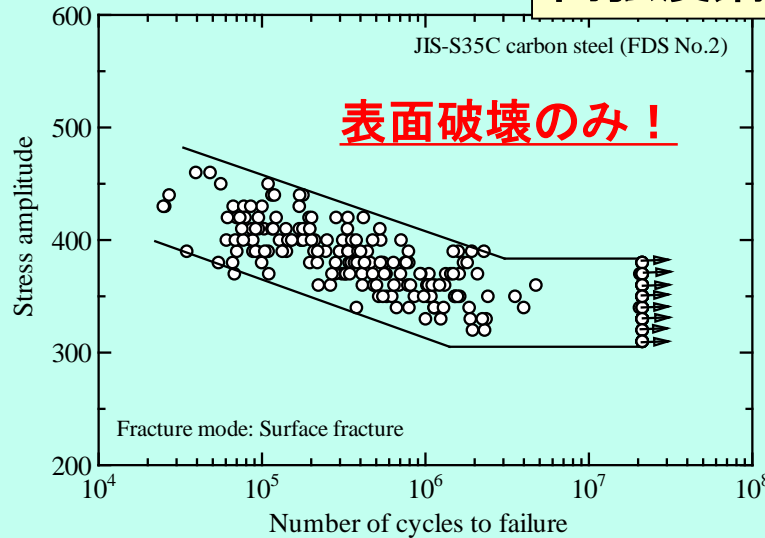


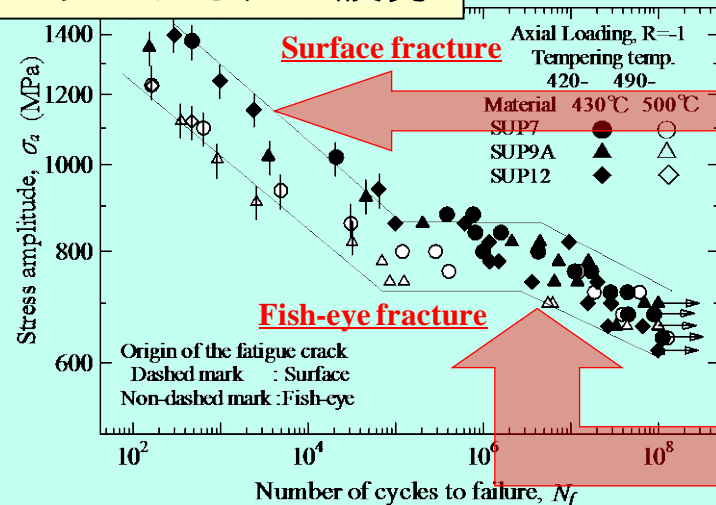
高強度鋼のギガサイクル疲労強度予測式

物質・材料研究機構 古谷佳之

高強度鋼のギガサイクル疲労

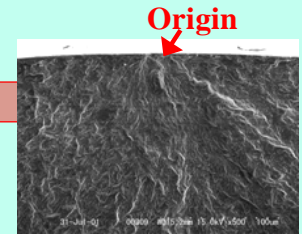


通常の鋼の疲労特性

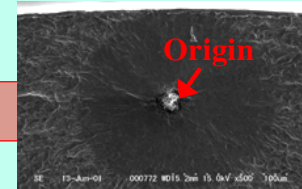


NRIM Fatigue data sheets Nos. 59, 60 and 63

高強度鋼の疲労特性



表面破壊



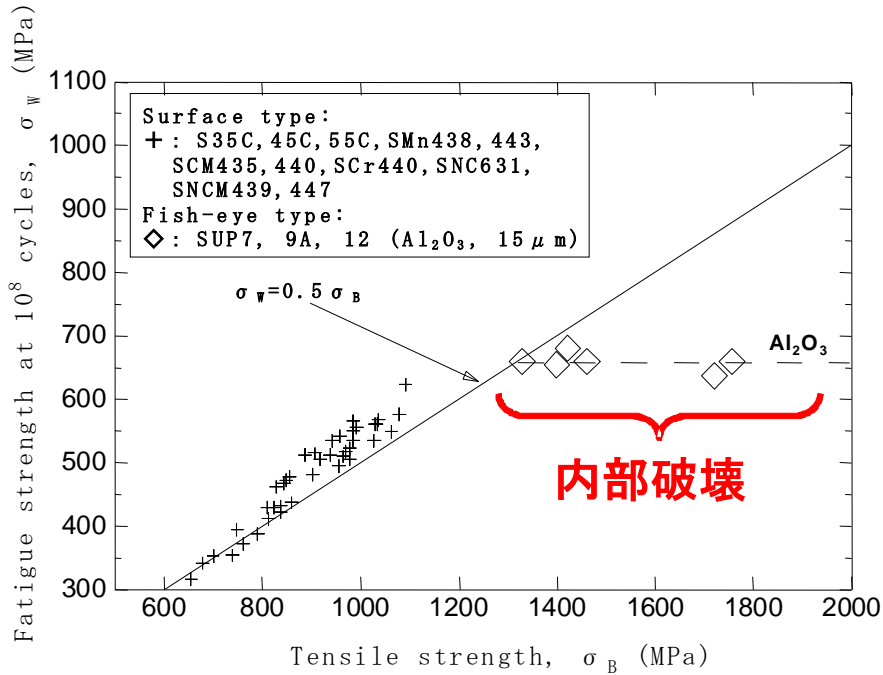
内部破壊

引張強度が1200MPaを超える高強度鋼では、主に介在物を起点とした内部破壊が生じ、通常の疲労限が消滅する。

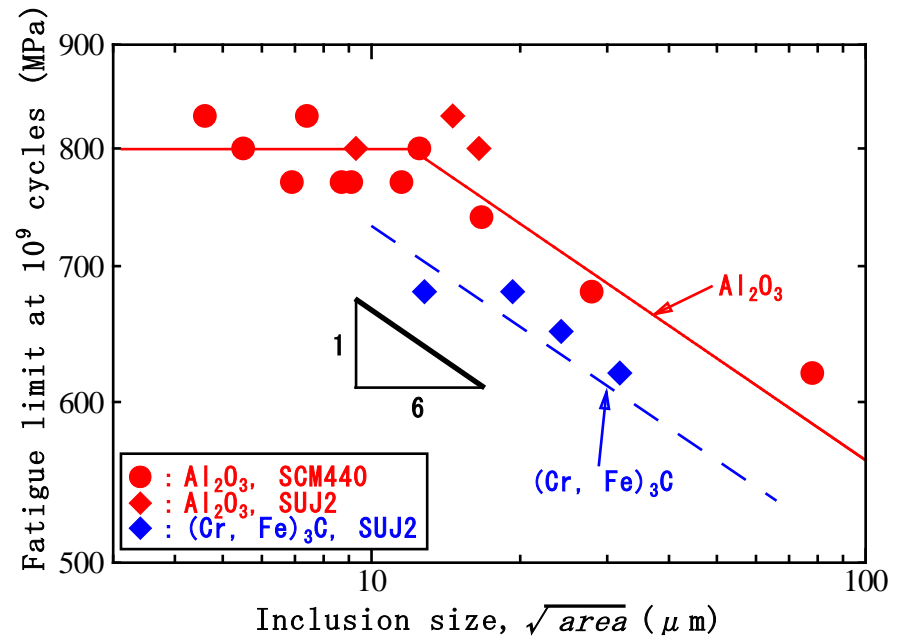
高強度鋼のギガサイクル疲労は、内部破壊を如何に評価するかという問題である!

ギガサイクル疲労(内部破壊)の特徴

— 通常の疲労とは支配因子が異なる —



引張強度の影響



介在物寸法の影響

ギガサイクル疲労強度の予測には、新しい力学モデルの構築が必要！

加速試験技術の確立

— 超音波疲労試験 (20 kHz) を用いた加速試験 —

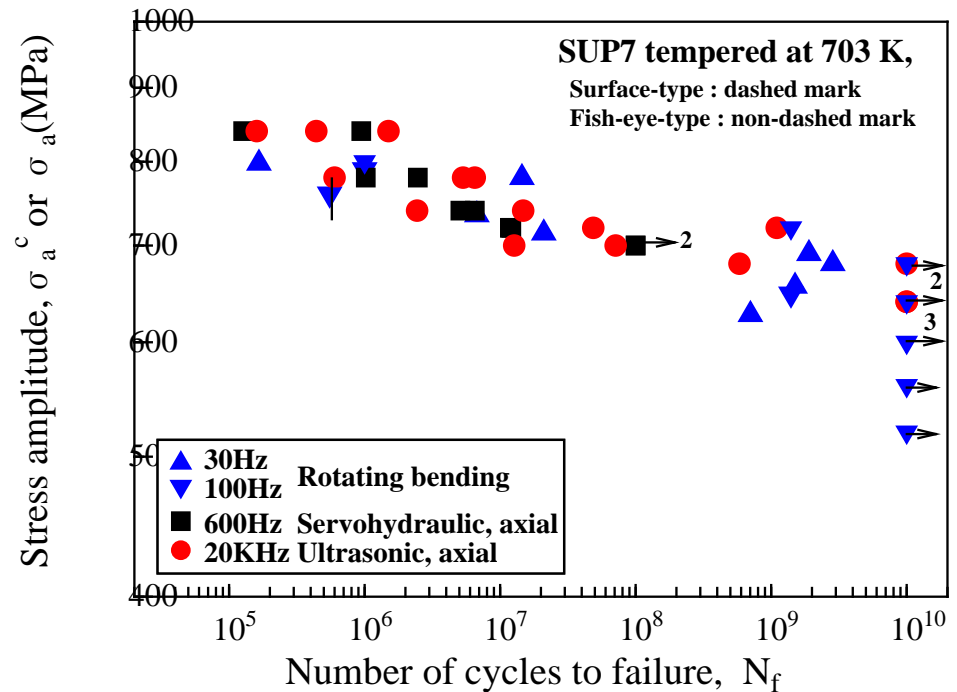
