

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

耐熱構造要素評価試験用赤外線ランプ加熱システムの 機能性向上と加熱特性評価

種村 利春, 佐藤 裕, 甲斐 高志

2007年3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

耐熱構造要素評価試験用赤外線ランプ加熱システムの
機能性向上と加熱特性評価

Functionality Improvement and Heating Property Evaluation of Infrared Lamp
Heating System for Thermal Resistive Structure Element Tests

種村 利春^{*1}, 佐藤 裕^{*1}, 甲斐 高志^{*1}

Toshiharu TANEMURA^{*1}, Yutaka SATO^{*1} and Takashi KAI^{*1}

* 1 総合技術研究本部 構造技術開発センター

Structure Technology Center, Institute of Aerospace Technology

2007年3月

March 2007

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

Abstract	1
1. はじめに	1
2. システムの構成	2
2.1 赤外線クオーツランプ	2
2.2 真空槽と排気系	2
2.3 制御系	2
2.4 供試体の位置合わせ機構	2
2.5 冷却系	4
2.6 計測系	4
3. 熱流束センサアレイ	5
4. 赤外線加熱試験	5
5. 試験結果	6
6. おわりに	11
参考文献.....	11
付録：装置構成要素のデータ.....	12
真空槽2面図	15

耐熱構造要素評価試験用赤外線ランプ加熱システムの 機能性向上と加熱特性評価

種村 利春^{*1}, 佐藤 裕^{*1}, 甲斐 高志^{*1}

Functionality Improvement and Heating Property Evaluation of Infrared Lamp
Heating System for Thermal Resistive Structure Element Tests

Toshiharu TANEMURA^{*1}, Yutaka SATO^{*1} and Takashi KAI^{*1}

Abstract

Basic heating property evaluation tests were conducted by using an infrared quartz lamp heating system which was developed to investigate the thermal conductivity properties of Thermal Protection System (TPS) applied for reusable reentry vehicles. Recently, a great modification was made to this system to improve the functionality and the reliability of applied heat flux condition. A renewal system has a programmable control capability of both the atmospheric pressure and the irradiative heating strength so as to simulate a condition of reentry. Moreover, the precise heat flux distributions profile can be measured by introducing newly developed heat flux sensor array measurement equipment. In this report, the outline of the improved system and the basic heating characteristic data were shown to give the useful information on this system for the future application.

Keywords: Reentry vehicles, Thermal protection system, Thermostructure, Radiant heating test, Heat flux calibration

概 要

宇宙往還機の熱防護系（TPS）評価試験に用いるために開発された、赤外線ランプを加熱源とした耐熱構造要素評価試験システム¹⁾に対して、運用上の機能性と実験精度の向上を図ることを目的とした改修をあらたに加え、基本的加熱特性評価試験を行った。本システムは、真空槽内に設置した供試体を、真空槽の一端に取り付けられた石英ガラス製ベル型耐圧容器（ベルジャ）を通して、赤外線ランプにより加熱するものである。今回の改修では、これまで手動によって行うことが必要であったランプへの供給電力制御および真空度制御の全自動化が図られた。これにより供給電力および雰囲気圧力を、時刻歴も含めて予めプログラムされたパターンに従った制御が容易に行えるようになり、従来と比較して機能性が格段に向上するとともに、同時に進めたランプ冷却用圧縮空気源等の補機類の能力向上によって、より長秒時の試験にも安定的に対応できるシステムとすることができた。また本システム専用の加熱率校正用熱流束センサアレイの開発も行い、供試体設置箇所における輻射加熱率の空間分布プロファイルが精度良く評価できるようになった。

1. はじめに

赤外線ランプを加熱源として用いた耐熱構造要素評価試験システムは旧NALにおけるHOPE開発に関連して、平成8年頃より順次整備が進められてきたもので、

宇宙往還機が大気圏再突入する際の空気力学的加熱条件を模擬することによって、熱防護系（TPS）の伝熱特性評価を行うことを目的としたものである。これまでにセラミックタイルを中心とした各種TPSの評価試験に実際に適用され、その有用性が示されてきた。宇宙輸送

* 平成19年3月15日受付 (received 15 March 2007)

*1 総合技術研究本部 構造技術開発センター

(Structure Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

系分野においては新たなTPSの開発は重要な課題のひとつであるが、この種の評価試験システムは世界的に見てもあまり例が無く、今後さらに高精度の試験を効率良く行うために、既存のシステムに対して以下に示すような改修を行った。

- A) デジタル制御器導入による加熱電力と気圧のプログラミング制御機能付加。
- B) 供試体2軸位置決めステージ機構の設置。
- C) ガードゲージを用いた定温水冷方式熱流束測定センサアレイの開発・設置。
- D) 赤外線ランプ保持フレームを堅牢化することにより、照射位置精度を向上。
- E) 赤外線ランプ冷却用圧縮空気源の能力向上による長秒時試験性能の向上。

以降では改修された装置の特徴、基本性能の紹介及び、条件を変えた加熱特性評価試験を行うことによって得られた基本加熱特性データの分析を通じて、耐熱構造要素評価試験装置としての有用性を示す。

2. システムの構成

装置の概要としては、真空槽と一体をなすベルジャ内部に供試体を設置し、これに赤外線ランプで照射加熱を行うものである。以下システムを構成する各要素について説明する。

システム全体の構成を図1に、外観を写真1に示す。

2.1 赤外線クォーツランプ

本ランプはResearch Inc.製で、1基につき外径10mm、有効長250mmの5kWのバルブ6本から構成され、本体はアルミ合金製である（写真2）。通電発光時、反射板は循環冷却水により、また電極については圧縮空気の吹きつけにより冷却がなされる方式である。これを3基組み合わせることにより最大90kW（30kW×3）の消費電力で赤外線照射加熱を行える。ランプには3相400Vの電源が供給され、半導体スイッチング素子により電力量の連続的変化が可能である。ランプ部とその冷却ホース類はアルミフレーム製架台で支持され、その架台を真空槽台座に固定することにより、ランプと供試体の相対位置精度を確保している。また架台の上端にターミナルを配置し、電力制御装置からの出力を各ランプに供給している。

ランプは真空槽及びこれに取り付けられたベルジャ円筒部の中心軸を基準に半径330mmの円周上の上部に取り付けられている。ベルジャの真上に1基、これと中心が22°ずらした角度で左右に1基ずつ固定されている。ランプ位置は必要に応じて調整可能である。

写真3に赤外線ランプ照射加熱状況（一例として電力出力10%）を示す。

2.2 真空槽と排気系

本体は、両端部にフランジ付き開口部を有した内径800mm、長さ800mmの円筒形ステンレス製であり、片側には開閉扉が、もう一方のフランジ部には合成石英で製作された内径600mm、長さ600mm、一般部肉厚が約4mmのガラスベルジャが取り付けられている。この真空槽全体は架台構造によって支持され、容器中心は床面から高さ1200mmとなっている。

排気は吐出量能力530L/min.のロータリーポンプを用いており、供試体からの発生ガスがない理想的状態において、1Pa台の真空度を維持することができる。真空度はピラニ真空計およびクリスタルゲージによって計測している。

また真空度を与えられた時刻歴に沿って能動的に制御するために、マスフローコントローラによる空気導入量制御とスロットルバルブによる排気抵抗制御を行うことができるようになっている。不活性気体による雰囲気気の置換も可能である。

2.3 制御系

大気圏再突入時の大気圧と加熱率履歴を模擬するために、赤外線ランプへの電力と大気圧を同時にプログラミング制御するシステムを新たに開発した。制御器はイー・アンド・デー社のデジタル制御器DSP AD5430型を適用し、MATLAB/Simulinkにより制御モデルを構築した。電力制御は、新たに追加されたプログラム制御と従来の手動制御が切り替えスイッチにより選択できる。

