

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6273365号  
(P6273365)

(45) 発行日 平成30年1月31日(2018.1.31)

(24) 登録日 平成30年1月12日(2018.1.12)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 N 25/72 (2006.01)

G O 1 N 25/72

K

請求項の数 20 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2016-536829 (P2016-536829)	(73) 特許権者	506398025
(86) (22) 出願日	平成26年12月3日 (2014.12.3)		ワットロー、エレクトリック、マニファ
(65) 公表番号	特表2016-539340 (P2016-539340A)		クチュアリング、カンパニー
(43) 公表日	平成28年12月15日 (2016.12.15)		アメリカ合衆国ミズリー州セントルイス、
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/068275		ラックランド ロード 12001番
(87) 国際公開番号	W02015/084909	(74) 代理人	100107766
(87) 国際公開日	平成27年6月11日 (2015.6.11)		弁理士 伊東 忠重
審査請求日	平成29年11月24日 (2017.11.24)	(74) 代理人	100070150
(31) 優先権主張番号	14/097, 143		弁理士 伊東 忠彦
(32) 優先日	平成25年12月4日 (2013.12.4)	(74) 代理人	100091214
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 大貫 進介
早期審査対象出願		(72) 発明者	ノスラティ、モハマド
			アメリカ合衆国 94065 カリフォル
			ニア州、レッドウッド シティ、カヌー・
			コート 407
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 サーモグラフィ検査システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体の外表面に着脱可能に取り付けられるように構成された熱源と、  
 前記熱源の熱画像を取得する熱撮像装置と、  
 前記熱画像に基づいて、前記物体内にある欠陥の位置を決定する分析装置と、を備え、  
 前記熱源は、前記物体と前記熱撮像装置との間に配置され、  
 前記分析装置は、前記熱源が前記物体に取り付けられているときに、前記熱源の面温度  
 を決定して、前記物体内にある欠陥の位置を決定する、  
 サーモグラフィ検査システム。

【請求項 2】

前記熱源はシート形状を有するヒーターである、請求項1に記載のサーモグラフィ検査  
 システム。

【請求項 3】

前記熱源は熱を生じ、該熱は熱伝導により前記物体の外表面に伝わる、請求項1記載の  
 サーモグラフィ検査システム。

【請求項 4】

前記熱源は前記物体の外表面に直接接触した、請求項1に記載のサーモグラフィ検査シ  
 ステム。

【請求項 5】

前記熱源は前記ヒーターを前記外表面に結合する接着フィルムをさらに含む、請求項2

10

20

に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 6】

前記熱源は独立的に制御可能な複数の加熱素子を含む、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 7】

前記複数の加熱素子は、前記物体の外表面に沿って配置された、請求項6に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 8】

前記複数の加熱素子は異なって通電され、異なる熱エネルギーを提供する、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

10

【請求項 9】

前記複数の加熱素子は、同時に通電される、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 10】

前記熱源は、ポリイミドヒーターを含む、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 11】

前記熱撮像装置は赤外線カメラを含む、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 12】

20

前記赤外線カメラは、所定の時間にわたって複数の熱画像を取得する、請求項11に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 13】

前記分析装置は、前記外表面の温度上昇に基づいて前記欠陥の位置を決定する、請求項1に記載のサーモグラフィ検査システム。

【請求項 14】

物体を検査する方法であって、  
着脱可能に物体の外表面に熱源を取り付ける工程と、  
前記熱源を通電して、熱を生じさせる工程と  
前記熱を熱伝導により前記物体の外表面に伝える工程と、  
前記熱源が前記物体の外表面に取り付けられているときに、前記熱源の外表面の熱画像  
を取得する工程と、  
前記熱画像に基づいて、前記物体内にある欠陥の位置を決定する工程と、を備える方法。

