NAL TR-1446

ISSN 1347-4588
UDC 533.6.011.6
533.6.07
537.52.5

独立行政法人
航空宇宙技術研究所報告
TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1446

アーク加熱チャンネルノズル流の気流診断

石田清道・渡辺泰夫・松崎貴至
伊藤　健・福井利夫・長井遵正

2002年7月

独立行政法人　航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

This document is provided by JAXA.

アーク加熱チャンネルノズル流の気流診断*

石田清道*1，渡辺泰夫*1，松崎貴至*1
伊藤　健*1，福井利夫*2，長井遵正*3

Diagnostic Experiments in an Arc-Heated Channel Nozzle Flow *

Kiyomichi ISHIDA *1, Yasuo WATANABE *1, Takashi MATSUZAKI *1
Takeshi ITO *1, Toshio FUKUI *2, Junsei NAGAI *3

ABSTRACT

The 750kW arc-heated (or arc-jet) wind tunnel is equipped with a channel nozzle to evaluate flat plate TPS materials. TPS material tests for HOPE-X design data have been made with this channel nozzle, but the flow characteristics of the high enthalpy flow generated in the nozzle have not been well investigated. Therefore, flow diagnostic experiments have been planned. Experimental items included in the plan are emission spectroscopy, mass spectrometry, heat flux measurements, and thermometry and direct surface observations of the test materials. A new calibration module was designed to install the instrumentation necessary for the measurement of these items in the channel nozzle test section. The conception of the experiments, design details of the module and main experimental results are presented.

Keywords :arc-jet wind tunnel, TPS material test technique, spectroscopy ,heat transfer

概　要

NAL/NASDA共同研究で運用されている750kWアーク加熱風洞において，平板材料供試体試験用チャンネルノズル内部気流の診断実験を行った。従来の材料試験の条件設定は，測定部での熱流束，圧力の計測のみに依存していたが，観測窓を備えた新しい校正用モジュールの製作により，上記項目に加えて，内部気流の分光スペクトル，気流成分の質量分析，供試材料の表面温度，加熱試験中の表面状態の観測等が可能となった。また，ガードンゲージを交換式で装着可能とし，固定式ゲージとの併用により，高エンタルピ境界層流れ中でのゲージの計測精度評価を行った。これらの計測系の概要と計測結果について述べる。

1．まえがき

大気圏再突入環境模擬装置としてのアーク加熱式風洞は，アーク放電により高いエンタルピの超音速気流を長時間持続して得られることが特徴であり，この特性を生かして宇宙往還機等の熱防御系材料の開発，評価に活用され，重要な熱空気力学的設計資料を提供してきている。その代表的な例が米国のスペースシャトル開発機関・NASA等の大型アーク風洞の活躍である。しかし，この種の高エンタルピ風洞では，一様流気流条件等の同定

*　平成14年1月11日受付（received 11 January, 2002）
*1　流体科学研究センター（Fluid Science Research Center）
*2　宇宙開発事業団（National Space Development Agency of Japan）
*3　㈱エイ・イー・エス（Advanced Engineering Services Co.,Ltd.）

This document is provided by JAXA.

がいまだ不十分な点が問題であり，現在米欧各国の設備でLIF(Laser Induced Fluorescence) 等の新しい技術を適用して診断計測能力の向上が進められている。NAL/NASDA共同研究で運用されている750kWアーク加熱風洞[1]においても，計画されたHOPE-X（H－Ⅱロケット打上げ型無人有翼往還機）等の国産宇宙往還機のTPS(Thermal Protection System)材料開発・評価試験が進められ，所期の成果が得られつつある。しかし，HOPEや将来型のRLV(Reusable Launch Vehicle) 開発等における機体重量の軽減等の厳しい設計条件から要求されている精密な材料試験データの取得のためには，気流の診断技術の向上による試験精度の向上が従来に増して強く要求されている状況であり，現在鋭意気流診断技術・データの蓄積を進めている。

本風洞では，試験対象とする防熱材料等の形状，材質，使用加熱条件等に対応して，試験装備の変更が可能である。一般的には，通常コニカルノズルを使用して軸対称気流を作り澱点試験を実施する。材料試験としては，寸法的に要素レベルに限られるが，高い加熱率での評価試験が可能である。澱点試験時の一様気流条件については，圧力プローブ，各種カロリメータプローブ[2]，分光計測[3]等により圧力，熱流束，温度等の試験計測技術を蓄積してきた。また，模型前方の衝撃層条件についても分光計測による解析・評価を進めている。また，ウェッジを利用する材料試験も必要に応じて実施している。一方，大型平板材料模型加熱試験時には，コニカルノズルをチャンネルノズルに交換・装着して使用する。この場合，ノズル側壁測定部に100mm×100mmの平板材料模型を取り付けて加熱試験が可能である。チャンネルノズル使用時の気流条件設定は，風洞建設時に装備された校正用モジュール（Channel Nozzle Calibration Module : CNCM-1 : 以後CM-1）のみによって行っていた。このモジュールは，熱流束計（５点）と圧力孔（４点）を配置した100mm×100mmの水冷平板で，模型取り付け部に装着して上記諸量の分布計測が可能である。しかし，チャンネルノズル使用時には，その構造上ノズル内部の気流状態量の直接計測および試験中の材料模型の表面温度計測，表面状況の観察等が困難であった。前記試験精度の向上を目的としてチャンネルノズル試験の基本データを充実させるために，今回新たに発光分光，質量分析等の計測技術の適用によるノズル内部気流観測を可能とし，かつ赤外線二色温度計による材料模型表面温度計測およびCCDカメラによる模型表面観察を行えるように内部観察用のモジュール（CM-2）を製作した。本モジュールでは，流れ方向三カ所の観測窓部に交換式で気流分光観測用集光光学系，質量分析計用気体採集管，材料表面観察用光学系，二色温度計の装着が可能であり，また中心部上下対称位置に交換式の熱流束計測用ガードンゲージを取り付けている。本報告では，本モジュール（CM-2）の風洞試験における評価の全体構想，CM-1データの併用による基礎データ取得・検討結果等について述べる。

２．平板（Panel）模型実験装置概観

米国のスペースシャトル開発時には，開発の各フェーズで機体各部の加熱・評価のために米国内の多数のアーク加熱設備が活用された。機体ノーズ部，主翼前縁等の高い加熱が予測される部分では実物大の構造部材の加熱評価試験が必要であり，従って，必然的に風洞自体も大型化が必要となる。NASAのAmes研究所，Johnson研究所(JSC)等の大型アークジェット風洞での大寸法機体構造部品の加熱評価試験は，実機の設計，初期飛行後の不具合改良等に極めて有効であったと思われる。本節では，大型の平板局所構造部材の供試体試験で活用された代表的試験設備（特にノズル）について概観する。

使用されたノズルには，二種類の形式がある。その一つは半楕円型ノズルで[4]，Ames研究所の20 MW Panel Test Facility(PTF)に装備され熱防御系の試験に活用された。ノズルは，幅と高さのアスペクト比4 : 1の半楕円形で幾何学的面積比36 : 6，ノズル出口に平板固定装置を取り付け，ノズルから試験模型表面に滑らかな遷移で高温気流が形成されるように設計されている。平板模型は迎え角0～8°の範囲で試験可能とされている。150mm×150mmのHRSIタイルを複数枚張り合わせて480mm×500mmの平板構造として加熱試験した試験例[5]が発表されている。この試験では，シャトルでの飛行実験のために，RCG(Reaction Cured Glass Coating) やC742コーティングの触媒効率を評価することを目的としていた。また，60MW Interaction Heating Facility(IHF) にも，より大型の半楕円ノズルが装備されている（幅813mm，アスペクト比4 : 1，幾何学的面積比44 : 6，運用マッハ数約5）。平板模型表面での気流の一様性については，ノズル幅の約75％の試験領域で，熱伝達率は中心線上値の15％程度以内に収まると言われている。

他の形式はチャンネル型ノズルで，JSCのARMSEF (Atmospheric Reentry Materials and Structures Evaluation Facility) の10MW風洞に装備された[6]。この風洞設備もシャトル開発にフル稼働し，遂行した主要な試験項目が文献6にまとめられている。チャンネルノズルは，アーク加熱器に続くスロートが1×2インチ角（25.4mm×50.8mm）で，膨張部の横幅は50.8mmで一定，上下方向は半頂角10°で広がって出口高530mm，スロートより出口まで1450mmである。側壁の試験部には，8”×10”, 12”×12”, 24”×24”(203.2mm×254mm, 304.8mm

This document is provided by JAXA.

×304.8mm，609.6mm×609.6mm）の試験部材の装着が可能とされている。対向する両側壁に設置する壁面材の特性の組み合わせにより，試験加熱条件の種々の変更が可能である（e.g.試験部材（温熱壁（Hot Wall(HW)），黒色冷熱壁，研磨冷熱壁等の組み合わせによる供試材の加熱条件の設定）。シャトルタイル部のgap加熱の実験と解析評価[7]や，側壁の他に，出口面にヒンジ装着したエレボンの対流－放射加熱環境下での試験例[6]等が報告されている。ノズル気流（コニカルおよびチャンネル）の計算は，汎用のNATA（Non-equilibrium Arc Tunnel Analysis）コード[8]により行われている。この風洞では，コニカルノズル使用時にウェッジホルダーの使用による材料試験も可能となっている。

これらの風洞およびノズルについては，発表された気流特性試験データ等が少ないが，当時は風洞が多忙なシャトル開発試験に優先的に占有使用されたためと思われる。ただし，Ames，JSC両研究所においても，ここ数年アーク加熱気流の特性計測が発光分光やLIF等の診断技術の適用により集中的に行われている。これは，前述のRLV等の経済性重視の新しいタイプの往還機開発のためのデータ収集や，空力加熱軽減に有効と期待されている機体表面触媒効率の評定等の化学反応計測が目的と思われる。

また，最近の報告[9,10]では，DLR（ドイツ航空宇宙センター）のアーク加熱設備LBKにおいて，通常のコニカルノズルを使用した平板模型の試験が実施されている。この風洞設備にはL2K（Huels型アーク）と6MWのL3K（縮流型アーク）の二系統があり，大型のL3Kではノズル出口径最大400mm使用時に，均一超音速流れ場で280mm×300mm×50mmの平板模型，直径150mmの澱点模型の試験が可能とされている。NASAのX-38試験機のフラップ模型やノーズキャップとスカートのインタフェイス部模型の試験が最近の実施例として報告されている。

我々の750kW風洞は，1993年に縮流型アーク加熱器の装備を始めとした主要要素の大改修を実施して現在の形となったが，この際に前述のように平板模型の試験が実施可能なようにチャンネルノズルが併設装備された。実機の設計には，上述のように，高い加熱を受ける機体構造部材実寸大模型の大型設備による試験が不可欠であるが，国内でMW級の大型設備の整備は現状では非現実的であり，必要に応じて外国大型設備利用による試験が実施されている状況である。我々の風洞試験は，風洞全体の規模が小さいため，澱点，平板いずれの試験時にも材料要素規模での評価に限定されるが，防熱材開発，評価試験に必要な試験計測技術の開発，知識の蓄積にはそれなりの成果を挙げることが可能である。このような経験の蓄積は，外国風洞での試験実施，結果評価のためにも極めて重要である。

