

JAERI-Tech  
2005-055



JP0550523



耐熱セラミックス複合材料の照射試験(その2)  
—第2次(98M-41A)、第3次(99M-30A)  
予備照射試験中間報告—

2005年9月

馬場 信一・根本 誠\*・相沢 静男・山地 雅俊  
石原 正博・沢 和弘

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

耐熱セラミックス複合材料の照射試験(その2)  
—第2次(98M-41A)、第3次(99M-30A)予備照射試験中間報告—

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部  
馬場 信一・根本 誠\*・相沢 静男<sup>+1</sup>・山地 雅俊<sup>\*</sup>・石原 正博<sup>+2</sup>・沢 和弘

(2005年8月11日受理)

原研(JAERI)では、高温工学試験研究炉(HTTR)を用いた高温工学に関する先端的基礎研究の課題の1つとして「耐熱セラミックス複合材料の照射損傷効果に関する研究」のため、材料試験炉(JMTR)を用いて一連の予備照射試験を進めている。本報告は、このうちの第2次(98M-41A)及び第3次(99M-30A)の照射試験について記載したものである。両試験の照射温度は973K-1173K及び1273K-1473K、高速中性子照射量  $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ )の照射条件のもとで行った試料について、直径寸法の基本統計値、寸法変化及び熱膨張率の結果について報告する。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

+1 材料試験炉部

+2 企画室

※ 業務協力員

\* 株式会社原子力エンジニアリング

**An Irradiation Test of Heat-resistant Ceramic Composite Materials (2)  
—Interim Report on Post-irradiation Examinations of the Second and  
Third Preliminary Test : 98M-41A, 99M-30A—**

Shin-ichi BABA, Makoto NEMOTO\*, Shizuo SOUZAWA<sup>+1</sup>, Masatoshi YAMAJI\*,  
Masahiro ISHIHARA<sup>+2</sup> and Kazuhiro SAWA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 11, 2005)

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has been carrying out the research on radiation damage mechanism of heat-resistant ceramic composite materials, as one of the subjects of the innovative basic research on high temperature engineering using the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). A series of preliminary irradiation tests is being made using the Japan Materials Testing Reactor (JMTR). The present report describes results of post-irradiation examinations (PIE) so far on specimens irradiated in the second and third capsule, designated 98M-41A and 99M-30A, to fast neutron fluencies of  $1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) at temperatures of 973-1173K and 1273-1473K. The PIE were conducted as the fundamental statistic index of the diametral dimensions for irradiated specimen, irradiation induced dimensional change rate and thermal expansion rate.

**Keywords:** Ceramics; Dimensional Change; Thermal Expansion; c/c Composite;  
SiC/SiC Composite; Irradiation Damage; Temperature Monitor; Annealing  
Effect

---

+1 Department of JMTR

+2 Office of Planning

\* Cooperative Staff

\* Nuclear Engineering, Ltd.

## 目 次

1. 緒言 -----	1
2. 照射供試料及び照射条件 -----	2
3. 照射後試験方法 -----	2
4. 照射後試験結果 -----	3
4.1 直径寸法の基本統計値 -----	3
4.2 照射誘起寸法変化率 -----	4
4.3 熱膨張率 -----	5
5. 結言 -----	6
謝辞 -----	7
参考文献 -----	7

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Irradiated Samples and Irradiation Conditions -----	2
3. Procedures of Post Irradiation Experiments -----	2
4. Results of PIE -----	3
4.1 Fundamental Statistic Index for the Diametral Dimensions -----	3
4.2 Irradiation Induced Dimensional Change -----	4
4.3 Thermal Expansion Rate -----	5
5. Summary -----	6
Acknowledgements -----	7
References -----	7

**This is a blank page.**

## 1. 緒 言

高温工学試験研究炉(High Temperature Test Reactor, HTTR)を用いた高温工学に関する先端的基礎研究の課題の一つである「耐熱セラミックス複合材料の照射損傷機構の研究」のため、効果的でより有効に HTTR による本照射試験を実施する目的で、事前に予備照射試験が材料試験炉(Japan Material Testing Reactor, JMTR)を用いて行われた。第一次予備照射試験の結果については既に報告<sup>(1)</sup>されている。本報告は第二次及び第三次予備照射試験の中間結果を記述したものである。本研究の照射試験に使用した JMTR 装荷キャップセルの照射条件等についても既に報告<sup>(2)</sup>したが、照射後試験(Post Irradiation Examination, PIE)は現在も鋭意実施しているところである。PIE は主として寸法変化率及び熱膨張率について実施したが、今後は JMTR-ホットラボに整備されたレーザー熱定数測定装置を用いて熱拡散率及び熱伝導率についてもデータ取得する予定である。

本報告に示した照射誘起寸法変化及び熱膨張率に関する測定結果及び解析については、一部報告されている<sup>(3)~(9)</sup>が、ここでは照射試料データ全体を銘柄別／照射温度別に系統的にまとめ、特徴的な事項を整理した。また、照射後試料外観写真とともに供試料の直径プロフィールについての基本統計値についても整理した。今後、個々のデータについて詳細な分析・評価は別途行う予定である。

## 2. 照射供試料及び照射条件

第2次及び第3次予備照射試験に使用したキャップセルは、それぞれ98M-41A/99M-30Aで、Table 1及び2に示すような供試料が装荷された。装荷供試料のうち炭素系及びSiC系複合材料試料の個々の特性については既報<sup>(1)</sup>に詳述したので、ここでは省略するが、測定結果を説明する上で必要な技術情報については当該箇所において順次説明することとする。

第2次試験キャップセルは照射温度を973K(700°C)、1073K(800°C)及び1173K(900°C)の3領域に区分した構造となっており、3サイクル総照射時間1763時間、中性子照射量は中段の1173K領域で最も高く、約 $1 \times 10^{25}(\text{m}^{-2}, E > 1\text{MeV})$ であった。第3次試験キャップセルの照射温度は1273K(1000°C)、1373K(1100°C)及び1473K(1200°C)を目標としたもので、5サイクル総照射時間2060時間、中性子照射量は第2次試験と同様、約 $1 \times 10^{25}(\text{m}^{-2}, E > 1\text{MeV})$ であった。また本キャップセルは高温照射条件であったため、キャップセル構造部材の一部損傷等によりPIEの解体取り出しの際、下段部1373K領域の試料では一部の試料が破損していた。(ホルダーA:寸法測定用黒鉛容器7本、ホルダーB&C:F/M容器、ホルダーD:ジルコニア引張試験片3本中1本が破損)その他の領域の試料は健全な状態で取り出すことが出来た。

## 3. 照射後試験方法

全てのPIEはJMTRホットラボ施設内において行われた。直径寸法測定は非接触レーザー寸法測定器(LS-5000, キーエンス社製)を用いて行った。1本の試料毎にホットラボ既設(被覆管欠陥検査装置)の試料保持具に取り付けた後、1回転360°の外径データを1°毎に連続収集し、直径全周についてのプロフィールデータを取得した。直径測定の校正は、標準のピンゲージ( $\phi 5\text{mm}$ )を使用した。長さ方向は25mmの基準棒を使用して校正した。測定部位は端部より3~4.5mm中心に入った両端部位置及び中心部の3カ所とした。測定対象は第2次予備照射試験の3温度領域の棒状試料( $\phi 4.5\sim 5.0\text{ mm} \times \text{length } 15\sim 20\text{ mm}$ )全てとした。

外観写真の撮影はデジタルカメラ(COOLPIX800, ニコン製)を用いた。画像はフルサイズ1600x1200の2Mピクセルで、画像圧縮はJPEG(Joint Photographic Expert Group)方式とした。

熱膨張率は熱機械分析装置(TMA-8310, 理学電機製)を用いて測定した。測定条件は室温から1673Kまで、10K/min.の昇温速度、高純度ヘリウムガス流動速

度 100ml/min.における昇温時のデータを収集した。C/C 及び黒鉛系の熱膨張率測定は文献<sup>(10)</sup>を参考に行った。

## 4. 照射後試験結果

### 4.1 直径寸法の基本統計値

Table 3～5 に照射後直径寸法の基本統計値を示した。各統計指標の概略について順次説明する。

- (1) 平均－相加平均または算術平均で、数の総和を数の個数で除した数値。
- (2) 中央値－データを大きさの順に並べた時、中央に位置する数値。
- (3) 最頻値－選択範囲内のデータの中で、同じ値が複数ある時、最も頻繁に出現する値。
- (4) 標準偏差－確率変数とその平均値との差を 2 乗したもののが期待値の正平方根。EXCEL の計算では引数を母集団の標本と見なして、母集団に対する標準偏差を求める。計算式は  $STD=\sqrt{n\sum x^2-(\sum x)^2}/\sqrt{n(n-1)}$  である。
- (5) 分散－標準偏差の平方。
- (6) 尖度－対象となるデータの分布を標準分布と比較して、度数分布曲線の相対的な鋭角度あるいは平坦度を数値で表したもの。尖度が正のとき、度数分布曲線が相対的に鋭角になっていることを意味し、負の数になっているときは相対的に平坦になっていることを意味している。
- (7) 歪度－分布の平均値周辺での両側の非対称度を表す値。正の歪度は対称となる分布が正の方向へ延びる非対称な側を持つことを示し、負の歪度は逆に負の方向へ延びる側を持つことを示す。
- (8) 範囲－最大値と最小値の差
- (9) 最小－評価対象群の最小の値
- (10) 最大－評価対象群の最大の値
- (11) 信頼区間(95.0%)－母平均の区間推定という評価方法で、この場合、母平均が有意水準 95.0% の確からしさは平均値士信頼区間で存在する。

これらの基本統計値の中から最も特徴的な指標として標準偏差、尖度及び歪度を取り上げて、各銘柄間を比較・検討した結果を以下に記す。

- (1) 標準偏差の値を各銘柄間で比較すると、小さい順に次のように配置された。 $SiC_p/SiC < \text{等方性黒鉛(準等方性黒鉛を含む)} < SiC_f/SiC < C/C$  であった。外観写真を Fig.1～104 に示すように  $SiC_p/SiC$  は一見して滑らかな表面となっており、 $SiC_f/SiC$  や C/C のような異方性の大きい材料とは大きく異なる。こ

れは照射前の外観観察の結果と同様であり、照射による大きな変化は観察されなかった。

- (2) C/C 複合材料のうち CX-270,CX-2702,CX-270G 及び CX-2702G の纖維配列方向(parallel\_direction)と纖維垂直方向(vertical\_direction)の試料の標準偏差を比較すると、全ての vertical 試料は parallel 試料の 4~10 倍を示した。この原因は直径プロフィールの測定ではより顕著な数値となって表れるため、同一材料の試料加工方向の違いにより現出する一つの特徴と言える。
- (3) CX-270(G)及び 2702(G)の尖度及び歪度は照射温度によらず、半数以上の試料が負値を示した。これは相対的に大きな鋭角を持つ試料が多いこと及び正の方向へ延びる非対称な側面を有していることを意味している。照射による影響評価については、未照射試料に関する直径プロフィールデータが少ないため、直接的な比較は実施しなかった。今後、同一材料を用いた未照射データを蓄積し、詳細な評価を実施する予定である。一方、他の C/C 材料の場合、900°C 照射領域ではピッチ系(PCC-2S)及び PAN 系(CCM-190)とともに負値が優位を占めたものの、700°C / 800°C 照射領域の場合はむしろ正値が優位であった。
- (4) 等方性黒鉛(IG-110)の 700°C 照射領域の歪度／尖度は全て負値であったが、800°C / 900°C 照射領域はほとんど正値であった。この原因是外観写真、寸法変化率、熱膨張率などの特徴／数値上から特定することは出来なかった。

#### 4.2 照射誘起寸法変化率

##### (1) 炭素系セラミックス複合材料

供試料として①ピッチ系フェルト積層含浸黒鉛化熱処理材料(PCC-2S)、②PAN 系高強度炭素纖維黒鉛化／炭素化熱処理材料(CCM-190G/C)、③PAN 系纖維ピッチ含浸黒鉛化／炭素化熱処理材料(CX-270G/C)の 3 種類で、これらは全て 2 次元複合材料である。③の材料にはピッチ含浸とは別にフェノール樹脂含浸複合材料(CX-2702/G)についても対象とした。Fig.105~109 に照射温度／銘柄別に示した。

各銘柄に共通して言えることは、纖維配列方向の依存性が比較的小さく、直径／長さの両方向のほぼ全てにわたり収縮することが示された。なお、照射後の寸法測定は 1673K までの熱膨張率測定後に実施した。

##### (2) SiC 系セラミックス複合材料

供試料として①SiC 粒子分散強化 SiC 基複合材料(5%/10%SiCp/SiC)、②SiC 繊維強化 SiC 基複合材料(HiNicaloceram/ HiNicaloceram-II)の 2 種類で、後者の材料は 2 次元複合材料である。同様に Fig.105~109 に示した。

SiC 粒子分散強化複合材料は全ての照射温度条件の下で、直径／長さの

両方向ともに膨張するが、SiC 繊維強化複合材料は 1473K 照射条件の直径方向をのぞいて、全て収縮した。

### (3) 等方性／準等方性黒鉛材料 & 無加圧焼結 SiC

供試料との比較参照用材料として①等方性黒鉛材料(IG-110)、②準等方性黒鉛材料(Gilso-carbon)、③無加圧焼結 SiC の 3 種類で、これらの材料はこれまで多くの使用実績とともに熱機械的特性データが蓄積されているものである。同様に Fig.105~109 に示した。

これらの材料はほぼ全ての照射温度条件下で収縮する傾向となることが分かった。例外として 1078K 及び 1175K の照射温度条件の直径方向に膨張した試料がみられたが、これは全て準等方性黒鉛であった。

### 4.3 熱膨張率

熱膨張率の測定データは、前項に記載した供試料 3 種類について、照射温度／銘柄／繊維配列方向別に Fig.110~144 に示した。この中で照射温度 1175K の試験片は試験方法を定速連続加熱方式によるデータ収集ではなく、照射温度前後の一定時間保持によるステップ加熱方式を採用了。これは SiC などに現出する照射温度モニター効果の詳細調査及び照射アニール効果の活性化エネルギー算出を目的としたものであり、現在、解析を進めている。

#### (1) 炭素系セラミックス複合材料(C/C)

ピッチ系 C/C の PCC-2S の熱膨張率は Fig.110~114 に示すように繊維配列方向で約 0.3%(1673K)であるが、繊維垂直方向では 0.8%(1673K)程度であった。照射温度の増加とともにそれぞれ 0.37%, 1.0%程度まで増加する傾向が表れた。また、照射温度 1078K の試験片ではアニール効果が明瞭に観察されたが、これ以外の照射温度の試験片では不明確であった。

PAN 系 C/C の CCM-190C/G は Fig.115~119 に示すように、繊維配列方向の熱膨張率は 0.2%(1673K)以下の極めて小さい数値であるが、繊維垂直方向では約 2%(1673K)に達した。また、照射温度の増加とともに熱膨張率が増加する傾向はピッチ系 C/C と同様であった。PAN 系 C/C の別銘柄である CX-270C/G は Fig.120~124 に示すように、CCM-190C/G とほぼ同様の傾向であった。一方、フェノール樹脂含浸 C/C の CX-2702C/G は Fig.125~129 に示したように、照射温度 1003K の繊維垂直方向の試料で照射アニール効果が観察されたが、その他の試料には現出しなかった。

#### (2) SiC 系セラミックス複合材料(SiC/SiC) & Monolithic $\alpha$ -SiC

SiC には単相型、複合材料型に関わらず、共通して照射温度モニター効果の発現することが知られている<sup>(11)~(20)</sup>。Monolithic  $\alpha$ -SiC 及び SiC 粒子

分散強化型 SiC<sub>p</sub>/SiC は Fig.135～139 に示すように温度モニター効果が確認されたが、照射温度 1300K 以上の場合、同効果の発現は確認されなかった。これは高温照射による欠陥生成機構に及ぼす緩和効果と考えられる。一方、SiC 繊維強化型 SiC<sub>f</sub>/SiC の場合、Fig.130～134 に示すように繊維配列方向依存性が小さく、共通して約 0.5%(1673K)程度の熱膨張率であった。

### (3) 等方性／準等方性黒鉛材料

参照試料として等方性黒鉛(IG-110)及び準等方性黒鉛(GilsoCarbon)の熱膨張率は、Fig.140～144 に示すように文献値<sup>(10)</sup>と比較して同一レベルにあることが確認された。これらの参照試料の熱膨張率データは照射温度 1078K の場合、1400K 付近に熱膨張率曲線の屈曲点が観察されたが、これより低い照射温度 1003K の場合には 1500K 付近に観察された。また、これより高い照射温度 1321K の場合には、屈曲点の現出した試料と現出しなかった試料は半々であった。さらに、高い照射温度 1473K の場合には全ての試料に著しい屈曲点が観察された。特に等方性黒鉛では 1300K 付近から熱収縮現象が観察されたが、同一銘柄を 2 本装荷した内の 1 本のみにこの現象が発現したものであり、今後の検討課題である。

## 5. 結 言

- (1) HTTR を用いた耐熱セラミックス複合材料の照射損傷機構の研究に資するため、JMTR を用いて第 2 次及び第 3 次予備照射試験が実施された。両試験は照射温度：973K～1473K、高速中性子照射量： $1 \times 10^{25}(\text{m}^{-2}, E > 1\text{MeV})$  の照射条件で実施された。この中で炭素系及び SiC 系セラミックス複合材料の PIE の一部である照射後直径データの基本統計値、照射誘起寸法変化及び熱膨張率を調べた。
- (2) 照射後直径の基本統計値の中でも特徴的な指標である標準偏差、尖度及び歪度について評価した。その結果、照射前の外観観察結果と同様に 2 次元 C/C 及び SiC/SiC などの異方性材料の標準偏差値は、Monolithic  $\alpha$ -SiC 及び等方性黒鉛などよりも大きいことが確認された。また、繊維垂直方向の試料は繊維配列方向試料の 4～10 倍の標準偏差値を示した。
- (3) 基本統計値の内、尖度及び歪度については特定の供試料群、特に PAN 系 C/C に負値の偏りが見られた。歪度の負値は平均値から負側へ非対称となることであり、尖度の負値は標準分布よりも相対的に平坦度が大きいことを意味している。すなわち、供試料群の代表寸法均一性が小さいことが原因と考えられる。
- (4) 照射誘起寸法変化は 2～3 の例外も散見されるが、黒鉛及び C/C の場

合、直径／長さ方向に依存せず全て収縮し、SiC/SiC の場合は粒子分散強化型では膨張し、纖維強化型では収縮することが確認された。

- (5) SiC の場合、熱膨張率の照射温度モニター効果が顕著に表れることが確認した。しかし、照射温度が 1300K を越える条件では発現しないことが今回新たに分かった。すなわち、照射中の欠陥生成機構に及ぼす緩和効果と考えられる。黒鉛の場合は照射温度の増加とともに照射欠陥の影響と考えられる屈曲点が多く観察された。C/C は熱膨張率の異方性が顕著に発現することが確認された。

### 謝 辞

本報告書作成にあたり、キャプセル設計においては材料試験炉部照射第 1 課 斎藤隆氏、正治章氏、キャプセル製作では東海研究所工務・技術室工作技術グループ菊地泰二氏、中性子照射量評価では計画課の諸氏、照射後試験ではホットラボ課の諸氏に多大なるご尽力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表するものである。

### 参考文献

- (1) 馬場信一、他：「耐熱セラミックス複合材料の照射試験－第 1 次照射試験 (97M-13A) 照射後試験中間報告－」JAERI-Research 2001-028
- (2) 馬場信一、他：「先端的基礎研究用セラミックス材料の予備照射試験」JAERI-Tech 2005-002
- (3) 馬場信一、他：「炭素纖維強化複合材料の熱膨張係数」、日本学術会議振興会 炭素材料第 117 委員会(東京)1998 年 12 月 11 日
- (4) 馬場信一、他：「炭素纖維強化複合材料の熱膨張係数」、日本原子力学会 春の大会(広島大学)J5, 1999 年 3 月 22 日
- (5) 馬場信一、他：「SiC/SiC 複合材料の熱膨張率の温度依存性」、日本原子力学会 春の大会(広島大学)A38, 1999 年 3 月 22 日
- (6) 馬場信一、他：「炭素複合材料の照射誘起寸法変化」、日本原子力学会 秋の大会(新潟工科大学)I31, 1999 年 9 月 10-12 日
- (7) 馬場信一、他：「炭素系/SiC 系複合材料の照射誘起寸法変化及び熱膨張係数」、日本学術会議振興会炭素材料第 117 委員会(東京)1999 年 11 月 26 日

- (8) 馬場信一、他：「SiC/SiC 複合材料の照射誘起寸法変化と熱膨張率」、日本原子力学会 秋の大会(青森大学)H60, 2000 年 9 月 15-17 日
- (9) 馬場信一、他：「炭素系及び SiC 系複合材料の照射誘起寸法変化率と熱膨張率の照射温度依存性」、日本機械学会 2004 年度年次大会(北海道大学)2007, 2004 年 9 月 5-9 日
- (10) 炭素材料学会編：「最新の炭素材料実験技術(物性・材料評価編)」 p.45-49、アライズ理工センター(サイペック株式会社)、2003 年 9 月 30 日
- (11) Price R.J. : "Annealing behavior of neutron-irradiated silicon carbide temperature monitor", Nucl.Tech 16, 536-542 (1972)
- (12) Hiroshige S. et al.: "Annealing behavior of neutron irradiated  $\beta$ -SiC", J. Nucl. Mat. 48(1973) 247-252
- (13) T.Suzuki, et al.: "Recovery behavior in neutron irradiated  $\beta$ -SiC", J. Nucl. Mat. 149(1987)334-340
- (14) T.yano, et al.: "Microstructure and annealing behavior of heavily neutron-irradiated  $\beta$ -SiC", J.Nucl.Mat. 155-157(1988)311-314
- (15) T.Suzuki, et al.: "Effects of sintering aids on the length change of neutron irradiated SiC ceramics during annealing at high temperature", J.Nucl.Mat. 165(1989)247-251
- (16) Y.Yano, et al.: "A step-heating dilatometry method to measure the change in length due to annealing of a SiC temperature monitor", Nucl. Tech. 93(1991)412-415
- (17) H.Miyazaki, et al.: "Effects of thermal annealing on the macroscopic dimensions and lattice parameter of heavily neutron-irradiated silicon carbide", J.Nucl.Sci.and Tech 29(1992)656-663
- (18) G.W.Hollenberg, et al.: "The effect of irradiation on the stability and properties of monolithic silicon carbide and SiC<sub>f</sub>/SiC composite up to 25 dpa", J.Nucl.Mat. 219(1995)70-86
- (19) T.Suzuki, et al.: "Neutron irradiation damage of silicon carbide", Fus.Tech. 27(1995)314-325
- (20) GE.Youngblood : "Passive SiC irradiation temperature monitor" DOE/ER-0313/19 (1995)

Table 1 Irradiation samples for 98M-41A

PIE項目	SEM/XMA 試料形状/寸法(mm)	寸法/CTE 試料形状/寸法(mm)
1. 単繊維・粒子素材		
SiC粒子(日立化成) 炭素繊維(カーボンZ) 炭素繊維(ア'イアリート'QG) 炭素繊維(ア'イアリート'QE) 炭素繊維(クリカ)	A-(1) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) ⊖ A-(2) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) A-(3) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) A-(4) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) A-(5) $\phi 5 \times 50 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) ⊖	なし
SiC繊維(ニカルン) SiC繊維(ハイニカルン)	B-(1) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎) B-(2) $\phi 5 \times 35 \sim 45L$ (3温度域に1本毎)	なし
	小計7本×3 = 21本 A-(1~5), B-(1, 2)はアングル形状	
2. コンポジット材		
2-1. 炭素系		
PCC-2S-P(日立化成)	C-(1) $\phi 10 \times 2.0t$ (3温度域に2個毎)	C-(2) $\phi 5 \times 20L$ (3温度域に2個毎)
CCM-190C(日本カーボン) CCM-190G(日本カーボン)	D-(1) $\phi 10 \times 2.3t$ (3温度域に2個毎) D-(2) $\phi 10 \times 2.7t$ (3温度域に2個毎)	D-(3) $\phi 5 \times 18.5L$ (3温度域に2個毎) D-(4) $\phi 5 \times 19.5L$ (3温度域に2個毎)
PCC-2S-V(日立化成)	E-(1) $\phi 9.6 \times 2.0t$ (3温度域に2個毎)	E-(2) $\phi 4.7 \times 20L$ (3温度域に2個毎)
クリカKシート(奥羽化学)	F-(1) $\phi 10 \times 3.2t$ (3温度域に2個毎) ⊖	なし
CX-270G(東洋炭素) CX-270(東洋炭素) CX-2702(東洋炭素)* CX-2702G(東洋炭素)*	G-(1) $\phi 10 \times 3.8t$ (3温度域に2個毎) G-(2) $\phi 10 \times 4.2t$ (3温度域に2個毎) G-(5) $\phi 10 \times 3.0t$ (3温度域に2個毎) G-(6) $\phi 10 \times 3.4t$ (3温度域に2個毎)	G-(3) $\phi 5 \times 16L$ (3温度域に2個毎) G-(4) $\phi 5 \times 17L$ (3温度域に2個毎) G-(7) $\phi 5 \times 15L$ (3温度域に2個毎) G-(8) $\phi 5 \times 15.5L$ (3温度域に2個毎)
*:追加分(98/11/4変更)	(C~G各2個をホルダーに挿入する) 小計(54個)	(C~G各2個をホルダーに挿入する) 小計(48個)
2-2. SiC系		
Hi-Nicaloceram(日本カーボン) Hi-Nicaloceram(日本カーボン) Hi-Nicalo II(日本カーボン) Hi-Nicalo II(日本カーボン)	H-(1) $\phi 10 \times 5.5t$ (3温度域に2個毎) X H-(2) $\phi 9.6 \times 5.5t$ (3温度域に2個毎) ⊖ H-(5) $\phi 10.0 \times 5.2t$ (3温度域に2個毎) X H-(6) $\phi 9.8 \times 5.2t$ (3温度域に2個毎) ⊖	H-(3) $\phi 4.5 \times 20L$ (3温度域に2個毎)    H-(4) $\phi 4.7 \times 20L$ (3温度域に2個毎) ⊥ H-(7) $\phi 5.0 \times 19L$ (3温度域に2個毎)    H-(8) $\phi 4.8 \times 19L$ (3温度域に2個毎) ⊥
Hitachi-X1(日立化成) Hitachi-X2(日立化成)	I-(1) $\phi 10 \times 6.0t$ (3温度域に2個毎) I-(2) $\phi 10 \times 6.2t$ (3温度域に2個毎) X ⊖	I-(3) $\phi 4.5 \times 19L$ (3温度域に2個毎) I-(4) $\phi 4.5 \times 18.5L$ (3温度域に2個毎)
X1はSiC粒子5%分散型 X2はSiC粒子10%分散型	(H, I各2個をホルダーに挿入する) 小計(36個)	(H~I各2個をホルダーに挿入する) 小計(36個)
3. 参照材		
$\alpha$ -SiC(ヘサロイ)	K-(1) $\phi 10 \times 6.5t$ (3温度域に2個毎) X	K-(2) $\phi 4.5 \times 18L$ (3温度域に2個毎)
IG-110	L-(1) $\phi 10 \times 4.5t$ (3温度域に2個毎)	L-(2) $\phi 4.5 \times 17L$ (3温度域に2個毎)
IM-P(ギルソナイト) IM-V(ギルソナイト)	M-(1) $\phi 10 \times 5.0t$ (3温度域に2個毎) ⊖ M-(2) $\phi 9.6 \times 5.0t$ (3温度域に2個毎)	M-(3) $\phi 4.5 \times 16L$ (3温度域に2個毎)    M-(4) $\phi 4.7 \times 16L$ (3温度域に2個毎) ⊥
HOPG	N-(1) $5 \times 5 \times 2$ (3温度域に2個毎)	なし
	(K~N各2個をホルダーに挿入する) 小計(30個)	(K~M各2個をホルダーに挿入する) 小計(24個)

## 注記

1. キャップセル全体の試料挿入領域の長さを約600mmと想定し、基本的に3温度領域に区分する。低温度領域、中温度領域及び高温度領域の区分は(700°C)、(800°C)及び(900°C)とする。1領域の長さを約200mm、直径33mm程度とする。
2. コンポジット材(炭素系、SiC系)/SEM/CTE試料の繊維配向の区別は試料寸法により分別する。
3. アングルの区別は耐熱塗料にて表面に記号を印字する。
4. 各温度領域に配置する試料は、A-(1~5), B-(1, 2), C-(1, 2), D-(1~4), E-(1, 2), F-(1), G-(1~8), H-(1~8), I-(1~4), K-(1, 2), L-(1, 2), M-(1~4), N-(1)
5. PIEのうち、⊖マークはSEM、XマークはXMAを示す。

Table 2 List of irradiation samples for 99M-30A capsule.  
(99M-30A)

PIE項目	SEM/XMA 試料形状/寸法(mm)	寸法/CTE 試料形状/寸法(mm)
1. 単繊維・粒子素材		
SiC粒子(日立化成) 炭素繊維(カーボンZ) 炭素繊維(ダイヤリットQG) 炭素繊維(ダイヤリットQE) 炭素繊維(クレカ)	A-(1) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) ⊖ A-(2) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) A-(3) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) A-(4) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) A-(5) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) ⊖	なし
SiC繊維(ニカラ) SiC繊維(ハイニカラ)	B-(1) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎) B-(2) $\phi 5 \times 45L$ (3温度域に1本毎)	なし
	小計7本×3 = 21本 A-(1~5), B-(1, 2)は黒鉛製円筒形状	
2. コンポジット材		
2-1. 炭素系		
PCC-2S-P(日立化成) CCM-190C(日本カーボン) CCM-190G(日本カーボン) PCC-2S-V(日立化成)	C-(1) $\phi 10 \times 2.0t$ (3温度域に2個毎) D-(1) $\phi 10 \times 2.3t$ (3温度域に2個毎) D-(2) $\phi 10 \times 2.7t$ (3温度域に2個毎) E-(1) $\phi 9.6 \times 2.0t$ (3温度域に2個毎)	C-(2) $\phi 5.0 \times 20L$ (3温度域に2個毎) D-(3) $\phi 5.0 \times 18.5L$ (3温度域に2個毎) D-(4) $\phi 5.0 \times 19.5L$ (3温度域に2個毎) E-(2) $\phi 4.7 \times 20L$ (3温度域に2個毎)
クレカ Kシート(吳羽化学) CX-270G(東洋炭素) CX-270(東洋炭素) CX-2702(東洋炭素) CX-2702G(東洋炭素)	F-(1) $\phi 10 \times 3.2t$ (3温度域に2個毎) ⊖ G-(1) $\phi 10 \times 3.8t$ (3温度域に2個毎) G-(2) $\phi 10 \times 4.2t$ (3温度域に2個毎) G-(5) $\phi 10 \times 3.0t$ (3温度域に2個毎) G-(6) $\phi 10 \times 3.4t$ (3温度域に2個毎)	G-(3) $\phi 5.0 \times 16L$ (3温度域に2個毎) G-(4) $\phi 5.0 \times 17L$ (3温度域に2個毎) G-(7) $\phi 5.0 \times 15L$ (3温度域に2個毎) G-(8) $\phi 5.0 \times 15.5L$ (3温度域に2個毎)
	(C~G各2個をホルダーに挿入する) 小計(54個)	(C~G各2個をホルダーに挿入する) 小計(48個)
2-2. SiC系		
Hi-Nicalo-II(日本カーボン) Hi-Nicalo-II(日本カーボン) Hitachi-X1(日立化成) Hitachi-X2(日立化成)	H-(5) $\phi 10 \times 5.2t$ (3温度域に2個毎) H-(6) $\phi 9.8 \times 5.2t$ (3温度域に2個毎) I-(1) $\phi 10 \times 6.0t$ (3温度域に2個毎) I-(2) $\phi 10 \times 6.2t$ (3温度域に2個毎) ⊖	H-(7) $\phi 5.0 \times 19L$ (3温度域に2個毎)    H-(8) $\phi 4.8 \times 19L$ (3温度域に2個毎) ⊥ I-(3) $\phi 4.5 \times 19L$ (3温度域に2個毎) I-(4) $\phi 4.5 \times 18.5L$ (3温度域に2個毎)
X1はSiC粒子5%分散型 X2はSiC粒子10%分散型	(H, I各2個をホルダーに挿入する) 小計(36個)	(H~I各2個をホルダーに挿入する) 小計(36個)
3. 参照材		
$\alpha$ -SiC(ハイドロイ) IG-110 IM-P(キルナイト) IM-V(キルナイト) HOPG	K-(1) $\phi 10 \times 6.5t$ (3温度域に2個毎) ⊖ L-(1) $\phi 10 \times 4.5t$ (3温度域に2個毎) M-(1) $\phi 10 \times 5.0t$ (3温度域に2個毎) ⊖ M-(2) $\phi 9.6 \times 5.0t$ (3温度域に2個毎) N-(1) $5 \times 5 \times 2$ (3温度域に2個毎)	K-(2) $\phi 4.5 \times 18L$ (3温度域に2個毎) L-(2) $\phi 4.5 \times 17L$ (3温度域に2個毎) M-(3) $\phi 4.5 \times 16L$ (3温度域に2個毎)    M-(4) $\phi 4.7 \times 16L$ (3温度域に2個毎) ⊥ なし
	(K~N各2個をホルダーに挿入する) 小計(30個)	(K~M各2個をホルダーに挿入する) 小計(24個)
4. 先進機能性材料		
n型6H-SiC(高崎研NTD用) p型6H-SiC(高崎研NTD用)	P-(1) $5 \times 5 \times 0.3t$ (2温度域に2枚毎) P-(3) $5 \times 5 \times 0.3t$ (2温度域に2枚毎) 1000°Cと1200°C領域に挿入	P-(2) $2.5 \times 2.5 \times 0.3t$ (2温度域に2枚毎) P-(4) $2.5 \times 2.5 \times 0.3t$ (2温度域に2枚毎) 1000°Cと1200°C領域に挿入
超塑性ZrO <sub>2</sub> (高照研)	Q-(1) $50 \times 15 \times 2$ (3温度域に3枚毎) 引張試験片-小計(9枚)	Q-(2) $20 \times 2 \times 1$ (3温度域に30枚毎) 曲げ試験片-小計(90枚)

## 注記

- キャップセル全体の試料挿入領域の長さを約600mmと想定し、基本的に3温度領域に区分する。低温度領域、中温度領域及び高温度領域の区分は(1000°C)、(1100°C)及び(1200°C)とする。1領域の長さを約200mm、直径33mm程度とする。高速中性子照射量は $1 \times 10^{21} (\text{cm}^{-2})$ を目標とする。
- コンポジット材(炭素系、SiC系)/SEM/CTE試料の繊維配向の区別は試料寸法により分別する。
- 黒鉛製円筒の区別は円筒表面に記号を刻字する。
- 各温度領域に配置する試料は、A-(1~5), B-(1, 2), C-(1, 2), D-(1~4), E-(1, 2), F-(1), G-(1~8), H-(1~8), I-(1~4), K-(1, 2), L-(1, 2), M-(1, 2), N-(1)
- n/p型6H-SiCは1000°Cと1200°Cの2領域のみ配置する。
- PIEのうち、⊖マークはSEM、⊖マークはXMAを示す。





Table 5 Fundamental statistics index of diameral dimensions for the specimen at 900°C\_98M-41A.

統計方向		$\alpha$ SIC	10%SIC/SIC	5%SIC/SIC	5%SIC/SIC	$\alpha$ SIC	5%SIC/SIC	10%SIC/SIC	PCC-2S.p	HINicato-II.p	HINicato-II.p	GisseCar.p	IG-110
HL_No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
平均	4.583212	4.582666	4.582984	4.579668	4.582005	4.587723	4.958662	4.806275	4.611501	4.982835	4.476126	4.483244	
標準誤差	6.46E-05	1.45E-04	2.20E-04	2.27E-04	2.25E-04	1.39E-04	6.49E-04	1.10E-03	7.97E-04	3.19E-04	1.60E-04	1.92E-04	
中央値(メジアン)	4.5833	4.5862	4.5833	4.5818	4.5833	4.5892	4.5897	4.8072	4.6053	4.9843	4.4765	4.4823	
最頻値(モード)													
標準偏差	0.002933	0.004684	0.007124	0.003136	0.007225	0.00451	0.021031	0.035718	0.025839	0.010351	0.005177	0.006209	
分散	4.38E-06	2.19E-05	5.07E-05	5.42E-05	5.29E-05	2.03E-05	4.42E-04	1.28E-03	6.68E-04	1.07E-04	2.68E-05	3.85E-05	
尖度	0.638682	-1.26085	-0.50622	0.13066	0.232034	0.750593	-0.32145	0.629911	-0.26304	-0.83408	1.15129	-0.05059	
歪度	-0.47103	-0.36254	0.011466	-0.7252	-0.72867	-1.05157	-0.25194	-0.33709	0.293322	-0.06817	-0.44821	0.373238	
範囲	0.0132	0.0175	0.0424	0.0439	0.0395	0.0264	0.1127	0.199	0.1507	0.0512	0.0351	0.0307	
最小	4.576	4.5731	4.5614	4.5554	4.557	4.5701	4.5877	4.6116	4.535	4.456	4.4692		
最大	4.5892	4.5906	4.6038	4.5979	4.5965	5.0004	4.8906	4.6857	5.0077	4.4911	4.4989		
合計	4812.373	4813.48	4812.144	4808.66	4811.105	487.109	5206.551	5046.889	4842.076	5231.977	4659.933	4707.406	
標本数	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	
信頼区間(95.0%)	0.000127	0.000284	0.000431	0.000445	0.000441	0.000273	0.001274	0.002163	0.001565	0.000627	0.000313	0.000376	

統計方向		GisseCar.p	GisseCar.v	IG-110	GisseCar.v	GisseCar.v	PCC-2S.v	HINicato-II.v	HINicato-II.v	HINicato-II.v	HINicato-II.v	CX-270G.p	CX-270G.v
HL_No	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
平均	4.681914	4.471348	4.449082	4.61984	4.66665	4.664739	4.995455	4.388002	4.830981	4.614474	4.931286	4.879111	
標準誤差	1.47E-04	1.75E-04	2.03E-04	1.78E-04	1.33E-04	4.39E-04	1.60E-03	3.55E-04	2.44E-03	6.38E-04	2.51E-03	3.41E-03	
中央値(メジアン)	4.6813	4.47121	4.4984	4.6155	4.6667	4.6682	5.0165	4.3857	4.8233	4.6126	4.9213	4.8584	
最頻値(モード)	4.6784	4.475	4.4999	4.6892	4.6726	4.674	5.0179	4.3799	4.8013	4.6082	4.9111	4.8233	
標準偏差	0.004778	0.005681	0.006579	0.006528	0.006249	0.014227	0.015886	0.011507	0.079759	0.020653	0.081492	0.110591	
分散	2.28E-05	3.23E-05	4.33E-05	5.42E-04	3.91E-04	2.69E-04	3.12E-04	6.36E-04	4.27E-04	6.64E-03	1.22E-02		
尖度	0.044792	-0.32266	3.833177	-1.2662	0.35127	2.420438	-0.1452	-0.27897	0.965662	1.111071	-1.14649	-1.40553	
歪度	0.334023	-0.02289	1.242981	0.17761	-0.4038	-1.4354	-0.90647	0.655325	-0.78039	0.605862	0.038393	0.076821	
範囲	0.0278	0.0322	0.0468	0.0334	0.038	0.0963	0.2503	0.0527	0.3922	0.1391	0.3043	0.3702	
最小	4.6696	4.4945	4.4838	4.5745	4.6404	4.6404	4.8452	4.3667	4.5716	4.5496	4.7648	4.6989	
最大	4.6974	4.4867	4.5306	4.6519	4.6784	5.0872	5.0955	4.4194	4.9638	5.0981	5.0691		
合計	4916.01	4694.915	4724.037	4850.83	4899.982	4891.976	5245.227	4607.402	5072.53	4845.477	5177.85	5123.066	
標本数	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	
信頼区間(95.0%)	0.000289	0.000344	0.000398	0.00141	0.000378	0.000382	0.0003142	0.000697	0.00483	0.001251	0.004935	0.006697	

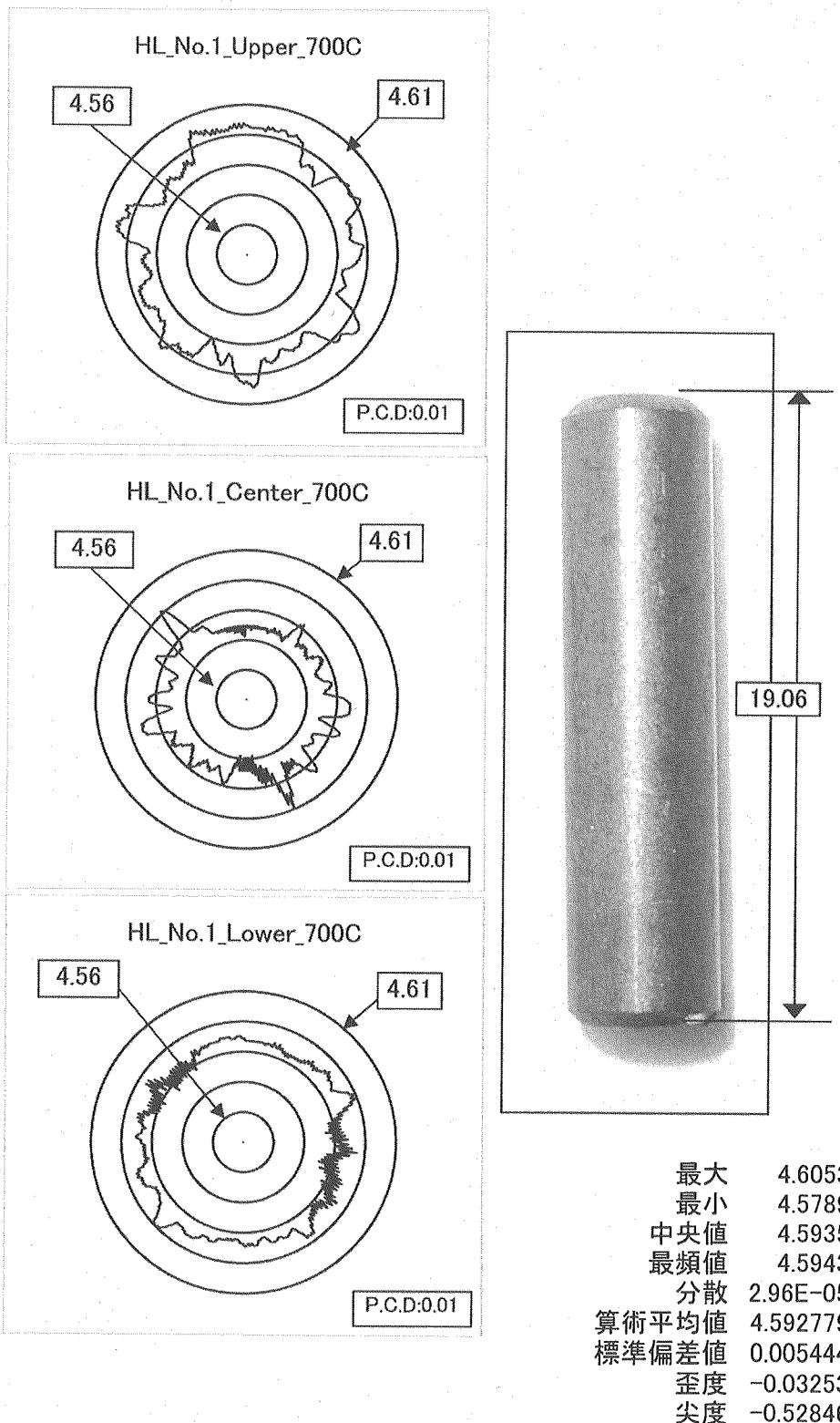


Fig.1 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(5%SiC\_particle/SiC)

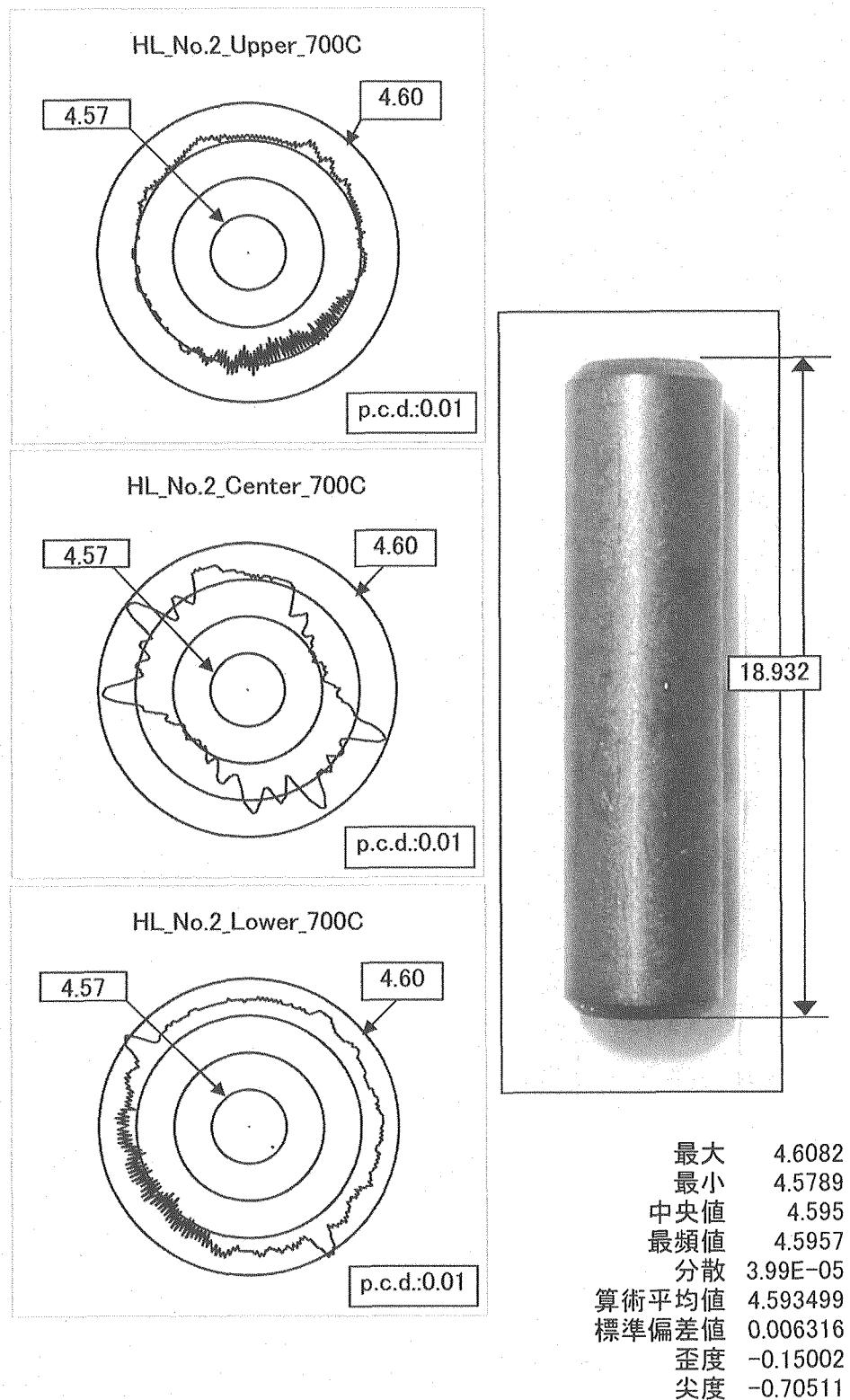


Fig.2 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(5%SiC\_particle/SiC)

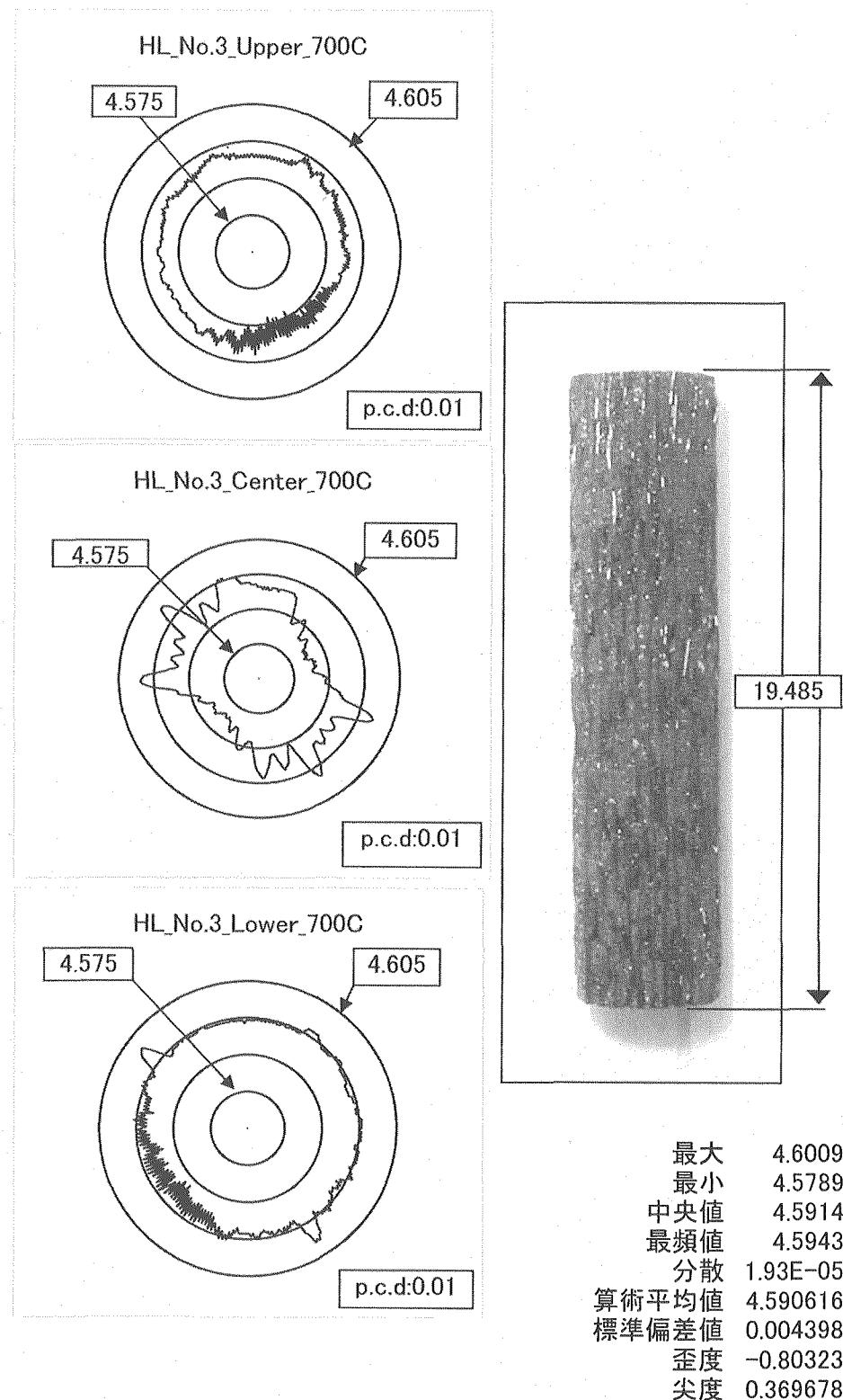


Fig.3 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforced SiC composite .  
(HiNicaloceram\_parallel)

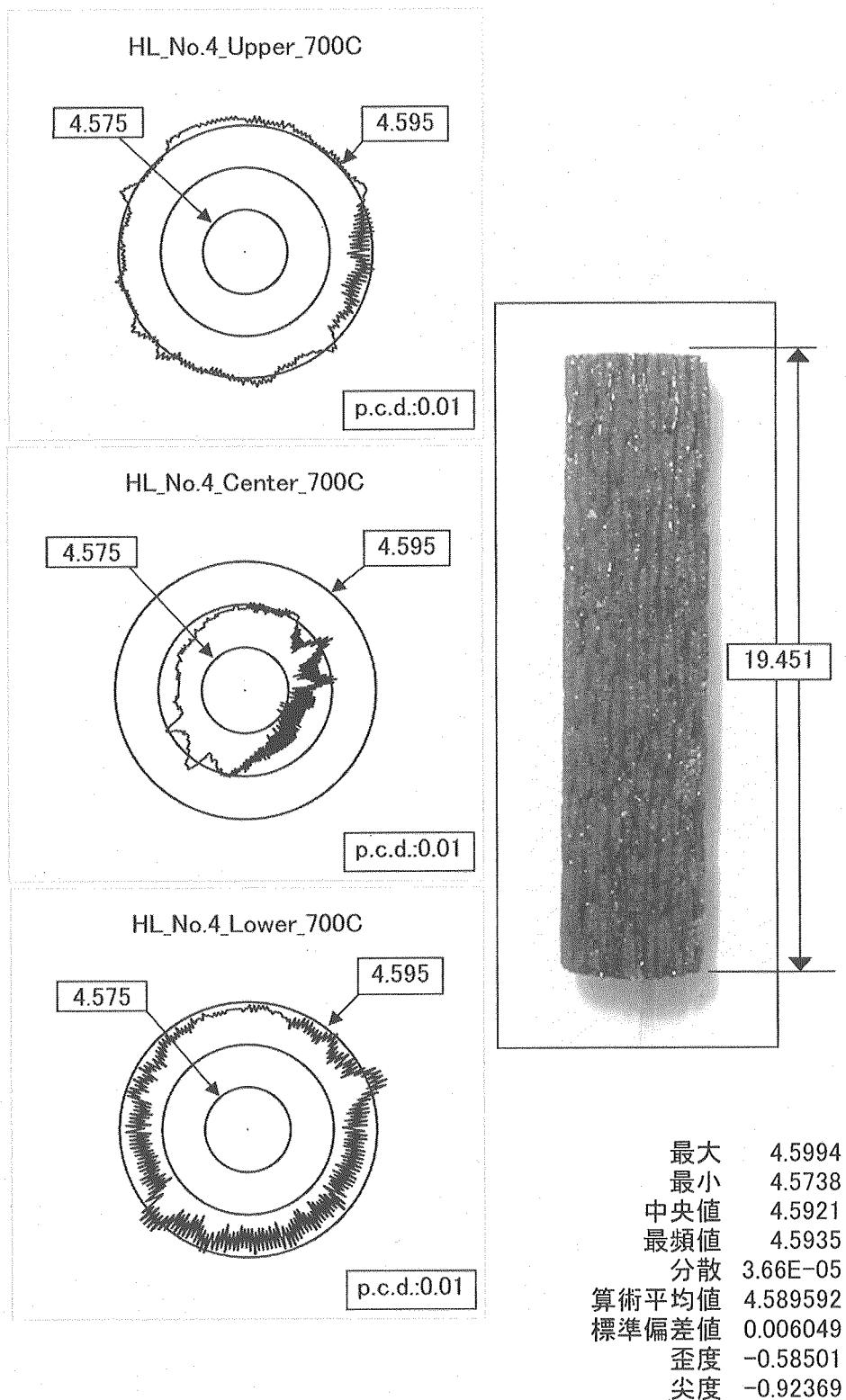


Fig.4 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_parallel)

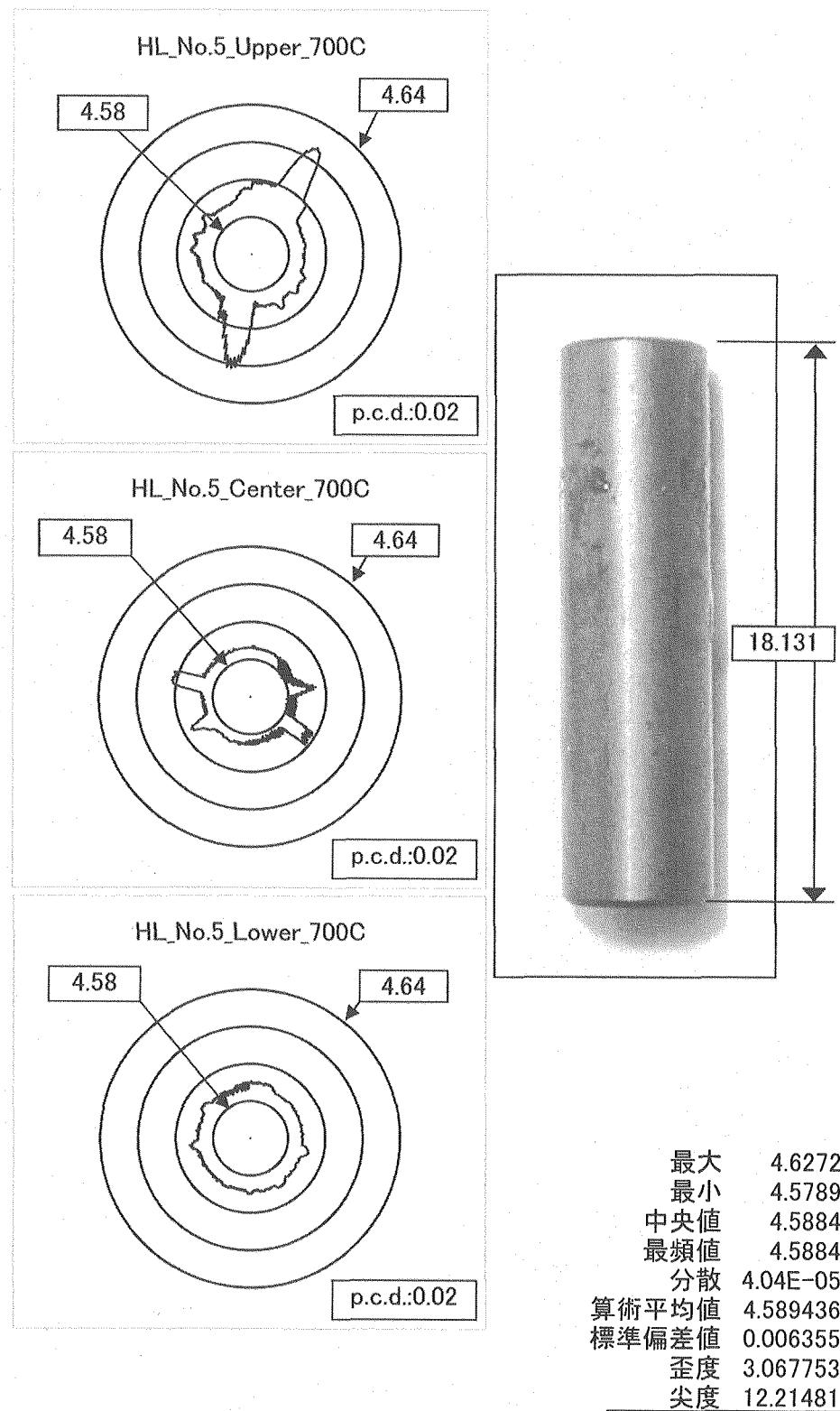


Fig.5 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for monolithic  $\alpha$ -SiC. (Hexaloy)

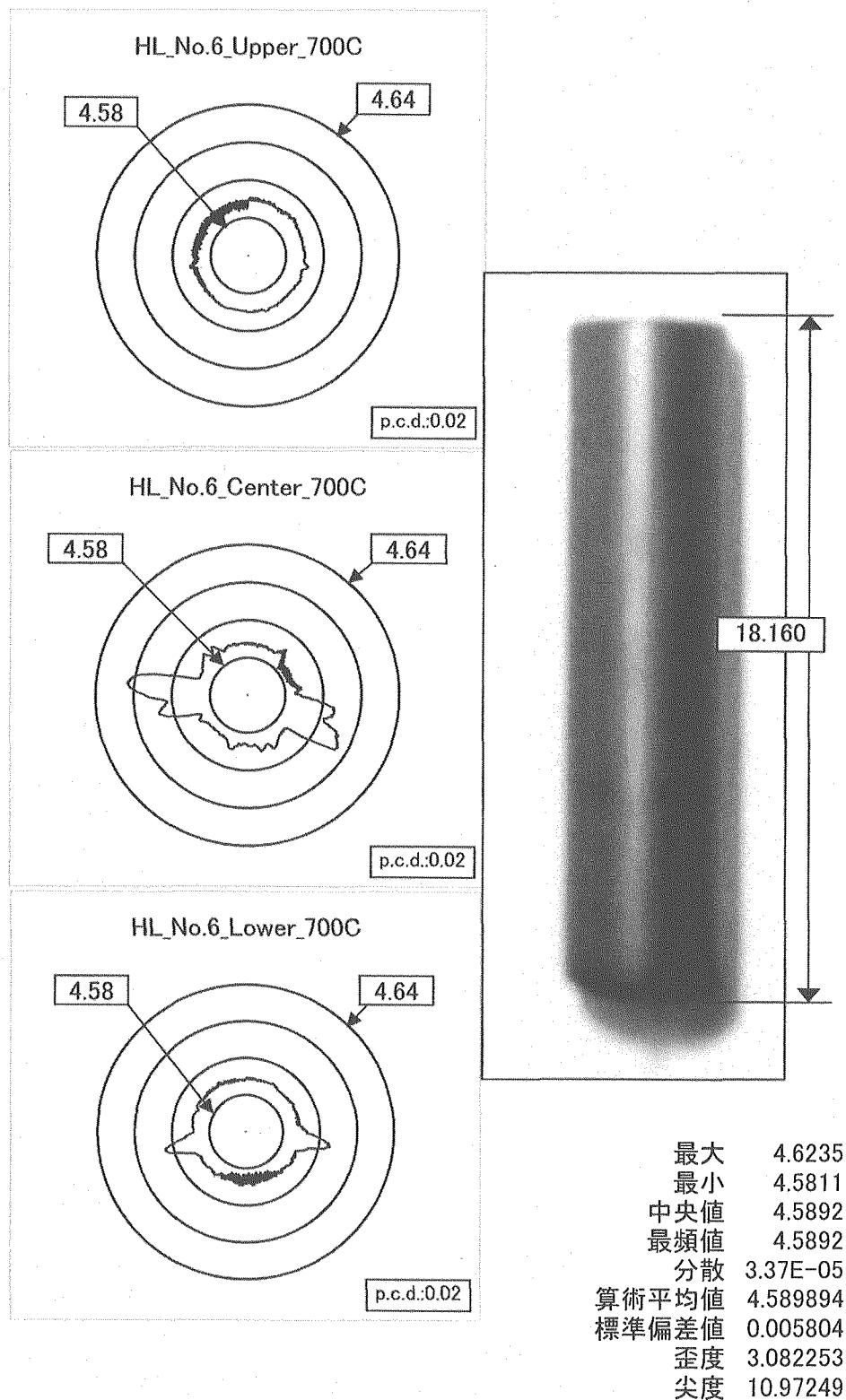


Fig. 6 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for monolithic  $\alpha$ -SiC. (Hexaloy)

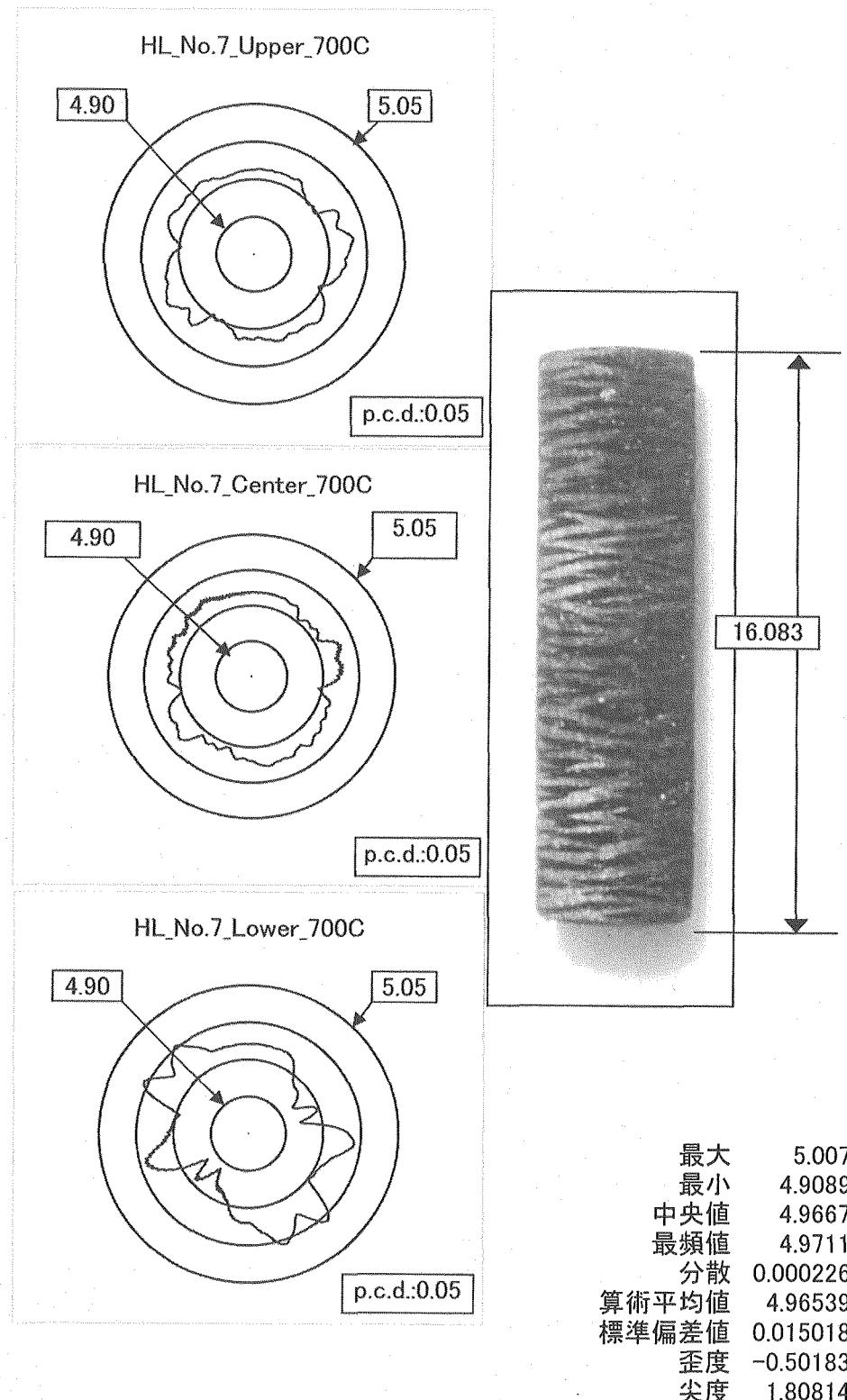


Fig. 7 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CX-270G\_vertical)

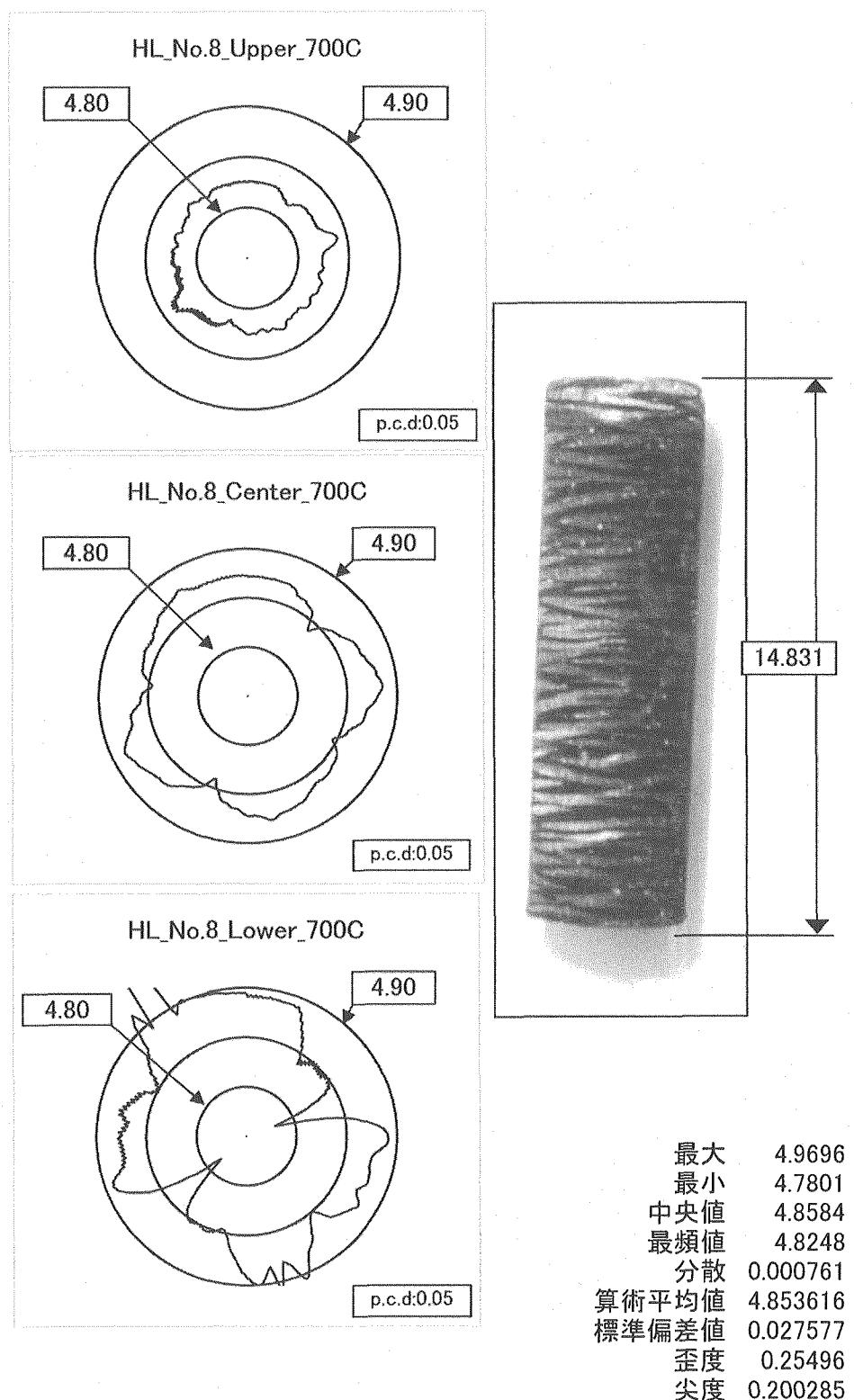


Fig. 8 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CX-2702\_vertical)

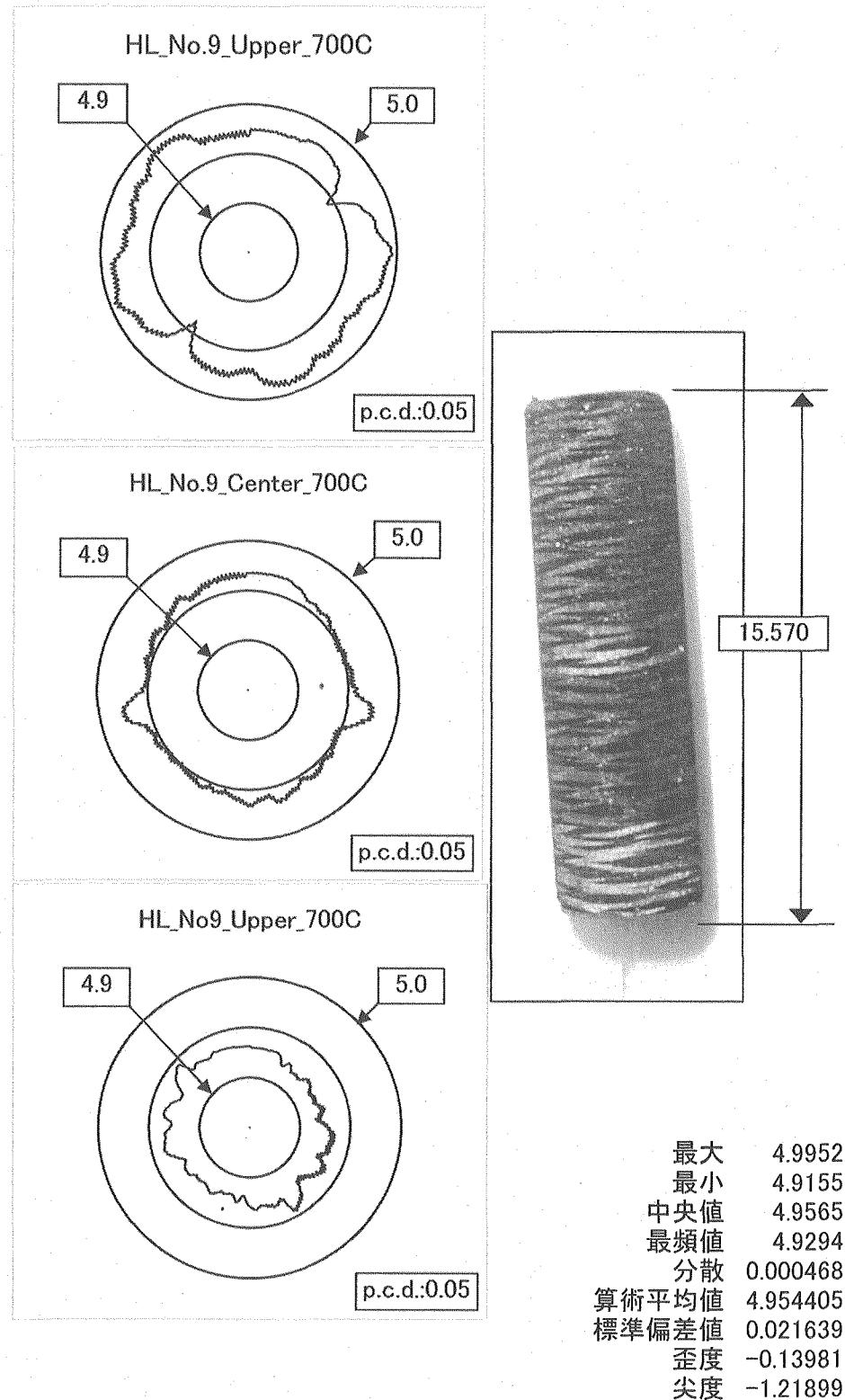


Fig. 9 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CX-2702G\_vertical)

