



衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 臺丸谷, 政志, 内藤, 正鄰, 浜田, 恒平, 佐々木, 一之, 小野崎, 秀 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1112

衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

台丸谷 政 志・内 藤 正 鄰・浜 田 恒 平
佐々木 一 之・小野崎 秀

Dynamic Stress-Strain Diagrams for Copper, Aluminium and Lead

Masashi DAIMARUYA, Masachika NAITOH, Kouhei HAMADA, Kazuyuki SASAKI,
and Shigeru ONOZAKI

Abstract

The split Hopkinson bar has become an increasingly popular tool in the study of the dynamic response of materials. In the present paper, an application of the split Hopkinson bar technique with the aid of a micro-computer is presented which allows simultaneous recording of stress vs. strain, stress vs. time, strain vs. time, and strain-rate vs. time for a dynamic loading. Specimens of copper, aluminium and lead are tested at the range of strain rates up to about 1000 sec^{-1} to determine their strain-rate sensitivity. The experimental results agreed approximately with either a logarithmic law $\sigma \propto \ln \dot{\epsilon}$ or a power law $\sigma \propto \dot{\epsilon}^n$.

1 緒 言

静的試験における応力-ひずみ曲線は、普通、ひずみ速度が、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ [1/sec] 程度でのところで得られたものであり、材料の静的特性を示す重要なものである。しかし、衝撃荷重下では、ひずみ速度が、 $10 \sim 10^4$ [1/sec] の範囲に達し、材料は静的荷重を受ける場合とは異なった挙動を示すことが知られている。衝撃塑性学において、ひずみ速度の影響の問題は主要な研究課題であり、理論と実験に関する多くの文献が見られる。ひずみ速度依存性を示す材料の機械的特性を記述するために、多くの構成方程式が提案されてきた。たとえば、Malvern¹⁾ は過剰応力 $\sigma - f(\epsilon)$ (動的応力 σ と静的応力 $f(\epsilon)$ の差) はひずみ速度の 1 次関数であると仮定して構成方程式を提案している。また、Hauser²⁾ は、高ひずみ速度域で過剰応力はひずみ速度に比例すると報告している。一方、低ひずみ速度域では、過剰応力はひずみ速度の対数に比例するとの Lindholm³⁾ の報告もある。いずれにしても、ひずみ速度の影響について定まった結論が得られていないのが実状である。

本研究では、材料の動的な機械的特性を調べるために用いられるスプリット・ホプキンソン棒法によって、銅、アルミニウム、鉛の金属材料について、動的応力-ひずみ関係を実験的に求め、数式化を試みた。なお、測定装置にマイクロコンピュータを使用することによって、データ処理

時間の短縮化，および計測された信号が指示計や記録計などを経ずに直接マイクロコンピュータに入力されるため，読み取り誤差を無くすことができ，実験データの信頼性の向上を図った。

2. スプリット・ホプキンソン棒法の測定理論

スプリット・ホプキンソン棒法による測定原理を図1に基づいて簡単に述べる。

入・出力棒の単位体積当たりの質量，縦弾性係数，弾性波速度をそれぞれ ρ, E, c とし，試験片の長さを a とする。また，それぞれの棒に

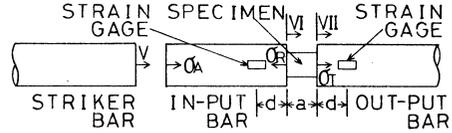


図-1 スプリットホプキンソン棒

おける応力波の伝ば方向を次の記号で示す。すなわち，衝撃棒の進行方向と同方向に伝ばする応力波に対して(→)，その逆方向に伝ばする応力波に対して(←)の符号を付ける。

衝撃棒と入力棒の衝突によって生じた圧縮応力波 $\vec{\sigma}_A$ は入力伝達棒内を右方へ伝ばし，試験片との接触面に到達する。ここで応力波は試験片に伝えられる応力波と入力伝達棒に反射される反射引張り応力波 $-\vec{\sigma}_R$ とに分かれる。また，試験片に伝えられた応力波は出力伝達棒との接触面に到達し，ここでまた試験片内に反射される応力波と出力伝達棒に伝達される伝達圧縮応力波 $\vec{\sigma}_T$ とに分かれる。いま，入力伝達棒と出力伝達棒の試験片に接触している端面のそれぞれの速度を V_I および V_{II} とすれば，試験片の圧縮ひずみ ϵ は，

