

# 衝撃波の衝突によって固体内に発生する応力波の伝播角度

## Propagation Angle of Stress Wave Generated in Solid by Impact of Shock Wave

○神山 遥介(東電大・院) 榊原 洋子(東電大) 遠藤 正樹(東電大) 松谷 巖(東電大)  
 Yosuke KAMIYAMA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
 Yoko SAKAKIBARA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
 Masaki ENDO, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
 Iwao MATSUYA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394

### 1. 序論

超音速で飛行する航空機や隕石、あるいは爆発などによって発生する衝撃波はガラスなどの固体に衝突すると、内部に応力波が形成され破壊を引き起こすことがある<sup>(1)</sup>。

そうした問題を防ぐため、近年では防爆性を意識した強化ガラスの研究<sup>(2)</sup>などが行われている。しかしながら、固体内に発生する応力波の挙動についての研究は多くなく、衝撃波の強さや衝撃面の形状による影響など、不明な点が多く残されている。

そこで本研究ではポリカーボネートブロックを使用し、衝撃面に角度をつけ、衝撃波を衝突させることで内部に形成される応力波をシュリーレン法で可視化し、その挙動を明らかにすることを目的としている。

### 2. 実験装置

実験には衝撃波管出口径 13 mm の無角膜式衝撃波管装置を用いる。図 1 に実験装置全体図を示す。まずコンプレッサで圧縮された空気はサージタンクに貯められ、エアドライヤ、オイルミストセパレータを通り、エアレギュレータで圧縮空気圧と大気圧との圧力比が 5.0 になるように調整され高圧タンクに供給される。そしてソレノイドバルブを作動させることにより、高圧タンク内の弁が低圧タンク側に移動し、圧縮空気が解放され供試管に流れ込むことで衝撃波が発生する。

圧力センサを管出口から 165 mm の位置に設置する。衝撃波を検知した際に圧力センサから読み取られた信号は、

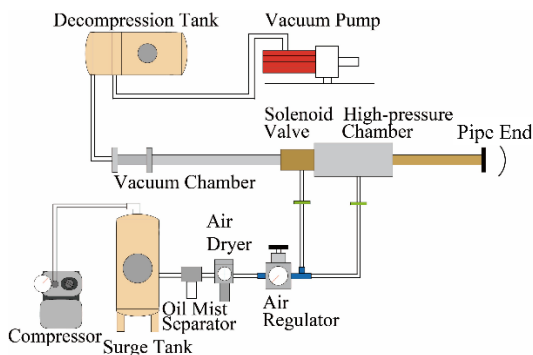


Fig. 1 Experimental Set Up

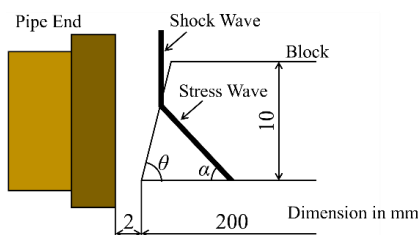


Fig. 2 Block Shape

デジタルリターダで設定した時間  $t$  だけ遅れて、可視化のための光源を発光させる。

図 2 に衝撃波を衝突させるポリカーボネートブロックを示す。寸法は  $10 \times 10 \times 200$  mm となっており、ブロック先端角  $\theta$  は  $90^\circ$  から  $60^\circ$  まで  $2^\circ$  ずつ変化させる。また管出口からブロック先端までの距離は 2 mm とする。また可視化はシュリーレン法を用いて行い、応力波の伝播角度  $\alpha$  の測定を行う。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 可視化写真の比較

図 3 は衝撃波を  $\theta = 90^\circ$  のブロックに衝突させたときの可視化写真である。図 3(a) では衝撃波管から放出された衝撃波がブロックに衝突し、その反射波が確認できる。また応力波がブロック内に発生し、図 3(b) では下流方向に伝播しているのが確認できる。

図 4 は  $\theta = 80^\circ$  のときの可視化写真である。図 4(a), (b) のいずれにおいても、図 3 と比べて応力波が斜めに伝播していることが確認できる。これは斜面の先端から順に斜面の上部に向かって衝撃波が衝突していくためだと考えられる。

