

2017.06.09

FrontCOMP熱可塑樹脂解析機能の FrontISTRへの移植

(株)エデュサイエンス総合研究所
董 勤喜

ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR と FrontCOMP_TP の連携開発

ポスト「京」プロジェクト 重点課題8

マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発

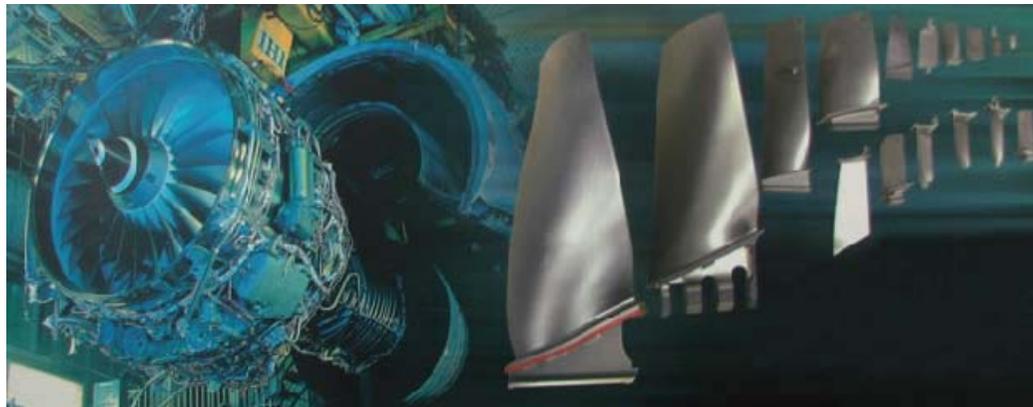
熱可塑CFRP材料活用への期待

利点

- ・成形速度が速い
- ・生産コストが安い
- ・リサイクル可能

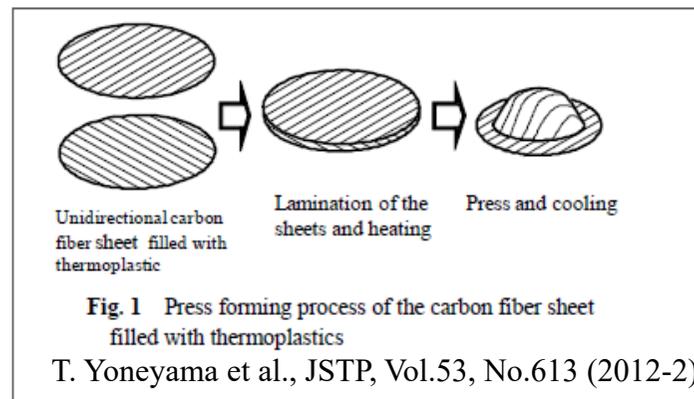
欠点

- ・耐熱性, 耐薬品性は熱硬化性樹脂よりやや劣る
- ・成形後の初期欠陥の予想が困難
 - ・繊維方向の不整, シートのしわ, そり, 残留ひずみ, 残留応力
- ・初期欠陥と強度の相関が不明



IHI 技報, Vol.50, No.3 (2010)

ジェットエンジンのファンブレード



熱可塑 CFRP シートのプレス成形

マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータ

熱硬化樹脂対応のFrontCOMP_cureをベースに熱可塑樹脂対応の解析技術を導入

Updated Lagrange 法によるFrontISTR温度連成接触大変形解析手法を参照

ミクروسケール熱可塑CFRP成形解析プログラム

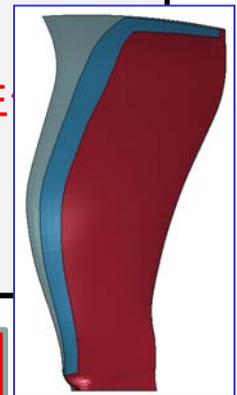
- 熱可塑樹脂と炭素繊維の温度依存材料モデル化 ← **結晶化度発展則**
- 温度と接触大変形の連成解析
- 試験片成形の解析によるValidation ← **しわ・反り発生メカニズムの解明**



試験片から実部品への
マルチスケール展開

マクروسケール熱可塑CFRP成形解析プログラム

- プリプレグシート単位の直交異方性連続体モデル化 ← **温度依存性粘弾性**
- ミクروسケールモデルシミュレーションによるマクロ材料パラメータ決定
- プリプレグシートのしわ解析 ← **Updated Lagrange 法**



熱可塑CFRP部材成形後のプリプレグシートの不整合および欠陥の発生状況を高精度に予測し正確な強度評価を実現

FrontISTR への FrontCOMP_TP の機能移植

FrontISTR 現最新版 (FrontISTR ver.4.5) への移植

■ 定式化

熱伝導解析・結晶化度解析

・結晶化度の発展則

$$\frac{d\chi(T, \chi)}{dt} = n K(T) (1 - \chi) \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \chi} \right) \right]^{(1-n)/n}$$

→ 結晶化度求解ルーチン新規作成

ひずみ・ひずみ緩和解析

・熱および結晶化による体積変化

$$\frac{dV}{V_0} = \frac{V_{sp}(t+dt) - V_{sp}(t)}{V_{sp}(t)}$$

$$V_{sp}(\chi, T) = \chi X_{\infty} V_c(T, P) + (1 - \chi X_{\infty}) V_a(T, P)$$

→ 該当ルーチンへ

・粘弾性体モデル

一般化Voigtモデル

→ 該当ルーチンへ

または, 一般化Maxwellモデル使用

FrontISTR への FrontCOMP_TP の機能移植

FrontISTR 現最新版 (FrontISTR ver.4.5) への移植

■ 材料特性モデル化

熱伝導解析・結晶化度解析

・物性値の温度, 結晶化度依存性

$$\rho(\chi, T), c_p(\chi, T), k(\chi, T)$$

→ 該当ルーチンへ

ひずみ・ひずみ緩和解析

・物性値の温度依存性

$$E(T), \nu(T), \beta(\chi, T)$$

→ 該当ルーチンへ

■ 熱伝導／応力連成解析機能強化

弱連成解析

・FrontISTR 現最新版 FrontISTR ver.4.5 へ移植

強連成解析

・ポスト「京」プロジェクトで開発予定のFrontISTR 最新版へ移植

FrontCOMP_TP の材料特性モデル化について

熱可塑性樹脂の材料特性モデル化(温度, 結晶化度依存性)

熱伝導解析・結晶化度解析: 熱伝導率, 比熱, 比体積(密度)

ひずみ・ひずみ緩和解析 : ヤング率, ポアソン比, 線膨張係数, 粘弾性特性

次の代表的2材料を対象にモデル化

・結晶性樹脂: ポリプロピレン(PP)

応力解析に関する材料特性のモデル化は不明であり, 他の材料のモデル化を参考にした

・非晶性樹脂: ポリエーテルイミド(PEI)

文献上での全材料特性のモデル化は不明であるため, 次の方法を併用

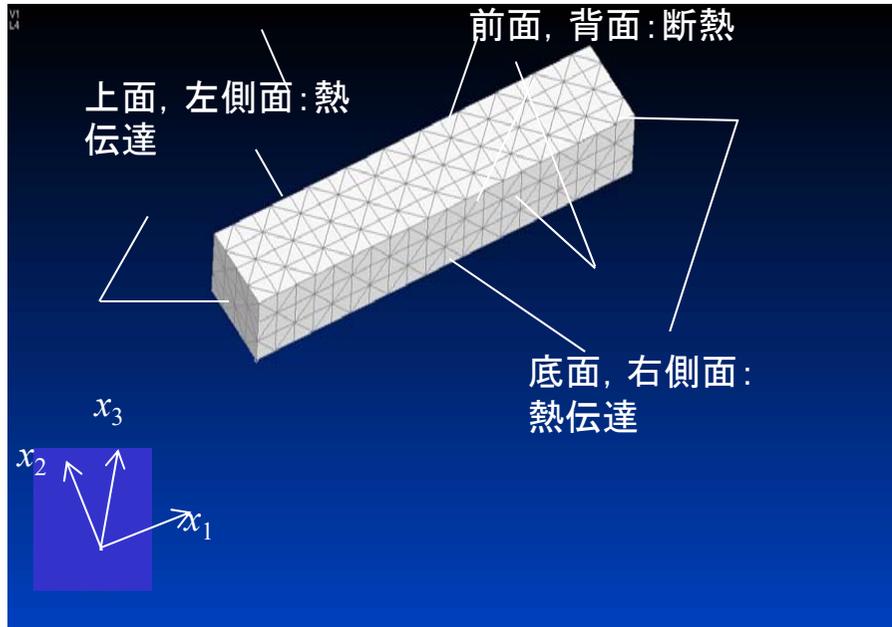
- ・他の材料のモデル化を参考にする
- ・実験により材料特性を取得後モデル化
 - ・熱伝導率, 比熱, 比体積
 - ・粘弾性特性

FrontISTRの修正・追加・変更

- M_material.f90
- Fistr_setup.f90
- Fistr_setup_RESIN_HEAT.f90
- Fistr_ctrl_heat.f90
- M_fstr.f90
- Heat_LIB_THERMAL.f90
- Heat_LIB_CAPACITY.f90
- Heat_solve_TRAN.f90
- Fstr_ctrl_common.f90
- Fstr_ctrl_material.f90
- Fstr_ctrl_static.f90
- Fstr_solve_NLGEOM.f90
- Static_LIB_3d2TL.f90