3．実験装置

3.1 アーク加熱風洞

750kWアーク加熱風洞は，作動気体（通常は空気）をマルチセグメント式縮流型アーク加熱器で加熱し，通常の澱点試験時の運用では，スロート径25mm，出口径115mm，半頂角15度のコニカルノズルで加速膨張して低密度超音速高エンタルピ気流を得る。試験条件設定は，アーク加熱器パック数（アーク長），電流値と作動気体流量の制御により行う。アーク加熱器，測定部，計測系等の詳細は文献1に詳述した。コニカルノズルとチャンネルノズルの換装は，ノズルブロック全体の交換により行う。チャンネルノズル使用時のアーク加熱器設定，運用等についてはコニカルノズル使用時と特に変更点はない。

3.2 チャンネルノズル

チャンネルノズル取り付け時の測定部全体図をFig.1に示す。測定室は直径1600mmの横置円筒形で，手前側は開閉扉，奥側は固定壁で各種観測，計器用フランジを装備している。ノズル全体は高圧冷却水で冷却されている。本風洞のチャンネルノズルの構造，寸法は，スロート22mm×22mm，出口22mm×173mmの矩形断面で，側面は平行で22mm一定，上下面のみ半頂角10°で拡張している。平行部両側面に100mm×100mmの試験用開口部を備え，平板材料模型，計測用モジュール等をここに装着して加熱評価試験を実施する。ノズルの試験配置概略図をFig.2に示す。前述のJSCノズルと同様に，対向壁の条件の組み合わせにより加熱条件の調整等が可能である。現状の材料試験では，冷却壁－加熱壁（供試材料），加熱壁（参照用材料）－加熱壁（供試材料）の組み合わせで使用している。後者の組み合わせは，加熱壁よりの放射加熱により供試材料への加熱率を増大させる目的で使用する。但し，チャンネル内対向壁間での放射熱伝達の解析は複雑で精密な予測には困難がある。供試材料模型への加熱率を高めるためには，壁面を4°傾斜させて取り付けて試験することも可能である。Fig.3にノズル取り付け時の測定部内部写真を示す。ノズルの手前側測定部は解放状態，対向側は冷却壁（水冷金属壁）である。Fig.4には平板材料供試体の組み立て状況写真を示す。C/C材（炭素繊維強化炭素複合材）平板材料，支持用断熱材，取り付けフランジを組み立てた状況で，材料面をノズル内壁面と段差の無いようにノズルに取り付けて加熱試験を実施する。写真には，50mm×100mmの寸法のC/C材供試体が2枚取り付けられた状況を示し

This document is provided by JAXA.

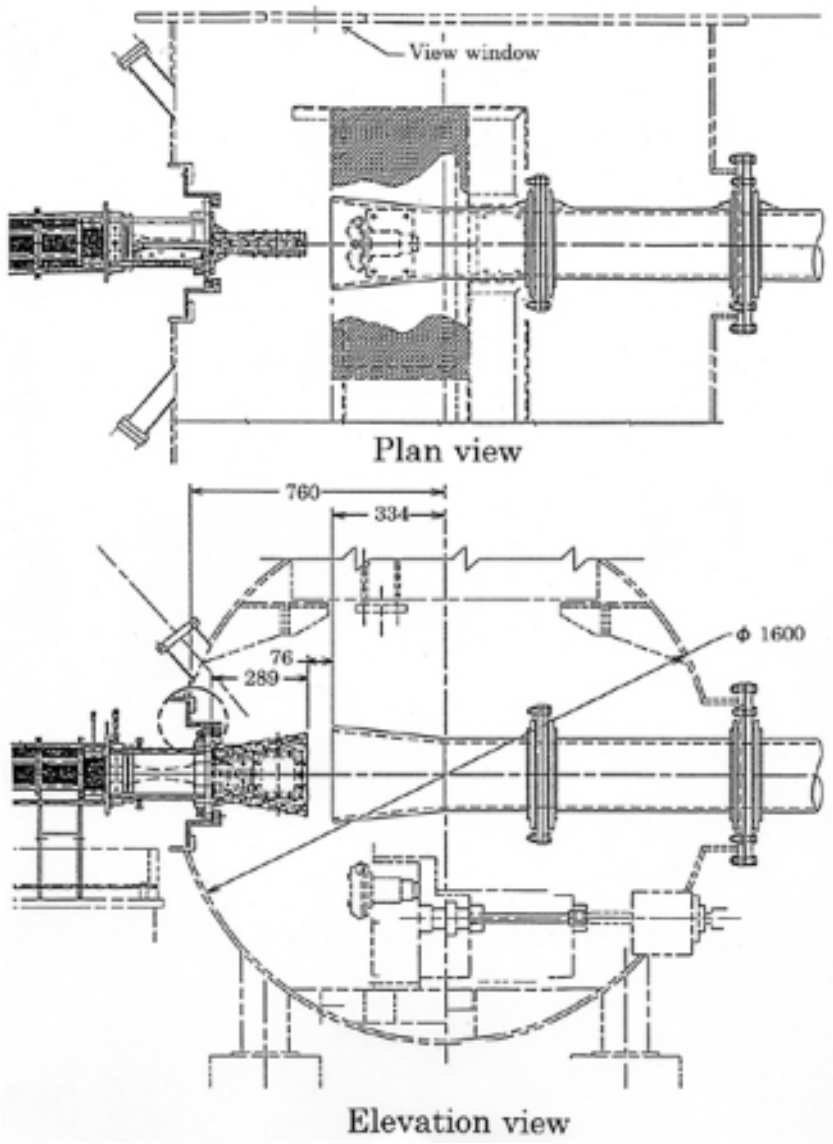

Fig.1 Test chamber configuration with a channel nozzle

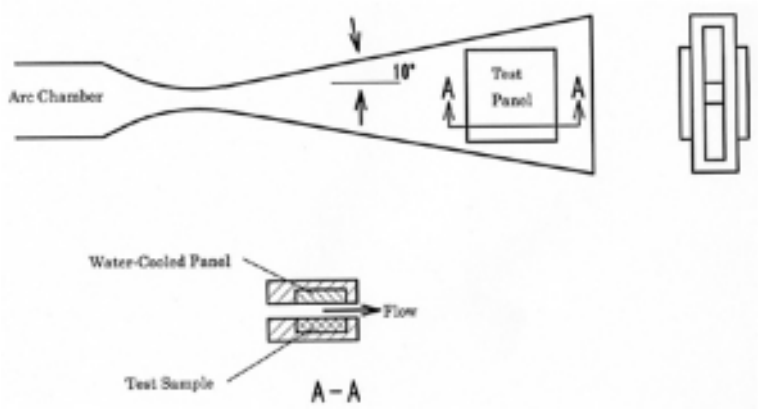

Fig.2 Channel nozzle test configuration

This document is provided by JAXA.

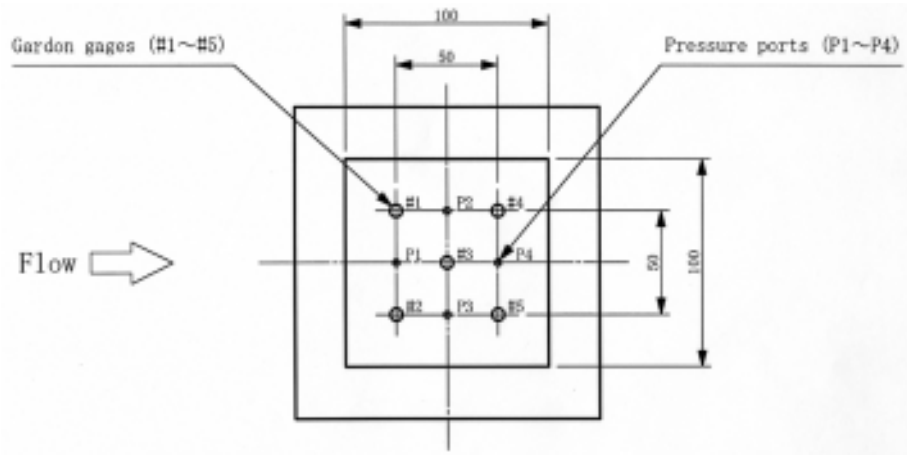

Fig.7 Arrangement of the sensors and pressure ports on the CM-1 module

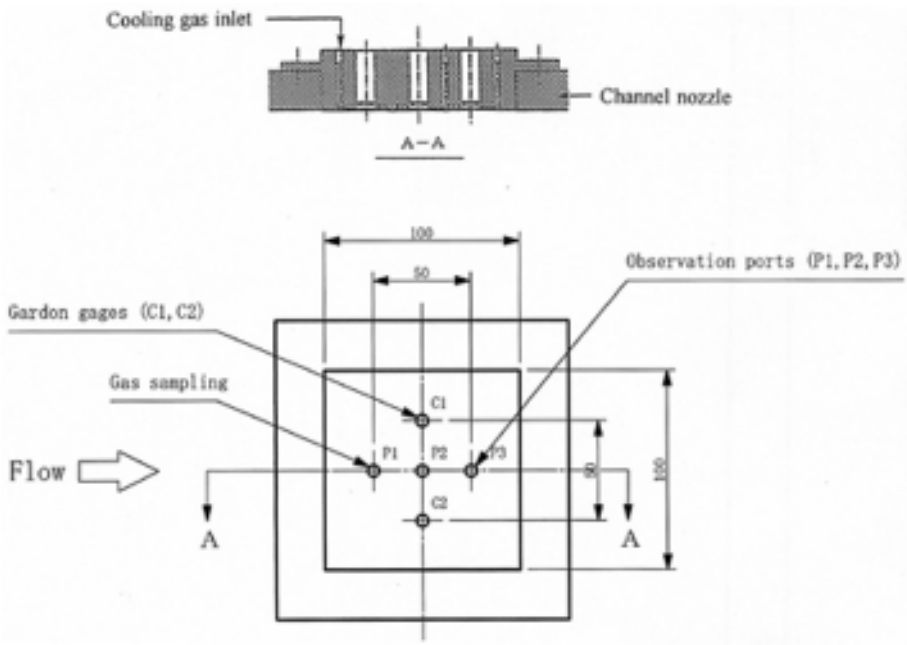

Fig.8 Arrangement of the observation ports and calorimeters on the CM-2 module

ジュール（CM-1）には，測定部での供試体表面の熱流束と圧力の分布を知るために五個のガードンゲージ（#1~#5）と四個の圧力孔（Port1~Port4）が一枚の板上に25mm間隔で固定配置されており，全体は高圧冷却水により冷却されている（冷熱壁）。全体寸法は100mm×100mmで前出の模型と同様に測定部内面に段差無く取り付けて計測する。Fig.8に今回製作した無酸素銅（OFC）製モジュール（CM-2）を示す。本モジュールは，流れ方向中心線上に等間隔（25mm）で3個所の観測窓（P1,P2,P3）と中心部上下対称位置に熱流束計（ガードンゲージ，C1,C2）を設け，計測概念図（Fig.6）に示す諸項目（以下の(1)-(5)）の計測を実施する。

