

樹脂硬化プロセスシミュレーター FrontCOMP_cure の概要

東京大学生産技術研究所
吉川研究室 小笠原 朋隆

2016.07.22 (金)
東京大学本郷キャンパス

目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

超高压FRP容器の硬化プロセス最適化

製造コスト低減と強度信頼性確保のトレードオフ

水素スタンド用超高压FRP容器

- ・1000気圧, 極厚

硬化時間短縮

- ・高温保持 → 発熱, 過昇温 → 強度低下



http://www.r-expo.jp/wsew2015/exhiSearch/FC/jp/search_detail.php?id=20352

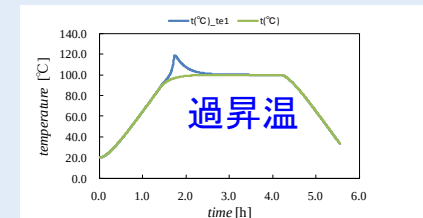


シミュレーションによる硬化プロセス最適化

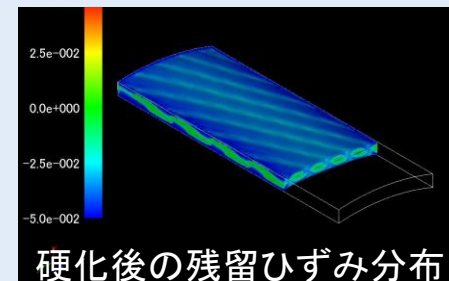
- ・温度管理
 - ・昇温速度, 保持温度, 保持時間
- ・樹脂選択
 - ・発熱量, 硬化特性



- ・硬化時過昇温の評価
- ・硬化後初期欠陥の評価



温度管理



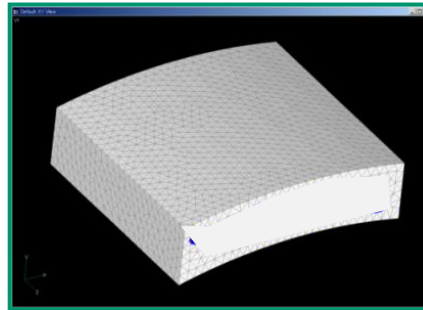
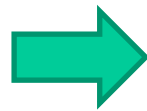
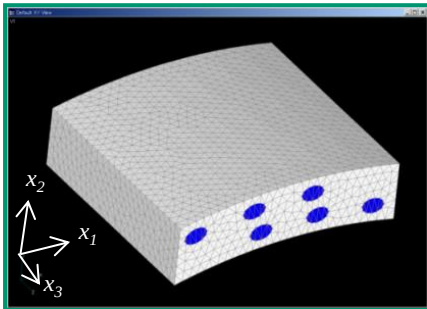
最適硬化プロセス探索シミュレーション実施に必要な項目

繊維強化複合材料の的確な硬化特性の評価

複合則等による連続体化した解析

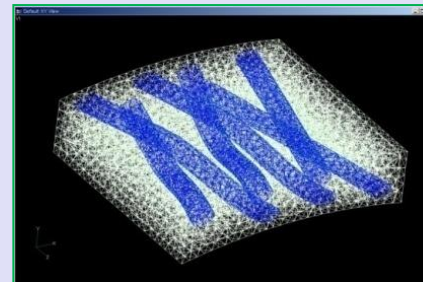


炭素繊維束と樹脂を個別に扱うメゾスケールモデル解析



複合則等により連続体化したモデル

- ・伝熱特性
- ・硬化による相変態
⇒ 複合則モデルなし



繊維束と樹脂を分離したメゾスケールモデル

- ・繊維束および樹脂単体の材料特性
⇒ 直接的に評価へ反映



大規模解析が必要不可欠

最適硬化プロセス探索シミュレーション実施に必要な項目

樹脂の硬化プロセスを正確にシミュレーション可能なプログラム
開発 *FrontCOMP_cure*

(イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発)

機能

- ・樹脂の自己発熱を考慮した熱伝導解析と硬化度解析
- ・温度変化と相変化により発生するひずみ解析
- ・樹脂流動によるひずみ緩和解析

要素拡充

- ・3次元四面体2次要素, 軸対称三角形2次要素

材料特性の正確な同定



実験結果とシミュレーション結果との合せ込み

- ・非定常熱伝導解析・硬化度解析
 - 発熱量測定, 容器温度測定
- ・ひずみ解析・ひずみ緩和解析
 - 二層積層試験片等の硬化そり試験

複合材料強度信頼性評価シミュレーターの研究開発

FrontCOMP

<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/project/material/>

RISS
Research and Development of
Innovative Simulation Software

文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発
イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発
Research and Development of Innovative Simulation Software

RISSについて 研究内容 イベントカレンダー 産業界との協力 ダウンロード

ホーム > 研究内容

研究内容

次世代ものづくりシミュレーションシステム

- ❖ 大規模アセンブリ構造対応熱流体解析ソルバーの研究開発
- ❖ 大規模アセンブリ構造対応構造解析ソルバーの研究開発
- ❖ 複合材料強度信頼性評価シミュレーターの研究開発
- ❖ 大規模アセンブリ構造対応マルチ力学シミュレーターの研究開発

