

ゴム架橋プロセスの 数値解析

岡山県立大学情報工学部

野津 滋

解析支援ネット OKAYAMA 第3回セミナー
2007.08.27



- ・ 目的

- ゴム架橋プロセスの数値解析モデルをつくる

- ・ 数値解析

- 化学反応をともなう非定常熱伝導

- 温度と架橋密度が空間的に非一様な現象

- ・ 実験

- 円筒金型内におけるスチレンブタジエンゴム(SBR)の架橋

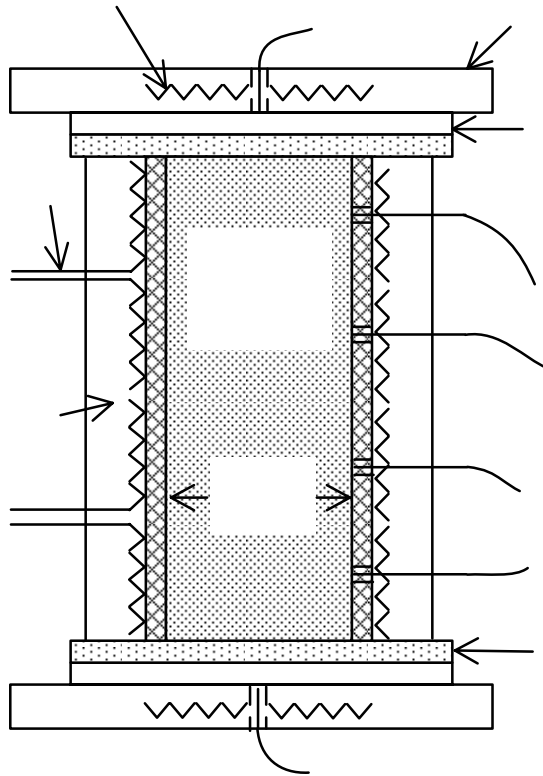
- ・ 金型加熱

- A : 架橋完了まで金型温度を140℃に維持

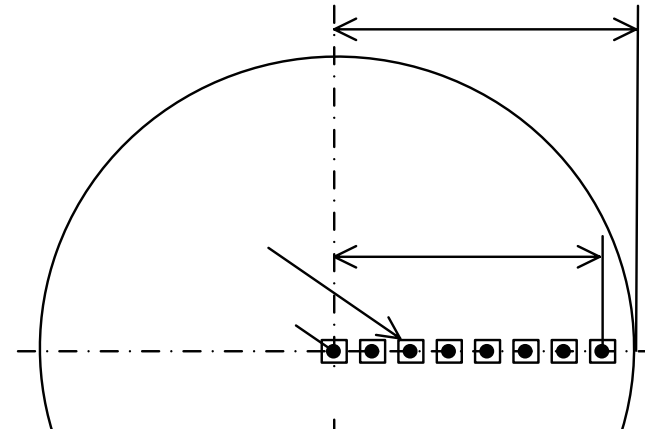
- B : 金型加熱開始から45分間は140℃に維持

- 加熱時間の短縮化も検討

金型



円筒金型の概要
(内径74.6, 高さ240)



Counter
heater
ゴム試料 (SBR)

Thermoc

実験方法

金型加熱温度

- A 架橋完了まで 140
- B 加熱開始から 45 分間は 140
その後は自然対流冷却

温度測定

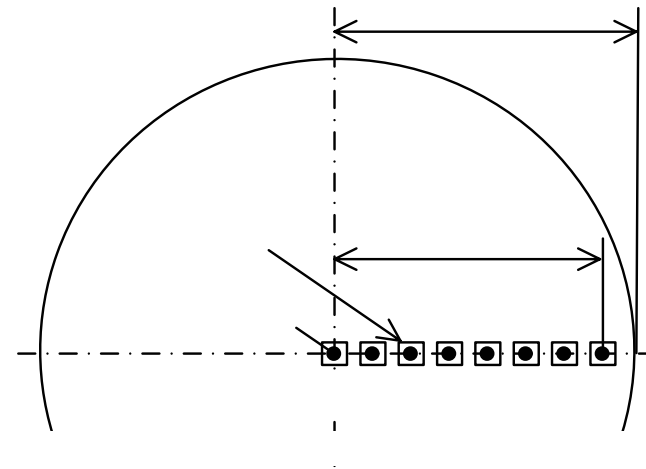
- ゴム中央断面内に，半径方向に 5 ミリ間隔で熱電対を配置
- 中心軸上で 2 点の温度を測定 半径方向 1 次元性を確認

