

1.目的

秋田工業高等専門学校 生産システム工学専攻 加藤裕太郎、磯部浩一

(1) 変態相力学手法を用いて、連铸-分塊HCR工程における微細 γ 組織の肌焼鋼鋳片の逆変態処理での適正冷却方法、冷却条件の解明。(鋳片曲がり、焼割れ防止)

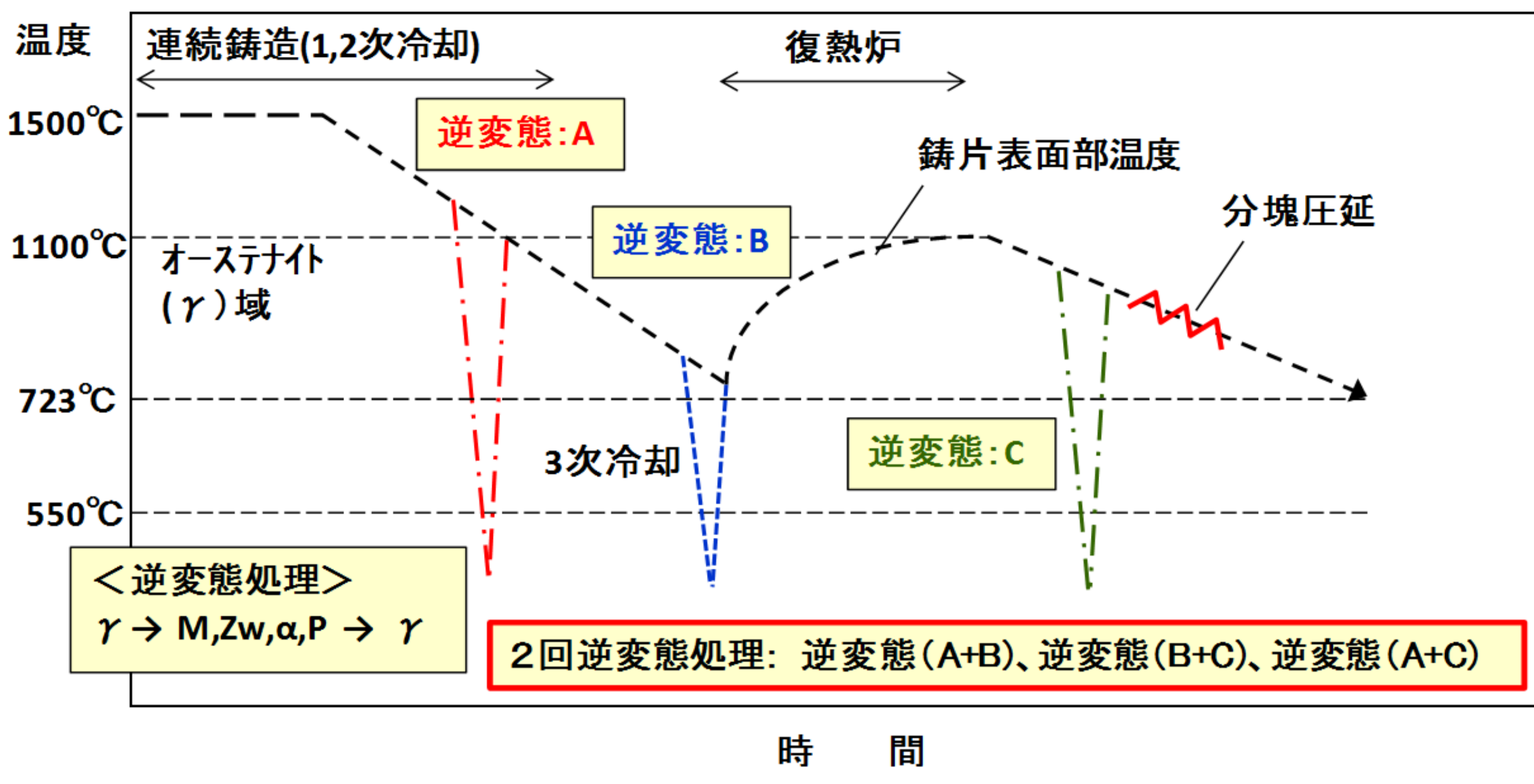


図1 HCR (Hot Charge Rolling) 工程の熱履歴模式図

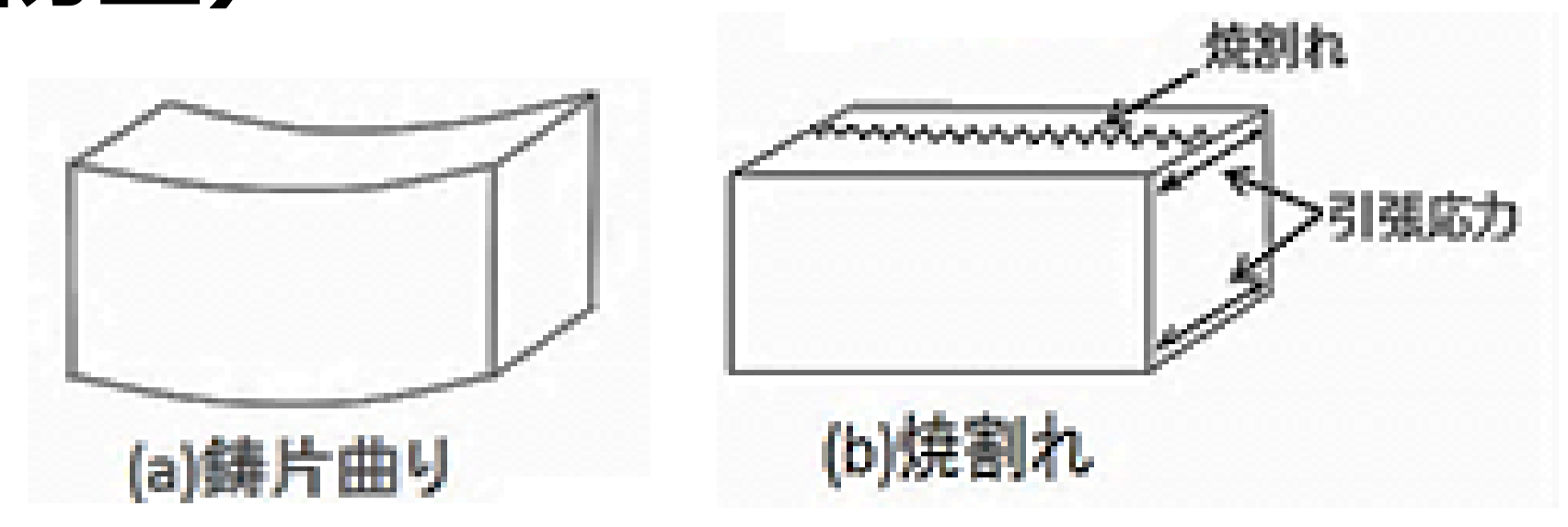


図2 浸漬冷却時の鋳片曲り、焼割れ



図3 粗大 γ 粒起因の分塊圧延割れ

2.解析方法

(1) 変形解析

$$\text{弾性ひずみ: } \varepsilon^e = -\rho \frac{\partial \hat{g}^e}{\partial \sigma} = \sum_{I=1}^N \varepsilon_I^e \xi_I \quad (1)$$

$$\varepsilon_I^e = \frac{1+\nu_I}{E_I} \sigma - \frac{\nu_I}{E_I} \mathbf{1} \text{tr} \sigma + \alpha_I (T - T_0) \mathbf{1} + \beta_I \mathbf{1} \quad (2)$$

$$\text{塑性ひずみ増分: } d\varepsilon^p = \hat{G} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} : d\sigma + \frac{\partial F}{\partial T} dT + \sum_{I=1}^N \frac{\partial F}{\partial \xi_I} d\xi_I \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad (4)$$

$$\text{応力増分: } \{\dot{\sigma}\} = [D^{ep}] \left(\{\dot{\varepsilon}\} - \{\alpha\} \dot{T} - \frac{\partial [D^{ep}]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \dot{T} - \sum_{I=1}^N (\alpha_I (T - T_0) + \beta_I + \frac{\partial [D^{ep}]^{-1}}{\partial \xi_I} \{\sigma\}) \dot{\xi}_I \right) - \frac{1}{S_0} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \left(\frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \sum_{I=1}^N \frac{\partial F}{\partial \xi_I} \dot{\xi}_I \right) \quad (5)$$

(2) 熱伝導方程式

$$\rho c \dot{T} + \rho \sum_{I=1}^N l_I \dot{\xi}_I + T \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial T} : \dot{\sigma} + \left[\rho \frac{\partial h}{\partial \varepsilon^p} : \dot{\varepsilon}^p + \rho \frac{\partial h}{\partial \kappa} \dot{\kappa} - \sigma : \dot{\varepsilon}^p \right] = k \text{div}(\text{grad } T) \quad (6)$$

$$-k(\text{grad } T) \cdot n = H(T - T_g) \quad (7)$$

ε : ひずみ, ρ : 密度, \hat{g} : Gibbsの自由エネルギー, ξ : 体積分率, ν : ポアソン比, E : ヤング率, σ : 応力, α : 線膨張係数, β : 変態膨張係数, T : 温度, $1/\hat{G}$: ひずみ硬化パラメータ, F : 降伏関数, $[D^{ep}] = [D^e] - [D^p]$, $[D]$: 係数マトリクス, $\{\alpha\}^T = \{\alpha, \alpha, \alpha, 0, 0, 0\}$, $S_0 = \frac{1}{G\hat{G}} + \frac{\partial F}{\partial \sigma} : \frac{\partial F}{\partial \sigma}$, l : 変態潜熱, h : エンタルピー, k : 熱伝導率, H : 熱伝達係数, T : 温度, T_g : 冷媒温度 or 雰囲気温度

