

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5197624号  
(P5197624)

(45) 発行日 平成25年5月15日 (2013.5.15)

(24) 登録日 平成25年2月15日 (2013.2.15)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 N 25/72 (2006.01)

GO 1 N 25/72 K

GO 1 N 29/00 (2006.01)

GO 1 N 29/00 5 O 1

GO 1 N 29/04 (2006.01)

GO 1 N 29/10 5 O 6

GO 1 J 5/48 (2006.01)

GO 1 J 5/48 A

GO 1 J 5/48 D

請求項の数 17 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2009-540331 (P2009-540331)  
 (86) (22) 出願日 平成19年12月6日 (2007.12.6)  
 (65) 公表番号 特表2010-512509 (P2010-512509A)  
 (43) 公表日 平成22年4月22日 (2010.4.22)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2007/025229  
 (87) 国際公開番号 W02009/035445  
 (87) 国際公開日 平成21年3月19日 (2009.3.19)  
 審査請求日 平成22年11月9日 (2010.11.9)  
 (31) 優先権主張番号 11/567, 405  
 (32) 優先日 平成18年12月6日 (2006.12.6)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 598028028  
 ロッキード マーティン コーポレイショ  
 ン  
 Lockheed Martin Cor  
 poration  
 アメリカ合衆国 20817 メリーラン  
 ド州, ベセスダ, ロックリッジ ドライブ  
 6801  
 (74) 代理人 110000855  
 特許業務法人浅村特許事務所  
 (74) 代理人 100066692  
 弁理士 浅村 皓  
 (74) 代理人 100072040  
 弁理士 浅村 肇

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 赤外線サーモグラフィーを使う改良したレーザ・超音波検査

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

目標材料を検査するための方法であって、

前記目標材料に超音波音響振動を誘発するための生成レーザと、前記振動を検出するた  
 めの検出レーザとを有するレーザ超音波検査システムを使って前記目標材料のレーザ超音  
 波検査を行う工程、

サーモグラフィ検査システムを使って前記目標材料のサーモグラフィ検査を行う工程、

前記超音波検査試験システムおよび前記サーモグラフィ検査システムを、レーザ超音波  
 検査システムには典型的であるがサーモグラフィに典型的に使うより大きい前記目標材料  
 からの離隔距離に提供する工程、および

前記目標材料の内部構造を決めるためにレーザ超音波検査結果とサーモグラフィ検査結  
 果の両方を解析する工程  
 を含む方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の方法に於いて、前記目標材料の前記超音波検出結果および前記サーモ  
 グラフィ検査結果を前記目標材料のモデル上に組み合わせる方法。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の方法であって、更に、定量的熱肉厚を決める工程、および前記定量的  
 熱肉厚に予期しない変化が起るところに前記目標材料内の傷を特定する工程を含む方法。

【請求項 4】

10

20

請求項 1 に記載の方法であって、前記サーモグラフィ検査と前記超音波検査を行う工程の間に所定量の時間待機する工程を含み、前記目標材料の前記サーモグラフィ検査は、前記目標材料の上記超音波検査の前に行われる方法。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の方法に於いて、前記サーモグラフィ検査が、  
前記目標材料に熱過渡現象を誘発するために前記目標材料を照射する工程、  
前記目標材料の経時サーマルイメージを取得する工程、および  
前記目標材料についての情報を得るために前記目標材料のサーマルイメージを解析する工程を含む方法。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の方法に於いて、前記サーモグラフィ検査システムが反射式フラッシュランプおよびカメラを含み、前記方法が、更に、前記目標材料を前記反射式フラッシュランプによって前記離隔距離で照射する工程を含み、それにより前記サーモグラフィ検査システムおよび前記レーザ検査システムを同じ位置決めシステム上に取付けることができ、また前記カメラが大きい視野を持つことができる方法。

【請求項 7】

請求項 1 に記載の方法であって、前記目標材料が複合材料を含むとき、この複合材料の深内部構造についての情報が得られるように、前記超音波検査結果で検出した超音波変位を解析する工程、および

前記目標材料が複合材料を含むとき、この複合材料の近表面内部構造についての情報が得られるように、前記サーモグラフィ検査結果からの目標材料のサーマルイメージを解析する工程をさらに含む方法。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の方法に於いて、前記超音波検査が、  
検出レーザビームを発生する工程、  
前記検出レーザビームを前記目標材料の表面へ向ける工程、  
前記目標材料の表面で前記検出レーザビームを散乱して超音波表面変位によって位相変調した光を作る工程、

前記位相変調した光を集める工程、  
前記位相変調した光を処理して前記表面での超音波変位を表すデータを得る工程、および

前記目標材料を解析するためにデータを集める工程を含む方法。

【請求項 9】

目標の内部構造を検査するために使用できる検査システムであって、  
前記目標内の超音波変位を創成し且つ検出することによって前記目標の内部構造を検査するために使用できるレーザ超音波検査システム、

前記レーザ超音波検査システムと同じ位置決めシステム上に取付けられ、前記目標の内部構造を検査し且つ前記目標のサーマルイメージを得るために使用できるサーモグラフィ検査システムであって、前記位置決めシステムは、レーザ超音波検査システムには典型的であるがサーモグラフィに典型的に使うより大きい前記目標材料からの離隔距離に配置されているサーモグラフィ検査システム、

