

共同研究

「アレスト特性の評価手法の標準化・
規格化に関する研究開発」
成果の概要

2013年6月



一般財団法人 日本海事協会
一般社団法人 日本溶接協会 ATE委員会

◆事業の目標

- (1)汎用的なアレスト特性評価試験方法規格の作成とISO規格化の準備
- (2)長大亀裂問題の解明のための基礎データ収集
- (3)脆性亀裂伝播現象に関する最新知見の整理

◆期間

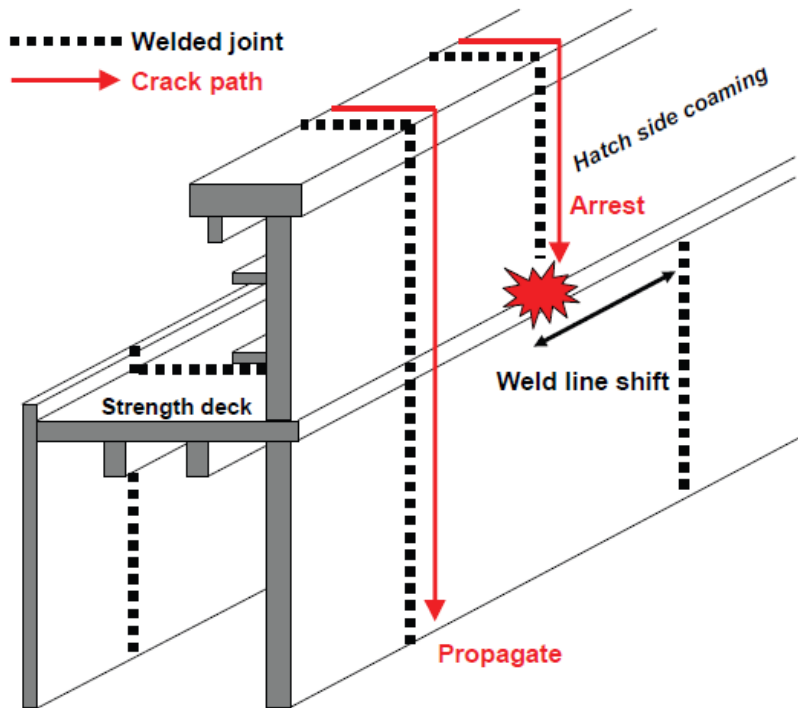
2010年4月～2013年3月(3年間)

◆参加メンバー

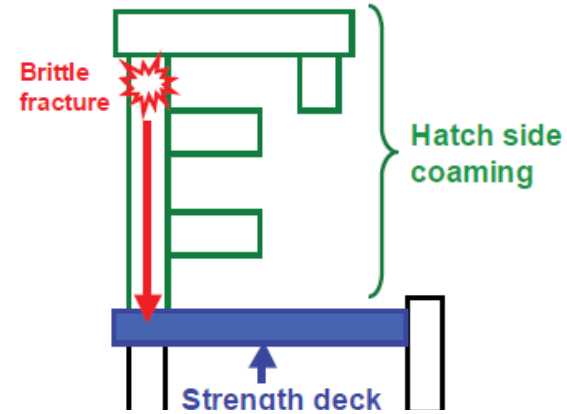
上智大学、東京大学、名古屋大学、筑波大学、海技研、
日本海事協会、
新日鉄住金、JFEスチール、神戸製鋼所、
日本溶接協会

溶接鋼構造物の脆性破壊防止

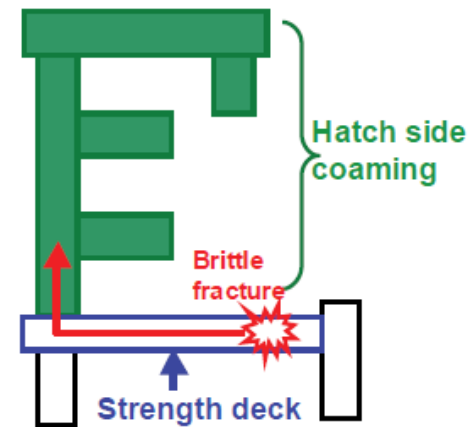
- ・発生防止（溶接部の検査、溶接部靱性）
- ・万が一発生した亀裂の停止（母材のアレスト靱性、構造）



