

ISSN 0389-4010
UDC 533.6.011.6,
532.517.3,
536.21

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1415

極超音速飛行実験(HYFLEX)における空力加熱率計測

藤井啓介・渡辺重哉・白水正男
井上安敏・黒滝卓司・小山忠勇
津田尚一・平林則明

2000年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第 1 章	まえがき	3
第 2 章	HYFLEX 飛行実験	3
2.1	HYFLEX 空力加熱計測	3
	飛行経路、機体形状	3
	空力加熱計測	4
	センサ設計方針	4
2.2	C/C 空力加熱センサ概要	6
	センサ構造、仕様	6
	各構成要素の熱物性値	7
2.3	セラミックタイル空力加熱センサ概要	7
	センサ構造、仕様	7
	各構成要素の熱物性値	8
第 3 章	センサモジュール熱モデル	8
3.1	熱モデルチューニングの目的	8
3.2	C/C 空力加熱センサ熱モデル較正試験	9
	接触熱抵抗取得試験	9
	第 1 回熱モデル較正試験	10
	第 2 回熱モデル較正試験	13
3.3	熱モデル較正試験解析時の C/C 空力加熱センサ熱モデル	15
	計算方法、格子	15
	境界条件	16
3.4	C/C 空力加熱センサ熱モデルチューニング	16
	熱モデルチューニング方針	16
	熱モデルチューニング結果	17
3.5	セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル較正試験	17
3.6	セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル	17
	計算方法、格子	17
	境界条件	19
3.7	セラミックタイル空力加熱センサ熱モデルチューニング	19
	熱モデルチューニング方針	19
	熱モデルチューニング結果	20
第 4 章	飛行データ処理	21
4.1	飛行データに基づく加熱率算出法	21
4.2	飛行時加熱率計測およびその誤差	21
第 5 章	飛行データ及び考察	25
5.1	比較データ	25
	極超音速風洞試験結果をベースとした予測値	25
	実在気体効果を考慮したCFD解析	26
5.2	加熱履歴、風試ベース予測、CFD解析との比較、考察	26
	C/C 空力加熱センサ	26
	セラミックタイル空力加熱センサ	29
第 6 章	結論	34
	引用文献	35
	付録A. C/C 空力加熱センサ第2回熱モデル較正試験における試験結果の妥当性について	37
	付録B. C/C 及びセラミックタイル空力加熱センサの実飛行時温度履歴	38
	付録C. C/C 空力加熱センサによる温度推定結果、加熱率推定結果	42
	付録D. セラミックタイル空力加熱センサによる加熱率推定結果	52

極超音速飛行実験 (HYFLEX) における空力加熱率計測*

藤井 啓介^{*1} 渡辺 重哉^{*2} 白水 正男^{*1}
井上 安敏^{*3} 黒滝 卓司^{*1} 小山 忠勇^{*2}
津田 尚一^{*2} 平林 則明^{*2}

Aerodynamic Heating Measurements on Hypersonic Flight Experiment (HYFLEX) Vehicle*

Keisuke Fujii^{*1}, Shigeya Watanabe^{*2}, Masao Shirouzu^{*1}, Yasutoshi Inoue^{*3},
Takuji Kurotaki^{*1}, Tadao Koyama^{*2}, Syouichi Tsuda^{*2}
and Noriaki Hirabayashi^{*2}

ABSTRACT

Aerodynamic heating on the Hypersonic Flight Experiment vehicle was measured using newly developed sensors, calibrated by lamp heating tests. These sensors were shown to be of use for flight measurement purposes. The results of the aerodynamic heating measurements on the vehicle were compared with predictions based on cold hypersonic wind tunnel tests and CFD calculations. The flight results on the nose cap were lower than the predictions based on the wind tunnel tests in the stagnation region of around $t=100\text{sec}$. Comparison with real gas CFD results assuming a fully catalytic wall and non-catalytic wall indicate that this discrepancy is due to the effect of dissociation of the air, and can be explained by the dependence of catalycity on surface temperature. For the measurements on the elevon, an increase in aerodynamic heating caused by boundary layer transition was observed immediately prior to it being observed on the windward fuselage. Flight data on the windward side of the afterbody show boundary layer transition and following laminarization, which may be explained qualitatively by the transition criteria for the attachment line of the yawed cylinder, taking into account the effect of nose bluntness.

Key words: Flight test, aerodynamic heating, boundary layer transition, dissociation, measurement technique.

概 要

極超音速飛行実験機における澱点近傍、エレボン部及び胴体、安定板における空力加熱を計測するためにセンサを新規に開発し、ランプ加熱試験によりセンサ周りの精密な熱モデルを定めることで実飛行実験にそれぞれ適用可能であることを確かめた。検証された熱モデルを用いて HYFLEX 飛行中の空力加熱計測をおこない、極超音速風洞試験結果に基づく予測、CFD 解析などと比較した。澱点近傍 C/C センサの飛行データは $t=100\text{s}$ 付近において、風洞試験結果に基づく予測と比べ低い加熱が得られた。非平衡流解析コードによる CFD 結果との比較により、観察された現象は空気の解離／再結合に伴う実在気体効果によるものと考えられ、触媒性の温

* 平成12年2月24日受付 (received 24 February 2000)

* 1 革新宇宙プロジェクト推進センター

* 2 空力特性研究部

* 3 流体科学総合研究グループ

度依存性を考慮することで定性的に説明できた。エレボン部 C/C センサでは胴体下面セラミックタイル部において観察された時期とほぼ対応して境界層遷移が見られた。胴体下面のセラミックタイル部においては境界層遷移および再層流化がみられた。無限斜め円柱付着線上遷移判定基準をもとに気流条件を評価した結果、セラミックタイルギャップ・ステップによる表面粗さ、迎角変化などを考慮すれば妥当な範囲で遷移及び再層流化が起こっていることがわかった。またその他のセラミックタイル部における空力加熱データから層流時における加熱率はおおよそ予測値と一致した結果が得られたが、胴体下面前方付近では C/C ノーズ部で見られた実在気体効果と考えられる現象と類似した低加熱の領域が観察された。

記 号

C	比熱, J/kgK
D	胴体下面曲率半径 (=ノーズ曲率半径), m
d	温度スポット (センサ) 直径, m
h	気流エンタルピー, J/kg、高度, km
I	輻射強度, W/m ²
k	付着線上における速度勾配, 1/s
L	HYFLEX 胴体長 (=4.0m), m
L_s	澱点よりセンサまでの機体表面に沿った長さ, m
M	マッハ数
P	接触面圧, N/m ²
Pr	Prandtl 数
q	加熱率, W/m ²
q_{TMT}	熱モデル試験時印加加熱率, W/m ²
R	接触熱抵抗, km ² /W
Re	Reynolds 数
Re_θ	運動量厚を基準長とした Reynolds 数 $\left(=\frac{\rho_e u_e \theta}{\mu_e}\right)$
Re_h	有効粗さ高さ Δ_s における気流条件から得られる Reynolds 数 $\left(=\frac{\rho_{\Delta s} u_{\Delta s} \Delta_s}{\mu_{\Delta s}}\right)$
$R_{\infty D}$	D を基準とした一様流 Reynolds 数 $\left(=\frac{\rho_{\infty} u_{\infty} D}{\mu_{\infty}}\right)$
$\overline{R^*}$	斜め円柱付着線における特性長さを基準長とした局所 Reynolds 数 (Eq. 5.8)
r	回復係数
St	Stanton 数
$\overline{St^*}$	Stanton 数比 $\left(=\frac{q}{\rho_{\infty} u_{\infty} (h_0 - h_w)}\right)$
s	機体表面に沿う座標軸, m
T	温度, K
t	分離後時刻, s、または厚さ, mm
u, v, w	x 方向、y 方向、z 方向気流速度, m/s
V	大気速度, km/s
W_s	澱点からセンサ後端までの長さ (= $L_s + d$), m
x, y, z	機体固定の座標軸 (図2.5) またはセンサ熱解析時直交座標軸, m
Λ	後退角 (= $\pi/2 - \alpha$), rad
α	迎角, deg

γ	触媒効率 (Catalytic efficiency)
$\delta_{elevation}$	エレボン舵角 (下げ舵正), deg
Δ_s	ギャップ・ステップ高さ, m
ΔT	C/C空力加熱センサ差温, K
ε	輻射率
θ	運動量厚, m
κ	熱伝導率, W/mK
μ	粘性係数, kg/sm
ν	動粘性係数, m ² /s
ρ	密度, kg/m ³
σ	ステファン-ボルツマン定数 (= 5.67×10^{-8}) または標準偏差
η	付着線境界層における特性長さ, m
π	円周率

subscript

0	澱点状態、または $T=0K$ における値 (接触熱抵抗) または i 番目の値
1	高温側界面における値 (輻射率)
2	低温側界面における値 (輻射率)
+	$i+1$ 番目の値
-	$i-1$ 番目の値
∞	一様流状態
a	高温側と低温側界面の平均値
coat	セラミックタイルガラスコーティング層
const-T	表面温度分布が一様である場合の値
e	境界層端における値
in	入射光波長における値
out	輻射光波長における値
ref	参照値
s	付着線上における値
sensor	センサ表面における値
TC/CC	C/Cセンサモジュールと表面側熱電対シリーズの間 (の接触熱抵抗)
tile	セラミックタイル素地部物性値
w	壁温度における値
周辺	センサ周辺部表面における値

superscript

*	参照エンタルピーにおける値 ($h^* = 0.3h_e + 0.1h_w + 0.6h_0$)
---	---

略 号

CFD	Computational Fluid Dynamics
C/C	Carbon reinforced carbon composite
FM	Flight Model
FHI	Fuji Heavy Industries
FSI	Flexible Surface Insulation
HOPE-X	H2 Orbiting Plane Experimental
HYFLEX	Hypersonic Flight Experiment
KHI	Kawasaki Heavy Industries
NAL HWT	航空宇宙技術研究所 極超音速風洞
RSS	Root Sum Square
SIP	Strain Insulation Pad
TPS	Thermal Protection System

第 1 章 まえがき

宇宙往還機などの極超音速領域を飛行する機体の設計には、空力、熱空力特性の正確な予測が不可欠となる。それらの予測は一般に風洞試験や CFD、工学的手法などをもとに行われており、実際、現在航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団との共同で開発が進められている宇宙往還技術試験機 HOPE-X の設計においても同様の推算が行われている。それら推定手法を検証するための飛行試験データとして、過去に米国 Space Shuttle をはじめ実飛行によりいくつかの空力加熱計測が行われている^{1~3)}ものの、予測法検証の目的にはまだ十分とはいえない。そのような状況の中で、再突入機体の設計法、熱空力特性予測法の検証のためのデータ取得をその一つの目的として、極超音速飛行実験(HYFLEX)が計画され実施された^{4~9)}。

空力加熱予測に密接に関係し重大な影響をもつ空力現象としては境界層遷移や、おもに澱点加熱率に影響する空気の解離効果などがある。空気の解離による流れ場への効果は高エンタルピー風洞実験、CFD 解析等によって行われるが、一様流状態、壁温、表面触媒性などのすべての条件において飛行状態を模擬して実験を行うことは一般に困難であり、特に飛行実験結果が必要とされる分野の一つである。また境界層遷移に関する研究は飛行実験、風洞試験などで盛んに行われており極超音速領域においても低乱風洞などによる研究が行われつつある。しかし低乱かつ高 Reynolds 数による極超音速風洞実験はいまだ十分な予測検証のための道具として確立しておらず、この分野における飛行データの意味もまた重要である。

飛行試験による空力加熱計測は上記の様に重要であり、飛行実験と予測との不一致が有意なものであるかの判断を行うために、計測精度を向上し誤差を評価することが不可欠である。一方、飛行実験では加熱が長時間に及ぶことや

機体表面温度が高温になることなどの、地上試験時とは異なるさまざまな制約があり¹⁰⁾、地上試験において使用されるセンサは一般に使用できない。また飛行実験における空力加熱計測では飛行環境(上昇時、再突入時)、計測部位、加熱率、加熱時間、熱防護材材質などの状況に応じて適切な計測方法が異なるため、各飛行実験、計測目的、要求精度などに応じてセンサを設計する必要がある。そのようなセンサでは一般にセンサ出力と空力加熱率との関係が一对一の対応とならずそのため加熱率導出のためには何らかの熱モデルが必要である。さらに地上におけるキャリブレーションを実施することでこの熱モデルの精度を確認または不確定のパラメータをチューニングしより精度の高いモデルとすることが要求される。

HYFLEX において米国 Space Shuttle や HOPE-X 等と比べ加熱率の時間変化が激しいなどの特有の問題を考慮しつつ計測部位に適したセンサを新規開発し、地上においてランプ加熱により較正試験を実施し、熱モデルチューニングにより高精度の計測を試みた。更に、そのように較正されたセンサを用いて得られた実飛行データを、cold な極超音速風洞における試験結果をもとにした予測データと比較し、ノーズ部においては実在気体非平衡解析コードによる CFD 結果と、また胴体下面においては斜め円柱付着線における加熱率理論値及び境界層遷移判定基準との比較を行った。

第 2 章 HYFLEX 飛行実験

2.1 HYFLEX 空力加熱計測

飛行経路、機体形状

HYFLEX は 2 段式 J-1 ロケット 1 号機によって 1996 年 2 月 12 日に種子島宇宙センタより打ち上げられ、高度 107 km、対気速度 3.88 m/s の条件でほぼ水平に分離した。胴体長を基準とした一様流 Reynolds 数、Mach 数、迎角、対気速度、高度を図 2.1、図 2.2、図 2.3 に示す¹¹⁾。分離後、実験機はほぼ一定の迎角 $\alpha = 49\text{deg}$ に保ち、 $t = 100\text{sec}$ 程

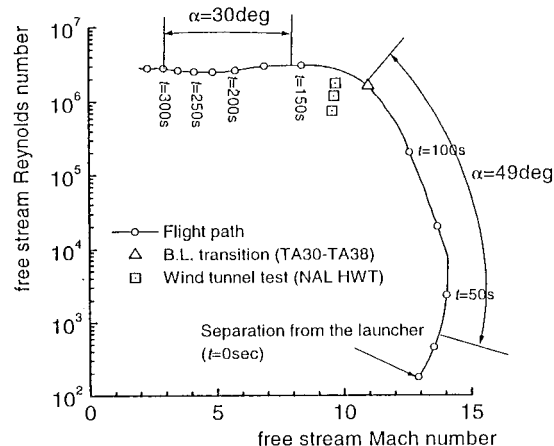


図 2.1 HYFLEX 飛行経路 (Reynolds 数-Mach 数)

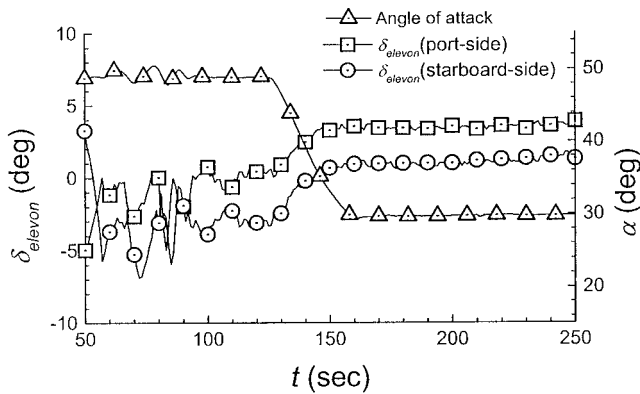


図2.2 YFLEX 飛行中における迎角、エレボン舵角の履歴

度までは動圧が非常に小さいためにほぼ自由落下に近い飛行を行った。その後動圧の上昇に伴い経路を引き起こし、約 $t=127\text{sec}$ において最大澱点加熱を迎え、迎角を約 30deg へ変更し平衡滑空に近い飛行を行った。迎角変更開始とほぼ同時に澱点最大空力加熱が起きると予測されていた (図 2.4)。

HYFLEX の機体形状は図2.5に示されるように胴体長 $L=4.0\text{m}$ で、ノーズ下部は半径 0.4m の球形状、機体全備重量は 1072.9kg である。宇宙往還技術試験機 HOPE-X に向けた実験機であるため、HYFLEX では熱防護として HOPE-X で想定されているものと共通であるカーボン/カーボン (C/C) 複合材をノーズ及びエレボン部に、セラミックタイルを胴体下面、側面、安定板に、可撓断熱材 (FSI) を胴体上面、および胴体底面部に採用している。

空力加熱計測

空力加熱計測点配置を表2.1に示す。熱空力設計において加熱分布として整理する際の基準量となり、かつ実在気体効果が顕著に現れると予想される $\alpha=49\text{deg}$ 一定飛行時における幾何学的澱点近傍を中心に5点 (ノーズC/C部)、及び流れが複雑となり予測法の検証が必要と考えられる左舷エレボン舵面上 (C/C部) の3点において空力加熱計測を行うこととした。さらに機体上の基本的な空力加熱データとして胴体下面、側面に7点 (セラミックタイル部)、安定板 (左舷) に3点 (セラミックタイル部)、胴体上面に3点 (セラミックタイル部1点、可撓断熱材部2点) で計測を行った。ノーズ部を除いて機体中心線上にセンサが配置されていないがこれは主に構造上の制約によっている。また、C/C ノーズキャップにおける熱解析時にはC/C 裏面放射環境を境界条件として与えねばならないため、センサモジュールのデータを補強するデータとしてノーズキャップ背後における放射強度計測をラジオメータにより図2.6に示されるように行った。

センサ設計方針

一般に飛行試験へ適用をする際のセンサとしては周辺温度場を乱さないことが要求される。これはセンサと周辺の

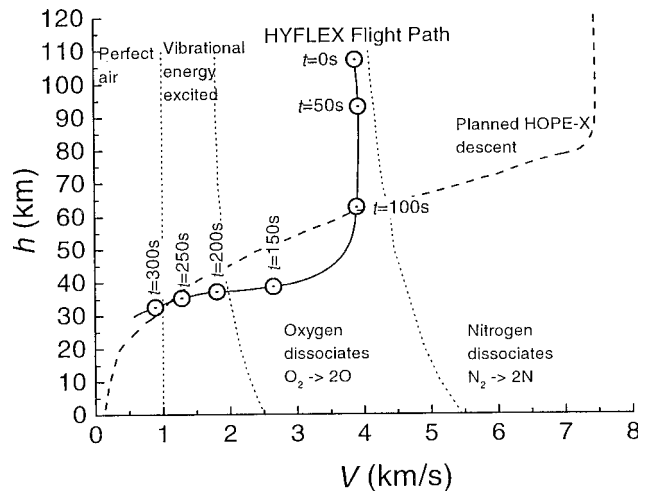


図2.3 HYFLEX 飛行経路 (h-V線図)

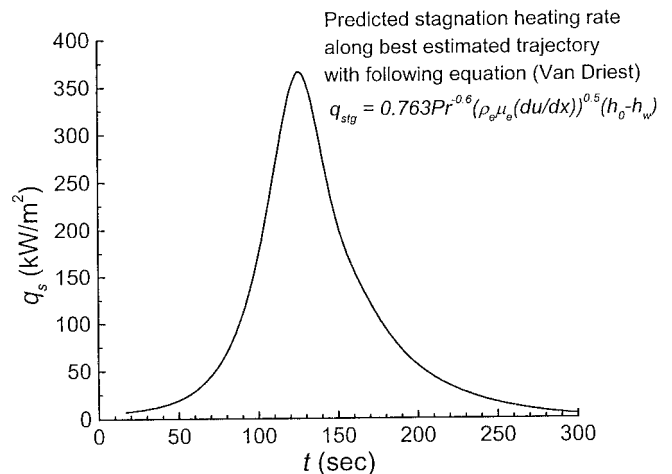


図2.4 HYFLEX 飛行経路に沿った澱点加熱率予測値

表面温度に急激な温度変化がある場合、境界層流れ場に影響を及ぼし正しい (表面温度分布のない場合の) 空力加熱を計測できない事が一般に知られている¹⁰⁾ ためである。簡単なモデルによってその効果を見積もる手法が提案されている¹²⁾ ものの極超音速領域では定量的な補正は難しい。そのため本飛行実験では周辺材料と基本的に同一の材料で、周辺温度場を乱さない極力熱容量の小さなセンサとする事をセンサ設計方針の1つとした。そこで、センサ周囲の熱防護材種類に応じて、C/C 部及びセラミックタイル部それぞれに対し独立にセンサを設計した。ただし可撓断熱材による熱防護部においてはセラミックタイル部と共通とした。可撓断熱材部へのセラミックタイル空力加熱センサの装着方法に関して TA46 セラミックタイルセンサは可撓断熱材に直接かこまれ、TA48では可撓断熱材に埋め込まれたセラミックタイル中央にセンサを埋め込む方法を採用している (図2.5参照)。

<C/C空力加熱センサ>

HYFLEX の予測澱点加熱率履歴は上述のとおり時間変

表2.1 HYFLEX 空力加熱計測点

sensor number [†]	x(mm)	y(mm) starboard:+	z(mm)	TPS material	sensor type	height , mm	TC2 depth, mm
TA01/02	20.00	0.0	274	C/C nose	C/C	42.5	10.1
TA03/04	127.0	0.0	107	C/C nose	C/C	42.5	10.1
TA05/06	136.0	-99.0	117	C/C nose	C/C	42.5	10.3
TA07/08	400.0	0.0	0	C/C nose	C/C	42.5	10.7
TA09/10	500.0	0.0	0	C/C nose	C/C	42.5	10.0
TA11/12	4050.0	-241.0	36	C/C elevon	C/C	42.5	9.9
TA15/16	4337.0	-241.0	36	C/C elevon	C/C	42.5	9.9
TA17/18	4240.0	-241.0	36	C/C elevon	C/C	42.5	10.1
TA19/20	430.0	318.0	618	Ceramic Tile	Tile	28.6	14.2
TA21/22/23	1250.0	171.0	24	Ceramic Tile	Tile	28.4	14.0
TA24/25/26	1250.0	380.0	107	Ceramic Tile	Tile	28.6	13.9
TA27/28/29	1250.0	523.0	385	Ceramic Tile	Tile	28.7	12.8
TA30/31/32	2140.0	181.0	26	Ceramic Tile	Tile	28.6	14.0
TA33/34	2815.0	-280.1	43.2	Ceramic Tile	Tile	25.4	11.3
TA35/36/37	3565.0	-280.1	43.2	Ceramic Tile	Tile	25.2	11.9
TA38/39	3895.0	-280.1	43.2	Ceramic Tile	Tile	25.2	11.5
TA40/41	3028.9	-5914.0	602.3	Ceramic Tile	Tile	55.3	28.1
TA42/43	3550.0	-645.9	547.6	Ceramic Tile	Tile	19.3	9.3
TA44/45	4349.6	-595.4	622.5	Ceramic Tile	Tile	30.1	12.9
TA46/47	1493.0	-256.0	953	FSI [#]	Tile	28.6	12.9
TA48/49	2935.0	-148.4	1011.8	FSI [#]	Tile	20.5	9.8

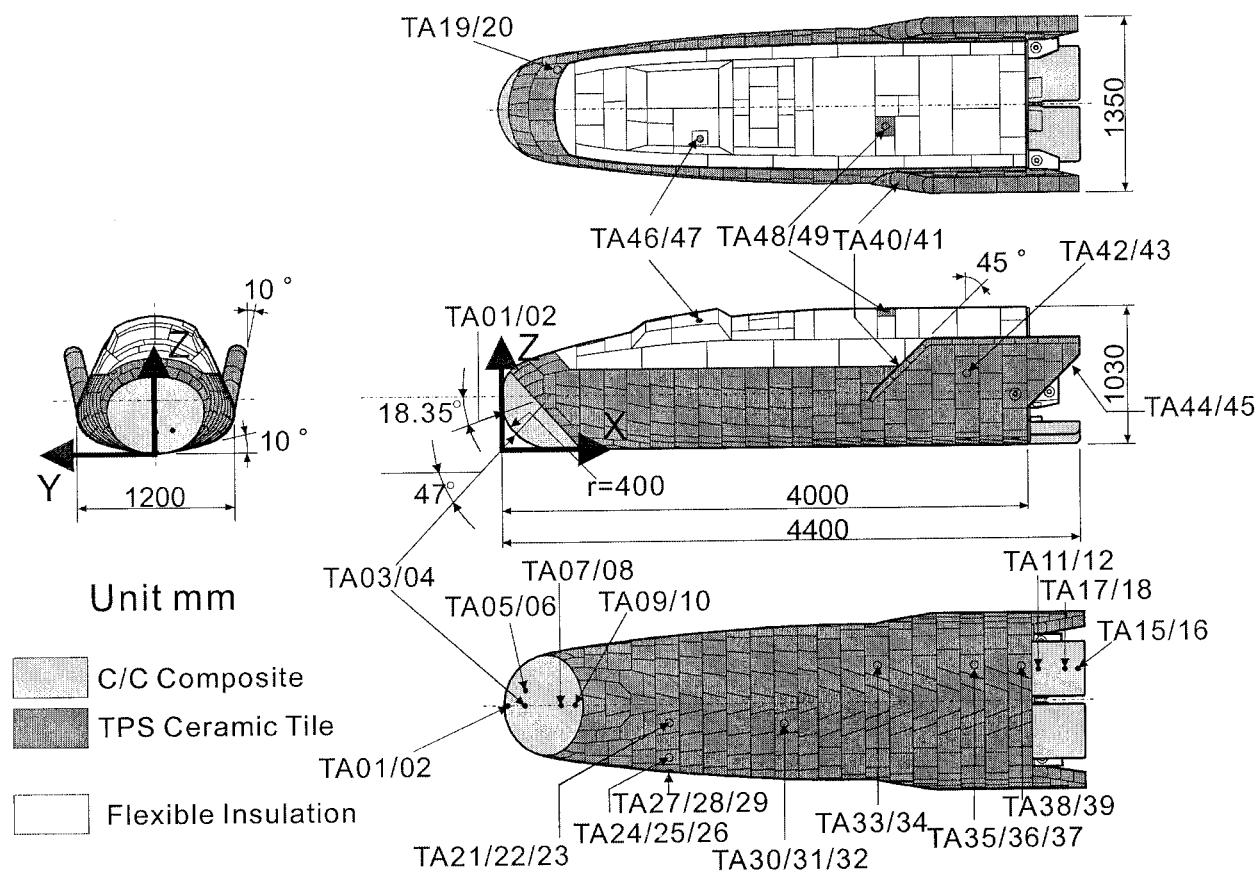
[†] The sensor number denotes thermocouple numbers[#] Flexible Surface Insulation

図2.5 HYFLEX 機体概要、空力加熱計測用センサ配置

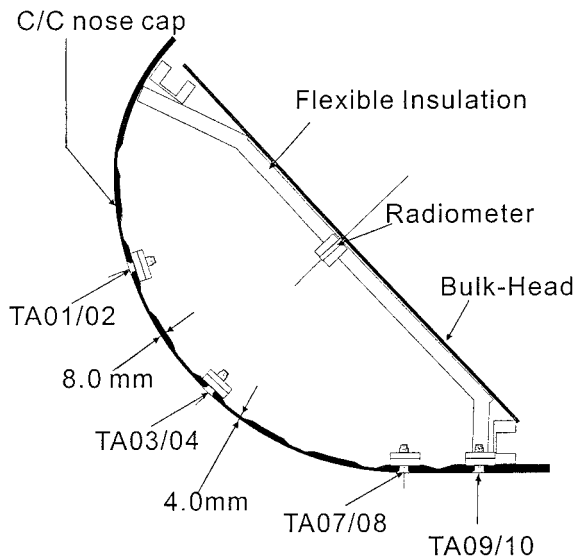


図2.6 ノーズキャップ部における空力加熱計測、
輻射強度計測位置

化が大きく、C/C 裏面温度のみの計測では熱伝導に伴う時間遅れによって表面加熱率の時刻歴を正確に計測できない可能性があると考えられたため、熱電対を極力表面付近に配置することを考えた。さらに熱電対位置、接触熱抵抗などといった計測困難な不確定要素があるため地上試験によりキャリブレーションを行うことを考えた。そこで、表面近傍への熱電対装着に伴うノーズキャップ全体の製作上のリスクが少なく、かつ地上試験によりキャリブレーションが容易に行え、かつ故障時に交換可能であるという長所を持つプラグイン型のセンサを採用した。

＜セラミックタイル空力加熱センサ＞

セラミックタイル部においても C/C 空力加熱センサ設計と同様に熱電対を極力表面付近に配置することを考えた。セラミックタイルはその製作工程上でガラスコーティング直下の表面に素線熱電対を装着することができるため理想的なビルドイン型の加熱率センサとなり得、基本的発想は shuttle におけるセラミックタイルセンサと同様である¹⁰⁾。しかし製作工程上、機体取り付け作業中その他の際に不具合が発生した場合の対処を考慮し、熱電対を装着したタイルそのものをモジュール化しリスクの低減を図った。

2.2 C/C 空力加熱センサ概要

センサ構造、仕様

加熱率導出には表面温度が最も重要な計測量となるが、より精度の高い計測のためにはより正確にセンサ内部の温度場を把握する必要がある。その目的で、表面近傍の温度のほかに、深さ方向に更に一点の温度を計測するセンサとし、上述の方針に従って設計を行った。センサモジュール構造概要を図2.7に示す。モジュール本体は熱歪を吸収す

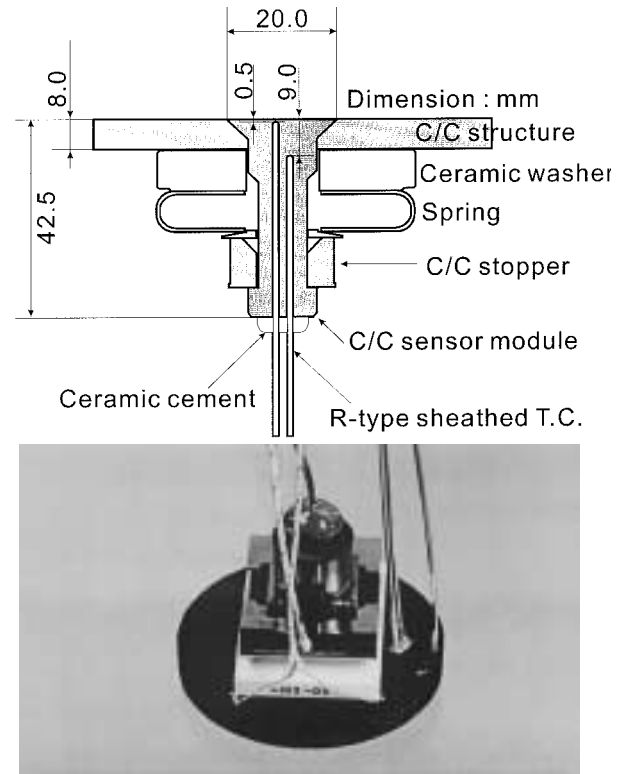


図2.7 C/C 空力加熱センサ構造
(写真は熱モデル校正試験用センサ)

るスプリング (inconel718) を介して、ストッパ (ランダム配向 C/C) により C/C 構造 (ノーズキャップまたはエレボン) に固定される。スプリングと C/C 構造の間にはさまれたマシンابلセラミック製ワッシャはスプリング温度が許容値以下となるよう断熱材として挿入された。センサモジュールは前述のとおり C/C で作ることにしたが C/C 材はカーボン繊維を二次元的に織込んだものを積層することにより製作されたもので一般に層間強度が弱く、センサモジュール製作のような機械加工は難しい。そこでここでは細かくきざまれランダムな繊維方向をもったカーボン繊維を固めたランダム配向 C/C と呼ばれる材料を用いてモジュールを製作することとした。また同様の強度制約からセンサを取り付ける C/C 構造そのものもまた一般部板厚 (約 4 mm) では強度上の問題があり、センサモジュールを取付ける部分は約 $\phi 50\text{mm}$ の範囲でパッドアップされ板厚を約 8 mm としている (図2.6参照)。耐熱限界、強度などの制約から、結果的にセンサモジュールは当初の思想から外れ、複雑かつ熱容量の大きな構造となってしまう、第5章2節及び付録 C 図 C.2 において後述のように C/C 構造一般部とモジュール表面の間に大きな温度差を生じることとなった。

計測は高温環境下であることを考慮して R-type (白金-白金ロジウム) 熱電対を使用することとしたが、白金は高温においてカーボン (C) と反応を起こすことが知られており白金ロジウム (Pt・10%Rh) 製シース型のものとした。

表2.2 計測条件概要

	sensor type	A/D (bit)	sampling rate (Hz)	range (degC)	TC type
C/C nose cap	C/C sensor surface	12	10	-50 - 1700	sheath-R
	ΔT	12	10	-100 - 300	sheath-R
C/C elevon	C/C sensor surface	12	10	-50 - 1700	sheath-R
	ΔT	12	10	-100 - 300	sheath-R
fuselage	tile sensor surface	12	10	-50 - 1600	bare-R
	middle	8	5	-50 - 650	bare-R
	bottom	8	1	-50 - 250	bare-K

シース型 R 熱電対（シース外径1.0mm）はモジュール表面より0.5mm及び9.0mmまでの穴に裏面側より差込み、モジュール間接触熱抵抗を減らす目的で熱電対とセンサモジュールとの間に酸化マグネシウム（MgO）粉末を充填させ、最後にモジュール端でセラミック系セメント（スミセラム）にて固定する方法により装着した。

計測温度データは表2.2に示される通りセンサモジュール表面温度計測に関してはレンジ：-50℃(+1700℃、分解能：12bit でA/D 変換され、表面温度と内部温度との差温に関してはレンジ：-100℃(+300℃、分解能：12bit とした。サンプリングレートはともに10Hzである。センサモジュールフライト品の熱電対は全数校正されている。

各構成要素の熱物性値

熱解析に使用したC/C空力加熱センサモジュールまわり構成要素それぞれの熱物性値、輻射率（垂直方向）を別途試験により測定した(表2.3)。ただし同表中 inconel 1718、マシナブルセラミック、白金の熱物性値はカタログ値である。

2.3 セラミックタイル空力加熱センサ概要

センサ構造、仕様

セラミックタイル空力加熱センサ（図2.8）はHYFLEXで使用された一般部セラミックタイルと同一の材料で作られた。直径と、高さ（＝周辺タイル厚さ）はセンサ部タイル側面における加熱の影響がセンサ部温度計測に及ばないように、直径φ50mm、高さは表2.1に示されるとおりで、円柱形状（安定板前後縁部を除く）とした。また熱電対装着後、一般部タイルと同様にセラミックタイル素地に黒色ガラスコーティング（設計コーティング厚さ0.3mm）を施している。

加熱率計測の目的では表面温度の計測が重要となり、セラミックタイル空力加熱センサにおいても表面ガラスコーティング層直下に熱電対を配置した。セラミックタイルは断熱特性が極めて高く、一般に再突入環境では表面温度は輻射平衡温度に近い温度となるが、非定常性の強いHYFLEXにおける加熱履歴では輻射平衡には至らずタイ

表2.3 C/C空力加熱センサ構成要素とその熱物性値

温度	(degC)	25	500	1000	1500
C/C材 C/C構造 (nose cap, elevon舵面)					
密度	(kg/m ³)	1500	1500	1500	1500
比熱	(J/kgK)	666	1327	1817	2277
熱伝導率 (面内)	(W/mK)	20.49	33.91	34.87	43.53
(面外)	(W/mK)	4.552	7.535	7.744	9.67
輻射率		0.85	0.85	0.85	0.85
ランダム配向C/C材 (M-2) 温度センサモジュール、ストッパ					
密度	(kg/m ³)	1867.2	1867.2	1867.2	1867.2
比熱	(J/kgK)	785	1733	2157	2416
熱伝導率 (面内)	(W/mK)	121.9	114.7	92.11	72.07
(面外)	(W/mK)	24.39	22.95	18.42	14.41
輻射率		0.87	0.87	0.87	0.87
inconel718金属ワッシャ、スプリング					
密度	(kg/m ³)	8221	8221	8221	8221
比熱	(J/kgK)	411	556	709	862
熱伝導率	(W/mK)	11.69	18.53	25.73	32.94
輻射率		0.2	0.2	0.2	0.2
マシナブルセラミック(マセライト)セラミックワッシャ					
密度	(kg/m ³)	2550	2550	2550	2550
比熱	(J/kgK)	795.3	1088.4	1297.7	1507
熱伝導率	(W/mK)	2.093	2.093	2.093	2.093
輻射率		0.75	75	0.75	0.75
Pt熱電対、R-type (Ptシース)					
密度	(kg/m ³)	21460	21460	21460	21460
比熱	(J/kgK)	133.1	145.8	158.8	171.4
熱伝導率	(W/mK)	71.57	75.37	83.84	93.26
輻射率		0.2	0.2	0.2	0.2

ル内部への熱伝導が無視できない。そのため熱解析のチェック用と、キャリブレーション時の熱モデルチューニングのために中間部（表2.1）に熱電対を配置した。更に一部センサに対してはセラミックタイルの TPS 性能評価用としてセラミックタイルと Strain Insulation Pad (SIP) との界面（底面部）における温度計測も行った。

熱電対としては熱電対熱容量及び熱伝導性による周辺温度場への影響を減らすよう先端露出型（熱電対温接点付近のみ素線露出、以降シース保護）のものを用了。計測の際熱電対によって温度場を乱さないことが理想であるが、このセンサの場合、熱伝導率がセラミックタイルと比べ極めて大きい熱電対が熱を機体構造側へ逃がすことが危惧された。そこで、このセンサモジュール内は基本的に1次元

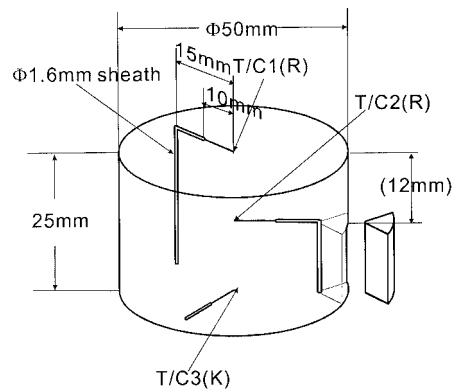


図2.8 セラミックタイル空力加熱センサ構造
(写真は熱モデル校正試験用センサ)

熱伝導と考えられるので、簡単な熱解析をもとに10mm程度表面と平行に熱電対を這わせることで防ぐこととした。表面及び中間部の熱電対はシース外径 $\phi 1.6\text{mm}$ 、素線径 $\phi 0.26\text{mm}$ 、露出部長さ10.0mmの R-type 熱電対であり、底面部のものは同一寸法の K-type 熱電対である。表面熱電対はセラミック系セメントによりセンサタイルに固定されている。中間部熱電対は $\phi 1.6\text{mm}$ のセンサ表面と平行な穴にセラミック系セメントにより固定され、底面部は表面と同様にセンサタイルにセメントにて固定されている。

各構成要素の熱物性値

セラミックタイル空力加熱センサは熱電対、サイズを除けば一般部タイルと同様の構造、材料であり、熱解析において使用した各構成要素の熱物性値、輻射率は表2.4のようになっている。

第3章 センサモジュール熱モデル

3.1 熱モデルチューニングの目的

飛行実験における空力加熱センサでは実測温度履歴から加熱率を求める際には、地上試験で使用される加熱率センサと異なりセンサ出力と加熱率との間に一対一の対応関係がなく、一般に校正曲線を作れない。そのため、この複雑な関係を何等かの熱モデルを用いて数値的に解析すること

表2.4 セラミックタイル空力加熱センサ構成要素と熱解析において使用した初期熱物性値

温度	(degC)	25	250	500	750	1000	1200
セラミックタイル(富士重工業製)							
密度	(kg/m ³)	193.6	193.6	193.6	193.6	193.6	193.6
比熱	(J/kgK)	883.	1147.	1260.	1317.	1333.	1343.
熱伝導率	2.53×10^{-4} (Pa)	(W/mK)	0.049	0.071	0.093	0.128	0.168
	1.33×10^{-1} (Pa)	(W/mK)	0.029	0.051	0.076	0.102	0.127
セラミックタイル(川崎重工業製)							
密度	(kg/m ³)	193.6	193.6	193.6	193.6	193.6	193.6
比熱	(J/kgK)	749.	992.	1118.	1197.	1242.	1278.
熱伝導率	2.53×10^{-4} (Pa)	0.049	0.071	0.093	0.128	0.168	0.197
	1.33×10^{-1} (Pa)	0.029	0.051	0.076	0.102	0.127	0.147
glass coating							
密度	(kg/m ³)	3320.	3320.	3320.	3320.	3320.	3320.
比熱	(J/kgK)	916.	1011.	1116.	1222.	1327.	1411.
熱伝導率	(W/mK)	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
SIP							
密度	(kg/m ³)	200.	200.	200.	200.	200.	200.
比熱	(J/kgK)	1006.	2829.	6161.	10869.	16954.	22813.
熱伝導率	(W/mK)	0.026	0.034	0.043	0.051	0.060	0.067
アルミ構造							
密度	(kg/m ³)	2770.	2770.	2770.	2770.	2770.	2770.
比熱	(J/kgK)	880.	880.	880.	880.	880.	880.
熱伝導率	(W/mK)	120.	120.	120.	120.	120.	120.
セラミックセメント							
密度	(kg/m ³)	3850.	3850.	3850.	3850.	3850.	3850.
比熱	(J/kgK)	1181.	1181.	1181.	1181.	1181.	1181.
熱伝導率	(W/mK)	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4

が必要となる。熱物性値や構造上の不確定要素などのパラメータが熱モデル上存在するため、熱モデル校正試験を実施しそれらパラメータのチューニングを行うこととした。しかしそれらすべてのパラメータの効果を分離して校正試験データに基づき真のパラメータ値を導出することは現実には不可能であるので、加熱率推定に大きな影響を与えかつ誤差が大きいと考えられるパラメータを選び調整することが必要になる。つまりここでいう熱モデルパラメータ推定は加熱率、温度推定への類似の効果を有するものは一つのパラメータで代表し調整するというものであり、熱物性値など個々のパラメータの真値推定とは性質が異なる。そのため熱モデルパラメータが実飛行時と同様の効果を有するよう、熱モデル校正試験条件は実飛行条件と等しいことが理想であり、加熱率、加熱時間、雰囲気圧力など極力飛行予測条件を模擬して校正試験を計画した。

3.2 C/C 空力加熱センサ熱モデル校正試験

この熱モデル校正試験は理想的には実機搭載品すべてについて行い、それぞれのセンサに対して熱モデルを個別に調整するべきであり、そのために搭載品すべての校正試験として熱モデル校正試験（第1回試験）を行った。しかしその試験は後述のように印加加熱率絶対値の精度に問題があったため、ノミナルの熱モデルは別途試験（熱モデル校正試験（第2回試験））により調整し、第1回熱モデル校正試験結果はセンサの個体差による加熱率推定のばらつきを評価することにのみ用いることとした。

センサは表3.1に示される様に実機に搭載された8個のセンサの他、熱モデル校正試験用に製作された飛行モデル(FM)相当品1個の全9個があり、それらは同表に示される様に熱モデル校正試験または実飛行に供された。

接触熱抵抗取得試験

複数の要素の組み合わせで構成されるセンサにとって各

表3.1 C/C 空力加熱センサ試験 フライト履歴モジュール番号

モジュール番号 85AS3120-	略称	熱モデル試験(#1)	熱モデル試験(#2)	フライト
101	FM0	実施	X	TA01/02
111	FM1	実施	X	TA03/04
121	FM2	実施	X	TA05/06
131	FM3	実施	X	TA07/08
141	FM4	実施	X	TA09/10
151	FM5	実施	X	TA11/12
171	FM7	実施	X	TA15/16
181	FM8	実施	X	TA17/18
191	FM9	実施	実施	X

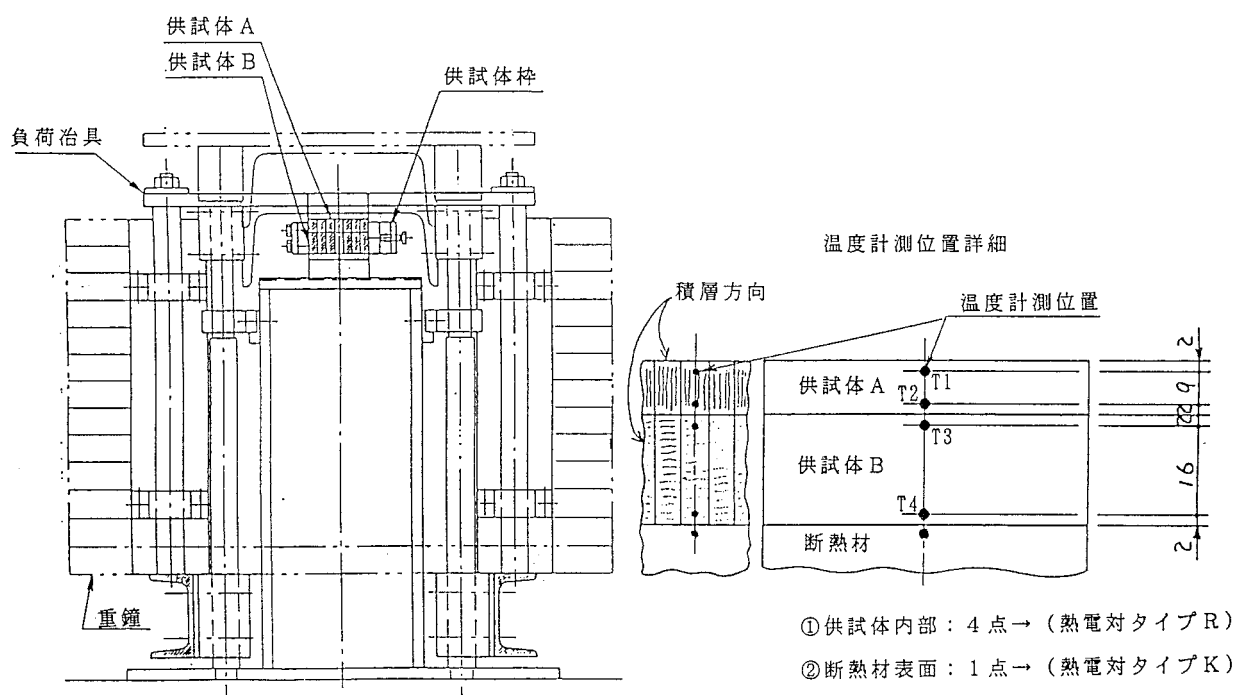


図3.1 接触熱抵抗取得試験セットアップ

要素間の接触熱抵抗は熱の流れに大きな影響を与える。特に今回の C/C 空力加熱センサの場合モジュール温度は一般部 C/C やパッドアップ部温度と比べ熱容量が大きく温度応答が悪い。さらに時間変化の大きな加熱履歴下ではモジュールに入る熱量のうち周辺部 C/C からの寄与が無視できないため、モジュール-C/C 構造間の接触熱抵抗は熱モデル上重要なパラメータとなる。そこで後述の熱モデル較正試験実施に先立ち、最も重要と考えられる C/C パネル-モジュール間の接触熱抵抗を調べる目的で接触熱抵抗取得試験を三菱重工業高砂研究所にある電子ビーム照射装置を用いて行った。試験は図3.1に示される様に C/C パネル及びセンサモジュールを模擬した供試体同士に荷重をかけて接触させ各部温度を計測し、接触面圧の関数として接触熱抵抗を求める方法をとった。装置作動の制約により雰囲気圧力依存性のデータ取得は実施できなかったため、試験を真空環境下（7 Pa以下）で行った。

