

# 防撓構造の最終強度に及ぼす 初期不整および残留応力の影響の検討

大阪府立大学 工学域 機械系学類  
海洋システム工学課程 生島研究室 4年生 武内 洋介

1. 背景・目的
2. 大変形座屈解析に及ぼす解析パラメータの影響
3. 防撓構造試験体の最終強度解析
4. solid要素を用いた試験体の最終強度解析
5. 結言

# 背景・目的

## 船体の最終強度

船舶は貿易で重要な役割を担っており、物資の輸送に限らず、**航行中の安全性**は極めて重要  
構造の安全性を担保するためには、**構造としての最終強度**について事前に検討する必要

溶接によって発生する  
**初期不整**や**残留応力**などが影響

**溶接変形・残留応力を考慮する必要**



<http://www.ieis.or.jp/>

事故の例: 2020年7月 モーリシャス沖



<https://www.iza.ne.jp/article/20200817-6EXQFYZIBBPS7MFGMYF7FKMQVY/>

## 研究目的

船体最終強度に及ぼす  
**溶接変形・残留応力**の影響の検討

## 検討項目

溶接変形・残留応力の考慮には**ソリッド要素**が必要  
→ソリッド要素を用いた場合の、**解析パラメータ**の影響を検討  
防撓構造試験体において、**溶接変形・残留応力**の影響を検討

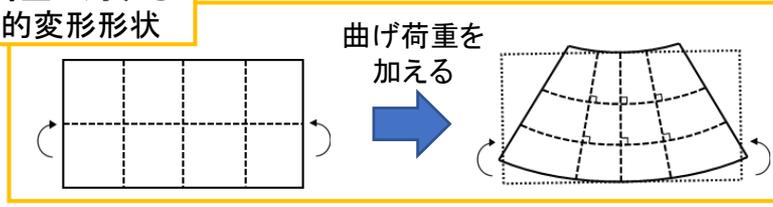
# 大変形座屈解析に及ぼす 解析パラメータの影響

# せん断ロッキングと低減積分

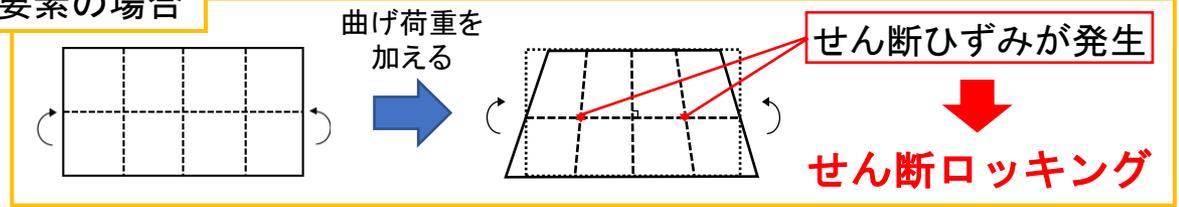
solid要素では、曲げ変形に対する剛性が高めに評価されるので、解析結果の精度が低下

せん断ロッキング

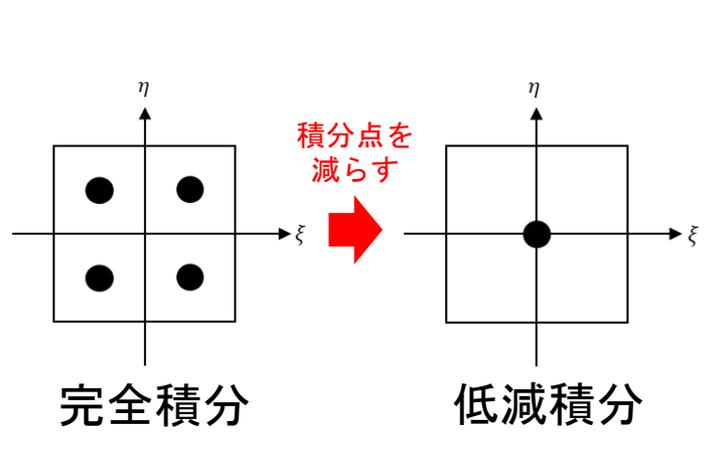
曲げ荷重に対する理想的変形形状



solid要素の場合



## 低減積分によるロッキングの防止



ゼロエネルギーモード(アワーグラスモード)の発生

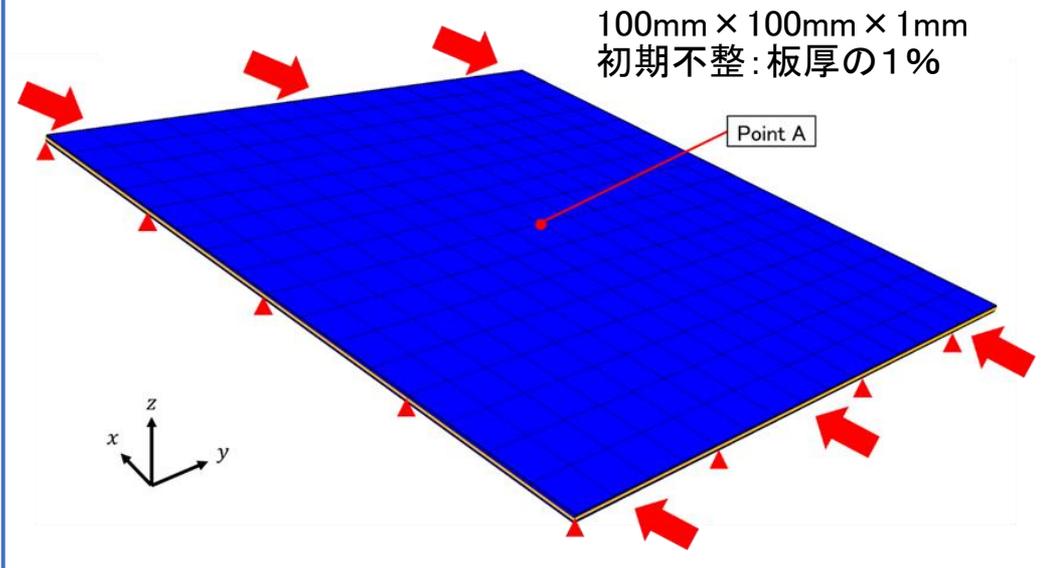
アワーグラスモードの発生

- ・低減積分パラメータ (低減積分を行う割合)
  - ・モデルの要素分割数
- についての検討が必要

solid要素を用いると、要素数が大きくなるので、理想化陽解法FEMを用いた解析を行う

# 大変形座屈解析に及ぼす低減積分の影響

## 解析モデル



## 解析条件

- ・  $x=0$ の面をx軸方向に  
0.00018mm × 400STEP強制変位
- ・  $x=100$ の面をx軸方向に  
-0.00018mm × 400STEP強制変位
- ・ 原点をy軸方向に拘束
- ・ 中立面上 ( $z=0.5$ ) の周囲の節点をz軸方向に拘束

## 解析パラメータ

### 要素分割数

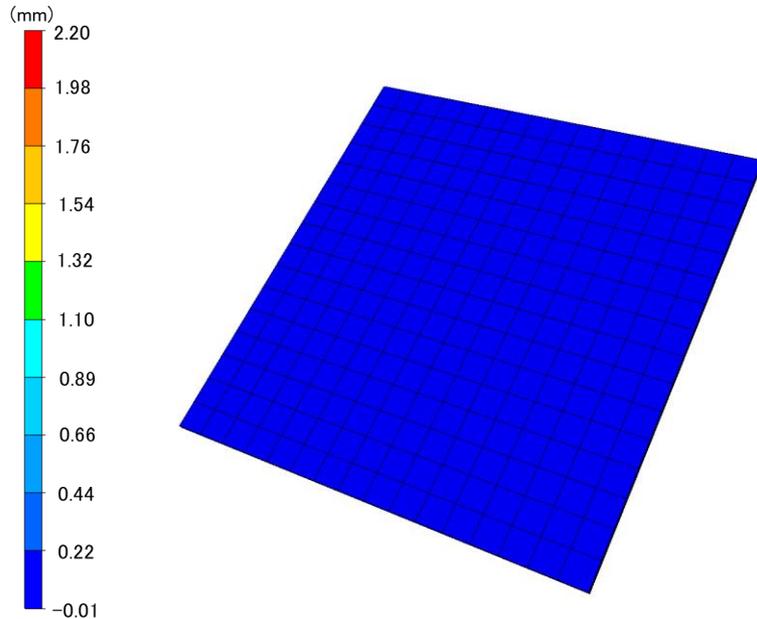
- ① solid/16\*16\*4分割
- ② solid/32\*32\*8分割
- ③ solid/64\*64\*16分割
- ④ shell/16\*16\*4分割