処理および制御システムであって、

前記目標の内部構造についてのサーモグラフィ検査結果を得るために前記目標のサーマルイメージを解析し、

前記目標の内部構造についての超音波検査結果を得るために前記目標で検出した超音波変位を解析し、また

前記目標の内部構造についての情報を得るために前記目標材料の前記超音波検査結果と前記サーモグラフィ検査結果を組合わせる  
ために使用できる処理および制御システム

10

20

30

40

50

を含む検査システム。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の検査システムに於いて、前記レーザー超音波検査システムが、  
前記目標での前記超音波表面変位を照射するために使用できる検出レーザービームを発生するために使用できる検出レーザー、  
前記目標表面によって散乱した検出レーザービームから超音波表面変位によって位相変調した光を収集するための収集光学装置、  
位相変調した光を処理し且つ少なくとも一つの出力信号を発生するための干渉計、および

前記目標での超音波表面変位を表すデータを得るために少なくとも一つの出力信号を処理するための光処理ユニット  
を含むシステム。

10

【請求項 11】

請求項 9 に記載の検査システムに於いて、前記サーモグラフィ検査システムが赤外線 ( I R ) 過渡サーモグラフィシステムを含むシステム。

【請求項 12】

請求項 11 に記載の検査システムに於いて、前記目標に振動を誘発するために前記超音波検査システムによって生成レーザービームが創成され、また前記 I R 過渡サーモグラフィシステムが、前記生成レーザービームによって照射した前記目標のイメージフレームを取得するために使用できる I R 感応カメラを含むシステム。

20

【請求項 13】

請求項 12 に記載の検査システムに於いて、前記目標のイメージフレームは、画素列を含み、また経過時間に対応するフレーム番号が割当ててあり、定量的熱肉厚が、サーマルイメージの連続するフレームを解析することによって決められるシステム。

【請求項 14】

請求項 12 に記載の検査システムに於いて、前記処理ユニットが、前記検出した超音波変位と前記サーマルイメージを相関付けるシステム。

【請求項 15】

請求項 9 に記載の検査システムであって、更に、サーマルイメージングフレームの取得を生成レーザービームのパルス繰返し率に整合させるために使用できる制御モジュールを含むシステム。

30

【請求項 16】

請求項 9 に記載の検査システムであって、処理ユニットを更に含み、前記目標材料が複合材料を含む場合、前記処理ユニットは、

前記複合材料の深内部構造についての情報を得るために検出した超音波変位を解析し、

複合材料の近表面内部構造についての情報を得るために前記目標でのサーマルイメージを解析し、また

複合材料の深内部構造とこの複合材料の近表面内部構造についての情報を相関付けるようになっているシステム。

40

【請求項 17】

大面積複合検査システムであって、  
試験中の複合材料に超音波変位および熱過渡現象を誘発するために使用できるパルス式レーザービームを発生するために使用できる生成レーザー、

前記複合材料での前記超音波表面変位を検出するために使用できるレーザー超音波検出システム、

前記複合材料での前記熱過渡現象を検出するために使用できるサーマルイメージングシステムであって、レーザー超音波検査システムには典型的であるがサーモグラフィに典型的に使うより大きいテスト中の前記複合材料からの離隔距離に、前記レーザー超音波検出システムとともに取付けられるサーマルイメージングシステム、

50

サーマルイメージフレーム取得を前記生成レーザビームのパルス繰返し率に整合させるために使用できる制御モジュール、および

前記複合材料の内部構造についての情報を得るために、前記複合材料で検出した超音波変位と前記複合材料のサーマルイメージの両方を解析するために使用できるプロセッサを含むシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、非破壊試験に関し、更に詳しくは、材料の内部構造を検査するために赤外線画像および超音波試験を使うことに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、複合構造物を使うことが航空宇宙、自動車、およびその他多くの営利産業で甚だしい成長を見せている。複合材料は、性能でかなりの改善を示すが、それらは、製造工程および完成品での使用中の両方で厳密な品質管理手順が要求される。特に、非破壊評価（NED）法によって複合材料の構造的完全性を評価しなければならない。適正な評価には、表面領域近くおよび深内部領域の両方で含有物、層間剥離および有孔性を検出する能力が必要である。

【0003】

複合材料の構造的完全性を評価するために種々の方法および装置が提案されている。或る解決法は、目標材料に超音波表面変位を生成するために超音波源を使う。次にこの超音波表面変位を測定し且つ解析する。この超音波源は、目標に向けたパルス式生成レーザビームでもよい。別の検出レーザからのレーザ光をこの被検査物の超音波表面変位によって散乱させる。次に収集光学装置が散乱したレーザエネルギーを収集する。この収集光学装置は、干渉計またはその他の装置に接続してあり、この複合構造物の構造的完全性についてのデータをこの散乱したレーザエネルギーの解析によって得ることができる。レーザ超音波は、製造工程中の部品の検査に非常に効果的であることを示している。

【0004】

典型的に、レーザ源は、表面上の局部スポットで熱膨張によって音を生成し、一方、干渉計に接続した、プローブレザビームは表面変位または速度を検出する。生成レーザの吸収によるこの熱膨張は、変位を生じ、それをこのレーザ・超音波検出システムによって復調し、このレーザ・超音波信号の最初にパルスを出す結果となる。このエコーを普通表面エコーと呼ぶ。この表面エコーは、試料表面近くの欠陥によって生じたあらゆるエコーを隠すかも知れない。この表面エコーの持続時間は、生成レーザパルス持続時間およびこの検出システムの周波数帯域幅に依存する。典型的に、CO<sub>2</sub>生成レーザおよび検出用共焦点ファブリ・ペローでは、表面エコーが数マイクロセカンドまで持続するかも知れない。それでその時間中にエコーを作るあらゆる欠陥が隠されるかも知れない。レーザ・超音波検出は、深内部欠陥に敏感であり、近表面欠陥に鈍感である。