試験ケースは下記の通り接触面圧として3種類、目標接触界面温度として3種類の計9ケースを行い、再現性を調べる目的で各ケース2回の試験を行った。

目標界面温度 $T = 400\text{degC}, 800\text{degC}, 1200\text{degC}$

界面圧力 $P = 2.45 \times 10^5 \text{Pa}, 5.49 \times 10^5 \text{Pa}, 1.16 \times 10^6 \text{Pa}$

試験に先立ち銅製カロリメータにより電子ビーム加熱による熱流束を測ったが、計測結果のばらつきが大きく、試験装置の再現性を考慮すると熱流束の同時計測をすることが必要であることがわかった。そのため各試験において計測される供試体内温度差から印加加熱率をもとめることとした。温度計測は図3.1に示されるように4箇所（T1～T4）で行い、各部温度がほぼ定常になった時点の温

度を記録した。試験により得られた接触熱抵抗の温度依存性を図3.2に示す。温度が高くなると熱伝導の他に輻射により熱が伝わる効果が大きくなるため接触熱抵抗は一般的に下がることが知られており、今回の試験でも同様の傾向が見られた。この輻射の効果は以下ようになる。

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{4\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_1\varepsilon_2} T_a^3} \quad (\text{Eq.3.1})$$

$\varepsilon = 0.87$ として各面圧における R_0 （輻射による伝導がない場合における熱抵抗）を $\log(r)$ の差を最小にするよう求めたものを図3.3に示す。この図からここでは接触熱抵抗と接触面圧との関係は $R_0 = 9.53 \times 10^{-5} P^{-0.88}$ ($R_0: \text{Km}^2/\text{W}, P: \text{Pa}$) であるとした。フライト時のセンサモジュール-C/C パネル界面の予測ノミナル面圧範囲を同図中に示す。これから今回の熱解析ではセンサ装着後の接触面圧変化の影響を考慮せず C/C モジュール・C/C パネル間接触熱抵抗を $R_0 = 1.12 \times 10^{-2} (\text{Km}^2/\text{W})$ の一定値とした。

第1回熱モデル較正試験

当初、実験機に搭載するそれぞれの C/C センサに対し熱モデル較正試験を実施し熱モデルをセンサ毎に調整することで計測精度を高めることを考えた。そこで、フライト模擬加熱パターンの加熱をフィラメントランプヒータにより行い、各部温度の記録を行うこととした。試験は三菱重工業高砂研究所において5kWランプヒータをもちいて実施した。試験セットアップ状況を図3.4に示す。センサ供試体を厚さ8mm、直径 $\phi 60\text{mm}$ の C/C 円盤に実機搭載時と同様に装着し、C/C 円盤端をピンにより4箇所で支持した。

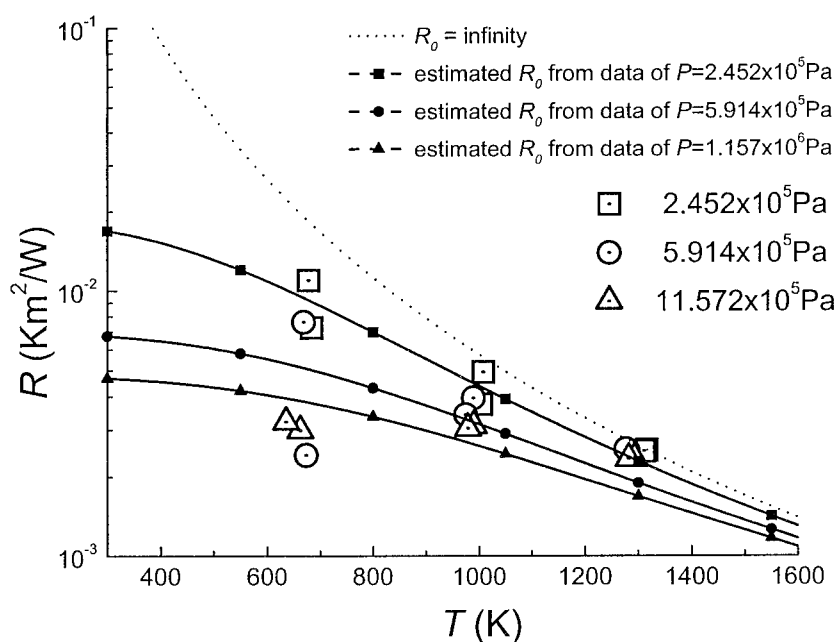


図3.2 接触熱抵抗の温度依存性

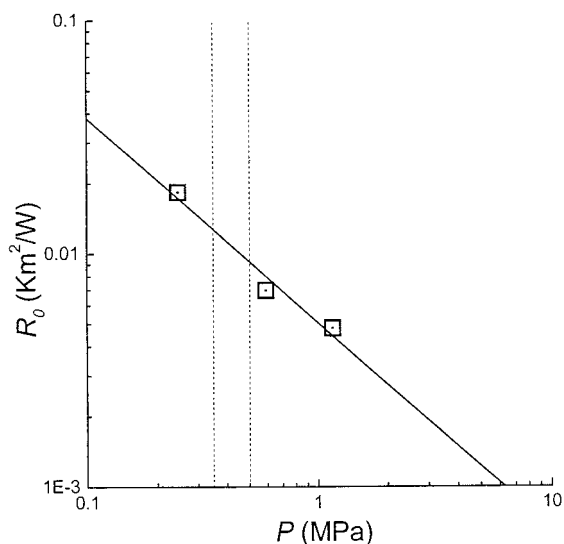


図3.3 接触熱抵抗計測値

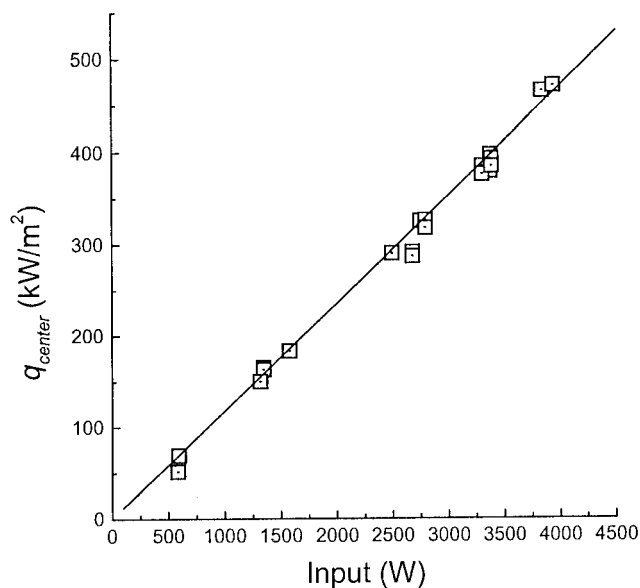


図3.5 印加加熱特性

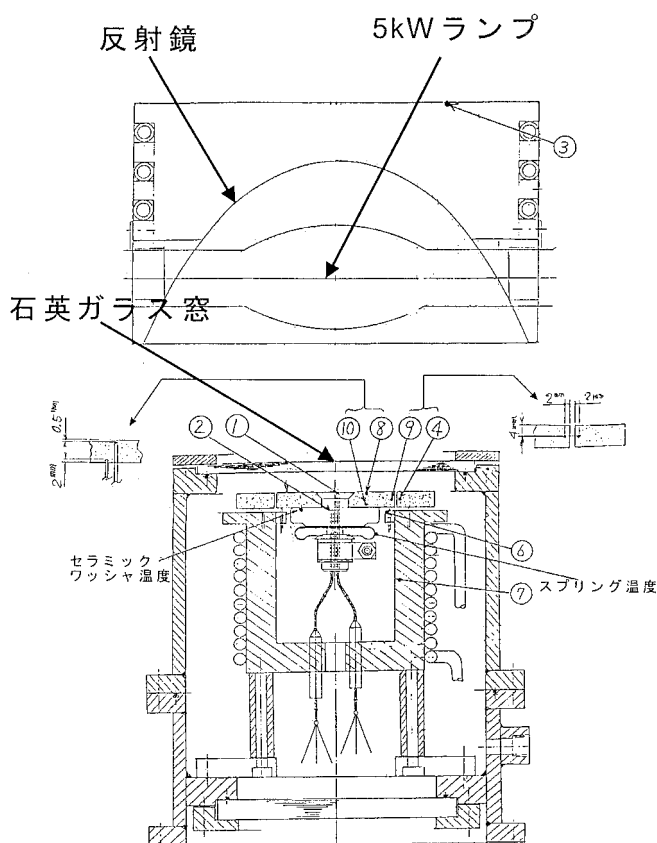
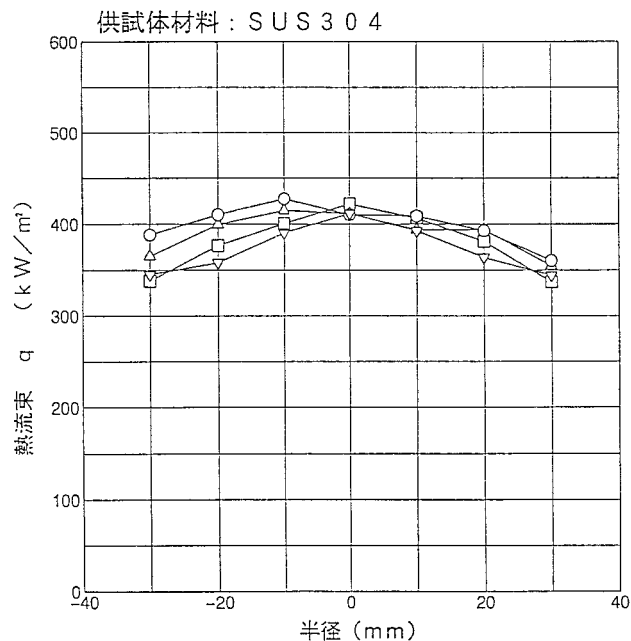


図3.4 C/C 温度センサ熱モデル試験 (第1回試験) セットアップ

さらにφ100mmのC/C板で周辺を囲み、端面からの加熱の影響を極力減らすことを考えた。供試センサ全体は真空容器内に設置し石英ガラス窓を通して加熱を行った。供試センサ裏面側は境界条件を明確にする目的で水冷された銅製円筒で覆いその内面は黒体塗料を塗布している。温度計測はセンサモジュールに埋め込まれている熱電対による2点の他、図3.4に示される様に計10点で行った。C/C部温



各シンボルは周方向分布を示す。

図3.6 径方向熱流束分布

度はセンサモジュールと同様にφ1.0mm白金シース熱電対により計測した。

ランプヒータはフィラメント型のハロゲンランプであり、電圧を変えることにより加熱履歴を自由に設定することができる。ここではHYFLEXのノミナル計画飛行経路に沿った加熱率履歴を模擬した加熱パターンの試験を真空中(<27Pa)で行った。

<予備試験>

本試験に先立ちランプヒータによる印加加熱特性をカロリーメータ、Gardon型加熱率センサを用いて調べ、本試

験においては印加加熱率の同時計測は行わなかった。中心位置加熱率絶対値は Gardon 型加熱率センサ (Medtherm 社製 GT-50-16-2-492T) を用いて計測を行った。その結果装置の加熱率再現性は標準偏差で 6.5% であった。ランプ入力電力—中心位置加熱率との関係および空間分布を図 3.5、図 3.6 に示す。空間分布計測では、加熱時間が内部伝導に比べ十分長くとれること、また同時に複数の計測を行う事を考慮しセンサ単価を抑える必要があったことなどから、SUS304 製カロリメータ ($\phi 9\text{mm}$, $t 5\text{mm}$) で行った。ただしここでの加熱率は輻射率 (吸収率) $\varepsilon = 1.0$ の表面に

吸収される加熱率に換算している。

<本試験>

Gardon 型加熱率センサによる計測結果をもとに図 3.7 に示される模擬飛行時加熱履歴を実現する様、電力を調整し本試験を行った。各試験におけるモジュール表面温度 (TC1) および C/C パネル表面温度 (それぞれ図 3.4 中①及び⑧) の時間履歴を図 3.8 に示す。ランプ入力電力 (実測) をもとに推定した印加加熱率履歴 ($\varepsilon = 1.0$ における値) を図 3.9 (破線) に示す。同図中に、初期パラメータ値 (熱物性値、接触熱抵抗として実測値) を用いた調整前の熱モ

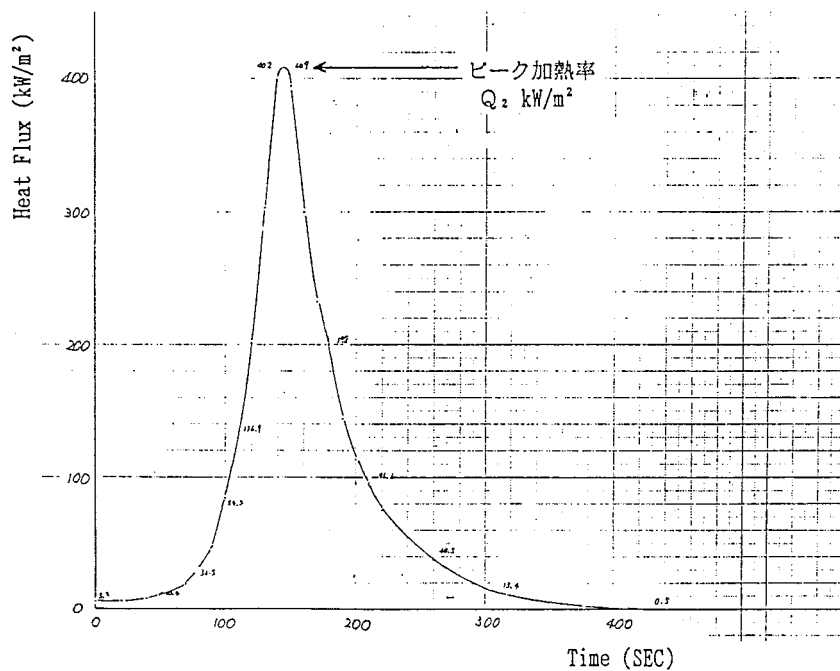


図3.7 印加加熱履歴計画値

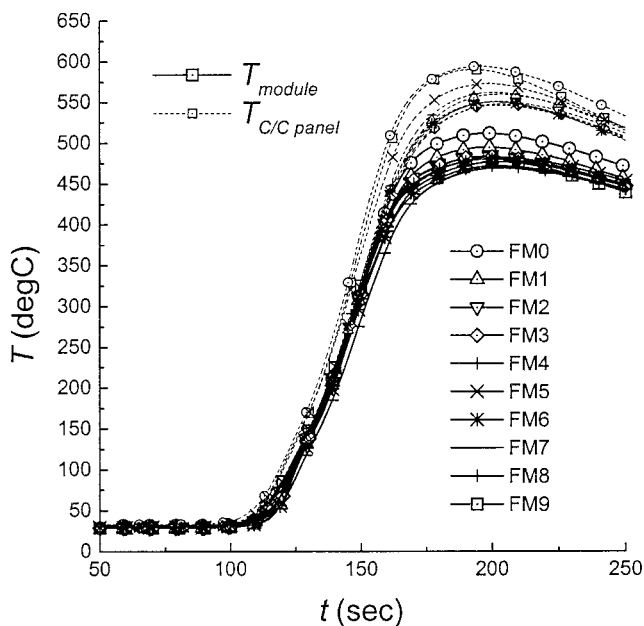


図3.8 モジュール表面温度と C/C パネル表面温度 (実測値)

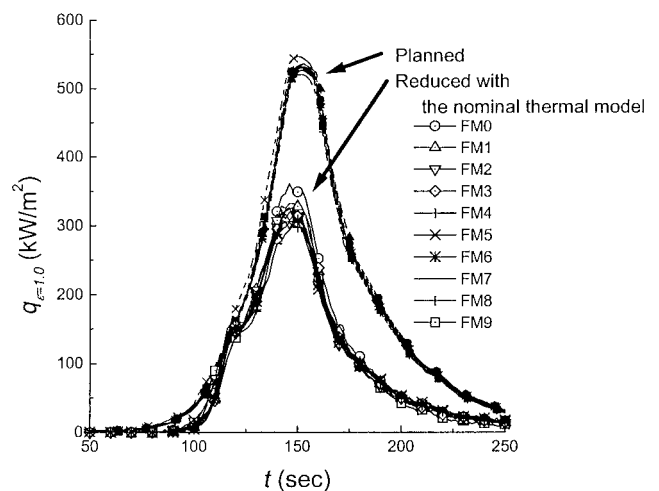


図3.9 センサ温度実測値から求めた加熱履歴 (初期熱モデル)

デルを用いて実測モジュール表面温度履歴から求めた加熱率履歴をあわせて示す。いずれのケースにおいても熱モデルを用いた実測加熱率履歴は予備試験結果に基づく印加加熱率推定値をおおきく下回る結果となり、熱モデルの調整可能な範囲を超えた結果となった。更にセンサモジュール内差温 (TC1-TC2) 履歴 (図3.10) では加熱前半において単調に上昇せず不規則に変化する現象が見られ、熱モデル上のパラメータ調整で再現することは極めて困難であった。この不規則な変動は通常の熱伝導では考えられないため、HYFLEX 飛行後にFM9 センサモジュールに関して改めて熱モデル較正試験を行うこととした。

第2回熱モデル較正試験

再試験を超高温材料研究センター (JUTEM) (岐阜県多

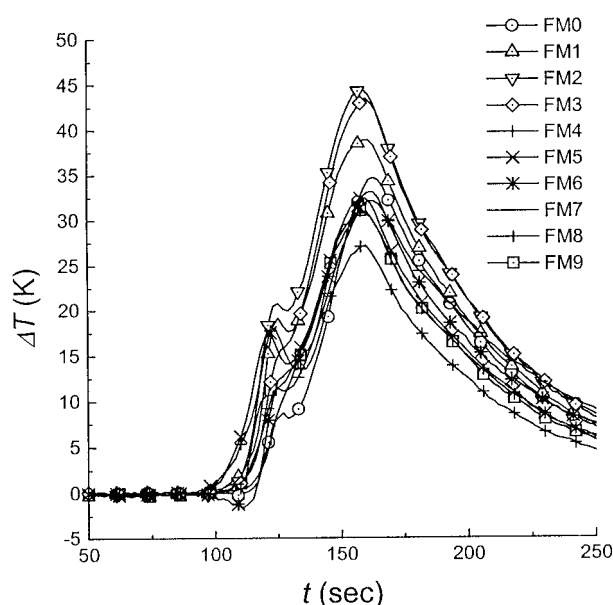


図3.10 熱モデル試験におけるモジュール熱電対間差温履歴

治見市) の超高温酸化揮散試験装置で実施することとした。第1回熱モデル較正試験における不具合の原因は不明であるが加熱源と、供試センサとの間の相互干渉による実印加加熱率の変化の可能性もあり、そのような相互干渉は、本装置のように、供試体 (センサ及び周辺 C/C パネルなど) 温度上昇による輻射量に対して十分大きな出力を持つ加熱源を用いることによって回避できると考えられる。本装置は図3.11に示される様に30kWの Xenon アークランプヒータにより真空容器内の供試体を加熱させる装置である。そのためフィラメントランプを用いていた前回熱モデル較正試験と異なり、加熱履歴を連続的に変化させることが困難で加熱パターンとしては飛行状態加熱率、加熱時間をおおよそ模擬したステップ加熱 (一定加熱) パターンとした。供試センサまわり治具などは第1回熱モデル較正試験の際と同様の設計とした。本装置はもともと加熱率センサ較正装置ではなく、加熱率の空間分布はそのままでは均一ではないので、ここでは均一化を図るためランプヒータと供試体の間に石英すりガラス板を挿入した。

＜予備試験＞

加熱率及び分布を確認する目的で本試験の前に第1回熱モデル較正試験と同様に Gardon 型加熱率センサを用いた予備試験を行った。更に本試験では C/C 空力加熱センサ供試体の外側に加熱率センサを取り付け試験中における加熱率を同時計測し、予備試験の際に得られた中心位置における加熱率との関係を用いて印加加熱率の時間変化として整理した。この試験は熱モデルを調整するためのものであり、加熱率、分布、履歴、再現性が直接飛行データ解析精度に影響する。しかし使用したランプヒータはアークランプの光を反射鏡により供試体付近に集光させるものであるため、加熱率は供試体の高さ位置に依存する。また更にこのランプヒータは加熱率分布のデータが予めわかっていな

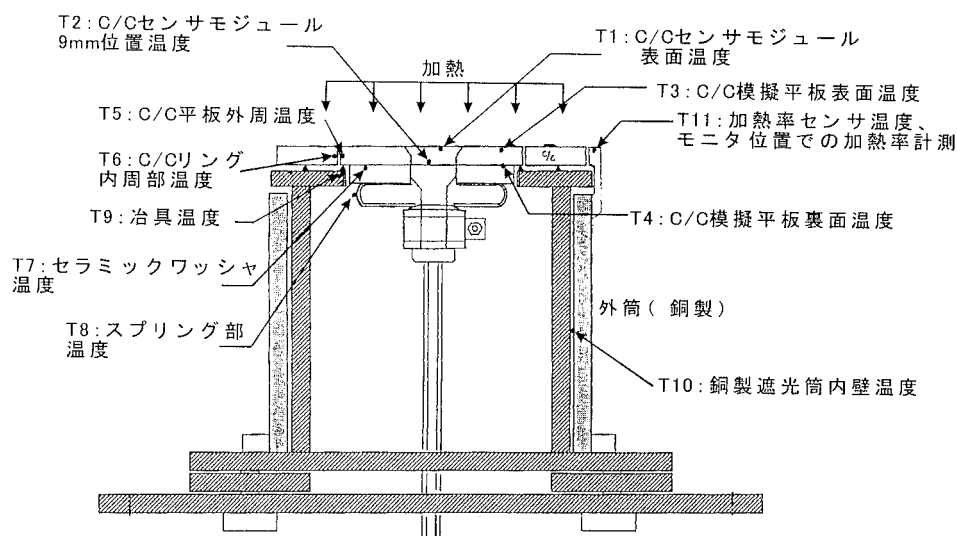


図3.11 C/C 空力加熱センサ熱モデル試験 (第2回試験) セットアップ

い等の理由から、Gardon 型加熱率センサ、銅スラグカロリーメータを用いて加熱率分布、履歴、再現性に関するデータを取得すると同時に高さ位置などの設定を行った。また本試験時に行った供試体外縁位置における加熱率と中心位置における加熱率との関係に関するデータの取得も行った。それらの結果を図3.12、図3.13及び表3.2に示す。

＜本試験＞

実機搭載の C/C センサが受けると想定される加熱率範囲、時間を飛行時センサ位置、加熱率最大値、加熱率平均値、加熱時間等をカバーして模擬するように表3.3に示す

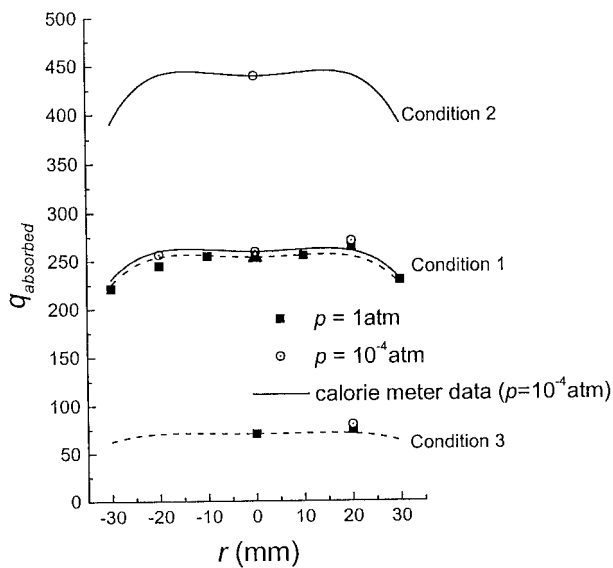


図3.12 熱モデル試験（第2回試験）予備試験における加熱分布

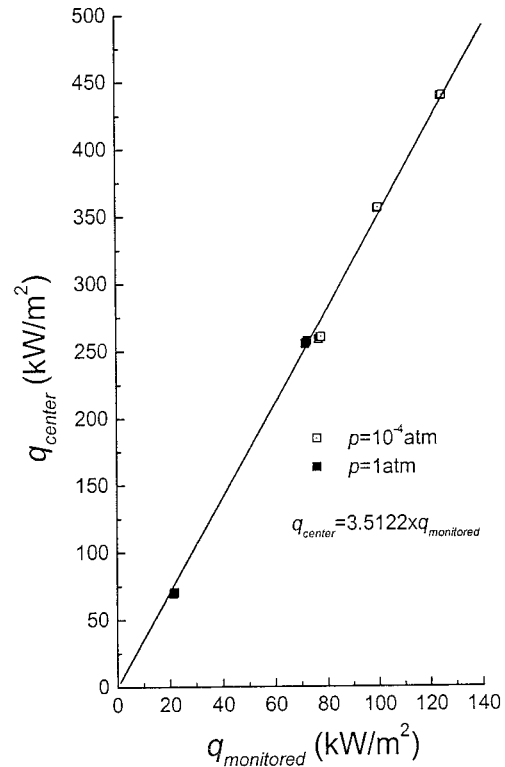


図3.13 中心位置加熱率と外縁部加熱率との関係

表3.2 C/C 実機加熱率と熱モデル試験における試験条件の相違

$q = 250 \text{ kW/m}^2$		
カロリメータ、gardon センサとの不一致分	$\sigma_{q/q\text{-incident}}$	0.0114
中心位置、モニター位置における比の偏差	$\sigma_{ratio(q\text{-center}/q\text{-monitor})}$	0.0452
RSS	$\sigma_{q/q\text{-incident}}$	0.0466

表3.3 C/C 実機加熱率と熱モデル試験（第2回試験）における試験条件

case#	加熱時間 sec	加熱条件	kW/m ²	備考
001	50	condition#1	279	高加熱試験
002	100	condition#1	279	
003	200	condition#1	279	
004	50	condition#2	478	極高加熱試験
005	50	condition#3	81	
006	100	condition#3	81	低加熱試験
007	200	condition#3	81	
009	50	condition#1	279	再現性確認試験
010	100	condition#1	279	
011	200	condition#1	279	
012	100	condition#2	478	極高加熱試験の再現性確認
013	200	condition#1	279	

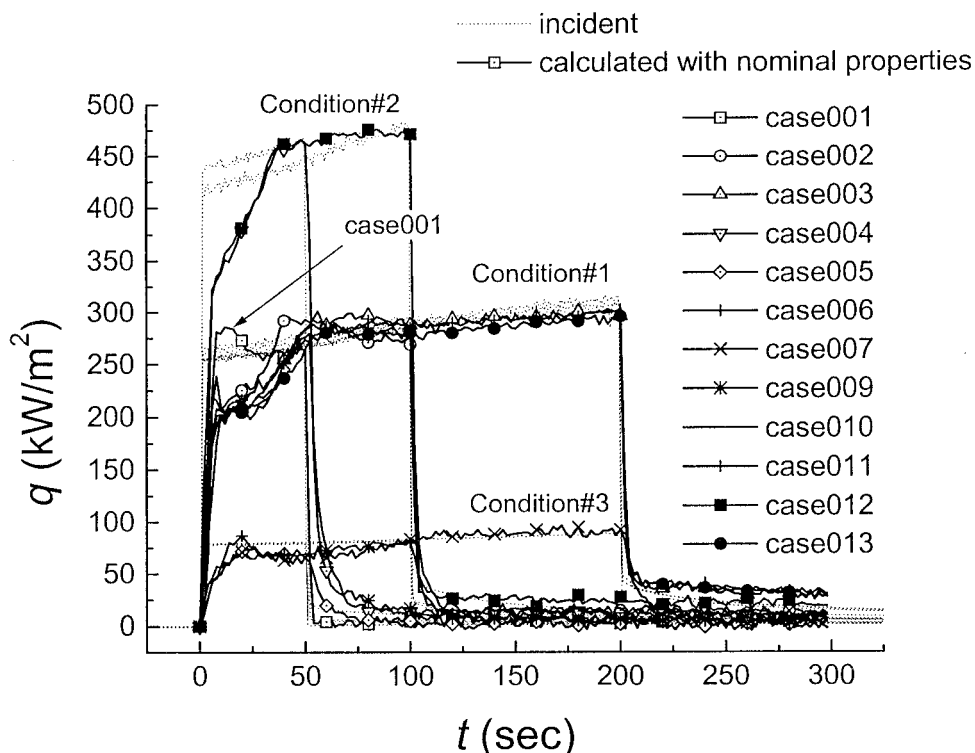


図3.14 初期熱モデルによる熱モデル試験（第2回試験）加熱率推定結果

に取り付けられた熱電対によりステップ加熱中及び加熱停止後の各部温度履歴を記録した。

図3.14に示されるようにモジュール表面温度から、接触熱抵抗、熱物性値などを実測値とした初期熱モデルを用いて得られた加熱率履歴（ $\varepsilon=1.0$ 換算）（実線）は点線で示される印加加熱率と比較すると、ほぼレベルが一致した結果となっている。しかしcase001以外では20%–30%程度実測加熱率より低い値が得られ case 001とcase 002以降とで明らかに加熱開始直後の挙動が異なっていることがわかった。原因として、今回の試験では case 001加熱終了後の冷却時に熱電対シースがモジュールから剥離し次回以降の再加熱の際、温度の上昇とともに熱膨張などのために熱電対シース/モジュール間の接触熱抵抗が再び小さくなるという可能性が考えられ、付録Aに示される検討の結果、飛行時におけるセンサ状態はcase001における状態に近いと考えられた。case 001では温度範囲が飛行時と比べ低い、これらのことからcase 001のみのデータに基づき熱モデルチューニングを行うこととした。

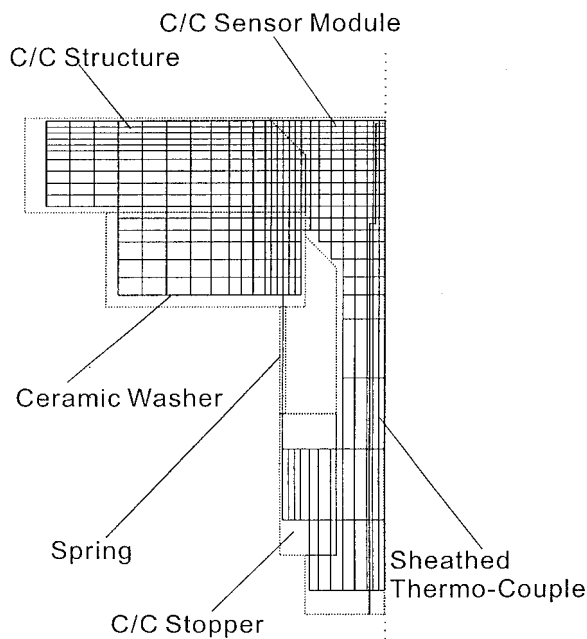


図3.15 熱モデル試験熱解析の際のC/C空力加熱センサ周り計算格子

3.3 熱モデル較正試験解析時のC/C空力加熱センサ熱モデル

計算方法、格子

モジュール周辺のC/Cパネルを含めた熱モデルを2次元軸対称形状として模擬し（図3.15）、差分法によって実機搭載状態、熱モデル較正試験時における温度場を計算した。

熱モデルでは実機C/C構造を模擬したC/Cパネル、C/Cセンサモジュール、セラミックワッシャ、スプリング、C/Cストッパ、白金シース熱電対を模擬した白金棒が含まれている。また各要素間の接触熱抵抗では前述の接触熱抵抗試験結果をもとに温度依存性を輻射によるメカニズムとしてモデル化したものを用いた。熱物性値は温度依存性を

含めた実測値を基本的に使用しているが、3次元形態のセンサ周りを軸対称にモデル化する際に生じる長さ、断面積、体積の不一致の影響を減らす目的で熱伝導率、熱容量（比熱）の実測値をこの熱解析では一部修正して使用した。

境界条件

熱モデル較正試験解析で、シース熱電対指示温度から表面加熱率を求める際、(1)センサモジュール中心表面（対称軸上1ノード目）では温度を境界条件として与え、(2)その他の表面（対称軸以外の1ノード目）では(1)で得られた中心位置における加熱率と予備試験で得られている加熱率の空間分布とから各点における加熱率を求めそれを境界条件としている。試験時 C/C パネル端は外周 C/C パネル（リング）に向かい合っていることを考慮し断熱境界条件とした。試験では C/C 裏面側は黒体塗料を塗布した銅製周辺輻射シールドの温度上昇が小さかったことから、センサ周辺からの輻射、反射はなく周辺からの輻射は一様に $T=273.15\text{K}$ の黒体輻射と等しいとした。

センサモジュールは極力表面温度を計測することができる様に設計を行ったが厳密には表面ではなく、実際には内部のシース温度を測っているため、計測温度は実際の表面温度と異なる可能性がある。そこで表面温度を仮定し、計算された内部にあるシース部温度が実測値と合うように繰り返し計算を行った。

3.4 C/C 空力加熱センサ熱モデルチューニング

熱モデルチューニング方針

一般に熱モデル調整において調整されるべきパラメータを選択する際、以下の条件を満足し、熱モデル較正試験結

果と一致させるのに必要十分なものを選択する必要がある。

1. 実測値の信頼性が低いもしくは実測値が存在しない
2. 加熱率推定への感度が大きい

このとき、C/C 空力加熱センサ解析においては、各構成要素熱物性値や要素間の接触熱抵抗は実測値として計測データが存在しているのに対し熱電対シース/モジュール間接触熱抵抗に関しては明確な計測値がなかった。そのうえ、初期モデルで熱モデル較正試験結果とほぼ一致した結果が得られていたため、ここでは熱電対シース/モジュール間接触熱抵抗のみを調整パラメータとして熱モデルチューニングを実施した。

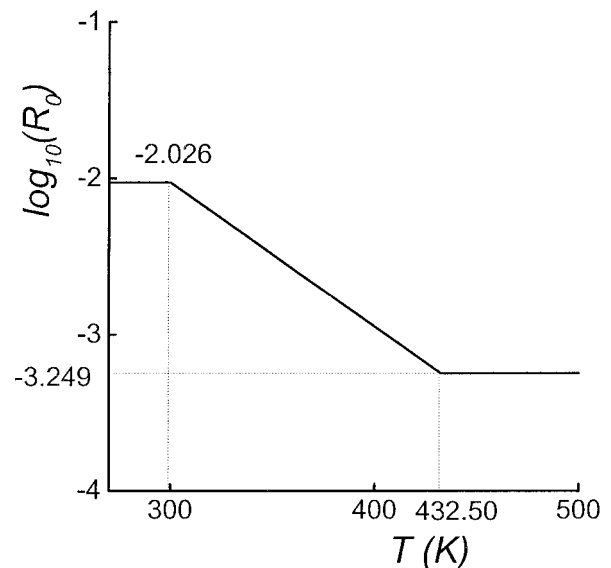


図3.16 熱電対シース/モジュール間接触熱抵抗のモデル化

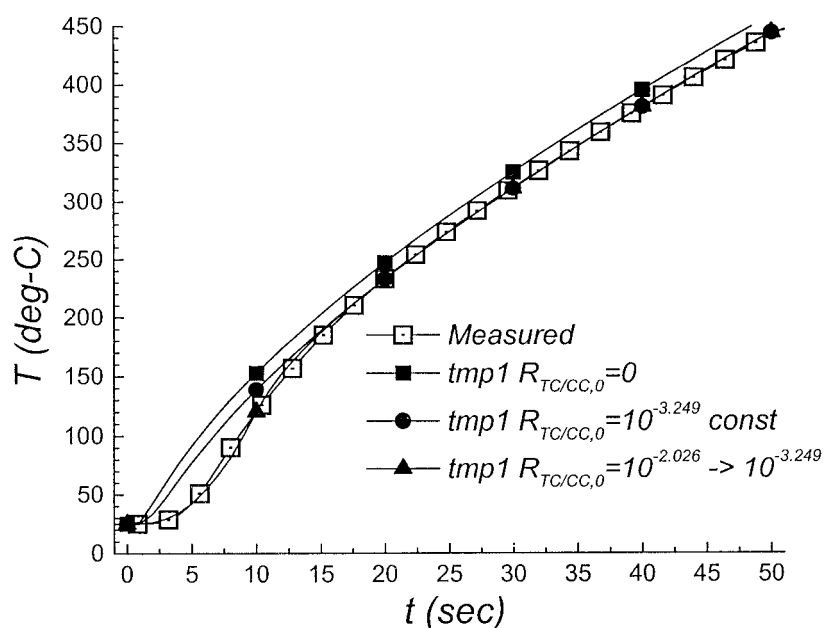


図3.17 熱モデル検証計算結果

熱モデルチューニング結果

熱電対シース/モジュール間接触熱抵抗の温度依存性を導入し熱モデルを調整することで case 001においてみられた表面側温度の立ち上がりの遅れ (5-10sec 程度実測と比べ遅れている) をほぼ再現することができた。温度依存性を導入して調整した接触熱抵抗推定およびそれをもとにした温度推定結果をそれぞれ図3.16、図3.17に示す。センサ表面から0.5mm内部にある熱電対計測温度と一致するように繰り返し表面加熱率を推定し熱伝導解析を行ったが、得られた接触熱抵抗を考慮すると、表面と熱電対位置との温度差が大きくなり内部温度から表面加熱率を求める逆解法が (特に step 的な加熱履歴の場合) 計算上不安定となる。そのため、繰り返し計算によって推定計算された熱電対位置温度と実測との差温が0.5K以内で一致した時間範囲でのみ推定加熱率と実測印加加熱率とを比較し加熱率推定精度を求めた。このようにして得られた加熱率推定誤差は $\sigma_{q/q(\text{incident})} = 0.030$ であった。

3.5 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル較正試験

セラミックタイル空力加熱センサに関しても C/C 空力加熱センサと同様に熱モデル作成のための熱モデル較正試験を実施した。実験機搭載品すべてに対して試験を行い、個々の熱モデルを作ることが理想的であるが、費用、時間等の関係でFM品と同一仕様、工程で製作されたセンサモジュールに対して試験を行い、そこで調整された熱モデルを用いて飛行データ解析を行うこととした。TPS 用のセラミックタイルの製作工程、材料などが前部胴体 ($x < 2370\text{mm}$) と後部胴体とで若干異なり、実機においても前胴タイル素材 (富士重工業(株)製) を用いたセンサと後胴タイル素材 (川崎重工業(株)製) を用いたセンサの2種類が用いられているため本試験においてもこの2種類に対し

て行った。

試験は C/C 空力加熱センサ熱モデル較正試験 (第2回試験) と同様に超高温材料研究センタ (JUTEM) の超高温酸化揮散試験装置を用いて実施した。熱モデル較正試験の試験条件を定めるためには、加熱率推定に大きく影響するパラメータを見つけそれらが実飛行環境に近い状況で試験を実施する必要がある。HYFLEX の様に一定加熱履歴とならない場合、表面輻射により外部空間に放出される熱の他にセラミックタイル内部へ伝導する熱が大きくなるが、セラミックタイルの場合、このタイル熱伝導率は雰囲気圧力に強く依存している。そのため、加熱率、加熱時間の他に雰囲気圧力を変えて試験する必要があった。行った試験ケースを表3.4に示す。低加熱条件はランプと真空容器間に金属製の網を挿入することで実現した。

本試験の前に加熱率、分布、時間変化などの調整および確認のための予備試験を行い、本試験では加熱率の同時計測は行わなかった。予備試験で得られた加熱率分布を中心に加熱率で規格化して図3.18に示す。またこの試験で使用した装置は前述のようにアークランプの周りの反射鏡で供試体に集光させるものであるが、ランプ点灯後装置が熱的に平衡状態に達するまで中心位置における加熱率が徐々に増加することが判明した (図3.19) ので、熱モデル解析の際の印加加熱率としてその増加傾向を線型で近似した (同図)。本試験セットアップ状況を図3.20に示す。タイルセンサの側面への加熱を避けるために、内径 $\phi 52\text{mm}$ のセラミックタイル製のブロックでセンサ周辺を覆い、センサに装着されている熱電対で3個所の温度応答を計測した。

3.6 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル

計算方法、格子

熱電対の装着方法を考慮して平面2次元差分法を用いた。

表3.4 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル試験ケース

case#	供試 センサ	加熱条件 (kW/m ²)	加熱時間 (sec)		雰囲気圧力 (Pa)
F101	FHI1	238	200	高加熱条件 1	2.53×10^4
F102	FHI1	238	200	高加熱条件 1	1.33×10^1
F105	FHI1	238	200	高加熱条件 1	2.53×10^4
F106	FHI1	238	200	高加熱条件 1	1.33×10^1
F107	FHI1	238	200	高加熱条件 1	1.01×10^3
F201	FHI1	257	200	高加熱条件 2	2.53×10^4
F202	FHI1	69.7	200	低加熱条件	2.53×10^4
F203	FHI1	69.7	200	低加熱条件	1.33×10^1
F213	FHI1	257	200	高加熱条件 2	2.53×10^4
F215	FHI1	69.7	200	低加熱条件	1.33×10^1
K201	KHI2	238	200	高加熱条件 1	1.33×10^1
K202	KHI2	238	200	高加熱条件 1	2.53×10^4
K203	KHI2	238	200	高加熱条件 1	1.01×10^3
K205	KHI2	238	200	高加熱条件 1	1.33×10^1
K301	KHI2	257	200	高加熱条件 2	2.53×10^4
K302	KHI2	69.7	200	低加熱条件	1.33×10^1
K303	KHI2	69.7	200	低加熱条件	2.53×10^4

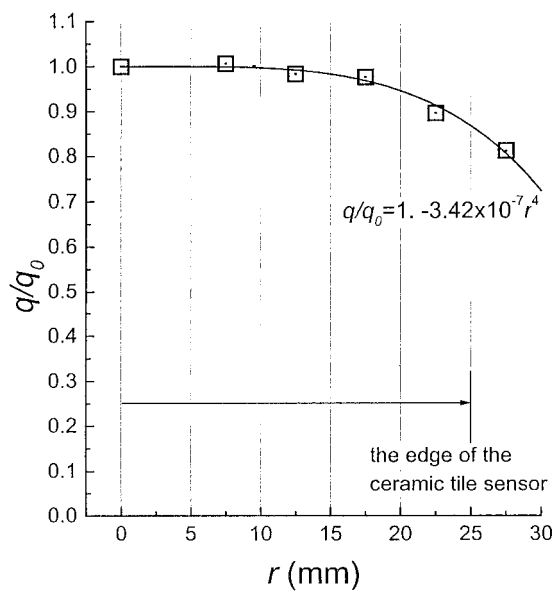


図3.18 セラミックタイル空力加熱センサ
熱モデル試験予備試験結果

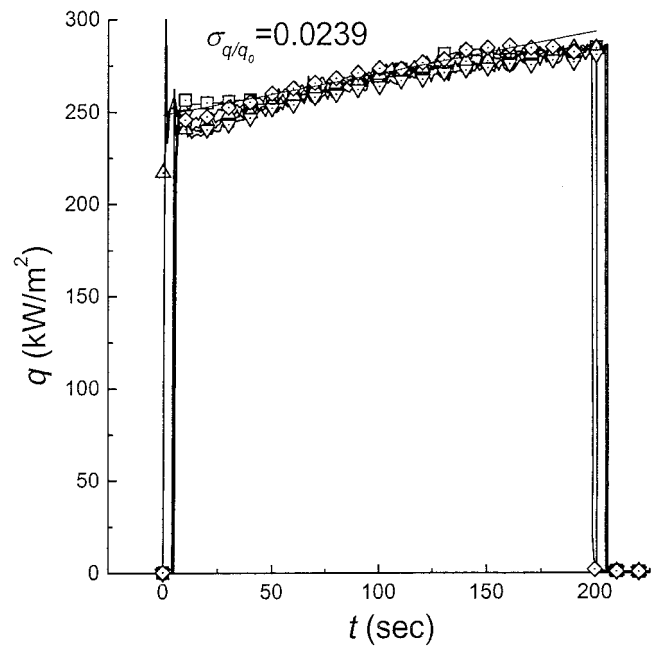


図3.19 ランプ加熱率の時間変化

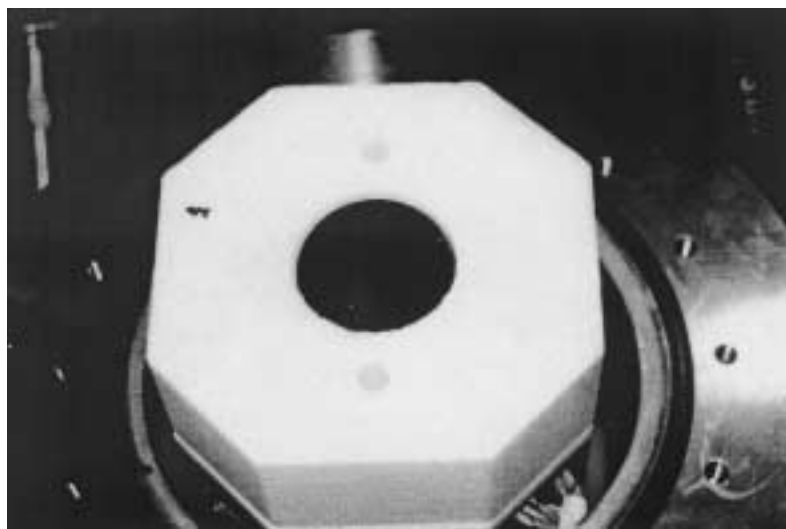
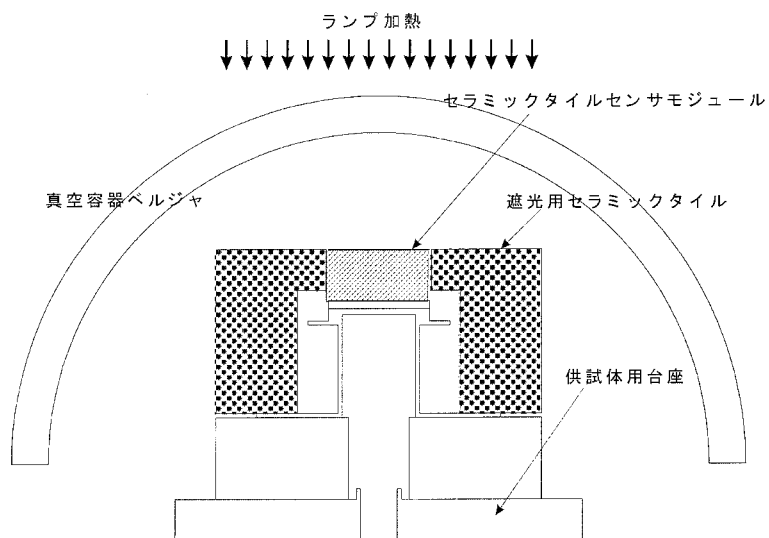


