

# 衝撃荷重用高精度ロードセルの開発と その鍛造加工への適用に関する研究

東北学院大学 工学部 機械工学科

教授 佐藤裕久

(平成4年度研究開発助成 AF-92025)

## 1. 研究の目的と背景

精密鍛造の精度は、現在のところ、 $\pm 0.02\text{mm}$ 程度であるといわれている。さらに高精度の要請に答えるためには、加工荷重の変動を $\pm 1\%$ 以下に抑える必要がある。また、加工の高効率化の要請と言った背景からその高速化に伴い発生する衝撃荷重について、その計測と制御が問題となってきている。

本研究では、荷重測定精度が衝撃負荷条件で最大荷重の $3\%$ 以下の高精度ロードセルをドロップハンマーシステムにおいて実現することを目的とする。

ドロップハンマーは、従来、金属の高速鍛造に利用されてきた<sup>1)~4)</sup>。近年、やや小型のドロップハンマーが、FRPなど複合材料の強度評価用<sup>5)</sup>、あるいは、各種構造材料のエネルギー吸収能評価用<sup>6)</sup>などとしても利用されるようになってきている。これらにおいては、いずれも、発生する動的あるいは衝撃荷重を高精度で測定する必要がある。しかし、真の衝撃荷重が不明であるため、その測定精度の評価は困難である。これまで、受け台ロードセルにより求めた衝撃荷重の測定精度を検討した例<sup>7)</sup>では、光学系によるハンマーの運動の測定を必要とするなど簡便ではなかった。本研究では、まず、金属やプラスチックの円柱をドロップハンマーにより圧縮し、受け台ロードセルによりその際の衝撃荷重を計測する。次に、圧縮後の試片寸法に対し、実測の衝撃荷重とハンマーの運動方程式とから計算される試片の圧縮後寸法を比較検討する。この時、試片の圧縮後寸法は衝撃荷重の大きさの影響を直接受けるので、実測した衝撃荷重の測定精度が評価できる。

本報告では、以上のような手順により、まず、衝撃荷重の簡易検定法を提示する。次に、自作の受け台ロードセルで求めた衝撃荷重の精度を提示の検定法により評価し、その結果が所期の精度内にあることを示す。

## 2. 自作のロードセルの概要

### 2.1 ロードセルの準静的特性

使用したハンマーと受け台の概要をFig. 1に示す。受け台の突起部は、ひずみゲージ型ロードセルになっている。ロードセル用ひずみゲージとして半導体ひずみゲージ(共和電業製KSP-2-E4)を採用し、試験片接触端から一定の距離にある受け台突起円筒部の円周に沿って等間隔に4枚接着した。ゲージは交互にその方向が円周方向と軸方向になるよう貼り付け、4ゲージ法としてブリッジ回路を構成した。

試験片を介してロードセルに荷重を作用させる場合、同一荷重であっても、ロードセル出力は試験片との接触面積の変化や設置位置のずれにより影響を受ける。その影響の程度は4枚組のゲージを試験片接触端からどの程度離れた円周上に接着してあるかによって異なる。ゲージ位置が試験片接触端に近いほど出力の受けるその影響が大きいたことが分かった<sup>7)</sup>。試作のロードセルにおいてはFig. 1に示すように、試験片接触端からロードセル直径と同程度離れた位置にひずみゲージを貼り付けた。このため試験片の接触面積の変化や設置位置のずれによる出力の変化は、準静的負荷条件において、約 $1.7\%$ より小さくすることができた<sup>7)</sup>。

### 2.2 衝撃荷重の測定

ドロップハンマーにより受け台上の試験片を圧縮している間のロードセルによる衝撃荷重を計測する装置の概要をFig. 2に示す。図中のハンマー加速度の計測については第3章で述べる。

ロードセル出力は、一旦、デジタル信号化して波形記憶装置(オートニクス製APC-204)に記録し、実験終了後、パーソナルコンピュータに転送して荷重に変換する。このとき、ロードセルの出力と荷重との関係として、予め求めておいた準静的負荷条件での較正曲線

を用いた。従って、衝撃実験で得られる荷重はロードセル出力信号に相当する静的荷重であるが、本研究ではこれを衝撃荷重とみなし、その測定精度を検討する。Fig. 3にロードセルにより得た衝撃荷重の推移の例を示す。

