

### 3. 解析ならびに実験結果

#### 3-1. クレータならびにターゲット断面の概観と変数の定義

##### 3-1-1. クレーターの形の特徴と変数の定義

石膏上に形成されたクレーターは、中央に見られる楕円形の深いくぼみである **pit** 領域と、その周りを取り囲む比較的浅い **spall** 領域の二つに分けられ (Onose et al. 2002)、これは Arakawa (2005)による雪に対する高速度衝突実験において観測されたものと類似する。図. 3-1 に衝突により形成されたクレーターとその断面を示した。これらの二つの領域の間には、帯状に崩れた遷移領域が存在する。石膏に形成されたクレーターでは、玄武岩や、氷におけるクレーターとは異なり、これらの領域の境界が非常に明確に確認できる。直径 1 mm の針金により構成された型取りゲージを用いて、飛翔体の弾道を含みターゲット表面と垂直な平面と、これに直交する平面におけるクレーター断面形状を観察した。

**pit** 領域の内壁は、粉っぽい表面をした、高さ、底辺ともに 3 mm 程度の、もろい角錐に覆われている。これらの角錐の頂点はほぼ衝突点を向いており、これらを結ぶと衝突点を中心とした深くて滑らかな楕円体となる。**pit** 領域の端はターゲット表面に対してほぼ垂直に落ち込んでいる。

図. 3-1 にも見られる様に衝突角度が大きくなると共に、**pit** 領域の形は飛翔体弾道と同じ方向(以後は縦方向と呼ぶ)に伸び、また浅くなる。ターゲットの縦方向の断面では **pit** の長さはほとんど変化せず、浅くなっていく傾向が強く見られる一方で、これと直交する方向(以後は横方向と呼ぶ)の断面では衝突角度が 70 度になってもほぼ相似な形で縮小していくのが見られる。衝突角度が 75 度を超えると **pit** の底に段が見られるようになり始め、衝突角度 85 度のかすめるような衝突では、**pit** の形状は縦方向に引き伸ばされ、更に横方向、深さ方向に段が見られる。このクレーターは長さ 48 mm、幅 12 mm であり、3 つの **pit** から構成されていると考えることもできる。

**spall** 領域には、衝突により放出された **spall** 破片を埋め戻すことができ、ここから比較的大きな **spall** 破片が放出されていることがわかる。底の部分は比較的滑らかであり、ターゲット表面と同程度の硬さを持ち、その表面には石膏ターゲットにもともと存在した丸い形の気泡を確認することができる。各 **spall** 破片が放出されるか否かは確率的であり、したがって、**spall** 領域の幅は垂直衝突のときであっても非常にばらつきが大きい。クレーターの飛翔体弾道に添う方向を下流、その逆を上流、飛翔体弾道に対して垂直方向を側面とすると、**spall** 領域に対する衝突角度の影響はそのそれぞれに対して異なる。たとえば、衝突角度が 45 度の衝突においては下流方向の **spall** 領域の幅が垂直衝突におけるそれよりも大きくなるのに対し、側面方向では変わらず、上流方向では減少する。

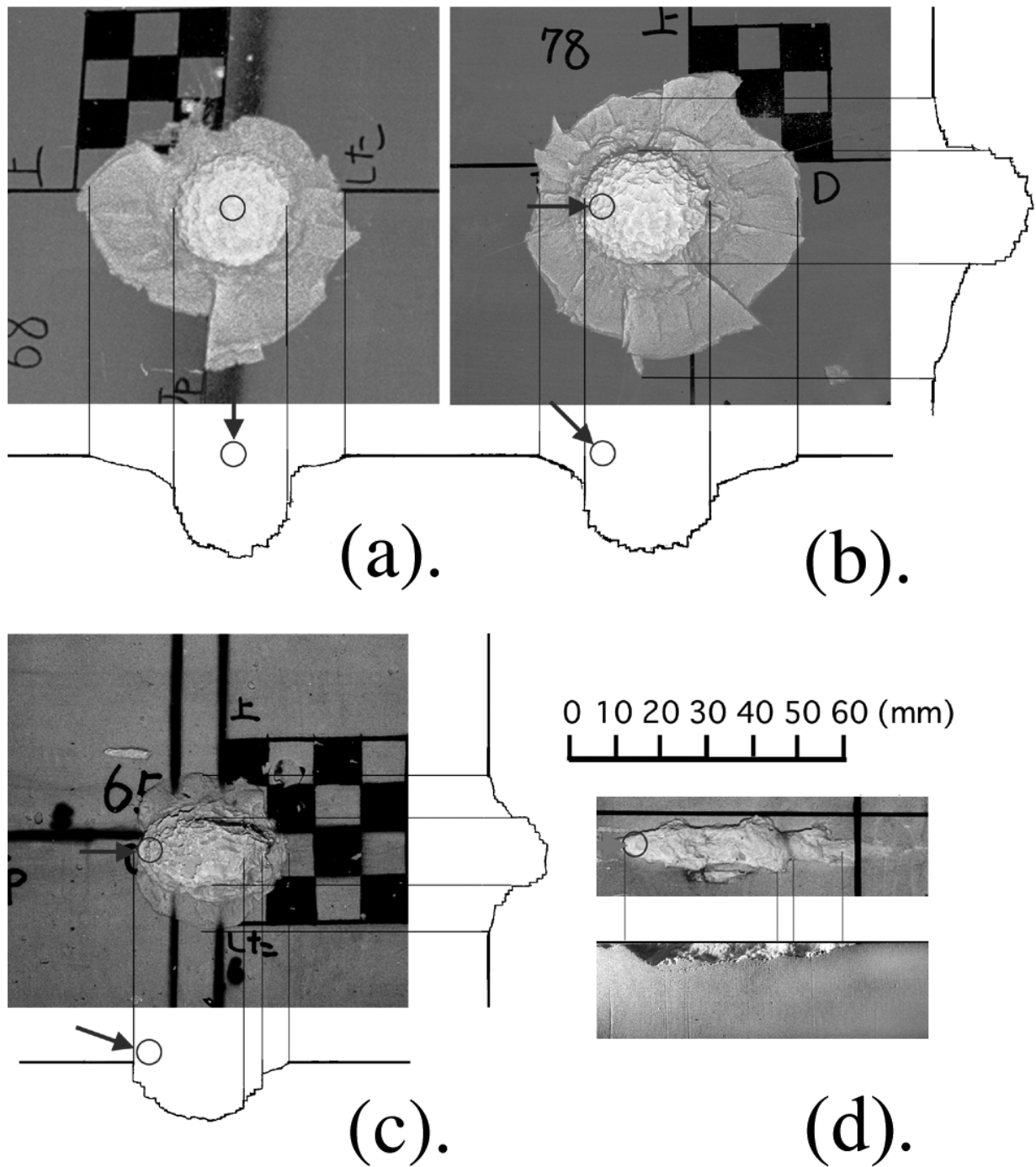


図 3-1. 衝突により石膏ターゲットに形成されたクレーターとその縦横断面図: 断面図は(d)以外 1 mm 幅型取りゲージで計測したもの。飛翔体サイズ、衝突方向、衝突位置は図中に示す。(a) 0 度(垂直衝突) (b) 45 度 (c) 70 度 (d) 85 度。この断面図は飛翔体弾道を含む平面でターゲットを切ったものである。

**Fig. 3-1. Top view of the craters and their cross sectional profiles:** resolution of profile gauge is 1 mm. The size, trajectories, and impact points of projectiles are shown in this figure. (a) 0 degree (normal) (b) 45 degrees (c) 70 degrees (d) 85 degrees, a crater profile was obtained by cutting the target in half.

これらを定量的に評価するために導入された変数を図. 3-2 に示す。古典的に用いられてきたクレーターの縦、横方向の直径  $D_{cd}$ 、 $D_{cc}$ 、深さ  $D_p$  に加えて、pit 領域の縦、横方向の直径  $D_{bd}$ 、 $D_{bc}$ 、上流、下流ならびに横方向の spall 領域の幅  $W_U$ 、 $W_D$ 、 $W_L$  をノギスを用いて計測した。計測された各クレーターサイズの値を Table V に示す。実験番号 0\_21 においては、ターゲットの回収時にこれが二つに割れていることが確認されており厳密に言うとは破壊に属する衝突であるが、動画を見る限りにおいてはその放出の様相はクレーター形成領域のものと大差はなかったため、クレーター形成の結果と同列に示した。

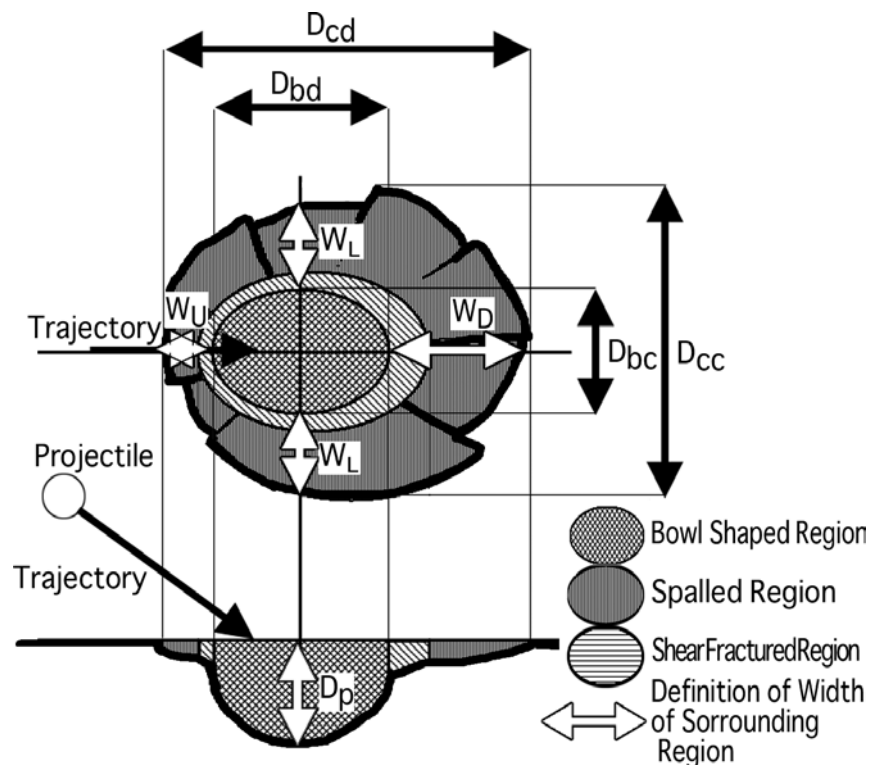


図 3-2. クレータサイズを表す変数の定義

Fig. 3-2. Definitions of crater dimensions

クレーター体積は、直径  $80\mu\text{m}$  のガラスビーズを用いて 4 回ずつ測定を行った。これらの測定間の  $1\sigma$  は  $0.2\text{ ml}$  程度である。ターゲット内部の圧密の程度を調べるために、衝突によって実際に放出された質量を、衝突の前後のターゲット質量の差を測定することにより求めた。ターゲットの質量測定に使用した電子天秤の精度は  $0.1$  から  $1\text{ g}$  である。また、湿度の高い日にはターゲットが大気中の水分を吸着するため、 $4\text{ kg}$  のターゲットで  $1$  から  $2\text{ g}$  ほど質量が増加する。したがって、晴れの日の実験を行い、ターゲットの質量計測は、衝突の直前、直後に行った。

