



高濃度浸炭での炭化物ネットワーク 形成による強度低下の予測方法

旭川工業高等専門学校 機械システム工学科
生産システム工学専攻

○杉本 剛
福井光穂





本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ 実体形状での減圧浸炭シミュレーション
- ✓ セメントタイトの析出予測
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ まとめ



本日の発表の流れ

✓研究の背景

✓実体形状での減圧浸炭シミュレーション

✓セメントタイトの析出予測

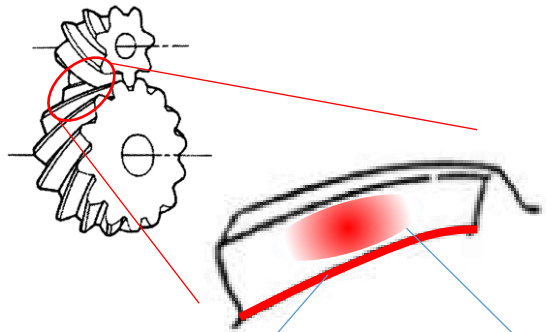
✓炭化物ネットワーク形成

✓実験結果との比較

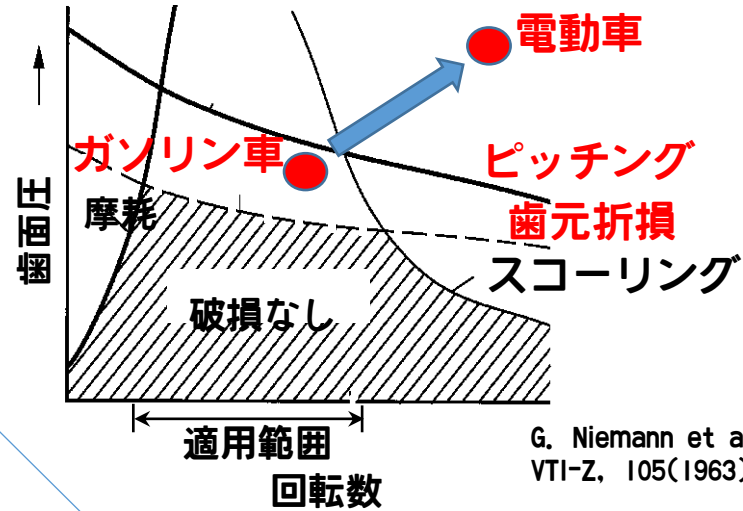
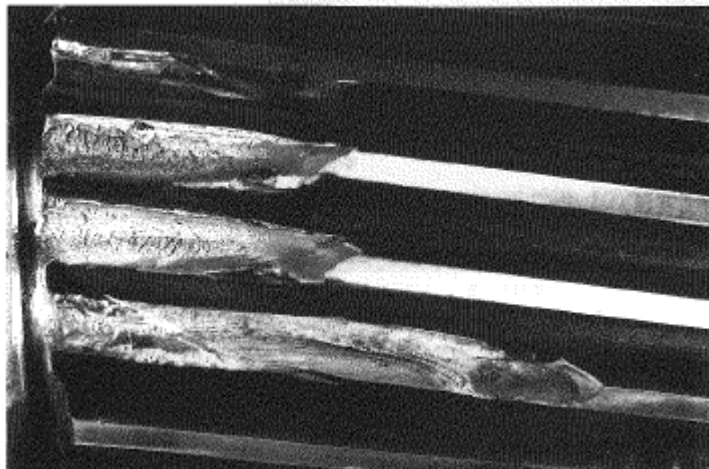
✓まとめ



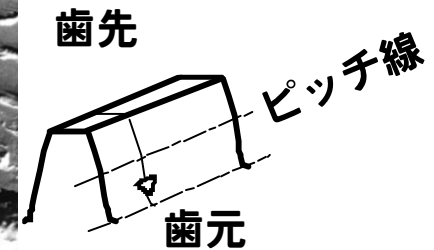
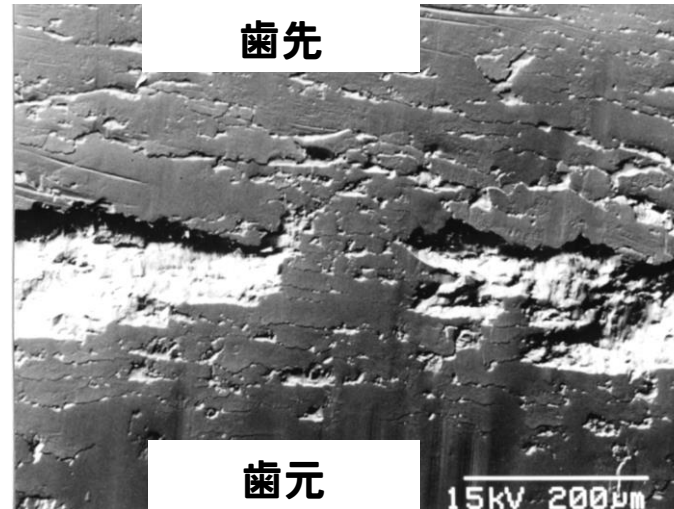
電動化による歯車破損モード変化



