ピエゾフィルム応力ゲージによる ポリメタクリル酸メチルの衝撃応答の検討*

佐藤 裕久^{*1}, 菊池 亘^{*2}, 鈴木 英^{*2}

On Evaluating Impact Responses of Polymethyl Methacrylate by Piezofilm Stress Gauges

Yasuhisa SATO, Wataru KIKUCHI and Takeshi SUZUKI

An unsteady-wave-sensing-system (UWSS) is developed for evaluating the wave propagation characteristics of polymethyl methacrylate (PMMA) for loading-reloading-unloading waves using plate-impact experiments and three PVDF gauges. By applying the UWSS, stress, particle-velocity, strain and two kinds of phase velocities at one location in the PMMA are determined as functions of time. The phase velocities U^{σ} associated with the stress profiles are generally different from the other phase velocities U^v associated with the particle-velocity profiles. From loading to reloading are transitions very near from the Hugoniot in the stress-strain plane, but from reloading to unloading are transitions upward off the Hugoniot. In the region of our experimental stress, PMMA does not behave as liquid and the Hugoniot of PMMA is not effective for the loading-history-characteristics.

Key Words: Material Testing, High Polymer Materials, Impact Strength, Constitutive Equation, Plate-Impact Experiment, PVDF Gauge, Hugoniot Curve

1. 緒 言

固体の衝撃応答を把握するために、物体内部で衝撃応力などを求めることは重要である。しかし、物体内部へのセンサの挿入は、一般に、衝撃インピーダンスの不連続性を来し、それが計測データに影響するために衝撃諸量の高精度計測を困難とする。最近、衝撃応力計測のために PVDF または PVF₂(Polyvinyliden Fluoride)ゲージと呼ばれる piezo 圧電効果を有する高分子フィルムを利用したゲージが開発され、検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。このゲージは電源が不要で、大きな出力信号を取得できるという利点を持つ。それ以上に、PVDF ゲージを高分子材料の試験片への埋込みゲージとして用いるとき、ゲージ素子だけでなくゲージの絶縁材料も高分子であるため、衝撃インピーダンスのマッチングが良好となり、前述の問題点を回避できる。さらに、この種のゲージの開発初期に採用されていた電流モード法に比べ、電荷モード法を採用することにより、前者の方法よりも容易に出力信号が記録できるようになった⁽²⁾。著者らもポリメタクリル酸メチ

ル(Polymethyl Methacrylate: PMMA, 以下、PMMA と呼ぶ)の平板衝撃試験を行い、単軸ひずみ状態の応力波に関し PVDF ゲージを使用して電荷モード法により数 GPa のプラトー応力を数%の精度で計測できることを示した⁽³⁾。

一方、PMMA はレーザ速度干渉計の窓材に使用される⁽⁴⁾など重要な材料であるが、その衝撃応答は複雑であり⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾十分には解明されていない。例えば、衝撃負荷後の再負荷やそれに続く除荷の挙動はいまだ調査されていないが、PMMA に限らずこのような負荷履歴を含む衝撃応答の研究は少ない⁽⁸⁾。しかし、複数の埋込みゲージを用いる解析法⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を適用すれば、比較的容易に検討が可能であると思われる。事実、著者らは物体内の 3 箇所 で非定常応力波を測定し、その結果から他の衝撃諸量を求める具体的手続きを提示し、単軸ひずみ状態における応力・ひずみ図に及ぼす負荷履歴の影響が検討できることを示した⁽¹²⁾。

本研究では、まず、一段式火薬銃を用いて PMMA の積層板ターゲットとアルミニウム・銅の積層板インパクトとで構成される平板衝撃試験を行う。すなわち、PMMA ターゲット内に単軸ひずみ状態で負荷-再負荷-除荷の応力波を発生させ、その応力波をターゲット中心軸に沿った 3 箇所 で PVDF ゲージにより計

* 原稿受付 1997 年 3 月 19 日。

^{*1} 正員、東北学院大学工学部 (〒985 多賀城市中央 1 13 1)。

^{*2} 東北学院大学大学院。

測する。次に、その3箇所の応力推移から、波動伝ばに関連した運動量と量質の保存則を適用してPMMA内の一点で粒子速度やひずみなどの推移を計算する⁽¹²⁾。以上の結果からPMMAの単軸ひずみ状態での負荷-再負荷-除荷の応力・ひずみ図を求め、その特徴をユゴニオ曲線と対比しながら考察する。