**Table V Crater dimensions**

Run No.	Impact Velocity	Impact Angle	Volume	Ejected Mass	Depth	Crater Diameter		Bowl Diameter		Depth of Equivalent Center	Shattered Diameter	Damaged Depth	Width of the Spalled Region			
	$V_i$ km/sec	$\theta_i$ degree	$V_c$ ml	$M_{eject}$ g	$D_p$ mm	$D_{cd}$ mm	$D_{cc}$ mm	$D_{bd}$ mm	$D_{bc}$ mm	$D_{eq}$ mm	$D_{sd}$ mm	$D_{ps}$ mm	$W_u$ mm	$W_D$ mm	$W_{L1}$ mm	$W_{L2}$ mm
<3D-view with the slit>																
0_01	4.58	0	15.4	8.9	24.49	59.05	68.62	27.72	27.5	NA	NA	NA	15.4	13.3	21.24	13.8
0_02	4.00	0	12.8	10.0	22.2	54.4	59.2	23.1	24.5	NA	NA	NA	27.1	2.9	10.3	19.7
0_03	4.00	0	15.2	10.0	20.9	64.6	57.9	27.9	25.4	NA	NA	NA	10.3	19.4	6.3	8.5
45_01	4.00	45	15.4	9.7	20.4	60.6	61.9	29.0	25.8	NA	NA	NA	10.1	19.5	20.3	13.4
<3D-view with two cameras>																
0_04	4.00	0	16.8	NA	24.0	64.3	65.1	26.2	25.8	NA	NA	NA	19.2	17.3	19.4	15.0
<2D-view with a camera>																
0_05	4.11	0	15.7	11.2	22.64	64.1	68	24.84	25.85	NA	NA	NA	15.4	15	18	19
0_06	4.27	0	17.2	12	24.1	58.6	71.1	26.0	26.5	NA	NA	NA	10.2	20.5	16.2	25.0
0_21	3.84	0	NA	5.51	15.8	47.3	47.6	17.6	17.4	NA	NA	NA	15.0	10.3	8.8	18.9
0_31	1.2	0	2.1	1.4	13.5	23.74	21.12	13.64	13.2	NA	NA	NA	4.32	4.16	5.7	3.8
45_02	4.36	45	13.1	5.23	20.2	52.2	53.8	28.0	24.4	NA	NA	NA	4.4	11.5	18.3	10.4
45_03	4.36	45	12.8	7.82	19.9	61.2	62.6	28.7	24.9	NA	NA	NA	7.1	25.9	15.1	20.8
45_04	3.70	45	8.8	NA	18.4	42.2	42.4	28.4	26.1	NA	NA	NA	4.4	9.2	7.4	10.6
45_21	4.50	45	NA	0.51	7.3	16.0	17.6	9.7	11.3	NA	NA	NA	3.2	2.9	0.9	3.8
60_01	4.31	60	6.3	4.14	15.4	38.8	42.1	26.0	21.3	NA	NA	NA	0.0	6.7	8.2	11.6
70_01	4.00	70	4.3	0.47	12.5	33.6	33.5	28.3	14.9	NA	NA	NA	0.0	6.5	9.1	10.7
70_02	4.37	70	4.2	NA	14.4	39.1	29.5	27.0	19.6	NA	NA	NA	2.9	5.9	4.8	2.8
70_03	4.08	70	NA	NA	16.0	42.1	31.7	30.4	20.5	NA	NA	NA	0.0	8.5	3.3	7.0
<No camera>																
0_07	4.20	0	14.5	NA	24.9	48.5	45.3	26.5	26.1	12.4	43.6	34.2	16.2	12.0	11.9	7.4
0_08	4.00	0	12.5	NA	24.2	43.9	48.9	27.1	27.0	NA	NA	NA	6.2	10.7	18.1	16.8
0_09	4.00	0	NA	NA	23.5	60.7	65.3	27.6	26.5	NA	NA	NA	8.6	18.8	18.7	15.7
0_10	3.5	0	11.1	7	21.59	49.02	56.99	22.7	23.7	NA	NA	NA	14.2	14.69	18.2	5.64
0_11	3.74	0	12.7	9	23.14	55.34	52.66	23.52	26.9	NA	NA	NA	19.83	10.61	3.77	18.91
0_12	1.92	0	3.4	1.8	15.85	24	29.5	17	16	NA	NA	NA	6	10	7.5	5.5
0_13	2.05	0	5.0	3	16.82	39.55	40.7	17	18.5	NA	NA	NA	10.09	9.34	10.26	12.31
0_14	2.11	0	NA	NA	16.95	37.49	38.8	17.87	16.75	NA	NA	NA	9.35	8.72	8.66	9.67
0_15	1	0	1.3	1	11.07	19.63	21.79	12.73	11.92	NA	NA	NA	2.1	5.13	2.21	7.36
0_22	4.00	0	NA	0.95	9.5	23.2	26.7	11.5	11.3	NA	NA	NA	2.1	6.0	7.9	7.7
15_01	3.60	15	13.8	NA	23.8	44.6	59.2	26.0	25.5	15.0	42.8	31.8	8.0	9.4	18.3	13.0
30_01	3.80	30	10.5	NA	21.4	37.5	40.3	25.4	23.8	12.8	52.4	39.0	3.9	8.0	8.8	7.7
45_06	4.20	45	12.4	NA	18.8	55.3	51.4	28.3	23.6	8.8	38.4	27.2	6.9	20.1	9.1	18.7
45_07	4.26	45	16.6	NA	22.4	52.7	53.9	32.6	28.6	NA	NA	NA	5.5	11.7	12.5	8.6
45_08	3.40	45	13.3	8.8	18.3	84.0	63.6	25.1	24.4	NA	NA	NA	17.8	16.6	7.9	27.7
45_09	4.00	45	12.7	5.2	19.9	51.9	57.0	29.7	25.0	NA	NA	NA	7.7	15.6	9.4	10.8
45_10	4.50	45	10.8	4.6	20.1	50.6	43.8	29.6	25.6	NA	NA	NA	4.3	8.6	6.0	8.0
45_11	4.28	45	11.6	6.6	18.8	58.4	51.8	26.0	23.0	NA	NA	NA	9.5	20.7	19.4	7.5
45_12	4.00	45	9.3	3.7	19.0	52.8	43.8	28.2	23.8	NA	NA	NA	8.9	7.3	9.8	9.8
45_13	4.28	45	14.3	9.2	19.6	57.4	59.3	32.6	26.1	NA	NA	NA	8.6	9.2	16.1	12.0
45_14	3.91	45	10.1	6.0	18.5	44.8	46.5	27.5	24.5	NA	NA	NA	4.7	3.9	5.0	12.6
60_02	4.20	60	6.5	NA	14.8	38.4	39.0	29.1	24.9	8.0	37.2	23.0	0.0	4.9	9.7	6.6
70_04	4.00	70	4.3	NA	13.4	48.2	26.8	34.1	19.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
70_05	4.28	70	3.4	1.5	10.5	40.63	40.6	27.79	20.6	NA	NA	NA	0	12.1	11.65	7.4
75_01	4.20	75	2.3	NA	9.2	35.0	21.5	28.0	17.0	2.0	30.8	16.2	0.0	5.3	0.0	5.1
75_02	3.78	75	2.2	2.5	9.15	32	24	32	14.9	NA	NA	NA	0	0	3.6	5.5
80_01	4.20	80	1.1	NA	7.5	43.8	17.0	43.8	12.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
80_02	4.46	80	1.4	1.3	6.12	42.1	14.84	42.1	14	NA	NA	NA	0	0?	0	2
85_01	4.20	85	1.0	NA	3.2	48.0	12.0	48.0	12.0	0.0	44.0	7.6	NA	NA	NA	NA

### 3-1-2. ターゲット断面に見られる特徴と変数の定義

ターゲット内部の圧密ならびに破壊の様子を観察するために、衝突後のターゲットを飛翔体弾道を含み、ターゲット表面と垂直な平面で切断した。断面を 600 番のサンドペーパーで研磨し平らにすると共に、更に穂先の短い筆で研磨し、ターゲット断面に現れた割れ目などの弱い領域を選択的に侵蝕することにより、これらを観察しやすくした。表面上の石膏粉末は真空掃除機により除去した。この様に加工したターゲット断面の例を図. 3-3 (a)に示す。また、ひとつのターゲットに対しては、クレーターが形成された面にスプレーで着色をし、石膏で埋め立てた後に切断した(図. 3-3 (b))。これは、クレーター底部にある、崩れやすい領域が切断時の振動で壊れるのを防ぐためである。

Polansky and Ahrens (1990)と同様に、クレーター断面の様子からこれを 3 つの領域に分割した。pit のすぐ外側にある剪断破壊領域、クレーターの spall 領域の底にあたり spall-crack がある spall 領域、そして、これらの外側に広がる遠方領域であり、ここには数本の radial-crack のみが存在する。

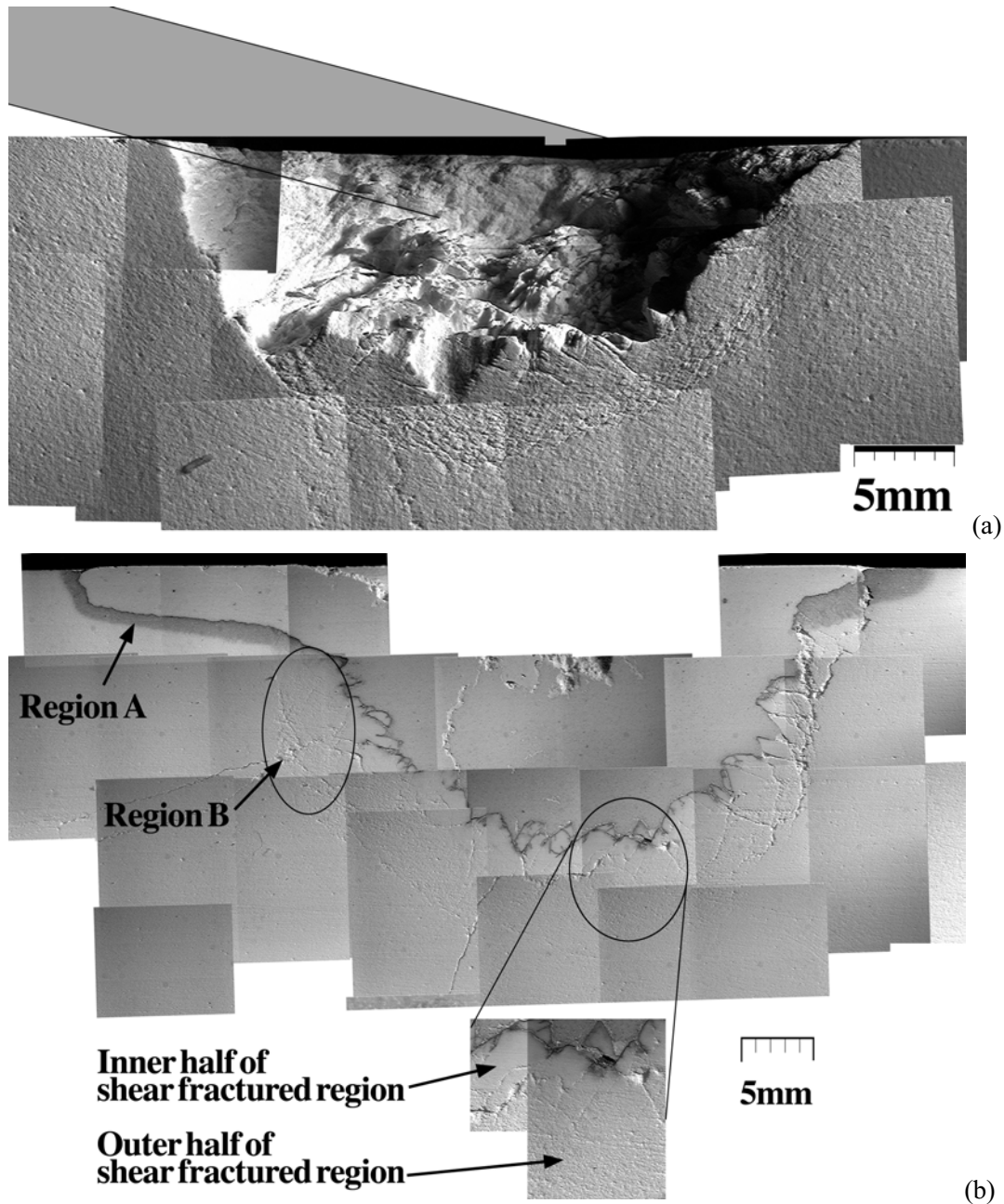
spall 領域ならびに遠方領域の断面には、石膏ターゲットにもともと存在する円形の気泡がみられる。また、これらの領域では図. 3-3 (b)に見られるように、表面に吹き付けられた染料が空隙の中に浸透し、深さ数 mm に達している。spall 領域では、実際に放出された spall よりも深い位置に、ターゲット表面とほぼ平行な 2 本目の spall crack が存在することもある。これらは、潜在的な spall 破片を表していると思われる。spall crack の多くは pit の壁からターゲット表面に続いている。

