



結晶粒成長を考慮したセメントタイト 組織形成予測手法

旭川工業高等専門学校 機械システム工学科 ○杉本 剛
生産システム工学専攻 福井 光穂
惣田 和馬





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
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション
- ✓ 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

✓結晶粒成長シミュレーション

✓炭化物ネットワーク形成

✓実験結果との比較

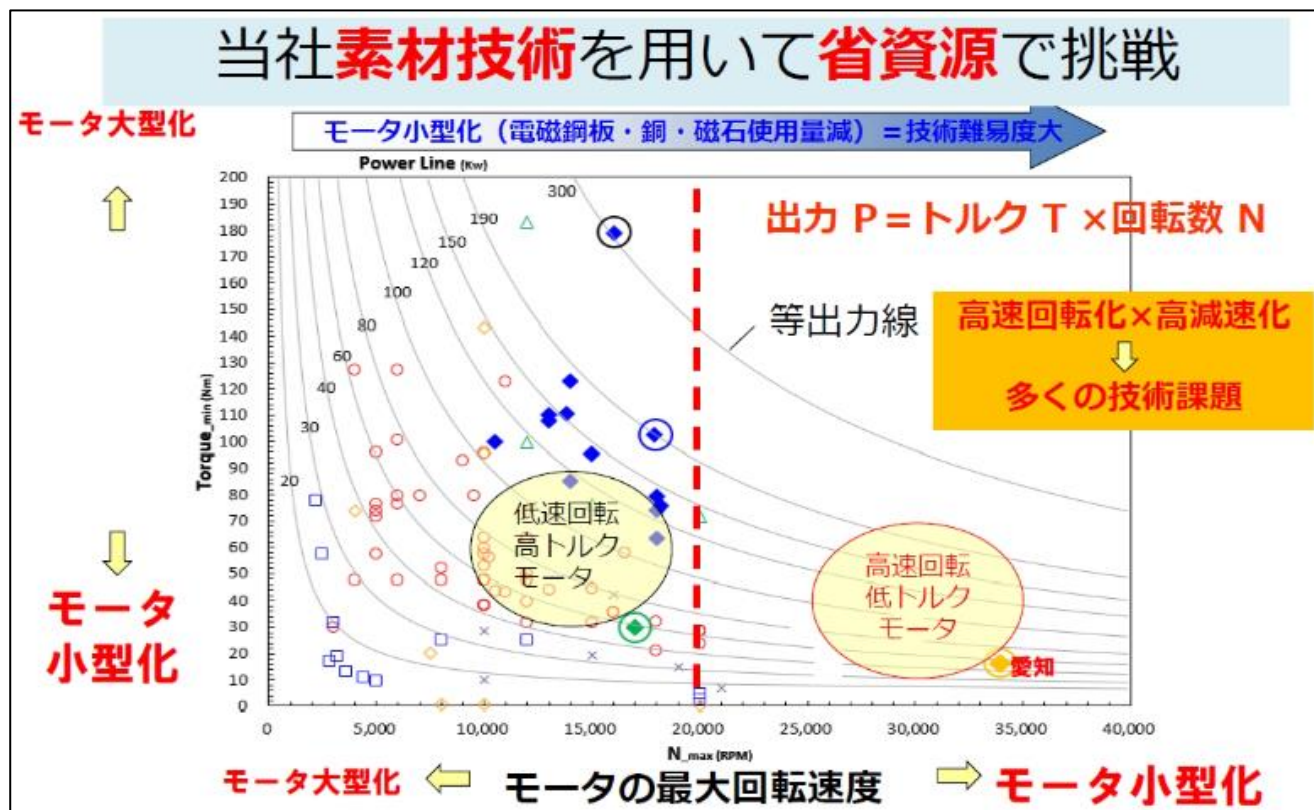
✓まとめ



EVxによる駆動系への要求



e-PT将来動向として35,000rpm程度までが提案されている



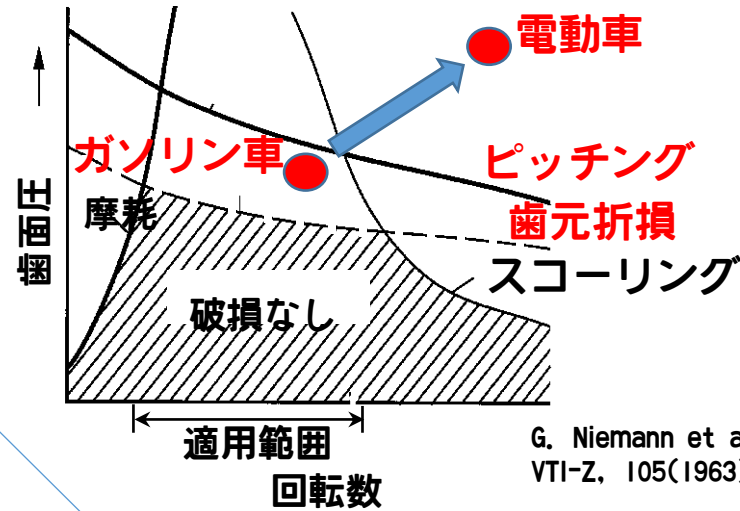
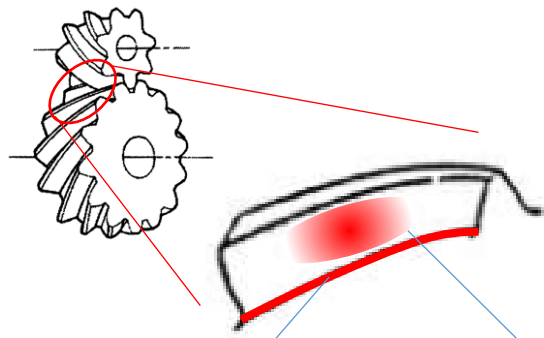
次世代電動アクスル



次世代電動アクスルと従来製品のサイズ比較イメージ

Car Watch: 愛知製鋼、高回転モータを生かす減速比21.8を実現した小型高減速機搭載「EV向け次世代電動アクスル」実証に世界初成功, 佐久間 秀
<https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1387490.html>

