(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2016-149465
(P2016-149465A)
(43)公開日　平成28年8月18日(2016.8.18)

(51)Int.Cl.			F I			テーマコード（参考）
H01F	1/34	(2006.01)	H01F	1/34	S	4K017
B22F	9/00	(2006.01)	B22F	9/00	B	4K018
B22F	1/00	(2006.01)	B22F	1/00	K	5E041

審査請求 未請求　請求項の数 5　ＯＬ　（全 11 頁）

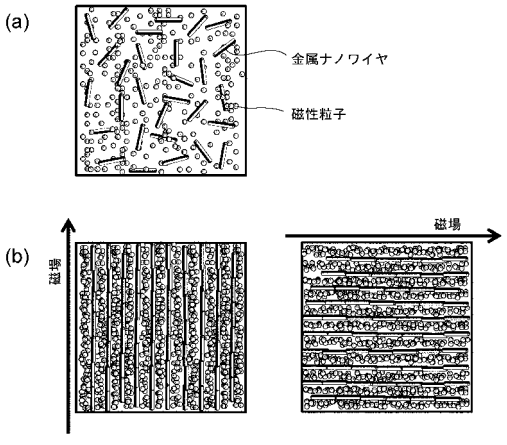
(21)出願番号　特願2015-25815(P2015-25815)
(22)出願日　平成27年2月12日(2015.2.12)

(71)出願人　506158197
公立大学法人　滋賀県立大学
滋賀県彦根市八坂町２５００
(71)出願人　304021277
国立大学法人　名古屋工業大学
愛知県名古屋市昭和区御器所町字木市２９番
(71)出願人　503027931
学校法人同志社
京都府京都市上京区今出川通烏丸東入玄武町６０１番地
(71)出願人　506334182
ＤＯＷＡエレクトロニクス株式会社
東京都千代田区外神田四丁目１４番１号

最終頁に続く

(54)【発明の名称】磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体

(57)【要約】
【課題】従来の磁性流体に比べ高い熱伝導性が得られ、かつ磁場の方向やＯＮ／ＯＦＦあるいは強／弱によって熱流方向や熱流量をコントロールすることが可能な磁気機能性流体を提供する。
【解決手段】液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤが分散しており、前記磁性粒子の平均粒子径P_Mが前記金属ナノワイヤの平均直径D_Mより小さく、前記金属ナノワイヤの平均長さL_Mと平均直径D_Mの比L_M／D_Mで表される平均アスペクト比A_Mが１０以上であり、磁性粒子の体積濃度が１．０％以上、金属ナノワイヤの体積濃度が３０ｐｐｍ以上である磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤが分散しており、外部磁場を付与することにより金属ナノワイヤがその磁場方向に沿って配向する性質を有する磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【請求項２】
液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤが分散しており、前記磁性粒子の平均粒子径P_Mが前記金属ナノワイヤの平均直径D_Mより小さく、前記金属ナノワイヤの平均長さL_Mと平均直径D_Mの比L_M／D_Mで表される平均アスペクト比A_Mが１０以上であり、磁性粒子の体積濃度が１．０％以上、金属ナノワイヤの体積濃度が３０ｐｐｍ以上である磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【請求項３】
金属ナノワイヤは、平均直径D_Mが５００ｎｍ以下のものである請求項２に記載の磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【請求項４】
磁性粒子が酸化鉄粒子である請求項１～３のいずれか１項に記載の磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【請求項５】
金属ナノワイヤが銀ナノワイヤである請求項１～４のいずれか１項に記載の磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、外部磁場を付与することにより金属ナノワイヤがその磁場方向に沿って配向する性質を有する、熱輸送デバイスに適した磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体に関する。
【背景技術】
【０００２】
本明細書では、太さが１０００ｎｍ未満の金属ワイヤの集まりを「ナノワイヤ（ｎａｎｏｗｉｒｅｓ）」と呼ぶ。粉末に例えると、個々のワイヤは粉末を構成する「粒子」に相当し、ナノワイヤ（ｎａｎｏｗｉｒｅｓ）は粒子の集まりである「粉末」に相当する。
【０００３】
液状媒体中に微細な磁性粒子をコロイド分散させた「磁性流体（Magnetic fluid）」が知られている。磁性流体は外部磁場を付与したときに磁性粒子同士が連なる性質を有するので、例えば磁場印加時にのみ２つの離れた物体（磁極）間の熱移動を担う、というような特異な機能を発揮する。磁性流体は熱輸送デバイスの作動流体として注目されている。
【０００４】
しかし、熱流は、電流と比べ精密かつ能動的な制御が難しい。また、磁性粒子が連なることによる熱伝導性の向上効果は、今後ニーズが増大すると考えられる多くの熱輸送デバイス用途において十分とは言えず、更なる改善が望まれる。
【０００５】
特許文献１には、紫外線硬化樹脂中に磁性粒子（約５０ｎｍ径の球状ニッケル）を有する磁性流体を基板上に塗布し、磁場を与えて磁性粒子のワイヤを形成し、その樹脂を固化させる技術が開示されている（段落００２１）。この場合、ワイヤは磁性粒子同士の接触によって形成されているため、そのワイヤによる熱伝導性は金属ワイヤに比べて小さいと考えられる。また、磁性粒子のワイヤを樹脂により固定しているので、磁場のＯＮ／ＯＦＦ等により熱流の状態（熱流量や方向）を変化させるタイプの熱輸送デバイスは構築できない。
【０００６】
特許文献２には、銀ナノワイヤの表面にマグネタイト粒子を形成した銀／マグネタイト

