

マイクロ組織に基づくフェライト・セメンタイト鋼の脆性破壊発生
予測

柴沼 一樹
東京大学
大学院工学系研究科

マイクロ組織に基づくフェライト・セメンタイト鋼の脆性破壊発生予測

柴沼 一樹

東京大学・大学院工学系研究科システム創成学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

shibanuma@struct.t.-u-tokyo.ac.jp

近年、構造物に使用される鋼材の高張力化や使用環境の過酷化が進み、構造材料において従来より高い破壊抵抗特性、すなわち靱性が鋼材に要求されている。特に、脆性破壊は突発的に発生した後、不安定的な亀裂の伝播を伴い、構造物に大規模な損害を及ぼす可能性があることから確実に防止する必要がある。

従来から、鋼の靱性はマイクロ組織を構成する結晶粒の微細化により向上するだけでなく、セメンタイトなどの脆い第2相の寸法によっても靱性が変化することは広く知られている。しかしながら、その理由は必ずしも明確ではなく、マイクロ組織と脆性破壊靱性の関係を解明すると共に、そのばらつきを含めて精度よく靱性を推定することは実用上重要な課題である。この課題の解決には、破壊の素過程に立脚した数値モデルの構築が有用であると考えられる。本研究では、最も基本的なフェライト・セメンタイト鋼を対象として、そのマイクロ組織情報のみを用いて靱性を定量的に予測するための数値モデルを提案する。

本研究では、**Stage-I**:セメンタイト割れによる亀裂の核生成、**Stage-II**:セメンタイト割れのフェライト・マトリクスへの伝播によるへき開面の形成、**Stage-III**:へき開による亀裂のフェライト結晶粒界突破、という微視的な3段階の破壊条件が連続的に満足された場合に巨視的な脆性開破壊が生じると仮定した。

まず、**Stage-I**の破壊条件に関して、セメンタイト割れに与える影響因子を実験的に定量化するために、マイクロ組織寸法を系統的に変化させた供試鋼を用いて切欠付引張試験を実施した。作用ひずみ・応力に対するセメンタイト粒の割れ個数の計測することで、任意の鋼に対して統一的に適用可能なセメンタイト割れ率の定式化を行った。次に、**Stage-II**の破壊条件として、**Petch**の提案した破壊応力を仮定した。これはセメンタイト割れがフェライト粒に伝播する際の堆積転位と亀裂によるエネルギー解放率を破面形成エネルギーと比較することで定式化されたものである。最後に、**Stage-III**の破壊条件として、有効表面エネルギーに関する温度依存性を考慮した上で、円形亀裂に対する**Griffith**の条件を仮定した。

以上の破壊条件を考慮した数値モデルを構築するために、破壊発生起点となりうる領域をアクティブゾーンとして定義し、それを有限個の体積要素に離散化した。各体積要素にフェライト結晶粒およびセメンタイト粒の分布を与えた。各体積要素における作用応力・ひずみの推移を**FEM**によるマクロ解析によって評価し、体積要素が1個でも上記3段階の破壊条件を連続して満足した場合、その時点で巨視的な脆性破壊が発生すると仮定した。

本モデルを複数の小型切欠付3点曲げ試験に適用した結果、各試験温度の破壊靱性値を定量的に推定できる可能性が示唆された。この結果より、本研究で提案したフェライト・セメンタイト鋼の脆性破壊の靱性予測モデルは、材料のマイクロ組織情報と応力・ひずみ曲線のみを用いて、脆性破壊靱性を定量的かつ高精度に予測可能であり、破壊靱性に及ぼすマイクロ組織の影響を評価する上で有用であることが明らかとなった。

ミクロ組織に基づく フェライト・セメンタイト鋼の 脆性破壊発生予測

東京大学 大学院工学系研究科
システム創成学専攻

柴沼 一樹

発表項目

1. 研究背景・目的

- ・ 構造材料の破壊靱性予測
- ・ 理論・実験・計算力学の融合

2. 亀裂核生成の実験的定量化

3. 脆性破壊靱性予測モデルの構築

4. 破壊靱性試験の再現解析

5. 結論

1. 研究背景・目的

構造材料の破壊靱性予測

高負荷条件下での構造物の使用が進み、
材料・構造の**破壊信頼性確保**が重要な課題となっている



例えば

国際的な海上物流量の増大

↓
コンテナ船の大型化
(コンテナ積載数10,000個以上)

↓
75mm以上となる極厚の
高強度鋼板の使用

↓
脆性破壊の危険性の増加

最近の大規模損傷事例

コンテナ船海難事故(2013年6月17日)

荒天下のインド洋を航行中、船体中央部に亀裂が発生し、船体は真っ二つに破断。その後約1ヵ月間漂流し沈没。積荷コンテナ4,382も海没。人的被害はなし。現在原因調査中。



脆性破壊に関係した事故の可能性

構造安全性を保証する確固たる基準の策定は海洋立国を目指す我が国にとって極めて重要な喫緊の課題

Maritime Danmark (<http://www.maritimedanmark.dk/>)

構造材料の破壊靱性予測

脆性破壊(へき開破壊)

- 突発的に発生
- 不安定亀裂伝播

へき開破壊の発生条件



作用応力
・ひずみ

- 負荷応力・ひずみ
- 溶接残留応力

靱性

へき開破壊に対する材料の抵抗値

「定量的な予測」は極めて重要

- 低靱性
- ミクロ組織
 - 低温
 - 衝撃
 - 溶接熱影響
- 応力集中
- 切欠き
 - 亀裂状欠陥
 - 疲労損傷

構造材料の破壊靱性予測

「マイクロ組織」と「靱性」の関係 → **経験的**

- 最弱リンク仮説に基づく定式化
Bereminモデル(ローカルアプローチ)

連続体力学に基づく定式化であり
組織と靱性の関係に解を与える
ものではない

- 転位論など微視的機構に基づく
定式化

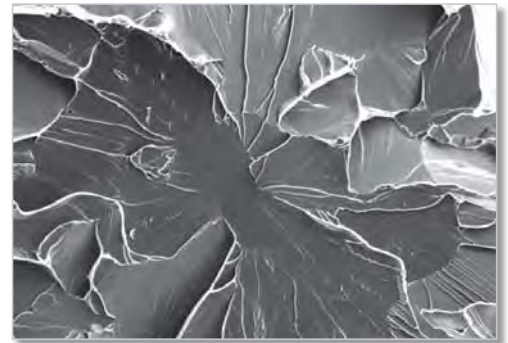
Smithモデル, Petchモデルなど
実用十分な精度で靱性を推定可能
とは言い難い

