

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6183948号  
(P6183948)

(45) 発行日 平成29年8月23日(2017.8.23)

(24) 登録日 平成29年8月4日(2017.8.4)

(51) Int.Cl. F I  
**GO 1 N 25/18 (2006.01)** GO 1 N 25/18 H

請求項の数 9 (全 23 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2013-31452 (P2013-31452)                  (22) 出願日 平成25年2月20日 (2013.2.20)                  (65) 公開番号 特開2014-160038 (P2014-160038A)                  (43) 公開日 平成26年9月4日 (2014.9.4)                  審査請求日 平成28年2月12日 (2016.2.12)</p> <p>特許法第30条第2項適用 特許法第30条第2項適用                  、平成24年10月3日 大阪市大において開催された                  第33回日本熱物性シンポジウムで発表</p>	<p>(73) 特許権者 504203572                  国立大学法人茨城大学                  茨城県水戸市文京二丁目1番1号</p> <p>(73) 特許権者 000136941                  株式会社ベテル                  茨城県石岡市荒金3-11</p> <p>(74) 代理人 100074631                  弁理士 高田 幸彦</p> <p>(72) 発明者 太田 弘道                  茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号                  国立大学法人茨城大                  学 工学部内</p> <p>審査官 大森 伸一</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 熱拡散率測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

試料を保持する保持機構と、試料の加熱点を加熱周波数  $f$  で周期的に加熱する加熱手段と、前記加熱点に対して距離  $L$  離れた測定点の周期的に変化する温度を測定するセンサと、測定した前記周期的に変化する温度から位相遅れ  $\tau$  を求めて出力する位相差検出回路と、前記試料の厚さ  $d$  と見かけの熱拡散率  $r$  と前記加熱周波数  $f$  とをパラメータとする補正係数  $C$  のデータで構成された第1データベースを有する制御装置と、を備え、

前記制御装置は、前記求めた位相遅れ  $\tau$  と前記距離  $L$  とに基づいて前記見かけの熱拡散率  $r$  を演算して求め、さらに前記見かけの熱拡散率  $r$  に基づき前記第1データベースから前記見かけの熱拡散率  $r$  に対応する前記補正係数  $C$  を求め、さらに前記見かけの熱拡散率  $r$  と前記求めた補正係数  $C$  から真の熱拡散率  $t$  を演算して求める、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項2】

請求項1に記載の熱拡散率測定装置において、前記制御装置は、前記位相遅れ  $\tau$  と前記距離  $L$  とに基づいて求めた前記見かけの熱拡散率  $r$  から新たな距離  $L$  を求め、さらに前記新たな距離  $L$  が、前記見かけの熱拡散率  $r$  を求めるために使用した前記距離  $L$  に対して収束した状態になったかどうかを判断し、収束した状態になっていない場合には前記新たな距離  $L$  に基づいて再び見かけの熱拡散率  $r$  を求めると共に最後に求めた前記見かけの熱拡散率  $r$  から再び新たな距離  $L$  を求めて、前記新たな距離  $L$  が一つ前に求めた前記距離  $L$  に対して収束した状態になったかどうかを判断し、収束した状態になるまでこの動

作を繰り返し、

前記新たな距離  $L$  がその一つ前の前記距離  $L$  に対して収束した状態になったと前記制御装置が判断すると、前記制御装置は、前記収束した状態の前記見かけの熱拡散率  $r$  に基づき前記第 1 データベースを使用して補正係数  $C$  を求め、前記収束した状態の前記見かけの熱拡散率  $r$  と前記求めた補正係数  $C$  から演算により真の熱拡散率  $t$  を求める、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 3】

請求項 1 あるいは請求項 2 に記載の熱拡散率測定装置において、前記試料の一方の面に加熱点を設けると共に、前記一方の面の側に前記加熱手段として動作するレーザ発生部とレーザ光を収束するためのレンズとを配置し、

10

さらに前記試料の他方の面に測定点を設けると共に前記他方の面の側に赤外線測定する前記センサを設け、

前記制御装置は、前記加熱点を通るレーザの照射方向に沿う法線と測定する赤外線方向に沿う前記測定点を通る法線との間の長さを前記加熱点と測定点との間の前記距離  $L$  とし、この前記加熱点と測定点との間の前記距離  $L$  を変化させながら前記位相遅れ  $\tau$  を前記変化させた距離  $L$  のそれぞれに対応して測定し、

前記制御装置は、前記距離  $L$  を変化させながら測定した前記位相遅れ  $\tau$  のデータから前記見かけの熱拡散率  $r$  を求める、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 4】

請求項 2 に記載の熱拡散率測定装置において、

20

前記制御装置は、前記試料の厚さ  $d$  と前記見かけの熱拡散率  $r$  と前記加熱周波数  $f$  とをパラメータとする前記距離  $L$  のデータを第 2 データベースとして記憶し、

前記制御装置は、前記第 2 データベースを使用して前記見かけの熱拡散率  $r$  から前記新たな距離  $L$  を求める、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 5】

請求項 2 乃至請求項 4 の内の一に記載の熱拡散率測定装置において、

前記制御装置は、前記収束状態となったときの前記見かけの熱拡散率  $r$  に基づき前記補正係数  $C$  を求める処理を、前記収束状態となったときの前記見かけの熱拡散率  $r$  と前記試料の厚さ  $d$  と前記加熱周波数  $f$  とから前記第 1 データベースを使用して前記見かけの熱拡散率  $r$  に対応する補正係数  $C$  を求めることにより行う、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

30

【請求項 6】

請求項 4 に記載の熱拡散率測定装置において、加熱周波数  $f$  と見かけの熱拡散率  $r$  との比を少なくとも 1 つの検索用パラメータとして、前記第 2 データベースを構成する前記距離  $L$  のデータが記憶されている、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 7】

請求項 5 に記載の熱拡散率測定装置において、加熱周波数  $f$  と見かけの熱拡散率  $r$  との比を少なくとも 1 つの検索用パラメータとして、前記第 1 データベースを構成する前記補正係数  $C$  のデータが記憶されている、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 8】

40

請求項 1 乃至請求項 7 の内の少なくとも一に記載の熱拡散率測定装置において、前記制御装置は、位相遅れ  $\tau$  の計測結果、あるいは計測結果から見かけの熱拡散率  $r$  を求めた履歴、あるいは見かけの熱拡散率  $r$  に基づき新たな距離  $L$  を求めた履歴、あるいは見かけの熱拡散率  $r$  に基づき補正係数  $C$  を求めた履歴の内の少なくとも一つを、要求に基づき出力する、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

【請求項 9】

請求項 1 乃至請求項 7 の内の少なくとも一に記載の熱拡散率測定装置において、前記制御装置は、加熱周波数  $f$  に基づいて、真の熱拡散率  $t$  の予測範囲を演算し、前記求めた真の熱拡散率  $t$  が前記予測範囲を外れた場合に、前記制御装置は異常を知らせる出力を行う、ことを特徴とする熱拡散率測定装置。

50

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は材料の熱拡散率を測定する熱拡散率測定に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、電子機器の小型化や精密化が進む中で、回路等から発生する熱を処理する上で、該回路等を構成する部品の熱拡散率の測定が重要となっている。熱拡散率の測定には、レーザーフラッシュ法、レーザースポット周期加熱法、光音響法、熱物性顕微鏡法など様々な測定方法があるが、試料の厚さや大きさなどにより、適切な測定方法が選択される。

10

## 【0003】

レーザースポット周期加熱法は、伝搬する温度波の位相が伝搬距離および熱拡散率の関数で変化する性質を利用して試料の熱拡散率を測定する方法である。この方法は試料を局所的に周期加熱し、試料面の温度伝搬距離に対する位相の変化を検出する。この基本原理は点熱源および等方的な無限平面の薄膜のように厚さを無視できる試料に対して適用される。しかし、実際に試料の測定にこの原理を利用しようとする、例えば実際の試料は有限の厚みを持つなどの理由で、測定誤差が生じる。

## 【0004】

試料の厚みによる測定誤差を考慮して熱拡散率を測定するレーザースポット周期加熱法の一例が特許文献1に記載されている。

20

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0005】

【特許文献1】特開2011-185852号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

前記のようにレーザースポット周期加熱法による熱拡散率の測定では、試料の厚さが測定誤差の原因となる。特許文献1では、レーザー径の形状を変更することで、試料の形状や測定方向に合わせた最適な測定を行うことができる。しかしさらに測定精度を向上することが望ましい。

30

## 【0007】

発明者らの研究によれば、測定誤差につながるさらなる要因が明らかとなった。1つの要因は熱源として使用する加熱点、例えばレーザーの照射点が、面積としての影響を無視できるような小さい点ではなく、面積としての影響を無視できない面を有することである。また他の要因は、温度の測定を行う検出部、例えば赤外線検出器を用いる検出部が、面積が無視できる点の温度を測定するのではなく、空間感度分布を有する面の温度を測定することである。特許文献1ではこれらの要因に付いて開示や示唆を行っていない。これら測定誤差につながる要因に対応することでより測定精度を向上することができる。

40

## 【0008】

本発明の目的は、より精度の高い熱拡散率を測定できる熱拡散率測定装置を提供することである。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

前記課題を解決する第1の発明の熱拡散率測定装置は、試料を保持する保持機構と、試料の加熱点を加熱周波数  $f$  で周期的に加熱する加熱手段と、前記加熱点に対して距離  $L$  離れた測定点の周期的に変化する温度を測定するセンサと、測定した前記周期的に変化する温度から位相遅れ  $\phi$  を求めて出力する位相差検出回路と、前記試料の厚さ  $d$  と見かけ熱拡散率  $r$  と前記加熱周波数  $f$  とをパラメータとする補正係数  $C$  のデータで構成された第1データベースを有する制御装置と、を備え、前記制御装置は、前記求めた位相遅れ  $\phi$  と前

50

記距離  $L$  とに基づいて前記見かけの熱拡散率  $r$  を演算して求め、さらに前記見かけの熱拡散率  $r$  に基づき前記第 1 データベースから前記見かけの熱拡散率  $r$  に対応する前記補正係数  $C$  を求め、さらに前記見かけの熱拡散率  $r$  と前記求めた補正係数  $C$  から真の熱拡散率  $t$  を演算して求める、ことを特徴とする。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、より精度の高い熱拡散率測定装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