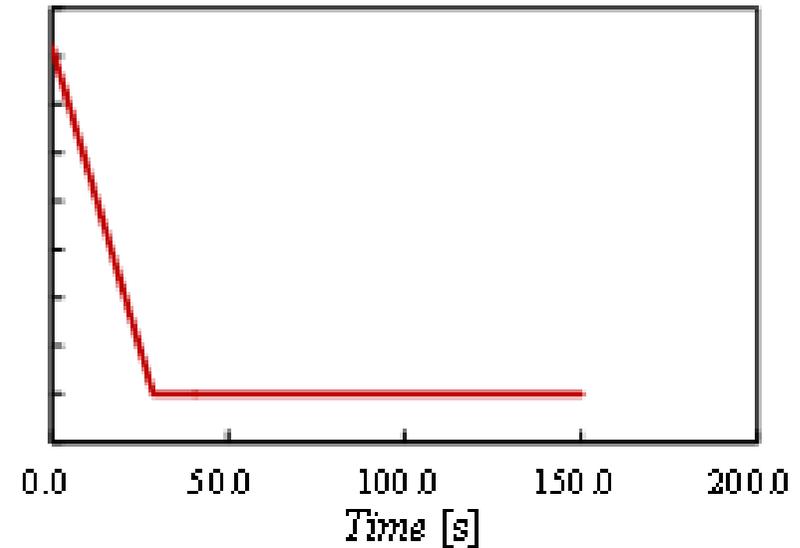
結晶性樹脂単体の解析例題 (非定常熱伝導・結晶化度解析)

解析モデル



メッシュ分割図(節点数 3,353)

雰囲気温度



冷却条件

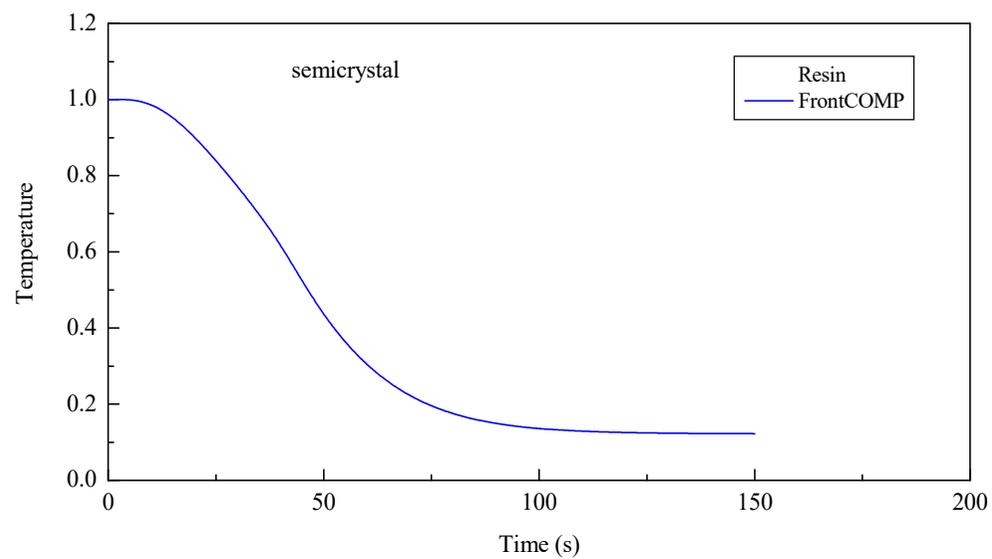
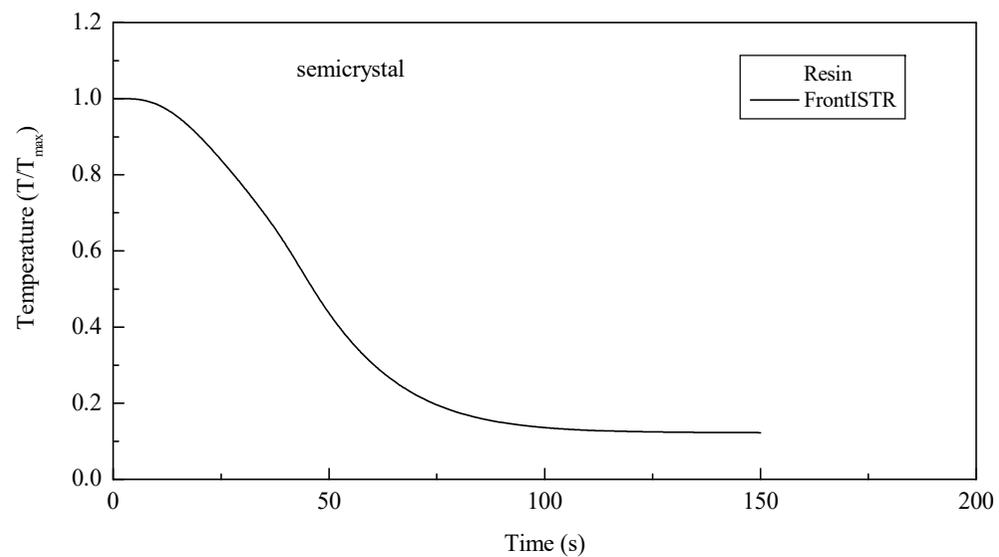
境界条件:

上面, 底面, 左側面, 右側面: 熱伝達

他の面: x_3 方向の周期性を仮定して断熱

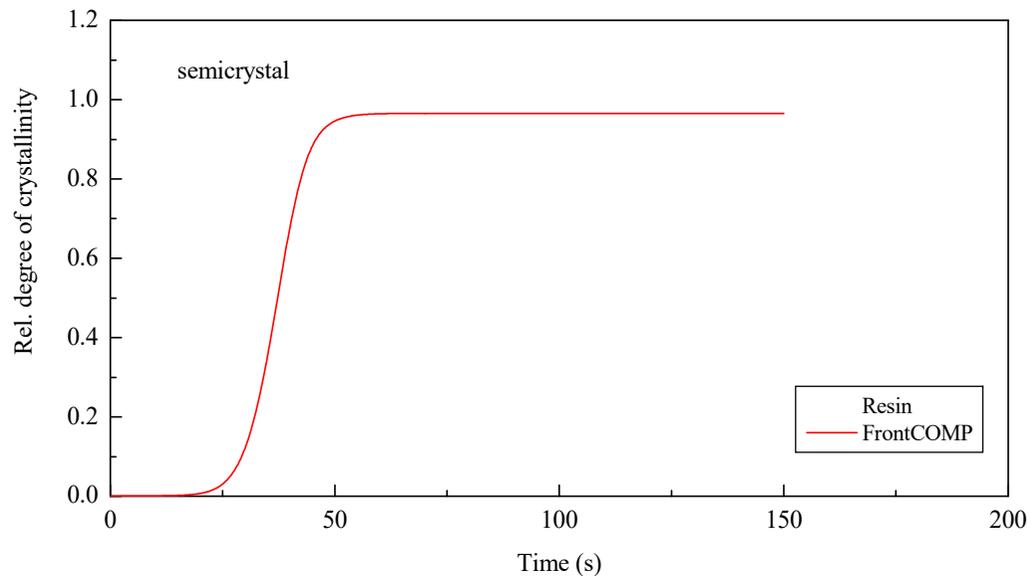
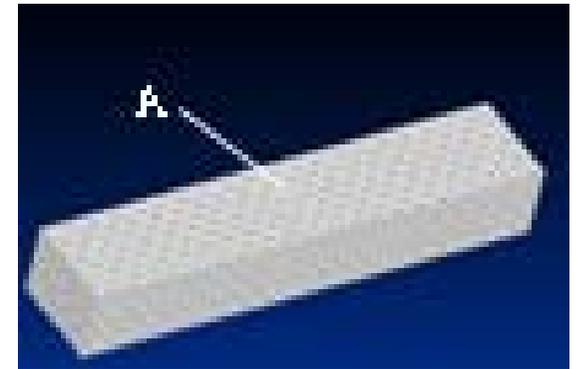
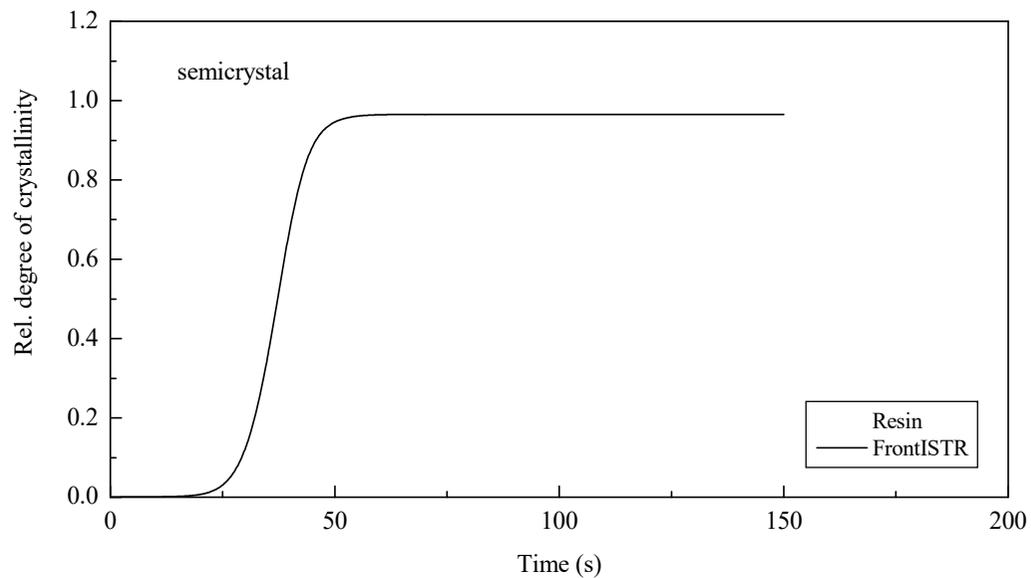
物性値: 省略