図3.20 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル試験セットアップ

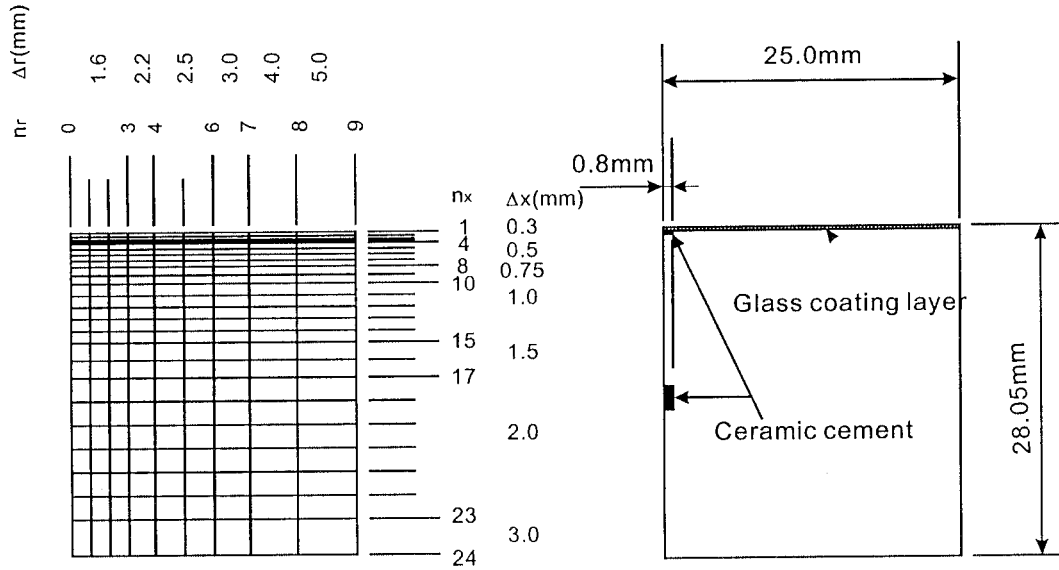


図3.21 セラミックタイル空力加熱センサ周り熱モデルの計算格子

計算領域は熱モデル較正試験解析においてはガラスコーティング層及びセラミックタイル素地のみとした。計算格子は図3.21のようになっており、ガラスコーティング層は1層目で表現されている（厚さ0.3mm相当）。各構成要素間の接触熱抵抗は0としている。

境界条件

熱モデル較正試験解析ではタイル底面は実測 TC3（図2.8参照）に等しい様温度分布であるとし、側面は断熱、被加熱表面は(1)与えられた表面温度履歴から加熱率を求める場合と(2)与えられた加熱率から温度場を計算する場合とで、それぞれ次の2通りの方法で境界条件を与えた。

- (1) 中心ではTC1温度を与え、その温度変化となるように加熱率を求める。中心以外の表面ではその加熱率が1様に加わっているものとして温度履歴を計算する。
- (2) すべての表面の点で加熱率を与え、温度履歴を計算する。

またここでは吸収率と輻射率とを別箇に考え表面における ε_{in} と ε_{out} の関係を以下のとおりとした。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho C \Delta x} \left(k_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 - k_0 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_0 \right) + \frac{1}{\rho C} \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{Eq.3.2})$$

$$k_0 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_0 = \varepsilon_{in} q_0 - 0.94 \varepsilon_{out} \sigma T^4 \quad (\text{Eq.3.3})$$

3.7 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデルチューニング 熱モデルチューニング方針

セラミックタイルにおける熱モデルチューニングパラメータの選定方針も C/C 空力加熱センサの際と同様である。ただし「実測値の信頼性」に関して、セラミックタイルは熱伝導率が極めて小さい上セラミック繊維を固めて作られ

るセラミックタイルは空隙を多く含むため熱物性値の計測が一般に困難で相対的に計測精度が悪い。また表面熱電対まわりの熱容量は熱電対を固定するための接着剤やコーティング層厚さ、熱物性値等不明確な要素があり信頼性が低いと考えられる。

更にこれらパラメータはいずれも加熱率推定に大きな影響をもつため、調整すべきパラメータとして以下の4パラメータを考え、他のパラメータ、熱物性値は表2.4に示される実測値とした。

1. コーティング部熱容量 ρC_{coat}
2. タイル部熱伝導率 ρ_{tile}
3. タイル部熱容量 ρC_{tile}
4. コーティング吸収率/輻射率（垂直） $\varepsilon_{out}/\varepsilon_{in}$

実際はコーティング層厚さ、熱電対回り接着剤熱容量などのパラメータも考えられるが、加熱率－温度の関係への効果としてガラスコーティング層熱容量と類似していると考えられるため熱容量 ρC_{coat} のみの推定で代表することとした。

またコーティング層吸収率と輻射率とを異なる値とした理由は、今回の試験ではほぼ輻射平衡となるはずの長時間加熱中の表面温度が実測とモデルとで輻射率を1.0以上にしなければ一致しなかったケースが存在したためである。これはランプ光の波長と試験時表面温度における輻射光波長とが異なりその影響がでたものと考えた。

今回の熱モデル較正試験においては、それぞれのパラメータの温度への効果として、コーティング層熱容量はおもに加熱開始直後の表面温度立ち上がり、コーティング層吸収率/輻射率はおもに最高表面温度、タイル部熱容量及び熱伝導率はおもに加熱停止後の表面温度の立下り及び中間部温度履歴に影響を与えている。

熱モデルチューニング結果

上記計測表面温度を境界条件として熱解析を行い、加熱率が一致する様に各パラメータを試験ケースごとに調整し、その後にタイル種類、加熱条件、雰囲気圧条件別にパラメータを平均した。熱物性値の実測値との比であらわした調整

後のパラメータの値を表3.5に示す。これらパラメータ値を用い各試験ケースにおいて実測温度から加熱率を逆に推定した。その推定加熱率結果と印加熱率の比較を図3.22に示す。今回の試験条件での熱モデルを用いた加熱率推定誤差の標準偏差は表3.6に示される通りとなった。

表3.5 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル調整結果（実測値との比率）

Pressure		ρC_{coat}	K_{tile}		ρC_{tile}	$\varepsilon_{out}/\varepsilon_{in}$
			T<750	750<T		
FHI tile sensor						
1.33x10 ¹	Pa	0.830	1.726	1.781	1.615	1.002
2.53x10 ⁴	Pa	0.830	1.883	2.432	1.615	1.002
KHI tile sensor						
1.33x10 ¹	Pa	1.083	1.013	1.407	1.408	0.930
2.53x10 ⁴	Pa	1.083	1.152	1.637	1.408	0.930

表3.6 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル推定精度検証結果

	$q=70\text{kW/m}^2$	$q=250\text{kW/m}^2$
FHI tile sensor		
$\sigma_{q/q(\text{incident})}$	0.0776	0.0278
KHI tile sensor		
$\sigma_{q/q(\text{incident})}$	0.0400	0.0504

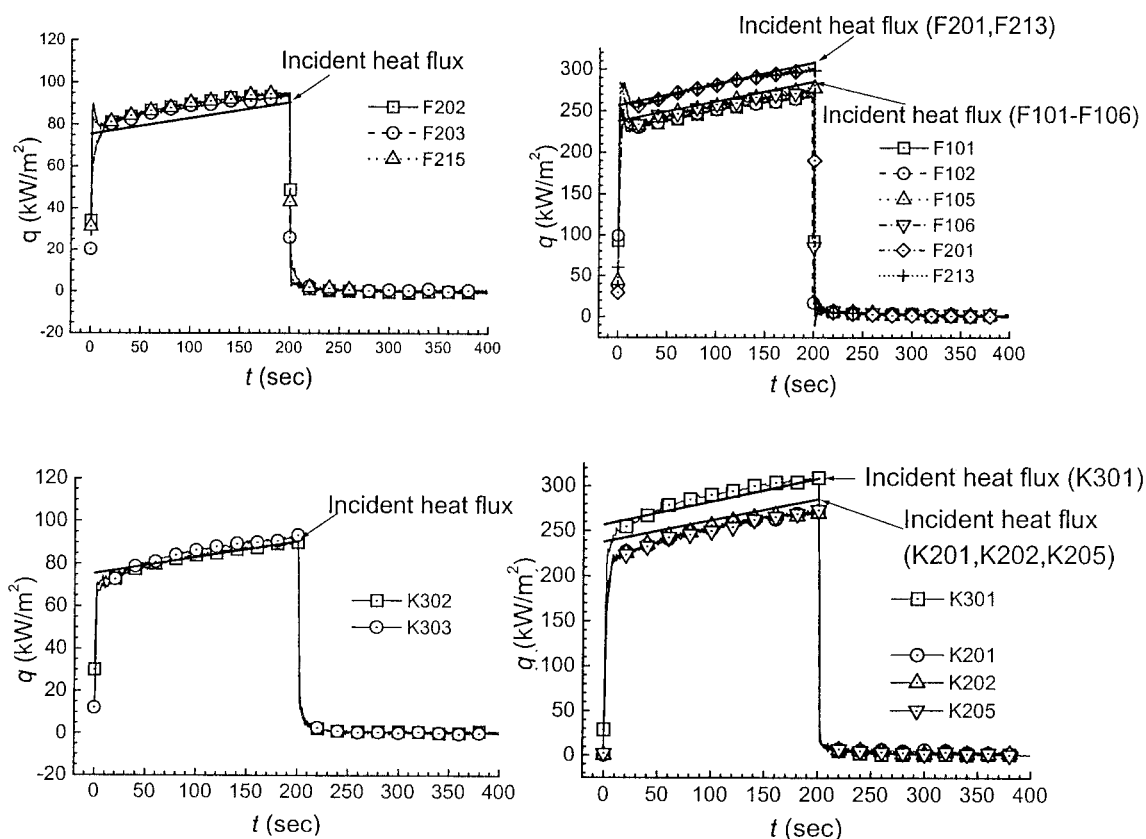


図3.22 セラミックタイル空力加熱センサ熱モデル検証計算結果

第4章 飛行データ処理

4.1 飛行データに基づく加熱率算出法

<C/C 空力加熱センサ>

飛行中テレメトリによって受信されたセンサ温度出力から、前述の熱モデルにより加熱率を逆算した。計算では熱モデル校正試験解析時と同様に表面温度出力のみを用いて繰り返し計算によって加熱履歴を求めている。校正試験解析との計算方法における相違点は主に2点あり、ひとつは加熱率ではなく計算領域内で局所的に Stanton 数が一様の空力加熱分布であると仮定したこと、もうひとつは計算格子を周辺 C/C パッドアップを考慮したものとしたことである。

C/C 空力加熱センサの飛行時と校正試験時ではいくつか異なる条件があり、より信頼性のあるデータとするためにはそれらを十分考慮する必要がある。熱モデル校正試験時と異なる主な要素として、センサ裏面の輻射環境があげられるが、これはフライト時にセンサ裏面がバルクヘッド及びノーズキャップ裏面からの輻射及び反射にさらされる事による。これをセンサ熱解析に反映させるために、まず C/C ノーズキャップ、バルクヘッド可撓断熱材を球、円柱、平面で模擬し、C/C は、厚さ方向に2点、対称面内周方向、機体軸周り周方向にそれぞれ約40mm間隔で分割したモデルで3次元熱伝導を考え、バルクヘッドでは、厚さ25mmの可撓断熱材を18分割したモデルで1次元熱伝導を考えセンサ熱解析の裏面境界条件として与えることとした。ここで C/C ノーズキャップ厚さは前述のように一般部で4mmであるが空力加熱センサ、圧力センサ固定用のため8mm厚にパッドアップされた構造をしているのでここでは各センサ位置を中心にφ65mm以内の要素がパッドアップされているものとした。ノーズキャップ内の輻射を熱伝導と同時に0.5sec刻みで計算し各点における温度履歴、輻射強度を求めた。

ここで C/C ノーズキャップ温度の計算では加熱率分布の履歴として完全気体澱点加熱率推算値¹³⁾に風試結果で得られた澱み点における比をかけた加熱履歴および Lees 分布¹⁴⁾を仮定した。この輻射強度計算は、C/C センサ熱解析とは独立に各センサ位置における輻射強度の履歴を求め、C/C センサ熱解析の際の裏面境界条件とするためにおこなった。裏面輻射強度はセンサ軸方向に垂直な面（面外方向）および平行な円柱面（面内方向）に対する輻射強度を同時に求めたが、その際センサのあるパッドアップされた C/C からの輻射による寄与は除外した。

<セラミックタイル空力加熱センサ>

実飛行結果解析ではタイル底面温度を計測していない箇所もあるため、熱モデル校正試験解析時と異なりアルミ構造裏面の境界条件として断熱を仮定した。これは

HYFLEX の飛行で条件において裏面境界条件の加熱率導出に及ぼす影響が小さいことに基づいている。つまりこの解析では、ガラスコーティング層、セラミックタイル素地、SIP、アルミ構造（厚さ1.6mm）を計算領域としアルミ構造裏面を断熱境界とした。また飛行実験では計測点によってセンサ形状が異なり、それを反映させるためにそれぞれの計算格子は異なる。

校正試験時との環境条件における相違点として雰囲気圧力がある。前述のようにタイルの熱伝導率はタイル内部圧力に依存しているが、ここではセラミックタイル内部圧力はその部位における表面圧力に等しいと仮定し、タイル内部の対流などは考慮しない。実飛行中の表面圧力は澱点加熱率と同様に大きく変化する。そのためここでは風上側のセンサに関しては Modified Newtonian により、また側面、背面側のものは一様流静圧に等しいとして表面圧力の時刻歴を求め、空力加熱導出時に使用した。

4.2 飛行時加熱率計測およびその誤差

Stanton 数は Reynolds 数、Mach 数に依存するために風洞試験結果と実飛行データとの直接比較はできない。そのためここでは下記のような完全気体澱点 Stanton 数 (St_{ref})¹³⁾ で規格化したパラメータで整理する。

$$\bar{St} = St / St_{ref} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$St_{ref} = \frac{0.763 P_r^{-0.6} \sqrt{\rho_e u_e \frac{du_e}{ds}}}{\rho_\infty u_\infty} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

上記の様に、得られた加熱率を Stanton 数として無次元化し更に St_{ref} で規格化を行う際に、一様流状態量推定の誤差の影響を受ける。HYFLEX で行った一様流状態量（静温、静圧）の推定は NOAA の気象衛星による計測結果を元にしており¹⁵⁾、その推定誤差の評価は高度50km以下において行われた。ここでは50km以上においても推定誤差が表4.1のとおりであるとして \bar{St} への影響を調べた（図4.1）。ここで風速の推定誤差として、GRAM-90による推定¹¹⁾と風速0m/sとした場合の差の最大値（ほぼ50m/s）を仮に用いている。

<C/C 空力加熱センサ>

実機条件での空力加熱導出において生じる誤差は熱モデル校正試験をもとに評価できるものばかりでなく、加熱条件の違いのために評価できないものも含まれる。その中

表4.1 フライト一様流条件推定精度（仮定）

一様流状態量推定誤差	
静温(T)	5 K
静圧	3 %
風速(含対地速度推定誤差)	50m/s

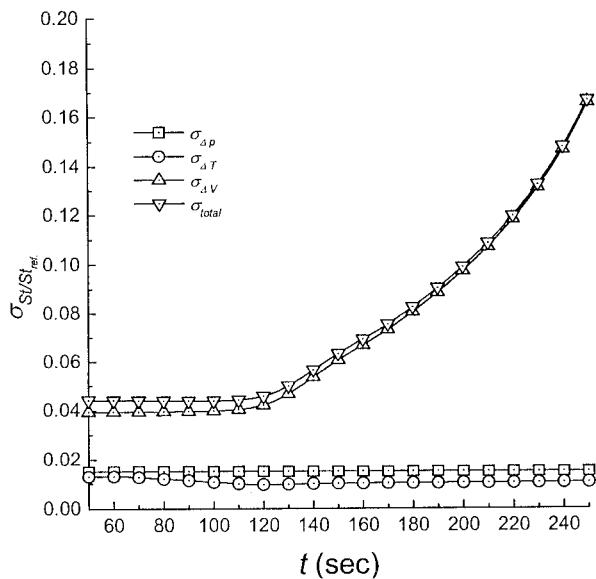


図4.1 一様流条件推定誤差の Stanton 数比に及ぼす効果

で有次元の加熱率計測に影響するものとしては、加熱レベルの違いと、裏面輻射条件の違いの二つが主要因と考えられる。

本来校正試験では熱流束、温度の両面で実飛行時を包含しているべきだが、今回の校正調整で使用了熱モデル校正試験結果は比較的低い加熱を短時間でのみ行ったものであるため、モジュール各部の温度が実飛行時と比べて十分に上昇していない。そのため各要素間の熱の流れがある程度以上大きくなるとこの熱モデル校正試験をもとに誤差を評価できなくなると考えられる。この事を定量的に評価するために実飛行時におけるセンサモジュールと各センサコンポーネント間の熱の収支の例 (TA03) を図4.2に示す。表面からの加熱が減少し始める付近から各要素間との熱のやりとりが大きくなっていることがわかる。表面加熱量とその他の熱流束の収支をRSS (二乗和) したものととの比は、図4.3に示される様にいずれのノーズ部センサにおいても $t=120\text{sec}$ 前後から急激に増大し各要素間の熱流速の見積りが加熱率導出に大きく影響を与えるようになることがわかる。一方、校正試験ではこの熱流束の比は図4.4の様に0.2程度であるため、誤差の見積りが可能な範囲として実飛行時には熱流束の比が0.2以下である $t=120\text{sec}$ までと考えた。エレボン上のセンサに関しても同様に評価し、およそ $t=130\text{sec}$ までの結果に関して誤差の評価が可能であると判断した。

センサ裏面輻射強度推定誤差による加熱率導出への誤差として、バルクヘッド上輻射強度計による実測強度と相当位置における推定強度との比較を図4.5に示す ($\varepsilon=1.0$ の面が受ける加熱率に換算)。これによると推定結果は実測と比べ時間的に早く立ち上がり早く減少する。これはモデル上で模擬されていないノーズキャップとバルクヘッドに

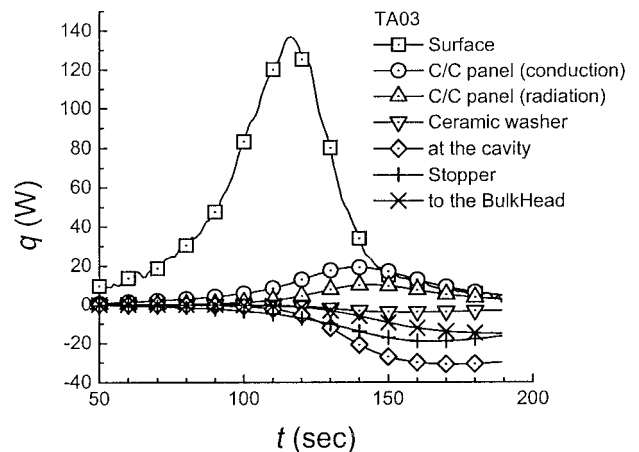


図4.2 C/C 空力加熱センサモジュールへの熱の流入 (+)、流出 (-)

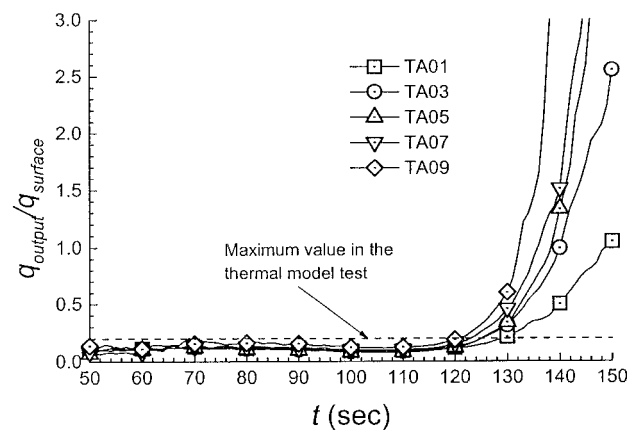


図4.3 C/C 空力加熱センサモジュールへの総熱流入と空力加熱との比

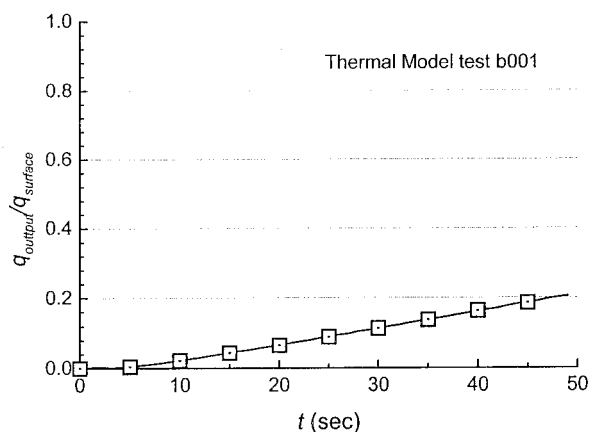
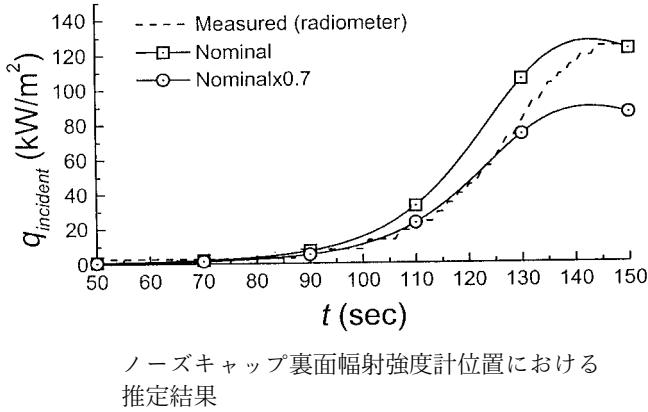


図4.4 熱モデル試験 (第2回試験) における熱流束比

囲まれた空間に存在するADS 圧力配管やその他構造などの熱容量の影響と考えられるが、ここでは模擬することが困難かつ信頼性が低いと考えられたため、輻射強度推定としては実測値をカバーするよう計算結果の70%-100%の範囲であるとして、センサ熱解析における裏面境界条件推定



誤差とした。各センサ位置における輻射強度はC/C ノーズキャップ面に平行な面に入射するものはC/C 面で評価し、C/C 面に垂直な面へ入射するものはC/C 裏面から35mm (センサ後端に相当) の点で評価した (図4.6)。

エレボン部の裏面輻射環境に関しては、内部構造が複雑でまたエレボン上面、構造部材の温度などがわからないため次の2極限を裏面境界条件推定における誤差幅とした。

(1) センサからの輻射は無限空間に放射され他からの輻射は σT_i^4 に等しい ($T_i = 273.15\text{K}$)。

(2) センサからの輻射はすべて反射される (熱的に断熱)。

また、ノーズキャップの最後端に位置するTA09センサは図2.5に示されるように他のノーズキャップセンサと異なりバルクヘッド断熱材に囲まれた状況となっており、直接C/Cやバルクヘッドからの輻射を受けにくい状況となっているためエレボン部と同様の二種類の裏面境界条件を用いることとした。

この他に空力的な誤差要因として、センサ周辺における表面温度のミスマッチが上げられる。本センサによる計測では、センサ周辺でC/Cがパッドアップされている上にセンサ自体が大きな熱容量を持っており、センサモジュール部表面、パッドアップ部表面、C/C一般部表面はそれぞれ異なる温度履歴を示している (後述する熱モデルによる推定結果例を図4.7に示す。その他のセンサに関しては付録B参照) ため温度ミスマッチの効果によりセンサ周辺で等温壁を仮定している予測と異なる可能性がある。この効果を正確に見積もることは困難だが以下に示されるWestkaemper¹²⁾の推算式を用いた結果、各センサにおける影響量は図4.8の様になり、この推算法による限り効果は小さい。ただしWestkaemperの方法はもともとは非圧縮流を対象としたものであり、今回のような圧縮性流れへの適用可能性は十分検討する必要がある。

$$W_s = L_s + d$$

$$\frac{\overline{St}}{St_{const-T}} = 1 + H'(L_s/W_s) \frac{h_{sensor} - h_{周辺}}{h_{sensor} - h_0} \quad (\text{Eq.4.3})$$

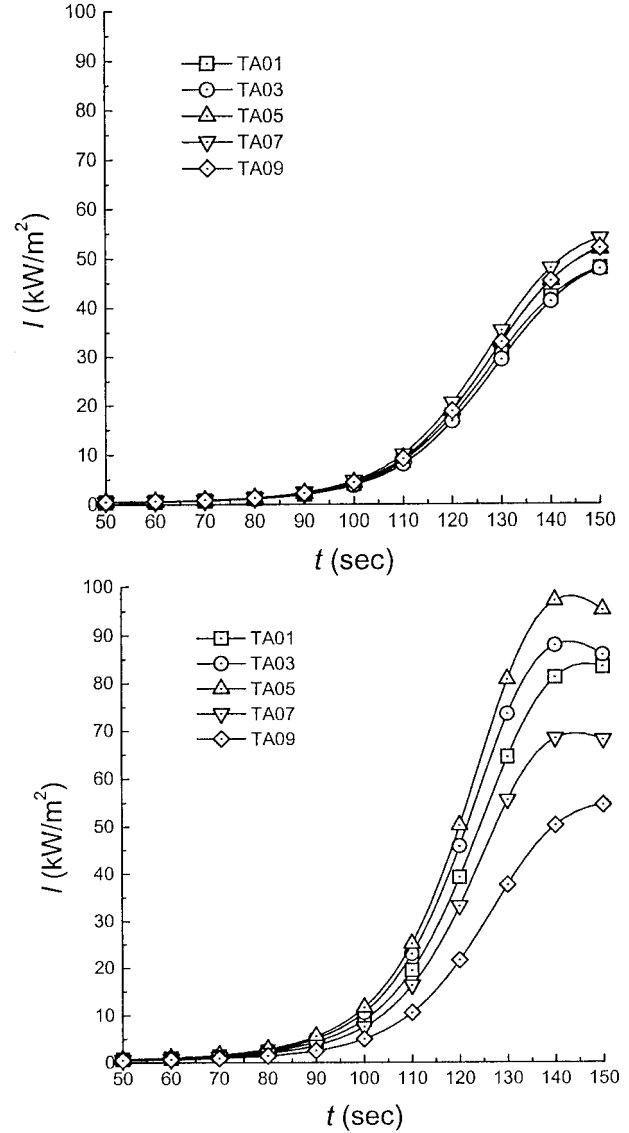


図4.6 ノーズキャップ部センサ位置における輻射強度推定結果 (上: C/C ノーズキャップに平行な面への輻射強度、下: C/C ノーズキャップ面に垂直な面への輻射強度)

ここで

$$H'(L_s/W_s) = \frac{5}{4} \frac{(L_s/W_s)^{4/5}}{(1-L_s/W_s)} \left[\left(\frac{W_s}{L_s} \right)^{9/10} - 1 \right]^{8/9} - 1 \quad (\text{Eq.4.4})$$

ここで L_s は激点からセンサまでの距離、 d はセンサ直径とする。

以上の誤差を表4.2にまとめる。そのうち熱モデル較正試験結果から評価できる誤差は、基本的には熱モデル較正試験時の印加加熱率である $q_{TMT} = 250\text{kW/m}^2$ におけるものと考えられるため、安全側の仮定として $q > q_{TMT}$ の場合は誤差は q に比例し、 $q < q_{TMT}$ では熱モデル較正試験時の誤

表4.2 C/C 空力加熱センサ計測誤差

	$\sigma_{g/q0}$
熱モデル誤差	0.057
熱モデル試験時における加熱率計測精度	0.047
熱モデル調整誤差 (推定と実測との差)	0.030
センサ個体差 ($q > 50 \text{ kW/m}^2$)	0.019
実飛行時裏面境界条件推定精度による誤差 (最大)	0.124*
一様流条件推定精度による誤差 (最大)	0.046
温度ミスマッチによる誤差予測 (最大)	(0.054)

* 二つの極限のケースの差を示し標準偏差とは異なる。

()内の数字は図5.2、図5.5で示される誤差幅には含まれていない。

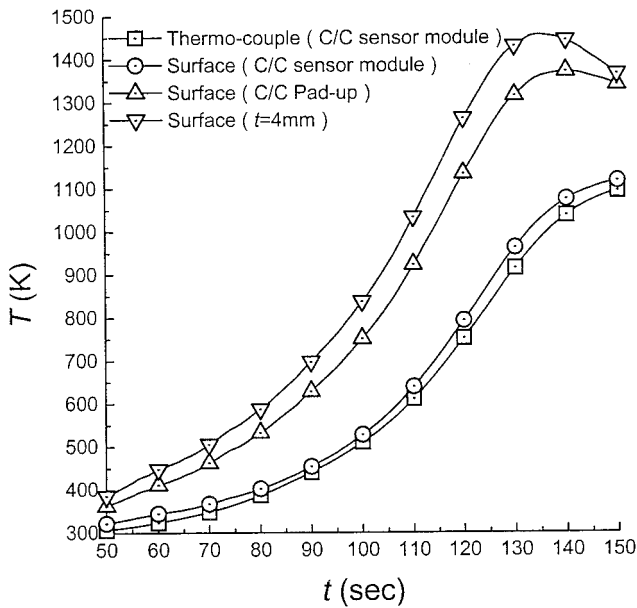


図4.7 フライトにおけるTA03 周り温度分布 (推定)

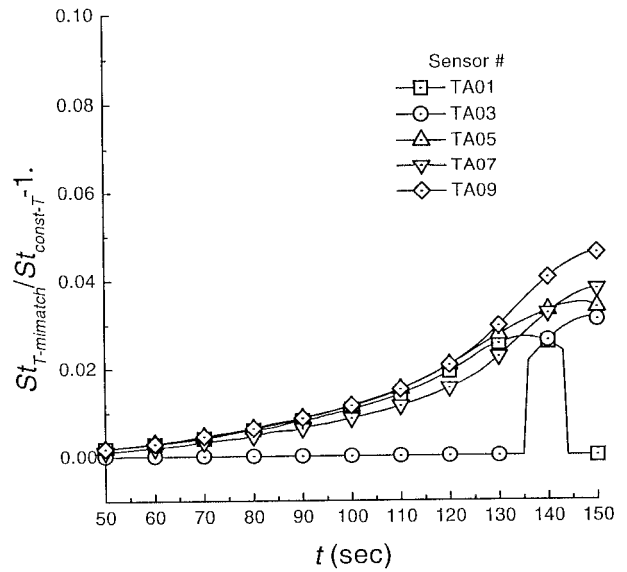


図4.8 C/C ノーズ部における温度ミスマッチの加熱に及ぼす効果 (推定)

差 (加熱率の次元) で一定であるとした。

<セラミックタイル空力加熱センサ>

計測誤差としては C/C センサと同様に熱モデル校正試験の際の印加熱率計測精度、その際の熱モデルを用いた加熱率推定精度をもとに、各センサ、時刻における誤差を求めた。センサタイル側面への空力的な加熱の効果としては極限のケースとして側面が一様に表面温度に等しいと仮定した場合と断熱とした場合とで比較した。胴体下面にある TA35 温度データをもとにした結果は、図4.9に示されるようになり推定誤差にして最大で10%程度であり、 $t < 150 \text{ s}$ の範囲でほとんど 0 に近い。そのため今回の解析ではこの効果を誤差源には含めなかった。側面加熱の加熱率計測に及ぼす影響が小さいのは、セラミックタイルは熱伝導が小さいため表面が輻射平衡温度に近いこと、今回の飛行実験は比較的短期間に行われたため表面中心まで影響が及ばなかったことが考えられる。

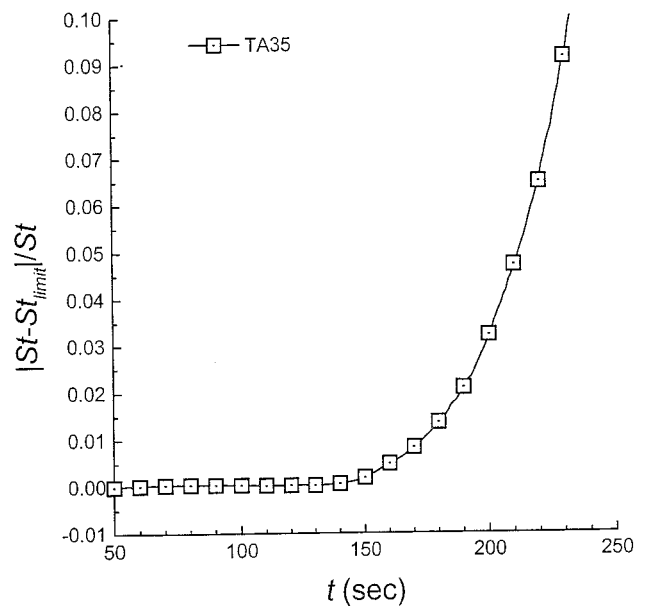


図4.9 セラミックタイル温度センサ二次元性 (側面加熱) の空力加熱推定へ及ぼす効果

第5章 飛行データ及び考察

5.1 比較データ

極超音速風洞試験結果をベースとした予測値

空力加熱飛行データとの比較データ取得の目的で、実機センサ位置に対応する計測点を持つ HYFLEX10% 模型 (HRV03-540形状) を用いた確認風洞熱試験を航空宇宙技術研究所大型極超音速風洞 (NAL HWT) において実施した。

<試験方法>

試験は1998年10月において行い、試験気流条件は図2.1中に示されるように一様流Mach数は9.6~9.7、模型長さを基準としたReynolds数は $6.7 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^6$ である。Reynolds 数が小さいため、一連の試験を通じ模型表面の境界層は層流であった。使用した空力加熱計測用 HYFLEX10% 模型はステンレス SUS303 製で米国 Medtherm 社製同軸熱電対 ($\phi 1.6\text{mm}$, E-type) を27個所に装着したものである。気流条件を安定にさせるため気流成立から20秒後に、高速投入装置を用い模型を気流中に投入し、その後0.5sec~1.5sec の約1秒間の温度履歴から加熱率を計測した。センサ位置、実機対応センサ番号は表5.1の通りである。同軸熱電対は異種金属に圧入し装着す

表5.1 NAL 極超音速風洞熱試験10% HYFLEX 模型センサ概要

#	x(mm)	y(mm)	corresponding HYFLEX sensor #	model thickness (mm)	sensor length (mm)
1	2.00	0.00	TA01	6.0	3.18
2	12.70	0.00	TA03	6.0	3.18
3	13.60	-9.90	TA05	6.0	3.18
4*	40.00	0.00	TA07	8.0	9.53
5*	50.00	0.00	TA09	8.0	9.53
6*	100.00	0.00	-	8.0	9.53
7*	150.00	0.00	-	8.0	9.53
8*	200.00	0.00	-	6.0	9.53
9*	300.00	0.00	-	6.0	9.53
10*	385.00	0.00	-	10.9	9.53
11	125.00	17.10	TA21	6.0	3.18
12*	214.00	18.10	TA30	6.0	9.53
13	281.50	-28.01	TA33	6.0	3.18
14	356.50	-28.01	TA35	6.0	3.18
15*	389.50	-28.01	TA38	7.9	9.53
16	125.00	38.00	TA24	6.0	3.18
17	302.89	-591.4	TA40	6.0	3.18
18	355.00	-64.59	TA42	6.0	3.18
19	434.96	-59.54	TA44	6.0	3.18
20	405.00	-24.10	TA11	6.0	3.18
21	414.50	-24.10	(TA13)	6.0	3.18
22	433.70	-24.10	TA15	6.0	3.18
23	424.00	-24.10	TA17	6.0	3.18
24	125.00	52.30	TA27	11.3	3.18
25	43.00	31.80	TA19	6.0	3.18
26	149.30	-25.60	TA46	?	3.18
27	293.50	-14.84	TA48	6.0	3.18

ると電氣的な誤差を生じるという報告¹⁶⁾があり、表5.1中*印のあるものは模型本体との電氣的絶縁がなされていないものであるが、他はセラミック系セメントによって電氣的な絶縁を行っている。

各センサからの温度データから半無限一次元熱伝導を仮定した以下の式¹⁷⁾によって加熱率を求め(Eq. 5.1)、完全気体を仮定した風洞気流条件とからStanton数の時刻歴に整理した。

$$q_w(t) = \sqrt{\frac{\rho C k}{\pi}} \left\{ \frac{T(t)}{\sqrt{t}} + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{T(t) - T(\tau)}{(t - \tau)^{3/2}} d\tau \right\} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$St = \frac{q_w(t)}{\rho_\infty u_\infty (h_0 - h_w)} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

その後 Stanton 数を時間平均し、更に飛行データ整理の際と同様に完全気体を仮定した澱点加熱率推算値を参照加熱率として規格化を行って整理した。

<試験結果、比較データ>

迎角ごとに胴体下面における結果を図5.1に示す。この試験におけるReynolds数範囲では明確な Re_θ 数効果は見られず、またここで示される胴体下面以外の点においても同様であったためここではReynolds数の異なる試験結果を再現性試験結果と同様の扱いをした。また試験中TA07相当位置のセンサに不具合が発生したため、この点における比較データとしてはHYFLEX詳細風試 (仏国ONERA S4MAにて実施) 結果により補完した。またこの風洞試験では乱流加熱のデータが得られなかったため比較データとして以下の式に示す無限斜め円柱付着線加熱理論値¹⁸⁾を飛行経路に沿ってとめた。その際円柱半径としてはHYFLEX胴体下面対称面における曲率である0.4mとした。しかし胴体下面センサは実際には対称面内ではなく、またHYFLEXの空力加熱率は機体軸方向に分布を持つためこの無限円柱を仮定した理論値はセンサにおける加熱率と直接比較できるものではなく、境界層が層流か、乱流かを判定するための指標としてのみ用いた。

$$\left. \begin{aligned} \text{層流: } St_s &= 0.773 P_r^{-1} \sqrt{\frac{1}{M_\infty R_{\infty, D}}} \left(\frac{\mu_s}{\mu_\infty} \right) \left\{ \frac{T_\infty}{T_s} \frac{P_\infty}{P_s} \left(\frac{P_\infty}{P_s} - 1 \right)^{\frac{1}{5}} \right\} \\ & \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$\text{回復係数: } r = P_r^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$\left. \begin{aligned} \text{乱流: } St_s &= \cos \Lambda \sin^{\frac{3}{5}} \Lambda R_{\infty, D}^{\frac{1}{5}} P_r^{\frac{2}{5}} \left(a \frac{\mu_w}{\mu_0} \frac{T_\infty}{T_w} \frac{P_s}{P_\infty} \right)^{\frac{4}{5}} \\ & \quad \times \left[\frac{49}{376} \frac{\mu_0}{\mu_\infty} \left(\frac{D}{u_\infty} \frac{dy}{dy} \right) \right]^{\frac{1}{5}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

$$\text{ただし } a = 0.0228 \quad (\text{Eq. 5.6})$$

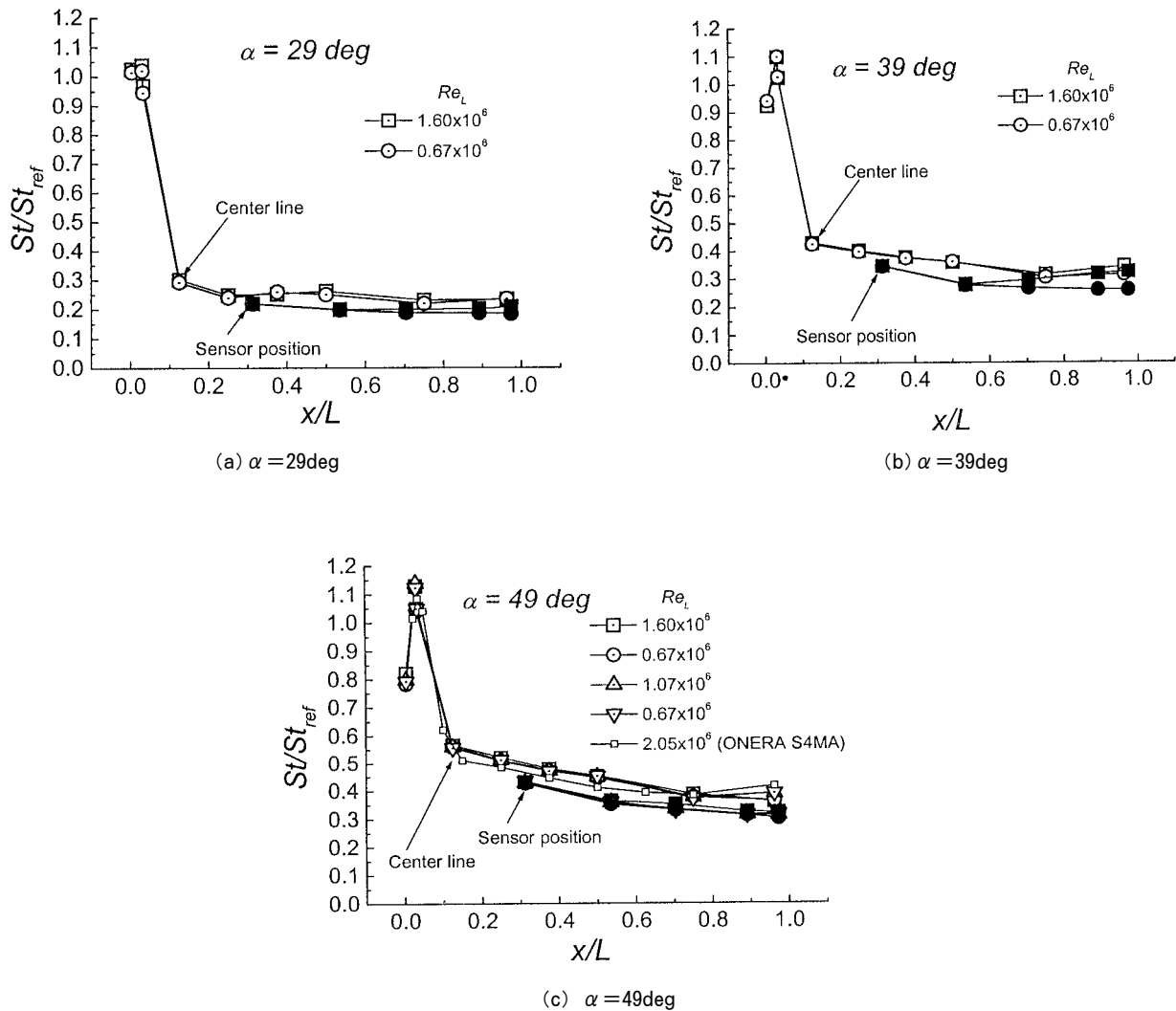


図5.1 NAL 極超音速風洞熱試験結果（胴体下面における結果）

$$\text{回復係数} : r = P_r^{1/3} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

実在気体効果を考慮したCFD 解析

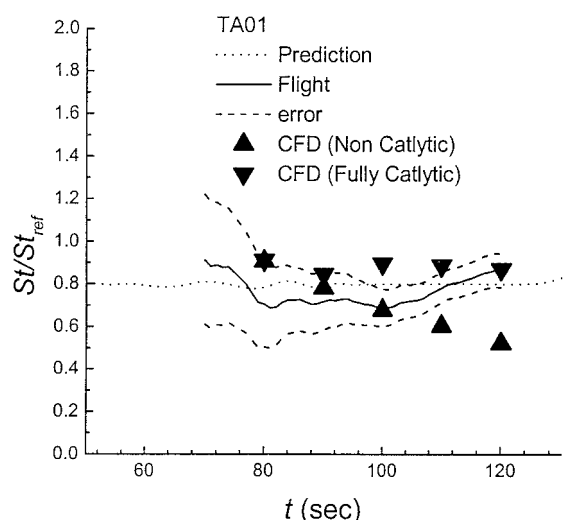
特に澱点における実飛行加熱率との直接比較のため、HYFLEX 飛行経路に沿って、3次元 Navier-Stokes 非平衡流解析コードによってCFD 解析^{19, 20)}を実施した。非平衡流解析における空力加熱率は表面触媒性に大きく依存するため、ここでは両極限と考えられる完全触媒壁仮定及び完全非触媒壁仮定の2ケースをそれぞれの解析条件で行った。また壁温度も空力加熱に大きな影響を与えるパラメータであり、ここではHYFLEX 飛行時の実測表面温度を適用した等温壁を仮定した。その際の壁温度の設定値として、澱点領域の比較を行う際はHYFLEX上澱点近傍のTA03センサにおける実測温度を用い、胴体下面における比較では遷移が起こっていないTA24表面温度実測温度を用いた。使用した解析コードの詳細を表5.2^{21~23)}に示す。

表5.2 非平衡流解析コード詳細^{21~23)}

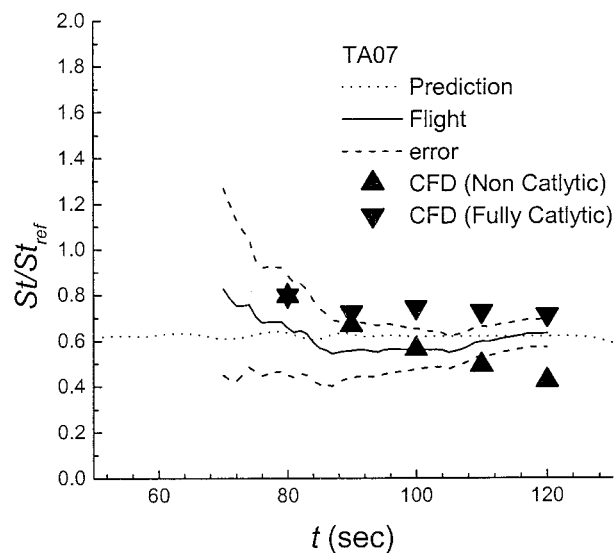
項目	モデル
対流項の定式化	AUSM+スキーム ²¹⁾
気体モデル	7成分18反応モデル
反応物理モデル	Parkの2温度モデル ²²⁾
分子振動緩和時間のモデル化	SSH理論 ²³⁾