歯元；衝撃・折損



歯面；ピッチング・摩耗



CASE化電動車の高出力化により歯面圧と回転数が上昇するため対策が必要となる

G. Niemann et al. :
VTI-Z, 105(1963)



ギア寿命の向上方法

セメントイト析出は電動車の歯面強化に有効

耐ピッチング性の向上

焼戻軟化抵抗の向上

母相の焼戻し軟化抵抗向上

合金元素

炭素濃度

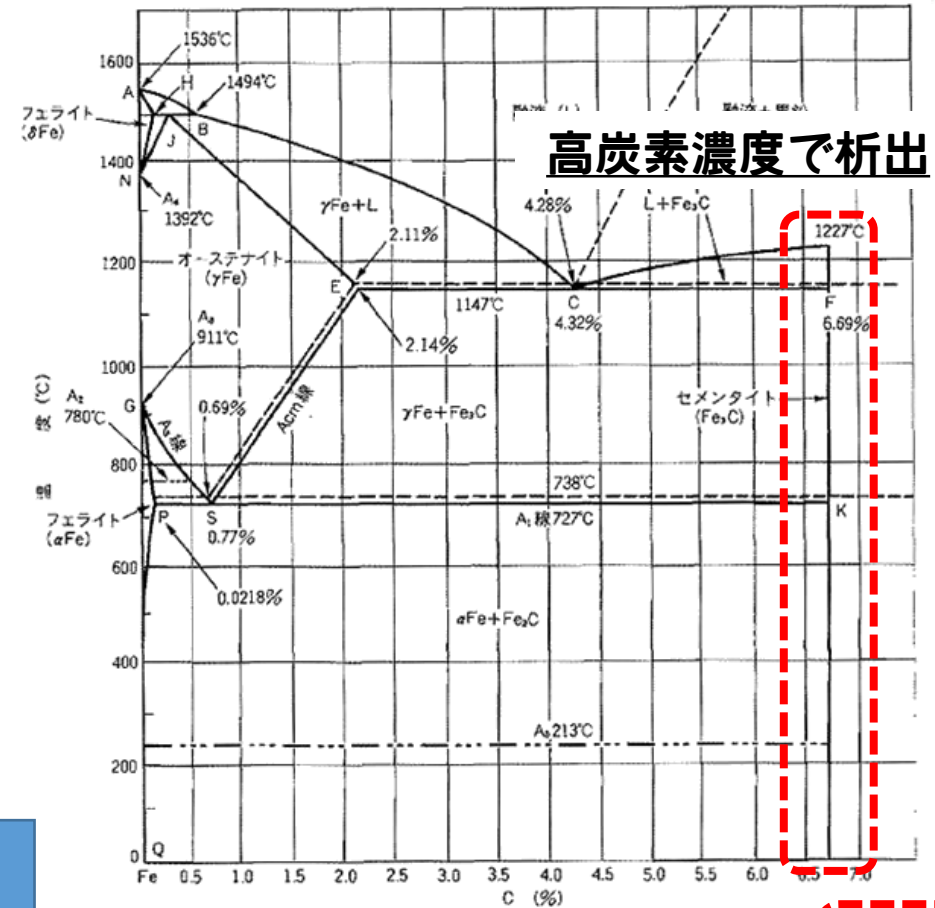
窒素

高硬度析出物の活用

析出物

セメントイト

セメントイトの活用
⇒ 高濃度浸炭



高炭素濃度で析出

Fe
(iron)

Fe-C 2元系状態図 (実線: Fe-Fe₃C系, 点線: Fe-黒鉛(グラファイト)系)

Fe₃C
(cementite)

高温で分解しづらい



セメンタイト活用とその課題



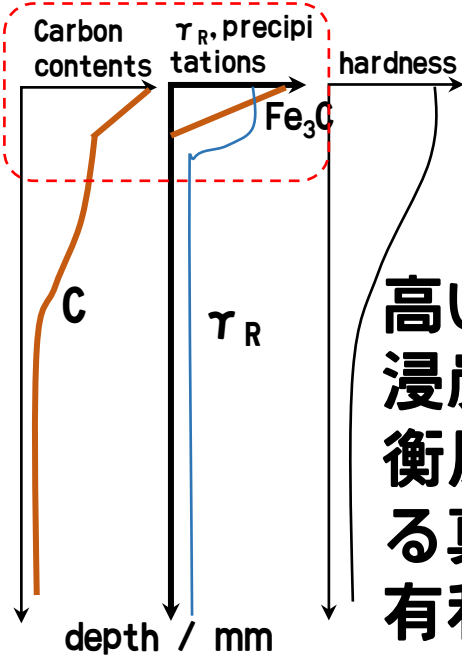
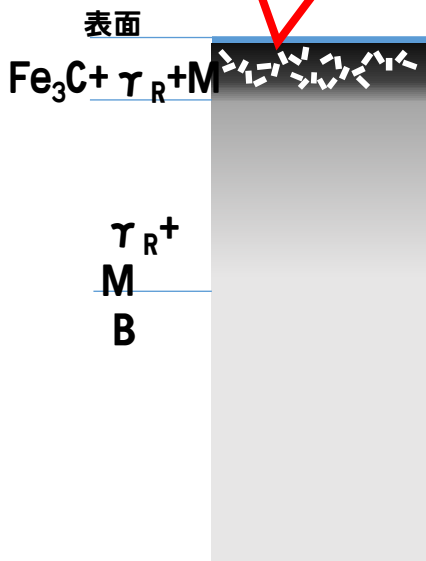
実部品形状での粗大セメンタイト発生抑制が必要



形状依存性を反映できる浸炭焼入れシミュレーション要

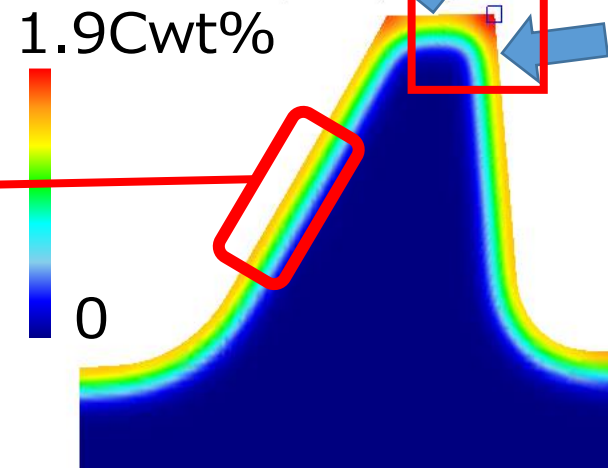
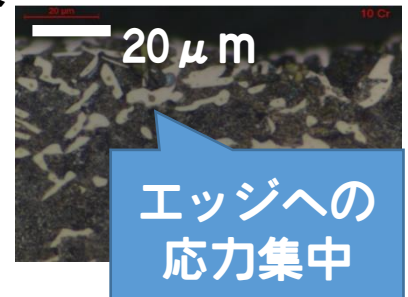


微細セメンタイトにより
高い表面硬さ・焼戻し軟
化抵抗を得ることが可能



高い濃度での
浸炭には非平
衡反応を用い
る真空浸炭が
有利

- 課題**
- エッジ部での二方向からの浸炭
 - コントロールできない
セメンタイト析出
 - 粗大セメンタイト・
ネットワーク炭化物形成
 - 応力集中による破損



歯車での浸炭結果





本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ **実体形状での減圧浸炭シミュレーション**
- ✓ セメントタイトの析出予測
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ まとめ



研究方法



化学成分; Mo, Si, Cr, Cu, Mn for SCr420H

一次浸炭(1050°C, 46min)

二次浸炭
(保持 in N₂, 900°C)
by 1200sec, 2400sec

中間冷却

油冷

時間

ヒートパターン

CatCalc(Calphad)

入力パラメータ;
処理温度
飽和炭素濃度, グラファイト生成炭素濃度

セル・オートマトン シミュレータ

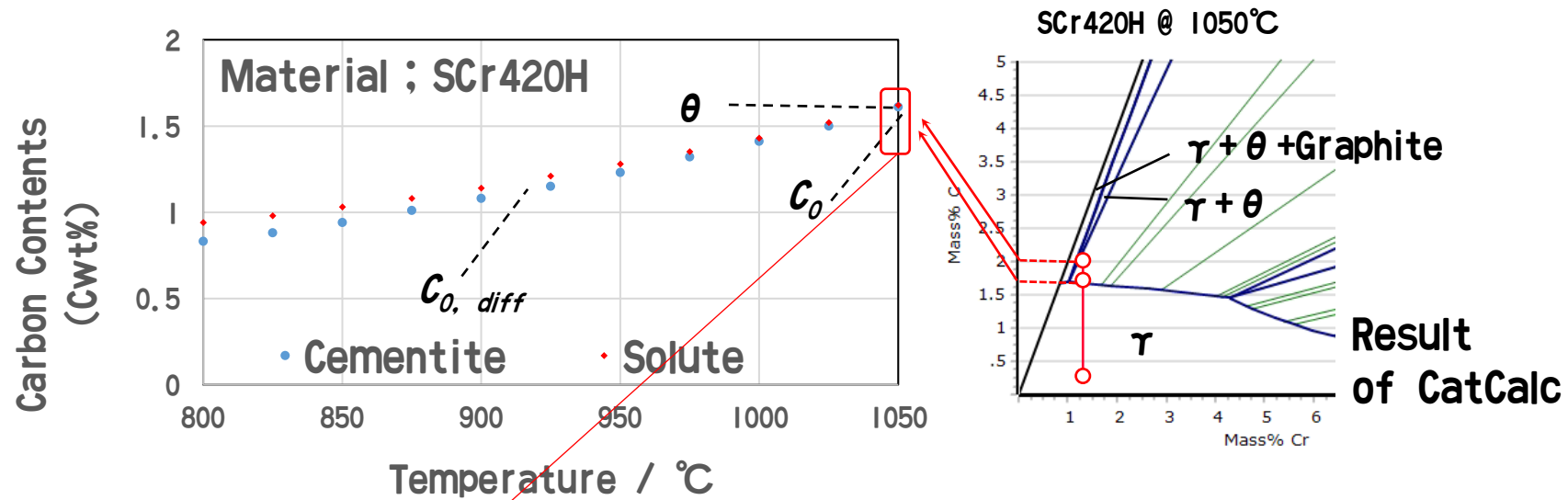
実体実験結果

Cwt% 分布
セメントイト濃度
硬さ





固溶・グラファイト析出炭素濃度の計算 by CatCalc (Calphad)



