

特性テンソル法を用いたき裂周辺の 力学的状態の評価に関する基礎検討

生島研究室
B4 橋本 周太郎

研究背景

輸送コスト・環境負荷の低減を目的に
コンテナ船の大型化



鋼材の極厚・高張力鋼を多用



最大積載量 24000 TEU

引用

HMM ALGECIRAS, Container Ship - Details and current position - IMO 9863297 - VesselFinder

課題

溶接継手は板厚が大きくなるにつれて
靱性値が低下する



脆性き裂の発生・進展

大型船舶の座礁・衝突によるき裂発生・進展
は大きな損害に



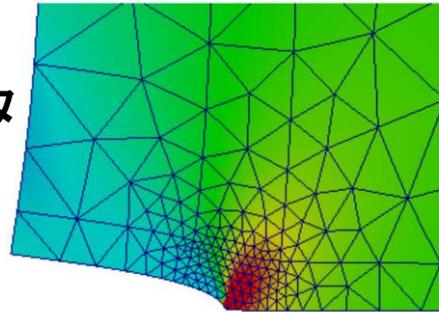
引用

<https://vdata.nikkei.com/newsgraphics/wakashio/>

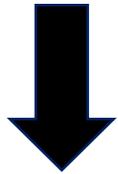
材料、部材のき裂進展防止のための破壊評価が必要

一般的な手法

破壊力学パラメータ
(K,G,J値)の計算



引用
<https://www.fem-vandv.net/a24.html>



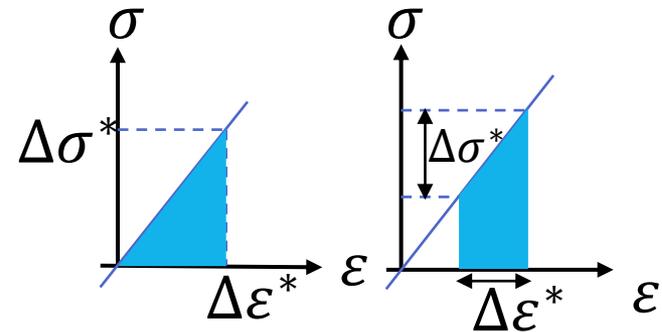
- 計算手法に関する知識
- 複雑なFEMモデルの作成

問題点

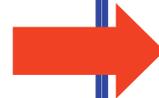
- 解析までに至る工数が多い
- 大規模なモデルでの解析が困難

特性テンソル法

- 応力拡大係数を簡易的に表現
ひずみエネルギー密度から算出



- 計算時間の短縮, 大規模なモデルの解析, 複合荷重, 溶接残留応力などの諸因子を考慮した解析も可能



本研究の目的

- 簡易モデルでの提案手法の有用性
- き裂進展解析を用いた船体上部構造物への適用

特性テンソル法を用いた応力拡大係数に関する 基礎検討

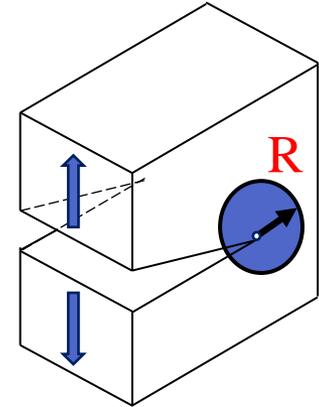
特性テンソル法における応力拡大係数の評価

特性テンソル法によるひずみエネルギー密度から求める応力拡大係数

$x_{ij}(R) = \mu_{ij} \times \sqrt{R}$ $\lim R \rightarrow 0 \rightarrow$ **応力拡大係数に比例**

$\mu_{ij} = \int (\sigma_{ij}) dV / V$ μ_{ij} : 平均応力 x_{ij} : 特性テンソル

$G = K^2 / E$ $W^* = \frac{1}{2} E \varepsilon$



$K^2 = E \times G \propto E \left(\frac{1}{2E} \sigma^2 V \right) / A \propto \frac{1}{2} \sigma^2 L = \frac{1}{2} \sigma^2 E \varepsilon = E W^* \rightarrow K = (E W^*)^{\frac{1}{2}}$

ヤング率とひずみエネルギーから求める駆動力 W^* の積で応力拡大係数を表現

K	応力拡大係数	応力場の特異性の強さ	$\text{MPa } m^{\frac{1}{2}}$
x_{ij}	特性テンソル	平均応力 $\times R^{\frac{1}{2}}$ ($R \rightarrow 0$)	$\text{MPa } m^{\frac{1}{2}}$
W^*	ひずみエネルギーから求めた駆動力	ひずみエネルギー密度の平均値 $\times R$	$\text{MPa } m$
$K_w^* = D$	ひずみエネルギー密度から求めた K 値	$K_w^* (= C_{f3} (E W^*)^{\frac{1}{2}}) = D$	$\text{MPa } m^{\frac{1}{2}}$

$K \propto K_w^* (= C_{f3} (E W^*)^{\frac{1}{2}})$ C_{f3} : 較正係数

- き裂進展条件 $K_w^* (= D) > D_c$ D : 靱性パラメータ D_c : 材料の靱性値

検討目的

特性テンソル法でのロバスト性

解析値と理論値を比較

- 理論値

片側き裂の場合

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = 0.265 \left(1 - \frac{a}{b}\right)^4 + \frac{0.857 + 0.265 \frac{a}{b}}{\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

