平板衝突試験による動的 material 特性の計測結果*

(第 1 報, チタン合金)

野 間 俊 人^{*1}, 藤 井 圭 介^{*1}
正 村 修 身^{*2}, 間 山 利 勝^{*1}

Dynamic Mechanical Properties of Materials Measured by Plate Impact Experiments (1st Report, A Titanium Alloy)

Toshihito NOMA, Keisuke FUJII,
Osami MASAMURA and Toshikatsu MAYAMA

In order to study dynamic mechanical properties of the titanium alloy Ti-6Al-4V, plate impact experiments with PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) stress gauges and the VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) were conducted using a shock gun system. From the experiments, we obtained the Hugoniot curve, the Hugoniot elastic limit and the spalling strength of the alloy.

Key Words: Elasticity, Plasticity, Stress Wave, Plate Impact Experiment, Dynamic Mechanical Properties, Hugoniot Curve, Hugoniot Elastic Limit, Spalling Strength, PVDF Stress Gauge, VISAR, Titanium Alloy

1 はじめに

高速で飛来した弾丸による装甲の侵徹破壊やスポール破壊など、高速衝撃による材料の破壊現象を分析し予測するためには、通常材料試験や音速測定などにより得られる準静的材料特性を知るだけでは不十分であり、高速衝撃下における材料特性（いわゆる動的 material 特性）を把握することが必要である。その計測を行うための代表的な方法として平板衝突試験（例えば文献⁽¹⁾）がある。本論文では、防衛庁技術研究本部第 1 研究所の高速弾撃試験装置（ショックガン）を用いて平板衝突試験を行いチタン合金の動的 material 特性を計測した結果について述べる。

1.1 平板衝突試験

平板衝突試験は、平板状の試料に対して別の平板（飛しょう板）を高速で衝突させて平面衝撃波を発生させ、試料に生じた衝撃圧縮状態での応力、衝撃波速度などを計測するものである（図 1 または図 2 参照）。

1.2 動的 material 特性

本研究で平板衝突試験により取得した動的 material 特性（例えば文献⁽¹⁾ ⁽²⁾ ⁽³⁾）は次のとおりである。

(1) ユゴニオ (Hugoniot) 曲線

任意の 2 個の衝撃パラメータ（例えば、相対体積 V/V^0 と応力 σ 、粒子速度 u_p と衝撃波速度 u_s 、など）を選んで衝撃圧縮状態下での関係をプロットしたものがユゴニオ曲線（または、ユゴニオ）と呼ばれ、各材料ごとに固有のものである。

(2) ユゴニオ弾性限 (HEL: Hugoniot Elastic Limit)

平板衝突試験などによって材料を衝撃的に圧縮した場合、弾性的性質を持つ限界をユゴニオ弾性限という。

通常の準静的な引張試験を行った時の弾性限を静的弾性限と考え、ユゴニオ弾性限を動的弾性限と考えて両者を比較することは興味深い。しかしながら、その際次の 2 点に注意しなければならない。まず、引張試験と平板衝突試験では応力状態が異なる（1 軸応力状態と 1 軸ひずみ状態）ため、両弾性限における応力の値を比較する場合には変換したうえで

* 原稿受付 1997 年 3 月 12 日。

^{*1} 防衛庁技術研究本部第 1 研究所 (〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1)。

^{*2} 正員、防衛庁技術研究本部第 1 研究所。

比較する必要がある (詳細は3.2節参照)。また、金属材料について準静的引張試験で得られた弾性限を圧縮状態にまで拡張して考える (応力やひずみはその値の絶対値が等しい) ことはかなり一般的 (von Mises の降伏条件など) であるが、ユゴニオ弾性限を引張状態に拡張できるかどうかは不明であるため、あくまでも圧縮状態における静的弾性限と動的弾性限の比較という位置付けとなる。