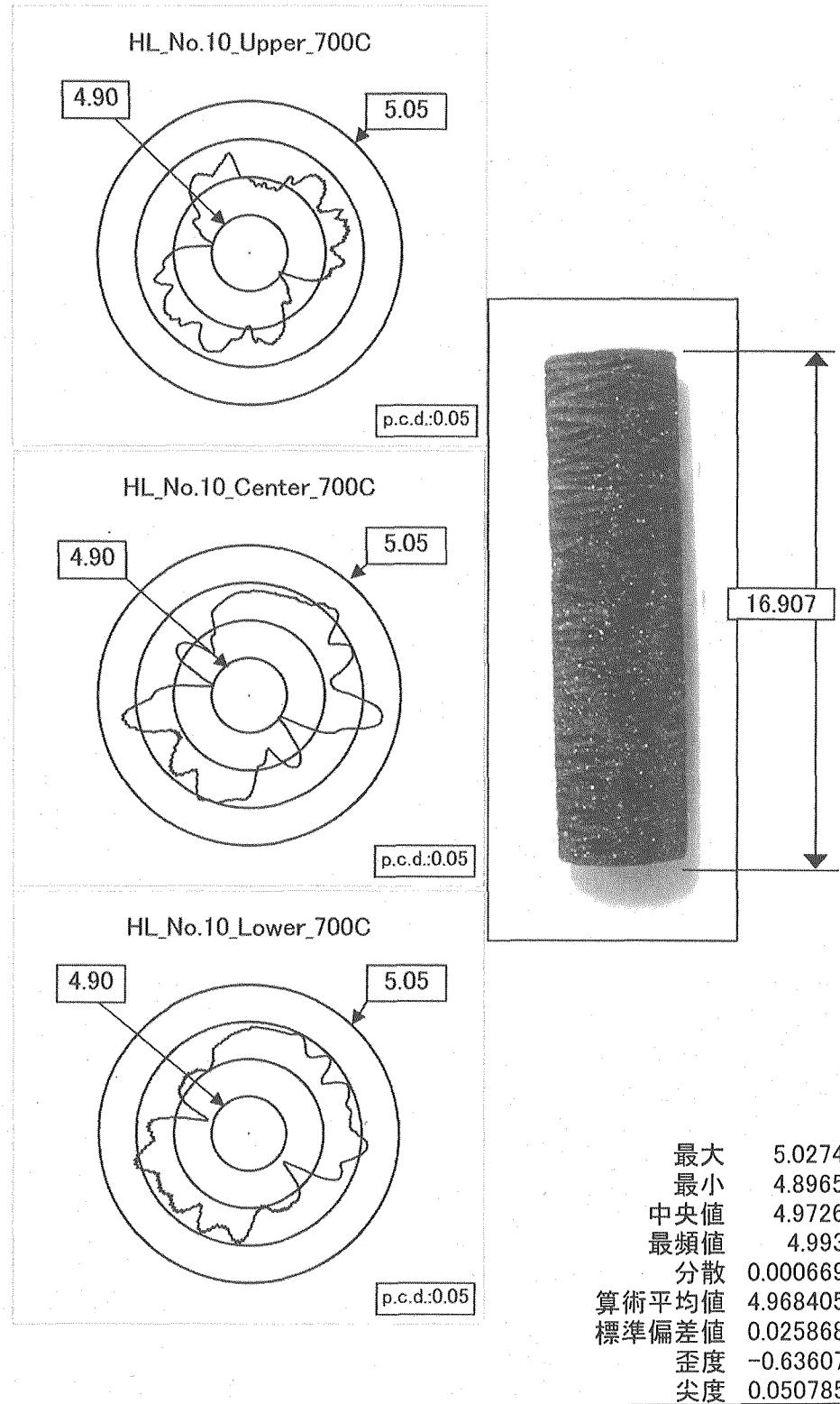


Fig.10 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CX-270\_vertical)

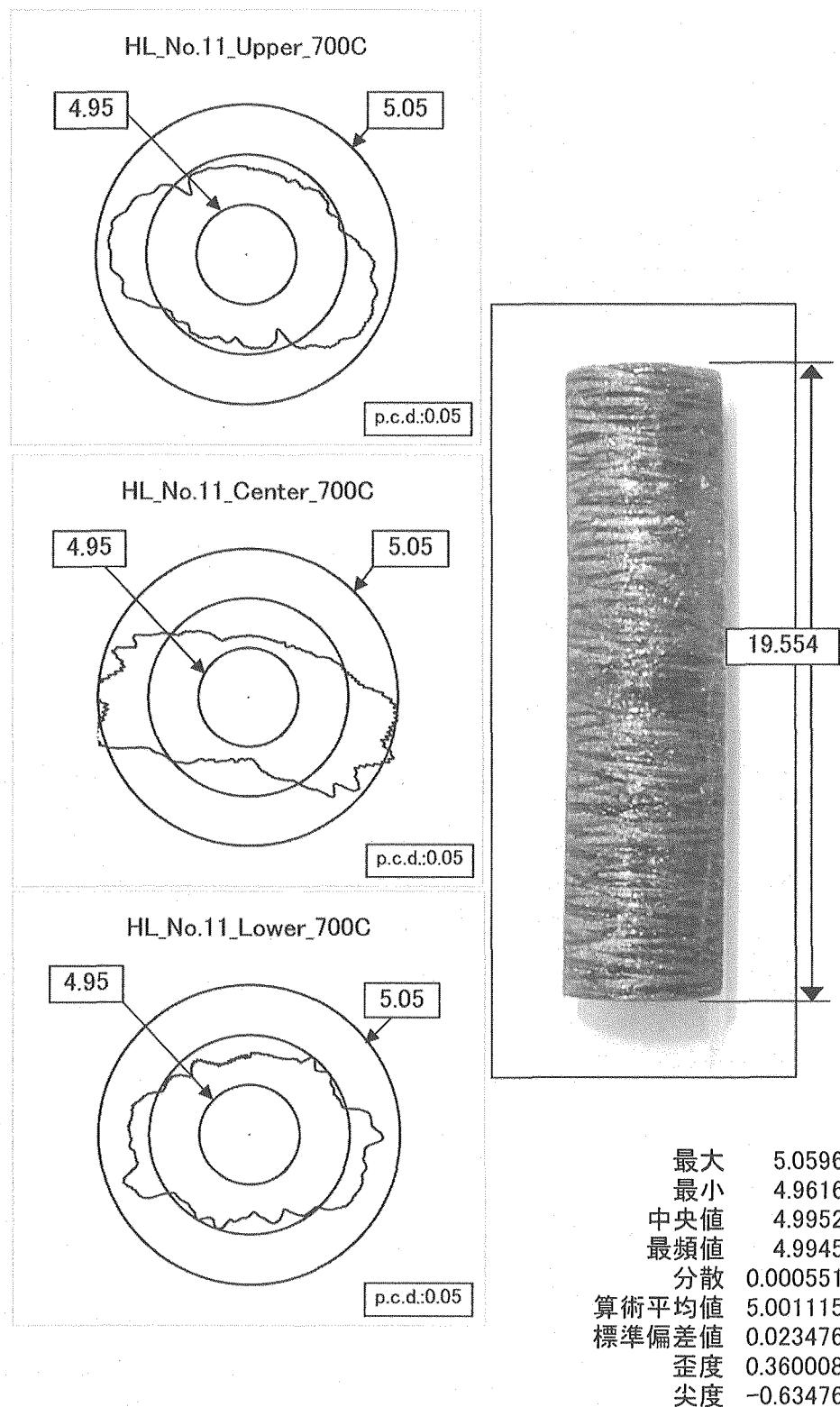


Fig.11 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CCM-190G\_vertical)

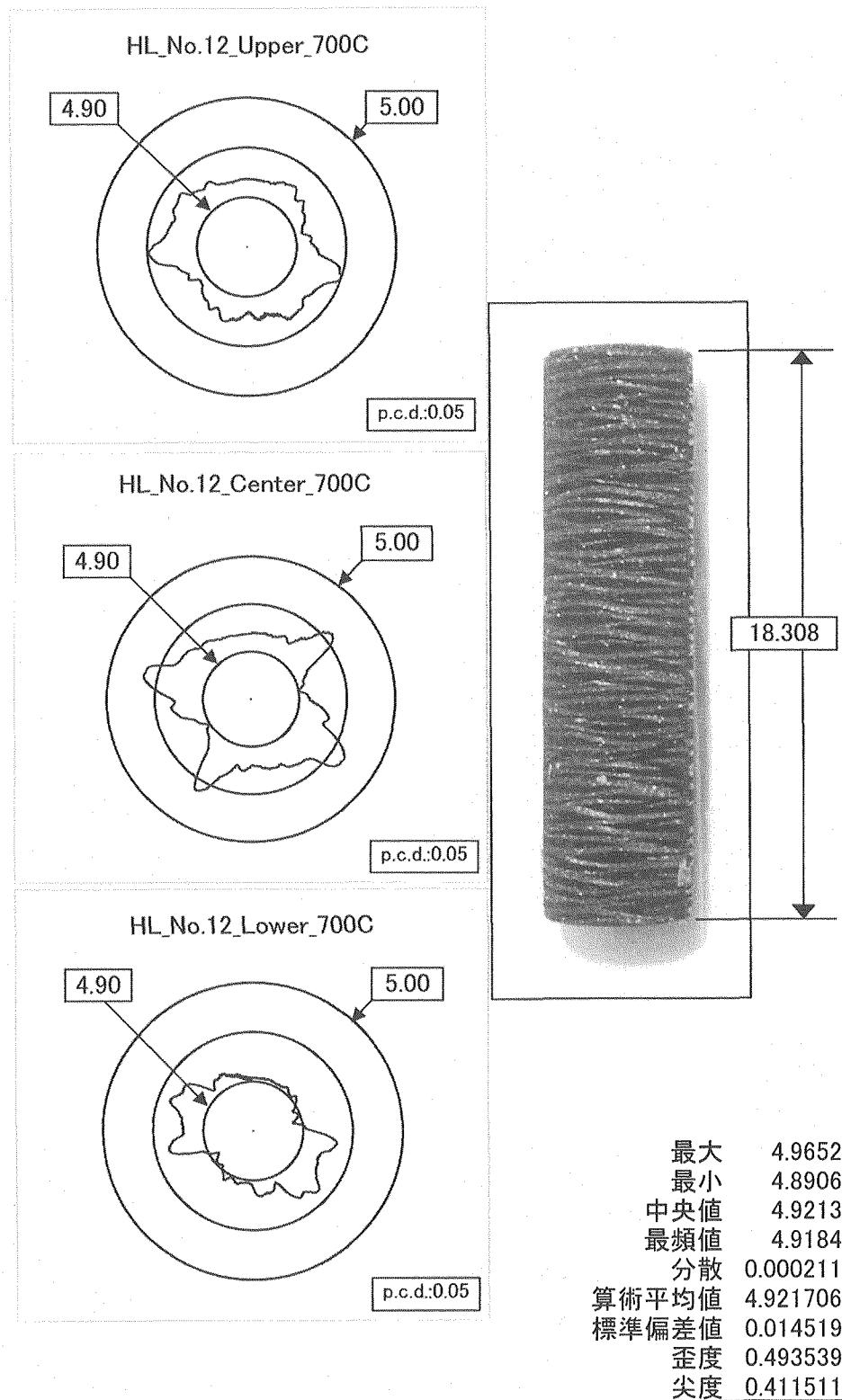


Fig.12 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CCM-190C\_vertical)

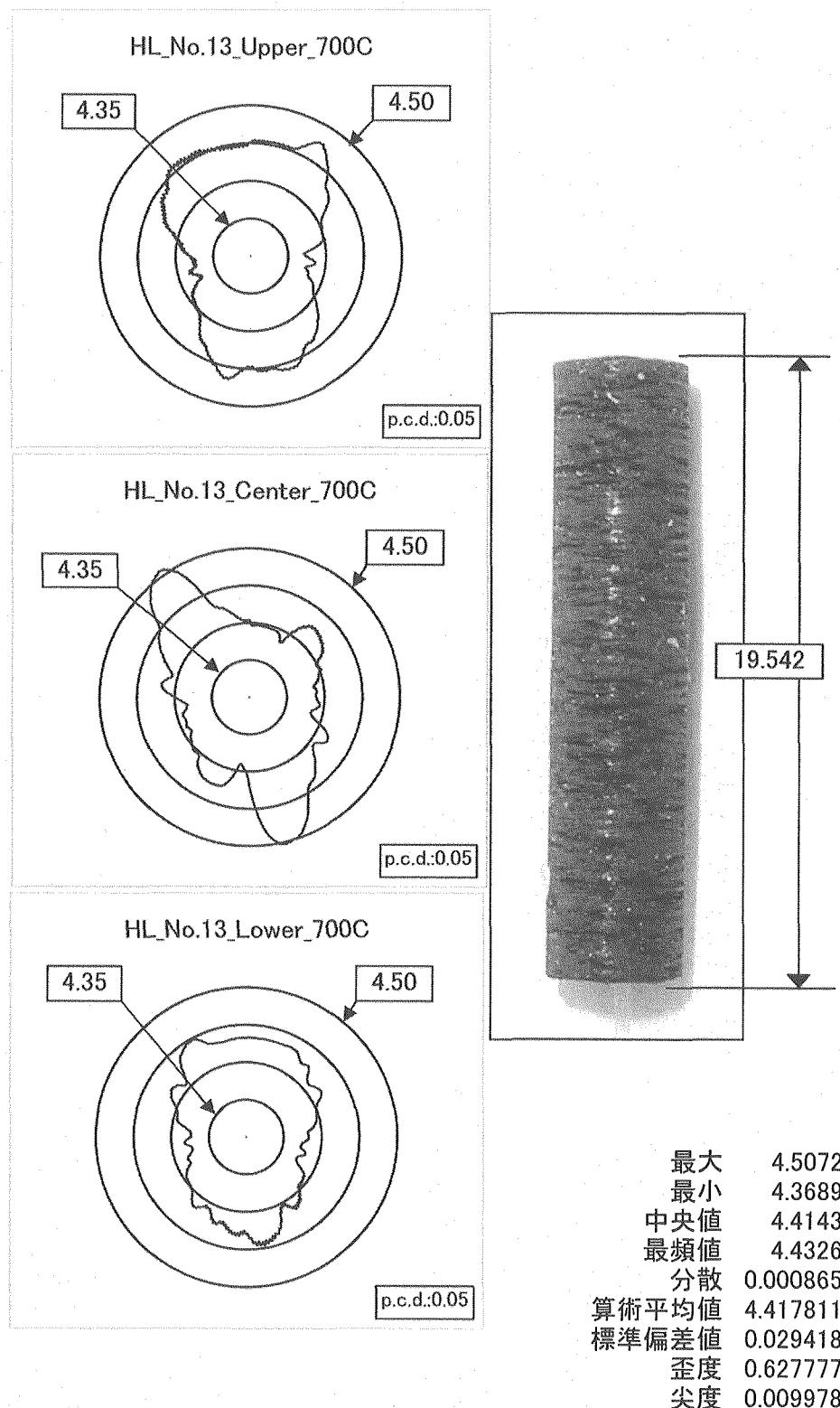


Fig. 13 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_vertical)

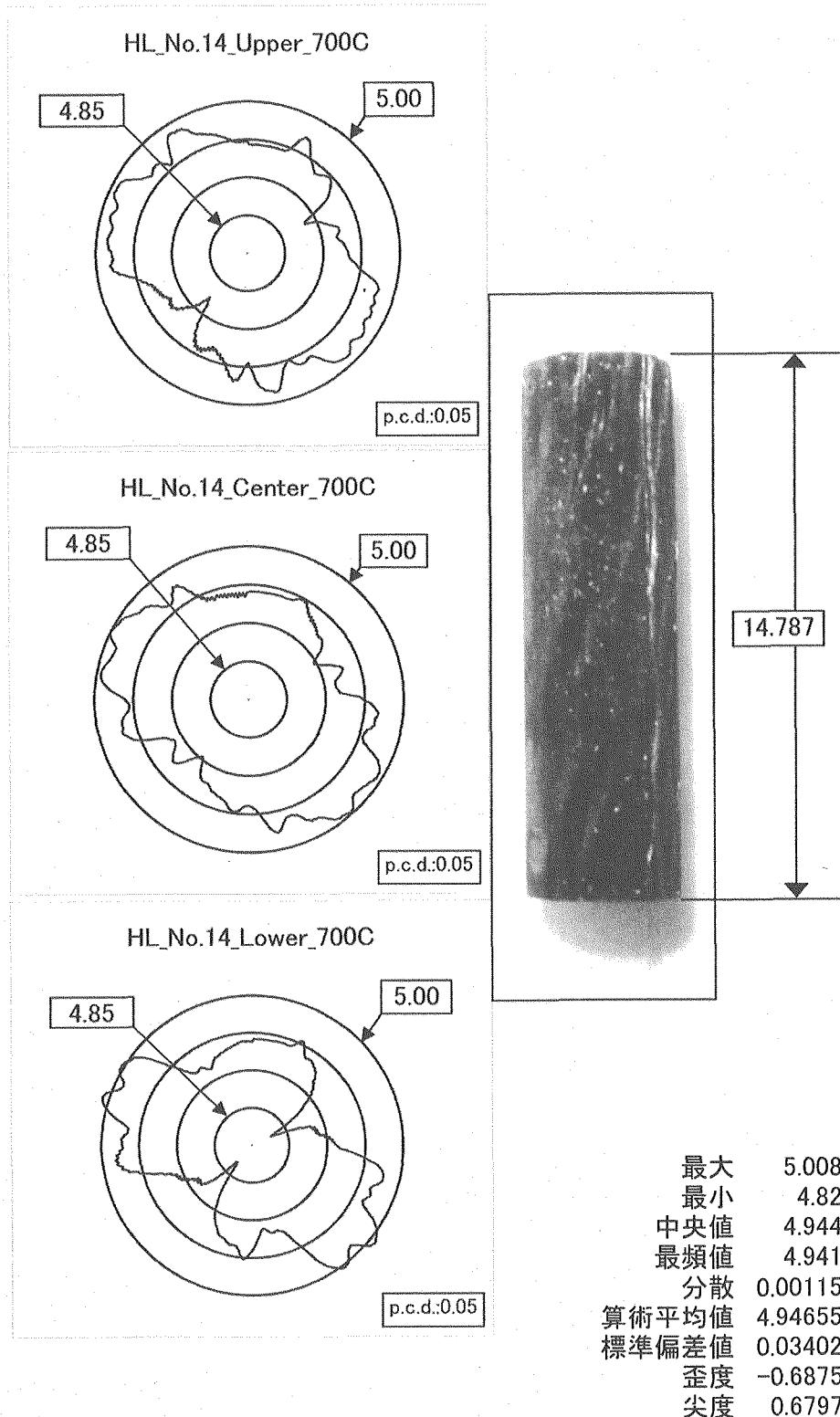


Fig.14 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite .  
(CX-2702\_parallel)

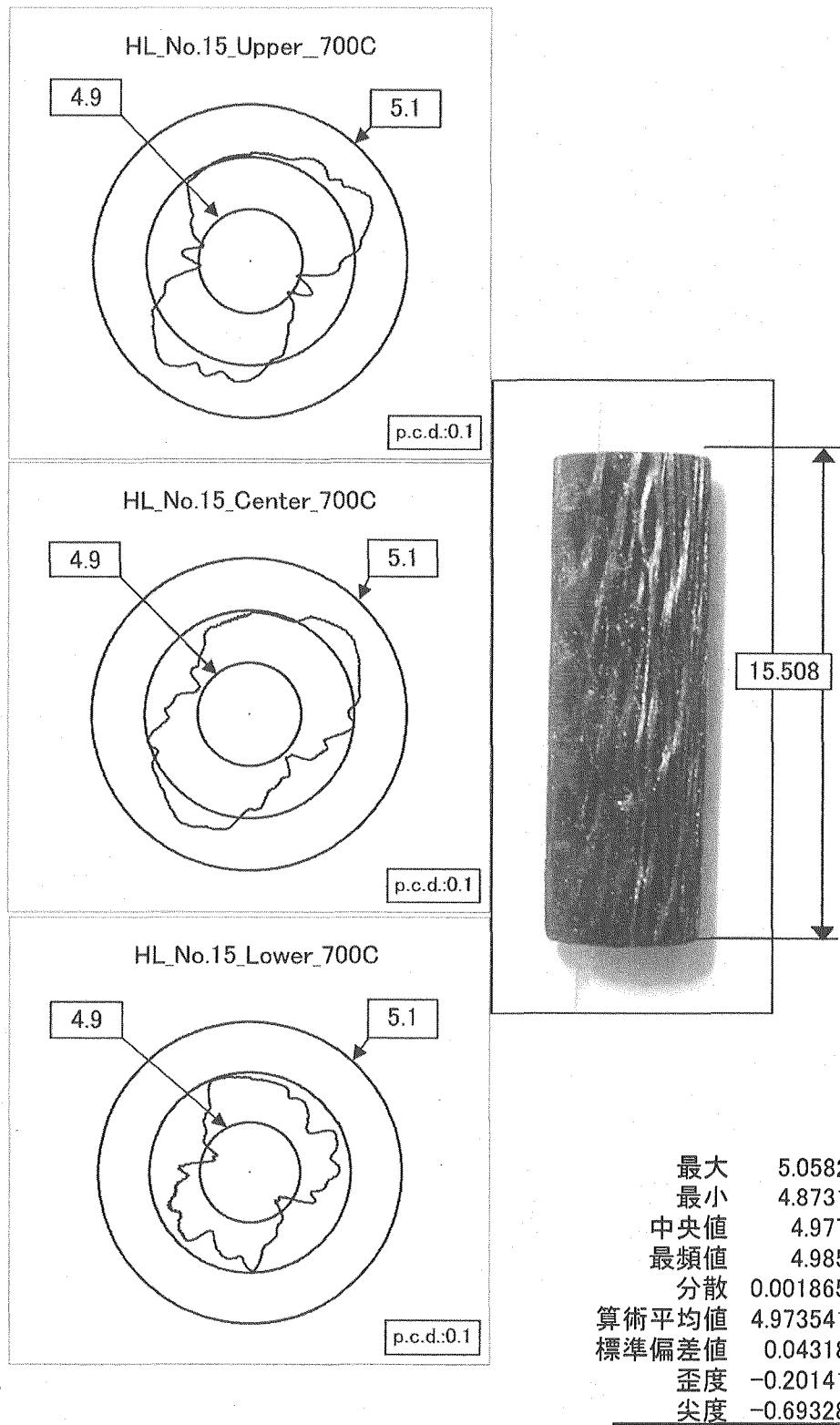


Fig.15 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-2702G\_parallel)

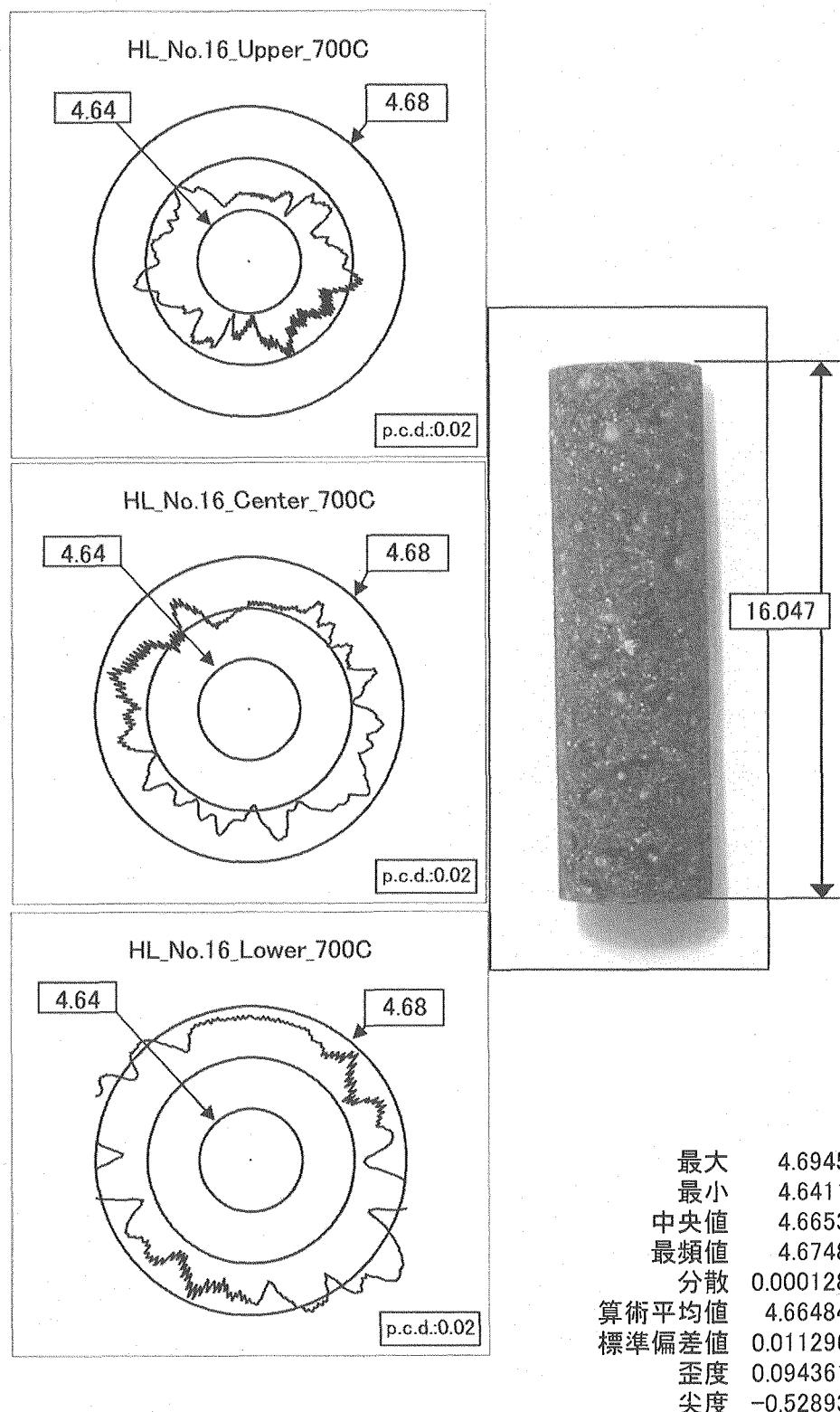


Fig.16 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for near-isotropic graphite.  
(GilsoCarbon\_vertical)

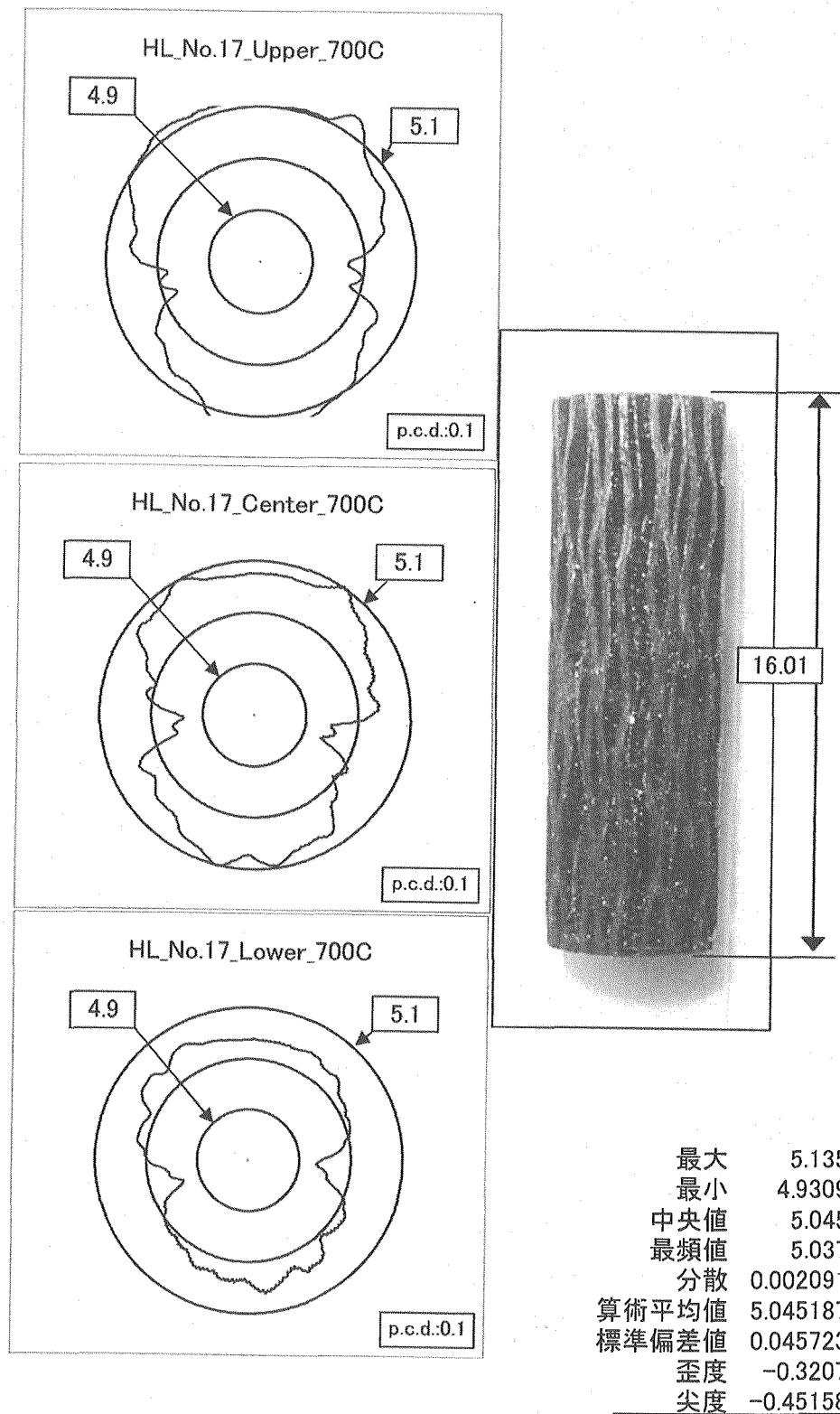


Fig. 17 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-270G\_parallel)

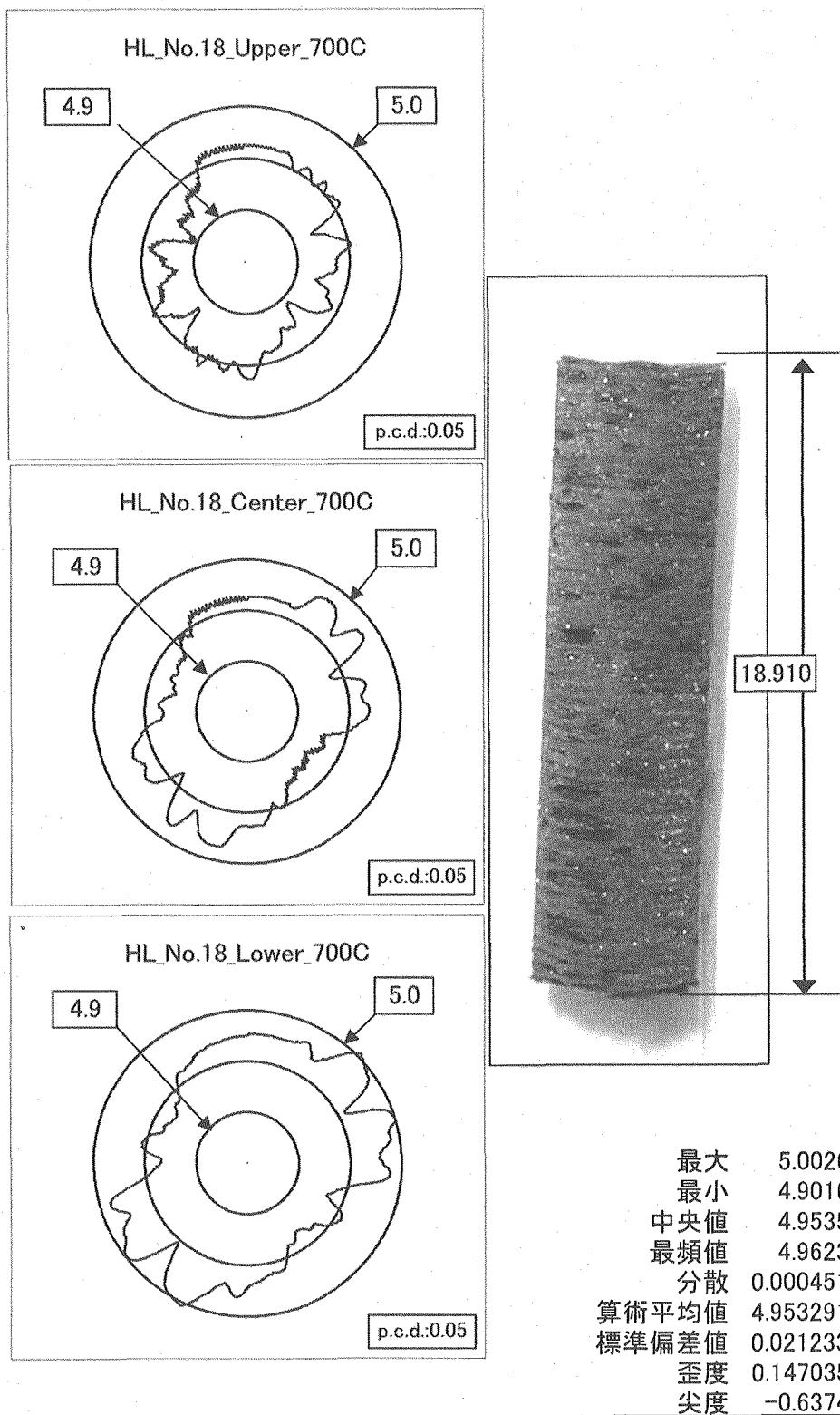


Fig. 18 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_vertical)

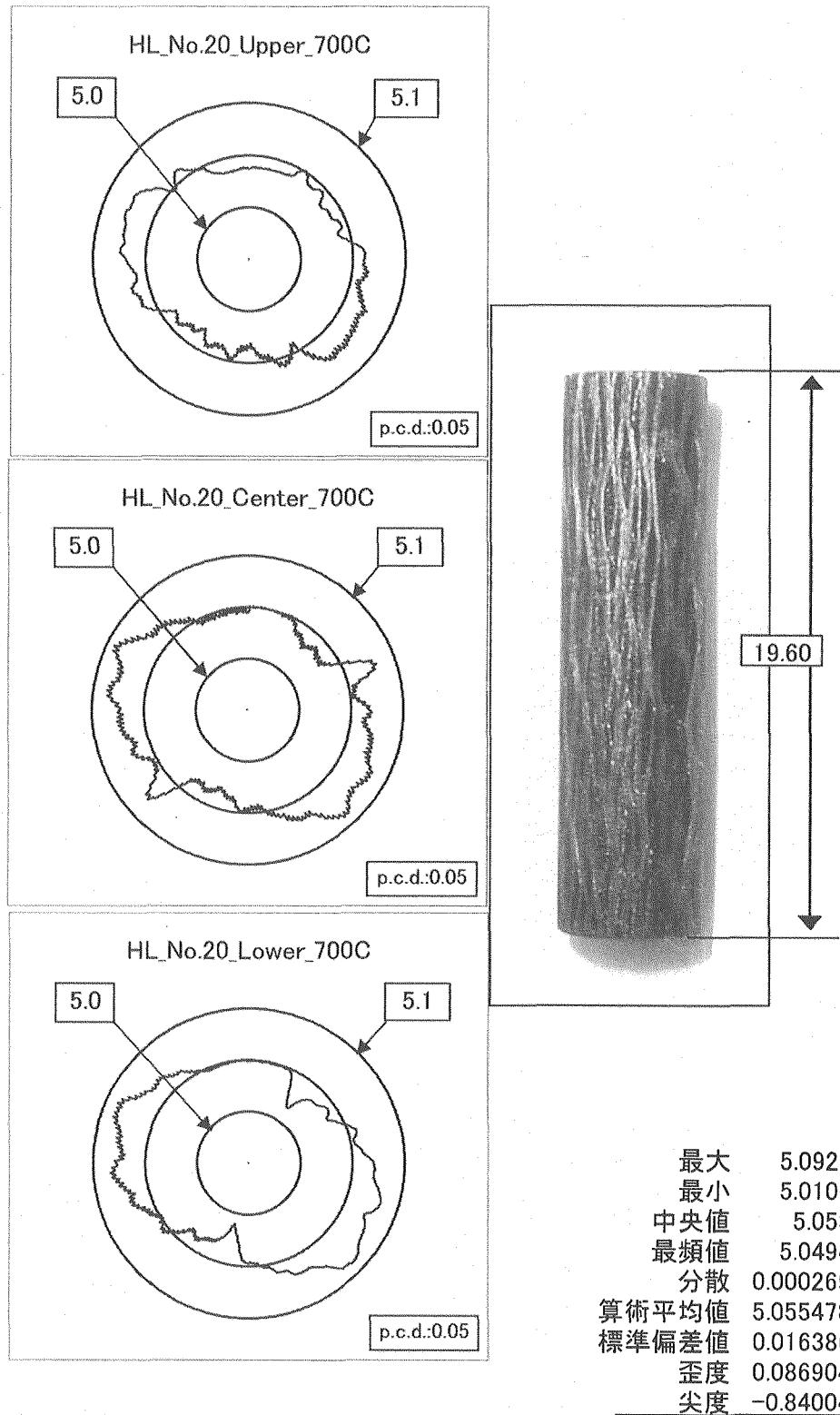


Fig. 19 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(CCM-190G\_parallel)

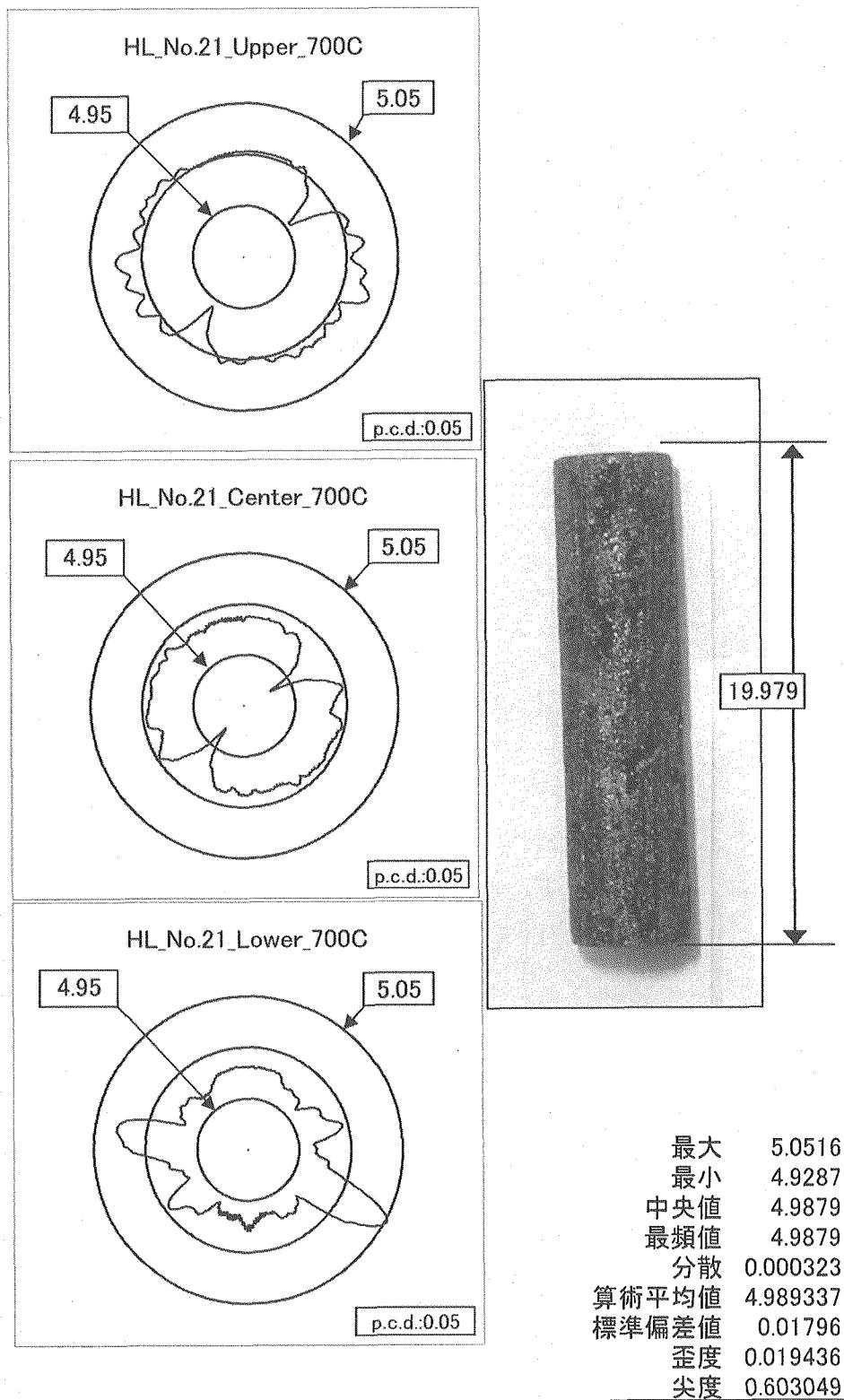


Fig.20 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(PCC-2S\_parallel)

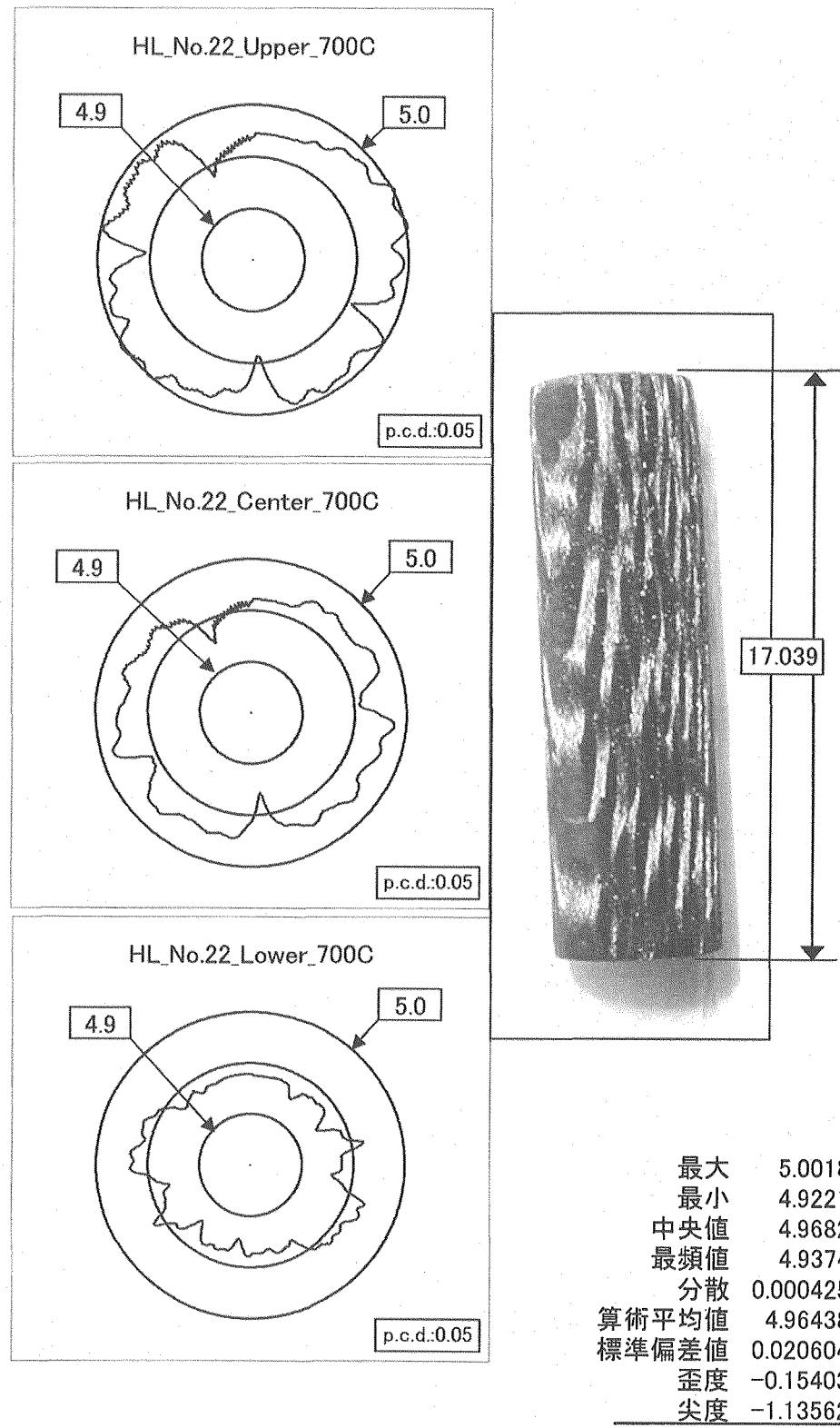


Fig. 21 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(CX-270G\_parallel)

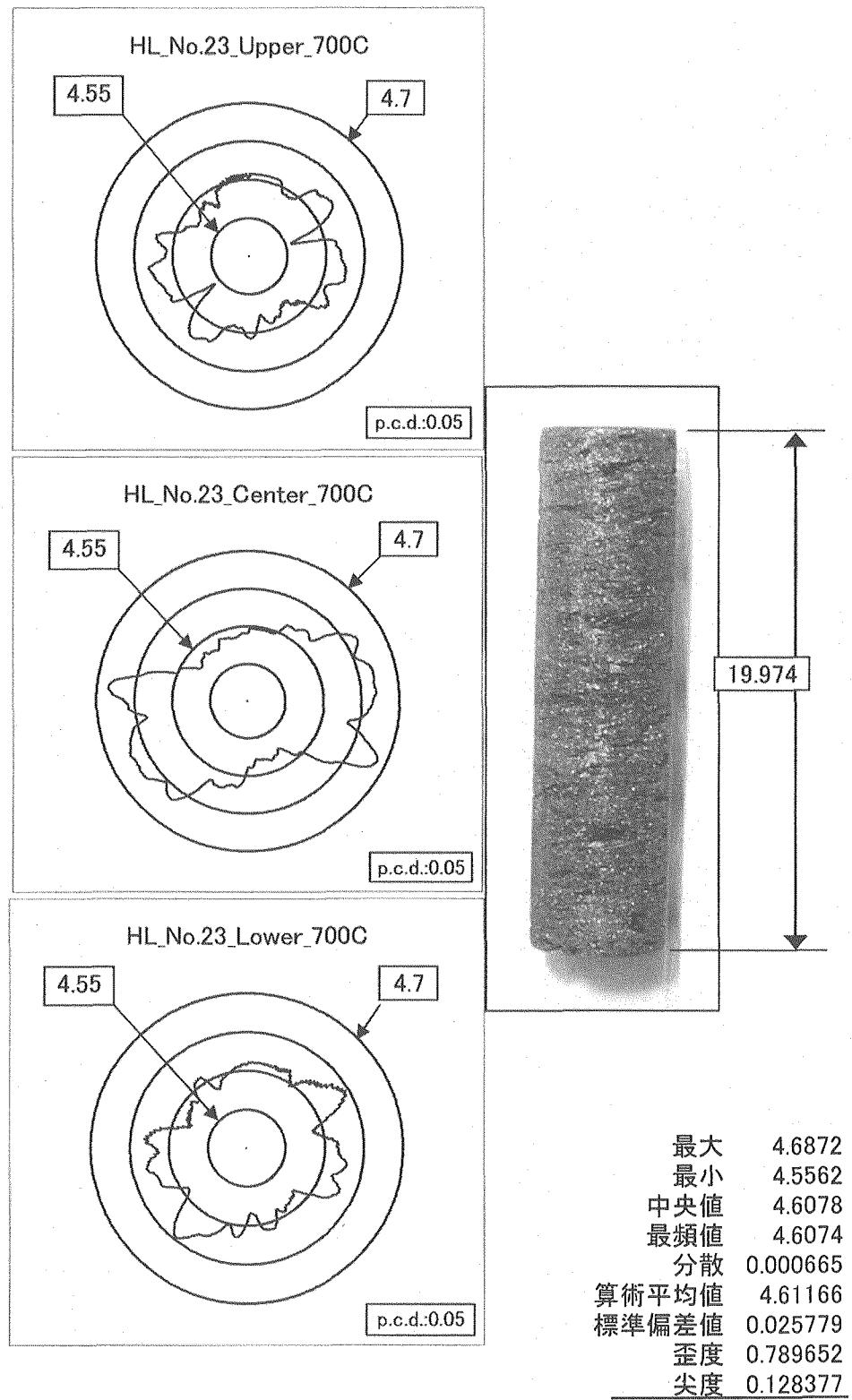


Fig.22 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

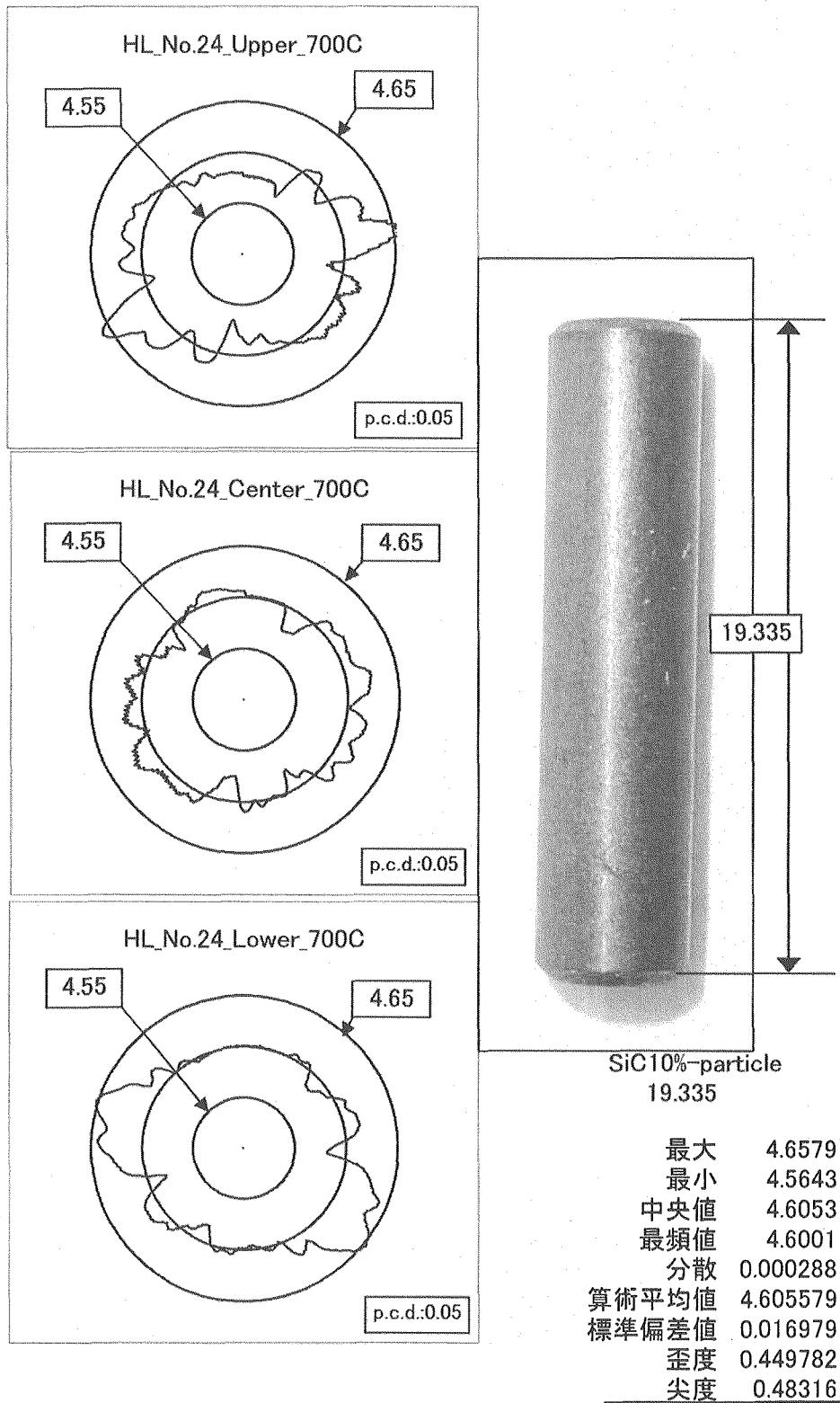


Fig.23 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC particle(10%) reinforcement SiC composite.  
(10%SiC\_particle/SiC)

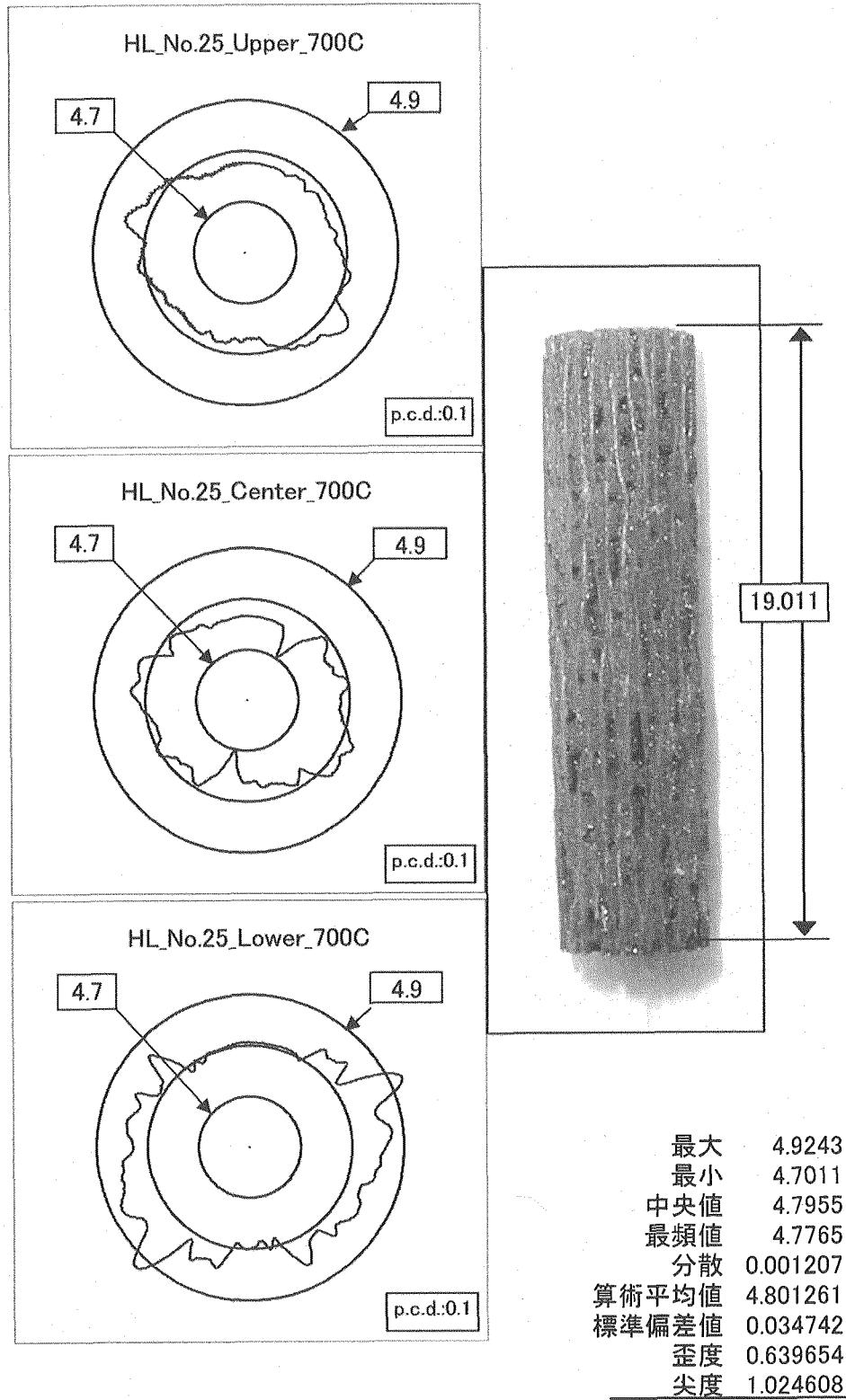


Fig.24 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_parallel)

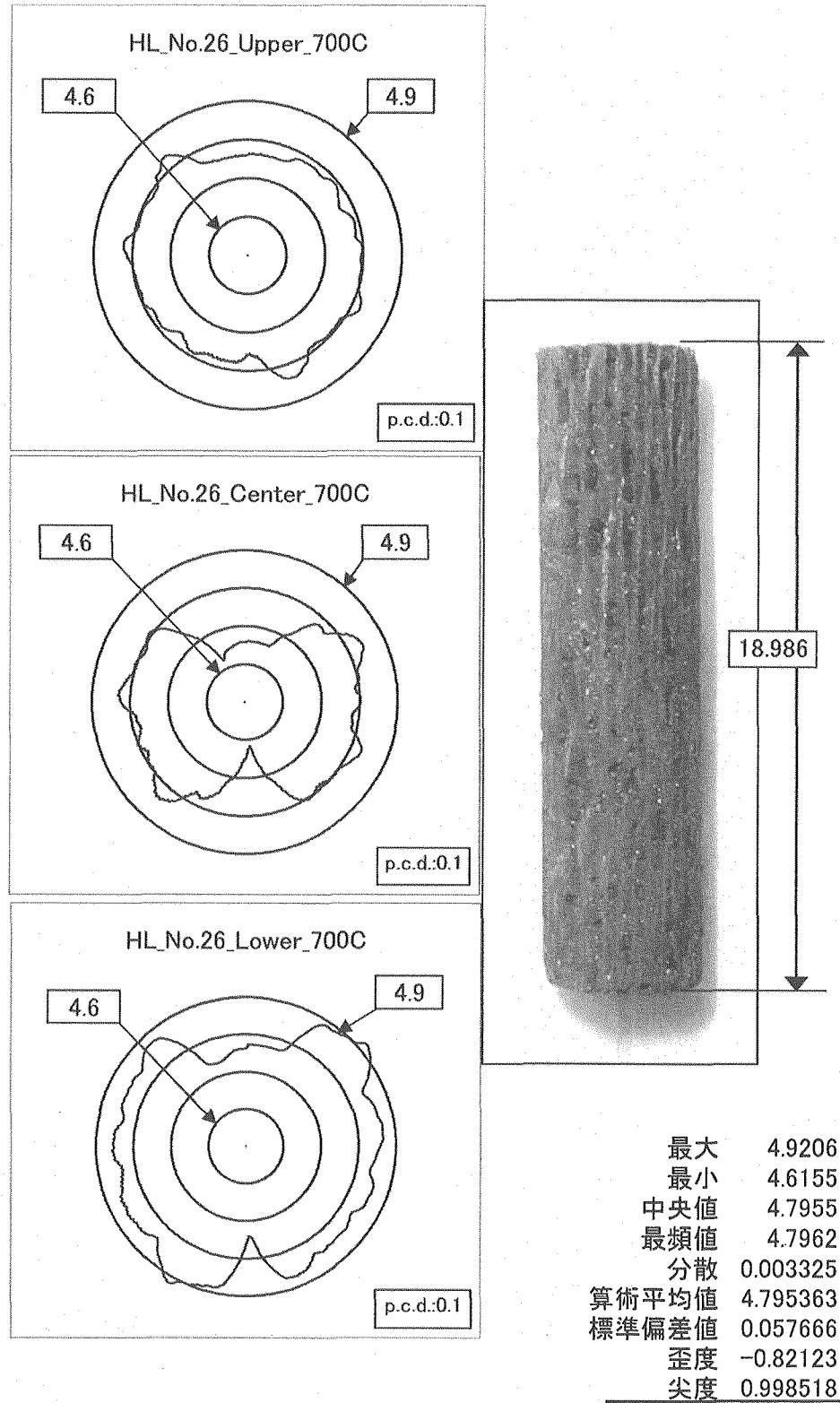


Fig. 25 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_parallel)

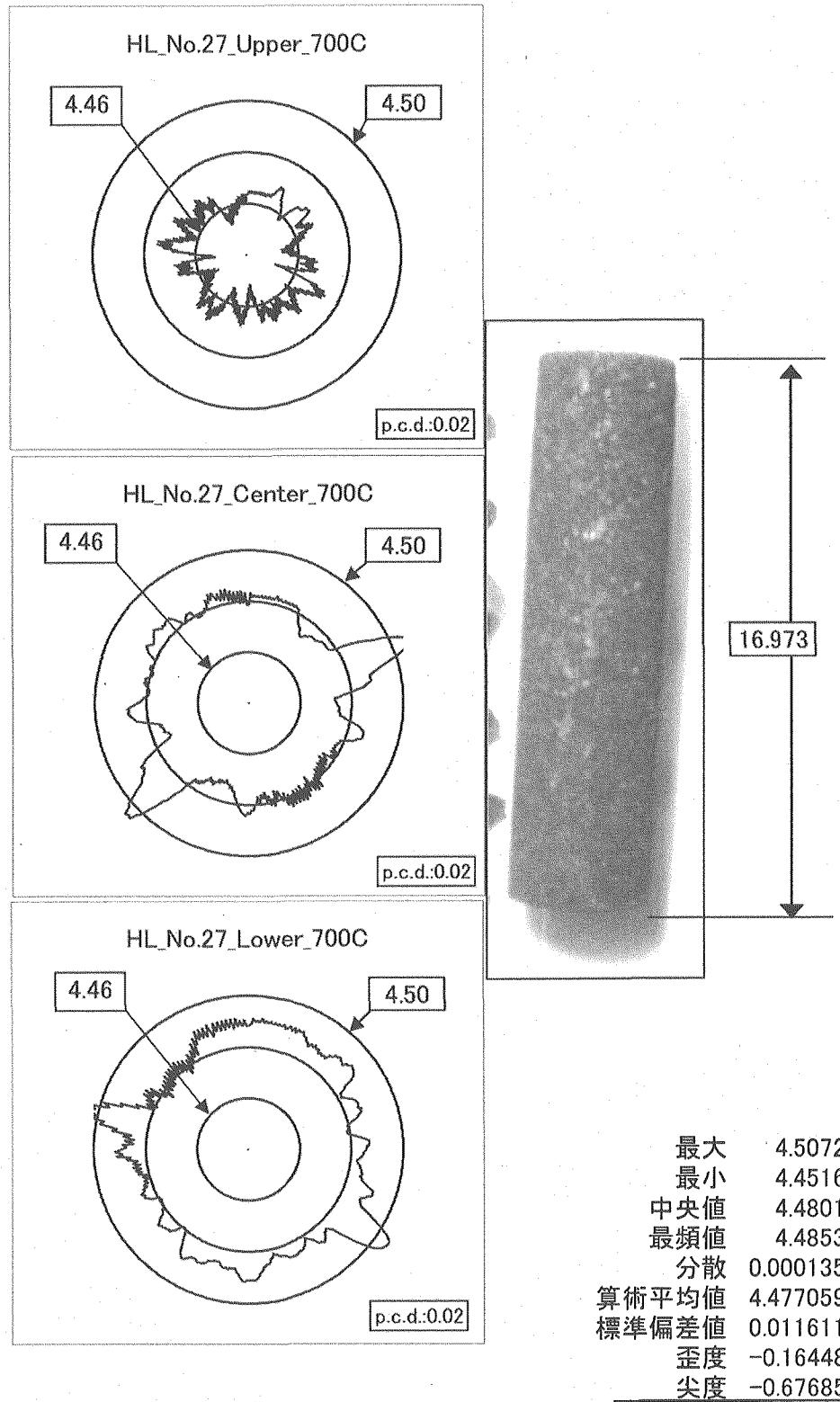


Fig.26 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for isotropic graphite. (IG-110)

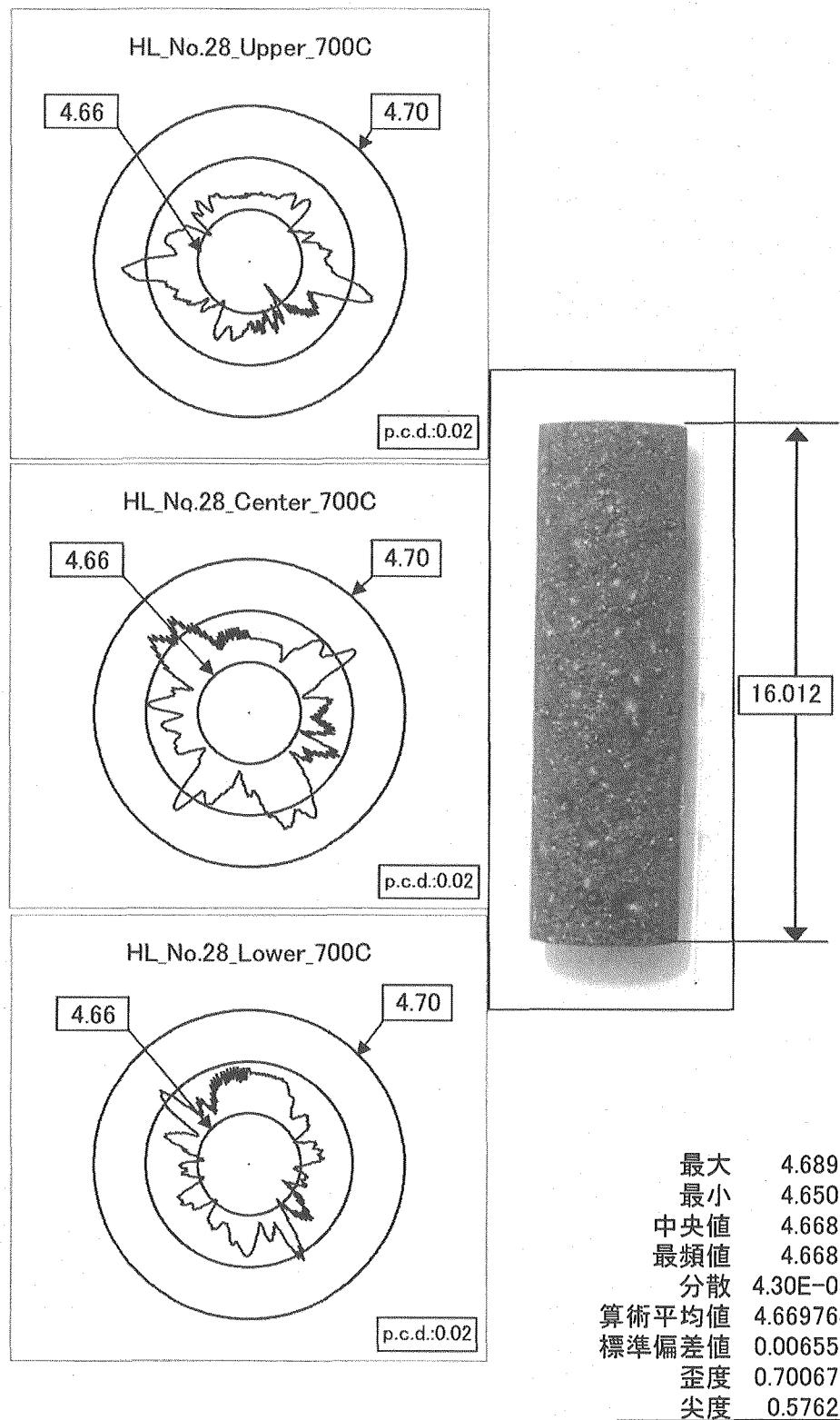


Fig.27 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for isotropic graphite. (GilsoCarbon\_vertical)

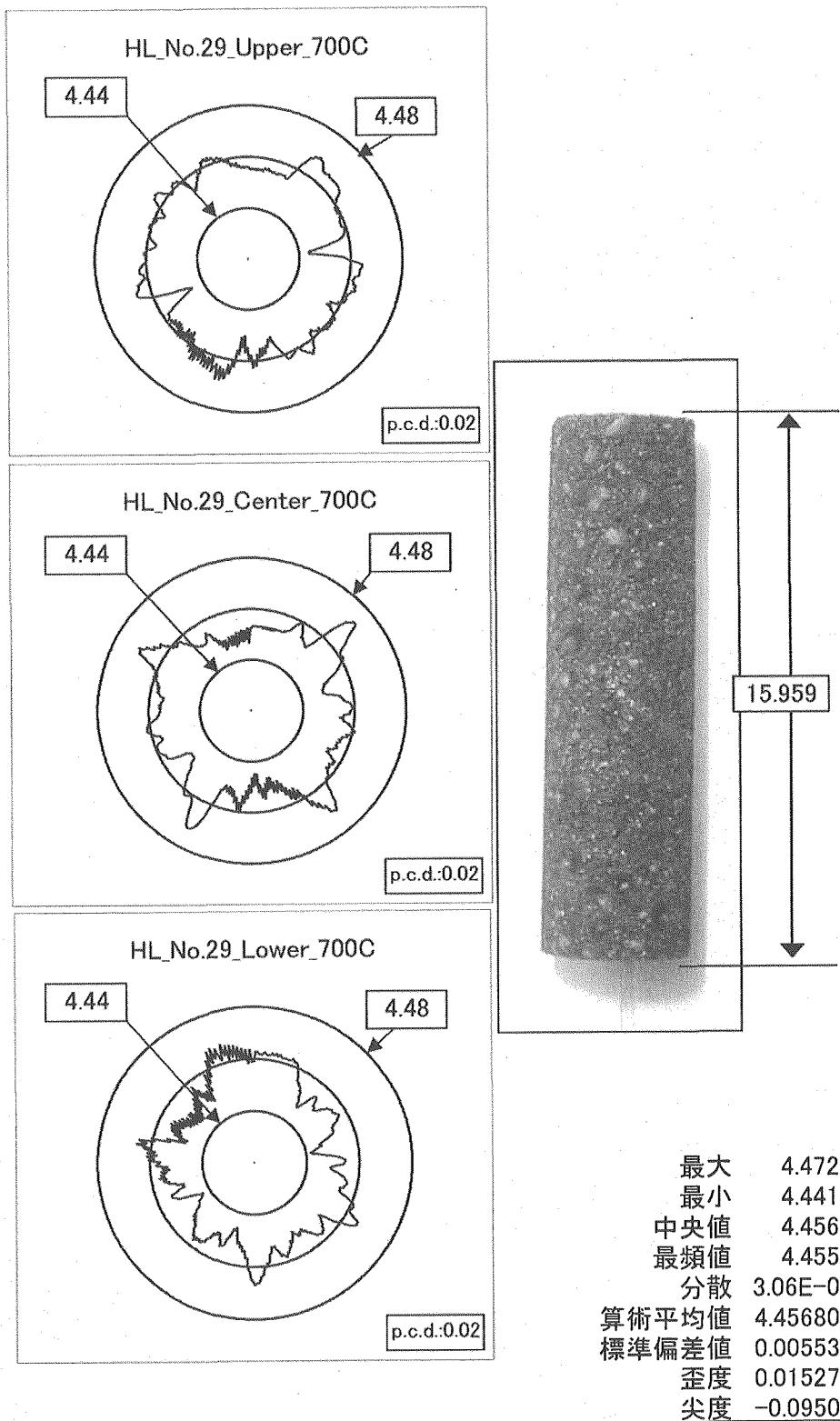


Fig.28 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for near-isotropic graphite. (GilsoCarbon\_parallel)

