

## 残留応力場における動的破壊進展解析

課題責任者

廣部 紗也子 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

著者

廣部 紗也子<sup>\*1</sup>, 小國 健二<sup>\*1</sup>

<sup>\*</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

キーワード：残留応力，破壊解析，強化ガラス，PDS-FEM

### 1. はじめに

残留応力場は、温度や水分量変化による変形、塑性変形、相転移など様々な要因から発生し、その空間スケールは地震断層からイオンサイズまで幅広い。例えば、産業現場では、古くから残留応力場が材料の破壊過程と強度に大きな影響を与えることは知られており、残留応力場の適切なコントロールが材料設計において重要な課題となっている。しかしながら、残留応力場と亀裂進展の定量的な関係は得られておらず、未だ経験則に基づいて材料設計が行われている。また、残留応力は断層の連動性にも影響を与える可能性があることも指摘されており、残留応力場内における破壊解析を実現することは、産業・学術の両面から非常に重要な課題である。

そこで、本課題では独自開発した動的破壊進展解析コードを大規模並列化し、残留応力場を考慮した地震断層挙動の解析に適用することで、残留応力場での動的破壊進展という視点で、地震断層挙動の解明・予測につなげていくことを最終的な目標としている。本解析手法は、PDS-FEM(Particle Discretization Scheme Finite Element Method) [1-3]における離散化手法をベースに開発されており、世界で初めて残留応力場を伴う場における動的破壊進展解析を可能にしたものである。また、残留応力場のソースや空間スケールによらず適用でき、材料定数以外の不確かなパラメータを一切必要としないため、あらゆる対象に適用できる非常に汎用性の高いツールである。

今年度は、結晶化ガラスの解析を例に、特に三次元的で複雑な残留応力場が存在する複合材料中での動的破壊現象における提案手法の妥当性の検証、地震断層等の大規模計算に向けた高度並列化を行った。

なお、本解析コード自体の妥当性は化学強化ガラスの破壊に関する実験と解析の比較によって既に検証済みである[4, 5]。

### 2. 結晶化ガラスのモデル作成

結晶化ガラスは、ガラスを再加熱しガラス内部に結晶を析出させたガラスである。結晶と残ガラスの物性値は大きく異なるとともに、結晶化ガラスの冷却過程においてガラス相と結晶相の収縮率の違いにより結晶化ガラス内部に残留応力が発生する。この結晶化ガラスの破壊現象は、「残留応力場を含む複合材料での破壊」という点に

おいて、地震断層内での破壊のモデルとなり得る。また、ガラスは、物性がよく知られた理想的な脆性材料であること、高い透明度を有することなどから、実験における観察・計測も容易であり、数値解析手法の妥当性の検証材料として非常に有用である。

本研究では、結晶化度と残ガラスの熱膨張率の差が残留応力に与える影響を確認するとともに、残留応力の分布と亀裂進展パスの関連性の確認するため、まず結晶化ガラスの結晶化度を仮定し、結晶化ガラスのモデルを作成した。解析モデルサイズは、5mm×5mm×1mmで、結晶化度は20、40、60%とし、ランダムに結晶位置を決定した。この際、結晶直径は約100 $\mu$ mになるようにした(表1)。また、解析モデルのメッシュ粗さによる影響を考慮するため、平均節点間の異なる2種類のメッシュを用いた。Mesh Iは接点数768, 818、要素数4, 721, 479、平均節点間距離0.397 $\mu$ mで、Mesh IIは接点数34, 978, 767、要素数222, 468, 589、平均節点間距離0.11 $\mu$ mである。ここでは例として、図1にMesh Iの結晶化度19.5%のモデルを示す。

このモデルを用いて、結晶と残ガラスが950 $^{\circ}$ Cから25 $^{\circ}$ Cまで温度が低下した際の残留応力分布の解析を行った。解析では、結晶も残ガラスも等方的に収縮すると仮定した。結晶化度が最も低いモデルを例に、得られた残留応力分布のメッシュ粗さによる比較を図2に示す。これより、細かいメッシュ(Mesh II)の方が、粒子・残留応力場ともにはっきりとモデル化されていることが分かる。そのため、破壊解析を行うにあたり、100 $\mu$ mの粒子を含む場合には、平均節点間距離が約0.1 $\mu$ mのモデルが望ましいと言える。

表1 結晶化ガラスのモデル作成

	結晶化度 (%)	平均結晶直径 ( $\mu$ m)
Mesh I	19.5	125
	35.2	120
	58.0	113
Mesh II	15.4	115
	39.4	109
	56.5	104

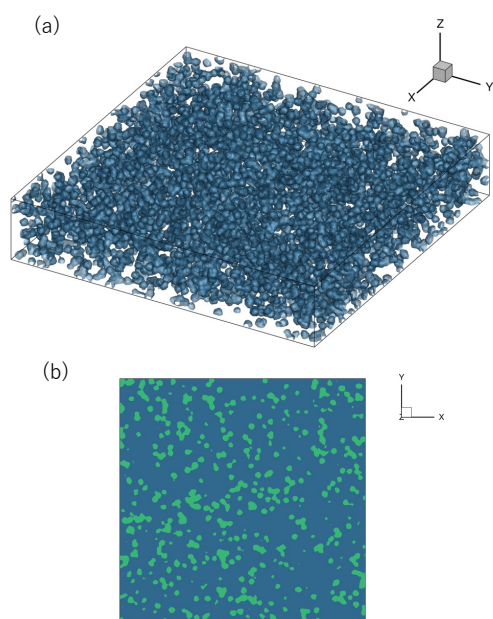


図1 結晶化ガラスのモデル(Mesh I 結晶化度 19.5%). (a) 結晶分布 (青い粒が結晶). (b) 板厚中心(z=0.5mm)での結晶分布(緑の領域が結晶).