(3) スポール (Spall) 強度

高速衝撃によって発生した衝撃波が裏面などで反射して生じる希薄波によって局所的に材料が引張状態になりそこに亀裂が生じることがスポール破壊である。この現象は材料内の圧力 p^1 がある一定の負の値 p_{spall} を下回った場合に起きるという考え方や垂直応力 σ がある一定の負の値 σ_{spall} を下回った場合に起きるという考え方があり、この p_{spall} あるいは σ_{spall} をスポール強度という。両者を区別するときは、 p_{spall} をスポール圧力、 σ_{spall} をスポール応力と呼ぶことにする。

上に挙げた動的材料特性はいずれも、高速衝撃下における現象 (衝突、侵徹など) を考察するうえで標準的な指標となるものであり、また、コンピュータによる数値計算によってそれらの現象を模擬する数値シミュレーションを行う際の入力データとしても重要なものである。

2 試験及びデータ分析の方法

2.1 供試品

本研究で使用した供試品は、約6%のアルミニウムと約4%のヴァナジウムを含むチタン合金 Ti-6Al-4V である。その化学的組成及び機械的性質 (引張試験、音速測定、密度測定の結果) を表1に示す。この Ti-6Al-4V は、チタン合金のなかでは最も強度が高い種類の材質である。

今回の平板衝突試験では、試料 (標的板) と飛しょう板のどちらも同じ材質 Ti-6Al-4V を使用し、試料は直径46mm、厚さ10mm、飛しょう板は直径38mm、厚さ5mmのそれぞれ円盤状とした。

2.2 計測方法

今回の試験では、ショックガンを用いて火薬の燃焼エネルギーにより飛しょう板を約270~1500m/sに加速し、ショックガンの砲口の先に設置した試料 (標的板) に衝

¹⁾ 本論文では圧力と応力は用語として区別し、圧力 p は各方向の垂直応力の平均 $(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ を意味するものとする。また、圧力 p や応力 σ は圧縮の時に正、膨張・引張の時に負と規約する。

Table 1 Chemical and mechanical properties of the specimen

Composition	Al	6.33%
	V	4.23%
	Fe	0.20%
	Ti	Re.
Tensile test	Proof stress Y_S	948 MPa
	Tensile strength	990 MPa
	Elongation	17 %
	Reduction of area	35 %
Density ρ^0		4.410 g/cm ³
Sound velocity	Longitudinal c_L	6211 m/s
	Transverse c_T	3182 m/s
	Bulk c_B	5008 m/s
Elastic moduli	Bulk modulus K	110.6 GPa
	Shear modulus G	44.7 GPa
	Young's modulus E	118.1 GPa
	Poisson's ratio ν	0.322

突させた。計測方法はPVDF (PolyVinylidene DiFluoride) 応力ゲージ法 (以下、「PVDF ゲージ法」という。) と VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) 法の2種類を用いた。PVDF ゲージ法は VISAR 法に比べて試験準備が容易であるが、(応力解放時のゲージの特性が不明なことから) スポール強度の測定には向かない。そこで、衝突速度が約450m/s以上ではPVDF ゲージ法、衝突速度が約450m/s以下ではVISAR 法 (スポール強度を精度良く計測するため) で計測した。

それぞれの計測方法について、砲口付近での供試品等の配置状況を図1及び図2に示す。飛しょう板をショックガンの砲身内で効率的に加速し、試料 (標的板) に対して平行性を保ちながら衝突させるため、ポリエチレン製のサボ (Sabot) を用いる。また、飛しょう板の衝突速度を求めるため、砲口延長管に2本の検速ピンを設置している。当初この検速ピンは電氣的に断になっているが、飛しょう板の通過により電氣的に接になるような構造にしてあり、2本の検速ピンが出すこの電気信号をデジタルオシロスコープで計測し、その時間差から衝突速度を求める。同様な構造のピン (トリガーピン) を試料の衝突面にも設置してあり、飛しょう板が試料に衝突したときにトリガーピンの出す電気信号で衝突時刻を計測する。

(1) PVDF ゲージ法 (文献⁽⁴⁾)

PVDF ゲージ法の場合は、試料の裏面に PVDF ゲージをはさんでアクリル板²⁾ (ユゴニオ曲線が既知の材料) を接着した。PVDF ゲージは、作用している (垂直) 応力に応じた電荷をその両極間に発生