量子バイオシミュレーションシステム

- ❖ バイオ・ナノ分子特性シミュレーターの研究開発

研究内容

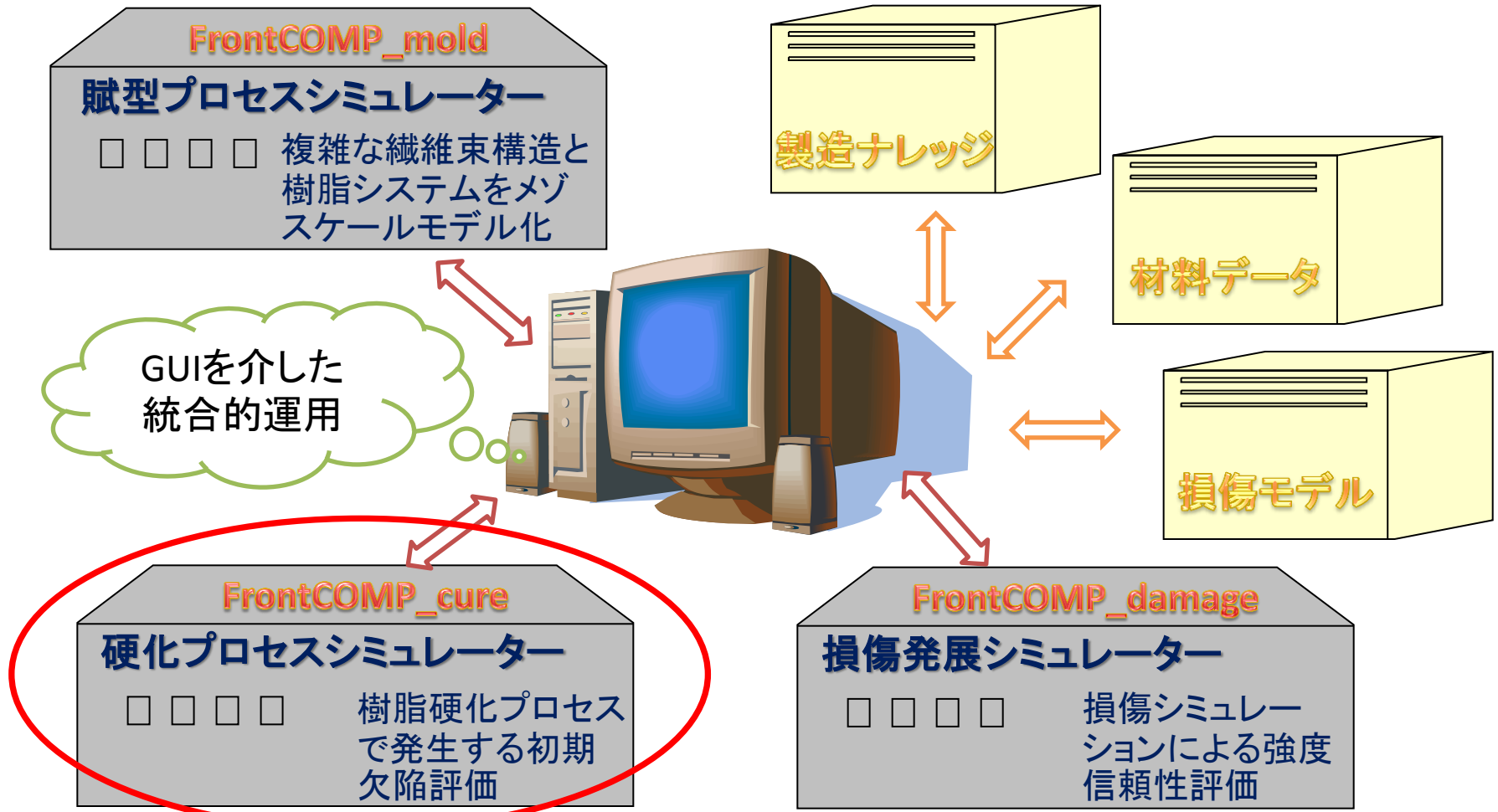
次世代ものづくりシミュレーションシステム

- ❖ **大規模アセンブリ構造対応熱流体解析ソルバーの研究開発**
ものづくり関連の基幹産業におけるイノベーション創出に資するため、次世代の流体解析システムを開発します。
- ❖ **大規模アセンブリ構造対応構造解析ソルバーの研究開発**
複数の部品から構成される大規模なアセンブリ構造体を“まるごと解析”できるシステムが実現します。
- ❖ **複合材料強度信頼性評価シミュレーターの研究開発**
炭素繊維束をプラスチック容器あるいはアルミ合金容器に巻きつけて補強した、燃料電池自動車用の高圧水素容器の設計問題を取り上げる予定です。
- ❖ **大規模アセンブリ構造対応マルチ力学シミュレーターの研究開発**

FrontISTR

FrontCOMP

複合材料強度信頼性評価シミュレーター *FrontCOMP* の構成



高度な信頼性評価に基づく 製造プロセスまで含めた
炭素繊維強化プラスチック(FRP)の最適設計！

目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

樹脂硬化プロセスシミュレーションの概要

成形プロセス時に発生する残留ひずみ，残留応力等の初期欠陥評価が可能な有限要素解析システム

樹脂の自己発熱を考慮した熱伝導解析と硬化度解析

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho \dot{Q}$$
$$\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt} = H_r (K_1 + K_2 a^m)(1-a)^n$$

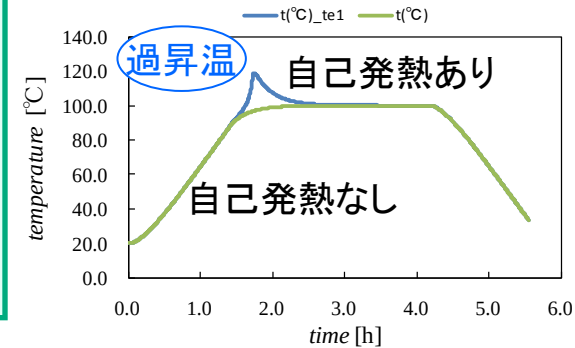
- ・温度時刻歴データ
- ・硬化度時刻歴データ

温度変化と相変化により発生するひずみ解析

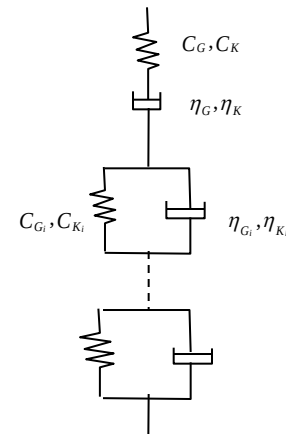
$$\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \right) = (\beta_{gel}(T)(1-a) + \beta_{cured}(T)a) \frac{dT}{dt} - \lambda_{chem} \frac{da}{dt}$$

樹脂流動によるひずみ緩和解析

- ・粘弾性解析 $\eta(T, a) = E(T, a) T_g$



樹脂の自己発熱による温度，硬化度への影響



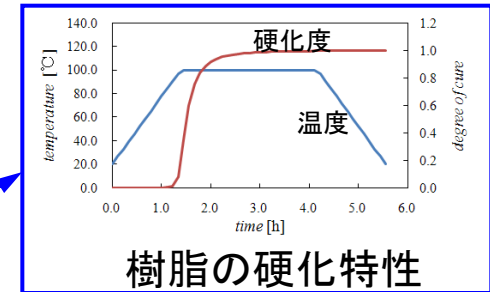
一般化Voigtモデル

樹脂硬化プロセスシミュレーションに必要な樹脂に関する諸特性

樹脂の自己発熱を考慮した熱伝導解析と硬化度解析

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho \dot{Q}$$

$$\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt} = H_r (K_1 + K_2 a^m)(1-a)^n, \quad K_i = A_i e^{-(E_i/RT)}$$



温度変化と相変化により発生するひずみ解析

$$\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \right) = \left(\beta_{gel}(T)(1-a) + \beta_{cured}(T)a \right) \frac{dT}{dt} - \lambda_{chem} \frac{da}{dt}$$

硬化収縮量

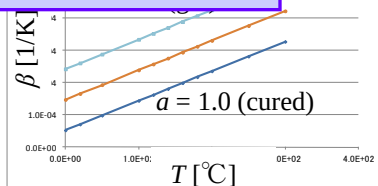
樹脂流動によるひずみ緩和解析

・粘弾性解析

$$\eta(T, a) = E(T, a) T_g$$

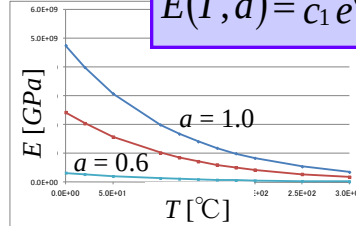
$$\beta_{gel}(T) = \beta_{a=0.0}(T) = e_1 T + f_1$$

$$\beta_{cured}(T) = \beta_{a=1.0}(T) = e_2 T + f_2$$

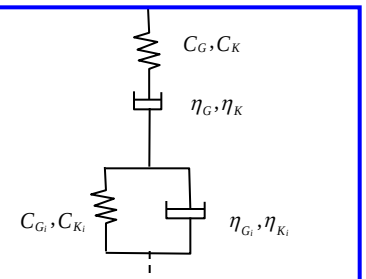


線膨張係数の温度・硬化度依存性

$$E(T, a) = c_1 e^{(-d_1 T)} c_2 e^{(d_2 a)}$$



ヤング率の温度・硬化度依存性



$$\eta_G(T, a) = G(T, a) T_G$$

$$\eta_K(T, a) = K(T, a) T_K$$

一般化Voigtモデル

目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

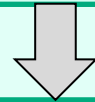
FrontCOMP_cure のプログラム構造

HEC-MWによる大規模並列有限要素法構造解析プログラム

FrontSTR ver. 2.02

「革新的シミュレーションソフトウェア
の研究開発」プロジェクト

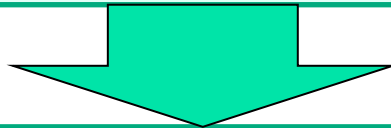
非定常熱伝導解析



温度

幾何学的非線形解析

変位, ひずみ, 応力

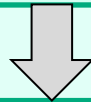


注) 赤字は新規追加, 改変事項

樹脂硬化プロセスシミュレーター FrontCOMP_cure ver. 3.1

非定常熱伝導解析(自己発熱)