n 個の直列リング

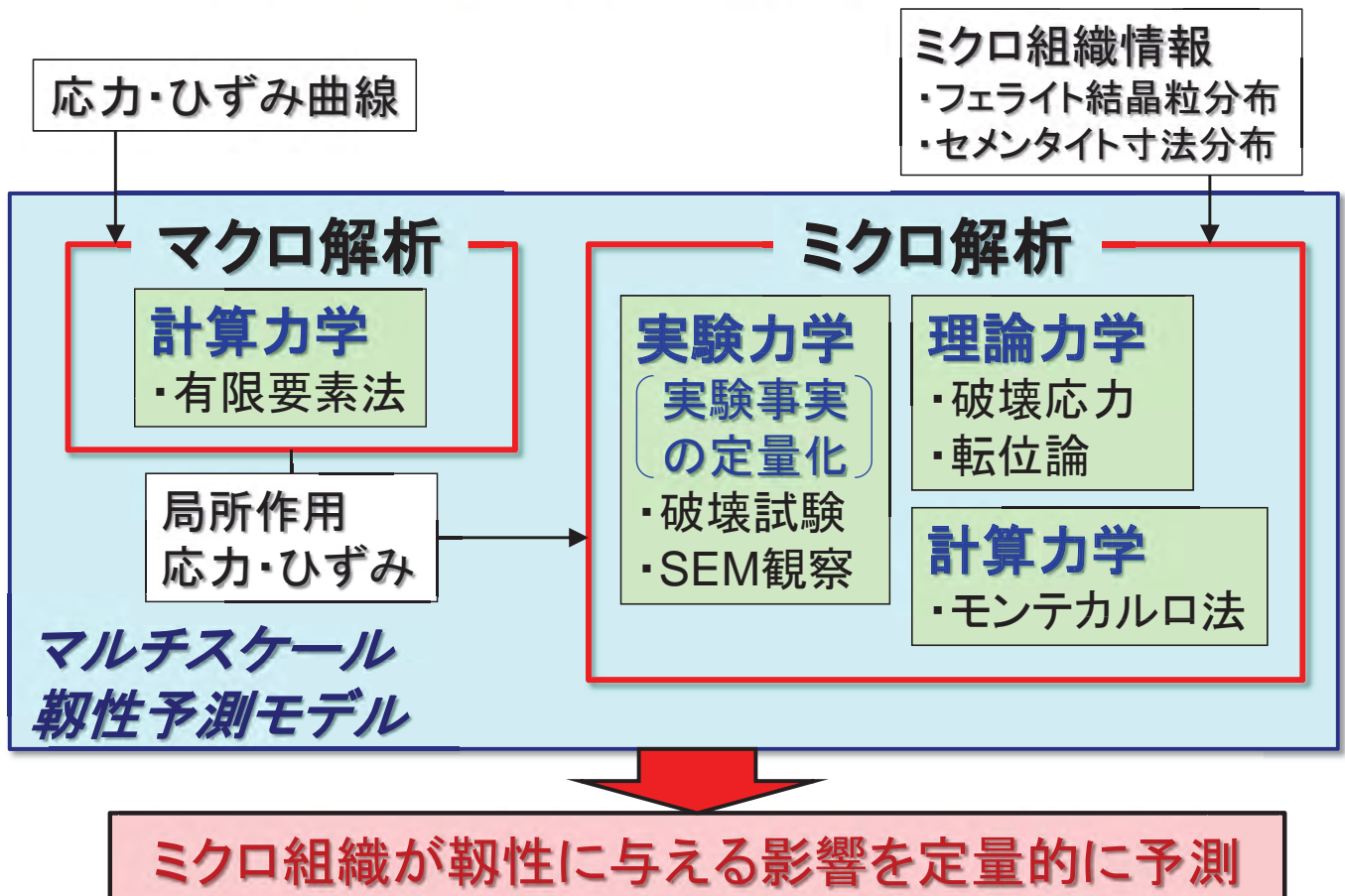


個々の破壊確率 $P_i(\sigma)$

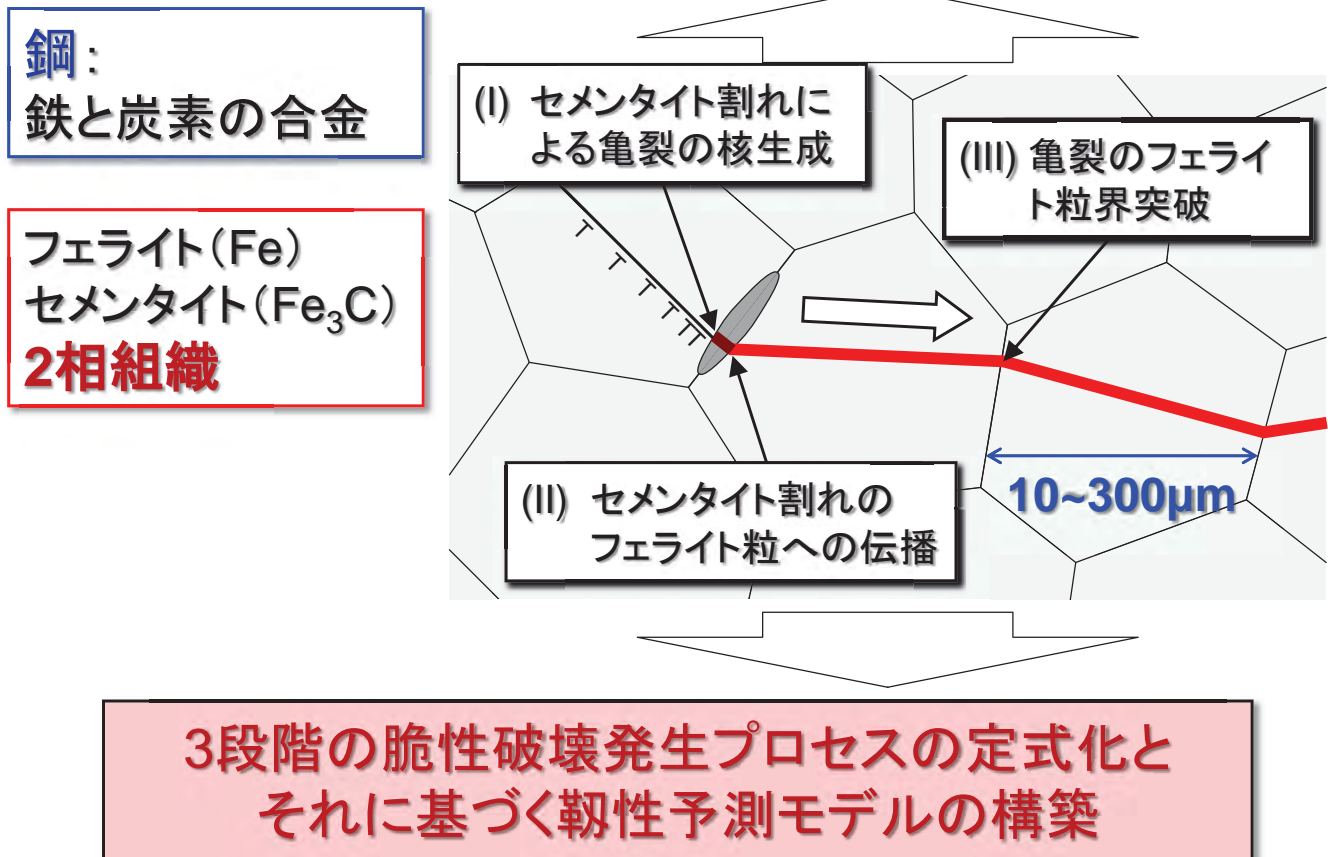
$$\text{破壊確率 } P = 1 - \{1 - P_i(\sigma)\}^n$$



理論・実験・計算力学の融合



脆性破壊発生マイクロプロセス



2. 亀裂核生成の実験的定量化

供試鋼

• 化学成分

(mass%)

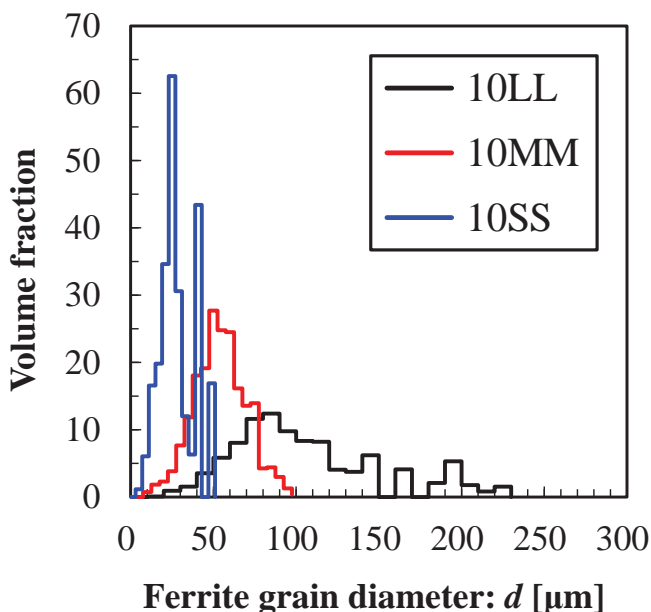
Symbol	C	Si	Mn	P	S	Al	N
10	0.10	0.06	0.49	< 0.002	0.0005	0.010	0.0011
5	0.05	0.05	0.48	< 0.002	0.0003	0.010	0.0014

• 供試鋼の種類

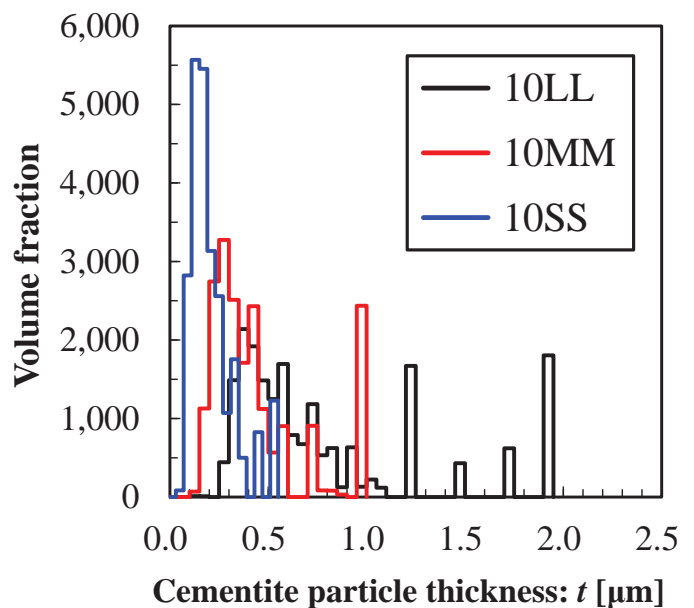
Cementite particle thickness	Ferrite grain size	
	Large	Small
Large	10LL	5SL
↕	10LM	10MM
Small	10LS	10SS / 5SS

供試鋼

フェライト結晶粒径分布およびセメントイト寸法分布の例



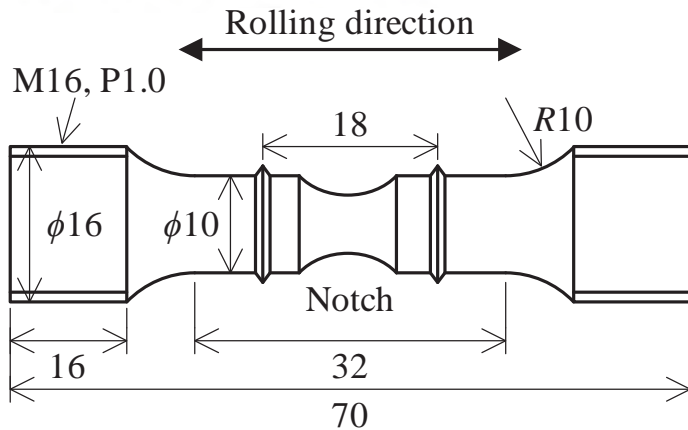
フェライト結晶粒径分布



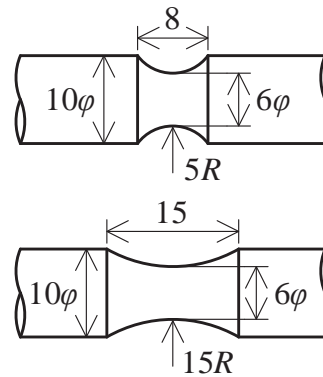
セメントイト寸法分布

実験方法

切欠付き引張試験片

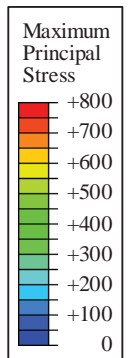
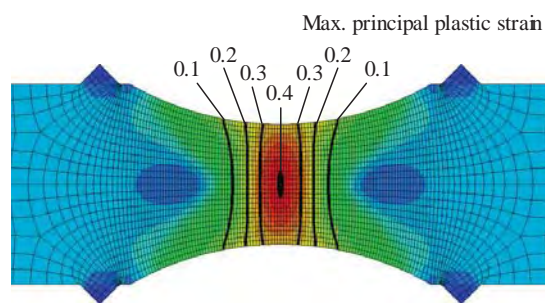


Detail of notch

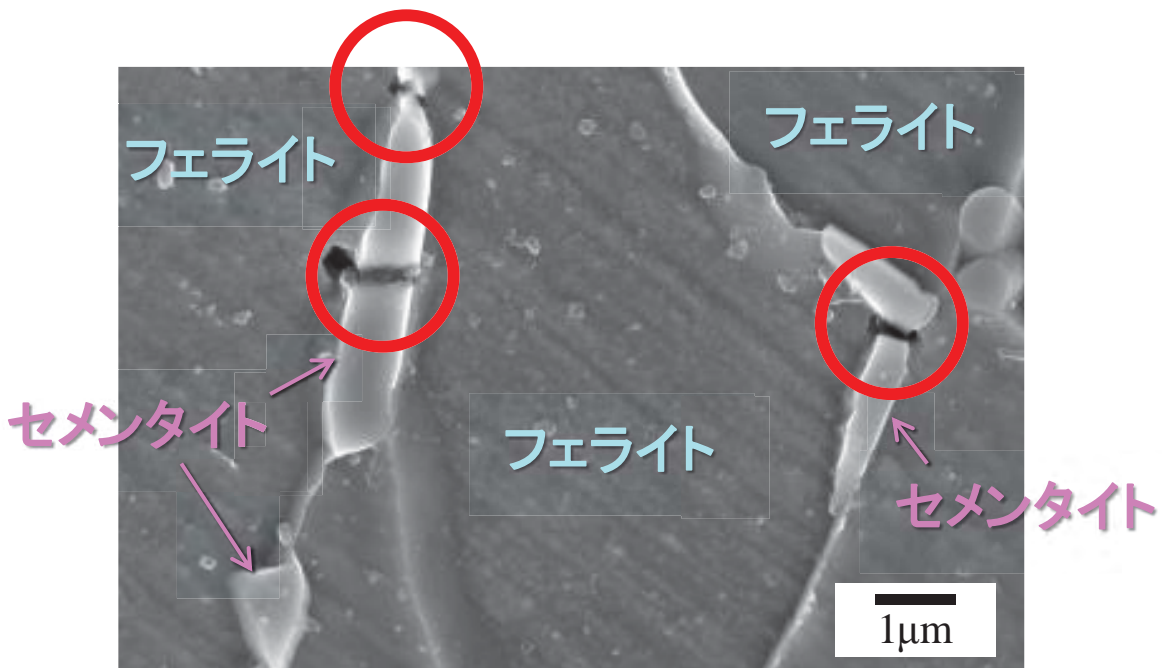


Unit: [mm]