CM-2による気流状態量の計測項目は，

(1) 分光器による気流発光の分光観測

(2) 質量分析器による気流の成分分析

(3) 壁面への熱流束計測

である。分光観測等の光学観測を実施する際には，各ポート内壁側にはレンズ兼用の石英窓ガラスを装着する。Fig.8上部のA-A断面図に示すように，各ポート外側には各計測に必要な部品取り付け用アダプタ取り付け孔があり，また窓ガラスを高温気流から保護するための冷却気体用配管が装備されている。冷却気体には，主流の空気成分との反応を避けるためアルゴンを使用した。分光計測時には，集光用レンズの保持と保護のための鏡筒にレンズを収納し，取り付け孔に固定して気流発光を測定室外の分光器スリットに導く。質量分析用には，ノズル内部より気体を収集するための気体収集用アダプタを製作した（Fig.9）。壁面での気体反応を防ぐため導管内壁は石英ガラスとし，過熱防止用に独立の冷却水系を備えている。このアダプタはポートP1専用とし，使用時には冷

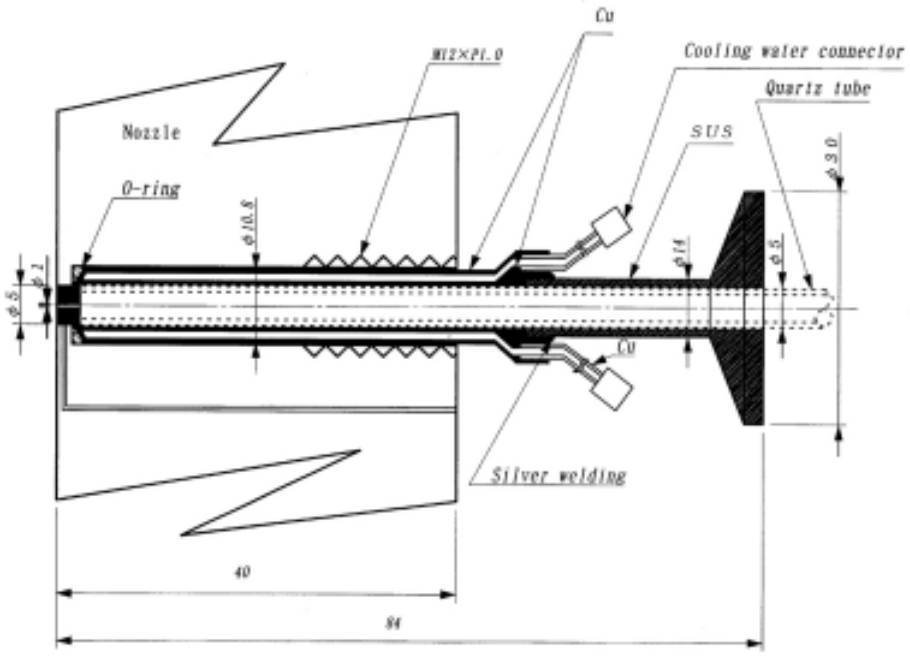

Fig.9 Gas sampling adaptor

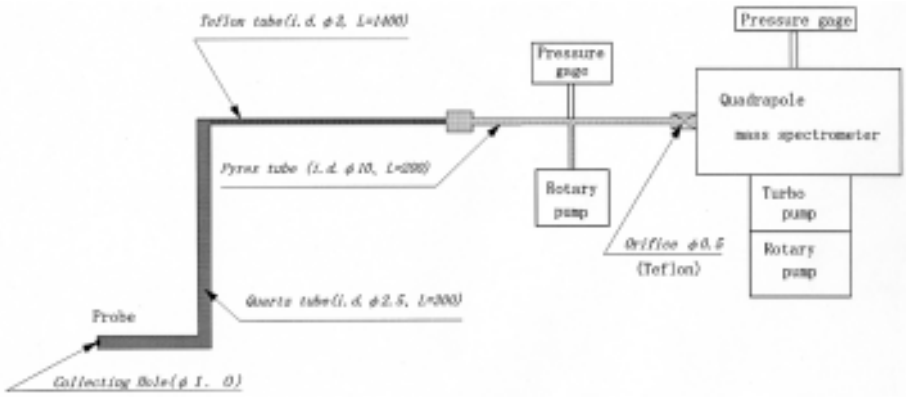

Fig.10 Schematic of a typical mass spectrometric measurement system

却用気体を遮断する。質量分析用計測配管例をFig.10に示す。熱流束の計測には，モジュール中央部，気流中心より25mmの上下対称位置に交換式熱流束計を取り付けている（熱流束計C1, C2）。センサはガードンゲージで，各ゲージは専用の冷却水系統で冷却されている（Fig.11）。本計測では，上下のゲージの交換による気流の対称性，計測値のゲージ感度依存性，境界層内での対流加熱環境下でのゲージの応答等を調べ，CM-1の計測結果も含めてガードンゲージの性能を評価することを目的としている。熱流束計不使用時のための盲栓も準備してある。

供試体加熱試験評価項目としては，

(4) ファイバ式二色温度計による供試体材料表面温度計測

(5) CCDカメラによる加熱試験中の表面観察

を行う。従来の平板供試体加熱試験では，試験中の材料表面情報は全く得られず，取り付け可能な場合に限っては供試体内部熱電対等によるモニタを行って試験を進めていた。CM-2を対向壁として使用出来る場合には（これは冷却壁なので，加熱率を高めたい場合には温熱壁を使うことになる），アダプタポートにファイバ式温度計のセンサ部を装着して表面温度を計測したり，光学系を装着してCCDカメラにより表面状況を観察出来る（光学集光系は分光計測用と共用にしている）。

CM-2の表面積は極めて限られており，高圧冷却水，窓冷却用気体配管等の取り付け部と内部流路確保，計測系取り付けの配置面積確保が必要なため，かなり窮屈な配置となった。製作したCM-2の写真をFig.12に示す。外側には，項目 (4),(5) の計測系が取り付けられている。

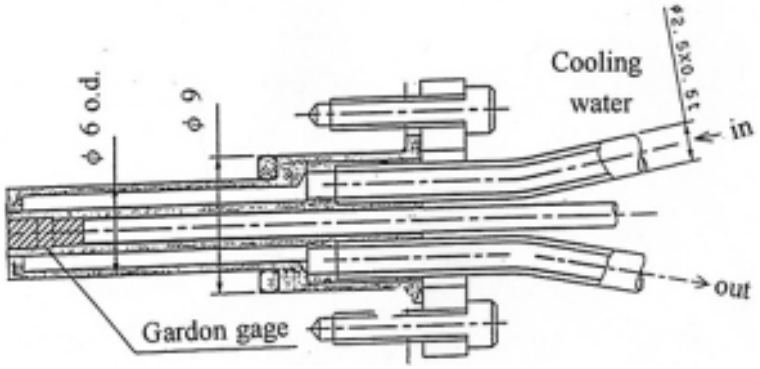

Fig.11 Configuration of the Gardon gage of the CM-2 module

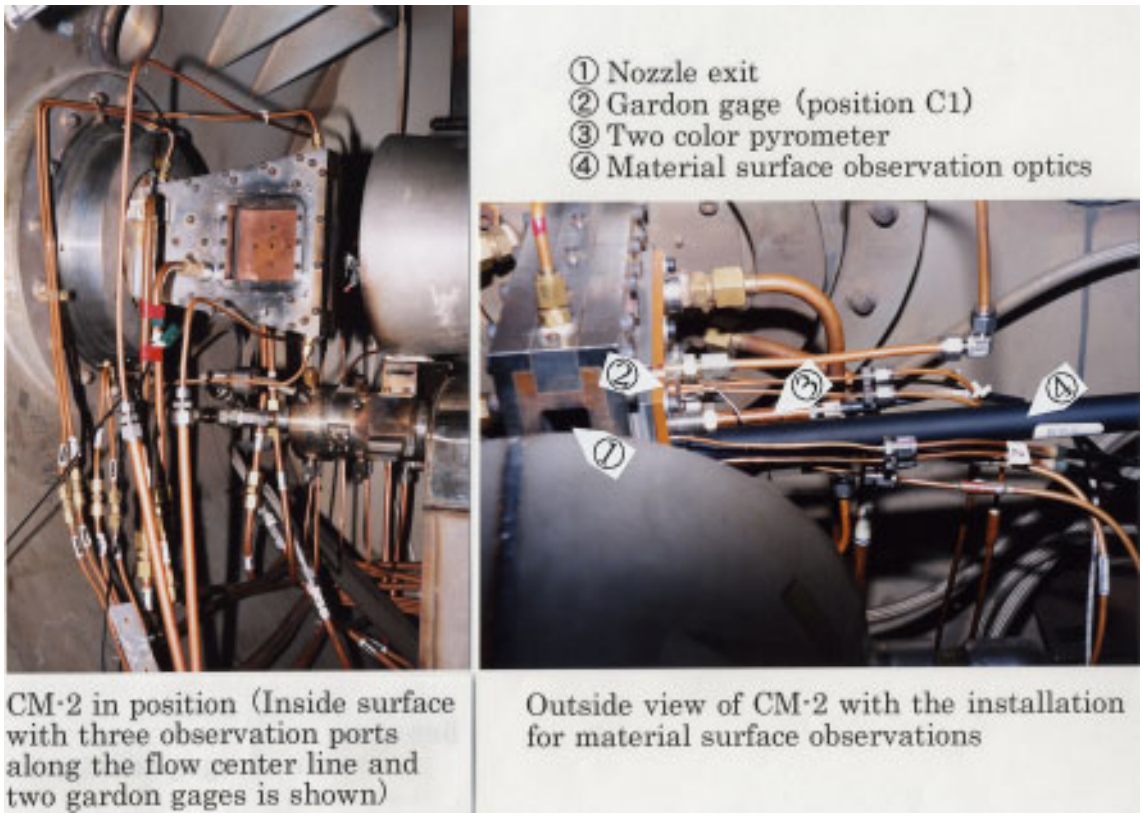

Fig.12 Photographs of the CM-2 module in position

5．実験結果と討論

本モジュールCM-2をチャンネルノズルに取り付けてCM-1との併用により性能評価試験を行い，前記の各実験項目への適用性を調べ，所期の性能を満足することを確認した。以下に結果を述べる。

5.1 分光計測

観測ポート２個所（P1,P3 : Fig.8の番号に対応）にアダプタにより集光光学系を設置し，ノズル内部気流の発光を分光器（Acton SpectraPro-500i）スリットに集光し，ICCD検出器（Andor社製DH520, 有効素子数690×256）によりスペクトルを収集した。対向壁には無酸素銅製冷却壁を装着した。従来行なってきた自由流および衝撃層の分光観測の結果より[3]，NO分子とNやO原子のスペクトルの出現が期待される二つの波長域（紫外および赤外）を選定して観測を行った。Fig.13に紫外領域で得られたポートP1でのスペクトル（波長応答校正済み）を示す。予測通り，NO分子のδ及びγバンド系列の強い発光が観測されている。参考のために，コニカルノズル使用時の自由流で得られた同一波長域のスペクトルをFig.14に示す。両スペクトルの主要な相違点は，P1でのスペクトルがノズルの膨張比の小さい位置で観測されているために，気流の温度がかなり高く，各バンドが高い