10

【図1】本発明の一実施例である熱拡散率測定装置の全体構成を示すブロック図である。

【図2】図1に示す熱拡散率測定装置の測定部の構成を示す説明図である。

【図3】図1に示す熱拡散率測定装置の形状の一例を説明する説明図である。

【図4】本発明に係る周期加熱法の基本原理に基づく位相遅れと距離との関係を説明する説明図である。

【図5】本発明に係る試料の厚さを考慮した場合の加熱点と測定点との距離の関係を説明する説明図である。

【図6】本発明に係る試料の材料と加熱周波数との関係を説明する説明図である。

【図7】本発明に係る測定点の温度検出の感度分布について説明する説明図である。

【図8】図7における温度分布と感度分布とを説明する説明図である。

20

【図9】本発明に係る距離と位相遅れとの関係を示すグラフである。

【図10】図9のグラフに基づく距離と、見かけの熱拡散率  $r$  と真の熱拡散率  $t$  との比との関係を説明する説明図である。

【図11】本実施例における温度波の位相遅れと熱源からの距離との関係を示すグラフである。

【図12】本実施例における見かけの熱拡散率と距離との関係を示すグラフである。

【図13】本実施例における見かけの熱拡散率と補正係数との関係を示すグラフである。

【図14】本実施例における真の熱拡散率  $t$  を測定する動作手順を説明するフローチャートである。

【図15】本実施例における熱拡散率測定装置の動作手順を説明するフローチャートである。

30

【図16】本実施例における熱拡散率測定装置の他の実施例の動作手順を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明を熱拡散率の測定装置に適用した一実施形態（以下実施例と記す）を図面に基づいて説明する。なお以下の実施例における図で、同一符号を付した構成はほぼ同じ内容の構成であり、ほぼ同じ作用を為しさらにほぼ同じ効果を奏する。同一符号を付した事項については説明の繰り返しを省略する。

【0013】

40

図1から図3は本発明の一実施例である熱拡散率の測定装置（以下熱拡散率測定装置と記す）の一例を示す。図1は熱拡散率測定装置の全体構成を示すブロック図であり、図2は熱拡散率測定装置の測定部の構成を示す説明図、図3はその外観形状を示す図である。

【0014】

図1乃至図3において、熱拡散率測定装置100は測定装置本体10と測定部12を備えている。測定装置本体10と測定部12の構成の一例を以下に説明するが、測定装置本体10と測定部12に分けることは必ずしも必須ではなく、また測定装置本体10と測定部12に分けた構成であっても、熱拡散率測定装置100が有する各構成を測定装置本体10とするか測定部12とするかは色々選択可能である。本実施例では、熱拡散率測定装置100の利用者が試料2を固定するためにカバーを開けたとき、測定部が外気に出来

50

るだけ触れないように構成している。このことにより装置は信頼性が高くなり、安定した測定の維持が容易となり、また安全性が確保し易くなるなど、色々な効果を奏する。

【0015】

測定部12は試料2に対して所定の周波数で周期的に変化する加熱用レーザービーム27を発生する加熱手段22と加熱用レーザービーム27を絞込むレンズ24を備えている。レンズ24で絞り込まれた加熱用レーザービーム27が試料2の加熱点26に照射され、該加熱点26が所定の周期で繰り返し加熱される。

【0016】

加熱手段22やレンズ24をX方向やY方向、Z方向に移動出来るようにするために、加熱手段22やレンズ24は加熱用ステージ20に支持されている。加熱用ステージ20をX方向およびY方向に移動させることにより、加熱点26をX方向およびY方向に移動させることができる。また加熱用ステージ20をZ方向に移動することにより、試料2の表面の加熱点26とレンズ24との間の距離を適切に設定することができる。例えば加熱点26とレンズ24との間の距離を変えることにより、試料2の加熱点26における加熱用レーザービーム27の照射面積、すなわちスポットの大きさを後記するように調整することができる。なお本実施例では以下で説明の図2に記載の如く、加熱用レーザービーム27の試料2に対する照射方向をZ軸とし、加熱用レーザービーム27が照射される試料2の表面をX軸とY軸からなる2次元の面としている。

【0017】

加熱点26が加熱用レーザービーム27により周期的に加熱されることによって、試料2に設定された温度の測定点46に熱、すなわち温度波が伝達され、測定点の温度が周期的に変化する。測定点の温度を測定するために、測定部12は測定点46が発する赤外線47を集光するレンズ44と集光した赤外線47を電気信号に変えるセンサ42を備えている。なおセンサ42は以下で説明する測定回路35により動作し、センサ42で受光した赤外線47の強度に基づく電気信号が測定回路35で増幅されて出力される。加熱点26の温度が加熱用レーザービーム27の周期的な変化に基づいて変化するので、測定点46の温度が周期的に変化し、測定回路35は測定点46の温度変化を表す周期的に変化する電気信号を出力する。

【0018】

X軸方向やY軸方向、Z軸方向に移動することができる測定用ステージ40にセンサ42やレンズ44が支持されているので、測定用ステージ40をX軸方向やY軸方向に移動することにより、測定点を試料2の表面における望ましい位置に設定することができる。また測定用ステージ40をZ方向に移動することにより、試料2の測定点とレンズ44との間の距離を調整することができ、測定点から発せられる赤外線47の集光状態を調整することができる。

【0019】

なお、熱拡散率測定装置100を簡易型のシンプルな構造とする場合の1例として、加熱手段22やレンズ24を加熱用ステージ20に設けるのではなく、移動しない構造で固定することも可能である。この構造では、加熱手段22やレンズ24を3次元の各軸方向に移動できないが、試料2の表面とレンズ24との間の距離が所定の距離に維持される構造とすることが可能であり、また加熱点26も予め望ましい位置となるように設定しておくことが可能であり、このような構造とすることで装置をシンプルな構造とすることができる。さらに測定装置が一般的に広く利用される状態では、高度な技術を有する専門家だけでなく仮に熟練していない人が利用しても、ある程度の精度が保障されることが望ましく、このような場合には前記のような簡易型の構造の方が望ましい場合がある。

【0020】

色々な試料を測定する場合に試料の厚さが一定でないことが考えられる。この場合に試料2の厚さが変わるにより、試料2とレンズ24との間の距離あるいは試料2とレンズ44との間の距離の一方が常に一定となる構造とした場合に、試料2の厚さの変化を他方で調整することが必要となる。このため第2例として、加熱手段22とレンズ24ある

10

20

30

40

50

いはセンサ42とレンズ44のどちらか一方がZ方向に調整できる構造とすることが考えられる。上述したように第1の例や第2の例とすることで、測定装置の構造の簡素化が可能となる効果を奏する。さらに測定方法も簡素化できる効果を奏する。

#### 【0021】

図1の如く加熱用ステージ20と測定用ステージ40の2つの移動用ステージを使用する例や上述したように第1や第2の例であっても、X軸方向やY軸方向、Z軸方向の3軸方向に移動できる構造とするのではなく、X軸方向のみ移動可能とすることにより、すなわち3軸方向に移動できる構造とするのではなく2軸方向のみや1軸方向のみとすることにより、測定装置の構造の簡素化が可能となる効果や測定方法の簡素化が可能となる効果が得られる。

10

#### 【0022】

次に測定装置本体10に設けられる各構成に付いて説明する。上述したように熱拡散率測定装置100の各構成部品を測定装置本体10に配置するか測定部12に配置するかは熱拡散率の測定の基本に関わる問題では無いので、色々な条件を考慮して変更することが可能である。本実施例では試料2を出し入れする時に熱拡散率測定装置100が開放された状態で、利用者が手で触れることができる測定用部品をできるだけ少なくした方が、信頼性の維持や耐久性の向上の点で望ましいとの考えに基づいて構造や部品の配置を決めている。

#### 【0023】

測定装置本体10には、以下で説明する熱拡散率の測定のための演算処理や測定動作の制御を行う制御装置70が設けられていて、該制御装置70により加熱用ステージ20や測定用ステージ40を制御することができる。また測定装置本体10には、制御装置70からの制御信号により測定部12の加熱用ステージ20や測定用ステージ40を動作させるための駆動回路36および37が設けられていて、上記制御装置70の入出力端74からの制御信号に基づき、加熱用ステージ20や測定用ステージ40の位置を制御することができる。

20

#### 【0024】

さらに上記制御装置70の入出力端74からの加熱周波数 $f$ を設定する指令に基づき、周期信号発生回路32は設定された加熱周波数 $f$ の周期信号32Sを発生し、この周期信号32Sが駆動回路33介して加熱手段22に加えられる。加熱手段22は図示しないレーザ発生素子を備えており、前記レーザ発生素子は加熱周波数 $f$ に基づいて変化するレーザ光を発生し、レンズ24を介して加熱点26に前記レーザ光が照射される。さらに測定装置本体10には、センサ42を動作させて試料2の測定点46の温度を表す電気信号を出力する測定回路35と、この測定回路35から出力された電気信号と周期信号発生回路32の出力信号との位相差を検出する位相差検出回路34が設けられている。

30

#### 【0025】

位相差検出回路34は、例えばロックインアンプで構成することができ、位相差を送出することができる。ロックインアンプで構成された位相差検出回路34に周期信号発生回路32が発生する周期信号32Sと測定回路35が発生する周期信号35Sとを入力することにより、周期信号32Sに対する周期信号35Sの位相遅れを検出することができる。

40

#### 【0026】

制御装置70は、熱拡散率測定装置100の利用者である測定者が操作するためのキーボードやマウスなどの入力装置79や必要な情報や処理結果等の情報を表示したり印刷したりする出力装置78を有する入出力装置77や、デジタル信号やアナログ信号を入出力するための入出力端子74や、演算処理を行う演算処理装置(central processing unit)72や、以下で説明するデータベース81~84やデータ85や履歴86を保持するメモリ80を有している。なお制御装置70は演算処理装置72が動作するために必要なプログラムや一時記憶装置などを有しているが、これらの図示を省略する。

50

## 【0027】

制御装置70が位相差検出回路34からの位相遅れに基づいて以下に説明する演算処理を行うことにより、試料2の見かけの熱拡散率  $r$  を求めることができる。さらにデータベース81~84を用いて処理することにより、より正確な試料2の真の熱拡散率  $t$  を求めることができる。