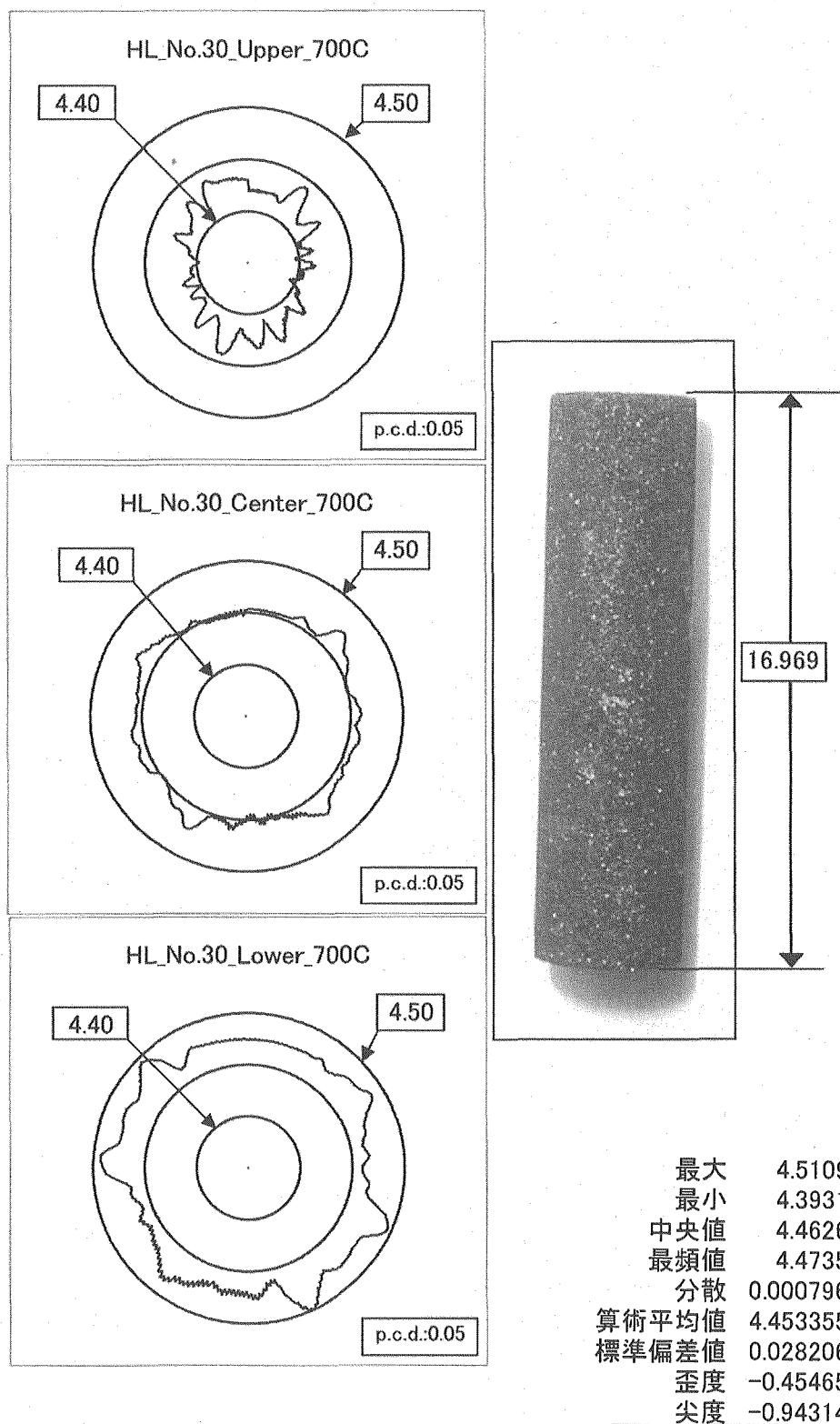


Fig.29 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C for isotropic graphite. (IG-110)

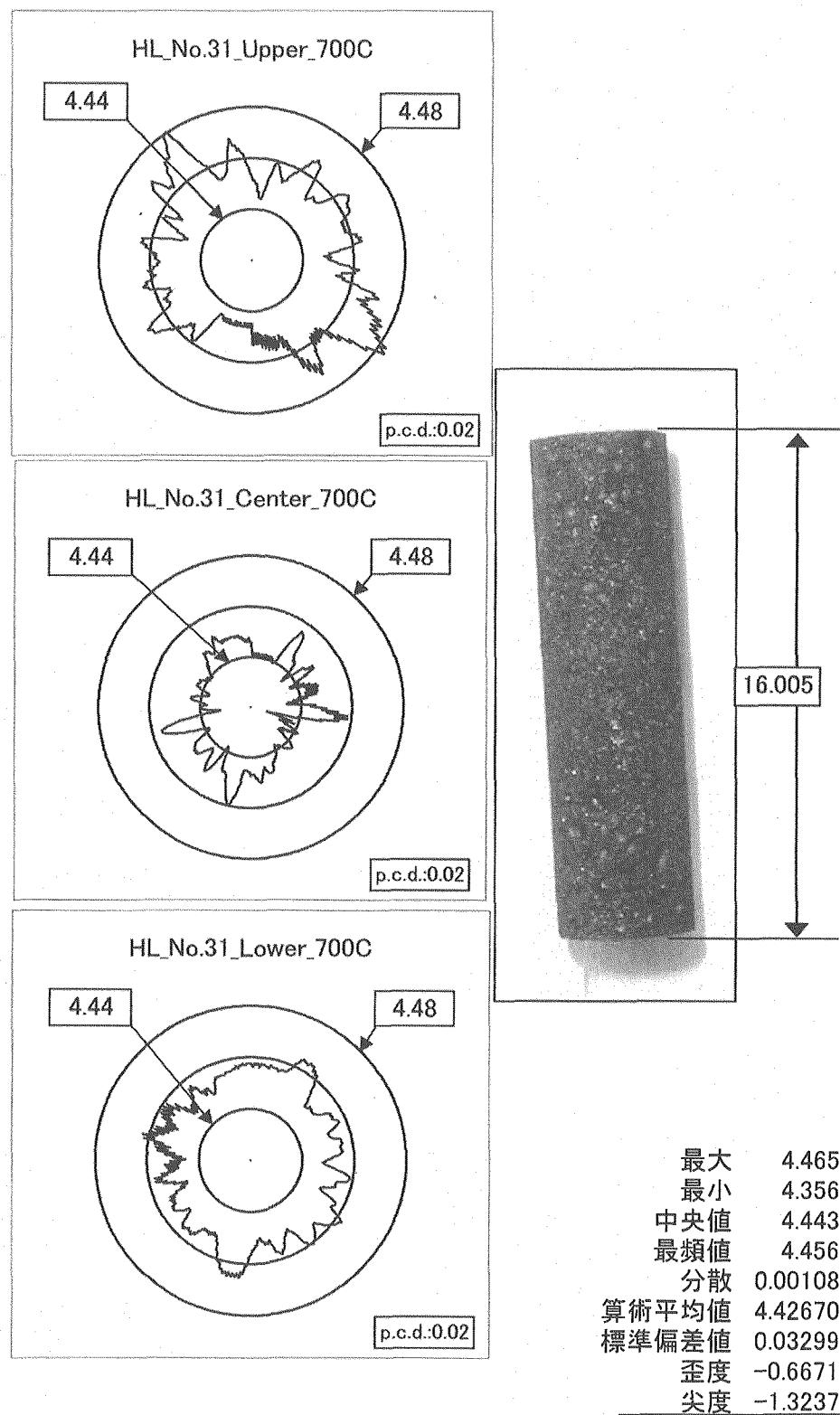


Fig.30 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for near-isotropic graphite. (GilsoCarbon\_parallel)

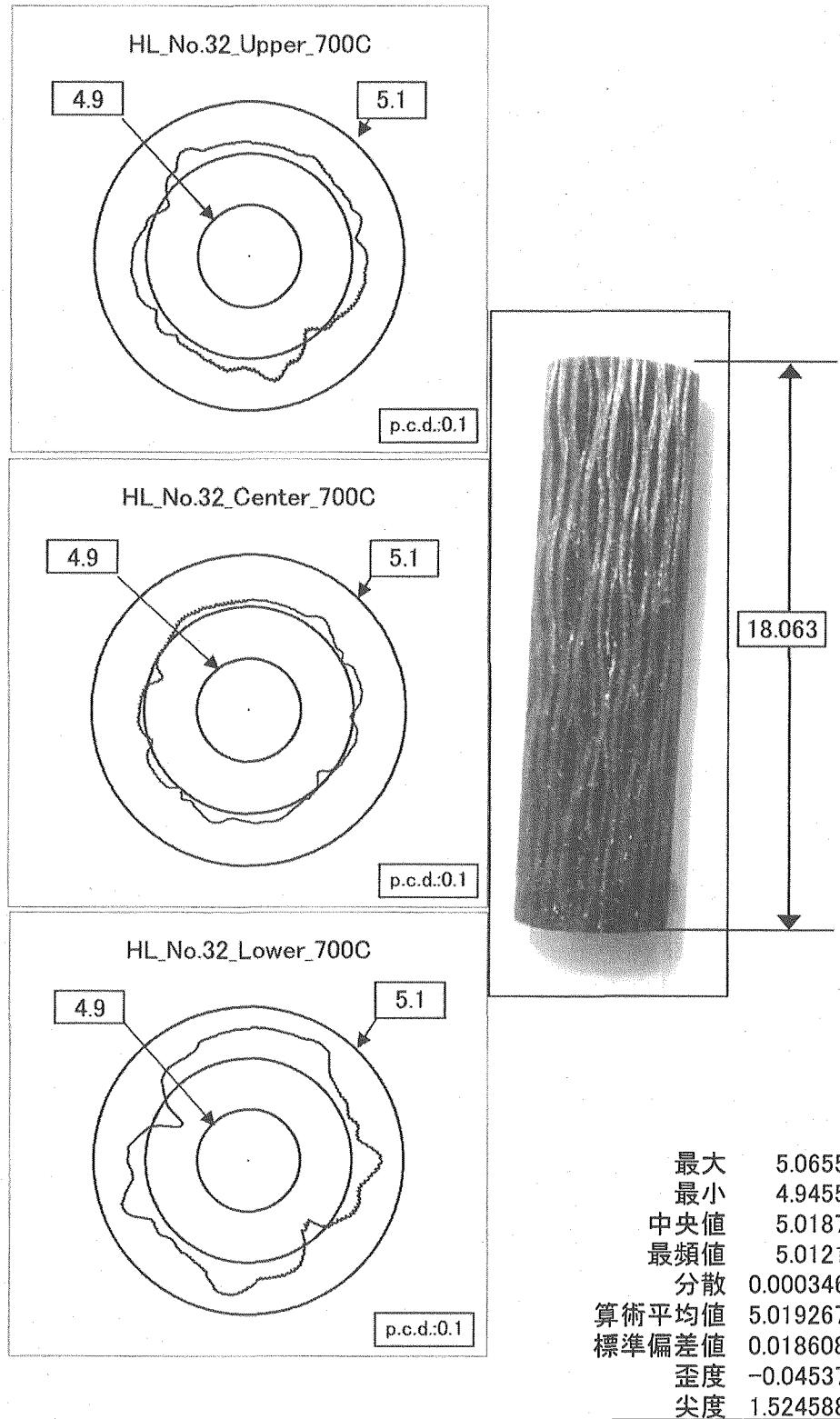


Fig.31 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(CCM-190C\_parallel)

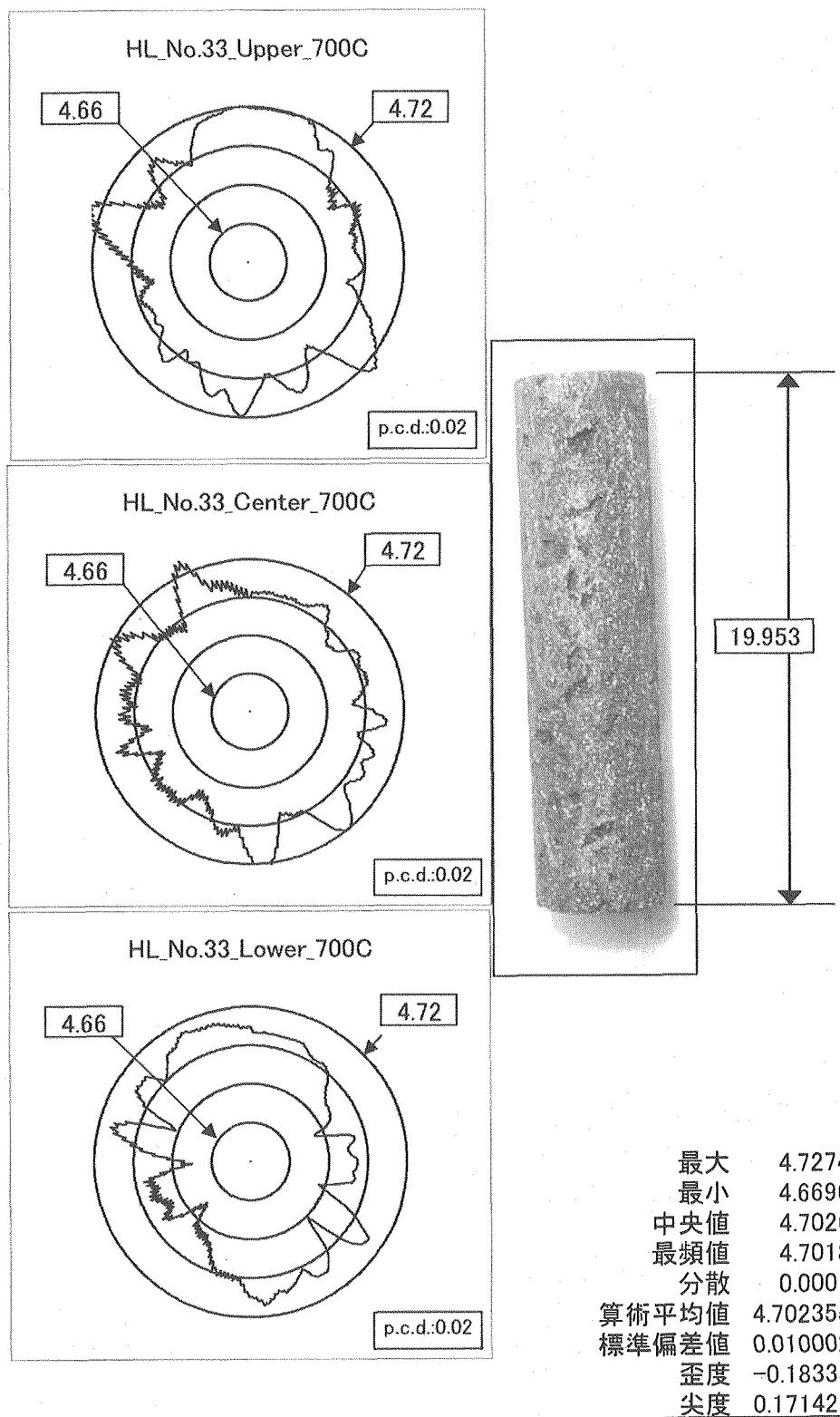


Fig.32 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(PCC-2S\_parallel)

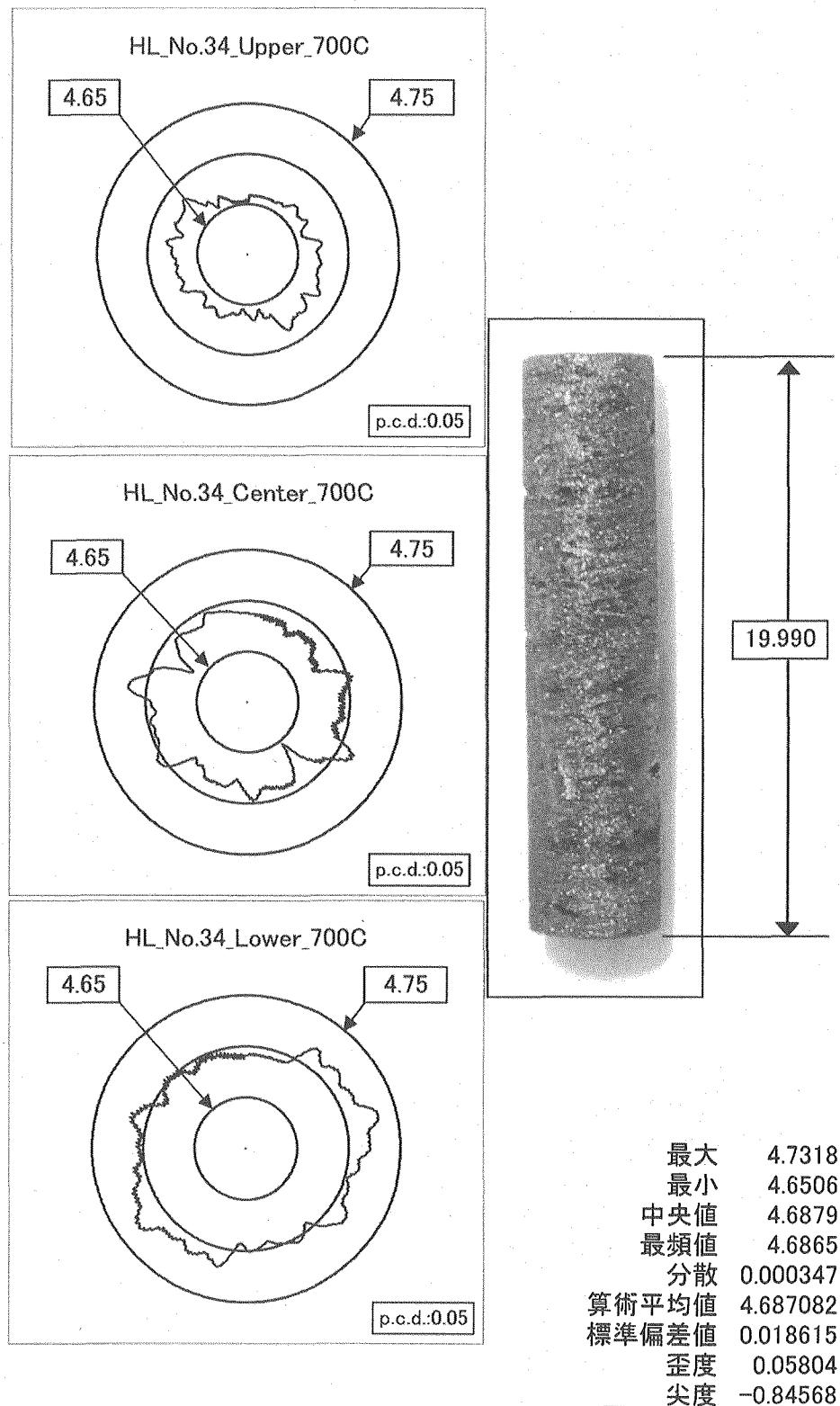


Fig.33 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for carbon fiber reinforcement carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

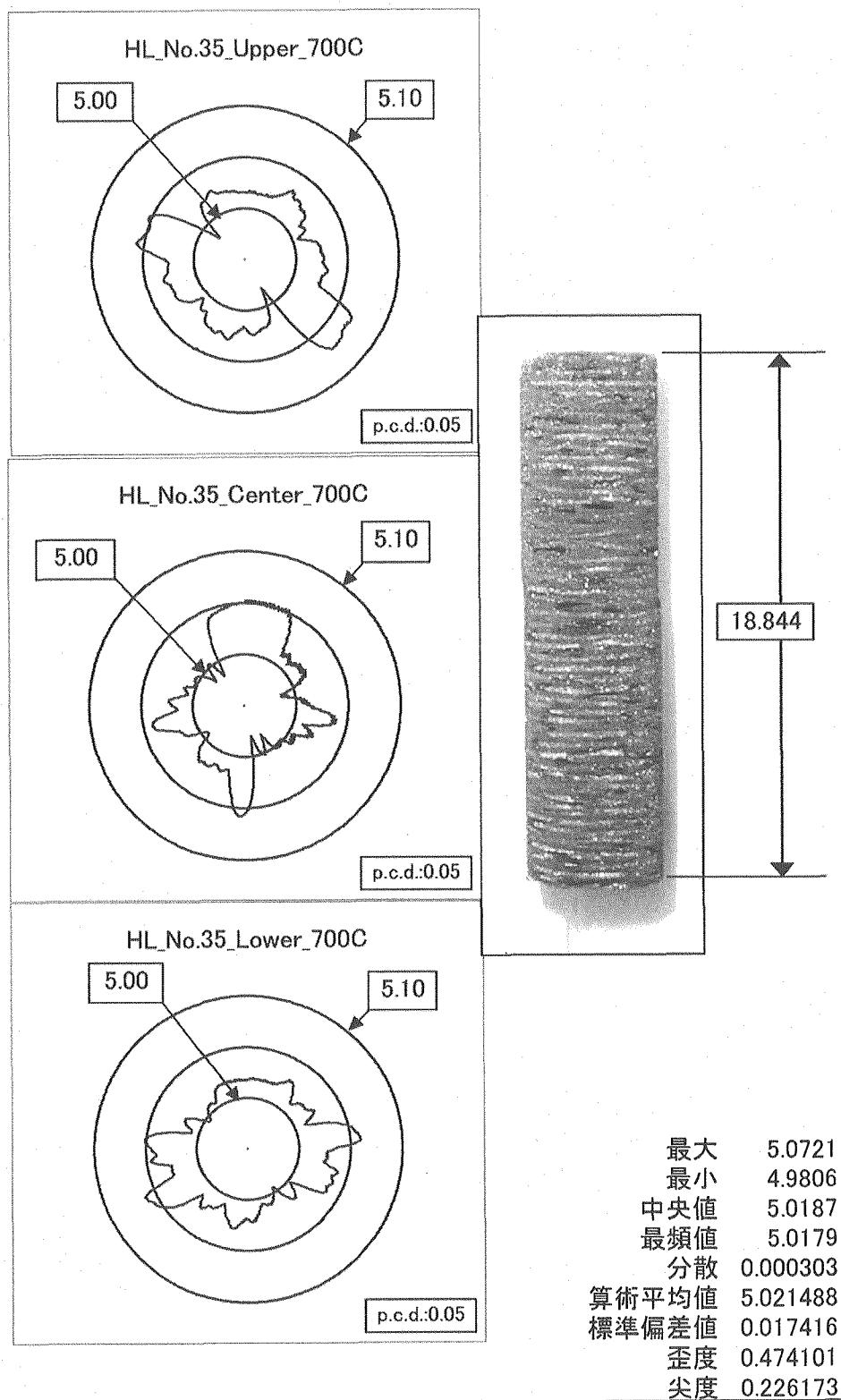


Fig.34 Profile in diameter of the irradiated specimen at 700C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_vertical)

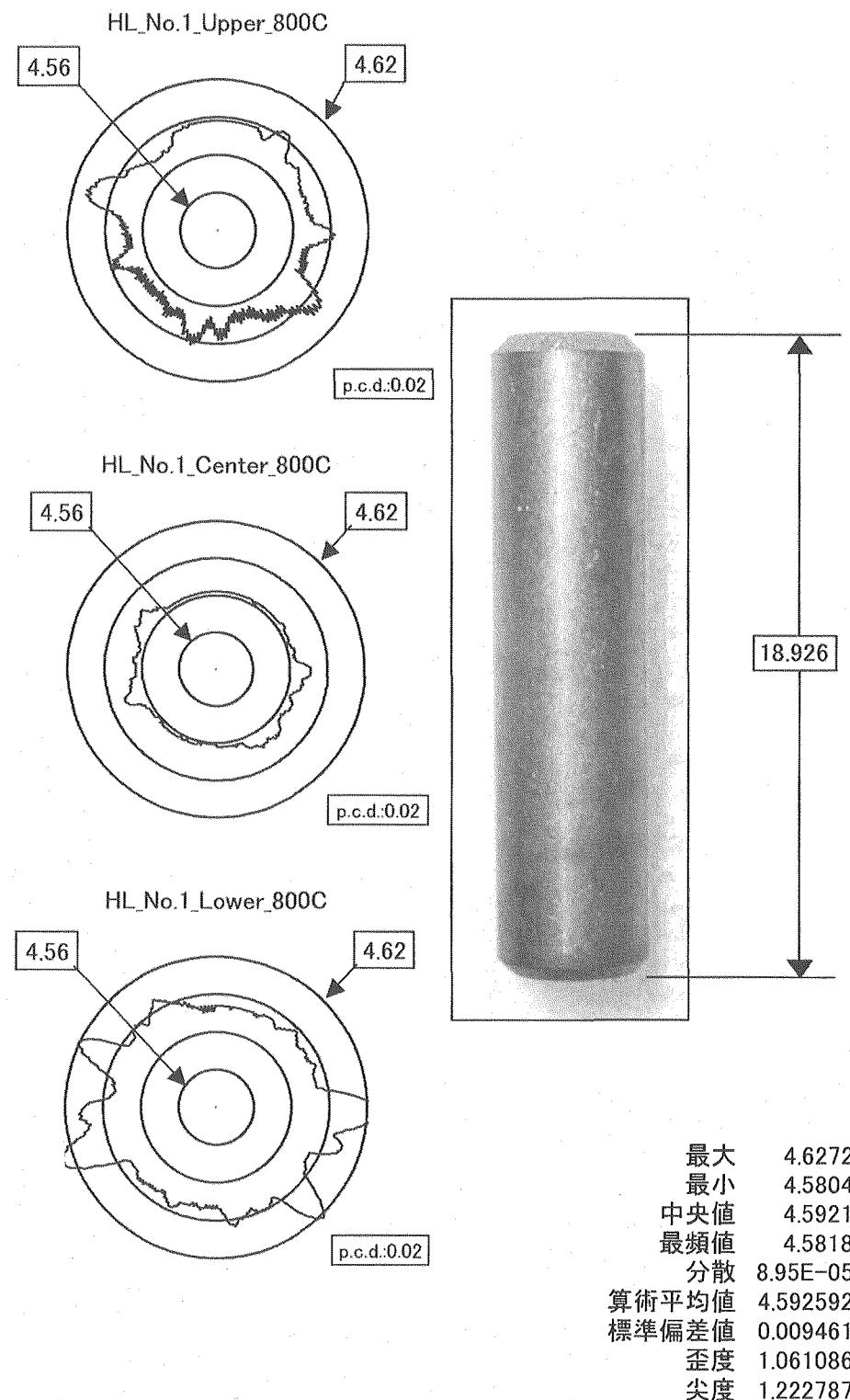


Fig.35 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(5%SiC\_particle/SiC)

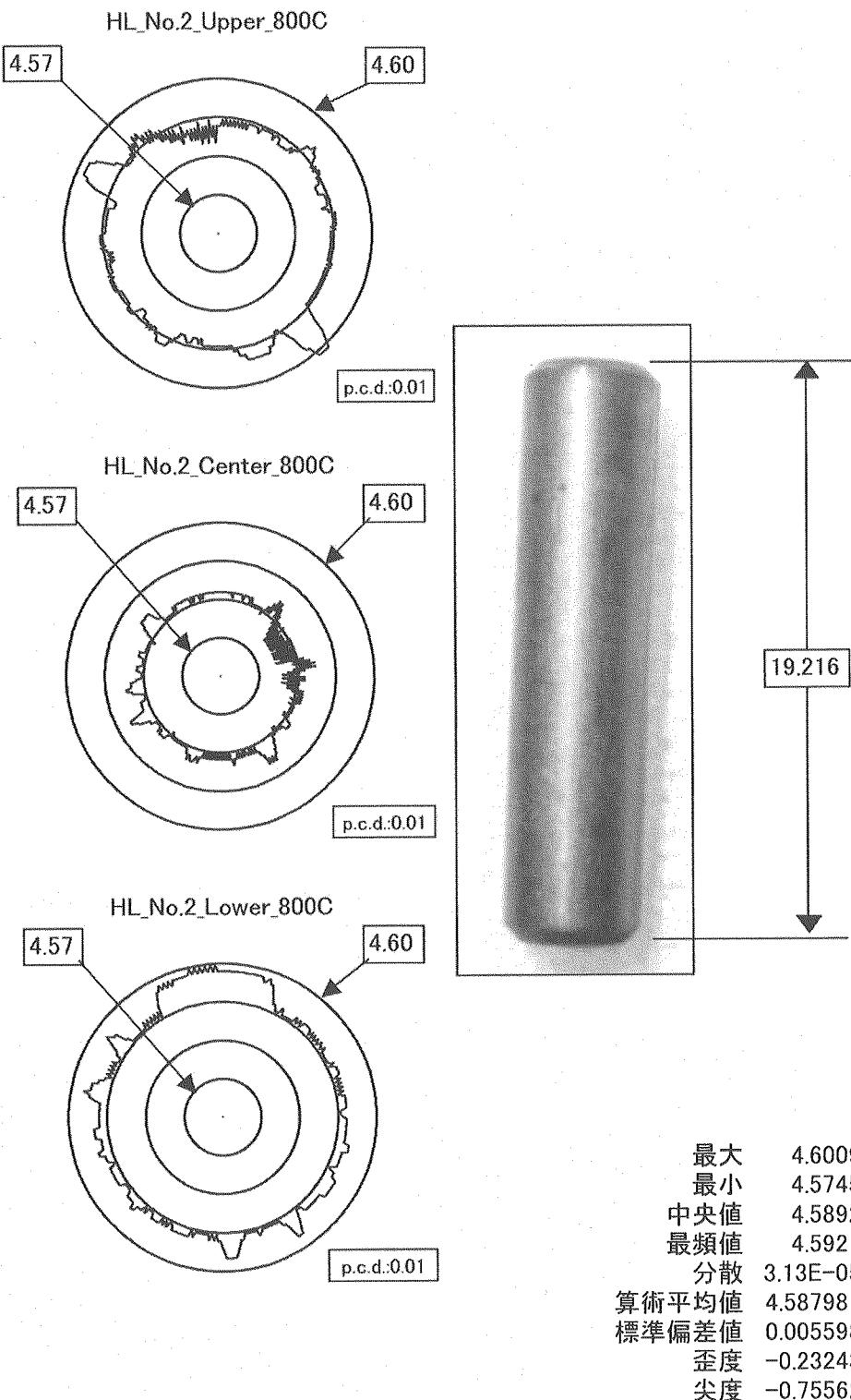


Fig.36 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(10%SiC\_particle/SiC)

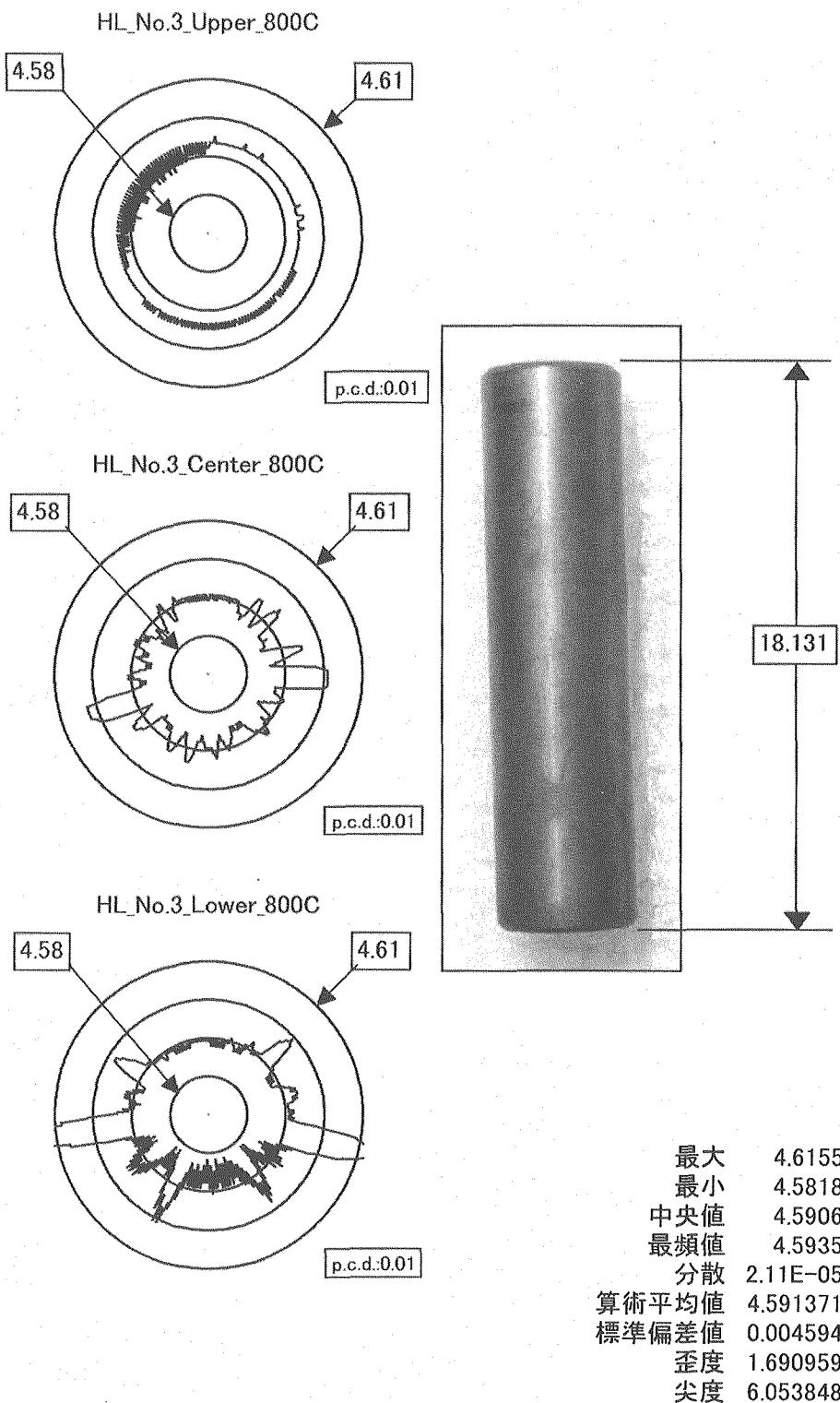


Fig.37 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for monolithic  $\alpha$ -SiC.(Hexaloy)

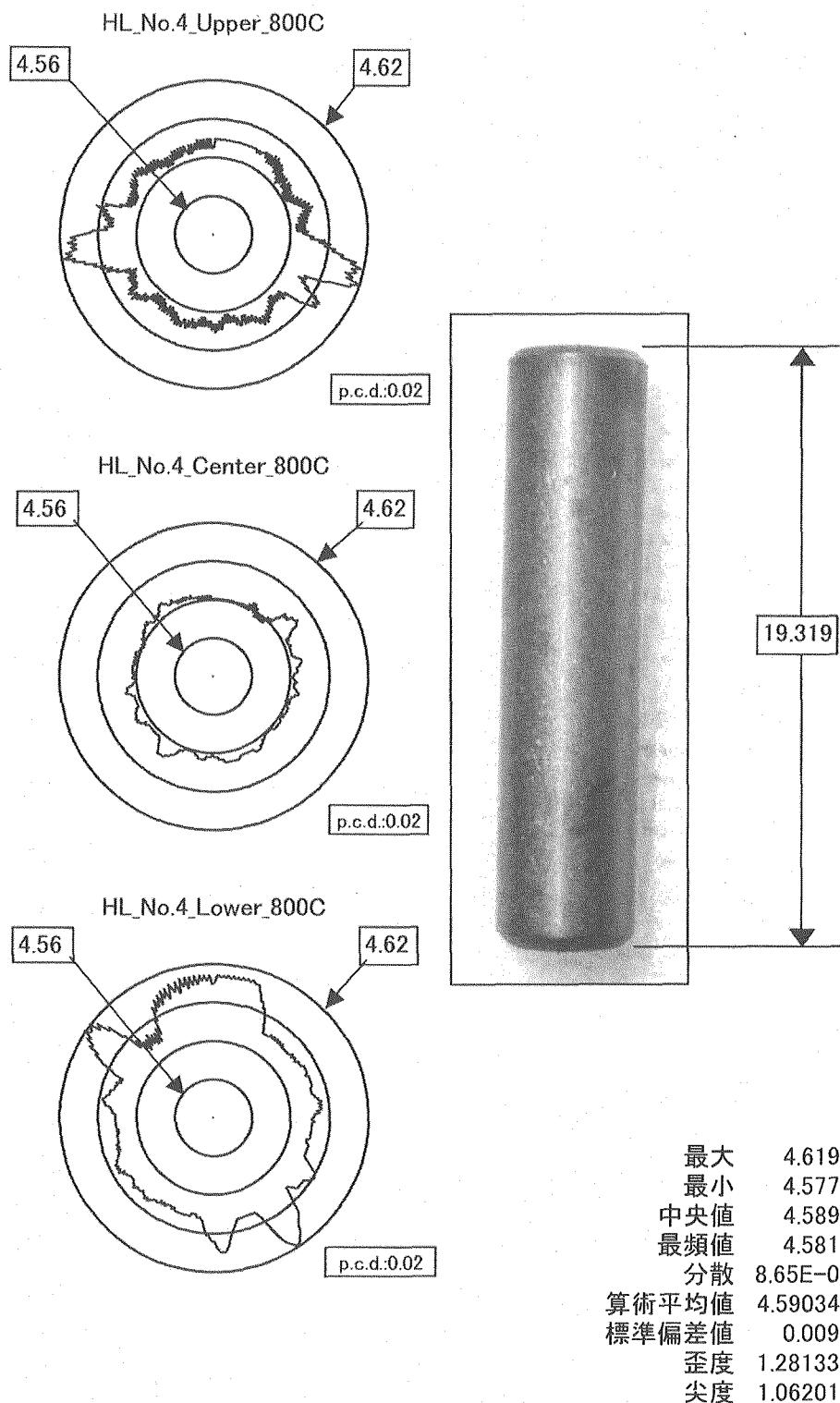


Fig.38 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(10%SiC\_particle/SiC)

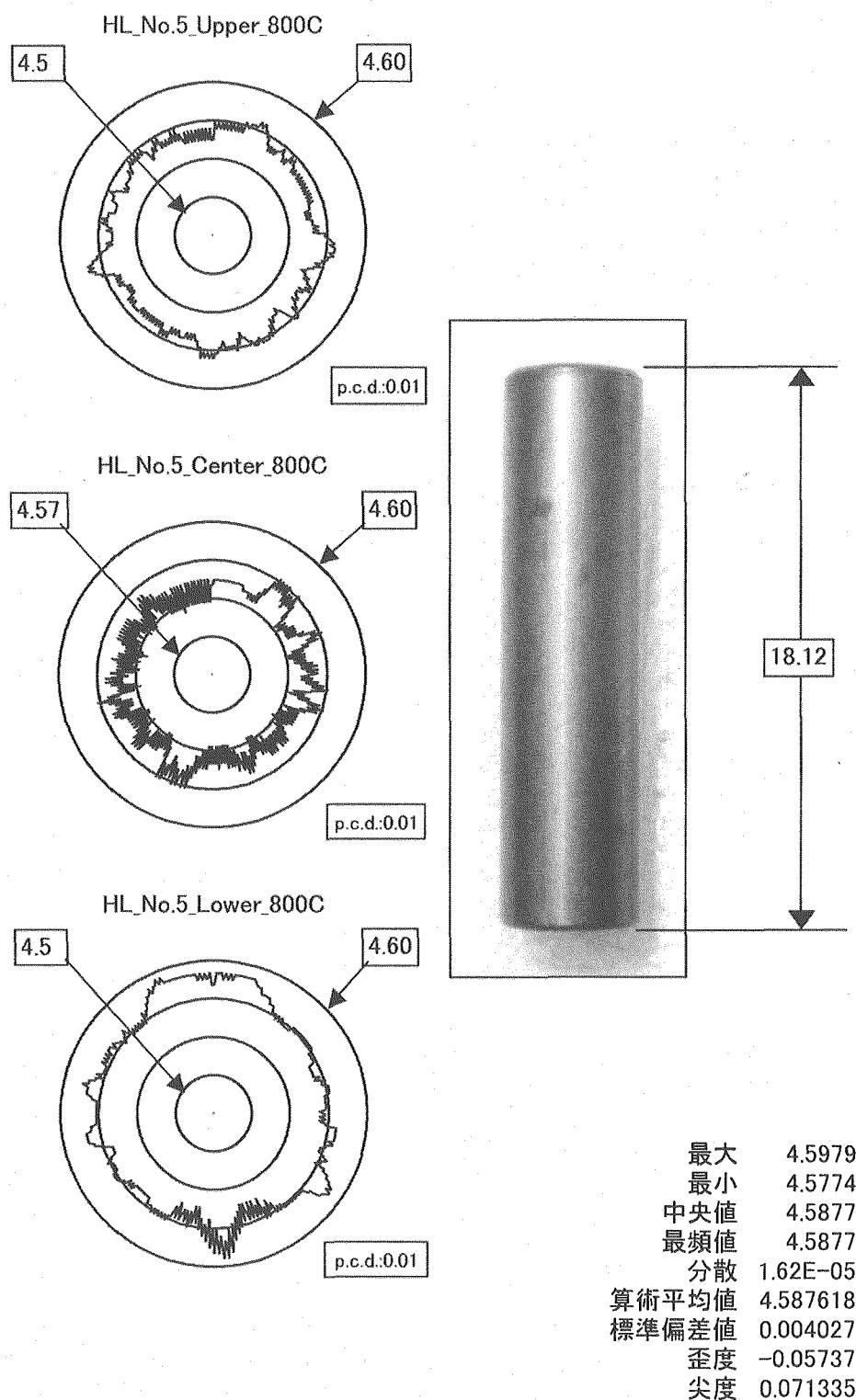


Fig.39 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for monolithic  $\alpha$ -SiC.(Hexaloy)

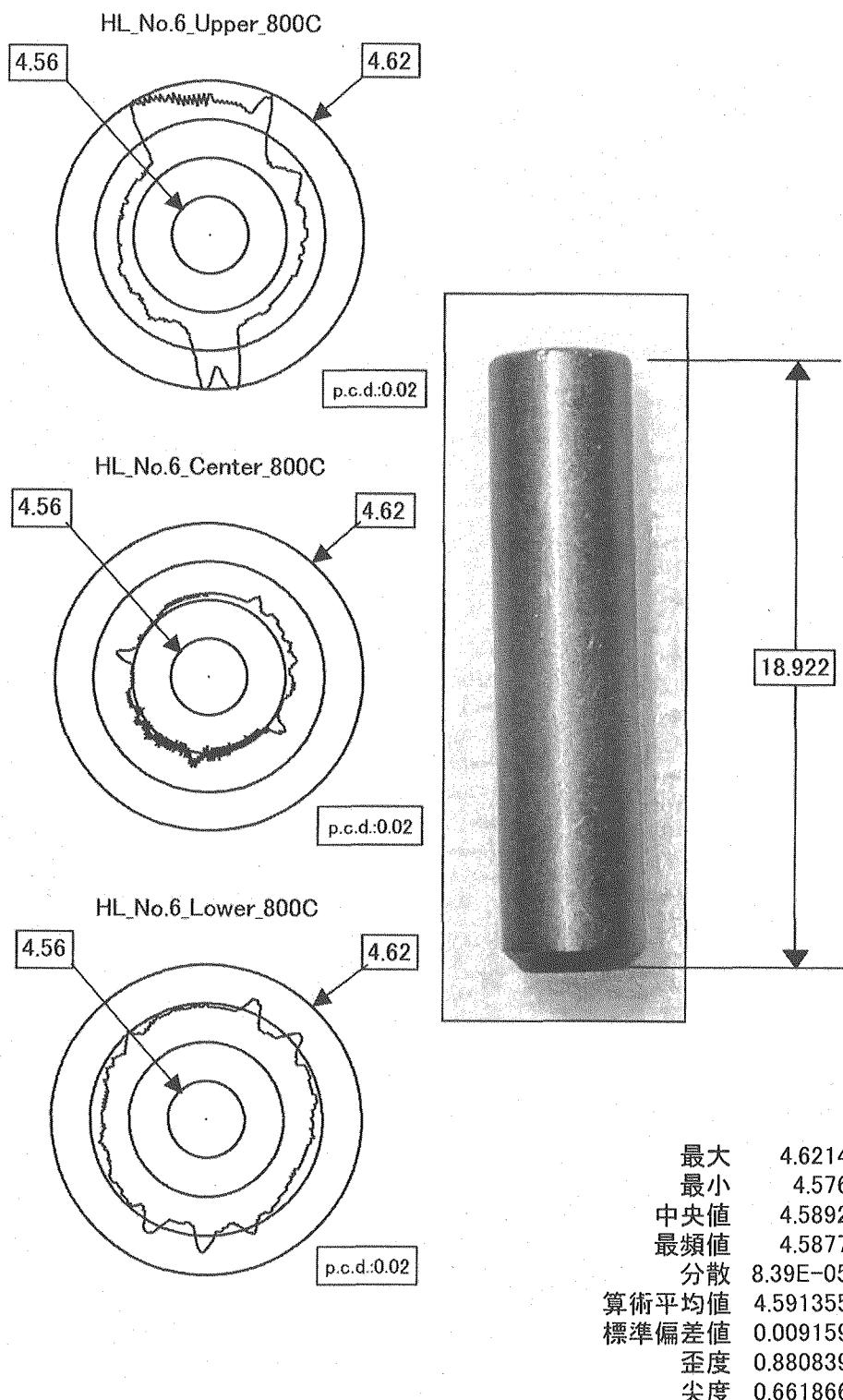


Fig.40 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC particle(5%) reinforced SiC composite .  
(5%SiC\_particle/SiC)

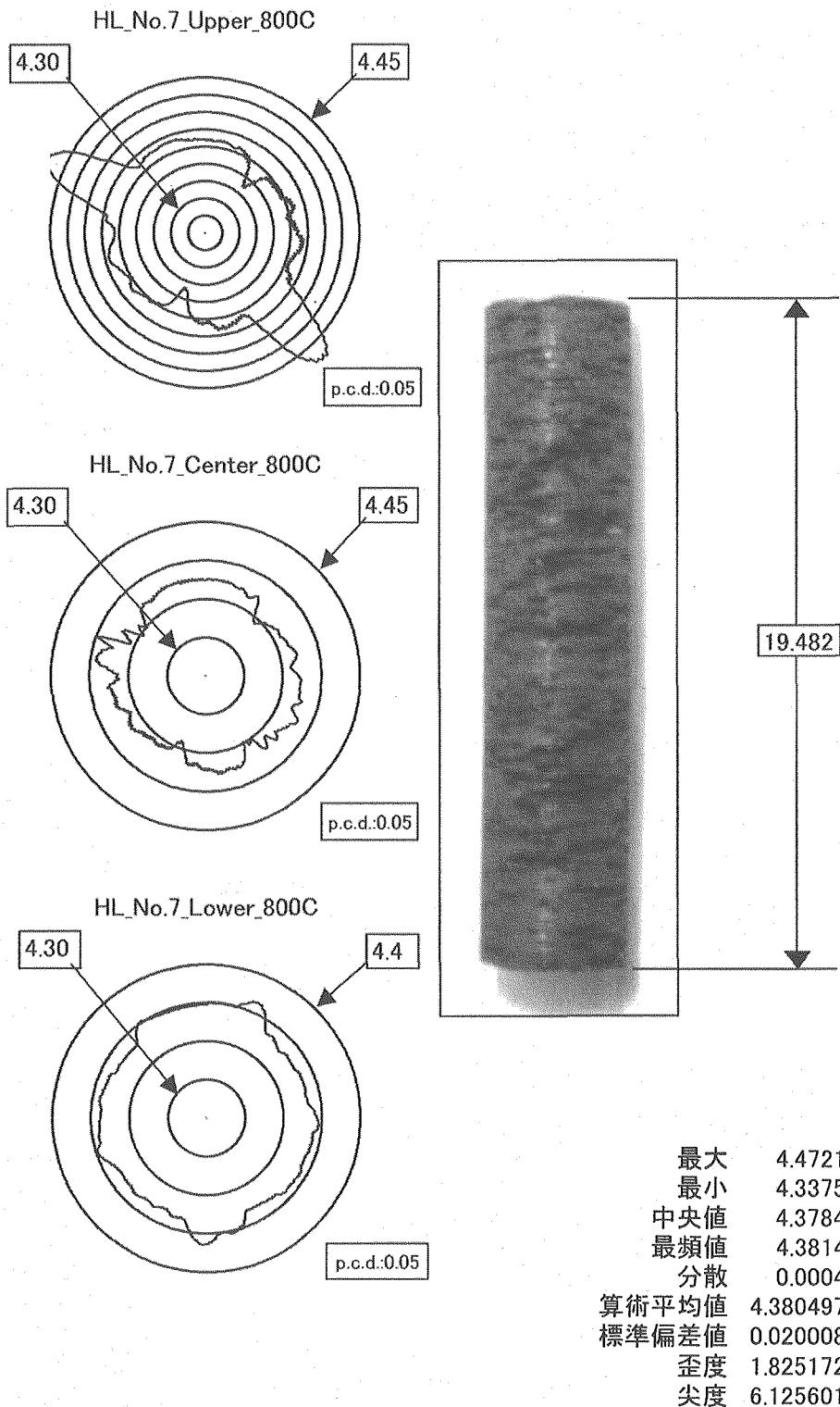


Fig.41 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800°C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_vertical)

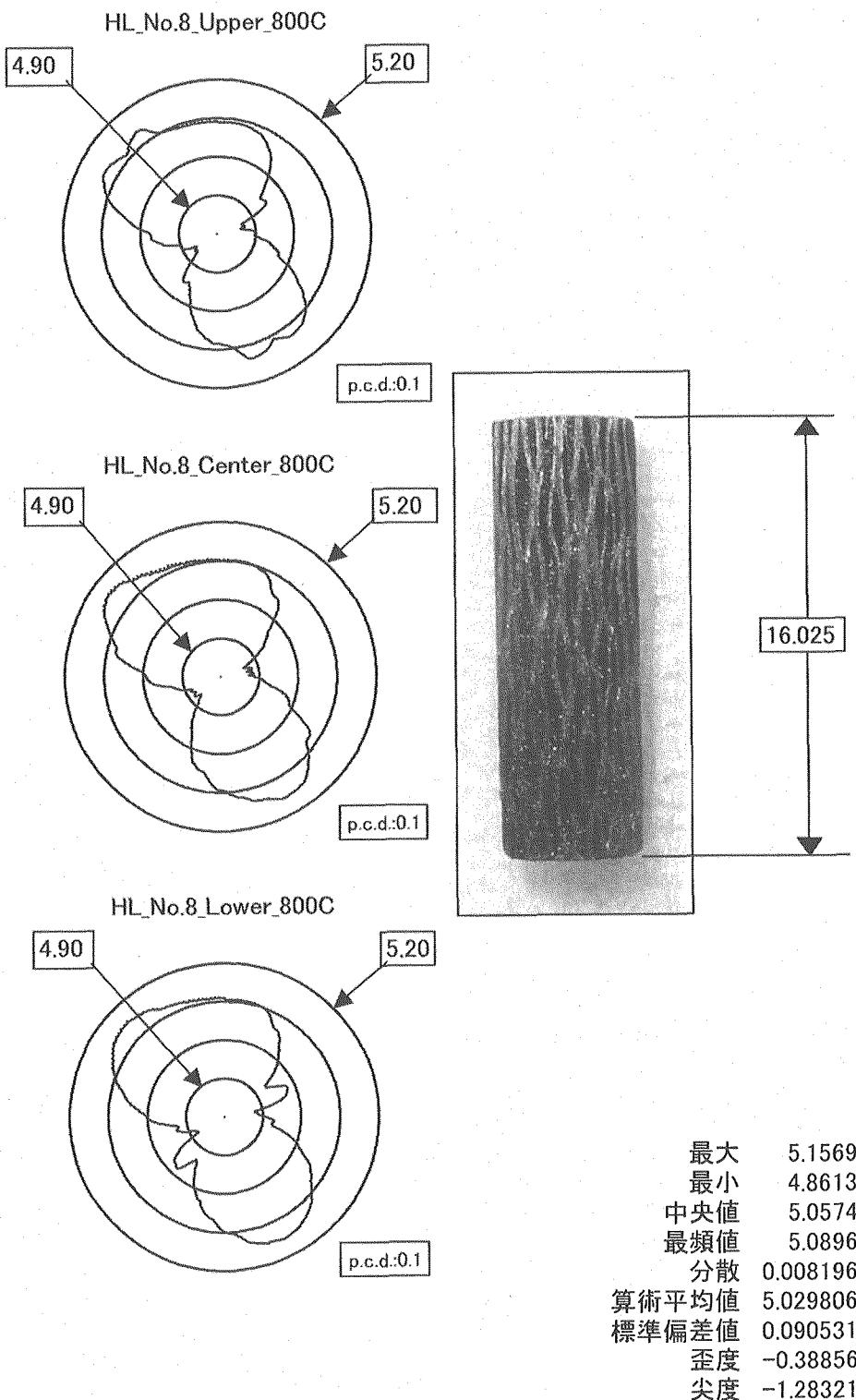


Fig.42 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-270G\_parallel)

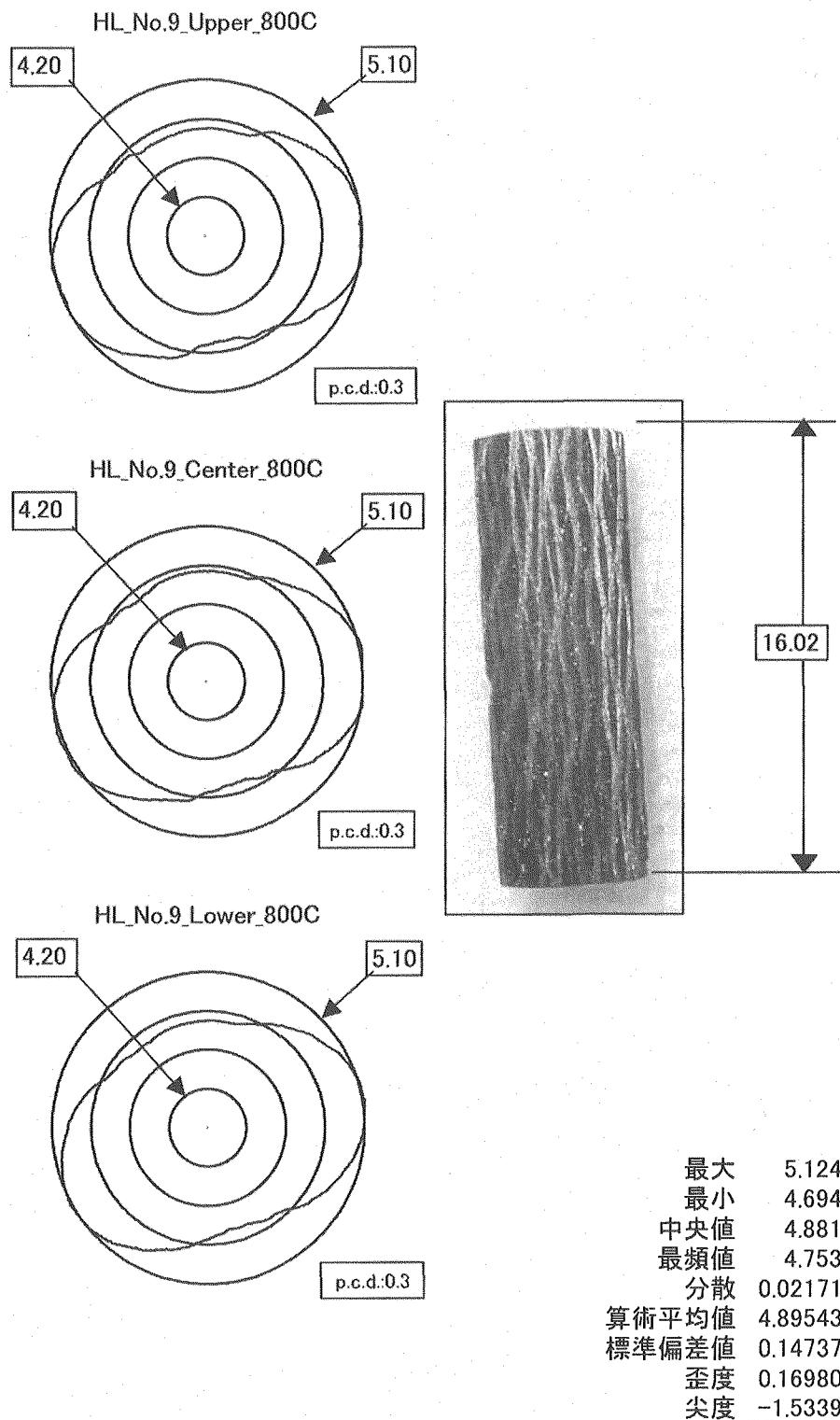


Fig.43 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-2702G\_parallel)

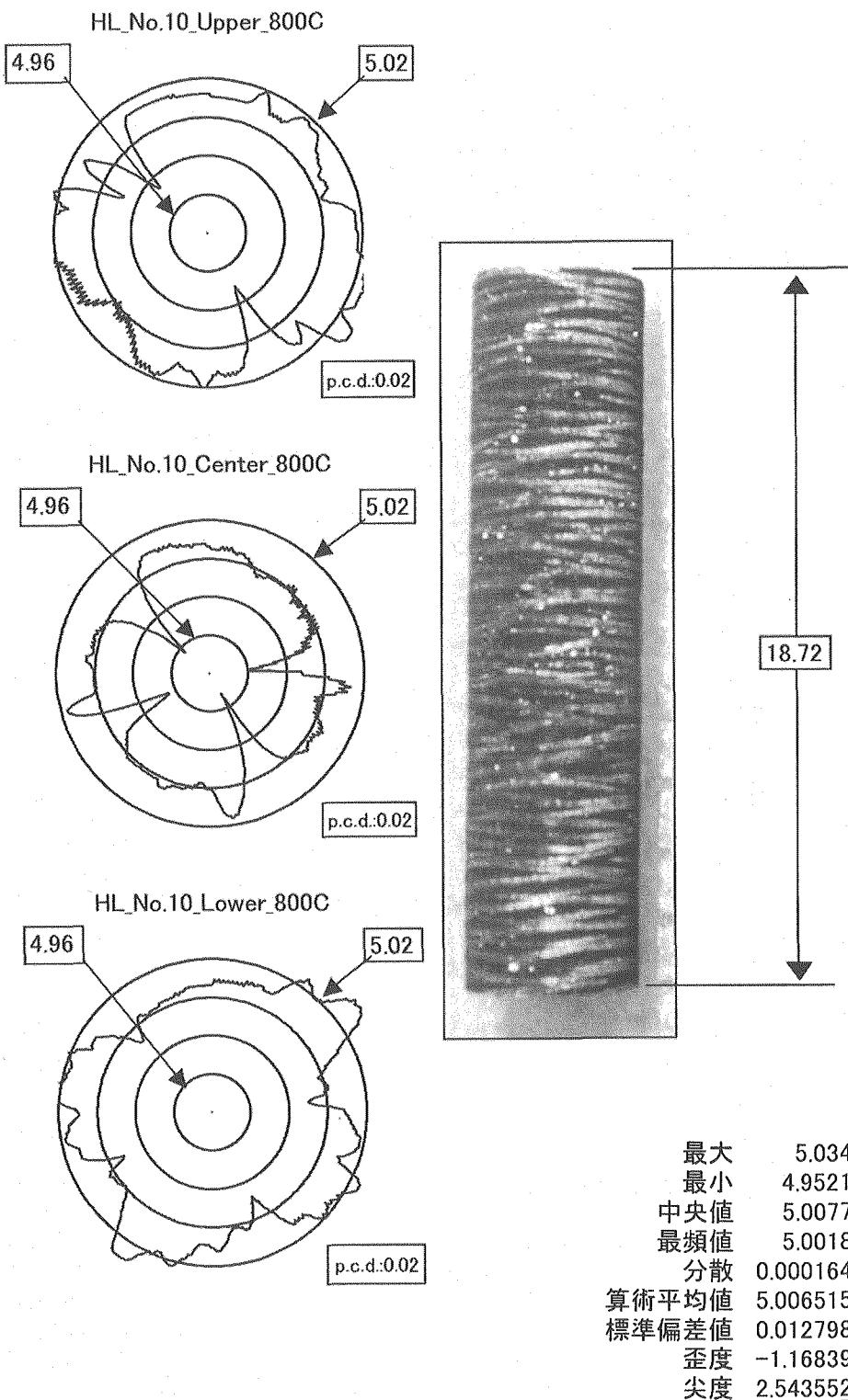


Fig.44 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CCM-190C\_vertical)

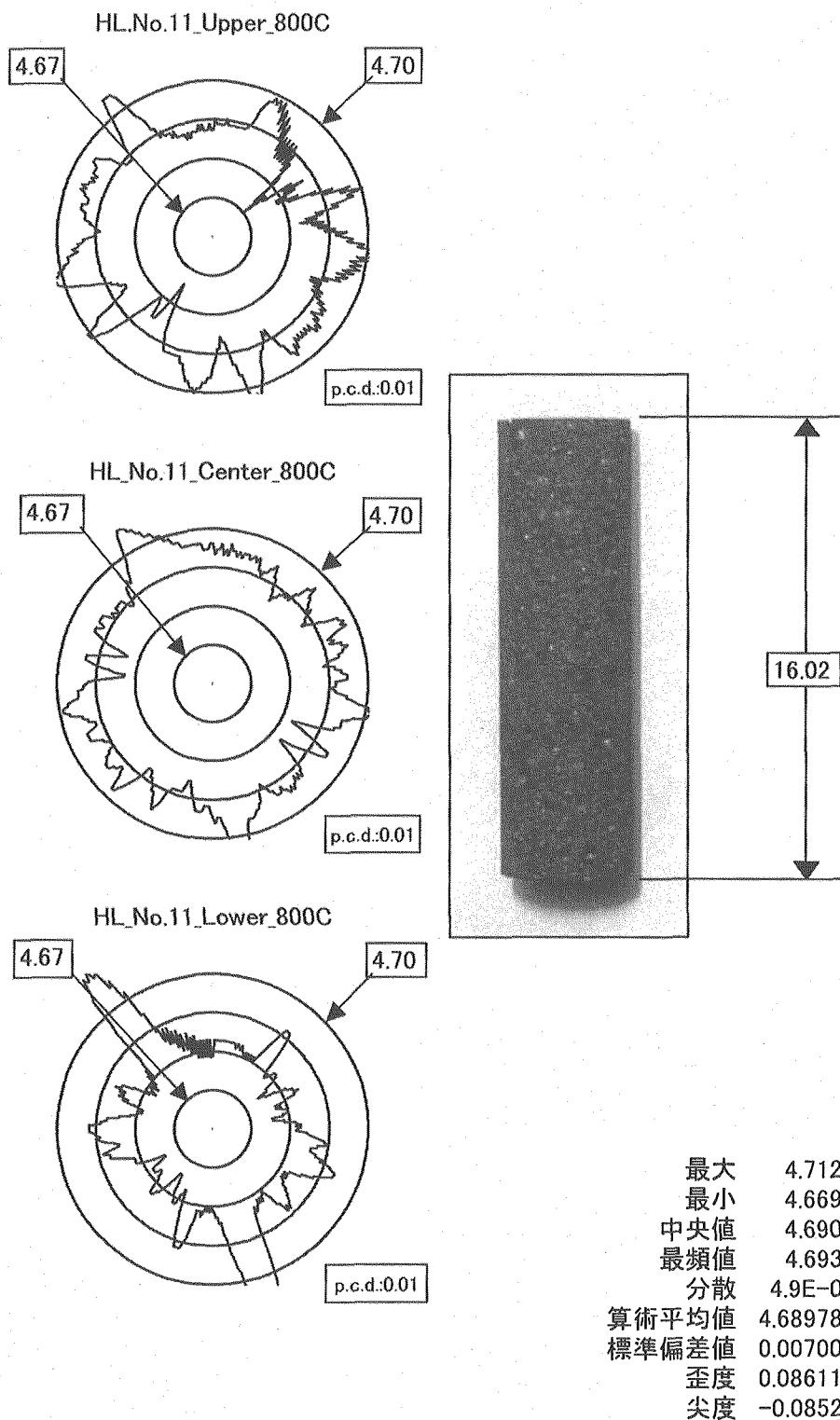


Fig.45 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for near-isotropic graphite.  
(GilsoCarbon\_vertical)

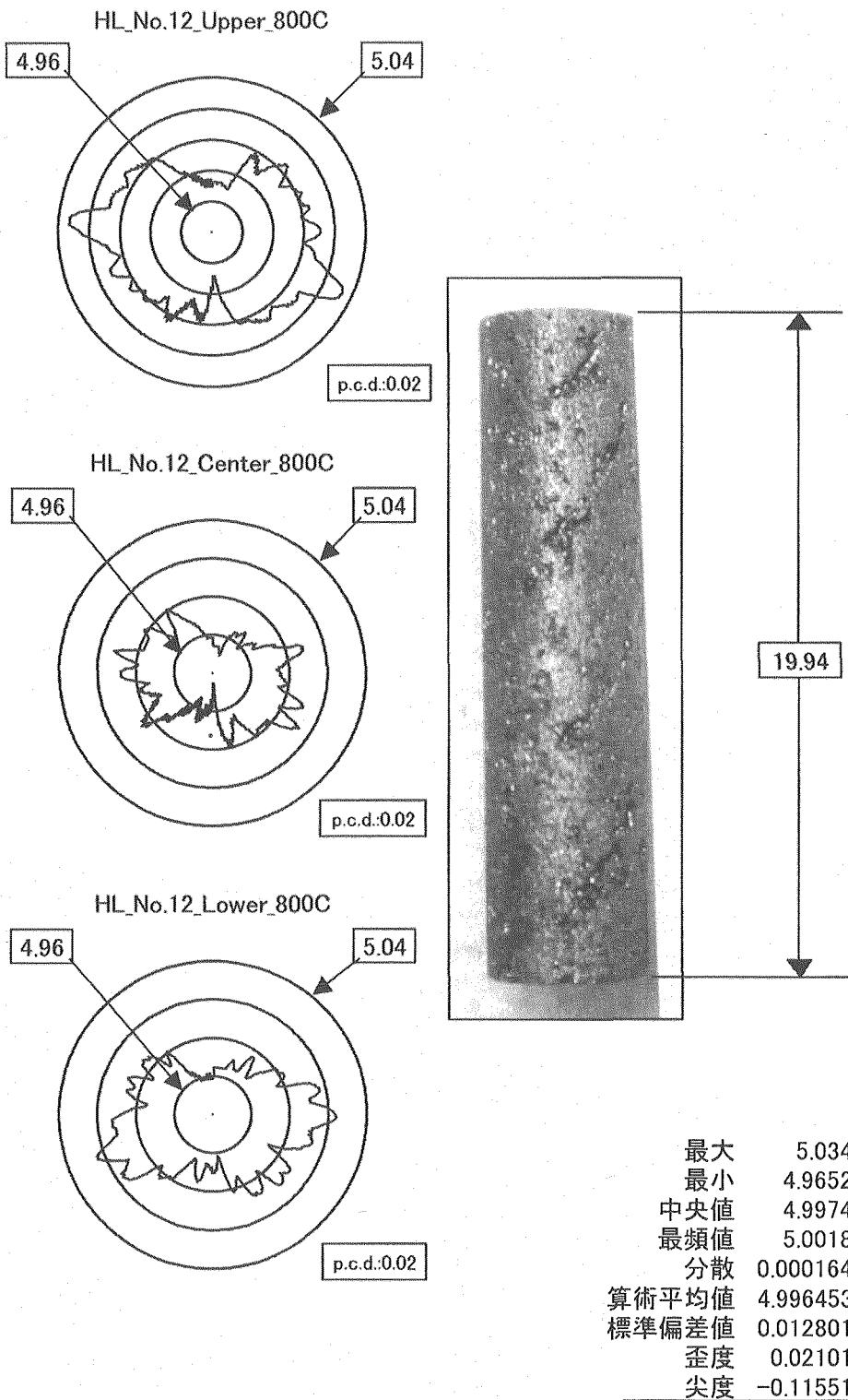


Fig.46    Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(PCC-2S\_parallel)

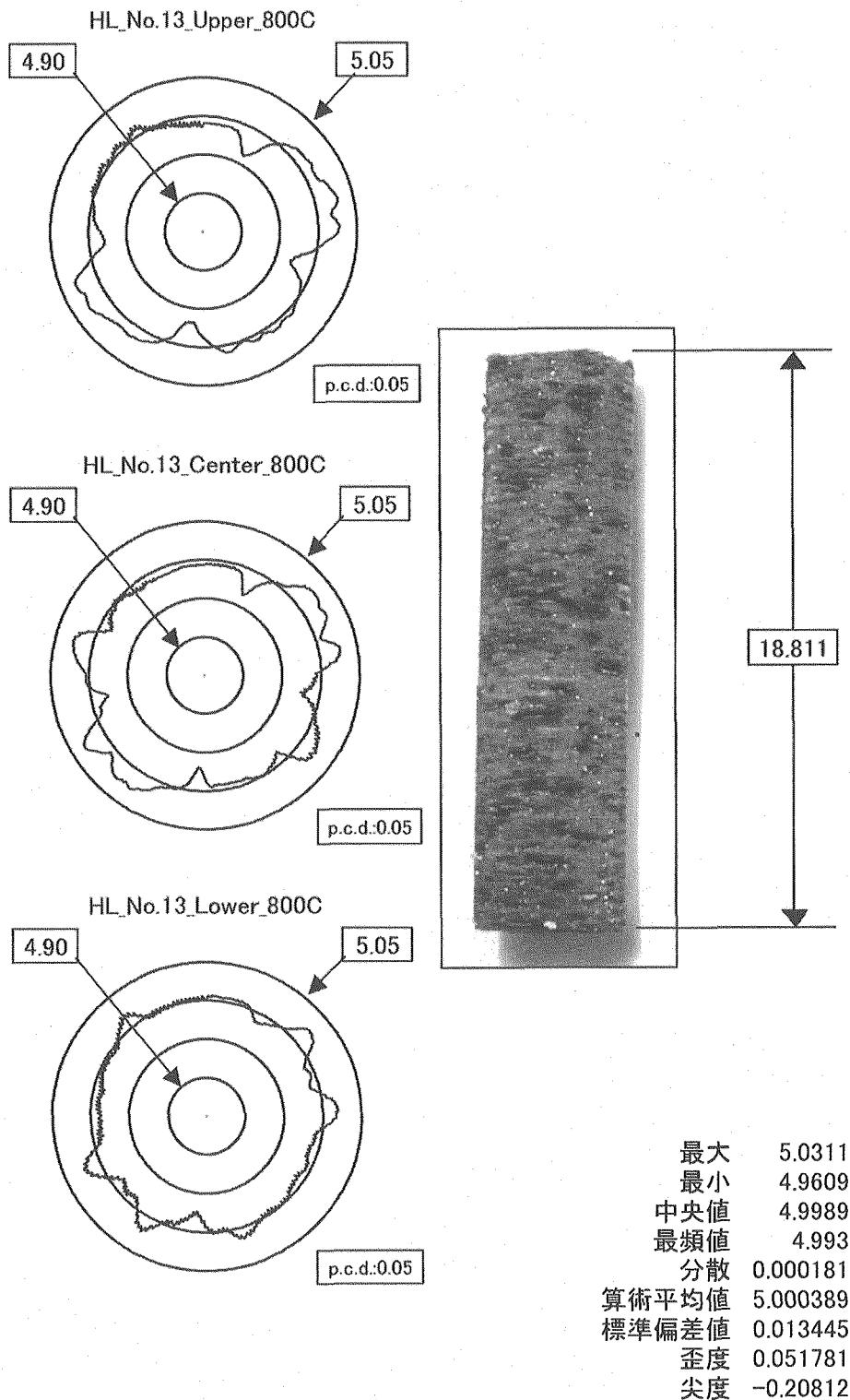


Fig.47 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_vertical)

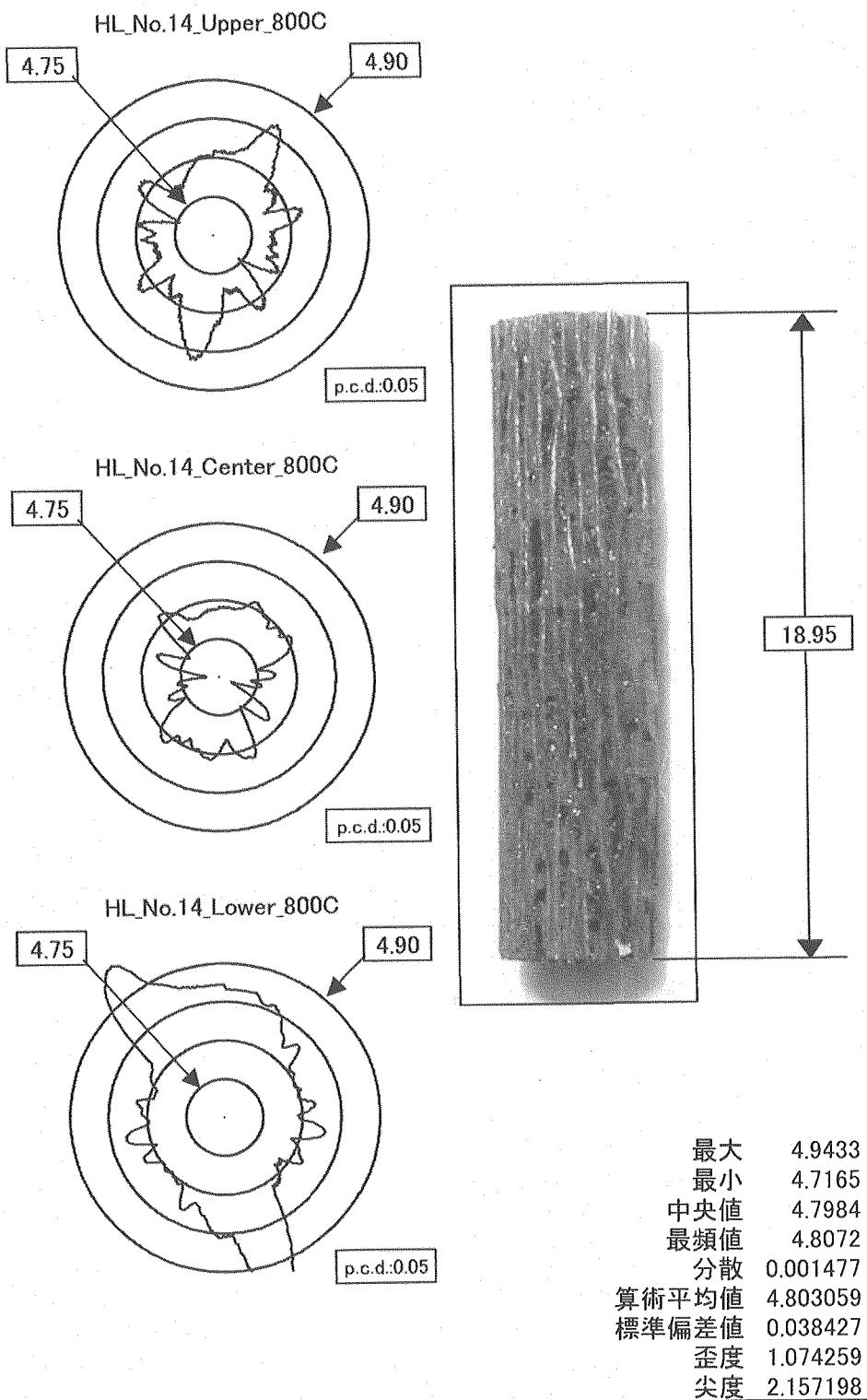


Fig.48 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_parallel)