【0005】

もう一つのNDE法である、過渡現象赤外線（IR）サーモグラフィは、高分子マトリックス部品で数ミリより深い欠陥に鈍感であるために高分子マトリックス複合材の検査を効率的に可能にすることはない。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の実施例は、上に特定した要求におよびその他の要求にも同様に実質的に取組むシステムおよび方法に関する。本発明の実施例を以下の記述および請求項で更に詳しく説明する。本発明の実施例の利点および特徴は、この説明、添付の図面および請求項から明白になるだろう。

【0007】

10

20

30

40

50

本発明の実施例は、上に特定した要求におよびその他の要求にも同様に実質的に取組むためにレーザ・超音波と赤外線画像技術を組合わせる。レーザ超音波生成技術を使って過渡熱源を提供してもよい。それで、過渡現象赤外線（ＩＲ）サーモグラフィをレーザ超音波と組合わせて高分子マトリックス部品（即ち、複合材料）のより完全な非破壊検査を提供してもよい。

或る実施例は、目標材料の近表面および深内部構造を検査するための検査システムを提供する。この検査システムは、超音波検査システムとサーモグラフィ検査システムを組合わせる。このサーモグラフィ検査システムを超音波検査システムに取付けてレーザ超音波検査と両立する距離で目標材料のサーモグラフィ検査ができるように修正する。目標材料上に深部赤外線（ＩＲ）イメージングを使って定量的情報を得る。このＩＲイメージングおよびレーザ・超音波結果を組合わせて複雑な形状の複合材の３次元投影法で投影する。このサーモグラフィの結果がレーザ・超音波結果を補足して、特に目標材料が薄い複合部品であるときに、より完全でより信頼性のある、目標材料の内部構造についての情報をもたらす。

#### 【０００８】

別の実施例は、目標の内部構造を検査する方法を提供する。この方法は、目標材料での超音波変位および熱過渡現象の両方を含むことを伴う。これらの超音波変位は、レーザ超音波システムを使って生成し且つ解析してもよい。これらの熱過渡現象は、フラッシュランプを使って生成し且つサーモグラフィ検査システムを使って解析してもよい。解析は、目標の構造についてのより完全な理解をもたらすために超音波情報と熱情報の両方の相関関係が必要かも知れない。超音波変位の解析は、例えば、複合材料内の深部内部構造についての情報をもたらすかも知れない。赤外線画像は、複合材料の近表面内部構造についての情報をもたらすかも知れない。この超音波情報と熱情報を相関付けることは、目標の内部構造全体のより良い理解を生じる。

#### 【０００９】

更に別の実施例は、複合材料検査システムを提供する。この複合材料検査システムこの検査システムは、超音波検査システムとサーモグラフィ検査システムを組合わせる。超音波検出システムが複合材料での超音波表面変位を検出するために設けてある。赤外線画像システムが複合材料での熱過渡現象を検出するために設けてある。この制御モジュールが、この目標の内部構造全体についての情報をもたらすためにレーザ超音波情報と赤外線画像の相関関係を助けるために赤外線画像取得物をレーザ超音波取得情報と合わせてもよい。

#### 【００１０】

本発明およびその利点をより完全に理解するために、次に添付の図面に関連する以下の説明を参照し、これらの図面で類似の参照数字は類似の形態を指す。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【００１１】

【図１】本発明の実施例に従ってレーザ超音波変位および熱過渡現象を生成および検出するための生成レーザビームおよび検出レーザビームの使用法を示す。

【図２】レーザ超音波／赤外線画像システムの基本構成を示すためのブロック線図を提供する。

【図３】本発明の実施例によるレーザ超音波およびＩＲイメージングシステムの機能図を提供する。

【図４】本発明の実施例に従って超音波変位および熱過渡現象を生成するように動作可能な生成レーザのブロック線図を描く。

【図５】本発明の実施例によるサーモグラフィ検査システムの機能線図を提供する。

【図６】本発明の実施例による超音波およびＩＲイメージングシステムのブロックまたは機能線図を提供する。

【図７】本発明の実施例に従って平底穴のある高分子板内の熱過渡現象を解析することによって得た赤外線結果を示す。

10

20

30

40

50

【図 8】本発明の実施例に従って目標材料を検査するための方法を記述する論理流れ図を提供する。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明の好ましい実施例がこれらの図面に示してあり、種々の図面の類似および対応する部品を示すために類似の数字が使っている。

【0013】

本発明の実施例は、それに限らないが高分子マトリックス部品（即ち、複合材料）のような目標材料のより完全な非破壊検査を提供するためにレーザ超音波および赤外線画像技術を組合わせる。或る実施例は、目標材料の内部構造を検査するために使用可能な検査システムを提供する。或る実施例は、目標材料の近表面および深内部構造を検査するための検査システムを提供する。この検査システムは、超音波検査システムとサーモグラフィ検査システムを組合わせる。このサーモグラフィ検査システムを超音波検査システムに取付けてレーザ超音波検査と両立する距離で目標材料のサーモグラフィ検査ができるように修正する。目標材料上に深部赤外線（IR）イメージングを使って定量的情報を得る。このIRイメージングおよびレーザ・超音波結果を組合わせて複雑な形状の複合材の3次元投影法で投影する。このサーモグラフィの結果がレーザ・超音波結果を補足して、特に目標材料が薄い複合部品であるときに、より完全でより信頼性のある、目標材料についての情報をもたらす。本発明の実施例は、検査速度の迅速化、システム信頼性の向上、および運転費の低下をもたらす。

