

複合材料の塑性変形に伴う異方性を考慮した 近似的セルフコンシステント予測

鈴木貴大

構造強度学研究室

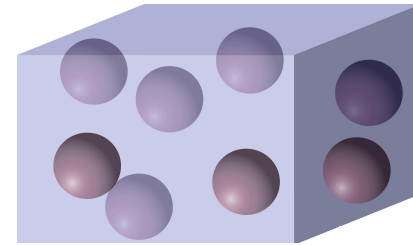
2016年2月10日

背景 - 架空母材を導入した 森・田中平均 (等方弾性)

母材・介在物ともに**等方弾性体**の場合

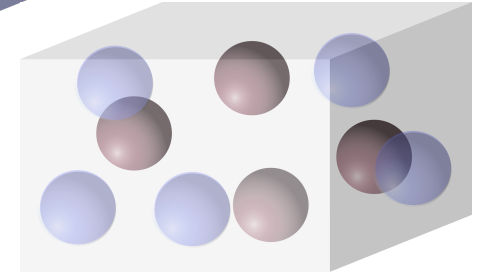
2相複合材料

架空母材 (等方弾性体) に
実母材 $C_{母}$ と実介在物 $C_{介}$ を
介在物 として入れる



母材 : $C_{母}$
介在物 : $C_{介}$

⇒



各材料中の平均の応力場・ひずみ場を求め

$$\bar{\sigma} = f_V \langle \sigma \rangle_V + f_M \langle \sigma \rangle_M + f_I \langle \sigma \rangle_I, \quad \bar{\epsilon} = f_V \langle \epsilon \rangle_V + f_M \langle \epsilon \rangle_M + f_I \langle \epsilon \rangle_I$$

その上で $f_V \rightarrow 0$ ($f_M + f_I = 1$) の極限をとり

平均の応力ひずみ関係 $\bar{\sigma} = \bar{C} : \bar{\epsilon}$ で平均剛性 \bar{C} を定義する

ただし \bar{C} ($C_V, C_{母}, C_{介}, f_I, f_M, \text{介在物の形状}$)

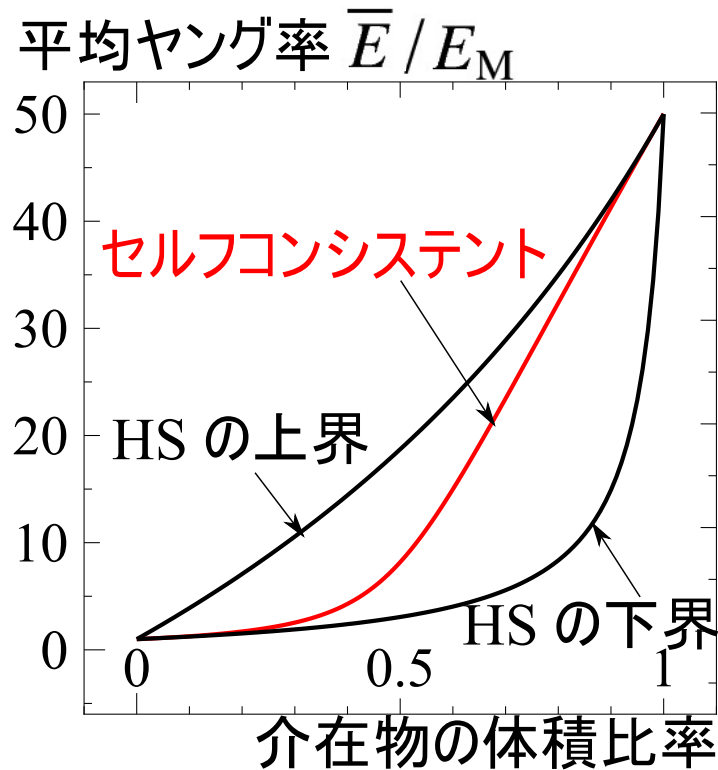
C_V の**選択自由** : Voigt と Reuss の上下界内を予測

背景 - 逐次計算手法（等方弾性）

2 相複合材料の介在物形状が球形状のとき

逐次計算 得られた平均剛性 \bar{C} を再度 架空母材 C_V として反復計算

予測値は Hill のセルフコンシステント解に収束



セルフコンシステント解の予測値は Hashin-Shtrikman の上下界内に存在し

介在物少 母材に介在物が入った系
介在物多 介在物に母材が入った系

の予測値に漸近する

異方弾性でも同様の予測値を得た
(昨年度卒論)