- 事前のFEM解析で試験片中央部のひずみが40%となる条件を算定
- 試験片断面から複数の応力・ひずみのレベルに関するSEM組織観察を実施



セメント割れ計測



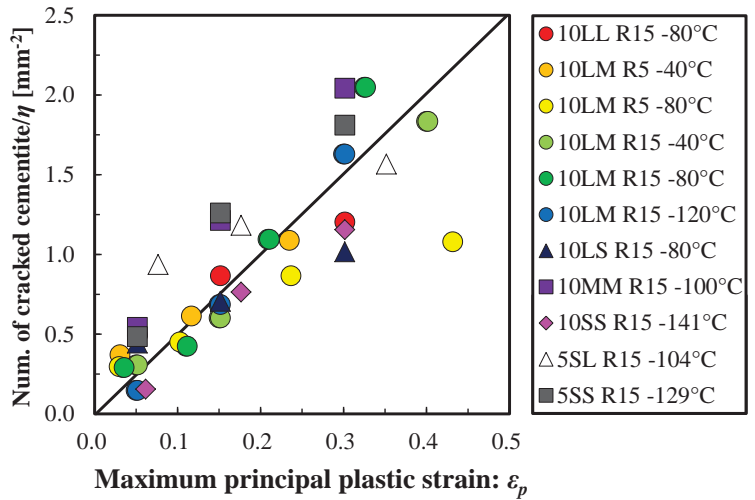
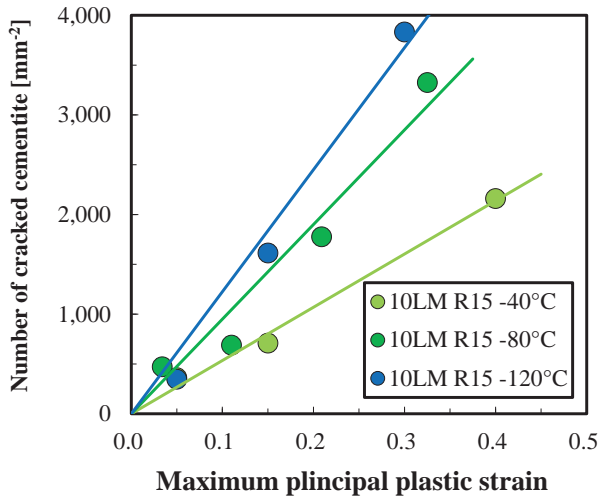
各条件に関して16 ~ 105視野のSEM画像を解析
(供試鋼の種類, ひずみ, 温度)

セメントait割れの定量化

負荷応力で正規化



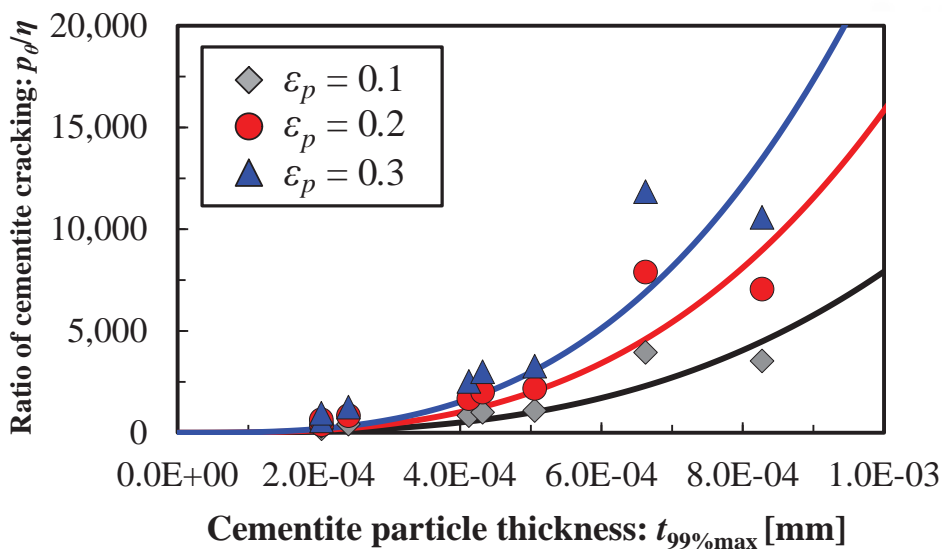
η : (負荷応力) × (炭素重量率)



セメントaitの割れ個数: $N_\theta = 5.04 \times 10^9 \eta \varepsilon_p$

セメントait割れの定量化

(セメントaitの割れ率) = $\frac{\text{(セメントait割れ個数)}}{\text{(全セメントait個数)} [\text{単位面積当たり}]}$



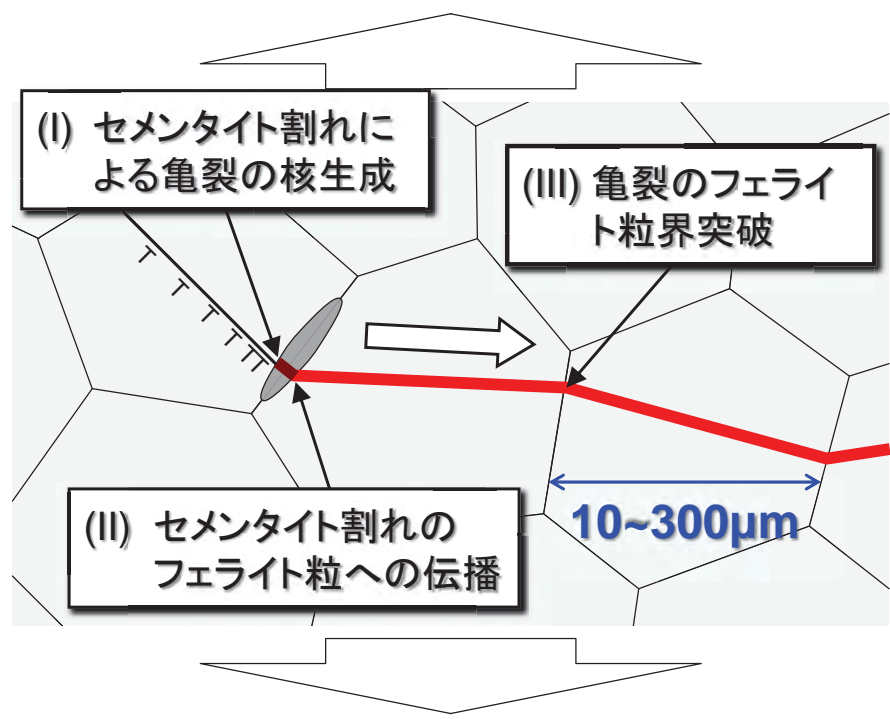
$$p_\theta = 7.92 \times 10^{13} \varepsilon_p \eta t_{99\%max}^3$$

3. 脆性破壊靱性予測モデルの構築

脆性破壊発生のプロセス

鋼：
鉄と炭素の合金

フェライト(Fe)
セメンタイト(Fe_3C)
2相組織



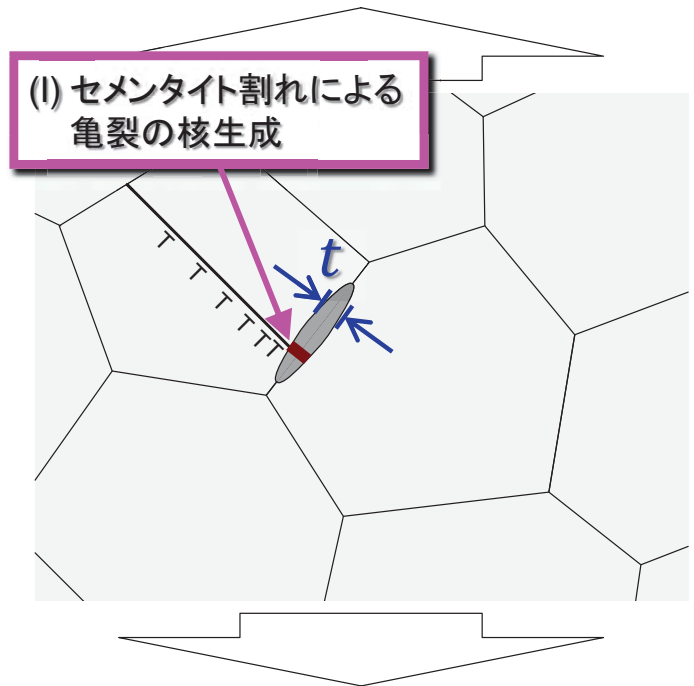
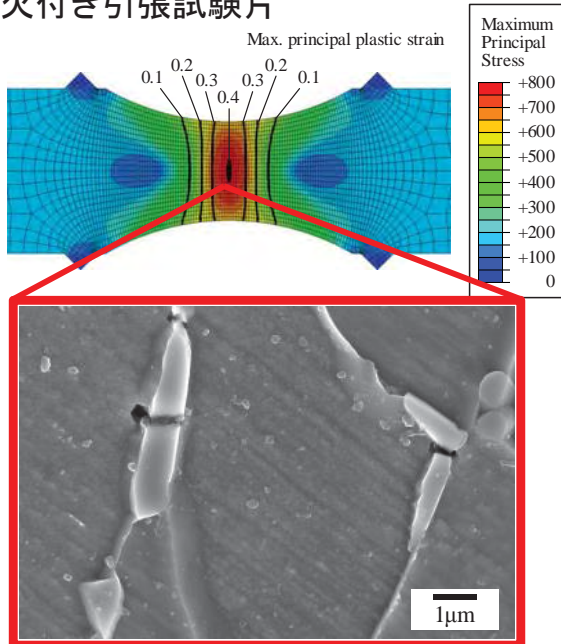
3段階の脆性破壊発生プロセスの定式化と
それに基づく靱性予測モデルの構築