プログラム制御はPC上で各ランプへの供給電力を、時間を含め独立に制御可能で、その際のシステムの安全状況も確認して動作する（写真4、7）。

2.4 供試体の位置合わせ機構

真空槽内の供試体の前後・左右方向の位置移動は、真空槽内の固定ベース上に、直動スライダをボールスクリーンエッジによって駆動する方式を上下2段に組み合わせ用い、前後700mm、左右160mmの移動量が可能である。真空槽内に設置の様子を写真5に示す。

前後方向の移動量を多く確保してあるのは、試験位置（ベルジャ側）から試験準備作業を行う開閉扉側への供試体の移動を容易にすることで、作業性の向上を図るためである。高さ方向の位置調整については、対象とする供試体の形状にも依存することから、現在のところ現実性を優先して、数種類の高さの異なるスペーサ・ブロックを挿入する方式としている。なお、本稿で報告するセ

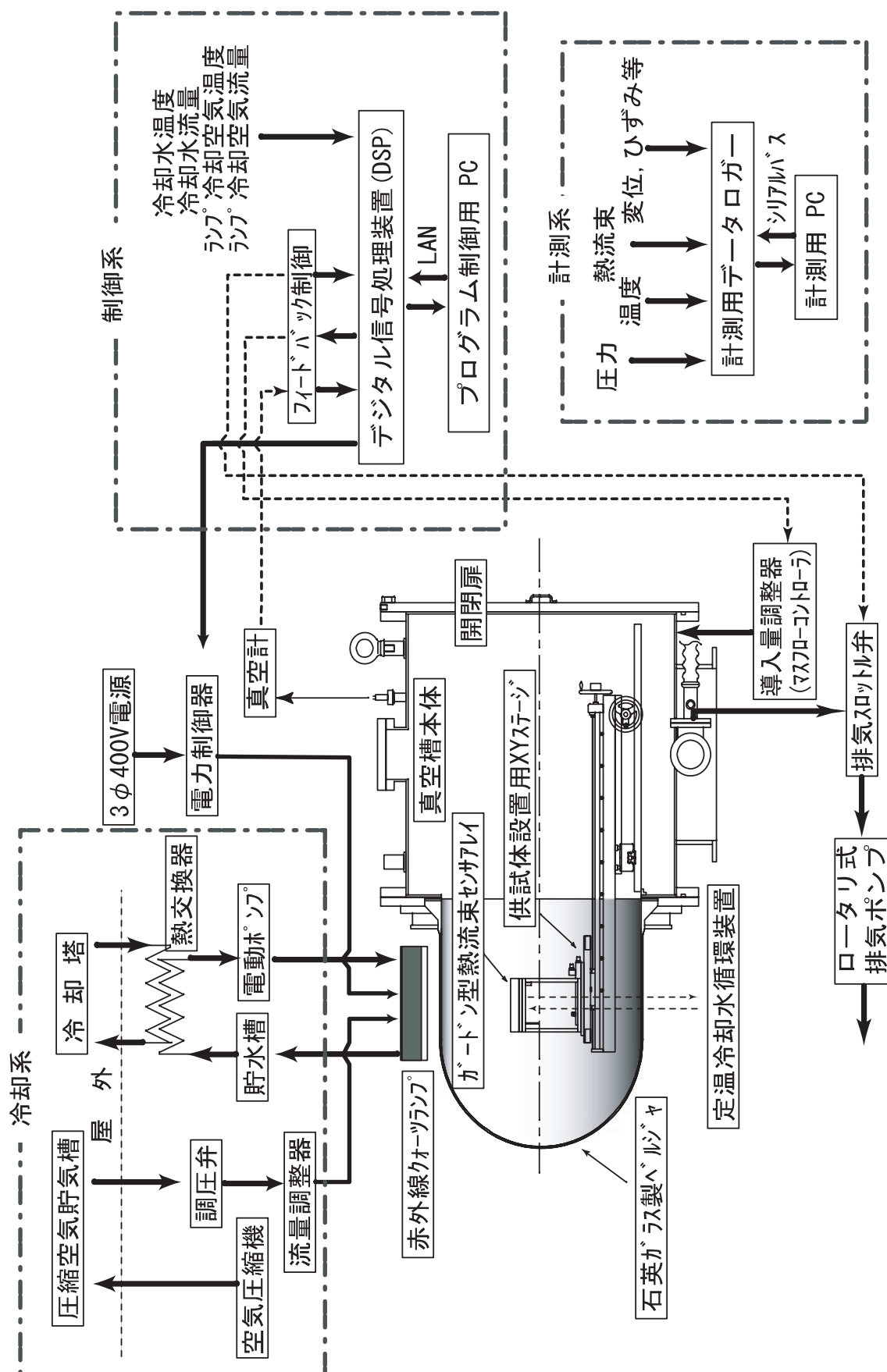


図1 システムの構成



写真1 システム全体



写真2 赤外線クオーツランプ



写真3 赤外線ランプ照射加熱状況

ンサアレイを適用した基本加熱特性取得試験においては、加熱を継続しながらセンサアレイを水平面で手動により移動する必要から、真空槽扉を開放して大気圧下でのデータ取得とした。

2.5 冷却系

前述のランプ冷却のため、また熱流束センサ部分の温度を定温とするため、水及び圧縮空気を使用して冷却



写真4 電力制御装置

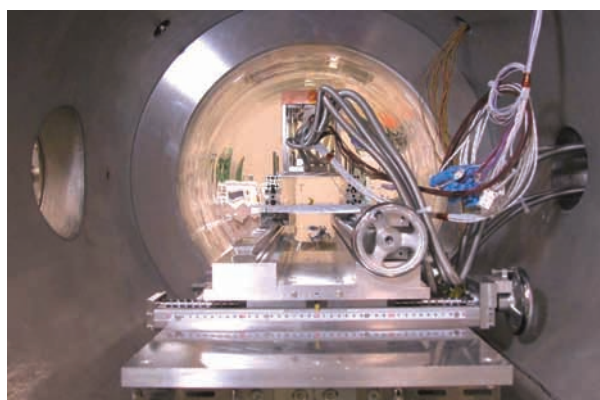


写真5 供試体の位置合わせ機構

行っている（写真6）。水冷は目的により2系統を使用することとし、赤外線ランプ3基には循環水を熱交換により冷却するシステムを、また、熱流束センサアレイは、定温（20℃）に保つ必要から温度制御可能な冷却水循環装置を専用に割り当てている。

圧縮空気は圧縮機とこれに接続された屋外の貯気タンクから、赤外線加熱ランプ3基の電極部分を冷却している。こちらは供給電力量に応じた空気流量が必要であり、吹き出し温度をおおむね150℃以下に保っている。

2.6 計測系

計測項目は以下の通りである。

- ・熱流束，センサ温度（各9点）



写真6 冷却系

- ・冷却水流量, 温度 (各5点)
- ・治具温度 (5点)

これらをデータロガーで取得し, PCのデータ処理ソフトにより, 測定値として記録する (写真7)。測定データのうち, 熱流束値以外は今のところ測定環境のモニター用としている。