【0014】

図1は、本発明の実施例に従ってレーザ超音波変位および熱過渡現象を生成および検出するための生成レーザビームおよび検出レーザビームの使用法を示す。レーザビーム102が超音波を生成し、一方照明（検出）レーザビーム104が試験中の複合材料のような、目標106でこの超音波を検出する。目標106に熱過渡現象を誘発するために、赤外線（IR）のような、放射線を向けるために、フラッシュランプ（図示せず）のような、熱源を使ってもよい。熱放射線が目標106の全てを同時に照射してもよい。それで赤外線画像と超音波検査の間に冷却期間があってもよい。この超音波検査に関連するレーザは、目標106と同軸に適用してもよい。生成レーザビーム102は、目標106に熱弾性膨張112を生じ、それが超音波変形または波108を形成する結果となる。変形または超音波108は、目標106を伝播し、検出レーザビーム104を変調、散乱および反射して目標106から離れる方向に向いた位相変調光110を作り、それを集め且つ処理して目標106の内部構造を示す情報を得る。

【0015】

図2は、本発明の実施例に従って超音波試験と赤外線（IR）サーモグラフィの両方を行う検査システムの透視線図を提供する。検査システム200は、サーモグラフィ検査システムに結合した超音波検査システムを含む。この超音波検査システムは、レーザ超音波位置決めシステム202、および走査光学装置206を含むレーザ超音波ヘッド204を含む。これらの作用は、図3を参照して更に詳しく議論する。

【0016】

このサーモグラフィ検査システムは、IRランプ208とIRカメラ210を含む。これらのIRランプは、複合または目標材料214内に熱過渡現象を誘発する。IRカメラ210は、目標214の赤外線画像を捕捉するように使用可能である。この実施例に示すように、カメラ210の視野は、目標214の像を単一フレームで捕捉するように十分大きくてもよい。その代わりにIRカメラ210が複合赤外線画像を創るために使う複数のフレームを捕捉してもよい。或る時系列のイメージを使って目標214の熱的性質に基づいて複合イメージを創ってもよい。これは、例えば、定量的熱肉厚の決定を含んでもよく、その場合、定量的熱肉厚の予期しない変化は、目標214内の切れ目、潜在的切れ目または傷を示す。

【0017】

図3は、超音波レーザ試験を行うための基本部品と共にブロック線図を提供する。レーザ超音波検査システム300は、生成レーザ310、検出レーザ320、光学組立体314、収集光学装置326、光プロセッサ328および干渉計330、並びに制御およびデータ処理モジュール332を含む。生成レーザ310は、生成レーザビーム312を生じ、それを光学組立体314が目標316へ向ける。図示するように、光学組立体314は、レーザビーム312を走査または試験計画318に沿って動かすスキャナまたはその他の類似の機構を含む。光学組立体314は、視覚カメラ、深度カメラ、IRカメラ、距離検出器、狭帯域カメラまたは当業者に知られるその他の類似の光センサを含んでもよい。これらの光センサは、検査を行う前に較正が必要かも知れない。この較正は、種々のセンサによって集めた情報をこのシステムが統合する性能を検証する。生成レーザ310は、目標316内に超音波108および熱過渡現象を作る。

10

#### 【0018】

超音波108および熱過渡現象は、複合材料がこの生成レーザビームを吸収するのでこの複合材料の熱弾性膨張112の結果である。複合材料316は、消散または分解せずに生成レーザビーム312を容易に吸収する。高出力生成レーザは、被検査物の表面で材料を消散し、部品を損傷する可能性があるため、信号対雑音比(SNR)問題を克服するためには必ずしも好ましくない。別の実施例では、試験する材料に依っては、検出した信号のSNRを向上するために或る程度の消散が許容されるかも知れない。生成レーザビーム312は、超音波表面変形および適当な熱過渡現象を誘発するために適当なパルス持続時間、出力、および周波数を有する。例えば、横方向励起大気圧(TEA)CO<sub>2</sub>レーザは、100nsパルス幅に対して波長10.6μmのビームを作ることができる。このレーザの出力は、目標に、例えば、0.25Jのパルスを送出するために十分でなければならず、それは、400Hzのパルス繰返し率で作動する100Wのレーザを要するかも知れない。生成レーザビーム312は、熱としてこの目標表面に吸収され、それによって消散なしに熱弾性膨張を生じる。

20

#### 【0019】

パルスモードまたは連続波モードで作動する検出レーザ320は、超音波変位を誘発しない。例えば、Nd:YAGレーザを使うことができる。このレーザの出力は、例えば、100mJ、100μsのパルスを送出するに十分でなければならず、それには1kWのレーザが必要かも知れない。検出レーザ320は、検出レーザビーム322を発生する。検出レーザ320は、検出レーザビーム324から雑音を除去するために濾過機構324を含みまたはそれに光学的に結合してあってもよい。光学組立体314は、検出レーザビーム324を複合材料316の表面へ向け、それが検出レーザビーム324を散乱または反射する。結果として生じた位相変調光を収集光学装置326によって集める。ここに示すように、散乱したおよび/または反射した検出したレーザ光は、光学組立体314を通じて戻る。任意の光プロセッサ328および干渉計330がこの位相変調光を処理して複合材料316の表面での超音波変位を表す信号を作る。