## 【0028】

図2は測定部12の内部構成が理解し易いように模式的に記載した説明図であり、図3は測定部12の構成が理解し易いように記載した外観図である。図2と図3を用いて熱拡散率測定装置100の測定部12の概要を説明する。

## 【0029】

測定部12の外側には構成器機を保護するためのカバー62とカバー63が設けられており、これらの内側に測定空間50が形成されている。試料2は測定空間50のXY平面上に置かれている。なお図2では測定部12の内部構成が見えるように、特別にカバー62およびカバー63を板状の形状とし、さらにカバー63を透明な状態として破線で記載している。このため図2では測定空間50は開放された空間となっている。しかし図3に示す如く安全性や測定の信頼性等の観点から測定空間50はカバーで覆われた空間となることが望ましい。

## 【0030】

試料2は測定時には保持機構66や保持機構68により保持固定される。どのような固定方法でも利用可能であるが、本実施例では試料2を両面から保持機構66と保持機構68で挟む構造となっている。図3に示すように保持機構66と保持機構68の少なくとも一方、例えば保持機構68を、弾力性を有する構造とすることにより、試料2を保持機構66の上に載置し、さらに弾力性を有する保持機構68で反対面を押さえることで試料2を固定することができる。このように本実施例では試料2を所定の位置に簡単に固定することが可能となる。また保持機構66や保持機構68を熱抵抗の大きい材料で、例えば金属以外の材料で作ることにより、保持機構66や保持機構68の熱伝達の測定精度に及ぼす影響を低減できる。

## 【0031】

試料2の一方の面に対して加熱用レーザービーム27を照射するための加熱手段22やレンズ24が設けられており、加热点26に加熱用レーザービーム27が照射される。加熱用レーザービーム27の強さは図1に示す周期信号発生回路32が出力する周期信号32Sに基づいて変化する。このため加热点26の温度が周期的に変化する。この実施例では、加熱手段22とレンズ24がX軸とY軸とZ軸に方向に移動可能な加熱用ステージ20に固定されている。試料2の一方の面がX軸とY軸とに沿うように試料2が配置されているので、加熱用ステージ20をX軸とY軸とに沿って移動させることにより、加热点26を試料2の一方の面上で移動させることができる。また加熱用レーザービーム27がZ軸方向に照射される構造となっているので、加熱用ステージ20をZ軸方向に移動させることにより、加热点26とレンズ24との間の距離を調整することが可能となり、加热点26の大きさを調整することができる。なお、図3では加熱手段22やレンズ24の図示を省略している。

## 【0032】

試料2の他方の面の側に、レンズ44やセンサ42が設けられており、測定点46の温度に基づく電気信号を図1の測定回路35から出力する。測定点46は加热点26に対して試料2の表面上で距離Lだけ離れた位置に設定されており、加热点26の周期的に変化する温度が測定点46に温度波として伝達され、測定点46の温度が周期的に変化する。

## 【0033】

以下で説明するが加热点26における温度の周期的な変化に対して、測定点46における温度の周期的な変化は位相が遅れており、この位相遅れが距離Lと共に試料2の熱拡散率に依存する。従って予め位相遅れや距離Lに基づく熱拡散率との関係を求めておき、この関係をメモリ80に記憶しておけば、測定された位相遅れから制御装置70

10

20

30

40

50

の検索処理により熱拡散率 を求めることができる。さらに仮に距離  $L$  を予め定めた値に設定しておけば、距離  $L$  を検索パラメータから外すことができ、測定された位相遅れ からより簡単に熱拡散率 を求めることができる。しかし、以下で説明するように、発明者らの研究で明らかになった測定誤差の要因が存在し、これら測定誤差の要因に対応することが必要である。

#### 【0034】

前記位相遅れ は、加熱点 26 の周期的な温度変化（以下加熱周期波形と記す）と測定点 46 の周期的な温度変化（検出周期波形と記す）を求め、加熱周期波形と検出周期波形とを比較することで、求めることができる。加熱点 26 は図 1 の周期信号発生回路 32 が出力する周期信号 32S に基づいて変化していると見ることができる。従って加熱周期波形は周期信号 32S の周期波形と見ることができる。

10

#### 【0035】

測定点 46 の温度変化を検出するために、測定点 46 が発生する赤外線 47 をレンズ 44 により集光し、集光された赤外線 47 がセンサ 42 と測定回路 35 により周期信号 35S に変換される。上述したように加熱点 26 の温度変化を表す周期信号 32S と測定点 46 の温度変化を表す周期信号 35S とから位相差検出回路 34 により、位相遅れ が検知される。

#### 【0036】

上述したようにセンサ 42 やレンズ 44 は測定用ステージ 40 に設けられているのでセンサ 42 やレンズ 44 を X 軸と Y 軸に沿って移動することにより、測定点 46 の位置を所定の間隔で移動することができ、測定点 46 の位置を移動させながら、各位置における位相遅れ を順に連続して測定することが可能である。

20

#### 【0037】

レンズ 24 やレンズ 44 として例えば  $CaF_2$ 、Si、Ge、ZnSe などの良好な透過性を有する材料を用いた有限補正系のレンズを用いることができる。また金コートされた 2 つの放物面ミラーで、レンズ 24 やレンズ 44 を構成することができる。

#### 【0038】

本実施例では、試料 2 の一方の面に加熱手段 22 やレンズ 24 に基づく加熱点 26 を設け、試料 2 の他方の面に測定点 46 を設定し測定点 46 の温度をレンズ 44 やセンサ 42 で測定する構造としている。加熱点 26 や測定点 46 を異なる面ではなく同じ面に設けても良いが、本実施例の如く、加熱点 26 と測定点 46 を試料 2 の表面と裏面に分けて設けることにより、熱拡散率測定装置 100 を小型にすることができる。また加熱手段 22 やレンズ 24 とレンズ 44 やセンサ 42 とを同一の面に設けると、加熱点 26 と測定点 46 とが接近している場合に、加熱手段 22 やレンズ 24 とレンズ 44 やセンサ 42 とが互いにぶつかり合うことが懸念されるが、本実施例ではそれぞれ異なる面に配置されているので加熱点 26 と測定点 46 を自由に設定することができる。

30

#### 【0039】

図 3 は測定部 12 の形状の一例を示している。カバー 62 は測定装置本体 10 に固定されており、カバー 63 は例えば蝶番のような回転支持体 14 により測定装置本体 10 に固定されている。カバー 63 を図の上方向に開くことができ、試料 2 を出し入れすることができる。カバー 62 には試料 2 を保持するための保持機構 66 が設けられており、またカバー 63 に弾性体で作られた試料 2 を固定するための保持機構 68 が設けられている。

40

#### 【0040】

カバー 63 を開き、保持機構 66 の上に試料 2 を置き、カバー 63 を閉じることにより弾性体で作られている保持機構 68 により試料 2 が抑えられ、保持機構 66 と保持機構 68 との間に挟まれることにより試料 2 が固定される。図では加熱手段 22 やレンズ 24 およびセンサ 42 やレンズ 44 の図示を省略しているが、加熱用ステージ 20 や測定用ステージ 40 を動作させることにより、加熱点 26 や測定点 46 の位置を調整できる。また試料面とレンズ 24 やレンズ 44 との間の距離を調整することができる。

#### 【0041】

50

保持機構 66 と保持機構 68 の少なくとも一方が、変形可能に作られているので、厚さの異なる試料 2 であっても、試料 2 の厚さの変化に対応することができる。なおこの例では、加熱用ステージ 20 に設けられたレンズと試料 2 の面との間の距離が常に一定となるので、加熱用ステージ 20 を使用しないで、保持機構 66 側に配置したレンズや加熱手段 22 をカバー 62 に固定しても良い。図示していない加熱点 26 を固定にしても図示していない測定点 46 の位置を測定用ステージ 40 により調整することにより、加熱点 26 の Z 軸と測定点 46 の Z 軸との間の距離 L を調整することができる。

〔周期加熱法の基本原理〕

次に前記の熱拡散率測定装置 100 に使用される周期加熱法の基本原理を説明する。周期加熱法は、等方的無限平面中に設けられた点を熱源としてその温度を所定の周波数（以下加熱周波数と記す）で周期的に変化させることにより熱拡散率 率などの温度伝搬率を測定する手法である。周期的に変化する熱源の温度を  $P_0 e^{i\omega t}$  とした場合に熱源から距離 L の位置の周期的な温度変動は次式によって表される。

【0042】

【数 1】

$$T_{ac} = \frac{P_0}{4\pi\alpha Lc} e^{-kL+i(\omega t-kL)}$$

【0043】

ここで、L は加熱点 26 における Z 軸と測定点 46 における Z 軸との間の距離、 $T_{ac}$  は測定点 46 の温度、 $\omega$  は角周波数、t は時間、 $\alpha$  は熱拡散率、c は単位体積あたりの比熱容量である。k は温度周期の波数であり次式で定義される。

【0044】

【数 2】

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} = \frac{1}{\mu}$$

【0045】

ここで、f は測定者が設定する加熱周波数、 $\mu$  は熱拡散長である。これより加熱点 26 の Z 軸から距離 L だけ離れた測定点 46 における温度  $T_{ac}$  の加熱源における温度に対する位相遅れ  $\theta$  は次式で表される。

【0046】

【数 3】

$$\theta = -\sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} L$$

【0047】

（数 3）式から位相遅れ  $\theta$  は、距離 L や加熱周波数 f の平方根に比例することがわかる。従って位相遅れ  $\theta$  の距離依存性又は加熱周波数依存性を利用して熱拡散率  $\alpha$  を求めることができる。すなわち距離 L あるいは加熱周波数 f を変化させて位相遅れ  $\theta$  を測定することにより、原理的には熱拡散率  $\alpha$  を求めることができる。

【0048】

図 4 は、（数 3）式をグラフ化した図である。例えば（数 3）式の関係が成り立つと仮定して、実際の測定において距離 L を変化させて、位相遅れ  $\theta$  と距離 L との関係プロットしたグラフである。得られたグラフの勾配から原理的には熱拡散率  $\alpha$  を得ることができる。しかし、実際の測定結果に基づくグラフは、図 4 に示すような直線のグラフではなく、直線からずれたグラフとなる。その理由として例えば、周期加熱法の基本原理は試料の厚さを無視できる場合において成り立つ原理であることや、実際の測定では加熱ビームの強度分布や検出器の感度分布の影響が無視できないからである。そこで、以下で説明するシミュレーションを用いて、試料の厚さの影響や、加熱ビームの強度分布の影響、検出器

