

# ローカル荷重によって 二重底構造に生じる応力の推定法 ～ 縦曲げ最終強度の推定法への適用～

---

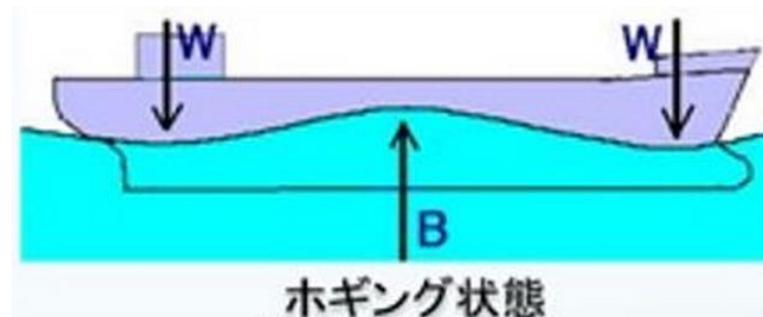
\* 松井貞興 村上睦尚 有馬俊朗 (海上技術安全研究所)  
辰巳晃 藤久保昌彦 (大阪大学)

1. 背景と目的
2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法
3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法
4. まとめ

# 1. 背景と目的

2013年6月  
大型コンテナ船の折損事故

原因調査

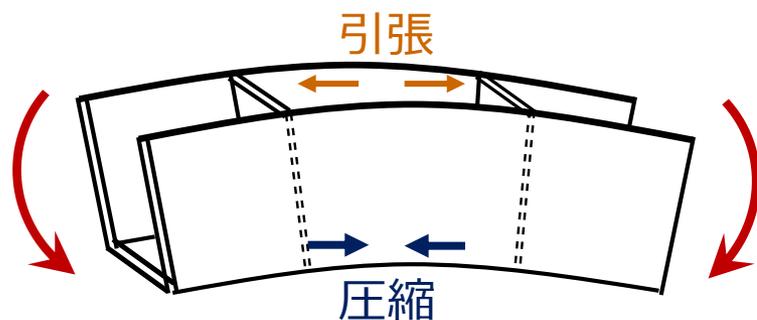


事故調査報告によると、これまでローカル荷重(水圧等)が縦曲げ強度評価に対して陽に考慮されていなかった事が原因

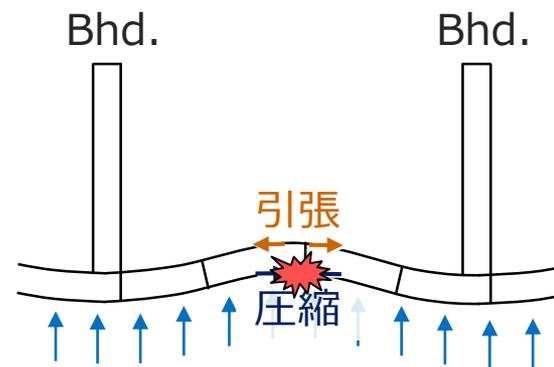
→ ローカル荷重の影響を考慮した強度評価の開発が重要性を増す

# 1. 背景と目的

- 縦曲げモーメント  
→二重底全体が**圧縮**を受ける



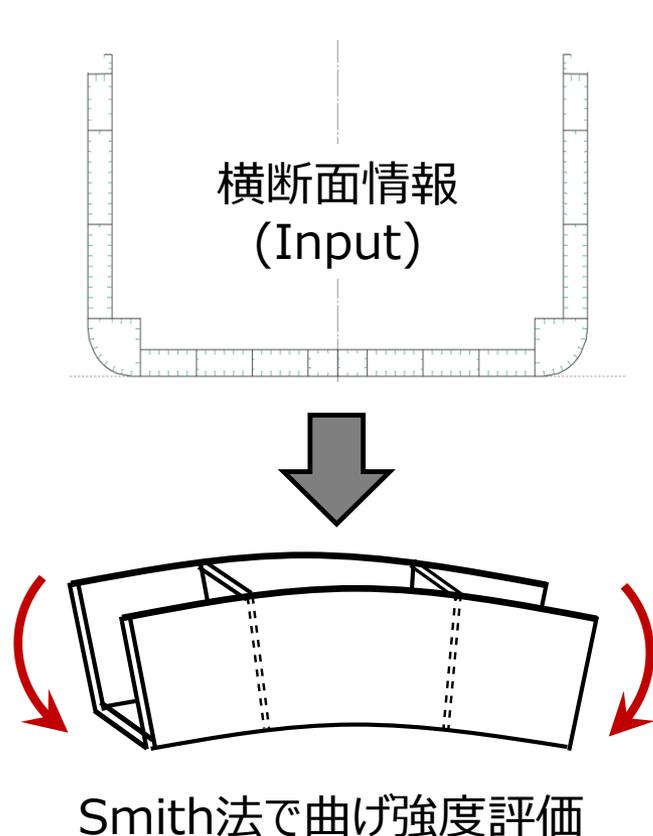
- ローカル荷重  
→二重底が撓む事で船底外板に**2軸の圧縮**が発生



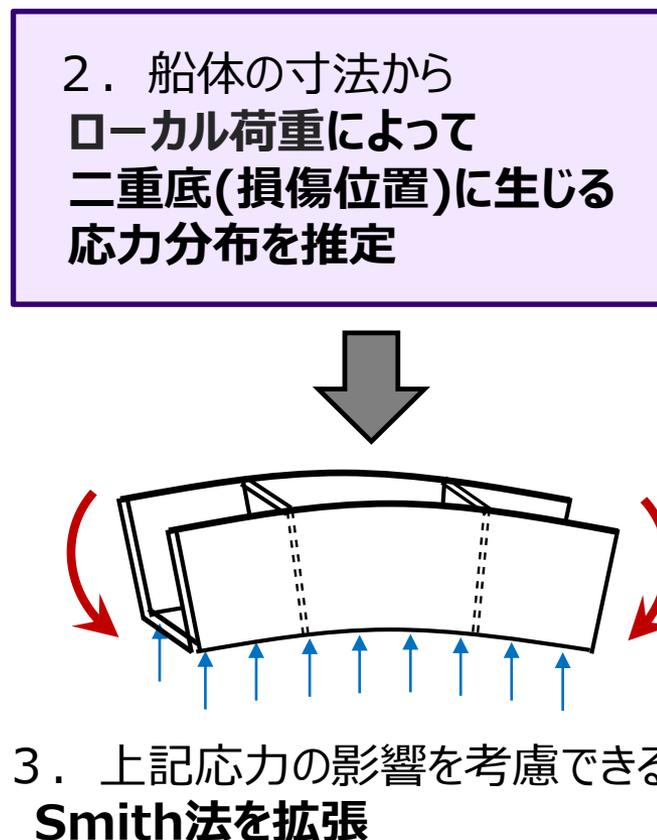
船底外板は**圧縮**が重畳し、早期に座屈崩壊してしまう  
事実、折損事故は船底外板の座屈崩壊に起因しているとの報告