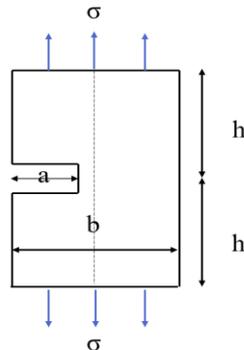
- 特性テンソル法

$$K_w (= C f_3 (E W^*)^{\frac{1}{2}})$$

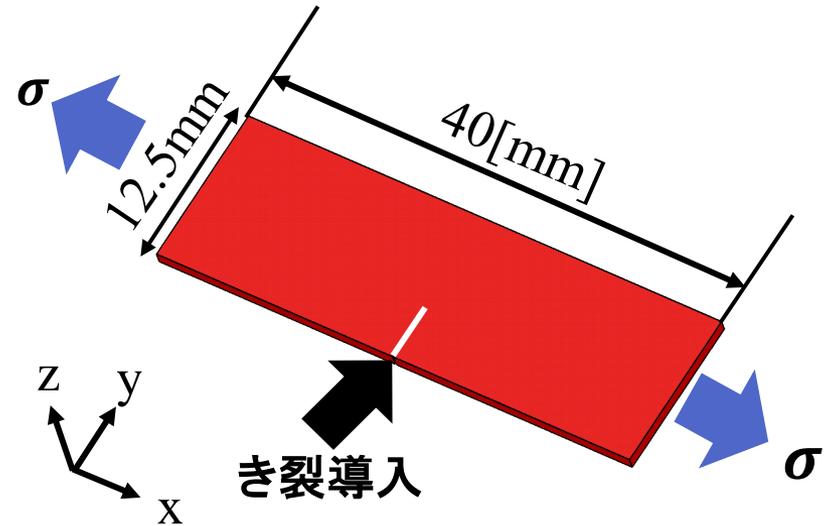
理論値と比較し, $C f_3$ を決定



平均化半径 R , 要素サイズの違いによる
応力拡大係数 K_w の変化の検討



解析モデル・条件



40[mm] × 12.5[mm] × 1 [mm]

要素数 8125

最小要素サイズ: 0.10mm

初期き裂長さ : 2mm ~ 10mm

平面ひずみ状態

$\sigma = 10 \text{MPa}$

$C f_3 = 1.0$

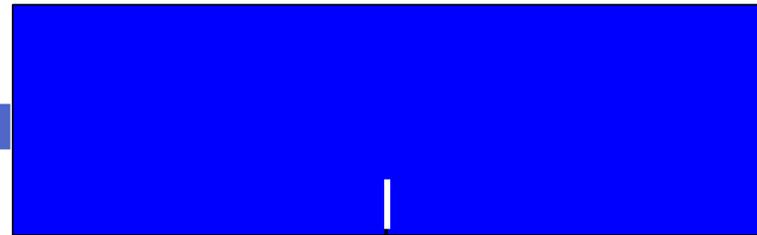
鋼材: SM490A

片側き裂を持つ平板引張解析

解析で得られる応力場

引張前

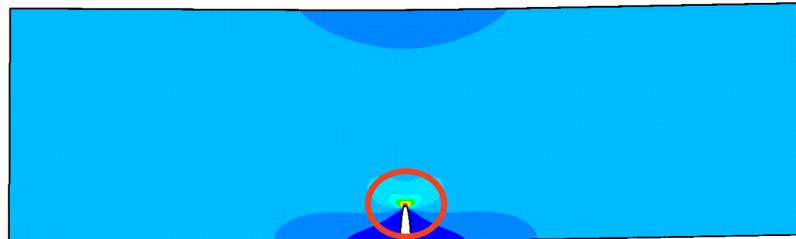
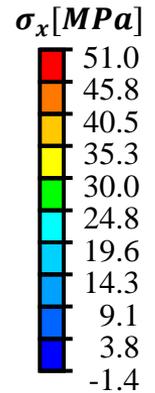
$\sigma (= 10\text{MPa})$



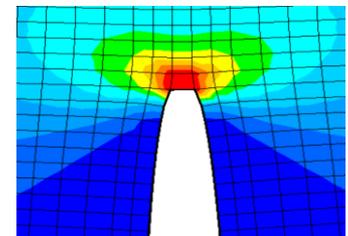
$\sigma (= 10\text{MPa})$

引張後

初期き裂長さ
2mm

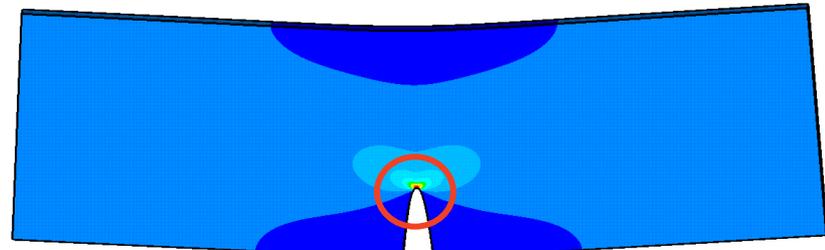
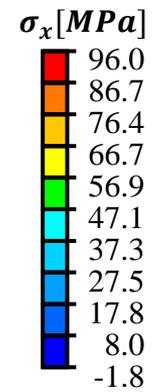