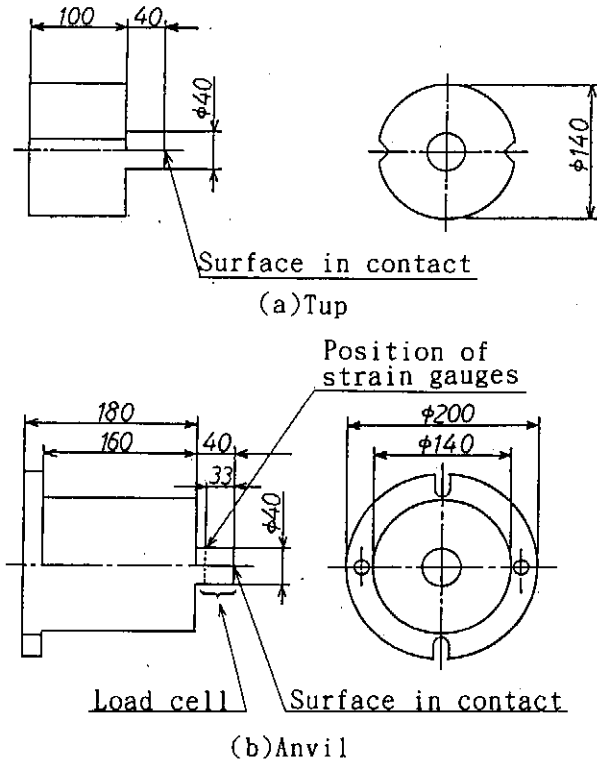


Fig. 1 Shapes and dimensions of tup and anvil and position of strain gauges in load cell.

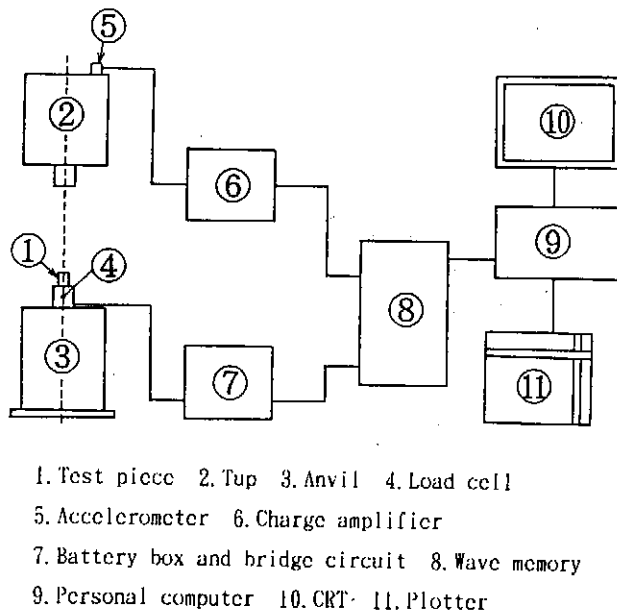


Fig. 2 Experimental setup for measuring impact load and acceleration during simple upsetting.

### 3. 加速度計による検討

本章ではハンマーの加速度を測定し、これとロードセルにより求めた衝撃荷重とを比較検討する。さらに、衝撃荷重の測定精度を検討する準備として受け台の運動を加速度計により求める。

#### 3. 1 加速度計の選定

本研究のロードセルの出力には、例えば、Fig. 3の波形に見られるように、周期が約数 $10 \mu\text{s}$ の高次の小振動が重畳している。そのため、加速度計の周波数応答が、例えば、約数 $10 \text{ kHz}$ まで直線的である加速度計を用いることが望ましい。また、計測可能な加速度の大きさも十分大きく、例えば $10^4 \text{ m/s}^2$ 程度に耐え得るものとして、本研究ではデンマークB & K製8309型振動ピックアップとB & K製2635型チャージアンプを選定した。

ハンマー加速度の測定はFig. 2に示したように、ロードセル荷重の測定と同様、チャージアンプ出力を、一旦、波形記憶装置にデジタル信号化して記録し、それをパーソナルコンピュータに転送して行う。ロードセル荷重に対応するハンマー荷重は計測した加速度にハンマーの質量を乗ずれば得られる。