10¹⁰回疲労試験:

- ・100 Hz ⇒ 3年
- ・20 kHz ⇒ 1週間

妥当性検証のため、100Hzと20kHzで10¹⁰回試験を実施!



内部破壊となる条件ではよく一致することを確認!



加速試験技術の確立により、膨大なデータの蓄積に成功した!



予測式を導出する準備が整った!

力学モデル構築に必要なこと

— き裂の発生、停留、伝ぱのいずれが支配的かを特定 —

1. き裂発生支配説 (Bathiasら)

き裂発生特性が内部破壊特性 (ギガサイクル疲労特性) を支配しているとする説。

→ 介在物寸法の影響は？

2. き裂停留支配説 (村上ら)

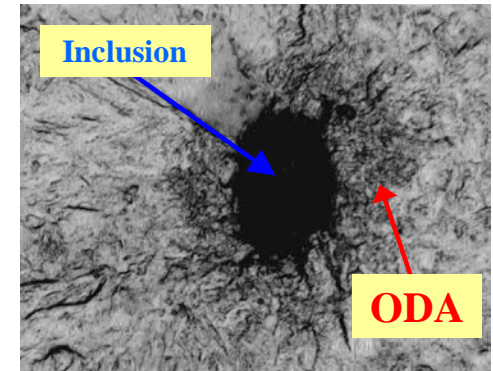
き裂停留特性 (ΔK_{th}) により内部破壊強度が決定されるとする説。ODA (Optically Dark Area) の議論もここに含まれる。

→ ODA成長則の導出は？

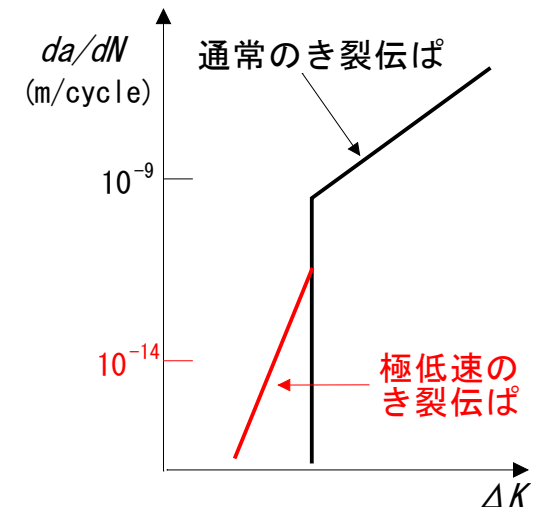
3. き裂伝ぱ支配説 (田中・秋庭)

き裂伝ぱ特性 ($da/dN - \Delta K$) により内部破壊特性が決定されるとする説。

→ 極低速の内部き裂伝ぱあり得るか？



ODAの代表例



田中・秋庭モデル

内部き裂伝ぱの評価がメカニズム解明の鍵！

予測式導出の手順

— メカニズム解明、力学モデル、予測式の導出 —

(ステップ1)

