

(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2004-205318  
(P2004-205318A)

(43) 公開日 平成16年7月22日(2004.7.22)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>  
GO1B 21/08

F I  
GO1B 21/08

テーマコード(参考)  
2FO69

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 11 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2002-373931(P2002-373931)</p> <p>(22) 出願日 平成14年12月25日(2002.12.25)</p> <p>特許法第30条第1項適用申請有り 2002年10月10日 社団法人日本機械学会発行の「平成14年度材料力学部門講演会 講演論文集」に発表</p>	<p>(71) 出願人 501204525 独立行政法人海上技術安全研究所 東京都三鷹市新川6丁目38番1号</p> <p>(74) 代理人 100100413 弁理士 渡部 温</p> <p>(72) 発明者 島田 道男 東京都三鷹市新川6-38-1 海上技術安全研究所内</p> <p>(72) 発明者 吉井 徳治 東京都三鷹市新川6-38-1 海上技術安全研究所内</p> <p>(72) 発明者 成瀬 健 東京都三鷹市新川6-38-1 海上技術安全研究所内</p>
--	--

最終頁に続く

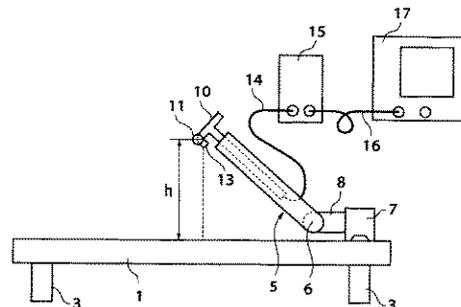
(54) 【発明の名称】 インパルスハンマを用いた板厚測定方法

(57) 【要約】

【課題】板厚測定をより簡単に効率良く行うことができるインパルスハンマを用いた板厚測定方法を提供する。

【解決手段】本発明の板厚測定方法は、インパルスハンマ5のハンマ部10に設けたロードセル11により、インパルスハンマ5の鋼板1の打撃荷重Fを計測する。さらに、インパルスハンマ5に設けた加速度計13によりインパルスハンマ5の鋼板1に近付く速度(ハンマ速度)Vを検出する。そして、これら打撃荷重Fとハンマ速度Vを、インパルスハンマ5で鋼板1を打撃した際の反発係数eと関係付け、この反発係数eに基づき鋼板1の板厚を求める。このような板厚測定方法によれば、鋼板1表面を簡単に錆落とししただけで高精度の測定を行うことができるので、船体のような巨大で測定点数の多い検査に適用した場合は、手間やコストを低減できる。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

平板状の被測定物をインパルスハンマで打撃した際の打撃荷重に基づき該被測定物の厚さを測定する方法であって、  
前記インパルスハンマの打撃部に設けた打撃荷重計測手段により前記打撃荷重 F を計測し、  
前記インパルスハンマに設けた速度検出手段により該インパルスハンマの前記被測定物に近づく速度（ハンマ速度）V を検出し、  
これら打撃荷重 F とハンマ速度 V を、前記インパルスハンマで前記被測定物を打撃した際の反発係数 e と関係付け、該反発係数 e に基づき前記板体の厚さ T を求めることを特徴とするインパルスハンマを用いた板厚測定方法。

10

## 【請求項 2】

前記インパルスハンマの前記被測定物との接触時間を求め、  
該接触時間と、前記打撃荷重 F、前記ハンマ速度 V、前記反発係数 e を、次式の力積 I で関係付けることを特徴とする請求項 1 記載のインパルスハンマを用いた板厚測定方法：

## 【数 1】

$$I = \int_0^{\tau} F dt = MV(1+e)$$

但し、M：インパルスハンマの質量。

20

## 【請求項 3】

前記力積 I を表す波形パラメータである打撃荷重積分値を実験から求め、  
該波形パラメータと前記被測定物の実際の厚さとの関係を近似する修正係数を含む多項式を求め、  
該多項式に前記力積 I を表す波形パラメータである打撃荷重積分値を代入して前記被測定物の厚さを推定することを特徴とする請求項 2 記載のインパルスハンマを用いた板厚測定方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