3. 熱流束センサアレイ

熱流束校正用として新たに開発したものであり, センサはMEDTHERM社製ガードン型熱流束計 (64シリーズ) を使用している。仕様は以下の通りである。

- ・使用形状: 直径25.4mm (1inch)
- ・測定範囲: (ガードン型) $\sim 500\text{kW/m}^2$
- ・最大温度: (水冷式) $1,200^\circ\text{C}$
- ・直線性: フルスケールの $\pm 2\%$ 以内
- ・再現性: $\pm 0.5\%$ 以内
- ・精度: $\pm 3\%$ 以内
- ・輻射率: 0.92
- ・応答速度 (63.2%): 290ms以下

上記の熱流束センサを $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 36\text{mm}$ (厚さ) の冷却板上に縦・横それぞれ50mm間隔で3列, 合計9個配置することにより, センサアレイを設計, 製作した。このセンサアレイの構造は各々のセンサを中心間距離50mm間隔で嵌め込めるようにした冷却水流路を設けた上側部材 (写真8-1左) と下側部材 (同右) との間を銀ろうづけ処理により密着接合し一体化 (写真8-2左) したもので, 材質は無酸素銅である。この冷却板に対する冷却水循環系と各々のセンサに予め設けられている冷却水循環系を独立なものとし, 2.5節で述べた冷却水循環装置からの冷却水を2分してそれぞれに適用するこ

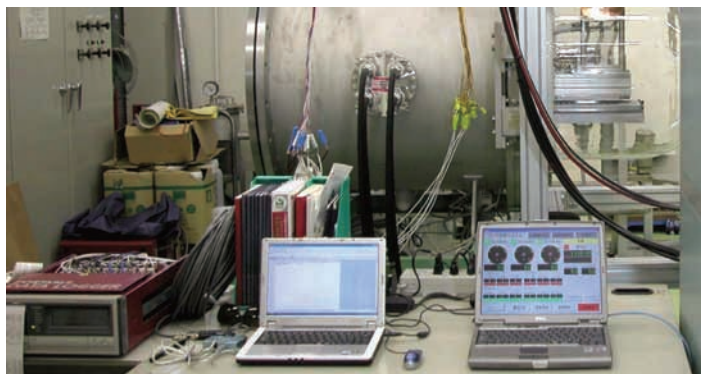


写真7 計測系及び制御用PC

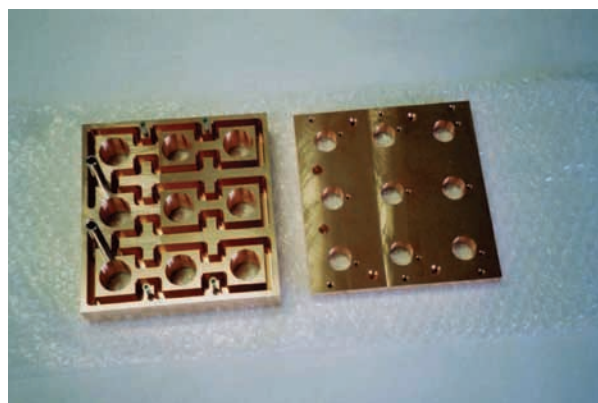


写真8-1 センサアレイ製作過程 (1)

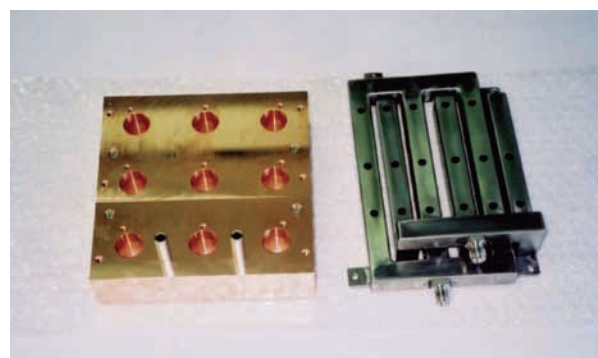


写真8-2 センサアレイ製作過程 (2)

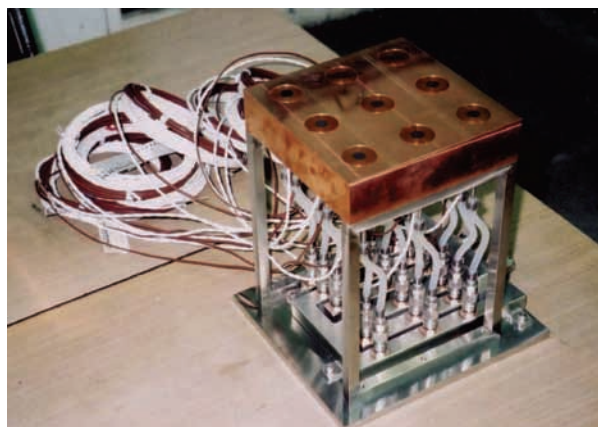


写真8-3 センサアレイ製作過程 (3)

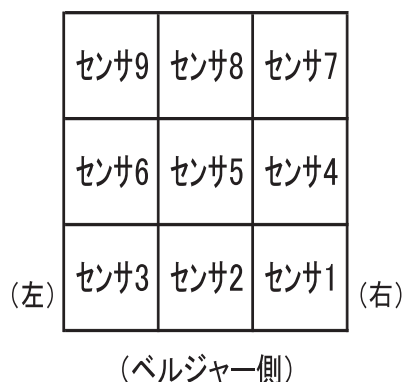


図2 センサアレイ配置

とにより測定値の冷却水温度依存性をできるだけ小さくする工夫を行っている。各々のセンサへの冷却用循環水の分岐・集合には写真8-2右に示すようなマニホールドを用いている。なおセンサアレイ装置全体としてはステンレス製の冷却水循環用配管および支持構造を含め全高は220mmになっている（写真8-3）。

図2にセンサアレイの配置、及び図3～図8のグラフの凡例を示す。

真空槽内に設置することから各種配線・配管は真空槽胴部の各種フランジに設けた専用コネクタを通して接続されている。また加熱試験時、センサアレイ上面以外の加熱を受ける部位についてはガラスクロスで覆うなどして、赤外線ランプからの輻射から保護している。

4. 赤外線加熱試験

センサアレイを使用した本システムでの加熱特性評価試験を行った。これによって供試体による試験を行う場合の、要求に合った条件設定を選定できることを目指

表1 熱流束センサ校正データ

センサ No.	校正值 kW/m ² ・mV	修正係数 (2006.12.11)	修正係数 (2007.03.16)
1	52.2	1.026	1.021
2	52.7	1.005	0.995
3	55.7	1.001	0.988
4	53.5	0.992	0.993
5	50.4	0.958	0.973
6	51.5	0.988	0.998
7	51.4	1.012	0.998
8	51.3	1.064	1.015
9	53.7	1.022	1.022

した。試験は9個のセンサについて電力出力、ランプとの距離を変えての熱流束、及び中心位置から横方向における位置の熱流束分布を測定した。

表1に熱流束センサ校正データを整理した。この中で、修正係数は各センサに同位置で同エネルギーを与えた際の数値は同一になるとの考えで補正を行っているものであり、修正係数は絶対的基準がここでは不明であることから9個の係数値全体の算術平均が1となるように算出した。なお測定時期が離れている場合は修正係数を求め直している。

この中で1個のセンサはセンサ面の塗装の剥がれがあったためメーカー指定塗料で補修を行ったが、測定データ上からは安定したデータが得られるのにある程度の期間が必要であるとの印象を受けた。

