

# シェル-ソリッド混合解析による 薄板構造物における力学的挙動の 効率的解析手法に関する検討

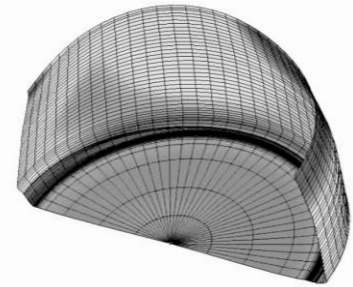
大阪府立大学 工学域 機械系学類  
海洋システム工学課程  
B4 山内 悠暉

# 研究背景・目的

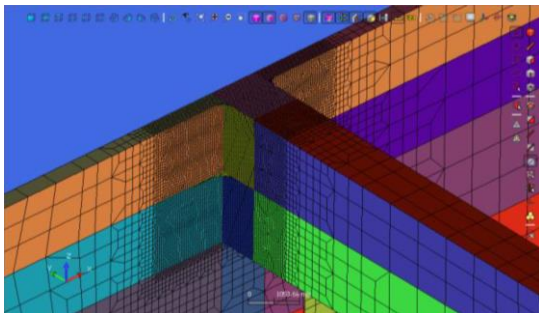
## 薄板構造物



薄板構造物：航空機や船舶、LNGタンクなどの主構造  
長大であり、解析規模が大きい  
→シェル要素での解析が一般的



## 船体構造の解析



接合部においては強度や変位の詳細な検討が必要  
ソリッド要素にてモデル化を行う

- モデル化が大変 / 要素数が多く、計算時間が膨大に
- 接合部周辺以外の要素はソリッド要素とシェル要素で差がない
- 解析が非常に非効率である

## 課題：効率的解析手法の検討

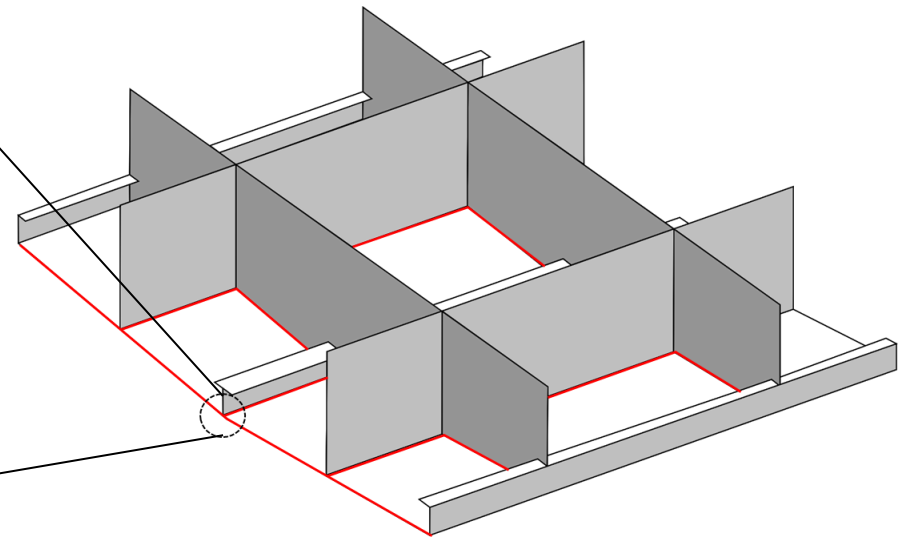
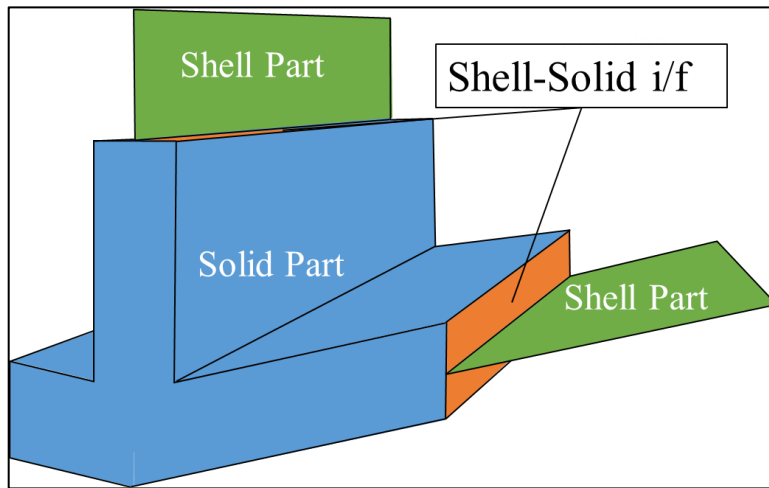
シェル要素とソリッド要素を  
混合させた解析手法を作成  
基礎問題における性能を確認  
→実大構造物への適応性を議論

