

短繊維強化複合材料の 破壊予測技術

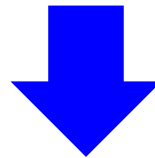
岡山大学 大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻 先端機械学講座
教授

多田直哉

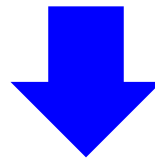
2019年9月5日

従来技術とその問題点

従来は、短繊維強化複合材料の破壊や強度を推定する場合、単純に**繊維の体積分率**（または重量分率）と**確率論**を用いていた。



材料の破壊や強度に強く影響すると考えられる**繊維の方位分布**や**繊維が束状に集中**している箇所の影響が考慮されていない。

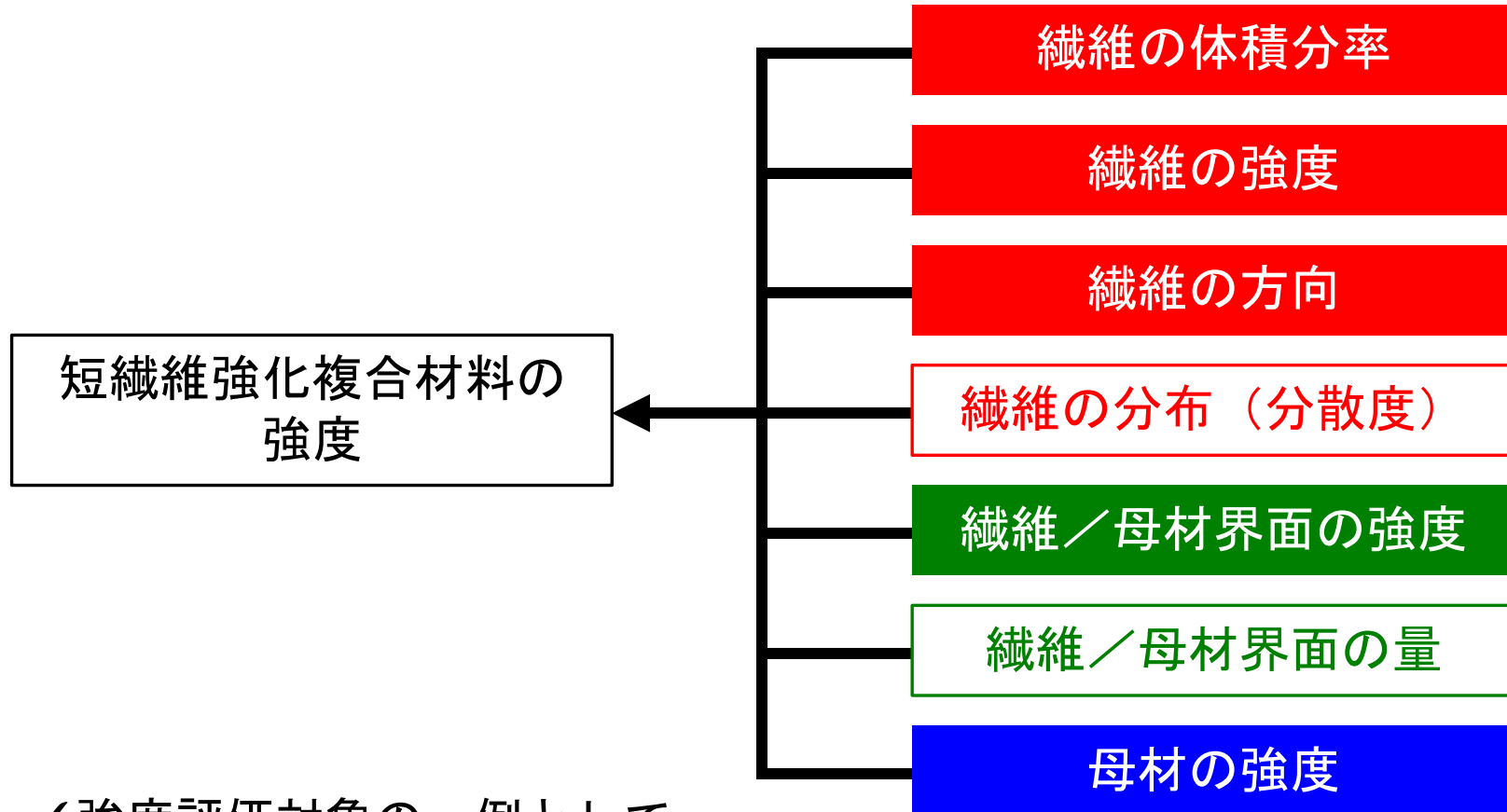


不十分な予測精度（広い予測範囲）

新技術の特長

- 単純な繊維の体積分率（重量分率）ではなく、**繊維／マトリクス界面の状況も考慮した強度評価手法**
- 繊維観察結果を基に**非破壊的な特性評価**が可能
- 不明な原因を確率的方法で処理せず、**より確定論的視点**に立って特性を把握
- **力学的な裏付け**が可能

短繊維強化複合材料の強度に及ぼす様々な因子



✓ 強度評価対象の一例として
繊維の可視化が容易な自己
強化ポリエチレンを採用

自己強化ポリマー

地球環境問題

廃棄プラスチックの削減とリサイクル量の増加が課題



高いリサイクル性と高比強度を有する新たな材料の開発が期待されている

自己強化ポリマー Self-reinforced polymers (SRPs)

Capiati and Porterによって提案された繊維と母材が同種の材料で構成される複合材料

(Journal of Materials Science, Vol.10, Issue 10, pp.1671-1677, 1975)

単一ポリマー複合材料 Single-polymer composites (SPCs)

自己強化ポリエチレン Self-reinforced polyethylene (SRPE)

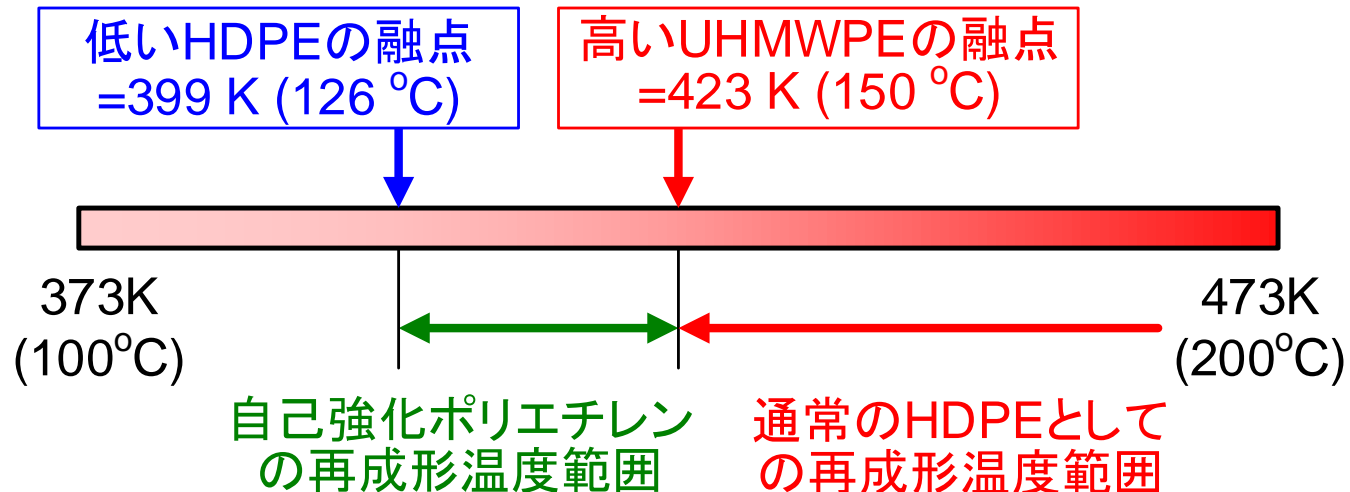
自己強化PE

超高分子量ポリエチレン (UHMWPE)

高密度ポリエチレン (HDPE)

長所

- ✓ 繊維と母材の間の優れた応力伝達性（繊維と母材が同種のポリマーであるため良好な界面接合）
- ✓ リサイクル性（再生材料として高い価値）
- ✓ 高いコストパフォーマンス



試験材料

母材

高密度ポリエチレン
High Density Polyethylene (HDPE)

Suntec-HD, J240
Asahi Kasei Corp.