#### 3. 2 加速度計信号に及ぼすフィルターの影響

2635型チャージアンプでは使用する振動ピックアップに合わせてチャージ感度を設定できる。また、内蔵のハイパスフィルター及びローパスフィルターにより下限および上限周波数を設定できる。下限周波数を最低値 $0.2 \text{ Hz}$ とし、上限周波数を $10, 3, 1 \text{ kHz}$ と切り替えて、ほぼ同一条件の圧縮実験を行って得たハンマーの加

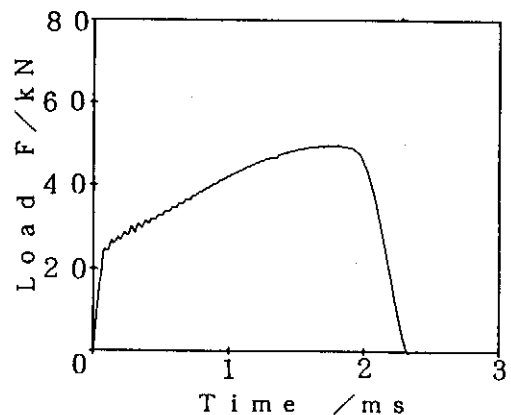


Fig. 3 Typical record of impact load measured by load cell.

速度の推移とロードセル出力とを比較し、Fig. 4(a)～(c)に示す。ただし、ロードセルの出力波形との比較のために加速度波形も縦軸は荷重に換算してある。すなわち、加速度の値にハンマーの質量を乗じてある。また、試験片は市販の工業用純銅棒から旋削した直径10mm、高さ12mmの未焼鈍材であり、ハンマー落下高さは50cmである。

三つの図を比較してみて、フィルターの上限周波数を3kHzに設定したFig. 4(b)においてロードセルおよび加速度計の両波形の一致の程度が良好である。両波形における時間軸のずれは約20～30μsであるが、ロードセルのゲージ位置と加速度計取り付け位置のずれがその原因と考えられる。実際、両位置の差を弾性波速度で除した値は20～30μs程度となる。

一方、フィルターの上限周波数を10kHzに設定したFig. 4(a)では、加速度波形に振動ピックアップを含む測定系の共振の影響が極めて大きく現れているようであり、実際の加速度の変化が現れているとは思えない。また、上限周波数を1kHzに設定したFig. 4(c)では、アンプの高域特性がフィルターのため見かけ上不良となり、波形の高域部分すなわち立上りおよび立下り部分では実際の加速度を表現できていないと考えられる。以後、フィルターの上限周波数を3kHzに、下限周波数を0.2Hzに設定して実験を行った。

### 3.3 加速度計チャージ感度の検定について

前節の結果においては、加速度計の出力の推移とロードセルの出力の推移がほぼ比例している。しかし、問題が一つ残った。それは前節の結果を得るのに、アンプで設定したチャージ感度はメーカーの指定した振動ピックアップのチャージ感度ではなく、その約0.92倍であったことである。具体的には、メーカーの示したチャージ感度が $0.00449 \text{ pC/ms}^2$ であったが、この数値でアンプの感度設定を行うと両波形のピーク値が約8%異なった。そこで両波形のピーク値がほぼ一致するチャージ感度を求めたところ $0.00413 \text{ pC/ms}^2$ であったということである。これらは約8%の相違であり、無視できない。

一方、従来の我々の研究<sup>1)</sup>では、ハンマーの衝突速度が4 m/s程度以下ならば、本研究で使用する受け台ロードセルにより得られる衝撃荷重、従って、ハンマーの受ける衝撃荷重は4%程度以内の精度で計測できるはずである。すなわち、前節の実験ではハンマーの衝突速度が約3 m/sであり、アンプのチャージ感度を変化させることにより、ロードセル荷重と加速度計出力にハンマーの質量をかけたハンマー荷重を一致させることができる。

