

M10

連続体損傷力学に基づくスポット溶接継手の破壊挙動についての数値解析的検討

Numerical Investigation on Fracture Behavior of Spot Welded Joint Based on Continuum Damage Mechanics

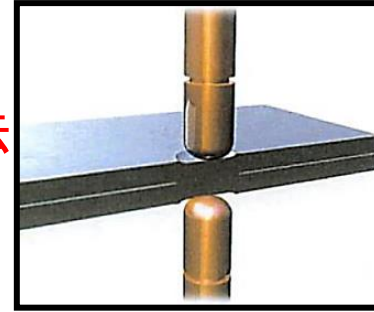
大阪公立大学 大学院 工学研究科
航空宇宙海洋系専攻 海洋システム工学分野
生島研究室 尾崎雄一

研究背景

スポット溶接

薄板に電流を流し、抵抗発熱で溶接する手法

- 特徴
- 安価(1打点1円以下)
 - 作業員の技能依存度が低い
 - 仕上がりが早く、ひずみが少ない



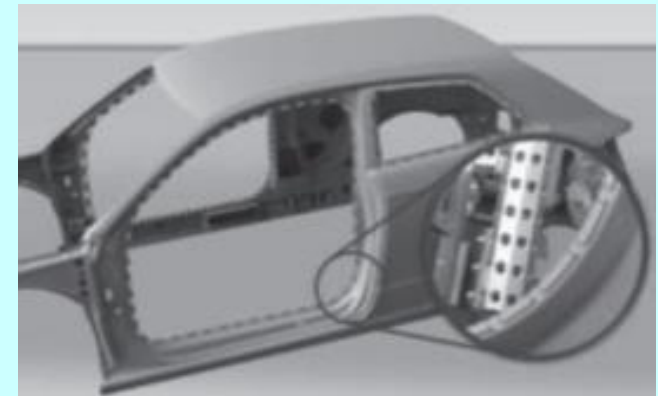
生産性に優れた溶接法(自動車における接合で**9割**を占める)

スポット溶接継手部の評価

ますます増加する環境規制

CO₂排出量の削減による環境負荷低減

燃費の改善、パワートレインの性能の向上が求められる



軽量化を図りつつ、**強度性能**を十分持った車体構造を設計しなければならない

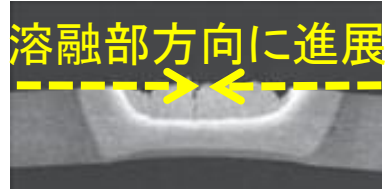
多点スポット溶接を行うことで**剛性**や**強度性能**が向上すると、鋼板の板厚を下げることで可能

スポット溶接における溶融部の破壊強度評価が**必要である**

研究背景

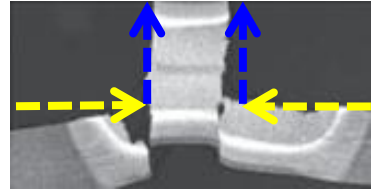
スポット溶接部の破壊挙動についてのこれまでの検討

CTS試験(十字引張試験)

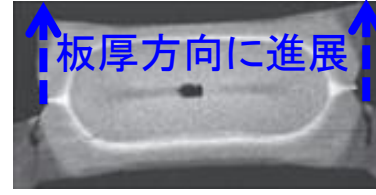


界面破断

溶接径: **小**
継手強度: **低**



界面破断+プラグ破断



プラグ破断

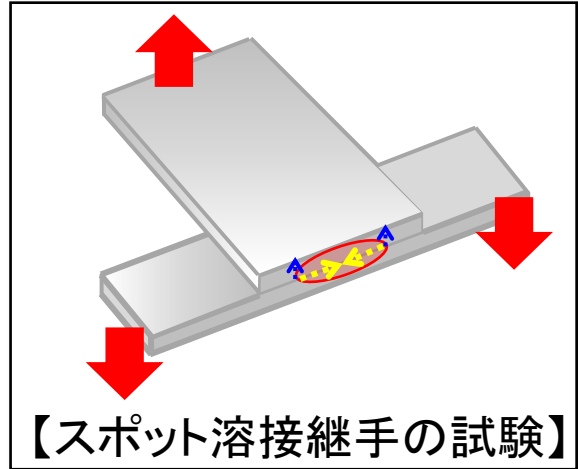
溶接径: **大**
継手強度: **高**

溶接径が大きいほど継ぎ手の**強度が大きい**

単点スポット溶接部においての検討が多くされてきた

参考文献

貞末照輝 他: 高張力鋼のスポット溶接継手の破壊に関する数値的検討: 溶接学会全国大会講演概要Vol.92, pp166-167



【スポット溶接継手の試験】

一方で

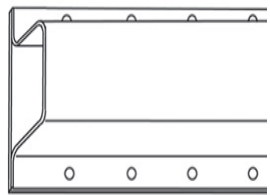
実際の自動車においては

多くの部品で**スポット溶接を多数行い接合**



スポット溶接部が破壊時に相互に影響している

多点スポット溶接されている構造物



ハット部材



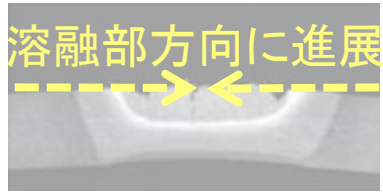
ドアパネル

多点スポット溶接継手部における破壊の評価を行うことが重要

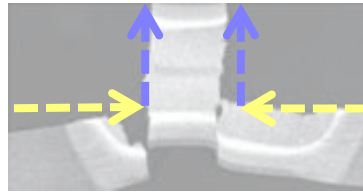
研究背景

スポット溶接部の破壊挙動についてのこれまでの検討

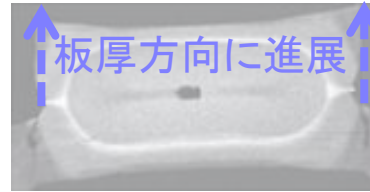
CTS試験(十字引張試験)



界面破断



界面破断+プラグ破断

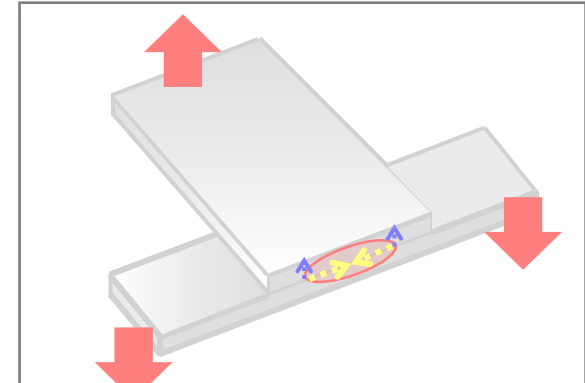


プラグ破断

溶接径:(大)

参考文献

貞末照輝 他: 高張力鋼のスポット溶接継手の破壊に関する数値的検討: 溶接学会全国大会講演概要Vol.92, pp166-167



本研究の目的

連続体損傷力学に基づく損傷モデルを**多点スポット溶接試験片**に適用し、それらの**延性破壊挙動**についての検討を行う

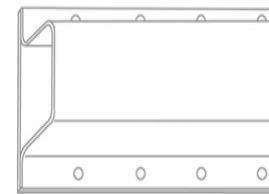
一方で

実際の自動車においては

多くの部品で**スポット溶接を多数行い接合**

スポット溶接部が破壊時に相互に影響している

多点スポット溶接されている構造物



ハット部材



ドアパネル

多点スポット溶接継手部における破壊の評価を行うことが重要

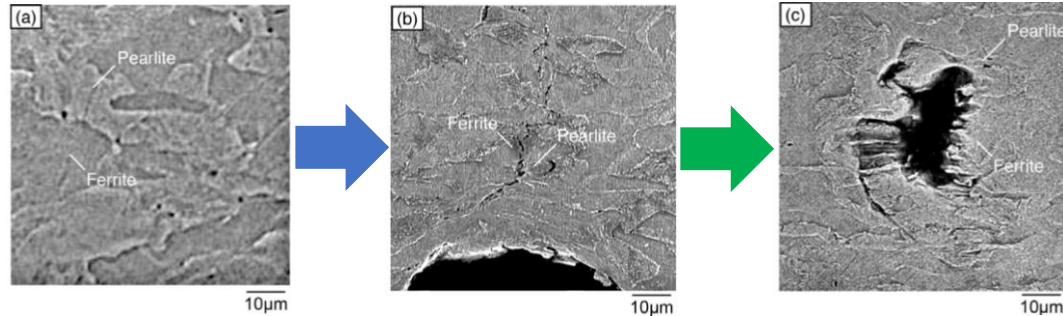
解析手法

延性き裂進展解析

連続体損傷力学の概念

損傷モデルにおけるき裂進展評価

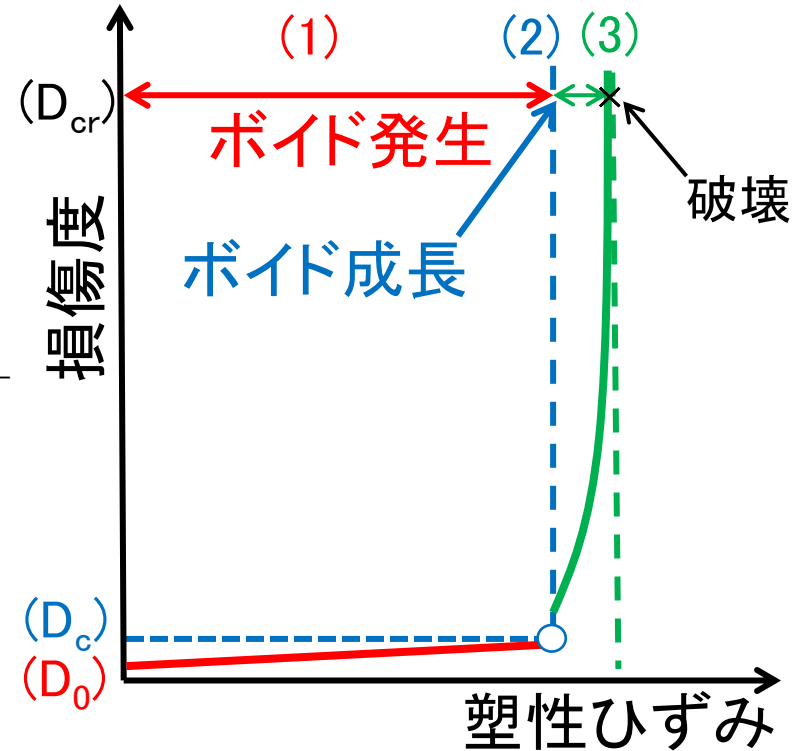
ステージ(1) ステージ(2) ステージ(3)