$$\epsilon = (1/a) \int (V_I - V_{II}) dt \quad (1)$$

として与えられる。ただし， V_I, V_{II} は図1において右方へ動くときに正であり，応力，ひずみについては圧縮を正とする。この式でわかるように， ϵ は試験片全長にわたっての平均値であって，特定の点におけるひずみではない。それぞれの端面の速度 V_I, V_{II} と応力の関係式は次式のように与えられる。

$$V_I = (c/E) (\vec{\sigma}_A + \vec{\sigma}_R) \quad (2)$$

$$V_{II} = (c/E) (\vec{\sigma}_T) \quad (3)$$

ここで， $c = \sqrt{E/\rho}$ であるから，式(1)は

$$\sigma = (1/\rho ca) \int (\vec{\sigma}_A + \vec{\sigma}_R - \vec{\sigma}_T) dt \quad (4)$$

また，ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は次式のように与えられる。

$$\dot{\epsilon} = (1/\rho ca) (\vec{\sigma}_A + \vec{\sigma}_R - \vec{\sigma}_T) \quad (5)$$

なお，試験片内における応力 σ は両端面における応力値の平均で与えられるとし，棒および試験片の断面積をそれぞれ A, A_0 とすると，

$$\sigma = (A/A_0) (\vec{\sigma}_A - \vec{\sigma}_R + \vec{\sigma}_T) / 2 \quad (6)$$

与えられる。

以上のように，伝達棒を伝ばする応力波 $\sigma_A, \sigma_R, \sigma_T$ を知ることで，ひずみ ϵ ，ひずみ速

度 ϵ , および応力 σ の関係を求めることができる。

図2に応力解析の図式例を示す。

3 実験装置および測定系

本実験で使用した実験装置および測定系の概略を図3に示す。実験は衝撃棒①の自由落下を利用して、入力伝達棒②の一端に縦衝撃を加える方法でおこなった。これによって入力伝達棒内を圧縮弾性波が伝わり、試験片③に急激な力を加え衝撃的に試験片を塑性変形させる。余分のエネルギーは、出力伝達棒④に伝えられる。このとき、入力伝達棒、出力伝達棒、衝撃棒は弾性変形内に留まるように設定されている。衝撃速度は、衝撃棒の落下高さ (0.5~6.0m) によって調整した。

入力伝達棒、出力伝達棒に伝えられる応力-時間波形は、それぞれの棒に貼りつけられたひずみゲージ⑤によって検出し、ブリッジ・ボックス、アンプを通してデジタル・ストレージ・スコープに写し出される。また GP-IB バスを通してマイクロ・コンピュータに転送され、ミニ・フロッピーディスクに記憶される。

衝撃棒、入力伝達棒、出力伝達棒には全て、直径20mm、長さ1000mmのステンレス丸棒 SUS 360を使用した。材料特性は縦弾性係数 $E_0 = 2.1 \times 10^4$ [kg/mm²]、弾性波伝ば速度 $C_0 = 5.17 \times 10^6$ [mm/s] である。入力伝達棒、出力伝達棒には、試験片に接触する端面から $10d$ (d : 入・出力棒の直径) の位置に半導体ひずみゲージを軸対称に4枚貼り、直列に接続して、曲げの影響を取り除いた。

なお、銅試験片は、直径8mm、長さ3, 5, 10, 20mmで、450℃で1時間焼鈍を行ったものを用いた。アルミニウム試験片は、直径10mm、長さ3, 5, 10, 15, 20mmで、400℃で1時間半焼鈍を行ったものを用いた。鉛試験片は、直径8.5mm、長さ5, 10, 15mmのものを用いた。