繊維

超高分子量ポリエチレン
Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE)

IZANAS (former name Dyneema) SK60
Toyobo Co., Ltd.

繊維直径 = 12 μm

繊維長さ = 6 mm or 12 mm

結晶化率 : 95%以上

強化板の作製方法

加熱プレスで厚さ約0.07mmの
HDPEシートを10枚作製



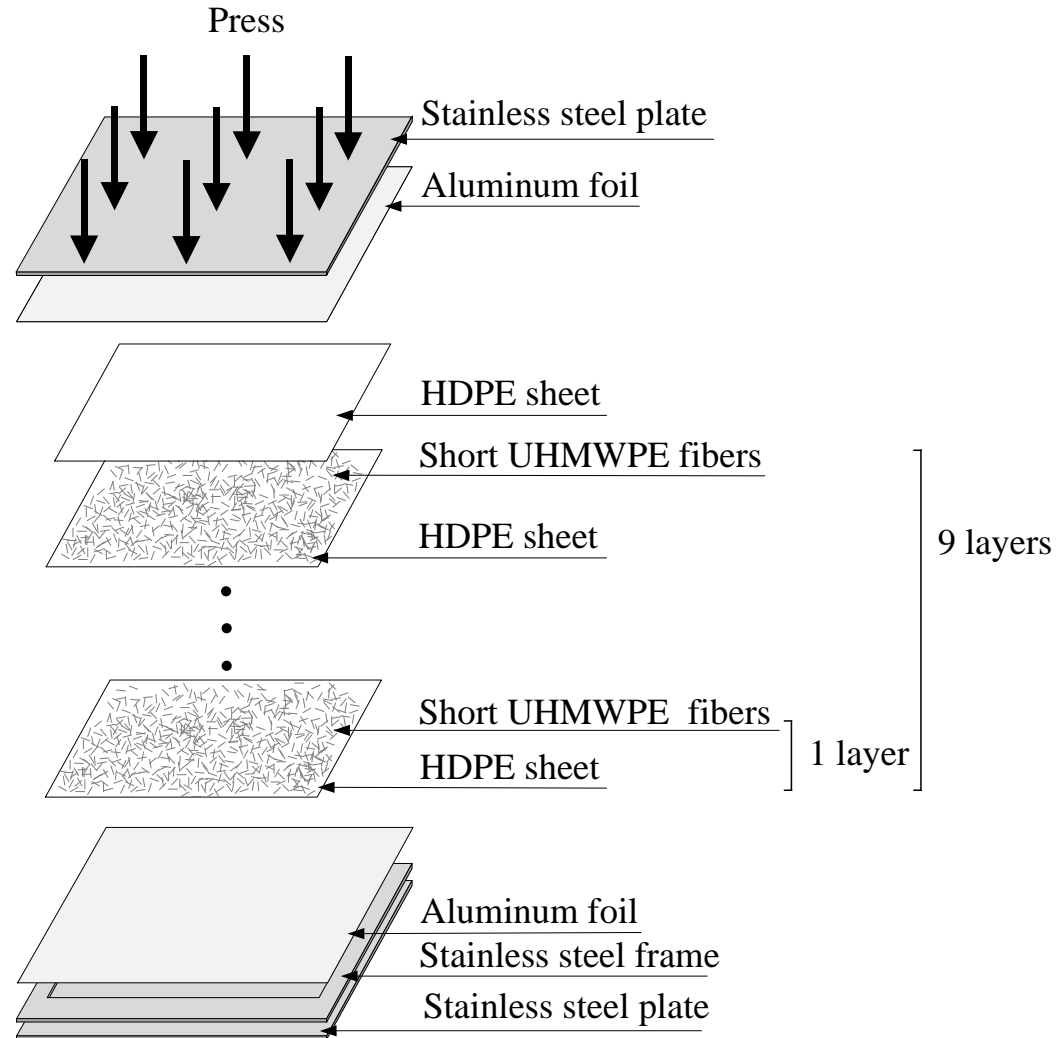
0.2 wt.%の強化繊維を各HDPEシ
ート上に均等に分散させて積層



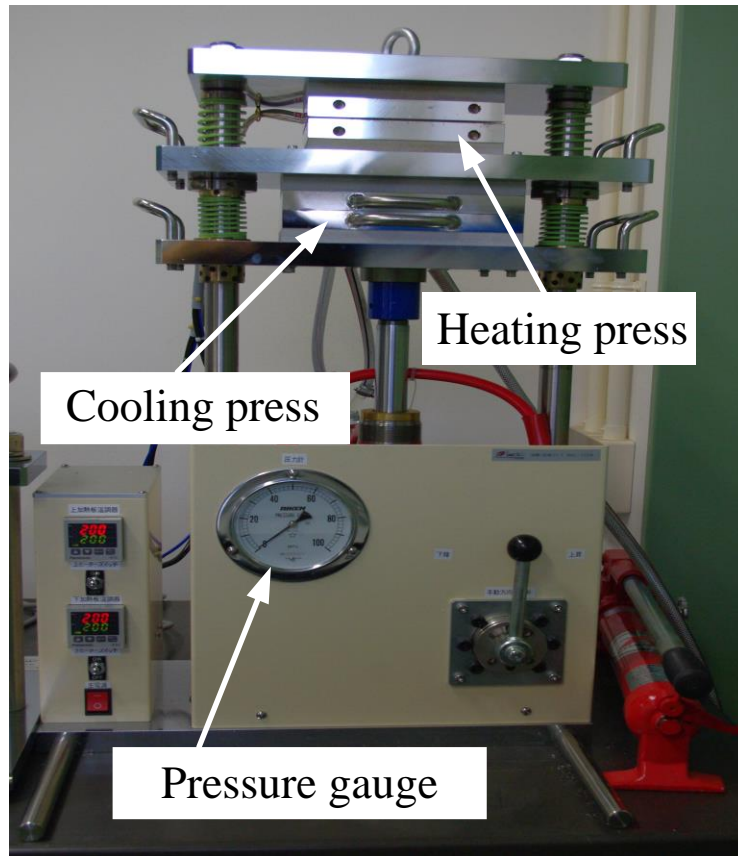
積層したシートを加熱プレスす
ることにより強化板を作製



強化板（厚さ0.8 mm）から試験
片を切り出し



積層シートの加熱プレス条件



手動加熱冷却プレスType MIC-11D6
(井元製作所)

