

Altair Technology Conference Japan 2025 (ATC Japan 2025)

**古典的な理論やCAEによるシミュレーションを代替する
AIを用いた次世代の設計手法の開発
～船体防撓パネルの座屈固有値評価を一例に～**

2025年 6月 3日(火)

長崎総合科学大学 工学部工学科 船舶工学コース長
准教授 古野 弘志 (*FURUNO_Hiroshi@Nias.ac.jp*)

発表の流れ

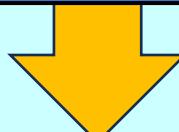
- 1. 研究の背景と目的**
- 2. 防撓材の影響を考慮した座屈強度推定法(*SSEM.SPBUCK*)**
- 3. 船体防撓パネルの弾性座屈強度と座屈強度に及ぼす防撓材の影響**
- 4. 迅速かつ簡易的な座屈強度推定法(*AISSEM.SPBUCK*)の開発**
- 5. 結言**

日本の造船業界は激しい国際競争にさらされている

各造船所は高性能を維持しつつ建造コストが低い船舶を建造する必要がある

現在、遺伝的アルゴリズムを用いて高速かつ自動的に数多くの設計案の中から、より船殻重量の軽い新しい船体構造を探索する構造初期計画システムを開発

現状の構造初期計画システムでは、座屈強度の制約条件を考慮するまでに至っていない

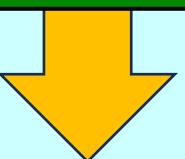


構造初期計画システムで使用可能な迅速かつ簡易的な座屈強度計算方法が必要

船体は防撓構造であるため、座屈強度の制約条件を考慮する際に防撓パネルの座屈強度に及ぼす防撓材の影響を考慮することが望ましい

まず、既存の研究^[1]にある古野の方法(*SSEM.SPBuck*)について説明する

実際の船体構造において座屈による損傷が懸念される单軸圧縮応力状態に近い強力甲板と二軸圧縮応力状態が顕著となる船底構造の船体防撓パネルを想定し、防撓材の影響を調査する



人工知能(AI)を用いて迅速かつ簡易的な船体防撓パネルの新しい簡易座屈強度推定法(*AISSEM.SPBuck*)の開発を行う

[1]Furuno et al. : A Study on Simplified Evaluations of Buckling Strength and Natural Frequency for Stiffened Panel, Proceedings of The 12th International Offshore and Polar Engineering Conference (2002), pp.615-622

発表の流れ

1. 研究の背景と目的
2. 防撓材の影響を考慮した座屈強度推定法(*SSEM.SPBUCK*)
3. 船体防撓パネルの弾性座屈強度と座屈強度に及ぼす防撓材の影響
4. 迅速かつ簡易的な座屈強度推定法(*AISSEM.SPBUCK*)の開発
5. 結言

2. 防撓材の影響を考慮した座屈強度推定法

ATC Japan 2025

y, η (Transverse direction)

吉野の方法
(SSEM.SP.Buck)

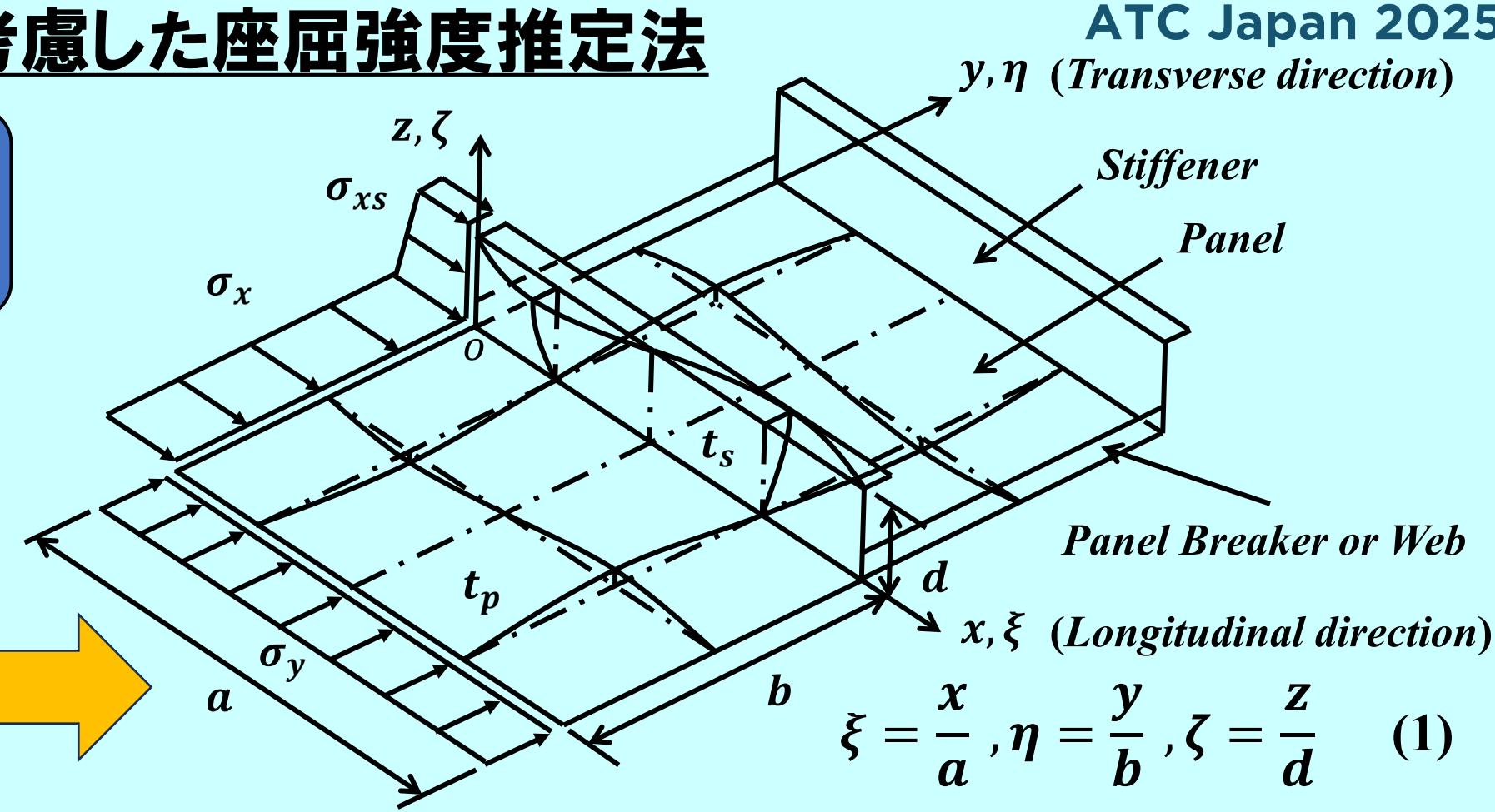
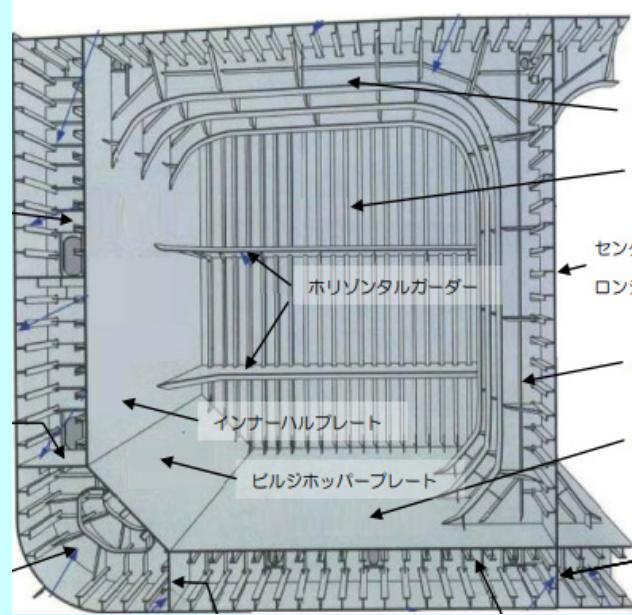


Fig. 1 船体防撓パネルの工学的モデル化

—考え方—

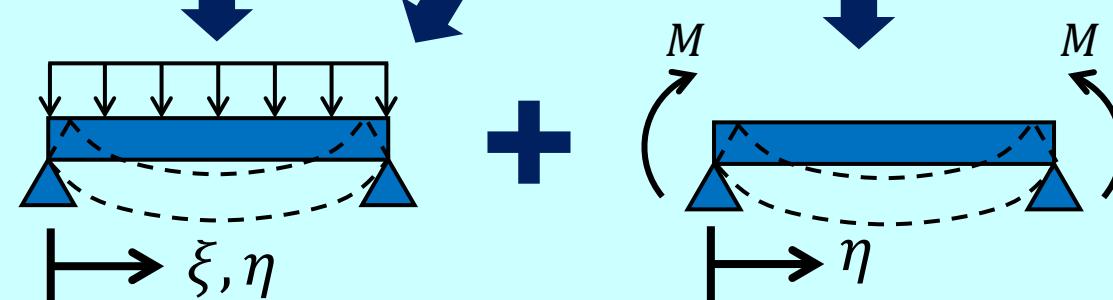
- ・パネルの横方向の座屈モードを1半波とし、**長さ方向の座屈モードをm半波**と仮定する。
- ・パネルの曲げ変形及び防撓材ウェブの曲げ、回転変形（倒れ変形）を考慮する。
- ・防撓材の面材は梁として表現し、面材部の面外変形に対する曲げ剛性を考慮する。

パネルと防撓材ウェブの座屈モードの仮定

パネルと防撓材ウェブの撓みを線形重ね合わせの原理を用いて仮定する。

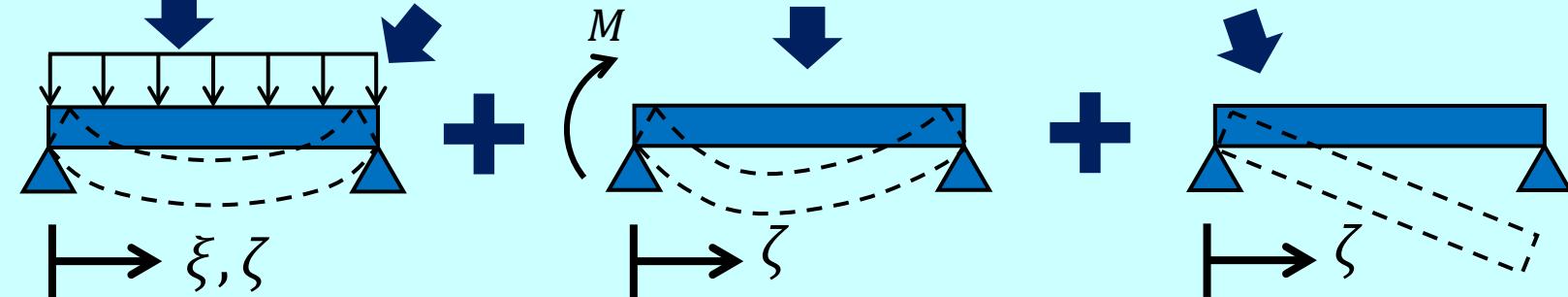
パネルの
座屈モード

$$w_p(\xi, \eta) = \sin m\pi\xi \{ \delta_{p1} \sin \pi\eta + \delta_{p2} \eta (1 - \eta) \} \quad (2)$$



防撓材ウェブの
座屈モード

$$w_s(\xi, \zeta) = \sin m\pi\xi \{ \delta_{s1} \sin \pi\zeta + \delta_{s2} \zeta (2 - 3\zeta + \zeta^2) + \delta_{s3} \zeta \} \quad (3)$$



ここで、 $\delta_{p1}, \delta_{p2}, \delta_{s1}, \delta_{s2}, \delta_{s3}$ は未定の撓み係数である。

パネルと防撓材ウェブの接合線上の連続条件

パネルと防撓材ウェブの接合線上の連続条件

パネルと防撓材ウェブの接合線上における
撓み角の連続条件 f_1 とモーメントの連続条件 f_2
を考慮する。

撓み角の連続条件 f_1

$$\frac{1}{b} \frac{\partial w_p}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = \frac{1}{d} \frac{\partial w_s}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} \quad (4)$$

モーメントの連続条件 f_2

$$2D_p \left(\frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} + \frac{\nu}{a^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} \right) \Big|_{\eta=0} = -D_s \left(\frac{1}{d^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} + \frac{\nu}{a^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} \right) \Big|_{\zeta=0} \quad (5)$$

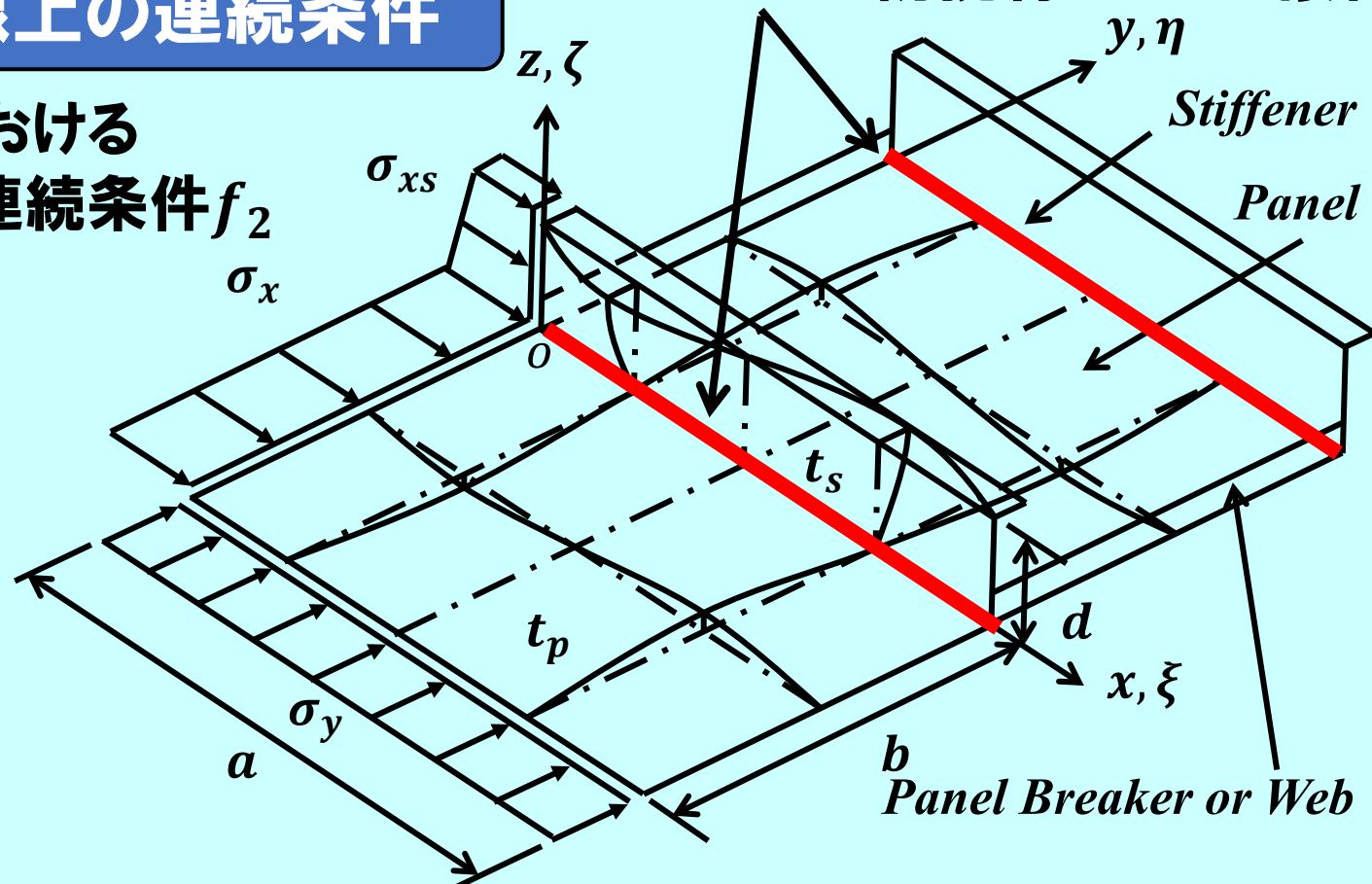


Fig. 2 パネルと防撓材ウェブの連続条件の考慮位置

系のエネルギー式

撓み角とモーメントの連続条件を*Lagrange*の未定乗数 Γ_1, Γ_2 で保証すると
系のエネルギー式は次式となる。

$$J \equiv U_p + U_s + U_f$$

パネル、防撓材ウェブ、面材の歪エネルギー

$$-W_{px} - W_{py} - W_{sx} - W_{fx}$$

パネル、防撓材に作用する軸力のなす仕事

$$+\Gamma_1 \cdot f_1 + \Gamma_2 \cdot f_2 \quad (6)$$

*Lagrange*の未定乗数法を用いて連続条件を
満足させる(Γ_1, Γ_2 は*Lagrange*の未定乗数)

パネルの歪エネルギー: U_p

パネルの歪エネルギーは次式で与えられる。このとき、 D_p はパネルの板の曲げ剛性である。

$$\begin{aligned} U_p &= \frac{abD_p}{2} \int_0^1 \int_0^1 \left[\left(\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} + \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{a^2 b^2} \left\{ \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} - \left(\frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi \partial \eta} \right)^2 \right\} \right] d\xi d\eta \\ &= \frac{1}{2} (A_{11} \delta_{p1}^2 + 2A_{12} \delta_{p1} \delta_{p2} + A_{22} \delta_{p2}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

防撓材の歪エネルギー: $U_s + U_f$

防撓材の歪エネルギーは次式で与えられる。このとき、 D_s は防撓材ウェブの板の曲げ剛性であり、防撓材の面材は梁として表現する。

$$\begin{aligned} U_s + U_f &= \frac{adD_s}{2} \int_0^1 \int_0^1 \left[\left(\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} + \frac{1}{d^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} \right)^2 - \frac{2(1-\nu)}{a^2 d^2} \left\{ \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} - \left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi \partial \zeta} \right)^2 \right\} \right] d\xi d\zeta \\ &\quad + \frac{EI_f}{2a^3} \int_0^1 \left. \left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} \right)^2 \right|_{\zeta=1} d\xi \\ &= \frac{1}{2} (B_{11} \delta_{s1}^2 + B_{22} \delta_{s2}^2 + B_{33} \delta_{s3}^2 + 2B_{12} \delta_{s1} \delta_{s2} + 2B_{23} \delta_{s2} \delta_{s3} + 2B_{13} \delta_{s1} \delta_{s3}) \end{aligned} \quad (8)$$