破壊発生マイクロプロセスの定式化

Stage (I) セメント割れによる亀裂の核生成

様々なセメント寸法を有する鋼を使用してセメント割れを計測

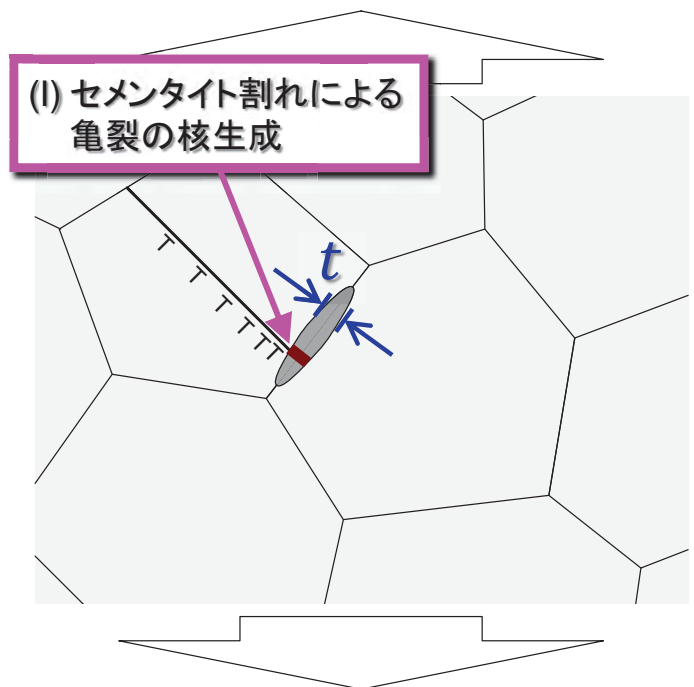
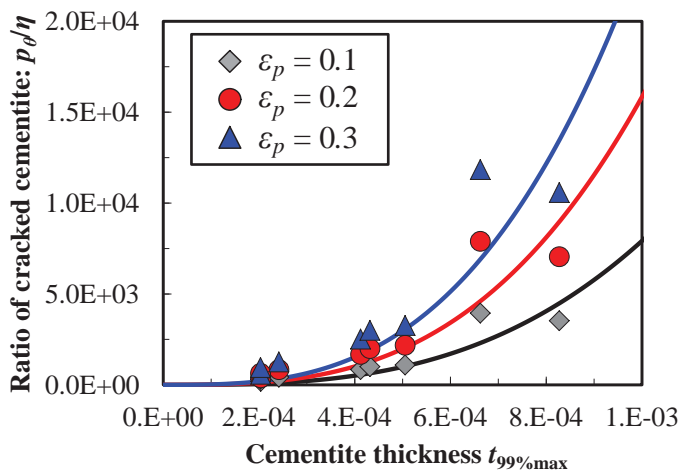
切欠付き引張試験片



破壊発生マイクロプロセスの定式化

Stage (I) セメント割れによる亀裂の核生成

セメント寸法と作用ひずみで定量化



セメントの割れ率

$$p_\theta = 7.92 \times 10^{13} \eta \epsilon_p t^3$$

破壊発生マイクロプロセスの定式化

Stage (II) セメント割れによるフェライト粒への伝播

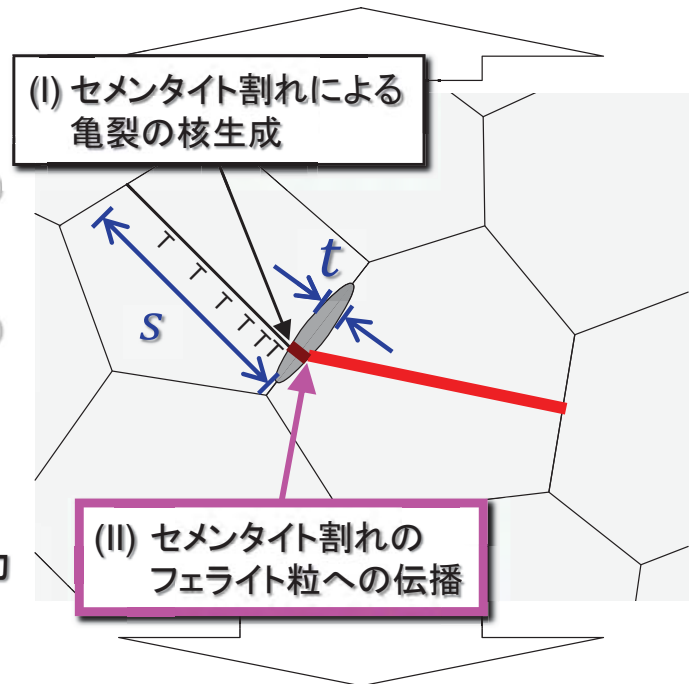
Petchの破壊応力(1986)

$$\sigma_{F\theta\alpha} = \begin{cases} \frac{4E\gamma\theta\alpha}{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)(1 - \nu^2)k_y\sqrt{s}} & (t < c_c) \\ \sqrt{\frac{4E\gamma\theta\alpha}{\pi(1 - \nu^2)t} - \frac{k_y^2 s}{8\pi^2 t^2} - \frac{k_y\sqrt{s}}{2\sqrt{2}\pi t}} & (t \geq c_c) \end{cases}$$

σ_n : 結晶粒の{100}面に作用する垂直応力

破壊条件

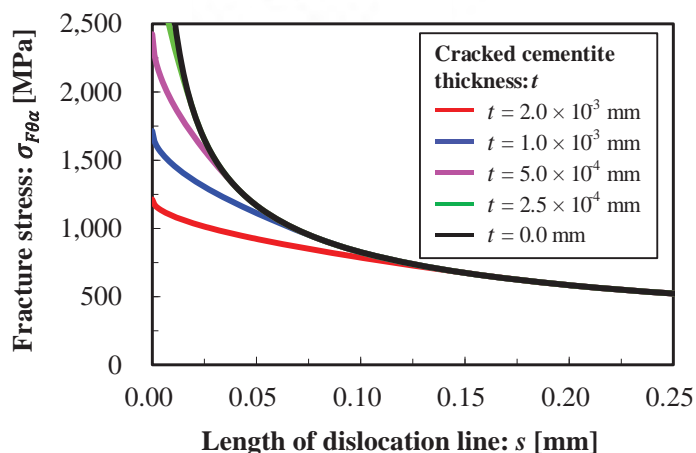
$$\sigma_n > \sigma_{F\theta\alpha}$$



破壊発生マイクロプロセスの定式化

Stage (II) セメント割れによるフェライト粒への伝播

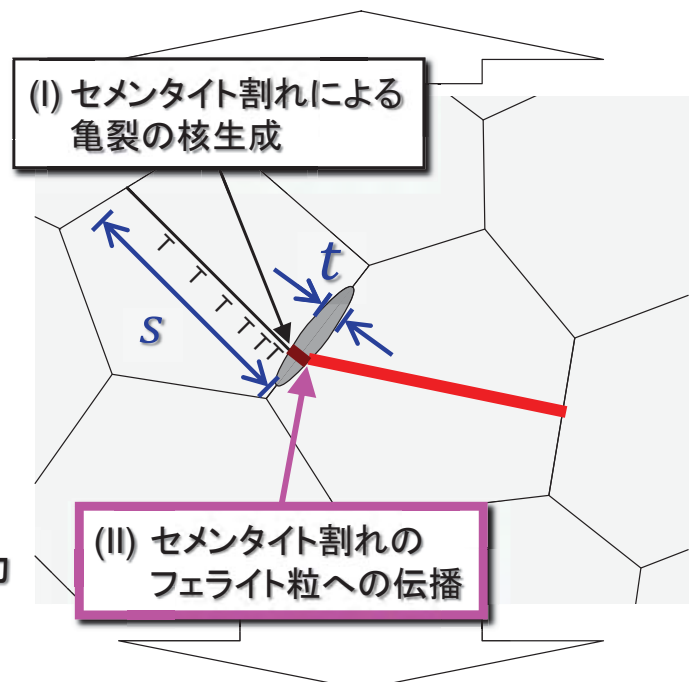
Petchの破壊応力(1986)



σ_n : 結晶粒の{100}面に作用する垂直応力

破壊条件

$$\sigma_n > \sigma_{F\theta\alpha}$$



破壊発生マイクロプロセスの定式化

Stage (III) 亀裂のフェライト粒界突破

Griffith理論に基づく破壊応力

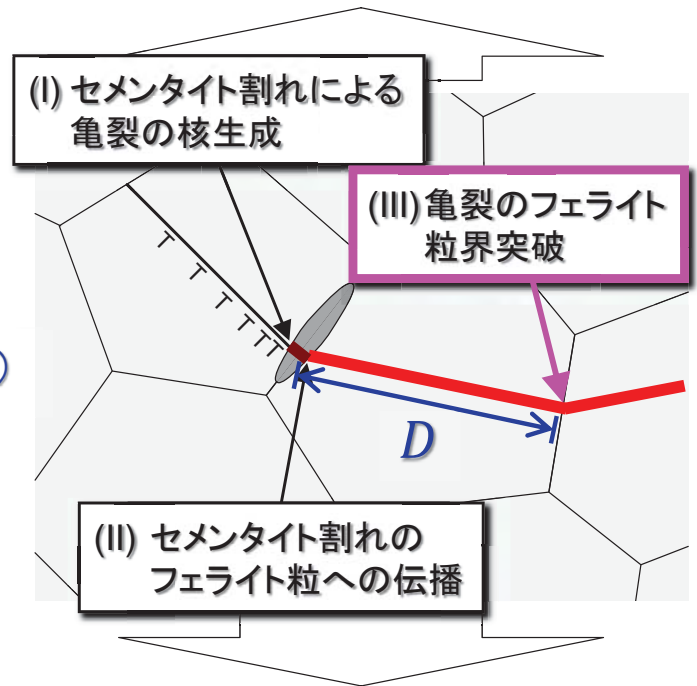
$$\sigma_{F\alpha\alpha} = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_{\alpha\alpha}}{(1 - \nu^2) D}}$$

$\gamma_{\alpha\alpha}$: 有効表面エネルギー(温度依存性)

