

# スプリットホプキンソン棒型衝撃引張り試験法における降伏現象<sup>†</sup>

小川 欽也\* 杉山 文子\*

## Yielding Phenomena Appeared in Impact Tensile Test Using a Split-Hopkinson Pressure Bar Method

by

Kinya OGAWA\* and Fumiko SUGIYAMA\*

To identify the yielding phenomena often observed in tensile test at high strain rates even for the constitutive equation of material without any yielding phenomena, numerical simulations using the dynamic FEM analysis have been performed to study the effect of specimen geometry and loading configurations in the Split-Hopkinson Pressure Bar apparatus. Stress distributions in the specimens and the loading bars are clarified, and it is found that the three-dimensional stress wave propagation from the specimen to the loading bar dominates the yielding phenomena due to radial oscillations associated with, even though a slight effect of the specimen geometry is involved to some extent. It is also found that the relevant shape of loading bar end is served to suppress the yielding phenomena.

**Key words :** Yielding phenomena, Impact test, Tensile test, Split-Hopkinson pressure bar method, Stress wave propagation

### 1 緒 言

降伏応力は塑性変形開始を判定するために重要であるばかりでなく、局所変形の発生と密接に結びついており、構造不安定を惹き起こすひとつの要因としてその的確な評価が重要である。準静的な変形速度域における降伏現象は主として温度やひずみ速度に依存する現象であり、本質的に材料特性に起因することが明らかにされてきた。しかしながら、高速変形においては材料特性に起因する<sup>1)</sup>だけではなく、試験片中の塑性波伝播特性<sup>2)</sup>や、測定系での応力波伝播に起因することが示されており、<sup>3)</sup>スプリット・ホプキンソン棒 (Split Hopkinson Pressure Bar) 法においては、圧縮試験の場合に比べて引張り試験において顕著な降伏現象が観測されることが報告されている。

本報告では、FEM 解析により試験片内部と応力棒中の応力波伝播を詳細に調べ、試験片形状ならびに応力棒形状が降伏現象に及ぼす影響を明らかにした。

### 2 有限要素解析

解析コード ANSYS/LS-DYNA を用いて動的解析、ANSYS を用いて静的解析を行った。Fig. 1 に試験片 (板厚 1mm, 全長 14mm) および応力棒 (入, 出力棒共 14φ × 150mm) の解析モデルを示す。対称性を考慮して 1/4 モデルとした。解析に用いた材料定数は応力棒については密度  $7.8 \times 10^3 \text{Kg/mm}^3$ , ヤング率  $21.0 \times 10^4 \text{MPa}$ , ポアソン比 0.292, 試験片については密度  $2.69 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$ , ヤング率  $7.0 \times 10^4 \text{MPa}$ , ポアソン比 0.334 とし、アルミニウム合金 7075-T6 材を想定して、Fig. 2 に示すひずみ速度非依存型応力-ひずみ関係を用いた。破線は準静的試験で得られた応力ひずみ関係であり、実線は塑性変形開始時の応力が高く、引き続き小さい加工硬化率で変形

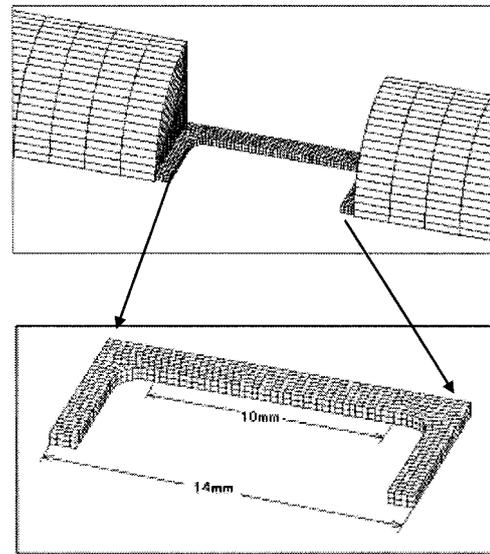


Fig. 1 FEM mesh models for the stress bar and specimen.

