

簡易き裂進展解析手法を用いた 構造物の靱性評価に関する基礎検討

Fundamental Study on Toughness Evaluation of Structures
Using a Simplified Crack Propagation Analysis Method.

大阪公立大学大学院 工学研究科

航空宇宙海洋系専攻
海洋システム工学分野

生島研究室 ○山内悠暉

コンテナ船の大型化

事発生時の被害：大
→社会的なリスクの増大



(a) ホギング (船体が凸形状に曲げられる状態)

厳しい荷重条件

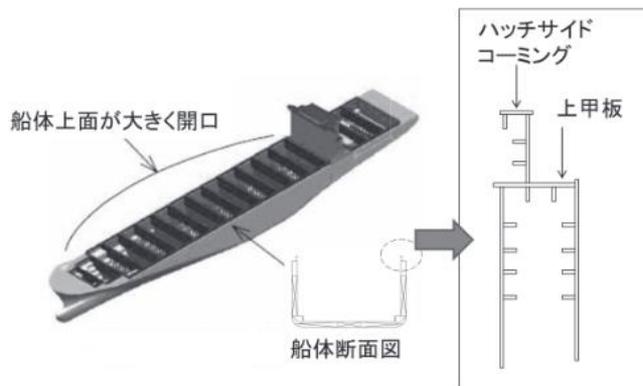


図5 コンテナ船の基本構造

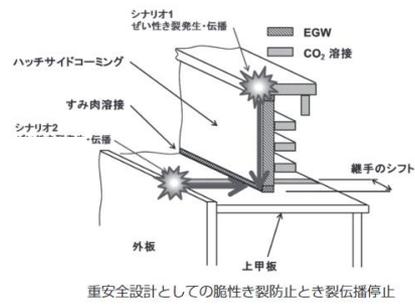


ハッチサイドコーミング及び強力甲板に多大な荷重
⇒ 脆性き裂に伴い大規模破壊の恐れあり

脆性き裂の進展を阻止する必要

進展停止に向けた取り組み

- **材料的な取り組み** : 靱性値の改善
- **構造的な取り組み** : 構造不連続部の配置



脆性き裂伝播シナリオ
 • 強力甲板 ⇒ ハッチサイドコーミング
 • ハッチサイドコーミング ⇒ 強力甲板

重安全設計としての脆性き裂防止とき裂伝播停止

Table 1 Test conditions

Scenario	Test specimen	Weld type between test plates and crack running plate	Test plate		Test stress (N/mm ²)	Test temperature (°C)	Kca of test plate (N/mm ^{3/2})
			Grade	Thickness (mm)			
1	Ultra-large	t/3 partial penetration	EH40	100	257	-30	7,000
						-35	6,000
2	Large	t/3 & t/4 partial penetration	EH47	100	257	-34	7,000
	Ultra-large					-28	8,000

Width of root face (d)	0mm [Full-penetration]	33mm [Partial penetration]	65mm [Fillet welding]
Cross section of Tee joint			
Welding method	CO ₂ arc welding		
Welding consumables	YFL-C504R φ 1.2mm, CO ₂		
Welding position	Horizontal fillet welding		
Welding condition	180-280A, 20-34V, 20-45cm/min		
Weld layer and pass for each side	9 layers 20-24 passes	4 layers 7 passes	2 layers 3 passes

破壊靱性評価が抱える課題

破壊靱性指標の例

- 応力拡大係数による評価 : K_{1c} (発生), K_{ca} (停止)
- き裂開口変位 : CTOD δ
- 弾塑性破壊靱性指標 : J_{1c}
- シャルピー衝撃試験における吸収エネルギー
- など

適用範囲の狭さ
 試験規模の増大
 数値計算の煩雑さ

種々の靱性指標は適用範囲や試験方法の何度が増大していく
 ⇒ 統一的かつ簡潔に評価する手法が求められる

研究目的

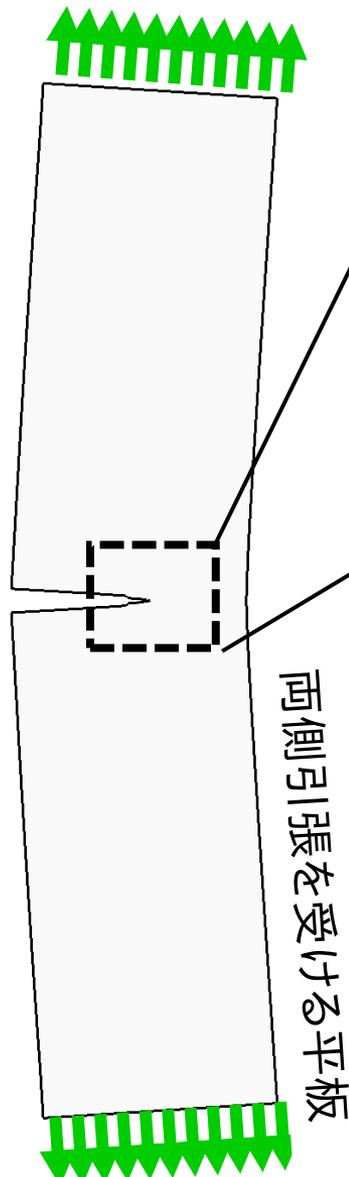
簡易き裂進展解析手法による構造物の靱性評価手法の確立

靱性パラメータ D_c の導入

発表内容

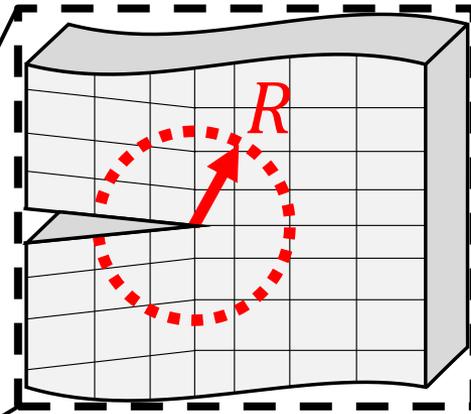
- 簡易き裂進展解析手法の説明
- 3点曲げ試験への適用
 - D_c および 降伏応力が及ぼす影響に関する検討
- 十字継手の引張試験への適用
 - 未溶着部の長さがき裂進展挙動へ及ぼす影響に関する検討
 - D_c 及び降伏応力が進展挙動へ及ぼす影響に関する検討
- 結論

簡易き裂進展解析手法



両側引張を受ける平板

特性テンソル法:大阪大学村川らによって開発



き裂先端の力学状態を
周辺要素を用いて表現

$$\chi_{ij} = \lim_{R \rightarrow 0} \sqrt{R} \cdot \int \sigma_{ij} \frac{dV}{V}$$