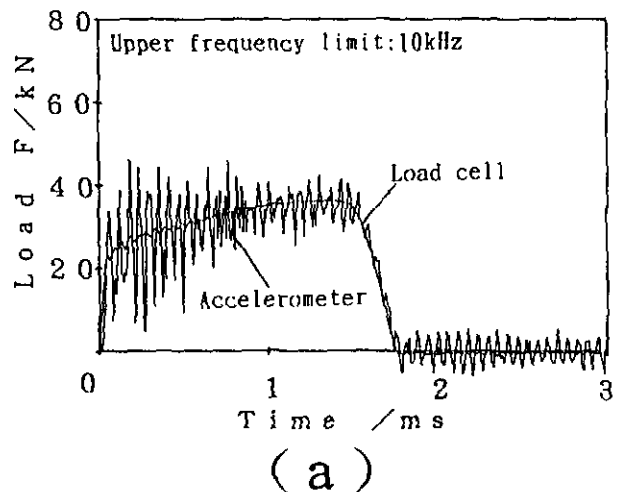
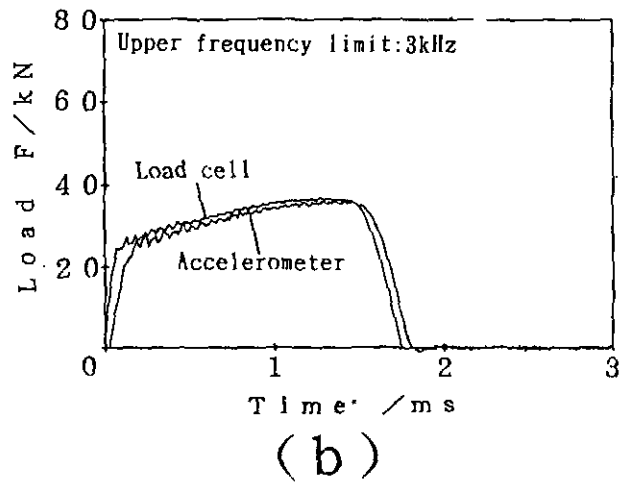
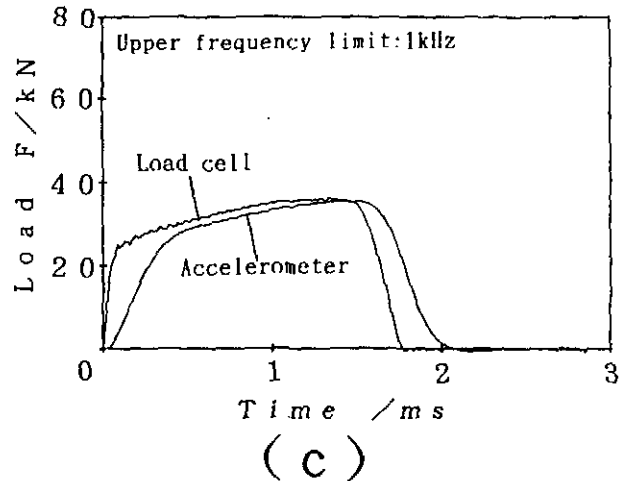


Fig.4 Comparison between outputs of load cell and accelerometer for three upper frequency limits.

以上の事実はメーカーの与えたチャージ感度に誤差のある可能性を示唆している。実際、銅試験片よりも少し複雑な応答特性を示すポリカーボネート試験片を圧縮した場合についても、前節で我々の得た  $0.00413 \text{ pC/ms}^2$  のチャージ感度に設定して計測した結果が Fig. 5 のように両結果の一致の程度が最良となる。すなわち、この図ではロードセル荷重とハンマー加速度に質量をかけた値とが、ほぼ一致しているので、我々の得たチャージ感度が妥当であると言えよう。このことは、ドロップハンマー法によりロードセル荷重とハンマー加速度を比較検討して加速度計のチャージ感度を比較的容易に検定することができることを示している。

### 3.4 受け台変位の測定

ここでは、本研究で較正した加速度計により試験片圧縮中の受け台の運動を測定する。受け台の運動を計測する理由は二つある。一つは、次章で提示する衝撃荷重の測定精度検定法が妥当であるためには、荷重がゼロになった時点で受け台の変位がほぼゼロになる必要があり、この点を実測して確かめなければならないからである。他の一つは、圧縮加工中の受け台の運動を正確に知ることが、衝撃荷重からハンマーの運動方程式を介して推定する<sup>4)</sup>試験片の変形量の推定精度を向上させることになるからである。これは、例えばドロップハンマー法で試験片の応力・ひずみ曲線を求める際の、その測定精度を向上させることを意味する。

受け台の直径  $14.0 \text{ mm}$  の部分の上端 (Fig. 1(a)参照) に加速度計を取り付け、試験片を動的に圧縮している間の受け台の加速度の推移を求めた。Fig. 6 に受け台の