この炭素濃度をセル・オートマトンの境界条件に用いる

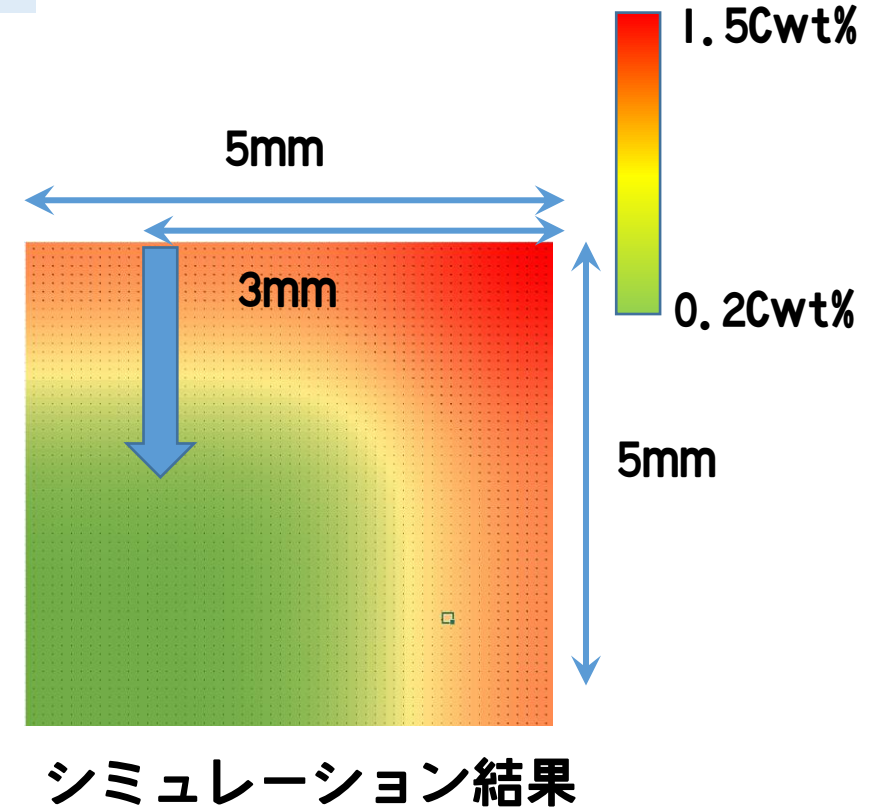
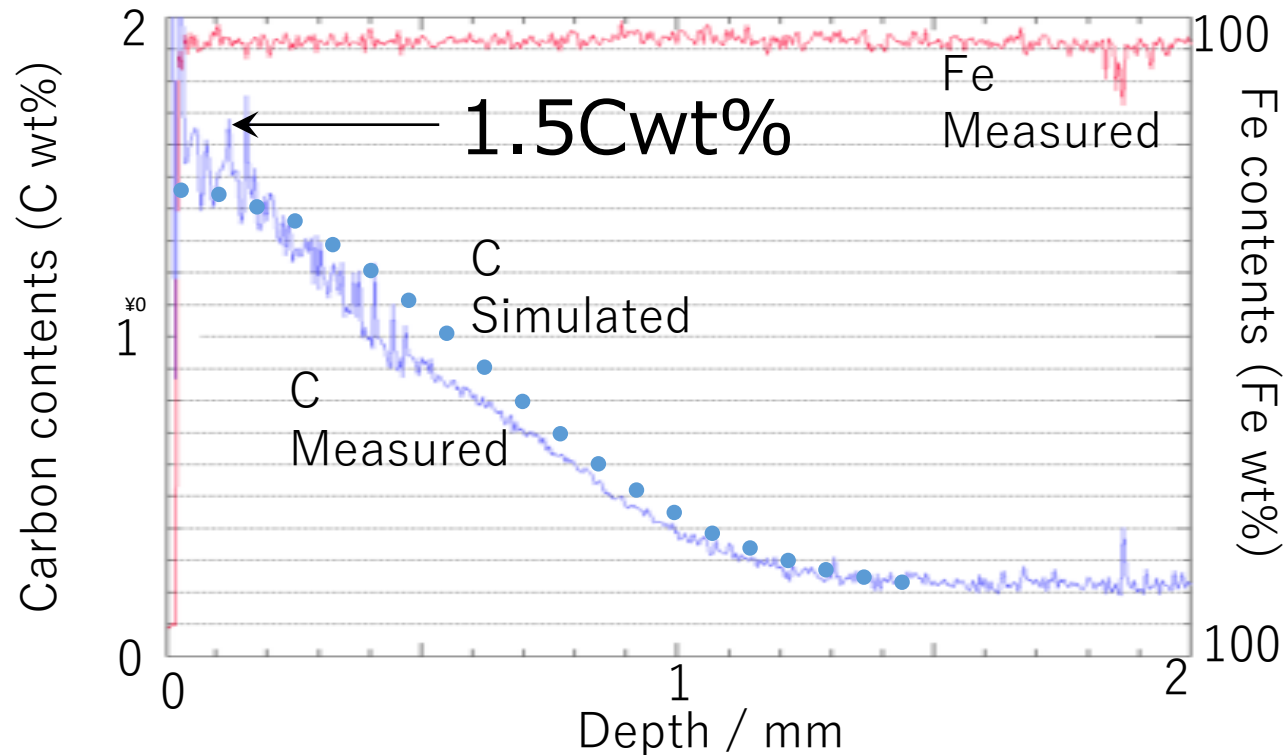
$$D(C, T) = C_0 e^{\left(18.5 - 1.5C + \frac{546C^2 + 2361C - 19410}{T}\right)}$$