予熱

圧力 : 0 MPa
温度 : 403 K (130 °C)
時間 : 5 min



加熱圧縮

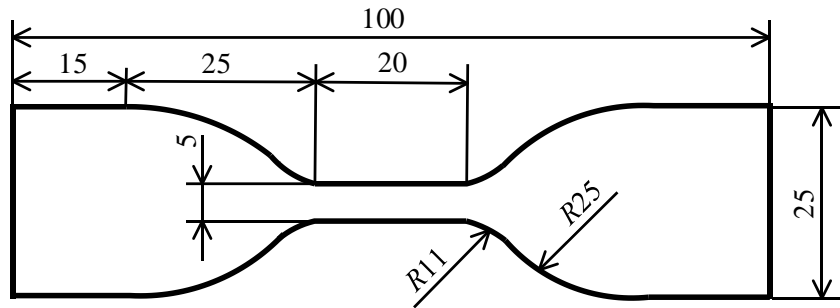
圧力 : 0.5 MPa
温度 : 403 K (130 °C)
時間 : 2 min



冷却中圧縮

圧力 : 0.5 MPa
時間 : 2 min

試験片と試験条件



試験片の形状と寸法 (mm)



引張試験機 AGS-J (島津製作所)

試験片の名称

F12-1

強化繊維

NF : 繊維無し

F6 : 長さ6 mmの繊維

F12 : 長さ12 mmの繊維

試験片番号

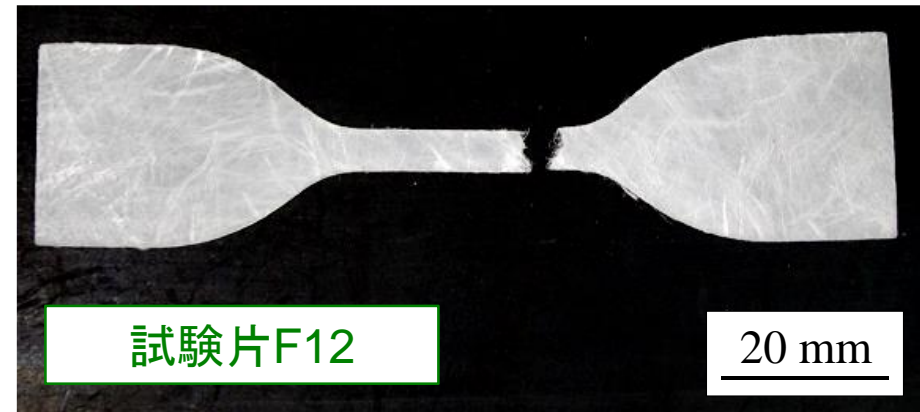
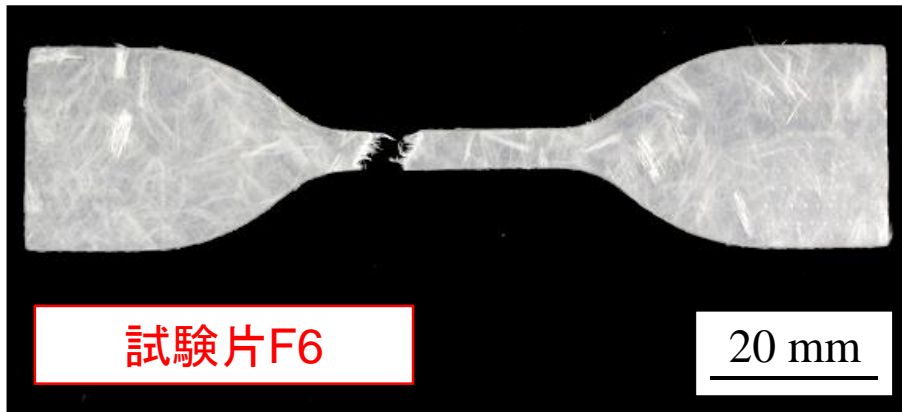
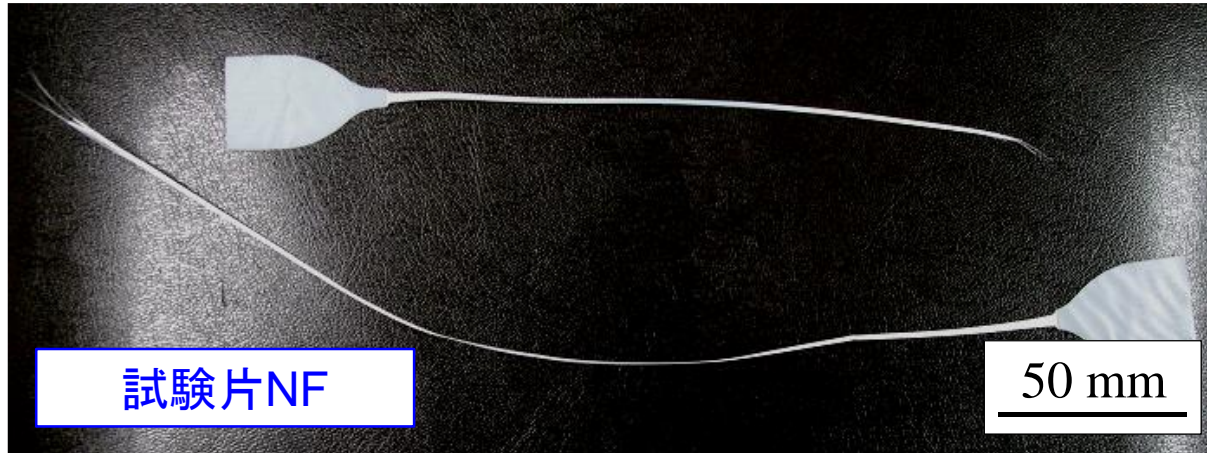
1 to 6

試験条件

温度 : 室温 (295 to 299 K)

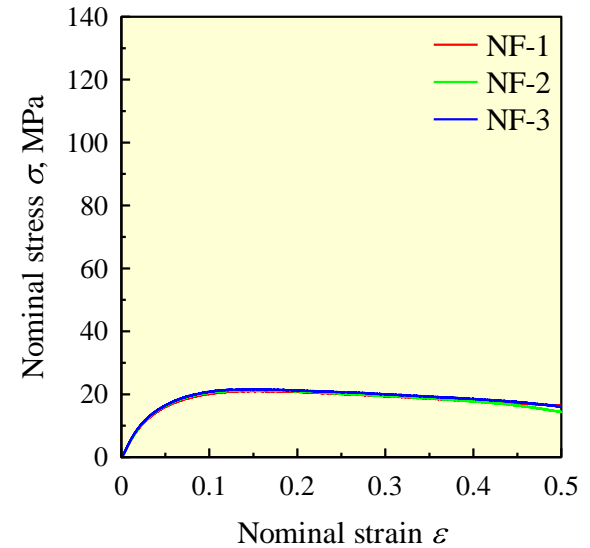
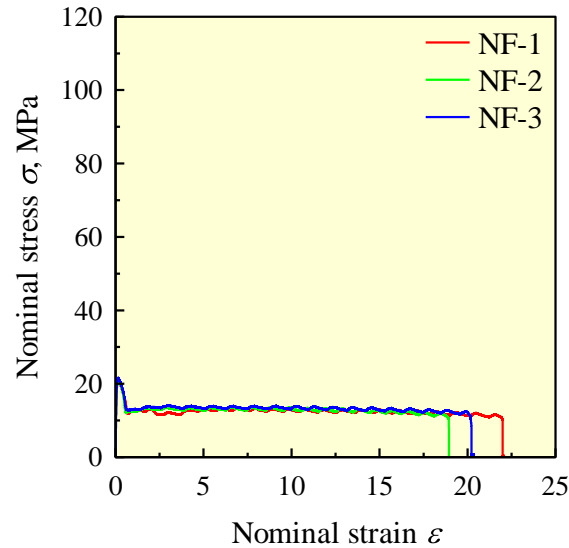
変位速度 : 1.0 mm/min