# 1. 背景と目的

- 従来の評価法

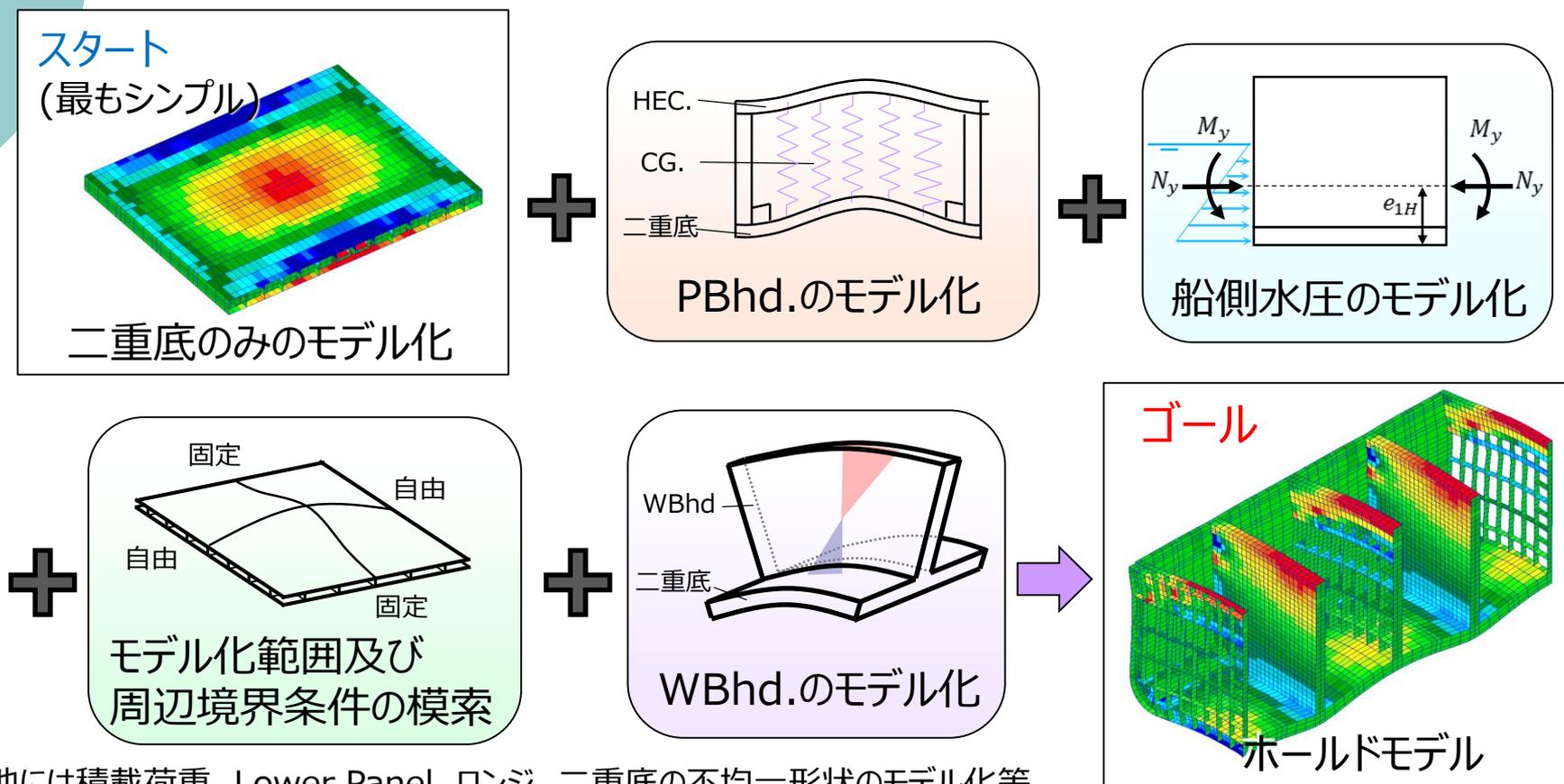


- 本研究のタスク



## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

始めに二重底を物理モデル化(既存)し、二重底の応力に影響する他の構造要素毎については線形FEMと比較しつつ、妥当なモデル化を行って理論式に取り込む



## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

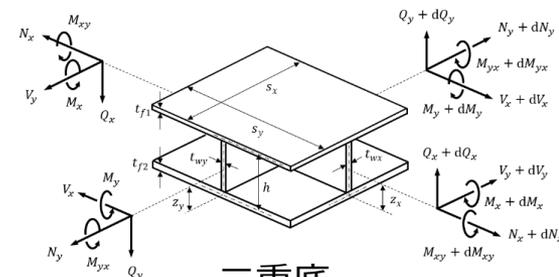
### ● 二重底のモデル化

・ 内外板に板理論、ガーダー・フロアに梁理論を適用し、二重底の異方性板としての曲げ、捩り剛性を導出する「Shade理論」を用いる

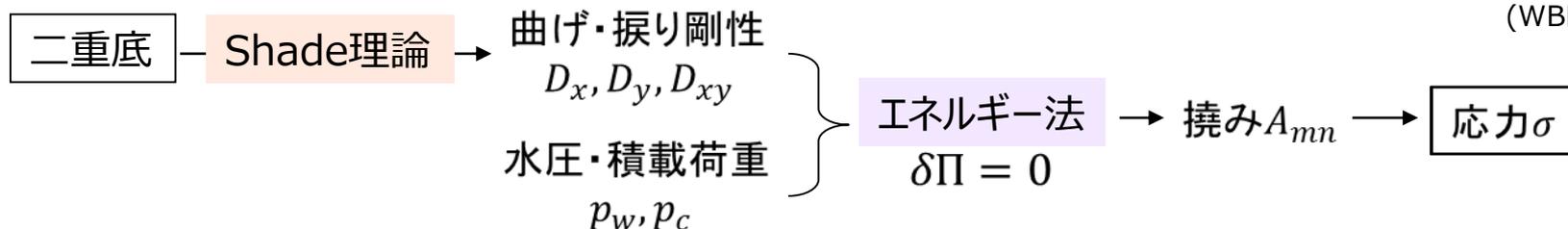
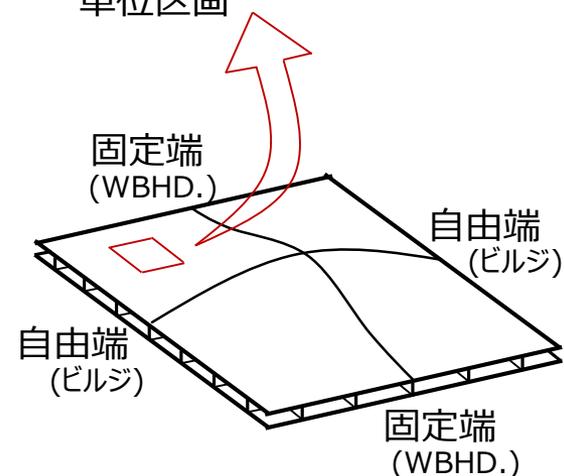
・ Shade理論によって求めた剛性を用いて、エネルギー法によって二重底の撓みを求め、応力を導く、という方針を採る