C_0 ; Surface carbon contents
 C ; carbon contents
 T ; Temperature



炭素濃度計算結果と実験結果の比較

シミュレーションと計算結果は良い一致を見た



EPMAによる炭素濃度測定結果との比較



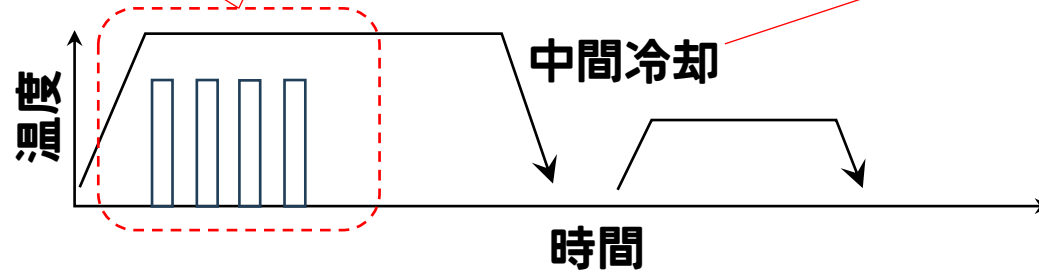
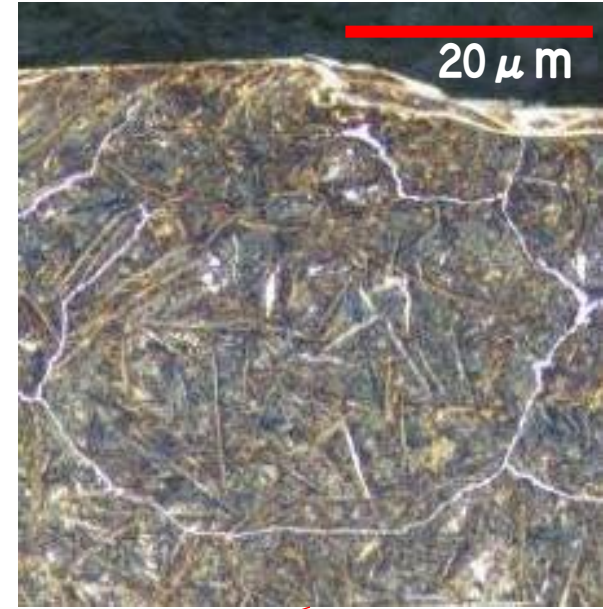
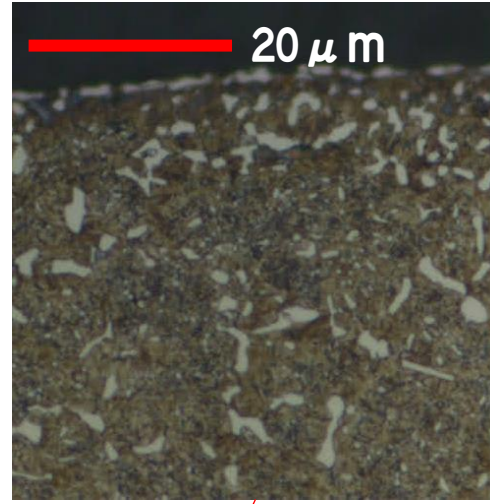
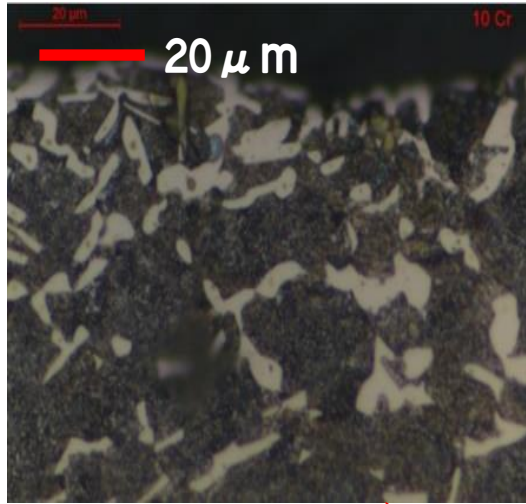


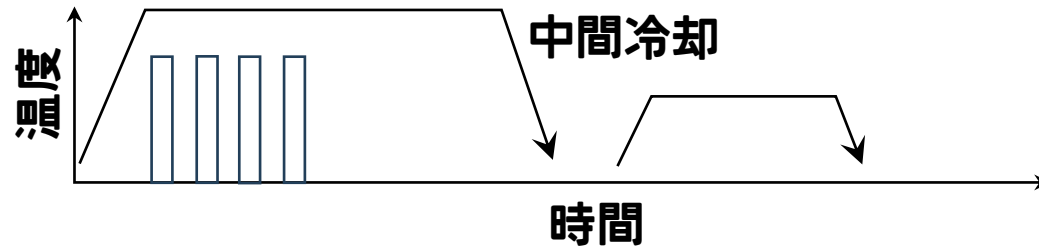
本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ 実体形状での減圧浸炭シミュレーション
- ✓ セメントタイトの析出予測
- ✓ 炭化物ネットワーク形成**
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ まとめ



セメントタイトの析出

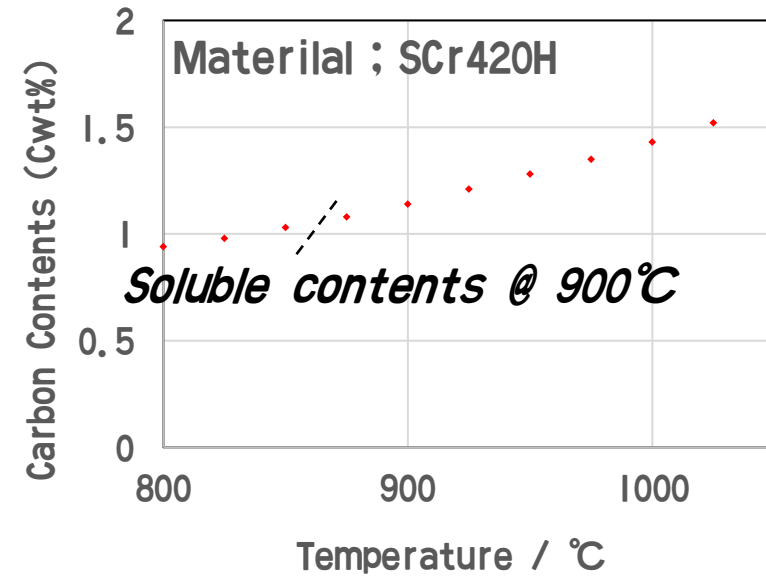
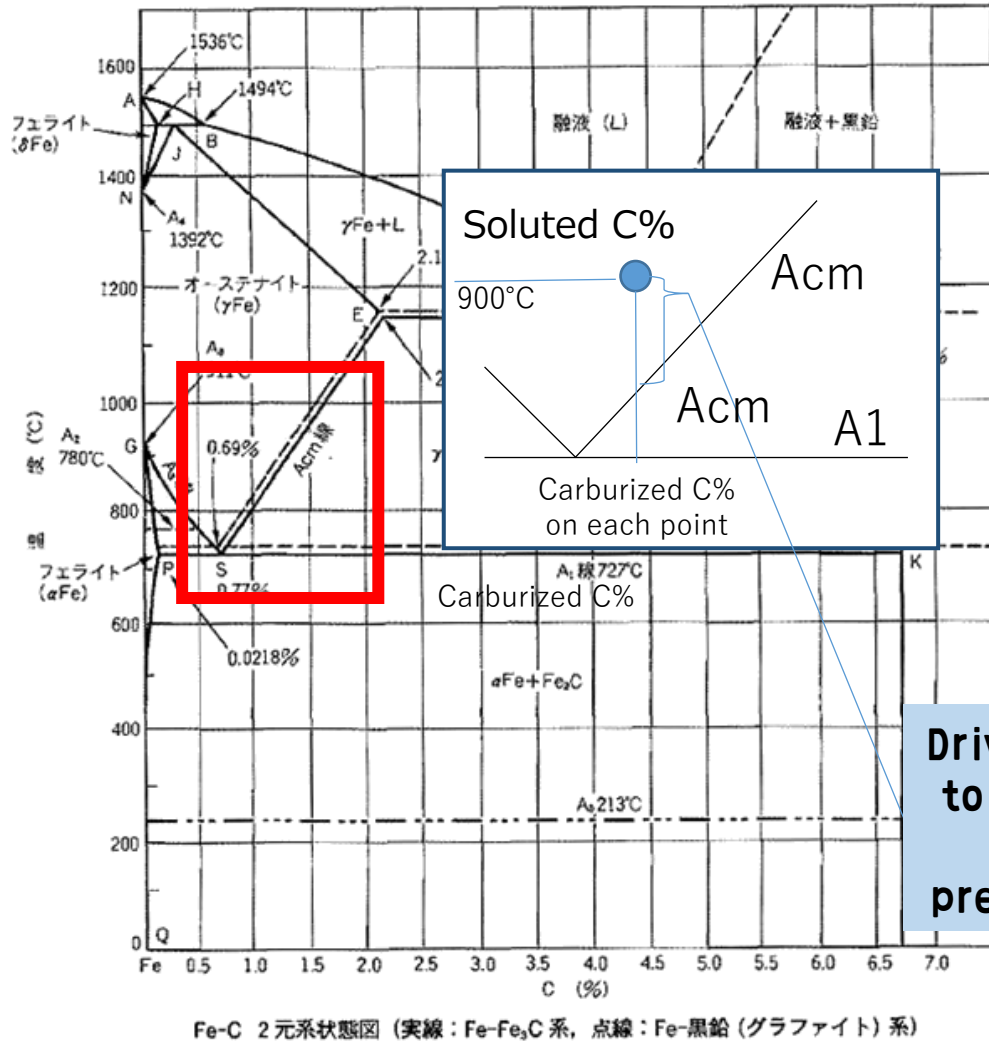