架橋密度

- トルエンによる膨潤試験
- 架橋密度を計算

半径方向 5 ミリ間隔で測定

- A 架橋完了時に測定
- B 加熱打ち切りから，0，15，
30，45，75 分経過後に測定



数値解析（熱伝導）

熱伝導方程式（円筒座標系，半径方向 1 次元非定常）

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \Delta H \frac{d\varepsilon}{d\tau} \quad (1)$$

架橋反応に伴う
内部発熱項

架橋度 ε

$$\varepsilon = \frac{[RX]}{[RX]_0} \quad (2)$$

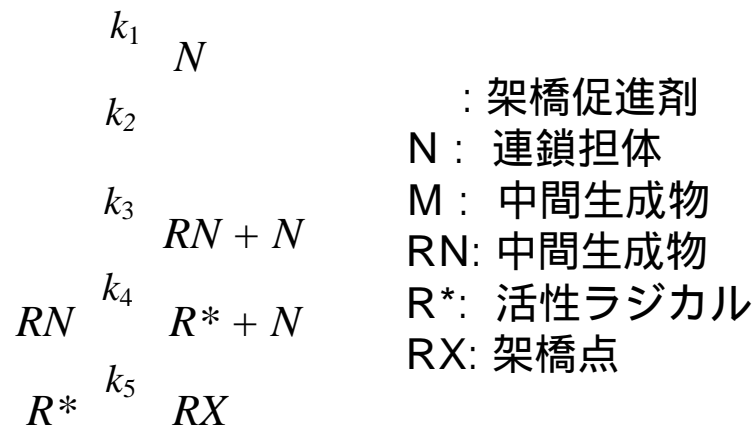
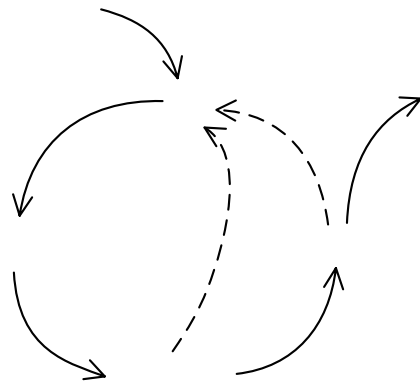
完全架橋状態における
架橋密度との相対値．
[RX]は架橋密度

初期条件，境界条件

$\tau = 0$	$T = T_{init}$	}	ゴムの初期温度，金型温度には 実験値を与える
$\tau > 0, r = r_M$	$T = T_M(\tau)$		
$\tau > 0, r = 0$	$\partial T / \partial \tau = 0$		

数値解析（架橋点の生成反応）

架橋点の生成（連鎖反応）



反応速度式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d[\alpha]}{d\tau} &= -k_1[\alpha] - k_2[N][\alpha] \\ \frac{d[N]}{d\tau} &= k_1[\alpha] - k_2[N][\alpha] + k_3[M] + k_4[RN] \\ \frac{d[M]}{d\tau} &= k_2[N][\alpha] - k_3[M] \\ \frac{d[RN]}{d\tau} &= k_3[M] - k_4[RN] \\ \frac{d[R^*]}{d\tau} &= k_4[RN] - k_5[R^*] \\ \frac{d[RX]}{d\tau} &= k_5[R^*] \end{aligned} \right\} (3)$$

初期条件 $[\alpha] = 1$ (4)

$$[N] = [M] = [RN] = [R^*] = [RX] = 0$$

数値解析（物性値，反応速度）

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \rho\Delta H\frac{d\varepsilon}{d\tau} \quad (1)$$

$$c = 1.84 \times 10^3 \text{ J/kgK}$$

$$k = 0.33 \text{ W/mK}$$

$$\rho = 1.165 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta H = 12.3 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