図 5 は  $\theta = 70^\circ$  のときの可視化写真である。図 4 と比べて応力波が薄くなっていることがわかる。これは衝撃波に対しブロックの面が傾いていると固体が受ける圧力が低下し、内部の密度勾配が小さくなるためだと考えられる。また応力波の角度は図 3 のようにほぼ垂直に戻っている。

図 6 は  $\theta = 60^\circ$  のときの可視化写真である。図 5 と比べ、応力波伝播角度は再び斜めになっていることがわかる。

図 7 は  $\theta = 75^\circ$  のときの可視化写真である。これまでの可視化写真と比べ、応力波が発生していないことがわかる。

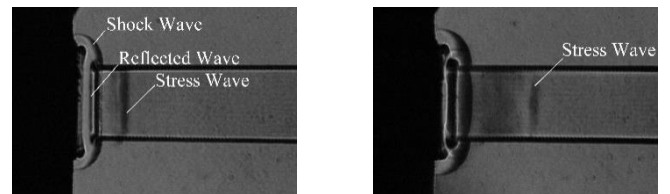


Fig. 3 Schlieren images ( $\theta = 90^\circ$ )

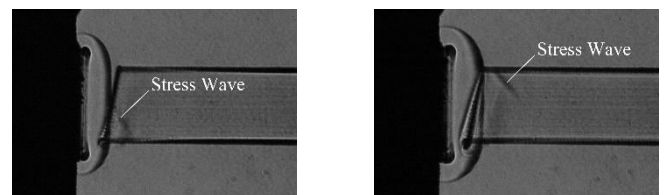
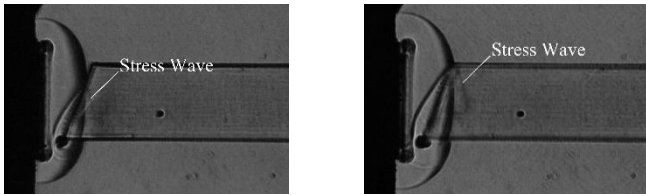
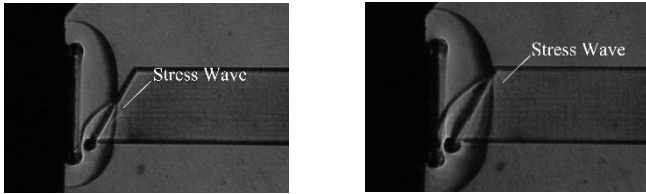


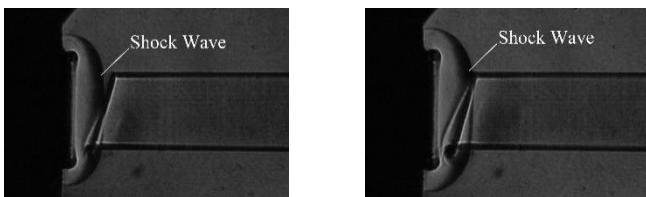
Fig. 4 Schlieren images ( $\theta = 80^\circ$ )



(a)  $t = 309 \mu\text{s}$  (b)  $t = 311 \mu\text{s}$   
 Fig. 5 Schlieren images ( $\theta = 70^\circ$ )



(a)  $t = 316 \mu\text{s}$  (b)  $t = 320 \mu\text{s}$   
 Fig. 6 Schlieren images ( $\theta = 60^\circ$ )



(a)  $t = 314 \mu\text{s}$  (b)  $t = 316 \mu\text{s}$   
 Fig. 7 Schlieren images ( $\theta = 75^\circ$ )

### 3.2 臨界角

図7より、応力波が可視化されない角度が存在することがわかった。これは臨界角のようなものであると考えた。この臨界角は以下の式(1)で求めることができる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $V_1$ は衝撃波の伝播速度<sup>(3)</sup>、 $V_2$ は縦波の応力波伝播速度<sup>(4)</sup>である。 $V_1$ は圧力比より理論的に求めることができ、495 m/sである。 $V_2$ はポリカーボネートの物性値から求めることができ、1814 m/sである。