Scenario 1

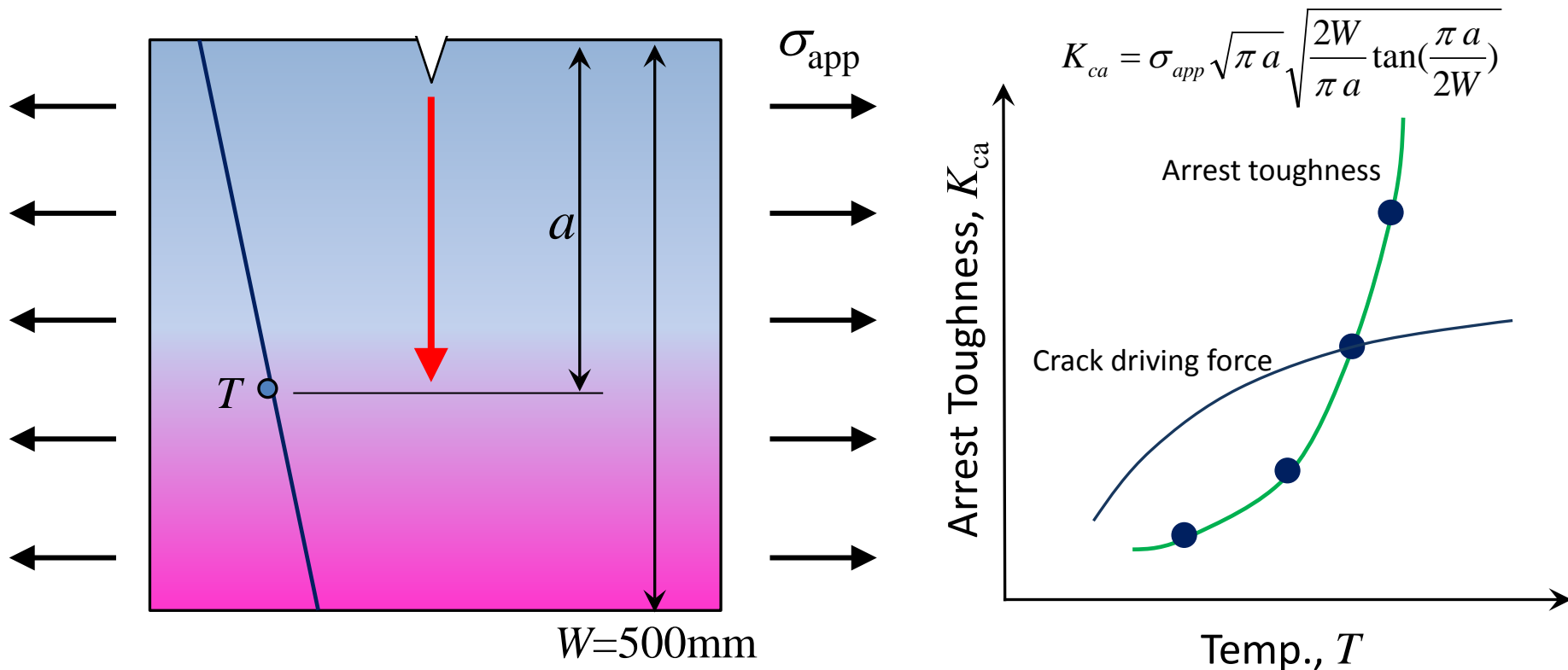


Scenario 2



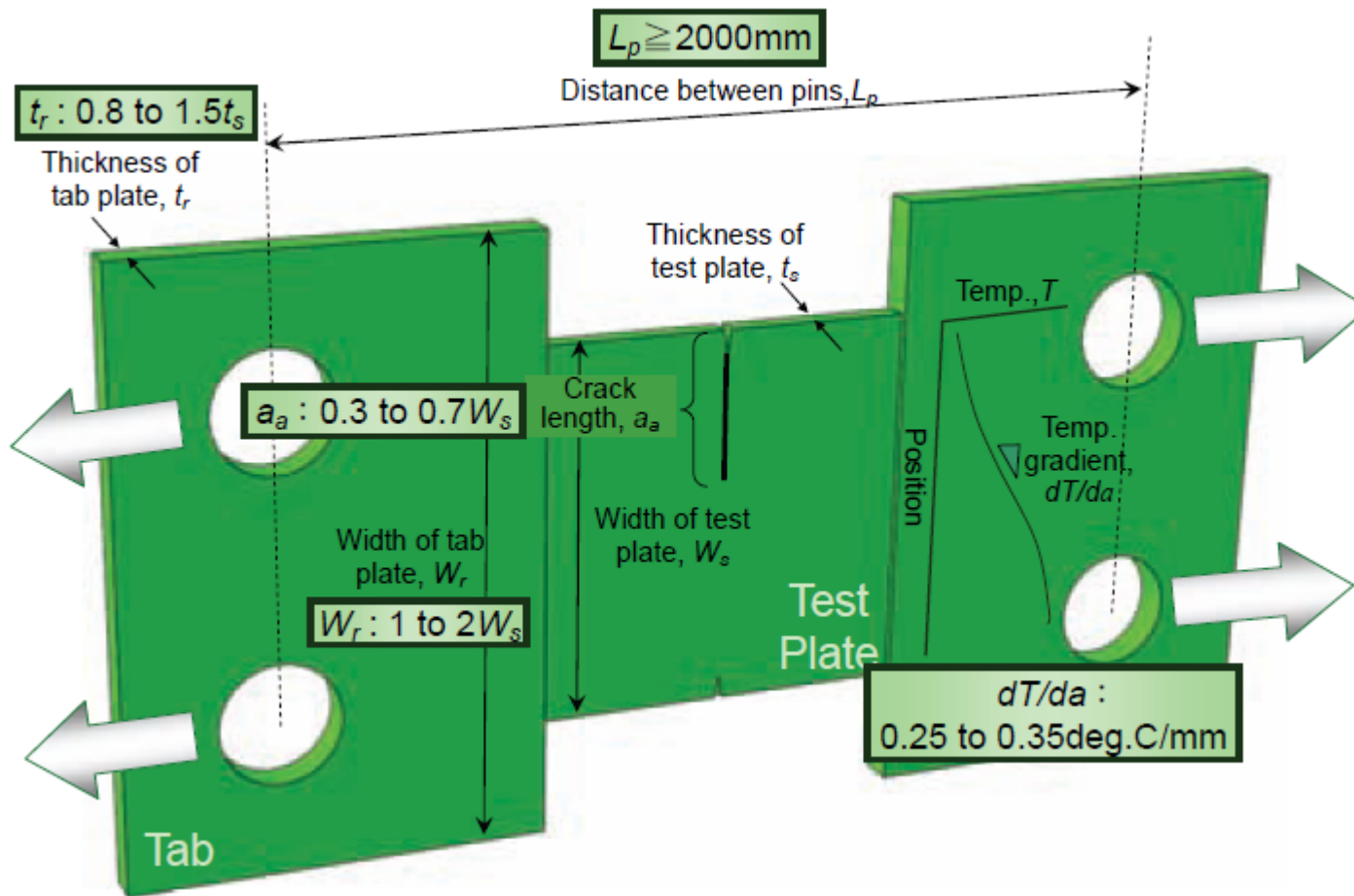
母材のアレスト靱性を評価する試験方法(温度勾配型アレスト試験)

- ・温度勾配を設けた試験片に一様応力を負荷し、打撃により脆性亀裂を発生させる
- ・亀裂駆動力(応力拡大係数)と亀裂抵抗(アレスト靱性)が釣り合ったところで亀裂が停止
- ・アレスト亀裂長さ(a)と負荷応力からアレスト靱性(K_{ca})を算出



温度勾配型アレスト試験方法

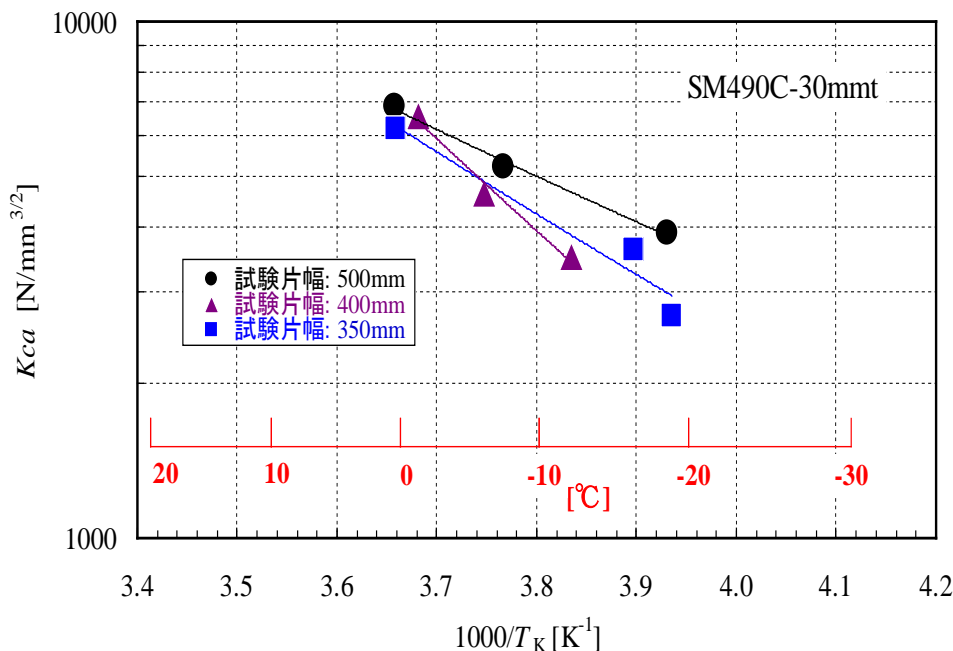
- ・脆性き裂アレスト設計指針(日本海事協会;2009)で規定
- ・試験片寸法や温度勾配などが規定されているが、世界標準とするためにはさらに詳細な規定が必要



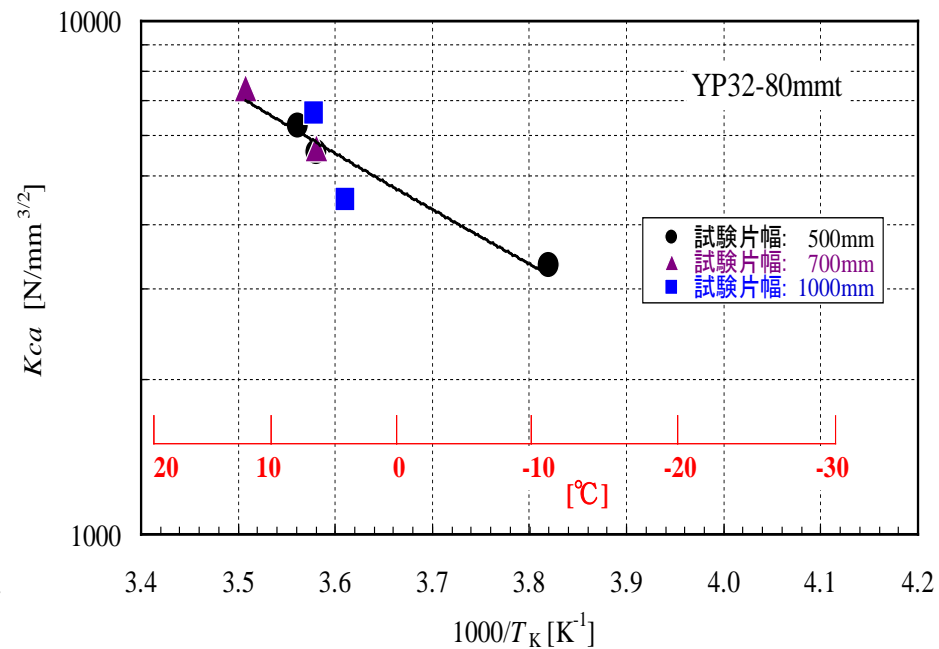
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(1) 試験片幅の影響

- ・試験片幅が標準500mmより小さくなると K_{ca} は低くなる傾向 (安全側評価)
- ・1000mm幅までは K_{ca} に差は認められない
- ・試験遂行の実際を考慮して $350\text{mm} \leq W \leq 1000\text{mm}$ と規定



Kcaに及ぼす試験片幅(狭幅)の影響

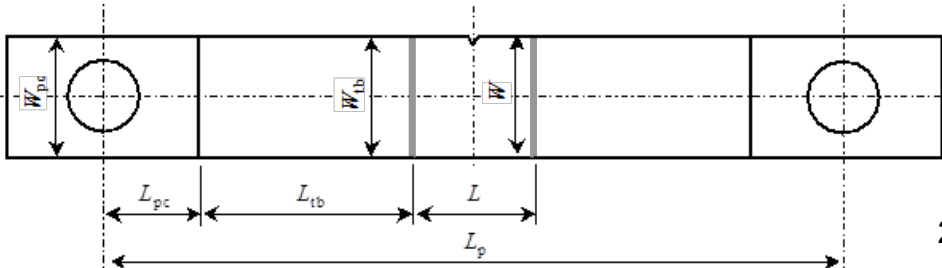


Kcaに及ぼす試験片幅(広幅)の影響

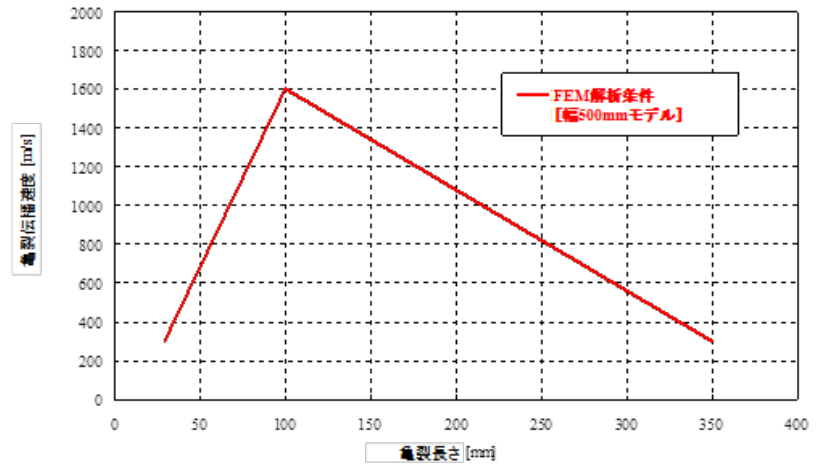
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(2) 試験体ピン間距離の影響