が進行する場合を示す。応力棒の要素数は約 117000, 試験片の要素数は試験片の寸法に応じて 2000 ~ 3000 である。静的解析では応力棒と試験片の境界を固定し、他端に変位を与えた。動的解析では、試験片を応力棒に固着し、入力棒の他端に立ち上がり時間 20μs の勾配に続き一定値 (10m/s) となる速度履歴を与えた。出力棒の他端は自由端としたが、以下の結果は、自由端からの反射波の影響を受けない時間内におけるものである。計算時間刻みは 1μs 以下の場合には結果に影響を及ぼさないことが確認できたので、0.25μs あるいは、1μs を用いた。

<sup>†</sup> 原稿受理 平成 17 年 12 月 21 日 Received Dec. 21, 2005

\* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, Grad. School of Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

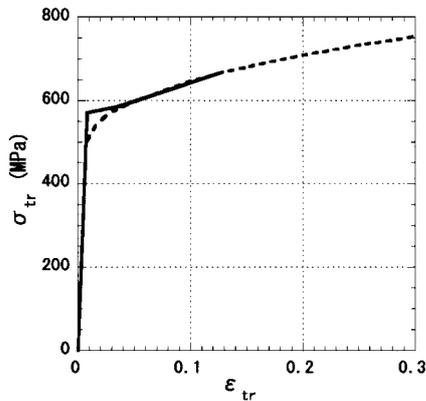


Fig. 2 Stress-strain relations for the analysis.

### 3 解析結果および考察

#### 3.1 試験片の応答

Figs. 3 a, b に二種類のフィレット部半径の場合について試験片中心軸上の各点で得られた軸方向直応力  $\sigma_x$  の時間的変化を示す。フィレット半径  $R = 1\text{mm}$  の場合、フィレット底より僅かに平行部に入った場所で最も顕著な降伏現象が見られ、試験片の端部に移るにしたがってその程度は穏やかになるが、明瞭な降伏現象が認められる。試験

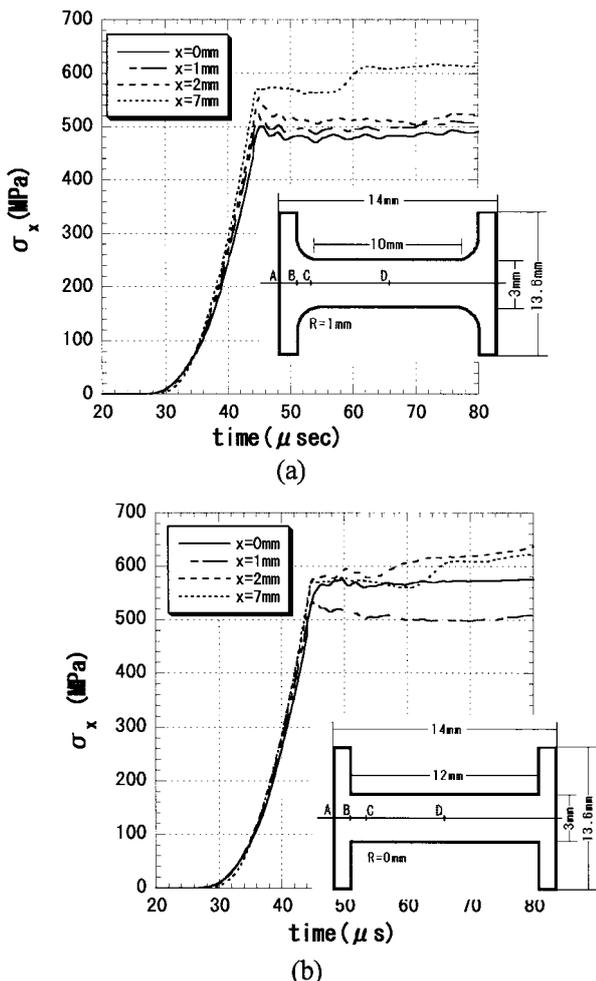
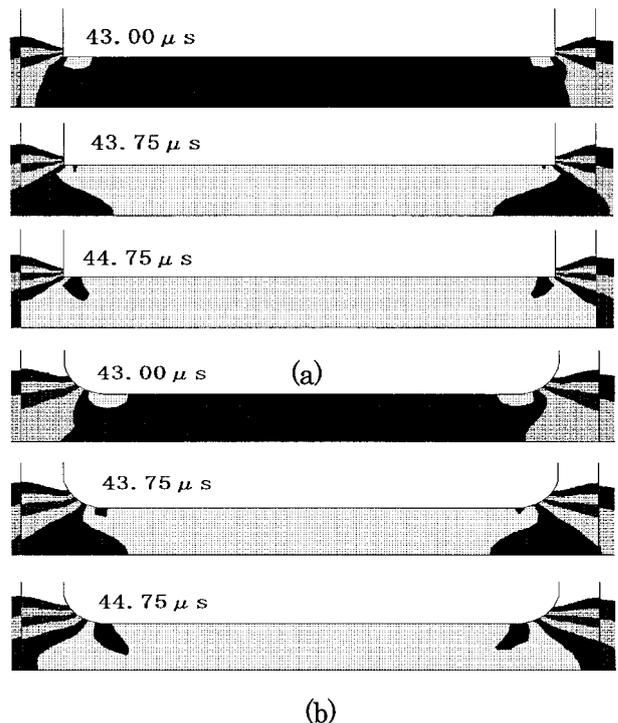


