ベイジアンニューラルネットワークを用いた多層溶接継手における溶接変形予測

大阪公立大学
Osaka Metropolitan University

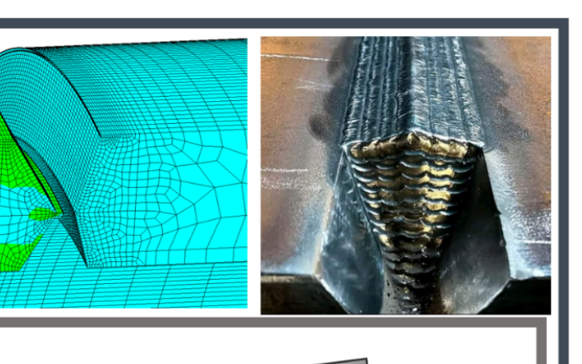
大阪公立大学　原田 青空，佐々木 駿伍，前田 新太郎，生島 一樹，柴原 正和

研究背景

発電所の保全

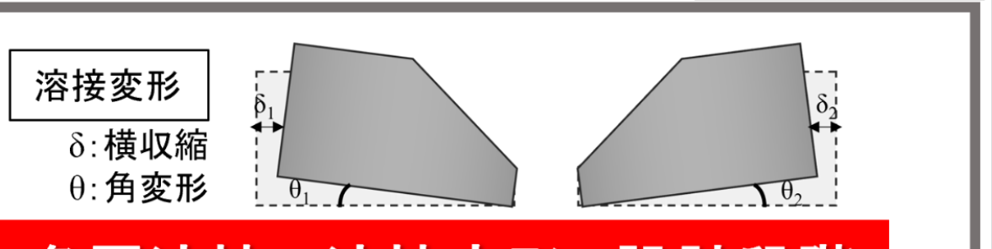
原子力プラントで使用される部材
→**大型構造物**のため，**厚肉鋼板**を使用

多層溶接が行われる



多層溶接が抱える問題

多層溶接による溶接変形 & 残留応力の発生
- 応力腐食割れの発生，疲労亀裂
- 溶接後のひずみ取りが困難
- 製品精度の悪化


溶接変形
δ:横収縮
θ:角変形
δ_1
θ_1
δ_2
θ_2

多層溶接の溶接変形を設計段階で把握しておくことは重要

多層溶接解析での問題点

FEM解析での多層溶接解析は膨大な**計算時間**
- 継手の解析には数週間かかる
- それぞれのパスが非線形に変形

設計段階での変形量の予測は困難

本研究

簡易力学モデルと機械学習を組み合わせることでFEM解析を用いない
設計に使える瞬時に計算可能な溶接変形予測手法を確立

多層溶接による変形を設計段階で予測可能にし、
モノづくりの手戻りを防ぐ**フロントローディング**の実現

多層溶接時の溶接変形サロゲートモデルの開発

溶接変形サロゲートモデル：ベイジアンニューラルネットワーク(BNN) + 簡易力学モデル

簡易力学モデル

固有変形のモデル化

固有収縮量S_0^*　溶接部の収縮量(パス毎)