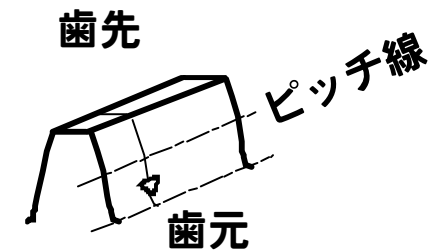
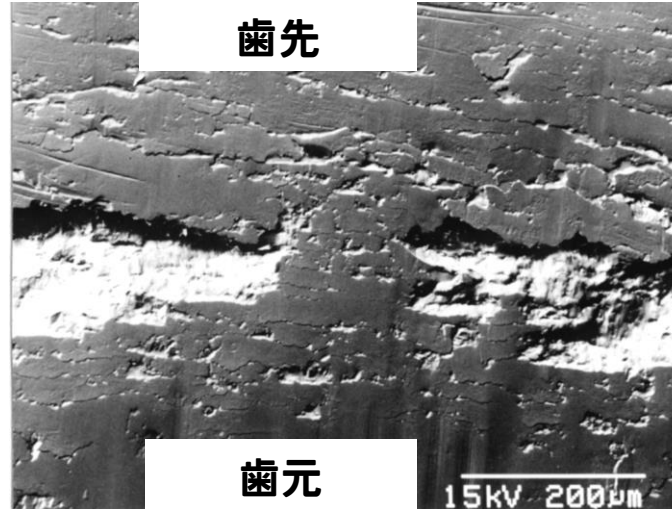
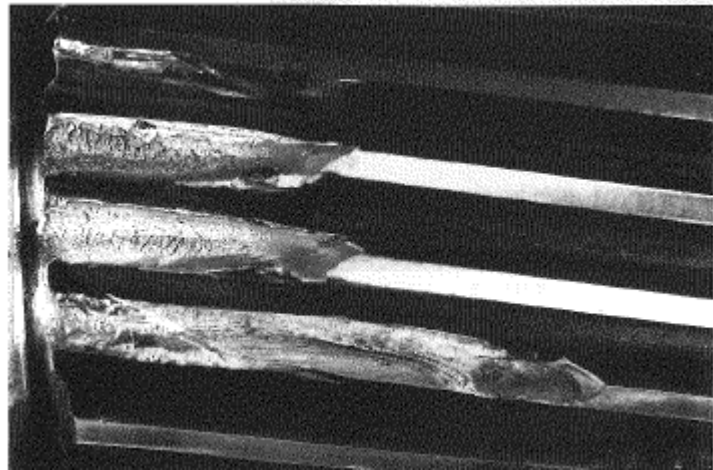
EVxによる歯車破損モード変化



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

歯元：衝撃・折損

歯面：ピッチング・摩耗



ギア寿命の向上方法

セメンタイト析出による歯面強化は
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

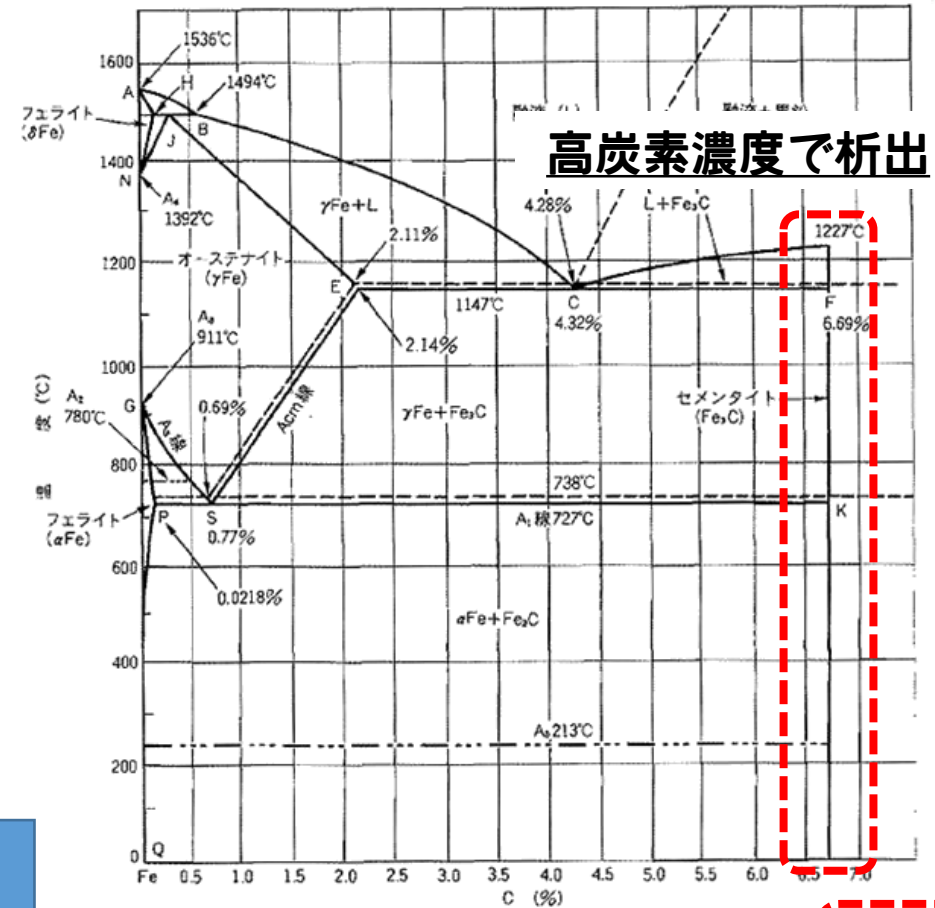
窒素

高硬度析出物の活用

析出物

セメンタイト

セメンタイトの活用



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



セメントイト活用とその課題



実部品形状での粗大セメントイト発生抑制が必要

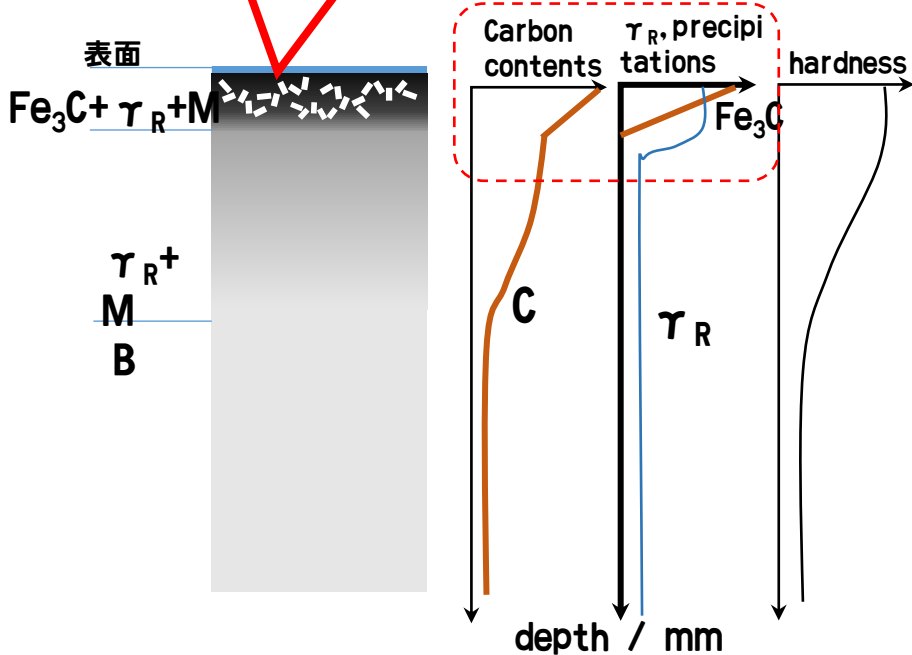


形状依存性を反映できる浸炭焼入れシミュレーション要
特に減圧浸炭

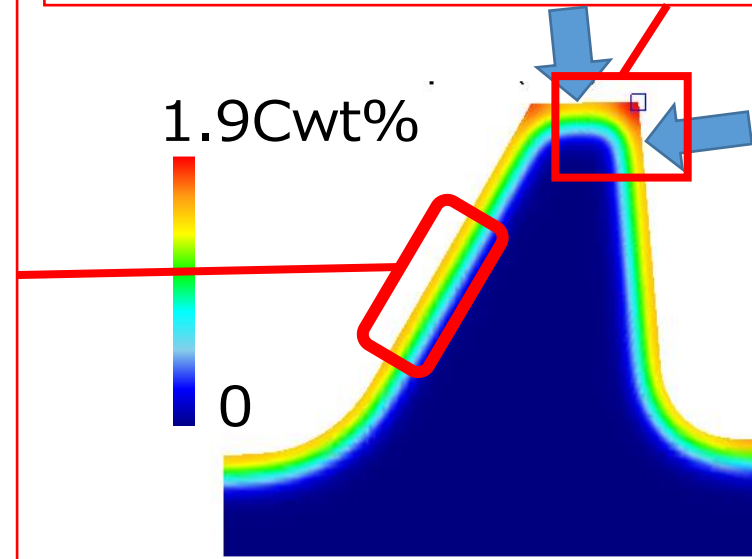
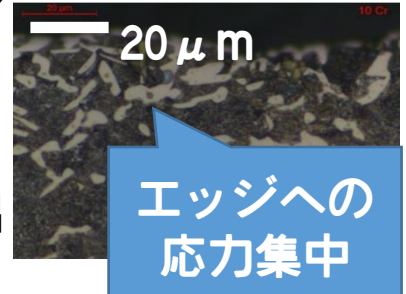