・ 二重底の撓み関数：

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi m}{a}\right)x \right\} \sin\left(\frac{\pi n}{b}\right)y$$



二重底  
単位区画

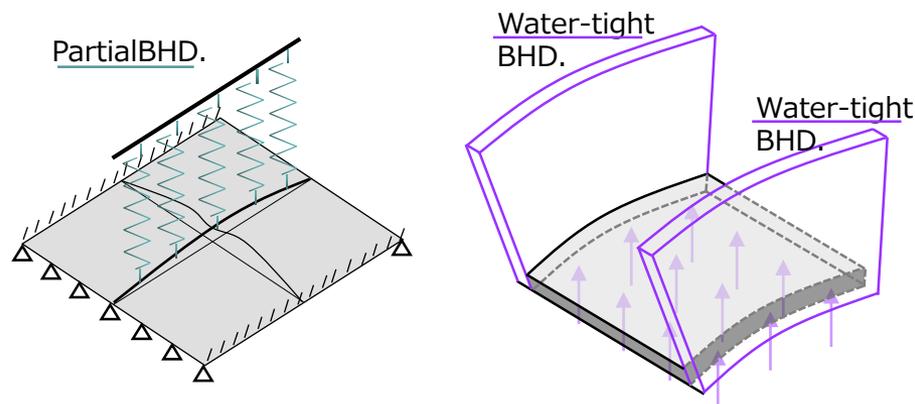


## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

- BHD.のモデル化

Partial BHD.はホールド中央に位置する**バネ**だと考える。(左図)

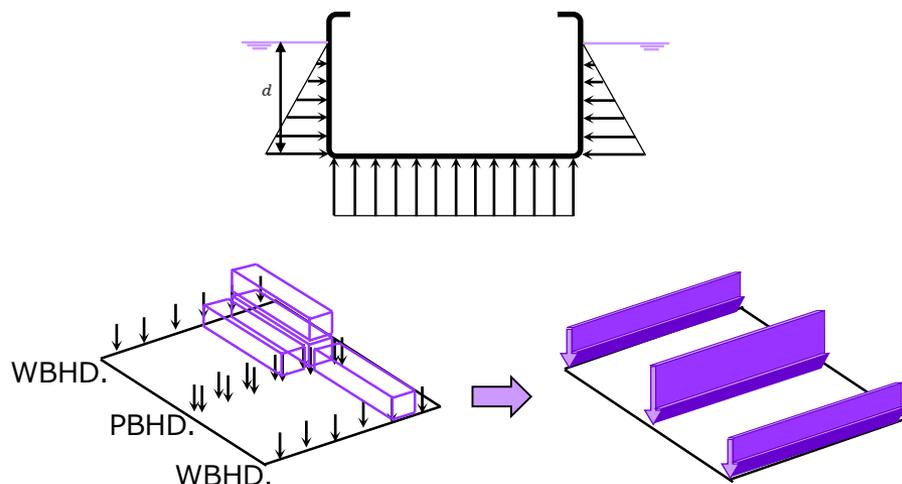
Water-tight BHD.は船底水圧を受けることで変形が生じ、その変形量が二重底に重畳すると考える。(右図)



- 荷重のモデル化

水圧は、船底と船側の2成分に分ける。船底水圧は二重底の突き上げ、船側水圧は船幅方向の一様圧縮の要因だと考える。

コンテナ荷重は、それぞれのコンテナの四隅に作用する集中荷重を、ホールド中央に作用する線荷重と見なして与える。



## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

- ・ 結果的に、誤差1割程度の精度を有する推定法が完成  
→ 8隻の大型コンテナ船で応力値がよく一致することを確認
- ・ **しかし**、逆行列計算を行っており、応力を得るには数値プログラムが必須
- ・ 実際の設計や規則算式の利用の観点からは陽な式で、且つ物理的に明快であることが望ましい

船の寸法(input)

応力推定プログラム

応力分布(output)

分かり易く陽な式

$$\sigma(x, y) = \left( \frac{\text{ローカル荷重}}{\text{船の寸法(剛性)}} \right)$$

→ 応力算式の**簡易化**が必要

## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

- 撓み関数を4つのモードに絞る  
この近似による誤差は3%程度であることを確認

→ 一部のモードが互いに直交する事を利用すると、 $2 \times 2$ の逆行列計算のみで済む

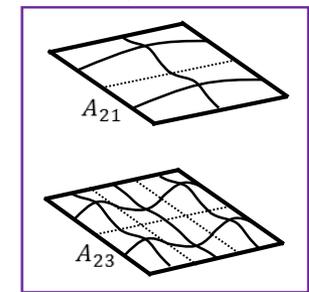
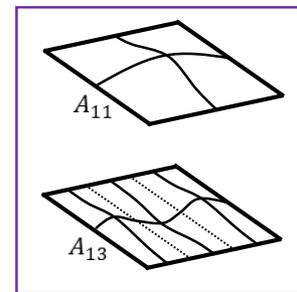
→ 撓みの**解析解**を簡潔に記述する事に成功

撓みの解析解

$$A_{1n} = \frac{\gamma_n - \delta_n(1 + \beta_n/\alpha_{2n})}{\alpha_{1n} + \beta_1(1 + \alpha_{1n}/\alpha_{2n})}$$

$$A_{2n} = \frac{\gamma_n + \delta_n(\beta_n/\alpha_{1n})}{\alpha_{2n} + \beta_1(1 + \alpha_{2n}/\alpha_{1n})}$$

独立 (線形足し合わせ可能)



$$\begin{aligned} \text{水圧: } \gamma_n &= \frac{ap_w}{\bar{n}} \\ \text{コンテナ荷重: } \delta_n &= \frac{2p_c}{\bar{n}} \end{aligned}$$

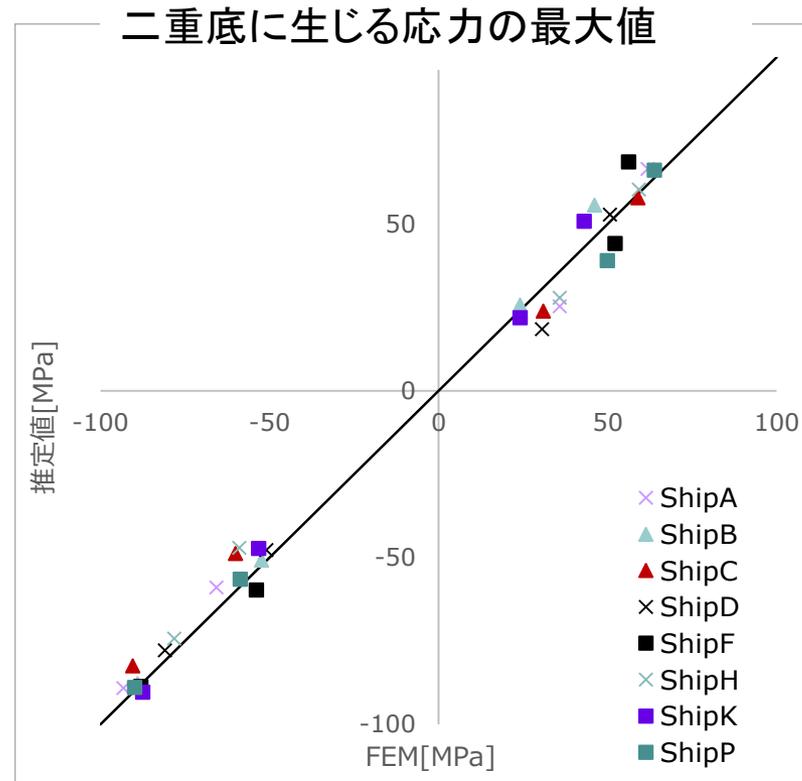
$$\begin{cases} \alpha_{mn} = \frac{ab}{8} (D_x \bar{m}^4 + D_y \bar{n}^4 + 2H \bar{m}^2 \bar{n}^2) + bk_l \\ \beta_n = \frac{ab}{4} D_y \bar{n}^4 \end{cases}$$

