飛散物の拡散範囲の推定方法

台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究 その 5

正 会 員 立 川 正 夫*

1. はじめに

1983 年 8 月にヒューストンを襲ったハリケーンは、地域的に限られた範囲ではあるが、高層ビルの壁面ガラスに飛散物によるかなりの被害をもたらした。この場合の飛散物の主なものはビルの屋上に敷かれた砂利であり、我が国とは若干事情が異なるが、この事件に関する報告^{1),2)}をみると、我が国でも、建物の外装の設計に飛散物に対する考慮が必要であることを改めて感じる。

著者はこれまで、飛散物の空力特性、飛跡、拡散の性状等について、実験を主として研究を行ってきた^{3)~6)}。多様な形状の飛散物の空力特性を詳細に知ることはきわめて困難であり、したがって、飛跡や速度を正確に推定することは不可能に近いが、今までの結果を利用すれば、少なくとも、飛散物の拡散の範囲のおよそを推定することは可能な段階に達したように思われる。

本報では、今まで対象としなかった風速プロファイルや上昇気流の影響その他について、数値計算による考察を加えた上で、既報の実験結果に基づき、飛散物の拡散範囲の推定方法について、一つの試案を提出する。

2. 数値計算による考察

既報の風洞実験^{4),6)}はすべて一様流中で行った。その結果を実際の問題に利用するには、風速プロファイルや乱れの影響について、なんらかの考慮が必要である。初期条件や寸法効果についても、さらに検討が必要であろう。

以上についての答えとして十分とはいえないが、この章では最小限必要と思われる事項をとりあげ、2次元モ

デルの運動方程式の数値計算結果を示し、考察を加えることにする。

2.1 風速プロファイルの影響

C_D , C_L (抗, 揚力係数) が一定の 2 次元モデルの運動方程式 (既報⁶⁾の (1) 式, ただし風速 v を高さ z の関数とする) を用いて計算した風速プロファイルのある場合の飛跡を、一様流中のそれと比較してみる。図—1 は $m/A=1 \text{ g/cm}^2$ (m : 飛散物質量, A : 同代表面積), $C_D=1.0$ とした場合で、実線は一様流, 破線は指数 $\alpha=1/8$ および $1/4$ のべき法則によるプロファイルを持つ流れ (いずれも飛散初期高さ 10 m で $v=40 \text{ m/s}$) の中の飛跡を示している。プロファイルの影響の強さは、当然、飛跡が基準高さ (10 m) から離れる度合に関係し、この場合 $C_L=0.8$ および $C_L \leq 0.0$ で若干の飛跡の差がみられる。

同じ 3 種の流れについて、 $m/A=0.5, 1$ および 2 g/cm^2 とし、 $C_L=0.6$ および 0.8 のときの飛跡の最高点高さ $z_{\max}$ を求め、指数 α に対してプロットしたのが図—2 である。 $C_L=0.8$ では、 $m/A=0.5 \text{ g/cm}^2$ よりも、 $1, 2 \text{ g/cm}^2$ の重い飛散物の方が、かえってプロファイルの影響が大きい。

プロファイルのある場合の便法として、最高点高さを予測し、その高さでの風速をもつ一様流と仮定して

図—1 風速プロファイルによる飛跡の変化 ($C_D=1.0$) 図—2 風速プロファイルによる $z_{\max}$ の変化 ($C_D=1.0$)

* 鹿児島大学 教授・工博
(昭和 60 年 9 月 28 日原稿受理)

$z_{\max}$ を求める方法が考えられる。図-2の $\alpha=1/4$ の大きな記号(+, ○, ●はそれぞれ $m/A=0.5, 1, 2$ g/cm²を表す)は、まず初期高さでの風速をもつ一様流として $z_{\max,1}$ を求め、次に $z_{\max,1}$ での風速をもつ一様流として求めた最高点高さ $z_{\max,2}$ で、 $C_L=0.6$, $m/A=1$ g/cm²の場合を除き、いずれも安全側の結果となっている。

実際に飛散物が問題となる高さでは、特に市街地では、べき法則で示すようなきれいな風速プロファイルが存在するとは考えにくい。風速プロファイルを深刻に考えることは、必ずしも意味がないようにも思われる。図-1, 2の結果からも、飛散範囲の推定には計算の簡単な一様流の仮定を用いるのが適当であろう。