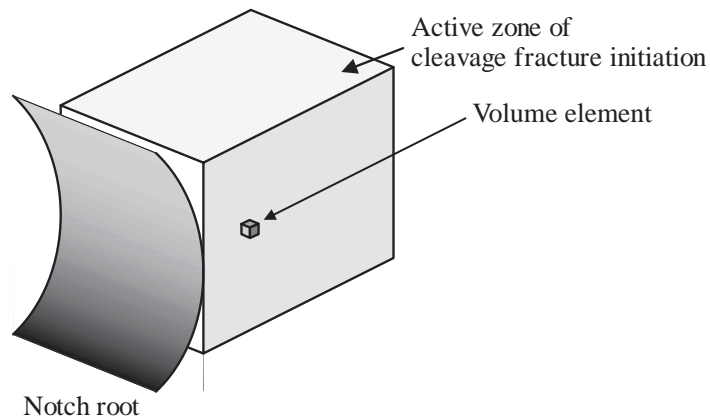
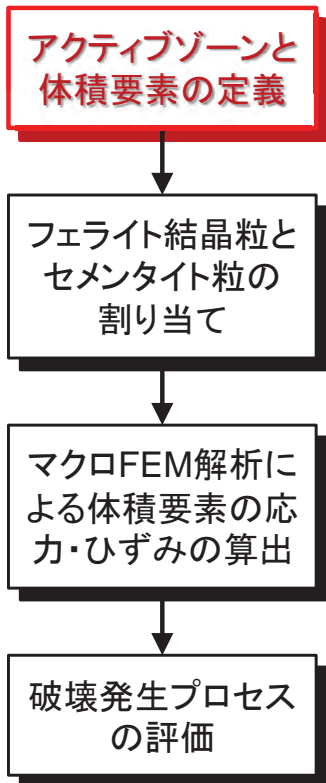
σ_n : 結晶粒の{100}面に作用する垂直応力

破壊条件

$$\sigma_n > \sigma_{F\alpha\alpha}$$



数値モデルの構築



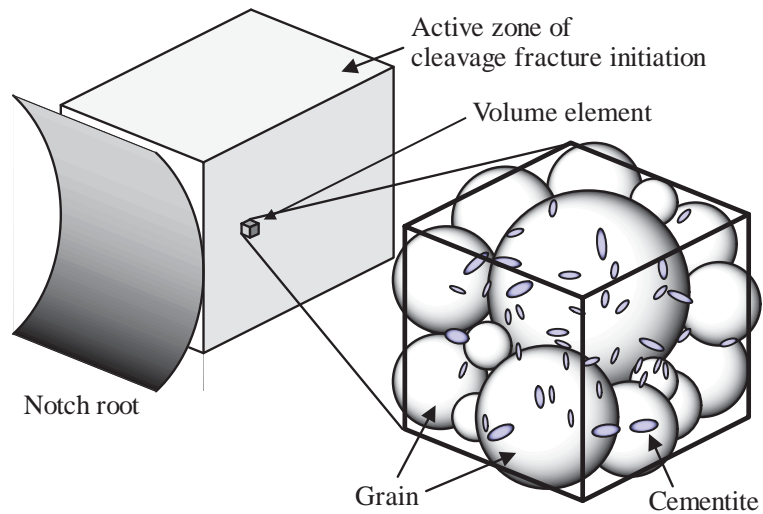
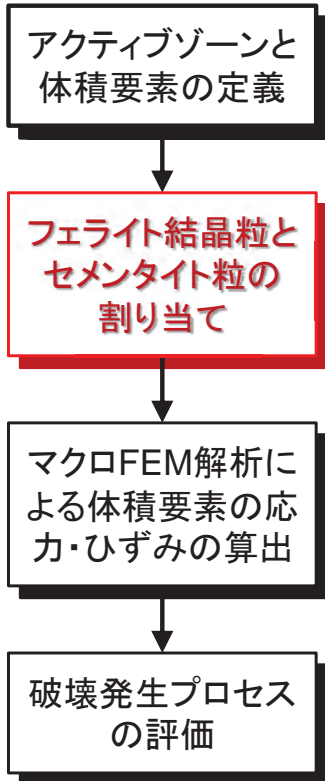
アクティブゾーン:

構造・試験片において脆性破壊発生の可能性がある範囲(応力集中部)として定義

体積要素:

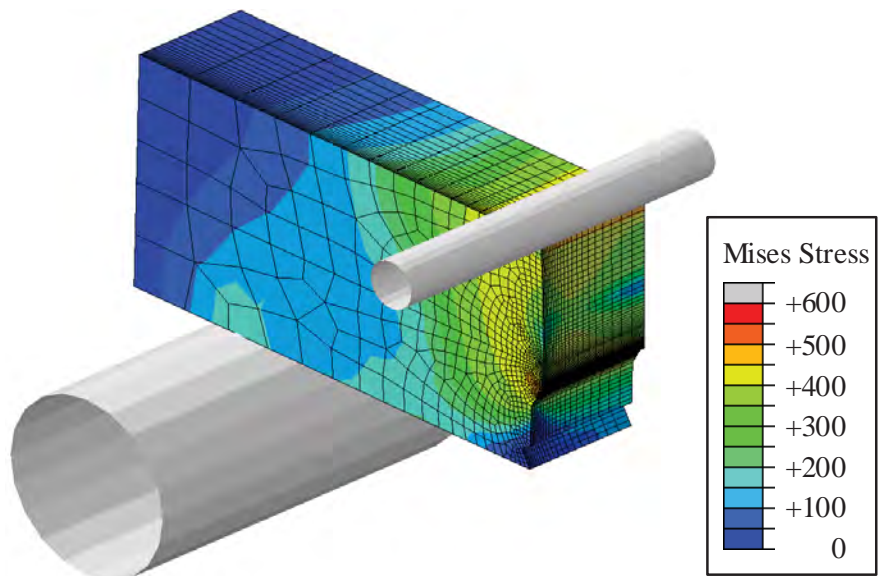
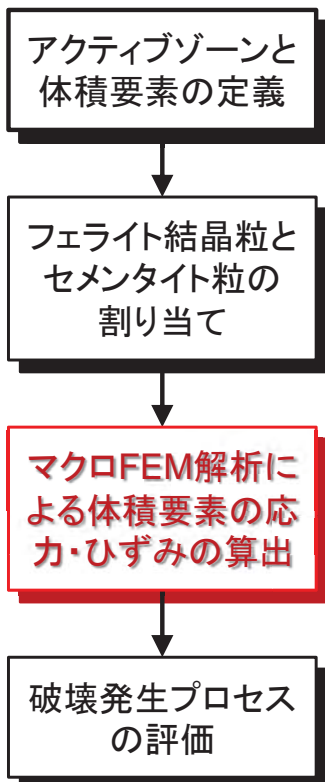
3段階の破壊発生プロセスを評価する単位領域としてアクティブゾーンを離散化

数値モデルの構築



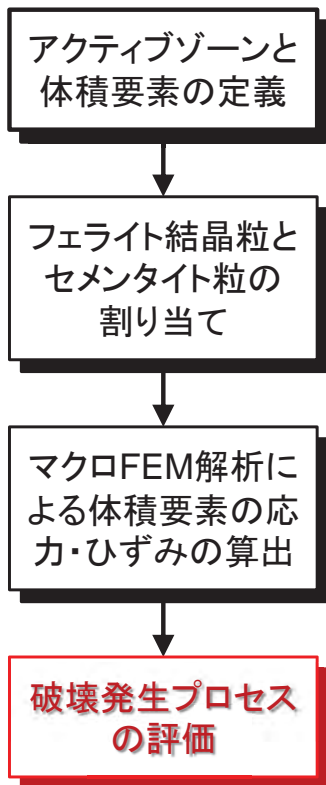
- 各体積要素にフェライト結晶粒およびセメンタイト粒をそれぞれの粒径分布に従ってランダムに割り当てる(モンテカルロ法)
- フェライト結晶粒の結晶方位(オイラー角)もランダムに割り当てる