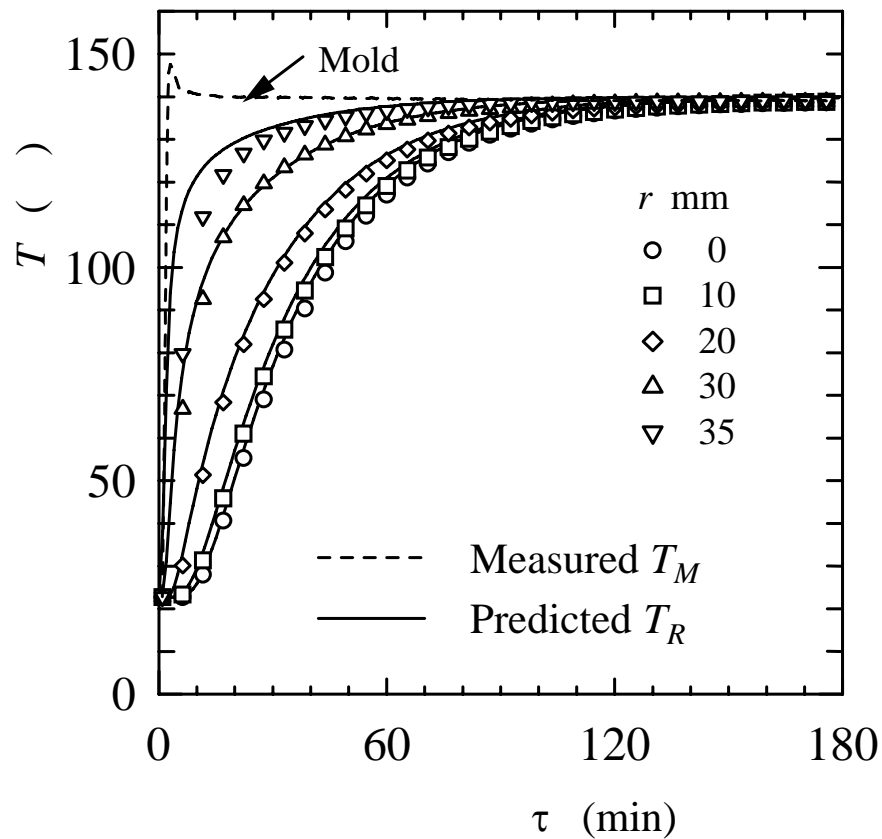
比熱，熱伝導率，反応熱
は実測値

$$k_i = A_i \exp(-E_i/R(T+273.15))$$

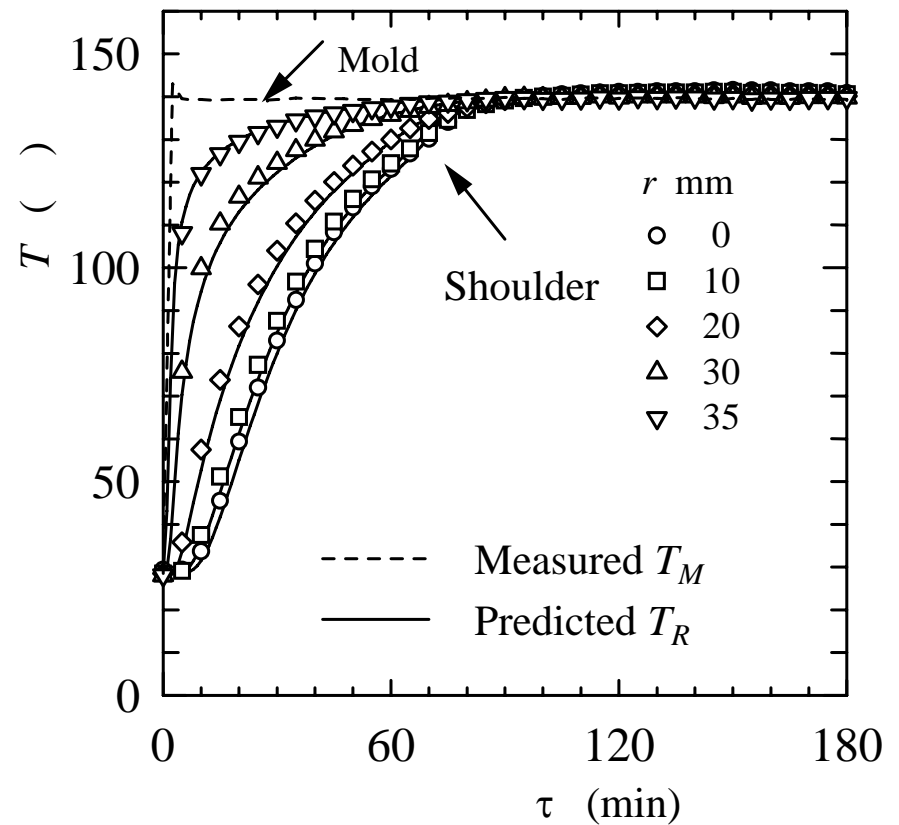
	A_i	E_i
k_1	1.034×10^7	9.695×10^4
k_2	3.159×10^{13}	1.219×10^5
k_3	2.182×10^7	6.985×10^4
k_4	1.089×10^7	7.016×10^4
k_5	1.523×10^9	9.304×10^4