10

20

30

40

50

の感度分布の影響を考慮した熱拡散率 を求めることとした。

〔シミュレーションの概要〕

本実施の形態では円筒座標系を用いて、測定対象試料が厚さ50 - 1000 mmの範囲の値を持つと想定し、また半径10 mmの回転対称の円板の測定を想定して、円筒座標系を用いた有限要素法のシミュレーションを行った。ソフトウェアはCOMSOL Multiphysicsを使用した。上述影響の確認のために試料2の厚さや試料2の形状、距離Lをこのように想定したが、このシミュレーションに基づく本発明は、試料2の適用範囲を前記に限定するものではない。本発明では、前記想定範囲以外の試料2に対しても測定精度が向上する効果が得られ、またそれ以外の実施例の説明において述べる効果を奏することができる。

10

【0049】

周期加熱法の基本原理では試料厚さを考慮していないが、ここでは厚さを考慮した計算を行うため、図5に記載のように加熱部10の加熱点26から測定点46までの直線距離Rを定義した。Rは、試料の厚さdと前記説明の距離Lに対応する半径rを用いて次式で表される。

【0050】

【数4】

$$R = \sqrt{r^2 + d^2}$$

【0051】

厚さを考慮する計算では、基本原理で説明した距離Lを直線距離Rとして計算する。試料の表面を加熱するレーザー強度は、ガウシアン分布に従う以下の式によって表される。

【0052】

【数5】

$$\frac{E}{4\pi a^2} e^{-2(r/a)^2} \{1 - \cos(2\pi f t)\}$$

【0053】

Eはレーザーの全吸収エネルギー、aはガウシアンレーザービームの半径である。なおレーザー照射部位以外の表面は断熱と仮定している。

30

〔シミュレーション条件〕

次にシミュレーション条件を説明する。一例として試料2は、材料が銅の試料を用いる。空間メッシュは三角要素法を用い、熱拡散長の20分の1程度とする。レーザーの加熱周波数は試料2の材料を考慮し10 Hzとする。またガウシアンレーザービームの半径aは151 μm、レーザーの全吸収エネルギーEは、 $80 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ とする。センサ42の感度分布の半径は600 μmとし、熱拡散長は $8.51 \times 10^{-4} \text{ m}$ から $2.73 \times 10^{-3} \text{ m}$ の範囲において測定し、試料2の熱拡散率 を求める。

〔試料と振動数の関係〕

前記のように、銅材で作られた試料2を考慮して、このシミュレーションでは加熱周波数fを10 Hzに選んでいる。加熱周波数fをこの加熱周波数以外の他の加熱周波数の値に設定することも可能であるが、試料2の材料に基づき望ましい加熱周波数fが変わる。材料に対する望ましい加熱周波数fの関係を図6に記載する。図6の欄Aには試料2の材料の内代表的なものを示し、欄Aに記載の材料に対応した望ましい加熱周波数fの範囲を欄Cに示す。例えば試料2の材料が銅である場合の望ましい加熱周波数fの範囲は5 Hzから50 Hzであり、材料がステンレスである場合の望ましい加熱周波数fの範囲は0.2 Hzから2 Hzである。欄Cに示す加熱周波数fを使用して測定した熱拡散率 の平均値を欄Bに示しており、試料2の材料が銅である場合の熱拡散率 は $1.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ である。他の材料に関しても同様である。

40

【0054】

図6に示すデータは、図1に記載の本実施例において、加熱周波数fの決定に利用され

50

る。このため図6に示すデータは、データベース82としてメモリ80に記憶されている。以下で記載するが、熱拡散率測定装置100の利用者が材料を入力することにより、予め記憶されているデータベース82が出力装置78に表示され、前記利用者が加熱周波数 $f$ の決定に利用することができる。あるいは好ましい加熱周波数 $f$ がデータベース82に基づいて自動的に決定される。決定された加熱周波数 $f$ は制御装置70から周期信号発生回路32に指令として送信され、周期信号発生回路32は決定された加熱周波数 $f$ に基づく周期信号32Sを発生する。

〔温度検出の感度分布〕

実際の測定では測定点46が面積を無視できるような小さい点ではなく、面積を持つ。すなわち実際の測定点46は面積を持ち、その面積に対してセンサ42が赤外線47を測定する場合に感度分布を持って測定することとなる。

【0055】

次に測定点46の温度検出の感度分布について説明する。実験的な温度測定の検出感度の空間分布を得るために、図7に示すように、材料が銅の試料2の測定面の半分を黒化処理した黒化処理面3とし、測定面の残り半分を黒化処理しない非黒化処理面4として、試料2の裏面をヒータ23で均一に加熱し、センサ42である赤外線検出器で測定位置 $x$ を変化させながら試料2の表面の温度を測定した。

【0056】

試料2の表面の内、黒化膜処理した黒化処理面3からは赤外線が放射されるが、黒化膜処理を行っていない非黒化処理面4からは赤外線が放射されない。図7に示すように、平板形状のヒータ23により試料2を均一に加熱し、黒化処理面3の方を距離 $x$ の正側また非黒化処理面4の方を距離 $x$ の負側として、距離 $x$ を変えながら黒化処理面3から非黒化処理面4の方へ測定点46を移動する。すると黒化膜処理している黒化処理面3では信号強度が大きく、黒化膜処理していない非黒化処理面4では赤外線の量が減少し検出される信号強度が小さくなる。この測定結果を図8のグラフAで示す。このグラフAは温度分布関数 $U(x)$ であり、測定点46が黒化膜処理している黒化処理面3と黒化膜処理されていない非黒化処理面4との境界を距離 $x$ のゼロ点とすると、距離 $x$ の正側の温度が高く、距離 $x$ の負側の温度が低い状態を表している。そして、温度分布関数 $U(x)$ であるグラフAの $x$ に対する微分値を求めると、微分値はグラフBで表され、このグラフBが検出感度分布 $S(x)$ を表す。

【0057】

図8は、温度分布を表すグラフAと感度分布を表すグラフBとを表示した図である。温度分布を表すグラフAは、上述したように距離 $x$ と測定温度との関係を表しており、図の左側の縦軸が測定温度を示し、横軸が距離 $x$ を示す。またグラフBは感度分布を表し、横軸の距離 $x$ をグラフAと共通の軸とし、図の右側の縦軸がグラフBの縦軸である感度を表している。グラフAの各黒点は、距離 $x$ を変化させ状態での各距離 $x$ における測定温度をプロットした点であり、グラフAの破線は各測定温度をスムーズ化して求めた温度分布関数 $U(x)$ を表す。

【0058】

温度が高い位置で収束する、距離 $x$ が0.6mm付近の領域31は、試料2の黒化膜処理されている部分を測定領域とした測定結果の温度分布を表している。また温度が低い位置で収束する、距離 $x$ が-0.6mm付近の領域32は、黒化膜処理されていない部分を測定領域とした測定結果とした温度分布を表している。

【0059】

またグラフBが、温度分布関数 $U(x)$ を表すグラフAを微分して得られたグラフで、感度分布 $S(x)$ を表す。グラフAが表す温度分布関数 $U(x)$ が、黒化膜処理をしている黒化処理面3と黒化膜処理を施していない非黒化処理面4との境界、すなわち距離 $x$ が0.0mmの位置で最も変化が大きいいため、測定感度 $S(x)$ は黒化処理面3と非黒化処理面4との境界上である一点鎖線Aの位置で最大となる。

【0060】

10

20

30

40

50

実際には検出器の中心に対する軸対称の感度分布を求める必要がある。つまり、検出器の中心から半径方向の距離を  $r_s$  とした場合の位置  $r_s$  の感度分布  $S(r_s)$  を求める。図8の感度分布  $S(x)$  の関数の形から、感度分布  $S(r_s)$  が  $r_s$  の4次多項式で近似できると仮定して、座標変換を行ない、図8のグラフB示す感度分布  $S(r_s)$  を求める。

#### 【0061】

またシミュレーションによれば上述したように測定結果の精度を向上するためには試料2の厚さの影響も考慮しなければならない。試料2の厚さの影響や検出感度分布などの影響をできるだけ少なくして測定精度を向上することが望ましい。以下精度向上についての考え方について説明する。

10

#### 【0062】

図9は距離  $L$  を変化させながら位相遅れ  $\phi$  を測定したグラフである。(数3)式を用いて熱拡散率  $\alpha$  を位相遅れ  $\phi$  と距離  $L$  から求めると、もし上述した影響がなければ距離  $L$  を変えて測定された各位相遅れ  $\phi$  の測定結果に対して、一定の熱拡散率  $\alpha$  となるはずである。しかし、実際の測定結果では図10で示すような結果となる。変化させながら測定した各距離  $L$  における位相遅れ  $\phi$  から演算した熱拡散率  $\alpha_r$  (以下見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  と記す) に対する、試料2の真の熱拡散率  $\alpha_t$  (以下真の熱拡散率  $\alpha_t$  と記す) の割合を図10に示すようになる。この測定結果では見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が真の熱拡散率  $\alpha_t$  より大きな値を示すので、(真の熱拡散率  $\alpha_t$  / 見かけの熱拡散率  $\alpha_r$ ) の比は1より小さい値となっている。見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が真の熱拡散率  $\alpha_t$  より大きい値となるか小さい値となるかは色々な条件で異なり一概には述べられないが、見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が真の熱拡散率  $\alpha_t$  とは異なる値を示すことが分かる。また距離  $L$  に対して(真の熱拡散率  $\alpha_t$  / 見かけの熱拡散率  $\alpha_r$ ) の比は一定ではなく変化しており、距離  $L$  が大きくなるに従って前記見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が真の熱拡散率  $\alpha_t$  に近づく傾向が見られる。

20

#### 【0063】

加熱点26から十分に離れた位置に測定点46を設定すれば、測定点46の測定結果に基づく見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が真の熱拡散率  $\alpha_t$  に近い値を示すこととなるが、実際にはいろいろ困難な課題が生じる。例えば加熱点26と測定点46との間の距離  $L$  を十分に長くすると、測定点46で加熱周波数に基づいて発生した温度波が距離  $L$  と共に減衰し、測定点46では減衰が大きく温度波の測定が困難となる。