30

【請求項 15】

接着フィルムを用いて、着脱可能に前記物体の外表面に前記熱源を取り付ける、請求項14に記載の方法。

【請求項 16】

前記熱源は、複数の抵抗加熱素子を含む、請求項15に記載の方法。

【請求項 17】

40

前記複数の抵抗加熱素子を独立的に制御する工程をさらに備える、請求項16に記載の方法。

【請求項 18】

前記複数の抵抗加熱素子を前記物体の外表面に沿ってアレイ状に並べる工程をさらに備える、請求項16に記載の方法。

【請求項 19】

前記複数の抵抗加熱素子の各々に対応する位置で前記外表面の温度を分析して、前記欠陥の位置を決定する工程をさらに備える、請求項16に記載の方法。

【請求項 20】

物体を検査する方法であって、

50

着脱可能に物体の外表面に熱源を取り付ける工程と、  
熱伝導により、前記熱源から前記物体の外表面を通して前記物体に熱を入れる工程と、  
前記熱源が前記物体の外表面に取り付けられているときに、前記熱源の外表面の熱画像  
を取得する工程と、  
前記熱画像に基づいて、前記物体内にある欠陥の位置を決定する工程と、を備える方法  
。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本開示は、非破壊検査(NDT)に関し、より詳細には、物体を検査するサーモグラフィ検査システム及び方法に関する。

#### 【背景技術】

#### 【0002】

このセクションにおける記述は、本開示の関した背景となる情報を提供するにすぎず、従来技術を構成するものとしてはならない。

#### 【0003】

非破壊検査(NDT)は、概して、物体への外部励起を取り入れて、物体の材料特性を恒久的に変化させることなく物体を調べを伴う。サーモグラフィは非破壊検査技術の一つであり、外部のエネルギー源を用いて物体を加熱し、物体内の欠陥領域と非欠陥領域との温度差を引き起こす。一般的に知られているサーモグラフィ検査技術の一つは、キセノンフラッシュランプ等のフラッシュランプからのパルス光が物体に伝わる光学的励起を用いる。光が物体の外表面にたどりつくると、光が熱に変換され、その熱が熱波の形で物体の内部に伝搬する。熱波の伝搬は、熱波が物体の欠陥又は空隙に衝突すると、妨げられ、熱波は物体の外表面に戻るよう反射する。反射した熱波は外表面での局所的な温度上昇を引き起こす。赤外線カメラを用いて熱画像、つまり、外表面の温度パターンを撮影してもよい。外表面での温度差を分析することによって、欠陥又は空隙の位置を決定することができる。

#### 【0004】

光学的励起による典型的なサーモグラフィには制約がある。熱波を物体の内部に取り入れるフラッシュランプの能力は、調べられる物体の光学的特性に高く依存する。高い反射性と低い透過性を有する物体はその物体の外表面で、そこから離れる方向にパルス光を容易に反射するため、変換して、物体に侵入する熱は少なくなる。結果として、物体に侵入する熱は、熱画像カメラを用いて容易に視認できる、許容範囲内における面温度差を引き起こすには十分でない可能性がある。

#### 【0005】

さらに、光学的励起によるサーモグラフィは、環境による反射と面形状により簡単に影響を受けてしまうため、複雑な形状と曲率を有する物体については用いることができない。

#### 【発明の概要】

#### 【0006】

本開示の一態様においては、熱源と、熱撮像装置と、分析装置とを含むサーモグラフィ検査システムを提供する。前記熱源は、着脱可能に物体の外表面に取り付けられるように構成される。前記熱撮像装置は、前記物体の熱画像を取得する。前記分析装置は、前記熱画像に基づいて前記物体内の欠陥の位置を決定する。

#### 【0007】

本開示の他の態様においては、物体を検査する方法であって、着脱可能に熱源を物体の外表面に取り付ける工程と、前記熱源を通電して熱を生じさせる工程と、前記熱を熱伝導により前記物体の外表面に伝える工程と、前記外表面の熱画像を取得する工程と、前記熱画像に基づいて前記物体内にある欠陥の位置を決定する工程と、を備える方法である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 8 】