代入

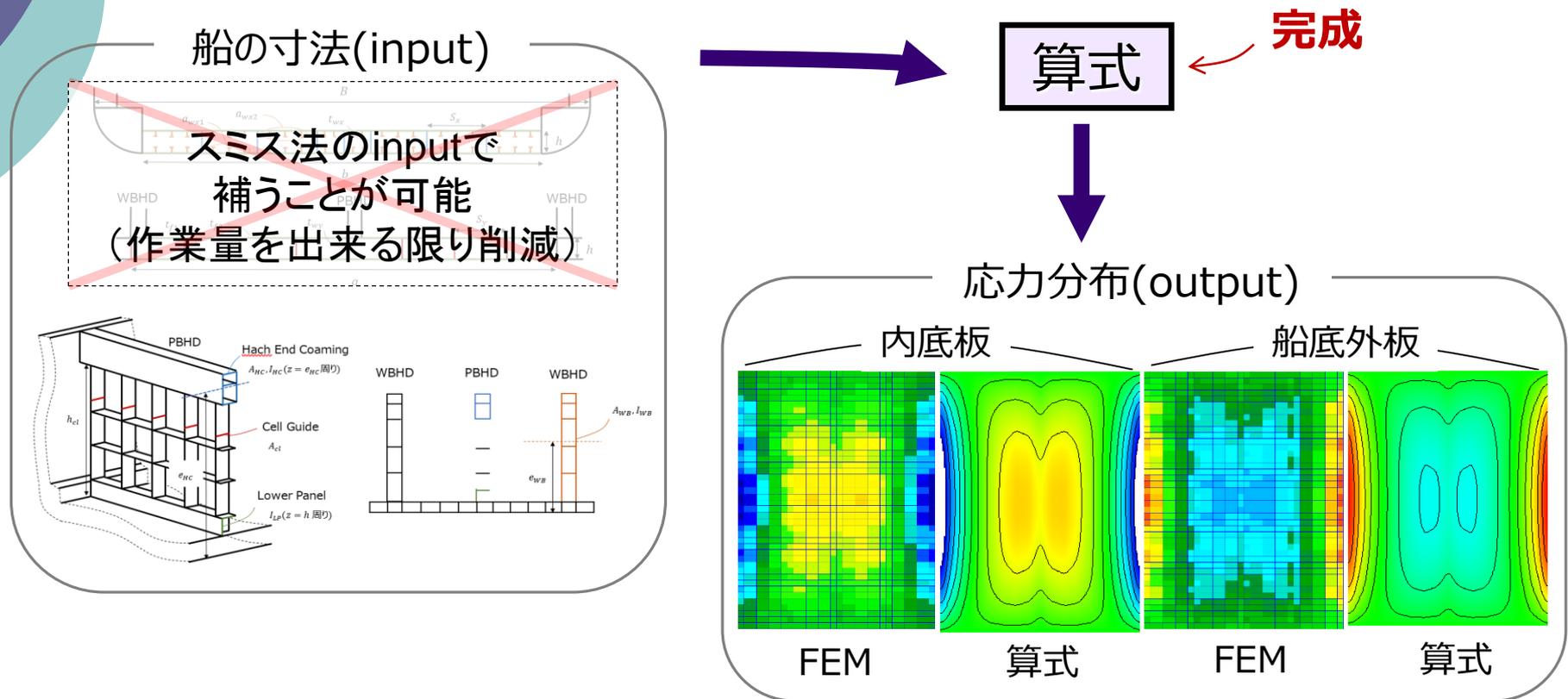
$$\sigma(x, y, z) = (A_{mn} \text{の関数})$$

## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

- ・ 応力の最大値で誤差1割程度の精度を有することを確認



## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法



## 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法

### 二重底の応力分布

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(x, y, z) &= \underline{\sigma_{xD}(x, y, z)} + \underline{\sigma_{xWBm}(y, z)} \\ \sigma_y(x, y, z) &= \underline{\sigma_{yD}(x, y, z)} + \underline{\sigma_{yWBm}(y, z)} + \underline{\sigma_{yWBn}} + \underline{\sigma_{yS}(z)} \end{aligned} \right\}$$

### 二重底の変形による応力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xD} &= \frac{E}{1-\nu^2} \sum_{m=1,2} \sum_{n=1,3} A_{mn} \{ (z-z_x) \bar{m}^2 \cos \bar{m}x \sin \bar{n}y \\ &\quad - \nu (z-z_y) \bar{n}^2 (1 - \cos \bar{m}x) \sin \bar{n}y \} \\ \sigma_{yD} &= \frac{E}{1-\nu^2} \sum_{m=1,2} \sum_{n=1,3} A_{mn} \{ -(z-z_x) \bar{n}^2 (1 - \cos \bar{m}x) \sin \bar{n}y \\ &\quad + \nu (z-z_y) \bar{m}^2 \cos \bar{m}x \sin \bar{n}y \} \end{aligned} \right\}$$

### 二重底の変形

$$\left. \begin{aligned} A_{1n} &= \frac{\gamma_n - \delta_n (1 + \beta_n / \alpha_{2n})}{\alpha_{1n} + \beta_1 (1 + \alpha_{1n} / \alpha_{2n})} \\ A_{2n} &= \frac{\gamma_n + \delta_n (\beta_n / \alpha_{1n})}{\alpha_{2n} + \beta_1 (1 + \alpha_{2n} / \alpha_{1n})} \end{aligned} \right\}$$

$$\left( = \frac{\text{船底水圧} + \text{コンテナ荷重}}{\text{二重底の剛性} + \text{PBHD.の剛性}} \right)$$

### WBHD.の変形による応力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xWBm}(y, z) &= \frac{E}{1-\nu^2} \frac{\partial^2 w_{WB}}{\partial y^2} (z - z_y) \\ \sigma_{yWBm}(y, z) &= \frac{\nu E}{1-\nu^2} \frac{\partial^2 w_{WB}}{\partial y^2} (z - z_y) \\ \sigma_{yWBn} &= \frac{4e_{1H}(ap_w - 2p_c)}{\pi(1-\nu^2)} \left\{ \frac{1}{I_{1H}} \left( \frac{b}{\pi} \right)^2 \right\} \sin \frac{\pi}{b} \end{aligned} \right\}$$

