

High-Strain-Rate Characteristics in the Shock Wave-Front of Glassy Polymer

Yasuhisa SATO

1 緒 言

航空機客室の衝撃安全対策には各種材料の衝撃波領域における材料特性が必要である。窓材に必須の PMMA やポリカーボネート (PC) など非晶性高分子の衝撃応力波頭を正確に計測する方法が、最近、提案された¹⁾。本研究では、この手法により得られたデータ²⁾を含め、非晶性高分子 (PMMA, PC) の衝撃波頭における応力・ひずみ特性を求め、そのひずみ速度依存性を評価する。

2 PVDF ゲージによる衝撃波頭計測

2.1 電荷モード法による衝撃応力の測定

(1) 平板衝撃実験

静止している円板試片に、一段式火薬銃 (ISG-40-3000 型) により衝突速度 600m/s 程度に加速した飛翔円板を、正面衝突させる。この時、円板外径からの除荷波 (エッジウェーブ) が円板中心軸付近に到達するまでは、その中心軸近傍は単純な一軸ひずみ状態にある。通常、平板衝撃実験においては、この一軸ひずみ条件下で衝撃諸量の計測と諸特性を検討・評価する。

(2) 非定常波センシングシステム (UWSS)

PVDF ゲージのような、埋め込みゲージを用いて非定常波を計測する際に、応力、ひずみ、粒子速度といった基本諸量の伝播速度は一般に異なると考えて実験を行うべきことを Fowles ら³⁾ が初めて指摘した。さらに、粒子速度または応力の埋め込みゲージのどちらかを適用する場合、どちらも 3 つのゲージを必要とすることを明らかにした³⁾。

これに倣い、我々は、3 枚の応力ゲージを使用する場合について、応力と粒子速度の伝播速度 U^o 、 U^v を用い実験データ解析手順を具体化し、PMMA につき、負荷-再負荷-除荷条件での応力・ひずみ特性を検討した⁴⁾。

(3) 電荷モード法による PVDF ゲージの電荷測定

PVDF ゲージによる計測法には、電流モード法と電荷モード法とがある⁵⁾。電流モード法は出力電流を高域特性の特に優れたオシロスコープにより検出し、この電流の時間積分を実行して電荷を求める。一方、電荷モード法は、測定回路中に、Fig.1 に示すように積分回路を挿入し、その出力コンデンサー間の電圧を計測して、これに其のコンデンサーの静電容量倍して、電荷を得る。ゲージ感圧面積の単位あたりの電荷が分かれば、Dynasen 社の校正曲線から応力に変換できる⁵⁾。電荷モード法の方が電流モード法に比べて、安価なオシロスコープで済むという利点がある。

2.2 衝撃応力決定の改良法

主に使用した PVDF ゲージは、Dynasen 社の PVF2-11-

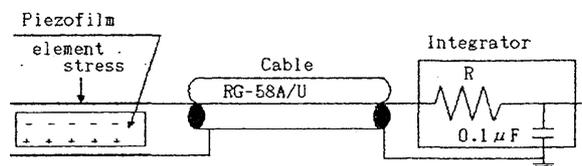


Fig. 1 Measuring circuit for piezofilm stress gauge

.010-EK である⁶⁾。ごく最近まで、前節で述べたように、Fig.1 のような測定回路で、出力コンデンサーの電荷 Q_2 がゲージ内の電荷 Q_1 に等しいと見なすことに疑問を感じていなかった。しかし、両者は一般に異なるということ、Fig.2 に示す Fig.1 の等価回路について、電荷の過渡応答の方程式(1)により示すことが出来た¹²⁾。