$$S_0^* = \xi^* \times \frac{\alpha Q}{c\rho h^*}$$

溶接部の変位量δ

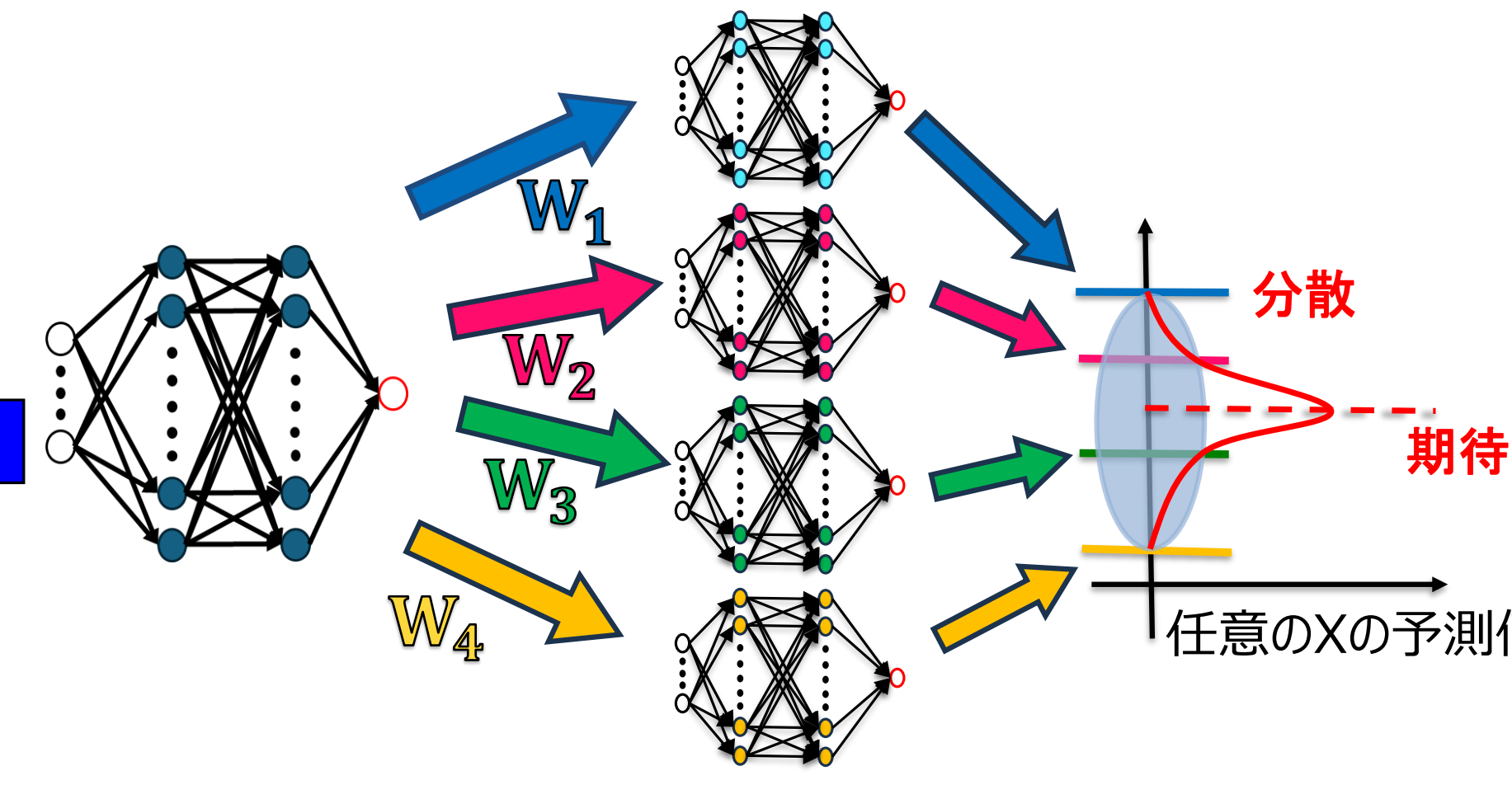
$$\delta = \frac{fB_w}{AE} - S_0^*$$

α:線膨張係数
Q:入熱量
c:比熱
ρ:密度
h^*:層の厚さ
f:溶接部の内力
ξ^*:固有収縮率

溶接力学に基づく簡易力学モデル

物理パラメータに関連性を考慮

ベイジアンニューラルネットワーク(BNN)


W_1
W_2
W_3
W_4
分散
期待値
任意のXの予測値

重みが単一ではなく確率分布に従う

BNNによる出力の信頼性の評価

本研究の内容：
予測時にFEM解析を介さない溶接変形予測手法（サロゲートモデル）の構築

V開先多層溶接継手における簡易力学モデル

多層溶接のモデル化

各パスの溶接金属を棒としてモデル化→溶接部の収縮量(固有収縮量)を考えることが可能

溶接部の変形量

固有収縮量S_0^*　溶接部の収縮量(パス毎)