### 低減積分パラメータ

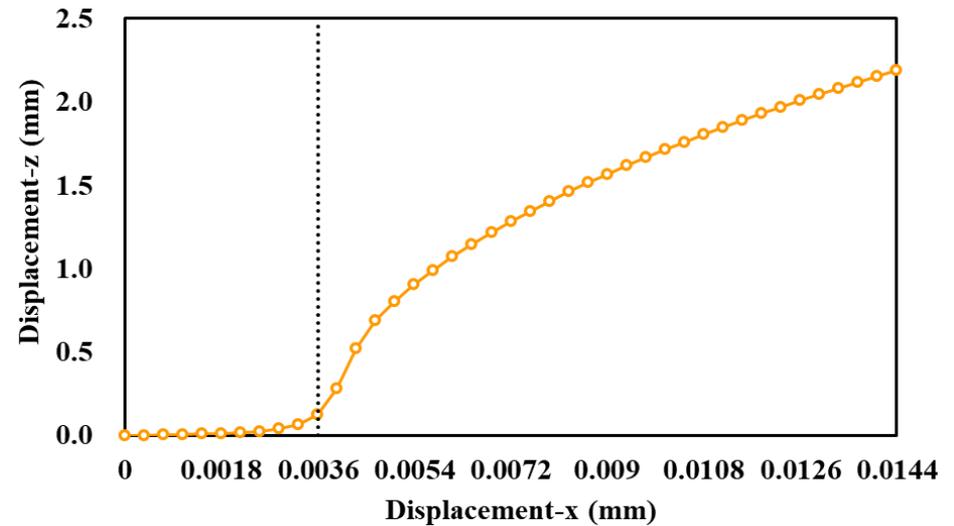
0.0, 0.1, 0.2, ..., 0.9のように、  
0.0から0.1ずつ変化させる

# 解析結果

解析の様子 (変形倍率  $\times 20$ )



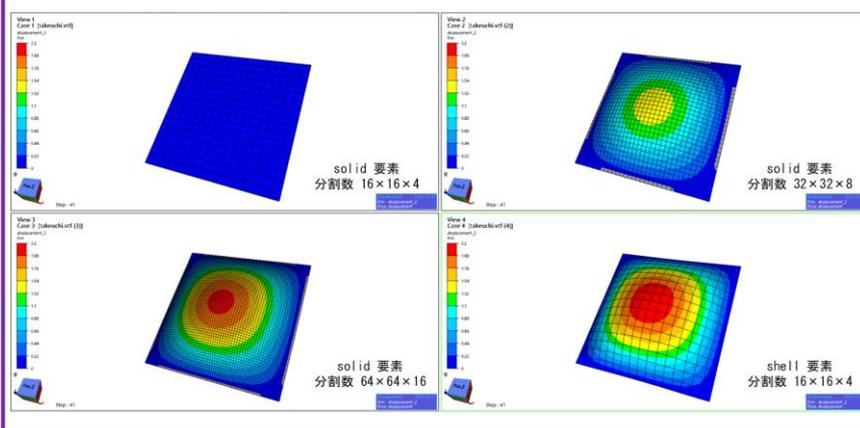
中心点のz方向変位



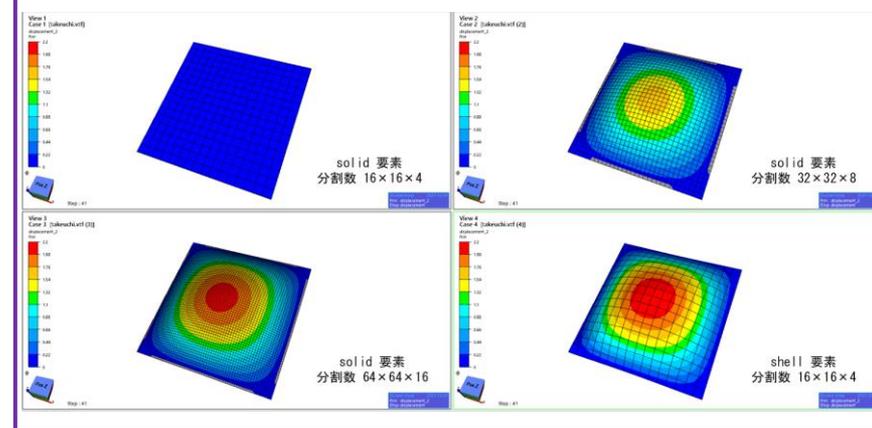
両側から圧縮変位を加え始めてしばらくは、変形がそれほど大きくは見られないが、ある時点 ( $\Delta x = 0.0036$ ) から急激に変形が大きくなり、座屈変形がみられる

