

3-4. 動画からの計測

3-4-1. 破片速度の計測法

3-4-1-1. 窓への 2 次衝突を用いた 3 次元速度の計測

ターゲットチャンバー内での衝突位置とターゲット表面の向き、撮影を行った窓までの距離により、衝突クレーター形成により放出された破片のうちの一部が、窓に衝突する様子を観測することができる。飛翔体の衝突点と窓面、ならびにターゲット表面の位置関係は既知であるので、破片の放出点と pit の中心が、放出時刻と衝突時刻がそれぞれ等しいと仮定すれば、窓面上での衝突位置と衝突時刻から各破片の放出速度と放出角度を求めることができる。この方法により、ターゲットチャンバーの窓へ向かって放出された 10 から 250 m/sec の速度の破片が観測された。破片の放出位置の不確定性に伴う破片速度の測定誤差は、破片が pit の中心から放出された場合とクレーターの端から放出された場合とを比べた場合で 10 % である。

この測定方法を用いて、各破片の 3 次元速度、放出角度を求めることが可能であるが、この方法単独では破片の初期位置や放出時刻、破片サイズに関する情報は得られない。いくつかの破片に対しては、破片の追跡を用いた計測と窓への 2 次衝突を用いた計測の双方に成功した。これらの破片に関しては、3 次元放出速度、角度ならびに放出時刻、破片のおおよそのサイズが求められる。

3-4-1-2. 2 次元射影速度の計測

衝突の様子を撮影した高速度ビデオカメラの画像を用いて、斜め衝突クレーター形成時に放出される破片の 2 次元射影速度ならびに見かけの体積を求めた。高速度 16 mm フィルムカメラを用いて撮影したフィルムを、現像の後フィルムスキャナを用いてデジタル化した。各実験あたり 170 から 500 枚の画像に対し、これらのノイズを除去し、輝度を調整し、グレースケールにした後、NIH-image でスタックを作り動画にした。このスタックは、撮影時間にして 33 msec から 183 msec に相当し、その時刻での現象の速度にしたがってコマ落としを行ってある。図. 3-19 に高速度ビデオカメラにより取得された画像の一例を示す。検出可能な全ての破片の輪郭を手動で強調した後、これを 2 値化し、NIH-image の Particle analysis を行うことにより、各コマにおける各破片の面積重心の位置、影の面積、破片の影を同じ面積の楕円で近似したときの長軸と短軸を計測した。各破片には識別のためアルファベットと数字を組み合わせて最大 3 桁の名前をつけた。比較的大きな破片に関しては、可能な限り回収破片との照合を行った。回収破片との対応をつけることに成功した破片の数は、一回の垂直衝突につき 10 個前後であり、それらの質量は、おおむね 0.1 g 以上であった。

解析を行う上での原点は、ターゲット表面と pit 領域の中心軸の交点とした。ここから画面とターゲット表面に沿って右向きを x 軸、ターゲット表面に垂直な方向を z 軸、画面に対して垂直奥向きを y 軸とする。衝突時刻の定義は、画面上に初めて発光が見られるコマを第 1 コマと

し、この 1 コマ前を 0 msec とした。したがって、衝突からの経過時間には最大 1/(撮影速度)の誤差が含まれるが、これは本研究において注目している 100 m/sec 以下の破片の速度計測には影響を与えない。

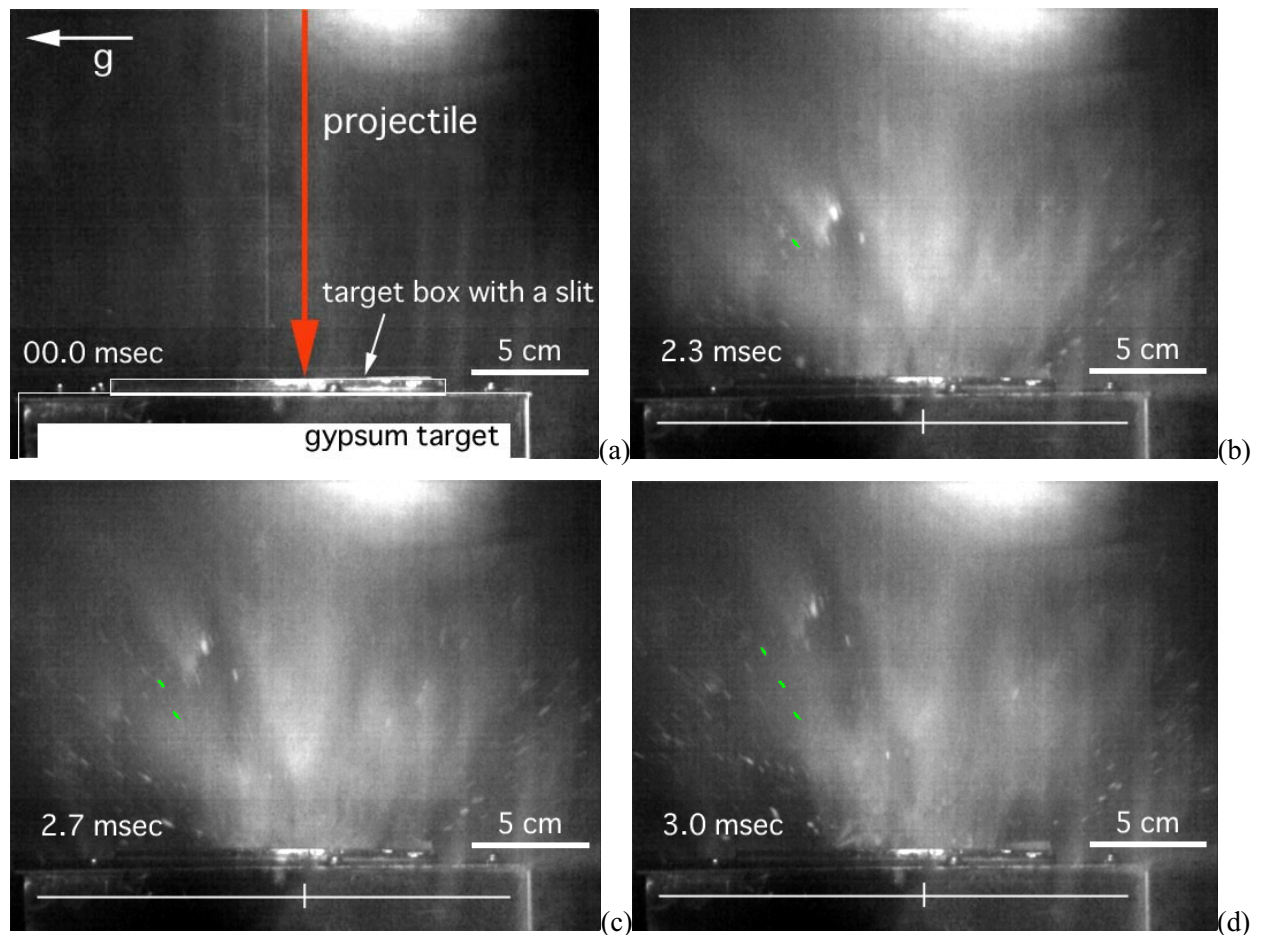


図 3-19. 高速度ビデオカメラにより撮影された画像の例: 実験番号 0_01、衝突角度 0 度、衝突速度 4.6 km/sec、スリット付きターゲット容器を用いた実験。(a)には容器内のターゲットならびにこれに形成されたクレーターの位置を、それ以外にはターゲット表面を示す水平線と衝突点を示す短い縦線を記した。飛翔体の弾道は画面上から下、重力の方向は左側、スリットは画面に平行である。(a) 衝突前、(b) 衝突から 2.3 msec 後。この例で認識し輪郭を検出した破片は、左中央の緑色で縁取られた点であり、その速度は 48 m/sec である。(c) 衝突から 2.7 msec 後 (d) 衝突から 3.0 msec 後 (この破片は実際は 9 コマ分追跡された)

Fig. 3-19. Sample frames of high-speed CCD video camera: run No. 0_01, vertical impact at 4.6 km/sec, employing a target box with a slit. The gypsum target and the crater made through this impact are shown in panel (a), and in other panels, horizontal lines and short vertical lines represent the target's surface and the impact point, respectively. The projectile's trajectory was from up to down, the gravity points light, and the slit was set parallel to these panels. (a) before the impact, (b) 2.3 msec after the impact. A fragment traced and tracked in these panels was outlined with light green, and its velocity was 48 m/sec. (c) 2.7 msec after the impact, (d) 3.0 msec after the impact. This fragment was tracked for 9 frames.

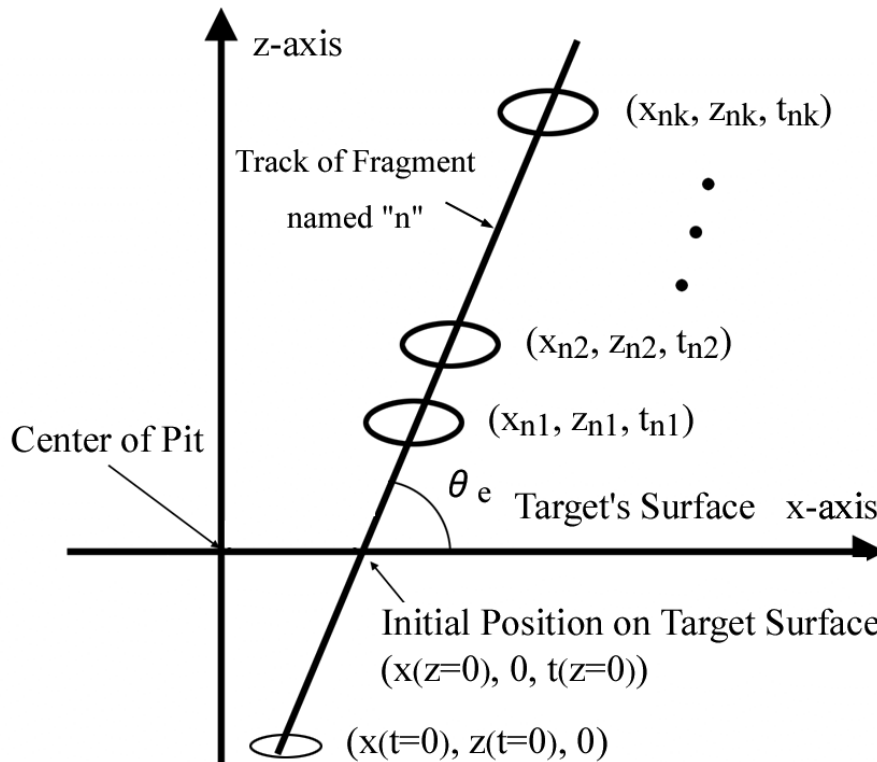


図 3-20. ある破片の軌跡と破片速度を表す変数: 破片名 n の第 k コマ目での破片位置 (x_{nk}, z_{nk}) ならびにその時刻 t_{nk} と、破片軌跡を表す線。更に破片軌跡を $t=0$ まで外挿したとき、これとターゲット表面の交点で表される初期位置 $x(z=0)$ と放出時刻 $t(z=0)$ 。

Fig. 3-20. A track of a fragment and variables representing its ejection: A fragment named n on k -th frame, at t_{nk} after the impact was represented by (x_{nk}, z_{nk}, t_{nk}) , and its track measured by fitting. Extrapolating this track to $t=0$, an intersection with the target's surface was defined as an initial position $x(z=0)$ and a time of ejection $t(z=0)$.

破片名 n の第 k コマ目で得られた面積重心の位置 (x_{nk}, z_{nk}) と衝突からの経過時刻 t_{nk} の組を用いて破片の軌跡を求めた(図. 3-20)。その破片に作用している力が重力のみであると仮定して、各破片の軌跡をターゲット表面まで外挿することにより、ターゲット表面での 2 次元射影速度 v_e 、その x および z 成分 v_x 、 v_z 、放出角度 θ_e 、初期位置 $x(z=0)$ と放出時刻 $t(z=0)$ を求めた。また、衝突時刻($t=0$)における位置 $x(t=0)$ 、 $z(t=0)$ も外挿により算出した。破片の軌跡や速度測定における曲線近似の例を Appendix B に記す。

以下に、高速度カメラ画像を用いた破片速度計測法の利点と欠点を述べる。まず、この方法を用いる利点としては、非接触で破片速度を計測できる事である。非接触であるがゆえに、カメラの解像度、チャンバーの広さの許す限り、広い速度範囲の破片を多数計測することができる。本研究では 400 m/sec 以下の破片を、1 ランにつき最大 1200 個、総計 5473 個測定することに成功している。また、破片の軌跡から個別に破片速度を求めることにより、個々の破片に対して初期位置、放出時刻を求めることができる。また、破片速度のみではなく、破片の影のサイズから破片の大まかな質量を推測することも可能であるし、比較的大きな破片に対しては、画面上で追跡した破片と回収された破片を対応付けることも可能である。困難な点としては、多数の細かい破片を計測することができる高分解能の画像を得るためには、性能のよい高速度

カメラが必要であるばかりでなく、照明やチャンバー、ターゲットの設置にも工夫が必要であること、解析に非常に時間がかかることが挙げられる。また、照明の不均一さや、粉の舞い上がりにより、時々刻々と変化するバックグラウンドの上で、互いに重なり合った細かな破片を手動で認知するため、測定者による検出率の差異が生まれやすい。本研究では、破片の輪郭の検出作業を簡易暗室内で行い、特に、検出破片の確認の段階においては、深夜に 30 分以上暗順応した後に、再度動画の確認を行い、検出率を上げると共に誤認率を下げることを心がけた。

実験番号 0_04 においては、互いに直交する 2 方向からの撮影を行うことにより破片の 3 次元速度を計測した。まず双方において独立に破片速度の計測ならびに回収された破片との照合を行い、その後に、双方において観測された破片に対して 3 次元速度を求めた。3 次元速度を求めることができた破片は 0.03 g 以上のもの、8 個である。この方法は、非常に近接した軌道で大量の破片が放出されている、細かな破片には使えない。

3-4-1-3. 破片の影の面積を用いた破片サイズの推定

各破片に対して、各コマでの影の面積の平均値 d_{ave} を求め、これと同じ面積を持つ円の半径 r_f をこの破片の半径とした。破片形状を球とし、破片密度をターゲット密度に等しい 920 kg/m^3 と仮定すると、仮の破片質量 $m_{estimated}$ は次式で表される。

$$m_{estimated} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_f^3 \cdot 920 \quad \text{ただし } r_f = \left(\frac{d_{ave}}{\pi} \right)^{0.5} \quad (3-4-1)$$

実際の破片は 3-3 で述べた様に 2 種類存在し、それぞれ形状と密度が異なるため、画面上で計測された破片をその初期位置や放出速度から分類し、それぞれに対して、形の係数を掛けたり密度を修正したりする必要がある(4-2 特に 4-2-2-2 ならびに 4-2-3-2 を参照)。

動画上で見られる各破片の輪郭は必ずしも明確なものではなく、ものによっては明らかに破片と認められる明るさを示す位置から明らかにバックグラウンドであると考えられる明るさを示す位置まで数 pixel 要するものも含まれている。そこで、輪郭の検出のしきい値に伴う仮の破片質量の誤差を評価するために、破片の輪郭を強調する際に、実際の破片の輪郭の 1 pixel 外側を選択した際に生じる誤差を Table IX に示す。全周を 1 pixel 分外側に描くという仮定自体が極端な例ではあるが、直径が 2 pixel の破片では体積比で 5.20 倍の、直径が 8 pixel の破片でも体積比で 1.95 倍の誤差になる。つまり、検出限界に近いサイズの破片の計測に対しては、その速度の計測ならびに軌道の決定に関しては、特に遅い破片以外では比較的良い精度で求めることが可能であるが、その影の面積に基づいて計算される破片質量に関しては大きな誤差が含まれている。

Table IX Errors in fragment mass estimation

Fragment diameter pixel	Area pixel ²	Enlarged area pixel ²	Area ratio	Volume ratio
2	4	12	3	5.20
4	12.6	28.3	2.25	3.38
8	50.3	78.5	1.56	1.95
16	201	254	1.27	1.42
32	804	908	1.13	1.20

本研究においては、上記の輪郭のトレースで発生する可能性のある破片直径に対する誤差 2 pixel よりも、露光時間に伴う破片の曳光の影響が大きくなる場合に、露光時間と破片速度に関する補正を行った。本実験で用いた露光時間は 1/62500 秒から 1/4500 秒であり、露光時間が 1/4500 秒のとき、20 m/sec、5 m/sec の破片は、おののお 4 mm、1 mm 移動する。これは、視野の狭い実験ではそれぞれ 8 pixel、2 pixel に相当し無視できない。したがって露光時間が 1/62500 秒、1/10000 秒、1/4500 秒の実験に関して、それぞれ 150 m/sec、10 m/sec、5 m/sec よりも大きな速度で放出されたものに関しては、画像のぶれに伴う破片サイズの過大評価について補正を行う。破片の影の長径の平均値 l_{ave} 、破片速度 v_e 、露光時間 t_{exp} を用いた、修正破片長半径 r_{fl} を次式で表す。

$$r_{fl} = \frac{l_{ave} - v_e t_{exp}}{2} \quad (3-4-2)$$

破片の影の短径の平均値 s_{ave} を用いた修正破片短半径 r_{fs} を次式で表す。

$$r_{fs} = \frac{s_{ave}}{2} \quad (3-4-3)$$

これらを用いて、補正後の破片の半径は、次の二つのうち大きな方とした。

$$r_{f1} = \sqrt{r_{fl} r_{fs}} \quad r_{f2} = r_{fs} \quad (3-4-3)$$

これは、実際の撮影状況では、破片の回転や重なり の程度で必ずしも露光時間全部で破片が写るとは限らないためである。

3-4-1-4. 測定限界と誤差

クレーター形成実験の場合、測定することが可能な最大破片は、そのままクレーターから放出された最大破片を意味する。また、測定することが可能な最小の破片は、理想的には影の面積にして 1 pixel 相当の破片であるが、高速度ビデオカメラ TMR E-2 を用いた実験では 2 pixel 以下の破片に関しては検出力の低下が認められる。図. 3-8 に示す様に、篩で計測された破片の質量分布のべき係数は、破片質量が 10^{-5} g の領域まで-1.2 のままであるのに対し、画像から求められた破片の質量分布においては、図. 3-21 の様に、影の面積にして 2pixel の位置から傾きが緩

やかになり、細かい破片を検出しきれていないことを表す。同様に、高速度ビデオカメラ CodacHS4500 を用いた実験では 4 pixel 以下の破片に関して検出力の低下が確認されている。これはより新しく開発されたカメラである TMR E-2 では、CodacHS4500 よりもノイズが少なく、より細かな破片を見分けることが出来るようになったことを示している。

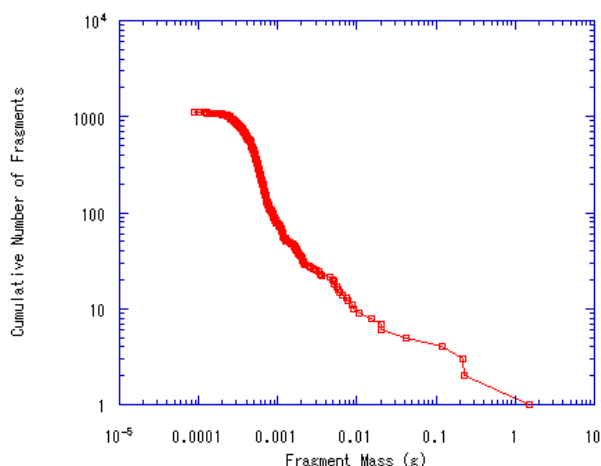


図 3-21. 実験番号 0_01 において、画面上で確認された破片の仮の破片質量の分布: 0.13 mg および 1.3 mg の破片は、おのおの 1 および 4 pixel の破片の破片に相当する。

Fig. 3-21. Estimated mass distribution of fragments observed on the movie of the experiments named 0_01: 0.13 mg and 1.3 mg correspond to 1 and 4 pixel on the movie.

