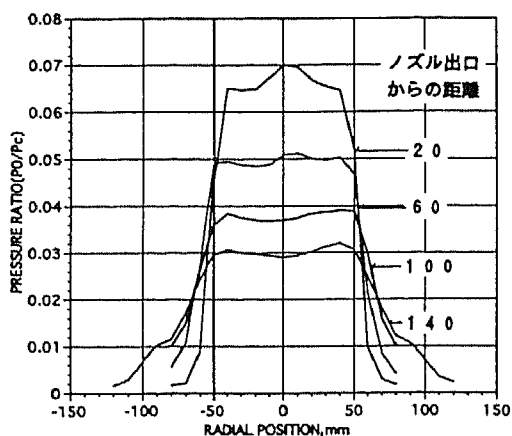


図 9. ピトー圧分布

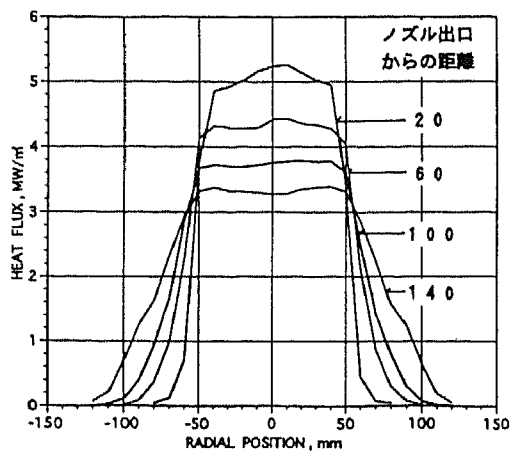


図 10. 加熱率分布

5. 実験結果と討論

気流中にプローブを投入して気流状態特性量の計測評価を行う際には、測定対象位置でのセンサ表面の気流の一様性を確認する必要がある。直径 12.5mm の半球形状ピトー管およびカロリメータプローブ (G 4) を用いて、気流内各断面でのピトー圧および加熱率の径方向分布を測定した結果を図 9,10 に示す。出口径 115mm のノズル出口面より 20mm 下流断面ではまだコアリングが認められるが、60,100,140mm の各断面では多少の非対称性は認められるものの径方向にほぼ一様な気流が得られている。また、直径 50mm までの模型については、投入時の気流の縮流等は発生しないことが確認されていることより、ノズル出口より 104mm の位置で行った今回の実験におけるセンサ面での気流の一様性は十分と思われる。

図 11,12 にガードン式カロリメータ G 1 と G 3 の同一試験条件における測点での出力電圧の時間履歴を示す。G 1 は Thermogage 社製 (Model

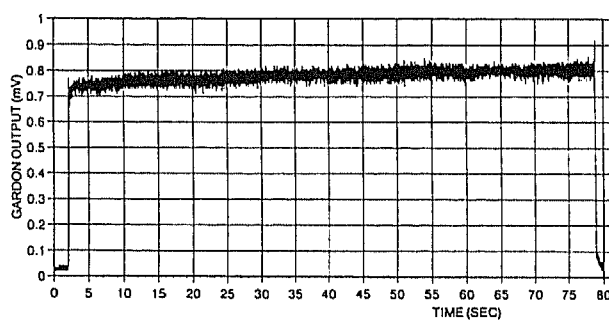


図 11. ガードン式カロリメータ出力時間履歴 (G 1)

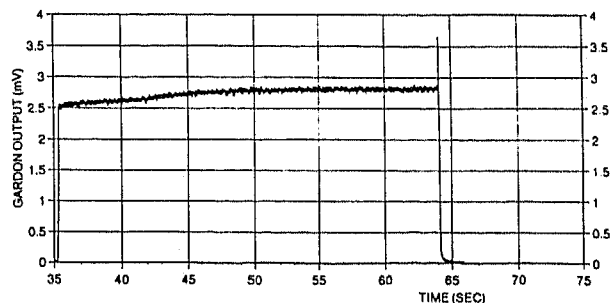


図 12. ガードン式カロリメータ出力時間履歴 (G 3)