+ 硬化度解析



温度, 硬化度

幾何学的非線形解析(硬化収縮, 温度・硬化度依存物性, 粘弾性解析)

変位, ひずみ, 応力

FrontCOMP_cure の計算フロー(1/2)

現在は弱連成解析(非定常熱伝導・硬化度解析とひずみ・ひずみ緩和解析)
下図は一時間増分区間内の計算の流れを示す

注) 赤字は新規追加, 改変事項

樹脂の自己発熱を考慮した非定常熱伝導解析と硬化度解析

雰囲気温度 入力

硬化度解析

$$\frac{1}{\Delta t} [C_a(t)] \{a(t + \Delta t)\} = \frac{1}{\Delta t} [C_a(t)] \{a(t)\} + \{ \{F_a(t)\} + \beta(\{F_a(t + \Delta t)\} - \{F_a(t)\}) \} , \beta = 0$$

$$\frac{da}{dt} = (K_1 + K_2 a^m)(1 - a)^n$$

硬化度 a

非定常熱伝導解析

$$\left\{ \beta[K(t)] + \frac{1}{\Delta t} [C(t)] \right\} \{\phi(t + \Delta t)\} = \left\{ -(1 - \beta)[K(t)] + \frac{1}{\Delta t} [C(t)] \right\} \{\phi(t)\} + \{ \{F(t)\} + \beta(\{F(t + \Delta t)\} - \{F(t)\}) \} , \beta = 1$$

温度 T

樹脂の自己発熱

$$\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt}$$

連成解析用温度・硬化度 出力

FrontCOMP_cure の計算フロー(2/2)

注) 赤字は新規追加, 改変事項

温度変化と相変化により発生するひずみ解析および樹脂流動によるひずみ緩和解析(幾何学的非線形解析)

連成解析用温度・硬化度 入力

熱膨張・硬化収縮による初期ひずみ増分付与

$$d\varepsilon_{xx} = d\varepsilon_{yy} = d\varepsilon_{zz} \doteq \frac{1}{3} \left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \right) dt = \frac{1}{3} \left(\beta(T, a) \frac{dT}{dt} - \lambda_{chem} \frac{da}{dt} \right) dt$$

物性値の温度, 硬化度依存性

$$E(T, a) = c_1 e^{(-d_1 T)} c_2 e^{(d_2 a)}$$

$$\beta(T, a) = \beta_{gel}(T)(1-a) + \beta_{cured}(T)a$$

粘弾性解析

$$\{\dot{\sigma}\} = [D_g^e] \{\dot{\varepsilon}\} - \underbrace{\{\dot{A}\}}_{\text{粘性項}} - [D_g^e] \{\dot{\varepsilon}^\theta\}$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \underbrace{\{\dot{\varepsilon}^e\}}_{\text{弾性成分}} + \underbrace{\{\dot{\varepsilon}^v\}}_{\text{粘性成分}} + \underbrace{\{\dot{\varepsilon}^\theta\}}_{\text{熱膨張・硬化収縮成分}}$$

弾性成分 粘性成分 熱膨張・硬化収縮成分

一般化 Voigt モデル

$$\eta_G(T, a) = G(T, a) T_G$$

$$\eta_K(T, a) = K(T, a) T_K$$

$$\eta_{Gi}(T, a) = G_i(T, a) T_{Gi}$$

$$\eta_{Ki}(T, a) = K_i(T, a) T_{Ki}$$

変位 u
ひずみ ε
応力 σ

硬化度解析について

質量保存則を表す式

$$\rho \frac{da(T, a)}{dt} = \rho r_a(T, a) = \rho (K_1(T) + K_2(T)a^m)(1-a)^n$$

上式に対して Galerkin法を適用し有限要素離散化後の全体系有限要素平衡方程式

$$[C_a(t)] \left\{ \frac{da(t)}{dt} \right\} = \{F_a(t)\}$$

$$\text{ここで,} \quad [C_a(t)] = \sum_e \int_{V^e} \rho(T) \{N\} [N] dV \quad \{F_a(t)\} = \sum_e \int_{V^e} \rho(T) r_a(t) \{N\} dV$$

$$\{a(t)\} = \sum_e \{a(t)^e\} \quad : \text{節点硬化度ベクトル}$$

時間積分に一般化Crank-Nicolson法を適用すると次式が得られる

$$\frac{1}{\Delta t} [C_a(t)] \{a(t + \Delta t)\} = \frac{1}{\Delta t} [C_a(t)] \{a(t)\} + \left\{ \{F_a(t)\} + \beta (\{F_a(t + \Delta t)\} - \{F_a(t)\}) \right\}$$

粘弾性解析について(1/3)

一般化Voigtモデルにおける粘弾性体の構成式

$$\{\dot{\sigma}\} = [D_g^e]\{\dot{\varepsilon}\} - \{\dot{A}\} - [D_g^e]\{\dot{\varepsilon}^\theta\} \quad (3.3.2-B1)$$

ここで,

$$\{\dot{A}\} = [D_g^e] \left([\eta_g]^{-1} + \sum_i [\eta_i]^{-1} \right) \{\sigma\} - [D_g^e] \sum_i [\eta_i]^{-1} [D_i^e] \{\varepsilon_i\} \quad (3.3.2-B2)$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon}^e\} + \{\dot{\varepsilon}^v\} + \{\dot{\varepsilon}^\theta\} \quad (3.3.2-B3)$$