## 【発明の属する技術分野】

30

本発明は、インパルスハンマの打撃荷重に基づいて平板状の被測定物の厚さを測定する方法に関する。特に、板厚測定をより簡単に効率良く行うことができるインパルスハンマを用いた板厚測定方法に関する。

## 【0002】

## 【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】

船舶検査における船体鋼板の厚さ測定を例に採って説明する。  
船体鋼板の厚さ測定は、船舶検査における重要な項目である。この厚さ測定は、船殻が巨大であることや、腐蝕により船体鋼板に生じた錆等を測定前に除去する必要があること等から、多くの時間や費用がかかっている。そのため、船体検査への適用性に優れ、効率的に測定を行うことができる板厚測定方法が求められている。

40

## 【0003】

従来、この種の検査では、超音波厚さ計を用いる方法が知られている。この方法は、船体鋼板の表面から超音波を発信して、鋼板の裏面から反射してくるエコーを受信し、この受信波形に基づいて鋼板の厚さを測定する。

ところが、超音波厚さ計を用いる場合は、船体鋼板に生じた錆等を単に削り落とすだけでは、ノイズエコーが多く混在してしまうので、厚さの測定精度が悪い。測定精度を向上するためには、腐蝕した鋼板表面をグラインダ等で平滑化する作業が必要である。しかしながら、船体鋼板が複雑に湾曲していたり、船殻上での測定点数が多い場合等は、平滑化作業が困難であり、経済的な負担も大きい。

## 【0004】

50

さらに、超音波厚さ計を用いる以外に、懐の深いキャリパー（ノギス）を用いる方法も知られている。

しかしながら、キャリパーは、測定できる箇所が板体の端部に限られる。そのため、検査対象となる部位に対して汎用性が低いという難点がある。

【0005】

あるいは、前述の検査においては、テストハンマを用いることもあるが、これは主として鋼板表面の錆落としや、船殻の骨位置確認のために用いており、鋼板の定量的な厚さ測定には利用されていない。

【0006】

本発明は、このような現状に鑑みてなされたものであって、板厚測定をより簡単に効率良く行うことができるインパルスハンマを用いた板厚測定方法を提供することを目的とする。

10

【0007】

【解決を課題するための手段】

前記の課題を解決するため、本発明のインパルスハンマを用いた板厚測定方法は、平板状の被測定物をインパルスハンマで打撃した際の打撃荷重に基づき該被測定物の厚さを測定する方法であって、前記インパルスハンマの打撃部に設けた打撃荷重計測手段により前記打撃荷重  $F$  を計測し、前記インパルスハンマに設けた速度検出手段により該インパルスハンマの前記被測定物に近づく速度（ハンマ速度） $V$  を検出し、これら打撃荷重  $F$  とハンマ速度  $V$  を、前記インパルスハンマで前記被測定物を打撃した際の反発係数  $e$  と関係付け、該反発係数  $e$  に基づき前記板体の厚さ  $T$  を求めることを特徴とする。

20

【0008】

本発明によれば、従来の超音波厚さ計を用いて板厚測定するものに比べ、鋼板表面を簡単に錆落とししたただけで、高精度の板厚測定を行うことができる。そのため、本発明を船体のような巨大で測定点数の多い検査に適用した場合は、手間やコストを低減できる。

【0009】

本発明のインパルスハンマを用いた板厚測定方法においては、前記インパルスハンマの前記被測定物との接触時間を求め、該接触時間と、前記打撃荷重  $F$ 、前記ハンマ速度  $V$ 、前記反発係数  $e$  を、次式の力積  $I$  で関係付けることができる：

【数2】

30

$$I = \int_0^{\tau} F dt = MV(1+e)$$

但し、 $M$ ：インパルスハンマの質量。

この場合、ハンマ速度  $V$  を求めておくと、力積  $I$  の打撃荷重積分値から反発係数  $e$  を求めることができ、この反発係数  $e$  から板厚を求めることができる。