組織不均質を考慮した三次元延性損傷シミュレーション法-複相組織材料の延性予測-
大畑充, 庄司博人, 南二三吉: 鉄と鋼Vol.99(2013)No.9 より引用

連続体力学に基づく損傷プロセス

- (1) ナノ-サブミクロンの大きさのボイドが発生・成長し、マイクロボイドに至るまでのステージ
- (2) マイクロボイドが形成し始めるひずみレベル
- (3) ボイドが結合し損傷が加速するステージ



$$dD = (1 - D)dE_m^p$$

D: 損傷度

dE_m^p : 体積ひずみ増分の塑性成分

損傷度を用いてき裂を再現

連続体損傷力学による延性破壊

き裂進展評価のための損傷ポテンシャル

既往のポテンシャル

複雑構造物では計算困難

$$\varphi = \left(\frac{\bar{\Sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^2 + a_1 D^* \exp \left(a_2 \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) - 1 = 0 \quad (2) \quad D^* = \begin{cases} D & \text{for } D \leq D_c \\ D_c + K(D - D_c) & \text{for } D > D_c \end{cases}$$

損傷を表す項

φ : 損傷ポテンシャル D^* : 有効損傷度

Σ_m : 損傷を含む単位要素内の平均垂直応力 $\bar{\sigma}$: 損傷を含まない単位要素内の相当応力

$\bar{\Sigma}$: 損傷を含む単位要素内の相当応力 a_1, a_2 : 材料定数

参考文献

大畑充, 深堀拓也, 南二三吉; 損傷挙動に基づく延性き裂発生・進展特性を支配する鋼材機械的特性の解明-延性き裂進展シミュレーション手法の構築-, 鉄と鋼, Vol.94, 8008, No2

き裂進展解析の簡易手法

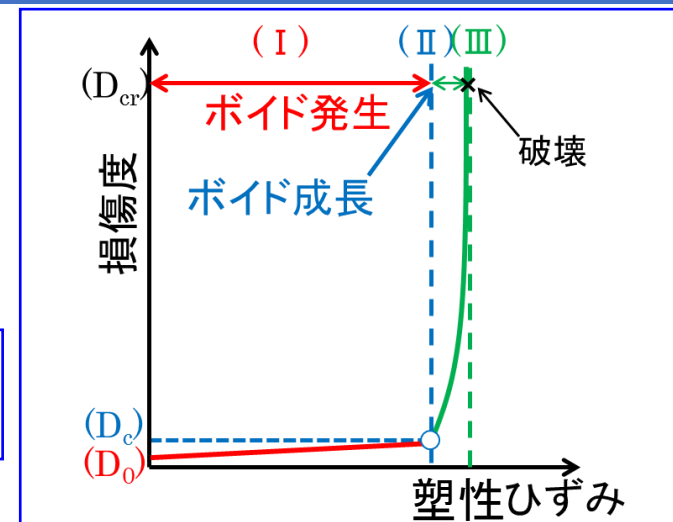
体積ひずみ増分の塑性成分 dE_m^p と相当塑性ひずみ増分 $d\bar{E}_p$ の関係

$$dE_m^p \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\Sigma}} - d\bar{E}_p \frac{\partial \varphi}{\partial \Sigma_m} = 0 \quad (3)$$

(1), (2), (3)式より

$$\frac{1}{(1-D)D} dD = \frac{1}{2} a_1 a_2 \exp \left(a_2 \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\Sigma}} d\bar{E}_p \quad (4) \quad \begin{array}{l} \text{損傷度増分と} \\ \text{相当塑性ひずみ増分の関係} \end{array}$$

き裂進展がステージ(2)に至ると起こると仮定 ($D < D_c$ のとき $\bar{\sigma} = \bar{\Sigma}$)

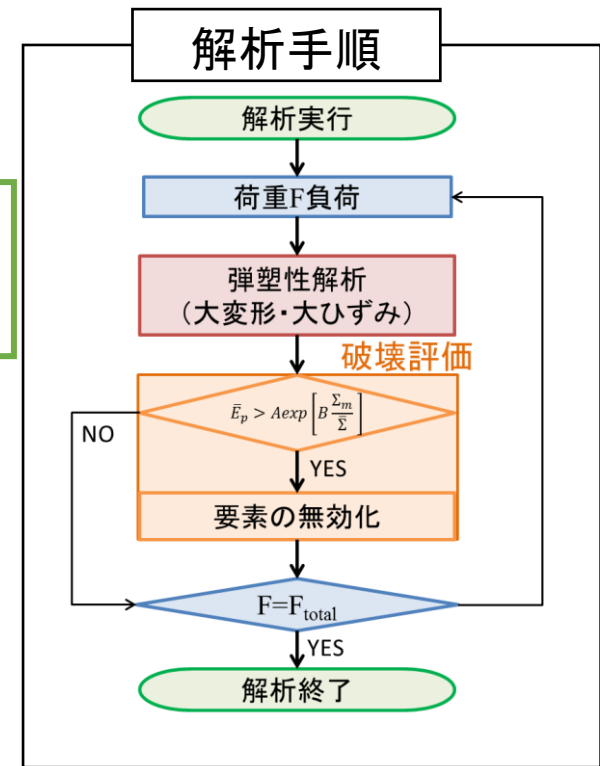
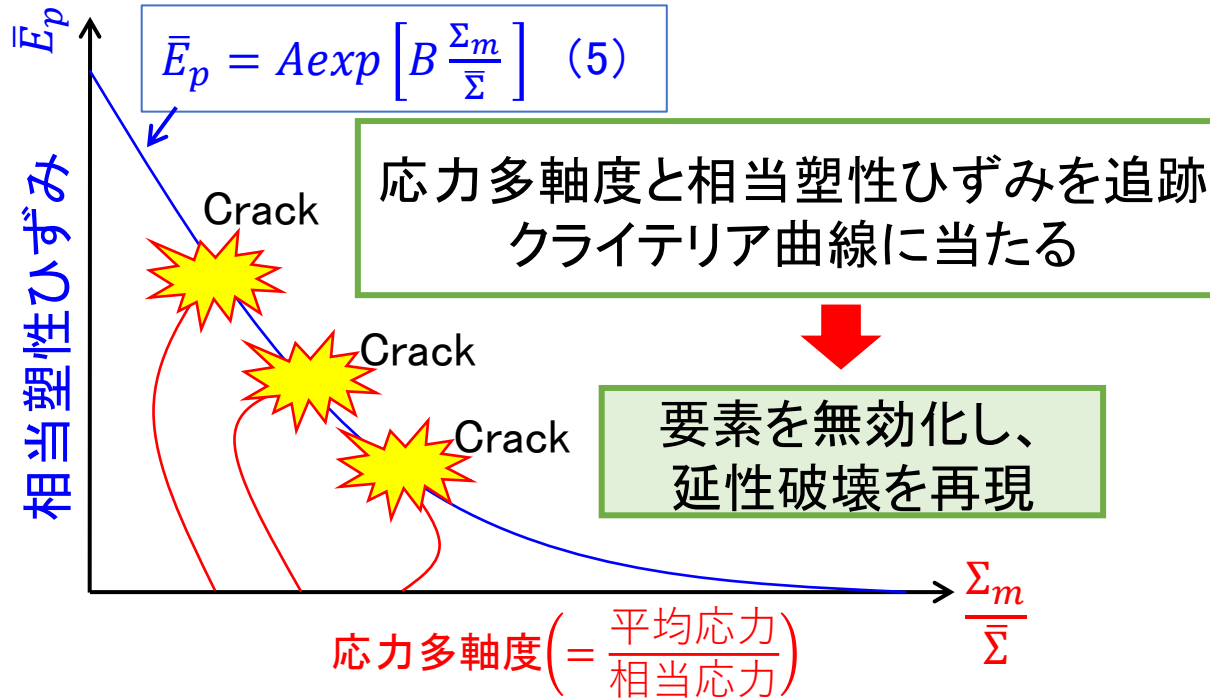


破断時の相当塑性ひずみ

$$\bar{E}_p = A \exp \left[B \frac{\Sigma_m}{\bar{\Sigma}} \right] \quad \begin{cases} A = \frac{2}{a_1 a_2} \ln \frac{(1-D_0)D_c}{(1-D_c)D_0} \\ B = -a_2 \end{cases} \quad (5)$$

損傷モデルに基づくき裂進展解析し手法の簡易化

今回用いたき裂進展解析の簡易手法



簡易手法におけるポテンシャル

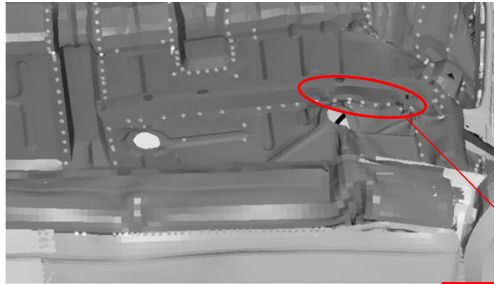
$$\varphi = \left(\frac{\bar{\Sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^2 - 1 = 0$$