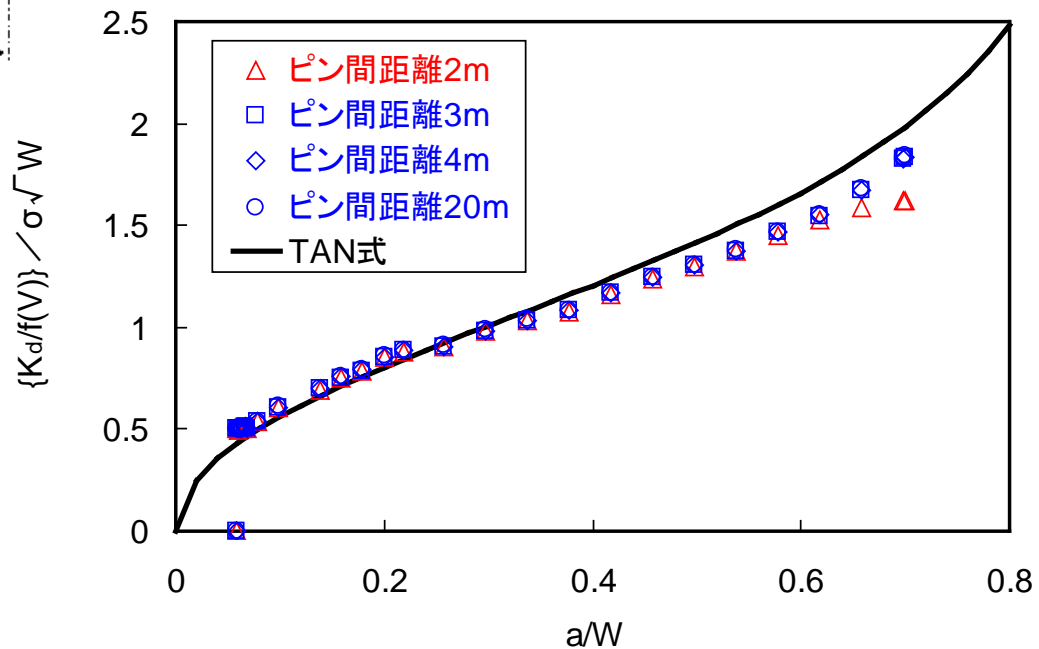
- ・ピン間距離が短いと亀裂伝播に伴う応力波が反射して亀裂伝播部に到達し応力拡大係数を低下させる(亀裂伝播動的FEM)
- ・ピン間距離を試験片幅の3倍以上に規定



試験体ピン間距離の定義



動的FEMで仮定した亀裂伝播速度履歴

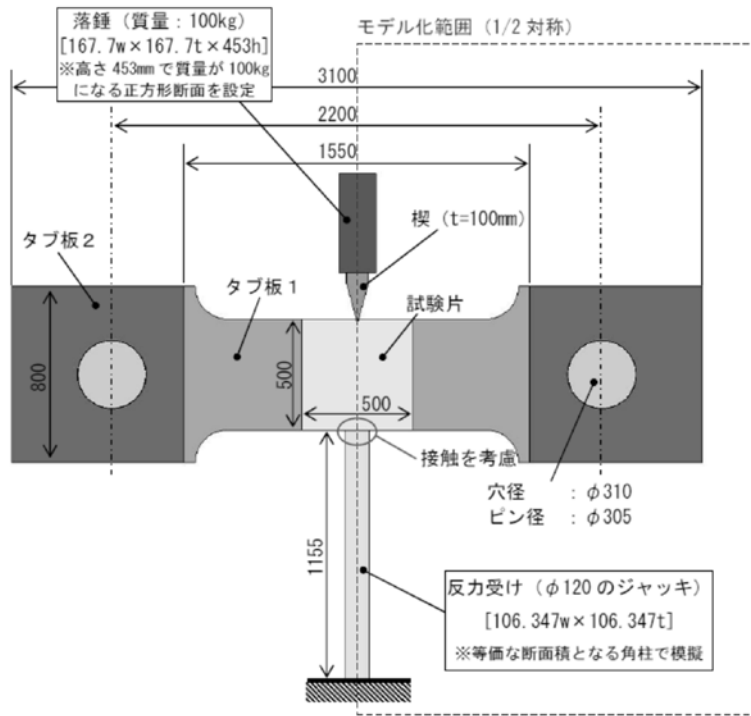


応力拡大係数に及ぼすピン間距離の影響(動的FEM)

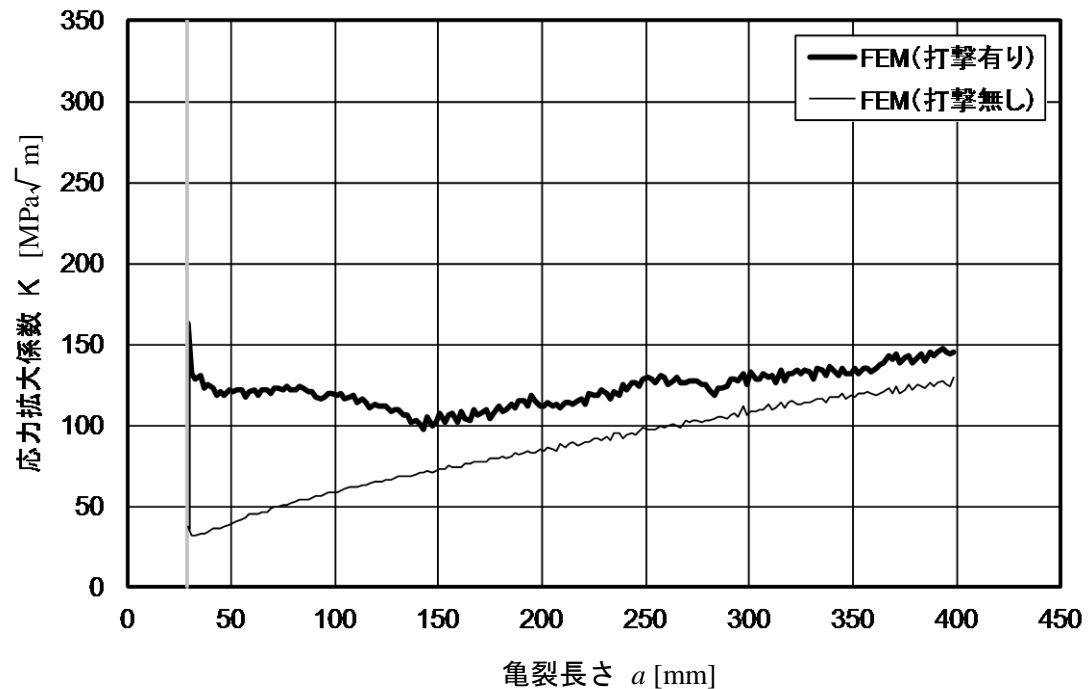
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(3) 打撃の影響

- ・打撃により亀裂発生直後の応力拡大係数は上昇
(亀裂伝播動的FEM)
- ・打撃エネルギーが大きいほど、あるいは、負荷応力が低いほど、
打撃の影響範囲が拡大
- ・適正な打撃エネルギーであれば K_{ca} に及ぼす影響は無視できる