## 検討内容

- ・引張り・曲げの変位は正確か
- ・薄板構造物の変形が表現可能か
- ・実大構造物への適用可能性

# 概略

モデル全体を同一の要素で解析せず、  
シェル要素とソリッド要素とに分ける

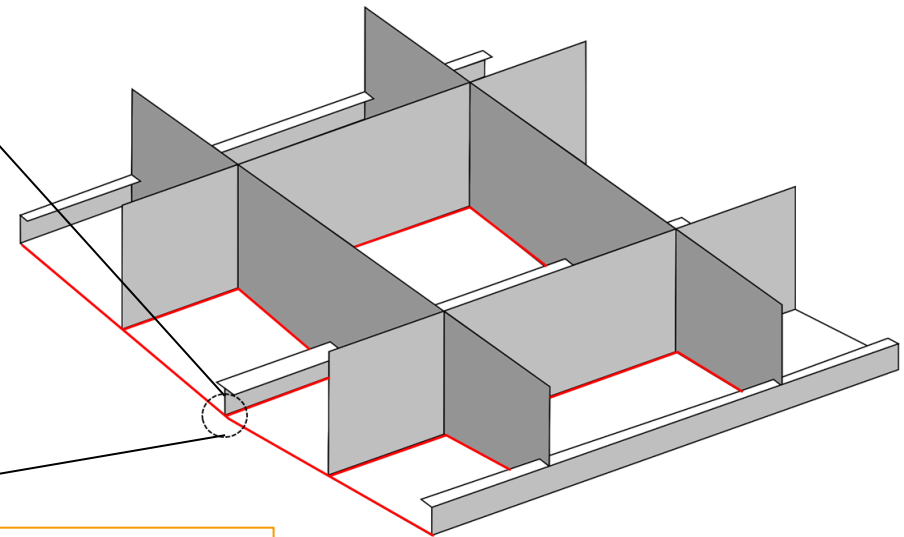
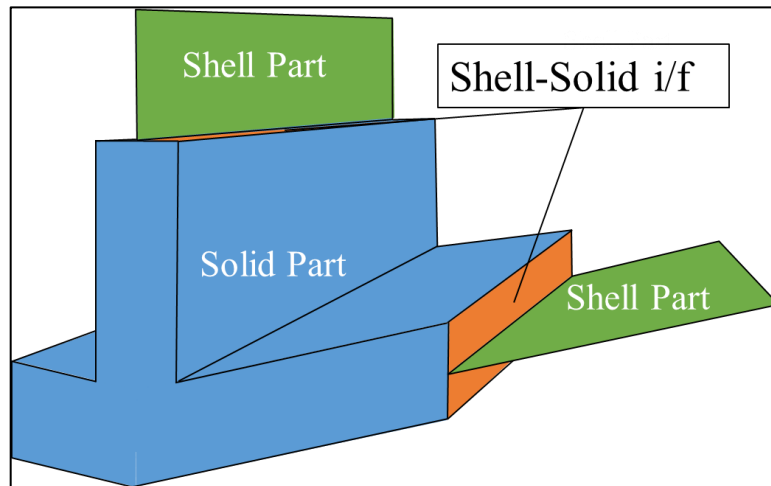


# 概略

## Shell Part

ソリッド要素以外の場所に配置  
MITC4シェル要素を用いる

モデル全体を同一の要素で解析せず、  
シェル要素とソリッド要素とに分ける



## Solid Part

詳細な検討が必要な部分に配置  
ソリッド要素を用いる

## Shell-Solid i/f

シェル要素とソリッド要素の接合面  
連続性を保つ工夫がなされている



より高速/省メモリな解析が可能になる

# 混合手法の例

## ■ 疑似的なシェル要素

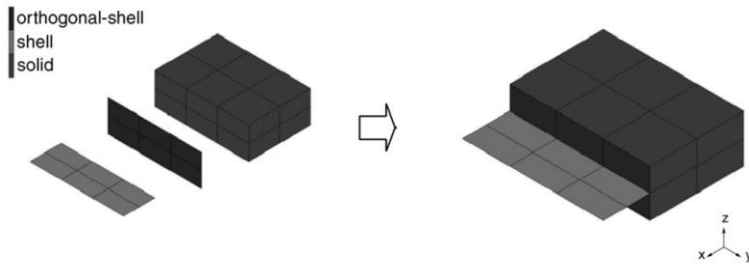


Fig. 1. The concepts of perpendicular shell coupling method (PSCM).

出展 大沢ら Study on shell-solid coupling FE analysis for fatigue assessment of ship structure Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

シェル要素-ソリッド要素の接続面に疑似シェル要素を貼る

- ・ 応力摂動を回避するために疑似シェル要素の板厚を設定する必要がある

## ■ 剛体リンク要素

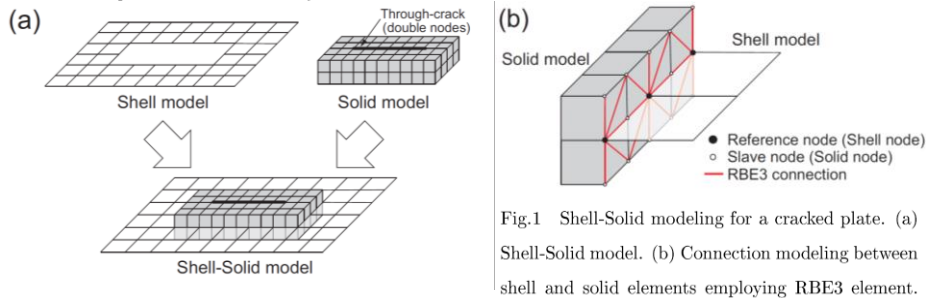


Fig.1 Shell-Solid modeling for a cracked plate. (a) Shell-Solid model. (b) Connection modeling between shell and solid elements employing RBE3 element.