2.2 上昇気流の影響

C_D , C_L が一定の2次元モデルの運動方程式(この場合は距離、時間を無次元化した既報⁶⁾の(2)式)により、風速 v の一様流中において、特定の水平区間、一定の上向き風速 w が重畳した場合の飛跡の変化を調べてみる。

図-3は計算結果の一部で、 v の20%の w が、無次元水平距離 $X=(g/v^2)x$ (g :重力加速度, x :水平実距離)が0~0.05, 0.2~0.25, 0.4~0.45の3区間にそれぞれ加わった場合の飛跡(実線)を、 $w=0$ の場合(破線)と比較して示した。無次元パラメータ $K=\rho v^2 A/2mg$ (既報³⁾, 4.1を参照, ρ :空気密度)は5, 10, 20の3種, C_D は0.8と仮定しているが、いずれも w の影

響は飛散初期の $X=0\sim0.05$ の場合に顕著である。

C_L が正で浮上する場合の飛跡は、図-4に示す無次元最高点高さ $Z_{\max}=(g/v^2)z_{\max}$, 最高点の水平位置 $X(\max)$, $Z=0$ となる水平位置 $X(0)$, そして $Z=-0.1$ となる水平位置 $X(-0.1)$ の4つの値でおおむね表すことができる。この4つの値が上昇気流の強さ w/v (区間は $X=0\sim0.025$ を加えた4区間)によってどのように変化するか、 $K=10$ ($C_D=0.8$)の場合について示したのが図-5である。この図から、 $X\leq0.05$ で上昇気流が加わる場合には、 $Z_{\max}\sim X(-0.1)$ は w/v にリニアに近い関係で顕著に増加することがわかる。なお、 $K=5, 20$ についても同様な図を求めたが、 $Z_{\max}\sim X(-0.1)$ と w/v の関係は(傾向としては同じであるが) K によって若干微妙に変化する、という結果になった⁷⁾。

風速 v の一様流に、風速 w の上昇気流が重畳したときに飛散物に作用する相対風速による速度圧 q_r は

$$q_r=(\rho/2)\{(\dot{v}-\dot{x})^2+(\dot{w}-\dot{z})^2\}$$

となる($\dot{x}$, $\dot{z}$:飛散物の水平、鉛直方向速度成分)。 $X=0$ で飛散し始める物体に作用する q_r の初期値は $(\rho/2)\times(v^2+w^2)$ であるが、物体が風で加速した後に上昇気流が作用する場合の q_r は、 $(v-\dot{x})^2$ の項の影響でかなり低減する。例として、図-3の $K=10$, $C_L=0.4$ の場合について試算してみると $X=0.2$ で $\dot{x}$ はすでに風速の70%を超え、この位置で上昇気流が作用したときの q_r は $X=0$ で上昇気流が作用したときの q_r の15%となり、 q_r と相対風速の風向、 C_D , C_L から求めた風力

図-3 水平風速の20%の上昇気流が一定区間作用するときの飛跡の変化($C_D=0.8$)

の鉛直方向成分は、 $X=0$ のときの 24 % となる。この試算結果からも、上昇気流の影響が飛散の初期に著しく、その後急速に低下するのは、主に q_r の変化によるためと判断できる。このことから、 $(v - \dot{x})^2$ の項がきわめて小さくなくても、上昇気流だけで十分浮上するような軽い (K のかなり大きい) 飛散物を除けば、飛散後しばらく経過したあとの上昇気流の影響は、あまり重大でないと考えてよからう。より一般的に、気流の変化や乱れの影響についても同じことがいえる。

飛散初期に作用する上昇気流として、まず潜在飛散物が存在する構造物の周辺気流が考えられる。図-5 に示した区間 $X=0 \sim 0.025$ は、風速 50 m/s のときの実距離 $x=0 \sim 6.4$ m に相当する。例えば、ここの配屋根の風上側には、この程度の幅の上昇気流 (w/v は風向に対する屋根のこの配等から判断して定める) を仮定し、屋根面からの飛散物の飛跡を求めるのも一案と思われる。