本研究

同じ手法を、異方性が生じた弾塑性問題に拡張

架空母材と逐次計算を用いた平均弾塑性挙動予測手法

各増分ステップ毎の平均の応力増分・ひずみ増分を求め

$$\dot{\bar{\sigma}} = \bar{C}^{\text{ep}} : \dot{\bar{\epsilon}} \quad \text{で平均接線弾塑性係数 } \bar{C}^{\text{ep}} \text{ を定義する}$$

解析的手法（Eshelby の解の利用）では架空母材 C_V の等方性が必要

⇒ 「従来の森・田中」各相の等方弾性 $C_{\text{母}} \cdot C_{\text{介}}$ を利用

塑性変形に伴う異方性を持つ接線剛性 \bar{C}^{ep} を C_V に採用したい

しかしそのままでは使えない

\bar{C}^{ep} を何らかの方法で等方剛性 $\bar{C}_{\text{iso}}^{\text{ep}}$ に近似し

増分ステップ毎に逐次代入法を併用することで

セルフコンシステント的な近似が期待できる

架空母材の選択方法 - 等方近似手法

増分ステップ毎の接線弾塑性係数 \bar{C}^{ep} を等方近似した $\bar{C}_{\text{iso}}^{\text{ep}}$ の

見かけの体積弾性率 κ^{ep} 、せん断弾性率 μ^{ep} を求める

- 最小二乗法を用いた手法

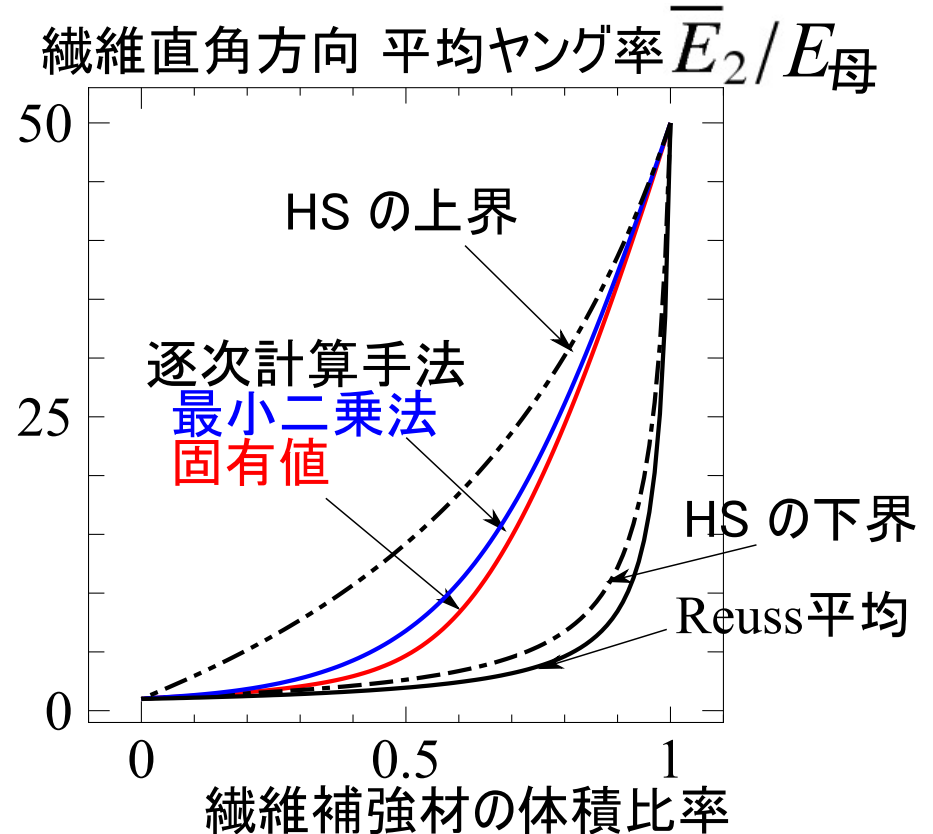
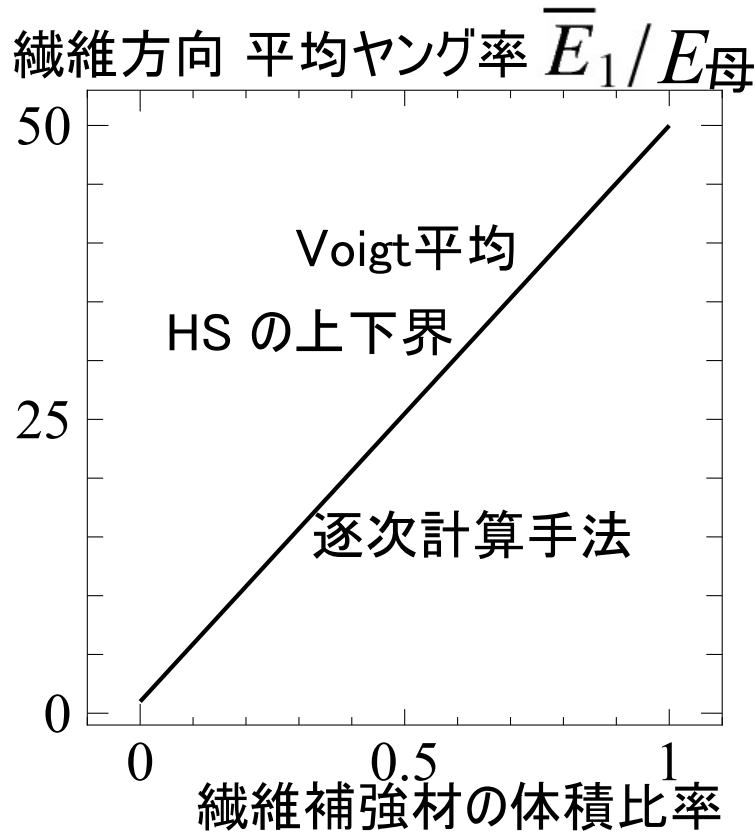
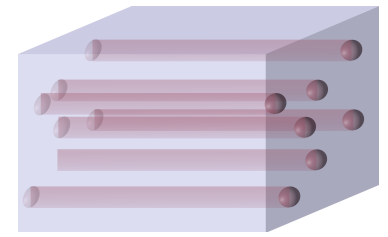
$$R \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \left(\bar{C}_{ijkl}^{\text{ep}} - C_{ijkl}^{\text{iso}} \right)^2 \rightarrow \text{最小とする}$$
$$\frac{\partial R}{\partial \kappa^{\text{ep}}} = 0 \text{ かつ } \frac{\partial R}{\partial \mu^{\text{ep}}} = 0 \text{ で } \kappa^{\text{ep}}, \mu^{\text{ep}} \text{ を決定}$$