動的き裂伝播のFEMモデル化

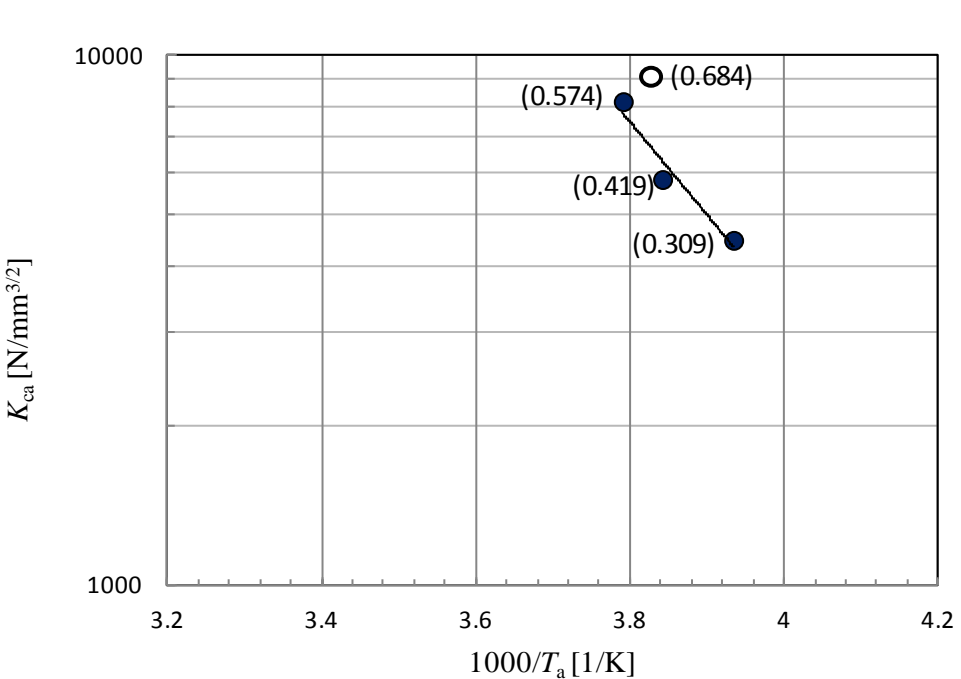


き裂伝播に伴う動的応力拡大係数の変化

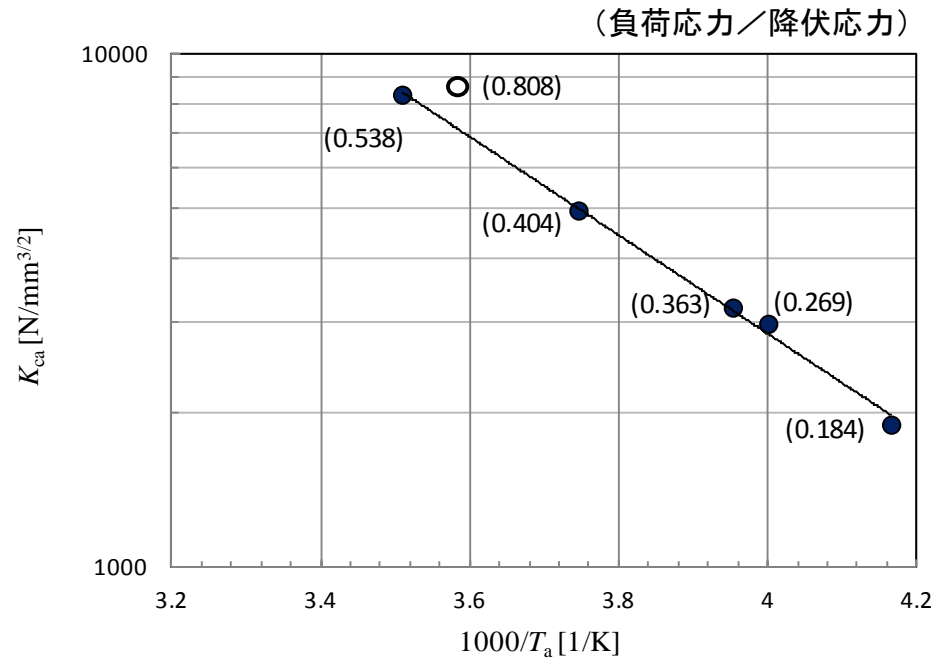
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(4) 負荷応力の影響

- ・ 負荷応力が高すぎると K_{ca} を高め評価する(アレスト時の亀裂先端平面歪状態が緩和される)
- ・ (負荷応力/降伏応力)比が2/3以下であれば影響はない



(a) YP36 TMCP材 (30mm)



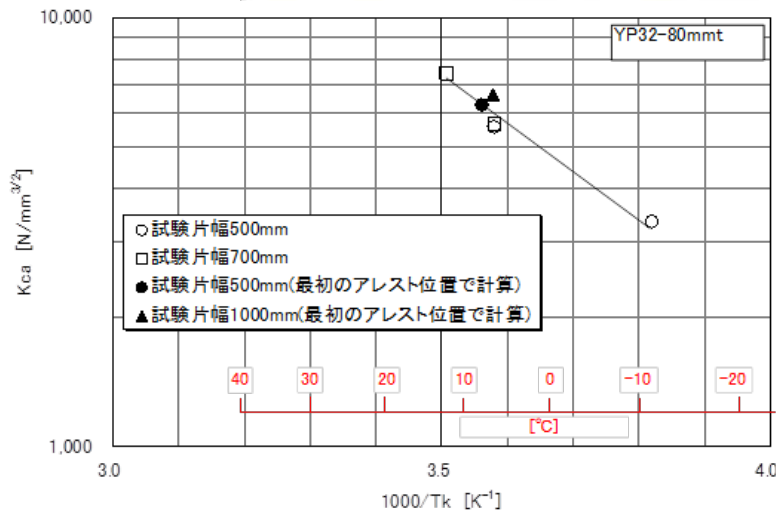
(b) YP36 ノルマ材 (50mm)

Kcaに及ぼす(負荷応力/降伏応力)比の影響

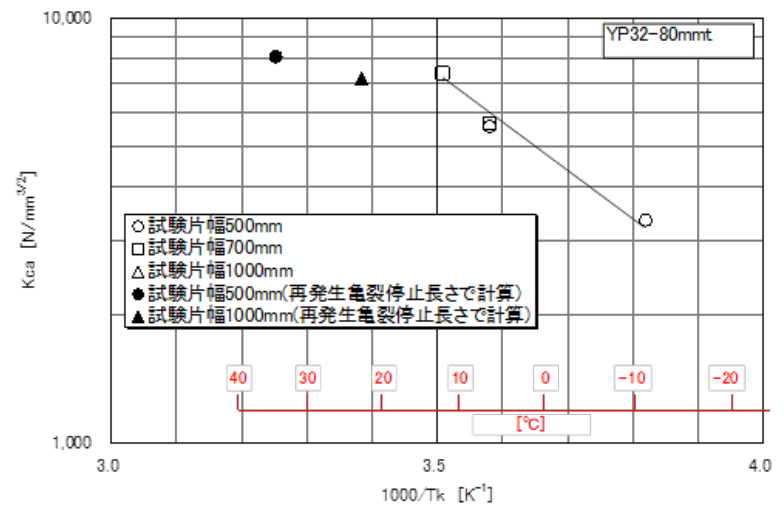
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(5) 亀裂再発生の評価

- 一旦アレストした亀裂が再発生した場合は最初のアレスト位置で評価することにより K_{ca} の温度依存性が正しく評価される(亀裂再発生はアレスト後の試験片振動によるものと推定)



(a)最初のアレスト位置で評価



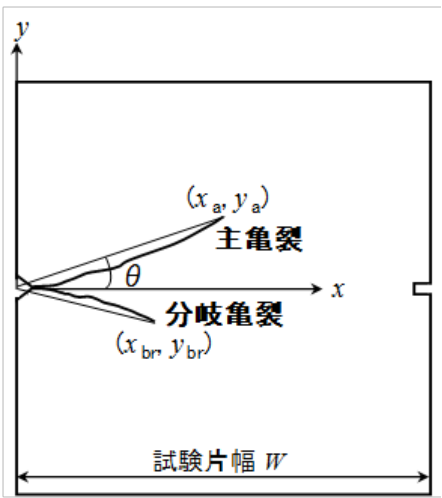
(b)最後のアレスト位置で評価

き裂再発生を生じた場合の K_{ca} 温度依存性データ

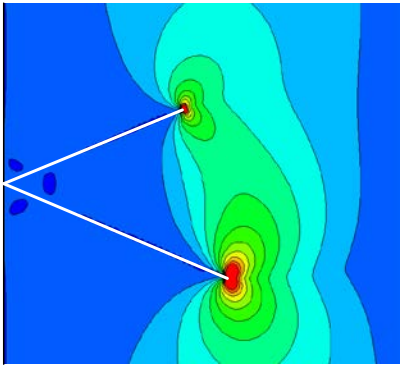
[1] アレスト試験法標準化のための基礎検討

(6) 亀裂分岐の評価

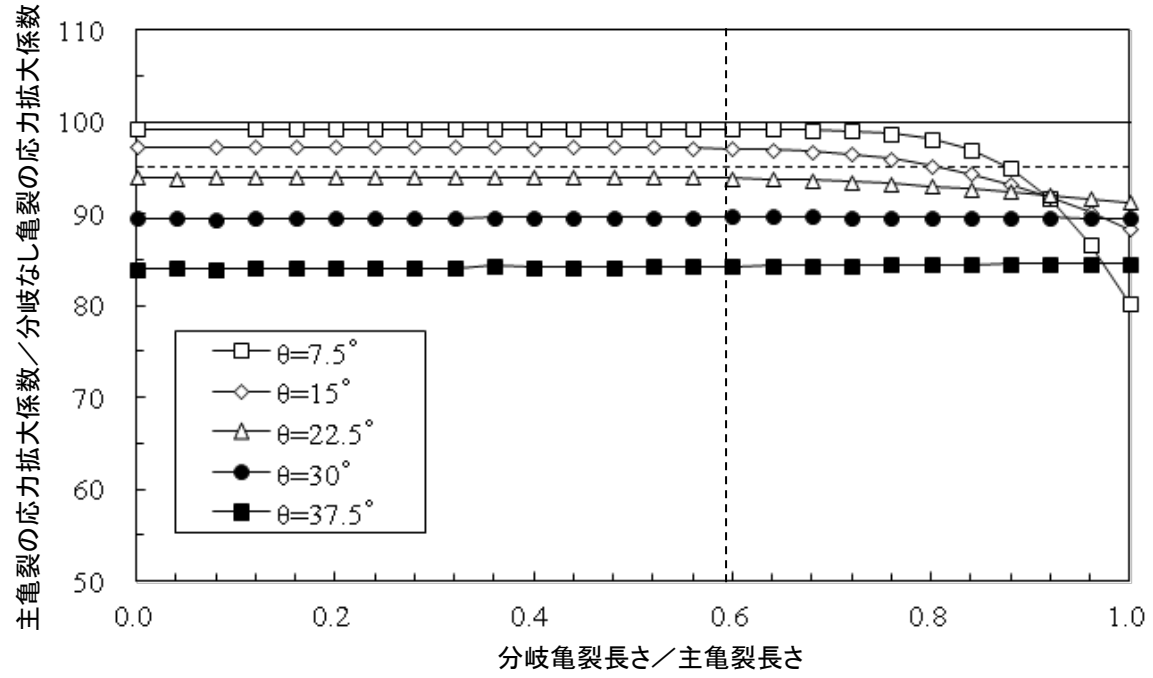
- 主亀裂の応力拡大係数に及ぼす分岐亀裂の影響をFEMで解析
- (分岐亀裂長さ／主亀裂長さ)比が0.6以下であれば影響小