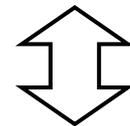
$$K = \alpha_{ij} \chi_{ij}$$

$$K^2 = E \cdot G \propto E \left(\frac{1}{2E} \sigma^2 \cdot \frac{V}{A} \right) \propto \frac{1}{2} \sigma^2 L = \frac{1}{2} E \sigma^* \varepsilon^* = EW^*$$

$$Kw = \sqrt{EW}$$

Kと同様の値をとるように校正

ひずみエネルギーの平均値から求めた応力拡大係数 Kw



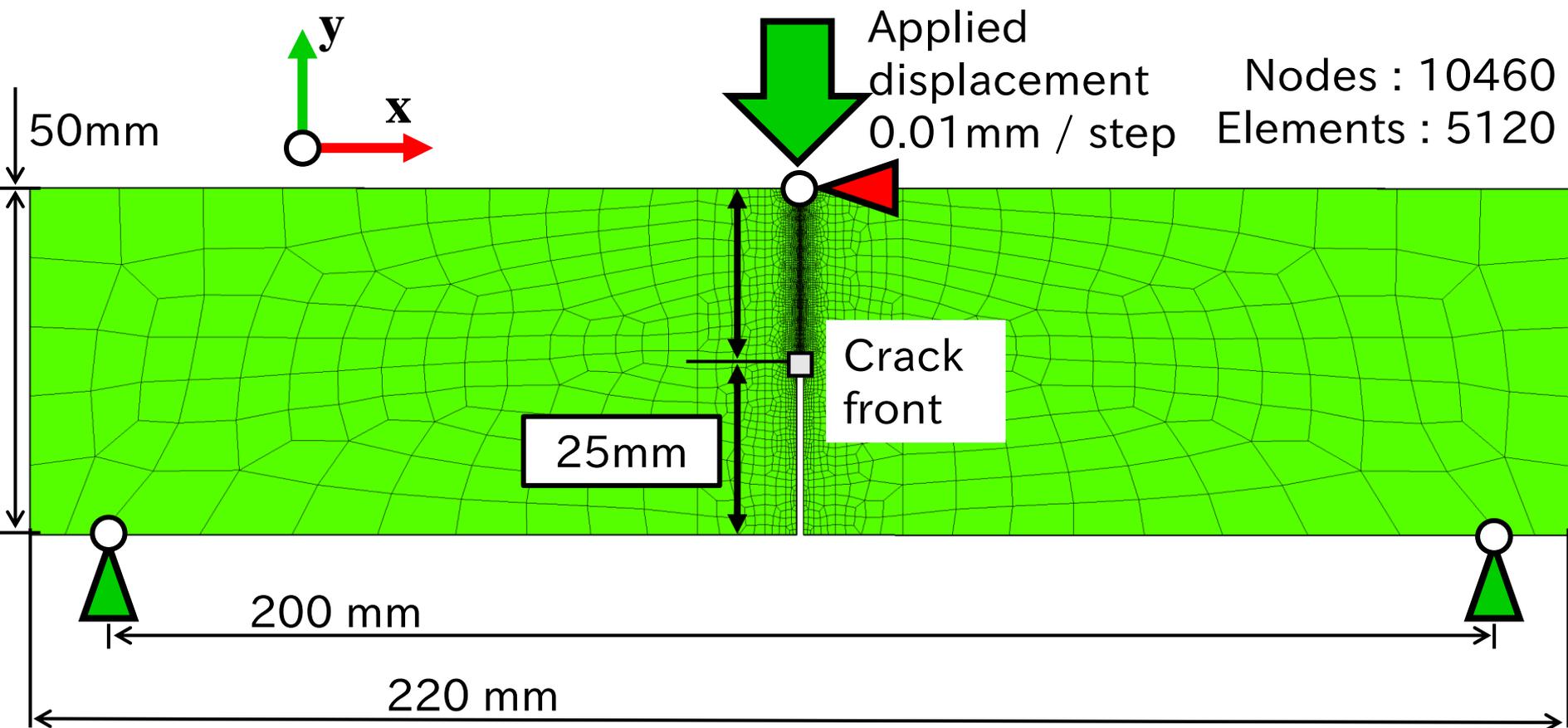
き裂の進展を判断

材料パラメータである D_c = 靱性(粘り強さ)

$Kw > D_c$ の時にき裂が進展する (要素を削除する)