$$S_n^* = \xi^* \times \frac{\alpha Q}{c\rho h^*}$$

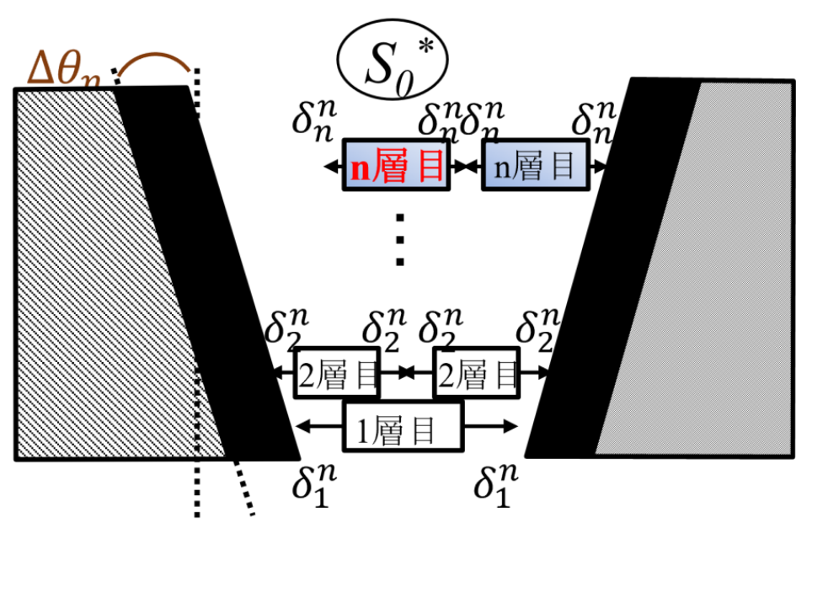
溶接部の変位量δ

$$\delta = \frac{fB_w}{AE} - S_0^*$$

α:線膨張係数
Q:入熱量
c:比熱
ρ:密度
h^*:層の厚さ
f:溶接部の内力
ξ^*:固有収縮率

新たに固有収縮率 ξ^*を追加
→剛体拘束や残留応力を考慮

V開先における横収縮量，角変形量


$\Delta\theta_n$
S_0^*
δ_n^n
n層目
n層目
δ_2^n
2層目
2層目
1層目
δ_1^n

- 力のつり合い
- モーメントのつり合い
- 伸びの関係

より算出

横収縮増分

$$\Delta\delta_n = -\frac{S_n^*}{n}$$

角変形増分

$$\Delta\theta_n = -\frac{(n-M)}{\sum_{k=M}^{n} a_k} \frac{S_n^*}{h_n}$$

力学モデルによるパスごとの変形量の推移

固有収縮率を一定と仮定しパスごとに横収縮量を計算した結果

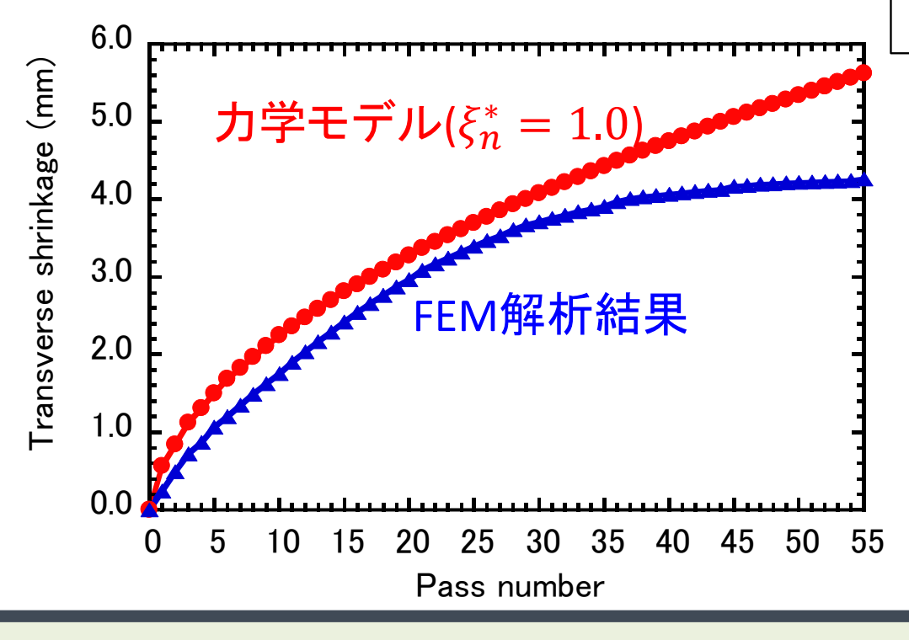
用いた簡易力学モデル式

固有収縮量

$$S_n^* = \xi^* \times \frac{\alpha Q}{c\rho h^*}$$

横収縮量

$$\Delta\delta_n = -\frac{S_n^*}{n}$$



固有収縮率を一定と仮定

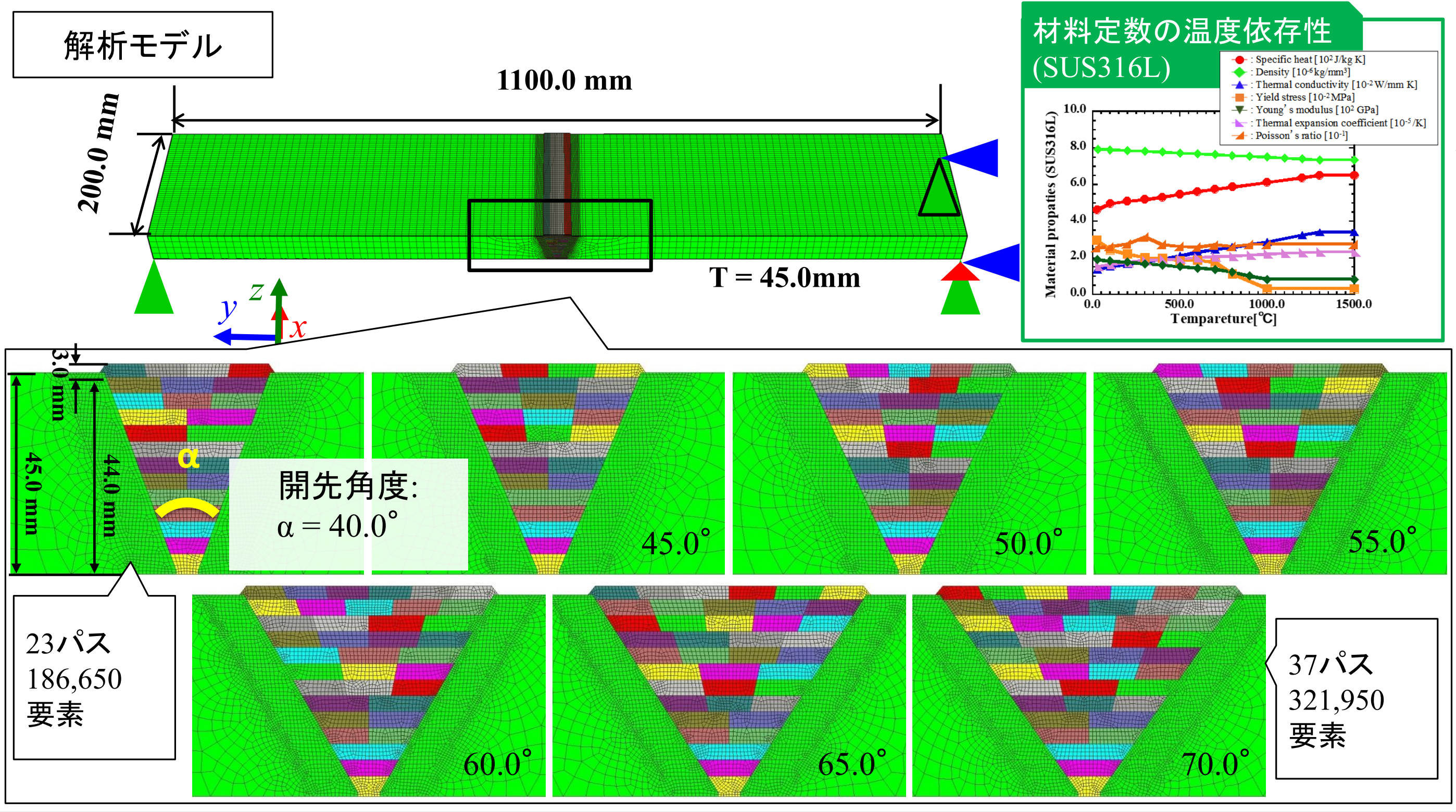
パス数が小さいときは
FEM解析結果と
良好に一致

簡易力学モデルにより，おおよその変形予測が可能

学習におけるデータベースの構築と学習対象

DB自動作成システムの構築

解析モデル


1100.0 mm
200.0 mm
T = 45.0mm
y
z
x
材料定数の温度依存性
(SUS316L)
Specific heat [10^2 J/kg K]
Density [10^{-6}kg/mm^3]
Thermal conductivity [10^{-2} W/mm K]
Yield stress [10^2MPa]
Young's modulus [10^2 GPa]
Thermal expansion coefficient [10^{-5}/K]
Poisson's ratio [10^{-1}]
Material propaties (SUS316L)
Tempareture[℃]
3.0 mm
45.0 mm
44.0 mm
α
開先角度:
α = 40.0°
45.0°
50.0°
55.0°
60.0°
65.0°
70.0°
23パス
186,650
要素
37パス
321,950
要素