5.2 加熱履歴、風試ベース予測、CFD 解析との比較、考察 C/C 空力加熱センサ

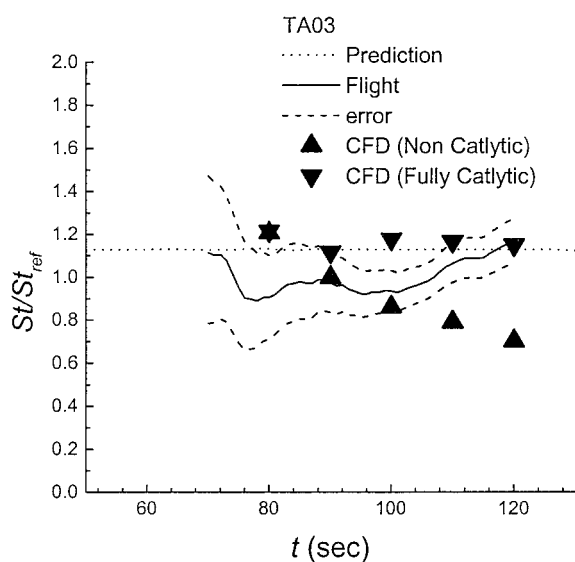
フライト時の各空力加熱センサにおける Stanton 数比履歴を 1σ 相当誤差幅と共に図5.2に示す。同図中点線は完全気体を仮定した風試結果をもとにした予測の Stanton 数比履歴を示している。ここでこの予測履歴は風試結果から各点における Stanton 数の迎角効果のみを考慮し求めたものである。完全触媒壁及び非触媒壁を仮定したCFD 結果は対称面に近いセンサに関して得られており (TA01, TA03, TA07, TA09)それぞれ▼印、▲印で示している。 $t < 70\text{s}$ では加熱率絶対値が小さく相対的に誤差が大きくなるため図中に載せなかったが、 $t = 80\text{s}$ 付近においても誤差がかなり大きくフライトデータと予測との違いについて



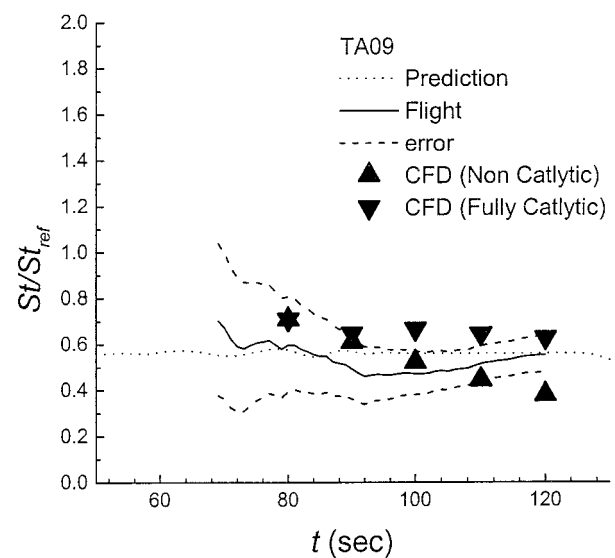
(a) TA01



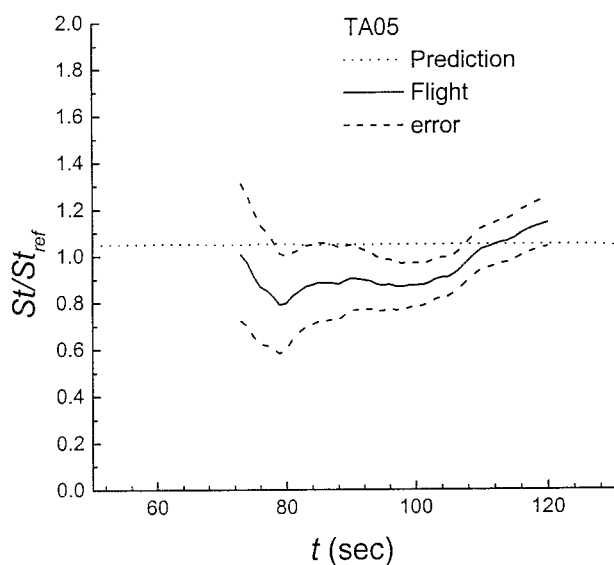
(d) TA07



(b) TA03



(e) TA09



(c) TA05

図5.2 ノーズキャップ部におけるフライト空力加熱 (Stanton 数比)

て評価することができない。誤差の小さくなる $t=100\text{sec}$ 付近では、いずれのセンサにおいても以下のような同様の傾向が見られる。例えば、 $\alpha=49\text{deg}$ の際の激み点に最も近い TA03 センサ位置でみると、風洞試験結果ベースの予測と比べフライト加熱率が誤差幅を考慮してもなお低い値となり、そののち時間とともに増加し予測に近づいている。

まず $t=100\text{sec}$ 付近における予測との不一致の原因の一つとして、ノーズ部において大気中の酸素の解離が予想されるため (図2.3)、その影響が考えられる。実際、完全触媒壁、完全非触媒壁を仮定した CFD 結果 (それぞれ図中で▼印、▲印) との比較では、フライトデータは二種類の CFD 結果の中間値となっていることがわかる。詳しく見れば、 $t=100\text{sec}$ ではほぼ非触媒壁仮定の結果に近く、時間とともに完全触媒壁過程の結果に近づいている。 $t=100\text{s}$ 以降のフライトデータの増加傾向は壁温の上昇による効果として定性的に説明できる。つまり SiO_2 ベースのコーティング層の O および N の再結合反応に対する触媒性効率 (γ : Catalytic efficiency) は壁温と共に増大することが知られており²⁴⁾、TA03 センサモジュール表面温度の逆数を横軸として図5.2(2)を再プロットした図5.3では $T=500\text{ K}$ から $T=800\text{ K}$ の間にフライトデータは非触媒壁の CFD 結果から完全触媒壁の結果へ近づいている。これは、図5.4に示されるように触媒性効率 (Catalytic efficiency) が急激に変化する時期とほぼ一致している。これから、今後触媒性効率の温度依存性のモデルを用いた CFD 解析との比較が更に必要であると考えられる。定性的にはここで見られた変化について触媒性効率の表面温度依存性により説明が可能であることがわかった。

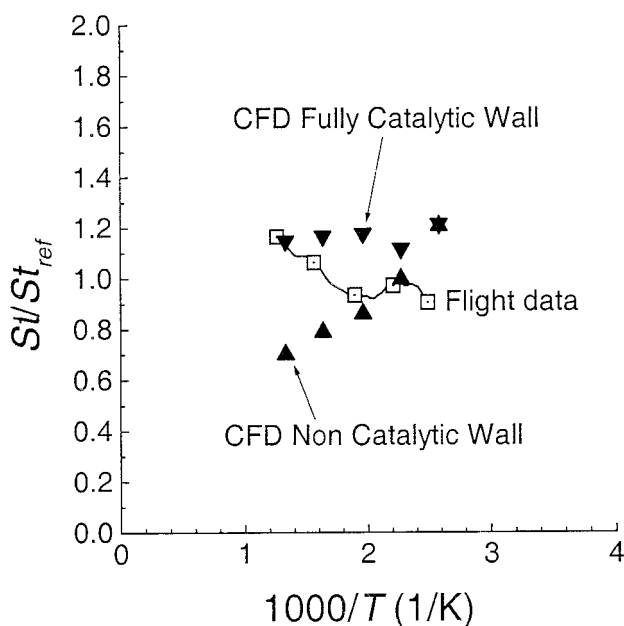


図5.3 フライト Stanton 数比と表面温度との関係 (TA03)

エレボン舵面上における計測結果では図5.5に示される様に $t=120\text{sec}$ における急激な上昇が観測された。これは後述のようにセラミックタイル空力加熱センサにおいて境界層遷移²⁵⁾が直後の $t=126\text{sec}$ で確認されたことから、境界層遷移がエレボンにおいて $t=120\text{sec}$ に生じたものと考えられる。また境界層遷移以前においてフライトデータは予測から徐々に増加する傾向が見られた。更にこの予測との違いは TA11、TA17、TA15 と下流に行くにつれて小さくなっている。この時期のセンサ周辺温度では裏面輻射が加熱率導出に及ぼす影響はきわめて小さく、また剥離域、境界層遷移などでは説明ができない。原因の一つとして上

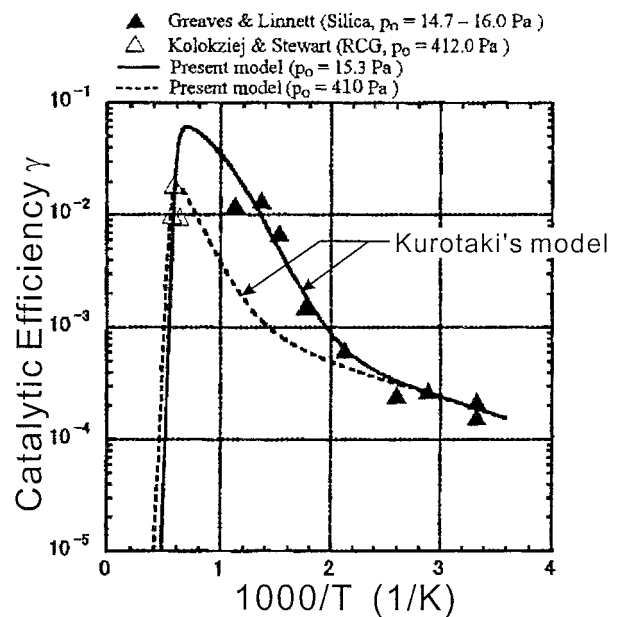


図5.4 $\text{O}-\text{O}_2$ 再結合反応に対する SiO_2 ベースコーティングの触媒性の温度依存性²⁴

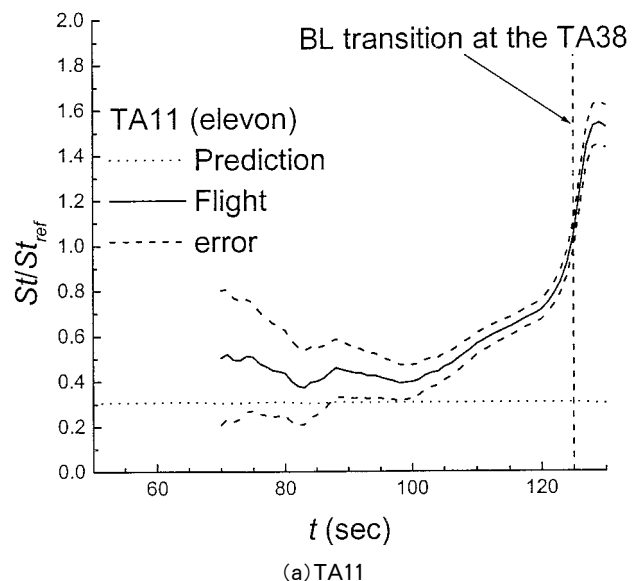


図5.5 エレボン部フライト空力加熱 (Stanton 数比)

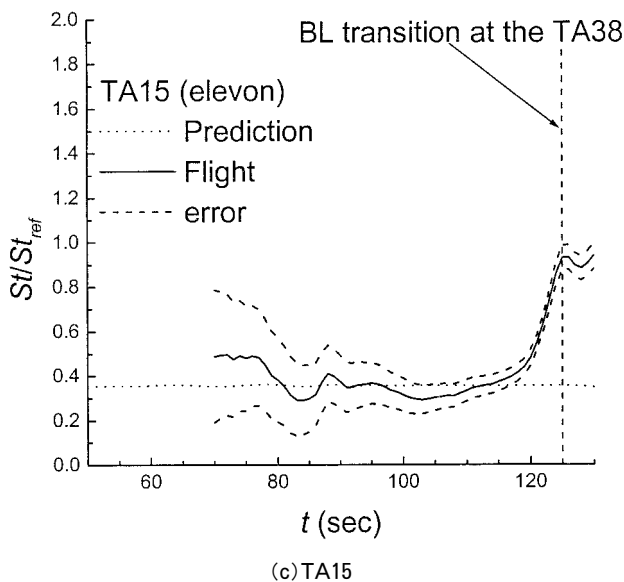
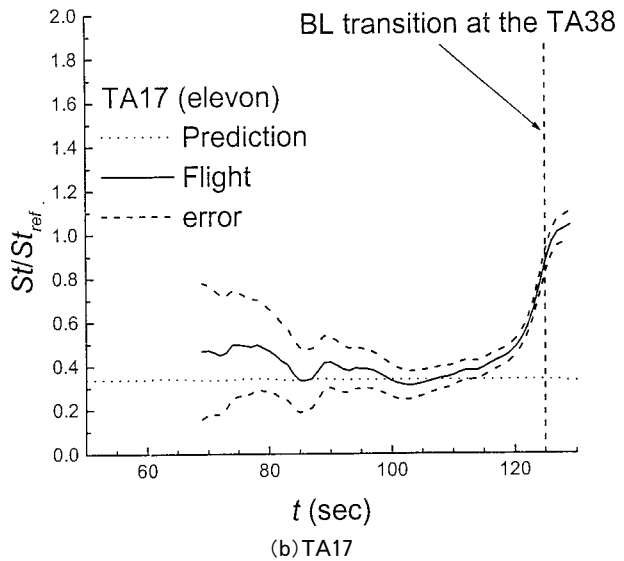


図5.5 (つづき)

流にあるセラミックタイル表面温度と熱容量の大きなC/Cエレボンおよびセンサモジュール表面との温度ミスマッチの影響が考えられるがWestkaemper¹²⁾の報告における推算法によると影響は最大でも10%程度(図5.6)であり、定量的な説明はできない。しかしこの推算法は定量的に十分検証されたものではないと考えられるため、温度ミスマッチによる影響の可能性も含め本データの解釈に際しては今後更に検討が必要と考えられる。

セラミックタイル空力加熱センサ

調整された熱モデルを用いて飛行データから求めたStanton数比を図5.7に示す。また風洞試験(層流境界層状態)ベースの予測(迎角効果のみ考慮)を点線で併せて示す。破線は熱モデル校正試験の際に得られた加熱率導出精度(1 σ 相当)をあらわす。胴体下面に位置するTA21、TA30、TA33、TA35、TA38の5個所においては分離後

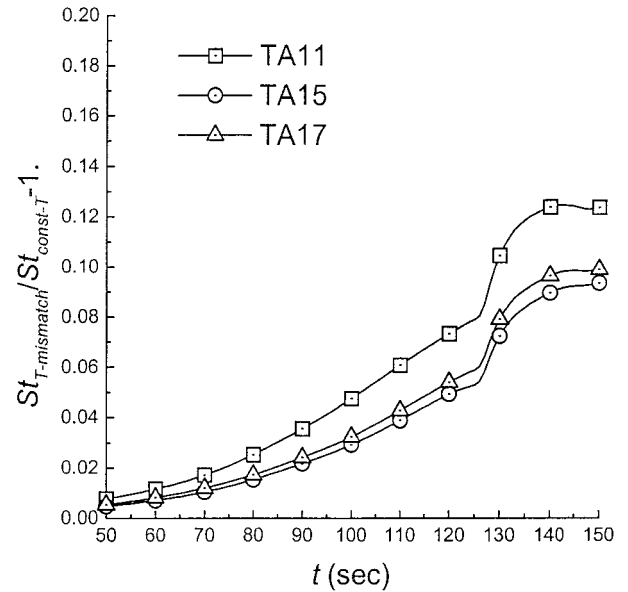
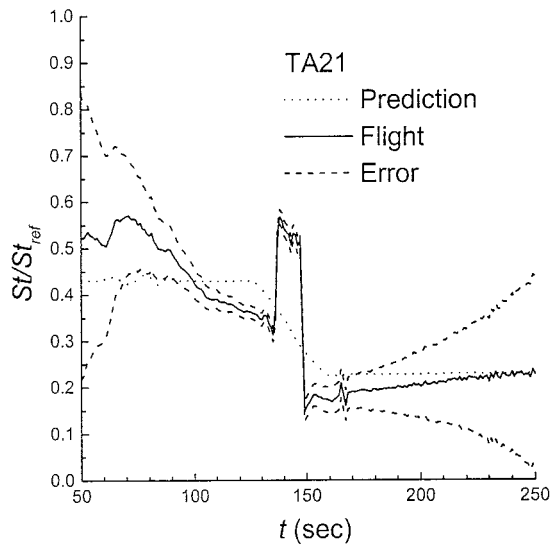
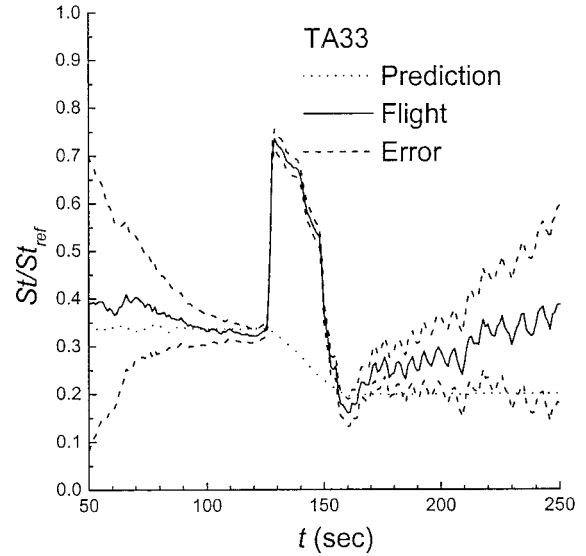


図5.6 セラミックタイル部表面温度(TA38)履歴を用いたエレボン部温度ミスマッチによる空力加熱へ及ぼす効果の推定

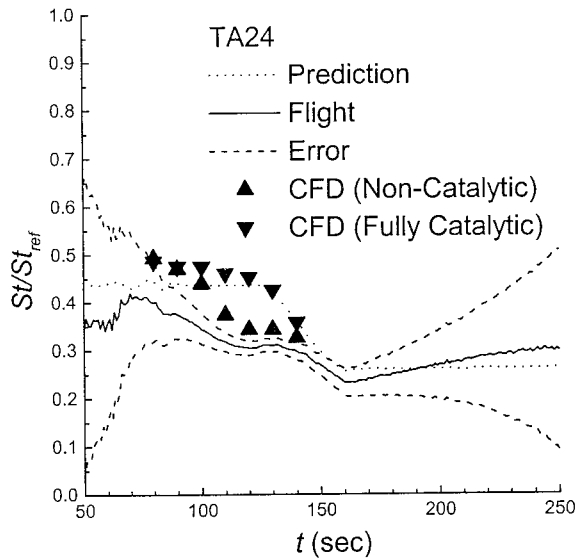
$t=125\text{sec}$ 前後において胴体後方より次々に加熱率が急激に増加するという結果が得られた。HYFLEX 確認風試では十分高い Re 数での試験ができず乱流データが得られていないため、無限斜め円柱付着線上加熱率の層流、乱流加熱率理論値¹⁸⁾を飛行経路に沿って求め飛行データと比較した(図5.8)。これに示されるように高い加熱レベルは乱流理論値に近く、一方低い加熱レベルは層流理論値に近い。ため、約 $t=125\text{sec}$ で生じた加熱率の増加は境界層の遷移によるものと考えられる。更に機体前方に位置するTA21、TA30、TA33に関してはHYFLEXの迎角変更が完了するまでに再び層流に戻る現象が観察された。TA38において遷移が確認されたのは一様流 Reynolds 数で 1.58×10^6 であり、それ以後の一様流 Reynolds 数の変化は小さい(図2.1)。このような境界層遷移を説明するためにここでは斜め円柱付着線遷移の評価基準と比較することとした。これは、HYFLEXが主翼のない円柱に近い形状をしておりまた胴体下面対称面近傍は一定曲率の円柱形上をしている(図5.9)ことその他以下の理由によっている。再突入時の境界層遷移の予測法に関して米国 Space Shuttleの設計では、境界層の運動量厚を基準長とした Reynolds 数 Re_θ を元に、パラメータ Re_θ/M_e によって予測しており、また表面粗さに関する基準として、粗さ有効高さを基準長としその点における気流条件で作られる Reynolds 数 Re_{hk} によって定めていた²⁶⁾。しかしながら遷移する Re_θ/M_e の絶対値は機体形状、壁温、飛行経路などの多くのパラメータに依存しており、それぞれの設計過程で定めなければならない。そのため、ここではこのような絶対値での不明確性を避ける



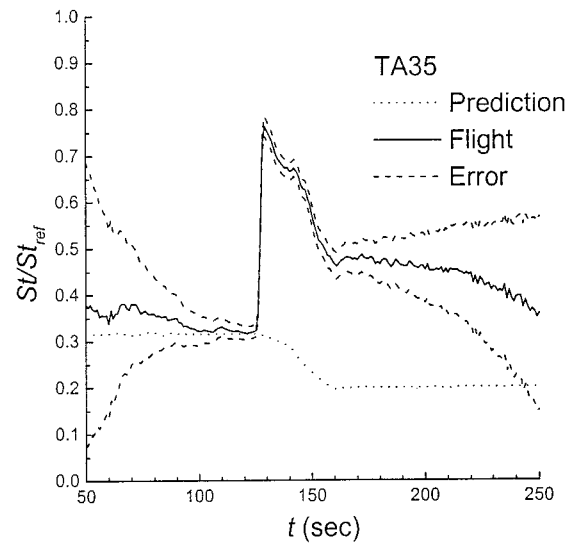
(a)TA21 (胴体下面)



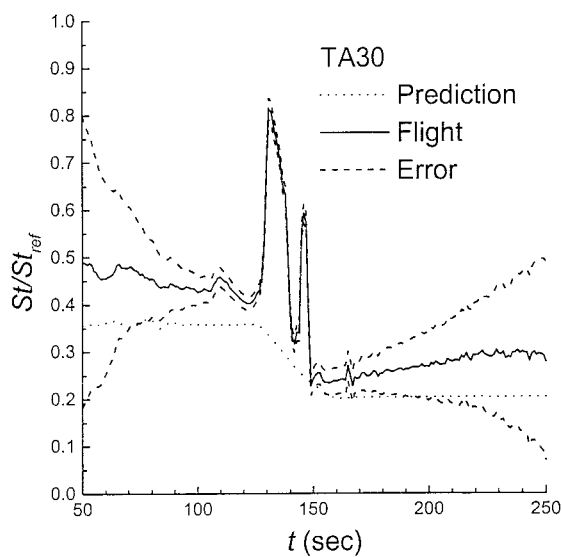
(d)TA33 (胴体下面)



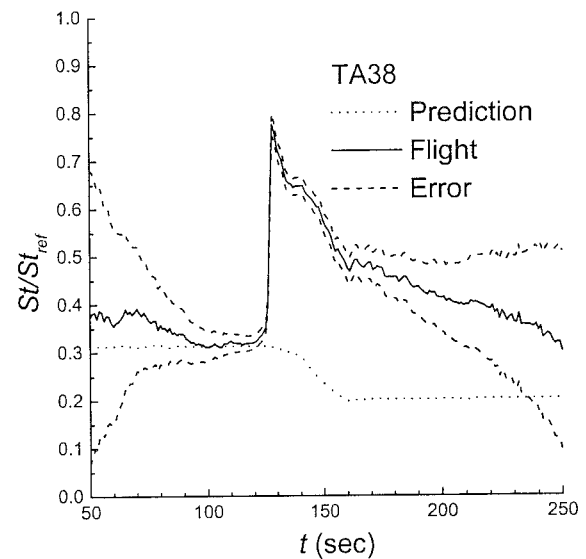
(b)TA24 (胴体下面)



(e)TA35 (胴体下面)

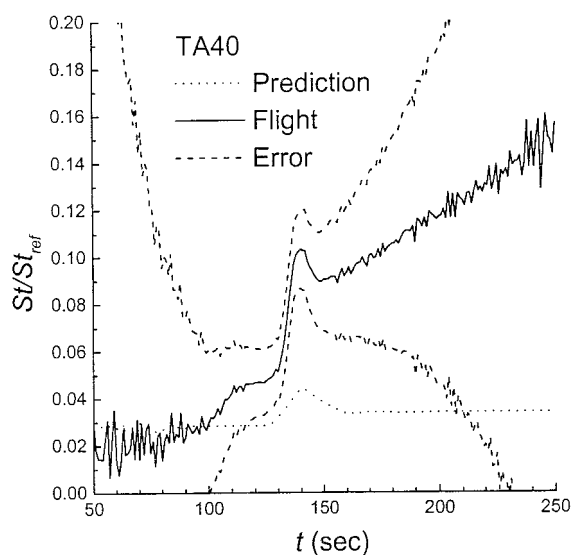


(c)TA30 (胴体下面)

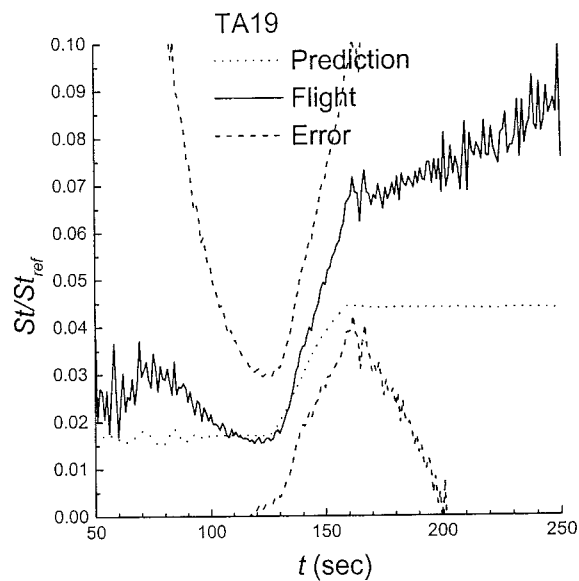


(f)TA38 (胴体下面)

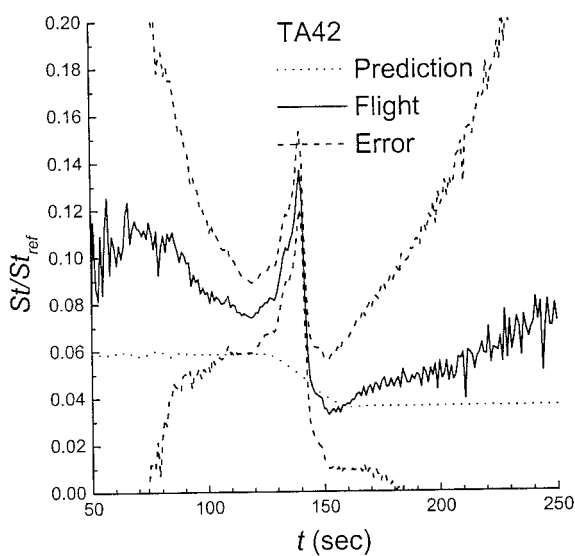
図5.7 セラミックタイル温度センサによる空力加熱計測結果



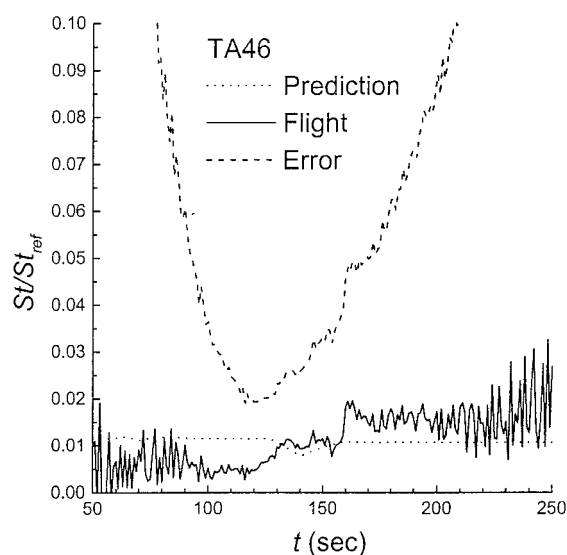
(g)TA40 (安定板前縁)



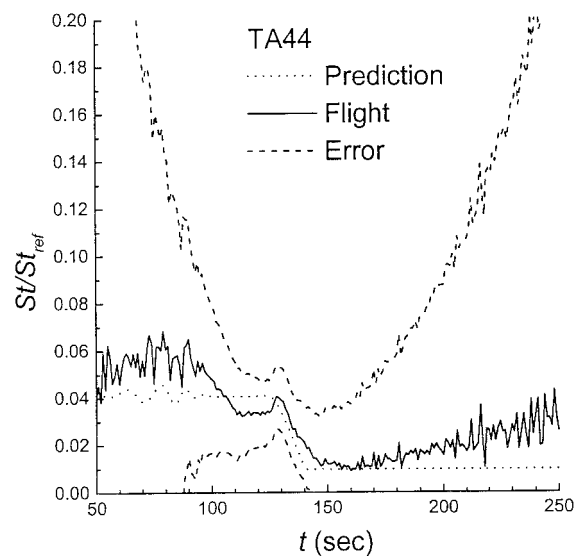
(j)TA19 (胴体上面)



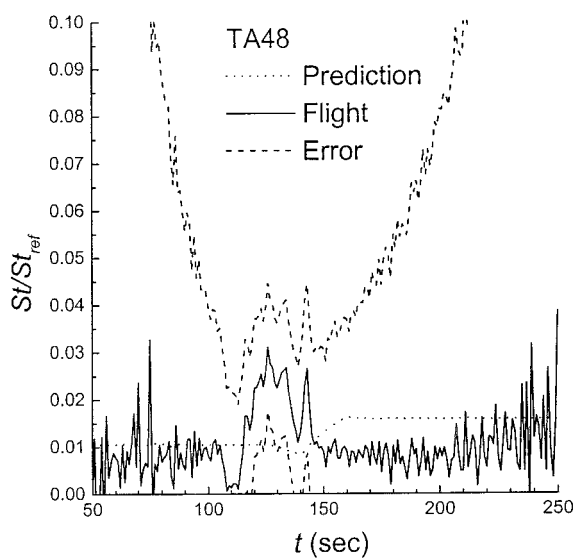
(h)TA42 (安定板翼面)



(k)TA46 (胴体上面)

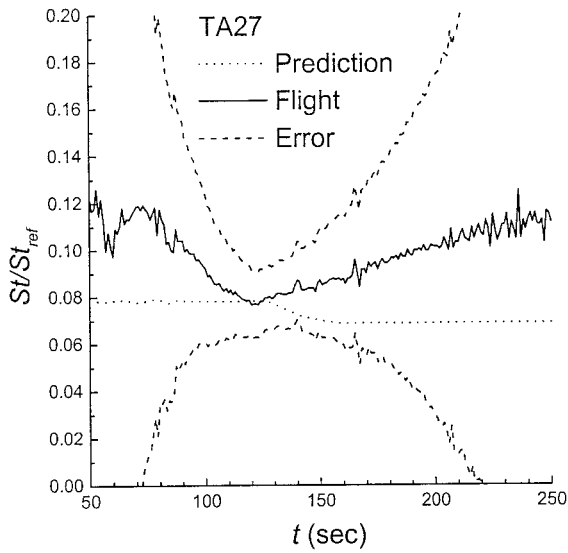


(i)TA44 (安定板後縁)



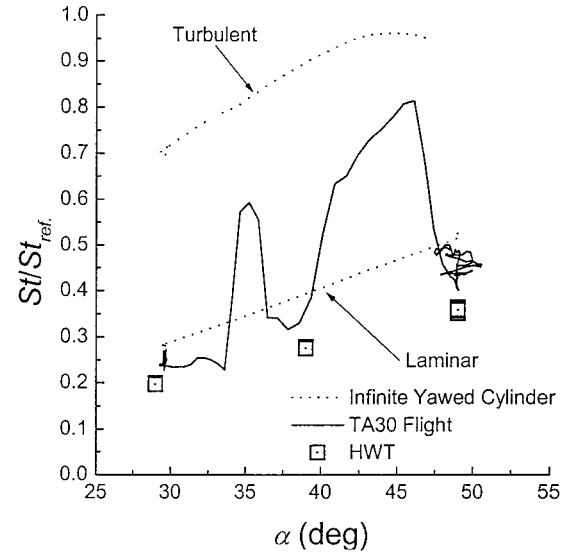
(l)TA48 (胴体上面)

図5.7 つづき

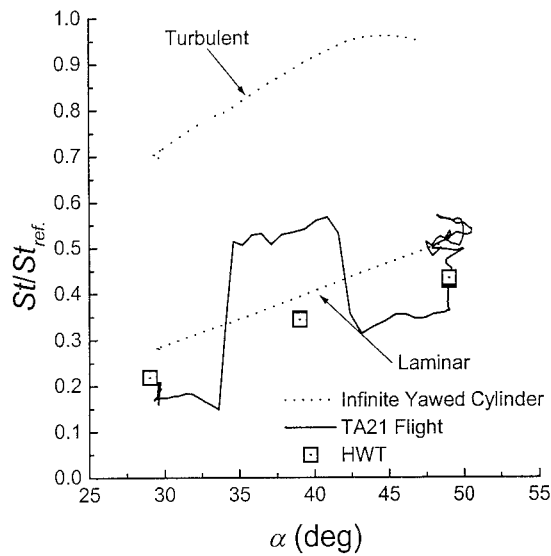


(m)TA27 (胴体側面)

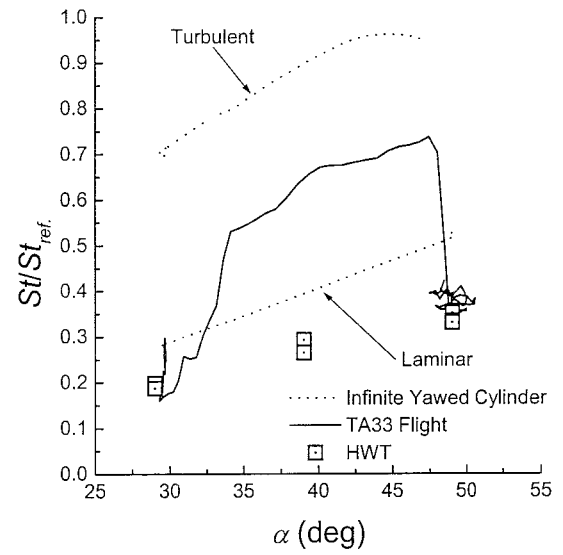
図5.7 つづき



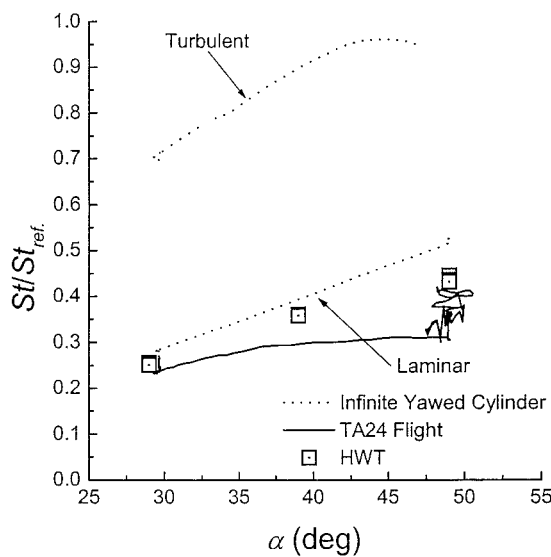
(c)TA30



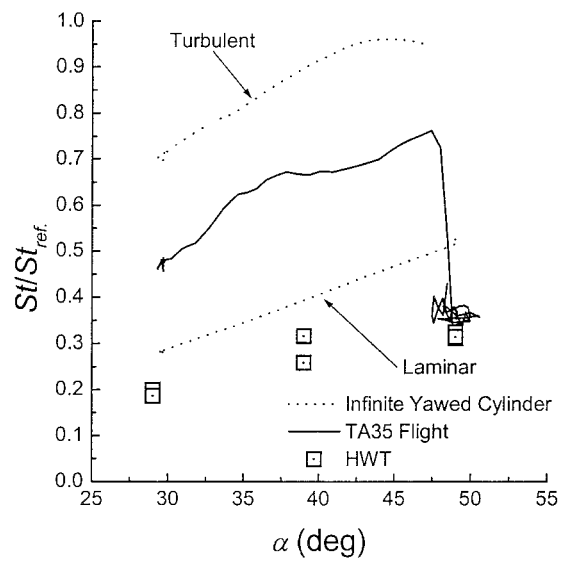
(a)TA21



(d)TA33



(b)TA24



(e)TA35

図5.8 胴体下面におけるフライト空力加熱と層流、乱流加熱率（斜円柱付着線）との比較

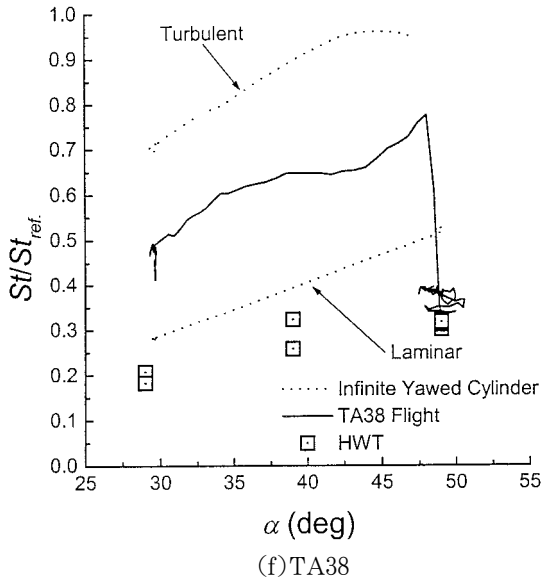


図5.8 つづき

ために多くの地上データ等によって検証されている斜め円柱付着線における遷移判定基準²⁷⁾を適用することとした。この判定基準は境界層端 Mach 数 M_e の効果として " $R_{e\theta}/M_e = \text{一定}$ " の基準と同様な傾向があるなど、定性的な範囲においては、ここで得られる結果に関して " $R_{e\theta}/M_e = \text{一定}$ " による評価と同一であると考えられる。もちろん空力加熱センサは対称面内にないため、遷移の原因として3次元的不安定性の可能性も考えられたが、まずこの2次元不安定性での説明の可能性について考察した。斜め円柱付着線における遷移評価基準としてはPollが境界層端の局所気流条件で定義されるReynolds数を用いた基準を提案しており²⁷⁾、それを圧縮性の効果を考慮して修正したものとして下記のような局所 Reynolds 数が広く知られている。

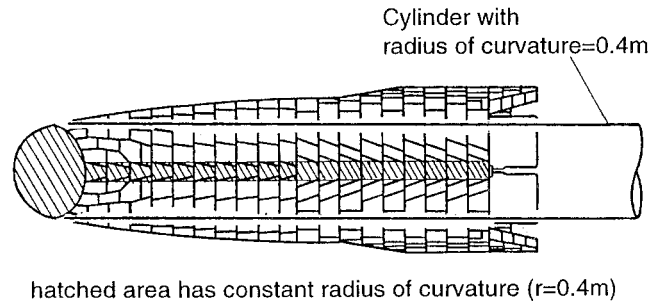
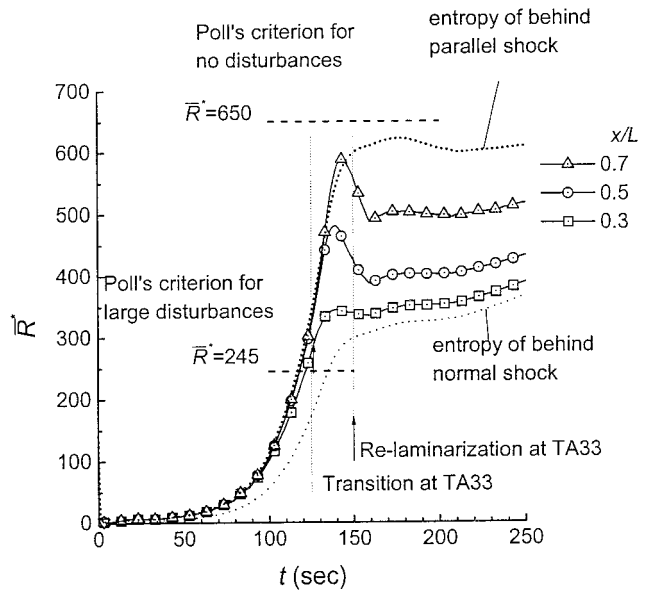
$$\overline{R^*} = \frac{u_e \eta^*}{\nu^*} \quad (\text{Eq.5.8})$$

ここで、

$$\eta^* = \sqrt{\nu^*/k} \quad (\text{Eq.5.9})$$

$$k = \frac{dy}{dy} \quad (\text{Eq.5.10})$$

付着線上に大きな擾乱源がある場合は $\overline{R^*} = 245$ 付近、擾乱のない場合は $\overline{R^*} = 650$ 付近、また表面に critical height を超えたラフネスがある場合はそれらの中間の Reynolds 数が遷移 Reynolds 数となると考えられている。この Reynolds 数を HYFLEX 飛行経路に沿って半径0.4m 無限斜め円柱付着線上として計算したものが図5.10に太点線(上側、"entropy of behind parallel shock")で示されている。これからTA38において遷移が確認された時点では $\overline{R^*} = 343$ であり、HYFLEX セラミックタイルのギャッ

図5.9 HYFLEX胴体下面における曲率一定 ($r=0.4\text{m}$) の範囲図5.10 HYFLEX飛行経路に沿った斜円柱付着線 $\overline{R^*}$ の変化

プ/ステップ有効高さが critical height を超えるならば遷移時期として妥当であると考えられる。しかし無限斜め円柱の仮定ではこの Reynolds 数はおおきく減少することはなくTA21、TA30、TA33などで層流化したことの説明ができない。この原因として迎角の変化による影響が考えられたため、以下のようにして迎角変更に伴うエントロピー層の呑み込みの効果を評価した。まず表面圧力分布として Newtonian 圧力分布を仮定し境界層外縁における流線を求め²⁸⁾、境界層をその流線の広がりに対応する回転体上の境界層と近似して境界層厚を空間的に逐次解く方法 (axi-symmetric analogue) を用いた^{29,30)}。衝撃波形状を極超音速風洞試験 ($M_\infty (=10)$) のシュリーレン写真より仮定し、回転体上の境界層内を流れる流量と一様流量との関係 (mass balance) から通過した衝撃波角度を求め Newtonian 表面圧力を仮定した境界層外縁の諸量をもとに求めたを同図中実線にて示す ($x/L=0.3, 0.5, 0.7$)。迎角が49degの時期はエントロピー層の呑込が激しいため $x/L=0.3$ における境界層外縁の流線でも、機体軸にほぼ

平行な斜め衝撃波を通過することになり、無限斜め円柱の値と一致するが、30deg へ迎角が変化すると吞込が押さえられるため広い範囲の境界層外縁における流線は垂直に近い角度の衝撃波を通過することとなり、結果的に一樣流 Reynolds 数が増加するにもかかわらず減少することがわかった。もともと無限円柱において報告されたによる評価基準をこのような三次元的な流れに適用可能かは別途調べる必要があるが、層流化時期を考えた場合迎角変更に伴う減少が前部胴体下面で見られた再層流化の原因となっていたと考えられる。

critical roughness height には絶対的な基準はないが、地上試験による結果では上記特性長さ η との比 ($\Delta s / \eta^*$) で 0.2~1.4 との報告がある³¹⁾。また HYFLEX では全域におけるタイルギャップ/ステップの実測は行われていないが、製作上の許容値を定めており、ギャップは 1.0mm (前胴)、1.5mm (後胴) 以下、ステップ高さは 1.5mm 以下である。ここでは仮に 1.0mm の粗さが存在したとしてこれが critical height となり得るかを調べた。図 5.11 は HYFLEX の飛行経路に沿って計算した η^* の履歴を示す。図中の一点鎖線はギャップ/ステップの有効高さが 1.0mm であった場合の critical height となりうる領域を示している。この図から HYFLEX の場合、有効表面粗さ 1.0mm が critical height となるためには $\eta^* = 0.2 \sim 0.7$ 程度となることがわかる。これは妥当な範囲であり、HYFLEX で見られた境界層遷移は、タイルギャップ/ステップが critical height を越えたため生じたものと考えられる。

加熱率の絶対値で層流状態ではおおむね風試ベースの予測とほぼ一致した結果となったが、胴体の比較的前方に位置する TA21、TA24 では $t = 100\text{s}$ 程より風試ベース予測と比べやや低い値を示した。原因は今のところ不明であるが、TA01、TA03、TA05 のノーズ部において同様の現象が見られた (図 5.2(a)-(c)) 時期とほぼ一致していること、非触媒壁を仮定した CFD 結果と傾向が似ていることなどから、ここにおいても空気の解離に伴う実在気体効果が現れた可能性がある。

安定板上 (TA40: 前縁、TA42: 平板部、TA44: 後縁) の加熱率については、加熱率の絶対値が小さく相対的に誤差が大きい。後縁では予測とよく一致した結果が得られたのに対し、それぞれ安定翼前縁および翼面上に位置する TA40 および TA42 では $t = 130\text{s}$ 付近から層流レベルを意味する予測より大きな加熱率が見られ、TA42 ではその後の $t = 150\text{s}$ 付近において再び予測値に近い値に戻ることが確認された。TA42 における挙動は胴体下面において観測された境界層遷移、層流化の時期とほぼ一致しているため安定板上においても境界層遷移及び再層流化が起こっていたものと考えられる。

背面側加熱率計測 (TA19、TA46 および TA48) は加熱

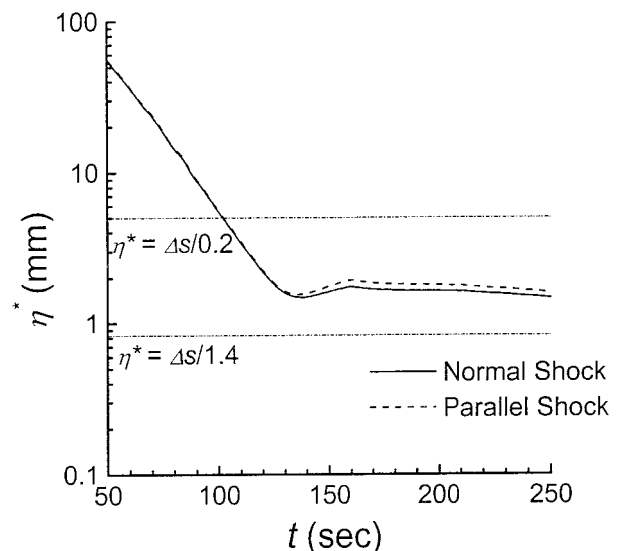


図 5.11 HYFLEX 飛行経路に沿った特性長さ (η^*) の変化

率絶対値が誤差幅と比べ極めて小さく、計測精度の範囲で予測と一致することを確認するにとどまった。

第 6 章 結 論

極超音速飛行実験機における澱点近傍、エレボン部の空力加熱を計測するために C/C センサを、また胴体などその他部位における計測のためにセラミックタイルセンサを新規に開発した。それぞれランプ加熱による熱モデル較正試験データに基づきセンサ周りの精密な熱モデルを定めることで実飛行実験で要求される精度をほぼ満足でき適用可能であることを確かめた。

熱モデル較正試験により検証された熱モデルを用いて HYFLEX 飛行中の空力加熱計測をおこない、極超音速風洞試験結果に基づく予測と比較した。澱点近傍 C/C センサの飛行試験データは $t = 100\text{s}$ 付近において、風洞試験結果に基づく予測と比べ低い加熱が得られた。非平衡流解析コードによる CFD 結果との比較により、観察された現象は空気の解離 / 再結合に伴う実在気体効果と考えられ、表面触媒性の温度依存性を考慮することで定性的に説明できた。エレボン部 C/C センサでは胴体下面セラミックタイル部において観察された時期とほぼ対応して境界層遷移が見られた。