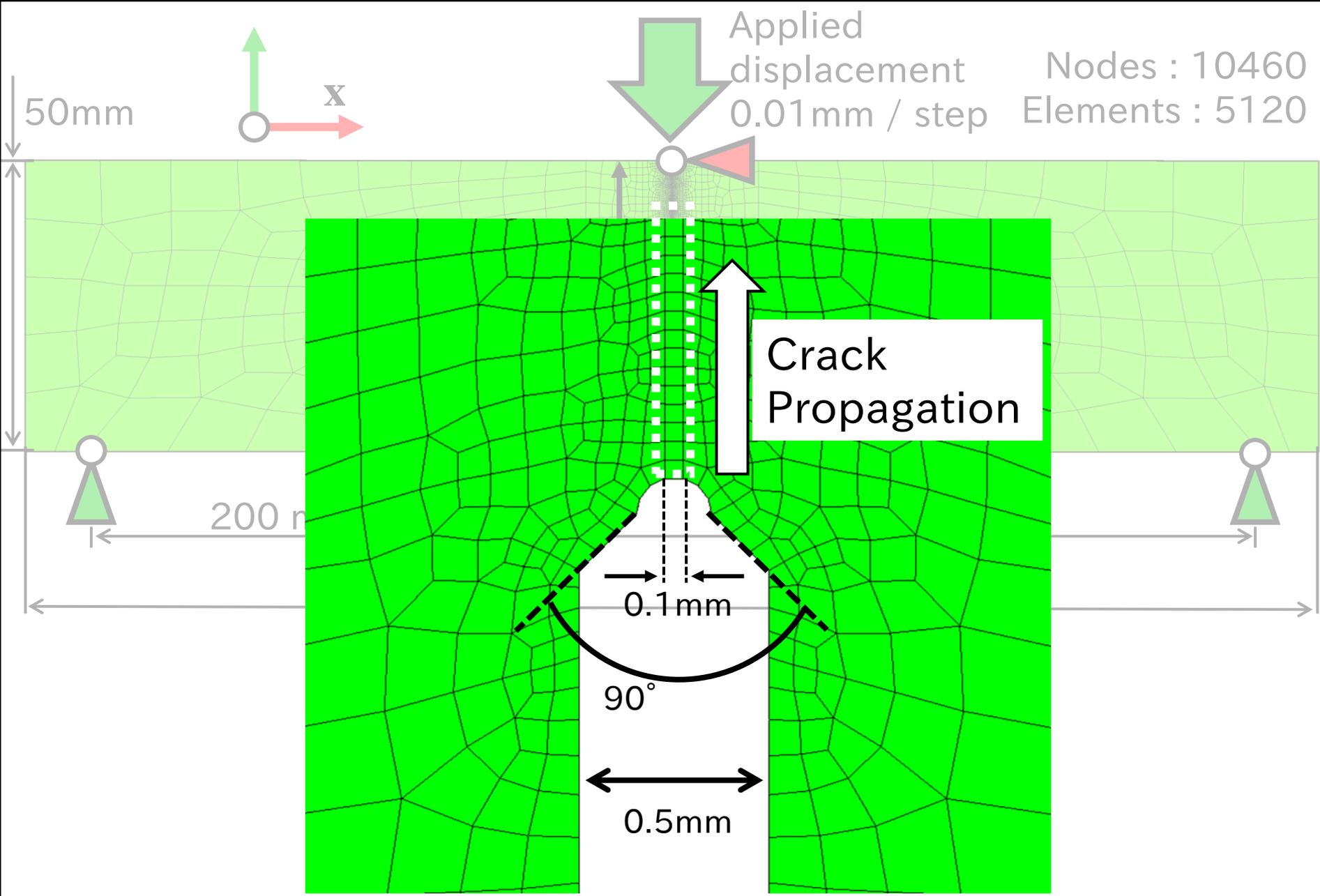
3点曲げ試験への適用：試験条件

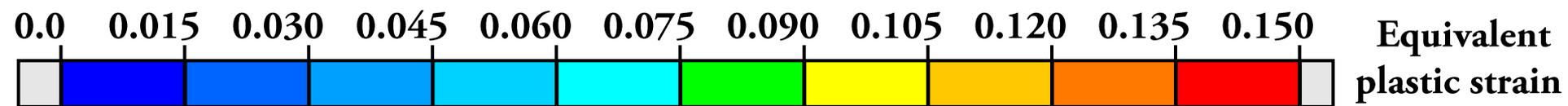
靱性パラメータ及び降伏応力が強度に及ぼす影響について検討



き裂進展条件: $Kw > D_c$

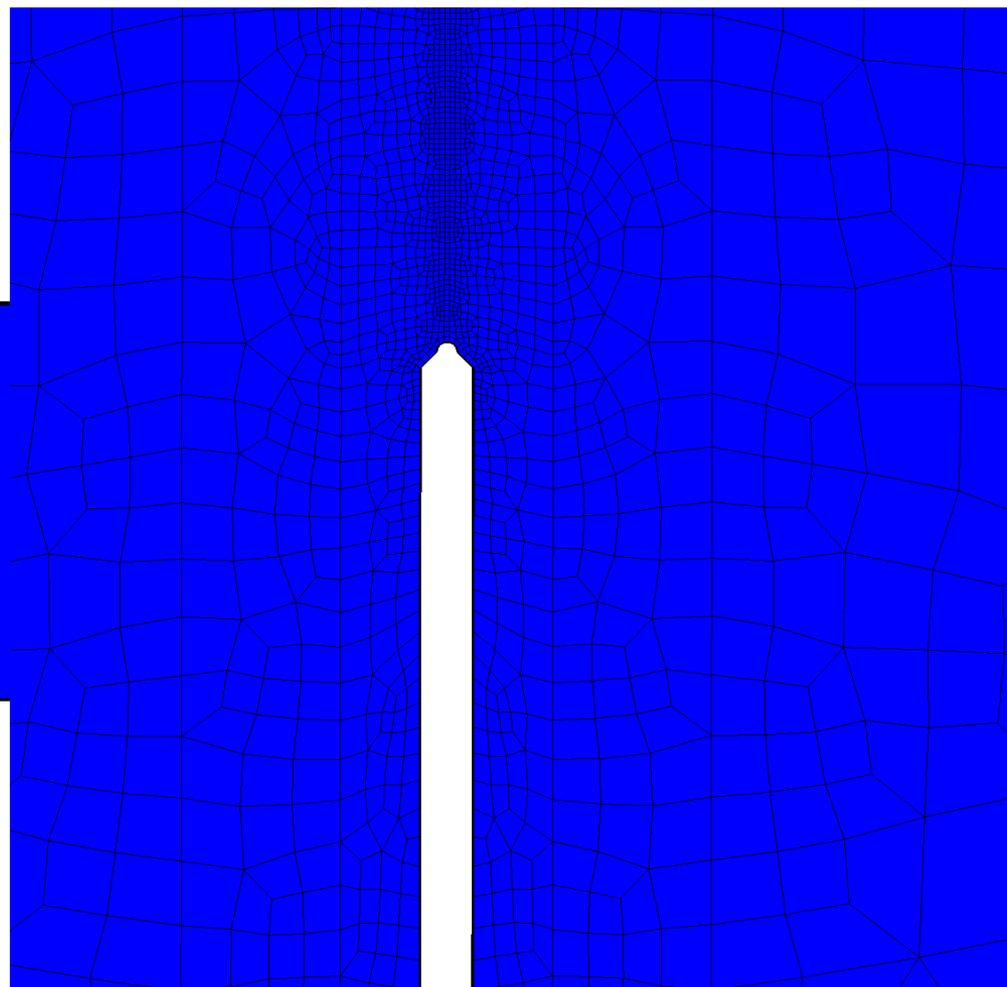
試験条件





変形倍率：等倍

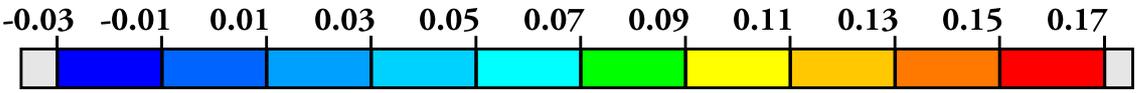
$$D_c = 50$$



き裂の進展とともに全体が下に凸状に変形

Dcの違いによる進展挙動の違い

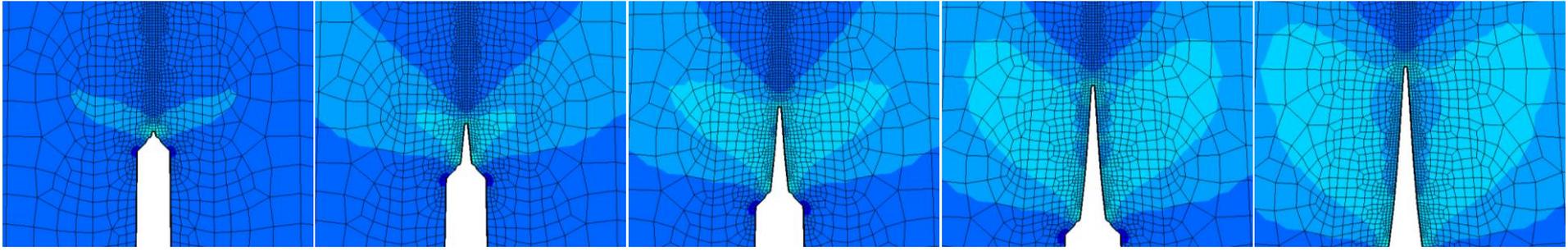
き裂先端部を拡大して表示



Plastic strain x

靱性パラメータ $D_c=10$

塑性ひずみがほとんど発生していない