これらの領域とは対照的に、剪断破壊領域では全ての円形の気泡がつぶされており、特に pit の壁にあたる部分は、吹き付けられた染料の染み込みも見られない。この剪断破壊された領域は更に内側の破壊されかつ圧密された領域と、外側の破壊されただけで目立った圧密のない領域に分けることができる。

内側の圧密された領域では、サンドペーパーをかけた後には、緻密で滑らかな表面が見られる。これを侵蝕すると pit の壁と約 45 度の角度をなし、互いに交差する割れ目が見られ、これは pit の壁に見られる角錐構造へと連続している。この部分を切り出して密度を計測すると  $1300 \pm 50 \text{ kg/m}^3$  であり、これは二水石膏の結晶の密度  $2300 \text{ kg/m}^3$  と較べると低い、圧密される前の石膏ターゲットの密度  $920 \text{ kg/m}^3$  と較べると 1.4 倍である。

剪断破壊された領域の外側にあたる、剪断破壊されただけの領域は非常にもろく、ターゲット断面上では pit 壁に平行な方向を主とする皺の寄った領域として認識される。この部分を切り出して行った密度計測は誤差が大きく、 $500 \text{ kg/m}^3$  から  $1500 \text{ kg/m}^3$  としか測定できなかった。誤差が大きくなった理由は、切り出したサンプルの表面が粗くガラスビーズを用いた体積計測の誤差が大きくなったことと、切り出し中に割れてしまい、十分な大きさの資料を得られなかったことによると考えられる。

ターゲット断面に見られる剪断破壊領域は、内側、外側の両方ともに横および斜めに走るクラックによって特徴付けられる領域である。したがって、なだらかな領域とクラックの多い領



**図 3-3. ターゲット断面:** 飛翔体弾道とターゲット表面の法線を含む平面で切断し、サンドペーパーをかけ、ブラシで磨いた。(a) 75 度の衝突により形成されたクレーター (b) 45 度の衝突により形成されたクレーター。クレーター面に塗料を吹き付け、石膏で埋め立てた後に切断したもの。領域 A は spall 領域を、領域 B は剪断破壊領域を示す。拡大部分には内側にある均質で滑らかな領域と、外側にある気泡がなくクラックの多い領域が示されている。

**Fig. 3-3. Cross section of targets:** each target was cut in a plane including projectile's trajectory and perpendicular to the target's surface. It was filed with sand papers, and edged by a brush. (a) A crater made by an impact at an angle of 75 degrees. (b) A crater made by an impact at an angle of 45 degrees. Dye was sprayed and gypsum was filled in the crater before the cutting. Region A and B represent spalled and shear-fractured region, respectively. A magnified region indicates inner part and outer part of the shear-fractured region.



域をターゲット断面の画像を電子的に処理し、区別することによってもその輪郭を描くことが可能である。断面を撮影した 35 mm の写真フィルムをスキャナーにかけ、影を強調する様に画像補正をしてから、画像処理ソフトの輪郭を検出するフィルターをかけてから、これをややぼかしたのち、90 / 256 の明るさを持つ領域の輪郭を取ったものが図 3-4 中のオレンジに着色した部分である。この領域を円で近似したものと、ターゲット断面に見られる境界をそのまま手で円で近似したものはほぼ同じ値になる。

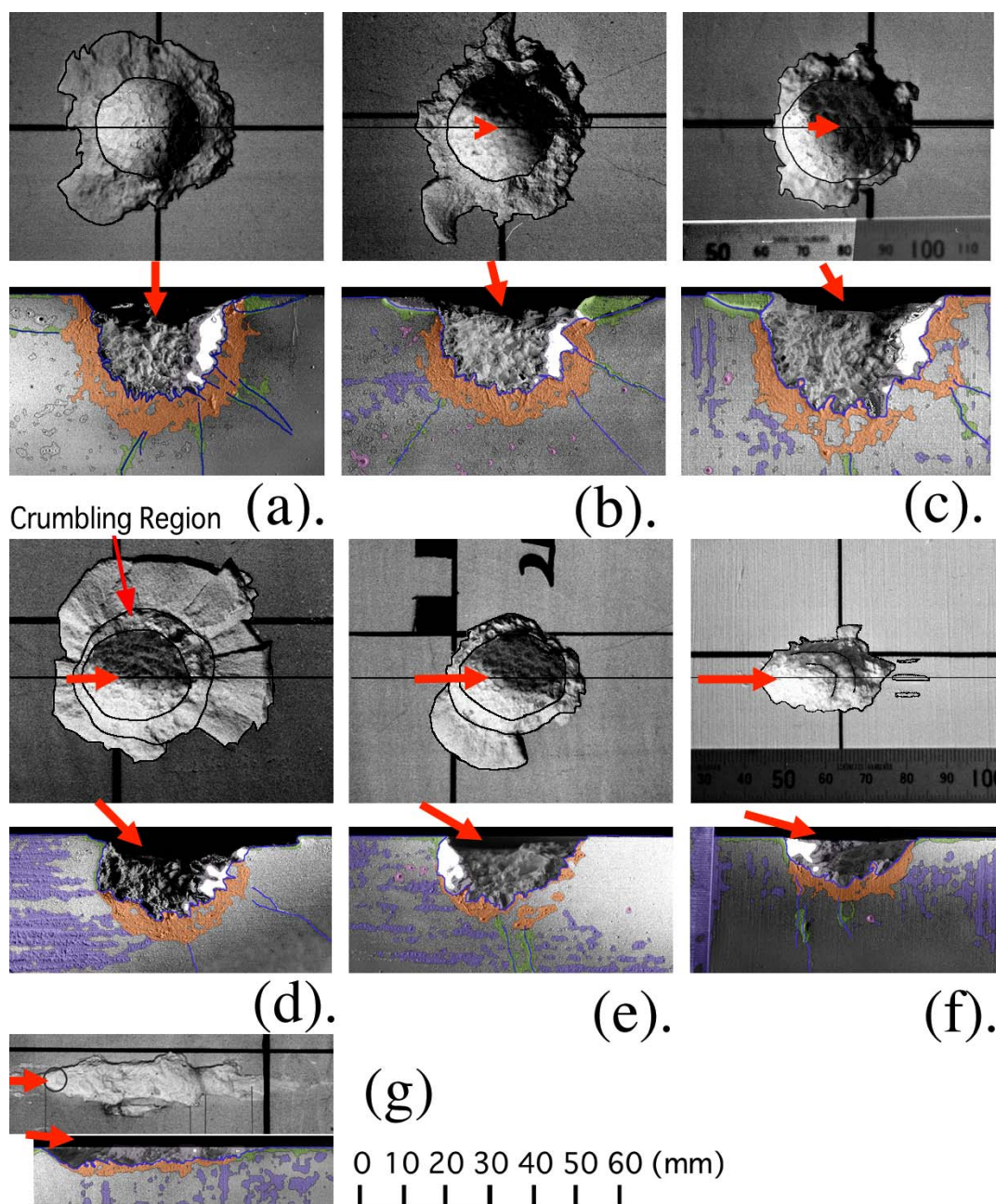


図 3-4. クレーターの上面図と断面図: 各境界、剪断破壊領域は強調されている。衝突角度はおのの、(a) 0 度, (b) 15 度, (c) 30 度, (d) 45 度, (e) 60 度, (f) 75 度, (f) 85 度

Fig. 3-4. Top and cross-sectional views of craters: (a) 0 degree, (b) 15 degrees, (c) 30 degrees, (d) 45 degrees, (e) 60 degrees, (f) 75 degrees, (f) 85 degrees

ターゲット断面に見られる、pit の壁、剪断破壊領域の内側、外側の領域の境界、ならびに遠方領域との境界は、ほぼ同心円をなしており、その中心はターゲット表面からやや埋まった位置にある。そこで、最も判別の容易な剪断破壊領域の外側の境界を円で近似し、その中心の深さを本研究における爆破中心の深さ  $D_{eq}$  と定義した。剪断破壊された領域の内側、外側の領域の深さも同時に計測し、これを  $D_{pc}$ 、 $D_{ps}$  とおいた(図. 3-5)。測定した値はクレーターサイズと共に Table V に記す。

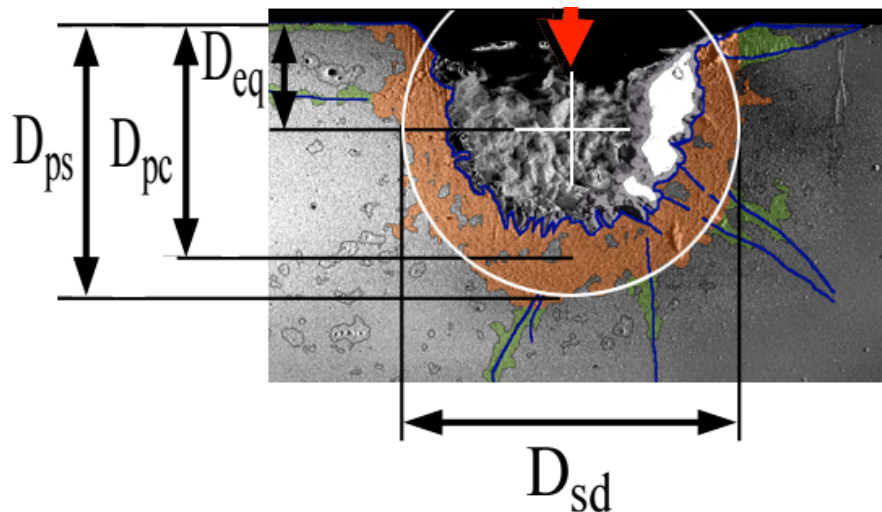


図 3-5. 衝突によりダメージを受けた領域の定義: 垂直衝突により形成されたクレーターの一例。白の円は剪断破壊領域の外側を近似したものである。

**Fig. 3-5. Definition of damaged regions:** this crater was made by a vertical impact. A white circle represents an outline of shear-fractured region.