複合ワイヤが開示されている。この複合ワイヤは磁性、導電性、熱伝導性、電磁波シールド性材料などにおいて、少量の添加でネットワークを形成しうるフィラーとして有用であるという（段落００３０）。しかし、表面を覆うマグネタイト粒子は内部の金属銀より熱伝導性に劣るので、金属銀の良好な熱伝導性を活かした熱輸送デバイスを構築することができない。また、複合ワイヤを製造するための工程が必要である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００７】

【特許文献１】特開２０１１－１９０４６８号公報

【特許文献２】特開２０１２－１０２３６０号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００８】

本発明は、従来の磁性流体に比べ高い熱伝導性が得られ、かつ磁場の方向やＯＮ／ＯＦＦあるいは強／弱によって熱流方向や熱流量をコントロールすることが可能な磁気機能性流体を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【０００９】

上記目的を達成するために、本発明では、液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤが分散しており、外部磁場を付与することにより金属ナノワイヤがその磁場方向に沿って配向する性質を有する磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体が提供される。

ここで、外部磁場は外部から付与される地磁気以外の磁場を意味する。

【００１０】

より具体的には、液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤが分散しており、前記磁性粒子の平均粒子径P_Mが前記金属ナノワイヤの平均直径D_Mより小さく、前記金属ナノワイヤの平均長さL_Mと平均直径D_Mの比L_M／D_Mで表される平均アスペクト比A_Mが１０以上であり、磁性粒子の体積濃度が１．０％以上、金属ナノワイヤの体積濃度が３０ｐｐｍ以上である磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体が提供される。

ここで、ナノワイヤの平均直径、平均長さ、平均アスペクト比は以下の定義に従う。

【００１１】

〔平均直径〕

顕微鏡画像（例えばＦＥ－ＳＥＭ画像）上で、ある１本の金属ワイヤの投影像において、太さ方向両側の輪郭に接する内接円の直径をワイヤ全長にわたって測定したときの前記直径の平均値を、そのワイヤの直径と定義する。そして、ナノワイヤ（ｎａｎｏｗｉｒｅｓ）を構成する個々のワイヤの直径を平均した値を、当該ナノワイヤの平均直径と定義する。平均直径を算出するためには、測定対象のワイヤの総数を１００以上とする。

【００１２】

〔平均長さ〕

上記と同様の顕微鏡画像上で、ある１本の金属ワイヤの投影像において、そのワイヤの太さ中央（すなわち前記内接円の中心）位置を通る線の、ワイヤの一端から他端までの長さを、そのワイヤの長さと定義する。そして、ナノワイヤ（ｎａｎｏｗｉｒｅｓ）を構成する個々のワイヤの長さを平均した値を、当該ナノワイヤの平均長さと定義する。平均長さを算出するためには、測定対象のワイヤの総数を１００以上とする。