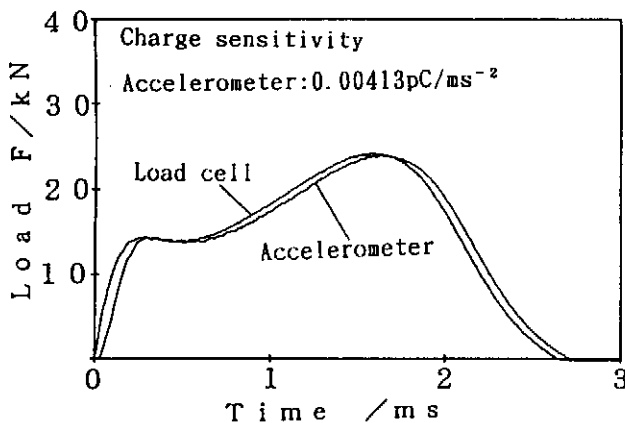


Fig. 5 Load histories for simple upsetting of polycarbonate specimen.

加速度の推移を、Fig. 7 に加速度の推移を数値積分して求めた受け台の速度の推移を、さらに Fig. 8 に、速度の推移を数値積分して求めた受け台の変位の推移を示す。Fig. 6 から、圧縮開始時と除荷時におけるように荷重が大きく変化する際に受け台の加速度はやや大きく変化するが、荷重の変化が小さい領域では加速度の変化も小さいことが分かる。また、Fig. 8 から、圧縮中の受け台の変位は、最大でも約  $0.1 \text{ mm}$  程度と大きくなく、また圧縮終了時点ではその変位がほぼゼロに戻っていることが分かる。この結果は、例えば、最大荷重が平均で  $55 \text{ kN}$  となる 9 回の実験結果から、受け台最大変位の平均が  $0.11 \text{ mm}$ 、圧縮終了時変位の平均が  $0.001 \text{ mm}$  であったことから妥当であるといえる。

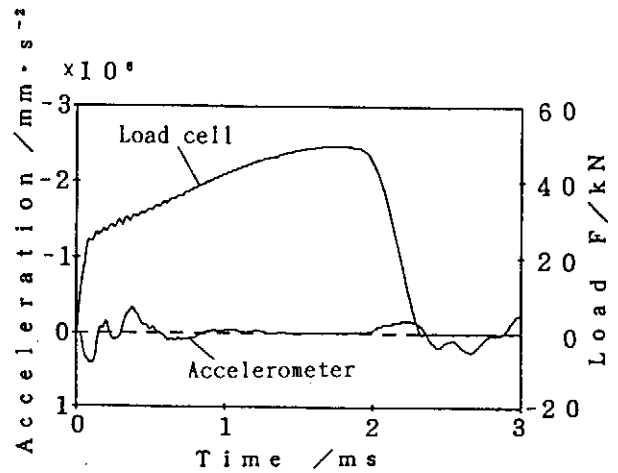


Fig. 6 Load vs. time and acceleration of anvil vs. time characteristics during simple upsetting of copper specimen.

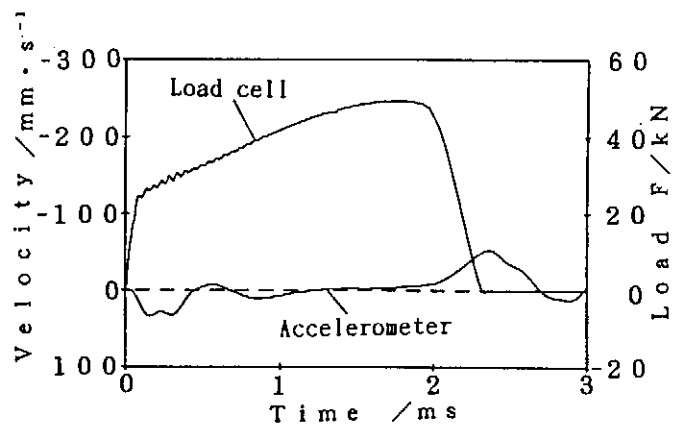


Fig. 7 Load vs. time and velocity of anvil vs. time characteristics during simple upsetting of copper specimen.