胴体下面のセラミックタイル部においては境界層遷移および再層流化がみられた。無限斜め円柱付着線上遷移判定基準をもとに気流条件を評価した結果、セラミックタイルギャップ/ステップによる表面粗さ、迎角変化などを考慮すれば妥当な範囲で遷移及び再層流化が起こっていることがわかった。またその他のセラミックタイル部における空力加熱データから層流時における加熱率はおよそ予測値と一致した結果が得られたが、胴体下面前方付近では C/C

ノーズ部で見られた実在気体効果と考えられる現象と類似した低加熱の領域が観察された。

引用文献

- 1) Curry, D. M., Rochelle, W. C., Chao, D. C., and Ting, P. C., "Space Shuttle Orbiter Nose Cap Thermal Analysis," AIAA Paper 86-0388, Jan. 1986
- 2) Throchmorton, D. A., "Benchmark Determination of Space Shuttle Orbiter Entry Aerodynamic Heat-Transfer Data," *J. Spacecraft & Rockets* Vol. 20, No.3, May 1983, pp219-224
- 3) Hodge, J. K., and Audley, D. R., "Aerothermodynamic Parameter Estimation from Space Shuttle Thermocouple Data During Transient Flight Test Maneuvers," AIAA Paper 83-0482, Jan. 1983
- 4) Shirouzu, M., and Watanabe, S., "On the Hypersonic Flight Experiment(HYFLEX) for the Development of HOPE," AIAA Paper 93-5080, Nov. 1993
- 5) NAL/NASDA HOPE 研究共同チームHYFLEXサブグループ「極超音速飛行実験(HYFLEX)基本設計初期構想—予備設計結果—」NAL-TM-675, 1995年1月
- 6) Shirouzu, M., Watanabe, S., and Suzuki, H., "A Quick Report of the Hypersonic Flight Experiment, HYFLEX," 20th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Paper 96-f-09, May 1996
- 7) Inoue, Y., Fujii, K., Takizawa, M., Takaki, R., Watanabe, S., and Ito, T., "Flight Results of HYFLEX Onboard Measurements," AIAA 17th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA-96-4528-CP, Nov. 1996
- 8) Watanabe, S., Ishimoto, S., and Yamamoto, Y., "Aerodynamic Characteristics Evaluation of Hypersonic Flight Experiment Vehicle Based on Flight Data," *J. Spacecraft & Rockets* Vol.34, No.4, July 1997 pp.464-470
- 9) HYFLEX 空力特性研究チーム「極超音速飛行実験機(HYFLEX)の空力特性」NAL-TR-1334, 1997年12月
- 10) Neumann, R. D., Erbland, P. J., and Kretz, L. O., "Instrumentation of Hypersonic Structures," AIAA Paper 88-2612 Jun. 1988
- 11) Suzuki, H., Ishimoto, S., and Morito, T., "Postflight Evaluation of the HYFLEX Guidance, Navigation and Control," AIAA Paper 96-4525 Nov. 1996
- 12) Westkaemper, J. C., "On the Error in Plug-Type Calorimeters Caused by Surface-Temperature Mismatch," *J. Aerospace Sciences* Nov. 1961, pp907-908
- 13) Van driest, E. R., "The Problem of Aerodynamic Heating," *Aeronautical engineering Review*, October 1956, pp.26-41
- 14) Lees, L., "Laminar Heat Transfer Over Blunt-Nosed Bodies at Hypersonic Flight Speeds," *Jet Propulsion*, 1956 April, pp259-269, 274
- 15) 白水正男、末松俊二、山本一二三「NOAA極軌道衛星データに基づく上層大気状態の推定について」NAL-TM-700, 1996年7月
- 16) Kidd, C. T., Nelson, C. G., and Scott, W. T., "Extraneous Thermoelectric EMF Effects Resulting from the Press-Fit Installation of Coaxial Thermocouples in Metal Models," ISA, 1994 Paper 94-1022
- 17) Cook, W. J., and Felderman, E. J., "Reduction of Data from Thin-Film Heat-Transfer Gages: A Concise Numerical Technique," *AIAA J.* Vol. 4, No. 3, Mar. 1966, pp.561-562
- 18) Bechwith, I. E., and Gallagher, J. J., "Local Heat Transfer and Recovery Temperatures on a Yawed Cylinder at a Mach Number of 4.15 and High Reynolds Numbers," NASA TR R-104, 1961
- 19) Kurotaki, T., "Numerical Analysis of Thermochemical Non Equilibrium Hypersonic Flow," NAL-SP-29, 1996. pp.114-121
- 20) Kurotaki, T. and Yamamoto, Y., "Axisymmetric and Tree Dimensional Non-equilibrium Hypersonic Flow Analysis around Re-entry Vehicles," 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 98-d-18, 1998
- 21) Liou, M. S., "A Sequel to AUSM: AUSM+," *J. of Computational Physics*, Vol. 129, 1996. pp.364-382
- 22) Park, C., "Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics," John Wiley & Sons, Inc., 1990
- 23) Schwartz, R. N., Slawsky, Z. I. and Herzfeld, R. N., "Calculation of Vibrational Relaxation Times in Gases," *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, 1954. pp.1591-1599
- 24) 黒滝 卓司、「SiO₂ 壁面における触媒性モデルの構築—O₂-O, N₂-N 2成分気体の場合—」第31回流体力学講演会講演集、1999 Sep. , pp.5-8
- 25) Fujii, K., and Inoue, Y., "Aerodynamic Heating Measurement on Afterbody of Hypersonic Flight Experiment," *J. Spacecraft & Rockets*, Vol.35, No.6, Nov. 1998. pp.736-741
- 26) Goodrich, W. D., Derry, S. M. and Bertin, J. J., "Shuttle Orbiter Boundary Layer Transition at Flight and Wind Tunnel Conditions," Shuttle

- Performance : Lessons Learned, Part 2 NASA-CP-2283, March 1983, pp.753-779
- 27) Poll, D.I.A., "Transition Description and Prediction in Tree-Dimensional Flows," AGARD-Rept.709, June 1984, pp.5-1 -5-23
- 28) Rakich, J.V. and Mateer, G.G., "Calculation of Metric Coefficients for Streamline Coordinates," *AIAA Journal* Vol. 10, No 11, Nov. 1972, pp. 1539-1540
- 29) Zoby, E.V., Moss, J.N. and Sutton, K., "Approximate Convective-Heating Equations for Hypersonic Flows," *J. Spacecraft & Rockets* Vol.18, No.1 Jan.1981 pp.64-70
- 30) DeJarnette, F.R. and Davis, R.M., "A Simplified Method for Calculating Laminar Heat Transfer over Bodies at an Angle of Attack," NASA TN D-4720, August 1968
- 31) Murakami, A., Stanewsky, E. and Krogmann, P., "Boundary-Layer Transition on Swept Cylinders at Hypersonic Speeds," *AIAA J.* Vol.34, No.4, April 1996

付 録

付録A. C/C 空力加熱センサ第2回熱モデル較正試験における試験結果の妥当性について

モジュール表面温度から、接触熱抵抗、熱物性値などを実測値とした初期熱モデルを用いて得られた加熱率履歴 ($\varepsilon = 1.0$ 換算) (図3.14) に示されるように case 001 以外では 20%-30% 程度実測加熱率より低い値が得られ case 001 と case 002 以降とで明らかに加熱開始直後の挙動が異なっていることがわかった。原因として、今回の試験では case 001 加熱終了後の冷却時に熱電対シースがモジュールから剥離し次回以降の再加熱の際、温度の上昇とともに熱膨張などのために熱電対シース/モジュール間の接触熱抵抗が再び小さくなるという可能性が考えられたため以下に示される検討を行った。

モジュール表面温度 (T_1) の代わりにパネル表面温度 (T_3) から加熱履歴を各試験 case に対して推定した結果 (図A.1) では、全体に推定加熱率は低く立ち上がりが緩やかであるが case 001 と case 002 との間には明らかな違いは見られず、代わりに case 001-case 003 と、case 009-case 013 との間で明らかな傾向の違いが見られた。このことから case 001 と case 002 以降における傾向の変化は加熱系全体の問題ではなく、モジュール表面熱電対もしくはモジュール固有の問題であると考えられる。

また、熱電対シース/モジュール間の接触熱抵抗が温度の関数とした場合 case 002 以降に見られるような現象が起

こりうる事をモデル化により確認した (図A.2)。これは以下のようなモデル化によりモジュール熱電対部における温度履歴を計算しそれをもとにシースまわり接触熱抵抗がないというモデルで加熱率を再度推定したものである。

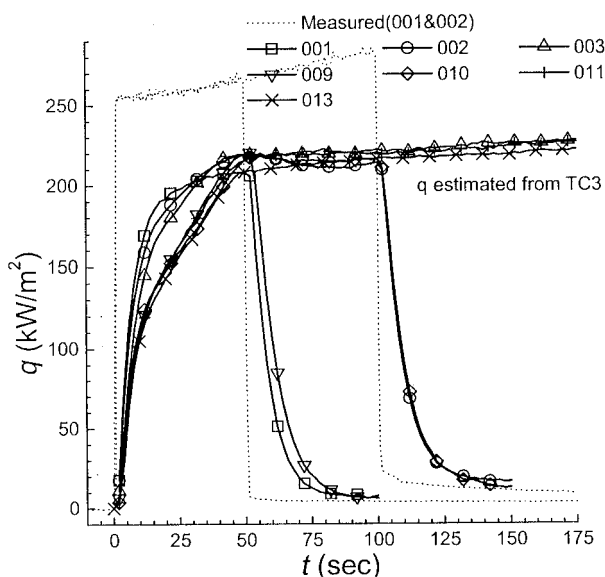
R-model-0 : $R_{TC/module} = 0. (\text{Km}^2/\text{W})$

R-model-1 : $R_{TC/module} = 1. (\text{Km}^2/\text{W}) \quad (T < 500\text{K}),$
 $= 10^{-(T-500)/200} (\text{Km}^2/\text{W}) \quad (T > 500\text{K})$

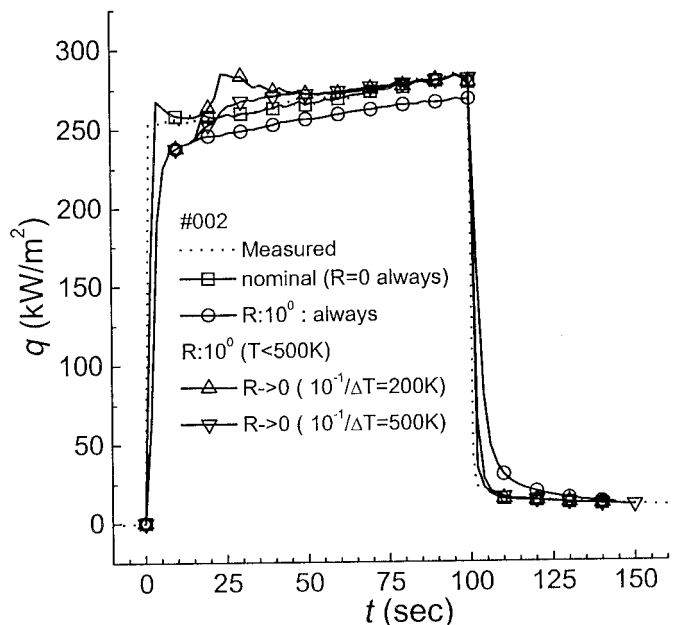
R-model-2 : $R_{TC/module} = 1. (\text{Km}^2/\text{W}) \quad (T < 500\text{K}),$
 $= 10^{-(T-500)/500} (\text{Km}^2/\text{W}) \quad (T > 500\text{K})$

R-model-3 : $R_{TC/module} = 1. (\text{Km}^2/\text{W})$

確証は得られないが、case 001 と、case 002 以降との推定加熱率の傾向の違いがモジュールまたは表面熱電対固有の問題であることと、シース熱電対周りの接触熱抵抗温度依存性モデルで再現が可能であることから考えて、上記の推論が妥当であると考えた。更に熱モデル較正試験 (その 2) に供された FM 9 センサは熱モデル較正試験 (その 1) において HYFLEX 搭載センサより高加熱、長時間にわたり試験されたこと、熱モデル較正試験 (その 1) においてはランプヒータの再現性を含めてもなおいずれのセンサもよい再現性が見られたこと (図3.9) などから、飛行時におけるセンサ状態は case 001 における状態に近いと考えられる。



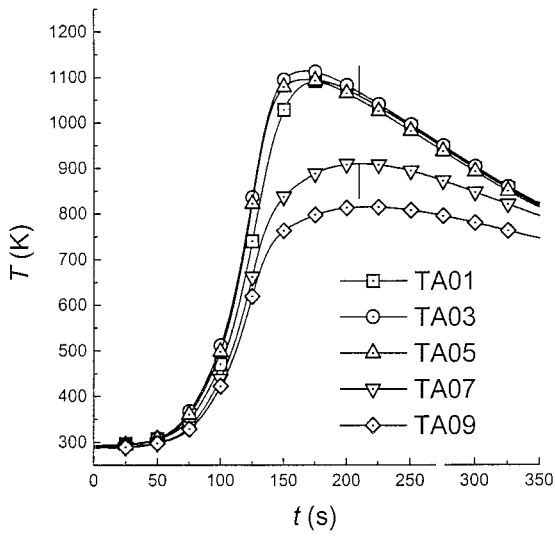
図A.1 C/C パネル表面温度 T_3 から求めた加熱率



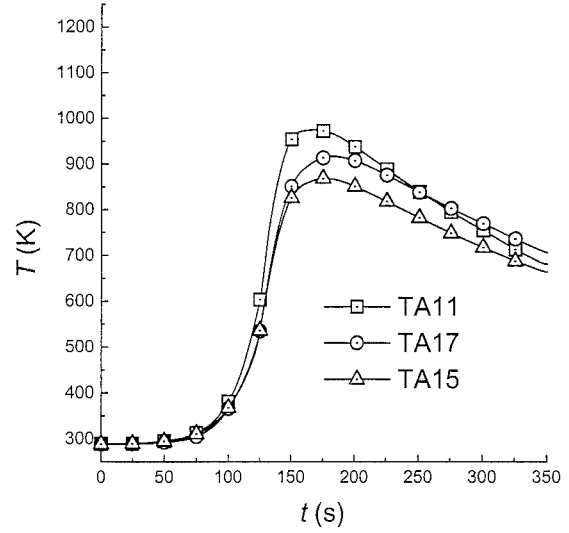
図A.2 熱電対シース/モジュール間熱抵抗の加熱率導出に及ぼす効果

付録B. C/C 及びセラミックタイル空力加熱センサの実飛行時温度履歴

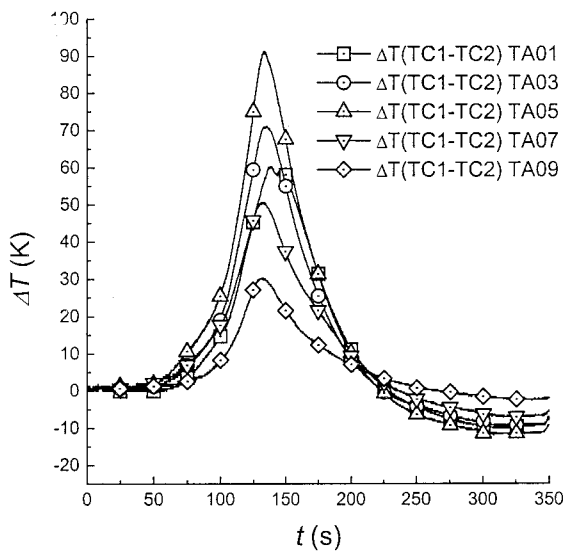
HYFLEX に搭載された空力加熱センサで計測された温度履歴を図B.1 及び図B.2 に示す。



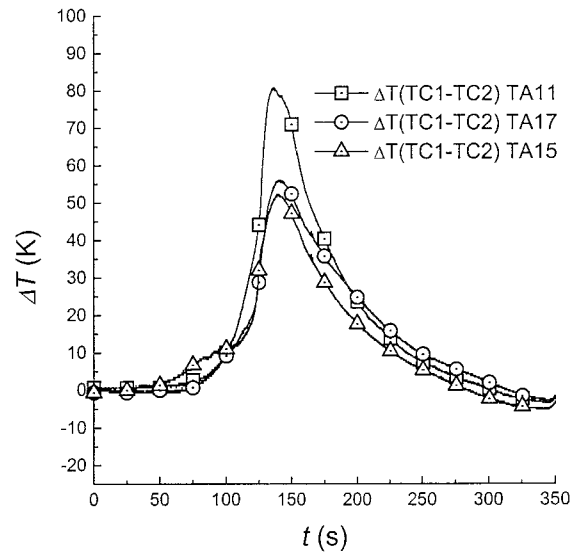
(a) ノーズ部表面側熱電対指示温度履歴



(c) エレボン部表面側熱電対指示温度履歴

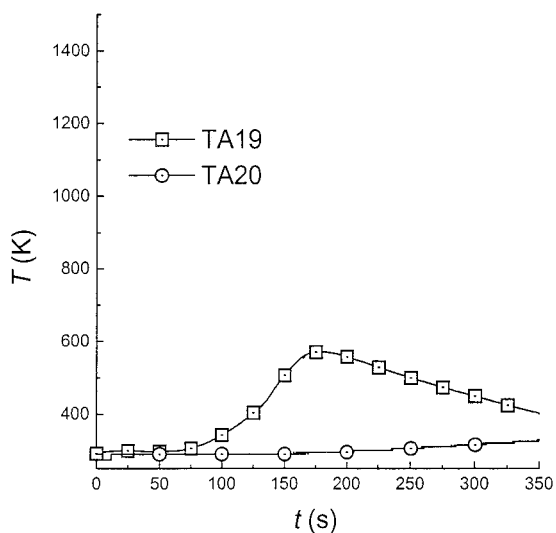


(b) ノーズ部差温 (TC1-TC2) 履歴

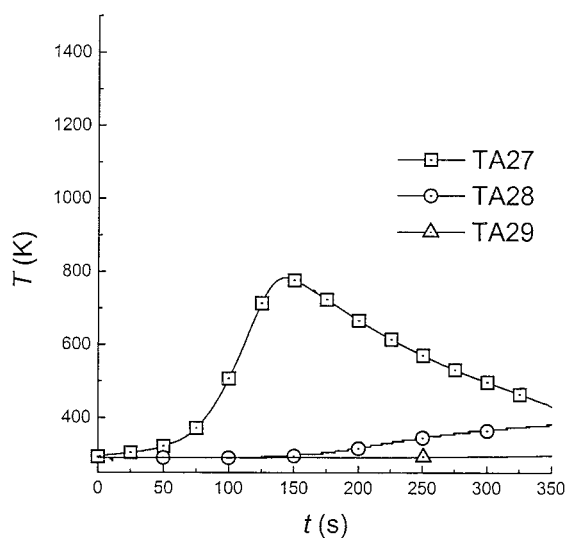


(d) エレボン部差温 (TC1-TC2) 履歴

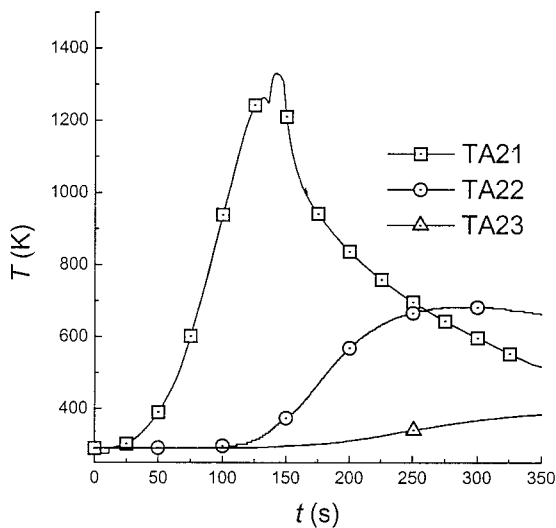
図B.1 C/C 空力加熱センサ温度出力 (HYFLEX 飛行データ)



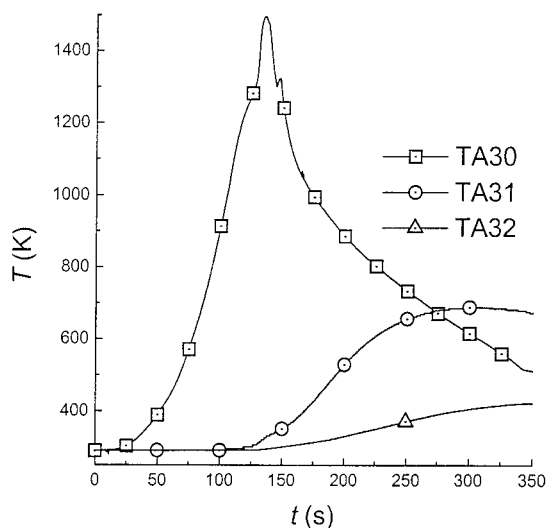
(a) TA19,TA20



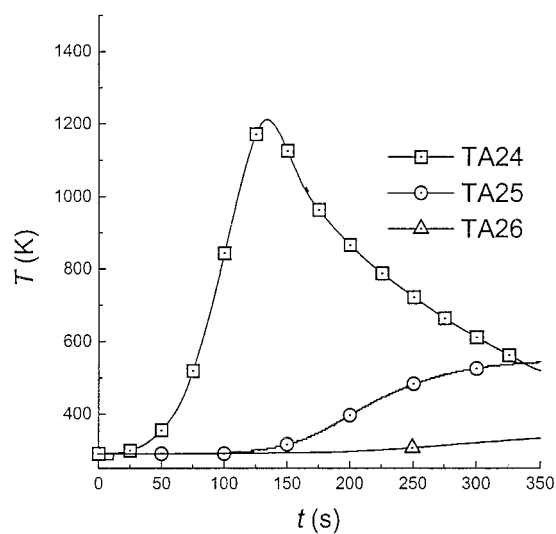
(d) TA27,TA28, TA29



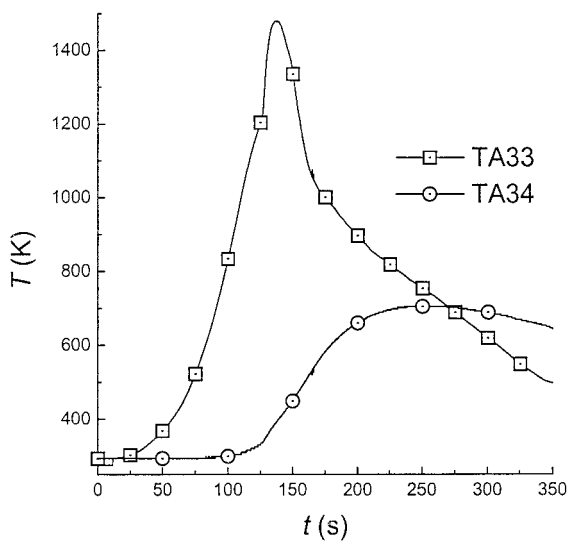
(b) TA21,TA22, TA23



(e) TA30,TA31, TA32

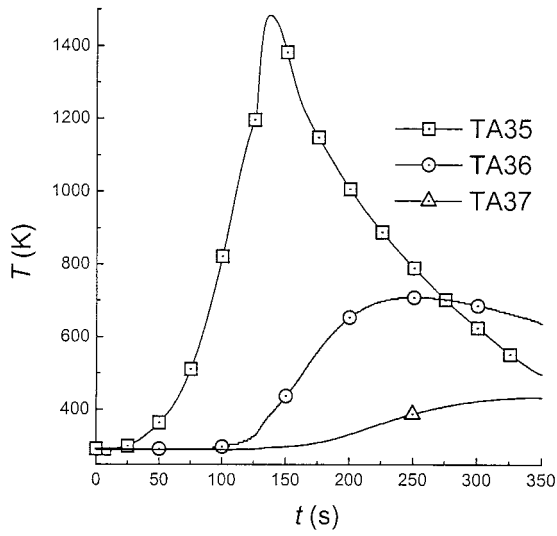


(c) TA24,TA25, TA26

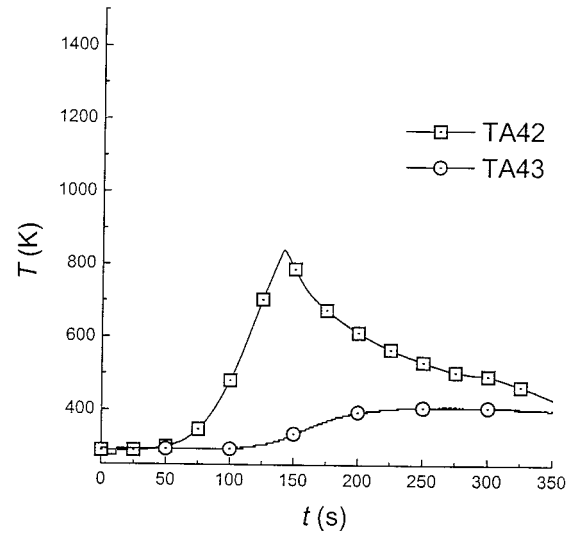


(f) TA33,TA34

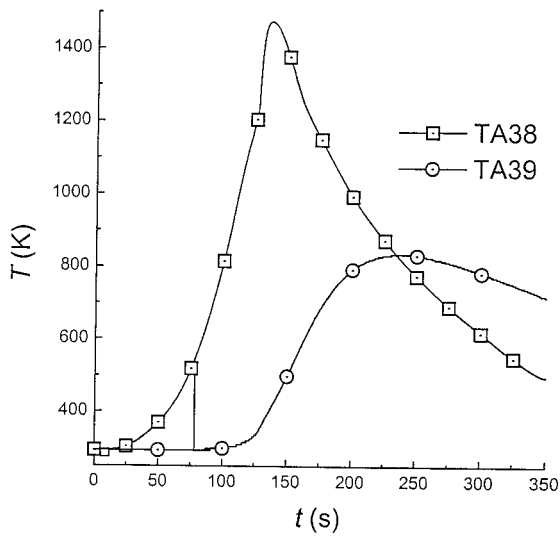
図B.2 セラミックタイル空力加熱センサ温度出力 (HYFLEX 飛行データ)



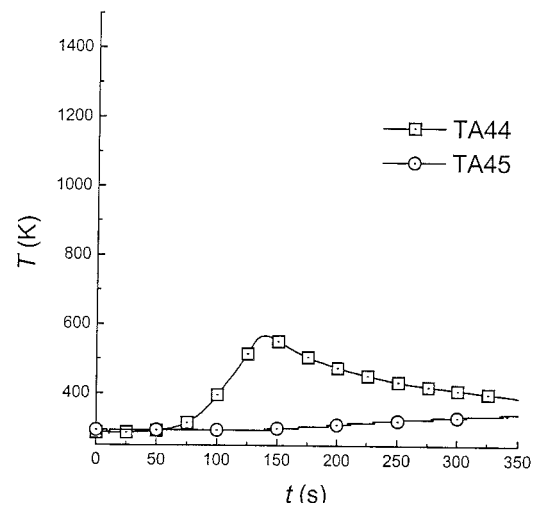
(g) TA35,TA36, TA37



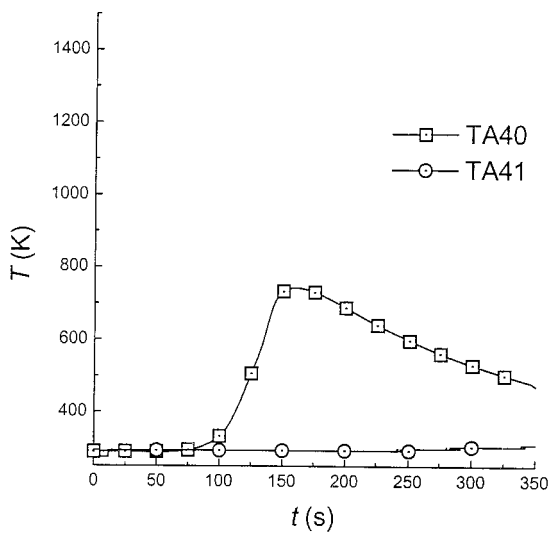
(j) TA42,TA43



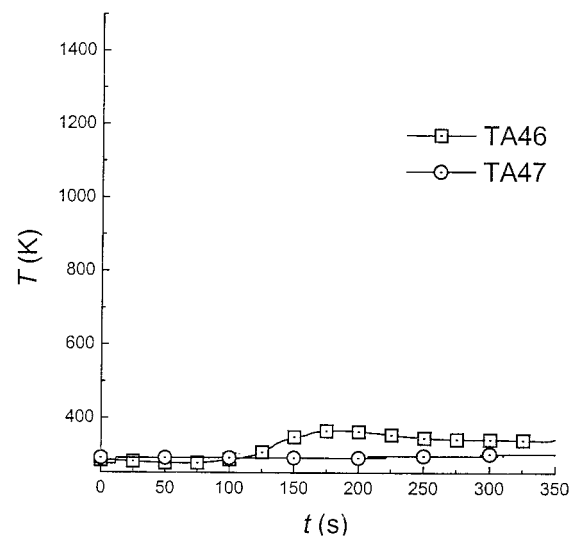
(h) A38,TA39



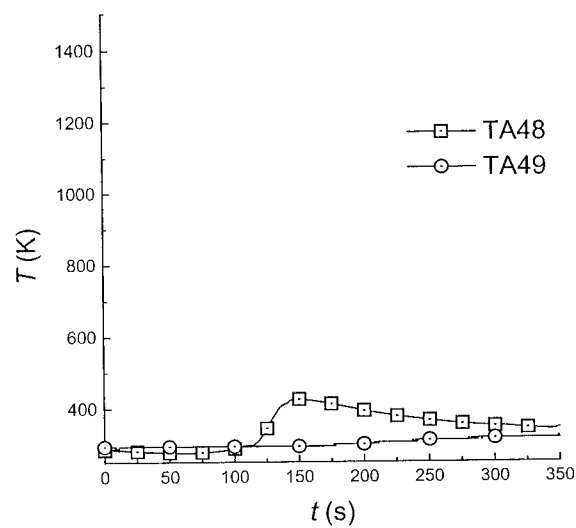
(k)TA44,TA45



(i)TA40,TA41



(l)TA46,TA47

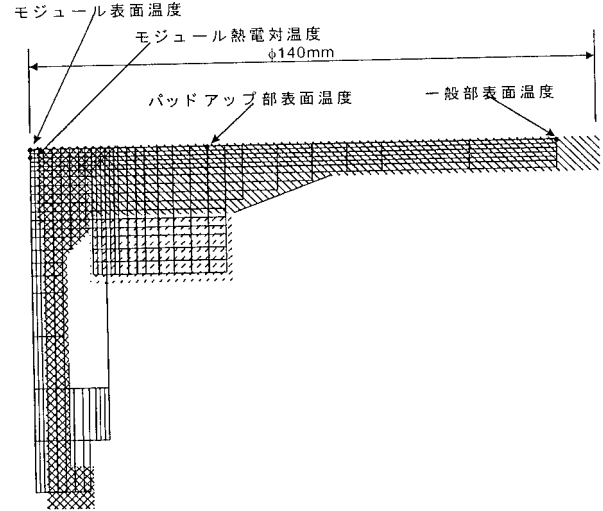


(m)TA48,TA49

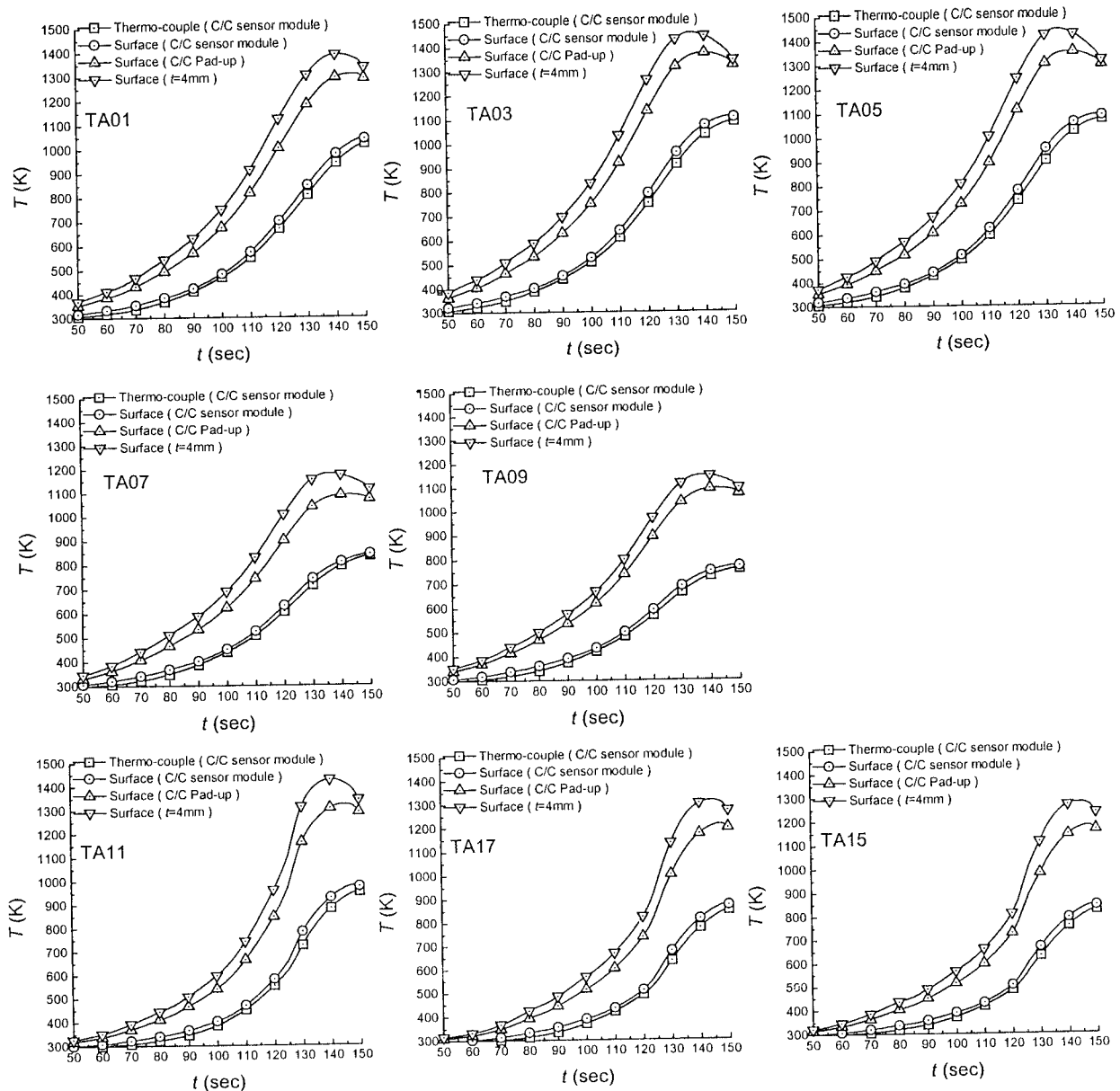
図B.2 つづき

付録C. C/C 空力加熱センサによる温度推定結果、加熱率 推定結果

飛行データ解析に用いた計算格子を図 C.1 に示す。同図中温度代表点として4点を選びそれらを○印により示す。熱電対シース/モジュール間接触熱抵抗を熱モデル校正試験結果により調整した熱モデルをもちいて、飛行時のモジュール表面温度データより求めた加熱率履歴を計測温度履歴、推定誤差履歴と共に表 C.1 に示す。また、同時に得られた各部代表点温度履歴（モジュール表面側熱電対指示温度、モジュール表面温度（中心）、C/C パッドアップ部温度、C/C 一般部温度）を図 C.2 及び表 C.2 に示す。



図C.1 フライト C/C センサ熱解析における計算格子と代表表面温度位置



図C.2 C/C 温度センサ周りにおける温度ミスマッチ

表C.1 C/ C 温度センサにおける空力加熱計測結果

t (sec)	TA01 (K)	TA03 (K)	TA05 (K)	TA07 (K)	TA09 (K)	TA11 (K)	TA15 (K)	TA17 (K)	Qta01 (kW/m ²)	Qta03 (kW/m ²)	Qta05 (kW/m ²)	Qta07 (kW/m ²)	Qta09 (kW/m ²)	Qta11 (kW/m ²)	Qta15 (kW/m ²)	Qta17 (kW/m ²)	$\sigma 01$ (kW/m ²)	$\sigma 03$ (kW/m ²)	$\sigma 05$ (kW/m ²)	$\sigma 07$ (kW/m ²)	$\sigma 09$ (kW/m ²)	$\sigma 11$ (kW/m ²)	$\sigma 15$ (kW/m ²)	$\sigma 17$ (kW/m ²)
1	291.53	290.87	291.73	288.94	287.24	288.89	288.30	288.40	12.87	11.60	3.35	-0.16	5.64	-5.60	1.76	-7.85	16.38	17.53	14.89	14.30	14.39	14.25	14.25	14.25
2	291.97	291.13	291.98	288.94	287.33	288.82	288.30	288.37	1.88	3.12	0.56	2.71	-0.33	6.43	-0.27	4.10	16.43	15.37	14.76	15.55	14.52	14.25	14.25	14.25
3	292.30	291.35	292.17	288.99	287.40	288.80	288.30	288.37	3.63	5.13	1.22	3.53	1.40	1.76	0.35	0.88	16.09	14.41	15.48	15.04	14.52	14.25	14.25	14.25
4	292.56	291.56	292.31	289.06	287.47	288.81	288.30	288.38	3.41	3.90	3.00	3.22	1.94	3.77	0.88	1.61	16.10	14.97	15.10	14.99	14.57	14.25	14.25	14.25
5	292.79	291.75	292.46	289.16	287.55	288.85	288.31	288.39	7.01	6.73	6.12	5.55	6.39	4.22	0.96	0.83	15.93	15.05	15.14	14.58	14.59	14.25	14.25	14.25
6	293.02	291.96	292.63	289.29	287.67	288.91	288.33	288.41	7.15	6.38	7.05	6.34	6.41	1.88	-0.40	-0.19	15.96	15.37	15.17	14.30	14.61	14.25	14.25	14.25
7	293.26	292.16	292.81	289.44	287.81	288.96	288.33	288.42	4.21	2.21	4.28	3.91	2.19	0.89	-0.23	-0.14	16.05	15.64	15.37	14.77	14.63	14.25	14.25	14.25
8	293.47	292.32	292.99	289.58	287.93	289.00	288.33	288.43	3.57	0.06	2.25	0.10	-0.94	0.01	-0.74	0.38	16.22	15.91	15.64	15.18	14.65	14.25	14.25	14.25
9	293.66	292.45	293.14	289.67	288.02	289.03	288.33	288.44	1.92	-0.77	1.78	-2.49	-2.54	-0.50	-0.29	0.77	16.35	16.07	15.92	15.49	14.66	14.25	14.25	14.25
10	293.81	292.53	293.26	289.72	288.06	289.05	288.32	288.45	-0.99	-1.71	-1.03	-3.14	-4.31	-0.26	-0.04	0.01	16.37	16.10	16.08	15.63	14.67	14.25	14.25	14.25
11	293.91	292.57	293.33	289.72	288.06	289.07	288.32	288.46	-5.10	-4.16	-5.65	-6.19	-7.74	0.16	-0.19	-0.69	16.22	15.95	16.06	15.58	14.67	14.25	14.25	14.25
12	293.94	292.56	293.33	289.66	288.00	289.08	288.31	288.47	-7.00	-6.84	-7.73	-7.55	-8.76	0.45	-0.73	0.30	15.89	15.65	15.81	15.36	14.67	14.25	14.25	14.25
13	293.92	292.41	293.27	289.57	287.90	289.09	288.31	288.47	-4.23	-5.08	-7.44	-4.73	-7.46	-0.40	-0.07	-0.13	15.41	15.22	15.38	15.01	14.67	14.25	14.25	14.25
14	293.90	292.45	293.18	289.48	287.78	289.12	288.30	288.47	0.91	-1.25	-3.53	-0.64	-2.06	1.02	1.24	0.49	14.86	14.73	14.85	14.62	14.67	14.25	14.25	14.25
15	293.92	292.42	293.11	289.41	287.70	289.12	288.31	288.49	1.09	-0.39	-0.82	-1.10	1.24	1.47	1.30	1.90	14.32	14.26	14.29	14.25	14.67	14.25	14.25	14.25
16	293.97	292.41	293.08	289.37	287.66	289.15	288.33	288.51	2.59	0.84	2.55	0.13	2.48	1.38	1.27	2.10	14.63	14.66	14.67	14.55	14.67	14.25	14.25	14.25
17	294.07	292.44	293.11	289.36	287.67	289.19	288.35	288.55	4.57	2.84	4.24	0.76	4.68	1.23	1.48	2.43	14.92	14.94	15.00	14.73	14.66	14.25	14.25	14.25
18	294.21	292.52	293.19	289.37	287.72	289.22	288.38	288.60	5.78	4.69	5.50	1.45	3.91	1.30	1.93	1.08	15.03	15.09	15.14	14.82	14.66	14.25	14.25	14.25
19	294.39	292.63	293.32	289.40	287.78	289.27	288.42	288.64	7.03	5.07	4.04	1.63	2.93	2.37	2.75	0.77	14.97	15.13	15.14	14.84	14.65	14.25	14.25	14.25
20	294.62	292.78	293.47	289.45	287.86	289.32	288.48	288.68	6.30	4.22	3.99	0.89	3.09	2.28	3.92	0.33	14.80	15.08	15.05	14.83	14.64	14.26	14.25	14.25
21	294.66	292.95	293.62	289.50	287.95	289.38	288.57	288.72	5.94	3.15	2.99	1.17	2.95	3.00	6.24	1.42	14.55	14.99	14.92	14.82	14.64	14.25	14.25	14.25
22	295.12	293.12	293.79	289.57	288.05	289.46	288.68	288.75	5.36	4.43	3.94	1.30	4.46	3.48	4.34	0.92	14.32	14.90	14.80	14.81	14.63	14.25	14.25	14.25
23	295.37	293.31	293.96	289.64	288.17	289.55	288.79	288.80	3.18	4.73	4.72	1.84	5.72	3.03	2.01	2.19	14.37	14.83	14.71	14.81	14.63	14.26	14.25	14.25
24	295.60	293.51	294.15	289.72	288.32	289.65	288.90	288.86	1.46	5.10	4.14	2.40	6.19	3.66	3.62	3.73	14.46	14.78	14.65	14.82	14.62	14.25	14.25	14.25
25	295.81	293.73	294.35	289.82	288.49	289.76	289.02	288.93	1.94	5.55	3.65	4.35	5.72	3.80	3.69	3.48	14.46	14.75	14.60	14.81	14.62	14.25	14.25	14.25
26	296.00	293.96	294.56	289.95	288.67	289.87	289.13	289.09	3.67	5.77	6.10	4.63	5.74	3.89	1.93	1.41	14.38	14.71	14.56	14.78	14.62	14.25	14.25	14.25
27	296.21	294.22	294.79	290.10	288.86	290.00	289.24	289.02	4.53	7.27	7.41	4.97	4.77	3.90	1.35	0.51	14.26	14.66	14.51	14.73	14.61	14.25	14.25	14.25
28	296.43	294.49	295.04	290.26	289.06	290.13	289.34	289.16	4.45	8.55	5.52	4.51	6.01	3.74	1.55	0.44	14.37	14.59	14.44	14.68	14.61	14.25	14.25	14.25
29	296.67	294.80	295.31	290.44	289.27	290.27	289.43	289.21	5.13	7.08	5.57	3.55	6.26	4.65	3.14	-0.67	14.48	14.50	14.39	14.63	14.61	14.25	14.25	14.25
30	296.92	295.11	295.57	290.61	289.49	290.43	289.55	289.25	5.78	7.98	6.04	3.99	5.73	6.75	5.07	-0.02	14.56	14.39	14.34	14.60	14.61	14.26	14.25	14.26
31	297.20	295.45	295.85	290.80	289.72	290.62	289.69	289.28	6.80	8.04	6.20	6.10	4.78	7.94	6.52	0.86	14.61	14.29	14.30	14.58	14.61	14.25	14.25	14.25
32	297.49	295.79	296.14	291.02	289.96	290.83	289.86	289.33	6.42	8.29	6.43	7.03	5.68	7.12	7.91	1.91	14.62	14.29	14.29	14.56	14.62	14.26	14.26	14.25
33	297.81	296.15	296.45	291.26	290.20	291.07	290.06	289.39	6.43	8.82	8.18	6.68	8.04	6.97	7.45	3.29	14.62	14.33	14.28	14.54	14.62	14.26	14.26	14.26
34	298.13	296.53	296.78	291.52	290.48	291.31	290.29	289.47	7.17	7.87	8.45	7.81	8.67	7.05	7.87	4.73	14.61	14.32	14.29	14.49	14.62	14.26	14.26	14.25
35	298.48	296.91	297.13	291.81	290.79	291.56	290.54	289.58	9.03	8.75	8.02	8.90	9.01	6.31	7.17	5.86	14.60	14.27	14.30	14.42	14.62	14.26	14.25	14.25
36	298.66	297.31	297.50	292.12	291.12	291.82	290.79	289.72	8.26	9.73	9.10	8.55	9.44	6.06	5.27	6.89	14.57	14.31	14.32	14.33	14.63	14.26	14.26	14.26
37	299.25	297.74	297.89	292.45	291.47	292.08	291.03	289.89	8.61	10.71	9.51	8.88	9.53	6.71	3.79	6.33	14.55	14.39	14.35	14.28	14.63	14.26	14.26	14.26

