



JAEA-Technology

2006-053



JP0650674

ジルコニア（3Y-TZP）の熱拡散率

-O2M-73A キャプセル照射試験-

Thermal Diffusivity of Zirconia-Ceramic Materials (3Y-TZP)

-Interim Report on Irradiation Examinations:02M-73A-

馬場 信一 柴田 大受 石原 正博 沢 和弘

Shin-ichi BABA, Taiju SHIBATA, Masahiro ISHIHARA and Kazuhiro SAWA

原子力基礎工学研究部門
耐熱燃料・材料開発グループ

High Temperature Fuel & Material Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

December 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

ジルコニア(3Y-TZP)の熱拡散率
—02M-73A キャプセル照射試験—

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット
馬場 信一・柴田 大受・石原 正博⁺¹・沢 和弘

(2006年10月2日受理)

結晶粒径を微細化した正方晶の安定化ジルコニア(3Y-TZP:3mol% Y_2O_3 Tetragonal Zirconia Polycrystal)は、高温で大きな塑性変形(超塑性)を示すことに着目し、変形機構や超塑性変形後の試料の機械的性質等が調べられている。しかし、ジルコニア基同族材料としての熱障壁被覆材料(TBC:Thermal Barrier Coating)やイナートマトリックス燃料(IMF:Inert Matrix Fuel)の熱物性についての研究報告例は多いが、原子力分野への応用を目指した超塑性材料としての熱特性(比熱、熱伝導率、熱膨張率など)についての報告は少ない。本報告では3Y-TZPの熱特性への照射効果を調べるための中性子照射試験の概要及び同材料の熱拡散率測定結果を述べるとともに、TBCやIMF分野に適用されている3Y-TZP関連材料の熱物性についても概略した。

熱拡散率の測定はレーザーフラッシュ法(L/F法:Laser Flash Method)により行った。得られた測定データの解析法はJISの規定では3手法が採用されている。すなわち、ハーフタイム法($t_{1/2}$)、対数法及び回帰分析法である。これら3手法の原理・利害得失について述べるとともに、3手法を使用して参照材料の等方性黒鉛及び3Y-TZPの熱拡散率を求め、熱損失補正について検討した。また、両材料の熱特性(比熱、熱拡散率、熱伝導率)についても比較検討した。その結果、ハーフタイム法による解析では高温測定データの熱損失補正是必須であること、特に低熱拡散率値を示す3Y-TZP試料の場合は室温から高温まで一貫して熱損失補正が必要であることが分かった。3Y-TZPの熱伝導率は約 $3\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ でジルコニア基同族材料の $1.5\sim2.0\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と比較して近い値を示した。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村百方白根2-4

+1 経営企画部

Thermal Diffusivity of Zirconia-Ceramic Materials (3Y-TZP)
— Interim Report on Irradiation Examinations : 02M-73A —

Shin-ichi BABA, Taiju SHIBATA, Masahiro ISHIHARA⁺¹ and Kazuhiro SAWA

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October2, 2006)

The ceramic-materials, especially grain refining 3mol%-yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals, 3Y-TZP, has investigated for the deformation mechanism and mechanical properties of super plastically deformed in high temperature. There are many reports of the thermal properties concerning zirconia-based family materials as thermal barrier coating (TBC) and also as inert matrix fuel (IMF) although few reports belong with the super plastically materials which is expected to apply the nuclear energy field. This paper describes the outline of the neutron irradiation test on the thermal properties of 3Y-TZP. The measured data of thermal diffusivity for the 3Y-TZP and the outlines of the thermal properties for zirconia-based materials applied to the TBC/IMF are also described in this report.

The thermal diffusivity is measured by the laser flash method. (L/F method) The analyses of the data are adopted with the 3-techniques regulated on Japan Industrial Standard (JIS). Namely, it is ①the half-time method, ②logarithmic and ③regression analysis. The principles of the 3-techniques and its characteristics are explained, and the measurements of thermal diffusivity for the both materials isotropic graphite as reference materials and 3Y-TZP are carried out, and discussed to the heat loss. It is necessary to the correction of heat loss in the half-time method for measured at high temperature, and also especially need to the low-thermal diffusivity such as 3Y-TZP. In the results, the thermal conductivity of 3Y-TZP material has $3\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, zirconia-based family materials has almost nearly $1.5 \sim 2.0\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Keywords: Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity, 3Y-TZP, Laser Flash Method, Half Time Method, Logarithmic Method, Regression Analysis, Heat Loss, Isotropic Graphite.

⁺¹ Policy Planning and Administration Department

目 次

1. 緒言 -----	1
2. 照射試験の概要 -----	2
2.1 装荷試料及び照射キャプセル -----	2
2.1.1 装荷試料 -----	2
2.1.2 照射キャプセル -----	2
2.2 照射試験 -----	3
2.2.1 照射実績 -----	3
2.2.2 フルエンスモニター(F/M)による中性子照射量評価 -----	3
2.2.3 使用計算コード -----	3
3. 3 Y-TZP の熱拡散率 -----	6
3.1 热拡散率と热伝導率 -----	6
3.2 3 Y-TZP 関連材料の热伝導率 -----	7
3.2.1 热障壁被覆材料(TBC) -----	7
3.2.2 イナートマトリックス燃料用材料(IMF) -----	8
3.3 热拡散率测定装置 -----	9
4. 热拡散率のデータ解析手法 -----	11
4.1 $t_{1/2}$ 法及び t_x 法 -----	11
4.2 対数法 -----	13
4.3 CFP 法 -----	16
5. 解析結果と検討 -----	19
5.1 参照試料 (等方性黒鉛) -----	19
5.2 3Y-TZP -----	22
5.3 3Y-TZP 热特性の温度依存性 -----	24
6. 結言 -----	26
謝辞 -----	27
参考文献 -----	27
付図 -----	31

Contents

1. Introduction -----	1
2. Outlines of Irradiation Test -----	2
2.1 Irradiated Samples and Capsule -----	2
2.1.1 Irradiated Samples -----	2
2.1.2 Irradiated Capsule -----	2
2.2 Irradiation Test -----	3
2.2.1 Irradiation History -----	3
2.2.2 Evaluation of Neutron Fluencies by F/M -----	3
2.2.3 Calculation Code -----	3
3. Thermal Diffusivity of 3Y-TZP -----	6
3.1 Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity -----	6
3.2 Thermal Conductivity for Zirconia-based Materials -----	7
3.2.1 Thermal Barrier Coating (TBC) -----	7
3.2.2 Inert Matrix Fuel (IMF) -----	8
3.3 Apparatus for Thermal Diffusivity -----	9
4. Analysis Methods for the Thermal Diffusivity Data -----	11
4.1 $t_{1/2}$ and t_x Method -----	11
4.2 Logarithmic Method -----	13
4.3 Regression Analysis (CFP Method) -----	16
5. Results and Discussion -----	19
5.1 Reference Material (Isotropic Graphite) -----	19
5.2 3Y-TZP Material -----	22
5.3 Temperature Dependences on Thermal Properties for 3Y-TZP -----	24
6. Summary -----	26
Acknowledgements -----	27
References -----	27
Appendices -----	31

1. 緒 言

安定化ジルコニアは高温における体積変化を緩和させて高温域における破壊防止を達成したことにより、工業用途を飛躍的に拡大させ魅力的な素材となつたことはよく知られている。ジルコニア(ZrO_2)の体積変化は1100°C付近の正方晶→単斜晶への相変態により4.6%程度膨張することで、これが昇降溫等の熱サイクル時の破壊の原因となっていた⁽¹⁻³⁾。この問題が解決されてから、安定化ジルコニアの優れた熱機械的性質、耐腐食性などの化学的性質を活かした高温分野での適用が拡がったのである。安定化ジルコニア系超塑性セラミックス材料への中性子照射試験については、既に著者らによる検討が報告⁽⁴⁾されているが、本報告では高温域での適用を検討する際の最も重要な熱物性指標の一つである熱拡散率／熱伝導率測定手法について検討を行った。原子力産業分野、特に高温ガス炉の高温構造部材としての適用を図るための鍵となる熱特性への照射効果の研究について、中性子照射試験の概要を述べる。本照射試験は、照射効果の最も顕著に発現する温度領域である室温から50°C以下の照射条件に設定した。キャップセル装荷試料は直径10mm×厚さ1mmと2mmの2種類、各々5個とした。すなわち、本照射試験の意義は3Y-TZPの熱拡散率に及ぼす照射効果の基礎データを収集することにある。

近年、高温域における安定化ジルコニアの用途は拡大途上にある。セラミックス材料が通常ほとんど塑性変形を示さないのでに対して、結晶粒径を微細化した正方晶の安定化ジルコニア(3mol% Yttria stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal, 3Y-TZP)等のセラミックスが高温で大きな塑性変形(超塑性)を示すことに着目し、超塑性変形機構や超塑性変形後の試料の機械的物性等に対する照射効果を明らかにするための研究が進められている。次に、特に熱拡散率／熱伝導率を重視した関連分野での適用例をとり上げ、同材料の熱特性研究の現状を概観する。また、中性子照射試験用供試験片3Y-TZPについて照射前の熱拡散率データを精度よく求めるために、レーザーフラッシュ法(L/F)を原理とした熱拡散率測定装置の仕様を明示し、得られた測定データの代表的な解析手法であるハーフタイム法($t_{1/2}$)、対数法及び回帰分析法の3種類の手法を説明する。この手法を用いて3Y-TZPとの比較検証用の参考試料(等方性黒鉛)の評価についても記述した。3Y-TZP試料の熱拡散率は1000Kを越える高温測定では、原データと熱損失補正值との差が9%以上となるため、精確な値を求めるには熱損失補正が必須であること、さらに参考試料と3Y-TZPの比熱、熱拡散率及び熱伝導率の温度依存性について評価した結果を述べる。

2. 照射試験の概要

2.1 装荷試料及び照射キャプセル

2.1.1 装荷試料

キャップセルに装荷した 3Y-TZP 試料は東ソー(株)が製造した製品で、組成分析結果を Table 2-1 に示す。寸法及び個数は、直径 10mm × 厚さ 1mm → 5 個、厚さ 2mm → 5 個、計 10 個であるが、同試料の厚さ 1mm 及び 2mm 試料を各々 25 個、計 50 個製造した。同試料について製造の仕上がり精度を確認するため、試料の厚さ集団別に嵩密度の Weibull plot を求めた。その結果、Fig. 2-1 に示すとおり 1mm 試料の Weibull 係数 m は 34.6、2mm 試料で 27.9 であり、厚さの薄い試料の方がバラツキは小さいことが分かった。

Table 2-1 Chemical compositions of the sample for 3Y-TZP irradiation test.

Elements	Unit	Specification	Result of analysis
Y ₂ O ₃	%	4.95～5.35	5.24
Al ₂ O ₃	%	0.15～0.35	0.254
SiO ₂	%	Max. 0.02	0.006
Fe ₂ O ₃	%	Max. 0.01	Max. 0.002
Na ₂ O	%	Max. 0.04	0.011
lg-loss	%	2.7～3.9	3.40
ZrO ₂	%	Bal.	Bal.
Crystallite Size	nm	Not specified	37

(Grade:TZ-3YSB-E、Lot_No.:S301064B)

2.1.2 照射キャプセル

3Y-TZP 試料を JMTR の反射体領域において照射するために使用したインナーキャップセルの概略構造を Fig. 2-2 に示した。本キャップセルは新規のバスケット(1 孔反射体用アルミニウム製バスケット)を使用し、インナーキャップセルは外筒、試料容器、上部端栓等により構成されている溶接密封構造である。外筒と上部端栓の溶接は電子ビーム溶接(真空雰囲気中)にて実施した。試料容器内部は高純度ヘリウムで封入されたが、ヘリウム封入孔の溶接も電子ビーム溶接で実施した。インナーキャップセル内の構造部材には、試料容器(A1050 製)が配置され、試料容器内部には下部よりスペーサーが 2 段(試料側スペーサーの中心孔には A-V 型フルエンスモニター 1 本装荷)、照射試料 A, B が各 5 段、スペーサーが 1 段重ねられ、最上段にはインナー構成部材のずれ防止の為のスプリング(SUS316-WPA 製)が配置されている。

本キャップセルの使用条件は、JMTR の軽水冷却材温度(50°C)において 1 サ

イクル照射試験に供するために設計されたもので、インナーキャップセル外筒の設計圧力条件は最高使用圧力 1.76MPa(外圧)、0.3MPa(内圧)である。

2.2 照射試験

2.2.1 照射実績

材料試験炉(JMTR)で#148 サイクル(2003 年 6 月 17 日—6 月 20 日)及び#149 サイクル(2003 年 10 月 4 日—11 月 3 日)の運転期間中、照射孔 G-4 において 786.91 時間の照射を行った。#148 サイクルは計画外停止により照射時間短縮(実質の照射時間は 76.37h)となつたため、次の#149 サイクルまで照射試験を延長した。

2.2.2 フルエンスモニター(F/M)による中性子照射量評価

高速中性子照射量の測定には鉄ワイヤ、熱中性子照射量の測定にはアルミニウムーコバルト合金{Al(Ti)-Co}を使用して $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 反応及び $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ 反応によって生成する ^{54}Mn 及び ^{60}Co の生成量をゲルマニウム(Ge)検出器による γ 線分析により定量し、中性子照射量を求めた⁽⁵⁾。

F/M 測定位置から評価した高速中性子、高速中性子束、熱中性子照射量及び熱中性子束のインナーキャップセル中心軸方向分布図を Fig.A-1～A-4 に示した。また、高速中性子照射量及び高速中性子束の中心軸ピーク値は各々 $2.51 \times 10^{23}(\text{m}^{-2})$ 及び $8.86 \times 10^{16}(\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ であった。

2.2.3 使用計算コード

F/M の放射化実効断面積算出に使用する中性子スペクトルの計算には、モンテカルロコード MCNP4B を、核データライブラリとしては JENDL3.2 を各々使用した。

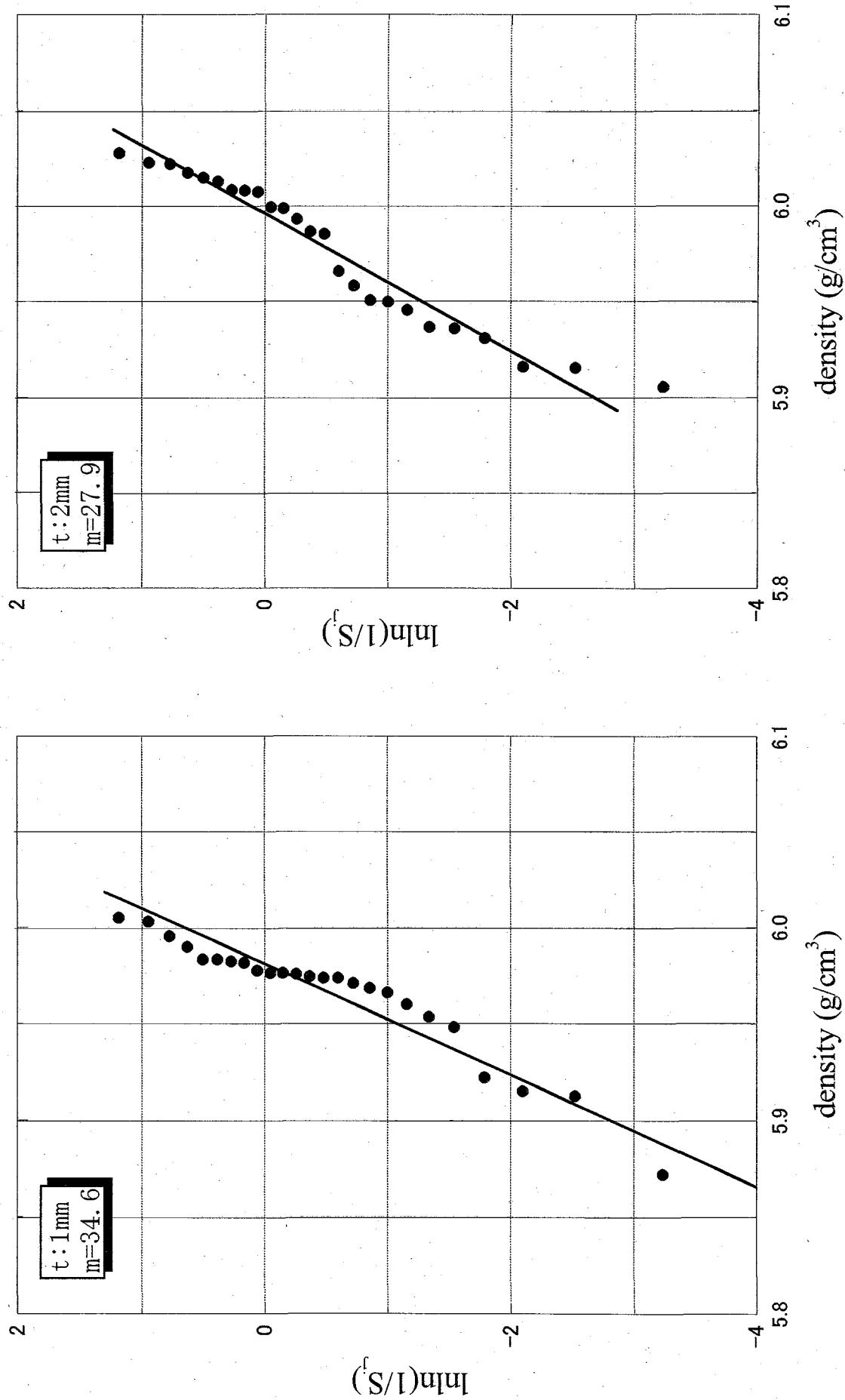


Fig. 2-1 Weibull plot of density for zirconia(3Y-TZP) specimen.

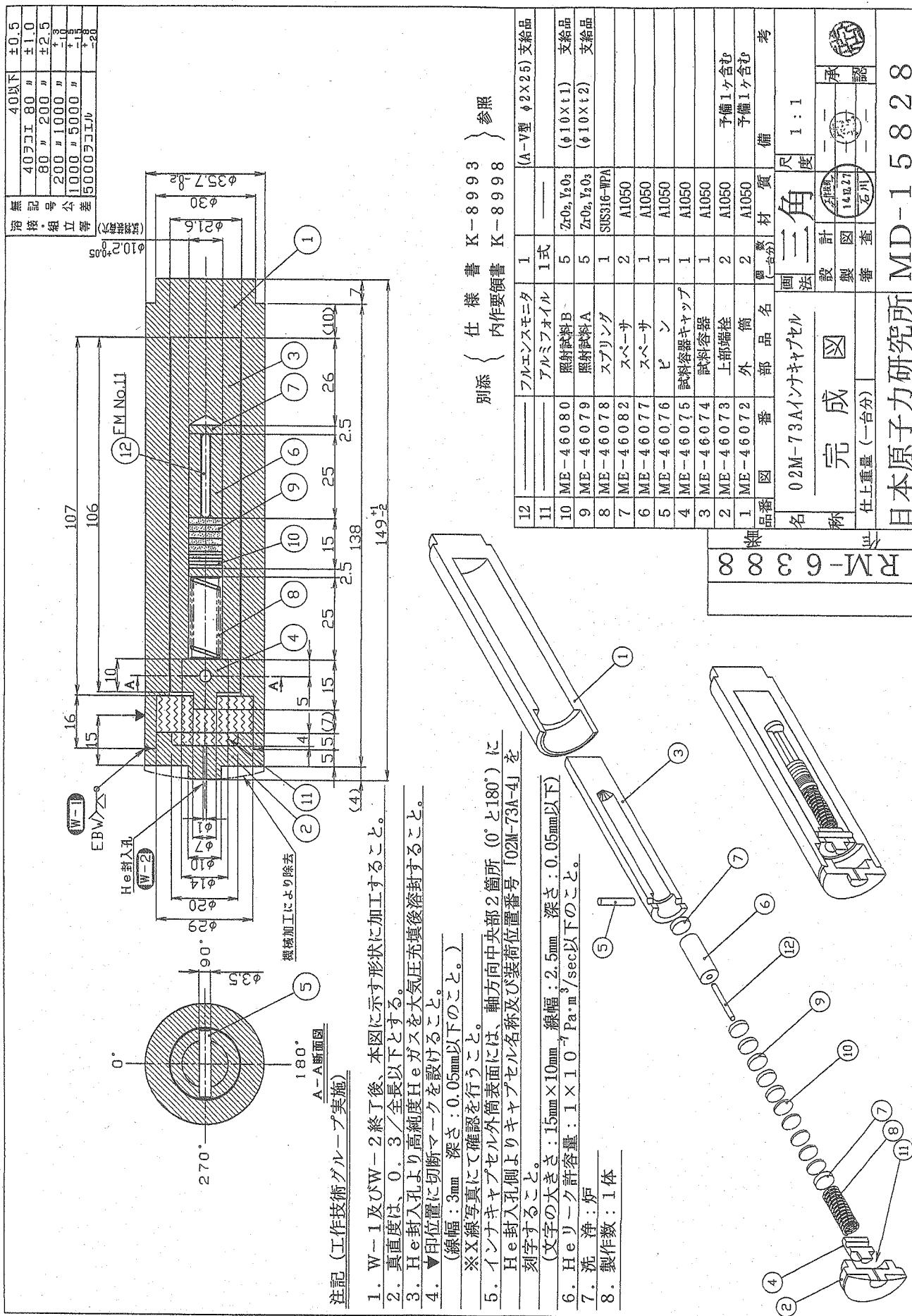


Fig. 2-2 Irradiation capsule 02M-73A.

3. 3Y-TZP の熱拡散率

3.1 热拡散率と热伝導率

物質中の熱の輸送に関係する媒体はいくつか存在するが、粒子あるいは量子の名で挙げれば、フォノン、電子、励起子、光子、マグノン、イオンなどである⁽⁶⁾。金属の熱伝導は電子が最も大きく寄与するが、セラミックスの熱伝導に最も寄与する媒体は格子振動、すなわちフォノンの寄与である。

熱伝導率 K は物体内の任意の層を通過する一次元熱流量 Q と、その層の温度勾配との比例関係として定義される⁽⁷⁾。すなわち、

$$Q = -K \left(\frac{dT}{dx} \right) A \quad (3.1)$$

ここで A は温度変化最大の x 方向に垂直にとった断面積、 dT/dx は層の温度勾配である。一般的に、温度分布のある均質な三次元物体内の非定常な熱流は、(3. 2)式に示す熱伝導方程式を満足する。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] \quad (3.2)$$

比例定数 α ($m^2 \cdot sec^{-1}$) は熱拡散率で、熱伝導率 K ($Wm^{-1}K^{-1}$) との間に次ぎの関係式がある。

$$\alpha = K / \rho C_p \quad (3.3)$$

ρ ($g \cdot m^{-3}$) は嵩密度、 C_p ($J \cdot g^{-1} K^{-1}$) は定圧比熱である。熱伝導率 K が定常的な熱流下で定義されるのに対して、熱拡散率 α は非定常な熱流下で知覚される量である。ある化学種についての質量流を J 、濃度を C とすれば拡散係数 D ($m^2 \cdot sec^{-1}$) は(3.4)式で定義される。

$$J = D \operatorname{grad} C \quad (3.4)$$

すなわち、(3.3)式の α が拡散係数 D と同一の次元を持つことで、熱拡散率と呼ばれる由縁となっている⁽⁶⁾。

3.2 3Y-TZP 関連材料の熱伝導率

3.2.1 熱障壁被覆材料(Thermal Barrier Coating, TBC)

焼結法により製造したバルク材の 3Y-TZP は、 ZrO_2 を主成分に Y_2O_3 を 3 mol % (5.15 mass %) 固溶含有した組成であり、主として正方晶(tetragonal, t-相)構造である。一方、TBC として適用されている YSZ(plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia)は Y_2O_3 を 3~6mol %に增量した組成である。これは立方晶(cubic, c-相)中に少量の t-相が析出分散した部分安定化ジルコニアと呼ばれている。プラズマスプレー処理した YSZ の熱伝導率がバルク材よりも低くなる原因は、スプレー処理中に生成する気孔と被覆層内に出来るマイクロクラックによると云われている。被膜材料として 3Y-TZP 単独の適用例では、ガスタービンの入口温度を高くするために、 Y_2O_3 添加ナノ結晶(粒径 100nm 以下)ジルコニアをプラズマスプレー処理した TBC の熱伝導率が報告されている⁽⁸⁾。同材料の理論密度(Theoretical Densities)63%~99%、結晶粒径(Grain Diameter)30~150nm の範囲について熱伝導率の温度依存性を調べた結果によれば、TD63%_GD30nm の熱伝導率は室温から 350°Cまでは約 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ で変化なく推移するが 400°Cを越えると徐々に増加していく。TD99%_GD150nm の熱伝導率は $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ で室温から 1000°Cまで大きな変化はない。一方、单斜晶(monoclinic, m-相)_TD98%_GD63nm の熱伝導率は、室温で $6.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ を示し温度の増加とともに低下して 800°Cでは $3.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ となる。このように熱伝導率が $1/T$ 温度依存性を示す曲線の特徴は、m-相ジルコニアの熱伝導率が phonon-phonon 散乱(Umklapp processes)により支配されている典型的な例である。P.G. Klemens and M. Gell⁽⁹⁾ は 7% Y_2O_3 ジルコニア/TBC に内在する原子レベルの点欠陥及び結晶粒界における phonon 散乱が熱伝導率低下に及ぼす効果について、GD5nm~ $1 \mu\text{m}$ の熱伝導率の温度依存性を理論計算した。この場合の原子レベルの点欠陥とは、 Y_2O_3 を添加することにより陰イオンであるジルコニア中の O^{2-} イオンの数が少くなり、この位置に空きが生じることにより生成する「酸素空孔欠陥」及び「溶質陽イオン」である。GD5nm の熱伝導率は、室温から 1000°Cまで $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 以下で推移し温度依存性はほとんど示さないが、 $GD1 \mu\text{m}$ に増加した場合、室温付近において $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、その後、温度の増加とともに緩く減少する温度依存性を示す結果を得た。藤井ら⁽¹⁰⁾は 8wt% Y_2O_3 /YSZ 等 6 種類の YSZ/TBC の遮熱性能について実験的な検討を行った。その結果、熱伝導率 K は次式の関係にあることを報告した。

$$K = -0.90P - 0.0040F + 0.00026T + 9.28 \quad (3.5)$$

ここで、P:気孔率 ($P = 9.59 - 0.0262H^{0.5}$, H:熱処理時間)

F:立方晶(c-相)の比率

T:温度

プラズマスプレー処理した単層／多層膜のYSZ/TBCの熱伝導率の温度依存性について実験的に検討した結果、バルク材のYSZと比較して大きく低下するが、その原因は気孔及び膜間境界相の熱抵抗であるとしている⁽¹¹⁾。YSZ/TBCの熱伝導率に及ぼす熱処理(流動アルゴンガス中 1300°C-50hr.)の結果、熱伝導率の増加が測定されたが、その原因是マイクロクラックが完璧に閉止したためであることを透過電子顕微鏡(TEM)により確認したことが報告⁽¹²⁾された。1000、1200 及び 1400°C-50hr.熱処理による熱伝導率と微細構造に及ぼす効果について調べた Trice et al⁽¹³⁾は、1400°C-50hr. の熱処理後に熱伝導率が増加する原因是、t-相及び c-相に変わってそれよりも熱伝導率の高いm-相 ZrO₂が形成されるからであることをX線回折/TEM観察により明らかにしている。Schlichting et al⁽¹⁴⁾は緻密質／多孔質 YSZについて 25°C-1000°Cの温度範囲の熱伝導率を測定した。その他、3.3wt%MgO部分安定化ジルコニア(Partially Stabilized Zirconia, PSZ)試料について、密度及びm-相、t-相及びc-相の比率を変えて熱伝導率を測定した結果、低密度でm-相の比率が多い試料ほど熱伝導率が低くなることを示した⁽¹⁵⁾。

YSZを複合材料組成の一部に使用する耐熱被覆材料としての応用例では、ジルコニアを主成分として含有する材料、例えば NZP(NaZr₂P₃O₁₂)の同族材料(Ca_{0.5}Sr_{0.5}Zr₄P₆O₂₄, SrZr₄P₆O₂₄, Ba_{1.175}Zr₄P_{5.65}Si_{0.35}O₂₄)等は YSZの熱伝導率を更に低下させて使用するためにNZP族を第2相として添加している。いわゆる NZP/YSZ複合被覆材料である。そのため、3Y-TZP粉末にNZP粉末を添加混合し、プラズマスプレー法により施工処理して被膜材料を形成する⁽¹⁶⁾。また、Nicalon/SiC複合材料やNi基超合金の被膜としてもNZP族材料が検討されている⁽¹⁷⁾。この他、炭素複合材料(c/c composite)の高温酸化防止用被膜材料として、このNZP族を利用した例が報告されている⁽¹⁸⁾。

3.2.2 イナートマトリックス燃料用材料 (Inert Matrix Fuel, IMF)

最近、軽水炉において余剰プルトニウムを燃料として利用するために、イットリア安定化立方晶ジルコニアを基本組成としたIMF:Er_xY_yPu_zZr_{1-x-y-z}O_{2-(x+y+z)}, (x+y=0.15, z:0.05-0.15)が注目され、基礎的な研究開発が行われている⁽¹⁹⁾。Degueldre et al⁽²⁰⁾はジルコニア基IMF及び模擬燃料材の熱伝導率をL/F法により室温から1250Kまで測定し、イットリア／エルビア／トリア／セリア添加物による立方晶固溶体の格子定数への影響、酸素

原子空孔の大きさと密度を考慮して熱伝導率をモデル化した。同モデルから得られた熱伝導率は $2.0\sim2.6\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ の間にあるが温度依存性はほとんど示さない、ことが報告されている。ジルコニア基 IMF の熱伝導率を評価するために分子動力学(Molecular Dynamics, MD) シミュレーションを行い、 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 系の熱伝導率を文献データ値⁽⁸⁾の $2.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と比較し、やや高い結果を得ている。また、イットリウム添加量の増加とともに熱伝導率は減少するが、この理由は熱抵抗としての酸素空孔量が Y ドーピングの結果、増加するためであると評価した⁽²¹⁾。

軽水炉において Pu を混合酸化物(Mixed Oxide, MOX)燃料としてリサイクルすることが数カ国で行われているが、Np, Am, Cm などのマイナーアクチノイド(Minor Actinides, MA) の利用は現状では計画されていない。MA は高放射性廃棄物の中では最もやっかいな超寿命核種である。MA を利用するためにはアクチノイド・ジルコネイト($\text{An}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)が検討されている。原子炉内における熱特性を調べるために UO_2 と比較してジルコニア基の $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ が最も適切な熱物性値を有している、として比熱、熱拡散率及び熱伝導率が調べられた⁽²²⁾。その結果、室温における比熱は約 $0.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、熱拡散率は $500\text{K}\sim1600\text{K}$ において $4\sim5\times10^{-7}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 、平均熱伝導率は測定温度域でほぼ一定の値 $1.33\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ を得ている。Ronchi et al⁽²³⁾はジルコニア基 IMF に U, Pu 及び Am を含有した物質の比熱、熱拡散率及び熱伝導率を調べた。その結果、①様々なジルコニア基材の熱伝導率値は 2 つの極値の間にあって、高い方の値は m-相ジルコニアであり、この物質は原子炉燃料用 UO_2 の値に近い。②低い方の値はプラズマスプレー施工した YSZ あるいは Ce-安定化ジルコニアである。③素材の特徴として、白っぽい酸化物あるいは半透明な材料の熱伝導率は + の温度勾配を示す。その場合の熱伝播はフォトン(光子)が効果的な役割を演ずる。同じような挙動が Y-/Ca-安定化ジルコニアでも観察されている。しかし、フォトンによる熱伝導の寄与は、相対的に高い熱伝導率を有する m-相ジルコニアの場合には明らかに小さくなっている。最近の軽水炉と同一条件下で、MOX 燃料と比較した YSZ/IMF の一般的な熱的挙動を調べるための照射試験が行われた⁽²⁴⁾。その他、軽水炉で効率的に Pu を燃焼させるため、スピネル基材中に Pu を含有した YSZ 粒子を分散させた非均質燃料である岩石型酸化物燃料(Rock-like oxide, ROX)も研究の対象とされている⁽²⁵⁾。

3.3 熱拡散率測定装置

熱拡散率測定に用いた装置は真空理工株式会社(現:アルバック真空理工)の熱定数測定装置(TC-7000H)である。装置の主たる仕様を以下に示す:
 1) 本体試料系: 試料寸法は円板形状で直径 10mm × 厚さ 1~3mm を標準とする

が、実際に用いた試料の最大厚さは SiC セラミックスで 6.2mm, 炭素系セラミックスで 5.0mm であり、両者ともに測定可能であることを確認している。試料に対して水平方向からのレーザー照射とする配置のため、円板試料側面を V 溝の試料台に設置する方式である。

- 2) 真空排気系: 本装置の真空排気装置は試料系容器に直結された油拡散ポンプによって試料系を排気するものである。
 - a) 油拡散ポンプ: 排気速度 160 リットル/秒、
 - b) 油回転ポンプ: 排気速度 20 リットル/分
 - c) 主バルブ&三方バルブ: 圧縮空気動作圧 3~5 kg/cm²·G
 - d) 低真空計: ピラニー真空計(GP-2A) 0.4~3kPa
 - e) 高真空計: 電離真空計(GI-TL3) ~10⁻⁵Pa
- 3) レーザー発振系: レーザーヘッドには直径 10mm × 長さ 100mm のネオジウム(Nd)ロッドを使用している。
 - a) パルス幅／発振波長: ~0.5msec / 1054nm
 - b) 入射エネルギー／出力エネルギー: 2.8kV-800 μF / 10J/pulse
 - c) 冷却: 10 リットル純水 - イオン交換器 - 循環式
- 4) 非接触測定系: 非接触温度センサーには InSb センサーを使用しており、室温測定時には自動絞りは最大となり、測定温度毎に変動する方式である。出力電圧が「0 V」になるよう自動キャンセル回路を介して増幅する。
- 5) 計測回路系: メインアンプの記憶容量は 8000W(ワード)、サンプリング速度は 1~50 μ sec/W, 0.1~5msec/W の切換方式で、高速データ記憶には 2ch の信号取り込み系がある。ch_1:InSb センサー、ch_2:熱電対(R 型)
- 6) 温度制御系: コンピュータ制御方式でソフトには LabVIEWTM5.0 を採用している。加熱は PID 直流加熱方式とした。温度範囲は室温~1500°C (常用 1400°C) を制御している。
- 7) データ処理系: パソコン Dell Dimension J500C, OS_Windows-98/TC-Win105

4. 热拡散率のデータ解析手法

レーザーフラッシュ法により得られた試料裏面の温度応答曲線の解析手法について、 $t_{1/2}$ 法 / t_x 法、対数法及び CFP 法の 3 種類を取り上げて説明する。

4.1 $t_{1/2}$ 法及び t_x 法

本手法はフラッシュ法を最初に提案した Parker 等⁽²⁶⁾の理論に基づいたもので、試料表面をキセノンランプによりパルス状に加熱したときの試料裏面の温度応答から熱拡散率を算出する手法である。その後の技術進歩によりパルス状加熱源はキセノンランプからレーザーエネルギーへ、試料裏面の温度測定は熱電対から非接触赤外温度計へと進展してきたが、基本手法の理論は変わっていない。以下に手法の要点を説明する。

一様な厚さ L の熱絶縁体の小円板試料の初期温度分布が $T(x,0)$ である場合、ある時間 t 経過後の温度分布は Carslaw and Jeager⁽²⁷⁾により以下に示す(4.1)式で与えられる。

$$T(x,0) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \times \cos\frac{n \pi x}{L} \int_0^L T(x,0) \cos\frac{n \pi x}{L} dx \quad (4.1)$$

ここで α は熱拡散率($m^2 sec^{-1}$)、フラッシュパルスの放射エネルギー Q ($J m^{-2}$) が一様な厚さ $L(m)$ の試料前部表面における微小深さ g に一様に吸収される場合、定常状態の温度分布は次式に示すとおりである。

$$\begin{array}{ll} 0 < x < g \text{ の場合} & T(x,0) = Q / \rho C_p g \\ g < x < L \text{ の場合} & T(x,0) = 0 \end{array}$$

この初期条件で式(4.1)は式(4.2)のように表すことが出来る。

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho C_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\frac{n \pi x}{L} \frac{\sin(n \pi g/L)}{(n \pi g/L)} \times \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \alpha t\right) \right] \quad (4.2)$$

ここで、 ρ は密度(gm^{-3})、 C_p は定圧比熱($Jg^{-1}K^{-1}$)、 g は不透明な物質で非常に小

さな数値であるため、 $\sin(n\pi g/L) \approx (n\pi g/L)$ となる。試料裏面 $x=L$ における温度履歴は(4.3)式に示される。

$$T(L,t) = \frac{Q}{\rho C_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \alpha t\right) \right] \quad (4.3)$$

二つの無次元因子として V と ω を次のように定義する。

$$V(L,t) = T(L,t) / T_M \quad (4.4)$$

$$\omega = \pi^2 \alpha t / L^2 \quad (4.5)$$

T_M は試料裏面における最高温度を示している。(4.3),(4.4)及び(4.5)式を組み合わせて(4.6)式を得る。

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \omega) \quad (4.6)$$

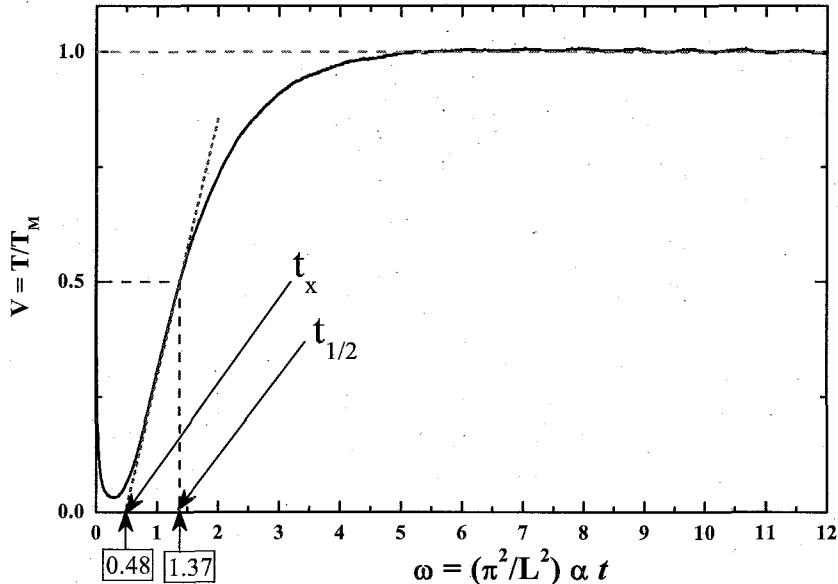


Fig.4-1 Dimensionless plot of rear surface temperature history at 522.3K. (IG-110).