2. PMMAの平板衝撃試験

2.1 概要 平板衝撃試験では、平らな2枚の円板を用い、1枚の円板(インパクトと呼ぶ)を加速し、静止している他の円板(ターゲットと呼ぶ)に片当たりなく衝突させることが基本である。平面同士が中心軸に垂直に衝突すると物質粒子は衝突方向にのみ運動するので、中心軸付近の変形は単軸ひずみ状態となり、発生する応力波の波面は平面で縦波である。

インパクトを取付けた発射体の加速には以前の研究の場合⁽³⁾と類似の一段式火薬銃を使用した。加速管の口径は25 mmで内面はホーニング加工してある。

図1に平板衝撃試験の測定系の概要を示す。計測対象は発射体の衝突速度とターゲット内に発生する衝撃応力である。

2.2 衝突速度の測定法 以前は発射体が加速管を離れ自由飛行した後、ターゲットに衝突するような実験を行っていた⁽³⁾ので、磁気誘導法により、コイルの設置間隔を十分長くとり衝突速度を1%以下の精度で決定できた⁽³⁾。しかし、中心軸に垂直な平面波を得るため、衝突時に発射体の長さの半分以上が加速管の中に留まるようにした。このため、発射体の衝突速度は短い間隔(約12.7 mm)に配置した二対のピンを用いるピンコンタクト法により計測する(図1参照)。イ

ンパクト段付部(図2参照)が加速管から出て約5 mm移動して一対めの接地側ピンに接触し、さらに約1 mm移動して一対めの+側ピンに接触する。このとき回路出力端からパルス電圧が生ずる。続いて、この段付部が約12 mm移動して二対めのピンに同様に接触して別のパルス電圧が生ずる。これらの信号をオシロスコープ2(Sony Tektronix 製 TDS 350)を用いて記録し、両パルスの時間間隔とピン間隔とから速度を定める。磁気誘導法との比較により、ピンコンタクト法での速度測定精度は±2%程度であった。

2.3 PVDF ゲージと衝撃応力の測定法 実験に用いたPVDFゲージはアメリカDynasen社製PVF₂-4-040-EKである⁽¹³⁾。一軸延伸され、分極処理された厚さ約10 μmのPVDFフィルムの両面にフォトエッチングにより厚さ約5 μmの電極が取付けられている。さらにその両面が厚さ約13 μmのポリイミドフィルムにより絶縁されており、ゲージの全厚は約46 μmである。また、感圧部は約1 mm×1 mmの方形である。

応力を計測するためのPVDFゲージ測定回路の出力側に積分器(Dynasen 社製 CI-50-0.1)を取付け、電荷モード法により出力電圧をオシロスコープ1(Sony Tektronix 社製 TDS 540)に記録する。衝突実験の後、この電圧をDynasen社の校正曲線により応力に変換する。なお、PVDFゲージ、積分器およびケーブルを含む系の出力特性の時定数は約5 nsである⁽¹⁴⁾。

2.4 インパクトとターゲット 図2にインパクトを装着した発射体とターゲットを示す。ターゲット内に発生する衝撃応力の推移を負荷-再負荷-除荷と変化させるために積層板インパクトを用いた。衝突面側

Fig. 1 Outline of the measurement system for plate-impact experiment

Fig. 2 Dimensions (in mm) of a typical target and projectile with the impactor

が厚さ約1 mmのアルミニウム板(JIS: A 1100)であり、裏打ちが厚さ約3 mmの銅板(JIS: C 1100)である。このインパクトを超高分子量ポリエチレン製丸棒から旋盤加工した全長約50 mmのサボに取付け発射体(図2参照)とした。このとき、板およびサボの接触面はいずれも少量の瞬間接着剤(商品名: アロンアルファ)を用い、25 N程度の重りにより加圧接着した。