振動式レオメータによる実験結果
から反応速度定数を決定

金型温度140 で180分加熱

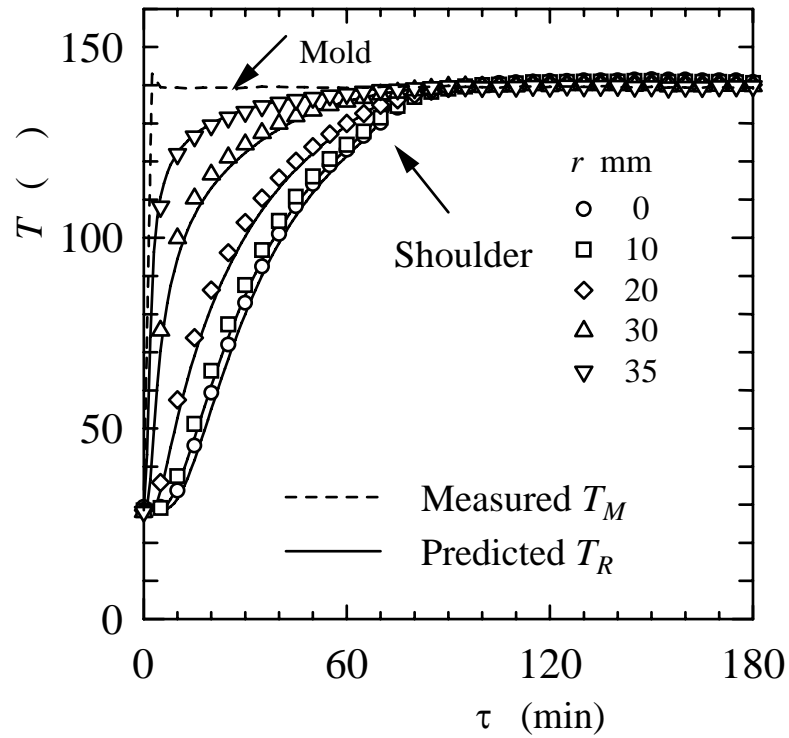


架橋済みゴム

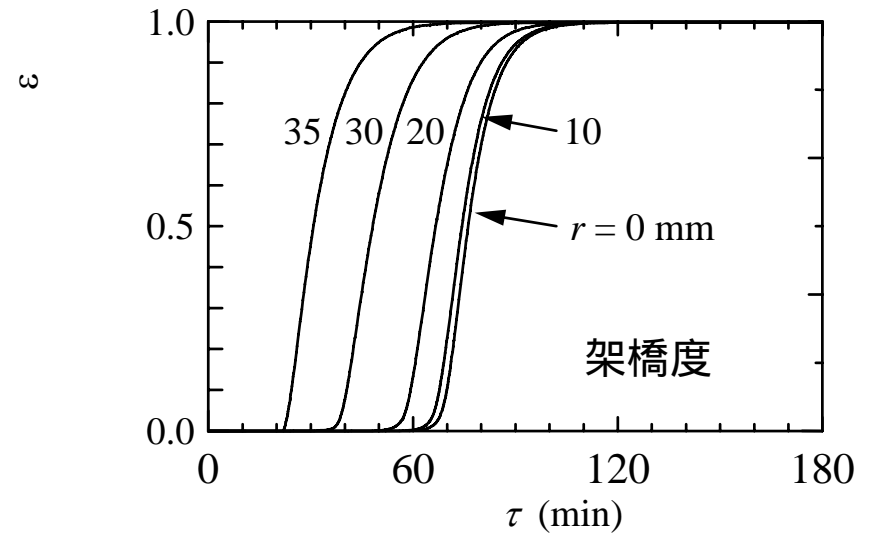
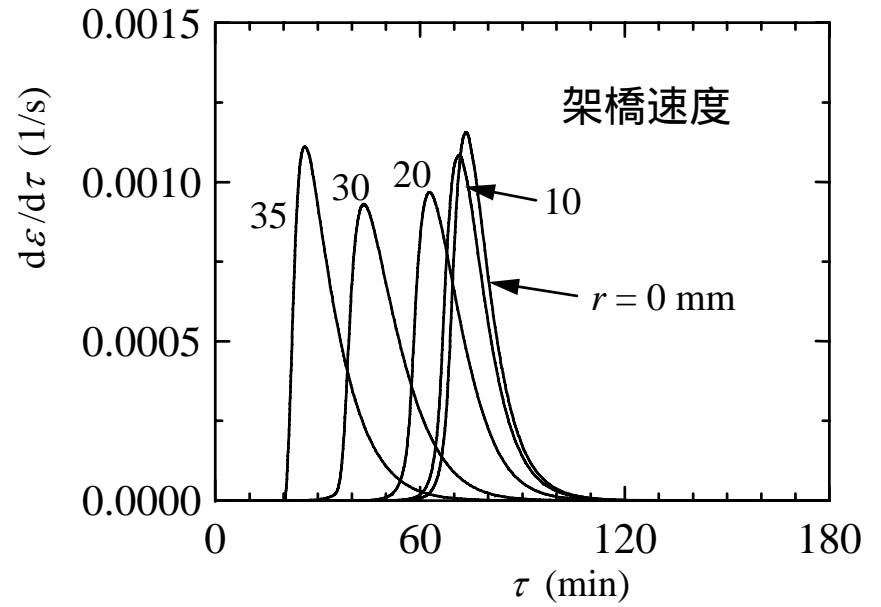


