衝撃波負荷によるガラス板の爆風強度試験

——フロートガラス板における応力発生——

西 瑞樹・荒谷眞一・小島英則*・高山和喜*

セントラル硝子(株)硝子研究所, 515-0001 松阪市大口町 1510
*東北大学流体科学研究所衝撃波研究センター, 980-8577 仙台市青葉区片平 2-2-1

Experimental Study of Glass Strength against Shock Wave Loading

——Stress Generation of Float Glass Plates——

Miziki NISHI, Shin'ichi ARATANI, Hidenori OJIMA* and Kazuyoshi TAKAYAMA*

Glass Research Center, Central Glass Co., Ltd., 1510, Ohkuchi-cho, Matsusaka-shi, Mie 515-0001

*Shock Wave Research Center, Fluid Science, Tohoku University, 2-2-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8577

Stress generation by shock wave on a 300 mm×300 mm float glass specimen was investigated. Stresses in float glass plate increased to a maximum value impulsively, and decayed accompanied by a periodical oscillatory pattern. The stress values σ so far generated can be written in the following form of time t and thickness d using 4 parameters, $\sigma(t, d^*) = C_d \sin \omega t \cdot \exp\{-\lambda(t - \pi/2\omega)\} + C_s$. In these 4 parameters, C_d and C_s are shown as a factor of Mach number by normalizing with glass thickness, and λ and ω are dependent on glass thickness.

[Received January 29, 2003; Accepted May 26, 2003]

Key-words : Glass strength, Shock wave loading, Shock tube, Stress generation, Float glass

1. 緒 言

近年の安全意識の高揚は、ガラス関連のセキュリティ分野においても高まっている。防犯性の高いガラスや防弾性の高いガラスなどのセキュリティ商品が開発される中^{1),2)}、日本国内ではこれまであまり着目されていなかった防爆性への認識も高まりつつある。

ガラス強度と防爆性の特性評価法は、従来概念からみて非常に高速の音速やそれを越える波動、例えば衝撃波や爆風を伴う高速流れの負荷試験で代表される。ガラスの破壊強度は、ガラス自体がもつ強さ、表面や内部の欠陥、寸法や板厚などの因子の他、負荷状態や速度によっても変わる。このため、ガラスの爆風強度を求めるためには、その負荷速度を爆風に極めて近い条件で再現することが必要である。しかし、防爆性を調べるためには、負荷にさらされるガラスの防爆強度と高速負荷源の両面から詳細に検討する必要がある。しかし、その実験法は単純ではないので、ガラスの防爆性に関する研究報告は少ない³⁾。

高速負荷源としては、爆波や衝撃波が代表的である。中でも、衝撃波は圧力の時間変動を伴う爆波よりも圧力を比較的長く持続できるので解析が容易となる。この研究では衝撃波発生装置を試作⁴⁾し、ガラスに対する高速負荷を検討している。防爆性を調べる研究の一環として、高速負荷源としての衝撃波特性⁵⁾及び衝撃波を発生させる衝撃波管特性⁶⁾については報告した。また、これまで測定が難しかった衝撃波負荷による応力測定^{5),7)}も可能となり、これらの結果を報告した。

一方、衝撃波負荷時におけるガラス内での応力発生機構に関する解析はまだ不十分で、例えば、そのとき発生する応力の動的变化や衝撃波特性の影響など、基礎事項の定義でも不明な点は少なくない。負荷にさらされるガラスの防爆強度を明らかにするためには、ガラス内に発生する応力を詳細に調べる必要がある。

ガラスは、その組成や製造方法によってその応力発生挙動や破壊強度は著しく異なる。フロートガラスはフロート法と称される方法で製造される板ガラスで、世の中の窓ガラスの大半を

占める。そこで、このフロートガラス板を用い、種々の特性をもつ衝撃波負荷での応力発生を検討した。以下、その結果を報告する。

2. 実 験

2.1 試 料

試料はセントラル硝子で製造され、市販されているフロートガラスである。用いた試料の板厚は19 mm, 12 mm, 及び6 mmで、大きさは300 mm×300 mmである。また、使用したフロートガラスのヤング率は71.6 GPa, ポアソン比は0.23である。ガラス試料の基本的組成及び拘束条件は別報⁵⁾を参照のこと。

2.2 衝撃波発生装置と衝撃波特性

実験は、東北大学流体科学研究所衝撃波研究センターの衝撃波管を用い、使用したマイラー隔膜厚さは、50, 100, 150, 188, 200 μm の5種類で、厚い隔膜ほど高い圧力に耐え、強い衝撃波を発生できる。衝撃波発生装置及び発生した衝撃波の特性については、別報^{5),6)}に詳しい。