1000-92)、G3はHy-Cal社製水冷付ゲージ(C-1312-A-500)を使用している。感度はそれぞれmV出力当り2190kW/m²、624kW/m²、応答時間は20ms及び50msである。測定手順は、アーク放電を起動して電流、作動気体流量を所定の値に設定し、条件の安定を確認後回転式模型投入装置によりプローブを急速に気流中心に投入し、出力の安定を確認して計測を終了する。気流条件はすみやかに安定するのに比して、記録されたカロリメータの出力電圧の応答は非常に遅い。ゲージのみの応答は十分に早く、また再現性もよいことが保証されており⁹⁾、気流条件の再現性もおおむね良好なので、この原因はプローブの構造に由来すると思われる。G1プローブでは、センサをプローブ本体に埋めこみ(メーカの独自技術による)全体を共通に冷却するが、センサのヒートシンク部は本体との接触冷却となるため、両者の間に温度差が生ずる可能性がある。G3プローブは、ヒートシンク部は独自の冷却回路を持っているのでこの冷却に不足がなければ指示値に誤差は生じない。冷却付センサ自体はさらにプローブ本体に埋めこまれるのでここで接触温度差が生ずる可能性はある。従って、出力応答の遅れはプローブがアーク加熱気流に投入された際にこれらの温度環境下でセンサのヒートシンク部の温度T_wが安定化するための緩和時間によるものと推定される。この特性は入力電力に依存せず、最大入力エンタルピ時でも出力が安定するまでの応答時間の短縮は見られなかった。風洞試験の効率的運用のためには応答時間は短縮されることが望ましい。G1とG2の出力安定部分より校正データにより求められた熱流束値は1.75と1.88MW/m²でほぼ一致した値が得られている。

ガードンゲージによる対流流れ場の熱流束計測においては、表面に温度分布があるために対流熱流束が正確に検知出来ないことが問題である。対流または対流/放射の複合環境での計測誤差については、低速での実験的、解析的研究が進められつつはあるが^{14, 15)}、適用限界は明確でない。特

に厳しい試験環境であるアーク加熱気流でのカロリメータ適用性についての議論は、AEDCにおけるヌルポイントカロリメータの特性評価が唯一のものであり¹²⁾、ガードンゲージのように有用性の高いセンサの適用性は十分に検討を深める必要がある。Kuo等¹⁴⁾の解析に従うと、対流/放射複合環境での円形膜の熱釣合い式は、

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q_r}{\delta k} + \frac{h}{\delta k} (T_\infty - T) = 0 \quad (3)$$

と書ける。rは膜中心より測り、r=RでT=T_w、r=0でdT/dR=0が境界条件である。(3)式では薄膜厚さ方向の温度勾配、裏面および中心ワイヤからの熱損失は無視、対流熱伝達係数hは膜面上で一定との仮定がなされている。この式で、h=0とおけば膜面への入射熱流束が放射のみの場合(q=q_r)の解として、膜中心と周辺の温度差ΔT=qR²/(4δk)が得られ、計測時出力と直接に関連づけられる。これはGardonの解で⁵⁾、図7に示す比例関係を表している。(3)式の対流も含めた場合の解より、対流/放射複合環境での全熱流束q_mは、

$$q_m = q_r (1 + (mR/2)^2) / (1 + (mR/4)^2) \quad (4)$$

と表わされる。これより、計測出力を放射のみによる校正カーブで熱流束値に変換したときの誤差は、ゲージ膜の半径R、厚さδ、熱伝導率k及び対流熱伝達係数hを用いて無次元パラメータmR(m=√h/kδ)の関数として求められる。アーク加熱気流ではhが大きいのでmRは十分小さくなく、(4)の近似式の成立性が十分ではないが、上記G1カロリメータのデータにこれを適用してみると、R=0.000254m、D/δ=10、衝撃波背後の気体温度3000Kとして、誤差は1%以下となる。これはKuo等の指摘通り、主として膜の径が小さいことに起因しており、従って、膜径の小さい低感度ゲージ(大熱流束計測用)の使用が計測誤差の低減には有利であることを示している。図11,12と表1に示すように、現用カロリメータではG1

の方が G3 よりもよりよい結果を与えると思われる（出力電圧は、膜面温度差 ΔT に比例する）。一般に、膜の寸法データは製作者より提供されないが、Brookley 等¹⁵⁾によると、 $1\text{MW}/\text{m}^2/\text{mV}$ 出力の感度のゲージ寸法は直径 $5.1 \times 10^{-4}\text{m}$ ($510\ \mu\text{m}$)、厚さ $3.05 \times 10^{-5}\text{m}$ ($30.5\ \mu\text{m}$)、 $D/d=16.6$ となっている。10mV 出力時の温度差は 167°C であるが、アーク加熱気流では衝撃波背後の温度が高いため、低感度ゲージ表面温度の対流熱流束計測への影響はより小さいことがこれよりもわかる。但し、ゲージの選択時には、計測感度との兼ね合いを考慮しなければならない。表面温度勾配の小さい低感度ゲージの使用は、平行流環境での対流加熱計測にも有用と思われる。