【0010】

本発明のインパルスハンマを用いた板厚測定方法においては、前記力積  $I$  を表す波形パラメータである打撃荷重積分値を実験から求め、該波形パラメータと前記被測定物の実際の厚さとの関係を近似する修正係数を含む多項式を求め、該多項式に前記力積  $I$  を表す波形パラメータである打撃荷重積分値を代入して前記被測定物の厚さを推定することができる。

40

この場合、力積  $I$  を表す波形パラメータである打撃荷重積分値を用いて、比較的高精度に板厚を推定できる。

【0011】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照しつつ説明する。

図1は、本発明の一実施の形態に係る板厚測定方法の実験装置を示す模式図である。

図2(A)～(C)は、インパルスハンマで鋼板を叩いた際の、鋼板の経時的変形状態を示す図である。

50

図3(A)～(C)は、本実施の形態における板厚測定実験で用いた鋼板のサンプルを示す図である。

【0012】

図1には、被測定物である鋼板(試験材)1が示されている。この鋼板1は、脚3を介して、図示せぬ基台上に水平状態で置かれている。鋼板1の図中右上面には、インパルスハンマ5の支持具7が取り付けられている。この支持具7のジョイント部8には、インパルスハンマ5の基端部6が連結されている。インパルスハンマ5は、その基端部6が支持具7のジョイント部8に支持された状態で、上下方向に旋回可能となっている。

【0013】

インパルスハンマ5は、頭部(打撃部)がT字型をしたハンマ部10を備えている。このハンマ部10の頭部下端面(鋼板1との接触部)には、ロードセル11が取り付けられている。このロードセル11により、インパルスハンマ5の頭部が鋼板1に当たった際の打撃荷重が計測される。同ハンマ部10の頭部下端側面には、加速度計13が取り付けられている。この加速度計13により、測定時にインパルスハンマ5が鋼板1に近づく際の速度(ハンマ速度)が検出される。なお、ハンマ速度の検出は、光学式の距離計のようなものを用いて行うこともできる。

10

【0014】

インパルスハンマ5のハンマ部10後端は、ケーブル14を介して電源15に接続されている。一方、この電源15には、ケーブル16を介してデジタルオシロスコープ17が接続されている。インパルスハンマ5のハンマ部10頭部のロードセル11で計測された打撃荷重信号は、ケーブル14、16を介してデジタルオシロスコープ17に送られて表示される。なお、打撃荷重信号の例は、後に図4を参照しつつ説明する。

20

【0015】

次に、本発明に係る板厚の測定原理について説明する。

図1に示す実験装置を用い、鋼板1をインパルスハンマ5で叩いたときの応答は、以下の通りに定式化される。

鋼板1を叩いたときに、インパルスハンマ5の有していた運動エネルギーと運動量は、鋼板1のたわみ波(0次非対称モードの板波)となって伝わり、このたわみ波の振動に伴い反発係数 $e$ で反発される。

【0016】

図2には、インパルスハンマ5で鋼板1を叩いた際の接触時間に伴う経時的変形状態が示されている。図2(A)に示すインパルスハンマ5と鋼板1との接触時(ハンマ速度 $V = V_0$ : 時間 $t = 0$ )から、図2(B)に示すハンマ速度 $V = 0$ となる時点までで、インパルスハンマ5の落下時の運動エネルギーと運動量に応じて、鋼板1にはたわみ波(0次非対称モードの板波)が生じて伝わる。そして、図2(C)に示す跳ね返り時(ハンマ速度 $V = eV_0$ : 時間 $t = \quad$ )には、鋼板1に生じたたわみ波の振動に伴い、インパルスハンマ5は反発係数 $e$ で反発される。なお、ハンマ先端のロードセル11の出力は、図2(A)の時点で立ち上がり、接触が終了する図2(C)の時点でゼロに戻る。