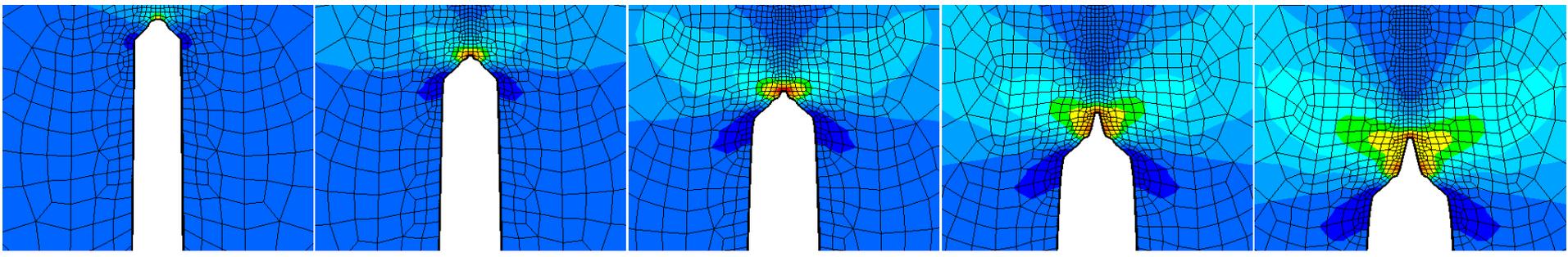
押し込み量
=1.0mm

2.0mm

3.0mm

4.0mm

5.0mm

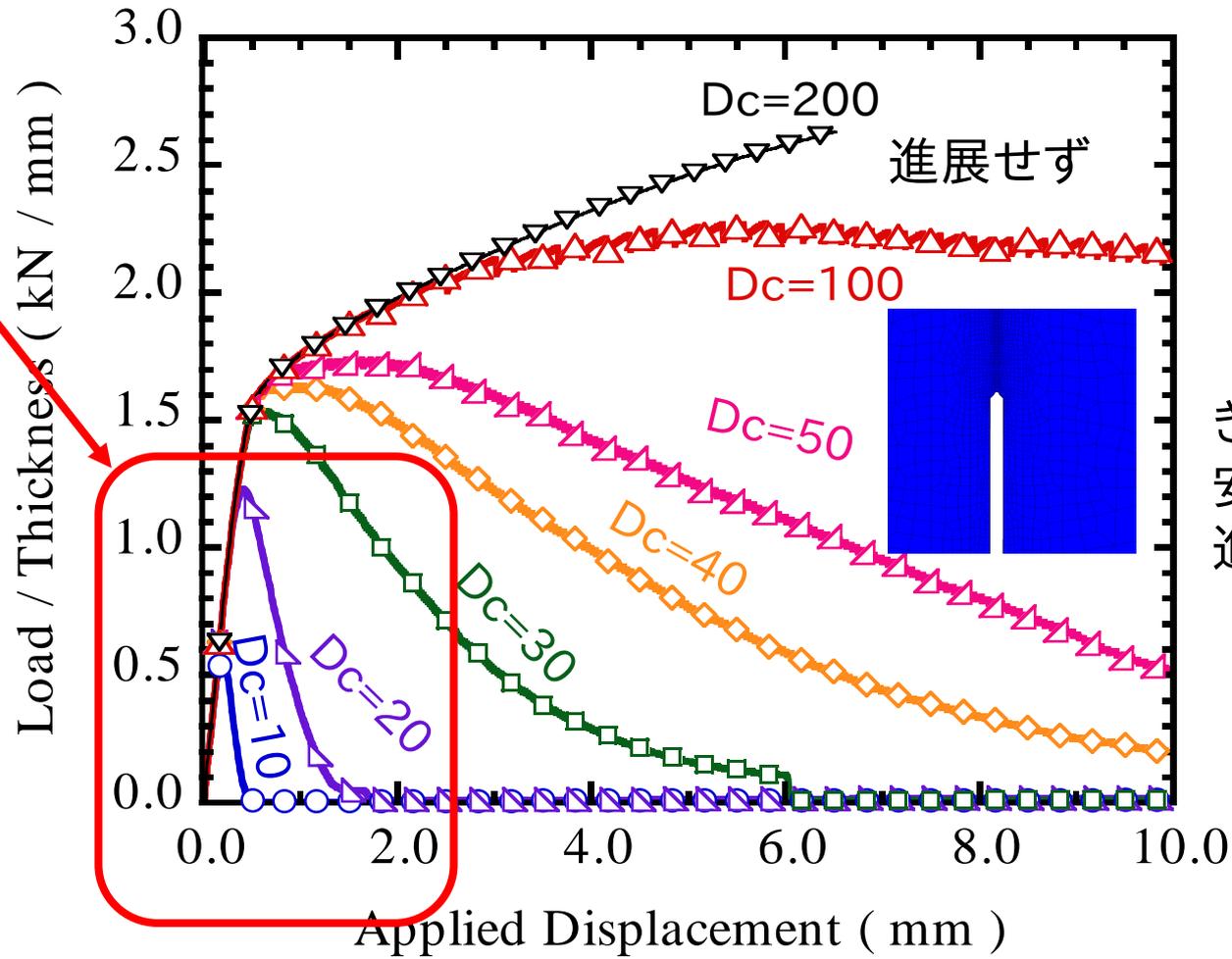


靱性パラメータ $D_c=50$

き裂先端付近に大きな塑性ひずみ

D_c : 大 \Rightarrow 塑性ひずみ : 大 / き裂の進展 : 短

塑性ひずみが発生せず
き裂が進展
⇒脆性破壊

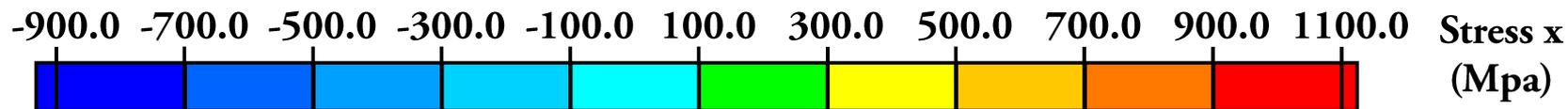


き裂が安定して進展

D_c : 大 ⇒ 試験片の強度 : 大

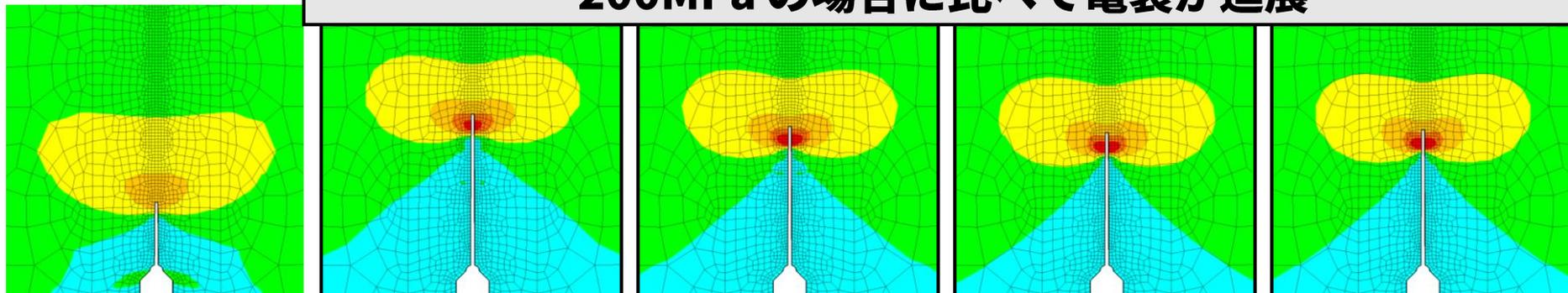
降伏応力及び靱性パラメータ D_c の関係

靱性パラメータ及び降伏応力を変化させて検討を行った



$D_c = 10$

