

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-691

ファスナ結合した分岐を有する構造要素の熱伝導試験

大竹邦彦・遠藤修司・田中 太
内田伸宏

1996年4月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ファスナ結合した分岐を有する構造要素の熱伝導試験*

大竹邦彦^{*1} 遠藤修司^{*1} 田中 太^{*1}
内田伸宏^{*2}

Experimental Study of Heat Conduction for the Fastener-Jointed Aeroframe Structure with a Branch Member.

Kunihiko Ohtake^{*1}, Shuji Endo^{*1}
Futoshi Tanaka^{*1}, Nobuhiro Uchida^{*2}

ABSTRACT

We have studied experimentally the heat conduction characteristics of the aluminum alloy fastener-jointed aeroframe structural component. The component consists of two sheets of plate and fasteners. The test environment is either a vacuum or atmospheric. One side of the specimen is electrically heated. The thermocouples, which are welded on the plate, are used for temperature measurement. The effects of radiation, convection and contact thermal resistance on the heat conduction behavior of such a structural component are investigated.

Keywords : fastener-jointed structure, contact thermal resistance, temperature measurement

概 要

我々はファスナ結合したアルミニウム合金製の分岐を持つ機体構造要素の熱伝導特性について実験的に検討を行った。供試体は2枚の板を分岐点でファスナ結合しており、一端を接着した電気ヒータで加熱した。試験は真空中および大気中で実施し、板の表面に溶着した熱電対で温度計測した。輻射、対流、接触熱抵抗が供試体の熱伝導特性に与える影響を観測した。

1. はじめに

超音速機の機体表面は空力加熱によって高温となる。従ってその構造設計に際しては、機体各部の温度分布、熱応力、熱変形を十分に考慮する必要がある。機体構造は薄い板殻の集合であり、構造の熱解析に際しては、固体部材内部の熱伝導のみならず部材表面での熱の出入りを反映させることが重要である。また金属機体の組立にはファスナ結合が多用されていることも検討する必要がある。

著者らは今までに結合部を有する構造の熱伝導特性を把握するため、航空機構造材料として代表的なアルミニウム

合金 2024-T6 および 7075-T6 の板材について、接触熱抵抗に関する2種類の実験を行った。その1つは接触圧力をパラメータとした同一材料間の接触熱抵抗測定で、他の1つはファスナ結合した板材の接触熱抵抗推算である¹⁾。

本研究では熱荷重をうけるファスナ結合組立構造機体の熱解析数値計算モデルの検討に資するため、分岐を有する2種類のファスナ結合アルミ合金構造要素の加熱時の熱応答を測定した。このような構造の熱応答には上に記した熱の移動に関わる複数の因子が影響を与えており、実物に近い供試体形状で、それぞれの影響を他の要因とのバランスの中で評価していくことが必要である。また特に問題を複

* 平成8年1月8日受付 (received 8 January 1996)

*1 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

*2 三菱重工業株式会社 (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

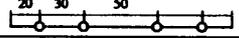
雑にする大気による対流熱伝達の影響を評価しやすくするために、真空および大気の両方の雰囲気下での測定を行った。

2. 供試体

供試体は形状によりT型およびr型の2系統に大別され、さらに結合部の接触長さ等によってT型はT1およびT2の2種類に、r型はr1、r2およびr3の3種類に分けられる。図1および表1に供試体の概要を示す。これらの図表から判るように、T型供試体は断面がL型の薄肉部材を平板に航空機用ファスナ（HL18PB-6-3, HL79-6, ボルト径約5.0mm）で結合したものである。L型部材、平板ともに材質は表面を防錆処理したアルミニウム合金2024-T62であり、肉厚は2mmである。供試体T1およびT2の結合部の接触長さはそれぞれ30mmおよび60mm、ファスナの本数はそれぞれ6本1列および6本2列（ファスナ列の間隔30mm）である。ファスナのピッチは両供試体ともに25mmで、締め付けのトルクは40 lbf·in (46.1kgf·cm)である。r型供試体は曲がり部に曲率半径10mmの丸みを付け直角に折り曲げて作られた辺の長さの異なる2つの薄板部材を背中合わせに航空機用ファスナ（NAS1103-3, NAS679A3W, ボルト径約4.8mm）で結合したものである。部材の材質はアルミニウム合金2024-T4で、板厚は2mmである。供試体r1、r2およびr3の結合部接触面長さはそれぞれ12mm、

20mmおよび40mmである。ファスナの本数、ピッチおよび締め付けトルクは、r1とr2の両供試体がともに、4本1列、ピッチ30mmで45kgf·cm、供試体r3では4本2列（ファスナ列の間隔20mm）、ピッチ30/50mmで40kgf·cmである。供試体には図1に示すように、その上端部の両面のそれぞれに、長さ50mm、幅150mmの薄いシート状（厚さ1.5mm）のシリコンラバー製ヒータ（アイデアヒータ（株）製、定格100V、80W）がシリコン接着剤（信越化学工業（株）製、KE3418）を用いて接着されている。以後、供試体の上下の方向を、シリコンラバーヒータが装着されている加熱源の方を上とし、その反対の方を下と呼ぶこととする。また特に断らない場合は、上端位置を長さの原点とする。供試体の分岐した両下端部のそれぞれには、

表1 供試体結合部概要

供試体	接触長 (mm)	ファスナ		
		本数	ピッチ (mm)	トルク (kgf·cm)
T1	30	6		46.1
T2	60	6×2		46.1
r1	12	4		45
r2	20	4		45
r3	40	4×2		40

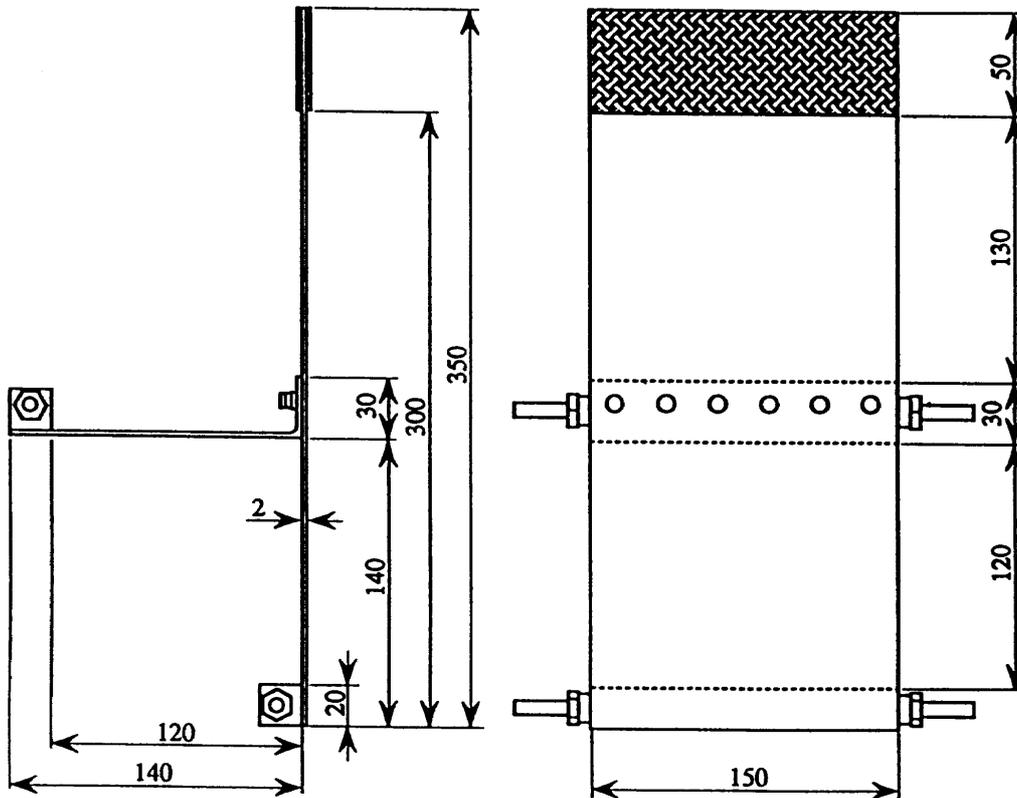


図1.1 供試体形状図（T1型）

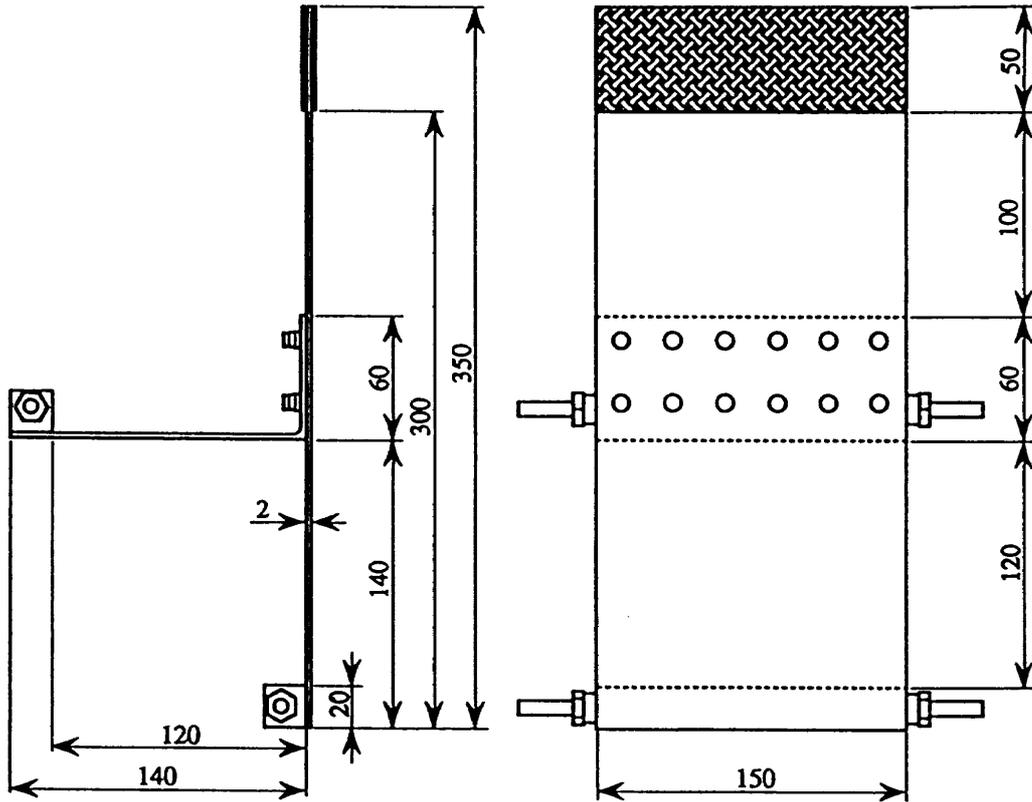


図 1.2 供試体形状図 (T2 型)

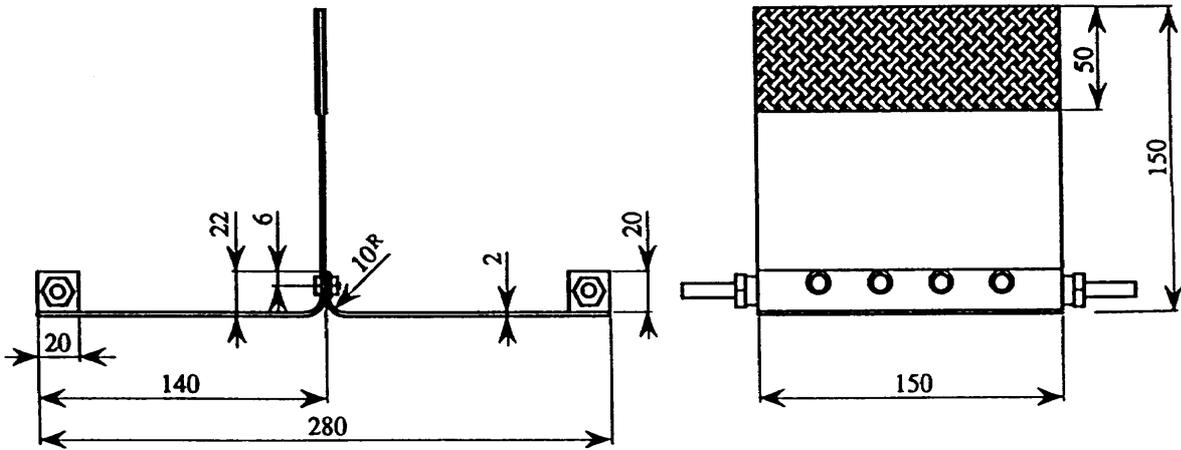


図 1.3 供試体形状図 (r1 型)

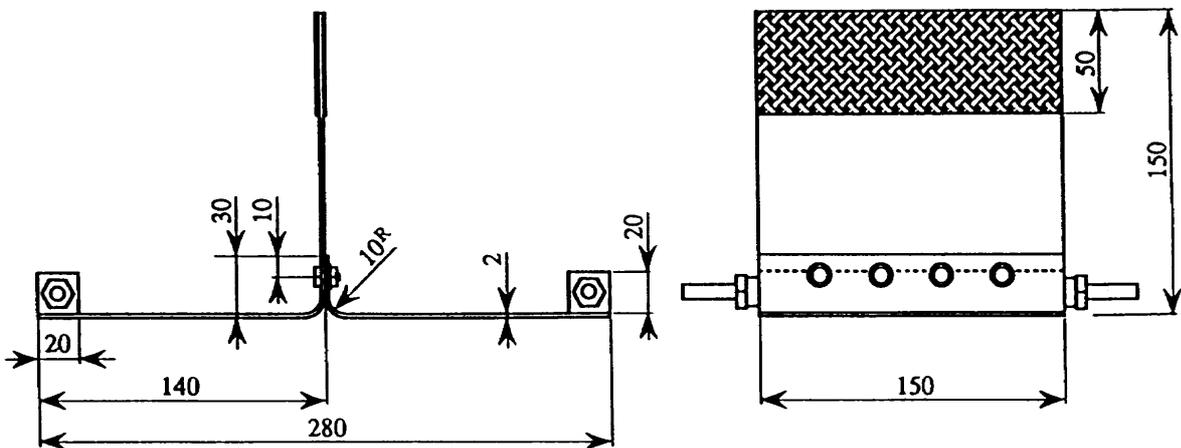


図 1.4 供試体形状図 (r2 型)

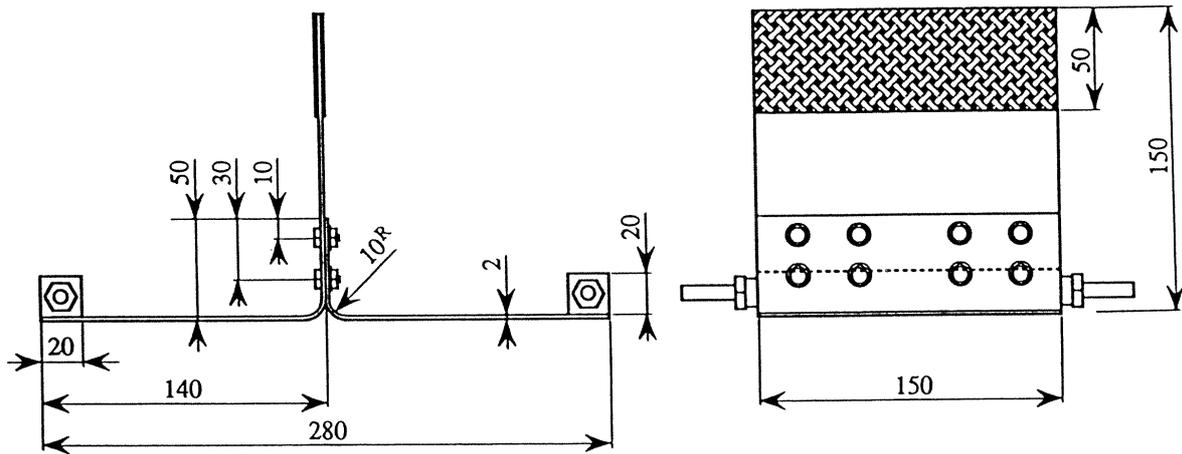
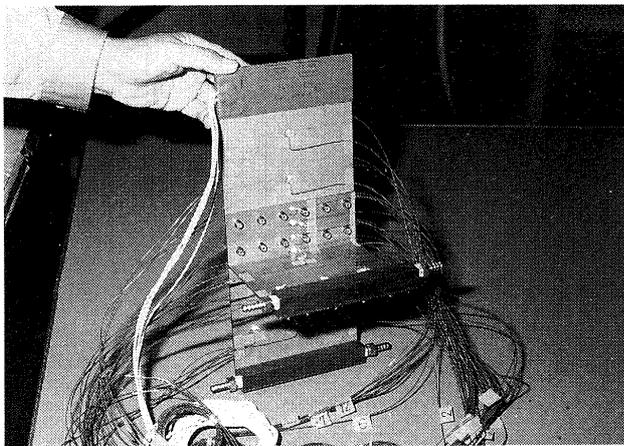
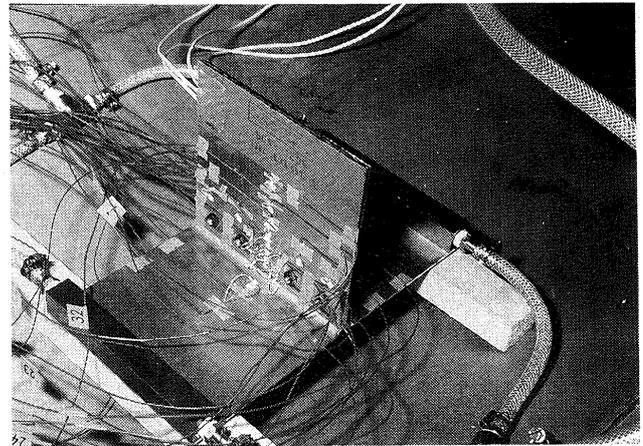


図 1.5 供試体形状図 (r3型)



T2型



r2型

図 2 供試体概観

その部位を加熱中一定温度に保つための、銅製で断面が20 mm×20mmの角形の冷却筒をビスで取り付けることが出来る。また各供試体には温度計測用にテフロン被覆された線径0.2mmのK熱電対をスポットウェルダを使って溶着固定してある。図2に供試体の外観を、また図3に各供試体の中心線に沿った熱電対の取り付け位置を示す。なお図3で○印で囲まれた番号は、隣接する囲みのない番号の熱電対と中心線上の同一座標で板の裏側位置にある熱電対を示す。

3. 試験装置および試験方法

試験装置は真空槽、加熱電力調整用スライドトランス、定温水循環装置および計測系から構成されており、その概略を図4に示す。以下にそれぞれについて説明する。

3.1 負荷装置

供試体は真空槽の中に置かれる。真空槽は内径800mm、長さ800mmのステンレス製の円筒型で、 10^{-2} torr程度まで到達可能な仕様になっている。壁面および前後の扉面には観測用の窓の他、電力および冷却水の導入や、計測信号

線の取り出しのためにフランジ(ICF70)を取り付けた開口部が幾つか設けられている。

供試体のシリコンラバーヒータへの電力の供給は、このフランジの1つに取り付けた電流導入端子を介して行われる。供給電力は真空槽外部のスライドトランス(東京理工舎製, RSA-20, 入力100V, 出力0-130V)によって調整される。他方、供試体の下端の2つの冷却筒は、真空槽壁面のフランジ付き開口部に取り付けたホースコネクタと内径6mmのテフロンブレンドホースによって接続されていて、供試体下端部の温度を一定に保った場合は、真空槽外部から定温水が供給される。定温水は定温水循環装置(HAAKE製, DC1-K15)によって設定温度に制御され毎分2リットルの流量で循環される。

3.2 測定装置

供試体の温度は熱電対で測定する。全体で36点の測定点を0.2mm径のK熱電対で測定した。測定点は供試体中心線に沿って表裏あわせて32点、そのほかに供試体の幅方向の温度分布の測定用に4点である。熱電対は表面の温度を精度良く求めるため、スポットウェルダ(共和電業GW-