表C.1 つづき

38	299.66	298.20	298.30	292.80	291.85	292.35	291.27	290.07	9.39	14.20	10.51	9.33	10.62	6.69	5.11	5.37	14.52	14.47	14.39	14.38	14.64	14.26	14.26	14.26
39	300.10	298.71	298.75	293.17	292.26	292.63	291.50	290.26	11.28	13.64	11.06	9.36	10.88	4.33	5.27	5.53	14.48	14.51	14.43	14.47	14.64	14.26	14.26	14.26
40	300.57	299.27	299.22	293.56	292.69	292.89	291.73	290.47	10.54	14.66	12.00	9.68	11.72	5.44	4.09	6.51	14.44	14.53	14.47	14.54	14.64	14.26	14.26	14.26
41	301.06	299.87	299.73	293.97	293.15	291.96	291.96	290.68	11.54	16.40	13.40	10.31	12.08	5.01	3.65	5.31	14.40	14.51	14.50	14.60	14.65	14.26	14.26	14.26
42	301.57	300.51	300.28	294.40	293.63	293.41	292.19	290.89	11.16	16.38	14.78	10.56	11.12	2.61	6.03	3.33	14.36	14.47	14.51	14.64	14.66	14.27	14.26	14.26
43	302.10	301.20	300.89	294.85	294.13	293.64	292.43	291.08	12.28	18.28	16.98	11.62	9.50	3.43	5.78	3.75	14.32	14.42	14.48	14.68	14.66	14.27	14.26	14.26
44	302.67	301.95	301.54	295.32	294.62	293.88	292.68	291.28	14.12	20.37	17.69	11.59	10.07	4.68	3.63	5.01	14.29	14.36	14.41	14.70	14.67	14.27	14.27	14.26
45	303.27	302.74	302.25	295.81	295.12	294.12	292.92	291.49	14.75	20.69	18.16	12.51	10.66	4.43	3.86	5.19	14.27	14.30	14.33	14.74	14.67	14.27	14.27	14.26
46	303.90	303.59	303.00	296.34	295.64	294.36	293.16	291.70	14.09	21.29	18.52	13.55	11.01	3.27	5.80	4.38	14.26	14.27	14.37	14.77	14.68	14.27	14.27	14.26
47	304.56	304.49	303.79	296.89	296.17	294.60	293.41	291.91	15.36	23.40	20.51	14.59	11.67	5.76	4.58	4.30	14.26	14.33	14.36	14.82	14.69	14.27	14.27	14.26
48	305.26	305.45	304.63	297.48	296.72	294.86	293.66	292.13	16.38	24.94	20.80	14.85	12.70	6.87	4.15	7.07	14.26	14.40	14.43	14.86	14.70	14.27	14.27	14.27
49	305.99	306.48	305.51	298.09	297.30	295.14	293.91	292.38	17.37	26.84	21.42	14.75	12.35	8.38	5.80	7.32	14.25	14.51	14.50	14.88	14.70	14.27	14.27	14.26
50	306.77	307.58	306.45	298.73	297.90	295.46	294.18	292.64	19.44	28.92	24.33	14.54	12.59	9.29	7.14	4.85	14.28	14.67	14.57	14.89	14.71	14.28	14.27	14.26
51	307.60	308.75	307.45	299.38	298.52	295.80	294.47	292.89	21.19	30.59	26.29	14.47	14.14	9.00	7.69	4.38	14.34	14.90	14.66	14.87	14.72	14.28	14.27	14.26
52	308.49	310.00	308.52	300.06	299.17	296.17	294.78	293.15	22.74	31.67	27.57	16.41	14.72	9.97	8.42	5.77	14.44	15.23	14.79	14.85	14.72	14.28	14.27	14.27
53	309.44	311.31	309.66	300.78	299.85	296.57	295.12	293.41	21.92	33.06	28.37	18.33	16.02	10.62	8.86	6.29	14.58	15.69	14.98	14.82	14.73	14.28	14.27	14.27
54	310.42	312.69	310.86	301.54	300.57	296.99	295.48	293.68	23.26	33.73	29.53	19.26	16.72	11.77	10.34	7.18	14.74	16.31	15.24	14.80	14.74	14.28	14.27	14.27
55	311.46	314.12	312.11	302.35	301.33	297.44	295.87	293.98	25.07	34.14	29.71	19.91	17.01	12.53	11.23	7.82	14.94	17.07	15.82	14.79	14.75	14.28	14.27	14.27
56	312.54	315.63	313.42	303.21	302.12	297.93	296.29	294.29	24.49	35.44	32.20	20.53	17.12	11.90	11.60	7.89	15.18	17.82	16.16	14.77	14.76	14.28	14.27	14.27
57	313.65	317.26	314.79	304.10	302.94	298.43	296.75	294.62	25.38	34.37	33.64	20.29	17.56	13.27	12.80	9.27	15.47	18.43	16.82	14.74	14.77	14.29	14.28	14.27
58	314.81	318.97	316.26	305.03	303.78	298.96	297.24	294.98	26.53	33.71	33.71	21.19	18.55	12.04	13.76	9.41	15.85	18.78	17.49	14.69	14.78	14.29	14.28	14.27
59	316.00	320.74	317.84	305.99	304.66	299.50	297.76	295.76	27.69	35.63	33.89	21.96	18.66	12.39	14.33	9.25	16.27	18.75	18.05	14.61	14.79	14.29	14.28	14.27
60	317.28	322.60	319.52	307.00	305.57	300.06	298.32	295.35	27.40	35.84	34.59	23.45	19.79	14.99	13.26	10.30	16.67	18.30	18.38	14.52	14.80	14.29	14.29	14.28
61	318.63	324.54	321.29	308.07	306.53	300.66	298.89	296.16	27.41	35.33	35.07	26.35	22.78	15.26	14.22	10.88	16.98	17.53	18.37	14.46	14.82	14.29	14.29	14.28
62	320.06	326.57	323.13	309.21	307.54	301.29	299.49	296.61	28.58	37.31	34.29	28.83	22.81	16.19	15.58	12.32	17.12	16.57	17.97	14.45	14.83	14.29	14.29	14.28
63	321.55	328.71	325.05	310.43	308.60	301.97	300.12	297.09	29.31	38.47	35.67	30.05	23.82	18.43	17.33	13.33	17.05	15.50	17.31	14.56	14.83	14.29	14.29	14.28
64	323.12	330.99	327.08	311.73	309.72	302.69	300.81	297.60	30.40	39.60	37.70	31.09	25.60	19.25	19.18	14.28	16.77	14.43	16.45	14.82	14.84	14.30	14.29	14.28
65	324.78	333.41	329.23	313.09	310.89	303.46	301.55	298.15	31.51	42.51	39.20	33.06	28.26	20.29	21.12	15.01	16.36	15.06	15.49	15.31	14.85	14.30	14.30	14.28
66	326.55	336.01	331.53	314.53	312.15	304.29	302.35	298.74	34.27	43.57	41.56	34.17	31.33	23.72	20.59	17.33	15.87	15.88	14.53	15.97	14.84	14.30	14.30	14.28
67	328.45	338.76	334.00	316.08	313.50	305.19	303.19	299.38	37.45	45.16	43.76	35.24	32.25	23.98	21.27	17.63	15.35	16.51	14.84	16.70	14.83	14.30	14.30	14.29
68	330.53	341.68	336.65	317.79	314.94	306.13	304.06	300.07	39.88	48.08	44.59	37.85	33.02	22.50	21.48	19.42	14.84	16.89	15.57	17.38	14.83	14.31	14.30	14.29
69	332.78	344.78	339.47	319.65	316.51	307.12	304.98	300.81	42.04	50.70	47.83	38.85	32.25	23.50	22.15	21.54	14.36	17.03	16.10	17.88	14.84	14.31	14.30	14.29
70	335.22	348.05	342.49	321.63	318.22	308.14	305.94	301.62	43.79	53.27	50.42	39.73	32.23	24.28	23.49	22.68	14.58	16.96	16.44	18.05	14.86	14.31	14.31	14.29
71	337.82	351.48	345.68	323.73	320.03	309.21	306.94	302.48	44.31	55.18	52.19	39.48	31.24	26.20	24.86	23.31	14.96	16.76	16.58	17.85	14.89	14.32	14.31	14.29
72	340.57	355.05	349.05	325.93	321.91	310.32	308.00	303.40	46.68	57.86	54.19	39.66	31.08	26.12	26.08	23.71	15.27	16.56	16.56	17.33	14.94	14.32	14.32	14.30
73	343.46	358.75	352.55	328.25	323.87	311.48	309.11	304.36	48.28	59.04	55.23	41.50	32.09	27.26	26.20	25.47	15.52	16.52	16.47	16.54	15.00	14.32	14.32	14.30
74	348.51	362.52	356.14	330.69	325.91	312.70	310.26	305.40	50.63	58.25	55.72	43.73	34.31	29.64	28.32	28.80	15.67	16.42	16.43	15.56	15.06	14.33	14.32	14.30
75	349.69	366.37	359.79	333.28	328.07	313.98	311.48	306.51	51.35	57.12	54.83	42.65	36.70	30.77	28.99	30.15	15.76	16.27	16.51	14.51	15.11	14.33	14.33	14.31
76	352.98	370.45	363.44	335.99	330.34	315.32	312.76	307.70	52.19	56.91	54.75	42.93	38.63	30.41	31.00	31.22	15.79	15.03	16.47	15.01	15.15	14.33	14.32	14.31
77	356.34	374.68	367.18	338.81	332.76	316.78	314.10	308.97	52.75	59.12	56.21	45.11	40.97	30.94	31.97	32.43	15.83	15.70	16.34	15.89	15.19	14.33	14.33	14.31
78	359.74	378.98	371.21	341.78	335.30	318.35	315.52	310.31	52.18	61.35	57.08	47.31	41.55	31.23	31.26	34.59	15.98	15.19	16.06	16.57	15.22	14.34	14.34	14.31
79	363.15	383.35	375.39	344.91	337.94	320.02	317.05	311.72	51.68	65.52	57.24	49.67	42.10	32.36	29.31	35.27	16.03	14.78	15.62	16.98	15.25	14.35	14.34	14.32

表C.1 つづき

80	366.61	387.81	379.62	348.18	340.70	321.80	318.66	313.21	53.50	68.62	60.52	49.98	45.46	33.22	29.13	35.86	15.95	14.44	15.04	17.14	15.29	14.35	14.34	14.32
81	370.33	392.37	383.94	351.55	343.58	323.66	320.33	314.80	54.77	72.98	65.86	50.81	47.63	32.03	28.37	36.07	15.72	14.43	14.57	17.10	15.34	14.36	14.35	14.32
82	374.27	397.09	388.42	355.02	346.58	325.58	322.02	316.52	57.60	78.65	70.80	53.88	48.37	31.79	26.43	35.54	15.40	14.86	14.31	16.95	15.39	14.37	14.36	14.33
83	378.40	402.00	393.10	358.60	349.68	327.55	323.73	318.38	62.41	84.18	75.85	55.23	49.87	32.76	25.65	35.72	14.91	15.35	14.68	16.87	15.44	14.37	14.36	14.33
84	382.73	407.12	397.97	362.24	352.87	329.60	325.44	320.33	66.45	88.83	80.28	54.70	51.18	36.46	26.75	33.45	14.51	15.81	15.10	16.67	15.50	14.38	14.37	14.34
85	387.23	412.42	403.03	365.93	356.14	331.75	327.19	322.33	69.68	93.91	85.11	54.84	52.75	38.78	28.83	32.39	14.29	15.09	15.55	16.35	15.56	14.39	14.38	14.35
86	391.88	417.89	408.24	369.89	359.49	334.05	329.01	324.38	73.38	97.92	89.19	56.59	55.37	42.09	32.11	34.02	14.55	16.25	15.95	15.89	15.60	14.40	14.39	14.36
87	396.63	423.39	413.60	374.06	362.94	336.51	330.96	326.49	75.79	102.59	93.72	57.77	55.76	46.66	39.38	36.63	14.85	16.19	16.19	15.37	15.64	14.40	14.39	14.36
88	401.44	428.98	419.09	378.36	366.50	339.19	333.15	328.74	78.41	109.76	97.85	61.49	57.89	51.50	45.98	42.41	15.23	16.06	16.32	14.74	15.72	14.41	14.40	14.37
89	406.33	434.76	424.60	382.76	370.40	342.09	335.58	331.19	82.73	114.62	103.95	64.92	59.82	53.10	46.69	48.82	15.62	15.91	16.28	14.26	15.79	14.42	14.41	14.38
90	411.34	440.72	430.26	387.27	374.57	345.17	338.19	333.88	88.00	118.59	110.52	68.38	60.56	54.75	46.01	51.39	15.93	15.82	16.18	14.58	15.89	14.43	14.41	14.39
91	416.54	446.83	436.13	391.90	378.86	348.40	340.91	336.80	93.23	122.69	115.37	72.38	61.22	56.46	44.93	52.10	16.12	15.73	16.08	14.85	16.02	14.43	14.42	14.39
92	421.86	453.13	442.19	395.66	383.19	351.77	343.71	339.88	97.32	129.08	120.38	75.63	62.27	59.12	47.58	52.43	16.19	15.64	16.03	15.18	16.16	14.44	14.43	14.40
93	427.23	459.61	448.46	401.50	387.54	355.27	346.82	343.08	102.84	132.67	125.63	78.55	66.18	60.27	51.37	53.93	16.15	15.55	15.96	15.60	16.30	14.45	14.44	14.41
94	432.77	466.25	454.91	408.42	391.99	358.90	349.86	346.41	108.36	137.78	129.57	81.94	69.73	63.73	54.15	58.37	16.07	15.49	15.89	16.03	16.42	14.46	14.44	14.41
95	438.47	473.02	461.54	411.45	395.54	362.64	352.87	349.91	111.66	142.54	135.31	87.58	72.96	65.24	57.49	60.71	16.02	15.50	15.82	16.36	16.56	14.47	14.45	14.43
96	444.32	479.89	468.40	416.67	401.19	366.59	356.23	353.56	116.04	149.32	142.28	92.00	76.26	66.94	59.55	63.36	15.97	15.56	15.79	16.55	16.70	14.47	14.46	14.43
97	450.34	486.99	475.41	422.00	405.98	370.96	359.72	357.35	120.21	158.18	147.72	96.49	80.79	69.29	60.53	65.31	15.90	15.68	15.83	16.59	16.86	14.48	14.47	14.44
98	456.53	494.38	482.58	427.36	410.93	375.82	363.29	361.25	125.55	165.49	154.68	100.76	85.26	70.85	60.57	65.80	15.85	15.84	15.94	16.52	17.06	14.50	14.48	14.45
99	462.91	502.07	490.00	432.85	416.05	380.45	367.00	365.26	129.85	174.76	163.11	105.38	89.37	74.77	61.96	65.92	15.82	16.01	16.09	16.41	17.28	14.52	14.49	14.46
100	469.46	510.06	497.70	438.53	421.29	385.44	371.04	369.58	135.01	182.72	171.22	111.17	93.34	79.12	62.38	66.00	15.83	16.29	16.48	16.36	17.52	14.53	14.50	14.47
101	476.16	518.31	505.70	444.44	425.52	390.61	375.25	374.12	141.71	189.95	179.48	116.30	97.77	84.70	62.81	66.52	15.92	16.30	16.48	16.33	17.78	14.55	14.51	14.48
102	483.07	526.88	514.01	450.57	431.87	396.03	379.51	378.74	150.15	201.42	189.53	121.16	102.77	93.10	64.28	68.40	16.06	16.43	16.66	16.29	18.06	14.56	14.53	14.50
103	490.33	535.83	522.72	456.94	437.41	401.77	383.81	383.39	160.56	213.20	202.03	127.09	109.50	99.90	66.71	70.88	16.25	16.56	16.83	16.26	18.35	14.58	14.55	14.52
104	497.96	545.18	531.84	463.54	443.21	407.80	388.18	388.09	169.08	224.88	212.75	132.42	115.39	105.81	71.13	75.37	16.46	16.71	17.00	16.25	18.67	14.60	14.57	14.54
105	505.92	554.94	541.34	470.31	449.23	414.14	392.86	392.92	177.68	237.46	223.02	135.74	119.78	115.60	75.36	80.44	16.68	16.89	17.19	16.30	19.00	14.62	14.58	14.55
106	514.20	565.12	551.24	477.21	455.49	420.79	397.31	397.92	186.69	250.68	237.20	143.93	127.01	124.43	80.29	86.12	16.87	17.15	17.41	16.42	19.38	14.65	14.60	14.57
107	522.83	575.76	561.64	484.36	462.03	427.62	402.14	403.14	197.33	266.45	253.89	152.59	133.97	135.73	84.93	91.91	17.07	18.30	17.90	16.61	19.79	14.67	14.62	14.59
108	531.88	586.94	572.63	491.86	468.83	434.83	407.14	408.61	210.88	284.94	272.37	162.27	140.04	147.80	88.55	98.33	17.27	19.64	19.26	16.86	20.23	14.70	14.64	14.61
109	541.39	598.69	584.23	499.77	475.84	442.50	412.34	414.32	223.72	303.23	291.39	173.59	149.99	159.89	95.63	103.60	17.49	20.98	20.66	17.14	20.71	14.73	14.66	14.64
110	551.36	610.98	596.44	508.06	483.12	450.72	417.82	420.22	236.63	319.40	309.73	182.32	157.78	174.03	103.28	110.11	17.74	22.21	22.04	17.41	21.23	14.76	14.68	14.66
111	561.78	623.73	609.16	516.67	490.68	459.45	423.51	426.22	250.67	335.51	323.97	188.98	165.27	185.37	110.99	118.64	18.04	23.42	23.19	17.67	21.78	14.80	14.71	14.68
112	572.62	636.90	622.29	525.54	498.51	468.63	429.35	432.42	262.21	350.64	338.89	197.92	172.99	197.61	116.68	126.02	18.98	24.57	24.35	17.91	22.36	14.84	14.74	14.72
113	583.80	650.41	635.79	534.71	506.59	478.07	435.40	438.83	272.48	363.02	353.80	207.20	180.28	209.72	123.14	130.45	19.85	25.55	25.32	18.14	22.98	14.88	14.77	14.74
114	595.29	664.15	649.62	544.16	514.89	487.78	441.66	445.40	285.11	374.33	367.21	215.56	187.24	221.24	129.10	135.39	20.88	26.47	26.63	18.40	23.64	14.92	14.80	14.78
115	607.10	678.10	663.76	553.89	523.41	497.79	448.16	452.19	297.12	386.60	383.32	224.34	194.96	233.05	137.14	144.70	21.89	27.47	27.91	18.68	24.34	14.97	14.83	14.81
116	619.23	692.33	678.27	563.88	532.17	508.13	454.95	459.32	309.94	404.01	401.16	232.78	203.28	245.43	144.74	155.07	22.97	28.81	29.33	18.99	25.08	15.03	14.87	14.85
117	631.69	706.90	693.15	574.14	541.17	518.80	462.06	466.86	323.14	421.60	418.20	242.17	211.25	258.92	154.30	165.43	24.08	30.21	30.73	19.32	25.86	15.59	14.90	14.89
118	644.45	721.83	708.36	584.61	550.37	529.82	469.56	474.70	334.55	438.84	433.24	248.70	217.48	271.75	165.97	175.24	25.10	31.63	32.05	19.66	26.69	16.39	14.95	14.94
119	657.45	737.09	723.84	595.24	559.73	541.14	477.43	482.83	344.94	455.04	447.26	254.63	224.34	283.36	180.04	186.28	26.06	33.03	33.31	20.27	27.55	17.13	14.99	14.98
120	670.59	752.62	739.54	606.00	569.23	552.75	485.90	491.36	351.19	467.46	459.82	260.34	223.06	296.36	201.73	201.28	26.78	34.18	34.48	20.97	28.45	17.95	15.04	15.03
121	683.80	768.38	755.42	616.86	578.80	564.72	495.38	500.48							314.26	234.51	220.46				19.06	15.10		15.09

表C.1 つづき

122	697.09	784.32	771.51	627.82	588.44	577.20	506.32	510.43	336.55	276.91	248.34	20.43	16.68	15.15
123	710.54	800.46	787.87	638.92	598.16	590.36	519.12	521.59	364.52	329.16	286.42	22.14	19.72	17.29
124	724.23	816.81	804.52	650.14	607.96	604.48	533.93	534.37	402.87	381.10	336.45	24.45	22.75	20.21
125	738.20	833.37	821.37	661.46	617.80	620.05	550.37	549.07	461.28	415.59	390.29	27.91	24.79	23.37
126	752.39	850.04	838.33	672.80	627.64	637.87	567.45	565.50	552.02	417.59	431.32	33.24	24.99	25.79
127	766.73	866.69	855.29	684.08	637.39	688.30	584.06	582.97	634.32	401.26	451.22	38.11	24.16	27.03
128	781.10	883.17	872.12	695.17	646.93	680.52	599.78	600.68	669.32	393.31	455.62	40.30	23.82	27.40
129	795.42	893.33	888.72	705.96	656.19	703.21	614.84	618.17	669.02	399.97	459.66	40.51	24.31	27.75
130	809.67	915.01	904.94	716.35	665.09	725.36	629.60	635.32	653.35	411.67	466.40	39.85	25.11	28.27
131	823.90	930.16	920.66	726.31	673.61	746.43	644.24	652.11						
132	838.17	944.79	935.77	735.83	681.76	766.22	658.76	668.47						
133	852.41	958.92	950.17	744.89	689.50	784.63	672.96	684.26						
134	866.53	972.46	963.75	753.43	696.77	801.66	686.68	699.35						
135	880.40	985.28	976.43	761.45	703.56	817.46	699.85	713.69						
136	893.96	997.30	988.17	768.94	709.89	832.18	712.45	727.33						
137	907.09	1008.51	999.01	775.96	715.76	845.98	724.53	740.34						
138	919.69	1018.95	1009.05	782.56	721.20	859.02	736.10	752.78						
139	931.72	1028.70	1018.35	788.78	726.26	871.33	747.11	764.63						
140	943.16	1037.77	1028.94	794.63	730.96	882.91	757.49	775.85						
141	953.96	1046.14	1034.84	800.14	735.32	893.79	767.24	786.40						
142	964.13	1053.80	1042.03	805.31	739.32	903.92	776.36	796.30						
143	973.67	1060.75	1048.48	810.14	742.94	913.21	784.89	805.59						
144	982.56	1067.01	1054.25	814.67	746.25	921.68	792.85	814.32						
145	990.83	1072.61	1059.39	818.88	749.31	929.38	800.28	822.49						
146	998.58	1077.62	1063.95	822.80	752.18	936.32	807.16	830.07						
147	1005.79	1082.00	1067.92	826.42	754.84	942.36	813.38	836.98						
148	1012.41	1085.71	1071.29	829.74	757.28	947.40	818.78	843.10						
149	1017.72	1088.23	1073.61	832.55	759.34	950.72	822.73	847.69						
150	1021.57	1089.52	1074.83	834.85	761.02	952.26	825.14	850.66						

(1) ノーズキャップ部

表C.2 C/C 温度センサ周り温度ミスマッチ

t (sec)	モジュール表面温度(K)					パッドアップ部表面温度(K)					一般部表面温度(K)				
	TA01	TA03	TA05	TA07	TA09	TA01	TA03	TA05	TA07	TA09	TA01	TA03	TA05	TA07	TA09
1	297.01	294.06	294.79	288.82	288.40	309.23	300.74	302.01	288.50	290.78	311.86	302.70	303.12	288.46	291.53
2	296.57	293.97	294.64	289.28	288.24	303.34	298.48	298.27	289.84	289.63	306.68	300.44	300.43	290.22	290.22
3	296.41	294.30	294.43	289.72	288.32	301.43	298.22	297.07	290.97	289.52	306.83	301.65	300.24	291.52	290.59
4	296.27	294.41	294.51	290.10	288.45	301.04	298.30	297.30	291.70	289.93	307.20	302.31	301.06	292.56	291.19
5	296.59	294.84	294.93	290.66	289.06	302.18	299.36	298.64	292.89	291.60	308.90	304.08	302.80	294.36	293.38
6	296.91	295.19	295.42	291.23	289.61	303.40	300.31	300.07	294.11	293.06	310.28	305.35	304.51	296.12	295.12
7	296.94	295.08	295.59	291.46	289.71	303.63	299.93	300.44	294.34	293.04	310.43	304.95	304.94	296.68	295.13
8	296.93	294.78	295.55	291.27	289.50	303.70	299.07	300.17	293.44	292.25	310.54	304.08	304.77	295.91	294.35
9	296.76	294.43	295.46	290.82	289.16	303.46	298.34	299.93	292.07	291.36	310.14	303.18	304.59	294.51	293.36
10	296.33	294.02	295.09	290.34	288.67	302.57	297.61	299.07	290.92	290.26	308.82	302.06	303.44	293.17	291.93
11	295.55	293.41	294.30	289.59	287.87	300.82	296.42	297.14	289.23	288.38	306.34	300.19	300.85	290.84	289.38
12	294.69	292.62	293.39	288.80	287.04	299.03	294.76	295.10	287.52	286.47	303.74	297.67	298.07	288.40	286.81
13	294.25	292.13	292.64	288.39	286.41	298.56	294.01	293.70	287.03	285.21	302.61	296.27	295.85	287.36	284.93
14	294.41	292.11	292.40	288.47	286.37	299.77	294.59	293.80	287.85	285.57	303.34	296.36	295.32	287.78	285.04
15	294.62	292.22	292.50	288.51	286.66	300.79	295.29	294.67	288.27	286.59	303.74	296.51	295.59	287.66	285.89
16	295.02	292.47	292.97	288.71	287.04	301.89	296.08	296.21	288.78	287.47	304.64	297.04	296.90	288.01	286.75
17	295.61	292.94	293.60	288.96	287.61	303.34	297.23	297.82	289.33	288.65	306.19	298.24	298.53	288.54	288.24
18	296.29	293.57	294.32	289.27	288.04	304.85	298.67	299.37	289.90	289.35	307.96	299.94	300.38	289.26	289.18
19	297.04	294.18	294.82	289.56	288.33	306.40	299.91	300.16	290.39	289.64	309.98	301.53	301.48	289.95	289.75
20	297.64	294.66	295.18	289.75	288.62	307.50	300.67	300.50	290.56	290.03	311.52	302.68	302.24	290.31	290.49
21	298.17	295.00	295.51	289.96	288.88	308.34	301.04	300.91	290.79	290.45	312.88	303.47	303.14	290.83	291.19
22	298.58	295.44	295.91	290.16	289.28	308.99	301.83	301.63	291.08	291.34	314.00	304.81	304.33	291.38	292.48
23	298.75	295.89	296.36	290.41	289.79	309.06	302.72	302.54	291.52	292.54	314.33	306.15	305.69	292.12	294.10
24	298.74	296.34	296.72	290.70	290.32	308.81	303.65	303.22	292.11	293.76	314.23	307.54	306.71	293.01	295.73
25	298.82	296.83	297.02	291.19	290.77	308.95	304.66	303.74	293.19	294.72	314.53	309.02	307.58	294.56	297.08
26	299.09	297.31	297.57	291.66	291.21	309.76	305.70	304.99	294.23	295.67	315.48	310.51	309.38	296.00	298.45
27	299.45	297.93	298.21	292.14	291.53	310.80	307.10	306.54	295.19	296.38	316.61	312.49	311.41	297.46	299.46
28	299.81	298.65	298.62	292.54	291.99	311.72	308.76	307.36	295.93	297.49	317.60	314.74	312.53	298.66	301.02
29	300.25	299.17	299.04	292.82	292.45	312.75	309.84	308.13	296.37	298.69	318.84	316.24	313.77	299.50	302.56
30	300.74	299.77	299.48	293.14	292.84	313.92	311.10	309.11	297.00	299.67	320.26	318.12	315.19	300.59	303.82
31	301.33	300.35	299.93	293.67	293.13	315.28	312.39	310.14	298.29	300.38	321.95	319.93	316.61	302.43	304.76
32	301.85	300.93	300.40	294.27	293.53	316.42	313.70	311.21	299.75	301.42	323.39	321.76	318.06	304.38	306.12
33	302.36	301.55	301.04	294.81	294.15	317.49	315.14	312.75	300.94	303.14	324.81	323.72	320.10	306.03	308.28
34	302.93	302.06	301.68	295.44	294.81	318.76	316.29	314.28	302.36	304.91	326.49	325.27	322.05	308.07	310.41
35	303.68	302.66	302.26	296.15	295.49	320.49	317.70	315.58	304.01	306.61	328.74	327.18	323.75	310.36	312.52
36	304.30	303.36	302.94	296.78	296.19	321.88	319.41	317.13	305.42	308.34	330.49	329.38	325.85	312.34	314.71
37	304.96	304.14	303.64	297.43	296.87	323.27	321.34	318.76	306.84	310.04	332.37	331.82	327.98	314.39	316.85
38	305.67	305.27	304.43	298.09	297.65	324.86	324.09	320.60	308.34	312.01	334.46	335.34	330.39	316.51	319.35
39	306.54	306.28	305.25	298.72	298.43	326.90	326.49	322.50	309.81	314.00	337.11	338.31	332.87	318.56	321.81
40	307.31	307.37	306.14	299.38	299.28	328.61	328.92	324.56	311.33	316.15	339.27	341.54	335.57	320.66	324.50
41	308.15	308.59	307.15	300.20	300.13	330.46	331.70	326.91	313.33	318.34	341.75	345.22	338.63	323.34	327.20
42	308.93	309.75	308.26	300.87	300.87	332.18	334.31	329.48	314.92	320.20	343.98	348.65	341.97	325.39	329.47
43	309.80	311.08	309.55	301.66	301.44	334.14	337.28	332.46	316.78	321.62	346.57	352.62	345.86	327.91	331.21
44	310.83	312.55	310.85	302.42	302.07	336.55	340.66	335.40	318.61	323.31	349.66	357.04	349.68	330.28	333.30
45	311.89	313.98	312.14	303.26	302.76	338.98	343.90	338.24	320.62	325.24	352.72	361.25	353.46	332.92	335.55
46	312.84	315.43	313.42	304.18	303.48	341.09	347.10	341.03	322.86	327.24	355.42	365.50	357.21	335.79	337.85
47	313.91	317.04	314.85	305.17	304.27	343.46	350.72	344.23	325.27	329.36	358.53	370.28	361.49	338.85	340.30
48	315.06	318.74	316.25	306.16	305.14	346.08	354.59	347.39	327.62	331.69	361.88	375.27	365.60	341.84	342.99
49	316.26	320.56	317.67	307.12	305.96	348.82	358.70	350.55	329.83	333.84	365.35	380.58	369.76	344.69	345.44
50	317.63	322.50	319.33	308.03	306.79	351.95	363.08	354.35	331.93	335.99	369.34	386.22	374.72	347.42	347.93
51	319.12	324.52	321.12	308.93	307.77	355.35	367.60	358.47	334.03	338.53	373.62	392.01	379.95	350.11	350.91
52	320.70	326.54	322.96	310.01	308.79	358.89	372.07	362.62	336.65	341.15	378.11	397.76	385.23	353.44	353.92
53	322.13	328.60	324.80	311.26	309.91	362.00	376.58	366.69	339.72	343.99	382.07	403.59	390.46	357.22	357.23
54	323.65	330.61	326.68	312.57	311.07	365.27	380.98	370.82	342.85	346.89	386.36	409.23	395.79	361.04	360.61
55	325.29	332.54	328.48	313.90	312.23	368.91	385.20	374.79	345.95	349.75	391.01	414.62	400.88	364.90	363.95
56	326.79	334.49	330.45	315.26	313.37	372.22	389.50	379.15	349.07	352.57	395.18	420.09	406.47	368.81	367.24
57	328.34	336.23	332.43	316.57	314.54	375.58	393.39	383.60	352.01	355.44	399.48	424.91	412.04	372.53	370.61
58	329.93	337.88	334.31	317.94	315.78	379.12	397.06	387.76	355.13	358.52	403.92	429.45	417.21	376.48	374.20
59	331.56	339.70	336.12	319.36	317.01	382.77	401.28	391.75	358.41	361.56	408.44	434.57	422.20	380.57	377.70
60	333.08	341.55	337.94	320.91	318.33	386.17	405.66	395.82	361.99	364.81	412.59	439.67	427.23	385.00	381.48
61	334.57	343.41	339.78	322.71	319.91	389.45	409.98	399.99	366.18	368.71	416.61	444.66	432.28	390.16	386.06
62	336.14	345.52	341.55	324.69	321.44	392.99	414.87	404.04	370.74	372.44	420.90	450.34	437.07	395.73	390.31

表C.2 つづき

63	337.75	347.78	343.51	326.70	323.03	396.69	420.11	408.50	375.27	376.22	425.28	456.35	442.37	401.29	394.73
64	339.47	350.19	345.69	328.73	324.76	400.61	425.58	413.56	379.71	380.33	429.90	462.62	448.27	406.83	399.56
65	341.30	352.89	348.05	330.85	326.70	404.77	431.60	418.95	384.31	384.94	434.76	469.64	454.51	412.63	404.97
66	343.39	355.67	350.64	332.94	328.87	409.50	437.71	424.77	388.85	390.07	440.34	476.72	461.31	418.32	411.01
67	345.76	358.57	353.44	335.02	331.05	414.84	443.90	430.93	393.34	395.14	446.62	484.02	468.53	423.93	416.93
68	348.32	361.69	356.28	337.23	333.25	420.47	450.50	437.05	398.18	400.13	453.28	491.86	475.74	429.97	422.83
69	351.03	364.94	359.38	339.42	335.30	426.29	457.34	443.62	403.01	404.79	460.24	499.98	483.64	435.89	428.31
70	353.85	368.31	362.64	341.64	337.31	432.21	464.33	450.50	407.84	409.37	467.42	508.31	491.86	441.81	433.72
71	356.64	371.73	365.97	343.79	339.18	437.98	471.33	457.41	412.53	413.72	474.47	516.66	500.14	447.51	438.75
72	359.61	375.27	369.36	345.98	341.01	444.07	478.52	464.35	417.31	418.02	481.98	525.28	508.52	453.30	443.70
73	362.63	378.80	372.74	348.38	342.92	450.31	485.66	471.18	422.60	422.57	489.62	533.79	516.76	459.65	448.88
74	365.80	382.17	376.06	351.01	345.01	456.81	492.35	477.86	428.45	427.57	497.56	541.73	524.81	466.58	454.53
75	368.94	385.34	379.25	353.55	347.27	463.20	498.59	484.21	434.02	432.95	505.33	549.16	532.42	473.07	460.57
76	372.08	388.43	382.38	356.17	349.66	469.52	504.72	490.44	439.60	438.53	513.04	556.39	539.86	479.70	466.82
77	375.19	391.65	385.56	359.01	352.20	475.79	511.23	496.87	445.68	444.36	520.63	563.95	547.44	486.92	473.39
78	378.21	394.96	388.73	362.02	354.72	481.83	518.00	503.37	452.15	450.06	527.88	571.63	554.92	494.54	479.79
79	381.14	398.55	391.84	365.20	357.23	487.68	525.31	509.68	458.88	455.66	534.85	579.87	562.09	502.46	486.12
80	384.18	402.27	395.15	368.33	360.01	493.81	532.88	516.38	465.38	461.82	542.11	588.30	569.71	510.08	493.16
81	387.24	406.26	398.82	371.46	362.89	500.12	540.84	523.88	471.74	468.26	549.39	597.20	578.16	517.63	500.40
82	390.48	410.58	402.78	374.79	365.76	506.76	549.37	531.94	478.52	474.56	557.01	606.78	587.14	525.69	507.47
83	394.03	415.19	407.02	378.14	368.70	514.03	558.35	540.41	485.36	480.92	565.30	616.88	596.62	533.70	514.67
84	397.79	419.99	411.47	381.36	371.69	521.68	567.52	549.11	491.80	487.38	573.96	627.23	606.40	541.20	521.94
85	401.69	425.03	416.16	384.49	374.75	529.46	576.97	558.07	498.00	493.96	582.79	637.99	616.57	548.46	529.33
86	405.79	430.23	421.00	387.69	377.98	537.46	586.55	567.16	504.42	500.87	591.93	648.94	626.94	555.91	537.10
87	409.95	435.67	426.04	390.90	381.16	545.45	596.40	576.49	510.88	507.65	601.07	660.25	637.66	563.28	544.62
88	414.20	441.52	431.26	394.34	384.44	553.46	606.96	586.03	517.78	514.54	610.27	672.42	648.60	571.14	552.33
89	418.67	447.54	436.85	397.95	387.81	561.85	617.77	596.12	525.06	521.68	619.94	684.80	660.26	579.32	560.28
90	423.43	453.70	442.78	401.77	391.17	570.76	628.59	606.82	532.63	528.71	630.18	697.22	672.56	587.81	568.04
91	428.45	460.00	448.90	405.81	394.52	580.12	639.47	617.73	540.55	535.61	640.89	709.74	685.06	596.71	575.65
92	433.67	466.61	455.22	409.99	397.91	589.67	650.82	628.78	548.62	542.52	651.81	722.84	697.80	605.79	583.25
93	439.19	473.28	461.76	414.29	401.56	599.61	662.19	640.07	556.74	549.99	663.26	735.82	710.81	614.96	591.50
94	444.97	480.16	468.40	418.73	405.42	609.96	673.73	651.39	565.01	557.87	675.17	749.02	723.83	624.35	600.14
95	450.84	487.20	475.31	423.51	409.45	620.29	685.45	663.01	573.85	565.97	687.02	762.35	737.22	634.44	609.02
96	456.89	494.55	482.53	428.49	413.66	630.76	697.58	675.14	583.04	574.28	699.11	776.12	751.14	644.85	618.16
97	463.10	502.32	489.93	433.72	418.13	641.41	710.40	687.45	592.48	583.00	711.37	790.69	765.15	655.61	627.81
98	469.56	510.34	497.64	439.15	422.83	652.39	723.56	700.09	602.16	592.07	723.99	805.64	779.54	666.65	637.85
99	476.15	518.78	505.71	444.82	427.72	663.51	737.19	713.26	612.12	601.38	736.70	821.25	794.61	678.05	648.17
100	482.97	527.47	514.09	450.78	432.79	674.87	751.09	726.83	622.53	610.88	749.66	837.20	810.17	690.00	658.72
101	490.11	536.39	522.79	456.98	438.07	686.68	765.08	740.72	633.24	620.64	763.10	853.32	826.17	702.26	669.58
102	497.65	545.84	531.92	463.38	443.58	699.12	779.73	755.15	644.14	630.75	777.21	870.36	842.88	714.75	680.86
103	505.71	555.75	541.61	470.06	449.45	712.37	795.16	770.36	655.38	641.45	792.30	888.16	860.56	727.66	692.82
104	514.08	566.08	551.66	476.95	455.58	726.00	811.19	786.01	666.85	652.54	807.86	906.55	878.73	740.81	705.16
105	522.79	576.88	562.05	483.90	461.84	739.89	827.83	802.02	678.23	663.68	823.87	925.58	897.24	753.80	717.56
106	531.84	588.15	573.05	491.31	468.47	754.12	845.07	818.87	690.21	675.32	840.38	945.25	916.74	767.58	730.59
107	541.33	600.03	584.74	499.12	475.38	768.86	863.17	836.83	702.91	687.41	857.60	965.85	937.44	782.07	744.08
108	551.44	612.63	597.17	507.38	482.52	784.47	882.33	855.94	716.26	699.75	875.91	987.63	959.34	797.39	757.80
109	562.02	625.85	610.29	516.18	490.11	800.84	902.37	876.03	730.37	712.67	894.96	1010.27	982.28	813.69	772.25
110	573.07	639.51	624.01	525.27	498.05	817.82	922.83	896.84	744.75	726.15	914.64	1033.27	1005.95	830.35	787.31
111	584.65	653.61	638.01	534.53	506.25	835.45	943.61	917.74	759.03	739.87	935.05	1056.59	1029.60	847.01	802.73
112	596.51	668.07	652.40	544.14	514.72	853.38	964.58	938.77	773.56	753.83	955.65	1080.02	1053.39	864.15	818.53
113	608.61	682.68	667.13	554.08	523.42	871.36	985.41	960.01	788.52	767.97	976.24	1103.12	1077.30	881.75	834.57
114	621.12	697.43	682.10	564.27	532.31	889.72	1006.01	981.30	803.79	782.23	997.23	1125.79	1101.06	899.56	850.79
115	633.93	712.40	697.50	574.75	541.46	908.42	1026.55	1002.92	819.36	796.81	1018.42	1148.22	1125.04	917.62	867.29
116	647.10	727.89	713.37	585.46	550.88	927.46	1047.65	1025.05	835.18	811.78	1039.84	1171.14	1149.35	935.82	884.12
117	660.62	743.80	729.59	596.48	560.53	946.85	1069.28	1047.49	851.33	827.03	1061.48	1194.30	1173.70	954.29	901.13
118	674.35	760.07	746.04	607.58	570.28	966.30	1091.18	1069.88	867.43	842.28	1082.94	1217.46	1197.68	972.48	917.99
119	688.24	776.63	762.68	618.76	580.20	985.64	1113.12	1092.06	883.36	857.58	1104.08	1240.39	1221.17	990.35	934.83
120	702.03	793.32	779.44	630.02	590.12	1004.41	1134.66	1113.91	899.17	872.69	1124.32	1262.55	1244.01	1007.93	951.31

(2) エレボン部

表 C.2 C/C 温度センサ周り温度ミスマッチ

t (sec)	モジュール表面温度(K)			パッドアップ部表面温度(K)			一般部表面温度(K)		
	TA11	TA15	TA17	TA11	TA15	TA17	TA11	TA15	TA17
1	287.59	288.31	287.75	284.8	288.21	286.73	283.99	288.34	285.99
2	288.42	288.26	288.32	287.91	288.27	288.11	287.81	288.18	288.35
3	288.6	288.31	288.38	288.78	288.33	288.65	288.03	288.31	288.48
4	289.01	288.4	288.56	289.57	288.58	288.94	289.15	288.62	288.92
5	289.42	288.49	288.62	290.43	288.79	289.01	290.35	288.89	289.05
6	289.55	288.43	288.58	290.45	288.57	288.77	290.56	288.62	288.85
7	289.58	288.4	288.55	290.22	288.43	288.63	290.61	288.54	288.79
8	289.52	288.32	288.58	289.91	288.22	288.72	290.46	288.29	288.95
9	289.42	288.29	288.65	289.61	288.19	288.93	290.24	288.26	289.21
10	289.37	288.29	288.63	289.52	288.25	288.88	290.18	288.29	289.12
11	289.36	288.27	288.55	289.6	288.23	288.62	290.26	288.22	288.83
12	289.38	288.2	288.57	289.76	288.04	288.72	290.41	287.96	289
13	289.32	288.2	288.55	289.64	288.07	288.71	290.19	288	288.92
14	289.41	288.34	288.59	289.94	288.48	288.85	290.59	288.5	289.1
15	289.54	288.47	288.78	290.35	288.82	289.39	291.04	288.87	289.78
16	289.65	288.58	288.98	290.63	289.05	289.89	291.37	289.19	290.38
17	289.74	288.71	289.19	290.82	289.3	290.37	291.64	289.58	291.04
18	289.84	288.87	289.25	291.02	289.66	290.4	291.95	290.12	291.14
19	290.04	289.11	289.28	291.52	290.22	290.36	292.66	290.92	291.24
20	290.21	289.46	289.26	291.96	291.06	290.27	293.22	292.09	291.23
21	290.46	290.02	289.37	292.54	292.45	290.57	294.04	293.97	291.68
22	290.73	290.34	289.41	293.21	293.09	290.73	294.96	294.88	291.85
23	290.95	290.41	289.6	293.67	292.98	291.23	295.64	295.02	292.53
24	291.23	290.67	289.93	294.29	293.49	292.14	296.57	296.02	293.68
25	291.5	290.91	290.21	294.95	294.13	292.83	297.51	296.95	294.55
26	291.78	290.97	290.26	295.58	294.22	292.81	298.44	297.15	294.61
27	292.04	290.98	290.24	296.19	294.21	292.6	299.33	297.29	294.52
28	292.28	291.02	290.21	296.75	294.39	292.52	300.16	297.59	294.54
29	292.61	291.23	290.08	297.58	295.1	292.24	301.33	298.47	294.17
30	293.14	291.64	290.03	298.98	296.31	292.23	303.19	299.93	294.15
31	293.77	292.17	290.08	300.57	297.76	292.54	305.26	301.69	294.42
32	294.28	292.82	290.24	301.74	299.38	293.09	306.84	303.77	294.99
33	294.75	293.38	290.53	302.77	300.66	293.93	308.38	305.49	295.95
34	295.22	293.96	290.95	303.84	301.94	295.03	309.97	307.36	297.29
35	295.61	294.45	291.46	304.72	302.99	296.28	311.26	308.91	298.88
36	295.97	294.72	292.04	305.58	303.5	297.62	312.53	309.8	300.7
37	296.39	294.86	292.52	306.68	303.73	298.64	314.05	310.33	302.15
38	296.8	295.15	292.89	307.79	304.54	299.31	315.49	311.51	303.26
39	296.98	295.46	293.27	308.24	305.47	300.08	316.06	312.65	304.53
40	297.29	295.64	293.73	309.08	306.05	301.18	317.22	313.32	306.16
41	297.55	295.8	294.05	309.9	306.56	301.92	318.17	313.92	307.22
42	297.57	296.22	294.17	310.07	307.8	302.11	318.27	315.44	307.62
43	297.72	296.59	294.36	310.59	308.93	302.57	318.88	316.65	308.39
44	298	296.74	294.68	311.57	309.34	303.52	319.91	317.04	309.62
45	298.25	296.93	295	312.43	309.88	304.49	320.72	317.7	310.77
46	298.38	297.33	295.25	312.91	311.05	305.17	321.09	319.09	311.57
47	298.79	297.58	295.49	314.1	311.84	305.83	322.46	319.84	312.41
48	299.29	297.8	296.02	315.55	312.45	307.31	324.02	320.5	314.27
49	299.93	298.2	296.55	317.24	313.56	308.75	325.95	321.81	315.95
50	300.62	298.72	296.8	318.99	315.02	309.33	328.02	323.45	316.63
51	301.26	299.27	297.02	320.48	316.47	309.81	329.84	325.11	317.34
52	301.98	299.88	297.39	322.14	317.98	310.81	331.98	326.93	318.64
53	302.73	300.51	297.81	323.91	319.5	311.99	334.26	328.81	320.02
54	303.57	301.27	298.3	325.9	321.33	313.32	336.83	331.13	321.61
55	304.46	302.08	298.85	327.99	323.28	314.75	339.53	333.59	323.32
56	305.25	302.9	299.37	329.8	325.19	316.04	341.87	336.04	324.9
57	306.17	303.82	300.03	331.9	327.32	317.7	344.67	338.83	327
58	306.92	304.79	300.68	333.64	329.6	319.31	346.93	341.8	329
59	307.7	305.79	301.3	335.45	331.9	320.77	349.34	344.81	330.87
60	308.73	306.64	302.01	337.97	333.8	322.47	352.59	347.33	333.08