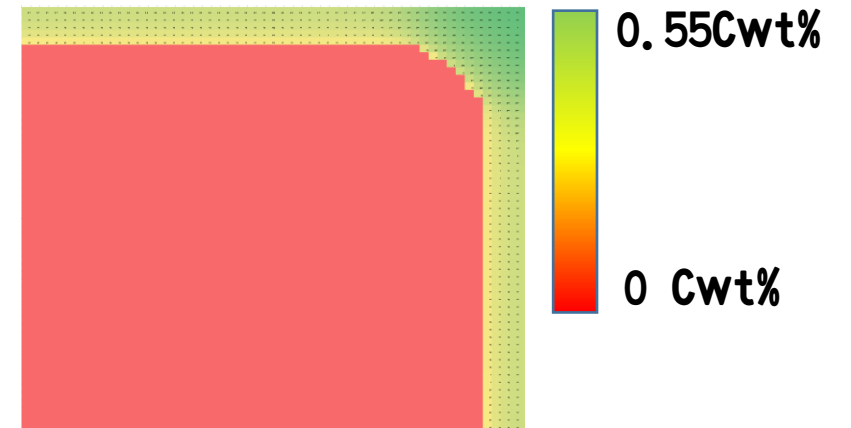
- ✓パルス浸炭時のセメンタイト析出
- ✓中間冷却時のセメンタイト析出
- +
- ✓浸炭時の粒界の移動



析出駆動力



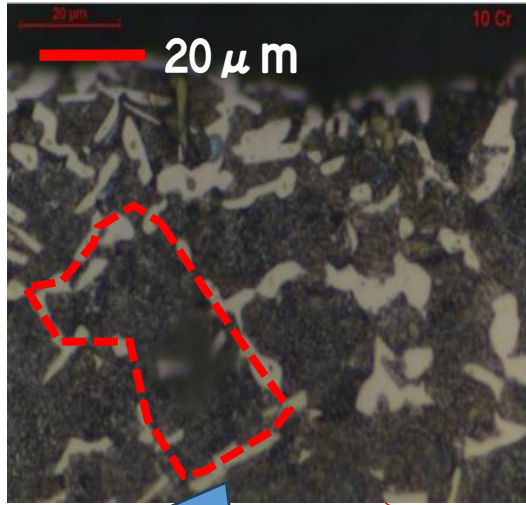
Driving force to generate Fe₃C precipitation