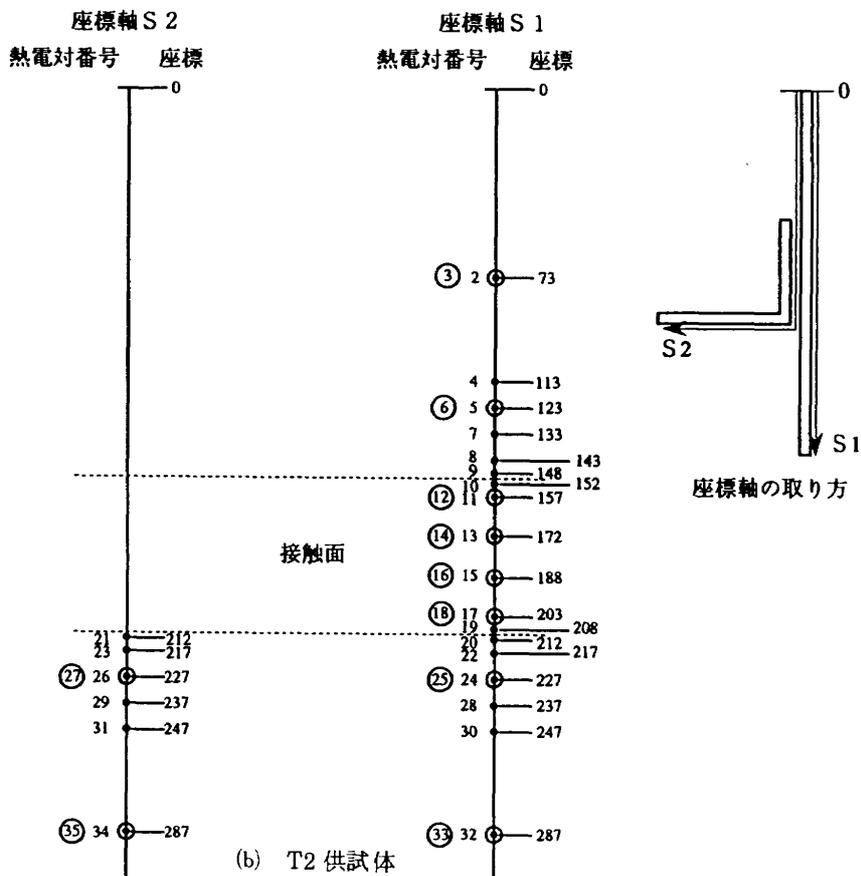
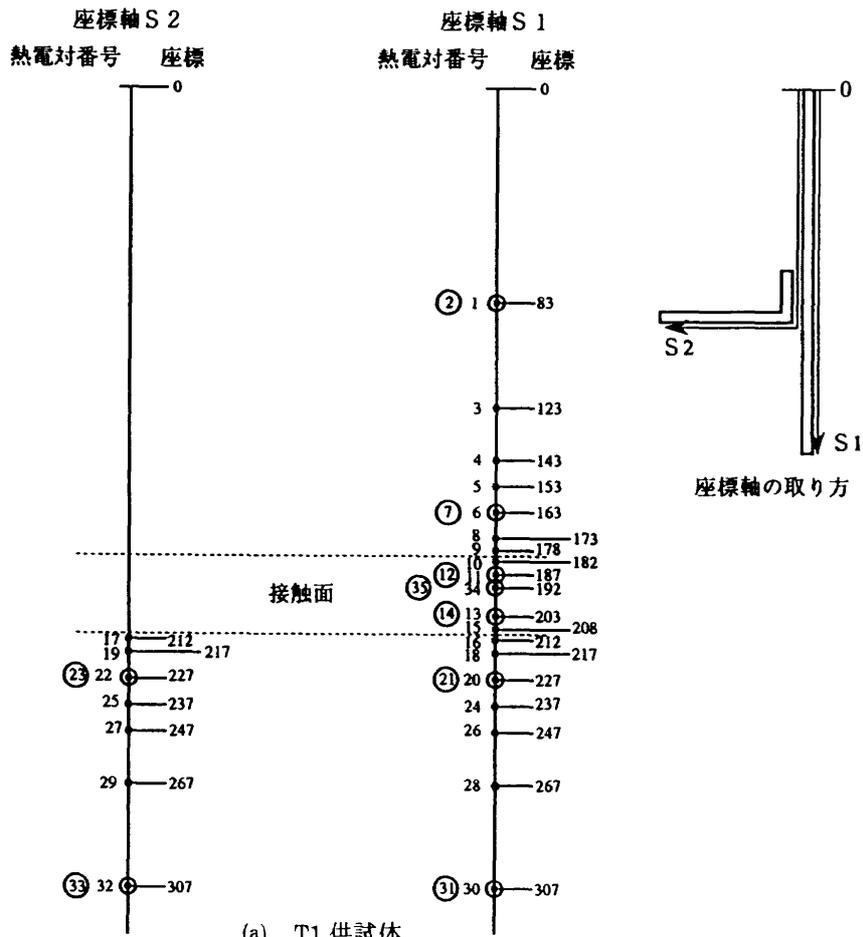
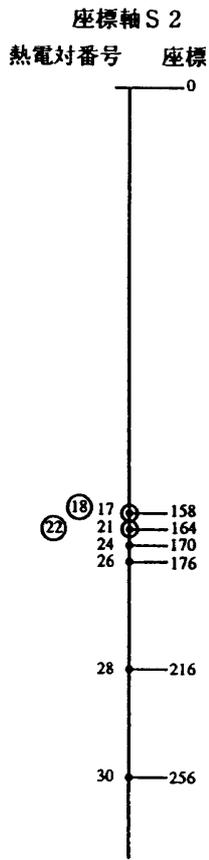
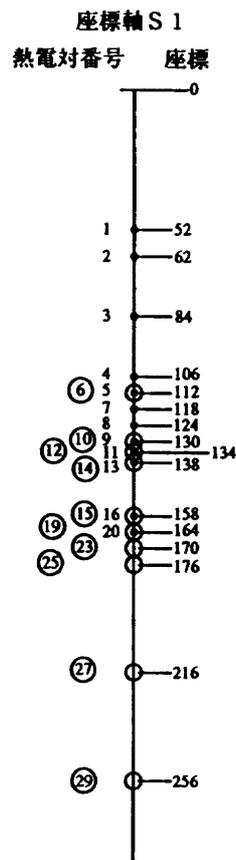


図3 熱電対取り付け位置 (単位: mm)

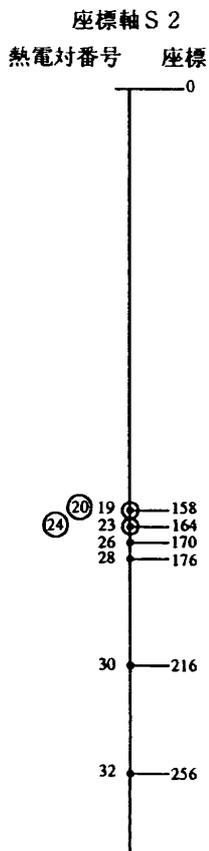
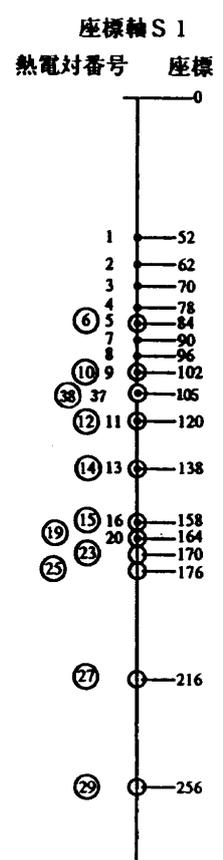
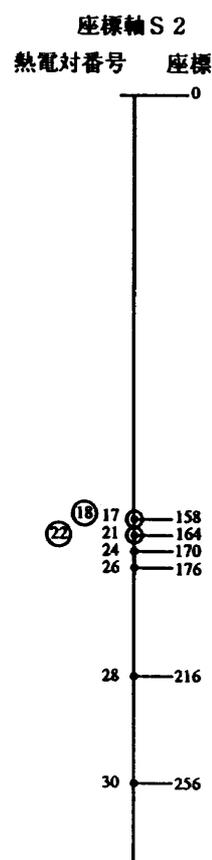
(注: 図10の横軸目盛り原点は本図座標50mm位置)



(c) r1 供試体



(e) r3 供試体



(d) r2 供試体

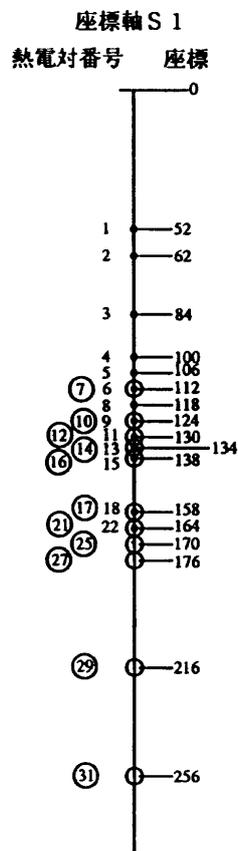


図3 終り

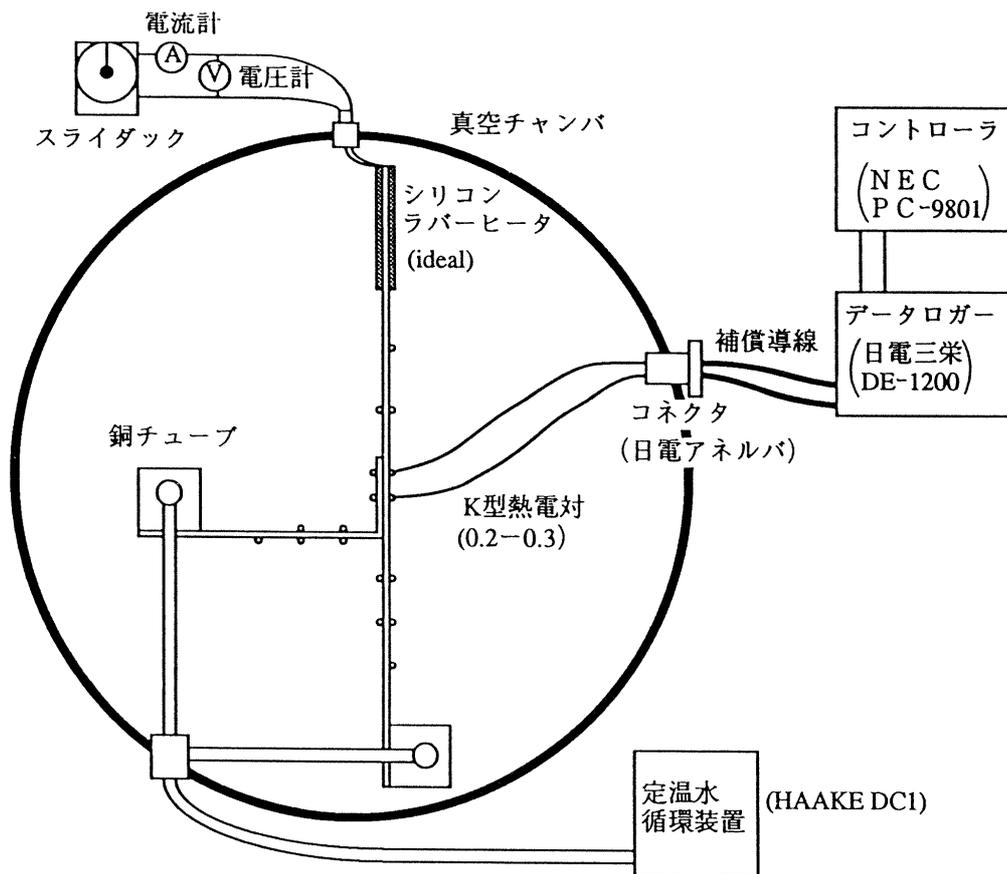


図4 実験システム概略



図5 測定システム概観

3B)を用いてアルミ供試体表面に直接溶着した。真空槽内の熱電対はその出力側に1.6mmのソケットコンタクトを接続した後、真空槽のフランジに取り付けた24極の電流端子(日電アネルバ954-7972)を介して外部の補償導線と結線され、パソコンで制御されたデータロガーに接続される。データロガーは日本電気三栄(株)製のDE1000システムを用いた。このシステムはデータロガーと専用のスキャ

ナユニット DE10-202及び NEC-PC9801専用データ収録ソフト (DE10-701)から成っていて、単一ユニットで最大毎秒60チャンネルの取り込み処理能力を有する。本実験では収録周期を30秒として使用した。測定システムの概観を図5に示す。

3.3 データ処理システム

DE1000システムで収録したASCII形式データはUNIX上で作動する日本電気製データ処理システムmicro-RESEARCHERによりグラフ化された。このシステムは時間および位置に対する温度出力をプロットできる。なおmicro-RESEARCHERの機能を補うために自製の数値データ表示ソフト(ppr)及びグラフ表示ソフト(hcp)を併用した。データ処理の流れを図6に示す。

3.4 試験方法

試験は真空槽内圧が大気圧の場合と0.5 torr以下の2つの場合に分けて行った。この設定は、自然対流の影響を調べるためと、おおよそ0.6 torr以下では接触熱抵抗が一定になる²⁾ためである。シリコンラバーヒータへの供給交流電圧及び電流は、ヒータの定格値、供試体材料の構造材としての使用温度限界などを考慮して、T型供試体では大気圧においてそれぞれ62.5-80Vおよび1-1.27A、真空中においてそれぞれ62-66Vおよび0.98-1.16Aとし、r型供

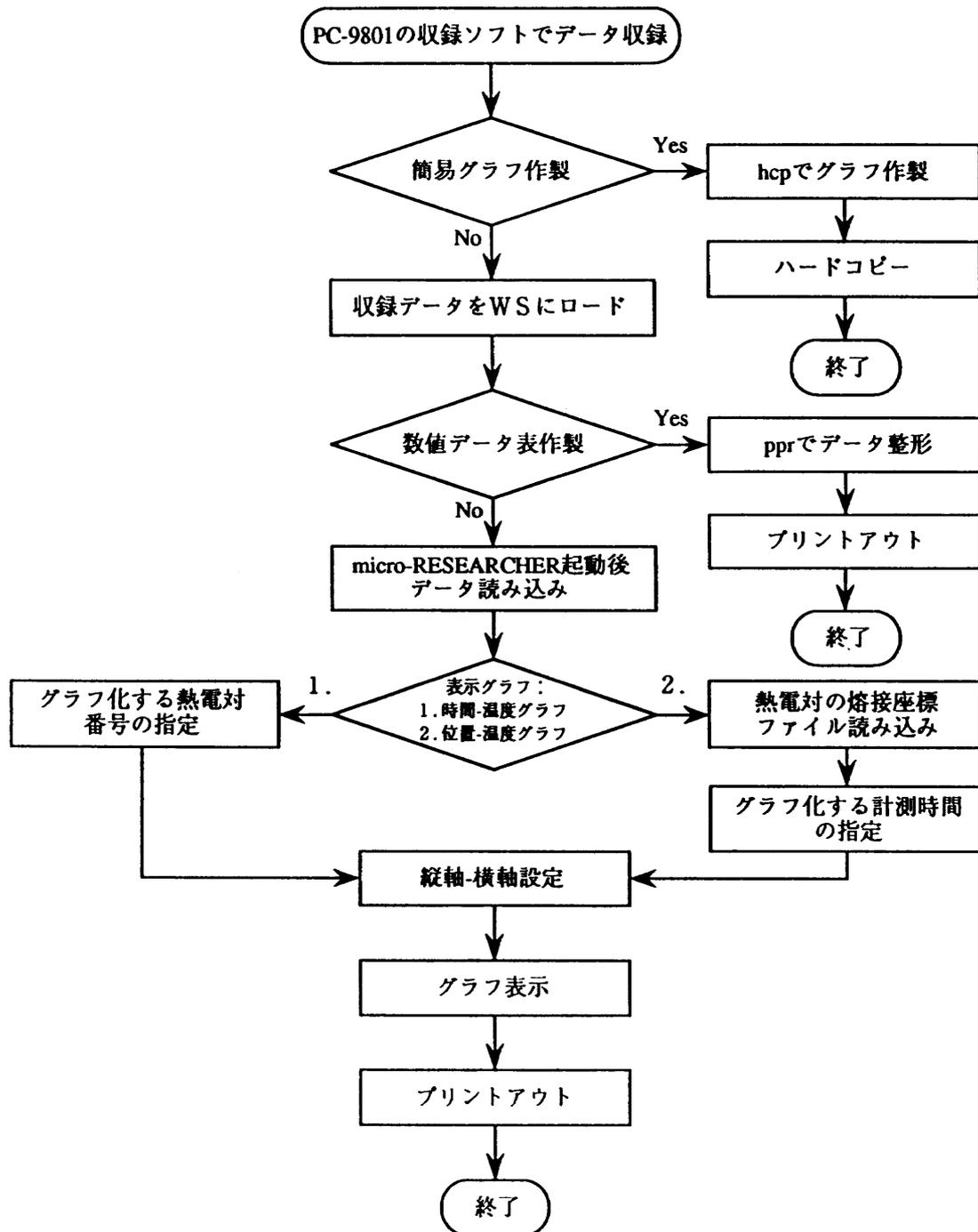


図6 データ処理の流れ

表 2 試験の条件一覧

試験番号	供試体タイプ	試験呼称	圧力 (torr)	供試体初期温度 (C)	ヒータ供給電力		供試体下端部定温水温度 (C)	ファスナ締付トルク (kgf・cm)
					電圧(V)	電流(A)		
1	T1	T1VC0526T11	0.38	20.0	66	1.16	20.0	46.1
2	T1	T1AC0526T21	大気圧	20.5	80	1.26	20.5	
3	T1	T1VN0526T41	0.22	25.0	62	0.98	—	
4	T1	T1AN0526T31	大気圧	23.8	80	1.27	—	
5	T2	T2VC0209T11	0.2	20.0	62.5	1.0	20.0	46.1
6	T2	T2AC0209T21	大気圧	20.0	62.5	1.0	20.0	
7	r1	r1VC0428T11	0.2	18.0	62	0.98	18.0	45
8	r1	r1AC0428T61	大気圧	18.5	71	1.11	18.5	
9	r1	r1VN0428T31	0.3	21.1	62	0.98	—	
10	r1	r1AN0428T41	大気圧	20.5	71	1.12	—	
11	r2	r2VC0516T11	0.2	18.6	62	0.97	18.6	45
12	r2	r2AC0516T31	大気圧	20.2	71	1.12	20.2	
13	r2	r2VN0519T21	0.3	19.5	62	0.98	—	
14	r2	r2AN0519T31	大気圧	22.2	75	1.18	—	
15	r3	r3VC0509T31	0.15	19.5	62	0.98	19.5	40
16	r3	r3AC0509T41	大気圧	20.6	70	1.11	20.6	
17	r3	r3VN0511T11	0.18	19.5	62	0.98	—	
18	r3	r3AN0511T21	大気圧	22.5	71	1.12	—	

試体では大気圧においてそれぞれ70-75Vおよび1.11-1.18 A, 真空中においてそれぞれ62Vおよび0.97-0.98 Aとした。ヒータからのこれらの供給電力の範囲では冷却水を通じた状態では、加熱後30分以内で供試体温度がほぼ定常状態になることが当初の試験で確認されたので、以後供試体の加熱時間は30分とした。これらの試験条件を表2に示す。また試験の手順を図7に、試験の状況を図8に示す。

4. 試験結果

前節で説明した条件に対応する試験結果のグラフを以下に示す。それらは各供試体について真空および大気の別に、端末条件の仕分けをして、測定点別に時間対温度をプロットしたトレンドグラフの図9および、時間別に位置対温度をプロットした温度分布グラフの図10である。トレンドグラフは一つの試験について代表的な12点を2枚のグラフに