表 C.2 つづき

61	309.75	307.57	302.75	340.46	335.93	324.28	355.67	350.21	335.39
62	310.83	308.62	303.62	343.03	338.42	326.39	358.93	353.46	338.09
63	312.1	309.8	304.55	346.06	341.28	328.65	362.79	357.12	340.96
64	313.4	311.13	305.55	349.14	344.46	331.02	366.66	361.17	344
65	314.76	312.61	306.58	352.29	347.93	333.44	370.7	365.59	347.14
66	316.42	313.96	307.81	356.16	351.03	336.35	375.68	369.57	350.92
67	318.03	315.36	309.01	359.87	354.14	339.16	380.36	373.69	354.55
68	319.44	316.72	310.36	362.95	357.25	342.26	384.38	377.77	358.63
69	320.92	318.13	311.87	366.22	360.46	345.77	388.76	381.96	363.2
70	322.44	319.63	313.42	369.71	363.96	349.35	393.26	386.46	367.85
71	324.11	321.22	314.98	373.58	367.7	352.86	398.2	391.18	372.46
72	325.72	322.89	316.52	377.32	371.58	356.32	402.87	396.07	377.05
73	327.42	324.51	318.19	381.2	375.34	360.12	407.78	400.78	382.08
74	329.29	326.31	320.14	385.57	379.48	364.63	413.23	406.03	387.92
75	331.22	328.12	322.13	390.03	383.67	369.23	418.74	411.23	393.78
76	333.06	330.09	324.16	394.21	388.17	373.8	423.89	416.86	399.68
77	334.91	332.08	326.24	398.38	392.74	378.45	429.11	422.51	405.72
78	336.75	333.95	328.47	402.57	396.95	383.45	434.29	427.73	412.18
79	338.67	335.61	330.68	406.95	400.62	388.42	439.68	432.32	418.54
80	340.62	337.24	332.89	411.45	404.29	393.34	445.13	436.93	424.85
81	342.4	338.77	335.06	415.56	407.88	398.18	450.05	441.29	431.05
82	344.16	340.12	337.13	419.55	411.09	402.82	454.86	445.07	436.94
83	345.98	341.41	339.18	423.78	414.23	407.45	459.9	448.71	442.79
84	348.12	342.81	340.97	428.81	417.74	411.55	465.82	452.69	447.86
85	350.4	344.41	342.66	434.18	421.76	415.45	472.01	457.15	452.67
86	352.93	346.29	344.5	439.96	426.42	419.84	478.76	462.3	457.97
87	355.79	348.8	346.56	446.41	432.45	424.87	486.34	469.13	463.83
88	358.98	351.8	349.12	453.46	439.46	431.03	494.68	477.1	470.99
89	362.17	354.71	352.17	460.34	445.92	438.25	502.85	484.48	479.31
90	365.41	357.46	355.32	467.09	451.63	445.42	511.05	491.31	487.6
91	368.68	360.03	358.42	473.87	456.83	452.14	519.36	497.73	495.56
92	372.08	362.78	361.44	480.92	462.52	458.53	528.02	504.79	503.32
93	375.47	365.79	364.52	487.95	468.93	465.01	536.58	512.58	511.26
94	379.08	368.94	367.9	495.4	475.67	472.24	545.68	520.63	520.07
95	382.7	372.28	371.37	502.9	482.73	479.69	554.72	529.1	528.98
96	386.33	375.69	374.97	510.39	489.86	487.31	563.76	537.63	538.12
97	390.06	379.09	378.63	518.09	496.84	494.98	573.03	546.03	547.32
98	393.79	382.39	382.23	525.79	503.55	502.43	582.21	554.13	556.25
99	397.78	385.71	385.72	533.95	510.33	509.63	591.98	562.35	564.9
100	402	388.98	389.13	542.64	517.08	516.71	602.24	570.42	573.37
101	406.56	392.23	392.52	551.93	523.75	523.77	613.19	578.34	581.74
102	411.65	395.54	396.01	562.23	530.56	531.07	625.31	586.37	590.3
103	417.07	398.98	399.64	573.08	537.7	538.69	638.04	594.7	599.13
104	422.74	402.73	403.57	584.18	545.45	546.92	651.12	603.68	608.59
105	428.98	406.71	407.8	596.18	553.69	555.75	665.43	613.13	618.67
106	435.65	410.98	412.38	608.89	562.38	565.14	680.54	623.13	629.4
107	442.92	415.49	417.26	622.51	571.42	575.01	696.81	633.54	640.7
108	450.77	420.14	422.49	637.09	580.56	585.36	714.23	644.12	652.65
109	459.17	425.22	427.94	652.47	590.4	595.97	732.62	655.64	664.93
110	468.23	430.71	433.74	668.81	601.03	607.02	752.24	668.04	677.84
111	477.66	436.61	439.99	685.59	612.24	618.8	772.37	681.16	691.67
112	487.57	442.7	446.54	702.86	623.62	631.05	793.3	694.51	706.02
113	497.89	449.07	453.16	720.59	635.28	643.2	815.03	708.32	720.29
114	508.54	455.64	459.93	738.67	647.19	655.36	837.38	722.46	734.69
115	519.54	462.58	467.18	757.13	659.65	668.31	860.32	737.29	750.09
116	530.92	469.81	474.9	776.01	672.56	682.16	883.86	752.6	766.4
117	542.71	477.46	483.06	795.51	686.1	696.69	908.07	768.67	783.47
118	554.83	485.65	491.6	815.57	700.52	711.64	932.7	785.78	801.19
119	567.19	494.52	500.58	835.92	716	727.14	957.48	804.26	819.75
120	579.89	504.54	510.24	856.7	733.4	743.67	982.61	825.24	839.7
121	593.22	516.38	520.81	878.49	753.95	761.66	1008.76	850.14	861.49
122	607.36	530.46	532.81	901.65	778.27	781.94	1036.28	879.77	886.22
123	622.57	547.21	546.76	926.56	806.99	805.64	1065.6	914.8	914.98
124	639.42	566.18	563.23	954.1	839.26	833.68	1097.85	954	948.85
125	659.01	585.88	582.08	986.09	872.07	865.65	1135.22	993.8	987.25
126	682.9	604.21	602.09	1025.23	901.26	899.06	1180.81	1029.45	1027.19
127	709.48	620.53	621.88	1069.08	925.39	930.93	1230.94	1059.75	1065.43

表 C.2 つづき

128	735.54	635.91	640.72	1110.94	946.92	959.78	1277.98	1087.57	1100.53
129	759.72	651.28	658.95	1146.96	968.74	986.49	1318.43	1115.47	1133.51
130	781.91	666.79	676.8	1177.08	991.6	1012.25	1352.66	1143.62	1165.27

付録D.セラミックスサイクル空力加熱センサによる加熱率推定結果

セラミックスサイクル空力加熱センサにおける空力加熱率の履歴を計測温度履歴、推定誤差履歴と共に表D.1に示す。

表D.1(1) セラミックスサイクル空力加熱センサにおける表面温度計測結果

t sec	Vel m/s	alp deg	beta deg	rho kg/m ³	Temp K	TA19 K	TA21 K	TA24 K	TA27 K	TA30 K	TA33 K	TA35 K	TA38 K	TA40 K	TA42 K	TA44 K	TA46 K	TA48 K
1	3.8817E+03	2.22	-1.02	1.6944E-07	223.93	291.95	289.31	289.92	293.81	289.85	291.80	292.56	293.57	288.62	288.52	286.68	283.37	285.00
2	3.8820E+03	1.86	-0.76	1.7334E-07	223.28	292.38	289.21	289.91	294.27	290.17	292.23	292.91	293.64	288.68	288.65	287.16	283.02	285.16
3	3.8822E+03	0.78	-0.25	1.7753E-07	222.60	292.90	289.64	290.04	294.60	290.17	292.33	292.79	293.93	288.73	288.51	286.86	283.52	284.99
4	3.8825E+03	0.17	0.13	1.8195E-07	222.00	293.36	289.43	290.23	295.05	290.18	292.32	293.00	293.93	288.65	288.50	286.84	283.55	284.99
5	3.8829E+03	0.59	0.35	1.8673E-07	221.36	294.36	289.74	290.79	295.86	290.51	292.61	293.28	294.19	289.11	288.58	286.93	283.78	285.27
6	3.8832E+03	1.79	0.51	1.9192E-07	220.63	295.51	289.98	291.18	296.65	290.84	293.01	293.84	294.82	289.63	288.63	287.50	284.08	285.83
7	3.8836E+03	3.38	0.63	1.9744E-07	219.91	296.05	290.24	291.16	297.09	290.84	293.16	293.98	294.80	289.77	288.93	287.56	284.05	285.76
8	3.8841E+03	5.14	0.67	2.0332E-07	219.22	296.39	290.16	291.21	297.85	291.06	293.11	293.83	294.82	289.66	288.71	287.39	283.74	285.69
9	3.8846E+03	7.00	0.67	2.0977E-07	218.38	297.02	290.42	291.26	298.03	291.06	292.98	293.81	294.72	289.90	288.74	287.36	283.65	285.30
10	3.8851E+03	9.06	0.65	2.1659E-07	217.59	297.55	290.60	291.37	298.47	291.07	292.99	293.84	294.82	289.98	288.47	287.36	283.72	284.96
11	3.8857E+03	11.23	0.60	2.2394E-07	216.76	297.96	290.70	291.39	299.00	291.38	293.20	294.07	294.88	289.92	288.27	287.27	283.34	284.86
12	3.8864E+03	13.39	0.50	2.3170E-07	216.03	297.45	290.33	291.28	298.79	291.06	292.61	293.81	294.46	289.32	287.56	286.49	282.66	283.87
13	3.8871E+03	15.54	0.30	2.4002E-07	215.30	297.66	290.52	291.36	299.23	291.19	292.99	293.81	294.72	289.33	287.56	286.49	282.55	283.59
14	3.8878E+03	17.71	0.16	2.4887E-07	214.60	298.30	291.04	291.59	299.78	291.84	293.23	293.84	294.86	289.40	287.56	286.48	282.22	283.41
15	3.8887E+03	19.89	0.11	2.5837E-07	213.88	298.42	291.27	291.94	300.17	292.28	293.70	294.31	295.32	289.32	287.55	286.38	282.22	283.29
16	3.8896E+03	22.07	0.07	2.6861E-07	213.10	298.64	291.94	292.51	300.61	292.58	293.95	294.51	295.69	289.32	287.44	286.49	282.17	282.86
17	3.8905E+03	24.26	0.10	2.7956E-07	212.33	299.06	292.82	292.95	301.04	293.24	294.65	294.89	296.15	289.32	287.53	286.49	281.64	282.37
18	3.8915E+03	26.45	0.14	2.9119E-07	211.65	298.96	293.47	293.37	301.37	294.02	295.04	295.49	296.54	289.32	287.33	286.49	281.44	282.33
19	3.8926E+03	28.38	0.17	3.0373E-07	210.91	299.07	294.33	293.83	301.80	294.97	295.56	296.09	297.22	289.31	287.56	286.49	281.43	281.96
20	3.8937E+03	30.13	0.21	3.1718E-07	210.18	299.07	295.28	294.48	302.22	296.18	296.28	296.82	298.05	289.21	287.56	286.47	281.30	281.61
21	3.8949E+03	31.86	0.26	3.3151E-07	209.52	299.07	296.49	295.18	302.73	297.19	297.23	297.60	298.88	289.32	287.56	286.28	281.06	281.49
22	3.8962E+03	33.58	0.33	3.4686E-07	208.88	299.24	297.61	295.96	302.96	298.44	297.93	298.21	299.66	289.33	287.57	286.49	280.65	281.34
23	3.8976E+03	35.31	0.40	3.6353E-07	208.14	299.15	298.86	296.85	303.50	299.63	299.12	299.20	300.81	289.38	287.75	286.49	280.61	281.07
24	3.8989E+03	37.03	0.49	3.8145E-07	207.41	299.07	300.34	297.88	304.04	301.14	300.15	300.26	301.91	289.10	288.22	286.48	280.31	280.81
25	3.9004E+03	38.76	0.59	4.0060E-07	206.75	299.15	301.66	298.63	304.26	302.75	301.31	301.28	303.10	289.31	288.22	286.40	280.43	280.56
26	3.9019E+03	40.47	0.70	4.2090E-07	206.10	299.15	303.36	299.66	304.89	304.60	302.58	302.37	304.32	289.20	288.24	286.61	280.10	280.47
27	3.9035E+03	42.17	0.71	4.4247E-07	205.46	299.07	305.30	300.76	305.40	308.59	303.88	303.64	306.03	289.20	288.38	286.61	279.99	280.40
28	3.9051E+03	43.85	0.63	4.6570E-07	204.79	299.07	307.41	301.97	305.74	308.60	305.43	305.19	307.68	289.18	288.57	286.66	279.65	279.84
29	3.9067E+03	45.50	0.51	4.9076E-07	204.11	299.06	309.42	303.19	306.38	310.61	307.17	306.85	309.26	288.93	288.52	287.09	279.36	279.93
30	3.9084E+03	47.07	0.36	5.1776E-07	203.46	298.84	311.70	304.50	306.89	313.14	309.11	308.62	310.81	288.59	288.81	286.90	279.43	279.92
31	3.9101E+03	48.18	0.23	5.4687E-07	202.83	298.51	314.11	305.98	306.99	315.77	311.19	310.36	313.20	288.49	289.16	287.25	279.22	279.66
32	3.9118E+03	48.70	0.10	5.7827E-07	202.23	298.30	316.86	307.64	307.74	318.49	313.16	312.38	315.39	288.50	289.29	287.37	279.11	279.20
33	3.9130E+03	48.93	-0.06	6.1217E-07	201.66	298.30	319.83	309.33	308.28	321.49	315.45	314.22	317.77	288.59	289.57	287.47	278.95	278.97
34	3.9138E+03	49.01	-0.19	6.4889E-07	201.08	298.08	322.72	311.08	308.75	324.35	317.78	316.73	320.17	288.49	290.15	287.52	278.44	278.96
35	3.9146E+03	49.01	-0.13	6.8857E-07	200.53	297.97	325.86	312.99	309.11	327.83	320.60	319.17	322.61	288.49	290.61	287.94	278.43	278.79
36	3.9154E+03	48.95	0.12	7.3154E-07	200.00	297.76	329.41	314.97	309.86	331.33	323.04	321.99	325.71	288.47	290.98	288.05	278.35	278.41
37	3.9162E+03	48.83	0.48	7.7815E-07	199.48	297.85	332.83	317.05	310.69	334.77	325.82	324.43	328.46	288.37	291.62	288.17	278.31	278.25
38	3.9170E+03	48.67	0.79	8.2868E-07	198.98	297.53	336.60	319.26	311.21	338.46	328.58	326.89	331.04	288.47	292.24	288.32	277.97	278.00

表D.1(1) つづき

39	3.9178E+03	48.46	1.10	8.8348E-07	198.51	297.53	340.46	321.58	312.07	342.13	331.71	329.65	334.10	288.37	292.55	288.76	277.81	277.99
40	3.9187E+03	48.20	1.38	9.4304E-07	198.05	297.53	344.32	324.02	312.79	345.94	334.54	332.63	336.83	288.47	293.22	288.90	277.81	277.80
41	3.9195E+03	47.91	1.62	1.0078E-06	197.62	297.36	348.21	326.74	313.52	349.87	337.53	335.22	339.70	288.35	293.54	289.26	277.75	277.61
42	3.9204E+03	47.60	1.78	1.0782E-06	197.21	297.35	352.12	329.44	314.38	353.83	340.43	338.13	342.59	288.35	293.96	289.59	277.23	277.51
43	3.9213E+03	47.47	1.89	1.1548E-06	196.82	296.93	356.43	329.14	315.14	357.72	343.82	341.20	345.62	288.37	294.70	289.71	277.12	277.34
44	3.9221E+03	47.58	1.99	1.2383E-06	196.46	297.09	360.85	334.97	315.94	361.93	346.69	344.02	348.62	288.47	294.90	289.87	277.02	277.32
45	3.9231E+03	47.86	2.06	1.3294E-06	196.12	296.93	365.38	337.91	317.06	366.22	350.05	346.90	351.84	288.35	295.78	290.32	277.02	277.19
46	3.9240E+03	48.17	2.10	1.4287E-06	195.81	297.10	369.92	341.05	318.02	370.56	353.39	350.11	355.14	288.33	296.27	290.63	276.99	277.04
47	3.9249E+03	48.43	2.15	1.5371E-06	195.53	297.19	374.95	344.20	319.06	375.33	356.71	353.55	358.46	288.13	296.87	290.89	276.78	276.78
48	3.9259E+03	48.63	2.05	1.6556E-06	195.28	297.27	379.94	347.56	320.00	379.98	360.43	356.77	361.95	288.47	297.69	291.27	276.65	276.64
49	3.9268E+03	48.76	1.84	1.7851E-06	195.06	297.01	385.18	351.22	321.21	384.63	364.14	360.07	365.54	288.35	298.42	291.67	276.43	276.50
50	3.9278E+03	48.82	1.61	1.9268E-06	194.87	297.28	390.46	354.79	322.17	389.50	368.05	363.73	369.33	288.37	299.28	292.07	276.22	276.36
51	3.9288E+03	48.83	1.38	2.0818E-06	194.72	297.44	396.02	358.63	323.36	394.58	371.88	367.48	373.01	288.49	299.93	292.35	276.22	276.24
52	3.9298E+03	48.92	1.12	2.2517E-06	194.59	297.28	401.55	362.71	324.34	399.69	376.01	371.32	376.93	288.49	301.12	292.72	276.21	276.19
53	3.9308E+03	49.04	0.85	2.4378E-06	194.51	297.53	407.58	366.82	325.60	404.96	380.16	375.35	380.95	288.49	301.93	293.04	276.06	275.79
54	3.9318E+03	49.10	0.56	2.6419E-06	194.46	297.45	413.63	371.15	326.91	410.42	384.48	379.39	384.98	288.49	302.88	293.61	276.21	275.67
55	3.9328E+03	49.09	0.21	2.8660E-06	194.44	297.54	419.80	375.70	328.05	415.93	389.01	383.58	389.39	288.50	304.12	294.00	276.02	275.64
56	3.9338E+03	49.04	-0.21	3.1125E-06	194.44	297.64	426.14	380.41	329.61	421.40	393.66	387.92	393.82	288.63	305.11	294.70	275.76	275.40
57	3.9347E+03	48.95	-0.63	3.3841E-06	194.43	297.54	432.52	385.17	330.69	427.08	398.49	392.20	398.24	288.83	306.62	295.29	275.69	275.51
58	3.9349E+03	48.93	-0.73	3.6837E-06	194.42	297.87	439.25	390.03	331.92	432.63	403.26	396.72	402.99	288.75	308.22	295.82	275.75	275.38
59	3.9349E+03	49.13	-0.61	4.0144E-06	194.41	298.19	445.83	395.05	333.33	438.46	408.20	401.35	407.82	289.00	309.49	296.45	275.59	275.38
60	3.9349E+03	49.44	-0.50	4.3798E-06	194.39	298.30	452.70	400.13	334.55	444.41	413.41	406.15	412.64	289.32	311.15	297.15	275.59	275.38
61	3.9348E+03	49.69	-0.44	4.7841E-06	194.38	298.31	459.64	405.59	335.90	450.63	418.57	410.90	417.58	289.32	312.71	297.76	275.58	275.38
62	3.9346E+03	49.87	-0.42	5.2317E-06	194.37	298.64	466.85	411.17	337.65	457.12	423.90	416.30	422.82	289.33	314.29	298.56	275.49	275.37
63	3.9344E+03	49.95	-0.39	5.7278E-06	194.35	298.96	474.67	417.00	339.20	463.88	429.50	421.53	428.25	289.45	316.07	299.44	275.58	275.29
64	3.9342E+03	49.94	-0.43	6.2783E-06	194.33	299.08	482.87	423.31	341.21	470.98	435.61	427.25	434.03	289.80	317.82	300.40	275.49	275.37
65	3.9340E+03	49.81	-0.48	6.8716E-06	194.79	299.51	491.86	429.78	343.31	478.53	441.78	433.16	440.16	289.91	319.80	301.38	275.58	275.29
66	3.9337E+03	49.58	-0.45	7.5097E-06	195.71	299.72	501.35	436.90	345.32	486.72	448.75	439.65	446.74	290.13	322.13	302.36	275.49	275.38
67	3.9336E+03	49.23	-0.33	8.2085E-06	196.72	300.34	511.15	444.63	347.67	494.96	455.93	446.40	453.38	290.39	324.60	303.49	275.58	275.40
68	3.9335E+03	48.79	-0.25	8.9779E-06	197.75	300.46	521.06	452.54	349.92	503.35	463.98	453.39	460.40	290.83	326.84	304.56	275.49	275.55
69	3.9334E+03	48.37	-0.31	9.8252E-06	198.79	301.22	531.59	460.77	352.56	512.14	470.60	460.47	467.52	291.02	329.41	305.82	275.59	275.81
70	3.9333E+03	48.20	-0.39	1.0759E-05	199.84	301.98	542.32	469.53	355.19	521.03	478.47	467.80	475.10	291.63	332.11	306.90	275.61	275.87
71	3.9331E+03	48.25	-0.50	1.1788E-05	200.90	302.51	553.56	478.70	358.17	530.40	486.79	475.66	483.05	291.83	334.85	308.24	275.78	276.36
72	3.9329E+03	48.41	-0.69	1.2928E-05	201.97	303.36	564.96	488.06	361.13	540.07	495.19	483.75	491.07	292.50	337.73	309.45	275.90	276.25
73	3.9327E+03	48.70	-0.83	1.4177E-05	203.04	304.11	576.43	497.77	364.28	549.71	503.84	492.13	499.27	292.79	340.66	311.10	276.22	276.39
74	3.9325E+03	49.07	-0.84	1.5554E-05	204.12	304.83	588.41	507.71	367.65	559.80	512.67	500.57	507.94	293.51	343.80	312.90	276.22	278.47
75	3.9319E+03	49.51	-0.81	1.7079E-05	205.21	305.82	600.39	517.82	371.14	569.98	521.90	509.32	516.70	293.98	347.23	314.36	276.22	277.25
76	3.9309E+03	49.97	-0.76	1.8763E-05	206.31	306.79	612.69	528.24	374.66	580.50	531.41	518.46	525.60	294.56	350.74	316.22	276.43	277.22
77	3.9295E+03	50.35	-0.68	2.0623E-05	207.42	307.62	624.95	539.06	378.41	591.08	540.87	527.77	534.88	294.90	354.20	318.24	276.86	277.32
78	3.9280E+03	50.55	-0.62	2.2679E-05	208.53	308.68	637.40	550.12	382.45	601.95	550.84	537.28	544.46	295.57	358.00	320.33	276.90	277.42
79	3.9265E+03	50.49	-0.52	2.4952E-05	209.65	309.72	649.81	561.26	386.22	612.96	560.78	547.15	553.85	296.39	361.44	322.78	277.11	277.69
80	3.9250E+03	50.13	-0.51	2.7466E-05	210.77	310.79	662.38	572.56	390.94	624.39	570.95	557.31	563.75	296.90	365.29	325.15	277.13	277.89
81	3.9233E+03	49.51	-0.80	3.0247E-05	211.89	312.02	675.48	584.16	394.92	636.06	581.50	567.68	573.78	297.65	369.52	327.65	277.54	278.12

表D.1(1) つづき

82	3.9216E+03	48.76	-1.26	3.3326E-05	213.02	313.20	688.27	595.96	399.39	647.75	592.41	578.41	584.14	298.59	373.75	329.78	277.77	278.39
83	3.9203E+03	48.14	-1.55	3.6734E-05	214.15	314.30	701.00	607.67	403.65	659.53	603.41	589.37	594.60	299.48	378.41	332.22	277.89	278.79
84	3.9197E+03	47.89	-1.37	4.0510E-05	215.28	315.80	713.65	619.46	408.09	671.52	614.85	600.72	605.84	300.89	383.20	334.85	278.49	278.96
85	3.9192E+03	48.14	-0.91	4.4692E-05	216.40	317.05	726.64	631.30	412.54	684.02	626.41	612.48	616.66	301.99	388.35	337.64	278.66	278.97
86	3.9186E+03	48.75	-0.56	4.9327E-05	217.52	318.42	739.96	643.47	417.12	696.88	638.30	624.30	628.06	303.22	393.57	340.42	279.17	279.53
87	3.9179E+03	49.45	-0.58	5.4466E-05	218.64	319.86	753.53	655.98	422.48	710.06	*650.45	636.52	639.63	304.48	398.84	342.88	279.64	279.81
88	3.9169E+03	49.90	-0.85	6.0164E-05	219.75	321.43	767.73	668.84	427.85	724.05	662.91	649.14	651.64	306.27	404.10	346.13	279.78	280.21
89	3.9159E+03	49.93	-0.99	6.6383E-05	221.16	323.03	782.31	682.20	433.45	738.38	675.94	662.23	664.06	307.63	409.75	349.72	280.08	280.54
90	3.9147E+03	49.58	-0.84	7.3192E-05	222.78	324.51	796.80	695.86	439.29	752.85	689.03	675.68	676.75	309.07	415.57	353.66	280.70	280.81
91	3.9138E+03	49.10	-0.57	8.0709E-05	224.39	326.19	811.12	709.75	445.08	767.66	702.35	689.11	689.42	310.90	421.46	357.40	281.17	281.43
92	3.9130E+03	48.80	-0.44	8.9012E-05	225.99	327.77	825.33	723.85	451.16	782.65	715.65	702.79	702.24	312.79	427.57	361.01	281.52	282.17
93	3.9119E+03	48.82	-0.51	9.8181E-05	227.57	329.24	839.36	738.11	457.36	797.79	729.44	716.43	715.12	314.64	433.36	364.53	281.95	282.48
94	3.9107E+03	49.02	-0.62	1.0831E-04	229.13	331.01	853.27	752.58	463.80	813.30	743.34	730.43	728.38	316.65	439.55	368.54	282.36	283.33
95	3.9092E+03	49.17	-0.60	1.1949E-04	230.67	332.85	867.34	767.18	470.50	829.36	757.57	744.65	741.71	318.86	445.84	372.51	282.81	283.85
96	3.9074E+03	49.16	-0.55	1.3185E-04	232.18	334.44	881.48	781.91	477.24	845.61	772.16	759.08	755.48	321.00	452.40	376.83	282.95	284.73
97	3.9054E+03	49.07	-0.54	1.4550E-04	233.66	336.33	895.69	796.82	484.27	862.00	786.96	773.75	769.53	323.74	458.82	381.16	283.57	285.39
98	3.9034E+03	49.00	-0.55	1.6059E-04	235.10	338.25	909.75	811.70	491.43	878.65	802.01	788.69	783.89	326.39	465.59	385.51	284.04	286.22
99	3.9012E+03	48.97	-0.60	1.7728E-04	236.49	340.08	923.71	826.63	498.74	895.36	817.26	803.71	798.32	329.01	472.42	389.97	284.29	287.14
100	3.8986E+03	48.96	-0.74	1.9568E-04	237.83	342.13	937.28	841.52	506.18	911.83	832.47	818.97	812.95	331.96	479.57	394.48	284.73	287.97
101	3.8957E+03	48.94	-0.83	2.1603E-04	239.11	344.06	950.71	856.33	513.53	928.61	848.06	834.45	827.95	335.30	486.59	399.09	285.02	288.72
102	3.8922E+03	48.92	-0.89	2.3852E-04	240.31	346.04	964.26	871.26	521.14	945.84	864.20	850.46	843.48	338.81	494.22	403.55	285.25	289.82
103	3.8881E+03	48.92	-0.92	2.6337E-04	241.43	348.07	978.15	886.19	528.76	963.64	880.67	866.67	859.61	342.65	501.82	408.13	285.67	291.12
104	3.8840E+03	48.93	-0.95	2.9062E-04	242.65	350.05	991.80	901.13	536.40	981.34	897.14	882.99	875.71	346.94	509.77	412.81	286.12	292.21
105	3.8803E+03	48.93	-1.05	3.2025E-04	244.11	352.30	1004.91	915.97	544.23	998.83	913.43	899.41	891.81	351.23	517.92	417.39	286.64	293.49
106	3.8761E+03	48.94	-1.16	3.5258E-04	245.67	354.57	1018.18	930.63	552.36	1016.68	929.57	915.92	908.00	356.10	526.10	422.08	287.38	294.54
107	3.8711E+03	48.94	-1.21	3.8793E-04	247.22	356.64	1031.68	945.24	560.48	1036.04	946.32	932.90	925.05	361.38	534.52	426.76	287.96	295.28
108	3.8651E+03	48.93	-1.17	4.2651E-04	249.78	358.70	1045.47	959.84	568.64	1055.97	963.09	950.44	942.22	367.04	543.30	431.37	288.51	295.46
109	3.8580E+03	48.91	-1.05	4.6852E-04	250.35	361.11	1059.64	974.48	577.16	1076.63	980.44	968.24	959.78	373.08	552.57	435.85	289.37	295.65
110	3.8499E+03	48.91	-0.93	5.1415E-04	251.94	363.43	1074.04	989.01	585.64	1096.88	997.92	986.28	977.64	379.55	561.55	440.34	290.11	295.75
111	3.8407E+03	48.92	-0.95	5.6354E-04	253.58	365.94	1087.75	1003.45	594.44	1115.91	1014.92	1003.89	994.99	386.71	570.79	444.62	290.89	295.93
112	3.8303E+03	48.93	-0.86	6.1681E-04	255.27	368.35	1101.37	1017.56	603.12	1133.81	1031.54	1021.11	1012.20	393.82	580.13	449.15	291.74	296.12
113	3.8186E+03	48.90	-0.76	6.7443E-04	256.90	370.84	1115.20	1031.49	612.11	1150.99	1047.99	1037.81	1029.20	401.37	589.27	453.52	292.60	296.16
114	3.8057E+03	48.89	-0.77	7.3724E-04	259.27	373.30	1128.59	1045.05	620.98	1166.24	1063.83	1054.07	1045.89	409.22	598.49	457.99	293.28	296.84
115	3.7914E+03	48.90	-0.84	8.0494E-04	259.57	375.84	1141.53	1058.20	629.79	1180.35	1079.01	1069.74	1061.76	416.94	607.62	462.66	294.32	298.19
116	3.7756E+03	48.91	-0.87	8.7777E-04	260.80	378.40	1154.38	1071.25	638.48	1193.51	1093.65	1085.00	1077.48	425.20	616.90	467.61	294.81	300.95
117	3.7594E+03	48.92	-0.82	9.5917E-04	261.13	380.91	1166.83	1083.96	647.16	1205.92	1108.14	1099.89	1092.81	433.67	626.16	472.43	295.74	304.14
118	3.7394E+03	48.92	-0.77	1.0479E-03	261.10	383.55	1178.50	1096.30	655.78	1217.47	1121.83	1114.13	1107.70	442.34	635.37	477.52	296.51	307.05
119	3.7188E+03	48.93	-0.86	1.1415E-03	261.44	386.06	1189.33	1109.26	664.48	1228.06	1134.98	1127.63	1122.08	451.09	644.52	482.67	297.45	310.41
120	3.6964E+03	48.97	-0.83	1.2390E-03	262.22	388.77	1199.60	1119.86	672.73	1237.82	1147.45	1140.37	1135.97	460.01	653.71	487.88	298.38	315.10
121	3.6724E+03	49.02	-0.84	1.3417E-03	263.05	391.65	1209.04	1130.79	680.89	1246.98	1159.24	1152.29	1149.36	468.99	663.09	492.95	299.37	320.17
122	3.6462E+03	49.02	-0.92	1.4533E-03	263.27	394.28	1217.77	1141.26	688.95	1255.54	1170.54	1163.61	1162.74	478.01	672.42	498.27	300.50	325.62
123	3.6177E+03	48.99	-0.92	1.5765E-03	262.52	396.91	1226.57	1151.28	696.79	1264.03	1181.78	1174.50	1176.07	486.98	682.07	503.44	301.90	331.55
124	3.5870E+03	48.94	-0.81	1.7081E-03	261.50	399.72	1234.64	1160.79	704.74	1272.55	1192.84	1184.84	1189.21	495.85	691.63	508.81	303.38	337.16

表D.1(1) つづき

125	3.5542E+03	48.86	-0.71	1.8443E-03	260.76	402.58	1242.01	1170.05	712.45	1281.53	1203.21	1194.70	1202.57	504.79	701.23	514.08	304.89	343.24
126	3.5194E+03	48.77	-0.78	1.9838E-03	260.31	405.29	1248.23	1178.73	720.18	1291.17	1215.22	1207.87	1221.75	513.76	710.58	519.47	306.44	350.45
127	3.4827E+03	48.48	-0.87	2.1268E-03	259.97	407.98	1253.34	1186.62	727.53	1300.62	1244.96	1240.80	1265.76	522.65	719.90	525.36	308.23	357.22
128	3.4446E+03	47.98	-0.84	2.2736E-03	259.57	410.98	1257.41	1193.37	734.55	1312.63	1297.73	1296.69	1324.60	531.51	728.79	531.66	310.12	363.72
129	3.4056E+03	47.41	-0.82	2.4237E-03	259.09	414.08	1259.48	1198.97	740.92	1333.84	1347.14	1349.60	1372.41	540.59	737.08	537.86	311.83	369.48
130	3.3657E+03	46.78	-0.81	2.5763E-03	258.51	416.93	1260.71	1203.37	746.92	1372.71	1385.95	1391.35	1406.93	549.26	745.30	543.68	314.06	374.81
131	3.3246E+03	46.12	-0.73	2.7299E-03	257.89	419.91	1262.82	1206.88	752.69	1420.11	1415.87	1423.19	1432.28	558.28	753.83	549.14	316.26	380.17
132	3.2828E+03	45.41	-0.77	2.8823E-03	257.29	423.19	1264.07	1209.52	757.99	1455.22	1438.80	1446.83	1450.65	567.87	762.75	553.80	318.66	385.74
133	3.2412E+03	44.69	-0.84	3.0323E-03	256.71	426.73	1262.27	1211.09	762.67	1476.99	1455.45	1463.23	1462.33	578.05	771.99	557.81	320.94	391.28
134	3.1999E+03	43.93	-0.83	3.1787E-03	256.14	430.42	1258.38	1211.32	766.73	1488.97	1466.23	1473.62	1468.62	589.26	781.22	560.84	323.40	396.75
135	3.1591E+03	43.15	-0.84	3.3204E-03	255.57	434.40	1251.91	1210.30	770.19	1494.09	1473.39	1479.94	1471.89	601.60	789.58	563.03	325.84	401.23
136	3.1190E+03	42.38	-0.94	3.4562E-03	255.02	438.77	1251.89	1208.37	773.23	1492.65	1477.56	1483.13	1473.22	614.75	797.78	564.88	328.12	404.82
137	3.0794E+03	41.61	-0.87	3.5852E-03	254.48	443.60	1275.66	1205.50	775.78	1484.66	1478.99	1483.79	1472.35	628.48	805.61	565.99	330.18	407.56
138	3.0404E+03	40.84	-0.77	3.7066E-03	253.96	448.52	1299.78	1202.03	777.85	1474.89	1478.74	1482.37	1470.53	642.16	813.58	566.75	331.88	409.65
139	3.0021E+03	40.09	-0.77	3.8196E-03	253.47	453.77	1316.48	1198.14	779.91	1453.33	1476.65	1479.85	1467.63	655.25	822.19	567.18	333.59	411.06
140	2.9648E+03	39.35	-0.85	3.9241E-03	253.00	459.03	1325.61	1193.66	781.92	1418.44	1472.11	1475.62	1463.77	667.60	831.25	567.22	335.03	412.52
141	2.9288E+03	38.58	-0.82	4.0197E-03	252.56	464.01	1330.11	1188.43	783.37	1381.87	1464.79	1470.69	1459.12	678.94	838.08	566.73	336.34	414.42
142	2.8942E+03	37.82	-0.76	4.1069E-03	252.15	469.02	1331.39	1182.64	783.79	1349.34	1454.45	1465.63	1452.81	689.31	839.34	566.10	337.58	417.19
143	2.8610E+03	37.12	-0.74	4.1845E-03	251.88	474.06	1328.34	1176.74	783.72	1324.82	1442.18	1459.31	1445.32	698.16	835.89	565.05	338.80	420.48
144	2.8290E+03	36.46	-0.70	4.2537E-03	251.71	478.65	1326.87	1170.54	783.37	1304.25	1429.66	1451.71	1437.19	705.76	830.11	563.59	339.92	422.71
145	2.7981E+03	35.82	-0.69	4.3165E-03	251.55	483.40	1324.11	1163.92	782.77	1310.07	1416.66	1442.31	1428.56	712.28	823.52	562.01	341.28	423.84
146	2.7683E+03	35.21	-0.67	4.3740E-03	251.40	488.04	1318.06	1156.55	781.89	1318.93	1403.41	1432.20	1419.29	717.80	816.53	560.21	342.89	424.42
147	2.7395E+03	34.61	-0.68	4.4269E-03	251.26	492.59	1312.46	1148.80	780.77	1322.42	1390.19	1422.04	1409.47	722.40	809.49	558.13	344.02	424.87
148	2.7117E+03	34.10	-0.68	4.4759E-03	251.13	497.25	1289.56	1140.77	779.21	1304.41	1377.32	1410.93	1399.77	726.24	802.50	556.01	345.12	425.05
149	2.6849E+03	33.62	-0.68	4.5216E-03	251.01	501.83	1248.42	1132.71	777.93	1271.22	1360.43	1398.89	1389.20	729.49	795.63	554.17	346.13	425.13
150	2.6590E+03	33.15	-0.72	4.5643E-03	250.91	506.01	1212.93	1124.89	776.67	1242.97	1336.64	1385.85	1377.73	732.33	788.51	552.17	347.12	425.00
151	2.6341E+03	32.69	-0.74	4.6045E-03	250.80	510.28	1183.53	1116.98	774.98	1219.64	1312.03	1372.08	1365.99	734.73	781.53	550.10	347.84	424.44
152	2.6102E+03	32.24	-0.75	4.6427E-03	250.70	514.34	1159.17	1109.06	773.22	1200.01	1287.04	1357.93	1354.36	736.72	774.55	548.08	348.73	424.22
153	2.5870E+03	31.80	-0.72	4.6793E-03	250.60	518.35	1138.81	1101.00	771.36	1182.76	1261.34	1343.60	1342.67	738.41	767.88	546.14	349.45	423.88
154	2.5647E+03	31.36	-0.66	4.7149E-03	250.50	522.21	1120.98	1092.93	769.53	1166.09	1238.07	1329.90	1330.28	739.79	761.57	544.04	349.67	423.69
155	2.5431E+03	30.93	-0.73	4.7499E-03	250.40	525.98	1104.58	1085.04	767.85	1150.57	1217.84	1316.79	1317.56	740.84	755.38	542.04	349.96	423.61
156	2.5223E+03	30.57	-0.72	4.7844E-03	250.31	529.58	1089.72	1077.12	765.72	1136.56	1195.91	1303.96	1305.96	741.37	749.58	539.83	350.35	423.13
157	2.5020E+03	30.22	-0.69	4.8186E-03	250.21	533.18	1075.93	1069.22	763.64	1123.67	1174.18	1291.29	1293.60	741.89	743.82	537.77	350.75	422.56
158	2.4823E+03	29.87	-0.72	4.8523E-03	250.11	536.69	1063.32	1061.54	761.58	1112.14	1154.15	1279.41	1284.39	742.44	738.49	535.69	351.21	422.15
159	2.4632E+03	29.54	-0.71	4.8859E-03	250.01	540.41	1051.64	1053.84	759.34	1101.72	1135.45	1267.94	1272.36	742.56	733.36	533.65	351.80	421.79
160	2.4445E+03	29.32	-0.69	4.9192E-03	249.90	543.97	1040.68	1046.25	757.13	1091.95	1117.86	1256.83	1261.27	742.56	728.48	531.48	353.09	421.33
161	2.4260E+03	29.31	-0.69	4.9525E-03	249.80	547.35	1030.28	1038.77	754.66	1083.04	1101.84	1246.29	1250.53	742.56	723.74	529.39	354.58	420.56
162	2.4076E+03	29.39	-0.72	4.9855E-03	249.69	550.86	1020.99	1031.67	752.35	1074.74	1088.36	1236.87	1241.27	742.19	719.28	527.32	355.87	420.00
163	2.3893E+03	29.47	-0.73	5.0181E-03	249.59	553.79	1012.53	1024.94	750.05	1066.92	1075.81	1228.40	1235.92	741.77	714.98	525.49	357.25	419.45
164	2.3709E+03	29.52	-0.70	5.0502E-03	249.48	556.40	1004.89	1018.51	747.84	1059.31	1064.31	1220.53	1225.33	741.35	710.97	523.48	358.43	418.72
165	2.3534E+03	29.55	-0.68	5.0822E-03	249.38	558.16	999.78	1012.29	746.20	1054.35	1055.45	1213.38	1218.27	740.86	707.15	521.88	359.26	418.16
166	2.3358E+03	29.57	-0.66	5.1142E-03	249.27	560.31	993.11	1006.44	744.14	1048.12	1048.09	1206.44	1210.57	740.25	703.33	520.05	360.20	417.56
167	2.3180E+03	29.60	-0.69	5.1461E-03	249.16	562.64	984.60	1001.00	741.37	1040.18	1041.21	1199.62	1202.96	739.67	699.86	518.26	360.90	416.89

表D.1(1) つづき

168	2.3002E+03	29.65	-0.74	5.1774E-03	249.05	564.37	978.35	995.70	739.15	1033.82	1034.35	1192.78	1195.96	738.80	696.26	516.45	361.58	416.39
169	2.2824E+03	29.69	-0.74	5.2080E-03	248.94	565.80	972.53	990.49	736.96	1027.48	1027.64	1186.16	1189.44	737.69	692.92	514.68	362.18	415.86
170	2.2648E+03	29.69	-0.67	5.2379E-03	248.83	566.82	967.02	985.39	734.61	1021.43	1021.94	1179.53	1183.01	736.74	689.74	513.31	362.59	415.09
171	2.2473E+03	29.68	-0.63	5.2671E-03	248.72	567.82	961.54	980.64	732.56	1016.17	1017.64	1173.34	1175.92	735.76	686.42	511.57	362.90	414.61
172	2.2299E+03	29.69	-0.70	5.2955E-03	248.62	568.80	956.22	975.90	730.36	1011.08	1014.01	1167.52	1169.11	734.57	683.40	510.13	363.37	413.95
173	2.2127E+03	29.72	-0.72	5.3230E-03	248.51	569.47	951.12	971.25	728.18	1005.57	1009.62	1161.46	1162.71	733.29	680.40	508.48	363.51	413.16
174	2.1955E+03	29.75	-0.69	5.3494E-03	248.41	570.00	946.18	966.78	726.02	1000.10	1005.04	1155.28	1156.30	732.11	677.31	506.92	363.59	412.65
175	2.1785E+03	29.73	-0.65	5.3745E-03	248.32	570.18	941.31	962.43	723.61	994.85	1000.98	1149.18	1149.92	730.68	674.45	505.59	363.60	411.78
176	2.1618E+03	29.69	-0.64	5.3986E-03	248.22	570.54	936.37	958.17	721.36	990.08	997.61	1143.32	1142.89	729.44	671.75	504.19	363.96	411.13
177	2.1452E+03	29.62	-0.73	5.4214E-03	248.14	570.63	931.43	953.82	719.20	985.35	993.83	1137.36	1135.83	727.96	668.88	502.78	364.07	410.60
178	2.1289E+03	29.65	-0.77	5.4428E-03	248.05	570.69	926.43	949.52	716.89	979.96	988.65	1130.95	1129.04	726.48	666.04	501.32	364.07	409.92
179	2.1127E+03	29.69	-0.76	5.4626E-03	247.98	570.81	921.79	945.25	714.53	975.00	983.28	1124.75	1122.33	724.98	663.38	499.86	364.25	408.89
180	2.0966E+03	29.68	-0.71	5.4808E-03	247.91	570.65	917.29	940.98	712.21	970.11	978.14	1118.52	1115.86	723.46	660.60	498.43	364.54	408.26
181	2.0807E+03	29.66	-0.68	5.4975E-03	247.84	570.64	912.60	936.89	709.96	965.56	973.79	1112.65	1109.48	721.87	657.93	497.42	364.75	407.47
182	2.0650E+03	29.64	-0.69	5.5129E-03	247.78	570.23	908.09	932.80	707.66	961.10	969.83	1107.04	1102.83	720.28	655.40	495.94	364.68	406.93
183	2.0495E+03	29.63	-0.75	5.5269E-03	247.73	570.05	903.61	928.80	705.40	956.61	965.60	1101.36	1096.47	718.56	652.68	494.57	364.76	406.17
184	2.0342E+03	29.66	-0.79	5.5396E-03	247.68	569.70	899.31	924.72	703.02	952.00	960.59	1095.39	1090.47	716.87	650.32	493.34	364.76	405.45
185	2.0189E+03	29.67	-0.74	5.5509E-03	247.64	569.22	895.01	920.75	700.76	947.43	955.06	1089.20	1084.60	715.23	647.89	492.10	364.94	404.61
186	2.0039E+03	29.66	-0.71	5.5611E-03	247.60	568.76	890.80	916.83	698.42	942.99	950.39	1083.28	1078.52	713.59	645.34	490.95	364.87	403.64
187	1.9891E+03	29.63	-0.70	5.5705E-03	247.56	568.19	886.55	912.83	696.05	938.70	946.38	1077.83	1072.18	711.90	642.80	489.77	364.77	402.85
188	1.9744E+03	29.62	-0.72	5.5792E-03	247.53	567.47	882.40	908.98	693.82	934.43	942.77	1072.30	1065.73	710.15	640.39	488.67	364.76	402.30
189	1.9600E+03	29.63	-0.74	5.5875E-03	247.50	566.86	878.26	905.15	691.49	929.99	938.61	1066.59	1059.43	708.43	637.96	487.37	364.76	401.63
190	1.9457E+03	29.66	-0.75	5.5953E-03	247.48	566.09	874.37	901.32	689.09	925.71	933.94	1060.87	1053.34	706.40	635.62	486.23	364.68	401.00
191	1.9315E+03	29.68	-0.72	5.6029E-03	247.45	565.40	870.40	897.53	686.81	921.40	929.27	1055.16	1047.20	704.67	633.30	485.09	364.40	400.14
192	1.9176E+03	29.66	-0.68	5.6106E-03	247.42	564.56	866.35	893.83	684.52	917.24	925.40	1049.55	1040.98	702.90	630.80	483.90	364.28	399.36
193	1.9039E+03	29.64	-0.70	5.6186E-03	247.39	563.65	862.49	890.17	682.25	913.18	922.13	1044.32	1034.77	701.02	628.59	482.77	364.18	398.80
194	1.8902E+03	29.64	-0.74	5.6269E-03	247.36	562.89	858.54	886.47	679.94	909.14	918.50	1039.03	1028.57	699.21	626.37	481.59	364.17	398.01
195	1.8768E+03	29.67	-0.76	5.6357E-03	247.34	562.10	854.82	882.78	677.72	905.08	914.46	1033.60	1022.71	697.25	623.99	480.57	364.01	397.33
196	1.8634E+03	29.70	-0.75	5.6448E-03	247.31	561.05	851.04	879.18	675.39	901.09	910.15	1028.13	1016.87	695.46	621.83	479.52	363.78	396.48
197	1.8502E+03	29.69	-0.70	5.6546E-03	247.29	560.18	847.53	875.60	673.06	897.29	906.13	1022.66	1011.20	693.63	619.60	478.54	363.55	395.66
198	1.8371E+03	29.66	-0.66	5.6653E-03	247.26	559.10	843.84	872.04	670.83	893.31	902.70	1017.44	1005.38	691.74	617.54	477.50	363.17	395.01
199	1.8243E+03	29.66	-0.65	5.6771E-03	247.24	558.15	840.28	868.59	668.59	889.40	899.60	1012.28	999.59	689.78	615.17	476.42	362.86	394.31
200	1.8115E+03	29.69	-0.65	5.6900E-03	247.21	556.89	836.56	865.08	666.33	885.45	896.37	1006.95	993.92	687.82	613.14	475.27	362.65	393.68
201	1.7989E+03	29.71	-0.70	5.7040E-03	247.17	556.11	832.99	861.64	664.08	881.82	892.77	1001.98	988.39	685.85	610.95	474.32	362.19	393.00
202	1.7864E+03	29.74	-0.74	5.7192E-03	247.13	554.88	829.71	858.18	661.79	878.08	888.75	996.72	982.75	683.95	608.79	473.37	361.96	392.39
203	1.7740E+03	29.75	-0.69	5.7356E-03	247.09	553.67	826.22	854.80	659.55	874.56	884.45	991.52	977.31	681.93	606.83	472.35	361.49	391.70
204	1.7618E+03	29.75	-0.69	5.7533E-03	247.04	552.70	822.73	851.55	657.44	870.94	880.58	986.39	971.90	680.18	604.66	471.42	361.02	390.89
205	1.7498E+03	29.74	-0.71	5.7725E-03	246.99	551.50	819.36	848.16	655.26	867.21	877.16	981.45	966.51	678.18	602.64	470.27	360.72	390.16
206	1.7379E+03	29.74	-0.75	5.7931E-03	246.94	550.40	816.09	844.87	652.97	863.52	873.94	976.50	961.23	676.38	600.51	469.43	360.33	389.47
207	1.7260E+03	29.60	-0.71	5.8095E-03	246.89	549.20	812.69	841.58	651.01	859.91	870.26	971.77	955.99	674.33	598.43	468.45	360.12	389.01
208	1.7141E+03	29.60	-0.72	5.8227E-03	246.86	547.81	809.51	838.34	648.79	856.64	866.06	966.83	950.87	672.50	596.57	467.47	359.73	388.39
209	1.7022E+03	29.74	-0.81	5.8360E-03	246.83	546.67	806.30	835.09	646.63	853.26	861.50	962.12	945.76	670.64	594.74	466.46	359.27	387.66
210	1.6905E+03	29.79	-0.81	5.8568E-03	246.77	545.74	803.13	831.80	644.48	849.84	857.24	957.30	940.78	668.74	592.97	465.41	358.99	386.91