温度変化時刻歴



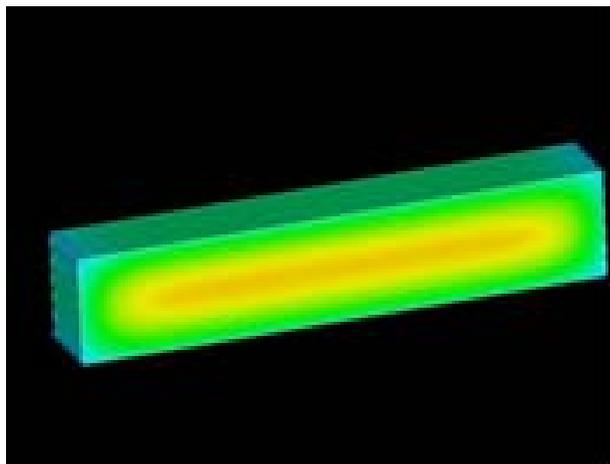
A点の温度時刻歴

結晶化度時刻歴

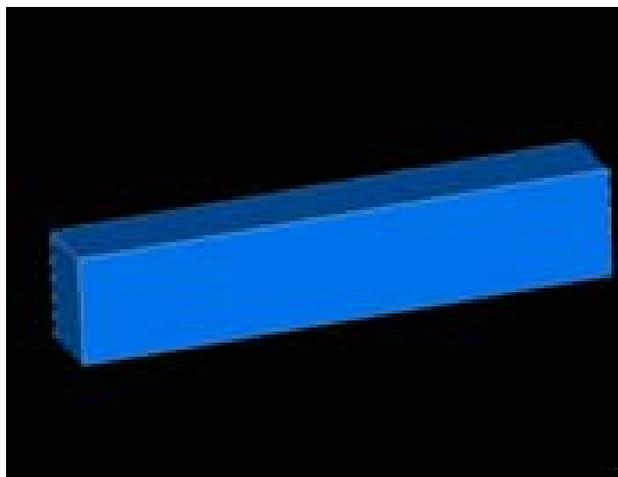
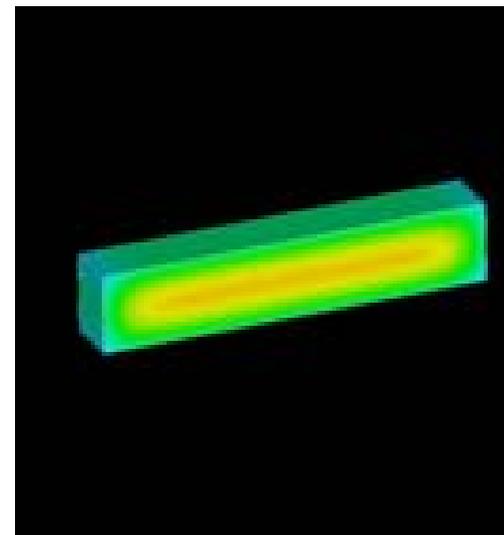


A点の相対結晶化度時刻歴(相対結晶化度は0~1の範囲に収まった)

温度分布

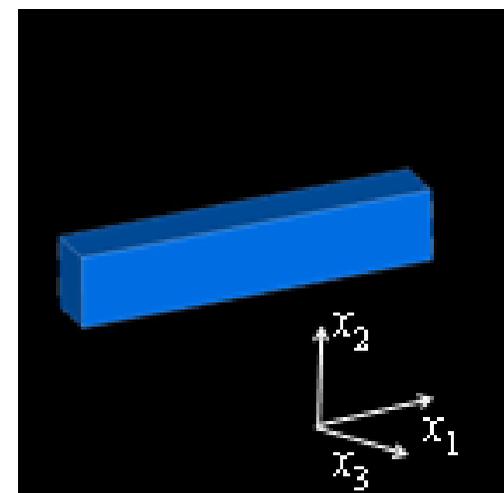


(a) $t = 30.0$ [s]



FrontISTR

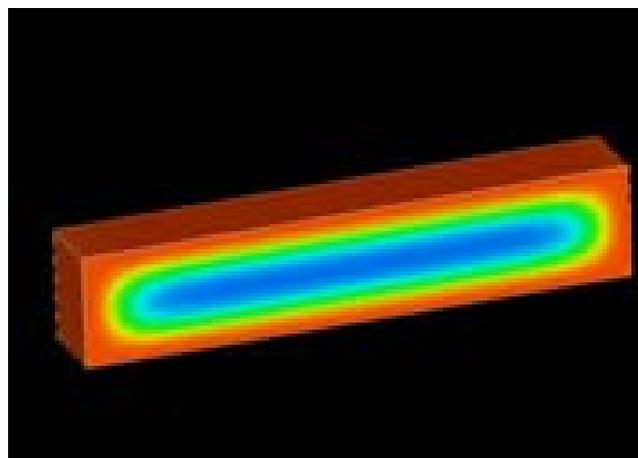
(b) $t = 150.0$ [s]



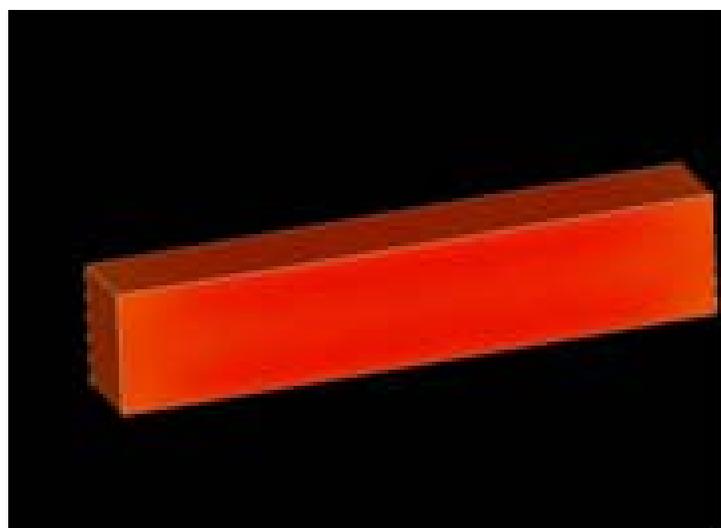
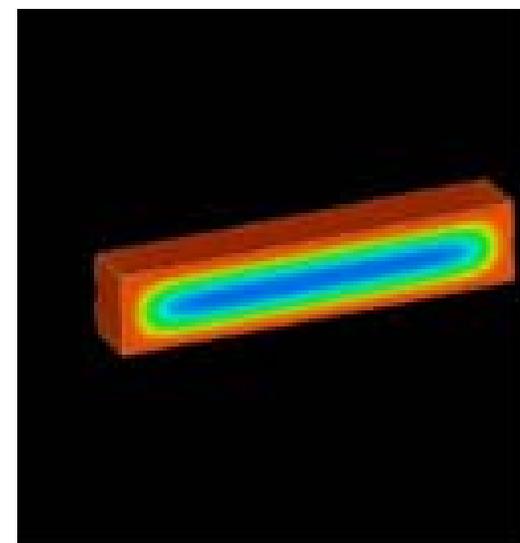
FrontCOMP

各時刻における温度分布図 [°C]

結晶化度分布

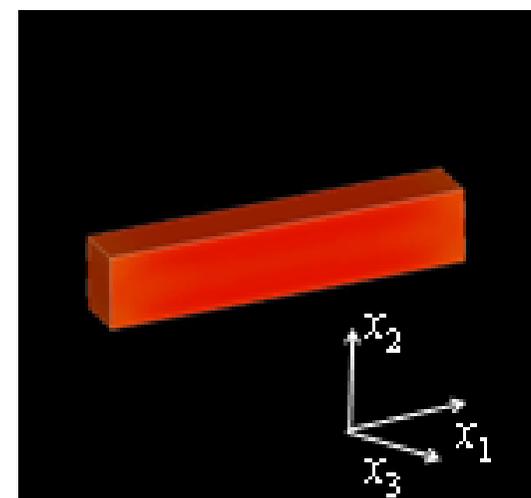


(a) $t = 30.0$ [s]



FrontISTR

(b) $t = 150.0$ [s]

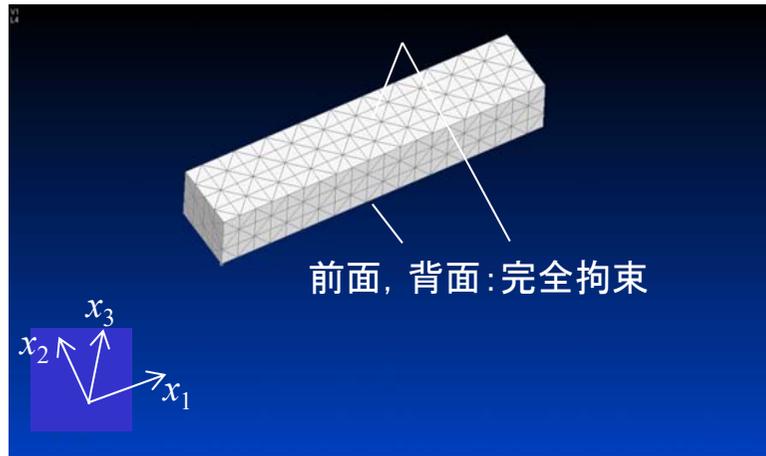


FrontCOMP

各時刻における相対結晶化度分布図

結晶性樹脂単体の解析例題 (ひずみ・ひずみ緩和解析)

解析モデル



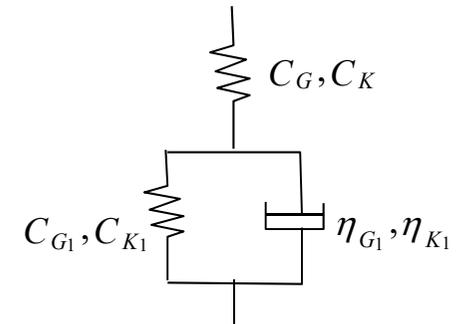
メッシュ分割図(節点数 3,353)

樹脂の粘弾性モデル:

Voigt 3 要素モデル

$$\eta_{G1}(T, a) = G_1(T, a) T_{G1}$$

$$\eta_{K1}(T, a) = K_1(T, a) T_{K1}$$



ここで,

η_{G1} : 粘性係数せん断成分, T_{G1} : 緩和時間せん断成分

η_{K1} : 粘性係数体積成分, T_{K1} : 緩和時間体積成分

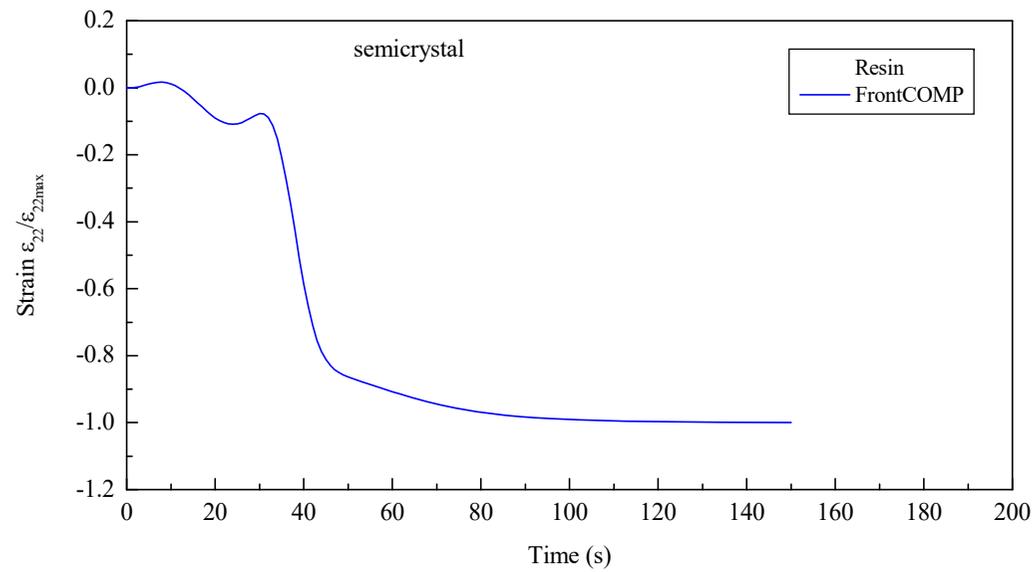
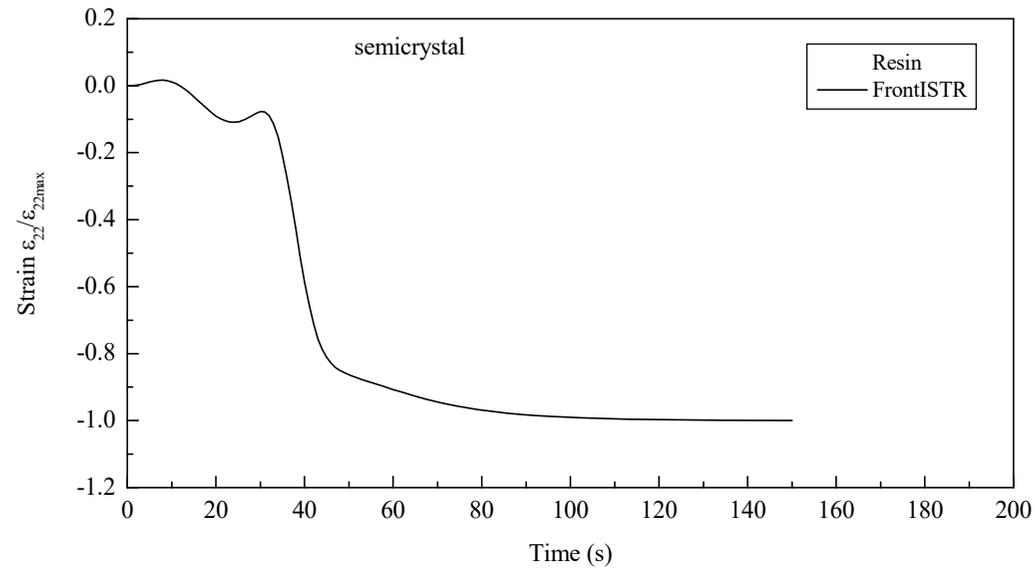
G_1 : 横弾性係数性, K_1 : 体積弾性係数

T : 温度, a : 硬化度

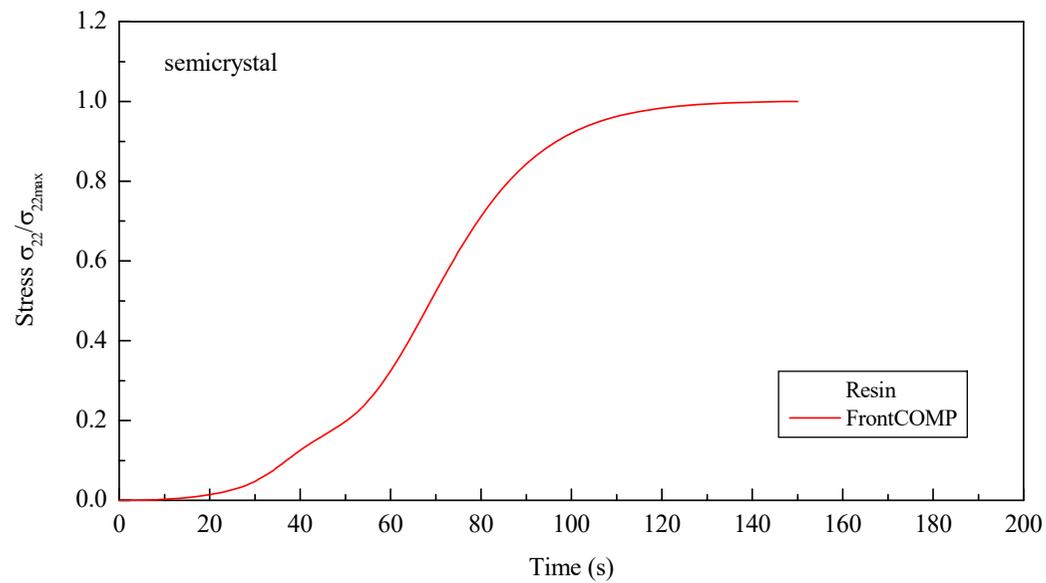
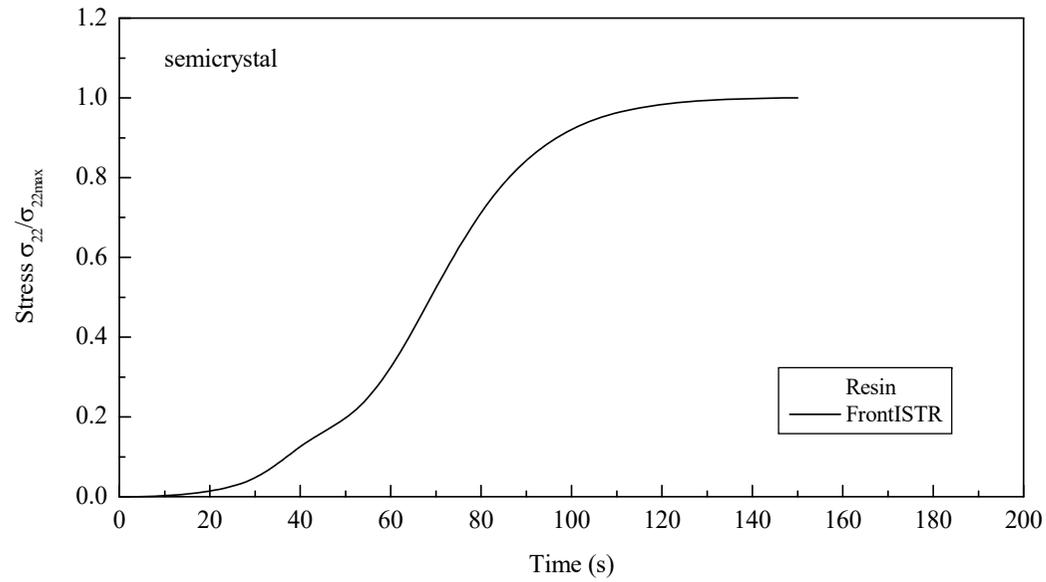
境界条件:

前面, 背面: x_3 方向の周期性を仮定して完全拘束

ひずみ変化の時刻歴

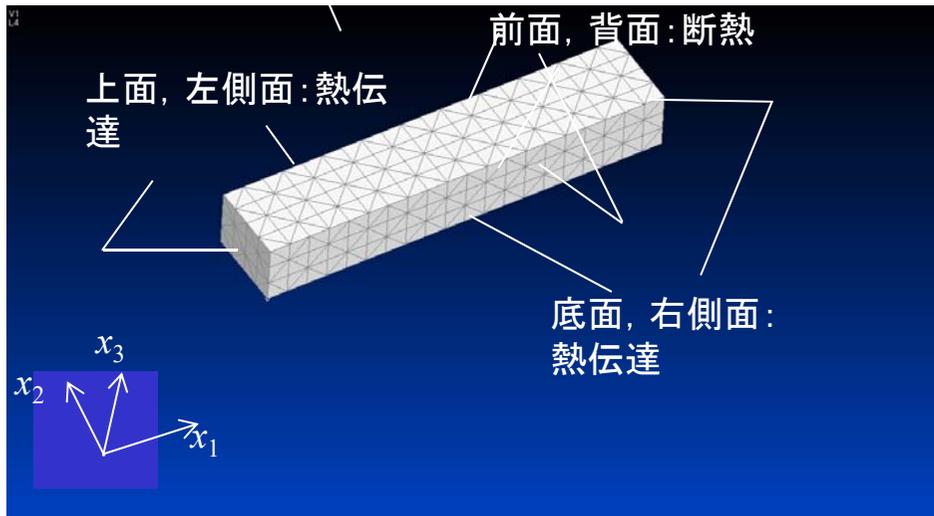


応力変化の時刻歴



非晶性樹脂単体の解析例題(非定常熱伝導解析)

解析モデル

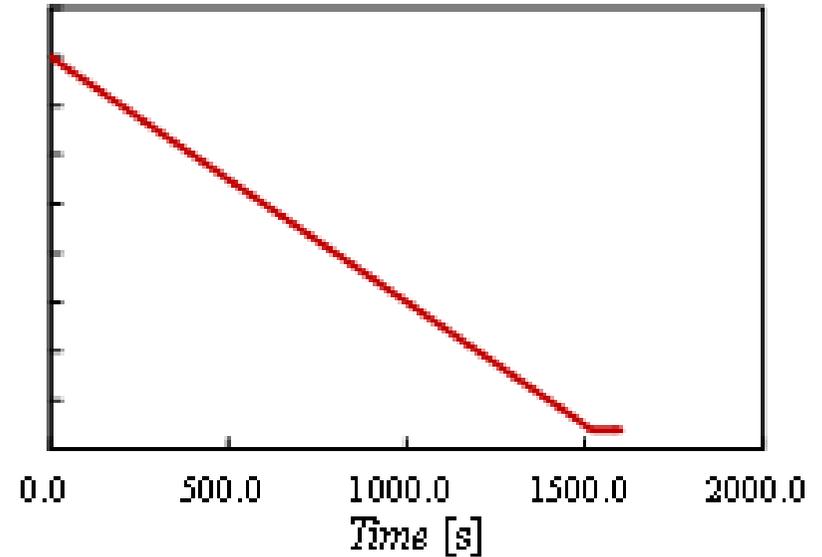


メッシュ分割図(節点数 19,538)