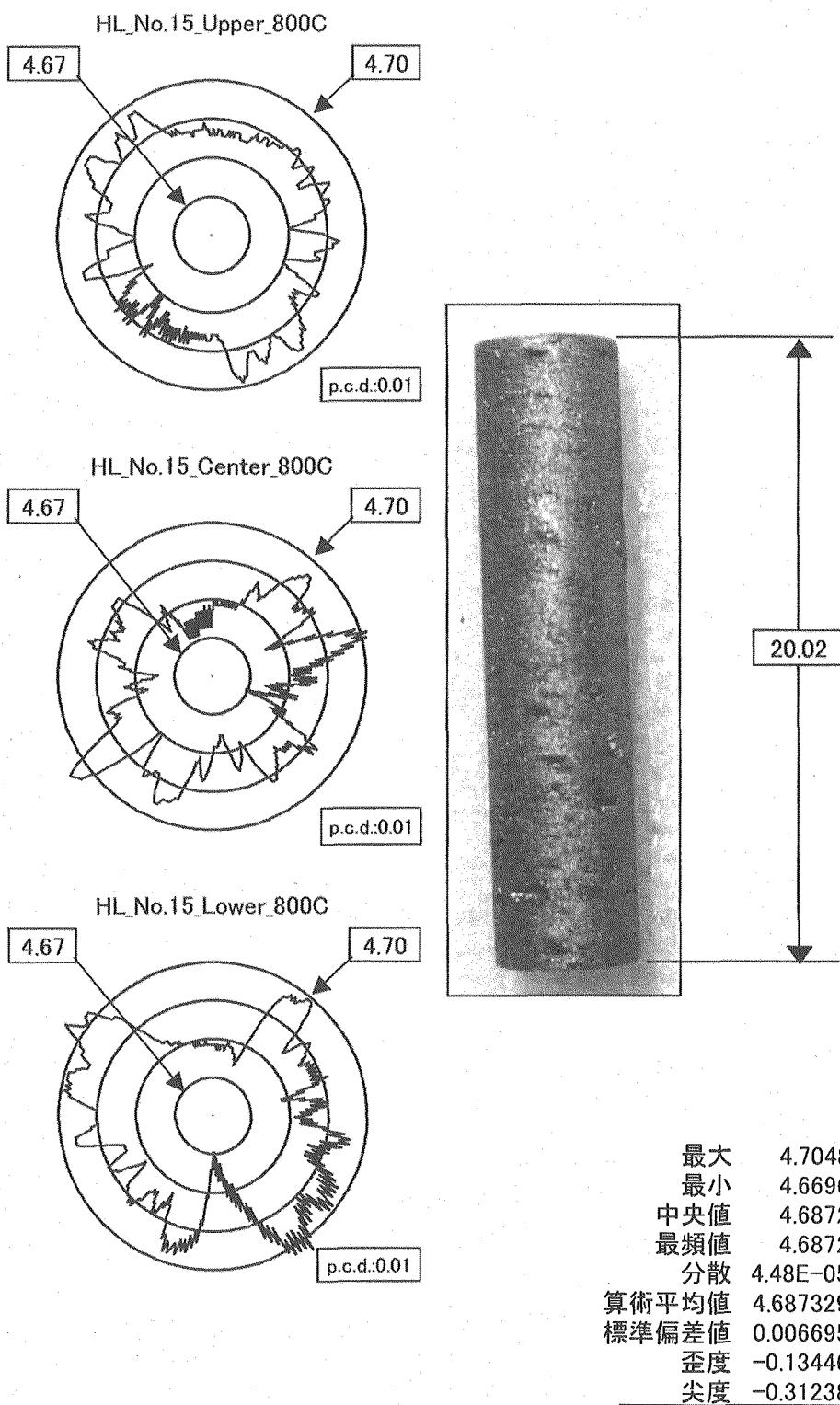


Fig.49 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

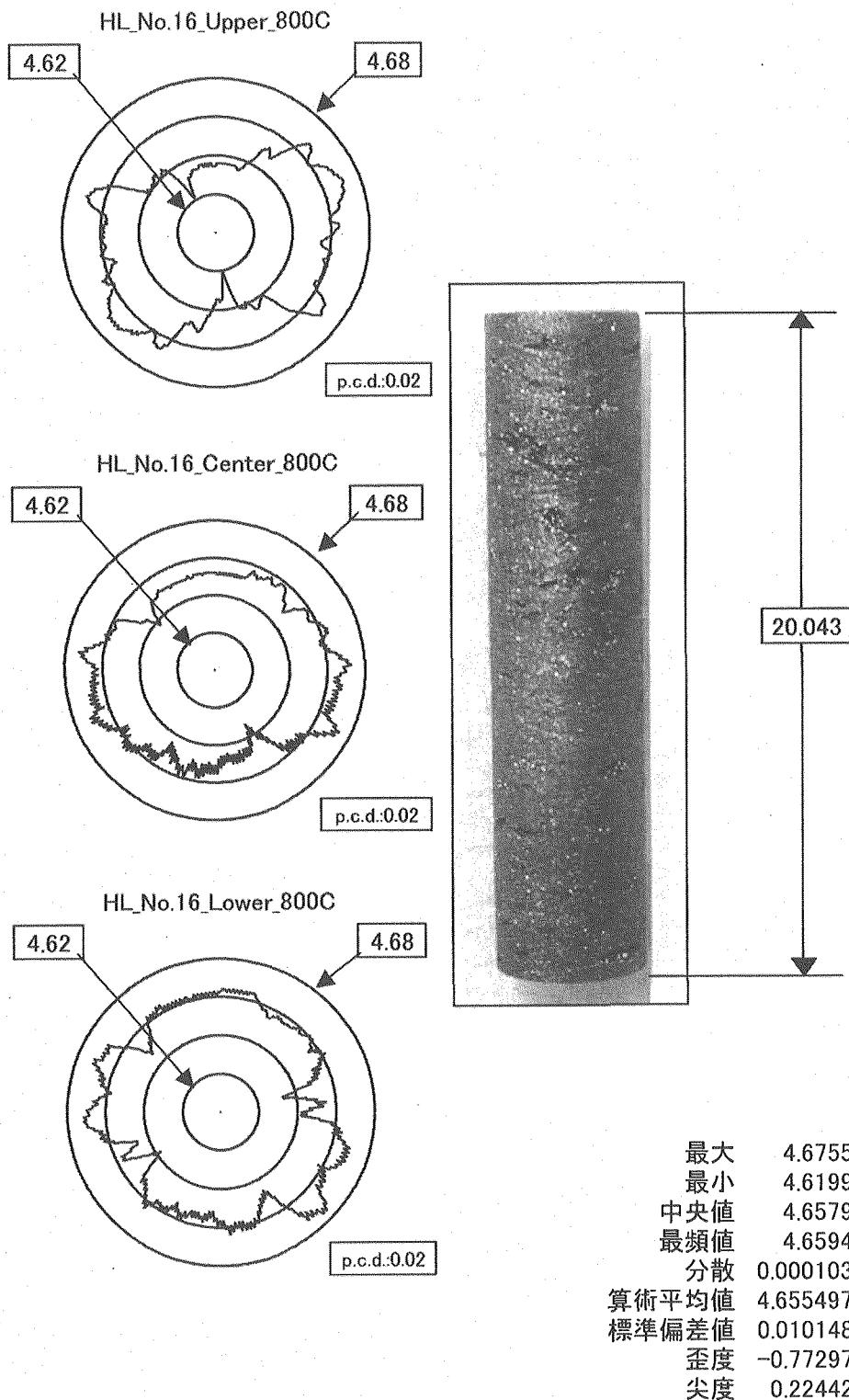


Fig.50 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

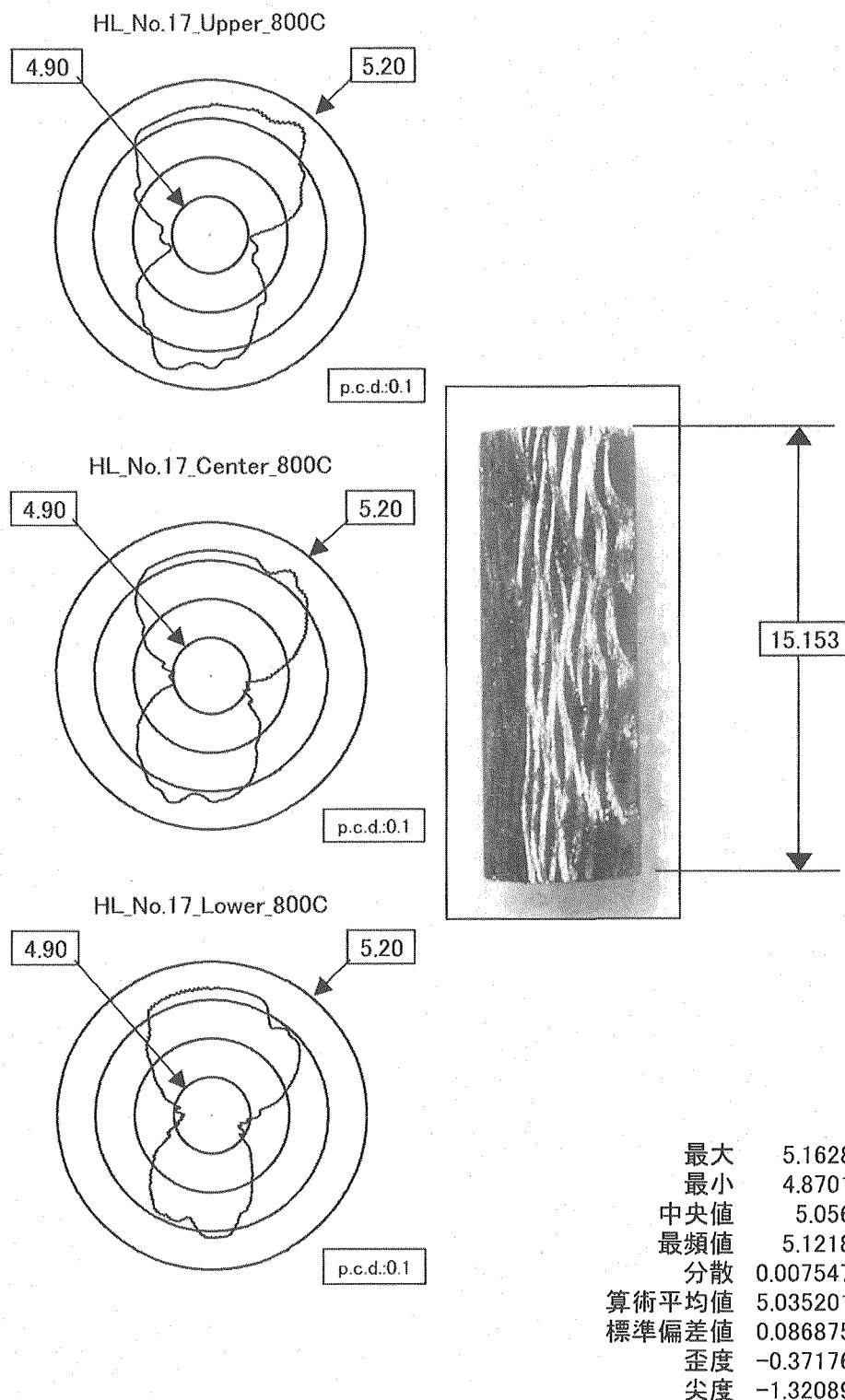


Fig.51 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-2702\_parallel)

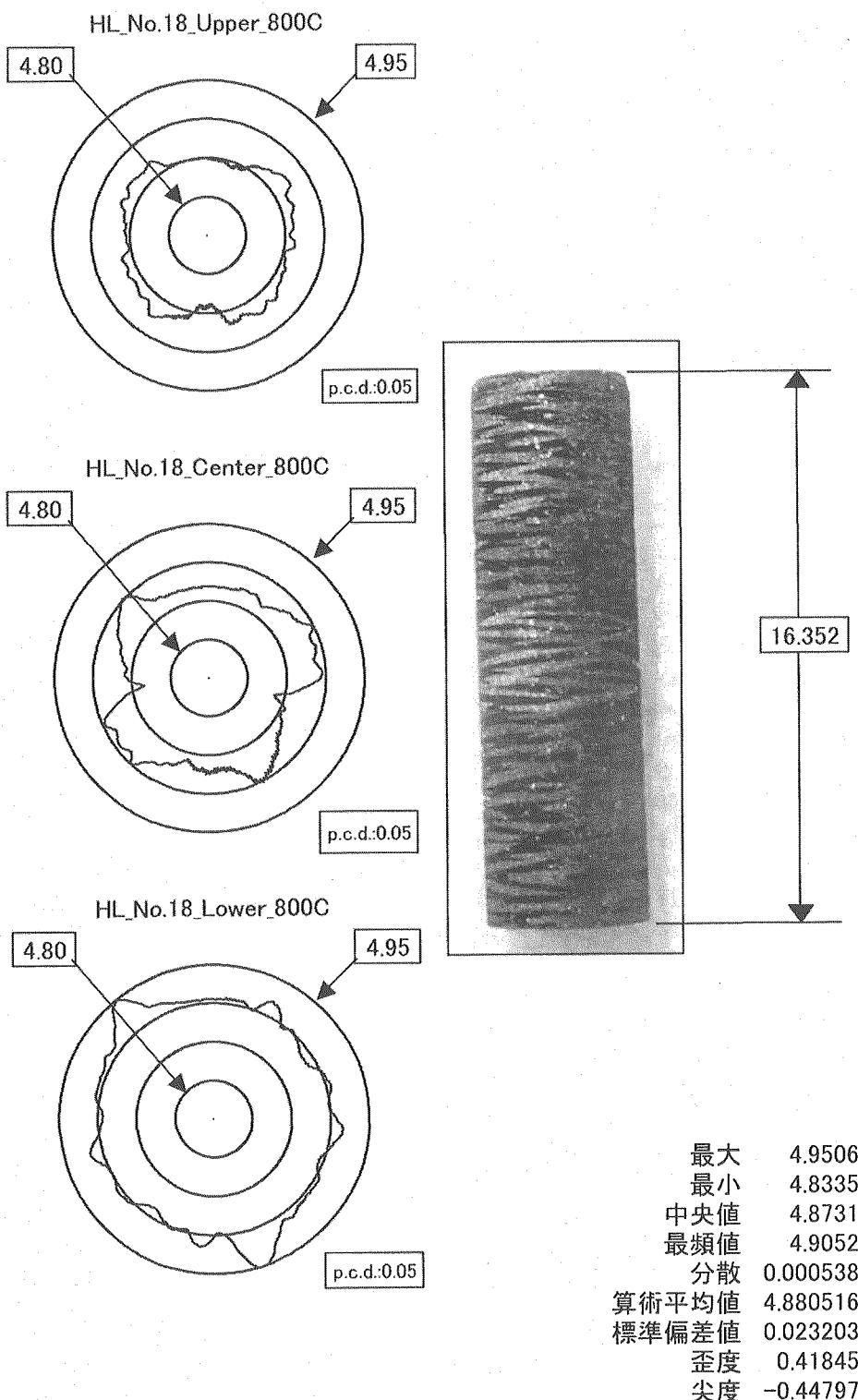


Fig.52 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-270G\_vertical)

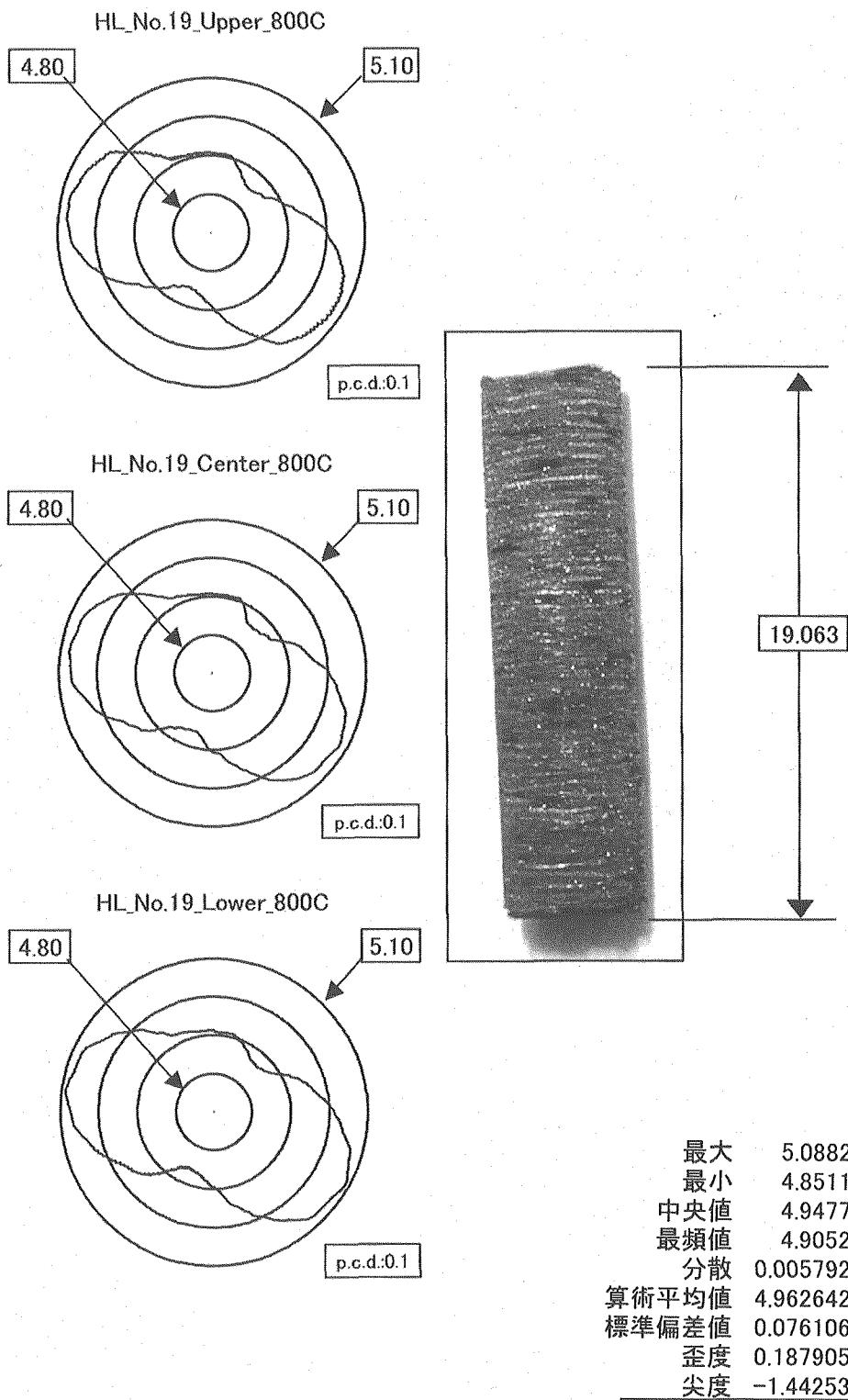


Fig.53 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_vertical)

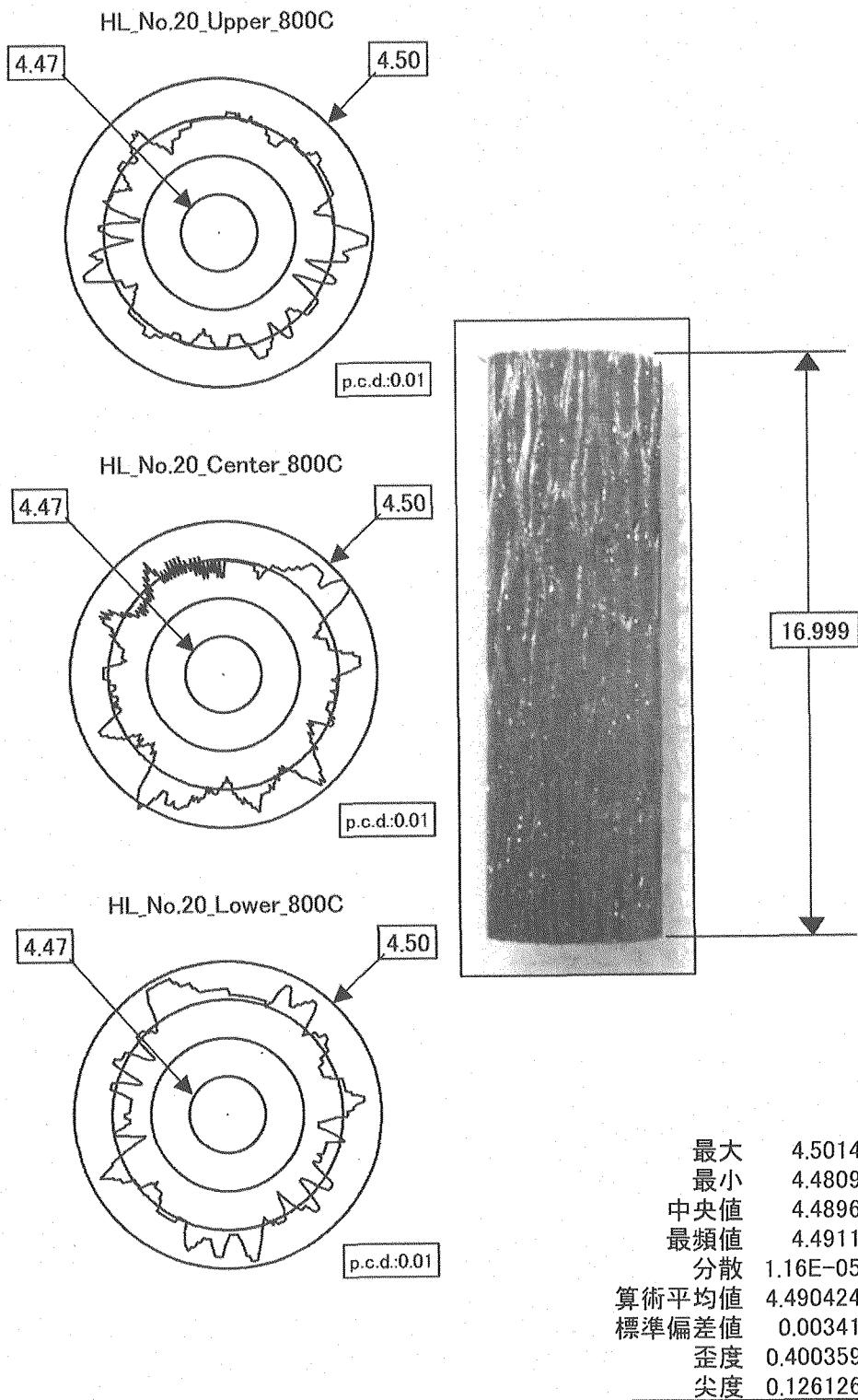


Fig.54      Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CCM-190C\_parallel)

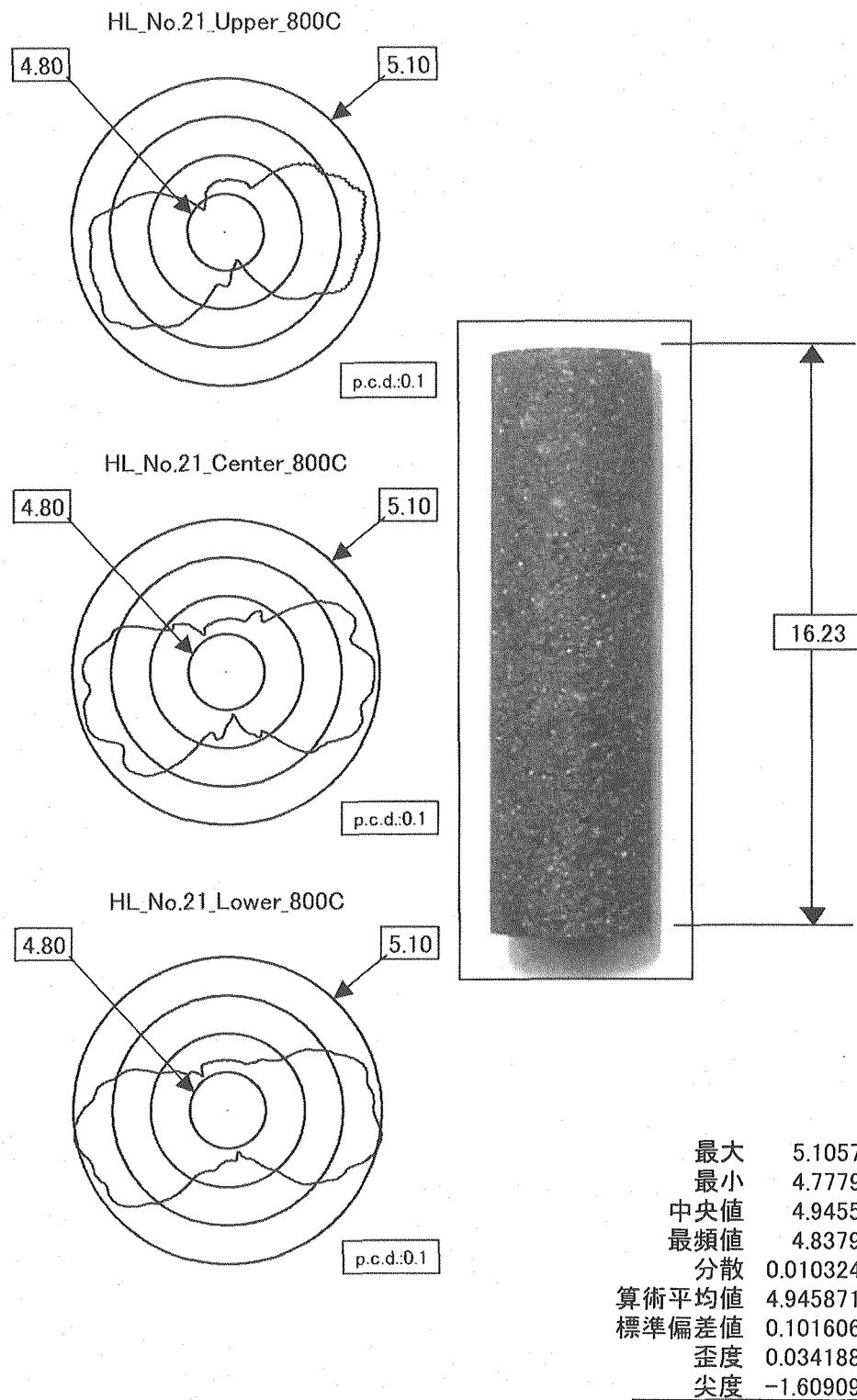


Fig.55    Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for near-isotropic graphite.  
(Gilsocarbon\_parallel)

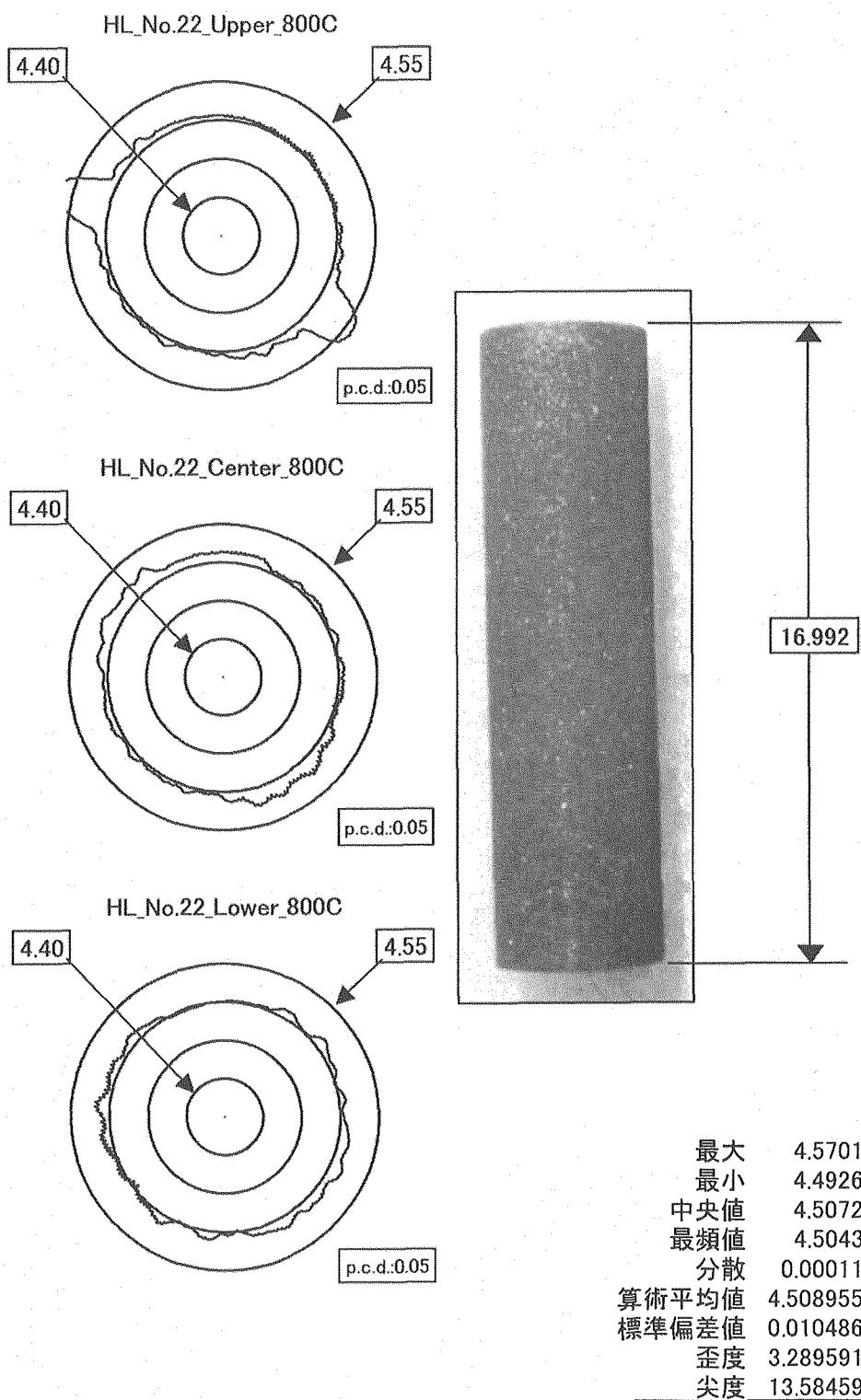


Fig.56 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for isotropic graphite. (IG-110)

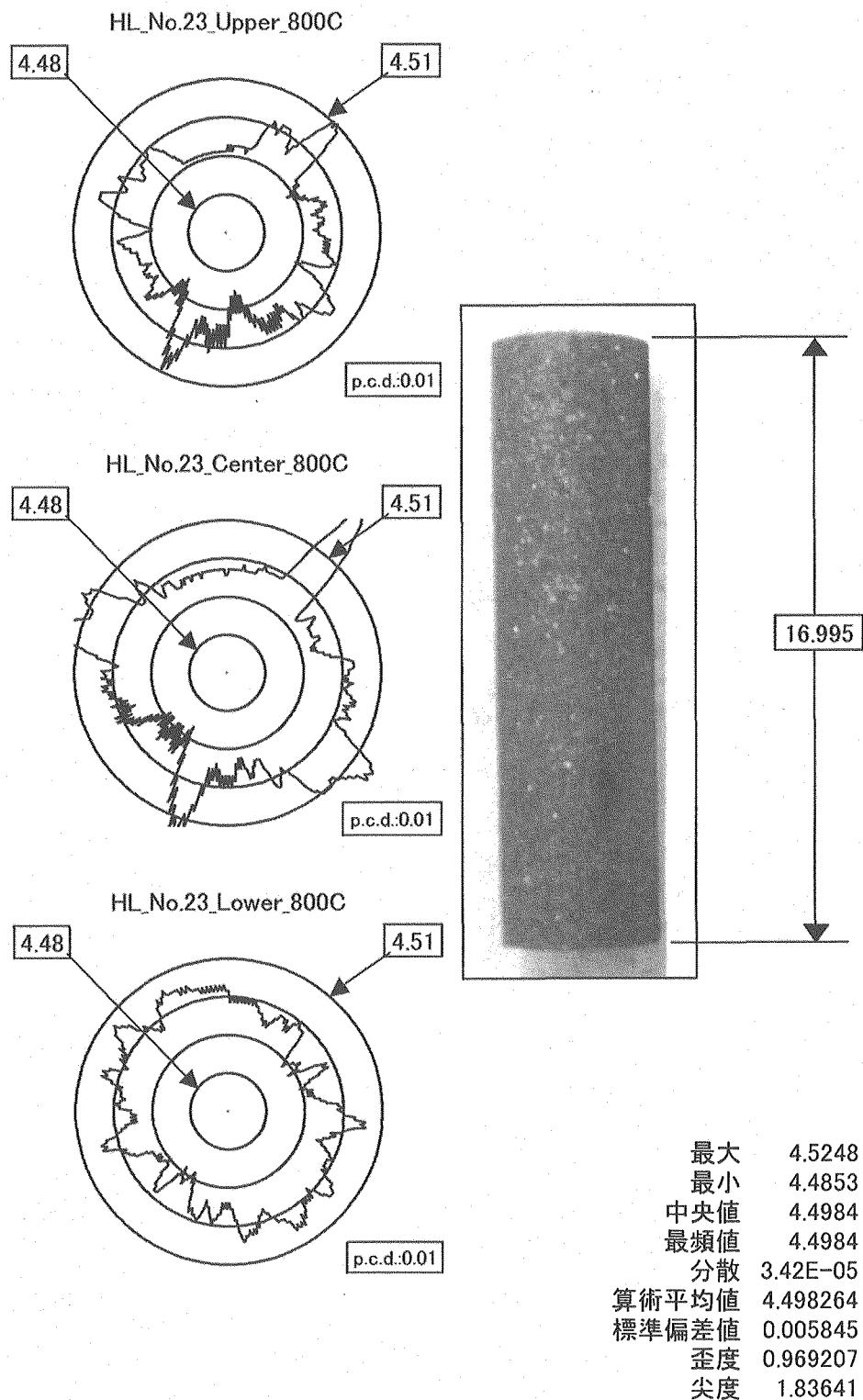


Fig.57 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C for isotropic graphite. (IG-110)

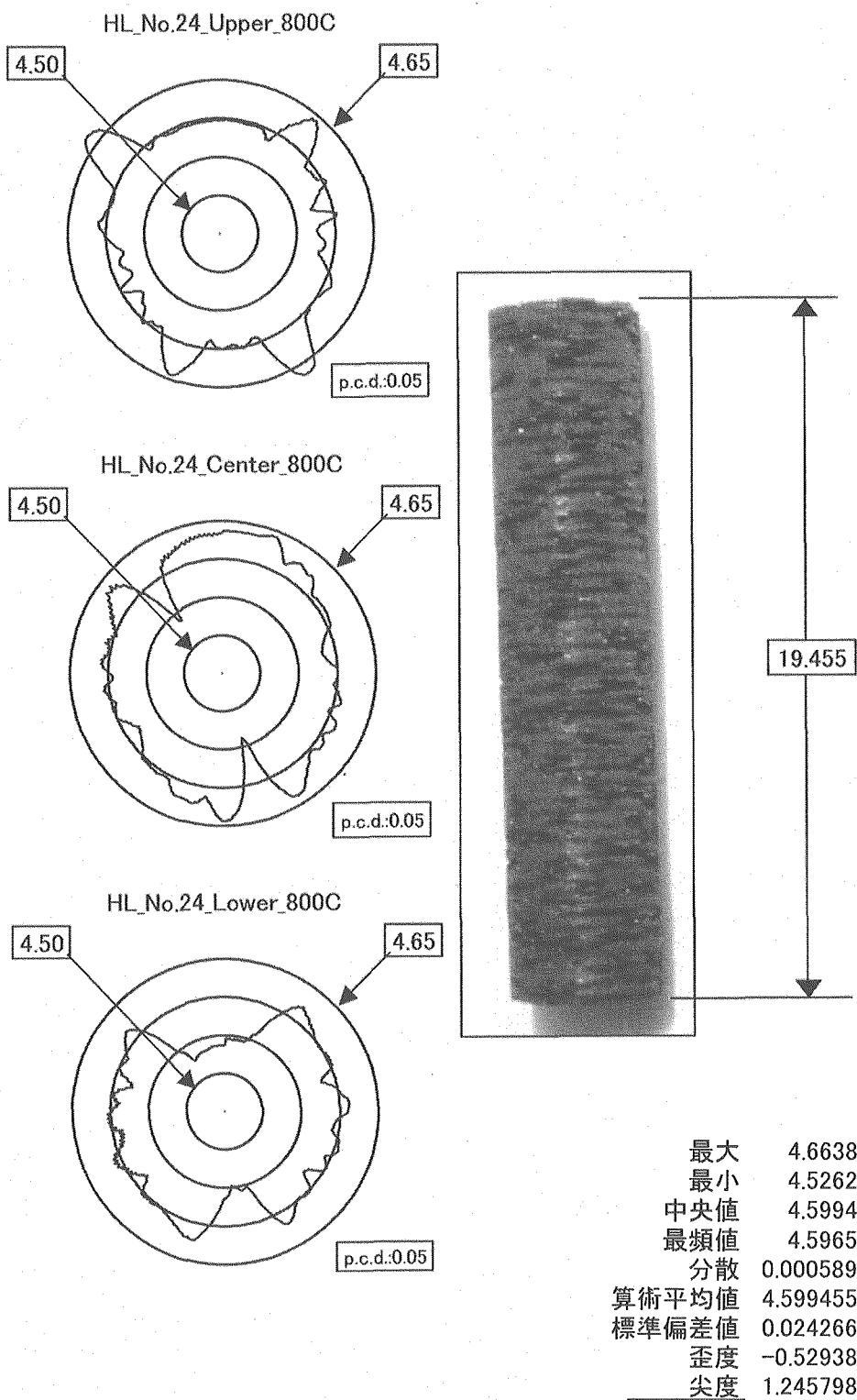


Fig.58 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_vertical)

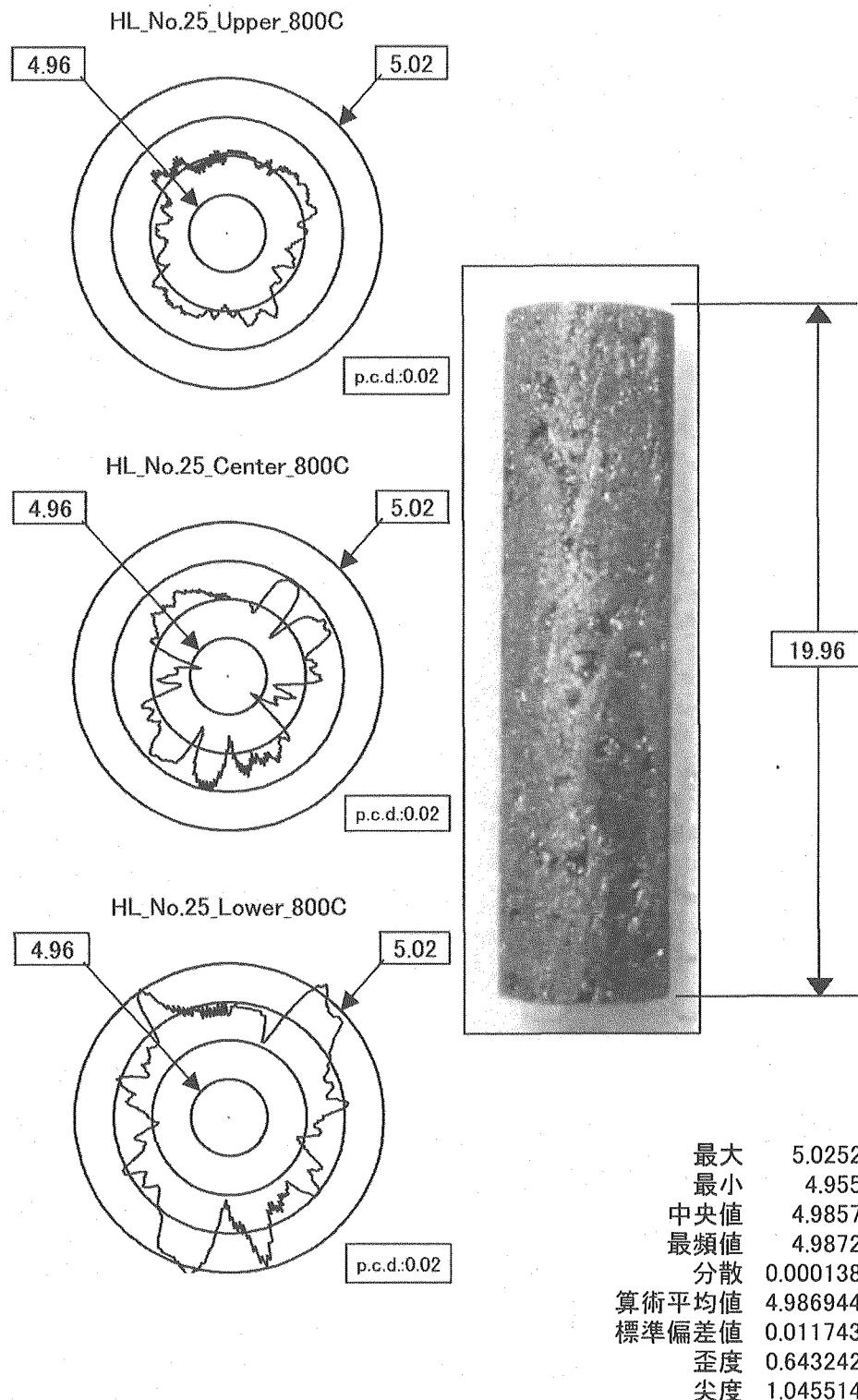


Fig.59 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(PCC-2S\_parallel)

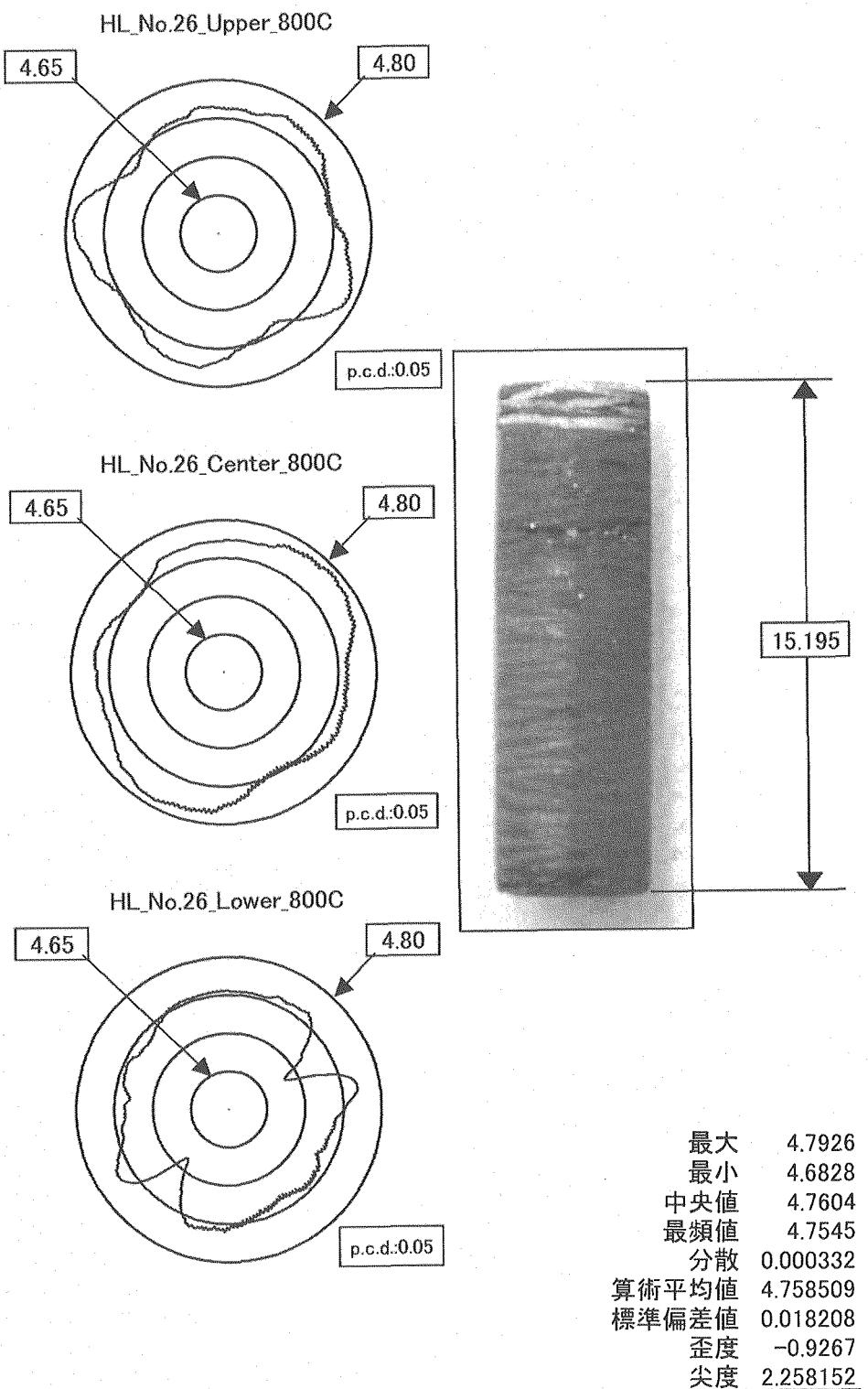


Fig.60 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-2702\_vertical)

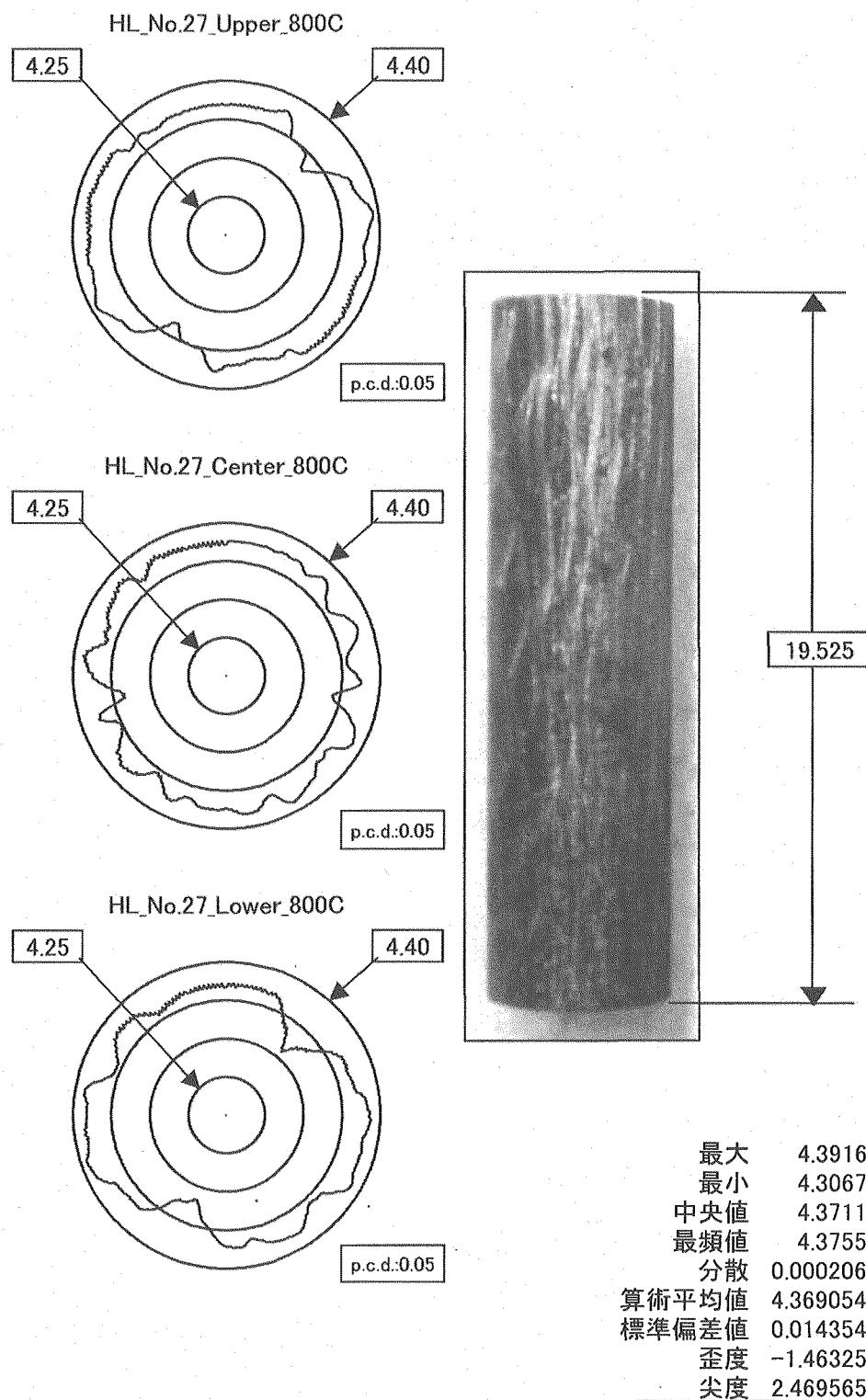


Fig.61 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CCM-190G\_parallel)

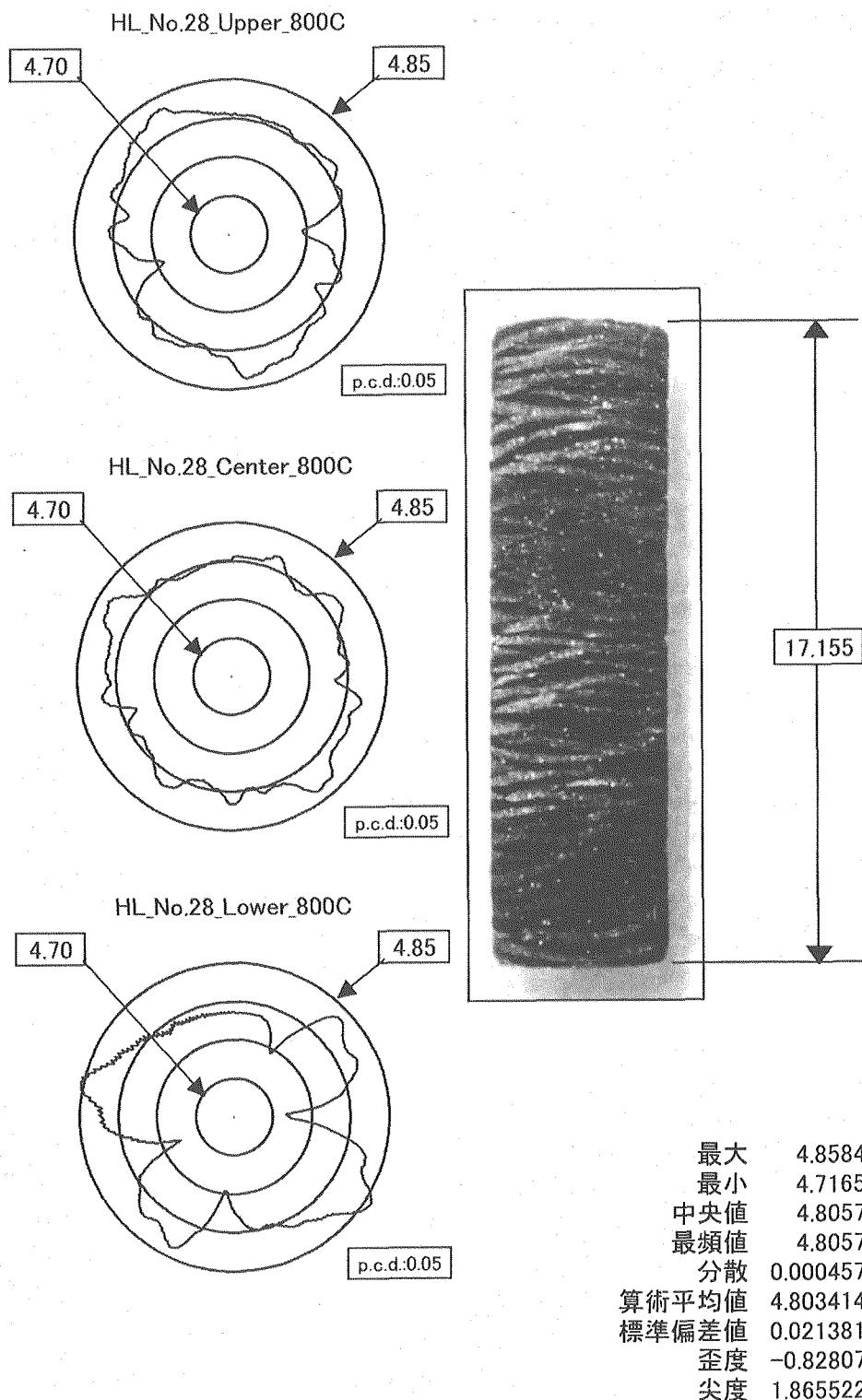


Fig.62 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-270\_vertical)

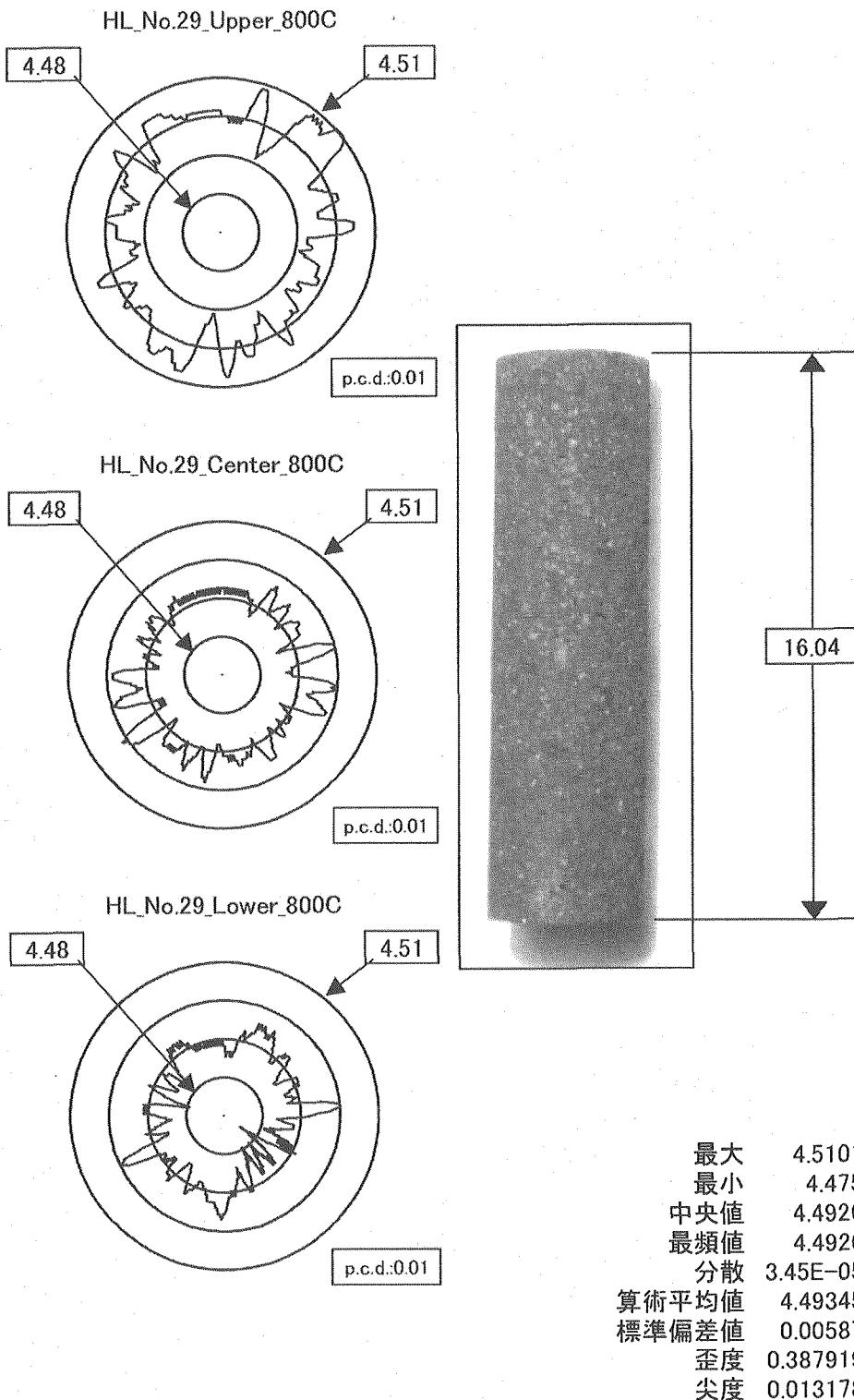


Fig.63 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for near-isotropic graphite.  
(GilsoCarbon\_parallel)

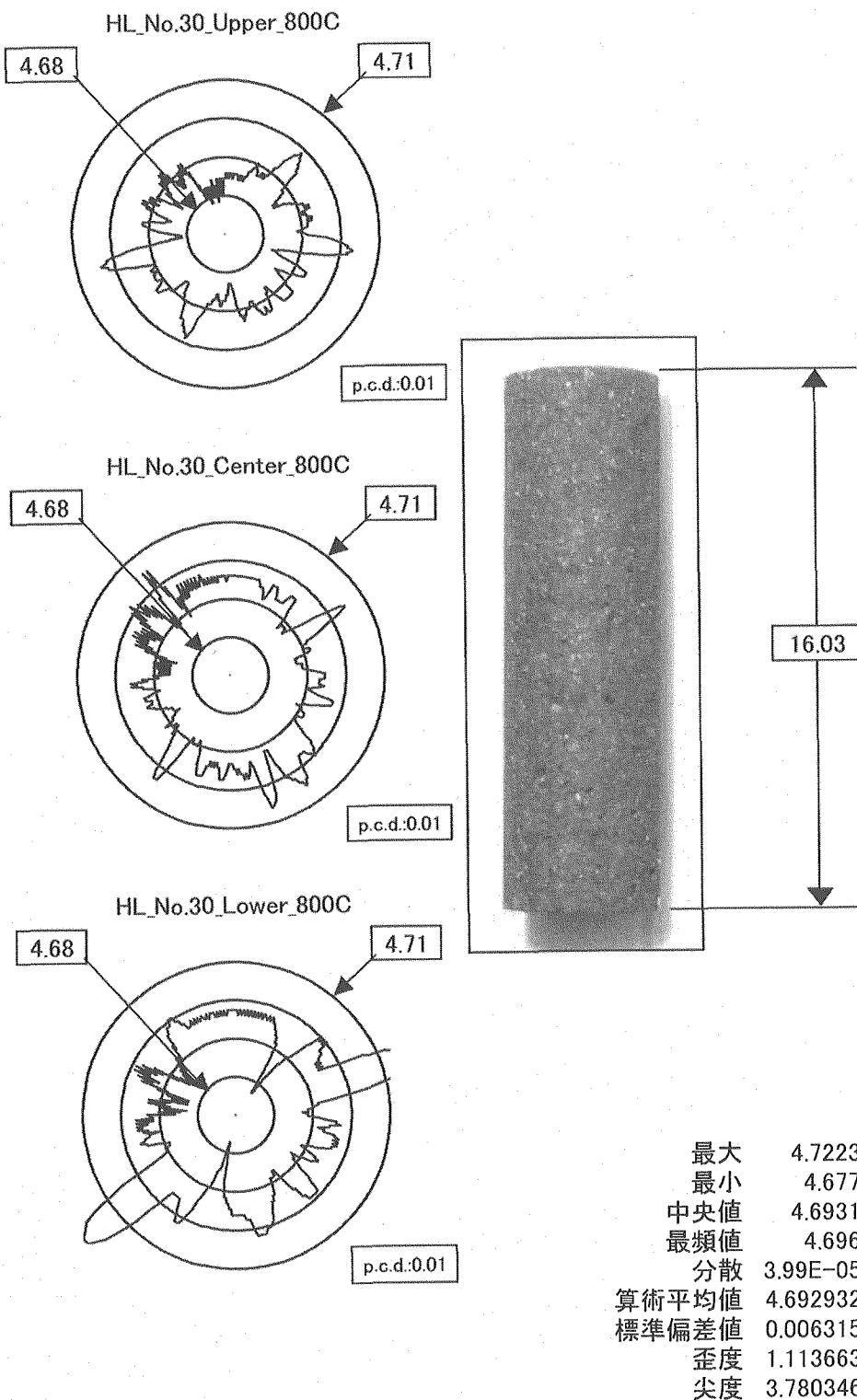


Fig.64 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for near-isotropic graphite.  
(GilsoCarbon\_vertical)

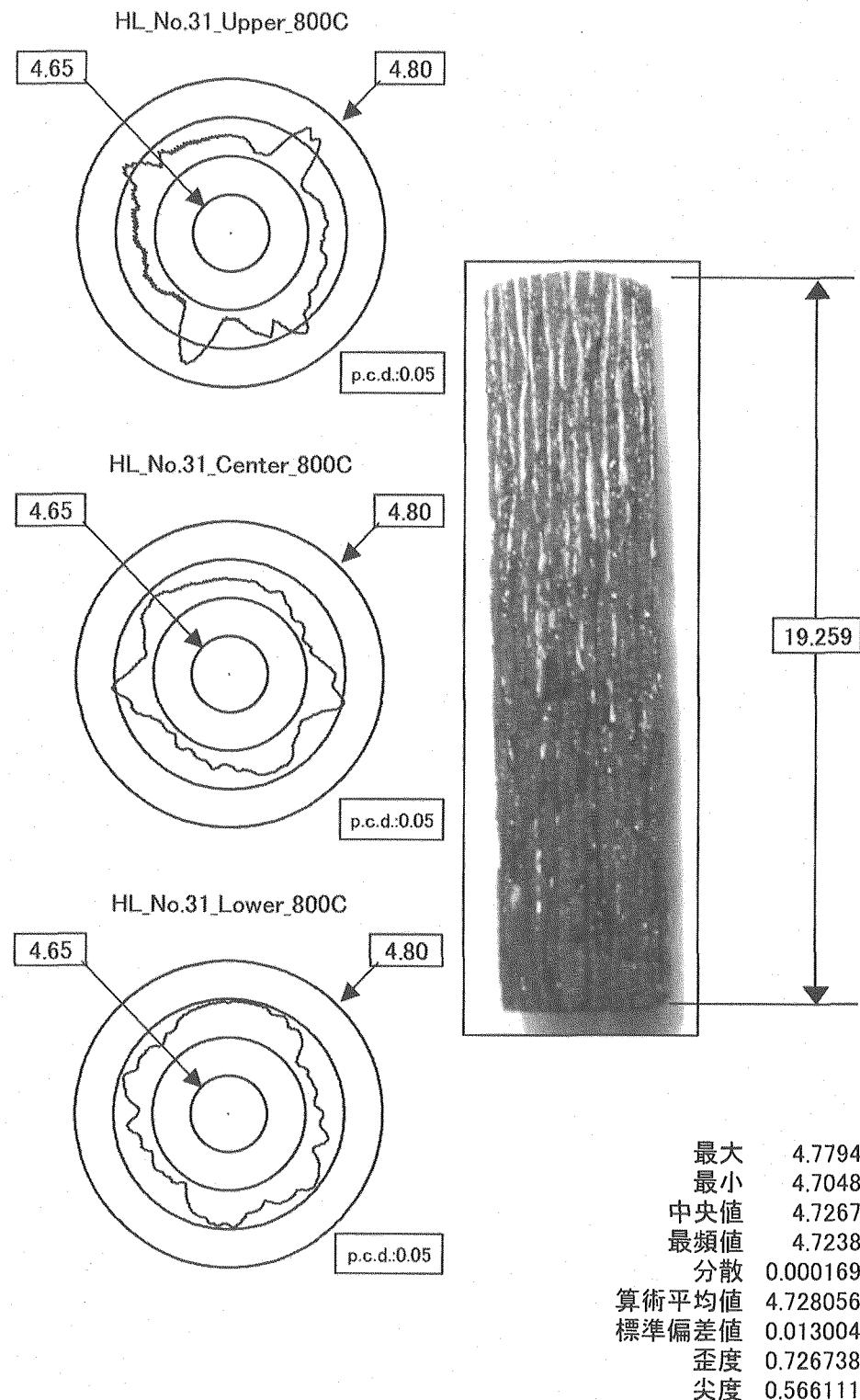


Fig.65      Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_parallel)

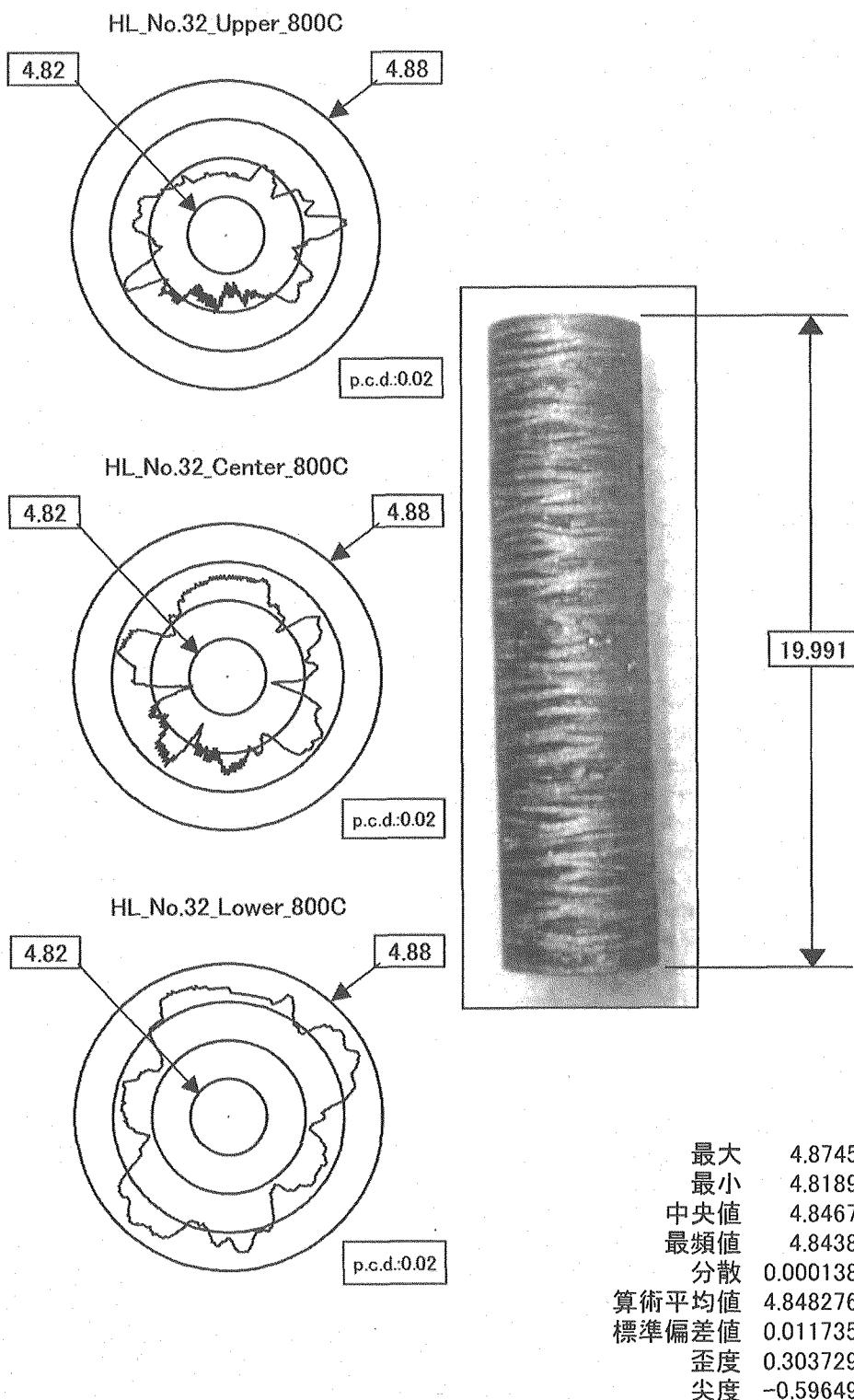


Fig.66 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CCM-190G\_vertical)

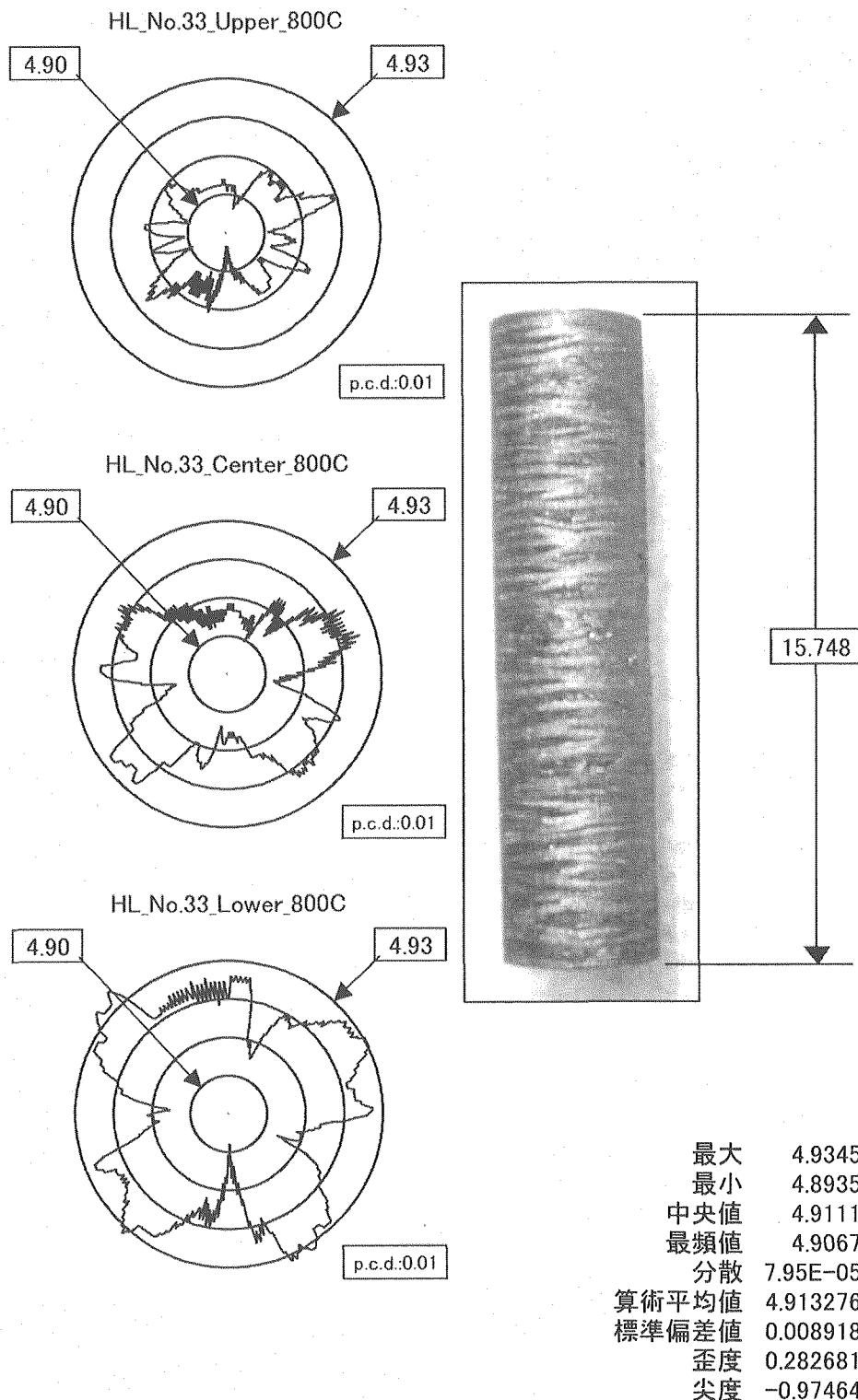


Fig.67      Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-2702G\_vertical)