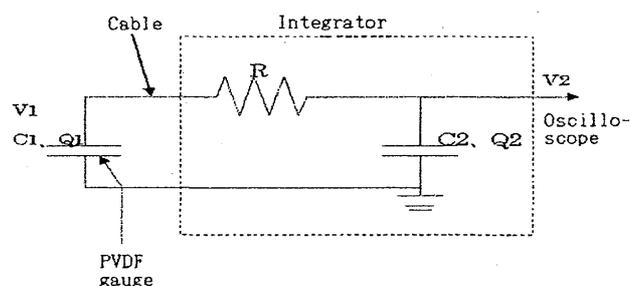


Fig. 2 Equivalent circuit to Fig. 1

ゲージに衝撃応力が作用し始めた時刻: $t=0$ 以降、ゲージに発生する電荷 $Q_1(t)$ と出力コンデンサー C_2 に蓄えられている電荷 $Q_2(t)$ との関係は次式で与えられる¹⁾。

$$Q_1(t) = T \frac{dQ_2(t)}{dt} + Q_2(t) \quad (1)$$

ここに、 T は RC_1 であり、 C_1 はもともとゲージの容量 C_g であるが、同軸ケーブルの容量 C_c が無視できず、 $C_1 = C_c + C_g$ となる。 Q_2 が一定の場合、 $Q_2 = Q_1$ であるが、衝撃波頭のように Q_2 が急激に変化する場合、 Q_2 と Q_1 とは異なる¹²⁾。

2.3 改良法による衝撃波頭の改善

応力推移に対応するゲージ電荷推移が従来の Q_2 に比べて新しく Q_1 を測定したことにより、どの程度、衝撃電荷が改善されたかを、衝撃波頭の立上り時間で評価してみた。

PMMA について 600m/s 程度の平板衝撃実験では、 Q_1 の立上り時間が約 20%、 Q_2 に比べて減少した¹⁾。さらに、PC については、やはり 600m/s 程度の同様の実験で、 Q_1 の立上り時間が約 50% も、 Q_2 の立上り時間に比べて減するという結果を得た²⁾。

2.4 他の衝撃諸量への影響

前節のように、ゲージの出力電荷 Q1 に基づき決定した衝撃応力の波頭部分の立上り時間が従来法 Q2 による立上り時間より 20% から 50% 程度も短くなっているの、応力以外の衝撃諸量も影響を受ける可能性がある。

(1) 応力伝播速度への影響

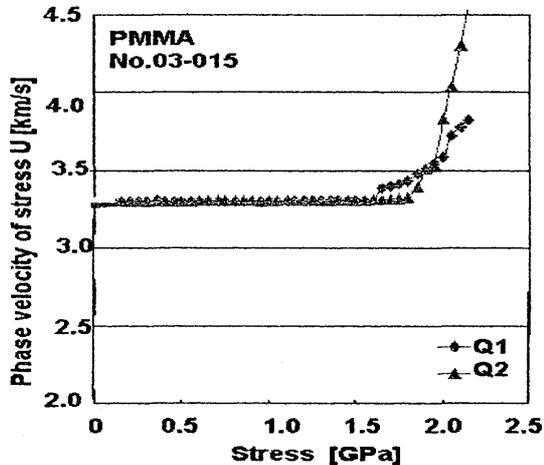


Fig.3 Effects on Phase vel. of stress vs. Stress

Fig.3 に示すように、応力の伝播速度は、従来法(Q2 法)と改良法(Q1 法)とで、応力が 1.5 GPa 程度までは両伝播速度は殆ど一致している。これとほぼ同様の結果が、粒子速度の伝播速度についても得られた。

応力の伝播速度は、3 ゲージ(G-, Go, G+)の波形において、任意の応力 σ_j が、G-ゲージ位置から Go ゲージ位置まで約 1mm 伝播するに要する時間は、両ゲージの σ_j となる時刻の差である。従って、Q2 法で σ_j を与える時刻と Q1 法で σ_j を与える時刻とが異なっている、G-, Go ゲージの応力波形が、両位置で相似的であるから、結果として伝播速度は殆ど変わらないものと考えられる。

(2) ひずみ波形への影響

応力や粒子速度の伝播速度とは異なり、粒子速度波形やひずみ波形そのものは、応力波形と同様、Q2 法と Q1 法とでは大きく異なる。参考のため、中間ゲージ Go の位置でのひずみ波形の結果を Fig.4 に示す。

