

Two-dimensional fragmentation

門野 敏彦

(宇宙科学研究所／京大・理)

物が壊れるという現象は日常普通に見られ、破壊を理解しようという試みは工学¹⁾や惑星科学²⁾など様々な分野で古くから行われてきた。これまでに得られている重要な認識は、破壊において破片はもともと物質の中に存在していた微小なひびが成長、合体して生成されるという考えである。しかし、ひびが成長してくるとお互いが影響し合い、その後の成長・合体の仕方はそれぞれのひびどうしの相互作用に依存する。その結果物体中のストレス場は非常に複雑になり、存在するすべてのひびの動きを追うことは大変難しい。

近年になって動的破壊現象をフラクタル成長現象で発展した考えを使って理解しようという試みが行われ始めた。そこでは、ひびのパターンや破片のサイズ分布などの全体的な特徴が注目される。

また、これまで動的破壊実験は応用を念頭においておもに球状あるいは立方体の物質を使って行われてきた。これらの形状の物質では力の三成分は非常に複雑で多様な破壊過程をもたらす。このような状況は破壊現象の本質を見るには複雑すぎるため、より単純な系で実験を行うことが必要である。

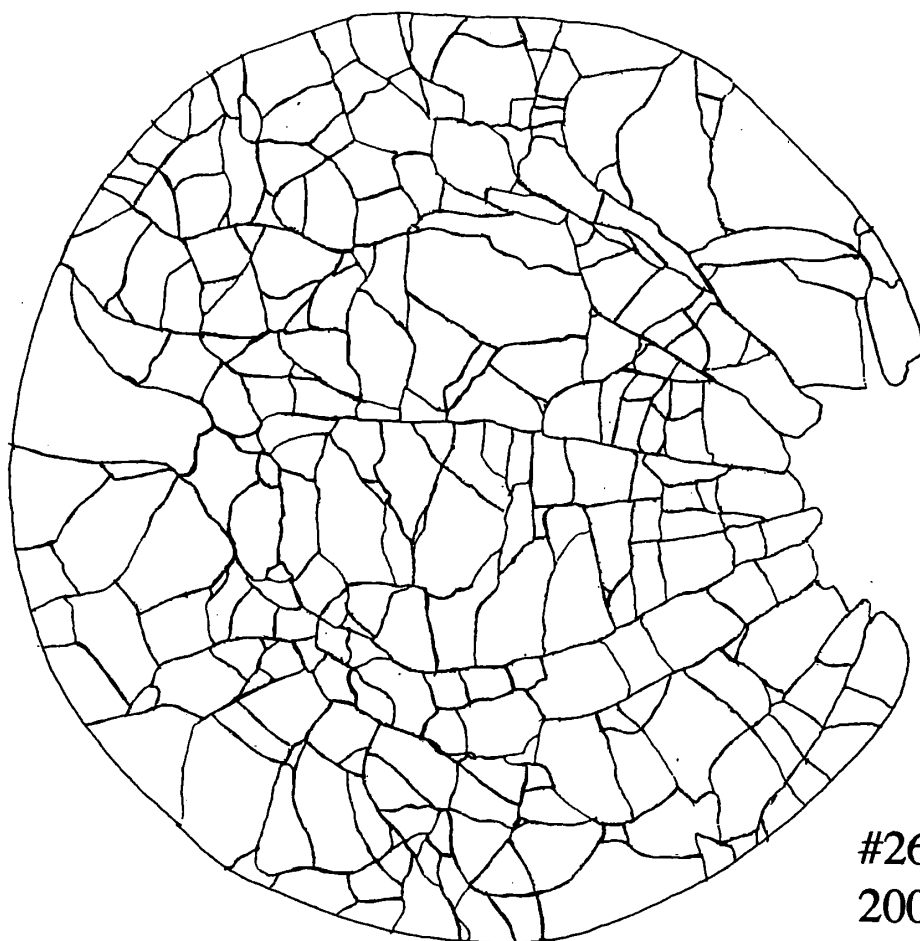
このような視点にたって、われわれは二次元の動的破壊実験を行い破片の質量分布を調べた。ここで、二次元動的破壊を次のように定義する。二次元では破壊を起こす力は破壊される平面状物体の面内に拘束され、面に垂直に働く力による破壊は実現されない。また、力は物体が置かれている面内の境界線からのみ負荷される。この定義では、たとえば平面上の物体に対して物体面に垂直に物体を折り曲げる、というような破壊は二次元破壊ではない。