数値モデルの構築

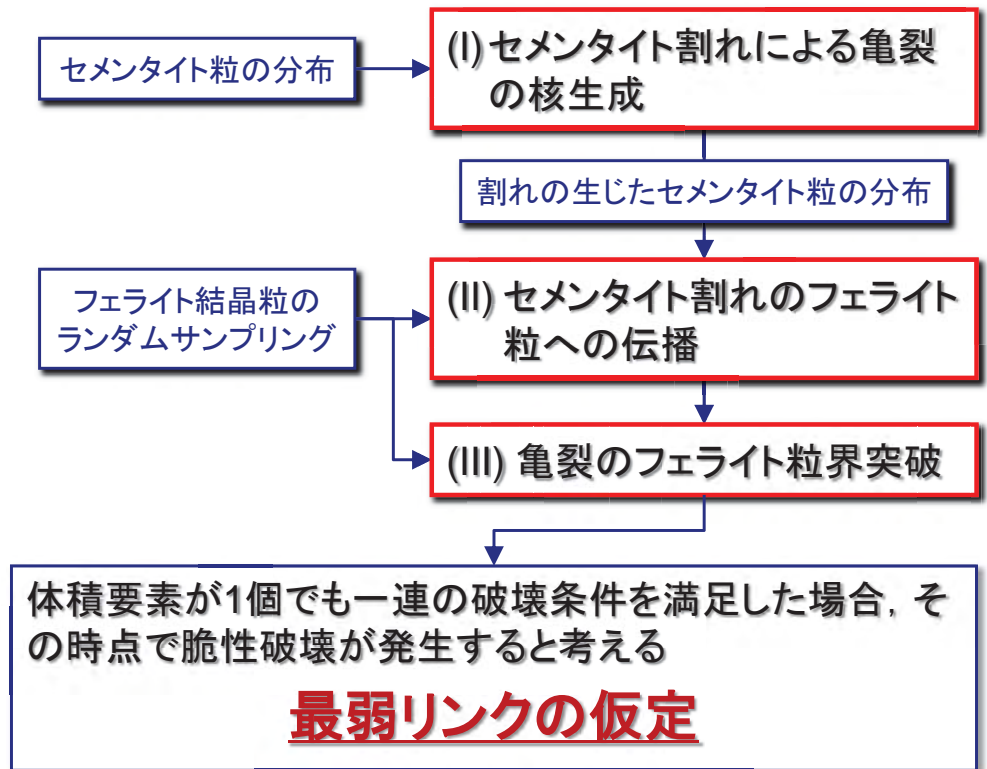


- 応力・ひずみ曲線を使用して、マクロスケールの有限要素解析を実施
- 各体積要素の作用応力・ひずみの推移を計算し、マイクロモデルと連成

数値モデルの構築

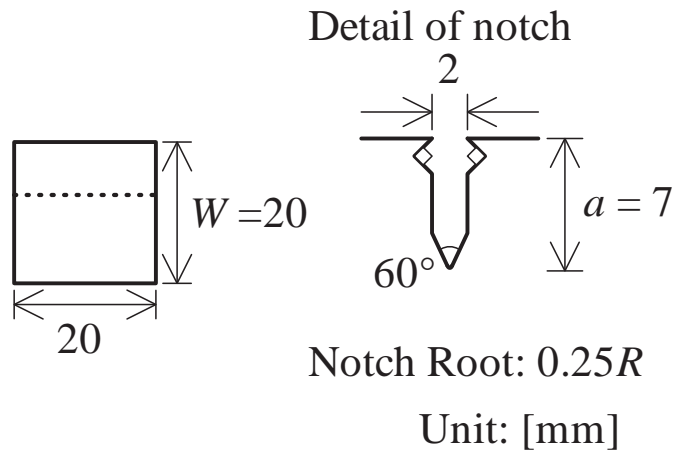
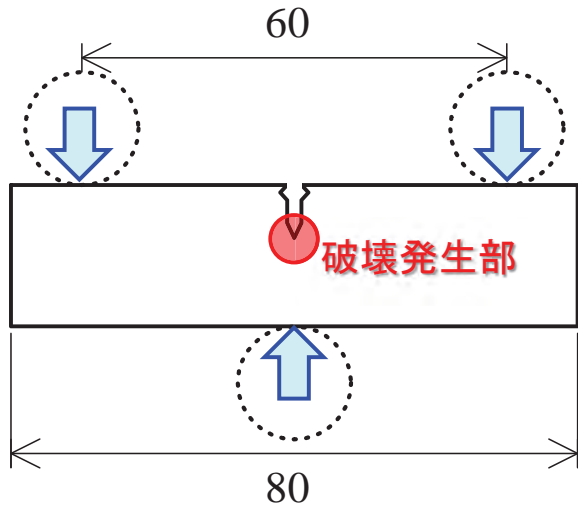


各体積要素の3段階の破壊発生プロセス評価



4. 破壊靱性試験の再現解析

準CTOD試験



供試鋼:

Cementite size	Ferrite grain size	
	Large ←	→ Small
Large ↑	10LL	5SL
Small ↓	10LS	5SS

靱性(準CTOD):

$$\delta = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{2\sigma_Y E} + \frac{r_p(W - a)V_p}{r_p(W - a) + a}$$

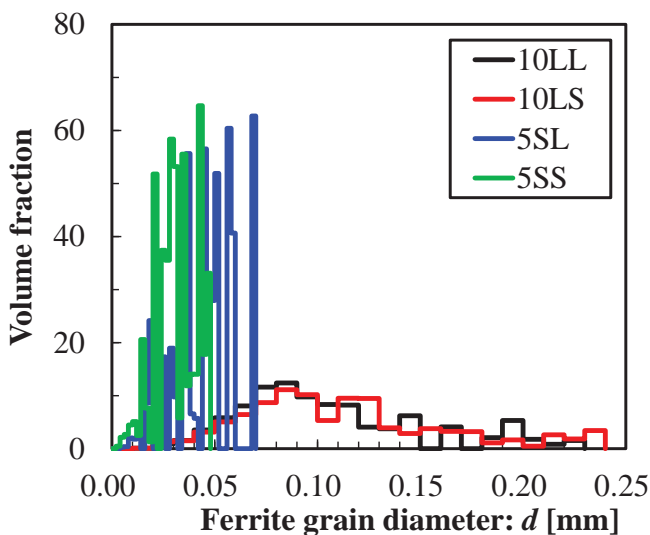
※ 疲労予亀裂はなし

供試鋼

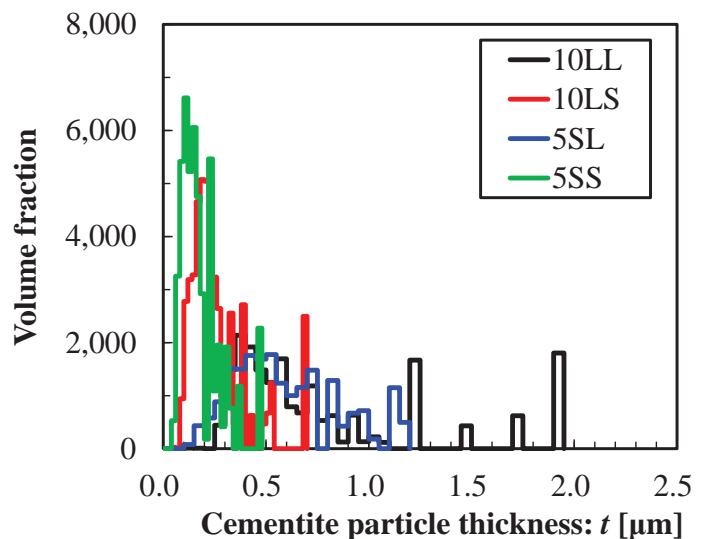
化学成分

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Al	N
10	0.10	0.06	0.49	< 0.002	0.0005	0.010	0.0011
5	0.05	0.05	0.48	< 0.002	0.0003	0.010	0.0014

Cementite size	Ferrite grain size	
	Large ←	→ Small
Large ↑	10LL	5SL
Small ↓	10LS	5SS