200MPa の場合に比べて亀裂が進展



200MPa

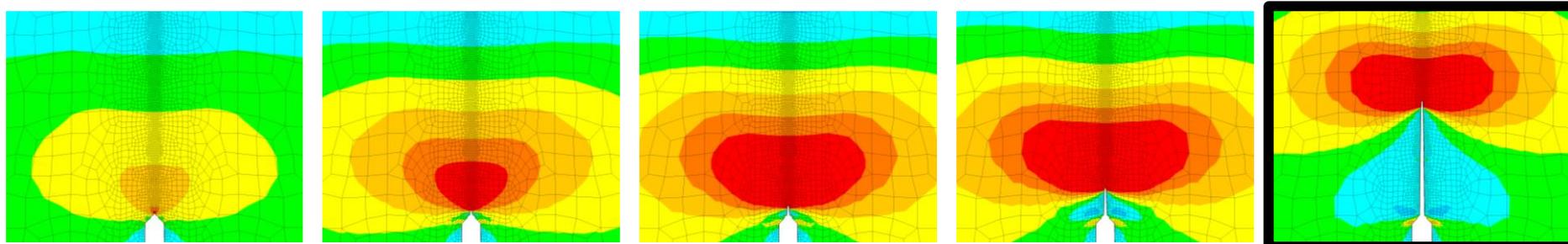
400MPa

600MPa

800MPa

1000MPa

$D_c = 50$



200MPa

400MPa

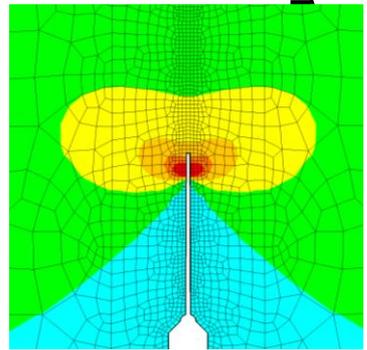
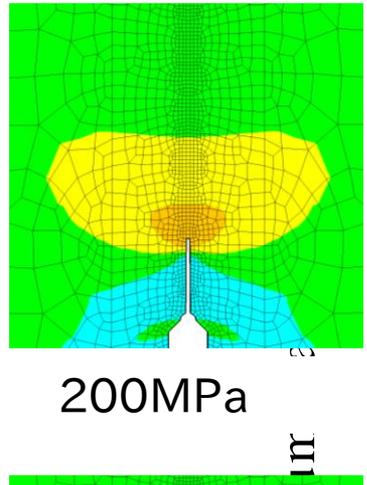
600MPa

800MPa

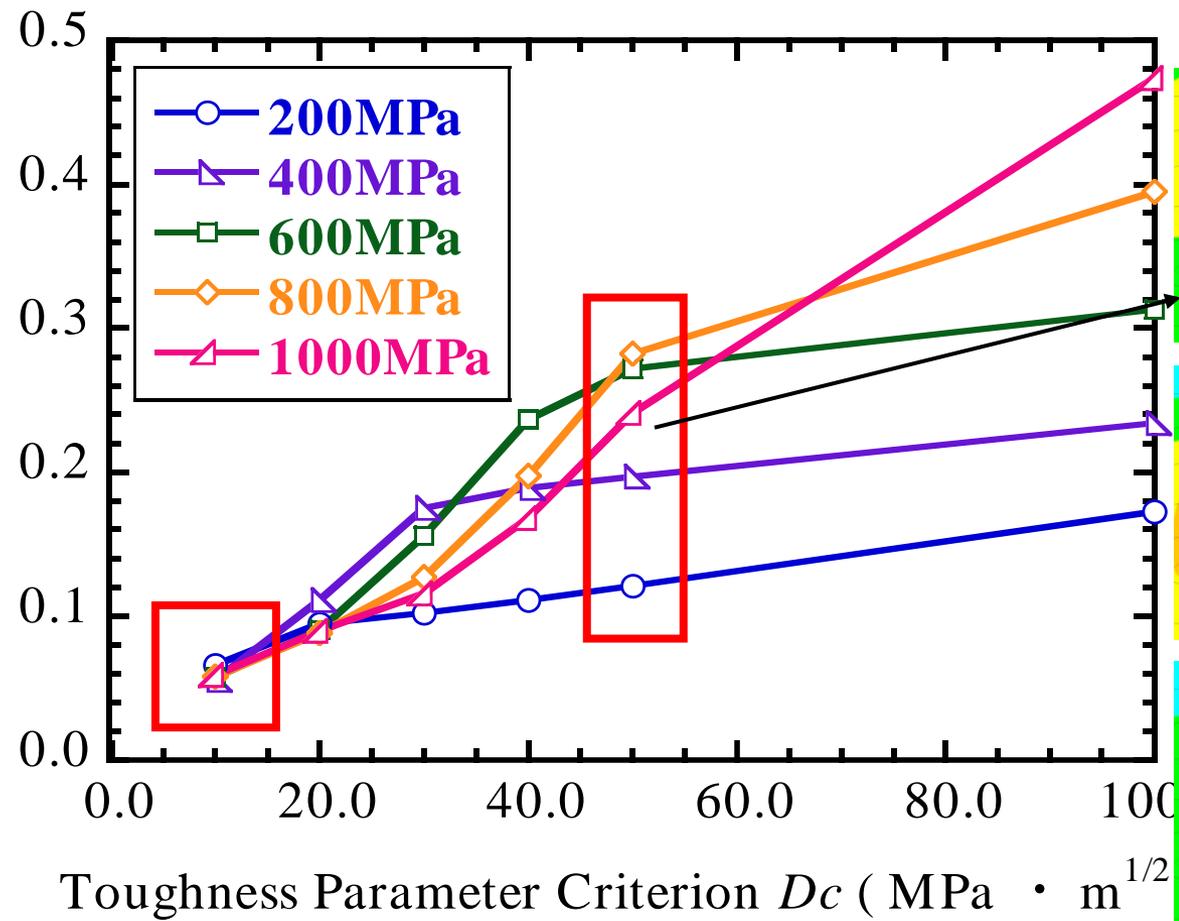
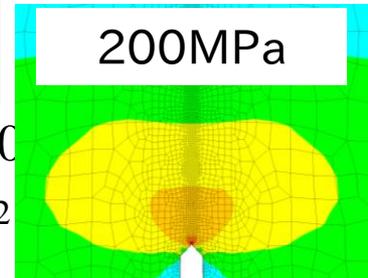
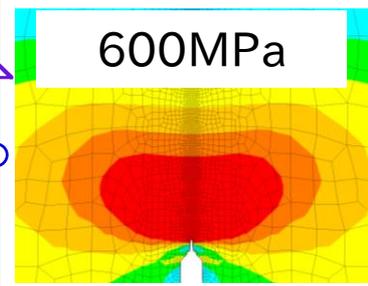
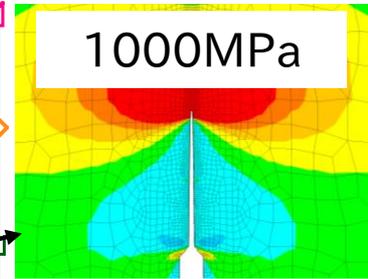
1000MPa