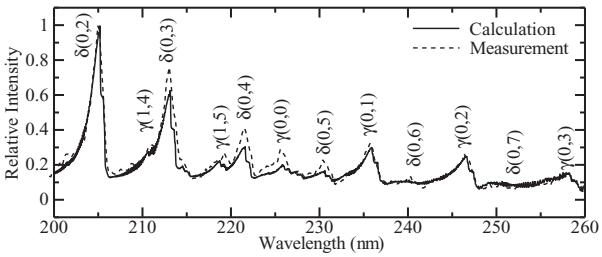

Fig.13 UV spectrum of the flow at port P1 with a calculated synthetic spectrum

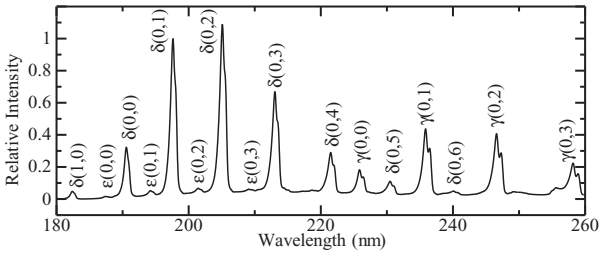

Fig.14 UV spectrum of a free stream from a conical nozzle in the test section

回転準位まで励起されていることである（各観測ポート位置断面のスロートに対する幾何学的面積比はそれぞれ，6.02,6.42,6.82，出口は7.86である）。理論合成スペクトルのプロファイルと比較して温度を決定するプロファイルマッチング法による温度の分析の結果，2000±300Kの温度が得られている[11,12]（上流側ポートP1での測定：試験条件＝電流300A，空気流量10g/s）。対応する下流側ポートP3でも同程度の温度値が得られている。バンドプロファイルを用いた温度の決定法についての問題点は，衝撃層のバンドスペクトル解析の場合等と同様に，温度が高くなるにつれてプロファイルの温度依存性が悪くなり温度決定精度が低下することである。バンドスペクトルの解析手法を一層工夫・検討し，今後の温度決定精度の向上に努力したい。今回の実験で取得した実験データではないが，別の機会に取得したノズル出口での紫外領域スペクトルをFig.15に示す。風洞観測窓の透

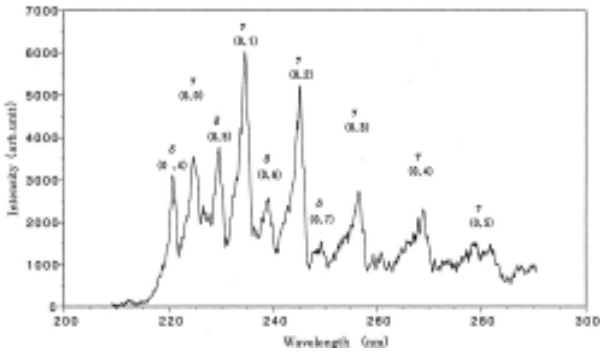

Fig.15 UV spectrum of a flow at channel nozzle exit

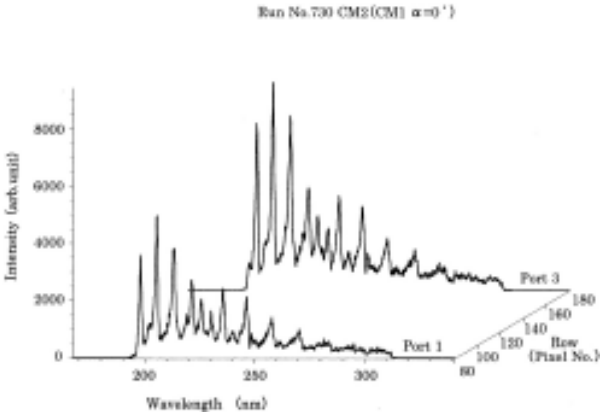

Fig.16 UV spectra taken simultaneously at P1 and P3

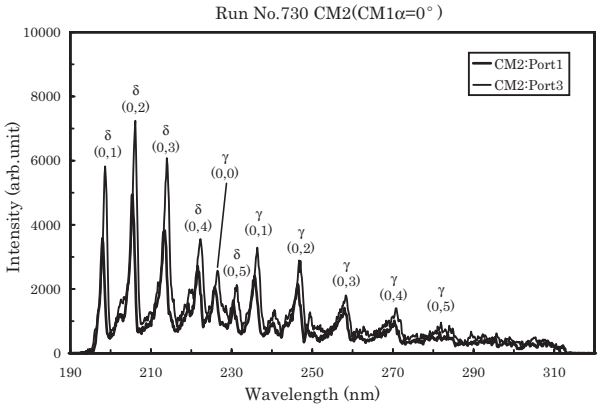

Fig.17 Comparison of the intensity distributions of the preceding NO spectra at P1 and P3

過率の違いにより短波長側がかなりカットされており，かつ使用したCCDの相違により波長応答も異なっているが（無校正），NO発光の特徴はノズル内部と類似である。

さらに興味ある特徴は，スペクトルのプロファイルは類似であるが，下流側測定点ポートP3での発光強度が上流ポートP1での強度よりかなり強いことである。Fig.16，Fig.17にその測定例を示す。Fig.16のスペクトルは，P1およびP3よりの放射光を三分岐ファイバの両端2端子に入力し，分光器のスリット上，上下位置に入射し，ICCDのpixelを対応する位置で分割使用して同時計測して得たものである。Fig.17は，このNOスペクトルを波長軸上で重ねて表示したものである。ICCDの各波長における強度応答は，この強度範囲では線形応答が期待できるので，各点での強度比はP1，P3での強度比を直接に示すと考えてよい。このバンド強度の増加は，NO分子の観測された各バンドの上位準位数密度の増加を意味するが，ノズル内での流れ場での物理現象は非平衡緩和過程等の寄与により極めて複雑であり，NOバンドの強度解析も包括的な流れ場の現象解析の中で議論さ

れねばならない。チャンネルノズル流れ場の解析は材料評価にとって重要であり，非平衡緩和過程を含む反応性ノズル流の解析は非常に興味ある重要な課題として研究を深める必要がある。

赤外波長領域での計測は，検出器の感度範囲では，顕著な特徴のあるスペクトルは得られなかった。この領域で一番高い発光強度が期待される777nmのOI線のみがわずかに確認出来た。一方，CM-1を4°傾斜させた場合（RunNo. 734：熱流束計測の項参照）には，Fig.18-21に示すスペクトルが得られた。紫外波長域でのNOスペクトルの特徴は（Fig.18,19），前述の（α=0°）場合と大差がない。これは，観測体積に占める主流の割合が大きく，主としてその発光を観察しているためと思われる。一方，Fig.20，21に示すように，赤外波長領域では，上流側のP1ポートでN,Oの原子線が明確に確認された。これらの原子スペクトルは，自由流中の模型前方の衝撃層で温度の回復に伴って観測されたNとOの原子スペクトルの特徴と類似している。コニカルノズル実験の際には，自由流中では原子の検出は出来なかった。Fig.20に見られるように，50mm下流のポートP3ではこれらの原子線強度は減衰して殆ど確認出来なかった。気流中での原子の検出は触媒効果等材料表面反応考察に重要な要素であり，原子濃度，励起温度の決定等への適用を進めたい。また，今回の観測より，ポート間の壁条件（壁面材料表面触媒性）の変化による壁面での再結合反応速度の変化に由来する原子の消耗量変化の追跡（atom-loss spectroscopy）の可能性も期待される。

5.2 質量分析

ポートP1に気体採集管（Fig.9に示す）を取り付けて採集した気体を，測定室外に置いた質量分析器に導いて気流成分の質量分析を行った。質量分析器は日本真空製四重極マススペクトロメータ（ULVAC MASSMATE-200 Quadrupole Mass Analyzer）を使用した。測定データの一例をFig.22に示す。採集した気体試料の配管内での反応を防ぎ，かつ迅速に分析器に導くために，Fig.10に示すように配管材料の選択（石英管，テフロン管，耐熱ガラス管の使用）と配管長の短縮，回転ポンプの増設，オリフィス材料と口径の変更等，配管系に種々の工夫を試みてデータを収集している。窒素，酸素の分子，原子，酸

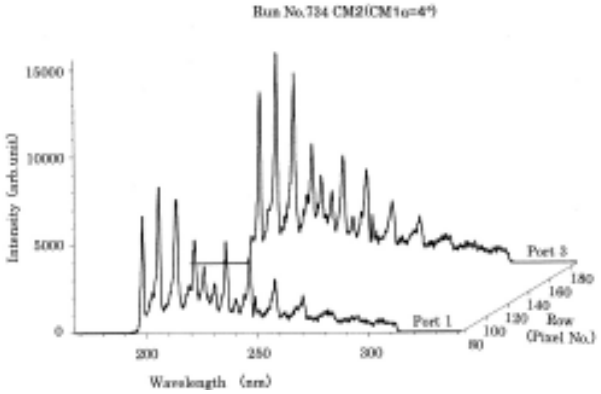

Fig.18 UV spectra taken at P1 and P3 with the opposite wall inclined 4 degrees

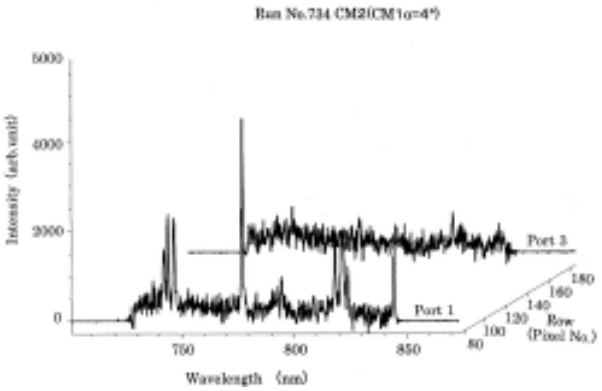

Fig.20 Infrared spectra taken at P1 and P3 with the opposite wall inclined 4 degrees

