

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21760563

研究課題名（和文） 応力波パルス負荷方式による衝撃押込み硬度及び破壊じん性測定装置の開発

研究課題名（英文） Determination of Impact Indentation Hardness for Metallic Materials and Impact Fracture Toughness for Brittle Materials

研究代表者

中井 賢治（NAKAI KENJI）

岡山理科大学・工学部・講師

研究者番号：70388924

研究成果の概要（和文）：ホプキンソン棒を利用した押込み硬度試験装置を用いて、鉄鋼，チタン合金，純チタン，アルミ合金の衝撃押込み硬度を測定した。また，インストロン試験機を用いて上記材料の静的押込み硬度を求め，それと衝撃押込み硬度とを比較することにより，押込み硬度に及ぼす負荷速度の影響を調べた。その結果，アルミ合金において，衝撃押込み硬度と静的押込み硬度の差はほとんどなく，負荷速度依存性はほとんどないことが確認できた。また，鉄鋼，チタン合金，純チタンにおいては，負荷速度の上昇とともに，押込み硬度は増加することがわかった。

研究成果の概要（英文）：The impact indentation hardness of several metallic materials is determined in the standard split Hopkinson pressure bar. Steel, titanium alloy, pure titanium and three different aluminum alloys are tested at room temperature. Cylindrical specimens are used in the Hopkinson bar tests and the static tests. The static indentation hardness is measured with an Instron testing machine. The effect of loading rate on the indentation hardness is investigated. It is shown that the indentation hardness is independent of loading rate for all aluminum alloys. It is also shown that the indentation hardness increases with increasing loading rate for steel, titanium alloy and pure titanium.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 2011年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 2012年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，構造・機能材料

キーワード：構造・機能材料，材料力学，応力波，衝撃押込み硬度，ホプキンソン棒

## 1. 研究開始当初の背景

押込み硬度試験は簡単で短時間に実施できるので，金属等の塑性加工に必要な材料の引張り強度，ひずみ加工硬化指数を推定するために広く使用されてきた。また熱処理の影

響や切削加工が強度特性に及ぼす影響を容易に評価できるので，工業材料の品質管理にも頻繁に使用されている。一般に材料の機械的特性や変形機構は，変形（ひずみ）速度に依存することが認められている。「押込み硬

度」も重要な機械的特性の一つであるから、やはり変形速度に依存する特性であると考えられる。

このような観点から「衝撃押し込み硬度」を何らかの合理的方法により簡単に測定できれば、衝撃荷重下における材料の塑性特性をある程度定量的に評価できるのではないかと考えた。

## 2. 研究の目的

押し込み硬度試験は、単純で短時間に実施できるので、材料の引張り強度、ひずみ加工硬化指数や、脆性材料等の破壊じん性を推定するため広く使用されてきた。一般に材料の機械的特性は変形速度に依存するので、押し込み硬度も変形速度に依存する特性と考えられる。この様な観点から、「衝撃押し込み硬度」を何らかの合理的方法によりビッカース硬度試験機による静的押し込み硬度と同様に簡単に測定できれば、衝撃荷重下における材料の強度特性を定量的に評価可能と思われる。

本研究の目的は、試作したホプキンソン棒法による押し込み硬度試験装置を用いて、6種類の金属材料（鋼、チタン合金、純チタン、3種類のアルミ合金）の衝撃押し込み硬度を測定することである。また同時に、インストロン試験機を用いて、それら材料の静的押し込み硬度を決定し、押し込み硬度に及ぼす変形速度の影響を調べた。

## 3. 研究の方法

### (1) 圧子と試験片形状

#### ① 圧子形状

本衝撃押し込み硬度試験に用いた圧子はビッカース硬度計で使用されているダイヤモンド圧子と同形状を用いた。さらに、弾性棒とのインピーダンスを考え弾性棒と同様の材質を用いた。この圧子は、480°C、3時間で時効処理したマルエージング鋼で、その質量密度は8020 kg/m<sup>3</sup>、縦弾性波の伝ば速度は4770 m/sである。なお、焼入れ後のビッカース硬度値は約600 kgf/mm<sup>2</sup>である。圧子の形状寸法を、図1に示す。