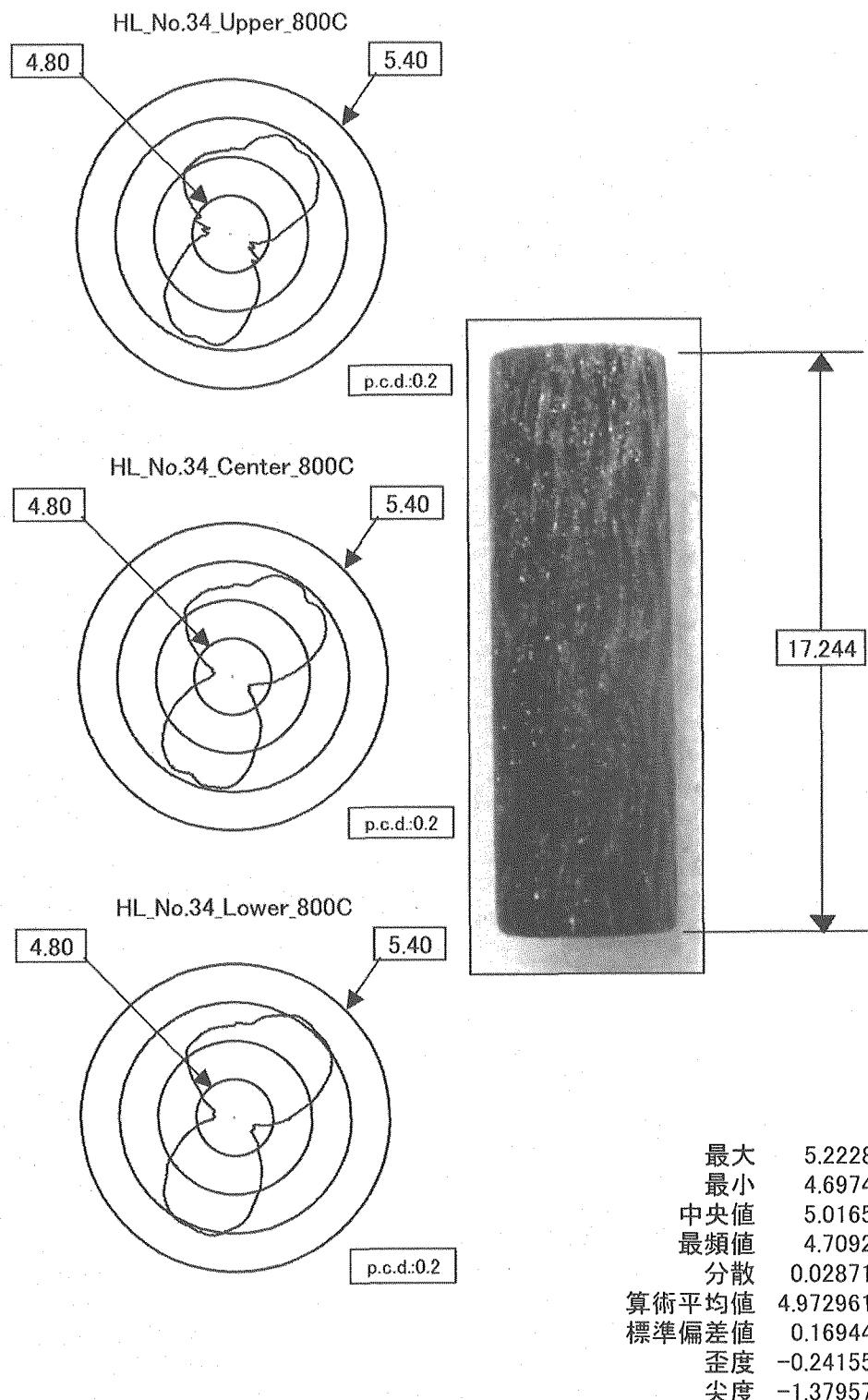


Fig.68 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for carbon fiber reinforced carbon composite.  
(CX-270\_parallel)

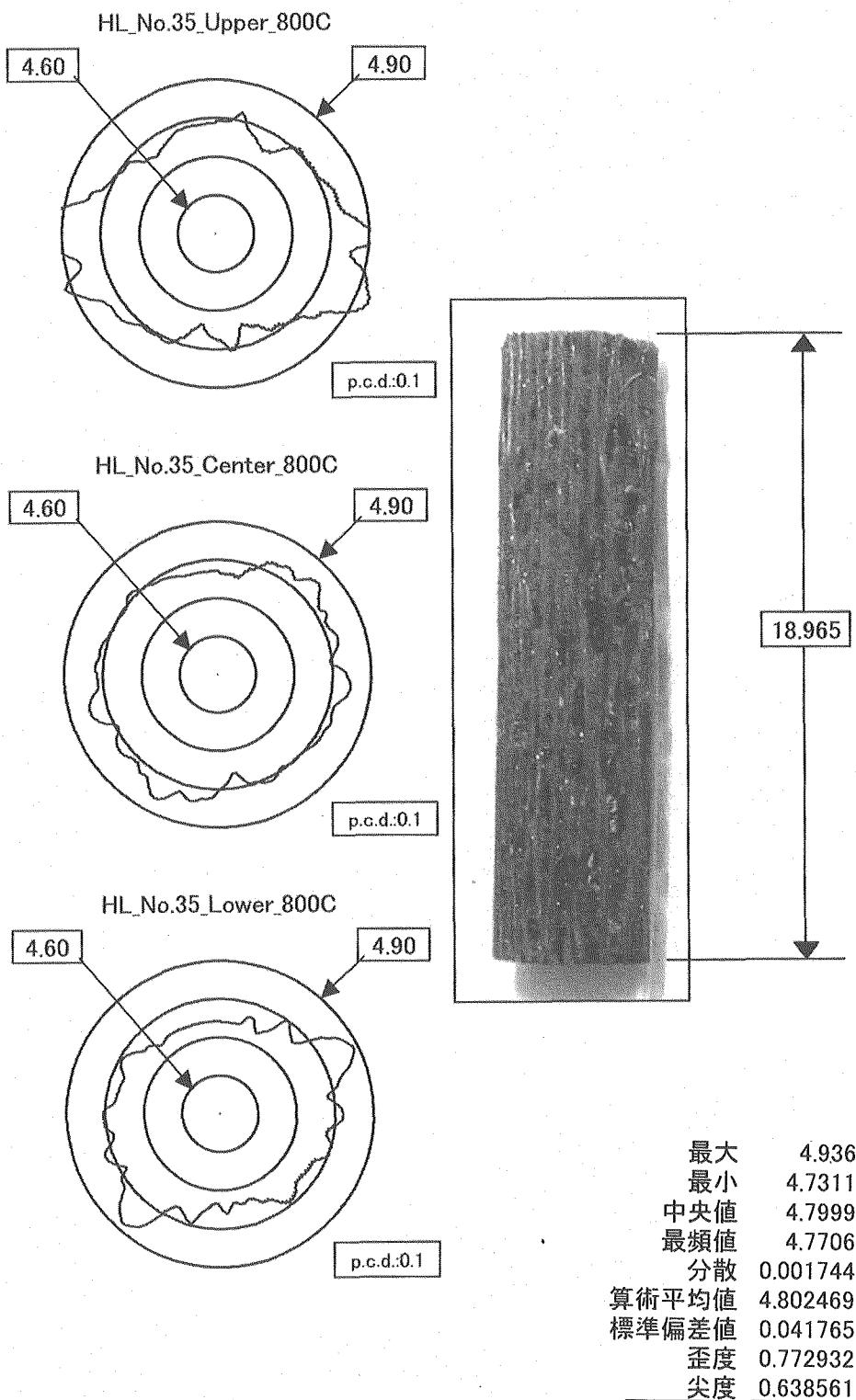


Fig.69 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforcement SiC composite.  
(HiNicalo-II\_parallel)

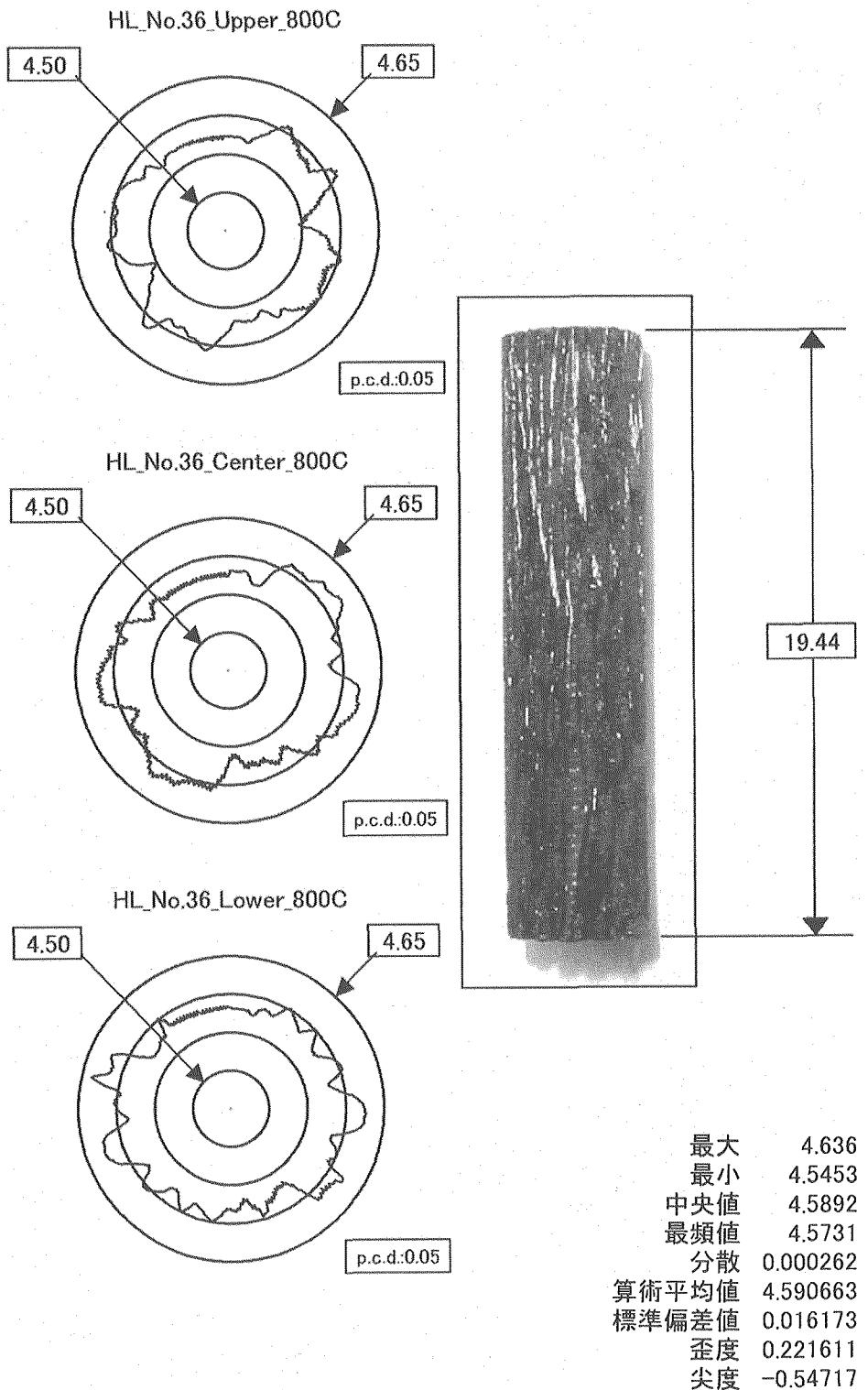


Fig.70 Profile in diameter of the irradiated specimen at 800C  
for SiC fiber reinforced SiC composite.  
(HiNicaloceram\_parallel)

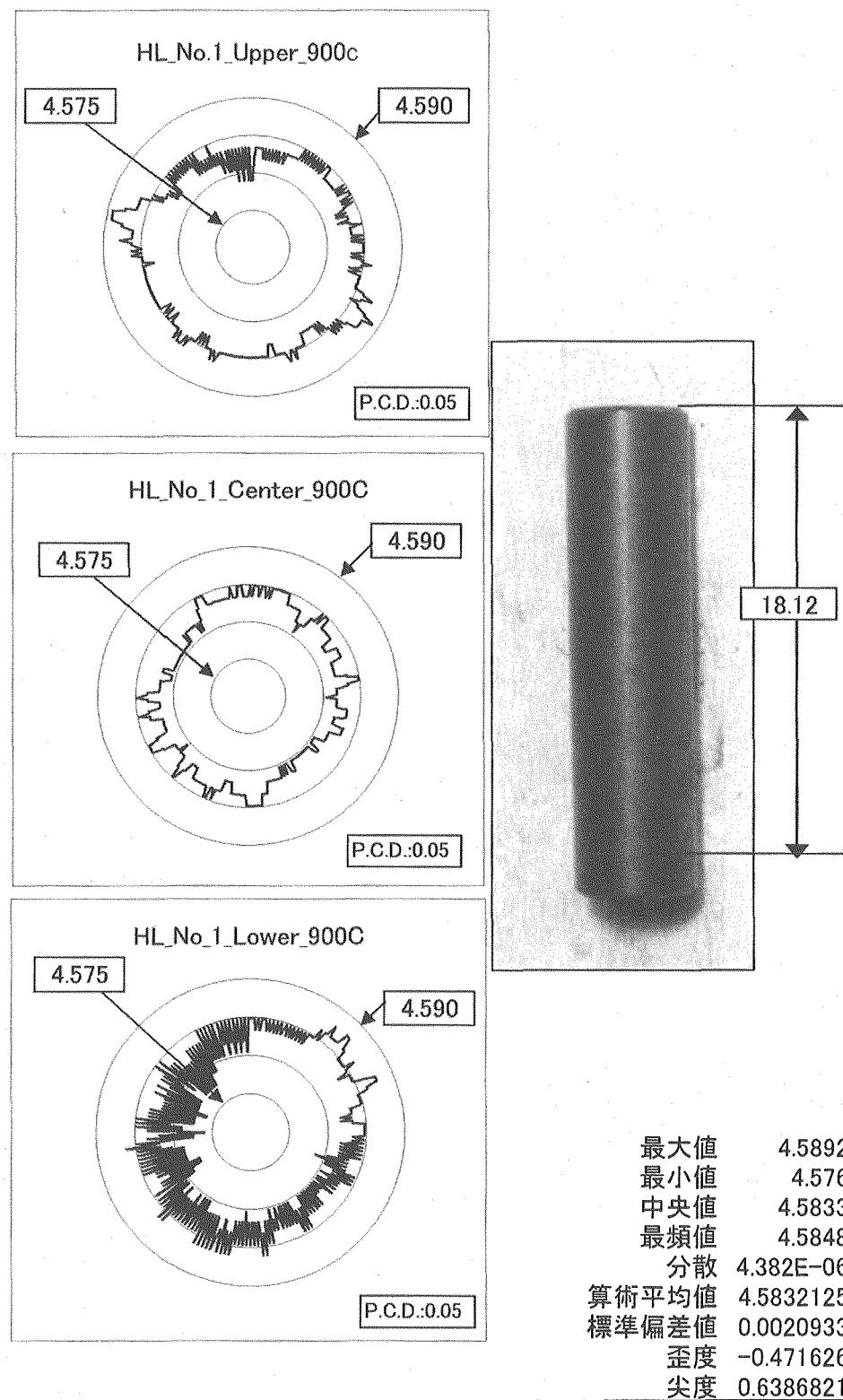


Fig.71 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for monolithic  $\alpha$ -SiC .

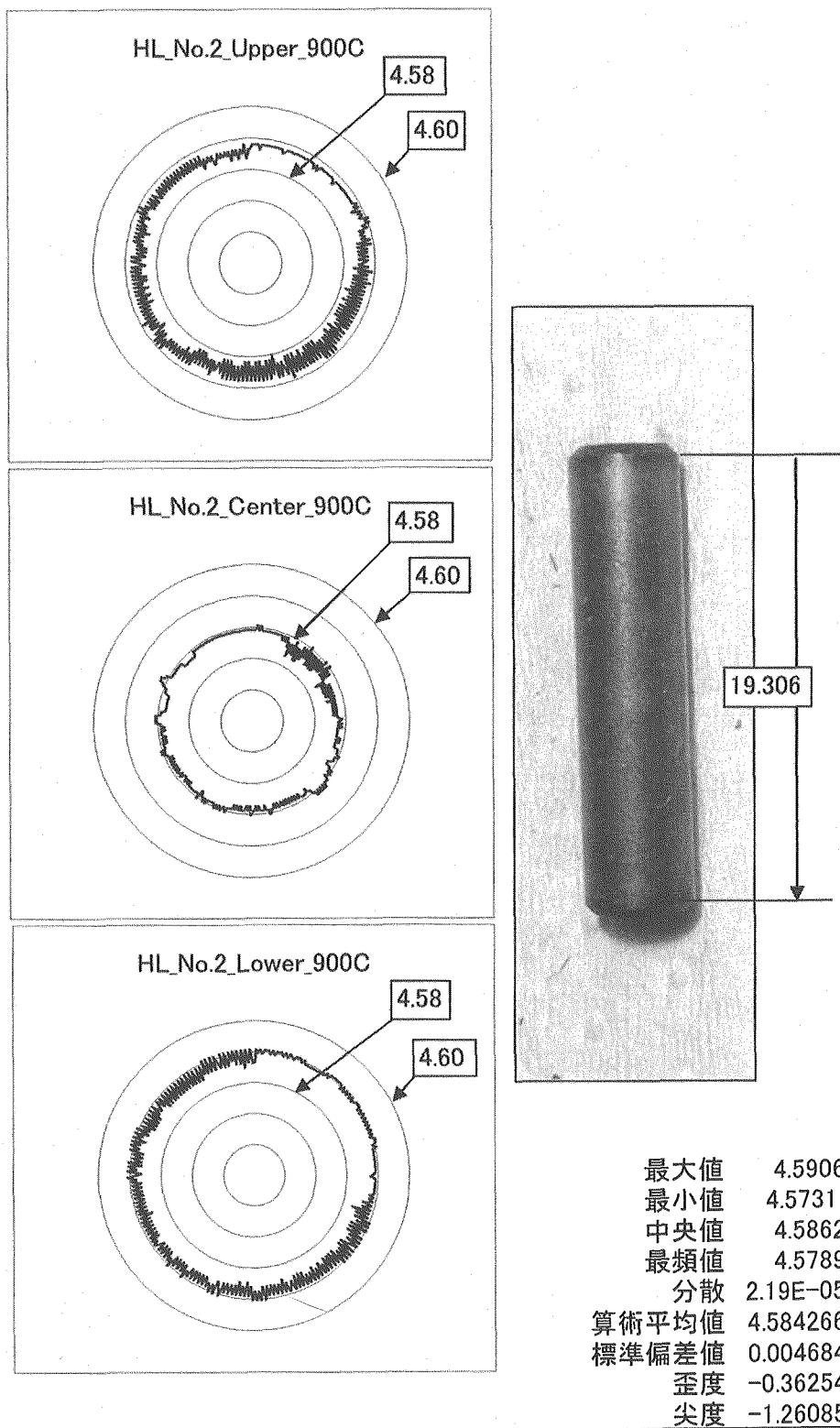


Fig.72 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for SiC particle reinforced SiC composite(10wt.%SiC).

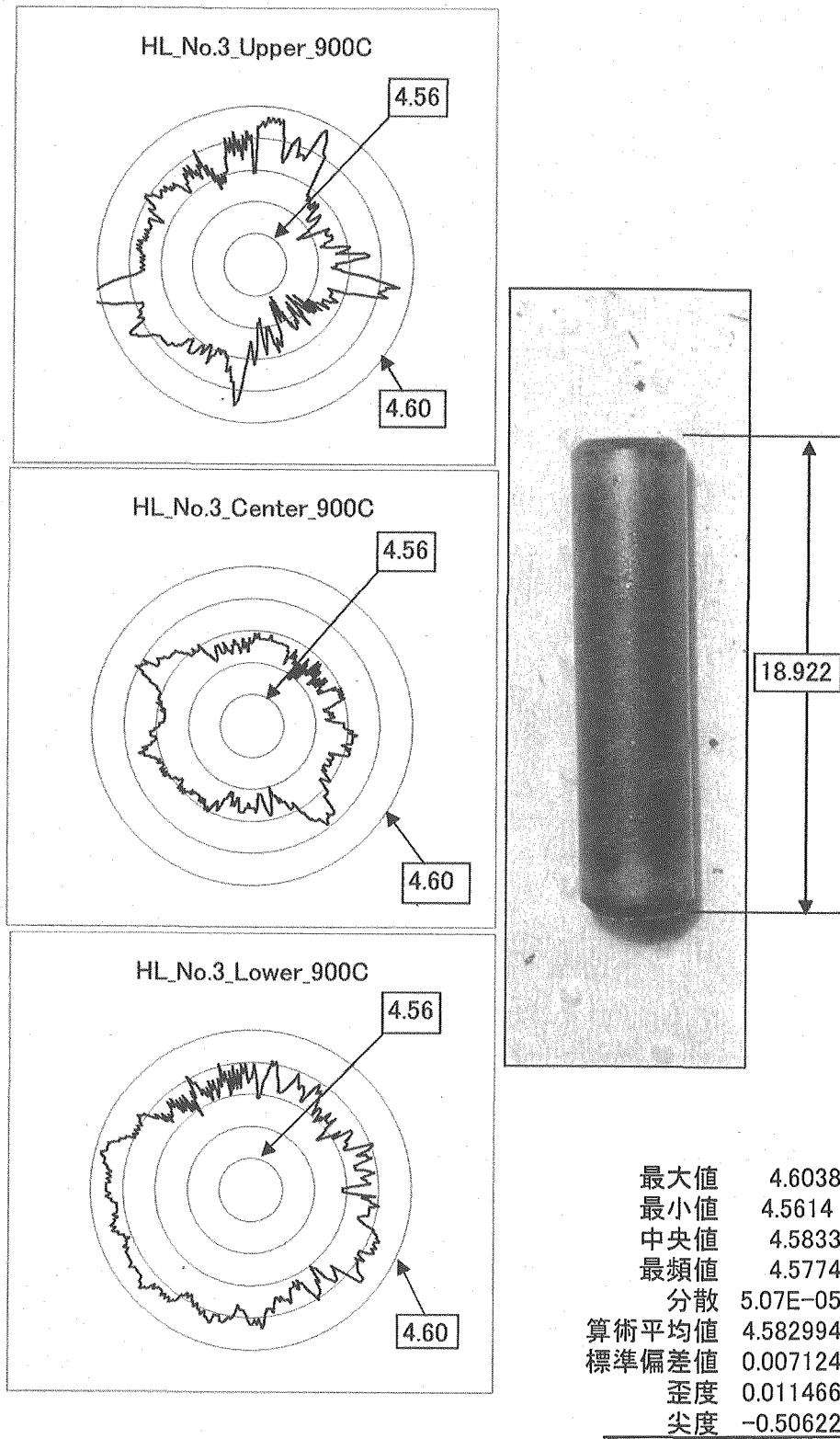


Fig.73 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for SiC particle reinforced SiC composite(5wt.%SiC).

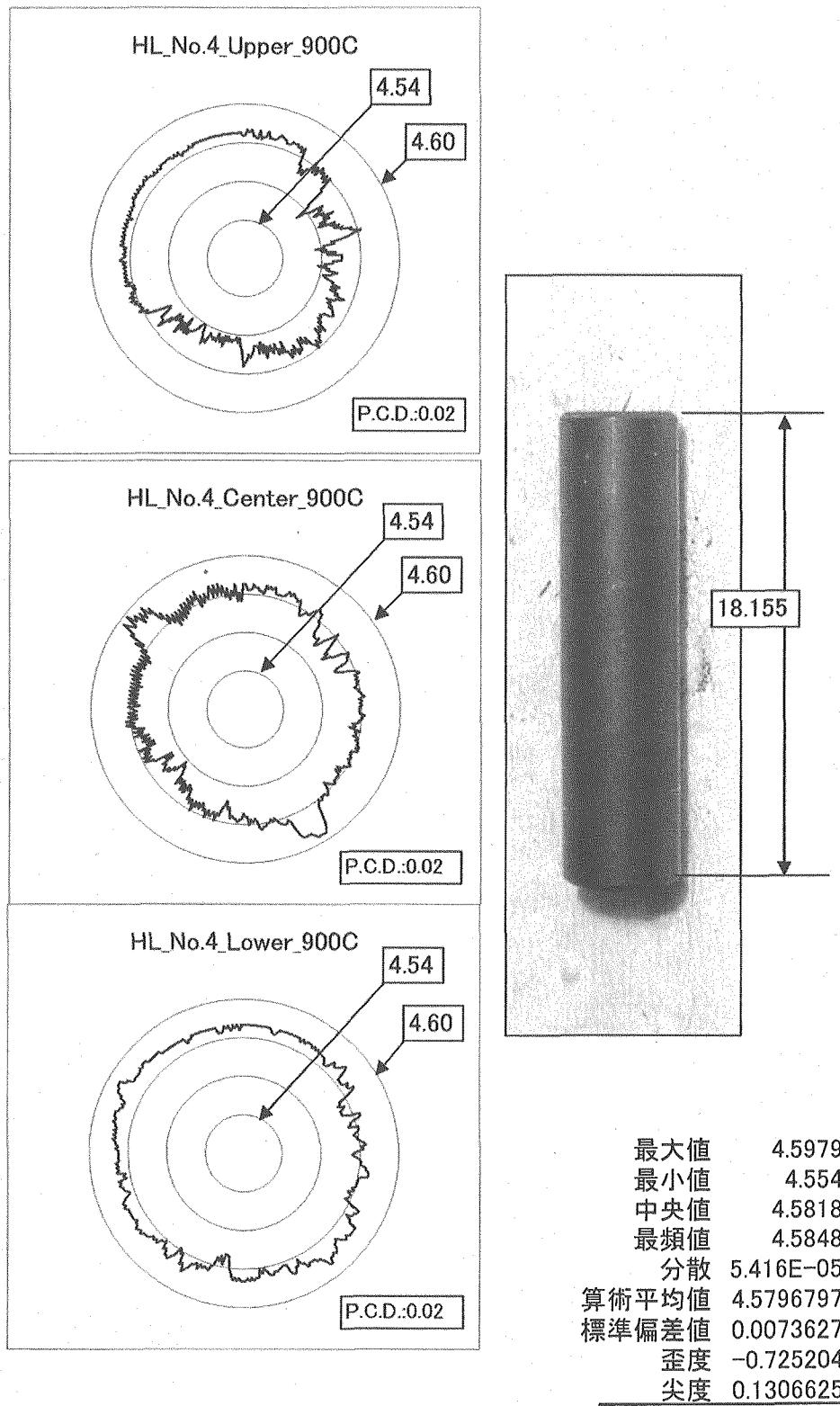


Fig.74 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for monolithic  $\alpha$ -SiC .

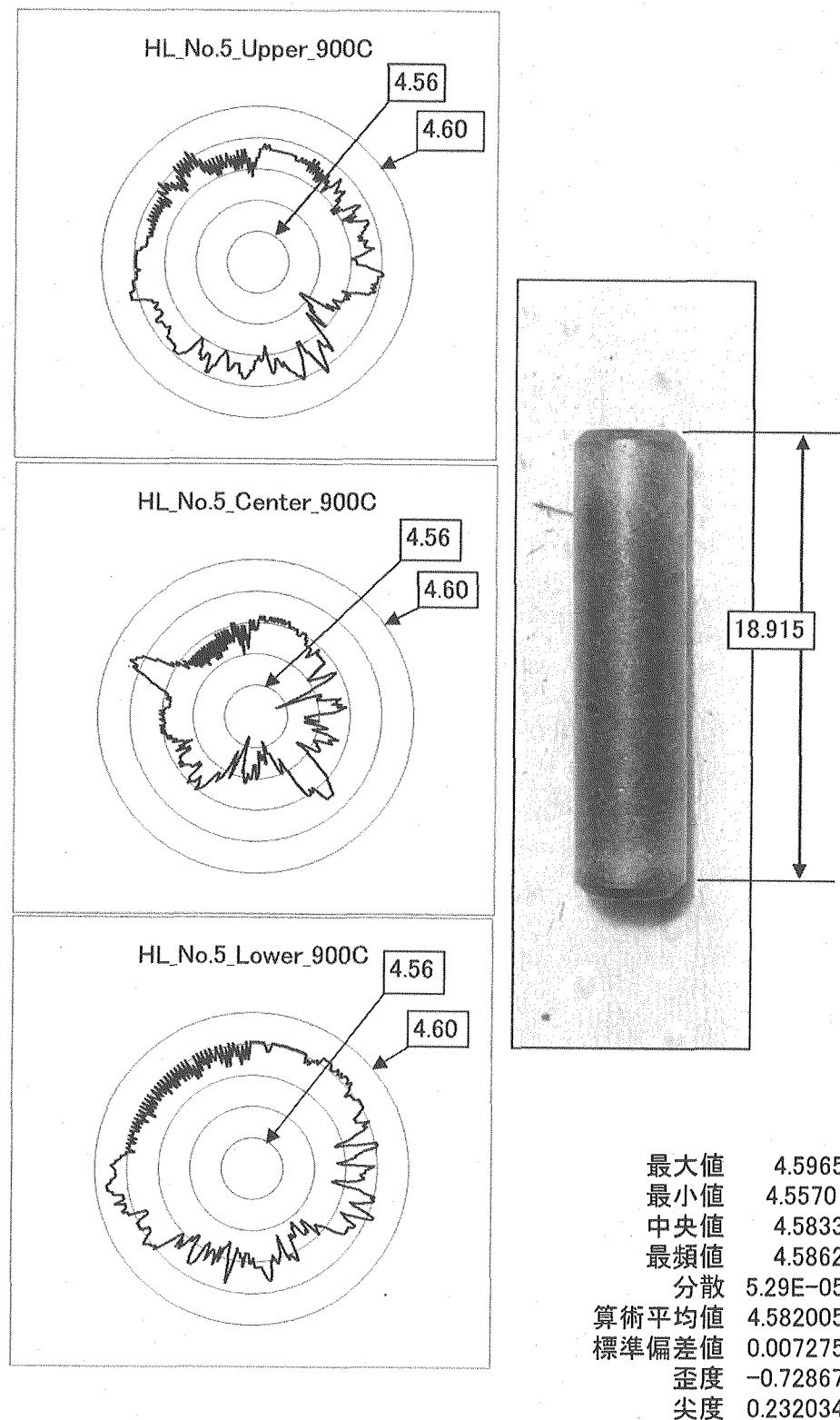


Fig.75 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for SiC particle reinforced SiC composite(5wt\_%SiC).

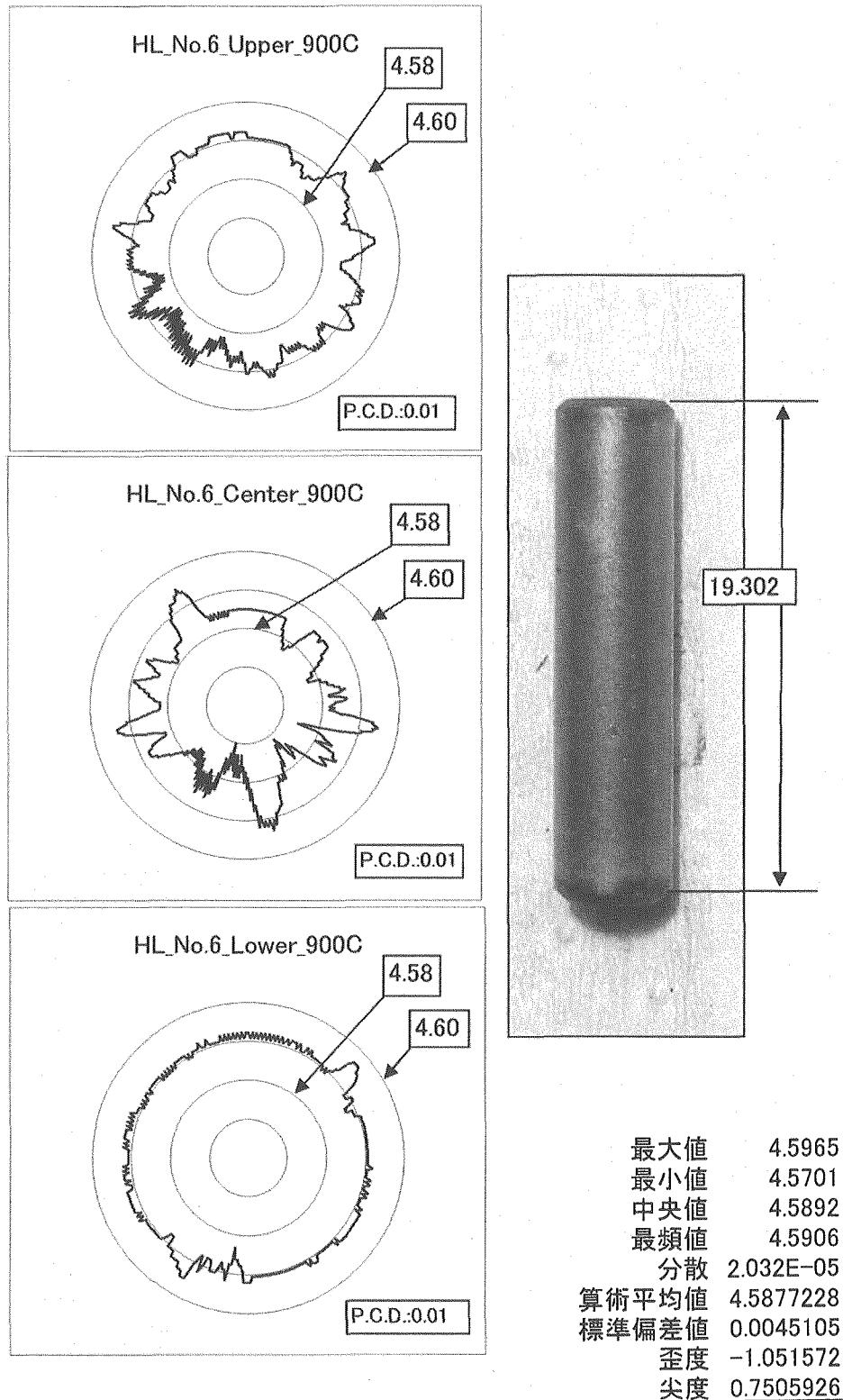


Fig.76 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for SiC particle reinforced SiC composite(10wt.%SiC).

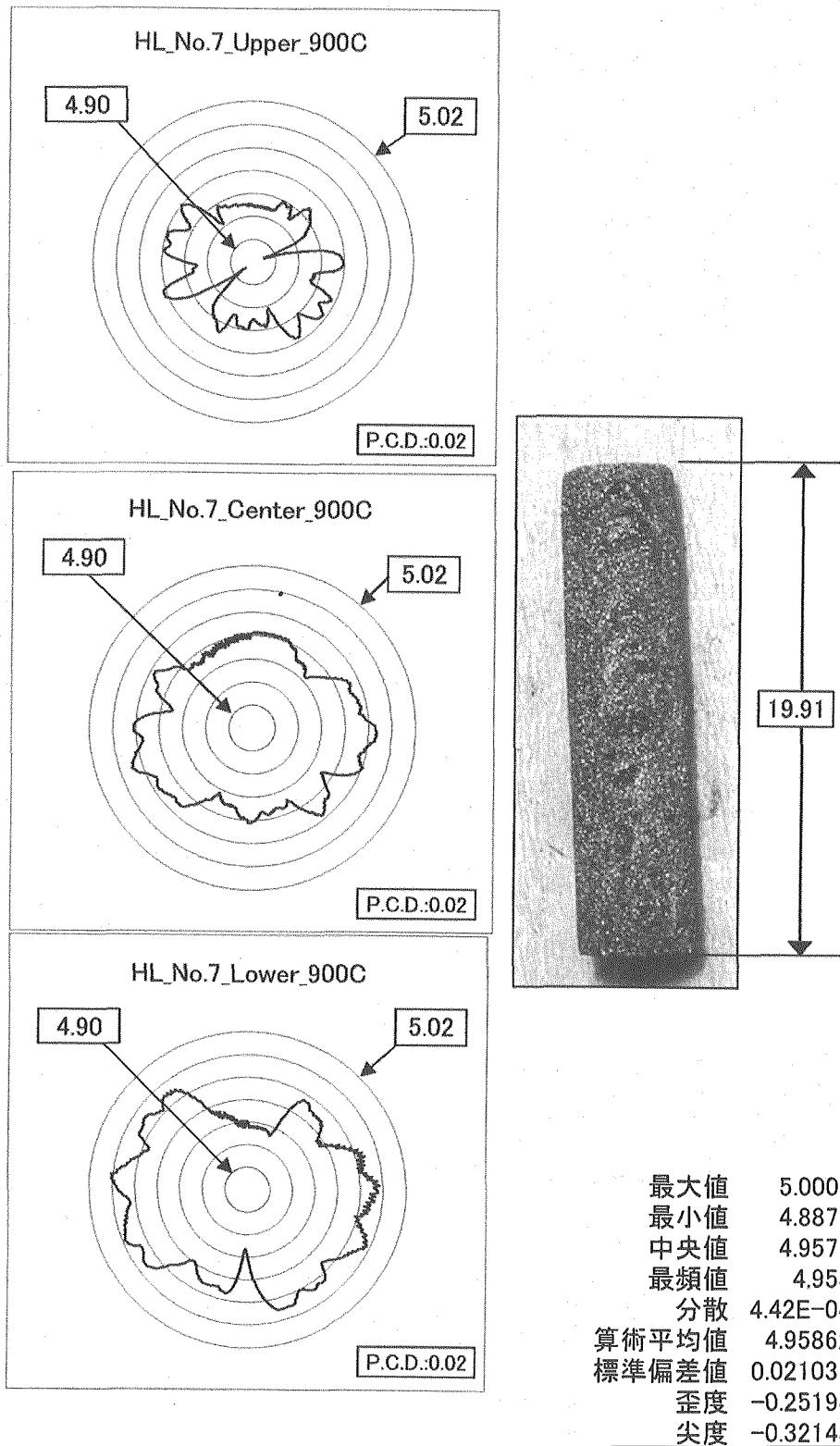


Fig.77 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(PCC-2S\_parallel)

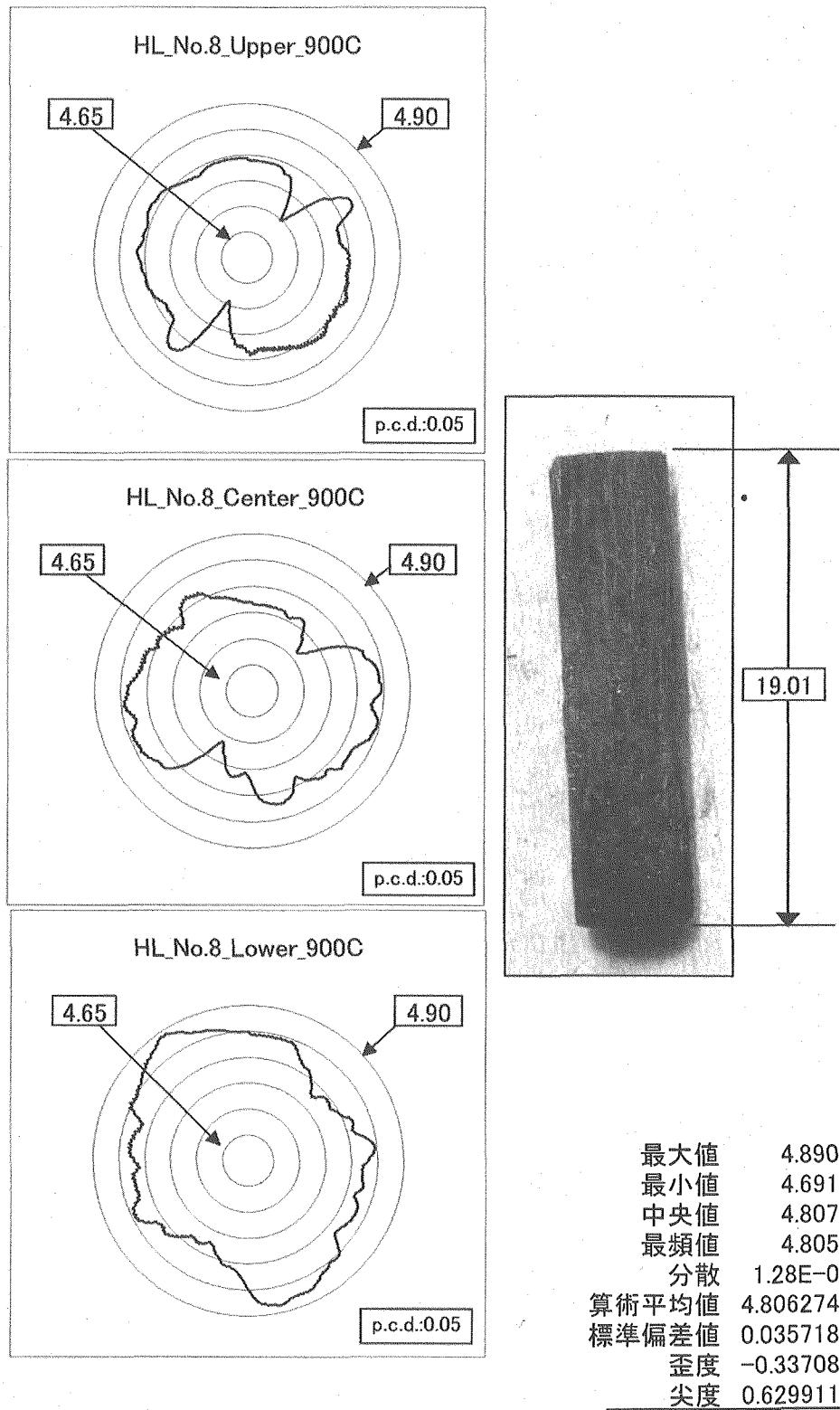


Fig.78 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional SiC/SiC composite.  
(Hi\_Nicalo-II\_parallel)

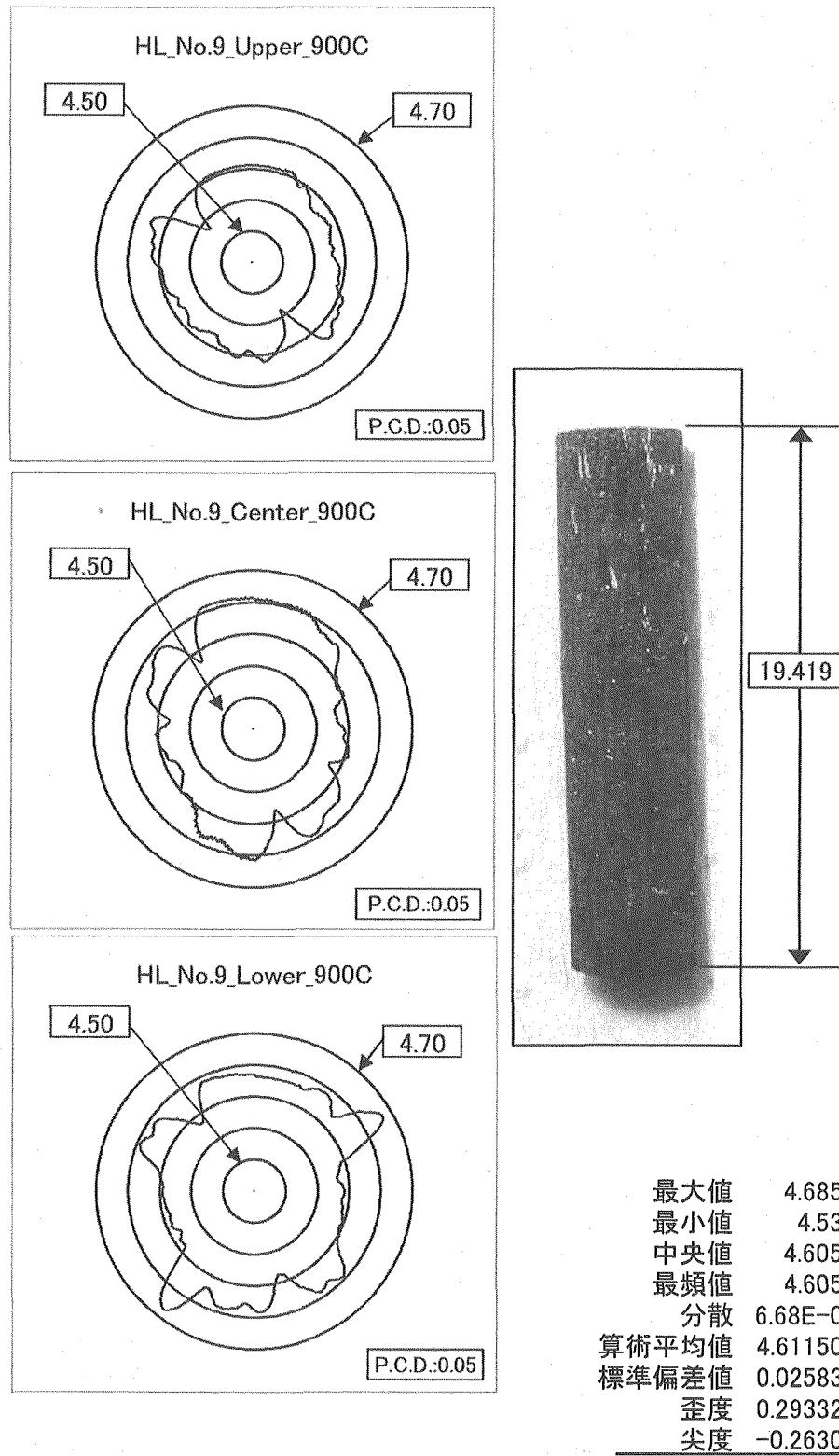


Fig.79 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-parallel).

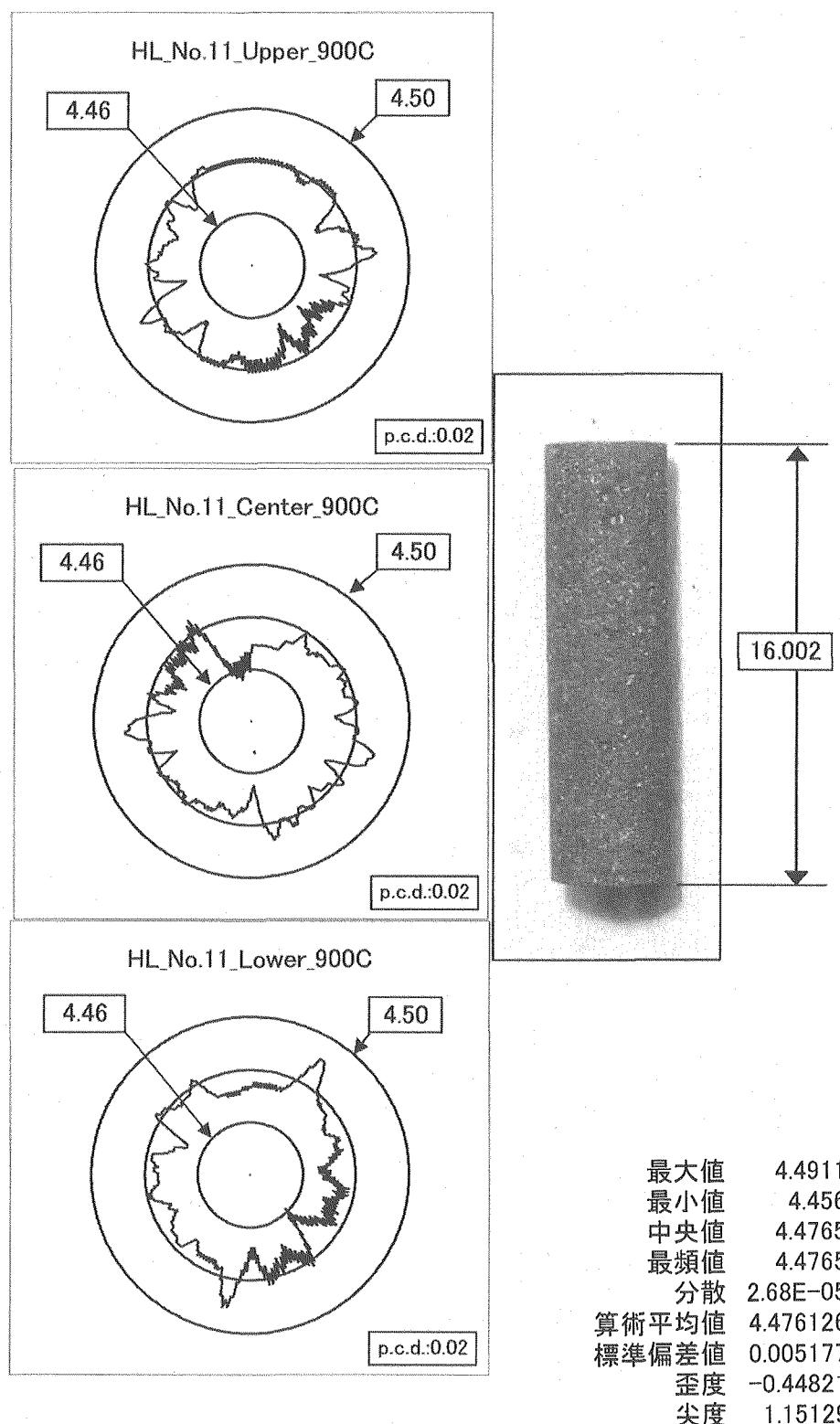


Fig.80 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for near-isotropic graphite. (GilsoCarbon\_parallel)

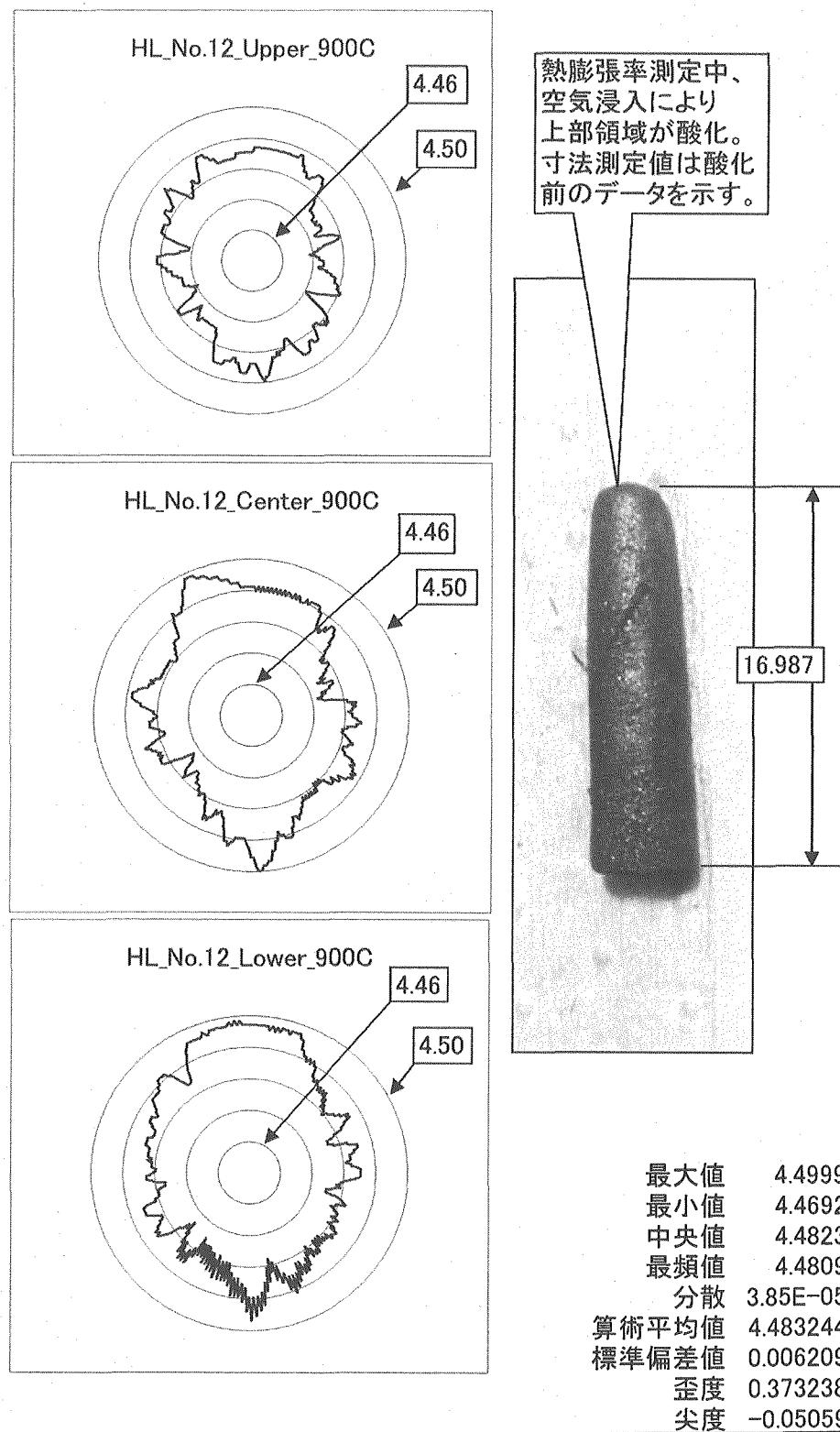


Fig.81 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for isotropic graphite(IG-110).

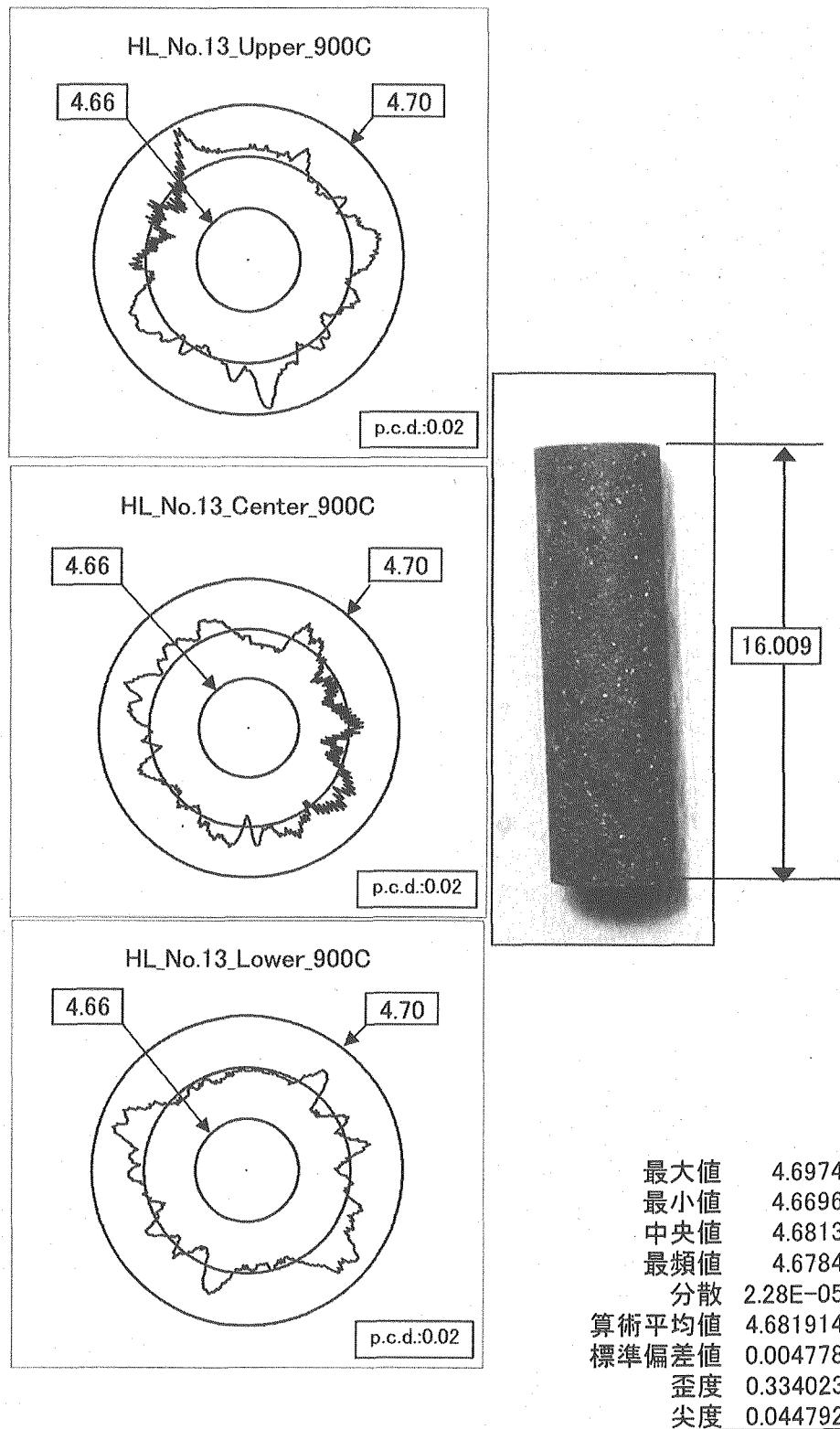


Fig.82 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for near-isotropic graphite. (GilsoCarbon\_parallel)

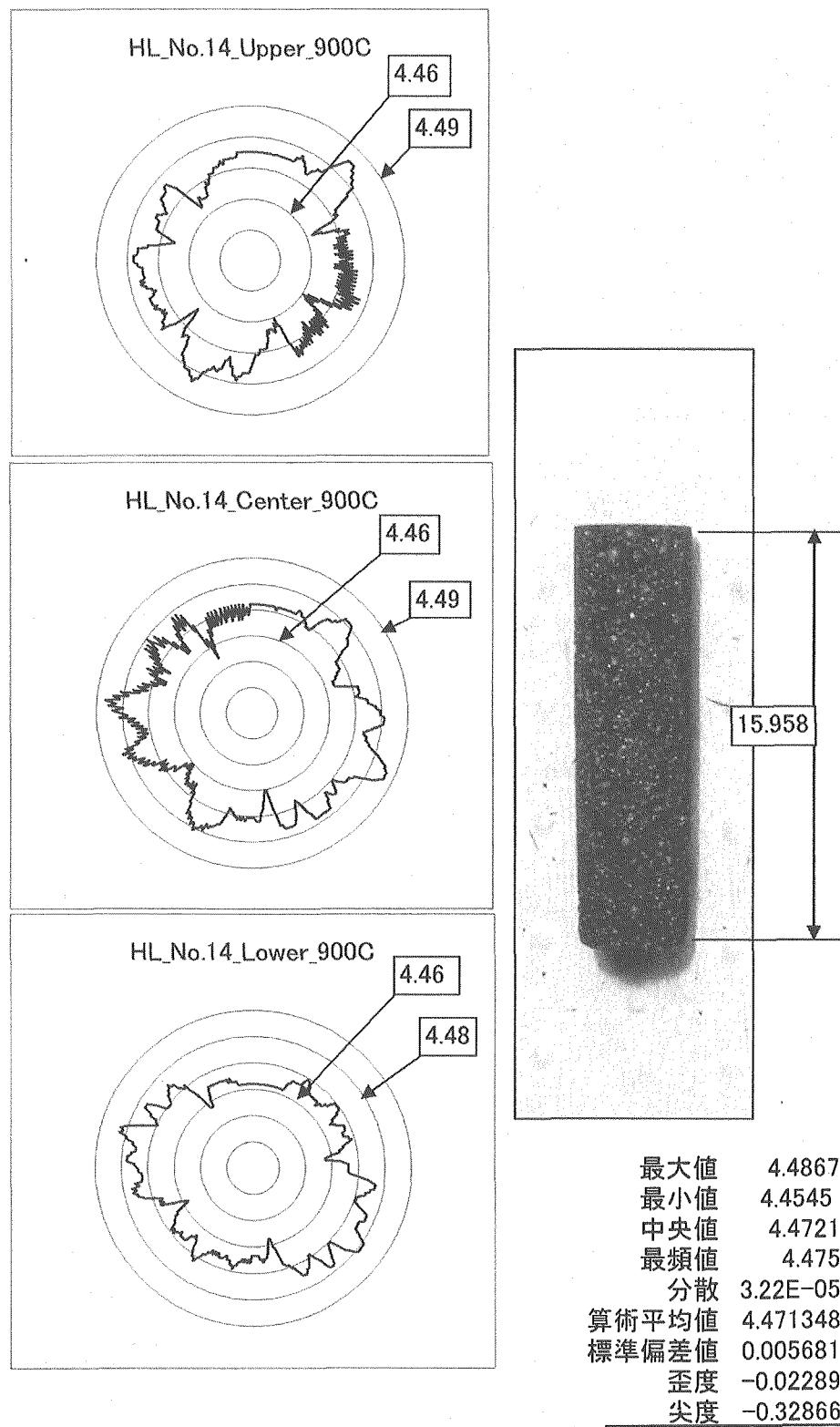


Fig.83 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(Gilso-Carbon\_vertical)

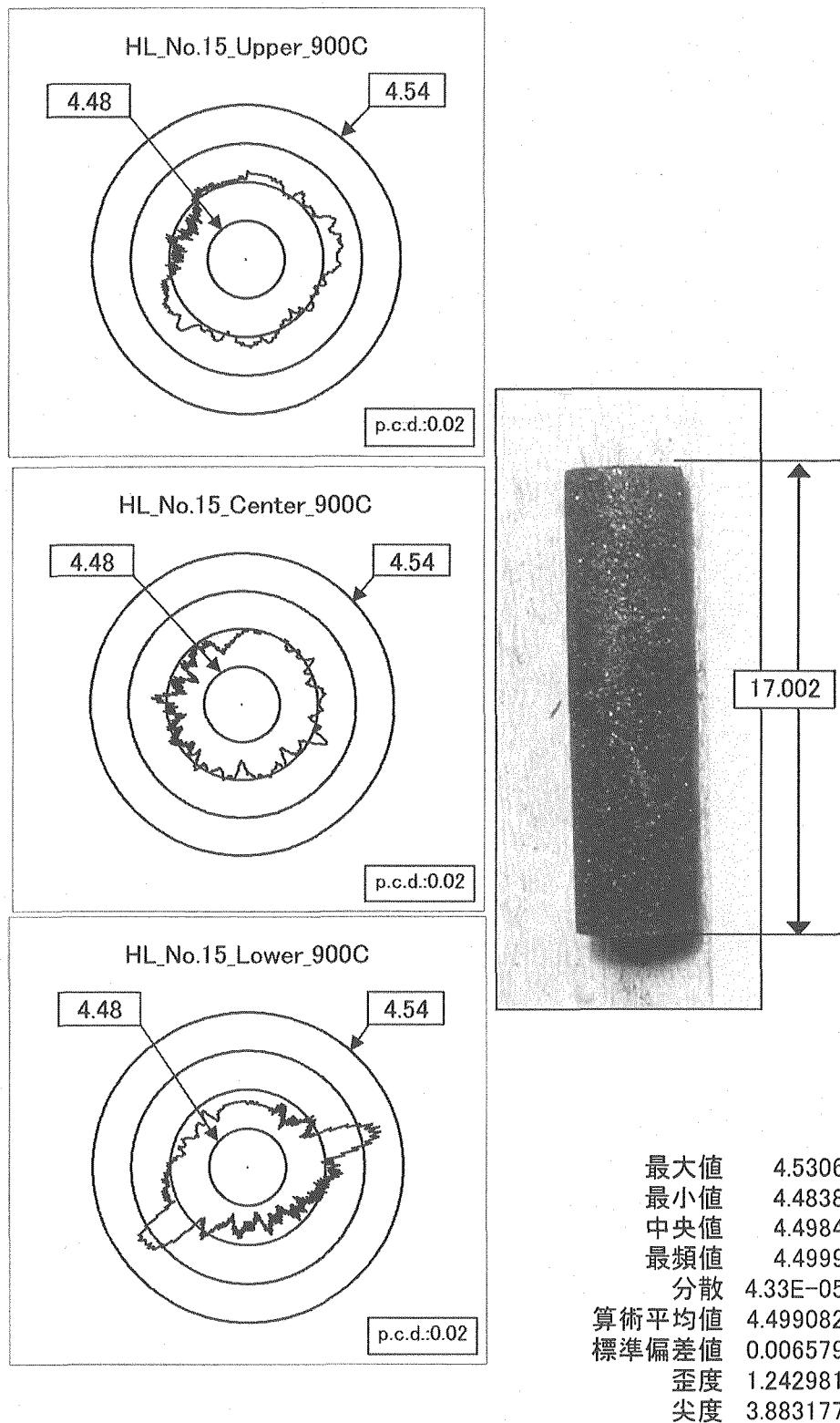


Fig.84 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for isotropic graphite(IG-110).

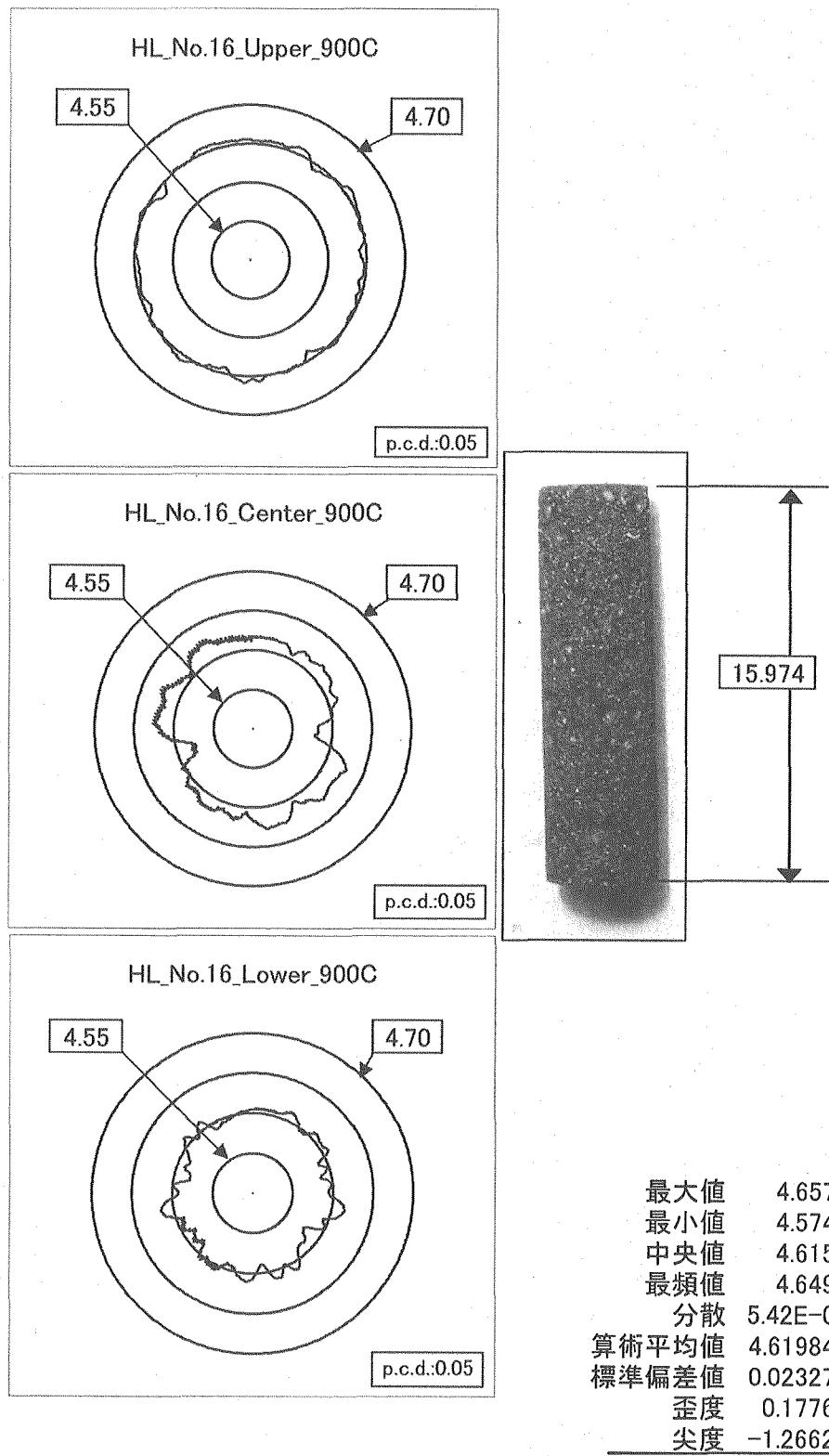


Fig.85 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional carbon/carbon composite(GilsoCarbon\_vertical).