破断時の相当塑性ひずみを簡単に取得可能
通常の弾塑性解析のみで延性破壊判定
解析の安定性が改善

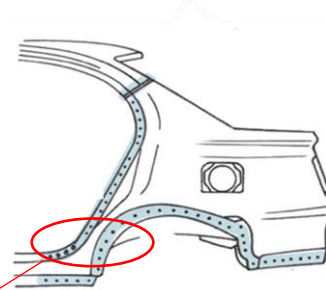
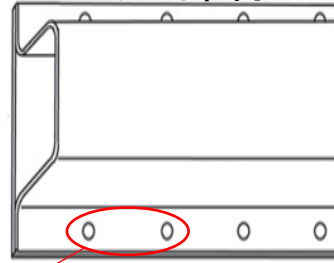
簡易手法 応力多軸度と相当塑性ひずみのみでき裂進展の評価可能

ピール試験解析への適用

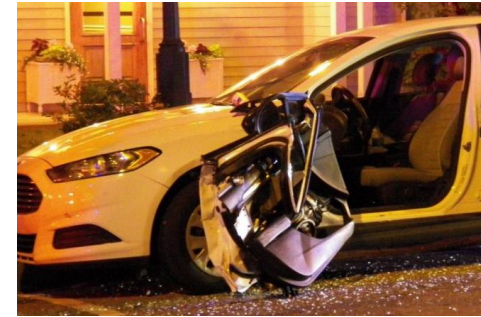
車体の多点溶接部



ハット部材



多点スポット溶接部



事故による部材の破断

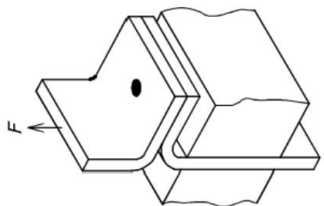
事故の際、溶接部で大きく変形し、破断する



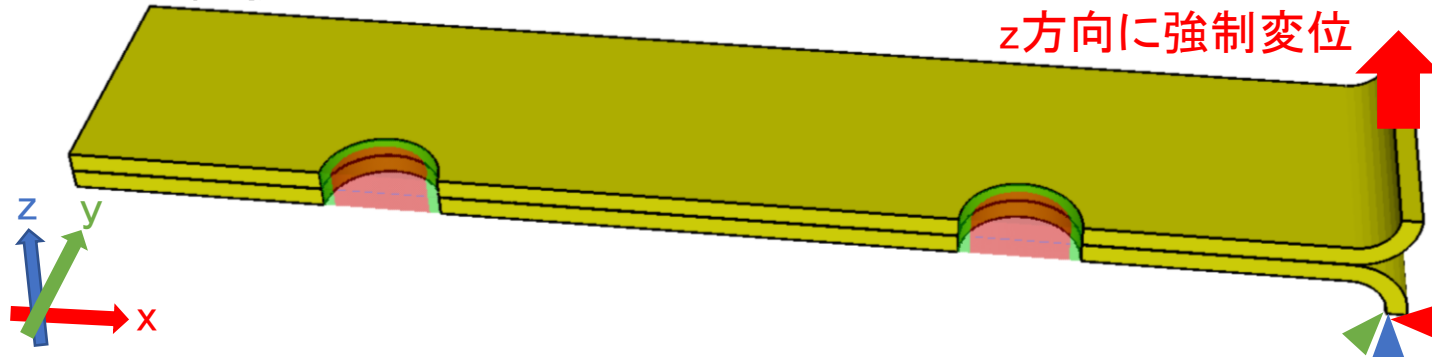
ピール試験で模擬可能

ピール試験

2点ピール試験モデル



機械式ピール試験



機械式ピール試験を参考にピール試験片をモデル化

単点スポット溶接試験片、2点スポット溶接試験片に対してピール試験解析を実施

打点数の違いが破壊挙動に及ぼす影響について検討を行う

基礎検討 単点ピール試験

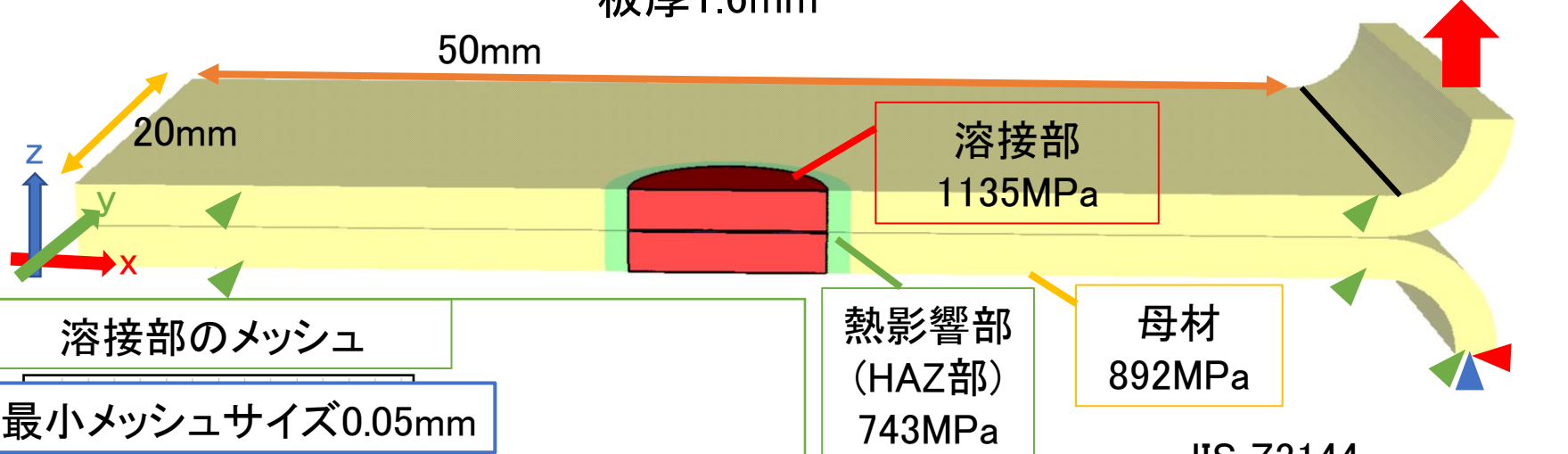
モデル詳細

1/2モデル

板厚1.6mm

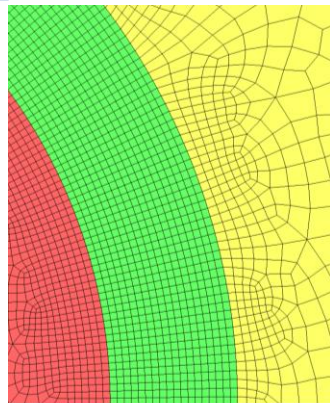
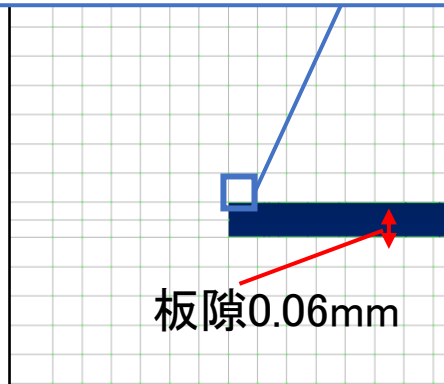
50mm

0.01mm/step



溶接部のメッシュ

最小メッシュサイズ0.05mm



単位 mm

呼び板厚a)	寸法			
	タイプ1		タイプ2及びタイプ3	
	板幅W	長さL	板幅W	長さL
T				
0.5以上~0.8未満	20	40	20	75
0.8以上~1.3未満	30	50	30	100
1.3以上~2.5未満	40	60	40	125
2.5以上~3.2以下	50	70	50	150

注a) 異なる板厚, 材質の場合は部材の(引張強さ)×(板厚)の値の小さい方の板厚による。3枚以上重ねる場合は, 2枚重ねに準じる。

JIS Z3144規格に沿ったモデルを作成

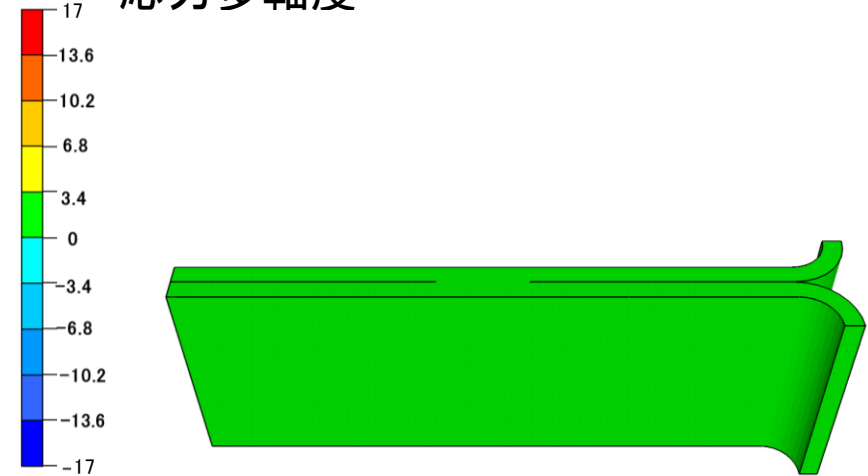
各部材で熱影響による材料組織の変化を考慮し、硬さを変更

単点ピール試験 解析結果

相当塑性ひずみ



応力多軸度

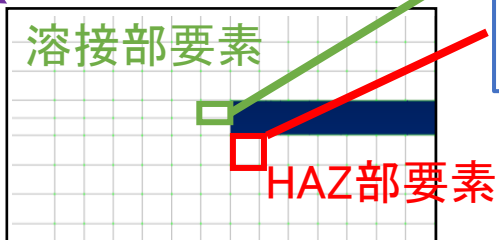
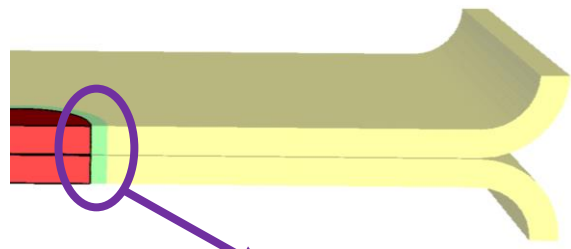