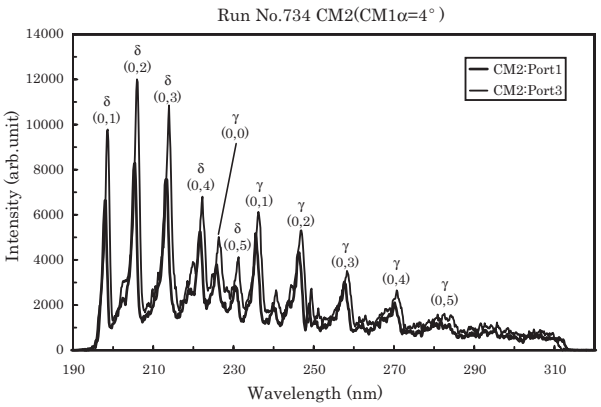

Fig.19 Comparison of the intensity distributions of the preceeding NO spectra

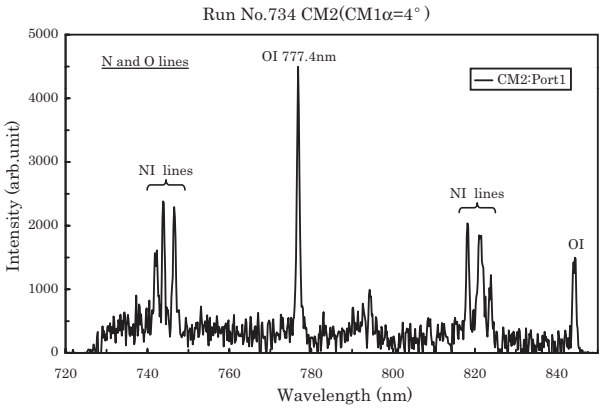

Fig.21 Intensities of the atomic lines in the preceding infrared spectrum at P1

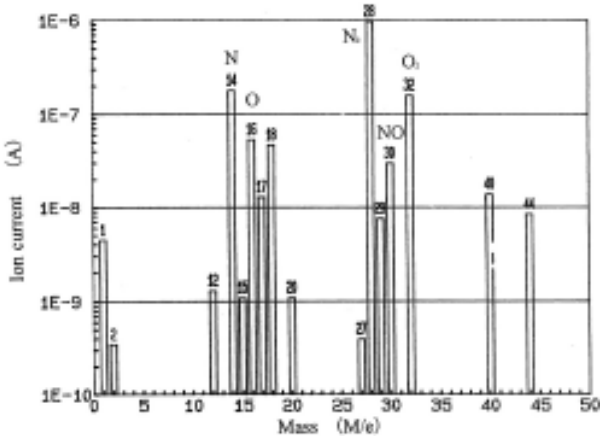

Fig.22 An example of mass spectrum

化窒素（NO）等が確認されるが，現在のところまだ安定したデータは得られていない。但し，NO については強い出力信号が観測され，気流中に大量に存在することが推定される。この結果は，分光観測の結果とも一致している。供試体表面での触媒効果の評定に際して原子成分濃度のデータは貴重であり，計測系を改良して原子成分濃度の分析を進めていく予定である。

5.3　熱流束および圧力計測

校正モジュールによる測定部熱流束および圧力分布の計測は，チャンネルノズルでの材料加熱試験の評価精度を決める最重要試験項目である。従来の材料試験では，Fig.7に示すCM-1モジュールによる熱流束，圧力分布データのみに基づいて加熱評価を行ってきた。今回の実験では，CM-1, -2両モジュールを使用して包括的な熱流束データを取得，評価した。

ＣＭ-１の熱流束計測用ガードンゲージはいずれもMedtherm社製で，同社の納入時校正値は，ゲージの番号順に1115，1065，1095，1025，1150(kW/m^2/10mV-output) である。信号出力時間履歴は横河製オムニレコーダ(YOKOGAWA ORM-1200 oscillographic recorder) で記録し，データ変換後Excel等で処理した。また，圧力計測には，所要圧力範囲の測定のために圧力計（エドワーズ590型Barocel：測定方式隔膜静電容量型，絶対圧型）を２台（測定範囲　0～13.33，0～1.333kPa）使用し，各ポートの圧力をスキャニバルブを介して接続計測し，専用パソコン処理装置で記録した。これらの圧力計は，標準圧力計（バラトロン：MKS　390HA：NIST (National Institute of Standards and Technology) 校正ずみ）により校正している。測定精度は，読み値の0.15％である。CM-2では，測定範囲の異なる２個のガードンゲージ（Medtherm社製：G1-10MW/m^2,G2-5MW/m^2,full scale）を使用した。信号処理法はCM-1のゲージ

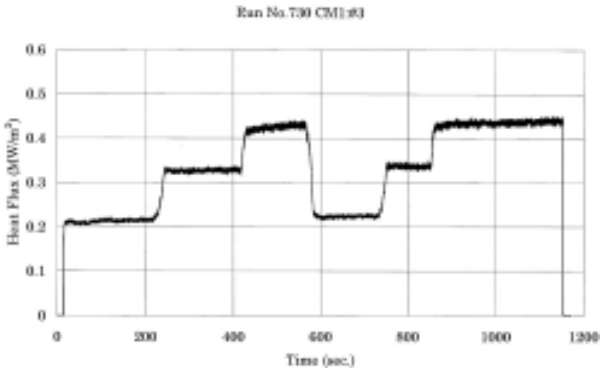

Fig.23 Time history of heat flux values of the gage #3 on the CM-1 module

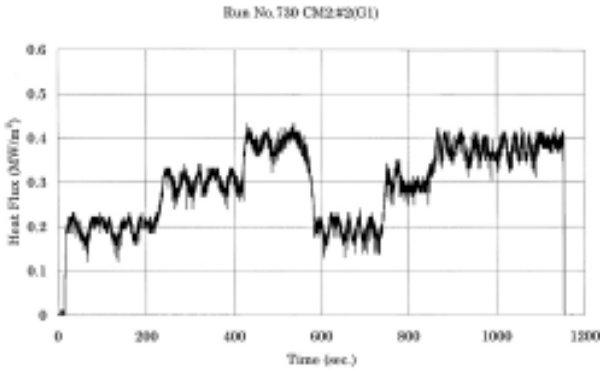

Fig.24 Time history of heat flux values of the gage G1 on the CM-2 module

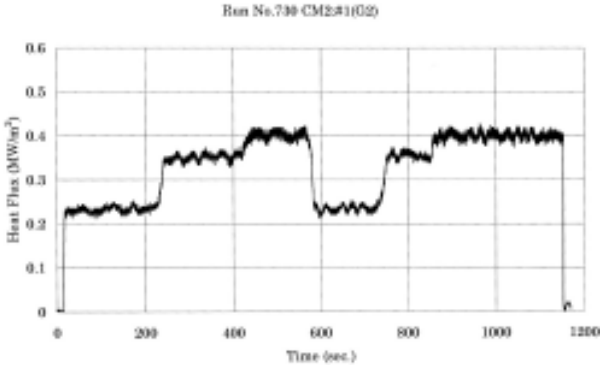

Fig.25 Time history of heat flux values of the gage G2 on the CM-2 module

と同様である。ゲージ出力の時間履歴記録例（Ｒｕｎ No.730）をFig.23,24,25（CM-1：#3，CM-2：G1,G2に対応）に示す。チャンネルノズルの実験では，ゲージはアーク作動中は常時高温気流にさらされた状態にある。途中での出力変化は試験条件の変更による。Fig.26にCM-2のガードンゲージG1,G2の同時記録時間履歴を示す。ゲージの選定理由については後述する。

従来のCM-1の計測では，気流軸に対して対称位置にあるゲージの熱流束測定値（#1と#2，#4と#5）に非対

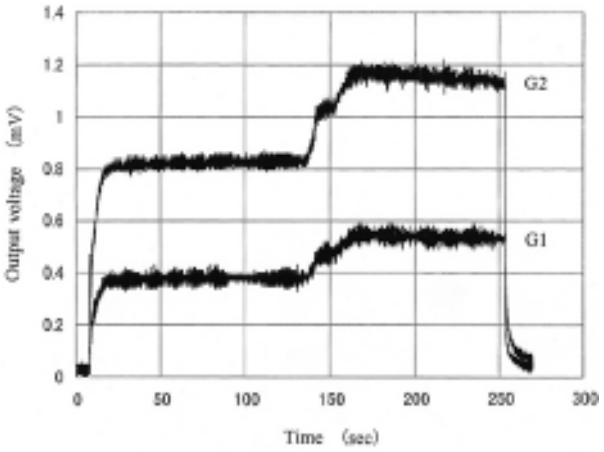

Fig.26 Time history of the output voltages of the Gardon gages G1 and G2

称性が見られた。これは高入力試験時に特に顕著であったが十分な原因追及が出来なかった。そこで，CM-1を上下反転した計測を実施し，またCM-2では，中央部上下対称位置に交換式のガードンゲージを装備して，上下のゲージ交換による熱流束対称性の検討，測定値の信頼性のゲージ感度への依存性の評価[12,13]等を行った。CM-2では圧力分布に関しては今回特に留意していないが，各ポートを利用しての圧力測定が可能である。本実験では，CM-1，CM-2，冷却板（計測系なしの水冷平板）の三種類の冷却壁と温熱壁としての校正用C/C材平板を測定部両側壁に装備して試験を実施した。CM-1とCM-2を対向壁として同時に計測する場合は冷却壁同士の計測となる。対向壁の組み合わせ，試験内容は下記のごとくである（上流から見て左側壁（測定室奥側）を先に記す）。

1．CM-2：(分光，熱流束）－ CM-1：熱流束および圧力分布
2．CM-1：上下反転計測 － CW（冷却板）
3．CM-2：(分光，熱流束）－ CM-1：CM-1を傾斜（α=4°）
4．CM-2：(分光，熱流束） － CM-1：CM-2のG1,G2の位置を交換（Run No.724のみG2が上，G1が下。他のRunはすべてG1が上，G2が下）
5．CM-2：熱流束 － HW（C/C材平板）：対向面温熱壁による加熱率の増加評価

以上の実験結果を以下に概観する。(今回の一連の熱流束，圧力測定データ（RunNo.724～737）の計測結果一覧表をTable.1に，対応する運転条件をTable.2に示す。）

1． 代表的な三試験条件（空気流量：12,16,20g/s，電流値：300-700A）に対するCM-1の熱流束分布をFig.27,28,29に示す。先述の如く，同一断面内で上下のゲージの出力値の非対称が見られ，上流，下流二断面（断面1及び3）で同様の傾向を示す（上側＞下側）。一連のデータ（Run No.726,727）の視察より，上下の差は入力の増加に対応して増加し，断面1,3でそれぞれ最大約16％および11％程度である。

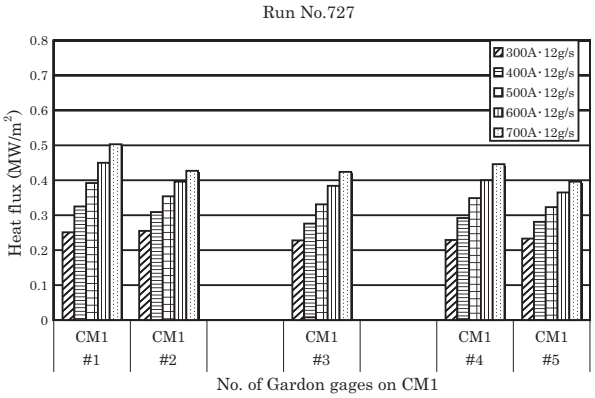

Fig.27 Heat flux distributions on CM-1 (air mass flow rate : 12g/s)

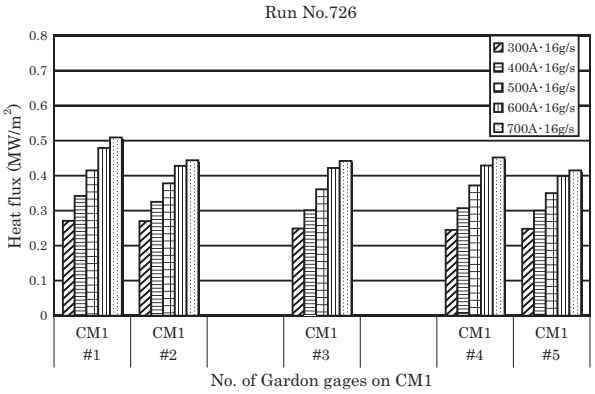

Fig.28 Heat flux distributions on CM-1 (air mass flow rate : 16g/s)