### 3-2. クレーターサイズのスケール則

本研究においてはクレーターサイズを表す変数として、クレーターの体積、深さ、縦方向、横方向の直径、pit 領域の縦方向、横方向の直径、上流、下流、側面方向での spall 幅、ターゲット断面にて観測される、剪断破壊された領域の半径、圧密を受けた領域の半径ならびにこれらの中心である爆破中心、ならびにこれらの比を考えた。これにたいして、衝突条件側の変数としては、飛翔体衝突速度、飛翔体質量、衝突角度を変えて実験を行った。Gault et al. (1973)は、クレーターサイズ  $D_{crater}$  を、飛翔体質量  $m_p$ 、衝突速度  $v_i$ 、衝突角度  $\theta_i$  の関数として以下のようにした。

$$D_{crater} \propto v_i^{a_{dimensions}} m_p^{b_{dimensions}} \cos^{c_{dimensions}} \theta_i \quad (3-2-1)$$

ただし、 $a_{dimensions}$ 、 $b_{dimensions}$ 、 $c_{dimensions}$  はクレーターサイズ  $D_{crater}$  の衝突速度、飛翔体質量、衝突速度への依存性を表すべき係数である。

本研究で使用した二段式軽ガス銃では、衝突速度のばらつきが 10 %程度存在し、衝突速度 4.2 km/sec を狙った実験における実際の衝突速度は 3.4 から 4.6 km/sec となる。これに対して、飛翔体質量ならびにその衝突角度は、直径 7 mm ナイロン球の垂直衝突に関しては、おのおの 0.3 %、3 %のばらつきしか存在しない。したがって、本研究においては、クレーターのサイズスケール則を求めるにあたり、まず衝突速度に関するスケール則を求め、これを用いてデータの規格化を行った後に、飛翔体質量依存性ならびに衝突角度依存性を求めるものとする。

#### 3-2-1. 衝突速度依存性

直径 7 mm ナイロン球を用いて、衝突速度を 1.2 から 4.6 km/sec まで変えて行った垂直衝突におけるクレーターサイズを図. 3-6 に示す。横軸が飛翔体運動エネルギーを、縦軸が各クレーターサイズを表す。四角はデータ点を、太い線が曲線近似で求めたもの、点線がその標準誤差を示す。圧密された質量は、クレーター体積に石膏の密度を掛けて求めた総排出質量と、衝突前後のターゲットの重さの違いにより測定されるターゲットの外側に放出された質量との差である。

クレーターの体積のばらつきが最も大きく、これにクレーター直径、spall 幅が続く。クレーター深さ、pit の直径のばらつきが最も少なく、その標準誤差はデータ点のサイズより小さい。圧密された質量の衝突速度依存性も、クレーター深さほどではないがよい相関をなしている。各直線の傾きについては Table VI に示す。

衝突速度を 1.2 から 4.6 km/sec まで変化させたときのクレーターサイズの衝突速度依存性を表すべき係数と、4.2 km/sec 付近でのそれを比較した。4.2 km/sec 付近のデータの具体的な衝突速度は 3.5 から 4.6 km/sec であり、速度幅が小さいので、体積、spall 領域の幅、圧密量などのばらつきの大きな変数に関するべき係数の比較は困難であるが、深さ、pit 直径、クレーター直径などのばらつきの少ない変数に関しては、衝突速度が 1.2 から 4.6 km/sec のものに対するべき係数と、3.5 から 4.6 km/sec のものに対するそれは、ターゲットの音速 2.2 km/sec を挟んでいるにも

かかわらず調和的である(Table VII)。

**Table VI Power law indices of crater dimensions**

	Impact velocity dependence			Projectiles mass dependence			Impact angle dependence		
	a <sub>dimensions</sub>		R	b <sub>dimensions</sub>		R	c <sub>dimensions</sub>		R
V <sub>c</sub>	0.774 ±	0.128	0.973				1.288 ±	0.198	0.979
D <sub>p</sub>	0.242 ±	0.014	0.989	0.408 ±	0.047	0.981	0.666 ±	0.056	0.988
D <sub>cd</sub>	0.405 ±	0.045	0.971	0.509 ±	0.109	0.935	0.476 ±	0.101	0.94
D <sub>cc</sub>							0.666 ±	0.064	0.988
D <sub>bd</sub>	0.28 ±	0.009	0.997	0.565 ±	0.111	0.932	-0.07 ±	0.032	0.706
D <sub>bc</sub>							0.282 ±	0.054	0.929
W <sub>U</sub>	0.441 ±	0.065	0.955	0.437 ±	0.114	0.919	2.341 ±	0.179	0.999
W <sub>D</sub>							0.995 ±	0.309	0.906
W <sub>L</sub>							0.965 ±	0.086	0.991
V <sub>pit</sub>	0.786 ±	0.059	0.992				1.038 ±	0.153	0.971
V <sub>spall</sub>	0.813 ±	0.397	0.848				1.629 ±	0.688	0.918
M <sub>compacted</sub>	0.776 ±	0.177	0.951				1.216 ±	0.655	0.824
D <sub>cd</sub> /D <sub>cc</sub>	1.111 ±	0.719	0.606	0.075 ±	0.061	0.842	0.186 ±	0.098	0.747
D <sub>bd</sub> /D <sub>bc</sub>							-0.08 ±	0.036	0.782
D <sub>cd</sub> /D <sub>cc</sub>	-0.04 ±	0.007	0.888	0.146 ±	0.066	1	0.723 ±	0.053	0.991
D <sub>bd</sub> /D <sub>bc</sub>							0.385 ±	0.065	0.942
D <sub>p</sub> /D <sub>cc</sub>							-0.32 ±	0.13	0.816
D <sub>p</sub> /D <sub>bc</sub>							-0.43 ±	0.082	0.912
D <sub>eq</sub>							1.38		0.94
D <sub>sd</sub>							0.30		0.73
D <sub>ps</sub>							0.58		0.91

**Table VII Impact velocity dependence of 3 crater dimensions in 2 different impact velocity ranges**

	0deg_all			0deg_4km/sec		
			R			R
V <sub>c</sub>	0.77 ±	0.13	0.97	0.34 ±	0.37	0.48
D <sub>p</sub>	0.24 ±	0.01	0.99	0.14 ±	0.11	0.53
D <sub>cd</sub>	0.41 ±	0.05	0.97	0.31 ±	0.24	0.61
D <sub>bd</sub>	0.28 ±	0.01	1	0.22 ±	0.06	0.88
W	0.44 ±	0.06	0.96	0.31 ±	0.4	0.43
M <sub>compacted</sub>	0.78 ±	0.18	0.95	1.84 ±	0.31	0.97

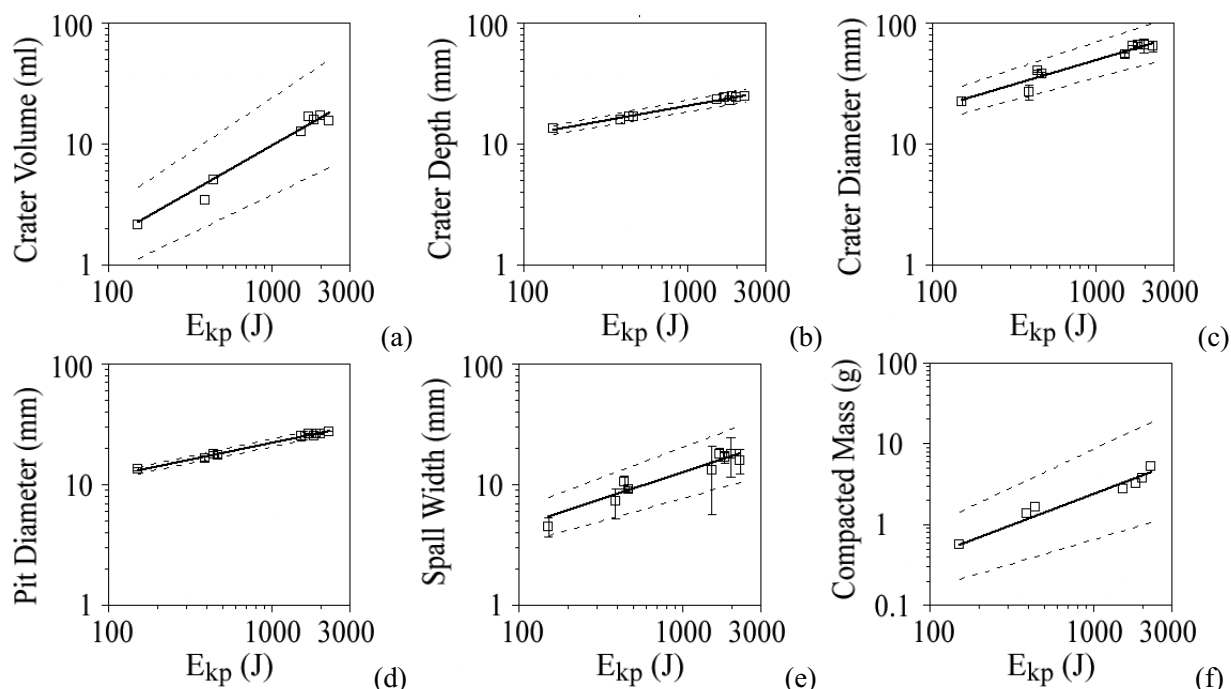


図 3-6. クレーターサイズの衝突速度依存性: 直径 7 mm ナイロン球を飛翔体として用いた垂直実験の結果のみを使用。横軸は飛翔体運動エネルギー。実線は近似曲線、点線はその標準誤差。(a) 体積 (b) 深さ (c) 直径 (d) pit 直径 (e) spall 領域の幅 (f) 圧密された質量

**Fig. 3-6. Impact velocity dependence of crater dimensions:** All data points represent ones obtained by vertical impact experiments employing nylon projectiles of 7 mm in diameter. Horizontal axes, thick lines, and dotted lines represent kinetic energy of projectiles, curve fits, and standard errors, respectively. (a) crater volume, (b) crater depth, (c) crater diameter, (d) pit diameter, (e) width of spalled region, (f) compacted mass

衝突速度の変化に伴う、クレーター形状の変化を評価するために、クレーターの深さ/クレーター直径、クレーター深さ/pit 直径の衝突速度依存性を求めた(図. 3-7)。spall 幅の衝突速度依存性 0.44 はクレーター深さの衝突角度依存性 0.24 と較べて大きいので、衝突速度が遅くなると、spall の幅がクレーター深さと較べて速やかな減少を示す。そこで、クレーター全体で見ると衝突速度の減少にしたがいやや深くなる傾向が見られるが、pit 部分の深さ/直径比は変化が見られない。したがって、石膏にたいするナイロン球の衝突において、衝突速度が 1.2 から 4.6 km/sec の範囲ならば、形成される pit 領域の形状に変化は認められない。といえる。

