

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-181912

(P2021-181912A)

(43) 公開日 令和3年11月25日 (2021.11.25)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
GO 1 N 25/18 (2006.01) GO 1 N 25/18 Z 2 GO 4 O
 GO 1 N 25/18 H

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2020-87061 (P2020-87061) (22) 出願日 令和2年5月18日 (2020.5.18) (出願人による申告) 平成29年度、国立研究開発法人 科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業CREST 「スピントロニック・サーマルマネジメント」委託研 究、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願	(71) 出願人 504139662 国立大学法人東海国立大学機構 愛知県名古屋市千種区不老町1番 301023238 国立研究開発法人物質・材料研究機構 茨城県つくば市千現一丁目2番地1 100128886 弁理士 横田 裕弘 (72) 発明者 長野 方星 愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大 学法人東海国立大学機構内 (72) 発明者 富岡 孝太 愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大 学法人東海国立大学機構内
--	---

最終頁に続く

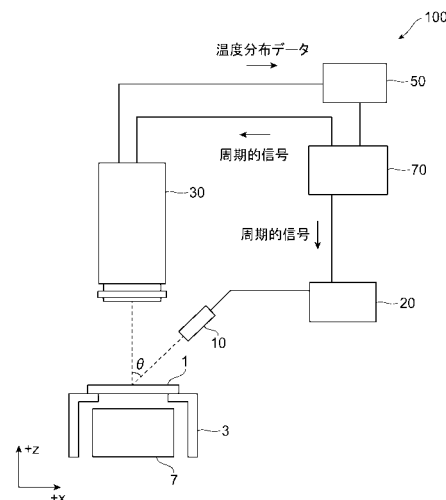
(54) 【発明の名称】 熱ホール効果情報取得装置、熱ホール係数計測装置、熱ホール効果情報取得方法、およびプログラム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 熱ホール効果に関する情報を取得することが可能な装置を提供する。

【解決手段】 熱ホール効果情報取得装置100は、試料1に対して光を照射し試料1を加熱する加熱部と、試料に1において加熱部によって加熱されかつ磁石7によって磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知する検知部30と、検知部30によって検知された温度分布に基づいて、領域における熱ホール効果に関する情報を取得する取得部50とを備える。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

試料に対して光を照射し当該試料を加熱する加熱部と、
前記試料において前記加熱部によって加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知する検知部と、
前記検知部によって検知された温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得する取得部と
を備える熱ホール効果情報取得装置。

【請求項 2】

前記試料に対向して設けられ、前記領域に前記磁場を印加する磁場印加部を備える
ことを特徴とする請求項 1 記載の熱ホール効果情報取得装置。

10

【請求項 3】

前記磁場印加部は、前記磁場の向きを変更可能である
ことを特徴とする請求項 2 記載の熱ホール効果情報取得装置。

【請求項 4】

前記取得部は、前記領域における熱ホール係数を算出する
ことを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項記載の熱ホール効果情報取得装置。

【請求項 5】

前記試料を支持する支持面を有する支持体を有し、
前記支持面は、前記試料における前記領域と対向する位置において当該試料から離間する離間部を有する
ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項記載の熱ホール効果情報取得装置。

20

【請求項 6】

前記加熱部は、前記領域に対して斜めに光を照射する
ことを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項記載の熱ホール効果情報取得装置。

【請求項 7】

前記検知部は、前記領域に対して前記加熱部が光を照射する側から当該領域の温度分布を検知する
ことを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項記載の熱ホール効果情報取得装置。

【請求項 8】

試料に対して斜めに光を照射し当該試料を周期加熱する光照射部と、
前記試料が配置される空間に磁場を形成し、かつ当該磁場の向きを第 1 の向きと当該第 1 の向きとは反対の第 2 の向きで変更可能な磁場形成部と、
前記試料において前記加熱部によって加熱された領域の温度分布を検知する温度検知部と、
前記磁場形成部が前記第 1 の向きで前記磁場を形成して前記温度検知部によって検知された第 1 の温度分布と、当該磁場形成部が前記第 2 の向きで当該磁場を形成して当該温度検知部によって検知された第 2 の温度分布とに基づいて、前記領域における熱ホール係数を算出する係数算出部と
を備える熱ホール係数計測装置。

30

40

【請求項 9】

試料に対して光を照射し当該試料を加熱するステップと、
前記試料において光により加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知するステップと、
前記温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得するステップと
を備える熱ホール効果情報取得方法。

【請求項 10】

コンピュータに、
試料において光により加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分

50

布を検知する機能と、

前記温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得する機能と

を実行させるプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、熱ホール効果情報取得装置、熱ホール係数計測装置、熱ホール効果情報取得方法、およびプログラムに関する。

【背景技術】

10

【0002】

特許文献1には、繊維を含む複合材料に対して光を照射し複合材料を加熱する加熱部と、複合材料において加熱部によって加熱された領域の温度分布を検知する検知部と、検知部によって検知された温度分布に基づいて、複合材料における繊維の含有率に関する情報を取得する取得部とを備える含有率情報取得装置が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2019-178970号公報

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

ところで、熱流と磁場もしくは磁化の外積方向に温度勾配が生じる現象である熱ホール効果(Thermal Hall Effect、THE、またはRighi-Leduc Effectとも呼ばれる)が知られている。そして、熱ホール効果を利用した、例えば排熱デバイスや熱制御機器の開発が期待されている。これらデバイスの開発においては、熱ホール効果を検証するために、熱ホール効果に関する情報を取得する新たな装置が求められることがあった。

【0005】

本明細書に開示される技術は、熱ホール効果に関する情報を取得することが可能な装置などを提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0006】

かかる目的のもと、本明細書に開示される技術は、試料に対して光を照射し当該試料を加熱する加熱部と、前記試料において前記加熱部によって加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知する検知部と、前記検知部によって検知された温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得する取得部とを備える熱ホール効果情報取得装置である。

ここで、前記試料に対向して設けられ、前記領域に前記磁場を印加する磁場印加部を備えとよい。

40

また、前記磁場印加部は、前記磁場の向きを変更可能であるとよい。

また、前記取得部は、前記領域における熱ホール係数を算出するとよい。

また、前記試料を支持する支持面を有する支持体を有し、前記支持面は、前記試料における前記領域と対向する位置において当該試料から離間する離間部を有するとよい。

また、前記加熱部は、前記領域に対して斜めに光を照射するとよい。

また、前記検知部は、前記領域に対して前記加熱部が光を照射する側から当該領域の温度分布を検知するとよい。

【0007】

他の観点から捉えると、本明細書に開示される技術は、試料に対して斜めに光を照射し当該試料を周期加熱する光照射部と、前記試料が配置される空間に磁場を形成し、かつ当

50

該磁場の向きを第 1 の向きと当該第 1 の向きとは反対の第 2 の向きで変更可能な磁場形成部と、前記試料において前記加熱部によって加熱された領域の温度分布を検知する温度検知部と、前記磁場形成部が前記第 1 の向きで前記磁場を形成して前記温度検知部によって検知された第 1 の温度分布と、当該磁場形成部が前記第 2 の向きで当該磁場を形成して当該温度検知部によって検知された第 2 の温度分布とに基づいて、前記領域における熱ホール係数を算出する係数算出部とを備える熱ホール係数計測装置である。