高濃度浸炭とは？

微細セメントイトによる
超高硬さを得る工法



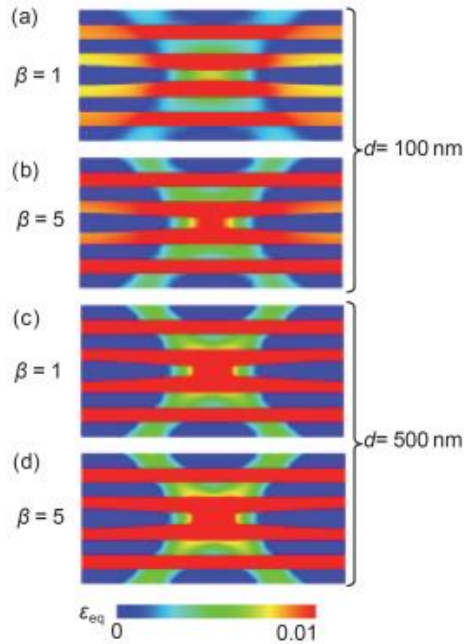
- 課題 エッジ部での二方向からの浸炭
→ コントロールできない
高炭素濃度
→ 粗大セメントイト・
ネットワーク炭化物の析出
→ 応力集中による破損



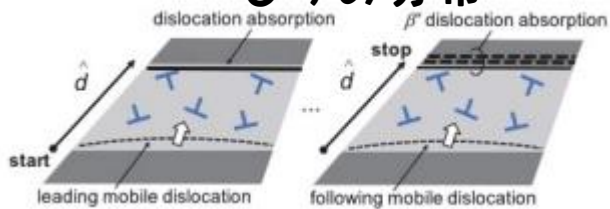
歯車での浸炭結果



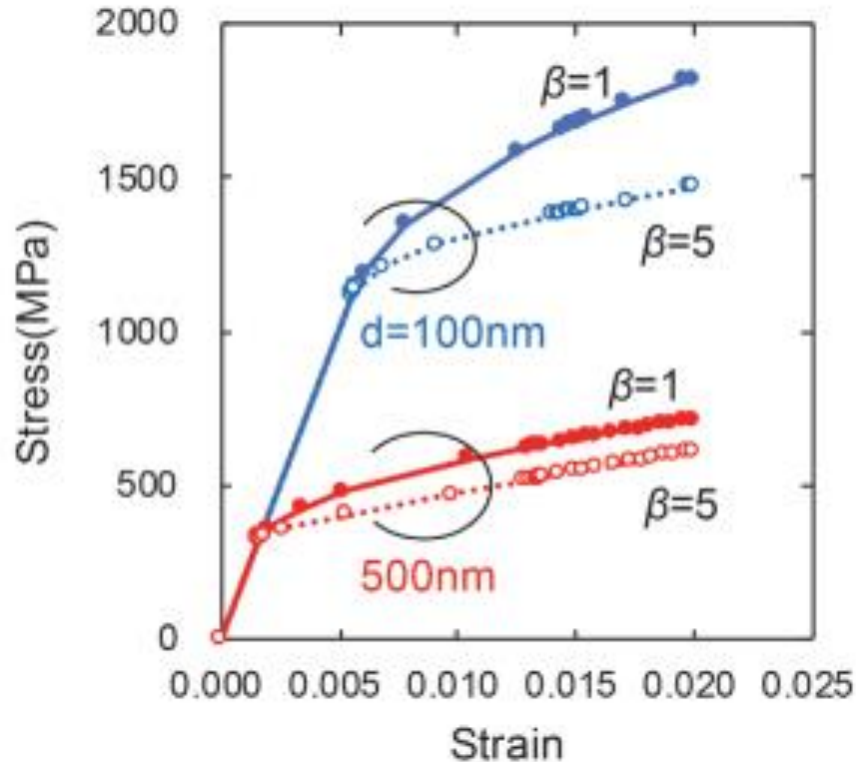
セメンタイト活用の可能性



パーライト内でのひずみ分布



フェライトセメンタイト界面での転位トラップ



転位トラップでの強度向上

安田洋平, 下川智嗣, 大橋鉄也, 新山友暁, フェライト/セメンタイト積層体の延性に関する結晶塑性解析: 界面の転位吸収能力の影響, 鉄と鋼, pp146-154, 2019

セメンタイトの存在形態はセメンタイト自体の性質にも影響を与える
(より細かいセメンタイトでは)



