

⑫ 公開特許公報(A)

平2-103430

⑬ Int. Cl.⁵

G 01 L 1/00
B 64 G 1/62
G 01 L 1/00
G 01 N 29/22

識別記号

5 0 2

庁内整理番号

C 8803-2F
8817-3D
G 8803-2F
6928-2G

⑬ 公開 平成2年(1990)4月16日

審査請求 有 請求項の数 3 (全7頁)

⑭ 発明の名称 超音波トモグラフィーを用いた試料の熱応力分布の評価方法および装置

⑮ 特 願 昭63-256481

⑯ 出 願 昭63(1988)10月13日

⑰ 発 明 者 天 田 重 庚 東京都日野市落川173-45

⑰ 発 明 者 島 田 道 男 東京都西多摩郡羽村町栄町2丁目13番7号 メゾン武蔵境103

⑱ 出 願 人 運輸省船舶技術研究所 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
長

明細書

1. 発明の名称

超音波トモグラフィーを用いた試料の熱応力分布の評価方法及び装置

2. 特許の請求の範囲

(1)

(イ) 非均一な温度場にある均質体の試料を複数の領域に区分したモデルを想定し、試料の表面上の一点から指向性の広い超音波を発生させ、前記試料を透過した超音波を、区分した各領域を少なくとも一本の超音波の伝播経路が横切るように試料表面の複数の点で受信し、各受信点に至るまでの超音波の透過時間を測定し、前記モデルの各領域を透過した超音波の伝播速度を求め(コンピューター・トモグラフィーの方法)、伝播速度と温度の関係から前記各領域の温度を求め、このデータと熱弾性方程式より計算機によって熱応力分布を求めることとなる。均質の試料内部の熱応力分布の評価法。

(ロ) 非均質な組成の試料を複数の領域に区分したモデルを想定し、室温状態で試料の表面上の一点から指向性の広い超音波を発生させ、前記試料を透過した超音波を、区分した各領域を少なくとも一本の超音波の伝播経路が横切るように試料表面の複数の点で受信し、各受信点に至るまでの超音波透過時間を測定し、前記モデルの各領域を透過した超音波の伝播速度を求め(コンピューター・トモグラフィーの方法)、その速度から前記各領域の組成を求める。次に、前記試料を非均一な温度場に置いて、前述の組成を求めたのと同様な手順で各区分領域の超音波の伝播速度を求める。別途求めて置いた各組成での温度と超音波の伝播速度との関係より温度を求める。このデータと熱弾性方程式から計算機を用いて熱応力分布を求めることとなる。非均質の試料の熱応力分布の評価法。

(2) 前記超音波をレーザー光の照射によって発生させることを特徴とする。

請求項(1)記載の熱応力分布の評価法。

(3) 請求項(1)、(2)を実施するための装置として、図-1に示すようなレーザー発振機と複数の超音波受信器(レシーバー)、及び超音波の透過時間測定装置(ブリアンプ、ハイパス・フィルター、トランジェントレコーダー、デジタルタイジング・

オシロスコープ、石英バファー・ロッド等)、並びに内部の組成、及び熱応力を計算する(トモグラフィー)計算機と試料を加熱する炉より構成するものとする。

3. 発明の詳細な説明

① 目的

(イ) 本発明は非破壊的に試料の内部の熱応力分布を求める方法に関し、特にコンピューター・トモグラフィーを用いた熱応力分布の評価法に関する。

(ロ) 従来の技術

宇宙往還機、核融合炉、断熱機関等の実現には耐熱材料の開発が最も重要な課題である。創製された材料が目的とした機能を発揮するかどうかを評価するために、高温の非均一温度場において生ずる熱応力の評価が必要である。現時点における代表的な熱応力評価法として、熱光弾性法や歪みゲージによる方法、最近開発されたスパイト(SPATE)法やレーザー・スベックル法等がある。熱光弾性法を除いた前述の手法は物体表面の情報しか得ることができない。一方、熱光弾性法は物体内部の情報が得られる代わりに、モデルの使用を前提としているために温度上限(約100℃)条件や相似則の成立のための制約を受ける。それ故、物体内部の熱応力を満足に評価できる方法は現在のところ無いに等しい。