【００１３】

〔平均アスペクト比〕

上記の平均直径および平均長さを下記（Ａ１）式に代入することにより平均アスペクト比を算出する。

［平均アスペクト比］＝［平均長さ（ｎｍ）］／［平均直径（ｎｍ）］　…（Ａ１）

【００１４】

磁性粒子の平均粒子径P_Mは、レーザー回折・散乱法による体積基準の累積５０％粒子

径D_{50}の値を採用することができる。

【００１５】

上記磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体において、金属ナノワイヤは例えば平均直径D_Mが５００ｎｍ以下のものを適用することができる。金属ナノワイヤの種類としては例えば銀ナノワイヤ、銅ナノワイヤ、銅－ニッケルナノワイヤなどが挙げられる。また、磁性粒子としては例えばマグネタイト（Fe_3O_4）、マグヘマイト（$\gamma-Fe_2O_3$）の１種以上で構成される酸化鉄粒子が挙げられる。

【発明の効果】

【００１６】

本発明によれば、磁場の付与によって熱伝導の異方性を呈する熱輸送デバイスが構築できる。一定方向に配向した金属ナノワイヤ同士の直接的な接触による熱流が得られるので、金属ナノワイヤ自体の優れた熱伝導性を活かした効率的な熱輸送が可能となる。また、印加する磁場の方向やＯＮ／ＯＦＦ等によって熱流の方向や熱流量を精密にコントロールすることができる。液状媒体として例えば紫外線硬化型樹脂などを用いると、外部磁場を印加して金属ナノワイヤが金属線状に配向した状態で封止することができ、一方向のみに優れた熱伝導性を呈する異方性熱伝導体を構築することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１７】

【図１】本発明に従う磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体に外部磁場を付与したときの金属ナノワイヤの挙動を模式的に示す図。

【図２】試験磁場中における各供試流体の熱伝導率を示したグラフ。

【図３】熱伝導率の測定方法を説明するための図（供試流体を収容する円筒容器）。

【図４】熱伝導率の測定方法を説明するための図（プローブ）。

【図５】熱伝導率の測定方法を説明するための図（非定常熱線法による時間に対する温度上昇の測定結果の典型的な例を示すグラフ）。

【図６】熱伝導率の測定方法を説明するための図（ヘルムホルツコイル、ネオジム磁石の設置）。

【発明を実施するための形態】

【００１８】

図１に、本発明に従う磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体に外部磁場を付与したときの金属ナノワイヤの挙動を模式的に示す。なお、図中、金属ナノワイヤの形状は便宜的に長さ方向を極端に縮めて描いてある。また、金属ナノワイヤの体積濃度についてもかなり誇張して描いてある。

【００１９】

図１（ａ）は外部磁場を付与していない状態である。液状媒体中に磁性粒子と金属ナノワイヤがランダムに分散している。この状態では金属ナノワイヤを伝わることによる特定方向の熱流は得られない。

【００２０】

図１（ｂ）は外部磁場を付与した状態である。発明者らは、金属ナノワイヤが銀のような非磁性体であっても、周囲に微細な磁性粒子が多量に存在するときには、個々の金属ナノワイヤ同士が自ら磁場の方向に沿って配向し、しかもそれらが互いに繋がり合って長い金属線状を呈することを見いだした。磁性流体中に置かれた非磁性粒子は反磁性体であるかのように振る舞う現象が知られているが、非磁性の金属ナノワイヤの場合もこの反磁性体的挙動を示すものと考えられる。個々の金属ナノワイヤは長手方向両端部がそれぞれＮ極およびＳ極となる反磁性体を形成する。端部同士が近接しているワイヤは、互いの端部が異極の場合はそれらの端部で繋がろうとし、互いの端部が同極の場合は斥力によって遠ざかろうとする。そのため、図１（ｂ）に模式的に示されるように、磁場の方向に沿って独立した長い金属線状のワイヤ列が多数形成されるものと推察される。この長い金属線状ワイヤ列は熱を長さ方向（磁場に沿う方向）に運ぶ機能を発揮する。しかも、それぞれの金属線状ワイヤ列は独立しているために磁場に対して垂直方向への熱流は遮断されたまま