30

【0017】

鋼板1のたわみ波には、インパルスハンマ5の有していた運動エネルギーの $(1 - e^2)$ 倍、運動量の $(1 + e)$ 倍がそれぞれ伝えられる。なお、これらの運動エネルギーと運動量の殆どは、接触終了時点で $a = \quad / 2$ (たわみ波の波長の半分、図2(C)参照)の範囲内において存在するものと仮定する。ここで、エネルギー保存則、運動量保存則を用いると、次の反発係数 $e$ の数式表現を得ることができる：

40

【数3】

$$e = \frac{T\rho a^2 - 1.12M}{T\rho a^2 + 1.12M} \quad \dots (1)$$

$$a^2 = \frac{\pi \tau T}{2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots (2)$$

ここで、 $T$ ：鋼板の厚さ、 $\rho$ ：鋼板の密度、 $a$ ：接触終了時点（図2（C）の時点）におけるたわみ波の存在範囲、 $M$ ：インパルスハンマの質量、 $\tau$ ：インパルスハンマの鋼板との接触時間、 $E$ ：ヤング率、 $\nu$ ：ポアソン比である。

10

【0018】

この式（1）と式（2）から、インパルスハンマの鋼板との接触時間が決まれば、たわみ波の存在範囲  $a$  が決定され、反発係数  $e$  が計算できることがわかる。なお、たわみ波の存在範囲  $a$  外に補強材等があったとしても反発係数  $e$  には影響せず、たわみ波の存在範囲  $a$  内における鋼板の厚さ  $T$  や密度  $\rho$  で反発係数  $e$  が決まる。

【0019】

前述の接触時間  $\tau$  は、ヘルツの接触理論に基づき次式で表現することができる：

【数4】

$$\tau = \frac{2.94 a}{V} \quad \dots (3)$$

$$a = \left[ \frac{30}{16} V^2 \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right) M \right]^{\frac{2}{5}} R^{-\frac{1}{5}} \quad \dots (4)$$

ここで、 $V$ ：ハンマ速度、 $R$ ：ハンマ先端曲率である。

なお、反発係数及びヘルツの接触理論については、例えば W.H.Hopmann II, "Effects of impact on structures" shock and vibration handbook, Vol.1, Magraw-Hill, 1961 を参照されたい。

30

【0020】

インパルスハンマ5のロードセル11で計測された打撃荷重  $F$  は、力積を  $I$  とすると、次式で反発係数  $e$  と関係付けられる。

【数5】

$$I = \int_0^{\tau} F dt = MV(1+e) \quad \dots (5)$$

そして、式（1）と式（5）を組み合わせると、鋼板の厚さ  $T$  に関して次式が得られる。

【数6】

$$T = \frac{1.12MI}{\rho a^2(2MV-I)} \quad \dots (6)$$

したがって、ハンマ速度  $V$  を求めておけば、力積  $I$  の打撃荷重積分値から反発係数  $e$  が計算でき、鋼板の厚さ  $T$  を求めることができる。

【0021】

次に、図1の実験装置を用いて行った実験結果について述べる。

最初に、前述した測定原理を確認するため、式（5）及び  $FEM$ （完全弾性モデル）あるいは実験から求めた力積と鋼板の厚さ  $T$  の関係を調べた。

図3には、実験に使用した鋼板が示されている。図3（A）の鋼板1Pは1m×1mのSM400鋼板であって、7種の厚さ（ $T = 6, 9, 12, 16, 19, 22, 25$  mm）

50

のものをそれぞれ用意した。図3(B)の鋼板は、図3(A)の鋼板1Pの下面に厚さ22mmの棒状の補強部材P'を設けたものである。補強部材P'は、鋼板1Pに隅肉溶接で接合されている。なお、この補強部材P'は、船殻においては裏骨に相当する。図3(C)の鋼板は、図3(B)の鋼板中央部に長さ400mmのスリットP''を切り込んだものである。