V開先（X開先）の多層溶接継手において
開先形状や板形状などを任意のメッシュモデルを**自動的に**作成可能

学習対象

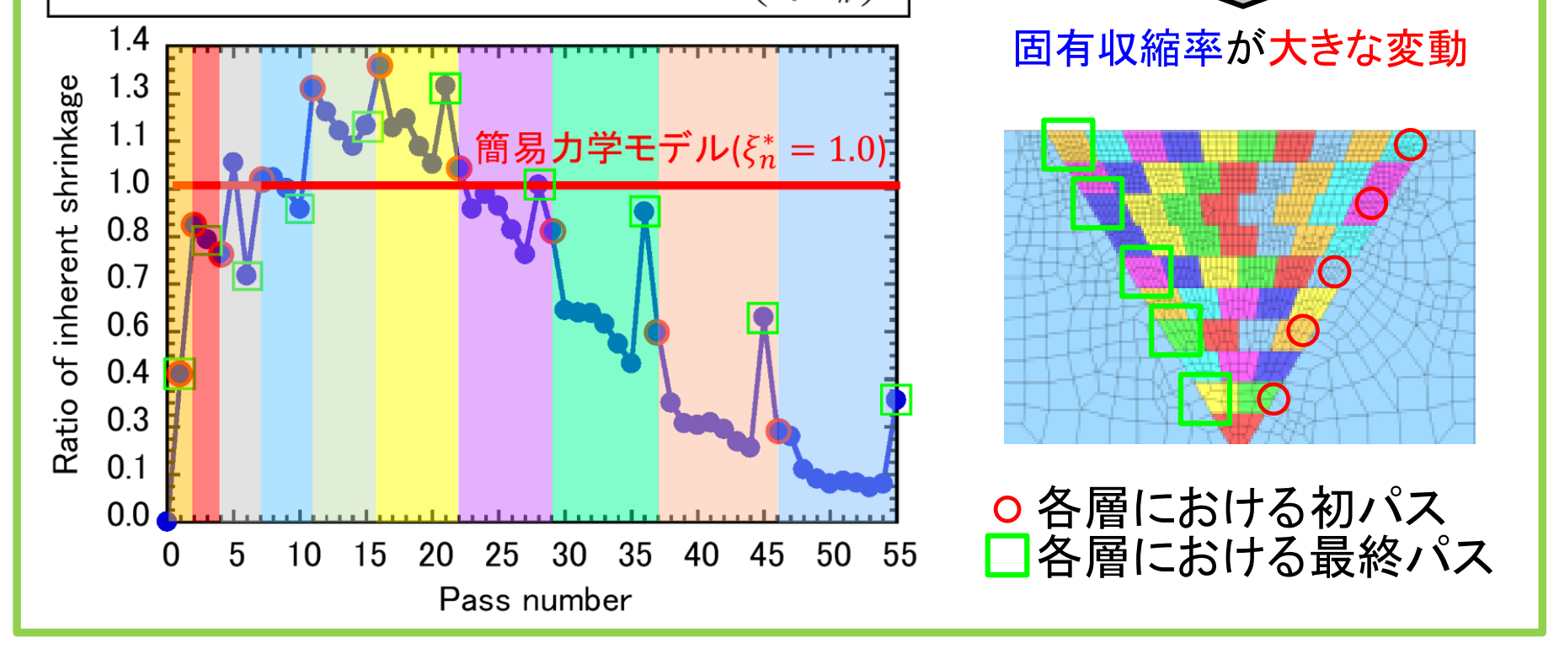
固有収縮率を固定した簡易力学モデル
→パスの増加につれ，精度が不十分

パスごとに変化する固有収縮率をBNNにより推定

固有収縮率ξ_n^*の推移

固有収縮率の計算式　$\xi_n^* = \Delta\delta_{FEM} / \left(\frac{\alpha Q_n}{c\rho h_n}\right)$