2.3 応力測定及び解析

応力測定は、別報⁵⁾で述べた歪ゲージと解析装置で行った。すなわち、ガラス表面に貼付した歪ゲージで歪量測定を行った後、ロゼッタ解析により応力値に換算し、その最大主応力の値から判断した。測定点は図1に示す10カ所とし、それぞれの点における発生応力を計測した。なお、各データの測定時間間隔は10 μs (測定周波数: 100 kHz) である。

本報では、市販の有限要素解析プログラム PAMCRASH を利用し、8 節点 SOLID モデルと 4 節点 SHELL モデルを組み合わせて非線形解析した。すなわち、ガラス面内の10カ所の応力値を参考に、有限要素法 (FEM) による応力分布を求め、その計算結果に基づいた応力値についても検討した。

3. 結果及び考察

3.1 発生応力測定結果

フロートガラス面に衝撃波を負荷し、そのとき発生する応力

を求めた。その一例を図2に示す。図2(a)は板厚19 mmのガラスで200 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧167 kPa、図2(b)は図2(a)と同じガラスで100 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧105 kPa、図2(c)は図2(a)と同じガラスで50 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧62 kPa、図2(d)は板厚12 mmのガラスで100 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧105 kPa、図2(e)は図2(d)と同じガラ

スで50 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧62 kPa、図2(f)は板厚6 mmのガラスで14 μm 隔膜を用い反射衝撃波圧13 kPaを示す。それぞれの隔膜厚さでの圧力変化⁵⁾も併せて表示した。衝撃波の圧力変化とガラスの応力変化を同時測定できないので、図2と参考値を求めた場合の衝撃波は同じではない。しかし、衝撃波発生は比較的再現性が良く⁶⁾、反射衝撃波圧の値からその最大値も推察できる⁵⁾ので、大きな問題はないと考えられる。

以下、得られた応力の時間変化から、ガラス内に発生する応力をまとめると以下の特徴を有す。

- (1) 衝撃波がガラス試料に衝突した直後に発生応力は最大値をとり、その後、減衰振動する。
- (2) 振幅中心は一定値を示し安定する。
- (3) その後、振幅中心は減衰する。
- (4) ある周期振動を示し、発生応力は変化する。

これらの結果から、衝撃波負荷直後での発生応力は、負荷した衝撃波の圧力よりも大きな値を示す動的要素と衝撃波負荷に対応した静的要素からなる。すなわち、当初、衝撃波の平均過剰圧より大きな応力が発生し、その後は衝撃波の負荷波形に対応した応力が発生する。動的負荷と静的負荷の和と考えると、ガ

Fig. 1. Stress measuring points for stress in float glass.

Fig. 2. Stress generation by shock loading. (a) Glass thickness: 19 mm, Mylar thickness: 200 μm , (b) glass thickness: 19 mm, Mylar thickness: 100 μm , (c) glass thickness: 19 mm, Mylar thickness: 50 μm , (d) glass thickness: 12 mm, Mylar thickness: 100 μm , (e) glass thickness: 12 mm, Mylar thickness: 50 μm , (f) glass thickness: 6 mm, Mylar thickness: 14 μm .

ラス内に発生する応力の時間変化 $\sigma(t)$ は,

$$\sigma(t) = \sigma_D + \sigma_S \quad (1)$$

と表すことができる。 σ_D は動的負荷による応力発生を、 σ_S は静的負荷による応力発生を表している。

なお、ガラスの応力が一定となった後の応力の減少現象については、衝撃波負荷の減少に依存している。また、ガラス内に発生する応力が周期性を保って振動減衰する現象は、試料の変形が板厚方向の振動を伴うことを示している。これらの定量的な解析は3.3節及び3.4節で述べる。

3.2 ガラス面内の応力分布

それぞれのガラス試料に対し、測定点10点を取り、FEM解析でガラス面内の応力分布を求めた。その一例として、板厚19 mm ガラスで200 μm 隔膜での動的解析結果⁸⁾を図3に示す。その負荷量と発生応力の値については、測定で得られたガラス面内の最大応力とFEM解析結果との間に差異が認められた。すなわち、測定値の方がFEM解析結果よりも約20%大きい。

一方、ガラス面内の応力発生を10測定点で検討したが、応力発生の変動などの特別な現象は認められなかった。このことは、衝撃波はガラスにはほぼ均一に負荷されたことを示している。また、負荷を約20%増加させたときのガラス内応力分布の動的解析結果は、測定値と良く一致した。このことは、衝撃波負荷のような高速負荷の解析でも従来の動的解析手法を援用して処理できるが、その詳細な検討には、その負荷に対する補正が必要であることを示している。