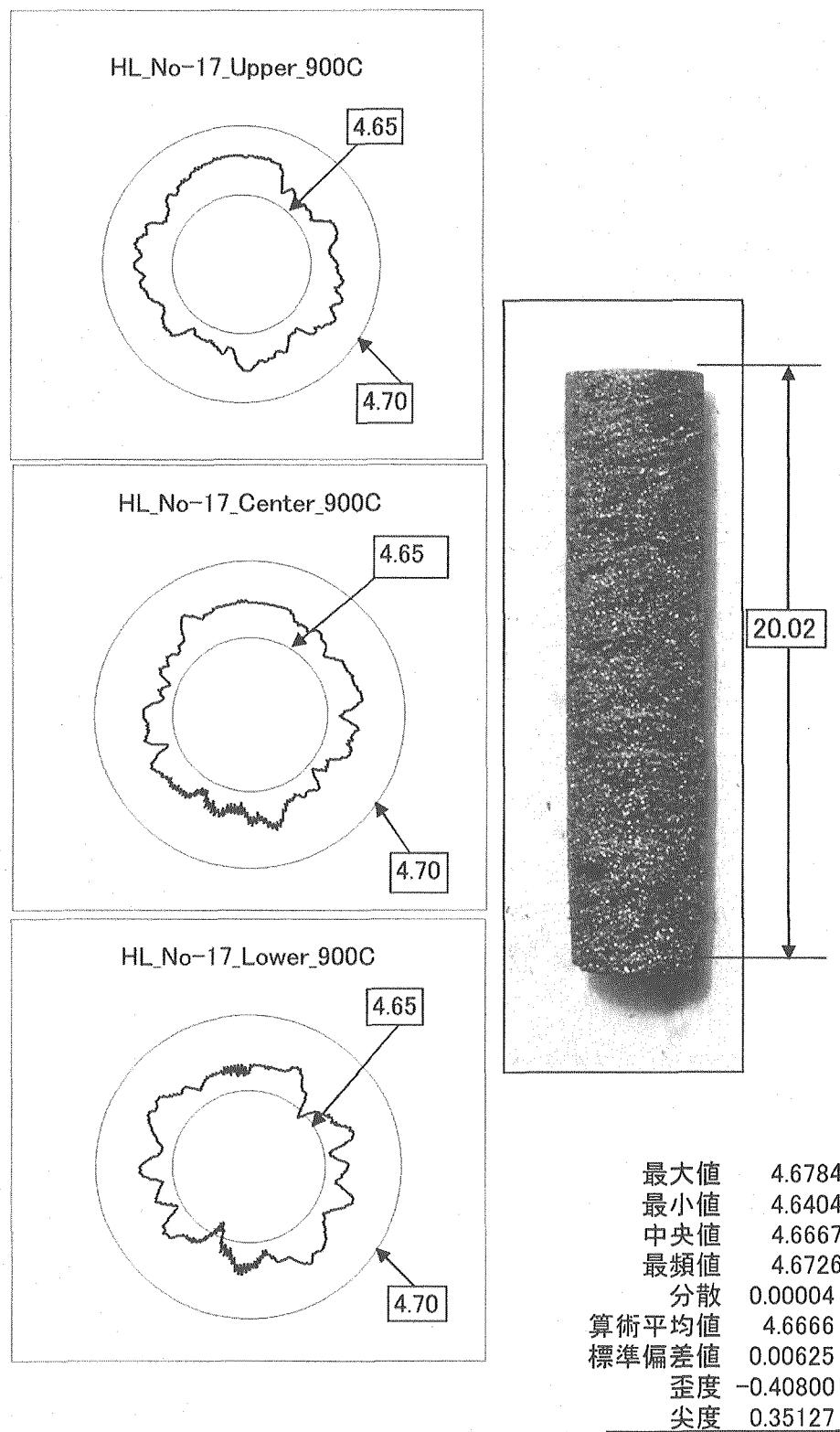


Fig.86 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

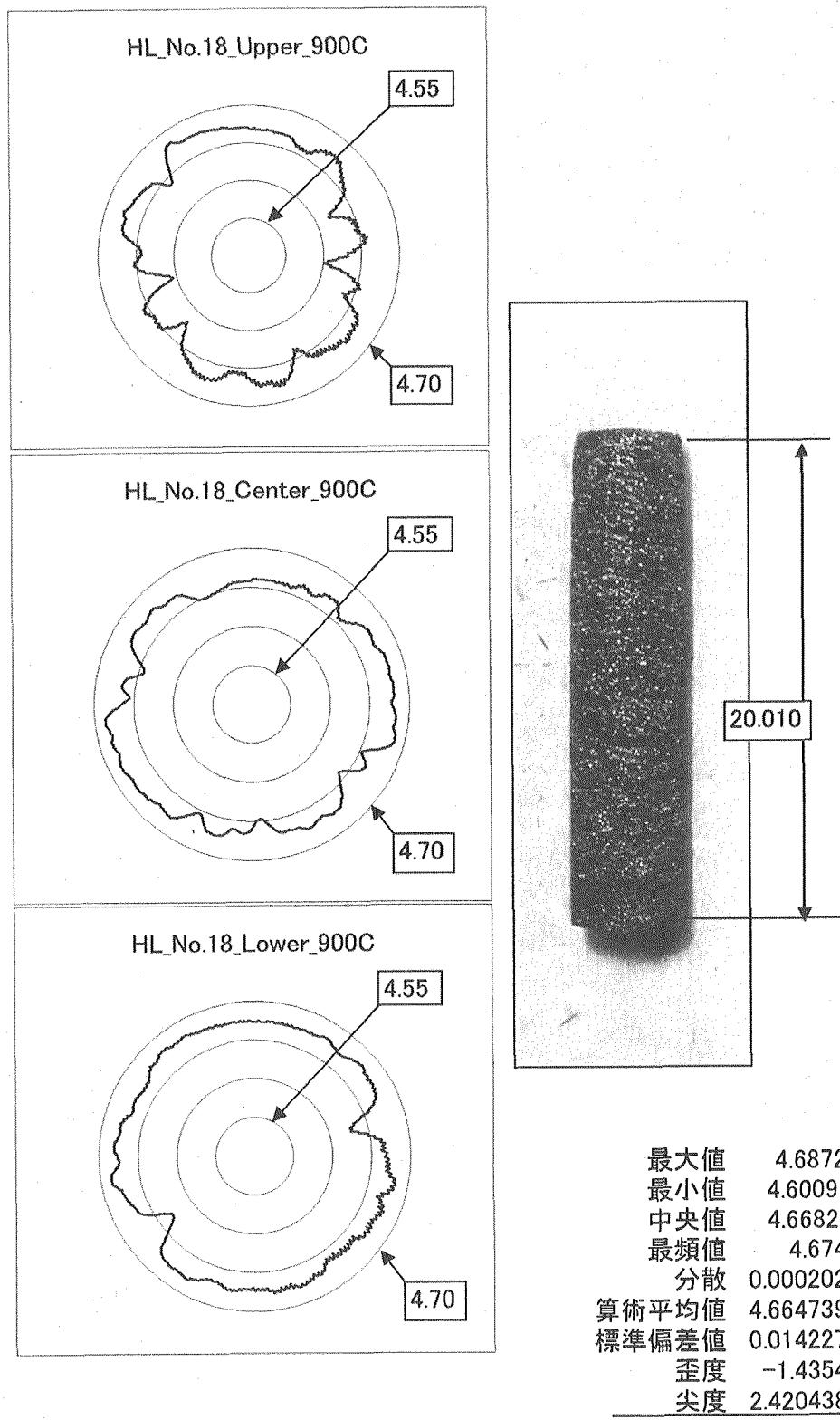


Fig.87 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(PCC-2S\_vertical)

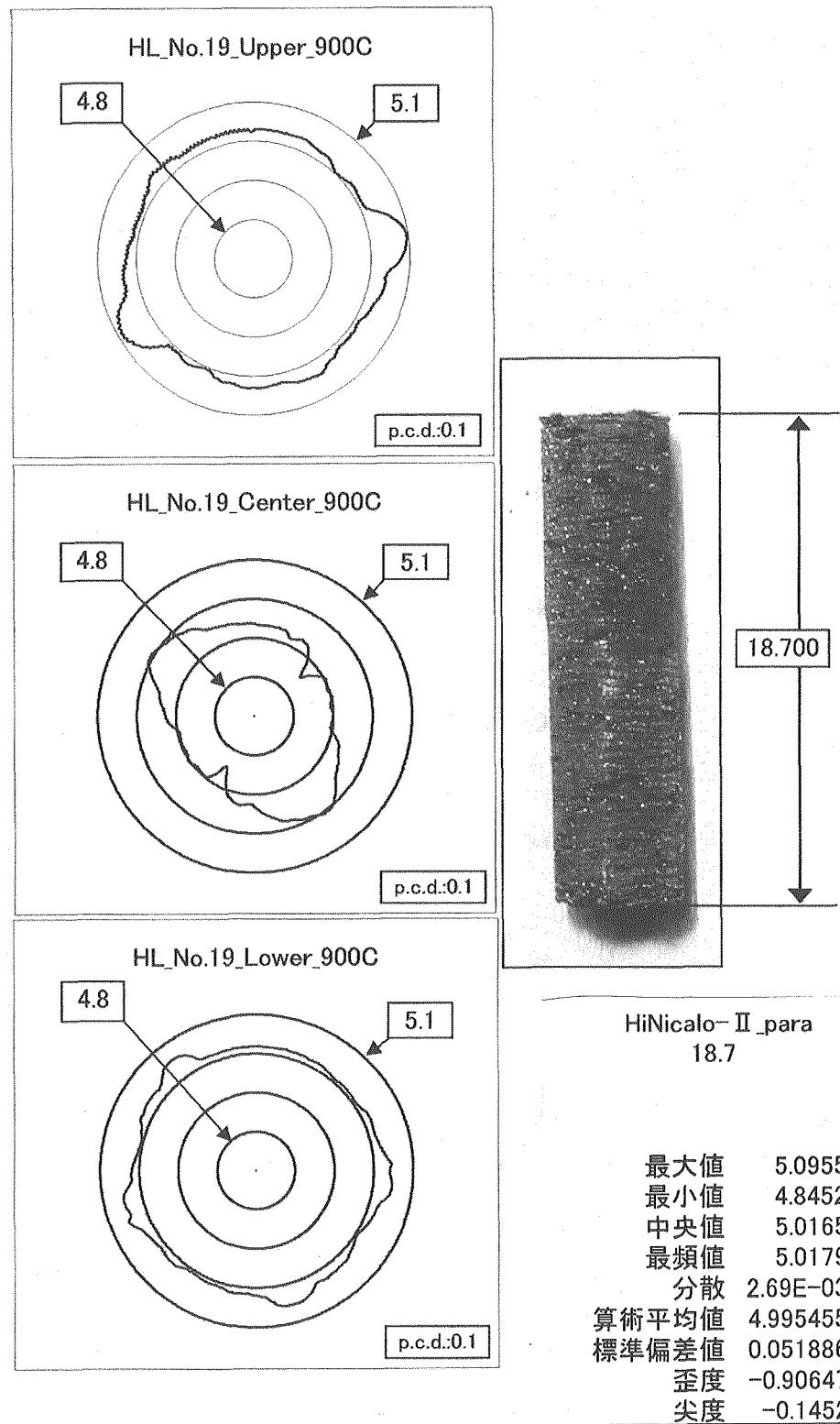


Fig.88 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-II\_vertical)

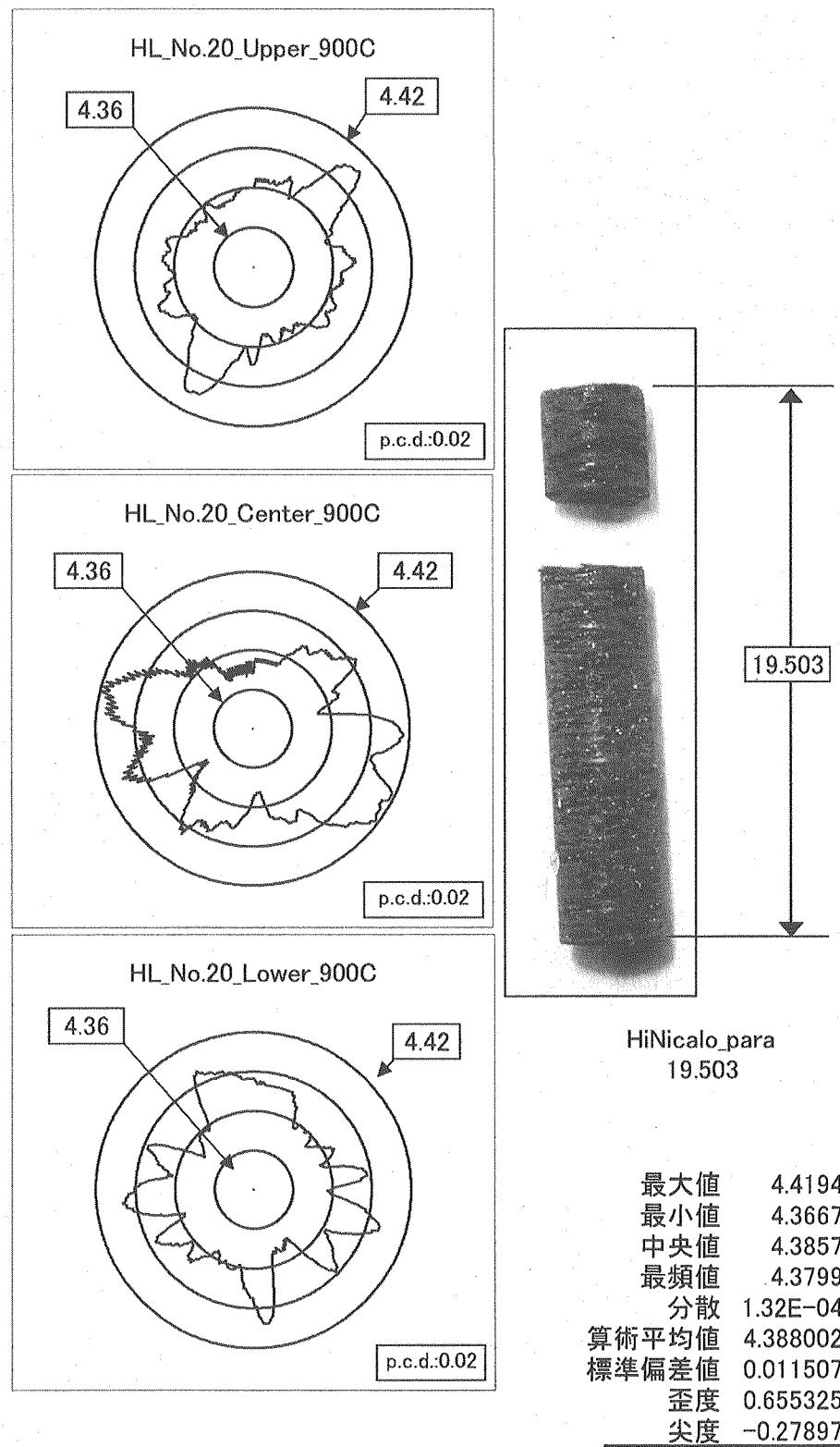


Fig.89 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo\_vertical).

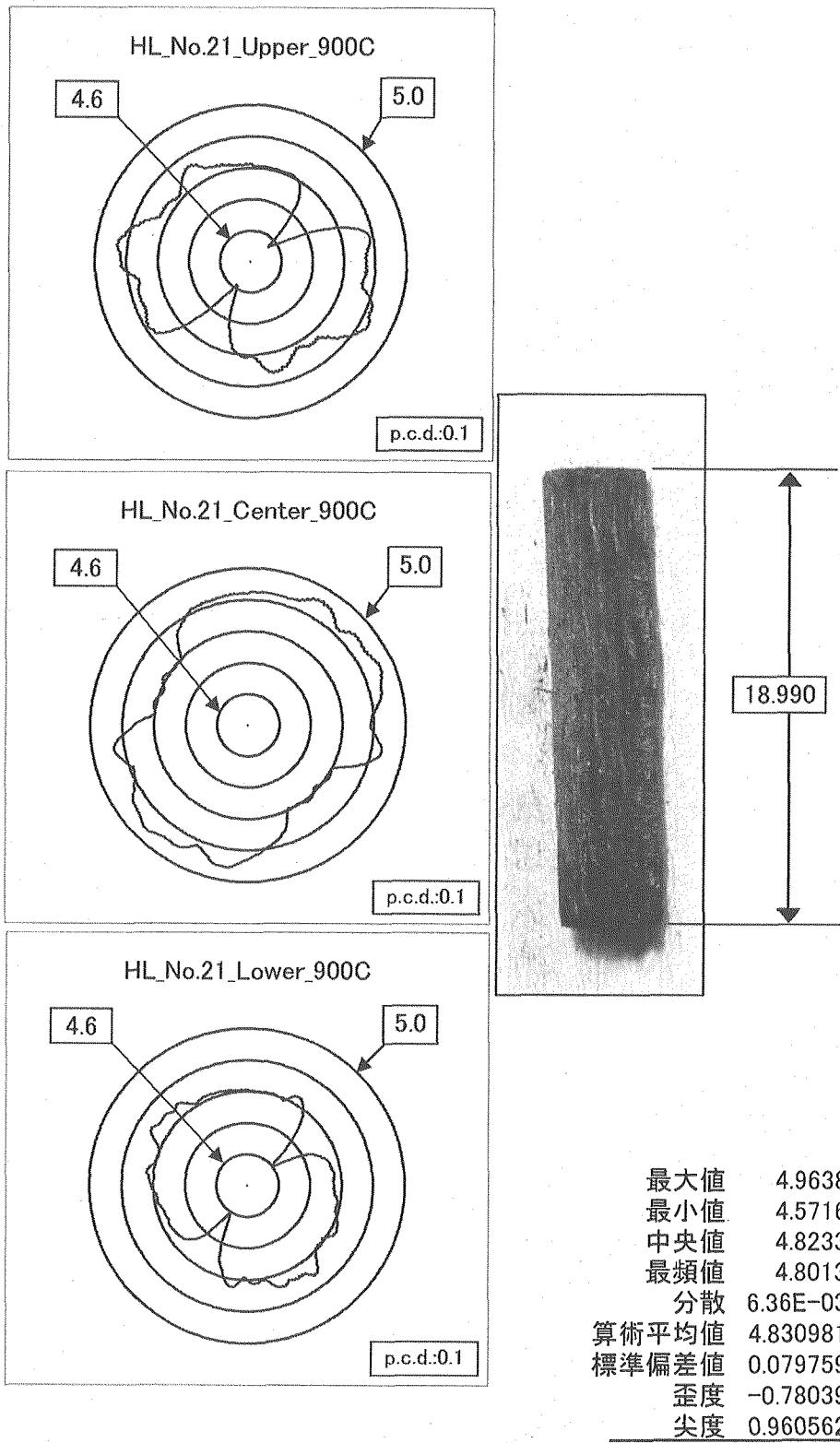


Fig.90 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-II\_parallel).

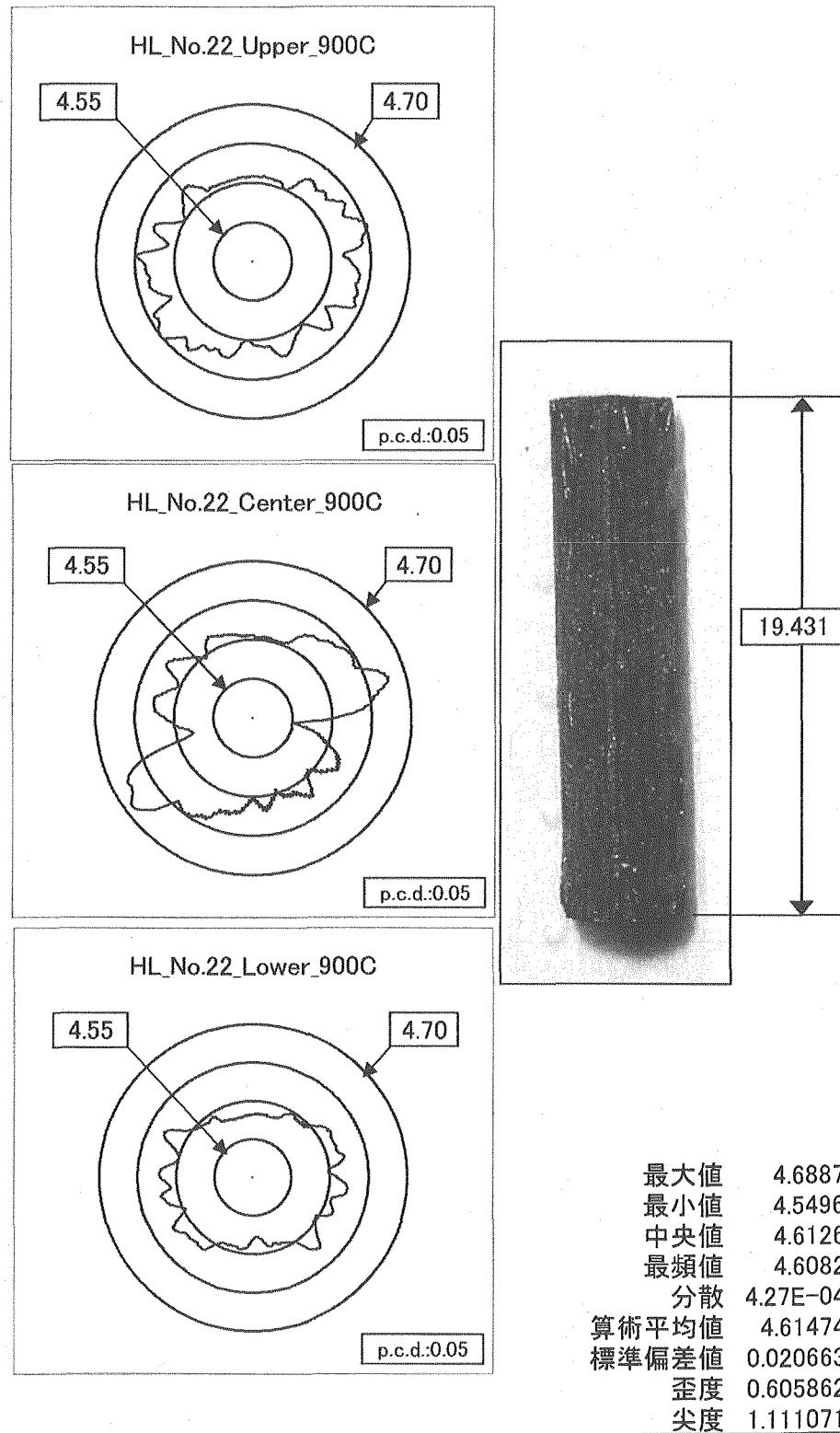


Fig.91 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-parallel).

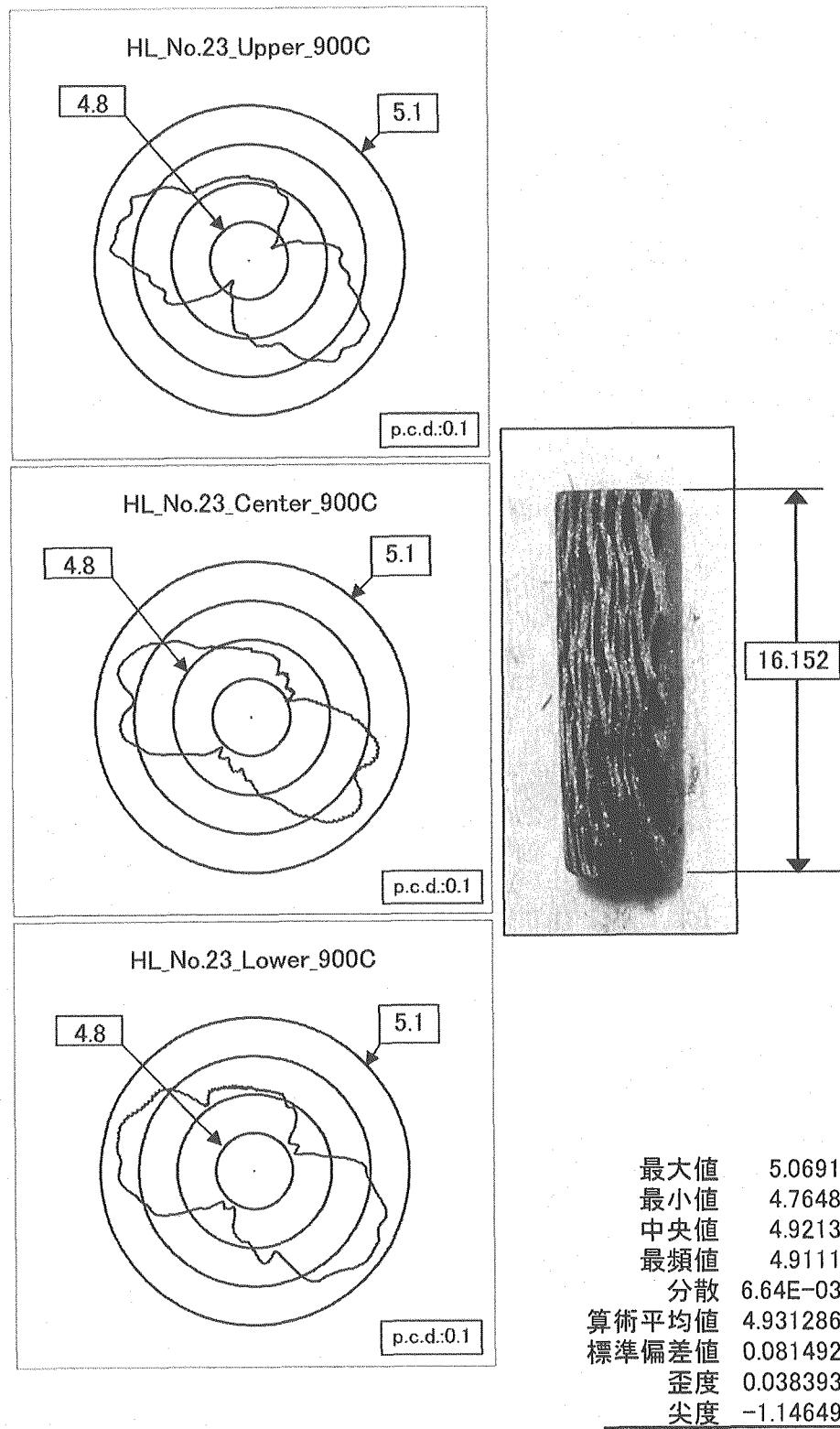


Fig.92 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite(CX-270G\_parallel).

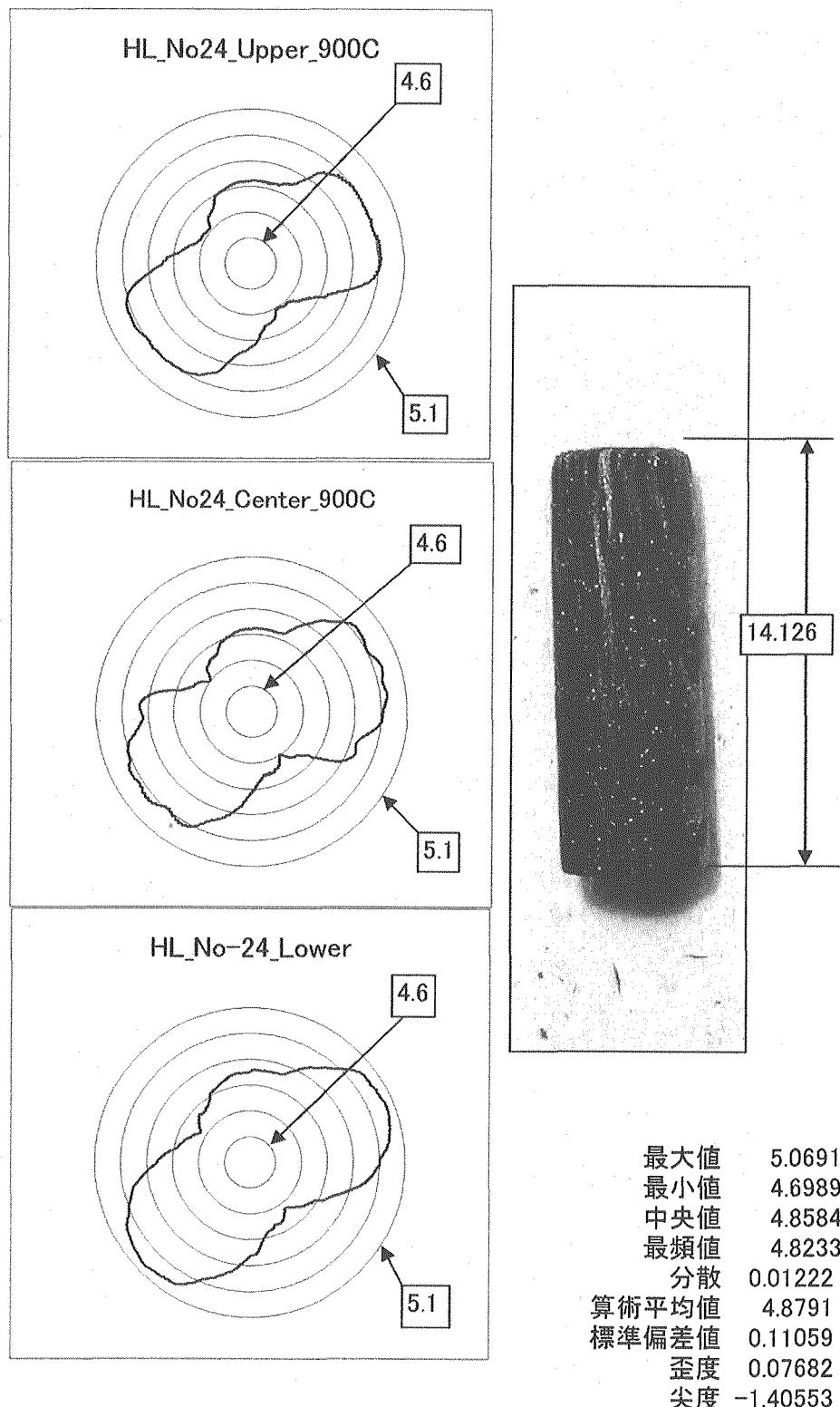


Fig.93 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CCM-190C\_parallel)

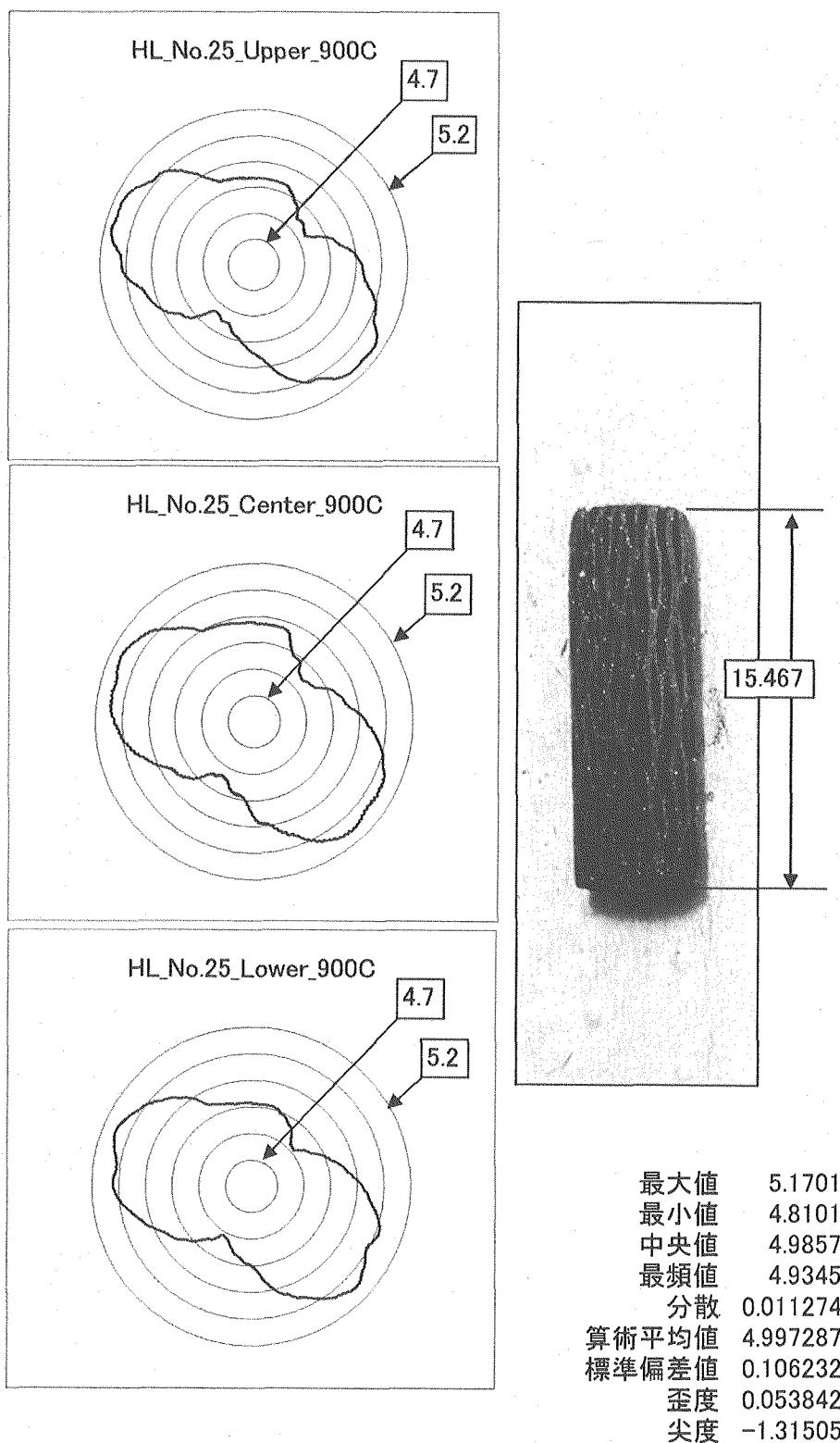


Fig.94 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite(CX-2702G\_parallel).

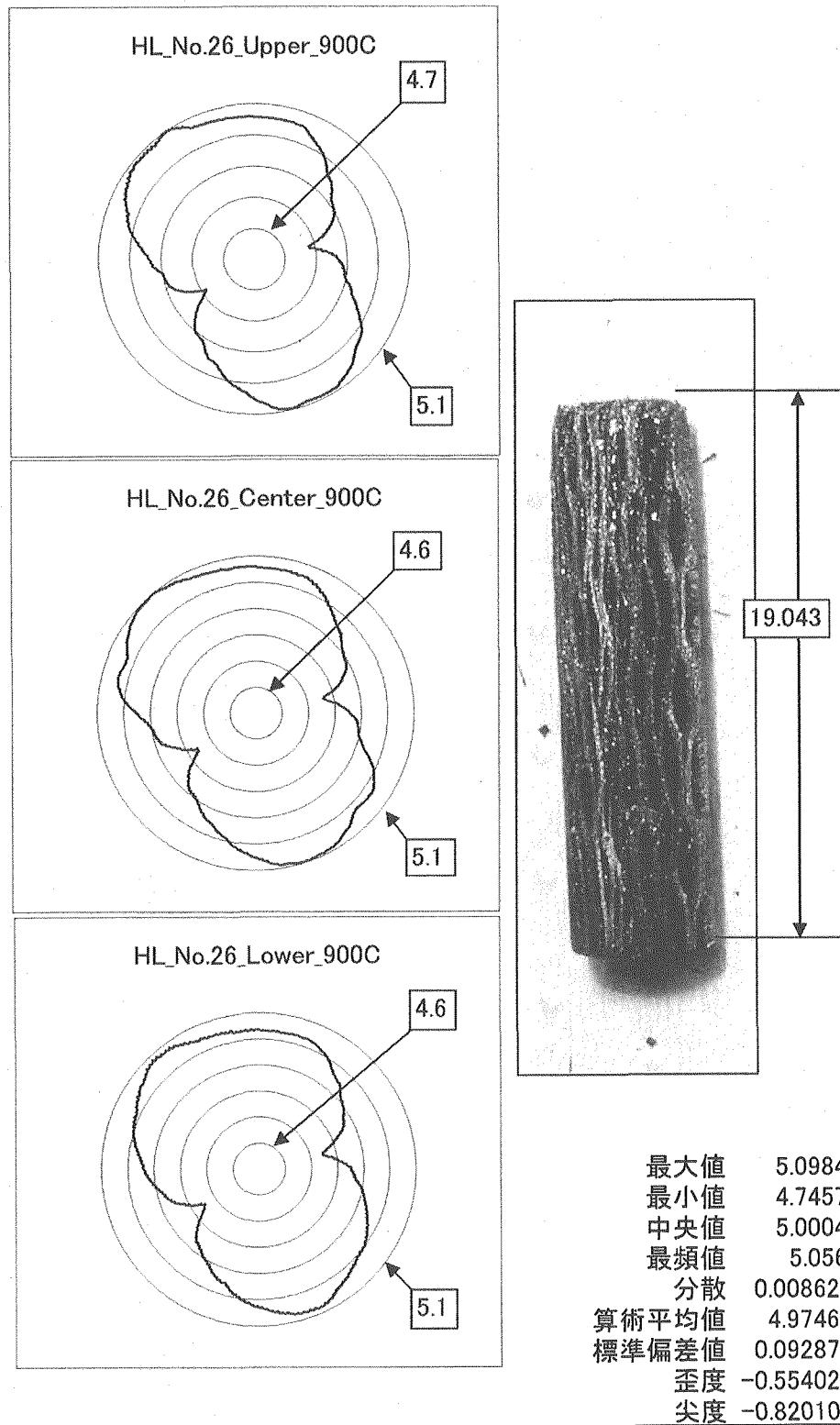


Fig.95 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900°C for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CCM-190G\_parallel)

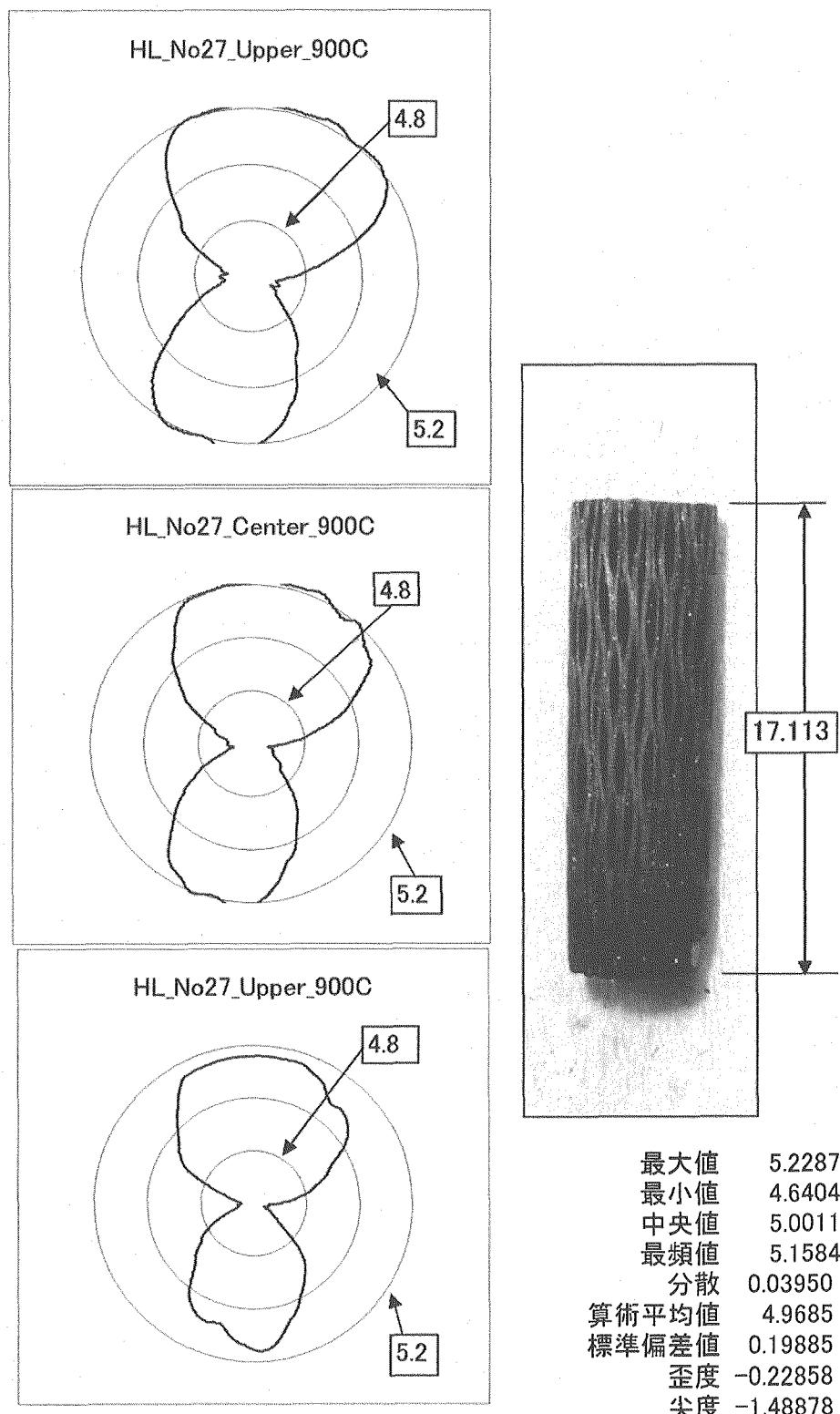


Fig.96 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CX-270\_parallel)

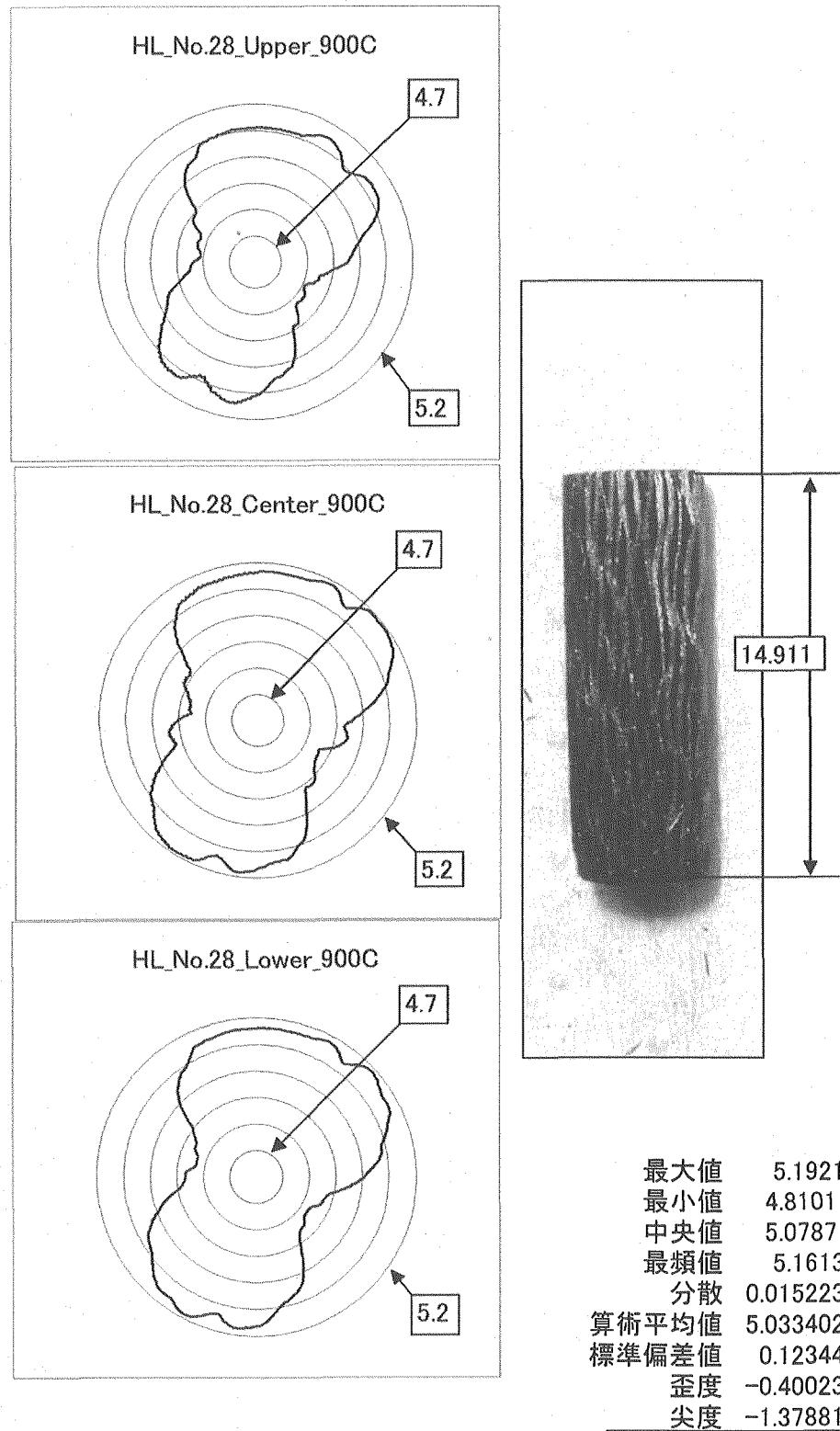


Fig.97 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CX-2702\_parallel)

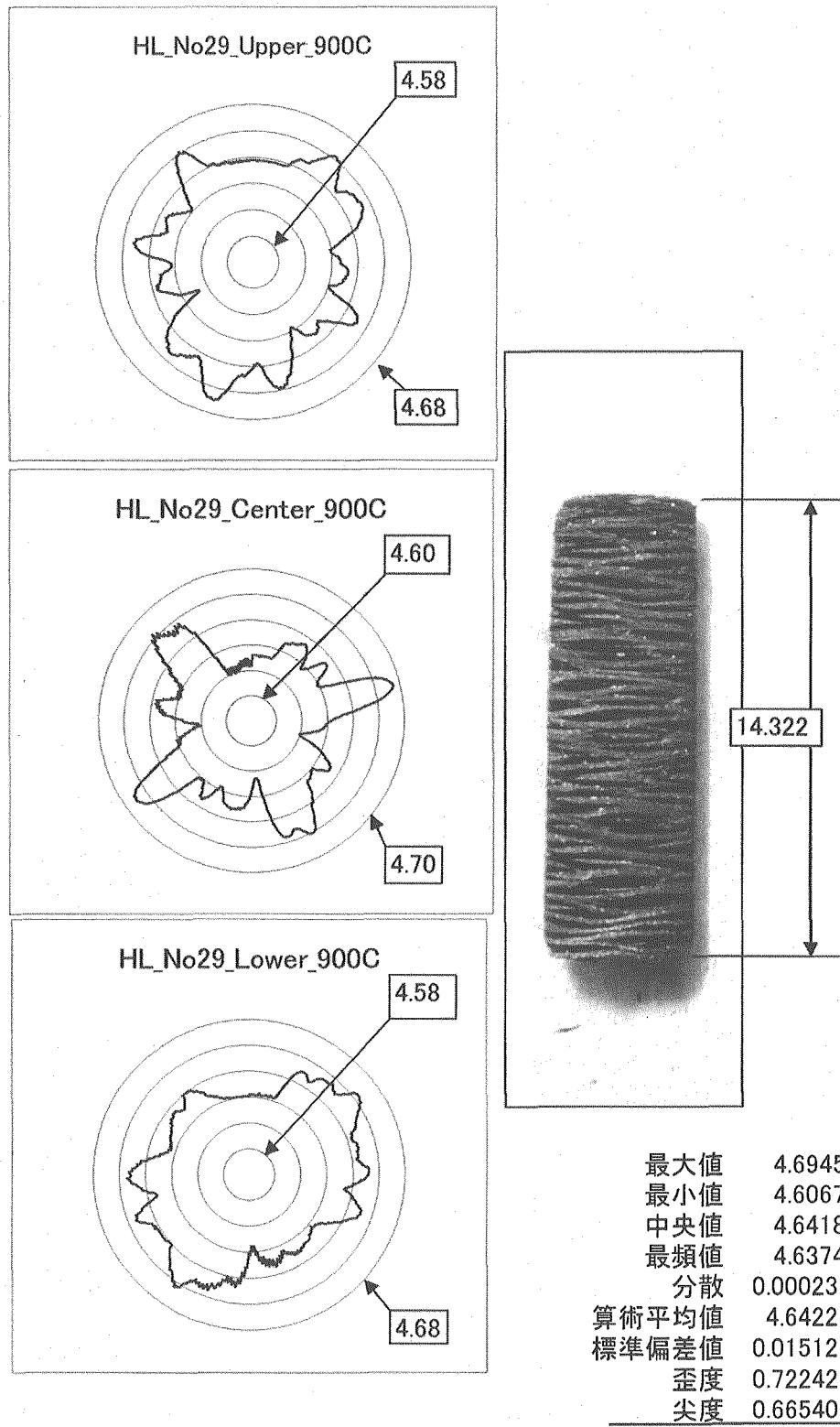


Fig.98 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CX-2702\_vertical)

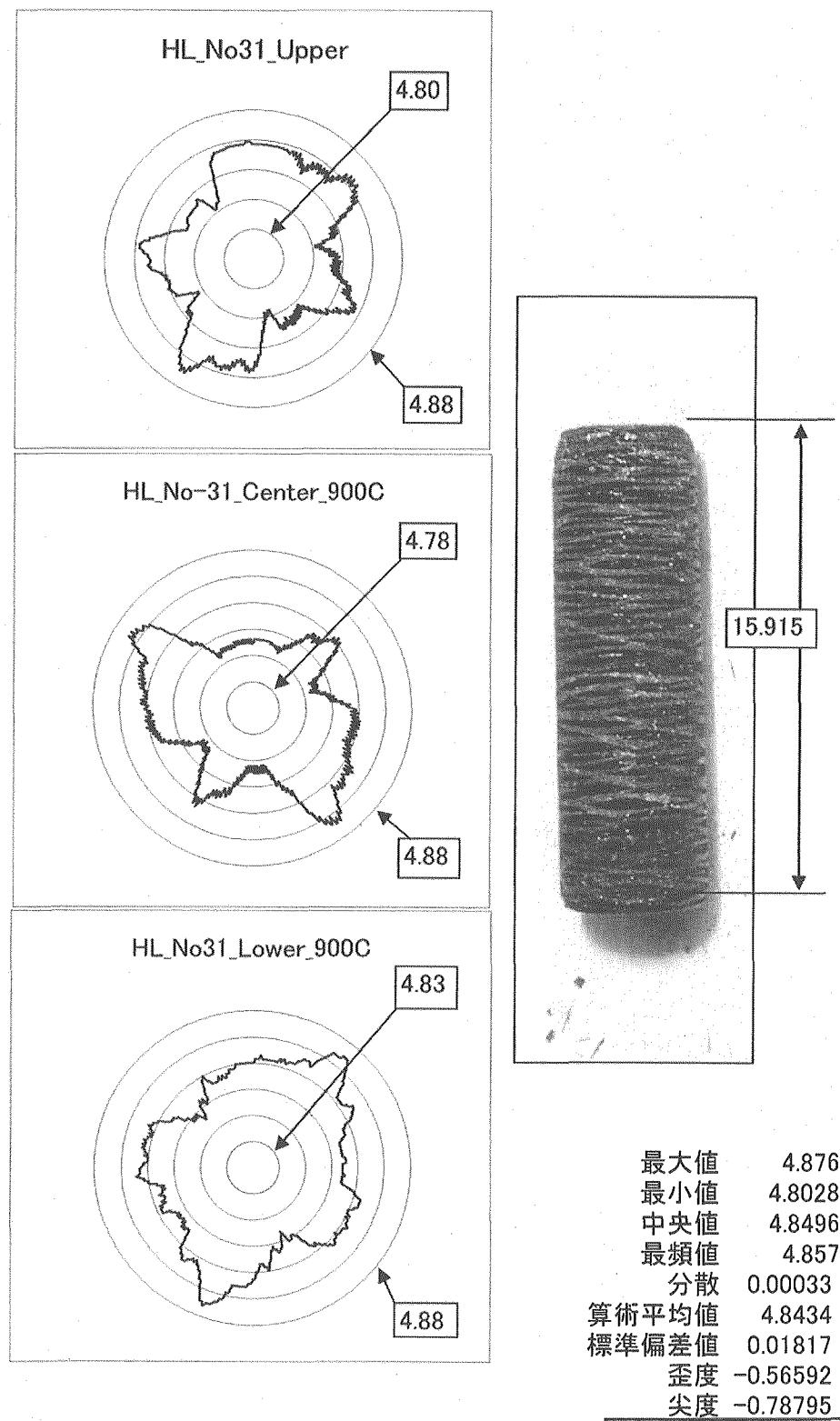


Fig.99 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite.  
(CX-270G\_vertical)

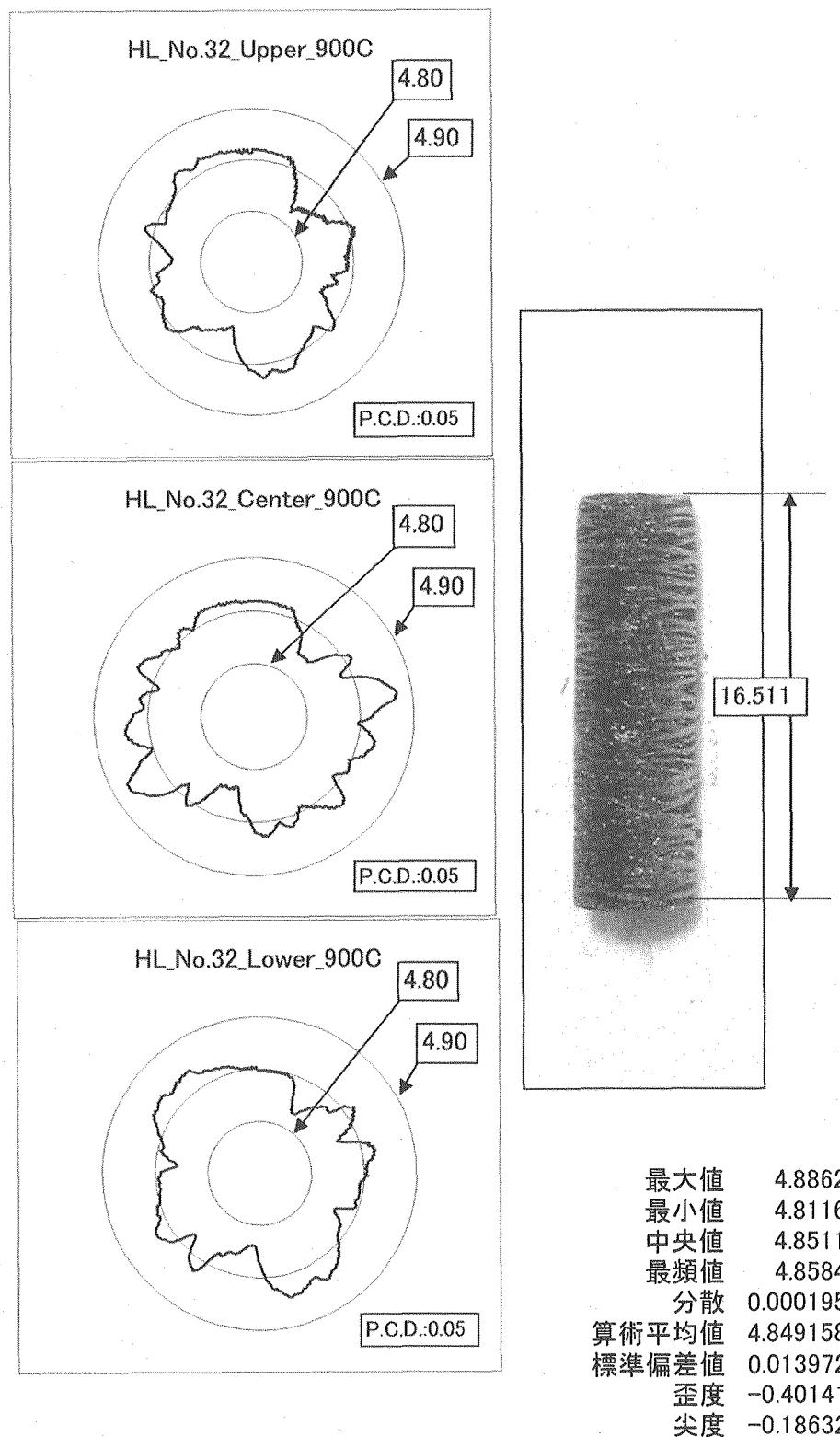


Fig.100 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional carbon/carbon composite(CCM-190C\_vertical).

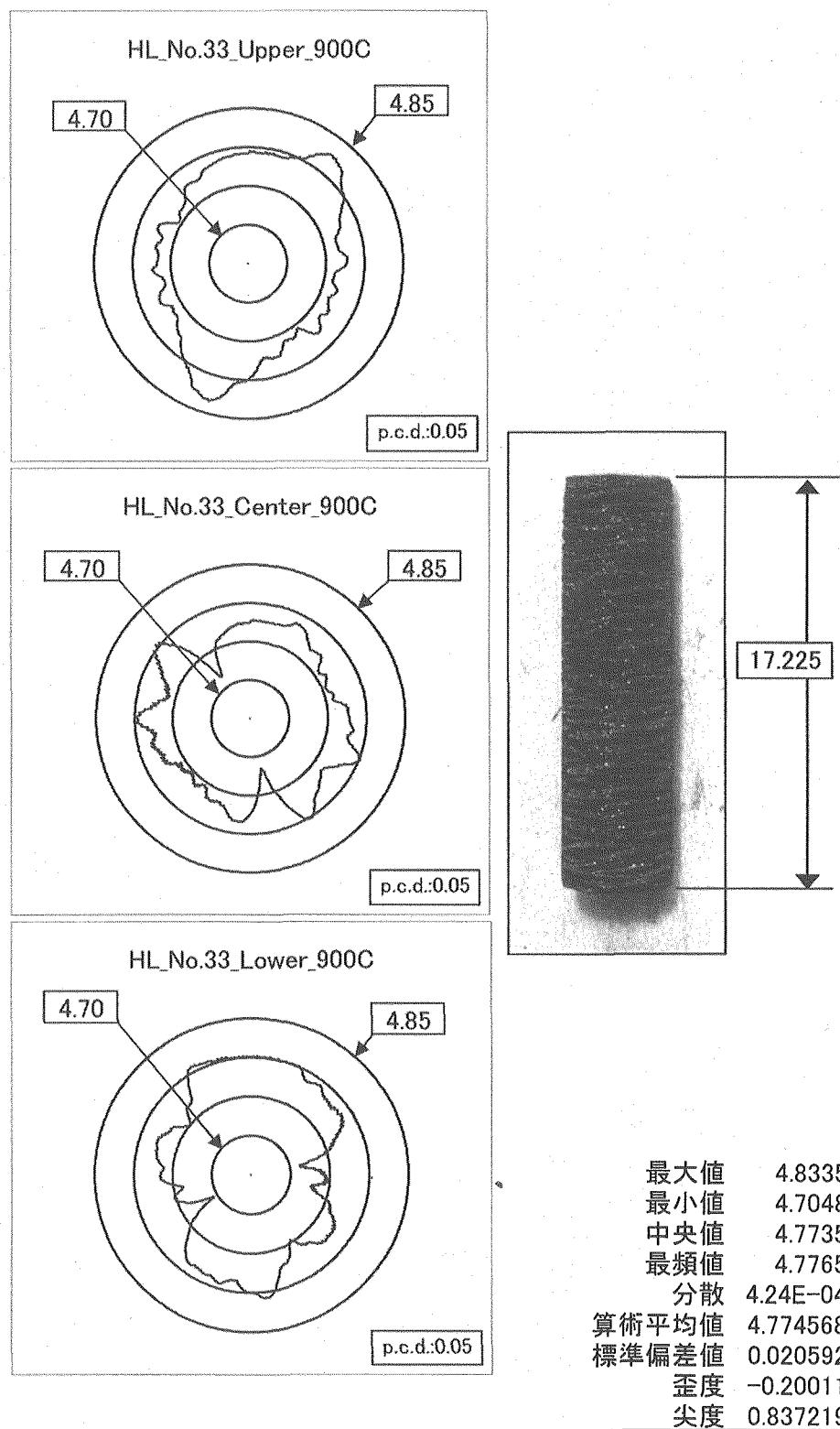


Fig.101 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional carbon/carbon composite(CX-270\_vertical).

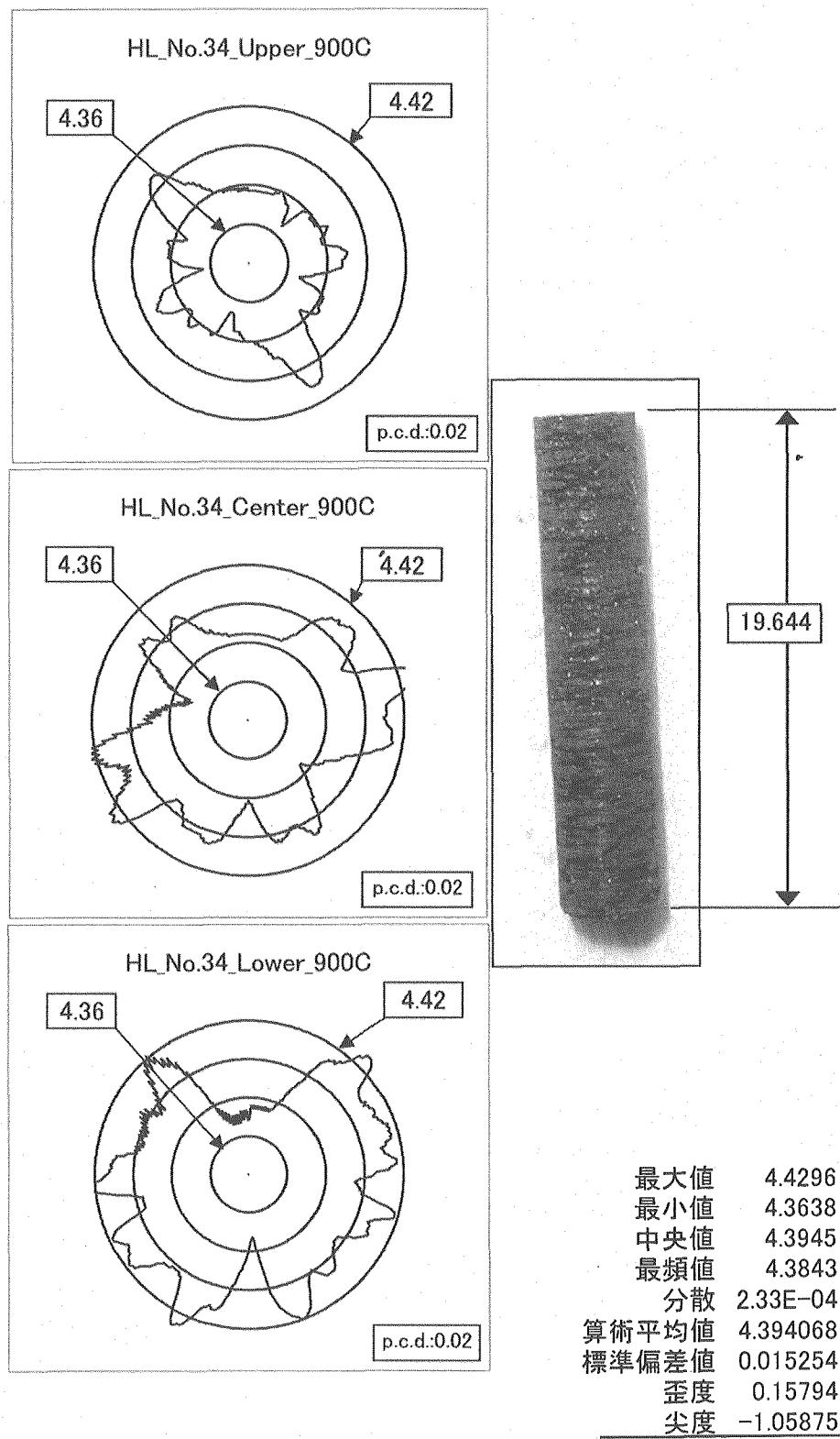


Fig.102 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-vertical).

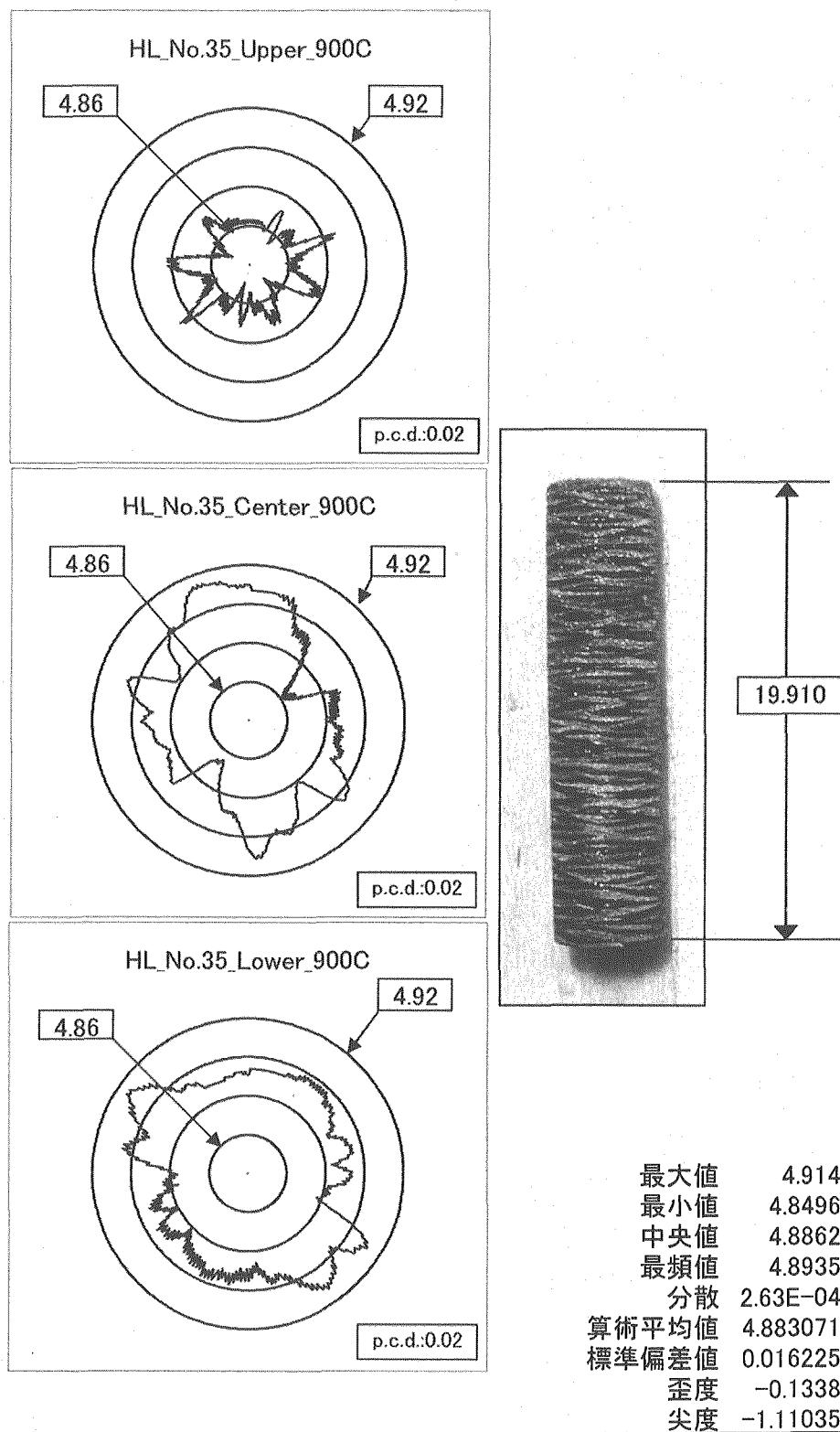


Fig.103 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C for 2-dimensional carbon/carbon composite(CCM-190G\_vertical).

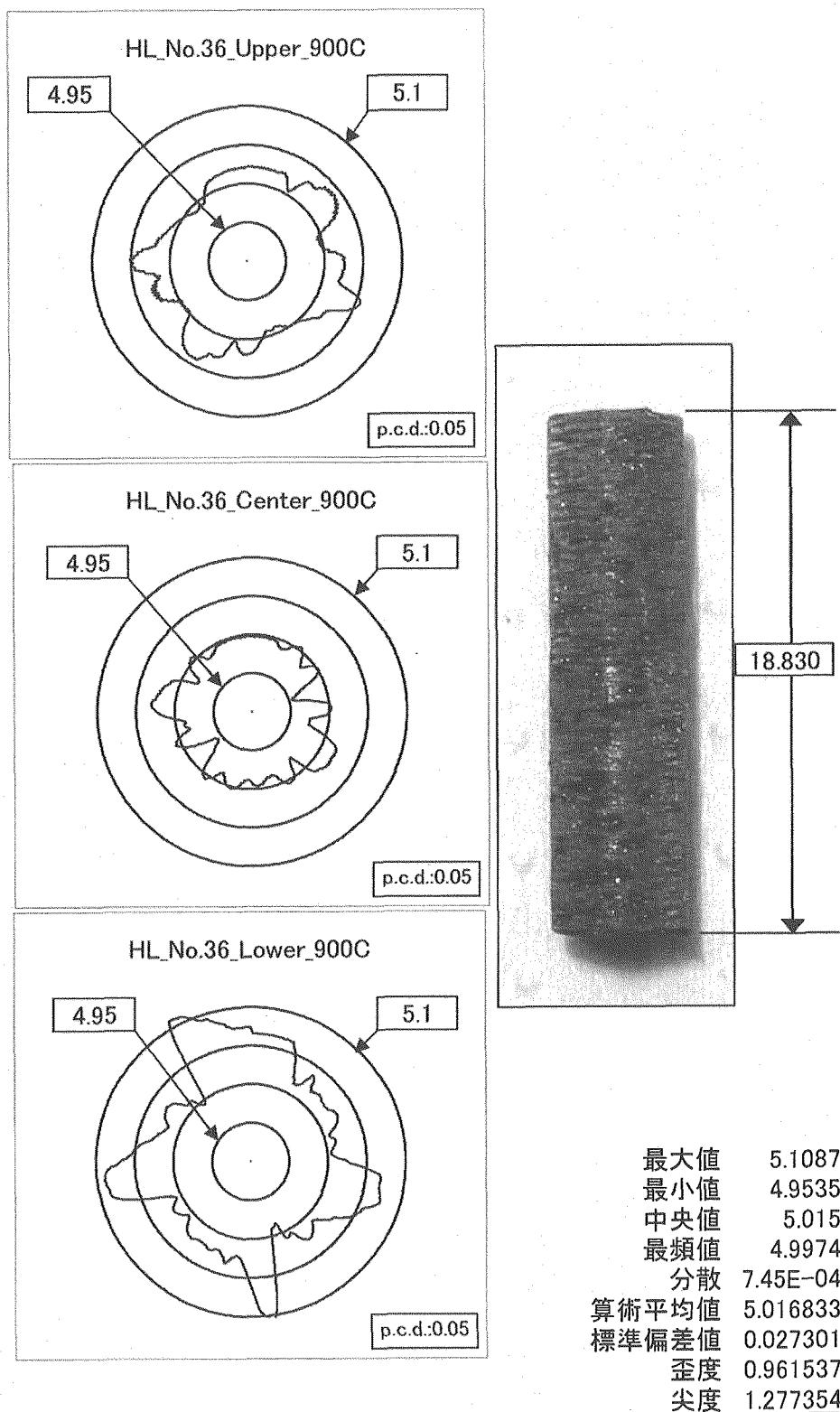


Fig.104 Profile in diameter of the irradiated specimen at 900C  
for 2-dimensional SiC/SiC composite(Hi\_Nicalo-II\_vertical)

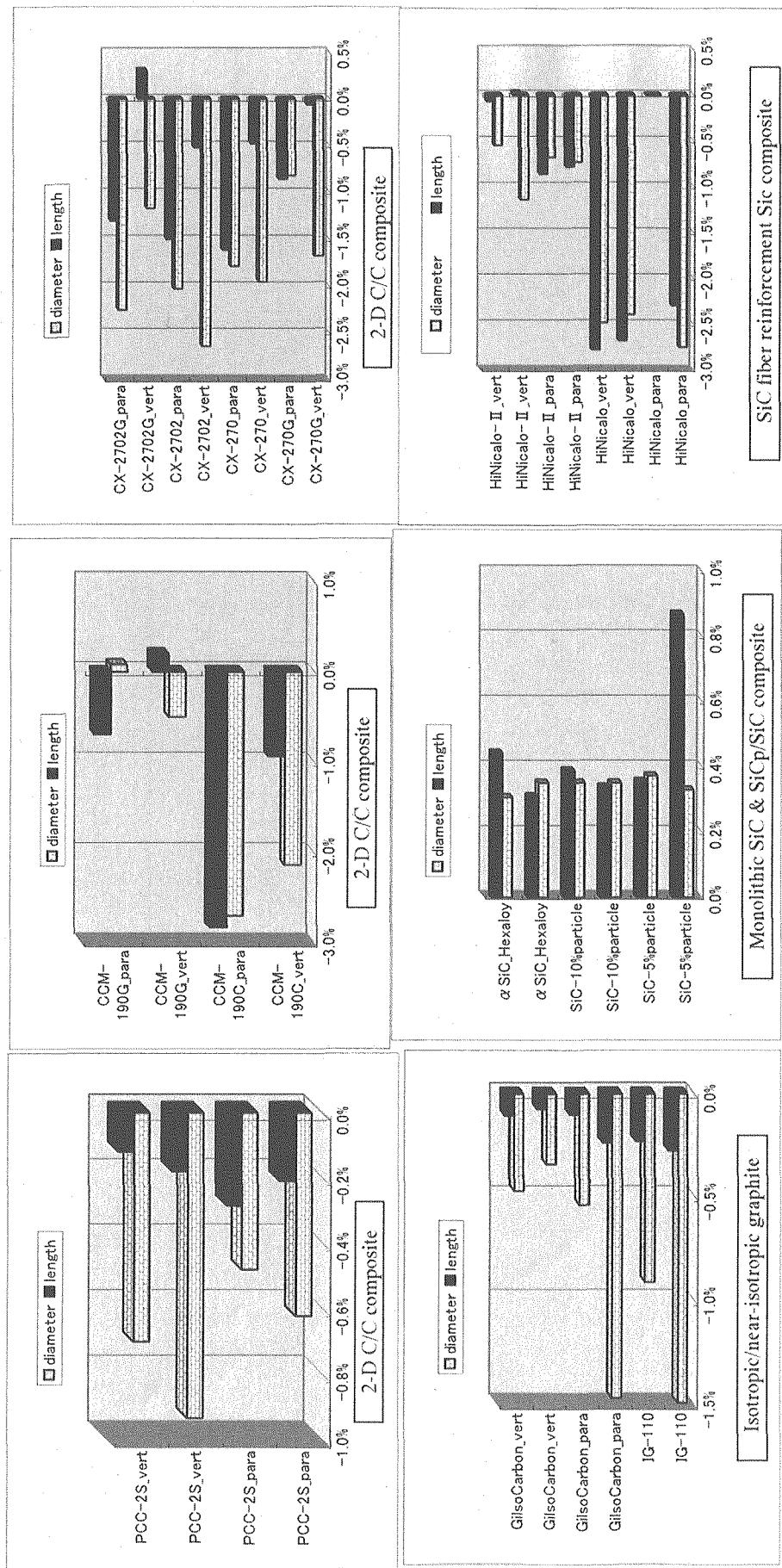


Fig.105 Irradiation induced dimensional change of the ceramics materials at 1003K.  
(700C\_98M-41A)

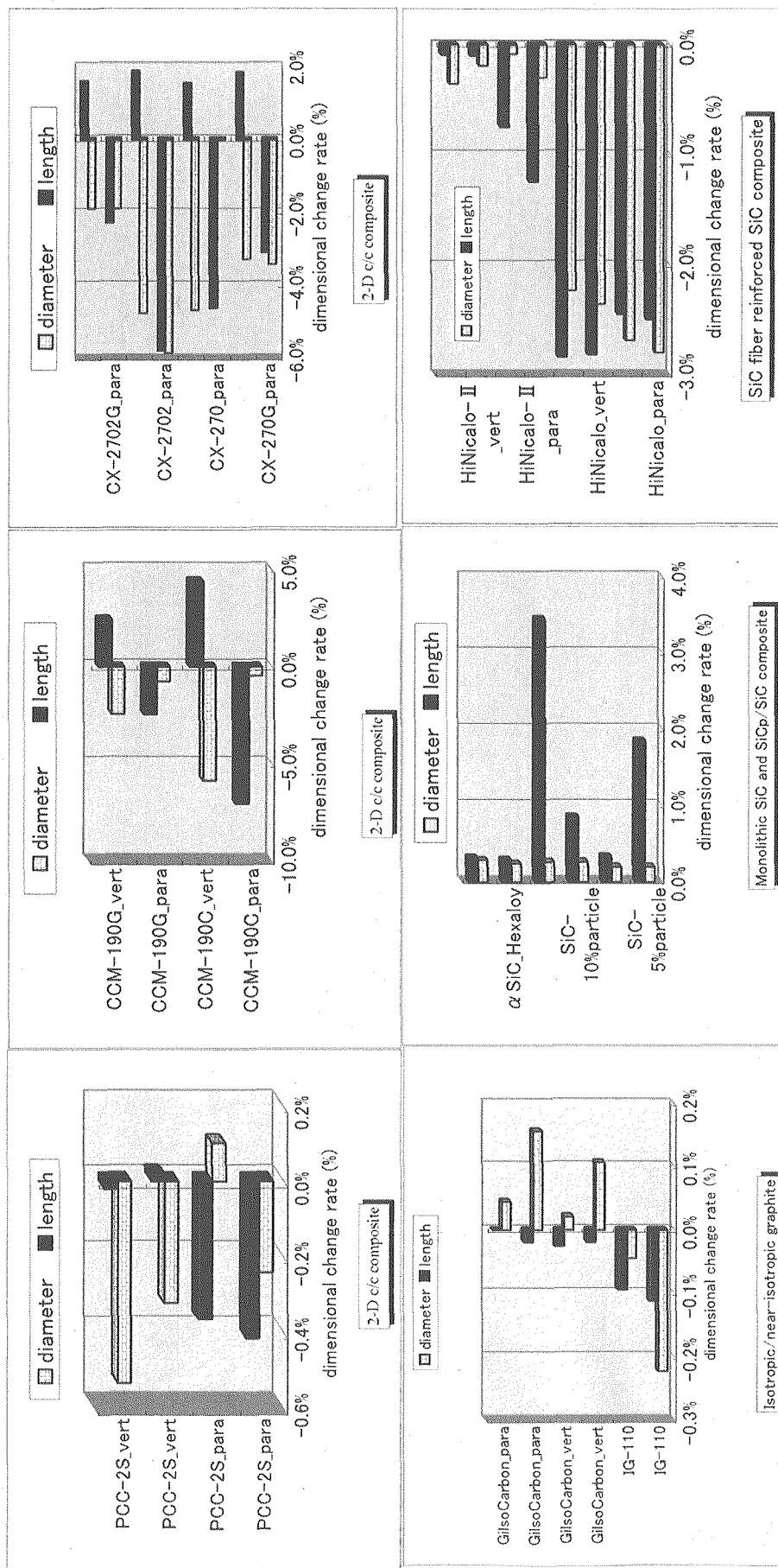


Fig. 106 Irradiation induced dimensional change of the ceramics materials at 1078K.  
(800C\_98M-41A)