(4.6)式について ω を横軸に、 $V=T/T_M$ を縦軸にプロットすると Fig.4-1(等方性黒鉛、IG-110 を 522.3K で測定したデータ) のように示される。

熱拡散率 α の決定は 2 つの方法で導くことが出来る。1 つは V が 0.5 に等しい時の ω が 1.37 となることを利用した(4.7)式による方法:

$$\alpha = (1.37L^2 / \pi^2 t_{1/2}) \quad (4.7)$$

別の方法は温度上昇曲線中の直線部分を時間軸に外挿し、Fig.4-1 に示したように x 軸を横切る点 $\omega=0.48$ となることを利用した(4.8)式の方法である。

$$\alpha = (0.48L^2 / \pi^2 t_x) \quad (4.8)$$

(4.7)式に示した $t_{1/2}$ は最大上昇温度の半分に達する時間、(4.8)式の t_x は x 軸 (ω) を横切る点が 0.48 となる時間である。両手法はともに試料表面のエネルギー吸収量を知ることなく熱拡散率の決定が出来る利点がある。一方、熱伝導率 K を知るために別途、比熱 C_p と蓄密度 ρ を測定し式(4.9)から求める。

$$K = \alpha \rho C_p \quad (4.9)$$

4.2 対数法

Parker 等の提案した $t_{1/2}$ 法は試料裏面の温度履歴曲線を(4.6)式のようにフーリエ級数で表し、温度上昇 $T(L,t)$ が最大値 T_M の 1/2 に達するまでに要する時間 $t_{1/2}$ を用いて(4.7)式から熱拡散率を求めるのであるが、この手法の欠点は試料の最大温度上昇の数値が直接熱拡散率に影響することである。従って、高温条件下の測定では試料からの熱損失やレーザー光の輝度分布によって大きく変化する。そのため、真の熱拡散率を得るためにには、理想的な状態からのずれを適切に補正してやる必要がある。実際の熱損失補正や輝度分布に対する補正は極めて複雑となるので、十分な精度を有する熱拡散率を求ることは容易ではない。これに対して、ラプラス変換及び項別逆変換を用いて熱拡散方程式を解析する手法によると、温度履歴曲線の立ち上がり部分で一項近似ができて、さらにこの一項近似式から熱拡散率を算出することが可能となる。この手法を対数法と呼んでいる。以下に高橋ら⁽²⁸⁾の導出した対数法の概要を説明する。

レーザー照射した円板状試料内部の熱拡散について、ラプラス変換による一次元熱拡散方程式を作る際、幾つかの理想条件のもとに、 $0 < z < L$ の有限な領域における一次元熱拡散問題を考える。初期条件を $T(z, s)=0$ とし、最初に、温度上昇 $T(z, t)$ のラプラス変換 $T(z, s)$ を熱拡散方程式に代入すると次式を得る。

$$sT(z, s) = \alpha \frac{dT(z, s)}{dz^2} \quad (4.10)$$

$s/\alpha = q^2$ とすれば(4.10)式は z に関して以下の解をもつ。

$$T(z,s) = C_l(s)e^{qz} + C_r(s)e^{-qz} \quad (4.11)$$

$z=0$ の位置で試料は瞬間的に加熱されるが、その際、 $z=0$ 及び $z=L$ すなわち試料表面及び裏面において試料からの熱損失はないものとする。このような仮定のもとでの境界条件として次式を得る。

$$K \frac{dT(0,t)}{dz} = -Q_0 \delta_t \quad (z = 0) \quad (4.12)$$

$$K \frac{dT(L,t)}{dz} = 0 \quad (z = L) \quad (4.13)$$

ここで K は熱伝導率、 Q_0 はレーザー照射による試料表面の単位面積あたりのエネルギーである。(4.12)及び(4.13)式の両辺をラプラス変換して(4.11)式を代入すると、 $q \neq 0$ より $C_l(s)$ 及び $C_r(s)$ については各々(4.14)及び(4.15)式を得る。

$$C_l(s) = \frac{\left(\frac{Q_0}{K}\right)e^{-2qL}}{q(1-e^{-2qL})} \quad (4.14)$$

$$C_r(s) = \frac{Q_0}{Kq(1-e^{-2qL})} \quad (4.15)$$

(4.14)及び(4.15)式を(4.11)式に代入して次式を得る。

$$T(z,s) = \left[\frac{Q_0}{Kq} \right] (e^{qz-2qL} + e^{-qz}) \cdot (1-e^{-2qL})^{-1} \quad (4.16)$$

(4.16)式は逆変換定理によって直接 $T(z,t)$ にすることができる。同式の最後の項はべき級数の和の収束値であるから、これを展開して次式に示す級数の形に表すことができる。

$$\begin{aligned} T(z,s) &= \left(\frac{Q_0}{Kq}\right)(e^{qz-2qL} + e^{-qz}) \times \sum_{n=0}^{\infty} e^{-2nqL} \\ &= \left(\frac{Q_0}{Kq}\right) \sum_{n=0}^{\infty} (e^{qz-2qL} + e^{-qz}) \times e^{-2nqL} \end{aligned} \quad (4.17)$$

このようなべき級数の和の形にした $T(z,s)$ を項別に逆変換して $T(z,t)$ を求めると、 t の小さな値、すなわち試料裏面温度曲線の立ち上がり領域に対しては級数部分の収束性がよい。 $z = L$ における温度変化は(4.17)式において $z = L$ とする。

$$T(L,s) = \left(\frac{Q_0}{K}\right) \cdot 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-(2n+1)qL}}{q} \quad (4.18)$$

試料の最大温度上昇 T_M は、

$$T_M = \frac{Q_0}{L \rho C_p} \quad (4.19)$$

逆変換の表⁽²⁷⁾より $T(L,t)$ を求め、(4.19)及び(4.9)式より(4.20)式を得る。

$$\frac{T(L,t)}{T_M} = 2\left(\frac{L^2}{\pi \alpha t}\right)^{1/2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(2n+1)^2 L^2}{4 \alpha t}\right\} \quad (4.20)$$

(4.20)式の t が小さい領域では収束性がよいので、これより $T_M < 0.9$ の部分については第 1 項のみで十分に近似できるから、試料裏面の温度履歴は(4.21)式のように表すことが可能となる。

$$\frac{T(L,t)}{T_M} = 2\left(\frac{L^2}{\pi \alpha t}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{L^2}{4 \alpha t}\right\} \quad (4.21)$$

対数法の具体的な表現方法は(4.21)式の両辺の対数をとり、 $t^{1/2}$ を左辺に移項して(4.22)式を得る。

$$\ln(t^{1/2} \cdot T/T_M) = \ln\left[2\left(\frac{L^2}{\pi \alpha}\right)^{1/2}\right] - \frac{L^2}{4 \alpha t} \quad (4.22)$$

T_M は時間に依存しない項であるから、(4.22)式は次式のように変形される。

$$\ln(t^{1/2} \cdot T) = \ln\left[2 \cdot T_M \left(\frac{L^2}{\pi \alpha}\right)^{1/2}\right] - \frac{L^2}{4 \alpha t} \quad (4.23)$$

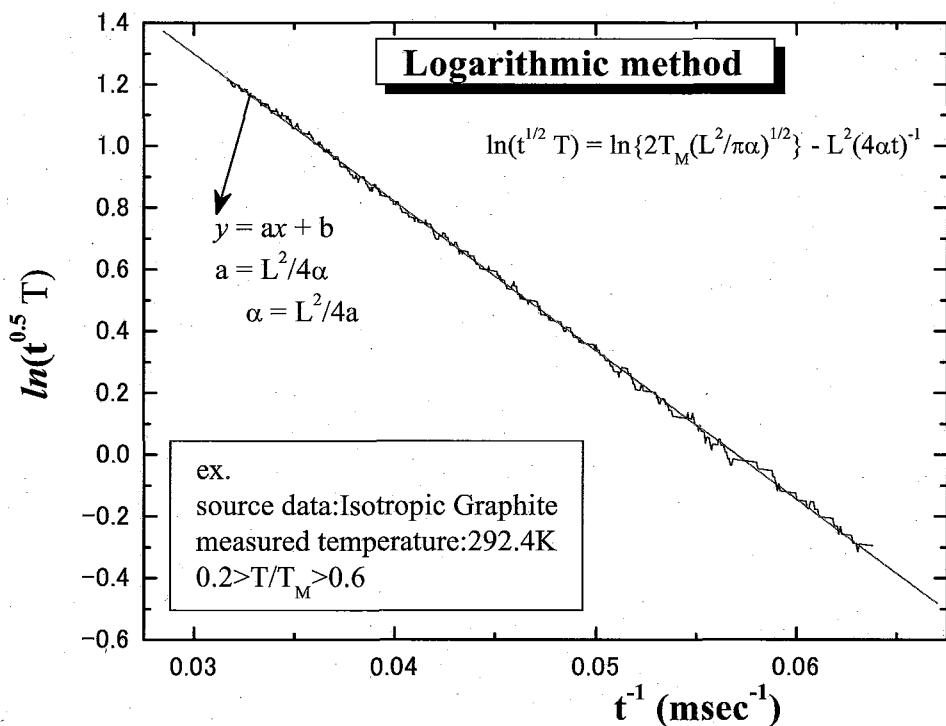


Fig.4-2 Plot of $\ln(t^{0.5} T)$ vs. t^{-1} for experimental data at 292.4K.

これより試料裏面温度曲線の立ち上がり領域($T/T_M < 0.9$)について、Fig.4-2に示したように測定時間の逆数 t^{-1} に対して $\ln(t^{0.5} \cdot T)$ をプロットすれば直線となり、その傾き $-L^2/4\alpha$ から熱拡散率 α を求めることができる。JIS R 1611-1997によれば温度履歴曲線の立ち上がり領域は $0.3 < T/T_M < 0.6$ にするよう規定されているが、低熱拡散率試料の高温測定では必ずしもこの条件を満たすことが出来ない場合もある。

4.3 CFP 法

CFP 法(Curve-Fitting Program)は、レーザーフラッシュ法により得られた試料裏面温度変化曲線全体を Cape & Lehman⁽²⁹⁾の式に基づく理論曲線でフィットして熱拡散率を算出する手法である。高温測定あるいは低熱拡散率試料の測定においては、試料から外界への熱損失が増大し、断熱条件の仮定が成立しない。こうした条件の下では「試料からの熱損失は Newton の冷却則で表される」に置き換えて、その時の試料裏面温度変化の解析解を回帰分析の目的関数とした手法が有効である。この手法は(1)ハーフタイム法及び(2)対数法に追加して(3)回帰分析から計算する手法として JIS 1611-1997 にも明記された。Baba ら^(30,31)の開発した「CFP32 for Windows」⁽³²⁾は Cape & Lehman の

式を基礎としてパソコンにより簡単に計算できるプログラムである。以下に CFP 法アルゴリズムの前提となる理論式の導出について以下に説明する。

Parker et al の導出した(4.6)式は、理想的な測定条件が満たされた場合のものである。その際、定義した(4.5)式の ω に替えて $t_0 = L^2 / (\pi^2 \alpha)$ 、 $T_M = Q / Cp$ (Q : 試料の吸収したエネルギー、 Cp : 試料の熱容量) とすれば、(4.6)式は(4.24)式に変形できる。

$$V = T_M \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 t/t_0) \right] \quad (4.24)$$

熱損失の大きさを表す無次元数 Biot 数があまり大きくない場合、Cape & Lehman は有用な式を導出した。試料表裏面の Biot 数 Y_x 、試料側面の Biot 数 Y_r は式(4.25)及び(4.26)に示される。

$$Y_x = 4 \sigma \varepsilon_x \Theta^3 L / K \quad (4.25)$$

$$Y_r = 4 \sigma \varepsilon_r \Theta^3 L / K \quad (4.26)$$

ここで Θ : 定常状態での試料温度、 σ : Stefan-Boltzmann 定数(5.67032 ± 0.00071) $\times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)、 ε_x 及び ε_r : 試料表裏面及び側面の実効的な半球全放射率である。 $Y_x, Y_r \ll 1$ であれば単一の Biot 数 $Y = Y_x + (L/r)^2 Y_r$ により熱放射の寄与が表され、試料裏面の中心温度 $T(t)$ に対して以下の展開式が成立する。ここで L : 試料厚さ r : 試料半径である。

$$T(t) = T_M \sum_{m=0}^{\infty} A_m \exp\left[-\left(\frac{X_m}{\pi}\right)^2 t/t_0\right] \quad (4.27)$$

ここで、

$$A_m = \frac{2(-1)^m X_m^2}{(X_m^2 + 2Y + Y^2)} \quad (4.28)$$

$$X_0 = (2Y)^{1/2} \left(1 - \frac{Y}{12} + \frac{7Y^2}{288}\right) \quad (4.29)$$

$$X_m = m\pi + \frac{2Y}{m\pi} - \frac{4Y^2}{(m\pi)^2} - \frac{2Y^3}{3(m\pi)^3} + \frac{16Y^4}{(m\pi)^4} + \dots \quad (4.30)$$

$t \gg t_0$ の場合、式(4.27)の第 2 項は第 1 項と比較して無視できるほど小さくなり、試料裏面の温度は指数関数的に定常温度に近付く。その時の時定数 $\tau = \pi^2 t_0 / X_0^2$ である。以降、Fig.4-3 を参照しつつ具体的にアルゴリズムの概略を記述する。

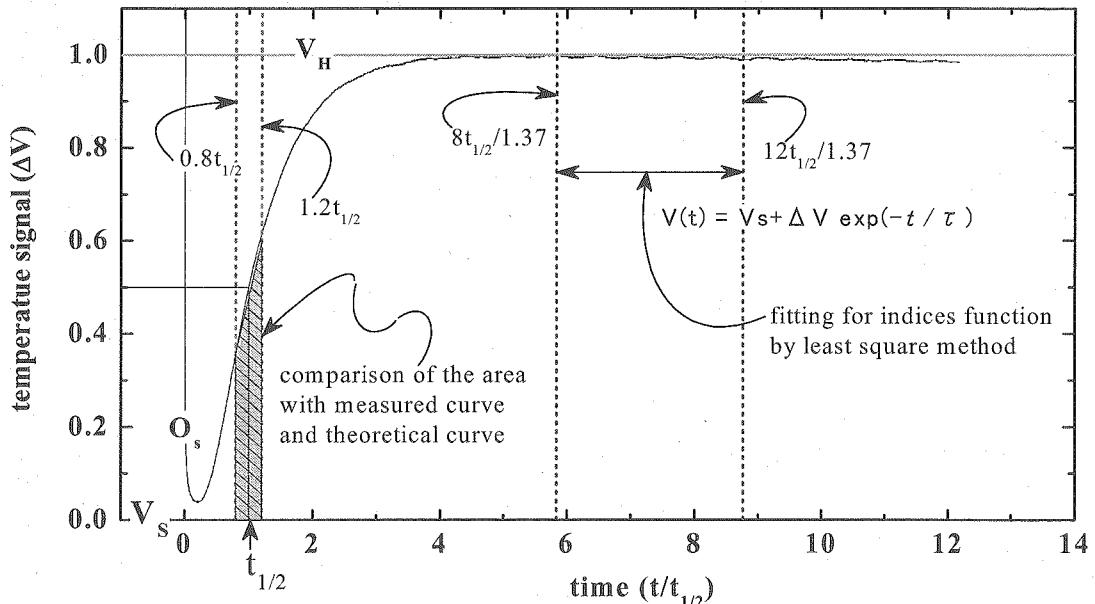


Fig.4-3 Example for Curve Fitting Program method.

- 1) 解析の原点をレーザーパルスエネルギーの時間軸上の重心(O_s)とする。
- 2) 原点以前のデータの平均値を計算し、パルス加熱前の定常値を V_s とする。
- 3) 原点以降の最高値 V_H (迷光成分、ノイズ成分を除く)を算出する。
- 4) $(V_H - V_s)/2$ との交点として $t_{1/2}$ を算出する。
- 5) $t_{1/2}$ による見かけの熱拡散率を $\alpha_{1/2} = 1.37 L^2 / (\pi^2 t_{1/2})$ により算出する。
- 6) $(t_{1/2} \times 8) / 1.370$ から $(t_{1/2} \times 12) / 1.370$ の時間領域のデータを
関数 $V(t) = V_s + \Delta V \exp(-t/\tau)$ により最小自乗法で適合させる。
- 7) τ が決定され熱拡散率 α と Biot 数 Y のうち一方のみが独立となる。
- 8) 全データを ΔV で除して規格化する。
- 9) $0.8t_{1/2}$ から $1.2t_{1/2}$ の時間領域において実測曲線の囲む面積と理論曲線(Cape & Lehman の式)の囲む面積が一致するように熱拡散率 α と Biot 数 Y を決定する。
- 10) 求められた α と Y を Cape & Lehman の式に代入し、実測曲線に重畠して理論曲線として描く。

5. 解析結果と検討

5.1 参照試料(等方性黒鉛)

等方性黒鉛(IG-110)試料について、室温から 1673K まで約 250K 間隔で 7 点_各温度 3 回以上測定(run number_11012A~11033A)した結果を Fig.B-1~B-22 に示した。各 run number には(a)原データ、(b)Parker et al の手法を規格化した $t_{1/2}$ 、 t_x 法、(c)高橋等の対数法及び(d)Cape & Lehman の理論式を基本に馬場らの開発した回帰分析を用いた CFP 法によるデータ解析例を比較した。同試料は高温工学試験研究炉(HTTR)の黒鉛構造物として採用された材料と同等材質で、原子力用として不純物を規定値以下に制限した高純度の微粒等方性黒鉛である。また、照射／未照射の熱拡散率についての測定例も多く、試料間の物性変位量は十分に信頼できる範囲内と確認されている。従って、熱拡散率の測定値を評価検討する上での標準的な材料として取り上げた。

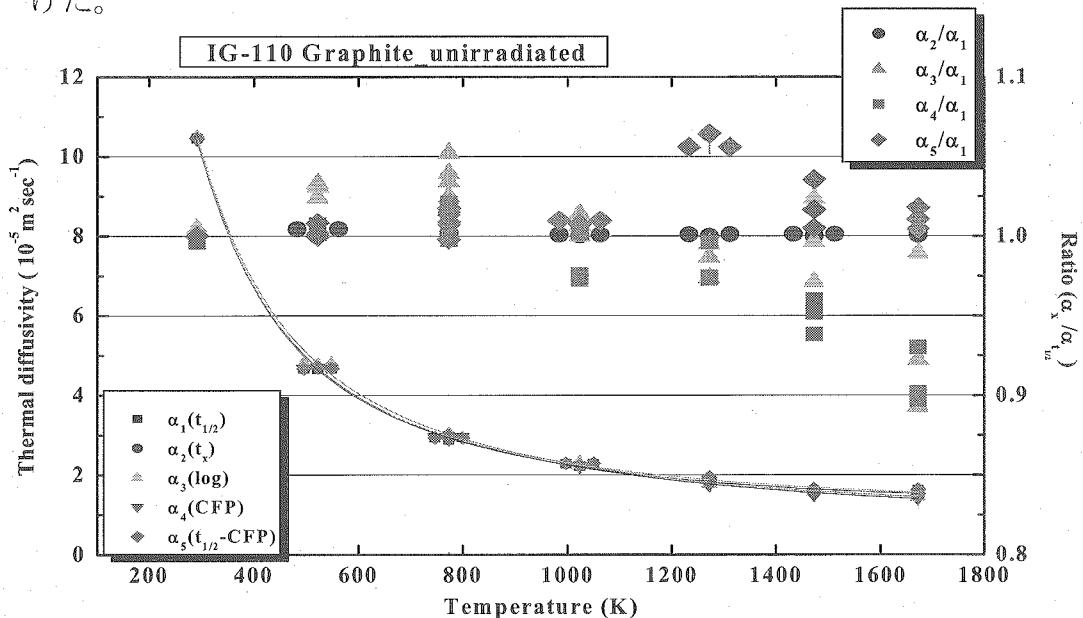


Fig.5-1 Thermal diffusivity in comparison with analysis method and normalized value with half time method for Isotropic Graphite.

(α_1 :half time, α_2 :intercept x-axis, α_3 :logarithm, α_4 :CFP, α_5 :half time_CFP)

IG-110 未照射試料について熱拡散率の温度依存性に関する解析手法の差異及び $t_{1/2}$ 法により測定した熱拡散率を基準とした時の他の手法との比を Fig.5-1 に示した。図中の $\alpha_5(t_{1/2}-\text{CFP})$ は CFP 法による解析手法の途中において算出する、 $t_{1/2}$ 法による見掛けの熱拡散率を示す。解析の結果、熱拡散率の温度依存性は解析手法による差は小さいが、1400K 以上の高温領域での測定

結果は対数法及びCFP法の数値は $t_{1/2}$ 法に比較して5~10%低くなることが分かった。つまり、 $t_{1/2}$ 法は高温測定の結果には熱損失補正が必要であることを明示している。そこで、この $t_{1/2}$ 法による測定値を基準とした各解析手法の比と熱損失係数(k_{2a} , k_{2b})の測定温度依存性を調べた結果をFig.5-2に示した。

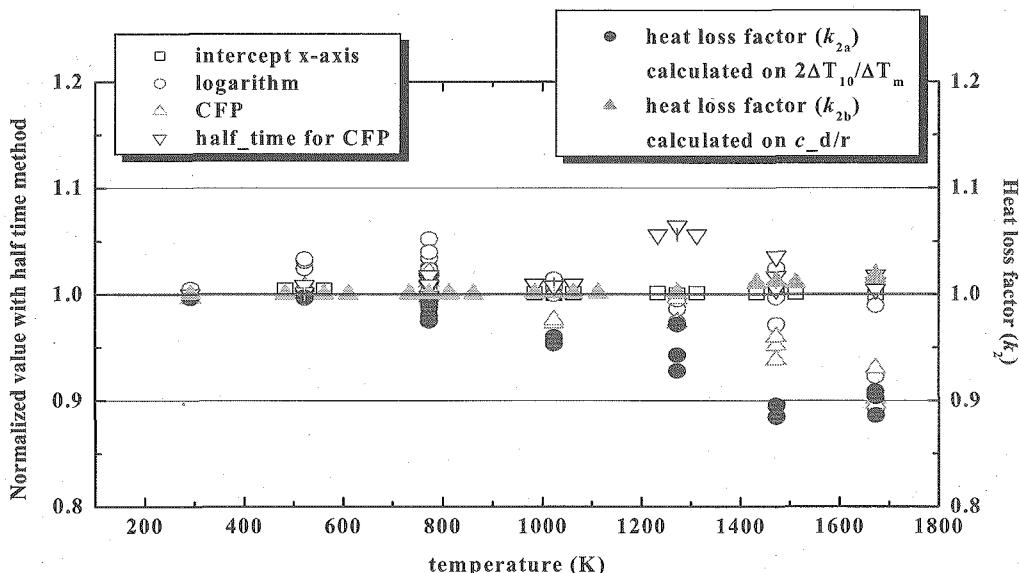


Fig.5-2 Temperature dependence on heat loss factor k_2 and normalized value with half time method for Isotropic Graphite (IG-110).

熱損失の大きさを表す無次元数Biot数を定義した式(4.25)及び(4.26)に示したように、熱損失が主として熱放射による場合、有効放射率と試験温度の3乗に比例し熱伝導率に反比例する。すなわち、高温測定では熱損失は試験温度の3乗に比例して増加するため、熱損失補正は必須のものとなる。熱損失補正是熱履歴曲線の立ち上がり領域と減衰領域を利用する方法があるが、ここではJIS R1611の規定により熱履歴曲線の減衰領域を利用した2つの方法を採用した。1つは温度緩和係数cを用いる方法、他の1つは強度比を用いる方法である。具体的な手法はJIS R1611の附属書[パルスの不均一及び熱損失の補正に関する推奨事項]に記述されているので、ここでは強度比を用いた熱損失補正係数 k_{2a} 及び温度緩和係数cを用いた熱損失補正係数 k_{2b} の定義式を記載するに留めた。

$$k_{2a} = A + B \cdot n + C \cdot n^2 + D \cdot n^3 + E \cdot n^4 + F \cdot n^5 \quad (5.1)$$

$$n = 2 \cdot \Delta T_{10} / \Delta T_m$$

ΔT_{10} : $10 t_{1/2}$ における温度上昇

ΔT_m : 最高温度上昇

A~F: 定数

$$k_{2b} = 1 - B_1 \{(1 + A_1 \cdot c \cdot t_{1/2})^{1/2} - 1\} \quad (5.2)$$

c : 温度履歴曲線の減衰領域を指指数関数近似 [$\Delta T_0 \cdot \exp(-ct)$]

したときの時間 t の係数 c

$0.4 < L/r \leq 1.0$ のとき

{IG-110 試料寸法: L : 試験片厚さ(4.5mm), r : 半径(5.0mm)}

$$(L/r = 4.5/5.0 = 0.9)$$

$$A_1 = 89[1 + 1.24(1 - L/r) - 2.70(1 - L/r)^2]$$

$$B_1 = 0.080[1 - 1.13(1 - L/r) + 2.01(1 - L/r)^2]$$

Fig.5-2 から明らかなように k_{2a} 及び CFP/t_{1/2} 法の比はほぼ一致した。 K_{2a} の算出根拠となる $n = 2 \cdot \Delta T_{10} / \Delta T_m$ が 1.7 以下の範囲では外挿温度上昇 ΔT_0 と理論値の差が 3% を越える場合が生じ、熱損失がこれより大きくなると誤差も急激に増大するので、この範囲を指指数関数近似できる限界としている。 IG-110 試料の測定結果から判断すると、1300K までは $n \geq 1.7$ であるが 1400K を超えると $n \leq 1.7$ となるので、精確な熱拡散率を求めるためには測定温度範囲は 1300K までとし、t_{1/2} 法による解析手法の場合には熱損失補正が必須である。なお、JIS 規定では k_{2a} を用いる場合、 n は 1~2 の範囲で適用できるとされているが、具体的に熱損失係数 k_{2a} による補正值と測定値を比較してみると、Table 5-1 及び Fig.5-3 に示したように測定温度 1000K 以上では 3% を超える。

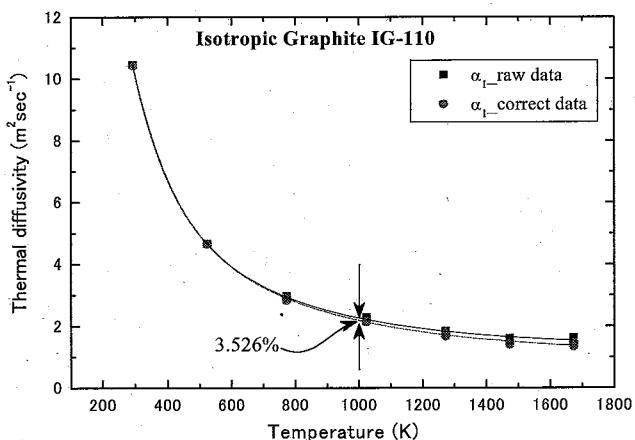


Fig.5-3 Temperature dependence of thermal diffusivity with and without the heat loss for isotropic graphite.

($\alpha_1 : \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$)

Table 5-1 Effect of heat loss factor(k_{2a}) on thermal diffusivity for isotropic graphite. (IG-110)

Temp(K)	α_1	$\alpha_{1\text{correct}}$	diff.
300	10.0927	10.05823	0.341%
400	6.707876	6.684981	0.341%
500	4.937944	4.923297	0.297%
600	3.920114	3.902713	0.444%
700	3.274969	3.246432	0.871%
800	2.830801	2.78649	1.565%
900	2.506158	2.444227	2.471%
1000	2.259604	2.17993	3.526%
1100	2.068057	1.97148	4.670%
1200	1.917327	1.805169	5.850%
1300	1.79788	1.671661	7.020%
1400	1.702863	1.564141	8.146%
1500	1.627125	1.477404	9.202%
1600	1.56669	1.407372	10.169%
1700	1.518437	1.350803	11.040%

すなわち、一見して誤差が小さいように観測されても熱拡散率の絶対値が大きいいため、 $1.7 \leq n \leq 2.0$ の範囲にあっても補正する必要のあることが分かった。

5.2 3Y-TZP

3Y-TZP の熱拡散率について室温から 1273K まで約 250K 間隔(5 温度点)で、各温度点につき 3 回以上測定した結果を Fig.C-1～C-18 に示した。参考試料(等方性黒鉛)と同様に 3 種類の解析手法($t_{1/2}$ 法、対数法、CFP 法)を用いて熱拡散率を評価した結果を Fig.5-4 に示した。

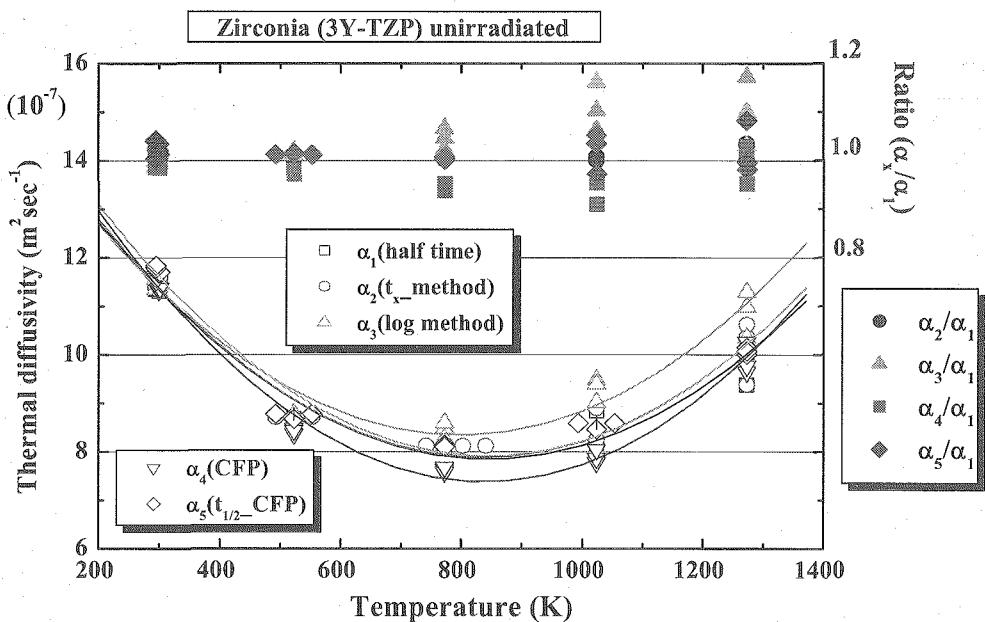


Fig.5-4 Thermal diffusivity in comparison with analysis method and the ratio on half time method for zirconia(3Y-TZP).