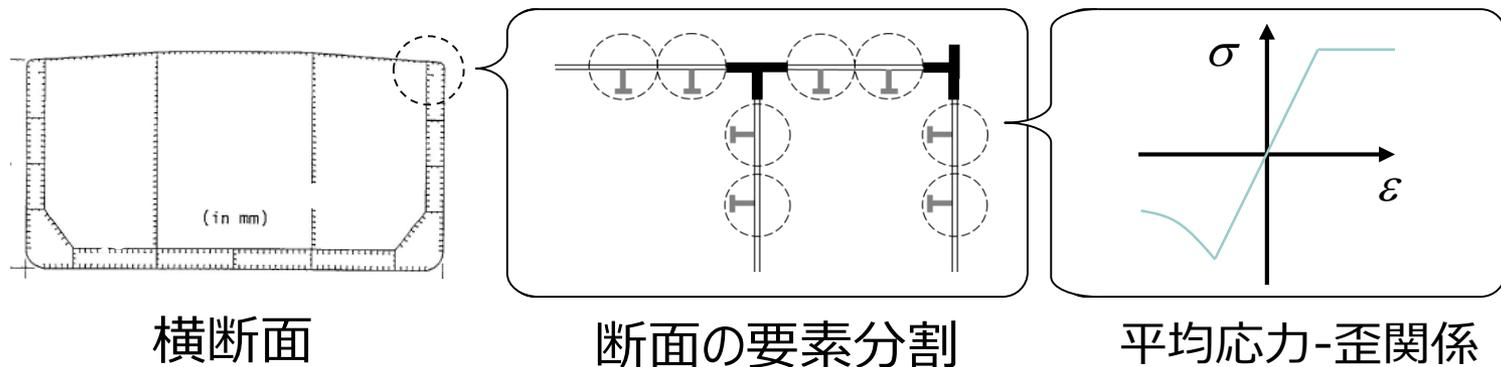
### 船側水圧による応力

$$\sigma_{yS}(z) = \frac{p_w da}{2} \left\{ \frac{1}{A_{1h}} + \frac{e_{1h} - z}{I_{1h}} \left( e_{1h} - \frac{d}{3} \right) \right\}$$

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

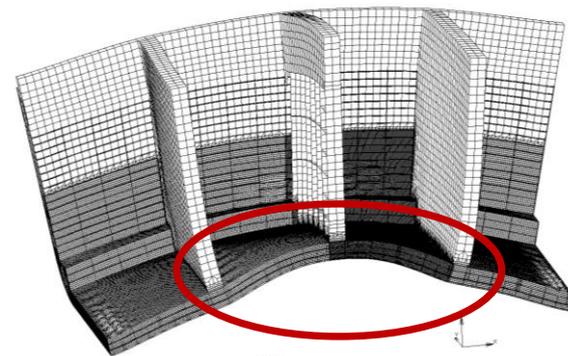
- ローカル荷重が最終強度を低下させる要因その1

従来のsmith法



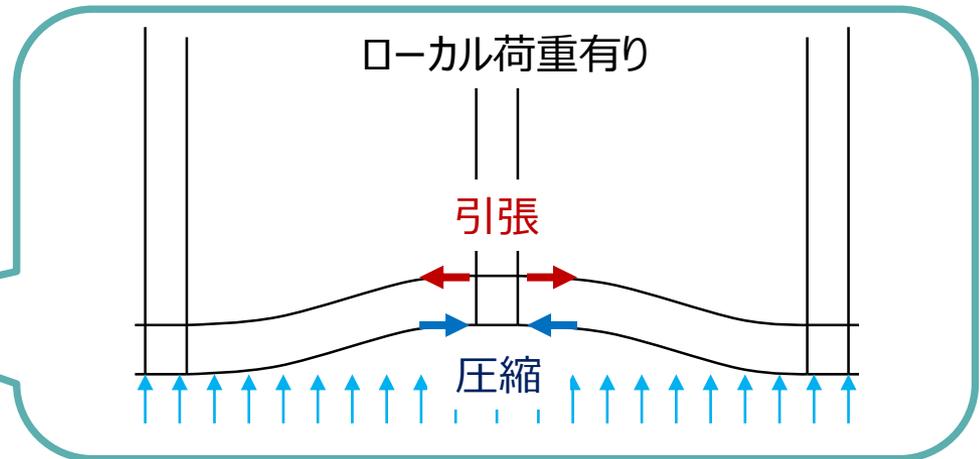
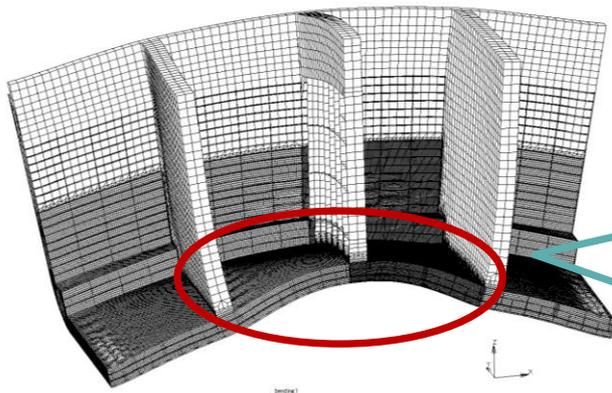
断面不変・断面平面保持の仮定