30

#### 【0064】

これらのことから真の熱拡散率  $\alpha_t$  に近い精度の高い熱拡散率を得るために次のような処理1、あるいは処理1と処理2とを実行する。処理1では、測定された見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  から真の熱拡散率  $\alpha_t$  を求めるための補正係数  $C$  を予め求めて、この補正係数  $C$  を図1のメモリ80にデータベース83として記憶しておく。この補正係数  $C$  は、例えば(真の熱拡散率  $\alpha_t$  / 見かけの熱拡散率  $\alpha_r$ ) の比として表され、例えば見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  に補正係数  $C$  を乗じることにより、真の熱拡散率  $\alpha_t$  を求めることができる。

#### 【0065】

処理2は、距離  $L$  の適正な設定についてである。距離  $L$  が短いと距離  $L$  に依存して見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  が大きく変化する。しかし加熱点26に対して測定点46が少し離れると距離  $L$  にして変化する見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  の変化が小さくなる。見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  の距離  $L$  に依存する変化が所定値より小さくなる見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  を使用し、この見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  を用いて前記補正係数  $C$  から真の熱拡散率  $\alpha_t$  を演算することにより、前記温度波の減衰が比較的小さい、言い換えると高い精度で前記温度波を測定できる位置の距離  $L$  使用することができる。

40

#### 【0066】

距離  $L$  を大きくすると上述したように前記温度波の減衰が大きく、前記温度波の測定精度が低下する、あるいは前記温度波の測定が困難となる。従って真の熱拡散率  $\alpha_t$  を所定の精度で得ることができる距離  $L$  であっても必要以上に距離  $L$  が長くなることのない位置に測定点46が存在する状態の測定結果を使用して見かけの熱拡散率  $\alpha_r$  を求め、この見

50

かけの熱拡散率  $r$  を前記補正係数で補正して真の熱拡散率  $t$  を算出する。

【0067】

適切な距離  $L$  での測定結果が使用されるようにフィッティング領域を設定する。このフィッティング領域は例えば  $1\text{ mm}$  とする。図9や図10では例えば以下に説明のようにしてフィッティング領域を求めることにより、結果として  $1.53\text{ mm}$  から  $2.53\text{ mm}$  の領域がフィッティング領域として設定され、この場合にフィッティング領域の幅を上述したように  $1\text{ mm}$  としている。このフィッティング領域の幅は、発明者が行った多くの実験結果に基づいて経験的に定めたものであり、この幅の設定には測定対象となる試料の大きさや図9に示す特性曲線の状態が反映されている。前記フィッティング領域の幅は、 $0.5\text{ mm} \sim 2\text{ mm}$  が適切である。

10

〔真の熱拡散率  $t$  の測定〕

図11から図14を使用して、熱拡散率測定装置100に取り付けられた試料2の真の熱拡散率  $t$  を測定する手順を説明する。図11は、上述した図9に対応する図であり、図12は、図9との関係において見かけの熱拡散率  $r$  を求めるための図である。図13は見かけの熱拡散率  $r$  に対する補正係数  $C$  を求める図である。図12や図13は、予め実測やシミュレーションから求められたデータベースの内容を説明する図であり、図12や図13に示すデータベースはそれぞれ図1のメモリ80にデータベース84や83として検索可能に保持されている。図14は、測定された図9に示す温度波の位相遅れ  $\tau$  のデータから真の熱拡散率  $t$  を演算するための熱拡散率測定装置100の動作を示すフローチャートである。

20

【0068】

なお本明細書では、制御装置70が行う演算処理の定義には、単なる代数的な計算だけでなく、予め検索可能なデータを記憶しておき前記データの検索に基づいて結果を導く処理や、色々な補間演算、さらには色々な統計処理も含まれるものとする。

【0069】

図14に示すフローチャートのステップS120が実行され、真の熱拡散率  $t$  を求める動作が開始される。この実施例では、試料2の材料は銅を主成分としており、試料2の厚さの実測値が  $318\text{ }\mu\text{m}$  である。フローチャートのステップS120が実行されると、ステップS122で、図1～3に示す装置で、加熱点26に対する測定点46の位置を変えながら、すなわち距離  $L$  を変えながら位相遅れ  $\tau$  の測定を行い、その結果を図1のメモリ80にデータ85として記憶する。この測定結果を図11に示す。既に図9で説明したグラフと同様、ステップS122で測定されたデータをグラフとして示すと、図11に示すグラフとなり横軸が距離  $L$  で縦軸が位相遅れ  $\tau$  である。なお試料2の材料は銅を主成分としており、図1のメモリ80に記憶されたデータベース82に基づき、加熱周波数  $f$  を  $10\text{ Hz}$  としている。なおこの測定動作は、演算処理装置72を有する制御装置70により自動的に行われ、測定結果が自動的にメモリ80に保持される。

30

【0070】

まずステップS124で、制御装置70により自動的に任意のフィッティング領域 ( $I$ ) の設定が行われる。このフィッティング領域 ( $I$ ) は図11に示すようにフィッティング領域 ( $I$ ) は ( $L = 0.0\text{ mm} \sim 1.0\text{ mm}$ ) を任意のフィッティング領域としている。このようにできるだけ距離  $L$  が小さい値で先ずフィッティング領域 ( $I$ ) を設定することが望ましい。その理由は次のとおりである。

40

【0071】

加熱点26から伝搬される温度波は距離が長くなるに従い減衰し、減衰に伴い温度波の測定精度が低下する。距離  $L$  が小さい位置の測定データをできるだけ使用することが、位相遅れ  $\tau$  の測定精度を向上することになる。本実施例では、任意のフィッティング領域 ( $I$ ) を先ず距離  $L$  の小さい値の方で設定するので、フィッティング領域の収束条件を、距離  $L$  の値ができるだけ小さい領域で見つけ出すことができ、この結果高い測定精度のデータを使用して見かけの熱拡散率  $r$  を求めることができる。このことは真の熱拡散率  $t$  の測定精度の向上につながる。

50

## 【 0 0 7 2 】

次にステップS 1 2 6で制御装置70は見かけの熱拡散率  $r$  を演算により求める。制御装置70は、フィッティング領域 ( I ) 内の実測値である黒丸をつなぐ線M 1を求め、線M 1の傾きから見かけの熱拡散率  $r$  を求める。図4を使用して説明した基本原理では、距離Lの範囲によらず一定の傾き  $[-( \quad / f ) 1 / 2 ]$  が得られたが、実際には上述したように試料の厚さや感度分布などの影響により、距離Lに対する位相遅れ  $\phi$  の傾きが一定の直線とはならず、結果として図11に示す測定結果では距離Lの範囲によって熱拡散率の傾きが異なる値となる。そのため数3で示した式により、制御装置70により求められたフィッティング領域 ( I ) の熱拡散率  $r$  は真の熱拡散率  $t$  ではなく、見かけの熱拡散率  $r$  である。本実施例では、制御装置70が演算して求めた領域Iの見かけの熱拡散率  $r$  は  $1.03 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$  である。

10

## 【 0 0 7 3 】

次にステップS 1 2 8で、制御装置70が演算により求めた見かけの熱拡散率  $r$  から、制御装置70は逆に距離Lおよびフィッティング領域を演算する。ステップS 1 2 8で演算した見かけの熱拡散率  $r$  から距離Lを簡単に求められるように、図12に示すデータベースが図1のメモリ80にデータベース84として保持されている。図12に示すデータベースは、横軸を ( 見かけの熱拡散率  $r$  / 加熱周波数  $f$  ) とし、縦軸を試料2の厚さ  $d$  としている。従ってステップS 1 2 8で、制御装置70は演算により求めた見かけの熱拡散率  $r$  から横軸である ( 見かけの熱拡散率  $r$  / 加熱周波数  $f$  ) を演算し、 ( 見かけの熱拡散率  $r$  / 加熱周波数  $f$  ) と試料2の厚さ  $d$  をパラメータとしてデータベース84を検索することにより、見かけの熱拡散率  $r$  に対応した距離Lを求める。

20

## 【 0 0 7 4 】

制御装置70により検索された距離Lは図12の矢印Iで示す値で、距離Lは  $1.53 \text{ mm}$  である。この距離Lを基に、図11で新たなフィッティング領域II (  $1.53 \sim 2.53 \text{ mm}$  ) が制御装置70によって設定される。なおこのときのフィッティング領域の幅は最初の設定のとおりで  $1 \text{ mm}$  である。

## 【 0 0 7 5 】

ステップS 1 3 2で制御装置70は新たなフィッティング領域II (  $1.53 \sim 2.53 \text{ mm}$  ) がその前のフィッティング領域Iに対して収束した状態かどうかを判断する。この例では、フィッティング領域Iとフィッティング領域IIとは大きく離れているので、制御装置70は収束していない、すなわち ( NO ) であると判断する。通常1回で収束することは少ない。

30

## 【 0 0 7 6 】

再びステップS 1 2 6により、制御装置70は新たに設定されたフィッティング領域であるフィッティング領域II (  $1.53 \sim 2.53 \text{ mm}$  ) に基づいて、図11における位相遅れ  $\phi$  の測定値をつなぐ線M 2を求め、その傾きから新たな見かけの熱拡散率  $r$  を演算する。上述したようにステップS 1 2 8で、新たな見かけの熱拡散率  $r$  に基づき新たなフィッティング領域IIIを図12に示すデータベースから算出する。制御装置70により新たに演算されたフィッティング領域IIIは、この実施例では  $1.60 \sim 2.60 \text{ mm}$  である。フィッティング領域IIIは  $1.60 \sim 2.60 \text{ mm}$  であり、フィッティング領域IIは  $1.53 \sim 2.53 \text{ mm}$  であり、その差は予め設定した所定値以下となり、フィッティング領域が収束した状態と判断することができる。ここでフィッティング領域が収束したか否かを判断する前記所定値は予め決められてメモリ80のデータ81として記憶していてもよいし、利用者が測定開始時に入力しても良い。例えばこの所定値は  $0.1 \text{ mm}$  であり、この実施例のフィッティング領域の幅  $1 \text{ mm}$  より小さい値である。また図12で矢印IIや矢印IIIはフィッティング領域IIやフィッティング領域IIIの検索状態を示しており、矢印IIは  $1.53 \text{ mm}$  を指し、矢印IIIは  $1.60 \text{ mm}$  を指している。なお、フィッティング領域Iは  $0.0 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$  であり、図12に記載の領域から外れているため、フィッティング領域Iについては図12に記載されていない。