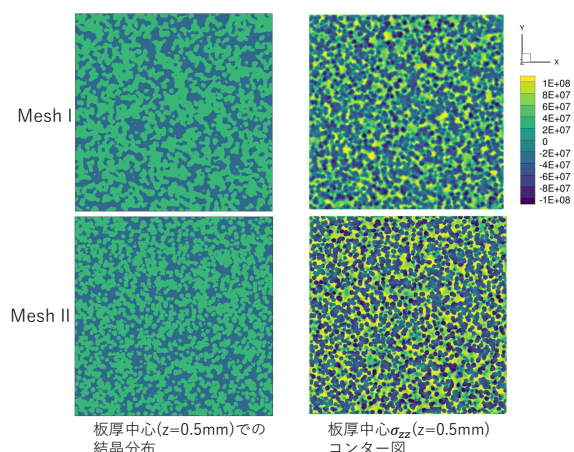


図2 メッシュ粗さの違いによる残留応力分布の違い.

### 3. 結晶化ガラスの破壊解析

作成した結晶化ガラスのモデルを用いて、PDS-FEMを用いた破壊解析を行った。破壊解析では、結晶化ガラス板端部に x 方向正の向きに長さ 0.3mm の初期亀裂を行い、y 方向正負の向きに 100MPa の引張力を作用させた。

図 3 に解析結果の例を示す。黄色いと緑で示された部分が亀裂である。これにより、亀裂がヤング率の高い結晶相を避けて進展している様子が分かる。これは、実験で観察される特徴とよく一致している。図 2 に示すように、モデル内には結晶分布に応じて複雑な残留応力分布が形成されているが、亀裂進展過程に残留応力分布がどの程度影響を及ぼしているかを定量的に評価するためには、今後更なる解析が必要である。

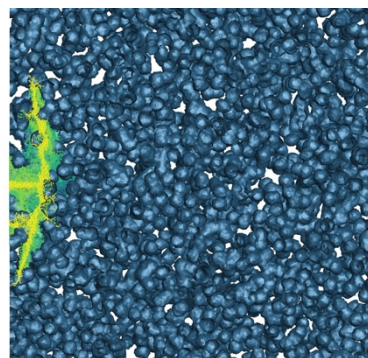


図3 結晶化ガラスの破壊解析結果。黄色で示された部分がモデル手前側の亀裂、緑がモデル奥側の亀裂。

### 4. まとめ

本課題では、三次元的で複雑な残留応力場が存在する複合材料中での動的破壊解析を実現するため、結晶化ガラスを対象としたモデル作成・動的破壊解析を行った。この解析にあたり、複雑な残留応力分布をもつ複合材料モデルを作成するためのプリプロセスプログラムの作成・本解析プログラムの作成を行い、モデルおよび解析結果の妥当性検証を行った。

プリプロセスでは、任意の結晶化度・結晶サイズを持つモデルを自動作成することを可能にした。また、このモデルを用いて、材料が熱収縮することによって生じる残留応力計算を実現し、実験からは計測できない複雑な残留応力分布を可視化した。また、PDS-FEMを用いた動的破壊進展解析により、亀裂が硬い結晶相を避けて進展する様子を再現することができた。この亀裂進展過程に対し、残留応力分布がどの程度影響を及ぼしているのか定量的に評価することが今後の課題である。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K14812 の助成を受けて実施されたものです。

### 文献

[1] M. Hori, K. Oguni, and H. Sakaguchi, Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomenon, *J. Mech. Phys. Solids* 53, 681 (2005).  
 [2] K. Oguni, M. L. L. Wijerathne, T. Okinaka, and M. Hori, Crack propagation analysis using PDS-FEM and comparison with fracture experiment, *Mech. Mater.* 41, 1242 (2009).  
 [3] M. L. L. Wijerathne, K. Oguni, and M. Hori, Numerical analysis of growing crack problems using particle discretization scheme, *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 80, 46 (2009).  
 [4] S. Hirobe, K. Imakita, H. Aizawa, Y. Kato, S. Urata, and K. Oguni, Simulation of Catastrophic failure in a residual stress field, *Phys. Rev. Lett.* 127, 064301 (2021).  
 [5] S. Hirobe, K. Imakita, H. Aizawa, Y. Kato, S. Urata, and K. Oguni, Mathematical model and numerical analysis method for dynamic fracture in a residual stress field, *Phys. Rev. E* 104, 025001 (2021).