(ハ) 発明が解決しようとする課題

可能な限り付加温度が高いこと、モデルは使用しない等の条件を備えた新しい試料内部の熱応力の評価法の開発が急務である。このため、昭和62年度から開始された科学技術庁振興調整費研究「熱応力緩和のための傾斜機能材料開発の基盤技術に関する研究」において、傾斜機能型の非均質材料に対する新しい熱応力の評価法の開発研究課題、「局所熱応力の定量的評価技術に関する研究」が盛り込まれた。新しく開発した手法は、非破壊検査の代表的な手法である超音波とコンピューター・トモグラフィー(CT)を併用して均質、非均質試料の局所的な内部の熱応力分布の評価法を提供することを目的とする。超音波の発生方法としてレーザーパルスを固体表面に照射し、熱弾性効果によって超音波を生じさせるレーザー超音波を採用する。

② 発明の構成

(イ) 解決するための手段

この目的のために、本発明は次のような構成であることを特徴とする。

(イ) 1 非均一な温度場にある均質体の試料を複数の領域に区分したモデルを想定し、試料の表面上の一点から指向性の広い超音波を発生させ、前記試料を透過した超音波を、区分した各領域を少なくとも一本の超音波の伝播経路が横切るように試料表面の複数の点で受信し、各受信点に至るまでの超音波の透過時間を測定し、前記モデルの各領域を透過した超音波の伝播速度を求め(コンピューター・トモグラフィの方法)、伝播速度と温度との関係から前記各領域の温度を求め、このデータと熱弾性方程式より計算機によって熱応力分布を求めるような構成であることを特徴とする。

(イ) 2 非均質組成の試料を複数の領域に区分したモデルを想定し、室温状態にて試料の表面上の一点から指向性の広い超音波を発生させ、前記試料を透過した超音波を、区分した各領域を少なくとも一本の超音波の伝播経路が横切るように試料表面の複数の点で受信し、各受信点に至るまでの超音波の透過時間を測定し、前記モデルの各領域を透過した超音波の伝播速度を求め(コンピューター・トモグラフィの方法)、その速度から前記各領域の組成を求める。次に、前記試料を非均一な温度場に置いて、前述の組成を求めたのと同様な手順で各領域の超音波の伝播速度を求める。別途求めておいた各組成での温度と超音波の伝播速度との関係より温度を求める。このデータと熱弾性方程式から計算機を用いて熱応力分布を求めるような構成であることを特徴とする。

(ロ) 作用

本発明は固体中を伝播する超音波の伝播速度が材料の物性値(ヤング率、密度、ポアソン比)に依存し、さらにこれらの物性値が温度によって変化する現象を利用するものである。

均質体の場合に対して図-2に示すように、温度勾配下の試料の超音波の透過時間を計測する。(ロ) 2に後述するようにCT(コンピューター・トモグラフィ)の手法を利用して計算機により温度分布を構築する。次に、得られた温度分布のデータから(ロ) 3で述べるように熱弾性方程式を用いて計算機により熱応力分布を評価する。

棒に対して、

$$V^2 = E(T) / \rho(T) \quad (7)$$

のように表せる。ただし、Tは温度を示す。一般に、ある材料または組成(E_i, ρ_i, ν_i)に対して、

$$V = f_i(T) = f_i(\text{温度}) \quad (8)$$

と書ける。ここで、f_iは一個関数であると仮定する。

一般の構造用材料の場合、図-4に示すようにE、ρ共に温度と共に減少し、νは増加するものもあれば減少する材料もある。従って、材料あるいは組成、すなわち物性値(E_i, ρ_i, ν_i)が与えられれば、図-5のように温度～伝播速度の関係が計測によって求まる。それ故、各々の場所での組成、即ち(E_i, ρ_i, ν_i)が既知であれば、その場所における伝播速度Vを求めることで、図-5の関係より温度が評価できる。