全体

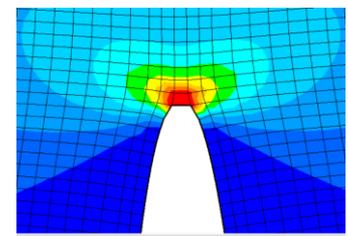


き裂先端周辺

初期き裂長さ
4mm



全体



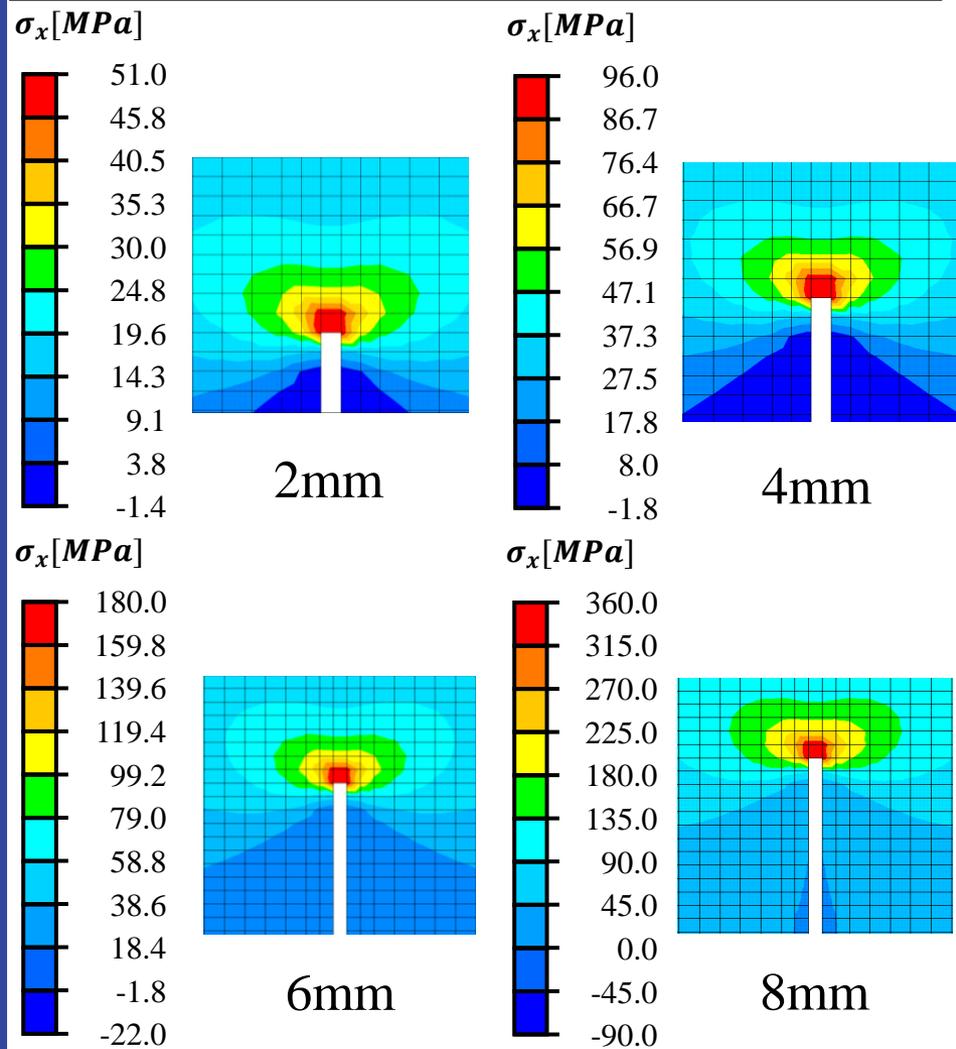
き裂先端周辺

き裂先端部での応力分布表現

き裂長さ と 応力拡大係数の関係

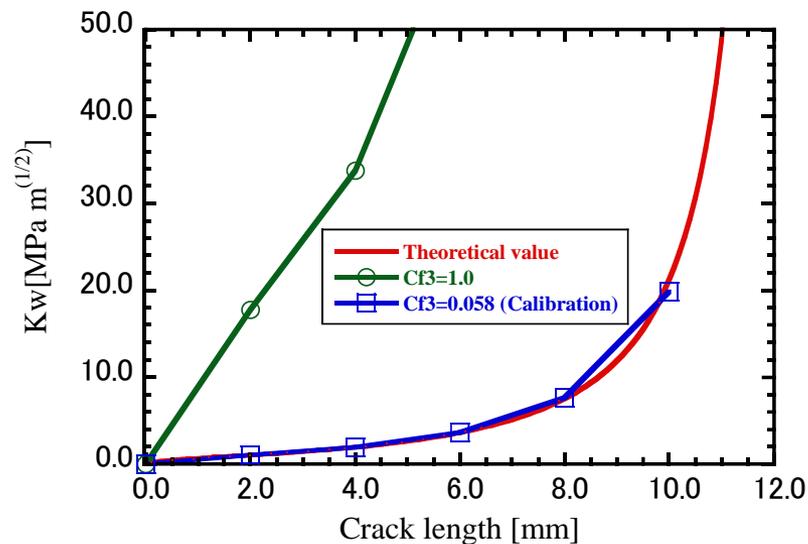
要素サイズ : 0.10mm R:0.15mm

各初期き裂長さ(2mm~8mm)での応力分布



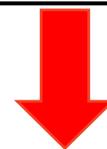
き裂長さ 大 → き裂先端部の応力 大

理論との比較並びに較正係数の決定



き裂長さ と 応力拡大係数の関係

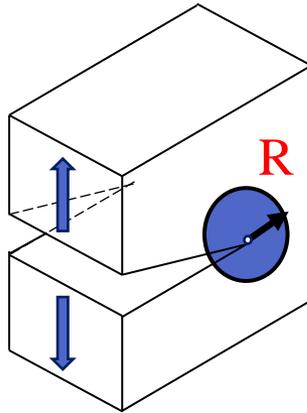
解析値と理論値の比 K_w/K から較正係数 Cf_3 を導出



較正係数 $Cf_3 = 0.058$ で理論値とほぼ一致

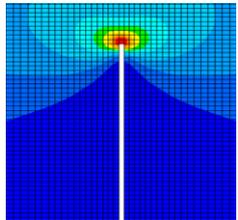
特性テンソル法での応力拡大係数の影響因子

平均化半径 R

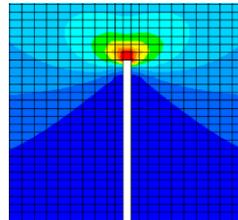


解析条件	最小要素サイズ	平均化半径 R	
	0.10mm		0.10mm
			0.15mm
			0.20mm
			0.40mm
			0.60mm

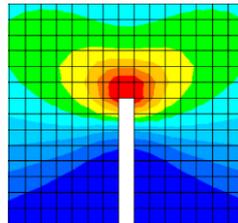
要素サイズ



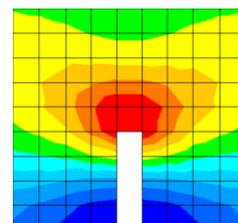
Element size 0.05mm



Element size 0.10mm



Element size 0.25mm



Element size 0.50mm

解析条件	最小要素サイズ	平均化半径 R
	0.05mm	0.075mm
	0.10mm	0.15mm
	0.25mm	0.375mm
	0.50mm	0.75mm