本開示のさらに他の態様においては、物体を検査する方法であって、熱伝導により、前記物体の外表面を通して前記物体に熱を入れる(injecting)工程と、前記外表面の熱画像を取得する工程と、前記熱画像に基づいて、前記物体内にある欠陥の位置を決定する工程と、を備える方法である。

## 【 0 0 0 9 】

さらなる適用可能な技術分野は、本開示で提供する記載から明らかとなる。記載と特定の実施例は説明のみを目的としており、本開示の範囲を限定することを意図していないと理解されるべきである。

## 【 図面の簡単な説明 】

10

## 【 0 0 1 0 】

本開示が十分に理解されるように、添付の図面を参照し、実施例により本開示の種々の態様を記載する。

## 【 0 0 1 1 】

【 図 1 】 図1は、本開示の教示に従って構成したサーモグラフィ検査システムの概略図である。

## 【 0 0 1 2 】

【 図 2 】 図2は、本開示の教示に従って構成したサーモグラフィ検査システムのピクセルヒーター(pixel heater)の断面図である。

## 【 0 0 1 3 】

20

【 図 3 】 図3は、本開示の教示に従って構成したサーモグラフィ検査システムのピクセルヒーターの平面図である。

## 【 0 0 1 4 】

【 図 4 】 図4は、本開示の教示に従って構成した物体を検査する方法のフロー図である。

## 【 0 0 1 5 】

本開示で記載した図面は、説明のみを目的としており、いかなる方法によっても本開示の範囲を限定することを意図していない。

## 【 発明を実施するための形態 】

## 【 0 0 1 6 】

以下の記載は、本質的に例示に過ぎず、本開示、用途又は使用を限定することを意図していない。

30

## 【 0 0 1 7 】

図1に示すように、本開示の教示に従ったサーモグラフィ検査システム10は、ピクセルヒーター12(pixel heater)と、制御システム14とを含む。制御システム14は、ピクセルヒーター12を制御するヒーターコントローラ18と、ピクセルヒーター12の熱画像を取得する撮像装置16(熱撮像装置)と、物体26内にある欠陥又は空隙(void)等の、内部構造の位置を決定(determine)する分析装置20とを含む。ピクセルヒーター12は、シート形状に形成され、着脱可能に物体26の外表面28に取り付けられる。用語「シート」は本明細書においては、広く、概して平らな、素材をいう。シート形状は、長方形、正方形、円形若しくは三角形等の多くの全体形状をとってよく又は、特定の物体26にフィットするカスタム形状でもよい。好ましくは、ヒーター12のシート形状は可撓性があり、分析される物体26の曲面に適応する。同様に、シート形状そのものが特定の用途のための曲面、つまり、シート状の素材が曲線を付けて作られて、人間の形に合った衣服に形付けられるかのように、物体26に概ね対応する曲面を有してもよい。

40

## 【 0 0 1 8 】

ピクセルヒーター12は自己接着フィルム(self-adhesive film)30をさらに含んでもよい。接着フィルム30は、ピクセルヒーター12を物体26の外表面28に取り付ける及び、ピクセルヒーター12を物体26の外表面28から取り除くのを容易にする。したがって、ピクセルヒーター12は、物体26の外表面28に直接接触している。あるいは、ピクセルヒーター12からの熱が熱伝導により物体26に伝わることができ、物体26の熱画像が撮像装置16により撮

50

影できるのであれば、本開示の範囲を逸脱することなく、ピクセルヒーター12は、ピクセルヒーター12と物体26の外表面28との間に一以上の材料層(図示せず)を配置して、物体26上に配置されてもよい。例えば、接着フィルム30はピクセルヒーター12と一体的に形成されている必要はなく、別々に形成され、物体26にピクセルヒーター12を取り付けるときに、利用のために提供されてもよい。さらには、いくつかの用途においては、接着剤が必要ではない可能性があり、ピクセルヒーター12を物体26の外表面上に直接置いてよい。