5. 試験結果

図3aは、センサアレイ中央（No.5センサ）と中央のランプ1基が中心に重なる位置で、電力を50%まで10%

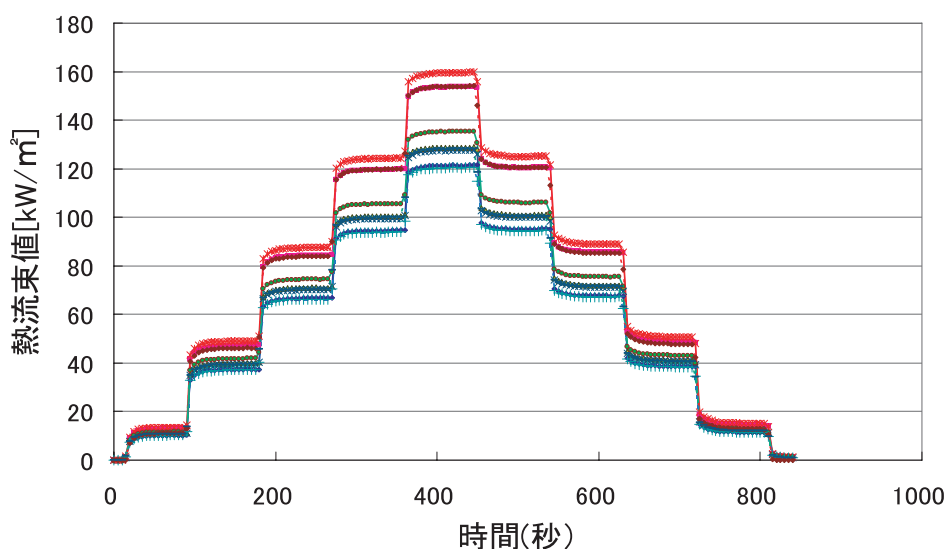


図3a 電力出力と熱流束値 (a)

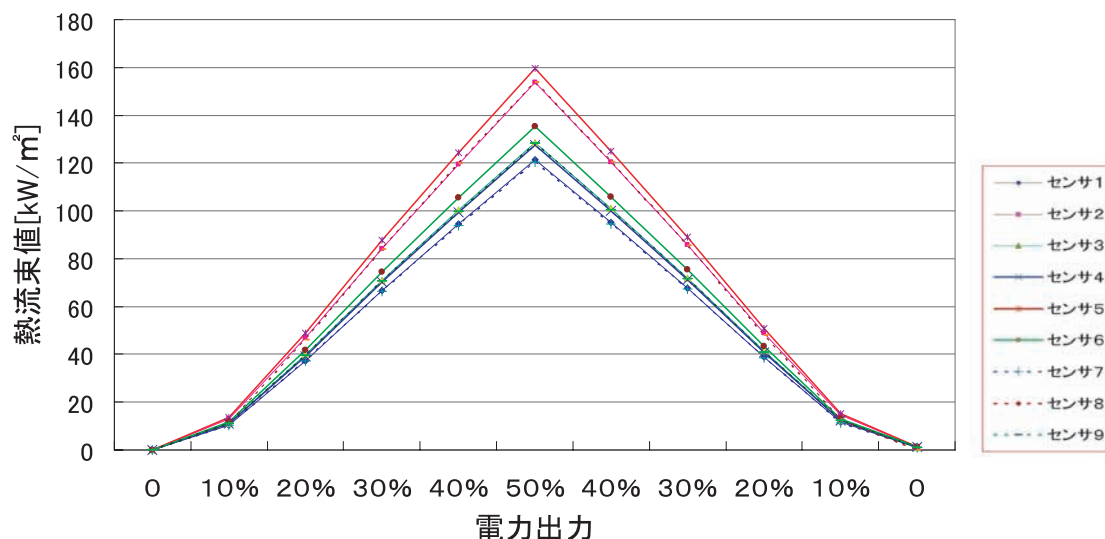


図3b 電力出力と熱流束値 (b)

刻みで上昇させ、次に下降させて得たデータをそのままグラフ化したものである。(測定間隔5秒、電力出力の各ステップは約90秒間) 図では各センサの値が重なっており識別が難しいが、最も上に示す値がセンサ5、次にセンサ2及び8、3番目にセンサ6、4番目にセンサ3、4及び9、最も下がセンサ1及び7になる。この図からは各ステップでの熱流束値が安定するまでの時間、約15秒程度が必要なが分かる。

図3bは、図3aの各ステップでの安定部分の平均値を図示したものである。この図からは、50%～10%の線を熱流束0へ外挿すると約6%の位置で交差することから電力の初めの6%程度が赤外線エネルギーに変換されないことが読み取れるが、実際には5%の電力でも弱いエネルギーが放出されており、電力10%未満では熱流

束“0”に向かって漸近線を描いていると思われる。電力10%以上では各センサ毎に、電力と熱流束値はグラフで直線上に位置していると言える。

全般では中心に位置しているNo.5センサが最も強いエネルギーを受けており、次にその縦方向にあるNo.2, No.8センサが、次に強いエネルギーを受けている。No.5の両側に位置しているNo.6, No.4センサは受感量に若干差が見られるが、その縦方向 (No.3・No.9, No.1・No.7) のセンサとは傾向の一致が見られる。このことはランプの取り付け精度、あるいはランプの個体差によるものと考えられるが、試験精度の向上のために今後解明が必要なものと考えている。