ターゲットは直径約35 mmで厚さ約1 mmのPMMA(クラレ社製コモグラス)3枚と、同直径で厚さ約5 mmのPMMA(クラレ社製パラグラス)1枚の計4枚を積層したもので、全厚約8 mmである。図2に示すように、三つの積層境界面の中心に、PVDF ゲージ感圧部中心が来るよう配置してゲージを挟み込んだ。この際にもインパクトの場合と同様、少量の接着剤を用い3回に分けて15 N程度の重りにより加圧接着した。

2.5 衝突時の片当たりを減ずる対策 ターゲットは加速管出口に固定したフランジに軽く押しあてた状態(図1参照)で、瞬間接着剤により3箇所ですめるだけとした。平面応力波を衝突軸に垂直に生じさせたいのでインパクトとターゲットの衝突時の片当たりをできるだけ小さくする必要がある。そのため以下のような工夫をした。①インパクトとターゲットの衝突時に発射体の長さの半分以上を加速管の中に留める(前述)。②フランジを加速管出口にねじで固定したとき、加速管穴中心軸に対し、フランジのターゲット接着面の法線ができるだけ平行となるように、試行錯誤でその接着面を平面研削盤で加工した。その結果、平行度は0.3 mrad程度である。③インパクト衝突面の法線がサボ中心軸にできるだけ平行に近い発射体を測定顕微鏡により検査し、選択した。その平行度が2 mrad程度以下の発射体を実験に供する。

3. 実験データ解析法

3.1 実験波形の例 PVDF ゲージ3枚(G_- , G_0 ,

Fig. 3 Typical voltage records of three gauges G_- , G_0 and G_+ .

G_+ ゲージと呼ぶ)を PMMA ターゲットの衝突面からそれぞれ約1, 2, 3 mmの位置に埋込んで、負荷-再負荷-除荷の応力波を計測したオシロスコープ上の記録例を図3に示す。縦軸は電圧であるが、おおむね応力に対応し、プラトー値は2 GPa程度である。また、この場合の発射体衝突速度は約500 m/sであった。

この波形の特徴を知るために、衝撃応力の予測に利用されるインピーダンス・マッチング法⁽¹⁵⁾を用いることが考えられる。衝撃超高压下では固体は流体的に振る舞うとされており、例えば、数 km/s の超高速負荷を受けると諸量が不連続となる衝撃波が発生し、伝ばするとの考えに基づく方法である。超高速衝撃により発生する衝撃波面直後の応力の主成分がほぼ等しいこと⁽¹⁶⁾なども、流体的挙動を裏付けていると思われる。図3の場合(衝突速度496 m/s)に対して、インピーダンス・マッチング法が正しく適用できるのかどうかの問題はあるが、三ゲージの各位置で、この方法で求めた応力波形を図4に示す。インピーダンス・マッチング法では、応力の変化はすべて不連続的に生ずると考えるので、図4では負荷波、再負荷波、およびインパクト裏面からの除荷波が明確に現れている。一方、図3では、負荷波を除く再負荷波や除荷波は不連続的ではないが、図4とその傾向が極めて類似していることがわかる。また、波形全体にわたって微小な階段状の変化が見られるが、これはA/Dコンバータの分解能に起因すると思われる。さらに、その他の高次の微小な変化やスパイク状の変化などもここではノイズとみなすことにする。

次に、このような三つの応力波形から、ひずみ、粒子速度などを求める手続きを示す。

3.2 諸量の計算手続き⁽⁹⁾⁽¹²⁾ 応力ゲージは埋込んで用いるので、ラグランジュ座標を用いる。

質量と運動量の保存関係は次のようになる。

$$\partial \epsilon / \partial t + \partial v / \partial x = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 4 Calculated stress vs time profiles corresponding to Fig. 3 by using the impedance matching method

$$\rho \cdot \partial v / \partial t + \partial \sigma / \partial x = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 x はラグランジュ座標、 t は時間、 v は粒子速度、 ρ は初期密度、そして、 σ と ε は、それぞれ x 方向の圧縮の公称応力成分とひずみ成分である。

次に、Fowles らにならって、応力および粒子速度の位相速度(または、伝ば速度)を定義する⁽⁹⁾。

$$U^\sigma = (\partial x / \partial t)_\sigma \\ = -(\partial \sigma / \partial t) / (\partial \sigma / \partial x) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$U^v = (\partial x / \partial t)_v \\ = -(\partial v / \partial t) / (\partial v / \partial x) \quad \cdots \cdots (4)$$