3Y-TZP の熱膨張係数は $12 \times 10^{-6} K^{-1}$ で 800K を越えた温度域の熱膨張率は 1%以上に達するため、試料厚さの補正是全ての試験温度で実施した。3Y-TZP の熱拡散率は室温において $1.1 \times 10^{-6} (m^2/sec)$ であるが、参考試料 IG-110 の熱拡散率 $1.05 \times 10^{-4} (m^2/sec)$ と比較しても約 2 衍低い値である。また、温度依存性曲線は参考試料では減少指数関数で近似できるが、3Y-TZP 試料では 850K 付近を最小値とした 2 次関数近似となる。L/F 法で測定可能な熱拡散率の範囲は、 $10^{-7} \sim 5 \cdot 10^{-4} m^2/s$ 程度で本試料の 800K 付近の測定値 $8 \cdot 10^{-7} m^2/s$ はこの範囲に入るが、測定誤差はかなり大きくなるものと予期できる。 $t_{1/2}$ 法に対する他の解析手法との比を調べると、対数法による測定値は 800K を越えた領域から上昇するが、CFP 法の測定値はやや減少する。 $t_{1/2}$ 法の測定値を熱損失補正係数 k_{2a} により補正した結果を元データとともに Fig.5-5 に示した。

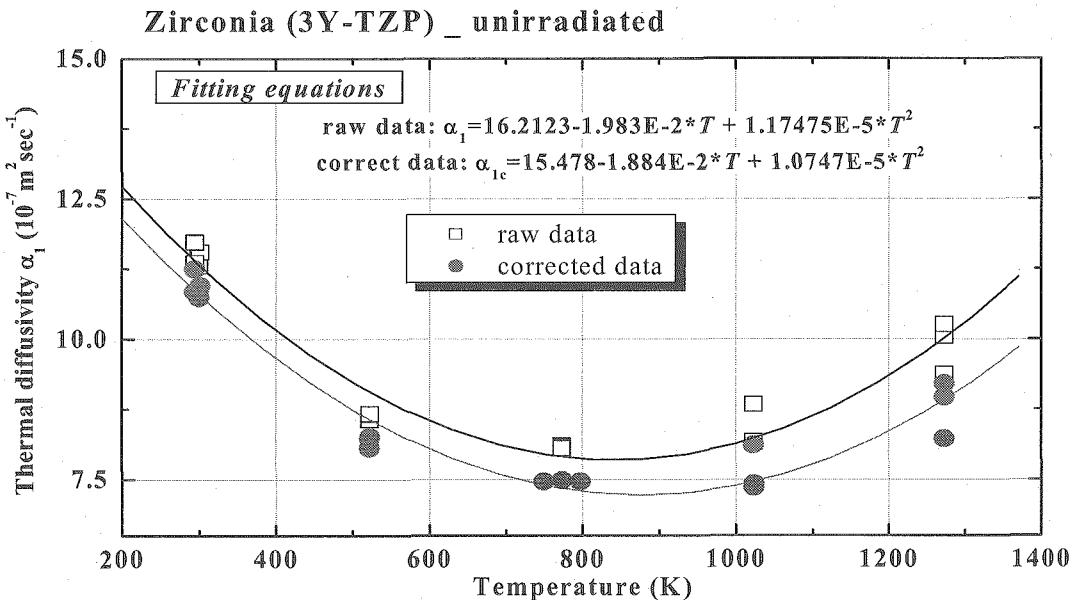


Fig.5-5 Effect of heat loss factor(k_{2a}) on the thermal diffusivity measured by half time method for zirconia material (3Y-TZP).

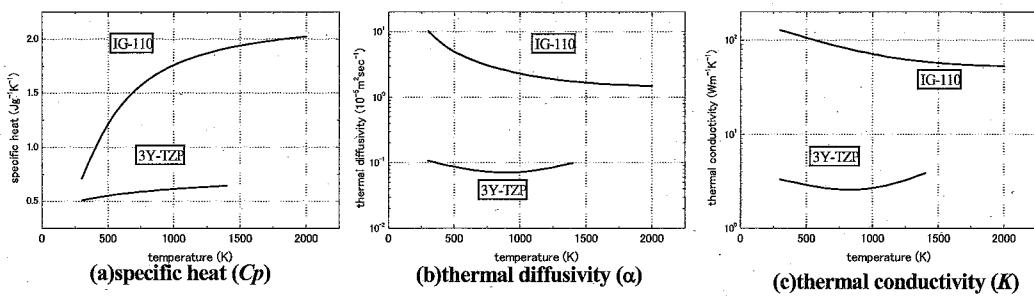
Table 5-2 は熱損失補正前後の熱拡散率値 α_1 、 $\alpha_{1\text{correct}}$ 及びその差を百分率で表示したものである。室温の測定においてすでに 4% を越える差となっており、1300K では 11% にまで達している。3Y-TZP 試料表面の色は白色であるが、測定前処理として炭素膜形成によるレーザーエネルギー吸収効率上昇を目的として試料表裏面及び側面全てに炭素液スプレー施工している。従って、実効的な半球放射率 ε_x 及び ε_r は参考試料あるいは黒体の放射率と同様と考えられる。しかし、この試料外表面に形成された炭素膜は試験終了後には試料表面より部分的に剥離した状態も観察されたことから推定した場合、高温状態においては室温時同様の状態が保持されていることは期待出来ない。従って、高温測定時においては 3Y-TZP 試料表面は黒体と同様の放射率が保持される可能性は低いうえ、熱損失が温度の 3 乗に比例し、また熱伝導率が小さくなる程大きな熱損失となるので、得られた測定値に対する熱損失補正は必須である。

Table 5-2 Differences of α_1 with and without heat loss factor (k_{2a}) for 3Y-TZP.

Temp(K)	α_1	$\alpha_{1\text{correct}}$	diff.
300	11.244	10.719	4.67%
400	10.069	9.574	4.92%
500	9.126	8.641	5.31%
600	8.417	7.923	5.87%
700	7.941	7.417	6.59%
800	7.697	7.125	7.43%
900	7.687	7.047	8.33%
1000	7.910	7.182	9.20%
1100	8.366	7.531	9.98%
1200	9.055	8.093	10.62%
1300	9.976	8.869	11.10%
1400	11.131	9.858	11.44%

5.3 3Y-TZP 热特性の温度依存性

热拡散率測定に使用した試料と同一素材の 3Y-TZP について、DSC (Differential Scanning Calorimeter)を用いて 473K から 1273K まで Al_2O_3 を基準物質とした比熱の相対測定を実施したことは別に報告⁽³³⁾した。これらの結果を適用して 1400K まで外挿した比熱の温度依存性曲線を参考試料とともに Fig.5-6(a)に示す。热損失補正済みの热拡散率を Fig.5-6 (b)に、さらに密度のデータを合わせ式(4.9)より計算した热伝導率の温度依存性曲線を Fig.5-6(c)に各々示した。



$$\begin{aligned} C_{p_{IG-110}} &= 2.268 - 1.105E-5(T) - 3.777E+2(T)^{-1} \\ &\quad - 1.818E+5(T)^2 + 6.665E+7(T)^3 - 6.011E+9(T)^4 \\ &\quad (\text{Butland and Maddison's equation}^{(\text{ref.36})}) \end{aligned}$$

$$C_{p_{3Y-TZP}} = 0.0887 \ln(T) + 0.0011$$

$$\alpha_{IG-110} = 1.3993 + 64.246 \exp(-T/108.34) + 9.4965 \exp(-T/420.6046)$$

$$\alpha_{3Y-TZP} = 15.438 - 1.89E-2(T) + 1.067E-5(T)^2$$

$$K = Cp \alpha \rho$$

Fig.5-6 Temperature dependence of specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity for the zirconia (3Y-TZP) in comparison with the isotropic graphite (IG-110).

3Y-TZP の热特性について黒鉛参照試料と比較して特徴的な事項を以下に記述した。

- 1) 室温付近における両者の比熱は比較的接近した数値であるが、温度の増加とともに黒鉛は急速に上昇するのに対して 3Y-TZP の温度依存性は小さく、1000K 付近における両者の比は約 3 倍に拡大する。
- 2) 热拡散率の温度依存性は室温付近において約 2 衍の差を示しているが、ともに室温付近から緩やかに低下していく。黒鉛は減少指数関数による近似曲線となるが、3Y-TZP は 900K 付近を最小値とした二次関数近似曲線となつた。
- 3) 热伝導率は比熱、热拡散率及び密度の積から求めたものであり、両材料ともに热拡散率の温度依存性曲線の傾向と同様であった。本測定における

3Y-TZP の熱伝導率は約 800K を最低値とし、1300K 以上の高温領域においては室温値を越える結果となった。

- 4) 本測定に供した試験片 3mol% Y_2O_3 濃度一定の正方晶ジルコニア(3Y-TZP)の熱伝導率が、800K 付近の温度域において再上昇(turn around)を示す主たる原因是、 $\text{ZrO}_2-\text{Y}_2\text{O}_3$ 相平衡状態図⁽³⁴⁾における共析反応(eutectoid reaction)温度が 840K 付近にあって $t+c$ 相 \leftrightarrow $m+c$ 相へと複雑に変わる第一種不動点反応になっているためと考えられる。一方、 $\text{ZrO}_2-\text{Y}_2\text{O}_3(\text{YO}_{1.5})$ 相平衡状態図の最近の研究結果⁽³⁵⁾によれば、 $t+c$ 相 \leftrightarrow $m+c$ 相への変態はマルテンサイト変態的な無拡散相遷移(diffusionless phase transition)による準安定状態の t' 相 / t'' 相へと遷移するためであり、熱力学的解析結果からも共析反応温度は 1000°C(1273K)付近にあるのが妥当としている。現状において、 $\text{ZrO}_2-\text{Y}_2\text{O}_3$ 系は多数の研究者間の一致した安定平衡状態図は得られておらず、多数の不一致な線図で示される。1473K 以下の場合、完全な相平衡状態図は陽イオン(Zr)拡散速度が極端に遅いため、安定した相平衡に到達することは実験を実施する上からも事実上困難となっている。

6. 結 言

- (1) 照射試料は 3mol% Y_2O_3 - ZrO_2 で、直径 10mm 厚さ 1 及び 2mm で各々 5 個装荷した。照射は材料試験炉(JMTR)の G-4 照射孔において 786.9 時間、 $2.51 \times 10^{23}(\text{m}^2, E > 1\text{MeV})$ 、温度は 200°C 以下の条件で行った。
- (2) 熱障壁被覆材料(TBC)及びイナートマトリックス燃料用材料(IMF)として適用あるいは検討されているジルコニア基関連材料の熱伝導率について概略し、3Y-TZP 試料との比較検討に供した。
- (3) 測定に使用した熱拡散率測定装置の仕様を示すとともに、JIS で推奨されているレーザーフラッシュ法によるデータ解析の 3 種類の手法、すなわち $t_{1/2}$ 法、対数法及び回帰分析法の利点と欠点を明らかにした。
- (4) 3Y-TZP 試料の他に参照試料として等方性黒鉛(IG-110)の熱拡散率を測定し、各解析手法の差異及び熱損失を評価した。その結果、 $t_{1/2}$ 法による高温条件での熱拡散率値は熱損失補正が必須であることが分かった。
- (5) 3Y-TZP のような $10^{-7}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ オーダーの低い熱拡散率の物質は室温から高温まで、全ての測定条件において熱損失補正が必須である。
- (6) 等方性黒鉛と 3Y-TZP の比熱、熱拡散率及び熱伝導率の温度依存性を比較した。その結果、比熱は両材料ともに正の温度依存性を示したが、等方性黒鉛の熱拡散率及び熱伝導率は負の温度依存性を示し、phonon 散乱による熱抵抗が温度の増加とともに増えることが示された。
- (7) 3Y-TZP の熱拡散率及び熱伝導率は 800~900K 付近を最小値とした 2 次関数近似曲線の温度依存性を示した。これは ZrO_2 - Y_2O_3 相平衡状態図の共析反応温度(840K)と密接な関連があるものと考えられた。

謝 辞

本報告書作成にあたり、キャプセル設計においては旧材料試験炉部照射第1課塙悟史氏、キャプセル製作では旧東海研究所工務・技術室工作技術グループ、中性子照射量評価では旧材料試験炉部計画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) 堂山昌男、山本良一編、水田進、河本邦仁：「材料テクノロジー13 セラミック材料」、東京大学出版会、東京、22(1986).
- (2) 日本セラミックス協会編：「セラミック工学ハンドブック」、技報堂出版(株)、東京、2006(1989).
- (3) ファインセラミックス事典編集委員会編：「ファインセラミックス事典」、技報堂出版(株)、東京、207(1990).
- (4) 柴田大受、本橋嘉信、石原正博、馬場信一、林 君夫：JAERI-Review 2000-008 「ジルコニア系超塑性セラミックス材料への中性子照射試験の検討」、(2000).
- (5) 日本原子力研究開発機構、材料試験炉部 JMTR 技術課：「中性子照射量報告書」、No.2006-3.
- (6) 山口 喬・柳田博明編：中村哲朗著：「セラミックサイエンスシリーズ6 セラミックスと熱」、技報堂出版(株)、東京、57(1985).
- (7) 日本機械学会編：「熱物性値測定法」、(株)養賢堂、東京、1(1991).
- (8) Srinivasan R., et al.: "The effect of grain size, porosity and yttria content on the thermal conductivity of nanocrystalline zirconia", Scripta Mater., Vol.39, No.8, pp.1119-1125, 1998.
- (9) Klemens P.G. and Gell M. : "Thermal conductivity of thermal barrier coating", Mat. Sci. Eng., A245(1998)143-149.
- (10) 藤井智晴、高橋毅：「ガスタービン用遮熱コーティング層の熱物性値の評価」、Netsu Bussei 15[4](2001)237/243.
- (11) Ravichandran K.S., et al. : "Thermal conductivity of plasma-splayed monolithic and multilayer coatings of alumina and yttria-stabilized zirconia", J. Am. Ceram. Soc., Vol.82, No.3, (1999), pp.673-755.
- (12) Dutton R., et al. : "Effect of heat treatment on the thermal conductivity of plasma-splayed thermal barrier coatings", J. Thermal Splay Tech., Vol.9, No.2,

- (2000), pp.204-209(6).
- (13) Trice R.W., et al. : "Effect of heat treatment on phase stability, microstructure, and thermal conductivity of plasma-splayed YSZ", J. Mat. Sci. Vol.37, No.11, (2002)2359-2365.
- (14) Schlichting K.W., et al.: "Thermal conductivity of dense and porous yttria-stabilized zirconia", J. Mat. Sci., Vol.36, No.12, (2001)3003-3010.
- (15) Swain M.V., et al.: "Thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity of porous partially stabilized zirconia ", J. Mat. Sci. Let 5(1986)799-802.
- (16) Trice R.W., et al.: "The role of NZP additions in plasma-splayed YSZ: microstructure, thermal conductivity and phase stability effects", Mat. Sci. Eng. A272(1999)284-291.
- (17) Woo Y. L., et al.: "High-Temperature Chemical Stability of Plasma-Sprayed $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Zr}_4\text{P}_6\text{O}_{24}$ Coating on Nicalon/SiC Ceramic Matrix Composite and Ni-Based Superalloy Substrates", J. Am. Ceram. Soc., 79[10](1996)2759-62.
- (18) Agrawal D. K., et al.: "[NZP], $\text{NaZr}_2\text{P}_3\text{O}_{12}$ -type materials for protection of carbon-carbon composites", J. Mat. Res., Vol.11, No.12, (1996)3158-3163.
- (19) Degueldre C., et al.: "Thermal conductivity of zirconia based inert matrix fuel:use and abuse of the formal models for testing new experimental data", J. Nucl. Mat., 319(2003)6-14.
- (20) Degueldre C., et al.: "Energy transfer and thermal conductivity through inert matrix and nuclear fuel analogous materials", JAERI-Research 97-087(1997).
- (21) Arima T., et al.: "Evaluation of thermal conductivity of zirconia-based inert matrix fuel by molecular dynamics simulation", J. Nucl. Mat., 352(2006)309-317.
- (22) Lutique S., et al.: "The themal conductivity of $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ pyrochlore and the thermal behaviour of pyrochlore-based inert matrix fuel", J. Nucl. Mat., 352(2003)1-5.
- (23) Ronchi C., et al.: "Thermophysical properties of inert matrix fuels for actinade transmutation", J. Nucl. Mat., 320(2003)54-65.
- (24) Streit M., et al.: "Yttrium stabilised zirconia inert matrix irradiation at an international research reactor", J. Nucl. Mat., 352(2006)349-356.
- (25) Akie H., et al.: "Neutronic double heterogeneity effect in particle dispersed type inert matrix fuels", J. Nucl. Mat., 352(2006)256-262.
- (26) Parker W.J. et al.: "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity.", J. Appl. Phys. 32(1961)1679-1684.
- (27) Carslaw H. S. and Jeager J.C. : "Conduction of heat in solid", 1959 2nd ed., (Oxford University Press)

- (28) 高橋洋一、他:「レーザーフラッシュ法熱拡散率測定における新しい解析法—対数法—の優位性」、Netsu Sokutei 15(3) 103-109(1988)
- (29) Cape J. A. and Lehman G. W.: "Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity.", J. Appl. Phys. 34(1963)1909-19113.
- (30) Baba T. and Ono A.: Meas. Sci. Tech., 12(2001)2046.
- (31) Cezairliyan A., Baba T. and Tayler R.: Intern. J. Thermophys., 15(1994)317.
- (32) <http://www.nmij.jp/tp/CFPSupport2/>
- (33) Wan C., et al.,: "Thermal conductivity of superplastically deformed 3Y-TZP.", Mat. Trans., Vol.43, No.10(2002)2473-2479.
- (34) Scott H. G.: "Phase relationships in the zirconia-yttria system.", J. Mat. Sci. 10(1975)1527-1535.
- (35) Yashima M., et al.,: "Metastable-stable phase diagrams in the zirconia-containing systems utilized in solid-oxide fuel cell application.", Solid State Ionics 86-88(1996)1131-1149.
- (36) Butland A.T.D and Maddison R.J.:AERE-R-815(1972)

This is a blank page.

Appendices

- A. Axial distribution of neutron fluence/flux for 02M-73A capsule.
- B. Thermal diffusivity of isotropic graphite (IG-110) for reference materials.
- C. Thermal diffusivity of 3Y-TZP samples.

List of figures

- Fig.A-1 Axial distribution of fast neutron ($E > 1\text{ MeV}$) fluence for 02M-73A.
- Fig.A-2 Axial distribution of fast neutron ($E > 1\text{ MeV}$) flux for 02M-73A.
- Fig.A-3 Axial distribution of thermal neutron ($E < 0.683\text{ eV}$) fluence for 02M-73A.
- Fig.A-4 Axial distribution of thermal neutron ($E < 0.683\text{ eV}$) flux for 02M-73A.

- Fig.B-1 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11012A, measured temperature: 292.4K)
- Fig.B-2 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11013A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-3 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11014A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-4 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11015A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-5 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11016A, measured temperature: 522.3K)
- Fig.B-6 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11017A, measured temperature: 522.4K)
- Fig.B-7 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11018A, measured temperature: 522.5K)
- Fig.B-8 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11019A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-9 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11020A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-10 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11021A, measured temperature: 773K)
- Fig.B-11 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11022A, measured temperature: 1023K)
- Fig.B-12 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11023A, measured temperature: 1023K)
- Fig.B-13 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11024A, measured temperature: 1023K)
- Fig.B-14 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11025A, measured temperature: 1273K)
- Fig.B-15 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11026A, measured temperature: 1273K)
- Fig.B-16 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11027A, measured temperature: 1273K)

Fig.B-17 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11028A, measured temperature: 1473K)

Fig.B-18 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11029A, measured temperature: 1473K)

Fig.B-19 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11030A, measured temperature: 1473K)

Fig.B-20 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11031A, measured temperature: 1673K)

Fig.B-21 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11032A, measured temperature: 1673K)

Fig.B-22 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11033A, measured temperature: 1673K)

Fig.C-1 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233536A, measured temperature: 299.1K)

Fig.C-2 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233537A, measured temperature: 299.6K)

Fig.C-3 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233538A, measured temperature: 301K)

Fig.C-4 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233539A, measured temperature: 294K)

Fig.C-5 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233540A, measured temperature: 294.2K)

Fig.C-6 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233541A, measured temperature: 294.5K)

Fig.C-7 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233542A, measured temperature: 522.4K)

Fig.C-8 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233543A, measured temperature: 522.3K)

Fig.C-9 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233544A, measured temperature: 522.7K)

Fig.C-10 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233545A, measured temperature: 772.9K)

Fig.C-11 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233546A, measured temperature: 772.9K)

Fig.C-12 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233547A, measured temperature: 773K)

Fig.C-13 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233548A, measured temperature: 1023K)

Fig.C-14 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233549A, measured temperature: 1023K)

Fig.C-15 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233550A, measured temperature: 1023K)

Fig.C-16 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample:3Y-TZP, run number:233551A, measured temperature:1273K)

Fig.C-17 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample:3Y-TZP, run number:233552A, measured temperature:1273K)

Fig.C-18 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample:3Y-TZP, run number:233553A, measured temperature:1273K)

This is a blank page.

A. キャップセル軸方向の中性子照射量／中性子束分布図

This is a blank page.

キャップセル内の縦方向モニタ位置と番号

キャップセル名	02M-73A
照射孔	G - 4
照射サイクル	148-149
モニタ	Fe

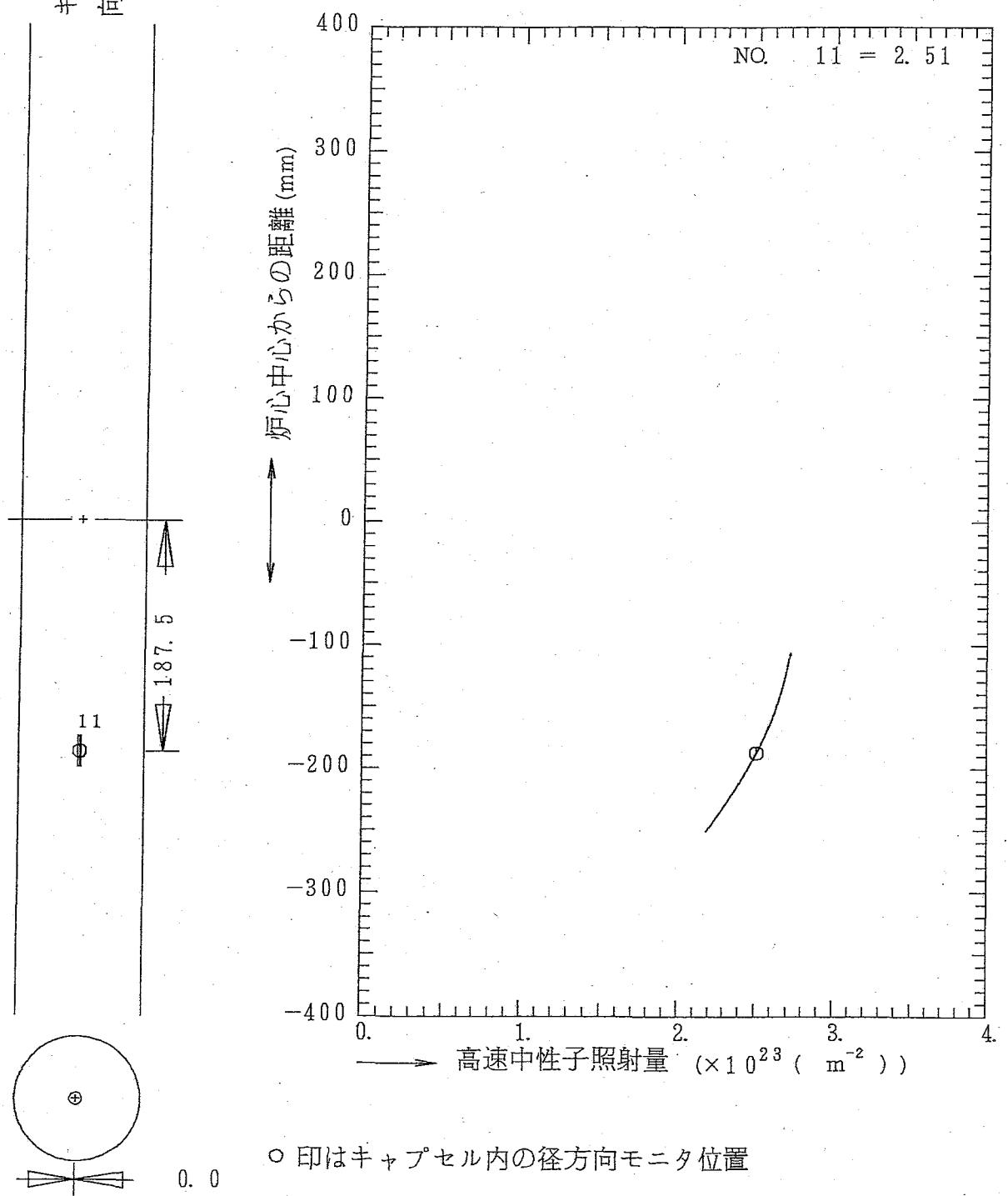


Fig.A-1 Axial distribution of fast neutron ($E > 1\text{MeV}$) fluence for 02M-73A.

キャップセル内の縦方向モニタ位置と番号

キャップセル名	02M-73A
照射孔	G - 4
照射サイクル	148-149
モニタ	F e

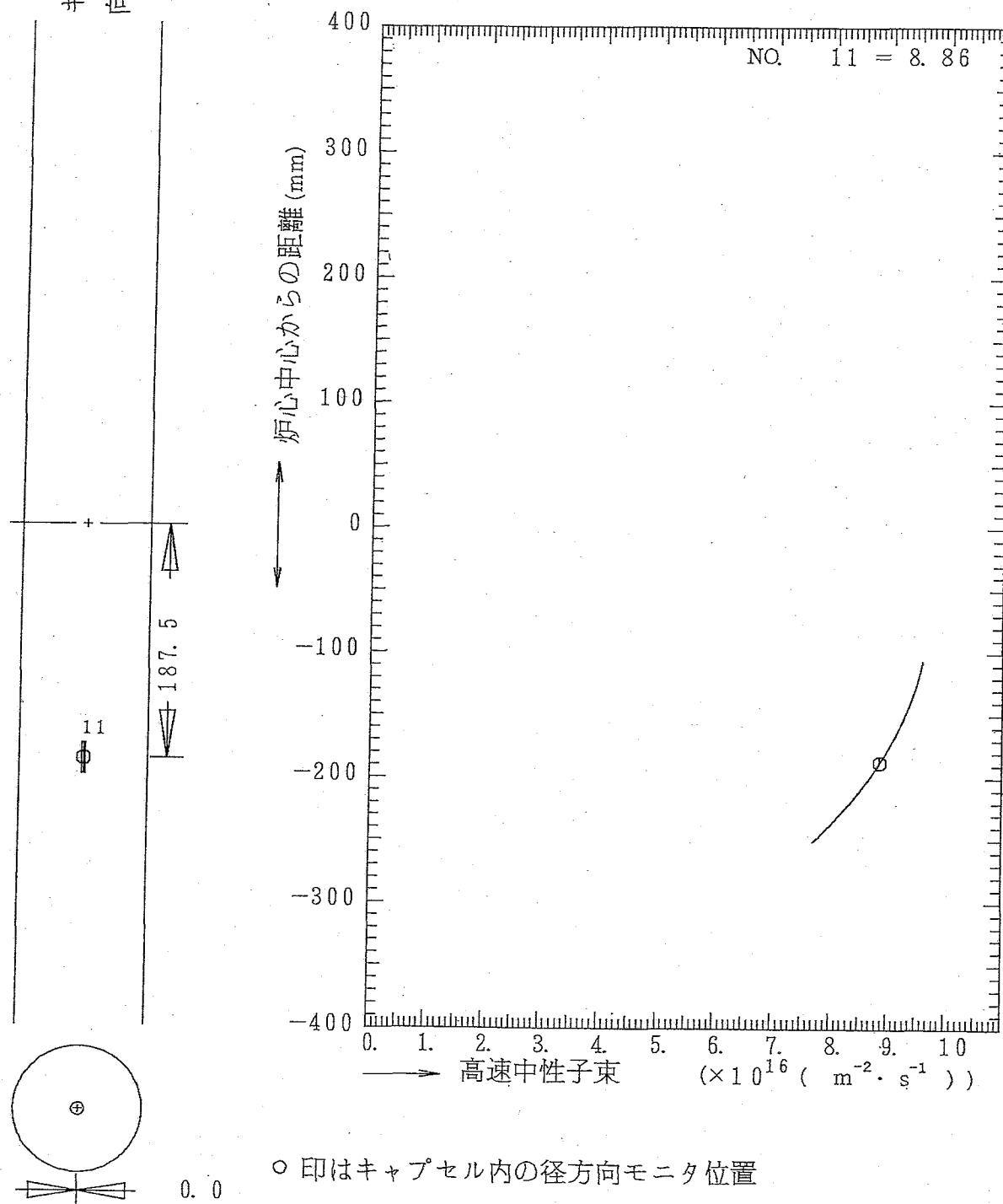


Fig.A-2 Axial distribution of fast neutron ($E > 1 \text{ MeV}$) flux for 02M-73A.

キャップセル内の縦方向モニタ位置と番号

キャップセル名	02M-73A
照射孔	G - 4
照射サイクル	148-149
モニタ	A1-Co

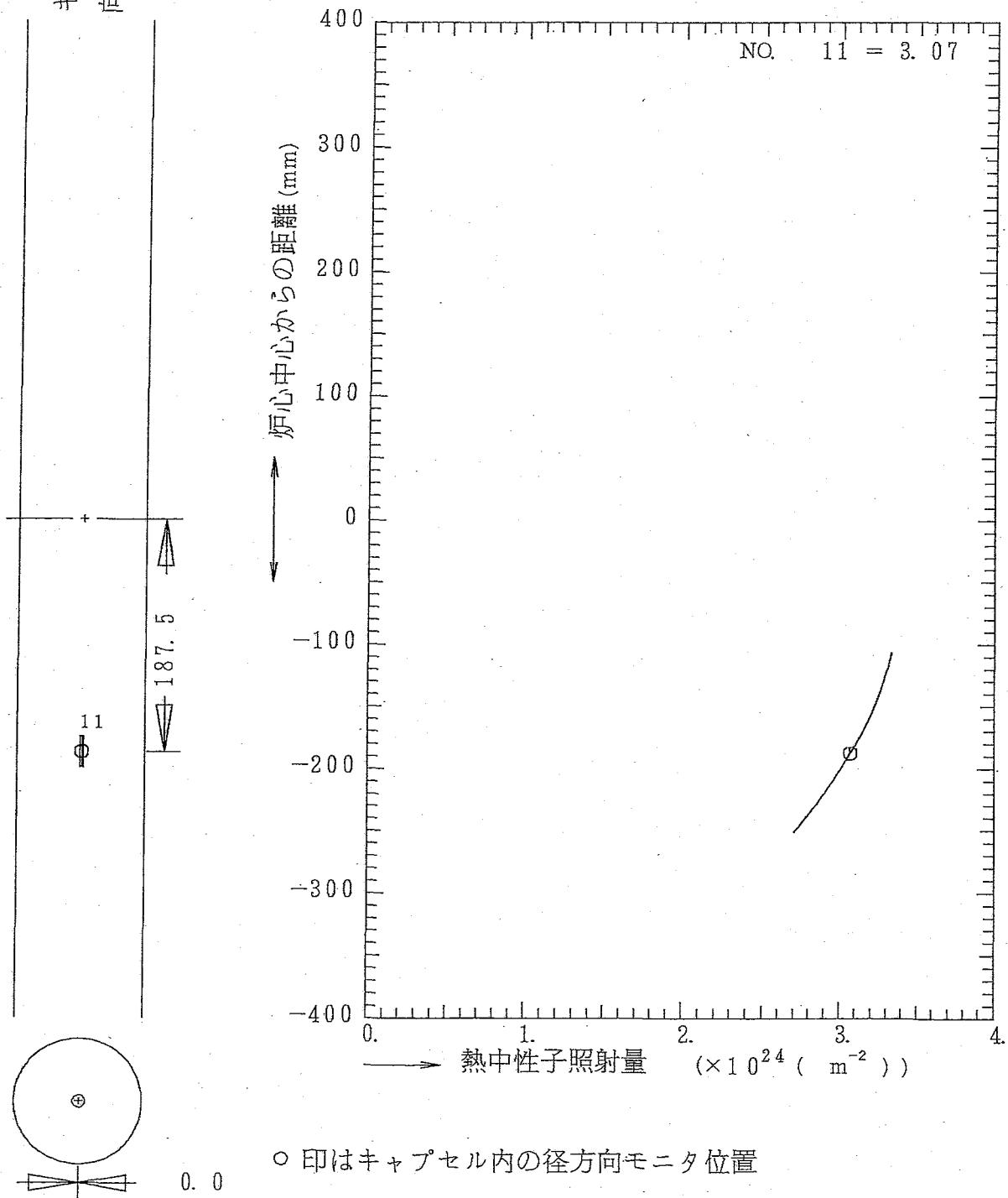


Fig.A-3 Axial distribution of thermal neutron ($E < 0.683\text{eV}$) fluence for 02M-73A.

キャップセル内の縦方向モニタ位置と番号

キャップセル名	02M-73A
照射孔	G-4
照射サイクル	148-149
モニタ	A1-Co

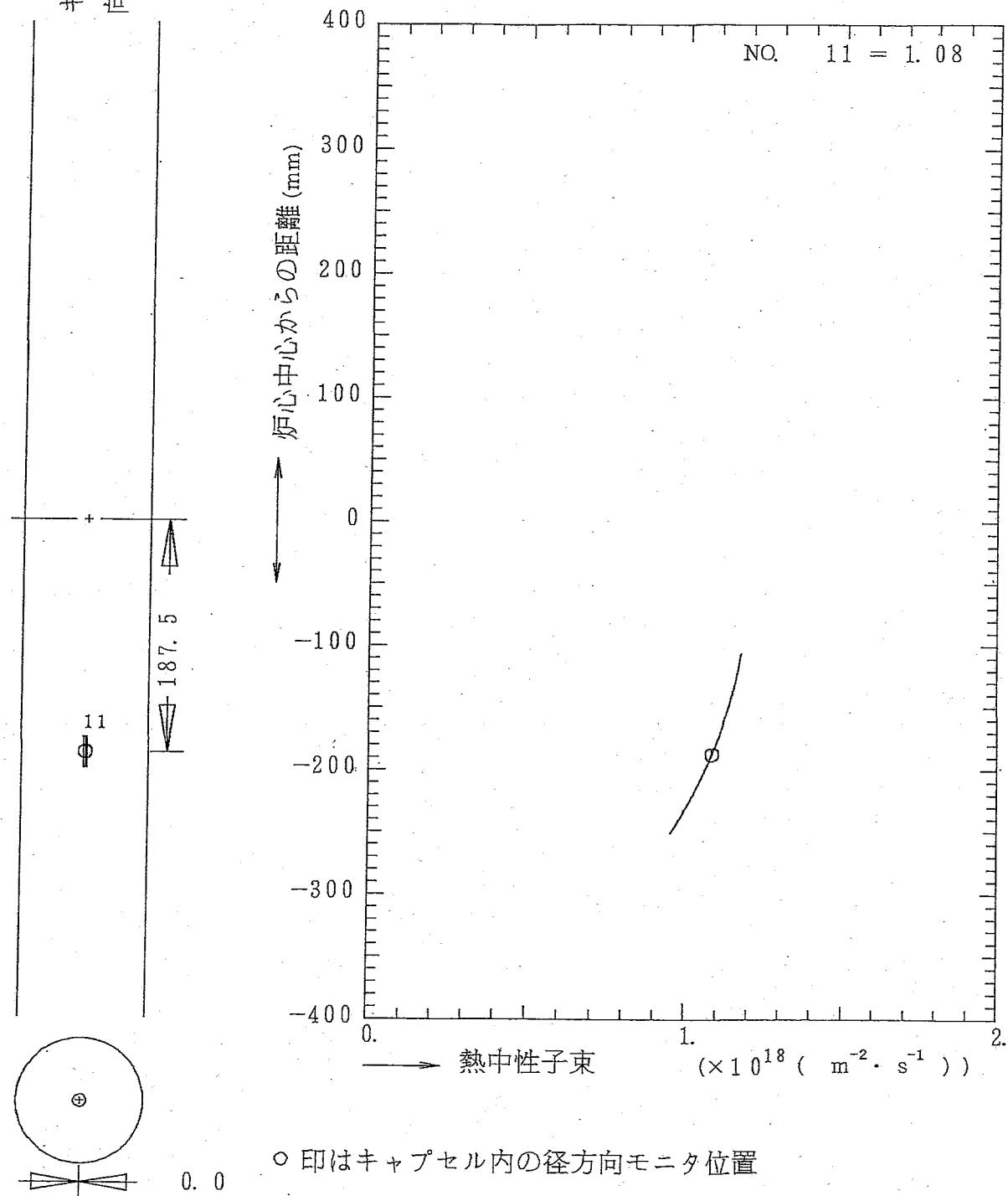


Fig.A-4 Axial distribution of thermal neutron ($E < 0.683\text{eV}$) flux for 02M-73A.