分けて表示してあり、その内訳は上半部3点、結合部5点（内4点は2対の表裏データ）、分岐後対称な2組4点である（図3参照）。温度分布グラフは加熱を始め、中間及び加熱終了直前の3つの時点で、結合部を中心にその前後の主要データを表示した。図9では同一実験に対する12点の温度のトレンドを6点ずつ(1),(2)の2枚に分けて表示している。図9の各線種と図3の熱電対番号との対応を表3に示す。なお図9、図10では表2の試験呼称をグラフ上部に表示しているが、ここで図10の / の後方の数字は加熱開始後の経過時間の秒数を示す。これらは今後計画している数値解析の便宜を考慮したものである。

1. 端末の温度を固定した場合、真空中では約1800秒、大気中では約1200秒で平衡状態に達している。
2. 真空中に比べ大気中の方が与えた熱に対し温度レベルが全体に低い。自然対流による表面放熱の影響である。

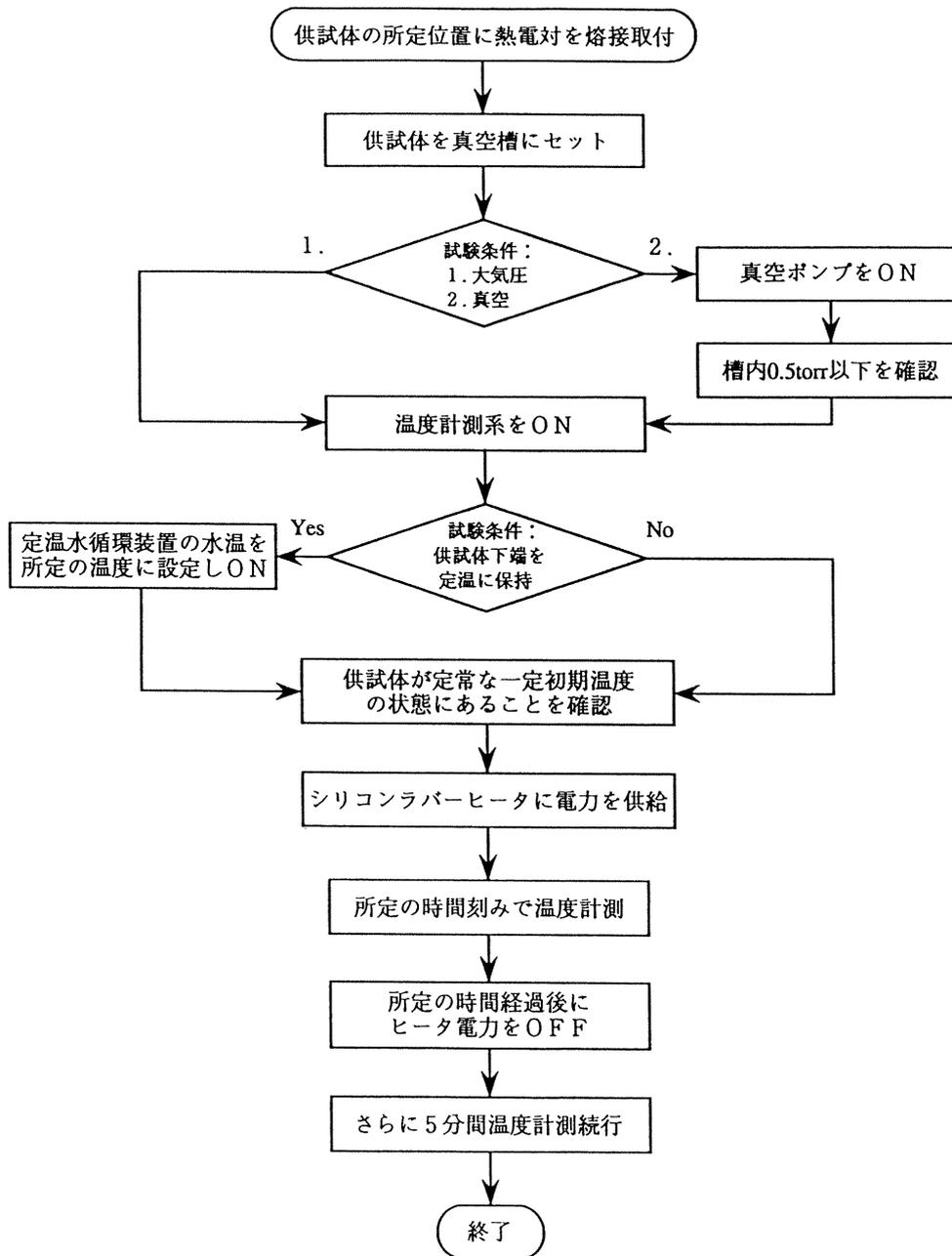


図7 試験の手順

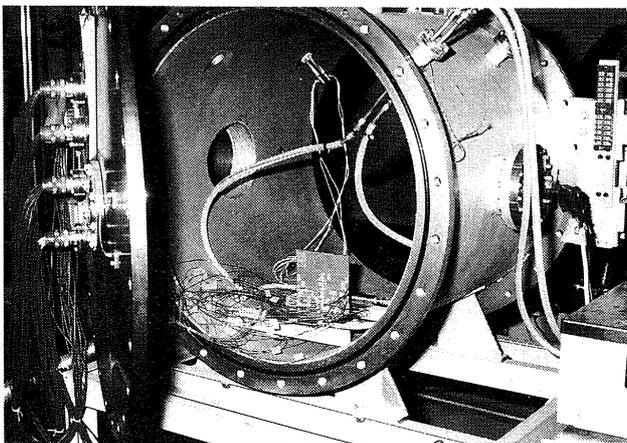


図8 試験全景（真空槽，供試体，冷却水供給系，熱電対と電極端子）

3. 真空中に比べ大気中では接触熱抵抗の影響は少ない。接触面に入り込んだ大気の熱伝導効果によると思われる。
4. 接触熱抵抗の影響は接触端面から10数mmの範囲に限られる。
5. 真空中では加熱端近傍を除き上流部分，下流部分とも温度と距離の関係は直線的である。金属表面からの放射による逃げは大きくない。
6. 末端の影響を，次節で述べるファスナ結合したものと一体削り出しのものの測定結果を考慮すると，末端から少し入ったところでの表裏の温度差は，接触熱抵抗のためである。

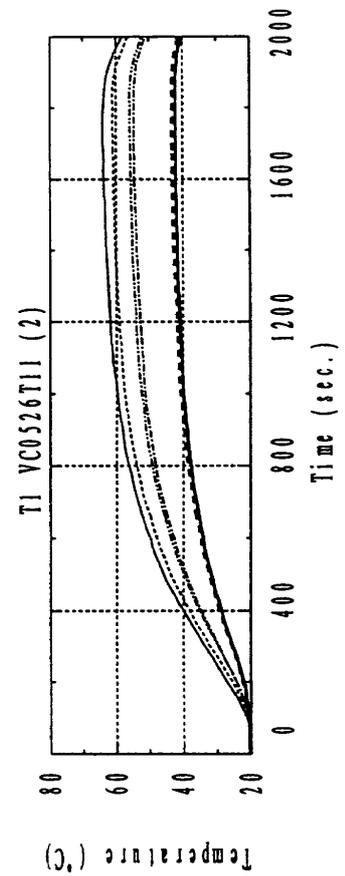
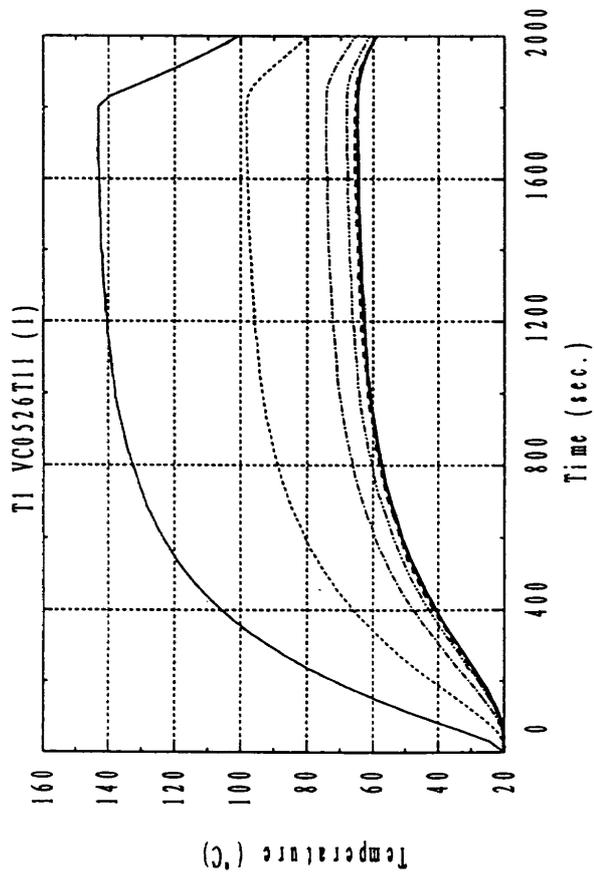
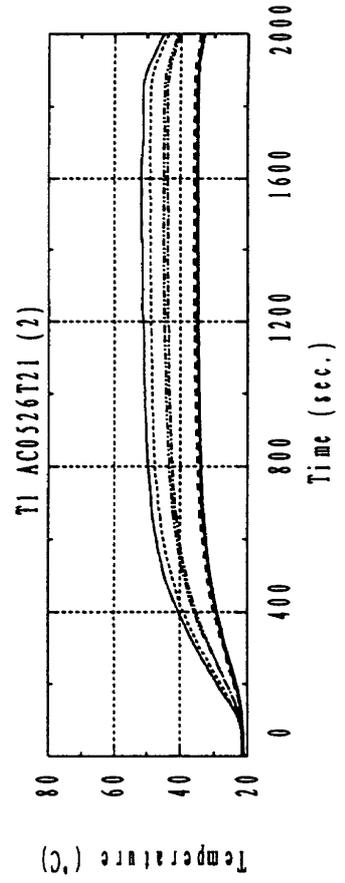
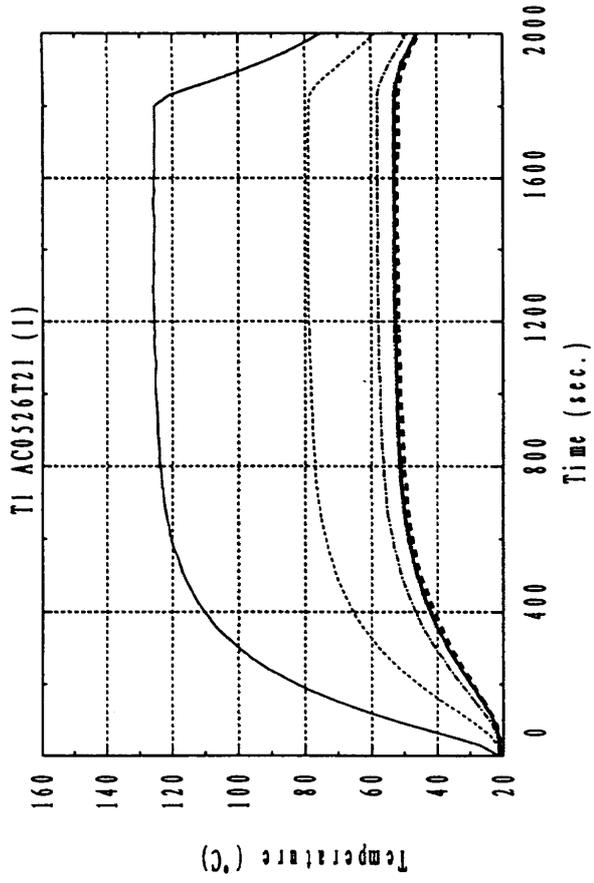


図9 温度のトレンドグラフ（線種と熱電対番号との対応は表3による）

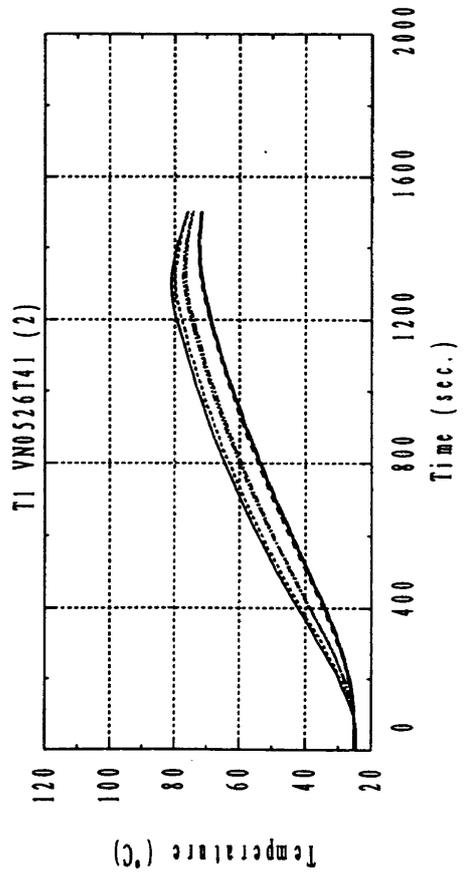
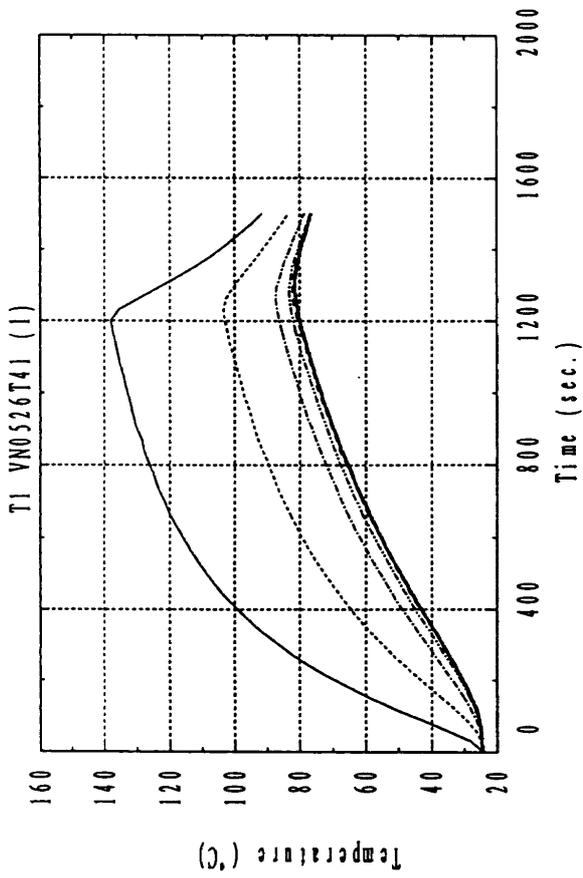
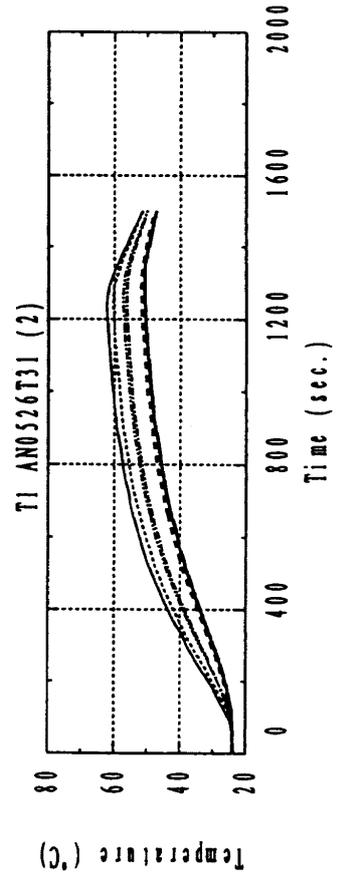
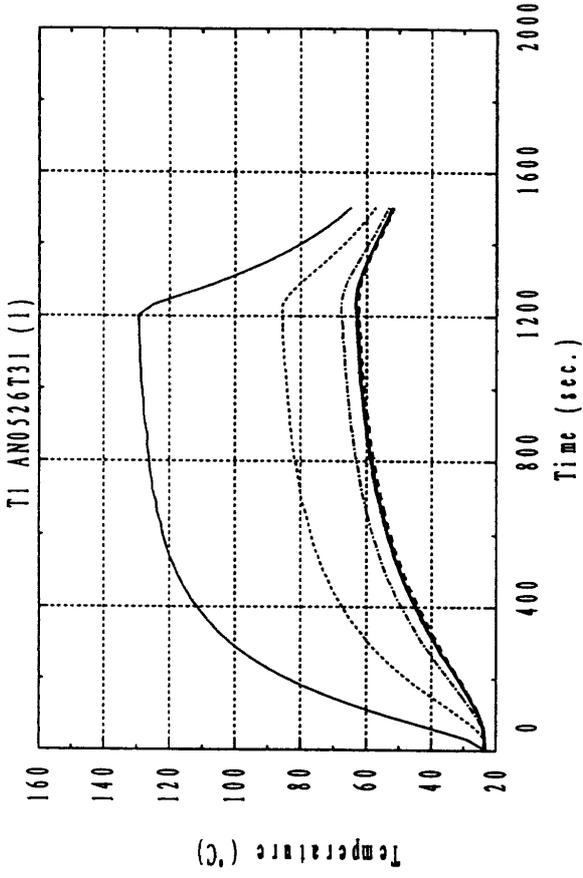