パネルに作用する軸力のなす仕事: $W_{px} + W_{py}$

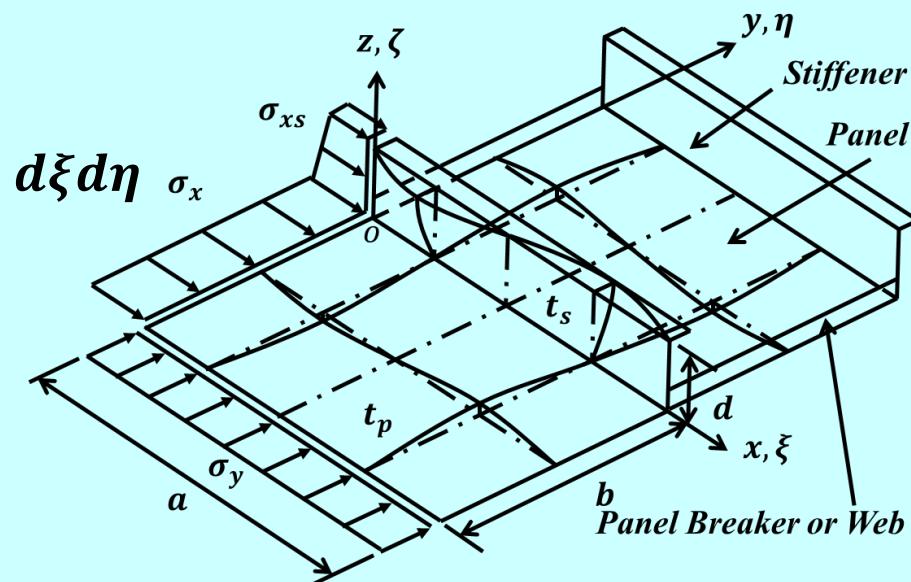
パネルに作用する軸力のなす仕事は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W_{px} + W_{py} &= \frac{t_p b \sigma_x}{2a} \int_0^1 \int_0^1 \left(\frac{\partial w_p}{\partial \xi} \right)^2 d\xi d\eta + \frac{t_p a \sigma_y}{2b} \int_0^1 \int_0^1 \left(\frac{\partial w_p}{\partial \eta} \right)^2 d\xi d\eta \\ &= \frac{1}{2} (C_{11} \delta_{p1}^2 + 2C_{12} \delta_{p1} \delta_{p2} + C_{22} \delta_{p2}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

防撓材に作用する軸力のなす仕事: $W_{sx} + W_{fx}$

防撓材に作用する軸力のなす仕事は次式で与えられる。このとき、防撓材に作用する軸力は防撓材の深さ方向に線形に分布すると仮定する。

$$\begin{aligned} W_{sx} + W_{fx} &= \frac{t_s d \sigma_x}{2a} \int_0^1 \int_0^1 (1 - \zeta) \left(\frac{\partial w_s}{\partial \xi} \right)^2 d\xi d\zeta + \frac{t_s d \sigma_{xs}}{2a} \int_0^1 \int_0^1 \zeta \left(\frac{\partial w_s}{\partial \xi} \right)^2 d\xi d\zeta + \frac{A_f \sigma_{xs}}{2a} \int_0^1 \left(\frac{\partial w_s}{\partial \xi} \right)^2 \Big|_{\zeta=1} d\xi \\ &= \frac{1}{2} (D_{11} \delta_{s1}^2 + D_{22} \delta_{s2}^2 + D_{33} \delta_{s3}^2 + 2D_{12} \delta_{s1} \delta_{s2} + 2D_{23} \delta_{s2} \delta_{s3} + 2D_{13} \delta_{s1} \delta_{s3}) \end{aligned} \quad (10)$$



固有値行列と座屈応力の計算

系のエネルギー式を各未定の撓み係数と Γ_1, Γ_2 でそれぞれ一階偏微分して零とおき、停留値をとる。

*Lagrange*の未定乗数を含んだ形でマトリックス表示すると以下のようになる。

$$[\mathbf{E}] \cdot {}^T(\delta_{p1}, \delta_{p2}, \delta_{s1}, \delta_{s2}, \delta_{s3}, \Gamma_1, \Gamma_2) = 0 \quad (11)$$

オイラーの弾性座屈理論

古野の方法(SSEM.SPBUCK)による拡張部分

撓み角とモーメントの連続条件を*Lagrange*の未定乗数法で保証

$$[\mathbf{E}] = \begin{bmatrix} A_{11} - \lambda C_{11} & A_{12} - \lambda C_{12} & 0 & 0 & 0 & \pi d & 0 \\ A_{22} - \lambda C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & d & 2D_p d^2 \\ & & B_{11} - \lambda D_{11} & B_{12} - \lambda D_{12} & B_{13} - \lambda D_{13} & -\pi b & 0 \\ & & B_{22} - \lambda D_{22} & B_{23} - \lambda D_{23} & B_{33} - \lambda D_{33} & -2b & 3D_s b^2 \\ & SYM. & & & & -b & 0 \\ & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

パネルの長辺方向の座屈半波数 m を1、2、3、…と固定させながらガウスの消去法を用いて $\det [E]$ が零となる座屈固有値 λ を求め、次式で弾性座屈応力を求める。

$$\sigma_{xcr} = \lambda \sigma_x \quad \sigma_{ycr} = \lambda \sigma_y \quad (13)$$

求めた弾性座屈応力と実際の座屈応力には乖離が生じる場合がある。

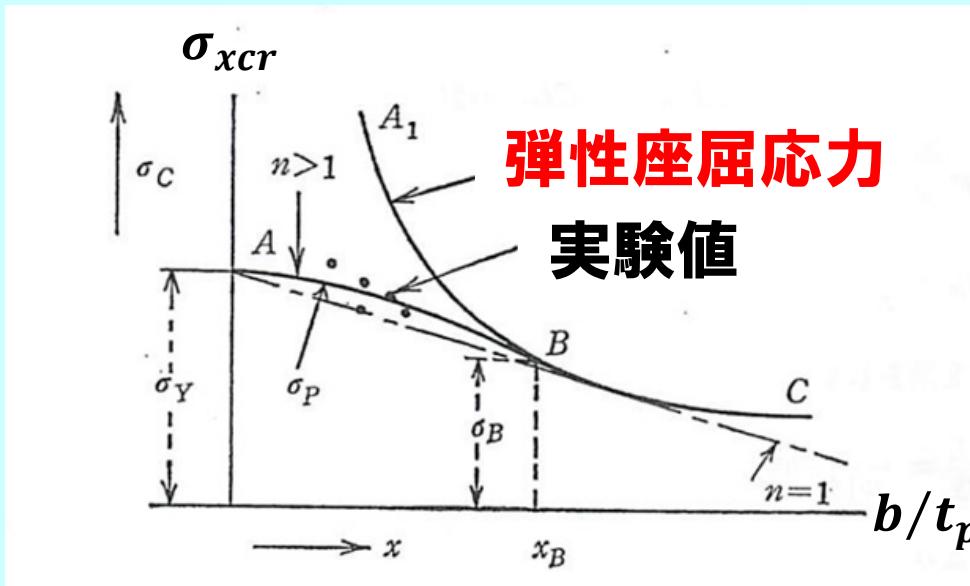


Fig. 3 弾性座屈応力、塑性座屈応力及び降伏応力の関係

弾性座屈応力が降伏応力の半分 $\sigma_Y/2$ よりも大きい場合、Johnson-Ostenfeldの塑性修正を行う。

$$\bar{\sigma}_{xcr} = \sigma_Y \left(1 - \frac{\sigma_Y}{4\sigma_{xcr}} \right) \quad (14)$$

固有モードの計算

δ_{p1} の項は最も基本的な関数なので零になることはないと考えられるので δ_{p1} を1として各未定の撓み係数で一階偏微分して零とおき、停留値をとる。

これをマトリックス表示すると以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} A_{22} - \lambda C_{22} & 0 & 0 & 0 & d & 2D_p d^2 \\ & B_{11} - \lambda D_{11} & B_{12} - \lambda D_{12} & B_{13} - \lambda D_{13} & -\pi b & 0 \\ & & B_{22} - \lambda D_{22} & B_{23} - \lambda D_{23} & -2b & 3D_s b^2 \\ SYM. & & & B_{33} - \lambda D_{33} & -b & 0 \\ & & & & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{p2} \\ \delta_{s1} \\ \delta_{s2} \\ \delta_{s3} \\ \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{12} + \lambda C_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\pi d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

いま仮定している座屈半波数 m に対してこの多元連立方程式を解くと δ_{p1} を1としたときの δ_{p2} , δ_{s1} , δ_{s2} , δ_{s3} を求めることができる。このとき、必然的にLagrangeの未定乗数 Γ_1 , Γ_2 は零となる。

座屈半波数 m と求めた δ_{p2} , δ_{s1} , δ_{s2} , δ_{s3} , Γ_1 , Γ_2 をパネルと防撓材ウェブの座屈モードに代入すれば、**防撓パネルの座屈モード**を求めることができる。

発表の流れ

1. 研究の背景と目的
2. 防撓材の影響を考慮した座屈強度推定法(*SSEM.SPBUCK*)
3. 船体防撓パネルの弾性座屈強度と座屈強度に及ぼす
防撓材の影響
4. 迅速かつ簡易的な座屈強度推定法(*AISSEM.SPBUCK*)の開発
5. 結言

3. 船体防撓パネルの弾性座屈強度と座屈強度に及ぼす防撓材の影響

SSEM.SPBUCKを用いて防撓パネルの弾性座屈応力を計算する

別法としてFEMを用いて防撓パネルの弾性座屈応力を計算する

Altair Engineeringの汎用FEM解析ソフトウェア
HyperWorks / Optistructを用いて解析する

SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力を比較してSSEM.SPBUCKが防撓パネルの弾性座屈現象を表現できているかを確認する

SSEM.SPBUCKで求めた防撓パネルの弾性座屈応力とオイラーの弾性座屈理論で求めた防撓材のない平板の弾性座屈応力を比較する

防撓パネルの弾性座屈強度に及ぼす防撓材の影響を調査

3.1 SSEM.SPBUCKとFEMによる弾性座屈強度計算

ATC Japan 2025

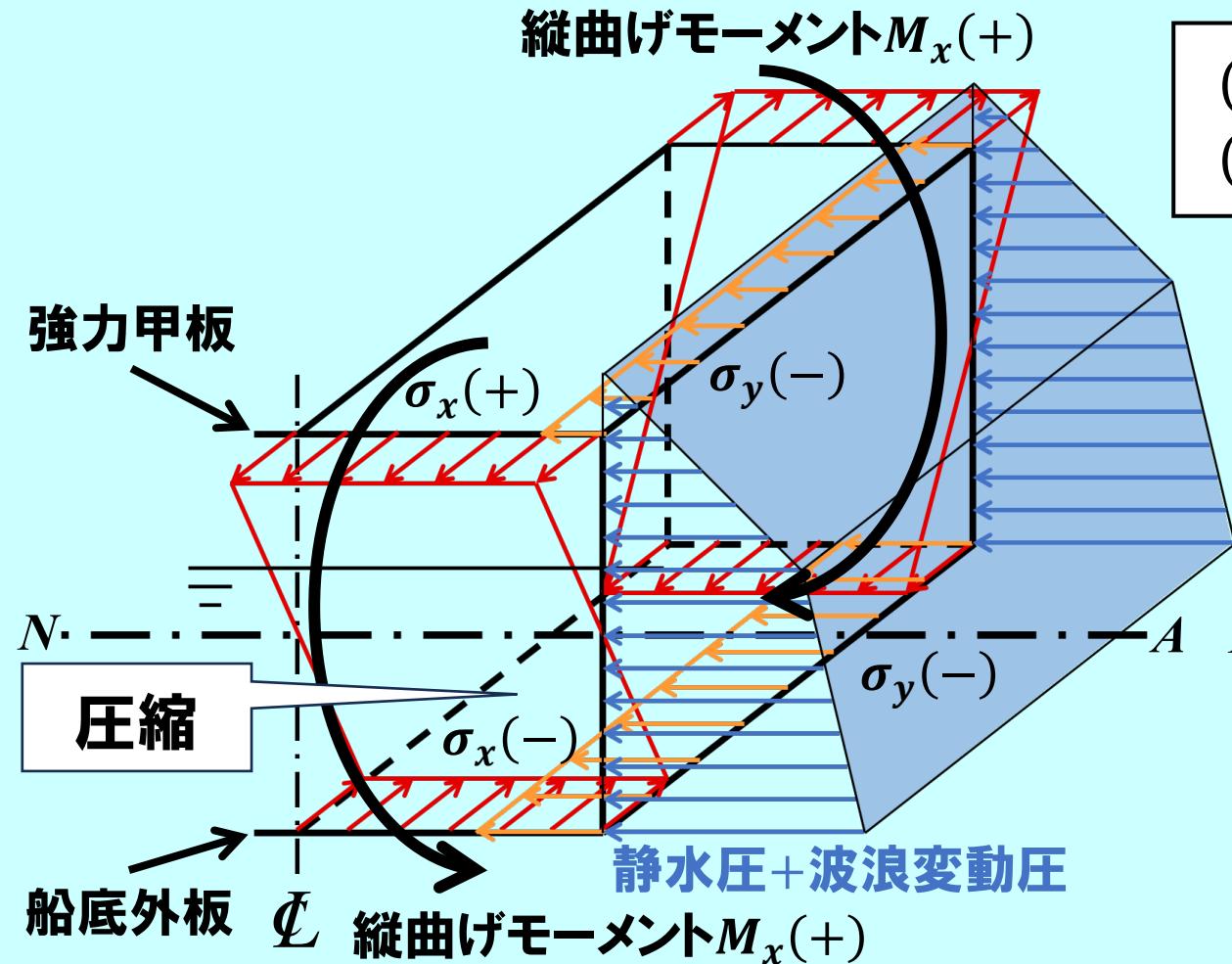


Fig. 4 *Hogging*における船体の応力状態

実際の船体構造で座屈による損傷が懸念される**単軸圧縮応力状態に近い強力甲板**と**二軸圧縮応力状態が顕著となる船底構造**の船体防撓パネルを想定する。

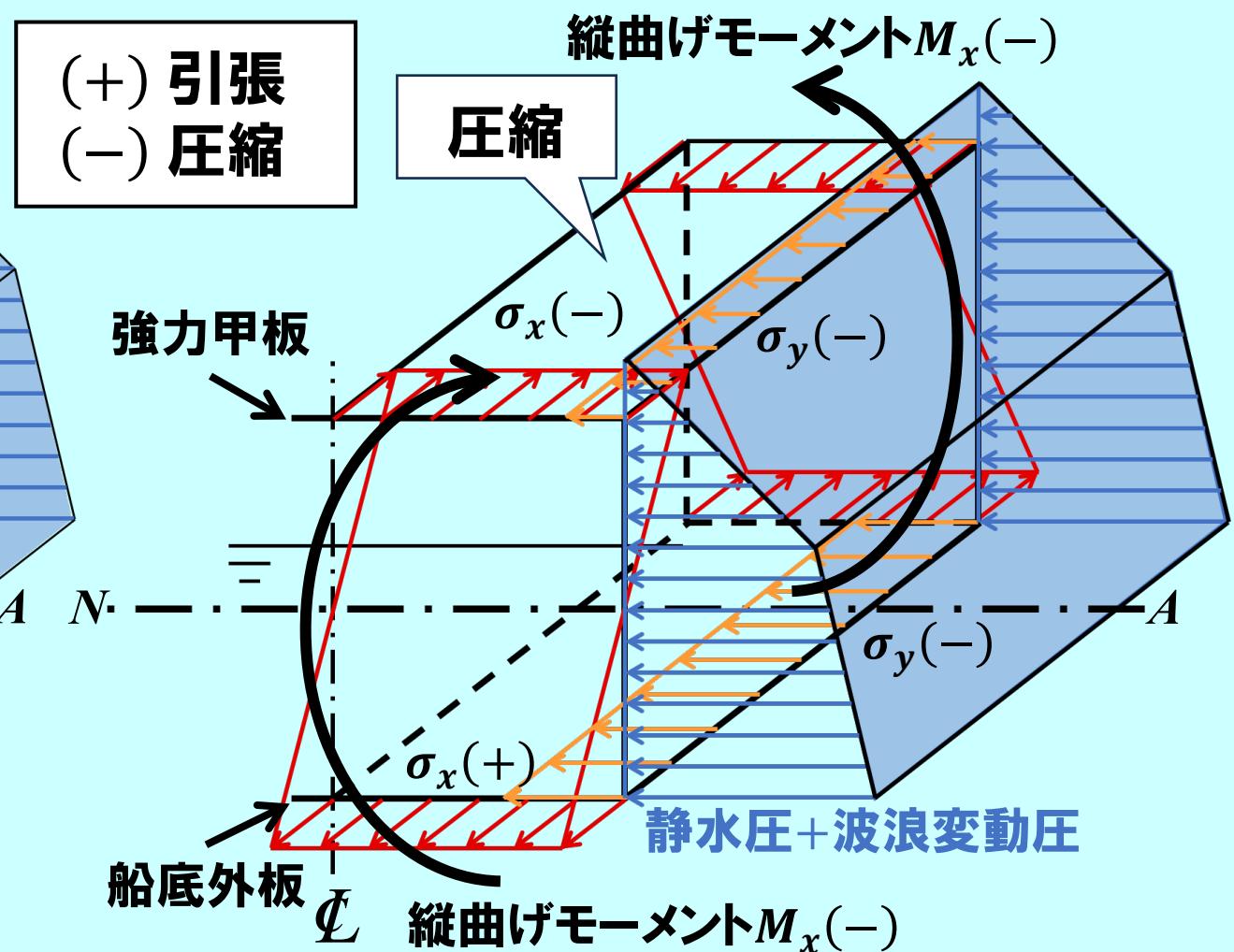


Fig. 5 *Sagging*における船体の応力状態

Table 1 SSEM.SPBUCKで計算する船体防撓パネルの寸法と圧縮応力比

SSEM.SPBUCK

756通りの
防撓パネル

パネルの辺のアスペクト比 a/b ($b=840\text{mm}$ で固定する)	1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0	7通り
パネルの板厚 t_p	10mm, 15mm, 20mm	3通り
防撓材の断面形状	T型鋼(T), アンダル材(I.A.), 平鋼(F.B.)	3通り
防撓材の深さ d	250mm, 350mm, 450mm	3通り
圧縮応力比 σ_y/σ_x ($\sigma_x = 100 \text{ N/mm}^2$ とする)	0.0, 0.5, 1.0, 1.5	4通り

FEM

324通りの
防撓パネル

パネルの辺のアスペクト比 a/b ($b=840\text{mm}$ で固定する)	1.0, 1.5 , 2.0 , 3.0, 4.0 , 5.0 , 6.0	3通り
パネルの板厚 t_p	10mm, 15mm, 20mm	3通り
防撓材の断面形状	T型鋼(T), アンダル材(I.A.), 平鋼(F.B.)	3通り
防撓材の深さ d	250mm, 350mm, 450mm	3通り
圧縮応力比 σ_y/σ_x ($\sigma_x = 100 \text{ N/mm}^2$ とする)	0.0, 0.5, 1.0, 1.5	4通り