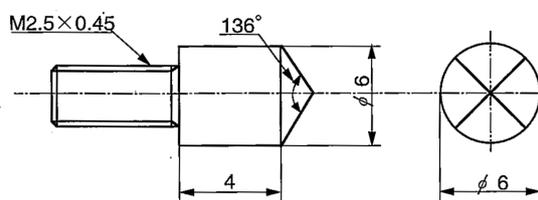


図1 使用した圧子の形状寸法

#### ② 試験片形状

静的・衝撃押し込み硬度試験で用いた材料は、炭素鋼(S45C)、チタン合金(Ti-6Al-4V)、純チタン(CP Ti)、3種類のアルミ合金

(AA7075-T6, AA2017-T4, AA6061-T6)の6種類である。アルミ合金は一般にひずみ速度依存性がない材料であり、鋼、チタン合金、純チタンはひずみ速度依存性がある材料である。衝撃押し込み硬度試験で使用した円柱状試験片の形状寸法は、直径6 mm×長さ6 mmである。なお、試験片の直径(6 mm)については、次節で述べるホプキンソン棒の直径(6 mm)を考慮して決定した。静的押し込み硬度試験で使用した円柱状試験片の形状寸法は、直径16 mm×長さ10 mmである。

### (2) 衝撃押し込み硬度試験

本衝撃試験で用いた応力波パルス負荷方式による押し込み硬度試験装置の概略図を、図2に示す。この試験装置は、2本の弾性棒(入出力棒)、打出し棒、銃身、計測装置(図では省略)からなる。弾性棒は、圧子と同条件で熱処理したマルエージング鋼である。入力棒の左端にはフランジ(打出し棒が衝突する部分;マルエージング鋼)がネジ結合で取付けられ、それに続いて入力管(Input tube)の右端とネジ結合された厚肉円筒状の反力質量(Reaction mass)が置かれている。フランジと入力管の左端はネジ結合されていない。入力管と反力質量には高炭素鋼(JIS SK4)を用いた。試験片両端面に固体潤滑剤モリコート(MoS<sub>2</sub>)を塗布し、出力棒の左端面に取付け、入力棒の右端面にネジ結合された圧子(図1参照)を試験片に先端が軽く触れる程度に接触させる。試験片取付けの様子を、図3に示す。試験手順を以下に説明する。空気圧で加速させたストライカ(打出し棒)を入力棒の左端面に衝突させると、フランジ端に発生した圧縮パルスは、入力棒と入力管の両方にわかれて左から右へ伝ばする。入力棒へ入射した圧縮ひずみパルス $\varepsilon_i(t)$ は、入力棒を左から右へと伝ばし、試験片の両端面で一部は反射 $\varepsilon_r(t)$ し、一部は試験片を通過し出力棒へ透過 $\varepsilon_t(t)$ する。一方、入力管へ入射した圧縮パルスは反力質量との接続部(固定端)で圧縮パルスとして左側へ反射する。その反射した圧縮パルスはフランジ部の自由端で再び反射し、引張波として入力棒内を左から右へ伝ばする。この引張波 $\varepsilon_{ul}(t)$ は入力棒と試験片の界面に到達して、入力棒端が引き離されるので、試験片に繰返し圧縮パルスは作用しない。入出力棒上に貼付された半導体ひずみゲージ(共和電業:KSP-2-120-E4)により、入射ひずみ波 $\varepsilon_i(t)$ 、反射ひずみ波 $\varepsilon_r(t)$ 、透過ひずみ波 $\varepsilon_t(t)$ を測定する。試験片両端に作用する圧縮荷重と圧縮変位をそれぞれ $P_1, P_2$ と $u_1, u_2$ とすると(添え字の1, 2はそれぞれ入力棒右端面と出力棒左端面を示す)、一次元弾性波伝ば理論に基づき、試験片の圧縮変形 $\delta(t)$ 、変形速度 $\dot{\delta}(t)$ 、圧縮荷重 $P(t)$ はそれぞれ次式より求めることがで