となる。本発明に従う磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体は、このようなメカニズムによって熱伝導性に顕著な異方性を呈する熱輸送デバイスの構築を可能にする。

【００２１】

金属ナノワイヤは、熱伝導性が良好であるものが好ましい。銅ナノワイヤ、銀ナノワイヤ、銅－ニッケルナノワイヤ等、現時点でナノワイヤの合成が可能となっているものが適用対象となる。なかでも、銀ナノワイヤは大量生産に適した合成技術が種々開発されており、本発明においても好適な対象となる。

【００２２】

金属ナノワイヤのサイズは、外部磁場の印加に起因した上述の配向挙動を発現しうる限り種々のサイズが許容される。直径については、あまり太いものは磁場印加時に液状媒体中での動きが緩慢になる場合がある。迅速な配向を得るためには平均直径D_Mが５００ｎｍ以下であるものが好ましい。例えば、後述の磁性粒子サイズとの兼ね合いを考慮しながら１０～５００ｎｍの範囲で調整すればよい。

【００２３】

一方、発明者らは、金属ナノワイヤのアスペクト比に関しては、磁場配向させた場合の導電性向上効果に及ぼす影響が大きいことを知見した。すなわち、金属ナノワイヤのアスペクト比が大きくなると導電性向上効果も増大する傾向がある。金属ナノワイヤの平均長さL_Mと平均直径D_Mの比L_M／D_Mで表される平均アスペクト比A_Mが１０以上であることが好ましく、４０以上であることがより好ましい。あまり高いアスペクト比を有する金属ナノワイヤを用意することは困難性を伴うので、通常、平均アスペクト比A_Mは２５０以下の範囲とすればよい。

【００２４】

金属ナノワイヤの長さについては、アスペクト比を考慮して調整すればよい。例えば平均長さL_Mを１．０～３０．０μｍの範囲で調整することが好ましい。

【００２５】

金属ナノワイヤの合成方法は、公知の種々の方法が適用できる。例えば銀ナノワイヤの場合はアルコール系溶媒を用いて有機保護剤存在下で銀イオンを還元する手法が種々開発されており、実用化も進んでいる。この手法で得られる銀ナノワイヤは、有機保護剤の種類を適切に選択することで所望の水系媒体や有機系液状媒体中で良好な分散性を呈するものを得ることができる。

【００２６】

磁性粒子は球状であることが好ましい。磁性体としては、マグネタイト（Fe_3O_4）、マグヘマイト（γ－Fe_2O_3）の１種以上で構成される酸化鉄粒子や、金属ニッケルなどが好適な対象となる。粒子サイズは、平均粒子径P_Mが金属ナノワイヤの平均直径D_Mよりも小さいことが好ましい。P_MがD_Mより大きくなると磁場印加時に金属ナノワイヤの動きを妨げる要因となり、迅速な配向を望む場合には不利となる。工業用に市販されている磁性流体を使用することもできる。ただし、金属ナノワイヤとともに液状媒体中に良好に分散するものであることが必要である。使用する液状媒体の種類や金属ナノワイヤの平均直径D_Mに応じて、適切な磁性粒子を選択することができる。

【００２７】

本発明に従う磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体を構成する液状媒体としては、磁性粒子と金属ナノワイヤがともに良好に分散するものであることが重要である。用途に応じて種々の水系媒体や有機系液状媒体が選択対象となる。例えば、水や、ケロシンなどの有機溶媒が挙げられる。また、液状媒体中には、必要に応じて界面活性剤、増粘剤や、シリコン系表面処理剤などが適宜添加される。

【００２８】

本発明に従う磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体中に存在する磁性粒子の濃度は、１．０ｖｏｌ．％以上であることが好ましく、３．０ｖｏｌ．％以上であることがより好ましい。磁性粒子濃度が高くなると磁性粒子や金属ナノワイヤの分散性を良好に維持するうえで不利となる。通常、体積濃度で例えば１０．０ｖｏｌ．％以下の範囲とすればよい。