軽い (K がかなり大きい) 飛散物で、飛散後建物に衝突する直前に、その建物の周辺の上昇気流の影響を受ける場合、竜巻や旋風で浮上する場合等については別な機会に検討をすることにしたい。なお、その場合は C_L は平均的に零になると考え、粒子モデル (既報³⁾, 4.1 では球形モデルと書いた) を用いて十分よい結果 (ただし 3 次元問題として解く) が出ることが予想される。また、ランダムな乱れに対しては、前に試みたモンテカルロ法による数値計算⁸⁾ が可能であろう。

2.3 上向き初速度の影響

海岸などでみられる飛砂現象では、衝突による上向き (鉛直方向) 初速度が砂粒を飛び上らせる主要な原因とされている^{9)~11)}。ここで対象とする物体の飛散は、飛砂と隣合わせの現象ではあるが、大きな物体ほど衝突による局所の破壊が生じやすいことから、飛砂ほどに衝突の影響は大きくないと考えられる。その代り、平板が支持構造物 (例えば屋根) 上でめくり上げられて流れに乗る場合などは、大きな寸法による効果が、反力による無視

図-5 上昇気流の影響, $K=10$ ($C_D=0.8$)

図-4 Z_{max} , $X(max)$, $X(0)$, $X(-0.1)$

図-6 後端部を支持した平板

図-7 端部を支持した平板の上向き初速度

できない上向き速度を生む可能性がある。

図-6 のように流れに対して後端をピン支持した平板を考え、風力による支点に関するモーメントが、重力の

図—8 上向き初速度の影響 ($C_D=0.8$)

それをわずかに上まわる角度位置から回転運動を始め、上向き反力 R_z が正から負に変わる瞬間にピン支持は解除され、平板は飛散を開始するとして、このときの上向き初速度 $\dot{z}_{t=0}$ と風速 v の比を求めてみた。なお、平板の C_D , C_L , C_M には（支持面の存在や平板の回転の影響は無視し）風洞実験で得た静止した正方形平板の値（既報³⁾, 表—1）を用いた。結果を無次元量 $L_n = gl/v^2$ （既報³⁾, 4.2 参照, l : 平板辺長）を変数として表すと図—7 のようになり、上向き初速度は L_n および K が大きいほど（大きくて軽い平板ほど）大となるのがわかる。計算した範囲では $\dot{z}_{t=0}$ はほとんど v の 10% 以下であるが、軽量の屋根全体が一枚の板のようにめくり上げられる場合には、支点反力の影響がかなり大きいことがこの図から予想できる。

上向き初速度が与えられる他の例として、物体が斜面に沿って転がり、流れに乗る場合が考えられる。このときには、なんらかの方法で斜面上を移動する速度を推定しなければならないが、鉛直方向とともに水平方向の初速度が生じるため、初期の相対風速が低下し、結果としてはあまり大きな浮上に結びつかないのではないと思われる。

C_D , C_L が一定のモデルを用い、上向き初速度 $\dot{z}_{t=0}$ が与えられたときの飛跡を、2.2 と同様に $Z_{\max} \sim X(-0.1)$ を用いて示すと図—8 のようになる。上向き初速度の影響は K が小さい方が大きい。

2.4 無次元量 L_n の影響

既報⁶⁾ で述べた実験は、 $L_n = gl/v^2$ が 1.8×10^{-3} （一

部 1.5×10^{-3} ）で行った。 L_n の飛跡に及ぼす影響は、この実験からは不明である。ここでは 2 次元平板モデル（既報³⁾, 4.2 を参照）を用い、数値計算により L_n の影響を調べることにする。

正方形平板の静的 3 分力特性（既報³⁾, 表—1）と回転時の 3 分力特性の仮定（既報⁴⁾, 表—2, 図—5, 図—6）

図—9 飛散範囲に及ぼす L_n の影響

を用い、初期迎角を 5° 間隔で変え、2次元平板モデルの運動方程式（既報³⁾の(15)および(17)式、ただし鉛直下向き Y を、上向きに Z と改める）から飛跡を計算し、この飛跡群の上限と下限を求めた。 $L_n=0.001$, $0.002, 0.005$ について結果を示すと図-9 的になり、 $K=4, 10, 20$ のすべてにわたって、 L_n の増加によって飛散範囲が上下に拡大する傾向が認められる。別に aspect 比 $A_r=2$ の矩形平板の空力特性値を用いて計算を行ったが、やはり同様な結果が得られた。