40

## 【 0 0 7 7 】

50

制御装置 70 はステップ S 132 で、フィッティング領域が収束したと判断し、制御装置 70 は次にステップ S 134 を実行する。前記新たに演算された見かけの熱拡散率  $r$  ( $1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) が信頼できる最終の見かけの熱拡散率  $r$  であると決定される。ステップ S 134 で制御装置 70 は、最終の見かけの熱拡散率  $r$  を基に図 13 に示すデータベースから補正係数  $C$  を演算により求める。図 13 に示すデータベースは図 1 のメモリ 80 にデータベース 83 として保持されている。データベース 83 を検索するパラメータとしてこの実施例では、(見かけの熱拡散率  $r$  / 加熱周波数  $f$ ) をパラメータとしさらに試料 2 の厚さ  $d$  をパラメータとしている。上述したように最終の見かけの熱拡散率  $r$  によりパラメータである (見かけの熱拡散率  $r$  / 加熱周波数  $f$ ) が決定されるので、最終の見かけの熱拡散率  $r$  に基づく補正係数  $C$  が検索処理による決定される。

10

【0078】

制御装置 70 はステップ S 136 で、最終の見かけの熱拡散率  $r$  と補正係数  $C$  とに基づいてこれらの掛け算により真の熱拡散率  $t$  を求め、演算結果である真の熱拡散率  $t$  を出力する。この実施例では、見かけの熱拡散率  $r$  が  $1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  であり、検索された補正係数  $C$  が 1.068 であるので、真の熱拡散率  $t$  は、 $1.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  となる。

【0079】

図 14 に記載のフローチャートでは、試料 2 が取り付けられ、さらに諸条件が熱拡散率測定装置 100 に入力された後の位相遅れ  $\tau$  の測定とそれに基づく真の熱拡散率  $t$  を求める制御装置 70 の動作に付いて説明したが、この熱拡散率測定装置 100 は色々な材質の試料 2 の熱拡散率  $t$  を測定できる。このようにより広い用途に対応するための熱拡散率測定装置 100 の動作に付いて、次に説明する。

20

【0080】

図 15 は、色々な材質の試料 2 の熱拡散率  $t$  を測定できる熱拡散率測定装置 100 の動作を説明するためのフローチャートである。例えば熱拡散率測定装置 100 の電源が投入されると、ステップ S 200 で示すフローチャートの実行が開始される。

【0081】

図 2 や図 3 に記載した一実施例としての熱拡散率測定装置 100 のカバー 63 を開け、試料 2 を取り付け、カバー 63 を再び閉じて準備完了の入力を行うと、ステップ S 202 で熱拡散率測定装置 100 の制御装置 70 は準備完了の信号を受信したこととなり、制御装置 70 は測定に必要な入力を行うための表示を入出力装置 77 の出力装置 78 に表示する。

30

【0082】

次にステップ S 204 で、測定動作に必要なデータ例えば位相遅れ  $\tau$  を測定して図 9 や図 11 に示す測定を行うための距離  $L$  の変化範囲すなわち位相遅れ  $\tau$  を測定するための距離  $L$  の領域や、位相遅れ  $\tau$  をそれぞれ測定するための距離  $L$  に関する単位間隔や、試料 2 の厚さ  $d$  や、試料 2 の主材料、などの入力を促す表示が為される。そしてステップ S 204 で、測定者が前記必要なデータの入力を行い、制御装置 70 がステップ S 206 で入力の完了を受信すると、制御装置 70 は次のステップ S 204 で入力された距離  $L$  の変化範囲に従って加熱用ステージ 20 あるいは測定用ステージ 40 のあるいはその両方の制御を行う。例えば制御装置 70 は、加熱点 26 と測定点 46 との Z 軸方向の法線間の距離  $L$  が入力された距離  $L$  の測定領域の最小値に対する値となるように、加熱用ステージ 20 あるいは測定用ステージ 40 を制御する。

40

【0083】

さらにステップ S 204 で入力された試料 2 の材料に基づいて、メモリ 80 にデータベース 82 として記憶されたデータをステップ S 210 で表示する。このデータの一例は図 6 に記載のとおりであり、欄 A に記載の試料 2 の主材料に対する欄 C に示す加熱周波数  $f$  や欄 B に示す参考的な熱拡散率が、参考データとして表示される。ステップ S 210 での表示は加熱周波数  $f$  の設定に非常に役立つことはもちろんであるが、例えば欄 B に示す参考的な熱拡散率が表示されることにより、これから測定される試料 2 の大よその熱拡散率

50

を推測することができ、誤測定防止などにつながる効果がある。

【0084】

加熱周波数  $f$  を自動設定するかどうかを、ステップ S 2 2 2 で入力し、制御装置 70 が加熱周波数  $f$  の自動設定の有無を受信すると、ステップ S 2 2 4 で制御装置 70 は受信内容に基づく判断を行い、自動設定の場合にはステップ S 2 2 6 でメモリ 80 に記憶されているデータベース 82 に基づいて、加熱周波数  $f$  が自動的に設定される。また熱周波数  $f$  を自動設定しない場合には、制御装置 70 は、ステップ S 2 2 8 で測定者による加熱周波数  $f$  の入力を受信する。

【0085】

ステップ S 2 3 0 では、図 1 4 で説明した動作により、制御装置 70 が図 1 1 に示す位相遅れ  $\phi$  をステップ S 2 0 4 で入力された範囲に対して自動的に前記距離  $L$  を、ステップ S 2 0 4 で入力された単位間隔  $\Delta L$  ずつ変化させながら測定する。この場合図 1 4 では説明を省略したが、1 つの距離  $L$  における位相遅れ  $\phi$  が制御装置 70 により測定されると、制御装置 70 は次に、ステップ S 2 0 4 で入力された測定を行うための単位間隔  $\Delta L$  が変化するように、加熱用ステージ 20 あるいは測定用ステージ 40 を制御して距離  $L$  を順次変更する。そしてステップ S 2 0 4 で入力された距離  $L$  の領域におけるすべての単位間隔における位相遅れ  $\phi$  を測定する。

【0086】

このようにして図 1 1 に示す黒点のように、ステップ S 2 3 0 で距離  $L$  の単位間隔に対応した位相遅れ  $\phi$  を全て測定する。この動作は図 1 4 のステップ S 1 2 2 で説明の動作である。さらに図 1 1 に示す測定データに基づいて最終的な見かけの熱拡散率  $r$  が制御装置 70 により求められる。

【0087】

ステップ S 2 3 0 では、図 1 4 で説明のようにして真の熱拡散率  $t$  を測定する。そしてステップ S 2 3 2 で、求められた真の熱拡散率  $t$  が図 1 の出力装置 78 により表示あるいは印字される。ステップ S 2 3 4 測定動作を終了する。

【0088】

以上説明したように本実施例では、補正係数  $C$  をデータベースとして記憶し、見かけの熱拡散率  $r$  を補正係数  $C$  で補正することができるので、熱拡散率  $r$  の測定精度を向上することができる。

【0089】

さらに見かけの熱拡散率  $r$  を求め、求めた見かけの熱拡散率  $r$  を用いて距離  $L$  を求め、距離  $L$  に対する見かけの熱拡散率  $r$  が収束状態となる最終の見かけの熱拡散率  $r$  を求め、該最終の見かけの熱拡散率  $r$  を使用して補正係数  $C$  を求めると共に真の熱拡散率  $t$  を演算するようにしているので、熱拡散率  $r$  の測定精度を向上することができる。

【0090】

見かけの熱拡散率  $r$  を用いて距離  $L$  を求める演算をデータベースの検索により行うことができるので、本実施例では処理が簡単となる効果がある。

【0091】

図 1 2 に示すデータベースを使用して求める距離  $L$  は、見かけの熱拡散率  $r$  と加熱周波数  $f$  と試料 2 の厚さ  $d$  の 3 つのパラメータの関係により定まる。これら 3 つのパラメータをそのまま使用して距離  $L$  を求めようとする、パラメータの数が多いためその処理はたいへん複雑なものとなる。図 1 3 に示すデータベースを使用して補正係数  $C$  を求める場合も同様である。補正係数  $C$  は、見かけの熱拡散率  $r$  と加熱周波数  $f$  と試料 2 の厚さ  $d$  の 3 つのパラメータの関係で定まる。これら 3 つのパラメータをそのまま使用して補正係数  $C$  を求めようとする、パラメータの数が多いためその処理はたいへん複雑なものとなる。

【0092】

発明者は、実験およびその実験結果の解析を繰り返すことにより、見かけの熱拡散率  $r$  と加熱周波数  $f$  の 2 つのパラメータの比を求め、該 2 つのパラメータの代わりにこの比

10

20

30

40

50

をパラメータとして使用できることを見つげ出した。この結果、距離  $L$  を 2 つのパラメータの関係で表すことができる。図 1 2 に示すように、求める距離  $L$  を（見かけの熱拡散率  $r$  と加熱周波数  $f$  との比）からなるパラメータと試料 2 の厚さ  $d$  との 2 つのパラメータで検索可能なデータベースとして記憶し、利用することが可能となった。

【 0 0 9 3 】

図 1 3 に示す補正係数  $C$  に付いても同様であり、補正係数  $C$  を（見かけの熱拡散率  $r$  と加熱周波数  $f$  との比）からなるパラメータと試料 2 の厚さ  $d$  との 2 つのパラメータで検索可能なデータベースとして記憶し、利用することが可能となった。

【 0 0 9 4 】

見かけの熱拡散率  $r$  を補正する補正係数  $C$  を検索可能なデータベースとして保持することが可能となったことにより、試料 2 の熱拡散率の測定精度を大幅に向上することができた。また図 1 2 に示す距離  $L$  を検索可能なデータベースとして保持できることで、試料 2 の熱拡散率の測定精度をさらに向上させることができた。

【 0 0 9 5 】

図 1 6 は熱拡散率測定装置 1 0 0 の他の実施例を説明するフローチャートである。図 1 6 に記載のステップの内、図 1 5 に記載のステップと同一の参照符号を付したステップは、同様の動作をなし同様の効果を奏する。これらについての詳細な説明を省略する。