【0019】

図1に示すように、物体26の外表面28は平面で示しているが、ピクセルヒーター12はシート形状と可撓性により、平面でない面、又は複雑な形状若しくは曲率を有する物体に容易に適用し得る。

【0020】

図2及び図3に示すように、ピクセルヒーター12は、基板32と、基板32上に配置された誘電体層34と、誘電体層34上に配置された抵抗加熱層36と、抵抗加熱層36上に配置され、この層を封入する(encapsulate)保護層38とを含む。ピクセルヒーター12は、外表面40を有し、その面は、保護層38の上表面である。抵抗加熱層36は、複数の抵抗加熱素子42を有し、それらは、ヒーターコントローラ18によって独立的に制御可能であり、アレイ状に並べられた複数の加熱ゾーン44に配置される(図3)。複数の抵抗加熱素子42は、物体26の外表面28に沿って並べられているとともに、物体26の外表面28に近接して配置されている。したがって、複数の抵抗加熱素子42からの熱エネルギーが熱伝導により物体の関心領域に対してより正確に伝わるとともに、物体26の反射性と透過性に影響されない。本明細書における抵抗加熱素子42の各々は、制御システムによって制御される。制御システムは、種々の態様でよい。そのいくつかは、係属の "System and Method for Controlling a Thermal Array" と題する、米国特許出願第13/598,939号及び、"Thermal Array System" と題する、米国特許出願第13/598,877に詳説されている。いずれの出願も本願と同一出願人によるものであり、それらの開示の全ての内容は、ここに参照として援用される。概して、制御システムは、抵抗加熱素子42と通信する複数の電力線と、電力線及び抵抗加熱素子42と電気的に通信するアドレス可能な複数の制御素子と含み、ピクセルヒーター12の選択的な制御を提供する。

【0021】

ピクセルヒーター12は、層状ヒーターでよい。そこでは、誘電体層34、抵抗加熱層36及び保護層38を含む複数の機能的な層が、厚膜、薄膜、溶射及びソルゲル等の層状処理によって形成される。小さい四角または「ピクセル」として図示されているが、抵抗加熱素子42は、細長い形状(form of elongated strips)、同心円の形状等をとってもよい。または、ピクセルヒーター12はポリイミドヒーターでもよい。ピクセルヒーター12は、種々の態様で電源(図示せず)に電気的に接続される。種々の態様は、"High Definition Heater and Method of Operation" と題する、米国特許出願第13/599,648号に記載されているものを含み、同出願は本願と同一出願人によるものであり、その開示の全ての内容は、ここに参照として援用される。

【0022】

図1に戻ると、サーモグラフィ検査システム10のヒーターコントローラ18はピクセルヒーター12の複数の抵抗加熱素子42を起動して、熱を生じさせるようにすることができる。熱は、物体26に向けて、熱波の形式で伝搬する。熱波が物体26の内部に向かって伝搬し、欠陥24に衝突すると、熱波は欠陥24で反射され、ピクセルヒーター12の外表面40に向かって進む。矢印Xは、複数箇所でのピクセルヒーター12の外表面の熱強度を示す。線分Aは、ピクセルヒーター12の外表面40に沿った熱エネルギー分布を示す。示されたように、熱エネルギーは、反射した熱波によって欠陥24が存在する場所で高くなっている。

【0023】

撮像装置16は、赤外線カメラでよいのであるが、ピクセルヒーター12の外表面40の熱画像を撮影する。すべての物質は温度に基づいて赤外線放射をすること、物体により放射された赤外線の量はその温度に応じて増加することが知られている。したがって、赤外線力

10

20

30

40

50

メラは、ピクセルヒーター12の外表面40の複数の熱画像を記録することによって、ピクセルヒーター12の外表面40の温度変化(variations)を撮影することができる。