拡大図

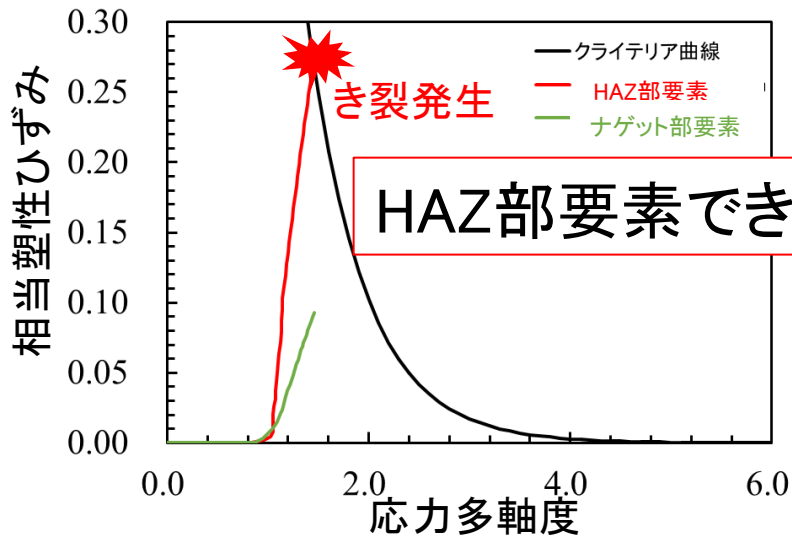


き裂進展部付近に大きな相当塑性ひずみが発生

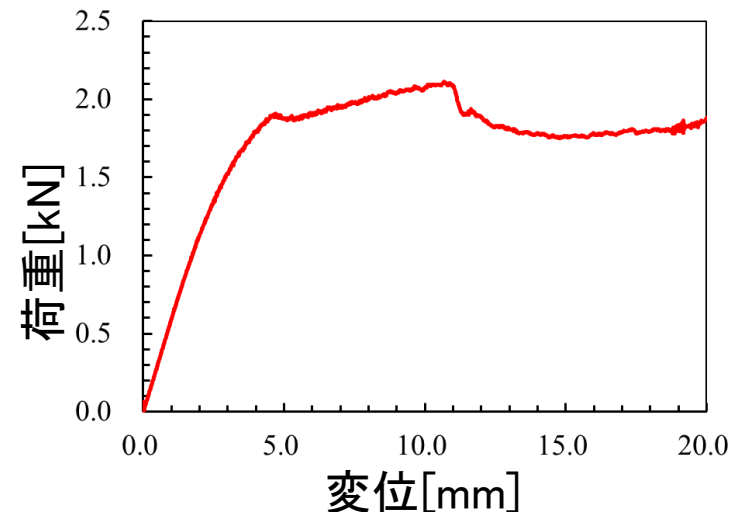
単点ピール試験



各要素における応力多軸度と
相当塑性ひずみを算出



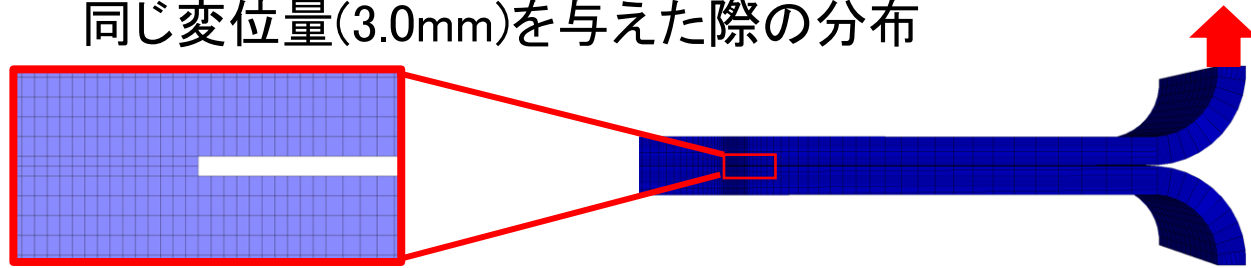
荷重変位曲線



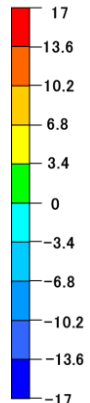
き裂が進展するに従い、各部において相当塑性ひずみが大きくなって破断する

板厚に関する検討

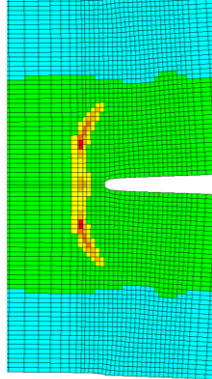
同じ変位置量(3.0mm)を与えた際の分布



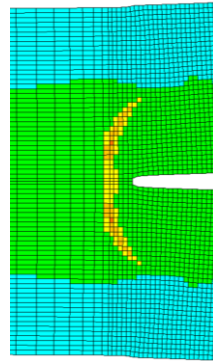
応力多軸度分布



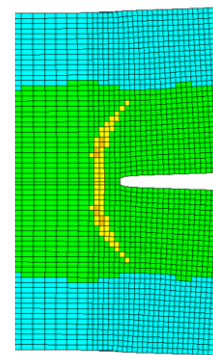
板厚2.0mm



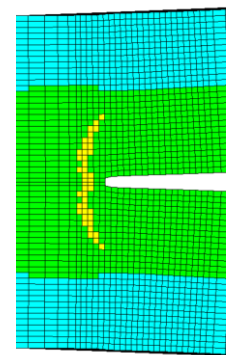
板厚1.8mm



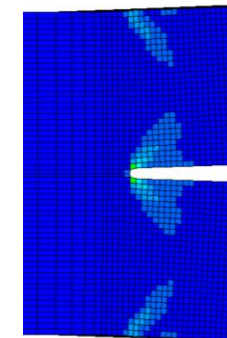
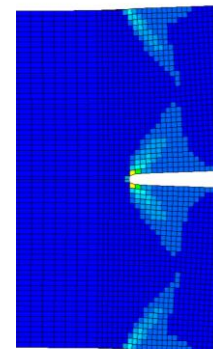
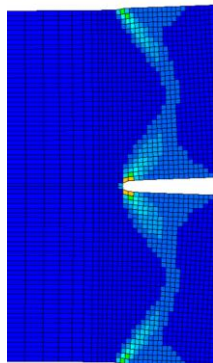
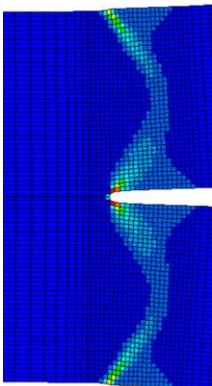
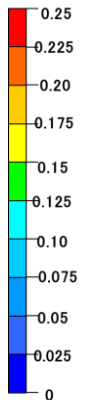
板厚1.6mm



板厚1.4mm



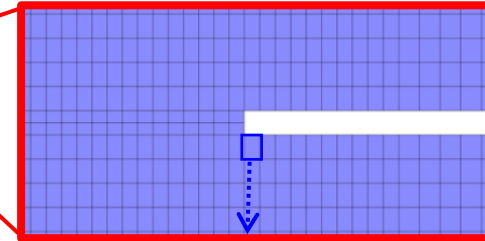
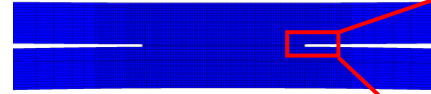
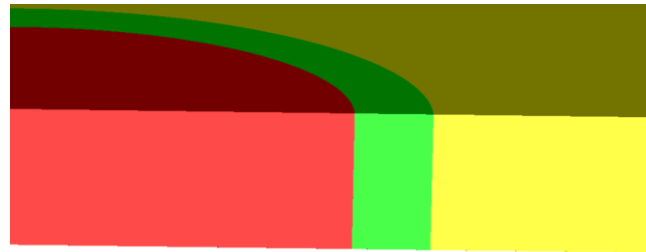
相当塑性ひずみ分布