境界条件:

上面, 底面, 左側面, 右側面: 熱伝達

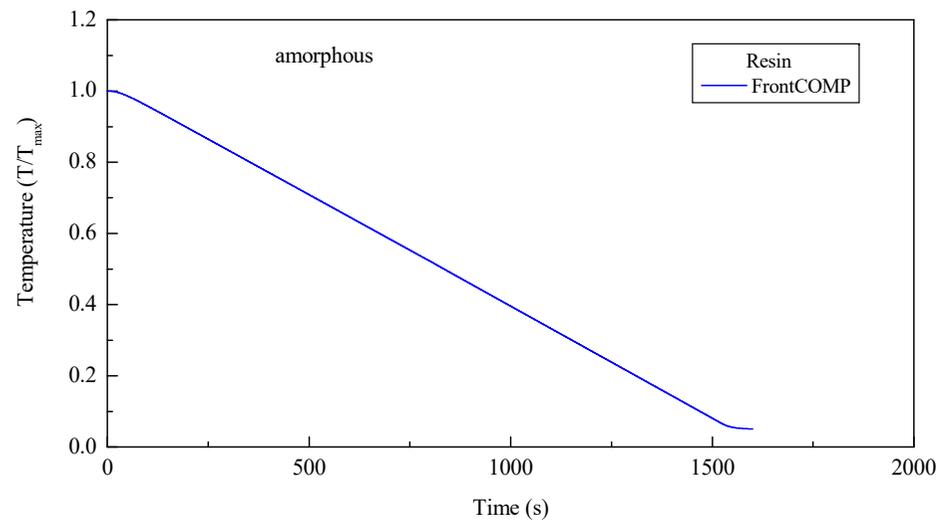
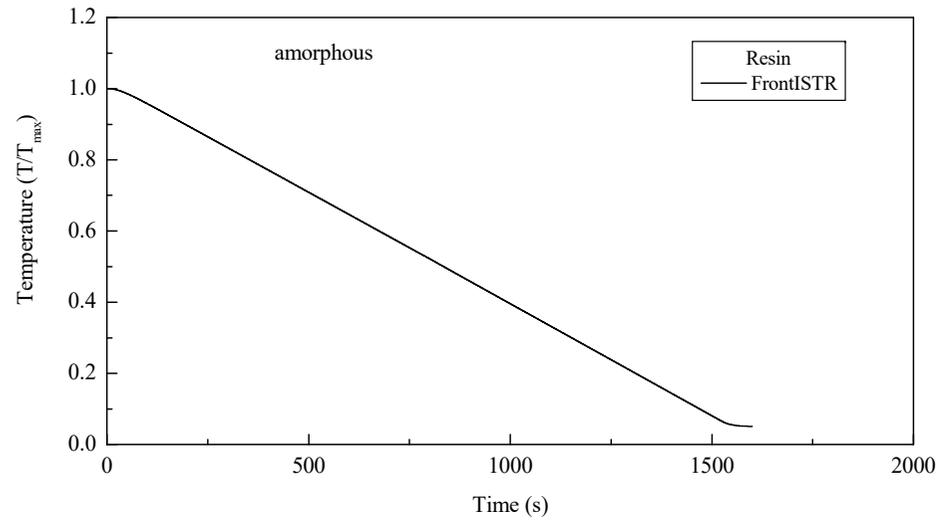
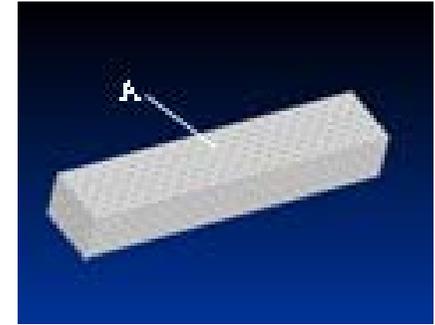
他の面: x_3 方向の周期性を仮定して断熱



冷却条件

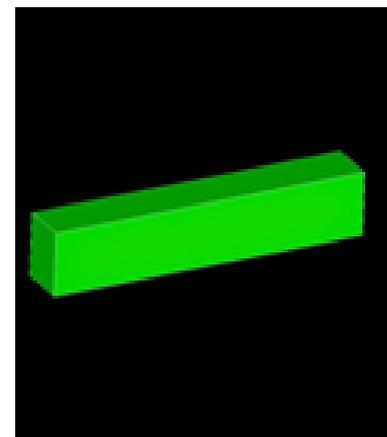
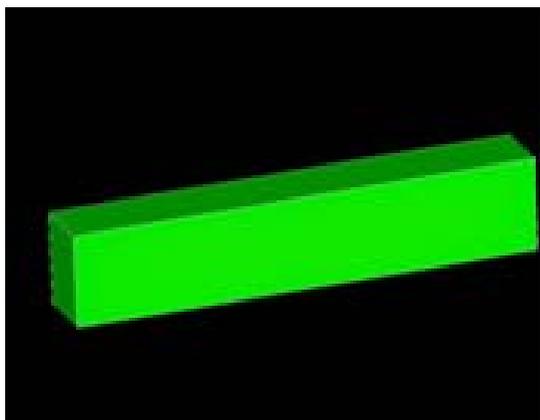
物性値: 省略

温度時刻歴

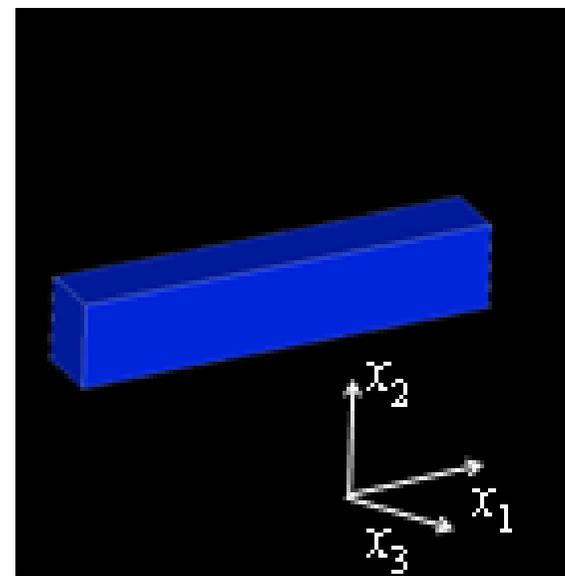
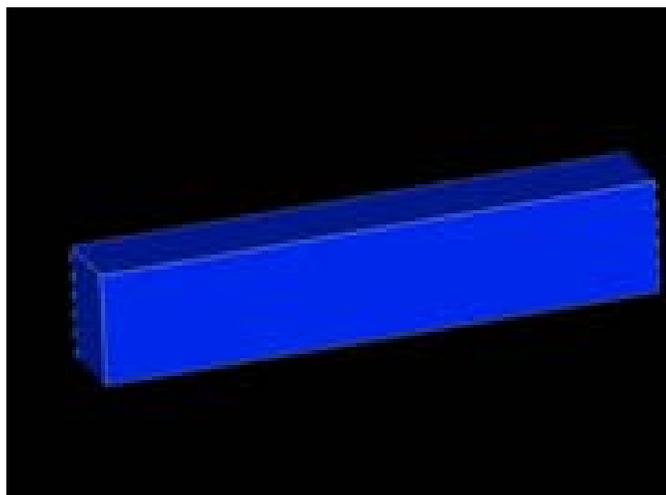


A点の温度時刻歴

各時刻における温度分布図

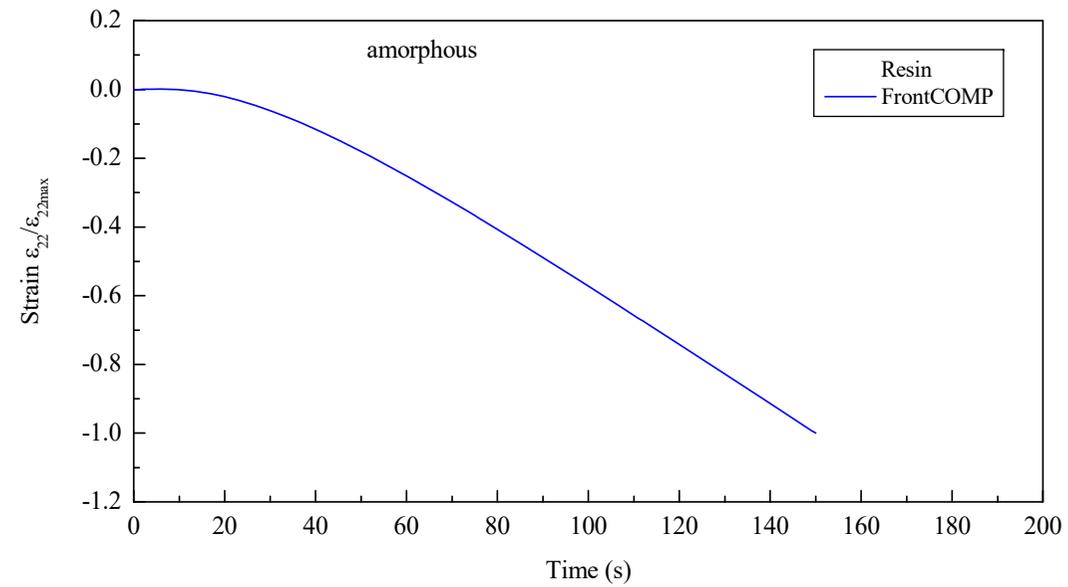
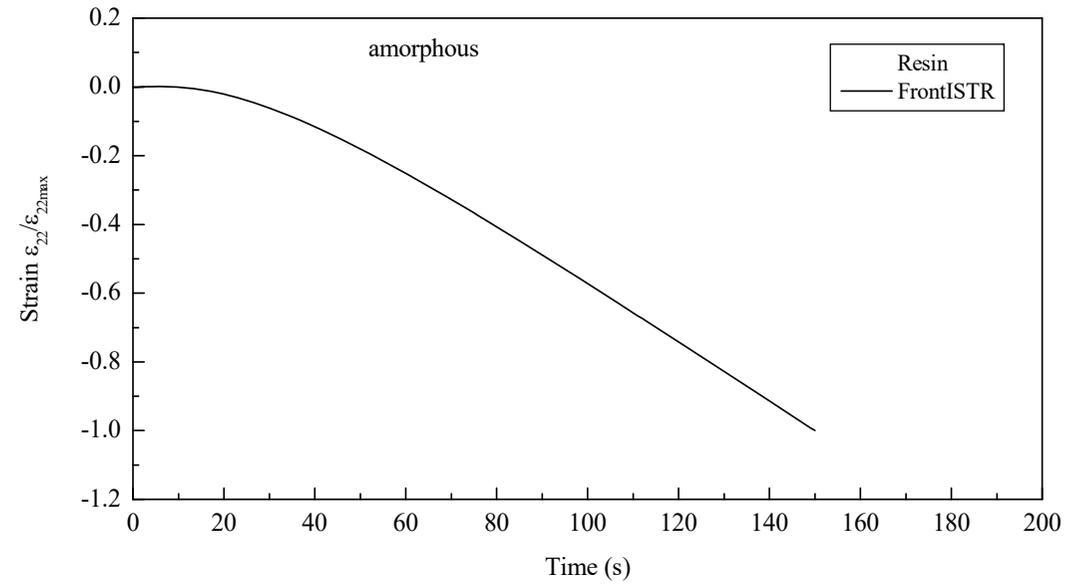