破片の軌跡から速度を求める方法において計測可能である破片の最高速度は、理想的には 2 コマ以上で確認できるものであり、その速度は CodacHS4500、TMR E-2、Shimazu HPV-1 において、おのおの 80 m/sec、160 m/sec、2 km/sec である。しかしながら、実際に計測することができた最高速度の破片はおのおの 59 m/sec、95 m/sec、400 m/sec であり、撮影条件や、その衝突での破片の発生状況によっては更に遅い場合もある。

高速度の破片の検出効率が落ちる原因のひとつとしては、これらの破片は露光時間との兼ね合いによっては画面上に線状に写り、速度方向に伸びると同時に単位ピクセルあたりの輝度が低くなることが考えられる。動画中に見られる個々の破片の認識と追跡は手動で行っているため定量的な閾値はないが、この破片の認識と追跡の作業を事後評価すると、バックグラウンドノイズの明るさの分布の 3σ より明るい点を破片と認識している事がわかった。

破片速度の小さいほうの測定限界は、地球重力に由来するものである。底面にたいする衝突においては、発生した最も遅い破片まで画面上で確認することができるが、側面に対する垂直衝突実験では、2-3-3 に述べた様に 0.3 m/sec 以下の破片がクレーターの底から放出されたと仮定すると、この破片は深い pit の側壁に落下することになるし、スリットを使用した実験では、0.9 m/sec 以下の速度でクレーターの底から放出された破片がスリットの外に出ることはできない。また、ターゲットの上面を撃った実験においては、破片の初期位置に関わりなく、0.6 m/sec 以下の破片を十分に観測することはできない。

放出速度、放出角度、初期位置、ならびに放出時刻における標準誤差(Ev_e 、 $E\theta_e$ 、 $Ex(z=0)$ 、 $Et(z=0)$)は、曲線近似により破片速度を求める際に得られた、各破片速度、初期位置にたいする標準誤差 Ev_x 、 Ev_z 、 $Ex(t=0)$ 、 $Ez(t=0)$ 、追跡できたコマ数 k_{tracked} 、撮影速度 $1/t_{\text{frame}}$ を用いて、次式の様に定義した。

$$Ev_e = Ev_x + Ev_y \quad (k_{\text{tracked}} > 2), \quad Ev_e = 0.1v_e \quad (k_{\text{tracked}} = 2) \quad (3-4-4)$$

$$E\theta_e = a \tan \left(\frac{Ev_x + Ev_y + \frac{Ez(t=0)}{v_e - Ev_e} g}{v_e} \right) \quad (3-4-5)$$

$$Ex(z=0) = |Ex(t=0)| + 4mm \quad (3-4-6)$$

$$Et(z=0) = \frac{Ez(t=0)}{v_e - Ev_e} + \frac{1}{t_{\text{frame}}} \quad (3-4-7)$$

追跡できたコマ数が 2 個の場合の放出速度誤差は、3 個以上の場合との整合性から放出速度の 0.1 倍とした。放出角度の誤差には、重力により破片の速度が変化する効果を考慮した。この重力の影響により、放出速度が 2 m/sec 以下の破片の放出速度は明らかに下向きの速度成分を得ており、更に、1m/sec 以下の速度の破片に対してはその放出角度を正確に求めることは困難である。上窓からの撮影を行った実験(0_02 他)にたいしてはこの項は必要ない。初期位置に関する誤差に加えられている 4 mm は、画面上での衝突位置決定精度にカメラの視差を加えたものである。放出時刻の誤差には、撮影速度に伴う衝突時刻決定誤差を含んだ。

破片同士、あるいはターゲットチャンバーの壁面、窓面への 2 次衝突を経た破片を、その軌道要素から排除するために、次のような基準を与えた。

$$|x(z=0)| > R_{cr} + Ex(z=0) \quad (3-4-8)$$

$$T(z=0) > \overline{T(z=0)} + 3\sigma(t(z=0)) \quad (3-4-9)$$

ここで R_{crater} はクレーター半径、 $\overline{T(z=0)}$ 、 $\sigma(t(z=0))$ は、その実験の全破片の放出時刻の平均値ならびにその標準偏差である。

本研究において破片速度の計測の多くは 2 次元で行われている。これらの破片が画面と垂直方向に 20 度、45 度で放出されると仮定するとき、その 3 次元速度は計測された 2 次元速度のおおの、3 倍、1.4 倍である。石膏クレーター形成実験においては、仰角が 60 度以下の放出は、斜め衝突時に下流方向に放出される jet と、クレーター形成初期に見られる円錐状の放出に限られており、本研究で注目している遅い破片の速度計測に与える影響は限定的である。

3-4-2. 破片速度の計測結果

3-4-2-1. 2 次衝突により求められた破片速度

衝突クレーター形成が窓の近くで行われた場合、最初に観測されるのは 0.1 mm 以下のサイズの破片が雲状となり、約 300 m/sec の速度で観測窓に衝突する様子である。やがて、個別の破片が観測窓に衝突する様子が観測可能になる。この方法により、ひとつの実験につき約 100 個の破片を観測することができた(Table X)。

各破片の衝突速度と放出方向を図. 3-22 に示す。ターゲット表面と pit 中心軸との交点を原点とし、ターゲット表面の法線方向を仰角 90 度、ターゲット表面に添う方向を仰角 0 度とし、垂直衝突においては重力の方向を、斜め衝突においては飛翔対弾道に対して下流側を方位角 0 度とする、極座標系の正積方位図法で書いたものである。斜め衝突においては、下流方向への放出を見るためにターゲット側面にたいして衝突を行ったもの(図. 2-6 (d)参照)と、側面方向への放出を見るためにターゲット下面あるいは上面にたいして衝突を行ったもの(図. 2-6 (a)から(c)参照)とを行い、図. 3-22 には角度毎にまとめてこれらを記してある。

また、図. 3-23 には、おのおのの衝突角度で観測された破片速度を放出方向別にヒストグラムに示した。扇状図の 0 度がターゲット表面に添う方向、90 度がこれの法線方向である。灰色の部分はこの方法では速度計測を行えない領域である。

垂直衝突により放出された破片の仰角は 37.5 度から 45 度のビンで最も多く、ターゲットに添う方向には放出されていない。これは Love et al. (1993)に述べられた、多孔質ターゲットへの衝突実験においてはターゲット表面に添う jet は観測されていないという報告と調和的である。また、ターゲットチャンバーの窓への衝突は、衝突クレーター形成の極初期に見られる高速度のもののみであり、10 msec 以上経過してからの窓への 2 次衝突は観測されていない。このことは、12 m/sec 以上、20 m/sec 以下の速度の破片が、仰角 60 度以下では放出されないことを示している。

この方法で観測された側面方向での最速の破片は、正面衝突においては 297m/sec、37 度であるが、衝突角度 45 度の衝突においては 194 m/sec、26 度であり、両者を較べると、衝突角度 45 度の衝突のときのほうが遅い破片が低角度で放出されているのがわかる。また、衝突角度が 70 度の衝突においては、193 m/sec、33 度であり、衝突角度が 45 度のときと較べて仰角がやや大きくなっていることが認められる。また、衝突角度が 70 度の衝突においては側面方向に放出された 60 m/sec 以上の速度を持つ破片は全て下流寄りである。

更に、斜め衝突においては、方位角により放出の様相が異なっている。ターゲット表面に沿って下流方向に放出される超高速の放出である jet はこの方法で計測することができないので、下流方向に関しては、仰角が 20 度を超える破片のみ計測を行った。衝突角度 45 度の衝突においては、側面方向では 180 m/sec 以上の速度を持つ破片が仰角 22 から 37.5 度の範囲で観測されたが、下流方向で同様の放出速度が観測されるのは仰角が 30 度から 50 度までとやや上向きである。また、下流方向においては速度の遅い破片ほど、仰角が大きくなる傾向が見られる。衝

Table X Velocities and angles of fragments measured with secondary collisions

0_04			45_02			45_05			70_01			70_03		
3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e
m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg
297.0	97.3	37.9	194.3	84.1	25.6	362.2	19.8	39.4	44.6	6.6	63.3	70.4	79.4	32.8
293.7	106.1	34.5	226.1	61.6	28.8	349.4	0.7	41.7	53.3	54.1	44.9	193.2	59.5	33.0
285.8	98.6	34.6	170.5	70.8	29.9	359.4	19.7	44.2	54.6	56.2	44.0	190.1	63.6	35.0
248.7	57.5	42.4	177.3	74.6	35.3	350.3	2.0	50.2	43.5	26.3	41.3	181.9	67.8	34.1
222.0	84.0	45.4	151.5	70.4	35.5	281.7	2.5	37.2	43.4	27.4	47.4	173.8	70.7	31.7
219.2	76.7	43.4	122.0	63.1	23.7	282.3	2.3	36.3	52.5	47.4	32.1	163.6	73.7	27.4
230.5	117.8	40.5	128.4	63.3	29.7	199.5	2.3	43.1	53.0	52.7	38.2	163.8	75.7	28.5
243.2	53.9	37.9	152.5	128.5	33.3	119.4	18.3	43.0	51.6	52.4	42.5	153.9	63.2	32.2
227.3	63.3	40.2	155.4	126.6	37.0	117.7	28.6	34.4	44.0	30.6	48.5	149.0	65.1	30.7
213.4	105.0	41.2	98.9	83.3	27.4	144.3	51.4	31.2	45.3	36.4	47.8	149.3	66.3	31.8
208.6	81.8	41.3	106.8	74.4	32.0	105.9	22.5	35.1	49.5	50.8	50.0	147.3	68.1	31.7
235.8	126.4	35.2	109.2	72.3	33.0	107.7	27.5	36.7	49.8	52.0	51.3	137.8	71.9	27.4
203.2	96.9	39.8	128.8	88.7	39.3	99.8	4.1	43.8	54.6	60.2	45.6	133.8	75.7	26.3
205.1	105.5	38.3	111.2	125.3	31.3	107.5	29.7	41.0	55.6	62.7	46.8	134.4	61.1	32.8
204.6	112.4	35.0	94.4	83.9	34.3	137.5	52.4	29.6	43.6	35.1	51.6	101.0	63.0	17.0
188.4	89.7	34.7	99.8	90.6	39.1	132.7	52.3	33.5	45.3	41.7	49.8	117.5	62.4	34.8
173.6	82.7	25.8	103.5	125.5	34.2	129.9	54.9	40.2	48.3	49.0	44.2	115.3	62.6	34.0
196.1	48.3	37.5	107.1	125.3	37.0	106.1	36.0	35.4	53.5	59.4	43.0	101.3	68.0	26.0
177.3	120.3	40.6	68.6	107.7	14.1	97.8	22.6	38.3	50.1	55.5	48.8	118.1	63.4	37.5
167.8	110.9	42.1	70.3	111.1	15.0	91.4	22.7	39.9	49.4	46.0	30.7	111.7	71.8	38.3
161.3	99.0	43.1	82.3	106.2	36.6	108.2	51.1	42.6	47.9	49.3	40.1	96.7	82.6	30.4
170.7	116.5	40.5	83.9	98.1	40.3	93.6	29.4	28.1	43.9	39.3	43.4	90.5	66.6	28.5
176.7	122.8	38.5	93.1	116.4	40.5	85.5	23.5	47.5	53.8	61.5	41.4	89.2	73.8	32.2
163.1	109.2	41.0	60.4	87.3	15.4	93.0	40.3	45.5	44.7	44.8	57.0	31.8	113.2	40.2
157.8	100.8	41.4	63.5	107.5	16.4	84.2	3.7	57.7	42.5	21.2	66.5	89.5	67.8	39.1
157.8	102.4	41.1	63.7	86.2	23.9	103.4	50.1	38.1	40.0	26.8	42.5	80.1	70.5	31.5
155.3	93.4	41.4	66.0	103.2	25.3	105.7	52.6	38.4	38.0	9.2	46.9	74.2	71.7	33.8
157.4	74.1	39.8	68.9	76.8	29.9	105.4	53.9	41.1	38.2	12.9	46.9	35.0	71.7	39.2
153.1	85.5	40.4	72.1	105.2	33.4	99.3	49.5	45.6	38.3	12.9	50.0	63.5	64.2	29.9
162.9	115.8	37.6	84.7	125.9	32.1	98.4	49.9	36.6	37.9	3.8	50.5	63.7	77.8	37.3
159.9	67.3	38.0	80.5	63.0	35.9	89.7	42.5	43.0	38.9	15.1	55.6	54.3	76.9	29.7
152.4	103.3	38.4	55.9	89.8	16.4	83.5	31.8	51.2	49.5	52.4	35.5	58.9	76.0	36.4
145.5	93.9	36.8	57.9	103.6	17.4	87.4	40.7	50.8	47.7	49.2	36.3	63.3	76.6	41.7
142.4	88.1	35.2	56.6	83.1	17.4	99.6	54.4	41.8	44.6	44.5	41.5	34.3	66.3	12.5
141.2	94.3	34.3	64.1	67.7	25.3	92.8	49.1	47.8	43.1	41.4	44.8	43.4	64.7	24.4
132.3	106.0	43.0	60.9	94.8	27.8	79.1	22.5	32.0	43.8	44.2	46.3	35.0	72.3	33.0
133.4	109.0	42.5	62.7	104.8	27.7	76.2	21.2	42.3	41.5	36.1	52.6	33.4	70.7	35.2
133.6	69.1	41.8	71.1	120.1	29.2	101.3	52.8	30.2	51.5	60.8	42.5	55.5	56.6	22.4
133.9	115.8	39.5	66.3	106.0	32.7	96.2	49.8	32.2	53.5	62.6	40.3	50.2	63.4	17.3
123.3	77.1	39.3	67.6	77.8	35.7	89.6	46.0	37.3	44.2	39.4	30.8	56.9	62.5	31.8
122.6	101.5	39.3	72.7	111.1	37.7	87.8	48.0	45.7	40.2	25.2	64.5	50.1	60.9	30.1
121.1	73.1	36.6	56.9	109.2	21.9	74.0	28.1	48.7	41.9	39.9	63.3	33.4	115.9	34.4
118.0	92.7	37.9	61.6	76.0	33.5	82.1	44.7	42.8	37.7	20.4	35.0	55.6	53.9	26.4
117.3	99.8	36.5	53.4	76.4	26.4	76.8	36.2	50.8	36.9	20.6	45.3	44.8	65.1	8.6
116.6	85.9	36.9	50.3	102.2	19.0	67.5	13.1	41.7	41.2	40.9	41.1	51.8	60.7	27.2
115.7	82.9	35.9	58.8	98.1	37.0	85.3	47.9	32.3	40.7	39.6	42.3	48.0	86.2	32.8
115.2	76.3	33.8	62.3	129.6	24.8	82.2	46.7	36.0	36.1	4.8	52.3	24.8	93.5	35.6
116.8	72.5	33.4	51.4	77.8	29.7	68.6	9.0	58.5	38.8	26.9	61.8	49.4	66.4	33.3
121.5	120.0	27.9	48.5	62.8	18.1	86.2	56.2	43.0	38.6	20.4	64.0	28.0	78.9	20.6
107.2	73.9	49.8	46.6	79.2	26.3	84.0	55.4	46.9	46.1	56.7	45.6	34.3	102.8	23.5
116.4	52.3	43.8	57.5	110.5	40.3	69.8	32.3	38.7	37.1	25.3	37.9	42.8	59.2	22.8
93.2	107.6	41.6	47.3	78.2	33.2	71.9	41.6	49.9	41.2	43.1	39.4	43.1	60.9	26.0
89.0	66.5	35.5	41.9	95.9	21.5	83.2	56.1	41.1	34.1	0.0	47.6	45.7	63.4	34.1
90.8	117.4	34.5	42.1	91.9	23.1	83.3	56.8	42.1	39.1	40.3	35.4	19.7	89.2	32.9
81.4	97.3	34.6	48.0	65.4	32.8	74.8	47.1	48.0	36.5	33.8	42.7	39.0	83.8	34.0
78.4	85.7	31.9	38.0	100.0	11.2	75.7	50.3	53.8	34.8	24.5	45.1	29.8	74.0	20.7
74.9	99.6	25.8	42.3	112.0	27.2	83.2	59.9	47.8	34.1	14.6	54.0	36.9	70.9	36.7
83.5	100.0	45.0	40.4	97.3	29.4	74.7	39.8	28.1	43.1	59.7	50.1	33.1	87.2	38.9
83.8	113.9	40.7	45.0	102.0	37.7	62.0	2.3	56.8	37.2	42.6	47.3	39.7	83.0	42.0
85.9	121.3	37.6	41.4	77.8	34.8	63.4	13.9	59.8	39.5	52.1	50.2	36.5	82.3	39.2
77.5	86.3	41.2	35.2	72.9	25.7	84.3	60.3	39.3	32.8	20.3	43.2	29.9	75.6	31.3
74.2	82.7	37.9	40.1	125.9	26.7	66.7	32.3	60.7	40.7	43.7	25.0	23.7	119.1	19.6
68.5	94.8	31.6	36.2	115.7	27.1	78.5	59.6	50.4	33.2	20.3	62.6	10.4	105.5	47.7
89.1	88.7	54.6	37.2	67.1	35.5	75.7	56.8	54.6	31.2	15.2	37.6	33.2	98.3	45.7
80.9	87.9	50.3	32.1	85.0	29.4	64.1	31.5	37.0	32.8	31.3	56.2	26.2	87.9	45.5
78.2	106.7	46.4	31.0	127.9	18.1	60.8	23.5	42.7	32.9	30.9	58.1	11.0	92.6	34.2
80.3	64.6	44.6	28.5	98.6	41.3	67.1	39.9	38.9	34.6	42.5	56.6			
79.2	67.5	45.1	21.7	65.2	16.5	79.8	60.4	41.2	34.3	38.7	61.6			
76.3	72.8	44.9				66.4	39.1	32.1	30.4	14.9	39.4			
77.2	59.9	39.3				60.1	26.2	36.1	32.5	34.5	54.3			
70.2	85.3	42.4				60.5	29.5	59.0	29.9	4.2	62.5			
76.2	59.3	37.9				73.1	60.0	48.2	30.9	28.4	60.4			
												13.9	67.3	76.7

Table X Velocities and angles of fragments measured with secondary collisions (continue)

0_04			45_02			45_05			3Dv			70_01			70_03		
3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e	3Dv	$ \Theta_e $	Φ_e
m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg	m/sec	deg	deg
68.8	91.3	41.3				57.7	29.2	56.3	35.8	56.0	50.2				14.0	48.8	52.6
68.9	83.5	41.0				56.7	19.9	59.7	32.7	42.8	61.3				13.9	56.5	57.4
66.5	90.0	39.0				55.9	32.4	52.5	29.2	17.6	34.3				12.7	30.2	64.8
67.6	74.8	37.6				55.2	28.4	55.1	30.3	25.5	62.4				12.9	46.1	65.7
66.9	109.0	35.2				55.8	30.6	56.0	32.9	48.1	59.9				13.2	50.5	59.3
75.7	51.8	29.7				53.4	30.3	47.5	27.7	10.6	51.2				12.6	39.1	63.4
66.4	68.2	33.0				59.5	49.3	49.5	32.4	49.2	59.0				12.7	47.3	65.3
62.8	103.6	32.1				53.2	29.0	53.6	28.5	2.4	64.7				12.3	40.6	67.1
63.9	109.7	30.8				60.6	48.5	42.2	29.0	6.6	66.9				12.5	25.1	48.5
59.7	106.9	25.3				49.0	15.2	44.5	26.6	10.4	41.9				12.4	18.2	46.2
85.2	73.8	55.4				59.5	50.2	41.8	28.1	15.7	63.4				10.6	44.2	54.6
74.0	123.1	41.5				60.0	51.5	42.1	26.0	7.8	44.4				10.4	46.7	57.6
64.2	84.9	43.3				58.6	49.7	44.2	27.1	17.5	63.0				9.3	72.9	73.3
64.5	57.2	30.9				52.5	34.3	52.4	29.7	37.6	27.7				7.9	0.7	58.6
51.9	80.5	24.6				52.3	33.2	54.9	25.2	14.1	36.6				7.4	3.3	79.4
76.8	125.2	51.9				52.0	29.1	31.1	25.5	23.1	50.8				7.5	51.2	76.0
64.1	120.4	45.5				63.8	56.2	35.3	23.6	17.2	53.5						
62.3	120.3	44.0				51.6	37.5	48.3	26.9	48.0	58.0						
58.4	123.6	37.2				54.2	45.7	49.7	22.7	9.0	34.6						
45.2	86.2	30.7				56.1	49.8	47.4	21.8	6.5	58.3						
45.1	84.3	30.2				52.4	40.2	37.4	26.4	57.1	55.3						
42.1	86.1	22.6				45.9	16.1	46.8	20.5	0.3	43.3						
66.1	126.8	47.5				47.3	22.1	56.3	20.6	1.3	55.8						
62.7	123.2	47.0				53.9	48.0	45.2	19.2	13.9	36.1						
57.3	46.9	31.3				49.2	34.7	50.6	20.0	33.6	53.8						
62.5	114.2	54.4				47.8	28.5	51.0	20.9	49.0	55.1						
61.7	121.0	51.1				47.6	26.0	54.2	17.2	11.0	45.0						
56.2	103.9	52.5				57.5	58.1	50.0	16.1	6.1	43.0						
55.2	107.5	50.9				49.8	39.1	40.2	16.3	9.8	53.4						
49.7	78.2	47.0				53.4	51.1	45.9	16.0	19.1	41.7						
38.0	89.4	29.1				55.9	56.4	45.6	15.5	5.8	53.1						
54.3	109.7	52.7				49.8	43.2	53.2	14.4	21.3	37.1						
31.6	79.7	28.3				42.7	9.3	41.3	13.6	19.2	52.6						
						50.5	42.4	35.8	13.2	15.6	54.2						
						56.9	54.5	35.2	13.2	23.5	54.6						
						42.8	10.6	51.2	14.1	40.5	52.4						
						45.0	29.2	48.4	12.9	16.2	58.5						
						43.4	12.5	55.3	10.1	13.0	47.0						
						43.8	13.7	57.4	9.9	14.9	49.0						
						43.8	8.4	59.2	9.0	14.3	43.9						