(ロ) 3 熱応力分布の評価法

前節にて温度がわれば、式(9)で与えられる熱弾性方程式を差分方程式に変換して計算機により応力を評価できる。

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu)(\partial e / \partial x) + \mu \nabla^2 u - (3\lambda + 2\mu)\alpha(\partial T / \partial x) &= 0 \\ (\lambda + \mu)(\partial e / \partial y) + \mu \nabla^2 v - (3\lambda + 2\mu)\alpha(\partial T / \partial y) &= 0 \\ (\lambda + \mu)(\partial e / \partial z) + \mu \nabla^2 w - (3\lambda + 2\mu)\alpha(\partial T / \partial z) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda e + 2\mu(\partial u / \partial x) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T \\ \sigma_{yy} &= \lambda e + 2\mu(\partial v / \partial y) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T \\ \sigma_{zz} &= \lambda e + 2\mu(\partial w / \partial z) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T \\ \sigma_{xy} &= \mu[(\partial u / \partial y) + (\partial v / \partial x)] \\ \sigma_{yz} &= \mu[(\partial v / \partial z) + (\partial w / \partial y)] \\ \sigma_{zx} &= \mu[(\partial u / \partial z) + (\partial w / \partial x)] \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、u, v, wはx, y, z軸方向の変位、eは次式

$$e = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z \quad (11)$$

にて与えられる量であり、λとμはLameの定数、αは熱膨張係数である。

(ハ) 実施例

超音波の弾性体を透過する時間より、内部の熱応力分布を構築するアルゴ

リズムとその実施例について述べる。

(ロ) 1 組成分布

弾性対中を伝播する超音波の縦波の速度Vは、ヤング率E、密度ρ、ポアソン比νを用いて、次式のように表せる。

$$V^2 = E[1 - \nu] / [(1 + \nu)[1 - 2\nu]\rho] \quad \text{無限体} \quad (1)$$

$$V^2 = E[(1 - \nu^2)\rho] \quad \text{板} \quad (2)$$

$$V^2 = E / \rho \quad \text{棒} \quad (3)$$

一般に、

$$V = f(E, \rho, \nu) = f(\text{組成の成分}) \quad (4)$$

と表せる。対象としている材料に含まれる成分に対して関数fは一個関数と仮定する。そこで図-2, 3に示すように、与えられた幾何学形状の物体に対して、局所的な超音波の透過時間を測定する。超音波の伝播速度は式(4)のように試料のヤング率E、密度ρ、ポアソン比νによって変化する。従って、透過時間を測定すれば超音波の透過経路上の(E, ρ, ν)なる量の積分値が得られることになる。これよりCT(コンピューター・トモグラフィ)計算を行うことで局所的な物性値(E, ρ, ν)が判り、最後に試料の組成を同定することで組成分布を求める。

(ロ) 2 温度分布

弾性体中を伝播する超音波の縦波の速度はヤング率E、密度ρ、ポアソン比νを用いて、無限体に対して

$$V^2 = E(T)[1 - \nu(T)] / [(1 + \nu(T))[1 - 2\nu(T)]\rho(T)] \quad (5)$$

板の場合、

$$V^2 = E(T) / [(1 - \nu^2(T))\rho(T)] \quad (6)$$

リズムとその実施例について述べる。

(A) 一次元物体

(I) 均質体

図-6に示すように等厚の無限板が板厚方向(X-軸)のみ非均一な温度分布となっている場合を考える。図の左端に微小スポット径を持つレーザー・パルスを照射すると照射部分より熱弾性効果によって超音波が発生する。これを右端のS_mなる場所でレーザーにより受信することで、経路L_mに沿って超音波が伝播する時間(TOF: Time of Flight)Γ_mが計測できる。一方、微小経路長さをdℓとすれば、L_mに沿うTOF: Γ_mは次式にて与えられる。

$$\Gamma_m = \int_{L_m} d\ell / V(x), \quad m=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

次に、受信場所S_mが必ず異なる層に含まれるように板厚をN個の層に分割し、各層内で温度が均一と仮定する。すると、式(12)は次式のように書き改められる。

$$\Gamma_m = \sum_{i=1}^K \bar{V}_i \cdot \Delta \ell_{mi} \quad (13)$$

ただし、 \bar{V}_i は層内の伝播速度の逆数、すなわち $\bar{V}_i = 1 / V_i$ 、 $\Delta \ell_{mi}$ は伝播経路L_mの内のi番目の層の伝播経路長さであり、KはL_m中に含まれる層の数である。例えば、図-6の第一番目の層にレーザー・ビームを照射した場合、式(13)は次のように書ける。

$$\begin{bmatrix} \Delta \ell_{11} \\ \Delta \ell_{21} & \Delta \ell_{12} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta \ell_{N1} & \Delta \ell_{N2} & \dots & \Delta \ell_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \dots \\ \bar{V}_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \dots \\ \Gamma_N \end{Bmatrix} \quad (14)$$

