

Bilateral Filter の重みづけを応用した SiC/SiC 複合材料における合体き裂再識別手法

金城 光成 †

松岡 丈平 ‡

† 東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科 コンピュータサイエンス専攻

‡ 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部

1 序論

近年、航空エンジン用の次世代材料として、Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Carbide Matrix Composites (以下 SiC/SiC) が注目されている。SiC/SiC は、従来の構造材料と比較して軽量であり、高強度・高耐熱性を備えるとともに、優れた靱性を有することから、実用化が強く期待される [1]。一方、SiC/SiC は従来の金属材料とは異なる破壊特性を示し、き裂の進展過程と最終破壊との関係は十分に解明されていない。

金属材料では単一のき裂が支配的に進展して破断に至るため、その進展挙動を追跡することで損傷の程度を評価することが可能である。一方、SiC/SiC は高い損傷許容性を有しており、内部繊維によりき裂進展が抑制される。その結果、複数の微細き裂が同時に発生・成長し、相互作用を伴いながら最終破断に至る。したがって、材料劣化を適切に評価するためには、複数き裂の成長挙動を観察・解析する必要がある。

本稿では、SiC/SiC 複合材料の引張試験により得られた小角散乱 (Small-Angle X-ray Scattering) 画像 (以下 SAXS) を対象とし、SAXS から手作業で作成したき裂領域の Ground Truth 画像 (以下 GT) を入力として扱う。引張試験では、荷重を段階的に増加させ、各段階で取得した SAXS から、材料内部に発生・成長する複数き裂の進展過程を観察する [2]。

提案手法は、Bilateral Filter (以下 BF) の重み付け原理を応用した新たなラベリング手法を導入し、個別のき裂に一貫した識別ラベルを付与するき裂追跡手法である。これにより、複数き裂進展挙動の解析を可能とする。

2 Baseline 手法とその課題

物体追跡は、一般に連続する画像間における対象領域の空間的な重なりに基づいて行われる。本研究では、この考え方に基づく手法を Baseline 手法と呼ぶ。

Baseline 手法では、引張試験で得られた GT の段階的な荷重画像を比較し、空間的に重なるき裂領域を同一のき裂と判定して同一ラベルを継承する。一方、き裂領域が重ならない場合、新たなき裂として別のラベルを付与する。

ただし、Baseline 手法では、複数のき裂が接近・合体した場合、それらを単一のき裂として扱うため、合体前に存在していた個々のき裂の成長履歴が失われる。その結果、き裂の合体を伴って最終破断に至る SiC/SiC においては、き裂単位での成長挙動や破断への寄与度を精密に解析することができない。

図 1 に、引張試験において Baseline 手法を適用したき裂識別結果を示す。図 1(a), (d) はそれぞれ引張荷重 2600 N および 3400 N における SAXS であり、図 1(b), (e) は対応する Baseline 手法によるカラーマップ (以下 CMAP) を示している。CMAP では、各き裂に識別ラベルを付与し、異なる色で可視化している。

図 1(b), (e) の比較から、引張荷重の増加に伴う複数き裂の接近・合体において、Baseline 手法ではそれらが単一のき裂ラベルが付与されていることが分かる。この結果、本来は合体前に独立して成長していた微細き裂の個別履歴が失われ、形態的特徴量の時系列解析や破断挙動の定量評価を正確に行うことができない。

以上より、SiC/SiC 特有のき裂進展挙動を考慮した新たなき裂トラッキング手法が必要である。

3 提案手法

本研究では、合体後のき裂領域を構成する各画素がどの合体前き裂に由来するかを推定することで、合体前のき裂構造を再識別する手法を提案する。

3.1 Bilateral Score の導入

ラベル再割り当ての指標として、画素間の空間的距離と輝度差を同時に考慮する「Bilateral Score」を導入する。本指標は、画像処理分野においてノイズ除去に用いられる BF の重み付け原理を応用したものである。

合体後の画素 P_j が、合体前の特定のき裂ラベル L_k に属する妥当性を評価するため、画素 P_j とき裂 L_k を

Bilateral Score-Based Tracking for Re-identification of Coalesced Cracks in CMCs

†Kosei KINJO ‡Johei MATSUOKA

†Tokyo University of Technology Graduate School of Bionics, Computer and Media science, Master's Program in Computer Science.