$\{\dot{\sigma}\}$: 応力速度ベクトル, $\{\sigma\}$: 応力ベクトル,

$[D_g^e]$: Maxwell要素の弾性剛性マトリクス,

$[D_i^e]$: Voigt要素*i*の弾性剛性マトリクス,

$[\eta_g]$: Maxwell要素の粘性マトリクス,

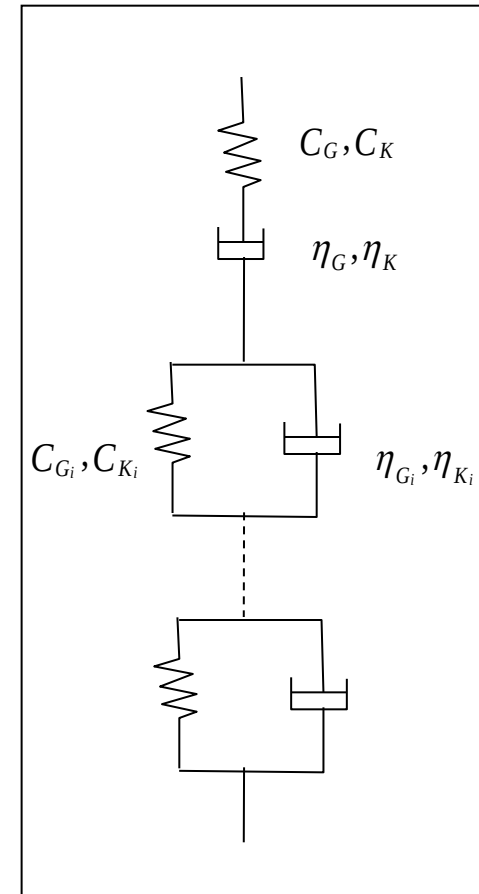
$[\eta_i]$: Voigt要素*i*の粘性マトリクス,

$\{\varepsilon_i\}$: Voigt要素*i*の全歪ベクトル,

$\{\dot{\varepsilon}\}$: 全歪速度ベクトル, $\{\dot{\varepsilon}^e\}$: 弾性歪速度ベクトル,

$\{\dot{\varepsilon}^v\}$: 粘性歪速度ベクトル,

$\{\dot{\varepsilon}^\theta\}$: 歪速度ベクトルの熱膨張および硬化収縮成分,



一般化Voigtモデル

粘弾性解析について(2/3)

プログラムでは、粘弾性構成式(3.3.2-B1)を単純に前進差分形式に置き換えるのではなく、時間増分区間内で応力変化を線形と仮定し、全歪み増分についての別表示を求めることにより、精度を改善した手法^[B1]を適用した次式を実装している。材料は等方性を仮定している。

$$\begin{aligned}\{\Delta\sigma(t)\} &= \{\Delta\sigma'(t)\} + \{\Delta\sigma_m(t)\} \\ &= \frac{2\{\Delta\varepsilon'(t)\}}{C_G(t)} + \frac{3\{\Delta\varepsilon_m(t)\}}{C_K(t)} - \frac{\{\Delta\varepsilon'_a(t)\}}{C_G(t)} - \frac{\{\Delta\varepsilon_{am}(t)\}}{C_K(t)} - \frac{3\{\Delta\varepsilon^\theta(t)\}}{C_K(t)}\end{aligned}\quad (3.3.2-B20)$$

ここで、

$$C_G(t) = C_G + \frac{\Delta t}{2\eta_G} + \sum_i C_{Gi} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right\} \frac{T_{Gi}}{\Delta t} \right\} \quad (3.3.2-B16)$$

$$\begin{aligned}\{\Delta\varepsilon'_a(t)\} &= \frac{\Delta t}{\eta_G} \{\sigma'(t)\} + \sum_i C_{Gi} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right\} \{\sigma'(t)\} \\ &\quad - 2 \sum_i \left\{ \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right\} \{\varepsilon'_i(t)\} \right\}\end{aligned}\quad (3.3.2-B17)$$

粘弾性解析について(3/3)

$$C_K(t) = C_K + \frac{\Delta t}{2\eta_K} + \sum_i C_{Ki} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right\} \frac{T_{Ki}}{\Delta t} \right\} \quad (3.3.2-B18)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \varepsilon_{am}(t)\} = & \frac{\Delta t}{\eta_K} \{\sigma_m(t)\} + \sum_i C_{Ki} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right\} \{\sigma_m(t)\} \\ & - 3 \sum_i \left(\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right\} \{\varepsilon_{mi}(t)\} \right) \end{aligned} \quad (3.3.2-B19)$$

参考文献) [B1] 山田嘉昭、塑性・粘弾性、初版、pp.130-135、培風館、(1980)

目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

主要なプログラム改変事項(1/6)

非定常熱伝導解析・硬化度解析

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
硬化度(未知変数)の追加	~/FrontCOMP_cure/src/lib/m_fstr.f90 m_fstr
硬化度求解部の作成 $\rho \frac{da}{dt} = \rho r_a = \rho (K_1 + K_2 a^m)(1-a)^n$	~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_solve_TRAN.f90 heat_solve_TRAN ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_mat_ass_capacity.f90 cure_mat_ass_capacity ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_mat_ass_boundary.f90 cure_mat_ass_boundary ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_mat_ass_bc_DFLUX.f90 cure_mat_ass_bc_DFLUX ~/FrontCOMP_cure/src/lib/heat_LIB_CAPACITY.f90 cure_CAPACITY_342 ~/FrontCOMP_cure/src/lib/heat_LIB_DFLUX.f90 cure_DFLUX_342

主要なプログラム改変事項(2/6)

非定常熱伝導解析・硬化度解析

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
樹脂の自己発熱の導入 $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho \dot{Q}$	~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_solve_TRAN.f90 heat_solve_TRAN ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_mat_ass_bc_DFLUX.f90 heat_mat_ass_bc_DFLUX ~/FrontCOMP_cure/src/lib/heat_LIB_DFLUX.f90 heat_DFLUX_342
硬化特性のモデル化 $\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt} = H_r (K_1 + K_2 a^m)(1-a)^n$	~/FrontCOMP_cure/src/lib/heat_LIB_DFLUX.f90 heat_DFLUX_342

主要なプログラム改変事項(3/6)

非定常熱伝導解析・硬化度解析

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
IO	~/FrontCOMP_cure/src/common/fstr_setup.f90 fstr_heat_init ~/FrontCOMP_cure/src/common/fstr_ctrl_heat.f90 ~/FrontCOMP_cure/src/lib/m_fstr.f90 m_fstr ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_solve_TRAN.f90 heat_solve_TRAN ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/ heat_output heat_post ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_init.f90 heat_init_result ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_make_result.f90 heat_make_RESULT

主要なプログラム改変事項(4/6)

ひずみ解析・ひずみ緩和解析

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
硬化度(未知変数)の追加	~/FrontCOMP_cure/src/lib/m_fstr.f90 m_fstr
温度あるいは硬化収縮による体積変化 $\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \right) = \beta(T, a) \frac{dT}{dt} - \lambda_{chem} \frac{da}{dt}$	~/FrontCOMP_cure/src/analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90 FSTR_SOLVE_NLGEOM fstrNLGEOM_SetKQ fstrNLGEOM_Update fstrNLGEOM_reaction_force3d ~/FrontCOMP_cure/src/lib/static_LIB_3d2TL.f90 STF_C3D10TL UPDATE_C3D10TL
物性値の温度, 硬化度依存性 $E(T, a) = c_1 e^{(-d_1 T)} c_2 e^{(d_2 a)}$ $\beta(T, a) = \beta_{gel}(T)(1-a) + \beta_{cured}(T)a$ $\beta_{gel}(T) = \beta_{a=0.0}(T) = e_1 T + f_1$ $\beta_{cured}(T) = \beta_{a=1.0}(T) = e_2 T + f_2$	/FrontCOMP_cure/src/analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90 FSTR_SOLVE_NLGEOM fstrNLGEOM_SetKQ fstrNLGEOM_Update fstrNLGEOM_reaction_force3d ~/FrontCOMP_cure/src/lib/static_LIB_3d2TL.f90 STF_C3D10TL UPDATE_C3D10TL

主要なプログラム改変事項(5/6)