Fig. 3 a, b Stress-time relations at four locations along specimen axis.

片の平行部の内部に十分入った位置では降伏現象は殆ど認められず、変形の進行とともに加工硬化するのが見られる。一方、 $R = 0\text{mm}$  の場合には、フィレット底では僅かに降伏現象が認められるが、試験片端部では認められず、加工硬化を伴って応力が上昇する。試験片の平行部では殆ど加工硬化せずに変形が進行した後、塑性波の伝播に起因する応力の上昇が認められる。Figs. 4 a, b には応力分布の時間的変化を示す。フィレット底近傍での応力集中によって塑性変形が開始し、これが部分的な除荷応力波として試験片内に広がって行き、試験片の端部に降伏現象が発生することがわかる。 $R = 0\text{mm}$  の場合には、フィレット底近辺の非常に小さな領域に強い応力集中が生じるため、変形への寄与が小さく、顕著ではない。これらの結果から、降伏現象を伴わない応力-ひずみ関係についても、塑性変形開始後の加工硬化率が低いため、応力集中部での塑性変形の開始によって、降伏現象が現れることが分かる。また、このような現象は試験片の入、出力側のどちらにおいてもほぼ同じように生じている。

Fig. 5 には、試験片端部での応力分布を示す。横軸は、中心軸 ( $x = 0$ ) からの距離を示す。試験片平行部の幅 (図中に矢印で示す) の二倍程度まで広がっているにすぎず、タブ部の横幅を減少させても大きな影響は現れないと考えられる。事実、Fig. 6 に、タブ部の幅を変化させた試験片について得られた、出力棒の試験片側端面から 50mm の位置での応力の時間履歴を示すが、殆ど影響のないことが分かる。

Fig. 7 には、試験片端部での応力分布より求めた平均的な応力の時間変化を示す。試験片中心軸付近に現れた局所的な応力には降伏現象が認められたが、平均的な応

Fig. 4 a, b Contours of stress in specimens of  $R = 0\text{mm}$  and  $R = 1\text{mm}$ , respectively.

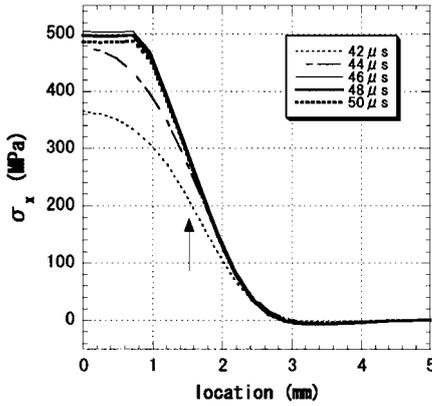


Fig. 5 Time variations of stress distributions on the edge of specimen for R=1mm.

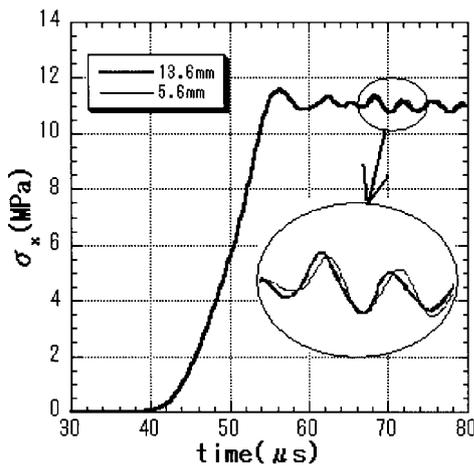


Fig. 6 Stress responses observed on the loading bar for the specimens with wide and narrow tabs.