‡School of Computer Science, Tokyo University of Technology

構成する各画素 $P_{k,m}$ と間のスコア $S(P_j, P_{k,m})$ を次式で定義する：

$$S(P_j, P_{k,m}) = \exp\left(-\frac{D(P_j, P_{k,m})^2}{2\sigma_{sp}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(I(P_j) - I(P_{k,m}))^2}{2\sigma_{int}^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $D(P_j, P_{k,m})$ は画素間のユークリッド距離、 $I(P)$ は画素 P の輝度値を表す。 σ_{sp} および σ_{int} は、それぞれ空間距離および輝度差の影響度を調整するパラメータである。各ラベル L_k への帰属スコアは、ラベル内の全画素に対する $S(P_j, P_{k,m})$ の平均値として算出する。

3.2 制約条件と物理的整合性

再割り当て結果の物理的整合性を担保するため、以下の制約条件を導入する。

面積比の保持 合体前の各き裂の面積比に基づいて、各ラベルが獲得可能な最大画素数を事前に算出し、特定のき裂が過度に領域を占有することを防ぐ。

連続性の担保 領域の分断（飛び地）を防止するため、既に割り当てられた領域に隣接する4近傍画素のみを探索対象とし、領域を逐次的に拡張する。

4 評価と考察

提案手法の有効性を検証するため、幾何学的整合性の確認および Baseline 手法との比較評価を行った。

4.1 幾何学的整合性の検証

評価の結果、合体前後において各き裂の面積比に大きな変動は見られず、相対的な大小関係が保持されていることが確認された。また、合体後のき裂領域を構成する総画素数が、再識別後に各き裂へ割り当てられた画素数の総和と一致していることから、未割り当て画素が存在しないことが確認された。加えて、飛び地のない連続した領域が形成されていることから、提案手法により幾何学的な一貫性が保たれていることが示された。

4.2 Baseline 手法との比較

Baseline 手法では、き裂の合体時に複数のき裂が単一のラベルに統合されるため、合体前に存在した個々のき裂を区別して追跡することが困難となり、き裂情報の欠損が生じる。一方、提案手法では合体後においても各き裂が独立したラベルを保持し続けた。引張荷重 3400N における比較では、Baseline 手法の識別数が

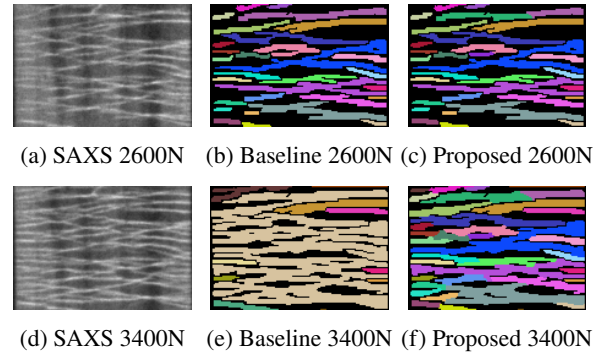


図 1: 引張試験におけるき裂識別結果の比較. 左から SAXS 画像, Baseline 手法, 提案手法による CMAP, また、引張荷重は上段 2600 N, 下段 3400 N.

86 本であったのに対し、提案手法では 203 本と大幅な増加が確認された。これは、近接・合体したき裂を個別に分離して認識できていることを示している。

図 1(b), (e) に示す Baseline 手法の結果では、複数の近接したき裂が合体後に単一のラベルとして扱われているのに対し、図 1(c), (f) に示す提案手法の結果では、画素レベルでの再識別により、各き裂が明瞭に分離されていることが分かる。この結果は、個別き裂の成長履歴や発生起点の特定を可能とし、形態評価およびき裂追跡精度の向上に寄与する。

以上より、提案手法は個々のき裂の形態的特徴量を適切に抽出し、き裂単位での追跡・比較、ならびに進展挙動の詳細な解析を可能にする手法であるといえる。

5 結論

本研究では、Bilateral Filter の重みづけ原理を応用したき裂再識別手法を提案した。画素間の位置および輝度に基づく Bilateral Score に加え、面積比の保持や連続性の制約を導入することで、合体後のき裂に対しても幾何学的整合性を保ったまま個々のき裂を再識別できることを示した。これにより、従来困難であったき裂単位での追跡や形態的特徴量の抽出が可能となり、き裂本数の把握精度が向上した。

参考文献

- [1] 香川豊. セラミックス基複合材料の力学特性および応用分野. *応用物理*, 86(6):467–473, 2017.
- [2] M. Kotani, Y. Tanaka, H. Hatta, and Y. Kagawa. Crack-ing detection of sic/sic composite by x-ray talbot-lau interferometry. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 44(13):7612–7621, 2024.