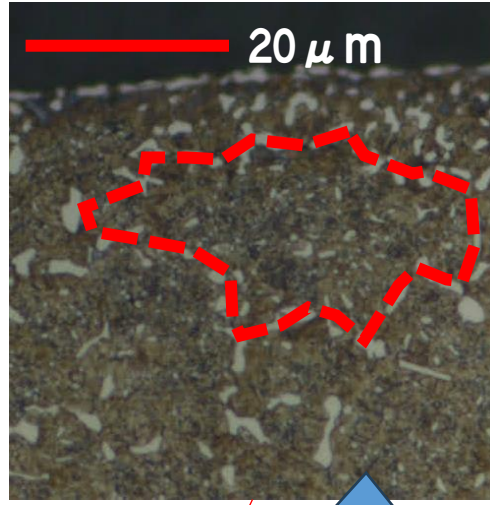
析出駆動力の分布



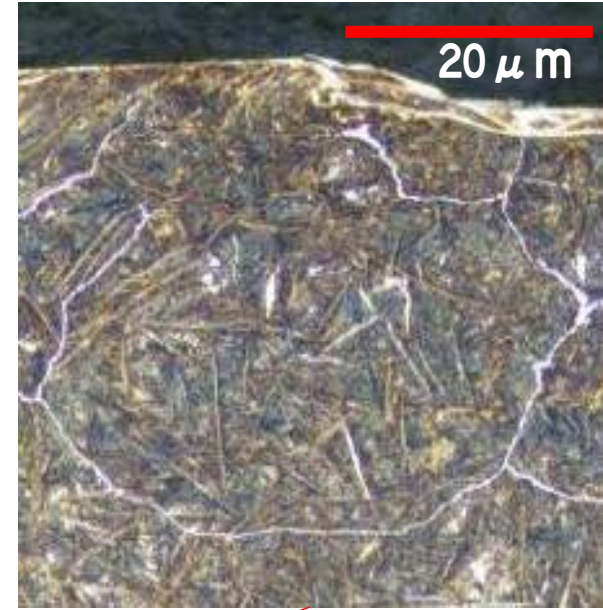
セメンタイトの析出



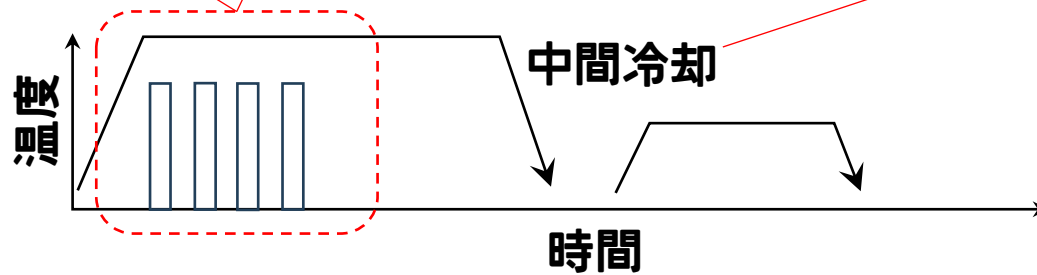
浸炭パルス
 C_2H_2 300s



浸炭パルス
 C_2H_2 3s x 5回



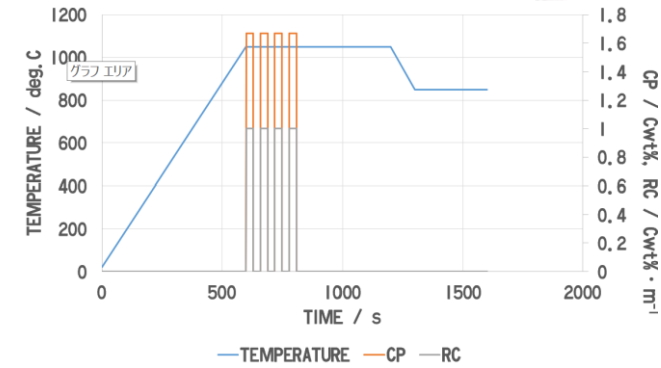
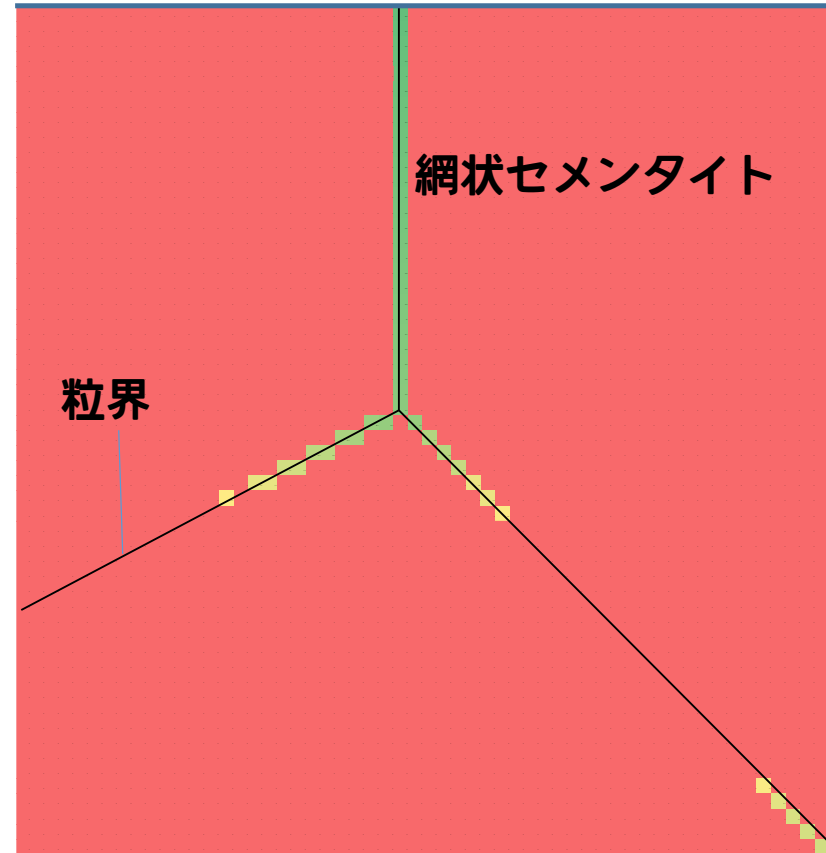
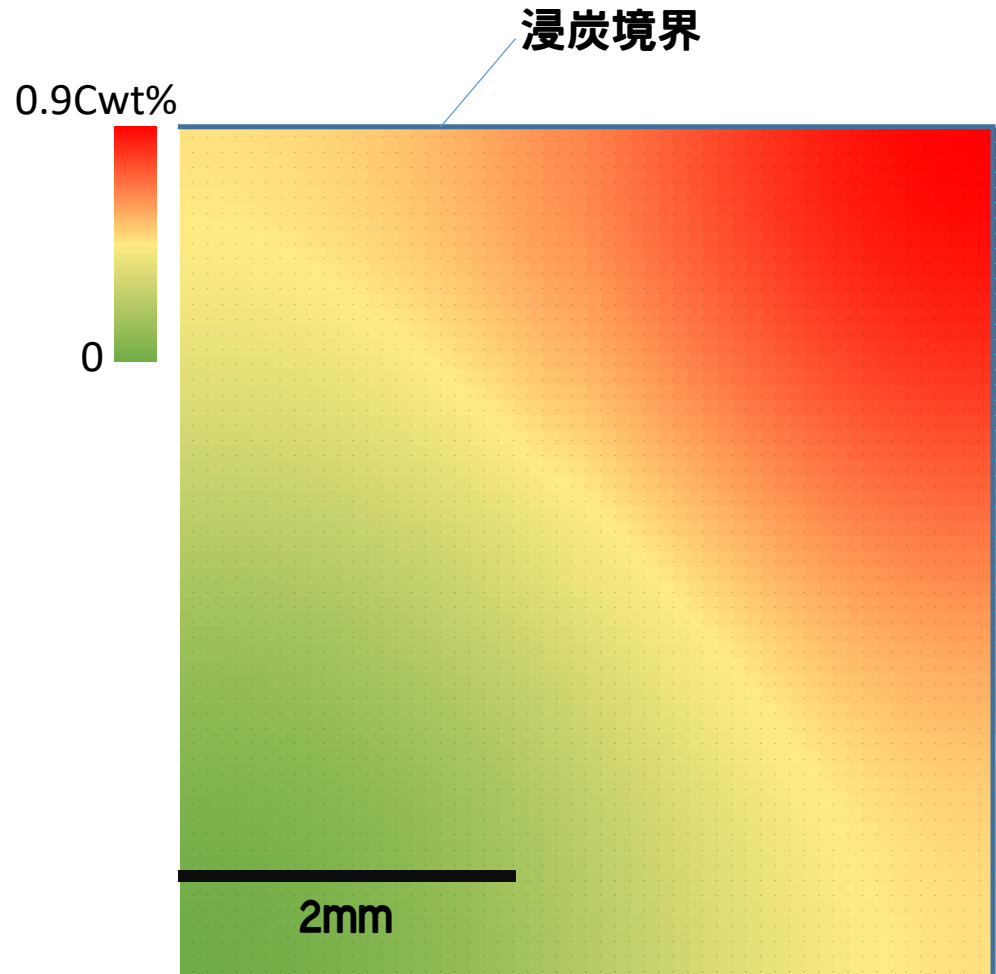
- ✓ 浸炭パルスの違いによりセメンタイトの形が違う
- ✓ 粒界の様な形をしている