突角度が 70 度の衝突においても、方位角による放出速度、角度の違いは大きい。ターゲットに添って放出される jet を除くと、下流方向に放出される破片の数は側面に放出されるものよりも仰角が 1 ビン分大きい位置に最大値を持つ。放出速度の最大値自身に衝突角度の増加に伴う有意な変化は見られないが、衝突角度の増加にしたがって、観測された破片のうちに、より遅い破片の占める割合が増加する。

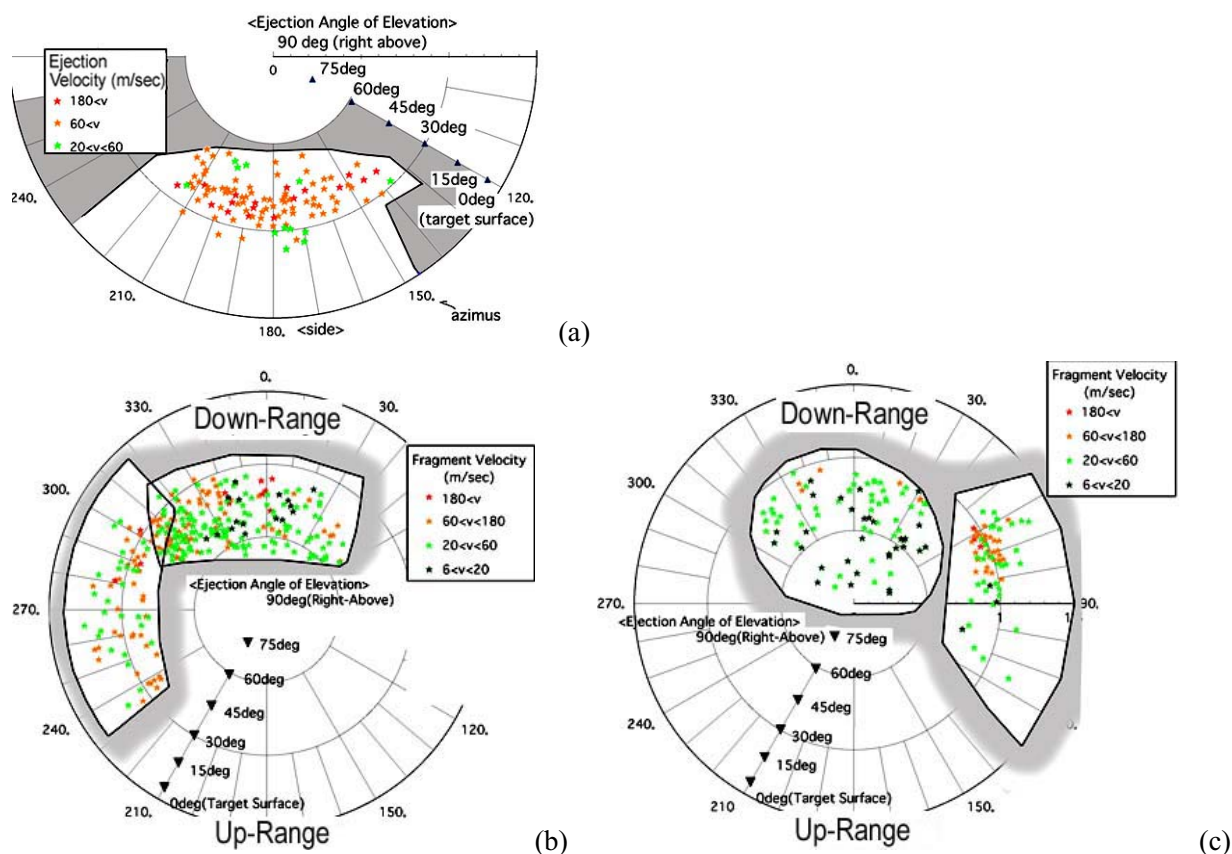


図 3-22. 窓への 2 次衝突により測定された破片の放出角度と放出速度: ターゲット表面上にある pit 中心を原点とし、ターゲット表面の法線を仰角 90 度、垂直衝突では重力の向き、斜め衝突では下流方向を方位角 0 度とした時の破片の放出角度分布。(a) 衝突角度 0 度の場合。実験番号 0_04 (b) 衝突角度 45 度の場合。実験番号 45_02, 45_05 (c) 衝突角度 70 度の場合。実験番号 70_01, 70_03

Fig. 3-22. Ejection angle and velocity of fragments measured with secondary collisions: Origin was set on the target surface and center of the pit. Elevation 90 degree means the direction same as the normal line of the target surface. Azimuth was set 0 degree in downrange direction. (a) vertical impact (0_04), (b) impact at an angle of 45 degrees (45_02 and 45_05), (c) impact at an angle of 70 degrees (70_01, 70_03)

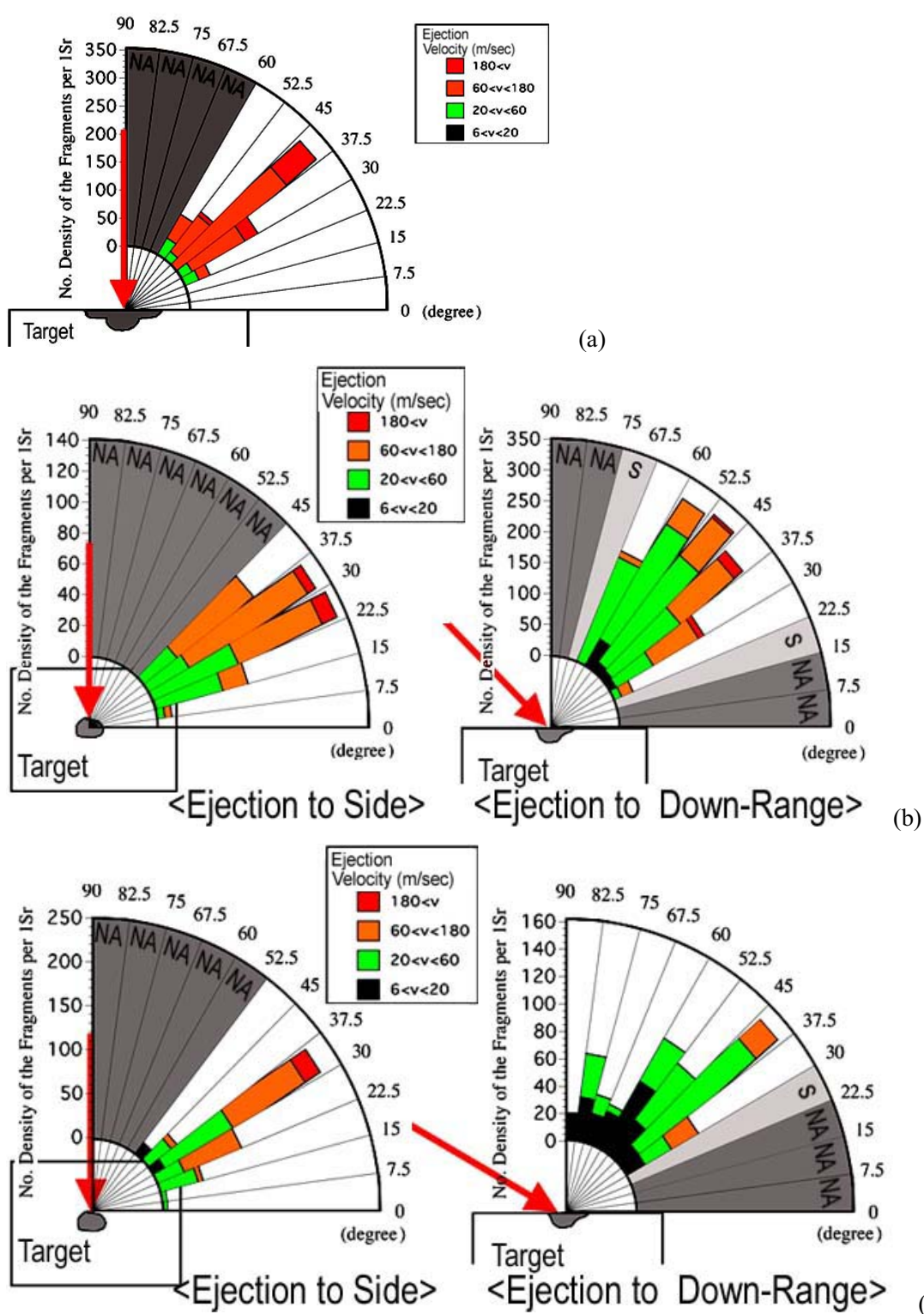


図 3-23. 窓への 2 次衝突により測定された破片の放出角度と放出速度のヒストグラム: (a) 衝突角度 0 度の場合。実験番号 0_04 (b) 衝突角度 45 度の場合。実験番号 45_02, 45_05 (c) 衝突角度 70 度の場合。実験番号 70_01, 70_03

Fig. 3-23. Histograms of ejection angle and velocity of fragments measured with secondary collisions: (a) vertical impact (0_04), (b) impact at an angle of 45 degrees (45_02 and 45_05), (c) impact at an angle of 70 degrees (70_01, 70_03)

3-4-2-2. 破片の軌跡より求められた破片速度

高速度ビデオカメラの動画上での破片を追跡することにより、破片の速度、その x 成分、 z 成分、各破片の軌跡から外挿されたターゲット表面における破片の初期位置、放出時刻、放出角度、これを更に外挿して計算した衝突の時点での破片の初期位置を測定した。実験番号 0_06, 70_01 において、破片が追跡されると共に、ターゲットチャンバーの窓への 2 次衝突によって 3 次元速度が計測できたもの、および、実験番号 0_04 において、2 台のカメラを用いることで 3 次元速度が計測できたものに関してはその 3 次元速度を太字で示した。また、垂直衝突で全ての破片を追う試みをしたものに関しては、放出時刻ビン毎の破片数と、放出速度、放出角度、初期位置、破片半径の平均値と標準偏差をそれぞれ Table XI に記した。

各破片の速度と初期位置を表すベクトルの例を、飛翔体衝突方向とその角度の衝突により形成されたクレーターの断面図と共に、破片放出時刻ビン毎に、図. 3-24 に示す。また、Gault and Heitowit (1963)と同様に、横軸に放出角度を縦軸に放出速度を表したものを図. 3-25 に示す。斜め衝突を記述するために、破片の放出角度を下流方向のターゲット表面が 0 度、ターゲット表面の法線方向が 90 度、上流方向のターゲット表面が 180 度となるよう拡張した。

Table XI Characteristics of fragments in each ejection time bin for two vertical impacts

run NO.	Ejection time at target surface msec	No. of fragments	V_e m/sec	θ_e degree	$x(z=0)$ mm	Fragment radius mm
0_01	$t(z=0) < 2.5$	251	25.83 ± 15.31	59.9 ± 16.2	14.0 ± 6.1	0.6 ± 0.6
	$2.5 < t(z=0) < 5$	69	6.83 ± 2.36	77.5 ± 11.6	7.5 ± 5.8	0.5 ± 0.2
	$5 < t(z=0) < 10$	262	3.36 ± 1.29	81.1 ± 8.9	3.5 ± 4.1	0.5 ± 0.1
	$10 < t(z=0) < 15$	200	1.89 ± 0.50	80.1 ± 8.2	2.9 ± 3.5	0.5 ± 0.1
	$15 < t(z=0) < 20$	138	1.42 ± 0.39	78.0 ± 8.5	3.1 ± 2.8	0.5 ± 0.1
	$20 < t(z=0) < 25$	54	1.10 ± 0.36	77.5 ± 10.3	3.6 ± 3.4	0.5 ± 0.1
	$25 < t(z=0) < 30$	33	0.99 ± 0.43	74.2 ± 10.3	4.5 ± 3.4	0.5 ± 0.1
	$30 < t(z=0)$	100	0.91 ± 0.37	73.6 ± 13.7	6.4 ± 6.2	0.5 ± 0.1
0_02	$t(z=0) < 2.5$	37	21.11 ± 6.77	66.9 ± 13.3	16.8 ± 5.6	1.6 ± 0.8
	$2.5 < t(z=0) < 5$	32	14.31 ± 3.98	78.2 ± 9.1	14.4 ± 10.0	0.9 ± 0.3
	$5 < t(z=0) < 10$	85	7.56 ± 2.57	83.4 ± 5.8	6.0 ± 6.7	0.8 ± 0.2
	$10 < t(z=0) < 15$	139	4.94 ± 1.63	82.9 ± 5.1	6.4 ± 7.8	0.7 ± 0.5
	$15 < t(z=0) < 20$	142	3.25 ± 1.02	80.8 ± 6.4	5.6 ± 5.4	0.7 ± 0.1
	$20 < t(z=0) < 25$	132	2.48 ± 0.90	79.8 ± 7.0	6.2 ± 6.2	0.7 ± 0.1
	$25 < t(z=0) < 30$	82	1.96 ± 0.81	78.5 ± 8.0	8.0 ± 6.9	0.7 ± 0.1
	$30 < t(z=0)$	117	1.30 ± 0.63	75.1 ± 11.8	7.7 ± 6.4	0.7 ± 0.1
0_06	$t(z=0) < 2.5$	80	11.63 ± 13.60	86.2 ± 20.3	7.3 ± 6.5	1.5 ± 1.5
	$2.5 < t(z=0) < 5$	82	4.47 ± 1.65	88.7 ± 18.0	7.6 ± 6.0	1.0 ± 0.8
	$5 < t(z=0) < 10$	129	3.18 ± 1.01	90.8 ± 13.4	6.6 ± 4.8	0.8 ± 0.3
	$10 < t(z=0) < 15$	95	2.31 ± 0.82	91.6 ± 10.6	7.7 ± 5.6	0.7 ± 0.2
	$15 < t(z=0) < 20$	67	1.91 ± 0.57	87.5 ± 9.9	9.4 ± 5.9	0.7 ± 0.2
	$20 < t(z=0) < 25$	39	1.54 ± 0.55	83.0 ± 13.7	9.2 ± 6.7	0.7 ± 0.2
	$25 < t(z=0) < 30$	30	1.60 ± 0.70	82.6 ± 15.4	9.9 ± 8.9	0.7 ± 0.3
	$30 < t(z=0)$	44	1.32 ± 0.76	72.7 ± 20.3	10.3 ± 6.9	0.7 ± 0.3

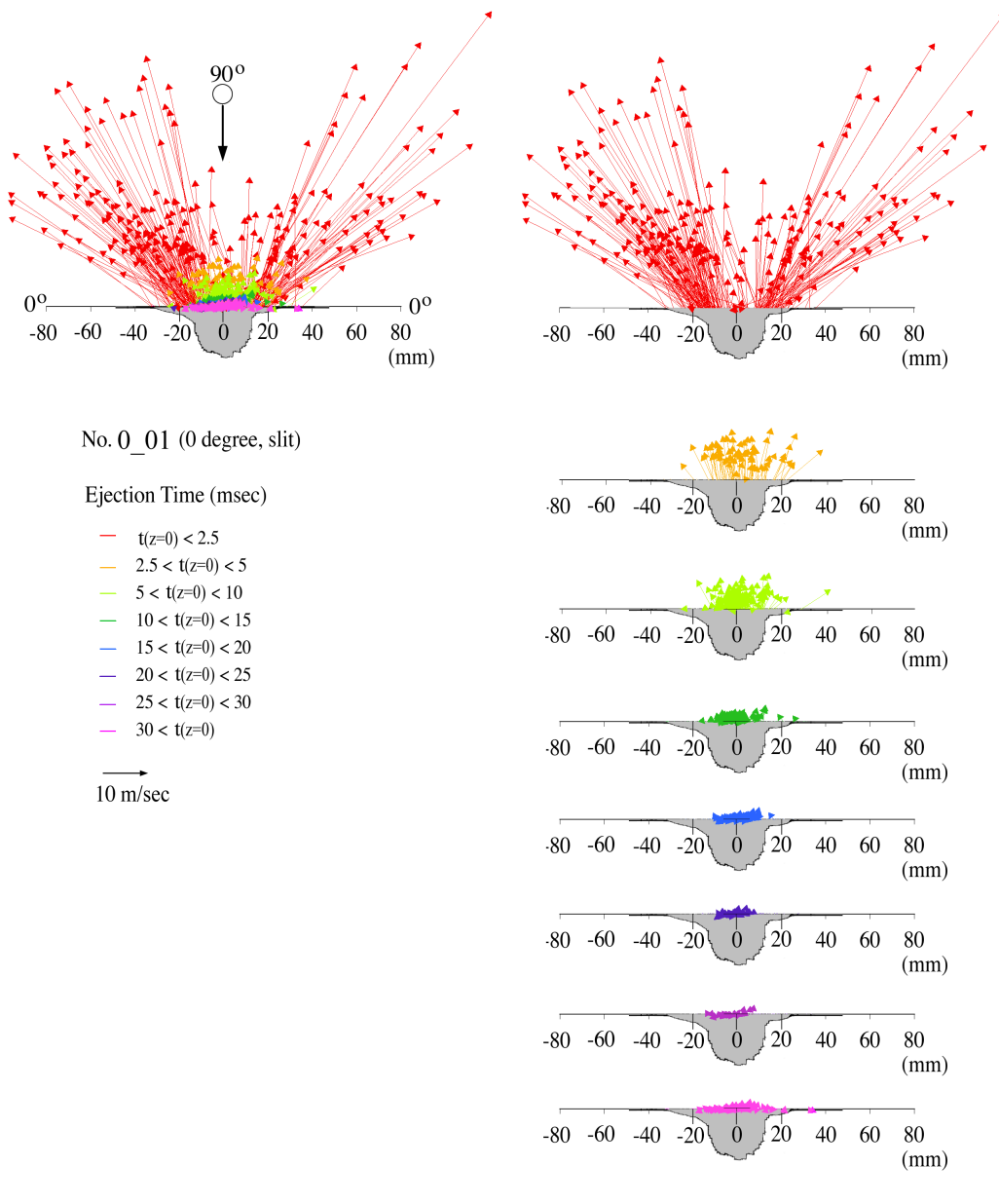


図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: 各破片の速度ベクトルの基点はおのの軌跡から外挿されたターゲット表面での初期位置を示す。衝突角度毎に得られたクレーター断面図を参考のため記す。Pit 中心を原点とし、垂直衝突ではターゲット表面を0度とし、これの法線を90度とする。斜め衝突においては、下流方向のターゲット表面を0度、これの法線方向を90度、さらに上流方向のターゲット表面を180度とする形で放出角度を定義した。3次元放出速度が得られた破片に関しては、3次元での放出速度、仰角を画像平面まで回転させて記載した。(a) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_01)

Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: Each origin of vector represents an initial position of each fragment obtained by extrapolating its trajectory to the target's surface. Cross sectional views of craters made by every impact angles are indicated. Polar coordinate which originate on the target surface and on the pit's center is employed, and its elevation angle set 0 degree at the target's surface in downrange direction, 90 degrees at the normal of the target's surface, and 180 degree at the target's surface in up range direction. For some fragments which 3 dimensional velocities were measured, 3 dimensional velocity and initial positions are shown on the same plane as those measured in 2 dimensional. (a) vertical impact employing a slit (0_01)

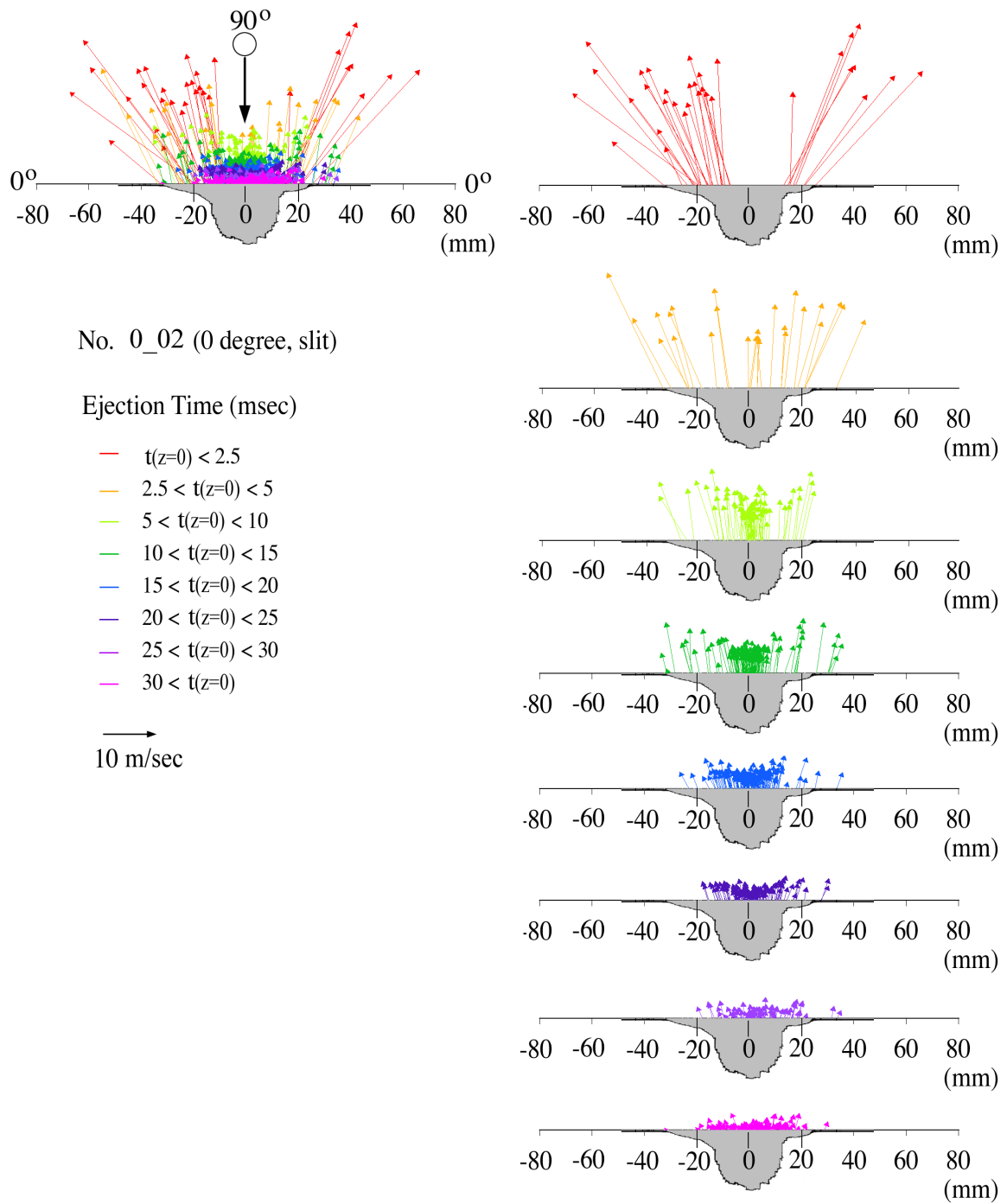
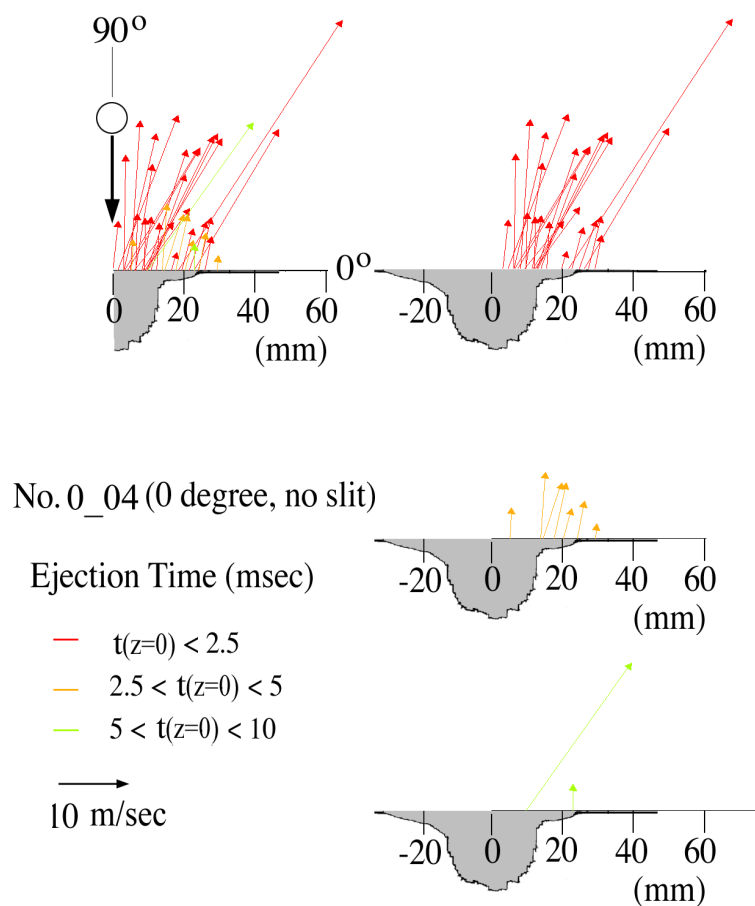


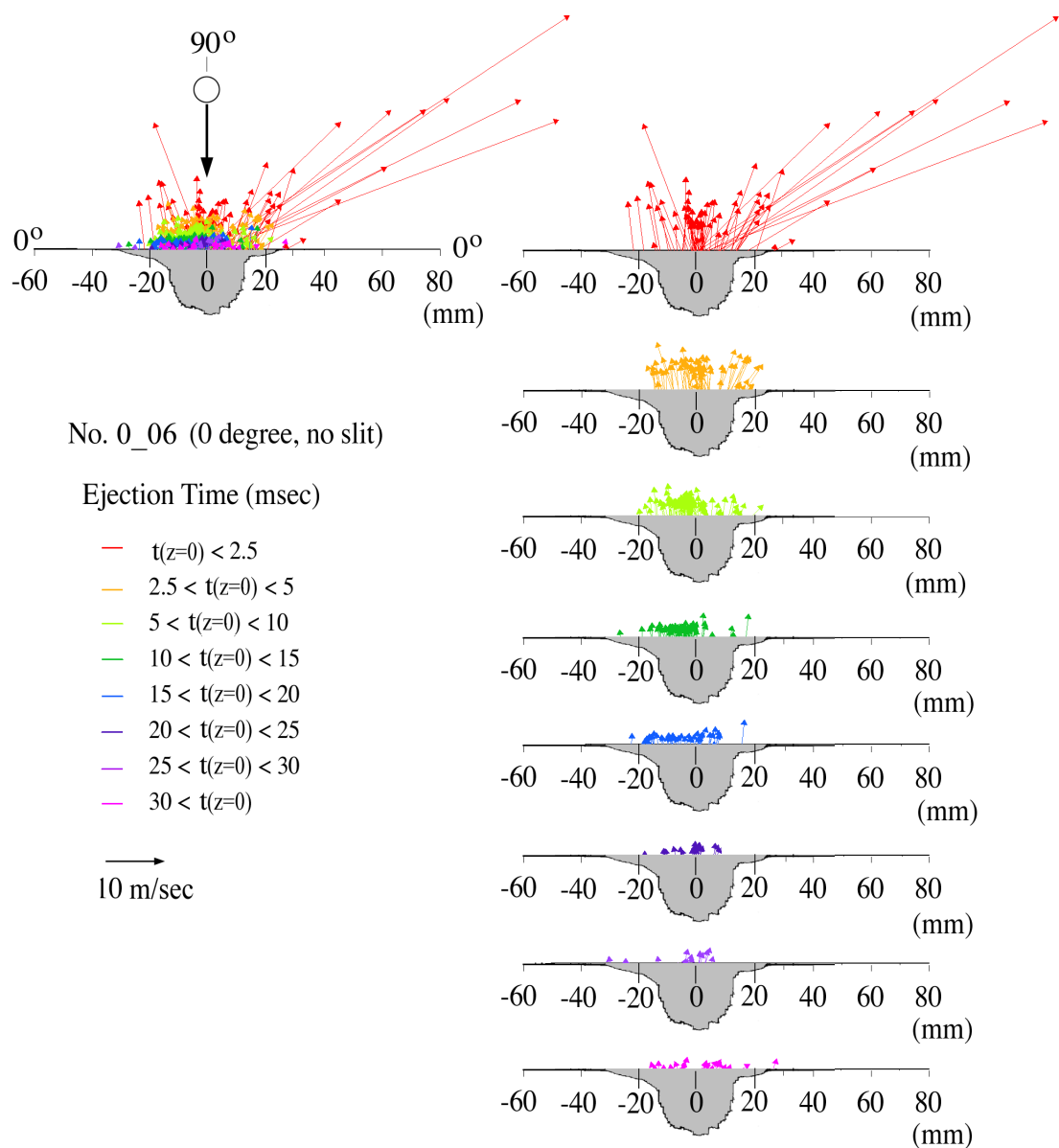
図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (b) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_02)
 Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (b) vertical impact employing a slit (0_02)



(c)

図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (c)衝突角度0度、2台のカメラを用いた3次元速度計測(0_04)。2次衝突による3次元速度の計測あり

Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (c) vertical impact with two cameras (0_04). Some fragments are measured in three-dimensional with secondary collision on the window.



(d)

図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (d) 衝突角度0度スリットなしの場合。2次衝突による3次元速度の計測あり(0_06)

Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (d) vertical impact without employing a slit (0_06). Some fragments are measured in three-dimensional with secondary collision on the window.

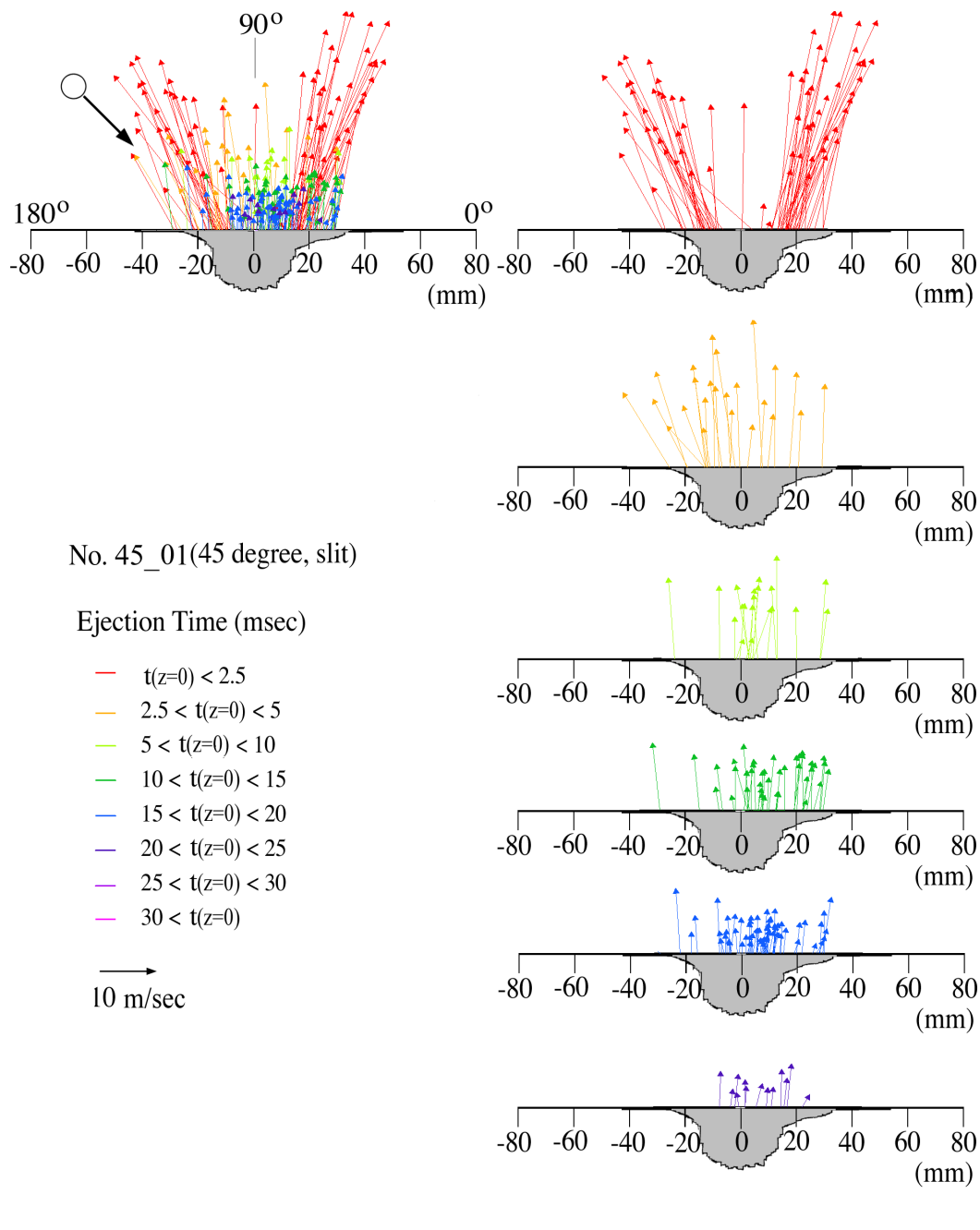
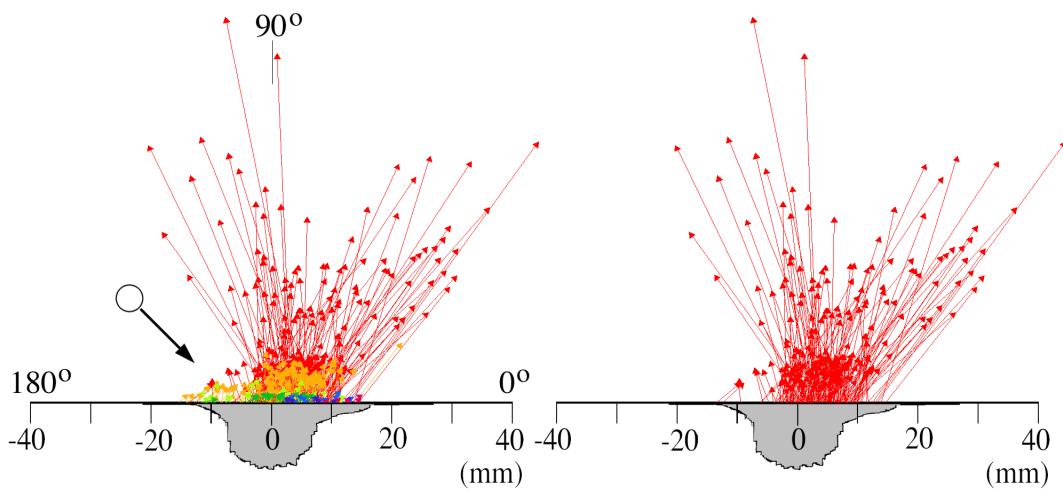


図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (e)衝突角度45度スリットありの場合。(45_01)
 Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (e)impact at an angle of 45 degrees, employing the slit(45_01).

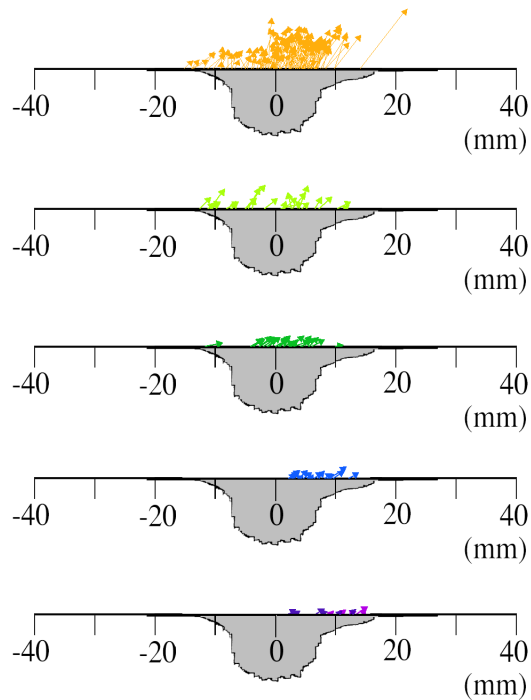


No. 45_21 (45 degree, no slit)

Ejection Time (msec)

- $t(z=0) < 2.5$
- $2.5 < t(z=0) < 5$
- $5 < t(z=0) < 10$
- $10 < t(z=0) < 15$
- $15 < t(z=0) < 20$
- $20 < t(z=0) < 25$
- $25 < t(z=0) < 30$
- $30 < t(z=0)$

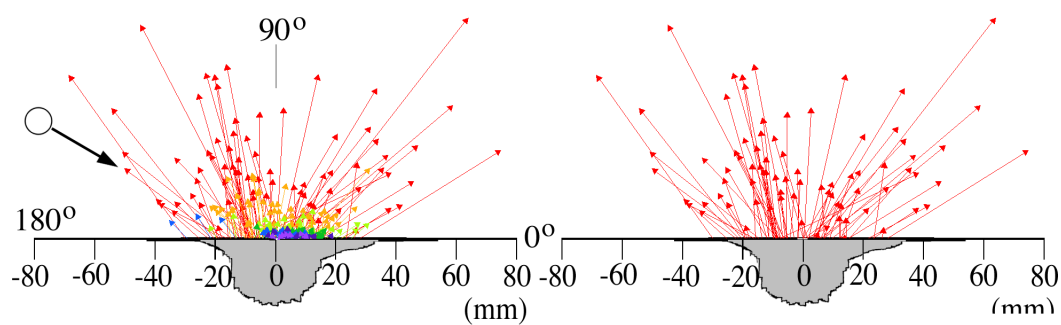
→
10 m/sec



(f)

図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (f) 衝突角度 45 度、スリットなし、小さな飛翔体(3 mm 球)の衝突の場合。(45_21)

Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (f) impact at an angle of 45 degree without employing the slit, with a projectile 3 mm in diameter. (45_21)

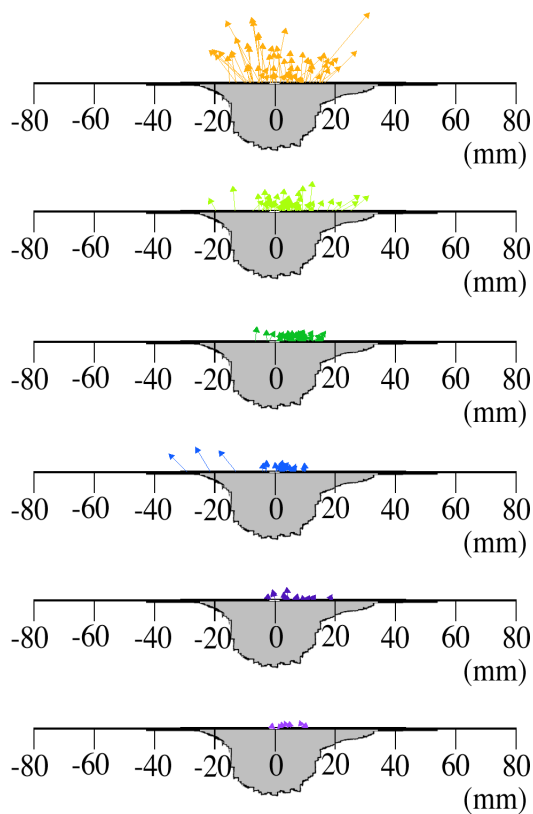


No. 60_01 (60 degree, no slit)