図9 つづき

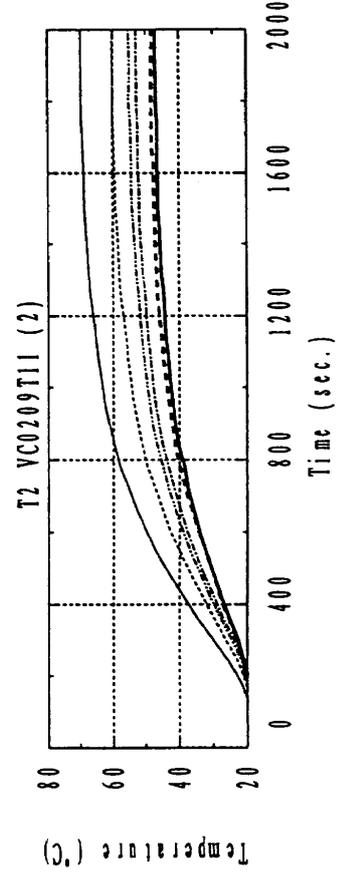
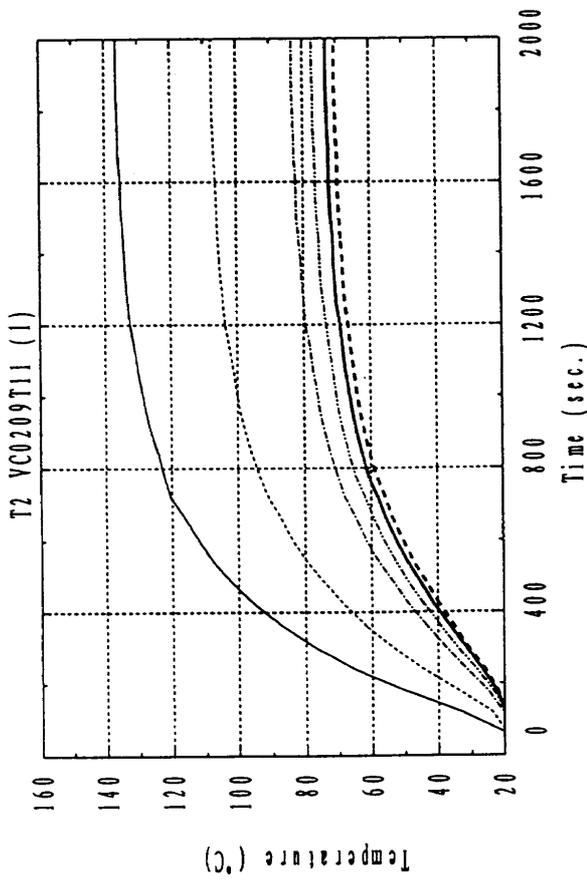
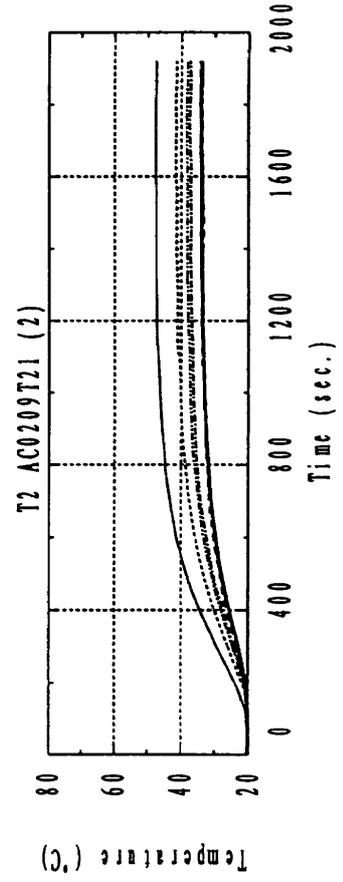
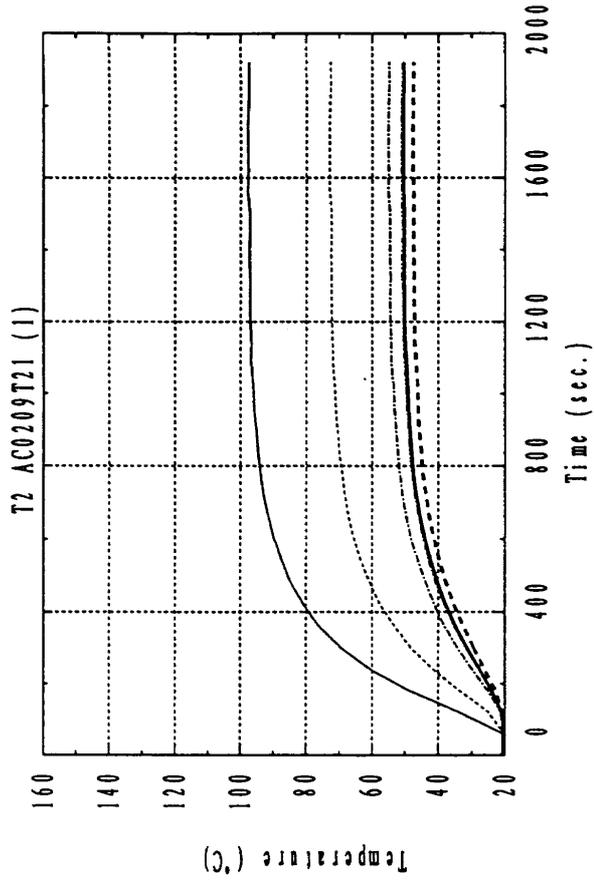


図9 つづき

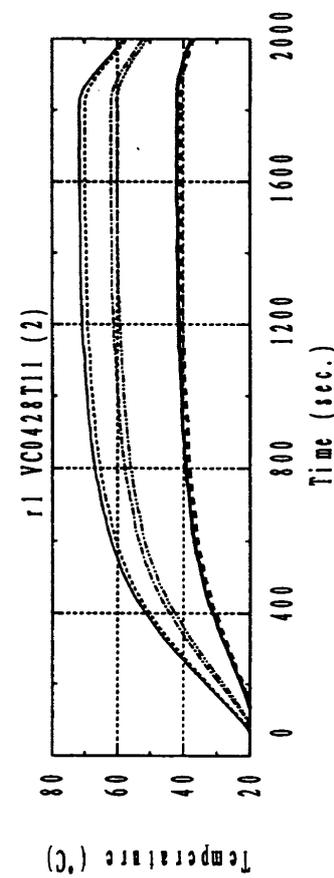
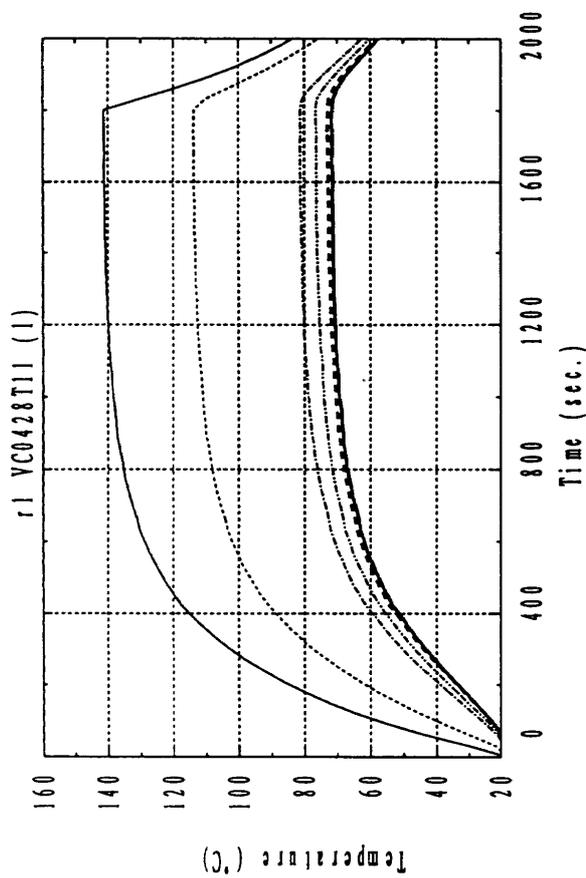
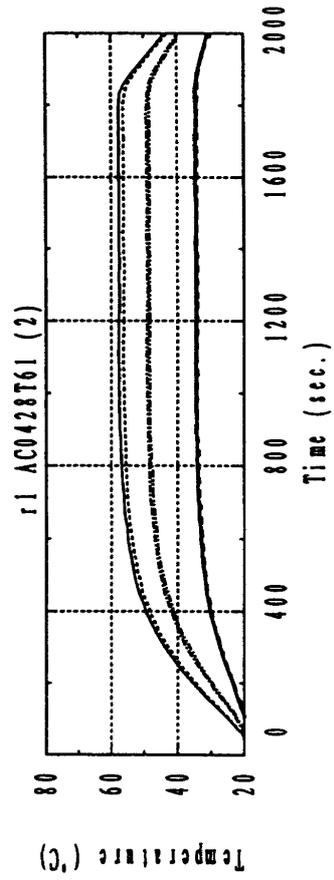
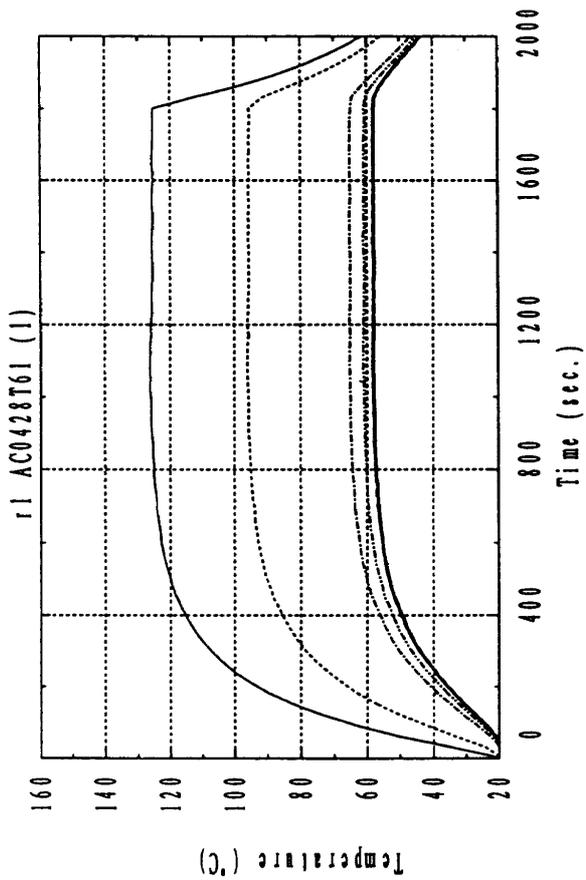


図9 つづき

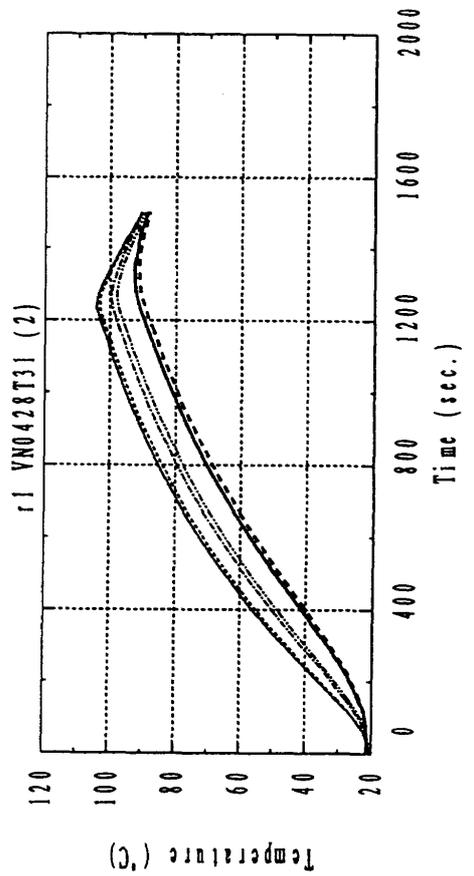
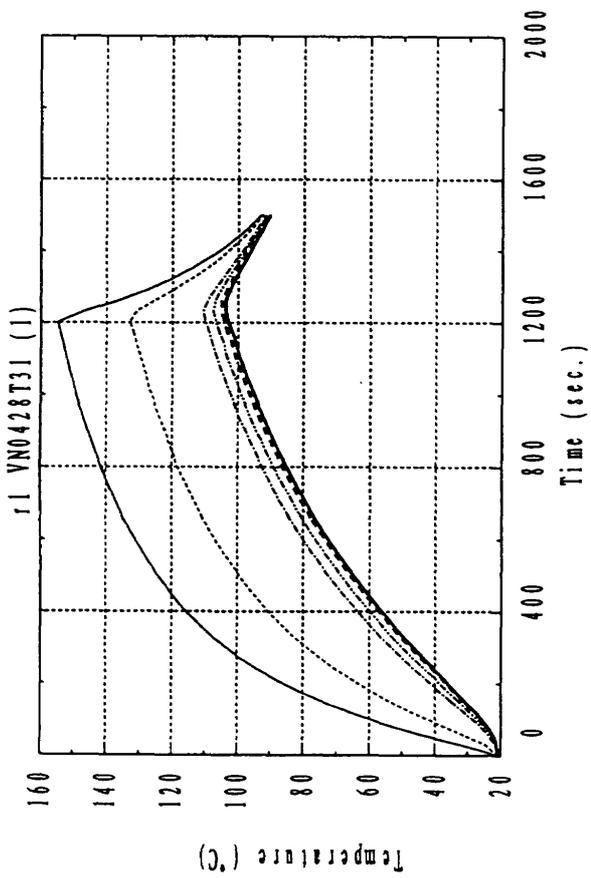
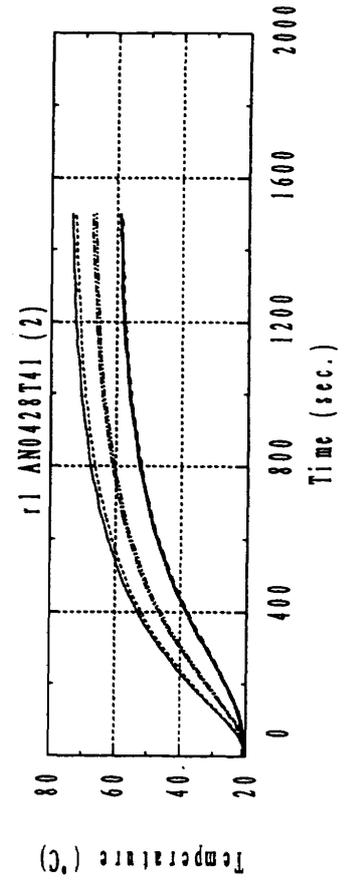
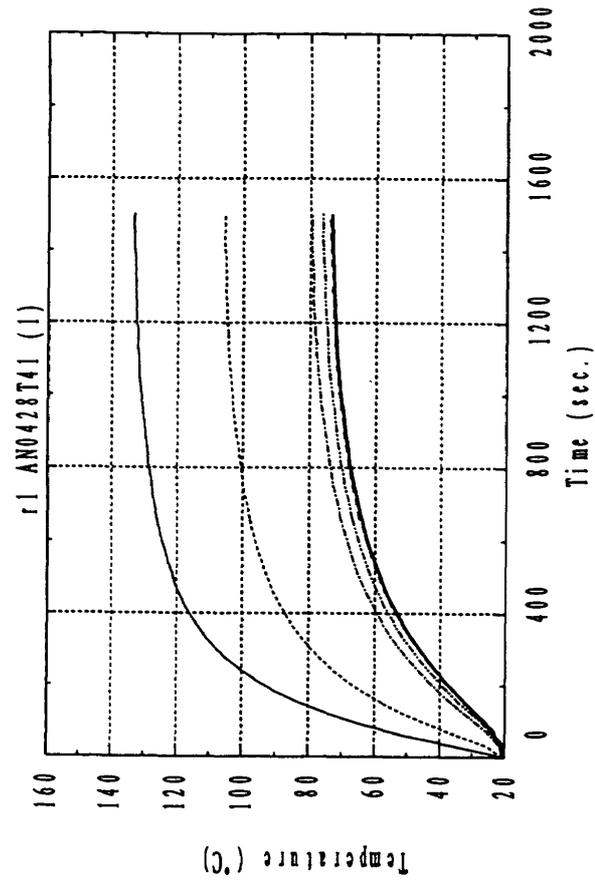


図9 つづき

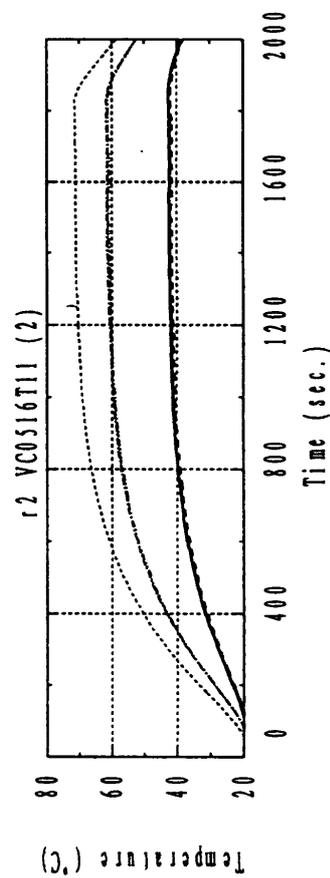
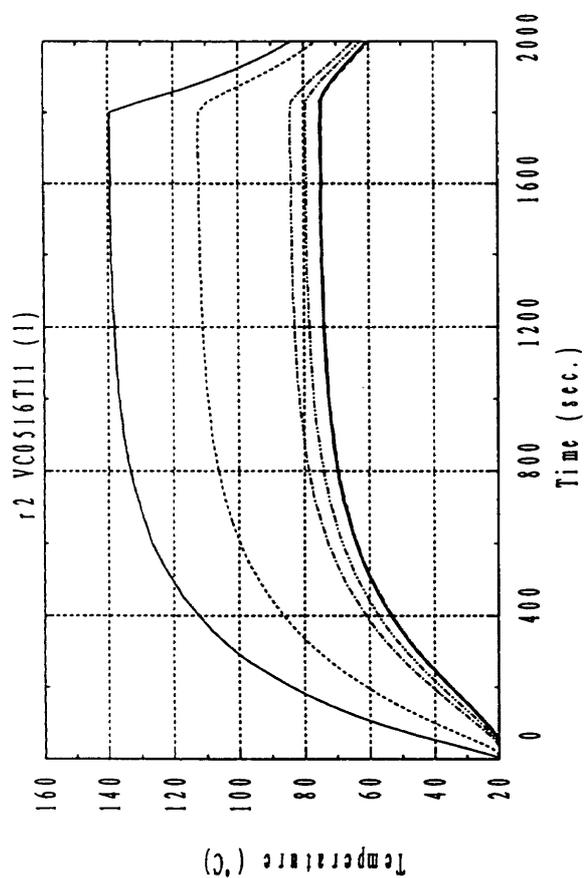
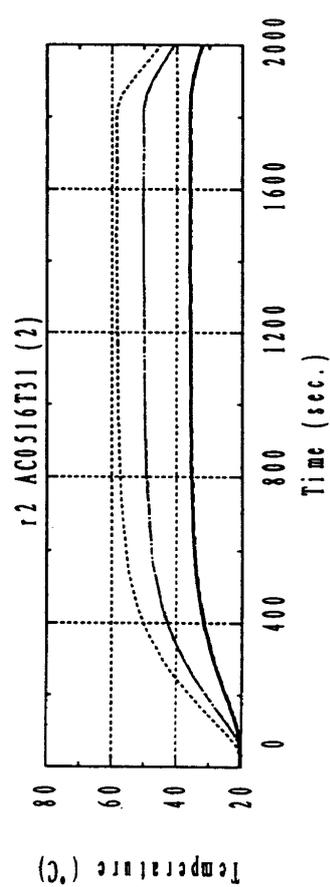
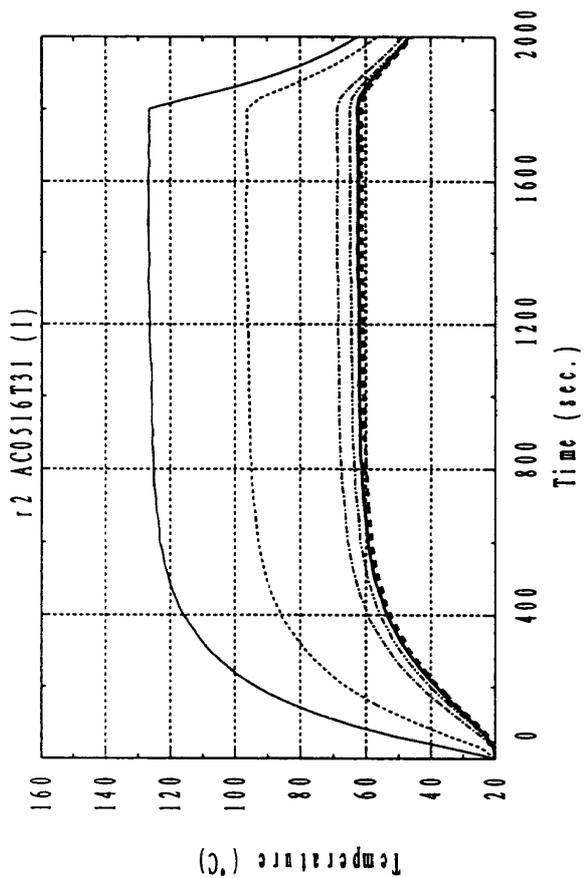