表D.1(1) つづき

211	1.6791E+03	29.51	-0.79	5.8839E-03	248.69	544.41	799.90	828.67	642.42	846.48	853.78	952.70	935.90	666.78	590.80	464.39	358.78	386.45
212	1.6677E+03	29.59	-0.75	5.9120E-03	248.61	543.32	796.87	825.58	640.47	843.17	851.05	948.16	931.26	664.90	588.96	463.64	358.53	385.92
213	1.6563E+03	29.76	-0.75	5.9413E-03	248.52	542.21	793.85	822.52	638.44	839.83	848.58	943.66	926.68	663.05	587.23	462.73	358.03	385.17
214	1.6451E+03	29.78	-0.74	5.9721E-03	248.43	541.02	790.89	819.42	636.37	836.73	845.95	939.24	922.17	661.11	585.50	461.74	357.64	384.92
215	1.6339E+03	29.80	-0.74	6.0042E-03	248.34	539.87	787.98	816.39	634.27	833.62	843.15	934.80	917.70	659.22	583.66	460.78	357.38	384.08
216	1.6229E+03	29.80	-0.81	6.0377E-03	248.23	538.72	785.01	813.40	632.31	830.70	840.29	930.37	913.24	657.43	581.87	460.13	357.09	383.37
217	1.6119E+03	29.81	-0.72	6.0719E-03	248.13	537.48	782.16	810.46	630.32	827.63	837.70	925.92	908.82	655.60	580.17	459.36	356.55	382.68
218	1.6009E+03	29.81	-0.61	6.1071E-03	248.02	536.38	779.24	807.57	628.35	824.38	835.61	921.56	904.41	653.76	578.55	458.30	356.11	382.16
219	1.5901E+03	29.80	-0.62	6.1436E-03	245.91	535.22	776.35	804.68	626.47	821.29	833.68	917.23	899.99	651.90	576.91	457.36	355.75	381.62
220	1.5793E+03	29.82	-0.60	6.1809E-03	245.79	533.97	773.46	801.76	624.56	818.33	831.55	912.96	895.60	650.06	575.24	456.56	355.35	380.98
221	1.5686E+03	29.84	-0.58	6.2191E-03	245.67	532.82	770.67	798.91	622.59	815.38	829.28	908.52	891.35	648.24	573.73	455.71	354.86	380.40
222	1.5578E+03	29.85	-0.60	6.2578E-03	245.55	531.66	767.93	796.12	620.72	812.49	826.69	904.15	887.03	646.51	572.13	454.90	354.45	379.88
223	1.5473E+03	29.86	-0.60	6.2970E-03	245.42	530.40	765.17	793.19	618.89	809.70	823.95	899.73	882.73	644.72	570.48	454.07	353.97	379.35
224	1.5368E+03	29.84	-0.57	6.3367E-03	245.29	529.09	762.42	790.37	616.89	806.84	821.33	895.40	878.33	642.89	568.89	453.25	353.62	378.92
225	1.5264E+03	29.79	-0.54	6.3768E-03	245.16	527.87	759.59	787.53	615.02	803.88	818.95	891.20	874.03	641.16	567.28	452.52	353.26	378.42
226	1.5160E+03	29.75	-0.51	6.4174E-03	245.03	526.73	756.85	784.82	613.21	800.85	816.74	886.89	869.84	639.34	565.74	451.76	352.77	377.80
227	1.5058E+03	29.74	-0.54	6.4584E-03	244.89	525.64	754.11	781.98	611.26	797.82	814.48	882.59	865.52	637.53	564.14	450.97	352.45	377.21
228	1.4956E+03	29.73	-0.57	6.4998E-03	244.75	524.45	751.39	779.15	609.32	794.86	811.86	878.39	861.26	635.77	562.70	450.09	352.12	376.76
229	1.4856E+03	29.74	-0.62	6.5414E-03	244.61	523.20	748.78	776.36	607.47	792.09	809.07	874.12	857.16	634.03	561.22	449.19	351.69	376.26
230	1.4755E+03	29.75	-0.67	6.5833E-03	244.47	521.96	746.01	773.70	605.67	789.30	806.00	869.90	853.02	632.26	559.77	448.39	351.26	375.71
231	1.4656E+03	29.75	-0.64	6.6254E-03	244.32	520.74	743.37	770.96	603.94	786.43	802.82	865.77	848.84	630.58	558.30	447.60	350.73	375.22
232	1.4557E+03	29.74	-0.63	6.6678E-03	244.17	519.65	740.76	768.09	602.11	783.62	799.92	861.60	844.89	628.91	556.80	446.88	350.43	374.77
233	1.4459E+03	29.73	-0.62	6.7106E-03	244.02	518.46	738.27	765.47	600.29	780.68	797.26	857.47	840.91	627.22	555.44	446.06	350.09	374.22
234	1.4362E+03	29.72	-0.60	6.7544E-03	243.87	517.32	735.73	762.79	598.48	777.69	794.83	853.40	836.85	625.54	554.09	445.21	349.67	373.60
235	1.4265E+03	29.72	-0.63	6.7991E-03	243.71	516.15	733.08	760.19	596.61	774.74	792.60	849.50	832.84	623.87	552.60	444.48	349.28	373.15
236	1.4169E+03	29.74	-0.66	6.8445E-03	243.56	514.96	730.58	757.61	594.98	771.92	790.15	845.48	828.88	622.13	551.19	443.72	349.00	372.66
237	1.4074E+03	29.77	-0.71	6.8905E-03	243.39	513.80	728.12	754.85	593.27	769.20	787.35	841.50	824.98	620.39	549.84	442.84	348.62	372.23
238	1.3980E+03	29.79	-0.77	6.9370E-03	243.23	512.77	725.60	752.30	591.50	766.54	784.43	837.54	821.12	618.83	548.43	442.12	348.35	371.67
239	1.3886E+03	29.80	-0.76	6.9842E-03	243.06	511.69	723.07	749.68	589.74	763.85	781.46	833.46	817.35	617.22	547.02	441.41	348.07	371.27
240	1.3792E+03	29.80	-0.73	7.0321E-03	242.88	510.50	720.67	746.97	588.01	761.16	778.63	829.49	813.55	615.61	545.66	440.68	347.64	370.91
241	1.3700E+03	29.79	-0.71	7.0810E-03	242.71	509.43	718.22	744.49	586.35	758.48	776.13	825.67	809.79	613.95	544.42	440.07	347.32	370.48
242	1.3608E+03	29.78	-0.69	7.1309E-03	242.52	508.30	715.79	741.97	584.67	755.78	773.88	821.91	805.95	612.31	543.16	439.32	347.17	370.06
243	1.3516E+03	29.78	-0.72	7.1816E-03	242.34	507.11	713.42	739.31	583.01	752.92	771.72	818.01	802.08	610.79	541.92	438.46	346.89	369.55
244	1.3426E+03	29.79	-0.74	7.2322E-03	242.20	506.02	711.09	736.87	581.34	750.10	769.48	814.17	798.32	609.08	540.47	437.76	346.43	369.11
245	1.3335E+03	29.81	-0.74	7.2831E-03	242.07	504.92	708.71	734.41	579.63	747.45	767.00	810.36	794.62	607.34	539.01	437.11	345.98	368.62
246	1.3245E+03	29.83	-0.72	7.3347E-03	241.95	503.79	706.30	731.80	577.94	744.79	764.33	806.43	790.87	605.79	537.73	436.42	345.71	368.21
247	1.3156E+03	29.84	-0.65	7.3873E-03	241.82	502.68	703.93	729.34	576.18	742.12	761.68	802.56	787.07	604.25	536.43	435.69	345.34	367.79
248	1.3067E+03	29.83	-0.62	7.4408E-03	241.69	501.55	701.49	726.81	574.49	739.47	759.27	798.75	783.31	602.65	535.08	435.06	345.09	367.23
249	1.2979E+03	29.83	-0.60	7.4954E-03	241.55	500.54	699.20	724.22	572.89	736.80	756.96	794.88	779.63	601.00	533.80	434.43	344.80	366.72
250	1.2891E+03	29.82	-0.65	7.5511E-03	241.42	499.39	696.93	721.84	571.26	734.01	754.77	791.08	775.88	599.41	532.52	433.69	344.52	366.45

表D.1(2) セラミックタイル空力加熱センサにおける空力加熱計測結果

t sec	QW19 kW/m ²	QW21 kW/m ²	QW24 kW/m ²	QW27 kW/m ²	QW30 kW/m ²	QW33 kW/m ²	QW35 kW/m ²	QW38 kW/m ²	QW40 kW/m ²	QW42 kW/m ²	QW44 kW/m ²	QW46 kW/m ²	QW48 kW/m ²
1	1.27	0.23	0.23	0.90	0.56	0.62	0.79	0.22	0.36	0.65	1.28	-0.34	0.86
2	1.12	0.68	0.75	0.96	0.58	0.75	0.08	0.79	0.42	0.15	0.00	1.08	0.15
3	1.12	0.49	0.37	1.06	0.36	0.29	0.56	0.35	0.07	0.23	-0.35	0.42	0.20
4	1.60	0.50	1.18	1.52	0.71	0.59	0.82	0.65	1.05	0.51	0.69	0.56	0.76
5	2.16	0.85	1.61	1.75	0.95	1.06	1.46	1.64	1.47	0.40	1.56	0.78	1.49
6	1.65	0.79	0.10	1.37	0.60	0.85	0.78	0.49	0.72	0.95	0.64	0.29	0.32
7	1.00	0.47	0.54	1.43	0.57	0.35	0.00	0.27	-0.03	0.00	-0.11	-0.25	0.06
8	1.20	0.55	0.40	1.14	0.55	0.09	0.18	0.11	0.65	0.30	0.13	0.06	-0.46
9	1.36	0.75	0.62	0.97	0.39	0.22	0.36	0.48	0.57	-0.14	0.31	0.47	-0.49
10	1.20	0.60	0.61	1.31	0.72	0.67	0.88	0.63	0.31	0.00	0.33	-0.16	0.25
11	0.26	0.11	0.22	0.67	0.34	-0.11	-0.03	-0.46	-0.87	-1.05	-1.19	-0.83	-1.46
12	0.30	0.30	0.26	0.75	0.27	0.21	0.25	0.71	0.13	0.14	0.06	0.10	-0.47
13	1.34	1.06	1.05	1.38	1.14	1.12	0.38	0.74	0.64	0.52	0.50	-0.14	0.12
14	1.10	0.97	0.57	1.27	1.27	1.13	1.28	1.24	0.28	0.42	0.21	0.29	0.25
15	0.77	1.11	1.55	1.18	0.91	1.04	0.89	1.14	0.34	0.15	0.55	0.34	-0.32
16	1.09	1.63	1.05	1.22	1.15	1.30	0.98	1.23	0.38	0.54	0.41	-0.51	-0.70
17	0.73	1.50	1.06	1.12	1.52	1.37	1.46	1.04	0.37	-0.04	0.33	-0.11	0.26
18	0.54	1.51	0.99	1.15	1.72	1.14	1.51	1.52	0.36	0.70	0.33	0.31	-0.18
19	0.64	1.75	1.27	1.22	2.06	1.51	1.65	1.91	0.15	0.45	0.33	0.16	-0.38
20	0.57	2.04	1.63	1.30	2.03	1.95	1.82	1.90	0.53	0.30	-0.09	-0.06	0.09
21	0.74	2.13	1.31	1.10	2.09	1.81	1.40	1.68	0.42	0.31	0.67	-0.40	0.16
22	0.62	2.16	1.97	1.19	2.21	2.08	2.00	2.35	0.51	0.55	0.45	0.24	-0.12
23	0.42	2.48	1.53	1.44	2.46	2.38	2.32	2.38	-0.20	1.28	0.30	-0.20	-0.18
24	0.61	2.48	1.78	1.12	2.79	2.28	2.18	2.46	0.65	0.45	0.11	0.49	-0.17
25	0.65	2.71	2.00	1.28	3.06	2.52	2.22	2.41	0.27	0.20	0.71	-0.20	0.12
26	0.49	3.22	1.98	1.50	3.35	2.62	2.52	3.34	0.30	0.49	0.42	0.07	0.35
27	0.51	3.54	2.32	1.21	3.46	2.91	3.10	3.42	0.37	0.73	0.28	-0.22	-0.76
28	0.58	3.54	2.21	1.39	3.46	3.34	3.32	3.16	-0.06	0.18	1.17	-0.26	0.31
29	0.37	3.72	2.41	1.51	3.97	3.69	3.52	2.87	-0.34	0.72	0.03	0.41	0.27
30	0.12	4.05	2.55	1.00	4.46	3.99	3.38	4.51	0.09	1.06	0.79	-0.02	0.07
31	0.17	4.47	2.99	1.34	4.59	3.92	3.94	4.44	0.41	0.58	0.65	0.05	-0.58
32	0.46	4.94	3.14	1.65	4.94	4.14	3.52	4.55	0.63	0.67	0.48	0.08	-0.26
33	0.40	5.02	2.96	1.39	5.01	4.49	4.72	4.64	0.22	1.36	0.29	-0.58	0.31
34	0.32	5.20	3.47	1.24	5.51	5.06	4.76	4.54	0.31	1.25	1.06	0.18	0.13
35	0.30	5.81	3.44	1.55	6.04	5.04	5.42	5.88	0.37	0.91	0.63	0.16	-0.45
36	0.52	6.01	3.78	1.93	6.00	4.98	4.83	5.49	0.13	1.36	0.45	0.24	-0.05
37	0.34	6.25	3.76	1.65	6.24	5.32	4.58	4.82	0.55	1.52	0.49	-0.28	-0.16
38	0.31	6.67	4.29	1.74	6.47	5.72	5.15	5.77	0.19	0.79	1.13	-0.08	0.25
39	0.57	6.78	4.07	1.89	6.65	5.72	5.83	5.36	0.53	1.42	0.62	0.24	0.02
40	0.37	6.88	4.88	1.78	6.94	5.57	5.06	5.48	0.18	0.92	0.86	0.25	-0.09
41	0.41	6.99	4.97	1.91	7.14	5.67	5.46	5.59	0.29	0.87	0.98	-0.59	0.09
42	0.13	7.48	4.74	1.93	7.17	5.96	6.03	5.91	0.36	1.70	0.53	-0.02	-0.04
43	0.39	7.98	5.11	1.89	7.52	6.13	5.59	5.90	0.58	0.63	0.45	0.09	0.24
44	0.52	8.23	5.27	2.24	7.94	6.35	5.56	6.33	0.16	1.77	1.11	0.23	0.07
45	0.55	8.40	5.61	2.33	8.12	6.66	6.22	6.59	0.28	1.32	0.96	0.23	0.00
46	0.72	8.98	6.01	2.26	8.67	6.60	6.89	6.63	-0.11	1.24	0.74	-0.12	-0.24
47	0.63	9.42	5.64	2.24	8.99	7.09	6.54	6.98	0.96	1.77	0.94	0.01	-0.03
48	0.30	9.72	7.07	2.45	8.98	7.52	6.51	7.21	0.29	1.65	1.04	-0.12	0.04
49	0.55	10.10	6.51	2.42	9.34	7.75	7.30	7.71	0.25	1.88	1.05	-0.14	0.02
50	0.86	10.57	6.89	2.46	9.89	7.88	7.65	7.56	0.57	1.39	0.81	0.20	0.00
51	0.43	10.94	7.69	2.45	10.24	8.20	7.83	8.00	0.38	2.41	0.94	0.23	0.25
52	0.59	11.57	7.69	2.57	10.58	8.58	8.27	8.38	0.31	1.90	0.84	-0.06	-0.46
53	0.60	12.18	7.98	2.86	11.08	8.84	8.39	8.42	0.33	1.85	1.34	0.43	-0.12
54	0.49	12.51	8.66	2.72	11.46	9.33	8.69	9.19	0.33	2.58	1.04	-0.03	0.29
55	0.65	12.99	8.97	3.00	11.65	9.74	9.13	9.49	0.54	2.08	1.54	-0.24	-0.19
56	0.45	13.41	9.40	2.89	12.06	10.14	9.09	9.44	0.79	2.90	1.46	0.04	0.43
57	0.71	14.04	9.32	2.68	12.31	10.30	9.58	10.15	0.18	3.37	1.24	0.34	0.10
58	1.02	14.43	10.21	3.01	12.71	10.52	9.95	10.54	0.66	2.60	1.38	-0.04	0.19
59	0.78	14.89	10.00	2.99	13.32	11.14	10.43	10.61	1.03	3.19	1.60	0.16	0.26
60	0.52	15.49	10.94	2.97	13.91	11.44	10.34	10.85	0.40	3.19	1.41	0.20	0.24
61	0.77	16.12	11.70	3.48	14.64	11.69	11.75	11.58	0.24	3.08	1.68	0.03	0.23
62	1.01	17.29	11.50	3.59	15.38	12.33	11.72	12.16	0.46	3.51	1.91	0.34	0.05
63	0.78	18.47	13.29	3.86	16.20	13.35	12.60	12.97	1.01	3.48	2.06	0.05	0.36

表D.1(2) つづき

64	0.93	19.89	13.33	4.31	17.22	14.03	13.21	13.80	0.59	3.81	2.10	0.32	0.09
65	0.95	21.41	14.33	4.26	18.53	15.14	14.46	14.94	0.65	4.54	2.05	0.04	0.35
66	1.16	22.54	16.31	4.54	19.44	16.37	15.29	15.28	0.76	4.94	2.35	0.32	0.26
67	0.99	23.36	16.67	4.73	19.98	16.60	15.92	16.12	1.17	4.43	2.23	0.04	0.45
68	1.21	24.62	17.41	5.03	20.92	17.15	16.28	16.58	0.64	4.90	2.59	0.33	0.75
69	1.70	25.93	18.47	5.35	21.82	18.18	16.86	17.62	1.42	5.28	2.25	0.21	0.26
70	1.42	27.25	20.08	5.68	22.87	19.30	18.21	18.75	0.69	5.37	2.68	0.44	1.13
71	1.55	28.56	20.50	5.96	24.11	20.09	19.05	19.23	1.48	5.61	2.48	0.34	0.09
72	1.71	29.52	21.70	6.15	24.91	20.73	19.90	19.75	0.87	5.72	3.21	0.70	0.28
73	1.59	30.95	22.69	6.55	25.97	21.52	20.43	21.06	1.49	6.13	3.66	0.22	0.36
74	1.57	32.31	23.51	6.76	27.02	22.05	20.74	21.61	1.69	6.21	3.64	0.14	0.34
75	2.08	33.24	24.56	7.02	27.90	23.46	21.88	22.18	1.02	6.92	2.79	0.18	1.97
76	1.99	34.95	26.00	7.13	29.37	24.41	23.15	22.88	1.38	6.94	3.90	0.55	-0.30
77	1.74	35.89	27.30	7.64	30.21	24.69	23.83	24.23	0.76	6.85	4.08	0.89	0.42
78	2.20	37.44	28.09	8.19	31.69	26.51	24.76	25.35	1.68	7.69	4.17	0.13	0.34
79	2.11	38.50	29.12	7.73	32.81	26.79	26.11	25.23	1.87	6.70	4.96	0.54	0.76
80	2.20	40.11	30.42	8.92	34.60	27.99	27.23	27.20	1.06	7.93	4.62	0.17	0.52
81	2.49	42.48	31.99	9.00	36.03	29.49	28.22	27.86	1.77	8.71	4.94	0.93	0.62
82	2.37	43.11	32.54	9.28	37.09	30.99	29.70	29.33	2.08	8.56	4.00	0.47	0.70
83	2.25	44.45	33.77	9.00	38.39	31.78	30.81	30.11	1.88	9.65	4.97	0.35	0.98
84	3.01	45.77	34.67	9.53	40.02	33.67	32.50	32.31	3.13	9.84	5.27	1.24	0.36
85	2.49	48.06	36.34	9.65	42.34	34.64	34.16	32.76	2.11	10.68	5.61	0.31	0.12
86	2.78	50.31	38.20	10.06	44.32	36.38	35.01	34.63	2.54	10.74	5.51	1.09	1.47
87	2.89	52.53	39.87	11.60	46.42	37.90	36.97	35.81	2.55	10.91	4.77	0.87	0.58
88	3.14	55.66	42.21	11.61	49.69	39.69	38.90	37.87	3.80	10.95	6.85	0.33	0.98
89	3.18	58.32	44.25	12.19	51.97	42.21	41.05	39.82	2.50	12.01	7.34	0.71	0.73
90	2.99	60.19	46.11	12.80	54.04	43.36	42.99	41.48	2.88	12.40	7.99	1.25	0.64
91	3.40	62.03	48.09	12.84	56.68	45.21	44.03	42.47	3.78	12.58	7.33	0.88	1.49
92	3.20	64.12	50.03	13.62	59.06	46.45	46.02	44.12	3.72	13.23	7.15	0.71	1.59
93	3.06	66.10	52.17	14.04	61.58	49.21	47.24	45.54	3.62	12.48	7.02	0.92	0.51
94	3.66	68.31	54.44	14.69	64.78	50.94	49.76	47.99	3.97	13.80	8.32	0.84	1.98
95	3.75	71.23	56.40	15.43	68.49	53.42	51.83	49.53	4.42	14.03	8.06	0.93	0.94
96	3.32	73.96	59.11	15.70	71.58	56.03	54.01	52.30	4.11	14.87	9.00	0.39	1.94
97	3.95	76.86	61.14	16.56	74.79	58.40	56.42	54.54	5.61	14.55	8.89	1.34	1.24
98	3.95	79.31	63.56	17.06	78.42	61.03	58.97	57.13	5.08	15.70	9.01	0.93	1.72
99	3.83	82.00	66.05	17.68	81.78	63.70	61.19	59.11	5.06	15.92	9.31	0.58	1.89
100	4.28	84.05	68.14	18.25	84.64	65.80	64.01	61.70	5.87	16.91	9.50	1.02	1.59
101	4.07	86.83	71.15	18.50	88.97	69.35	66.89	64.87	6.66	16.74	9.82	0.68	1.48
102	4.27	90.19	73.82	19.48	93.74	73.41	70.87	68.61	6.89	18.65	9.53	0.64	2.33
103	4.39	94.17	76.71	19.92	99.04	76.97	73.92	72.72	7.62	18.60	10.05	1.02	2.64
104	4.37	96.89	79.58	20.46	103.03	79.85	76.99	75.08	8.57	19.86	10.37	1.01	2.02
105	4.94	99.01	82.13	21.36	107.04	82.52	80.24	77.98	8.35	20.55	10.24	1.15	2.58
106	4.96	102.78	85.20	22.45	112.46	85.43	83.72	81.33	9.59	20.96	10.69	1.51	1.94
107	4.68	106.76	88.19	22.91	121.06	90.70	88.44	87.15	10.82	21.94	10.79	1.16	1.34
108	4.76	111.23	91.85	23.58	127.97	94.27	93.62	90.65	11.28	23.22	10.77	1.18	0.19
109	5.50	116.15	94.86	24.89	135.97	99.85	98.00	95.54	12.09	24.80	10.65	1.74	0.54
110	5.32	120.92	98.52	25.36	141.78	104.17	102.82	100.28	13.06	24.30	10.89	1.46	0.42
111	5.75	123.72	101.28	26.68	145.62	106.73	105.60	102.81	14.60	25.63	10.58	1.55	0.69
112	5.59	128.05	104.49	27.04	149.57	110.03	108.83	106.65	14.26	26.34	11.46	1.71	0.72
113	5.86	133.06	107.60	28.44	154.51	114.25	111.82	110.40	15.49	26.40	11.15	1.71	0.37
114	5.86	136.54	110.13	28.85	155.98	117.26	115.51	114.14	16.17	27.29	11.63	1.40	1.99
115	6.10	140.20	113.98	29.56	159.08	120.17	118.59	116.57	15.90	27.71	12.29	2.13	3.25
116	6.23	144.69	117.14	30.11	162.07	123.62	122.49	121.21	17.52	28.83	13.06	1.02	6.26
117	6.20	148.33	120.46	30.91	165.32	128.20	126.44	125.14	18.02	29.41	12.81	2.05	6.47
118	6.54	150.86	123.35	31.61	168.00	130.49	129.41	128.92	18.69	30.02	13.69	1.62	5.48
119	6.37	153.08	126.72	32.59	170.06	133.71	132.00	132.44	19.10	30.61	13.92	2.01	6.60
120	6.85	155.90	128.89	32.49	172.16	136.51	134.57	135.94	19.78	31.52	14.24	1.94	9.51
121	7.23	157.65	131.42	33.24	174.48	139.13	136.86	139.64	20.19	32.82	14.07	2.10	9.76
122	6.80	159.47	134.27	33.89	176.55	142.11	139.61	144.85	20.65	33.43	14.99	2.33	10.42
123	6.97	163.14	136.18	34.26	179.96	146.37	142.61	149.80	20.88	35.18	14.74	2.83	11.35
124	7.41	164.46	139.22	35.41	183.89	150.09	145.01	154.30	21.08	35.66	15.51	2.88	10.33
125	7.57	165.85	141.21	35.71	189.10	152.18	147.54	160.40	21.73	36.74	15.44	2.96	11.67
126	7.35	165.53	142.88	36.63	195.04	162.28	163.24	186.33	22.25	36.97	16.03	3.05	14.26
127	7.48	164.95	143.14	36.68	198.89	228.26	237.38	282.86	22.50	37.95	17.54	3.50	12.70
128	8.14	163.90	143.09	36.86	211.35	323.48	333.67	357.30	22.97	37.78	18.62	3.64	12.34
129	8.38	159.54	142.05	36.31	245.76	337.73	349.75	347.96	24.01	37.26	18.42	3.33	10.79
130	7.98	157.83	141.26	36.43	314.08	330.68	343.02	331.77	23.42	38.29	17.78	4.39	10.26

表D.1(2) つづき

131	8.41	160.40	140.36	36.67	367.53	324.60	335.68	321.93	25.01	40.21	17.30	4.22	10.79
132	9.05	158.00	138.72	36.36	360.12	318.83	326.80	312.87	26.93	42.14	15.69	4.64	11.47
133	9.58	149.27	135.94	35.73	342.29	310.33	315.16	298.91	28.80	43.92	14.69	4.41	11.53
134	9.92	142.30	132.25	35.00	325.34	298.30	302.48	285.05	31.87	44.81	12.76	4.85	11.55
135	10.55	132.74	129.33	34.28	309.93	290.90	293.11	276.95	35.06	43.45	11.30	4.81	9.32
136	11.37	148.15	125.59	33.86	289.41	283.15	284.17	270.63	37.47	44.47	11.07	4.58	7.74
137	12.30	215.84	122.17	33.15	264.02	274.26	275.33	261.74	39.49	44.58	9.53	4.30	6.31
138	12.55	225.04	119.28	32.45	250.97	267.69	266.49	256.74	40.06	46.22	9.17	3.76	5.35
139	13.33	216.21	115.93	32.69	202.16	259.15	260.25	250.20	39.50	49.13	8.60	3.97	4.19
140	13.47	203.71	111.93	32.71	145.04	246.82	250.42	243.61	38.88	51.38	7.87	3.50	4.88
141	13.17	195.58	107.54	31.63	120.82	231.98	244.07	237.07	37.61	45.89	6.75	3.41	6.11
142	13.52	188.41	104.70	29.55	112.59	214.79	239.50	226.54	36.57	31.58	6.68	3.37	8.20
143	13.81	175.56	101.19	28.63	118.01	200.54	230.07	217.49	33.94	20.78	5.67	3.39	9.17
144	13.18	178.79	97.92	27.98	114.89	192.01	220.42	209.86	32.21	16.08	4.84	3.25	6.28
145	13.82	172.78	93.12	27.33	181.73	182.24	208.02	202.49	30.76	14.51	4.66	3.77	4.06
146	13.82	160.78	89.06	26.55	188.41	173.48	199.45	194.34	29.30	13.27	4.15	4.19	3.33
147	13.89	158.84	85.33	25.84	176.82	165.81	192.85	186.44	27.97	12.66	3.46	3.24	3.42
148	14.37	103.69	81.60	24.63	115.06	159.49	182.63	181.01	26.92	12.07	3.41	3.35	2.91
149	14.40	43.30	79.45	25.04	66.78	137.24	172.64	171.72	26.13	11.59	4.10	3.22	2.91
150	13.88	44.93	76.22	24.70	68.72	104.70	162.02	162.39	25.73	10.02	3.44	3.26	2.52
151	14.35	45.80	73.44	23.47	69.02	93.05	152.26	155.23	25.06	9.67	3.26	2.77	1.58
152	14.16	47.03	70.37	23.06	68.66	81.28	143.65	149.38	24.42	8.78	3.29	3.20	2.68
153	14.32	48.01	67.34	22.54	66.78	67.21	135.78	142.94	24.04	8.84	3.36	2.86	2.26
154	14.24	46.98	65.15	22.28	61.48	64.40	130.92	134.32	23.47	8.98	2.80	1.96	2.68
155	14.30	44.55	62.66	21.80	58.64	64.30	126.04	127.27	22.88	8.39	3.04	2.28	2.89
156	14.16	43.30	59.83	21.38	57.29	49.54	120.53	125.32	21.67	8.72	2.30	2.46	1.83
157	14.42	41.41	58.20	20.73	55.49	42.74	114.94	120.20	21.93	7.96	2.70	2.45	1.79
158	14.41	40.45	55.69	20.44	54.92	40.88	111.94	115.42	22.08	8.50	2.46	2.55	2.21
159	15.03	39.27	53.81	19.72	54.18	38.20	107.36	110.76	20.88	8.28	2.47	2.78	2.27
160	14.85	37.98	51.61	19.46	52.64	35.62	103.16	105.22	20.75	8.30	2.01	4.06	1.97
161	14.71	36.58	50.43	18.55	52.03	35.17	100.03	101.44	20.76	8.01	2.16	4.22	1.24
162	15.19	36.87	49.28	18.59	51.09	38.29	99.22	101.85	19.69	8.23	2.04	3.77	1.89
163	14.19	36.66	48.34	18.23	50.03	36.75	98.11	101.91	19.64	8.07	2.58	4.04	1.81
164	13.84	36.72	47.07	18.07	48.54	36.45	96.32	99.88	19.60	8.34	1.89	3.64	1.34
165	12.35	41.27	46.15	18.97	53.43	41.48	95.44	95.79	19.31	8.31	2.94	3.08	1.83
166	13.46	35.86	45.84	17.66	48.47	43.54	93.02	92.63	18.91	7.82	2.03	3.42	1.62
167	13.84	30.37	44.81	15.90	42.97	42.36	90.70	89.99	18.92	8.40	2.13	2.96	1.43
168	12.67	34.71	43.93	16.94	45.56	40.40	88.00	89.17	18.03	7.51	1.97	3.01	1.89
169	12.29	34.06	42.57	16.55	43.81	39.51	86.28	87.97	17.34	7.95	1.98	2.90	1.70
170	11.60	33.65	42.53	15.90	43.16	41.76	83.73	85.69	17.76	7.95	2.94	2.59	1.07
171	11.70	32.68	41.44	16.29	43.78	44.57	82.94	81.06	17.46	7.19	1.68	2.45	1.89
172	11.29	32.10	40.52	15.61	42.95	44.60	81.86	79.81	16.76	7.78	2.55	2.81	1.30
173	11.54	31.67	39.97	15.41	40.83	40.38	78.88	78.75	16.45	7.43	1.78	2.12	1.02
174	10.84	31.16	39.20	15.18	39.92	40.12	76.52	76.38	16.61	6.88	2.02	2.13	1.75
175	10.19	30.44	38.72	14.35	39.36	41.10	74.84	74.35	15.70	7.32	2.50	2.01	0.72
176	10.61	29.45	37.59	14.48	39.46	42.35	73.62	70.07	16.16	7.39	2.16	2.69	1.40
177	10.02	28.64	36.74	14.35	38.50	39.26	71.33	68.03	15.27	6.62	2.07	2.10	1.59
178	9.97	27.71	36.14	13.76	36.00	34.12	67.98	66.72	15.18	6.53	1.85	1.98	1.13
179	10.04	27.76	34.99	13.41	36.15	34.31	66.92	64.80	14.96	6.81	1.83	2.33	0.29
180	9.43	27.26	34.85	13.25	35.29	33.92	64.83	63.54	14.72	6.17	1.86	2.47	1.42
181	9.73	26.09	33.85	13.14	35.18	35.90	64.24	61.83	14.39	6.33	2.82	2.28	0.86
182	8.84	25.82	33.48	12.74	34.52	35.43	63.19	59.03	14.20	6.43	1.38	1.77	1.49
183	9.36	25.16	32.48	12.59	33.58	33.50	61.26	58.27	13.69	5.69	1.82	2.14	0.82
184	8.87	24.89	31.85	12.07	32.52	30.20	58.75	57.55	13.65	6.53	2.05	1.95	0.99
185	8.59	24.20	31.51	12.11	31.83	28.45	56.53	56.19	13.59	5.99	1.93	2.29	0.64
186	8.61	23.77	30.39	11.67	31.34	31.22	55.80	53.87	13.38	5.54	2.09	1.75	0.37
187	8.29	23.06	30.09	11.37	30.89	31.55	55.69	51.55	13.05	5.40	1.91	1.77	0.86
188	7.94	22.70	29.49	11.44	30.19	31.85	53.82	49.69	12.73	5.62	2.07	1.94	1.33
189	8.12	22.07	28.82	10.96	29.05	28.68	51.82	48.62	12.64	5.30	1.49	1.92	0.93
190	7.67	22.09	28.22	10.62	28.74	27.02	50.46	47.70	11.61	5.44	1.91	1.74	1.03
191	7.82	21.32	27.79	10.64	27.91	26.75	49.08	45.96	12.38	5.25	1.81	1.40	0.40
192	7.39	20.60	27.29	10.35	27.58	28.91	48.01	44.33	11.97	4.62	1.65	1.75	0.70
193	7.20	20.51	26.66	10.20	27.13	29.37	47.85	42.90	11.47	5.32	1.75	1.72	1.19
194	7.43	19.73	25.96	9.87	26.50	27.01	46.30	41.57	11.57	5.01	1.55	1.87	0.49
195	7.24	19.76	25.62	9.86	25.81	25.54	44.64	41.26	10.92	4.44	1.95	1.54	0.86
196	6.65	19.10	25.18	9.40	25.36	24.35	43.35	39.93	11.29	4.94	1.73	1.44	0.35
197	6.97	19.25	24.44	9.21	25.20	25.09	42.20	39.21	10.92	4.53	1.90	1.44	0.47

表D.1(2) つづき

198	6.42	18.33	24.42	9.21	24.15	26.18	41.80	37.48	10.59	4.88	1.66	1.16	0.90
199	6.65	18.18	23.53	8.97	23.77	26.22	40.81	36.47	10.25	3.83	1.52	1.33	0.64
200	5.91	17.38	23.31	8.74	23.08	24.94	39.14	35.62	10.12	4.77	1.35	1.48	0.82
201	6.84	17.27	22.73	8.56	23.26	23.41	39.25	34.93	9.94	4.05	1.87	0.94	0.66
202	5.74	17.50	22.20	8.28	22.42	21.77	37.18	33.40	9.93	4.08	1.72	1.46	0.81
203	5.82	16.55	22.35	8.19	22.45	20.72	36.42	33.04	9.40	4.47	1.50	0.92	0.57
204	6.17	16.19	21.34	8.29	21.65	21.99	35.63	31.98	10.06	3.70	1.72	0.96	0.26
205	5.59	16.07	21.17	7.90	20.94	22.45	35.16	31.03	9.04	4.08	1.08	1.28	0.54
206	5.73	15.86	20.66	7.53	20.56	22.25	34.13	30.36	9.57	3.59	1.95	1.04	0.58
207	5.44	15.18	20.36	8.05	20.22	19.93	33.85	29.51	8.64	3.67	1.40	1.37	1.08
208	4.98	15.32	19.95	7.27	20.54	18.30	32.26	28.95	9.17	4.12	1.43	0.98	0.60
209	5.43	14.87	19.30	7.30	19.76	16.94	32.11	28.01	8.83	3.98	1.34	0.88	0.34
210	5.76	14.60	19.26	7.11	19.27	18.15	30.83	27.61	8.57	4.06	1.18	1.26	0.33
211	4.65	14.12	18.95	7.18	18.99	20.03	30.80	26.93	8.25	2.67	1.28	1.29	1.16
212	5.36	14.28	18.63	7.20	18.67	21.04	29.99	26.93	8.42	3.96	2.02	1.14	0.37
213	5.00	13.88	18.14	6.81	18.14	20.79	29.35	26.12	8.26	3.82	1.14	0.56	0.55
214	4.84	13.75	17.87	6.61	18.47	19.36	28.79	25.64	7.80	3.65	1.21	1.11	0.77
215	4.90	13.54	17.60	6.43	17.79	19.04	27.89	24.97	7.95	3.22	1.27	1.18	0.67
216	4.73	13.00	17.31	6.68	18.08	18.45	27.27	24.30	8.04	3.49	2.23	1.01	0.10
217	4.50	13.17	17.08	6.26	17.05	19.72	26.44	23.72	7.65	3.51	1.29	0.45	0.45
218	4.88	12.45	16.75	6.32	16.38	20.78	26.16	23.05	7.57	3.68	0.61	1.07	0.94
219	4.36	12.49	16.37	6.33	16.75	19.47	25.31	22.36	7.30	3.34	1.52	0.84	0.45
220	4.27	12.04	16.08	5.99	16.38	19.35	25.02	21.86	7.35	3.27	1.47	0.83	0.32
221	4.52	12.21	15.90	5.81	16.09	18.10	23.36	21.77	7.16	3.83	1.19	0.53	0.66
222	4.19	11.83	15.48	6.06	15.91	17.26	23.63	20.51	7.44	2.93	1.51	1.00	0.64
223	4.00	11.56	15.13	5.77	15.85	16.92	22.15	20.37	6.77	3.20	1.15	0.42	0.55
224	3.85	11.33	14.91	5.20	15.14	17.60	22.52	19.04	6.80	3.12	1.39	1.18	0.97
225	4.10	10.83	14.72	5.81	14.75	17.56	21.75	19.44	7.04	3.01	1.50	0.59	0.38
226	4.03	11.02	14.40	5.38	14.27	17.96	20.72	18.64	6.25	3.24	1.26	0.56	0.23
227	4.13	10.50	13.99	5.03	14.03	16.43	20.43	17.66	6.62	2.67	1.25	1.09	0.54
228	3.63	10.49	13.74	5.06	13.92	15.73	20.08	17.66	6.40	3.64	0.87	0.68	0.81
229	3.64	10.45	13.63	5.15	14.10	15.04	19.05	17.46	6.39	2.63	1.06	0.58	0.42
230	3.57	9.57	13.38	5.04	13.45	13.76	18.96	16.49	6.09	3.30	1.29	0.68	0.41
231	3.59	10.16	12.87	5.14	13.10	14.19	18.49	16.06	6.44	2.68	1.13	0.31	0.69
232	3.83	9.52	12.75	4.57	13.05	14.71	17.70	16.57	6.08	2.87	1.44	1.21	0.58
233	3.25	9.93	12.65	4.78	12.20	14.79	17.50	15.21	6.01	3.16	0.78	0.43	0.27
234	3.67	9.20	12.40	4.54	12.10	15.32	17.00	14.94	5.90	2.93	1.07	0.70	0.20
235	3.23	8.91	12.25	4.29	11.80	15.04	17.22	14.54	5.86	2.36	1.35	0.61	0.94
236	3.30	9.25	11.82	5.02	11.98	13.41	15.66	14.30	5.39	3.00	0.97	0.95	0.20
237	3.29	8.84	11.61	4.13	11.72	12.90	16.08	13.92	5.51	2.72	0.72	0.38	0.92
238	3.58	8.56	11.50	4.33	11.66	12.36	15.06	13.57	6.07	2.51	1.51	1.11	-0.11
239	3.11	8.38	11.08	4.10	11.15	12.23	14.43	13.47	5.21	2.60	0.93	0.52	1.19
240	3.00	8.61	10.99	4.17	11.06	12.72	14.59	12.69	5.64	2.65	1.20	0.47	0.44
241	3.31	7.97	10.93	4.17	10.75	13.37	14.33	12.70	4.99	2.97	1.42	0.83	0.59
242	2.88	8.13	10.51	3.96	10.51	13.35	14.00	11.64	5.31	2.57	0.69	1.08	0.51
243	2.89	7.91	10.38	4.00	9.70	13.24	12.87	11.56	5.48	2.78	0.70	0.47	0.25
244	3.07	7.88	10.34	3.76	9.98	12.25	13.17	11.47	4.37	1.73	1.39	0.32	0.69
245	2.82	7.46	9.94	3.67	9.93	11.64	12.37	11.11	4.82	2.32	1.03	0.51	0.16
246	2.80	7.36	9.74	3.66	9.52	10.83	11.74	10.49	5.21	2.64	1.02	0.89	0.87
247	2.80	7.23	9.59	3.28	9.39	11.64	11.73	10.05	4.80	2.22	0.89	0.31	0.29
248	2.65	6.83	9.23	3.62	9.15	11.49	11.32	9.93	4.65	2.17	1.34	1.01	0.11
249	3.02	7.25	9.20	3.51	8.86	11.75	10.68	9.73	4.38	2.43	0.96	0.42	0.46
250	2.26	6.79	8.90	3.33	8.29	11.53	10.70	8.96	4.67	2.15	0.77	0.80	1.15

表D.1(3) セラミックタイル空力加熱センサにおける空力加熱計測誤差の推定結果

[illegible]

表D.1(3) つづき

64	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
65	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
66	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
67	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
68	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
69	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
70	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
71	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
72	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
73	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
74	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
75	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
76	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
77	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
78	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
79	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
80	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
81	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
82	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
83	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
84	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
85	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
86	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
87	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
88	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
89	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
90	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
91	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
92	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
93	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
94	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
95	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
96	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
97	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
98	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
99	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.21	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
100	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.32	3.23	3.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
101	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.50	3.37	3.27	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
102	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.70	3.57	3.46	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
103	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.88	3.73	3.67	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
104	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.03	3.88	3.79	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
105	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.16	4.05	3.93	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
106	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.31	4.22	4.10	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
107	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.58	4.46	4.40	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
108	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.75	4.72	4.57	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
109	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.04	4.94	4.82	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
110	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.25	5.19	5.06	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
111	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.38	5.33	5.19	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
112	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.55	5.49	5.38	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
113	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.76	5.64	5.57	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
114	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.91	5.83	5.76	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
115	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.06	5.98	5.88	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
116	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.24	6.18	6.11	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
117	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.47	6.38	6.31	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
118	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.58	6.53	6.50	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
119	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.74	6.66	6.68	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
120	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.89	6.79	6.86	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
121	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	7.02	6.90	7.04	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
122	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	7.17	7.04	7.31	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
123	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	7.38	7.19	7.56	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
124	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	7.57	7.31	7.78	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
125	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	7.68	7.44	8.09	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
126	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	8.19	8.23	9.40	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
127	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	11.51	11.97	14.27	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
128	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	16.32	16.83	18.02	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
129	6.21	6.21	6.21	6.21	6.82	17.03	17.64	17.55	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
130	6.21	6.21	6.21	6.21	8.72	16.68	17.30	16.73	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20

131	6.21	6.21	6.21	6.21	10.20	16.37	16.93	16.24	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
132	6.21	6.21	6.21	6.21	9.99	16.08	16.48	15.78	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
133	6.21	6.21	6.21	6.21	9.50	15.65	15.90	15.08	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
134	6.21	6.21	6.21	6.21	9.03	15.05	15.26	14.38	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
135	6.21	6.21	6.21	6.21	8.60	14.67	14.78	13.97	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
136	6.21	6.21	6.21	6.21	8.03	14.28	14.33	13.65	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
137	6.21	6.21	6.21	6.21	7.33	13.83	13.89	13.20	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
138	6.21	6.24	6.21	6.21	6.96	13.50	13.44	12.95	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
139	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	13.07	13.13	12.62	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
140	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	12.45	12.63	12.29	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
141	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	11.70	12.31	11.96	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
142	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	10.83	12.08	11.43	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
143	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	10.12	11.60	10.97	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
144	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	9.69	11.12	10.59	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
145	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	9.19	10.49	10.21	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
146	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	8.75	10.06	9.80	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
147	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	8.36	9.73	9.40	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
148	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	8.04	9.21	9.13	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
149	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	6.92	8.71	8.66	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
150	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	5.28	8.17	8.19	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
151	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.69	7.68	7.83	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
152	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	4.10	7.25	7.53	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
153	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.39	6.85	7.21	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
154	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.25	6.60	6.78	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
155	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.24	6.36	6.42	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
156	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	6.08	6.32	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
157	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	5.80	6.06	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
158	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	5.65	5.82	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
159	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	5.42	5.59	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
160	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	5.20	5.31	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
161	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21	3.20	5.05	5.12	3.20	3.20	3.20	6.21	3.20
162	6.21	6.21	6.21	6.21	6.								

[illegible]

航空宇宙技術研究所報告1415号

平成12年12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 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

©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下さい。