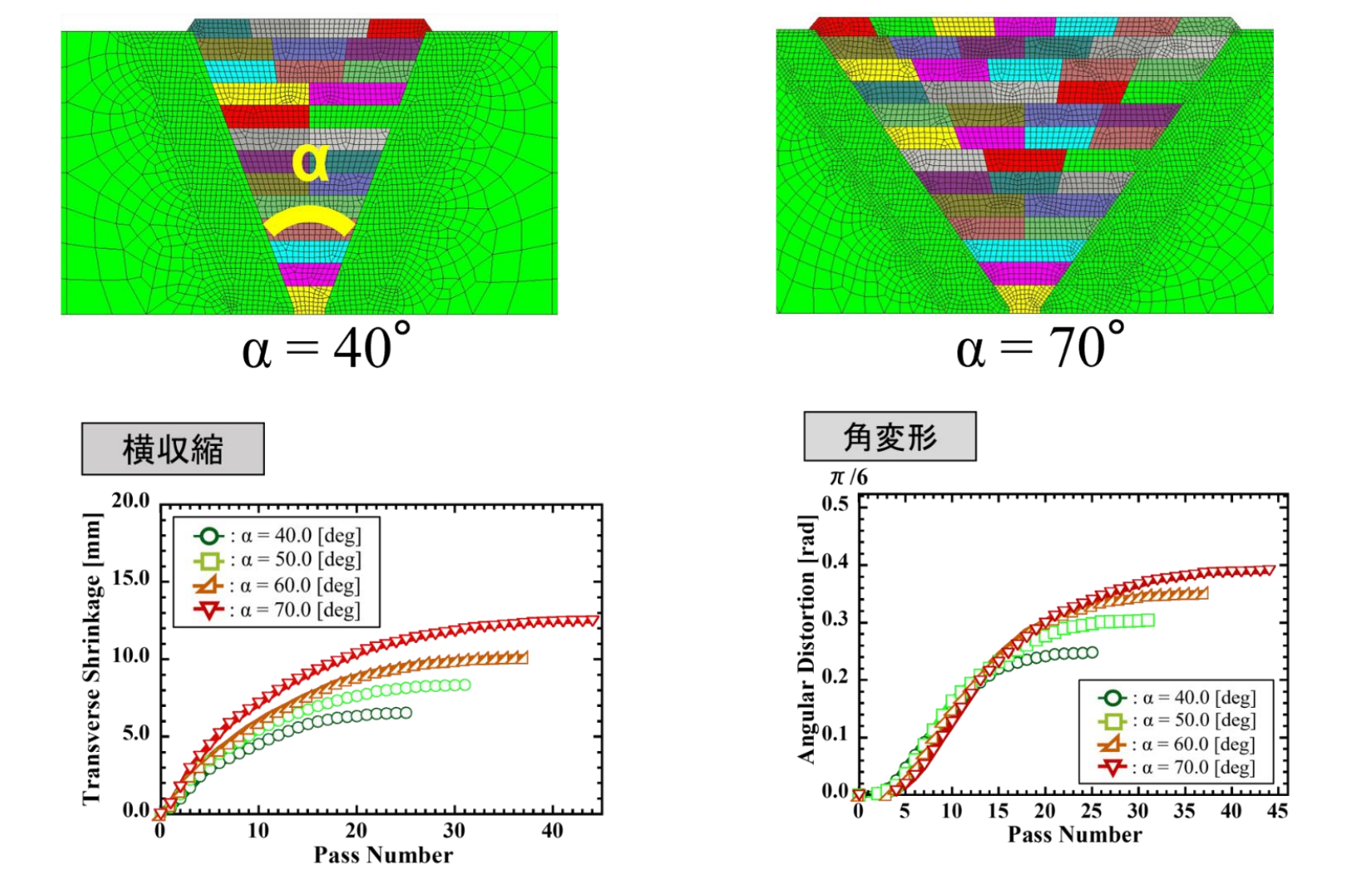
V開先では残留応力の影響 大
固有収縮率が大きな変動



○ 各層における初パス
□ 各層における最終パス

本研究で提案する溶接変形サロゲートモデルの概要

開先形状の決定

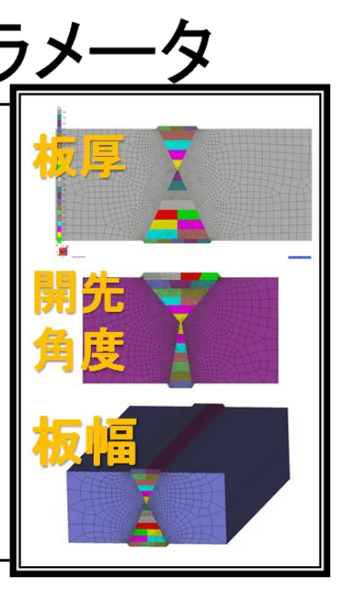


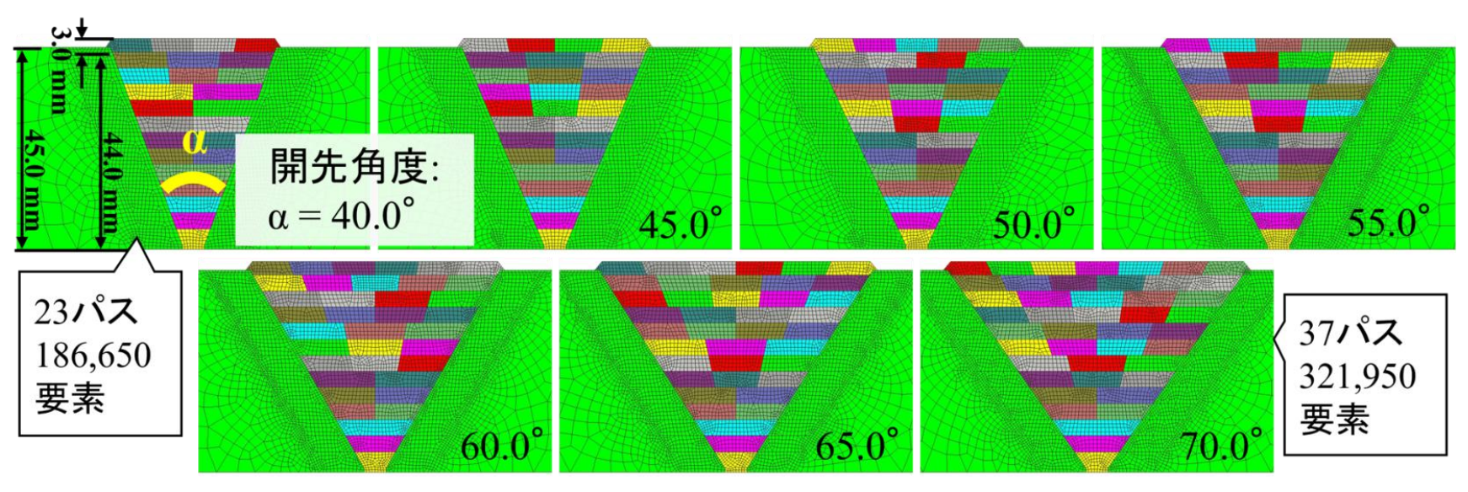
開先角度を大きくする → パス数の増加により変形量が大きくなる