【 0 0 0 8 】

他の観点から捉えると、本明細書に開示される技術は、試料に対して光を照射し当該試料を加熱するステップと、前記試料において光により加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知するステップと、前記温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得するステップとを備える熱ホール効果情報取得方法である。

10

【 0 0 0 9 】

他の観点から捉えると、本明細書に開示される技術は、コンピュータに、試料において光により加熱されかつ磁場が印加された領域または磁化した領域の温度分布を検知する機能と、前記温度分布に基づいて、前記領域における熱ホール効果に関する情報を取得する機能とを実行させるプログラムである。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 0 】

本明細書に開示される技術によれば、熱ホール効果に関する情報を取得することが可能な装置などを提供することができる。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 1 】

【 図 1 】 本実施の形態に係る熱ホール効果計測装置を示す概略構成図である。

【 図 2 】 コンピュータの機能構成図である。

【 図 3 】 熱ホール効果計測装置における測定試料周辺の構成を示す図である。

【 図 4 】 測定試料における温度変化を示す模式図である。

【 図 5 】 測定試料における温度分布の模式図である。

【 図 6 】 熱ホール効果計測装置の動作を説明するフローチャートである。

【 図 7 】 通常熱拡散熱流についての測定結果を示す。

30

【 図 8 】 熱ホール効果についての測定結果を示す。

【 図 9 】 コンピュータのハードウェア構成例を示した図である。

【 図 1 0 】 測定試料の光照射領域の変形例を説明する図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 2 】

以下、添付図面を参照して、本実施の形態について詳細に説明する。

< 熱ホール効果計測装置 1 0 0 の構成 >

図 1 は、本実施の形態に係る熱ホール効果計測装置 1 0 0 を示す概略構成図である。

まず、図 1 を参照して、本実施の形態が適用される熱ホール効果計測装置 1 0 0 の構成を説明する。

40

図 1 に示すように、本実施の形態が適用される熱ホール効果計測装置 1 0 0 は、板状に形成された測定試料 1 を支持する支持台 3 と、磁場を形成する磁石 7 と、加熱用光源として機能するレーザ 1 0 と、レーザ 1 0 を制御するレーザドライバ 2 0 と、測定試料 1 に対向して設けられる赤外線サーモグラフィ（ロックインサーモグラフィ）3 0 と、赤外線サーモグラフィ 3 0 からの信号を受けるコンピュータ 5 0 と、周期的信号を発生させレーザ 1 0 および赤外線サーモグラフィ 3 0 へと出力する周期的信号発生器 7 0 とを備える。

【 0 0 1 3 】

このように構成された熱ホール効果計測装置 1 0 0 においては、レーザ 1 0 から出射されたレーザ光が、測定試料 1 に周期的に照射される。この測定試料 1 においては、レーザ光が照射される箇所（領域）が周期的に加熱される。すなわち、測定試料 1 の表面にお

50

る特定の領域が、スポット周期加熱される。付言すると、レーザ１０の照射により、測定試料１の面内方向に沿う熱流が形成される。

【００１４】

また、レーザ１０のレーザ光により周期的に加熱された測定試料１の温度は、赤外線サーモグラフィ３０によって測定される。なお、赤外線サーモグラフィ３０は、レーザ１０によりスポット周期加熱される領域を含む予め定めた範囲を、赤外線画像として撮像（測定）する。この赤外線サーモグラフィ３０には、周期的信号発生器７０から周期的信号が入力される。また、赤外線サーモグラフィ３０で測定された温度のデータである温度分布データは、周期的信号とともにコンピュータ５０へと出力される。

【００１５】

コンピュータ５０は、赤外線サーモグラフィ３０とあわせて、所定間隔のフレームレートに基づいて、赤外線画像の取り込みと演算とを連続的に実行し、レーザによる周期加熱と同期して変化する温度変化をフーリエ解析により抜き出した画像を作成する（ロックイン方式）。さらに説明をすると、赤外線サーモグラフィ３０で得られたデータがコンピュータ５０により演算処理され、試料１における熱ホール係数（詳細は後述）を算出する。

【００１６】

なお、以下の説明においては、図１における図中左側から右側に向かう向きを＋ｘ方向、反対向きを－ｘ方向とすることがある。また、図１における図中下側から上側に向かう向きを＋ｚ方向、反対向きを－ｚ方向とすることがある。また、図１における紙面手前側から奥側に向かう向きを＋ｙ方向、反対向きを－ｙ方向とすることがある。

【００１７】

<コンピュータ５０の機能構成>

図２は、コンピュータ５０の機能構成図である。

次に、図１および図２を参照して、本実施の形態が適用されるコンピュータ５０の機能構成を説明する。

図２に示すように、本実施の形態が適用されるコンピュータ５０は、赤外線サーモグラフィ３０（図１参照）から入力される温度分布データおよび周期的信号を取得するデータ取得部５１と、データ取得部５１によって取得された温度分布データおよび周期的信号に基づいて温度変化の強度分布である温度振幅を算出する振幅分布算出部５２と、データ取得部５１によって取得された温度分布データおよび周期的信号に基づいて位相差の分布を算出する位相分布算出部５３と、データ取得部５１によって取得された温度分布データおよび周期的信号に基づいて新たに温度分布を算出する温度分布算出部５４と、算出された振幅および位相差に基づいて熱ホール係数（後述）を算出する熱ホール係数算出部５５と、算出された熱ホール係数の算出結果などを液晶ディスプレイ（不図示）に表示する算出結果表示部５６とを備える。

【００１８】

本実施の形態のコンピュータ５０は、赤外線サーモグラフィ３０により検出された測定試料１（図１参照）の温度分布に基づいて、測定試料１における熱ホール係数（後述）を算出する。さらに説明をすると、コンピュータ５０は、測定試料１の温度分布の変化の振幅および応答の遅れ、そして温度変化の磁場もしくは磁化依存性に基づいて、測定試料１における熱ホール効果による温度情報と、熱ホール効果ではない通常の熱拡散による温度情報とを分離する処理を行う。