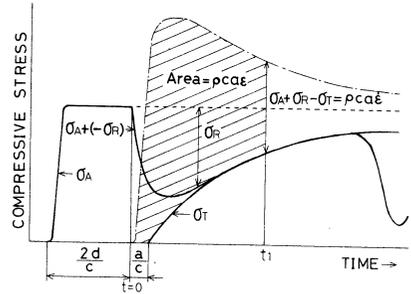


図-2 応力解析

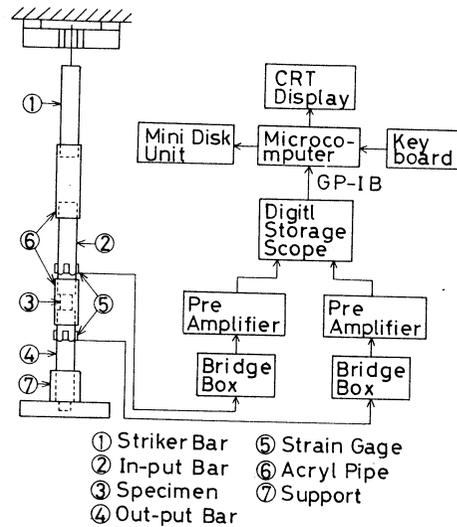


図-3 実験装置および測定系

4 実験結果

4.1 静的応力-ひずみ関係

銅，アルミニウム，および鉛の静的圧縮実験により得られた実験値および静的応力-ひずみ関係を図4に示す。曲線は次式で関数近似したものである。

$$\begin{aligned} \sigma \leq \sigma_Y : \sigma = f(\epsilon) = E_0 \cdot \epsilon \\ \sigma > \sigma_Y : \sigma = f(\epsilon) = A (\epsilon - \epsilon_Y)^B + \sigma_Y \end{aligned} \quad (7)$$

表1に各材料に対する諸量を示す。なお， σ_Y ， ϵ_Y は関数 $f(\epsilon)$ が実験値に最も一致するように決定した値で，必ずしも弾性限界を示す値ではない。

表-1 各材料の諸量

	COPPER	ALUMINUM	LEAD
E kg/mm ²	1.2×10^4	7×10^3	1.45×10^3
ϵ_Y %	0.6×10^{-2}	1×10^{-2}	2×10^{-2}
σ_Y kg/mm ²	0.72	0.7	0.29
A kg/mm ²	92.8	16.51	3.37
B	0.681	0.394	0.608
C mm/s	3.65×10^6	5.05×10^6	1.12×10^6

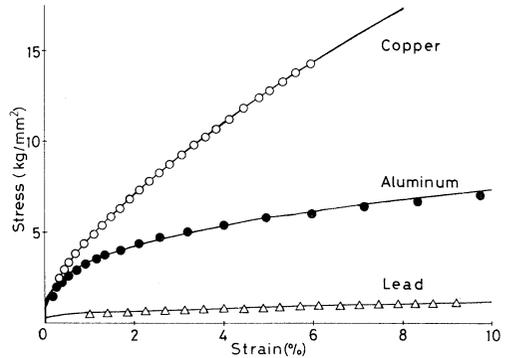


図-4 静的応力-ひずみ関係

4.2 測定波形

スプリット・ホプキンソン棒法の実験によって入・出力棒上で測定された，銅，アルミニウム，および鉛試料の応力波形をそれぞれ図5(a)~(c)に示す。縦軸は入・出力棒の応力値で，横軸は時間である。各図とも衝撃速度 $V_0 = 10.8$ [m/sec]であり，スケールは同じである。これらの図を比較すると，各図とも同様の応力変動を示しており，図2に対応している。ただし，波形上に小さな振動が見られるが，この振動は縦衝撃を受けた入・出力棒の主として横慣性効果による影響である⁴⁾。これらの波形により，2章で述べた理論に基づきひずみ，ひずみ速度，動的応力を計算した。