30

#### 【0020】

この生成レーザビームは、中間IR超音波生成レーザでもよい。その様な生成レーザは、超音波および熱過渡現象生成のためにコンパクトで、高平均出力の中間IRレーザを用意する。図4に示すように、生成レーザ700は、生成レーザヘッド404に結合したファイバであるファイバレーザを中に有するポンプレーザヘッド402を含む。ファイバレーザを使うと、このレーザポンプを生成レーザヘッド404から遠く離して位置付けることを可能にする。このポンプレーザヘッドは、光ファイバ402を介してこの生成レーザヘッド404に結合してもよい。

40

#### 【0021】

このポンプレーザヘッド402を生成レーザビーム送出ヘッド404から数メートル離して置くことは、コンパクトな中間IR生成レーザヘッドを可能にし、それは全体的ペイロードおよびこの生成レーザビームを送出するためおよびサーマルイメージを取得するために使うロボットまたは位置決めシステムに対する安定性要件を減らす。この生成レーザ

50

ビーム送出ヘッドおよび I R カメラを含むコンパクトで軽量のモジュールだけをこのロボットシステムの検査ヘッド内に取付ければよい。これは、小さいロボットを使う中間 I R レーザ源の展開を可能にする。この様に、可搬式レーザ超音波システムおよび I R サーモグラフィシステムを使う現場複合 N D E 用に新規な複合検査機会ができる。これらの手法は、“超音波を発生するためのファイバレーザ”という名称の米国特許出願第 号で議論しており、それを全ての目的でここに援用する。

#### 【 0 0 2 2 】

図 5 は、サーモグラフィ検査システムの機能線図を提供する。サーモグラフィ検査システム 5 0 0 は、赤外線画像カメラ（即ち、I R カメラ 2 1 0）および目標内に熱過渡現象を誘発するための I R フラッシュランプ 2 0 8 を含む。フラッシュランプ 2 0 8 は、熱放射を所望の位置へ向けるように作用できる反射器を含んでもよい。例えば、これらの反射器は、サーモグラフィに典型的に使うより遠い距離での熱励起を可能にするかも知れない。例えば、これらの反射器は、フラッシュランプをサーモグラフィ検査用により普通の 0 . 3 m 離すのではなく 1 . 8 m 離して置くことを可能にする。これは、サーモグラフィ検査システム 5 0 0 とレーザ超音波検査システム 3 0 0 の両方を同じ位置決めシステム上に取付けることを可能にする。これは、カメラ 2 1 0 が典型的離隔距離に関連する視野 5 0 4 に比べて大きい視野 5 0 2 を有することも可能にする。サーモグラフィ検査システム 5 0 0 は、この目標の赤外線画像を捕捉し且つ解析する。これらのイメージを処理して目標 3 1 6 の近表面内部構造についての情報を得る。

#### 【 0 0 2 3 】

データ処理および制御システム 3 3 2 は、この目標の内部構造についての情報を得るためにレーザ超音波システム部品と赤外線画像部品の作用を調整する。データ処理および制御システム 3 3 2 は、レーザ超音波検査システム 3 0 0 とサーモグラフィ検査システム 4 0 0 の両方の作用を指示する。この処理および制御システムは、この目標の内部構造についての情報を得るために検出した超音波変位および赤外線画像を解析する。次にこの超音波検査の結果およびサーモグラフィ検査の結果を組合わせてこの目標の内部構造のより正確な表現を提供し、その場合、この情報をこの目標のコンピュータモデルに写像してもよい。このデータ処理および制御システムは、或る実施例ではサーモグラフィ検査を最初に行って、次にこの熱過渡現象を治めるためにこのサーモグラフィ検査と超音波検査の間に所定量の時間が経過するように、検査の順序も指示してよい。

#### 【 0 0 2 4 】

データ処理および制御システム 3 3 2 は、単一の処理装置でも複数の処理装置でもよい。その様な処理装置は、マイクロプロセッサ、マイクロコントローラ、デジタル信号プロセッサ、マイクロコンピュータ、C P U、フィールドプログラマブルゲートアレイ、プログラマブル論理デバイス、状態機械、論理回路装置、アナログ回路装置、デジタル回路装置、および/またはメモリに記憶した操作上の指令に基づいて信号（アナログおよび/またはデジタル）を処理する何れかの装置でもよい。このメモリは、単一メモリ装置または複数のメモリ装置でもよい。その様なメモリ装置は、R O M、ランダムアクセスメモリ、揮発性メモリ、不揮発性メモリ、スタティックメモリ、ダイナミックメモリ、フラッシュメモリ、キャッシュメモリ、および/またはデジタル情報を記憶する何れかの装でもよい。このメモリは、後に説明する工程および/または機能の少なくとも幾つかに対応する操作上の指令を記憶し、データ処理および制御システム 3 3 2 が実行する。

#### 【 0 0 2 5 】

図 6 は、本発明の実施例によるレーザ超音波および I R イメージングシステム 6 0 0 のブロックまたは機能線図を提供する。レーザ超音波および I R イメージングシステム 6 0 0 は、生成レーザ 6 0 2、制御モジュール 6 0 4、レーザ超音波検出システム 6 0 6、赤外線画像システム 6 0 8、処理モジュール 6 1 0、光学システム 6 1 2、およびフラッシュランプ 6 1 6 を含む。生成レーザ 6 0 2 は、生成レーザビームを作り、それを光学システム 6 1 2 によって複合材料のような材料であるがそれに限らない材料からなる目標 6 1 4 へ向け、そこに超音波変位を上記議論したように誘発する。レーザ超音波検出システム