Ejection Time (msec)

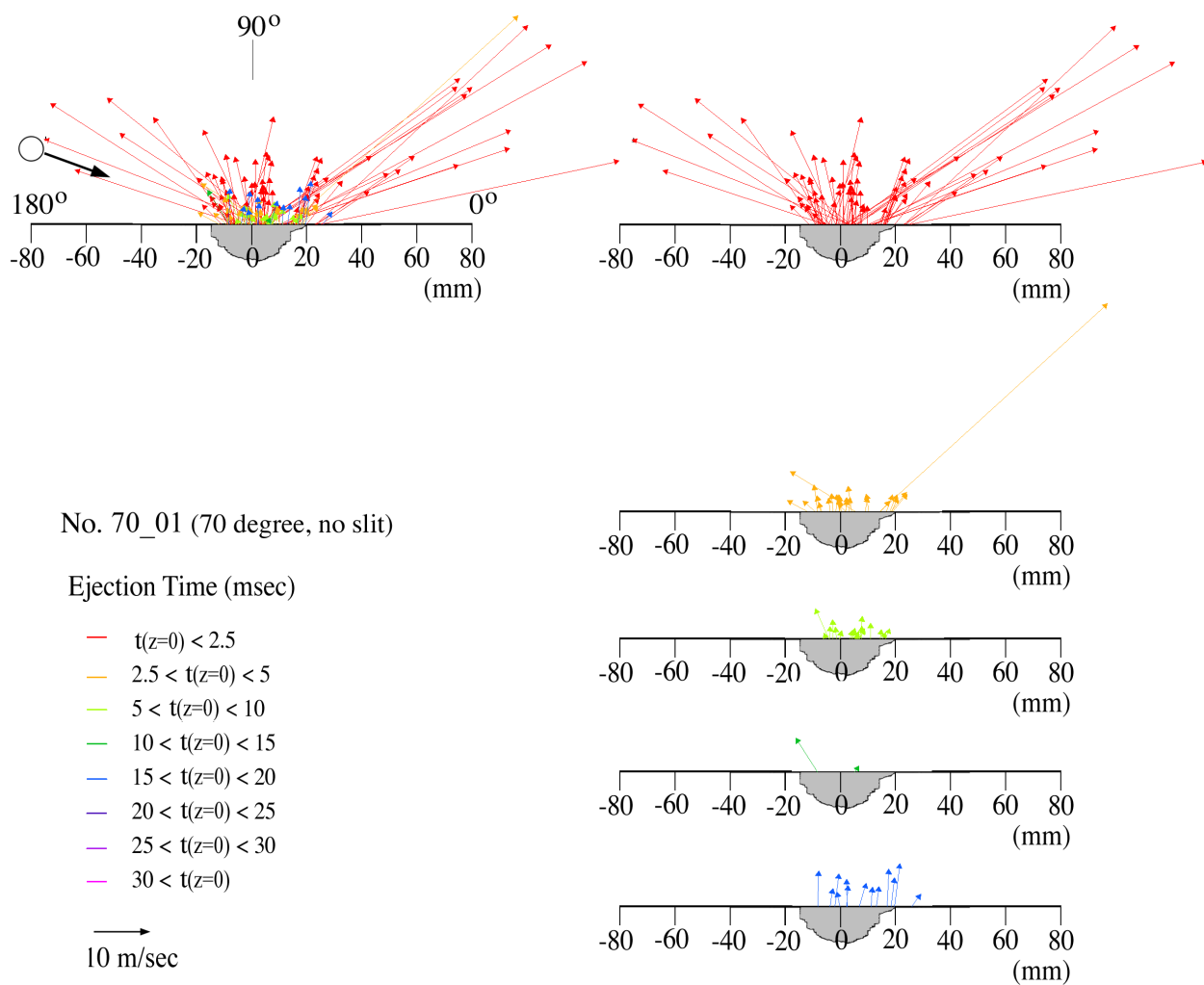
- $t(z=0) < 2.5$
- $2.5 < t(z=0) < 5$
- $5 < t(z=0) < 10$
- $10 < t(z=0) < 15$
- $15 < t(z=0) < 20$
- $20 < t(z=0) < 25$
- $25 < t(z=0) < 30$
- $30 < t(z=0)$

→
10 m/sec



(g)

図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル:(g)衝突角度60度スリットなしの場合(60_01)
Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (g) impact at an angle of 60 degrees without employing a slit (60_01)



(h)

図 3-24. 破片の初期位置と放出速度ベクトル: (h) 衝突角度70度スリットなしの場合(70_01) 2次衝突による3次元速度の計測あり。

Fig. 3-24. Initial positions and ejection velocity vectors of fragments: (h) impact at an angle of 70 degrees without employing a slit (70_01). Some 3 dimensional velocities were measured with secondary collision on the window.

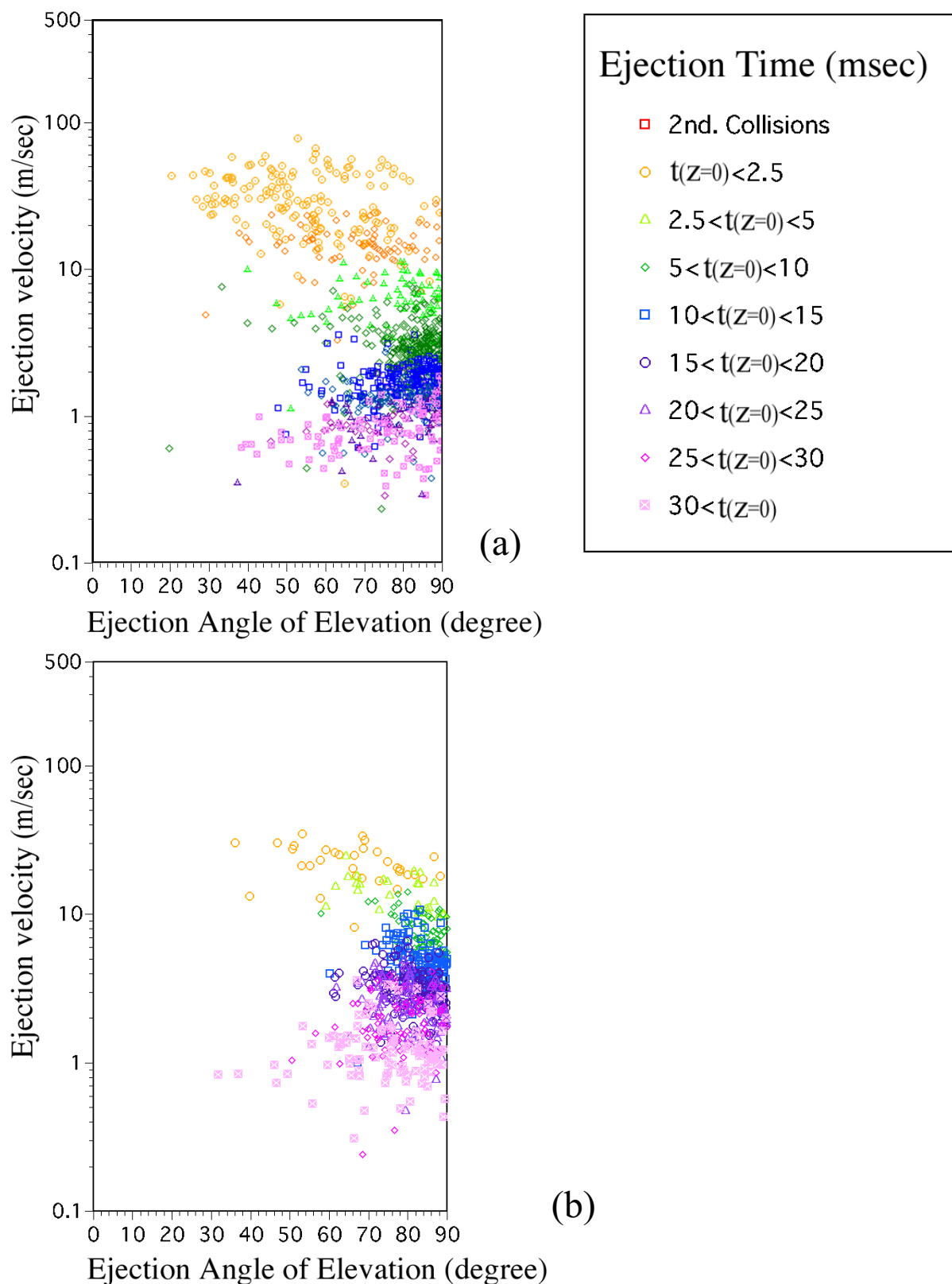


図 3-25. 破片の放出速度と角度: 斜め衝突の場合の仰角は、下流側ターゲット表面で0度、法線方向で90度、上流側ターゲット表面で180度となるように拡張した。(a) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_01) (b) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_02)

Fig. 3-25. Ejection velocity and elevation of fragments: In the case of oblique impact, elevation was extended as follows: set 0 degree at the target's surface in downrange direction, 90 degrees at the normal of the target's surface, and 180 degree at the target's surface in up range direction. (a) vertical impact employing a slit (0_01), (b) vertical impact employing a slit (0_02)

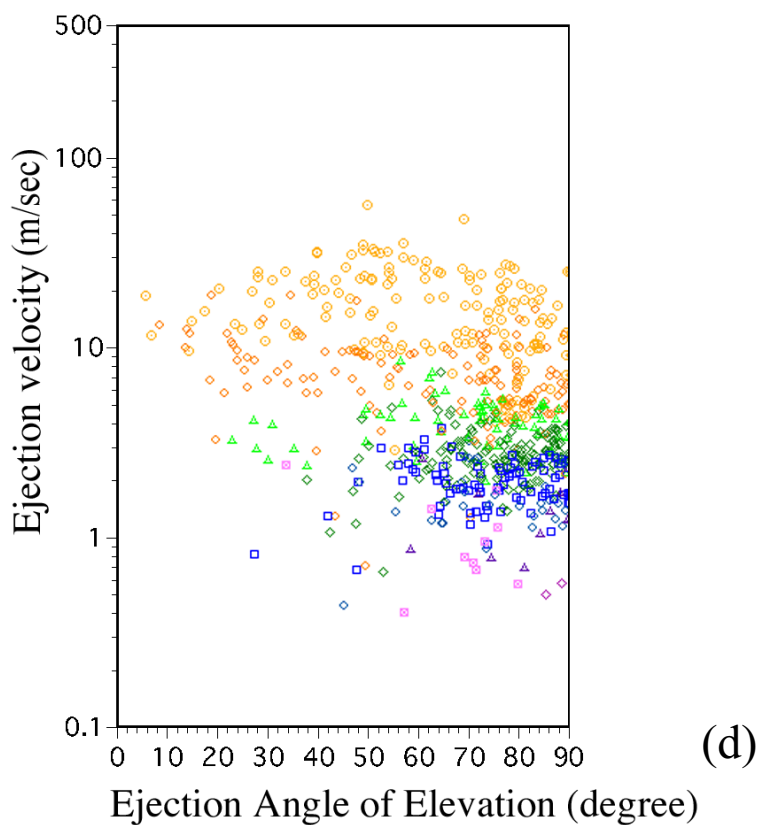
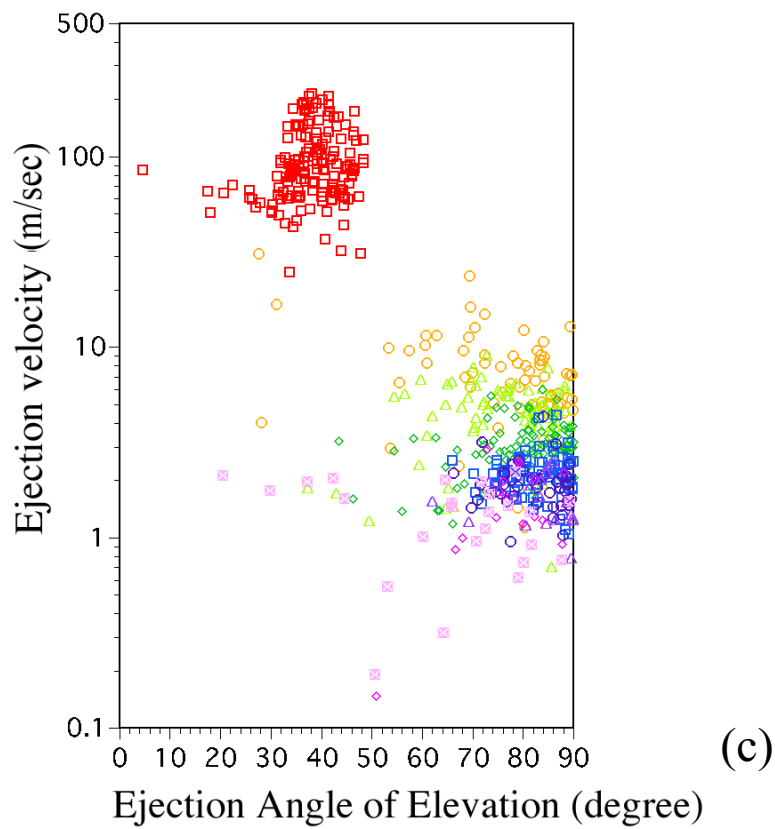
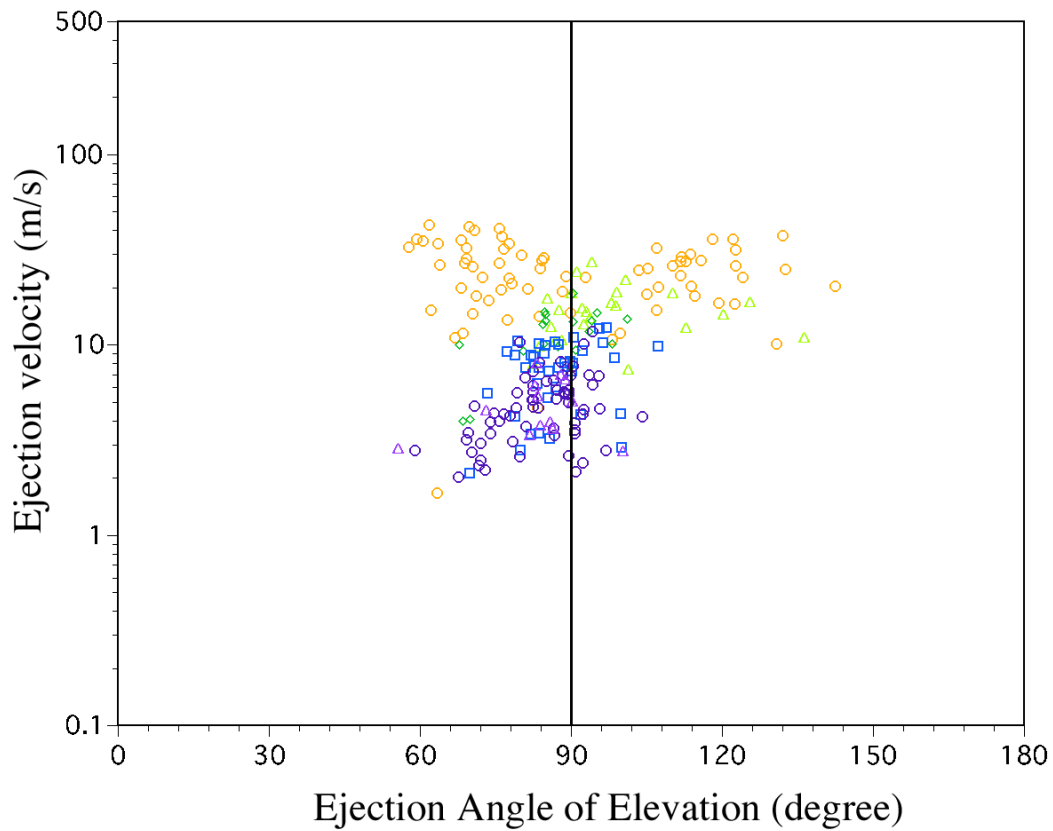
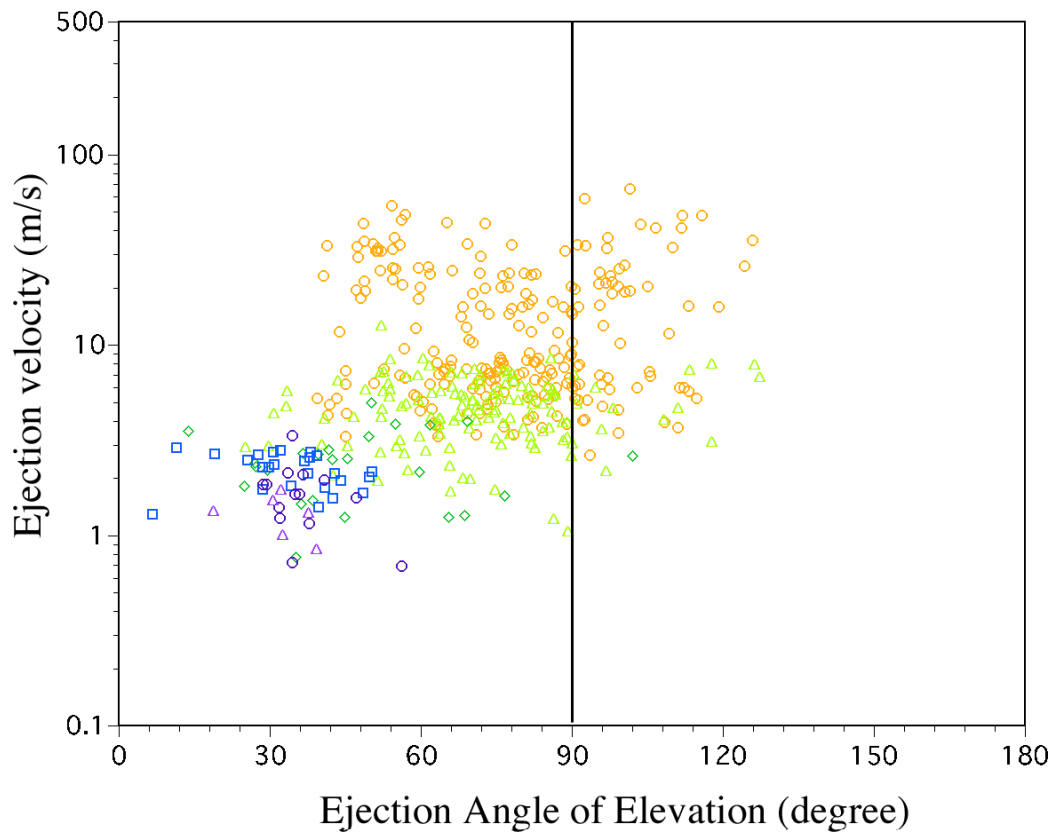


図 3-25. 破片の放出速度と角度: (c)衝突角度0度スリットなしの場合。2次衝突による3次元速度の計測あり(0_06) (d) 衝突角度0度、スリットなし、サボの衝突により二つ割れ(0_21)

Fig. 3-25. Ejection velocity and elevation of fragments: (c) vertical impact without employing the slit (0_06). Some fragments are measured in three-dimensional with secondary collision on the window. (d) vertical impact of a piece of sabot without employing the slit (0_21). The target splitted into two pieces.