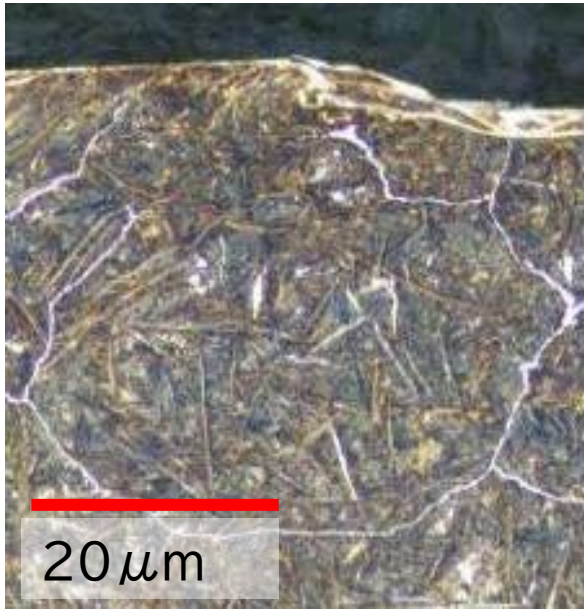
高濃度浸炭とその課題



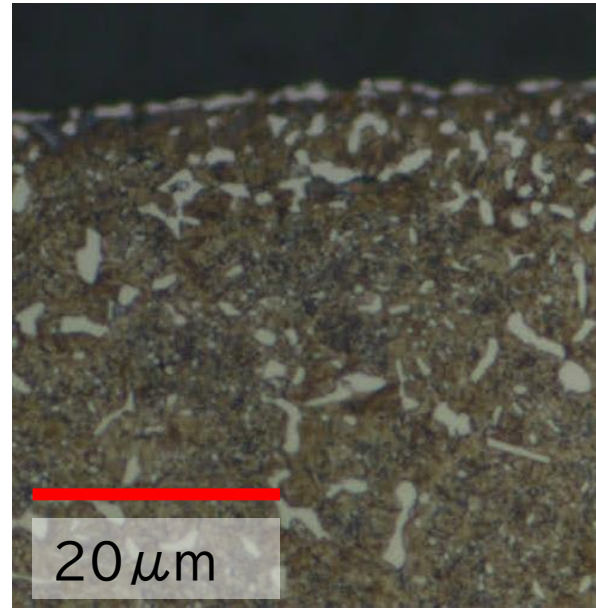
網状セメンタイト，粗大セメンタイトが発生しない条件を明確にする必要がある



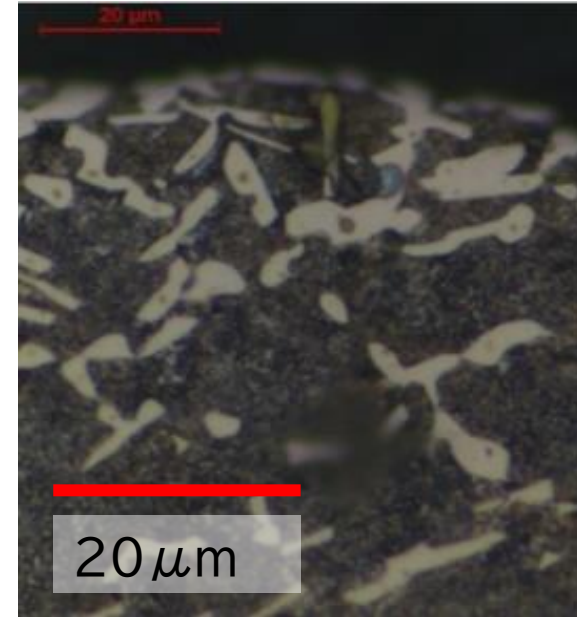
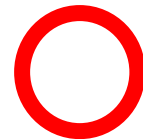
今回は形態に影響する結晶粒成長→析出まで見てみる



粒界に発生した
網状セメンタイト



分断した
粒状セメンタイト



過剰炭素濃度によって
発生した粗大セメンタイト



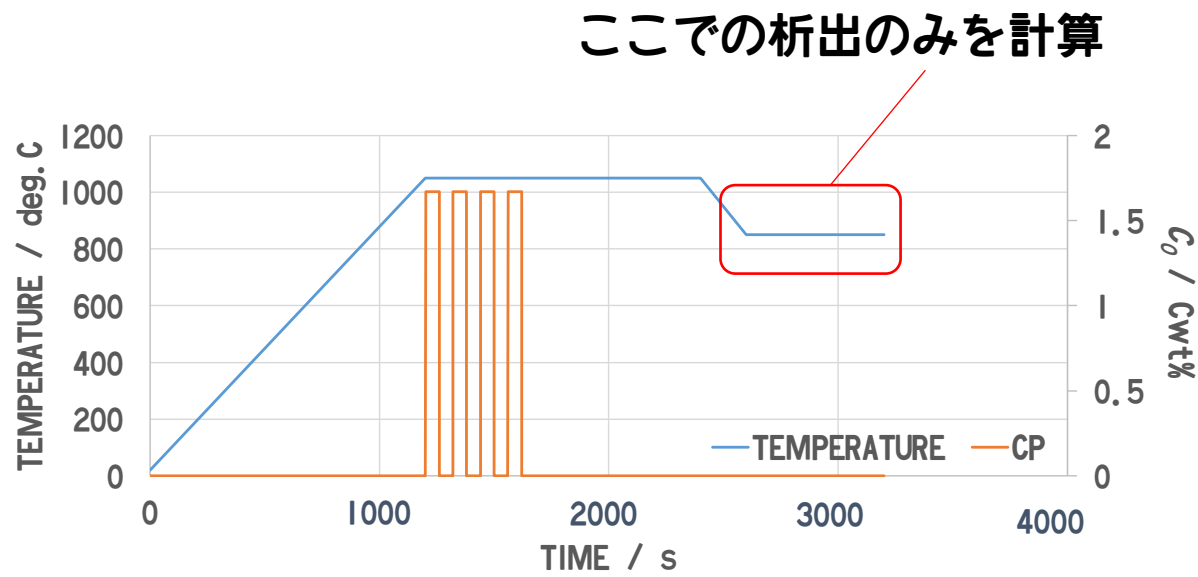


本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ **実体形状での減圧浸炭シミュレーション**
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション
- ✓ 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