606は、検出レーザービームを発生し、それを光学システム612によって目標614へ向け、そこで目標614の表面での超音波変位がこの検出レーザービームを位相変調させる。光学システム612は、この目標表面によって散乱した検出レーザービーム光も集める。このレーザ超音波検出システム606は、これらの超音波変位についての情報を含む信号を創り出すために集めた位相変調光を処理する。この信号を処理モジュール610に提供する。

#### 【0026】

フラッシュランプ616は、目標614のサーモグラフィ的測定のための熱過渡現象を創成する。IRカメラ608のような赤外線画像システムが目標614内の熱過渡現象の赤外線画像またはフレームを取得する。この視野は、これらの表面または目標614の単一フレームのイメージを可能にしてもよい。その代りに、複数のフレームを取得して複合赤外線画像を作ってもよい。この熱過渡現象中の所定の時間に追加のイメージを取得してもよい。これらの異なるイメージを処理してレーザ・超音波によって検査した全領域のサーモグラフィ検査を行う。

#### 【0027】

このサーモグラフィ結果は、レーザ超音波結果を補足し、この様にしてより完全でより信頼性のある検査を提供する。過渡現象IRサーモグラフィは、それだけでは高分子マトリックス複合材料のような複合部品の効率的検査ができない。過渡現象IRサーモグラフィは、高分子マトリックスの熱伝導率が低いために複合部品の上端面にしか敏感でない。それで、IRサーモグラフィは、高分子マトリックスまたは複合部品内の深部欠陥を確認、検出且つ確認するためには使えない。

#### 【0028】

レーザ超音波およびIRイメージングシステム600は、深内部検査システムを提供するレーザ超音波と目標614の近表面検査に取り組むための赤外線画像の両方を包含する。これは、レーザ超音波検査が近表面欠陥に敏感でないかも知れないという事実に関連する問題を処理する。これら二つに技術を組合わせることによって、レーザ超音波またはIRサーモグラフィだけを使うときに可能であるよりはより完全な複合部品または材料の非破壊検査が可能である。

#### 【0029】

図7は、本発明の実施例に従って平底穴のある高分子板内の熱過渡現象を解析することによって得た赤外線結果を示す。一連の赤外線画像をフラッシュランプの点灯によって始る熱過渡現象中の所定の時間に集めてもよい。目標の表面上の各点が特有の熱過渡現象を経験する。これらの熱過渡現象を使って目標材料に関する熱的性質を決めてもよい。例えば、定量的熱肉厚をこの目標での径時赤外線画像を解析することによって決めてもよい。これは、図7に示すように合成視覚像の形で表してもよい。この処理手法は、赤外線イメージを解析する（更に具体的には、異なるイメージ内の時間の関数としての温度変動を解析する）。IRカメラの各点に対する全てのIRイメージから相対温度変動曲線を形成する。

#### 【0030】

別の実施例は、近表面欠陥に対して材料を検査するための走査IRサーモグラフィ技術を提供するかも知れない。これは、任意の一時に目標の小さい部分しか加熱しないので、目標の最大熱負荷が限られるようにする。その様なシステムは、熱過渡現象を誘発するために走査レーザを使う。

#### 【0031】

目標702内の欠陥がこのグレイスケール画像700ではっきり見える。画像700は、材料702内の種々の点704を含む。この画像は、“合成参照赤外線画像法”という名称の米国特許第6,367,969号に記載してあるようなイメージング法を使って創成してもよく、それを全ての目的のために参考までにここに援用する。IR過渡現象サーモグラフィ解析手法は、目標の厚さを正確に測定し且つこの目標の所望の領域に亘ってその断面厚さを表す可視コード化表示を提供するために使ってもよい。

## 【 0 0 3 2 】

基本的に、好ましくは“前側”IRカメラ観測から得た、急速加熱した目標の表面の温度-時間 ( $T-t$ ) 応答解析に於ける変曲点のIR過渡現象サーモグラフィの使用。この変曲点は、この  $T-t$  で比較的初期に起り且つ本質的に横方向熱損失機構と関係ない。(その様な考慮は、例えば、金属を扱うときに、金属の熱伝導率が高いために、金属目標の熱的応答がかなり速く、従って、熱的データ測定値を得るために利用できる時間が通常短いので、特に関係があるかも知れない)。この屈曲点を連続するIRカメライメージフレームから所定の期間に亘って取得した熱的データから抽出する。この期間は、評価する目標の厚さの推定に基づく予想特性時間より少なくとも幾らか長いのが好ましい。

## 【 0 0 3 3 】

熱的参照データを結像した目標の各 ( $x, y$ ) 画素位置に対して計算し、次に各画素に対してコントラストを時間の関数として決めるために使う。コンピュータシステムがこのイメージングシステムを制御し、IRカメラを介して取得した表面温度データを記録し且つ解析し、およびこの目標の厚さに正確に対応するカラーまたはグレイパターンに統合したイメージを提供する。この情報をレーザ超音波データと組合わせてこの目標のより詳細な内部画像を作ってもよい。

## 【 0 0 3 4 】

この表面温度データの取得は、この目標の表面の一部を照射し且つ加熱するためにこの生成レーザを点火することに始る。次に熱的イメージフレームを各生成レーザパルス後の或る期間に亘って記録しおよび記録したイメージを熱過渡現象に関連するもののよう

## 【 0 0 3 5 】

次に各解像要素位置でのこの目標の厚さを決めるために、取得したイメージフレームの各画素に対してこの  $T-t$  履歴の熱流解析を行う。通常、目標の固体部を通る過渡熱流の解析は、熱エネルギーの“パルス”がこの目標の第1面を貫通し、反対面から反射しおよびこの第1面へ戻るために要する特性時間を決めることが必要である。この特性時間は、二つの面間の距離に関係するので、それを使って所望の点でのこの目標の二つの面間の厚さを決めることができる。この目標表面の各解像要素に対応する各 ( $x, y$ ) 画素位置に対してコントラスト対時間曲線を定める。