(e)



(f)

図 3-25. 破片の放出速度と角度: ((e)衝突角度 45 度スリットありの場合。(45_01) (f) 衝突角度 45 度、スリットなし、小さな飛翔体(3 mm 球)の衝突の場合。(45_21)

Fig. 3-25. Ejection velocity and elevation of fragments: (e)impact at an angle of 45 degrees, employing the slit(45_01). (f) impact at an angle of 45 degree without employing the slit, with a projectile 3 mm in diameter. (45_21)

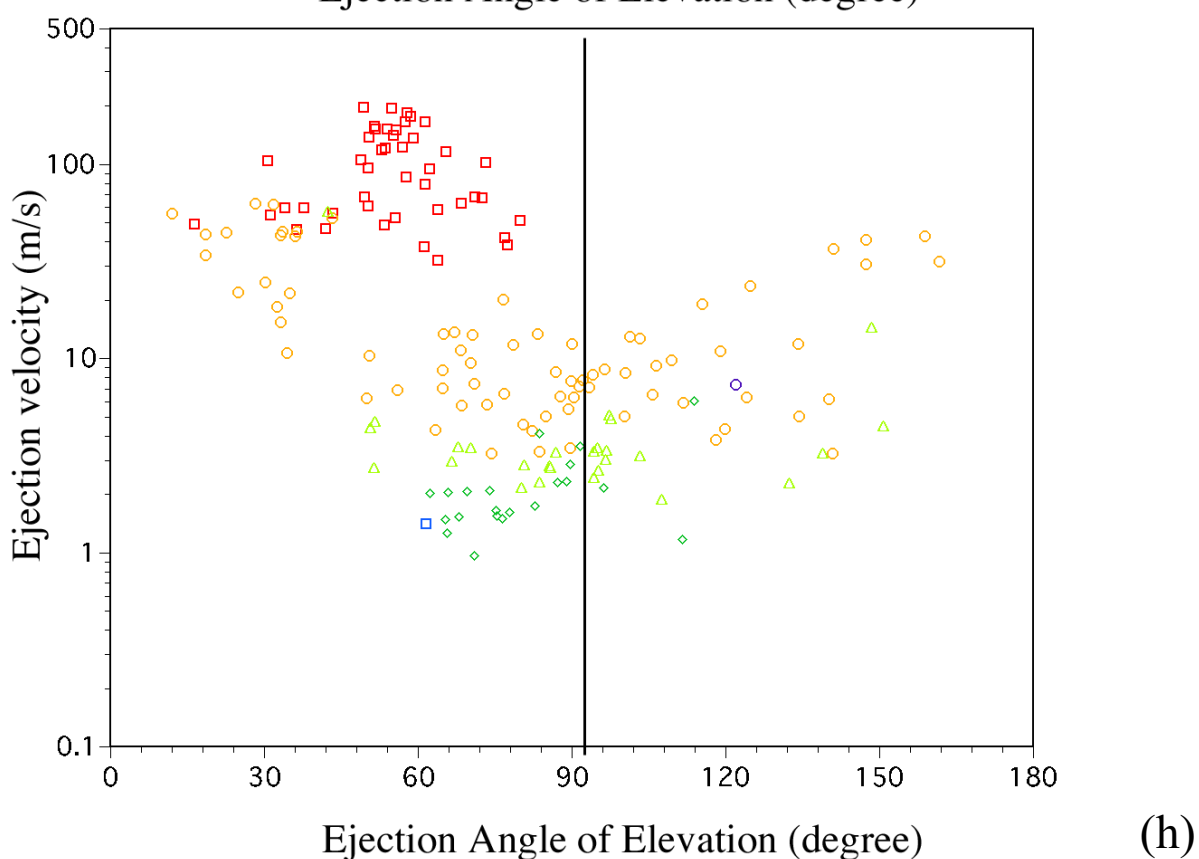
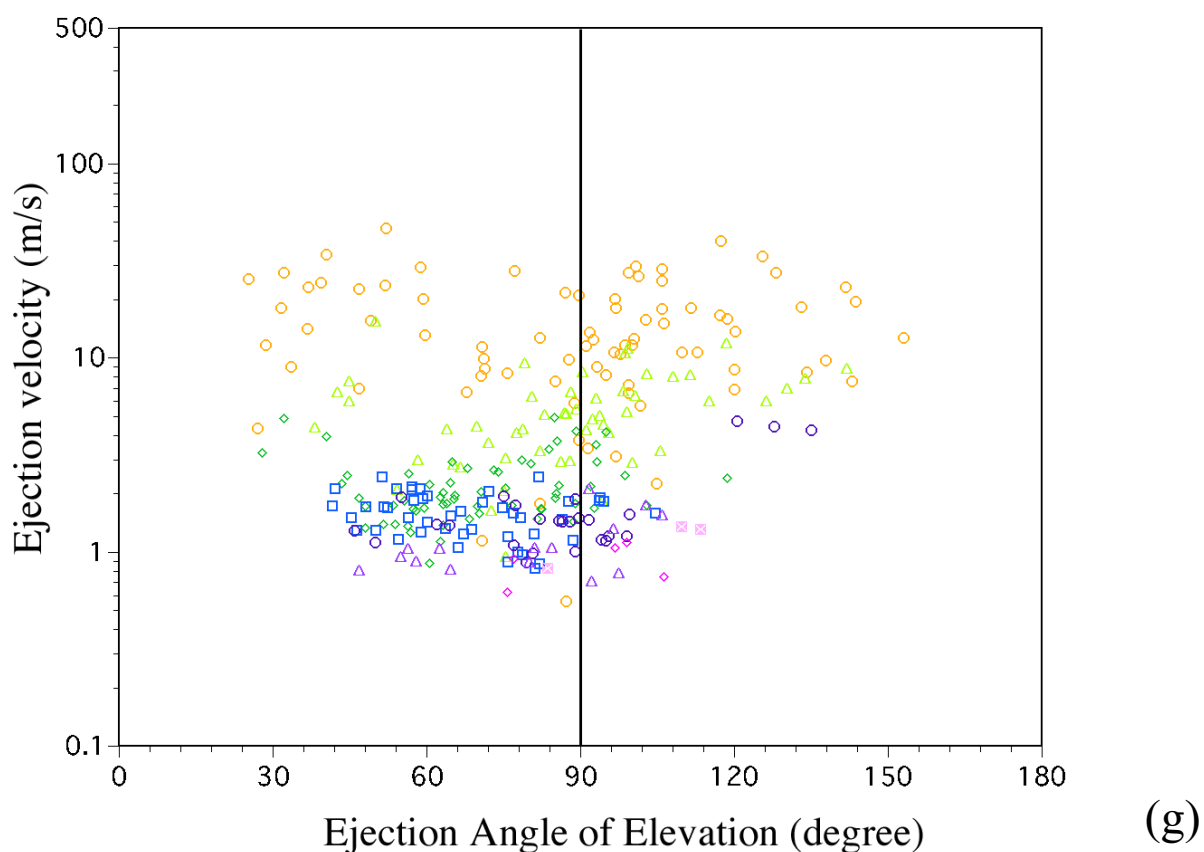


図 3-25. 破片の放出速度と角度: (g)衝突角度60度スリットなしの場合(60_01) (h) 衝突角度70度スリットなしの場合(70_01)。2次衝突による3次元速度の計測あり。

Fig. 3-25. Ejection velocity and elevation of fragments: (g)impact at an angle of 60 degrees without employing a slit (60_01) (h) impact at an angle of 70 degrees without employing a slit (70_01). Some 3 dimensional velocities were measured with secondary collision on the window.

スリットつきターゲット容器を使用した実験(0_01、0_02)においては、破片の 3 次元速度、初期位置の測定が可能であると同時に、破片放出場の内部構造をも観測することが可能である。したがって、まず、スリットつきターゲット容器を使用した垂直衝突実験における破片放出の特徴を、放出時間にしたがって解説した後、斜め衝突により得られた破片速度について述べる。

破片の放出速度は、衝突からの経過時間につれて劇的に変化する。まず、衝突から 2.5 msec 以内にターゲット表面を離れたと考えられる破片の放出角度の平均は 60 ± 15 度で、これに引き続く放出と較べると低角度であり、放出が逆円錐形であることを示している。より速い破片の観測に成功した実験番号 0_01 で観測された、60 m/sec 程度の速度を持つ破片の放出角度は 30 度の低角度まで分布し、これは、観測窓への 2 次衝突によって計測された放出角ならびに放出速度と調和的である。また、これらの早い時期に放出された破片の初期位置は pit の中心から 15 ± 5.8 mm になり、これはクレーターの spall 領域に相当する。破片の平均速度は 23 ± 11 m/sec である。

衝突から 2.5 から 5 msec の間は、クレーター形成初期に見られた高速度で逆円錐形の放出から、放出角度が大きく初期位置が内側の低速度の放出へと変化する遷移領域である。

衝突から 5 msec 以上経過した後の破片の放出角は、1 m/sec 以下の破片が重力の影響を受け下向きの角度を得る以外では、 80 ± 8 度とターゲット表面と垂直な方向に限定される。また、破片の初期位置は pit 領域に相当する、中心から 13 mm 以内に限定される。また、破片の放出速度の平均値は、衝突から 5 から 10 msec では 5 ± 2 m/sec であるのに対し、衝突から 15 から 20 msec では 2 ± 0.7 m/sec、衝突から 30 msec 以降では 1 ± 0.5 m/sec となり、ターゲット表面から放出される時刻が遅くなるにつれて低速度の破片が放出されている様子が観測された。衝突から 5 msec 以降に放出された破片の直径は 1 mm 以内のものが主であり、これらの遅くて小さな破片の数は、実験番号 0_01 では 787 個、実験番号 0_02 では 623 個と非常に多い。

互いに直交する方向に設置した 2 台のカメラを用いて破片の 3 次元速度を計測した実験(0_04)の結果を図 3-24 の(c)に示す。この実験においては、回収した破片との対応付けが可能な大きな破片と、観測窓に衝突した破片、ならびに比較的高速度の破片のみを選択的に計測した。この実験で 3 次元速度の計測に成功したのは 8 個であり、その全てが spall 破片である。回収された破片とのみ対応付けられた破片がこれ以外に 6 個あり、合わせて 14 個である。この実験においては、ターゲット表面から放出される spall 破片の更に下から放出された、2 枚目の spall 破片がターゲット表面から盛り上がり、そのままクレーターのすぐ下に落ちていくのが観測されている。ターゲット表面から完全に分離した状態で測定できなかったため、破片速度としては計測できなかったが、ターゲット表面での盛り上がり速度は 0.1 m/sec を下回った。

図 3-24、3-25 の(d)には、スリットつきターゲット容器を使用していない実験番号 0_06 での放出速度の分布を示した。スリットを用いない実験はおもに 5 mm 以上の大きな破片を観測するために行ったものであるが、スリットを用いた実験の結果との調和性を確かめるために、この実験においては細かい破片に関しても可能な限り計測を行った。この実験においてはカメラ

の視線方向の速度成分を持つ破片に対しても、画面内への 2 次元射影速度を計測しており、ある破片が視線方向に 45 度の角度を持って放出されたと仮定すると、真の破片速度は 2 次元射影速度の 1.4 倍になる。計測された破片は、画面と垂直方向の放出速度ならびに初期位置を持つので、放出時刻の変化に伴う放出方向ならびに速度の遷移は、スリットつきターゲット容器を用いた実験と較べると明確ではないが、逆円錐形の高速度の放出がターゲットと垂直方向の低速度の放出への変化するとしたスリットを利用した実験の結果に矛盾はない。この実験において観測された 10 m/sec 以上の速度を持つ破片の数が、スリットを用いた実験で観測されたものと較べて少ない理由は、この実験においてはクレーター形成初期の破片の観測窓への破片衝突があり、これにより視界が一時遮られたためである。また、2.5 m/sec 付近の破片の数が少ないのは、多数の細かい破片の軌道が重なり合い、これらを分離できなかったことに起因すると考えられる。

これらの実験(0_04、0_06)において主として計測された 5 mm 以上の大きな破片の中には比較的遅い放出速度を持つものや、ターゲット表面と垂直に近い放出角度を持つものもあるが、ターゲット表面から放出された時刻は共に 1.5 ± 1.3 msec であり比較的早い。また、これらの破片は回収された spall 破片に対応付けられる。

スリットつきターゲット容器を用いた衝突角度 45 度の斜め衝突(45-01)においても、衝突から 2.5 msec 以内に 10 m/sec 以上の速度の破片が逆円錐をなして放出されている様子と、その後の、ターゲット表面とほぼ垂直をなす方向への遅い破片の放出が認められる。クレーター形成初期に観測される逆円錐形の放出の下流方向での放出角は平均 74 度あり、垂直衝突における放出角度の平均が 65 度であることに較べてやや大きい。更に、下流方向への放出速度の平均が 26 m/sec であるのに対し、上流方向へのそれは 22 m/sec となっており、放出する方位による放出速度の非対称性が観測される。また、高速度の円錐放出から低速度の垂直放出に遷移する時刻も、垂直衝突のものと較べて早くなっている。クレーター形成後半に放出される低速度の破片の放出角はターゲット表面の法線からわずかに下流方向へ傾いている。この実験において、スリットの位置はターゲット表面から 55 mm と離れた位置にあり、かつスリットの開口部が下を向いているので、衝突の晩期においては、ターゲット容器内で跳ね返った破片が遅い破片と共にスリットから放出されるのが観測された。したがって、これらの破片の影響が少ないと見られる放出時刻が衝突の瞬間から 20 msec 以内のものを中心に計測を行った。

これに続く実験、45_21、60_01、70_01 は衝突角度がそれぞれ 45 度、60 度、70 度の斜め衝突において放出される破片の 2 次元射影速度を計測したものである。これらは、スリットを用いていない実験であるが、クレーター形成の早期には比較的高速度の破片が逆円錐方向に放出されること、同後期には比較的低速度の破片がターゲット表面から垂直に近い方向の放出されていることに関しては、垂直衝突により認められた現象と調和的である。また、衝突角度が大きくなるにしたがい、放出角度全体がやや下流に傾く傾向、逆円錐放出から垂直方向への放出への遷移の起こる時刻が早くなる傾向、そしてこのターゲット表面にほぼ垂直変更の放出がやや下流よりになる傾向が認められる。

3-4-2-3. 一回の垂直衝突により放出される破片のデータセットの再構成

本研究で用いた、スリットつきターゲット容器を用いた実験、これを用いない実験、ならびに超高速カメラ Shimazu HPV-1 を用いた実験は相補的なものであり、これらを組み合わせることにより、より広い放出速度、破片質量範囲でのデータセットを再構成することができる。(図 3-26)本研究においては、ひとつの垂直衝突にたいしてこれを行った。まず、スリットを使用した実験と使用していない実験のまとめ合わせについて述べ、その後に高速カメラ TMR-E2 を用いて計測したものと Shimazu HPV-1 を用いた実験とをまとめ合わせる。これらにより、垂直衝突において発生した破片を放出速度にして 0.1 m/sec(これ以下では破片のターゲット表面からの分離が明らかにならない)から 400 m/sec まで、破片質量にして 0.6 mg (TMR-E2 において 2 pixel に相当)から 0.4 g(この実験での最大破片)までのより網羅的なデータセットを再構成することができる。

まず、Table III に示された様に、スリットつきターゲット容器を用いた実験においては直径が 4 から 6 mm 以上の破片の放出が阻止されている。破片直径が 2 mm から 4 mm の間ではスリットを用いた実験と用いない実験との間に明確な相違が認められなかったので、ほぼ同じ衝突条件で実験を行った 0_01、0_05 のうち、直径が 3 mm 以下の破片に関しては、スリットつきターゲット容器を使用した 0_01 のデータを、これ以上のサイズの破片に関しては、スリットを使用しなかった 0_05 のデータを用いることにより欠けの少ないデータを求めた。0_01 で使用したスリットの幅は 20 mm あり、これは pit 領域の直径 26 mm に比較的近い。したがって、pit 領域のうちスリットに覆われているのは単純計算で 14%になる。そこで再構成を行うにあたっては、これらの大きな破片と小さな破片をそのまま加算した。

TMR-E2 を用いて計測できた破片速度の範囲は最高で 91 m/sec、速いものから 10 個目で 60 m/sec である。この TMR-E2 を用いて得られたデータセットに超高速カメラ Shimazu HPV-1 で計測された破片のうち 70 m/sec を超えるものを加算した。TMR-E2 により計測した、70 m/sec 以上の破片 2 個は削除していない。これにより、一回の垂直衝突により放出された 400 m/sec 以下の破片のうち、単純計算で 85 %の破片にたいして各破片の放出速度、初期位置、放出時刻、おおよその質量の情報が得られたことになる。今後このデータセットを垂直衝突の再構成と呼ぶ。

実験番号 0_05 はスリットを用いない実験なので、Shimazu HPV-1 を用いて取得したデータは 2 次元射影速度であるが、放出速度が 60 m/sec を超える高速度の破片の放出角度が大きくなることが示唆されている。再構成により得られた破片の数は 1323 個である。破片質量に関しては、破片の群分と、形の効果、圧密の効果の評価を行ってから述べる。

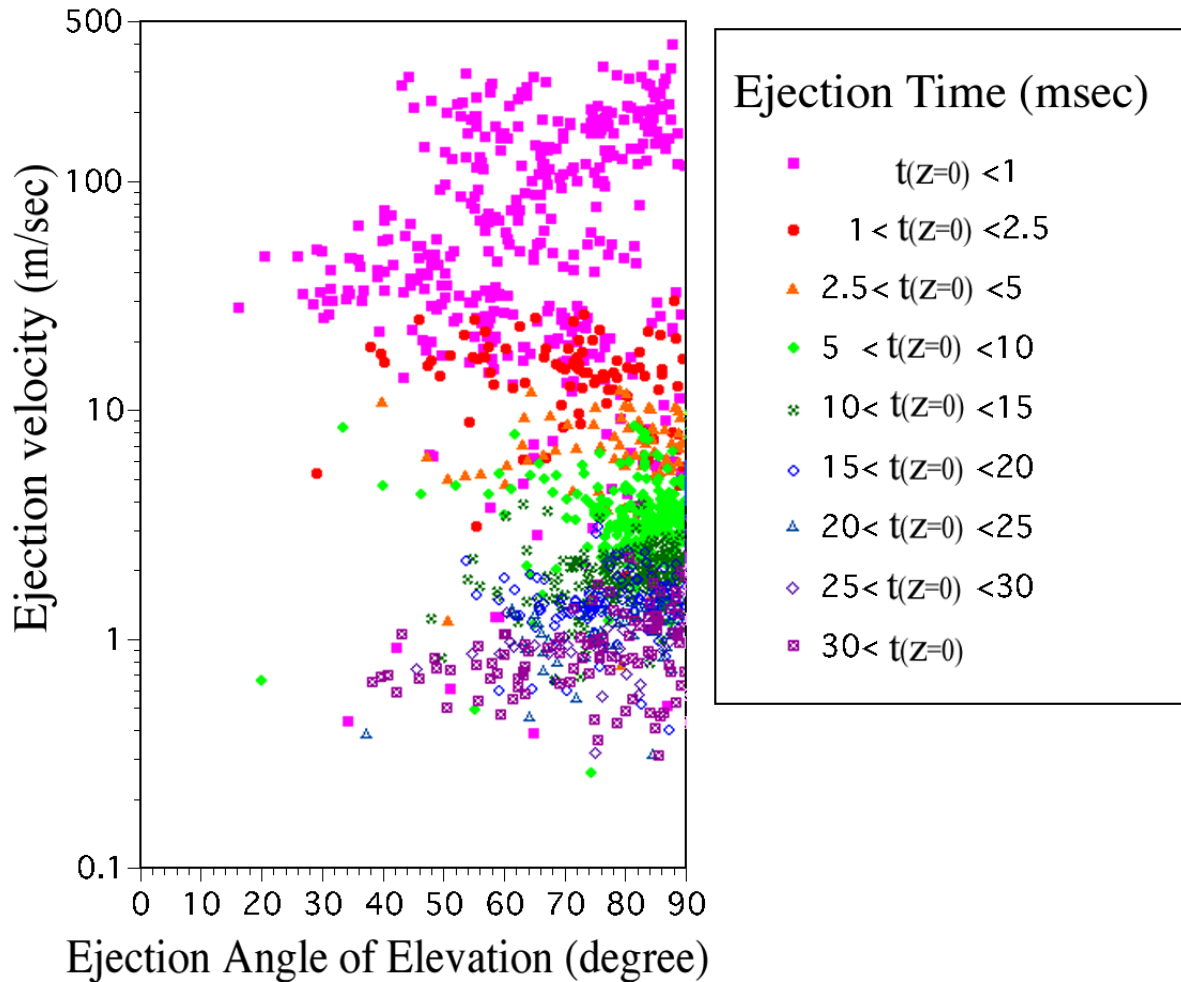


図 3-26. 1 run 分の破片の再構成: 実験番号 0_01 で TMR-E2 を用いて計測した破片のうち 3 mm 以下のものと、これと同じ実験において Shimazu HPV-1 を用いて計測した破片のうち 70 m/sec 以上の速度を持つものと、実験番号 0_05 で TMR-E2 を用いて計測した破片のうち 3 mm 以上のものを用いて再構成した。

Fig. 3-26. Reconstructed data set of fragments, which will obtain in a vertical impact: Fragment's data obtained in following experiments are gathered. empirical run No. 0_01, pictured with TMR-E2, smaller than 3 mm, empirical run No. 0_01, pictured with Shimazu HPV-1, faster than 70 m/sec, empirical run No. 0_05, pictured with TMR-E2, larger than 3 mm.