ここで各電力 (%) のステップアップ時の値に対するステップダウン時の値の全センサ平均値の比較を図4に

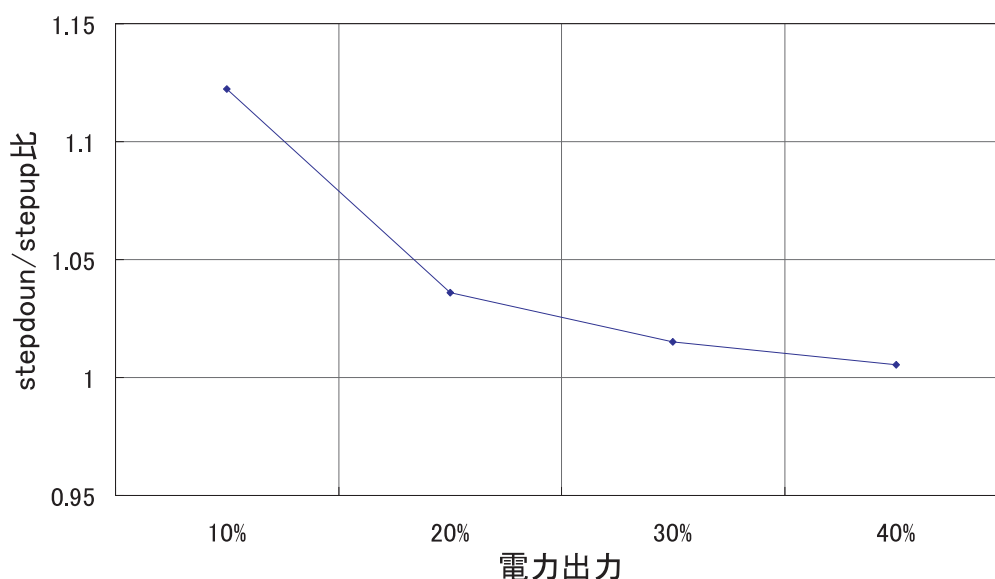


図4 往復加熱量比の変化

表2 熱流束測定値

			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4	センサ5	センサ6	センサ7	センサ8	センサ9
ランプ：1基 出力： 20～80%	TEST- 070314-09 距離 60mm	20%	50.7	75.3	50.8	52.9	79.0	53.9	48.0	74.8	50.1
		40%	125.5	187.4	124.8	130.3	195.9	132.9	118.5	184.3	123.5
		50%	160.5	239.8	159.2	166.3	251.3	169.8	151.2	234.8	157.8
		60%	194.9	290.1	192.2	201.6	303.5	205.4	182.5	283.3	191.5
		70%	228.0	339.0	224.6	235.5	354.4	239.9	213.9	330.6	223.4
		80%	259.9	385.0	255.1	267.6	402.2	273.1	243.7	375.1	254.8
	TEST- 070314-02 距離 94mm	20%	35.6	43.4	37.1	37.8	46.3	39.6	35.2	44.5	37.0
		40%	90.9	111.0	94.3	96.4	118.4	101.0	89.7	113.3	94.6
		50%	117.6	144.8	122.8	124.3	154.1	131.4	115.5	146.7	122.7
		60%	142.6	175.8	148.8	150.8	186.9	159.4	140.0	177.6	148.8
		70%	165.7	204.3	172.6	174.7	217.3	185.2	162.2	206.1	173.3
		80%	190.8	234.5	197.9	201.1	249.0	212.2	186.5	235.9	198.5
	TEST- 070314-05 距離 124mm	20%	28.6	30.8	29.5	30.1	32.6	31.2	28.1	31.3	29.1
		40%	70.8	76.4	72.9	74.5	80.8	77.1	69.5	77.3	72.2
		50%	90.3	97.8	93.1	95.2	103.5	98.6	88.7	98.8	92.1
		60%	109.2	118.3	112.3	114.9	124.9	118.9	107.1	119.2	111.3
		70%	127.9	138.4	131.1	134.2	146.2	139.1	124.9	139.1	129.9
		80%	145.6	157.6	149.1	153.0	166.4	158.2	142.3	158.3	148.2
	TEST- 070314-06 距離 164mm	20%	21.1	20.4	21.4	22.0	21.4	22.4	20.9	20.8	21.3
		40%	51.9	50.4	52.6	54.2	52.9	55.2	51.4	51.2	52.5
		50%	66.6	64.6	67.3	69.5	67.8	70.8	65.9	65.7	67.2
		60%	80.3	78.2	81.2	83.9	82.0	85.5	79.5	79.4	81.2
		70%	93.9	91.4	94.8	97.9	95.8	99.7	92.7	92.6	94.7
		80%	107.0	104.1	107.9	111.6	109.2	113.6	105.6	105.4	107.9
ランプ：3基 出力： 20～60%	TEST- 070314-08 距離 60mm	20%	81.5	93.3	80.2	85.5	98.6	86.8	79.0	92.8	81.2
		40%	206.0	234.4	199.3	215.2	247.2	216.4	198.7	230.8	203.6
		50%	262.6	297.9	252.8	274.0	314.0	274.5	251.9	292.5	258.6
		60%	318.6	361.6	306.4	332.3	380.2	332.2	305.0	353.3	313.9
	TEST- 070314-03 距離 94mm	20%	73.1	71.4	73.6	77.8	76.2	79.6	72.9	73.0	75.3
		40%	185.9	180.2	184.4	196.6	192.5	200.2	184.1	183.1	190.1
		50%	239.2	231.8	236.2	252.3	246.9	256.4	236.0	234.5	243.9
		60%	289.5	280.6	285.8	305.3	299.0	310.2	285.6	283.2	295.9
	TEST- 070314-04 距離 124mm	20%	64.0	59.9	64.0	67.7	63.6	68.6	63.6	61.4	65.2
		40%	161.0	150.6	159.4	169.9	159.7	171.5	160.2	153.5	163.4
		50%	206.2	192.7	203.4	217.2	204.1	218.7	204.1	195.5	208.9
		60%	249.7	233.3	245.7	262.8	247.1	264.4	247.0	236.2	252.8
	TEST- 070314-07 距離 164mm	20%	49.3	48.4	49.8	51.5	50.8	52.7	49.1	49.8	50.4
		40%	121.8	119.7	122.3	127.3	125.7	129.6	121.4	122.8	124.3
		50%	155.9	153.1	156.1	162.9	160.6	165.6	155.5	156.7	159.2
		60%	188.7	185.0	188.3	196.8	194.1	200.1	187.7	189.0	192.4

[データ測定日：2007.3.14]

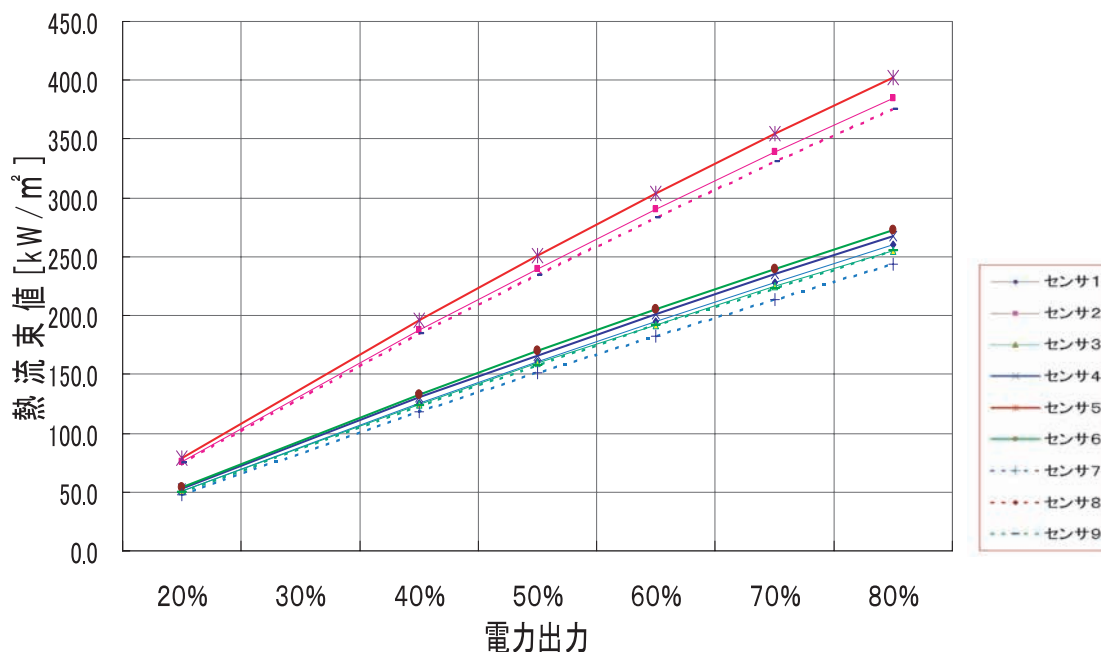


図5 赤外線ランプ出力変化と熱流束値 (1基, 距離60mm)