きる。

$$\delta(t) = u_1(t) - u_2(t) = 2c_0 \int_0^t \{\varepsilon_i(t') - \varepsilon_r(t')\} dt' \quad (1)$$

$$\dot{\delta}(t) = \dot{u}_1(t) - \dot{u}_2(t) = 2c_0 \{\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)\} \quad (2)$$

$$P(t) = P_2(t) = AE\varepsilon_i(t) \quad (3)$$

ここで、圧縮を正 (+) とする。A と E はそれぞれ入出力棒の断面積とヤング率 (= 209 GPa),  $c_0$  は入出力棒内の縦弾性波の伝ば速度 (= 4770 m/s) を表す。但し、これらの式は試験片の両端での動的な力のつり合い  $P_1(t) = P_2(t)$  即ち、 $\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$  を仮定している。得られた試験片のくぼみを、測定顕微鏡により測定する。式(3)より得られた最大圧縮荷重  $P_{MAX}$  を押し込み荷重として、その荷重とくぼみの直径  $d$  ( $= (d_1 + d_2) / 2$ ; 図4参照) を、以下のビッカース硬度を求める式に代入して衝撃押し込み硬度を得る。

$$H_V = \frac{2P_{MAX}}{d^2} \sin(136^\circ/2) = 1.854 \frac{P_{MAX}}{d^2} \quad (4)$$

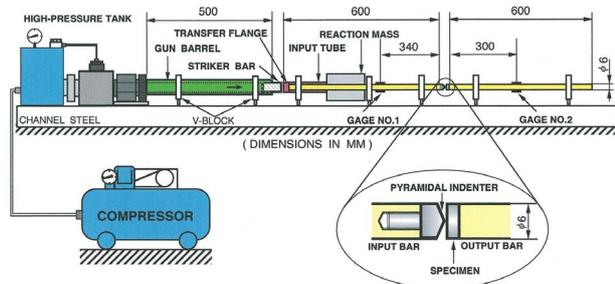


図2 ホプキンソン棒法による押し込み硬度試験装置の概略図

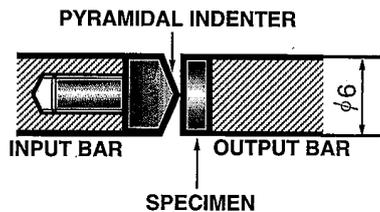


図3 試験片取付けの様子

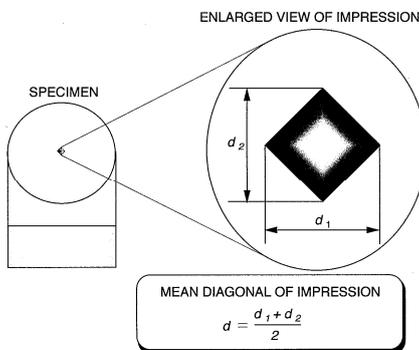


図4 試験後の試験片表面に残ったくぼみの形状

### (3) 静的押し込み硬度試験

インストロン材料試験機 (Model 5500R) を用いて、静的押し込み硬度試験を行なった。試験の様子を示した概略図を、図5に示す。試験機の上部に接着剤にて圧子を取付け、試験片を下部の土台に設置し、矢印の方向にクロスヘッド速度 1 mm/min, 荷重  $P$  を約 20~40 kgf の間で圧縮負荷して押し込み試験を行なった。

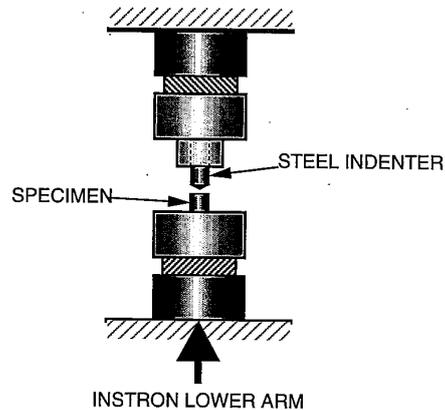


図5 静的押し込み硬度試験の様子

衝撃試験と同様、インストロン試験機により得られた最大圧縮荷重  $P_{MAX}$  を押し込み荷重として、その荷重とくぼみの直径  $d$  を、式(4)に代入して静的押し込み硬度を求める。