図19 つづき

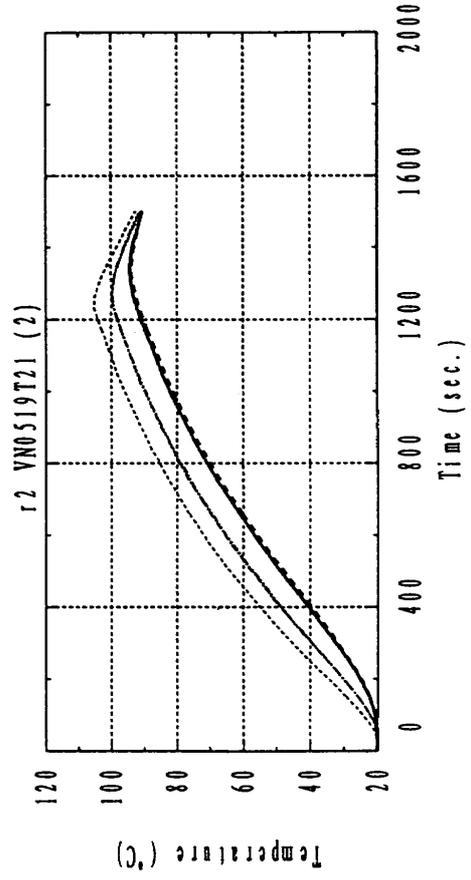
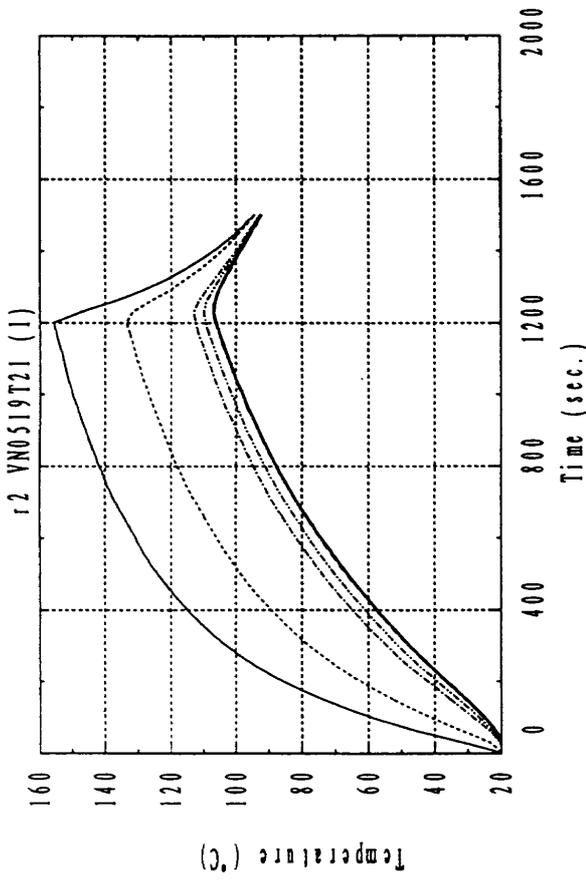
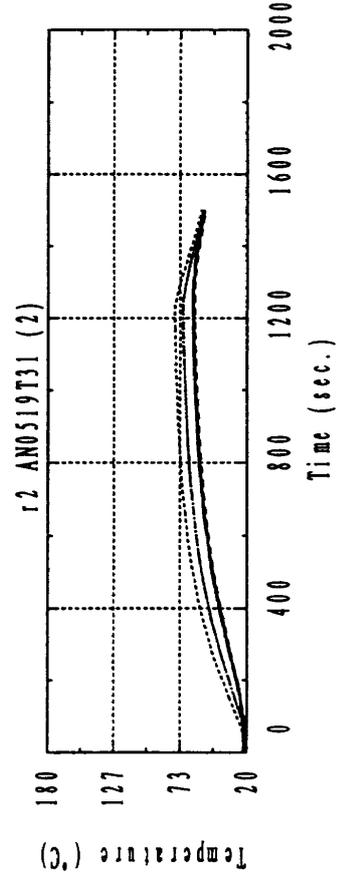
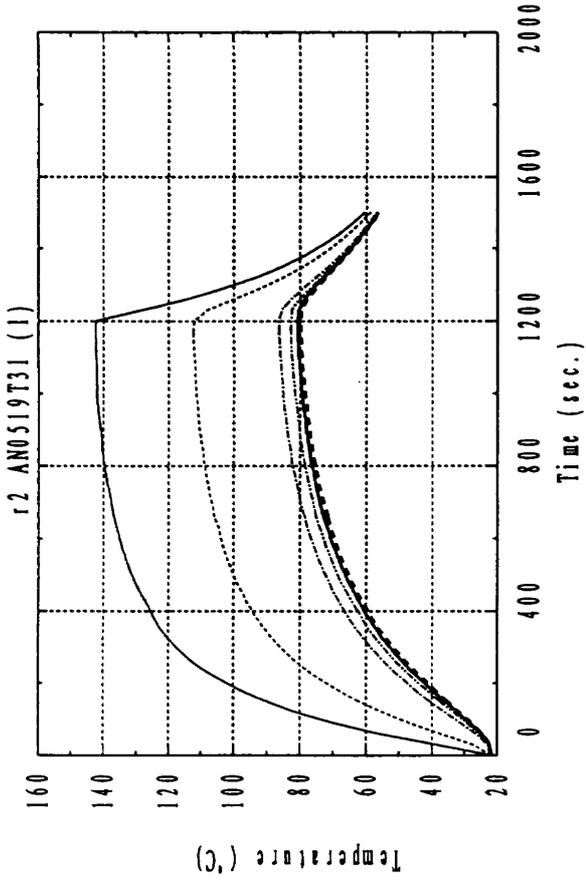


図9 つづき

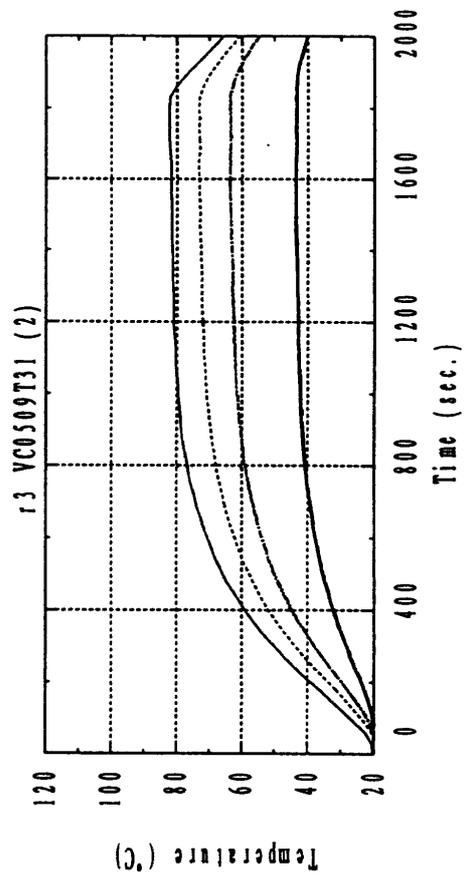
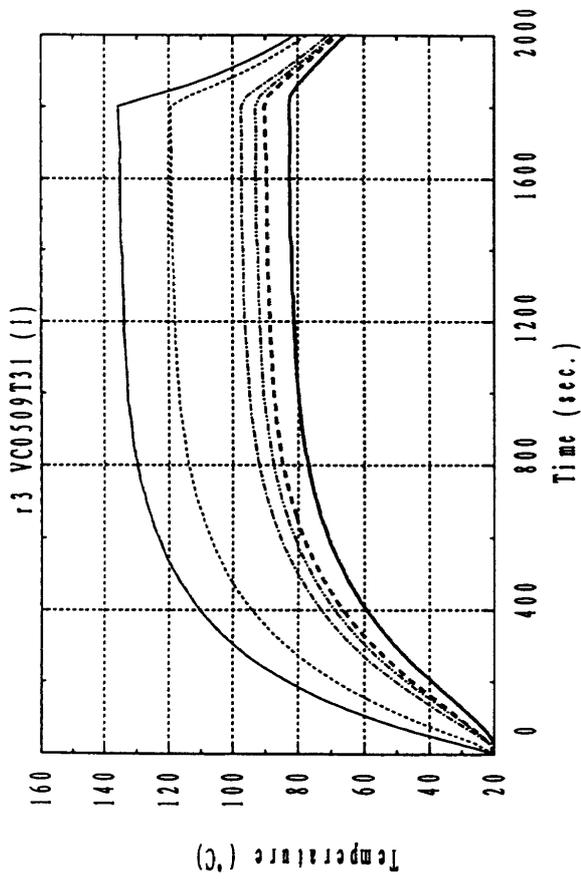
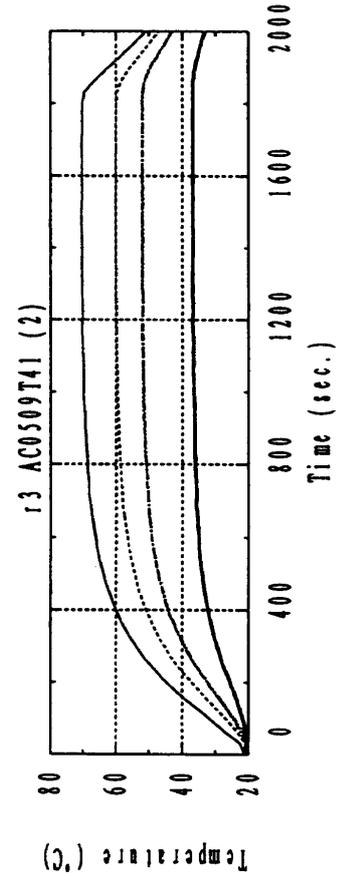
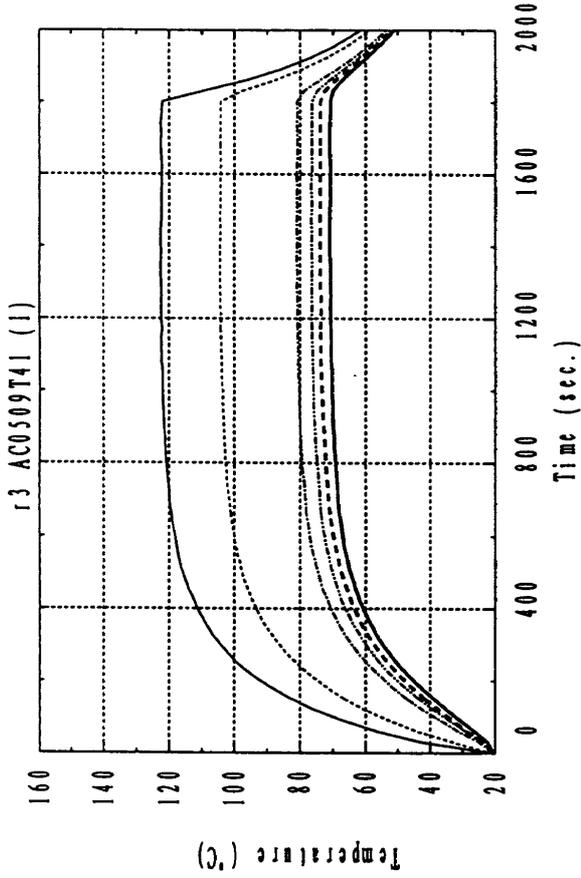


図9 つづき

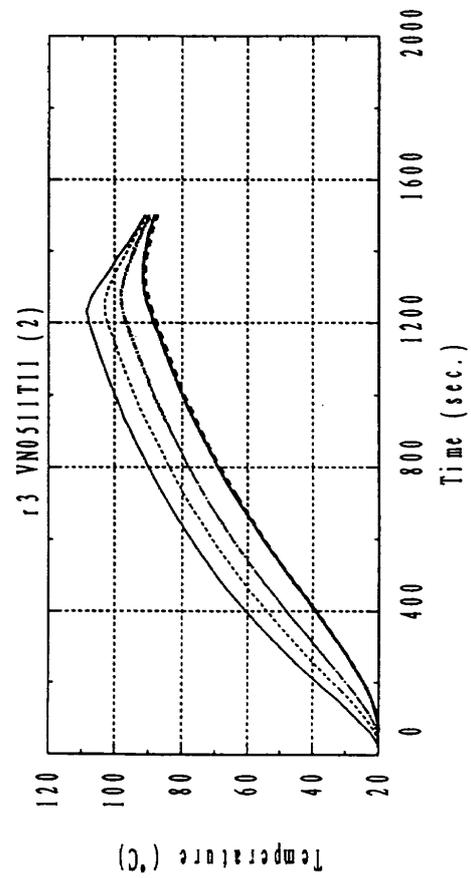
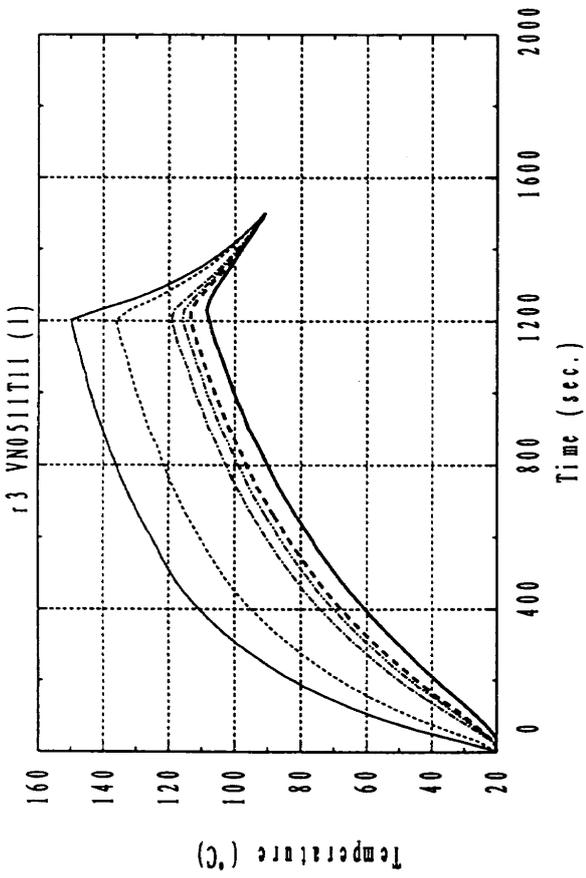
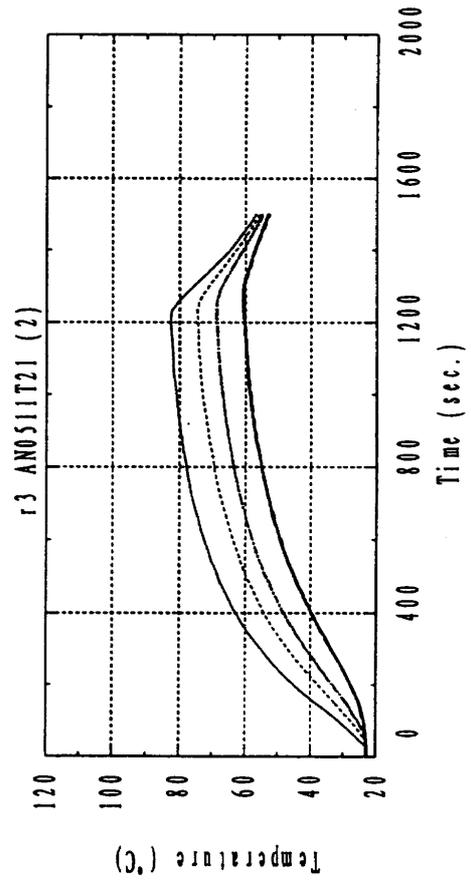
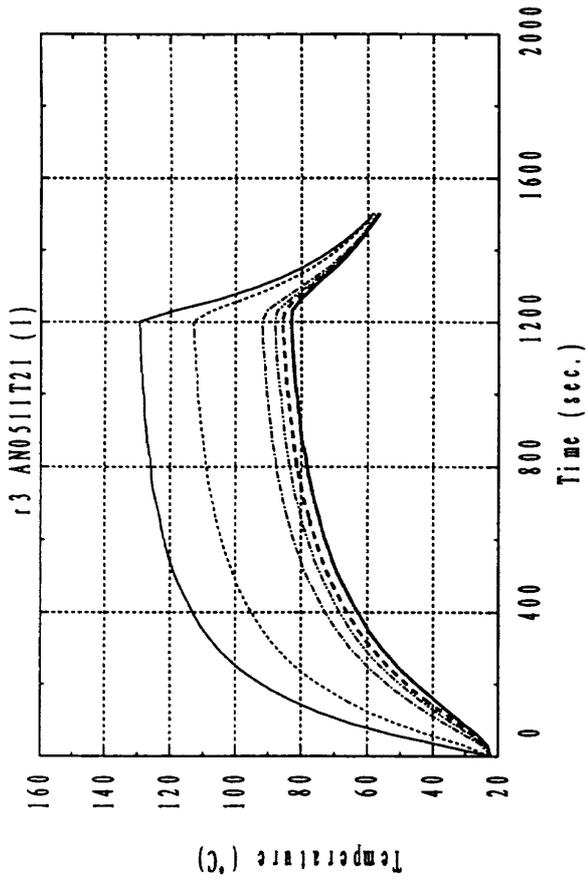


図9 終り

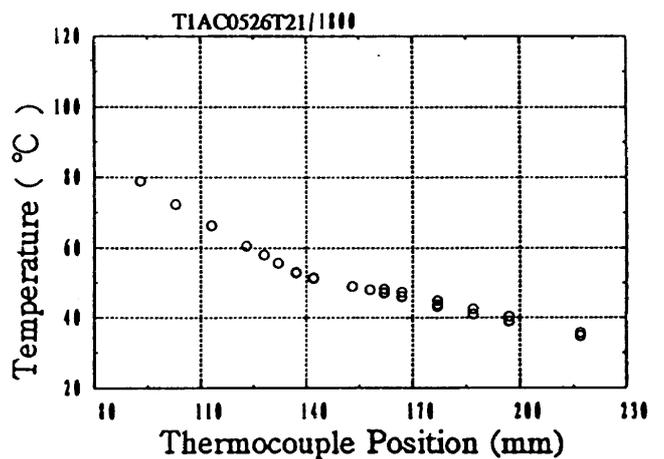
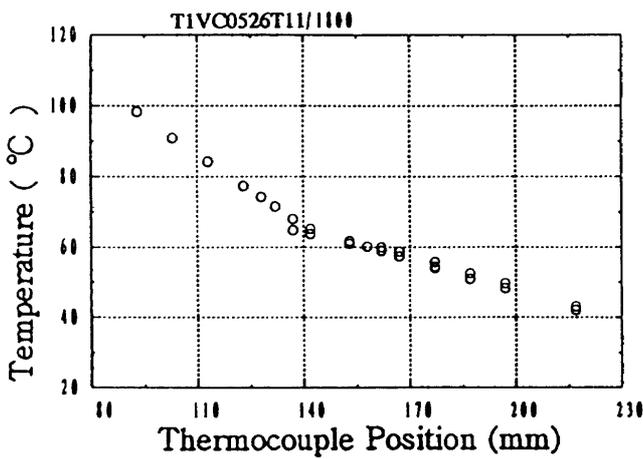
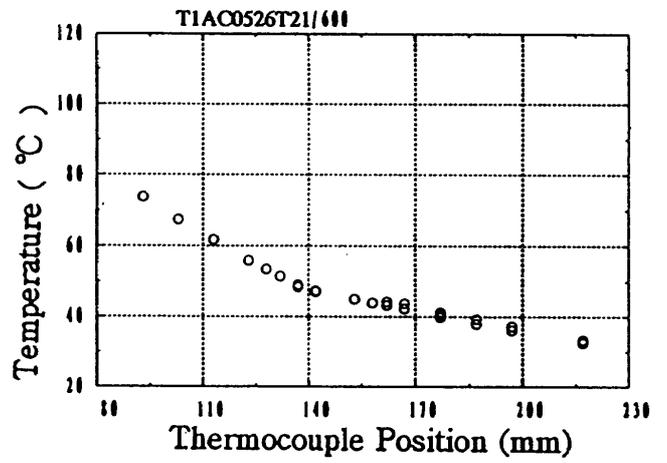
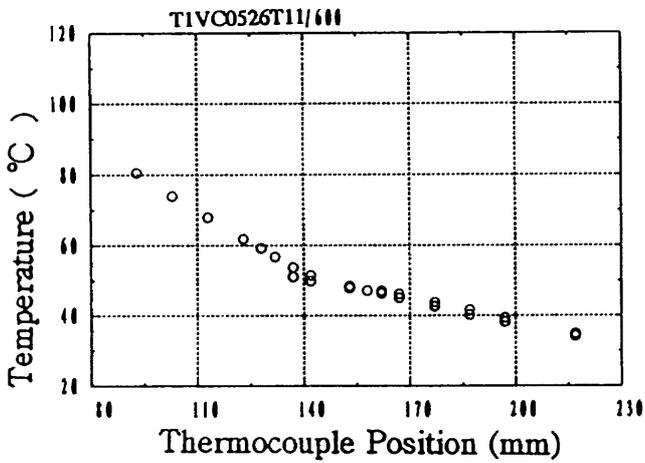
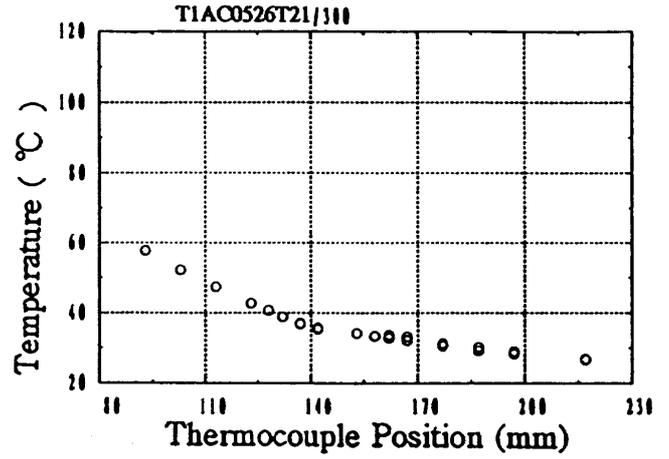
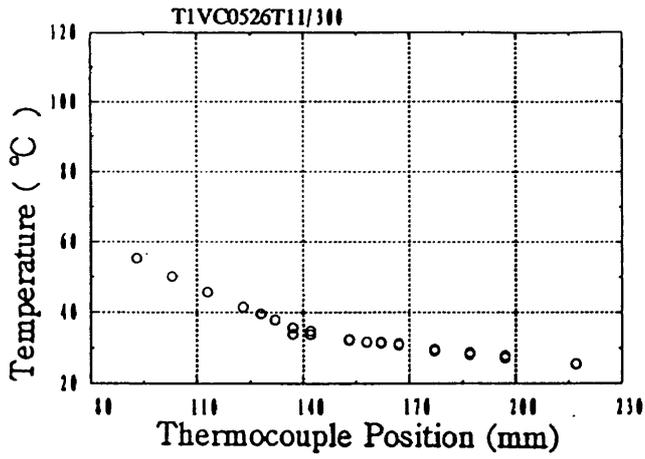