【００１９】

なお、振幅分布算出部５２は、後述する式（９）および式（１０）に基づいて温度振幅を算出する。すなわち、振幅分布算出部５２は、通常の熱拡散による温度振幅と、熱ホール効果による温度振幅とを算出する。また、位相分布算出部５３は、後述する式（１１）および式（１２）に基づいて位相差を算出する。すなわち、位相分布算出部５３は、通常の熱拡散による位相差と、熱ホール効果による位相差とを算出する。また、温度分布算出部５４は、振幅分布算出部５２が算出する温度振幅に基づいて、温度分布を算出する。すなわち、温度分布算出部５４は、通常の熱拡散による温度分布と、熱ホール効果による温度

10

20

30

40

50

分布とを算出（推定）する。

【 0 0 2 0 】

また、熱ホール係数算出部 5 5 は、温度分布算出部 5 4 が算出する通常の熱拡散による温度分布に基づいて、熱ホール係数 $R_{T H E}$ （後述する式（ 1 ）参照）を仮定した場合の熱ホール効果によって生じた温度分布を算出する。そして、熱ホール係数算出部 5 5 は、算出された温度分布と、温度分布算出部 5 4 によって得られた熱ホール効果による温度分布とを比較することで、熱ホール係数を算出する。

【 0 0 2 1 】

< 測定試料 1 周辺の構成 >

図 3 は、熱ホール効果計測装置 1 0 0 における測定試料 1 周辺の構成を示す図である。

10

次に、図 3 を参照して、測定試料 1 の構成および熱ホール効果計測装置 1 0 0 における測定試料 1 周辺の構成を説明する。

【 0 0 2 2 】

まず、測定試料 1 の構成について説明をする。図 3 に示すように、測定試料 1 は、平板状の部材である。測定試料 1 の材質は、特に限定されないが、例えばビスマスなどの多結晶の金属材料で構成される。測定試料 1 は、レーザ 1 0 によってレーザ光が照射される側、すなわち図中上側の面である上面 1 1 と、レーザ 1 0 によってレーザ光が照射される側とは反対側、すなわち図中下側の面である下面 1 3 とを有する。なお、上面 1 1 は、赤外線サーモグラフィ 3 0 と対向する面である。付言すると、赤外線サーモグラフィ 3 0 は、測定試料 1 の上面 1 1 における熱分布を測定する。

20

【 0 0 2 3 】

次に、熱ホール効果計測装置 1 0 0 における測定試料 1 周辺の構成を説明する。図 3 に示すように、支持台 3 は、測定試料 1 が搭載される板部材である搭載板 3 1 と、搭載板 3 1 を支持する支持脚 3 3 とを有する。ここで、搭載板 3 1 は板面中央に開口 3 5 が形成されている。この開口 3 5 は、測定試料 1 におけるレーザ光が照射される光照射領域 H A と、z 方向に見て重なる位置にある。言い替えると、測定試料 1 の光照射領域 H A と重なる位置となる下面 1 3 の板面中央部は、開口 3 5 が形成されていることにより搭載板 3 1 から離間している。すなわち、搭載板 3 1 の開口 3 5 により、測定試料 1 から搭載板 3 1 に熱が伝達されることが抑制される。

30

【 0 0 2 4 】

磁石 7 は、搭載板 3 1 を挟んで測定試料 1 とは反対側に位置する。さらに説明をすると、磁石 7 は、開口 3 5 と対向する位置に設けられている。図示の例においては、磁石 7 は、硬質磁性材料（永久磁石）である。図示の磁石 7 は直方体状であり、測定試料 1 と対向する側（図中上側）が N 極 7 1、測定試料 1 と反対側（図中下側）が S 極 7 3 である。この向きに配置された磁石 7 は、測定試料 1 が配置される空間において + z 方向の磁場を形成する。

【 0 0 2 5 】

さて、磁石 7 は、上下の向きを変更可能である。この向きの変更により、磁石 7 が生じさせる磁場が + z 方向と - z 方向とで切り替わる。さらに説明をすると、本実施の形態においては、磁石 7 の配置を変更することで、磁場の向きを反転させながら、熱ホール効果の測定を行う。

40

【 0 0 2 6 】

レーザ 1 0 は、測定試料 1 の上面 1 1 に対して斜めにレーザ光が入射するように配置されている。図示の例においては、レーザ 1 0 の照射方向 A N は、上面 1 1 の法線方向 N M と入射角 θ をなす。上面 1 1 に対してレーザ光が斜めに入射することによって、測定試料 1 に楕円形状の光照射領域 H A が形成される。なお、光照射領域 H A は、例えば光強度が最大強度となる加熱中心 H P と所定の関係の光強度（例えば加熱中心 H P の $1/e^2$ ）となる領域である。この光照射領域 H A は、非円形であることから、回転方向に対して非対称な二次元の温度場を形成する。

【 0 0 2 7 】

50

< 測定原理 >

図 4 は、測定試料 1 における温度変化を示す模式図である。

次に、図 3 および図 4 を参照しながら、本実施の形態における熱ホール効果の測定原理を説明する。以下では、まず熱ホール効果について説明をしたのち、本実施の形態における熱ホール効果の測定原理について詳細に説明する。

【 0 0 2 8 】

まず、熱ホール効果は、熱流の非相反応答として磁化または磁場環境下において見られる現象である。この熱ホール効果においては、測定試料 1 に印加した熱流と磁場（磁化）の両方向に対して垂直方向の熱流が生じる。この熱流による温度勾配の大きさは、熱流および磁場（磁化）の大きさに比例し、その比例係数は物質種に依存する。以下では、磁場に依存した熱ホール効果について記述するが、各式における磁場を磁化に置き換えれば、磁化に依存した熱ホール効果に対しても同様の測定方法を適用できる。ここで、熱ホール効果は、式（１）で表される。

10

【 0 0 2 9 】

【 数 1 】

$$R_{THE} = \frac{1}{H_z} \frac{\frac{dT_y}{dy}}{\frac{dT_x}{dx}} = \frac{1}{H_z} \Lambda \quad (1)$$

20

【 0 0 3 0 】

R_{THE} は熱ホール係数であり、 H_z は磁場であり、 Λ は単位磁場強さにおける熱流歪曲の割合である。

【 0 0 3 1 】

ここで、従来、熱ホール効果の計測は、熱電対や抵抗温度計を用いた接触式による定常法で行われていた。これらの手法においては、例えば試料と温度計との間において熱損失が生じ、測定の信頼性が低下することがあった。そこで、本実施の形態においては、レーザ 10 によって測定試料 1 を周期加熱しながら赤外線サーモグラフィ 30 を用いて計測することで、非接触な 2 次元温度分布の計測を行う。

【 0 0 3 2 】

30

さらに説明をすると、本実施の形態においては、図 4（a）に示すように、レーザ 10 によって測定試料 1 の周期加熱を周期 f で行う。このことにより、測定試料 1 の光照射領域 HA は、周期的に温度上昇を繰り返す。