出展 瀬戸ら き裂を有するパネルの有限要素法によるモデル化と最終強度解析に関する研究 日本計算工学会

- ・ 剛体リンク要素で節点同士を結合
- ・ 半自動の結合機能

- ・ リンクの設定方法に工夫が必要
- ・ ソリッド要素側に四面体二次要素を用いる

## ■ 重合メッシュ法

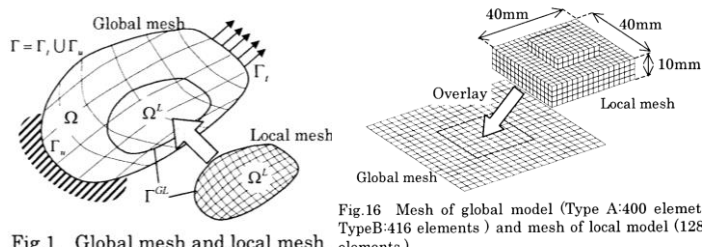


Fig.16 Mesh of global model (Type A:400 elements, TypeB:416 elements) and mesh of local model (1280 elements)

出展 中住ら 重合メッシュ法によるシェル・ソリッド解析 (第二報) 日本造船学会論文集 第190号

- ・ 重合メッシュ法による局所要素の埋め込み
- ・ ローカルメッシュにソリッド要素  
グローバルメッシュにシェル要素を用いる

- ・ 定式化が無複雑で実装に困難が伴う

# 混合手法の例

## ■ 疑似的なシェル要素



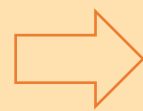
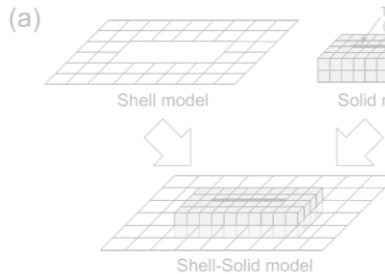
Fig. 1. The concepts of perpendicular shell-solid coupling.  
出展 大沢ら Study on shell-solid coupling

シェル要素-ソリッド要素の接続面に疑似シェル要素を貼る

・応力摂動を回避するために疑似シェル要素の

より平易な実装方法が必要

## ■ 剛体リンク要素



直接自由度を拘束する  
MPC(多点拘束)を用いて  
シェル-ソリッドを接続

出展 瀬戸ら き裂を有するパネルの有限要素法によるモデル化と最終強度解析に関する研究 日本計算工学会

土を結合

夫が必要

・ソリッド要素側に四面体二次要素を用いる

## ■ 重合メッシュ法

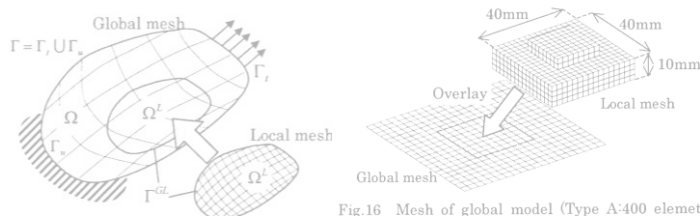


Fig.16 Mesh of global model (Type A:400 elements, TypeB:416 elements) and mesh of local model (1280 elements)

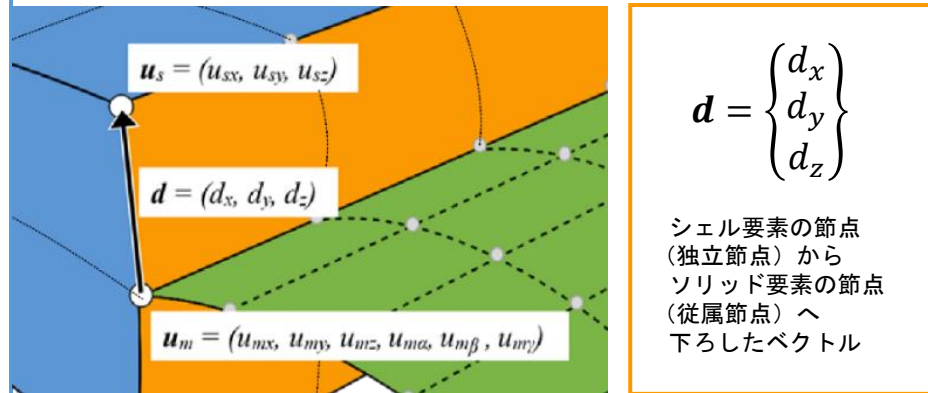
出展 中住ら 重合メッシュ法によるシェル・ソリッド解析 (第二報) 日本造船学会論文集 第190号