3.3 発生応力の動的変化

衝撃波負荷は極めて短時間のパルス状でかつその後は減衰する。すなわち、瞬時に負荷がかかった後は一定となり、その後減衰する。前述のように、ガラス内に発生する応力の値も、その負荷変動の影響を受け、ある周期性を保って振動減衰する。この減衰挙動を減衰率と周期で表示できれば、ガラス内の応力発生を時間変化を特定できる。

発生応力に着目すれば、一般的に、その減衰挙動は

$$\partial^2 \sigma / \partial t^2 + 2\lambda (\partial \sigma / \partial t) + \omega_0^2 \sigma = 0 \quad (2)$$

で表される。また、 $\lambda < \omega_0$ の場合、(2)式の解は

$$\sigma = C \cdot \sin \omega t \cdot e^{-\lambda t} \quad (3)$$

となる。ここに、 σ は応力、 t は時間、 ω 、 ω_0 、 λ 及び C は定数である。端部を除いたガラス試料の大半は板厚方向には、ほとんど拘束を受けていないので、抵抗が比較的小さい $\lambda < \omega_0$ の条件を適用できる。

ガラス内に発生する応力の時間変化は、(1)～(3)式から

$$\sigma(t) = C_D \sin \omega t \cdot \exp\{-\lambda(t - \pi/2\omega)\} + C_S \quad (4)$$

となる。ここに、 C_D は動的負荷に依存する定数、 C_S は静的負荷に対応する定数である。また、(4)式から明らかに、 $t = \pi/2\omega$ で最大値 ($C_D + C_S$) をとり、 $t > \pi/2\omega$ で有効である。

200 μm 厚隔膜と100 μm 厚隔膜の2種類の衝撃波負荷条件で、(4)式の妥当性を検討する。板厚19 mmのガラスに対し200 μm 厚隔膜の場合、 C_D は272、 λ は0.60、 ω は5.2であるので、(4)式の形で時間変化を求め、図4(a)に示した。同様に、板厚12 mmのガラスで100 μm 厚隔膜の場合を図4(b)に示し、 C_D は388、 λ は0.27、 ω は3.7であった。なお、 C_S は衝撃波の圧力波形から推定した。減衰波形については、本来減衰曲線で近似されるべきであろうが、ここでは簡単のため、直線で近似した。図4(a)及び(b)は、実際に測定した応力発生値を示す図2(a)、(d)にそれぞれよく一致し、応力発生は(4)式で近似できる。

3.4 衝撃波特性の影響と各ガラス板厚での発生応力の推定

負荷衝撃波の特性を変えた場合には、発生する応力の値も変化する。 C 、 λ 及び ω の値を知れば、動的なガラス内の応力発生を時間変化を特定できる。衝撃波マッハ数 M に対する、 C_D 、 λ 、 ω 及び C_S の関係をそれぞれ図5～図8に示す。図5～図8から以下のことが分かる。

Fig. 3. FEM analysis: glass thickness; 19 mm, Mylar thickness; 200 μm , the number in the figure means the stress generation of glass.

Fig. 4. Simulation results of stress generation by shock loading. (a) Glass thickness; 19 mm, Mylar thickness; 200 μm , (b) glass thickness; 12 mm, Mylar thickness; 100 μm .

Fig. 5. Relationship between C_D and Mach number.

(1) C_D 及び C_S はマッハ数 M とガラス板厚 d に依存し、マッハ数 M が増大しガラス板厚 d が薄くなるとその値は増加する。

(2) λ 及び ω はマッハ数 M に依存せず、板厚 d に依存する。

更に、発生応力は板厚の2乗に反比例するという一般性²⁾を利用する。得られた C_D 及び C_S を、 $C_d = (d/10)^2 C_D$, $C_s = (d/10)^2 C_S$ により10 mm 厚に規格化後、マッハ数 M に対して再プロットした結果を図9, 図10に示す。図9, 図10から明らかなように、 C_d 及び C_s は一本の直線として近似できる。また、 λ 及び ω については、板厚 d に対して再プロットし、図11, 図12に示す。この結果、 C_d , λ , ω 及び C_s は以下の形で示され、更に最小自乗法を用いることにより

$$C_d(d^*, M) = 348M - 350 \quad (5)$$

Fig. 6. Relationship between λ and Mach number.

Fig. 7. Relationship between ω and Mach number.

