

Appendix A. 石膏ターゲットを破壊するのに必要な Q^* 値

石膏に対する高速度衝突の結果は、破壊が衝突を受けた面内に留まるクレーター形成領域と、側面が欠ける遷移領域、そして最大破片質量がもとのターゲット質量の 1/2 以下になる破壊領域に分けられる(図. A-1)。本研究においては、実験を計画した斜め衝突の結果がクレーター形成領域に留まるために満たすべきターゲット質量の条件を、Fujiwara et al. (1977)ならびに Fujiwara et al. (1980)に基づいて評価した。Fujiwara et al. (1977)は、異なったサイズの玄武岩ターゲットに対する高速度衝突実験を行い、衝突により形成された最大破片の質量 M_L とターゲット質量 M_t の比 M_L/M_t と単位ターゲット質量あたりの飛翔体運動エネルギー Q^* ($=E_{kp}/M_t$) との間にべき乗則が成り立つことを示した。そして、曲線近似により求めた $M_L/M_t - Q^*$ 曲線が $M_L/M_t=1$ と交わる点における Q^* の値を破壊に必要な Q^* の値として定義した。また、Fujiwara et al. (1980)は、斜め衝突も含めた衝突実験を行い、斜め衝突の場合には Q^* に衝突角度 θ_i のコサインの何乗かをかける必要性があることを示した。

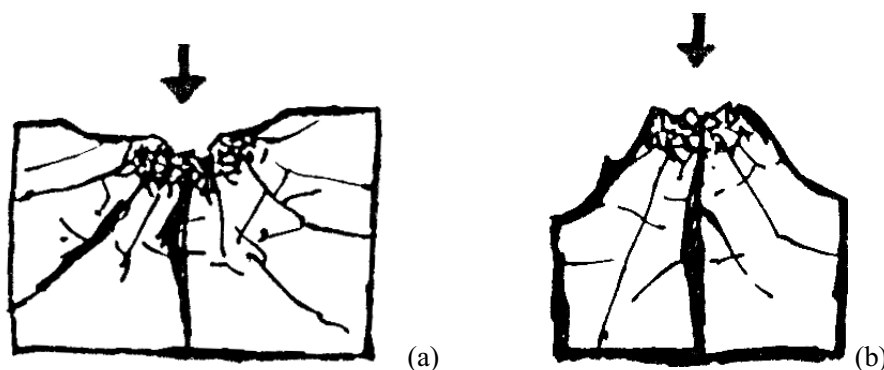


図 A-1. 石膏に対する衝突による結果の模式図: (a) クレーター形成領域 (b) 遷移領域(上面の端が欠ける)

Fig. A-1. Schematic figure of gypsum targets after impacts: (a) cratering region, (b) transition region, in which flank of the target was chipped off.

本実験ならびにその予備実験において得られた最大破片の質量比と Q^* の値を Table. A-I、図. A-2 に示す。石膏の直方体に対するクレーター形成の場合は、ターゲット側面や底面からの spalling が見られることはまれであり、クレーター形成の場合の比 M_L/M_t の値は 0.98 以上、遷移領域に相当する場合には比 M_L/M_t の値が 0.8 以下であり、ギャップが存在する。参考のため、図. A-2 には同じ石膏で作られた楕円体への衝突実験の結果も示されている。衝突の結果の M_L/M_t が 0.98 以上のものを除いて、これを式(A-1)で曲線近似した。

$$\frac{M_L}{M_t} = d(Q^* \cos^f \theta_i)^e \quad (\text{A-1})$$

ここで、 d 、 e 、 f は、ターゲット物質による定数とする。べき係数 f は $f = 0, 1, 1.5, 2$ とおいて曲線近似計算を行った際の相関係数 R の値が最も大きくなった時の値 $f=1$ を採用した(Table A-II)。このときの d 、 e の値はそれぞれ 440 ならびに -0.98 である。これをもとにターゲットの破壊に必要な Q^* の値を求めると、 $500 \pm 80 \text{ J/kg}$ となる。実際に実験を行うにあたっては、衝突速度のばらつきや、現象自体のばらつきも考慮し、計画した衝突速度に発射速度のばらつきの 1σ を加

えたものをもとに計算した飛翔体運動エネルギーに対し、 Q^* の値が 400 J/kg 以上になる様にターゲット質量を決めた。

石膏ターゲットの破壊に必要な Q^* の値は、玄武岩ターゲットに対する値 730 ± 120 J/kg と比較してやや小さくなっている。しかしながら、本実験により得られた石膏のデータは、Fujiwara et al. (1977)により得られた玄武岩データの 3σ 内に全て含まれており、両者の違いは明確ではない。

Table A1 Experimental Conditions

Run No.	Mass g	Mass kg	Impact Velocity km/sec	Angle degree	Maximum fragment size g
<Disruption of Cubic target>					
DC0	0.21	1.166	4.34	0	237.3
0_21	0.11	0.749	3.84	0	447.7
D45-1	0.21	0.935	4.44	45	223.4
D45-2	0.21	1.072	4.30	45	366.0
D45-3	0.21	0.900	4.00	45	296.5
D45-4	0.21	1.650	4.28	45	779.0
D45-5	0.11	0.299	4.60	45	46.6
D70-1	0.21	0.633	4.08	70	185.6
D70-2	0.21	0.630	4.17	70	176.0
<Disruption of spherical target>					
DSp-1	0.21	0.465	2.12	0	291.3
DSp-2	0.21	0.457	2.00	0	288.8
DSp-3	0.21	0.599	2.00	45	551.5

Table A2 Impact angle dependence

	d	e	R
Q^*	461	-1.17	0.86
$Q^* \cos \theta_i$	440	-0.98	0.90
$Q^* \cos^{1.5} \theta_i$	400	-0.96	0.89
$Q^* \cos^2 \theta_i$	342	-1.00	0.86

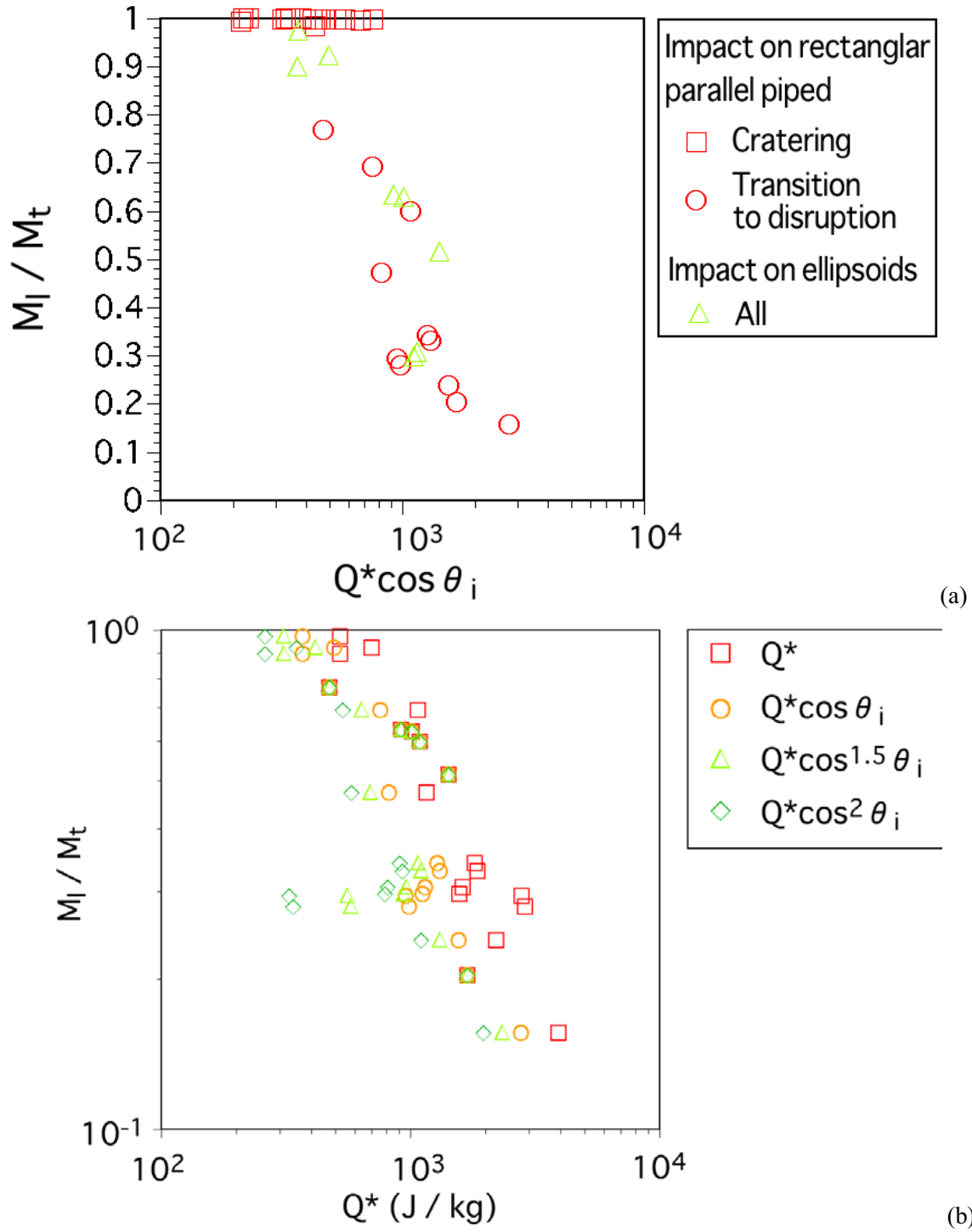
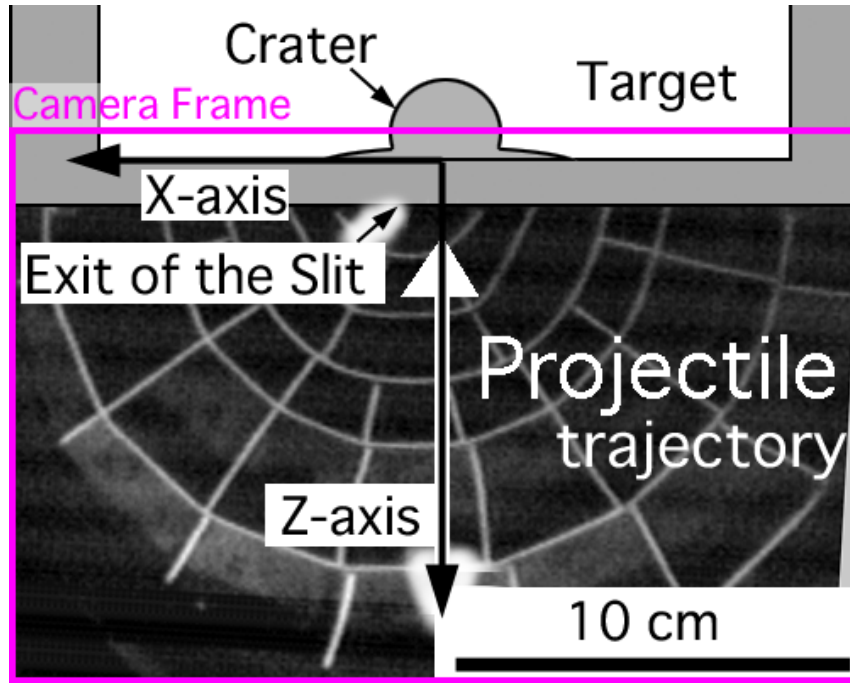


図 A-2. 単位ターゲット質量あたりの飛翔体の運動エネルギーと最大破片の質量比: (a) クレーター形成、球への衝突を含む。衝突角度依存性は全て $\cos \theta_i$ とおいた。(b) クレーター形成実験を除いたもの。衝突角度依存性を表すべき係数を変化させた

Fig. A-2. Specific energy and mass fraction of the largest fragment: (a) data from cratering experiments and impact on spheres are included with single impact angle dependence of $\cos \theta_i$. (b) data from cratering experiments are excluded and degree of impact angle dependence was varied.