3-4-2-4. 放出時刻の経過と放出角度、初期位置の変化

各破片がターゲット表面を離れる放出時刻の変化にたいする、破片放出速度、角度、破片の初期位置の変化を図 3-27、3-28 に示す。放出時刻に関する誤差の平均的な値は、放出速度が 6 m/sec を超える破片に関しては 1 msec 程度、放出速度が 1 から 6 m/sec のものに関しては放出時刻の値の約 10 %、1 m/sec 以下の速度で放出されたものに関しては、50 %である。低速度の破片に対して放出時刻の誤差が大きくなるのは、これらが重力の影響を受けやすいこと、非常にたくさんの小さな破片が類似した軌道に放出されること、これらの破片の間で衝突が起こること、放出速度が遅いことにより位置決定の誤差の影響が大きく出ることなどが考えられる。

衝突から 2.5 msec 以内のクレーター形成早期には、クレーターの spall 領域に相当する位置から、速度が大きく放出角度の低い破片が放出されている。スリットつきターゲット容器を用いて、放出の断面を観測した実験(0_01, 0_02, 45_01)においては、手前からの放出がないために、各破片の初期位置、ならびに放出角度がより明確に観測される。すなわち、放出速度が 91 m/sec 以下の破片に関しては、衝突から 2.5 msec 以内において放出された破片のうち、ターゲット表面から垂直の方向近くに放出されるものや、クレーターの pit 領域から放出されるものの数は少なく、逆円錐形の放出が観測されている。

衝突から 2.5 から 5 msec の遷移領域に続いて、5 msec 以降に放出される大半の破片の初期位置はクレーターの pit 領域に相当し、放出角度もターゲット表面とほぼ垂直となる。衝突から 20 msec を過ぎると放出される破片の速度も 1.25 m/sec 以下のものが多くなり、放出角度、初期位置の決定精度が低下するため、データ点のばらつきが認められる。

斜め衝突において、スリットを用いた実験を行ったのは 45 度の例だけである。この衝突においても、衝突の初期には、クレーターの spall 領域に相当する位置からの高速度、低角度の放出が認められており、ターゲットと垂直方向およびここからやや上流よりの角度で放出される破片や、クレーターの pit 領域に相当する位置から放出される破片の数は少ない。この実験を含む、斜め衝突実験においては、破片の初期位置が spall 領域から pit 領域に遷移する時刻が早まっていることが認められる。また、衝突の後期に見られるターゲット表面と垂直方向の放出がやや下流方向へ傾いているのが認められる。スリットを用いない実験においても、早い時期には高速度かつ低角度の破片が放出されており、これは垂直衝突において見られる逆円錐形の放出と調和的である。衝突角度が増加するにしたがい、衝突クレーター形成の早期に見られる逆円錐形の放出と同後期に見られるターゲット表面に垂直な放出の境界が不明瞭になっていく。

また、斜め衝突においては、クレーター形成自体が早く終息する傾向にあることが示唆される。実験番号 45_01、45_21、70_01 に関しては、スリットの設置方法や衝突を行った表面の向きなどの理由により 1 m/sec 以内の低速度破片の計測が困難になるためという説明も可能である。しかし、実験番号 60_01 の実験設定は低速度の衝突後期に放出される破片の観測に最適化されたものであり、クレーター形成が比較的早くに終息する理由を、遅い時期に低速度で放出される破片にたいする観測バイアスに帰することは困難である。

図. 3-29 には、3-4-2-3 で設定した 1 回の垂直衝突で形成される破片の再構成データセットにたいして、放出時刻と放出角度、ならびに破片の初期位置を示した。この再構成されたデータセットにはスリットを用いない実験における高速度(70 m/sec 以上)の破片の放出速度が含まれているため、これらが放出時刻 0 付近に多数存在している。(c)、(d)に示したヒストグラムからは、衝突から 5 msec 以内のクレーター形成の初期には高速度の破片がクレーターの spall 領域に相当する位置から逆円錐形に放出されていること、衝突から 5 msec 以降の後期においては低速度の破片がターゲット表面と垂直に放出されていること、またその放出速度は衝突からの経過時間が大きくなるにつれ小さくなることが認められる。

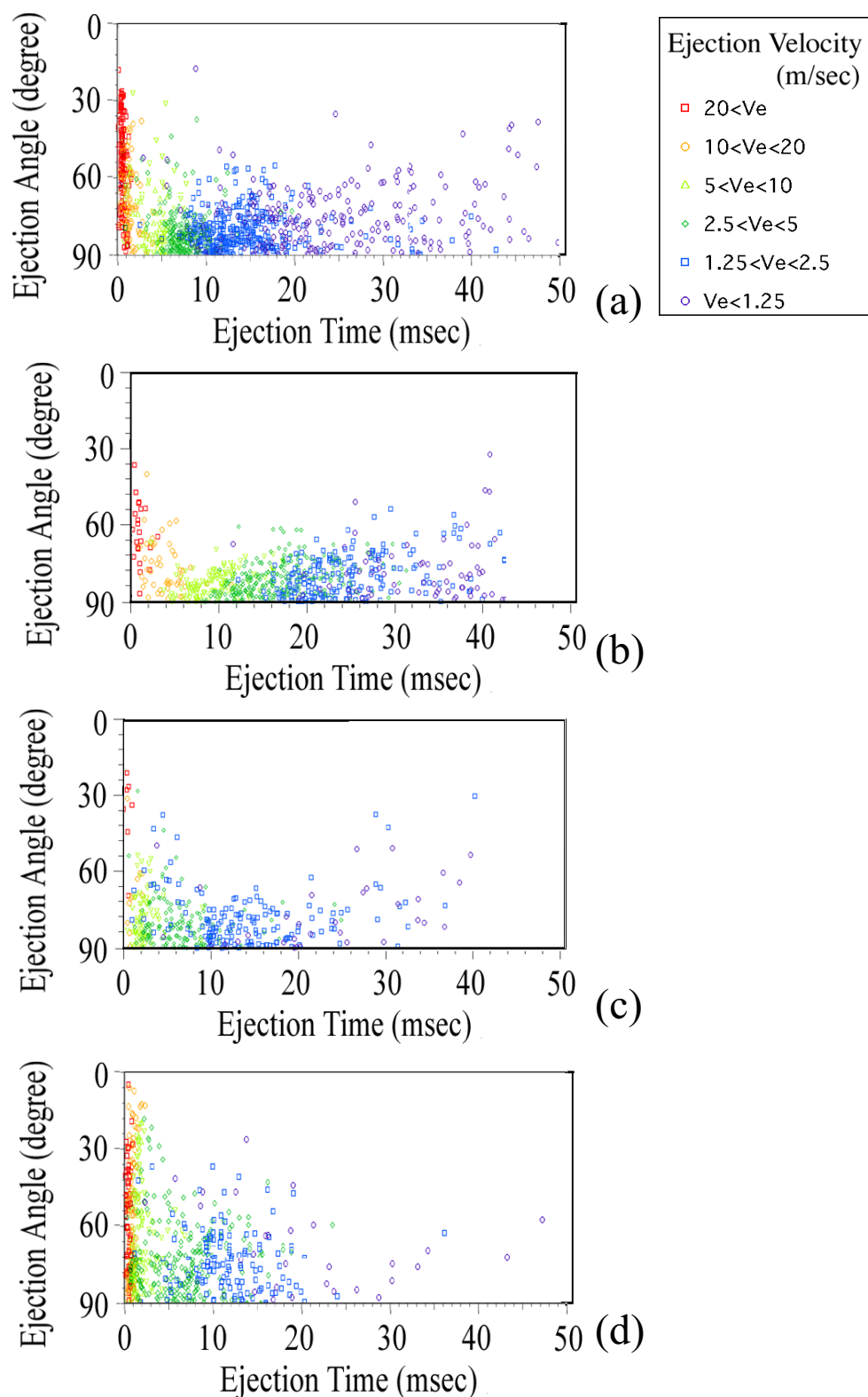


図 3-27. 破片の放出時刻と放出角度: 斜め衝突の場合の仰角は、下流側ターゲット表面で0度、法線方向で90度、上流側ターゲット表面で180度となるように拡張した。(a) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_01) (b) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_02) (c) 衝突角度0度スリットなしの場合 (0_06) (d) 衝突角度0度スリットなしの場合。(0_21)

Fig. 3-27. Ejection time and elevation of fragments: In the case of oblique impact, elevation was extended as follows: set 0 degree at the target's surface in downrange direction, 90 degrees at the normal of the target's surface, and 180 degree at the target's surface in up range direction. (a) vertical impact employing a slit (0_01), (b) vertical impact employing a slit (0_02), (c) vertical impact without employing a slit (0_06) (d) impact at an angle of 0 degrees(0_21).

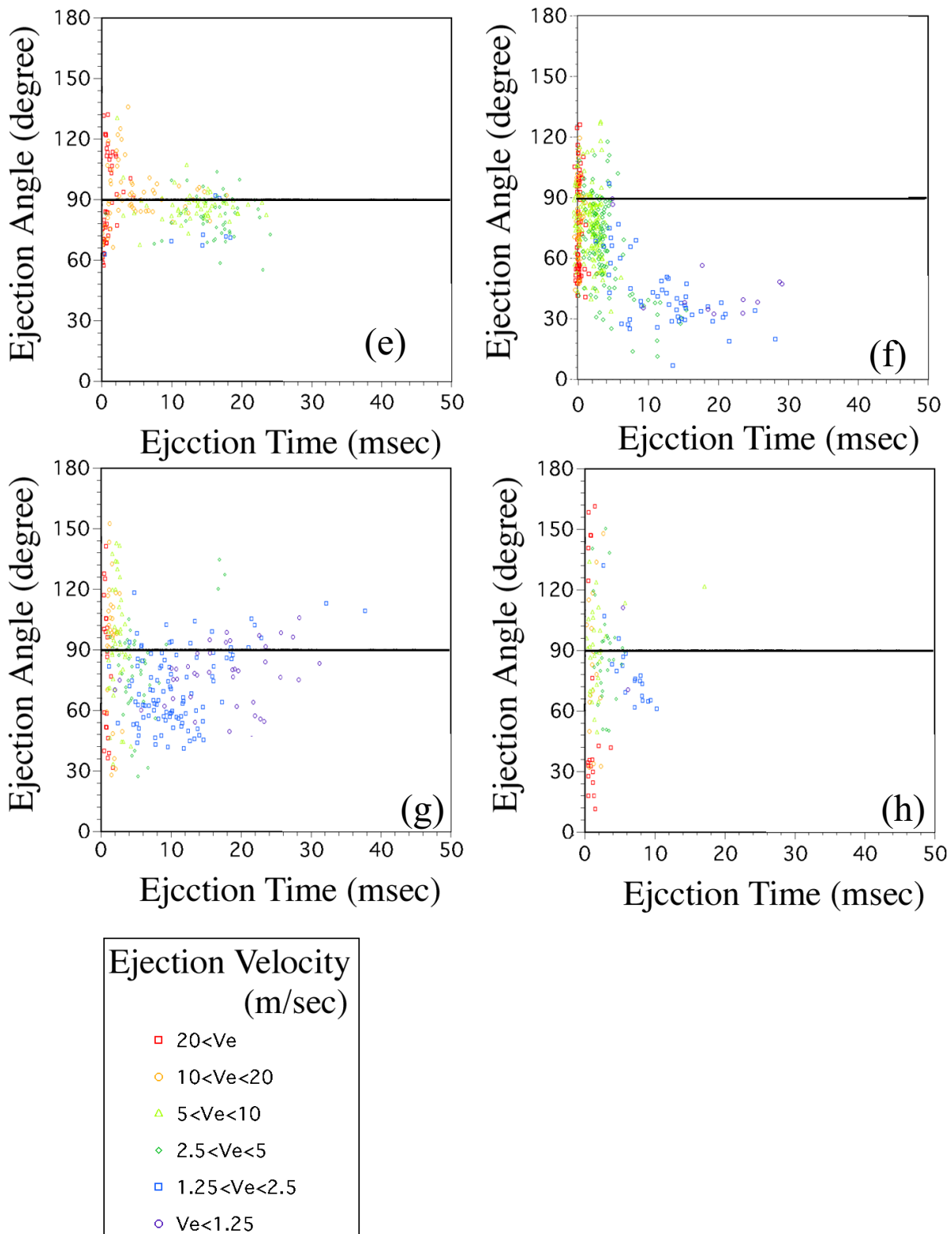


図 3-27. 破片の放出時刻と放出角度: (e)衝突角度45度スリットありの場合。(45_01)(f) 衝突角度45度、スリットなし、小さな飛翔体(3 mm 球)の衝突の場合。(45_21) (g)衝突角度60度スリットなしの場合(60_01) (h) 衝突角度70度スリットなしの場合(70_01)

Fig. 3-27. Ejection time and elevation of fragments: (e) impact at an angle of 45 degrees, employing the slit (45_01). (f) impact at an angle of 45 degree without employing the slit, with a projectile 3 mm in diameter. (45_21), (g) impact at an angle of 60 degrees without employing a slit (60_01) (h) impact at an angle of 70 degrees without employing a slit (70_01)

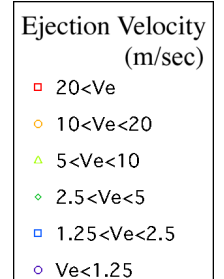
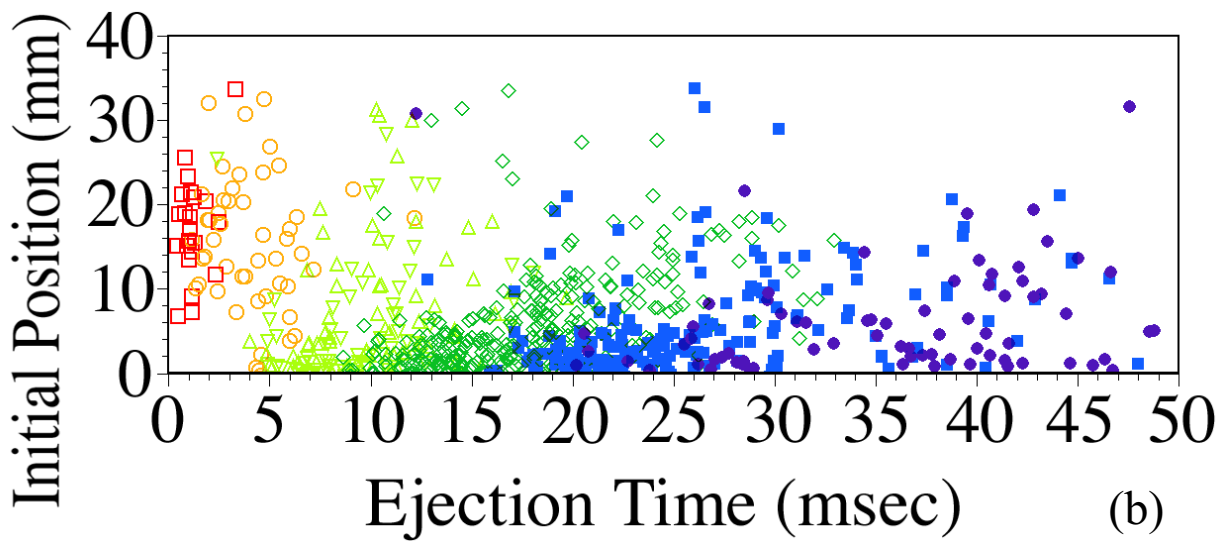
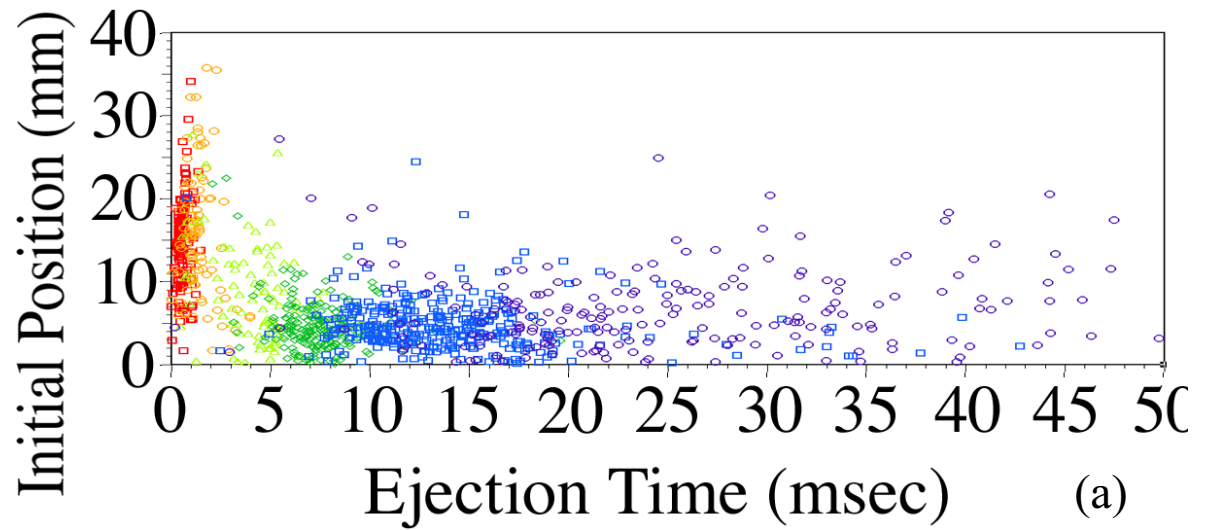
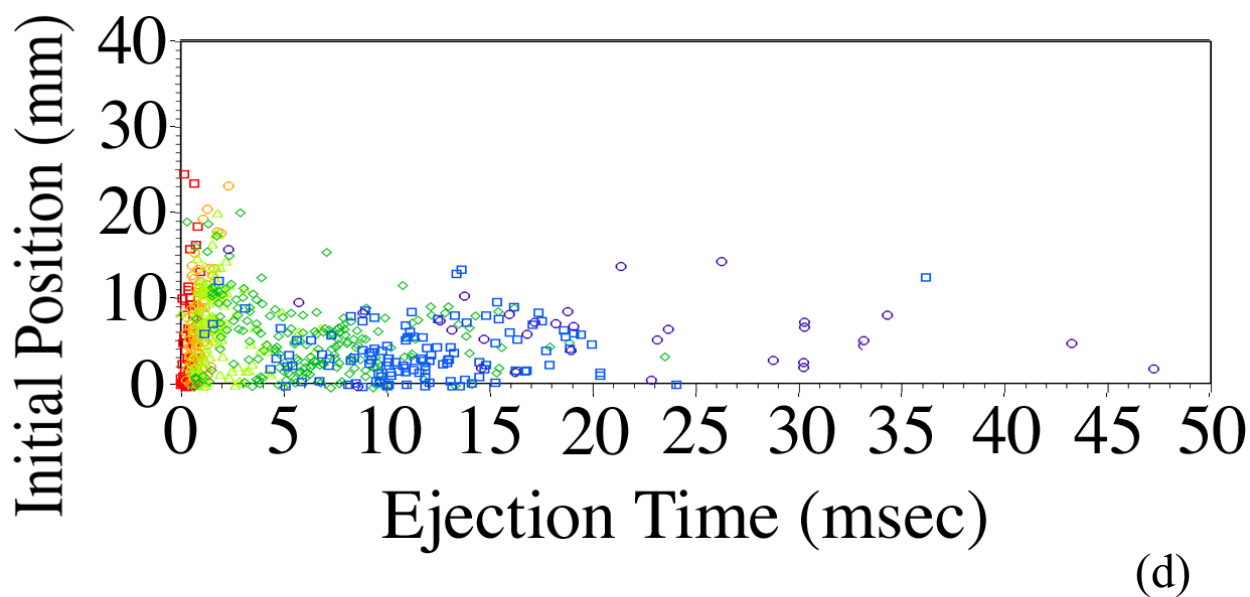
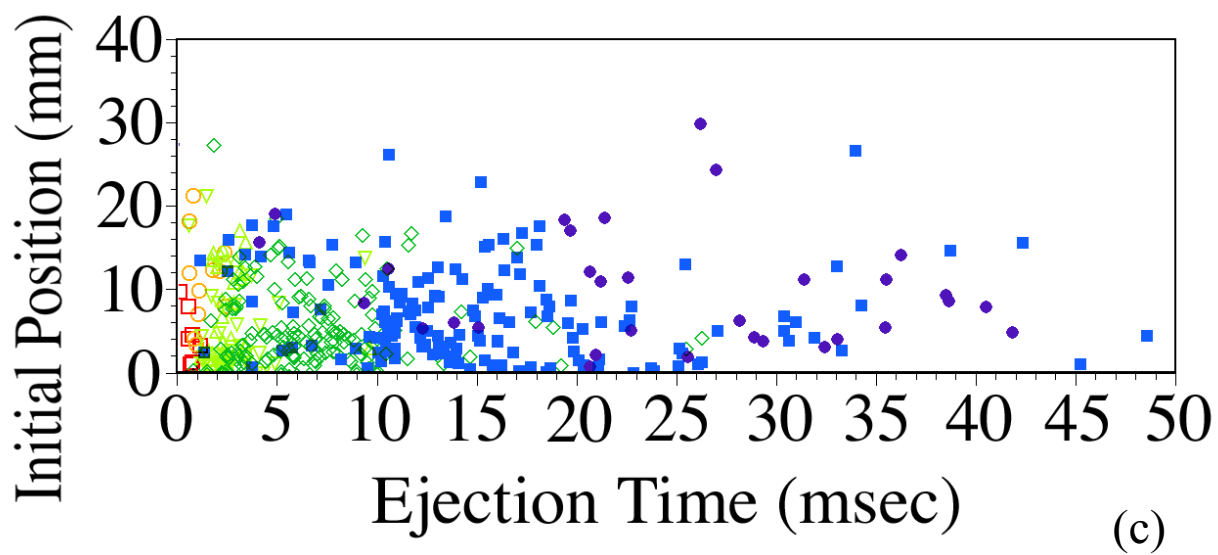
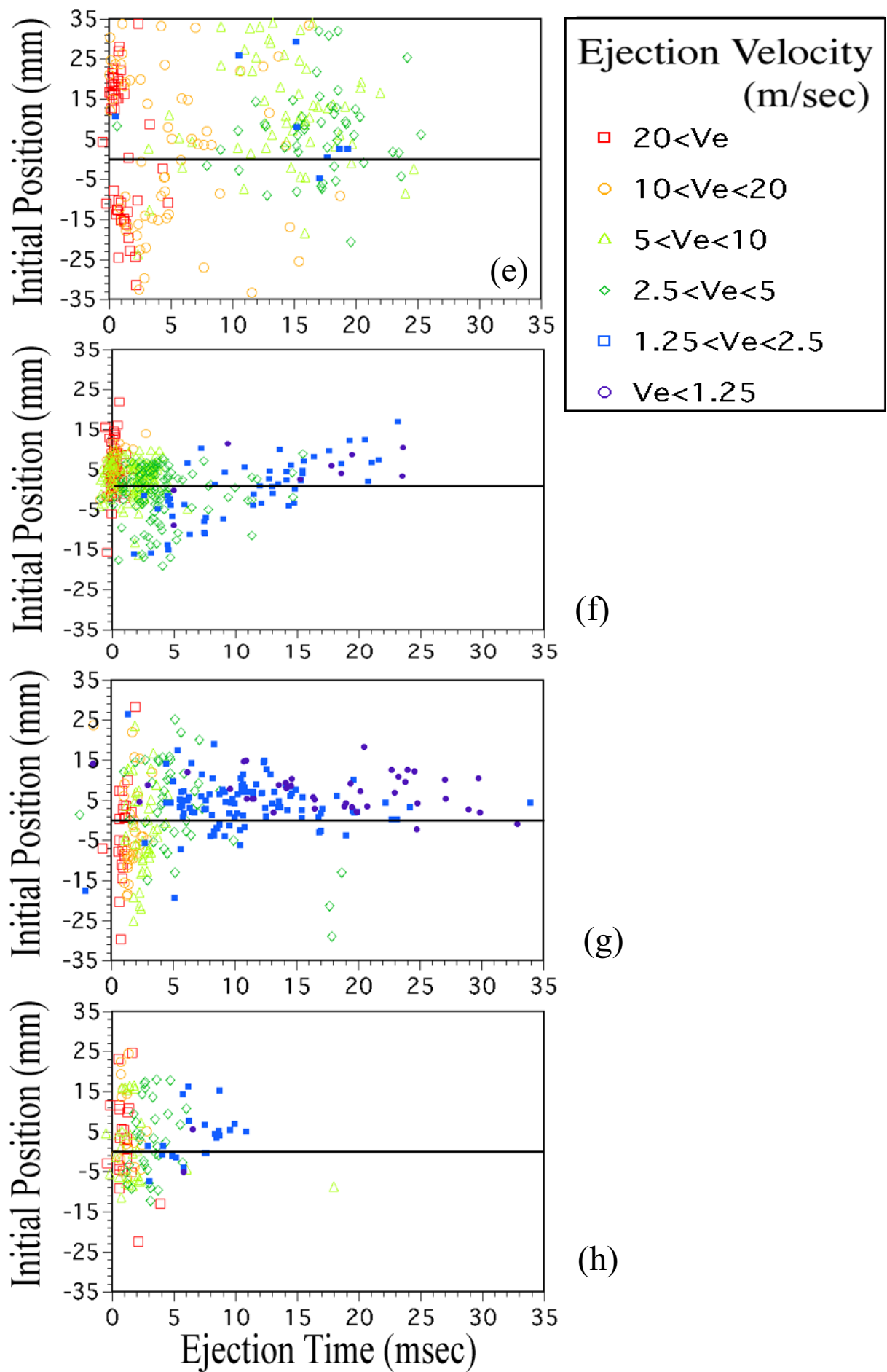