→ 3次元的変形を考慮できない



### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

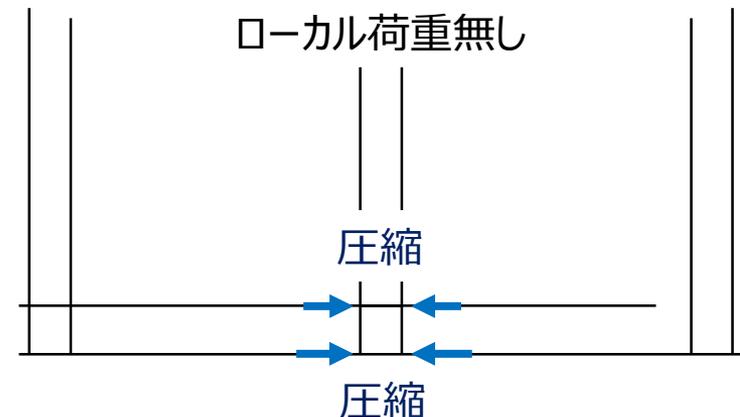
- ローカル荷重が最終強度を低下させる要因その 1



ローカル荷重によって二重底曲げが生じる

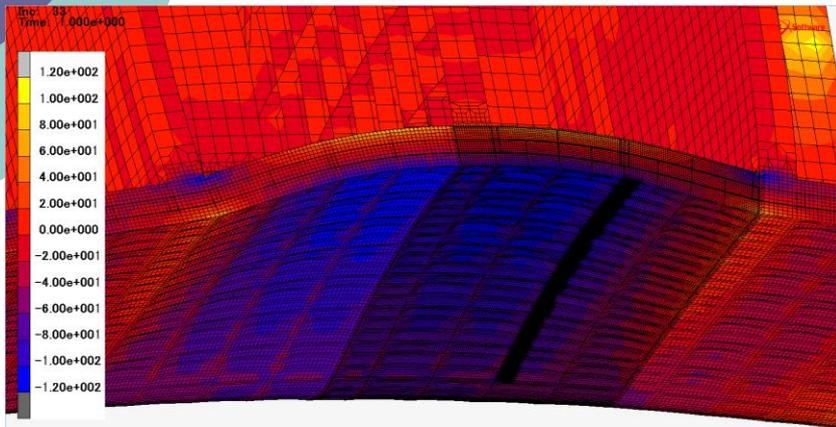
→内底板はホギング強度に対する有効性を失う

→船底外板が崩壊した直後に、全体が崩壊



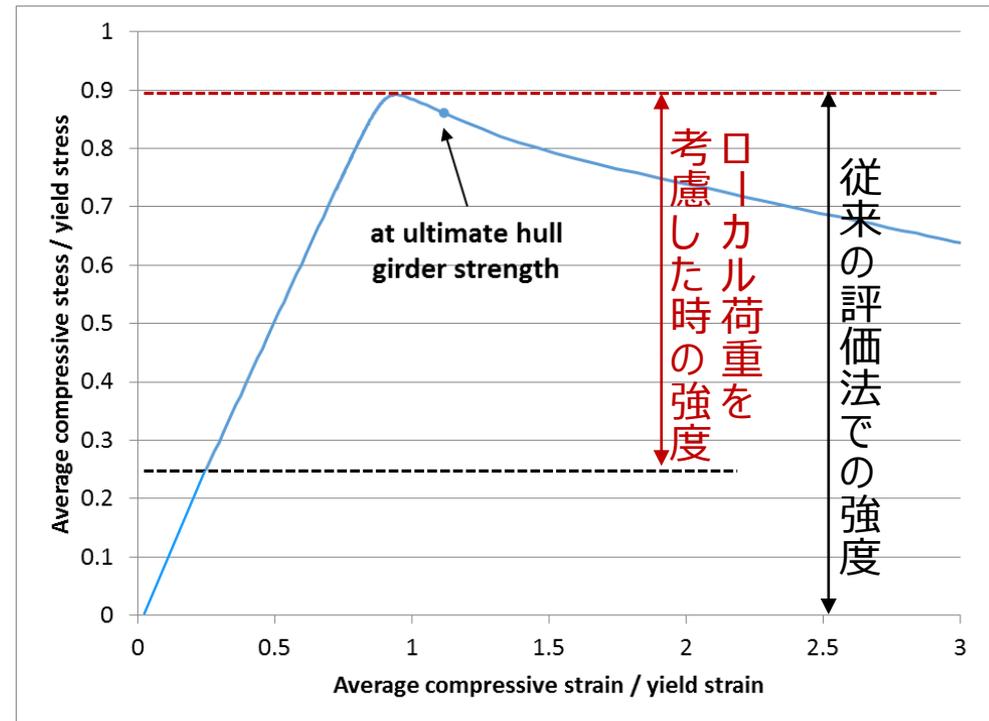
### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

- ローカル荷重が最終強度を低下させる要因その2



ローカル荷重によって生じる  
二重底の圧縮応力

→これは曲率を与える前の**初期状態**であり、すでに100MPa程度の圧縮応力が生じている



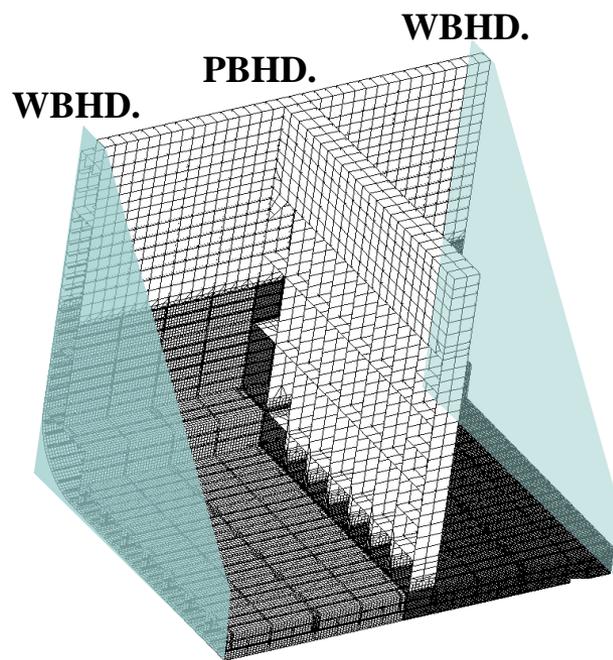
船底外板防撓パネルの  
平均軸応力-歪関係

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

Smith法に新たに①初期応力②二重底曲げを考慮したい。

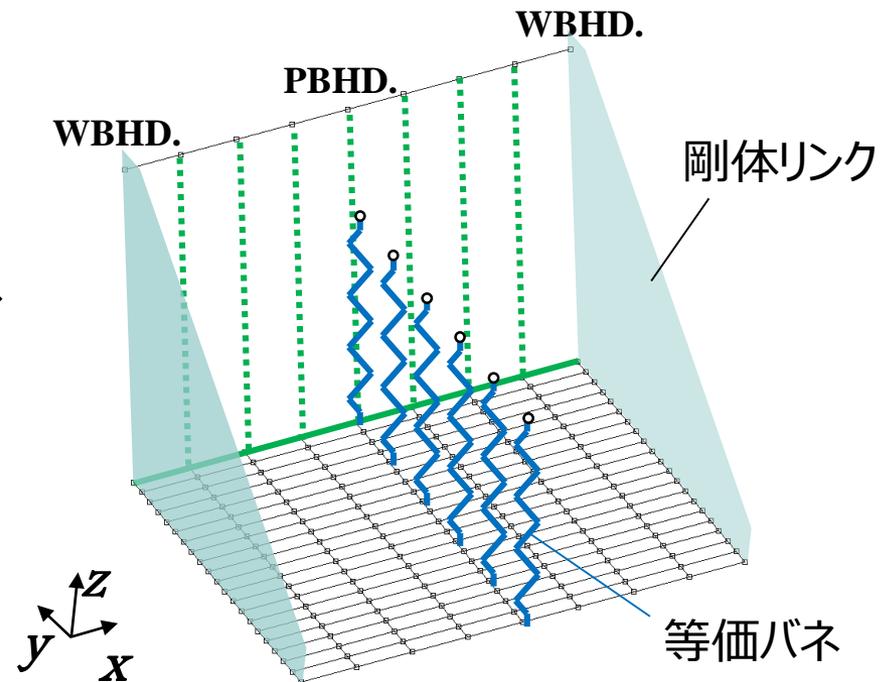
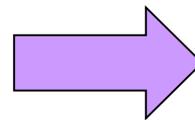
①⇒防撓材要素の応力-歪関係の修正を施せばよい