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

拡散シミュレーション

ヒートパターン

実験

- ・アセチレン(50L/hr)のパルス真空浸炭
- ・熱処理炉フルテック「FT101炉」

実体実験結果

粒成長実験によるパラメータ把握

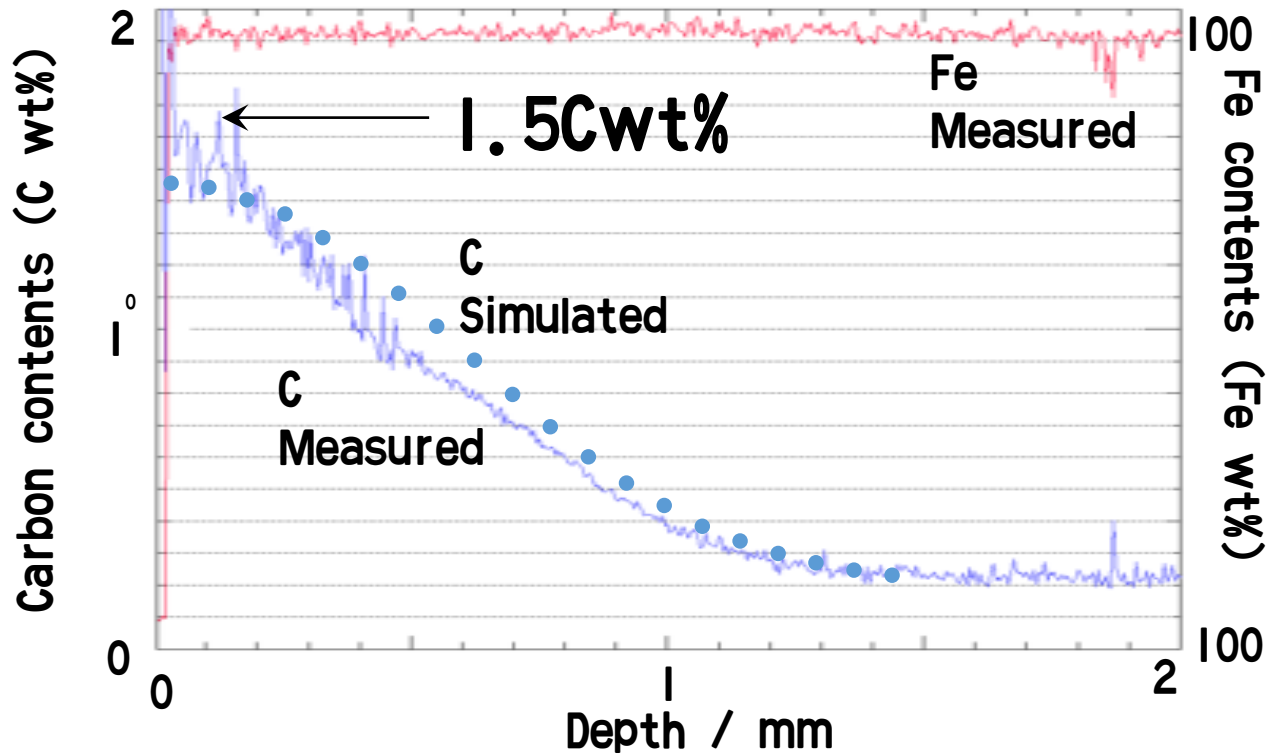
Cwt% 分布 確認

結晶粒粗大化シミュレーション

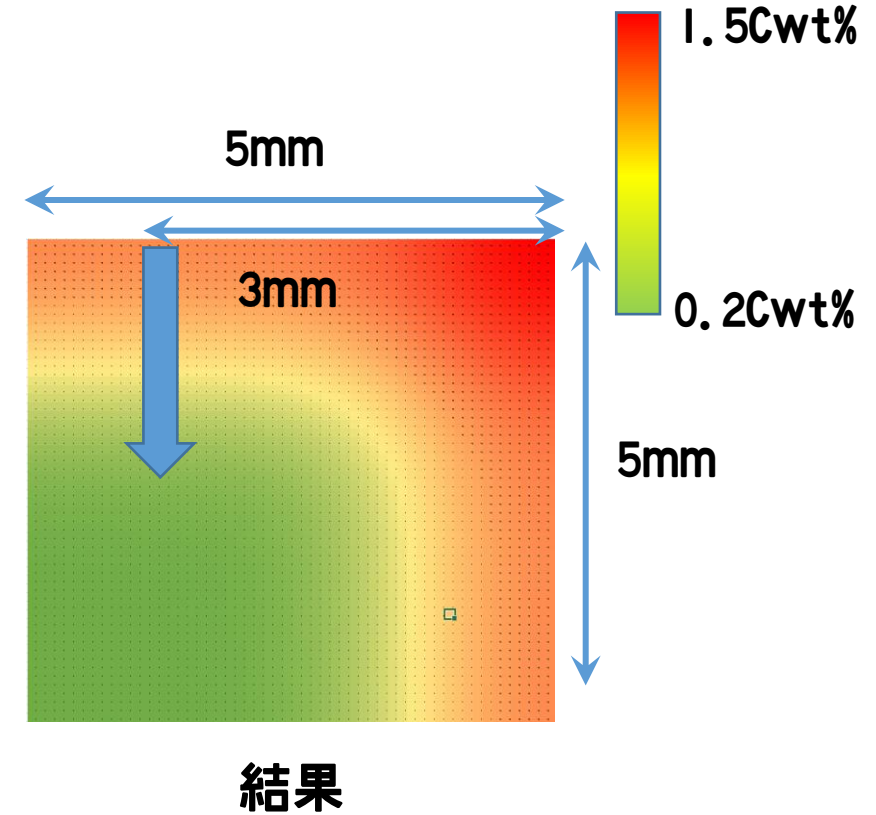
析出計算

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
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション**
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ まとめ

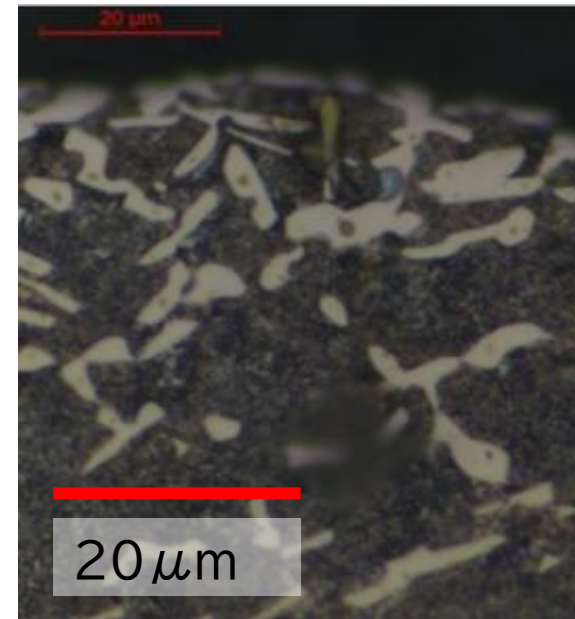
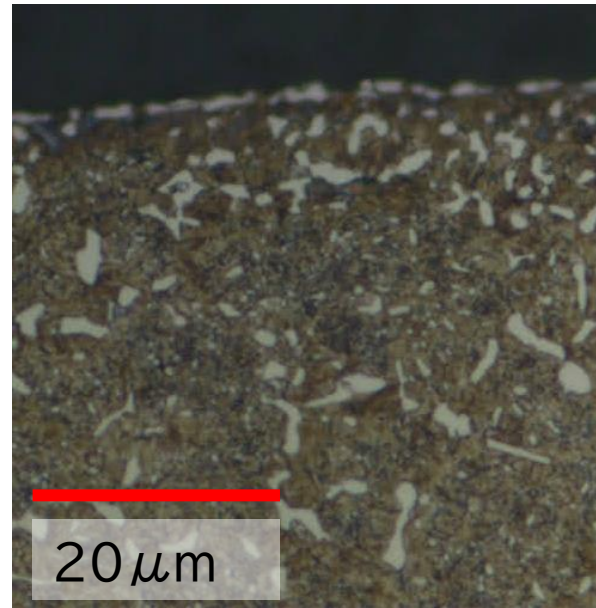
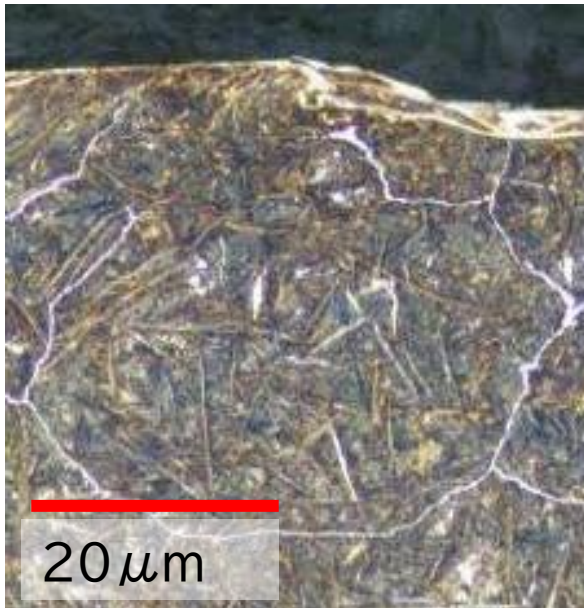


粗大セメンタイトの析出

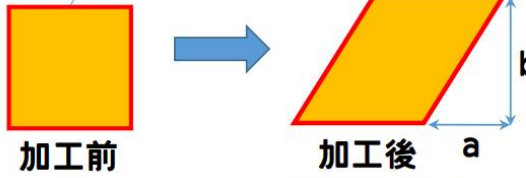
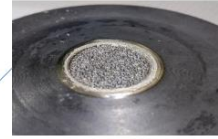
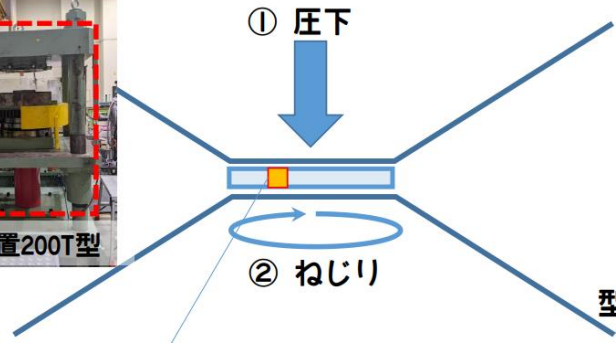
粗大セメンタイトは粒界に析出しているように見える