## 4. 研究成果

### (1) 衝撃押し込み硬度の試験結果

ホプキンソン棒を用いた衝撃押し込み硬度試験より、炭素鋼 (S45C) 試験片を使用して得られたひずみゲージ出力の代表的なオシロスコープ記録を、図6に示す。この記録の横軸は時間、縦軸は出力電圧を表している。各トレースの基準時間軸より下 (上) 向きの出力が、圧縮 (引張り) ひずみに対応している。入力棒上のひずみゲージ1より入射ひずみパルス  $\varepsilon_i$ , 試験片に繰返し圧縮負荷させない引張り波  $\varepsilon_{rl}$ , 反射ひずみパルス  $\varepsilon_r$  が、出力棒上のひずみゲージ2より透過ひずみパルス  $\varepsilon_t$  が測定されている (注: それ以降に記録された反転ひずみパルスは、入出力棒の自由端からの反射波であって、試験結果には全く影響しない)。図6の波形を、式(1), (3)に代入して求めた、炭素鋼 (S45C) の衝撃圧縮荷重と変形量の時間的变化を、それぞれ図7, 8に示す。図7から、最大圧縮荷重  $P_{MAX}$  は 877.7 N であり、それに対応する時間  $t$  は 47  $\mu$ s となっていることがわかる。これらの値から、負荷速度 ( $P_{MAX}/t$ ) を計算すると、約  $2 \times 10^7$  N/s となる。また、図8から、最大圧縮変形量は 0.1 mm であり、それに対応する時間  $t$  は 60  $\mu$ s となっていることがわかる。式

(1), (3)より, 時間  $t$  を消去して決定した衝撃圧縮荷重—変形関係を, 図9に示す。圧縮変形量 0.1 mm まで圧子が押し込まれ, 時間が経過するとともに, 変形量は 0.066 mm まで弾性回復している。この弾性回復後の変形量が, くぼみの深さである。