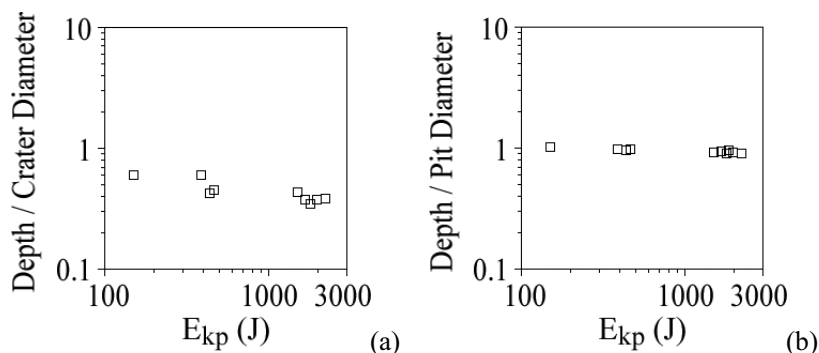


図 3-7. クレーターの深さ-直径比: 衝突条件は図 3-6 に同じ。(a) 深さ-クレーター直径比、(b) 深さ-pit 直径比

**Fig. 3-7. Depth-diameter rate of craters and pits:** Impact conditions are the same as those in Fig. 3-6. (a) crater depth / crater diameter, (b) crater depth / pit diameter

### 3-2-2. 飛翔体質量依存性

次に、3-2-1 で求められたクレーターサイズの衝突速度依存性に関するスケール則により衝突速度 4.2 km/sec で規格化したデータを用いて、垂直衝突におけるクレーターサイズの飛翔体質量依存性を求める。実際に実験を行った衝突速度は 3.7 から 4.6 km/sec である。飛翔体は直径が 3 mm、7 mm のナイロン球と 7 x 7 x 3 mm のポリカーボネート製のサボであり、いずれも垂直衝突である(図 3-8)。曲線近似により求められたべき係数を Table VI に示す。

飛翔体質量が 1/2 倍程度変化しても、クレーターの深さ直径比に変化は見られなかった。したがって、衝突速度が 4km/sec 付近でほぼ等しければ、飛翔体質量が 0.02 から 0.2g の範囲において変化してもクレーター形状に変化は認められないといえる。

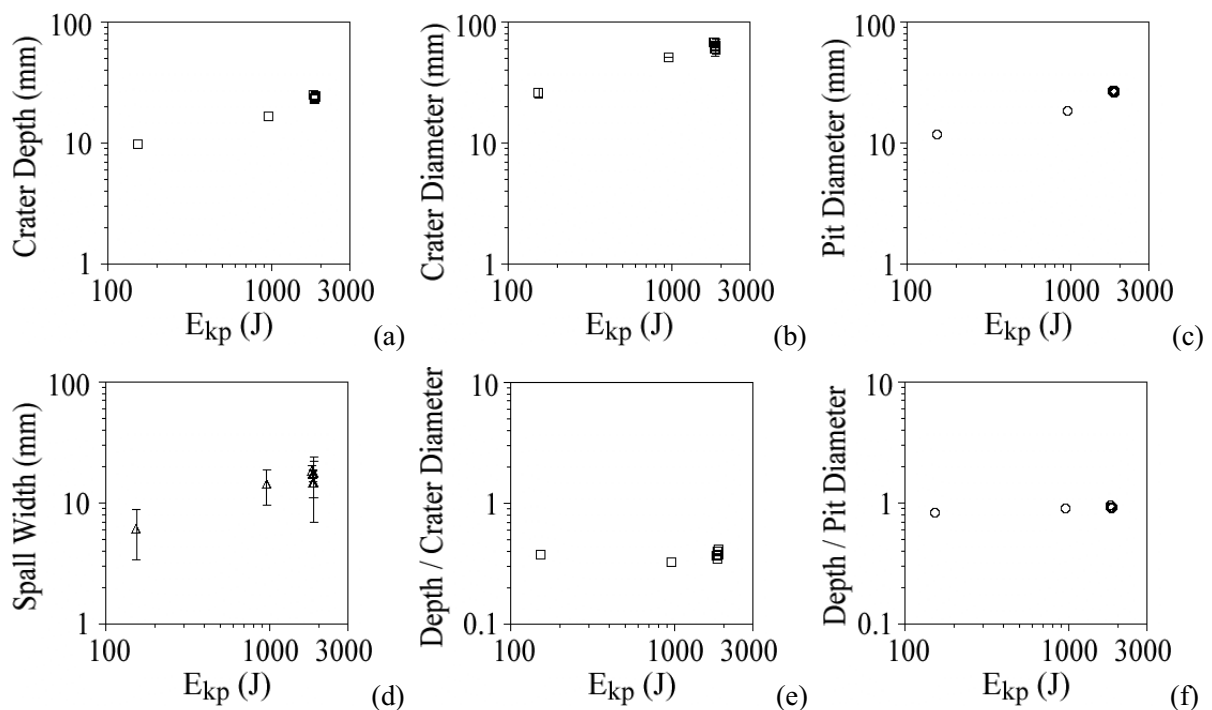


図 3-8. クレーターサイズの飛翔体質量依存性: ナイロンおよびポリカーボネート飛翔体の垂直衝突実験結果を、3-2-1 のスケール則を用いて衝突速度 4.2 km/sec に規格化したもの。(a) 深さ (b) 直径 (c) pit 直径 (d) spall 領域の幅 (e) クレーター深さ-クレーター直径比 (f) クレーター深さ-pit 直径比

**Fig. 3-8. Projectile's mass dependence of crater dimensions:** All data points are obtained by impacts of nylon and polycarbonate projectiles and normalized by scaling law obtained in section 3-2-1. (a) crater depth, (b) crater diameter, (c) pit diameter, (d) width of spalled region, (e) crater depth / crater diameter, (f) crater depth / pit diameter

### 3-2-3. 衝突角度依存性

最後に、3-2-2 と同様に衝突速度に関する規格化を行ったデータをもとに、クレーターサイズの衝突角度依存性を求める。実際に使用したデータは、直径 7 mm のナイロン球を飛翔体とし、衝突速度 3.5 から 4.6 km/sec で行われたもののみを使用した。図 3-9 には横軸に衝突角度のコサインを、縦軸にクレーターサイズをとった。クレーターサイズの衝突角度依存性の表現に関し

では、Gault et al. (1973)ならびにこれに続くもの以外の先行研究では必ずしも衝突角度のコサインのべき乗で表してはいない。Grey et al. (2002)では一部を線形近似しており、また Burchell and Mackay (1998)では全体をひとつのべきであらわすことは難しいと述べている。本研究における石膏に対する高速度斜め衝突により形成されたクレーターにおいても、衝突角度が 80 度を超えると pit 部分の引き伸ばしが激しくなり、これをひとつの楕円体で近似するのが困難になる、衝突角度 45 度で形成されたクレーターの体積がやや大きいほうにずれる等の現象が見られており、実験を行った衝突角度 0 度(垂直衝突)から 85 度までを一つのべきで表すことには慎重にならざるを得ない。したがって、本研究においてはクレーターに複数の pit が含まれはじめ、かつ spall 破片がほとんど見られなくなる 80 度以降を曲線近似からはずす。45 度近辺に見られる弱い曲がりに関しては、衝突クレーター形成時に発生する空隙の圧密にかかる時間が関連している可能性があるが、本研究においてはこれを考慮せずに曲線近似を行った。衝突角度が 0 度から 75 度の範囲で曲線近似して求めた、各クレーターサイズの衝突角度依存性を表現するべき係数の値を Table VI に載せた。また、衝突角度により試行数に大きな差があるので、各衝突角度後とにクレーターサイズの平均値を求め、これに対して曲線近似を行った。

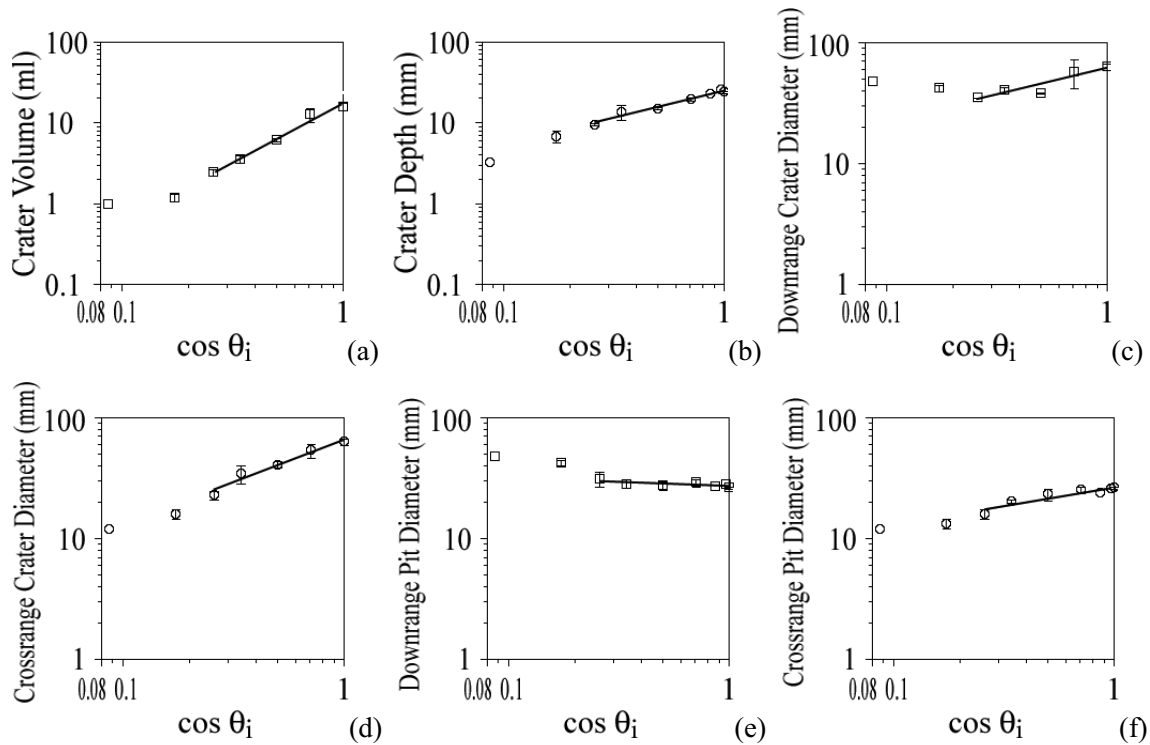


図 3-9. クレーターサイズの衝突角度依存性: (a) 体積 (b) 深さ (c) 縦方向のクレーター直径 (d) 横方向のクレーター直径 (e) 縦方向の pit 直径 (f) 横方向の pit 直径

Fig. 3-9. Impact angle dependence of crater dimensions: (a) crater volume, (b) crater depth, (c) downrange diameter of crater, (d) cross range diameter of crater, (e) downrange diameter of pit, (f) cross range diameter of pit