ひずみ解析・ひずみ緩和解析

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
粘弾性解析による樹脂流動の近似表現 一般化 Voigt モデル $\eta_G(T,a) = G(T,a)T_G, \quad \eta_{Gi}(T,a) = G_i(T,a)T_{Gi}$ $\eta_K(T,a) = K(T,a)T_K, \quad \eta_{Ki}(T,a) = K_i(T,a)T_{Ki}$	~/FrontCOMP_cure/src/analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90 FSTR_SOLVE_NLGEOM fstrNLGEOM_SetKQ fstrNLGEOM_Update fstrNLGEOM_reaction_force3d ~/FrontCOMP_cure/src/lib/static_LIB_3d2TL.f90 STF_C3D10TL UPDATE_C3D10TL
IO	~/FrontCOMP_cure/src/common/fstr_setup.f90 fstr_solid_init ~/FrontCOMP_cure/src/common/fstr_ctrl_static.f90 ~/FrontCOMP_cure/src/lib/m_fstr.f90 m_fstr ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90 FSTR_SOLVE_NLGEOM fstrNLGEOM_InitialState fstrNLGEOM_Output fstrNLGEOM_nodal_stress3d fstrNLGEOM_Post fstrNLGEOM_make_result

主要なプログラム改変事項(6/6)

連成解析

(非定常熱伝導解析・硬化度解析－ひずみ解析・ひずみ緩和解析)

改変項目	該当モジュール・サブルーチン
一方向連成解析用中間ファイル(温度, 硬化度)の作成	~/FrontCOMP_cure/src/lib/m_fstr.f90 m_fstr
中間ファイル入出力部 ・出力部 ・入力部	~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_solve_TRAN.f90 heat_solve_TRAN ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/heat/heat_output.f90 heat_output_sta ~/FrontCOMP_cure/src/analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90 FSTR_SOLVE_NLGEOM ~/FrontCOMP_cure/src/lib/static_NLGEOM_elpl.f90 fstrNLGEOM_ReadTemp

目 次

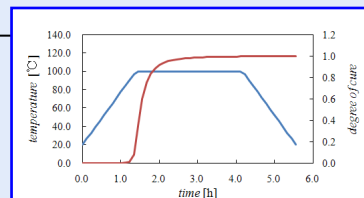
- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

材料特性の同定

非定常熱伝導解析・硬化度解析に関する材料特性の同定

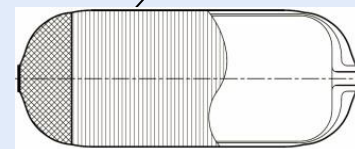
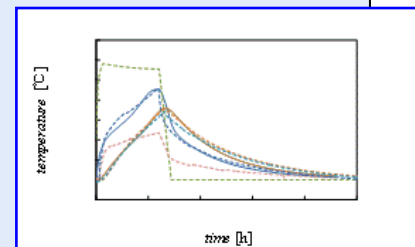
・樹脂の硬化特性

⇒ DSC測定
(時間積分)



・熱伝達率, 放射率

⇒ 容器温度測定結果と解析結果の合せ込み
(非定常熱伝導解析・硬化度解析)

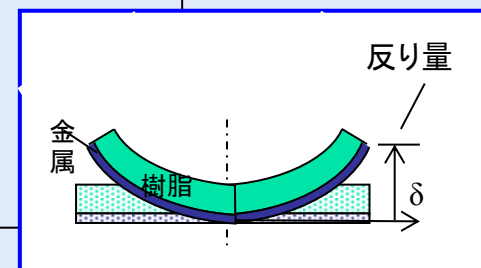


出展) 福岡水素エネルギー戦略会議, 平成22年度第6回研究分科会, サムテック殿資料

ひずみ解析・ひずみ緩和解析に関する材料特性の同定

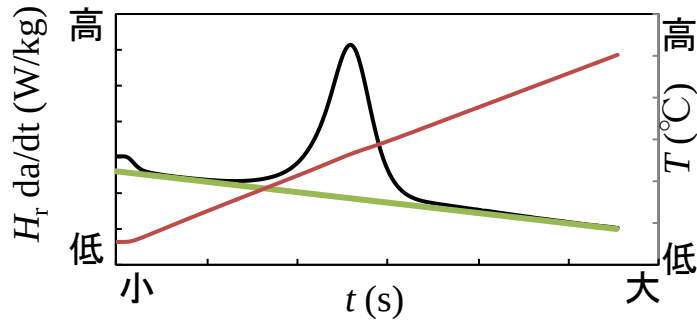
・ヤング率, 線膨張係数, 硬化収縮量, 粘弾性係数

⇒ 二層積層試験片等の硬化そり量測定結果と
解析結果の合せ込み
(非定常熱伝導解析・硬化度解析)
(ひずみ解析・ひずみ緩和解析)



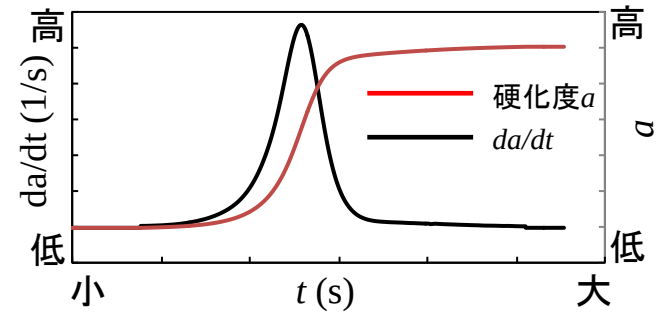
DSC測定データに基づくパラメータフィッティング

DSC測定(示差走査熱量測定)による 硬化時発熱データ



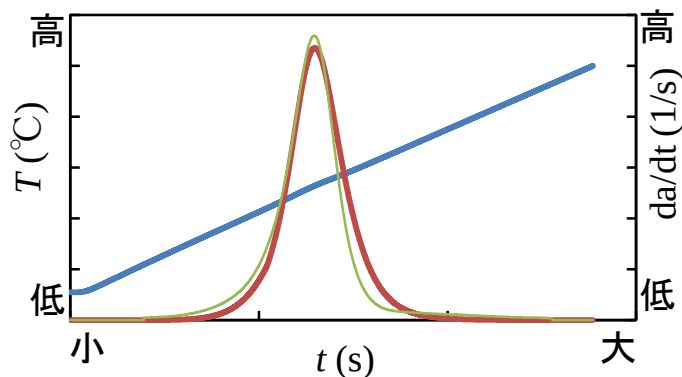
→
DSC補正

硬化度時間変化率および硬化度時刻 歴の実測値

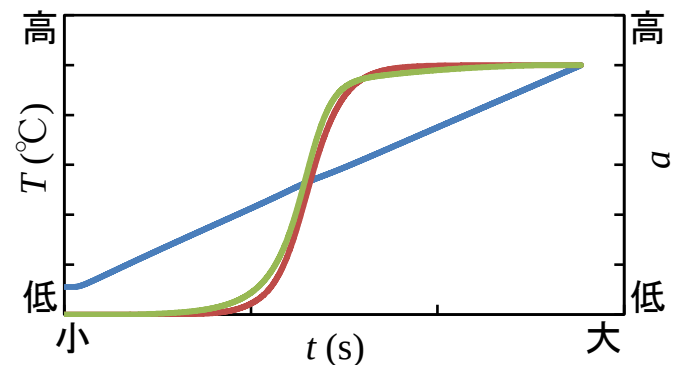


$$\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt} = H_r (K_1 + K_2 a^m) (1-a)^n$$