【００２９】
また、磁場配向性金属ナノワイヤ分散流体中に存在する金属ナノワイヤの濃度は、体積濃度で３０ｖｏｌ．ｐｐｍ以上を確保することが好ましい。それより少ないと良好な熱伝導性を十分に発揮させるうえで不利となる場合がある。金属ナノワイヤの濃度が高くなると液中での分散性が低下しやすい。また、互いのワイヤが絡み合って迅速な配向を妨げる要因にもなる。通常、体積濃度で例えば１０００ｖｏｌ．ｐｐｍ以下の範囲で設定すればよく、１００ｖｏｌ．ｐｐｍ以下に管理してもよい。
【実施例】
【００３０】
〔金属ナノワイヤ〕
表１に示す（Ａ）～（Ｃ）の３種類の銀ナノワイヤを合成し、水溶媒中に保存した。合成方法を、銀ナノワイヤ（Ａ）の場合を例に挙げて、以下に説明する。
【００３１】
常温でエチレングリコール６０ｇにポリビニルピロリドン（ＰＶＰ）２．５ｇを入れ、５００ｒｐｍで撹拌しながら１０ｍｉｎかけて１３５℃まで昇温した。その後も撹拌を継続して１３５℃に維持した。１３５℃に到達した時点から１０ｍｉｎ経過後に、予め別の容器でエチレングリコール０．６ｇに溶解させておいた塩化ナトリウム０．００６ｇ（０．１ｍｍｏｌ）を添加した。塩化ナトリウム添加時点から３ｍｉｎ経過後に、予め別の容器でエチレングリコールに７．６５ｇに溶解させておいた硝酸銀０．８５ｇ（５．０ｍｍｏｌ）を添加した。硝酸銀添加後、撹拌速度を１００ｒｐｍに変更し、１３５℃で３．０ｈ保持して加熱を終了し、そのまま８０℃以下になるまで自然冷却した。８０℃以下になったのち、溶液（反応後のスラリー）の一部を遠心管に分取し、蒸留水を添加して洗浄し、３０００ｒｐｍで５ｍｉｎの遠心分離を行った。遠心分離後の上澄みを除去したのちメタノールを添加して沈殿物を洗浄し、そのメタノール分散液に２５００ｒｐｍで５ｍｉｎの遠心分離を施した。遠心分離後の上澄みを除去したのち再びメタノールを添加して沈殿物を洗浄し、そのメタノール分散液に１５００ｒｐｍで１０ｍｉｎの遠心分離を施した。その遠心分離後の上澄みを除去したのち、沈殿物を水に分散させてスクリュー管瓶に保存した。この沈殿物は銀ナノワイヤの集合体である。このようにして表１に示す銀ナノワイヤ（Ａ）を得た。
【００３２】
同様に銀ナノワイヤ（Ｂ）および（Ｃ）を得た。ただし、銀ナノワイヤ（Ｂ）はさらに金属硝酸イオンを添加した条件で合成した。銀ナノワイヤ（Ｃ）は塩素原である塩化ナトリウムの代わりにテトラブチルアンモニウムクロリドを使用した条件で合成した。
【００３３】
【表１】

表1

銀ナノワイヤ			
試料記号	(A)	(B)	(C)
平均長さL_M［μm］	11.9	32.4	19.6
平均直径D_M［nm］	67.1	421	386
平均アスペクト比A_M	177	77	51

【００３４】
〔磁性流体〕
ここでは表２に示す市販の磁性流体（ＦｅｒｏＴｅｃ社製、ＭＳＧ－Ｗ１１）を用いた。これは水系の液状媒体中にマグネタイト（Fe_3O_4）粒子とマグヘマイト（γ－Fe_2O_3）粒子の混合物が分散しているものであり、平均粒子径は１０ｎｍである。
【００３５】

【表２】

表2

磁性流体	
磁性粒子	マグネタイトおよびマグヘマイト
平均粒子径［μｍ］	10
密度［kg/m^3］	1170
飽和磁化［mT］	16
粘度［mPa･s］	1.8

〔金属ナノワイヤを含有する磁性流体〕

上記の磁性流体と銀ナノワイヤ（Ａ）～（Ｃ）のいずれか１種とを混合した流体試料を得た。比較のために磁性流体のみの流体試料も用意した。これら４種類の流体試料を供試流体として後述の熱伝導率測定に供した。表３に各供試流体の銀ナノワイヤ平均アスペクト比および組成を示す。表３中の試料記号「ＭＦ」は上記磁性流体を表し、（Ａ）～（Ｃ）は上記の各銀ナノワイヤを表す。