試験後の試験片の様相



応力-ひずみ線図 (試験片NF)

試験片NF
(繊維で強化して
いない試験片)



公称応力

$$\sigma = \frac{F}{wt}$$

F : 荷重
 w, t : 試験片の幅
と厚さ

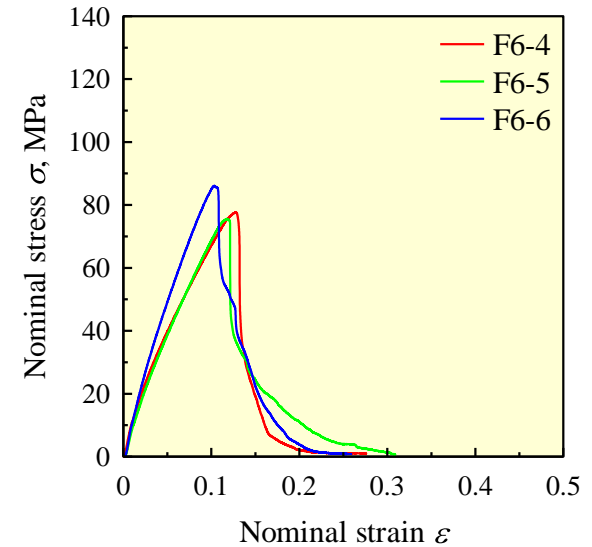
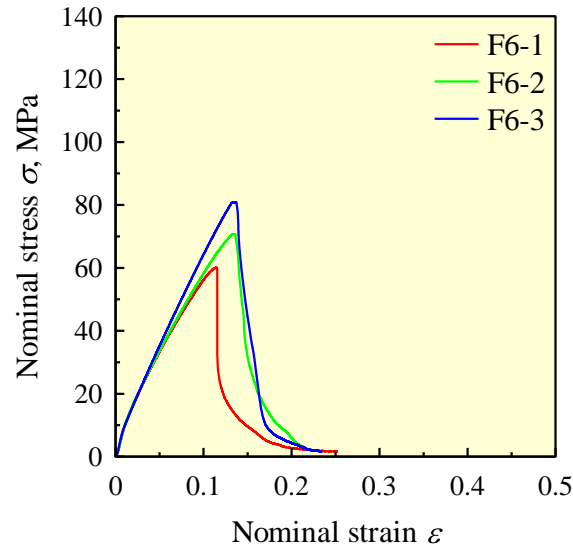
公称ひずみ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

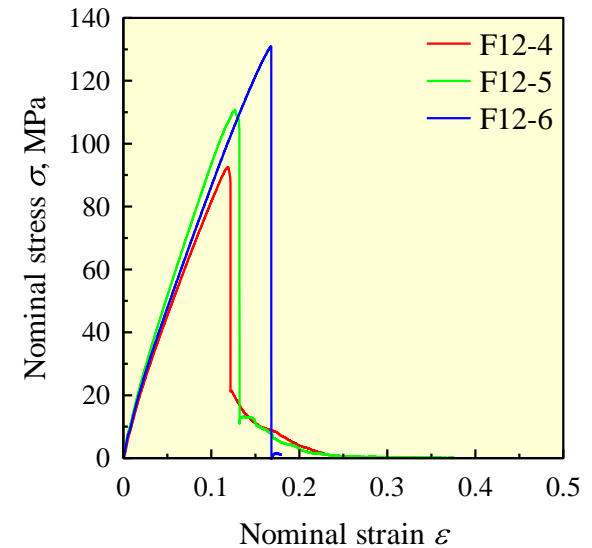
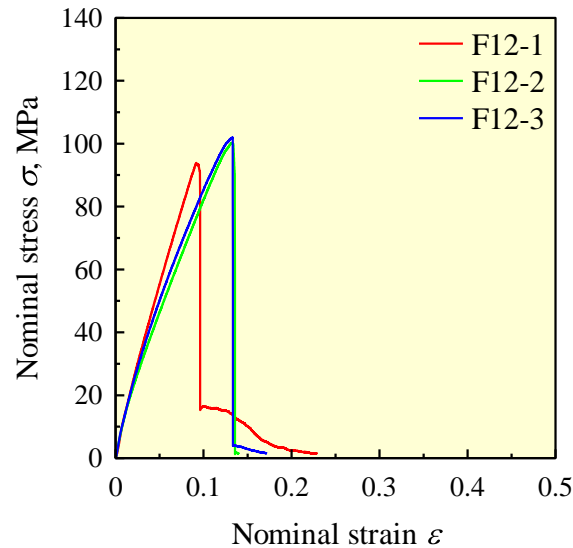
Δl : クロスヘッド
変位
 l_0 : 初期平行部長さ

応力-ひずみ線図 (試験片F6とF12)