もちろん、一般には、ひずみの伝ば速度 U^ε も存在するが、ここではその伝ば速度は議論しないことにする。式(1)~(4)から、 x = 一定のとき、

$$\rho \cdot \partial v / \partial t - (1/U^\sigma) \cdot (\partial \sigma / \partial t) = 0$$

または、

$$d\sigma = \rho U^\sigma dv \quad \cdots \cdots (5)$$

が得られる。同様に、

$$\partial \varepsilon / \partial t - (1/U^v) \cdot (\partial v / \partial t) = 0$$

または、

$$d\varepsilon = dv / U^v = d\sigma / (\rho U^\sigma U^v) \quad \cdots \cdots (6)$$

が得られる。

これらの微分関係式を増分形に置き換え、実験結果に適用して、 U^σ 、 v 、 U^v 、 ε を以下の手順で求める。

(a) ターゲット内に等間隔に配したゲージ G_- 、 G_0 、 G_+ の位置($x = x_-$ 、 x_0 、 x_+)で時間の関数として応力が図5のように得られたとする。これらから、 $x'_- [(x_- + x_0)/2]$ および $x'_+ [(x_0 + x_+)/2]$ において、応力 σ_j の位相速度 U_{j-}^σ および U_{j+}^σ が次のように計算できる。

Fig. 5 A model for typical stress vs time profiles at points x_- , x_0 and x_+

$$U_{j-}^\sigma \equiv (x_0 - x_-) / \Delta t_{j-} = \Delta x / \Delta t_{j-}$$

$$U_{j+}^\sigma \equiv (x_+ - x_0) / \Delta t_{j+} = \Delta x / \Delta t_{j+}$$

したがって、位置 x_0 での σ_j の位相速度 U_{j0}^σ は次のようになる。

$$U_{j0}^\sigma \equiv (U_{j-}^\sigma + U_{j+}^\sigma) / 2 \quad \cdots \cdots (7)$$

(b) x'_- と x'_+ において、応力が σ_j のときの粒子速度 v_{j-} と v_{j+} とを計算した後、 x_0 において $v_{j0} [(v_{j-} + v_{j+})/2]$ の伝ば速度 U_{j0}^v を定める。

まず、応力増分 $\Delta\sigma (= \sigma_j - \sigma_{j-1})$ = 一定に対応する粒子速度増分 $\Delta v (= v_j - v_{j-1})$ は式(5)より

$$\Delta v = \Delta\sigma / (\rho U^\sigma) \approx 2\Delta\sigma / [\rho(U_{j-}^\sigma + U_{j+}^\sigma)] \quad \cdots \cdots (8)$$

と書ける。これより次式を得る。

$$v_{j-} - v_{(j-1)-} \approx 2\Delta\sigma / [\rho(U_{j-}^\sigma + U_{(j-1)-}^\sigma)]$$

$$v_{j+} - v_{(j-1)+} \approx 2\Delta\sigma / [\rho(U_{j+}^\sigma + U_{(j-1)+}^\sigma)]$$

一方、初期状態で静止しているので $v_{0-} = v_{0+} = 0$ であるから、 j を 1 から j まで加え合わせて、

$$v_{j-} \approx 2(\Delta\sigma/\rho) \sum_{k=1}^j [1/(U_{k-}^\sigma + U_{(k-1)-}^\sigma)] \quad \cdots \cdots (9)$$

$$v_{j+} \approx 2(\Delta\sigma/\rho) \sum_{k=1}^j [1/(U_{k+}^\sigma + U_{(k-1)+}^\sigma)] \quad \cdots \cdots (10)$$

を得る。すなわち、 x'_- と x'_+ において、粒子速度が応力の関数として、したがって、図5の $\sigma \cdot t$ 関係より時間の関数として定まる。その二つの関数は例えば、

$$v = g_-(t) \quad \text{on} \quad x = x'_- \quad \cdots \cdots (11)$$

$$v = g_+(t) \quad \text{on} \quad x = x'_+ \quad \cdots \cdots (12)$$

で表せる。ここでは簡単のために、これらを折れ線で近似する。一方、 $x_0 [(x'_- + x'_+)/2]$ で、応力が σ_j のときの粒子速度 v_{j0} は近似的に、前述のように、

$$v_{j0} \approx (v_{j-} + v_{j+}) / 2 \quad \cdots \cdots (13)$$

である。したがって、 x_0 における v_{j0} の伝ば速度 U_{j0}^v は

$$U_{j0}^v \equiv (x'_+ - x'_-) / \Delta t_{vj} = \Delta x / \Delta t_{vj} \quad \cdots \cdots (14)$$