【 0 0 3 3 】

ここで、図 4（b）に示すように、磁場を $+z$ 方向すなわち $+H$ とした場合において、測定試料 1 の所定の位置で、熱ホール効果による温度変化が観察されるものとする。この熱ホール効果による温度変化は、レーザ 10 による周期加熱と同期する。一方で、図 4（c）に示すように、磁場を $-z$ 方向すなわち $-H$ とすると、所定の位置における熱ホール効果による温度変化が符号反転し、図 4（b）に示すように磁場を $+z$ 方向すなわち $+H$ とした場合と比べて周期的に変化する温度変化の位相が 180° 変化する。

40

【 0 0 3 4 】

ここで、測定試料 1 をレーザで周期加熱したとき、複素温度波 T は、レーザ周期加熱成分とそれに伴う熱ホール効果成分の合成波として、式（２）のように表される。

【 0 0 3 5 】

【 数 2 】

$$T = T_{\text{normal}} + T_{THE} \quad (2)$$

【 0 0 3 6 】

ここで、 T_{normal} はレーザ周期加熱によって生じた複素温度波であり、 T_{THE} は熱ホール効果によって生じた複素温度波であり、角周波数を w とし、レーザ加熱によ

50

て生じた温度振幅を A_{normal} とし、その位相差を φ_{normal} とし、熱ホール効果によって生じた温度振幅を A_{THE} とし、その位相差を φ_{THE} とすると、式 (3) および式 (4) のように表される。

【 0 0 3 7 】

【 数 3 】

$$T_{\text{normal}} = A_{\text{normal}} e^{i(\omega t + \varphi_{\text{normal}})} \quad (3)$$

【 0 0 3 8 】

【 数 4 】

$$T_{\text{THE}} = A_{\text{THE}} e^{i(\omega t + \varphi_{\text{THE}})} \quad (4)$$

10

【 0 0 3 9 】

式 (2) に式 (3) および式 (4) を代入すると、式 (5) が得られる。

【 0 0 4 0 】

【 数 5 】

$$T = A_{\text{normal}} e^{i(\omega t + \varphi_{\text{normal}})} + A_{\text{THE}} e^{i(\omega t + \varphi_{\text{THE}})} \quad (5)$$

【 0 0 4 1 】

ここで、 $t = 0$ のとき、式 (6) となる。

【 0 0 4 2 】

【 数 6 】

$$T = A_{\text{normal}} e^{i\varphi_{\text{normal}}} + A_{\text{THE}} e^{i\varphi_{\text{THE}}} \quad (6)$$

【 0 0 4 3 】

ここで、測定試料 1 に N 極を対向させた場合の複素温度波と、測定試料 1 に S 極を対向させた場合の複素温度波は、式 (6) より式 (7) および式 (8) となる。

【 0 0 4 4 】

【 数 7 】

$$A_N e^{i\varphi_N} = A_{\text{normal}} e^{i\varphi_{\text{normal}}} + A_{\text{THE}} e^{i\varphi_{\text{THE}}} \quad (7)$$

30

【 0 0 4 5 】

【 数 8 】

$$A_S e^{i\varphi_S} = A_{\text{normal}} e^{i\varphi_{\text{normal}}} - A_{\text{THE}} e^{i\varphi_{\text{THE}}} \quad (8)$$

【 0 0 4 6 】

式 (7) および式 (8) を変形すると、式 (9) 乃至式 (11) となる。

【 0 0 4 7 】

【 数 9 】

$$A_{\text{THE}} = \frac{1}{2} |A_N e^{i\varphi_N} - A_S e^{i\varphi_S}| \quad (9)$$

40

【 0 0 4 8 】

【 数 10 】

$$A_{\text{normal}} = \frac{1}{2} |A_N e^{i\varphi_N} + A_S e^{i\varphi_S}| \quad (10)$$

【 0 0 4 9 】

【数 1 1】

$$\varphi_{\text{THE}} = \angle(A_N e^{i\varphi_N} - A_S e^{i\varphi_S}) \quad (11)$$

【0 0 5 0】

【数 1 2】

$$\varphi_{\text{normal}} = \angle(A_N e^{i\varphi_N} + A_S e^{i\varphi_S}) \quad (12)$$

【0 0 5 1】

上記のように、本実施の形態においては、熱ホール効果による温度情報と、レーザ加熱によって生じた温度情報、すなわち通常熱拡散による温度情報とを分離することが可能となる。さらに説明をすると、測定試料 1 に印加している磁場分極を反転させると、熱ホール効果で誘導された温度分布の符号は反転するが、通常熱拡散現象の温度分布は変化しない。このことから、本実施の形態においては、向きが異なる磁場分極方向で測定された結果を比較し、熱ホール効果で誘導された温度情報のみを取得可能とした。

10

【0 0 5 2】

図 5 は、測定試料 1 における温度分布の模式図である。さらに説明をすると、図 5 (a) は磁場をかけない場合、図 5 (b) は + z 方向 (紙面の奥から手前向き) の磁場をかけた場合、図 5 (c) は - z 方向 (紙面の手前から奥向き) の磁場をかけた場合における測定試料 1 の表面温度分布を示す。また、図 5 (d) は、レーザ加熱の影響を除いた熱ホール効果による測定試料 1 の表面温度分布を示す。

20

【0 0 5 3】

次に、図 3 および図 5 を参照しながら、測定試料 1 において熱ホール効果により生じる温度分布について説明をする。

まず、図 5 (a) に示すように、磁場をかけない場合、すなわち熱ホール効果が生じない場合においては、レーザ 10 の楕円照射により、測定試料 1 に長軸が x 方向に沿う楕円上の表面温度分布が形成される。

【0 0 5 4】

そして、図 5 (b) に示すように + z 方向の磁場 (第 1 磁場) をかけた場合、熱ホール効果が生じる。すなわち、測定試料 1 の表面温度分布に、熱ホール効果による熱流成分による変化が含まれる。その結果、表面温度分布が回転する。この回転の向きは、熱ホール係数が負のときには、図 5 (b) に示すように + ψ 方向である。

30

【0 0 5 5】

また、図 5 (c) に示すように - z 方向の磁場 (第 2 磁場) をかけた場合においても、熱ホール効果が生じ、表面温度分布が回転する。この回転の向きは、図 5 (c) に示すように、- ψ 方向である。すなわち、- z 方向に磁場をかけた場合においては、図 5 (b) に示すように + z 方向の磁場をかけた場合とは反対向きに、表面温度分布が回転する。

【0 0 5 6】

ここで、上記の測定原理により、レーザ加熱の影響を取り除くと、図 5 (d) に示すように、熱ホール効果による温度変化が得られる。すなわち、熱ホール効果による発熱現象および吸熱現象が観察される。図 5 (d) においては、発熱現象が起こる領域 A H と、吸熱現象が起こる吸熱領域 A L とが各々 2 つずつ形成される。さらに説明をすると、周方向において領域 A H および吸熱領域 A L が交互に並ぶ、所謂四葉型が形成される。