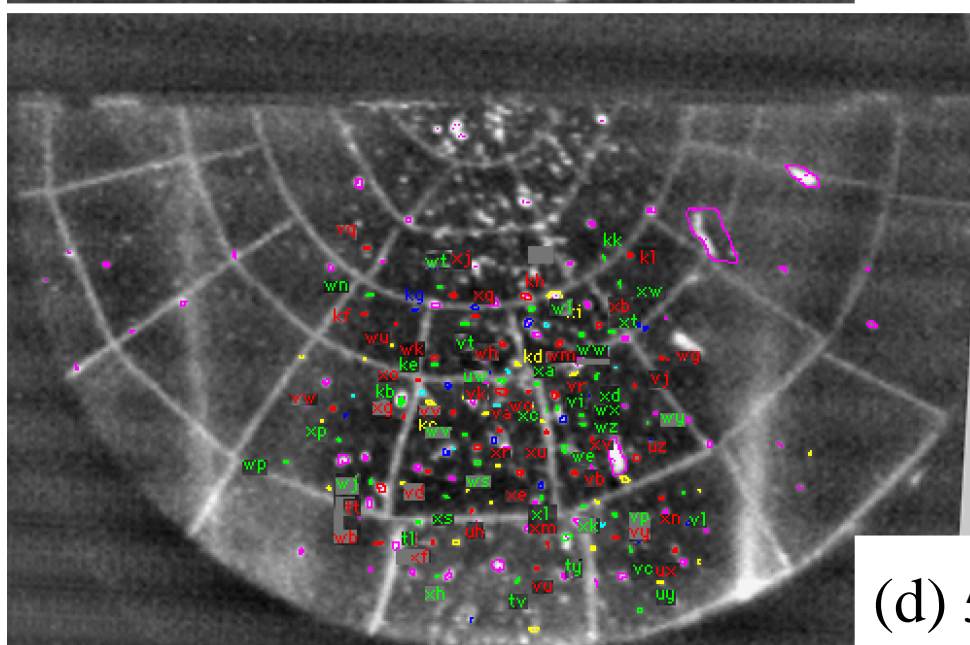
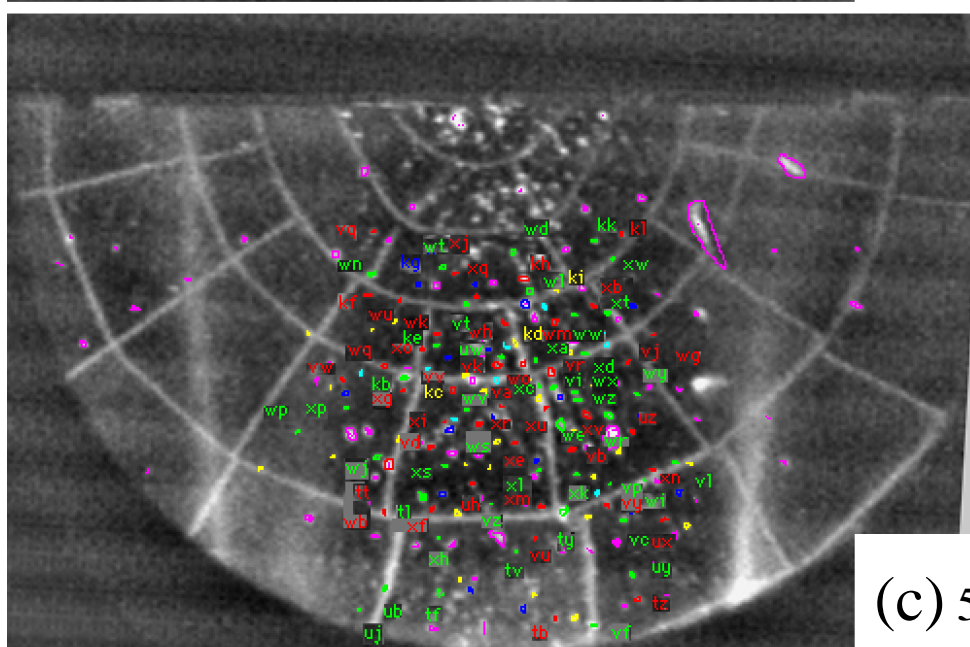
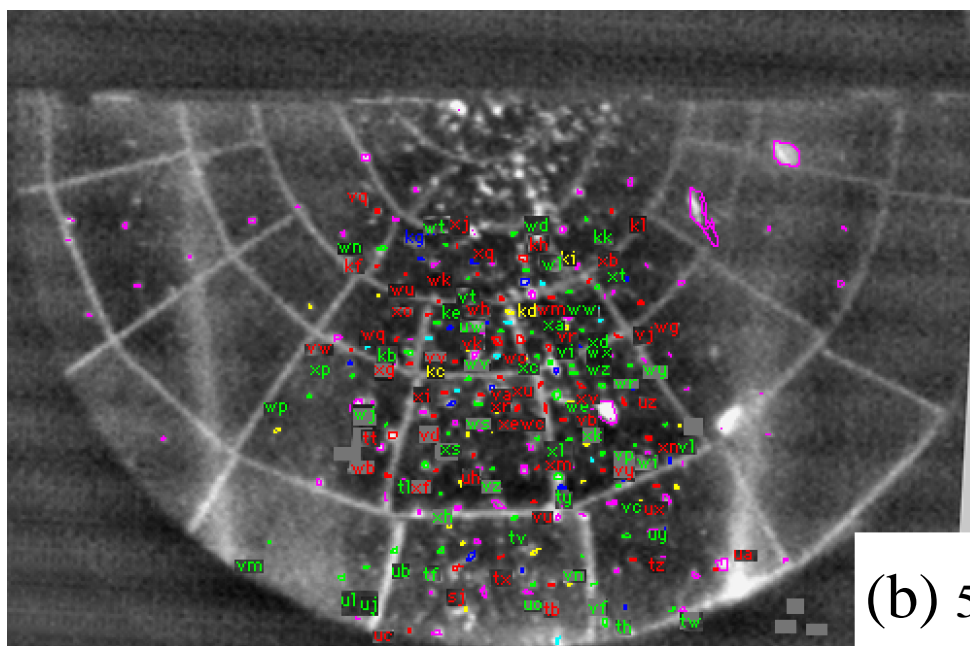
Appendix B. 破片速度計測のための軌跡ならびに位置時刻グラフの一例

この Appendix では、実験番号 0_02 の動画から破片速度を得るまでのグラフを早いものから 376/724 個の破片に関して例示する。この数は本研究において測定した全破片数約 4000 個の中の 1 割に相当する。動画から破片を計測するにあたっては、まず破片の輪郭を手動で強調し、二値化した後、NIH-image で影の面積重心、面積、長軸、短軸を計測した。図. B-1 に実験番号 0_02 の動画における画面構成と破片の追跡を行った画面を例示した。破片同士の衝突ならびに衝突発生ガスの吹き返しにより、途中で軌道を変えた破片に関しては、衝突が発生する 1 駒前まで追跡し、その後は切り捨てた。これらの破片衝突ならびに隣の破片との選り違いに関しては、個々の破片の軌跡をグラフ化した段階(図. B-2)、破片の速度計測のために時刻-位置グラフを作った段階までで取り除くことにほぼ成功したと考える。破片の重心が周期的に波打つものは、比較的大きな spall 破片に良く見られ、破片の回転を表している。この実験においては重力の方向は紙面奥向きであるので、破片速度解析の段階においては重力の影響を考える必要はない。側面の窓から撮影を行った実験においては、重力か速度の効果も加味した 2 次元曲線近似を行った。



(a)

Fig. B-1 Sample pictures of the experimental run No. 0_02. (a) Settings from a top-view camera. A coordinate, initial positions of the target, a scale, and a section of a crater made by this impact are overlayed on the pre-impact picture with a set of fragment collecting cells. (b) (51 msec) to (d) (55 msec) Sample frames from this run in the later phase. Fragments were outlined and named. In this series of pictures, fragments outlined in red and green were checked. Too see the move of the fragments obviously, sample frames were picked up every 10 frames (every 2.2 msec).