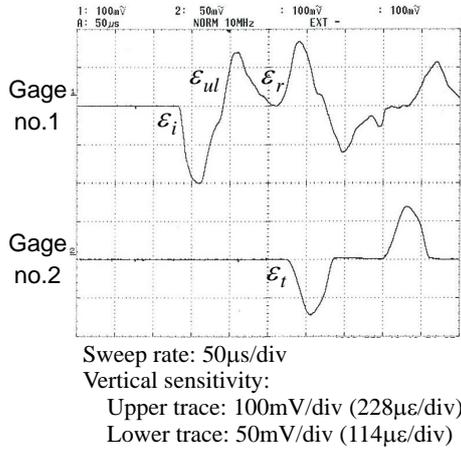


図6 炭素鋼 (S45C) 試験片に対して得られたひずみゲージ出力のオシロスコープ記録

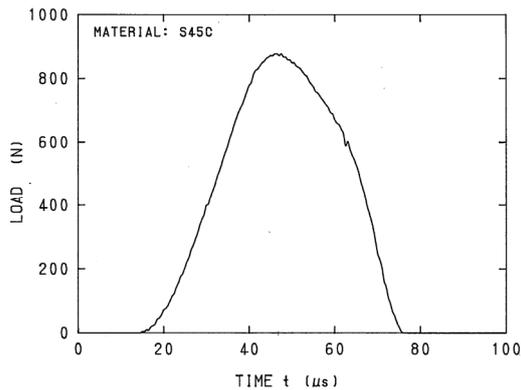


図7 炭素鋼 (S45C) の衝撃圧縮荷重の時間的変化

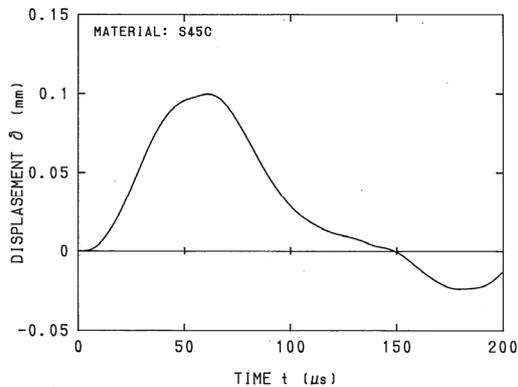


図8 炭素鋼 (S45C) の衝撃圧縮変形量の時間的変化

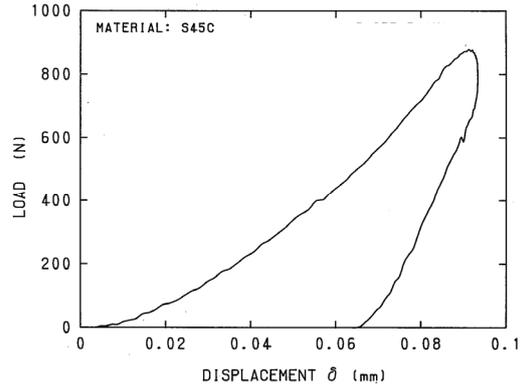


図9 炭素鋼 (S45C) の衝撃圧縮荷重—変形関係

すべての試験材料に対する衝撃圧縮荷重の最大値  $P_{MAX}$  とくぼみの直径の2乗  $d^2$  の関係をプロットした結果を, 図10に示す。すべての試験材料に対して, 最大圧縮荷重とくぼみの直径の2乗とは, 比例関係であることがわかる。

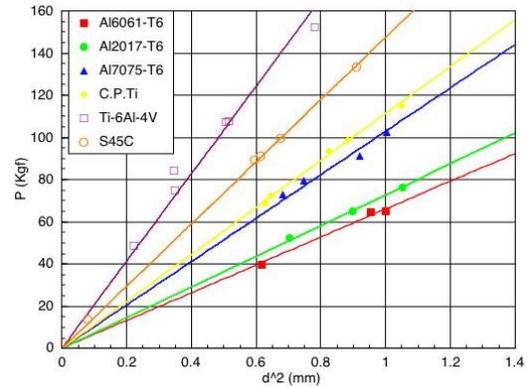


図10 衝撃圧縮荷重の最大値とくぼみの直径の2乗の関係

### (2) 静的押し込み硬度の試験結果

すべての試験材料に対する静的圧縮荷重の最大値  $P_{MAX}$  とくぼみの直径の2乗  $d^2$  の関係をプロットした結果を, 図11に示す。衝撃試験結果と同様, 最大圧縮荷重とくぼみの直径の2乗とは, 比例関係であることがわかる。

### (3) 静的押し込み硬度に及ぼす圧子の影響

ビッカース硬度計でのダイヤモンド圧子による静的押し込み硬度試験と, インストロン試験機を用いたマルエージング鋼圧子による静的押し込み硬度試験を行なった。両試験とも, 荷重  $P$  を約 20~40 kgf の間とした。両試験により得られた静的押し込み硬度値を, 図12に示す。

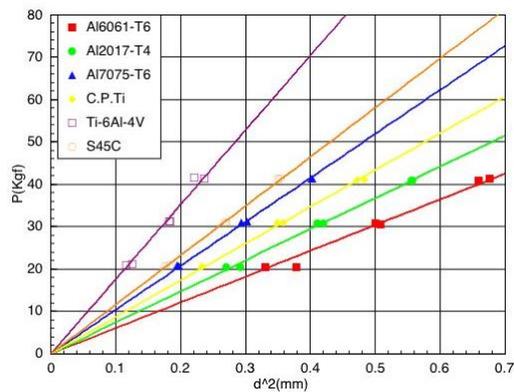


図 1 1 静的圧縮荷重の最大値とくぼみの直径の 2 乗の関係

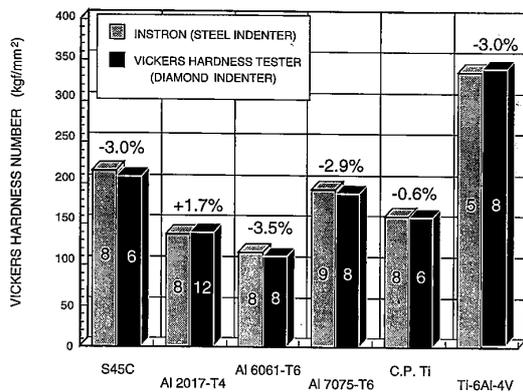


図 1 2 静的押し込み硬度に及ぼす圧子の影響

棒グラフ内の数値は、試験片の数を表す。ビッカース硬度計での硬度値と、インストロン試験機でのそれとの差の割合を、それぞれの棒グラフの上に%で表示している。両者にはほとんど差がなく、押し込み硬度に及ぼす圧子の影響は、静的だけではなく衝撃においてもほとんど無視できると考えられる。