3.2 FEM解析モデル

パネルの辺のアスペクト比 a/b の変化を
パネルブレーカーの設置により表現する

Table 3 要素の分割数

パネルの長辺方向 a	60分割
パネルの短辺方向 b	10分割
面材の幅方向	4分割
防撓材ウェブの深さ方向 d	4分割
パネルブレーカーの深さ方向	2分割

節点数:1179、要素数:1100

Table 4 圧縮応力比ごとの強制変位

σ_y/σ_x	$\delta_x [mm]$	$\delta_y [mm]$
0.0	-2.447	0.122
0.5	-2.080	-0.082
1.0	-1.713	-0.285
1.5	-1.346	-0.489

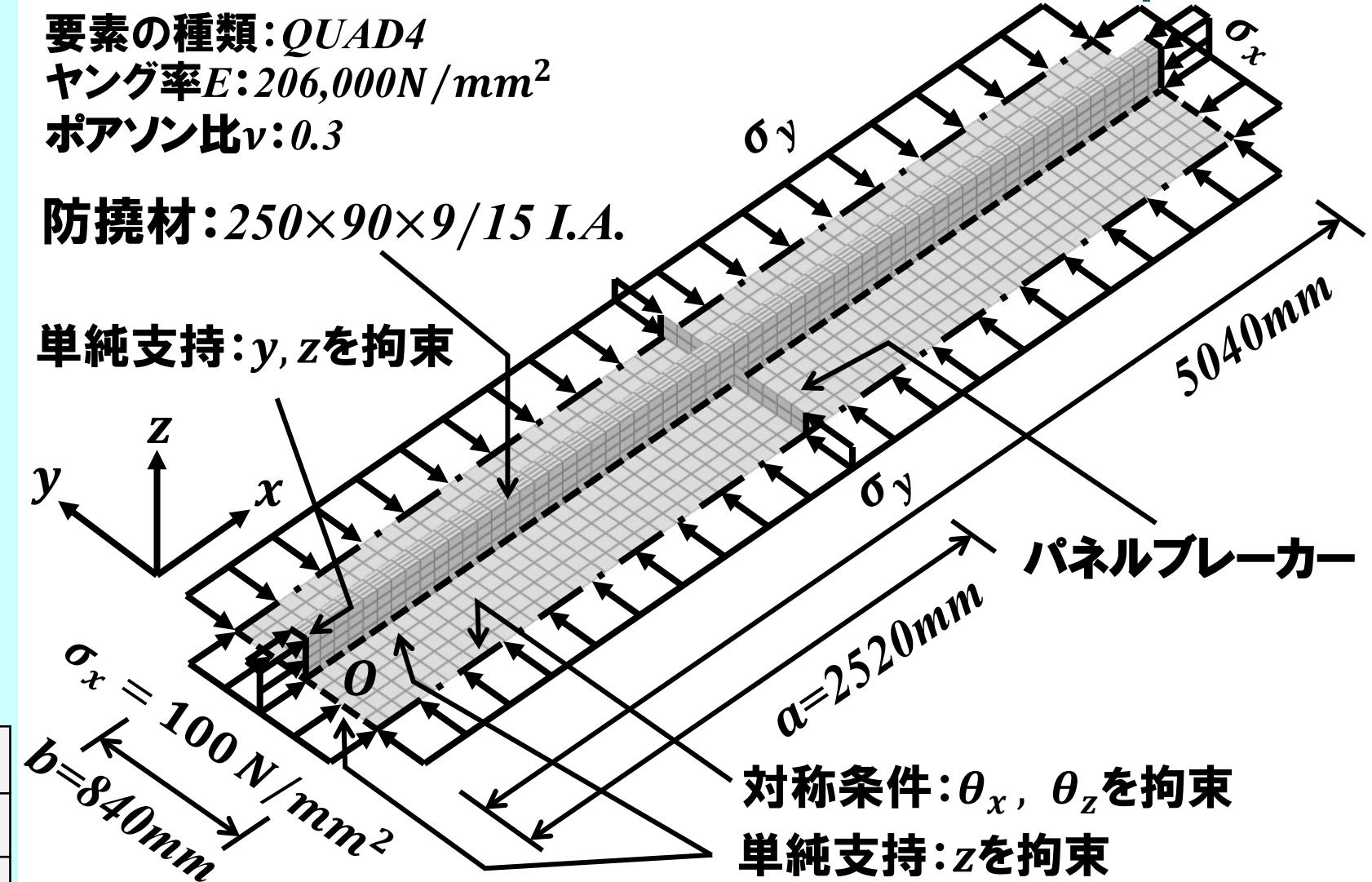


Fig. 6 FEM解析モデルの一例 ($a/b=3.0$)

平面応力状態の応力と歪の関係を使って圧縮応力比ごとに
強制変位 δ_x, δ_y を与える

3.3 SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力の比較

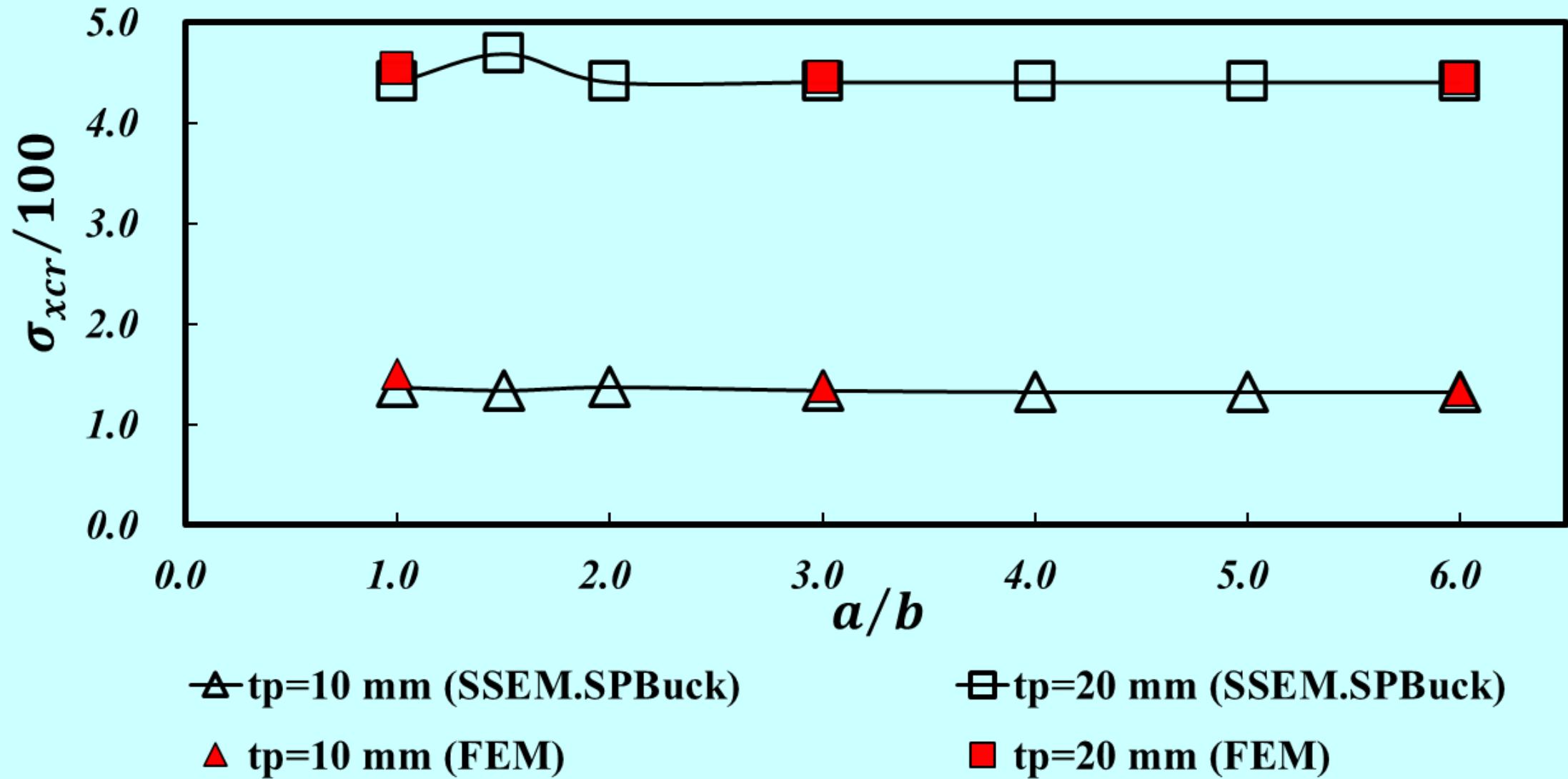


Fig. 7 $250 \times 90 \times 9/15$ I.A. $\sigma_y/\sigma_x = 0.0$ の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

3.3 SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力の比較

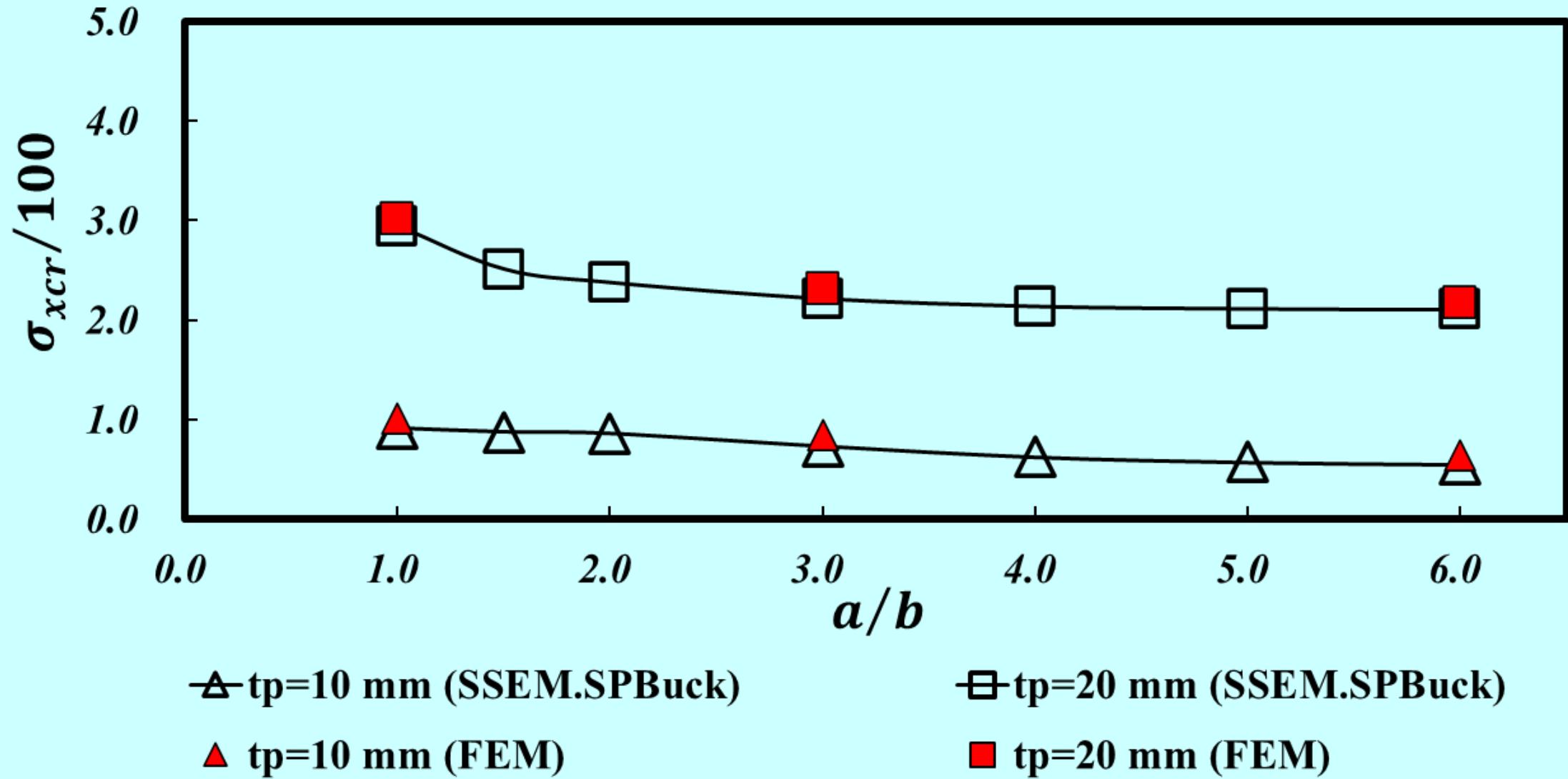


Fig. 8 250×90×9/15 I.A. $\sigma_y/\sigma_x=0.5$ の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

3.3 SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力の比較

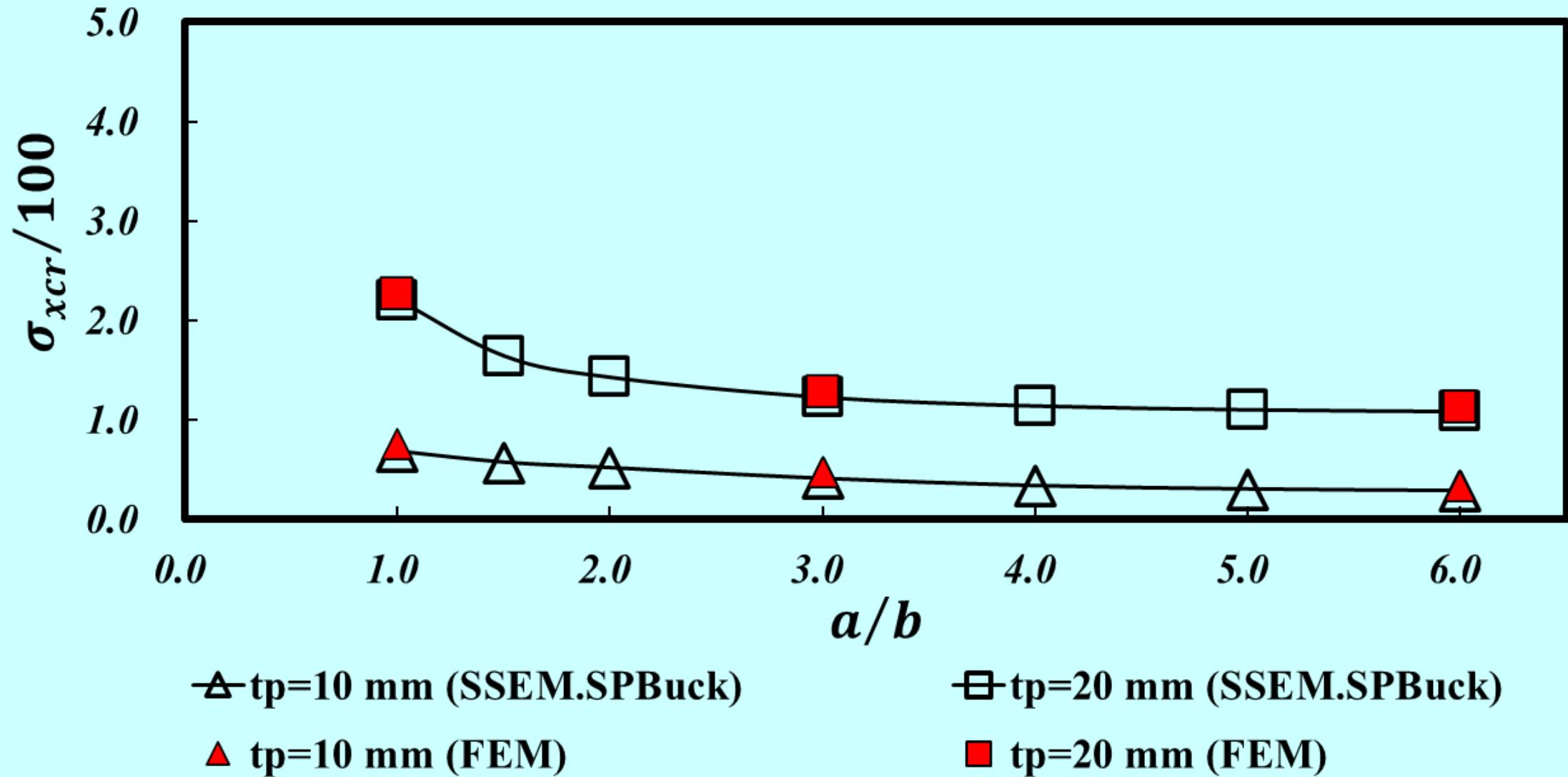


Fig. 9 250×90×9/15 I.A. $\sigma_y/\sigma_x=1.0$ の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

3.3 SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力の比較

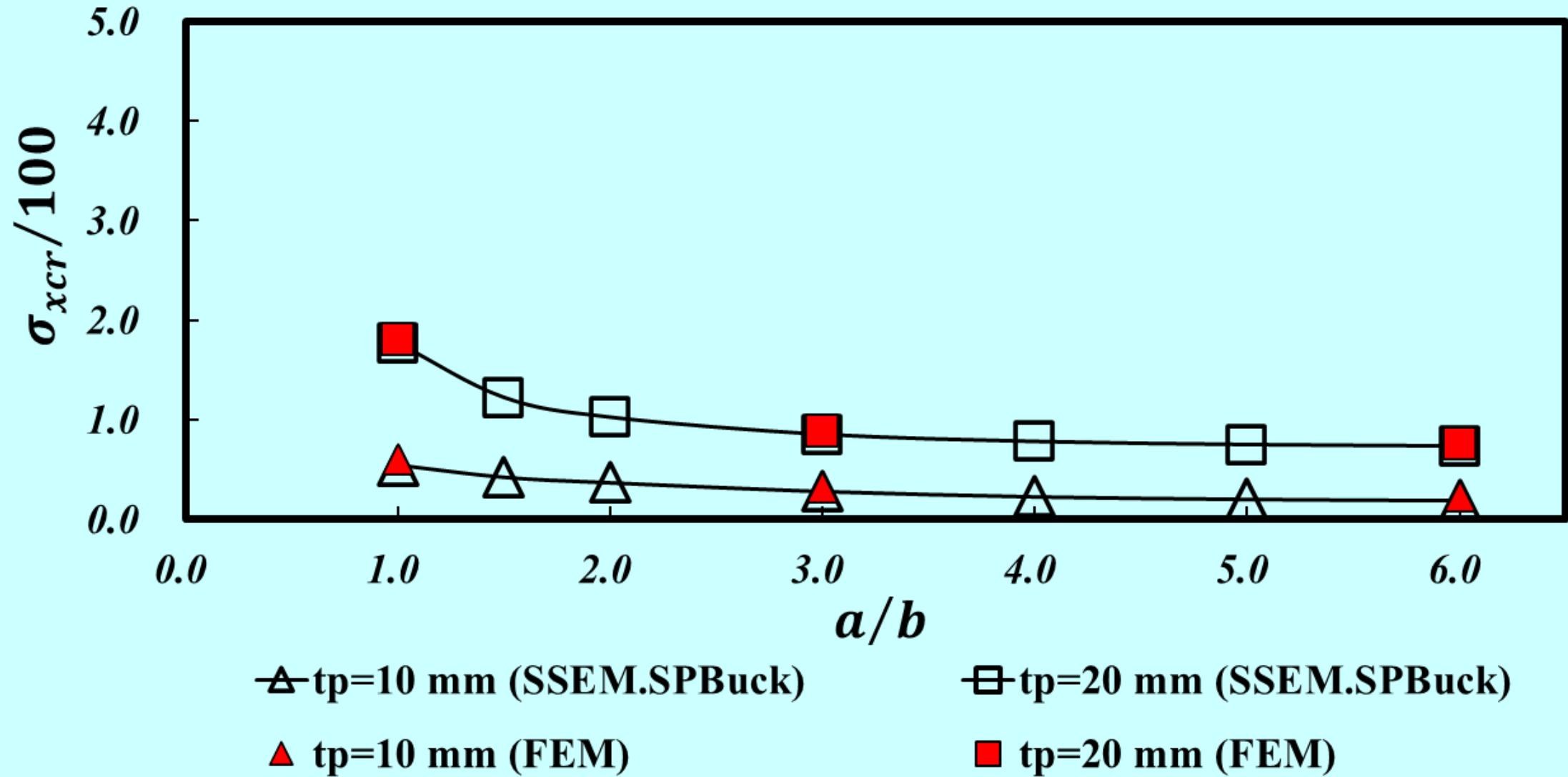
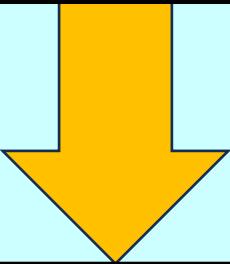