40

【0 0 5 7】

< 動作 >

図 6 は、熱ホール効果計測装置 100 (図 1 参照) の動作を説明するフローチャートである。

次に、図 1、図 2 および図 6 を参照して、本実施の形態における熱ホール効果計測装置 100 の動作を説明する。

【0 0 5 8】

まず、磁石 7 の N 極 7 1 を測定試料 1 と対向させ、+ z 方向の磁場をかける第 1 磁場に

50

設定する (S 6 0 1)。そして、この第 1 磁場で第 1 測定を行う (S 6 0 2)。すなわち、レーザ 1 0 が測定試料 1 の上面 1 1 をスポット周期加熱し、赤外線サーモグラフィ 3 0 が温度分布を測定する。

【0 0 5 9】

次に、磁石 7 の S 極 7 3 を測定試料 1 と対向させ、- z 方向に磁場をかける第 2 磁場に設定する (S 6 0 3)。そして、第 2 磁場で第 2 測定を行う (ステップ 6 0 4)。すなわち、レーザ 1 0 が測定試料 1 の上面 1 1 をスポット周期加熱し、赤外線サーモグラフィ 3 0 が温度分布を測定する。

【0 0 6 0】

次に、第 1 測定および第 2 測定で測定される温度分布から、振幅分布算出部 5 2 が振幅の分布を算出する (ステップ 6 0 5)。また、第 1 測定および第 2 測定で測定される温度分布から、位相分布算出部 5 3 が位相分布を算出する (ステップ 6 0 6)。

【0 0 6 1】

そして、算出された振幅の分布および位相分布に基づき、温度分布算出部 5 4 が熱ホール効果による温度分布を算出する (ステップ 6 0 7)。また、算出された振幅分布および位相分布に基づき、熱ホール係数算出部 5 5 が熱ホール係数を算出する (ステップ 6 0 7)。

【0 0 6 2】

そして、算出結果表示部 5 6 が、上記算出結果である振幅分布、位相分布、温度分布、熱ホール係数をコンピュータ 5 0 の液晶ディスプレイ (不図示) などに表示する (ステップ 6 0 9)。

【0 0 6 3】

< 測定結果 >

図 7 は、通常熱拡散熱流についての測定結果を示す。さらに説明をすると、図 7 (a) は上記式 (10) で示す温度振幅 A_{normal} の分布を示し、図 7 (b) は上記式 (12) で示す位相差 φ_{normal} ($-180^\circ < \varphi_{normal} < 0^\circ$) の分布を示し、図 7 (c) は通常熱拡散熱流による温度変化の実数成分の分布 $A_{normal} \cos \varphi_{normal}$ を示す。

【0 0 6 4】

図 8 は、熱ホール効果についての測定結果を示す。さらに説明をすると、図 8 (a) は上記式 (9) で示す温度振幅 A_{THE} の分布を示し、図 8 (b) は上記式 (11) で示す位相差 φ_{THE} ($-180^\circ < \varphi_{normal} < 0^\circ$) の分布を示し、図 8 (c) は熱ホール効果による温度変化の実数成分の分布 $A_{THE} \cos \varphi_{THE}$ を示す。

【0 0 6 5】

なお、図 7 および図 8 に示す各グラフは、測定試料 1 の中心から $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の範囲で計測されている。また、各グラフの測定条件は、周波数が 12.5 Hz 、入射角が 26 deg 、磁場強さが 415 mT である。

【0 0 6 6】

次に、図 1、図 3、図 7 および図 8 を参照して、測定試料 1 を用いた測定結果を説明する。以下では実験条件を説明した後に、測定結果について詳細に説明をする。

まず、実験条件を説明する。測定試料 1 は、アーク溶解により作製した多結晶ビスマスを寸法 $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ に切断したものである。また、測定試料 1 においては、放射率向上およびレーザ光の波長における吸収率を向上させるため、表面にグラファイトをスプレーで塗布し、黒化処理を行った。レーザ 1 0 は、ファイバを増幅媒体とする青色ファイバーレーザー (445 nm 、Brix X (登録商標) $445 - 2500 \text{ HP}$ 、Omicron) を用いた。ビーム径 1.5 mm であり、測定試料 1 に対して入射角 θ は、 13 、 26 deg とした。

【0 0 6 7】

支持台 3 は、厚さ 1 mm のアルミ板で形成し、開口 3 5 は直径 12 mm とした。磁石 7 は、寸法 $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ のネオジム磁石単体であり、Halbach 配列化する

10

20

30

40

50

ことで磁束密度を強化した磁石を用いた。磁場強さは、測定試料 1 の上面 1 1 において 2 8 6 m T、4 1 5 m T であった。測定周波数は、0 . 7 8 5、1 . 5 6、3 . 1 2 5、6 . 2 5、1 2 . 5、2 5、5 0 H z とした。そして、赤外線サーモグラフィ 3 0 (H 9 0 0 0、I n f r a T e c) によって、レーザ光と同期した周波数でロックイン信号としてデータを取得した。

【 0 0 6 8 】

次に、測定試料 1 の測定結果について説明をする。まず、図 7 (a) に示すように、測定試料 1 は、最大 4 0 0 0 m K 程度の振幅で、楕円状に周期加熱されていることが確認された。また、図 7 (b) に示すように、加熱中心から楕円状に熱拡散していく様子が確認された。さらに、図 7 (a) および図 7 (b) の結果から、図 7 (c) に示すような楕円状の温度分布 $A_{normal} \cos \varphi_{normal}$ が算出された。

10

【 0 0 6 9 】

また、図 8 (a) に示すように、熱ホール効果による温度振幅は、四方に分割された分布が確認された。また、図 8 (b) に示すように、位相は 4 隅で各々 1 8 0 ° 反転していることが確認され、発熱現象と吸熱現象とが観察された。さらに、図 8 (a) および図 8 (b) の結果から、図 8 (c) に示すような温度情報が得られ、上記図 5 (d) で説明した通り、四葉型の温度分布 $A_{THE} \cos \varphi_{THE}$ が算出された。付言すると、図 8 (a) 乃至図 8 (c) は、熱ホール効果の可視化の一例である。

【 0 0 7 0 】

さて、図 7 (c) で測定された温度分布 $A_{normal} \cos \varphi_{normal}$ を用いて、熱ホール係数 R_{THE} をシミュレーションで仮定した場合の温度分布 $A_{THE} \cos \varphi_{THE}$ についての計算を行うと、 -0.027 T^{-1} とした場合において、図 8 (c) の温度分布 $A_{THE} \cos \varphi_{THE}$ とよく一致した。この -0.027 T^{-1} の値は、室温のビスマスの熱ホール係数の文献値 ($-0.02 \sim -0.03 \text{ T}^{-1}$ 程度) と、符号および値ともに類似した結果となった。すなわち、本実施の形態における測定手法の妥当性が実験的に確認された。