- ・重合メッシュ法による局所要素の埋め込み
- ・ローカルメッシュにソリッド要素  
グローバルメッシュにシェル要素を用いる

・定式化が無複雑で実装に困難が伴う

# MPC (多点拘束) によるシェル-ソリッド混合

## 節点変位における自由度を削除



## MPC拘束条件

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{B}_n^n \mathbf{u}_m$$

$$\begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ u_{sz} \\ u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{s\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & d_z & -d_y \\ 0 & 1 & 0 & -d_z & 0 & d_x \\ 0 & 0 & 1 & d_y & -d_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{mx} \\ u_{my} \\ u_{mz} \\ u_{m\alpha} \\ u_{m\beta} \\ u_{m\gamma} \end{bmatrix}$$

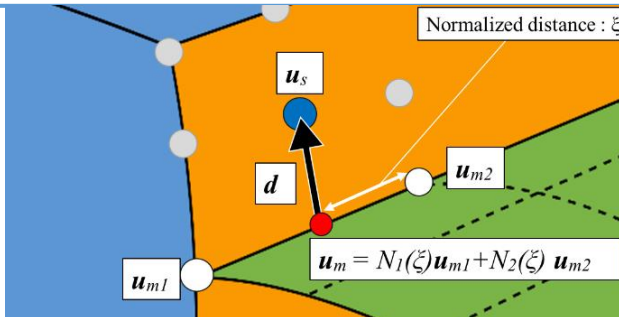
ソリッド側自由度

シェル側自由度

接合面における自由度を削除

## 垂線上にない場合

→近傍の2節点間において距離を正規化し、両者の変位を重み付けする



シェル-ソリッド接合面において断面形状を維持

・変位の関係が線形

$$\begin{cases} u_{sx} = u_{mx} + d_z u_{m\beta} - d_y u_{m\gamma} \\ u_{sy} = u_{my} + d_x u_{m\gamma} - d_z u_{m\alpha} \\ u_{sz} = u_{mz} + d_y u_{m\alpha} - d_x u_{m\beta} \end{cases}$$

・ソリッド節点側の回転を考慮

20節点二次要素ソリッド要素を縮退  
6面体一次要素に回転自由度を配置

有限要素法による定式化

$$\mathbf{K}^m \Delta \mathbf{u}^m = \Delta \mathbf{F}$$

$[\mathbf{K}^m]$ : 全体剛性行列

$\{\Delta \mathbf{u}^m\}$ : 変位増分ベクトル

$\{\Delta \mathbf{F}\}$ : 荷重増分ベクトル

$$\mathbf{T}^m = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{n1}^n \\ \mathbf{B}_{n2}^n \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{ni}^n \\ \vdots \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}: \text{単位行列}$$

解くべき方程式

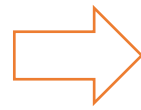
$$\mathbf{T}^{mT} \mathbf{K}^m \Delta \mathbf{u}^m = \mathbf{T}^{mT} \Delta \mathbf{F}$$

## 解析精度の検証



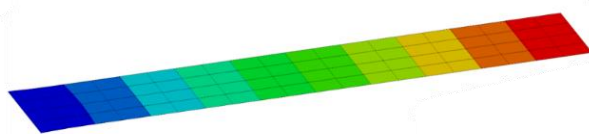
# 一軸引張り問題

引張り・曲げの変位は正確か

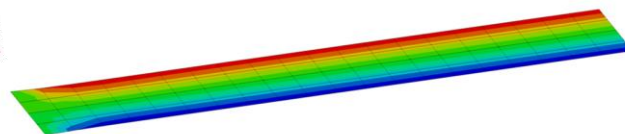


提案手法を棒の一軸引張り問題に適用

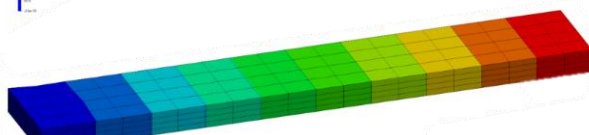
シェル要素のみ・ソリッド要素のみからなるモデルと比較



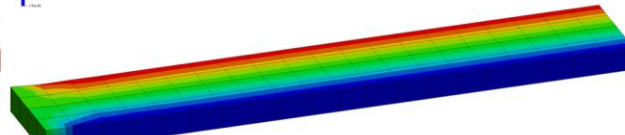
(a) Shell element model.



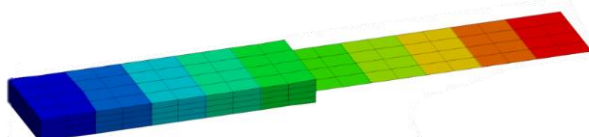
(a) Shell element model.