B. 参照試料(等方性黒鉛、IG-110)の熱拡散率データ

This is a blank page.

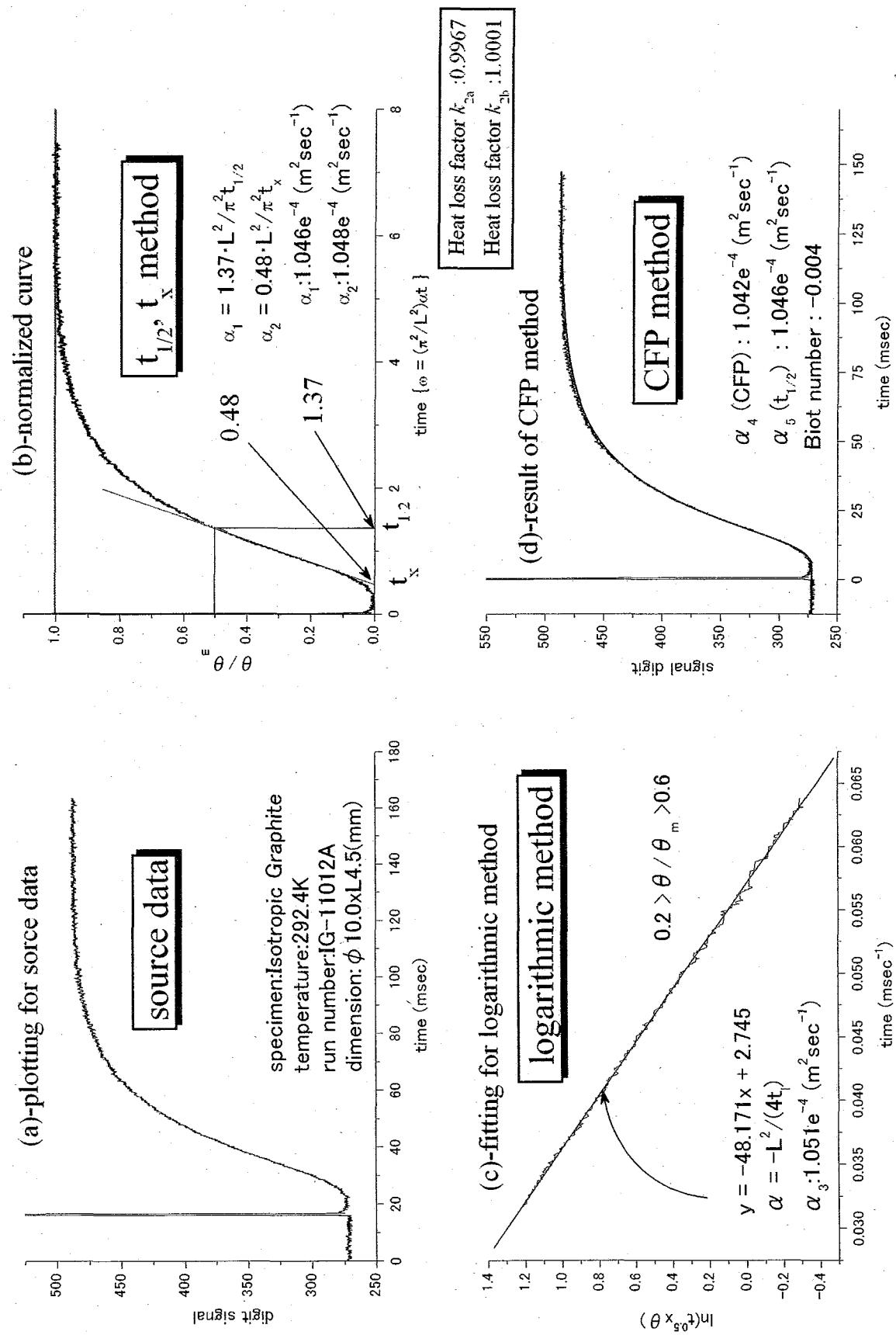


Fig.B-1 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:Isotropic graphite, run number:11012A, measured temperature:292.4K)

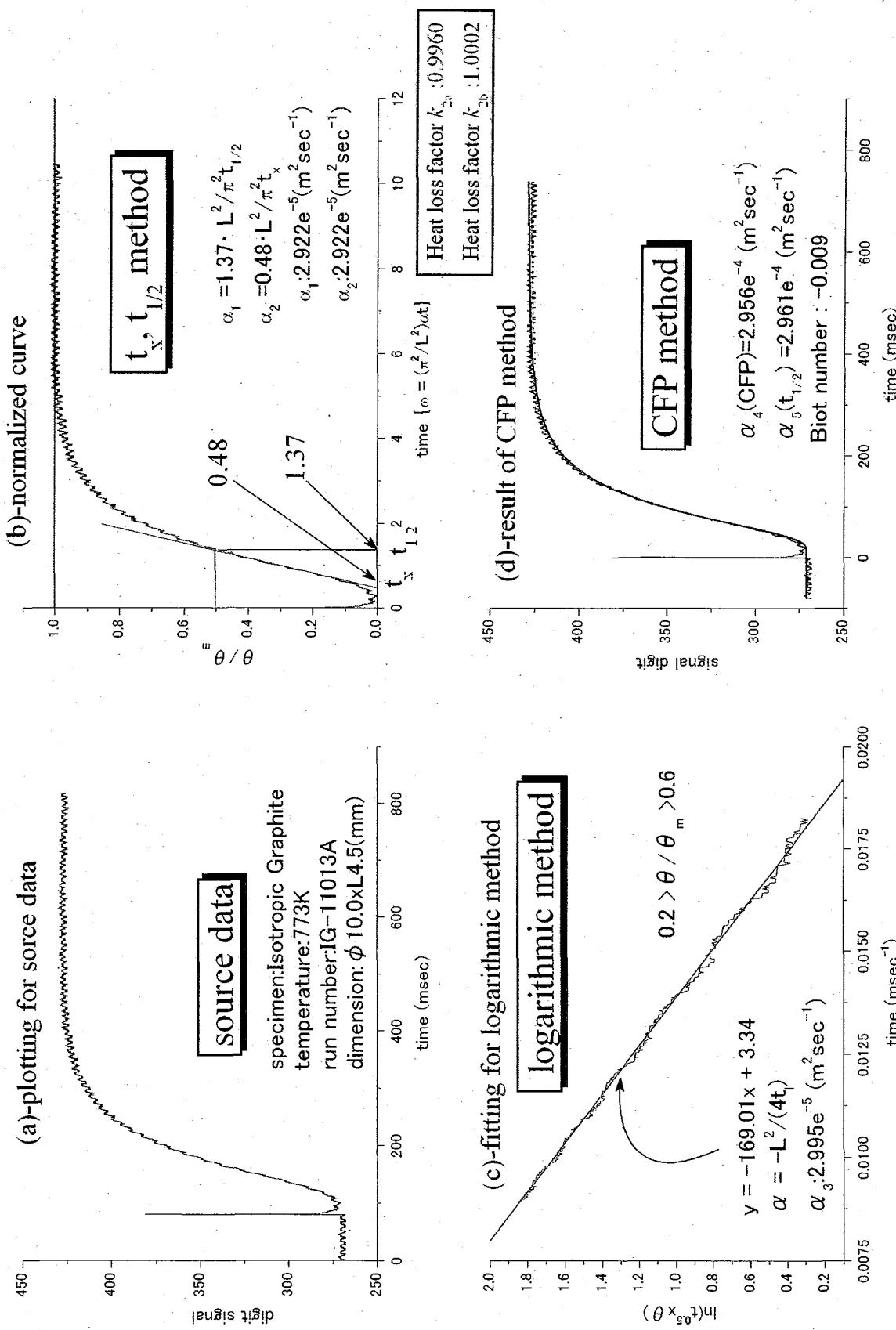


Fig.B-2 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11013A, measured temperature: 773K)

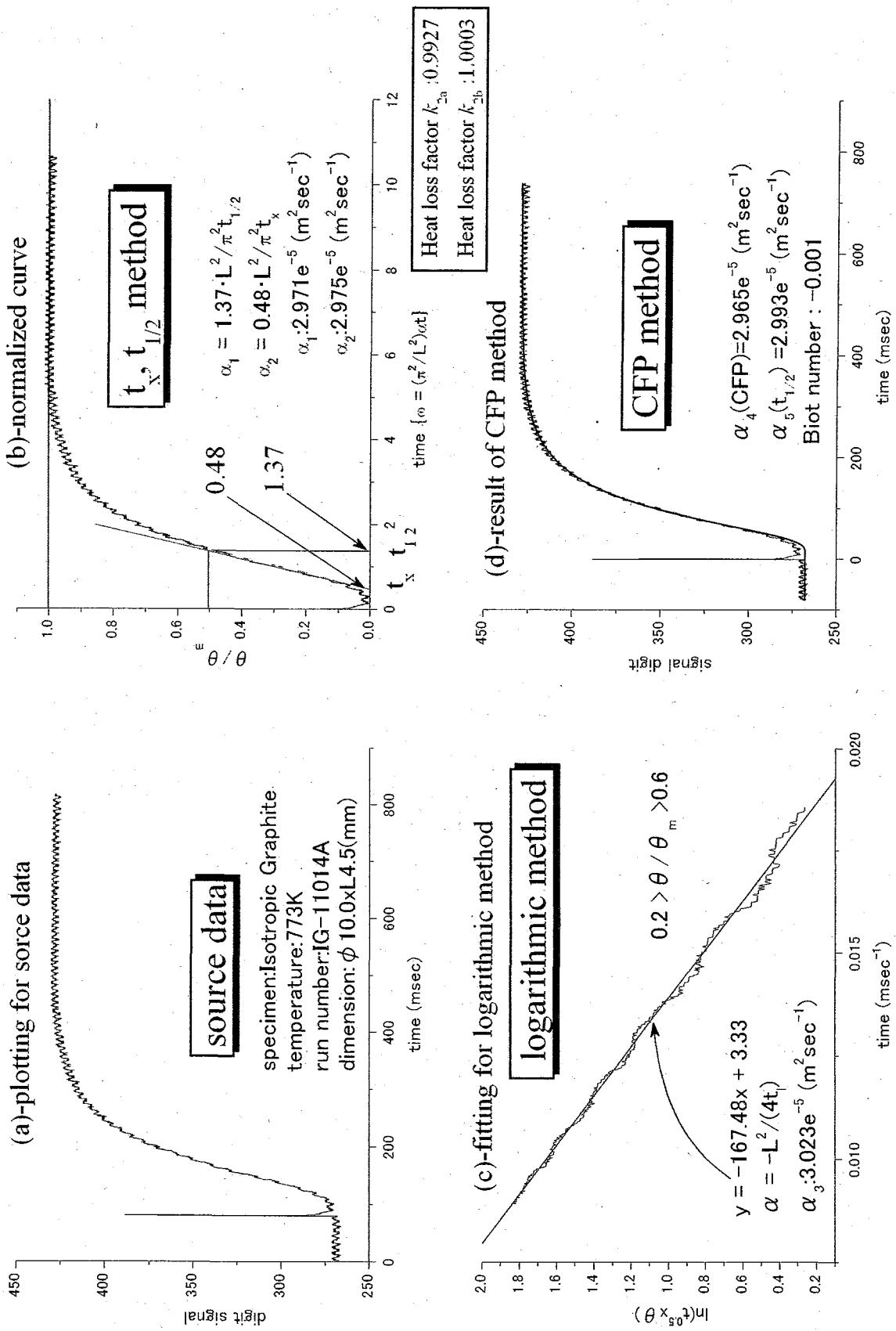


Fig.B-3 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11014A, measured temperature: 773K)

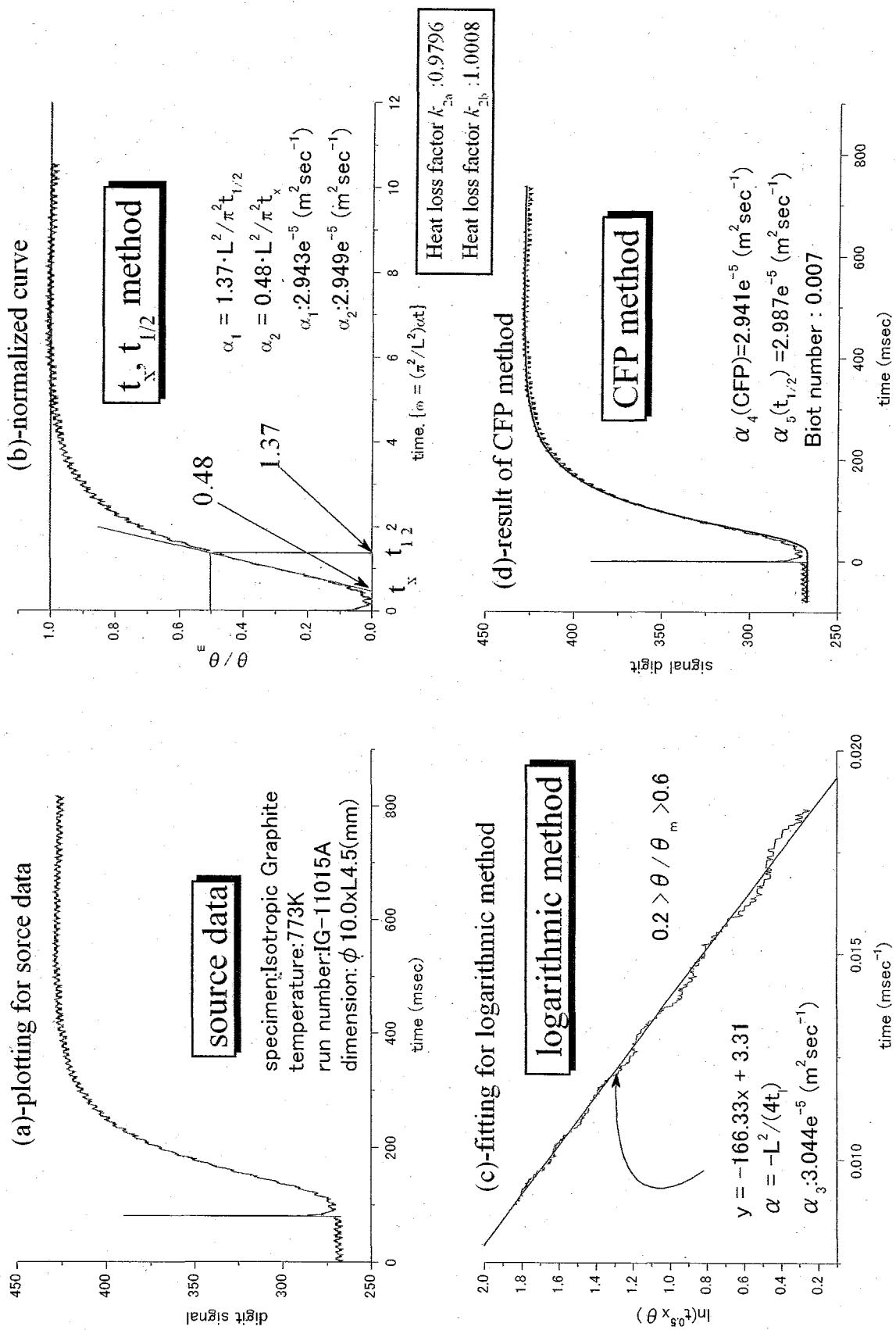


Fig.B-4 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11015A, measured temperature: 773K)

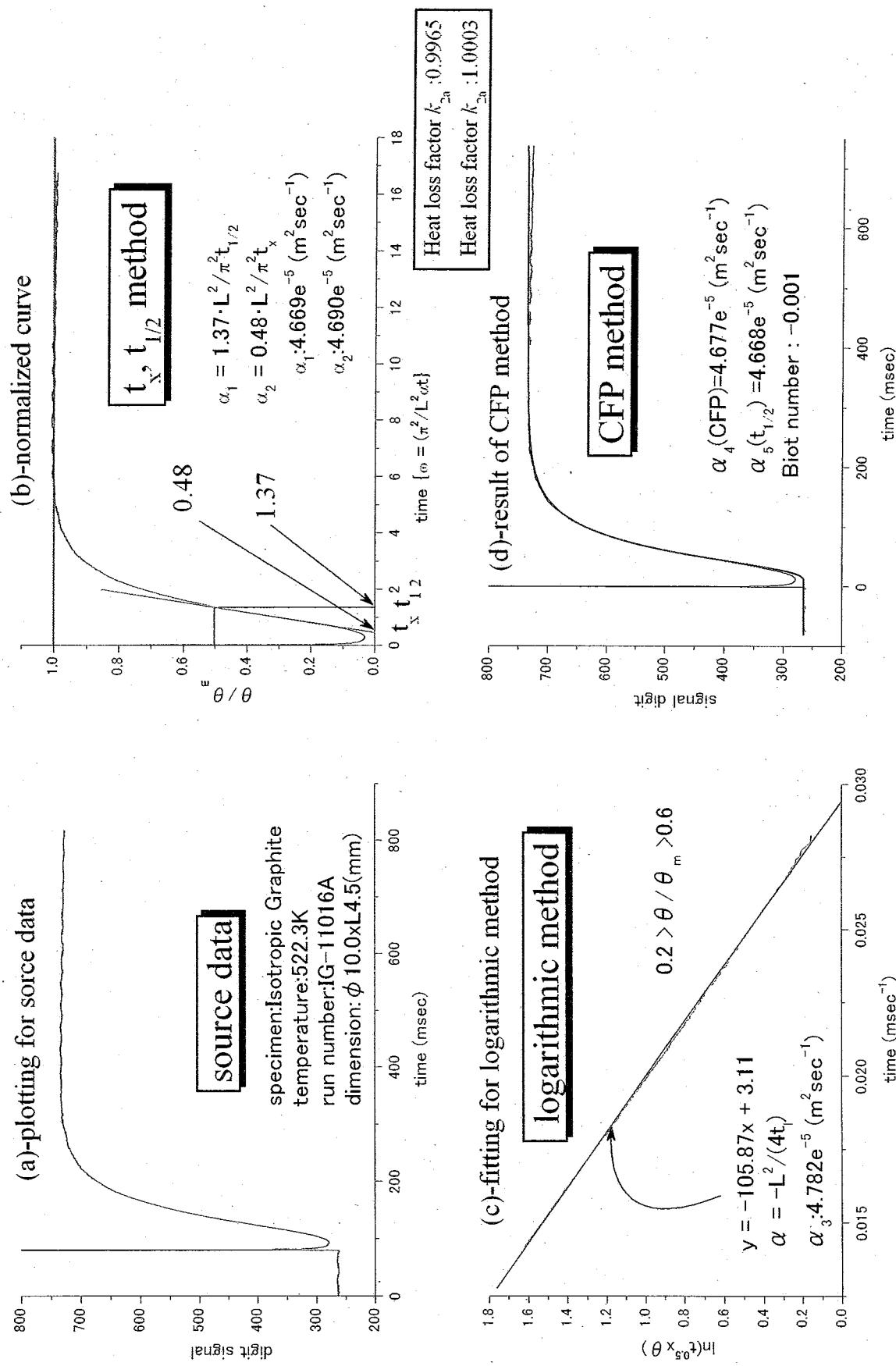


Fig.B-5 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11016A, measured temperature: 522.3K)

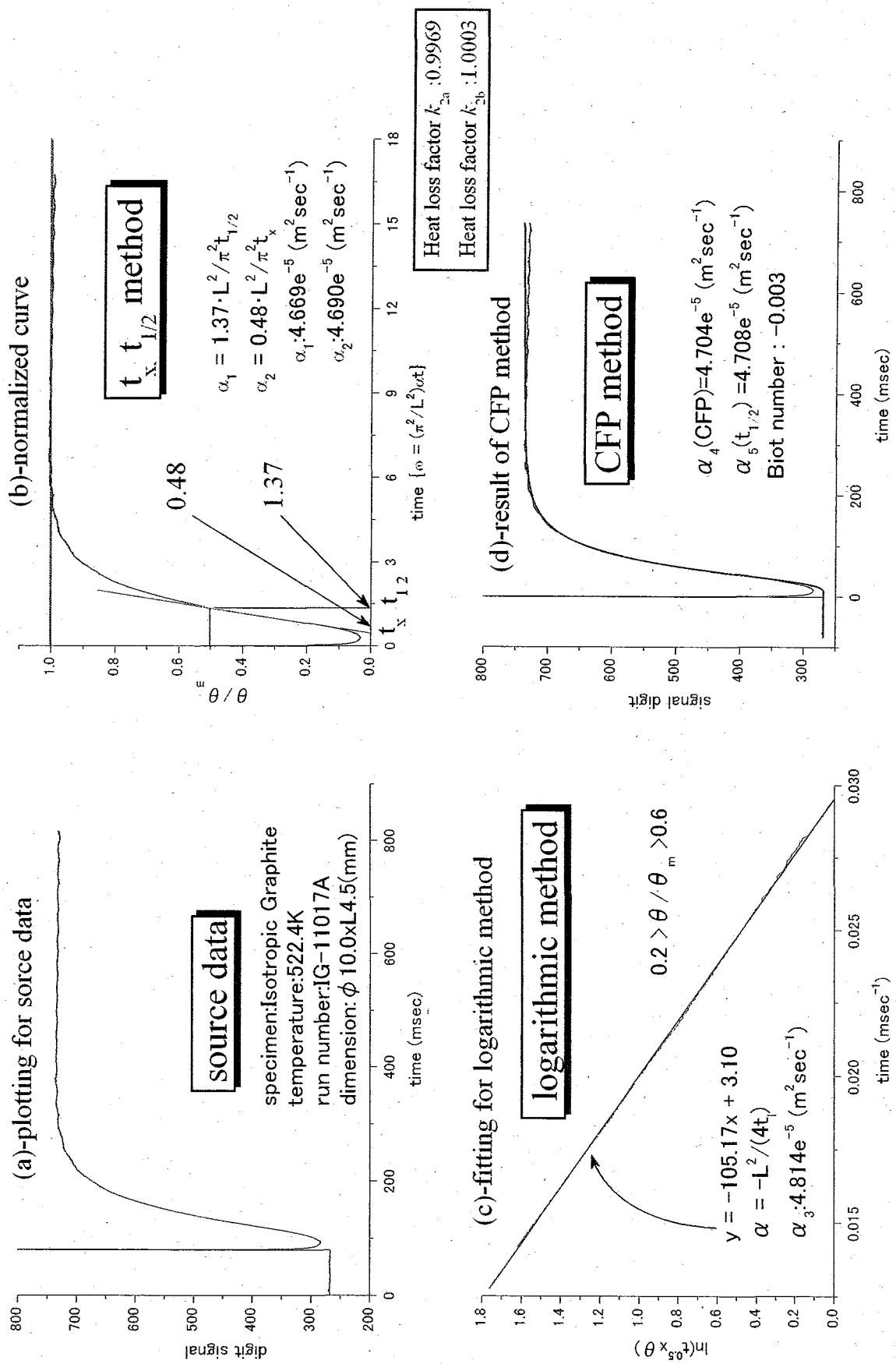


Fig.B-6 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11017A, measured temperature: 522.4K)

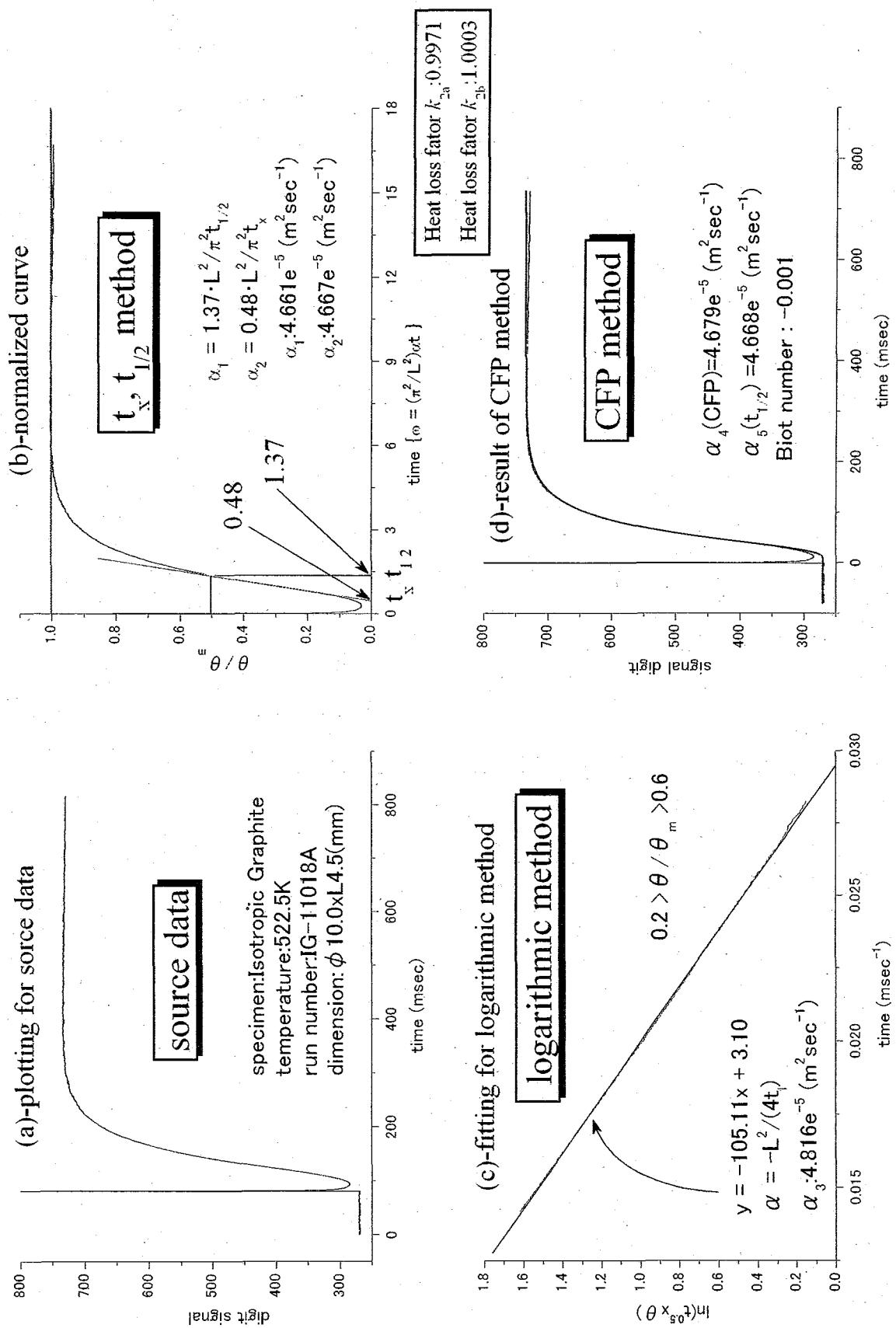


Fig.B-7 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11018A, measured temperature: 522.5K)

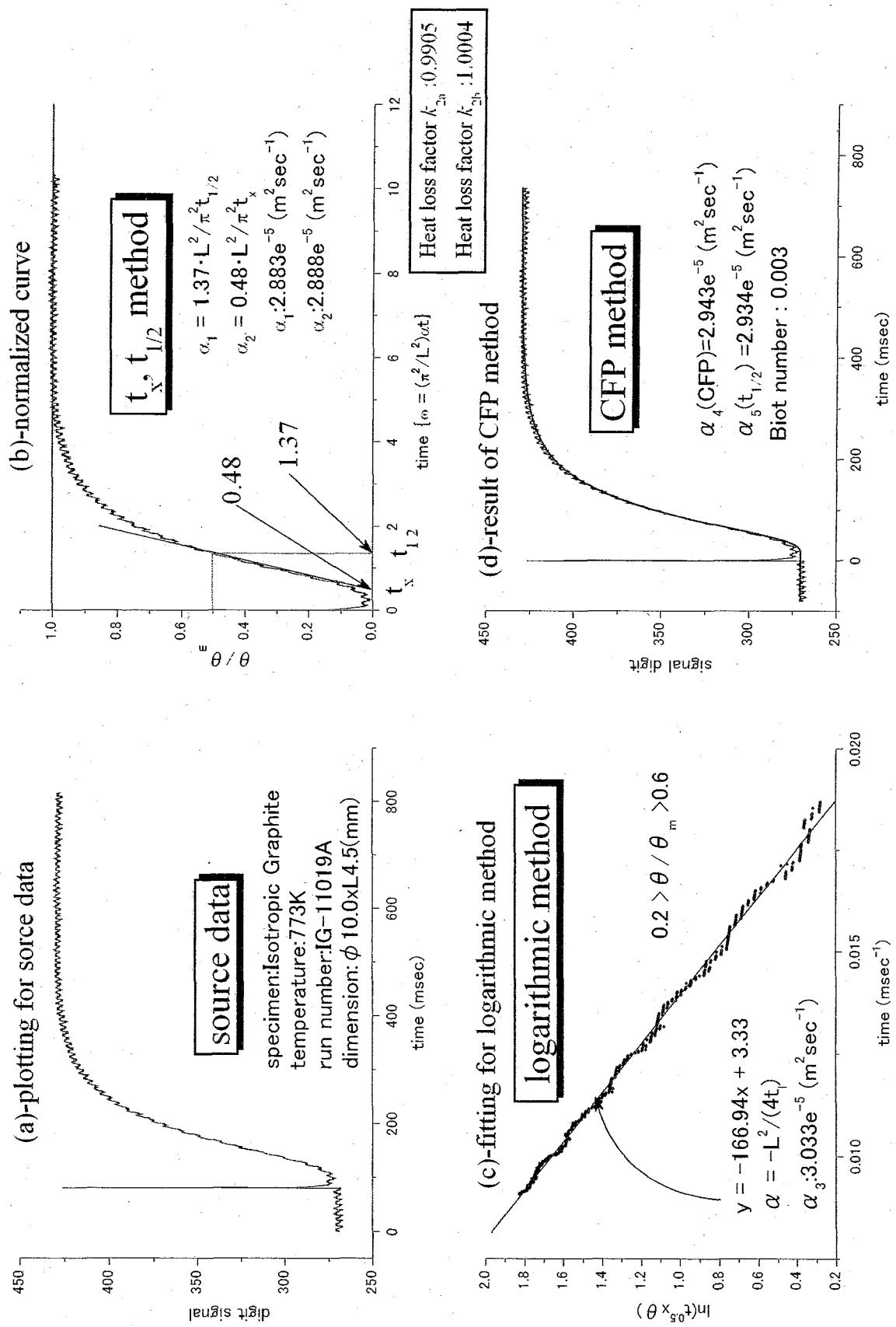
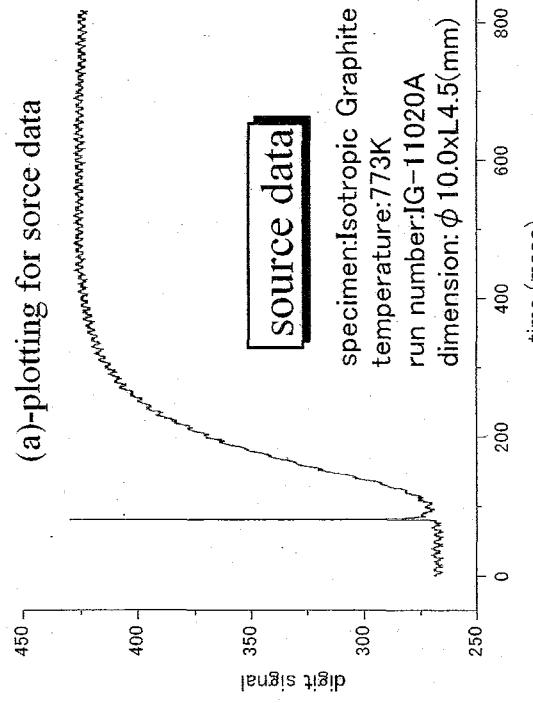
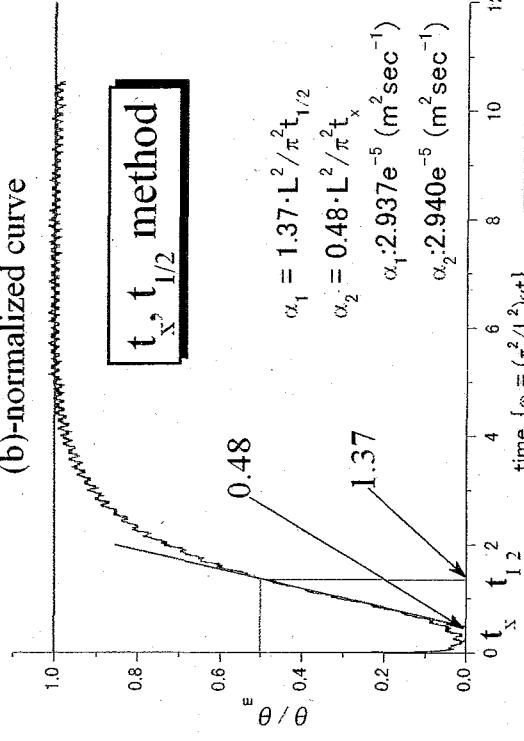


Fig.B-8 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11019A, measured temperature: 773K)

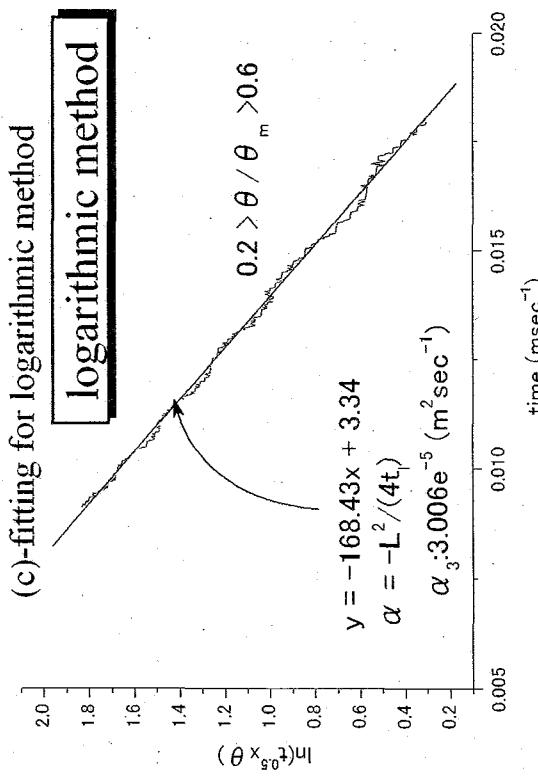
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