200MPa ~ 600MPa の場合に比べて亀裂が進展

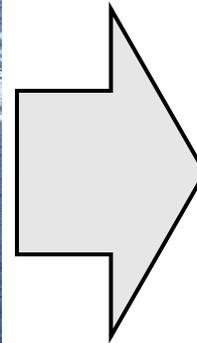
$D_c = 10$



$D_c = 50$



構造の強度は、降伏応力のみならず
降伏応力と靱性パラメータ D_c の**関係が重要**である



甲板との接合部



**脆性き裂貫通により
船体が大規模破壊を起こす**

脆性き裂伝播停止に向けた取り組み

- 材料的な取り組み
- **構造的な取り組み**

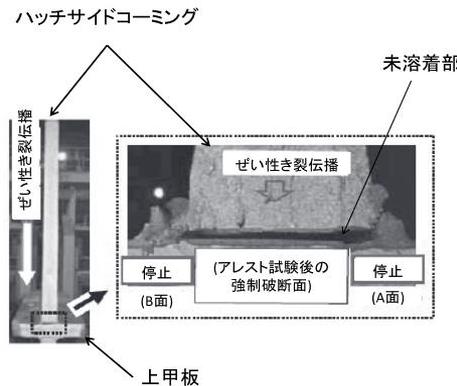


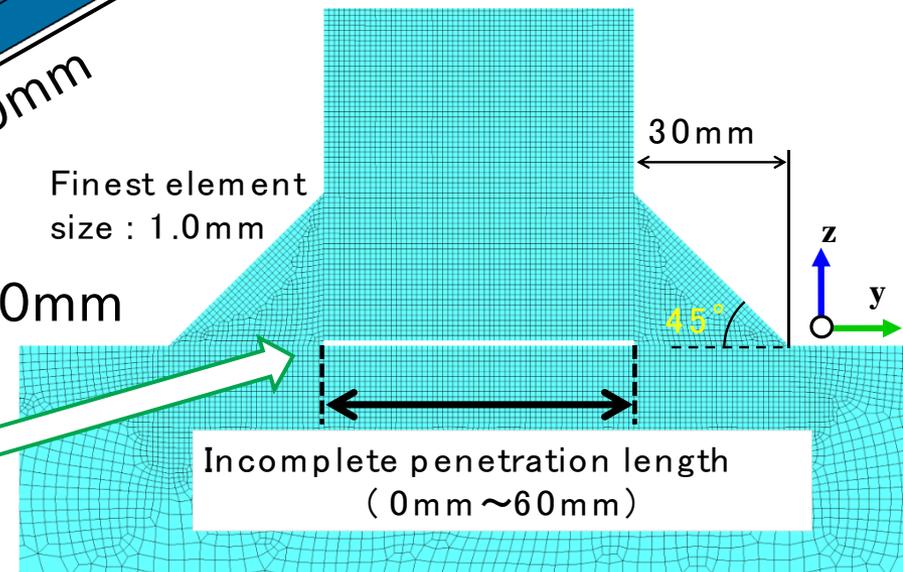
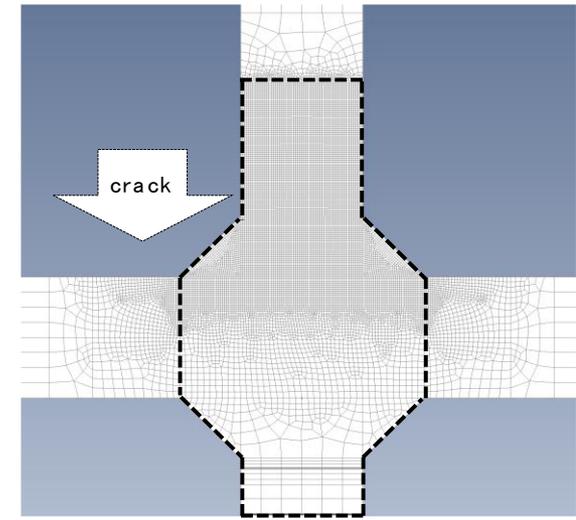
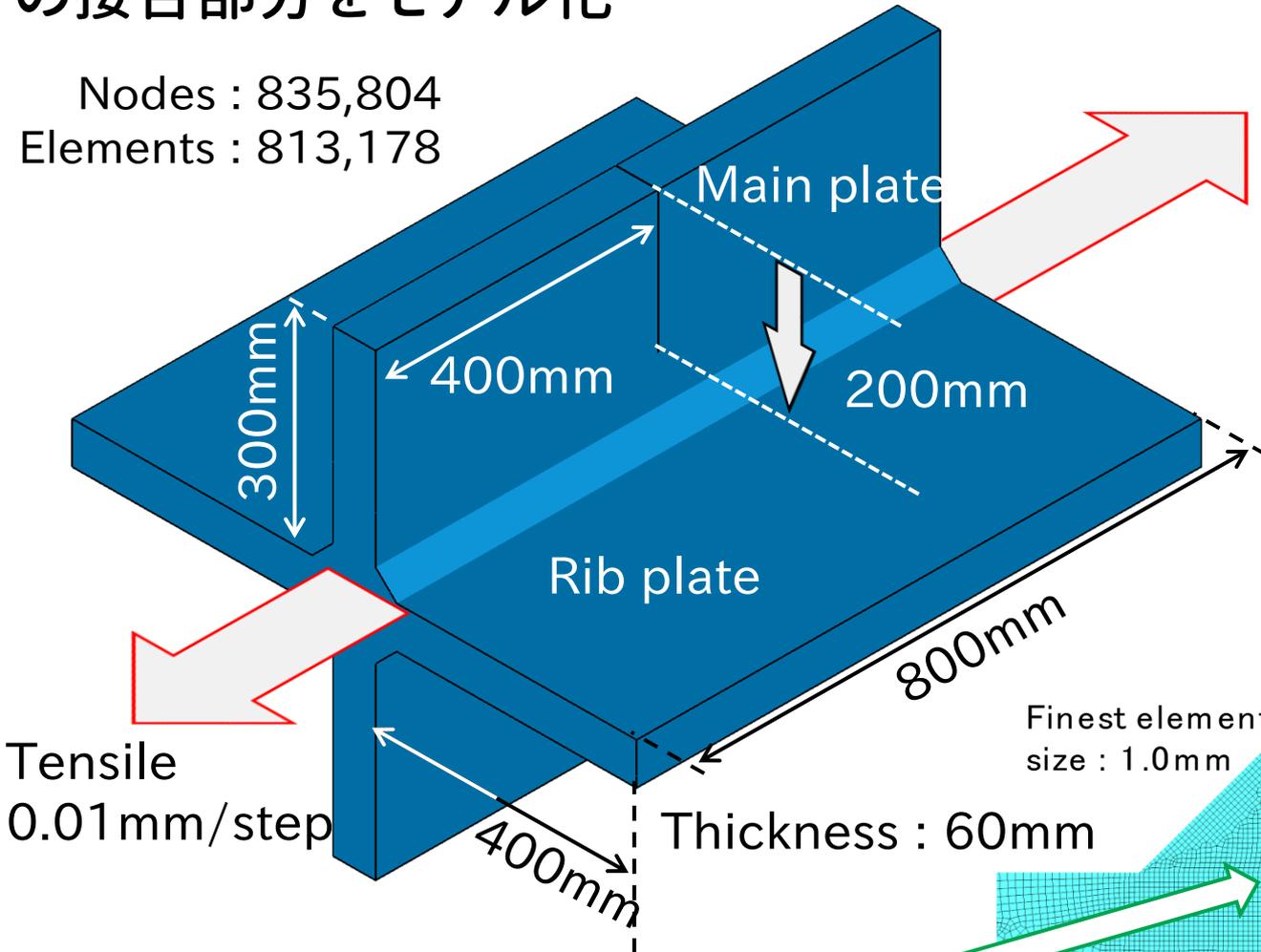
図20 大型アレスト試験構造体 (シナリオ1) 試験結果