图10 温度分布图

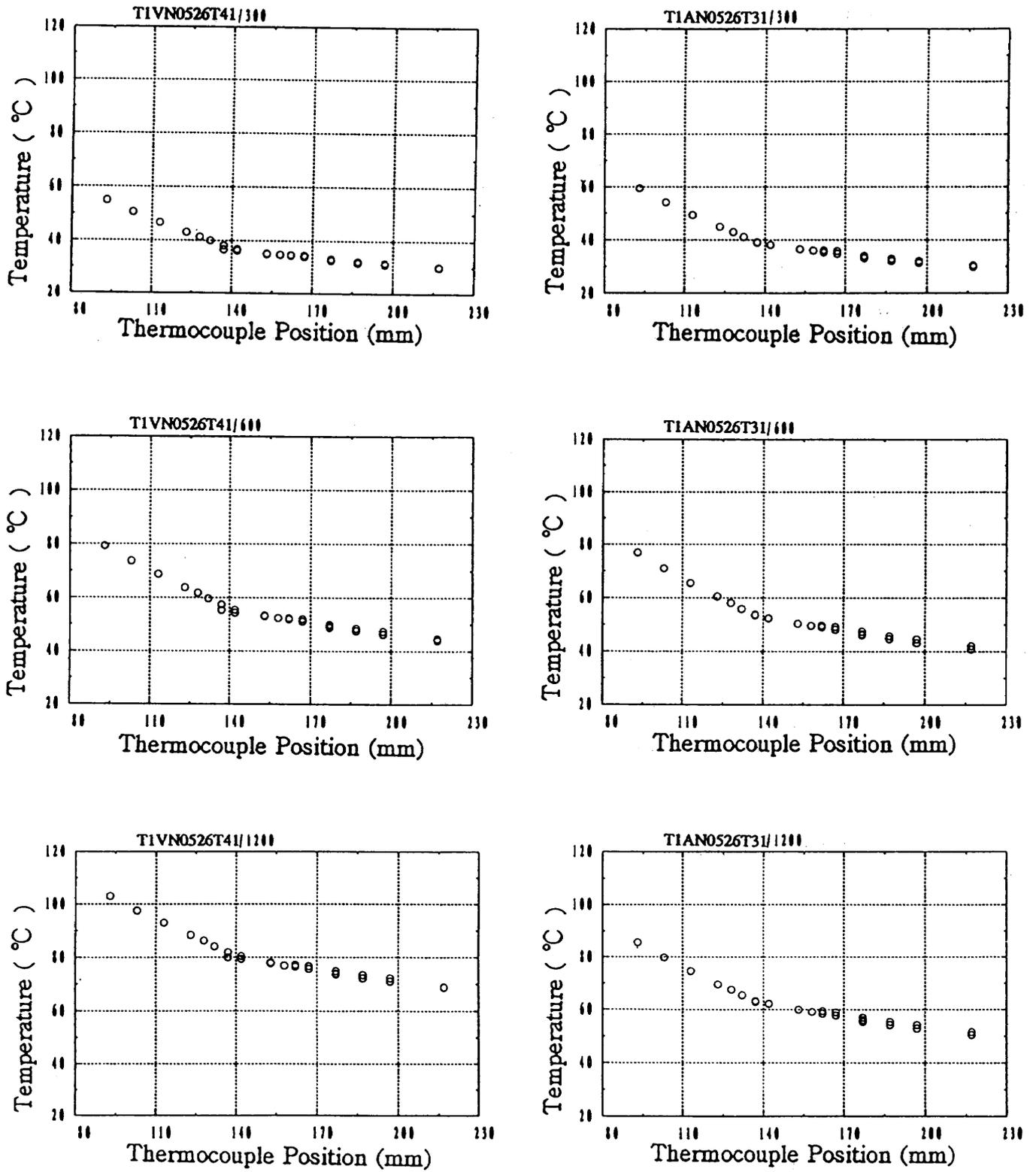


図10 つづき

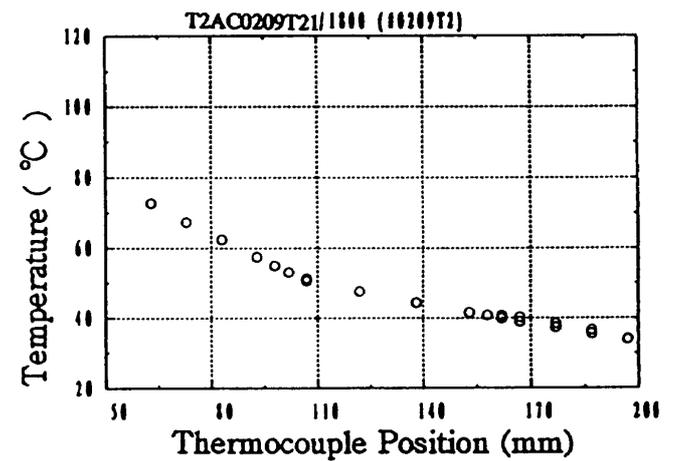
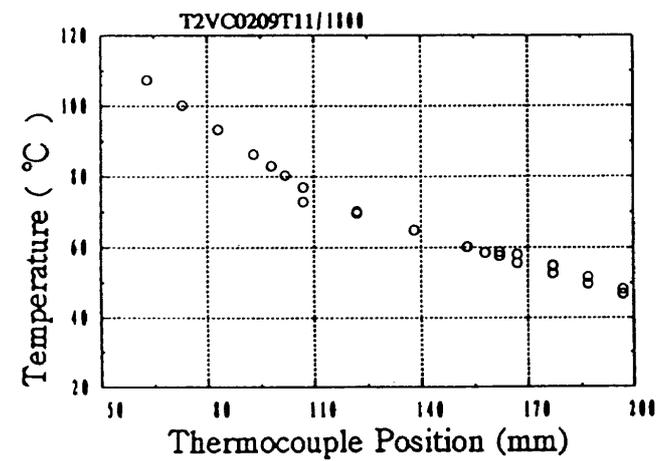
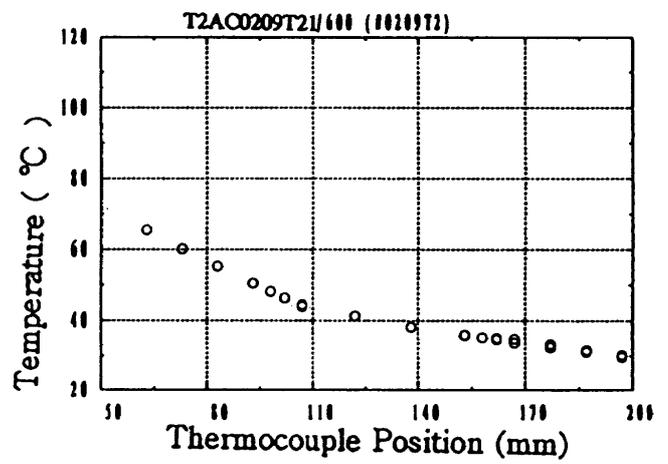
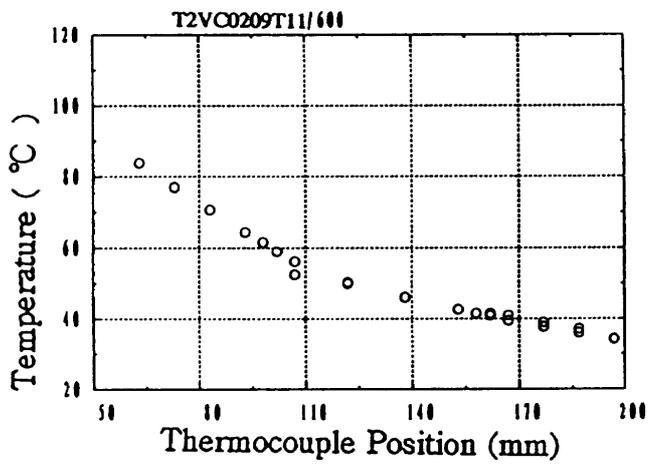
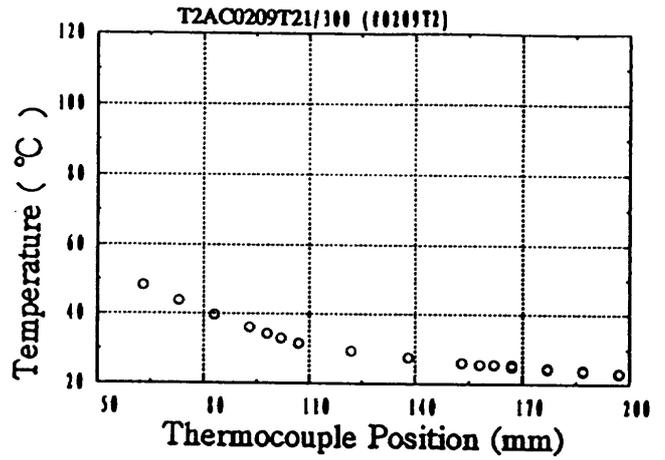
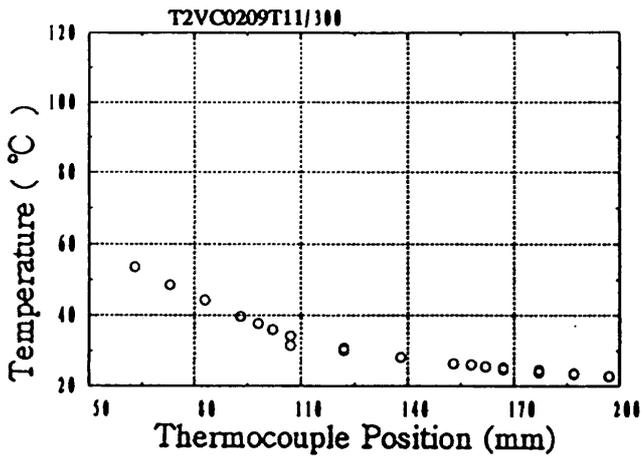


図10 つづき

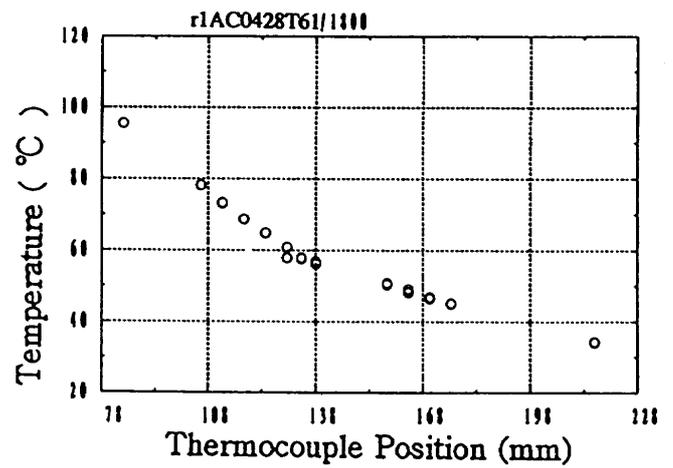
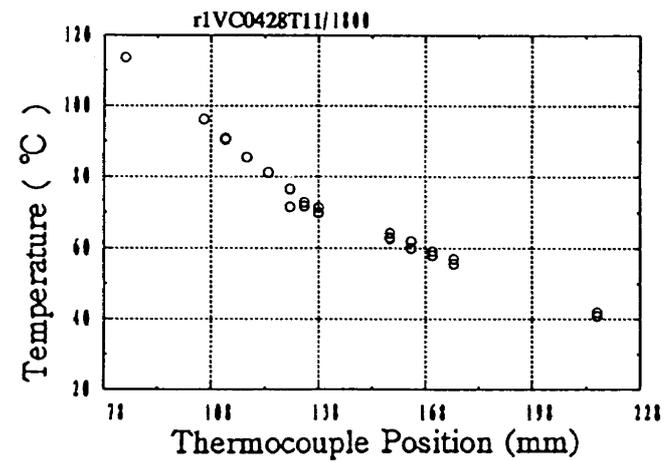
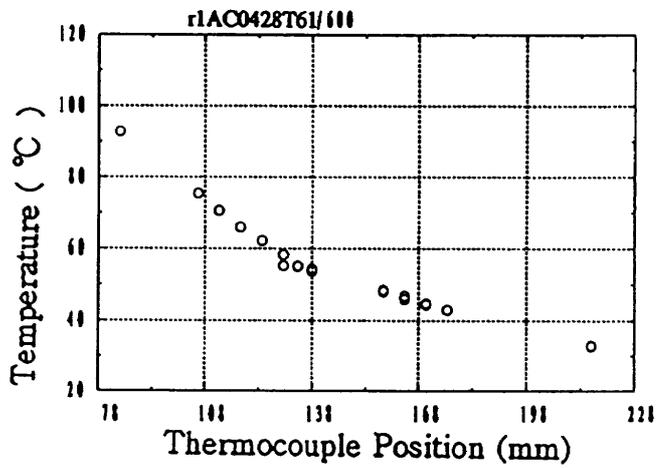
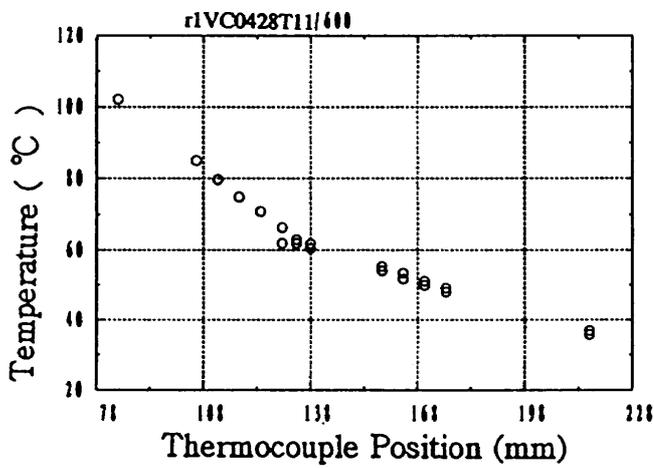
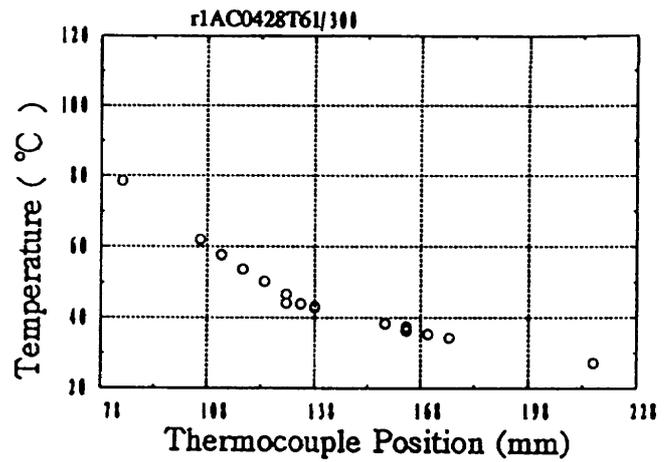
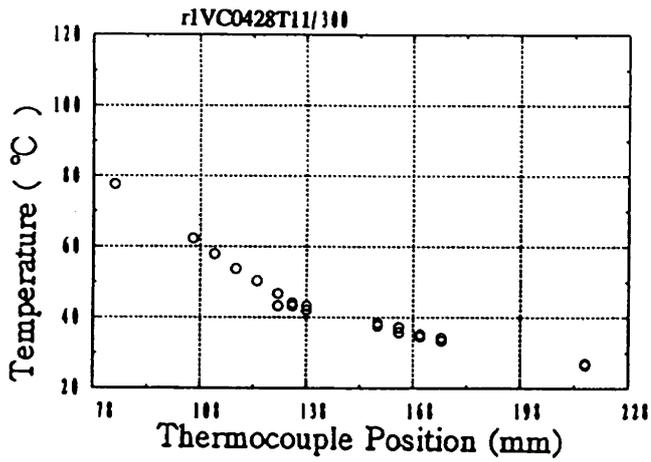