## 【 0 0 3 6 】

図8は、本発明の実施例に従って目標材料を検査するための方法を記述する論理流れ図を提供する。この方法は、この目標材料のより正確且つ信頼性のある試験を提供するために超音波検査とサーモグラフィ検査を組合わせる。作業800は、工程802に始る。工程802では、サーモグラフィ検査を行ってもよい。このサーモグラフィ検査を行った後に、超音波検査を行ってもよい。先に議論したように、超音波データとサーモグラフィデータの相関を助けるために、この超音波検査システムとサーモグラフィ検査システムが共通の位置決めシステムを共有してもよい。このサーモグラフィ検査と工程804の超音波検査の間に時間間隔があってもよい。これは、この目標材料が熱平衡に戻るかまたはこの熱過渡現象が治るようにする。この時間間隔は、この熱過渡現象が超音波検査の結果に影響するのを防ぐ。工程806で、超音波検査に関連して検出した超音波変位およびサーモグラフィ検査に関連する赤外線画像を解析して超音波検査結果およびサーモグラフィ検査結果を出す。工程808で、これらの結果を組合わせる。

## 【 0 0 3 7 】

サーモグラフィは、目標材料の合成イメージまたはその他の表示ができるようにする。これは、赤外線画像を解析することによって到達する定量的熱的厚さの決定を伴うかも知れない。この定量的熱肉厚の変化は、この定量的熱肉厚に予期しない変化が起る点でのこの目標材料の近表面傷を示すかも知れない。この情報をコントラストディスプレイによって可視化してもよく、そうすればコントラストの急激な変化がこの定量的熱肉厚の切れ目または変化を示す。これらの結果を組合わせると、目標材料のより正確な理解ができる結果となる。サーモグラフィ検査は、表面欠陥のために目標材料を調べるのにより良く適

10

20

30

40

50

し、一方超音波検査は、深い内部欠陥により良く適する。これらの結果を組合わせて工程 810 でコンピュータモデルに当てはめてもよい。サーモグラフィ検査システムと超音波検査システムの組合わせは、両検査システムが共通の検査プラットフォームを共有できるようにする。更に、サーモグラフィ検査システムの位置決めを較正するためにレーザ超音波位置決めを使ってもよい。これは、より正確な解析およびサーモグラフィと超音波データの相関を可能にする。要約すると、目標材料の内部構造を調べるための検査システムを提供する。この検査システムは、超音波検査システムとサーモグラフィ検査システムを組合わせる。このサーモグラフィ検査システムを超音波検査システムに取付け、レーザ超音波検査と両立する距離で目標材料のサーモグラフィ検査ができるように修正する。この目標材料上で深部赤外線 (IR) イメージングを使って定量的情報を得る。この IR イメージングおよびレーザ超音波の結果を組合わせて複雑な形状の複合材の 3 次元投影法で投影する。このサーモグラフィの結果がレーザ・超音波結果を補足して、特に目標材料が薄い複合部品であるときに、より完全でより信頼性のある、目標材料の内部構造についての情報をもたらす。

10

**【0038】**

当業者には分るように、ここで使うかも知れないような、“実質的に”または“ほぼ”という用語は、その対応する用語に業界が容認する許容差を与える。その様な業界が容認する許容差は、1 パーセント未満から 20 パーセントに及び且つ部品値、集積回路プロセス変動、温度変動、上下回数、および/または熱雑音に対応するがそれに限らない。当業者は更に分るように、ここで使うかも知れないような、“使用できるように結合した”という用語は、直接結合および別の部品、要素、回路、またはモジュールを介する間接結合を含み、その場合、間接結合に関して、介在する部品、要素、回路、またはモジュールは信号の情報を変更しないが、その電流レベル、電圧レベル、および/または出力レベルを調整してもよい。当業者はやはり分るように、推定結合は、“使用できるように結合した”と同様に、二つの要素間の直接および間接結合を含む。当業者は更に分るように、ここで使うかも知れないような、“都合よく比較する”という用語は、二つ以上の要素、項目、信号等の間の比較が所望の関係をもたらすことを示す。例えば、所望の関係は、信号 1 の大きさが信号 2 より大きいことであれば、都合のよい比較は、信号 1 の大きさが信号 2 のそれより大きいとき、または信号 2 の大きさが信号 1 のそれより小さいときに行ってもよい。