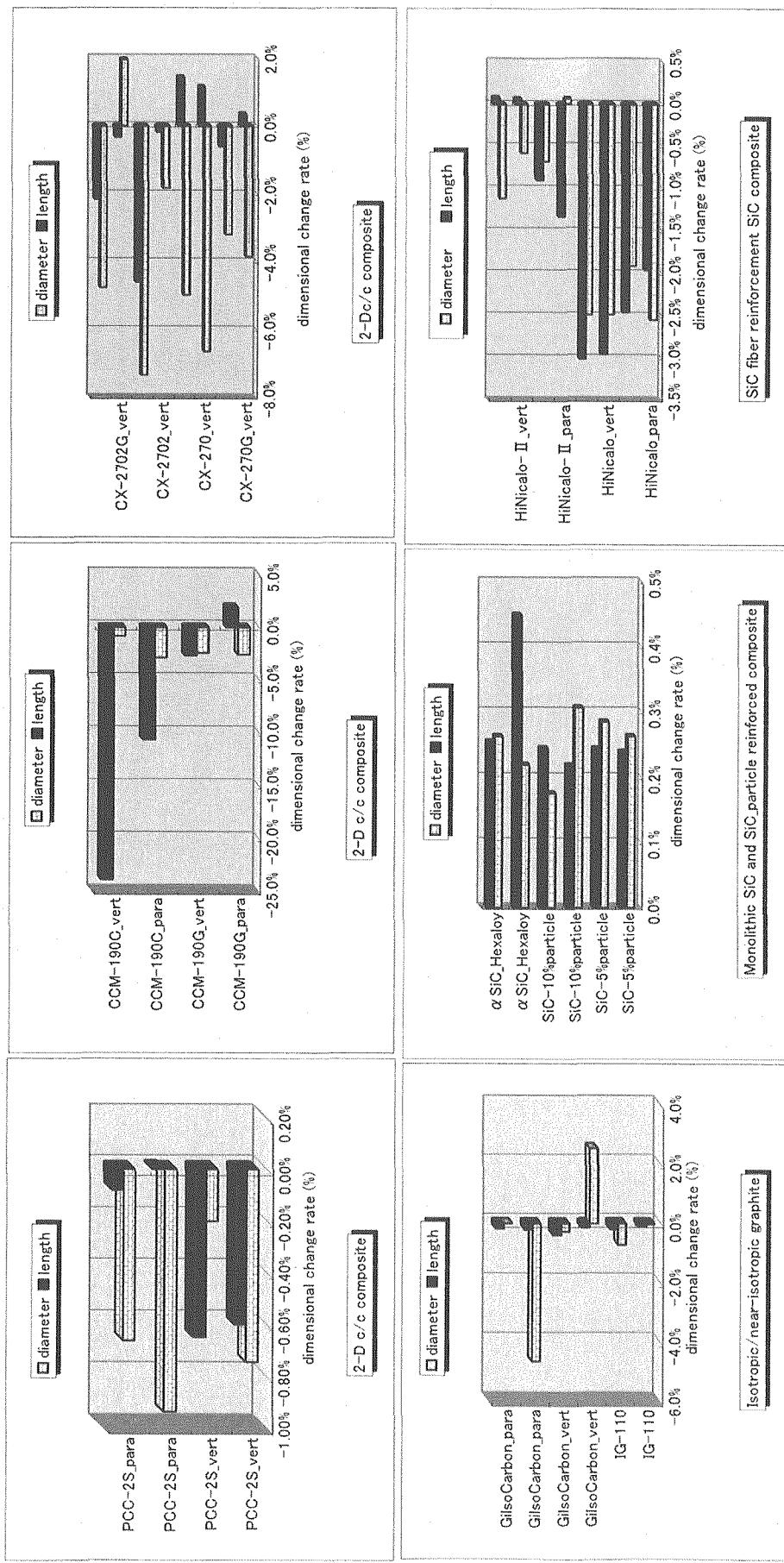


Fig. 107 Irradiation induced dimensional change of the ceramics materials at 1175K.  
(900C\_98M-41A)

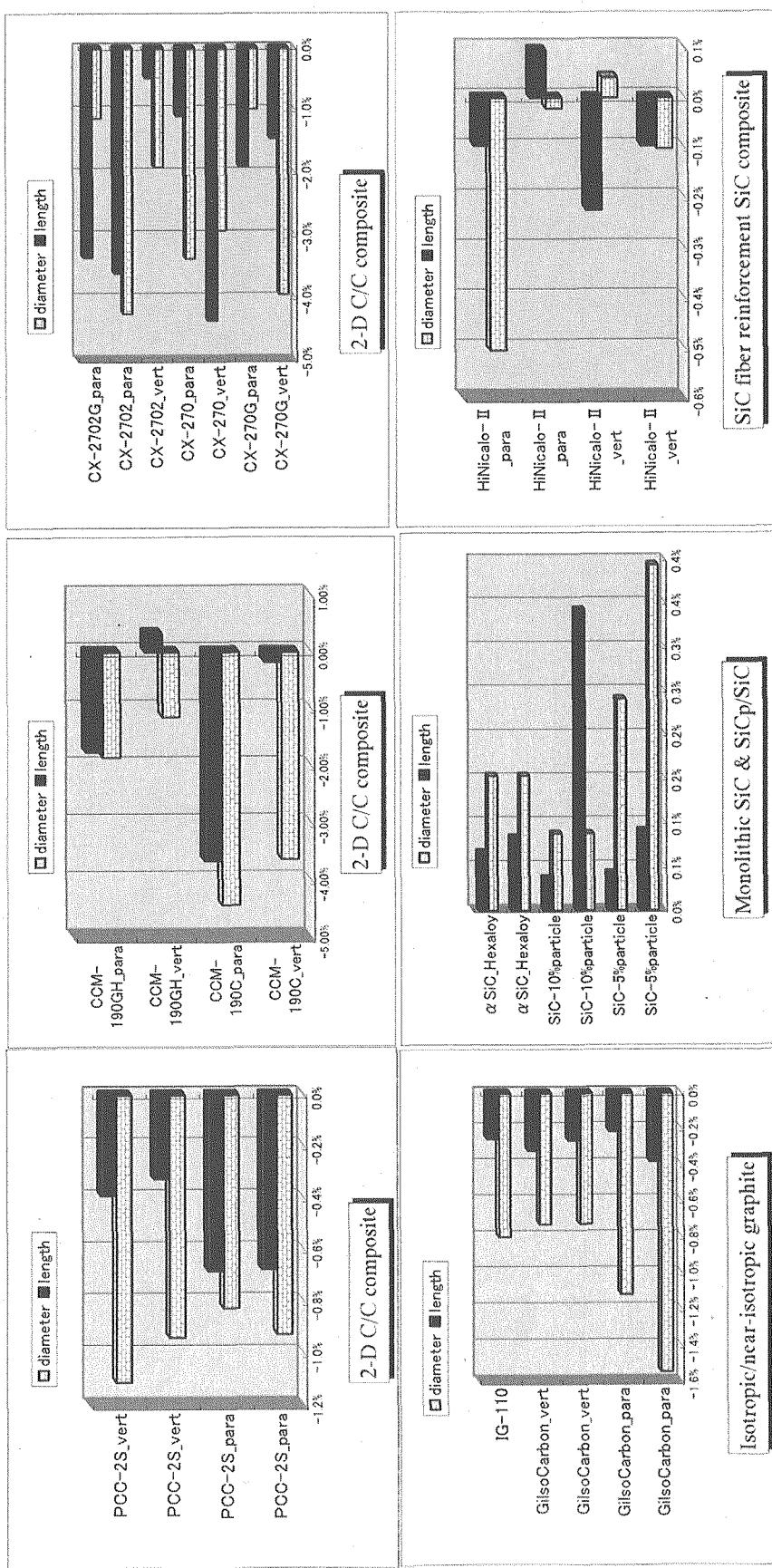


Fig. 108 Irradiation induced dimensional change of the ceramics materials at 1321K.  
(1000C\_99M-30A)

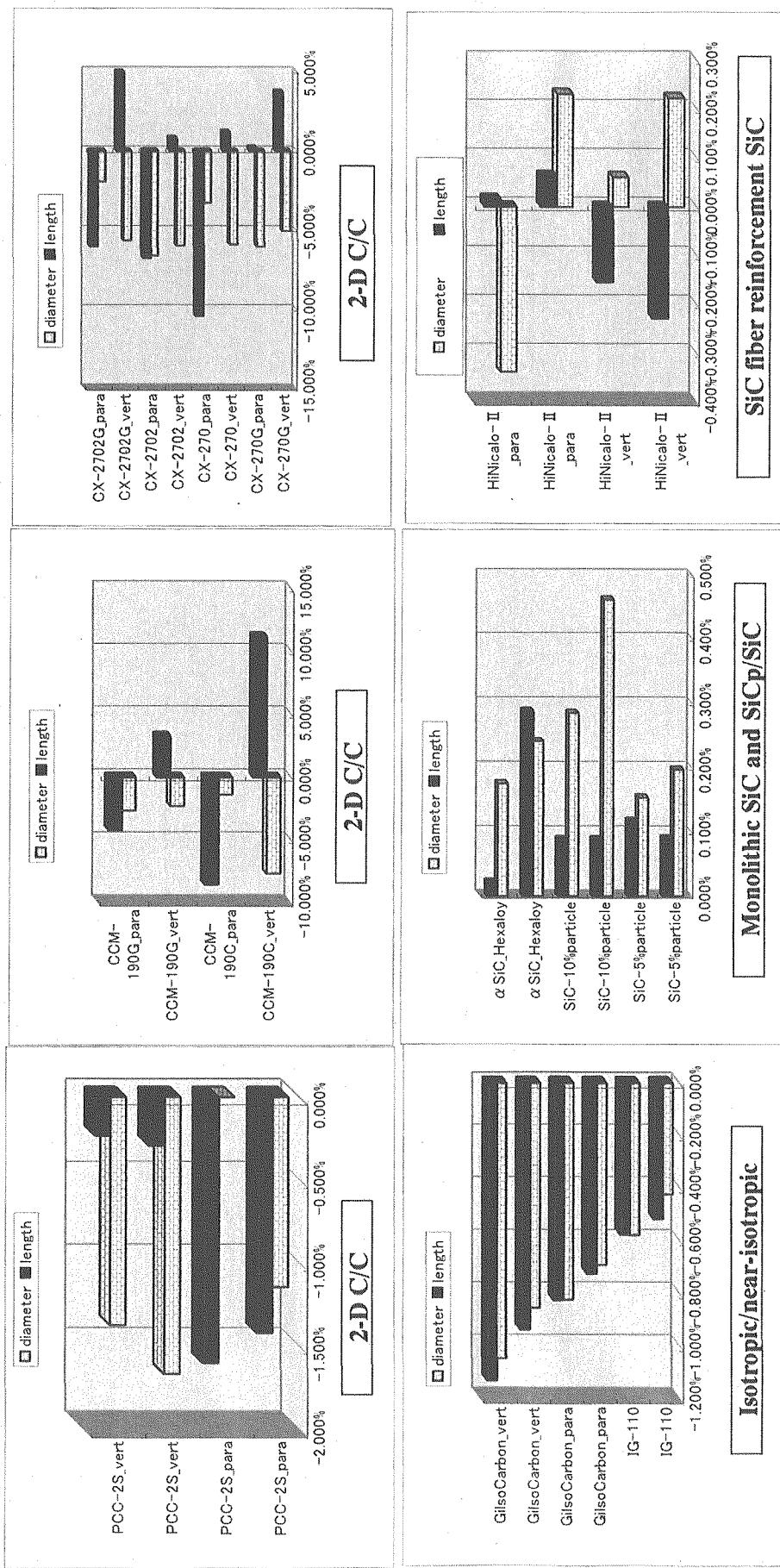
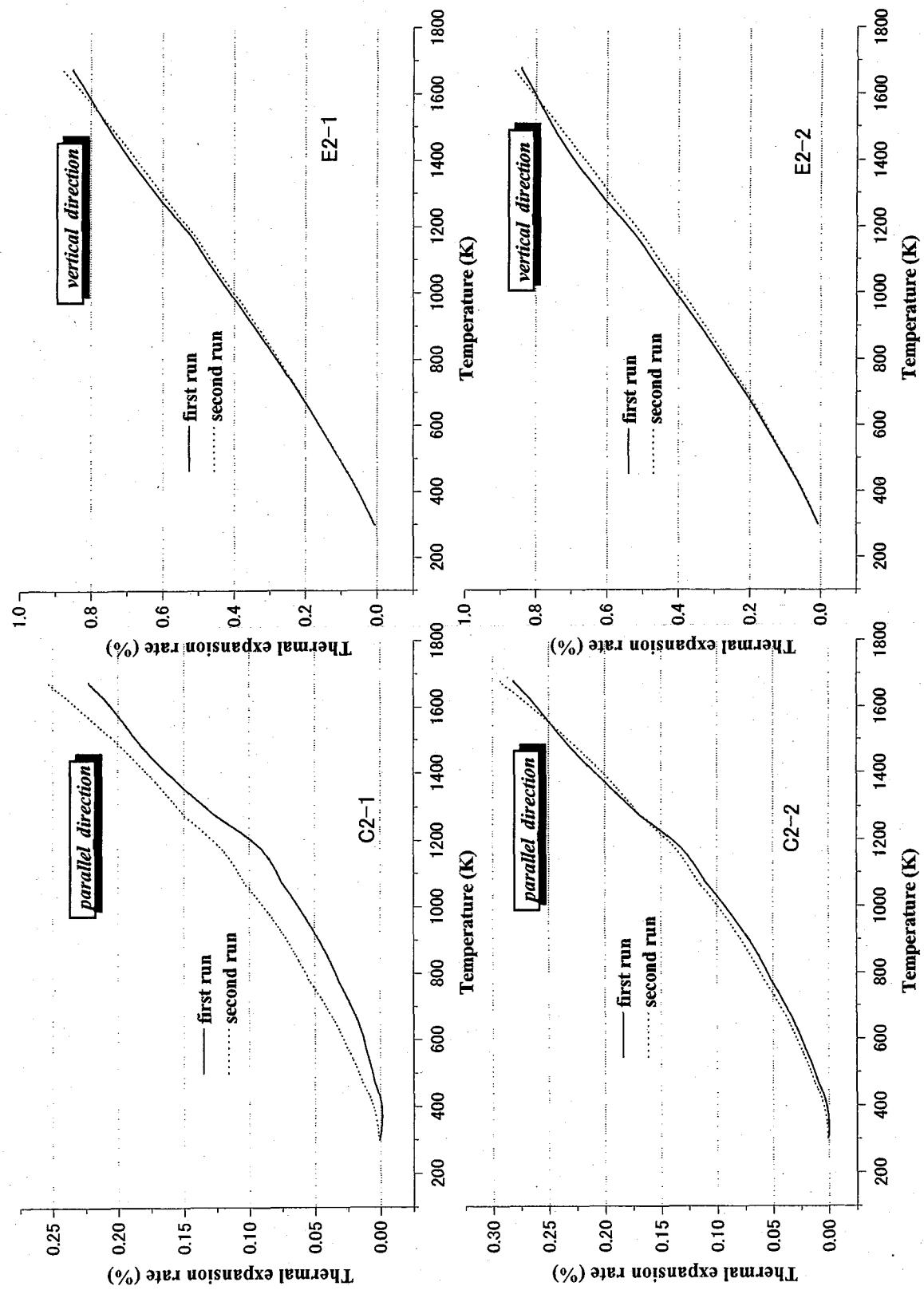


Fig.109 Irradiation induced dimensional change of the ceramics materials at 1473K.  
(1200C\_99M-30A)



**Fig.110** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:PCC-2S, temperature:1003K, neutron fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )

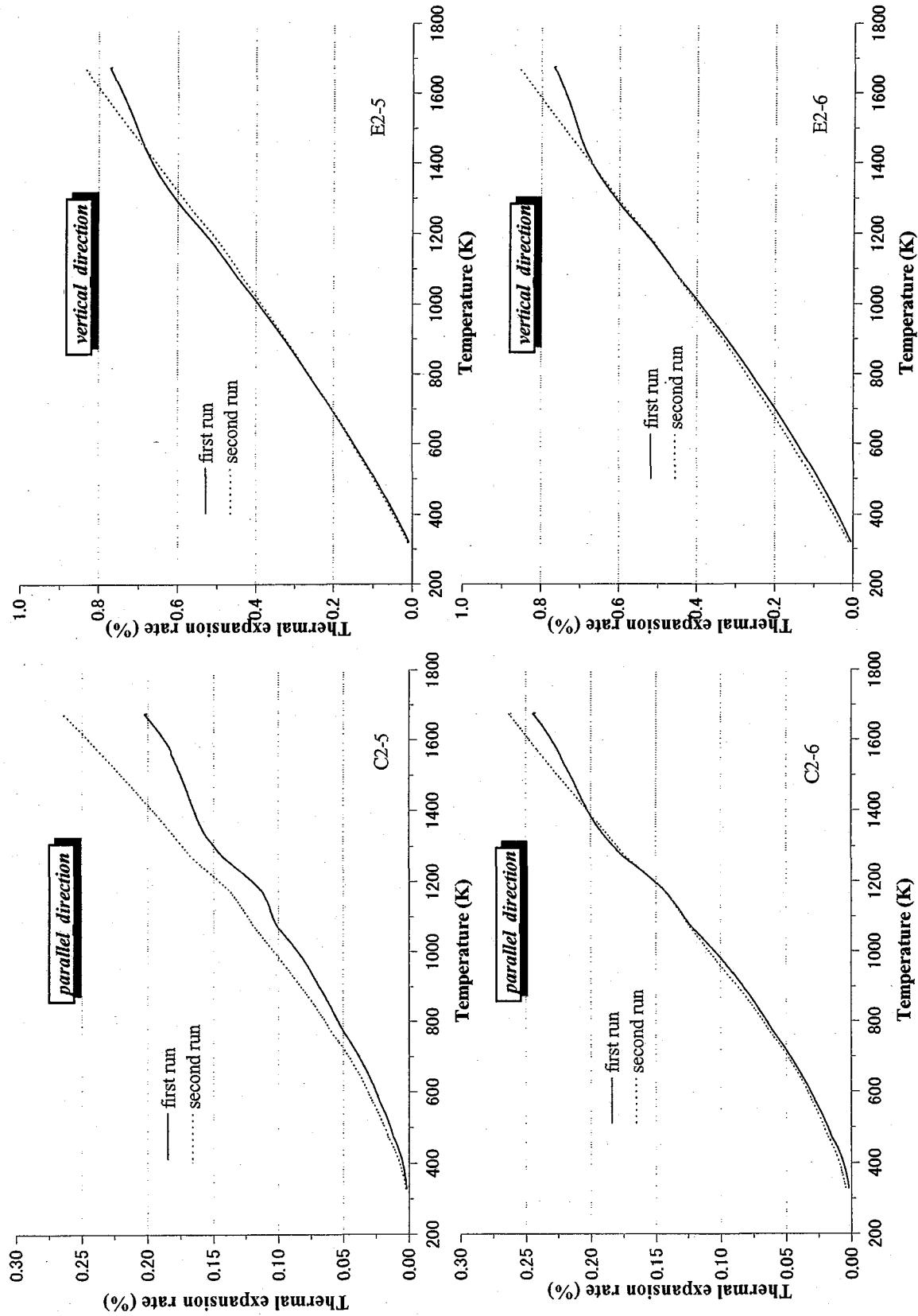
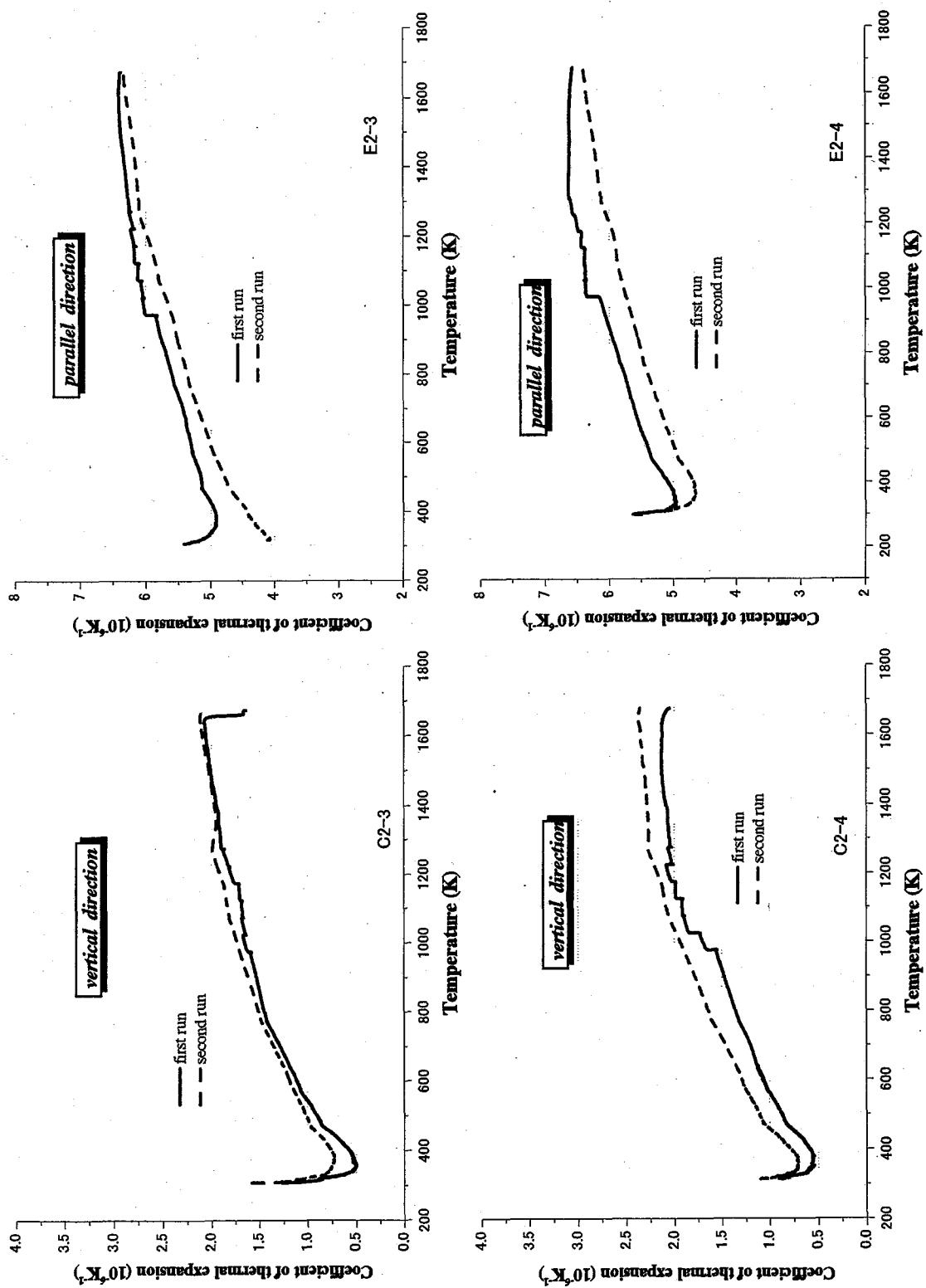
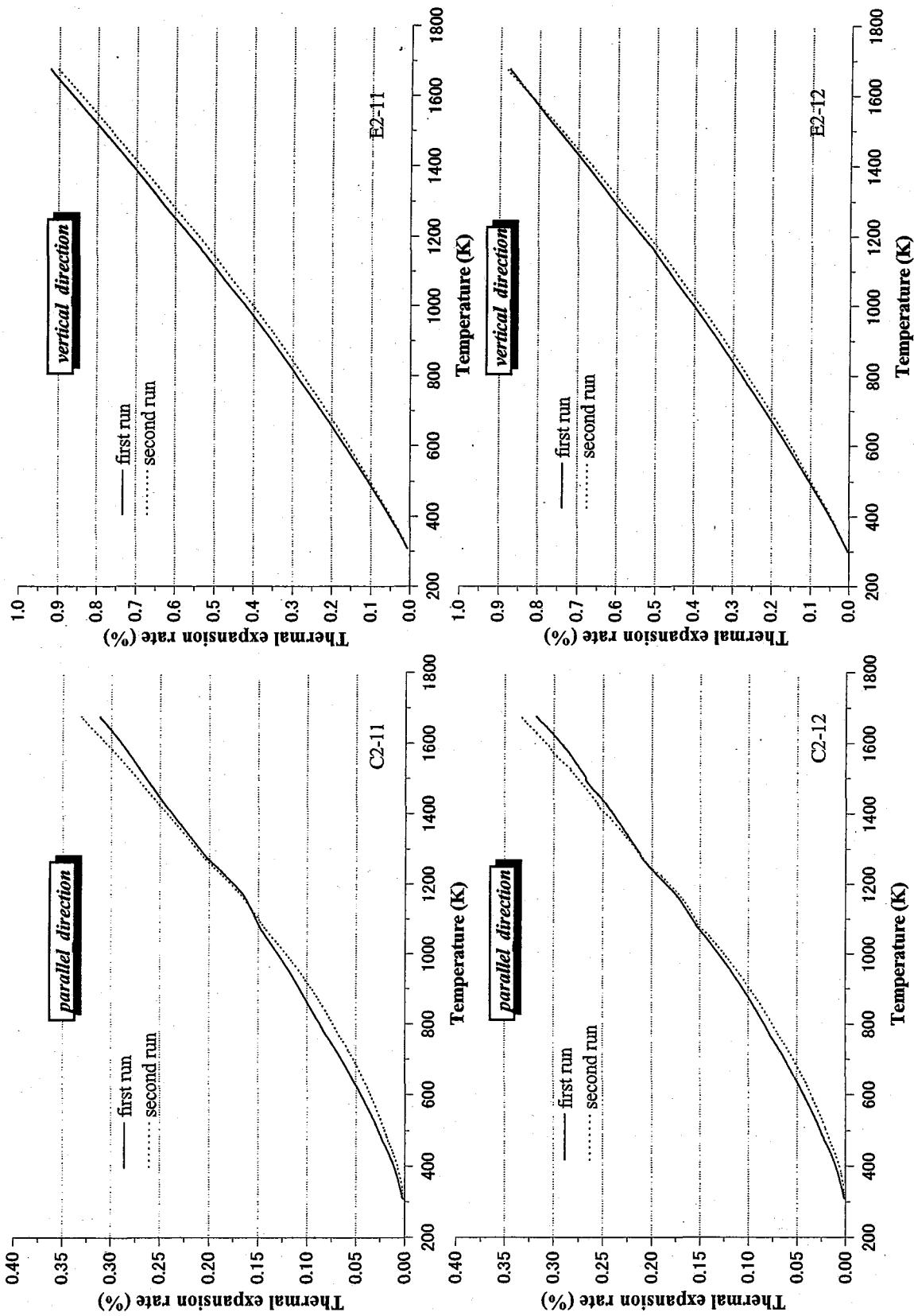


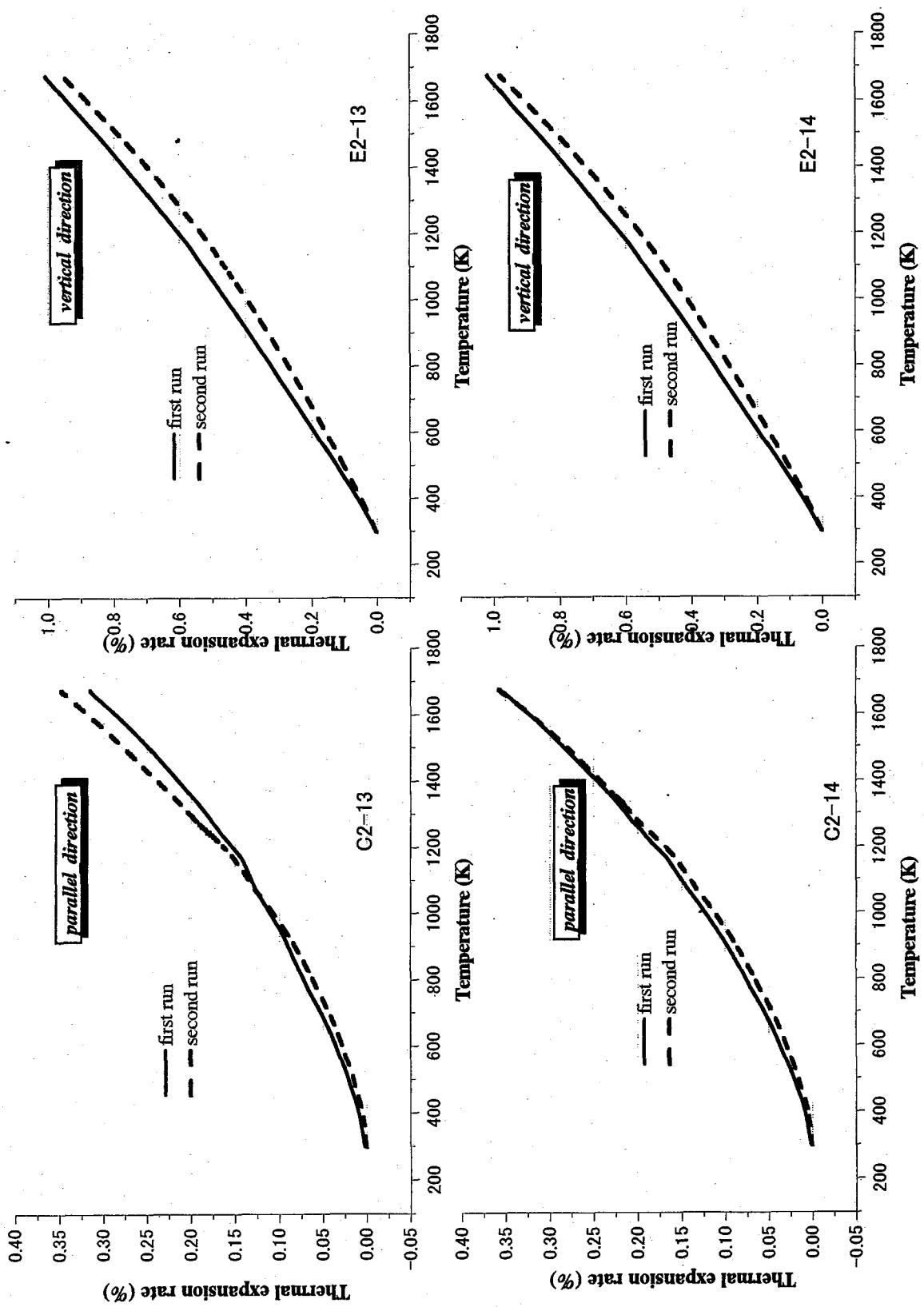
Fig.111 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: PCC-2S, temperature: 1078K, neutron fluence:  $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E > 1 MeV)



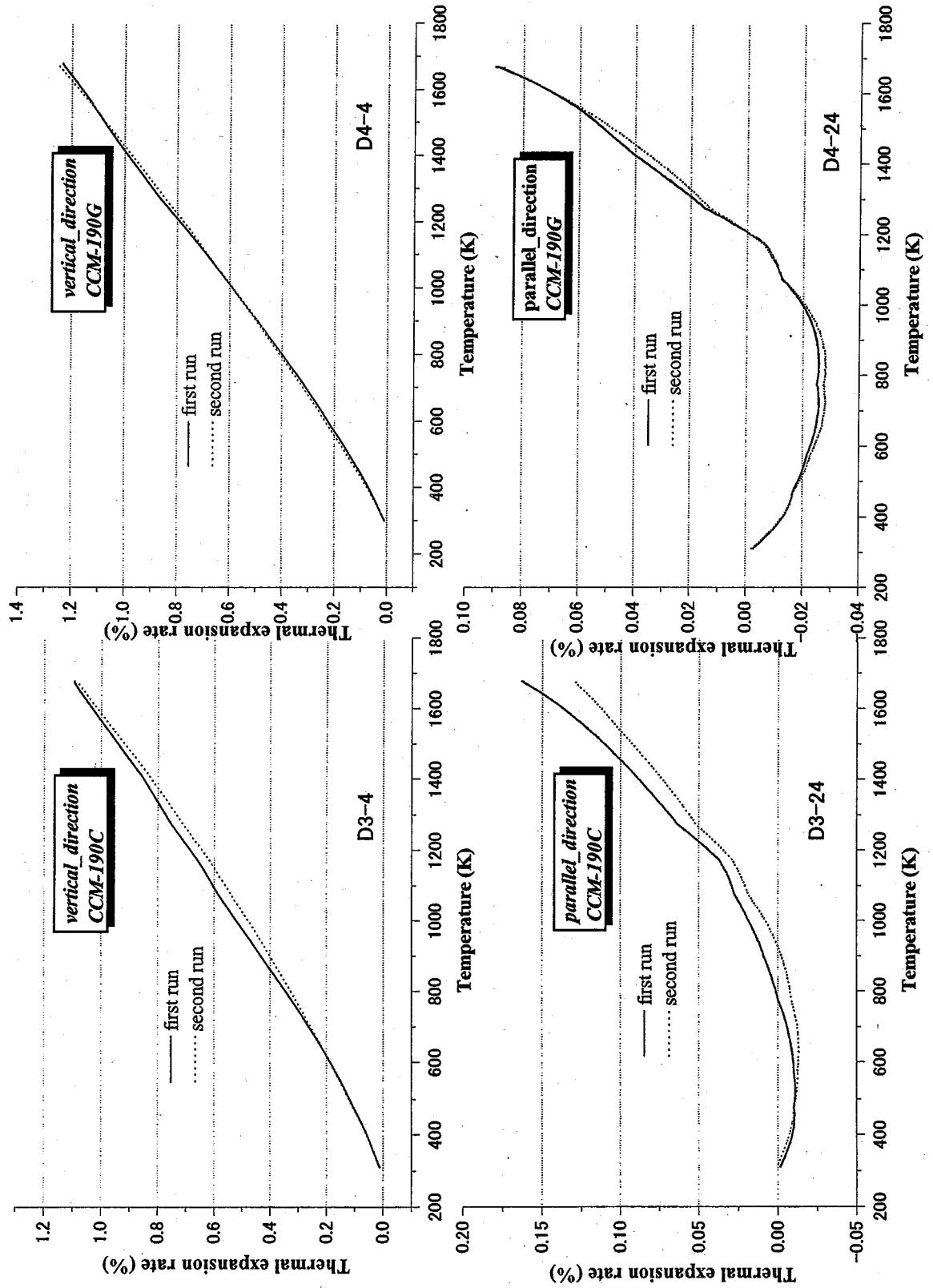
**Fig.112 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:PCC-2S, temperature:1175K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} m^{-2}$ , E>1MeV)**



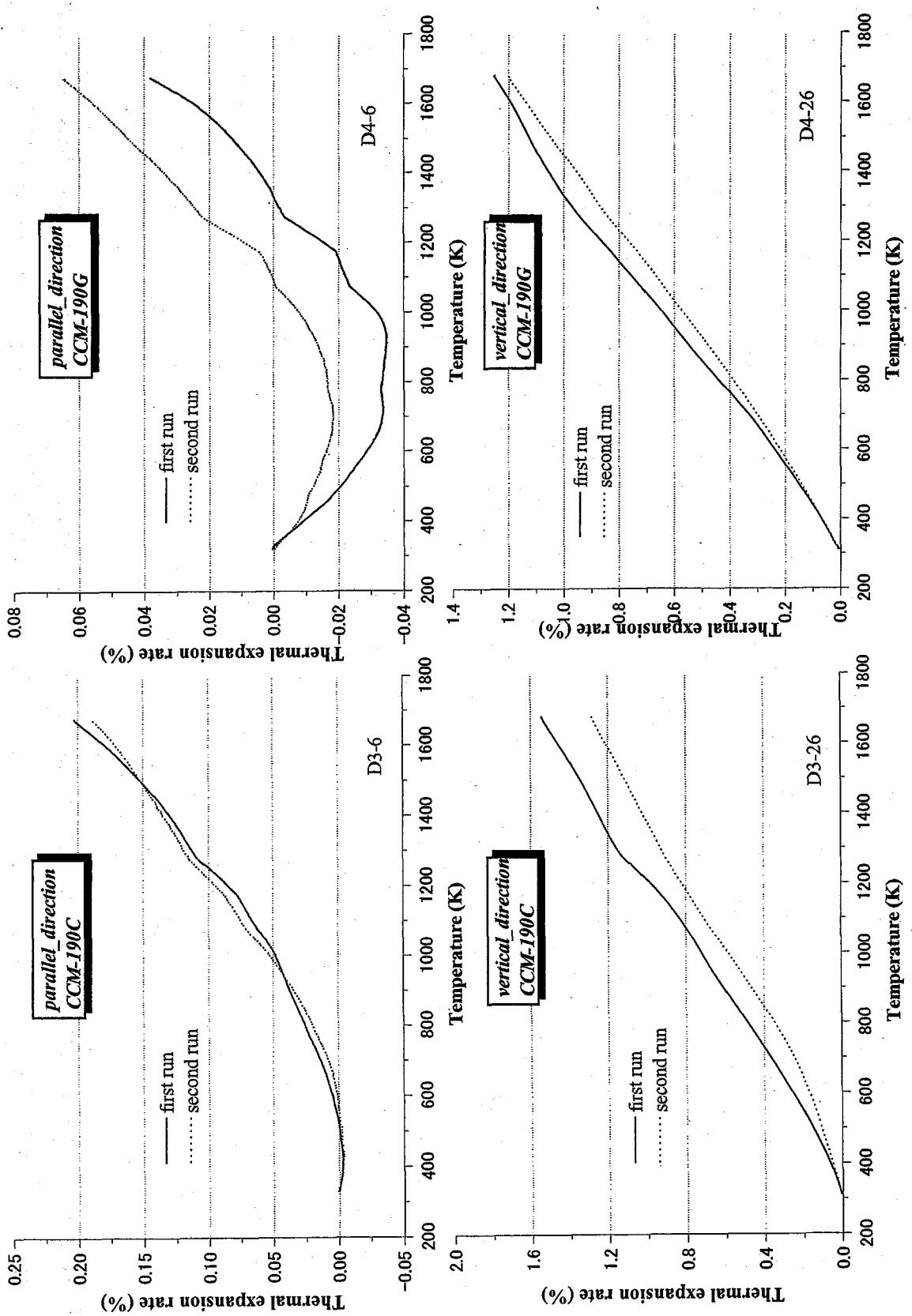
**Fig.113** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:PCC-2S, temperature:1321K, neutron fluence: $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )



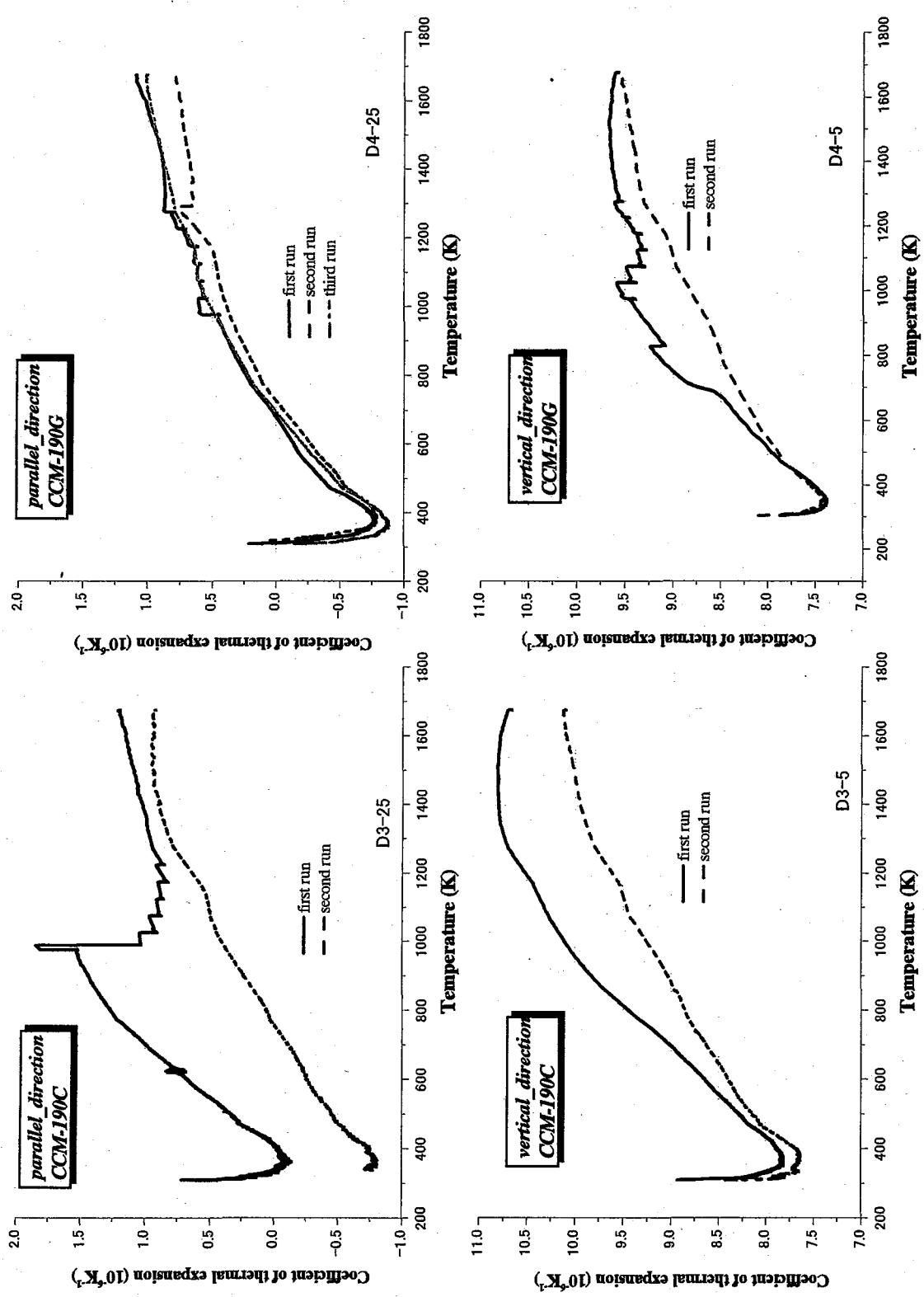
**Fig.114** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: PCC-2S, temperature: 1473K, neutron fluence:  $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )



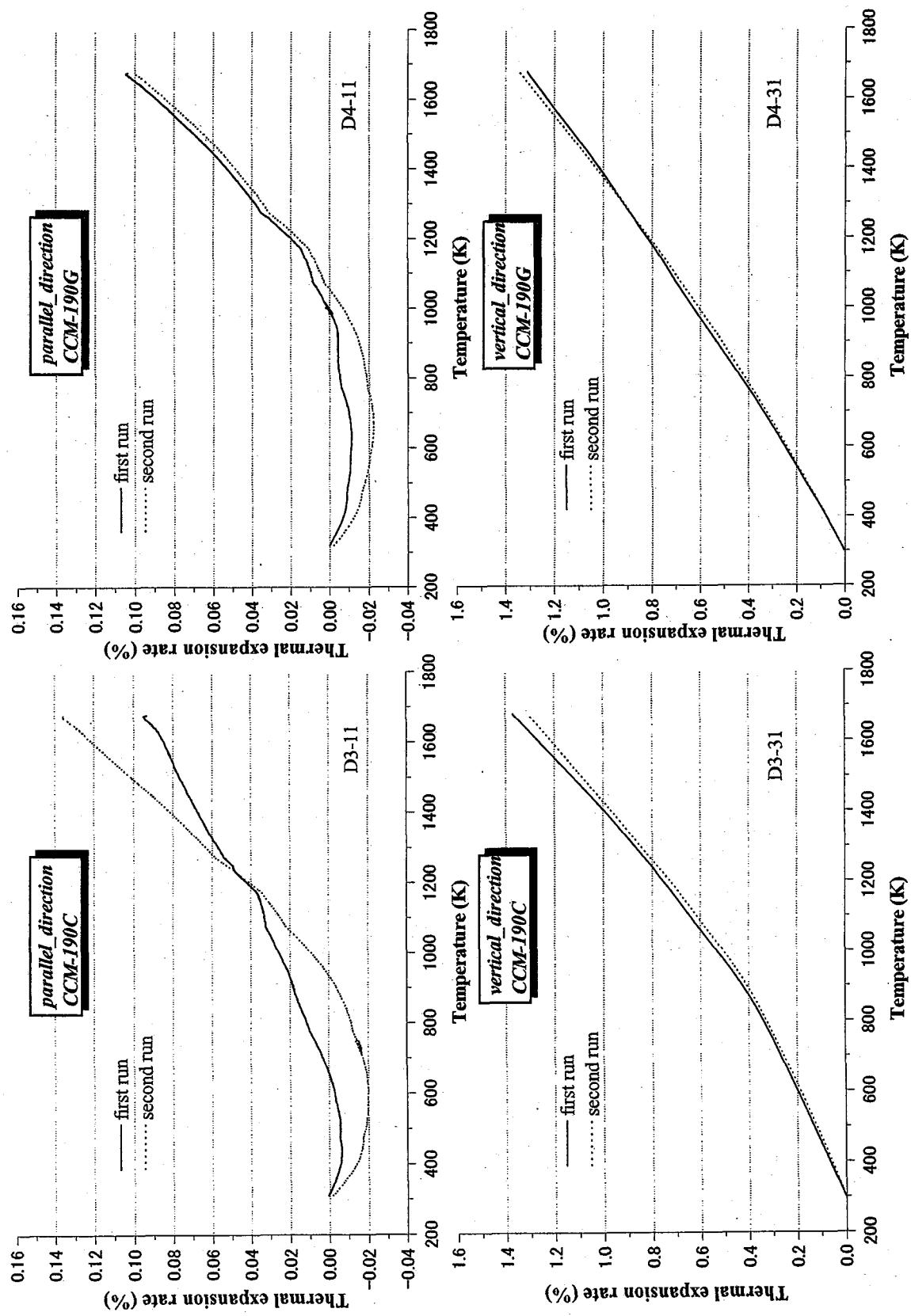
**Fig.115** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
**(irradiated specimen:CCM-190C & CCM-190G, temperature:1003K, neutron fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**



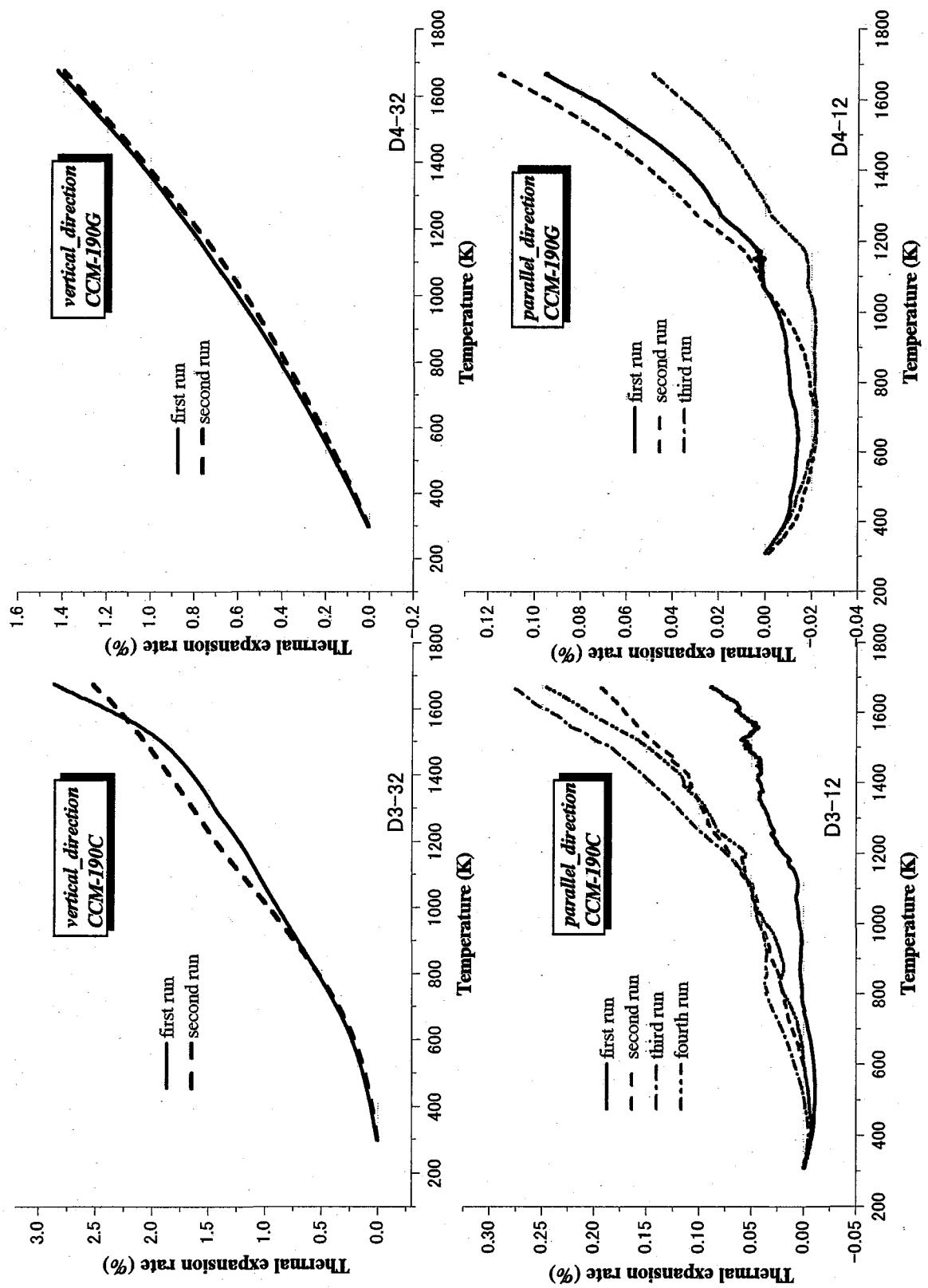
**Fig.116 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:CCM-190C & CCM-190G, temperature:1078K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**



**Fig.117 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated carbon/carbon composite.**  
**(irradiated specimen:CCM-190C & CCM-190G, temperature:1175K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} m^{-2}$ , E>1MeV)**



**Fig.118 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:CCM-190C & CCM-190G, temperature:1321K, neutron fluence: $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**



**Fig.119** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:CCM-190C & CCM-190G, temperature:1473K, neutron fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

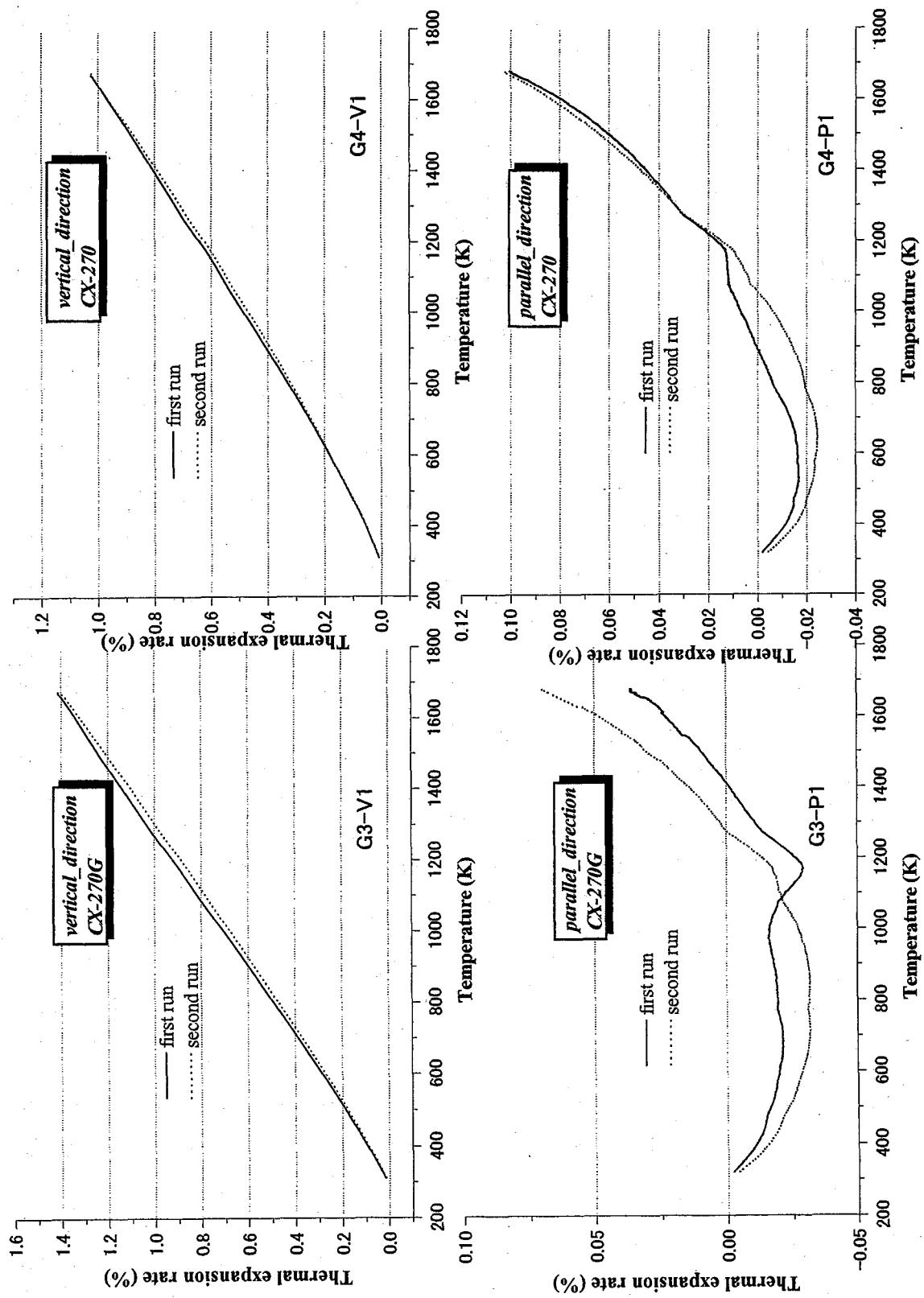
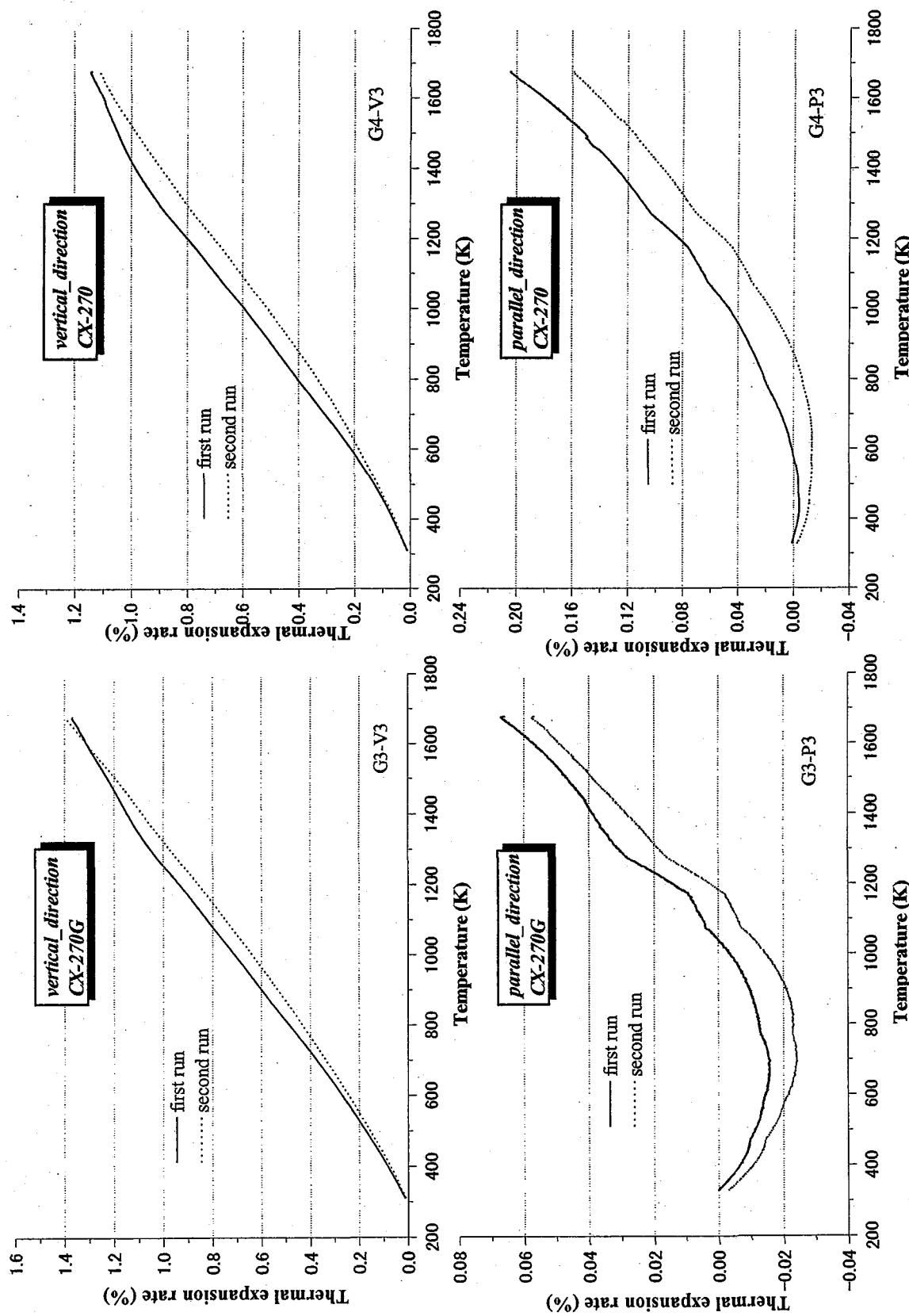


Fig.120 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
 (irradiated specimen:CX-270G & CX-270, temperature:1003K, neutron fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



**Fig.1.21** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: CX-270G & CX-270, temperature: 1078K, neutron fluence:  $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

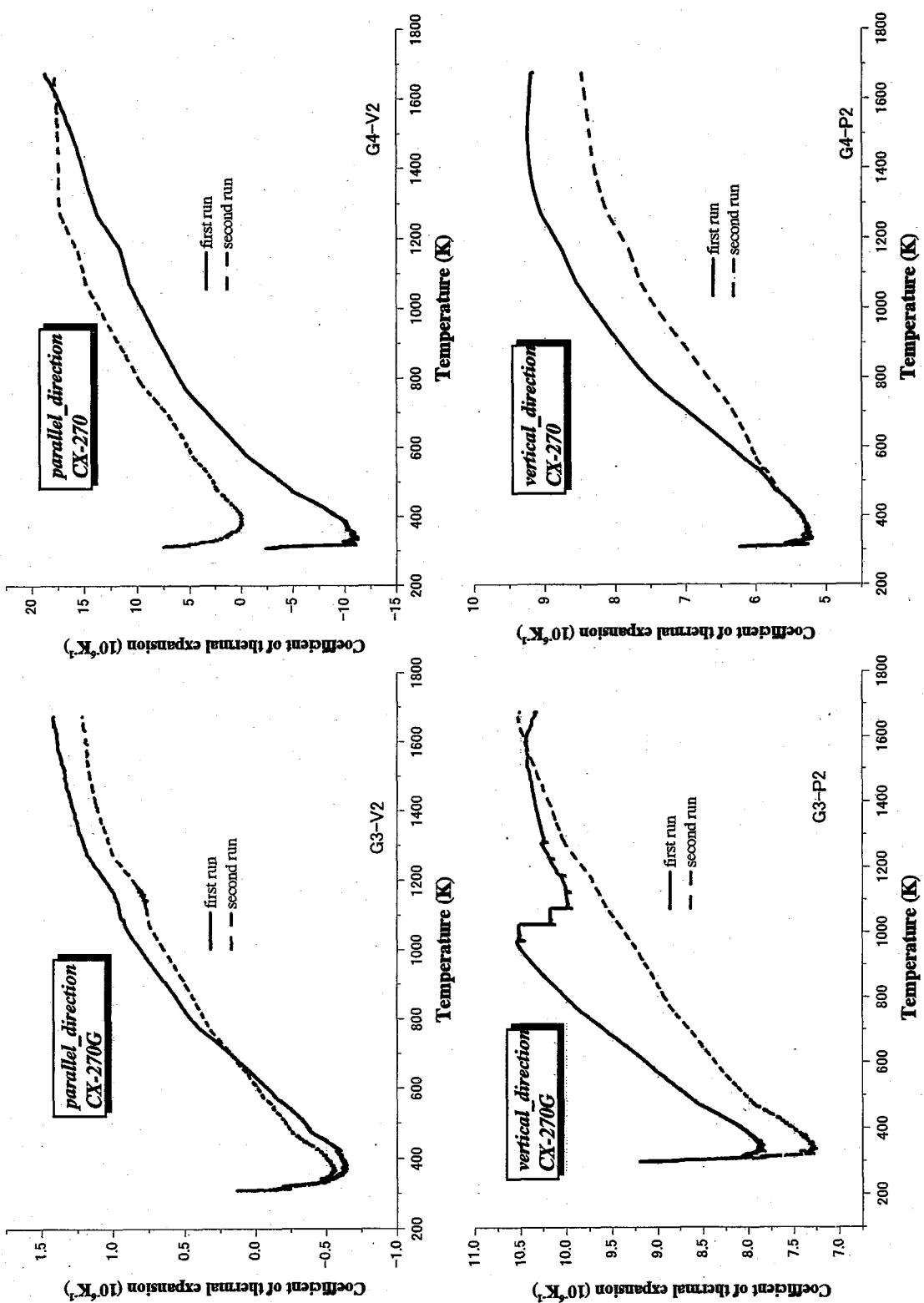
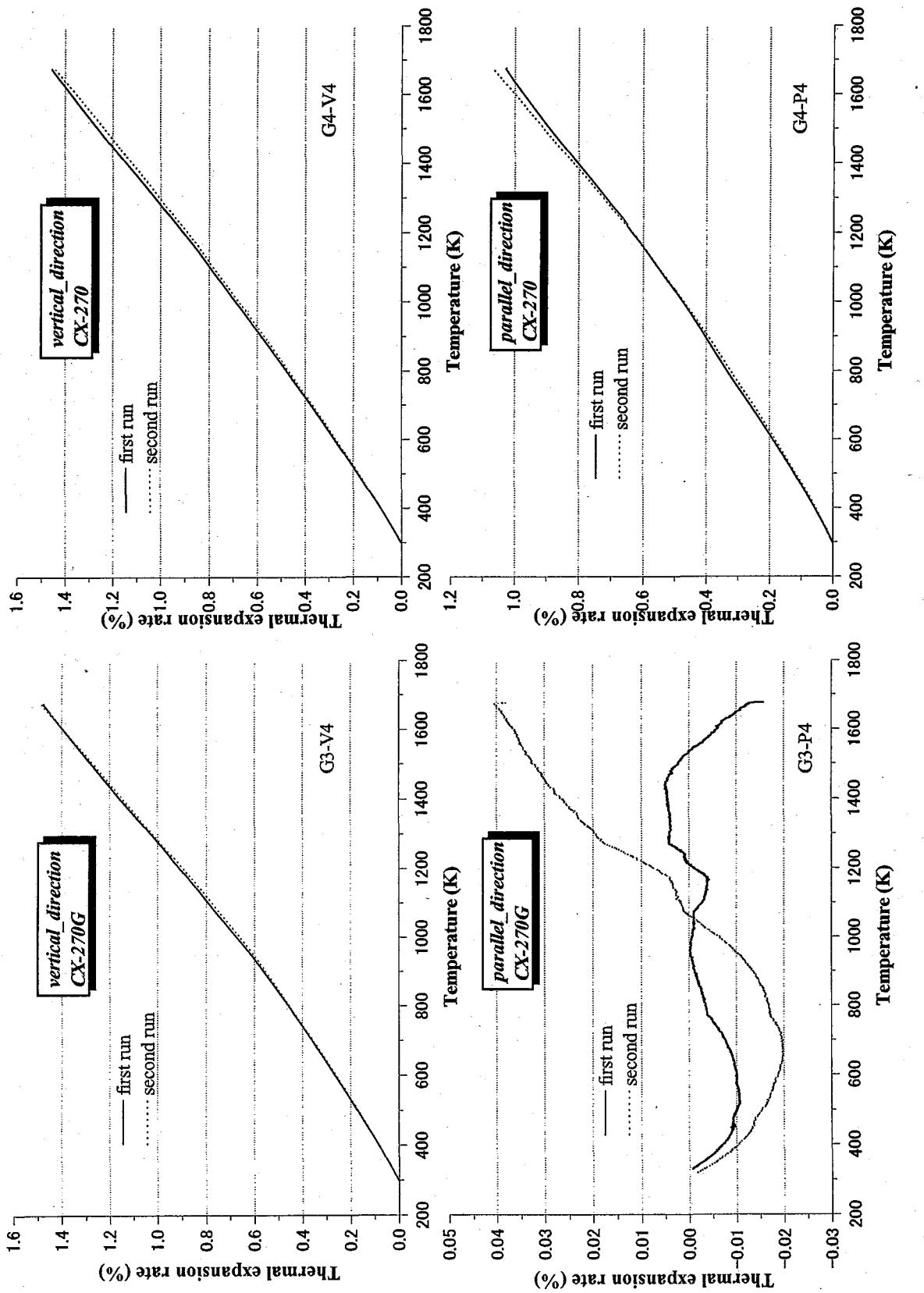
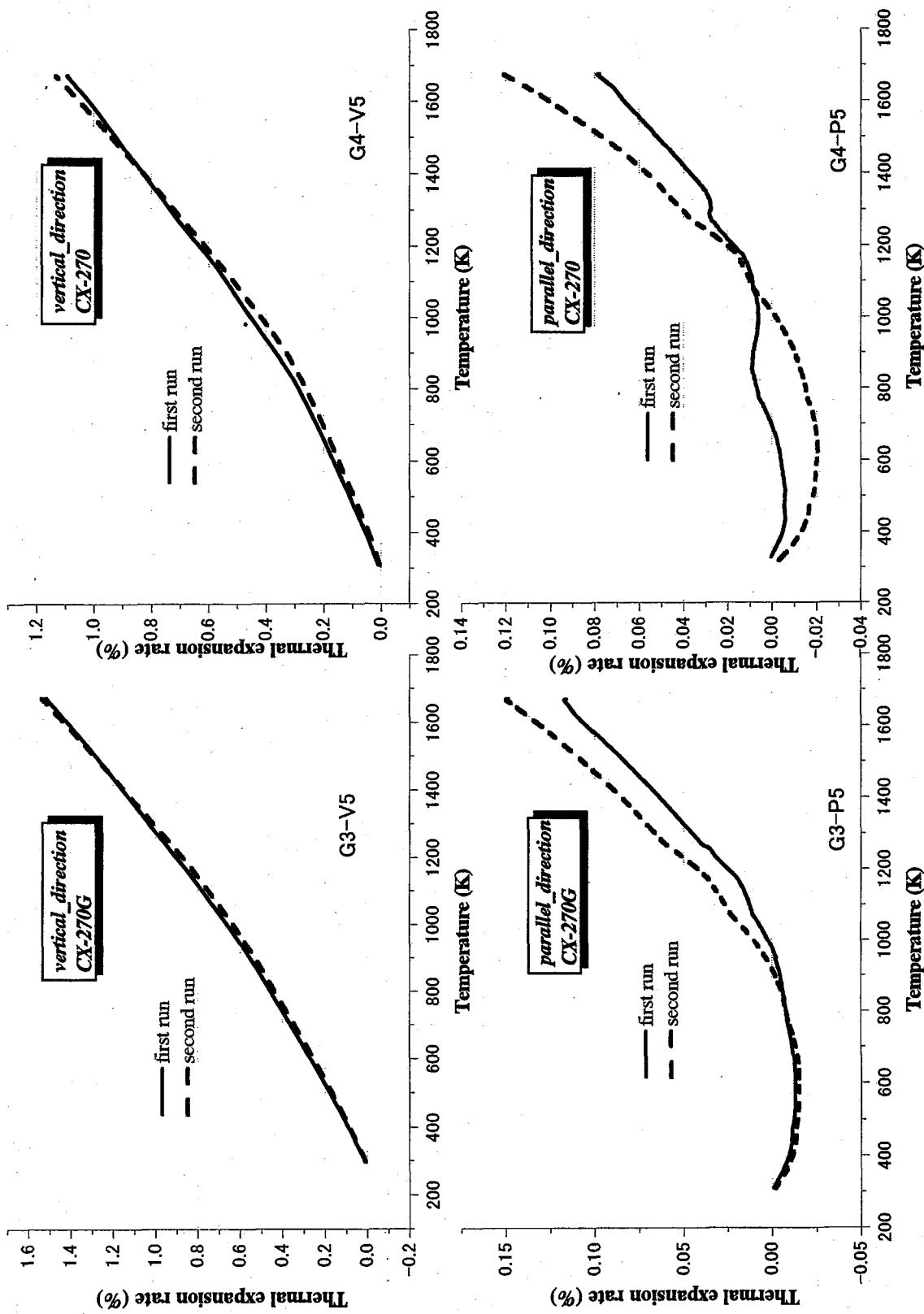


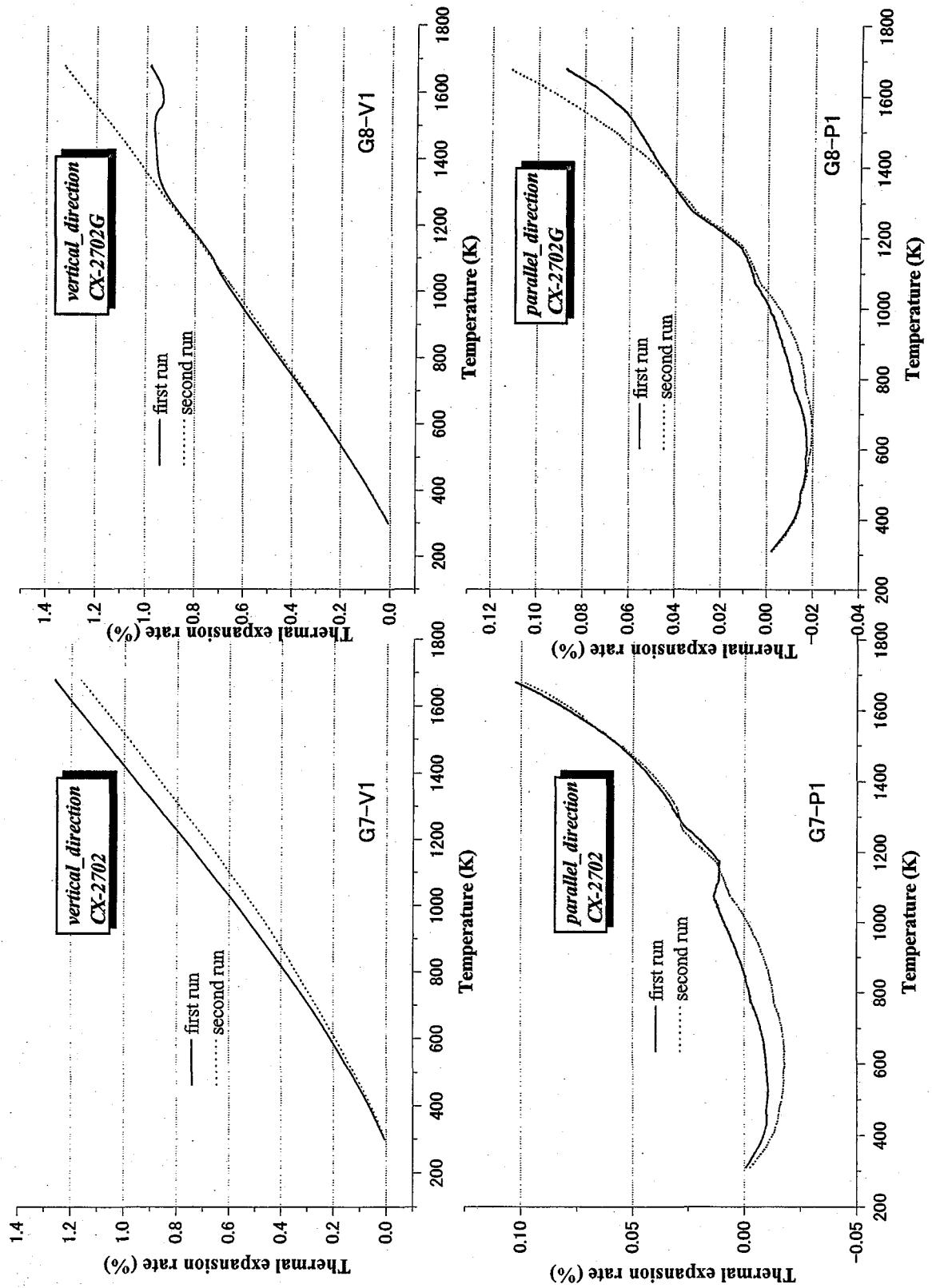
Fig.122 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: CX-270 & CX-270G, temperature: 1175K, neutron fluence:  $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