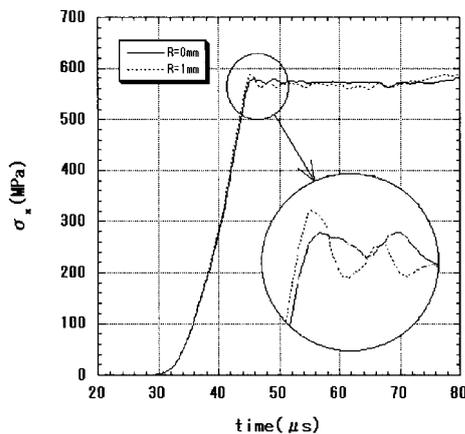


Fig. 7 Time variations of averaged stress on the edge of specimens for R=0mm and R=1mm.

力では  $R = 1\text{mm}$  の場合でもごく僅かに認められるに過ぎない。したがって、試験片フィレット部の半径が降伏挙動に及ぼす影響はきわめて小さい。このように試験片端部での降伏現象は非常に小さいため、試験片のタブ部に貼付したひずみゲージによって降伏現象を伴わない応力波が捉えられるとする報告<sup>4)</sup>について検討することが必要である。

Fig. 8 には、タブ部を長く出して設置された全長 32mm の試験片の場合に得られた試験片端部での応力の時間変化を示すとともに、タブ内の静的な応力分布を示す。タブ部を短く設置した全長 14mm の試験片の場合に比べて顕著な降伏現象が観測されるが、これは試験片の締結部が等価的に緩められたことによると考えられ、試験片と応力棒との締結の緩みが応力波頭に降伏現象を惹き起こすことを示した報告<sup>5)</sup>と良く対応する。また、タブ部での応力分布はかなり不均一であるため、ひずみゲージを用いて降伏現象などの詳細な応答を捉えることは困難と推定できる。

### 3・2 応力棒内の応力波伝播

Fig. 9 には、タブ部を短く設置した場合に得られた応力棒表面の各点での軸方向応力  $\sigma_x$  の時間変化を示す。同一断面上の表面にあって、それぞれ試験片の面内とこれに垂直な面との交点として与えられる A, B 二点での  $\sigma_x$  の時間変化は、試験片に面した応力棒端から直径程度離れると、殆ど一致しているの、ここでは、試験片の面と応力棒表面との交線上の B 点に沿った各点での応力を示した。試験片のフィレット部半径によらず、明瞭な降伏現象が認められ、応力棒中の伝播現象に主に依存していることが分かる。また、降伏時の応力減少量は試験片端部での結果より極端に大きい。一般に応力棒中の応力波伝播は分散を伴うため、各点での応答を外挿し応力棒端での応答が求められるが、これらの結果から、分散効果を除いた場合でも降伏現象が認められ、応力棒内の応力波伝播を詳細に調べることが必要である。

Fig. 10 には、応力棒端部近傍での応力分布の時間的な変化を示す。試験片端部からの応力波は半径方向への変位を伴いながら三次元的に伝播し、応力棒表面に到達すると、応力棒表面を半径方向に変位させる。その結果、復元力との相互作用によって、半径方向の振動が惹き起こされ、応力波頭での降伏現象を伴いながら  $x$  軸正方向に伝播する。応力棒表面に到達したこの応力波の一部は応力棒端面に向かって逆行し、自由表面で反射して三次元的な応力波と干渉するため、これが降伏現象にも影響を及ぼすことになる。Fig. 11 には、タブ部を長く設置した試験片の場合に応力棒で捉えた応力の時間変化を示す。

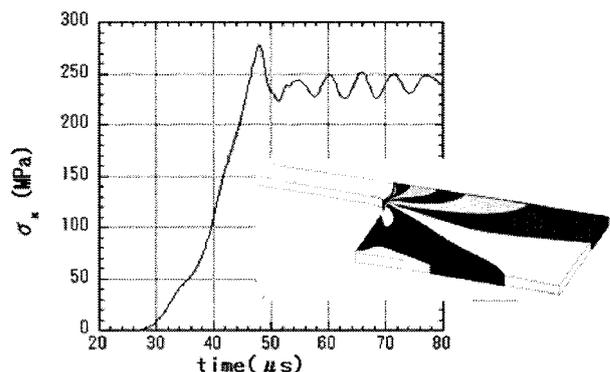


Fig. 8 Change of stress at end of specimen with wide tab and static stress distributions in the tab.