まずは結晶粒の形態を調べないといけない

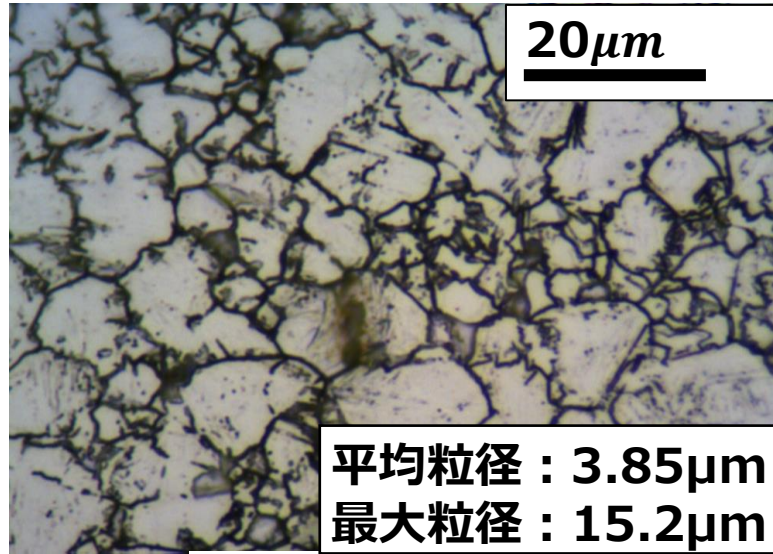


結晶粒粗大化量の調査



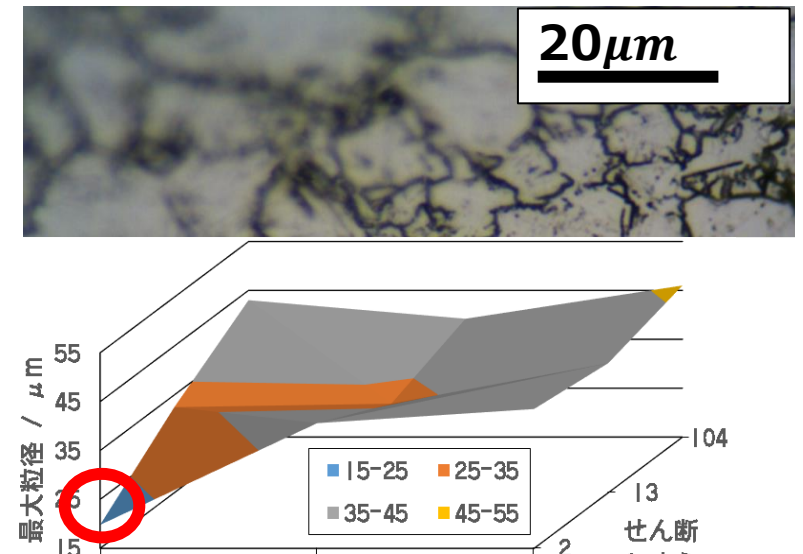
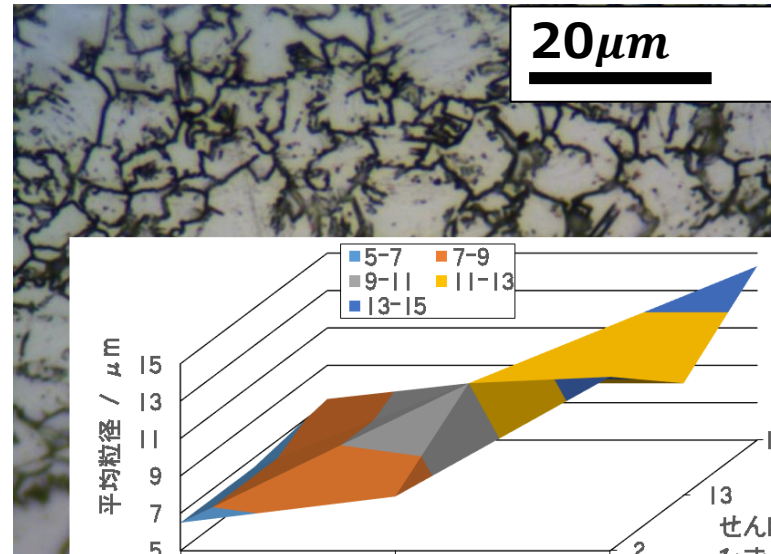
本加工で付与される
ひずみ量： $\sigma = b/a$

SCr420H,
HPT加工後, 930°Cx1.5hr →WQ

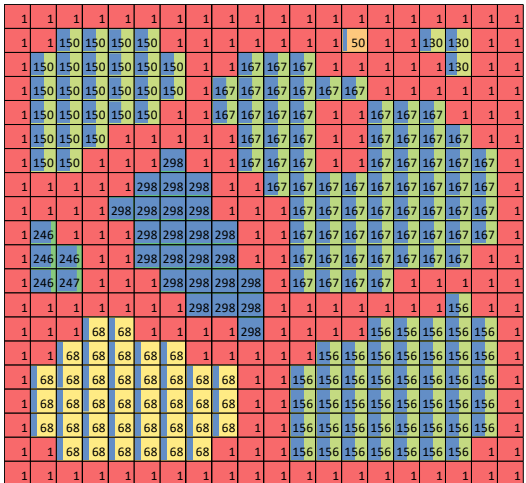


平均粒径：3.85μm
最大粒径：15.2μm

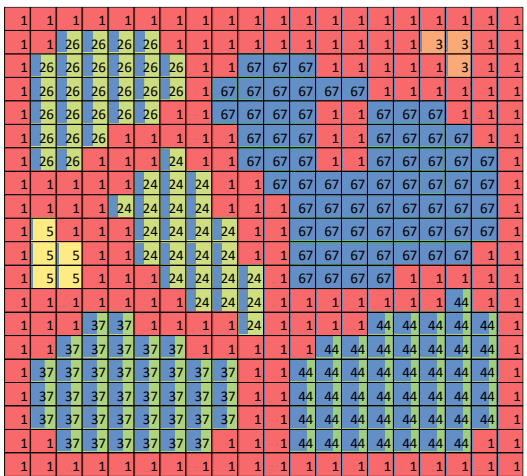
剪断ひずみ0



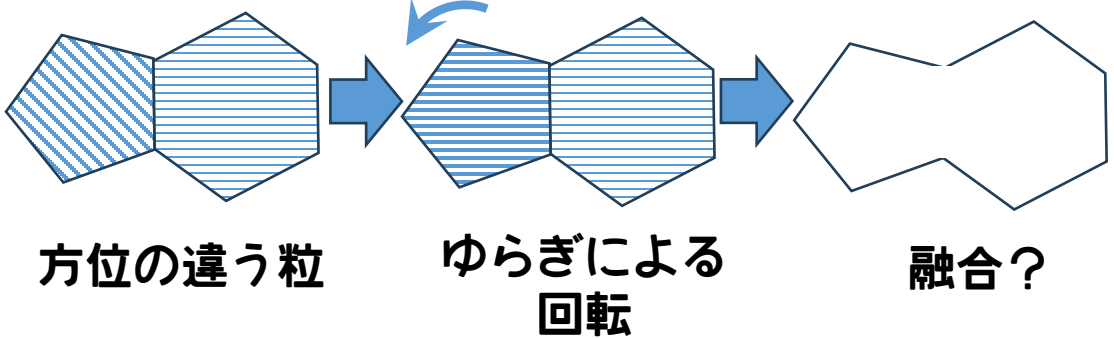
粒に付与したパラメータと粒成長メカニズム



結晶粒方位(ランダムに方位を付与)