- 線形異方弾性材料定数の固有値を用いた手法

\bar{C}^{ep} の固有値のうち体積弾性率とせん断弾性率に相当する値の平均によって κ^{ep} 、 μ^{ep} を決定

異方弾性の計算例 - 昨年の改善

母材 円柱
 繊維補強材 円柱
 $E_{介}/E_{母} = 50$

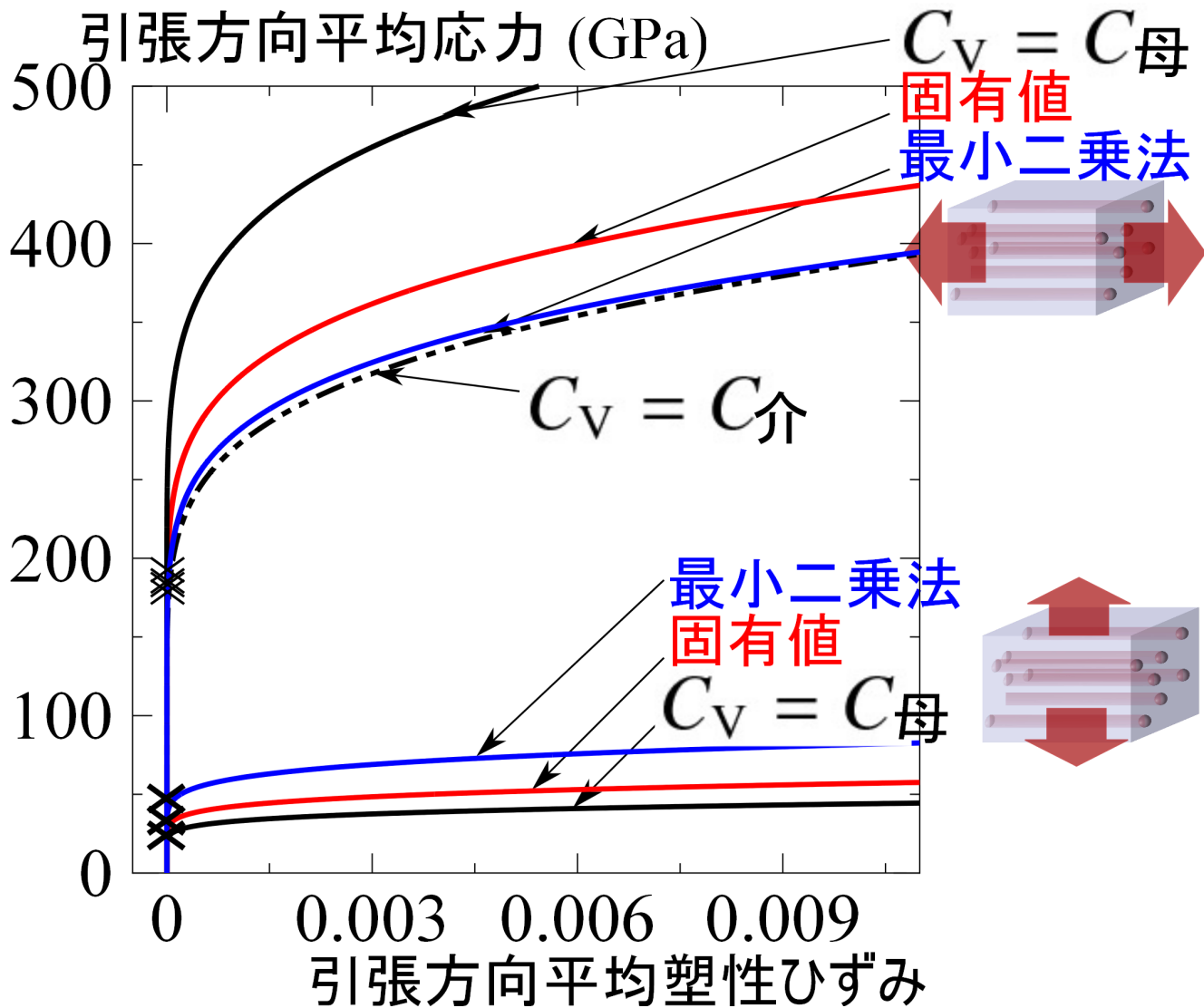


ちなみに土木学会「FRP 橋梁 技術とその展望」

E_1 は Voigt 平均、 E_2 は Reuss 平均

巨視的には横等方性材料なので Reuss にはならない

平均弾塑性挙動の計算例 (補強材体積比率 $f_2 = 0.3$)