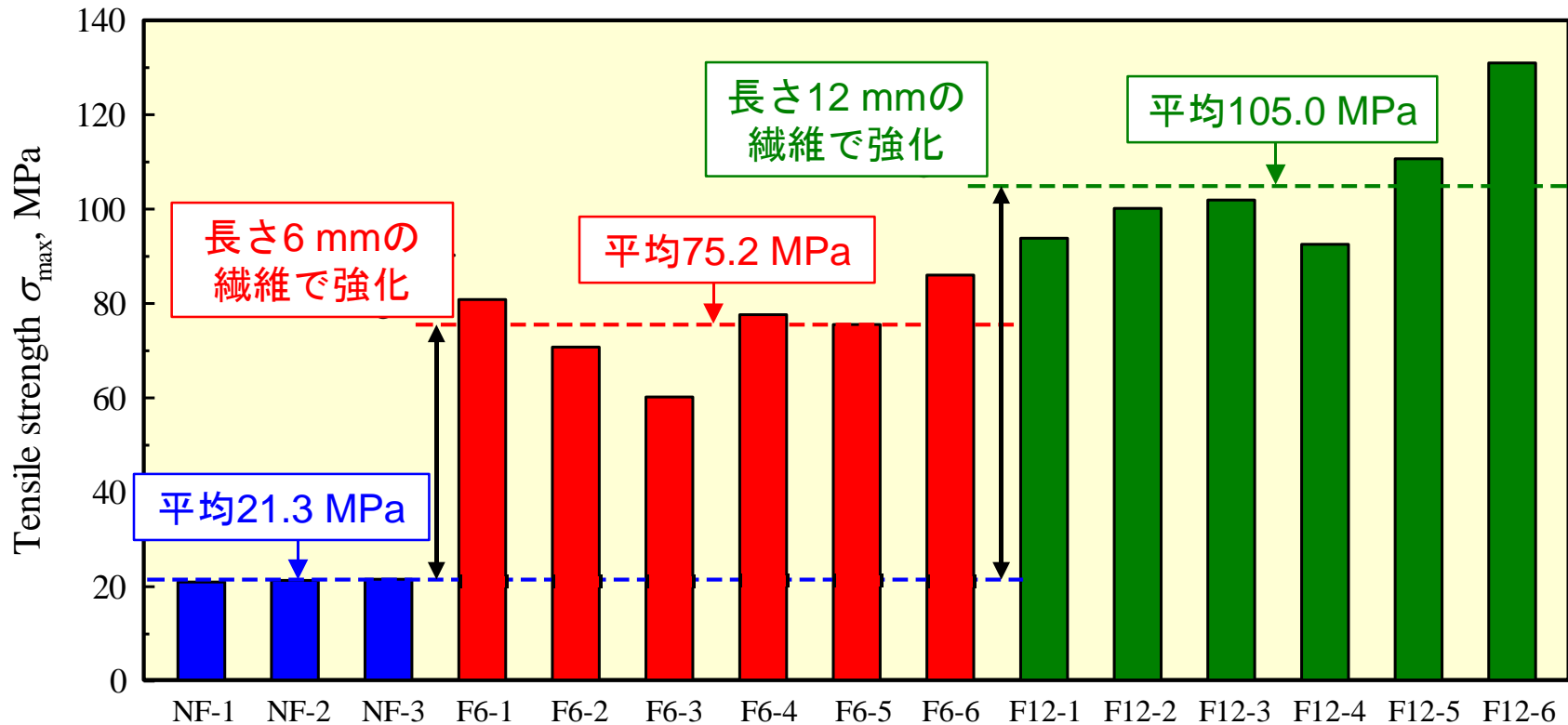
試験片F6
(長さ6 mmの繊維
で強化した試験片)



試験片F12
(長さ12 mmの繊維
で強化した試験片)



短繊維導入の効果



繊維の導入により引張強さが飛躍的に上昇

長い繊維を導入した方が効果的

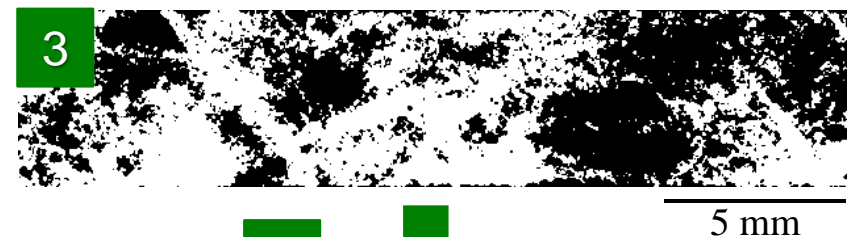
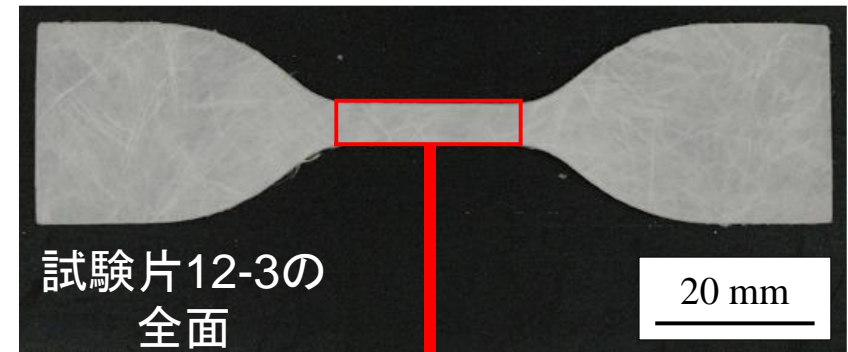
繊維分布の評価

1. 試験片平行部の画像を取得
(image size 630×135 pixels, 1 pixel = about 30 μm)