(a) $t = 800.0$ [s]

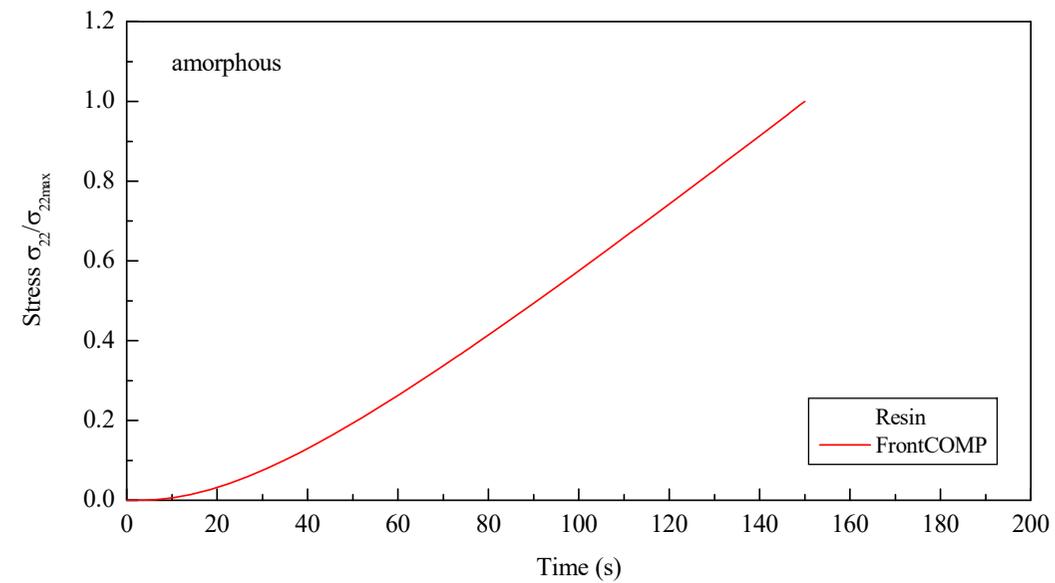
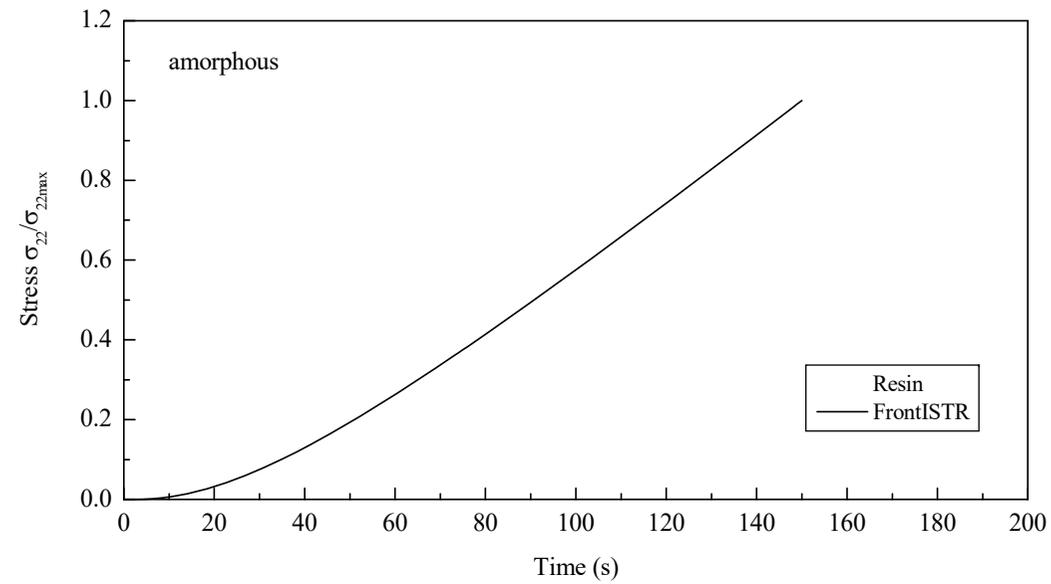


(b) $t = 1600.0$ [s]

ひずみ変化の時刻歴

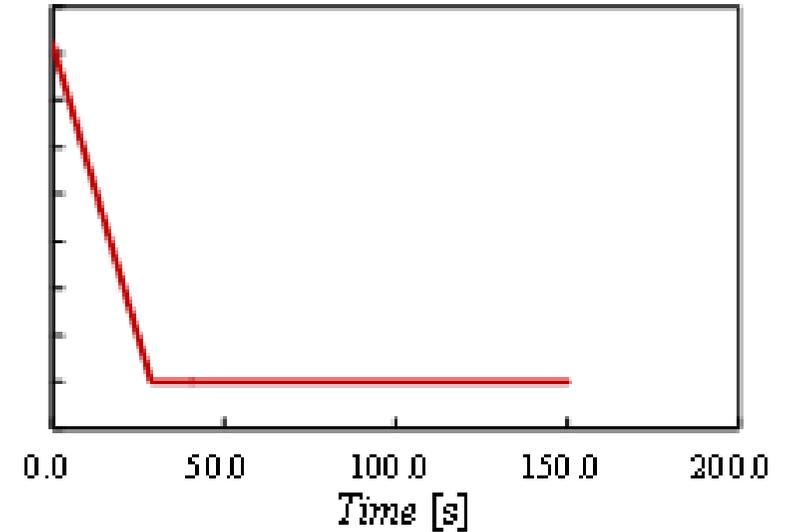
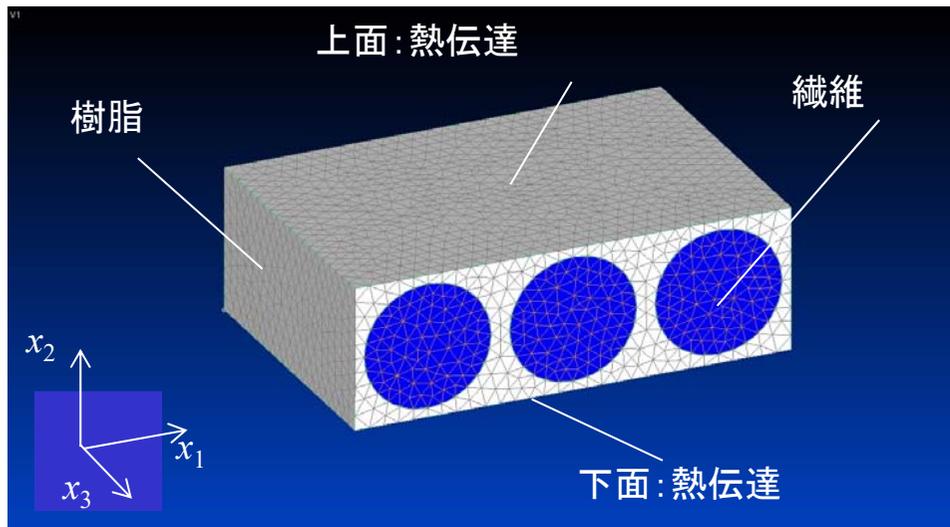


応力変化の時刻歴



CFRTPの解析例題(非定常熱伝導・結晶化度解析)

解析モデル



冷却条件

メッシュ分割図(節点数 60,733)