平均化半径 R / 要素サイズ = 1.5

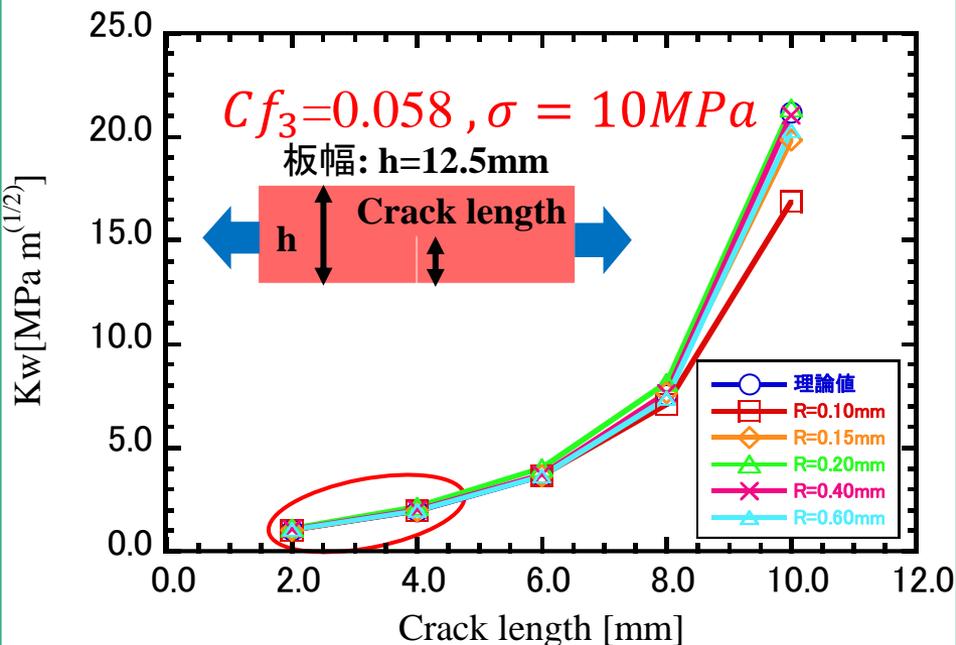
平均化半径 R と要素サイズの違いによる応力拡大係数の影響を検討

特性テンソル法での応力拡大係数の影響因子

平均化半径 R と要素サイズの違いによる応力拡大係数の影響

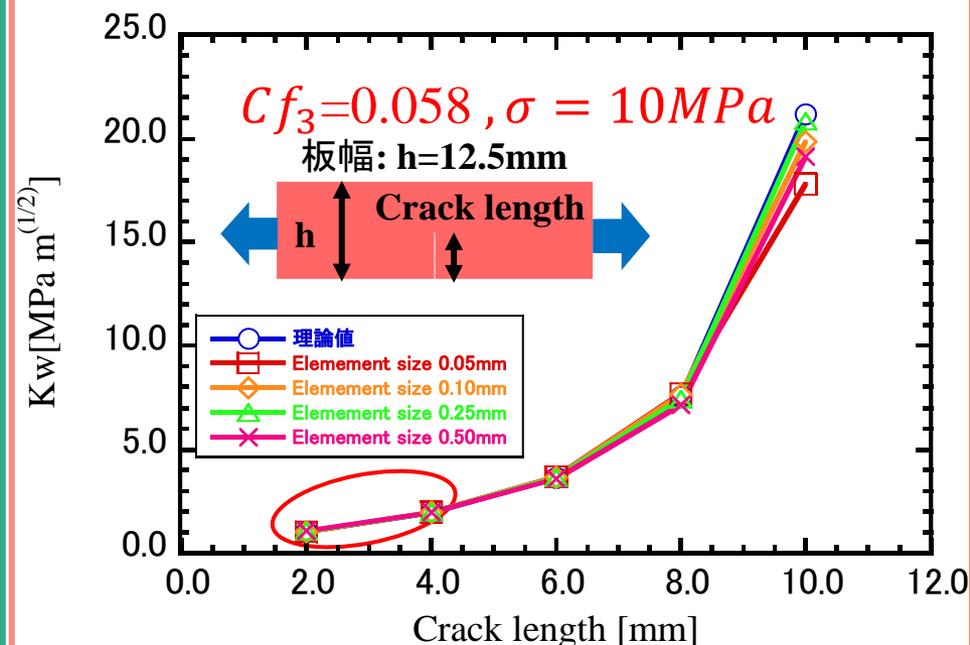
平均化半径 R

要素サイズ : 0.10mm



要素サイズ