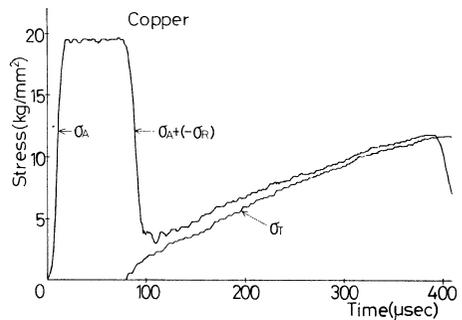


図-5(a) 銅

衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

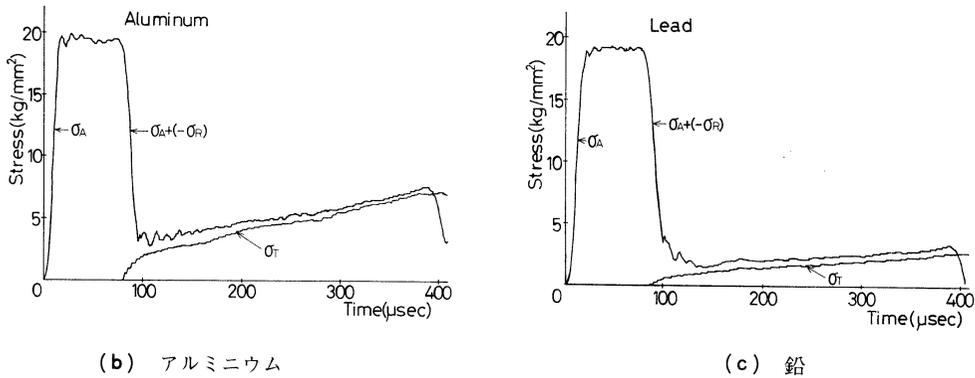


図-5 測定波形

4.3 動的応力-ひずみ速度関係

銅, アルミニウム, 鉛の測定波形から得られた一定ひずみ (2, 4, 6, 8, 10%) における動的応力-ひずみ速度関係を, 図 6(a)~(c)に示す。各材料とも一定ひずみにてひずみ速度の増加にともない応力値も増し, 中でも鉛は低ひずみ速度域から応力値の増加がみられる。また, ひずみの増加にともないひずみ速度の影響が大きく現れ, 動的応力の増加割合も増していることがわかる。

4.4 動的応力-ひずみ関係

一定ひずみ速度に対する動的応力-ひずみ曲線を図 7(a)~(c)に示す。これらの図は, 各一定ひずみ速度における応力値を, 各ひずみごとに読み取ってプロットした図である。各材料とも, 動的応力-ひずみ曲線は

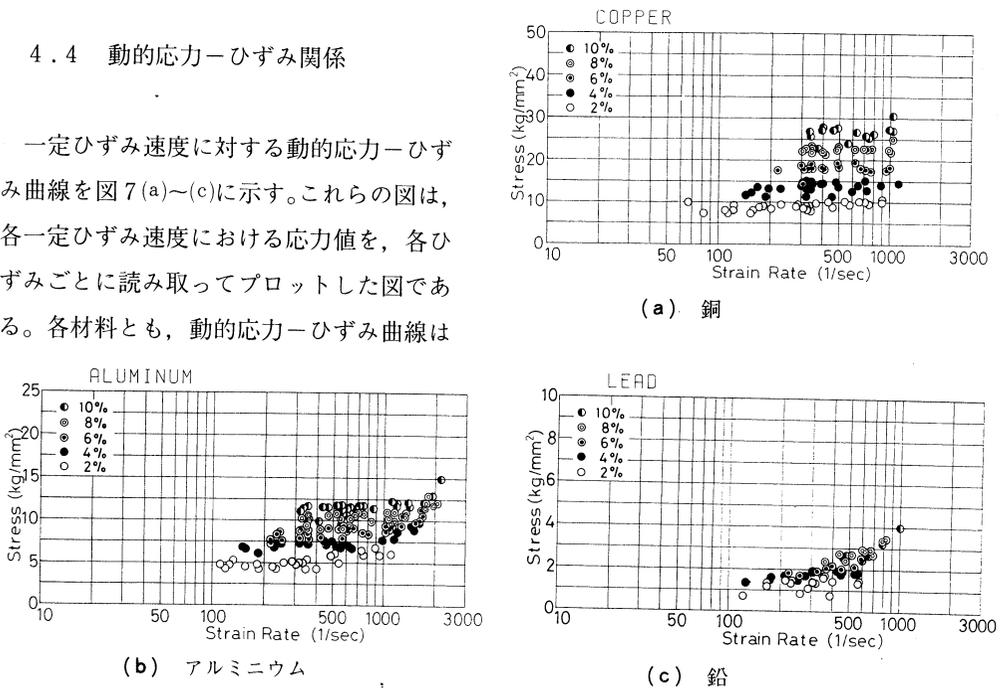


図-6 動的応力-ひずみ速度関係

静的応力-ひずみ曲線よりも応力が高くなり、この傾向はひずみ速度が大きいくほど顕著であることが分かる。

ひずみ速度200~800 [1/sec] の範囲内において、動的応力と静的応力の比は、銅の場合1.2~1.45倍、アルミニウムの場合1.1~1.5倍、鉛の場合1.7~3.2倍となっている。これより、鉛が一番ひずみ速度依存性が高く、銅とアルミニウムに関しては大きな違いが見られない。