20

【 0 0 7 1 】

上記の通り、熱ホール効果計測装置 1 0 0 においては、測定試料 1 における小さな領域で熱ホール効果を評価することが可能となる。また、熱ホール効果計測装置 1 0 0 による測定においては、従来法よりも測定試料 1 の大きさや形状についての自由度が高い。また、熱ホール効果計測装置 1 0 0 においては、測定試料 1 を破壊せずに測定を行うことが可能である。ここで、熱ホール効果計測装置 1 0 0 は、非接触で計測を行うことにより、計測にともない測定試料 1 の温度分布を乱すことが抑制される。

30

【 0 0 7 2 】

< コンピュータ 5 0 のハードウェア構成 >

図 9 は、コンピュータ 5 0 のハードウェア構成例を示した図である。

図 9 に示すように、コンピュータ 5 0 は、演算手段である CPU (Central Processing Unit) 5 0 1 と、記憶手段であるメインメモリ 5 0 3 および HDD (Hard Disk Drive) 5 0 5 とを備える。ここで、CPU 5 0 1 は、OS (Operating System) やアプリケーションソフトウェア等の各種プログラムを実行する。また、メインメモリ 5 0 3 は、各種プログラムやその実行に用いるデータ等を記憶する記憶領域である。HDD 5 0 5 は、各種プログラムに対する入力データや各種プログラムからの出力データ等を記憶する記憶領域である。そして、コンピュータ 5 0 が備えるこれらの構成部材により、上記図 2 などで説明した各機能構成が実行される。

40

【 0 0 7 3 】

なお、コンピュータ 5 0 は、赤外線サーモグラフィ 3 0 など外部との通信を行うための通信インターフェイス (通信 I / F) 5 0 7 を備えている。また、CPU 5 0 1 が実行するプログラム (例えば、上記熱ホール係数を算出するプログラム) は、予めメインメモリ 5 0 3 に記憶させておく形態の他、例えば CD - ROM 等の記憶媒体に格納して CPU 5 0 1 に提供したり、あるいは、ネットワーク (不図示) を介して CPU 5 0 1 に提供した

50

りすることも可能である。

【0074】

< 光照射領域 H A の変形例 >

図 10 は、測定試料 1 の光照射領域 H A の変形例を説明する図である。

次に、図 10 を参照しながら、測定試料 1 の光照射領域 H A の変形例について説明をする。

上記の実施の形態においては、測定試料 1 の上面 11 に形成される光照射領域 H A を楕円形とすることを説明したが、光照射領域 H A が真円形以外の形状であればこれに限定されない。

【0075】

例えば、図 10 (a) に示すように、マイクロレンズアレイなど周知のビーム成型技術を用いることにより、光照射領域 H A 1 が直線状、すなわち略長形状に形成されてもよい。また、図 10 (b) に示すように、光照射領域 H A 2 が十字状、すなわち 2 つの略長形状が交差する形状に形成されてもよい。また、図 10 (c) に示すように、光照射領域 H A 3 が卍字状、すなわち先端が屈曲した十字状に形成されてもよい。

【0076】

< 他の変形例 >

上記の実施の形態においては、測定試料 1 の上面 11 に対してレーザ光を斜めに入射させることを説明したが、これに限定されない。すなわち、光照射領域 H A が円形でなければ、測定試料 1 の上面 11 に対して直交する向きにレーザ光を入射させてもよい。

【0077】

また、レーザ 10 から測定試料 1 までの光路に、レンズやピンホールなどの光学部材を設けてもよい。例えば、レーザ 10 の光路に高分解能顕微赤外レンズを導入してもよい。なお、高分解能顕微赤外レンズを用いることにより、測定試料 1 におけるマイクロスケールでの熱ホール効果の検出が可能となる。

【0078】

また、上記の実施の形態においては、赤外線サーモグラフィ 30 が測定試料 1 の上面 11、すなわちレーザ 10 によって測定試料 1 が加熱される側の面を測定することを説明したがこれに限定されない。例えば、測定試料 1 の下面 13、すなわちレーザ 10 によって測定試料 1 が加熱される側とは反対の面と対向する位置に赤外線サーモグラフィ 30 を設け、下面 13 における熱分布を測定してもよい。

【0079】

また、上記の説明においては、測定試料 1 が多結晶の金属材料であることを説明したが、固体の試料であれば結晶性や熱キャリアの種類は問わない。さらに説明をすると、測定試料 1 における熱キャリアは、伝導電子のみならずフォノンやマグノンであってもよい。例えば、測定試料 1 は、強磁性金属や、半導体、絶縁体などにより構成されてもよい。

【0080】

また、上記の説明においては、磁場の向きを切り替えながら、熱ホール効果の測定を行うことを説明したが、磁場の向きを変化させることは必須ではない。すなわち、差分演算をする前の温度分布から、熱ホール効果が生じた場合と生じない場合とにおける光照射領域 H A の変化が検知できれば、磁場の向きを変化させなくともよい。この場合、磁場をかけて赤外線サーモグラフィ 30 によって温度分布を測定し、熱ホール効果を生じない場合における光照射領域 H A の向きを基準としながら熱ホール効果に関する情報を算出してもよい。

【0081】

また、上記の説明においては、磁石 7 により磁場を印加しているが、磁場の印加手段（磁場印加部）は特に限定されない。例えば、磁石 7 が電磁石により代替されてもよい。

また、磁石 7 により形成される磁場の向きが z 方向に沿う向きであることを説明したが、これに限定されない。例えば、測定試料 1 において z 方向に沿う向きに温度勾配が生じていれば、磁場は z 方向と交差する向きでも熱ホール効果が生じる。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 2 】

また、測定試料 1 において、熱ホール効果が発生する大きさの磁場が形成されていれば、磁石 7 を設けなくてもよい。例えば、測定試料 1 自身が自発磁化を形成すれば、外部磁場がなくてもよい。さらに説明をすると、測定試料 1 が板面に垂直方向に磁化している構成においては、磁石 7 を設けなくてもよい。なお、磁石 7 は、磁場に比例する正常熱ホール効果を測定する場合に設けるとよい。

【 0 0 8 3 】

なお、上記の説明においては、熱ホール効果に関する情報として、熱ホール効果による温度振幅、位相、および温度分布や、熱ホール係数などを算出することを説明したが、熱ホール効果の現象を表現可能であればこれらに限定されない。例えば、式 (1) により単位磁場強さにおける熱流歪曲の割合を算出してもよい。

10

【 0 0 8 4 】

また、上記の説明においては、赤外線サーモグラフィ 3 0 を用いた外線検知に基づくサーモグラフィ法を用いることを説明したが、温度観測の手段はイメージングが可能であればこれに限定されない。例えば、光の反射率の温度依存性から温度計測を行うサーモフレクタンス法を利用してもよい。