【００３６】

【表３】

表3

供試流体				
試料記号	MF	MF+(A)	MF+(B)	MF+(C)
銀ナノワイヤの平均アスペクト比	-	177	77	51
磁性粒子の体積濃度［vol.%］	4.1	3.8	3.8	3.8
銀ナノワイヤの体積濃度［vol.%］	0	40	47	72

【００３７】

〔流体の熱伝導率測定〕

非定常熱線法（Transient Hot Wire Method）により、供試流体の熱伝導率を測定した。磁場印加なし（Zero field）の熱伝導率、並びに磁場を印加した場合の磁場方向に対して垂直方向（Perpendicular field）および平行方向（Parallel field）の熱伝導率（Thermal conductivity）をそれぞれ求めた。具体的な測定方法は明細書末尾に付録として示してある。

【００３８】

図２に結果を示す。磁場印加なし（Zero field）の熱伝導率と、磁場垂直方向（Perpendicular field）の熱伝導率は、いずれの供試流体においてもほとんど変わらなかった。

磁場平行方向（Parallel field）の熱伝導率を見ると、銀ナノワイヤを含有しない供試流体（ＭＦ）では磁場印加なしの場合に対し熱伝導率の向上は＋３％程度であったが、銀ナノワイヤを含有する供試流体では＋９～＋１５％の向上が認められた。磁場印加による銀ナノワイヤの配向が熱輸送に有効に機能していることが確認された。

【００３９】

また、使用する銀ナノワイヤのアスペクト比が大きいほど磁場平行方向の熱伝導率向上効果が増大する傾向が見られた。例えば銀ナノワイヤの平均アスペクト比が１７７と大きい供試流体ＭＦ＋（Ａ）と、５１と小さい供試流体ＭＦ＋（Ｃ）を対比すると、前者は後者より銀ナノワイヤ体積濃度が大幅に小さいにもかかわらず、磁場平行方向の熱伝導率向上効果は前者が勝っている。このことから、磁場平行方向の熱伝導率向上効果については、ワイヤの体積濃度に比べ、アスペクト比の方がより支配的であると言える。

【００４０】

以上のように、磁性流体に、体積濃度が数十ｐｐｍオーダーという少量の金属ナノワイ

ヤを添加するだけで、磁場平行方向の熱伝導性を顕著に向上させることが可能となる。

【００４１】

《付録》非定常熱線法による供試流体の熱伝導率測定方法

非定常熱線法（Transient Hot Wire Method）により、供試流体の熱伝導率測定を行った。装置はクリマテック社製のＴＰＳＹＳ０２及びＴＰ０８である。この方法では、円筒状の容器（ガラス製）に１８０ｍｌの試料を入れ、円筒軸に測定プローブを鉛直方向に設置する。プローブからの入熱に関する模式図を図３に示す。

【００４２】

図３に示すようにプローブから円筒状の試料に対し、ステップ関数的に半径方向に入熱する。加熱により、供試流体の物性値に従って温度が上昇する。このときプローブ内に設置された熱電対により温度の測定を行う。プローブの模式図を図４に示す。プローブには、二点の温度センサーが内蔵されており、図４におけるベース部の白金測温抵抗体での測定温度を基準温度として、ニードル部の熱電対にて、供試流体の温度上昇を随時測定する。

【００４３】

非定常熱線法は、非定常熱伝導方程式に従って測定できる。以下に円筒座標系の場合の支配方程式を示す。

【数１】

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{c_p\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{1}$$

ｒは円筒軸からの位置である。ここで初期温度をT_0とし、温度差を

$\theta = T - T_0$

とおく。このとき初期条件及び境界条件は次のようになる。

【数２】

$$\begin{cases}\theta(r,t)=0\ [r>0,t=0]\\ \theta(r,t)=0\ [r\to\infty,t>0]\\ q=-2\pi\lambda\dfrac{\partial\theta}{\partial r}\ [r\to 0(r=r_0),t>0]\end{cases} \tag{2}$$