未架橋ゴム

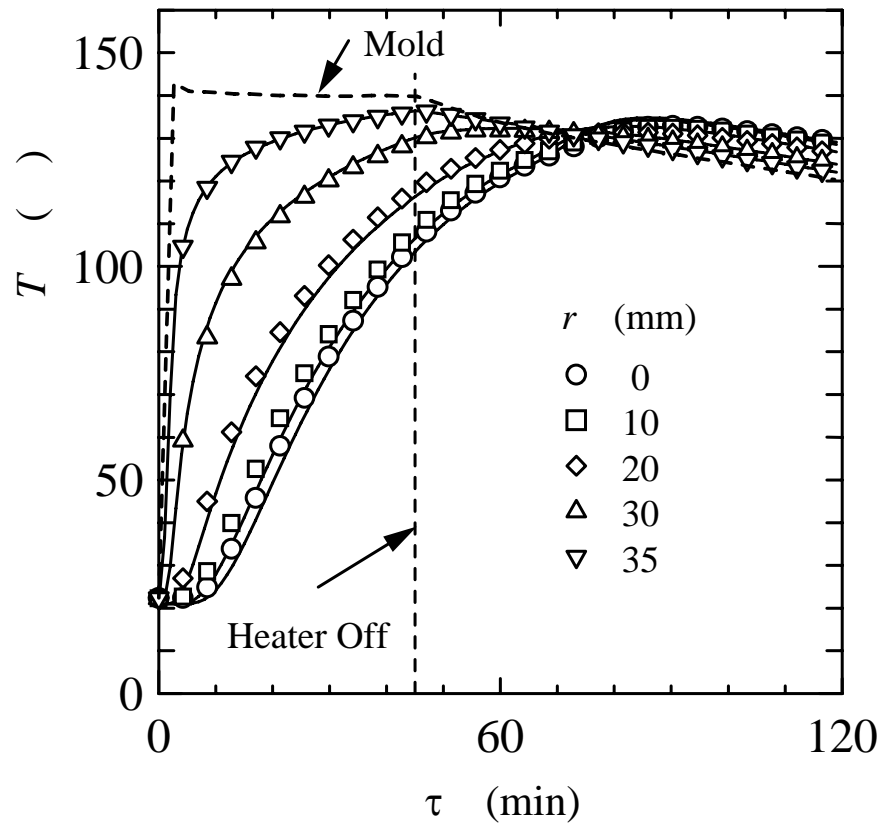
金型温度 140 で180分加熱



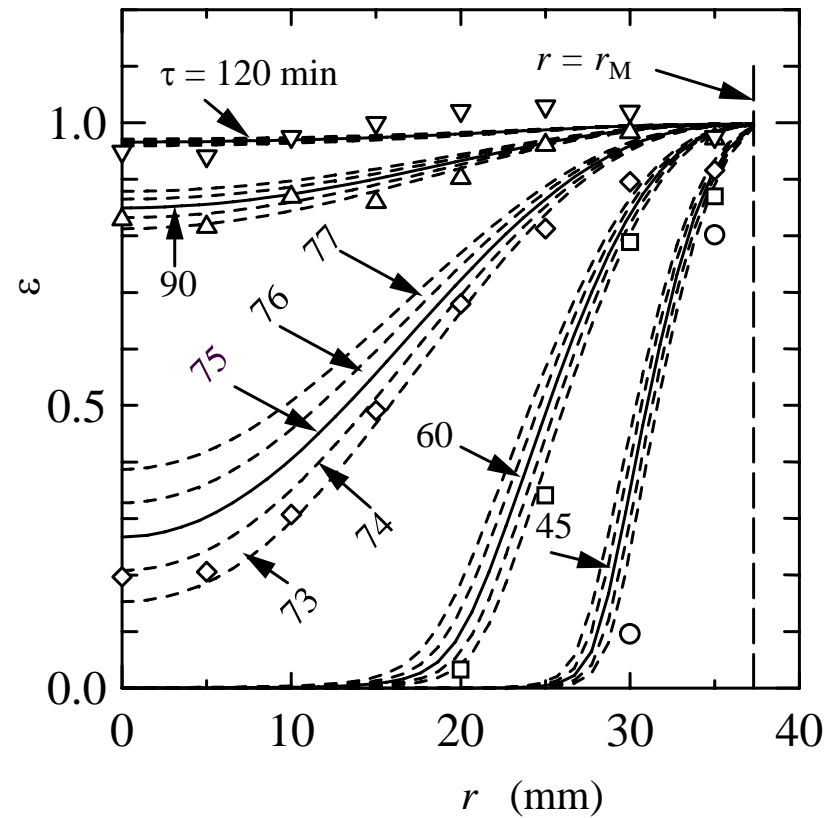
温度分布



金型温度 140 で45分加熱