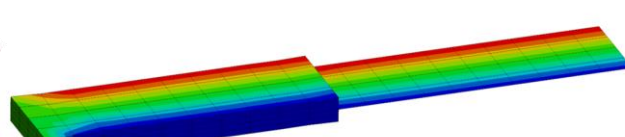
(b) Solid element model.



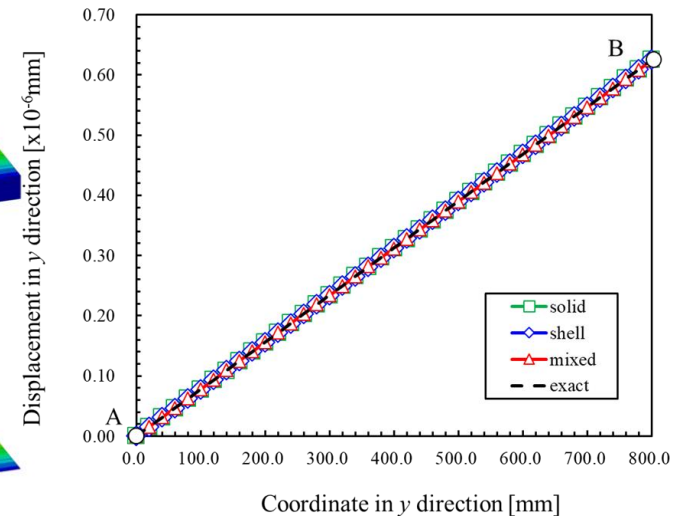
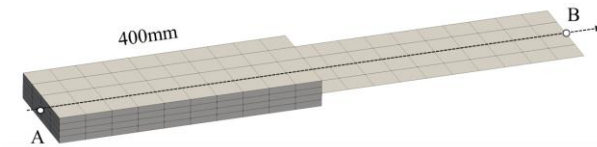
(b) Solid element model.



(c) Mixed element model.



(c) Mixed element model.