# 解析結果

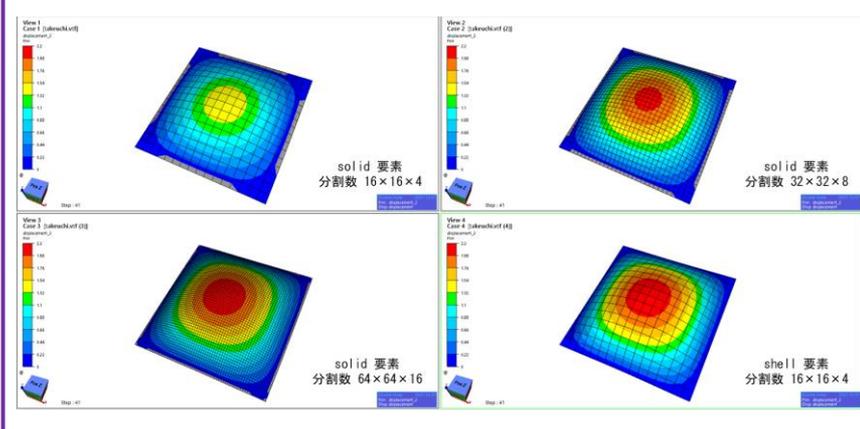
## 低減積分パラメータ0.0の時



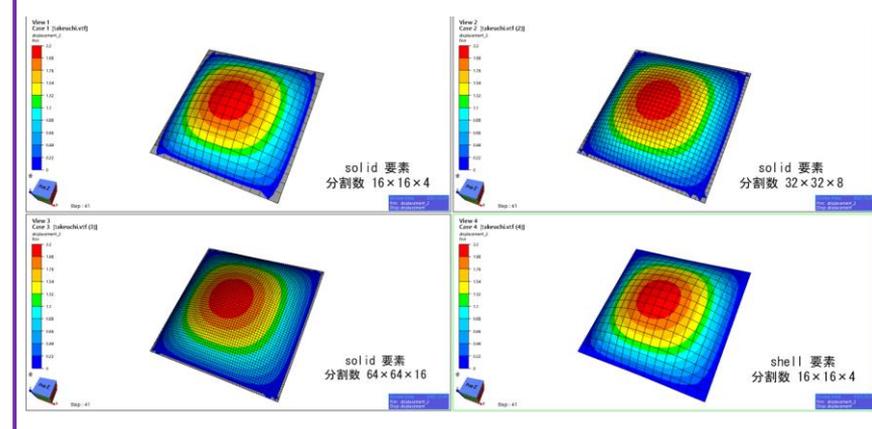
## 低減積分パラメータ0.1の時



## 低減積分パラメータ0.5の時



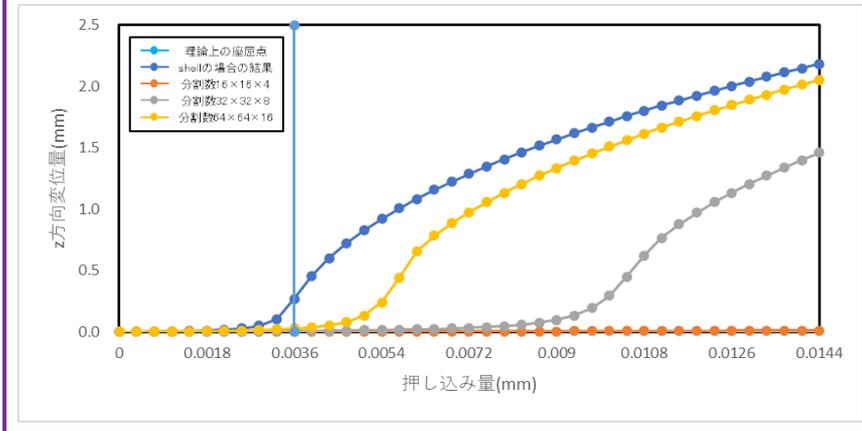
## 低減積分パラメータ0.9の時



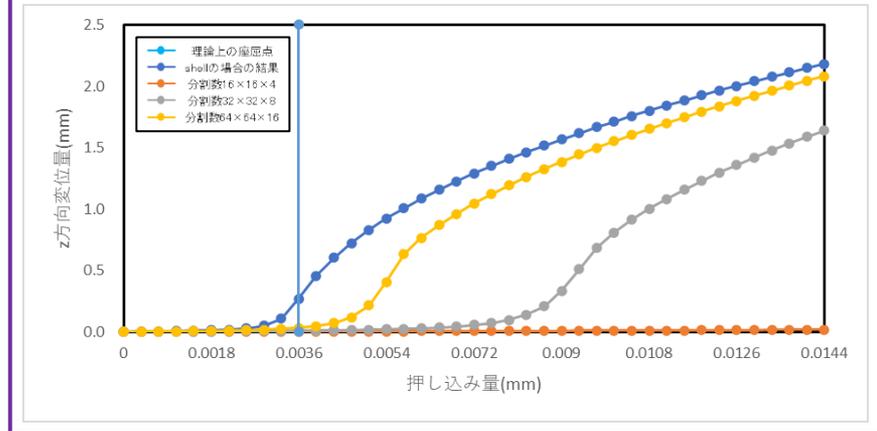
- ・分割数を大きくすると、shell要素とsolid要素の結果が次第に一致
- ・低減積分パラメータを大きくすると、shell要素とsolid要素の結果が次第に一致

# 解析結果

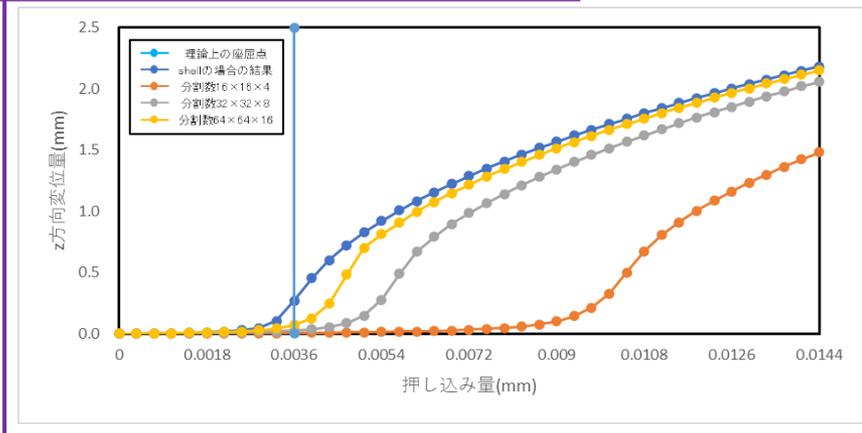
## 低減積分パラメータ0.0の時



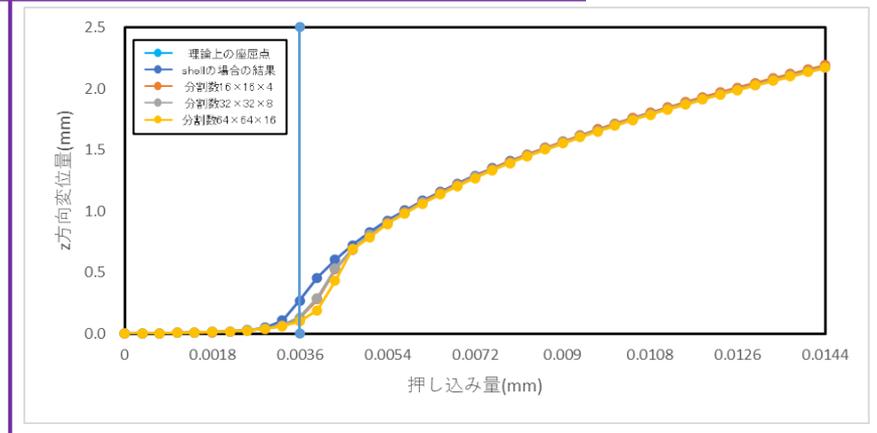
## 低減積分パラメータ0.1の時



## 低減積分パラメータ0.5の時



## 低減積分パラメータ0.9の時



- ・分割数を大きくすると、shell要素とsolid要素の結果が次第に一致
- ・低減積分パラメータを大きくすると、shell要素とsolid要素の結果が次第に一致

# 基礎解析から得られたこと

solid要素において、解析モデルの分割数を大きくし、1つの要素のサイズを小さくすると、座屈変形挙動は、shell要素を用いたときの変形挙動に近づくことが確認できた。

低減積分パラメータの値を大きくしていくと、次第にshell要素とsolid要素の座屈変形挙動が近づいていき、平板モデルにおいては低減積分パラメータの値が0.9の時、shell要素とsolid要素の座屈変形挙動がおおよそ一致する結果が得られることが分かった。

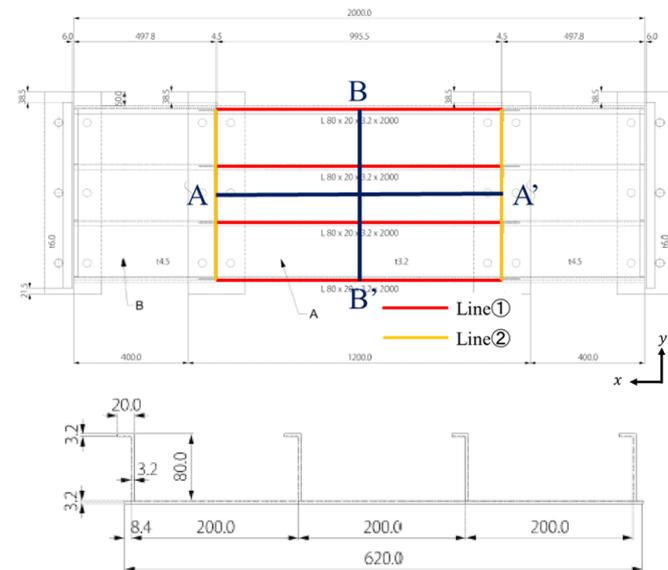
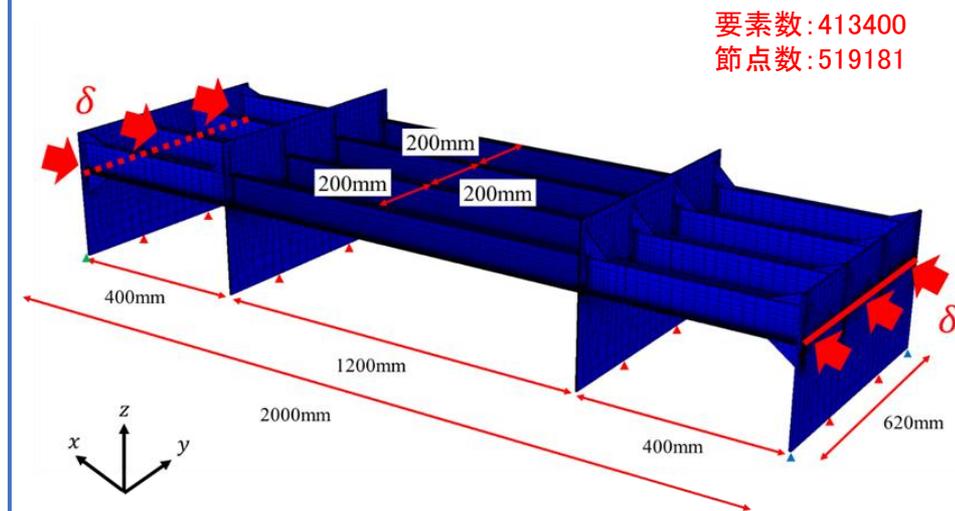