Fig. 10 250×90×9/15 I.A. $\sigma_y/\sigma_x=1.5$ の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

*SSEM.SPBUCK*と*FEM*で弾性座屈応力はよく一致している

*SSEM.SPBUCK*は防撓パネルの弾性座屈現象をよく表現できている

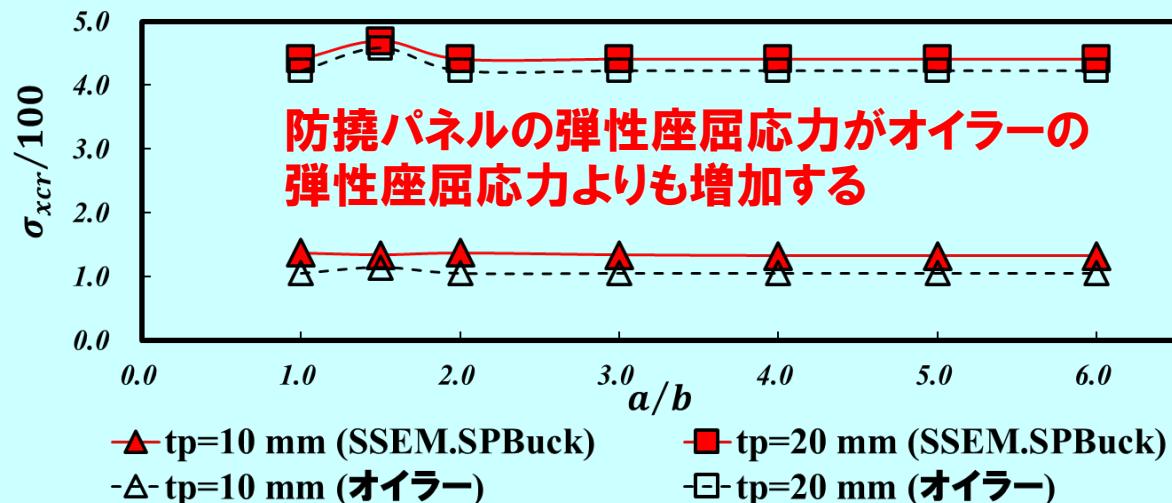
*FEM*の代わりに*SSEM.SPBUCK*を用いて防撓材の影響を調査する



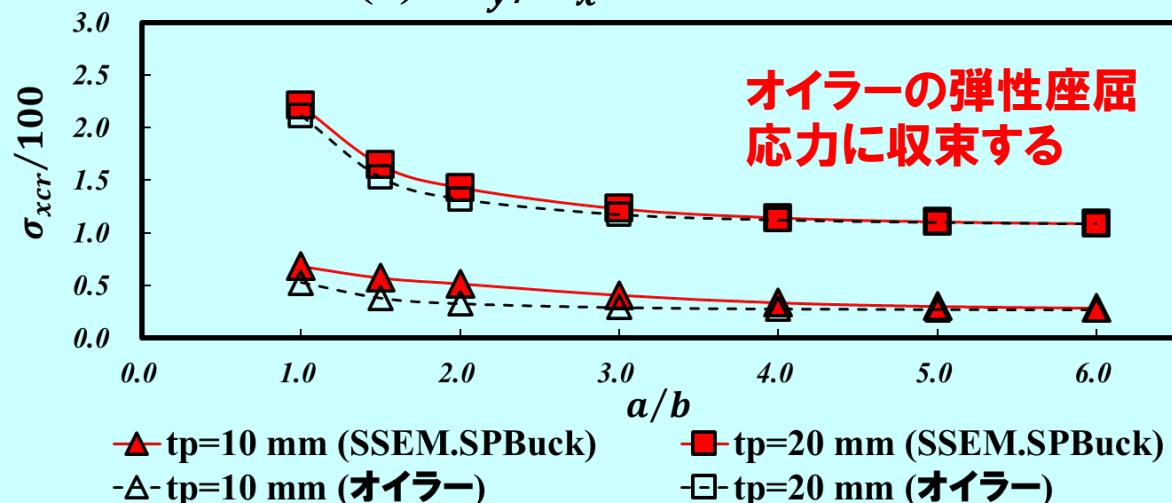
3.5 座屈強度に及ぼす防撓材の影響

ATC Japan 2025

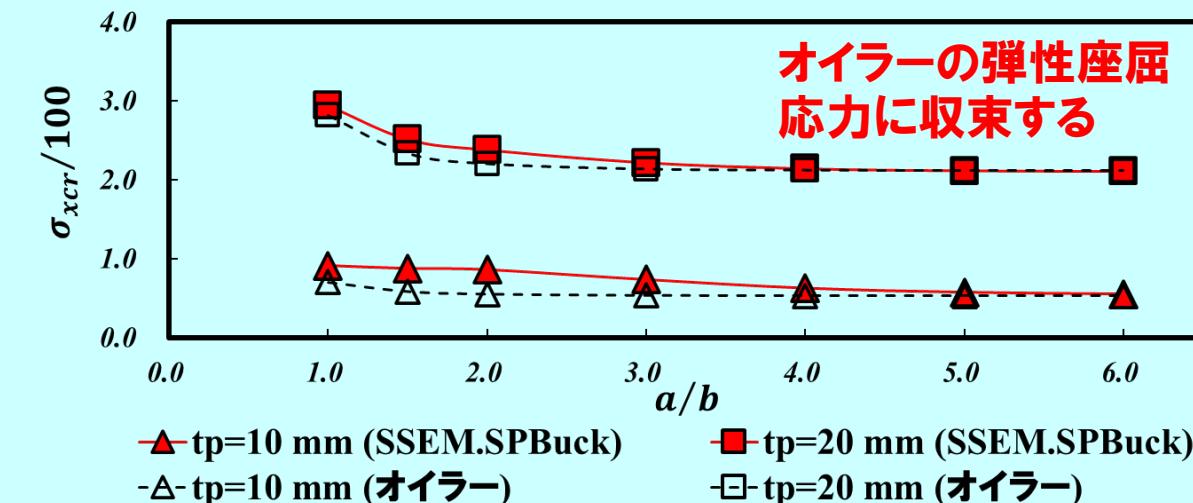
250×90×9/15 I.A.のときの防撓パネルの弾性座屈応力とオイラーの弾性座屈応力の比較



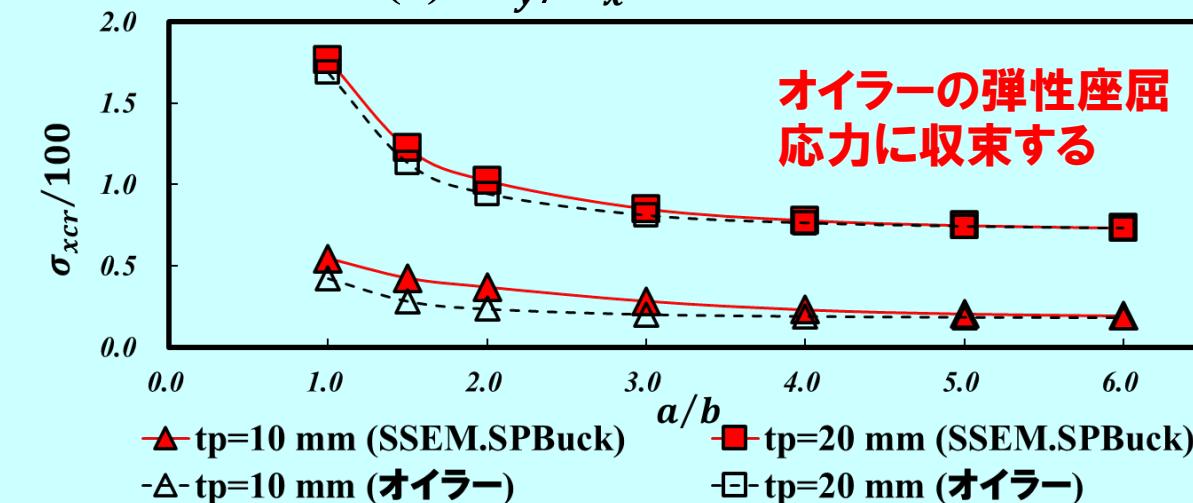
(a) $\sigma_y/\sigma_x=0.0$ の場合



(c) $\sigma_y/\sigma_x=1.0$ の場合



(b) $\sigma_y/\sigma_x=0.5$ の場合



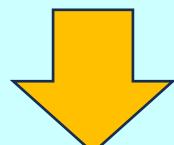
(d) $\sigma_y/\sigma_x=1.5$ の場合

250×90×9/15 I.A.の場合

- ・パネルの板厚 t_p が厚くなると防撓パネルの弹性座屈応力は大きくなる
- ・单軸、二軸圧縮応力状態で防撓パネルの弹性座屈応力はオイラーの弹性座屈応力よりも増加する

降伏応力 $235N/mm^2$ に対して弹性座屈応力が
单軸圧縮応力状態で約10%、二軸圧縮応力状態で約7%増加する。

- ・二軸圧縮応力状態では、 a/b を小さくすると防撓パネルの弹性座屈応力はオイラーの弹性座屈応力よりも増加する



防撓材の影響を考慮する必要がある

$450 \times 150 \times 11.5/15$ I.A. のときの防撓パネルの弾性座屈応力とオイラーの弾性座屈応力の比較

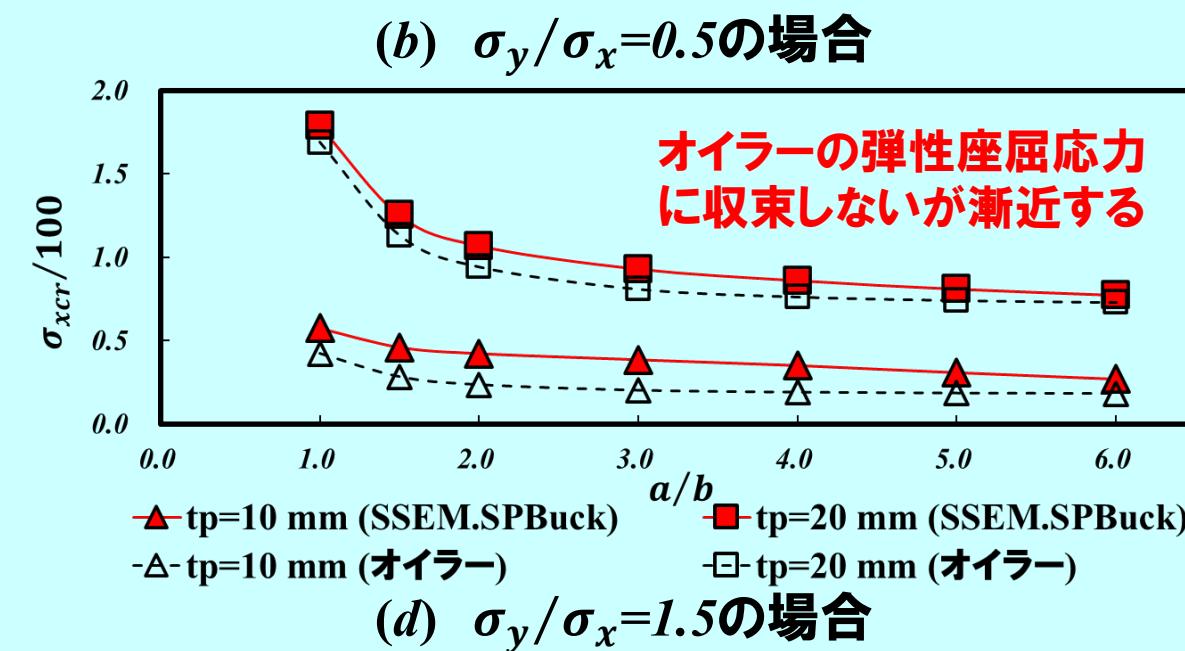
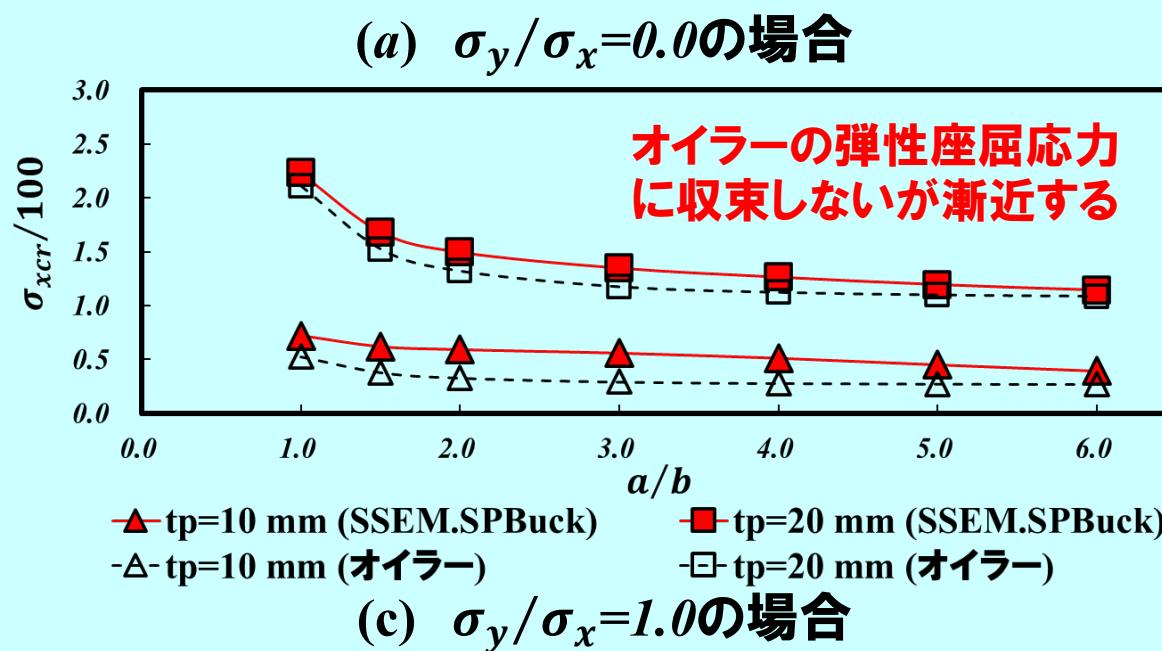
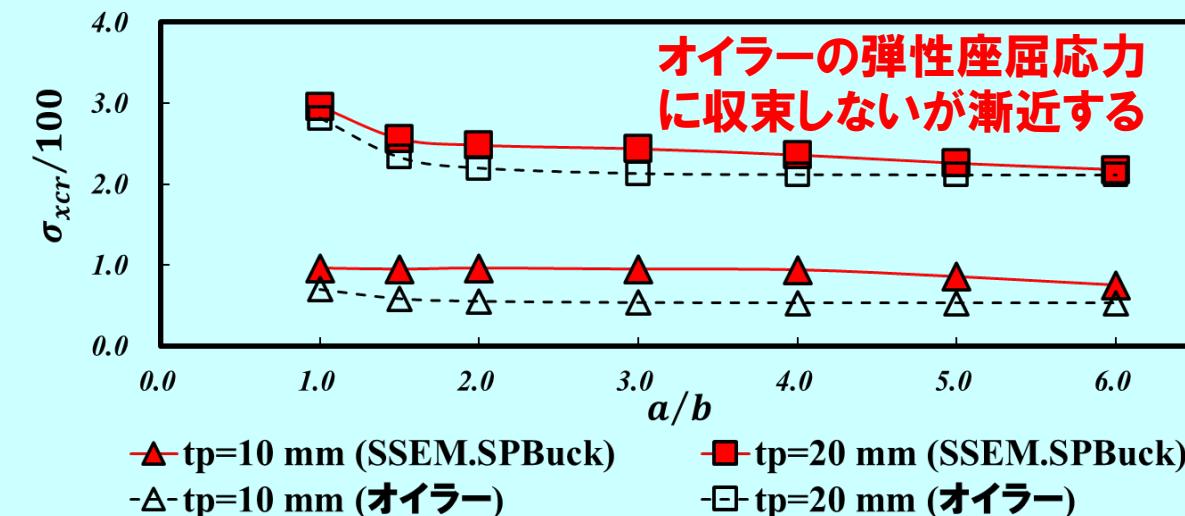
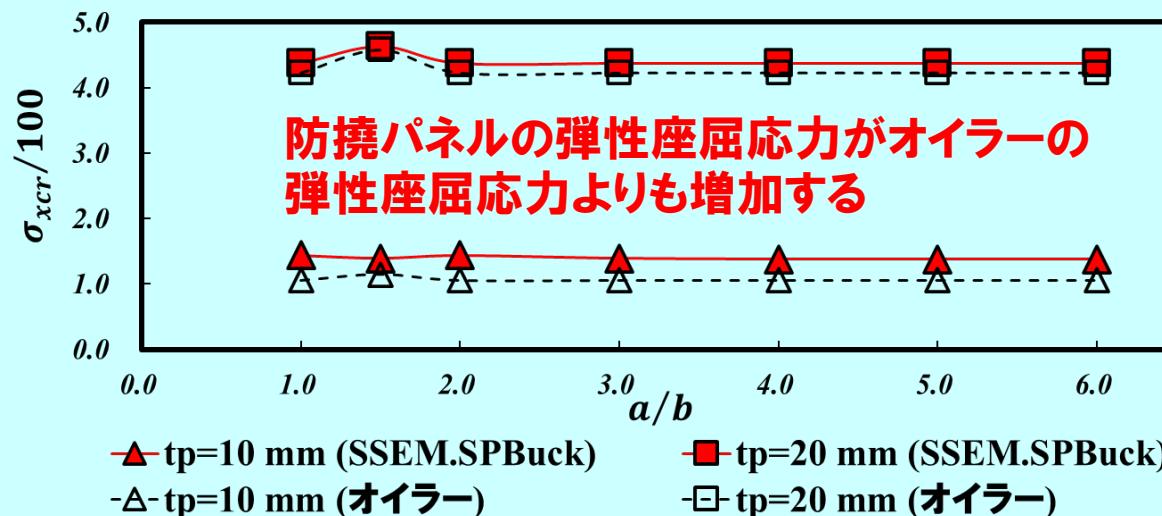
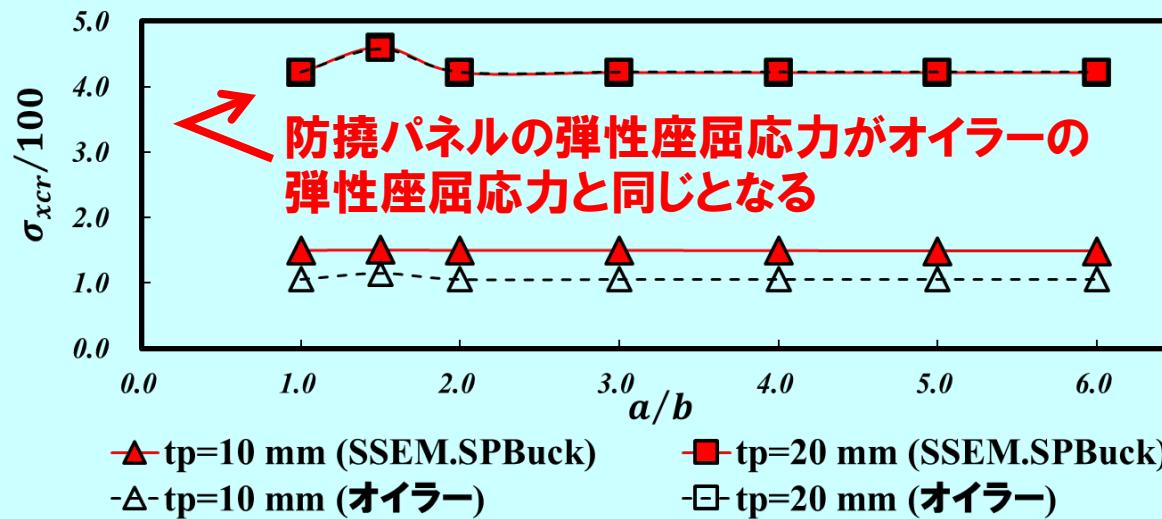
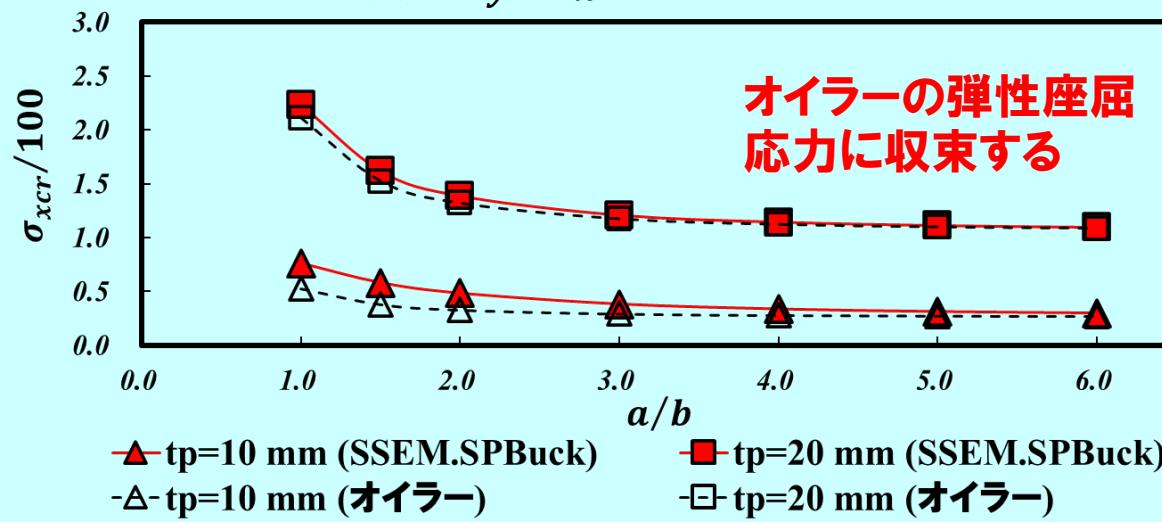