²⁾ 化学的にはポリメタクリル酸メチル (PMMA: polymethylmethacrylate)。

Fig. 1 Schematic of PVDF gauge method

Fig. 2 Schematic of VISAR method

するものである。その電荷に伴って生じる電圧の時間的変動をデジタルオシロスコープで計測し、ゲージの特性（既知）を用いて電圧を応力に換算することにより、試料とアクリル板の境界面に生じている応力の時間的変動を求めることができる。

(2) VISAR 法 (文献⁽³⁾ (5) (6))

VISAR 法の場合はアクリル板を使用しないで、試料の裏面は自由表面とした。VISAR は、物体の表面にレーザー光を当てその反射光同士を時間的にずらせて干渉させることにより、その表面の移動速度の時間的変動を求める装置である。本研究では、VISAR を用いて試料裏面の速度の時間的変動（衝撃波などの到達により極めて短時間のうちに起こる大きな変動）を計測した。

図2中のレンズは、レーザー光を試料裏面のごく限られた狭い領域に当たるとともに、試料裏面からの反射光を集めるためのものである。レーザー光はレーザー発振器から光ファイバーを通してレンズに入り試料の裏面に当たる。試料裏面で反射したレーザー光は再びレンズで集められ、光ファイバーによって干渉器に入る。VISAR では、この反射光の周波数（あるいは波長）がその時点での試料裏面の速度に応じて変わっている（ドップラー効果）ことを利用して、干渉によって生じる光の強度の時間的変動の計測結果から試料裏面の速度の時間的変動を

Fig. 3 The wave form to be measured

求める。

2.3 計測データの分析方法

PVDF ゲージ法及びVISAR 法の出力は図3のような波形となる。図の縦軸は、PVDF ゲージ法ではゲージ両極間に発生する電圧（またはそれを換算して得られる応力）、VISAR 法では試料裏面（自由表面）の速度である。

まず弾性波の到達（図中の時刻 t_1 ）により衝撃圧縮状態が生じ、その直後に塑性波が到達（時刻 t_2 ）して更に圧縮された状態となる。その後、この圧縮状態は飛ばしう板裏面からの反射希薄波の到達（時刻 t_3 ）により緩和されるが、試料内部でスポール破壊が起こった場合には再圧縮（時刻 t_4 ）が起きる。

この計測データを、平面衝撃波の通過前後における保存則を表わすランキン・ユゴニオの関係式（例えば文献⁽¹⁾ (2) (3)）を使って処理し、動的材料特性を求めることができる（文献⁽¹⁾ (2) (3) (4) (5)）。

具体的には、PVDF ゲージ法の場合は、試料裏面に接着したアクリル板の影響による衝撃状態の変化を考慮したインピーダンスマッチング法によって処理する。VISAR 法の場合はより直接的に求められる。例えばスポール応力 σ_{spall} は

$$\sigma_{spall} = \rho^0 c_L (u_p(t_4) - u_p(t_3)) / 2 \quad (1)$$

で求められる。ただし、 ρ^0 、 c_L は試料のそれぞれ初期密度と縦波音速、 $u_p(t_3)$ 、 $u_p(t_4)$ はそれぞれ図3の時刻 t_3 、 t_4 における自由表面速度を表わす。

3 結果及び考察

PVDF ゲージ法で10回、VISAR 法で3回の合計13回の計測データが得られた。

Fig. 4 The Hugoniot curve in V/V^0 - σ Fig. 6 The Hugoniot curve in u_p - σ Fig. 5 The Hugoniot curve in μ - σ Fig. 7 The Hugoniot curve in u_p - u_s

3.1 ユゴニオ曲線

弾性波到達後の状態及び塑性波到達後の状態における衝撃パラメータを求め、プロットして得られた試料Ti-6Al-4Vのユゴニオ曲線を図4～7に示す。今回の試験ではPVDFゲージ法とVISAR法とを衝突速度の高低に応じて使い分けており、またVISAR法の計測回数が3回しかないことから、両計測法の結果を区別せず一括して次のように処理した。