solid要素において、いずれの分割数の場合においても結果がshell要素とほとんど一致した低減積分パラメータが0.9の場合を本解析で使用。

# solid要素を用いた試験体の最終強度解析

# solid要素を用いた試験体の最終強度解析

## 解析モデル



## 解析目的

船体構造でよく用いる防撓パネル試験体に、

①初期不整、溶接変形を加えない場合

②初期不整を加えた場合

③溶接変形を加えた場合

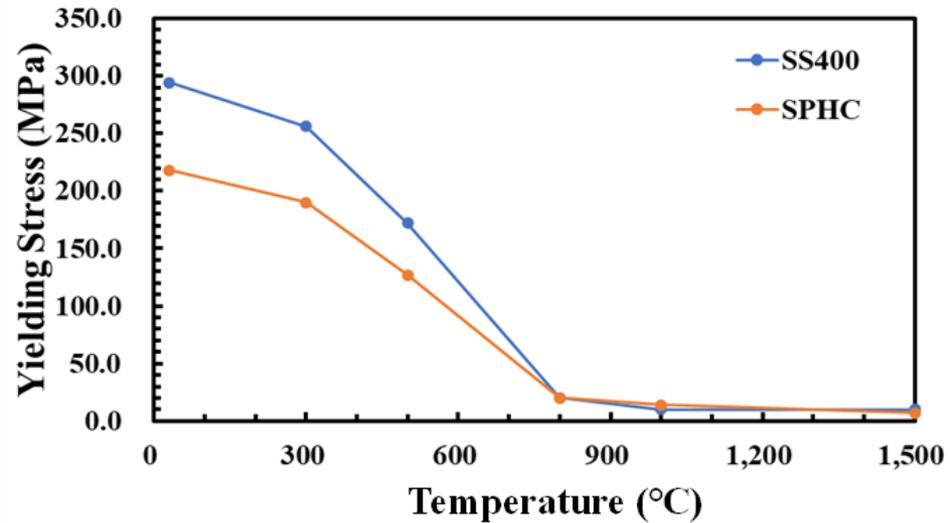
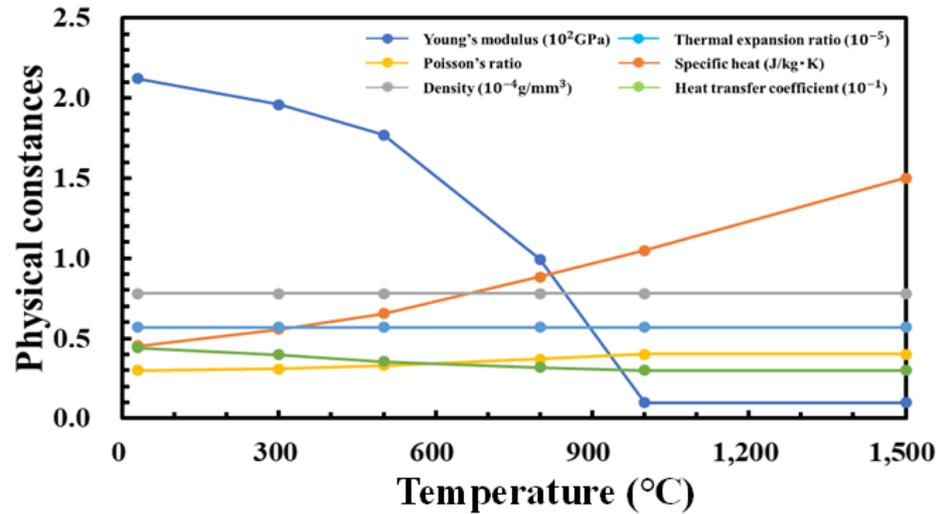
の最終強度を比較し、初期不整や溶接変形がもたらす最終強度への影響を検討

## 拘束条件

- ・ ▲ 24箇所 で x 方向 に 拘束
- ・ ▲ 2箇所 で y 方向 に 拘束
- ・ ▲ 1箇所 で z 方向 に 拘束

# solid要素を用いた試験体の最終強度解析

## 材料定数

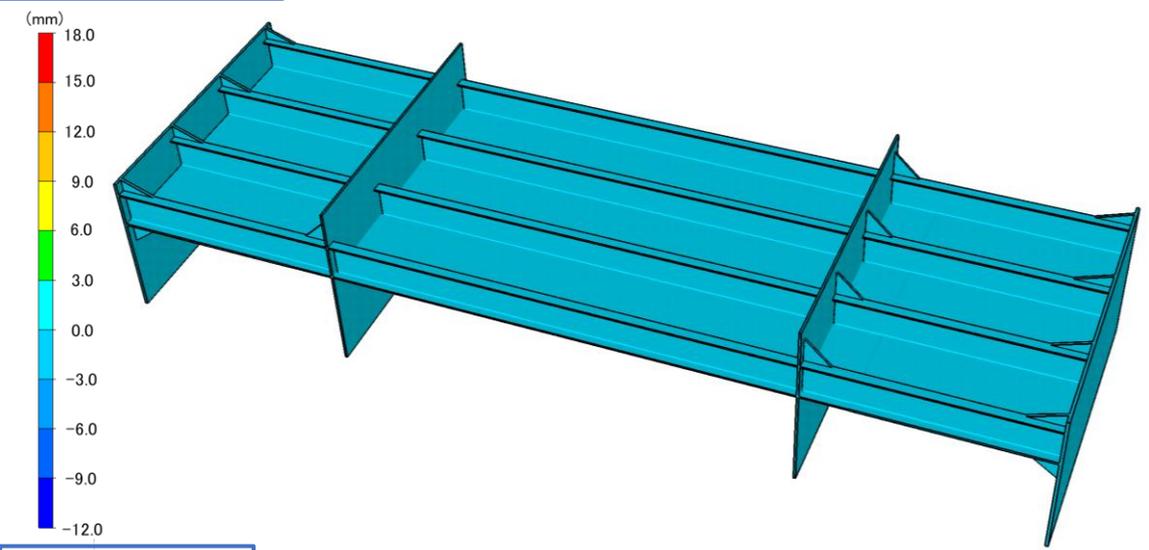


## 圧縮条件

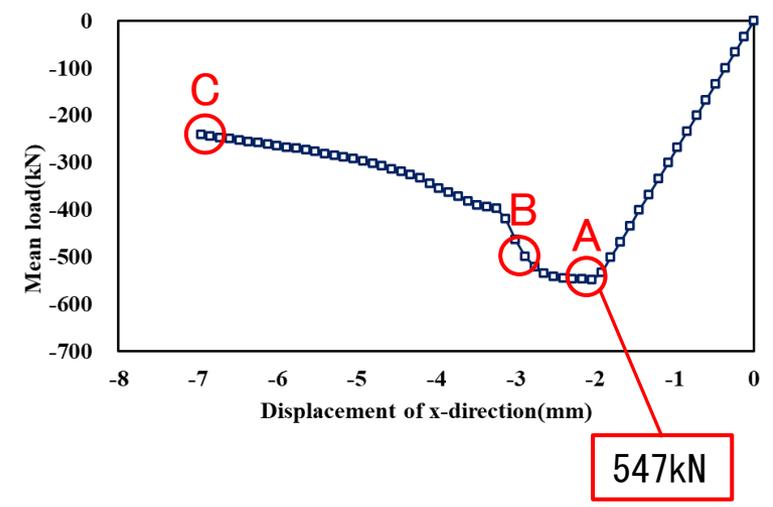
	$\delta$ : displacement per 1step	step
x = 0	0.01mm	400
x = 1200	-0.01mm	400

# 最終強度解析結果/初期不整・溶接変形なし

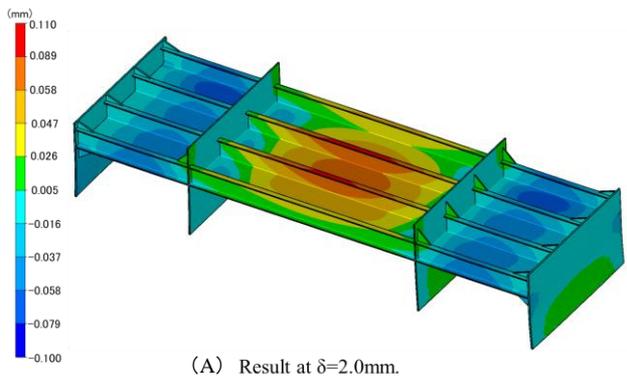
## 解析の様子



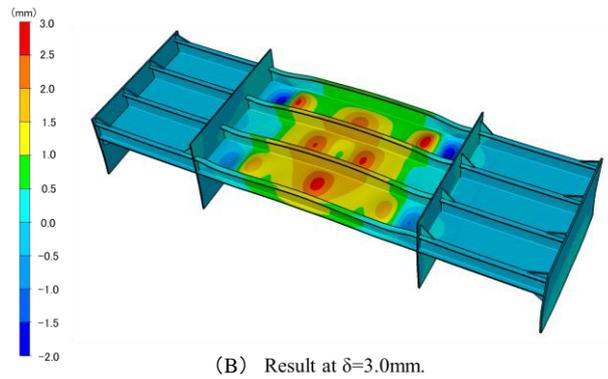
## 荷重変位曲線



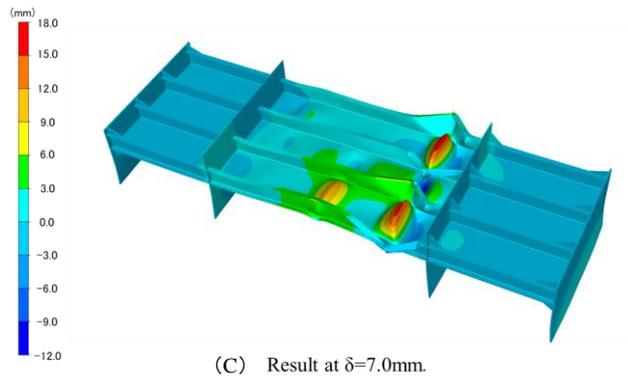
## z方向変位



(A) Result at  $\delta=2.0\text{mm}$ .