#### 【0022】

実験に使用したインパルスハンマの仕様は、測定範囲22kN、感度0.277mV/N、時定数1700sec、スティフネス0.202N/um、共鳴周波数75kHz、ヘッド質量318gである。但し、式(5)及びFEM(完全弾性モデル)の計算には、ハンマ落下試験ジグの質量も考慮して、ヘッド質量を407gとした。さらに、ハンマ先端には、曲率R=25mmの鋼製チップを使用した。ハンマの落下高さ(図1の符号h)は270mmである。

実験は、測定誤差を検証するため、各板厚(T=6、9、12、16、19、22、25mm)について、図3(A)に示す鋼板中央部の5点で測定した。

#### 【0023】

図4は、インパルスハンマで鋼板を打撃した際に得られる打撃荷重信号の例を示すグラフである。

図4には、各板厚の鋼板を打撃した際の、デジタルオシロスコープ17(図1参照)に表示される打撃荷重信号の波形の例が示されている。図4において、縦軸は打撃荷重(単位kN)を表し、横軸は時間(単位μs)を表す。

この図からわかるように、厚さの小さい鋼板(T=6、9、12、16)については、それぞれ負荷レベルが低く、ピーク位置は厚さに応じて図中右側にシフトする傾向にある。厚さが19mm以上の各鋼板は、打撃荷重信号の差が小さく、殆ど区別することができない。

#### 【0024】

次に、本方法による板厚の推定精度を調べるため、4つの波形パラメータ(打撃荷重積分値、ピーク荷重、半値幅、最大最小比)と板厚の関係を多項式近似し、修正係数を重回帰分析により求めた。そして、この修正係数を用い、各パラメータを板厚に変換して、真の板厚に対する誤差を求めた。

#### 【0025】

次に、実験結果について述べる。

図5は、式(5)、FEM解析、実験で求めた打撃荷重積分値(平均値)のそれぞれと板厚との関係を表すグラフである。この図において、縦軸は打撃荷重積分値(単位Ns)を表し、横軸は鋼板の厚さ(単位mm)を表す。

式(5)(図中 で示す)とFEM解析(図中 で示す)は、厚さが19mm以上では値がほぼ一致した。厚さが小さい場合は、式(5)による打撃荷重積分値(力積I)はFEM値よりも値が小さくなる傾向にある。なお、板厚が6mm及び9mmの場合は、計算上、負の反発係数が現れて式(5)の精度が低下すると考えたため、この場合の の2点は、図5にはプロットされていない。

#### 【0026】

実験で求めた打撃荷重積分値(平均値：図中 で示す)は、板厚が大きくなるに連れて、式(5)やFEM解析の場合と同様に値が大きくなる傾向にあるが、実験で求めた打撃荷重積分値自身は、これら両者よりも常に小さい値となっている。実験で求めた打撃荷重積分値と式(5)やFEM解析とを比較して、板厚が大きい領域において値の差が大きい理由としては、打撃時に生じる鋼板の塑性変形の影響であると考えられる。さらに、板厚が小さい領域での差異は、インパルスハンマの質量Mやハンマ速度Vの算定誤差等が含まれていると考えられる。

#### 【0027】

図6(A)は打撃荷重積分値(縦軸)と板厚(横軸)との関係を表すグラフであり、図6(B)は最大最小比(微分荷重波形の最小値を最大値で割った値：縦軸)と板厚(横軸)

10

20

30

40

50

の関係を表すグラフである。

図6(A)、(B)に示すように、打撃荷重積分値も最大最小比も、ともに板厚が大きいほど値が大きくなっている。さらに、板厚が大きい領域では値が飽和する傾向がある。なお、図6(A)では、プロット点が各厚さで1点のみのように描かれているが、前述の通り、実験は鋼板中央部の5点で測定されており、これら5点での値に殆ど差がないため、重なり合ってプロットされている。

#### 【0028】

図7(A)は打撃荷重積分値を厚さに変換した推定値(縦軸)と板厚(横軸)との関係を表すグラフであり、図7(B)は最大最小比を厚さに変換した推定値(縦軸)と板厚(横軸)の関係を表すグラフである。