図4～6においては、まず、各計測における弾性波到達後の状態での値を平均してユゴニオ弾性限(図中の点E)での値とした。(今回の試験の衝突速度の振れ幅(約270～1500m/s)程度では衝突速度に依らずユゴニオ弾性限は一定と見なすことができるとされているため。実際の結果もそのようになっている。3.2節参照。)初期状態とユゴニオ弾性限Eの間(弾性域)は1次式(直線)で近似し、塑性域は点Eを通る2次式で近似できると考え、各計測における塑性波到達後の状態の値を用いて近似2次式を求めた。以上は全て縦軸を応力 σ として処理している。最後に、塑性域での応力 σ の曲線を平行移動して初期点を通るようにし、圧力(静水圧) p を求めた(図

中に点線で示す)。

結果は、図4(相対体積 V/V^0 と応力 σ の関係)において

$$\sigma = \begin{cases} 170 - 170(V/V^0) \text{ (GPa)} & 0.986 \leq V/V^0 \leq 1 \text{ のとき} \\ 324 - 543(V/V^0) + 219(V/V^0)^2 \text{ (GPa)} & V/V^0 < 0.986 \text{ のとき} \end{cases}$$

$$p = 323 - 543(V/V^0) + 219(V/V^0)^2 \text{ (GPa)}$$

となった。ひずみ ϵ は

$$\epsilon = 1 - \frac{V}{V^0}$$

で与えられる(1軸ひずみ状態)ので、応力 σ -ひずみ ϵ 関係に直せば

$$\sigma = \begin{cases} 170\epsilon \text{ (GPa)} & 0 \leq \epsilon \leq 0.0142 \text{ のとき} \\ 0.894 + 104\epsilon + 219\epsilon^2 \text{ (GPa)} & \epsilon > 0.0142 \text{ のとき} \end{cases} \quad (2)$$

$$p = 104\epsilon + 219\epsilon^2 \text{ (GPa)} \quad (3)$$

が得られる。ちなみに、弾・完全塑性体モデルでは $p = K\epsilon$ (K は体積弾性率)すなわち

$$p = 111\epsilon \text{ (GPa)}$$

(表1参照) となり1次式であるため特に ε が大きくなるとずれが生じる。

次に、図5 (圧縮度 (Compression)³⁾ $\mu (= \rho/\rho^0 - 1)$ と応力 σ の関係) では

$$\sigma = \begin{cases} 168\mu \text{ (GPa)} & 0 \leq \mu \leq 0.0144 \text{ のとき} \\ 0.860 + 107\mu + 56.1\mu^2 \text{ (GPa)} & \mu > 0.0144 \text{ のとき} \end{cases}$$

$$p = 107\mu + 56.1\mu^2 \text{ (GPa)} \quad (4)$$

となった。数値シミュレーションの入力として必要な材料特性の一つに状態方程式があるが、圧力 p を圧縮度 μ の多項式で表わす式はその標準的な形の一つであり、式(4)を今回の試料Ti-6Al-4Vの状態方程式として数値シミュレーションに使用できる。

また、図6 (粒子速度 u_p と応力 σ の関係) からは

$$\sigma = \begin{cases} 0.0274u_p \text{ (GPa)} & 0 \leq u_p \leq 88.2 \text{ (m/s) のとき} \\ 0.494 + 0.0215u_p + 3.69 \times 10^{-6}u_p^2 \text{ (GPa)} & u_p > 88.2 \text{ (m/s) のとき} \end{cases}$$

$$p = 0.0215u_p + 3.69 \times 10^{-6}u_p^2 \text{ (GPa)} \quad u_p: \text{(m/s)}$$

が得られた。これらの関係は衝撃波伝播に伴う状態変化を考える際に有益である。以上得られた結果は、いずれもほぼ妥当なものと考えられる。

図7は粒子速度 u_p と衝撃波速度 u_s の関係で整理したものであるが、弾性域では u_s はほぼ縦波音速の値に等しく、塑性域では

$$u_s = c_0 + su_p \quad c_0(>0), s(>0): \text{定数}$$

の関係があり、定数 c_0 はバルク音速にほぼ等しいことが経験的に知られている (例えば文献⁽²⁾)。そこで図7では、他の図と同様に各計測における弾性波到達後の状態での値を平均してユゴニオ弾性限 (点E) を求めたほか、塑性波到達後の状態の値を用いて塑性域を1次式で近似した。