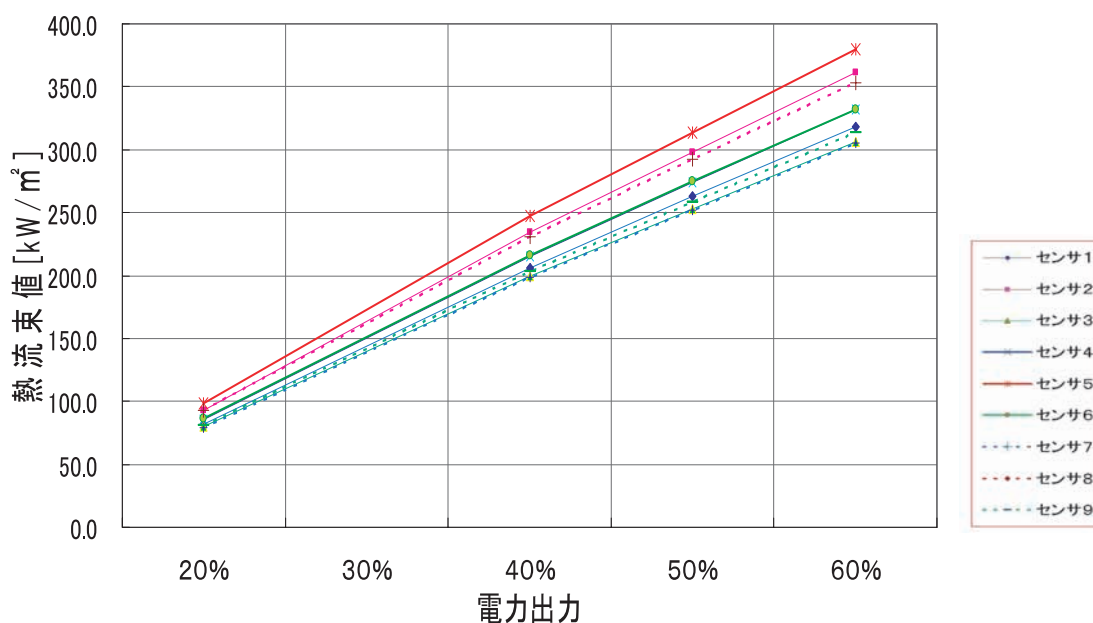


図6 赤外線ランプ出力変化と熱流束値 (3基, 距離60mm)

示す。10%電力の場合は比較的高い数値を示す。これはベルジャの壁面に蓄積された熱の輻射とも思われるが、実用域ではこの影響は無視出来るレベルと考える。

表2は3個の変数を変えての熱流束測定値である。変数は、ランプ個数 (1基, 3基), ランプ～熱流束センサ間距離 (60mm, 94mm, 124mm, 164mm), 電力出力 (20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 但しランプ3基の場合は60%まで) である。このうち最も強い熱流束を受ける距離60mmについて、図5及び図6のグラフに示した。

中間の電力出力で大きめの値が出る傾向は見られるが、素直な結果が得られている。

表2から各距離において最も強い電力出力を与えた場合を選んでグラフ化したものが図7及び図8である。図8では距離60mmの場合と94mm以上において中央列 (No.2, 5, 8) センサと他のセンサの測定値が交差していることが見られる。これは60mmと90mmとの間の距離において局所的な照射ムラが発生する可能性を示唆しているもので、両端のランプの照射角度の検討が必要と考えている。

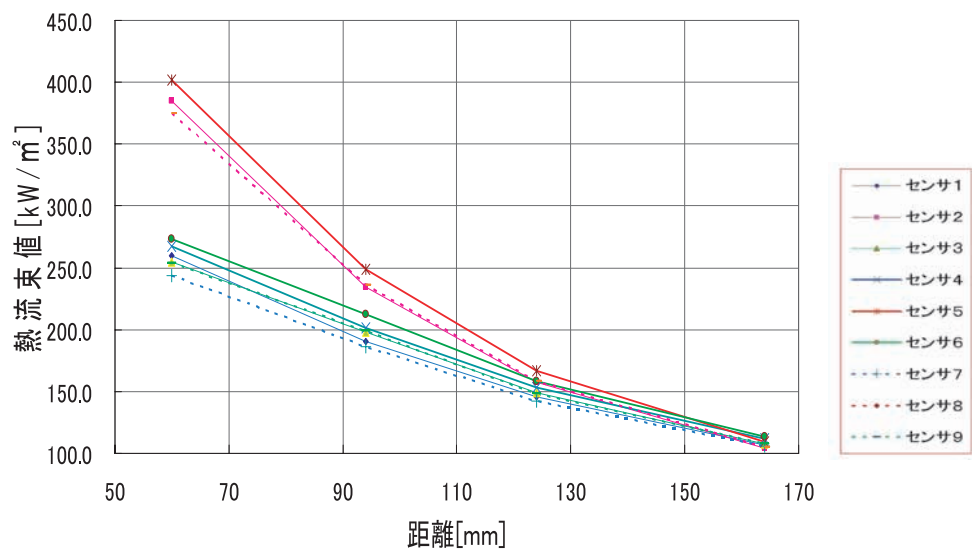


図7 赤外線ランプ1基, 80%出力時の熱流束値

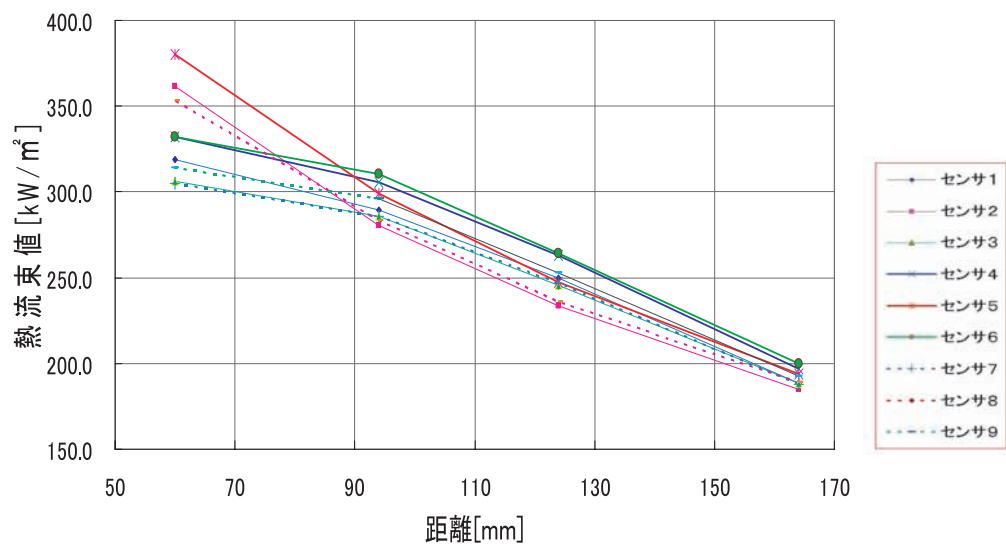


図8 赤外線ランプ3基, 60%出力時の熱流束値

表3 赤外線ランプ (1基・40%出力) におけるランプ縦方向の熱流束分布

単位: [kW/m²], (%)

		ランプ～センサアレイ距離 (mm)			
		60	94	124	164
No.2 ランプ 中心からの 位置 (mm)	150	75.6 (36.9%)	54.4 (44.3%)	42.1 (50.9%)	32.3 (59.7%)
	100	144.8 (70.7%)	88.2 (71.8%)	61.6 (74.4%)	42.5 (78.6%)
	50	191.3 (93.5%)	114.0 (92.8%)	76.8 (92.7%)	50.8 (93.8%)
	0 (中心)	204.7 (100.0%)	122.8 (100.0%)	82.8 (100.0%)	54.2 (100.0%)
	－50	189.3 (92.5%)	112.7 (91.8%)	76.6 (92.5%)	50.9 (93.9%)
	－100	139.8 (68.3%)	86.0 (70.0%)	60.8 (73.4%)	42.5 (78.5%)
	－150	70.9 (34.6%)	52.1 (42.4%)	41.0 (49.5%)	31.4 (57.9%)
	－200	27.9 (13.6%)	25.2 (20.5%)	23.2 (28.0%)	20.2 (37.3%)
	－250		11.4 (9.3%)	11.8 (14.3%)	12.0 (22.2%)
	－300		3.8 (3.1%)	5.5 (6.7%)	6.9 (12.7%)

括弧内の%は各距離における熱流束の相対的大きさを示す。

[データ測定日: 2007.3.16]

表4 赤外線ランプ（1基/3基・40%出力）におけるランプ横方向の熱流束の分布

単位: [kW/m²], (%)