校正時にセンサ表面に施される高放射率コーティングは、アーク加熱気流のような厳しい気流環境下で使用すると急速に脱落し、またプローブ及びセンサ表面特性も酸化により変化する。しかし、同一試験条件での熱流束値の再現性は良好なので、現在行っているように試験毎に表面の清掃を実施することにより、使用開始後の表面特性はある一定状態に保持することが可能と思われる。

ガードン式カロリメータにより得られた熱流束値の妥当性を評価するために、ガードンゲージとは計測原理の異なるスラグ式カロリメータ（図 8 に示す平頭模型）による熱流束計測を行った。無酸素銅製のスラグ表面にはニッケルコーティングを施した。図 13 に出力測定例を示す。2.2 節の解析法により、直線部の勾配より熱流束を求めた。計測結果の比較を表 2 に示す。1、2 の試験条件は、夫々入力エンタルピ 19.7、14.2MJ/kg に対応している。ガードンゲージは、前述のように表面状態が不明確であるが、同一試験条件に対する再現性はおおむね良好であり、表面条件は安定していることが確認された。スラグカロリメータの熱流束値は、条件 1、2 で、ガードンゲージの値にたいして約 30% 以内にある。表面を高触媒性の Ni でコーティングすることにより、スラグで得られる熱流束値は常時ガードン値を上回ることを期待した

が、条件 1 では逆の結果がえられた。スラグ式カロリメータについては、製作、組立上の困難が多く、実験回数の少なさが結果のばらつきを生じていると思われる。図 14 に、総エンタルピに対するガードン式カロリメータ (G3) の熱流束測定結果を示す。スラグ式カロリメータの測定結果は、前述の Ni コーティングに加えて、極めて低触媒性表面と考えられている SiO_2 及び SiC コーティングの結果も示している。ガードンゲージで得られた熱流束値は、おおむねこれらにはさまれた領域にあり、表面状態を考慮すると妥当な値を示していると判断される。この比較実験により、スラグ式カロリメータの設計、製作、実試験適用技術等についても多くの知見が得られた。この形式のカロリメータの使用については、表面の触媒効果評価への応用可能性を中心に解析、検討を進めつつある。

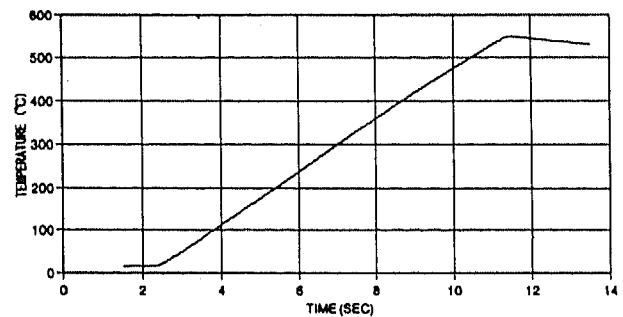


図 13. スラグ式カロリメータ出力

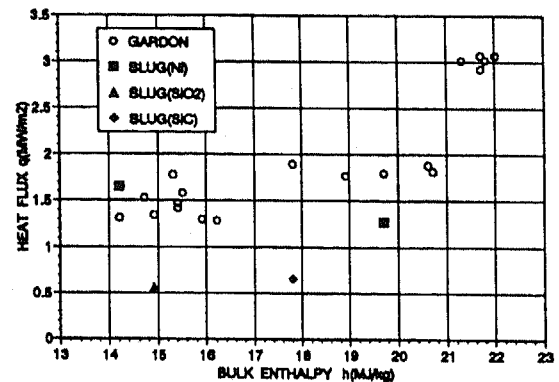


図 14. $\phi 40$ 平頭円柱カロリメータによる熱流束計測結果

模型周りの加熱率分布や平板材料試験に用いるチャンネルノズル側壁での熱流束測定結果解析のためには、流れがガードンゲージのセンサ面に対して平行または角度をもって流入する場合についても、温度分布の歪みの出力への影響等の適用性、センサの選択基準等を十分に把握しておく必要がある^{15, 16)}。解離度の高いアーク加熱気流における加熱量の計測では、表面での触媒反応による再結合加熱の寄与を無視できない。表面反応はプローブ測定では不可避であり、その効果の評定は非接触計測によらねばならない。包括的なセンサ出力検定法として、分光測定による衝撃波層の解析¹⁷⁾を介しての計測等を今後の課題として検討している。

6. まとめ

アーク加熱風洞において現用中のガードン式カロリメータによる熱流束計測値の妥当性の評価を目的として、ガードンゲージのセンサ特性、計測運用技術の評価、問題点の整理を行った。ガードン式カロリメータのアーク加熱気流への適用性について下記の知見を得た。