内部き裂伝ぱを評価し、**内部破壊メカニズム**を解明する。



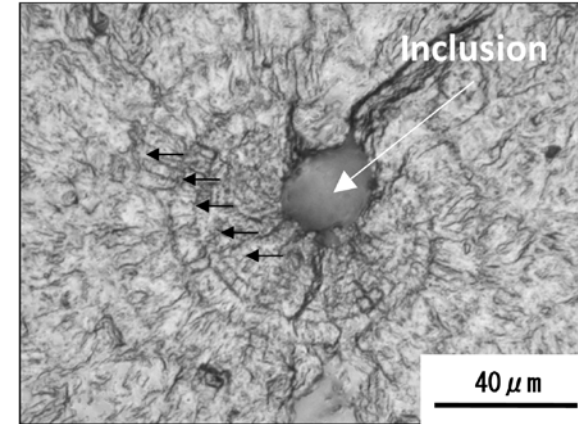
(ステップ2)

内部破壊メカニズムに基づいて、**力学モデル**を検討する。

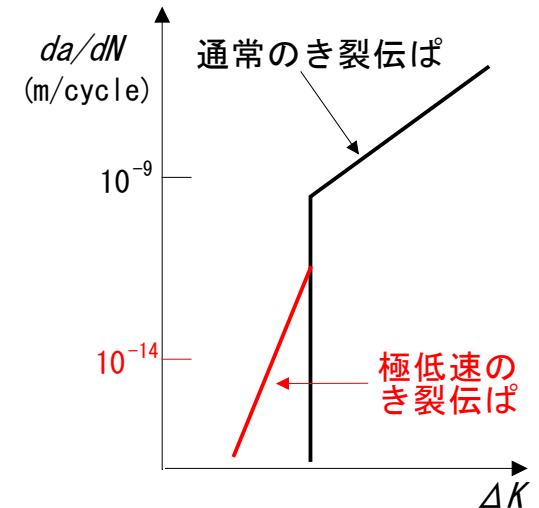


(ステップ3)