- ✓ 冷却時に粒界にセメンタイトが発生する



粒界セメンタイトの析出



粒界での拡散定数を高める(1.6倍)と粒界におけるセメンタイトの発生を計算できる

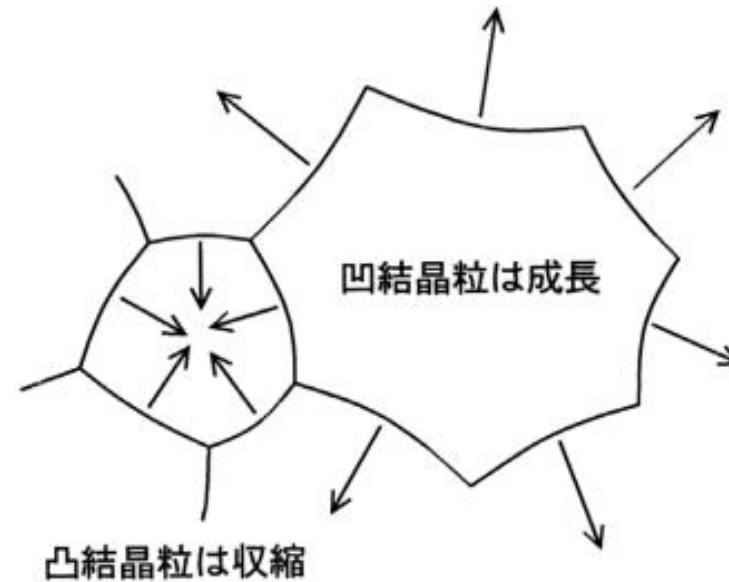


粒界の移動

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	F_3	0	0	1
1	1	1	↓	1	0	0
0	0	0	↗	1	0	0
0	F_1	0	1	0	F_2	0
0	0	0	1	0	0	0

$$\text{粒界移動力} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

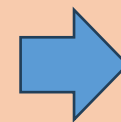
$\vec{F}_i \propto$ 近隣結晶粒の曲率半径



高山善匡, “結晶粒成長とそのシミュレーション”, 軽金属, 46(12), 674-681, 1994

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = M_\eta [\epsilon_\eta^2 \nabla^2 \eta - f'(\eta)]$$

M_η : 移動度
 f : 自由エネルギー密度
 η : 非保存秩序パラメータ

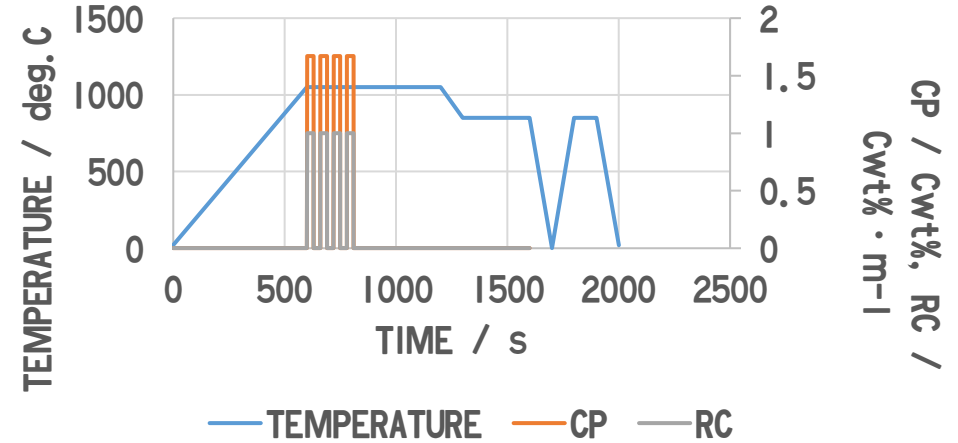
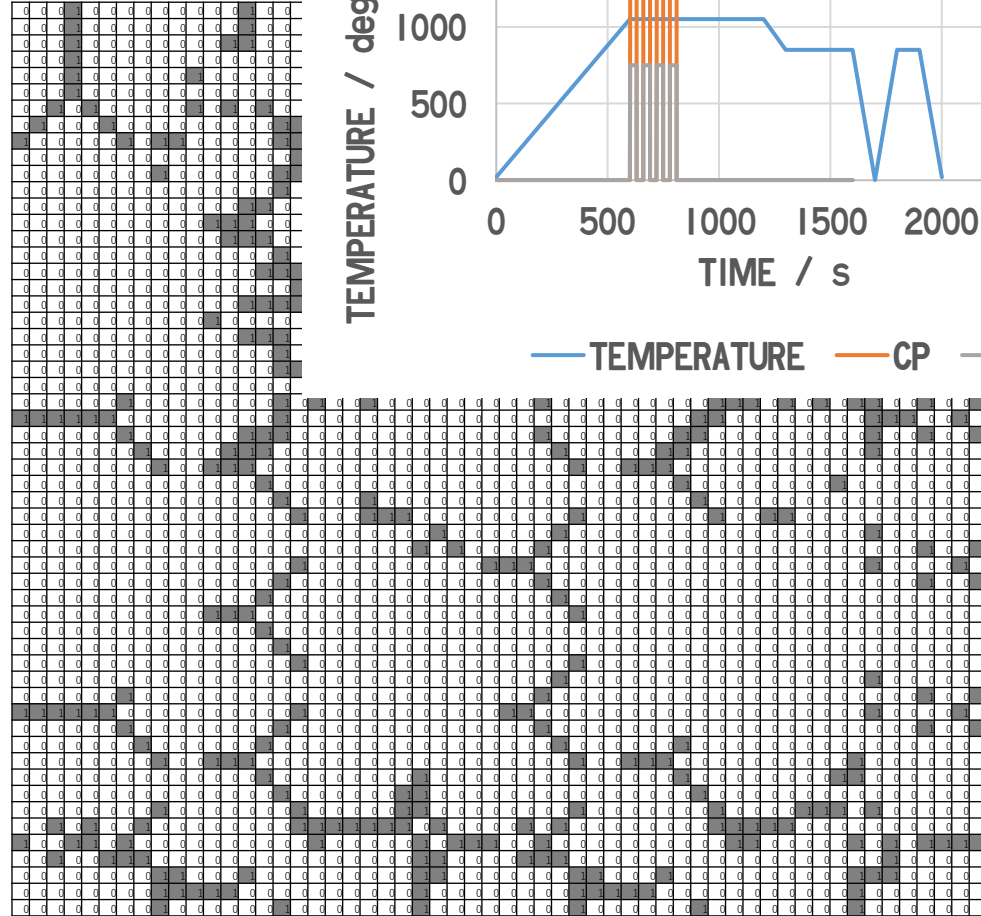
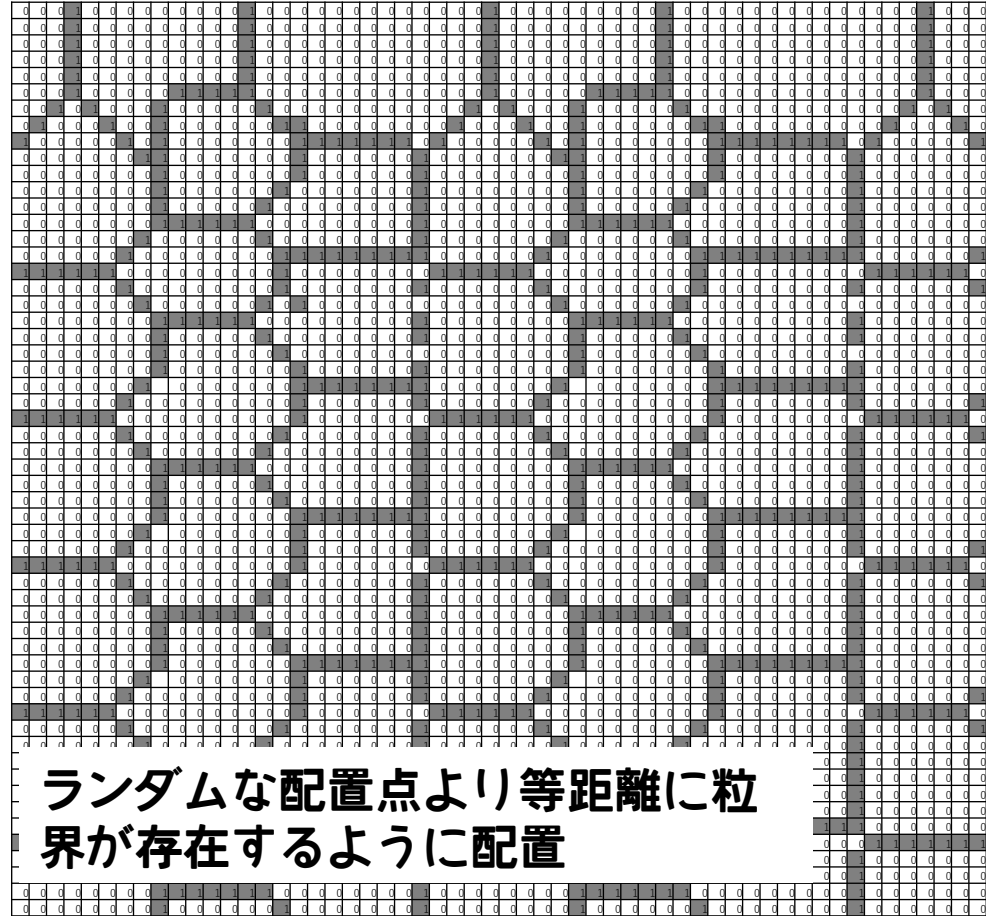