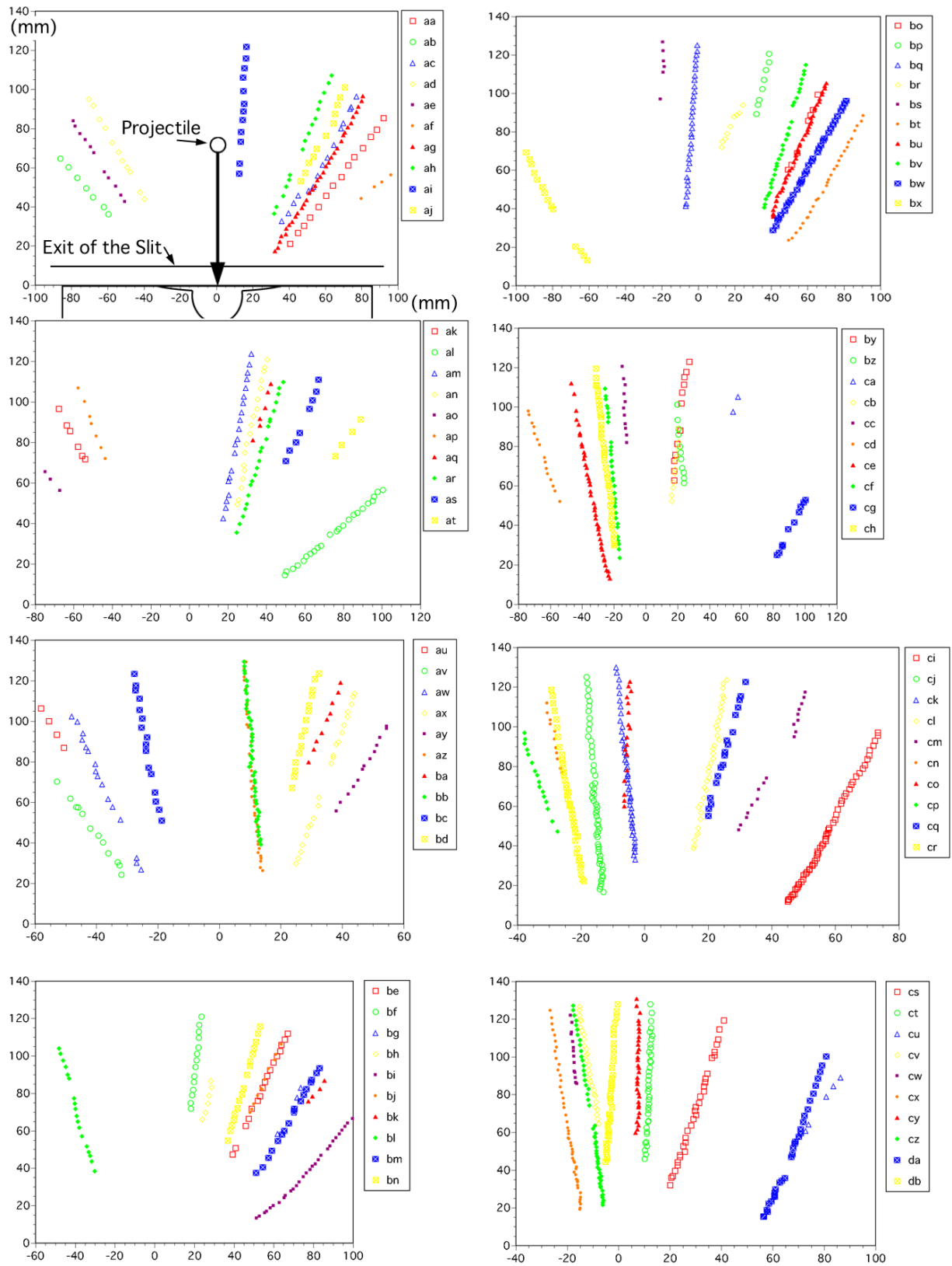
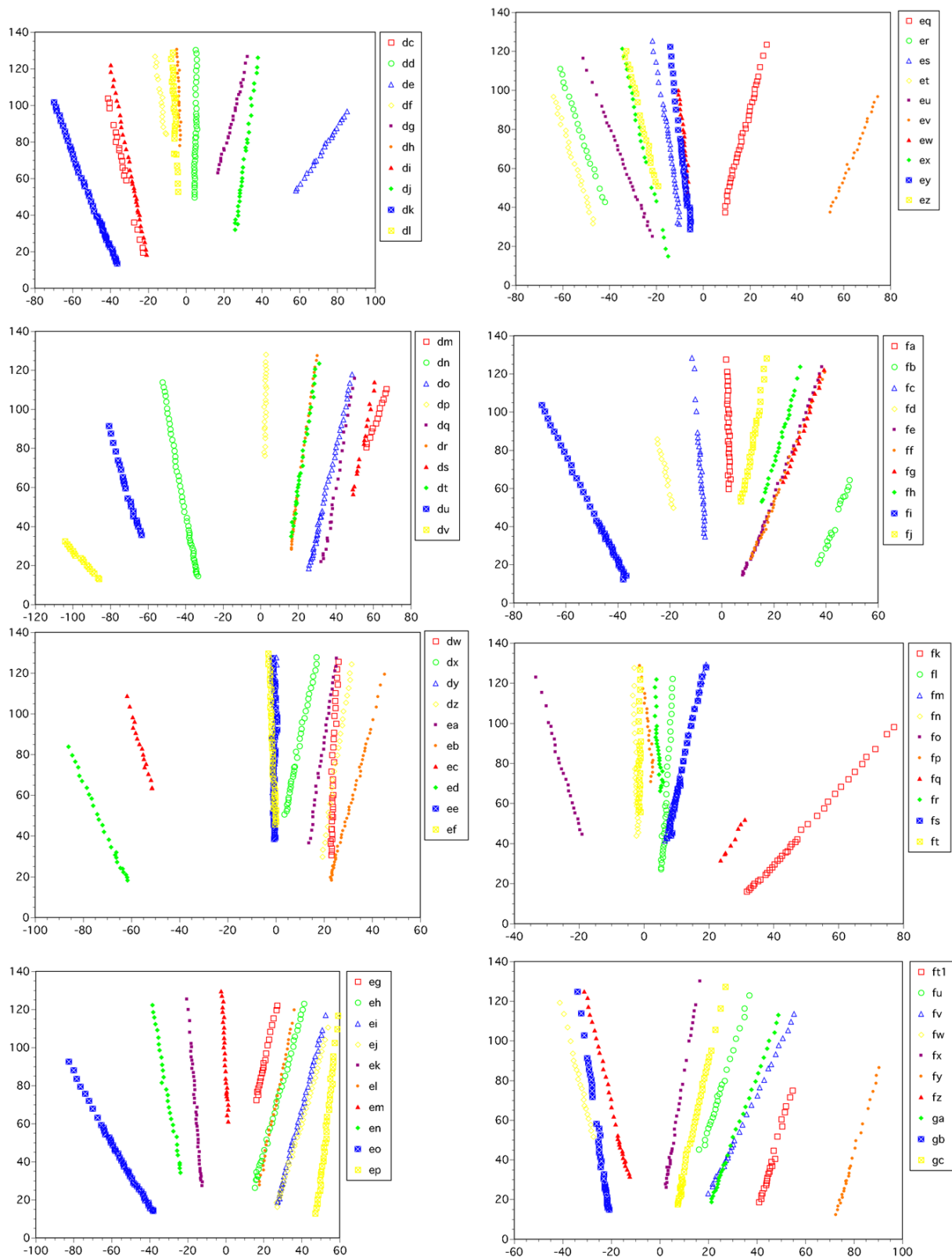
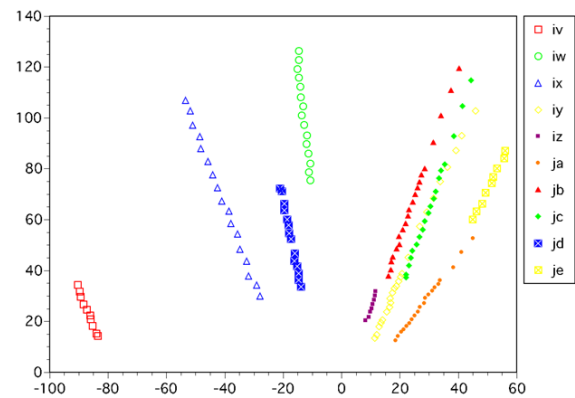
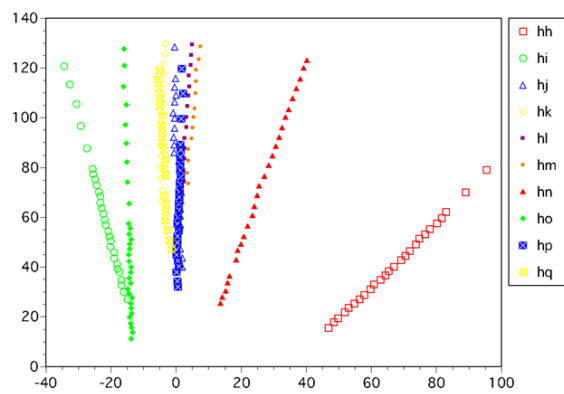
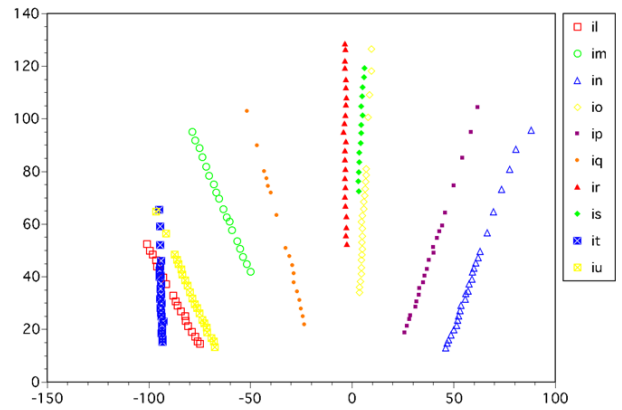
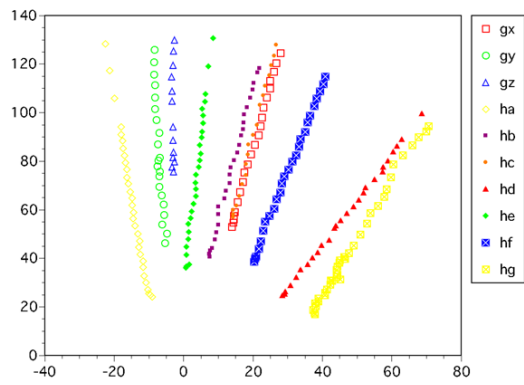
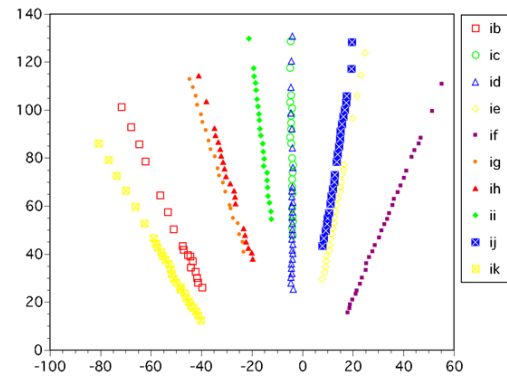
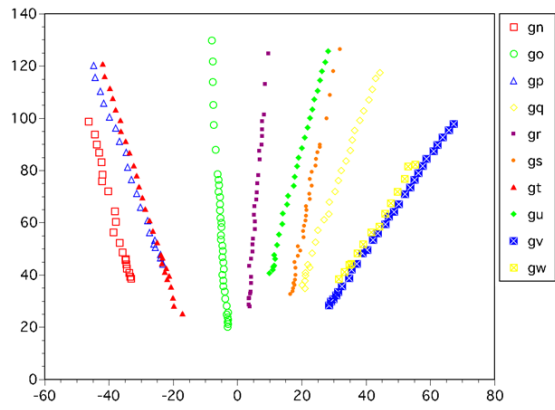
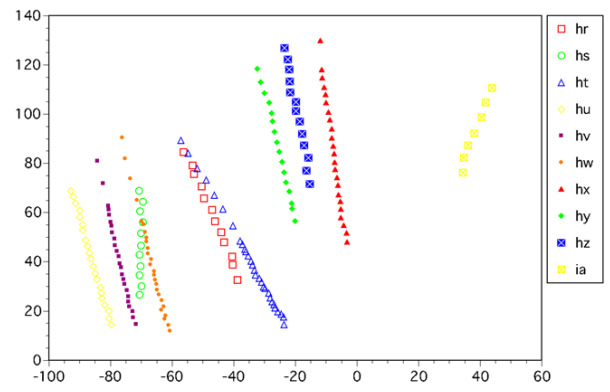
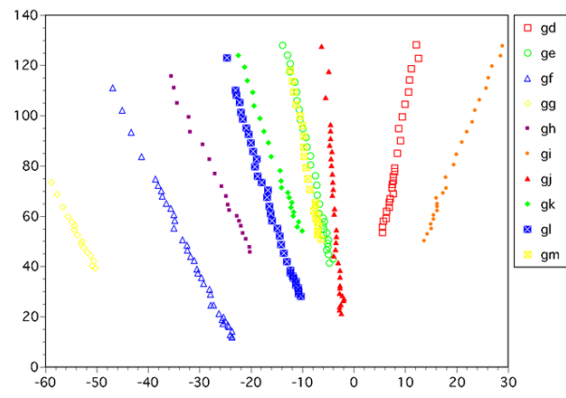
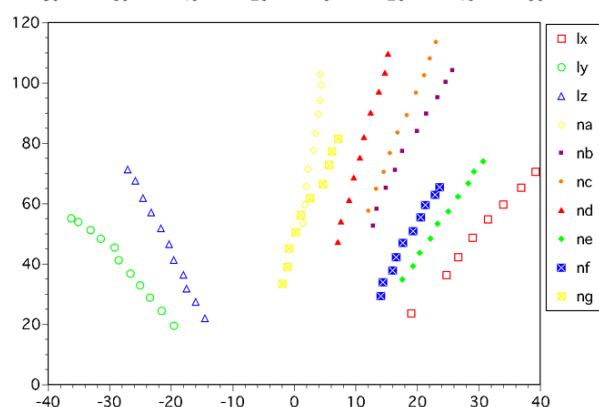
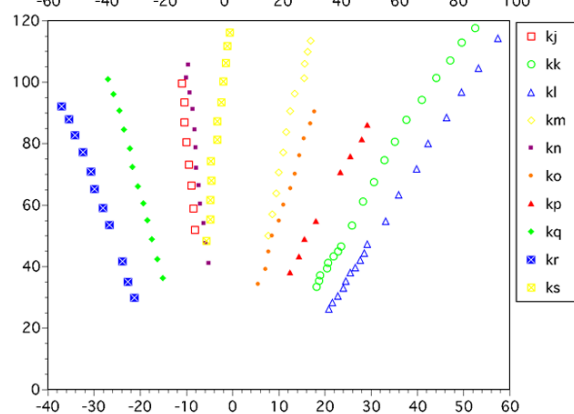
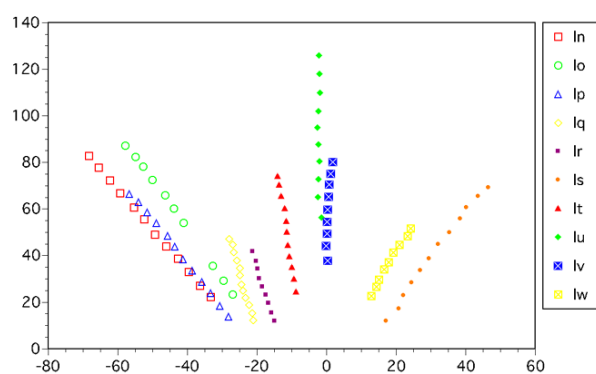
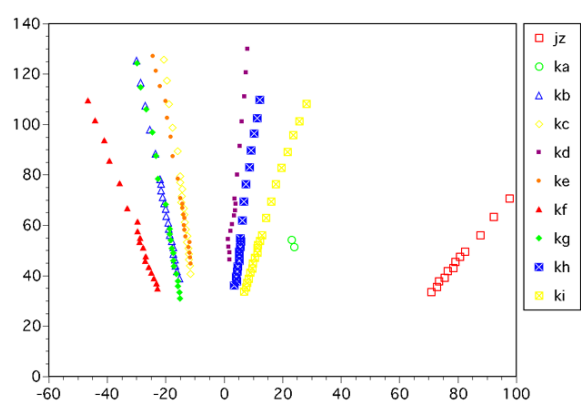
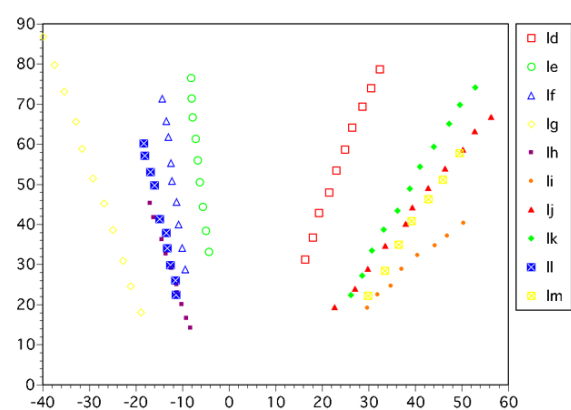
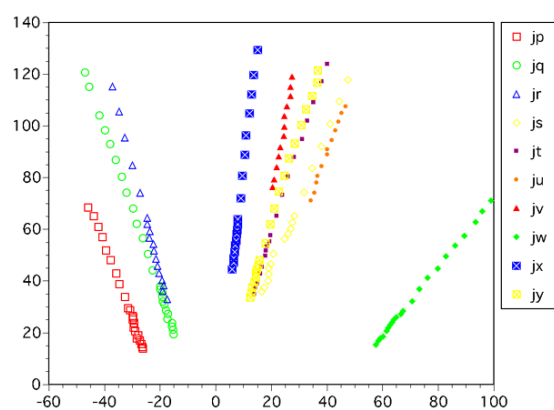
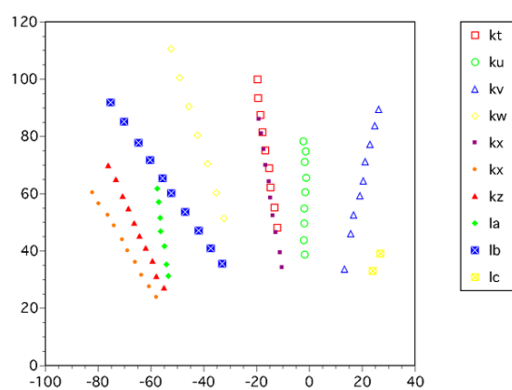
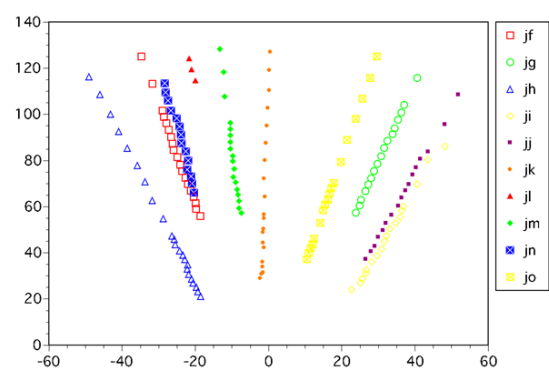
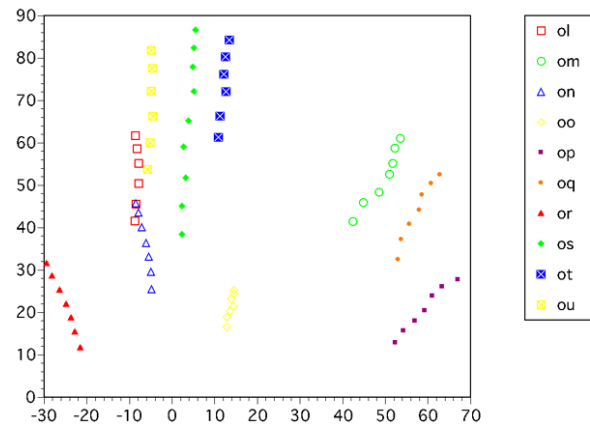
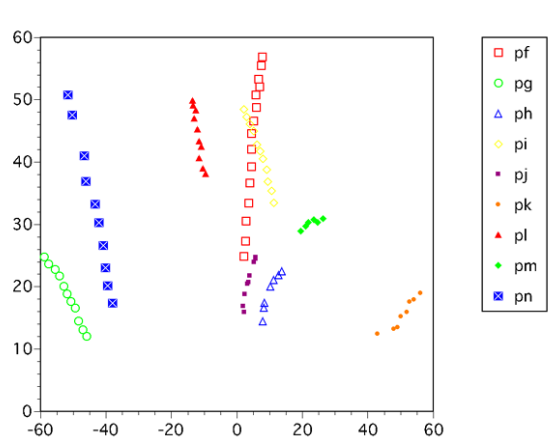
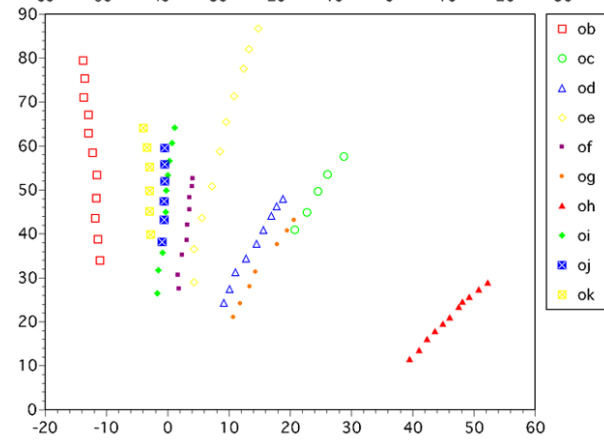
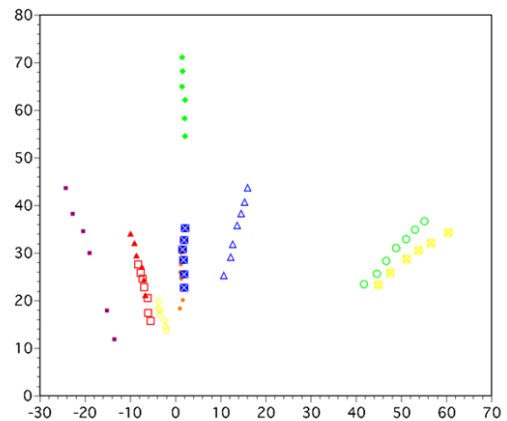
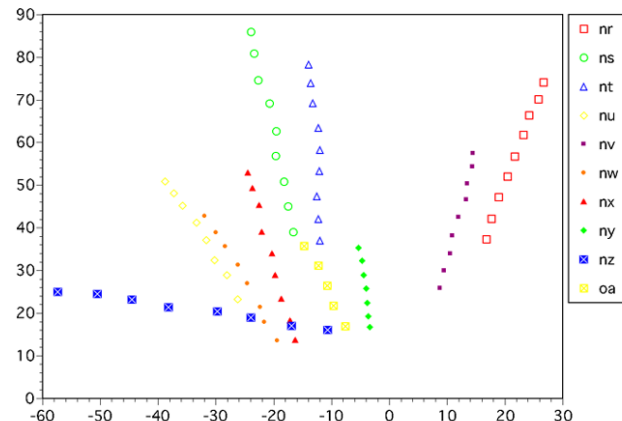
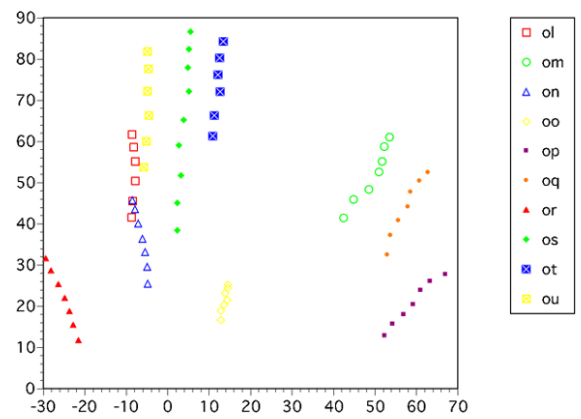
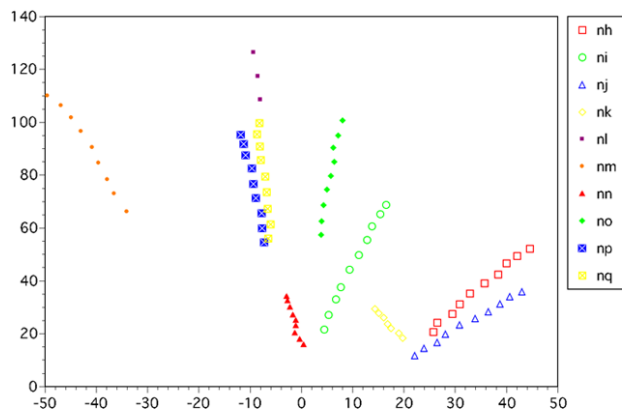