Fig. 12 $450 \times 150 \times 11.5/15$ I.A. の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

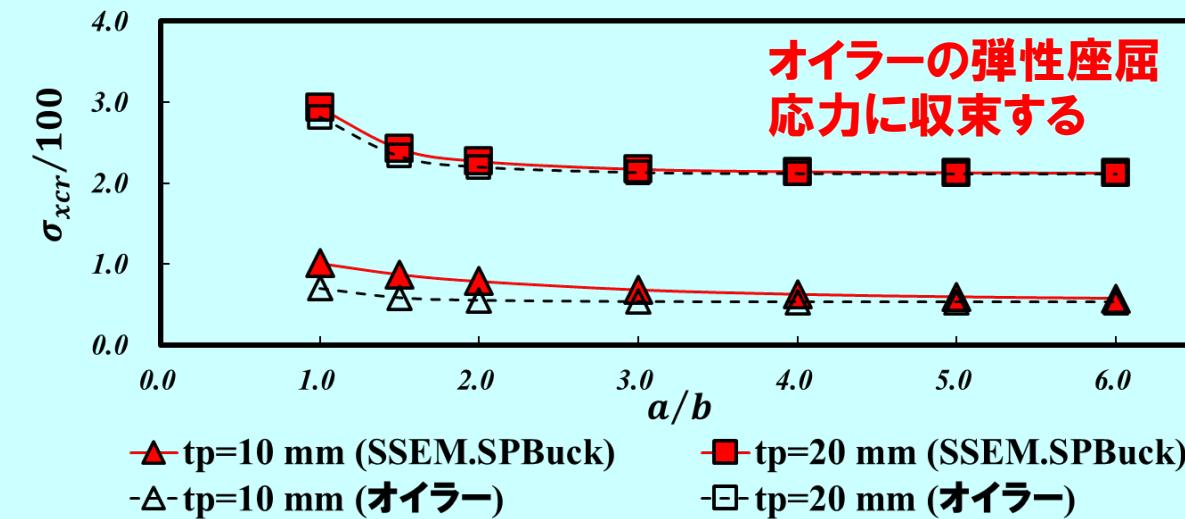
250×17 F.B.のときの防撓パネルの弾性座屈応力とオイラーの弾性座屈応力の比較



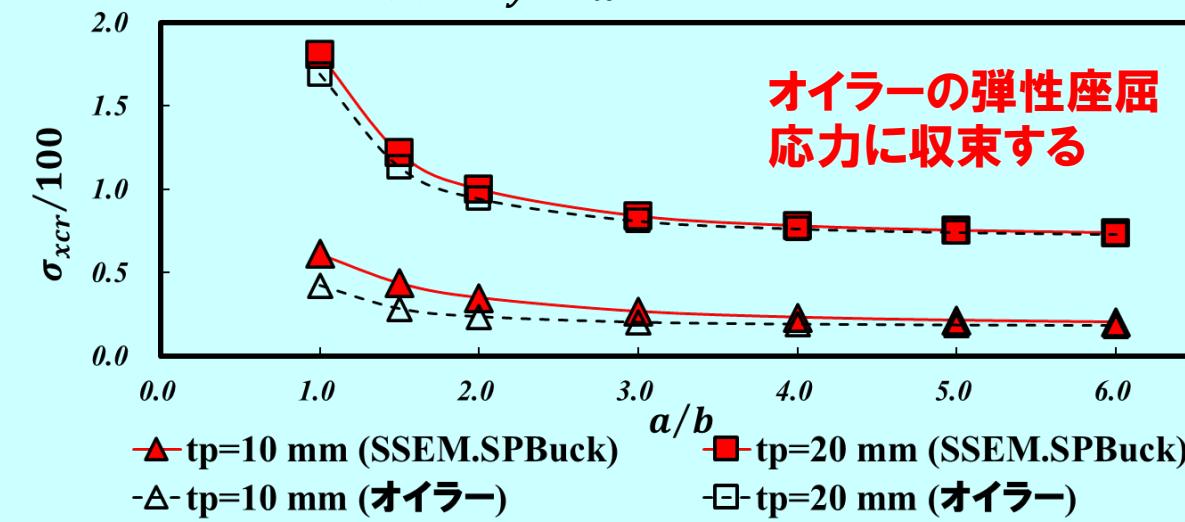
(a) $\sigma_y/\sigma_x=0.0$ の場合



(c) $\sigma_y/\sigma_x=1.0$ の場合



(b) $\sigma_y/\sigma_x=0.5$ の場合

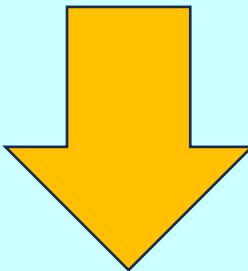


(d) $\sigma_y/\sigma_x=1.5$ の場合

Fig. 13 250×17 F.B.の場合の a/b と $\sigma_{xcr}/100$ の関係

防撓パネルの弾性座屈強度に及ぼす防撓材の影響を調査した結果

防撓材の深さや断面形状ごとに防撓材の影響は異なる



防撓パネルの弾性座屈現象は複雑であり、統一的な座屈補強指針の策定は難しいが、逐次SSEM.SPBUCKで計算することで防撓材の影響を考慮できる

発表の流れ

1. 研究の背景と目的
2. 防撓材の影響を考慮した座屈強度推定法(*SSEM.SPBUCK*)
3. 船体防撓パネルの弾性座屈強度と座屈強度に及ぼす防撓材の影響
4. 迅速かつ簡易的な座屈強度推定法(*AISSEM.SPBUCK*)の開発
5. 結言

4. 迅速かつ簡易的な座屈強度推定法の開発

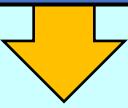
ATC Japan 2025

現在開発している構造初期計画システムでは、短時間に数多くの座屈強度評価を行う必要がある

SSEM.SPBUCKは固有値行列を計算するので座屈強度の計算に時間がかかる

より迅速かつ簡易的な座屈強度推定法が必要

人工知能(AI)と物理モデルを組み合わせた物理代理モデル(サロゲートモデル)に着目



SSEM.SPBUCKと人工知能の1つであるニューラルネットワーク(NN)^[2]などを組み合わせて簡易座屈強度推定法(AISSEM.SPBUCK)を開発する

[2] 古野弘志, 高見佳奈子, 古賀慶大:人工知能(AI)を用いた初期船殻重量推定システムの擬似アンサンブル学習による汎化性能向上に関する一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第36号 (2023), pp.427—434

4.1 使用するニューラルネットワークの構造

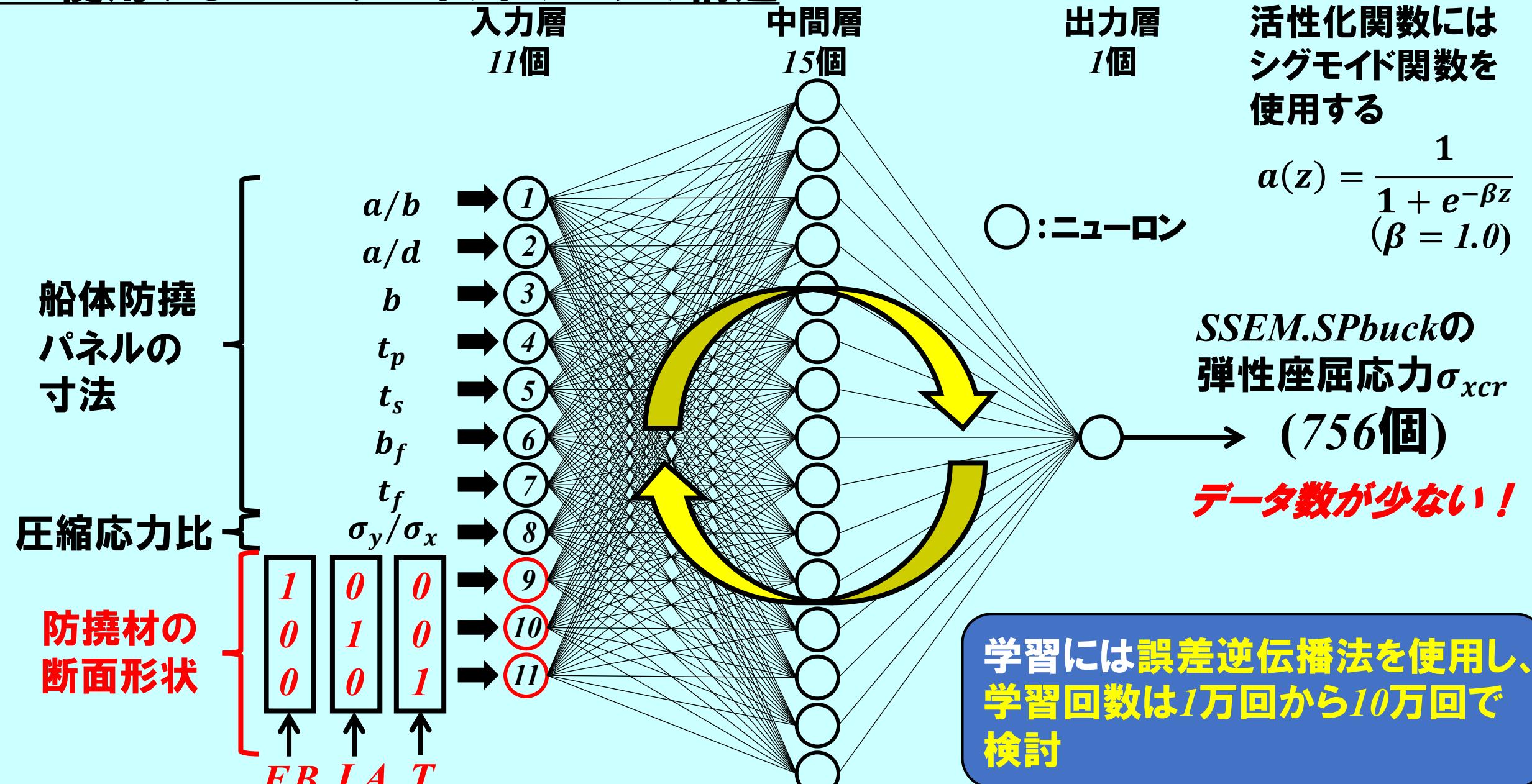


Fig. 14 AISSEM.SPBUCKの構造

4.2 ニューラルネットワーク(NN)のプログラム構造

ATC Japan 2025

別途、始めにパラメータを定義しておく

(各層のニューロン数、入力パラメータ、教示データ数、ゲイン β など)

Simulation (推定)

推定するデータの読み込み

*Learning*で出された重み w 、
バイアス b を読み込む

中間層・出力層の出力値計算

推定値の出力

終了

*Excel VBA*で開発

Learning (学習)

教示データの読み込み

中間層・出力層の出力値計算

誤差逆伝播法を用いて
出力層から中間層間、
中間層から入力層間、
の修正量を計算する。

重み w 、バイアス b の修正計算

計算結果をファイルに出力

終了

教示データ数繰り返す

学習回数繰り返す

4.3 NNの学習回数の検討およびAISSEM.SPBUCKの推定精度と汎化性能調査

NNに交差検証法を適用し、学習回数の検討および推定精度と汎化性能の調査を行う。

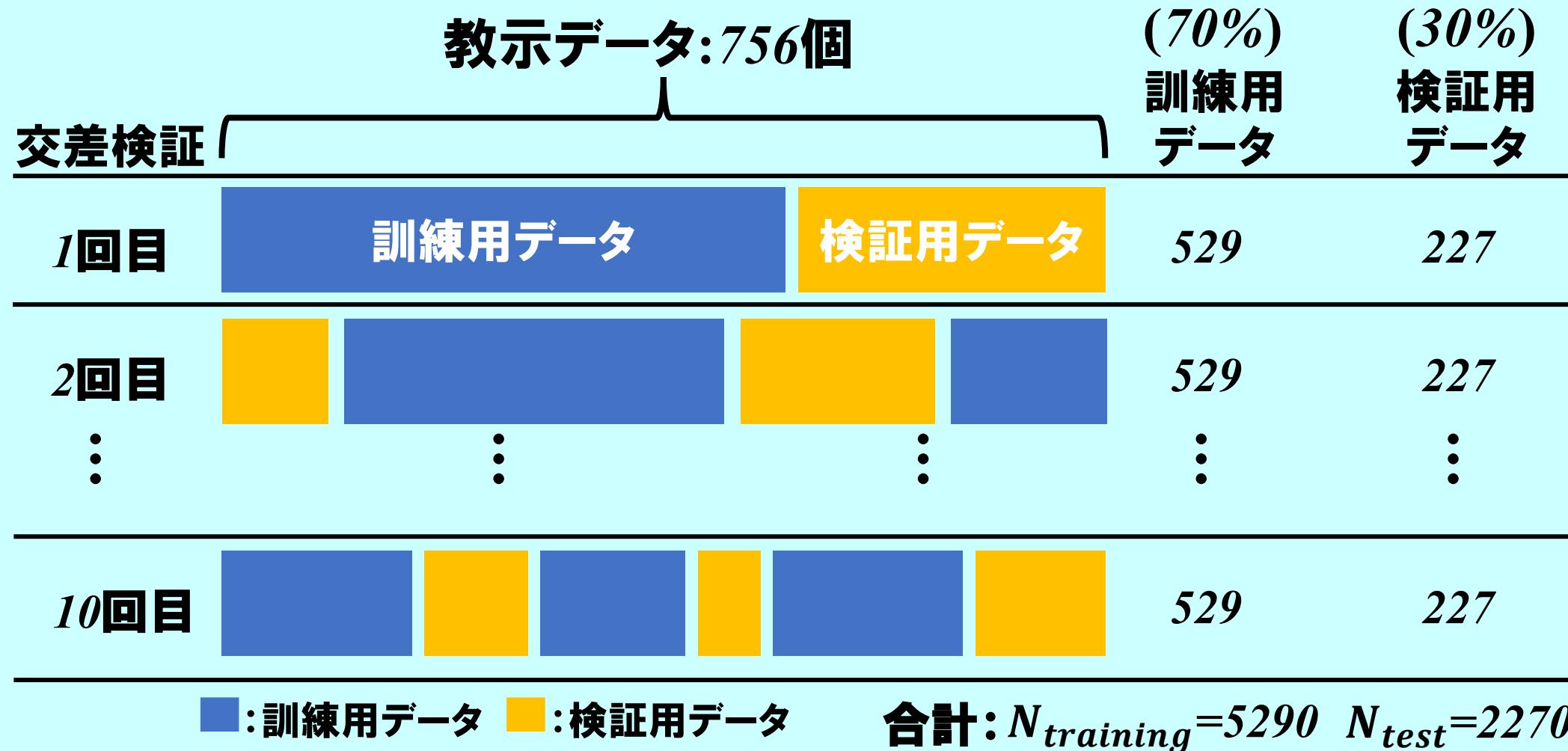


Fig. 16 交差検証法を適用した際の訓練用データと検証用データの分割方法

・誤差率 x_i

$$x_i = \left(1 - \frac{\hat{\sigma}_{xcr}}{\sigma_{xcr}} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (16)$$