運動方程式（既報³⁾の(15)式）でわかるように、 L_n の増大は慣性モーメントの増大、すなわち角加速度の減少を意味する。浅い正の（あるいは負の）初期迎角から平板が飛散運動に入る場合、角加速度の減少は、最初の大きな準静的揚力の作用する時間を増大させ、飛跡を上（あるいは下に）押しやる効果を生む。 L_n の増大とともに、飛散範囲が拡大するのはそのためである。このような理由で、実際の飛散運動でも、寸法の大きな平板状飛散物はよく飛び上ると考えてよからう。 $L_n=1.8 \times 10^{-3}$ （実際の風速を 50 m/s として辺長 46 cm の飛散物）の模型実験の結果を、直ちにより大きな寸法の飛散物に適用すると危険側の誤差を生む可能性があるといえる。

3. 拡散範囲の推定法

3.1 試案

飛散物の拡散範囲の推定方法として、次の手順を提案する。ただし、ここでは竜巻や旋風による飛散は対象としない。また、特に軽い飛散物については気流の変化や乱れに対する考慮が、また、特に大きな飛散物については飛散範囲の拡大に対する考慮が別に必要と思われる。

1) 範囲の推定には、 C_D, C_L が一定の2次元モデルの運動方程式（既報⁹⁾の(2)式）を用いる。

2) 風速は、予想される最高浮上高さにおける最大瞬間風速を用い、一樣流と仮定する。

3) 潜在飛散物の無次元パラメータ $K = \rho v^2 A / 2mg$ を求める。 A はその物体の最大見付面積（ただし四角柱はそれを構成する最大の面の面積）とする。

4) 表-1 に示す C_D, C_L の値を用い、図-10 に示す対象建物壁面上での飛跡の上限点 E の高さ z_E を求め、次に $C_L=0$ として C 点の高さ z_C を求める。

C 点を中心とし、 E 点を通る円を描き、その円を含む下側を飛散範囲とする。

表-1 飛散範囲推定のための C_D, C_L

飛散物	A_r	C_D	C_L	備考
平板状	1	0.8	0.5	瓦など
	2		0.6	
	≥ 4		0.8	
角柱状	≥ 2	1.0	0.5	角材など
塊状		1.0	0.4	角ばった石、ややへん平な石など
		0.6	0.2	球に近い石など

図-10 飛散物の衝突が予想される範囲（斜線部分）

5) 屋根面等からの飛散物に対しては、飛散初期に作用する上昇気流を仮定し、その影響を考慮して E 点を求める。

6) 特に必要と思われる場合には、上向き初速度を仮定し、 E 点を求める。

7) 衝撃力を求めるための飛散物の速度は、 $C_L=0$ で C 点に達したときの水平速度とする。

3.2 試案の説明

前報まで^{3)~6)}、一樣流中の飛散に対象を限って研究を行ってきた。実験における Re 数（ Re 数に対する検討はまったく行っていない）や K, L_n などのパラメータの範囲も限定されている。この段階での試案の作成には、かなりの限界があり、著者の判断によらざるを得ない点も多い。

まず竜巻による飛散物は試案の対象外とする。台風による強風の中には、大小の旋風が含まれると思うが、これも将来の問題として残す。なお、2.2 でも述べたが、この場合の飛散物モデルは $C_L=0$ とした粒子モデルで十分であり、またアメリカでの多くの研究が参考となる。

上昇気流の影響については、 $K=5 \sim 20$ の範囲内で検討を行った（2.2 参照）。例えば、屋根葺材に用いる亜鉛鉄板の K は、風速 50 m/s では 50 をこえる。このような場合の飛跡は、流線そのものになりに近くなることが予想され、どのような風速場を仮定するかが大きな問題となる。ランダムな乱れによる拡散に対しても、さらに検討が必要であろう。

L_n の増大が拡散範囲を拡大させることについては 2.4 で論じた。 L_n が 0.005 を超えるような大きな平板状飛散物では、2次元平板モデルの運動方程式（既報³⁾、4.2 を参照）を用いて上限値をチェックしてみるのも一案である。ただし、見方を変えれば、そのような大型の飛散物が生じること自体が問題で、風で飛ばないための処置がより重要といえなくもない。