(B) Result at  $\delta=3.0\text{mm}$ .



(C) Result at  $\delta=7.0\text{mm}$ .

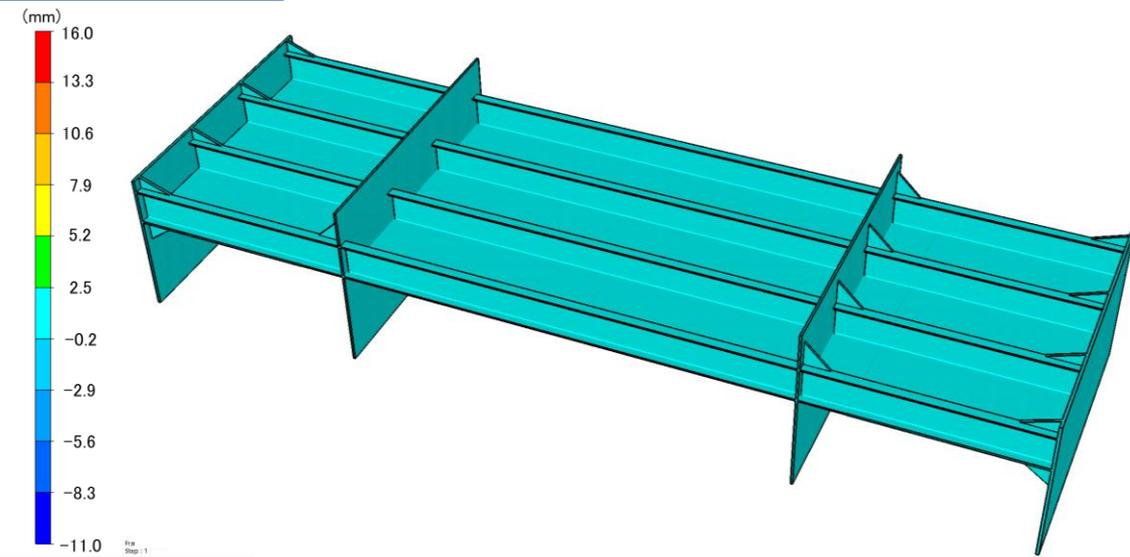
(A) 座屈前で微小変形

(B) 座屈が発生し変位が大

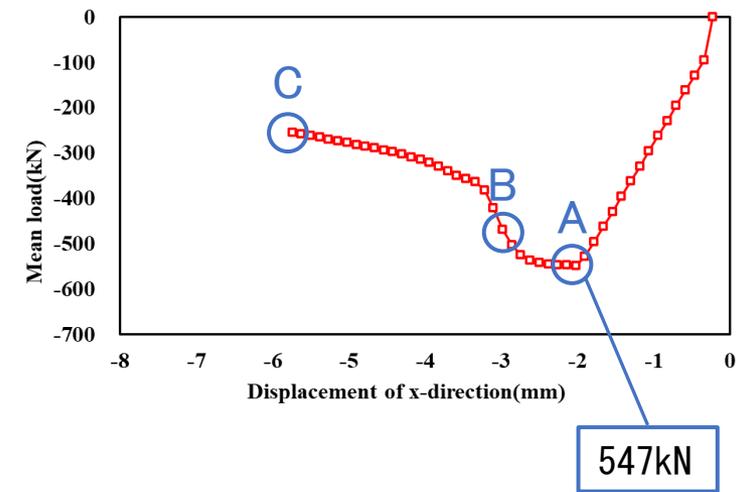
(C) 局所崩壊が発生

# 最終強度解析結果/初期不整あり

## 解析の様子

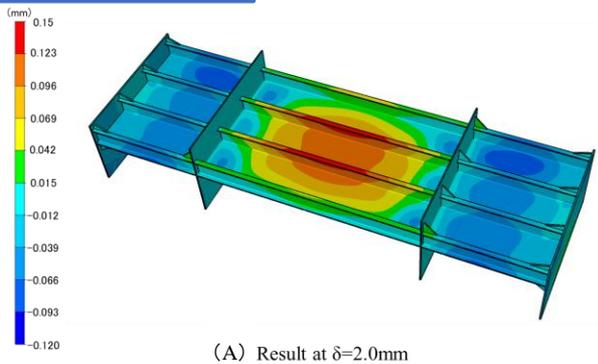


## 荷重変位曲線

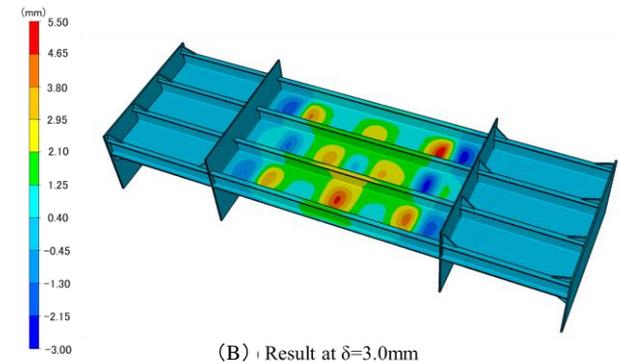


## z方向変位

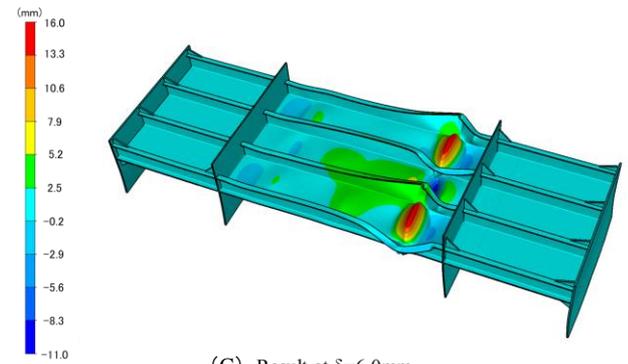
板厚3.2mmに対し1%の大きさの初期不整を加えた



(A) Result at  $\delta=2.0\text{mm}$