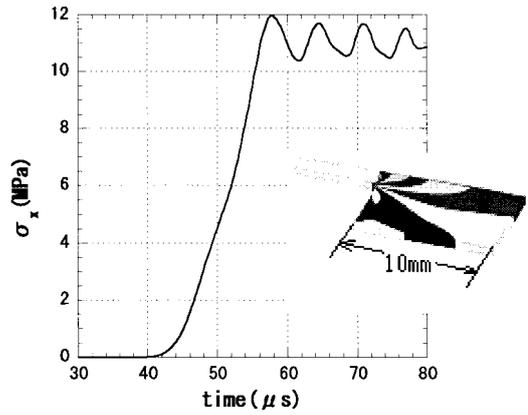
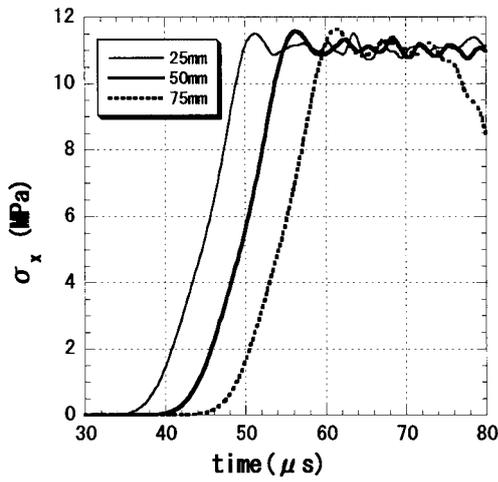


Fig. 11 Stress response at  $x = 50\text{mm}$  on the stress bar for specimen with wide tab and  $R = 1\text{mm}$ .

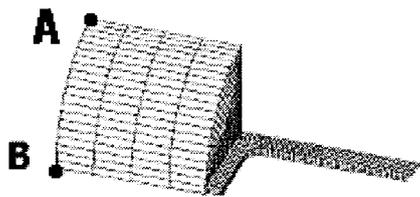
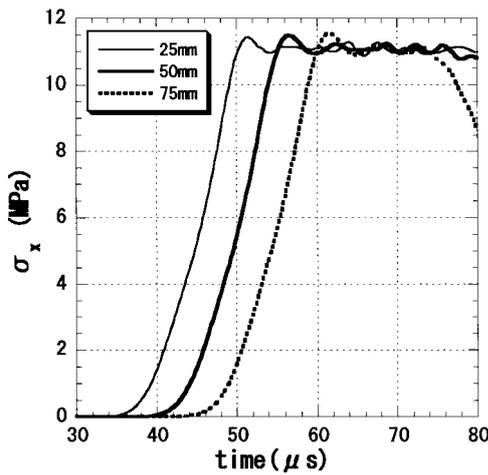


Fig. 9 Stress response at locations on the stress bar for specimens with  $R = 1\text{mm}$  (above) and  $R = 0\text{mm}$  (below).

Fig. 9 に比べ、応力波頭に顕著な降伏現象が生じており、試験片端部に見られた降伏現象が寄与していることが分かるが、試験片に応じた細い応力棒などを用いて三次元的な応力波による半径方向変位の発生を抑えることが降伏現象の低減に本質的に必要である。

### 3・3 応力棒先端形状の影響

三次元的な応力波による降伏現象の発生を抑制する手段の一つとして応力棒先端の形状を工夫し応力波を滑ら

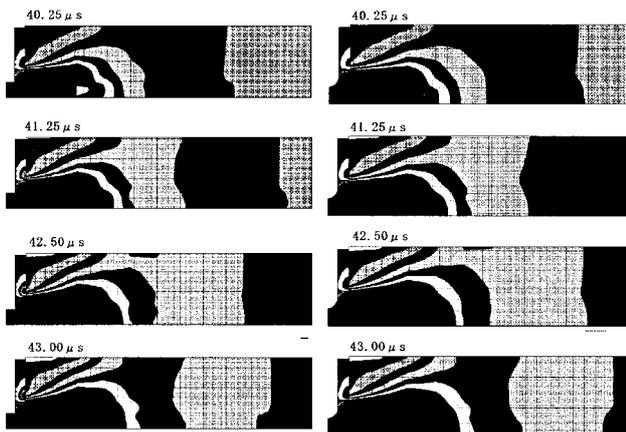
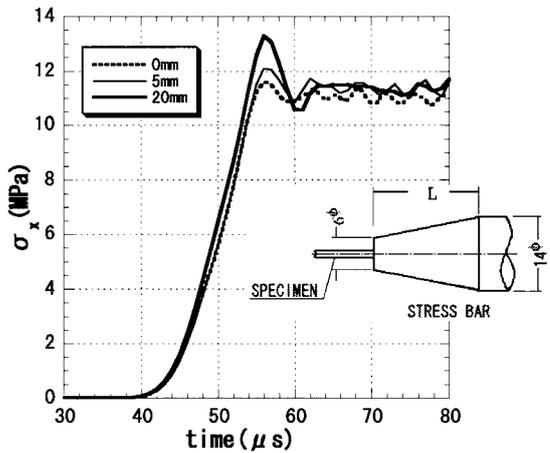