図—11 C_L の上限値と C_{Lr} , C_{Lmax} ⁶⁾

1) 2次元運動においても、飛散物の C_D , C_L は、時間的に多様に变化する。特に平板状飛散物では、飛跡に大きな影響を与える初期の C_D , C_L の変化は重要で、できれば2次元平板モデルの運動方程式を用いたい。しかし、現在この C_D , C_L に関するデータは不十分であり、数値計算もやや面倒である。そのような理由を含め、ここでは最も簡単な方法として、 C_D , C_L が一定のモデルを使うことにした。なお、すでに何回も述べたが、3次元の運動方程式を解くことは、動的6分力特性がわからない限り不可能である。

2) 風速プロファイルの影響については2.1で述べた通りで、上限の推定はまず最高浮上高さを予想し、その高さでの風速をもつ一様流を仮定することで、おおむね安全側の結果が得られる。風速は、飛散物の寸法を考慮し、わかりやすい瞬間風速とした。

3) 主要パラメータとして K をまず求める。代表面積 A の定義は C_D , C_L の求め方に関連する。

4) 風向が与えられたときの、対象とする(飛散物に対する防護処置を考える)建物壁面上の、飛散物が衝突する恐れのある部分を、図—10の斜線の範囲と定めた。円形のひろがりは、既報⁶⁾、図—3に示す実験結果によった。円の直径の幅で地上までを飛散範囲としたが、これは前の構造物の後流域に入った飛散物が、急速に落下することを考えたためである。

表—1の平板状および角柱の飛散物の C_D , C_L の値は、主として既報⁶⁾の実験結果から定めた。まず平板状の C_L は、図—11(既報⁶⁾、図—10を再び示す)で、超過確率0.1%の C_L の上限値に近い値とした。角柱は表—1で aspect 比 A_r を2以上としたが、実際には、木材など A_r のかなり大きなものが予想される。図—11で、 $A_r=4$ の正方形および矩形断面角柱の超過確率0.1%の値を上まわるよう $C_L=0.5$ と定めたが、 $A_r \gg 4$ の場合にそれでよいかどうか、若干問題が残る。なお、回転軸が与えられたときの Magnus 揚力係数 C_{Lr} は、平板、角柱とも $A_r=2$ で大きな値(既報⁵⁾、表—3参照)を示すが、既報⁶⁾の実験結果と、落下実験⁵⁾で得た C_{Lmax} (落下物を

水平方向に拡散させる空気力を表す揚力係数の標本最大値)の値を尊重してこれは無視した(図—11参照)。平板および角柱の C_D を、それぞれ0.8および1.0としたことについては既報⁶⁾、3.2, (3)を参照されたい。

塊状の飛散物としては小石などが考えられる。落下実験では、石の模型の C_{Lmax} は立方体のそれにほぼ等しい値となった(既報⁵⁾、表—5参照)。このことから、立方体($A_r=1$ の正方形断面角柱)の $C_D=1.0$ と $C_L=0.4$ (図—11で0.1%の上限値)を採り、角ばった石や、ややへん平な石に適用することにした。

特に球に近い塊状の飛散物については Re 数の影響を

図—12 $K \cdot C_D$ と Z_{max} , $X(max)$, $X(0)$, $X(-0.1)$

図-13 $C_L=0$ の場合の飛跡 図-14 $C_L=0$ の場合の水平速度

考えなければならない。直径 1 cm, 風速 50 m/s のときの Re 数は約 3×10^4 で, 乱れや粗さを考えても球の臨界 Re 数 $= 2 \sim 3 \times 10^5$ を超えることはない。この時の球の C_D は約 0.5 である。Minor¹²⁾ は $C_D = 0.4$ と仮定したが, この値は小さすぎる。明確な根拠はないが, ここでは一応 $C_D = 0.6$ とし, $C_L = 0.2$ とした。

以上の外に木の枝やテレビアンテナのような飛散物がある。これらは安全のために, 0.1~0.2 程度の C_L を考えればよいのではなかろうか。

C 点を求めるための C_D は, 最も風をはらみやすい状態の値, すなわち平板, 角柱共に 1.2 程度が適当 (既報⁵⁾, 図-4 参照) であるが, 簡単のために E 点を求めるための C_D をそのまま用いることにした。