蓄積した実験データを用いてパラメータを算出し、**予測式**を導出する。



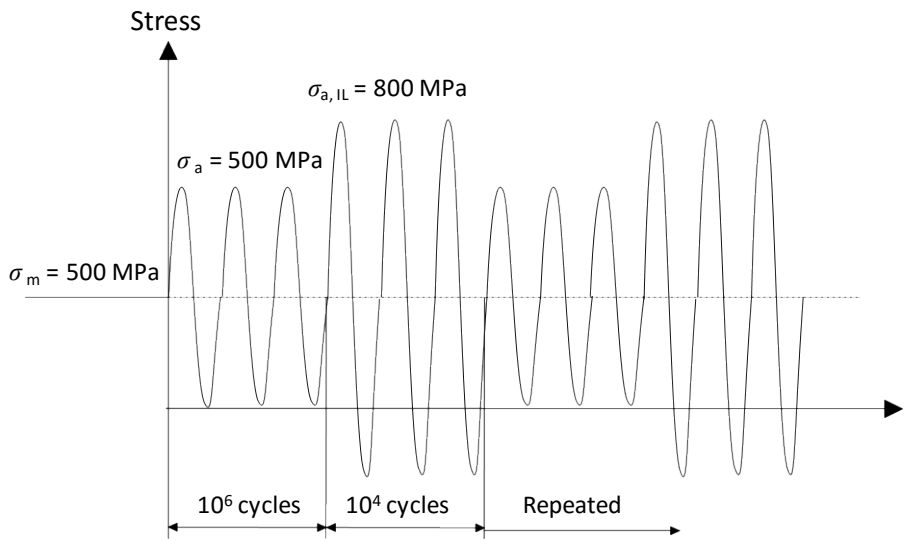
内部微小き裂伝ぱの可視化



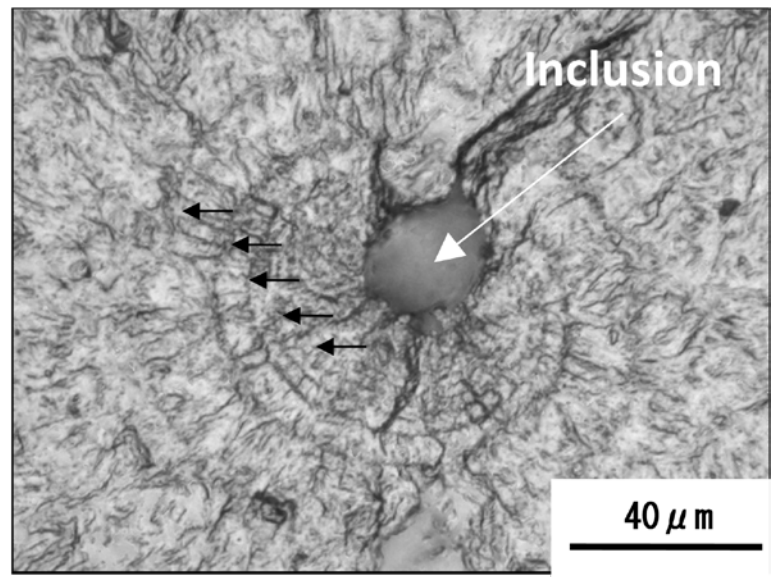
田中・秋庭モデル

ステップ1: 内部破壊メカニズムの解明

— ビーチマーク法による内部き裂伝ぱの可視化 —



2段多重変動応力疲労試験

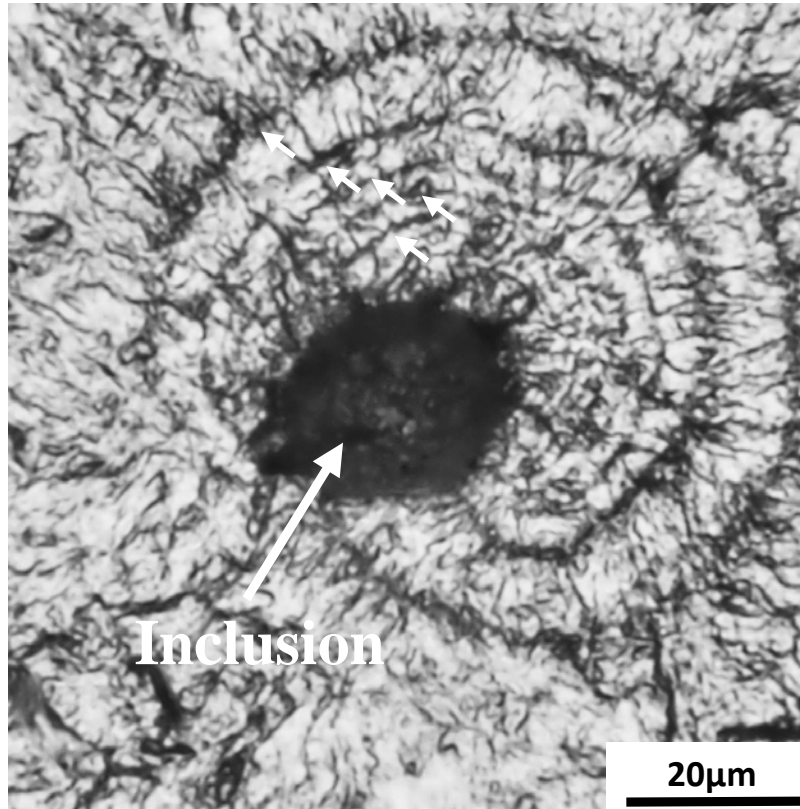


観察されたビーチマークの様子

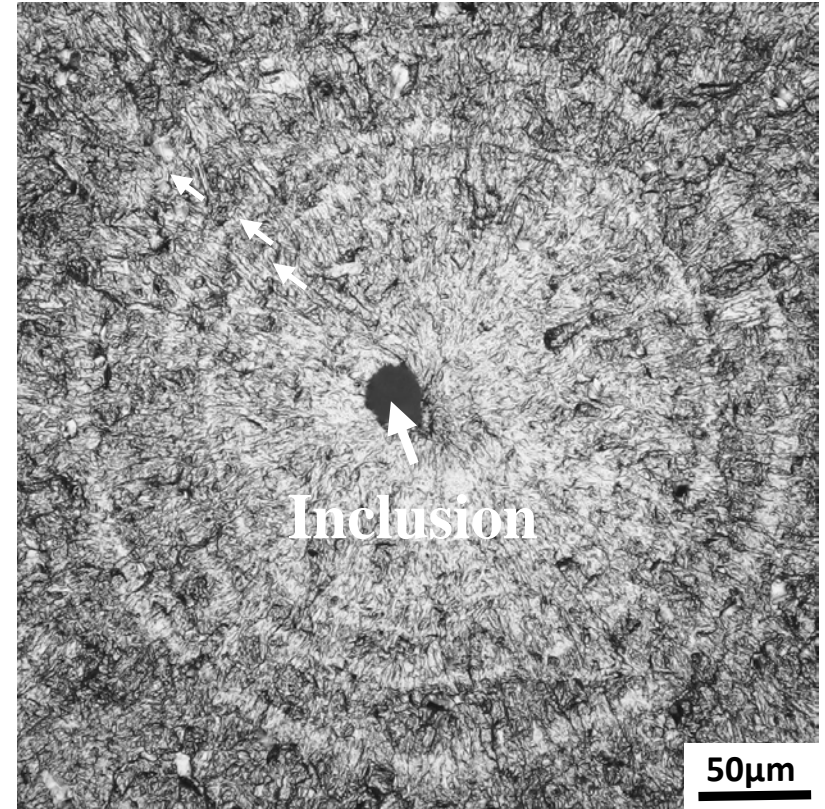
変動応力疲労試験により制御されたビーチマークを作成し、内部き裂伝ぱを可視化する！

破面様相:ビーチマークの代表例

— 内部微小き裂と通常の内部き裂 —



内部微小き裂に対応するビーチマーク

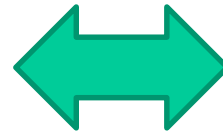
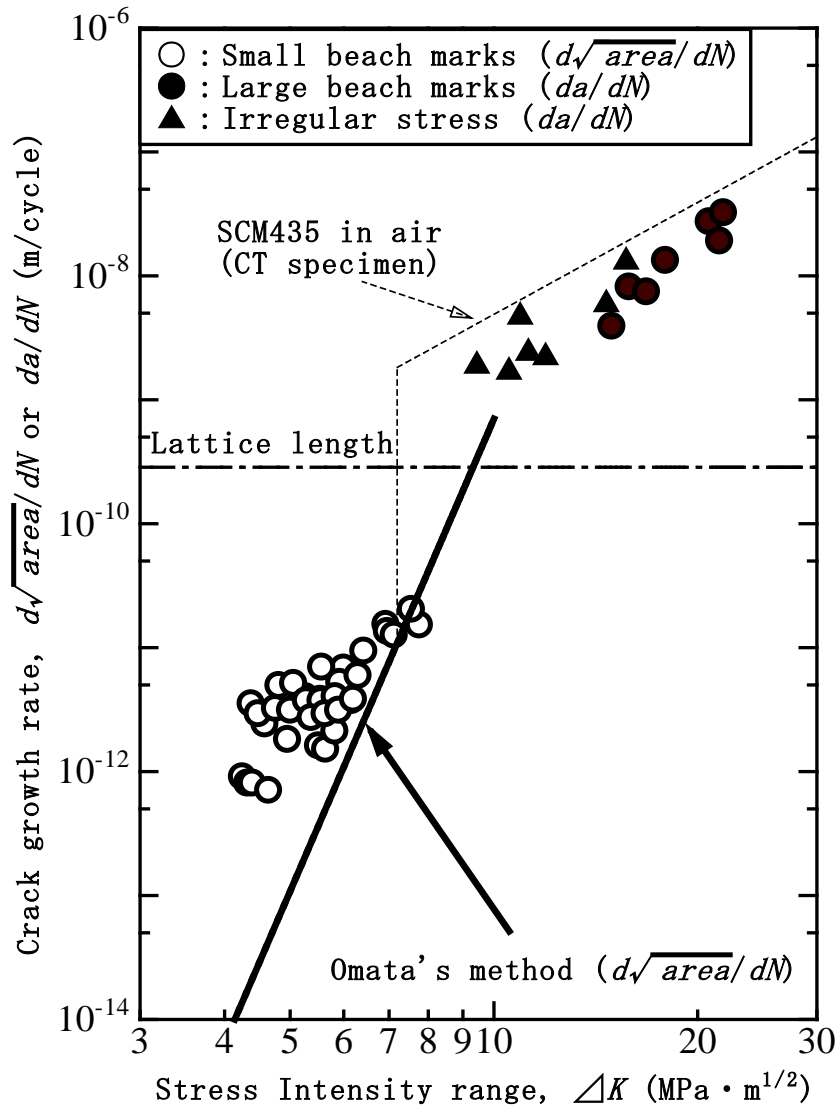