Fig. 10 Time changes of stress distribution in adjacent region of the stress bar to specimens with  $R = 0\text{mm}$  left and  $R = 1\text{mm}$  right, respectively.

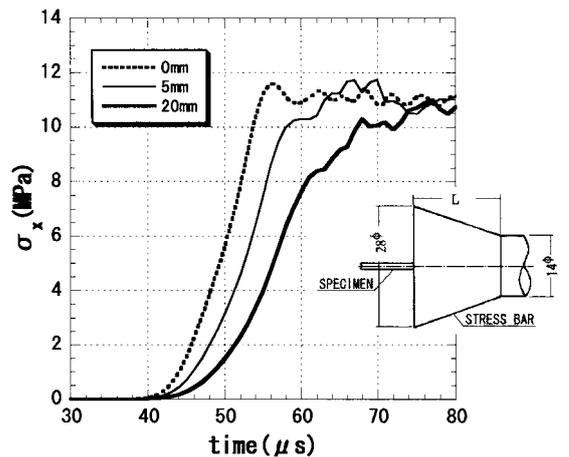


Fig. 12 Stress response for the convergent (above) and divergent (below) tapered stress bars.

かに一次元的に伝播させることが考えられる。ここでは、応力棒先端をテーパ状に加工した変断面棒での応力波の伝播と降伏現象への影響を調べた。Fig. 12には二種類の変断面棒で得られた、出力棒の試験片側端面から50mmの位置での応力と時間の関係を示す。応力棒先端を細めた場合には非常に高い応力ピークをもつ降伏現象が生じるとともに振動をともなった応力変化が見られる。また、細める領域の長さ $L$ が大きくなるほど、その傾向は顕著になる。一方、応力棒先端を広げた場合には応力波の立ち上がりは鈍くなり、降伏現象の発生は見られない。また、同様に、広げる領域の長さ $L$ が大きくなるほど、その傾向は著しくなる。前者では、先端部近傍の質量が除かれた結果、三次元的に伝播する応力波が応力棒表面に達したときに生じる半径方向の変位を抑制できず、後者では、過度に付加された棒の先端近傍の質量が棒表面の半径方向の変位を抑制していると考えられる。したがって、棒の半径に応じて逆テーパ状の先端をもつ応力棒を用いることによって極端な応力波の降伏現象を低減することが可能と考えられる。なお、応力棒の先端を狭めた場合には、試験片の幅が減少しているがそのことが応力履歴に殆ど影響しないことは先に Fig. 6 に示した。

#### 4 ま と め

衝撃引張り試験における降伏現象に及ぼす試験片フィレット部、タブ部の影響を調べた。前者に比べ後者の影響が大きいが、試験片から応力棒に伝播する三次元応力波が半径方向に引き起こす振動が最も大きな影響を示し、応力棒先端形状を工夫することにより、この影響を抑制できる可能性があることが分かった。

#### 参 考 文 献

- 1) K. Tanaka, T. Matsuo, M. Kinoshita and T. Maede, "Strength of Mild Steel at High Strain Rate" Bulletin of JSME, Vol.9, No.33, pp.21-28 (1966).
- 2) S. Yoshida and N. Nagata, "Deformation of Zinc Single Crystals at High Strain Rates", Journal of the Japan Institute of Metals, Vol.31, No.4, pp.444-449 (1967).
- 3) M. Daimaruya, H. Kobayash and H. Tsuda, "Discussions on Method of Impact Tension Test for Strip Specimen", Journal of Materials Science, Japan, Vol.53, No.11, pp.1240-1246 (2004).
- 4) The FY2000 Project Report on Contract Research for New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), pp.170-179 (2001) New Material Center.
- 5) The FY2000 Project Report on Contract Research for New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), pp.254-266 (2001) New Material Center.