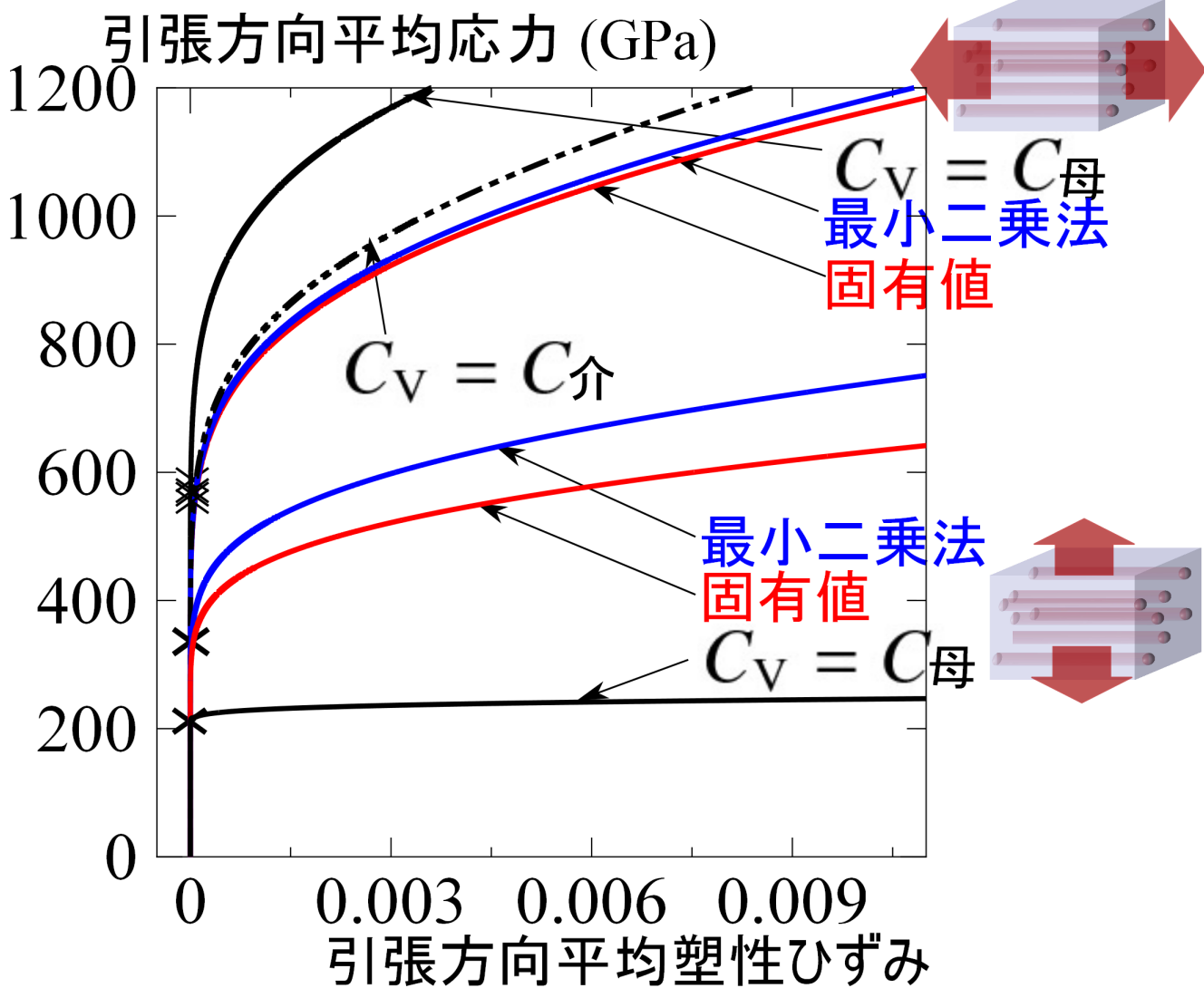
補強材は弾性体

母材の
初期降伏応力
 $\sigma_Y = 10 \text{ GPa}$

補強材の体積比率
 $f_2 = 0.3$

本手法：2種類の従来の森・田中平均より柔らかい可能性

平均弾塑性挙動の計算例 (補強材体積比率 $f_2 = 0.7$)