(B) Result at  $\delta=3.0\text{mm}$

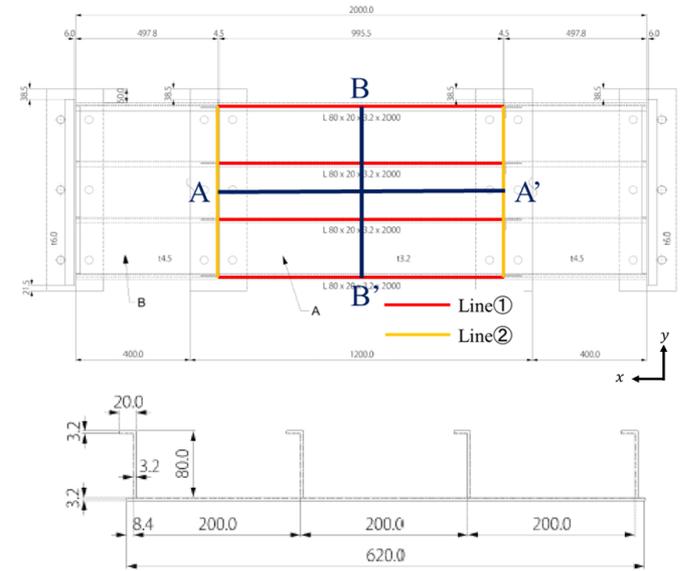
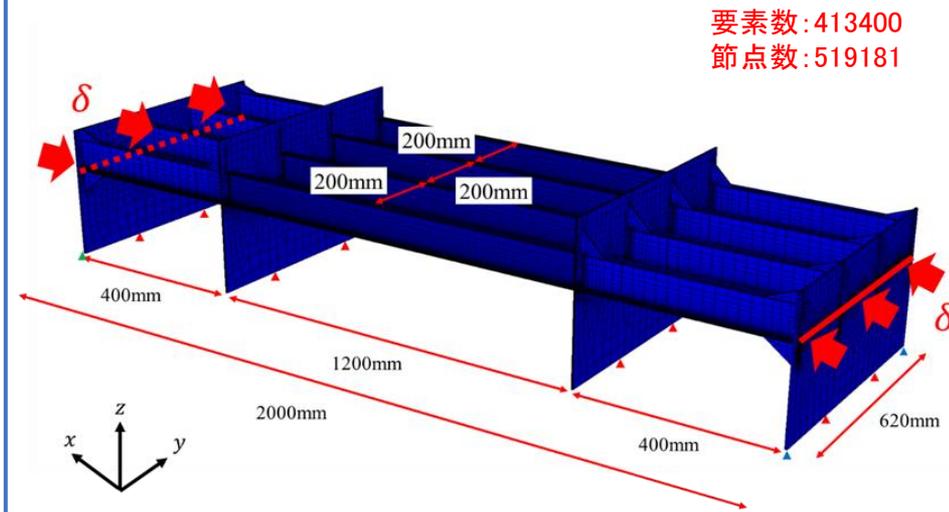


(C) Result at  $\delta=6.0\text{mm}$

初期不整がない場合とほとんど変化はなく、最終強度の変化も小さい

# 溶接解析

## 解析モデル

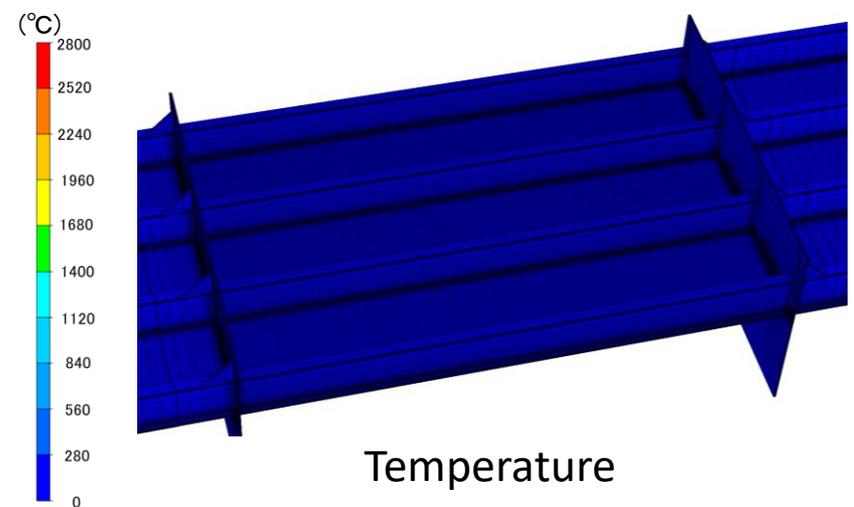
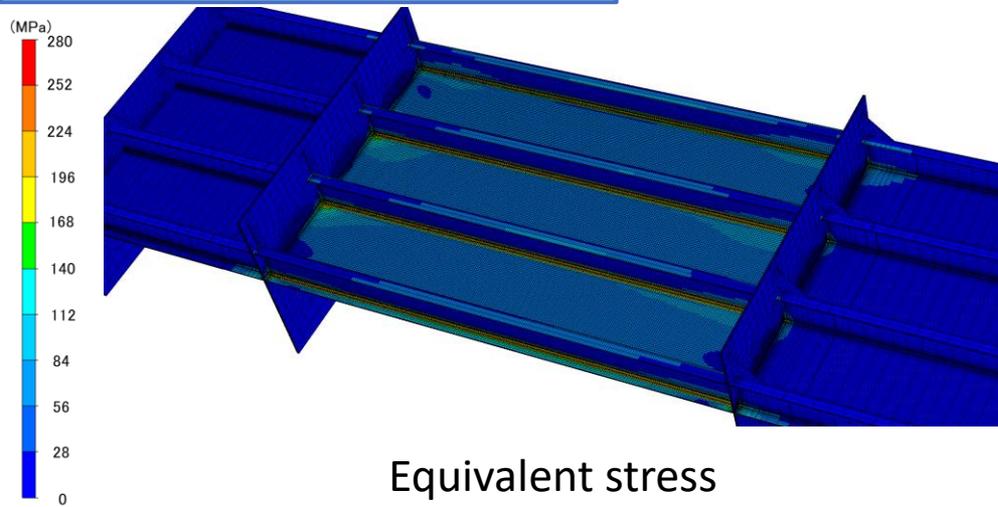


## 溶接条件

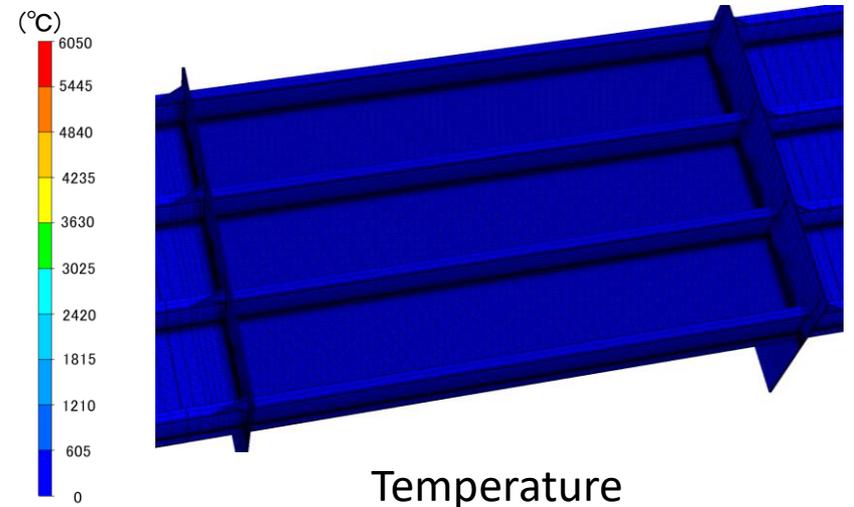
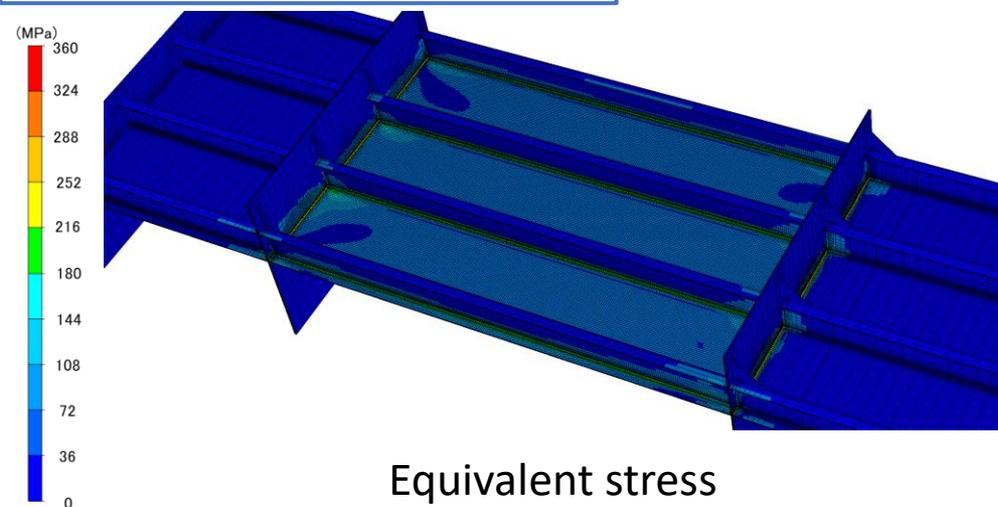
	Current[A]	Voltage[V]	Welding speed[mm/sec]	Heat efficiency
Line①	100	30	20	0.7
Line②	100	50	25	0.7