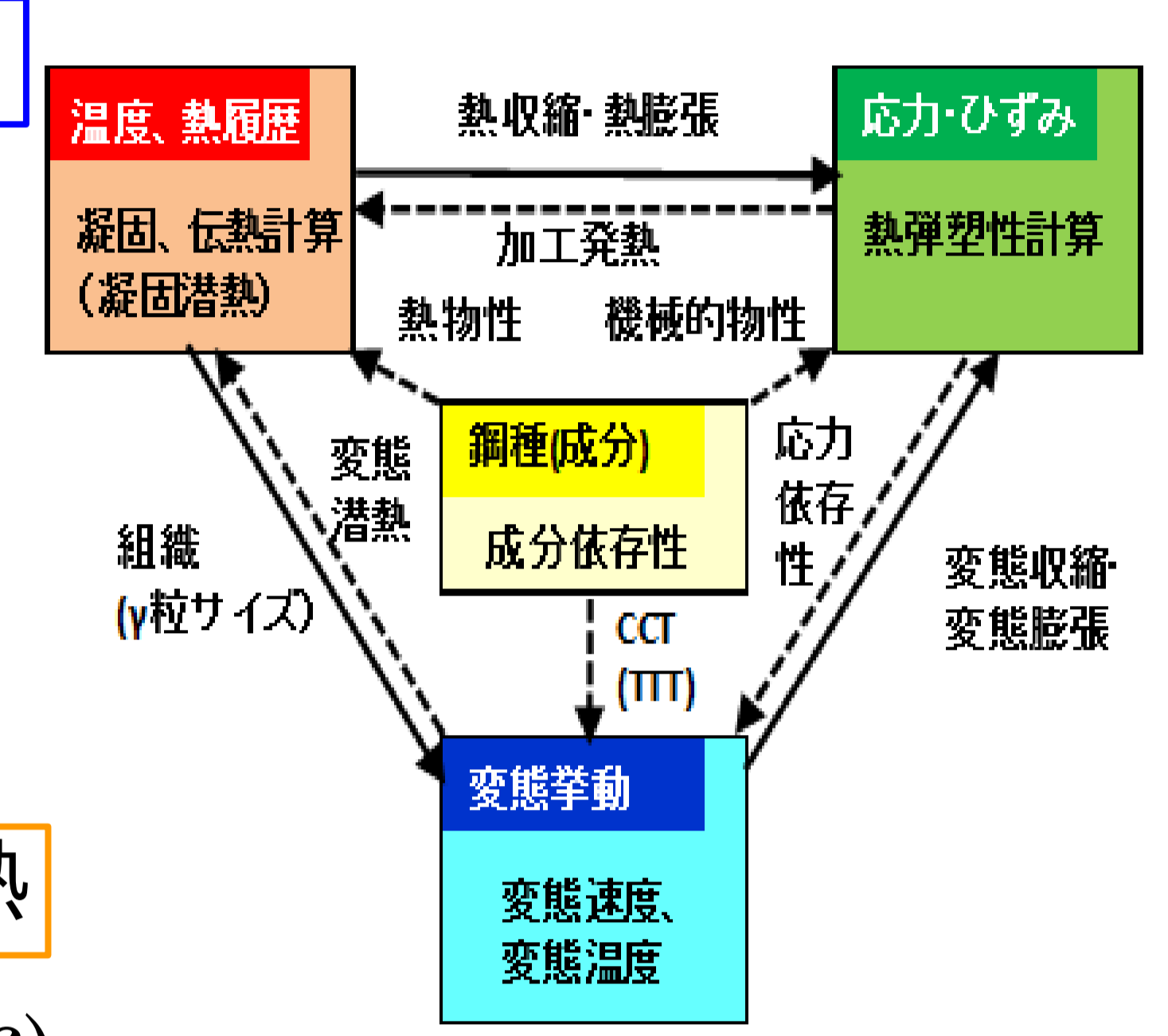


図4 相変態力学解析モデル (温度-変形連成 解析モデル: 井上達雄ら)

3.解析条件・解析結果

(1) 解析条件

- 鋼種: SCr420
- CCT図: 鋳片粗大 γ 粒、微細 γ 粒組織
- 鋳片形状: 200mm x 200mm ブルーム鋳片
- 計算: 2次元有限要素 (要素分割 30 x 30)

(2) 解析結果

1) 逆変態処理のための必要冷却時間

- 必要冷却時間は微細 γ 粒で粗大 γ 粒(逆変態処理1回目想定)に比べ大きく短縮(図3)。
- 2回目の逆変態処理は1回目より必要冷却時間を大幅に短縮可能。
- 同一冷却方法でも、攪拌強化、水量密度の増加で、必要冷却時間は短縮(図3)。

2) 発生応力への冷却方法、冷却条件の影響

- 鋳片幅方向の S_{xx} は面中央部とオフコーナ近傍の表層部で高い領域が出現。
- 表層部の高 S_{xx} 領域の分布は、面中央部に対するオフコーナ部のベイナイト変態の相対量に依存。相対量が低いと面中央部で、相対量が高いとオフコーナ部で張り出し量が増加するため、その部分で S_{xx} が増大。
- スプレー冷却やミスト冷却では水量密度の増加につれ最大 S_{xx} が増大 (図4)。
- 図6①, ②, ③では γ 組織で最大 S_{xx} が相違。