Fig. 8. Relationship between C_S and Mach number.

$$C_s(d^*, M) = 221M - 221 \quad (6)$$

$$\lambda(d) = 0.0425d - 0.249 \quad (7)$$

$$\omega(d) = 0.251d + 0.502 \quad (8)$$

が得られた。すなわち、 C_d 及び C_s はマッハ数 M の1次式として、 λ 及び ω は板厚 d の1次式として表すことができる。ここに、 d^* はガラス板厚 $d(\text{mm})$ を10 mm で基準化した値で、 $d^* = (d/10)^2$ である。

また、ガラス板の爆風強度を考慮する場合、発生する最大応力は極めて重要であるが、その最大発生応力は $(C_d + C_s)$ で簡単に計算できる。各板厚での最大発生応力の計算結果を図13に示す。図13からそれぞれのマッハ数における最大発生応力

Fig. 9. Relationship between C_d and Mach number with non-dimensional glass thickness.

Fig. 10. Relationship between C_s and Mach number with non-dimensional glass thickness.

Fig. 11. Relationship between λ and glass thickness.

を容易に推定できる。すなわち、各板厚での最大発生応力についても、マッハ数 M の関数として、その値を推定することが可能となる。

以上の点を考慮すると、前節で求めた(4)式は板厚も考慮した(9)式として表すことができる。すなわち、衝撃波負荷におけるフロートガラス板での応力発生 $\sigma(t, d^*)$ は、

$$\sigma(t, d^*) = C_d \sin \omega t \cdot \exp\{-\lambda(t - \pi/2\omega)\} + C_s \quad (9)$$

の形で示される。更に、(9)式は、式中の C_d , λ , ω 及び C_s を(5)式～(8)式を用いて具体化することにより、(9)式の定量化が可能となる。また、最大発生応力の推定も可能となる。

このように、衝撃波負荷時における単板ガラスでの応力発生

Fig. 12. Relationship between ω and glass thickness.

Fig. 13. Maximum stress generation values calculated from equation with shock wave loading. The number in the figure means the glass thickness.

に関し、板厚を変えた場合でもその時間変化を良い精度で推定でき、(9)式の形で表現できることが分かった。しかし、衝撃波はその発生条件により複雑に変化することから、種々の構造をもつ衝撃波負荷の影響については今後の研究課題である。

4. 結 論

フロートガラス板に対し、パルス波形状の衝撃波マッハ数 1.0～1.3 を負荷し、ガラス面内の応力発生を調べた。その結果、実験範囲内で、以下の結論を得た。

- (1) ガラス内での応力発生は、急激に増加して最大値を取り、振動周期性を保ちながら減衰した。
- (2) 一定の時間が経過した後は、静的な応力発生値の値となり、衝撃波負荷波形に対応する。
- (3) 発生する応力の時間変化は、動的要素と静的要素の二つの組み合わせ、

$$\sigma(t, d^*) = C_d \sin \omega t \cdot \exp\{-\lambda(t - \pi/2\omega)\} + C_s$$

の形で示されることを明らかにした。

- (4) 上式の四つのパラメータの内、 C_d と C_s は板厚で規格化することによりマッハ数の関数として表され、 λ と ω は板厚にのみ依存する。

謝 辞 本研究は、板硝子協会での ISO 規格制定に関する討議内容も含んでいる。貴重な助言を頂いた板硝子協会規格委員会 SC2/WG7 村上隆弘前委員、大久保洋常委員（旭硝子株式会社）及び菊田雅司前委員、尾花茂樹委員（日本板硝子株式会社）、更にはこの活動には井田全彦、磯部壽久、西村 浩各調査役（板硝子協会）の支援を得た。また、数値解析もしくは実験には近江 伸

副技師及び中屋和敏所員（セントラル硝子株式会社）の支援を得た。更に、本研究の一部は文部省科学研究費及び板硝子協会の助成を受けた。ここに、付記して、それぞれ謝意を表します。

References

- 1) Sakka, S., Sakaino, T. and Takahashi, K., "Glass Hand Book," Asakura Shoten (1975) [in Japanese].
- 2) Central Glass Co., Ltd., "Architectural Glass Products," Central Glass (2002) [in Japanese].
- 3) Johnson, N., 9th Int. Symp., "Effect of Munitions on Structures," Berlin-Strausberg, Germany (1999).
- 4) Aratani, S., Ojima, H. and Takayama, K., *SPIE Paper*, Vol. 4183, pp. 1025-1032 (2001).
- 5) Aratani, S., Nishi, M., Ojima, H. and Takayama, K., *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol. 111, pp. 669-673 (2003) [in Japanese].
- 6) Nishi, M., Aratani, S., Ojima, H. and Takayama, K., to be submitted in *JSM*E [in Japanese].
- 7) Aratani, S., Ojima, H., Jagadeesh, G. and Takayama, K., Proc. ISSW23, Fort Worth, Texas, USA, 2001, July to be published SPIE paper
- 8) Murakami, T., private communication.