補強材は弾性体

母材の
初期降伏応力

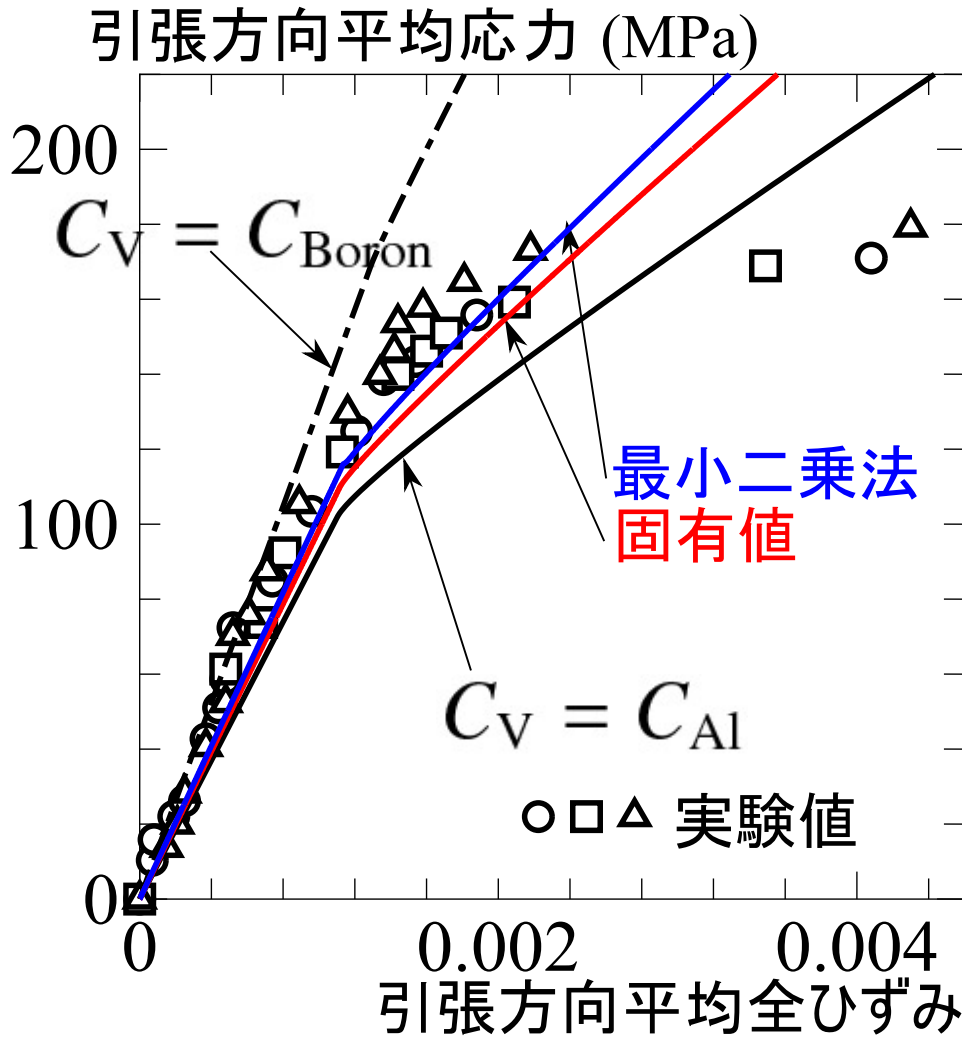
$\sigma_Y = 10 \text{ GPa}$

補強材の体積比率
 $f_2 = 0.7$

接線係数を架空母材に用いことから、より柔らかい予測値を得た

実験値との比較 (剛性比小)

Al : $E_M = 55.85 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.32$
Boron : $E_I = 379.23 \text{ GPa}$, $\nu_I = 0.2$
 $E_I/E_M = 6.79$