開先形状の変数を開先角度に決定

③自動メッシュ作成システム

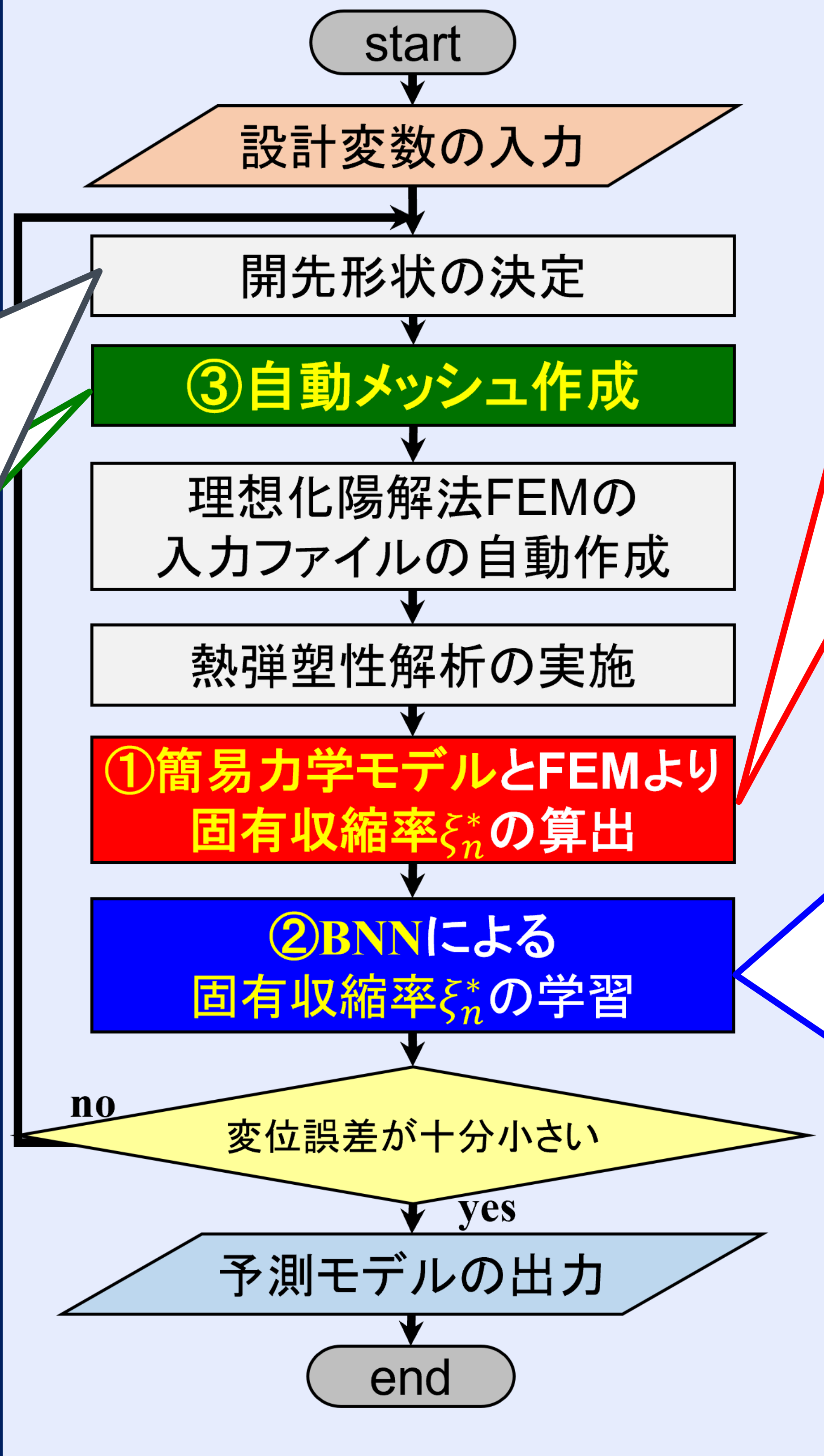
開先形状の決定に必要なパラメータ
- 開先角度
- 開先深さ(X開先)
- ギャップ幅
- ギャップ高さ
- パス数
- 各層厚さ
- パスのアスペクト比




3.0 mm
45.0 mm
44.0 mm
α
開先角度:
α = 40.0°
45.0°
50.0°
55.0°
60.0°
65.0°
70.0°
23パス
186,650
要素
37パス
321,950
要素