		ランプ～センサアレイ距離 (mm)		
		60	94	164
1基 No.2ランプ 中心からの 位置 (mm)	中央部	216 (100%)	124 (100%)	54 (100%)
	横25	192 (89%)	119 (96%)	55 (102%)
	横50	138 (63%)	98 (79%)	54 (100%)
	横75	79 (37%)	74 (60%)	46 (85%)
	横100	43 (20%)	51 (41%)	38 (70%)
3基 No.2ランプ 中心からの 位置 (mm)	中央部	264 (100%)	196 (100%)	126 (100%)
	横25	245 (93%)		128 (102%)
	横50	215 (81%)	197 (100%)	125 (99%)
	横75	210 (80%)		120 (95%)
	横100	275 (104%)	193 (98%)	121 (96%)

括弧内の%は各距離における熱流束の相対的大きさを示す。

[データ測定日: 2006.11.6/16]

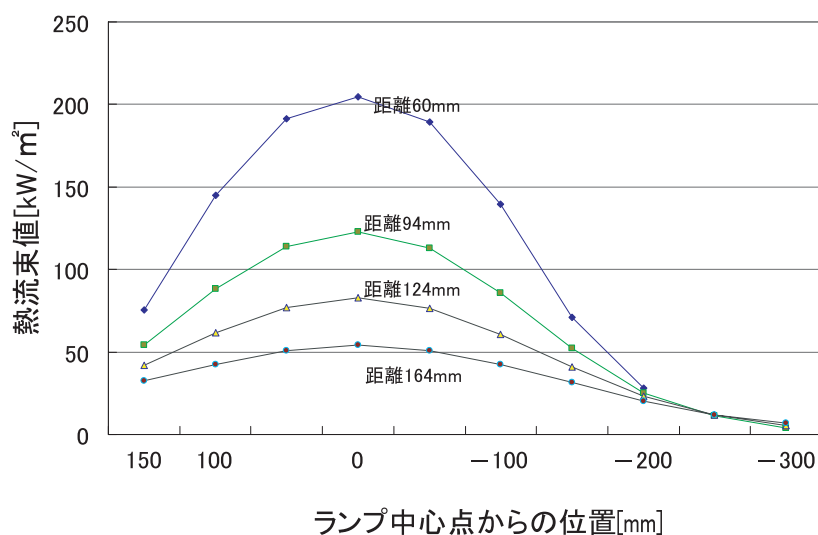


図9 ランプ（1基・40%出力）縦方向の熱流束分布

表3及び表4には、各中心位置を基準にしたランプの縦方向及び横方向に対する減衰の分布を示す。ランプの形状を考えると1基の場合では横方向の減衰は大きいことが予想できるが縦方向も横方向の1/2程度の減衰が認められる。ランプ3基を組み合わせることで横方向は均一な熱流束場を得ることができる。距離が離れるに従って熱流速分布の均一性は高くなるが、得られる熱流束値は当然低下する。従って電力出力も含めた全体での検討が要求される。

図9に表3をグラフで示す。

6. おわりに

今後本システムを使用した試験を行うに当たり、供試体の大きさや要求される試験条件に合わせてランプの配置や電力出力を総合的に検討するための基礎データを得た。供試体を用いた試験実施に当たっては今回得られた

基礎データをもとに試験条件を設定し、センサアレイによる較正を行い、供試体での試験を実施することになる。本システムを用いることにより400kW/m²レベルの高熱流束を受けるTPSの耐熱構造試験実施が可能である。

参考文献

- 1) 高崎浩一, 大竹邦彦, 遠藤修司;
赤外線ランプ方式熱真空加熱試験装置による宇宙往還機前縁部模擬構造供試体加熱試験, 第16回宇宙構造・材料シンポジウム講演後刷集pp.108～111, 宇宙科学研究所2001年3月発行
- 2) 種村利春, 佐藤 裕, 甲斐高志;
耐熱構造要素評価試験用赤外線ランプ加熱システムの機能性向上と加熱特性評価
第47回航空原動機宇宙推進講演会講演論文集 (CD-ROM), 2007年3月

付録1：赤外線加熱試験システム構成品一覧

1. 真空槽系

真空槽改修：富士真空株式会社（ベルジャー取り付けのため H9.10）

ベルジャー：東芝セラミックス 化学事業部営業部

X-Yステージ（スライド機構）：THK（株）

KR45H10BFME+440LOFE-00X0

KR45H20BFME+940LOFE-00X0

SR35M1W2+440L

SR35M1W1+1000L

LC5-K0188-02, LC5-K0188-03, LC5-K0188-04, LC5-K0188-05

ロータリーポンプ：DUO 35 ファイファー社

吐出量能力 530L/min.

真空槽内の圧力制御関係

真空計 : クリスタルゲージ M-320XG型 アネルバ株式会社
ピラニ真空計 アルバック製

真空度表示器 : A-NET M-390 アネルバ株式会社

排気量調整 : スロットルバルブ MDVX-015 Mykrolis

空気導入量調整：マスフローコントローラ CMQ0020 山武株式会社

2. 赤外線ランプ系

赤外線ランプハウジング：日本S.T.ジョンソン商会 機械部（×3）

CONTACT RESEARCH INC.

定格 : 480V 36kW（各ランプ6本使用）

大きさ : 81.7(W)×80.0(H)×320(L) 内部幅71.4mm

内部反射板深さ：32mm, ランプバルブ前面深さ：15mm

赤外線ランプ加熱制御装置 システム：エー・アンド・デイ株式会社

POWER CONTROLLER：RESEARCH INC.（×3）（H9.3）

Model.No. 664F-65-331

定格 : ライン電圧415V 最大電流125A（供給電圧：400V）

3. センサアレイ系

熱流束センサ：MEDTHERM社製，64シリーズ（有）テクノオフィス

センサアレイ製作：（有）三光工業（H17.9）

赤外線ランプ支持枠：ヤマト（株） フレームシステム YFL-8080-8シリーズ

基本枠組み外寸：1360W×760D×1900H（突起部除く）

難燃カーボンフェルト：トラスコ中山K.K. スパッターシート・ADタイプ

耐熱：連続250℃／瞬間1300℃

4. 冷却系

4.1. 赤外線ランプ 空気冷却系

空気圧縮機：日立産機システム OSP-15VRⅢ型

吐出圧力/空気量：0.83MPa/2.1m³/min

エアーレシーバー（外部貯気タンク）

容量：1.5m³ (1100φ×1600)

設計圧力：971kPa

ガス流量計：AM-1402-DU型（×3） 東京計装

ガス流量モニター：CMG400A 1501101D0型（×3） 山武株式会社

〔実験時冷却空気使用量：1～2m³/min・ランプ1基あたり〕

（ランプ3基の場合、各1.5m³/minが最大流量）

4.2. 赤外線ランプ 水冷却系

ステンレスポンプ：TYPE 20-RXAS-150TE (HARUYAMA MANUFACTURING.CO.LTD)

100m 17L/min (200V 50Hz 6.1AMP, 2800RPM) (H2.2購入)

プレート式熱交換機：アルファ・ラバル株式会社 M3-FGL型 (H7購入)

電熱面積：0.736m²

設計圧力/温度：6kg/cm²G/60℃

水槽（ポリプロピレン製）：約400×550×300H 使用水量：40L

4.3. 熱流束センサアレイ 水冷却系

冷却水循環装置：EYELA（東京理化器械K.K.） CA-1113型 (H18.10購入)

温度調節範囲：－20～＋20℃（低温時はエチレングリコール等使用）

冷却能力：900W

循環能力：揚程9.5m/流量14L/min

4.4. 冷却水流量計

流量計：東京計装K.K. VF-2000 渦式フローセンサ (VF-2032)