2. 明るさを50%減少+コントラストを100%増加

3. 白色画素（繊維）の面積と黒色画素（母材）の面積が等しくなるように二値化

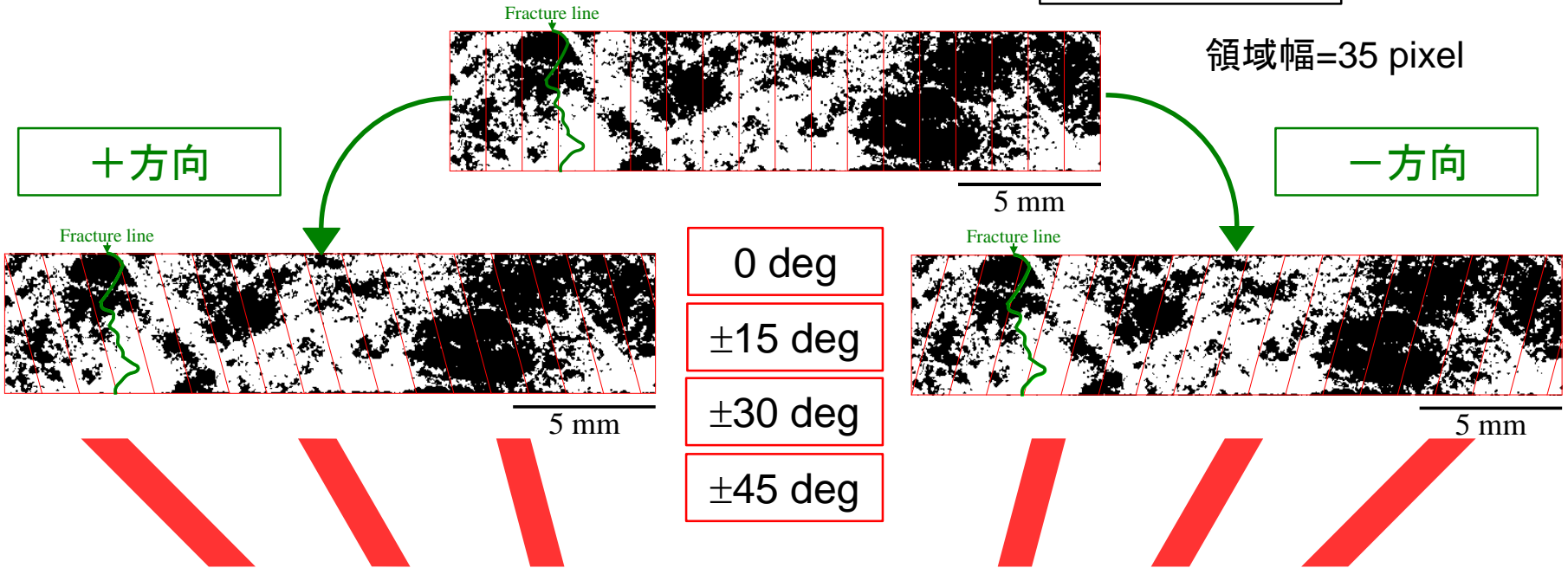
4. 全領域を幅35 pixelの領域に分割し、各領域で繊維面積率を評価



領域分割と面積率の評価

F12-3の前面

領域幅=35 pixel



*端にある通常の領域と比較して50%より小さな面積となる領域は除外

繊維面積率

$$A_F = \frac{S_F}{S_R}$$

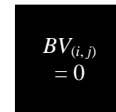
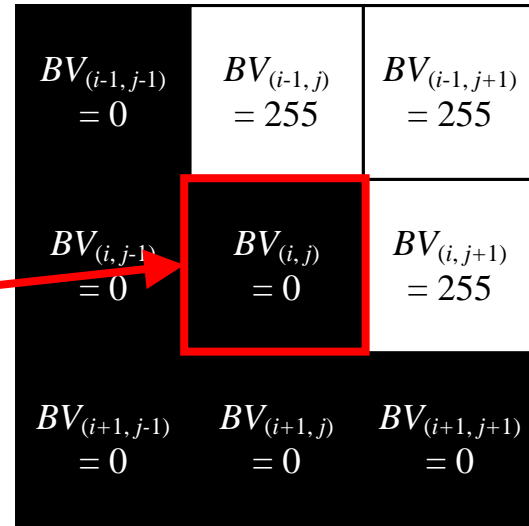
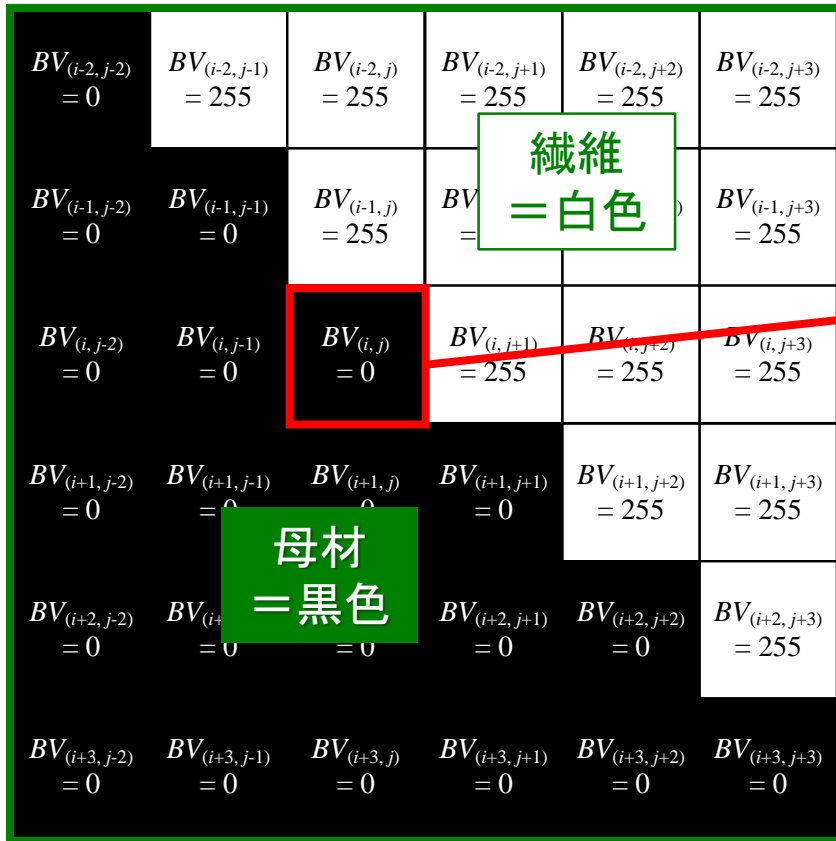
S_F : 白色画素 (繊維) の個数
 S_R : 領域内の総画素数

繊維／母材境界面積率

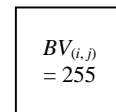
$$A_B = \frac{S_B}{S_R}$$

S_B : 繊維／母材境界の画素数
 S_R : 領域内の総画素数

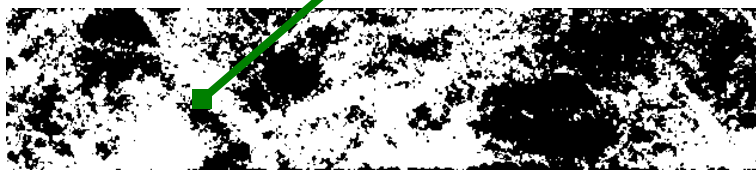
繊維／母材境界面積の評価（1／3）



黒色画素
輝度値=0（母材）



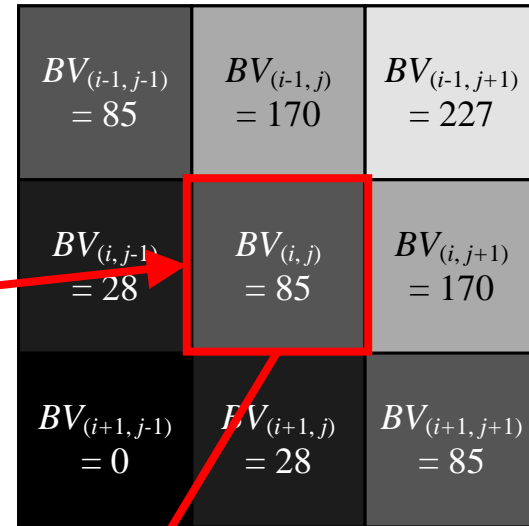
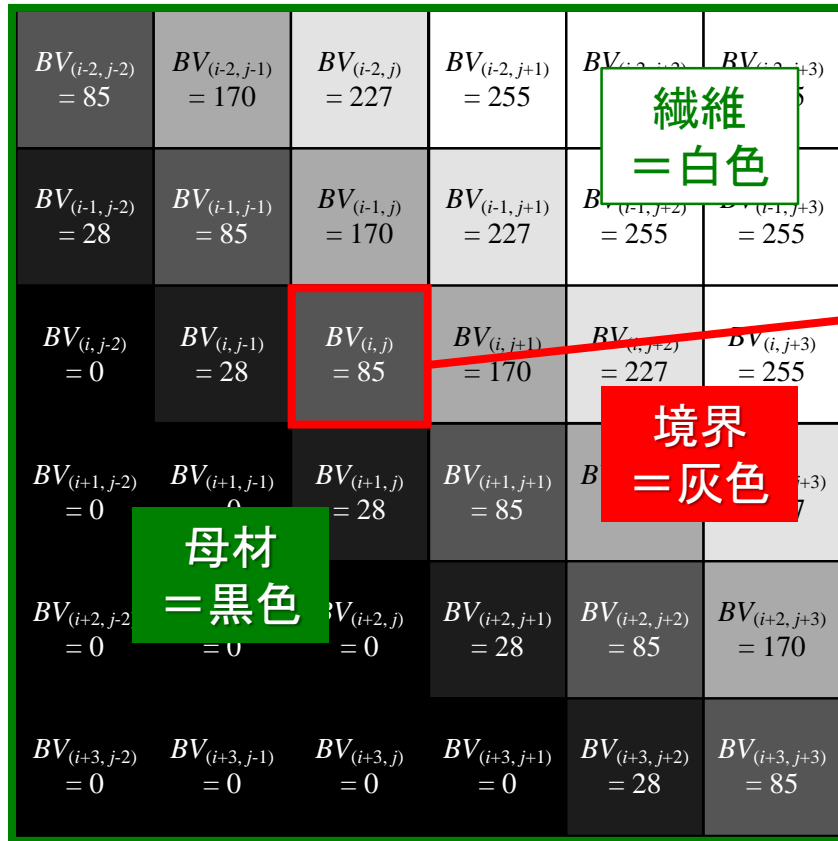
白色画素
輝度値=255（繊維）