**脆性き裂が貫入しない事(アレスト性)が重要
⇒ 構造不連続による伝播停止効果について検討**

脆性き裂進展防止に関する検討

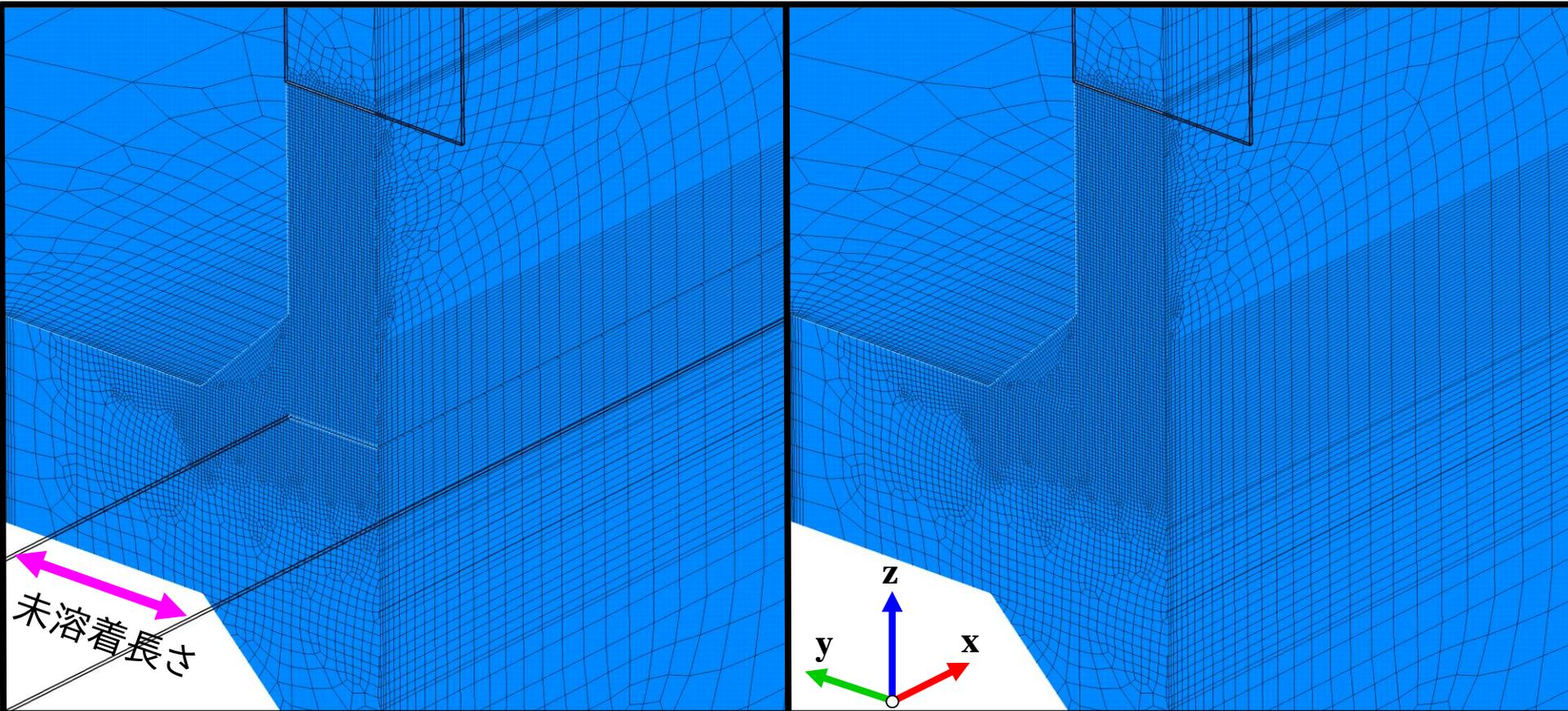
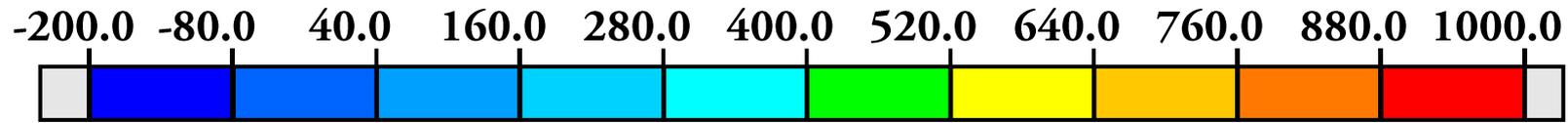
ハッチサイドコーミングと強力甲板の接合部分をモデル化

Nodes : 835,804
Elements : 813,178



構造不連続部の大きさが
き裂進展位置に及ぼす影響について検討

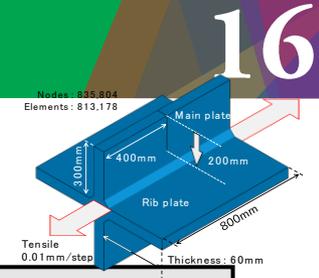
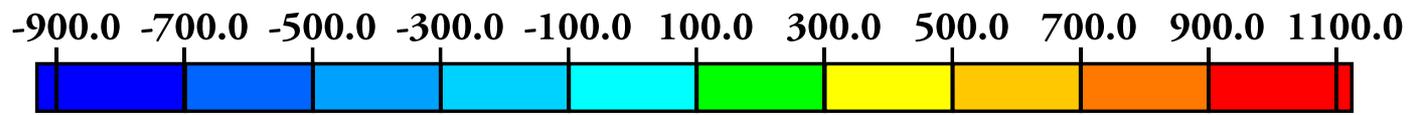
き裂進展の様子 (1/4 切断面)



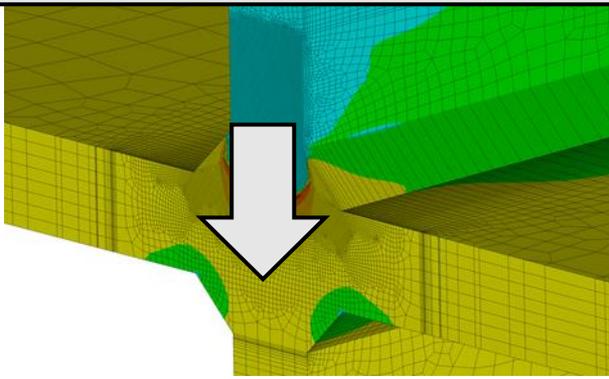
同じ強制変位量でも、未溶着位置によってき裂先端位置が異なっている

未溶着部の存在によってき裂の進展が阻害されていることを確認

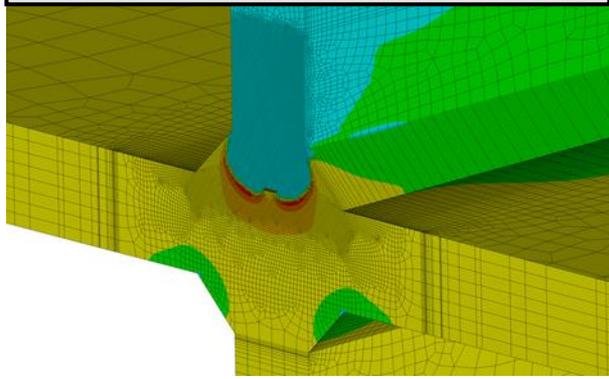
未溶着部の長さの影響



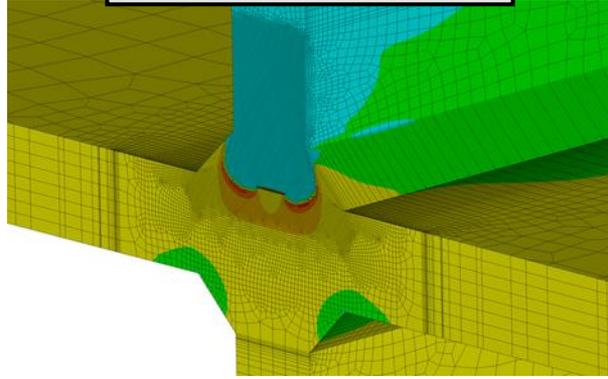
完全溶け込み(L=0mm)