図10 つづき

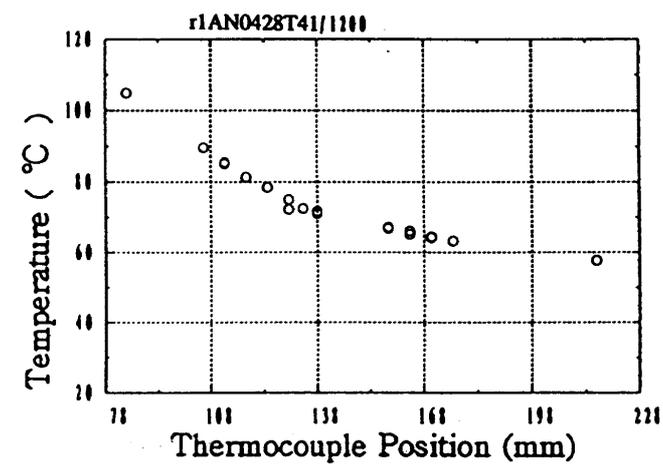
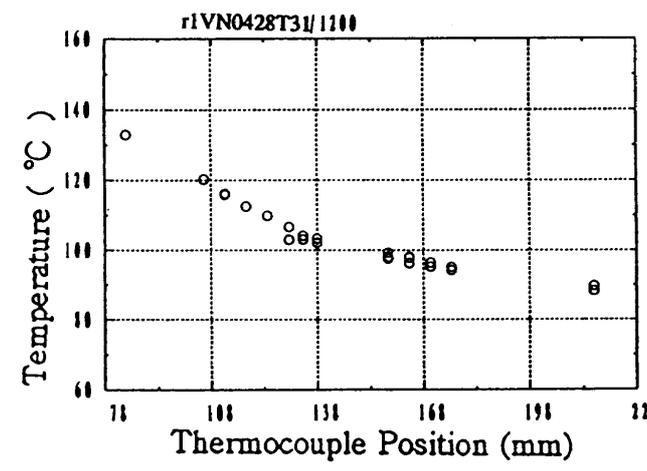
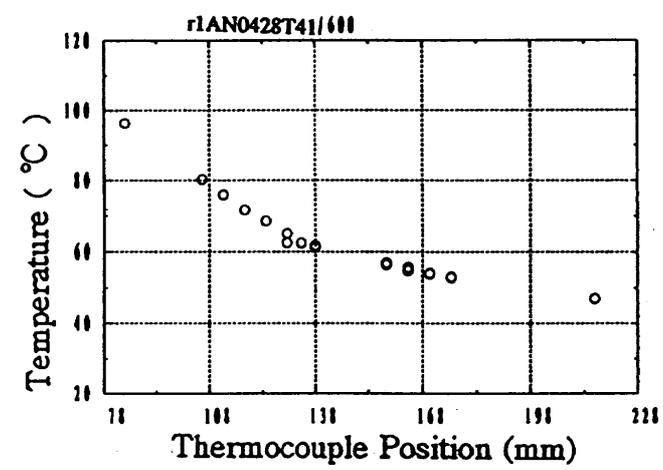
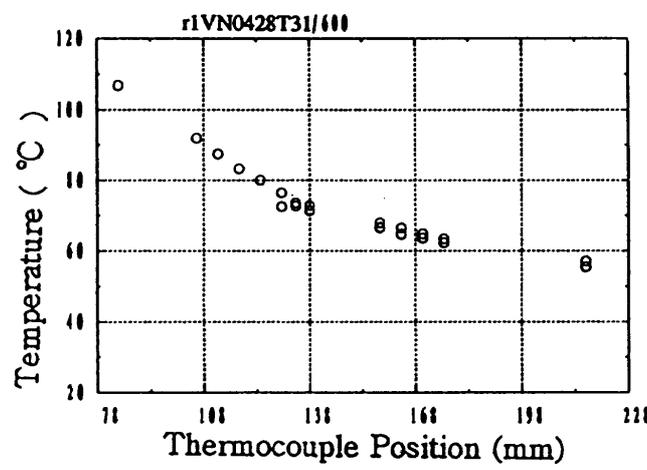
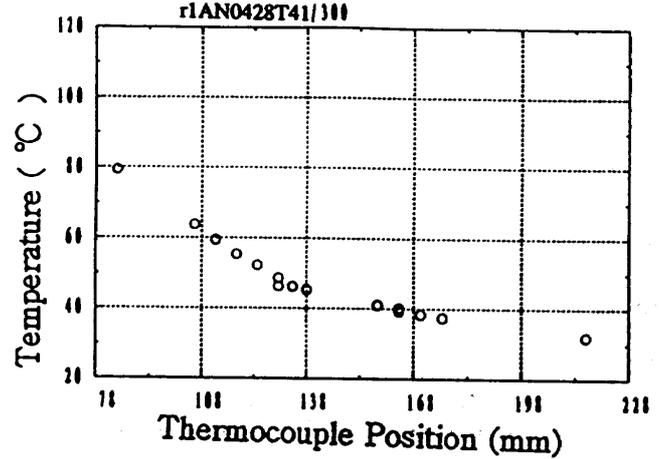
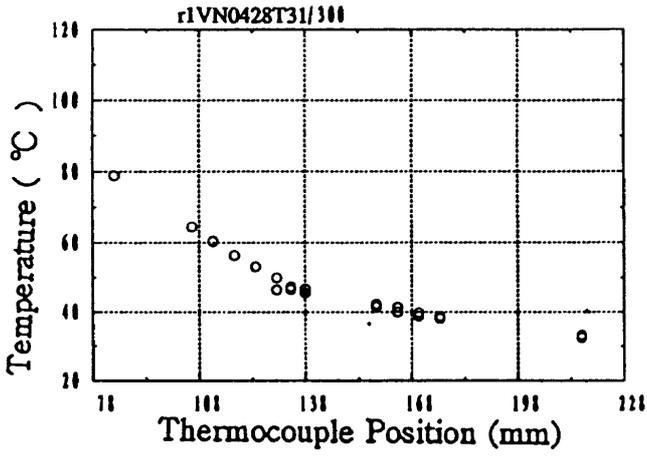


図10 つづき

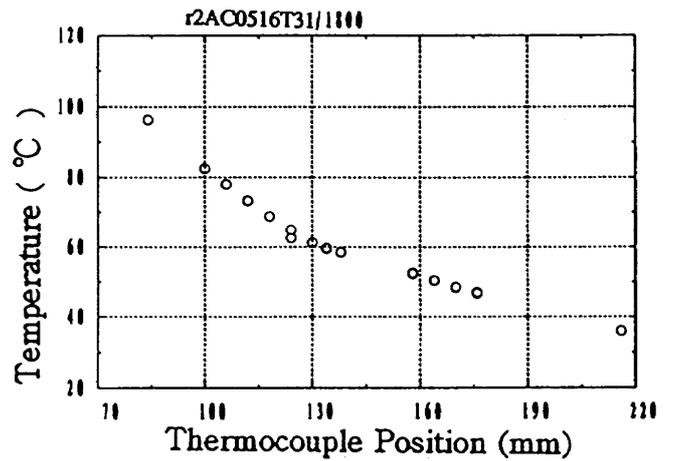
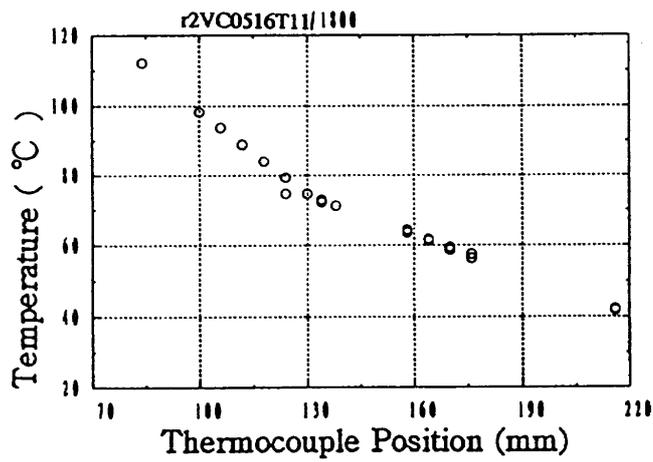
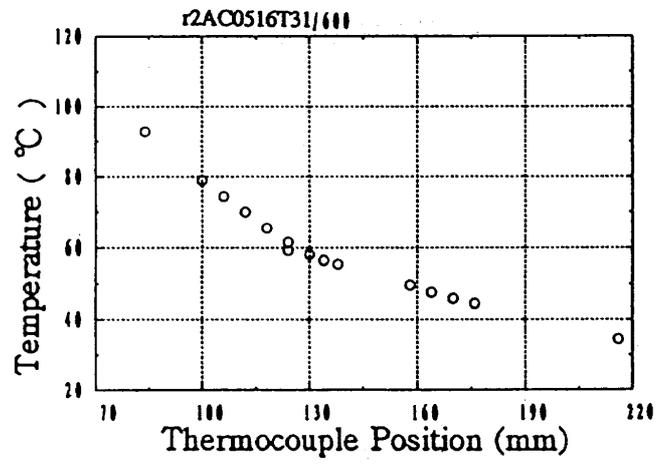
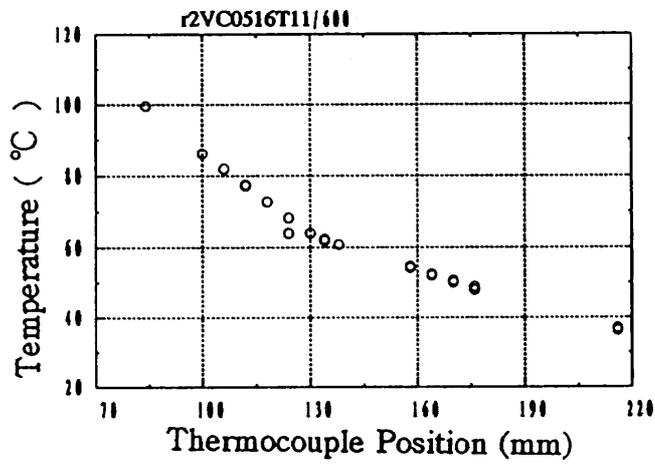
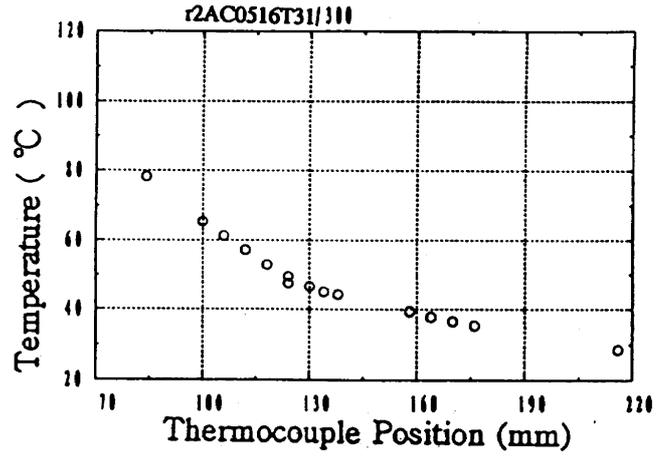
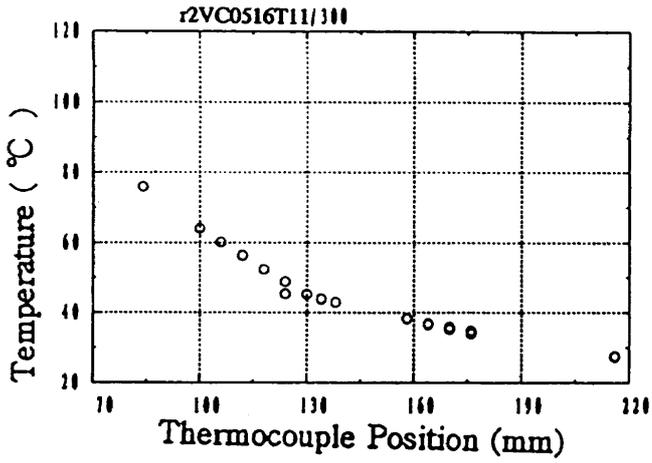


図10 つづき

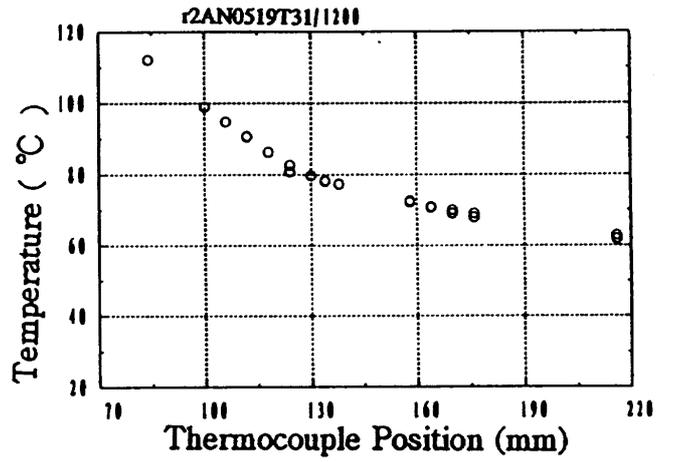
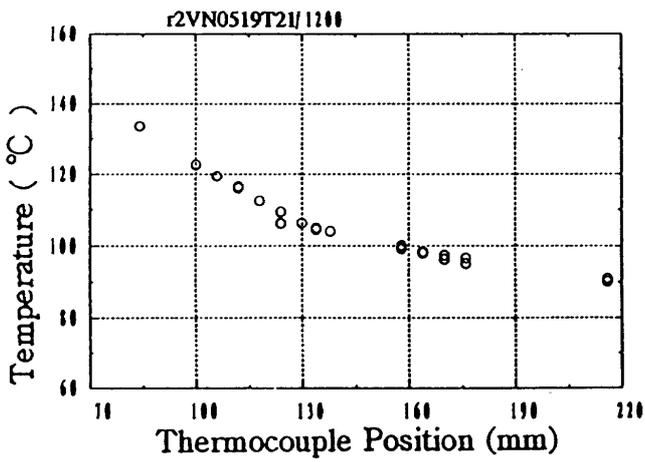
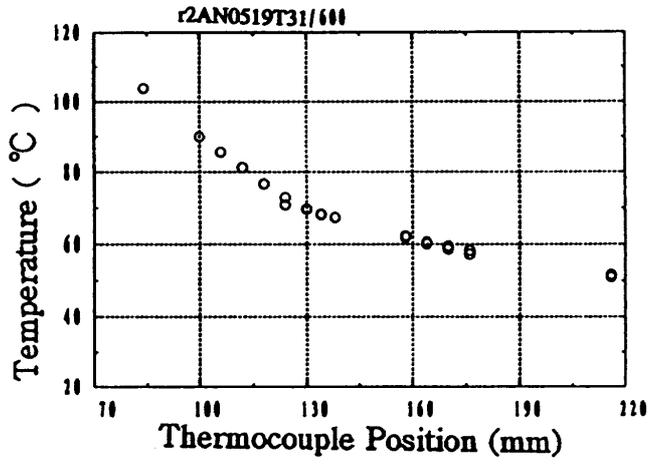
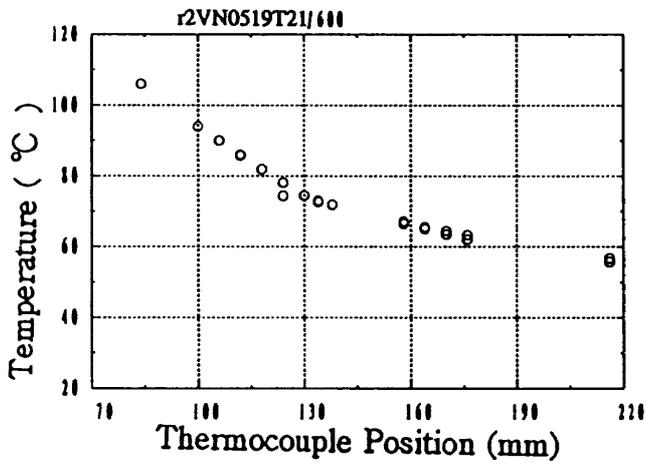
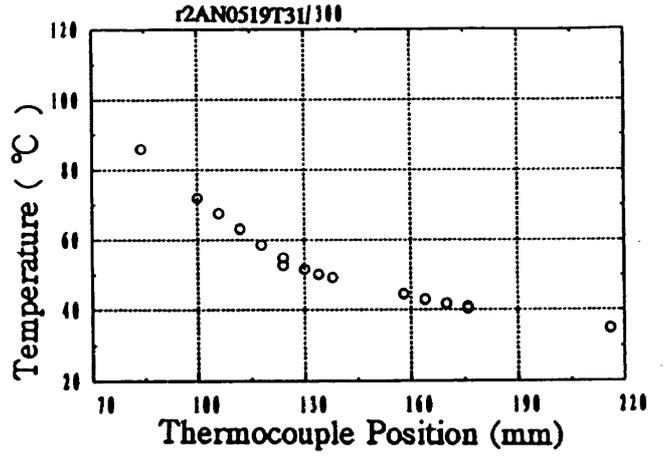
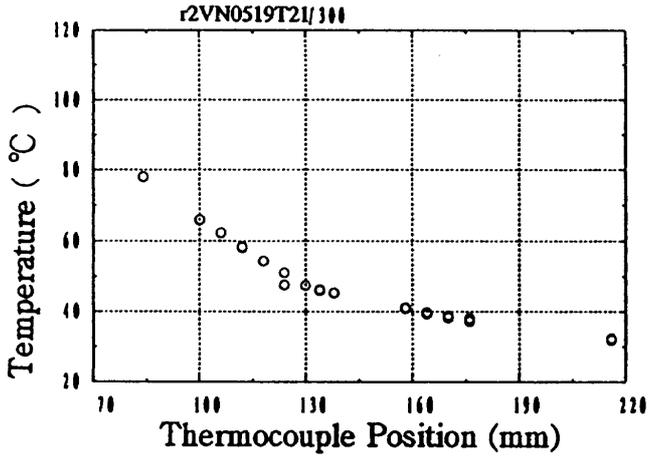


図10 つづき

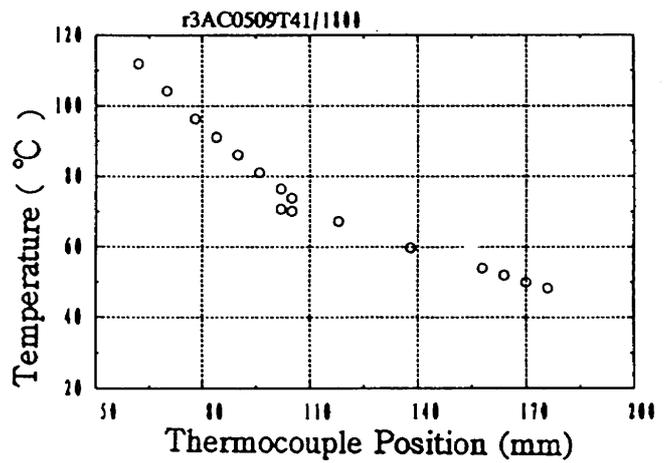
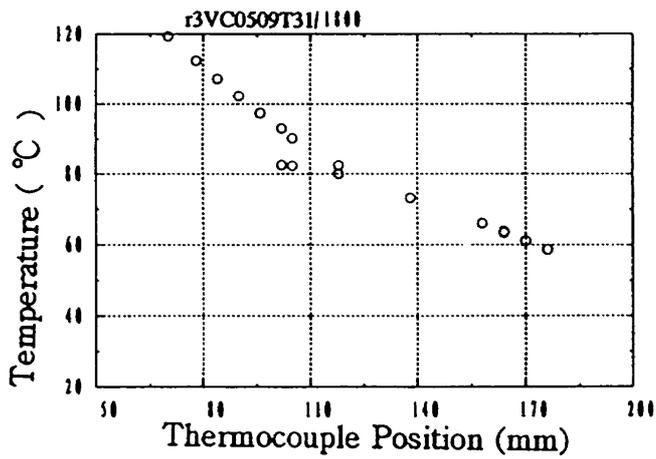
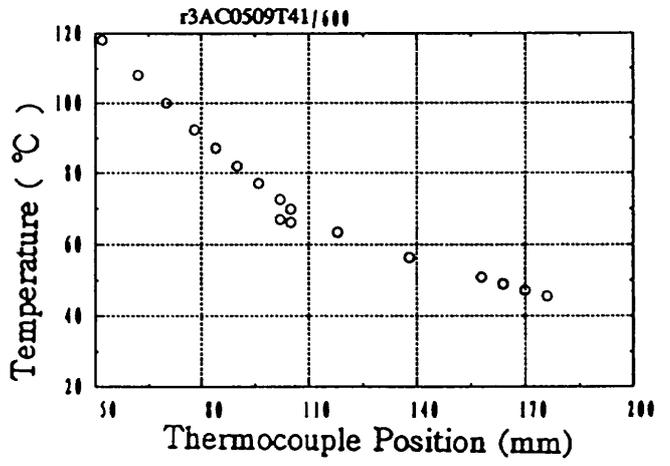
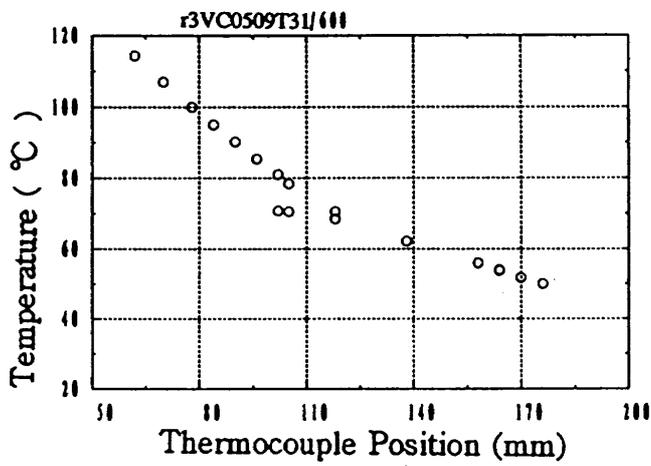
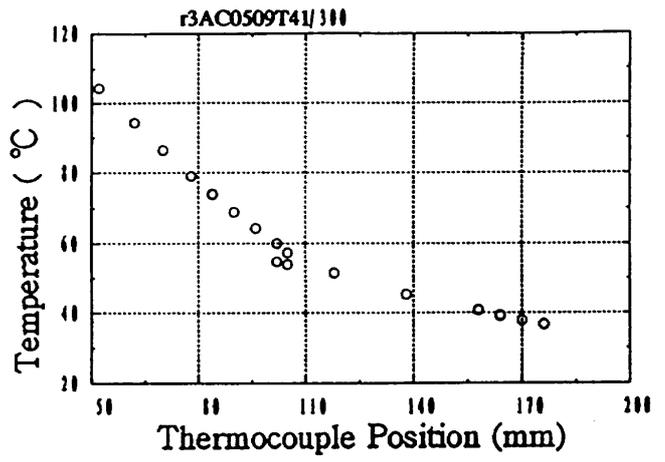
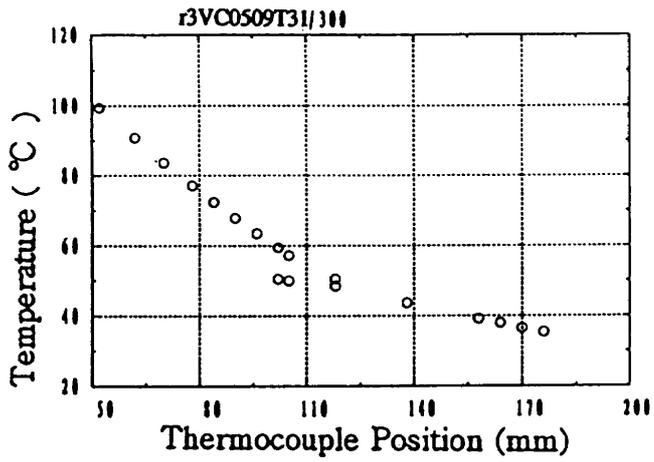