Fig. B-2 Sample trajectories of the experimental run No. 0_02. The direction of the z-axis is opposite to the Fig. B-1. The coordinate and the crater made by this impact are shown in the first figure. 376 fragments out of 910 fragments were listed here. These figures include the fragments those were rejected after measurement and analysis as fragments after secondary collisions. Because, in this pick-up phase, I've checked as much fragments as possible, aiming to check all the fragment observable. With these trajectory polts, collected data for each fragment are checked.









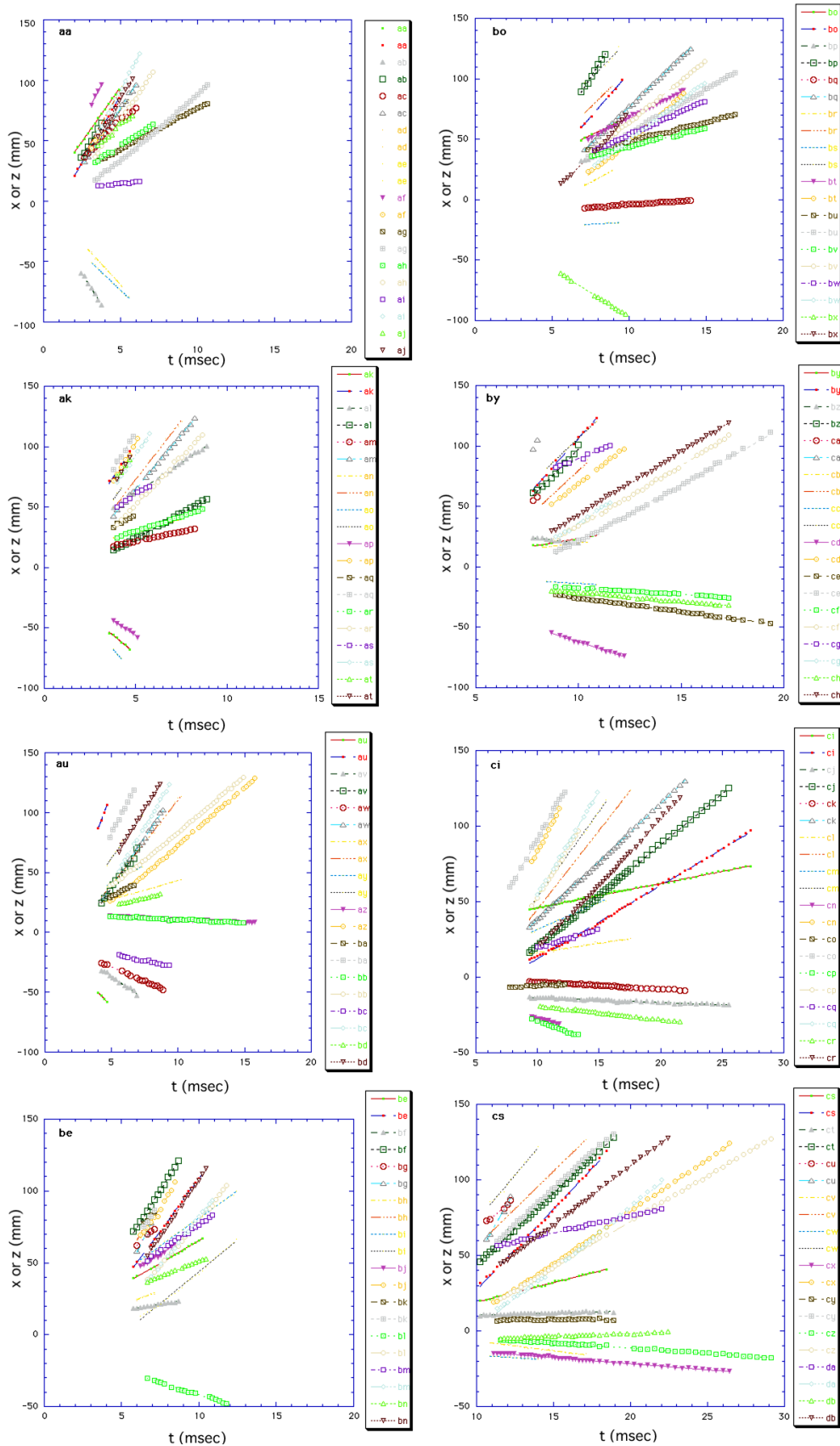
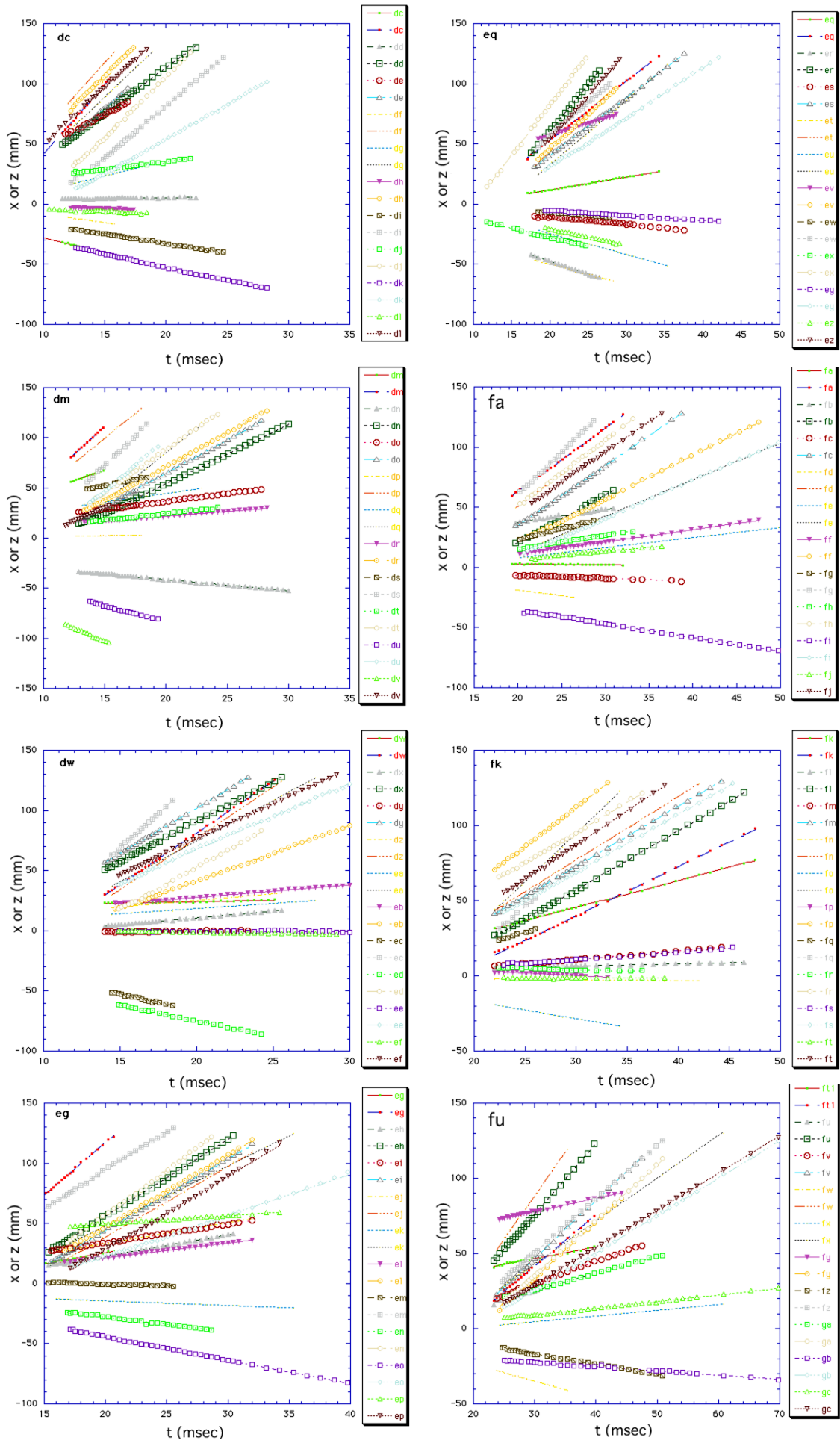