板厚が大きいほど、応力多軸度・相当塑性ひずみが大きく生じる

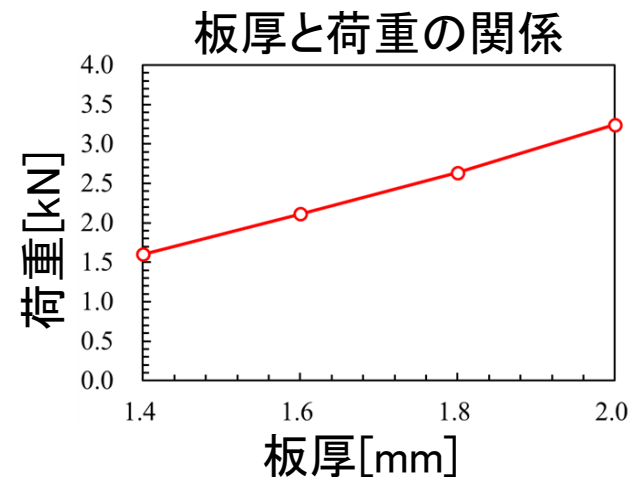
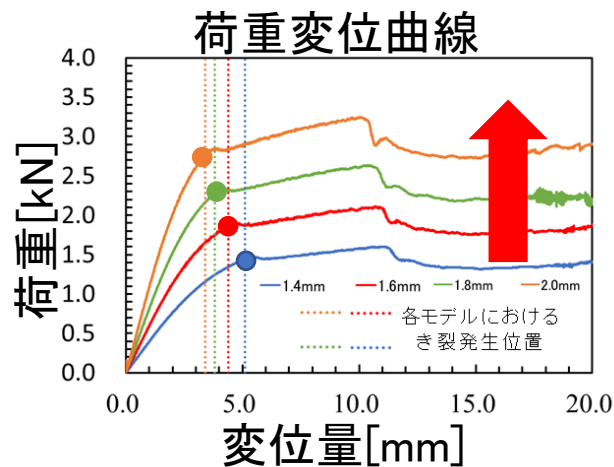
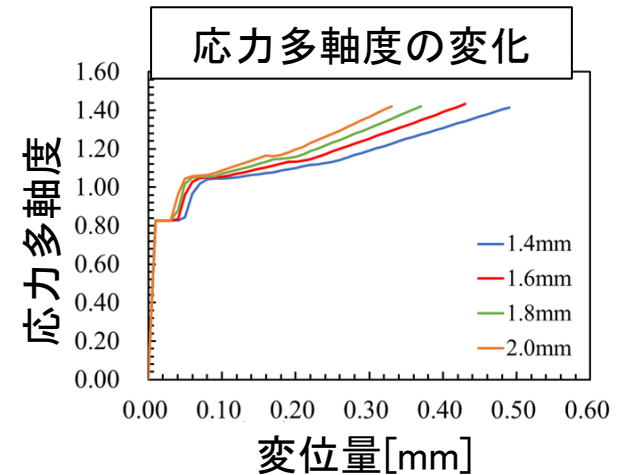
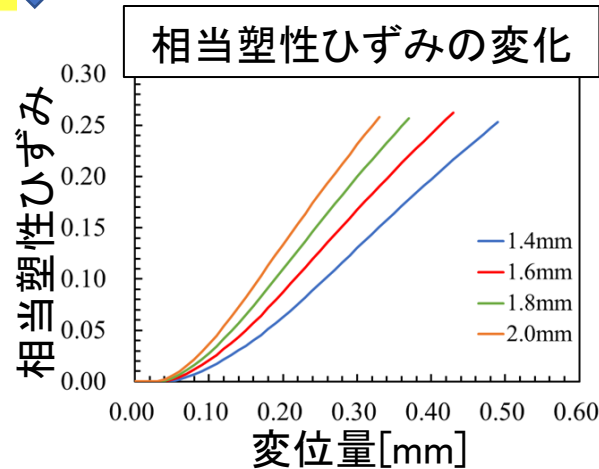
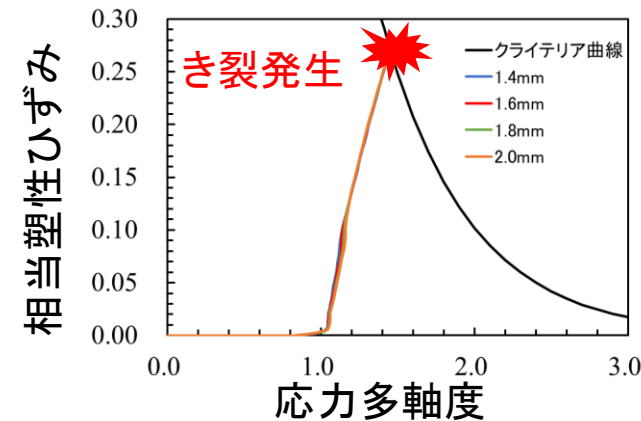
板厚に関する検討

板厚を変更



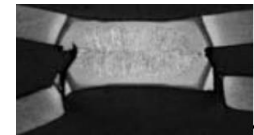
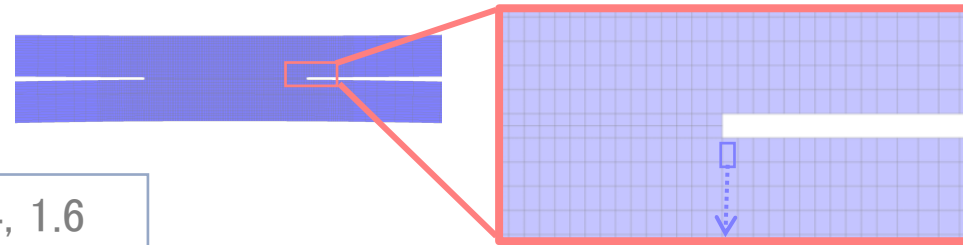
板厚 1.4, 1.6
1.8, 2.0mm

破断が生じる要素を選択



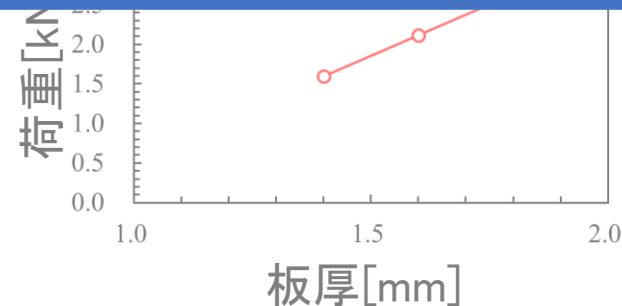
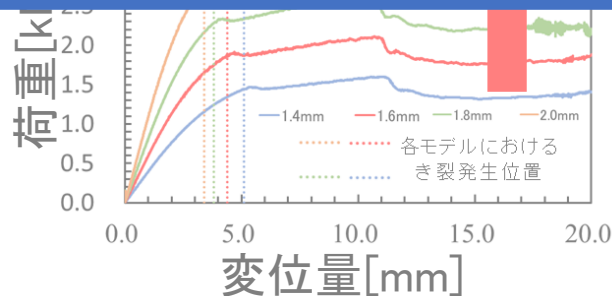
板厚に関する検討

板厚を変更し、引張試験を行った



プラグ破断

- ・板厚が変化しても破壊挙動は変わらない(プラグ破断が生じる)
- ・板厚が大きくなると、小さな変位量でき裂が発生する
- ・板厚が大きいほうが引張試験における荷重が大きくなる

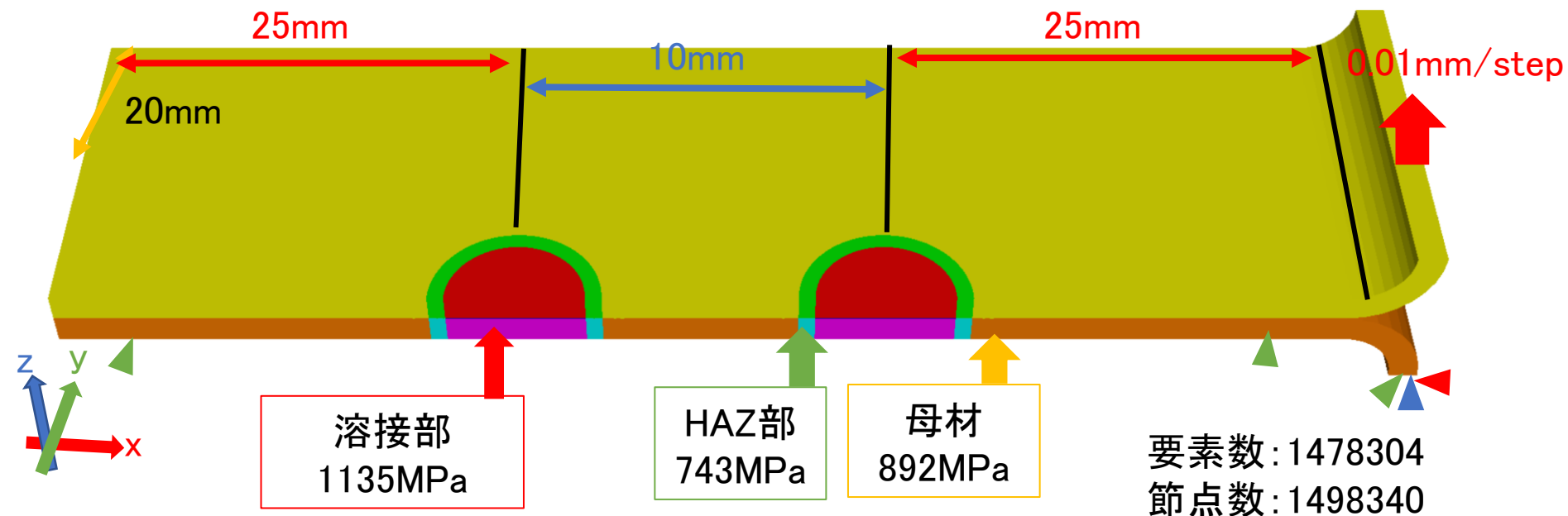


2点溶接試験片における 破壊挙動についての検討

2点スポット溶接試験片

1/2モデル ピッチ10mm

板端から溶接部までの距離を25mmと設定



JIS Z3144を参考に2点溶接部を要するピール試験片を作成

溶接部、HAZ部、母材で硬さをそれぞれ変更
スポットピッチ(打点間距離)を3種類用意: 10, 30, 50mm

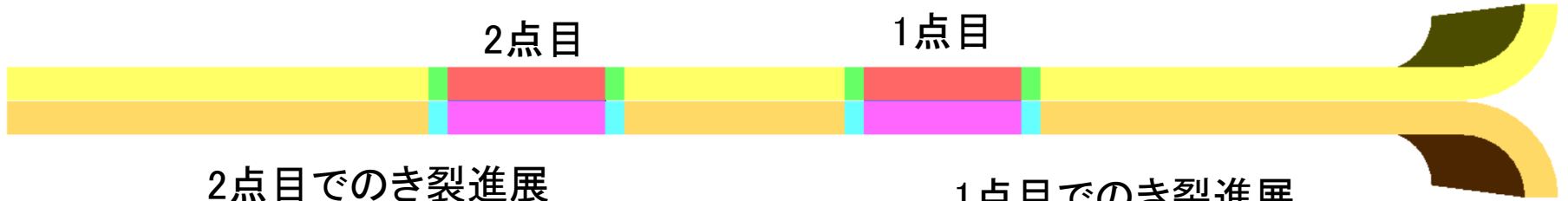
2点スポット溶接試験片でピール試験を行う

1打点目における破壊挙動が2打点目にどのように影響を及ぼすのか検討

ピッチ10mmにおける引張試験

2点目

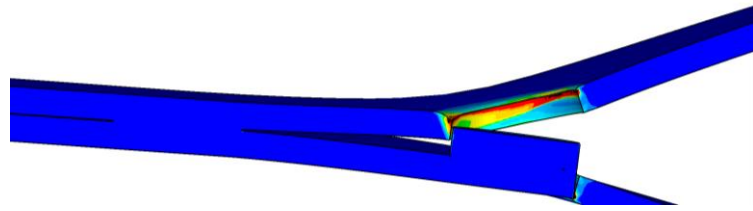
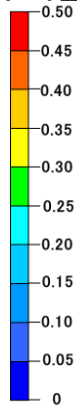
1点目