$R/Element\ size=1.5$



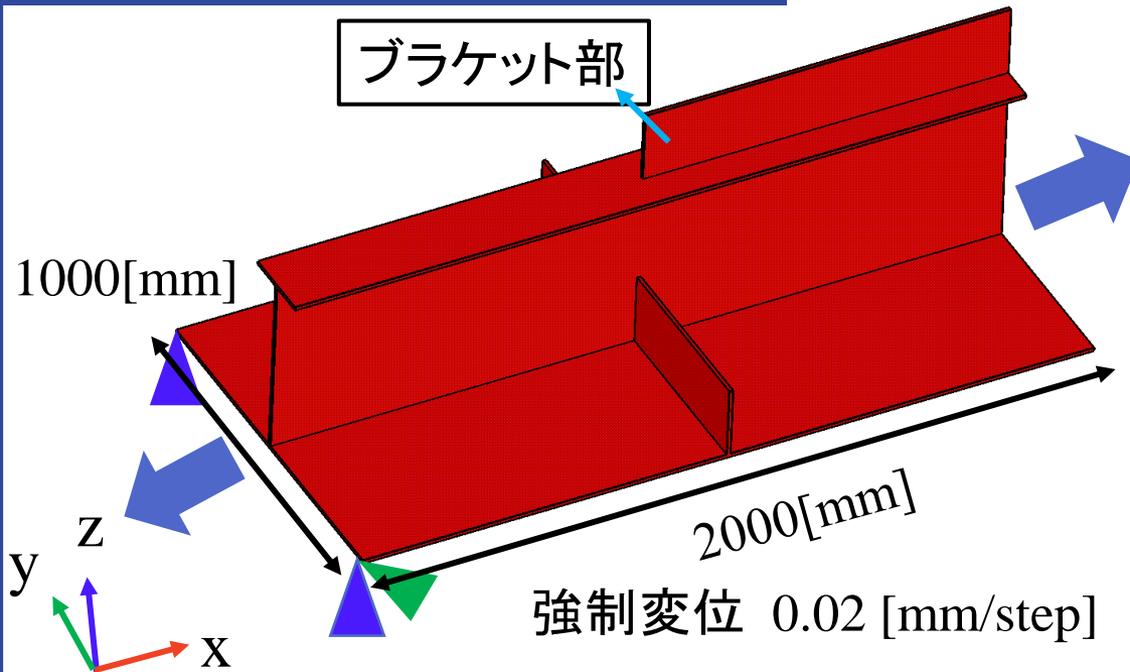
き裂長さと応力拡大係数の関係

き裂長さが小さい $\rightarrow K_w$ の値はほぼ変わらない

特性テンソル法は平均化半径 R , 要素サイズに対してロバストである

船体上部構造物への適用

船体上部構造でのき裂進展解析

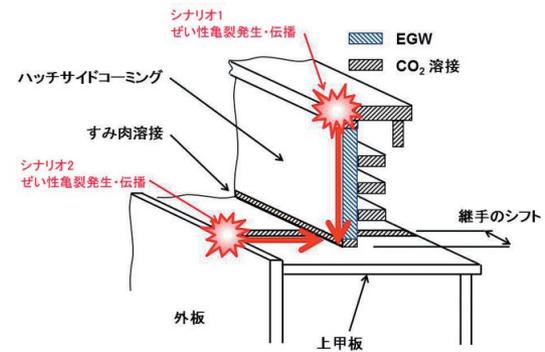


強制変位 0.02 [mm/step]