各粒の拡がろうとする力はAllen-Cahn方程式による反応拡散で決まる



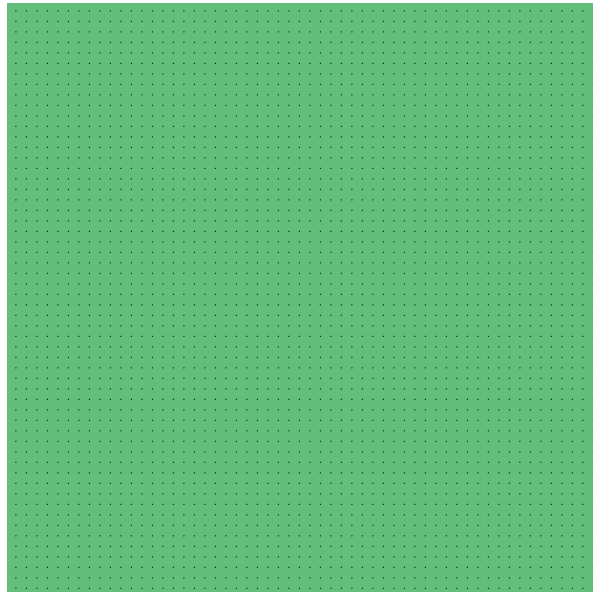
粒界の移動

加熱 (1050°C x 1200sec)

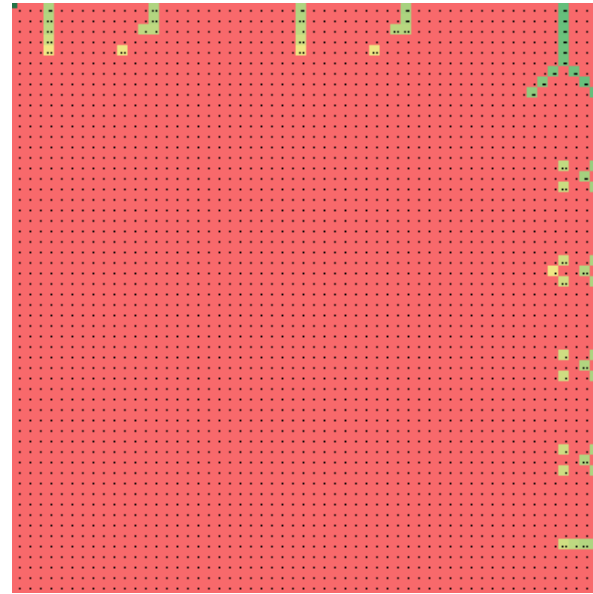


結晶粒の成長を簡易的に模擬できる

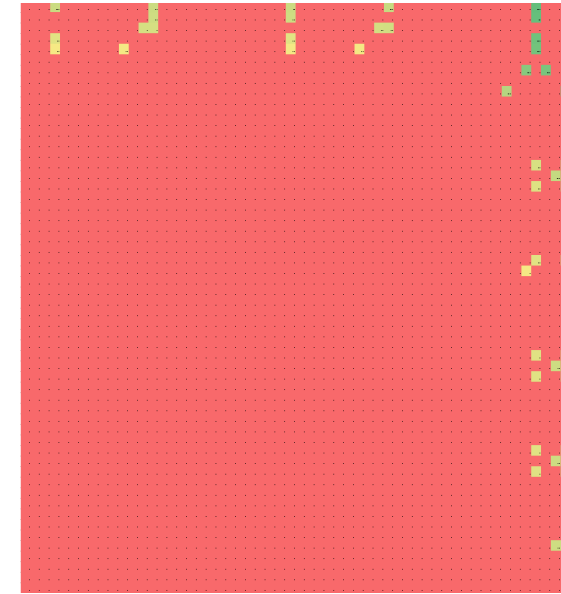




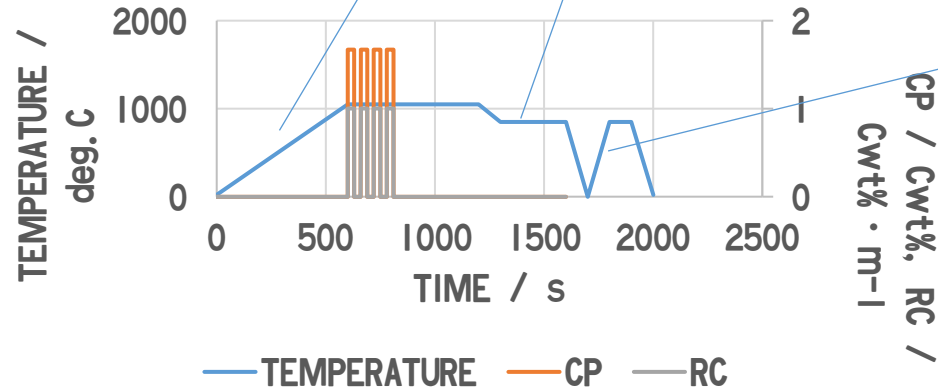
初期：セメントイト無



浸炭後：粒界にセメントイト発生



再加熱後：セメントイトが分断



- ✓ 冷却時点で過飽和セメントイトを析出させたが析出は確認できなかった
- ✓ セメントイトを分断する形で粒界ができて拡散が起きることでセメントイトが分断した





本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ 実体形状での減圧浸炭シミュレーション
- ✓ セメントタイトの析出予測
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ **まとめ**





まとめ

- ✓ セメント析出モデル，結晶粒成長モデルを検討した
- ✓ 結晶粒成長モデルを織り込むことでセメント析出の分断を再現できた
- ✓ 一方で冷却時の粒界へのセメント析出に関しては計算が成功していない
- ✓ 粒成長のピン止め効果等は織込めていない

今後

- ✓ 実際の析出現象の有無を確認する
- ✓ 実体形態との形状対応を検証する
- ✓ 冷却時の粒界析出モデルを作成する
- ✓ 粒成長モデルの検証

本研究はJFE21世紀財団研究助成の下で実施いたしました。関係各位に感謝致します