材料パラメータフィッティング後の硬化度時間変化率および硬化度時刻歴



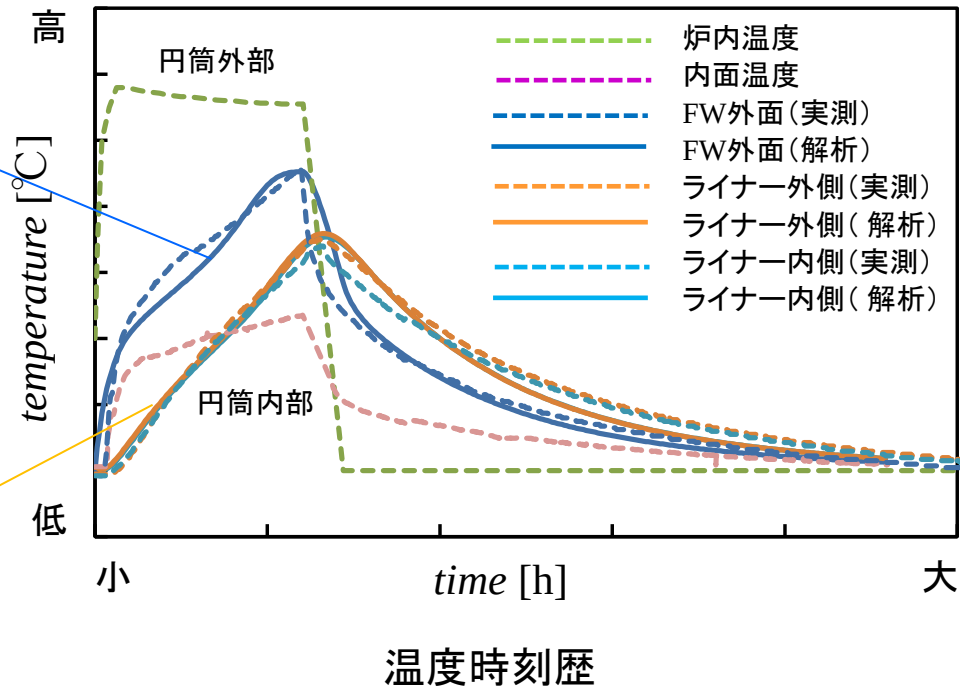
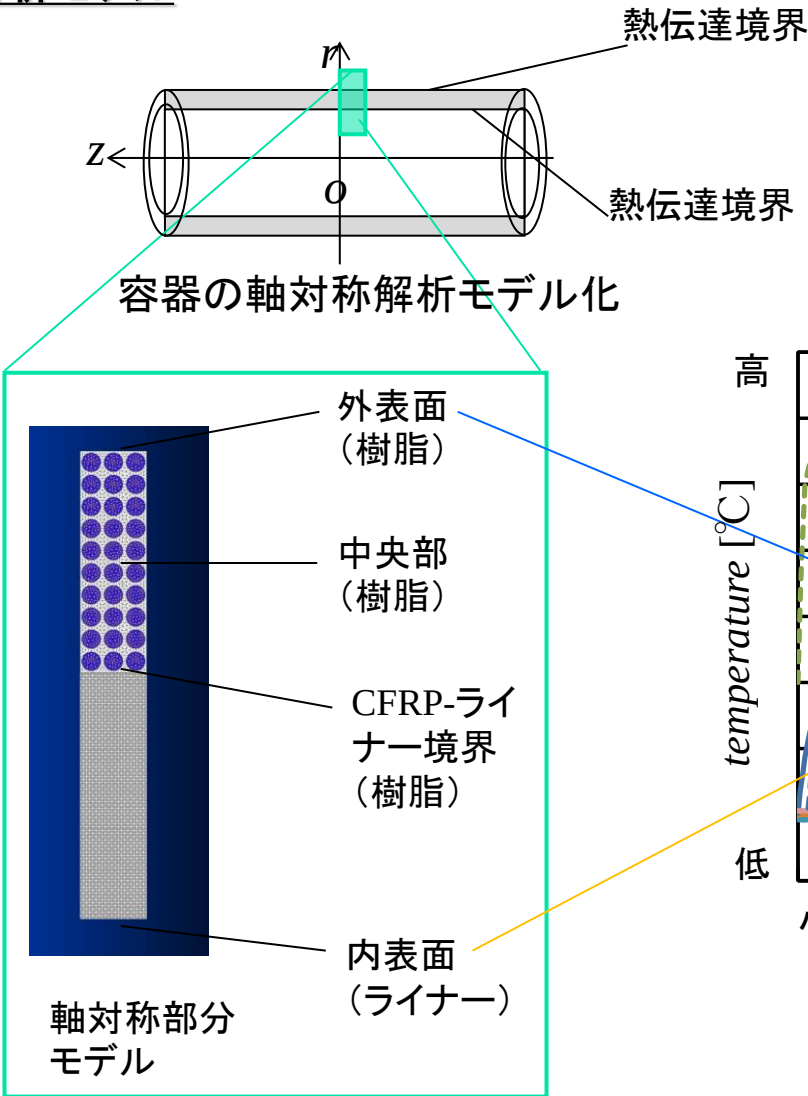
- 温度実測値
- 硬化速度実測値
- 硬化速度フィッティング



- 温度実測値
- 硬化度実測値
- 硬化度フィッティング

容器表面温度測定結果との合せ込み例

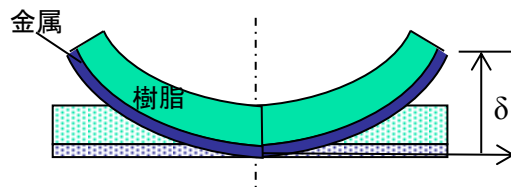
解析モデル



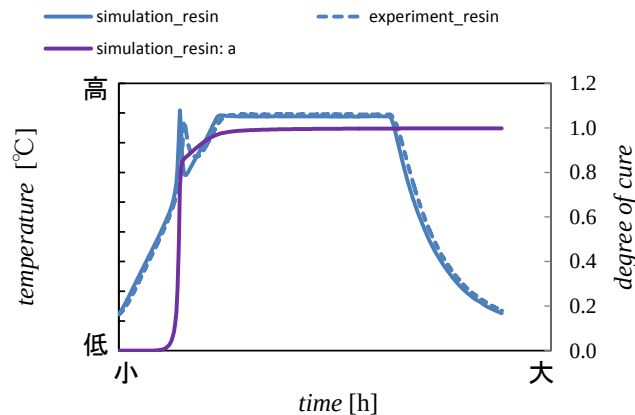
z 方向(軸方向)中央部を取り出した
軸対称解析モデル

二層積層試験片の硬化収縮時そり量測定結果と解析結果の合せ込み

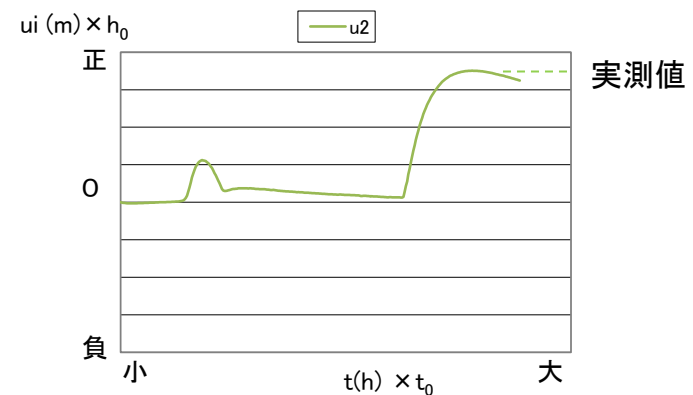
- ・樹脂と金属からなる二層積層試験片の硬化収縮によるそり変形量を測定
- ・シミュレーションにより下記項目に関する材料パラメータフィッティング実施