これらの値より式(1)を用いて計算すると臨界角は $15.4^\circ$ となる。先端角 $\theta$ に換算すると $74.6^\circ$ となり、応力波が発生していない $\theta = 75^\circ$ に近い値になることがわかる。すなわち、 $\theta = 75^\circ$ で応力波が可視化されなかったのは、臨界角であるため内部に応力波が伝播しなかったためだと考えられる。

### 3.3 衝撃波入射角と応力波出射角

図8のようにブロックの斜面に垂直に線を引き、衝撃波の法線となす角度を入射角 $\beta$ 、応力波の法線となす角度を出射角 $\varphi$ とする。これらの値はブロック先端角 $\theta$ と応力波角度 $\alpha$ から以下の式(2)、(3)で求めることができる。

$$\begin{aligned} \beta &= 90 - \theta & (2) \\ \varphi &= 180 - \theta - \alpha & (3) \end{aligned}$$

得られた $\beta$ 、 $\varphi$ の正弦を算出し、縦軸に $\beta$ の正弦、横軸に $\varphi$ の正弦の値をプロットしたのが図9である。図中の直線は最小二乗法による近似直線である。

図9より、 $\theta$ が $90^\circ$ から $76^\circ$ と $74^\circ$ から $60^\circ$ の2つの傾向があることが分かる。それぞれの範囲において傾きが一定であ

るため、スネルの法則が成り立つことが確認できた。

Table 1 Propagation Velocity

$\theta^\circ$	90	82	76	74	68	60
$V_1'$ m/s	2242	2400	2994	664	1180	1031

縦波の理論値は前章の $V_2$ であり、1814 m/sである。表面波の縦波であるレイリー波の理論値<sup>(5)</sup>は674.0 m/sである。

表1に抜粋した角度の応力波伝播速度を示す。90°から76°の範囲では縦波の理論値に近いことがわかる。よってこの範囲では縦波が可視化されたと考えられる。また74°から60°の範囲ではレイリー波の理論値に近いことがわかる。よってこの範囲ではレイリー波が可視化されたと考えられる。

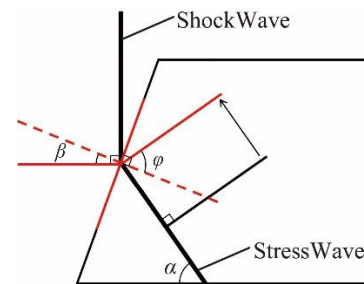


Fig. 8 Incidence Angle and Emission Angle

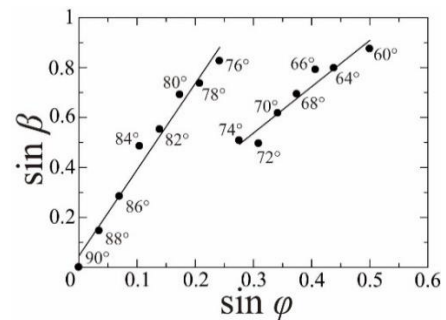


Fig. 9 Propagation Angle

## 4. 結論

- 先端角 $\theta$ が小さいほどブロックが衝撃波から受ける圧力は低下し、応力波は薄くなる。
- $\theta = 75^\circ$ は臨界角であり、応力波は伝播しない。
- ブロック先端角と応力波伝播角度をスネルの法則に当てはめると2つの傾向があらわれ、それぞれ成り立つ。

## 参考文献

- (1) 高野泰斉, 湯沢修, 水尻洋介, 後藤知伸, 衝撃波による固体内の応力波形成の研究, 日本機械学会論文集, (2001), pp. 130-135.
- (2) 西瑞樹, 荒谷真一, 小島英典, 高山和喜, 衝撃波負荷によるガラス板の爆風強度試験, 日本セラミックス協会学術論文誌, (2003), pp. 674-679.
- (3) 松尾一泰, 圧縮性流体力学 内部流れの理論と解析, 理工学社, (1994), pp. 224.
- (4) 山本辰徳, 桑山晋一, 小嶋栄治, 衝撃載荷試験に用いる杭の縦波伝播速度に関する検討, 第43回地盤工学研究発表会, (2008), pp. 1261-1262.
- (5) Dale Ensminger, Leonard J. Bond, Ultrasonics Fundamentals, Technologies, and Applications, (2012), pp. 36.