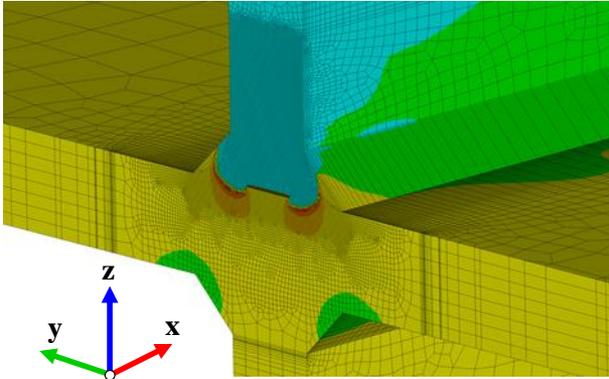
未溶着長さL = 12mm



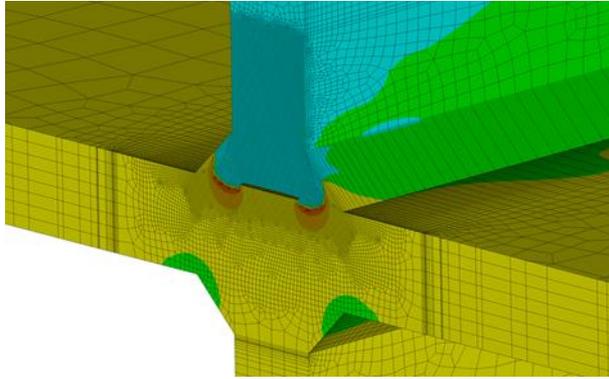
L = 24mm



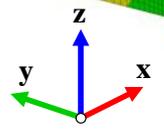
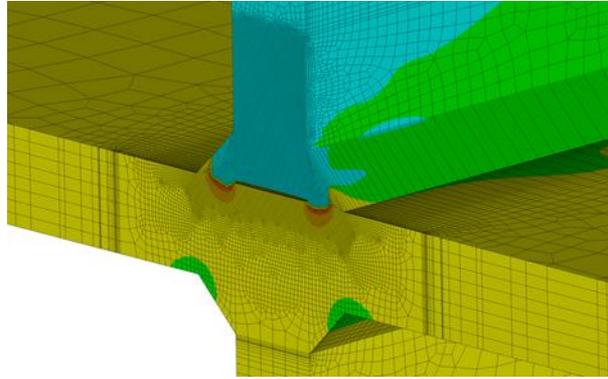
L = 36mm



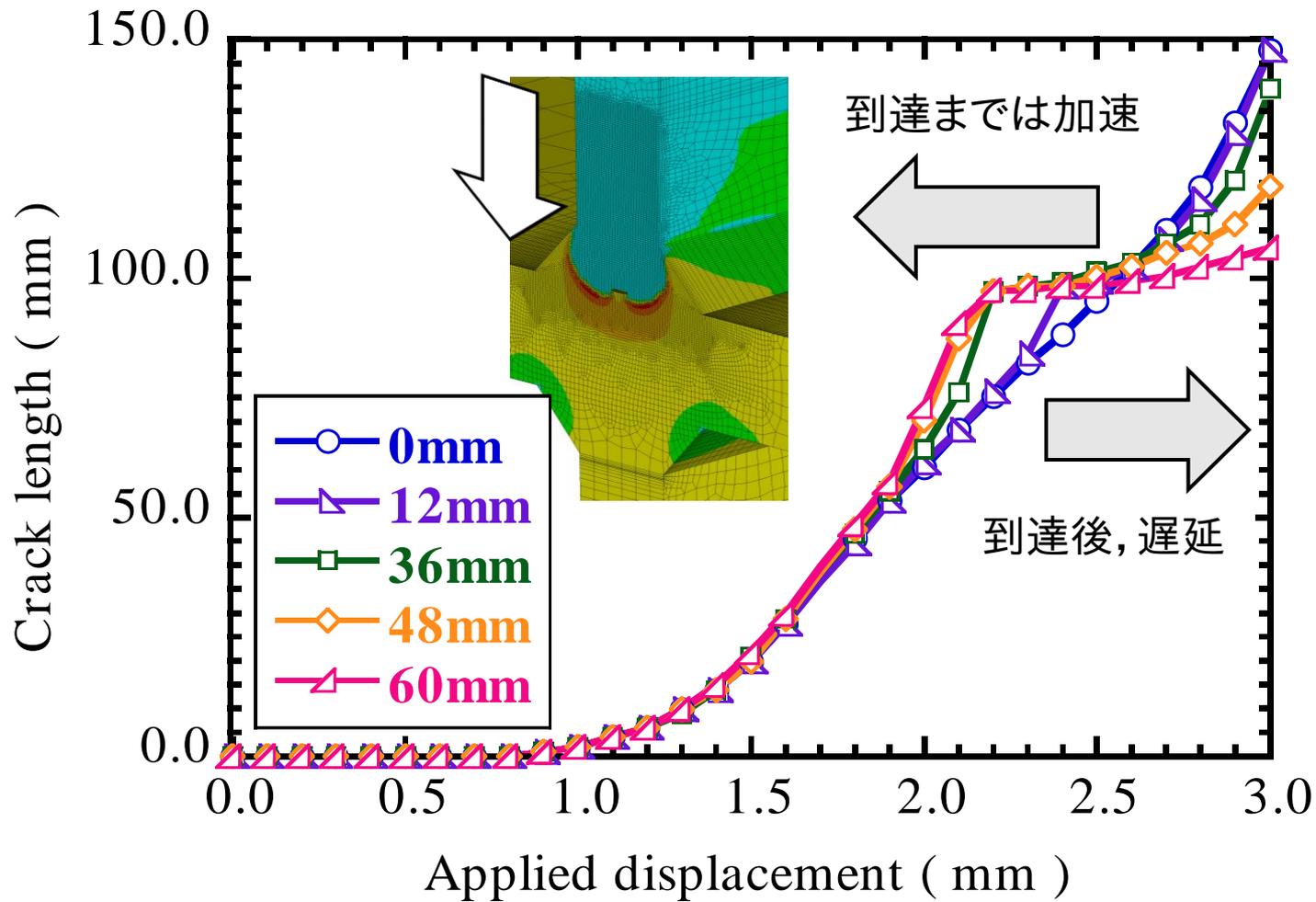
L = 48mm



L = 60mm



同一の強制変位量において
未溶着長さが長くなるにつれてき裂深さが短くなっている



未溶着長さが12mmより大きい場合にき裂進展が遅延
 ⇒ 構造不連続によるき裂の進展の遅延を確認

本研究では、簡易力学評価手法に基づくき裂進展解析を3点曲げ試験片及び未溶着部を持つ十字継手構造に対して適用した。その結果以下の知見が得られた

- 降伏応力毎に強度が最大となる靱性パラメータは異なった。理想的な材料は特に降伏応力が高く靱性値が高い材料であるが、実際にはそのような理想的な材料は存在しえないと考えられ、降伏応力と靱性値のバランスが重要であることが明らかになった。低い材料は脆性的なき裂進展を伴うため短軸引張試験と比較した場合に強度が著しく下がる事が示唆された。
- 未溶着部を含む十字継手のき裂進展解析に本手法を適用した。未溶着部を模擬した空隙長さがある程度 (12mm) 以上ある場合においてき裂の進展が疎外される事が判明した。そしてそれはき裂が空隙を迂回することによって発生する遅延であると考えられる。

発表は以上になります,ご清聴ありがとうございました