5 構成方程式の検討

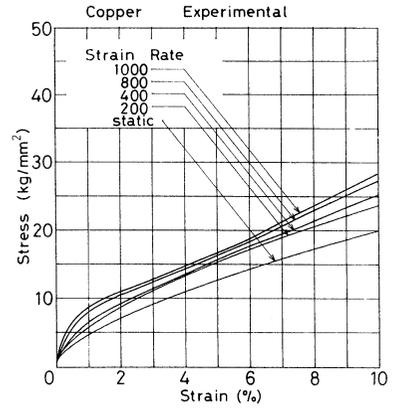
5.1 構成式の数式化

ひずみ速度を考慮した種々の構成方程式が提案されているが、大別すれば対数則と指数則に分類することができる。すなわち、 $\sigma \propto \log \dot{\epsilon}$ あるいは、 $\sigma \propto \dot{\epsilon}^n$ で、Lindholm³⁾の実験式は前者であり、Malvern 構成式¹⁾は後者の $n = 1$ の場合に相当する。これらの構成式は具体的には次式で表される。

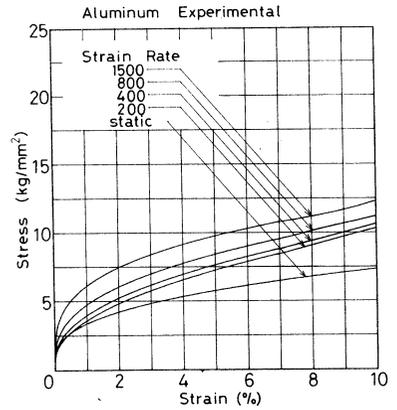
$$\text{Lindholm の実験式: } \sigma = f(\epsilon) + A \cdot \ln(\dot{\epsilon}/B) \quad (8)$$

$$\text{Malvern 構成式: } \sigma = f(\epsilon) + E_0/K \cdot \dot{\epsilon} \quad (9)$$

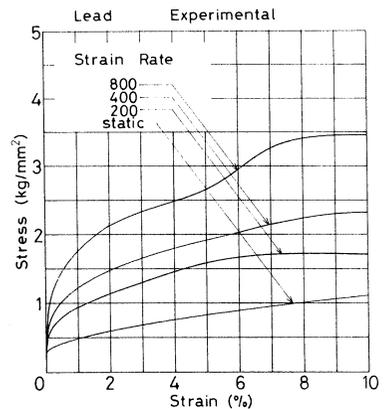
式(8)および式(9)に含まれている K, A は多くの場合、定数と仮定されているが、厳密にはひずみの関係と考えられる。ここでは、一定ひずみに対して得られた応力-ひずみ速度関係の実験値を最小二乗法を用いて式(8)および式(9)で近似し、 K および A の値を算出した。得られた値を用いて描いた、一定ひずみ(2, 4, 6, 8, 10%)における銅、アルミニウム、鉛についての実験値と両近似曲線を、図8~11に示す。ただし、縦軸は応力であり、横軸はひずみ速度の対数である。なお、 B 値については、静的実験でのひずみ速度が、 $10^{-3} \sim$



(a) 銅



(b) アルミニウム



(c) 鉛

図-7 動的応力-ひずみ曲線

衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

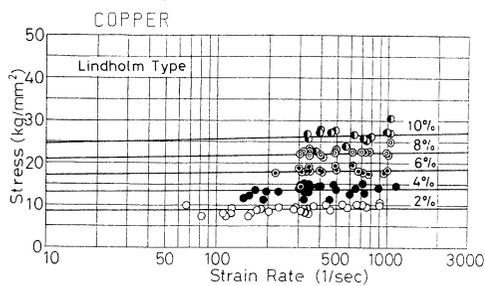


図-8 銅の対数則近似

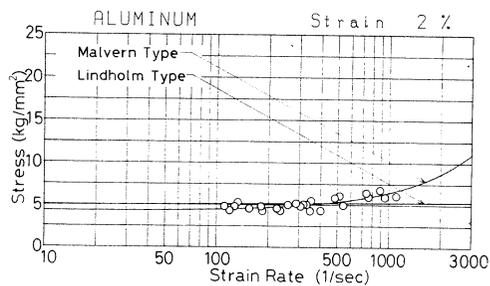


図-9(a)

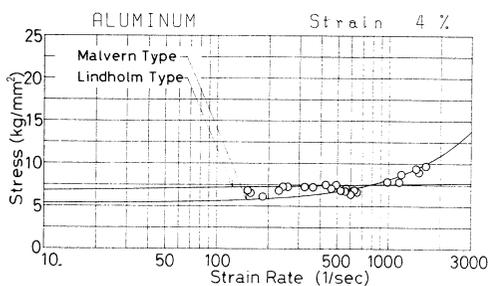


図-9(b)