層内の経路長差を表す係数行列は三角行列となる。式(14)は簡単に

$$[\Delta] \{\bar{V}\} = \{\Gamma\} \quad (15)$$

のようになり、これをベクトルVについて解けば

$$\{\bar{V}\} = [\Delta]^{-1} \{\Gamma\} \quad (16)$$

となって速度が求まる。速度から式(8)、図-5の関係より温度分布が得られ、計算

機を用いて式(9)、(10)、(11)より熱応力が求まる。

(II) 非均質体

前説と全く同様なステップにて熱応力分布が求められるが、非均質体の場合に図-7のごとくN個の層に分割するが、各層内で物性値(ヤング率: E_i 、密度: ρ_i 、ポアソン比: ν_i)と温度は一定であると仮定する。物性値の分布、すなわち組成分布を求めておき、均質体と同じ手順にて超音波の伝播速度の分布を求める。伝播速度が求まれば、図-5と式(8)の関係より温度分布が得られ、最後に式(9)、(10)、(11)の関係から熱応力分布が求まる。

(B) 二次元物体

二次元物体の場合に対しては、一次元物体の場合を直交する軸方向に拡張して、前節と全く同一の手順を実施すればよい。ただし、一次元の場合には層状に分割したが、二次元の場合にはピクセル(微小格子)となり、各ピクセル内で温度、あるいは物性値が一定の仮定に基づいたアルゴリズムとなる。

(C) 軸対称円筒

温度分布が軸対称な場合について解説する。

(I) 均質体

図-8に示すような軸対称温度分布を有する円筒体を扱う。伝播経路 L_m に沿う超音波のTOFは

$$\Gamma_m = \int_{L_m} dl / V(r) \quad , \quad m=1,2,\dots,N \quad (17)$$

ただし、 r は半径、 N は経路の総数である。図のごとく円筒体をN個のリングに分割し、リング内で温度は一定と仮定とする。すると、 L_m に沿うTOFは次式のように書き改められる。

$$\Gamma_m = \sum_{i=1}^K \bar{V}_i \cdot \Delta l_{mi} \quad (18)$$

ただし、 Δl_{mi} は経路 L_m に含まれる外側から i 番目のリングの経路長である。図に示すようなレーザー・ビームの照射とレーザースコープの配列に対して、式(18)は

$$\begin{bmatrix} \Delta l_{11} & \Delta l_{12} & & & \\ \Delta l_{21} & \Delta l_{22} & \Delta l_{23} & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ \Delta l_{N1} & \Delta l_{N2} & \Delta l_{N3} & & \Delta l_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \dots \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \dots \\ \Gamma_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

となる。簡単に

$$[\Delta][\bar{V}] = [\Gamma] \quad (20)$$

と表せ、式(20)を伝播速度ベクトル $[\bar{V}]$ について解けば、一次元均質体の場合と全く同じ手順にて熱応力を求めることができる。

(II) 非均質体

軸対称な組成分布と温度分布を有する場合を取り扱う。図-9に示すようにN個の層に分割するが、各層内で物性値(ヤング率: E_i 、密度: ρ_i 、ポアソン比: ν_i)と温度は一定であると仮定する。また、物性値は予め既知であるとする。すると、均質体と同一の手順にて伝播速度の分布が求まり、式(8)と図-5の関係より温度分布が得られ、最後に式(9)、(10)、(11)から熱応力分布が求まる。

(D) 非軸対称円筒

ここでは温度分布が非軸対称の場合を扱う。

(I) 均質体

図-10のように、円筒体をリングと放射状に分割する。半径方向にN分割(N個のリングに相当)、周方向にM分割すれば、 $N \times M$ 個のピクセル(分割された微小格子要素)にて円筒体は構成されることになる。各ピクセル内で温度は一定と仮定する。すると、 $N \times M$ 個のレーザースコープを、少なくとも一本の超音波の経路が各ピクセルを横切るように円筒体の外表面上に配置することにより、これまでの手順と同じように熱応力分布を求めることができる。

(II) 非均質体

図-11のように円筒体を $N \times M$ 個のピクセルに分割する。各ピクセル内で温度と物性値(E_i, ρ_i, ν_i)は一定と仮定する。さらに、物性値は既知とする。すると、前節の均質体と同様な手順にて各ピクセル内の伝播速度が求まり、式(8)と図-5の関係から温度が得られる。最後に、熱弾性方程式に基づき熱応力がもとまる。