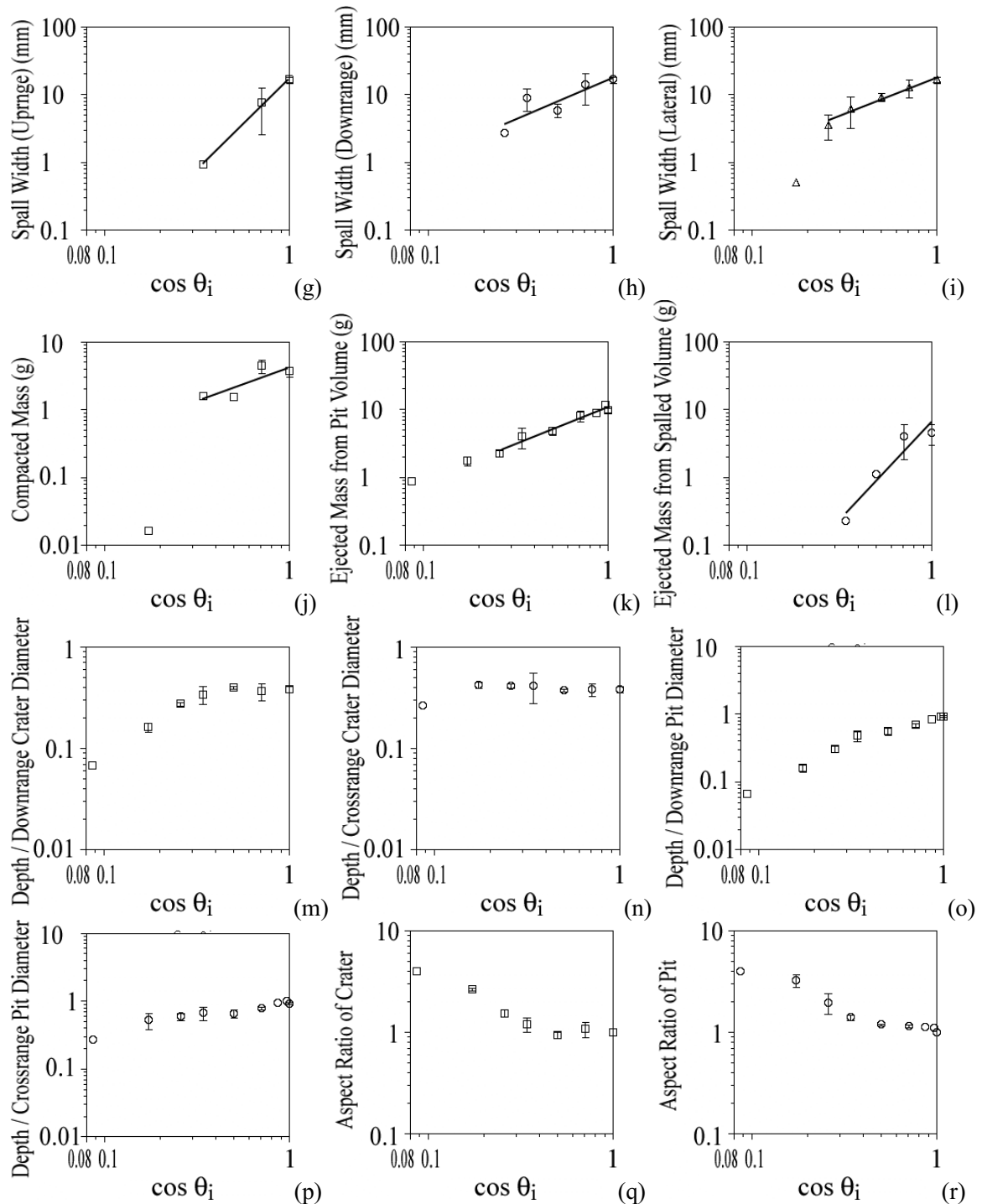


図 3-9. クレーターサイズの衝突角度依存性: (g) 上流方向の spall 幅 (h) 下流方向の spall 幅 (i) 側面方向の spall 幅 (j) 圧密された分の質量 (k) pit 体積から計算された放出質量 (l) spall 体積から計算された放出質量 (m) 深さ-縦方向のクレーター直径 (n) 深さ-横方向のクレーター直径 (o) 深さ-縦方向の pit 直径 (p) 深さ-横方向の pit 直径 (q) クレーターの縦横比 (r) pit 部分の縦横比

**Fig. 3-9. Impact angle dependence of crater dimensions:** (g) uprange spall, (h) downrange spall, (i) width of spalled region in lateral directions, (j) compacted mass, (k) Ejecta mass estimated from dimensions of the pit regions. (l) Ejecta mass estimated from crater's volume and dimensions of the pit regions, (m) crater depth and downrange diameter of crater, (n) crater depth and cross range diameter of crater, (o) crater depth and downrange diameter of pit, (p) crater depth and cross range diameter of pit, (q) aspect ratio of crater, (r) aspect ratio of pit



クレーター体積、深さ、横径に関しては、実験を行った全ての衝突角度領域において、衝突角度が増加するに従い単調減少することが確認された。クレーター深さの衝突角度依存性のべき係数 0.67 は、クレーター体積のべき係数 1.29 の 1/3 倍よりも大きい。これは衝突角度が大きくなるにつれ、クレーターの形が浅くなることを表している。一方で、クレーターの縦径は一度減少した後に衝突角度 70 度以上で増加に転じている。これは、pit 部分の長さが衝突角度 75 度まではほぼ一定でその後単調増加していることと、上流方向の spall 領域の幅が衝突角度の増加に従い激減すること、下流方向の spall 領域は上流方向にやや遅れて減少を開始し、双方とも衝突角度 75 度以上ではなくなってしまうこととなどが複雑に関連しているものと思われる。側面方向の spall 領域の幅は最も衝突角度が大きな領域まで存在する。圧密度では、衝突角度が 45 度の衝突のものがやや大きい値を示しているほかは、衝突角度にしたがって単調減少を示している。ただし、衝突角度が大きくなると、クレーター体積自体が減少するので、相対的にはかりの 1 デジット誤差が大きく出てしまい、圧密度の評価は困難になる。

pit 領域から放出された質量は、この領域を pit 半径と同じ半径を持つ半楕円体と、この半楕円体の上端とターゲット表面を結ぶ楕円柱で近似された pit 部分の体積に、ターゲット密度を掛けて求めたものである。体積計算の元になったクレーター深さ、pit 半径が衝突角度のコサインのよい関数であるため、pit 体積から求められたこの領域からの放出質量は 85 度という急な角度の衝突にいたるまで、衝突角度のコサインのよい関数となっている。

次にクレーター形状をあらわす変数について述べる。クレーター深さをクレーターの縦方向の直径で割ったものは、衝突角度が 70 度を超えるとクレーター直径が急激に大きくなるのに従い、急激な減少を見せている。一方でクレーター深さを横方向の直径で割ったものには、ほとんど変化が見られなかった。クレーター深さを pit の縦方向の直径で割ったもの、横方向の直径で割ったものは、それぞれ衝突角度に従い減少しているが、その変化率は pit の縦方向の直径で割ったもののほうが大きくなっている。

クレーターならびに pit 領域の縦横比に関しては、クレーター全体の縦横比は衝突角度が 70 度を超えるまで増加しないのに対して、pit 領域の縦横比は衝突角度が 45 度の時点で縦長の形状を示している。これは、spall 領域の幅の衝突角度依存性が、上流、下流、側面の各方向により異なり、これらが衝突角度 45 度以上で pit 領域の縦横比に現れる衝突角度の効果を、衝突角度が 70 度に至るまで相殺しているためと考えられる。

ターゲット断面から測定される変数にたいする衝突角度の効果を図. 3-10 に示す。剪断破壊された領域の深さの衝突角度依存性 0.58 は、クレーター深さのそれ 0.67 に近い値になっている。一方で、剪断破壊された領域から推測される爆破中心の位置は、衝突角度が大きくなるにつれ急速に浅くなる。これは、斜め衝突においては、飛翔体運動エネルギーのターゲットへの伝達が浅い領域に限られていることを示唆する。

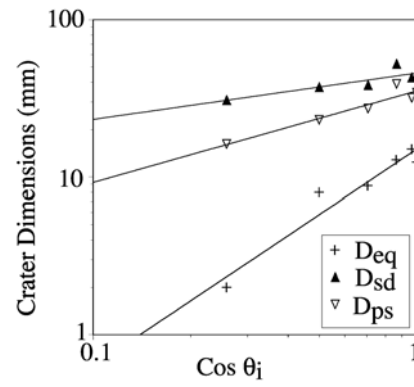


図 3-10. ターゲット断面に見られる剪断破壊された領域のサイズの衝突角度依存性

Fig. 3-10. Impact angle dependence of shear-fractured region observed on the cross-sectioned target

### 3-3. 回収された破片

各衝突クレーター形成実験の後、発生した破片をターゲットチャンバーならびにこれに接続されているダンパー用チャンバーより回収し、解析を行った。図. 3-11 に衝突速度 4 km/sec の垂直衝突において放出された破片の一例を示す。衝突により放出された破片の大きさは、2 cm 程度のものから、数  $\mu\text{m}$  のものまで存在する。この数  $\mu\text{m}$  という大きさは図. 2-2 で示した石膏ターゲットを構成する結晶よりも小さく、衝突によって石膏の結晶が砕かれた可能性を示唆している。

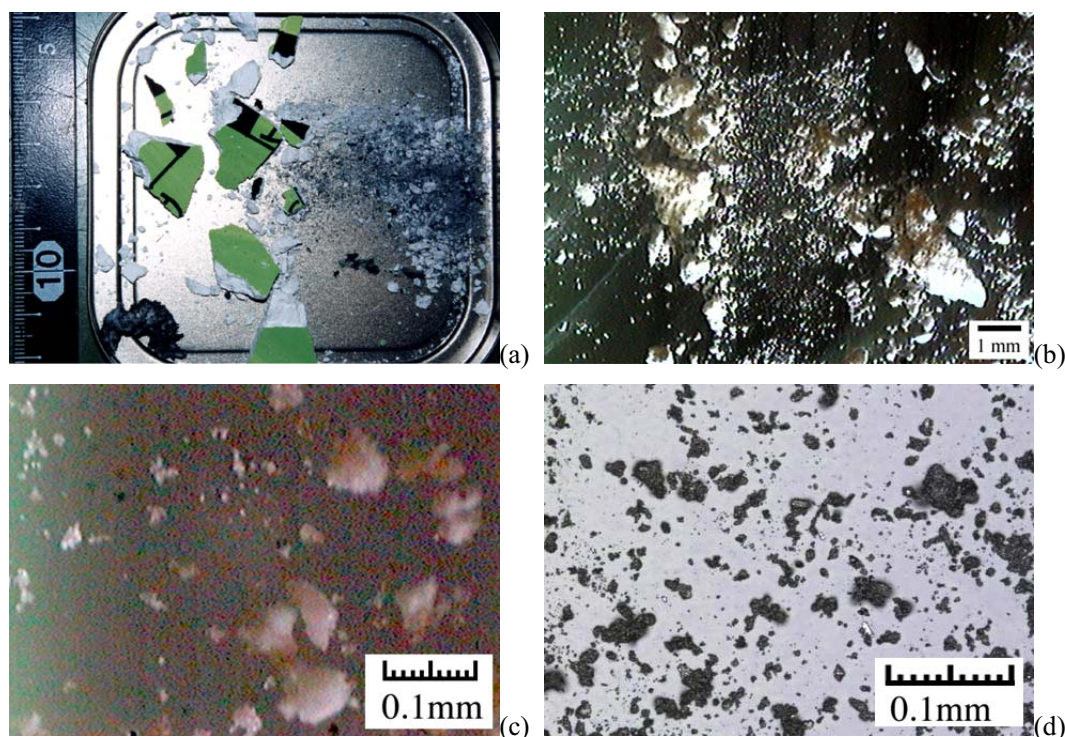


図 3-11. 実験番号 0\_06 で回収された破片の一例: 倍率を変えて撮影した。

Fig. 3-11. Sample of fragments made by an experimental run No. 0\_06: Pictures are taken with varying magnifications.