ただしr_0は細線の半径である。以上の条件より熱伝導方程式の解を次のように導くことができる。

【数３】

$$\theta=\frac{q}{4\pi\lambda}\left\{E_i\left(\frac{r_0^2}{4\alpha t}\right)\right\} \tag{3}$$

$$\left(E_i(x)=\int_x^\infty z^{-1}e^{-z}dz=-0.5772\cdots+\ln(1/x)+(x/1.1!)-(x^2/2.2!)+\cdots\right)$$

従って式（３）は

【数４】

$$\begin{aligned}\theta&=\frac{q}{4\pi\lambda}\left\{\ln\left(\frac{4\pi t}{r_0^2 C}\right)-0.5772+\cdots\right\}\\ &\approx\frac{q}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{4\pi t}{r_0^2 C}\right)\qquad\left(\mathrm{C}=\exp\{0.5772\cdots\}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

となる。更に熱伝導率λに関して式を整理すると

【数５】

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda}\left\{\ln\left(\frac{4\pi}{r_0^2 C}\right) + \ln(t)\right\}$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\theta}{d(\ln(t))} = \frac{q}{4\pi\lambda}$$

$$\therefore \lambda = \frac{q/4\pi}{d\theta/d(\ln(t))} \qquad (5)$$

となる。以上より式（５）によって時間ｔの自然対数に対する温度差θの傾きを得ることで、熱伝導率を測定することができる。

【００４４】

実験は温度が２５℃一定となる恒温室内で行う。供試流体の対流現象による測定誤差を軽減させるために、プローブの温度測定点における試験液温度が一定（１分間での温度変化が０．１℃以内）になるまで、おおよそ１５分待機し、実験を行う。入熱量は５Ｗ／ｍである。

【００４５】

非定常熱線法による、時間に対する温度上昇の測定結果の典型的な例を図５に示す。区間（ａ）では電流の入力に対する発生熱量の一次遅れがある。また区間（ｃ）では温度差が大きくなることで発生する自然対流の影響がある。そのため区間（ｂ）の時間ｔの自然対数に対する温度差θの傾きを用いて式（５）により、熱伝導率を求める。

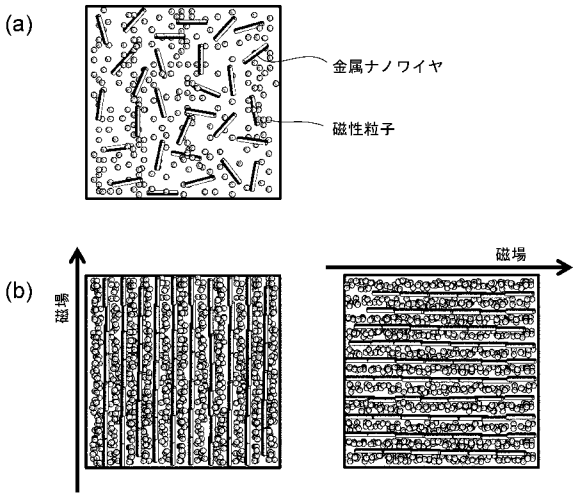
【００４６】

測定装置では、円筒容器内において半径方向（水平方向）に加熱が行われる。磁場印加は二種類あり、鉛直方向にはヘルムホルツコイルによる磁場、水平方向にはネオジム磁石による磁場を印加する。図６にヘルムホルツコイル及びネオジム磁石の設置方法を模式的に示す。供試流体の入っている円筒容器（図３）を、磁場垂直方向（Perpendicular field）の熱伝導率を測定するときには上下のヘルムホルツコイルの間にセットし、磁場平行方向（Parallel field）の熱伝導率を測定するときには左右のネオジム磁石の間にセットする。