結果は

$$u_s = 4795 + 1.12u_p \text{ (m/s)} \quad (5)$$

$$u_p > 88.2 \text{ (m/s) のとき}$$

となった。取得したデータの1次式への適合度、 u_s 切片の値4795m/sとバルク音速の値5008m/sとの一致度はいずれも特に良いとはいえないが、許容できる結果と考えられる。ただし、弾性域においては u_s の値が縦波音速の値(6211m/s)と一致するとしてデータ処理している。取得した波形 (PVDF ゲージあるいはVISAR の出力)

³⁾ここでは圧縮度と記したが、定訳があるかどうか不明。ちなみに、圧縮率 (Compressibility) とは体積弾性率 K の逆数 $1/K$ をいう。

Fig. 8 Impact velocity vs. elastic wave stress

から直接 u_s を求める方法を採用した場合にはばらつきが大きくなる。(数 μ sの間に起こる現象の計測であり、計測ピンやPVDFゲージの応答性を考えると u_s を精度良く計測することは難しい。) なお、式(5)を式(4)の代わりに数値シミュレーションでの状態方程式の入力として使うこともできるが、データの適合度がそれ程良くない点に留意しておく必要がある。

3.2 ユゴニオ弾性限

すでに述べてきたように各計測における弾性波到達後の状態がユゴニオ弾性限 (HEL) に相当する。まず、その応力が衝突速度によって変わるかどうかを見るために、各計測における衝突速度と弾性波到達後の状態での応力 σ の関係をプロットしたのが図8である。これより、発生応力 σ の衝突速度依存性はほとんど無く、2回の特異な計測データを除けば衝突速度に依らずほぼ一定の値である (むしろ個々の計測のばらつきの方が大きい) ことが分かる。これは期待された結果である (3.1 節参照)。また、PVDFゲージ法かVISAR法かという計測方法による違いもほとんど無い (図中の破線がPVDFゲージ法の平均値2.44GPa、点線がVISAR法の平均値2.34GPa、実線が全データの平均値2.42GPa) と考えられる。このことは今回両計測方法により得られた結果が信頼できるものであることを示唆している。

応力 σ 以外の衝撃パラメータについても同様で、衝突速度もしくは計測方法への依存性はほとんど無い。このことを踏まえ、前節で述べたように、ユゴニオ弾性限 (HEL) は各計測における弾性波到達後の状態での値を平均して求めた。得られた衝撃パラメータの値 (平均値) は

$$V/V^0 = 0.986$$

$$\mu = 0.0144 \quad (\rho = 4.474 \text{ (g/cm}^3\text{)})$$

$$\sigma = 2.42 \text{ (GPa)}$$

$$u_p = 88.2 \text{ (m/s)}$$

$$u_s = 6211 \text{ (m/s)}$$

となった。

以下、ユゴニオ弾性限での応力 $\sigma = \sigma_{\text{HEL}}$ について考察する。 σ_{HEL} は1軸ひずみ状態での弾性限応力である。これを変換して、引張試験のときのような1軸応力状態にしたときの弾性限応力 (動的降伏応力) Y_D を求める (文献⁽¹⁾ (2))。このため、

$$Y_D = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sigma_{\text{HEL}} \quad (6)$$

(ν はポアソン比) を用いて

$$Y_D = 1.27 \text{ (GPa)}$$

を得る。一方、弾・完全塑性体モデルでは

$$Y_D = \frac{3}{2}(\sigma - p) \quad p > 0 \text{ で塑性域のとき}$$

となり、前節で σ の曲線を平行移動して p の曲線を求めたときの曲線の移動量の $3/2$ 倍が Y_D となるはずであるが、実際は多少ずれる。例えば、式 (2) と (3) から求めれば $Y_D = 1.34 \text{ (GPa)}$ となる。この差は実際のユゴニオ曲線が弾・完全塑性体と多少ずれているために生じている⁴⁾ものである。