3) 鋳片変形挙動、応力発生挙動

- 図7のケースでは、ベイナイト変態による膨張とコーナー側での熱収縮との兼ね合いで、面中央部が張り出す度合いが最大で、面中央部表層で高い S_{xx} が発生。
- 図8のケースでは、冷却強度が低く、変態量の増加速度や熱収縮速度が低下するため図7のケースと比較すると、 S_{xx} の増加速度が減少。
- 最大応力点では、冷却初期に表層周辺部のベイナイト変態での膨張で引張応力が発生、さらに変態が進行するとその引張応力は一旦減少。さらにその後断面内側でのベイナイト変態の進行で引張応力が再度増大。

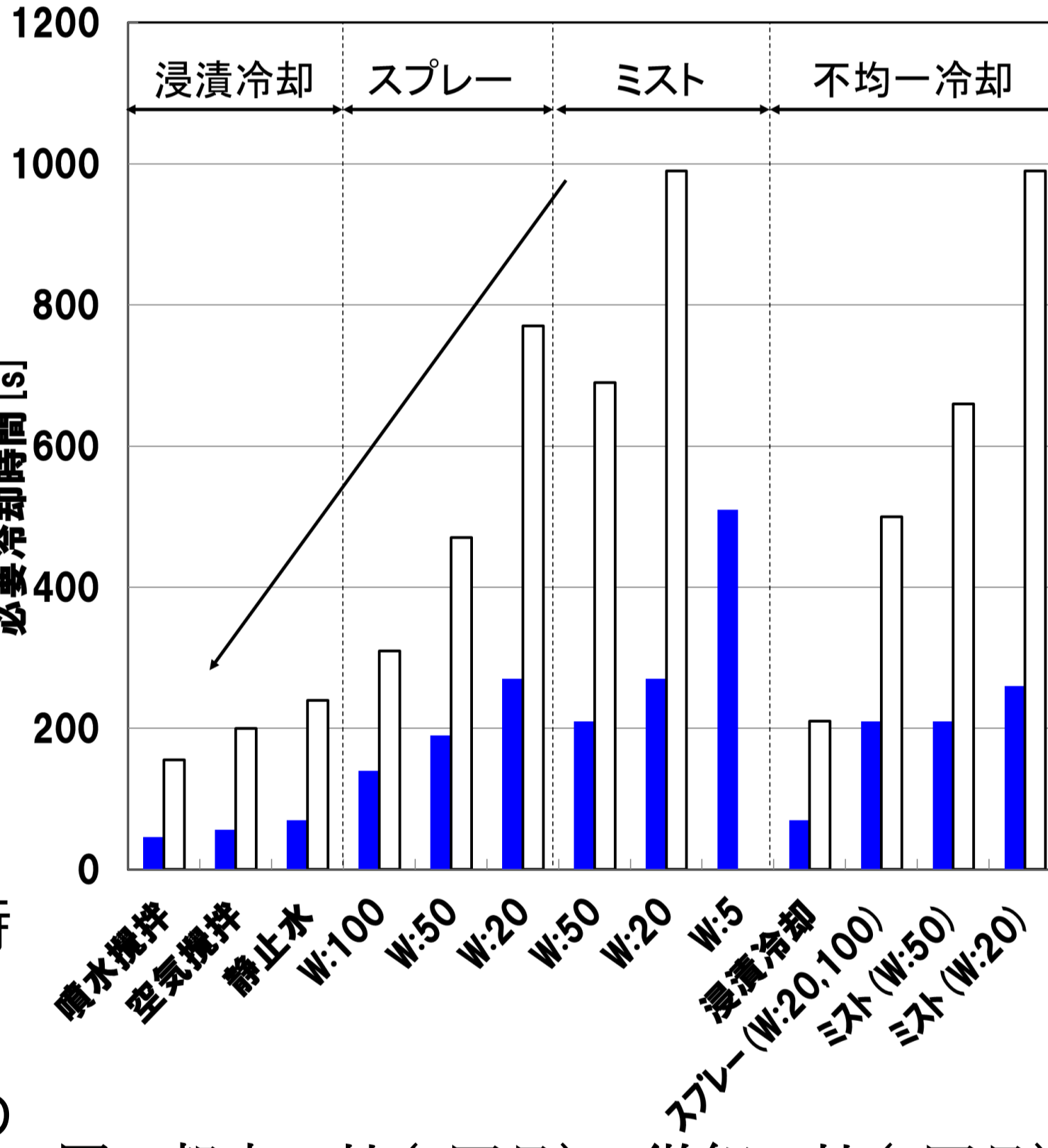


図5 粗大 γ 粒(1回目)、微細 γ 粒(2回目)組織での逆変態処理必要冷却時間

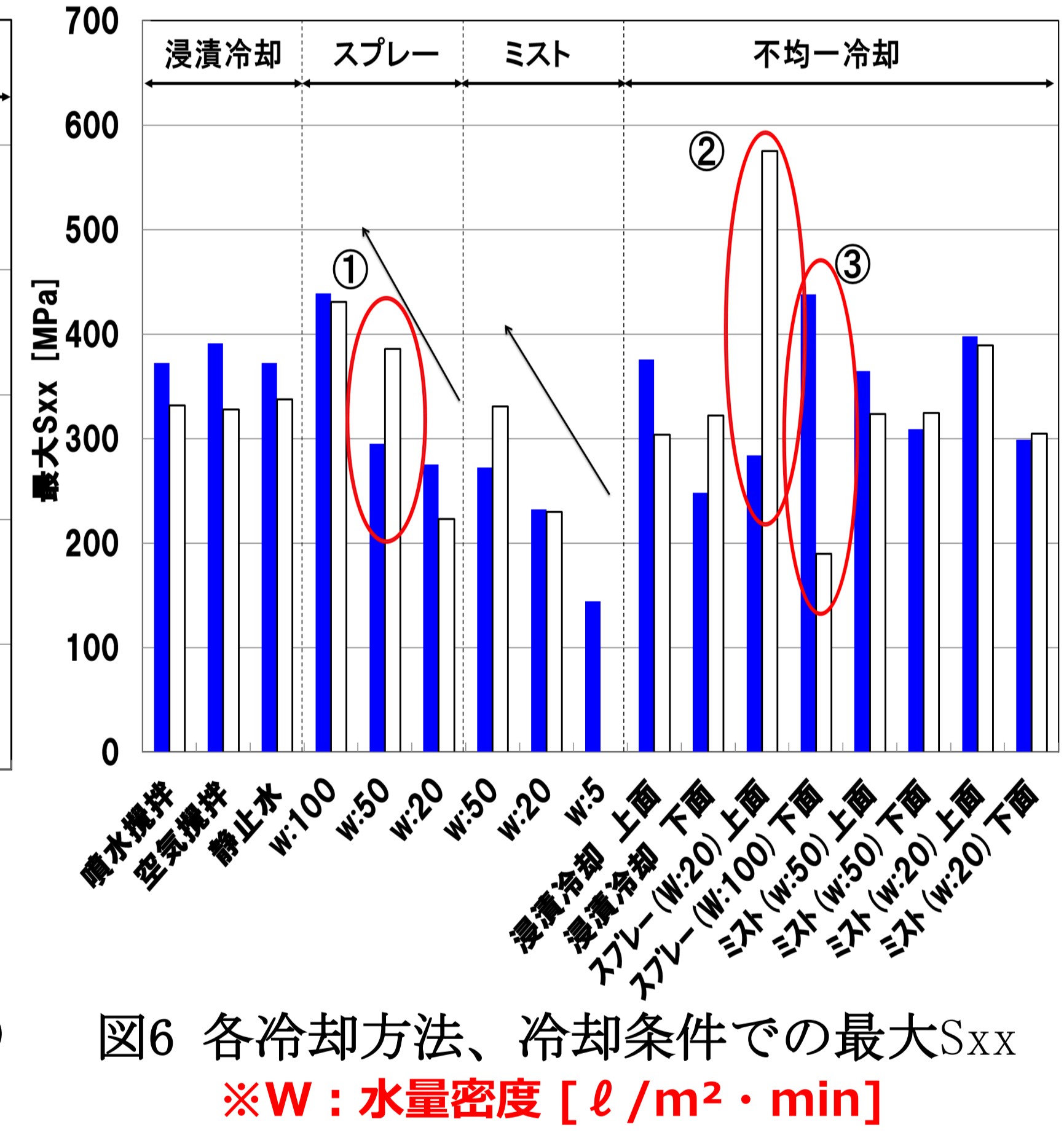


図6 各冷却方法、冷却条件での最大 S_{xx}
※W: 水量密度 [$\ell/m^2 \cdot \text{min}$]