主亀裂と分岐亀裂の定義



FEMによる分岐亀裂の応力解析の例(最大主応力分布)



主亀裂の応力拡大係数に及ぼす分岐亀裂長さの影響

[2] 標準アレスト試験規格の概要

脆性亀裂アレスト靱性試験方法

(Test Method for Brittle Crack Arrest Toughness, K_{ca})

序文

1. 適用範囲
2. 引用規格
3. 用語および定義
4. 記号とその意味
5. 試験装置
6. 試験片
7. 試験方法
8. 試験手順
9. アレスト靱性の決定
10. 報告

附属書A: 特定温度の K_{ca} を求める方法

附属書B: 動的計測方法

附属書C: 二重引張型アレスト試験

附属書D: 混成型アレスト試験

附属書E: 非直線亀裂に対する応力拡大係数の算定方法

解説

[2] 標準アレスト試験規格の概要

(1) 試験片・試験体の形状寸法規定

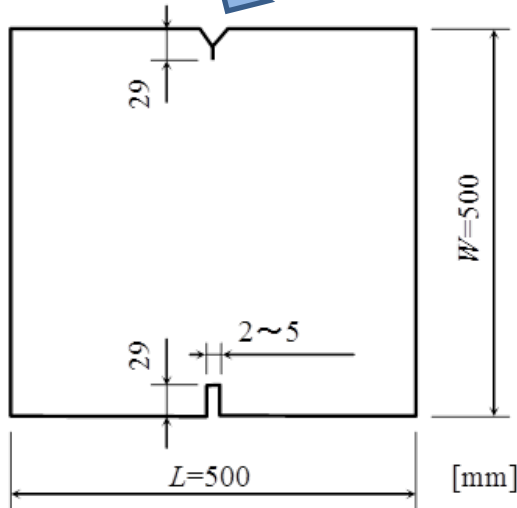
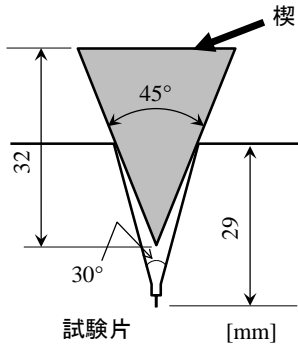
- ・200mm厚まで適用可能とした(極厚材のデータを整理して200mm厚まで正しく評価できることを確認)

試験片形状の規定

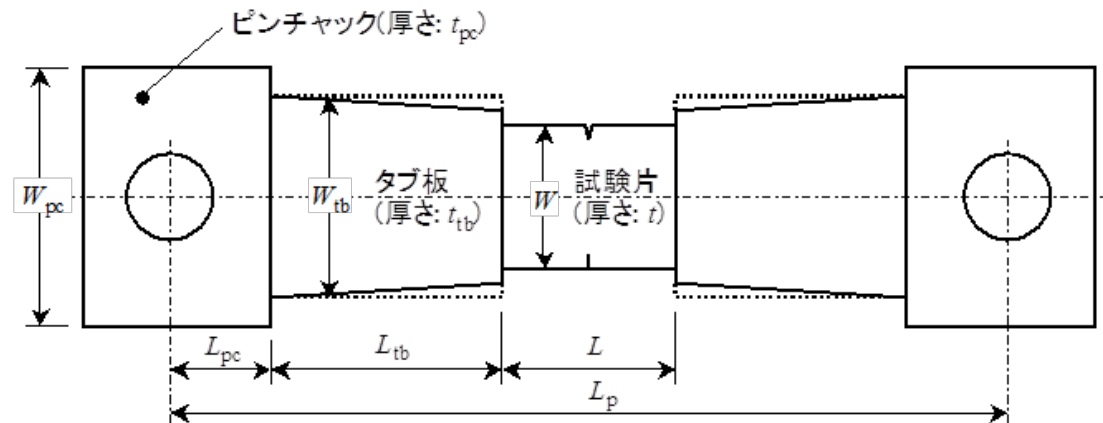
試験片厚さ t	$6\text{mm} \leq t \leq 200\text{mm}$
試験片幅 W	$350\text{mm} \leq W \leq 1000\text{mm}$ (標準: $W=500\text{mm}$)
試験片幅/試験片厚さ W/t	$W/t \geq 5$

試験体形状の規定

タブ板の厚さ t_{tb}	$0.8t \leq t_{tb} \leq 1.5t$
タブ板の幅 W_{tb}	$W \leq W_{tb} \leq 2.0W$
試験片+タブ板の全長 $L+2L_{tb}$ (試験片+タブ板片側長 $L+L_{tb}$)	$L+2L_{tb} \geq 3.0W$ ($L+L_{tb} \geq 2.0W$)
タブ板長さ(L_{tb})/試験片幅(W)	$L_{tb}/W \geq 1.0$



標準試験片形状



試験体形状の例

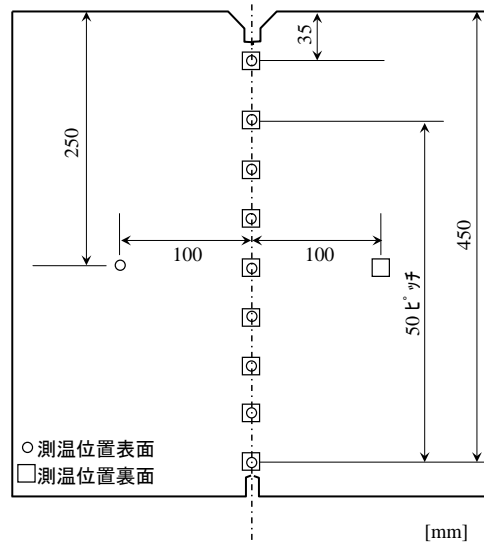
[2] 標準アレスト試験規格の概要

(2) 試験片温度制御の規定

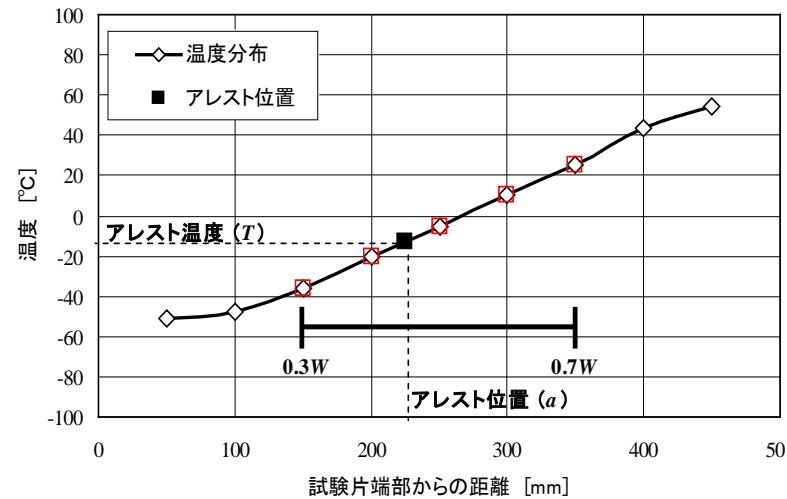
- ・試験片の冷却装置、温度計測範囲、冷却手順などを詳細に規定
温度勾配とアレスト位置の温度を正確に評価できるようにした
- ・試験片幅 $0.3W \sim 0.7W$ の範囲において、 $0.25 \sim 0.35^\circ\text{C}/\text{mm}$ の温度勾配



冷却槽の設置例



温度計測位置の規定の例



計測された温度分布とアレスト温度の決定方法

[2] 標準アレスト試験規格の概要

(3) アレスト亀裂の規定

- ・荷重低下影響を排除するため、(アレスト亀裂長さ/ピン間距離)比を0.15以下に規定(動的荷重計測による救済規定あり)
- ・亀裂伝播経路は温度制御範囲内を基本とする