- (1) ゲージのカロリメータへの組込みには、事前に冷却方法を慎重に吟味して速やかに計測値が安定するように設計、製作する必要がある。
 - (2) 膜径の小さい低感度ゲージの採用により、対流/放射複合環境での計測に放射のみによる校正を用いても計測誤差を極めて小さくできる。低感度ゲージは平行流環境での計測にも有用と思われる。
 - (3) 表面の放射率の変化が校正曲線の使用に与える影響は不明であるが、清掃により表面状態を常時一定に保つことにより、計測値の再現性は保てる。
 - (4) ガードン式カロリメータの計測値は、スラグ式カロリメータの計測値との比較により、表面状態の不明確さを考慮してもほぼ妥当な値を示していると判断される。スラグ式カロリメータ
- については、より多くのデータの蓄積が必要である。
- (5) センサ表面の触媒効果の測定値に及ぼす影響は非接触物理計測により評価する必要がある。分光計測による衝撃波層の解析等が有効な手段と考えられる。

熱容量式、ヌルポイント式カロリメータの適用、データ解析を進め、ガードン式カロリメータで得られたこれらの結果とまとめて、熱流束計測の諸問題の包括的な検討を進めていく予定である。

7. 参考文献

- 1) S.P.Sharma, C.C.Park, M.Newfield, J.Balboni, C.D.Scott, S.Arepalli, and J. Taunk : Arcjet Flow Characterization, AIAA-96-0612,1996.
- 2) R.B.Pope : Stagnation-Point Convective Heat Transfer in Frozen Boundary Layers, AIAA J., Vol.6, No.4, April 1968, pp.619-626.
- 3) L.A.Aderson : Effect of Surface Catalytic Activity on Stagnation Heat-Transfer Rates, AIAA J.,Vol.11,No.5,May 1973,pp.649-656.
- 4) C.D.Scott : Measured Catalycities of Various Candidate Space Shuttle Thermal Protection System Coatings at Low Temperatures, NASA TN D-7113, March 1973.
- 5) R.Gardon : An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation, Rev.Sci.Instrum.,24,1953, pp.366-370.
- 6) N. K. Hiester, and C. F. Clark : Feasibility of Standard Evaluation Procedures for Ablating Materials,NASA CR-379,Feb. 1966.
- 7) D.L.Shultz and T.W.Jones : Heat Transfer Measurements in short duration hypersonic facilities. AGARDograph 165, 1973.
- 8) T. E. Diller ; Advances in Heat Flux Measurements, Advances in Heat Transfer, Vol.23, Academic Press, 1993, pp.279-368.
- 9) ASTM:1995 Annual Book of ASTM Standards,

Vol.15.03, ASTM,1995.

- 10) T. Stöckle, M. Auweter-Kurtz, and S. Laure :
Material Catalysis in High Enthalpy Air
Flows, AIAA 96-1904, 1996.
- 11) 望月貞成、村田章 : 伝熱工学の基礎、日新出
版、1994、pp. 46-47.
- 12) D. B. Carver and C. T. Kidd : Heat-Transfer
Measurement Uncertainty in Arc-Heated
Flows, Proceedings of the 37th International
Instrumentation Symposium, ISA Paper #91-
115, 1991.
- 13) Y. Watanabe, T. Matsuzaki, K. Ishida, H.
Itagaki, K. Yudate, and T. Yoshinaka :
Characteristics of the 750 kW Arc Heated
Wind Tunnel, Proceedings of the 19th ISTS,
Yokohama, 94-d-36, ,1994.
- 14) K.H.Kuo, and A.K.Kulkarni: Analysis of Heat
Flux Measurement by Circular Foil Gages in a
Mixed Convection/Radiation Environment,
ASME / JSME Joint Thermal Engineering
Conference Proceedings, 1991, Vol.5, pp.41-45.
- 15) C.E.Brookley and C.A.Liller: Convective Heat
Flux Gage Measurements in Air at Flows up
to 7.1 Liters/sec and Temperatures up to
540°C, ISA Paper #94-1039, Proceedings of the
40th International Instrumentation
Symposium, 1994, pp.303-316.
- 16) M.F.Young, J.C.LaRue, and J.E.Koency: Effect
of Free-Stream Velocity Vector on the Output
of a Circular Disk Heat Flux Gage, ASME
Paper 83-HT-58, 1983.
- 17) D. S. Babikian, C. Park, and G. A. Raiche :
Spectroscopic Determination of Enthalpy in
an Arc-Jet Wind Tunnel, AIAA 95-0712, 1995.