- ・粘弾性パラメータ $\eta_G(T, a) = G(T, a) T_G$
 $\eta_K(T, a) = K(T, a) T_K$
- ・ヤング率 $E(T, a) = c_1 e^{(-d_1 T)} c_2 e^{(d_2 a)}$
- ・線膨張係数 $\beta_{gel}(T) = \beta_{a=0.0}(T) = e_1 T + f_1$
 $\beta_{cured}(T) = \beta_{a=1.0}(T) = e_2 T + f_2$
- ・硬化収縮量 λ_{chem}



樹脂中央の温度測定結果の合せ込み



端部反り変形量の合せ込み

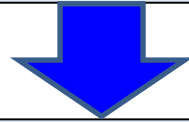
目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

硬化プロセス最適化の実手順

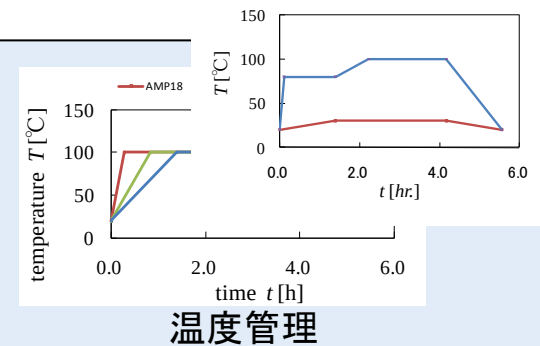
最適化探索のための事前準備

- ・非定常熱伝導解析・硬化度解析に関する材料特性の同定
 - ・樹脂の硬化特性, 熱伝達率, 放射率
- ・ひずみ解析・ひずみ緩和解析に関する材料特性の同定
 - ・ヤング率, 線膨張係数, 硬化収縮量, 粘弾性係数



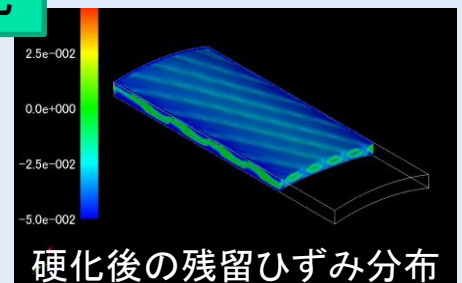
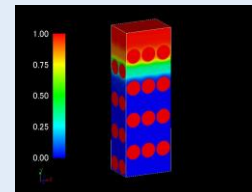
シミュレーションによる硬化プロセス最適化

- ・温度管理
 - ・昇温速度, 保持温度, 保持時間
- ・樹脂選択
 - ・発熱量, 硬化特性

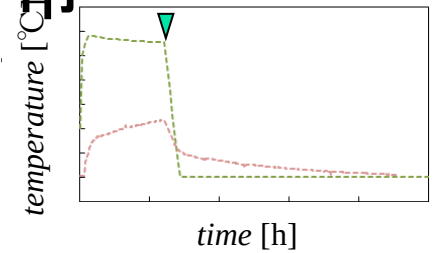
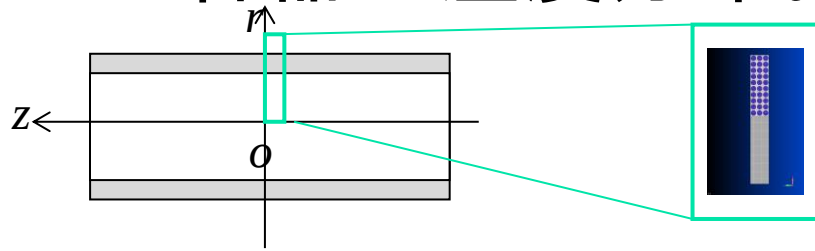


過昇温による CFRP, ライナーへの
ダメージのない, 硬化時間の縮小化

- ・非定常熱伝導解析および硬化度解析
 - ⇒ 硬化時過昇温の評価
- ・ひずみ解析およびひずみ緩和解析
 - ⇒ 硬化後初期欠陥の評価



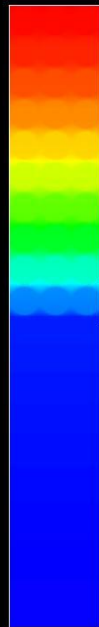
CFRP容器の温度分布および硬化度分布



高



低

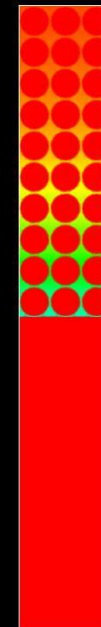


温度分布図

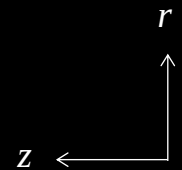
1.00



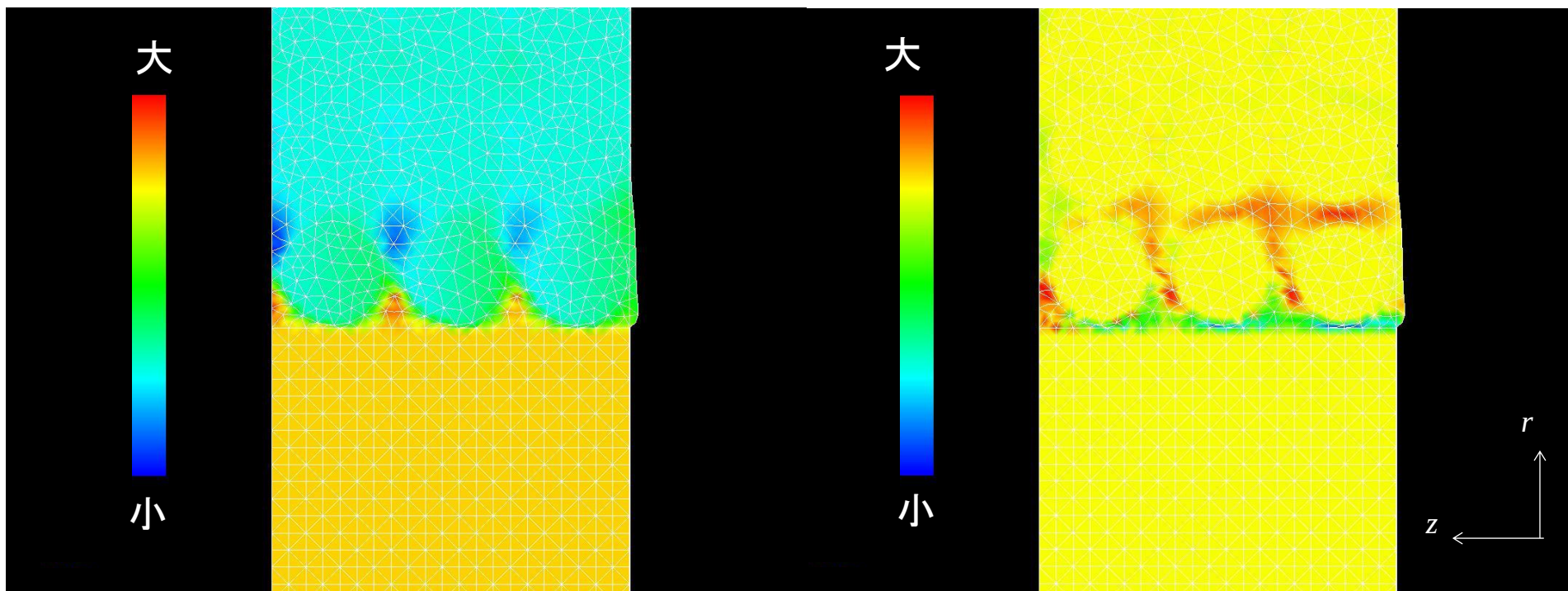
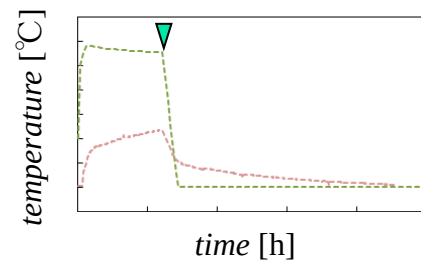
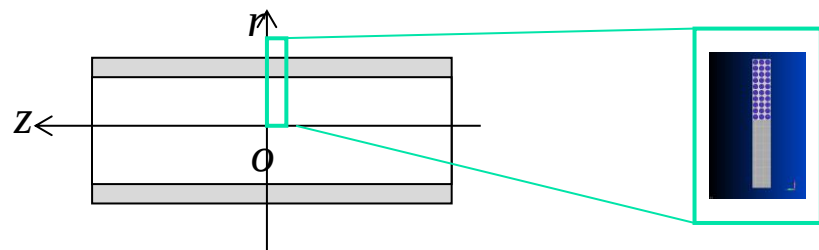
0.00