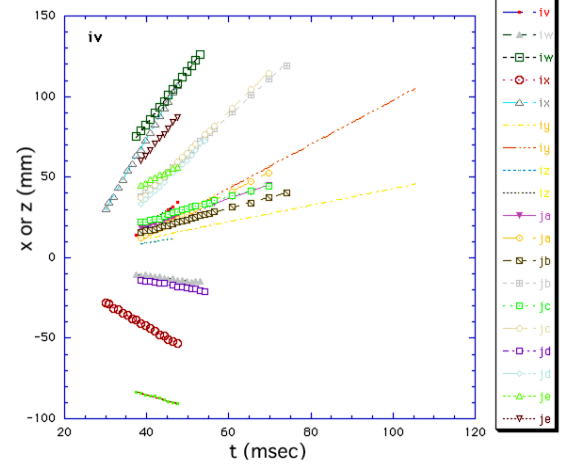
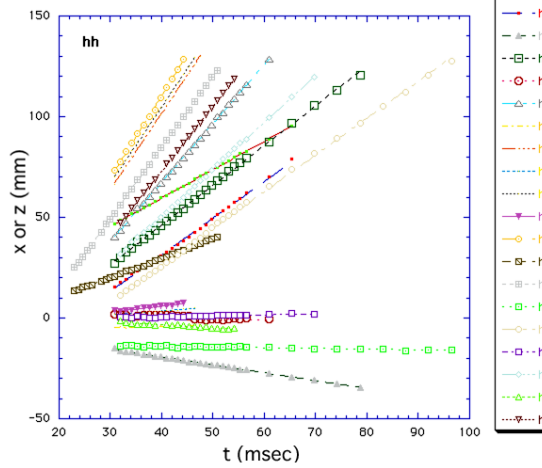
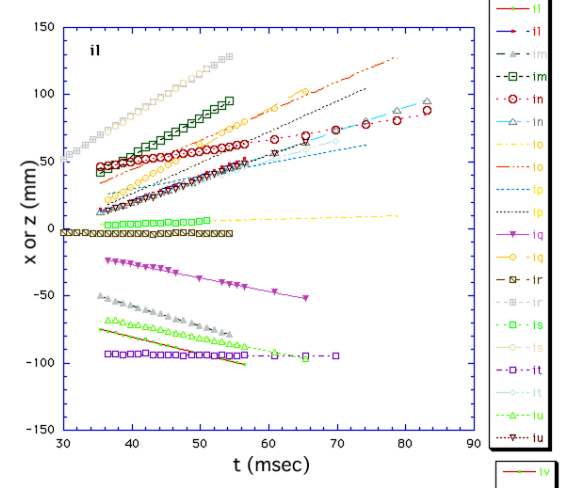
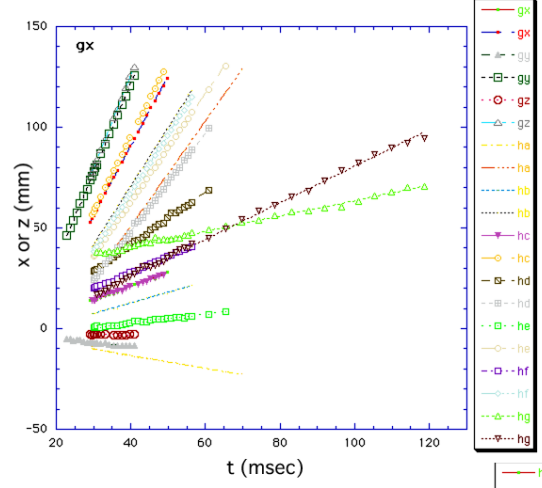
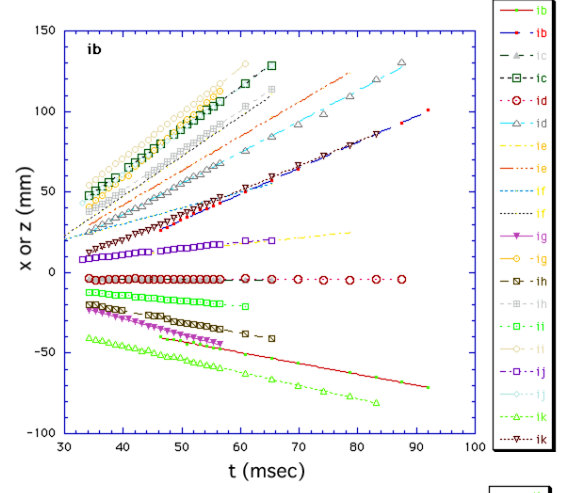
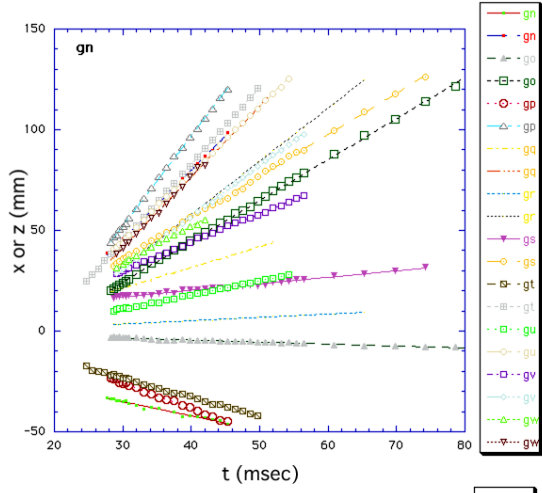
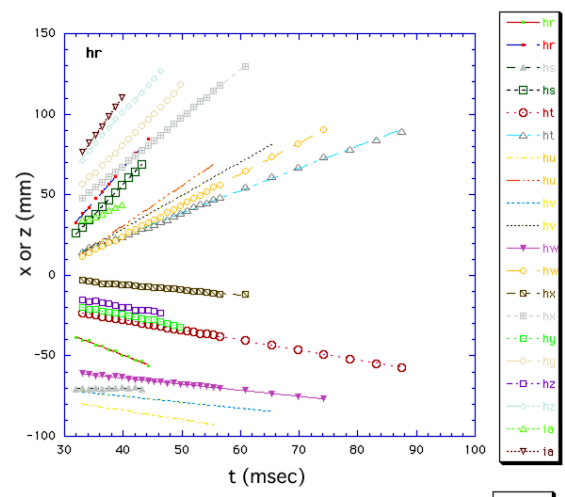
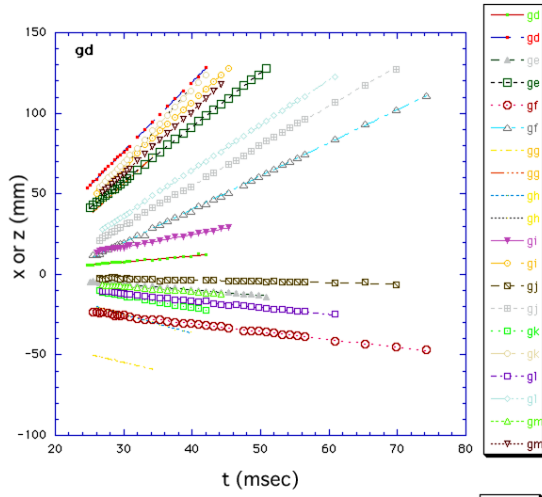
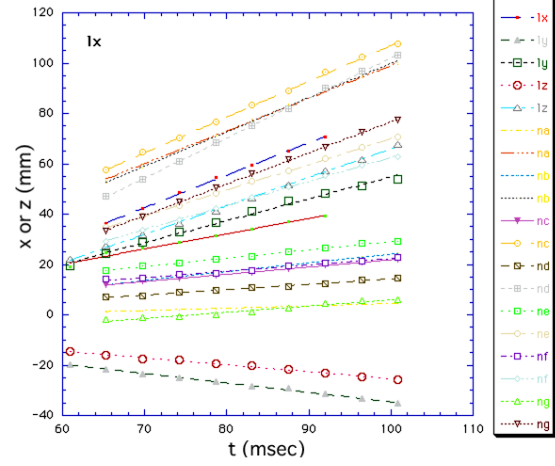
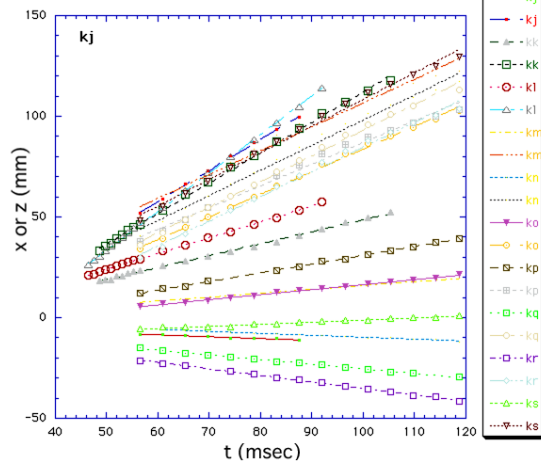
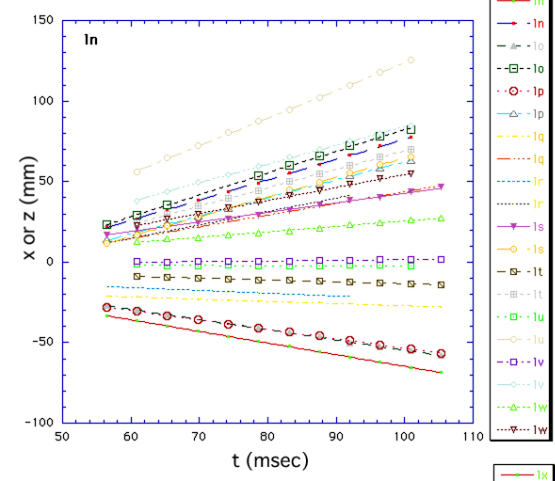
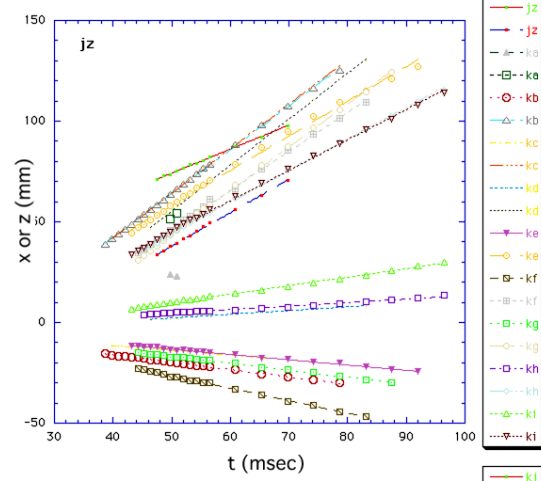
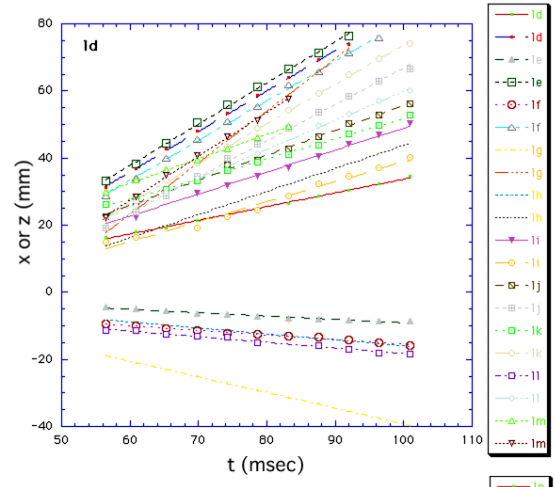
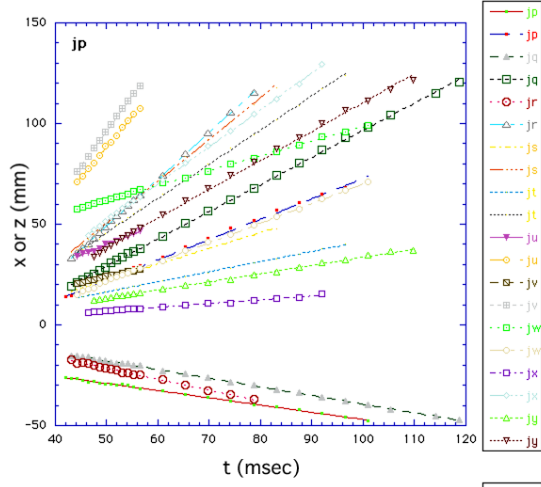
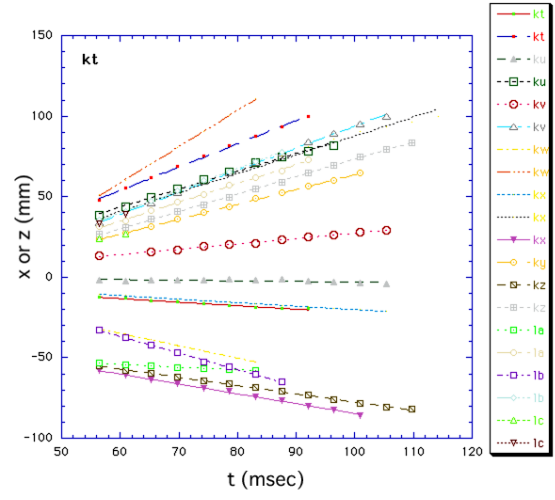
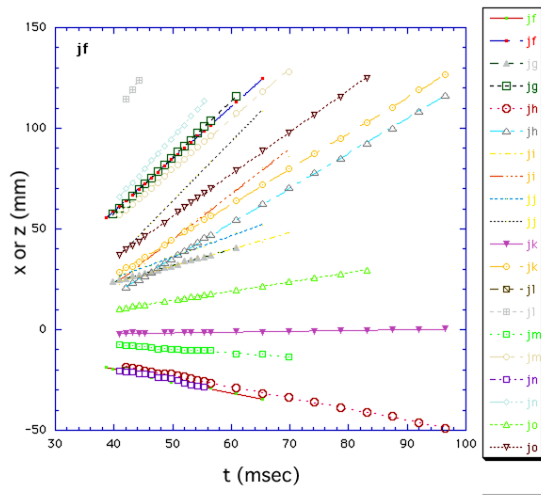
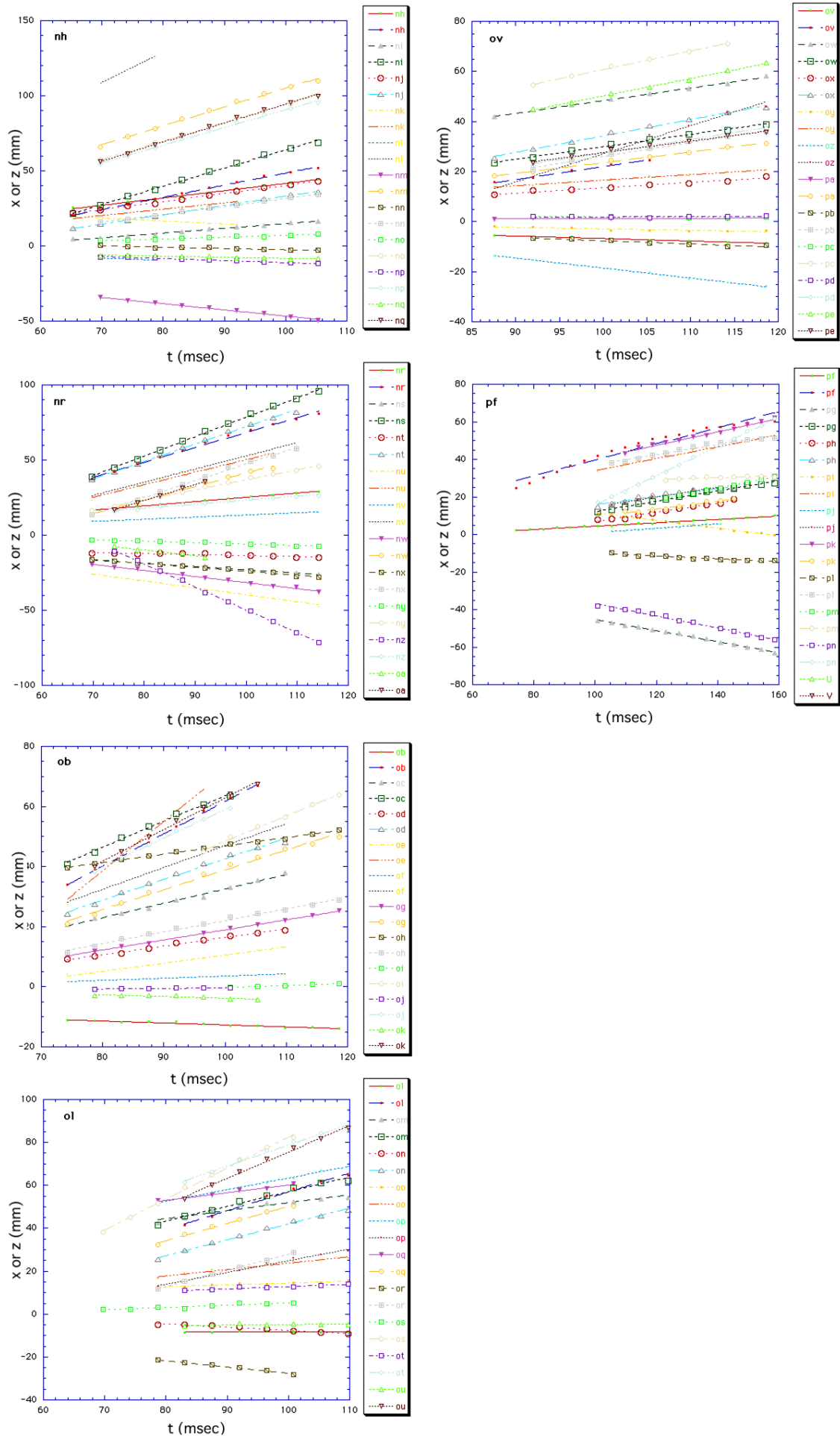