フェライト結晶粒分布



セメント粒短径分布

数値モデル設定条件

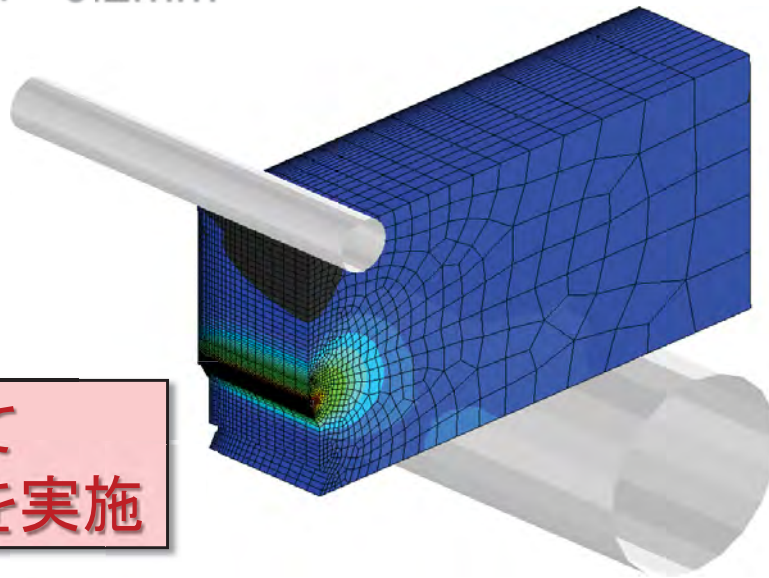
アクティブゾーンサイズ:
1.5mm × 0.7mm × 20mm

体積要素サイズ:
0.2mm × 0.2mm × 0.2mm

体積要素数:
3,570

マクロFEMモデル:
1/4 対象モデル

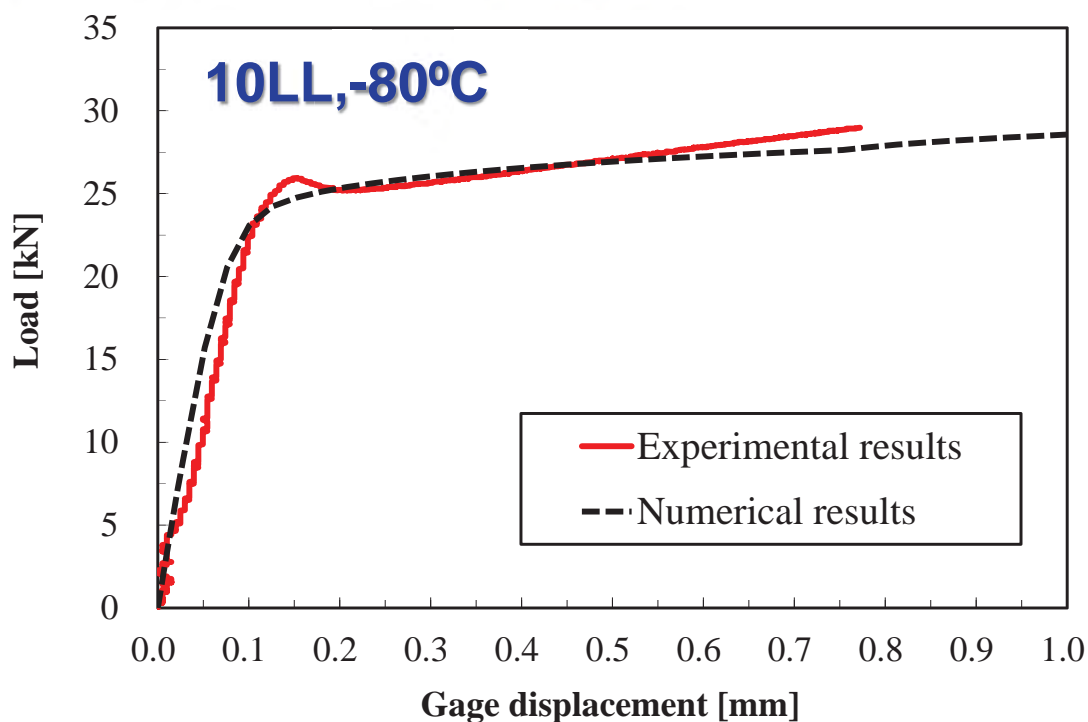
節点数: 22,540
要素数: 19,844



上記条件にて
靱性の予測を実施

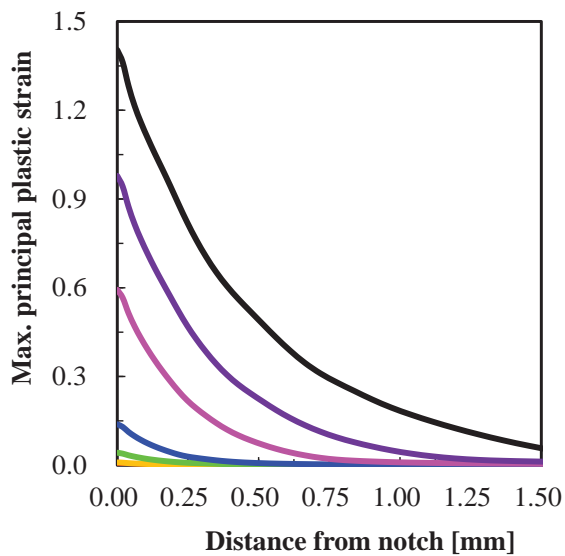
FEMモデルの妥当性

荷重-クリップゲージ変位曲線の一例

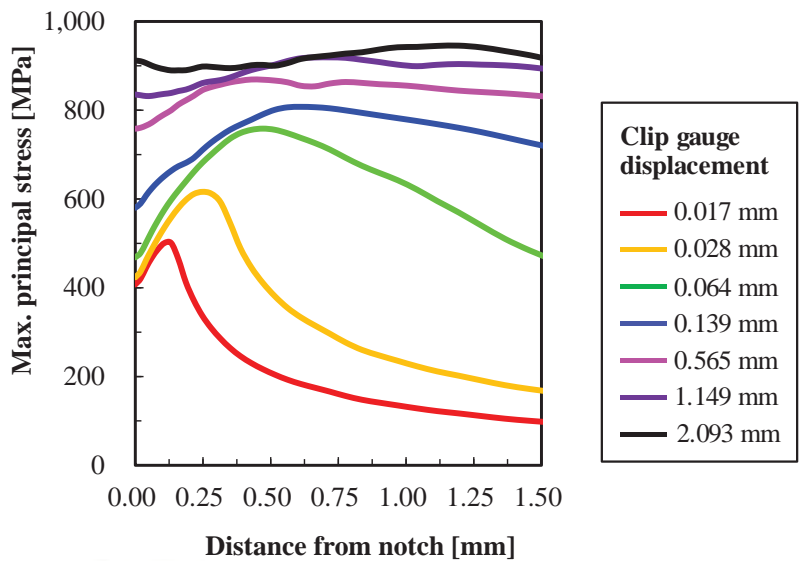


切欠き底の応力・ひずみ分布

板厚中心部 (10LL, -80°C)

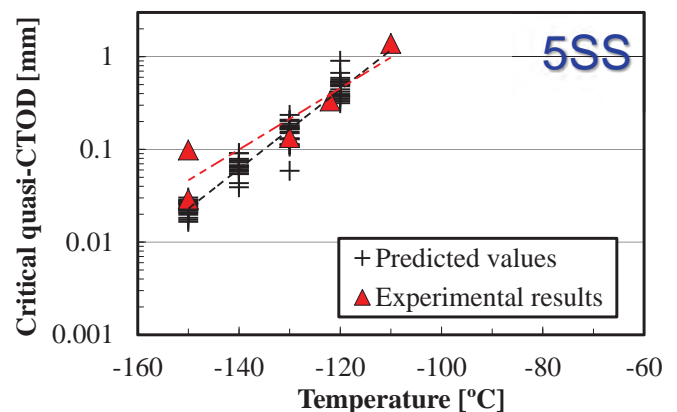
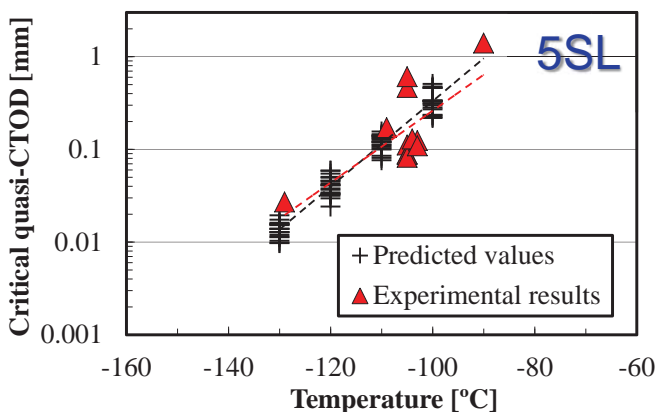
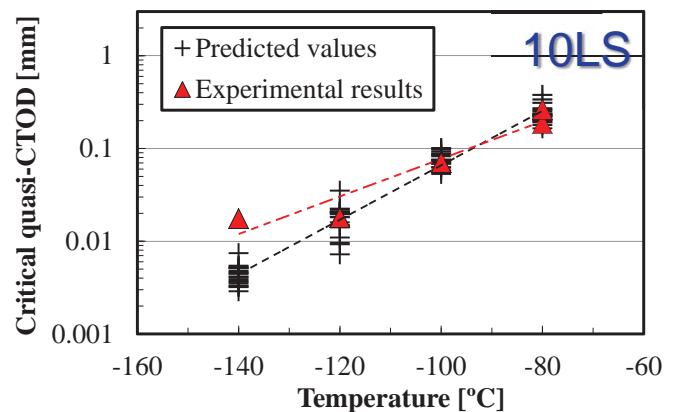
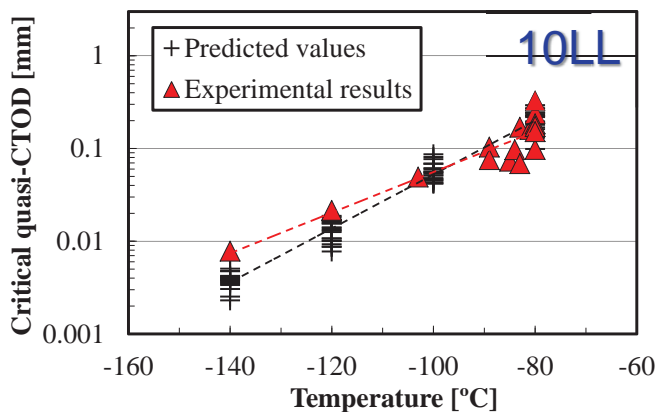


塑性ひずみ分布

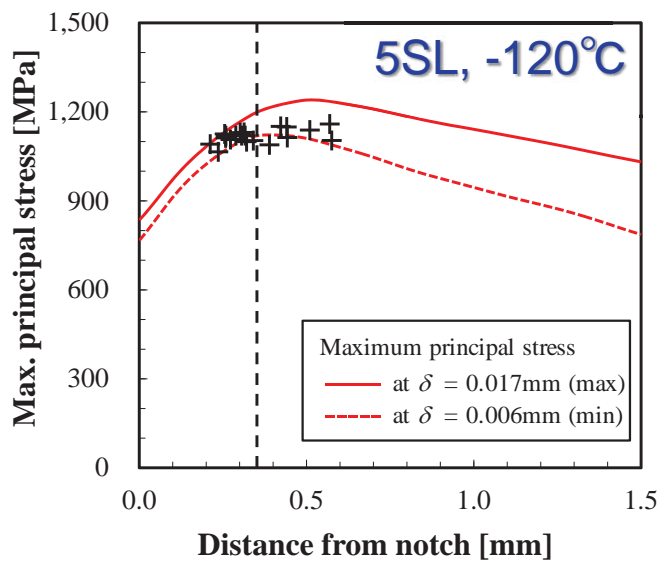
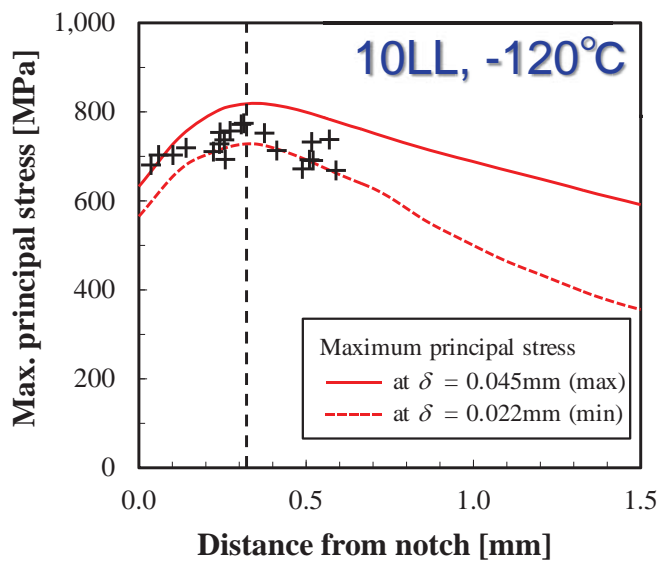


最大主応力分布

破壊靱性値の予測結果

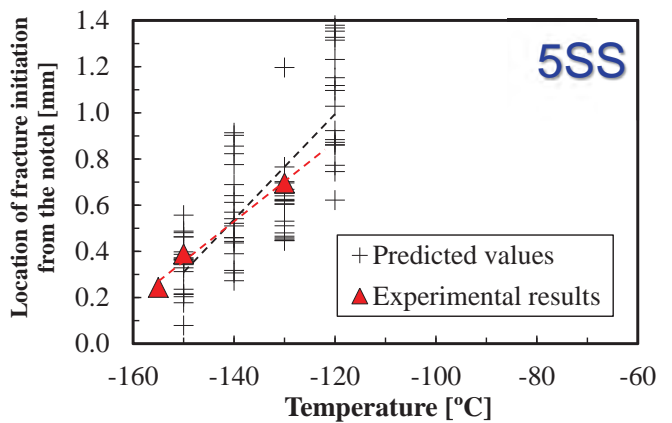
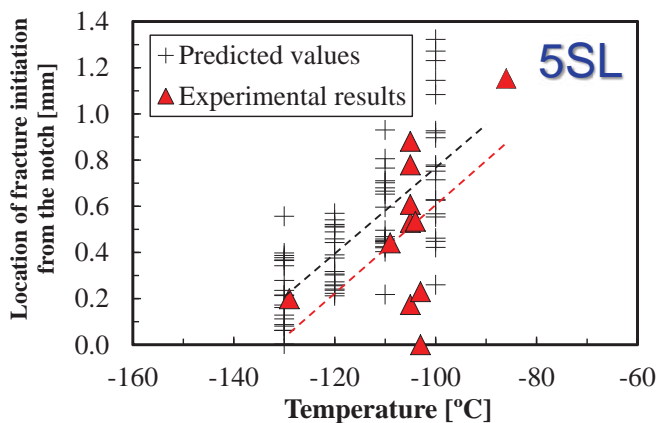
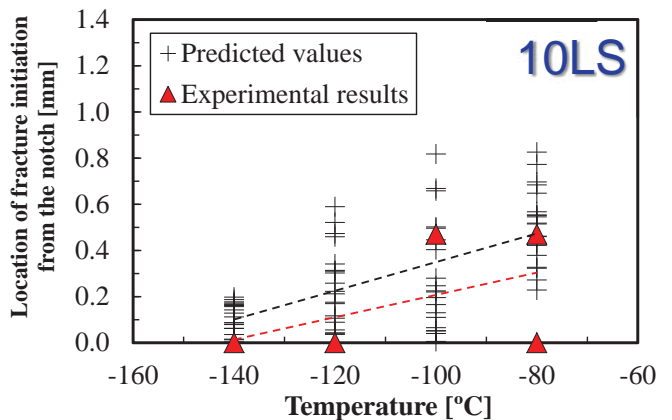
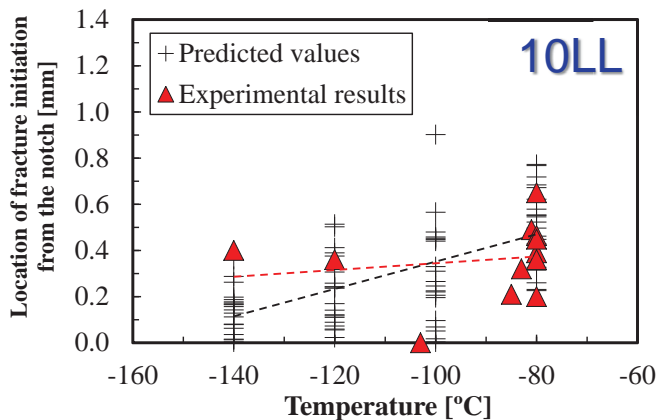