②⇒以下のような3次元梁要素モデルを用いる事で再現



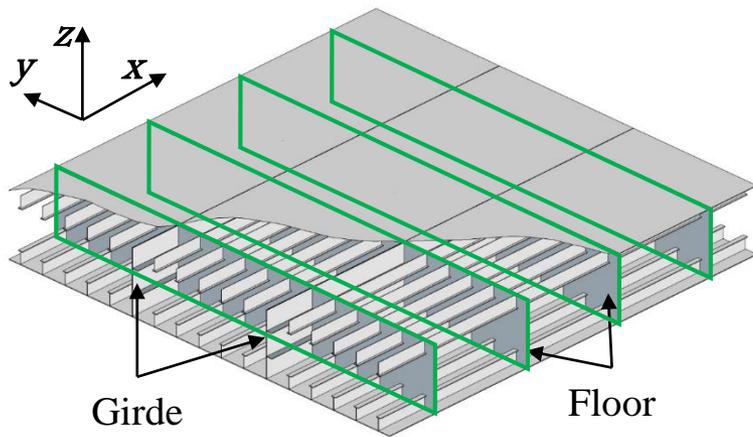
WBHD.間1ホールモデル

簡易化

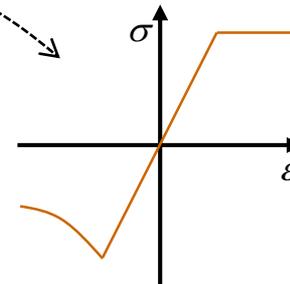
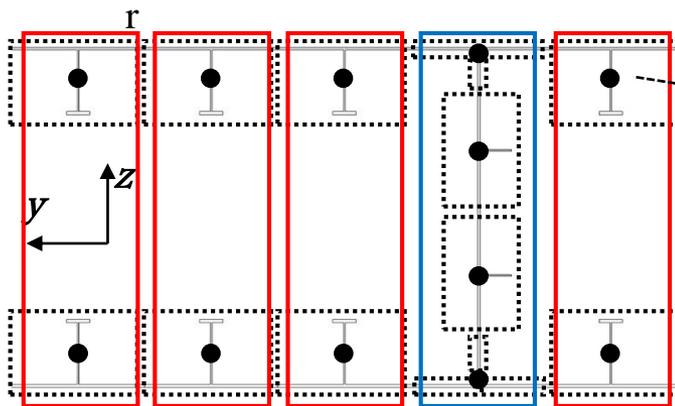
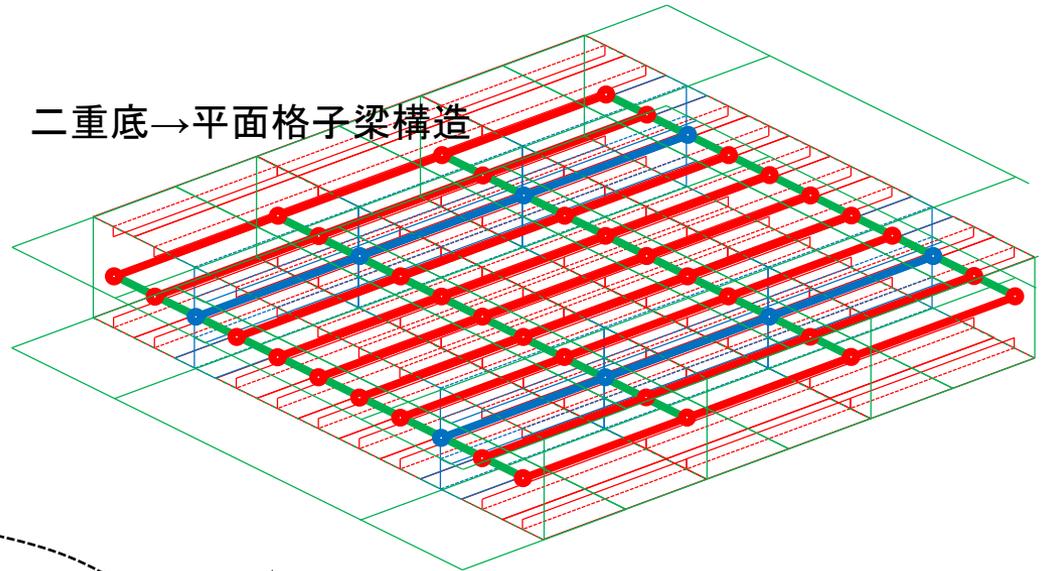


等価な梁要素で構成されたモデル

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法



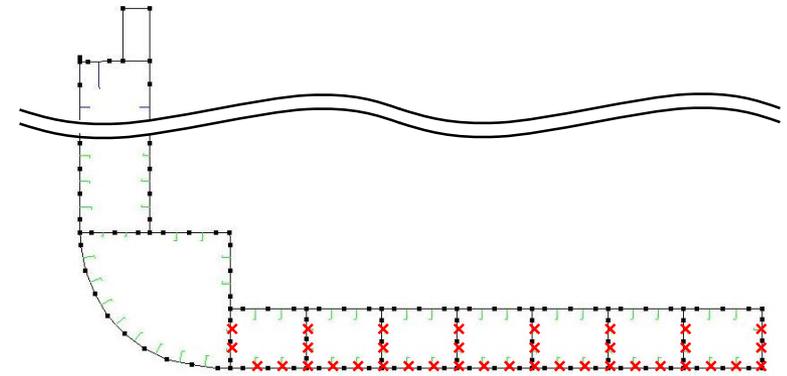
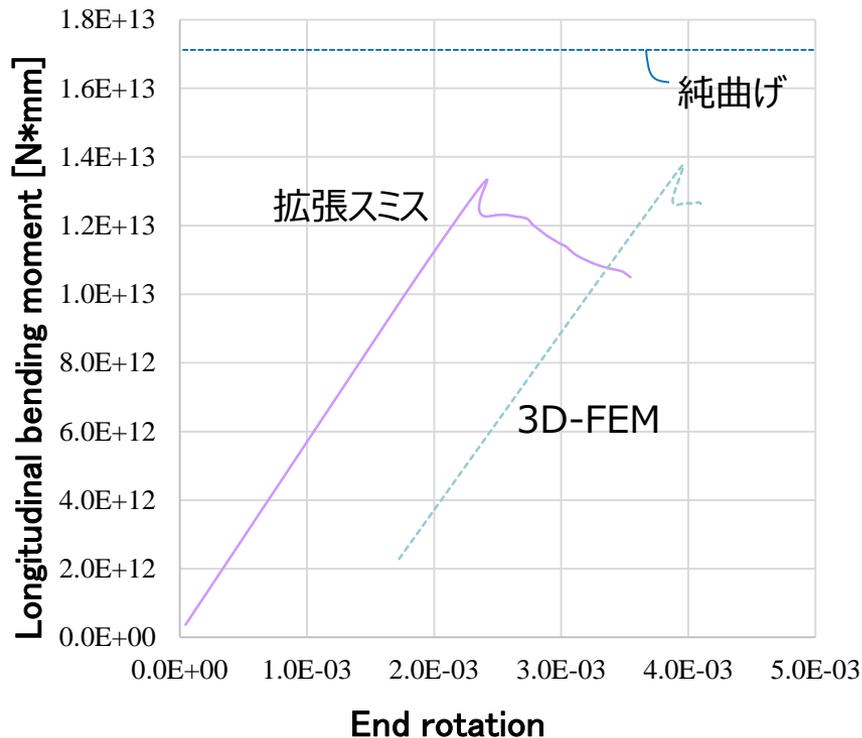
二重底→平面格子梁構造