Fig. B-3 Sample velocity measurement plots of the experimental run No. 0_02.
the x-axis represents the time after impact, and the y-axis represents the positions of the fragments.
In this velocity measurement phase, trajectory of each fragments was checked again, and fragment showing some strange movement will be rejected.









Appendix C. 破片の回転

実験番号 0_06 の動画において 20 駒以上継続して観察することができた破片に対して、これの影の面積の周期的変化から破片の回転速度を推定した。追跡を開始した時点からの時刻 t と破片の影の面積 $S_f(t)$ の関係を式(C-1)の関数で曲線近似した。この関数は、観測された小惑星の明るさの変化(ライトカーブ)から小惑星の自転周期を求めるのに用いられているものである。

$$S_f(t) = d_{ave} + m_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + m_2 \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) + m_3 \sin\left(\frac{6\pi}{T}t\right) + m_4 \cos\left(\frac{8\pi}{T}t\right) + m_5 \sin\left(\frac{10\pi}{T}t\right) \quad (C-1)$$

ここで、 d_{ave} は破片の影の面積の平均値、 T は破片の回転周期、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 は定数である。この曲線近似は周期 T の初期値への依存性が高いため、 T の初期値として 2 、 2^2 、 2^3 、 2^4 、 2^5 を与えて計算を行い、その中から相関係数 R が 0.7 以上のもののみを集めて、実際の動画と比較することで最終的に決定した。

この方法により、69 個の破片の回転速度を推定することができた。これは、破片速度を求めることに成功した破片の $1/10$ 相当する。破片の回転周期の測定が破片速度の測定よりも困難である理由は以下の通りである。高速度の破片に関しては、これが画面内を通過する時間がその回転の $1/2$ 周期よりも短いものが多いため、また、破片サイズの小さいものに関しては、回転に伴う面積変化より輪郭の検出に伴う面積変化の影響が大きくなるためである。

破片質量が 0.01 g 以上の破片のうち、回収破片との対応付けがされた 9 つの破片に関しては、各駒で観測された破片の影の面積 $S_f(t)$ だけでなく、破片の周囲長 $l_{per}(t)$ 、そしてこれと同じ面積を持つ楕円で近似した時の長軸 $l(t)$ 、短軸 $s(t)$ の長さならびに長軸の画面上の水平線 $\theta_f(t)$ と成す傾きの周期的変化からも破片の回転速度を推定した。破片の形状や模様強い特徴のある破片に関しては、視覚的にも回転速度を確認した。

実験番号 0_06 において追跡されたひとつの破片(01)を駒毎に切り取り、追跡開始からの時刻順に並べたものを図. C-1 に示す。破片の形状ならびに表面の模様から推測される破片の回転周期は 38 msec である。破片の影の面積、周囲長、長軸、短軸ならびに画面上の水平線と成す角を追跡開始からの時間との関数の形で表したものが図. C-2 である。式(C-1)と同様に、周囲長、長軸、短軸、角度からも回転の周期を求めるとこの破片の回転周期は 39 msec であり、破片形状から求めたものと矛盾しない。このようにして求めた破片の回転周期を Table. C に示す。

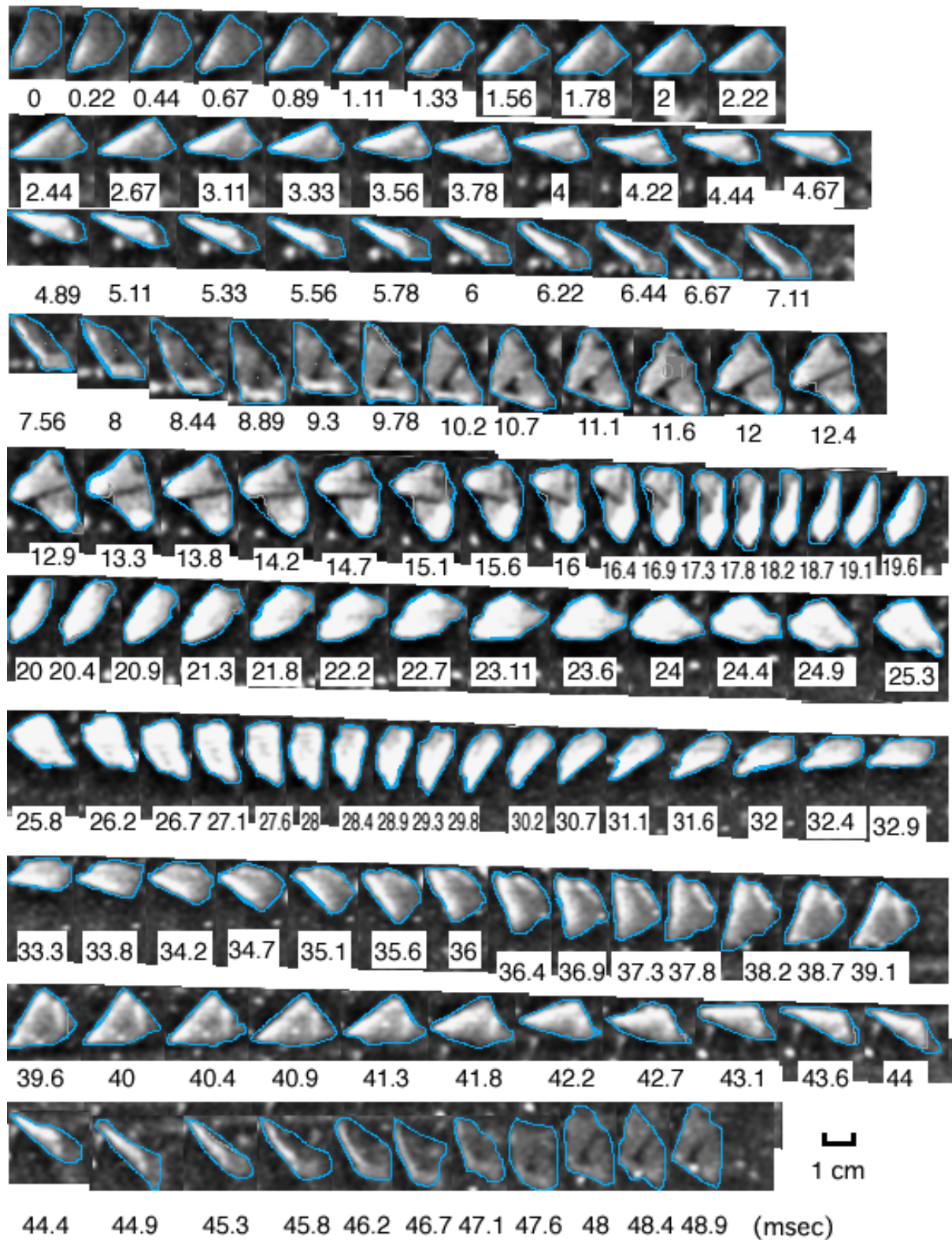


図 C-1. 破片の回転速度の計測の参考画像: 実験番号 0_06 の動画の各駒より破片番号 01 のみを抜き出したもの。破片の輪郭は手動で強調してある。

Fig. C-1. Sample frames of rotation measurements: Rotation of a fragment No. 01 out of the experiment No. 0_06. The fragment on each frame was outlined manually.

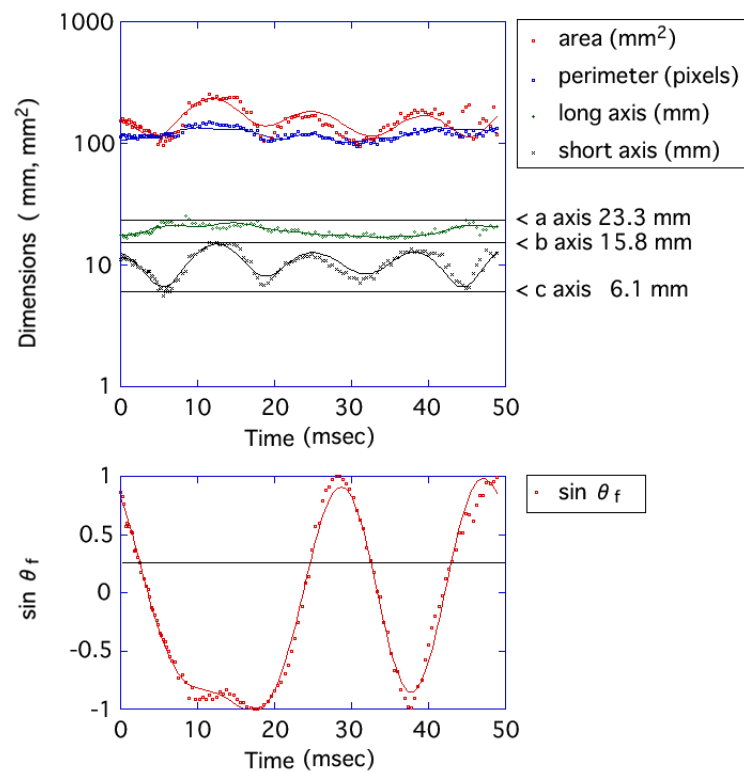


図 C-2. 破片サイズの周期的な変化と曲線近似例

Fig. C-2. Fragment dimensions with the time

Appendix D. スリットを用いた実験番号 0_02 の放出時刻について

実験番号 0_02 においては、スリット付きターゲット容器内における石膏ターゲットの固定を行っていなかった。一方で、実験番号 0_01 においては、ターゲット容器内でターゲットが移動しないように、緩衝材を用いて 6 方向から支えた。細かくて高速度の破片のターゲット容器内の動きを妨げない様に、これらの支柱は衝突地点から十分に距離を置いて設置した。実験番号 0_02 の破片放出時刻と破片速度との関係を、ターゲット容器内で十分な固定を行った 0_01 におけるもの、ならびにスリットを用いない実験のものと比較すると図. D-1 の様になり、実験番号 0_02 のもののみが同じ放出時刻で較べると遅い時刻に放出されていると計算される。これは、スリット付きターゲット容器を用いるときのデメリット、容器中の石膏ターゲットの表面ならびに衝突位置を外から観測できないことに関連付けられる。石膏ターゲット入りターゲット容器は重く(10 kg 程度)これを不安定な足場でターゲットチャンバー内に設置する作業の途中で、固定をしていないターゲットが移動し、計画していたよりも衝突点が後ろに移動した可能性が考えられる。しかしながら、ターゲット表面を直接見ることでできない容器の特性上、衝突実験を行った瞬間におけるターゲット表面の位置を知ることは不可能であった。