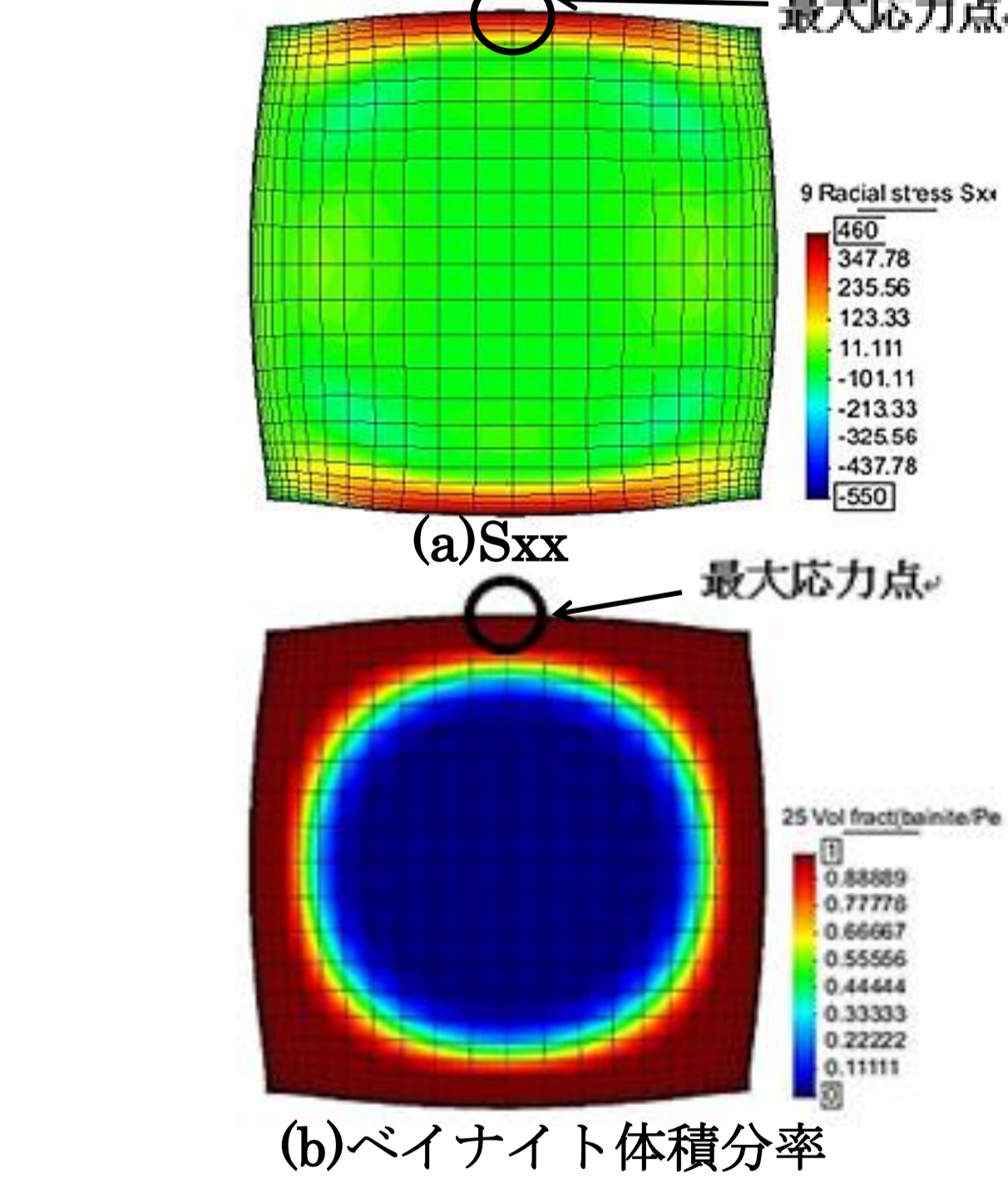


図7 スプレー冷却の水量密度 $W=100(\ell/m^2 \cdot \text{min})$ における最大応力発生時の S_{xx} 分布、ベイナイト体積分率分布と S_{xx} 最大位置の S_{xx} およびベイナイト体積分率の時間推移