結晶粒サイズ



高温顕微鏡観察で粒の融合が見られたため、界面での方位の整合を仮定し、融合をモデリングした

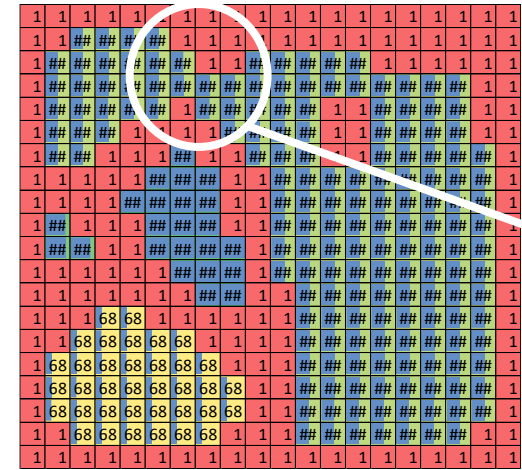
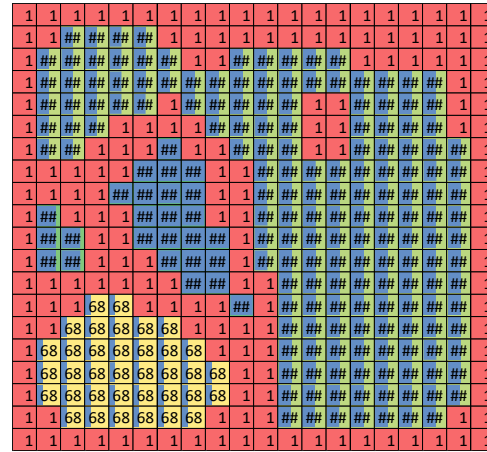
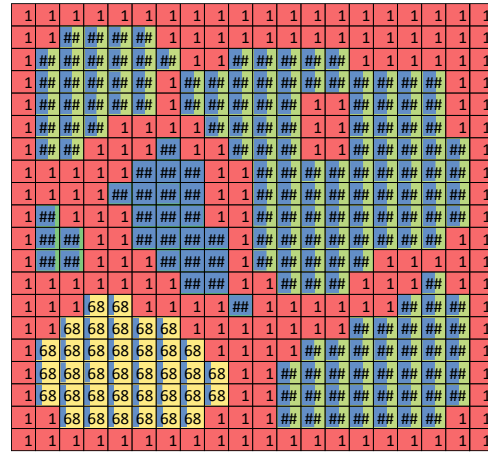
山中晃徳, 粒界移動と粒回転のフェーズフィールドクリスタルシミュレーション, 第29回 計算力学講演会, 2016 を参考

大きな粒の成長に係る表面エネルギー増加は少ないので、大きい粒が隣の粒を侵食して成長が起こる



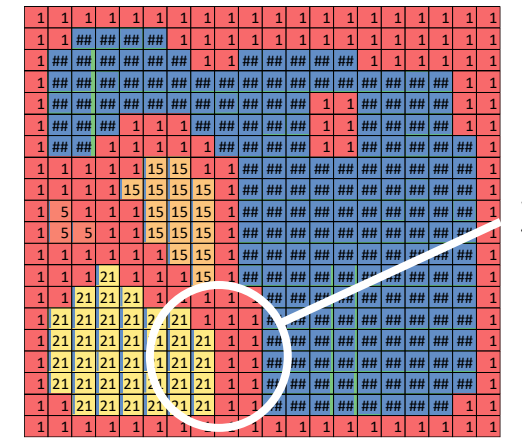
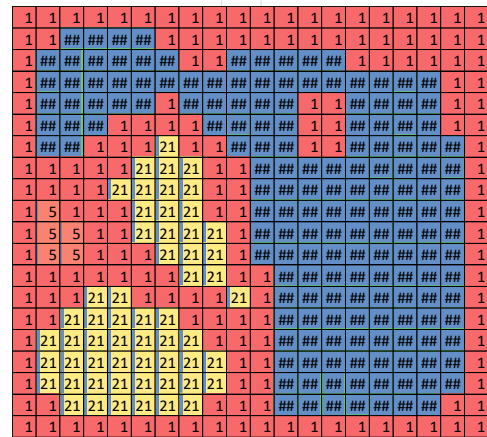
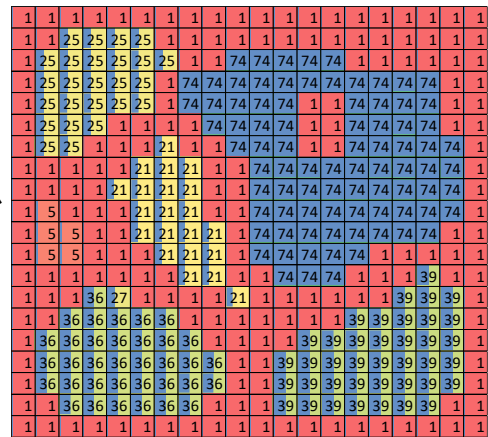
粒成長シミュレーション

粒方位



粒の融合

粒サイズ



粒の縮小

粒界易動度・方位の動きは結果を見ながら調整→今後EBSDで動きを測定し合わせる

10min 20 μm

30min

46min



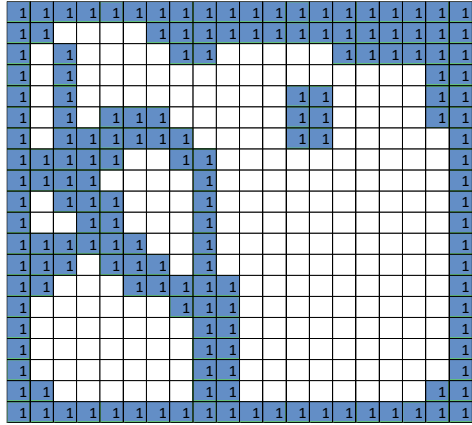


本日の発表の流れ

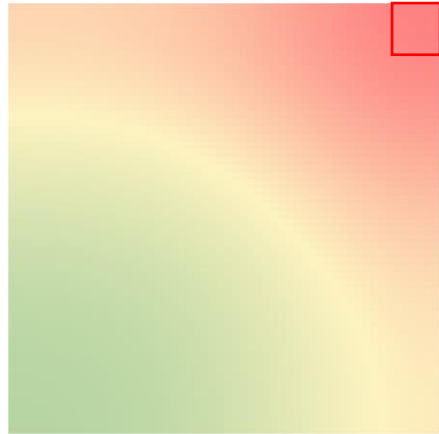
- ✓ 研究の背景
- ✓ 実体形状での減圧浸炭シミュレーション
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション
- ✓ 炭化物ネットワーク形成**
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ まとめ