通常の内部き裂に対応するビーチマーク

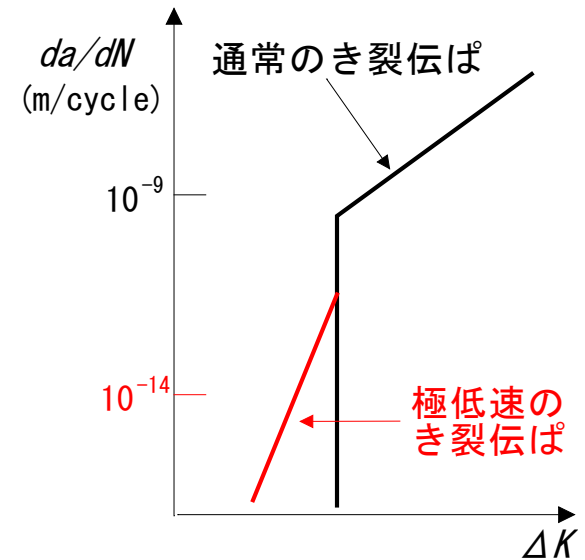
**内部微小き裂は非対称に伝ばするため、
平均値(2次元)では極低速になり得る!**

内部き裂伝ば速度の測定結果

— 田中・秋庭モデル(小俣の方法)とよく一致した —



同じ！



- ・大きな内部き裂は通常のき裂と同じ。
- ・内部微小き裂は極低速で伝ば。
- ・内部微小き裂は破壊力学計算と一致。



内部破壊は、内部微小き裂の伝ば支配である！

ステップ2: 力学モデルの検討

— 田中・秋庭モデル(小俣の方法)の検討 —

パリス則

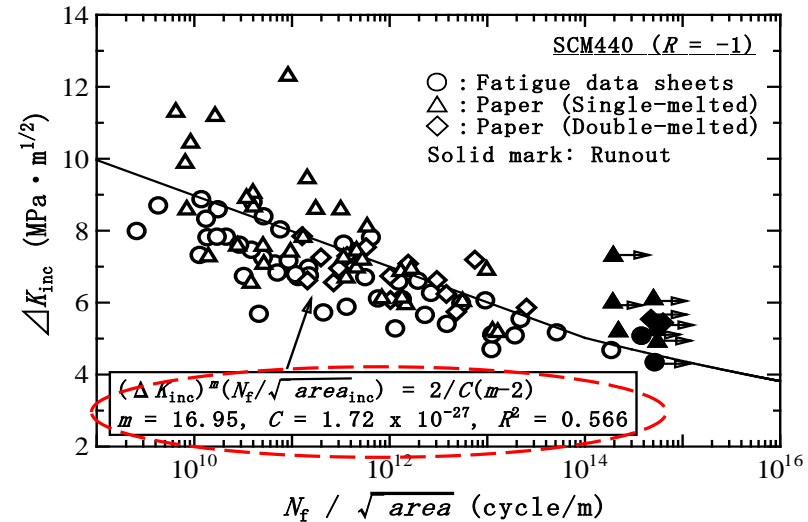
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{※} \Delta K = 0.5 \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$



$$(\Delta K_{inc})^m \left(\frac{N_f}{\sqrt{area_{inc}}} \right) = \frac{2}{C(m-2)}$$



$$\sigma_a = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{C(m-2)} \right)^{\frac{1}{m}} \times (N_f)^{-\frac{1}{m}} \times (\sqrt{area_{inc}})^{\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{2}\right)}$$



フィッティングの例

田中・秋庭モデルの問題点

— 介在物寸法の影響を過大評価 —

疲労強度の下限(最大介在物寸法に対応)が低すぎる。



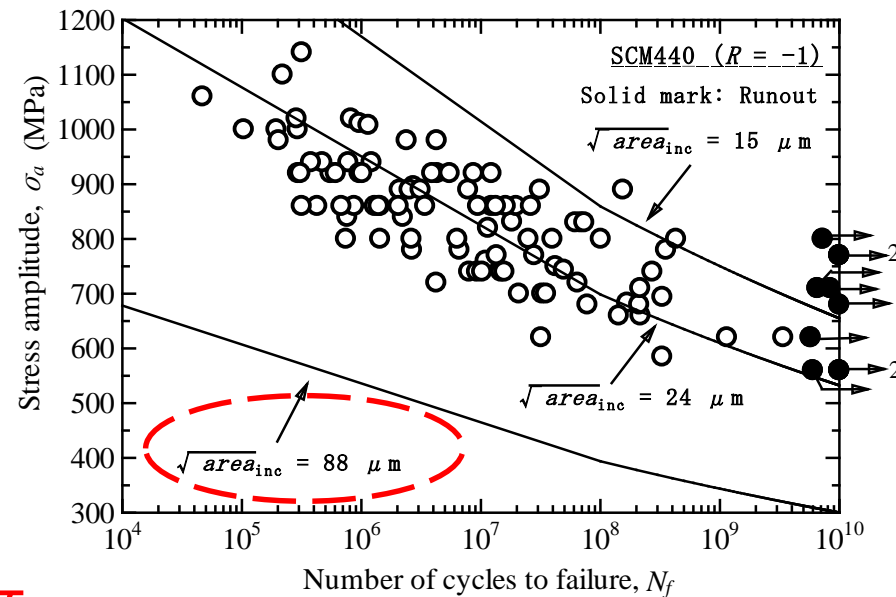
$$\sigma_a = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{C(m-2)} \right)^{\frac{1}{m}} \times (N_f)^{-\frac{1}{m}} \times (\sqrt{area_{inc}})^{\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{2} \right)}$$



ココが問題

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \longrightarrow \frac{d\sqrt{area}}{dN} = C(\Delta K \cdot \sqrt{area}^\alpha)^m$$

解決策!