【 0 0 8 5 】

なお、測定試料 1 は、試料の一例である。レーザ 1 0 は、加熱部および光照射部の一例である。光照射領域 H A は、領域の一例である。赤外線サーモグラフィ 3 0 は、検知部および温度検知部の一例である。熱ホール係数算出部 5 5 は、取得部および係数算出部の一例である。熱ホール効果計測装置 1 0 0 は、熱ホール効果情報取得装置および熱ホール係数計測装置の一例である。搭載板 3 1 は、支持体の一例である。開口 3 5 は、離間部の一例である。磁石 7 は、磁場形成部の一例である。

20

【 0 0 8 6 】

さて、上記では種々の実施形態および変形例を説明したが、これらの実施形態や変形例同士を組み合わせ構成してももちろんよい。

また、本開示は上記の実施形態に何ら限定されるものではなく、本開示の要旨を逸脱しない範囲で種々の形態で実施することができる。

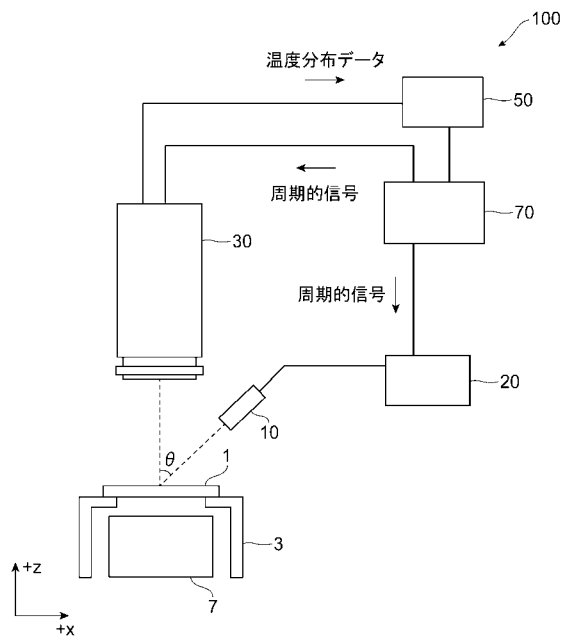
【 符号の説明 】

【 0 0 8 7 】

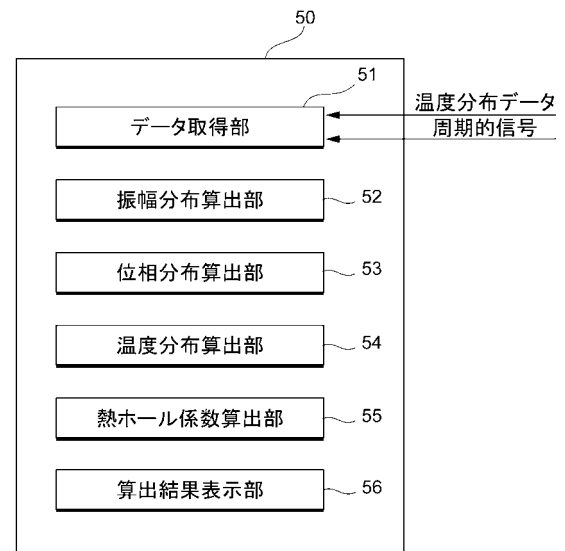
1 ... 試料、 7 ... 磁石、 1 0 ... レーザ、 3 0 ... 赤外線サーモグラフィ、 5 0 ... コンピュータ、 5 2 ... 振幅分布算出部、 5 3 ... 位相分布算出部、 5 4 ... 温度分布算出部、 5 5 ... 熱ホール係数算出部、 1 0 0 ... 熱ホール効果計測装置