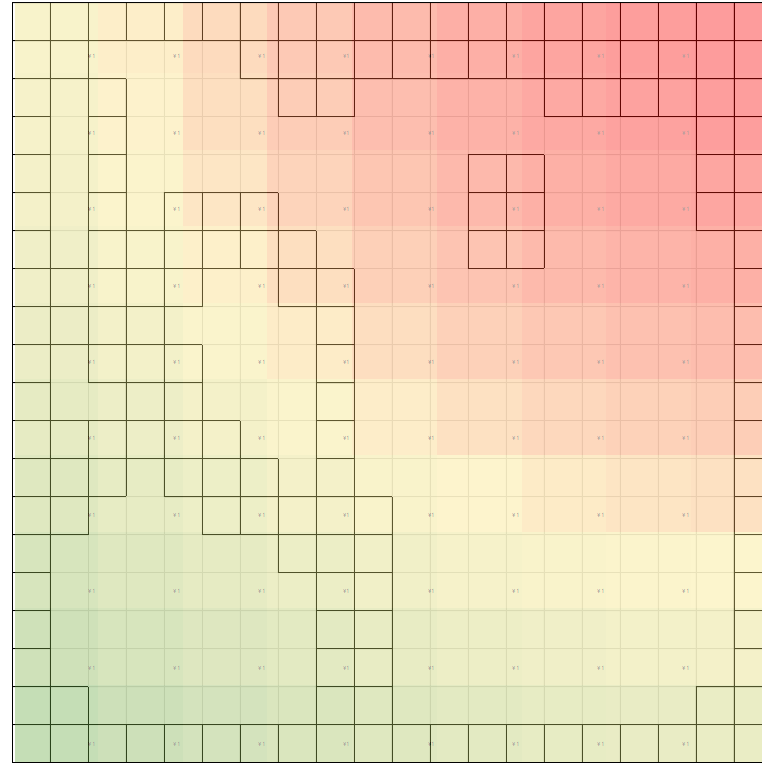
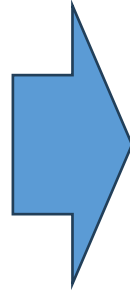
析出予測



粒界予測結果

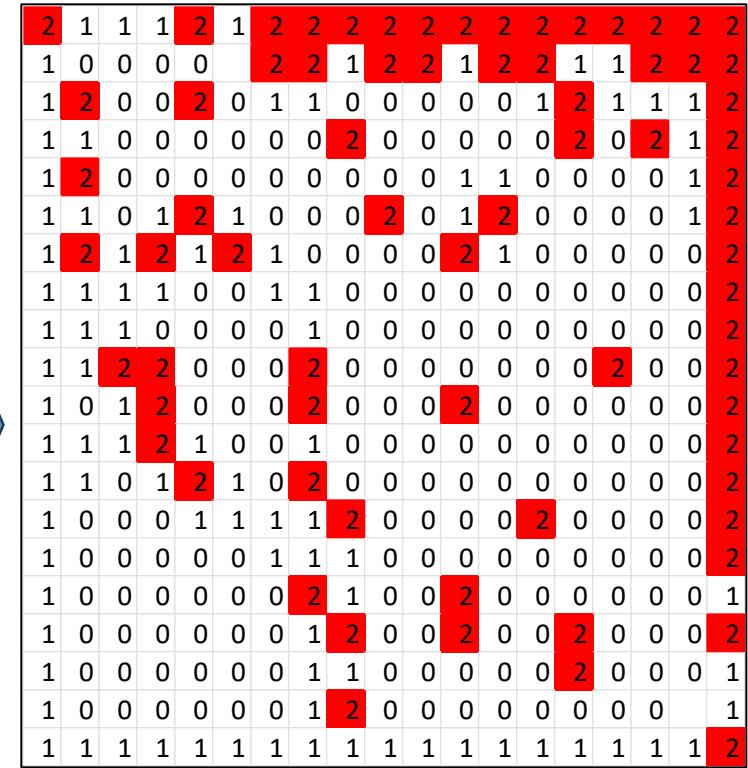


炭素濃度予測結果



粒界→析出速度大，粒内→析出速度小
析出量は炭素濃度で決まる

新井宏，竹田誠一，“ステンレス鋼における炭化物析出の理論解析”，鉄と鋼，72(7)，pp. 123-129



セメンタイト位置が求まった！





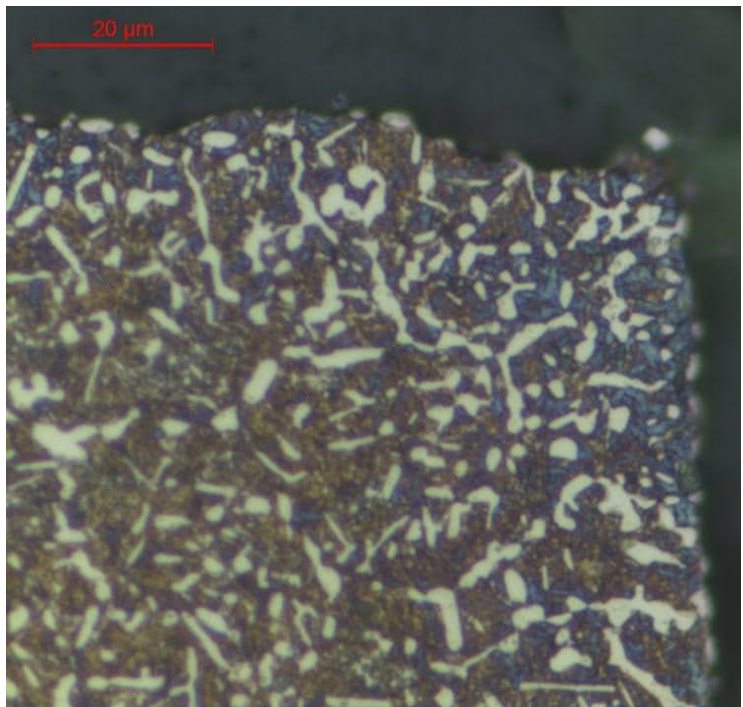
本日の発表の流れ

- ✓ 研究の背景
- ✓ 実体形状での減圧浸炭シミュレーション
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ **実験結果との比較**
- ✓ まとめ



2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	0	0	0	0	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
1	2	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	2
1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	2	1	1	2	
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2
1	1	0	1	2	1	0	0	0	2	0	1	2	0	0	0	0	0	1	2	2
1	2	1	2	1	2	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
1	0	1	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	0	1	2	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	0	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	2	2
1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

シミュレーション 20μm



実験

炭化物位置は予測できたが、

- ・ 粒内析出量が少ない？
- ・ 表面のセメンタイト被覆が正しく計算できない
- ・ 結晶粒サイズが異なっている？



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
- ✓ 結晶粒成長シミュレーション
- ✓ 炭化物ネットワーク形成
- ✓ 実験結果との比較
- ✓ **まとめ**



- 浸炭シミュレーションをベースにしてセメントイト析出形態予測手法を検討できた
- 粒成長，粒回転を仮定し結晶粒成長予測を行った
- ネットワーク炭化物の形成は予測できたが，実物に比較しスケールが異なっていたり，粒内・粒界析出・表面析出があっていない



- 炭化物ができたあと，拡散する計算も必要
- 結晶粒成長のパラメータ修正
- 浸炭中析出に関しても検討を進める。
- EBSD観察等の実態観察により，浸炭焼入時の粒回転を証明する

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