疲労強度の計算値と実験値の比較

※村上の式: $\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (HV+120) (\sqrt{area})^{1/3}$

新しいモデルの評価

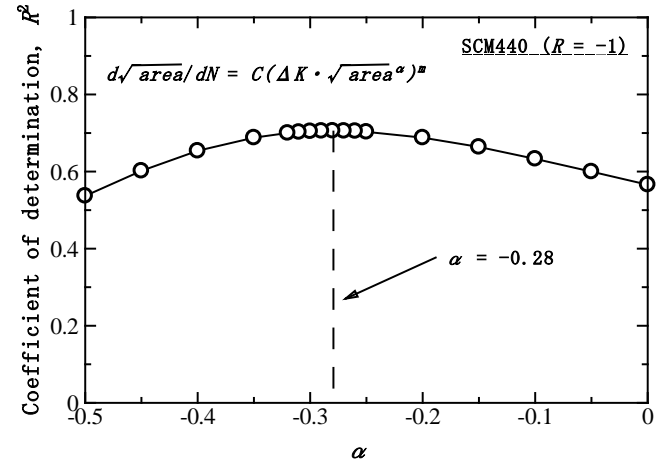
— 田中・秋庭モデルの問題点が解消された —

$$\frac{d\sqrt{area}}{dN} = C(\Delta K \cdot \sqrt{area}^\alpha)^m$$

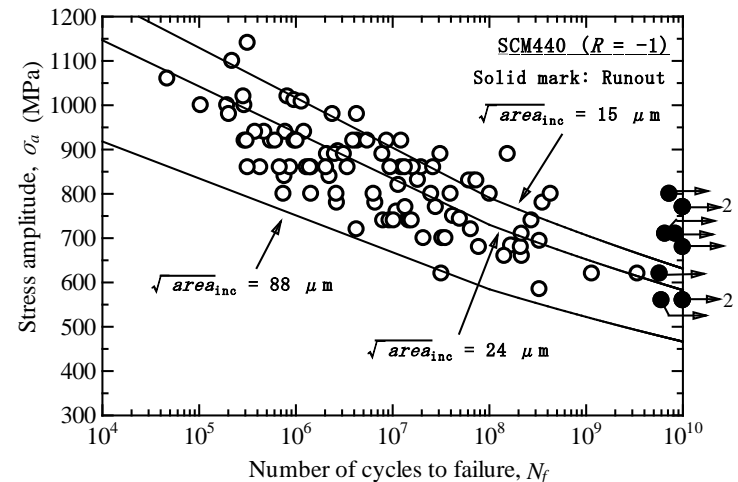
$$(\Delta K_{inc} \cdot \sqrt{area}_{inc}^\alpha)^m \left(\frac{N_f}{\sqrt{area}_{inc}} \right) = \frac{2^{1-m(\frac{1}{2}+\alpha)} - 1}{C(1 - m(\frac{1}{2} + \alpha))} = D$$

$$\sigma_a = \frac{1}{\sqrt{\pi}} (D)^{\frac{1}{m}} \times (N_f)^{-\frac{1}{m}} \times (\sqrt{area}_{inc})^{\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{2} - \alpha\right)}$$

**疲労強度の下限の予測精度
が向上した！**



α 値の決定方法



新しいモデルによる計算値と実験値の比較

ステップ3: 予測式の導出

— 鋼種・条件ごとに、実験データからパラメータを算出 —

$$\sigma_a = \frac{1}{\sqrt{\pi}} (D)^{\frac{1}{m}} \times (N_f)^{-\frac{1}{m}} \times (\sqrt{area_{inc}})^{\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{2} - \alpha\right)}$$

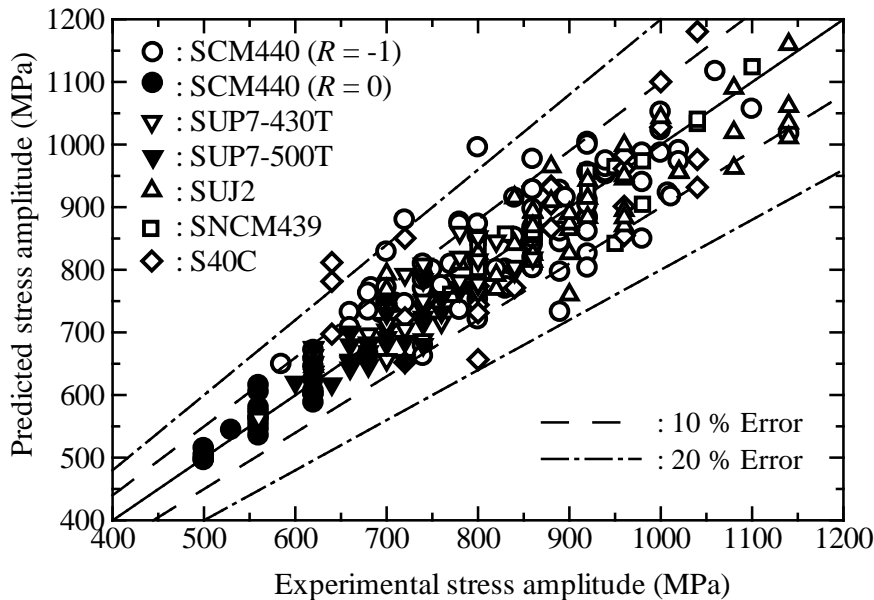


$$\sigma_a = A1 \times (N_f)^{a2} \times (\sqrt{area_{inc}})^{a3}$$

Steel	Vickers hardness	Stress ratio	Number of data points	Parameters		
				A1	a2	a3
SCM440	611	R = -1	95	292.2	-0.049	-0.171
		R = 0	20	443.8	-0.053	-0.107
SUP7-430T	527	R = -1	42	175.9	-0.037	-0.193
SUP7-500T	438	R = -1	29	237.4	-0.027	-0.143
SUJ2	753	R = -1	43	216.1	-0.049	-0.211
SNCM439	598	R = -1	20	360.3	-0.059	-0.171
S40C	585	R = -1	24	370.8	-0.072	-0.188

予測式の精度

— 炭素鋼、軸受け鋼で精度が低い —



疲労強度の予測値と実験値の比較

標準偏差の評価

Steel	Stress ratio	Number of data points	Standard deviations (MPa)
SCM440	R = -1	95	63.8
	R = 0	20	21.4
SUP7-430T	R = -1	42	42.6
SUP7-500T	R = -1	29	32.8
SUJ2	R = -1	43	70.5
SNCM439	R = -1	20	36.1
S40C	R = -1	24	85.6
All	—	273	58.0