図10 つづき

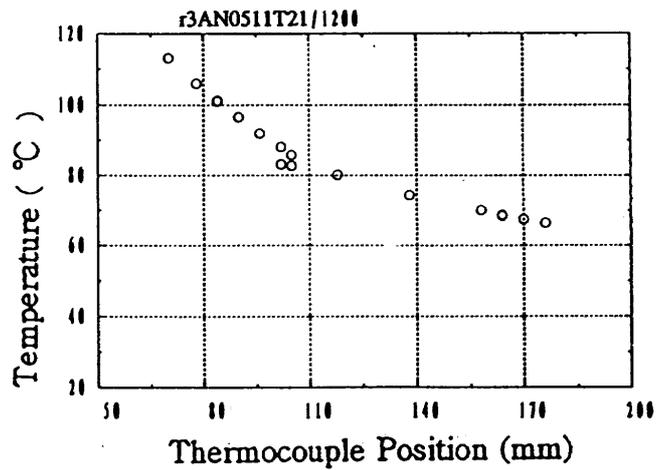
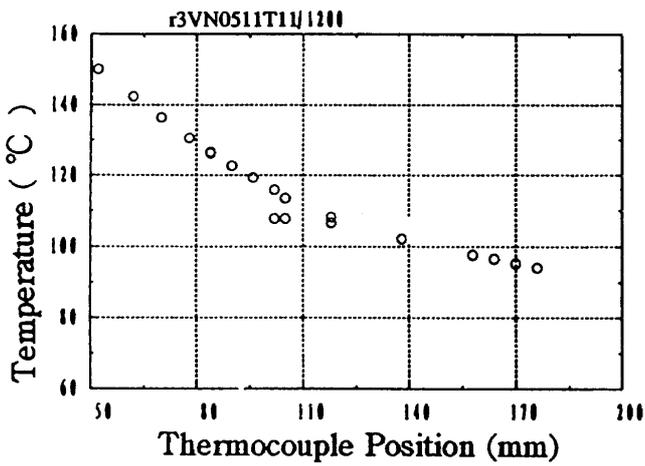
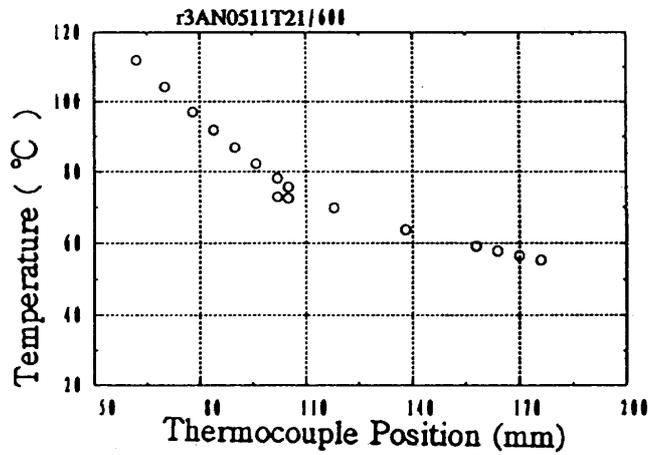
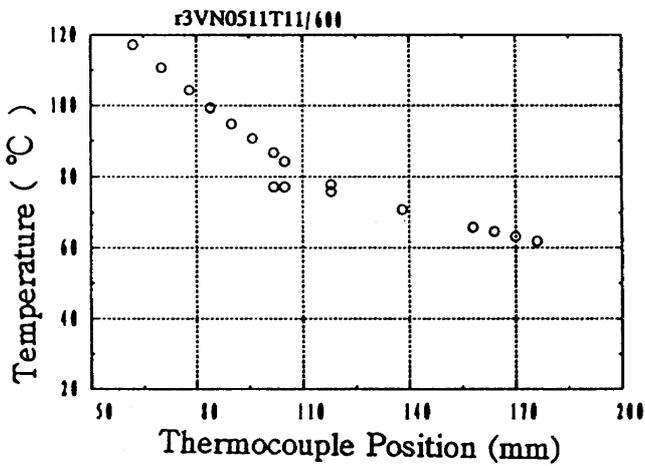
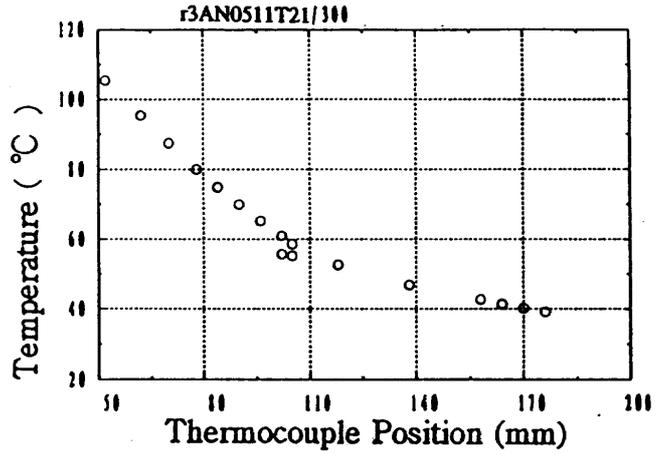
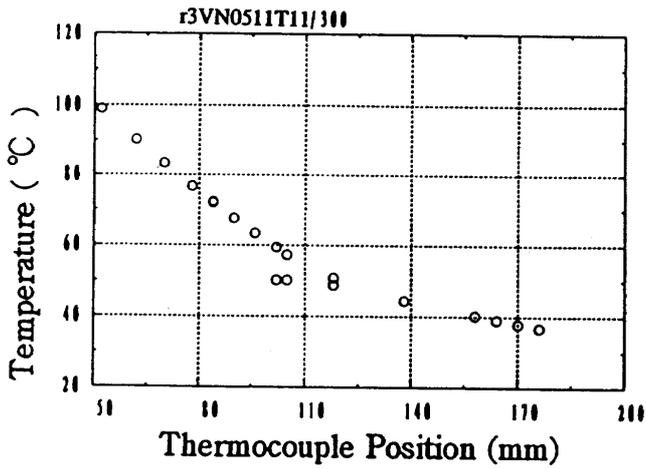


図10 終り

表3 図9の線種と図3の熱電対番号の対応表

図区分	線種	供試体				
		T1	T2	r1	r2	r3
(1)	—————	1	2	1	1	1
	- - - - -	4	4	3	3	3
	—————	9	9	8	8	8
	- - - - -	11	11	9	9	9
	—————	12	12	10	10	10
	- - - - -	34	13	11	11	37
(2)	—————	35	14	12	12	38
	- - - - -	14	18	14	16	14
	—————	20	24	19	21	19
	- - - - -	22	26	21	23	21
	—————	28	30	27	29	27
	- - - - -	29	31	28	30	28

5. 接触面効果の補足試験

前節でのべたように、結合部の上端に近い領域では、供試体の表裏間に他の部位と比較して顕著な温度差が観測されている。本節では、この温度差が何に起因して生ずるのかを実験的に明らかにするために実施した補足試験と、その結果について述べる。

結合部が二つの部材の重ね合わさった箇所であることに留意するならば、上述の温度差は結合部での、(i)接触面の存在、(ii)L型の段差を持つ形状、のいずれかに、あるいは両者に起因して生ずると考えるのが妥当であろう。

(i)の接触面の存在は、結合部での接触面に起因した接触熱抵抗が接触面の前後で温度を降下させ、結合部の表裏に温度差を与えようと考えられるからであり、(ii)の段差を持つ形状は、供試体断面内の上方からの熱流が結合部上端でL型のコーナを形成する段差を境界として二次元的に拡がるため、結合部の表裏に温度差を持つ局所的な温度分布を与える可能性が考えられるからである。温度差が接触面の熱抵抗に起因して生ずるのであれば、接触が熱的に完全な供試体、あるいは接触面が存在しない一体構造の供試体の場合は接触熱抵抗が零であるから、顕著な温度差は生じないことになる。一方、供試体の外形状が温度差の生ずる原因

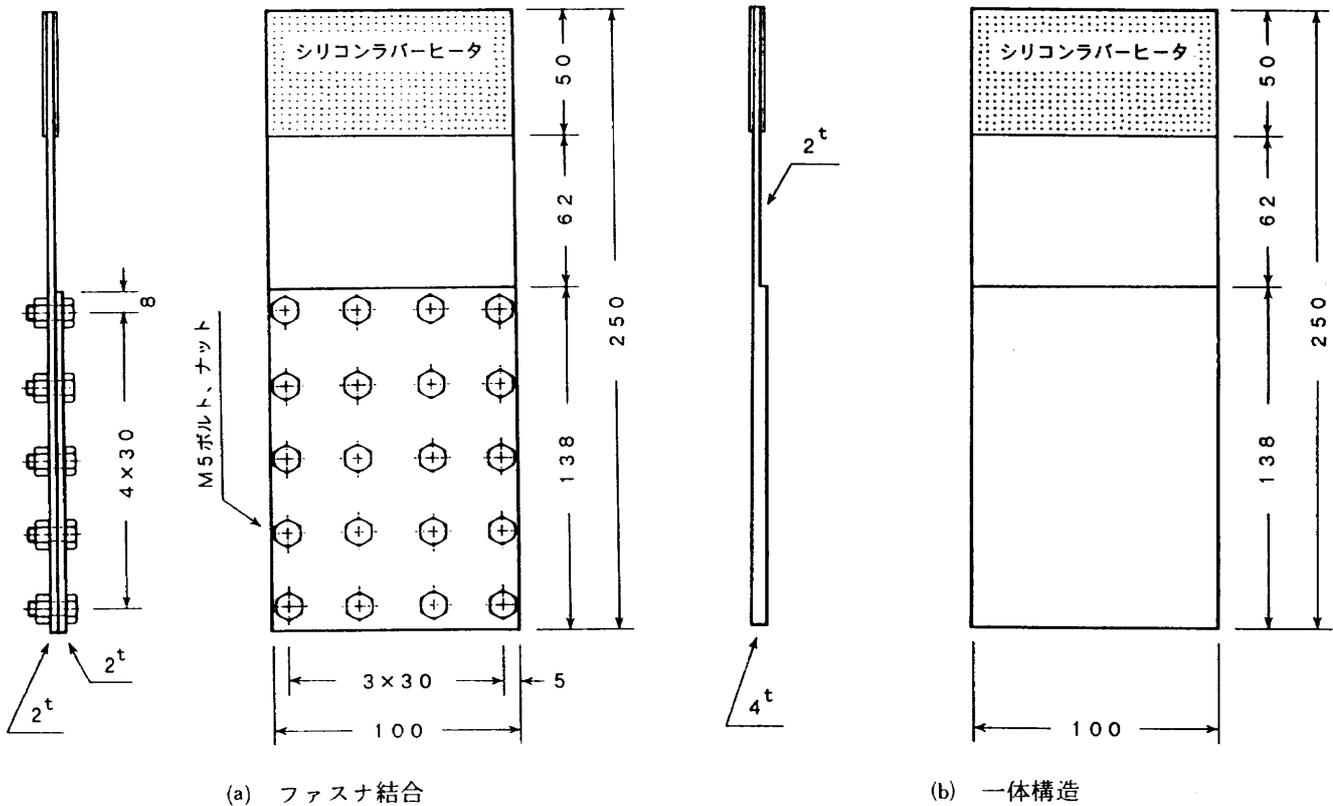
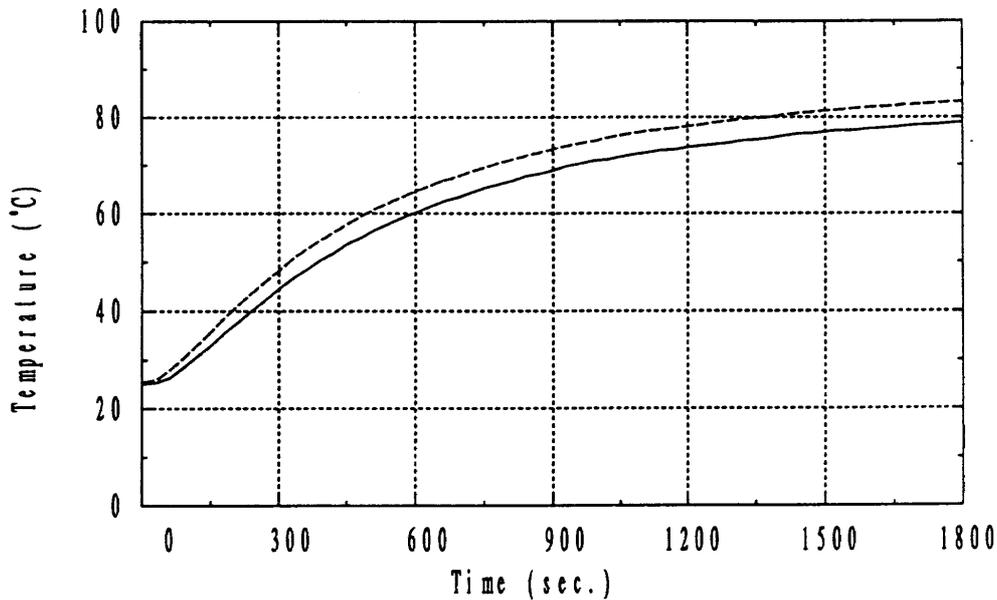


図11 補足試験供試体概略

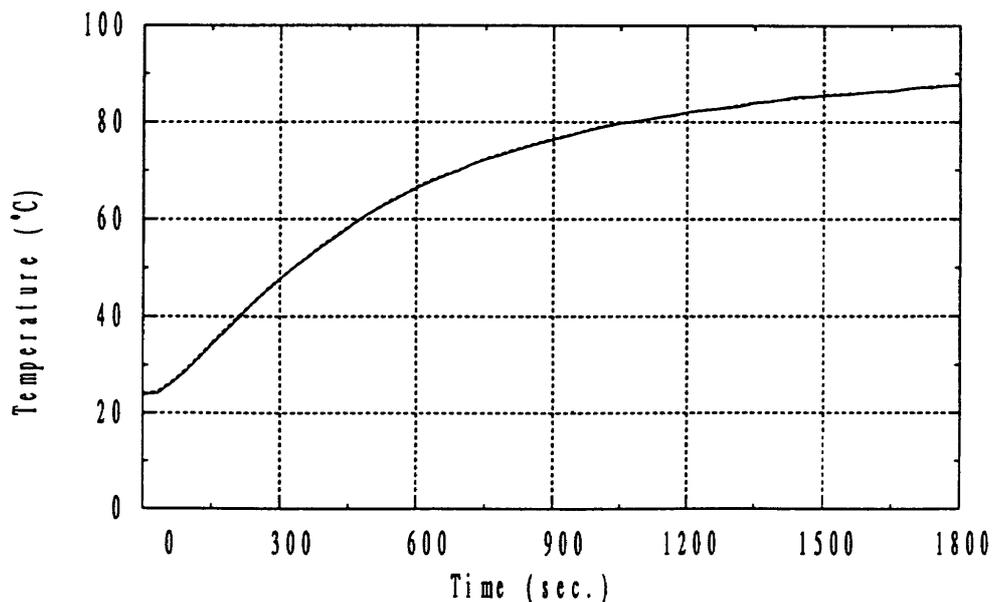
であるならば、温度差は接触面の有無に関わらず生じることになる。

補足試験には、上述の考察に基づいて、図11に示すようなファスナ結合部を有する試験片と、それと同一外形状の一体構造の試験片をそれぞれ製作し用いた。二つの試験片の材質はいずれもアルミニウム合金 2024-T4 であって、温度検出用の熱電対が、主として、試験片の表面（段差のある側の面）および裏面（段差のない側の平滑な面）の中心線上の互に対応する位置に取り付けられている。この二つの試験片に対して、3節で述べた同じ試験の手順にしたがい、真空中での熱伝導試験を行なった。図12に試験結果

の一例として、試験片の段差の先端から中心線上を下方に 2mm 下がった位置での表面と裏面の温度の加熱開始からの時間的变化の様子を示す。(a)はファスナ結合部を有する試験片の場合、(b)は一体構造の試験片の場合である。図中、実線は試験片の表面の温度を、破線は裏面の温度をそれぞれ表わしている。これらの図から判るように、結合部を有する試験片では加熱開始直後から表裏の温度に差を生じ約 8 分を経過すると、加熱停止の 30 分経過時まで、 5.5°C 前後のはぼ一定の温度差を保持して推移するのに対し、一体構造の試験片では表裏の温度に殆ど差を生ずることなく推移し、図の表裏の温度曲線は丁度一本の線のように見える。



(a) ファスナ結合



(b) 一体構造

図12 補足試験—温度のトレンドグラフ

これらの実験事実、前節に述べた供試体結合部の上端における表裏の温度差が、段差のある形状に起因して生ずるのではなく、結合部の接触面に起因した接触熱抵抗によって生じていることを明らかにしている。

6. おわりに

ここで行われた一連の実験では、低い熱流束レベルのもとでの外板とフレームのファスナ結合を意識した熱移送の状況を観測した。大気中では接触熱抵抗の影響は少なく、対流の影響は大きい。真空中では局所的に接触抵抗の影響が認められる。金属表面からの輻射熱放射は大きくない。目下この実験に対応する熱伝導計算モデルの検討を進めて

いる。また熱流束レベルが相当高い場合や結合面の接触条件が弱い箇所に対応した実験データ取得も計画を進めている。なお本研究の一部は平成6年度官民特定共同研究“先進航空機の要素技術に関する研究”の一環として実施された。最後に本試験の準備の一部に協力された慶応大学工学部学生山口浩之、中西淳一両君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大竹邦彦, 遠藤修司, 田中 太, 川島鋭司, 原文隆, 内田伸宏; 接触熱抵抗の測定試験, NAL J-94004 pp. 125-132 (1994)
- 2) 日本機械学会; 伝熱ハンドブック, pp.22-25 (1993)

航空宇宙技術研究所資料 691号

平成 8 年 4 月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182
印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18