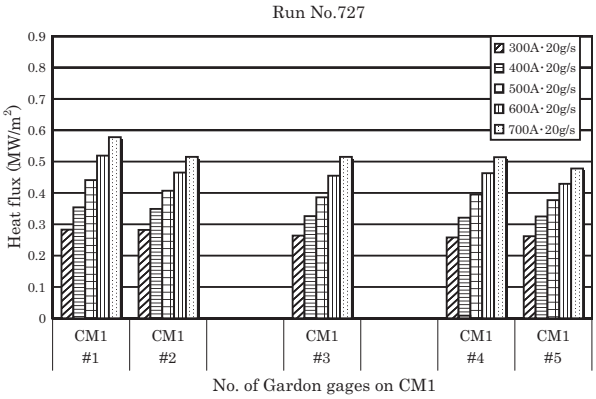

Fig.29 Heat flux distributions on CM-1 (air mass flow rate : 20g/s)

Table 1 Experimental results of heat flux and pressure on the modules

Run No.	加熱率 (MW/cm^2)							圧力 (kPa)			
	CNCM1					CNCM2					
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	Port 1	Port 2	Port 3	Port4
724-1	0.383	0.347	0.331	0.335	0.315	0.338	0.357	1.27	1.05	1.11	1.15
-2	0.561	0.495	0.501	0.490	0.457	0.489	0.496	2.19	1.91	1.95	2.00
-3	0.254	0.248	0.228	0.223	0.225	0.232	0.254	0.95	0.75	0.83	0.85
725-1	0.247	0.243	0.218	0.220	0.221	0.224	0.209	0.91	0.71	0.72	0.79
-2	0.318	0.299	0.273	0.281	0.272	0.288	0.272	1.05	0.89	0.91	0.96
-3	0.387	0.354	0.332	0.342	0.322	0.339	0.310	1.21	1.03	1.04	1.09
-4	0.482	0.430	0.419	0.423	0.394	0.410	0.394	1.65	1.40	1.44	1.51
-5	0.568	0.506	0.509	0.499	0.468	0.466	0.469	2.15	1.85	1.91	1.96
726-1	0.271	0.270	0.249	0.245	0.248	0.262	0.264	1.43	1.27	1.29	1.20
-2	0.342	0.325	0.301	0.307	0.300	0.331	0.306	1.56	1.36	1.37	1.32
-3	0.415	0.378	0.361	0.372	0.350	0.380	0.356	1.65	1.43	1.40	1.37
-4	0.479	0.428	0.422	0.429	0.399	0.417	0.392	1.71	1.41	1.48	1.44
-5	0.509	0.444	0.442	0.452	0.415	0.430	0.421	1.75	1.47	1.51	1.48
727-1	0.251	0.255	0.228	0.229	0.233	0.240	0.238	1.08	0.89	0.95	0.92
-2	0.325	0.309	0.276	0.292	0.281	0.300	0.305	1.16	0.99	1.00	1.01
-3	0.392	0.354	0.331	0.349	0.323	0.338	0.334	1.24	1.01	1.04	1.04
-4	0.450	0.396	0.384	0.400	0.365	0.356	0.381	1.29	1.07	1.07	1.05
-5	0.503	0.427	0.424	0.446	0.396	0.387	0.408	1.36	1.13	1.15	1.12
-6	0.283	0.282	0.264	0.258	0.262	0.276	0.272	1.72	1.53	1.56	1.41
-7	0.354	0.349	0.326	0.321	0.325	0.339	0.337	1.88	1.64	1.68	1.56
-8	0.441	0.407	0.386	0.395	0.377	0.406	0.408	1.99	1.75	1.77	1.64
-9	0.519	0.465	0.455	0.463	0.429	0.446	0.463	2.11	1.84	1.87	1.79
-10	0.578	0.515	0.515	0.514	0.478	0.472	0.490	2.16	1.84	1.87	1.81
730-1	0.242	0.237	0.214	0.216	0.218	0.233	0.198	1.01	0.87	0.91	0.92
-2	0.388	0.350	0.327	0.342	0.322	0.351	0.301	1.37	1.17	1.20	1.23
-3	0.508	0.430	0.425	0.445	0.400	0.401	0.390	1.43	1.20	1.25	1.31
-4	0.250	0.244	0.224	0.223	0.225	0.234	0.195	1.07	0.91	0.88	0.96
-5	0.399	0.358	0.337	0.352	0.330	0.355	0.295	1.36	1.16	1.19	1.24
-6	0.514	0.434	0.436	0.455	0.405	0.400	0.378	1.47	1.25	1.25	1.31
734-1	0.293	0.290	0.268	0.284	0.284	0.243	0.236	1.23	1.05	1.07	1.23
-2	0.483	0.435	0.419	0.460	0.431	0.384	0.366	1.69	1.48	1.49	1.73
-3	0.630	0.526	0.550	0.613	0.552	0.442	0.469	1.79	1.55	1.59	1.87
-4	0.306	0.300	0.279	0.293	0.295	0.254	0.241				
-5	0.496	0.440	0.428	0.468	0.437	0.390	0.381				
-6	0.630	0.532	0.555	0.614	0.556	0.437	0.477				
737-1	0.247	0.240	0.221	0.220	0.221			0.89	0.73	0.76	0.76
-2	0.257	0.252	0.232	0.229	0.231			1.08	0.92	0.93	0.87
-3	0.336	0.326	0.303	0.299	0.298			1.19	1.00	1.01	0.99
-4	0.387	0.375	0.345	0.343	0.343			1.25	1.01	1.07	1.04
-5	0.444	0.404	0.378	0.390	0.372			1.31	1.09	1.12	1.09
-6	0.516	0.440	0.432	0.454	0.407			1.32	1.11	1.13	1.12
-7	0.563	0.527	0.499	0.492	0.482			2.20	1.87	1.92	1.81
-8	0.530	0.474	0.460	0.464	0.440			1.75	1.48	1.51	1.45
-9	0.484	0.464	0.435	0.426	0.425			1.73	1.47	1.49	1.41
-10	0.437	0.424	0.404	0.386	0.390			1.65	1.40	1.43	1.35
-11	0.376	0.364	0.347	0.332	0.335			1.57	1.32	1.37	1.28
-12	0.301	0.291	0.275	0.265	0.267			1.44	1.28	1.29	1.17

Table 2 Test conditions of Arc-heated wind tunnel

Run No.	ガス流量 (g/s)	アーク電流 (A)	アーク電圧 (V)	入力電力 (kW)	測定室圧力 (Pa)	アークヒータ内圧 (kPa)	エンタルピー (MJ/kg)	冷却水流量 (m^3/h)	冷却水温度差 (℃)	アークヒータ効率 (%)
724-1	12.0	507.4	737.0	373.9	78.6	64.8	16.2	16.37	2.62	52.0
〃 -2	20.0	709.0	948.1	672.0	137.0	108.6	17.9	16.64	4.51	53.2
〃 -3	10.0	298.7	773.3	230.9	60.8	52.5	12.8	16.66	1.50	55.0
725-1	10.0	304.5	762.6	232.1	60.3	51.2	13.3	16.24	1.51	56.0
〃 -2	11.0	401.8	752.5	302.3	68.9	58.0	14.9	16.35	2.02	54.0
〃 -3	12.0	500.8	751.3	376.2	77.4	64.5	16.1	16.66	2.64	51.0
〃 -4	16.1	608.5	862.3	524.6	106.4	86.4	17.6	16.59	3.50	54.0
〃 -5	20.1	708.7	967.6	685.6	137.6	108.6	18.7	16.78	4.43	54.6
726-1	16.1	302.1	1048.0	316.5	98.3	77.4	12.1	16.30	1.78	62.0
〃 -2	16.0	403.1	975.2	393.1	101.6	81.0	14.3	16.39	2.39	58.3
〃 -3	16.0	505.1	917.4	463.3	104.5	84.4	15.7	16.48	30.8	54.1
〃 -4	16.0	604.8	868.9	525.0	106.5	86.7	17.0	16.52	3.66	51.8
〃 -5	16.1	707.0	803.9	568.0	107.1	87.8	17.4	16.66	4.16	49.1
727-1	12.1	299.5	840.6	252.0	73.4	60.3	11.4	16.67	1.64	55.0
〃 -2	12.1	403.7	798.4	322.3	76.5	63.4	13.1	16.71	2.34	49.0
〃 -3	12.0	505.2	745.4	376.5	78.3	65.7	14.9	16.77	2.81	48.0
〃 -4	12.1	602.4	716.7	431.7	79.7	67.2	16.2	16.82	3.39	45.1
〃 -5	12.0	706.7	681.6	481.7	80.7	69.1	17.1	16.86	3.93	42.2
〃 -6	20.0	304.4	1152.8	351.0	124.0	93.8	10.6	16.78	2.00	59.8
〃 -7	20.1	406.7	1094.9	445.0	129.4	99.1	12.5	17.11	2.66	56.9
〃 -8	20.0	506.5	1062.1	538.0	133.1	103.5	14.4	16.88	3.58	52.9
〃 -9	20.0	600.5	1013.1	608.0	135.9	107.0	15.7	17.03	4.14	51.4
〃 -10	20.0	704.5	957.9	675.0	137.9	109.5	17.0	17.11	4.69	50.3
730-1	10.0	304.0	719.0	218.8	59.6	51.6	12.3	16.32	1.40	56.0
〃 -2	11.9	506.0	739.8	374.2	76.7	64.9	15.6	16.46	2.71	50.0
〃 -3	12.0	701.0	686.0	480.2	79.5	68.7	17.4	16.51	3.92	43.5
〃 -4	10.1	301.3	732.6	220.7	60.4	51.8	11.8	16.71	1.42	55.0
〃 -5	12.1	518.1	743.0	385.0	77.2	65.9	16.3	16.75	2.68	52.0
〃 -6	12.0	707.0	687.0	485.4	79.7	68.6	17.8	16.75	3.87	44.0
734-1	10.0	303.0	711.1	215.5	75.1	51.1	12.8	16.34	1.27	60.0
〃 -2	12.0	501.0	746.0	373.5	111.0	64.8	16.1	16.43	2.67	51.0
〃 -3	11.9	702.0	684.1	479.9	118.4	67.8	18.2	16.56	3.81	44.3
〃 -4	10.1	302.0	729.1	220.5	76.5	51.8	12.1	16.67	1.45	54.0
〃 -5	12.0	502.7	756.7	380.3	111.9	65.3	17.1	16.66	2.52	54.0
〃 -6	12.0	705.0	687.0	485.0	118.5	68.0	18.6	16.67	3.78	45.0
737-1	10.1	308.2	717.9	221.2	59.0	51.4	13.2	16.10	1.31	60.0
〃 -2	12.1	304.0	813.9	247.6	70.7	59.5	12.4	16.16	1.46	60.0
〃 -3	12.0	401.0	793.0	317.8	73.8	63.1	15.0	16.17	2.03	57.0
〃 -4	12.0	501.9	753.3	378.0	75.5	65.3	16.8	16.18	2.61	53.0
〃 -5	12.1	604.0	720.6	435.1	76.8	67.0	18.3	16.24	3.15	50.7
〃 -6	12.1	704.0	688.8	485.0	78.2	68.5	20.1	16.29	3.55	50.0
〃 -7	20.0	704.0	964.2	679.0	136.2	109.0	19.1	16.36	4.42	55.3
〃 -8	16.0	707.4	816.9	577.8	105.4	88.4	19.0	16.51	3.99	52.4
〃 -9	16.0	600.4	870.1	522.3	104.5	87.0	18.1	16.69	3.45	54.3
〃 -10	16.0	502.0	921.0	462.0	103.2	84.6	16.5	16.66	2.86	56.9
〃 -11	16.0	401.3	990.8	397.6	100.9	81.4	14.7	16.68	2.34	58.7
〃 -12	16.1	279.3	1075.8	300.6	97.3	77.9	10.9	16.82	1.81	58.0