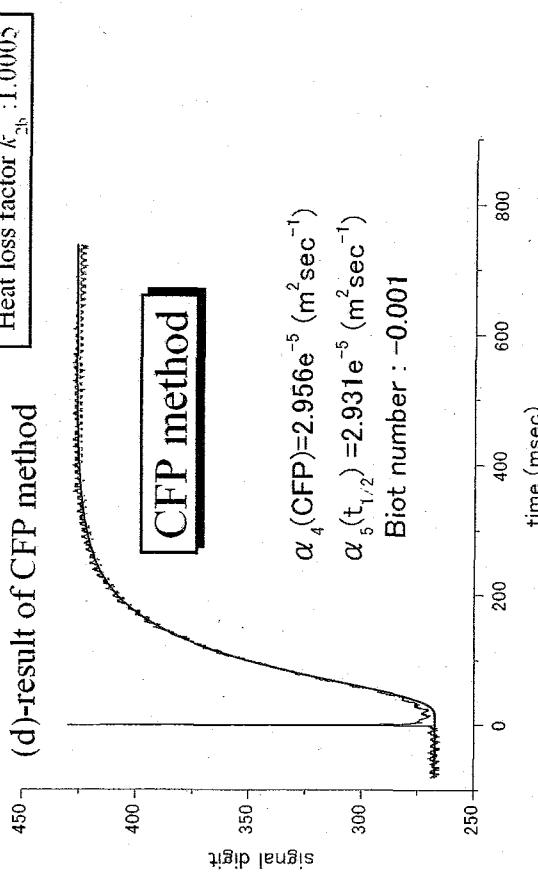


Fig.B-9 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:Isotropic graphite, run number:11020A, measured temperature:773K)

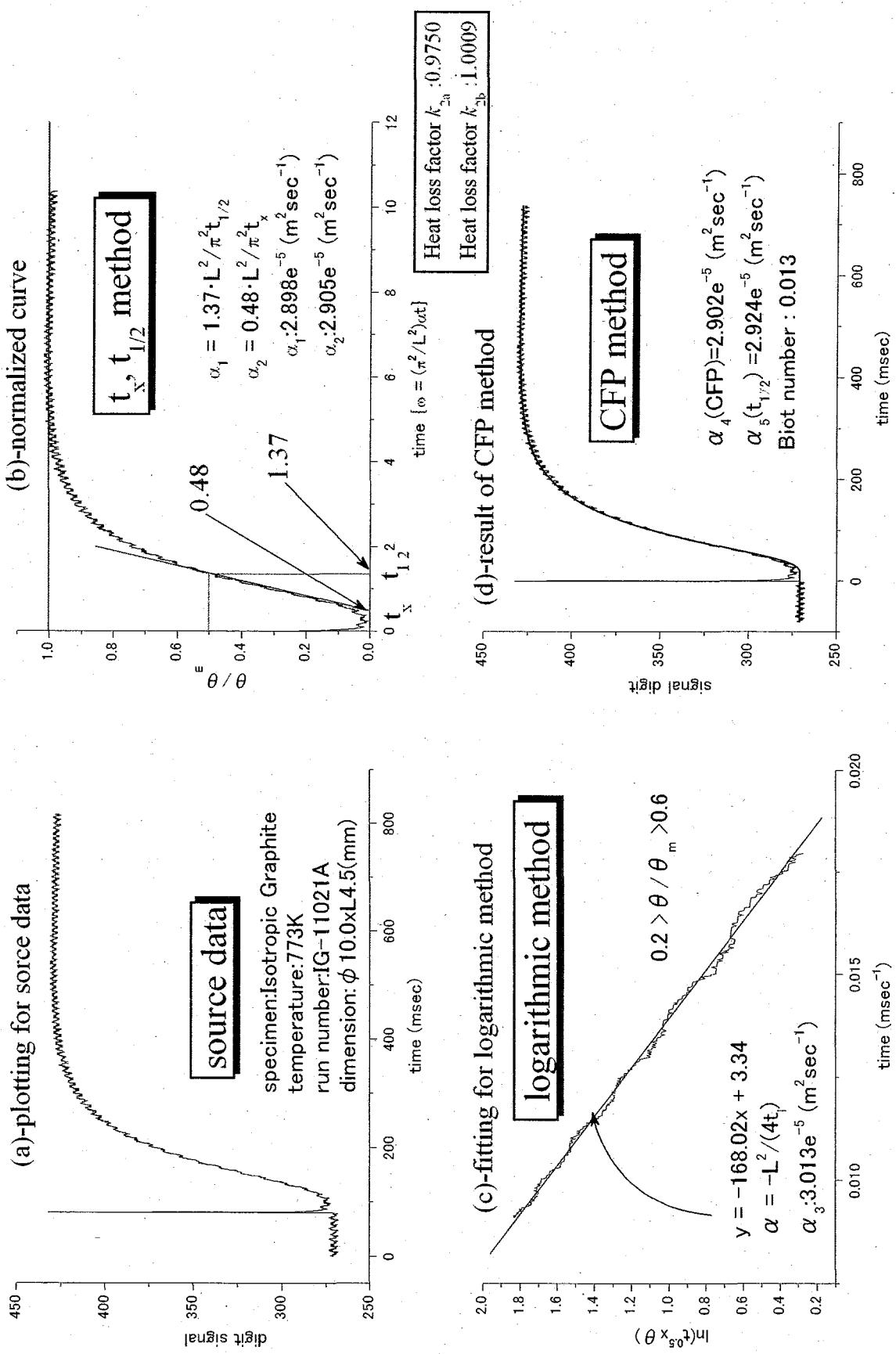
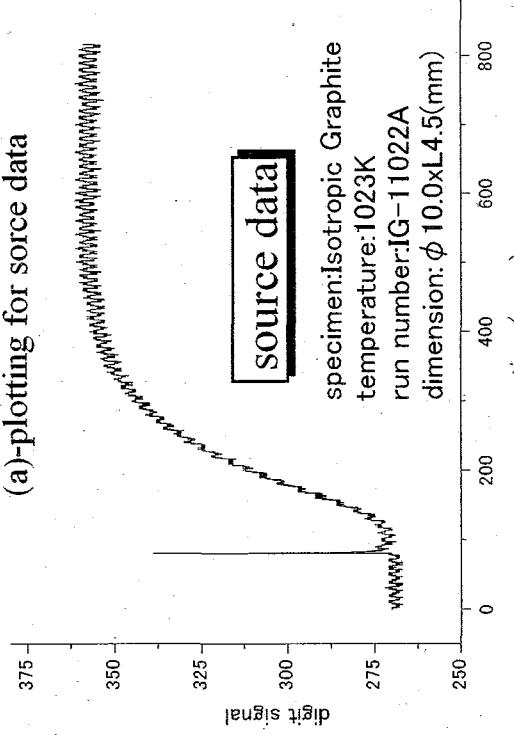
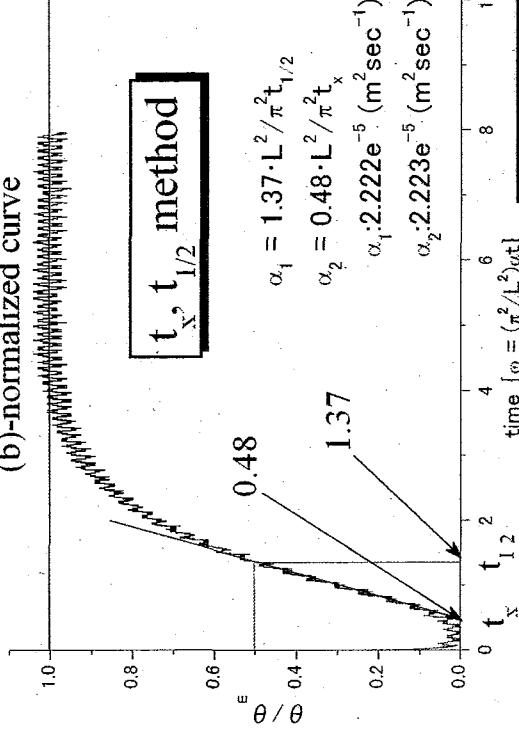


Fig.B-10 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
 (sample: Isotropic graphite, run number: 11021A, measured temperature: 773K)

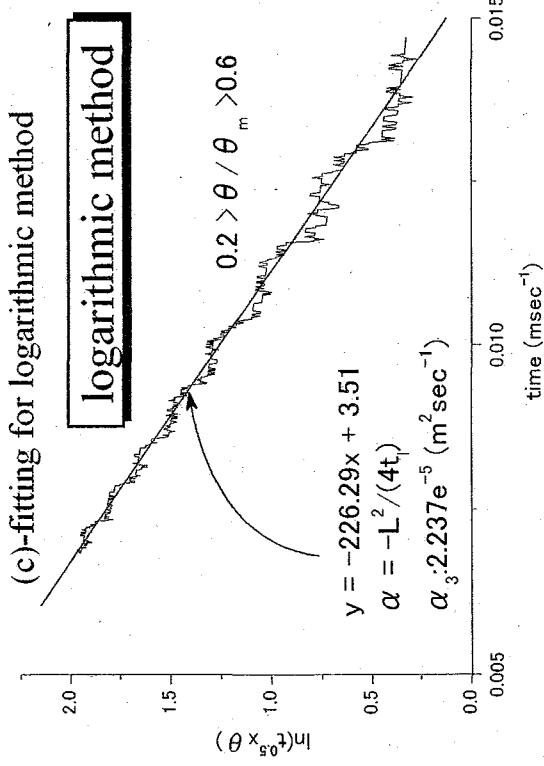
(a)-plotting for sorce data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

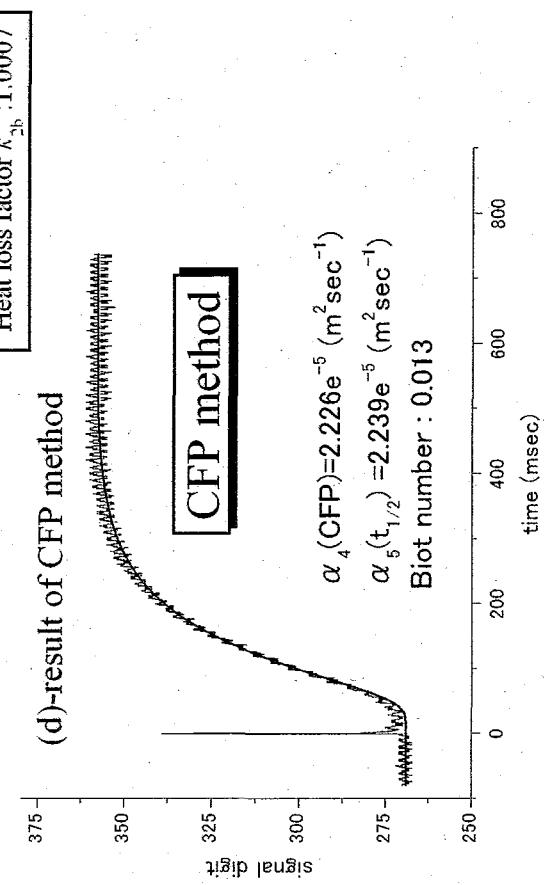
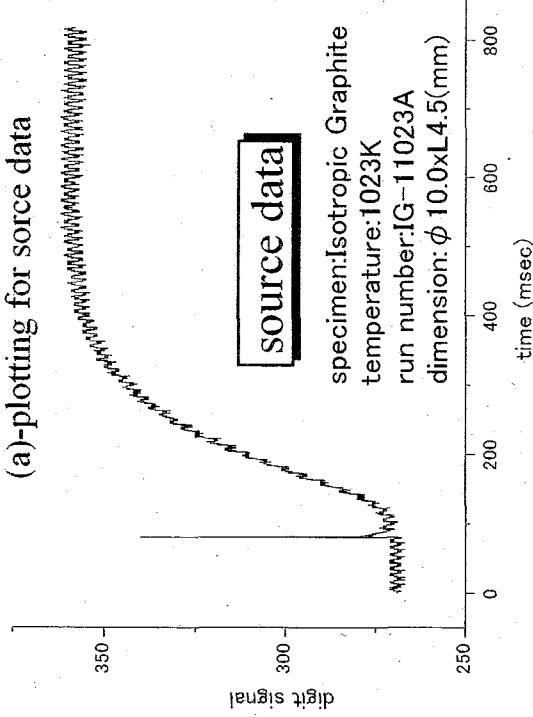


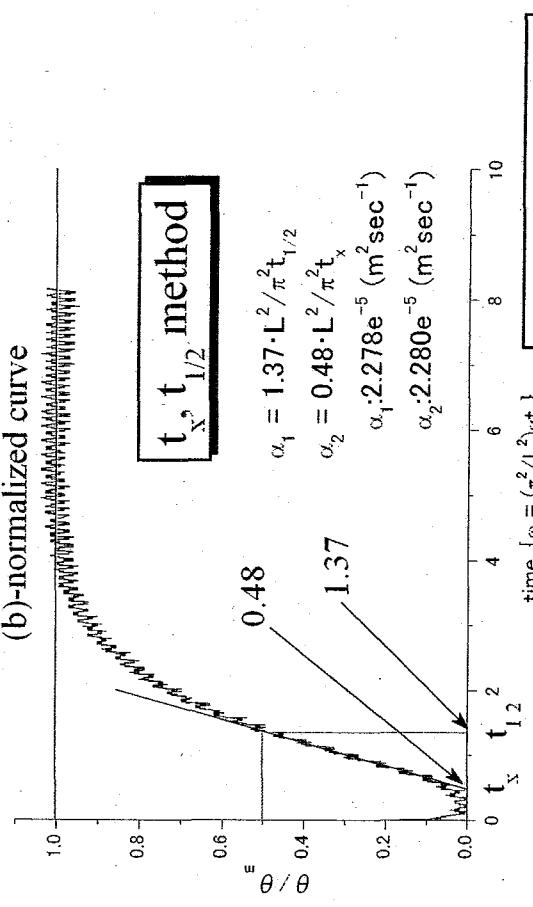
Fig.B-11 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11022A, measured temperature: 1023K)

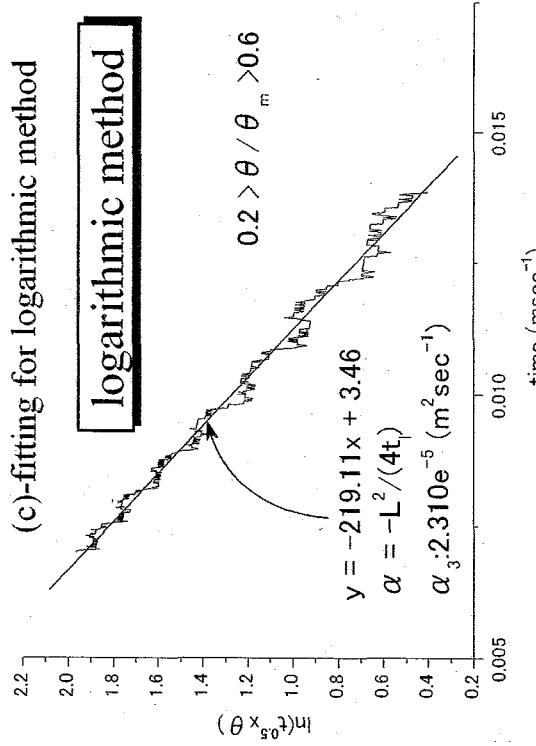
(a)-plotting for sorce data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

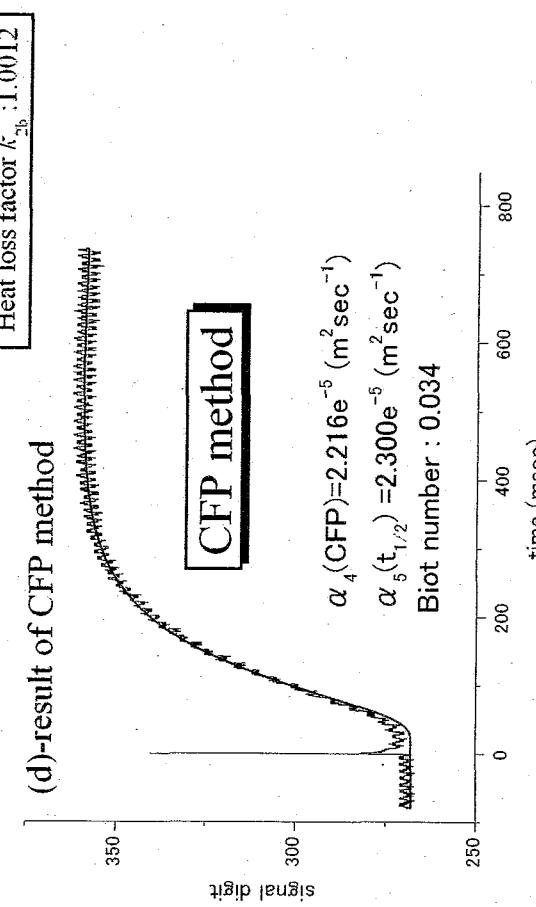
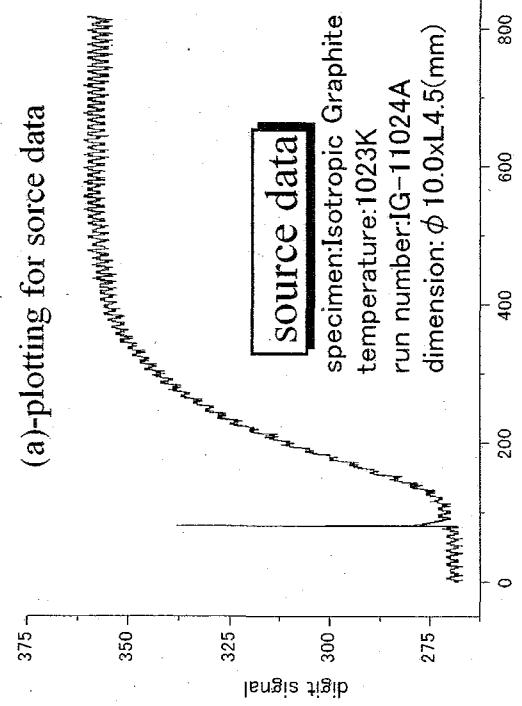


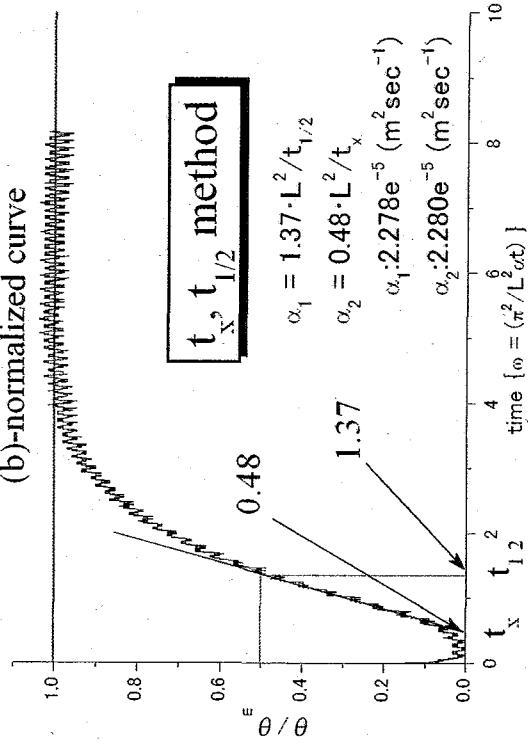
Fig.B-12 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11023A, measured temperature: 1023K)

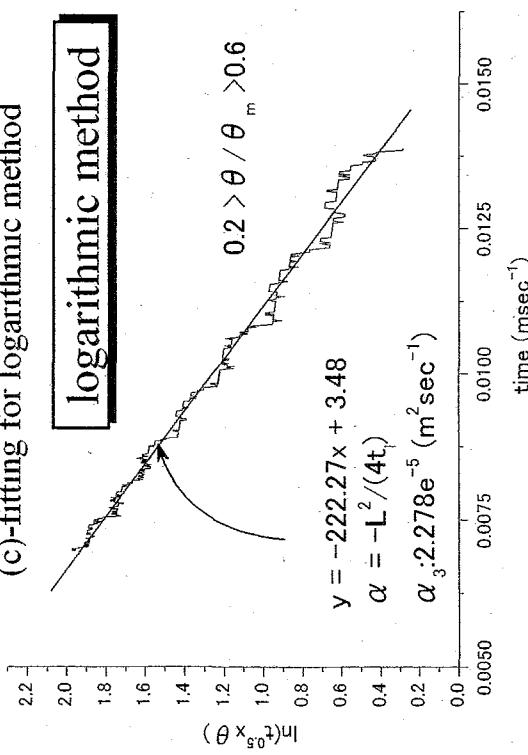
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

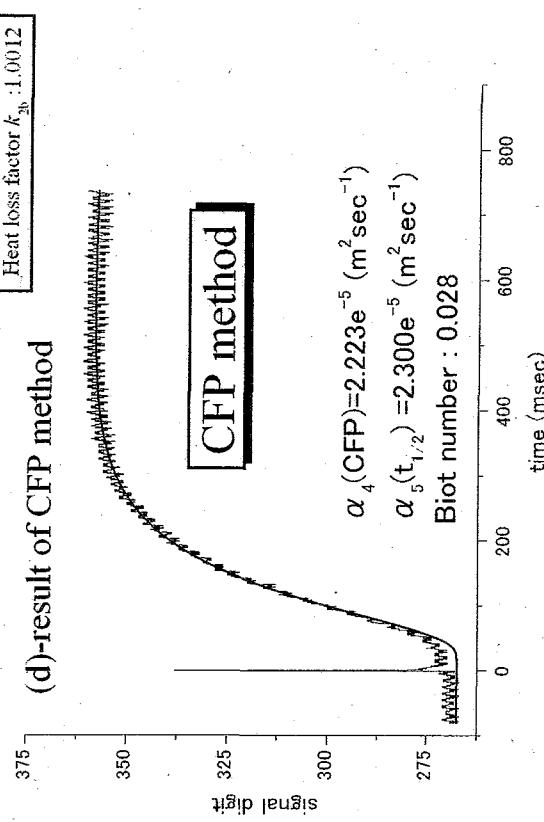


Fig.B-13 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11024A, measured temperature: 1023K)

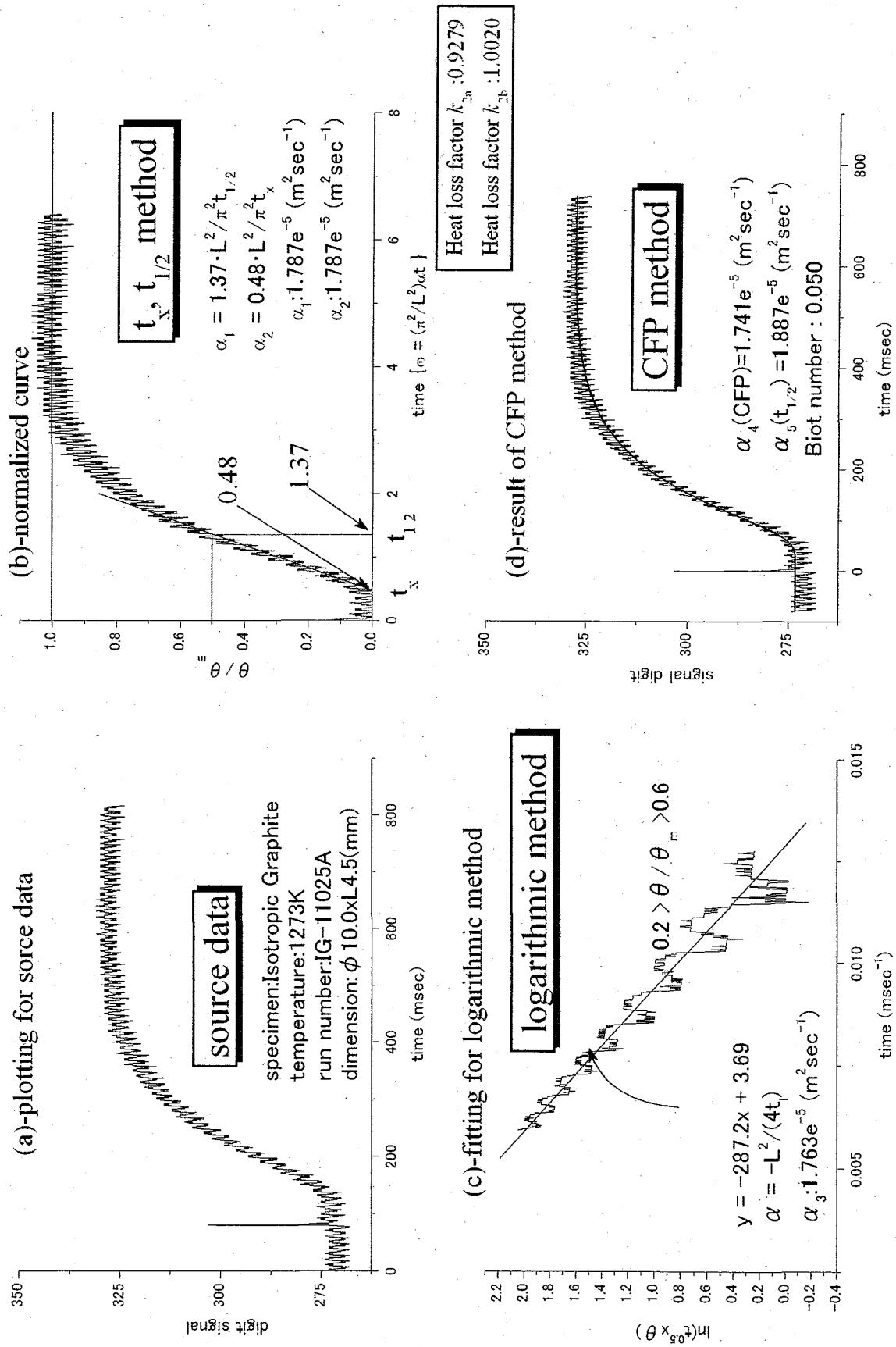


Fig.B-14 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11025A, measured temperature: 1273K)

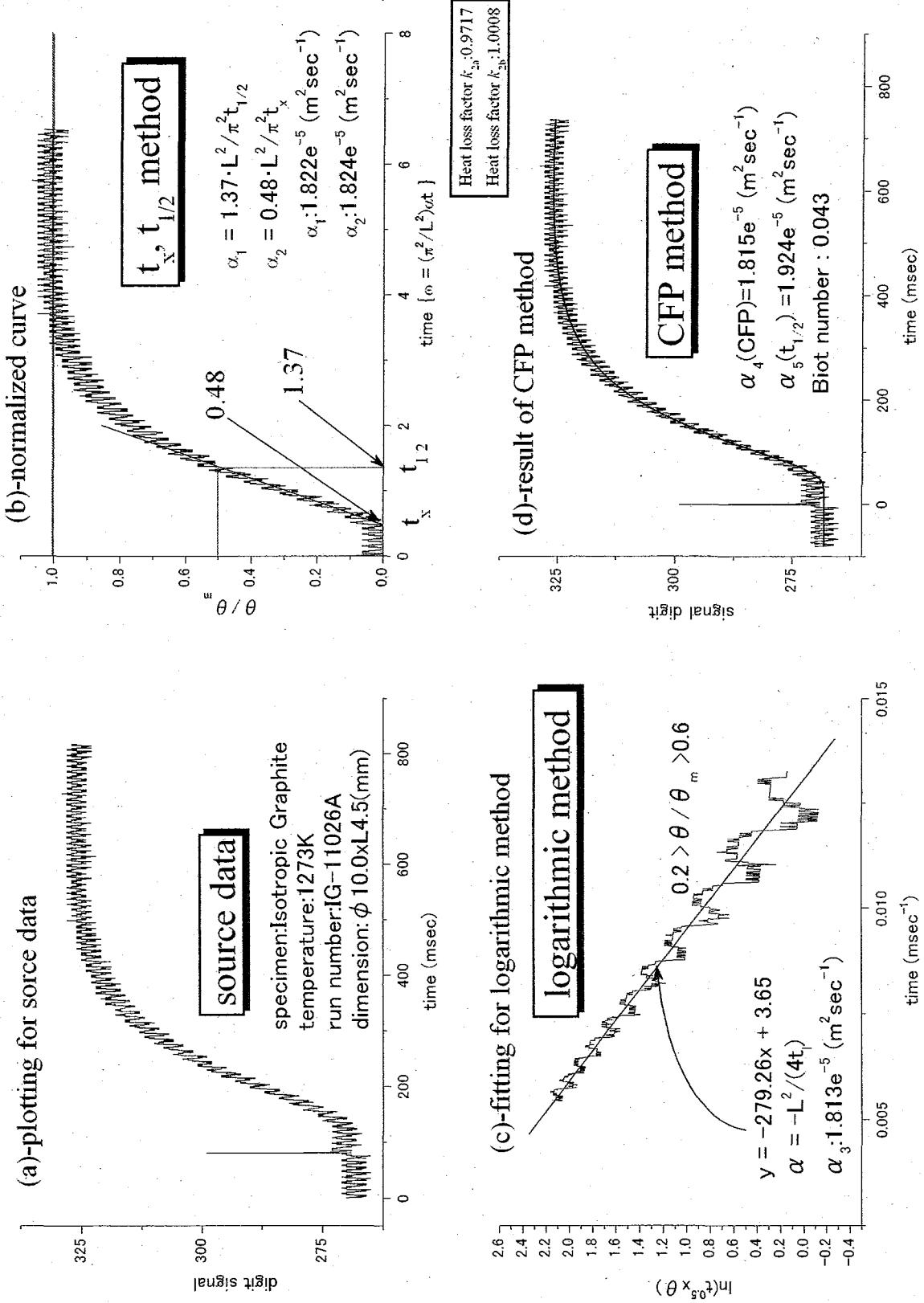


Fig.B-15 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11026A, measured temperature: 1273K)

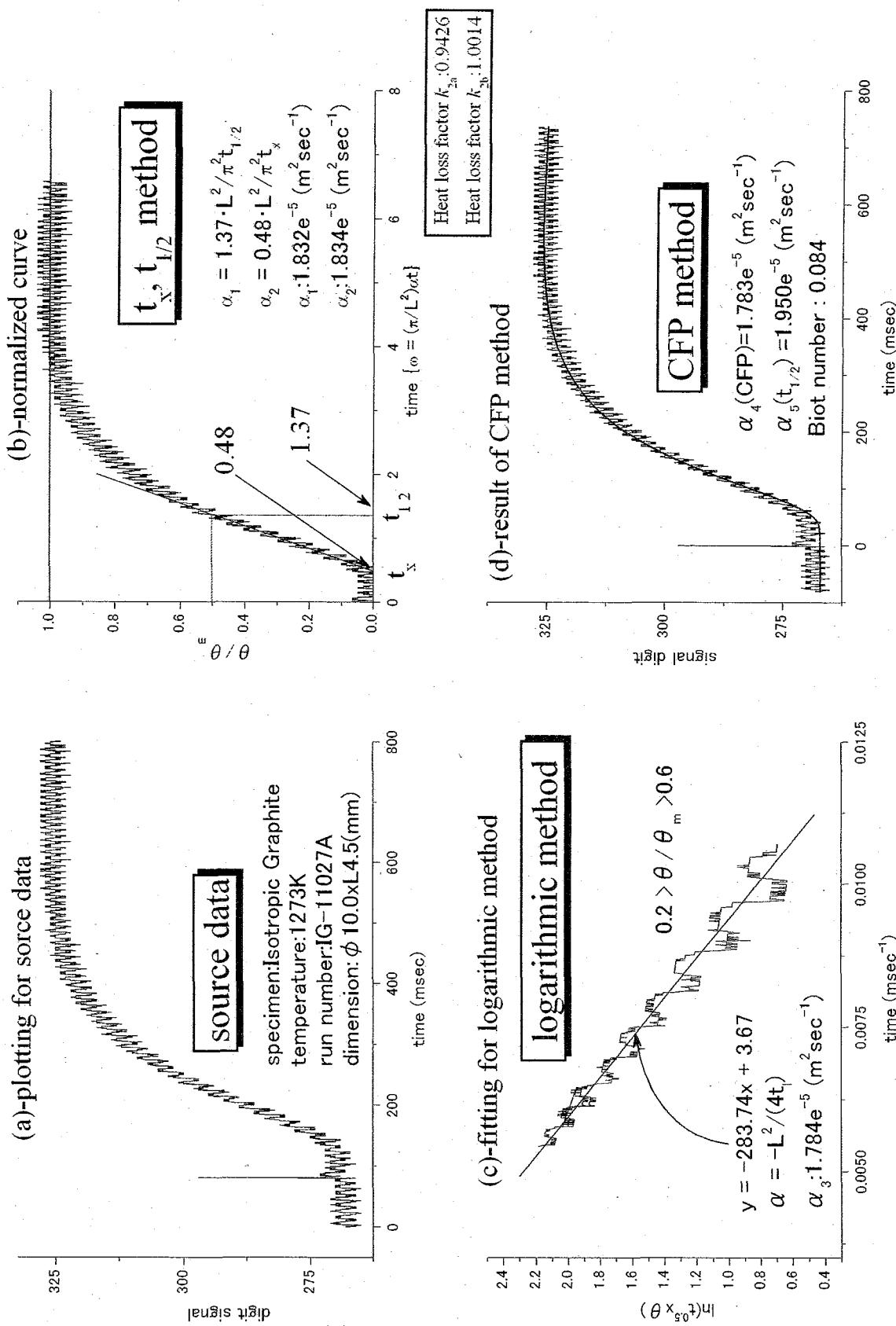
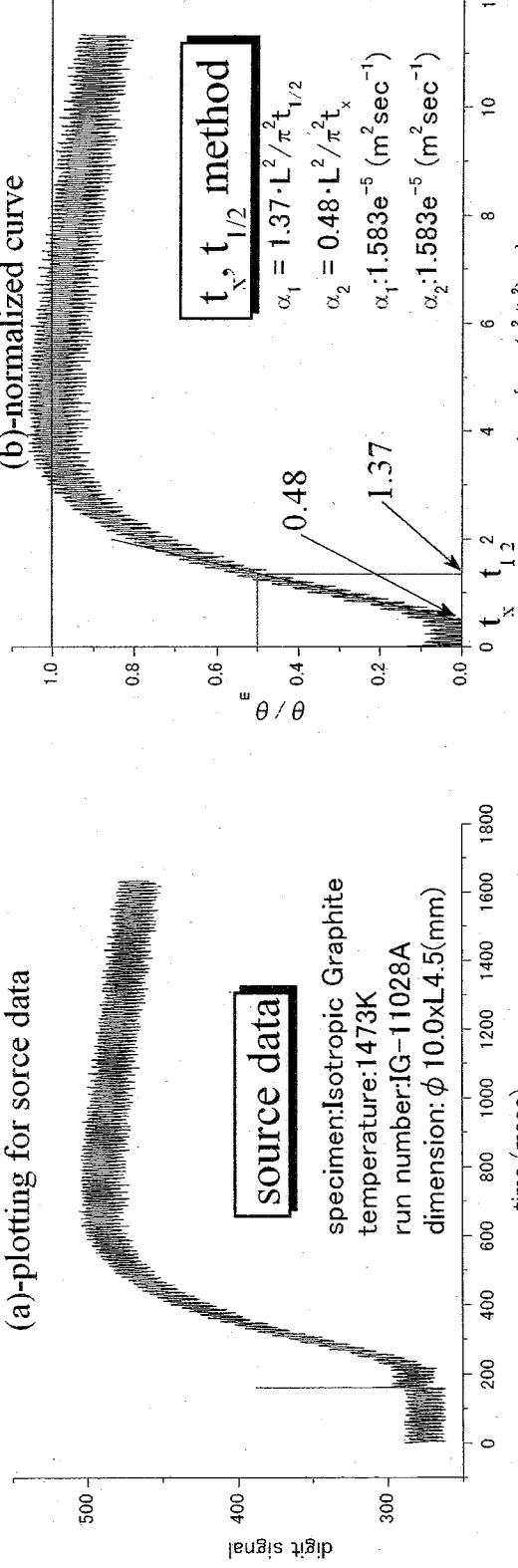
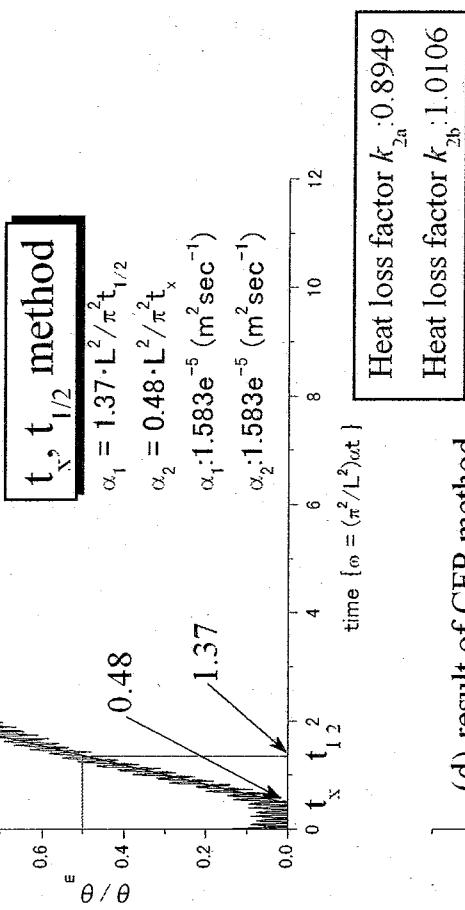