アレスト亀裂長さ・アレスト位置の条件

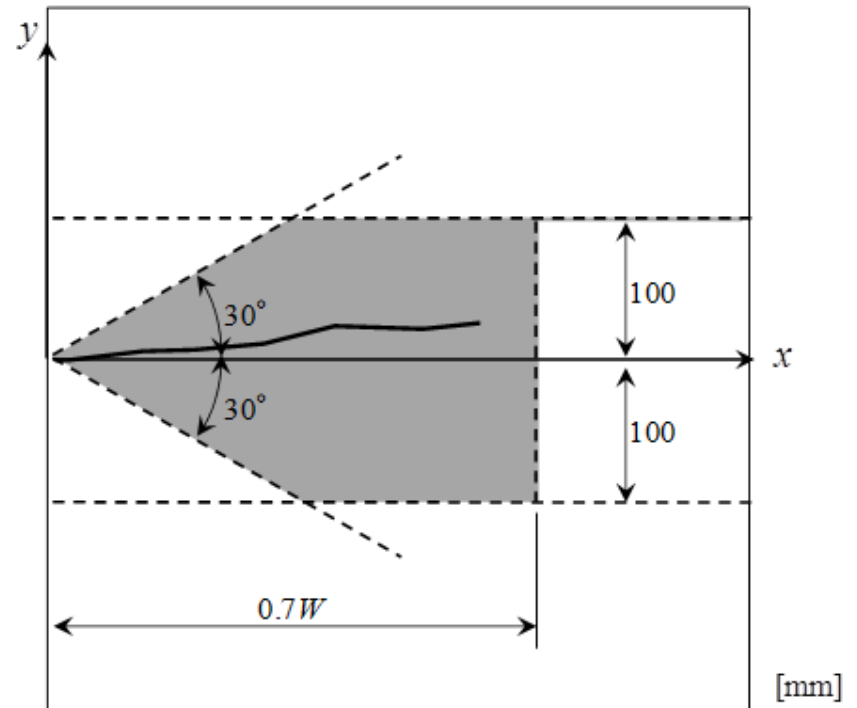
$$0.3 \leq \left(\frac{a}{W} \right) \leq 0.7$$

$$\left(\frac{a}{t} \right) \geq 1.5$$

$$\left(\frac{a}{L_p} \right) \leq 0.15$$

$$|y_a| \leq 50\text{mm}$$

$$\left(\frac{x_{br}}{x_a} \right) \leq 0.6$$



主亀裂伝播経路の許容範囲

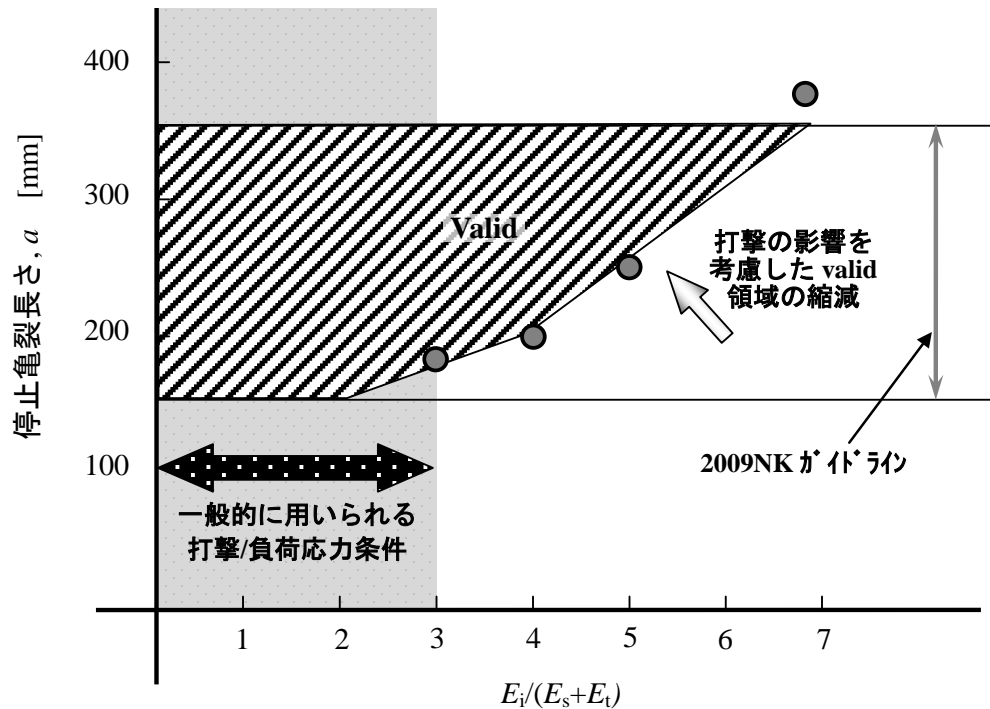
[2] 標準アレスト試験規格の概要

(4) 打撃エネルギーの判定

- ・アレスト亀裂長さ・試験体に蓄えられた歪エネルギーとの関係で打撃エネルギー許容範囲を規定

$$\frac{E_i}{E_s + E_t} \leq \frac{5a - 1050 + 1.4W}{0.7W - 150} \quad \text{ただし、} 0.3 \leq \left(\frac{a}{W}\right) \leq .7$$

(mm)



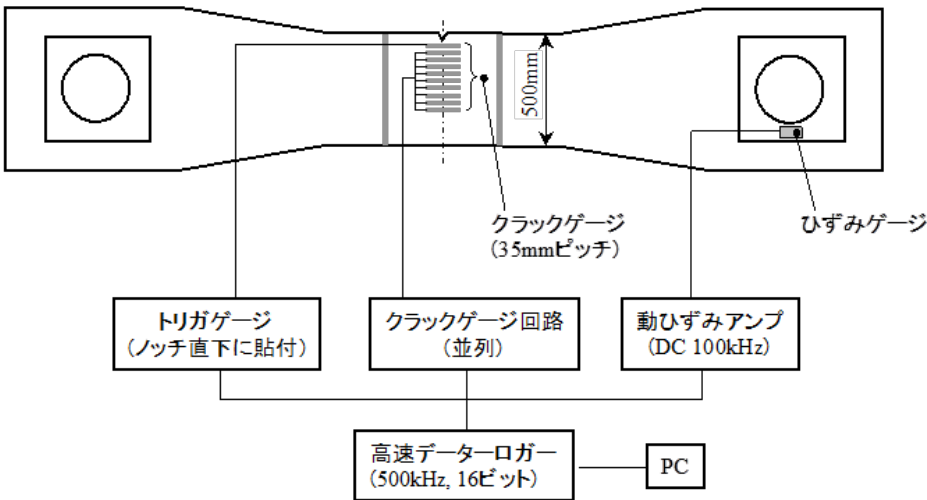
E_i : 打撃エネルギー
 E_s : 試験片の歪エネルギー
 E_t : タブ板の歪エネルギー

打撃エネルギーの許容範囲

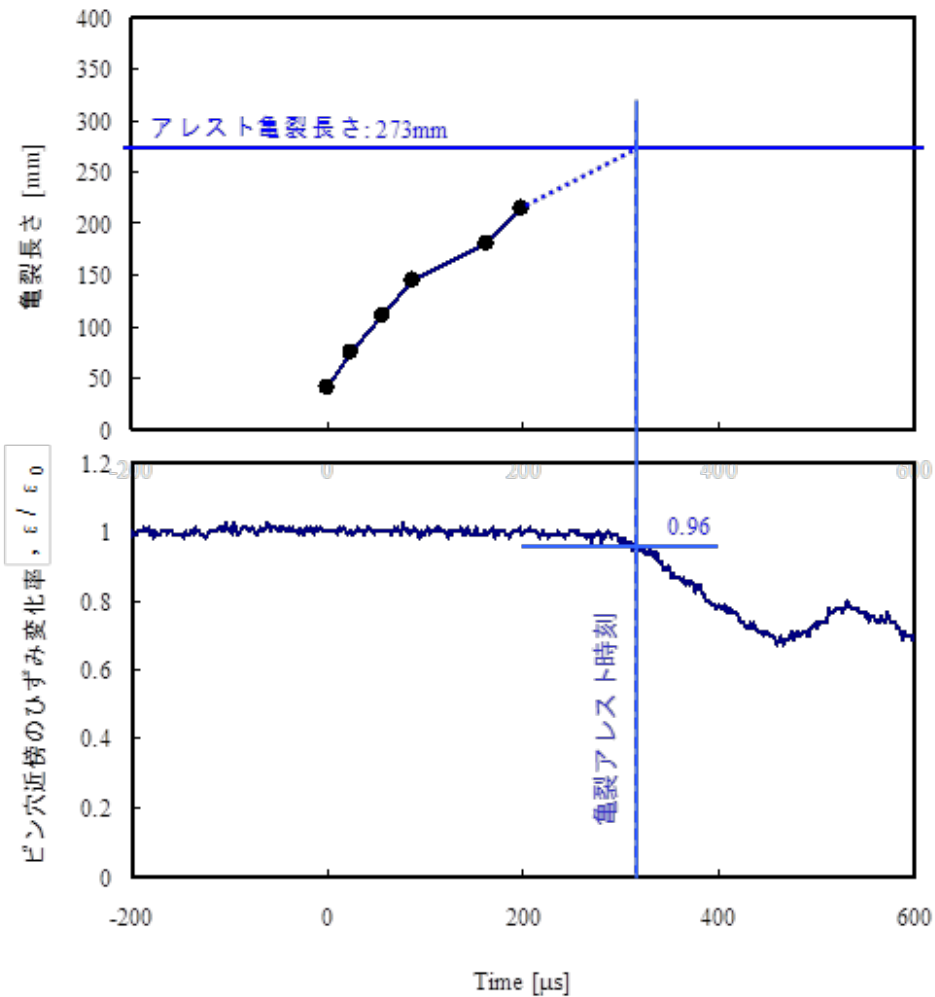
[2] 標準アレスト試験規格の概要

(5) 動的計測方法 (附属書B)