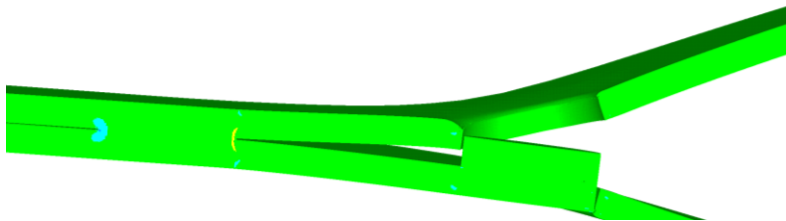
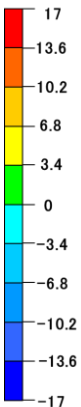
2点目でのき裂進展

1点目でのき裂進展

相当塑性ひずみ

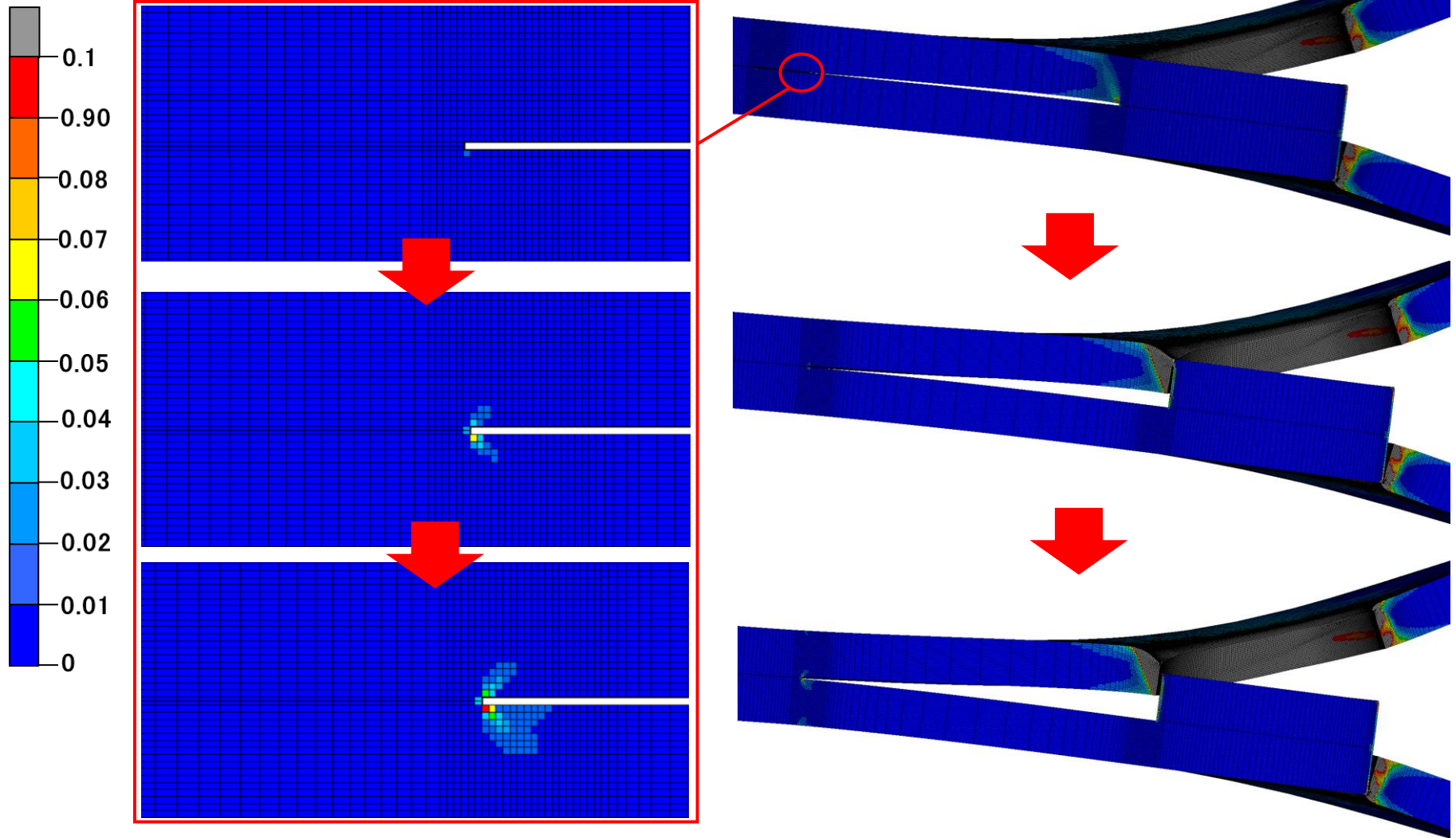


応力多軸度



1点目破壊時の2点目への影響

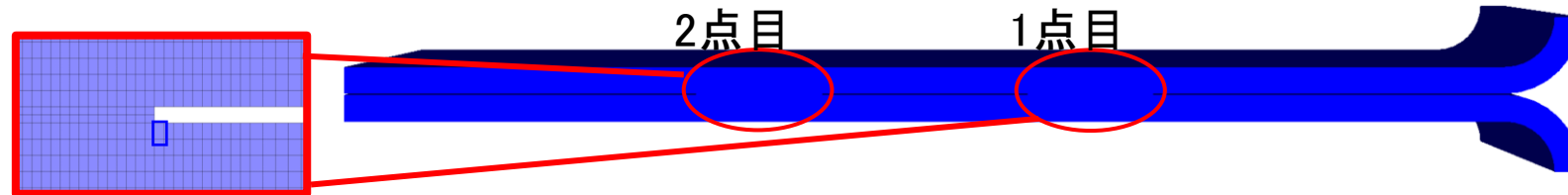
相当塑性ひずみ分布



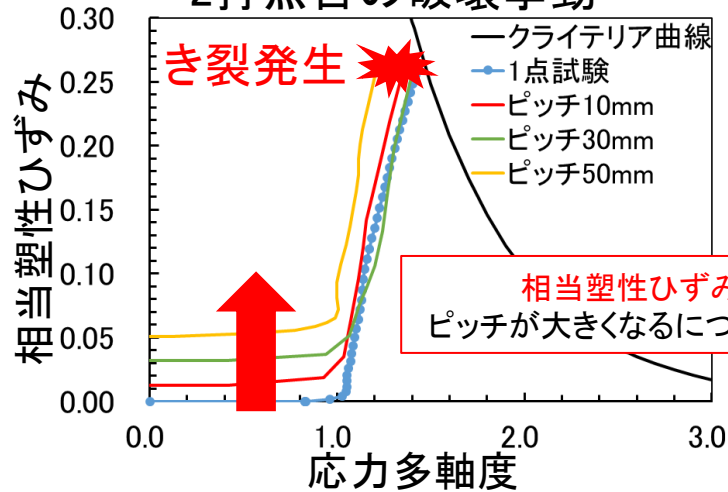
2点目で**相当塑性ひずみ**が発生している

➡ 1点目でき裂が進展が2点目に影響している

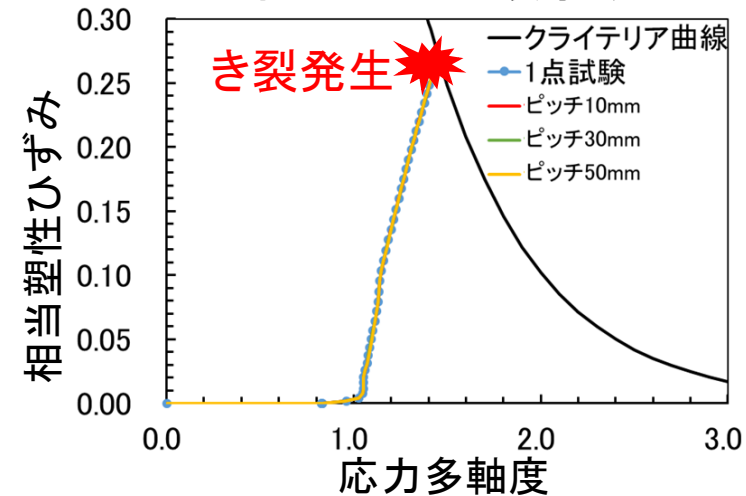
破壊挙動と強度



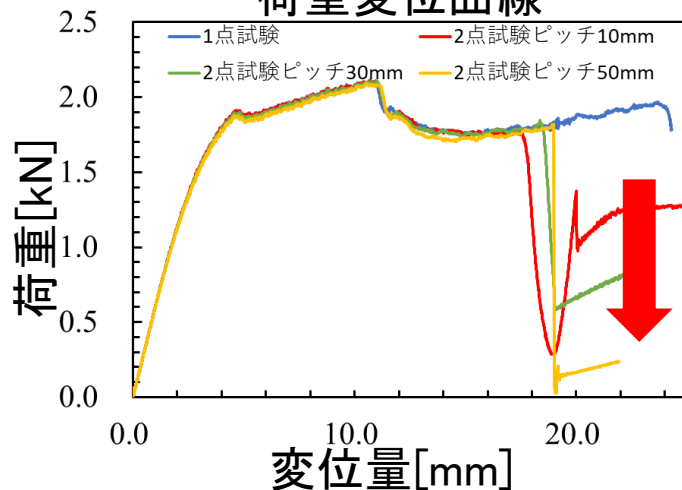
2打点目の破壊挙動



1打点目の破壊挙動



荷重変位曲線



- 1点試験における挙動と2点試験における1点目の挙動が一致
- ピッチが大きくなるほど小さな荷重で2点目でき裂進展が起こる
- ピッチが大きくなるにつれて荷重が低下し、最大荷重は1点目の破断時に現れる