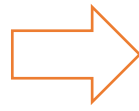


厳密解とも変形量が一致

引張りにおいて変位は正しい

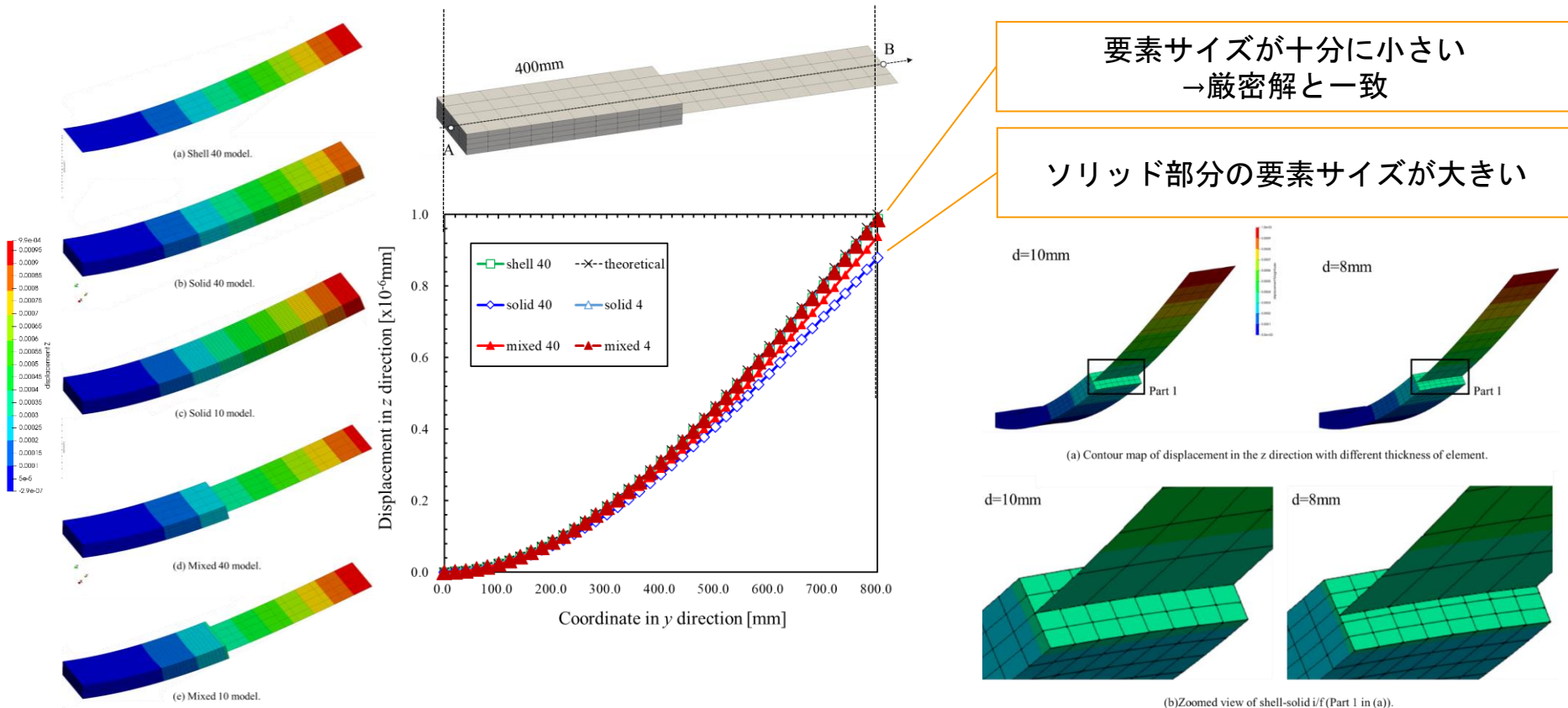
# はりの曲げ問題

引張り・曲げの変位は正確か



提案手法をはりの曲げ問題に適用

シェル要素のみ・ソリッド要素のみからなるモデルと比較



曲げにおいても変位は正しい



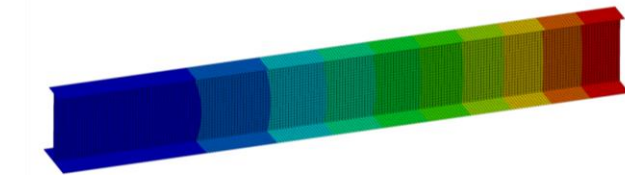
基本的な問題において正確な解析ができています

# その他の問題

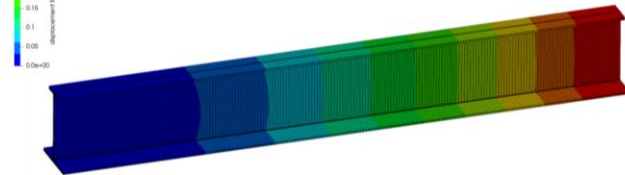
薄板構造物の変形が表現可能か

⇒ 提案手法を種々の薄板構造物に対して適用  
変形の様子を比較

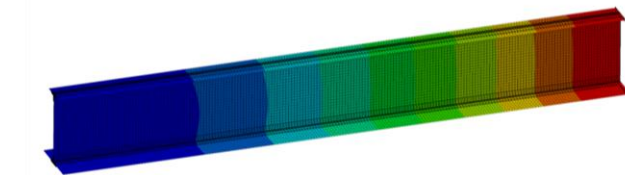
I げたの曲げ問題



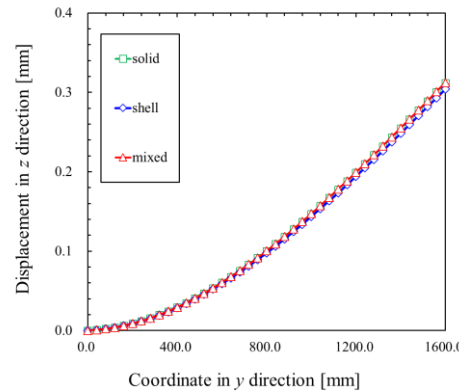
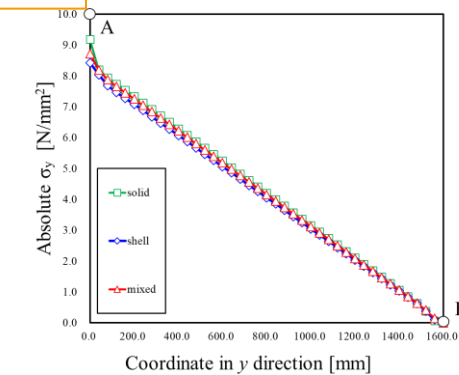
(a) Shell element model.



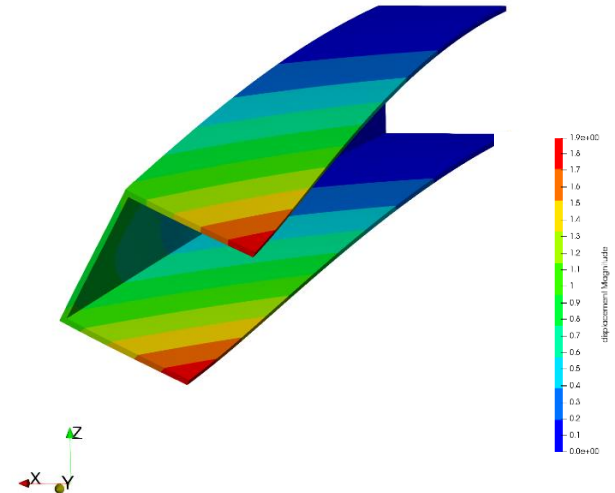
(b) Solid element model.



(c) Mixed element model.