また，同一電流値に対しては，流量が多いほど差が小さい。中央の断面２のゲージ#3の出力は，断面１の値より小さいが断面3，特に#4の値と反転している場合が多い。

上記1.の試験条件に対応する圧力分布をFig.30, 31, 32に示す。圧力値は，上流から下流へ減少するが，低流量流れでは断面２と３の値が対等または逆転する場合がある。流量の増加に対応して圧力値は増加し，かつ流れ方向の勾配は順勾配となる。Port.3の指示値は，次に述べる反転位置の場合も含めて，常時Port.2の指示値よりわずかに大きい。

２．　1.で示した現象は従来のデータでも観察されており，より大きな偏差を示す場合もあった。原因解明のための一方法として，CM-1の上下を反転させて計測した（Run No.737）。この場合，構造上の問題で，同一側壁面での反転取り付けが出来ないので，反対側面に取り付け，対向面には水冷平板をおいて試験した。比較結果をFig.33に示す。左側が通常位置（Run No. 725），右側が上下反転位置（Run No. 737）のデータである。反転位置では明らかに非対称性が反転している。他の出力傾向は通常位置のものと同一である。これより，観測された非対称性はゲージの特性によるものであり，ノズル内に異常波の発生等が存在しないことが確認できた。

３．　CM-1に傾斜角を４度つけた場合と傾斜角無しの場合の比較をFig.34に示す。左側が通常位置，右側が角度付きのデータである。熱流束の増加量は3試験条件の範囲で，断面１で21-24%，断面２で25-29

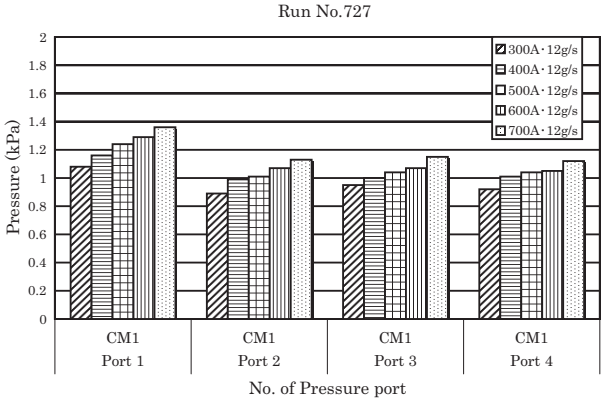

Fig.30 Pressure distributions on CM-1 (air mass flow rate : 12g/s)

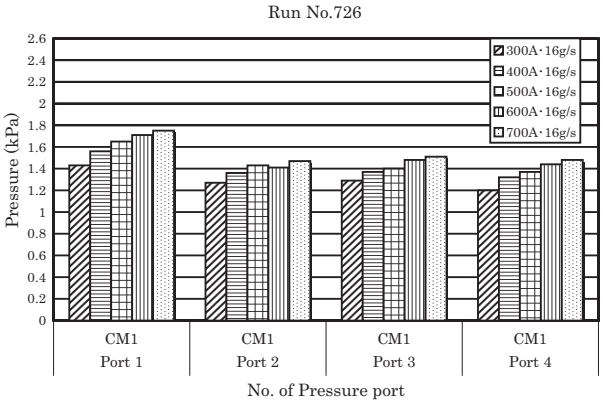

Fig.31 Pressure distributions on CM-1 (air mass flow rate : 16g/s)

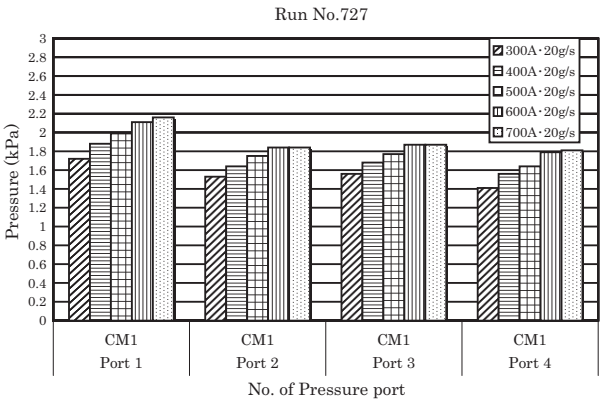

Fig.32 Pressure distributions on CM-1 (air mass flow rate : 20g/s)

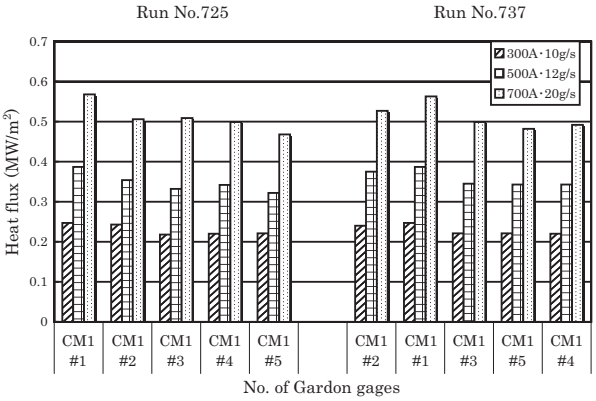

Fig.33 Comparison of heat flux distributions on CM-1 at normal and inverted upside down positions

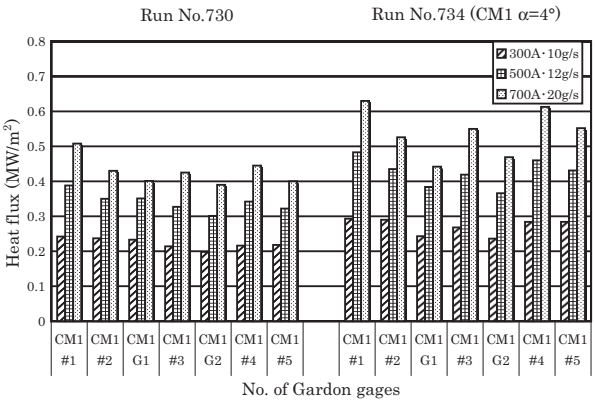

Fig.34 Comparison of heat flux distributions on CM-1 at normal and inclined positions

%，断面3で30-37%であった。対応する圧力の増加は，22-25%，18-29%，33-43%であった。対向壁のCM-2のゲージG1，G2熱流束計測値の増加量は4.3-10.2%，19.2-20.3%であった。

4．ガードンゲージの各種流れ条件下（放射と対流の混合加熱環境，出力のゲージへの流れ入射角依存性等）での計測精度については十分な議論がなされているとは言えず，特にアーク加熱気流のような高エンタルピ気流中での性能評価は殆ど行われていない。このような環境下での熱流束計測精度資料を得るために，Kuo[13] 等や Brookley[14] 等の議論の結果に基いて膜径の小さい（従って，感度が低めの）ゲージを二種類選定してCM-2に装備し，前述の各種環境設下での感度の効果をみるための実測を試みた。CM-2のガードンゲージG1,G2は，実験番号724ではG2が上，G1が下の位置にあるが，他の実験ではすべてG1を上，G2を下に取り付けている。チャンネルノズル取り付け状態では，測定室内は狭隘で，実験時間の制約上多数回の交換評価は困難であった。Fig.35に上下交換の比較結果を示す。加熱率の高い場合には，両者の一致は良好である。

Fig.23－Fig.25に，G1,G2，およびCM-1の#3ゲージの同一試験条件下での時間履歴を示している（Run No.730）。G1,G2については低感度による雑音の影響が見られ，また#3ゲージとの計測値のずれも見られる。また，Fig.26に対向面温熱壁の場合のG1,G2時間履歴（Run No.679）を示す。対面が温熱壁のため高めの信号レベルが得られているが，出力の比率に公称感度との差異が見られる。これらのゲージは，先述の様に低感度のゲージを使用しているために，今回の試験条件範囲では信号出力が低めで，計測誤差の要因になっていると思われる。

5．CM-2に対して，対面が冷却壁，冷却壁でG1,G2の位置交換した場合，高温壁の場合の三条件での各熱流束値測定結果をFig.36に示す。冷却壁の場合では，G1,G2の位置交換により熱流束値の逆転がみられるが計測誤差の範囲と考えられる。対面にC/C材供試体を取り付けた高温壁の場合には，高温壁よりの放射加熱により熱流束が60－70%増大している。C/C材の加熱試験時等に，高表面温度を実現するために対面に高温壁を組み合わせることにより加熱の増大を図っていたが，定量的に加熱量の増大が計測出来たのは今回が最初である。今回の実験では，G1,G2（特にG1）の感度選択がやや低すぎたと思われる。ゲージは交換が可能なので，より適正な感度のゲージ（3～5MW/m²程度）の採用により，より正確な計測が可能と思われる。

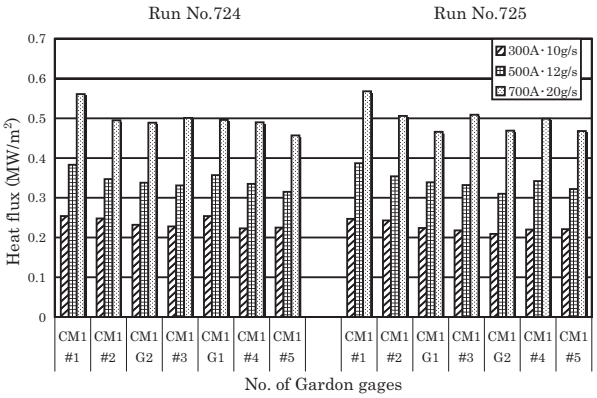

Fig.35 Comparison of heat flux distributions : positions of G1 and G2 gages on CM-2 interchanged

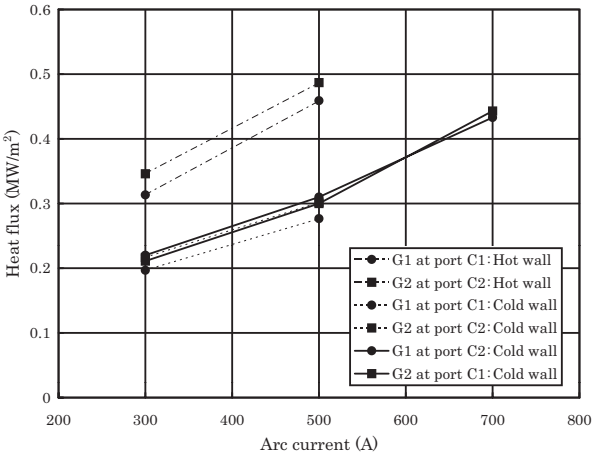

Fig.36 Heat flux data of G1 and G2 gages for (a)hot opposite wall, (b)cold opposite Wall and (c)position of the two gages interchanged