炭素繊維の体積含有率 : 0.60

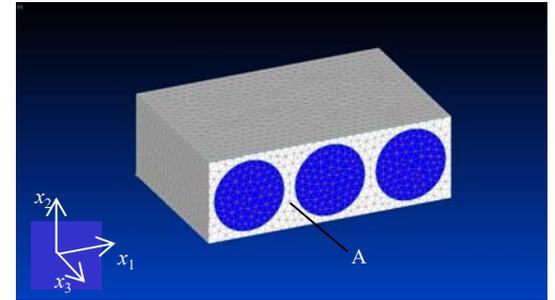
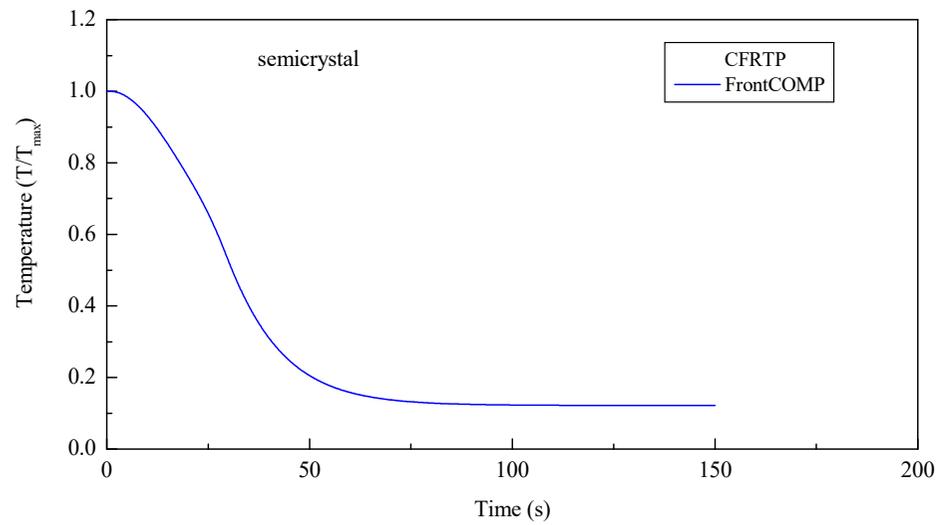
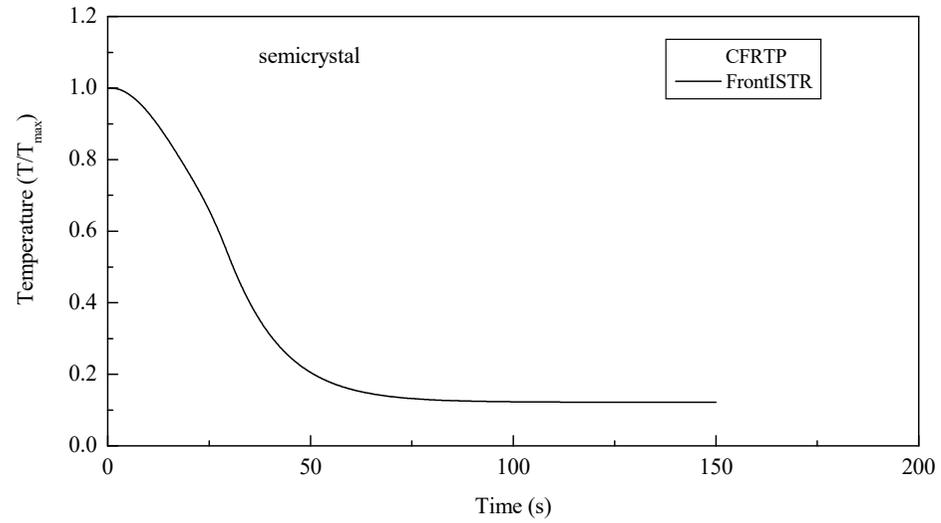
境界条件:

上面, 下面: 熱伝達

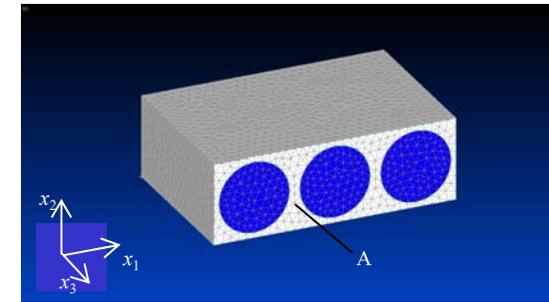
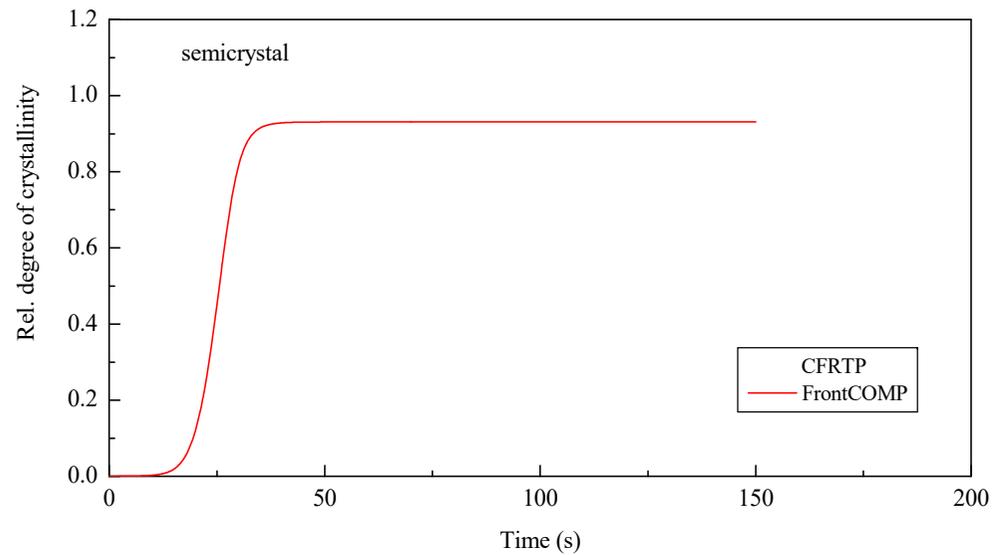
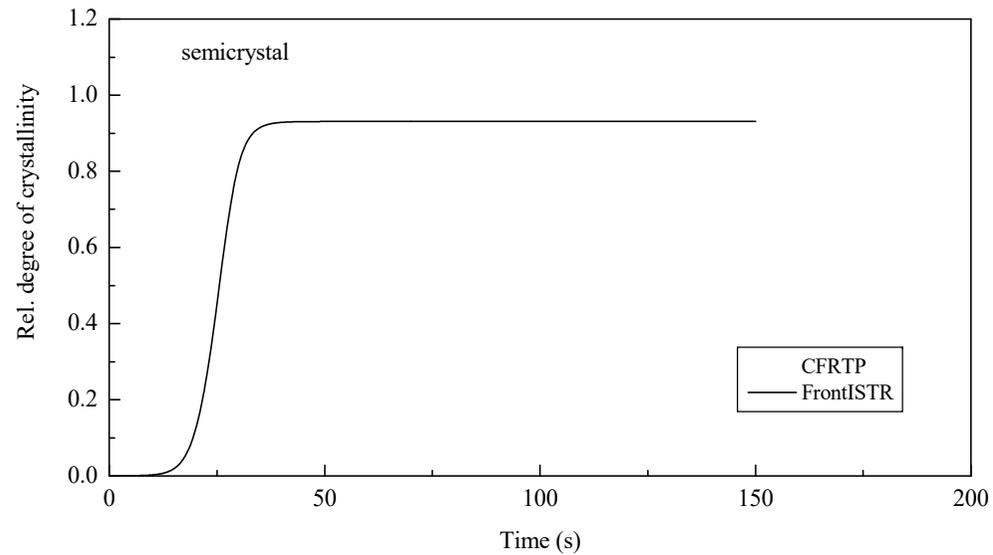
他の面: x_1 方向, x_3 方向の周期性を仮定して断熱

物性値: 省略

温度变化時刻歴

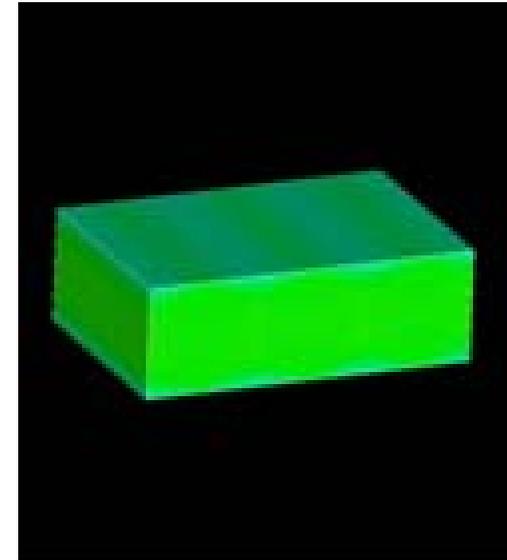
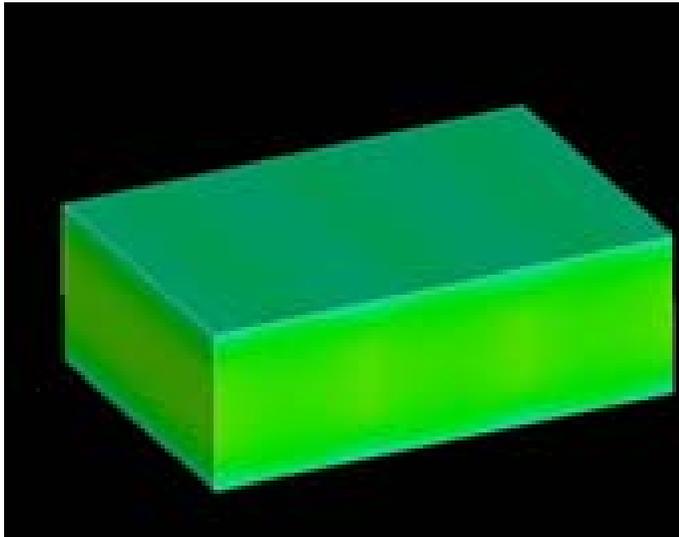