【 0 0 9 6 】

図 1 6 に示すフローチャートのステップ  $S 3 0 0$  が実行されると、このフローチャートの動作が開始される。図 1 に示す制御装置 7 0 は先ず図 1 5 に示すステップ  $S 2 0 2 \sim S 2 0 6$  を実行し、次にステップ  $S 2 0 8 \sim S 2 3 2$  を実行する。このステップ  $S 2 0 8 \sim S 2 3 2$  の実行で、図 1 5 に示すステップ  $S 2 3 0$  が実行され、制御装置 7 0 は真の熱拡散率  $t$  を演算により求め、ステップ  $S 2 3 2$  で出力装置 7 8 に表示するなどの方法で真の熱拡散率  $t$  を出力する。これらのステップの動作は図 1 5 に基づき説明済みであり、説明を省略する。

【 0 0 9 7 】

次に図 1 6 のステップ  $S 3 1 2$  で加熱周波数  $f$  に基づき、測定される真の熱拡散率  $t$  の予測範囲  $R$  を求める。このステップ  $S 3 1 2$  がステップ  $S 2 0 8 \sim S 2 3 2$  の後に実行されるが、これは単に一例であり、ステップ  $S 2 0 8 \sim S 2 3 2$  の後に限るものではない。図 1 5 におけるステップ  $S 2 2 6$  やステップ  $S 2 2 8$  で加熱周波数  $f$  が定まると、ステップ  $S 3 1 2$  の実行が可能である。

【 0 0 9 8 】

ステップ  $S 3 1 2$  における真の熱拡散率  $t$  の予測範囲  $R$  について説明する。図 6 に示す欄 B と欄 C は加熱周波数  $f$  と熱拡散率との対応関係を示している。例えば加熱周波数  $f$  が  $1 0 \text{ Hz}$ （ヘルツ）に設定された場合に、図 6 の欄 C と欄 B との関係を見ると予想される真の熱拡散率  $t$  は、欄 B の値  $1.16 \times 10^{-4}$  あるいは  $3.58 \times 10^{-5}$  に近い値である。これらの熱拡散率から大きくかけ離れた測定結果が出た場合は、加熱周波数  $f$  の設定を誤った可能性が高い。試料 2 の主材料の判断を誤った場合や加熱周波数  $f$  の入力を誤った場合に、このような測定結果となる可能性がある。ステップ  $S 3 1 2$  で制御装置 7 0 は、加熱周波数  $f$  に基づき、予想される測定結果である予想される真の熱拡散率  $t$  の予測範囲  $R$  を図 6 のデータに基づいて定める。真の熱拡散率  $t$  の予測範囲  $R$  を加熱周波数  $f$  に基づいて求めるが、さらに加えて入力された図 6 の欄 A に示す材料を考慮して定めてもよい。

【 0 0 9 9 】

ステップ  $S 3 1 4$  で制御装置 7 0 は、前記ステップ  $S 2 0 8 \sim S 2 3 2$  で行われた測定結果がステップ  $S 3 1 2$  で定めた予測範囲  $R$  内かどうかを判断する。範囲内であれば（YES）、測定結果としてステップ  $S 2 3 2$  で出力した値が正しいと判断し、制御装置 7 0 の実行がステップ  $S 3 3 2$  あるいはステップ  $S 3 3 4$  へ移る。一方ステップ  $S 3 1 4$  で制御装置 7 0 が、測定結果が予測範囲  $R$  から外れていると判断した場合に、ステップ  $S 3 1 6$  を実行し、予測範囲  $R$  に対して測定結果の真の熱拡散率  $t$  がどちらの方に外れたかを

10

20

30

40

50

判断する。もし測定結果が予測範囲 R に対して低い方に外れた場合に、制御装置 70 はステップ S 3 1 8 を実行し、測定結果が異常値を示していることの表示、さらに測定結果が低い方に外れたことおよび加熱周波数  $f$  を下げるべきである旨の表示を図 1 の出力装置 78 を介して行う。逆に測定結果が予測範囲 R に対して高い方に外れた場合に、制御装置 70 はステップ S 3 2 2 を実行し、測定結果が異常値を示していることの表示、さらに測定結果が高い方に外れたことおよび加熱周波数  $f$  を上げるべきである旨の表示を出力装置 78 を介して行う。このことにより、測定された結果が正しい値ではないことを検知して知らせることができると共に、正しい測定結果を得るためには加熱周波数  $f$  をどのように変更したらよいかの示唆を行うことができる。このことにより熱拡散率測定装置 100 の信頼性を向上することができる。さらに加熱周波数  $f$  をどのように修正すべきかの示唆を得ることができ、利便性が向上する。

10

**【0100】**

次に熱拡散率測定装置 100 の利用者が、前記表示を参考とするなどにより、ステップ S 3 2 4 で新たな加熱周波数  $f$  を図 1 の入力装置 79 を介して入力すると、ステップ S 2 0 8 ~ S 2 3 2 に制御装置 70 の実行が移り、制御装置 70 は新たな加熱周波数  $f$  に従って再び試料 2 の熱拡散率の測定動作を実行する。

**【0101】**

仮に試料 2 の材料が正しく把握できなくても、制御装置 70 がステップ S 2 0 8 ~ S 2 3 2 に加えて上述のステップ S 3 1 4 ~ S 3 2 4 を実行することにより、適した加熱周波数  $f$  を設定でき、正確な真の熱拡散率  $t$  を得ることができる。

20

**【0102】**

ステップ S 3 1 4 で測定された真の熱拡散率  $t$  が予測した範囲内に含まれる場合には、制御装置 70 は測定結果が正しいと判断し、ステップ S 3 3 2 に制御装置 70 の実行が移る。ステップ S 3 3 2 では、熱拡散率測定装置 100 の利用者が、図 1 4 に示すステップ S 1 2 6 やステップ S 1 2 8、ステップ S 1 3 4 における演算や検索の履歴に関する出力を要求する。上述したように制御装置 70 は、前記ステップ S 2 0 8 ~ S 2 3 2 の実行の中で、図 1 4 に示すステップ S 1 2 6 やステップ S 1 2 8、ステップ S 1 3 4 を実行し、これらの実行によりフィッティング領域を決定し、該フィッティング領域を収束させる処理を行う。

**【0103】**

30

利用者が制御装置 70 により行われたフィッティング領域の収束の経緯を検証することにより測定された真の熱拡散率  $t$  の信頼性や問題点を検証することができる。例えば、図 1 1 に示す測定された位相遅れ  $\tau$  のデータや、該データにおける線 M 1 ~ M 3 の設定の経緯や、図 1 2 や図 1 3 に示す検索の経緯を確認することにより、信頼性を確認でき、もし問題点があれば対応することが可能となる。ステップ S 3 3 2 で位相遅れ  $\tau$  の測定結果や検索の経緯の出力を要求する。なお要求の必要なければステップ S 3 3 2 をスキップすることができる。

**【0104】**

次のステップ S 3 3 4 で前記出力要求の有無を判断し、要求があればステップ S 3 3 6 を実行する。要求が無ければステップ S 3 3 8 に制御装置 70 の実行が移る。ステップ S 3 3 6 では出力要求に応じ、前記要求内容を出力装置 78 から出力する。図 1 1 に示す位相遅れ  $\tau$  の測定結果や、図 1 2 や図 1 3 に示すデータベースのグラフや検索履歴を出力することで、熱拡散率測定装置 100 の利用者は単に測定結果としての真の熱拡散率  $t$  の結果を得るだけでなく、測定の過程を知ることができる。本実施例では、図 1 1 や図 1 2、図 1 3 の全てを出力する例を説明したが、これらの内必要なものだけをステップ S 3 3 2 で選択的に要求することができ、制御装置 70 は要求されたものだけをステップ S 3 3 6 で出力する。

40

**【0105】**

ステップ S 3 3 8 ~ S 3 4 2 は、測定された真の熱拡散率  $t$  を使用してさらに新たな物理量を演算する処理ステップである。例えば試料 2 の真の熱拡散率  $t$  が測定できると

50

新たな物理量として試料 2 の熱伝導率を得ることができる。ステップ S 3 3 8 では、測定された真の熱拡散率  $t$  を利用した新たな物理量を求める演算処理の要求する。ステップ S 3 3 8 の入力方法として、新たな演算式を入力してもよい。さらに予め幾つかの演算式をメモリ 8 0 に保持し、利用者が保持している演算内容を表示して表示された中から選択するようにしても良い。このようにして測定結果を使用した新たな物理量の演算をステップ S 3 3 8 で行う。なおステップ S 3 3 8 は必要が無ければスキップすることができる。

【 0 1 0 6 】

ステップ S 3 4 0 で新たな物理量の演算要求の有無を制御装置 7 0 が判断し、要求がある場合にステップ S 3 4 2 で、要求された演算を行い、その結果を出力装置 7 8 から出力する。測定された真の熱拡散率  $t$  を使用した熱伝導率の演算を例にあげると、測定された真の熱拡散率  $t$  に試料 2 の比熱や密度を乗ずることにより、試料 2 の熱伝導率を演算することができる。

10

【 0 1 0 7 】

次にステップ S 3 4 4 に制御装置 7 0 の実行に移り、図 1 6 に記載のフローチャートの実行を終了する。図 1 6 のフローチャートは、ステップ S 3 0 0 で開始され、ステップ S 3 4 4 で終了するが、これは代表的な動作例である。利用者の操作に基づき図 1 6 の途中ステップから制御装置 7 0 が動作を開始することができる。例えばステップ S 3 1 4 の実行が終わり、測定された真の熱拡散率  $t$  が出力された直後に、熱拡散率測定装置 1 0 0 の利用者が、加熱周波数  $f$  の変更を図 1 の入力装置 7 9 から行い、測定開始ステップの指示を入力装置 7 9 から行くと、制御装置 7 0 は新たに入力された加熱周波数  $f$  に従って試料 2 を加熱し、ステップ S 2 0 8 ~ S 2 3 2 の内の指示されたステップから実行を開始し、真の熱拡散率  $t$  の測定を行い測定結果を出力する。このように図示していないが、入力装置 7 9 からの操作により、測定の途中であっても入力条件を変更して開始ステップを指示すると、制御装置 7 0 は入力された指示に従い、図 1 4 や図 1 5、図 1 6 に示すステップの実行を、指示されたステップから開始する。このことにより、利用者は試料 2 に適した測定を、試行を繰り返しながら効率的に行うことができる。