硬化度分布図



CFRP容器のひずみ分布



ひずみ成分 ε_{θ} 分布図

ひずみ成分 ε_{rz} 分布図

目 次

- 研究の背景と目的
- 樹脂硬化プロセスシミュレーション FrontCOMP_cure の概要
- FrontCOMP_cure のプログラム構造
- FrontCOMP_cure へのプログラム改変事項一覧
- 材料特性の同定
- 硬化プロセスシミュレーション例
- ポスト「京」プロジェクトにおける FrontISTR との連携開発

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

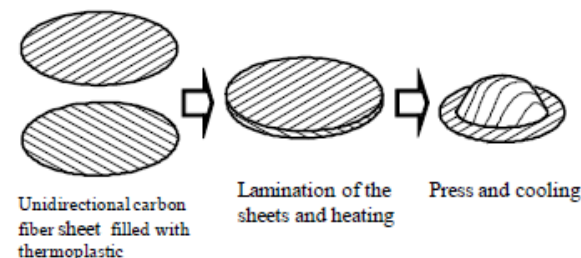


Fig. 1 Press forming process of the carbon fiber sheet filled with thermoplastics

T. Yoneyama et al., JSTP, Vol.53, No.613 (2012-2)

熱可塑 CFRP シートのプレス成形

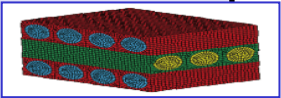
マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータ

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

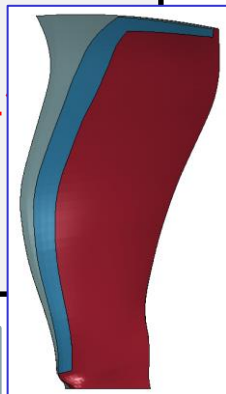
- 熱可塑樹脂と炭素繊維の温度依存材料モデル化 ← 結晶化度発展則
- 温度と接触大変形の連成解析
- 試験片成形の解析によるValidation ← しわ・反り発生メカニズムの解明



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

FrontCOMP_cure の熱可塑樹脂への改変 (熱伝導解析・結晶化度解析)

熱可塑性樹脂の結晶化度計算モデル¹⁾を導入し、結晶化による発熱を温度計算に組み込んだ。

熱硬化性樹脂
(FrontCOMP_cure)

熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho \dot{Q}$$

硬化発熱

$$\dot{Q} = H_r \frac{da}{dt} = H_r (K_1 + K_2 a^m)(1 - a)^n$$

a : 硬化度, H_r : 反応熱, $K_i = A_i e^{-(E_i/RT)}$: 反応速度定数
 A_i : 頻度因子, E_i : 活性化エネルギー, R : 気体定数
 m, n : 無次元定数

熱可塑性樹脂
(FrontCOMP_TP)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + m_m \rho \frac{\partial \chi}{\partial t} H_u$$

m_m : 樹脂の質量分率

χ : 相対結晶化度

H_u : 結晶化熱量(the ultimate heat of crystallisation)

結晶化発熱

$$\frac{d\chi}{dt}(T, \chi) = (f_1(T) + f_2(T)\chi)(1 - \chi)$$

$$f_i(T) = \kappa_i \exp\left(-\frac{E_D}{RT} - \frac{\psi_i T_m^0}{T(T_m^0 - T)}\right)$$

κ_i : 材料定数

ψ_i : 材料定数

E_D : the activation energy for transport of crystallizing units across the liquid-solid interface

R : ガス定数

T_m^0 : 融点

結晶化度の発展則

文献 1) A. Trendea, B.T. Astroma, G. Nilssonb: Modelling of residual stresses in compression moulded glass-mat reinforced thermoplastics, Composites: Part A 31 (2000) 1241–1254

FrontCOMP_cure の熱可塑樹脂への改変 (ひずみ解析・ひずみ緩和解析)

結晶化に伴う収縮の影響をプログラムに組み込む予定

熱硬化性樹脂
(FrontCOMP_cure)

体積変化

$$\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}\right) = \left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}\right)_{\text{thermal contribution}} - \left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}\right)_{\text{polymerization shrinkage}}$$

$$\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}\right)_{\text{thermal contribution}} = (\beta_{\text{gel}}(T)(1-a) + \beta_{\text{cured}}(T)a) \frac{dT}{dt}$$

$$\left(\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}\right)_{\text{polymerization shrinkage}} = \lambda_{\text{chem}} \frac{da}{dt}$$

ここで、 V_0 : 初期の体積, V : 現時刻の体積

$\beta_{\text{gel}}(T)$: 流動部分の熱膨張係数, $\beta_{\text{cured}}(T)$: 固化部分の熱膨張係数

λ_{chem} : 最大重合収縮度, T : 絶対温度

熱可塑性樹脂
(FrontCOMP_TP)

熱による体積変化

$$\Delta V_T = V_0[(1 + \epsilon)^3 - 1] \quad V_0: \text{参照温度時の体積}$$

$$\epsilon = \beta(T) \Delta T$$

$\beta(T)$: 温度依存性線膨張係数

ϵ : ひずみ

$$\Delta T = T - T_0$$

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_c : 結晶相の比体積

V_a : amorphous相の比体積

X_∞ : 最終結晶化度

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

樹脂の構成則

一般化Voigtモデルによる粘弾性体モデル

・6要素モデル

一般化Voigtモデルによる粘弾性体モデル

・7要素モデル以上へ拡張

FrontISTR への FrontCOMP_TP の機能移植

FrontISTR 現最新版(FrontISTR ver.3.7)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

$$\frac{d\chi(T, \chi)}{dt} = (f_1(T) + f_2(T)\chi)(1 - \chi)$$

→ 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.3.7) 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, 結晶化度依存性

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

→ 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.3.6 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