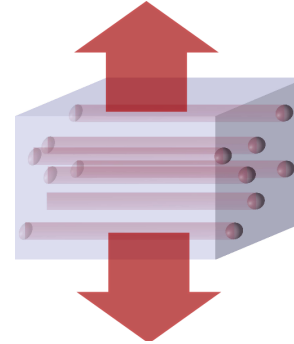
Boron 繊維で補強した Al 複合材

ボロンは弾性体

アルミニウムの初期降伏応力

$\sigma_Y = 79.29 \text{ MPa}$

ボロン体積比率 $f_I = 0.34$



繊維直角方向に
単軸引張を加える

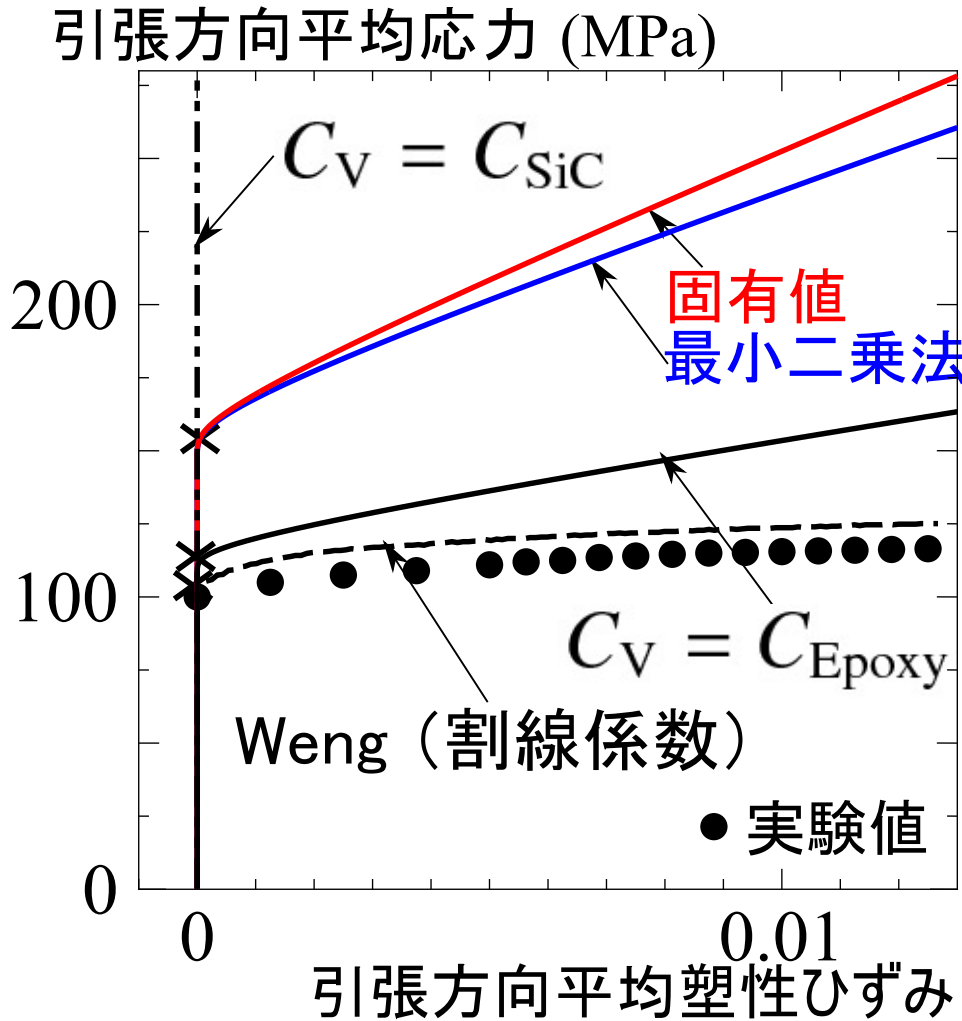
従来の森・田中平均 ($C_V = C_{\text{Boron}}$, $C_V = C_{\text{Al}}$) を改善

実験値との比較 (剛性比大)

Epoxy : $E_M = 3.16 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.35$

SiC : $E_I = 73.1 \text{ GPa}$, $\nu_I = 0.18$

$$E_I/E_M = 23.1$$



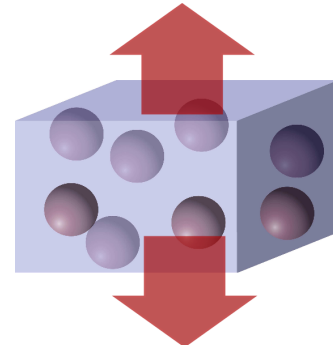
SiC 粒子で補強した Epoxy 複合材

シリカは弾性体

エポキシの初期降伏応力

$\sigma_Y = 75.86 \text{ MPa}$

シリカ体積比率 $f_I = 0.35$



剛性比が大きい複合材料の平均剛性予測は難しい

結論

- 各増分ステップごとに
 - 異方性を持つ平均接線弾塑性係数 \bar{C}^{ep} を等方近似した架空母材 C_V を用いたことから
 - 反復計算を併用する
- 平均弾塑性挙動の予測手法を提案した
- 従来の森・田中平均より柔な接線係数を用いたので、特に降伏後にはより柔らかい応答を予測できた
 - ただし、剛性比の適用範囲の改善には課題が残った