- 動的計測により、アレスト時の荷重を求め、初期荷重の90%以上であれば試験を有効とする



動的計測系の例

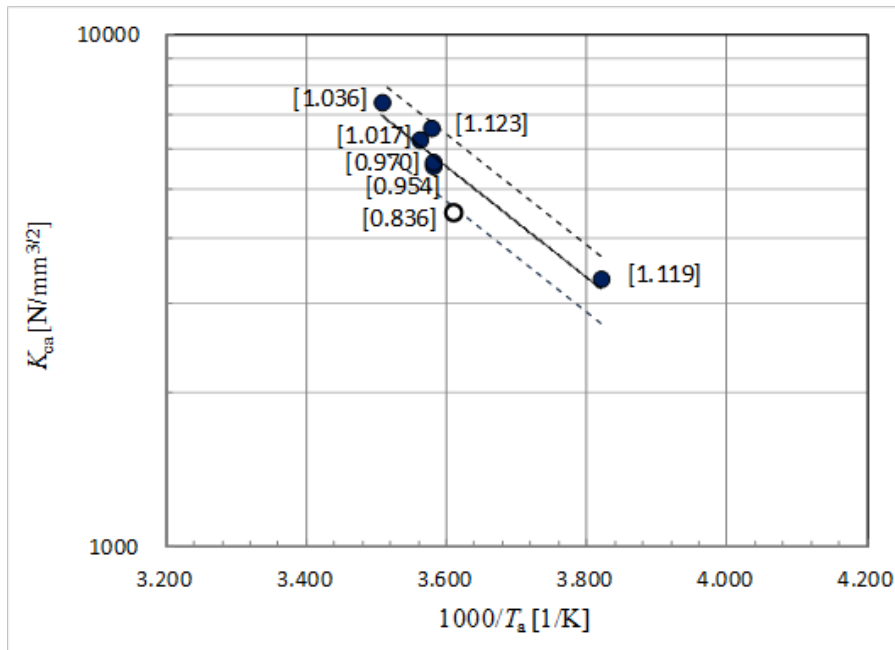


アレスト時荷重低下率の算定

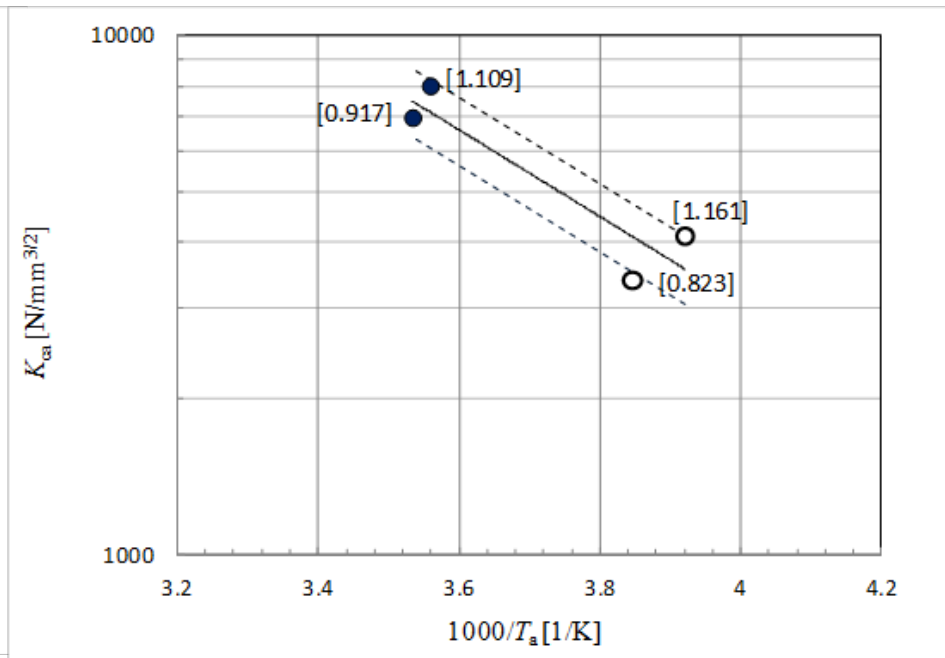
[2] 標準アレスト試験規格の概要

(6) 特定温度の K_{ca} を求める方法(附属書A)

- ・試験本数は最低4本
- ・全データをアレニウスプロットで直線近似し、個々値の直線からの乖離が±15%以上のデータ数が規定数(試験6本の場合は1点)以下であれば、直線近似を有効とする。無効な場合は追加試験により少なくとも2点のデータを追加して再評価