#### (4) 押し込み硬度に及ぼす負荷速度の影響

マルエージング鋼圧子を用いることにより得られた、すべての試験材料に対するホプキンソン棒法での衝撃押し込み硬度(図 1 0 より)と、インストロン試験機での静的押し込み硬度(図 1 1 より)の比較を、図 1 3 に示す。この図から、実際の静的・衝撃押し込み硬度の数値を表にまとめると、表 1 のようになる。衝撃押し込み硬度値と静的のそれとの差を、それぞれの棒グラフの上に%で表示している。アルミ合金(AA7075-T6, AA2017-T4, AA6061-T6)では、静的押し込み硬度と衝撃のそれとの差はほとんど無いが、その他の金属材料では、衝撃押し込み硬度値は静的のそれに比べて、炭素鋼(S45C)で 31%、純チタン(CP Ti)で 29.7%、チタン合金(Ti-6Al-4V)で 17.8%それぞれ上昇している。

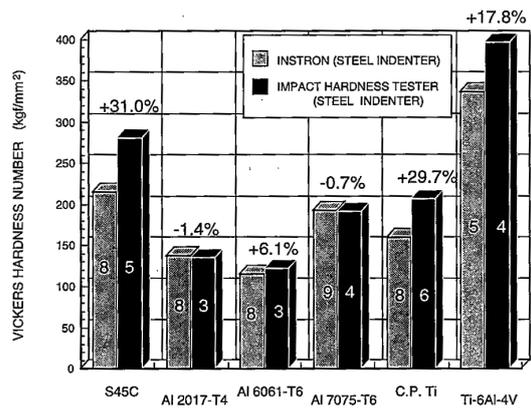


図 1 3 押し込み硬度に及ぼす負荷速度の影響

表 1 静的・衝撃押し込み硬度の数値データ

| TEST MATERIAL | STATIC Hv (kgf/mm <sup>2</sup> ) | DYNAMIC Hv (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|---------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| S45C          | 215                              | 282                               |
| Al 2017-T4    | 137                              | 136                               |
| Al 6061-T6    | 115                              | 122                               |
| Al 7075-T6    | 193                              | 192                               |
| C.P.Ti        | 160                              | 207                               |
| Ti-6Al-4V     | 336                              | 396                               |

#### (5) 静的押し込み硬度試験での引張り強度評価

本試験で得られた表 1 中の静的押し込み硬度値から求めた引張り強度( $\sigma_B = 0.325 H_v$ )と、静的引張り試験から求めた強度の比較を、表 2 に示す。すべての試験材料に対して、両者はほぼ近い値を示していることから、本押し込み硬度試験は精度良く行なわれたことを示唆している。

表 2 静的押し込み硬度値から求めた引張り強度と静的引張り強度の比較

| TEST MATERIAL | $\sigma_B^{H_v=0.325 H_v}$ (MPa) | STATIC TENSILE STRENGTH $\sigma_B$ (MPa) |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| S45C          | 685                              | 670                                      |
| Al 2017-T4    | 438                              | 426                                      |
| Al 6061-T6    | 364                              | 324                                      |
| Al 7075-T6    | 617                              | 574                                      |
| C.P.Ti        | 515                              | 430                                      |
| Ti-6Al-4V     | 1070                             | 1010                                     |