コの字形の梁の曲げ



⇒ 基本的な薄板構造物に対して  
ソリッド要素同様に変形が再現可能

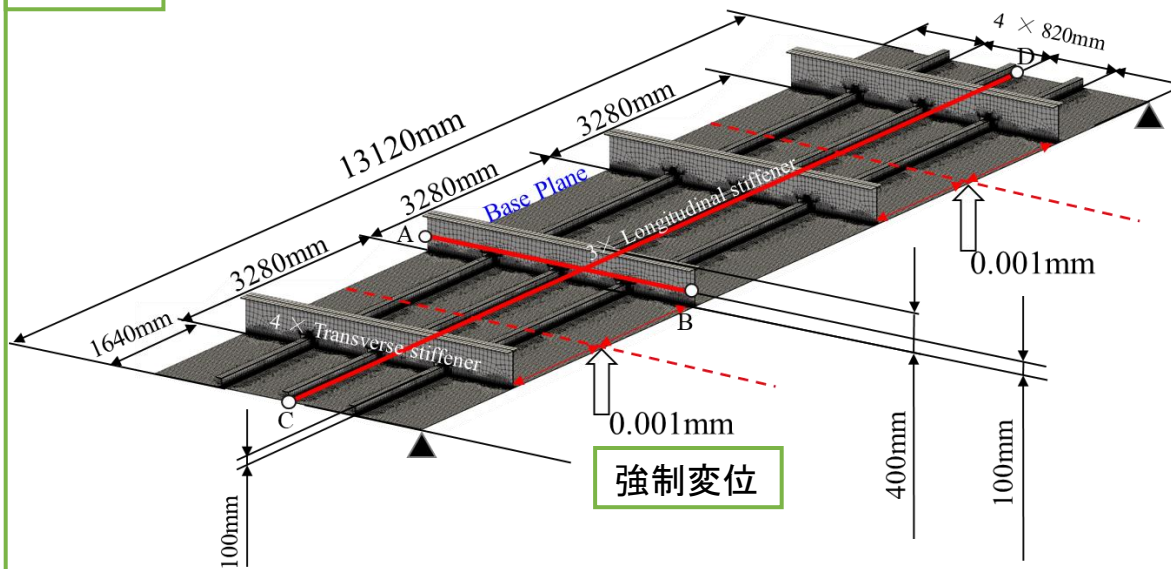
## 薄板構造物への適用

# 自動車運搬船のパネル構造

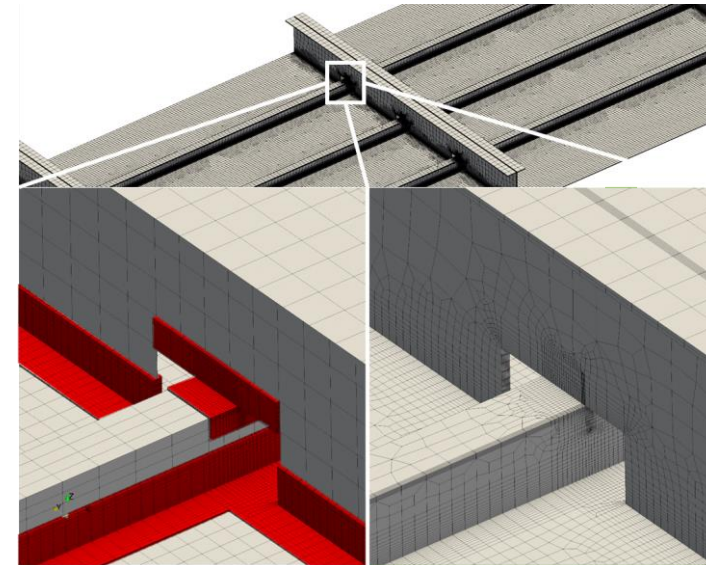
実大構造物への適用可能性を示す

➡ 提案手法を自動車運搬船のパネル構造に適用  
結果をソリッド要素のみからなる解析と比較

外観図



ソリッド要素との比較（接触部）



(a) Mixed element

(b) Solid element

	節点数	要素数
本手法	1408908	1198372
ソリッド要素	2162914	1880988

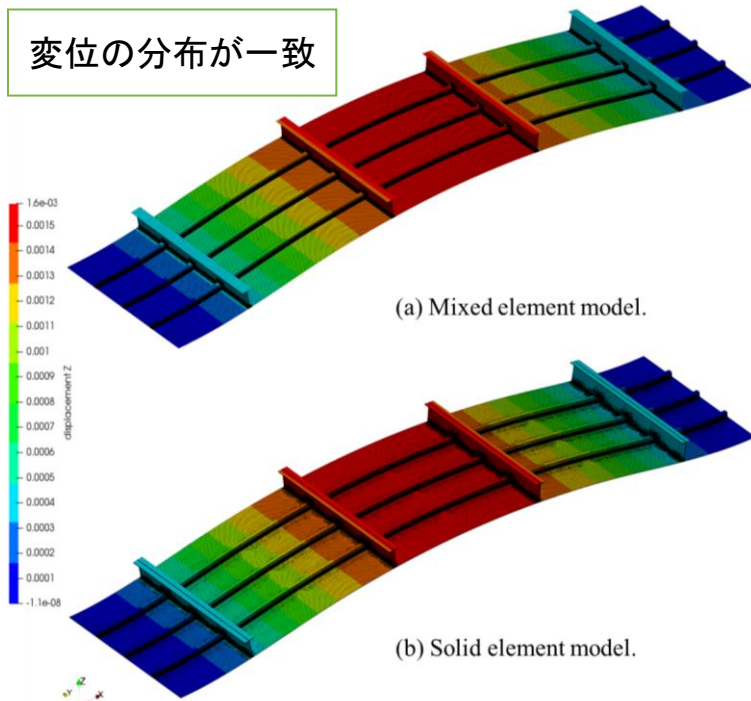
およそ0.6倍の規模  
解析時間の短縮

ソリッド要素のみで作成する  
→モデリングが複雑  
メッシュ作成が困難

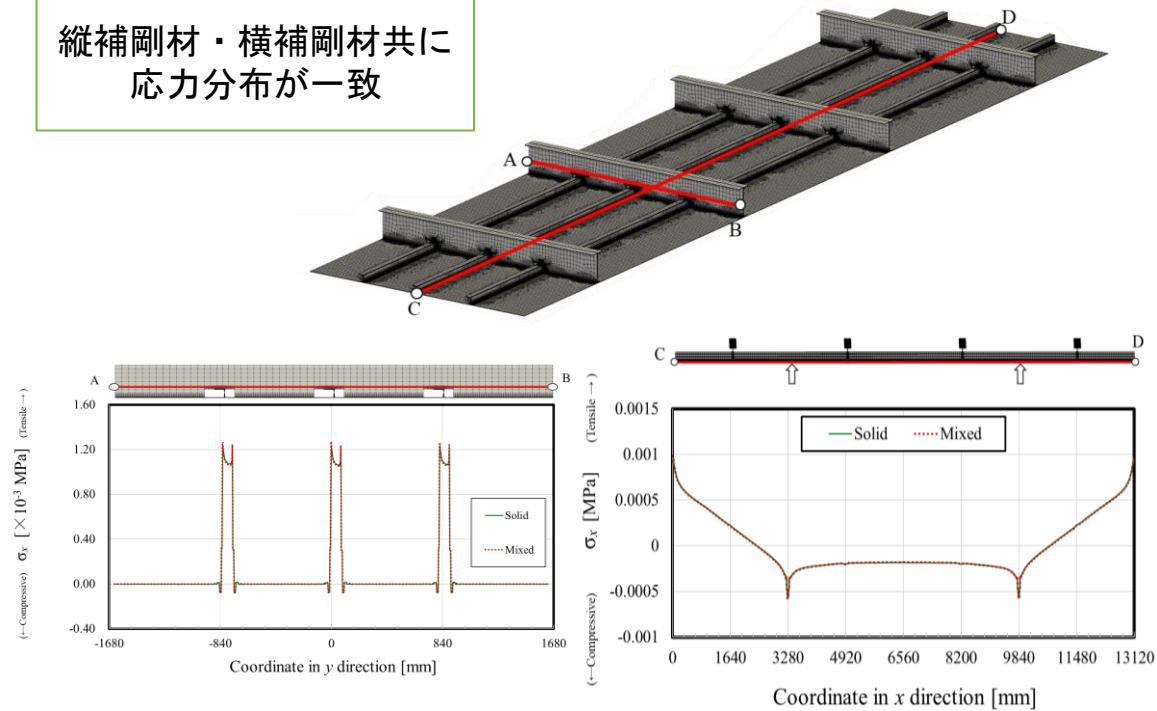
# 解析結果

## 実大構造物への適用可能性

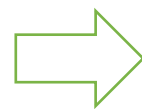
変位の分布が一致



縦補剛材・横補剛材共に  
応力分布が一致



メモリ使用量を50パーセント削減  
解析時間も0.6倍に短縮



ソリッド要素と同等の解析結果を  