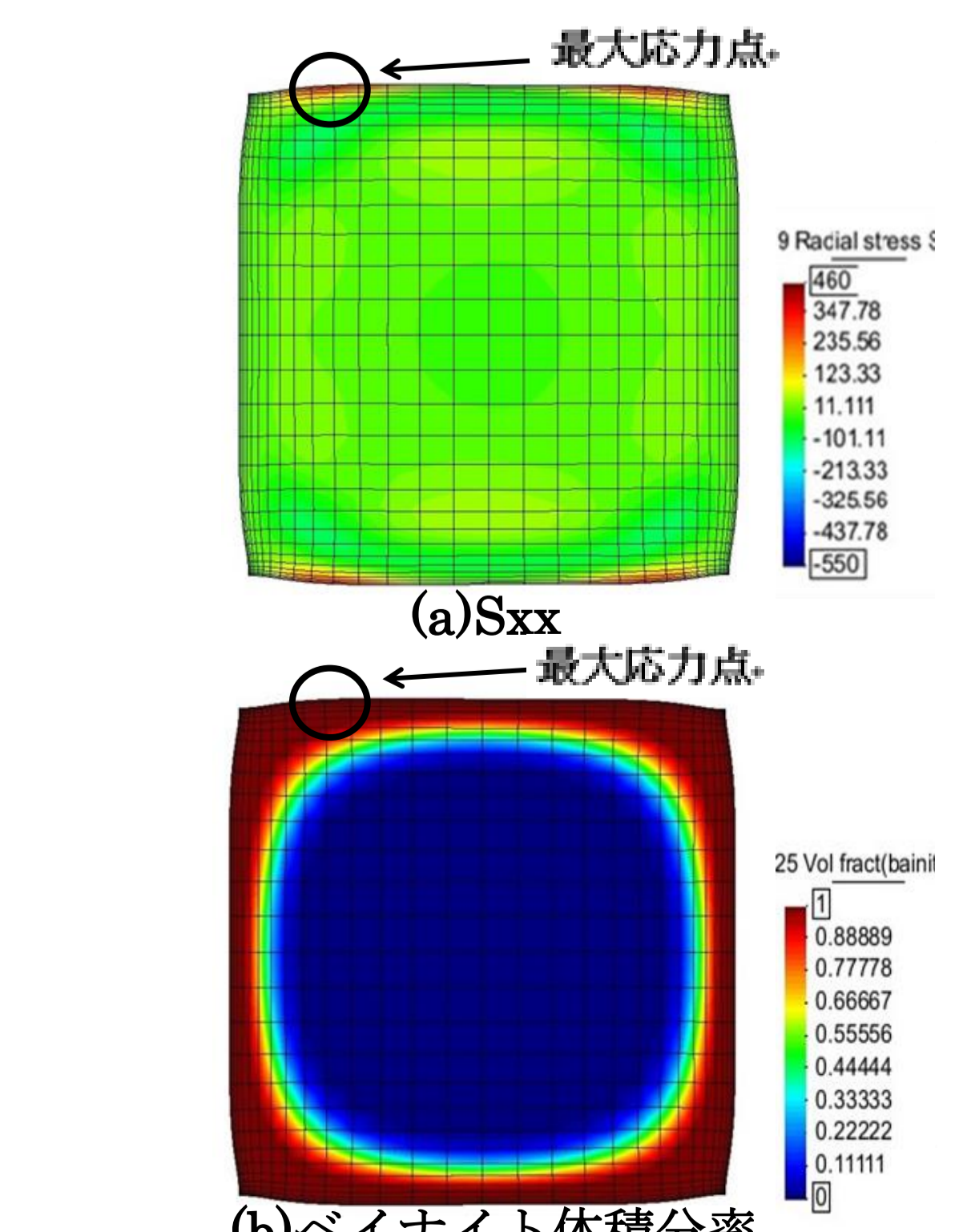
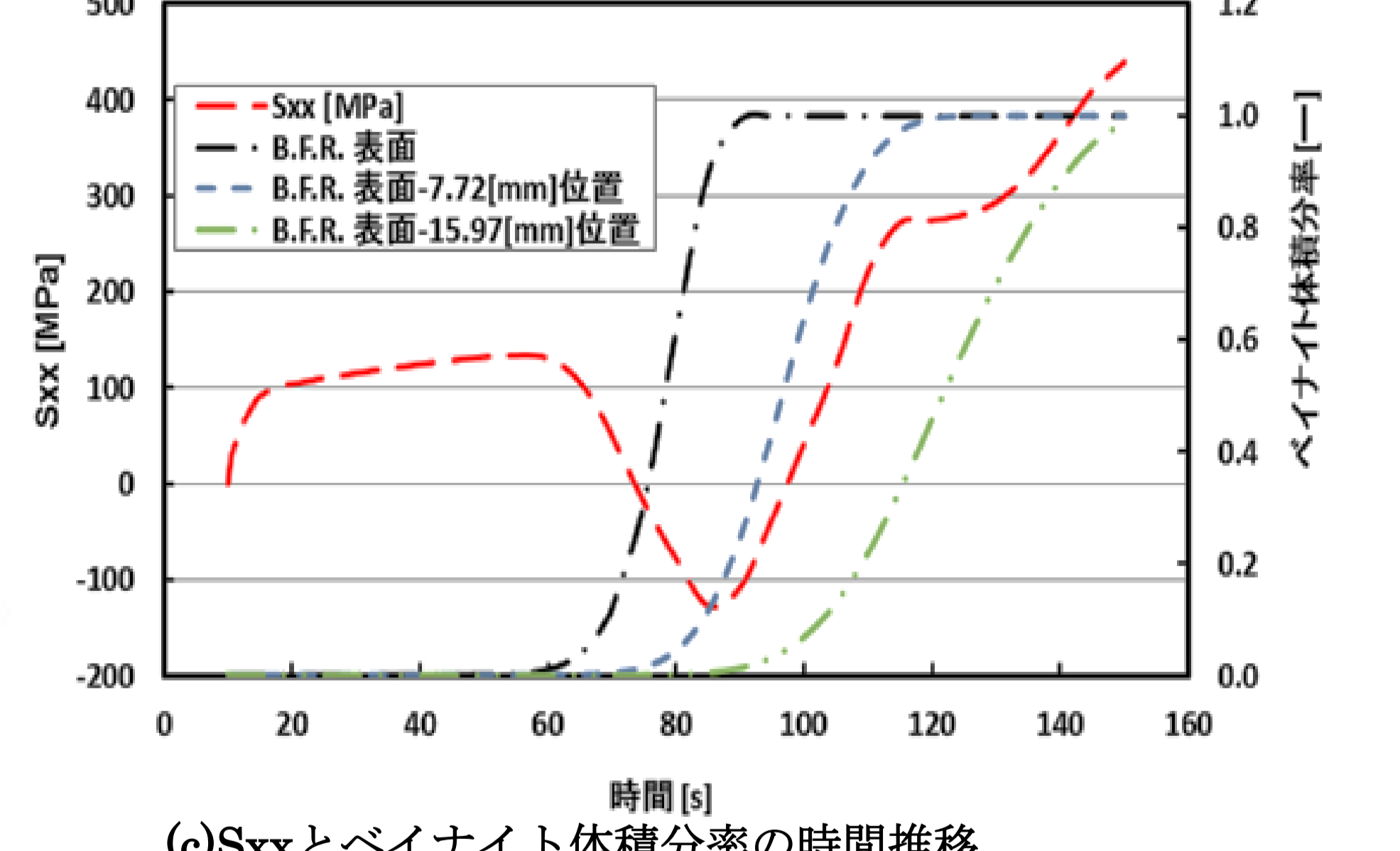
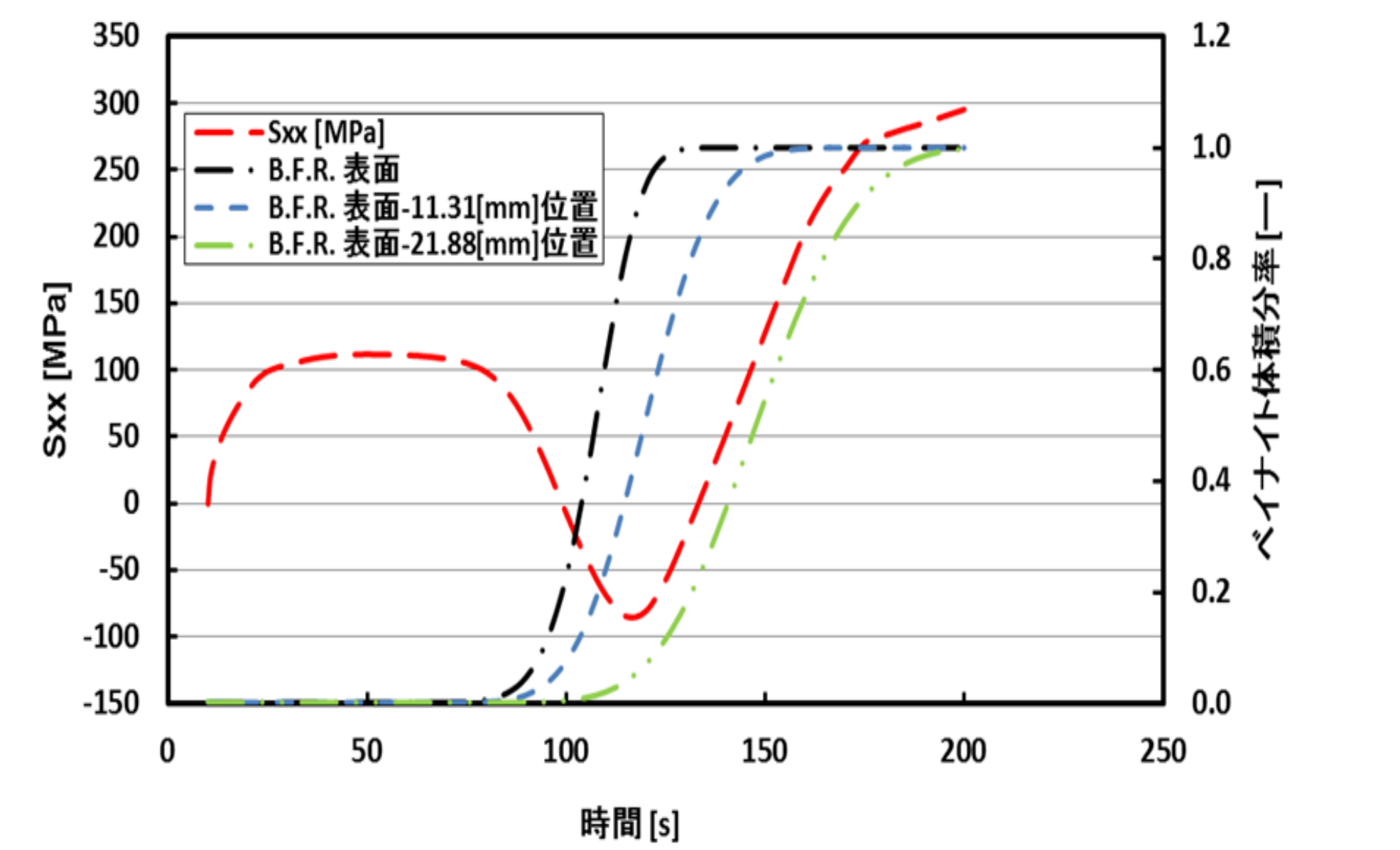


図8 スプレー冷却の水量密度 $W=50(\ell/m^2 \cdot \text{min})$ における最大応力発生時の S_{xx} 分布、ベイナイト体積分率分布と S_{xx} 最大位置の S_{xx} およびベイナイト体積分率の時間推移



(c) S_{xx} とベイナイト体積分率の時間推移



(c) S_{xx} とベイナイト体積分率の時間推移