5 mm

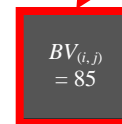
F12-3の前面

繊維／母材境界面積の評価（2／3）

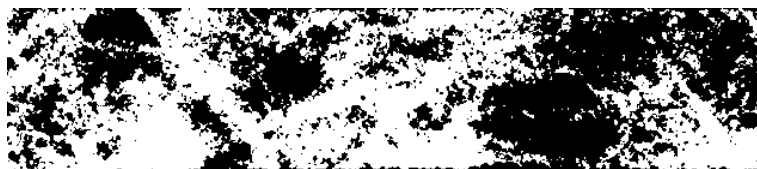


灰色画素 ($0 < BV < 255$)

中心画素と周辺画素
の平均輝度値を計算



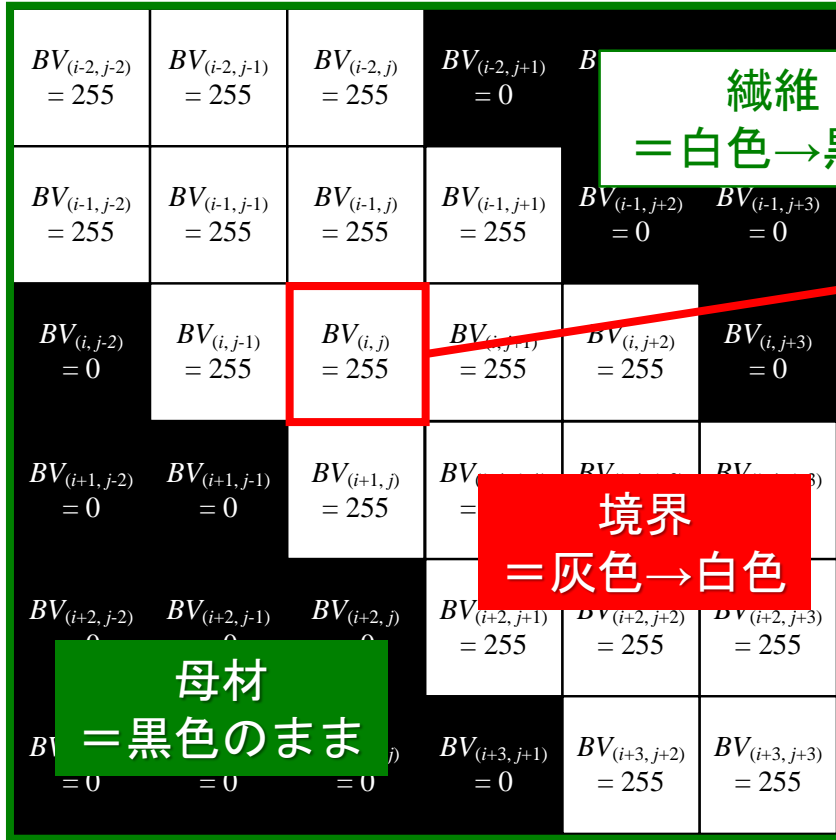
平均輝度値 $BV = 85$
 $= (255 \times 3) / 9$



5 mm

F12-3の前面

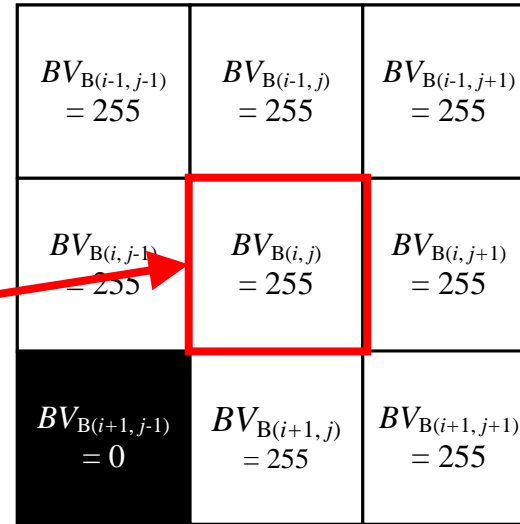
繊維／母材境界面積の評価 (3 / 3)



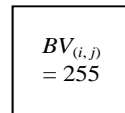
繊維
= 白色 → 黒色

境界
= 灰色 → 白色

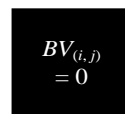
母材
= 黒色のまま



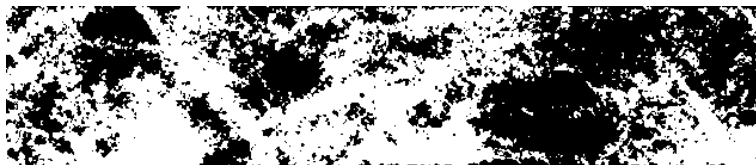
輝度値変換後、灰色画素を抽出



白色画素
輝度値=255 (繊維／母材境界)



黒色画素
輝度値=0 (繊維／母材境界以外)



5 mm



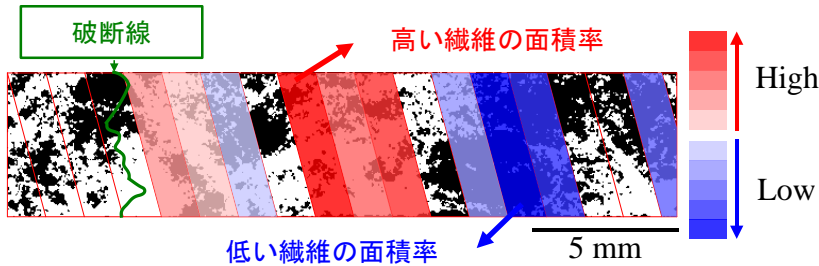
5 mm

F12-3の前面

破断線と繊維， 繊維／母材境界の関係

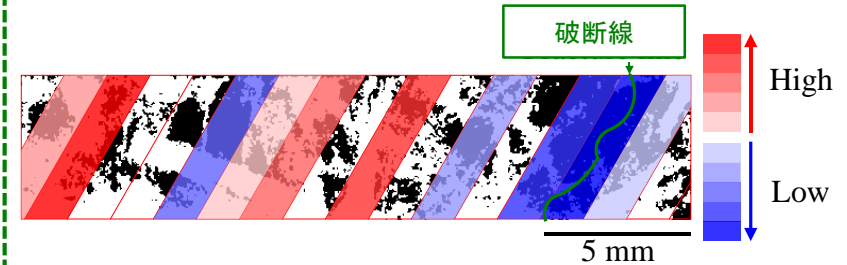
試験片F12の前面
(+15 deg 方向)

繊維の面積率



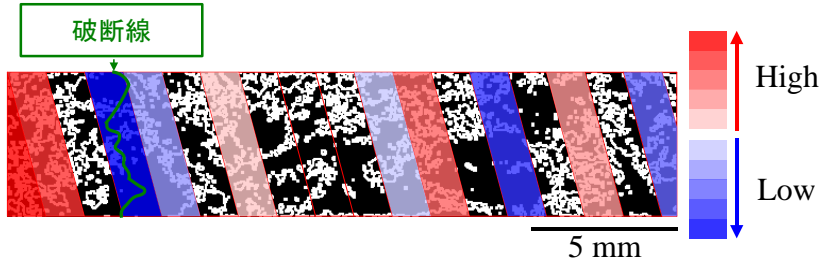
試験片F6の前面
(-30 deg 方向)