より短時間・省メモリで取得可能

	解析時間	メモリ使用量
本手法	5 Min.	73 GB
ソリッド要素	9 Min.	146 GB

# まとめ

本研究では薄板鋼構造物の解析における効率的な手法として、シェル要素とソリッド要素とをMPCによる多点拘束を用いて自由度を削除し結合させたシェラーソリッド混合解析を提案し、基礎的ないくつかの問題においてその性質を確認した後、実大構造物における適用可能性について検討した。結果として以下の知見を得た。

- 一軸引張り問題においてシェル要素、ソリッド要素並びに提案手法を用いた結果、すべて厳密解とほとんど一致していることが確認された。
- はりの曲げ問題において、シェル要素、異なる要素サイズのソリッド要素と提案手法を用いた結果、提案手法はソリッド要素とほぼ同様の解析精度で要素数を削減することに成功した。また、面内の変形についてはソリッド要素をと同程度の、面外の変形に関してはそれよりも少ない要素分割数で同等の解析結果を得ることができた。
- 提案手法による実大構造物への適用性を示すために、提案手法を用いて、自動車運搬船のパネル構造に対して4点曲げを行った解析を実施し、ソリッド要素のみからなるモデルによる解析結果と比較した。その結果、提案手法がソリッド要素のみからなるモデルと同等の解析結果を示していることが確認された。また、提案手法において適切にソリッド要素とシェル要素を配置することで、ソリッド要素と比較して、より効率的な解析が可能になることが確認できた。