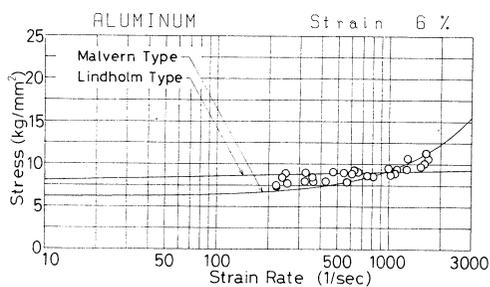


図-9(c)

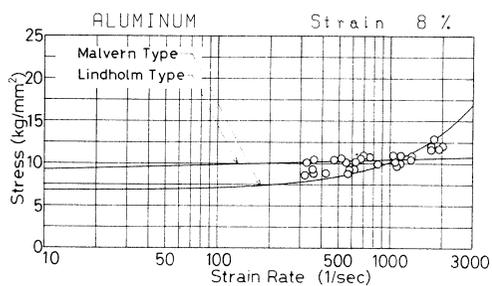


図-9(d)

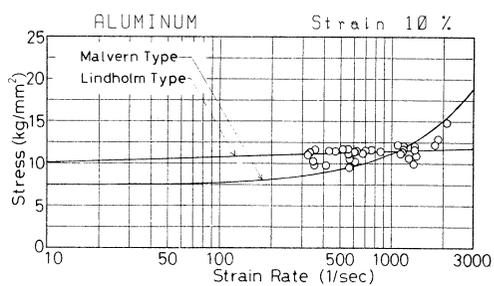


図-9(e)

図-9 アルミニウムの対数則および指数則近似

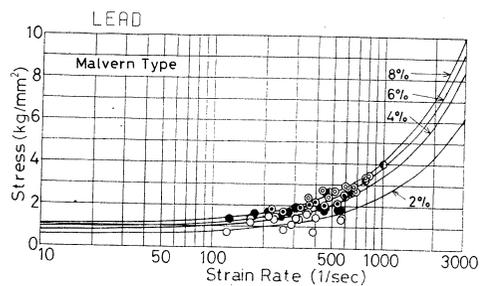


図-10 鉛の指数則近似

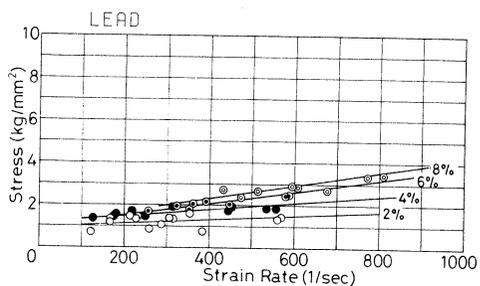


図-11 鉛の σ - $\dot{\epsilon}$ 関係

10^{-4} [l/sec]程度であるので、ここでは $B = 10^{-3}$ [l/sec]とした。

図8の銅の場合は、実験で得られたひずみ速度域において、対数則(8)式で近似した曲線と実験値がよく一致している。

図9(a)~(e)のアルミニウムの場合は、対数則および指数則の両者で近似したが、600 [l/sec]以下のひずみ速度において、両構成式とも実験値とよく一致している。しかし、高ひずみ速度域においては、むしろ Malvern 構成式に対応しており、応力はひずみ速度に比例して増加していると言える。

図10の鉛の場合、低ひずみ速度域から実験値と Malvern 構成式で近似した曲線が一致していることがわかる。そこで、鉛の場合には改めて横軸にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ をとり実験値を直線近似したものを、図11に示す。図11は、応力がひずみ速度に比例していることを明確に示している。

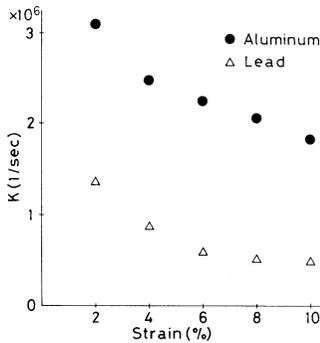


図-12 K - ϵ 関係

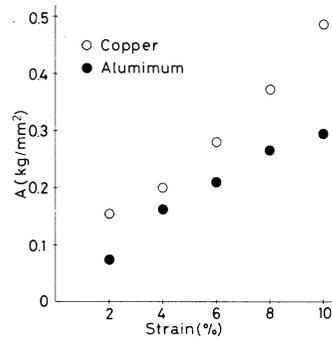


図-13 A - ϵ 関係

5.2 ひずみ速度依存性を表す材料定数 K および A

銅，アルミニウム，鉛試料について、それぞれ式(8)あるいは式(9)で近似したが、各ひずみごとにひずみ速度依存性を表す K 値および A 値がひずみ量によって変化した。これらの K 値，A 値をひずみ 2% ごとにプロットしたものを、図12, 13に示す。