流量レンジ：2～16L/min（分解能：0.1L/min）（×5）

〔実験時流量〕 赤外線ランプ(1) → 10.5L/min

赤外線ランプ(2) → 10.5L/min

赤外線ランプ(3) → 10.5L/min

熱流束センサ冷却板 → 2.3L/min

熱流束センサ → 3.8L/min

5. 計測系

データロガー：東京測器研究所 TDS-303 (S61.12)

本体測定点：30点. (仕様：最大1000点.), 0.06sec/点

外部スイッチボックス：東京測器研究所 ISW-50C (S61.11)

測定点：50点 (×3)

5.1. データロガー TDS-303 測定点, 及び配線識別 (端子位置: A, B, C, D, E)

00-CH.0 (空き)

00-CH.1 熱流束値1 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.2 熱流束値2 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.3 熱流束値3 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.4 熱流束値4 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.5 熱流束値5 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.6 熱流束値6 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.7 熱流束値7 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.8 熱流束値8 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

00-CH.9 熱流束値9 B:白 D:黒 E:アース (外皮:白)

01-CH.0 (空き)

01-CH.1 熱流束センサ温度1 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.2 熱流束センサ温度2 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.3 熱流束センサ温度3 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.4 熱流束センサ温度4 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.5 熱流束センサ温度5 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.6 熱流束センサ温度6 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.7 熱流束センサ温度7 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.8 熱流束センサ温度8 B:赤 D:白 (外皮:茶)

01-CH.9 熱流束センサ温度9 B:赤 D:白 (外皮:茶)

02-CH.0 (空き)

02-CH.1 センサアレイ温度1 B:赤白 D:白 (外皮:白青)

02-CH.2 センサアレイ温度2 B:赤白 D:白 (外皮:白青)

02-CH.3 センサアレイ温度3 B:赤白 D:白 (外皮:白青)

02-CH.4 センサアレイ温度4 B:赤白 D:白 (外皮:白青)

02-CH.5 センサアレイ温度5 B:赤白 D:白 (外皮:白青)

02-CH.6 センサアレイ冷却水流量1 B:中心 D:アース (外皮:黒)

02-CH.7 センサアレイ冷却水流量2 B:中心 D:アース (外皮:黒)

02-CH.8 センサアレイ冷却水温度1 B:赤 D:白 (外皮:青)

02-CH.9 センサアレイ冷却水温度2 B:赤 D:白 (外皮:青)

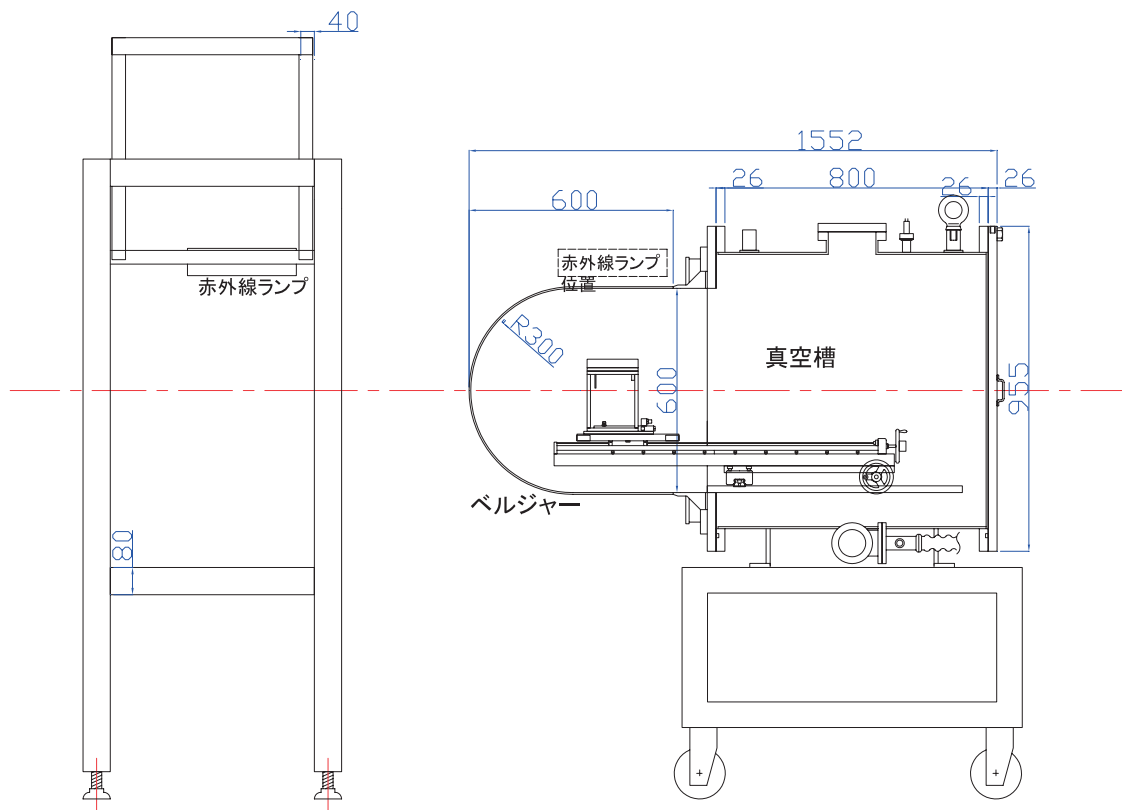
5.2. その他の測定点

赤外線ランプ冷却水流量 3点

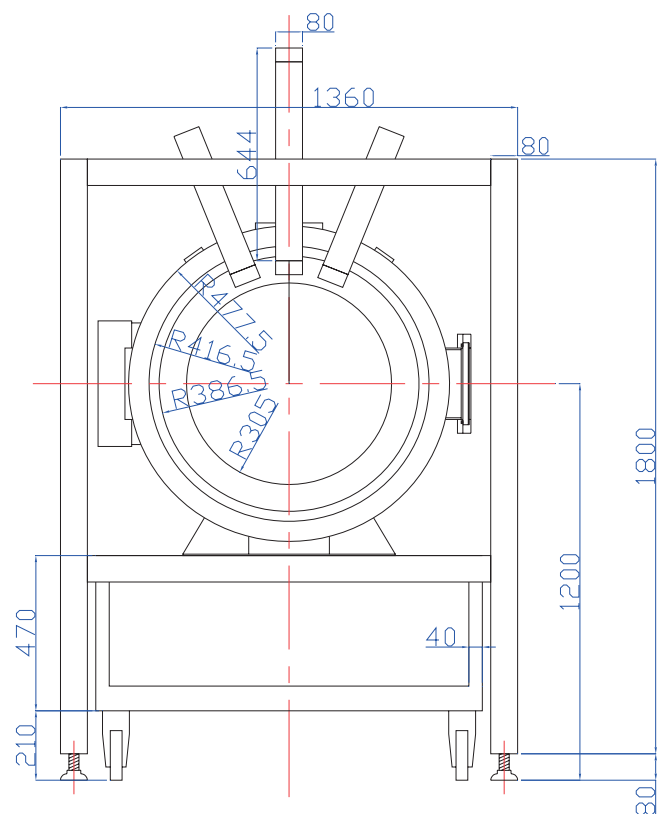
赤外線ランプ冷却水温度 3点

赤外線ランプ空気流量 3点

付録2：真空槽2面図



(左右の図は赤外線ランプ位置で重なる)



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-012

発 行 平成19年3月30日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL：029-868-2079 FAX：029-868-2956

©2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