# 溶接解析結果

## 解析の様子・Line①の溶接

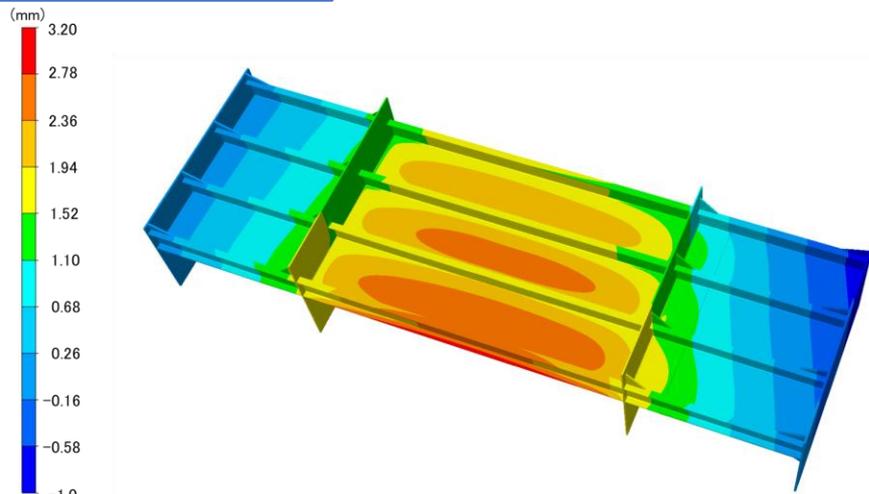


## 解析の様子・Line②の溶接

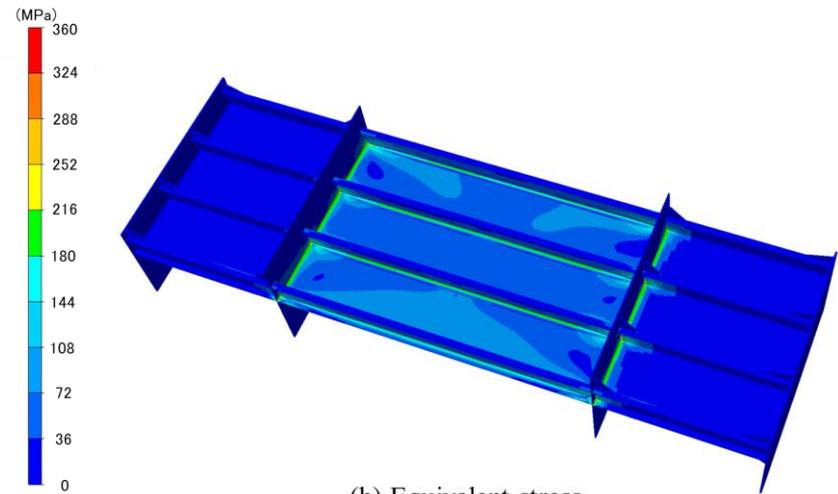


# 溶接解析結果

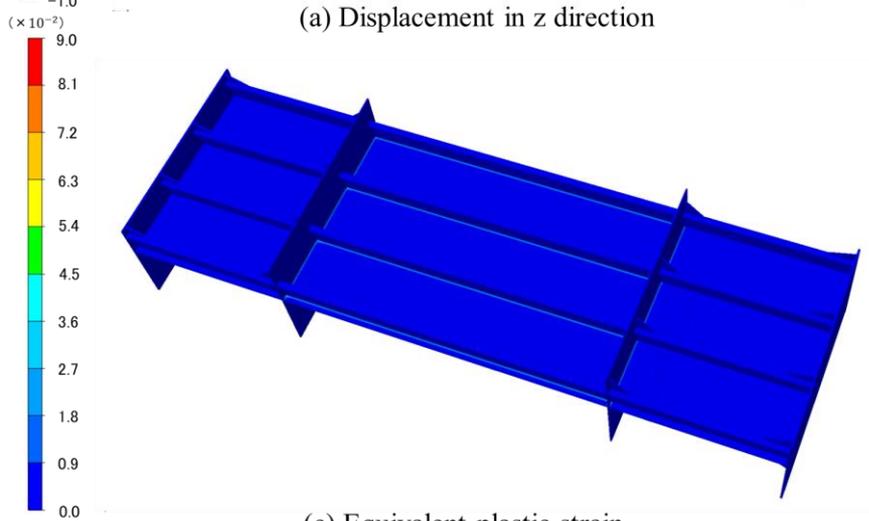
## 解析後の形状



(a) Displacement in z direction



(b) Equivalent stress

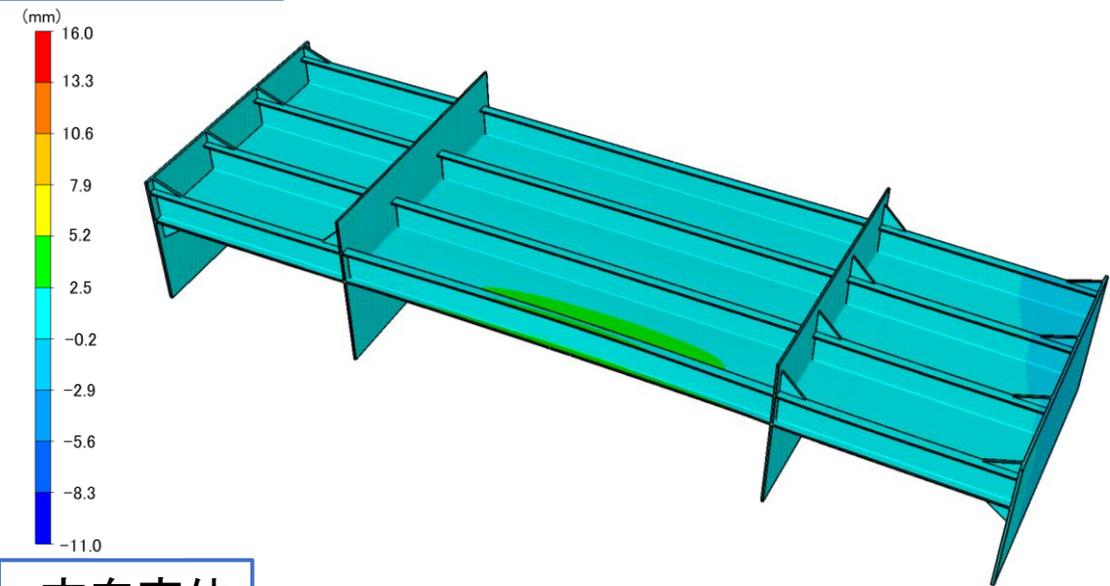


(c) Equivalent plastic strain

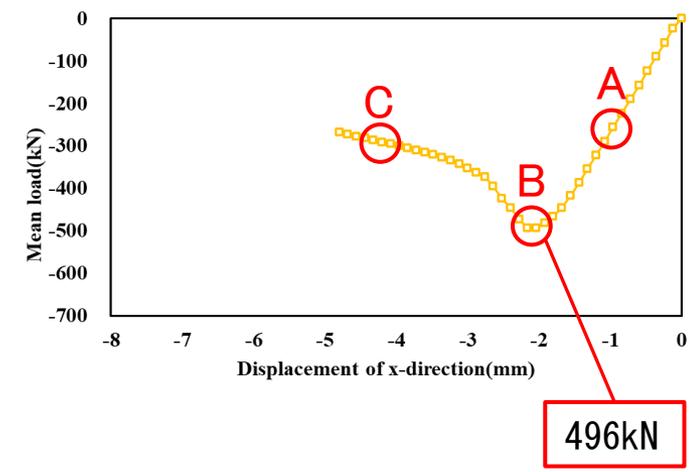
- Z方向変位に関しては、やせ馬形式の変形形状が見られた
- 相当応力に関しては、溶接線近傍で降伏応力程度の高い残留応力が発生していることが確認できる
- 相当塑性ひずみに関しても同様、溶接線近傍で大きくなっていることが分かる