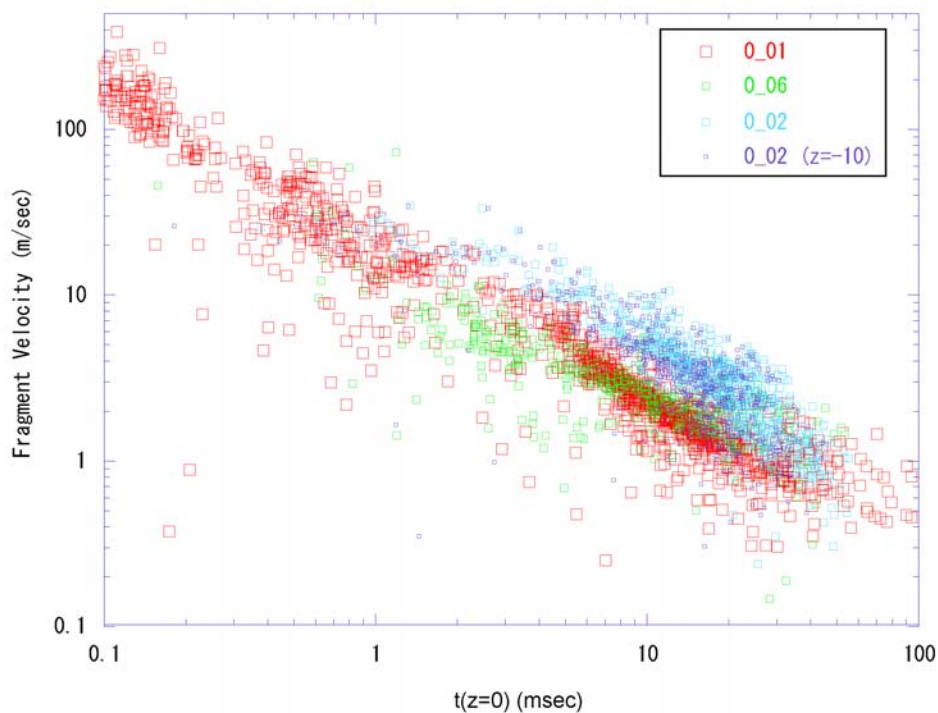


図 D-1. 各破片のターゲット表面からの放出時刻と破片速度: スリットを使わなかった実験 0_06 とスリットを使用した実験 0_01 ならびに 0_02 との比較。実験番号 0_02 に関しては容器内のターゲット表面の位置が 10 mm 後ろにあった場合の放出時刻も併記した。

Fig. D-1. Ejection time from the target surface and ejection velocity of each fragment: The slit was not employed in empirical No. 0_06, and it was employed in those No. 0_01 and 0_02. Ejection times of the empirical run No. 0_02 were calculated for two cases: the surface of the target was set as it was planed, the surface of the target was set 10 mm backward.

各実験におけるターゲット表面からの破片放出時刻のヒストグラムに、実験番号 0_02 において、ターゲット容器内に設置したターゲットの表面が 10 mm 後ろに存在した場合のものを加えたのが図. D-2 である。0_02 において、実際のターゲット表面が設計より 10 mm 後ろに存在したと考えると、他の実験番号 0_01 ならびに 0_06 と調和的であるといえる。従って、実験番号 0_02 においては、破片速度、破片質量ならびに放出角度に関する情報に関しては信頼性があるが、放出時刻、初期位置に関しては、実験設置時にターゲット表面がずれた可能性を考慮する必要があると考えられる。

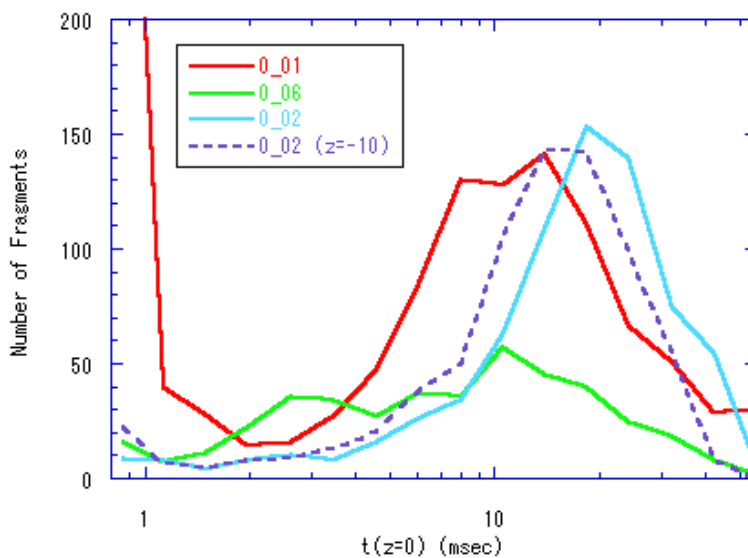


図 D-2. 破片の放出時刻のヒストグラム: 実験番号 0_02 のデータに関しては、ターゲット表面が 10 mm 後ろにあったと仮定した時の値も併記した。

Fig. D-2. Histograms of ejection time from the target surface: Ejection times of the empirical run No. 0_02 were calculated for two cases: the surface of the target was set as it was planed, the surface of the target was set 10 mm backward.

Appendix E. 実験番号 0_02, 0_04, 0_06 をもとにした垂直衝突一回分の破片の再構成

実験番号 0_01 と 0_02 で使用したスリットの幅は 20 mm、15 mm であり相異なる。0_01 においてはスリットにより覆い隠される pit 部分の面積は 14 %に過ぎないのに対し、0_02 においては 32 %に及ぶ。そこで、実験番号 0_02 を用いた再構成においては、スリットに覆われた部分から放出される破片を面積に応じて再配分し放出された全破片を予測することとした。また、直径 3 mm 以上の破片に関しては、0_04 ならびに 0_06 の二つの実験結果を、それぞれに 1/2 の重みを与えて合算してある。

スリットに覆われた部分から放出される破片を再構成するために、図. E-1 のようにクレーターを 6 つの同心円で分割した。実験番号 0_02 は垂直衝突であるので、中心から同じ距離にある領域から放出される破片の数と放出速度は、ほぼ同じであると考えられる。このスリットと直交する方向から観測を行ったため、動画上での初期位置を以って区別できるのは、図. E-1 のスリットの間に描いた長方形の領域から放出されるものであり、厳密には同心円状の領域とは異なるが、この実験における初期位置推定の制度を考慮すると、これは誤差の範囲内である。領域 1 から放出された破片数をこの領域の面積で割り、これにスリットに隠されているオレンジ色の部分の面積をかけることにより、pit 部分から放出される破片の個数を求め、領域 1 からランダムに選出した破片を必要数だけ複数回数えることにより、ここから放出された破片の速度分布を求めた。同様に、より外側の領域に対しても同様の手法で破片の数と速度分布を拡張した。

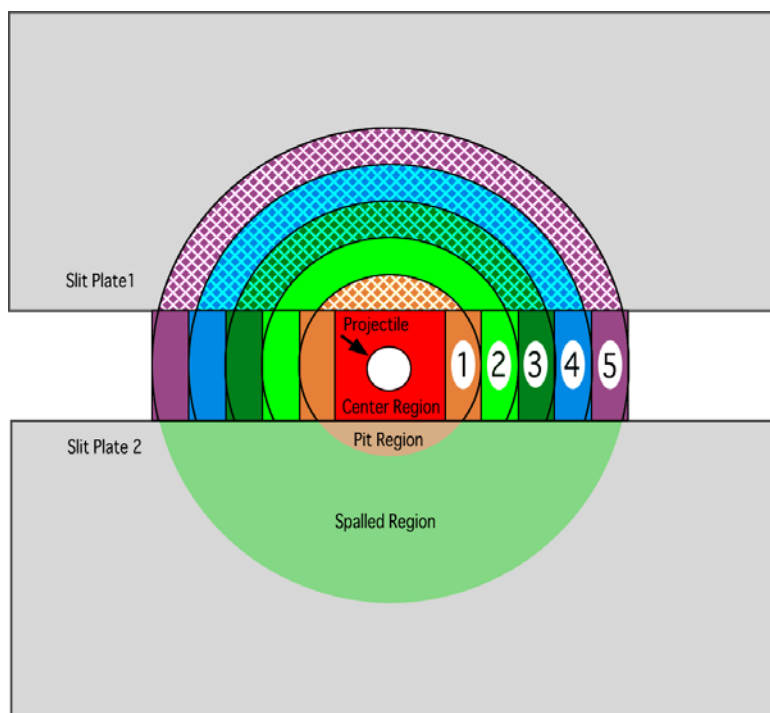


図 E-1. クレーターならびにスリットの模式図と同心円状の領域区分

Fig. E-1. Schematic figure of the concentric regions, the crater, and the slit.

Reference

- Abe M., Takagi Y., Kitazato K., Abe S., Hiroi T., Vilas F., Clark B. E., Abell P. A., Lederer S. M., Jarvis K. S., Nimura T., Ueda Y., Fujiwara A. 2006. Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft. *Science* 312: 1334-1338
- Ai H. A. and Ahrens T. J. 2004. Dynamic tensile strength of terrestrial rocks and application to impact cratering. *Meteoritics & Planetary Science* 39: 233-246
- Anderson J. L. B., Schultz P. H., and Heineck J. T. 2004. Experimental ejection angles for oblique impacts: implications for the subsurface flow-field. *Meteoritics & Planetary Science* 39: 303-320
- Arakawa M. 1995. Ejection velocity of ice impact fragments. *Icarus* 118: 341-354
- Arakawa M. and Higa M. 1996. Measurements of ejection velocities in collisional disruption of ice spheres. *Planetary and Space Science* 44: 901-908
- Arakawa M. 1999. Collisional disruption of ice by high-velocity impact. *Icarus* 142: 34-45
- Arakawa, M., 2005, 雪の衝突破壊とクレーターリング, 特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」ダスト班研究会 天体の衝突物理の解明 集録.
- Ahrens T. J., and O'Keefe J. D. 1977. Equation of state and impact-induced shock-wave attenuation on the moon. In *Impact and Explosion Cratering*. Pergamon Press, New York.
- Åström J. A., Linna R. P., Timonen J., Möller P. F., and Oddershede L. 2004. Exponential and power-law mass distributions in brittle fragmentation, *Physical Review E* 70: 026104
- Birkhoff G., MacDougall D. P., Pugh E. M., and Taylor G. 1948. Explosives with lined cavities. *Journal of Applied Physics* 19: 563-582
- Bonnan S., Hereil P. L., and Colombet F. 1998. Experimental characterization of quasi static and shock wave behavior of porous aluminum. *Journal of Applied Physics* 83: 5741-5749
- Britt D. T., Yeomans D., Housen K., and Consolmagno G. 2002. Asteroid density, porosity, and structure. In *Asteroid III*, edited by Bottke W. F., Cellino A., Paolicchi P., and Binzel R. P. Tucson, AZ: University of Arizona Press:485-500
- Burchell M. J. and Mackay N. G. 1998. Crater ellipticity in hypervelocity impacts on metals. *Journal of Geophysical Research* 103: 22761-22774
- Burchell M. J., Brooke-Thomas W., Leliwa-Kopystynski J., and Zarnecki J. C., 1998. Hypervelocity Impact Experiments on Solid CO₂ Targets. *Icarus* 131: 210-222
- Burchell M. J., Grey I. D. S., and Shrine N. R. G., 2001. Laboratory investigations of hypervelocity impact cratering in ice. *Advances in Space Research* 28: 1521-1526
- Burchell M. J. and Johnson E. 2005. Impact craters on small icy bodies such as icy satellites and comet nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 360: 769-781
- Burchell M. J., Leliwa-Kopystynski J., and Arakawa M. 2005. Cratering of icy targets by different impactors: Laboratory experiments and implications for cratering in the Solar System. *Icarus* 179: 274-288
- Cintala M. J., Berthoud L., and Hörtz F. 1999. Ejection-velocity distributions from impacts into coarse-grained sand. *Meteoritics & Planetary Science* 34: 605-623