④ 発明の効果

高温にさらされる物体内部の応力の情報を得られるので、耐熱材料の評価や、熱応力による破壊の評価、核融合炉や熱機関等の安全性評価に有効である。

④ 図面の簡単な説明

- 図-1は本発明の評価装置の概要である。
- 図-2は本発明の均質材に対する温度・熱応力の評価方法のフローである。
- 図-3は本発明の非均質材に対する温度・熱応力の評価方法のフローである。
- 図-4は本発明において用いる試料の物性値と温度との関係である。
- 図-5は本発明において用いる超音波の伝播速度と温度との関係である。
- 図-6は本発明において用いる一次元均質体のモデルである。
- 図-7は本発明において用いる一次元非均質体のモデルである。
- 図-8は本発明において用いる軸対称温度分布の均質体モデルである。
- 図-9は本発明において用いる軸対称温度分布の非均質体モデルである。
- 図-10は本発明において用いる非軸対称温度分布の均質体モデルである。
- 図-11は本発明において用いる非軸対称温度分布の非均質体モデルである。

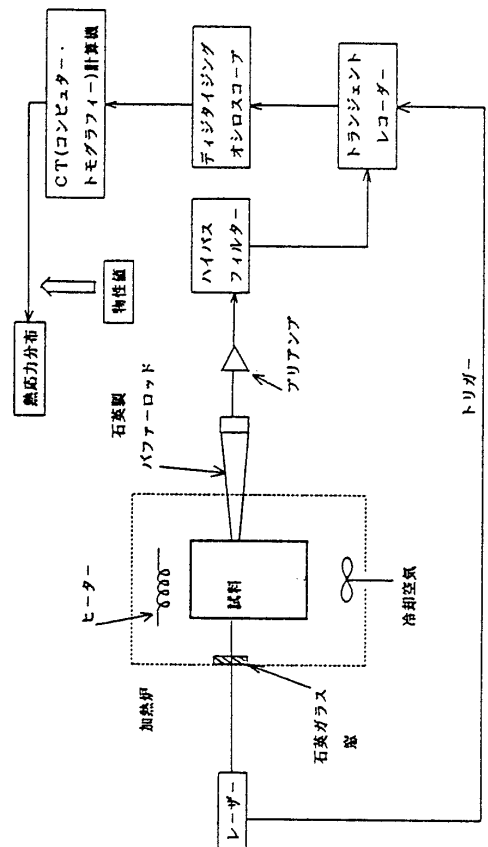


図-1 評価装置の概要

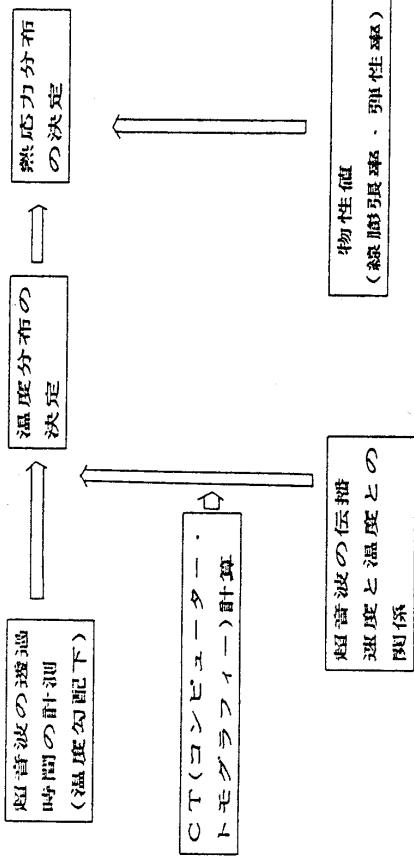


図-2 均質材料の温度・熱応力の評価方法のフロー

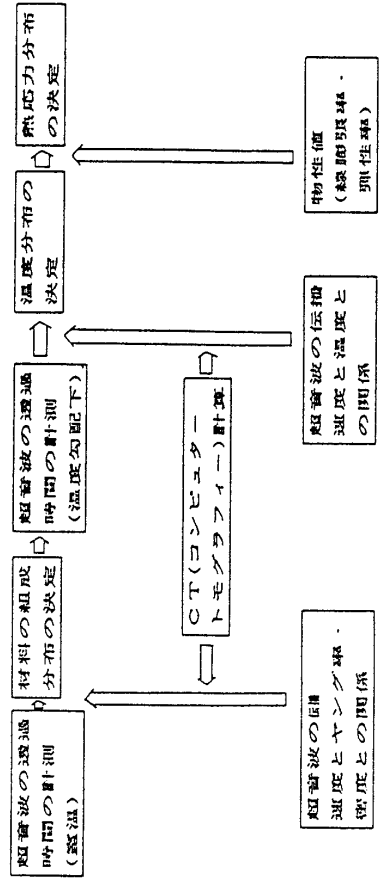
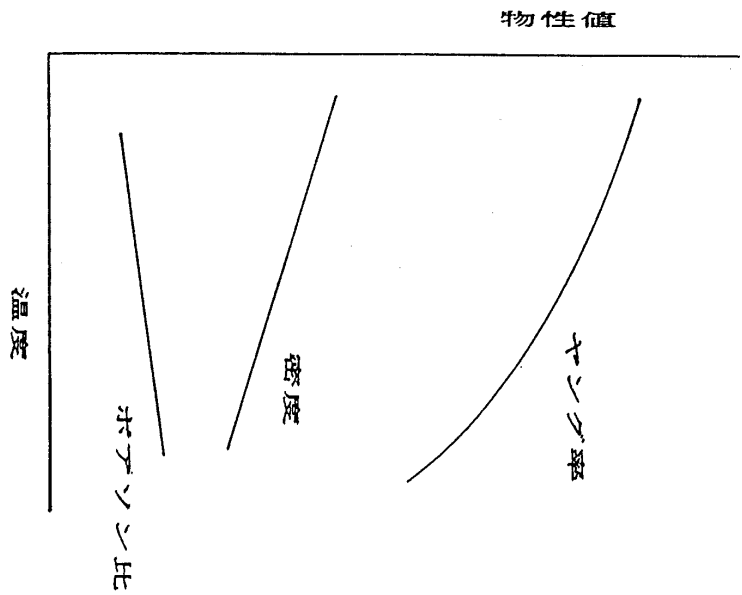


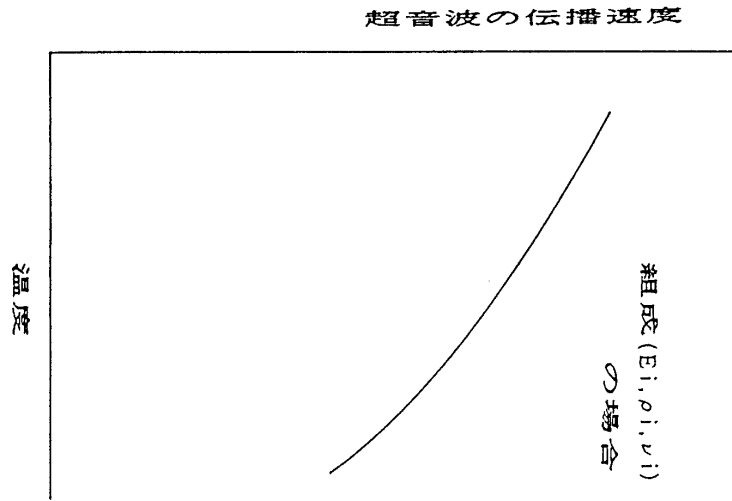
図-3 非均質材料の温度・熱応力の評価方法のフロー

図-4 試料の物性値と温度との関係



図面の浄書(内容に変更なし)

図-5 試料中の超音波の伝播速度と温度との関係



図面の書き(内容に変更なし)