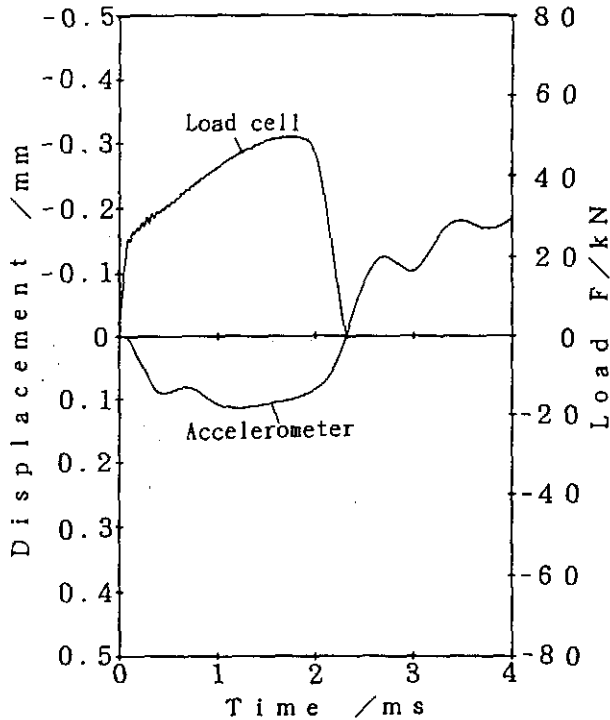


Fig.8 Load vs. time and displacement of anvil vs. time characteristics during simple upsetting of copper specimen.

#### 4. 衝撃荷重の測定精度の検討

前節の加速度計による受け台の変位測定結果から、圧縮中、受け台は少し変位するが、圧縮終了時の変位は殆どゼロになることが分かった。一方、ロードセルで求めた荷重  $f(t)$  から、ハンマーの運動方程式を介してハンマー先端、すなわち、試験片の上端の変位量を求めることができる<sup>1)</sup>。この両者を組み合わせれば、ロードセル荷重から試験片の最終寸法が推定できることになる。すなわち、ロードセル荷重が正しいならば、これを用いて推定した試験片の最終寸法と実測した最終寸法とが、一致するはずである。

以上の考察から、実測した試験後の試験片寸法  $h_m$  と、測定した衝撃荷重  $f(t)$  からハンマーの運動方程式を介して推定した試験片寸法  $h_l$  との比較を媒介として、 $f(t)$  の測定精度が検定できる。以下に、この方法で荷重の測定精度を近似的に評価する三段階の手順を示す。

まず、①  $h_m$  と  $h_l$  の相対差  $D$  を次式により求める。

$$D \approx \frac{h_l - h_m}{h_m} \times 100 \quad (\%)$$

Table. 1 にアルミニウム (JIS: Al100-0) と銅 (JIS: C1100-0) の円柱について、ハンマーの落下高さを変えて衝撃圧縮試験を行って求めた相対差  $D$  の例を示す。

次に、② 真の衝撃荷重の推移  $F(t)$  が、測定した衝撃荷重  $f(t)$  の定数倍  $k \cdot f(t)$  で表せるものと仮定し、試験片の最終寸法が  $h_m$  となるような  $k$  を求める。このときの  $k$  の値を  $k_0$  とする。すなわち、次式を得る。

$$F(t) \approx k_0 \cdot f(t)$$

本研究では図式的に  $k_0$  を求めた。この一例を Fig. 9 に示す。この Fig. 9 はアルミニウムをハンマー高さ 1.1 m で圧縮して得た結果に関するもので、横軸は  $k$  で縦軸は  $D$  である。  $k=1$ ,  $k=1 \pm 0.025$ , 及び  $k=1 \pm 0.05$  に対する  $h_l$  を計算し、 $D$  の値をプロットするとほぼ直線が得られている。したがって、 $D=0$  すなわち試験片の最終寸法が  $h_m$  となる  $k$  の値 ( $=k_0$ ) は、約 0.996 である。他の実験条件の場合も同様にして  $k_0$  を求めた。

Table 1 Relative difference  $D$  for various conditions.