図7(A)に示すように、打撃荷重積分値を厚さに変換した場合には、各プロット点は点線で示す直線上にほぼのっており、板厚との高い相関が得られていることがわかる。但し、板厚が19mm以上の領域では、若干誤差が増大していることもわかる。一方、図7(B)に示すように、最大最小比を厚さに変換した場合には、各プロット点は直線上にほぼのっているが、打撃荷重積分値の場合よりも相関が低く、値にばらつきが見受けられる。

#### 【0029】

図8は、本実験における4つの波形パラメータ(打撃荷重積分値、ピーク荷重、半値幅、最大最小比)を用いた厚さ推定の最大誤差(厚さごと5点の計測値の中で誤差が最大のもの)と板厚の関係を表すグラフである。

図8では、波形パラメータが打撃荷重積分値の場合を、ピーク荷重の場合を、半値幅の場合を、最大最小比の場合をで示している。このグラフからわかるように、波形パラメータが打撃荷重積分値の場合(図中)で示すが、他の3つの波形パラメータと比較して最も推定精度が良く、厚さ19mm以下に限ると $\pm 0.5$ mmの推定精度が得られている。なお、インパルスハンマの質量や打撃部形状、パネ定数等を改良することにより、厚さ19mm以上でも高い推定精度を得ることができるものと考えられる。

#### 【0030】

図9は、図3(B)に示す補強部材の効果を表すグラフである。(A)は打撃荷重積分値と隅肉溶接部からの距離の関係を表すグラフであり、(B)は最大最小比と隅肉溶接部からの距離の関係を表すグラフである。

これらのグラフにおいて、は鋼板厚さ $T = 22$ mmの場合を示し、は鋼板厚さ $T = 16$ mmの場合を示し、は鋼板厚さ $T = 10$ mmの場合を示す。これらのグラフからわかるように、図9(A)の打撃荷重積分値の場合も図9(B)の最大最小比の場合も、補強部材の隅肉溶接部の近くではともに値が大きくなっており、100mm以上の箇所においては殆ど定数となっている。そのため、補強部材(船殻における裏骨)の厚さ測定に対する影響は、補強部材からの長さが100mm以内で起こり、100mm以上では殆ど影響がないものと思われる。したがって、本発明を船舶検査に適用する際には、裏骨位置から大体8~10cm離れた箇所で行うと、十分な測定精度を得ることができるといえる。

#### 【0031】

なお、図3(C)に示すスリット付きの鋼板を用いた実験も行った結果、スリットから5cm以上離れた箇所では、十分な精度の厚さ測定を行うことができることがわかった。

#### 【0032】

##### 【発明の効果】

以上の説明から明らかなように、本発明によれば、板厚測定をより簡単に効率良く行うことができるインパルスハンマを用いた板厚測定方法を提供できる。

##### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施の形態に係る板厚測定方法の実験装置を示す模式図である。

【図2】インパルスハンマで鋼板を叩いた際の、鋼板の経時的変形状態を示す図である。

【図3】本実施の形態における板厚測定実験で用いた鋼板のサンプルを示す図である。

【図4】インパルスハンマで鋼板を打撃した際に得られる打撃荷重信号の例を示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図5】式(5)、FEM解析、実験で求めた打撃荷重積分値(平均値)のそれぞれと板厚との関係を表すグラフである。

【図6】図6(A)は打撃荷重積分値(縦軸)と板厚(横軸)との関係を表すグラフであり、図6(B)は最大最小比と板厚(横軸)の関係を表すグラフである。

【図7】図7(A)は打撃荷重積分値を厚さに変換した推定値(縦軸)と板厚(横軸)との関係を表すグラフであり、図7(B)は最大最小比を厚さに変換した推定値(縦軸)と板厚(横軸)の関係を表すグラフである。