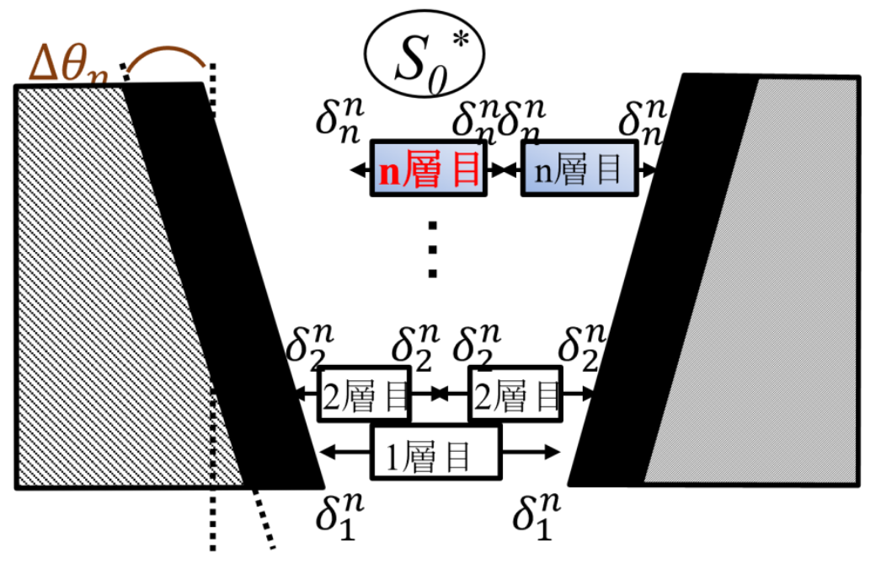
自動メッシュ作成システムにより
開先角度を変化させたメッシュモデルを瞬時に作成

溶接変形サロゲートモデルフロー



start
設計変数の入力
開先形状の決定
③自動メッシュ作成
理想化陽解法FEMの入力ファイルの自動作成
熱弾塑性解析の実施
①簡易力学モデルとFEMより固有収縮率ξ_n^*の算出
②BNNによる固有収縮率ξ_n^*の学習
変位誤差が十分小さい（no → 開先形状の決定 / yes ↓）
予測モデルの出力
end

①簡易力学モデル


$\Delta\theta_n$
S_0^*
δ_n^n
n層目
n層目
δ_2^n
2層目
2層目
1層目
δ_1^n

固有変形のモデル化

固有収縮量S_0^*　溶接部の収縮量(パス毎)

$$S_0^* = \xi^* \times \frac{\alpha Q}{c\rho h^*}$$

溶接部の変位量δ

$$\delta = \frac{fB_w}{AE} - S_0^*$$

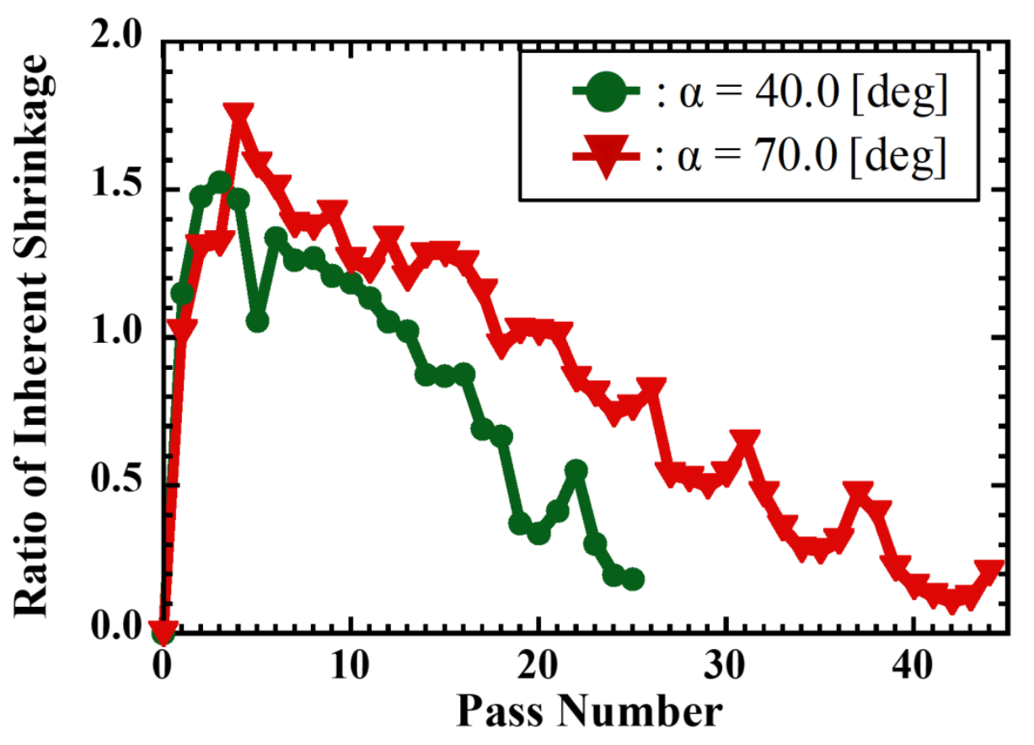
α:線膨張係数
Q:入熱量
c:比熱
ρ:密度
h^*:層の厚さ
f:溶接部の内力
ξ^*:固有収縮率

第n層溶接時における変位量

横収縮増分	角変形増分
$\Delta\delta_n = -\frac{S_n^*}{n}$	$\Delta\theta_n = -\frac{(n-1)}{\sum_{k=2}^{a} a_k} \frac{S_n^*}{h_w}$