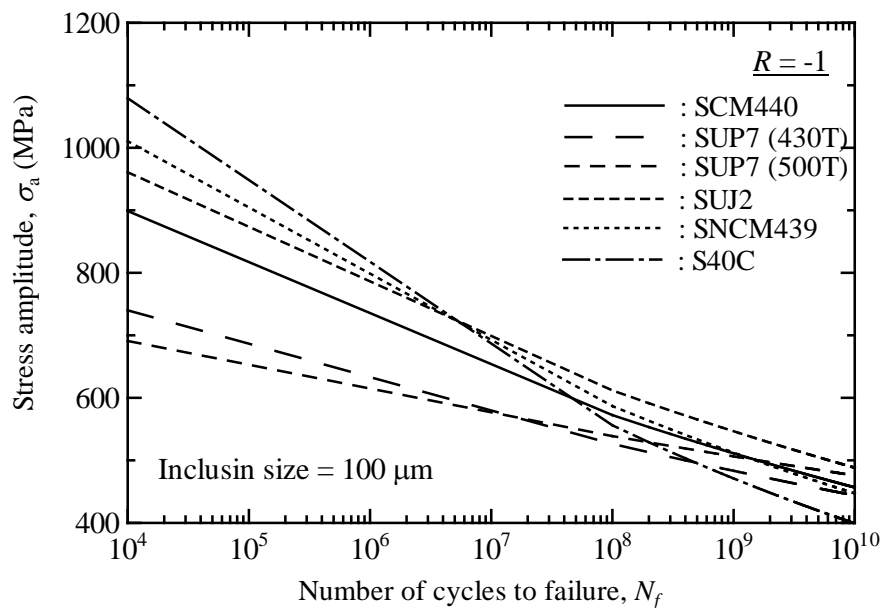
予測精度が低い材料

- ・ **S40C、SUJ2**: 焼入れ性が悪い材料のためと考えられる。
- ・ **SCM440**: ヒート数や熱処理条件が多かったためと考えられる。

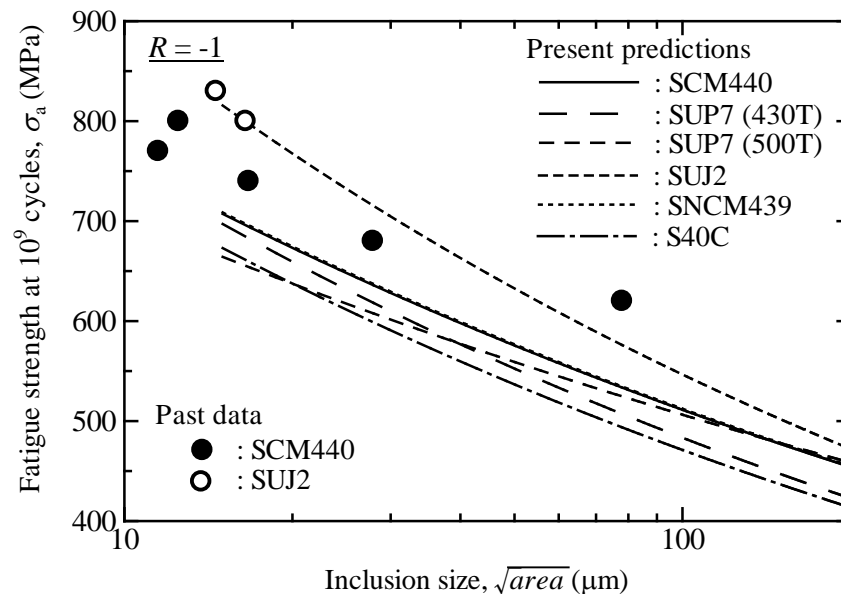
⇒ 予測精度は、元データのばらつき大きさに依存!