# 最終強度解析結果/溶接変形・残留応力あり

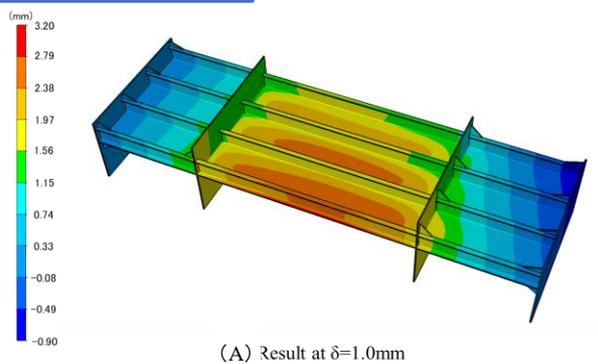
## 解析の様子



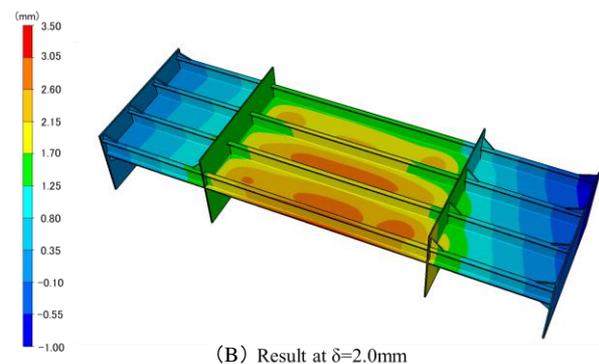
## 荷重変位曲線



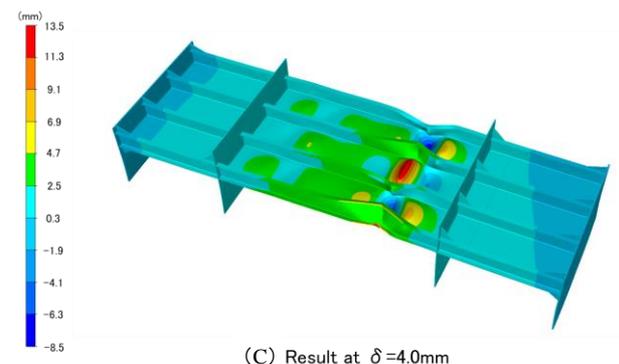
## z方向変位



(A) Result at  $\delta=1.0\text{mm}$



(B) Result at  $\delta=2.0\text{mm}$

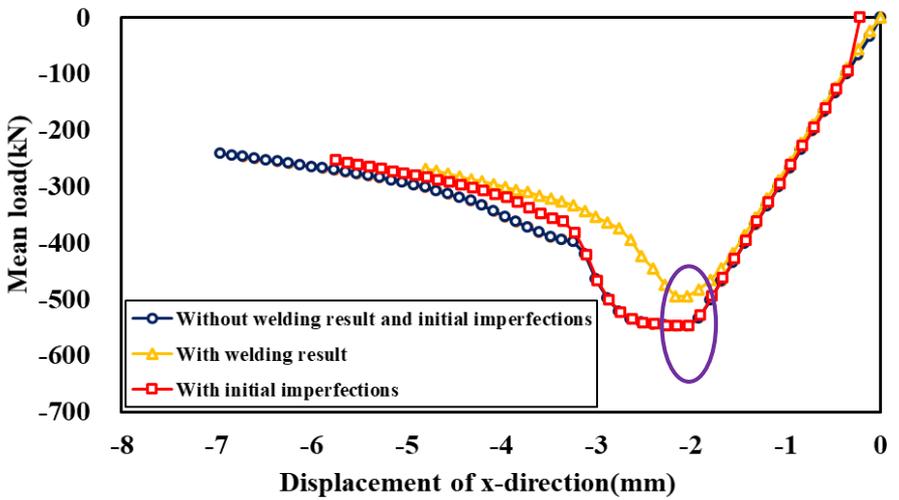


(C) Result at  $\delta=4.0\text{mm}$

溶接変形・残留応力がない場合と比べ、崩壊挙動に若干の異なりがあった

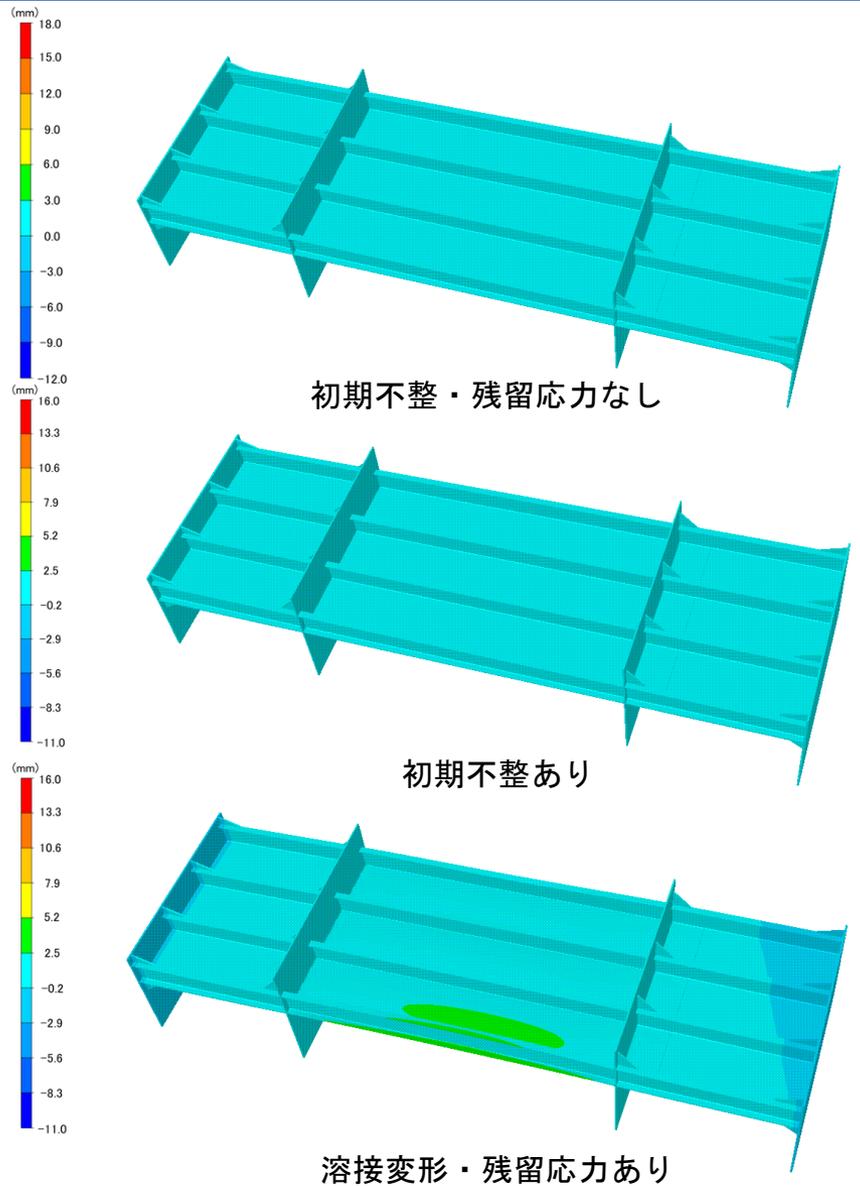
# 最終強度に及ぼす初期不整・溶接変形の影響

荷重変位曲線



初期不整を含めた場合と含めない場合とでは、荷重変位曲線の形状が**おおよそ一致**していることが確認できる

残留応力を含めた場合と含めない場合とでは、○部分のように、座屈が生じる部分における**反力の大きさに違い**があり、残留応力が最終強度の及ぼす影響が**大きい**ことが確認できる



# 結言

本研究では、防撓構造の最終強度に注目し、溶接がこれに及ぼす影響について数値解析法で検討した。最終強度解析時の座屈崩壊挙動においてロッキングの影響が想定されることから、最終強度解析に先立って、shell要素とsolid要素の座屈変形挙動について考察した。その後、防撓パネル試験体に関して、溶接などによる残留応力や初期不整が最終強度にどのように影響するのかを検討した。その結果を以下に示す。

- solid要素において、解析モデルの分割数を大きくし、1つの要素のサイズを小さくすると、座屈変形挙動は、shell要素を用いたときの変形挙動に近づくことが確認できた。
- 低減積分パラメータの値を大きくしていくと、次第にshell要素とsolid要素の座屈変形挙動が近づいていき、平板モデルにおいては低減積分パラメータの値が0.9の時、shell要素とsolid要素の座屈変形挙動がおおよそ一致する結果が得られることが分かった。
- 理想化陽解法FEMを用いることで50万節点規模の比較的大規模な防撓パネル試験体の座屈崩壊挙動を実用的な計算資源で解析できることを示した。
- 防撓パネル試験体に板厚の1%の初期不整を与えたとき、初期不整を与えない場合と結果がほとんど変わらなかったことから、1%の初期不整は最終強度にほとんど影響しないと分かった。また、最終強度に及ぼす溶接変形の影響は大きく、構造物の最終強度について検討する場合は慎重に考慮する必要があるといえる。