以上の検討結果よりは，高エンタルピ気流中の側壁でのガードンゲージの計測値の信頼性について，CM-1データとの比較がまだ十分には出来なかったが，使用ゲージの選定等についても一応の目安が得られたので，更に熱流束計測精度，信頼性向上のための検討を進めていく予定である。

5.4 供試体計測

供試体はノズル側壁に取り付けるため，従来の試験では，加熱試験中に表面状況を観察することが出来なかった。本実験では，観測ポートに観察用光学系を取り付け（分光用光学系を共用），表面像をCCD検出器で受光，ビデオ観測することにより実時間で表面状況のカラーモニタを可能とした。観察可能な視野角に制限があるため，実観測範囲はϕ2.5mm以内であり，使用した観測光学系倍率2.1倍，CCDカメラ有効画素数768×493より解像度は0.0051mmである。観測画面の一例をFig.37に示す。

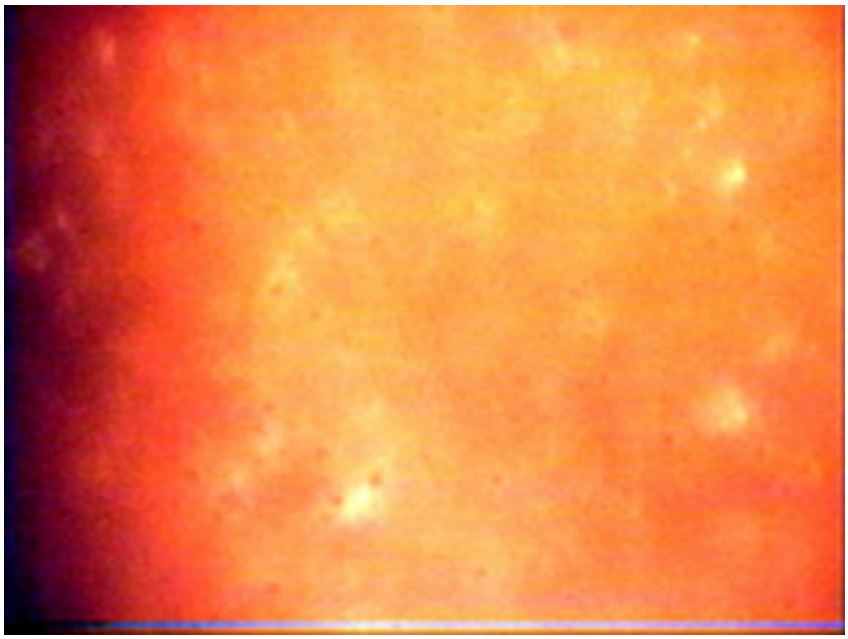

Fig.37 Real time observation of a sample tile surface during a heating test

また，ファイバ二色式放射温度計（チノ製：型式IR-FBQS：検出素子Si：計測範囲ϕ1mm：分解能1℃）の使用により，加熱試験中の供試体表面温度の計測を可能にした。計測温度範囲は800～1600℃，使用波長は0.85および1.0μmである。二色式温度計の最大の利点は，供試体材料表面の放射率データを必要としないという点である。但し，出来るだけ高い加熱率で供試体加熱試験を実施する際には，CM-2の代わりに温熱壁を使用する場合があり，そのような場合には表面温度の同時計測は出来ない。Fig.38に耐熱タイルの加熱試験時の計測例を示す。タイルには，流れ方向三個所（CM-2のポートP1, P2, P3の位置に対応）のコーティング直下および中心部（ポートP2の位置）の深さ方向三点に熱電対が埋め込まれており，それらの温度と二色温度計による表面温度の時間履歴が示されている。二色温度計はポートP2の位置で計測しており，立ち上がり区間では計測範囲外（測定下限約800℃）で計測出来ないが，定常加熱領域では対応する熱電対測定値と良好な一致を示している。供試体加熱結果の評価・解析に関しては，流れ場諸測定量を活用してタイル表面への熱流束の変化をCFD解析し，コーティング表面の触媒効果の評価等を実施していく予定である。

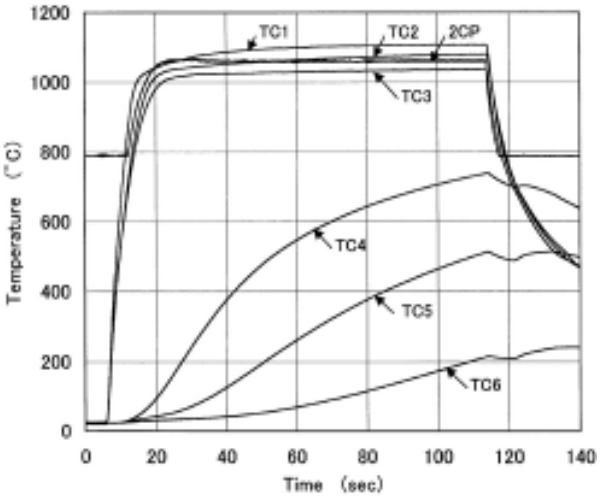

Fig.38 Heating test of a flat ceramic tile. Time history of surface temperature measured by two-color pyrometer and temperatures of the tile measured by six embedded thermocouples

6．まとめ

宇宙往還機等に適用する大型平板防熱材を加熱・評価するアーク加熱風洞チャンネルノズル内部の流れ場の計測，試験中の材料表面の観測等を目的とした校正装置（CM-2）を製作し，発光分光計測，質量分析，材料表面温度計測，表面観察等を可能とした。従来使用してきた校正装置（CM-1）を併用して総合的な実験を実施し，これら計測手法の適用性を検討し，所期の計測が可能であることを確認した。

分光計測の適用により，発光種の確認，NOバンドスペクトルによる測定部での回転温度の計測が可能となった。NOバンドの発光強度は下流に向かって増大することが確認された。アーク加熱空気プラズマの膨張流中でのこのような現象の観測は最初であり，チャンネルノズル以外の風洞膨張気流中でも同様の過程が期待される。

高エンタルピ空気流におけるNO分子の生成反応については，近年集中的な研究が進められている（文献 15, 16 とその引用文献）。本風洞気流でのNOバンド発光機構については，前駆解離による解析[12]が有効であった。今回の観察は，空気プラズマ膨張流での空気成分原子およびそのイオン，電子の再結合過程によるNO分子の生成反応の解析の際に有用であると考えている。また，ノズル内での空気成分原子の観察より，触媒反応評価等への適用性の期待が得られた。

壁面熱流束計測については，従来使用中の校正モジュール（CM-1）の併用による総合的熱流束計測評価を行った。測定部での計測値の非対称性については，測定ゲージの特性が原因との結論を得た。また，温熱壁や傾斜壁の使用による供試材料の加熱率増加手法の定量的検証が行えた。ガードンゲージ熱流束計測の精度の検証を試みたが，使用ゲージの感度の選択が必ずしも十分でなかったこともあって，満足な結論が得られたとは言えず，今後も引続き検討が必要である。

気流成分質量分析の定量的データの取得も今後の課題である。供試試験材料の試験技術として，表面温度の計測，表面状態の観測が可能となり，材料試験技術の向上が図れた。また，チャンネルノズルの性能について上記の新しい所見が得られ，かつ基礎データの蓄積が行えた。今後，各項目についてCFDの適用によるノズル流解析，定量評価を行い，気流特性評価，耐熱材料試験，触媒効果評価等への適用を進める。チャンネルノズルは使用例が少なく，JSCでシャトルの開発に使用されたもの[6]が唯一の実用例であるが，往還機開発には大型構造の熱試験が極めて重要であり，十分な気流診断により気流評価技術の蓄積，向上，信頼性確立を図りたい。

7．謝　辞

本報告は，平成10,11年度（1998,1999）の二年間にわたる航空宇宙技術研究所奨励研究の成果報告である。関係各位に謝意を表する。また，分光計測結果の解析，スペクトル特性の物理的考察に関して群馬大学工学部白井教授より協力および有用な示唆を受けた。

8．参考文献

1) 松崎貴至，石田清道，渡辺泰夫，三保和之，板垣春昭，芳仲敏成，“750kWアーク加熱風洞の構造と動作特性”，航空宇宙技術研究所資料 TM-760，2001年11月

2) 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年1月，pp.67-78

3) 渡辺泰夫，石田清道，白井紘行，“750kWアーク加熱空気流におけるNO分子バンド発光の分析”，航空宇宙技術研究所報告 TR-1417，2000年12月

4) A.Balter-Peterson, F.Nicols, B.Misfud, and W.Love, “Arc Jet Testing in NASA Ames Research Center Thermophysics Facilities”, AIAA-92-5041, Dec. 1992.

5) D.A.Stewart, J.V.Rakich, and M.J.Lanfranco, “Catalytic Surface Effects Experiment on the Space Shuttle”, in Thermophysics of Atmospheric Entry, Vol.82 of Progress in Astronautics And Aeronautics, 1982, T.E.Horton, Editor, pp.248-272.

6) W.C.Rochelle, H.H.Battley, J.E.Grimaud, D.J.Tillian, L.P.Murray, W.J.Lueke and T.M.Heaton, “Orbiter TPS Development and Certification Testing At the NASA/JSC 10MW Atmospheric Reentry Materials and Structures Evaluation Facility”, AIAA-83-0147, Jan. 1983.

7) H.E.Christensen and H.W.Kipp,“Heating in Shuttle RSI Gaps Derived from an Inverse Heat Transfer Solution”, ASME Paper 75-ENAs-15, July 1975.

8) W.L.Bade and J.M.Yos,“The NATA Code-Theory and Analysis”, NASA CR-2547, 1975.

9) A.Gulhan, B.Esser, and U.Koch, “Experimental Investigation on Local Aerothermodynamic Problems of Re-entry Vehicles in the Arc Heated Facilities LBK”, AIAA 2000-2518, June.2000.

10) A.Gulhan, B.Esser, and U.Koch,“Experimental Investigation of Reentry Vehicle Aerothermodynamic Problems in Arc Heated Facilities”, Journal of Spacecraft and Rockets Vol.38, No.2, March-April 2001, pp.199-206.

11) T.Miyakawa, H.Shirai and Y.Watanabe, “Characteristics of NO Band Emission Measured in an Arc-Jet Facility”, ISTS 2000-e-40, 22nd ISTS, Morioka, May 28-June 4,2000.

12) T.Miyakawa, H.Shirai, and Y.Watanabe,“Radiative Properties of NO Bands in Arc-Heated Wind Tunnel Flows”, Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.49, No.565, Feb.2001, pp.48-54.（in Japanese）

13) 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.

14) 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℃", ISA Paper #94-1039, Proceedings of the 40th International Instrumentation Symposium, 1994, pp.303-316.

15) G.Colonna, M.Tuttafesta, and M.Capitelli, "Non-Arrhenius NO Formation Rate in One-Dimensional Nozzle Airflow", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.13, No.3, 1999, pp.397-405.

16) G.Colonna, M.Tuttafesta, M.Capitelli, and Giordano, D.,"Influence of O_2(v)+N=NO+O on NO Formation in One-Dimensional Air Nozzle Flow", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.14, No.3, 2000, pp.455-456