ここで、 σ_{xcr} は教示データの弾性座屈応力

$\hat{\sigma}_{xcr}$ はAISSEM.SPBUCKが推定した弾性座屈応力

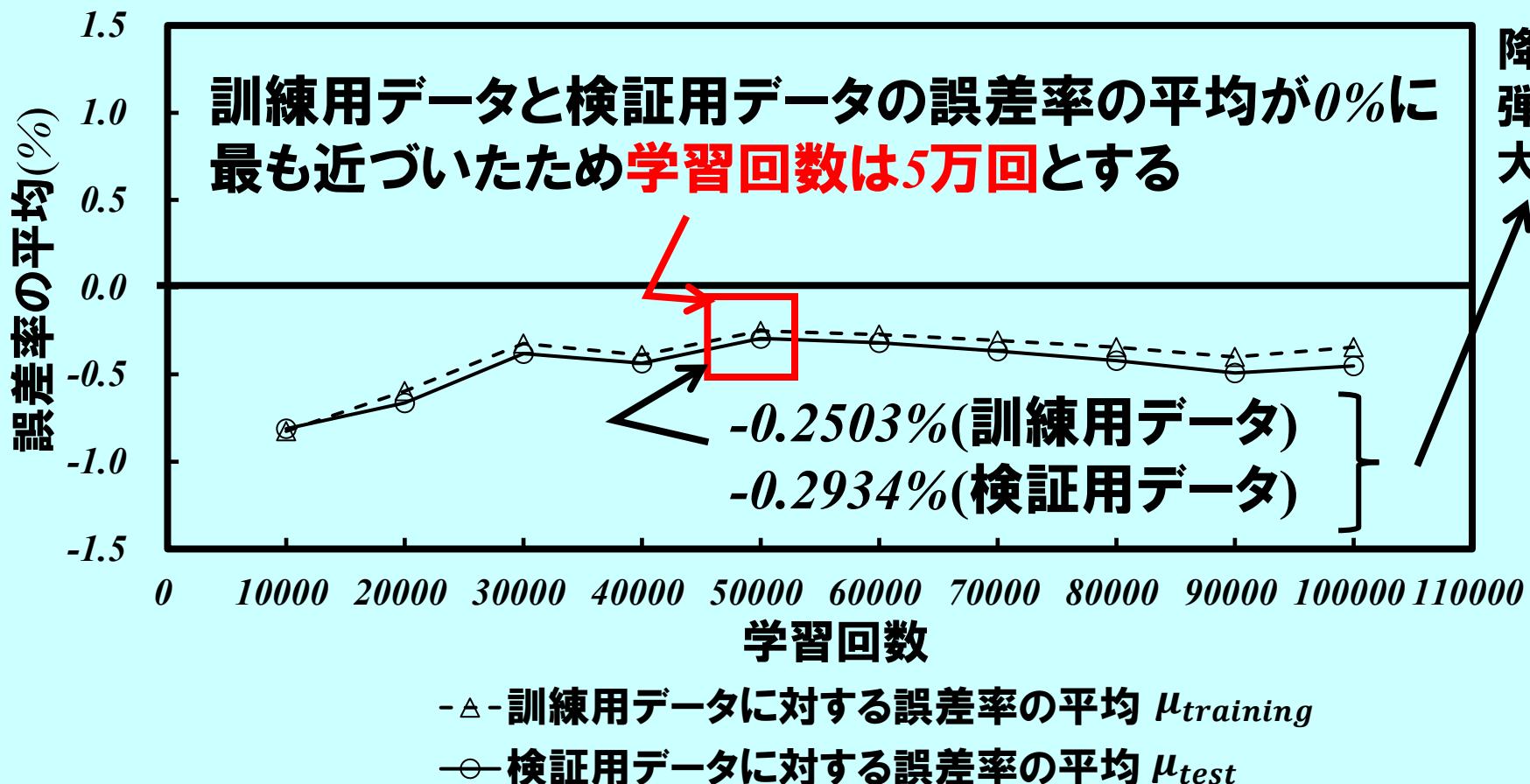
交差検証法を適用した場合、訓練用データと検証用データに対する誤差率の平均を用いて推定精度と汎化性能を評価する。

・訓練用データに対する誤差率の平均 $\mu_{training}$

$$\mu_{training} = \frac{1}{N_{training}} \sum_{i=1}^{N_{training}} x_i \quad (17)$$

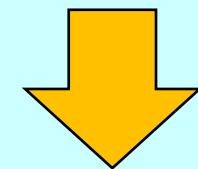
・検証用データに対する誤差率の平均 μ_{test}

$$\mu_{test} = \frac{1}{N_{test}} \sum_{i=1}^{N_{test}} x_i \quad (18)$$



降伏応力 $235N/mm^2$ に対して
弾性座屈応力を平均約 $0.6 N/mm^2$
大きく推定

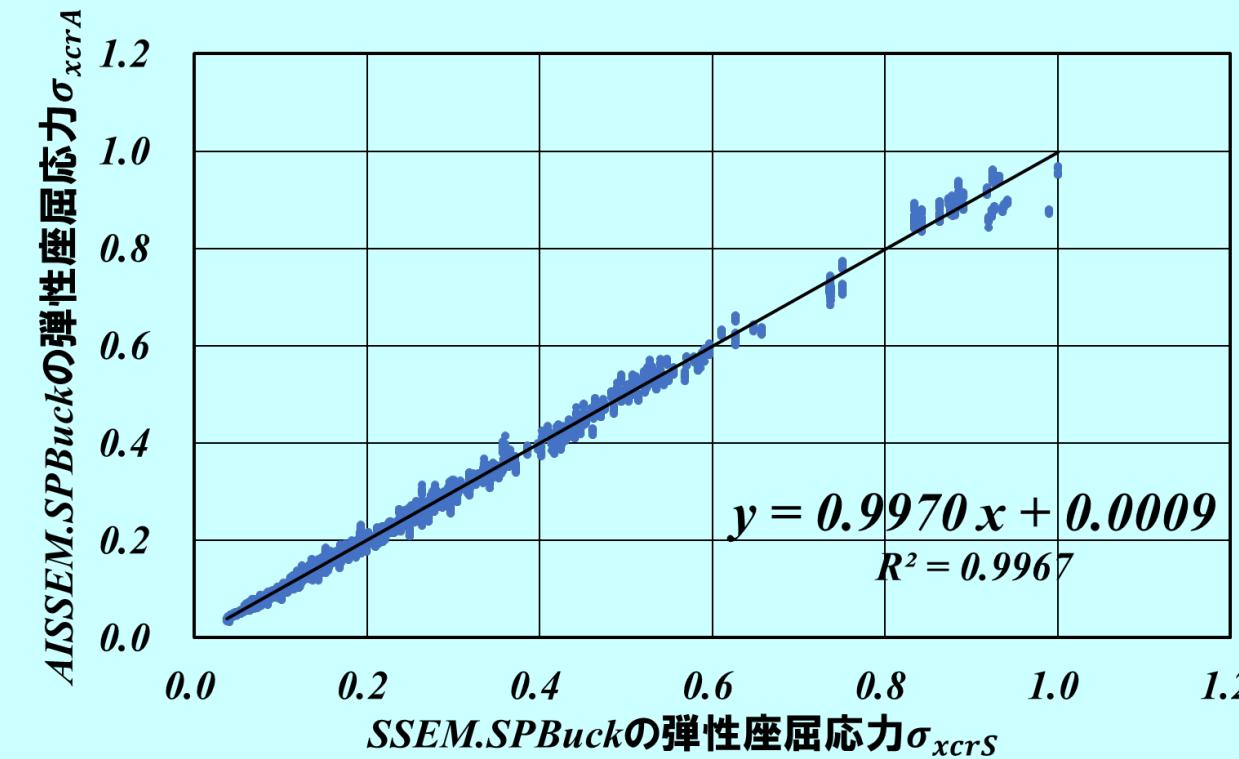
学習回数5万回のとき、
訓練用データと検証用
データの誤差率の平均
の差は小さい



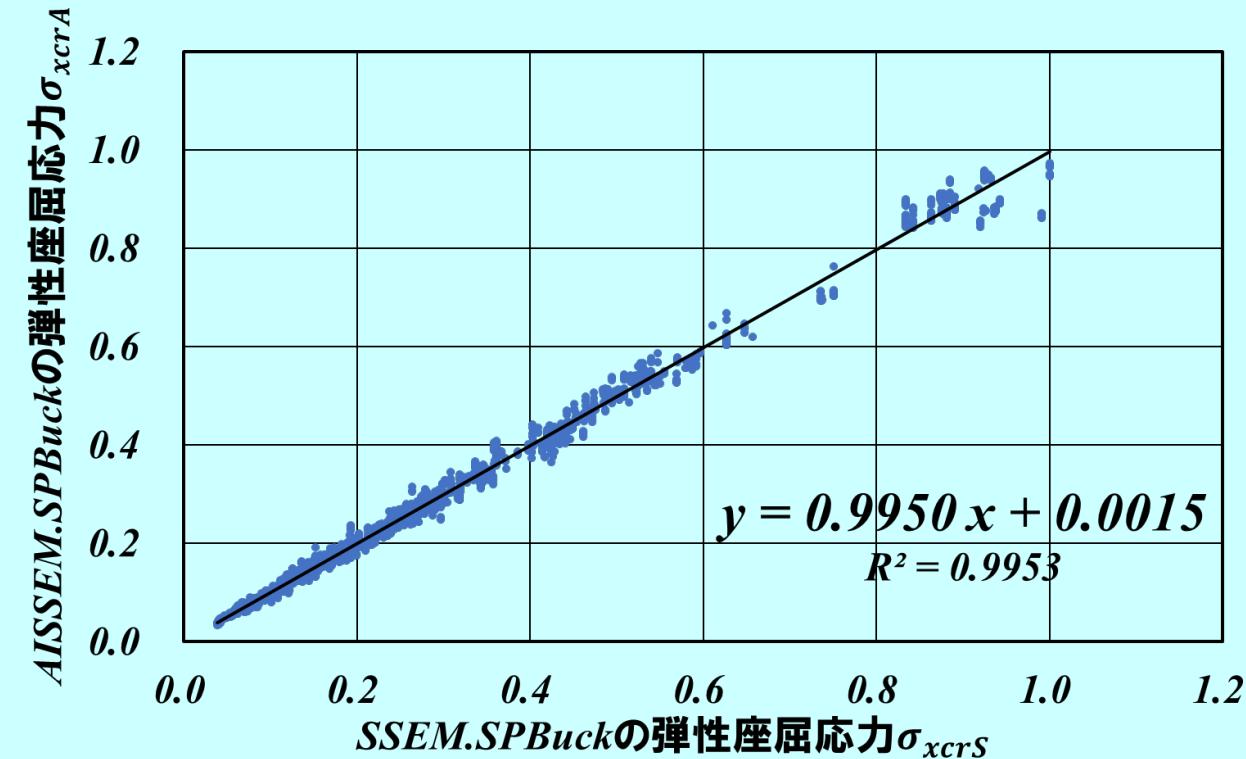
過学習のような問題
は生じていないと判断

Fig. 17 学習回数ごとの訓練用データと検証用データの誤差率の平均

*AISSEM.SPBuck*は、*SSEM.SPBuck*よりも僅かに推定精度が悪化したが汎化性能は高い。



(a) 訓練用データの場合



(b) 検証用データの場合

Fig. 18 学習回数5万回のときのSSEM.SPBUCKとAISSEM.SPBUCKの比較

SSEM.SPBUCKとAISSEM.SPBUCKの弾性座屈応力はよく一致する。

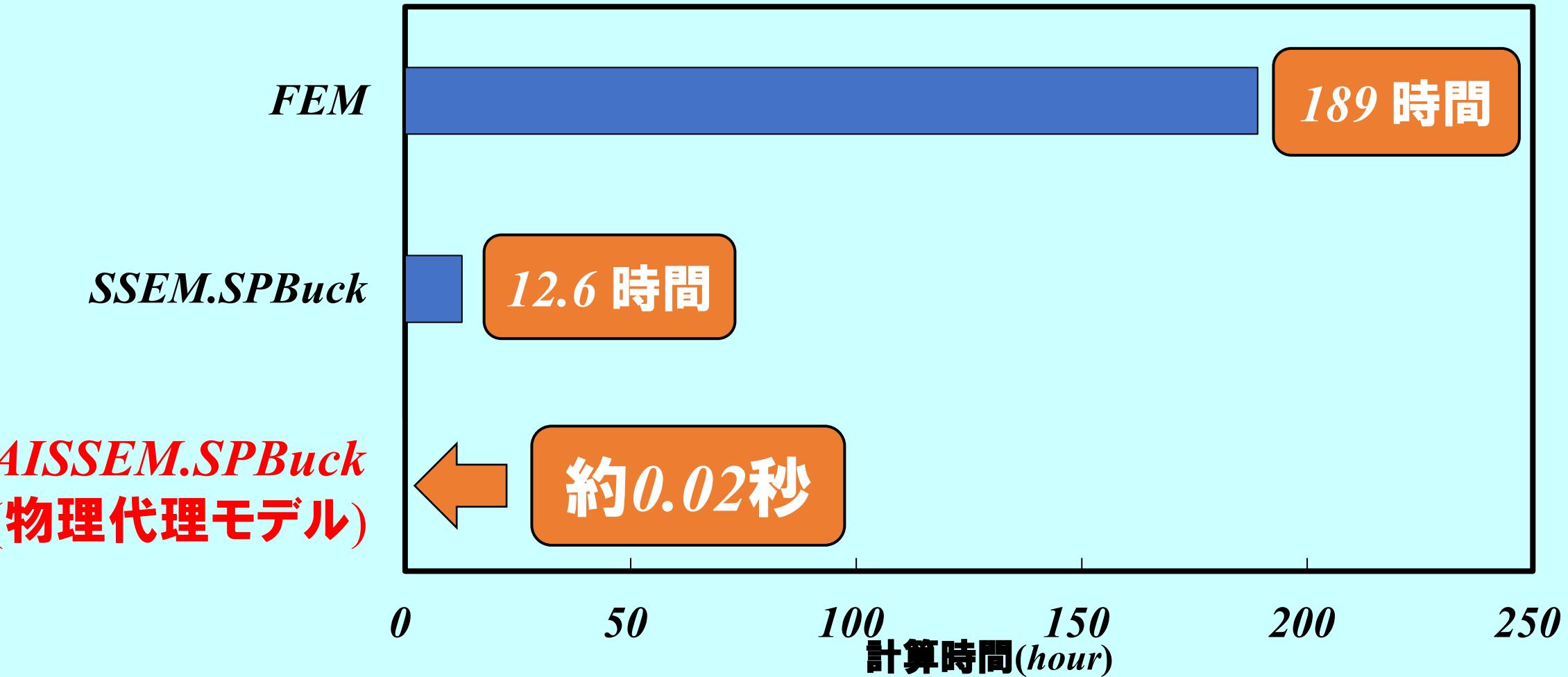


Fig. 19 756個の防撓パネルの弾性座屈応力計算時間

AISSEM.SPBUCKは、SSEM.SPBUCKよりも座屈強度計算時間が速い。

$$[E] = \begin{bmatrix} A_{11} - \lambda C_{11} & A_{12} - \lambda C_{12} & 0 & 0 & 0 & \pi d & 0 \\ & A_{22} - \lambda C_{22} & 0 & 0 & 0 & d & 2D_p d^2 \\ & & B_{11} - \lambda D_{11} & B_{12} - \lambda D_{12} & B_{13} - \lambda D_{13} & -\pi b & 0 \\ & & & B_{22} - \lambda D_{22} & B_{23} - \lambda D_{23} & -2b & 3D_s b^2 \\ SYM. & & & & B_{33} - \lambda D_{33} & -b & 0 \\ & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

入力毎に逐次固有値行列を計算

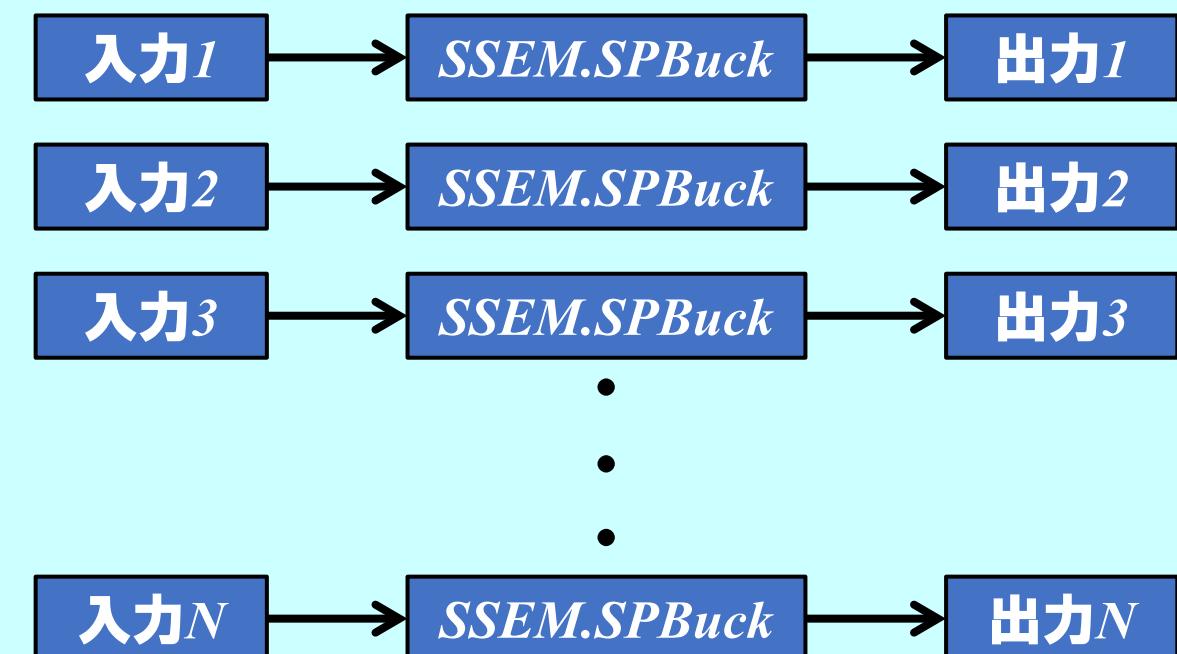


Fig. 20 SSEM.SPBUCKの入力と出力の関係

$$[E] = \begin{bmatrix} A_{11} - \lambda C_{11} & A_{12} - \lambda C_{12} & 0 & \pi d & 0 \\ & A_{22} - \lambda C_{22} & 0 & d & 2D_p d^2 \\ & & B_{11} - \lambda D_{11} & B_{12} - \lambda D_{12} & B_{13} - \lambda D_{13} \\ & & & B_{22} - \lambda D_{22} & B_{23} - \lambda D_{23} \\ SYM. & & & & B_{33} - \lambda D_{33} \\ & & & & -\pi b \\ & & & & -2b \\ & & & & -b \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$