回収された破片のうち 4 mm 以上のものに対しては、番号をつけ、長軸、短軸、中間軸の長さ、そして質量を測定した。さらに、はかりの限界である、質量 0.02 g 以上の破片に関しては、その質量を個別に計測した。細かい破片に関しては、ふるいを用いて分級した。

これらの破片は、Melosh (1989)などの先行研究でも述べられている様に、その特徴から 2 群に分けることができる。ひとつは spall 破片であり、これらは、衝突により形成された衝撃波、あるいは強力な圧縮波がターゲット表面で希薄波として反射する際に、ターゲットの表面に近い部分が張力破壊され、放出されたものである。これらの破片はもとのターゲットの表面を含み、板状である。本実験により形成されたものには、ターゲットにもともと含まれていた球形の気泡がそのまま存在していることが確認されている。もう一方は、Grady-Kipp 破片あるいは剪断破壊破片と呼ばれるものであり、衝突点近傍の衝撃波あるいは強力な圧縮波の最大応力が

ターゲットの一軸圧縮破壊強度を超える領域で形成されたものである。本実験において回収されたこれらの破片は、非常にもろく、粉っぽい表面をしており、フェルトペンを用いてもその表面上に書き込みを行うことが困難である。また、これらの破片のうち比較的大きな物の表面には、剪断破壊によると考えられる互いに斜行するクラックが認められる。これらの特徴は、3-1-1 に述べたクレーターの *pit* 部分の内壁に見られるものと一致している。これらの破片表面に見られる特徴をもとに、数 mm 以上の大きさの破片を分類し、おのおのの詳細を以下に述べる。

### 3-3-1. spall 破片

本研究において回収された 4 mm 以上の大きさを持つ破片は全て *spall* 破片に属するものである。図. 3-12 に、衝突速度が 4 km/sec の一回の垂直衝突により放出された破片の中から、破片の 3 軸の長さをノギスで計測することのできる程度に大きいもののみを示した。これらの破片に関しては可能な限りクレーター内に埋め戻しを行った(図. 3-13)。これは、破片の初期位置と破片放出メカニズムを確認するうえで重要なばかりでなく、高速ビデオカメラ上で確認された破片と回収された破片の対応をつけるうえでも重要な役割を果たす。図. 3-13 で、埋め戻されたクレーターの右側ならびに下側に付加されているデータ点と誤差棒は、3-4 で述べられる高速ビデオカメラの画像を用いて得られた各破片の重心の初期位置とその誤差である。*spall* 破片の裏面とクレーターの *spall* 領域の内壁は双方とも滑らかで、もとのターゲットの強度や球形の気泡を保持している。また、各 *spall* 破片とターゲット上に残された痕とは、4 mm 以上の破片に関しては明確に 1 対 1 対応がつけられる。垂直衝突では、4 mm 以上の破片の質量の合計は、クレーター体積から求められた総破片質量の 20 %から 40 %に達する。一方で、クレーター中央部にある深い *pit* 部分に直接対応付けて埋め戻せる破片は見られなかった。

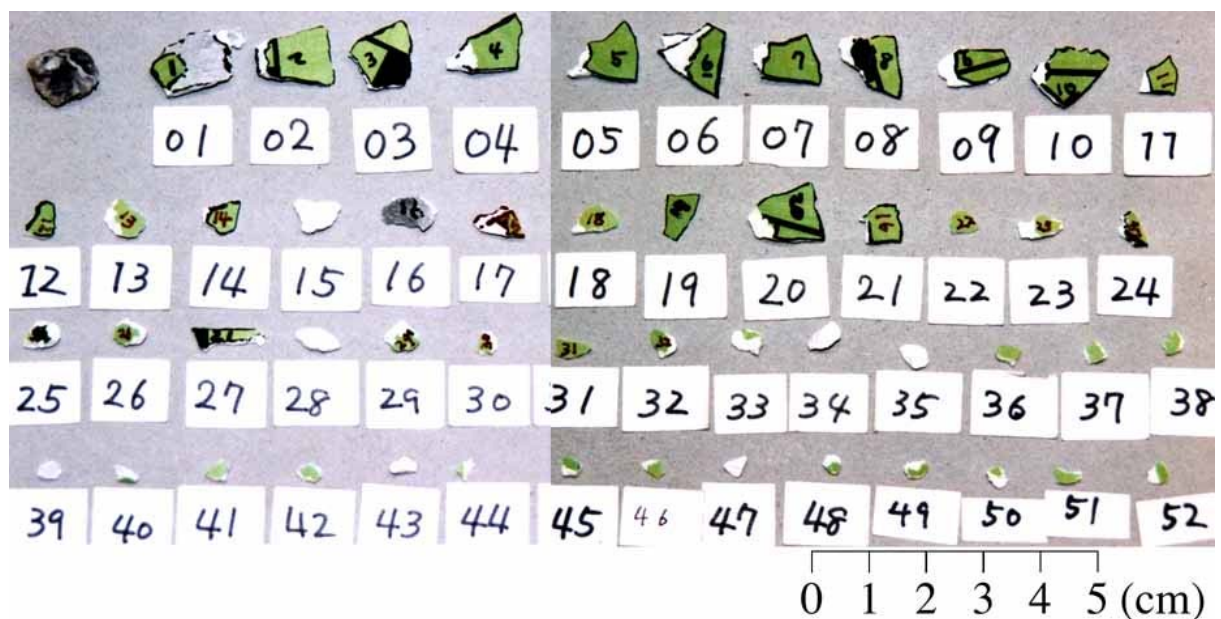


図 3-12. 実験番号 0\_04 で回収された破片のうち 4 mm 以上のもの

Fig. 3-12. Fragments larger than 4 mm obtained by an vertical impact (run No. 0\_04).



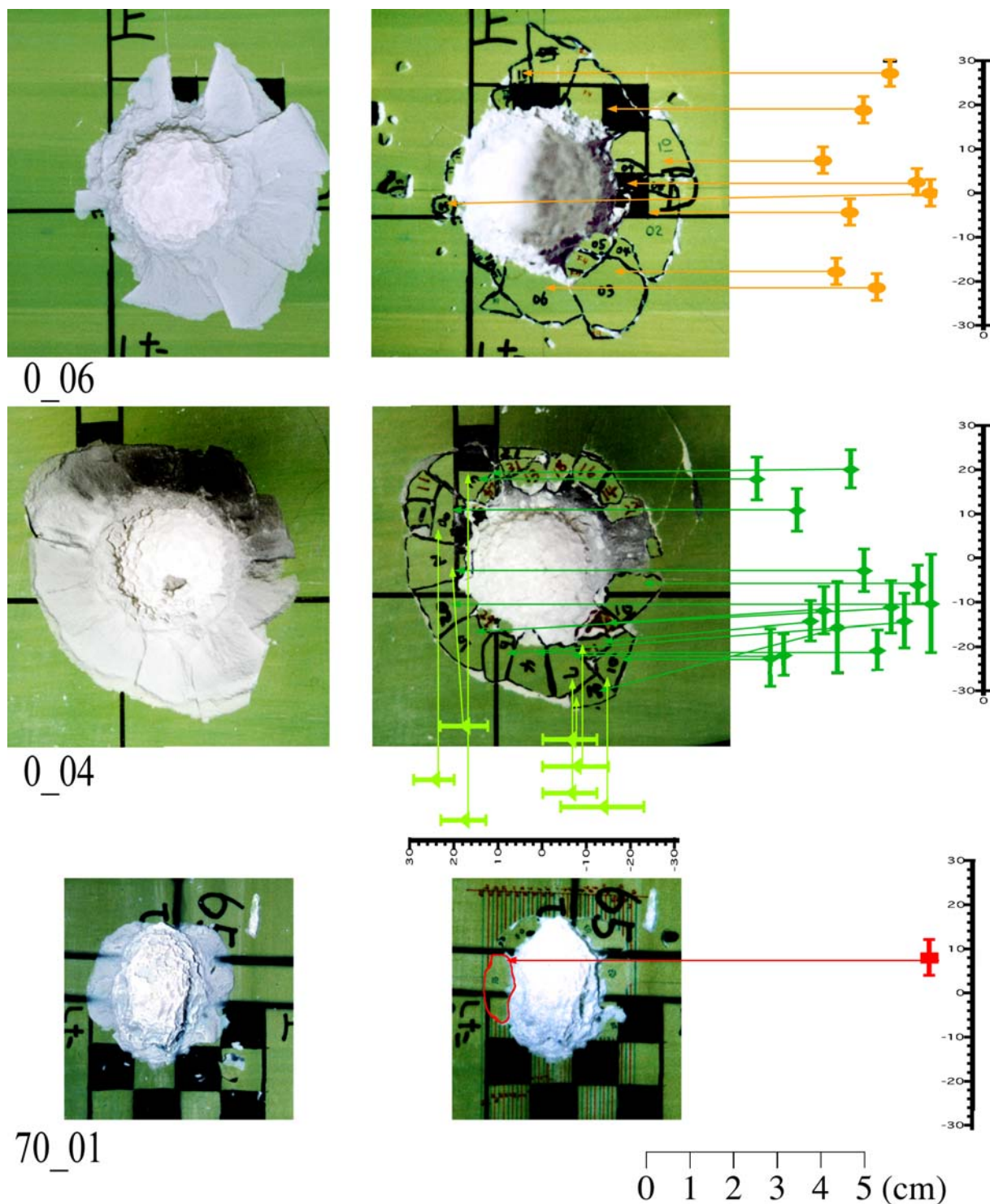


図 3-13. 衝突直後のクレーターと spall 破片の埋め戻し: 左の列が衝突直後のクレーター。中央の列が可能な限り spall 破片を埋め戻したクレーター。右の列が高速ビデオカメラから得られた各破片の初期位置とその誤差棒。埋め戻した破片には番号と輪郭線が書き足してある。(a) 実験番号 0\_06、垂直衝突 (b) 実験番号 0\_04、垂直衝突 (c) 実験番号 70\_01、衝突角度 70 度、上から下向き。

**Fig. 3-13. Craters before and after re-constructions:** left and center line of pictures show crater before and after reconstructions, respectively. On the right, initial positions of fragments, which were analyzed on movies obtained by high speed video cameras, and their errors are indicated. (a) run No. 0\_06, vertical impact, (b) run No. 0\_04, vertical impact, (c) run No. 70\_01, impact at an angle of 70 degrees, from up to down.

spall 破片の軸比は、図. 3-14 に示されるように、短軸、中間軸の長さを長軸の長さで割った値の平均がそれぞれ 0.22、0.68 となる板状である。本実験で軸比を測定することができた 0.01 g 以上の破片に関しては、spall 破片の形状の破片質量依存性は確認できなかった。この破片の軸比の値は、Fujiwara et al. (1978)が、玄武岩にたいする破壊実験において計測した破片の軸比 1: 0.50: 0.73 と較べると、より板状のものを含んでいることを表している。これは Fujiwara et al. (1978)のグラフは衝突破壊により形成された破片に関するものであり、さらに spall 破片、剪断破壊破片の双方を含んでいるのに対して、本実験においてはターゲット表面から放出された破片のみを選んでいることに関係すると考えられる。