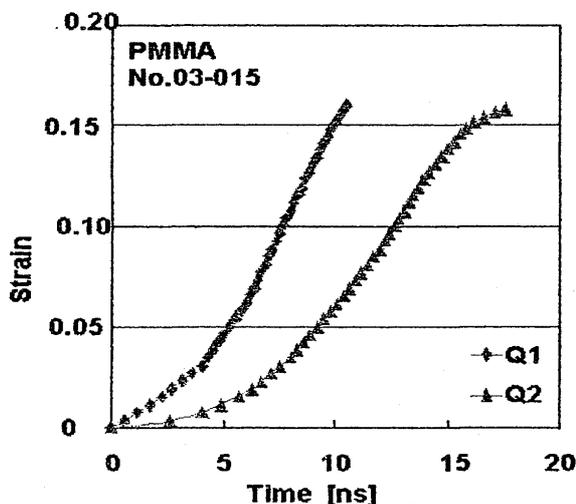


Fig.4 Effects on strain wave front of PMMA

(3) 応力・ひずみ曲線への影響

UWSS の手順に従い⁴⁾、決定される一軸ひずみ状態の応力・ひずみ曲線、すなわち、応力及び粒子速度の伝播速度を用いて、Q2 法と Q1 法とで定まる両曲線は、Fig.5 (PMMA) に示すようにほぼ一致する。比較のためにこの図に PMMA のユゴニオ応力・ひずみ曲線も示してある。実験結果の曲線がユゴニオ曲線の上に来ることからも、実験の応力波が衝撃波であることが分かる。PC についてもほぼ同様の結果が得られた。

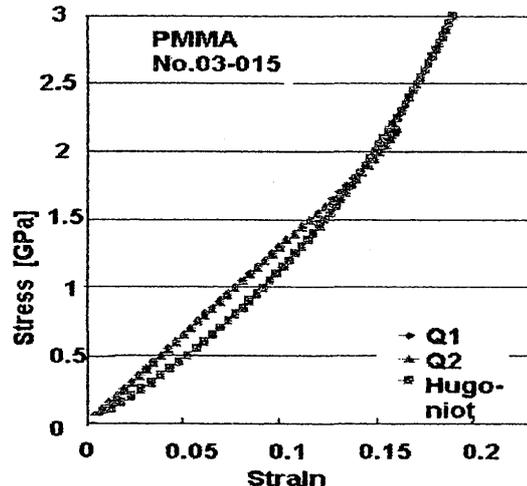


Fig.5 Effects on stress-strain curve of PMMA

3 PMMA や PC のひずみ速度依存性

前章までに述べた PMMA や PC などの非晶性高分子について、衝突速度 600m/s 程度で行った平板衝撃実験により得られる衝撃波頭部の応力・ひずみ特性はひずみ速度が 10^7 s^{-1} 程度の一軸ひずみ状態下の結果である。

次に、外挿法を適用し万能試験機を利用する、一軸応力状態下の準静的圧縮応力ひずみ曲線 (ひずみ速度: 約 10^{-4} s^{-1})。また、動的な外挿法適用の落錘法を利用する、ひずみ速度約 100 s^{-1} (中ひずみ速度) での一軸応力状態の応力・ひずみ曲線。これらを、一軸ひずみ状態の応力・ひずみ特性に変換した後、応力・ひずみ特性に及ぼすひずみ速度の影響が以下のように実験式表示できた。

$$\text{PMMA: } \sigma = 3.8 \times \epsilon \times (\epsilon' / 1.7 \times 10^{-4})^{0.04} \text{ [GPa].}$$

参考文献

- 1) 佐藤裕久, 古川猛夫, 上野拓, 他 3 名, 塑性と加工, 投稿中。
- 2) 鈴木一成, 小川友一, 佐藤裕久, 日本機械学会東北学生会平成 16 年度卒業研究発表講演会 Proc. A-123, 321(1999).
- 3) R.Fowles and R.F.Williams, J. Appl. Phys., 41-1, 360(2001).
- 4) 佐藤裕久, 菊池亘, 鈴木英, 日本機械学会論文集 A, 63-616, 2618(1997).
- 5) J.A.Charest and C.S.Lynch, Shock Compression of Condensed Matter 1989, Elsevier Science Publishers, 797(1990)
- 6) <http://www.dynasen.com>