※ $a_k = a_{k-1} + (k-1),\ a_2 = 1$

固有収縮率ξ_n^*の履歴



開先角度40°，70°におけるパスごとの変位量の**2ケース**のみデータベースに使用
→FEM熱弾塑性解析により得られた変位量から固有収縮率を算出

開先角度40°，70°における
パスごとの固有収縮率を学習

固有収縮率の計算式

$$\xi_n^* = \Delta\delta_{FEM} / \left(\frac{\alpha Q_n}{c\rho h_n}\right)$$

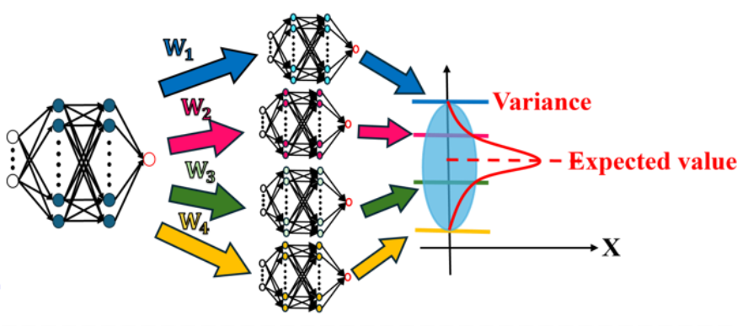
任意の開先形状での固有収縮率を推定し，
簡易力学モデルにより変形量を算出

②BNNによる変形予測

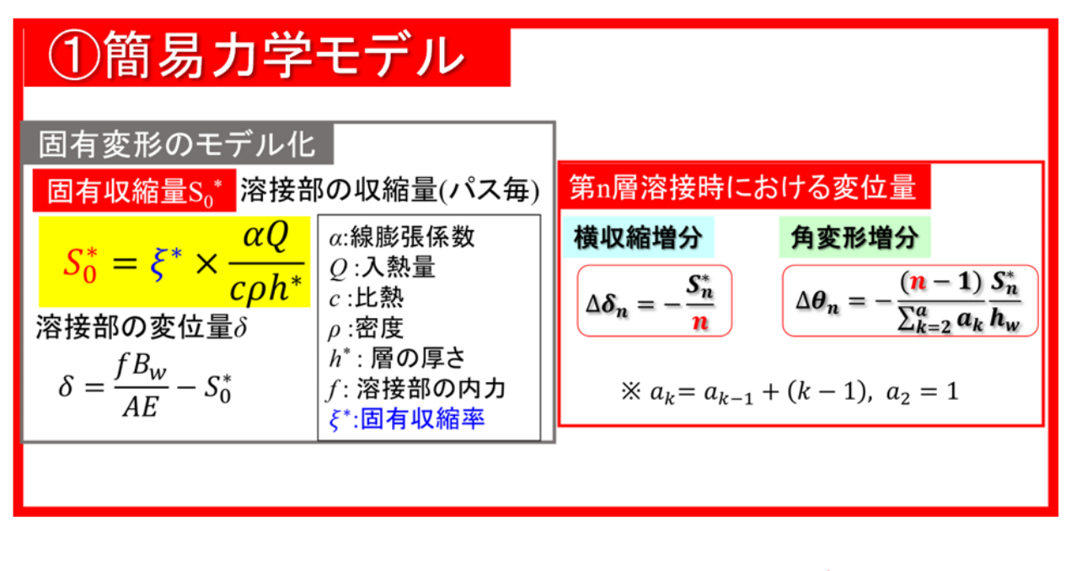
学習データ　開先角度40°，70°における固有収縮率

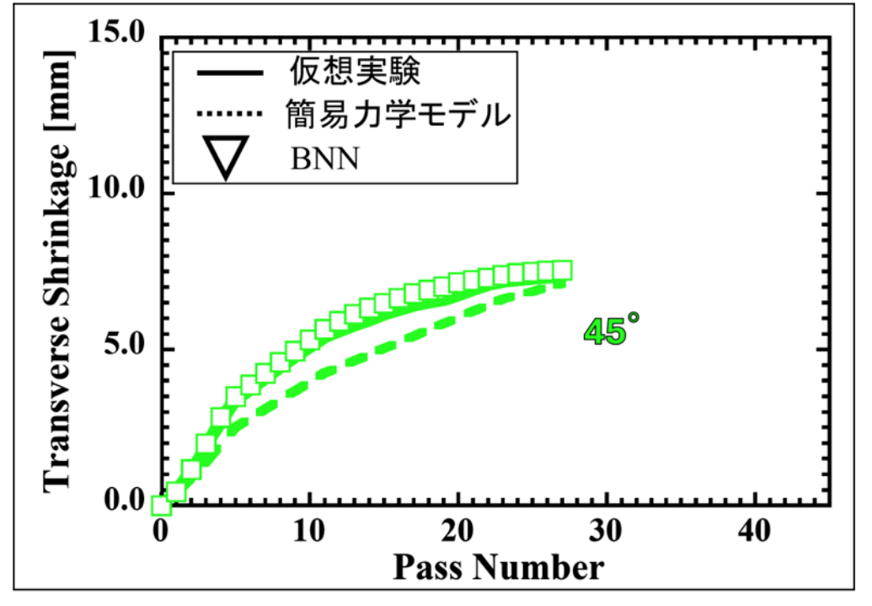
BNNによる学習

出力データ　開先角度45°，55°，65°における固有収縮率


Variance
Expected value
x

得られた固有収縮率から簡易力学モデルを用いて変形量を算出





固有収縮率を簡易力学モデルに代入

仮想実験値と良好に一致

簡易力学モデル＋BNNによる予測手法を構築

多層溶接による変形を設計段階で予測可能にし，モノづくりの手戻りを防ぐ
フロントローディング
の実現

結論

本研究では，原子力プラントなどの大型構造物に用いられる多層溶接継手に対し，溶接変形を事前に高精度かつ迅速に予測するサロゲートモデルを構築した．開先角度を変化させたV開先多層溶接継手に適用した結果，少量のデータでも高精度に予測が可能であることを確認した．これにより，多層溶接による変形を設計段階で予測可能にし，モノづくりをの手戻りを防ぐフロントローディングが実現可能となる