(6) まとめ

- ① 3種類のアルミ合金 (AA7075-T6, AA2017-T4, AA6061-T6) では, 押し込み硬度の負荷速度依存性はほとんどない。これは, 静的・衝撃引張 (圧縮) 試験結果の傾向と一致する。
- ② 炭素鋼 (S45C), 純チタン (CP Ti), チタン合金 (Ti-6Al-4V) において, 衝撃押し込み硬度は静的のそれよりも, 約 18~30%程度大きくなる。この傾向は, 引張 (圧縮) 流動応力の正の速度依存性の傾向と完全に一致する。
- ③ 以上から, 本衝撃押し込み硬度試験装置の衝撃強度評価法としての有効性を確認することができた。

他者により行われている動的硬度試験では, 単に荷重が極めて遅い速度 (数 mm/s) で負荷できるだけであって, 得られる負荷速度は  $10^{-2}$  N/s にすぎない。本衝撃押し込み硬度試験装置は応力波パルス負荷方式に基づいているので, 得られる負荷速度は  $10^7$  N/s オーダであり, 非常に高い負荷速度まで測定することに成功したため, 今後は本装置を利用して非常に高いひずみ速度までの材料の機械的特性を定量的に推定する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① K. Nakai and T. Yokoyama: High Strain-Rate Compressive Properties and Constitutive Modeling of Selected Polymers, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, (Reviewed), Vol. 6, No. 6 (2012), pp. 731-741.  
DOI: 10.1299/jmmp.6.731
- ② T. Yokoyama, K. Nakai and N. H. Mohd Yatim: High Strain-Rate Compressive Properties and Constitutive Modeling of Bulk Structural Adhesives, *The Journal of Adhesion*, (Reviewed), Vol. 88, Nos. 4-6 (2012), pp. 471-486.  
DOI: 10.1080/00218464.2012.660813
- ③ T. Yokoyama, K. Nakai and N. H. Mohd Yatim: High Strain-Rate Compressive Behavior of Bulk Structural Adhesives: Epoxy and Methacrylate Adhesives, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, (Reviewed), Vol. 6, No. 2 (2012), pp. 131-143.  
DOI: 10.1299/jmmp.6.131
- ④ T. Yokoyama, K. Nakai and N. H. Mohd

Yatim: High Strain-Rate Compressive Stress-Strain Response of Bulk Epoxy Structural Adhesive, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, (Reviewed), Vol. 11, Special Issue (2011), pp. SS204-SS209.  
DOI: 10.11395/jjsem.11.s204

- ⑤ T. Yokoyama, K. Nakai and K. Katoh: High Strain-rate Compressive Response of Friction Stir Welded AA6061-T6 Joints: Effect of Welding Parameter, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, (Reviewed), Vol. 10, Special Issue (2010), pp. 168-173.  
DOI: 10.11395/jjsem.10.s168

[学会発表] (計18件)

- ① 中井賢治: 一方向強化カーボン/エポキシ複合材の層間せん断強度の評価: イオンベスク試験片の使用, 日本非破壊検査協会主催 第44回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2013年1月22日~23日, 機械振興会館 (東京都港区).
- ② 中井賢治: 原子炉用黒鉛の動的引張応力-ひずみ特性, 日本機械学会主催 第20回機械材料・材料加工技術講演会, 2012年11月30日~12月2日, 大阪工業大学 (大阪市).
- ③ 中井賢治: High Strain-Rate Tensile Stress-Strain Loops of Selected Polymers, Joint Conference of 2nd ISEM, 11th ACEM, 2012SEM and 7th ISEM '12-Taipei, 2012年11月8日~11日, The Grand Hotel (台湾 台北市).
- ④ 中井賢治: High Strain-Rate Compressive Behavior and Constitutive Modeling of Selected Polymers, 第10回衝撃荷重下における材料の機械的・物理的挙動に関する国際会議, 2012年9月2日~7日, Konzerthaus Conference Center (ドイツ フライブルク市).
- ⑤ 中井賢治: 高分子材料の衝撃引張り応力-ひずみ特性の決定, 日本実験力学会主催 2012年度年次講演会, 2012年7月14日~15日, 豊橋技術科学大学 (愛知県 豊橋市).

[その他]

横山・中井研究室のホームページ  
<http://www.ous.ac.jp/MECH/yokoyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 賢治 (NAKAI KENJI)  
岡山理科大学・工学部・講師  
研究者番号: 70388924