Malvern 構成式に含まれる K [l/sec] は、その値が小さいほどひずみ速度依存性が高いことを示す。図12より、アルミニウム、鉛ともひずみの増加に伴い K の値は減少する傾向にあり、ひずみ速度依存性はひずみとともに増加することがわかる。

一方、対数則(8)式にふくまれる A [kg/mm²] も、その材料のひずみ速度依存性を表し、その値が大きいくほどひずみ速度依存性が高いことを示す。図13より、銅、アルミニウムともひずみの増加に伴い A の値は増加する傾向にある。

以上のことより、銅、アルミニウム、鉛ともひずみ速度依存性はひずみとともに増加し、ひずみの関数となっていることがわかる。

衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

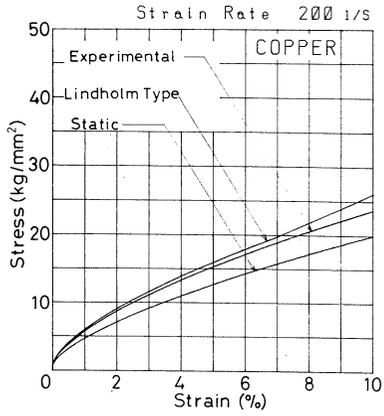


図-14(a) ひずみ速度200(1/sec)
(銅)

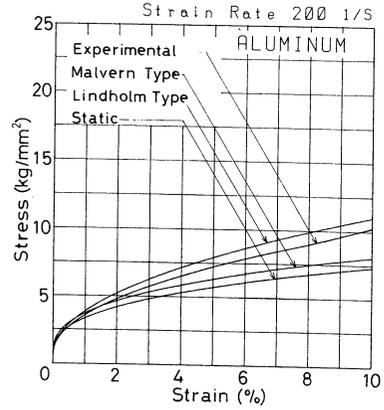


図-15(a) ひずみ速度200(1/sec)
(アルミニウム)

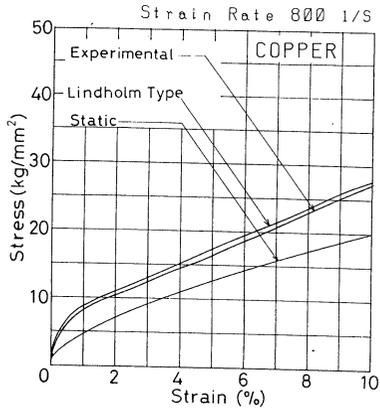


図-14(b) ひずみ速度800(1/sec)
(銅)

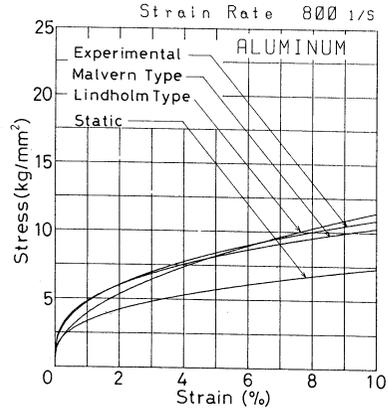


図-15(b) ひずみ速度800(1/sec)
(アルミニウム)

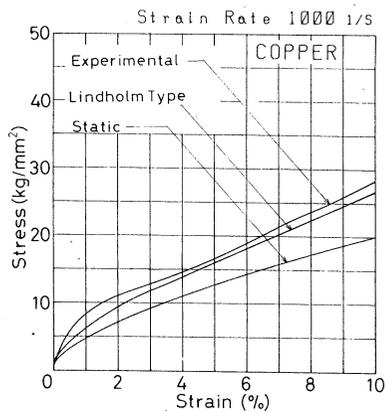


図-14(c) ひずみ速度1000(1/sec)
(銅)

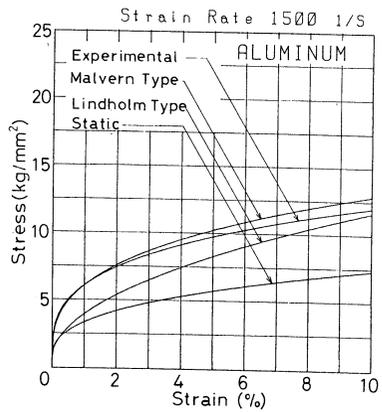


図-15(c) ひずみ速度1500(1/sec)
(アルミニウム)