30

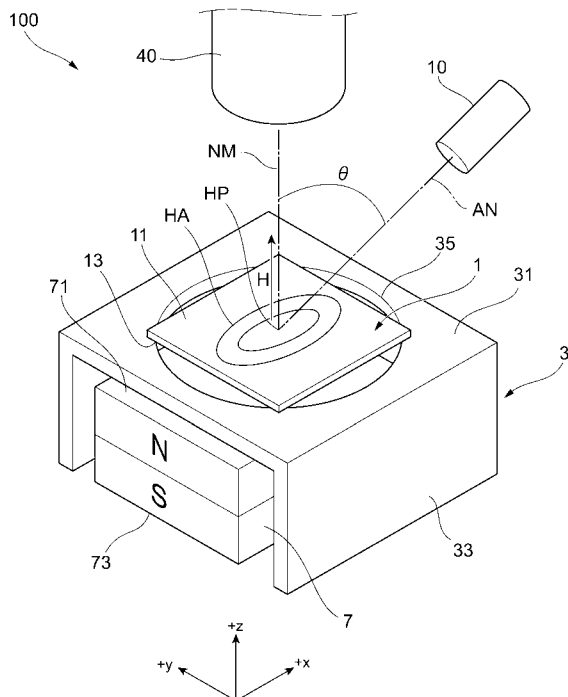
【図 1】



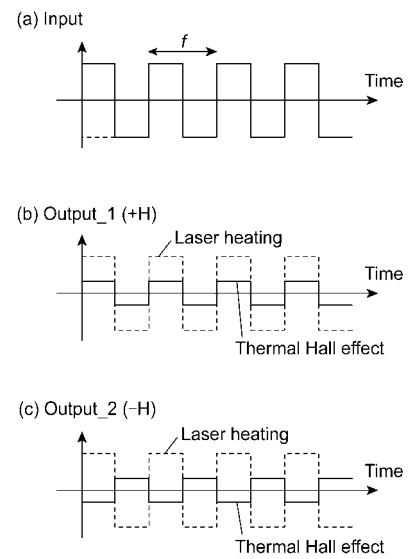
【図 2】



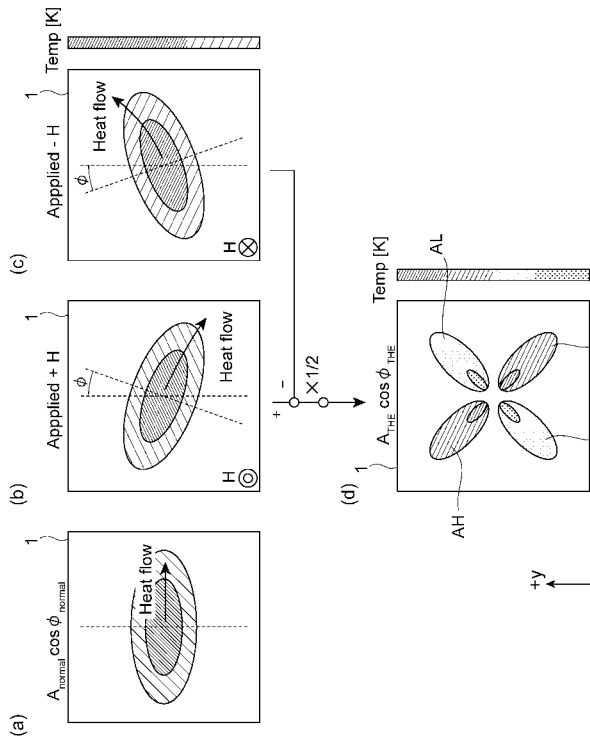
【図 3】



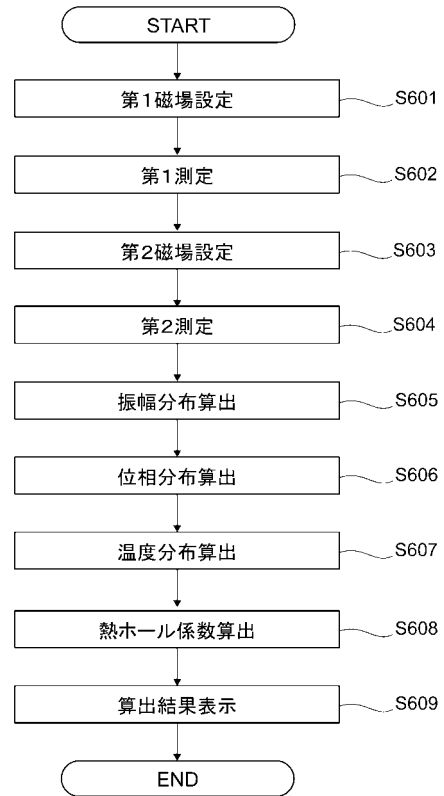
【図 4】



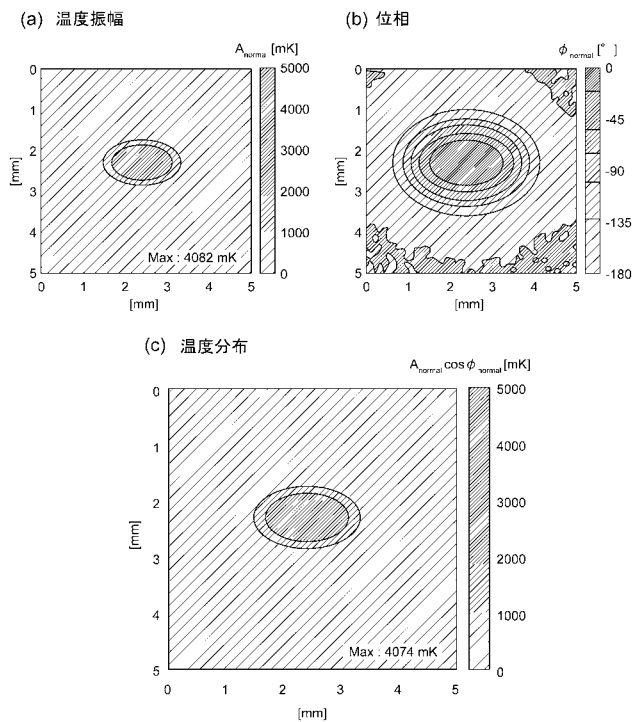
【図 5】



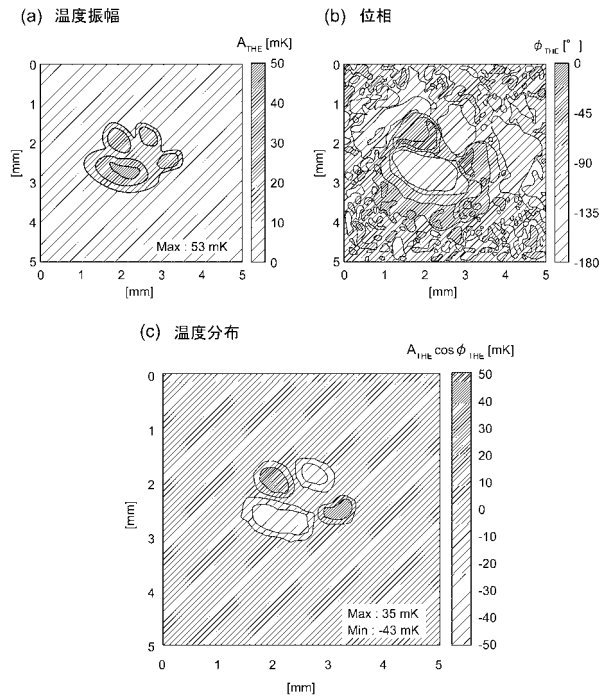
【図 6】



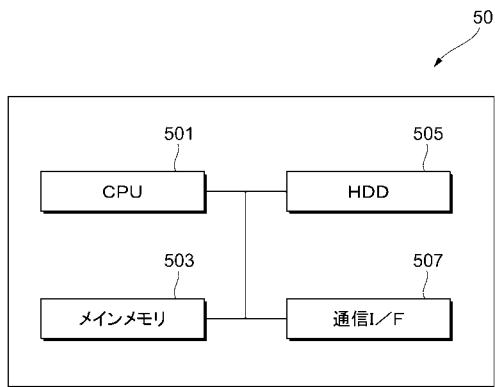
【図 7】



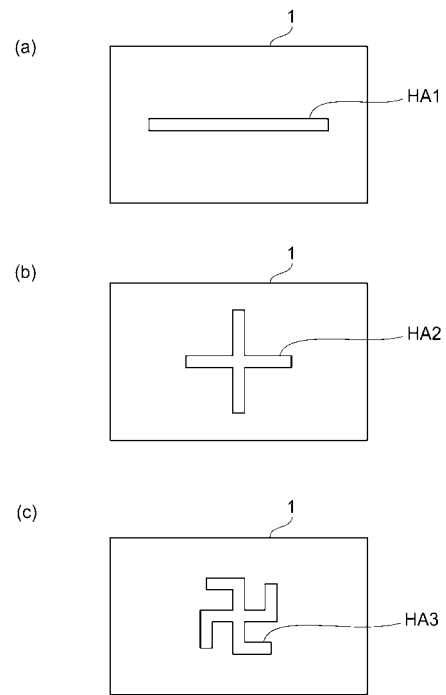
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(72)発明者 内田 健一

茨城県つくば市千現一丁目2番地1 国立研究開発法人物質・材料研究機構内

(72)発明者 井口 亮

茨城県つくば市千現一丁目2番地1 国立研究開発法人物質・材料研究機構内

Fターム(参考) 2G040 AB08 AB12 BA08 BA25 CA03 CA11 CA22 DA06 DA12 EA06
EB02 EC01 EC09 GA03 GB02 HA16