多点スポット溶接部を持つ 構造物に関する検討

多点溶接部材（ハット部材）

高さ70mm, 幅140mm, 長さ300mmのハット断面部材

溶接部

片側6点

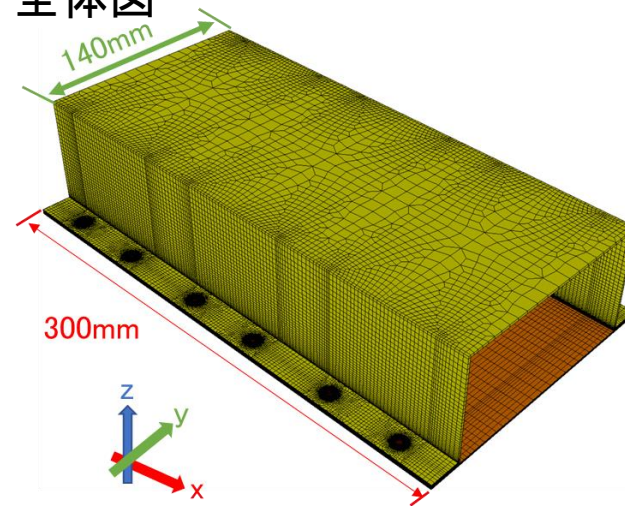
ナゲット径 $6\sqrt{1.6} = 7.6\text{mm}$

板厚1.6mm

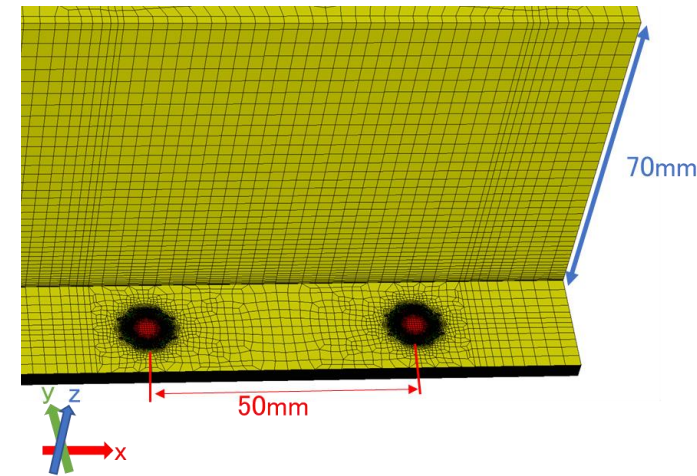
要素数: 3195048

節点数: 3267959

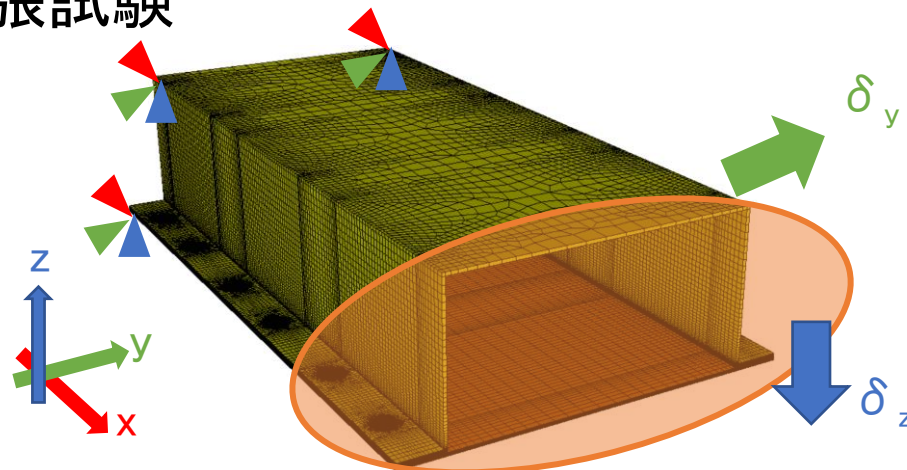
全体図



溶接部付近



引張試験



ハット部材の上部に対して
y方向, z方向に引張荷重を与えた

ハット部材の変形とスポット溶接部の
破壊挙動について検討

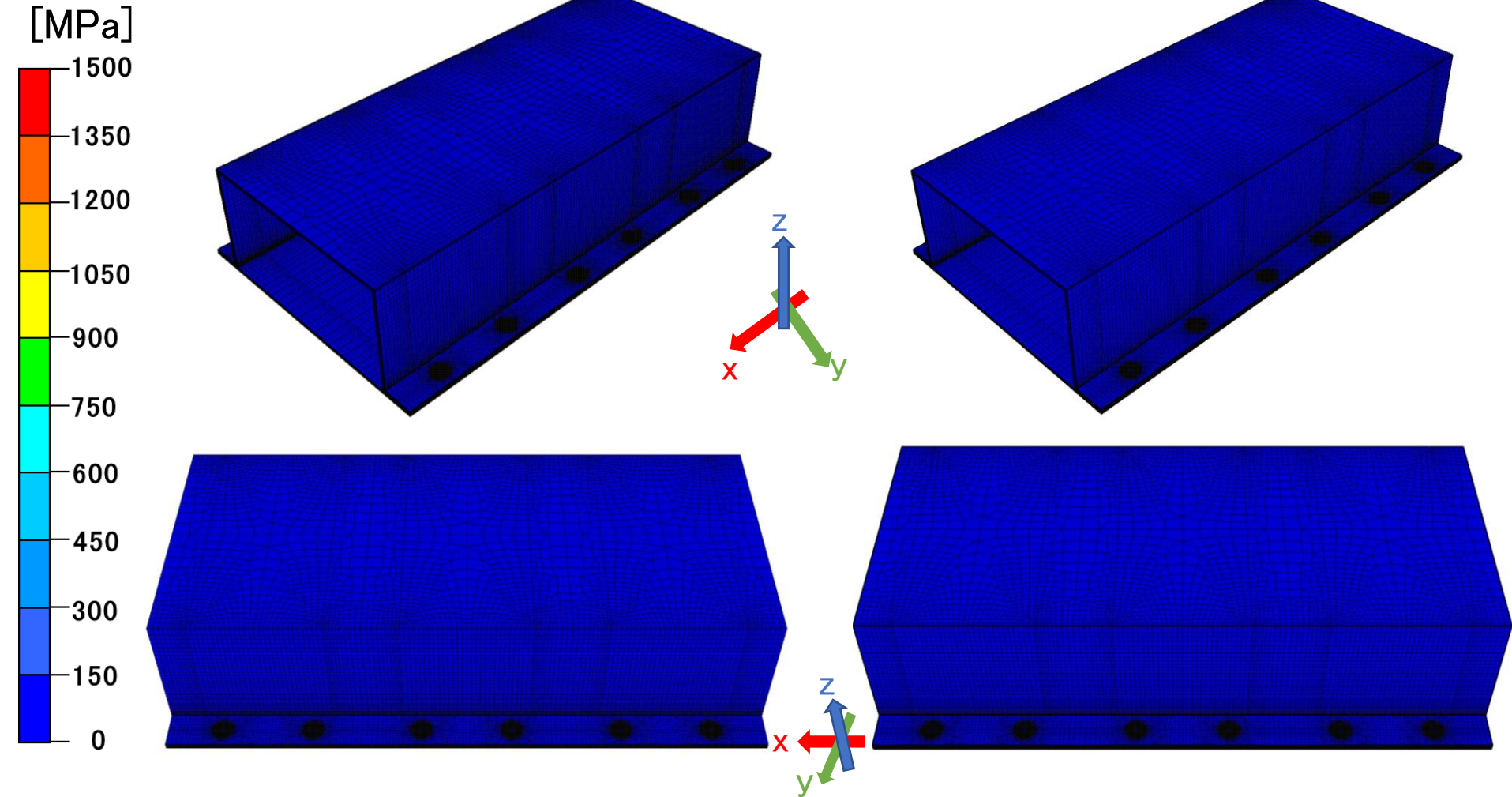
連続体損傷力学に基づき、構造物の変形と破壊挙動についての検討を行う

変形の様子

相当応力分布

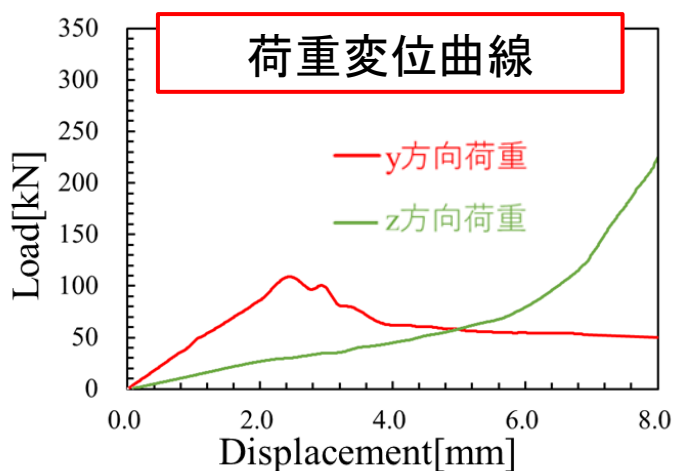
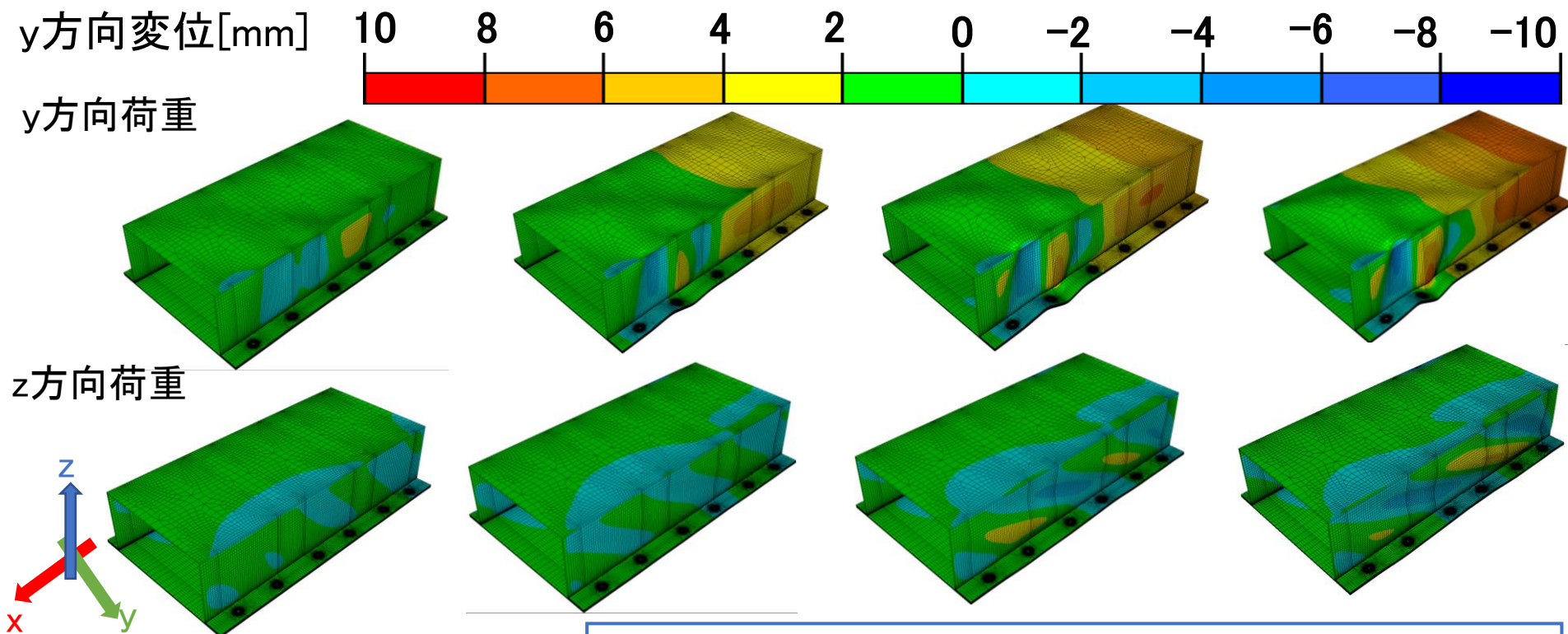
y方向荷重

z方向荷重



荷重を与えることによって連続的にたわみが発生
荷重方向によってたわみの形が異なる

座屈変形



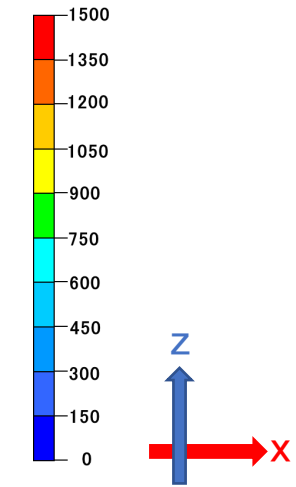
両方向の荷重において、
側面にたわみが発生

y方向荷重 より大きな変形が発生
荷重変位曲線で最大荷重が現れた