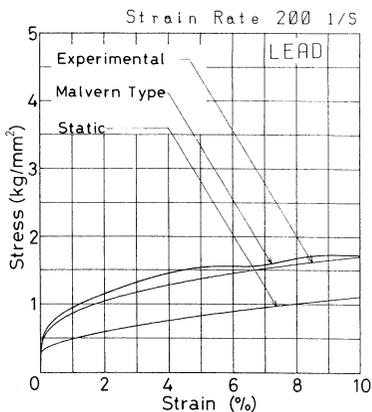


図-16(a) ひずみ速度200(1/sec)
(鉛)

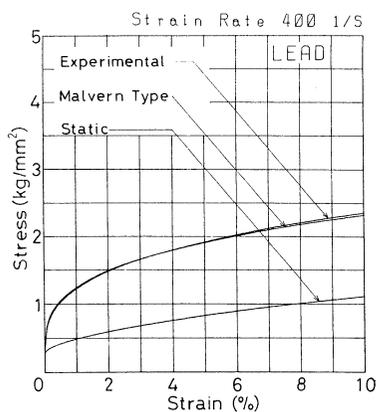


図-16(b) ひずみ速度400(1/sec)
(鉛)

5.3 動的応力-ひずみ曲線

各ひずみ速度に対して、実験により得られた動的応力-ひずみ曲線と、近似した両構成式から得られた動的応力-ひずみ曲線の比較を、図14～16に示す。銅の場合、実験により得られたひずみ速度域においては対数則に比較的良好に一致することがわかる。アルミニウムの場合、ひずみ速度200 [1/sec] では対数則の方が実験値に近く、ひずみ速度800 [1/sec] では両構成式とも同等の有効性を示している。また、ひずみ速度が

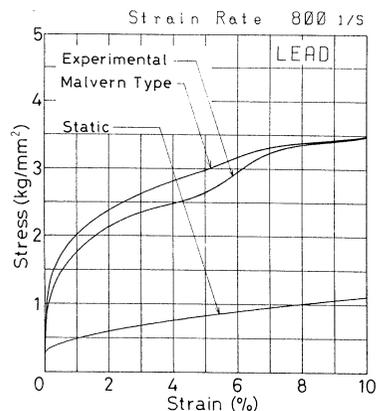


図-16(c) ひずみ速度800(1/sec)
(鉛)

1500 [1/sec] になると Malvern 構成式のほうが実験値により一致している。したがって、低ひずみ速度域では対数則に、高ひずみ速度域においては Malvern 構成式に近いことがわかる。

鉛の場合、各ひずみ速度において Malvern 構成式は実験値と近い傾向を示し、特にひずみ速度400 [1/sec] においては、実験値と一致している。

6 結 言

本研究では、スプリット・ホプキンソン棒法を用いて、試験片両端面の応力変動を測定することにより、応力、ひずみ、ひずみ速度を求め、銅、アルミニウムおよび鉛の動的応力-ひずみ曲線を求めた。また、各試料について構成方程式の数式化を試み、実験値との比較を行い、次の結論を得た。

- 1) 銅、アルミニウム、鉛ともひずみ速度依存性を示す。

衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線

- 2) 衝撃荷重下における応力-ひずみ曲線は、静的応力-ひずみ曲線よりも応力が高くなり、この傾向はひずみ速度が高いほど顕著である。
- 3) 動的応力-ひずみ関係について、銅は本実験で測定されたひずみ速度 10^3 [1/sec]までは対数則で近似される。アルミニウムは低ひずみ速度域では対数則に対応し、高ひずみ速度域では Malvern 構成式に対応する。鉛は低ひずみ速度から Malvern 構成式に対応する。
- 4) 対数則および指数則中のひずみ速度依存性を表す材料定数 K 値および A 値はひずみ量によって変化する。

(昭和61年 5月21日 受理)

参考文献

- 1) L. E. Malvern, : J. Appl. Mech, 18, 203 (1951)
- 2) F. E. Hauser, J.A. Simmons, and J. E. Dorn : Response of Metals to High Velocity Deformation (1961), 93, Interscience Publ.
- 3) U. S. Lindholm : Mech. Phys. Solid, 12 (1951), 317
- 4) 内藤, 台丸谷 : 縦衝撃を受ける丸棒の弾性波に及ぼす衝撃立上がり時間の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 50巻, 453号, (昭59), 1097