破壊発生位置と応力分布の関係



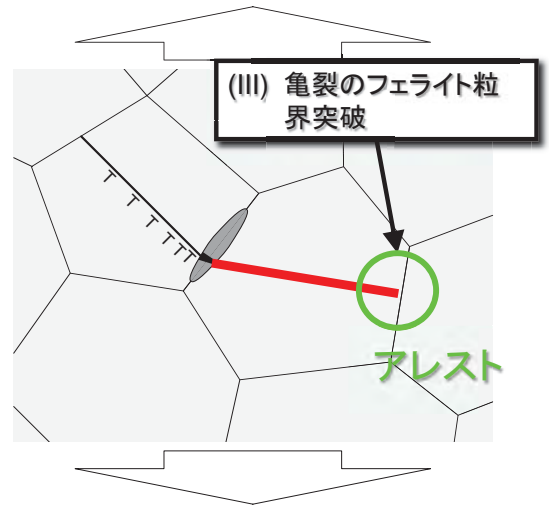
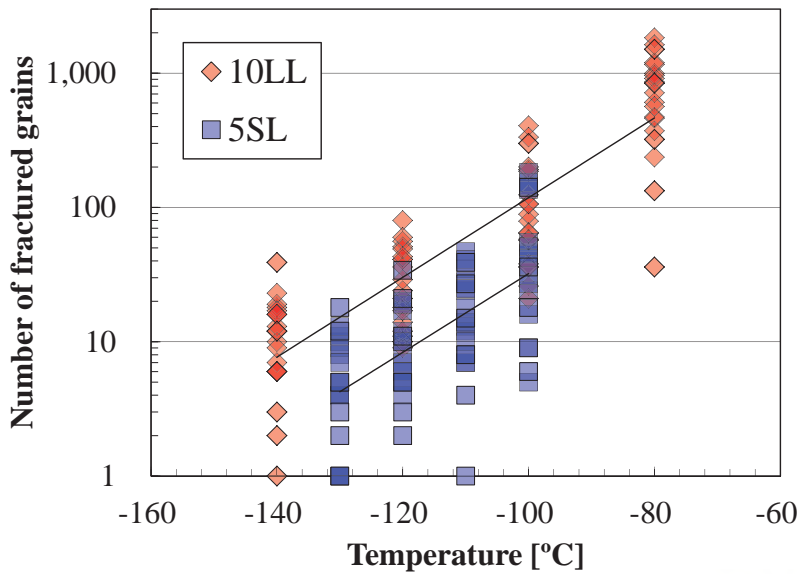
破壊発生位置は応力最大点位置に対して
 ほぼ同程度かやや切欠き側

破壊発生位置の予測結果



ボトルネックプロセスの評価

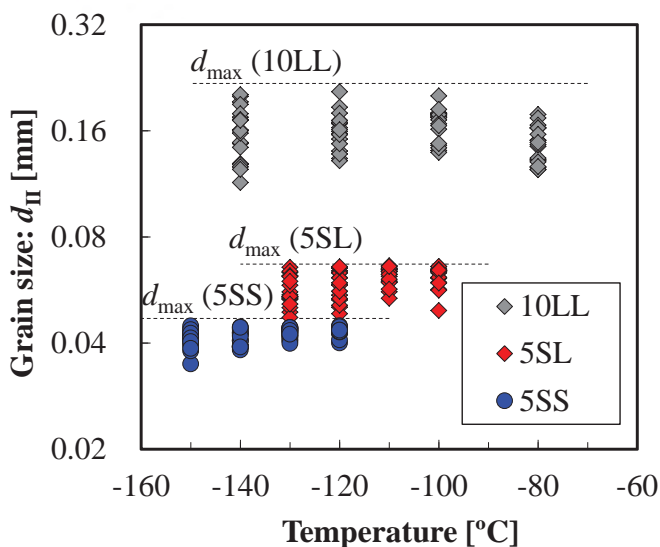
脆性破壊発生に至るまでに破壊したフェライト結晶粒の個数



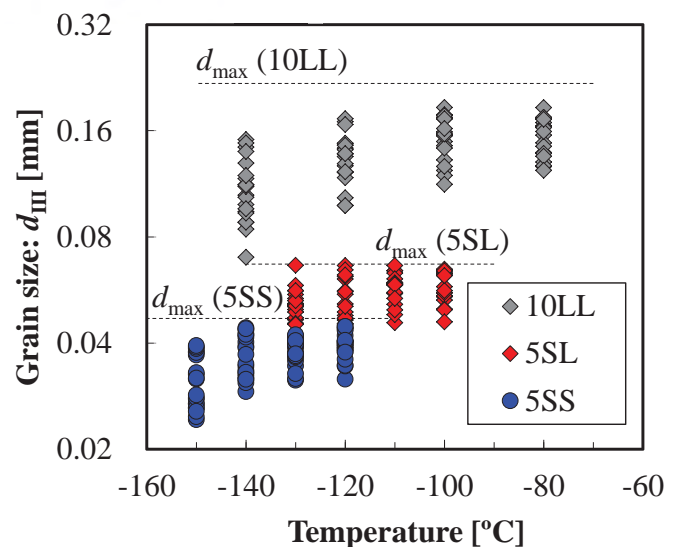
- ボトルネックプロセス: { 低温ではStage (II)
高温ではStage (III)

破壊起点となる結晶粒径の評価

Stage (II)



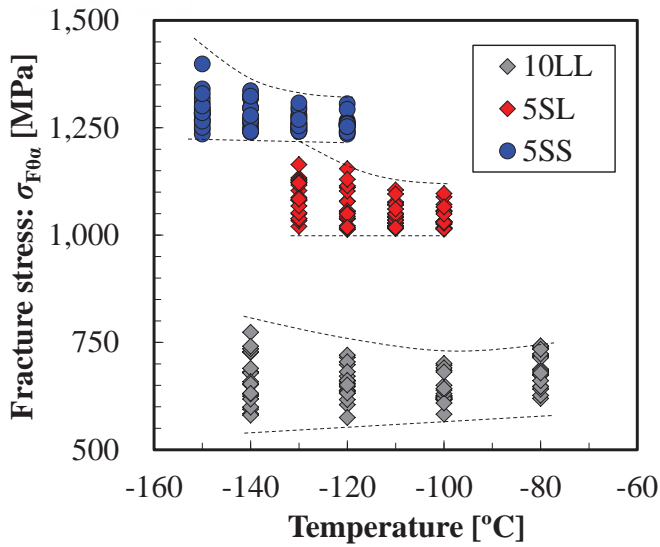
Stage (III)



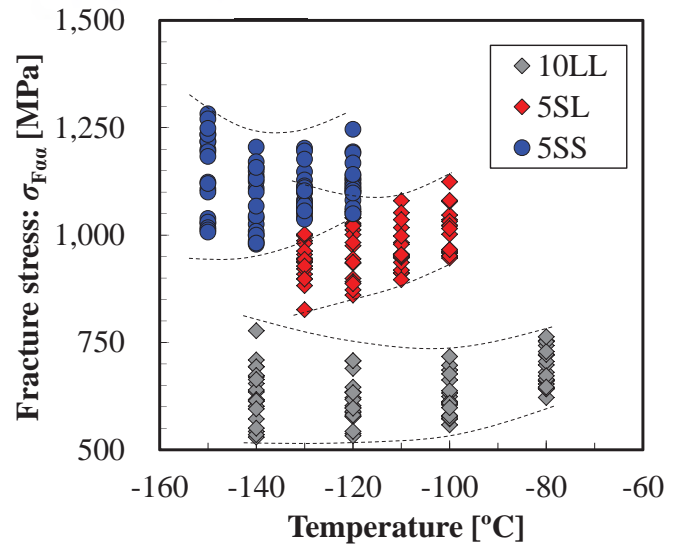
結晶粒が粗大な供試鋼では粒径分布のより広い範囲の結晶粒が破壊起点となり得る

破壊応力の温度依存性

Stage (II)



Stage (III)



破壊応力は温度が高いほどそのばらつきは小さい。
その傾向はフェライト結晶粒が微細な供試鋼ほど顕著

5. 結論

結論

鋼のマイクロ組織に基づきへき開破壊に対する靱性を予測可能な数値モデルの構築

- ・理論力学(破壊応力, 転位論)
- ・実験力学(破壊試験, SEM観察)
- ・計算力学(有限要素法, モンテカルロ法)

3段階の破壊発生プロセスを定式化

- (I) セメント割れによる亀裂の核生成
- (II) セメント割れのフェライト粒への伝播
- (III) 亀裂のフェライト粒界突破

結論

マルチスケールモデルの構築

- 連続体力学に基づくマクロ解析と材料組織因子を考慮したマイクロ解析の連成
- 体積要素への離散化による最弱リンクの仮定

準CTOD試験への適用・実験結果との比較検証

- 「マイクロ組織情報」と「応力・ひずみ曲線」のみを用いて脆性破壊靱性を高精度に推定可能であり, 提案したモデルの妥当性が示された.
- ボトルネックプロセス, 破壊起点となる結晶粒径, 破壊応力の温度依存性など, 実験では困難な現象の評価が可能

提案したモデルは, フェライト・セメント鋼の靱性に及ぼすマイクロ組織の影響を評価する上で有効