計算によらず, $Z_{\max}$, $X(\max)$, $X(0)$, $X(-0.1)$ から飛跡がおおよそ求まるように図-12 を付し, また $C_L = 0$ の飛跡を図-13 に示す。

5) 上昇気流が加わる場合の飛跡に及ぼす影響は, 飛散初期に特に著しいことは 2.2 で述べた。便法として, 屋根葺材等は, 屋根に沿う気流 (棟に直角とはかぎらない) を, 一定区間, 上昇気流が加わったものと考え, E 点を計算することを提案した。

6) 表-1 の C_D , C_L の根拠とした既報⁶⁾ の実験には, モデルを放流するために用いた吸着パイプの干渉効果が, 安全側の誤差として含まれている可能性が強い (既報⁴⁾, 図-8 参照)。2.3 で検討した平板のめくり上げによる上向き初速度もそれほど大きなものではなく, 上向き初速度の影響は特に必要と判断される場合に限って考慮すればよいと思われる。

7) 図-14 に, $C_L = 0$ の場合の水平速度と風速の比 $\dot{x}/v$ を無次元時間 $T = (g/v)t$ に対して示した。速度はきわめて短時間に, 風速に近くなることがわかる。

4. 結 び

「飛散物の軌跡と速度」という副題から多少はずれたが, まがりなりにも飛散物の拡散範囲の推定法の提案にまでこぎつけた。実験の精度など, 不満足な点も多いが,

一応, 考え方を整理したということで, これまでの研究の区切りとしたい。

飛びやすさを表す無次元パラメータとして, これまで風力・重力比 $K = \rho v^2 A / 2 mg$ を用いてきた。50 m/s の強風の中で, 瓦の K はおよそ 5, 亜鉛鉄板の K は 50 になる。瓦はやはり重い飛散物であり, 亜鉛鉄板は軽い飛散物の代表といえよう。このような考え方からすると, これまでの研究は比較的重い飛散物を対象としてきたことになる。

簡単に浮上するような軽い飛散物の問題, そして竜巻のような 3 次元の風速場の問題は今後の課題として残る。

この研究は昭和 57 年度および 58 年度の文部省科学研究費補助金によった。

参考文献

- 1) W.L. Beason et al. : Hurricane related window glass damage in Houston, Proc. ASCE, ST12, 1984
- 2) J.E. Minor : How to prepare glass building for hurricanes, Glass Digest, Nov.15, 1984
- 3) 立川正夫, 福山雅弘 : 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究, その 1, 日本建築学会論文報告集, 第 302 号, 1981
- 4) 立川正夫, 福山雅弘, 原英基 : 同上, その 2, 日本建築学会論文報告集, 第 314 号, 1981
- 5) 立川正夫, 原 英基 : 同上, その 3, 日本建築学会論文報告集, 第 319 号, 1982
- 6) 立川正夫, 谷本英輔 : 同上, その 4, 日本建築学会論文報告集, 第 355 号, 1985
- 7) 立川正夫 : 強風により生じる各種飛散物の軌跡に関する研究, 58 年度文部省科学研究費成果報告書, 1984
- 8) 立川正夫, 福山雅弘 : 強風による物体の飛散物経路について, 日本建築学会大会梗概集, 1977
- 9) バグノルド : 飛砂と砂丘の理論, 創造社, 1963 (金崎肇訳)
- 10) 河村龍馬 : 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第 5 巻, 第 3-4 号, 1951
- 11) B.R. White et al. : Magnus effect in saltation, J. Fluid Mech., Vol.81, Part 3, 1977
- 12) J.E. Minor : Window glass in windstorms, CE 74-01, Texas Tech. Univ., 1974

SYNOPSIS

UDC : 624.042.41 : 614.8

A METHOD FOR ESTIMATING THE DISPERSION RANGE OF WIND-BORNE MISSILE

Trajectories and velocities of typhoon-generated missiles Part 5

by Dr. **MASAO TACHIKAWA**, Prof. of Kagoshima Univ.
Member of A. I. J.

The effects of wind velocity profile, ascending current, initial vertical velocity and the Froude number on trajectories of wind-borne missiles are investigated by numerical integration of equations of motion of two-dimensional models.

Taking these effects into account, a method for estimating the range on a building surface in which impacts of wind-borne missiles during a typhoon may cause glass damage is presented on the basis of the experimental results described in the preceding parts.