疲労強度の予測結果

— ギガサイクル域では、鋼種間の差が小さくなる —



介在物 $100\mu\text{m}$ に対応する疲労強度

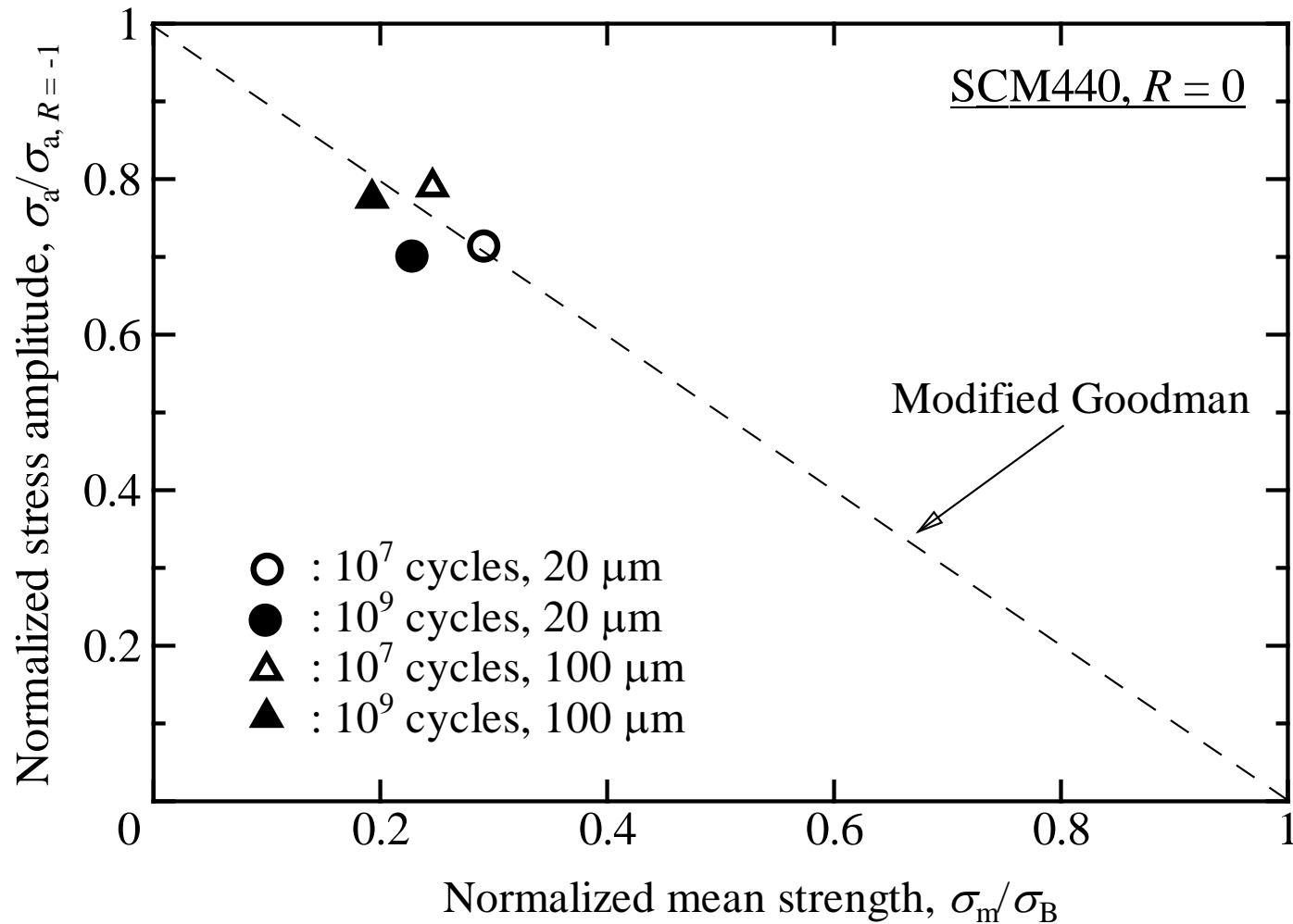


介在物寸法に対応する 10^9 回疲労強度

ギガサイクル疲労強度に対する鋼種の影響は小さいと考えられる！

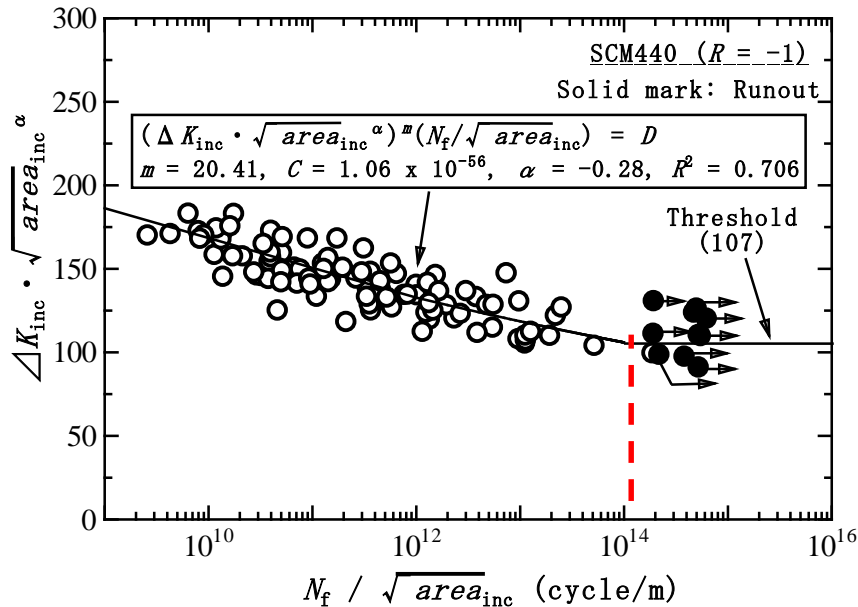
平均応力の影響

— 通常の修正Goodman線図で評価可能 —

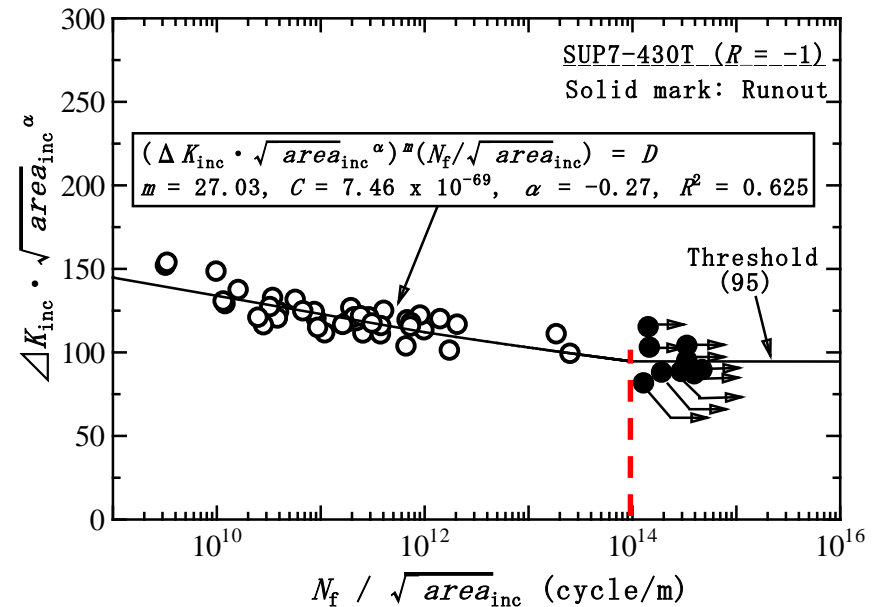


疲労限の示唆

— ギガサイクル域で新たな疲労限が出現する可能性 —



SCM440の回帰曲線



SUP7-430Tの回帰曲線

回帰曲線が、 $N_f / \sqrt{area} = 10^{14}$ 付近で折れ曲がる傾向

⇒ $10^9 \sim 10^{10}$ 回付近で疲労寿命曲線が折れ曲がる可能性！

⇒ 10^{11} 回までの疲労試験で疲労限を確認できる可能性がある！

まとめ

1. 高強度鋼のギガサイクル疲労は内部破壊の出現によって生じ、内部破壊特性を評価するには新しい力学モデルが必要であった。
2. そのためには内部微小き裂伝ぱの解析が必要であったため、ビーチマーク法を用いた内部き裂伝ぱの可視化技術を確立した。
3. 内部き裂の伝ぱ挙動を解析した結果、内部微小き裂の伝ぱにより疲労寿命が支配されていることが明らかとなった。
4. 内部微小き裂伝ぱから疲労寿命を予測する方法として、既存の田中・秋庭モデルを検討した結果、介在物寸法の影響が過大評価となることが分かった。そのため、新しいき裂伝ぱモデルを提案し、予測式を導出することとした。
5. 蓄積した疲労データからパラメータを算出ことにより、ギガサイクル疲労強度の予測式を導出した。その過程で、ギガサイクル域で内部破壊の疲労限が存在する可能性が示唆された。