Fig.B-16 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11027A, measured temperature: 1273K)

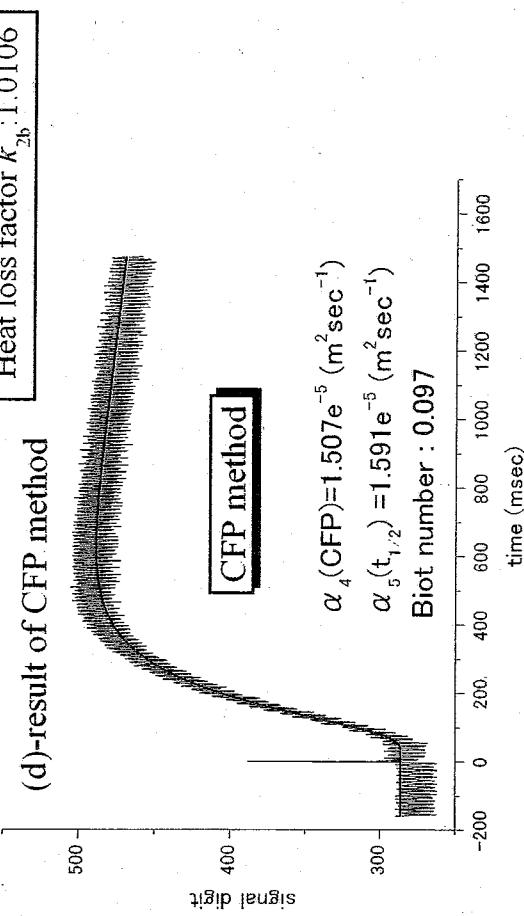
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(d)-result of CFP method



(c)-fitting for logarithmic method

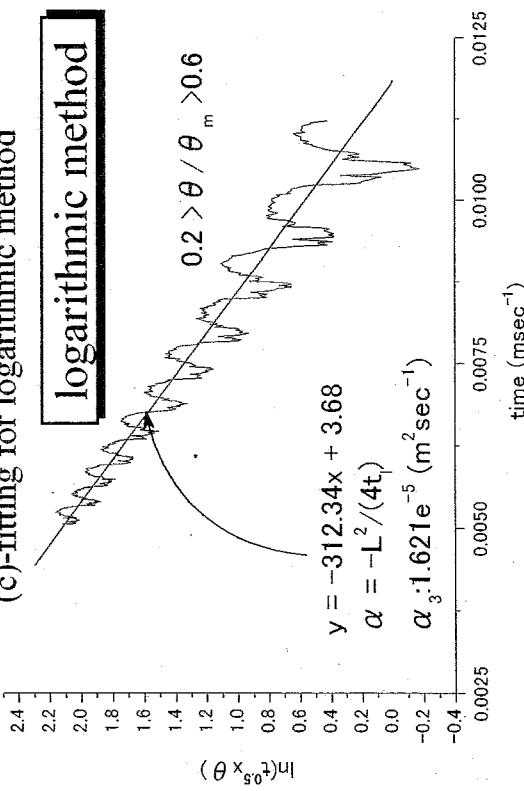
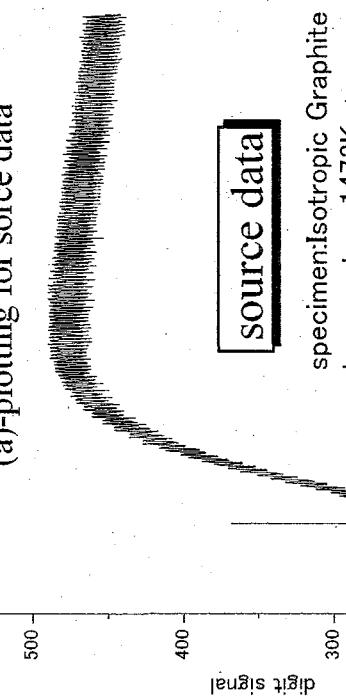


Fig.B-17 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: Isotropic graphite, run number: 11028A, measured temperature: 1473K)

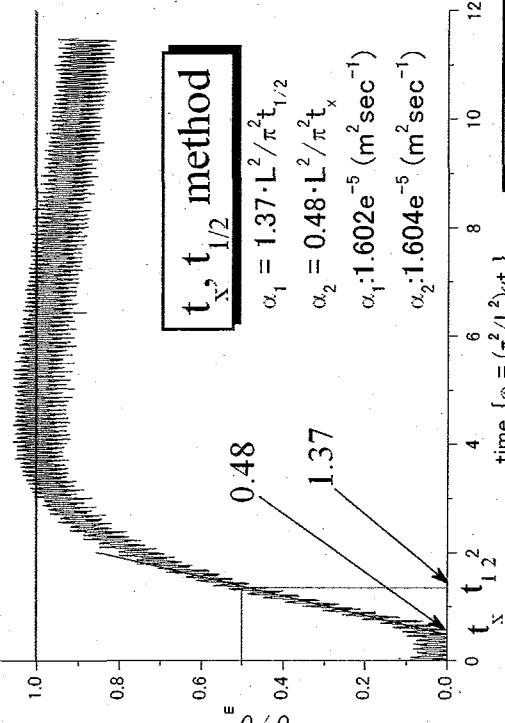
(a)-plotting for source data



source data

specimen: Isotropic Graphite
temperature: 1473K
run number: IG-11029A
dimension: $\phi 10.0 \times L4.5$ (mm)

(b)-normalized curve

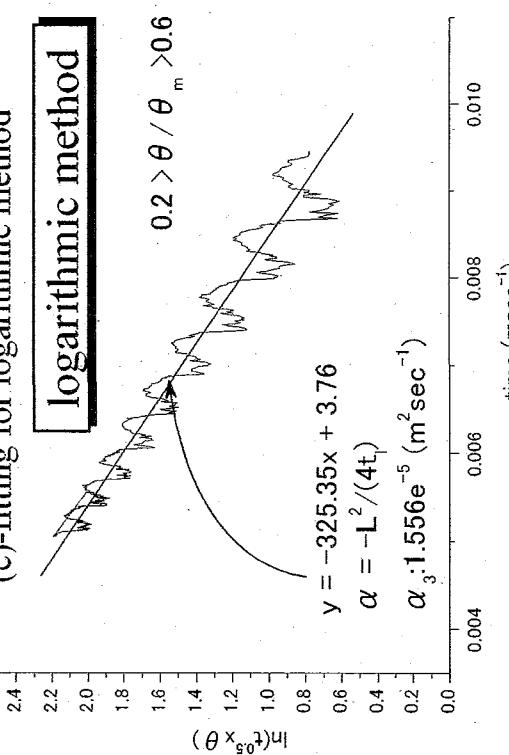
 $t_x, t_{1/2}$ method

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1.37 \cdot L^2 / \pi^2 t_{1/2} \\ \alpha_2 &= 0.48 \cdot L^2 / \pi^2 t_x \\ \alpha_3 &= 1.602e^{-5} (\text{m}^2 \text{sec}^{-1})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_0 e^{-\alpha_1 t_x - \alpha_2 t_{1/2}} \\ &\quad - \alpha_3 t_x^2 / (L^2 / 4t)\end{aligned}$$

(c)-fitting for logarithmic method

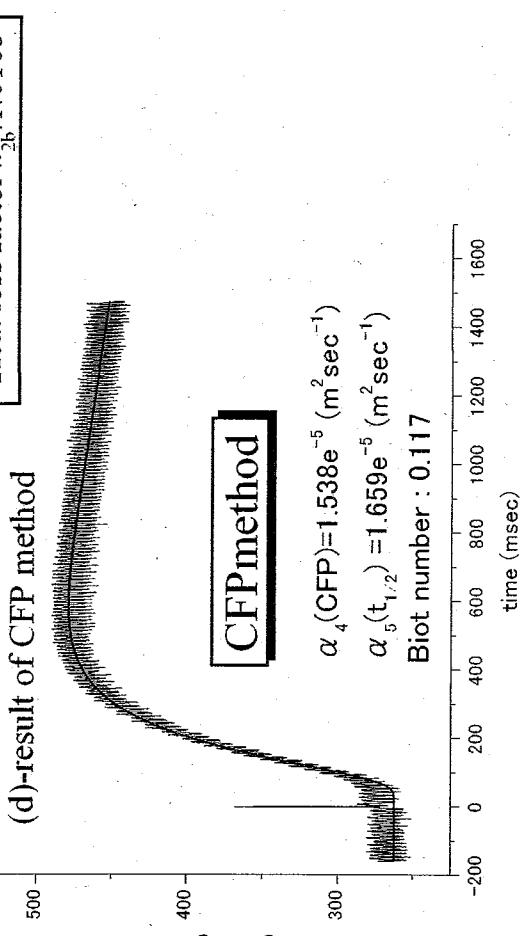
logarithmic method



$$y = -325.35x + 3.76$$

$$\alpha = -L^2 / (4t)$$

$$\alpha_4 = 1.538e^{-5} (\text{m}^2 \text{sec}^{-1})$$



CFPmethod

$$\begin{aligned}\alpha_4 (\text{CFP}) &= 1.538e^{-5} (\text{m}^2 \text{sec}^{-1}) \\ \alpha_5 (t_{1/2}) &= 1.659e^{-5} (\text{m}^2 \text{sec}^{-1}) \\ \text{Biot number} &: 0.117\end{aligned}$$

Fig.B-18 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11029A, measured temperature: 1473K)

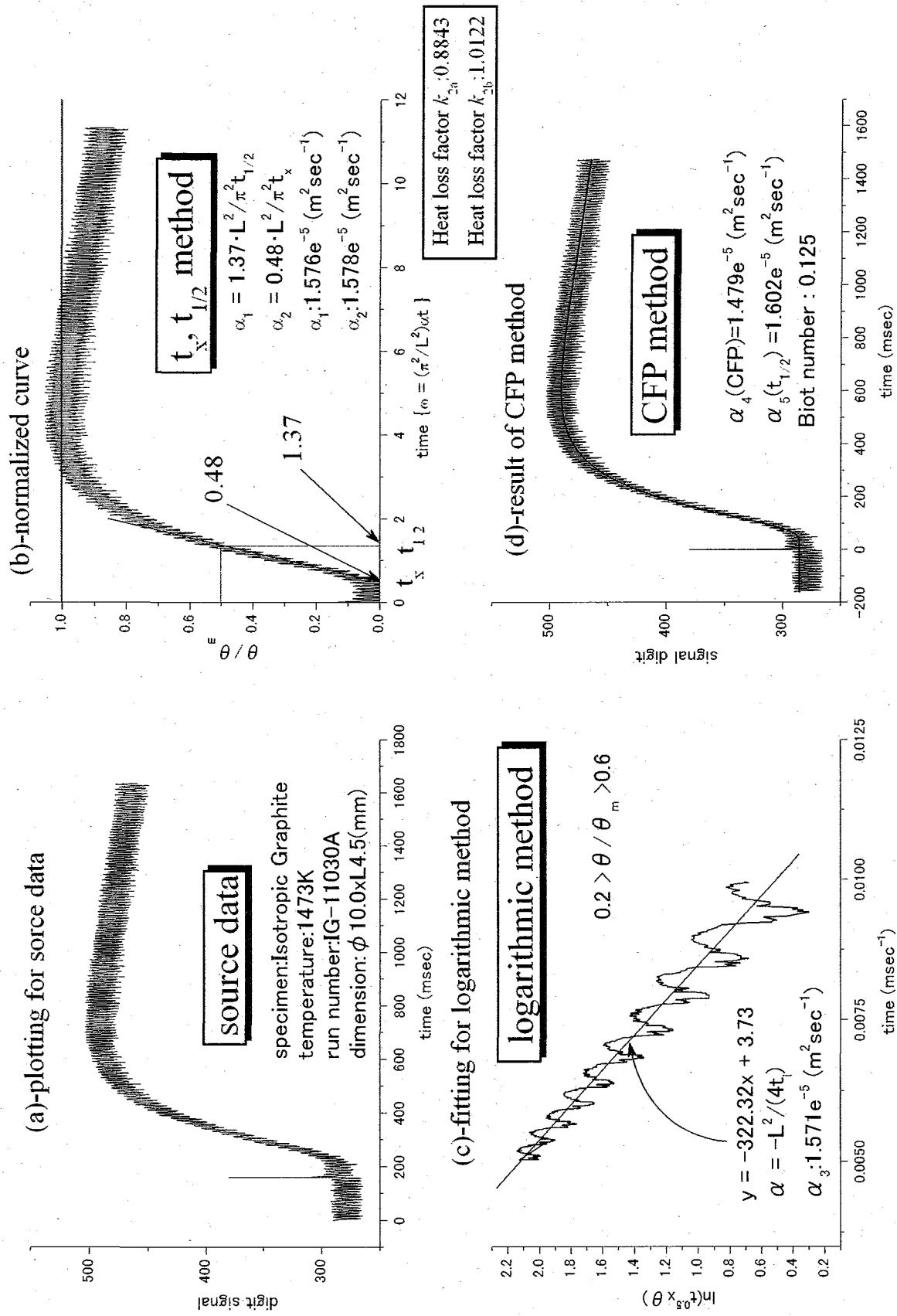


Fig.B-19 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11030A, measured temperature: 1473K)

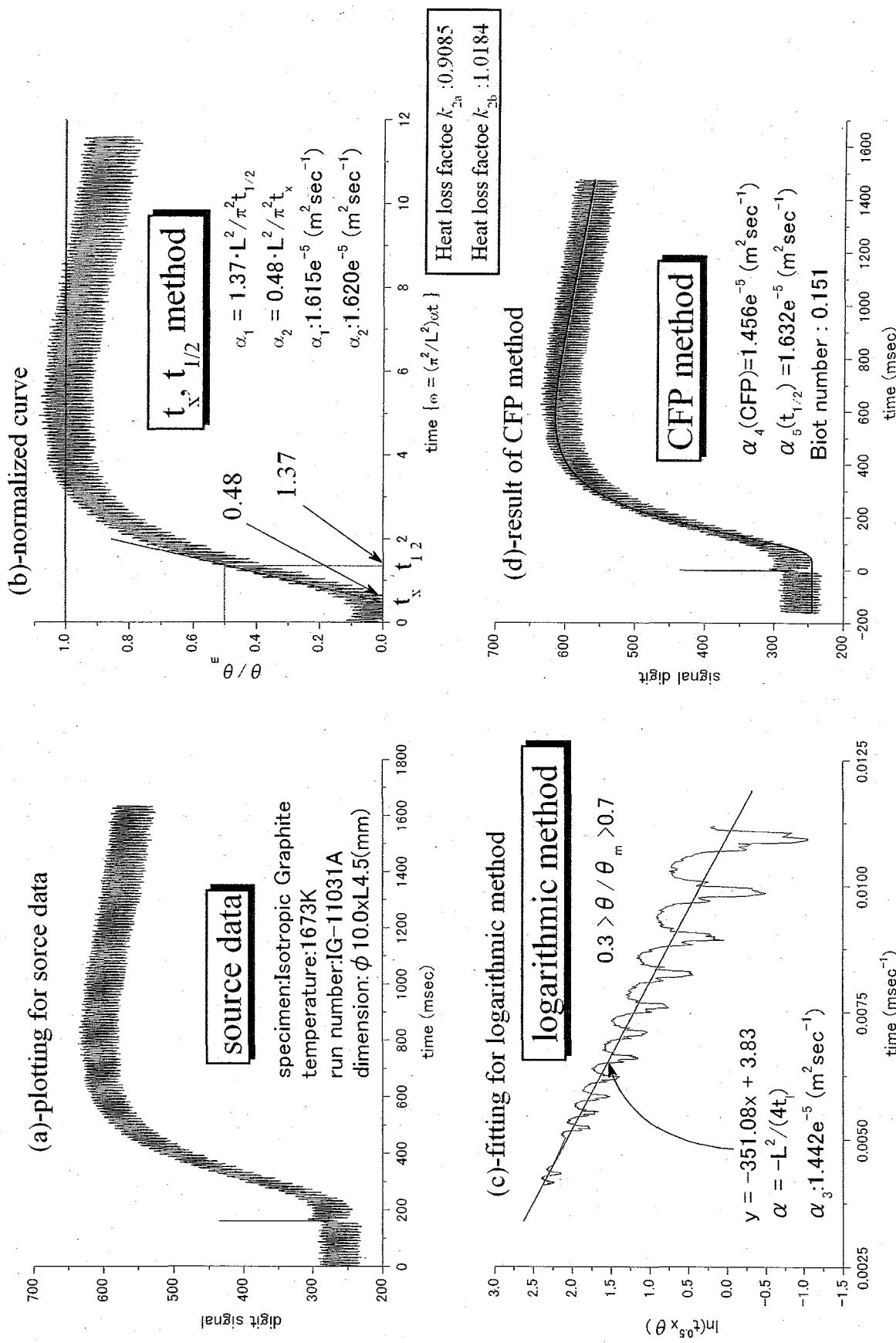
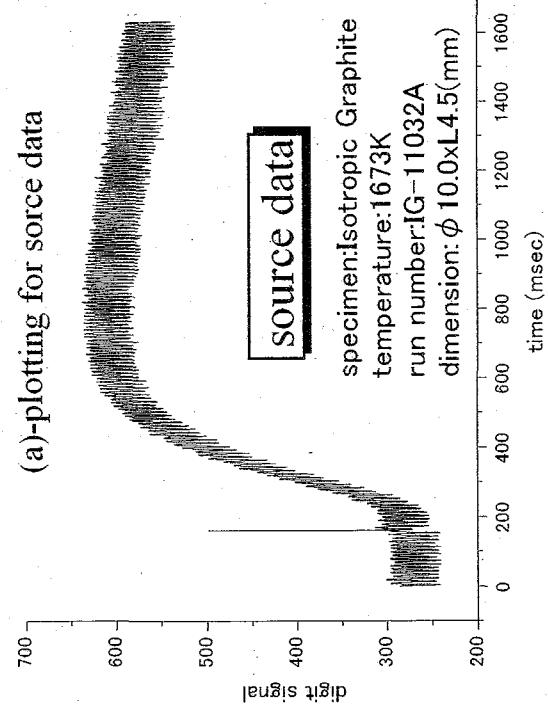
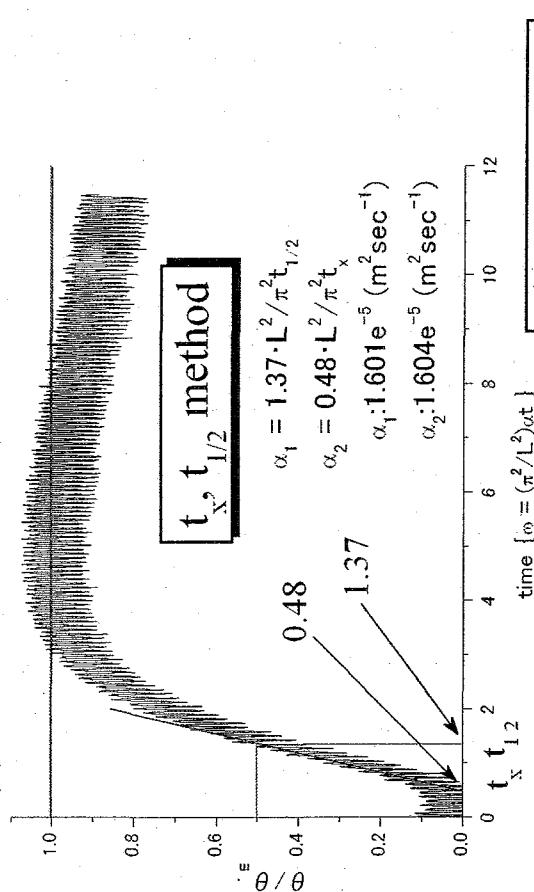


Fig.B-20 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11031A, measured temperature: 1673K)

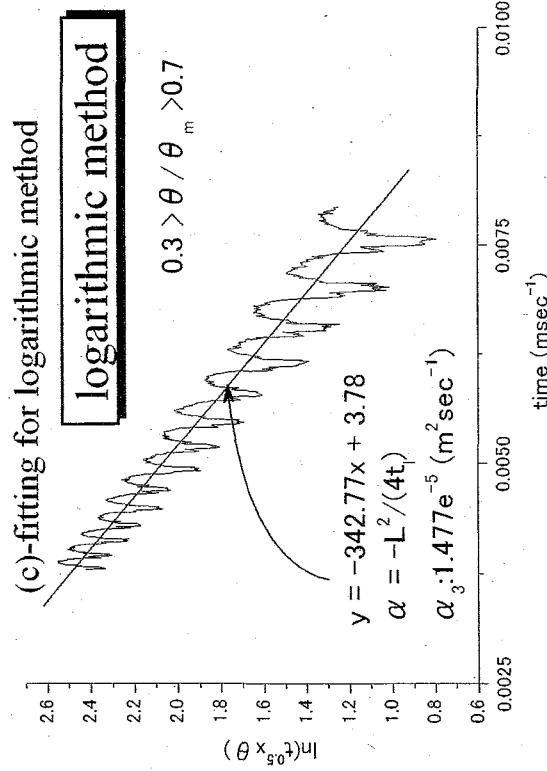
(a)-plotting for sorce data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

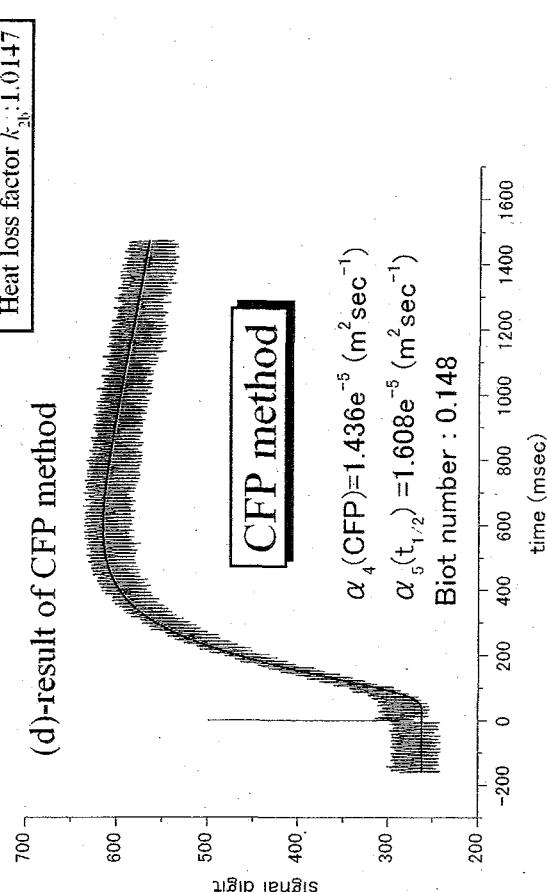
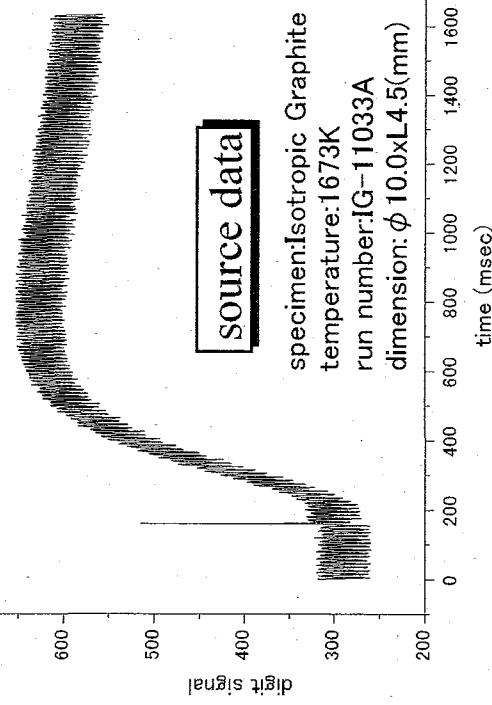


Fig.B-21 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

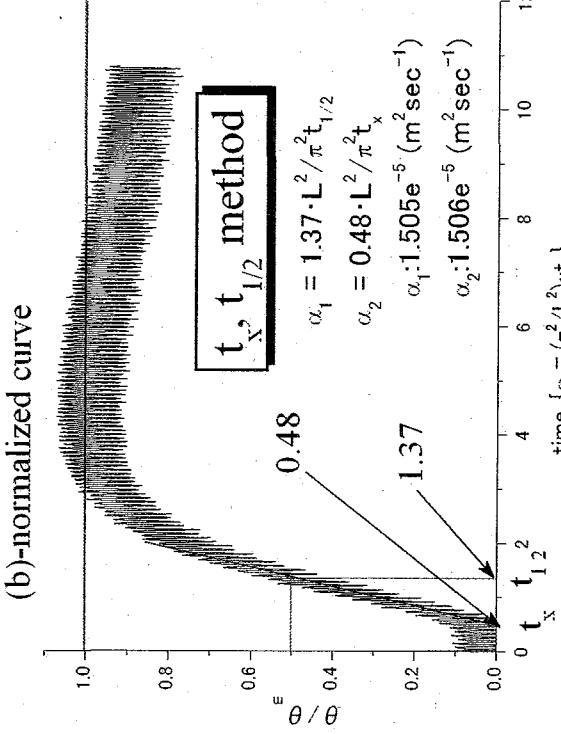
(sample: Isotropic graphite, run number: 11032A, measured temperature: 1673K)

(b)-normalized curve

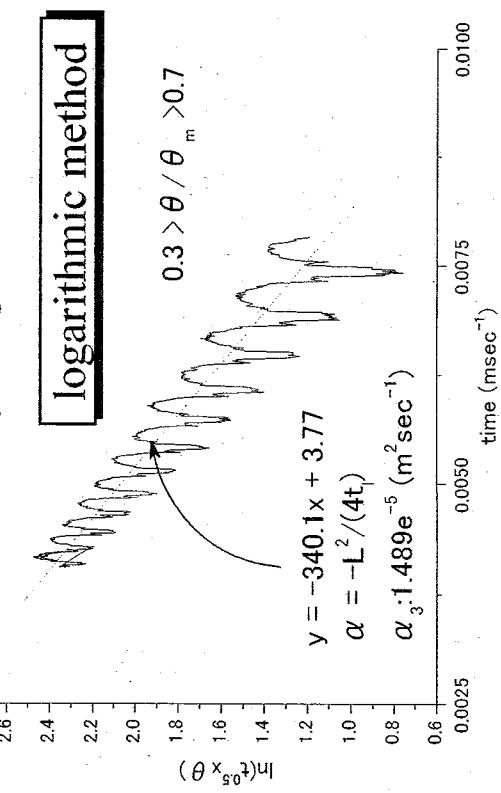
(a)-plotting for sorce data



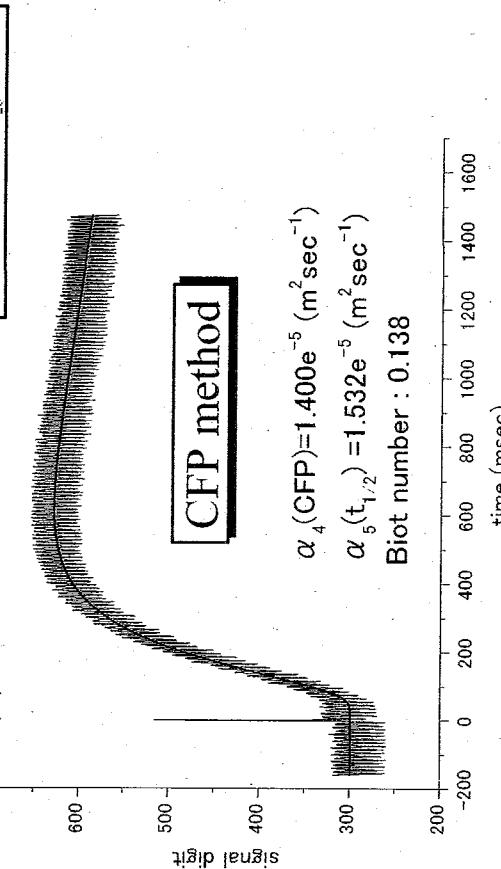
source data

 $t_x, t_{1/2}$ method

(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method



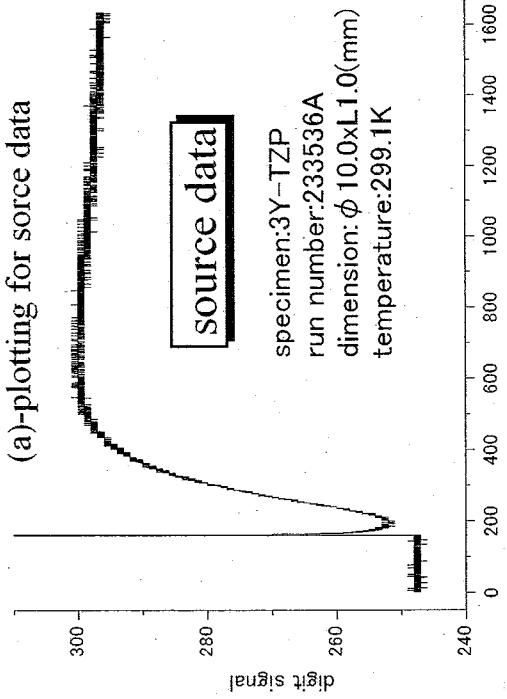
CFP method

Fig.B-22 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample: Isotropic graphite, run number: 11033A, measured temperature: 1673K)

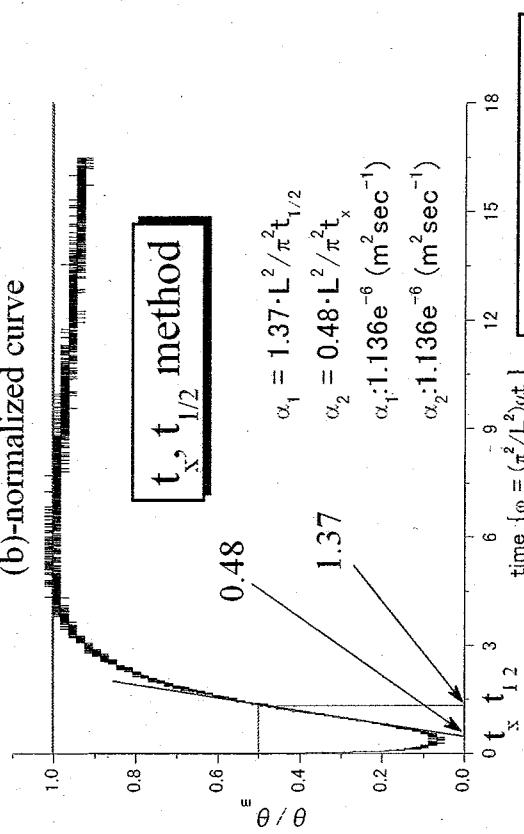
C. 3Y-TZP 試料の熱拡散率データ

This is a blank page.