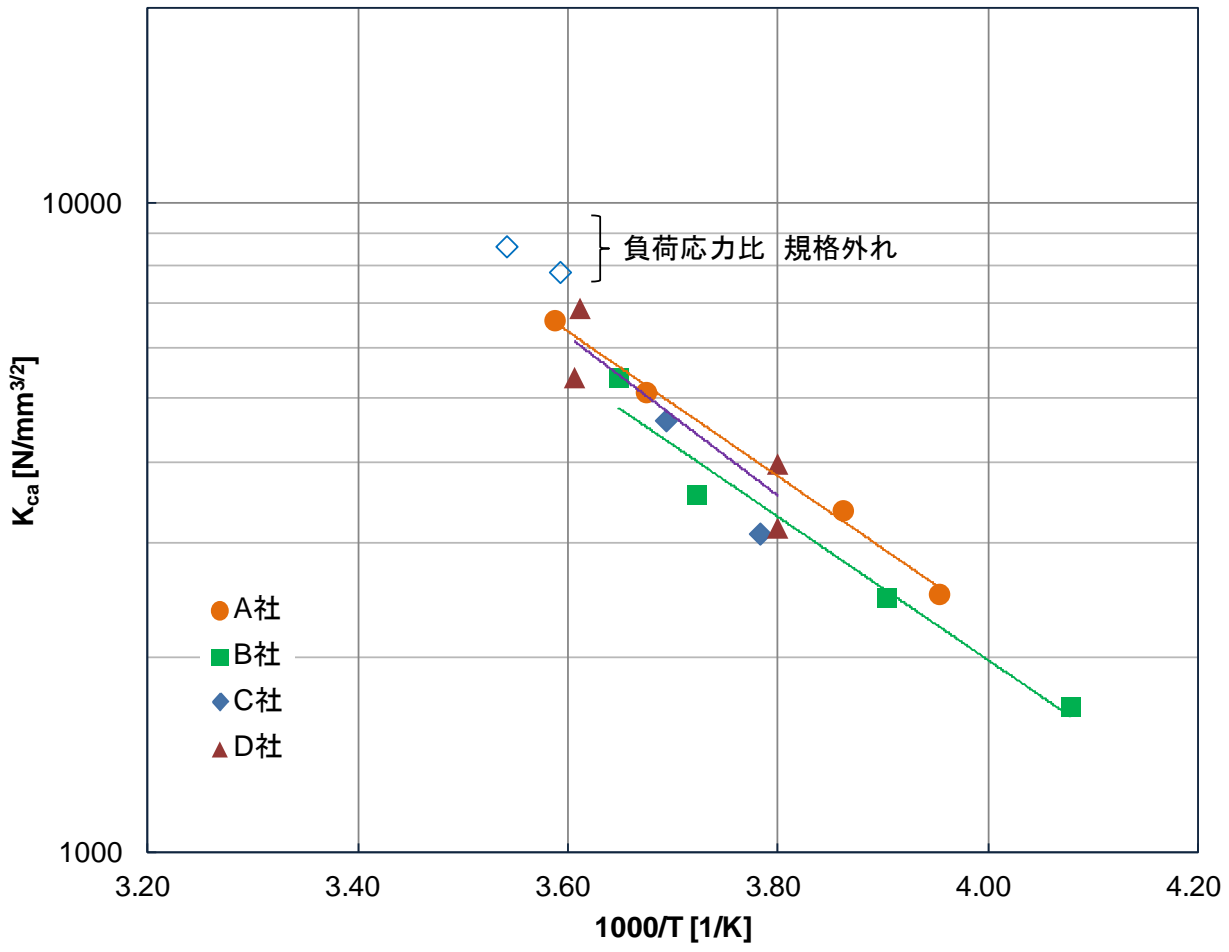
直線近似が有効な場合



追加試験が必要な場合

[3] 標準アレスト試験法の検証

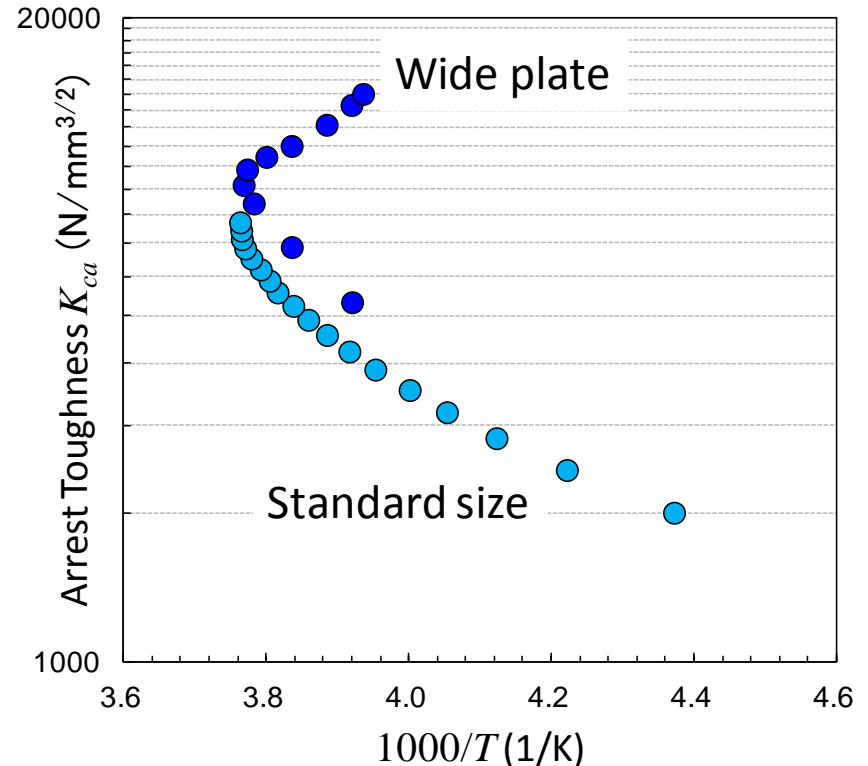
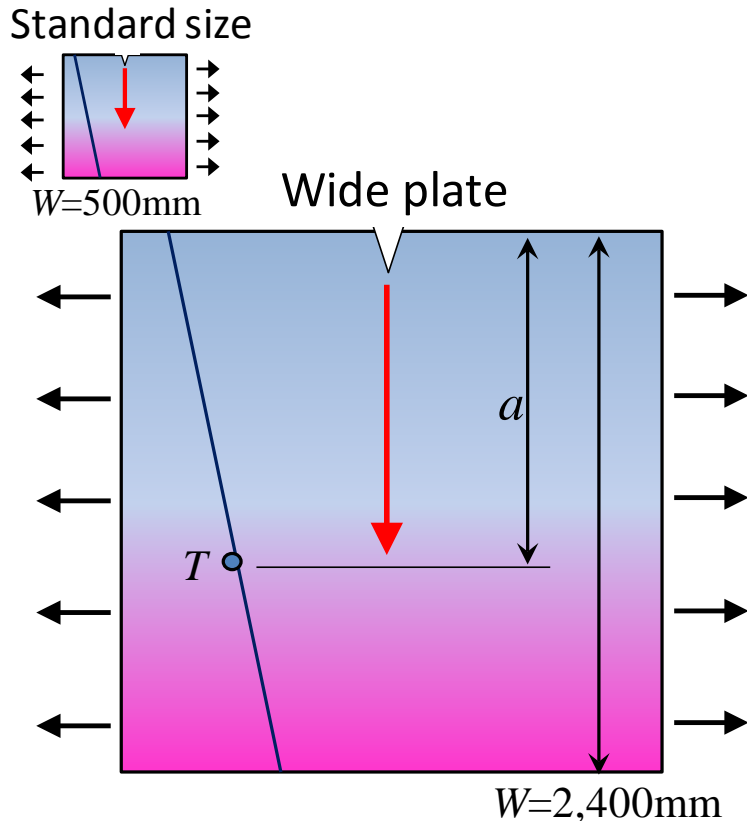
- ・鉄鋼各社において共通鋼板(50mmノルマ材)を用いてアレスト試験を実施
- ・本試験方法に従えば同一の K_{ca} 温度依存性が得られることを確認した



[4]長大亀裂問題への取り組み

(1)温度勾配型アレスト試験の解析

- 標準サイズ試験片の K_{ca} と超広幅試験片の K_{ca} が一致しない理由が長年、不明
- 応力拡大係数が大きくなると(超広幅試験片)亀裂先端塑性域が拡大して塑性拘束が低下、亀裂先端応力はむしろ低下
- 簡易モデルにより K_{ca} の試験片寸法依存性を説明

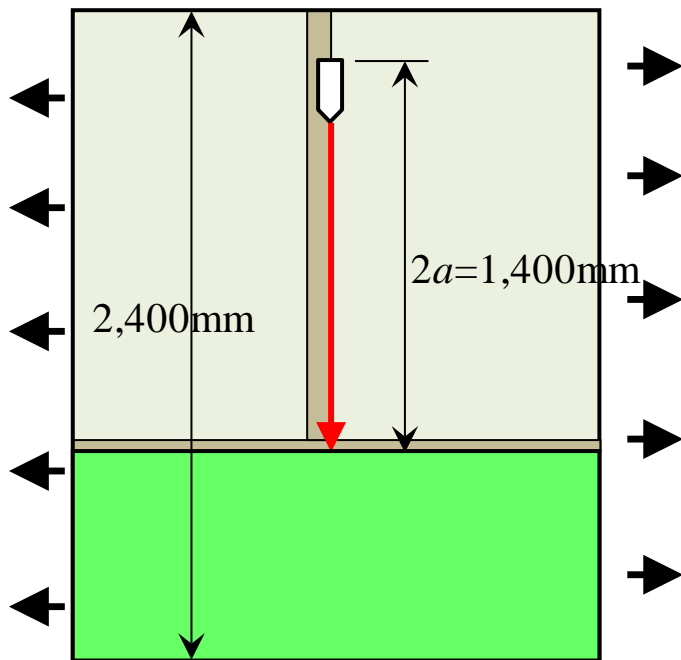


簡易モデルによる K_{ca} の試験片寸法依存性の予測

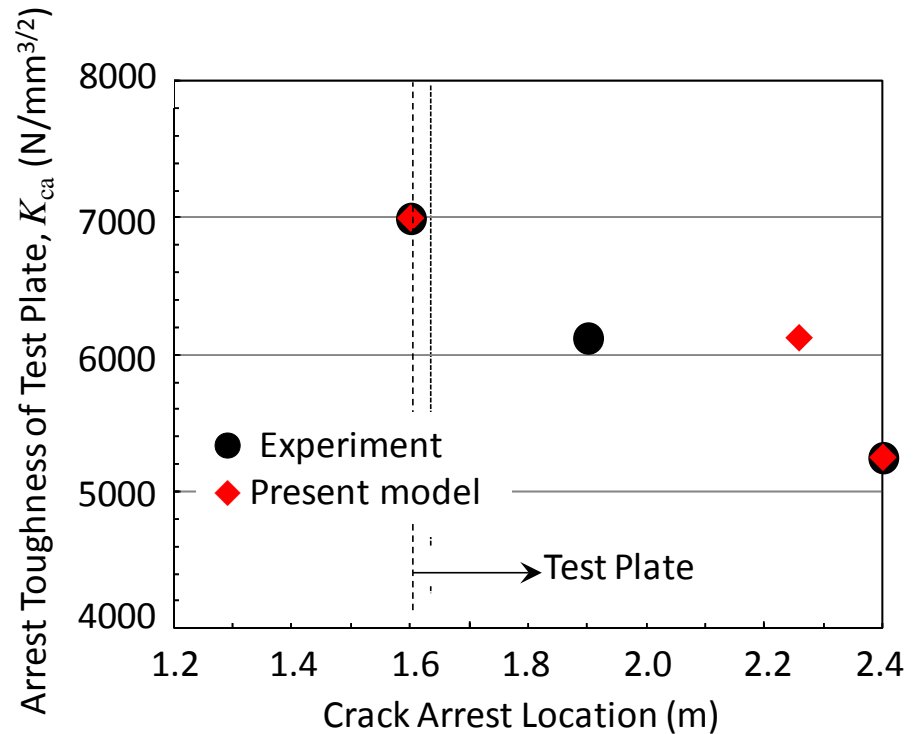
[4]長大亀裂問題への取り組み

(2)超広幅混成ESSO試験の解析

- ・一定負荷応力で試験温度を変化(試験板の K_{ca} 変化)させた実験結果は本モデルで説明可能
- ・一定温度で負荷応力を変化させた実験を実施したが、本モデルでは傾向を説明できなかった



$$\sigma_{app}=257\text{N/mm}^2$$



簡易モデルによる超広幅混成ESSO試験結果の予測
(一定負荷応力) <NKアレスト委員会データ>

[5] 成果まとめ

- (1) アレスト靱性 K_{ca} に及ぼす試験片寸法、試験条件などの影響に関する実験と数値解析を実施し、正確な K_{ca} を得るための試験条件・試験方法を決定した。
- (2) 上記に基づいてアレスト靱性試験方法の規格原案を策定した。
- (3) 上記試験方法の確認試験を実施し、有効性を検証した。
- (4) 長大亀裂の問題には未解明の点を残しており、継続して研究が必要。

[6] 今後の展開

(1) アレスト靱性試験方法のWES化

公衆審査等の手続きを経て2013年中に規格化手続き完了
2014年3月までに発行予定(日本語版・英語版)

(2) ISO規格化

ISO TC/164 SC4(Fracture Toughness)にNew Work Item
Proposal提出(2013年9月)、審議を経て数年後にISO規格化
予定

(3) 情報発信

シンポジウム「溶接鋼構造物における脆性亀裂伝播アレスト
研究の最前線」を開催(主催:日本溶接協会、後援:日本海事
協会他)2013年11月8日

(4) アレスト靱性簡易評価試験方法の開発

ATE2委員会で継続研究中(2012年4月～2014年9月)

(5) 長大亀裂問題の解決

基礎試験及びモデル解析を計画中