パラメーター

R	0.15 [mm]
Cf_3	0.057
D_c	20

要素数:1866930
 節点数:1953998
 最小要素サイズ: 0.10mm
 鋼材: SM490A



船体上部構造の一部

引用

https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_13/sec_1/1-1.pdf



0.1[mm] × 10[mm] × 2.5[mm]き裂導入

目的

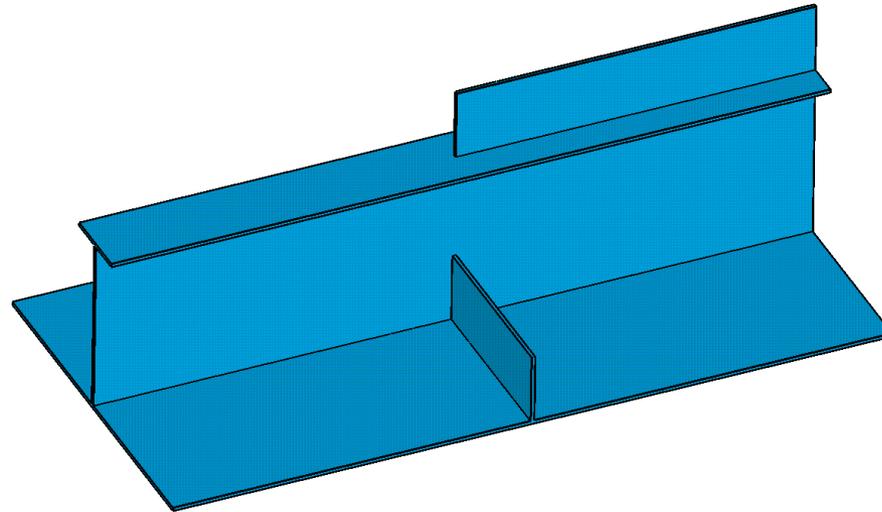
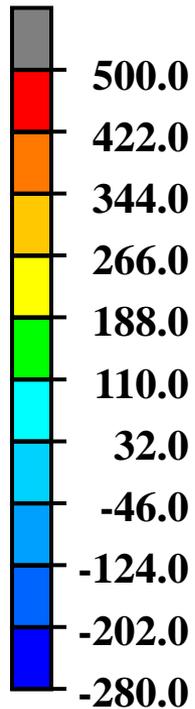
- 船体上部構造物に対してのき裂進展解析の適用
 - 構造物の違いでの破壊影響の検討

き裂進展挙動

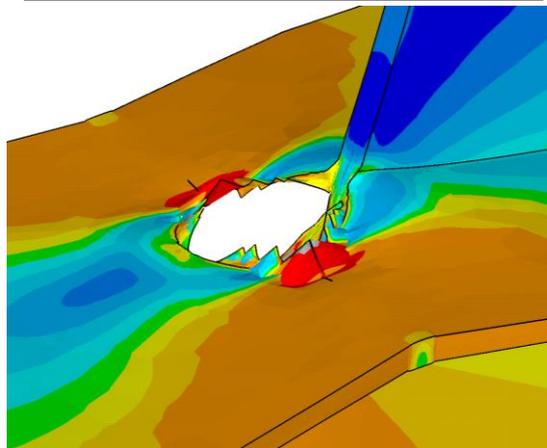
全体

変形倍率60倍

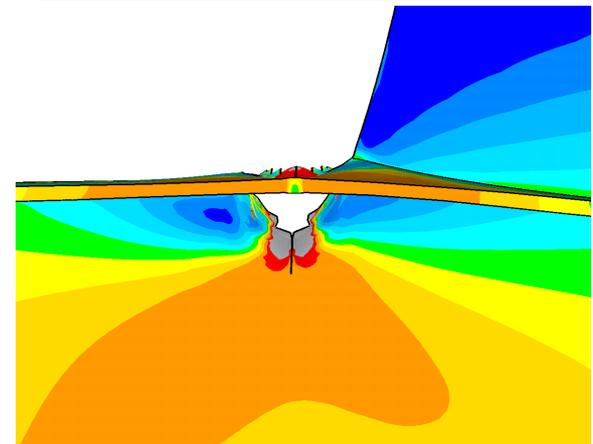
σ_x [MPa]