で与えられる。ここに、 Δt_{vj} は v_{j0} が x'_- から x'_+ まで伝ばするに要する時間であり、式(11)と式(12)を用いて計算する。

(c) x_0 において、応力 σ_j のときのひずみ ε_{j0} は式(6)から以下のように計算できる。まず、次式を得る。

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / (\rho U^\sigma U^v) \quad \cdots \cdots (15)$$

これより、次式が成立する。

$$\varepsilon_{j0} - \varepsilon_{(j-1)0} \approx 2\Delta\sigma / [\rho(U_{j0}^\sigma \cdot U_{j0}^v + U_{(j-1)0}^\sigma \cdot U_{(j-1)0}^v)] \quad \cdots \cdots (16)$$

初期状態でひずみは零であるので、 j を 1 から j まで加え合わせて次式を得る。

$$\varepsilon_{j0} = 2(\Delta\sigma/\rho) \sum_{k=1}^j [1/(U_{k0}^\sigma \cdot U_{k0}^v + U_{(k-1)0}^\sigma \cdot U_{(k-1)0}^v)] \quad \cdots \cdots (17)$$

4. PMMA の単軸ひずみ状態下の 応力・ひずみ特性の検討

PMMA ターゲット内に発生した応力波が衝撃端から数 mm 伝ばする間、本研究で扱う程度の応力波の振幅の減衰は殆ど無視できる⁽⁴⁾ので、ここでも三点での実験波形のプラトー応力がインピーダンス・マッチング法による理論プラトー応力に一致すると仮定して応力値を比例配分により修正した。その波形を図6に示す。衝撃端から離れるほど、負荷波到達の後に再負荷波が到達するまでの時間が短くなっているが、これは負荷波の伝ば速度より再負荷波の伝ば速度が大きいことによる。

以下に図6の三つの応力波形から3章の手続きに基づいて諸量を計算した結果について述べる。

図7に x_0 における位相速度と応力との関係を示す。

Fig. 6 Typical stress vs time profiles after adjusting plateau stresses to the calculated level

Fig. 7 Phase velocities associated with stress distribution and particle velocity distribution as a function of stress at x_0

負荷部では、 U^σ と U^v とは約 3 200 m/s で一致している。再負荷部では、 U^σ と U^v とは負荷部よりも大きな値を持ち、両速度はやや異なる。一方、除荷部では、両速度は大きく異なっていること、および、負荷部、再負荷部よりもやや大きな値を持つことがわかる。

図8に x_0 における応力・ひずみ図を示す。ここに、No. T96-011の衝突速度は680 m/sである。図8にはBarkerらのレーザ速度干渉計により求めたPMMAの平板衝撃試験結果の応力・ひずみ図⁽⁴⁾をも示す。実験条件が同一ではないため正確な比較はでき

Fig. 8 Comparison between measured stress-strain curves and the curves determined by Barker et al.⁽⁴⁾ for PMMA

Fig. 9 Comparison between the Hugoniot curve and the measured stress-strain curves under the loading-reloading-unloading condition

ないが、両実験結果の負荷曲線は極めてよく似た経路をたどることがわかる。Barker らは負荷-除荷試験のみを行ったが、本研究では負荷-再負荷-除荷試験を行っているので、その点を明らかにするため、改めて、その応力・ひずみ図を図9に示す。

