

# 衝突および残留応力による破壊パターン形成と数値解析手法の開発

廣部 紗也子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

## 背景

破壊現象は大きく、場の静的つり合いを保ちながら進展する準静的破壊と、弾性波を伴い高速に進展する動的破壊に分類される。準静的破壊では解析的な議論が可能な場合もある一方、動的破壊では亀裂進展速度や分岐、進展方向の予測が困難である。さらに、破壊過程はカオス的挙動を示し、わずかな初期条件の違いが最終的な亀裂パターンに大きな差異をもたらす。このような不連続場の発生は、数学的・数値解析的に大きな困難を伴う。

従来の有限要素法 (FEM) は連続体近似に基づくため、亀裂の生成・進展といった不連続現象の直接的な取り扱いが難しい。この問題に対し、Cohesive Zone Model (CZM)、XFEM、Phase Field Model (PFM) などが提案されてきたが、計算コストの高さやパラメータ設定の任意性といった課題が残されている。一方、DEM や Peridynamics といった粒子的手法は不連続性の表現に優れるものの、連続体力学との等価性等に課題がある。

## 粒子離散化有限要素法 (PDS-FEM)

PDS-FEM は、FEM に基づく手法と粒子的手法の長所を併せ持つ数値解析法である。解析領域を Voronoi 分割と Delaunay 分割という双対な離散化図形で表現し、固体連続体を Voronoi 粒子の集合として定式化する。変位場、ひずみ場、応力場は不連続かつ互いに重なり合わない補間関数によって表され、得られる剛性マトリクスや B マトリクスは通常の一次要素 FEM と一致する。

破壊は、Voronoi 粒子間の相互作用の喪失として自然に表現される。具体的には、対応する B マトリクス内の線（面）積分項をゼロとすることで亀裂面を導入するため、メッシュ再生成や破壊を表現するための特別な関数を必要としない。この結果、破壊前後におけるひずみエネルギーの変化を定量的に評価でき、連続体の変形との等価性も保たれる。

さらに、PDS-FEM では解析力学に基づいて Hamiltonian を定義できるため、正準方程式に基づく時間発展解析が可能である。シンプソンティック数値積分法を用いることで、陽解法でありながら長時間安定した動的解析を実現し、弾性波伝播や衝突を伴う破壊現象の高精度な解析が可能となる。

## PDS-FEM の残留応力場における破壊への拡張

本研究では、PDS-FEM を残留応力場破壊における問題へ拡張し、その定式化と有効性を示した。残留応力は、熱膨張・収縮、乾燥収縮、塑性変形、相転移などの不均一な非弾性変形に起因して生じる自己つり合い応力であり、外力が作用しない状態でも材料内部に応力場

が存在する。圧縮残留応力は亀裂進展を阻害するが、引張残留応力は亀裂進展を促進し、材料のカタストロフィックな破壊をもたらす。このため解析では、破壊進展に伴う応力解放と再分配、ならびに弾性波の発生を、亀裂進展挙動と同時に解く必要がある。従来手法では、残留応力場と動的破壊の同時取り扱いが困難であったが、PDS-FEM は解析力学に基づく定式化により、これを一貫して扱うことが可能となった。

### **解析事例:衝突および残留応力による破壊**

本研究では、PDS-FEM の有効性を示すため、複数の代表的な破壊現象を解析した。まず、ガラス端部に生じるハマ欠け (Edge Chipping) を対象とした衝突解析では、衝突速度や衝撃力の増加に伴い、ring crack から Hertzian cone crack、さらに非対称な cone crack へと亀裂形態が遷移する過程を再現した。数値解析により、ハマ欠けサイズが衝撃条件に依存して増大することが示され、既往研究との整合性が確認された。

次に、強化ガラスの破壊解析では、表面に圧縮、内部に引張をもつ残留応力分布が亀裂進展に与える影響を検討した。化学強化ガラスを対象に、残留応力分布を静的解析で導出した後、動的破壊解析を実施した。その結果、残留応力の大きさや分布形状によって亀裂パターンが大きく変化し、臨界条件を超えると瞬間的な粉碎破壊が生じることを、実験結果と良好に一致する形で再現できた。また、亀裂進展速度や分岐の臨界条件についても定量的評価が可能であることを示した。

さらに、残留応力を起因とする準静的破壊として、乾燥亀裂の解析を行った。拡散・変形・破壊を連成させたモデルにより、網目状の亀裂パターンやセル構造の形成、層厚に依存したセルサイズの変化を再現した。実験結果との比較から、残留応力場の形成と亀裂進展が同時に進行する問題に対して、PDS-FEM が有効であることが示された。

加えて、熱応力による亀裂遷移問題では、温度勾配下で進展する準静的亀裂を解析し、直進・蛇行・分岐といったパターン遷移を再現した。これは、残留応力場と亀裂進展の相互作用を適切に捉えられていることを示している。

### **まとめと展望**

PDS-FEM は、不連続な破壊現象を自然に表現しつつ、連続体力学との等価性を維持できる数値解析手法であり、残留応力場における破壊という、従来手法では解析できなかった現象の解析を可能にした。また、衝突破壊、強化ガラスの動的破壊、乾燥亀裂、熱破壊の亀裂遷移といった多様な事例において、実験結果と整合的な解析結果が得られ、その汎用性と有効性が確認された。今後は、弾塑性変形との連成を進めることで、塑性変形を伴うより複雑な破壊現象への適用が期待される。