上で求めた動的降伏応力 $Y_D = 1.27 \text{ (GPa)}$ を、(準静的) 引張試験により得られた静的降伏応力 (耐力) $Y_S = 0.948 \text{ (GPa)}$ (表1参照) と比較して考察する。第1.2節で注意したように、これは圧縮状態における静的弾性限と動的弾性限の比較となる。図9に、今回の供試材料 Ti-6Al-4V の他に、同様な平板衝突試験を行って求めた2種類のアルミニウム合金 Al6061 と Al7075 の結果も合わせて示す。さらに、文献⁽⁷⁾ (8) による静的降伏応力と動的降伏応力の間の経験的な関係 (1次式) を示した。図中の実線が鉄鋼とチタン合金の場合、破線がアルミ合金の場合である。これを見ると今回の結果は妥当なものとも考えられるが、データ数が少ないこともあり、今後他の材料に対して同様の計測を行いデータ数を増やした上で、アルミ合金の場合の一致度が良くないことも合わせて考察する必要がある。

3.3 スポール強度

平板衝突試験では、衝突速度が高くなるにつれて試料及び飛しょう板の裏面からの反射希薄波によって生じる膨張 (引張) 状態も、より高いレベルとなる (圧力 p や応力 σ がより低くなる)。従って、衝突速度があるしきい

⁴⁾ この整合をとるためには σ から p を求めるときの移動量を変えることとなるが、そうすると今度は例えば式 (3) や (4) に定数項が出ることとなり、それらの式の成立する ϵ や μ の範囲を示すことが必要になるなど取り扱いがかわって面倒になる。

Fig. 9 Static yield stress Y_S vs. dynamic yield stress Y_D

値 v_{spall} を超えた場合にスポール破壊が起こると予想される。もちろん v_{spall} の値は、試料裏面にアクリル板の無い VISAR 法の配置の場合の方が、試料裏面にアクリル板の有る PVDF ゲージ法の配置の場合よりも小さくなるのが期待される。

実際、そのような結果が得られた。スポール信号の有無によって推定すると、PVDF ゲージ法の計測のうち衝突速度が 453m/s と 475m/s の場合にはスポール破壊が起きず 589m/s 以上の残り全て (8回) においてスポール破壊が起こっている。したがって、PVDF ゲージ法配置でのスポール破壊が起きる衝突速度の下限値 v_{spall} は 475m/s と 589m/s の間にあると考えられる。また、VISAR 法の計測 (3回) では、衝突速度が 269m/s と 286m/s の場合にはスポール破壊が起きず、455m/s で起きている。したがって、VISAR 法配置での v_{spall} は 286m/s と 455m/s の間にあると考えられる。

次に、スポール強度 p_{spall} 及び σ_{spall} を考える。求めたスポール応力 σ_{spall} の値を衝突速度との関係として図 10⁵⁾ に示す。なお、上述した v_{spall} についても併せて図中に示した。この図の PVDF ゲージ法の結果からは衝突速度が高くなるにつれてスポール応力 σ_{spall} (負の値) の絶対値も大きくなる傾向が見られる。しかし、これらの値は応力解放時のゲージ特性が圧縮時と同じであると仮定して算出しているものであり、また、試料とアクリル板との間の衝撃インピーダンスの違いを考慮に入れてインピーダンスマッチング法により間接的に算出しているものであることから、今回はあくまでも参考値として考えたい。今回の試験では限られた試験回数のためできなかったが、

⁵⁾ 同じ衝突速度でも PVDF ゲージ法と VISAR 法とでは、試料裏面のアクリル板の有無の違いにより反射希薄波によって試料内部に発生する膨張 (引張) 状態が異なる。よって、図 10 においては各計測法ごとに衝突速度との関係を見るべきであり、両計測法の結果を一緒にして論じることはできない。一方、図 8 のユゴニオ弾性限応力についてはアクリル板の有無が影響しないため両計測法を一括して扱うことができることに注意。

Fig. 10 Impact velocity vs. spalling strength

今後、VISAR法でより高い衝突速度（500～1500m/s程度）の場合の計測を行い同様の傾向となるかどうかを調べることにより、今回PVDFゲージ法で得られた値の妥当性、あるいはスポール強度が衝突速度（に応じて発生する衝撃圧縮状態）に依存して変わる可能性について判断することが可能であると考える。