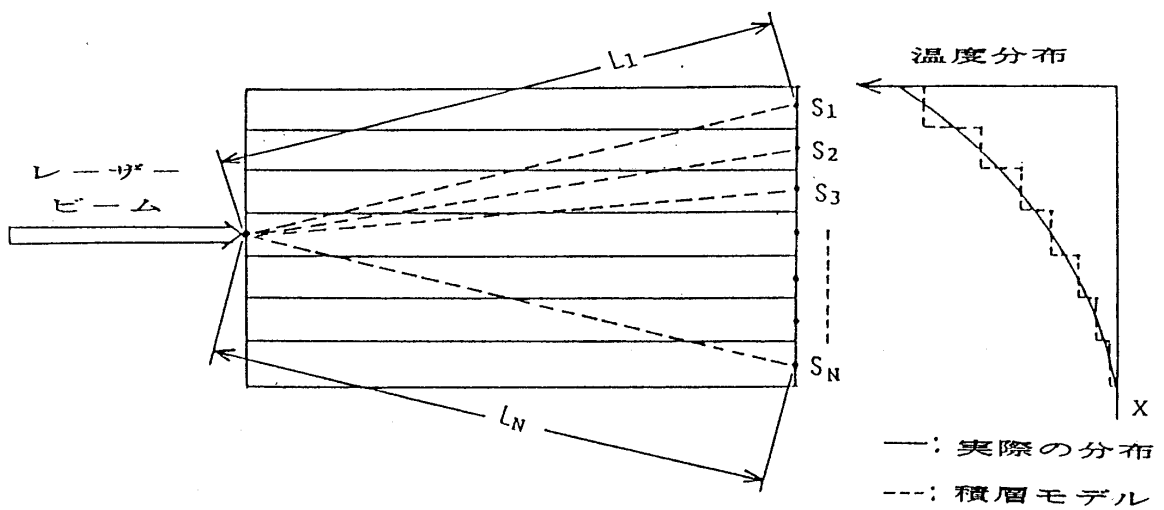


図-6 一次元均質体のモデル

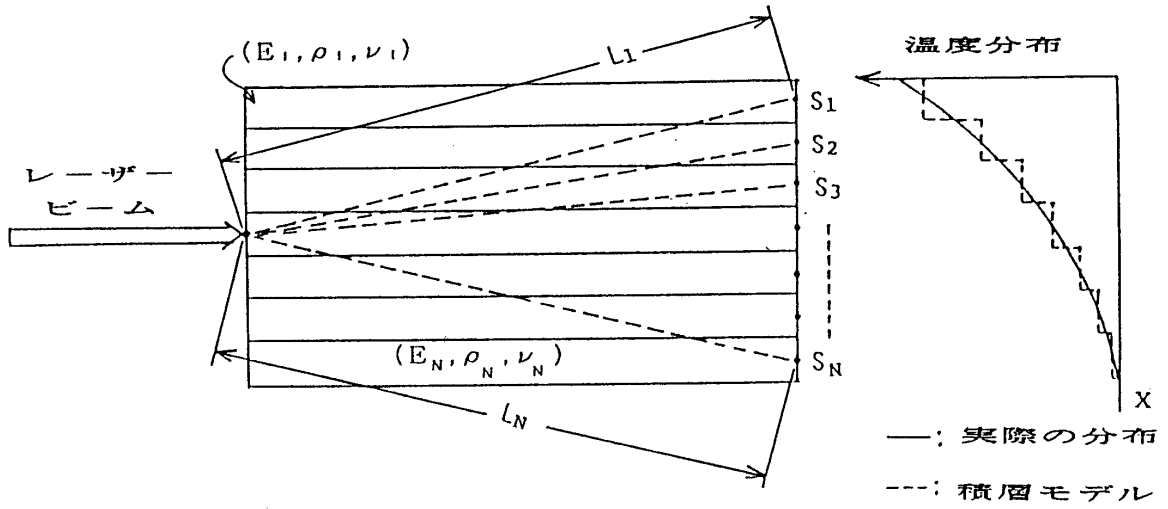


図-7 一次元非均質体のモデル

図面の浄書(内容に変更なし)

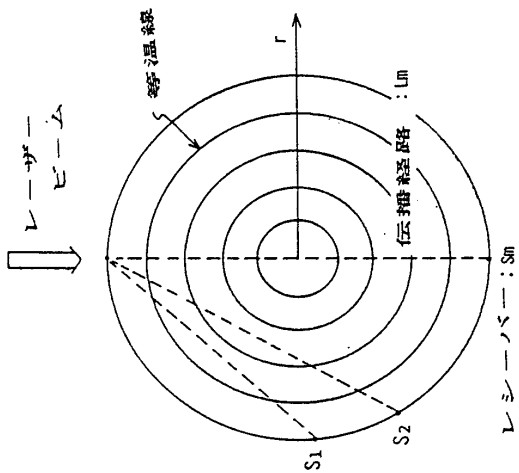


図-8 軸対称温度分布の均質体モデル

図面の浄書(内容に変更なし)

