



# 衝撃による材料の動的破壊

中野元博\*

## Dynamic Fracture of Materials under Impact

Key Words : Fracture, Impact, Shock, Ceramics, Glass

### 1. はじめに

材料の破壊に対する強度評価の工学的体系として『破壊力学』が近年急速な発展を遂げた。破壊力学では、材料に含まれる何らかの欠陥をき裂としてモデル化し、き裂先端の特異応力場の強さを表す『応力拡大係数』等の力学パラメーターが材料の『破壊じん性』を越えたとき、き裂の進展が始まり、破壊が起こると考えている。通常の荷重に対する破壊じん性試験では試験片と負荷部が力の平衡状態にあるため試験機側のロードセルを用いて荷重を容易に計測でき、標準試験法が規格されて設計と保守管理に実用されている。

一方、衝撃荷重が作用した場合、慣性の効果によって、き裂先端に波の伝播で支配される特異応力場が生じ、その強さを表す『動的応力拡大係数』等の解析が、材料の『動的破壊じん性』を正しく評価する上で問題となる。すなわち、衝撃試験では慣性項のために、通常のロードセルで試験片に作用する動的荷重を計測することができない。そこで、試験装置中を伝播する波を解析することにより、作用した衝撃荷重を求める必要がある。このように、衝撃による破壊に関しては、動的な力学場の計測の困難さから未だ研究の途上にあり、『破壊の動力学』の早急な確立が望まれ、種々の衝撃試験法<sup>1-3)</sup>が提案され

ているが、動的破壊じん性測定法として標準化されたものはない。ここでは、著者らが開発した固体衝撃破壊試験法を用いて材料の動的破壊強度を評価した結果と、レーザー衝撃による実験で新しく得られた高速破壊機構に関する観察結果を紹介する。

### 2. 固体衝撃による破壊の強度評価

材料の衝撃破壊強度の正しい評価において、(1)試験片に作用する衝撃荷重の計測、(2)動的応力拡大係数等の解析、(3)き裂進展開始の検出、この3つは基本事項である。固体の衝突で発生した波の試験装置中の伝播を解析することで求められた衝撃荷重に対し、動的応力拡大係数等は試験片に固有のステップ衝撃応答関数の畳み込み積分で評価できる。また、き裂進展開始は、破壊試験片の予き裂先端近傍で、き裂進展開始時の除荷波を測定することにより検出できる<sup>4-9)</sup>。

動的破壊強度の基本として、室温での固体衝撃により予き裂に純モードIの開口変位を生じさせた場合の破壊じん性を、片側切欠平板の曲げ衝撃、円周

表1 固体衝撃実験で測定した室温の動的破壊じん性  $K_{I_d}$  と静的破壊じん性  $K_{I_c}$  の比較

Material	Dynamic fracture toughness $K_{I_d}$ MPa $\sqrt{m}$	Static fracture toughness $K_{I_c}$ MPa $\sqrt{m}$	Ratio $\frac{K_{I_d}}{K_{I_c}}$
4340 steel	62.	42.	1.5
Aluminum alloy 6061-T6	45.	30.	1.5
Aluminum alloy 7075-T651	38.	30.	1.3
SiC-w reinforced Al 6061 alloy	21.	10.4	2.0
Zirconia ceramics ZrO <sub>2</sub>	9.0	3.4	2.6
Alumina ceramics Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	3.5	1.1
Graphite	1.8	1.2	1.5
Particle dispersed glass	2.4	0.9	2.7
Soda-lime glass	1.5	0.7	2.1



\* Motohiro NAKANO  
1956年3月11日生  
1980年大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻前期課程修了  
現在、大阪大学大学院・工学研究科・精密科学専攻・応用力学領域、助教授、工学博士、計算力学・実験力学  
TEL 06-6879-7293  
FAX 06-6879-7293  
E-Mail nakano@prec.eng.osaka-u.ac.jp

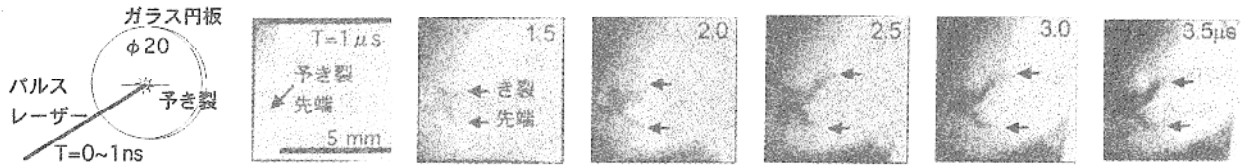


図1 レーザー衝撃実験中に超高速フレーミングカメラを用いて0.5  $\mu\text{s}$  毎に撮影した中央切欠ガラス円板の高速破壊

切欠丸棒の引張衝撃，中央切欠円板の1点圧縮衝撃試験法を用いて測定した結果を表1に整理した．表中の動的破壊じん性 $K_{Id}$ と静的破壊じん性 $K_{Ic}$ の値は平均値であり，右欄には動的と静的の強度比を示した．