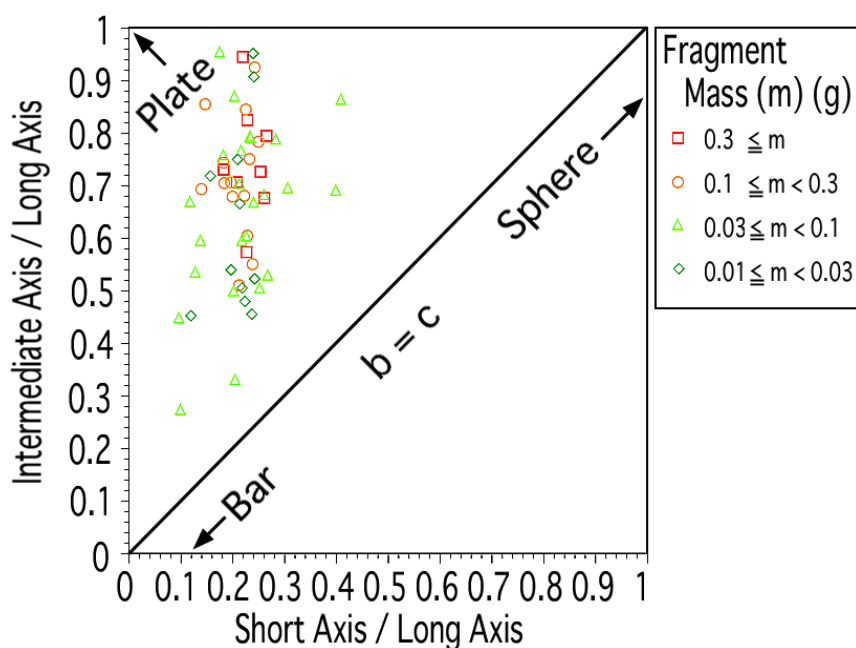


図 3-14. spall 破片の軸比

Fig. 3-14. Aspect ratio of spalled fragments

クレーター形成実験において回収された spall 破片の破片質量  $m_f$  とその質量より大きな破片の総数  $N(m_f)$ を表す積算質量分布を、Fujiwara et al. (1977)におけるの二つ目の表現法と同じ座標軸を用いて表したものを図. 3-15 に示す。このうち、破片サイズの大きなものは、破壊された領域が有限であることから、確率的な影響を強く受けるので、大きいほうから 7 個を排除し、破片サイズの小さな端ははかりの最少目盛りの影響を受けるので、0.05 g 以下のものを排除した、中間の部分 Fujiwara et al. (1977)に示されたべき乗則、式(3-3-1)で近似した値を Table VIII に示す。

$$N(m_f) \propto m_f^b \quad (3-3-1)$$



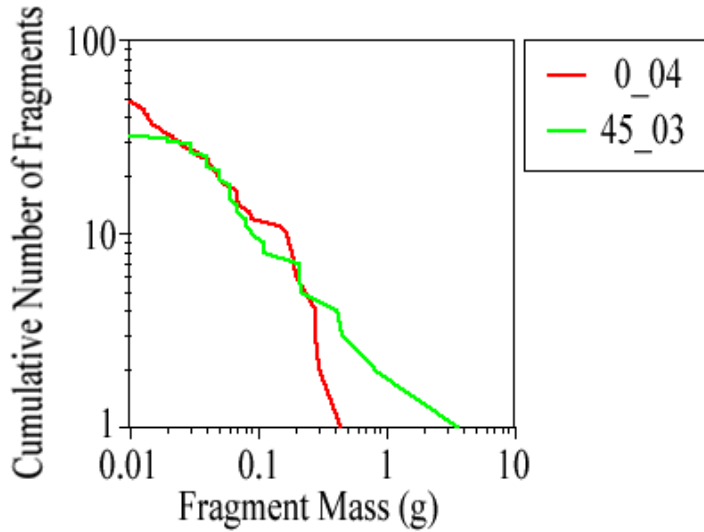


図 3-15. spall 破片の積算質量分布: spall 破片はもとのターゲット表面を含む破片を手で拾い出し計測した。  
**Fig. 3-15. Cumulative mass distribution of the spalled fragments:** spall fragments, which contains original surface of the target are selected manually.

**Table VIII Mass-cumulative No. distributions of fragments**

Run No.	Impact Angle degree	Fragments on Movie			Collected	
		All Fragments	Early fragments	Late fragments	Spalled Fragments	Shear-fractured Fragments
0_01	0	-1.47	-0.55	-3.92	N.A.	N.A.
0_02	0	-1.55	-0.39	-1.66	N.A.	N.A.
0_04	0	-0.43	-0.34	N.A.	-0.58	N.A.
0_06	0	-0.92	-0.23	-1.36	N.A.	N.A.
45_01	45	-2.40	-0.47	-2.54	N.A.	N.A.
45_03	45	N.A.	N.A.	N.A.	-0.66	N.A.
45_04	45	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	-1.27
60_01	60	-1.13	-0.55	-1.56	N.A.	N.A.
70_01	70	-0.96	-0.42	-0.84	N.A.	N.A.

### 3-3-2. 剪断破壊破片

ターゲット表面を下に向けた衝突角度 60 度の斜め衝突実験(60\_01)において、クレーターの **pit** 領域の真下に設置した破片回収箱から得られた破片のうち、比較的大きなものを一列に真上から(上の行)と真横から(下の行)撮影したものを図. 3-16 に示す。上下の行の破片はそれぞれ対応する。これらの破片の表面はもろく、粉に覆われており、クレーターの **pit** 領域の壁面に見られる特徴に類似する。また、比較的大きな **spall** 破片の埋め戻しによってクレーターの **spall** 領域がほぼ埋まってしまうことから、これらの破片の放出位置が **pit** であったことが示唆される。

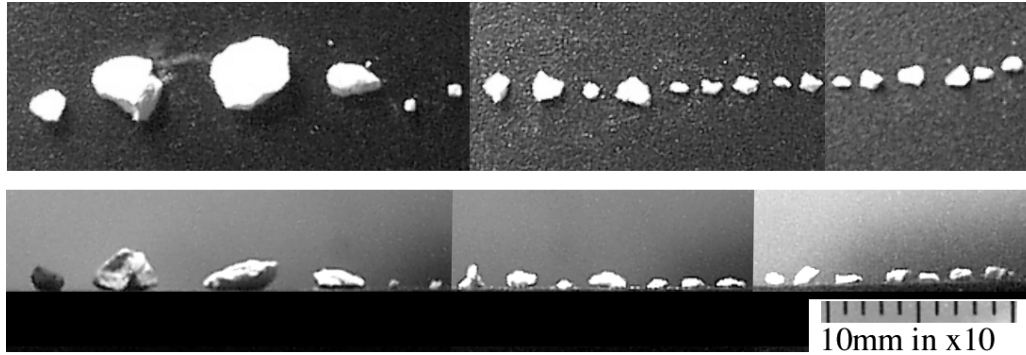


図 3-16. 剪断破壊された破片の上面図ならびに側面図: 実験番号 60\_01 において pit 部分直下から採集された剪断破壊破片。上段と下段の破片はそれぞれ対応している。

**Fig. 3-16. Top and side view of shear-fractured fragments:** fragments are collected just below the pit region in experimental run No. 60\_01. Each fragment in the lower row corresponds to one in the upper row.

直交する二つの方向から撮影した破片の写真から、各破片の輪郭を検出し、これから NIH-image を用いて、各破片の各写真での長軸と短軸を計測することにより 3 軸を求めた。剪断破壊された破片のサイズは spall 破片のそれより小さい。その軸比は 1: 0.6: 0.8 であり、これは板状の spall 破片と較べると球形に近い(図. 3-17)。

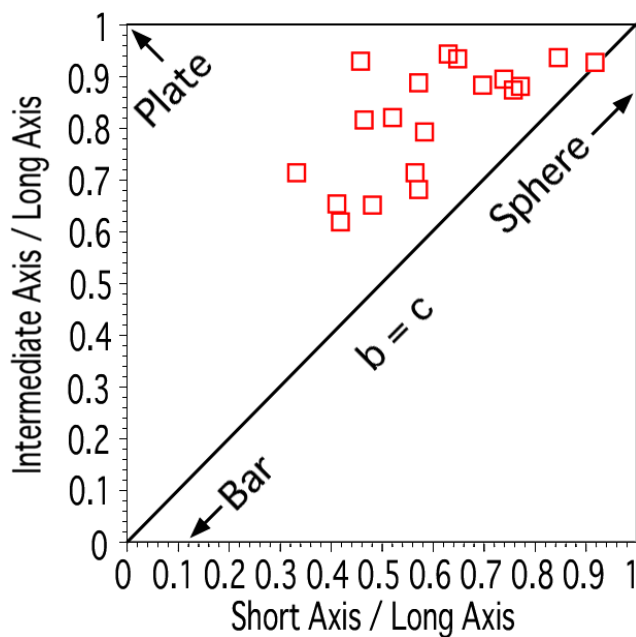


図 3-17. 剪断破壊された破片の形状分布

**Fig. 3-17. Aspect ratio of shear-fractured fragments.**

剪断破壊された破片の質量分布を求めるため、実験番号 45\_04 で放出された破片を篩にかけ分級した。この実験では大きな spall 破片があまり放出されておらず、回収された破片のうちの多くが剪断破壊破片であると考えられている。篩に掛ける際に破壊される破片は、直径が 3 mm 程度では 5 %以下である。この実験において回収された破片の質量分布を図 3-18.に示す。篩によって実際に計測された破片質量分布は実線で表され、篩う作業の間に破片全体の 5 %が破壊

されて、より小さなサイズビンに移動すると仮定したときのものである。これらの質量分布のべき係数の値はそれぞれ、-1.27、-1.23 であり、これらは共に spall 破片の質量分布のべき係数の数-0.58、-0.66 より急な傾きを示している。破片サイズの 2 mm 以下の領域では、spall 破片、剪断破壊破片双方が混ざり合っている可能性が高いが、細かい破片になればなるほど剪断破壊破片の占める割合が増すので、傾向としては変わらない。

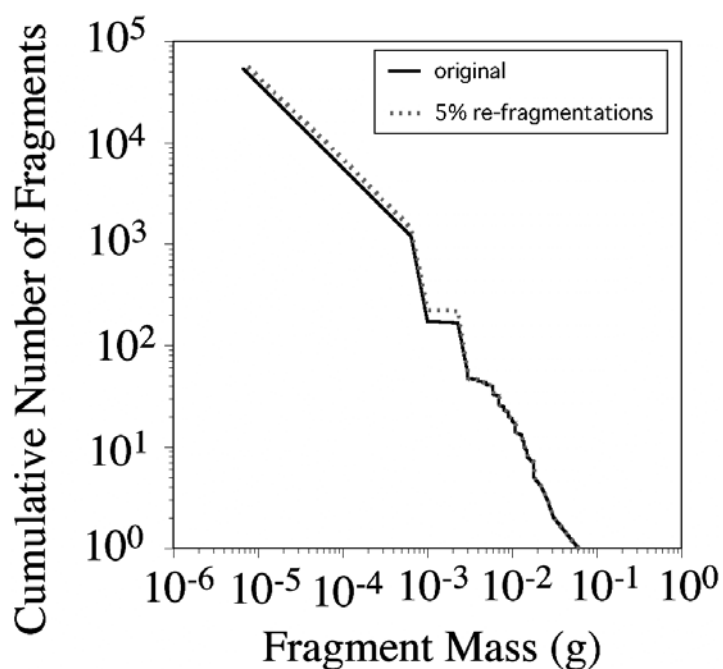


図 3-18. 篩いを用いて測定した剪断破壊破片の質量分布

Fig. 3-18. Mass distribution of shear-fractured fragment by sieve analysis.