【図8】本実験における4つの波形パラメータ(打撃荷重積分値、ピーク荷重、半値幅、最大最小比)を用いた厚さ推定の最大誤差と板厚の関係を表すグラフである。

【図9】図3(B)に示す補強部材の効果を表すグラフである。(A)は打撃荷重積分値と隅肉溶接部からの距離の関係を表すグラフであり、(B)は最大最小比と隅肉溶接部からの距離の関係を表すグラフである。

【符号の説明】

1、1P 鋼板(試験材)

P' 補強部材

3 脚

5 インパルスハンマ

7 支持具

10 ハンマ部

11 ロードセル

14、16 ケーブル

17 デジタルオシロスコープ

P スリット

6 基端部

8 ジョイント部

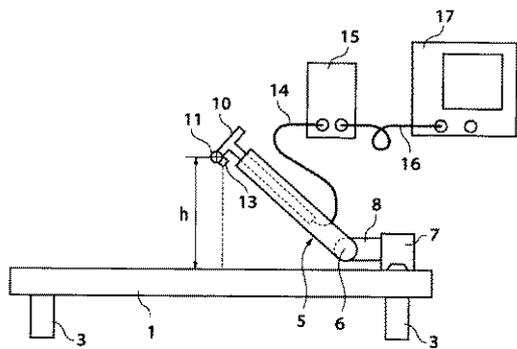
13 加速度計

15 電源

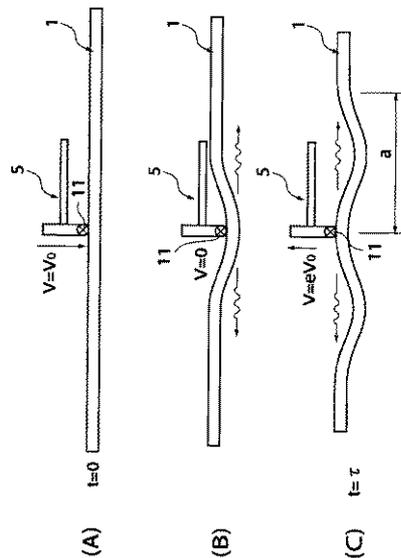
10

20

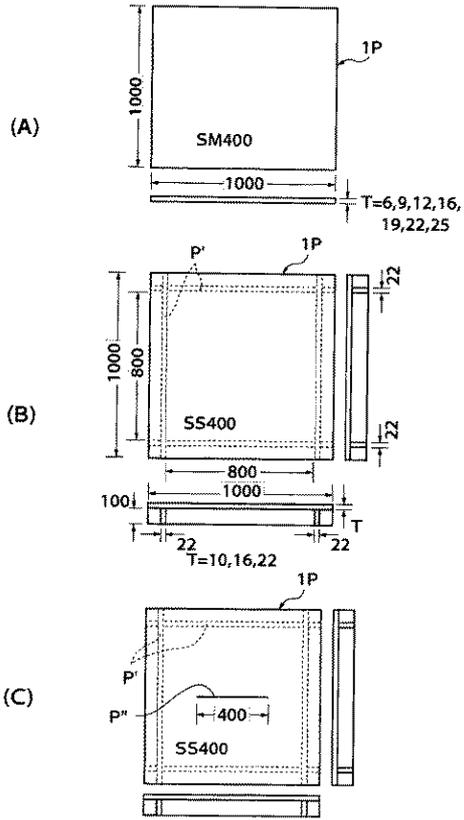