表1で比較した材料はすべて室温で脆性破壊し，その動的破壊じん性は静的と同程度か増大する負荷速度依存性を示した．一方，低強度の炭素鋼のように室温では，静的負荷に対して延性破壊し，衝撃負荷に対して脆性破壊へ遷移が起きる場合，静的な値より動的破壊じん性が低下する傾向を示すことがよく知られている．破壊は，き裂としてモデル化される欠陥の先端において，複数のミクロな変形挙動が非常に複雑に連結して生じるマクロな挙動であり，負荷速度の静的から動的への変化に対してそのミクロな破壊機構の変化がマクロな破壊じん性の負荷速度依存性として現れる．表1から，室温で脆性破壊が特に問題となる材料においては，動的破壊じん性 $K_{Id}$ を静的破壊強度 $K_{Ic}$ 以上と評価してよいが，高温においては静的負荷下で延性破壊する領域が現れ，反対に $K_{Id} < K_{Ic}$ となることが考えられ，破壊機構の脆性延性遷移が起きる温度・負荷速度の条件を十分に把握して使用することが重要である．

### 3. レーザー衝撃による高速破壊機構

Griffithに始まる脆性破壊の研究で最も基本的な材料であるガラスの強度特性は，固体衝撃による動的試験と準静的な破壊試験の結果から変形速度に依存することが明かであり，き裂進展までに要する負荷開始からの時間 $t_f$ が短いほど破壊じん性が増大する．そこで，さらに短い破壊時間 $t_f$ 下におけるガラスの高速破壊に関して研究するため，高強度パルスレーザーを集光させて生成したプラズマの超高压による衝撃波を用いる破壊試験を新たに実施した．

パルスレーザーで誘起された衝撃波による破壊の研究は，1973年に米国MITの実験<sup>10)</sup>に始まり，固体衝撃による実験法に比べて超高変形速度下の材料

の力学的挙動を研究できる利点がある．従来の円板試験片の板厚方向に平面衝撃波を伝播させる実験方法では，マイクロクラックの発生・成長領域が狭い範囲に限定されるので，実験後にその観察を行うことが困難であった．そこで，円板試験片の中心に円錐孔を加工して，1nsの超短パルスレーザーを集光・吸収させ，誘起される立ち上がりの急峻な衝撃波を円板の半径方向に伝播させる独自の試験法で，ガラスの極短時間負荷下の破壊挙動を調べた<sup>11)</sup>．この方法の特長は，円板の半径方向への伝播で拡大した円柱衝撃波により広い範囲でマイクロクラックが発生・成長し，その各プロセスの詳細が段階的に各半径位置に記録され，観察できることにある．

図1に，時間 $T=0$ にレーザーで誘起された衝撃波がガラス中を伝播して $T=1 \mu\text{s}$ に予き裂先端に到達し，その直後からき裂の成長が始まる様子を電子式超高速フレーミングカメラを用いて，0.5  $\mu\text{s}$ 毎に撮影した連続写真を示す．き裂は2つに枝分かれして成長を始めるが，超短パルスの衝撃波が通過した後，一度成長したき裂の先端が再び閉じている．このように，レーザー衝撃試験で極短時間の負荷が実現され，ガラス等の微視的な動的破壊のメカニズムを解明する上で重要な手がかりを与えるデータが得られている．

従来の衝撃波実験では，境界での波の反射によって生じる引張応力で，マイクロクラックが発生し，成長するスプール破壊の機構が提唱されてきた．ところが，図1に示されるき裂の成長は，圧縮の波が到達すると同時に起きている．図2に示すように，レーザー誘起衝撃波による破壊実験においては，ガラス中のボイドから多数のマイクロクラックが成長していることが破面観察から明らかになった．一方，破壊開始までの時間 $t_f$ が数分の準静的試験，数十 $\mu\text{s}$ の固体衝撃試験では，図3のように予き裂先端付近にマイクロクラックの発生が観察されず，予き裂からのき裂進展がボイドの存在に影響されないことが明かである．図2のようなボイドを核としたマ