平面状あるいは棒状の物体を、自由落下またはサンドイッチにして垂直に力を加えて破壊する、ということは行われている³⁻⁶⁾。これらの場合、力が面に垂直に加えられているまたは物体が折れ曲がっている、ということで二次元破壊ではない。

われわれは高速の粒子を平面上物体の側面に衝突させる実験を行った。高速度衝突では破壊は衝撃波によって起こる。衝撃波の通過により物体中の各点は力を受けるが、衝撃波は物体の側面から伝わるので力の面に垂直な成分は平行な成分に比べて衝突点から遠くなるほど小さくなる。その結果、破壊は面に平行な成分で起こると考えられる。それに対し衝突点の近傍では両成分の大きさはほとんど同じなので、三次元的な破壊が起こっているであろう。しかし、物体の厚さを薄くすればするほど、全体に対する衝突点近傍からの影響は小さくなることが期待される。

標的として円盤状の石膏を用意し、物体の側面に直径7 mm、質量0.21 gのナイロン球を一定速度 $4 \pm 0.4 \text{ km/s}$ で衝突させることにより力を注入した。粒子の加速には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使った。いろいろな直径と厚さを持った標的を用意し、塩化ビニール製の回収箱の中に水平に、両面を厚さ5 mmの亚克力板ではさんで設置した。上下の亚克力板の間には標的とほぼ同じ厚さに、四隅にスペーサーとして座金が挿入されている。標的は固定されているわけではなく、亚克力板の間を自由に動かすことができる。この回収箱には直径15 mmの穴が入射粒子の入り口としてあり、また破片の二次的破壊を防ぐため内側にウレタンやスポンジがしきつめられている。標的が設置された真空槽内は全ての実験において約1 Torrの真空度であった。

実験後破片を回収し復元した。ほとんどの破片は復元できたが、衝突点近傍の破片はできなかった。図1は復元後のひびのパターンの一例で、入射粒子は右から飛んできて物体の側面に衝突した。