図 3-28. 破片の放出時刻と初期位置: (a) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_01) (b) 衝突角度0度、スリットありの場合(0_02) (c)衝突角度0度スリットなしの場合 (0_06) (d)衝突角度0度スリットなしの場合 (0_21)小さな飛翔体(サボ)の衝突の場合。(e)衝突角度45度スリットありの場合。(45_01) (f) 衝突角度45度、スリットなし、小さな飛翔体(3 mm 球)の衝突の場合。(45_21) (g)衝突角度60度スリットなしの場合(60_01) (h) 衝突角度70度スリットなしの場合(70_01)

Fig. 3-28. Ejection time and initial position of fragments: (a) vertical impact employing a slit (0_01), (b) vertical impact employing a slit (0_02), (c) vertical impact without employing a slit (0_06) (d) vertical impact without employing a slit, with a small projectile (sabot). (0_21) (e) impact at an angle of 45 degrees, employing the slit (45_01). (f) impact at an angle of 45 degree without employing the slit, with a projectile 3 mm in diameter. (45_21), (g) impact at an angle of 60 degrees without employing a slit (60_01) (g) impact at an angle of 70 degrees without employing a slit (70_01)





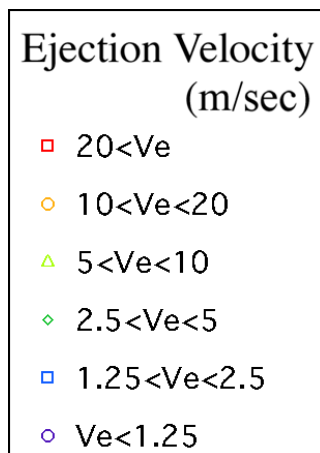
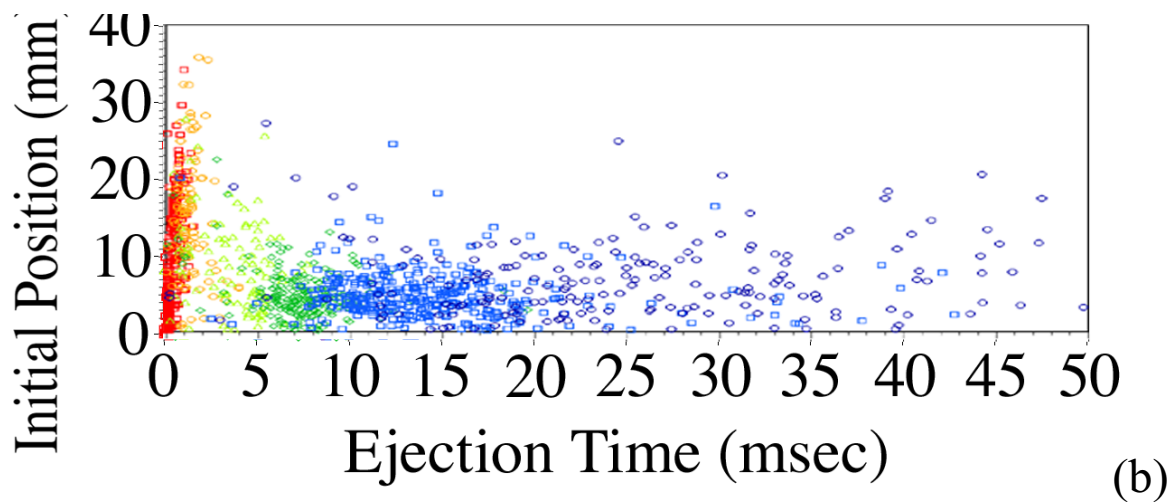
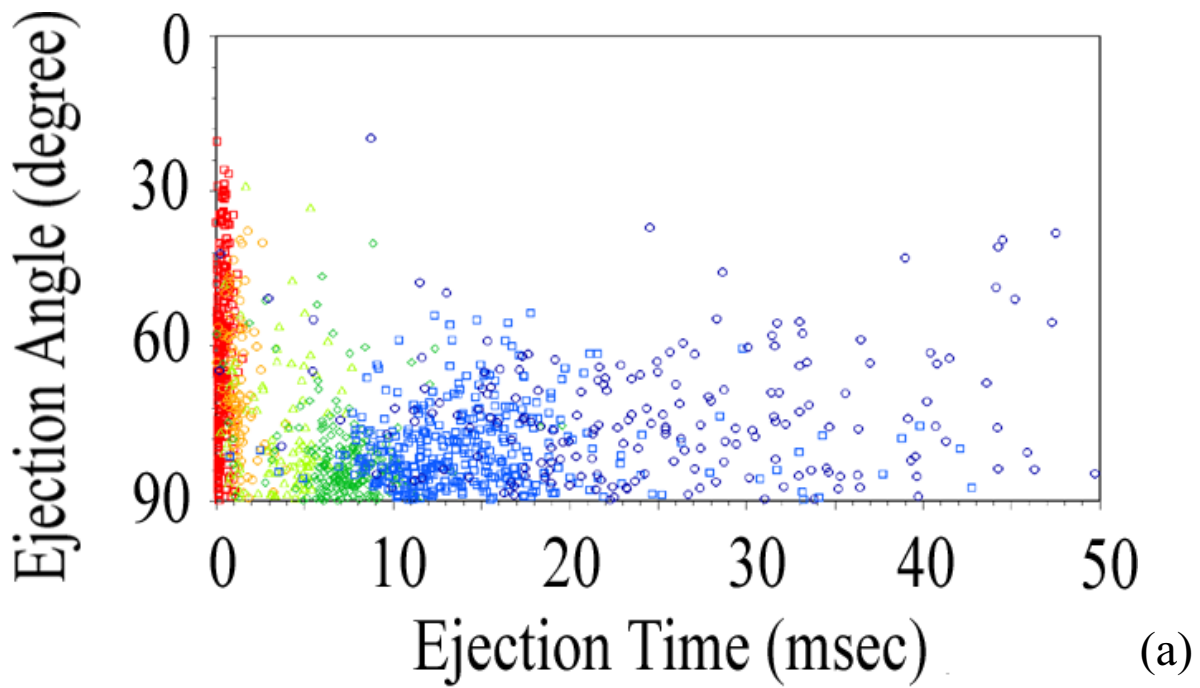
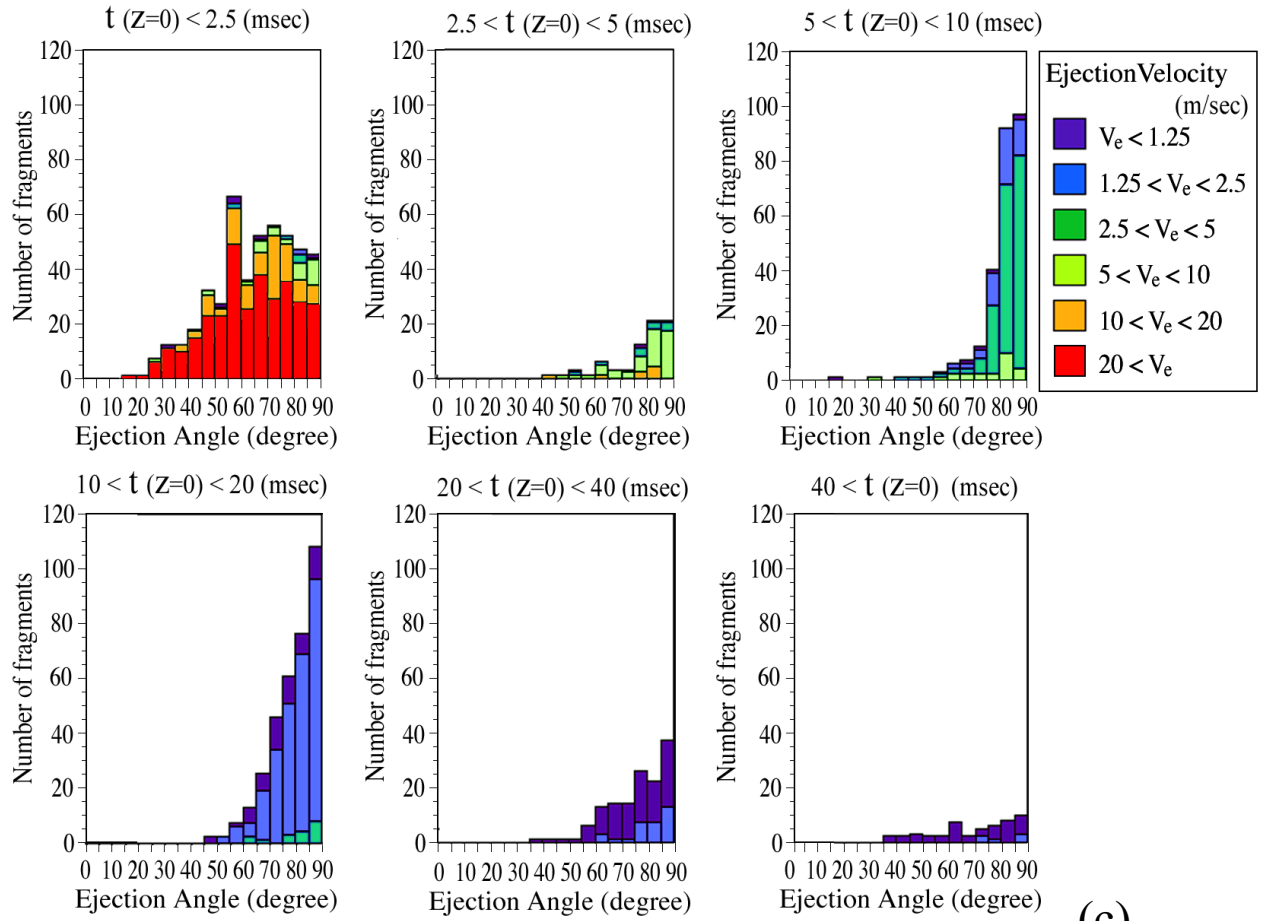
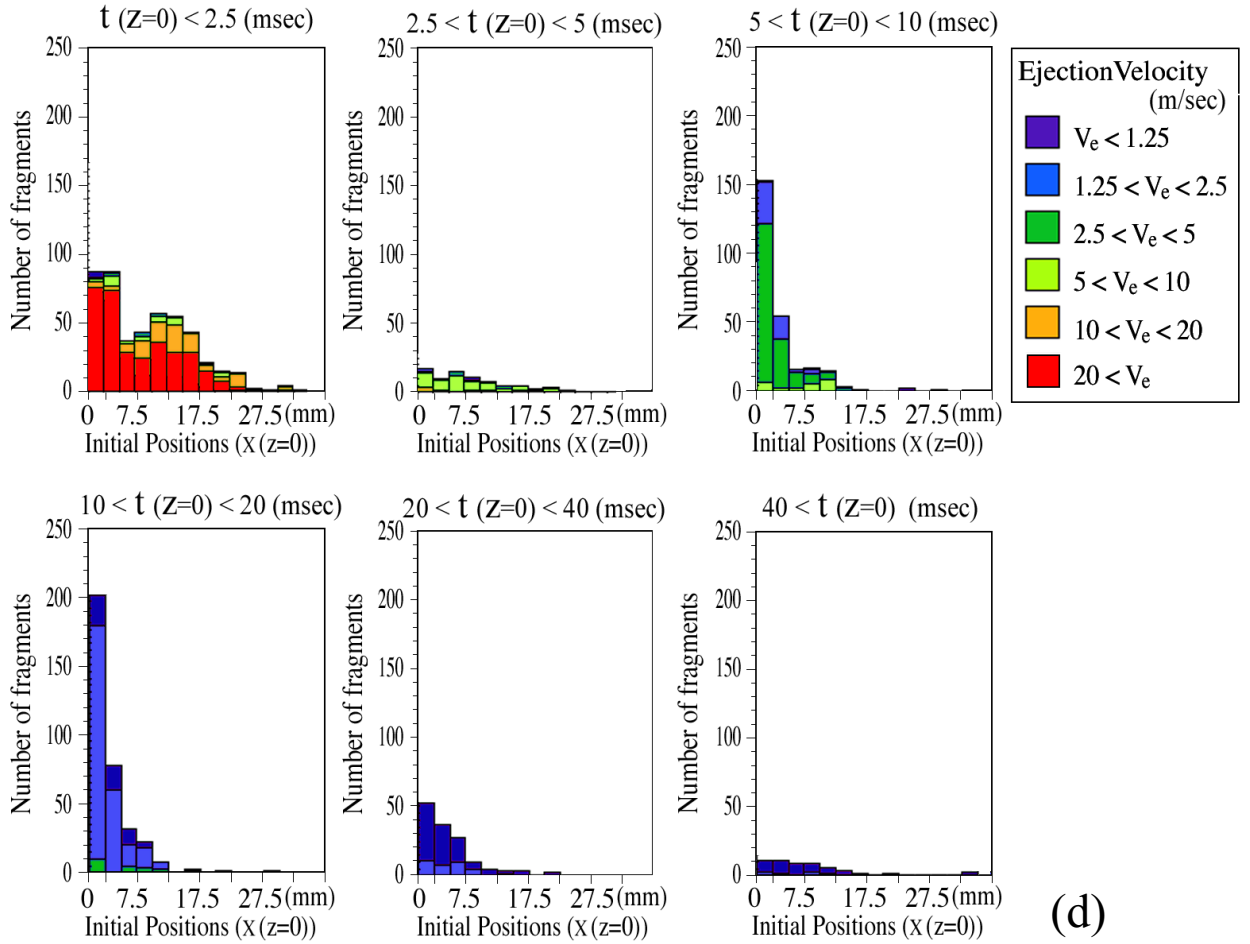


図 3-29. 再構成された垂直衝突において放出される破片の特徴: (a) 破片の放出時刻と放出角度 (b) 破片の放出時刻と初期位置 (c) 放出時刻ビン毎の放出角度の変化 (d) 放出時刻ビン毎の初期位置の変化

Fig. 3-29. Fragments of the reconstructed set for one vertical impact: (a) ejection time and elevation, (b) ejection time and initial positions, (c) histograms of elevation (d) histograms of initial position



(c)



(d)