図9には、実験結果に加えて、応力・ひずみユゴニオ曲線と等エントロピー応力・ひずみ図とを比較のために示した。実験で得た応力・ひずみ図は、最初の負荷部 (OP_1, OP_2) ではほぼ直線である。折れ曲り点 P_1, P_2 が再負荷波の到達に対応している。この P_1, P_2 はほぼユゴニオ曲線上にあるが、再負荷部 (P_1Q_1, P_2Q_2) はユゴニオ曲線から直線的に応力の大きい側に外れていく。ユゴニオ曲線が負荷履歴の影響に無関係に成立すると仮定すると、点 Q_1, Q_2 は除荷の開始点でもあるので、両点はユゴニオ曲線上にあるはずである。従来、例えば、インピーダンス・マッチング法ではこの二点はともにユゴニオ上にあるとされてきた。しかし、本研究の結果では再負荷によって、変形応力が高い側にずれることが示されている。一方、除荷部での応力・ひずみ曲線のこう配が等エントロピー曲線のそれよりも大きい。これらの結果は本研究の応力域では、PMMA のユゴニオ曲線は負荷-再負荷のように変化する負荷に対する特性を表現し得ないこと、また、PMMA が流体的に振る舞っていないことを示唆している。

5. 結 論

ポリメタクリル酸メチル (PMMA) に積層板を衝突させる平板衝撃試験を行い、負荷-再負荷-除荷波を発生させ、衝撃諸量の決定と応力・ひずみ挙動とを検討した。実験を行った応力域での結論は以下のようである。

(1) ピエゾ圧電効果を有する高分子の応力ゲージ (PVDF ゲージ) 3 枚を用いて、PMMA の 3 箇所での応力波を計測し、運動量および質量保存則から衝撃諸量の推移を定めることができる。

(2) 応力と粒子速度の両伝ば速度は異なることがある。

(3) 応力・ひずみ図について、負荷から再負荷に移る点はほぼユゴニオ曲線上にあるが、再負荷から除荷に移る点はユゴニオ曲線よりも応力の大きい側にある。

(4) PMMA は流体的ではない。

(5) PMMA のユゴニオ曲線は、負荷 再負荷のような履歴を含む特性とは区別して考えねばならない。

本研究の実施にあたり、参考文献をご教示いただいた九州大学教授・永山邦仁先生ならびに神戸商船大学教授・佐野幸雄先生に厚くお礼申し上げる。また、本研究の実験の遂行にご協力いただいた本学大学院学生・小森正純君および本学工学部学生・阿部卓也君に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば, Bauer, F., *USA Patent*, 4611260 (1986).
- (2) 例えば, Charest, J. A. and Lynch, C. S., *Shock Compression of Condensed Matter 1989*, (1990), 797, Elsevier Science Publishers.
- (3) 関口博喜・嶺岸茂樹・佐藤裕久・ほか 3 名, 塑性と加工, **36**-416(1995), 1029-1032.
- (4) Barker, L. M. and Hollenbach, R. E., *J. Appl. Phys.*, **41**-10(1970), 4208-4226.
- (5) Schuler, K. W., *J. Mech. Phys. Solids*, **18**(1970), 277-293.
- (6) Gupta, Y. M., *J. Appl. Phys.*, **51** 10(1980), 5352-5361.
- (7) Chartagnac, P. F., *J. Appl. Phys.*, **53** 2(1982), 948-953.
- (8) 例えば, Asay, J. R. and Lipkin, J., *J. Appl. Phys.*, **49**-7(1978), 4242-4247.
- (9) Fowles, R. and Williams, R. F., *J. Appl. Phys.*, **41** 1(1970), 360-363.
- (10) Seaman, L., *J. Appl. Phys.*, **45** 10(1974), 4303-4314.
- (11) Aidun, J. B. and Gupta, Y. M., *J. Appl. Phys.*, **69**-10(1991), 6998-7014.
- (12) 佐藤裕久・ほか 3 名, M&M'96 材料力学部門講演会, No. 96-10(1996-10), 333-334.
- (13) Dynasen Inc., *Catalogue (Shock Pressure Sensors and Impact Facility)*, (1991).
- (14) Lynch, C. S. and Charest, J. A., *Shock Compression of Condensed Matter 1991*, (1992), 901, Elsevier Science Publishers.
- (15) 例えば, 箕村茂編, 超高压(実験物理学講座 18), (1988), 30, 共立出版.
- (16) 例えば, 佐藤裕久・ほか 2 名, 塑性と加工, **32**-364(1991), 597-602.
- (17) Marsh, S. P. (編), *LASL Shock Hugoniot Data*, (1980), 182, University of California Press.