20

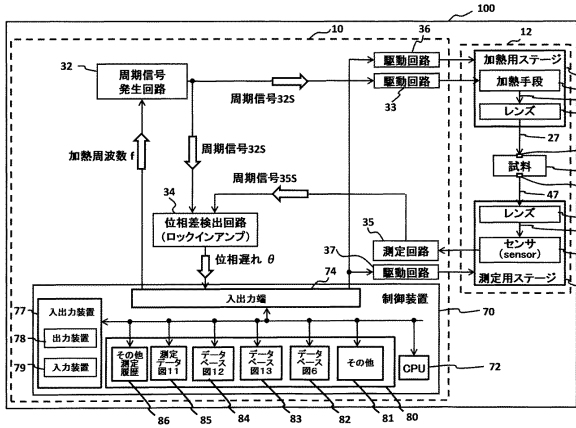
【符号の説明】

【 0 1 0 8 】

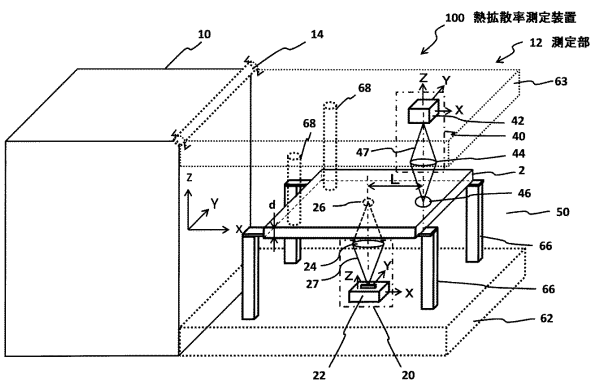
2 ... 試料、1 0 ... 測定装置本体、1 2 ... 測定部、ステージ 2 0 ... 加熱用、2 2 ... 加熱手段、2 4 ... レンズ、2 6 ... 加热点、2 7 ... 加熱用レーザービーム、4 0 ... 測定用ステージ、4 2 ... センサ、4 4 ... レンズ、4 6 ... 測定点、4 7 ... 赤外線、7 0 ... 制御装置、8 0 ... メモリ。

30

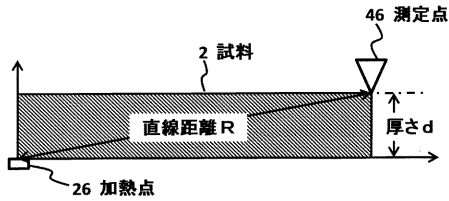
【図1】



【図2】



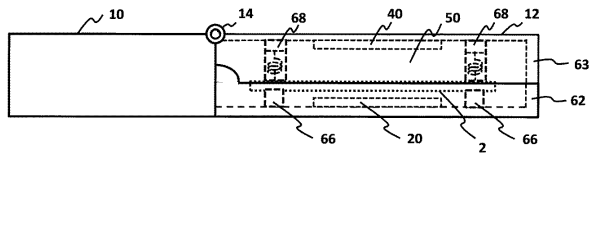
【図5】



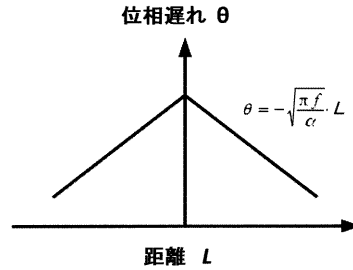
【図6】

欄 A	欄 B	欄 C
	熱拡散率(m <sup>2</sup> /s)	加熱周波数 f
銅	1.16×10 <sup>-4</sup>	5 - 50
黄銅(Cu-30Zn)	3.58×10 <sup>-5</sup>	2 - 16
ステンレス(SUS304)	3.79×10 <sup>-6</sup>	0.2 - 2
プラスチック(PET)	6.88×10 <sup>-7</sup>	0.03 - 0.3
セラミックス(アルミナ)	1.48×10 <sup>-5</sup>	0.6 - 7
ゴム(軟質天然ゴム)	7.51×10 <sup>-8</sup>	0.003 - 0.03
ゴム(硬質天然ゴム)	1.00×10 <sup>-7</sup>	0.004 - 0.04

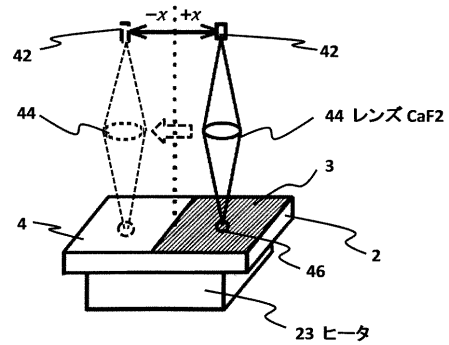
【図3】



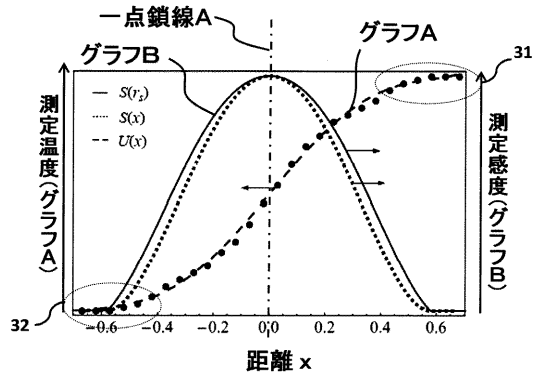
【図4】



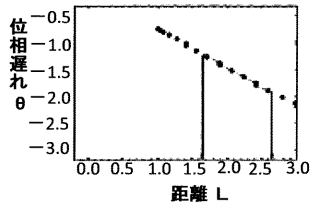
【図7】



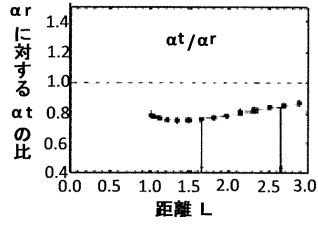
【図8】



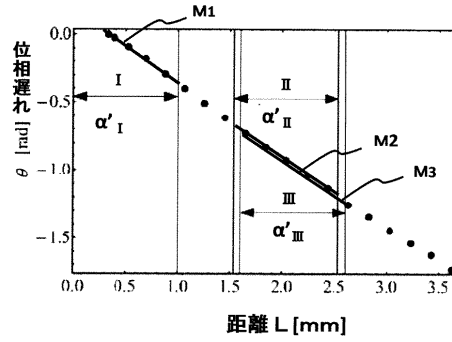
【図9】



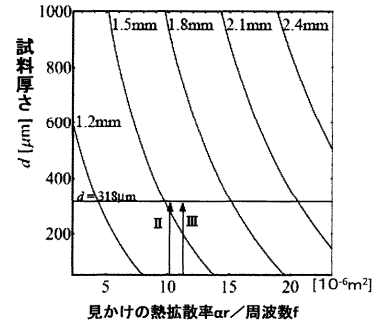
【図10】



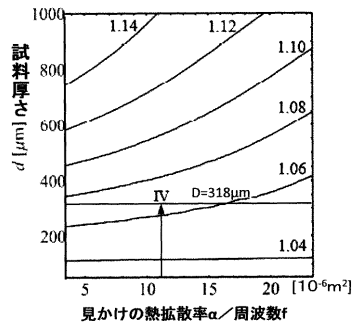
【図11】



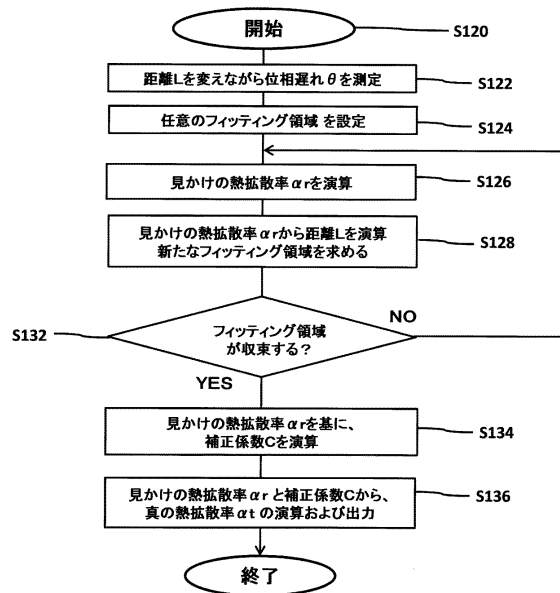
【図12】



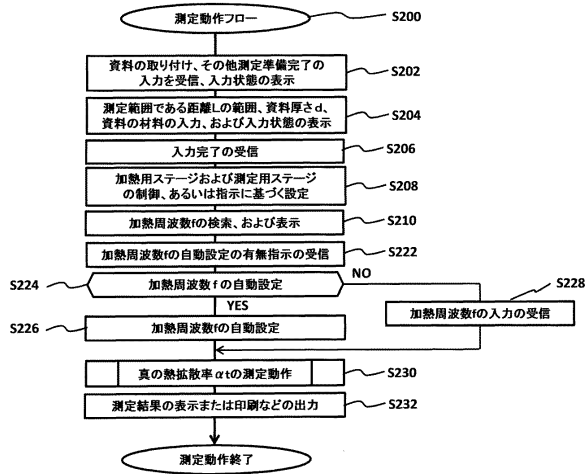
【図13】



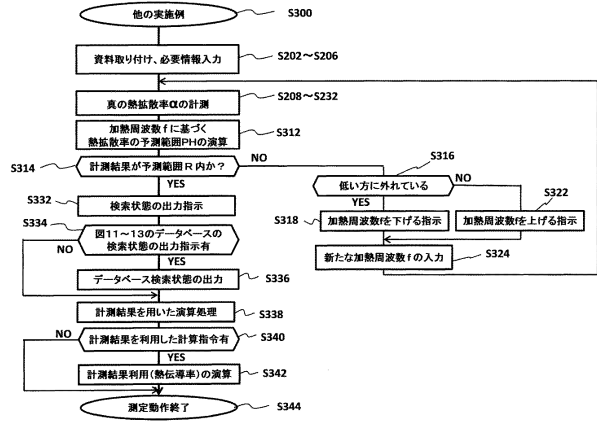
【図14】



【図15】



【図16】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許出願公開第2006/0153269 (US, A1)

特開平08-304315 (JP, A)

特開昭53-032078 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 25/00 - 25/72