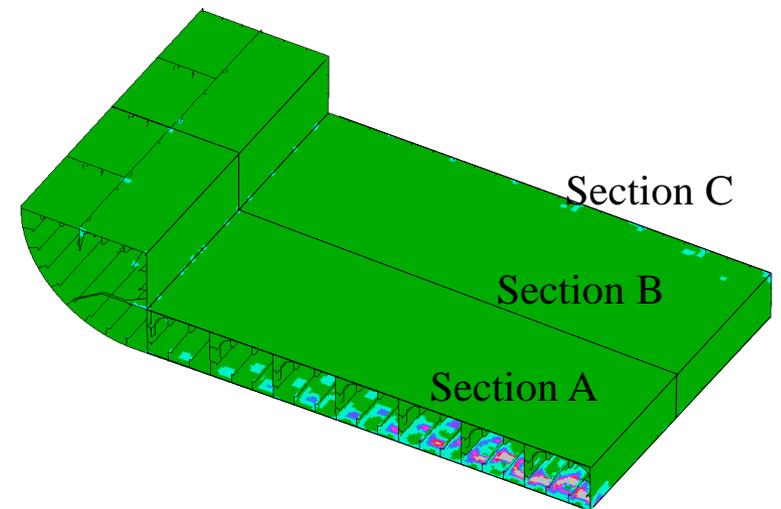
従来Smith法と同様に、  
平均応力-平均ひずみ関係を  
予め準備しておく。

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

モーメント-曲率関係の比較



崩壊要素の分布

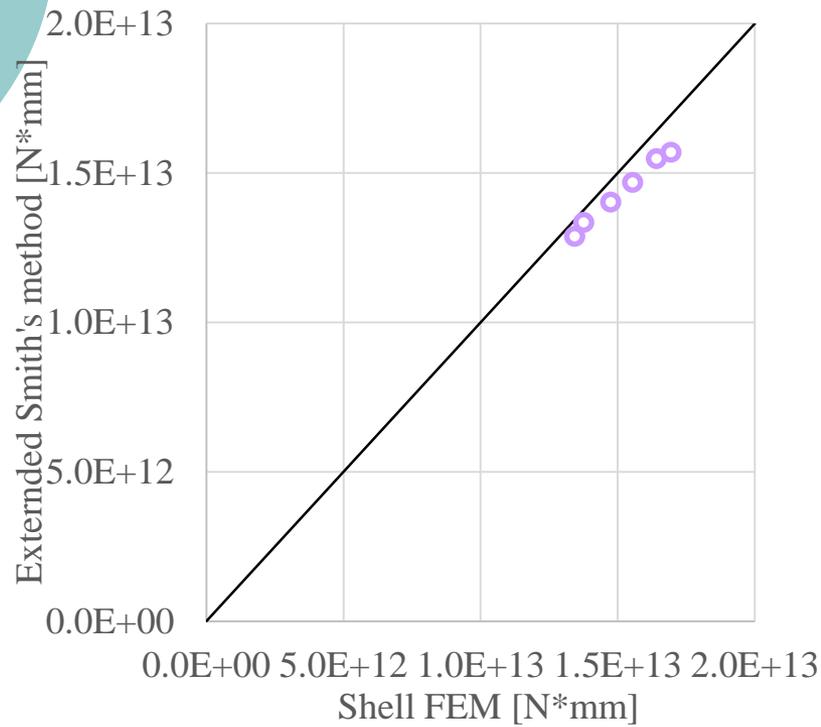


相当塑性ひずみ分布

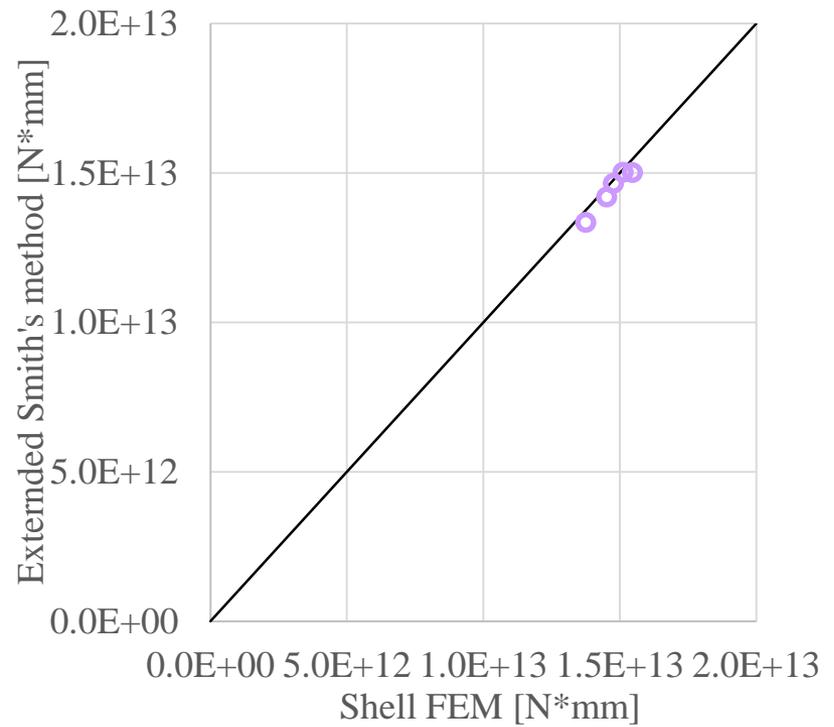
シェル F E M との比較を行った結果、  
崩壊挙動の傾向をよく再現できている

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法

水圧の大きさを変更  
コンテナ荷重はなし



水圧は一定（喫水13m相当）  
コンテナ荷重の大きさを変更



## 4. まとめ

---

### 2. ローカル荷重によって二重底に生じる応力の推定法について

- 主要部材の寸法のみを必要とする**陽な推定算式**によって、線形FEMと同等な結果が簡易的に得られる
- 本提案算式は汎用性があり、二重底構造であれば他船種でも適用できる  
また、ボトムロンジの応力判定など、縦曲げ強度以外の強度評価にも有用
- 前後非対称な積み付け条件に対しては別途検討し、算式の拡張が可能

### 3. ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度の推定法について

- 主要部材の寸法のみを必要とする梁格子モデルを用いた**拡張Smith法**によって、大規模な弾塑性シェルFEMと同等な結果が簡易的に得られる
- 拡張Smith法は汎用FEMで解析可能
- 対象船を増やすことで更なる信頼性及び精度の向上が期待される