奥行方向のき裂進展



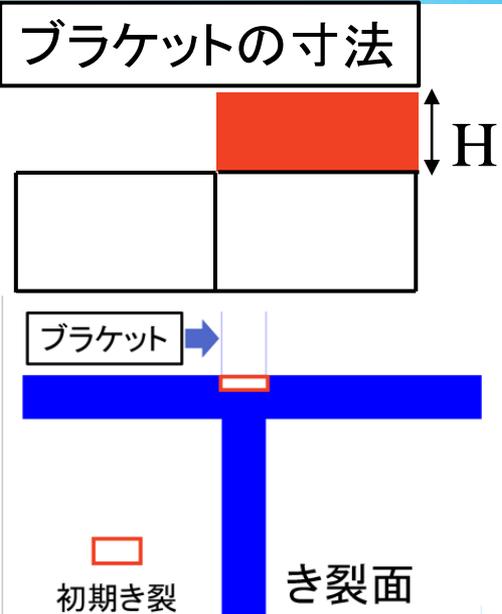
鉛直方向のき裂進展



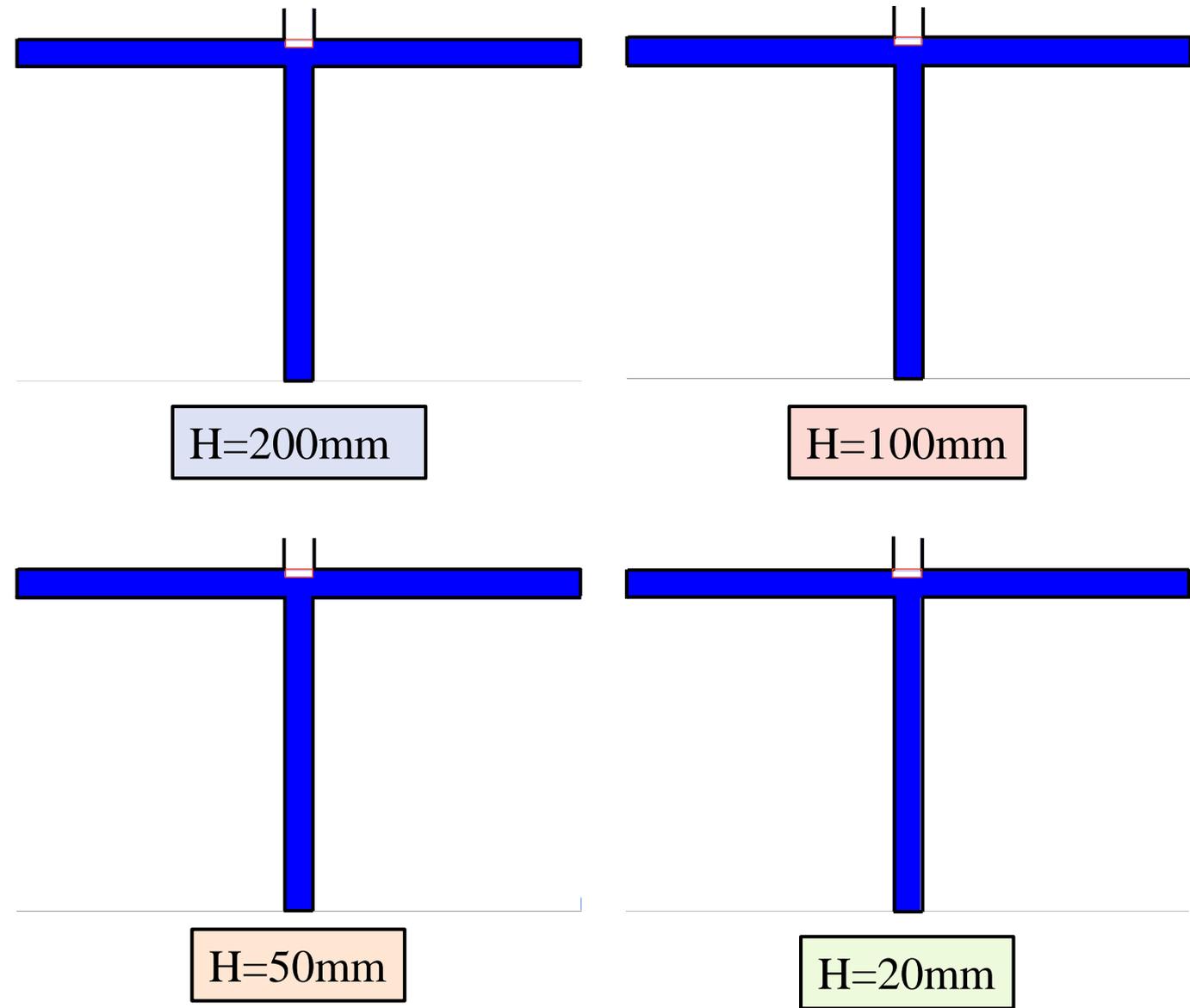
応力集中→奥行方向・鉛直方向

溶接板構造に対してもき裂進展解析が適用可能

船体上部構造物の形状の違いでのき裂進展速度の影響 14

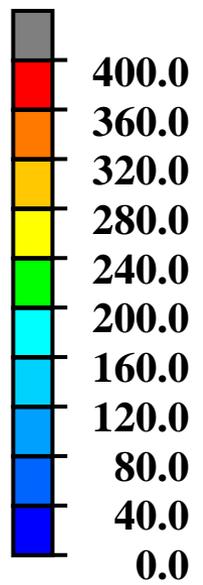


き裂面でのき裂進展挙動



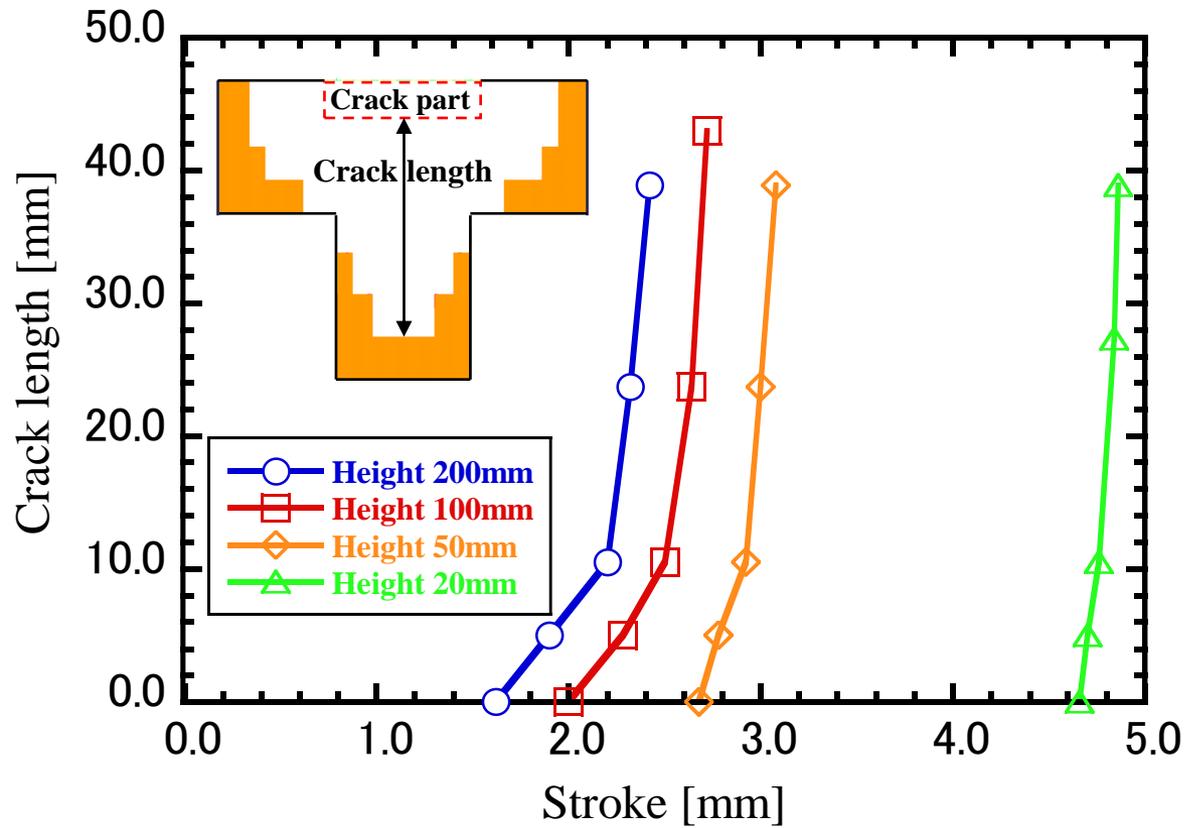
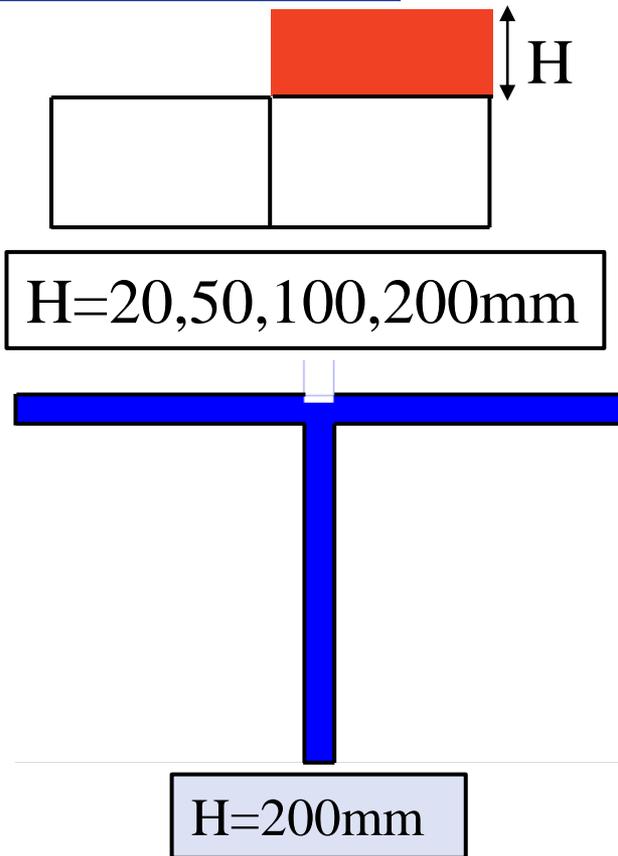
Equivalent stress

[MPa]



船体上部構造物の形状の違いでのき裂進展速度の影響 15

き裂進展速度



変位量とき裂長さ

- 高さ 小 →き裂進展開始までの変位量 長
- 高さ 大 →き裂進展開始までの変位量 短

構造設計時変更での破壊挙動を簡易的に検討可能

本研究では特性テンソル法を用いたき裂進展解析手法を提案し、その有用性を目的に提案手法の妥当性と平均半径 R 、及び要素サイズの違いでの応力拡大係数の影響を検討した。その後、具体的構造のき裂進展問題の適用性について検討を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- ひずみエネルギー密度から求める特性テンソル法でのき裂進展解析を用いて、初期き裂を伴う平面ひずみ状態での平板引張試験でのき裂先端部の応力拡大係数の計算について検討した結果、各き裂長さでの応力拡大係数は較正係数 $Cf_3=0.058$ をおくことによって理論値との応力拡大係数との誤差は5%以内に本手法が有用であることが得られた。
- 平均化半径 R 及び要素サイズの違いによる応力拡大係数の影響について検討した結果、初期き裂長さが小さい場合は応力拡大係数の値は平均化半径 R 及び要素サイズに依存せずほとんど変わらないことが確認でき、特性テンソル法での平均化半径 R 及び要素サイズに対してロバストであることを確認した。
- ひずみエネルギー密度から求める特性テンソル法でのき裂進展解析を用いて溶接板構造物での適応について検討を行った結果、平面拘束き裂進展及び自由き裂進展ともに溶接板のき裂進展が見られることから本手法で適用できることが確認でき、また溶接板構造物のブラケット及びフランジの形状や寸法の違いから構造物の破壊影響の違いが確認できたことから、構造設計変更時の破壊挙動を簡易適に検討できると考えられる。