#261
200×200×3.9 mm
3.92 km/s

図1. 実験後回収した破片を復元されたひびのパターン。入射粒子は図の右側から飛んできて物体の側面に衝突した。衝突点付近は復元できなかった。

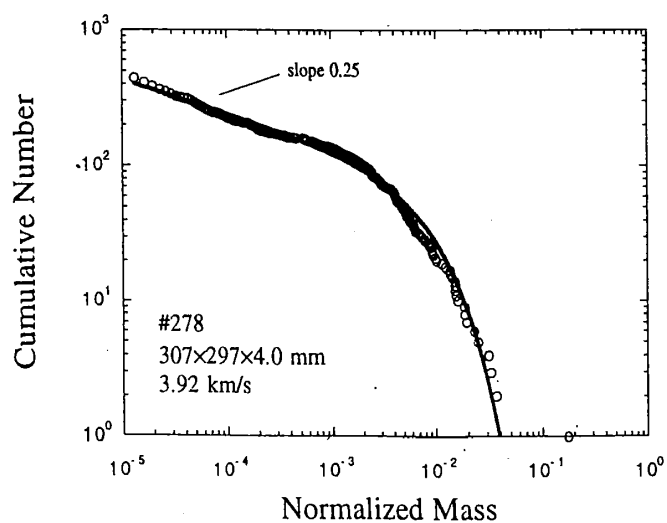


図2. 破片の質量分布。実線はフィットした曲線をあらわしている。

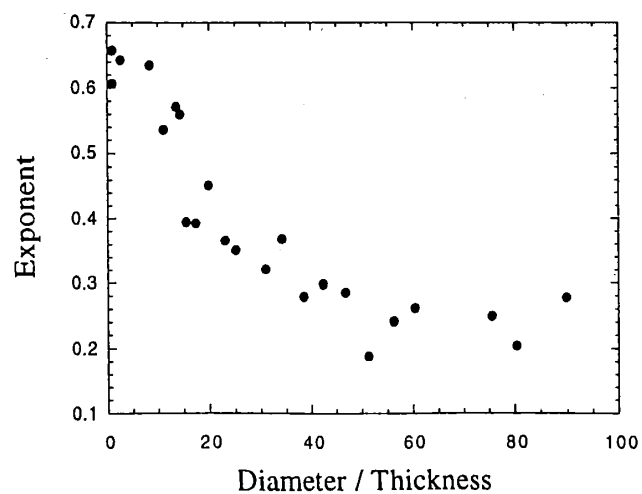


図3. いろいろな直径と厚さの比に対する小さい破片の質量分布のべき指数。

破片の質量分布は動的破壊現象の最も基本的な結果の一つであるため、これまで非常によく調べられている。実験により得られた重要な結果の一つは、破片の質量に対する積算個数の分布がもとの物体に比べて小さい破片の領域でべき分布で表され、その指数がいくらかのばらつきはあるものの普遍的な値、 $2/3$ 、をとるということである⁷⁾。この値は物質の種類などのによらず成り立っているように見える。質量分布全体は、一般に一つのべき指数で表すことができない。図2はわれわれの実験で得られた質量分布である。これを見ると、二次元の破壊でも質量分布は一つのべき指数では表せないことがわかる。そこで、この質量分布を

$$N(>m) = A \exp(-m/m_0)(m)^{-a}$$

という関数でフィットする。ここで、 A , m_0 , a は定数である。 a は小さい破片の分布を特徴づける。図2でフィットした曲線は実線で表されている。

図3はいろいろな厚さと半径を持った物体で行った実験の結果を、上の式でフィットして得られたべき指数、 a である。横軸は標的の直径と厚さの比で、この比が40を越えるあたりから指数の値はほぼ0.2から0.3になっている。球の標的の場合にその質量分布のべき指数は正確にいつも $2/3$ ではなかったように、破壊の実験では不確定性があらわれてしまうためこの値を正確に決めるのは難しい。

次にこの結果をこれまでに提出されている破壊のモデルから得られる値と比較してみる。Gilvarryは三次元の動的破壊においてべき指数が $2/3$ になることを説明するためのモデルを示した⁸⁾。彼は、もともと物体内に存在しストレスがかかると活性化して破片を生成するひびはランダムに分布していると仮定した。彼のモデルをここでは詳しく述べないが、簡単な解説は竹内&水谷⁹⁾にある。二次元では、三次元の場合にあらわれる体積に関する項がなくなり、面積および長さに関する項のみを考える。このときGilvarryのモデルに従えば、全面積が S_0 の物体から長さが $l+dl$ 、面積が $s+ds$ の破片が、

$$dN(l, s) = (S_0/s) \exp(-Q) dQ \quad (1)$$

個できる。ただし、 $Q = (l/L) + (s/S)$ で、 L , S は定数である。次に小さい破片の領域で、 $l/L \gg s/S$ 、すなわち $Q \sim l$ を仮定する。このとき(1)は $dN(l, s) \sim s^{-1} dl \sim s^{-3/2} ds$ となり、積分して積算個数に直すと $N \sim (s)^{1/2}$ となる。われわれの実験結果では s が質量に相当する。したがって、Gilvarryのモデルに従うと二次元動的破壊での小さい破片のべき指数は0.5になる。これはわれわれの結果よりも大きい。

以上をまとめると、高速衝突による二次元破壊実験をおこない生成された破片の質量分布を調べた。またこれまでに提出されている三次元の動的破壊によって生成される破片の質量分布のモデルについて、二次元の場合のべき指数を導出し実験結果と比較したが、モデルによる計算結果は実験結果とは異なっていた。

参考文献

1. Curran, D. R., Seaman, L. & Shockey, D. A. *Phys. Rep.* **147**, 253-388 (1987)
2. Fujiwara, A., P. Cerroni, D. Davis, E. Ryan, M. DiMartino, K. Holsapple, & K. Housen, in *Asteroid II* 240-265 (edited by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, University of Arizona Press, Tucson, 1989)
3. Grady, D. E. & Kipp, M. E. *J. Appl. Phys.* **58**, 1210-1222 (1985)
4. Ishii, T. & Matsushita, M. *J. Phys. Soc. Jpn.* **61**, 3474-3477 (1992)
5. Neda, Z., Mocsy, A. & Bako, B. *Mater. Sci. Eng. A* **169** L1-L4 (1993)
6. Oddershede, L., Dimon, P. & Bohr, J. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 3107-3110 (1993)
7. Turcotte, D. L. *J. Geophys. Res.* **91**, 1921-1926 (1986).
8. Gilvarry, J. J. *J. Appl. Phys.* **32**, 391-399 (1961)
9. Takeuchi, H. & Mizutani, H. *Kagaku* **38**, 622-624 (1968)