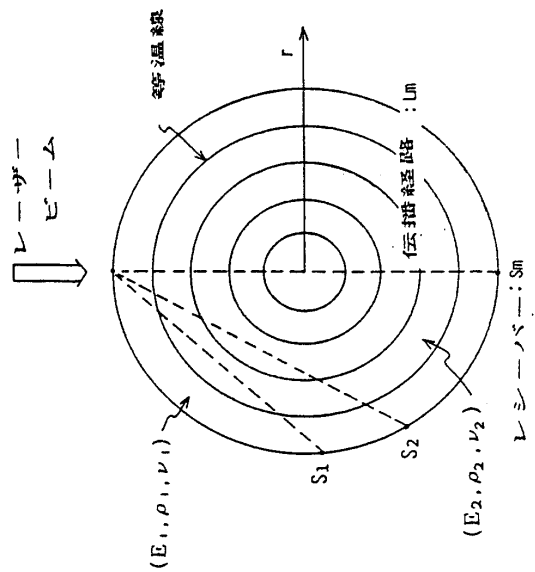


図-9 軸対称温度分布の非均質体モデル

図面の浄書(内容に変更なし)

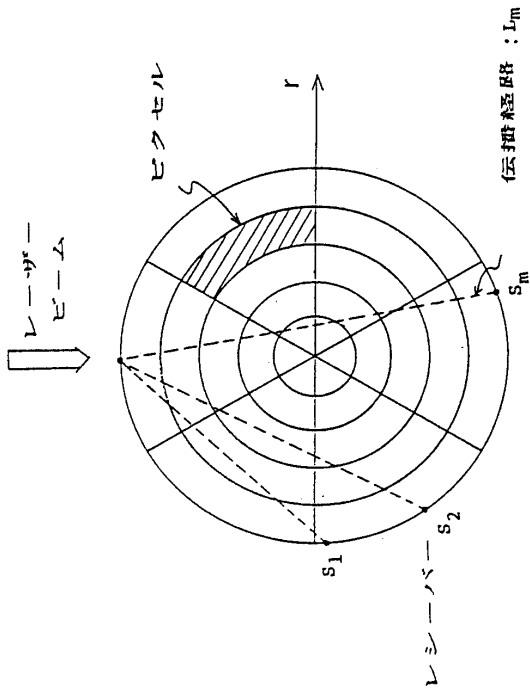


図-10 非軸対称温度分布の均質体モデル

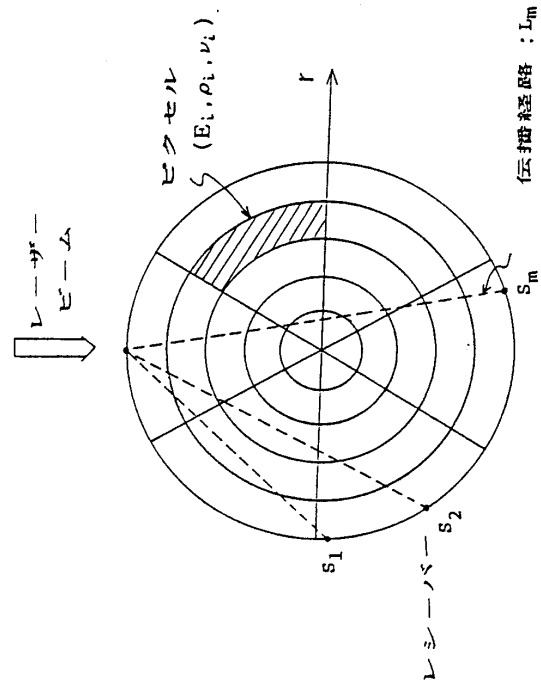


図-11 非軸対称温度分布の非均質体モデル

手続補正書(方式)

平成元年2月21日

特許庁長官 殿

1. 事件の表示
昭和63年特許願第256481号
2. 発明の名称
超音波トモグラフィーを用いた試料の熱応力分布の評価方法および装置
3. 補正をする者
事件との関係 特許出願人
住所 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
氏名(名称) 運輸省船舶技術研究所 菅井和夫
5. 補正の対象
昭和63年10月13日提出の特許願(出願人の印)
及び図面(図1~3, 6, 7, 10)
6. 補正の内容
別紙のとおり
(明細書の内容は変更なし)
(図4, 5, 8, 9, 11は浄書のため変更なし)