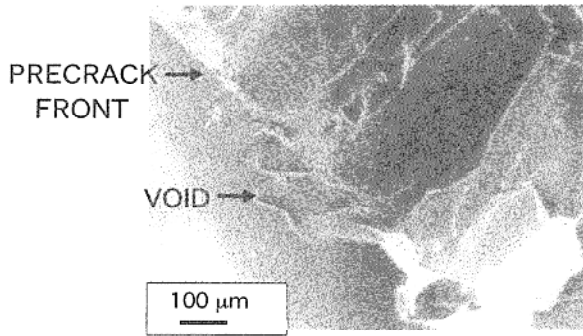


図2 レーザー衝撃により高速破壊した中央切欠ガラス円板の破面

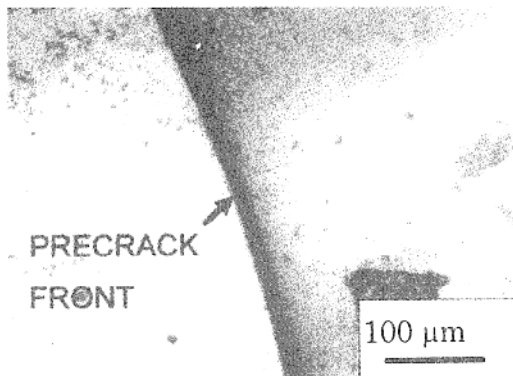


図3 固体衝撃により破壊した中央切欠ガラス円板の破面

マイクロクラックの発生・成長が、レーザー衝撃による高速破壊の特徴である。すなわち、マクロには圧縮の負荷が作用している場であっても、扁平なポイドの表面では局所的に引張応力が生じ、そこからマイクロクラックが発生することにより、エネルギーを解放している機構が考えられる。このような高速破壊のメカニズムを検証するため、マイクロクラックの発生・成長・連結による破壊プロセスの数値シミュレーションを実施している<sup>11)</sup>。

#### 4. おわりに

き裂の高速進展を起こす衝撃試験法を新たに開発し、材料の動的な破壊メカニズムについて調べてきた。特に、脆性なガラスやセラミックスのような材料の破壊強度特性を向上させるためには、真の微視的な破壊機構を明らかにすることが必要であり、超高速カメラを用いた破壊プロセスの観察や破壊じん性の速度依存性のデータがその重要な手掛かりとなる。材料の破壊強度特性は変形速度に依存し、破壊

開始までの時間 $t_f$ が異なる場合、き裂先端の変形挙動に違いが生じるために破壊じん性の値が変化する。この破壊強度特性の速度依存性を評価して、微視的な破壊機構のモデルを提案し、数値シミュレーションに基づく検討を進めている。

破壊の支配機構について、き裂先端の原子間距離のオーダーまで含めたさらにミクロな力学的モデルへと考えを深めると、非線形な挙動を示す原子モデルの導入による解析が不可欠となる。著者らは、このき裂先端における応力の極めて高い領域について原子モデルを導入し、一方、き裂先端から離れた応力の低い領域を線形弾性体として解析するという原子モデルと連続体モデルを融合した解析法の開発を試みている<sup>12)</sup>。ここで得られた成果は、今後の『破壊の物理』に関する研究の発展に寄与し得るものと考えている。

#### 参考文献

- 1) 林, 田中 編; 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1988.
- 2) 日本機械学会編; 衝撃破壊工学, 技報堂, (1990) 156.
- 3) 岸田; 機械の研究, 41 (1989) 1221.
- 4) 中野, 岸田; 日本航空宇宙学会誌, 36 (1988) 147.
- 5) 中野, 岸田, 横山; 日本機械学会論文集, A 55 (1989) 782.
- 6) M.Nakano, K.Kishida ; Eng. Fract. Mech., 36 (1990) 515.
- 7) M.Nakano, K.Kishida ; Int. J. Pres. Ves. Piping, 44 (1990) 3.
- 8) M.Nakano, K.Kishida, Y.Yamauchi, Y.Sogabe; J. Physique IV, 4 C8 (1994) 695.
- 9) 中野, 岸田, 山内; 日本機械学会論文集, A 63 (1997) 2586.
- 10) J.A.Fox, D.N.Barr ; Appl. Phys. Lett., 22 (1973) 594.
- 11) X.Z.Li, M.Nakano, Y.Yamauchi, K.Kishida, K.A.Tanaka ; J. Appl. Phys., 83 (1998) 3583.
- 12) 中野, 山内, 岸田, 山本, 住友; 日本機械学会 関西支部講演論文集, 954-4 (1995) 213.