結晶化度変化時刻歴

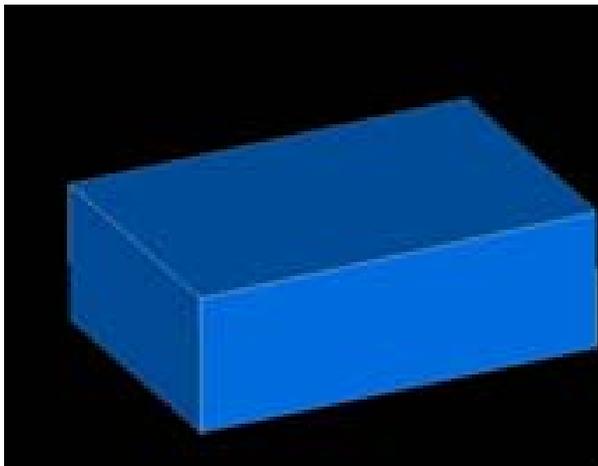


・相対結晶化度は 0~1 の範囲に収まった

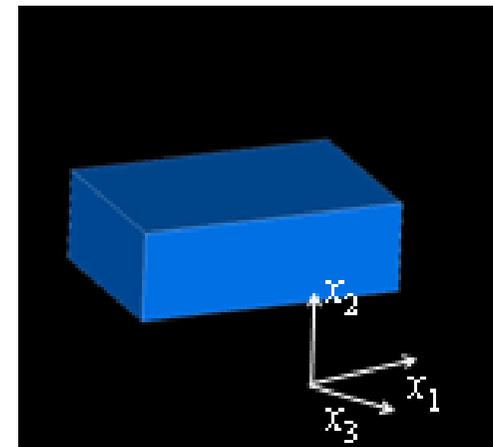
各時刻における温度分布



(a) $t = 30.0$ [s]



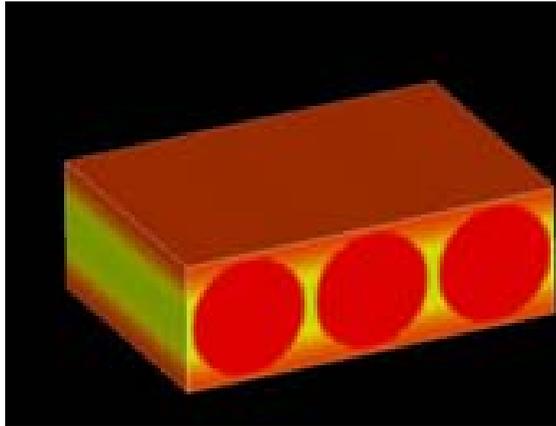
FrontISTR



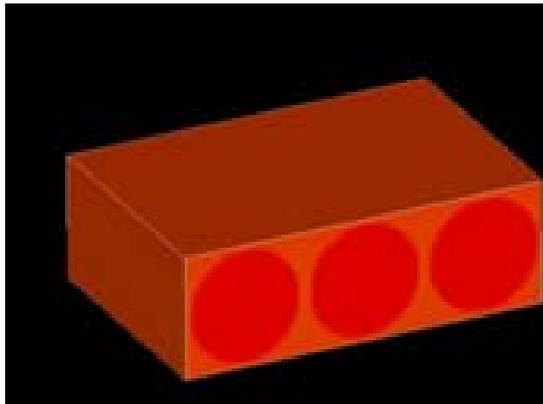
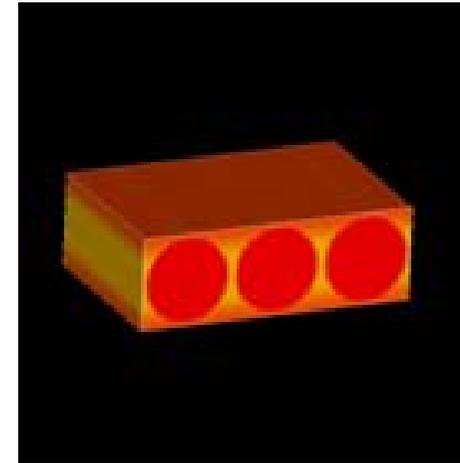
FrontCOMP

(b) $t = 150.0$ [s]

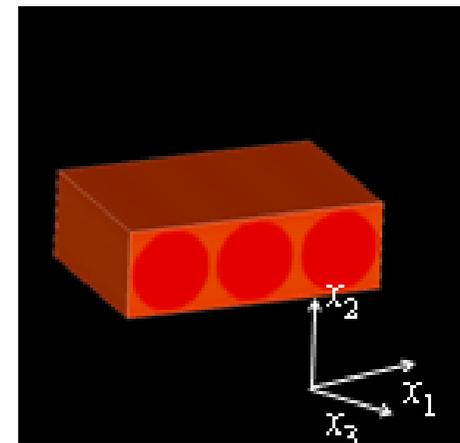
各時刻における結晶化度分布図



(a) $t = 30.0$ [s]



(b) $t = 150.0$ [s]



・すべての時刻, すべての領域で, 相対結晶化度は 0~1 の範囲に収まった

CFRTPの解析例題(ひずみ・ひずみ緩和解析)

樹脂の粘弾性モデル:

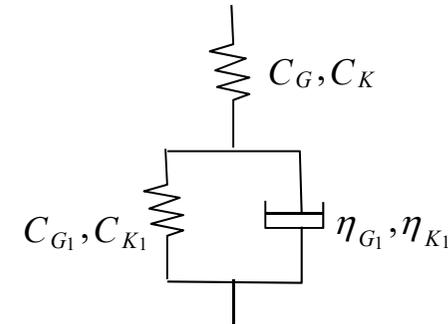
Voigt 3 要素モデル

$$\eta_{G1}(T, a) = G_1(T, a) T_{G1}$$

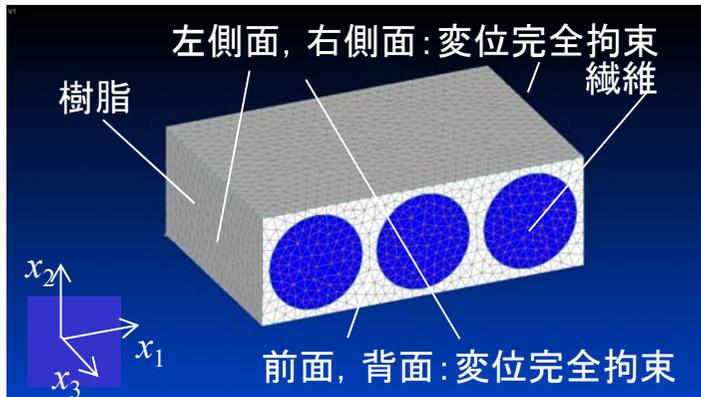
$$\eta_{K1}(T, a) = K_1(T, a) T_{K1}$$

ここで,

η_{G1} : 粘性係数せん断成分, T_{G1} : 緩和時間せん断成分
 η_{K1} : 粘性係数体積成分, T_{K1} : 緩和時間体積成分
 G_1 : 横弾性係数性, K_1 : 体積弾性係数
 T : 温度, a : 硬化度



解析モデル



メッシュ分割図(節点数 60,733)

炭素繊維の体積含有率 : 0.60

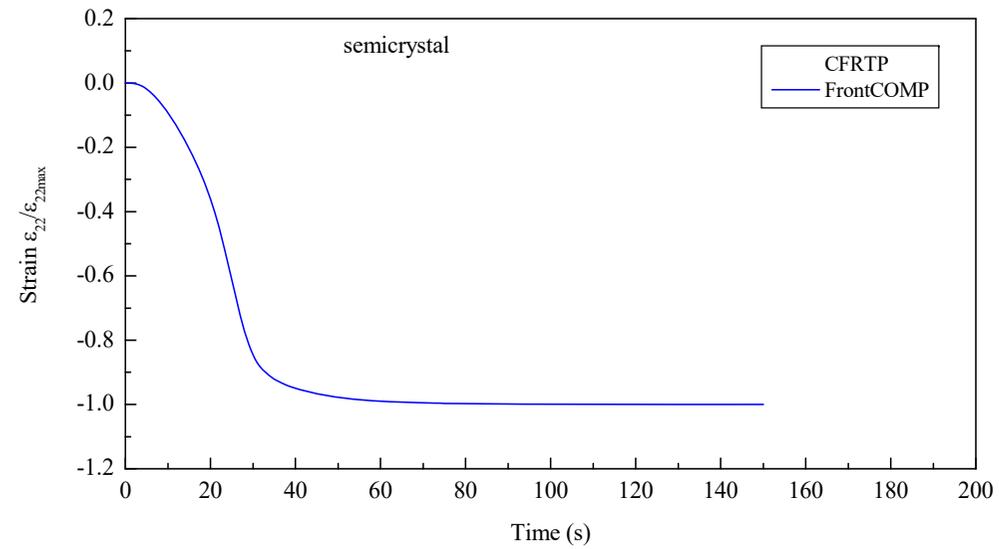
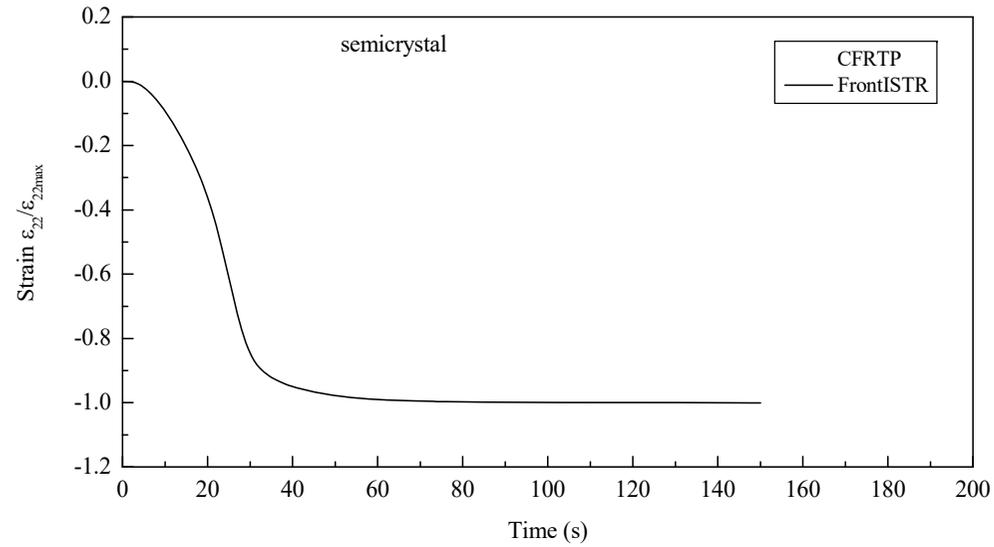
境界条件:

前面, 背面, 左側面, 右側面:

x_1 方向, x_3 方向の周期性を仮定して変位拘束

物性値:省略

ひずみ変化の時刻歴



応力変化の時刻歴