繊維の面積分率



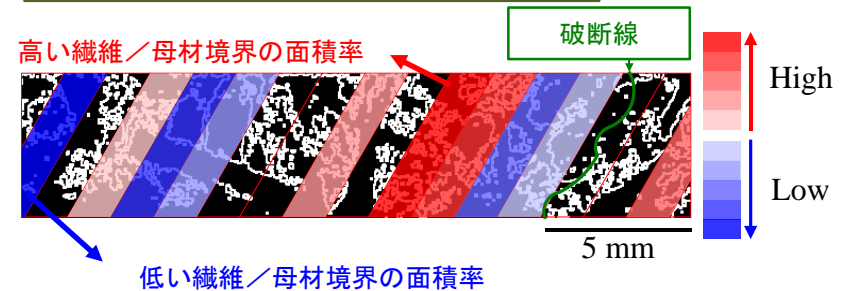
繊維の面積率が低い領域に破断線が存在

繊維／母材界面の面積分率



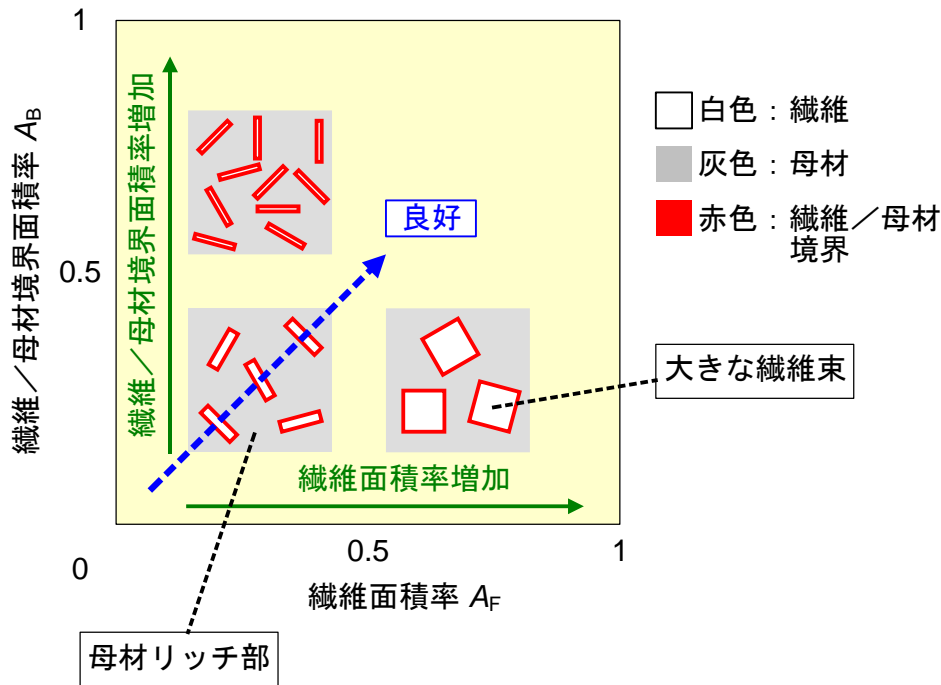
繊維／母材境界の面積率が低い領域に破断線が存在

繊維／母材界面の面積率

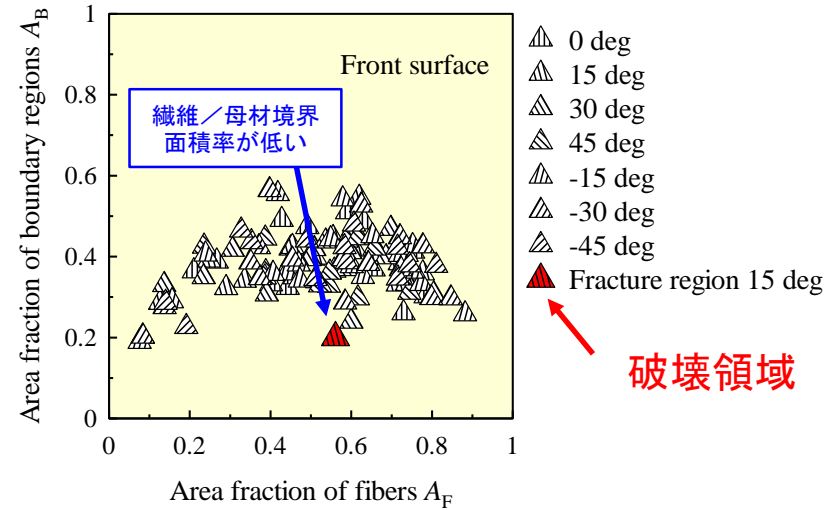


破断位置と繊維分布の関係

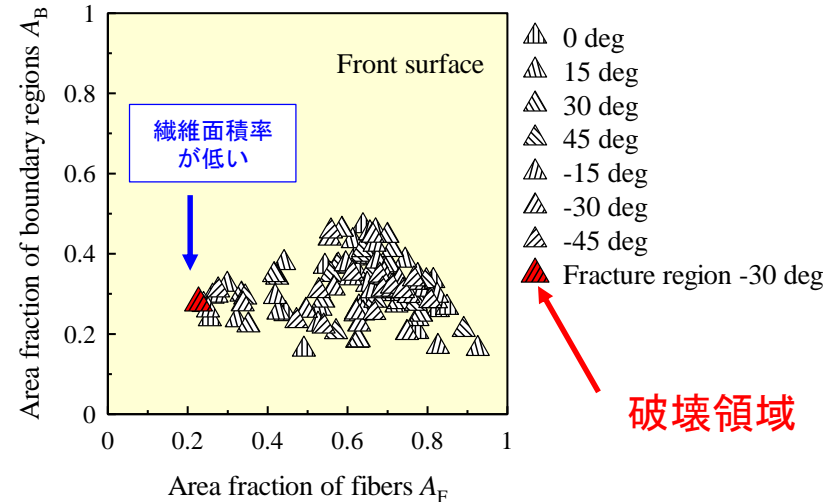
繊維分散特性マップ



試験片F12の前面



試験片F6の前面



想定される用途

- 短繊維強化複合材料の**最低強度を担保する**出荷前検査
- 部材の形状や使用条件に応じた**強化繊維分布の最適化**
- **破壊箇所**の予測による**要注意箇所**の特定

実用化に向けた課題

- 自己強化PE以外に関する検証
- 疲労損傷への適用
- 透明でないマトリックスへの適用（内部の強化繊維が見えない複合材料への適用）
→非破壊検査手法等との組み合わせ
- 力学的解析とのリンク

企業への期待

- **実用工業材料への適用**に関するご協力
- **画像処理**ソフトウェア企業との連携
- **非破壊検査, 可視化装置**企業等との連携

お問い合わせ先

岡山大学 産学連携・技術移転本部

TEL:086-251-8463

FAX:086-251-8467

sangaku@okayama-u.ac.jp

<http://www.orpc.okayama-u.ac.jp/>