【図1】



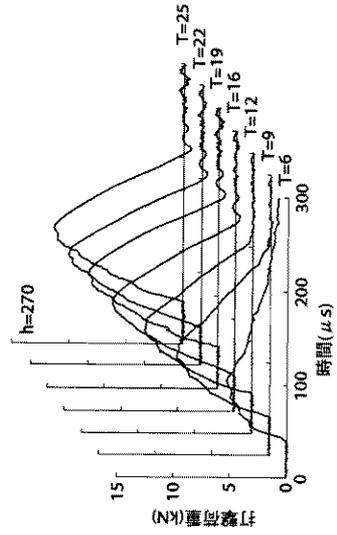
【図2】



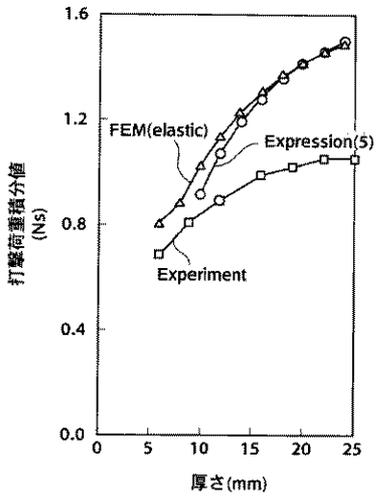
【 図 3 】



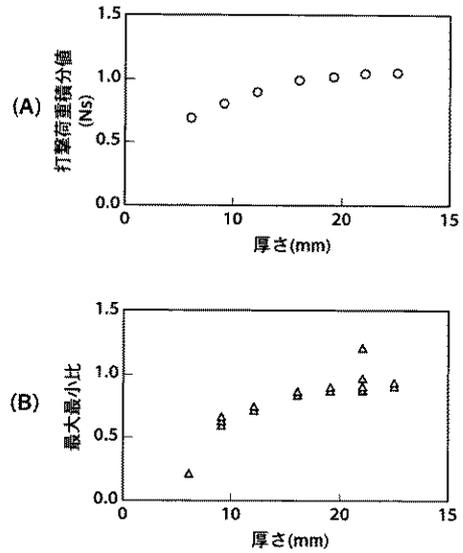
【 図 4 】



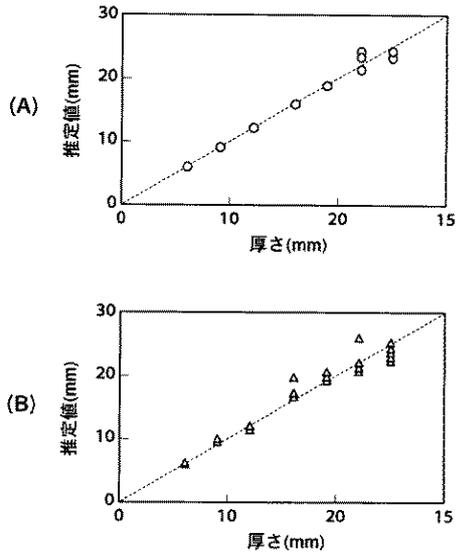
【 図 5 】



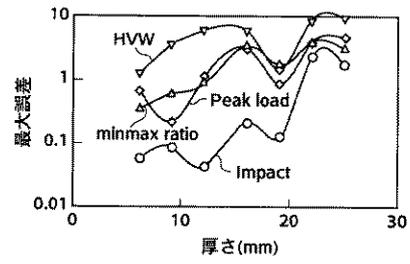
【 図 6 】



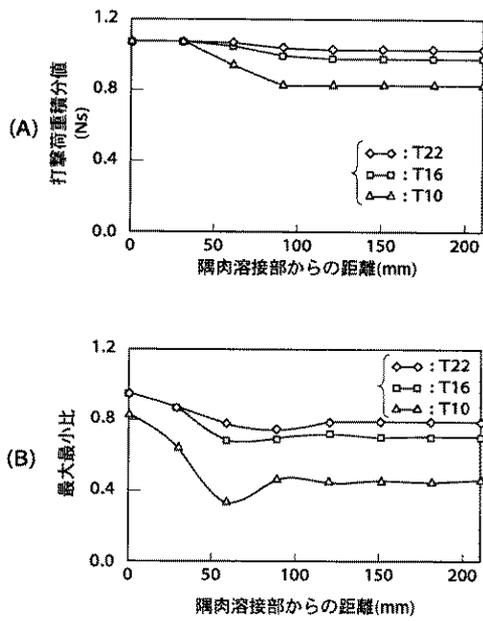
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F069 AA46 BB19 CC06 DD15 DD25 GG01 GG15 HH30 MM04 NN06  
NN18