【0024】

複数の熱画像は、ヒーターコントローラ18が抵抗加熱素子42を起動し次第、連続的に記録される。複数の熱画像の各々は、複数の加熱ゾーン44に対応する複数のピクセルを含む。熱画像における複数のピクセルの各々は、ピクセルヒーター12の外表面の温度を表す色を有する。一以上のピクセルの色が隣接するピクセルの色とは著しくずれているときは、ピクセルに対応する特定の加熱ゾーン44は、残りの領域よりも高い又は低い温度を有していると判定することができる。したがって、欠陥が、物体26の内部のその特定の加熱ゾーン44のすぐ下にあること判定することができる。

10

【0025】

撮像装置16によって撮影された画像は、分析装置20に送られる。分析装置20は、熱画像を分析し、面温度を計算し、欠陥の位置を決定する。分析装置20は、次の方程式を用いて面温度を計算してもよい。

$$T_{surf}(t) - T_{surf}(0) = \frac{Q}{k\rho c\sqrt{\pi t}}$$

ここで、 $T_{surf}(t)$ は、時間 $t$ における面温度であり、 $T_{surf}(0)$ は、時間0における面温度であり、 $Q$ は単位面積当たりの入力熱エネルギーであり、 $k$ は熱伝導率であり、 $\rho$ は密度であり、 $c$ は熱容量である。

20

【0026】

したがって、分析装置20は、ピクセルヒーター12の面温度を決定することができ、特定の加熱ゾーン44が他の加熱ゾーン44よりもより高い温度を有しているかどうかを決定する。そして、分析装置20は、より高い温度を有している特定の加熱ゾーンと欠陥がある場所を割り出す。

【0027】

図4に示すように、物体を検査する方法50は、ステップ52において、着脱可能にピクセルヒーター12を物体26の外表面上に取り付けることから始める。ステップ54において、複数の抵抗加熱素子42起動されて、熱を放出するようにしてもよい。複数の抵抗加熱素子42は、用途に応じて、同時に又は別々に起動されてもよい。抵抗加熱素子42が起動され次第、ステップ56において、撮像装置16は、熱画像の記録を始め、所定の期間にわたってピクセルヒーター12の外表面の熱画像を連続的に記録する。ステップ58にて、複数の熱画像はピクセルヒーター12の外表面40の温度パターン又は温度差を分析する分析装置20に送られる。そして、分析装置は、複数の熱画像に基づいて、どの加熱ゾーン44が他の加熱ゾーン44よりもより高い温度を有しているか、及び欠陥又は空隙24等の内部構造の場所を決定する。

30

【0028】

本開示のサーモグラフィ検査システムは、熱源から物体26の外表面28への直接的な熱伝導により物体への高い熱伝搬性有するという効果を有する。抵抗加熱素子42は、調べられる物体26に近接して配置されるため、熱が、関心領域により速く指向される。ピクセルヒーター12は熱伝導により熱を物体26に伝えるため、本開示のサーモグラフィ検査システム10は、真空やプラズマなどの非大気環境下で 사용할 ことができ、励起源と調べられる物体との間にある伝達媒体(大気)が、光の伝送(transmission)及び、そこから変換された熱に影響を与えるフラッシュランプとは対照的である。

40

【0029】

さらに、本開示によるサーモグラフィ検査システムは、独立的に制御可能な複数の抵抗加熱素子42を有するピクセルヒーター12により、特定の領域の熱励起(heat excitation)が、異なる時間依存の分析又は用途に依存したサイクル化で適用されうる。物体26に入れ