固有値行列の計算は一切行わない

1回のバッチ処理で計算できる

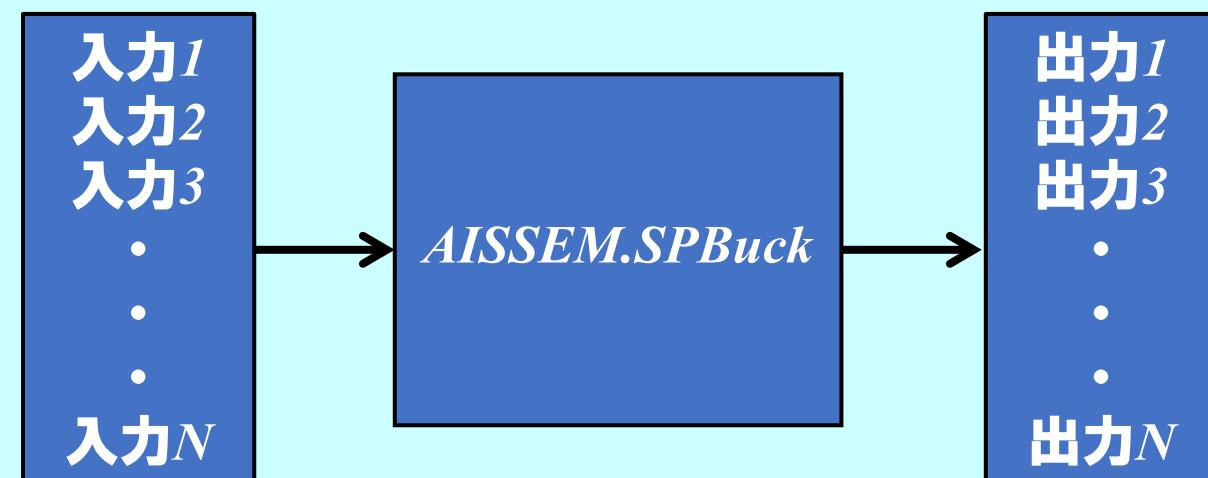


Fig. 21 AISSEM.SPBUCKの入力と出力の関係

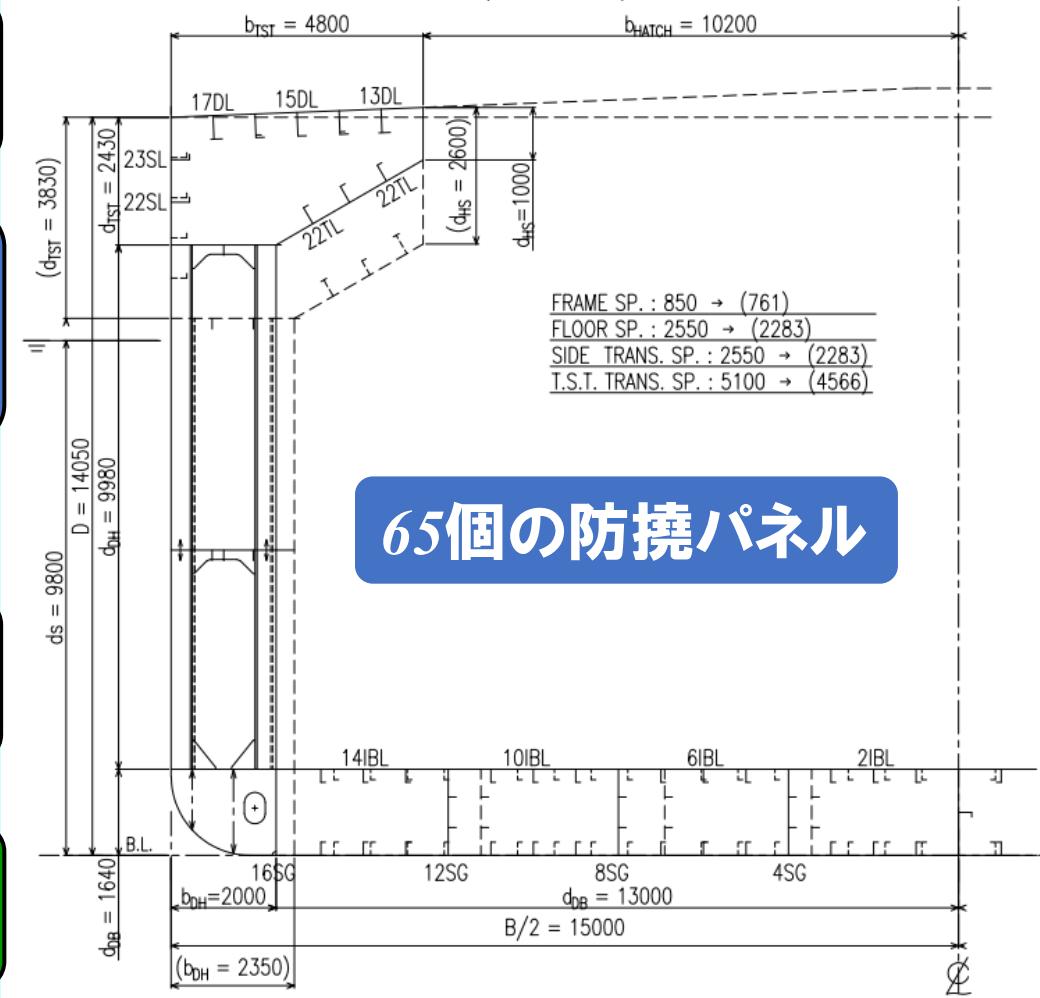
SSEM.SPBUCKとAISSEM.SPBUCKを構造初期計画システムで使用する場合

現状の座屈強度の制約条件を考慮していない構造初期計画システムを用いた場合、最適化にかかる時間は約1.5時間

構造初期計画システムでは遺伝的アルゴリズムを用いているので座屈強度の制約条件を考慮するためには65個の防撓パネルに対して約540万回の座屈強度評価が必要

SSEM.SPBUCKを用いた場合、約1.5時間+約30時間
(1個の防撓パネルに対する演算時間は約0.02秒)

**AISSEM.SPBUCKを用いた場合、約1.5時間+約30分
(65個の防撃パネルに対する演算時間を約0.02秒とする)**



65個の防撓パネル

構造初期計画システムにおける座屈強度計算を約60倍高速化できる。
代理モデルは大規模な最適化問題を解くことに対してその有用性が高まる。

付録 開発中の遺伝的アルゴリズムを用いた構造初期計画システム

構造初期計画システムの計算項目

- ・板と防撓材の強度評価
 - ・縦曲げ強度の評価
 - ・制約条件 $g_i(X)$ の計算
 - ・重量計算

										Initial Date	Date
										2023/4/12	2024/2/10
pal Dimension											
	L _{wl}	B _{wl}	D _{wl}	ds	L(NK)	L1		Seawater Rho		H.N.S.W	
	174	177	30	14.05	9.8	174	171.69		1.025		3769.7 ton
ment	Cb	Cb'	Lhold								
42500	0.8105	0.8214	140.2								
ip Section											
	b _{DH}	d _{DH}	b _{DH}	d _{TST}	b _{TST}	Bilge R	d _{CAM}			設計変数	
	1.64	26	9.98	2	2.43	4.8	1.5	0.55		従属	
	b _{HATCH}										
	1.0	20.4									
Condition											
	Volume			WEIGHT		Gamma		TSP _{FR}		TSP _{DH}	TSP _{TST}
	28.9	9229	8445	0.91508				0.85	2.55	2.55	5.1
								33.0	11	11	5
										12	0.81
											0.81
											2
General	Weight	Longi.strength	Constraint	BOTT	SIDE	INNBOTT	LBHD	TST	...	+	i

⇒ Excel で作成 船級協会の定める鋼船規則に基づいて評価

Bottom Shell																Bottom Longitudinal											
ID	X1	X2	Y1	Y2	b	Sp	K	tmin	C1	C2_min	C2	H_C16	L_C16	H_C14	L_C14	Overflow_F	B_f	k	144s	Data_h	1899	Area	lever	AI	AL^2	SI	1-(Zc/Zct)*10
1	0	2100	0	0	2100	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.338	16.89	12.48	14.62	11.90	13.83	10.5	12.82	14.48	14.20	30420	0	0	0	513305	0	
2	2100	6300	0	0	4200	0.750	0.78	11.65	1.000	3.338	3.338	16.89	12.48	14.62	11.90	13.83	10.5	12.82	12.67	12.50	52500	0	0	0	633594	-0.00931592	
3	6300	10300	0	0	4000	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.338	16.89	12.48	14.62	11.90	13.83	10.5	12.82	12.67	12.00	48000	0	0	0	516200	-0.001310295	
4	10300	15500	0	0	3200	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.336	16.89	12.48	14.62	11.90	13.83	10.5	12.82	12.67	12.00	38400	0	0	0	465000	-0.001370095	
5	15500	18500	0	0	0	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.338	16.89	25	14.62	11.90	13.83	10.5	3.50	11.65	11.20	0	0	0	0	0	0	
6	18500	15500	0	0	0	0.750	0.78	11.65	1.000	3.338	3.338	16.89	25	14.62	11.90	13.83	10.5	3.50	11.65	11.50	0	0	0	0	0	0	
7	15500	13800	0	0	0	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.338	16.89	25	14.62	11.90	13.83	10.5	3.50	11.65	11.50	0	0	0	0	0	0	
8	13800	13500	0	0	0	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.336	16.89	25	14.62	11.90	13.83	10.5	3.50	11.65	11.50	0	0	0	0	0	0	
9	13500	13800	0	0	0	0.750	0.78	11.65	1.000	3.335	3.338	16.89	25	14.62	11.90	13.83	10.5	3.50	11.65	11.20	0	0	0	0	0	0	
ID	X1	X2	Y1	Y2	b	BILGE_R	a	b																			
1	1300	15500	0	1640	1670	1.5	0.75	0.14	0.38	10.6775																	
Bottom Longitudinals																Bottom Longitudinal											
ID	X1	X2	I	Sp	K	h_C31	C	z_C31	C	h1_C14	h2_C14	h3_C14	z_C14	B_f	T_w	Tw	IT	Area	lever	AI	AL^2	SI	Zct	1-(Zc/Zct)*10			
1	750	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3F407	470	0	
2	1500	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
3	2250	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3F407	470	0	
4	3000	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
5	3750	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4500	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
7	5250	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3F407	470	0	
8	6000	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
9	6750	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	7500	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
11	8250	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3F407	470	0	
12	9000	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3L407	470	0	
13	9750	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	10500	0	2.22	0.75	0.78	14.324	6.549118	347.6561	1	14.62	11.20	13.83	205.775	348	2	250	90	9	15	3612	167	586004	9.8E-07	2.3F407	470	0	

Fig. 22 実際の構造初期計画システムの画面の一部

① 遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた構造最適化の有効性

遺伝的アルゴリズムは以下の特徴を有するため、船体構造の最適化のような複雑高度な非線形最適化問題の解法のひとつとして有効性である。

- ・自然界の生物進化, 優性遺伝の法則が動作原理
- ・ランダム操作による広域的多点探索のため局値に陥りにくい
- ・設計変数をコード化して取り扱うため、微分演算等が不要
- ・設計変数は連続関数でなく離散変数として扱われる
- ・ペナルティ法を用いた非線形最適化法の一種のため、制約条件付き最適化問題を無制約最適化問題として取り扱うことが出来る
- ・GAパラメータや進化戦略といった独特の概念があり、これらの設定にはある程度の経験が必要

② 遺伝的オペレーション

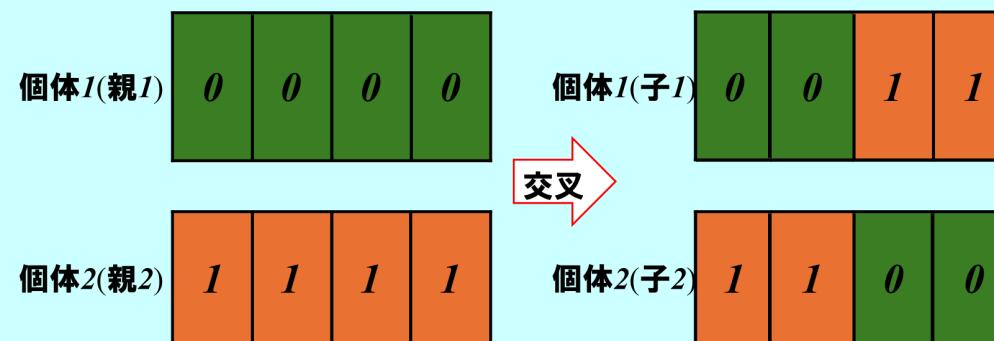
- 適応度 低 → 自然淘汰
 - 適応度 高 → 次世代へ

〈選択〉

適応度の高い個体を選択、保存(ルーレット選択、エリート保存)

〈交叉〉

選択された個体間で遺伝情報の組み換えによって新しい個体を生み出す(一点交叉)