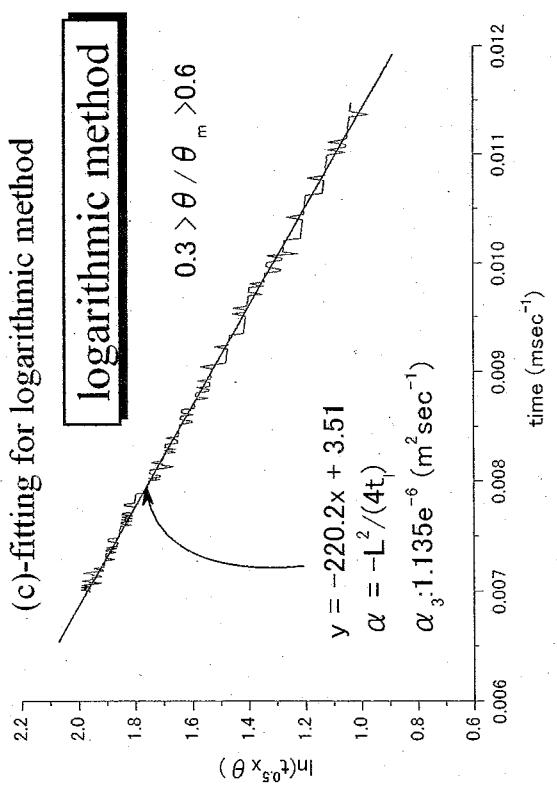
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

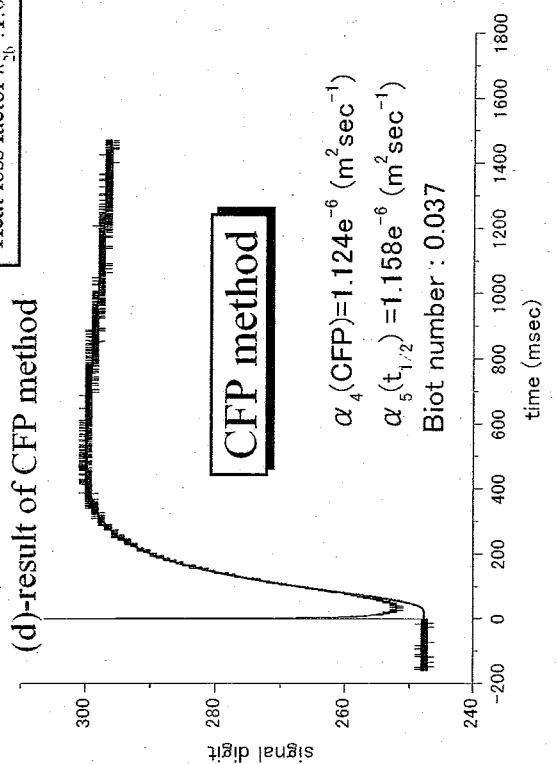
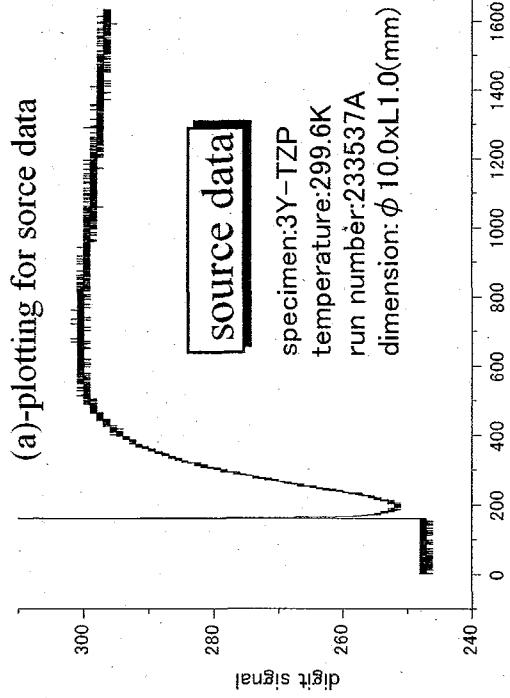


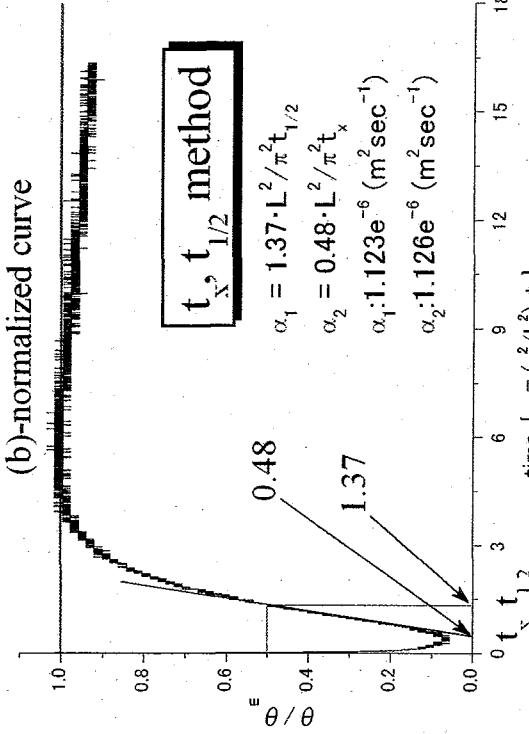
Fig.C-1 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233536A, measured temperature 299.1K)

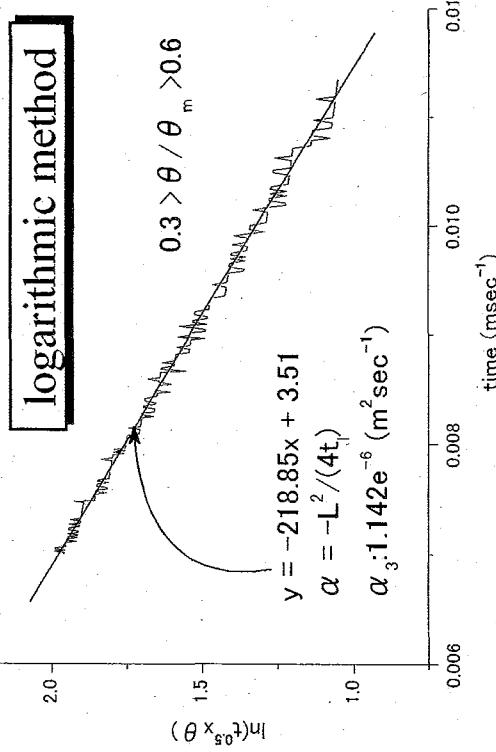
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

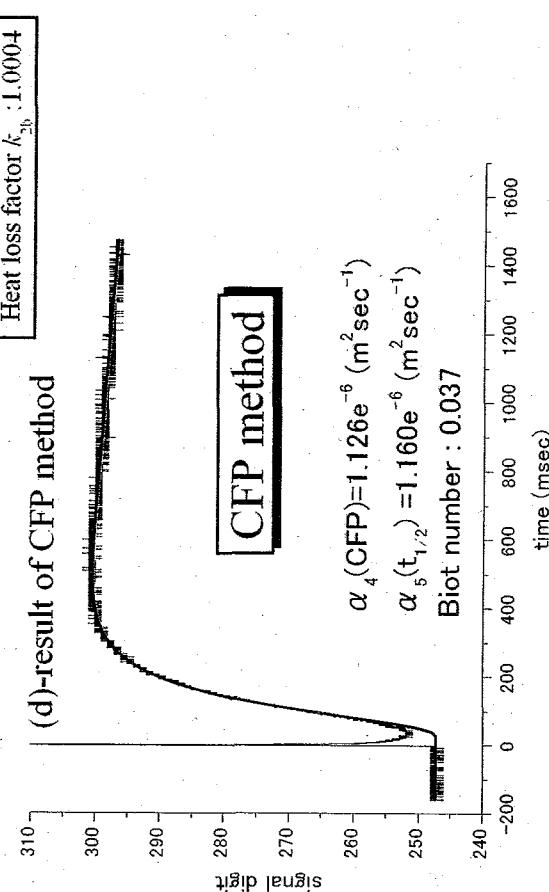
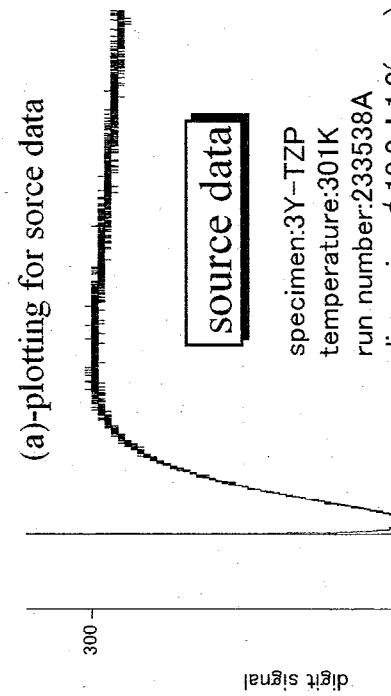
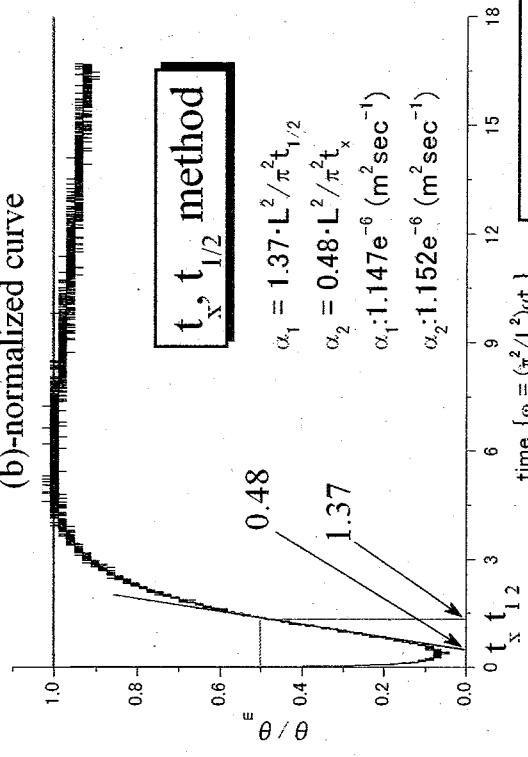


Fig.C-2 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3 Y-TZP, run number:233537A, measured temperature:299.6K)

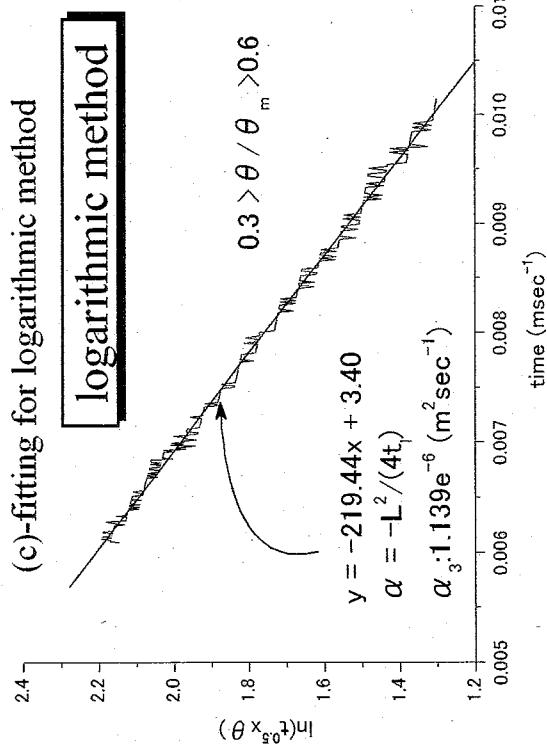
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

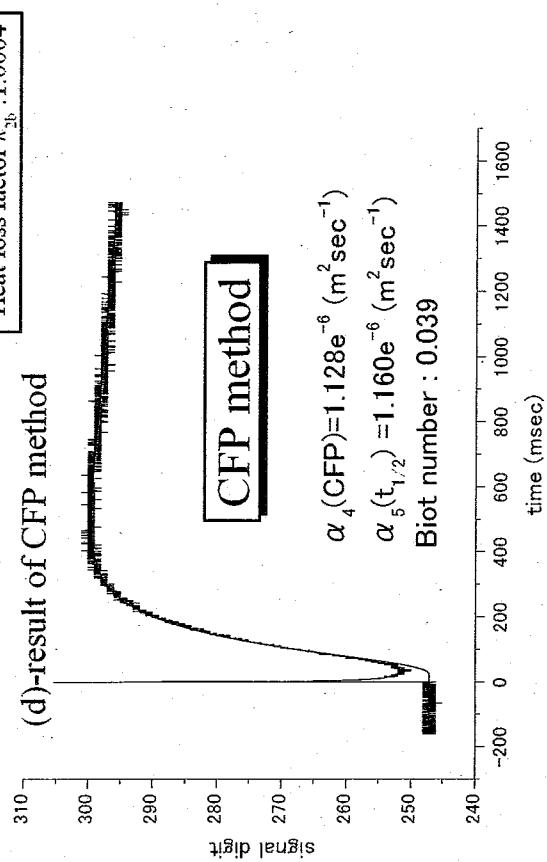
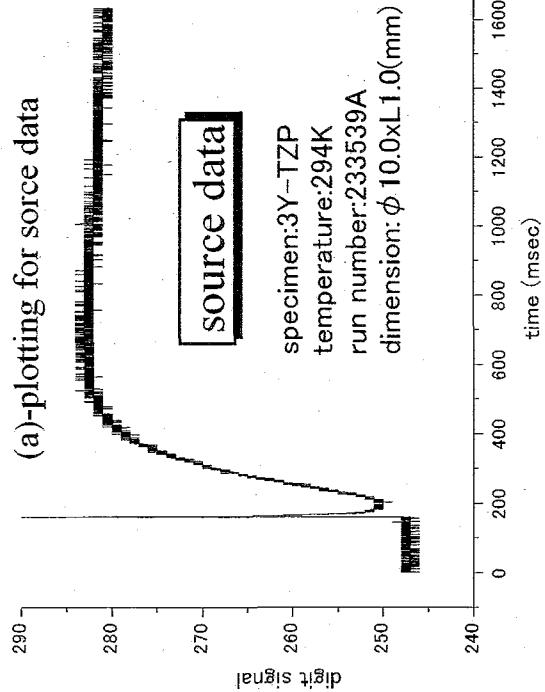
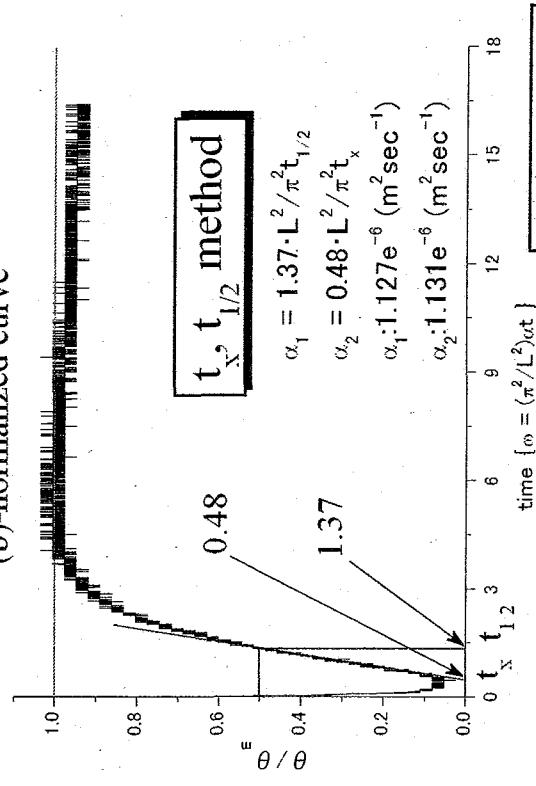


Fig.C-3 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
 (sample:3 Y-TZP, run number:233538A, measured temperature:301K)

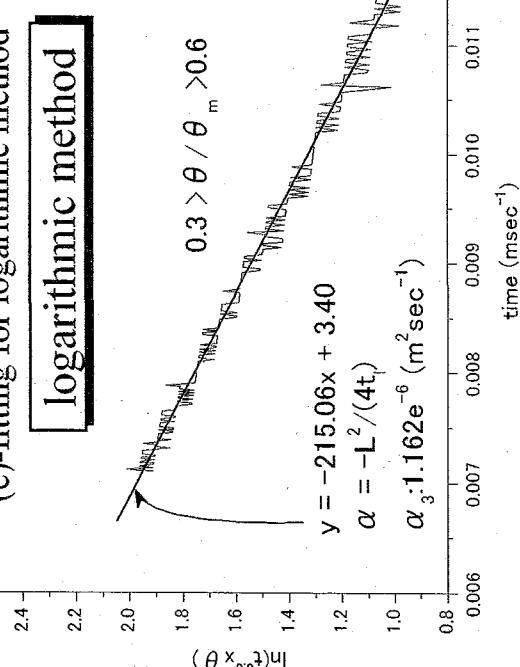
(a)-plotting for source data



(b)-normalized curve



(c)-fitting for logarithmic method



(d)-result of CFP method

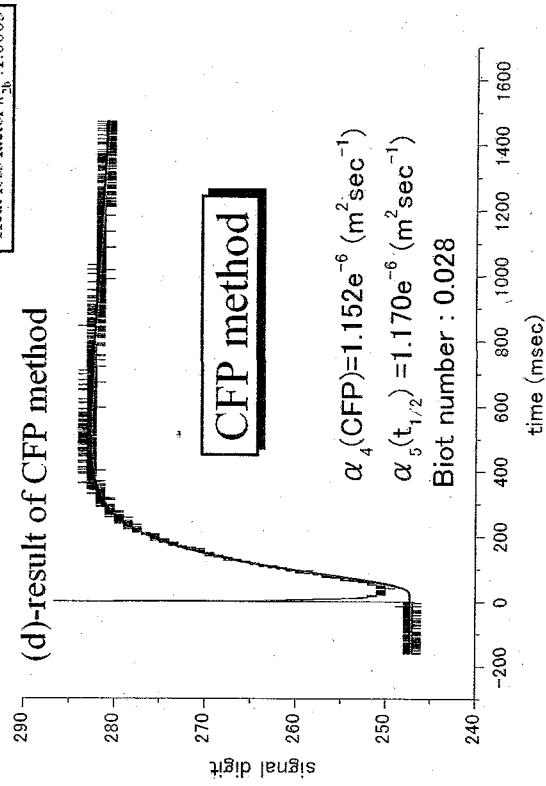


Fig.C-4 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.

(sample: 3Y-TZP, run number: 233539A, measured temperature: 294K)

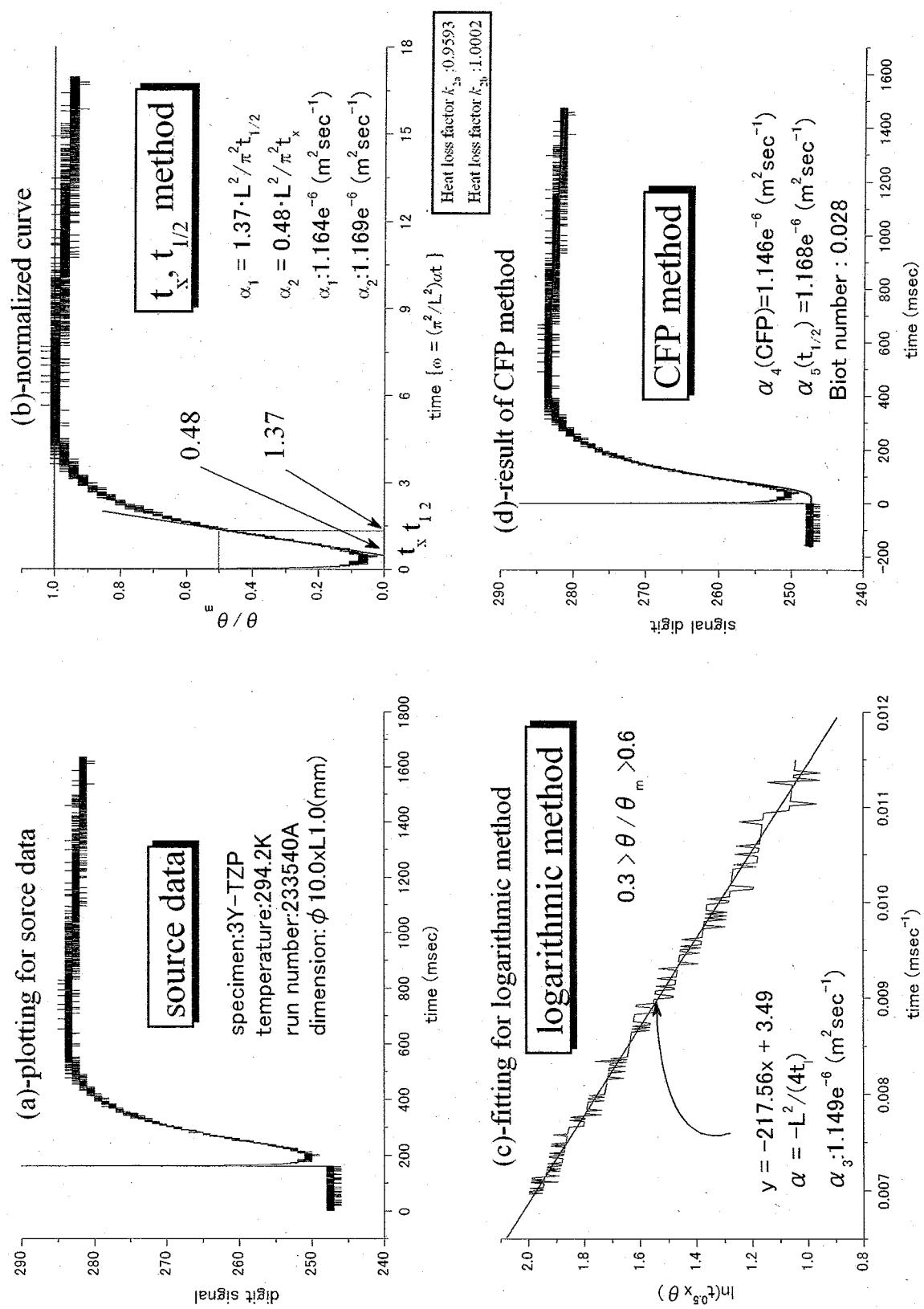


Fig.C-5 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
 (sample:3 Y-TZP, run number:233540A, measured temperature:294.2K)

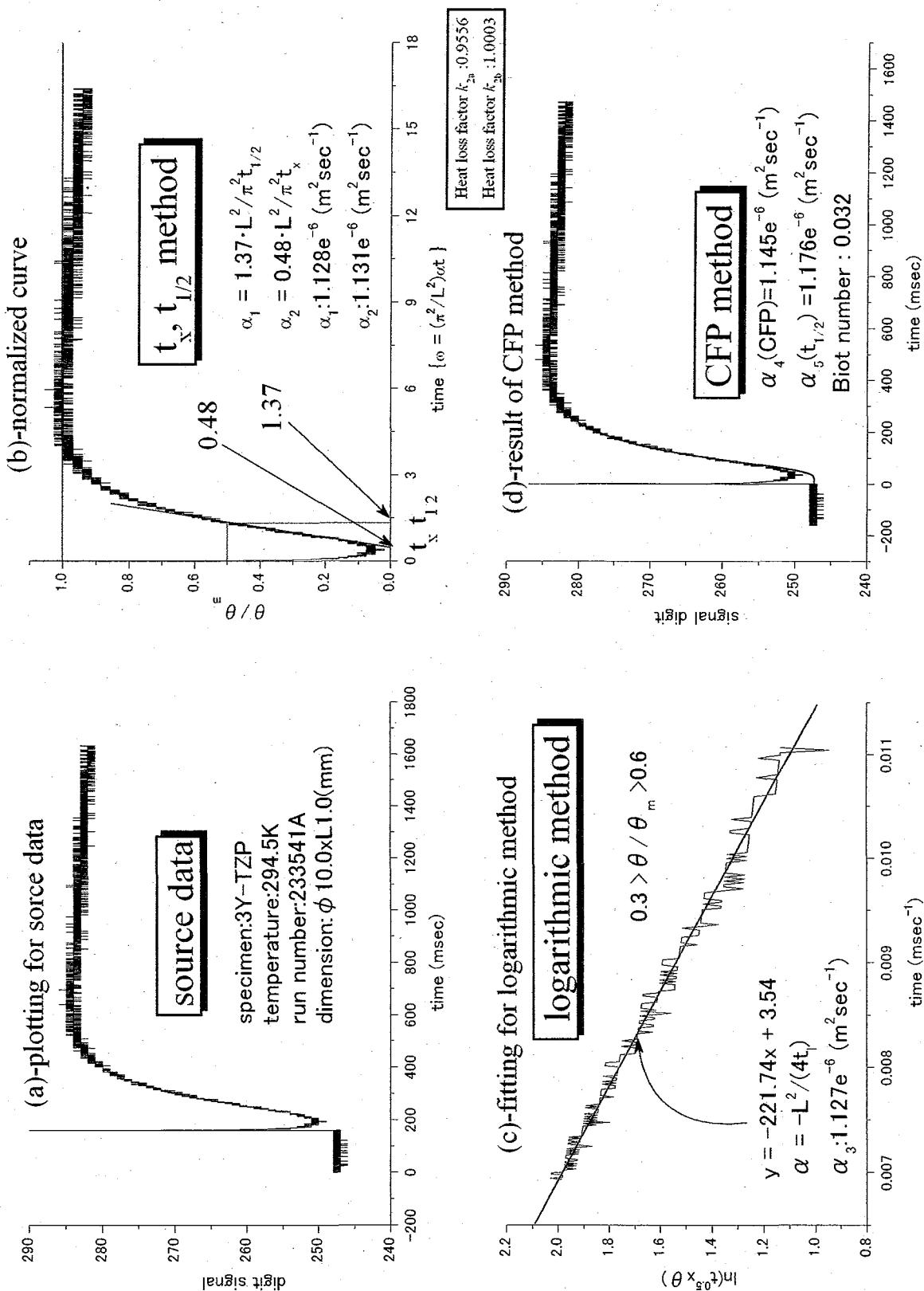


Fig.C-6 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233541A, measured temperature:294.5K)

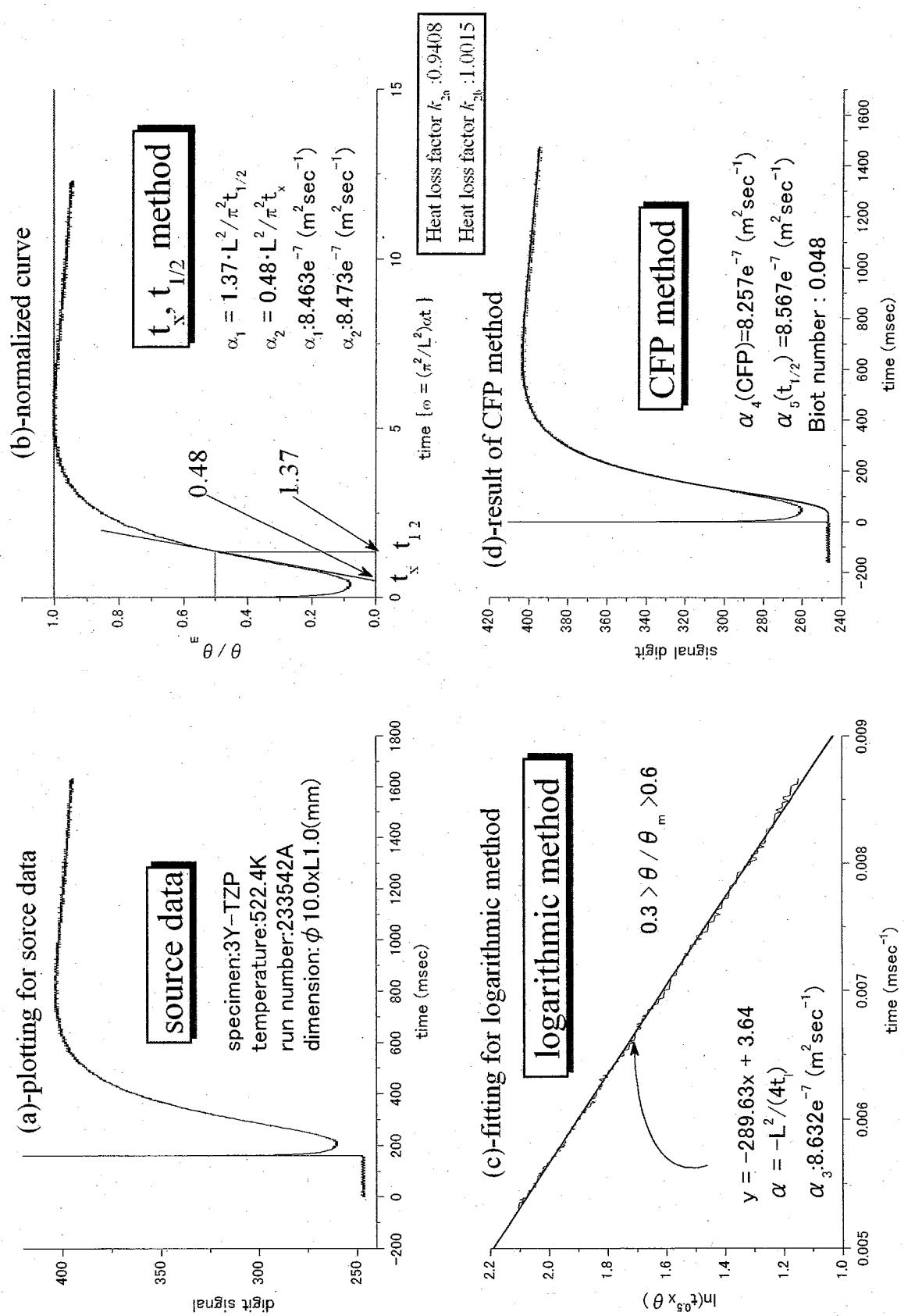


Fig.C-7 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233542A, measured temperature:522.4K)

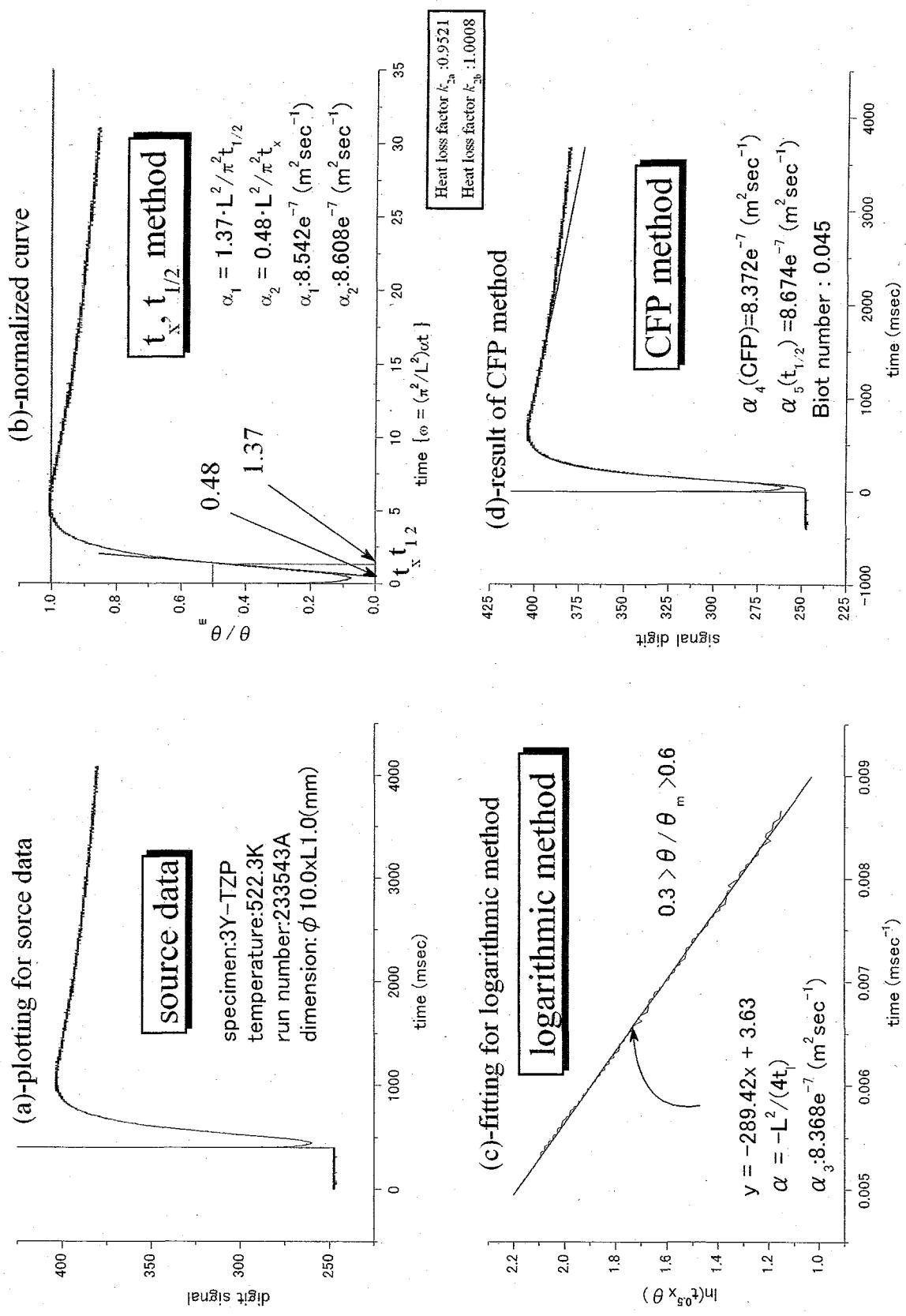


Fig.C-8 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3 Y-TZP, run number:233543A, measured temperature:522.3K)

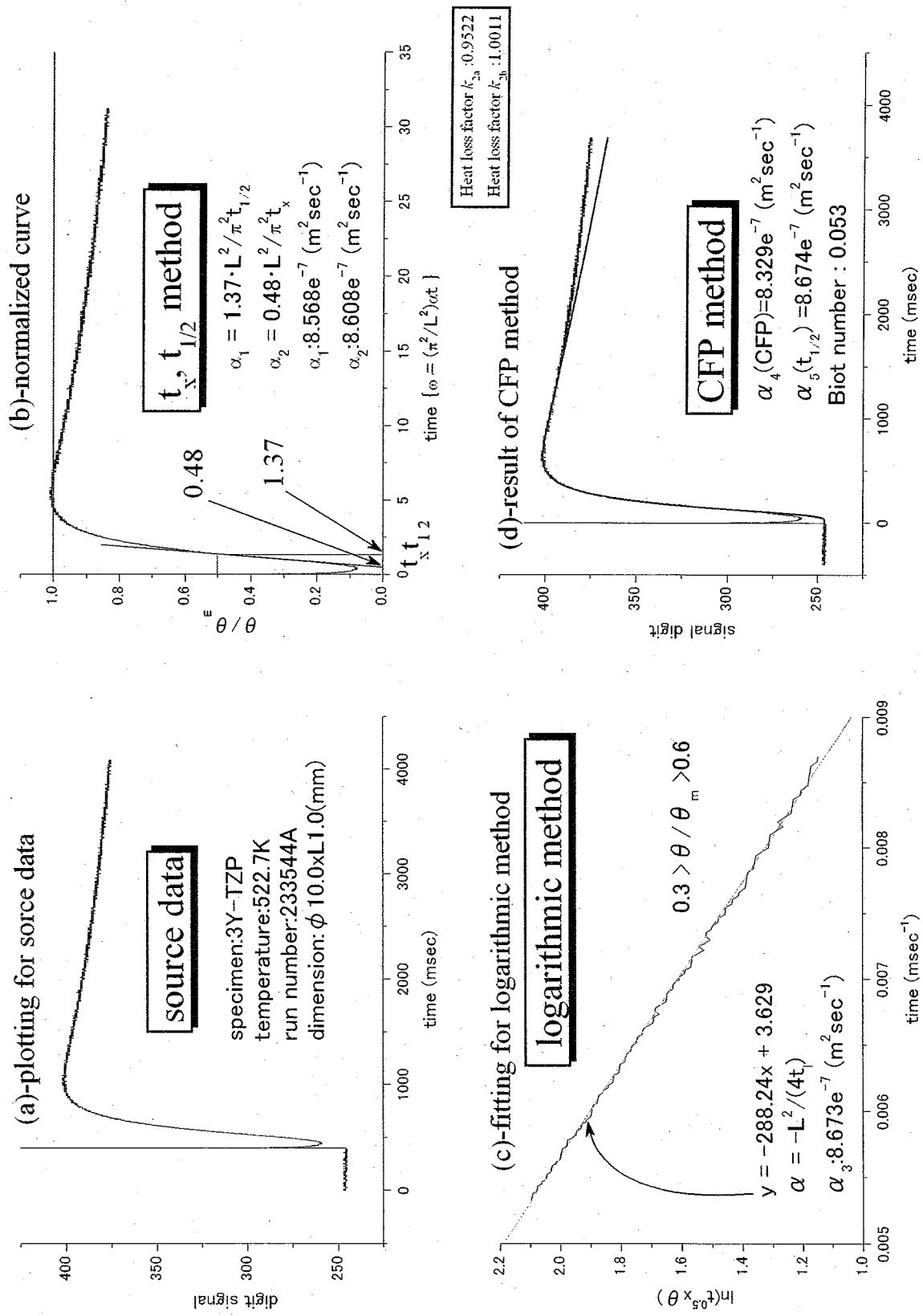


Fig.C-9 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
 (sample:3Y-TZP, run number:233544A, measured temperature:522.7K)