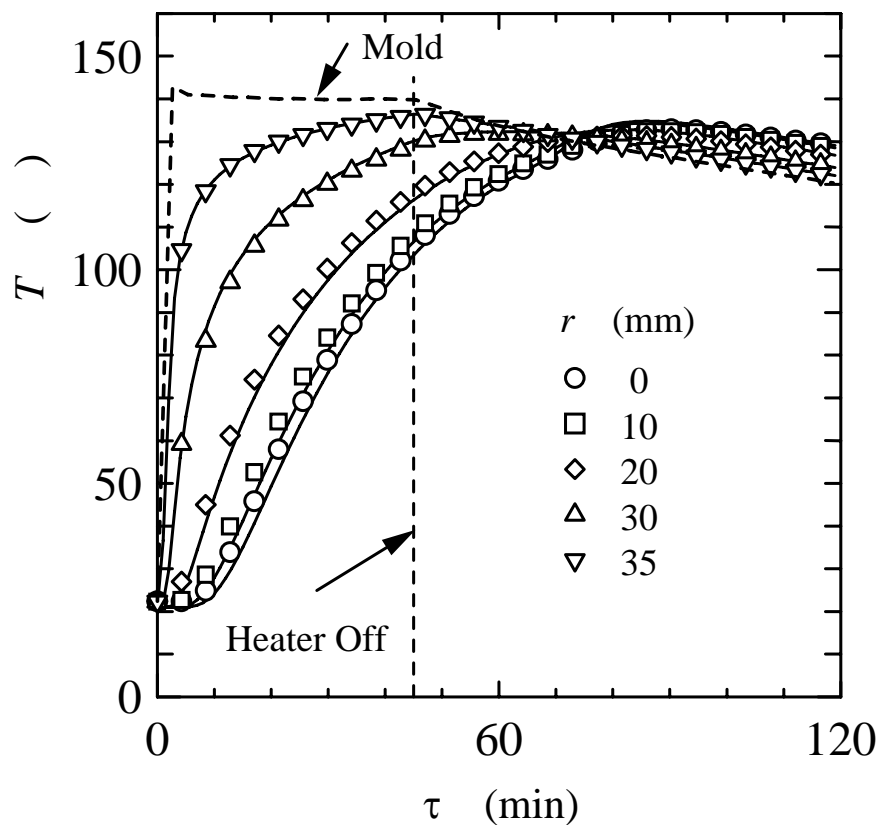


温度分布

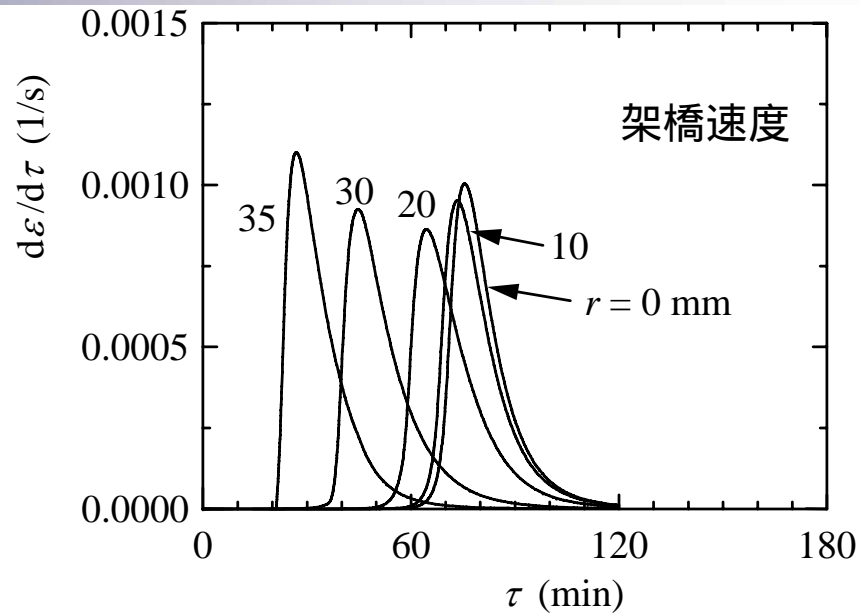


架橋度の分布

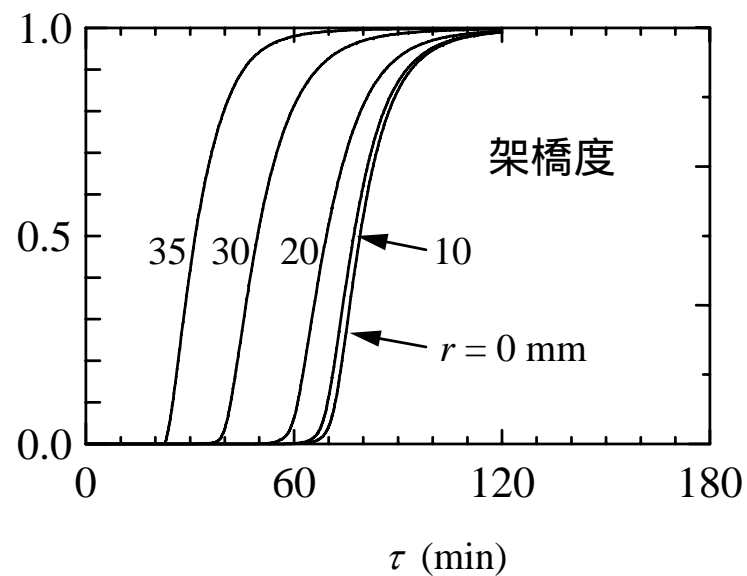
金型温度 140 で45分加熱



温度分布



ε





まとめ

- (1) 金型加熱を架橋完了前に打ち切っても，加熱と冷却プロセスを適切にコントロールすることにより，加熱時間の短縮化を図ることが可能．
- (2) 架橋度の計算結果と実験結果は平均絶対値偏差11.5%で一致し，本計算法は実用的に有効とみなせる