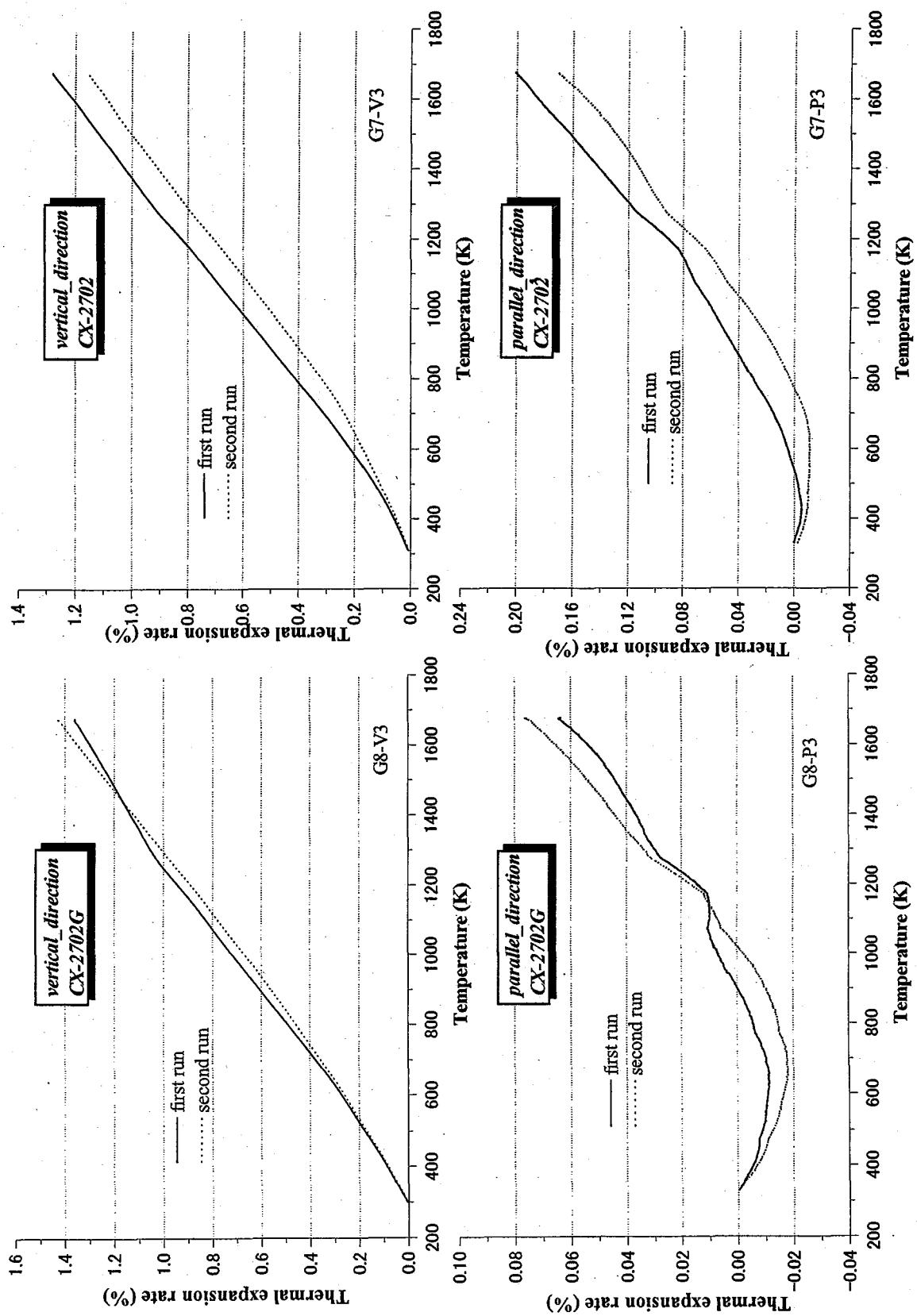
**Fig.123** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: CX-270G & CX-270, temperature: 1321K, neutron fluence:  $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



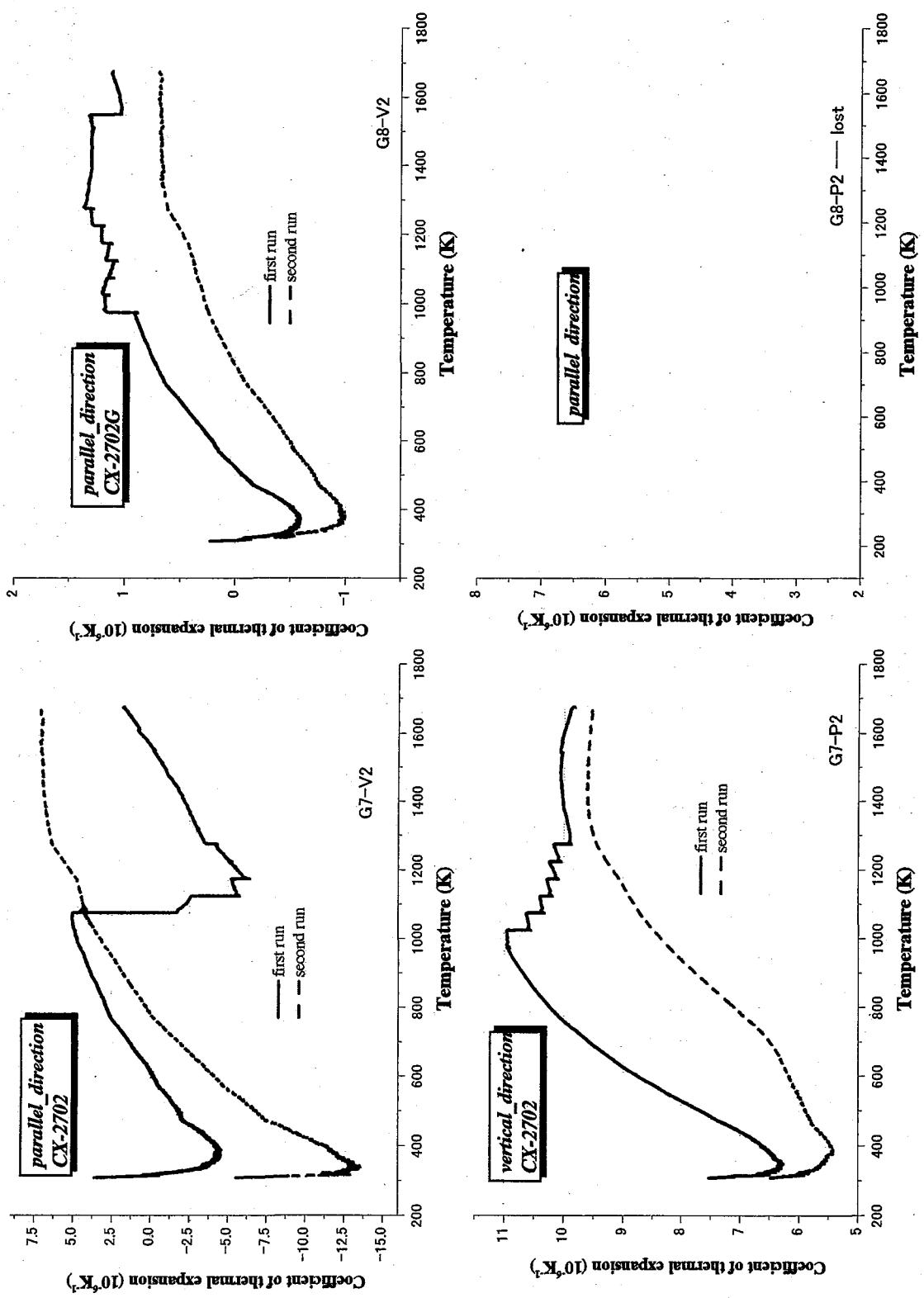
**Fig.124 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen:CX-270G & CX-270, temperature:1473K, neutron fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**



**Fig.1.25** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: CX-2702 & CX-2702G, temperature:1003K, neutron fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



**Fig.126 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
(irradiated specimen: CX-2702G & CX-2702, temperature:1078K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**



**Fig.127 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated carbon/carbon composite.**  
**(irradiated specimen:CX-2702 & CX-2702G, temperature:1175K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)**

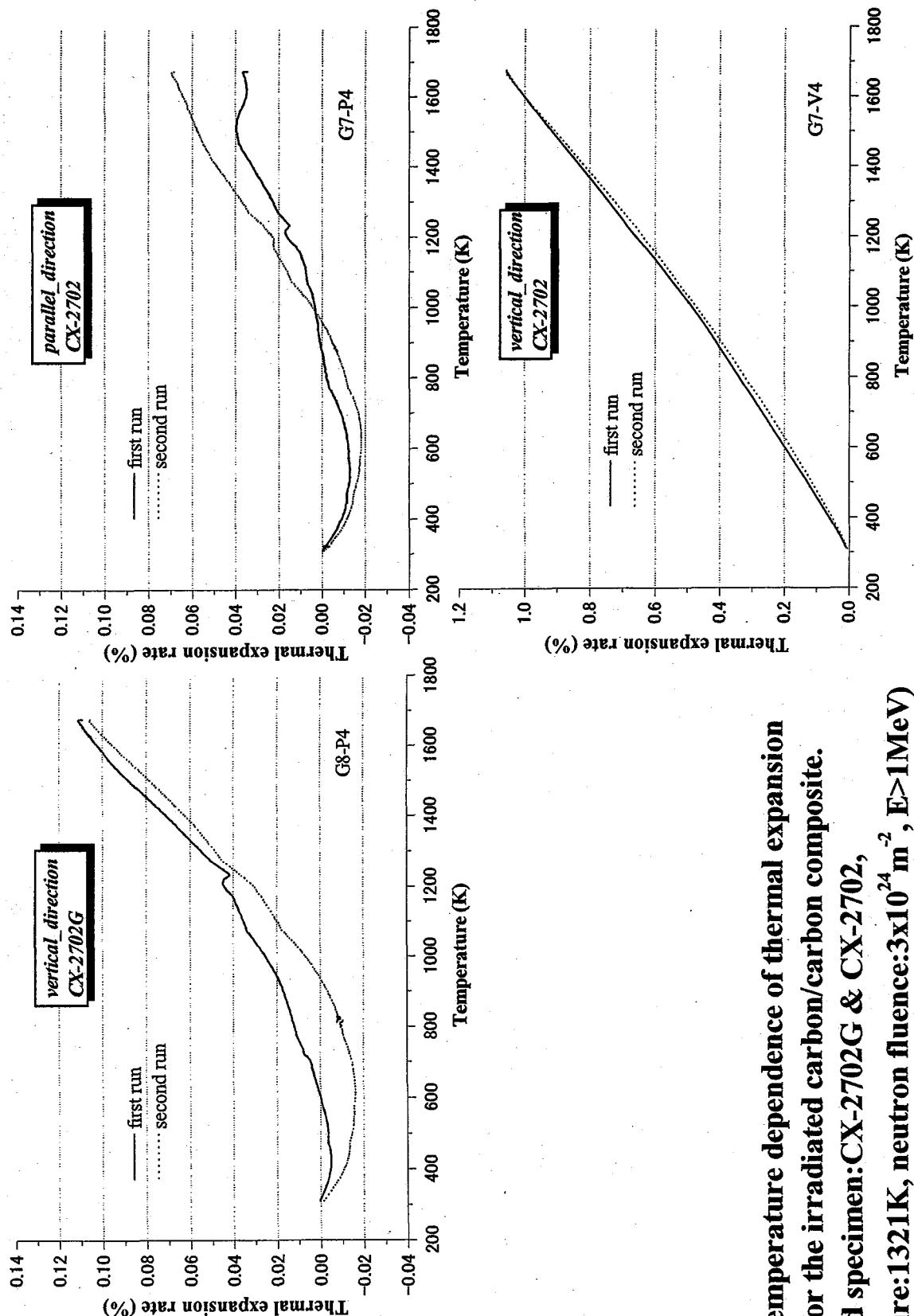
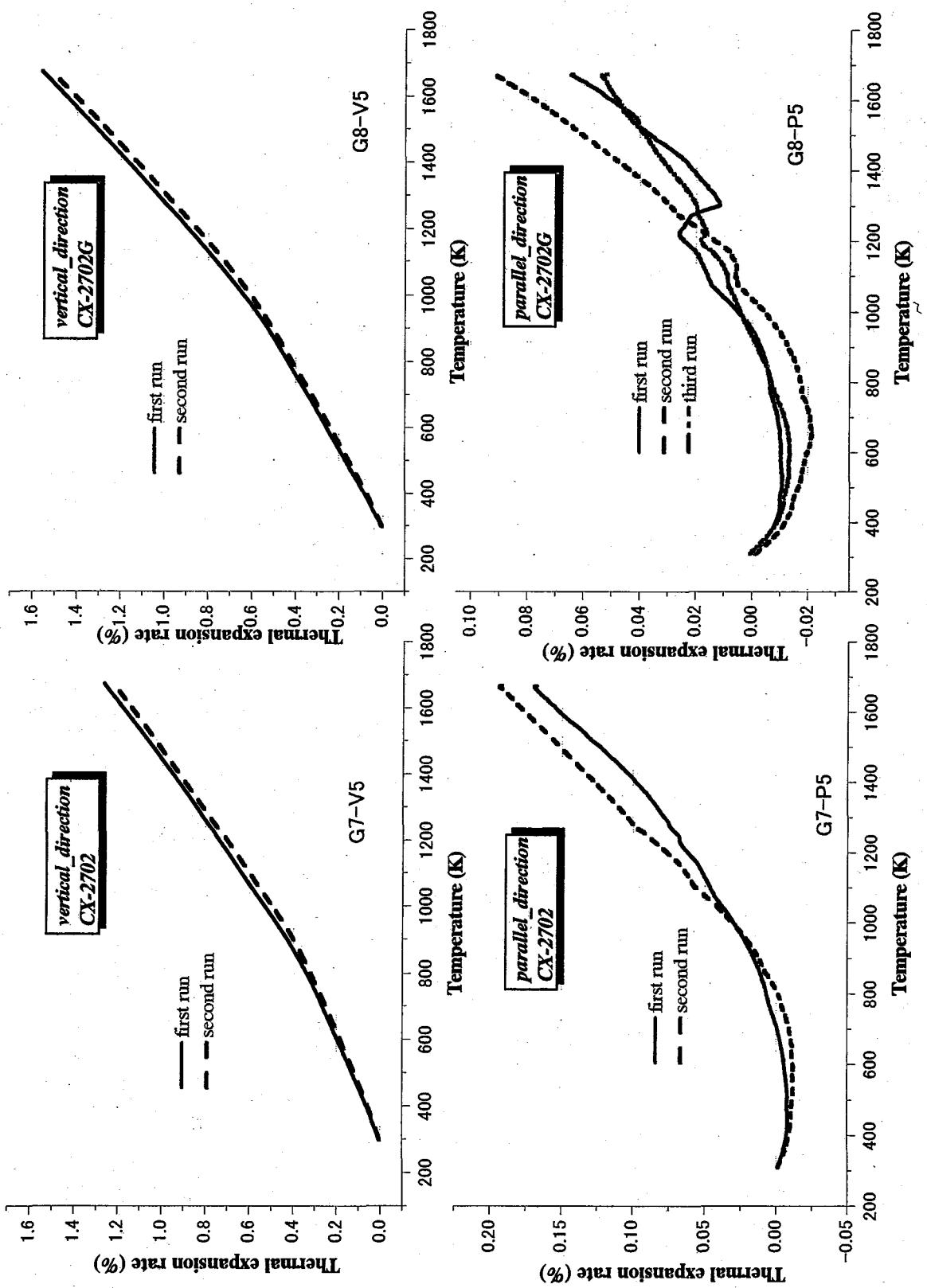


Fig.128 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
 (irradiated specimen:CX-2702G & CX-2702,  
 temperature:1321K, neutron fluence: $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



**Fig.129** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated carbon/carbon composite.  
 (irradiated specimen: CX-2702 & CX-2702G, temperature:1473K, neutron fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

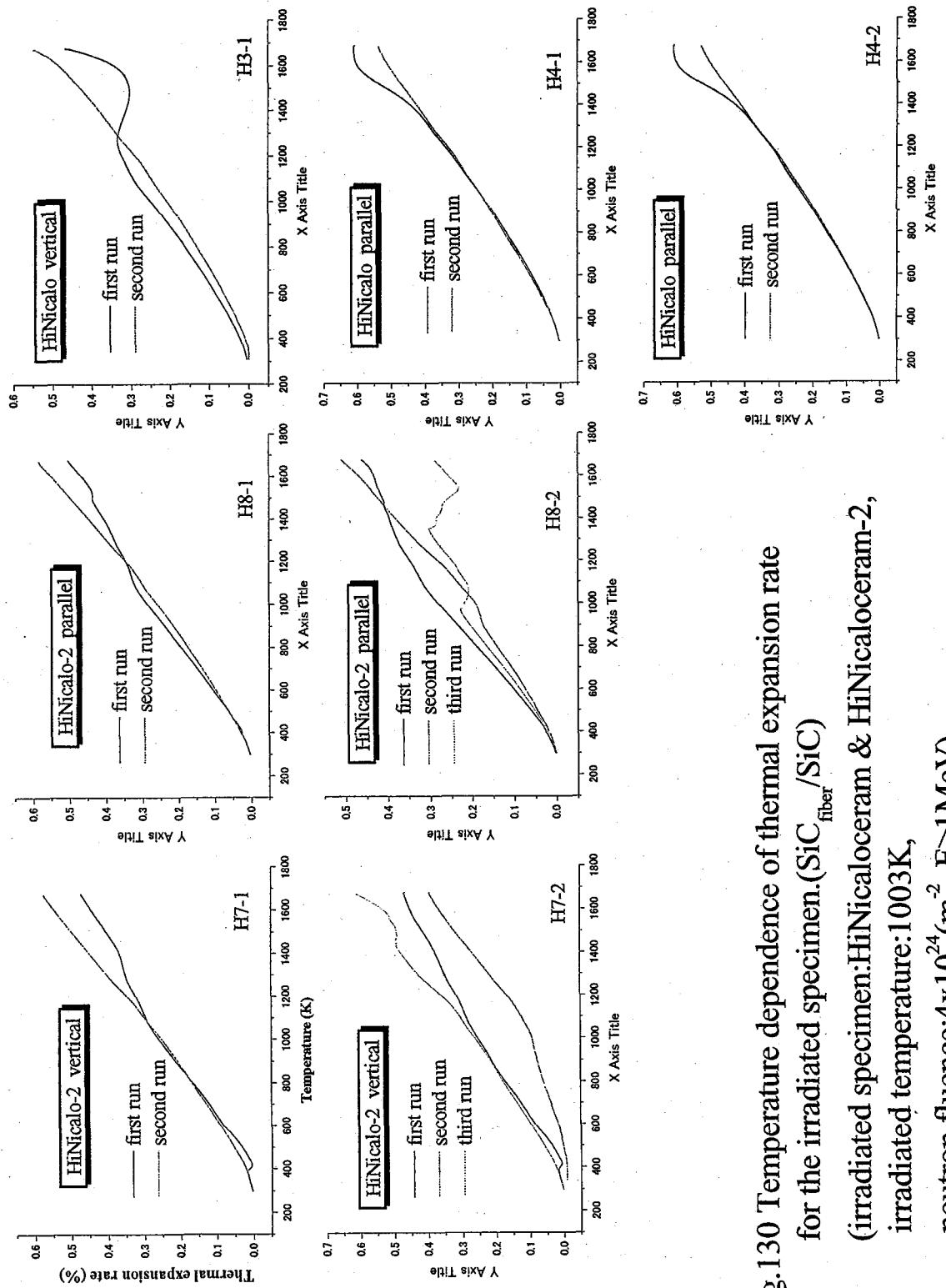
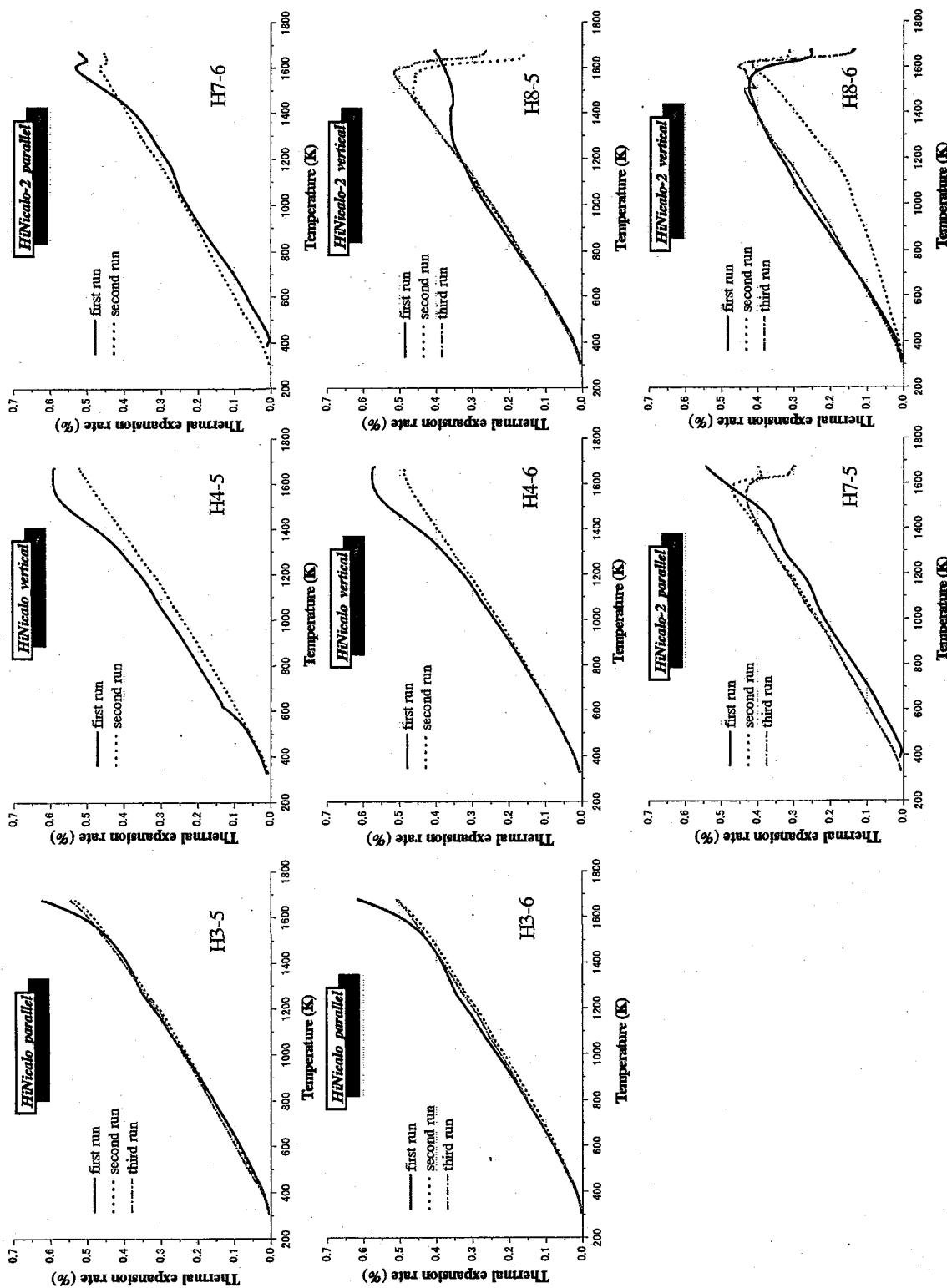
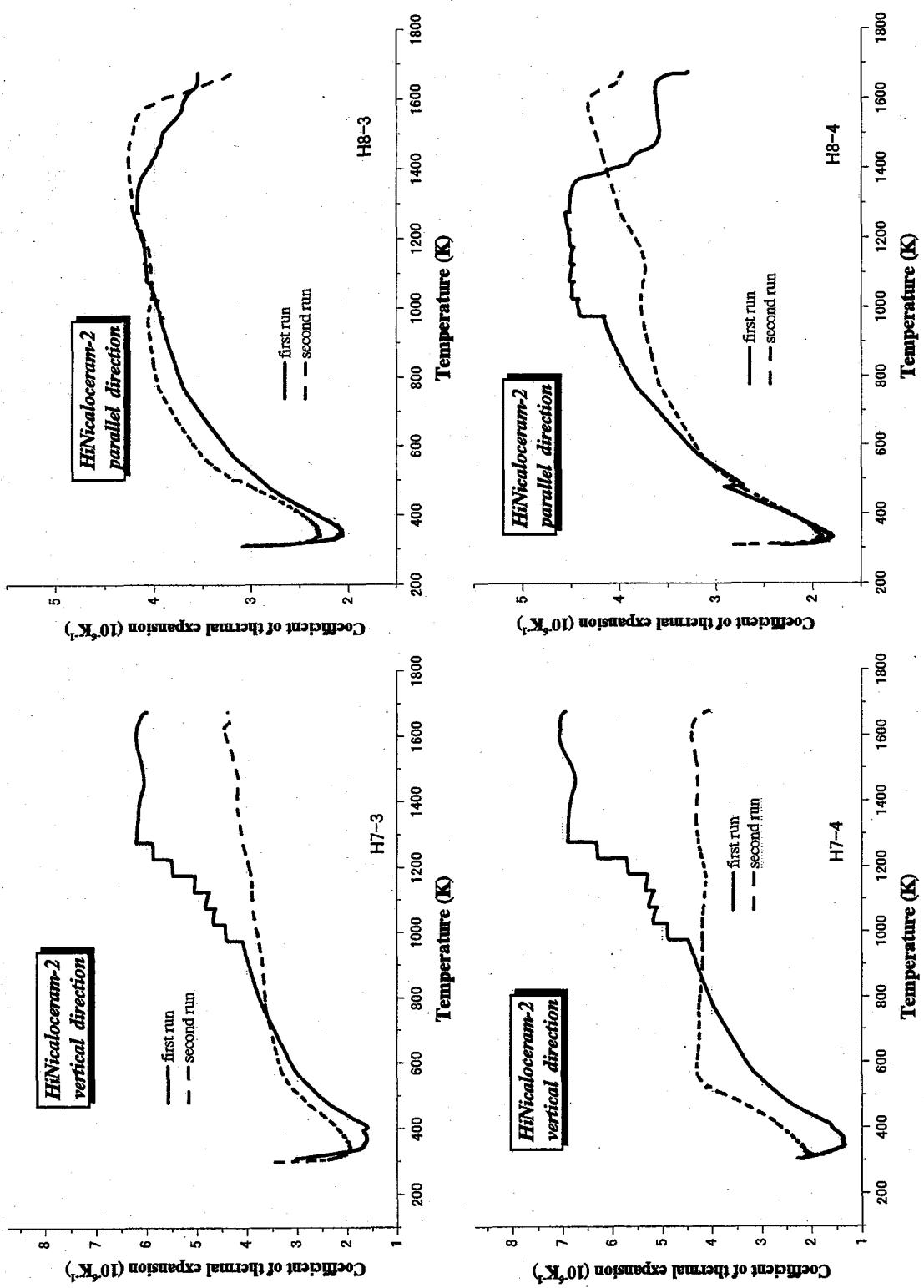


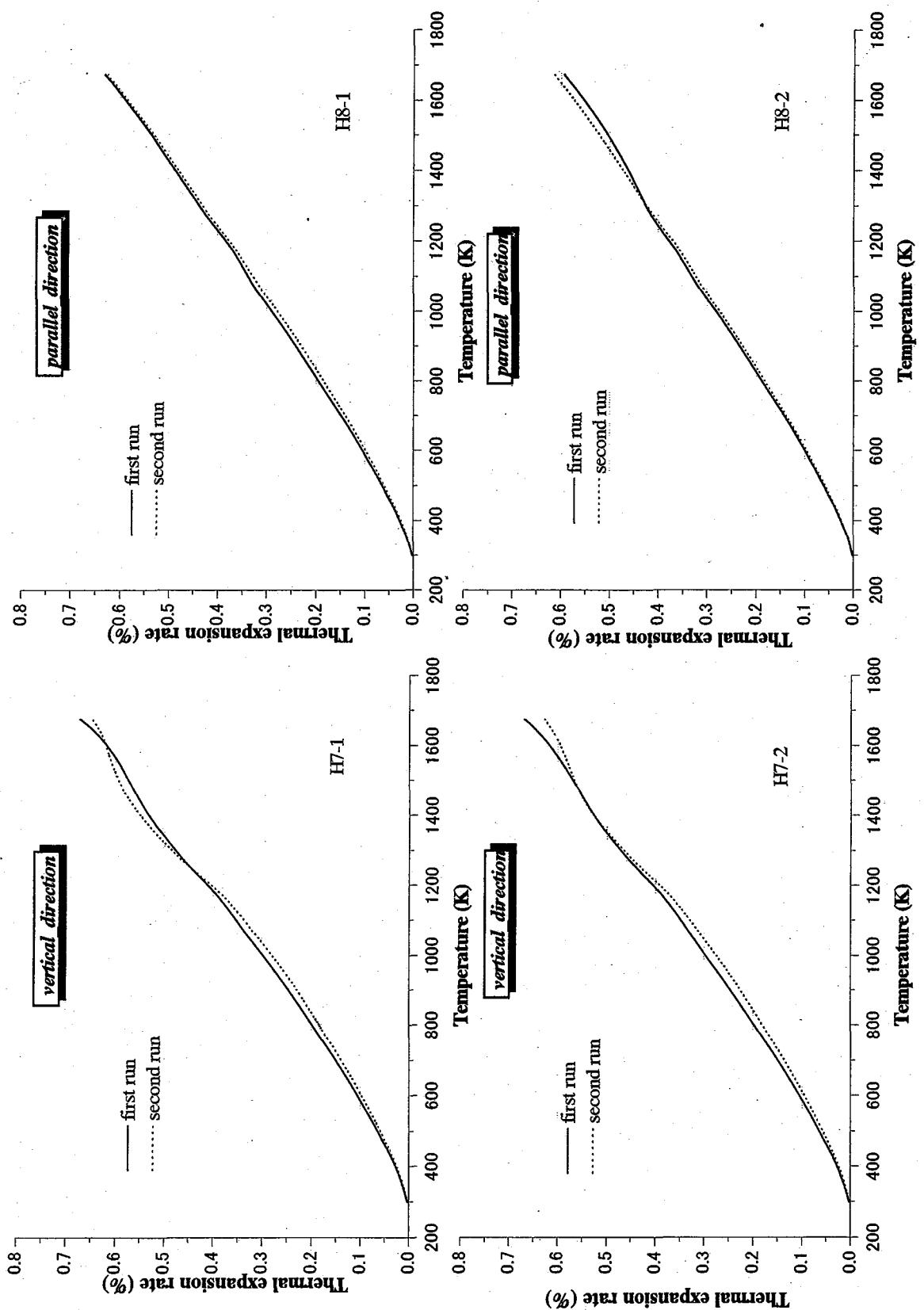
Fig.130 Temperature dependence of thermal expansion rate  
for the irradiated specimen.( $\text{SiC}_{\text{fiber}}/\text{SiC}$ )  
(irradiated specimen:HiNicaloceram & HiNicaloceram-2,  
irradiated temperature:1003K,  
neutron fluence: $4 \times 10^{24} (\text{m}^{-2}, E > 1 \text{MeV})$ )



**Fig.131** Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.( $\text{SiC}_{\text{fiber}}/\text{SiC}$ )  
(irradiated specimen:HiNicaloceram & HiNicaloferm-2,irradiated temperature:1078K, neutron fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )



**Fig.132** Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated  $\text{SiC}_{\text{fiber}}/\text{SiC}$  composite.  
 (irradiated specimen: HiNicacceram-2, temperature: 1175 K, neutron fluence:  $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E > 1 MeV)



**Fig.1.33 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.(SiC<sub>fiber</sub>/SiC)**  
**(irradiated specimen:HiNicelceram-2,irradiated temperature:1321K, neutron fluence:3x10<sup>24</sup>m<sup>-2</sup>,E>1MeV)**

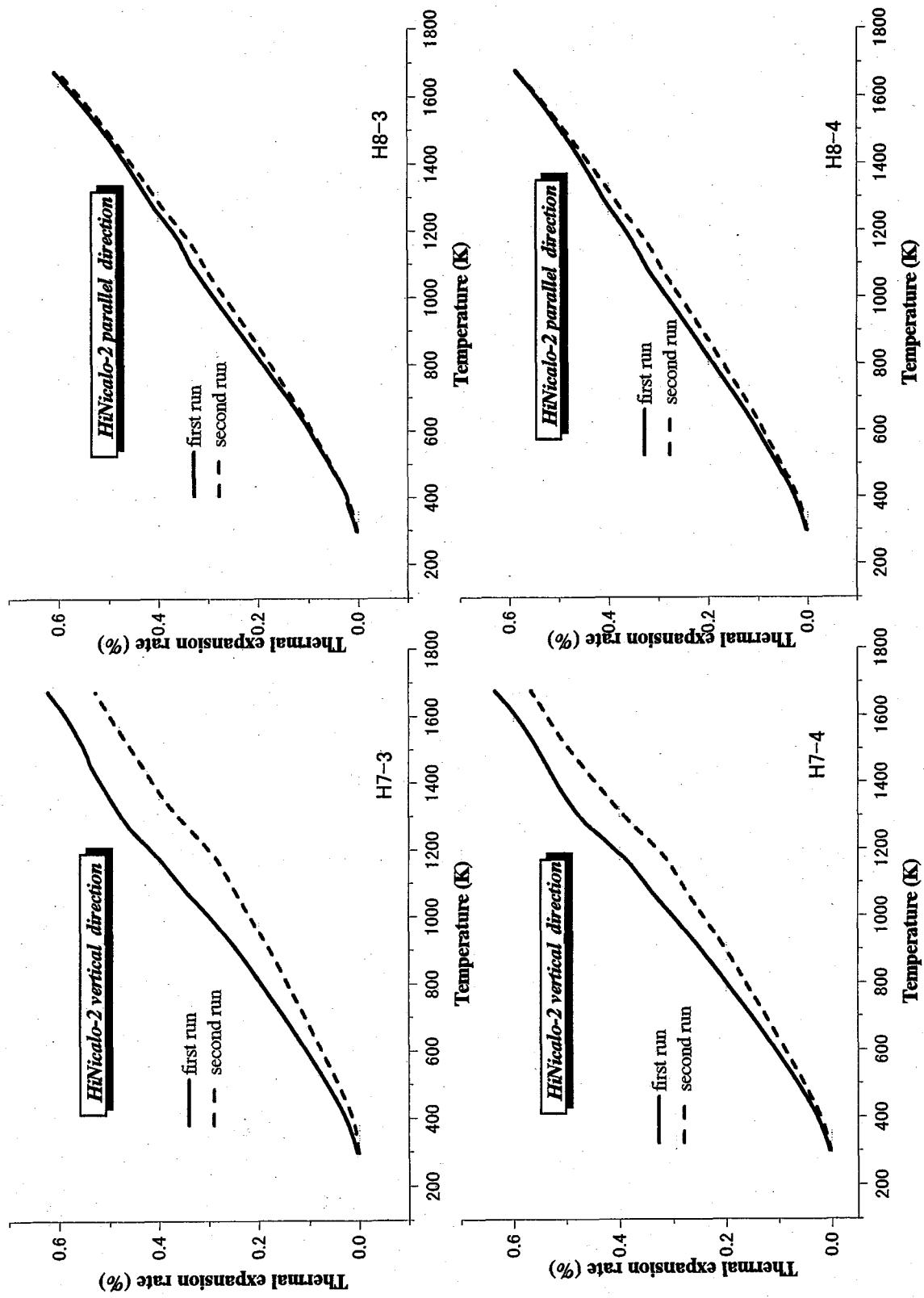


Fig.134 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated  $\text{SiC}_{\text{fiber}}/\text{SiC}$  composite.  
 (irradiated specimen:HiNicaloceram-2, temperature:1473K, neutron fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )

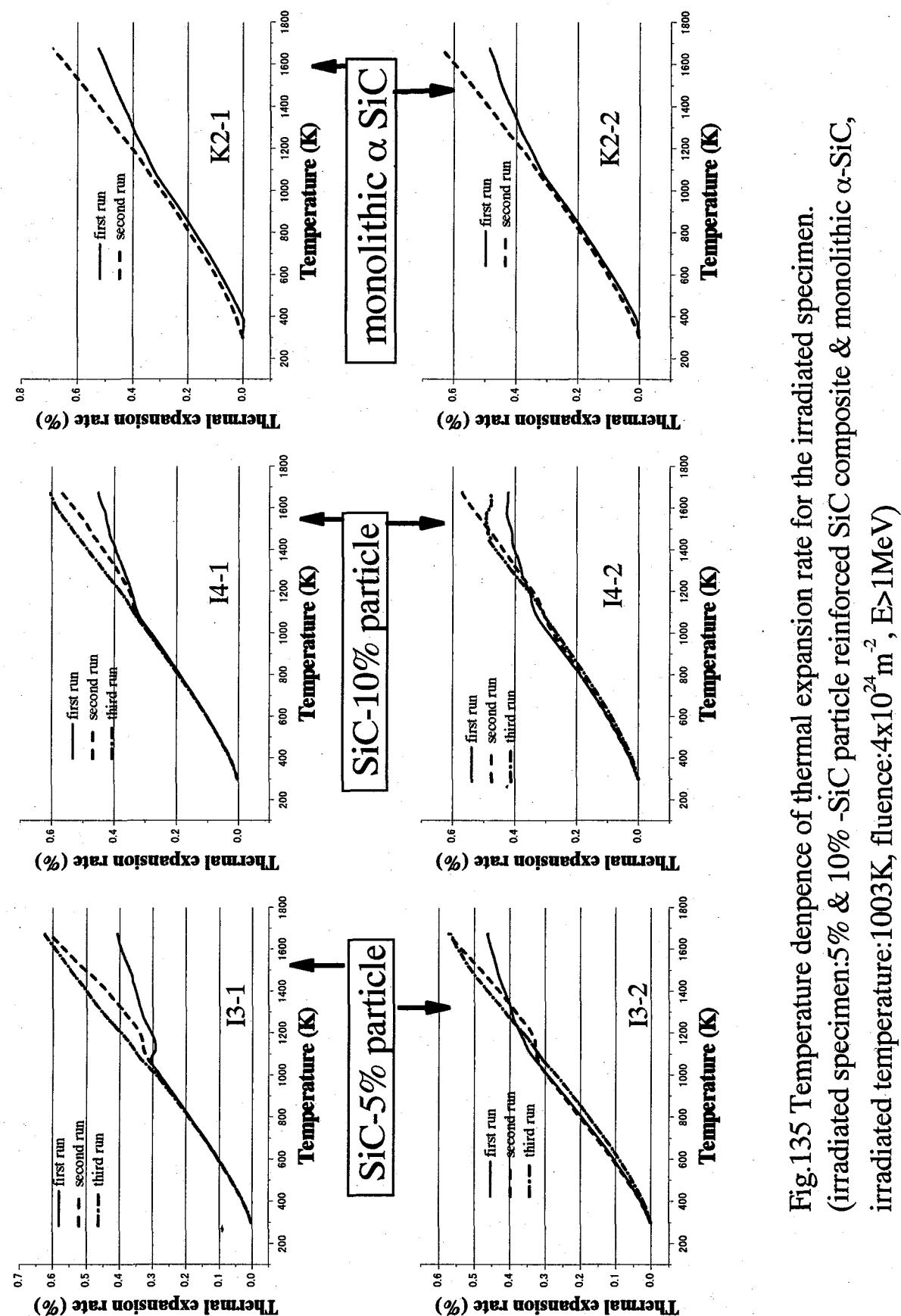


Fig.135 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen:5% & 10% -SiC particle reinforced SiC composite & monolithic  $\alpha$ -SiC,  
irradiated temperature:1003K, fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )

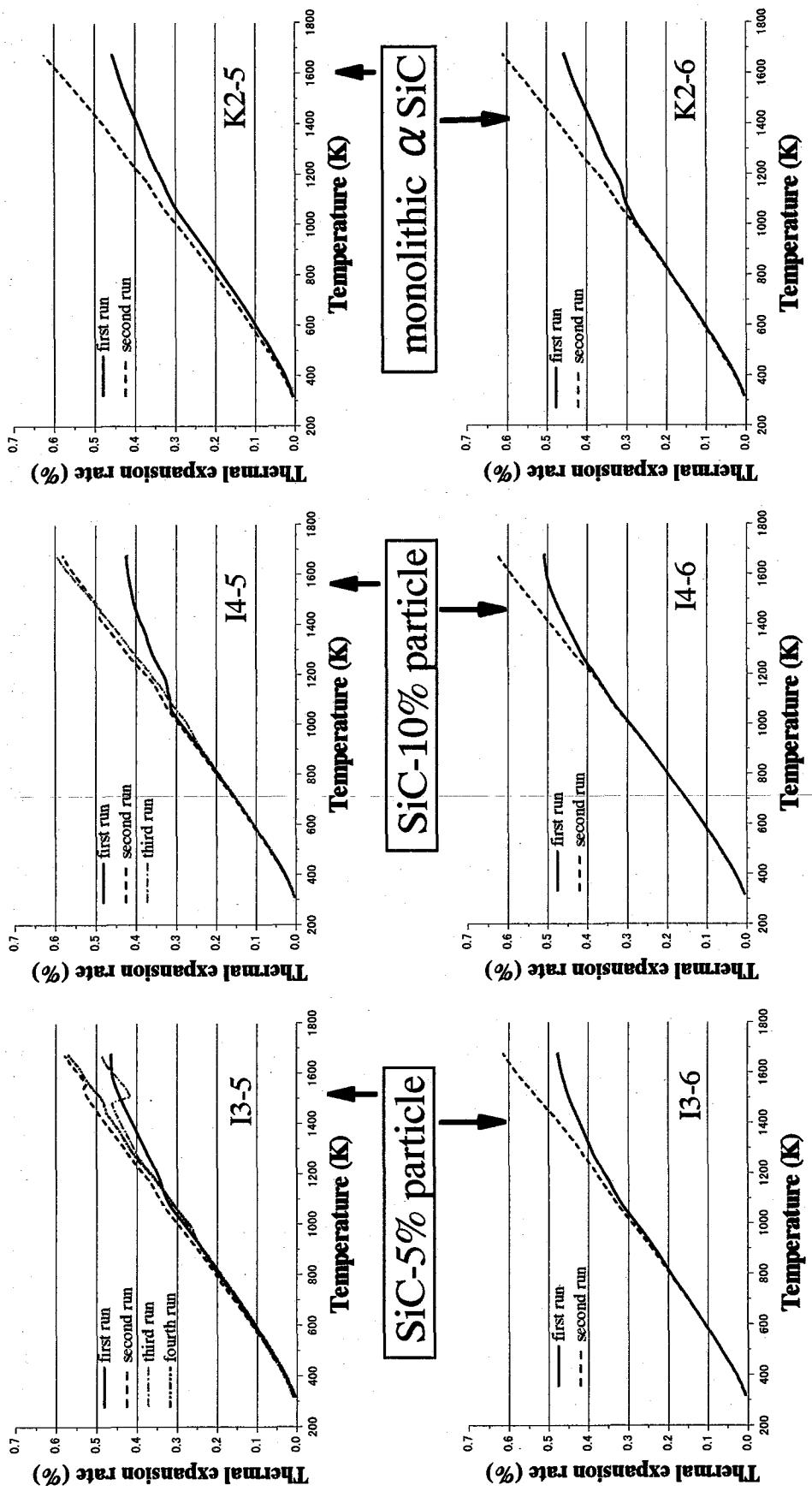
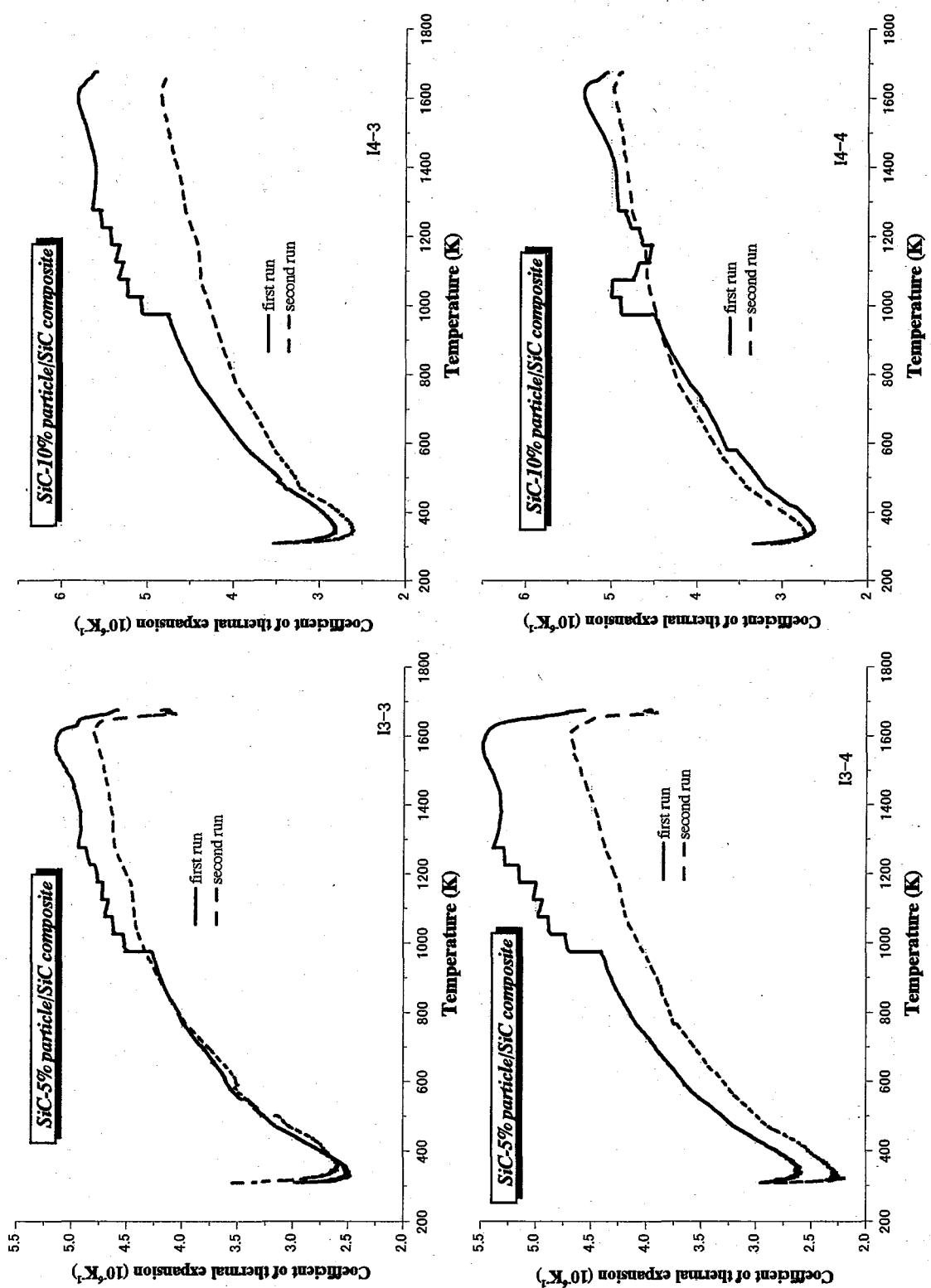


Fig.136 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen:5% & 10%-SiC particle reinforced SiC composite & monolithic  $\alpha$ -SiC,  
irradiated temperature:1078K, fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )



**Fig.137 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated SiC<sub>particle</sub>/SiC composite.**  
**(irradiated specimen:5% & 10% -SiCp/SiC, temperature:1175K, neutron fluence:9x10<sup>24</sup> m<sup>-2</sup>, E>1MeV)**

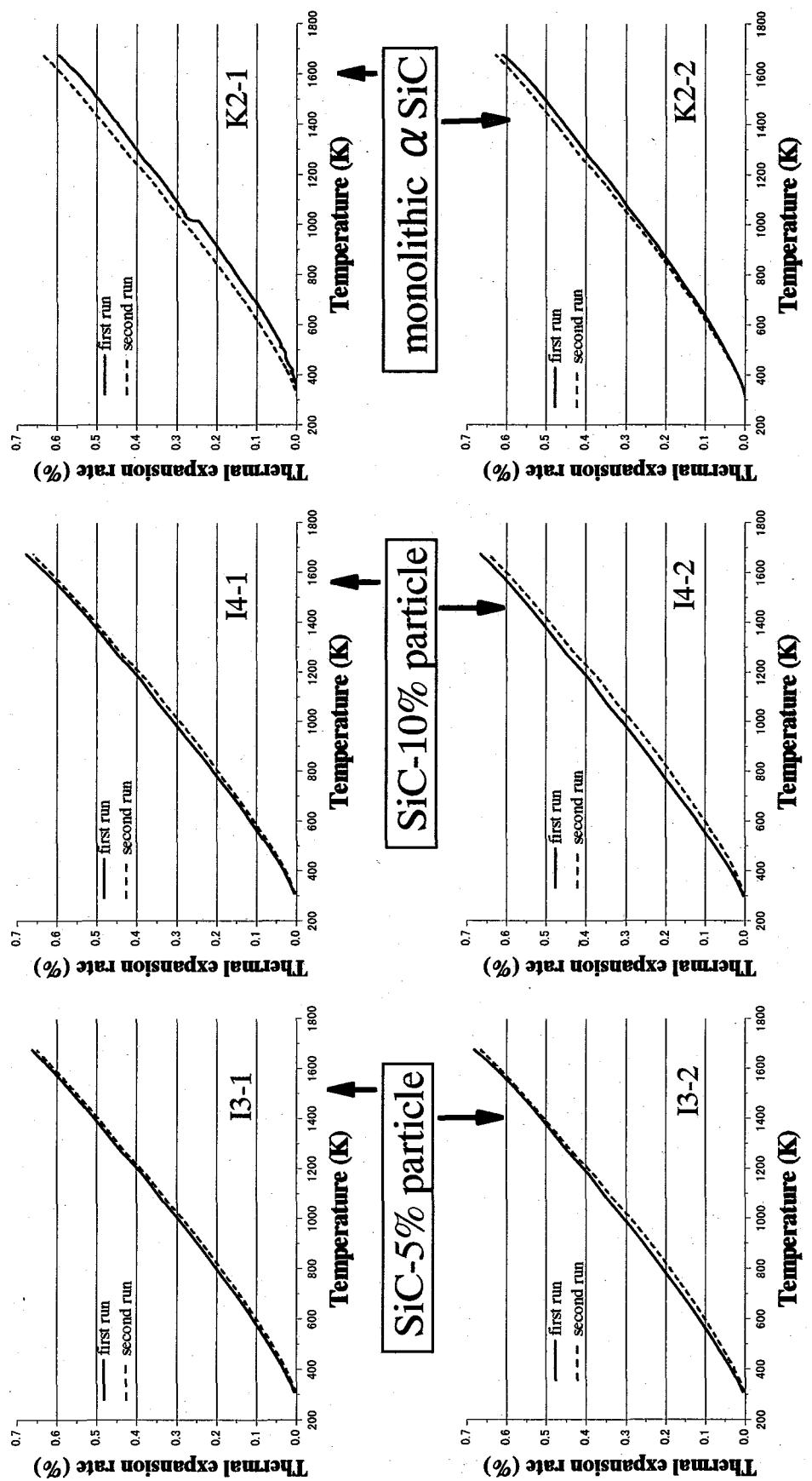


Fig.138 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
 (irradiated specimen:5% & 10%-SiC particle reinforced SiC composite & monolithic  $\alpha$ -SiC,  
 irradiated temperature:1321K, fluence: $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )

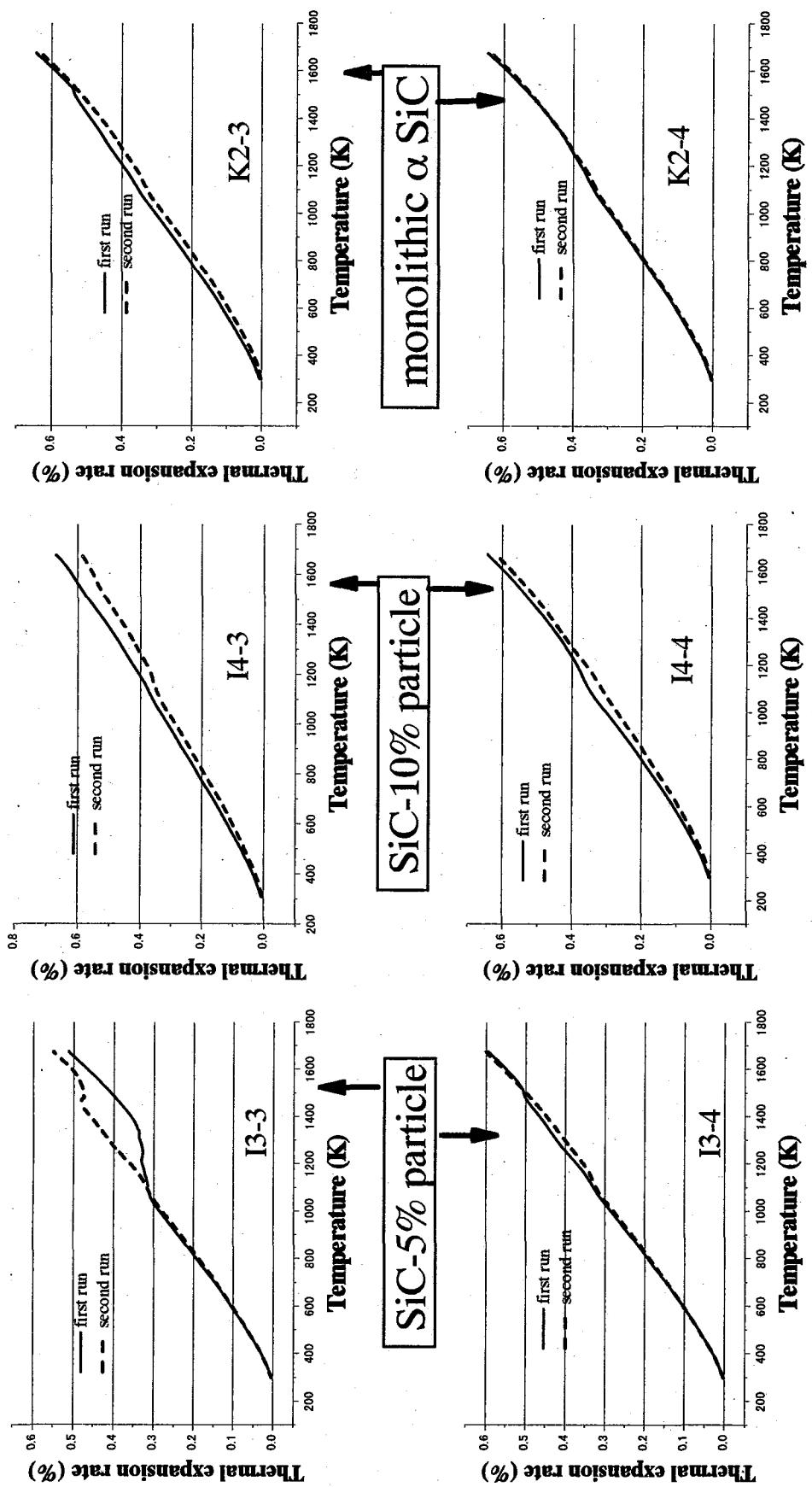


Fig.139 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen:5% & 10% -SiC particle reinforced SiC composite & monolithic  $\alpha$ -SiC,  
irradiated temperature:1473K, fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ )

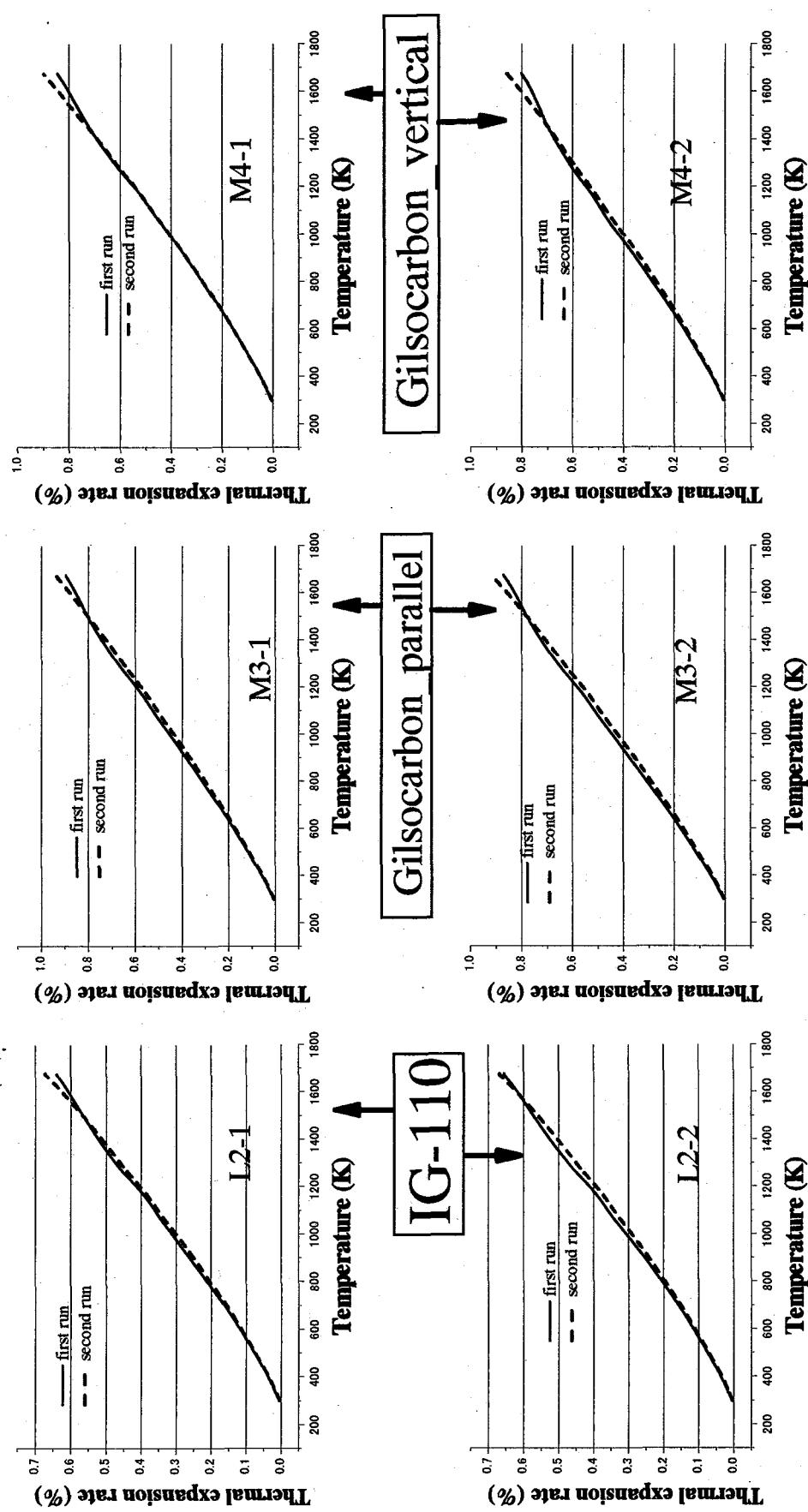


Fig.140 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen:IG-110 & Gilsocarbon, temperature:1003K, fluence: $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

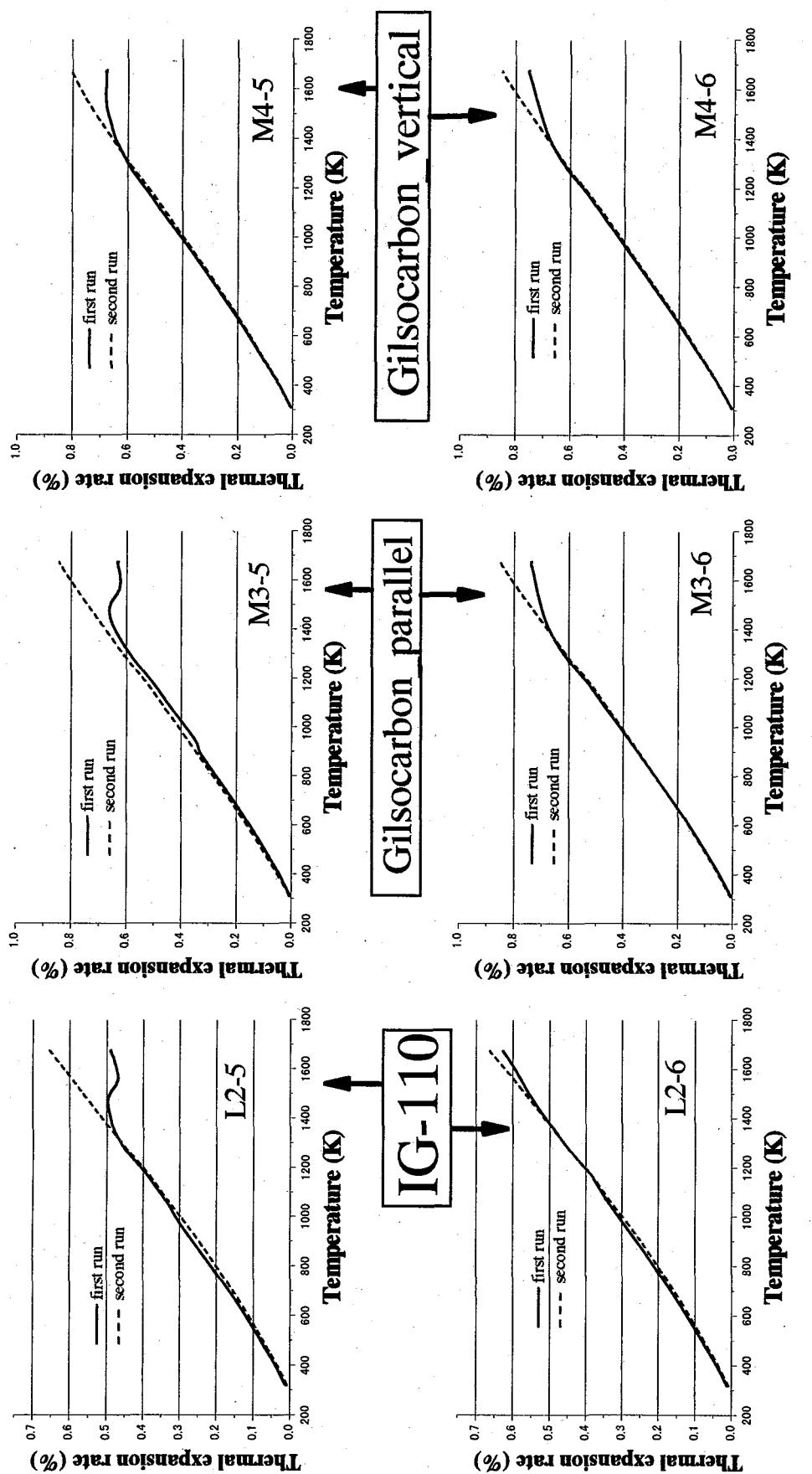
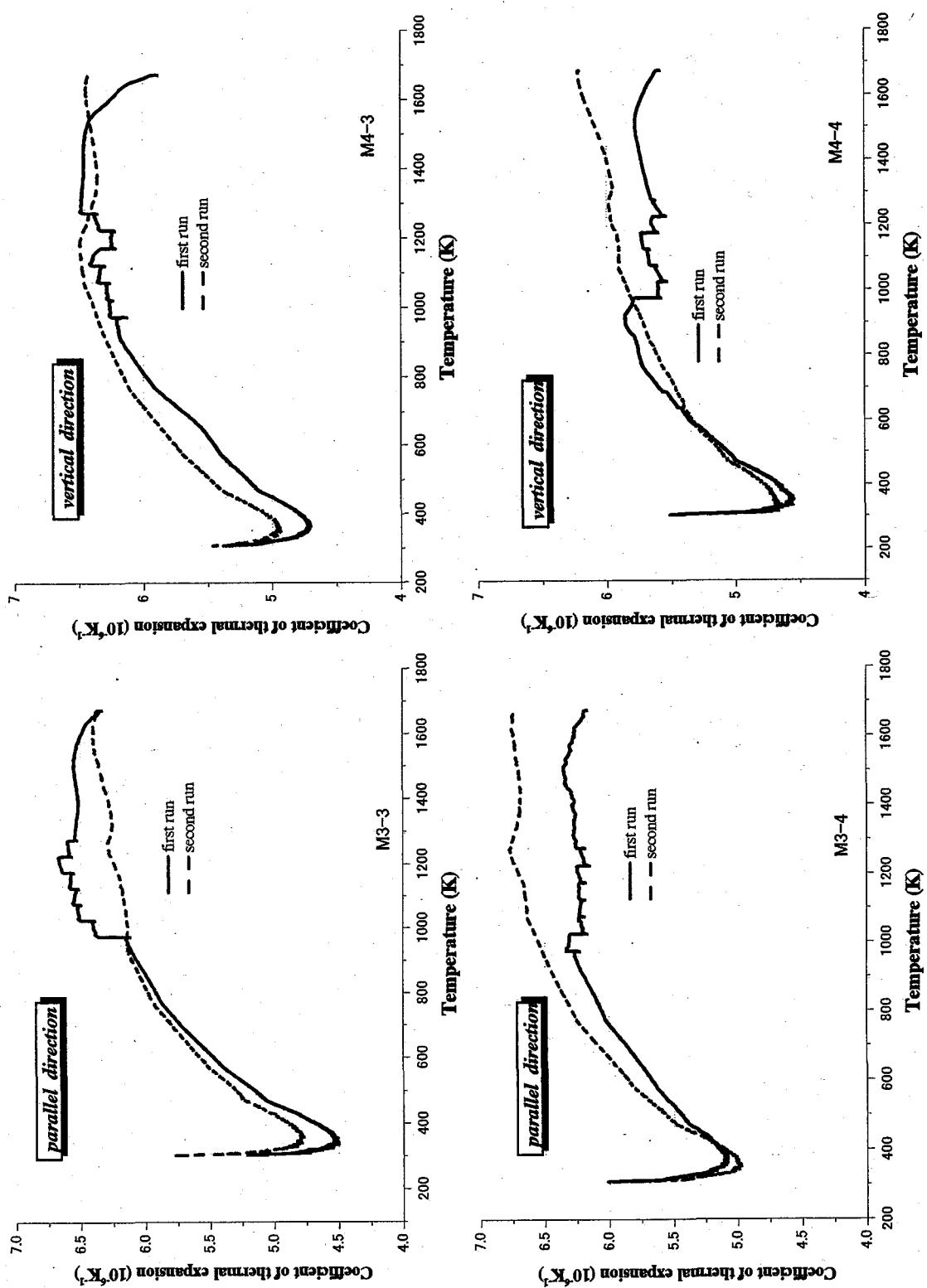


Fig.141 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen:IG-110 & GilsoCarbon, temperature:1078K, fluence: $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)



**Fig.142 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion for the irradiated specimen.  
(irradiated specimen: GilsoCarbon\_parallel/vertical, temperature: 1175K, neutron fluence:  $9 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E > 1MeV)**

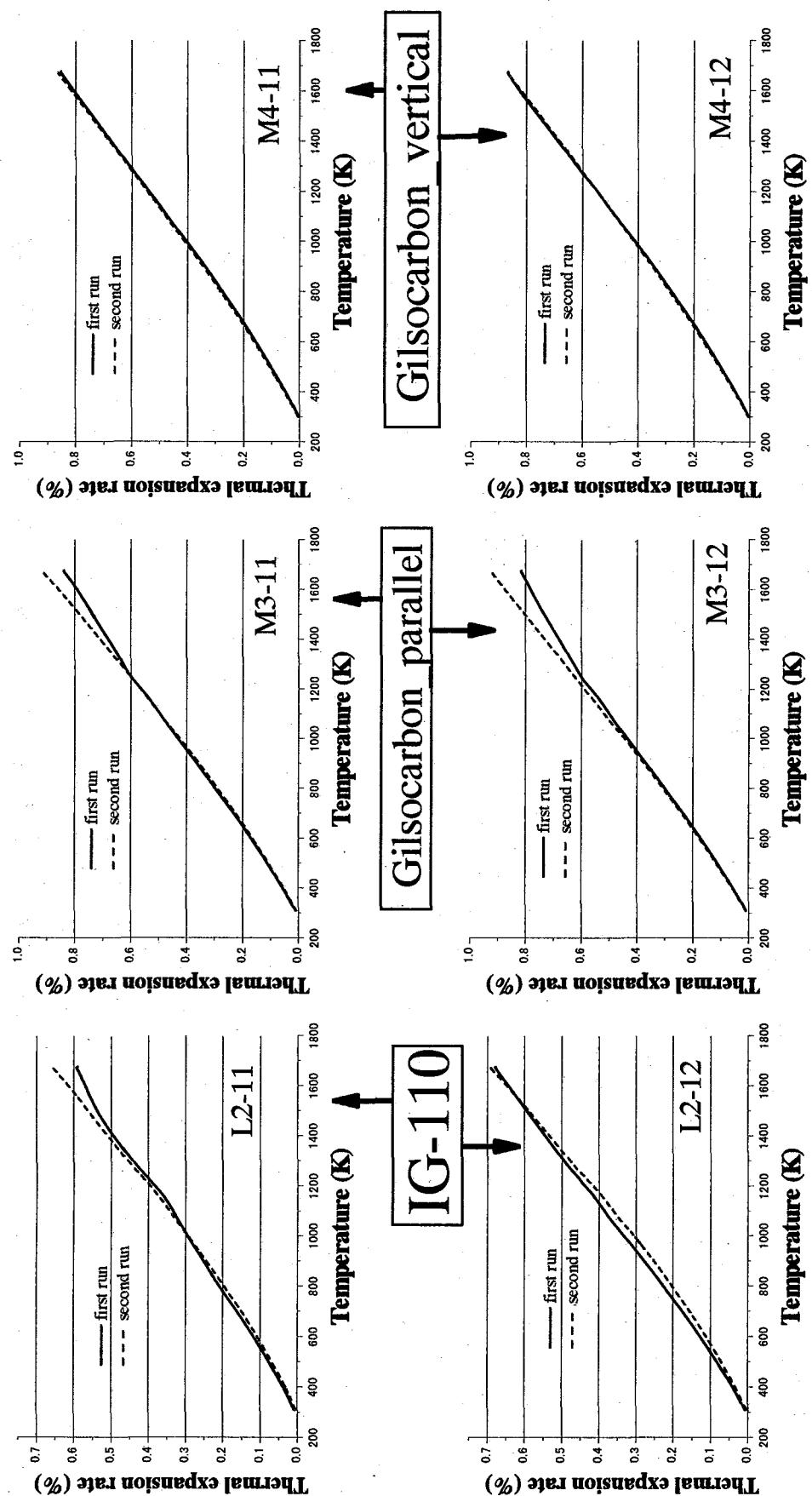


Fig.143 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.

(irradiated specimen:IG-110 & GilsoCarbon, temperature:1321K, fluence: $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

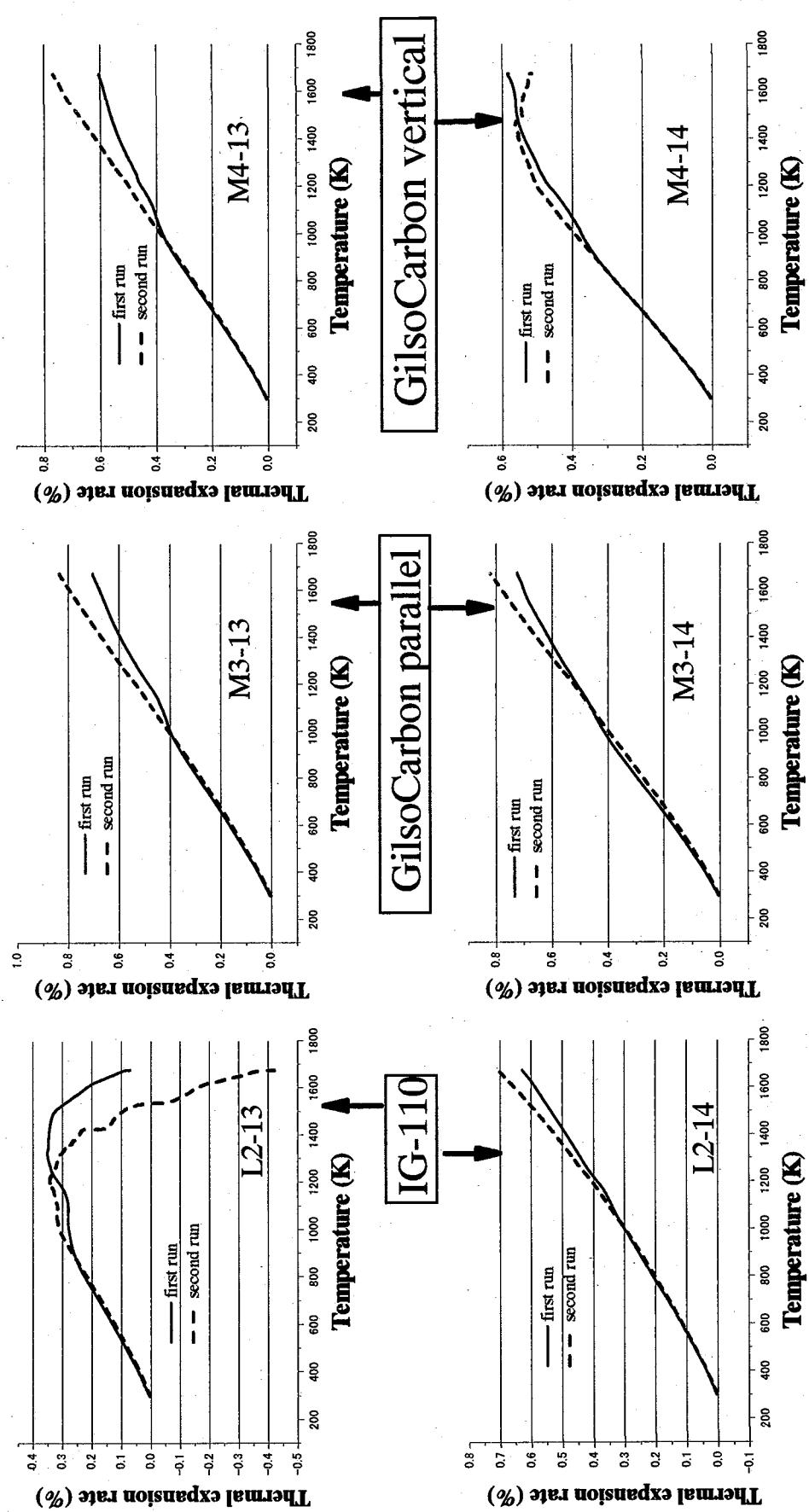


Fig.144 Temperature dependence of thermal expansion rate for the irradiated specimen.  
 (irradiated specimen:IG-110 & GilsoCarbon\_parallel/vertical\_direction  
 irradiated temperature:1473K, fluence: $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ , E>1MeV)

**This is a blank page.**



直熱セパレーツ複合材料の照射試験(No.6)一第1次(98M-41A)、第3次(99M-30A)予備照射試験中間報告書

R100

古紙製造率100%  
白度70%再生紙を使用しています