50

られた熱量は、抵抗加熱素子42の出力と通電時間を制御することによって容易に制御される。

【0030】

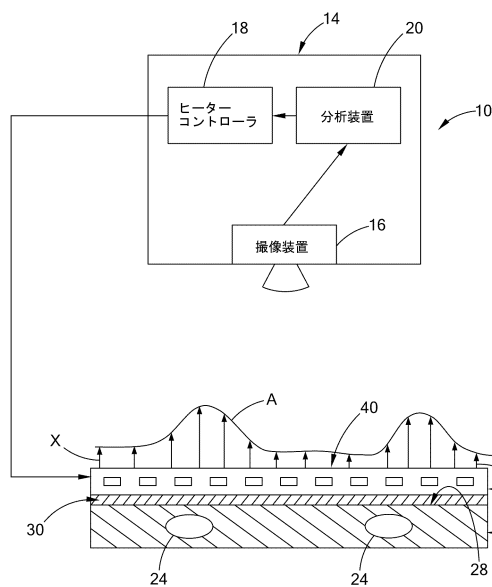
さらに、本開示によるサーモグラフィ検査システムは、ピクセルヒーター12がシート形状を有し、任意の物体上に容易に配置することができるため複雑な形状や曲率を有する物体を検査するのに用いることができる。ピクセルヒーター12は、設置面積が比較的小さいため、スペースが限られている環境下でも使用することができる。

【0031】

本開示は、実施例として記載され、図示された実施形態に限られないことに留意すべきである。多くの種々の修正が記載されており、それ以上のことが本技術分野の当業者の知識の一部である。技術的等価性による任意の置換とともに、本開示の保護範囲と本特許の範囲を置き去りにすることなく、これら及びさらなる修正が本明細書及び図面に追加されてもよい。

10

【図1】



【図2】

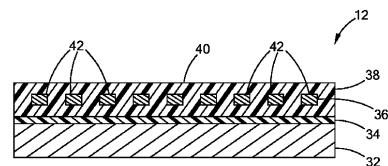


FIG. 2

【図3】

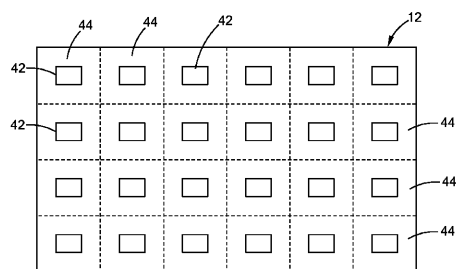
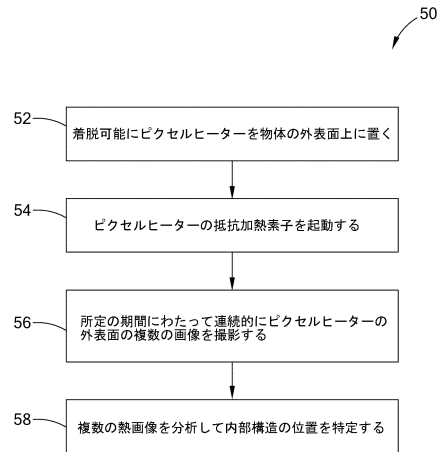


FIG. 3

## 【図 4】





---

フロントページの続き

- (72)発明者 スワンソン, カル  
アメリカ合衆国 6 3 1 3 9 ミズーリ州, セントルイス, ローン・アベニュー 3 3 0 7, アパ  
ートメント 4
- (72)発明者 プタシエンスキ, ケヴィン  
アメリカ合衆国 6 3 3 6 8 ミズーリ州, オファロン, アイリッシュ・ハウンド・ドライブ 2  
2 0
- (72)発明者 スミス, ケヴィン, アール  
アメリカ合衆国 6 5 2 0 3 ミズーリ州, コロンビア, カスケーズ・ドライブ 6 5 0 3
- (72)発明者 スタインハウザー, ルイス, ピー  
アメリカ合衆国 6 3 1 2 9 ミズーリ州, セントルイス, クリップル・クリーク・ドライブ 2  
4 4 8

審査官 伊藤 幸仙

- (56)参考文献 特開 2 0 0 6 - 1 8 9 4 1 0 ( J P , A )  
特開平 9 - 2 8 1 0 6 4 ( J P , A )  
特開平 5 - 3 1 2 7 4 5 ( J P , A )  
米国特許第 9 5 1 8 9 4 6 ( U S , B 2 )

- (58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)  
G 0 1 N 2 5 / 7 2