Height of falling weight(mm)	Relative difference $D$ (%)	
	Materials of test piece	
[Impact velocity(m/s)]	Aluminum	Copper
260 [2.26]	0.393	0.150
500 [3.13]	0.453	0.210
1100 [4.64]	0.247	0.206
1535 [5.49]	0.719	0.652

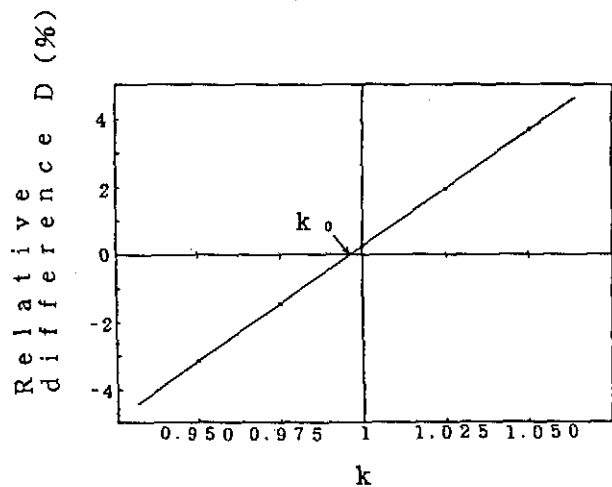


Fig.9 Example of determining critical value  $k_0$  combined with the experimental accuracy ER.

最後に、③衝撃荷重の測定精度ERを次式で評価する。

$$ER = \left| \frac{f(t) - F(t)}{F(t)} \right| \times 100$$

$$= \left| \frac{1 - k_0}{k_0} \right| \times 100 = \left| \frac{1}{k_0} - 1 \right| \times 100 (\%)$$

Table. 2に、上述のアルミニウムと銅の円柱について、ハンマーの落下高さを変えて衝撃圧縮試験を行って求めた測定衝撃荷重の近似精度を示す。表のように近似測定精度は、平均すると約1.1%程である。この結果は試験片材料やハンマー落下高さの相違による特定の傾向は見られない。従って、衝撃荷重測定の近似精度としては平均値約1.1%程度また悪くても約2.5%程度であるといえる。

## 5. 結 言

本研究ではドロップハンマー実験により衝撃荷重を与え、ロードセルの動的性能について検討した。このため、加速度計を用いて圧縮加工中のハンマー及び受け台の加速度の推移も測定した。これらにより得られた成果をまとめると次のようになる。

(1) 圧縮加工中のハンマーの加速度の推移を加速度計を用いて測定し、これと受け台のロードセルで測定した衝撃荷重の推移とを比較して、それらが比例していることを示すことができた。

(2) (1)の結果をもとに較正を行った加速度計により測定したハンマー加速度に質量をかけた値とロードセル荷重とが、ほぼ一致することが分かった。このことは、本研究の方法により比較的容易に加速度計のチャージ感度の較正ができることを意味する。

(3) 最大荷重約60 kN程度のドロップハンマー試験では、圧縮加工中の受け台の変位は、最大で約0.1 mm程度であり、また圧縮終了時点でその変位がほぼゼロとなっていることが分かった。

(4) 衝撃荷重の近似測定精度は、平均で約1.1%程であり、試験片の材料、ハンマーの落下高さが変わってもその精度に大きな違いはなく、かなり精度良く測定ができています。

Table 2 Approximate accuracy ER for various conditions.

Height of falling weight(mm) [Impact velocity(m/s)]	Approximate accuracy ER(%)	
	Materials of test piece	
	Aluminum	Copper
260 [2.26]	2.53	1.09
500 [3.13]	1.28	0.95
1100 [4.64]	0.40	0.70
1535 [5.49]	0.50	1.58

## 謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成金の援助を受けて行ったものであり、ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 松浦裕次：日本機械学会誌，62 489(1959)，1387.
- 2) Slater, R. A. C., Johnson, W. & Aku, S. Y. : Int. J. Mech. Sci., 10(1968), 169.
- 3) Samanta, S. k. : Int. J. Mech. Sci., 11(1969), 433.
- 4) Sato, Y. : Technology Reports, Tohoku Univ., 41 2(1976), 241.
- 5) Choi, H. Y., & Chang, F. K. : J. Compos. Mater., 26 14(1992), 2134.
- 6) Ujihashi, S., Matsumoto, H., Adachi, T. & Taga, K. : JSAE Review, 13 3(1992)
- 7) Sato, Y. : Advanced Technology of Plasticity Proc. 4th ICTP, Vol. 2, (1993), 1343.
- 8) Brüel&Kjær: 圧電型加速度計・振動用前置増幅器ハンドブック、(1987)