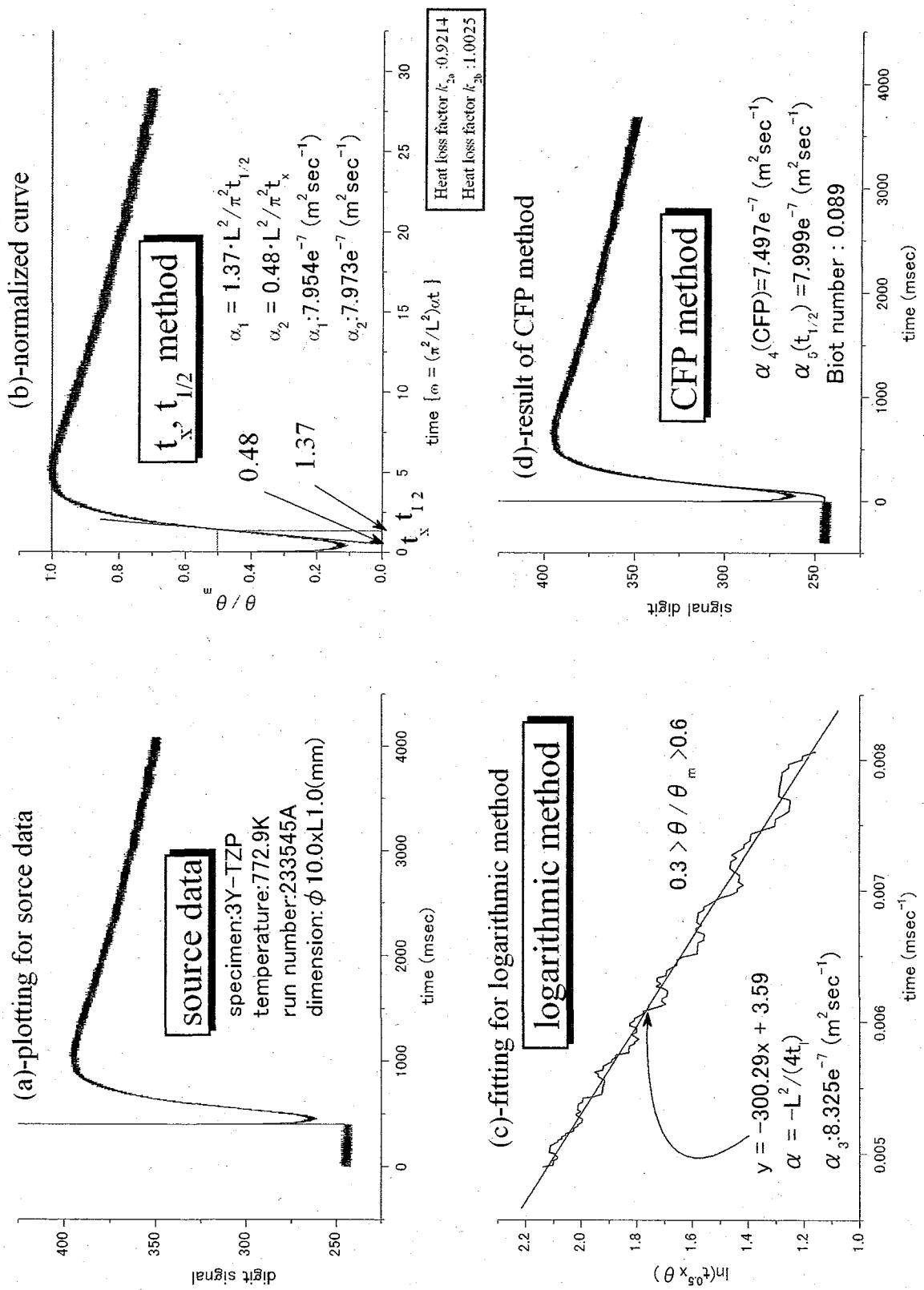


Fig.C-10 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233545A, measured temperature:772.9K)

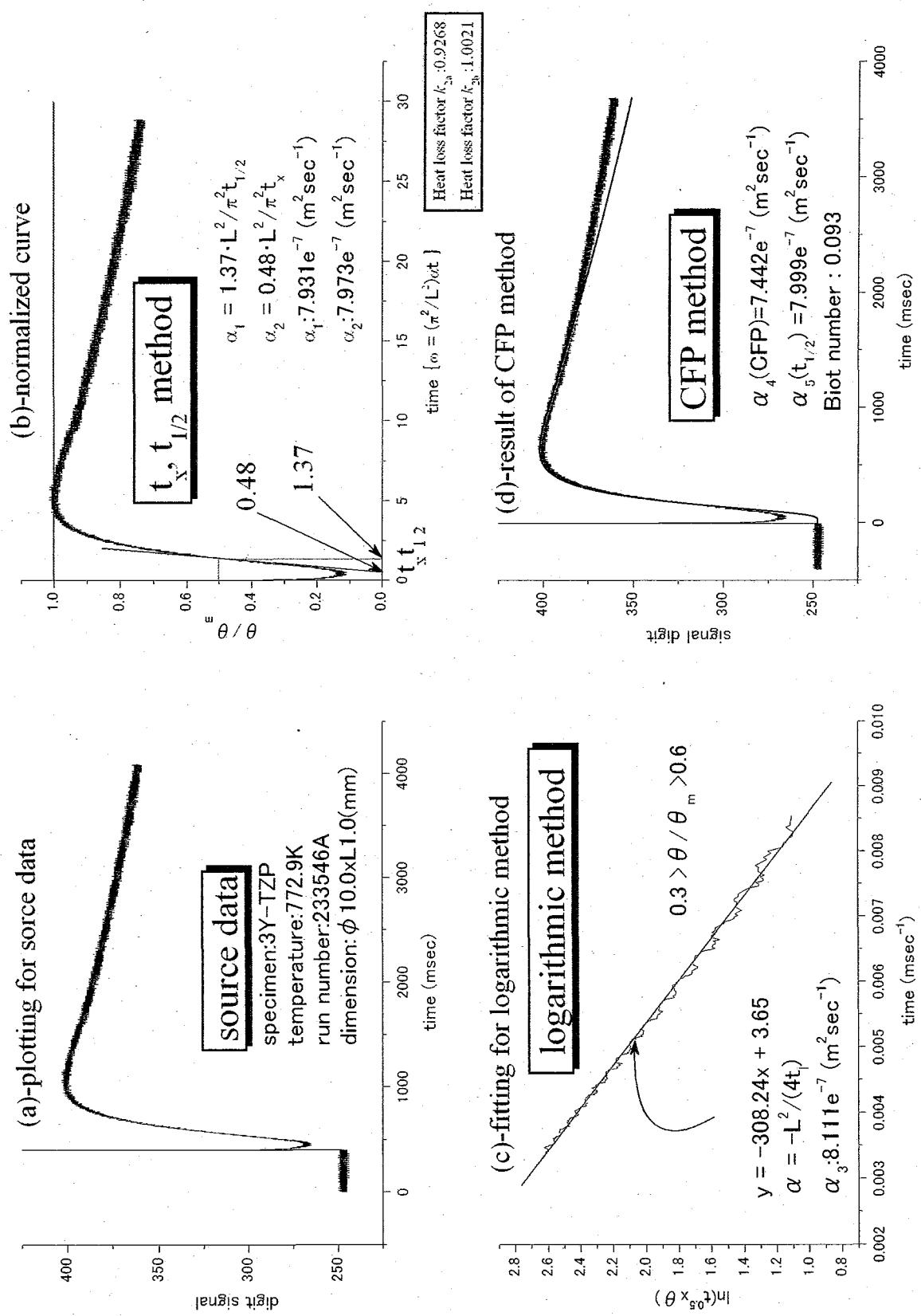


Fig.C-11 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233546A, measured temperature:772.9K)

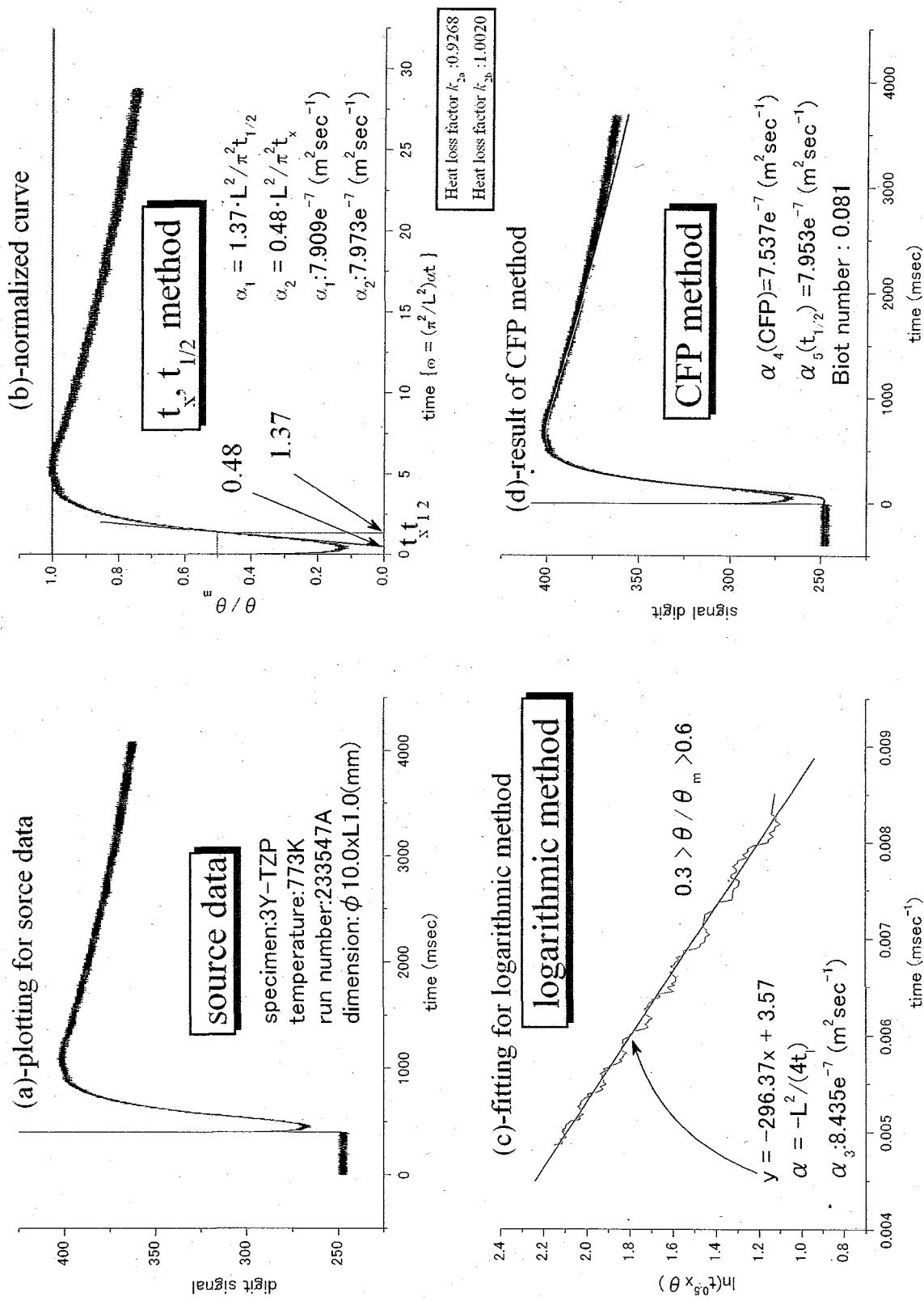


Fig.C-12 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233547A, measured temperature:773K)

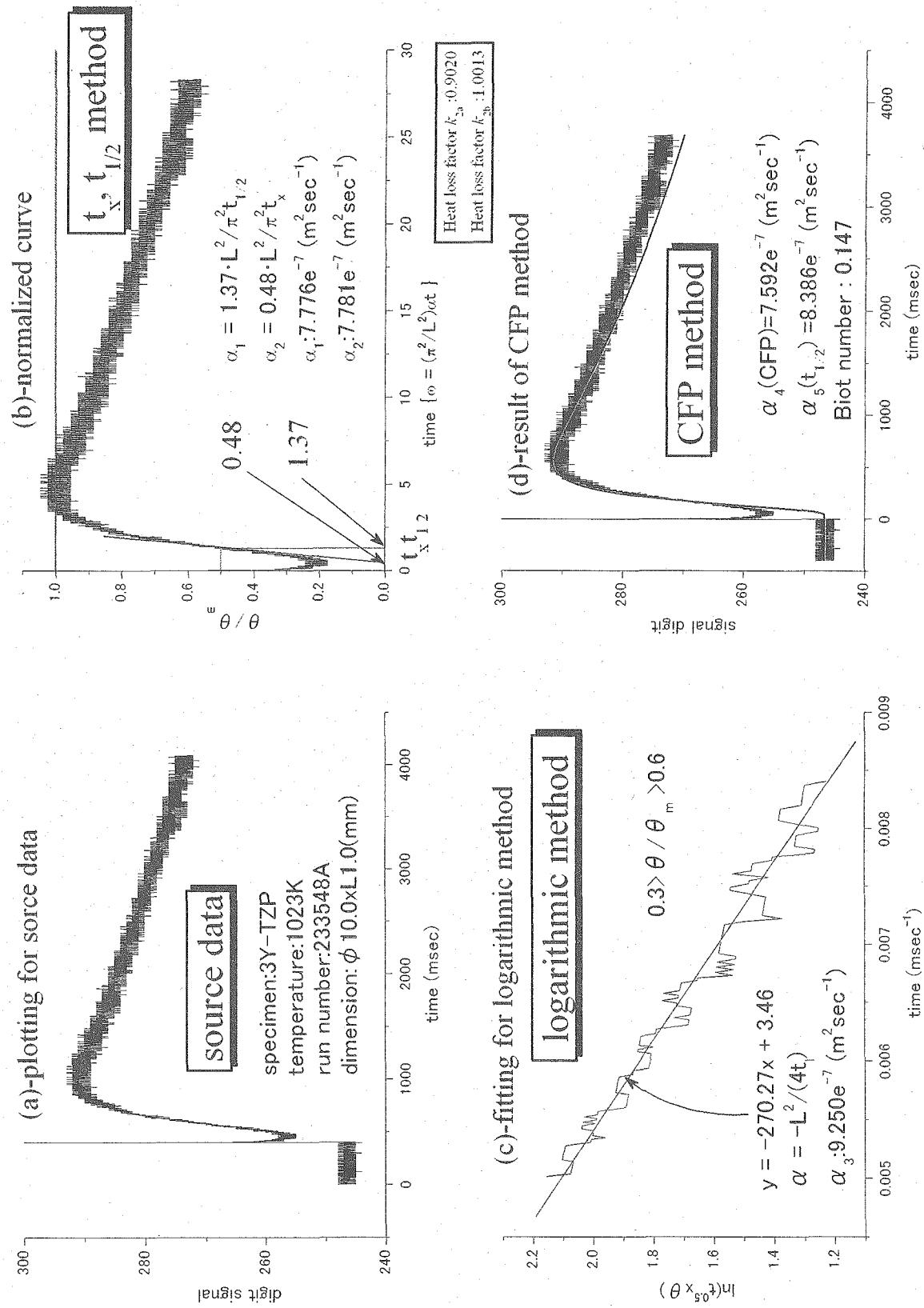


Fig.C-13 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233548A, measured temperature:1023K)

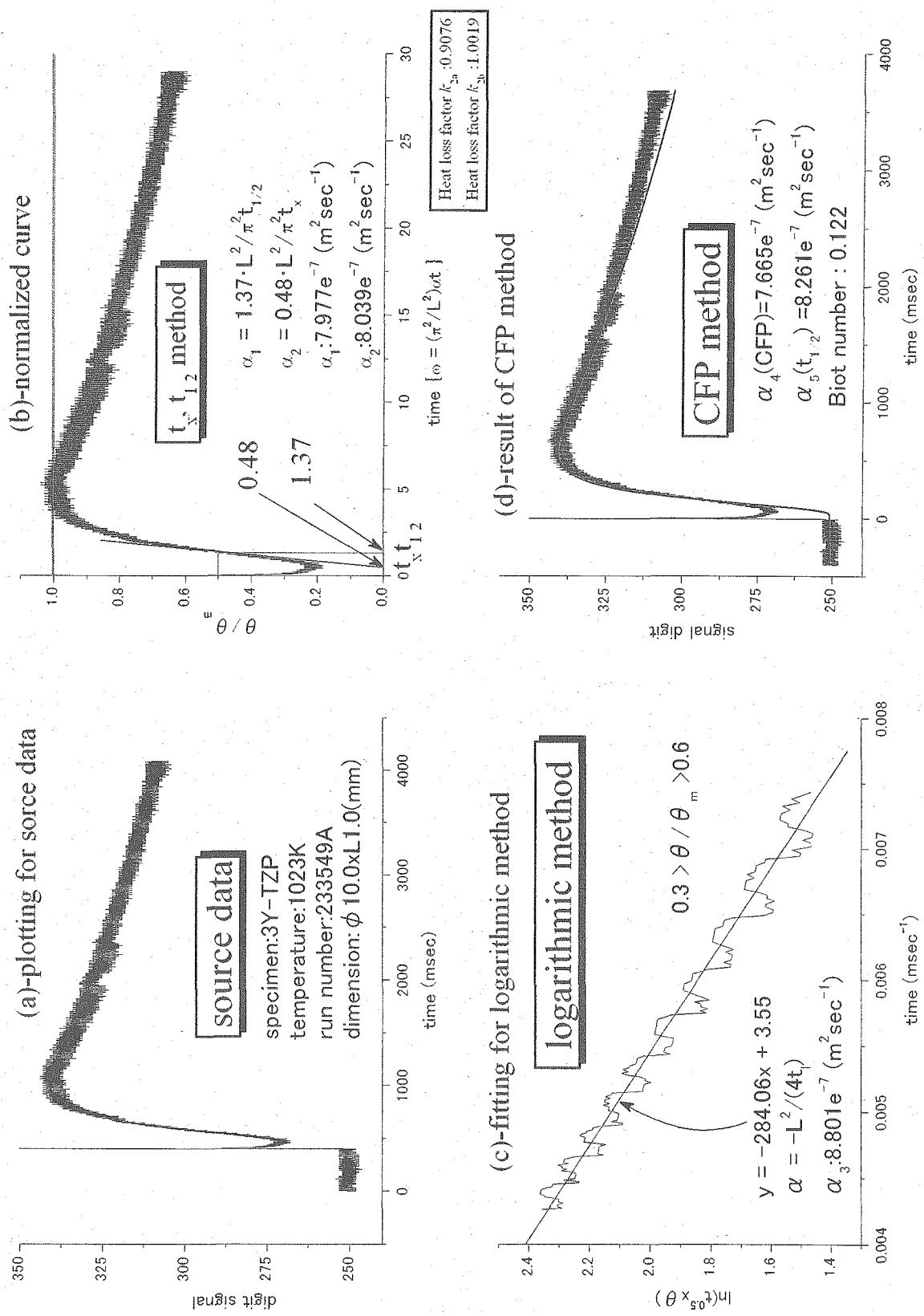


Fig.C-14 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3 Y-TZP, run number:233549A, measured temperature:1023K)

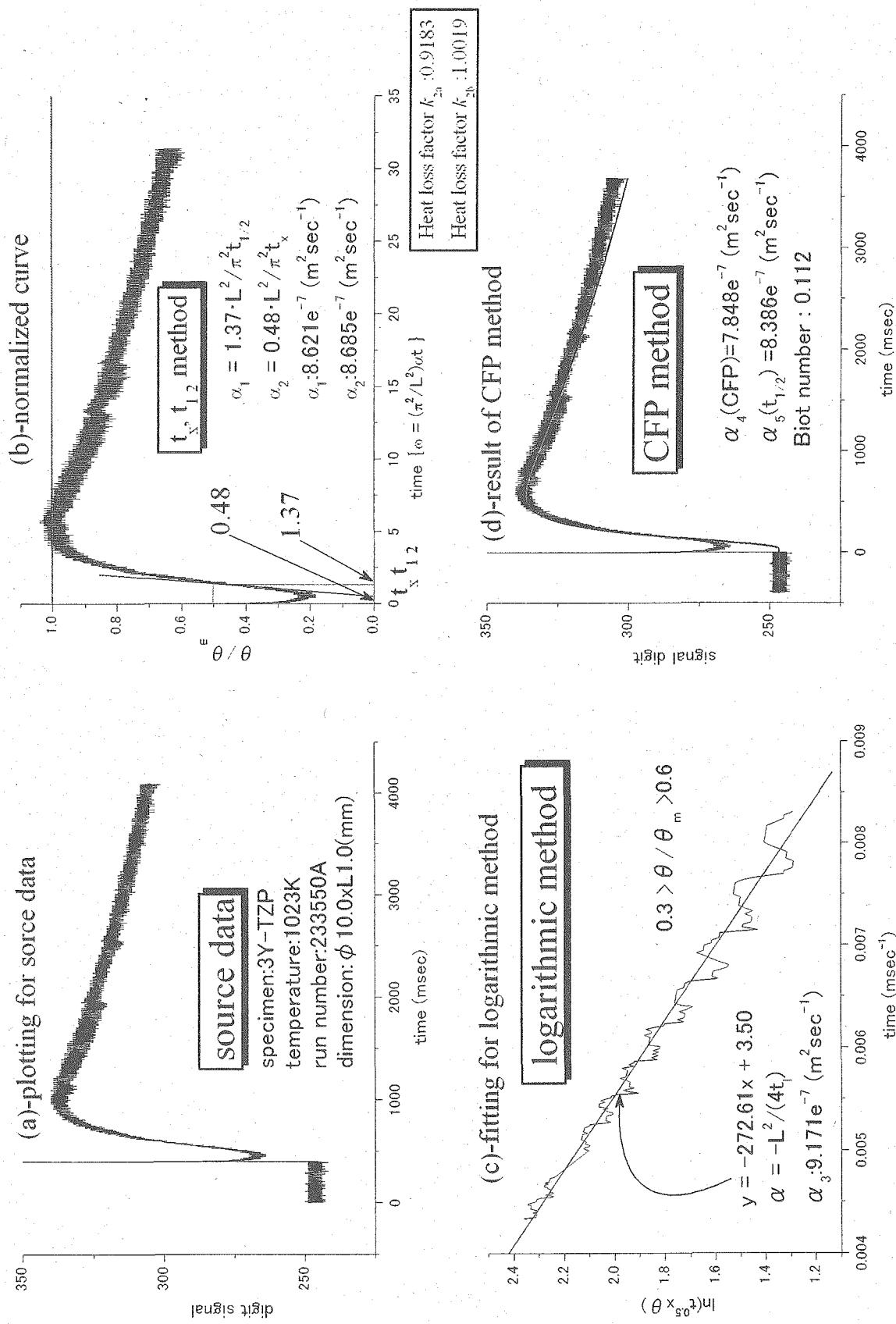


Fig.C-15 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3 Y-TZP, run number:233550A, measured temperature:1023K)

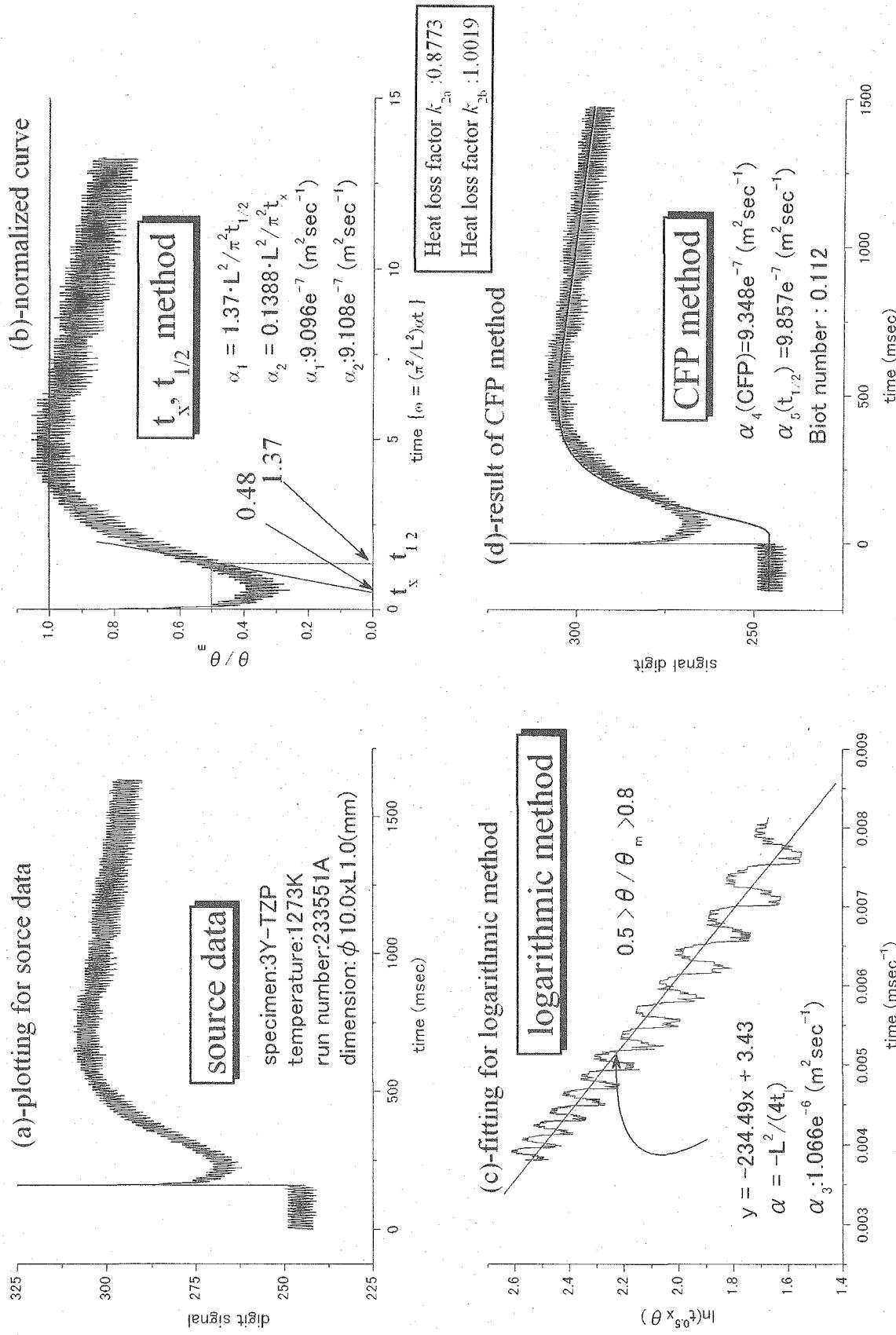


Fig.C-16 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233551A, measured temperature:1273K)

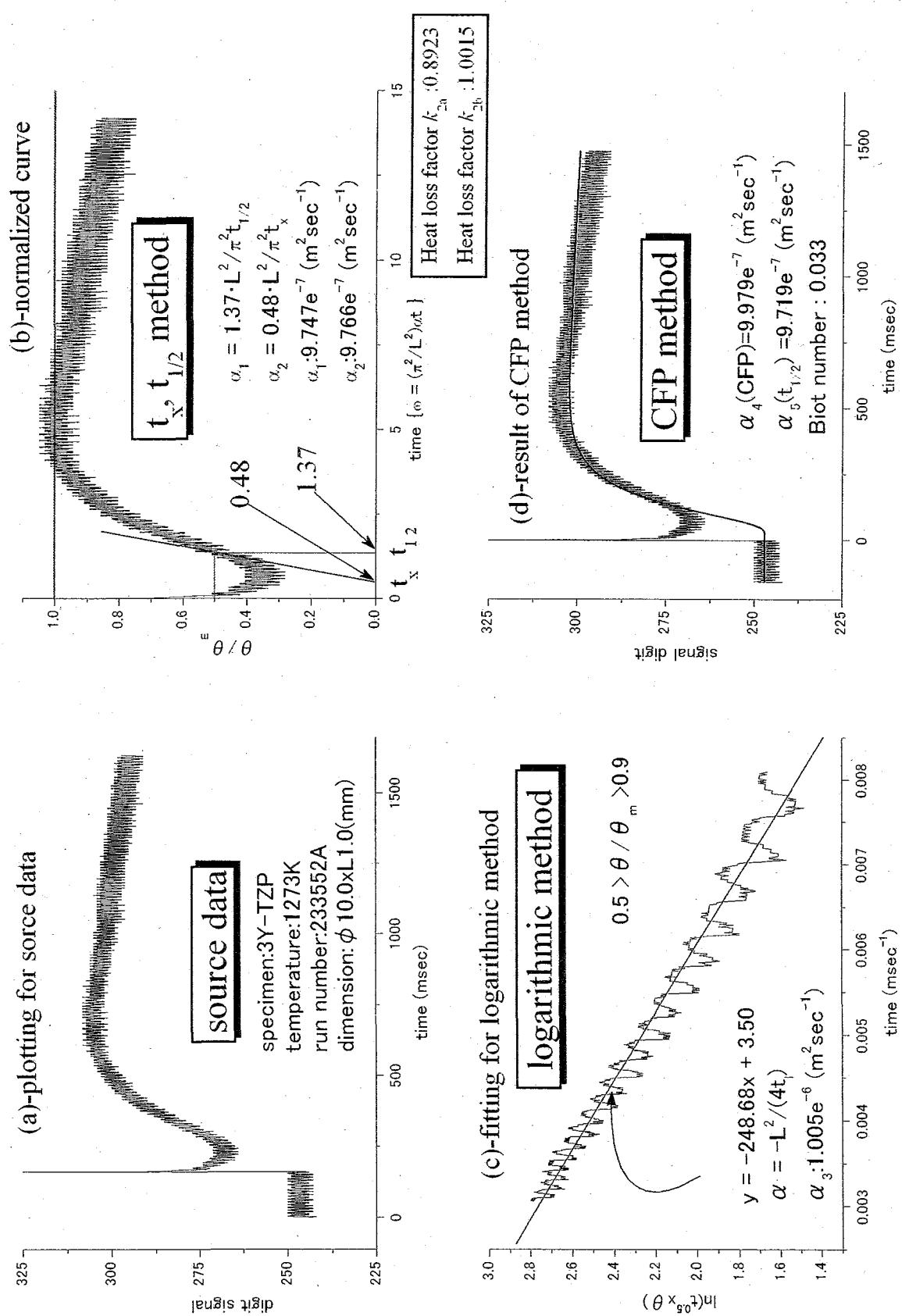


Fig.C-17 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3 Y-TZP, run number:233552A, measured temperature:1273K)

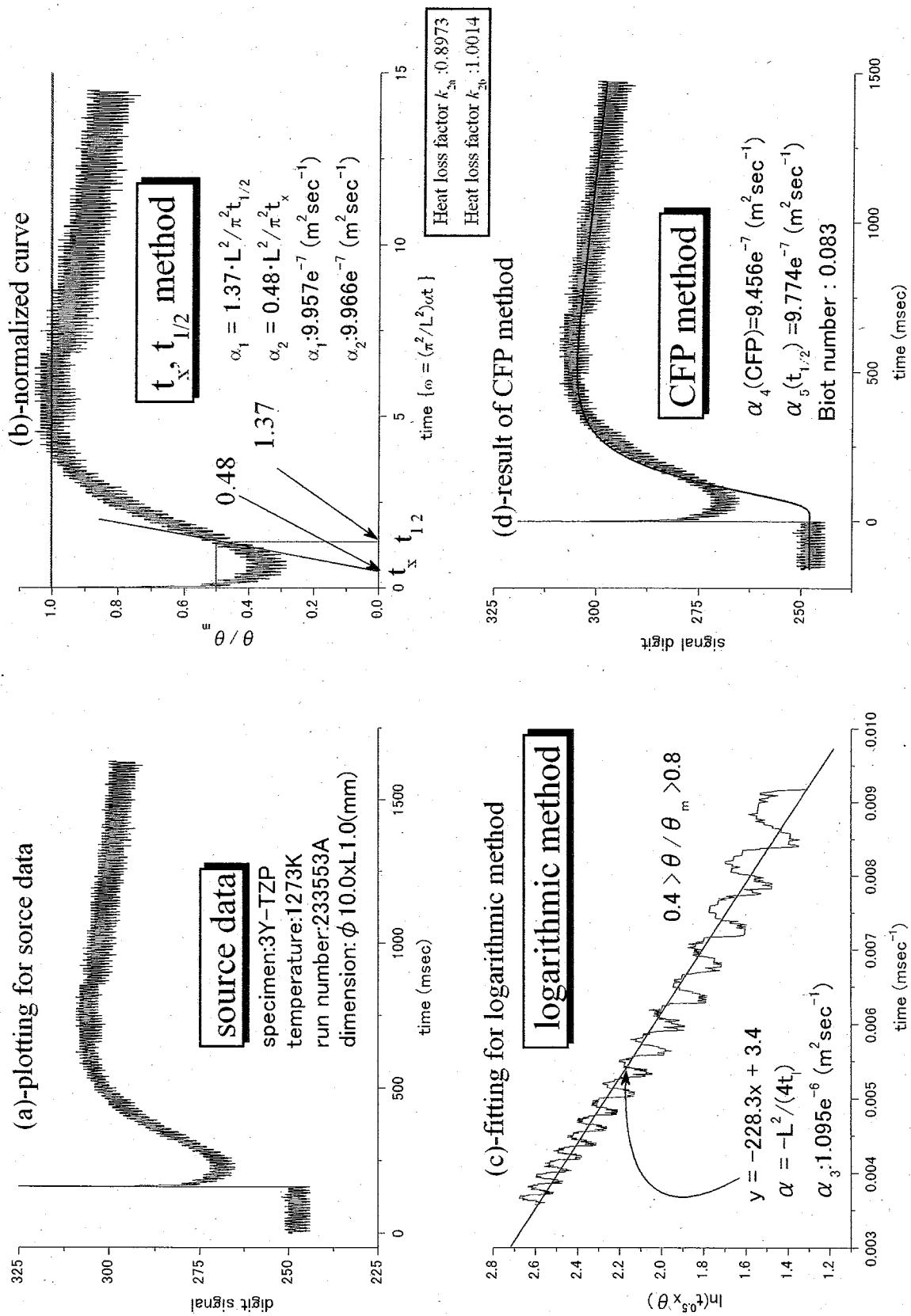


Fig.C-18 Comparison of analysis method for thermal diffusivity.
(sample:3Y-TZP, run number:233553A, measured temperature:1273K)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	シemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	A/V
インダクタンス	ヘンリ	H	Wb/m^2
光強度	カンデラ	$cd \cdot sr^{(c)}$	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマン量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	ベクレイ	Gy	J/kg
		Sv	J/kg

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピ	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	モル	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム		
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$W/(m \cdot K)$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{-21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{-18}	エク	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{-15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{-9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{-6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{-3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1t = 10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np = 1$
ベル	B	$1B = (1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV = 1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua = 1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里 = 1852m
ノット	ト	1 ノット = 1 海里毎時 = (1852/3600)m/s
アール	a	$1a = 1 dm^2 = 10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar = 0.1 MPa = 100kPa = 10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m$
バン	b	$1 b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg = 10^{-7} J$
ダイニ	dyn	$1 dyn = 10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P = 1 dyn \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-3} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-3} Sv$
X線単位	X unit	$1X unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
力口リ	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 u = 1 \mu m = 10^{-6} m$