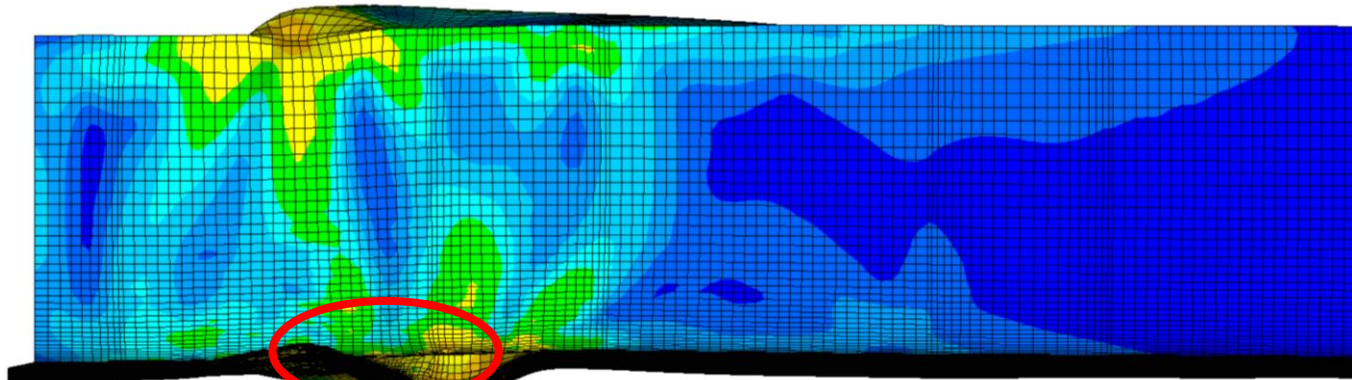
y方向荷重での溶接部のき裂について着目

y方向荷重の際の溶接部

相当応力[MPa]

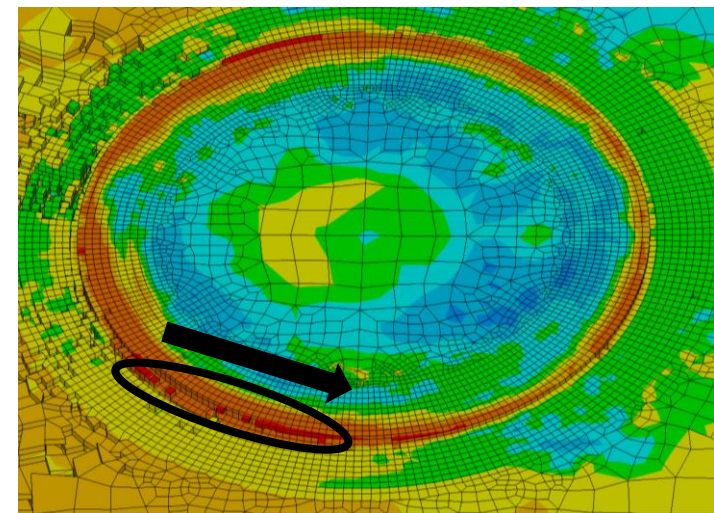
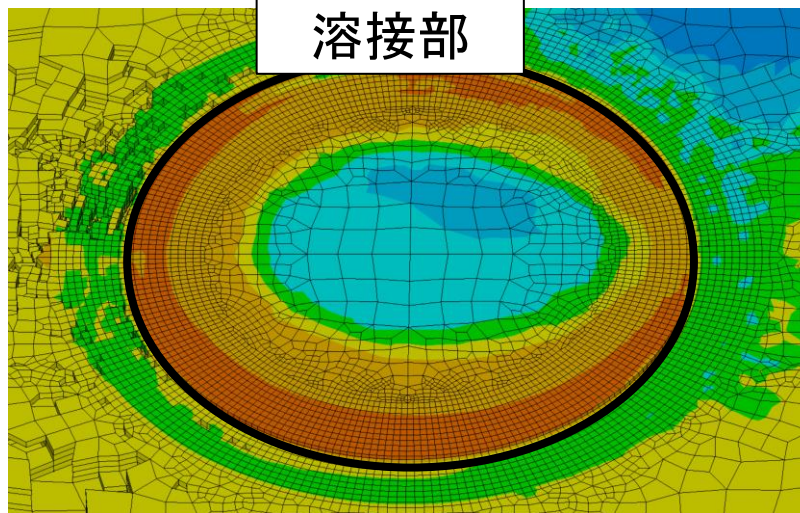


座屈の発生とともにき裂が進展



最大荷重量に達した後にき裂発生

溶接部付近



構造物の変形後に溶接部付近でき裂の進展が確認された
大きく変形が発生した箇所では溶接部に沿ってき裂が進展

結言

本研究では、連続体損傷力学に基づくき裂進展解析手法をスポット溶接継手に適用し、ピール試験解析を行った。また、具体的な構造物であるハット部材に適用し、破壊挙動に関する検討を行った。以下に本研究において得られた知見を示す。

1) 1点ピール試験について

- 板厚が小さいほどき裂が発生するまでの変位量が大きいことを示した。
- 板厚が大きいほど最大荷重も大きくなることが示された。

2) 2点ピール試験について

- 2点試験の1点目の破壊挙動と1点試験における破壊挙動が一致することを示した。
- 2点試験での最大荷重は1点試験と同じであり、1点目が完全に破断した後、荷重が小さくなって2点目でき裂が進展することが確認された。

3) 多点スポット溶接を有する構造物について

- ハット部材では与えた荷重の方向によって座屈変形の様子が異なることが示された。
- 荷重を与えた後、構造物が座屈変形した後に溶接部でき裂が進展することが確認された。