したがって今回は、より直接的に計測しているVISAR法の計測結果をもとにスポール強度 p_{spall} 及び σ_{spall} を求めることとする。3回のVISAR法の計測のうち、スポール破壊が起こったのはあいにく1回（衝突速度455m/s）のみで、式(1)でスポール応力 σ_{spall} を求めた結果は、-5.10GPaとなった。さらに、

$$p_{spall} = \sigma_{spall} + \frac{2}{3}Y_D \quad (7)$$

(Y_D は動的降伏応力)によりスポール圧力 p_{spall} を求める⁶⁾と-4.25GPaとなる。

今回は計測数が少なく精度の面では必ずしも良くないかもしれないが、

$$p_{spall} = -4.25 \text{ (GPa)}$$

$$\sigma_{spall} = -5.10 \text{ (GPa)}$$

をスポール強度と考える。この値の妥当性及び衝突速度依存性は今後の検討課題である。

図11は取得したスポール圧力 p_{spall} 及びスポール応力 σ_{spall} を静的降伏応力 Y_S との関係でプロットしたものである。図9と同様に、今回の供試材料Ti-6Al-4Vの他にアルミ合金Al6061とAl7075の結果（衝突速度はいずれも300m/s弱）も合わせて示した。

⁶⁾前節で注意したように、動的降伏応力 Y_D を式(6)で求めたとき、式(7)は厳密には成立しないがその誤差は小さく適用しても差し支えないと考える。

Fig. 11 Static yield stress Y_S vs. spalling pressure p_{spall} / stress σ_{spall}

4 おわりに

ショックガンを用いてチタン合金Ti-6Al-4Vを供試材料とした平板衝突試験を行い、PVDFゲージ法とVISAR法の2種類の計測を行った。その計測結果から、動的材料特性としてユゴニオ曲線、ユゴニオ弾性限(HEL)、スポール強度を取得した。2種類の計測方法のいずれにおいてもほぼ妥当な結果が得られたと考えられる。特にVISAR法による計測は、我々としては今回の試験で初めて成功したものであり、動的材料特性の有力な計測手法を会得したという点でも意義深い。

取得した動的材料特性は、それ自身としても高速衝撃下の材料特性データとして貴重な意味を持つが、さらに衝撃破壊現象の数値シミュレーションの入力データとしても有効に活用できる。今後は、取得した動的材料特性を用いて今回の平板衝突試験の模擬などの数値シミュレーションを行い、その結果を計測結果と比較して、取得した動的材料特性や数値シミュレーション法の妥当性を検証したい。また、同様の平板衝突試験や数値シミュレーションを他の材料に対しても実施し、より広範な材料に対して動的材料特性データの取得・蓄積を行うとともに、試験・計測から数値シミュレーションに至る一連の手法の有用性を実証したい。

参考文献

- (1) Zukas, J. A., *High Velocity Impact Dynamics*, (1990), 162-181, John Wiley & Sons.
- (2) 林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, (1988), 203-218, 日刊工業新聞社.
- (3) 箕村茂, 超高圧, (1988), 27-34, 共立出版.
- (4) 間山利勝・正村修身, PVDFゲージによる衝撃圧力

- 計測の応用, 防衛庁技術研究本部技報, 第6628号,
(1997).
- (5) 間山利勝・正村修身, 鋼材のスポール特性について,
防衛庁技術研究本部技報, 第5790号, (1990).
- (6) Hemsing, W. F., Velocity Sensing Interferometer
(VISAR) Modification, *Rev. Sci. Instrum.*, **50**-1,
(1979), 73-77.
- (7) Recht, F. R., Taylor Ballistic Impact Modelling
Applied to Deformation and Mass Loss Determination,
Int. J. Eng. Sci., **16**-2, (1978), 809.
- (8) 正村修身・間山利勝, 侵徹現象の数値シミュレーション
(第2報) (動的材料強度の評価について), 防衛
庁技術研究本部技報, 第5786号, (1990).
-