〈突然変異〉

遺伝情報をランダムに書き換える

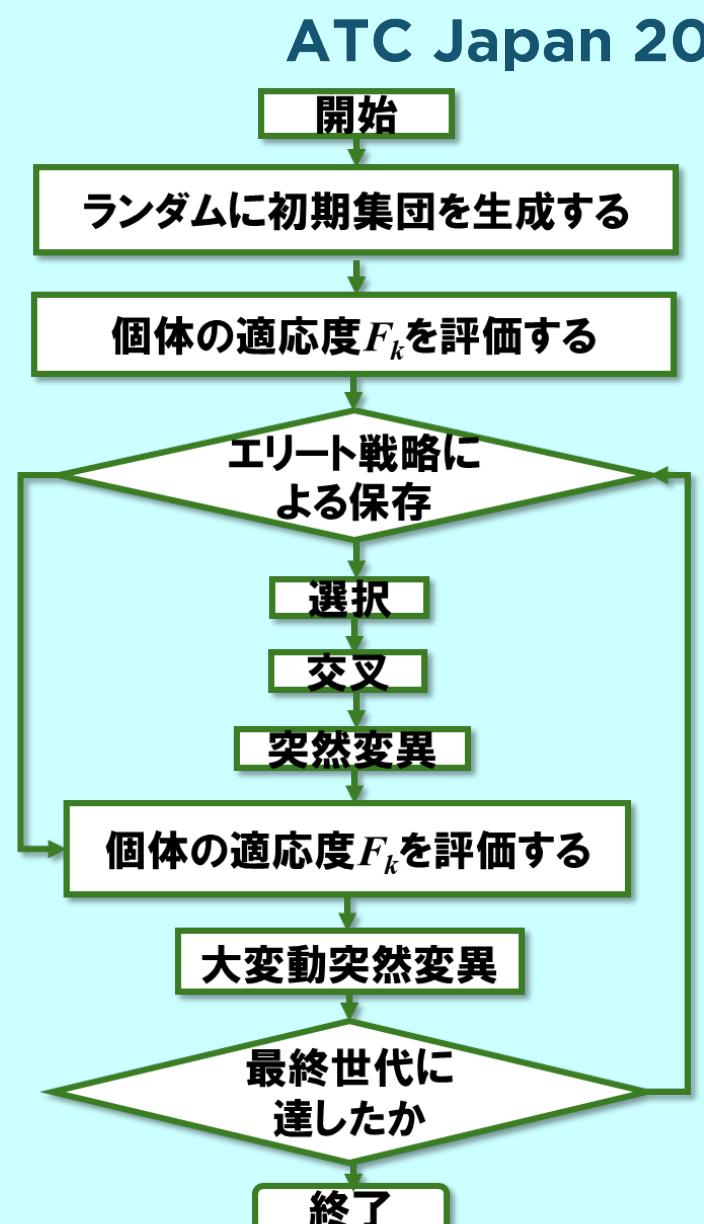


Fig. 23 遺伝的オペレーション

③ 設計変数 X_n

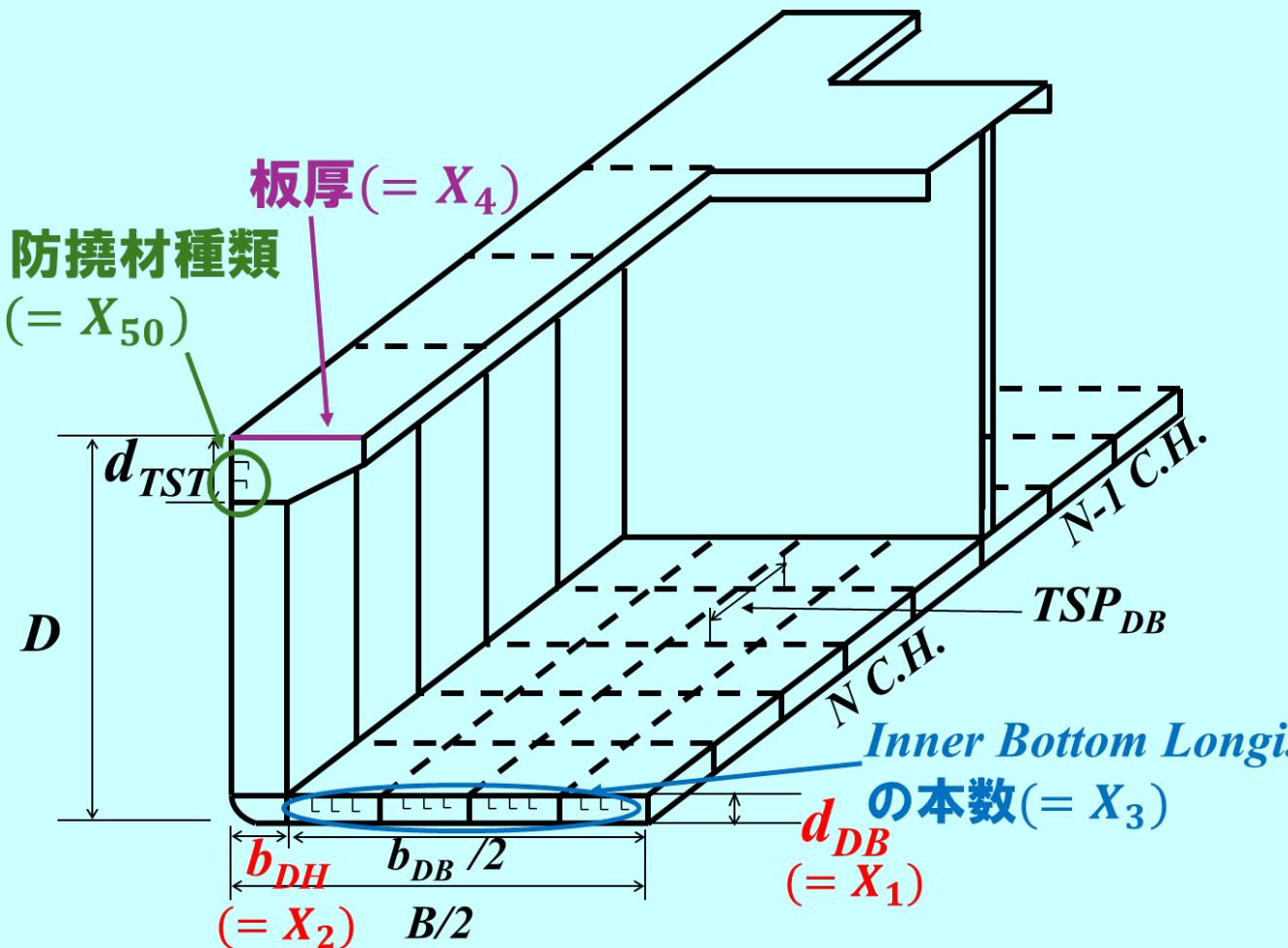


Fig. 24 ボックスシェイプバルクキャリアの船体中央部貨物倉

設計変数 X_n を細胞核内に存在する染色体の遺伝子として表現

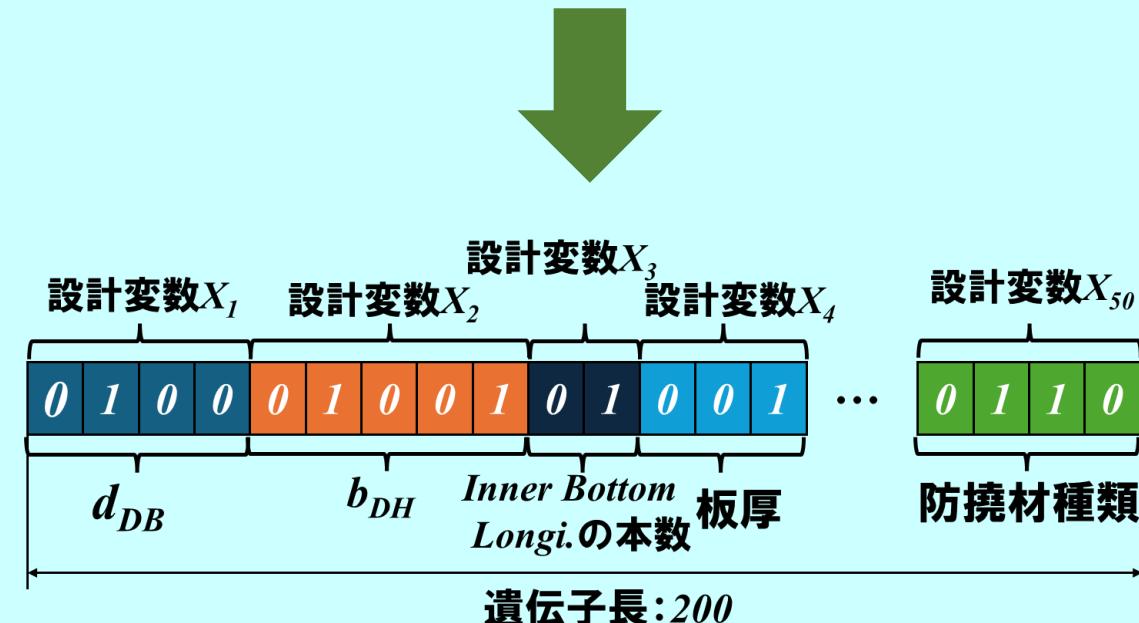
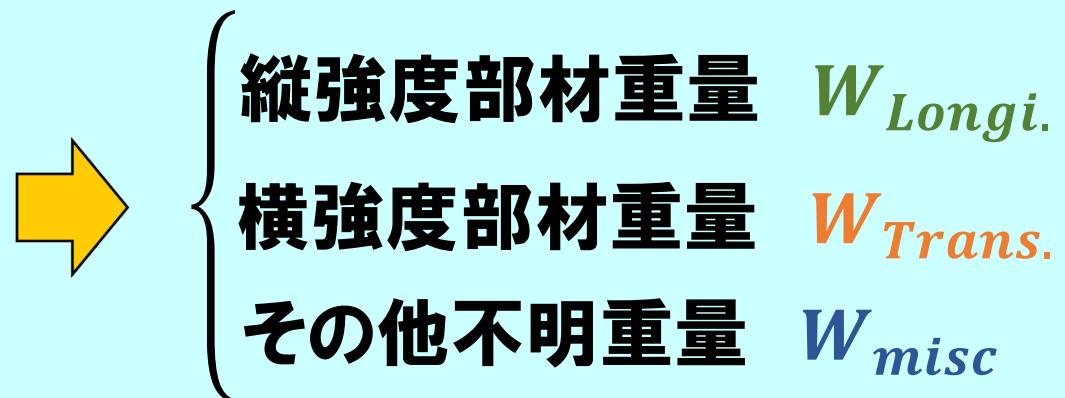


Fig. 25 遺伝子で表される設計変数

$2^{200} = 1.60 \times 10^{60}$ 通りの組み合わせ最適化問題

④ 目的関数 $f(X)$

貨物倉部重量 $W_{Hold}(X)$



$$\begin{aligned}
 f(X) &= W_{Hold}(X) \\
 &= \underline{\alpha \cdot W_{Longi.}} + \underline{\beta \cdot W_{Trans.}} + \underline{W_{misc.}} \\
 &= \underline{\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot A_{mid} \cdot l_{Hold}} + \underline{\beta(a \cdot n_{Floor} \cdot W_{Floor} + b \cdot n_{DSTRANS.} \cdot W_{DSTRANS.}} \\
 &\quad + \underline{c \cdot n_{TSTTRANS.} \cdot W_{TSTTRANS.} + d \cdot n_{HF} \cdot W_{HF}) \cdot n_{Hold}} + \underline{W_{misc.}}
 \end{aligned} \tag{19}$$

ここで、 α 、 β は落ち率を表す修正係数

⑤ 遺伝的アルゴリズム(GA)による最適化手法

一般に**不等式制約条件付最適化問題**は次のように表現される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimize} \rightarrow f(X) \\ \text{Subject to } g_i(X) \leq 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m) \\ X_j = (X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n) \\ \quad (j = 0, 1, \dots, n) \end{array} \right. \quad (20)$$

ここで、 $f(X)$: 最適化の**目的関数**

$g_i(X)$: **不等式制約条件関数**

X_j : **設計変数**

遺伝的アルゴリズムでは、**ペナルティ法**を用いて制約条件付最適化問題を無制約最適化問題に変換する。

$$\Phi_k(X) = f(X) \cdot \left[1 - C_p \cdot \sum_{i=1}^m \min(0, g_i(X)) \right] \quad (21)$$

ここで、 $\Phi_k(X)$: 個体 k の**無制約拡張目的関数**

C_p : **ペナルティ係数**

(2)式の最小化問題は無制約拡張目的関数の最大化問題に変換されなくてはならない。

$$F_k(X) = \Phi_{max}(X) - \Phi_k(X) \quad (22)$$

ここで、

$\Phi_k(X)$: 個体 k の**適応度関数**

$\Phi_{max}(X)$: 同世代の**無制約拡張目的関数**
の**最大値**

⑥ 実際に開発した構造初期計画システムの実演動画

Microsoft Excel ウィンドウ

メニュー: ファイル、ホーム、挿入、ページレイアウト、数式、データ、校閲、表示、自動化、開発、ヘルプ

ツールバー: マクロの記録、マクロ、相対参照で記録、マクロのセキュリティ、Visual Basic、マクロ、アドイン、Excel、COM、アドイン、挿入、デザイン、プロパティ、コードの表示、ソース、対応付けのプロパティ、拡張パック、データの更新、インポート、エクスポート、XML

セル:E15 の状態: E15

1. Principal Dimension													
L_{pp}	L_{wl}	B_{mld}	D_{mld}	ds	$L(NK)$	L1			Seawater Rho		H.N.S.W		
174	177	30	14.05	9.8	174	171.69			1.025		3777.4	ton	
Displacement	Cb	Cb'	Lhold										
42500	0.810528865	0.821434111	140.2										
2. Midship Section													
d_{DB}	b_{DB}	d_{DH}	b_{DH}	d_{TST}	b_{TST}	Bilge R	d_{CAM}				設計変数		
1.64	25.5	8.68	2.25	3.73	4.8	1.5	0.55				従属		
d_{HS}	b_{HATCH}												
2.4	20.4												
3. Load Condition						4. Spacing							
L_{CH}	Volume	WEIGHT	Gamma	TSP_{FR}	TSP_{DB}	TSP_{DH}	TSP_{TST}	LSP_{DB}	LSP_{Side}				
28.9	8872.320317	8445	0.95184	0.741	2.223	2.223	4.446	0.750	0.746				
9260				38.0	13	13	6	13	4				
5.Ms				6. Longitudinal Strength									
	INTACT	FLOODING		y_B	y_D	f_{BH}	f_{DH}	Z_{Mreq}					
				5.00	0.40								

⑦ 設定したGAパラメータと船殻重量の進化履歴

<検討に用いるGAパラメータ>

- ・1個体の遺伝子長 : 200
- ・1世代当たりの個体数 : 100
- ・最大世代数(終了条件) : 830
- ・交叉確率 p_c : 0.8
- ・突然変異確率 p_m : 1/200
- ・エリート保存数 : 2

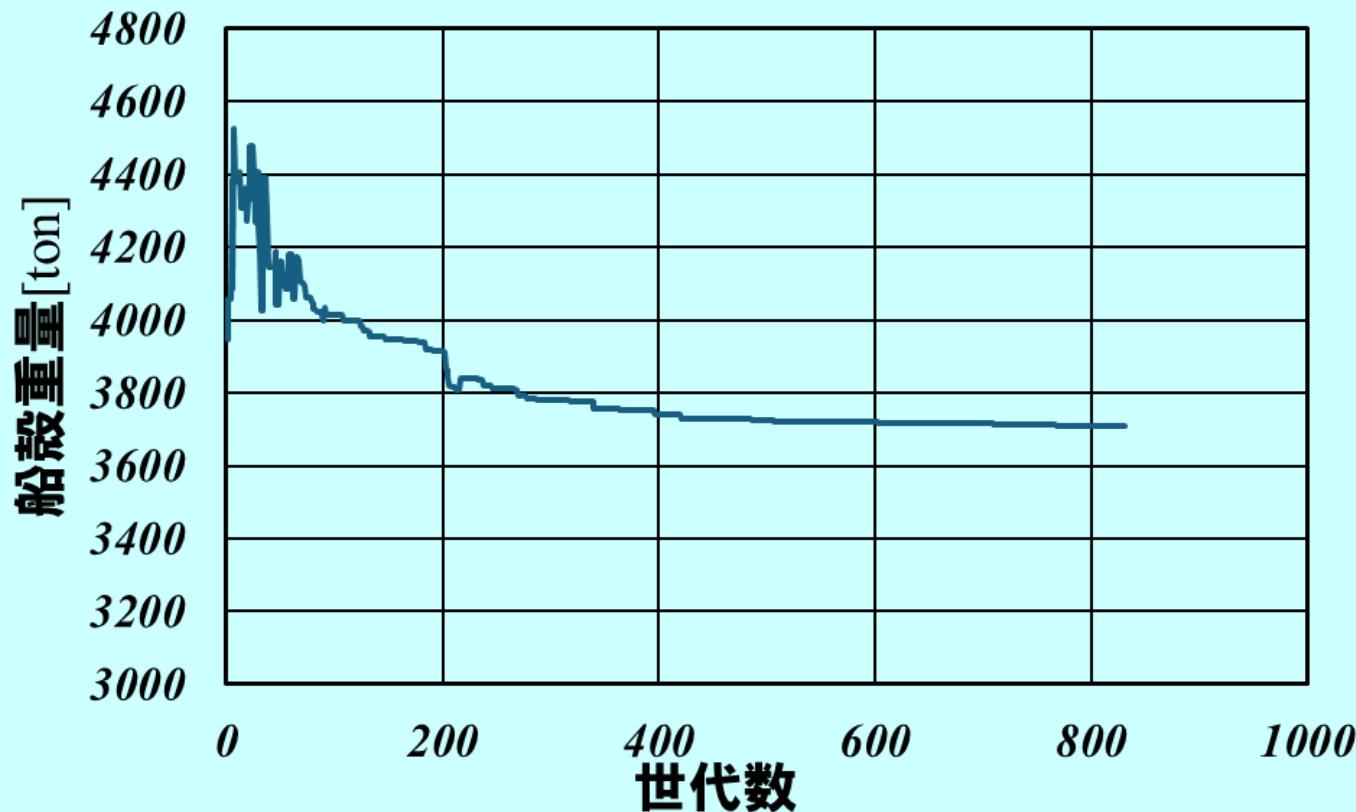


Fig. 26 船殻重量の進化履歴

検討する
防撓パネル

1世代あたりの
個体数

最大世代数

総試設計数

$$65 \times 100 \times 830 = 5,395,000$$

⑧最適化前後の船体中央横断面形状の比較（座屈評価未考慮）

最適化前（試設計）

$W_{Hold}(X) = \text{約}3770ton$

設計所要時間：約4か月

最適化後（GA）

$W_{Hold}(X) = \text{約}3709ton$

設計所要時間：約1時間半

約1.6%軽い船殻構造を創生！

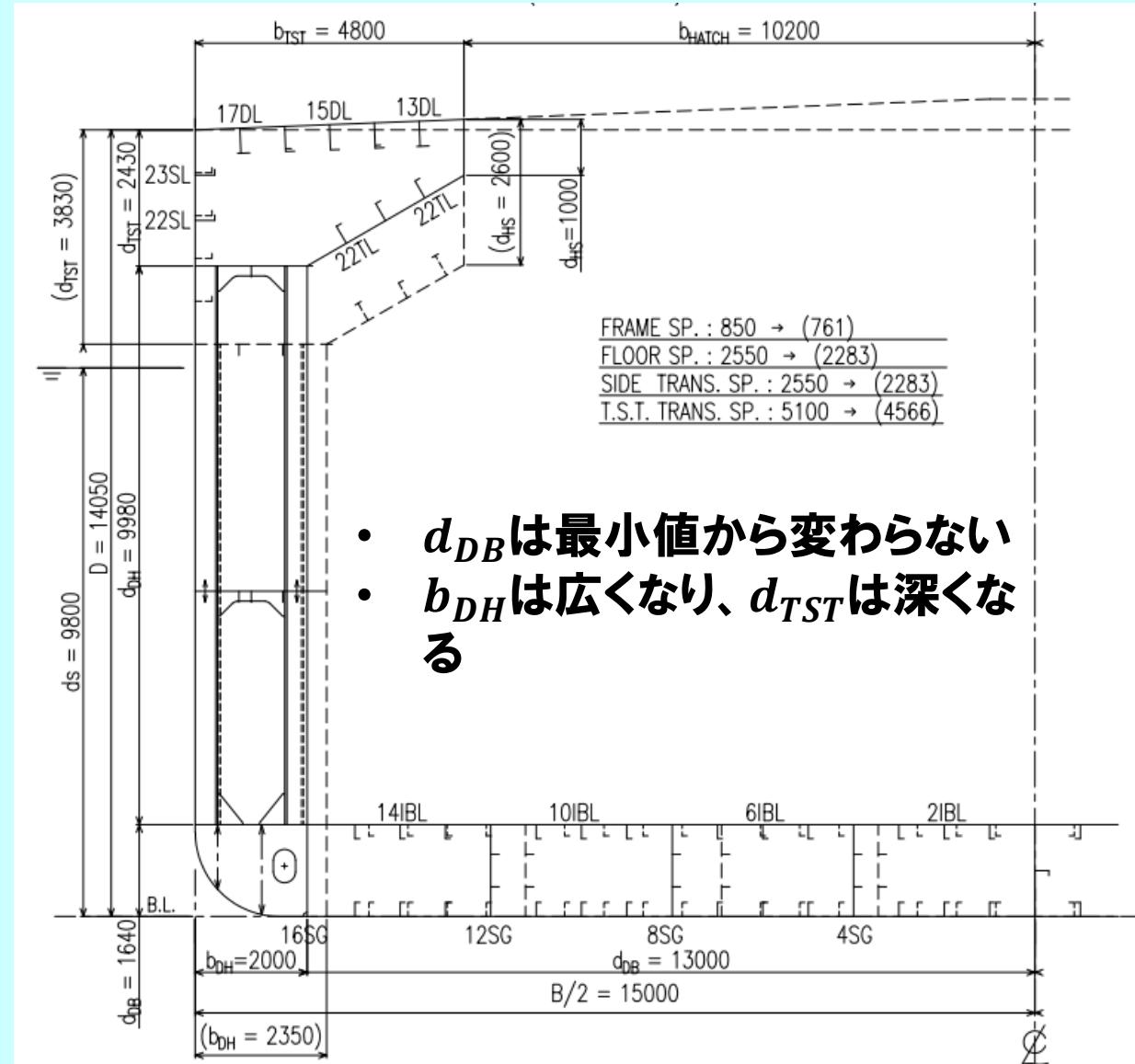
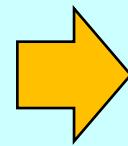


Fig. 27 最適化前後の船体中央横断面形状

SSEM.SPBUCKとFEMで防撓パネルの弾性座屈応力を計算して比較した



SSEM.SPBUCKとFEMの弾性座屈応力はよく一致することを確認した

SSEM.SPBUCKを用いて防撓パネルの弾性座屈強度に及ぼす防撓材の影響を調査した

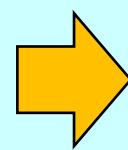


防撓パネルの弾性座屈現象は複雑であり、統一的な座屈補強指針の策定は難しい



逐次SSEM.SPBUCKで計算することで防撓材の影響を考慮できることを確認した

NNとSSEM.SPBUCKを組み合わせてAISSEM.SPBUCKを開発した



開発したAISSEM.SPBUCKの汎化性能は高く、防撓パネルの迅速な座屈強度計算が可能となった

今回はSSEM.SPBUCKの計算結果を使用してサロゲートモデルを作成したが、FEMの解析結果を使用しても作成可能。その場合、データ数の確保が課題。