- Comerford M. F. 1967. Comparative erosion rates of stone and iron meteorites under small-particle bombardment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31: 1457-1462
- Çolak A. 2000. Density and strength characteristics of foamed gypsum. *Cement and Concrete Composites* 22: 193-200
- Croft S. K., Kieffer S. W., and Ahrens T. J. 1979. Low-velocity impact craters in ice and ice-saturated sand with implications for Martian crater count ages. *Meteoritics & Planetary Science* 84: 8023-8032.
- Croft S. K. 1980. Cratering flow fields: Implications for the excavation and transient expansion stages of crater formation. *Proceedings, 11th LPSC.*: 2347-2378
- Dahl J. M. and Schultz P. H. 1999. In-Target Stress Wave Momentum Content in Oblique Impacts. *30th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, abstract no. 1854
- Fomin V. M. and Kiselev S. P. 1997. Elastic-Plastic Waves in Porous Materials. in *High pressure shock compaction of solids IV*, Springer, New York: 205
- Fujiwara A., Kamimoto G., and Tsukamoto A. 1977. Destruction of basaltic bodies by high-velocity impact. *Icarus* 31: 277-288
- Fujiwara A., Kamimoto G. and Tsukamoto A. 1978. Expected shape distribution of asteroids obtained from laboratory impact experiments. *Nature* 272: 602-603
- Fujiwara A. 1982. Complete fragmentation of the parent bodies of Themis, Eos, and Koronis families. *Icarus* 52: 434-443
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D. K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D. J., Barnouin-Jha O., Cheng A. F., Demura H., Gaskell R. W., Hirata N., Ikeda H., Kominato T., Miyamoto H., Nakamura A. M., Nakamura R., Sasaki S., and Uesugi K. 2006. The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa. *Science* 312: 1330-1334
- Gault D. E., and Heitowit E. D. 1963. The partition of energy for hypervelocity impact craters formed in rock. *Proceedings, 6th Hypervelocity Impact Symposium (2)*: 419-456
- Gault D. E., Shoemaker E. M., and Moor H. J. 1963. Spray ejected from the lunar surface by meteoroid impact. *Technical note D-1767*
- Gault D. E., Quaide W. L., and Oberbeck V. R. 1968. Impact cratering mechanics and structures. In *Shock Metamorphism of Natural Materials*, Mono Book Co., Baltimore, Md., : 87-99
- Gault D. E. 1973. Displaced mass, depth, diameter, and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks. *Moon* 6. 32-44
- Gault D. E. and Wedekind J. A. 1978. Experimental studies of oblique impact. in *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th*: 3843-3875
- Gault D. E., Schultz P. H. 1987. Oblique impact: Projectile ricochet, concomitant ejecta and momentum transfer. In *NASA, Washington, Reports of Planetary Geology and Geophysics Program*, 1986 p 384-385 (SEE N87-23341 16-91)
- Giblin I., Martelli G., Farinella P., Paolicchi P., Di Martino M., and Smith P. N. 1998. The properties of fragments from catastrophic disruption events. *Icarus* 134: 77-112
- Gilbert G. K. (1893). The moon's face: A study of the origin of its features. *Bull. Phil. Soc. Wash.* 12:241-292

- Grey I. D. S, Burchell M. J., and Shrine R. G. 2002, Scaling of hypervelocity impact craters in ice with impact angle. *Journal of Geophysical Research* 107. E10: 5076
- Gupta S. C., Ahrens T. J., and Yang W. 1999. Shock induced vaporization of anhydrate CaSO₄ and calcite CaCO₃. in *Shock Compression of Condensed Matter*, edited by M. D. Furnish et al., AIP Press Woodbury, NY: 1259-1262
- Holsapple K. A. and Schmidt R. M. 1979. A material-strength model for apparent crater volume. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th*: 2757-2777
- Holsapple K. A. 1980. The equivalent depth of burst for impact cratering. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th*: 2379-2401
- Holsapple K. A., and Schmidt, R. M. 1980. On the scaling of crater dimensions 1. Explosive processes. *Journal of Geophysical Research* 85: B12: 7247-7256
- Holsapple K. A. and Housen K. R. 1986. Scaling laws for the catastrophic collisions of asteroids. *Societa Astronomica Italiana, Memorie (ISSN 0037-8720)* 57: 65-85.
- Housen K. R., Schmidt, R. M., and Holsapple K. A. 1983. Crater ejecta scaling laws-Fundamental forms based on dimensional analysis. *Journal of Geophysical Research* 88: 2485-2499
- Housen K. R., Holsapple K. A., and Voss M. E. 1999. Compaction as the origin of the unusual craters on the asteroid Mathilde. *Nature* 402: 155-157
- Housen K. R., and Holsapple K. A. 2003. Impact cratering on porous asteroids. *Icarus* 163: 102-119
- Inui T. 1957. Partial Differential Equations and their Applications. (in Japanese)
(偏微分方程式とその応用 犬井鐵郎 コロナ社)
- Kadono T., and Fujiwara A. 1996. Observation of expanding vapor cloud generated by hypervelocity impact. *Journal of Geophysical Research* 101, E11: 26097-26109
- Kadono T. 1997. Fragment Mass Distribution of Platelike Objects. *Physical Review Letters* 78: 1444-1447
- Kato M., Iijima Y., Arakawa M., Okimura Y., Fujimura A., Maeno N., and Mizutani H. 1995. Ice-on-ice experiments. *Icarus* 113: 423-441
- Knittle E., Philips W., and Williams Q. 2001. An infrared and Raman spectroscopic study of gypsum at high pressures. *Phys. Chem. Minerals* 28: 630-640
- Koschny D. and Grün E. 2001. Impacts into ice-silicate mixtures: ejecta mass and size distributions. *Icarus* 154: 402-411
- Kun F. and Herrmann H. J. 2006. A study of fragmentation processes using a discrete element method (PMMH,ESPCI, Paris) *Condensed Matter*, cond-mat/9512017
- Love S. G., Hörtz F., and Brownlee D. E. 1993. Target porosity effects in impact cratering and collisional disruption. *Icarus* 105: 216-224
- Maxwell D. E. 1977. Simple Z model of cratering, ejection, and the overturned flap, in D. J. Robby, R. O. Pepin, and R. B. Merrill (Eds.), *Impact and Explosion Cratering*, Pergamon Press, New York, pp. 1003-1008
- Melosh, H. J. 1984. Impact ejection, spallations, and the origin of meteorites. *Icarus* 59: 234-260
- Melosh H. J. 1989. *Impact Cratering: a geologic process*, Oxford University Press, New York.
- Melosh H. J., Ryan E. V., and Asphaug E. 1992. Dynamic fragmentation in impacts: hydrocode simulation

- of laboratory impacts. *Journal of Geophysical Research* 97 E9: 14735-14759
- Mizutani H., Kawakami S., Takagi Y., Kato M., Kumazawa M. 1983. Cratering experiments in sands and a trial for general scaling law, *Journal of Geophysical Research* 88, B1: A835-A846
- Moore H. J., Gault D. E., and Heitowit E. D. 1965. *Proc. 7th hypervelocity Impact Symposium* 4: 35-45
- Nagel K. and Fechtig H. 1980. Diameter to depth dependence of impact craters. *Planet. Space Sci.* 28: 567-573
- Nakamura A., and Fujiwara A. 1991. Velocity distribution of fragments formed in a simulated collisional disruption. *Icarus* 92: 132-146
- Nakamura A., Sugiyama K., and Fujiwara A. 1992. Velocity and spin of fragments from impact disruptions 1. An experimental approach to a general law between mass and velocity. *Icarus* 100: 127-135
- Nakamura A. M. 1993. Laboratory studies on the velocity of fragments from impact disruptions. *The institute of space and astronautical science report* No. 651
- Nakazawa S., Watanabe S., Iijima Y., and Kato M. 2002. Experimental Investigation of Shock Wave Attenuation in Basalt. *Icarus* 156: 539-550
- Nomura Y. 1962. Gijyutushano tameno tokushukansuto sono ouyou. (in Japanese)
(技術者のための特殊関数とその応用 野邑雄吉 日刊工業新聞社)
- Oberbeck V. R. 1971. Laboratory simulation of impact cratering with high explosives. *J. Geophys. Res.* 76:5732-5749
- Onose N. 1996. Ice Crater Formation Experiments by Oblique Impact. Master thesis (in Japanese)
(斜め衝突による氷クレーター形成実験)
- Onose N., Higa M., Arakawa M., Nakamura A. M., and Fujiwara A. 1998. Velocity distribution of Fragments from Impact Cratering. *Proceedings of the 31st ISAS Lunar and Planetary Symposium*:5-8
- Onose N. and Fujiwara A., 2004a. Mass-velocity distributions of fragments in oblique impact cratering on gypsum, *Meteoritics & Planetary Science* 39: 321-332
- Onose N. and Fujiwara A., 2004b. Shapes and Dimensions of Craters Produced by Oblique Impacts.
(小野瀬直美、藤原顕：斜め衝突におけるクレーター形状、日本惑星科学会、札幌市青少年科学館、札幌市、2004年10月13日予稿集)
- Onose N. and Fujiwara A. 2006a. Elastic ejection of late fragments produced in impact craterings on gypsum targets. in: Impact craters as indicators for planetary environmental evolution and astrobiology, Östersund, Sweden, June 8 – 14, Abstract.
- Onose N. and Fujiwara A. 2006b. Mass – cumulative number distributions of fragments produced in impact craterings on gypsum targets, in: Impact craters as indicators for planetary environmental evolution and astrobiology, Östersund, Sweden, June 8 – 14, Abstract.
- Onose N. and Fujiwara A. 2006c. Shapes and Dimensions of Craters Produced by Impact Cratering on Gypsum, in: International Science Symposium on Sample Returns from Solar System Minor Bodies, the 2nd Hayabusa Symposium--- In-situ investigation of Itokawa, Sample Analyses Preparation and Spacecraft Operation ---Tokyo, Japan, July 12-14, Abstract.

- Pierazzo E., Kring D. A., and Melosh H. J. 1998. Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases. *Journal of Geophysical Research* 103, E12: 28607-28625
- Pierazzo E. and Melosh H. J. 2000. Hydrocode modeling of oblique impacts: The fate of the projectile. *Meteoritics & Planetary Science* 35: 117-130
- Polansky C. A., and Ahrens T. J. 1990. Impact spallation experiments: fracture patterns and spall velocities. *Icarus* 87: 140-155
- Resnyansky A. D. and Bourne N. K. 2004. Shock-wave compression of a porous material. *Journal of Applied Physics* 95: 1760-1769
- Roddy D. J. 1976. High-explosive cratering analogs for bowl-shaped central uplift and multiring impact structures. *Proc. 7th Lunar and Planet. Sci. Conference*: 3027-2056
- Ryan E. V. 1992. Catastrophic collisions: Laboratory impact experiments, hydrocode simulations, and the scaling problem. Ph. D thesis, Univ. of Arizona, Tucson.
- Shen A. H., Ahrens T. J., and O'Keefe J. D. 2003. Shock wave induced vaporization of porous solids. *Journal of Applied Physics* 93: 5167-5174
- Schmidt R. M. 1980 Meteor Crater: Energy of formation-implications of centrifuge scaling, *Proc. Lunar. Planet. Sci. Conf.* 11th 2099-2128
- Shoemaker E. M. 1962. Interpretation of lunar craters. In *Physics and Astronomy of the Moon*, Academic pres, New York and London: 283-359
- Simakov G. V., Pavlovsky M. N., Kalashnikov N. G., and Trunin R. F. 1974. Shock compressibility of twelve minerals. *Izv. Phys. Solid Earth* 8: 488-492
- Stewart S. T., and Ahrens T. J. 1999. Porosity effects of impact processes in solar system materials. LPSC XXX
- Stöffler D., Gault D. E., Wedekind J. A., and Polkowski G. 1975. Experimental hypervelocity impact into quartz sand: Distribution and shock metamorphism of ejecta. *Journal of Geophysical Research* 80: 4062-4077
- Stretton I. C., Schofield P. F., Hull S., and Knight K. S. 1997. The static compressibility of gypsum. *Geophysical Research Letters* 24, 10: 1267-1270
- Suzuki K., Saito S., Narita Y., Yamada S., Ohta Y., Ohya H., Tani J. Matsumoto K., Okazaki K., Chiba M., Ozawada T., Toki H., Yoshida S., Kobayashi Y., Nagai K., Saito S., Narisawa. T. 2003. (in Japanese)
(シェルの振動と座屈のハンドブック、日本機会学会編、編集 鈴木勝義、斎藤俊、成田吉弘山田聖志、技報堂出版、2003)
- Takagi Y., Mizutani H., and Kawakami S. 1984. Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophanites. *Icarus* 59: 462-477
- Takagi Y., Nakamura A. M., and Fujiwara A. 1996. Fragment velocity dependence on fragment mass of impact fragmentation phenomena (abstract). In *Lunar and Planetary Science XXVII*: 1301-1302
- Teramoto K., Akiyama H., and Yano H. Possibility of exploration of asteroidal internal structure by using elastic waves. *Proc. 37th ISAS Lunar Planet. Symp.*:255-258
- Vekinis G., Ashby M. F., and Beaumont P. W. R. 1993. Plaster of Paris as a model material for brittle

- porous solids. *Journal of Material Science* 28: 3221-3227
- Veverka J., Thomas P., Harch A., Clark B., Bell J. F., Carcich B., Joseph J., Murchie S., Izenberg N., Chapman C., Merline W., Malin M., McFadden L., and Robinson M. 1999. NEAR Encounter with Asteroid 253 Mathilde: Overview, *Icarus* 140: 3-16
- Vickery A. M. 1986. Size-velocity distribution of large ejecta fragments. *Icarus* 67:224-236
- Vickery A. M. 1987. Variation in ejecta size with ejection velocity. *Geophysical Research Letters* 14: 726-729
- Vickery A. M. 1993. The theory of jetting: application to the origin of tektites. *Icarus* 105:441-453
- Waza, T., Matsui, T. , 1983. Size Distribution of Fine Fragments Produced from Destruction of Rocks by Low Velocity Impact, *LUNAR AND PLANETARY SCIENCE XIV*: 838-839.
- Xu X., and Thadhani N. N. 2004. Investigation of shock-induced reaction behavior of as-blended and ball-milled Ni + Ti powder mixtures using time-resolved stress measurements. *Journal of Applied Physics* 96, 4: 2000-2009
- Yano H., Kubota T., Miyamoto H., Okada T., Scheeres D., Takagi Y., Yoshida K., Abe M., Abe S., Barnouin-Jha O., Fujiwara A., Hasegawa S., Hashimoto T., Ishiguro M., Kato M., Kawaguchi J., Mukai T., Saito J., Sasaki S., and Yoshikawa M. 2006. Touchdown of the Hayabusa Spacecraft at the Muses Sea on Itokawa. *Science* 312: 1350-1353
- Zel'dovich Ya. B. and Raizer Yu. P. 1967. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena. Academic Press NY.