20

30

**【0039】**

本発明を詳細に説明したが、これに種々の変更、置換および改造を添付の請求項に定義するこの発明の精神および範囲から逸脱することなく行えることを理解すべきである。

【図 1】

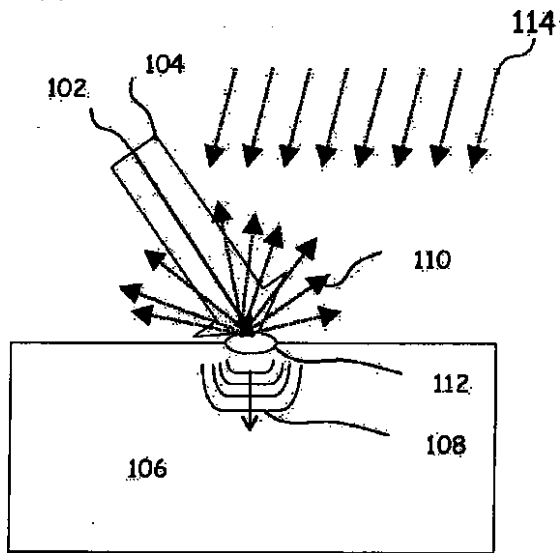


FIG. 1

【図 2】

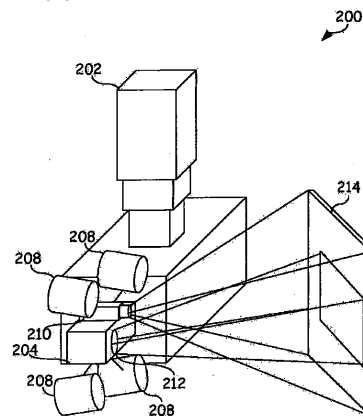
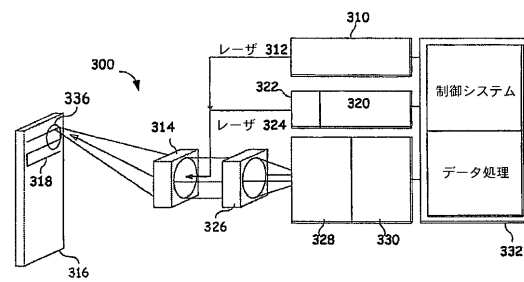
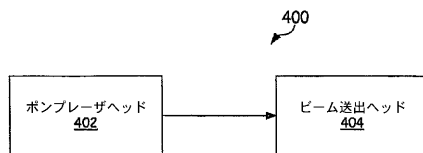


FIG. 2

【図 3】



【図 4】



【図 5】

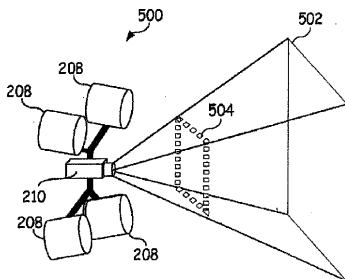
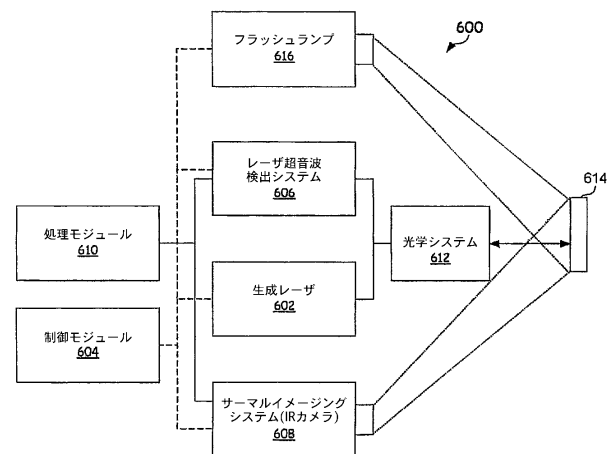


FIG. 5

【図 6】



【図 7】

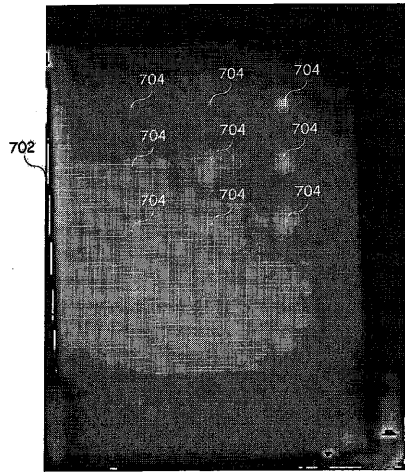
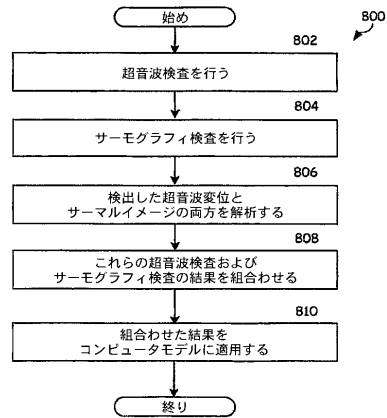


FIG. 7

【図 8】



## フロントページの続き

- (74)代理人 100093702  
弁理士 山本 貴和
- (74)代理人 100087217  
弁理士 吉田 裕
- (74)代理人 100072822  
弁理士 森 徹
- (74)代理人 100123180  
弁理士 白江 克則
- (74)代理人 100089897  
弁理士 田中 正
- (74)代理人 100137475  
弁理士 金井 建
- (72)発明者 ハワード、ドナルド、ロバート  
アメリカ合衆国、ニューヨーク、トロイ、チェリル コート 47
- (72)発明者 リンガーメイシャー、ハリー、イスラエル  
アメリカ合衆国、ニューヨーク、デランソン、メイン ストリート 1054
- (72)発明者 デュボイス、マルク  
アメリカ合衆国、テキサス、ケラー、フォックスクロフト レイン 312
- (72)発明者 リクター、ティモシー、ジェラルド  
アメリカ合衆国、ニューヨーク、ヴァイナンツキル、ガイザー ロード 239
- (72)発明者 ドレイク、トーマス、イー、  
アメリカ合衆国、テキサス、フォートワース、ライアン プレース 2530

審査官 高 見 重雄

- (56)参考文献 特開2006-170684(JP, A)  
国際公開第02/037085(WO, A1)  
特開昭64-078138(JP, A)  
特表2007-512530(JP, A)  
国際公開第2008/011055(WO, A1)

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 25/00-25/72  
G01J 5/48  
G01N 29/00-29/28