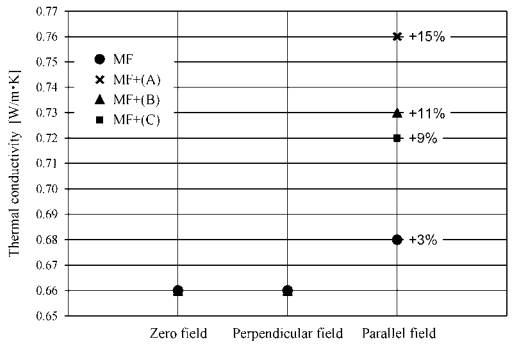
【００４７】

ヘルムホルツコイル内は一様な磁場分布となる。それに対し、ネオジム磁石間では非一様となる。図６内に記載される表には、温度測定点を原点とした場合のネオジム磁石間方向の磁束密度を容器寸法で測定した値が示されている。非定常熱線法では、温度測定領域が非常に微小であるため、その領域においては一様であるとみなす。

【図１】



【図２】



【図３】

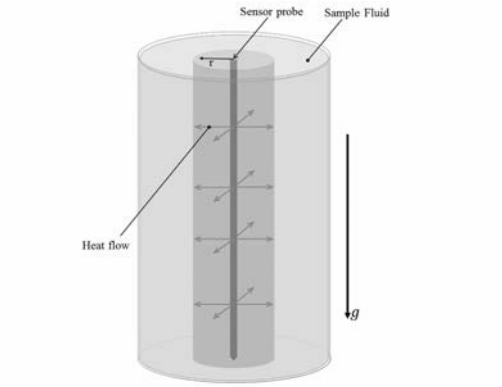


Fig . Schematic diagram of heat input from the probe

【図４】

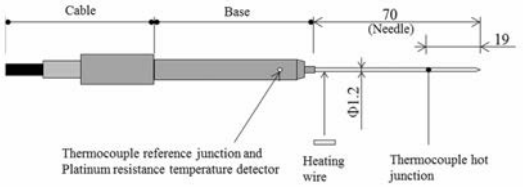


Fig . Schematic diagram of sensor probe (TP08)

【図５】

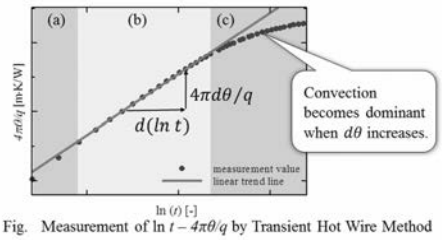


Fig. Measurement of $\ln t - 4\pi\theta/q$ by Transient Hot Wire Method

【図６】

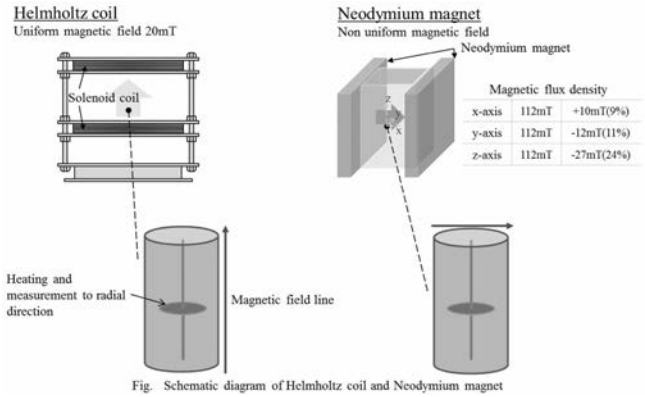


Fig. Schematic diagram of Helmholtz coil and Neodymium magnet

フロントページの続き

(74)代理人 100129470
弁理士 小松 高
(72)発明者 バラチャンドラン ジャヤデワン
滋賀県彦根市八坂町２５００ 公立大学法人滋賀県立大学内
(72)発明者 クヤ ウアマン ジョン レマン
滋賀県彦根市八坂町２５００ 公立大学法人滋賀県立大学内
(72)発明者 井門 康司
愛知県名古屋市昭和区御器所町 国立大学法人名古屋工業大学内
(72)発明者 岩本 悠宏
京都府京田辺市多々羅都谷１－３ 同志社大学内
(72)発明者 佐藤 王高
東京都千代田区外神田四丁目１４番１号 ＤＯＷＡエレクトロニクス株式会社内

Ｆターム(参考) 4K017 AA02 AA08 BA02 BA05 CA04 CA07 CA08 DA01 DA07
4K018 BA01 BB02 BB04 BB05 BD01 BD04 KA33
5E041 AB11 AB19 BD07 CA10