

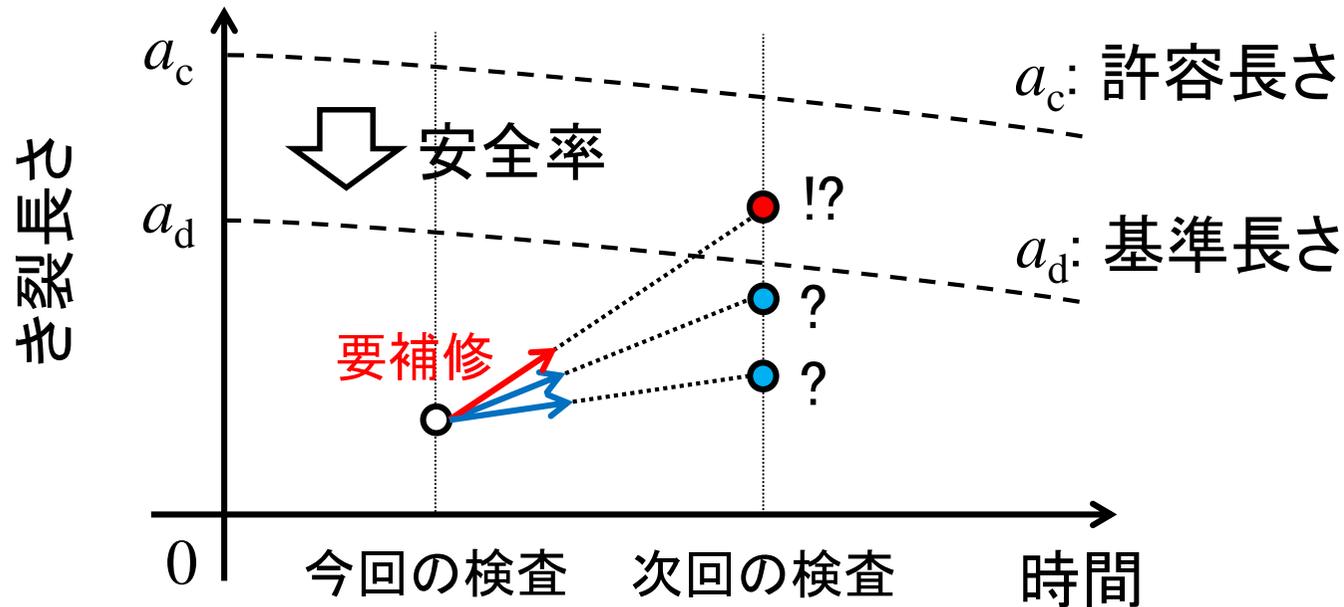
X線を利用した内部応力・ひずみの 可視化と加工精度の向上

2024年7月11日

工学院大学 工学部 機械システム工学科
准教授 小川 雅

供用期間中検査での余寿命予測

- ・疲労や応力腐食割れ (SCC) によるき裂の進展



き裂の検出 + その危険性の評価 → き裂進展速度の評価が必要

3次元応力分布の非破壊評価が求められる

現場での3次元応力の非破壊評価

応力

A. 外部応力: ○

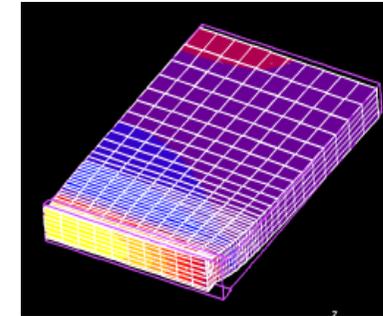
構造解析ツールにより, 大規模かつ
高精度な3次元応力の評価が可能

B. 残留応力: ✕

外力がなくても, 内部に残る応力

溶接:

- 残留応力が大
- 疲労の特大影響因子
- 職人技で, 個体差が大



有限要素法



溶接接合

⇒ 3次元残留応力: 現場での非破壊評価が困難

X線表面計測を利用した 内部応力・ひずみの可視化

中性子不要

残留応力 評価法	3次元	現場利用	非破壊
X線回折	× 表面のみ	○	○
中性子回折	○	× 専用施設のみ	○
切断法	○	○	× 破壊を伴う
本手法	○	○	○

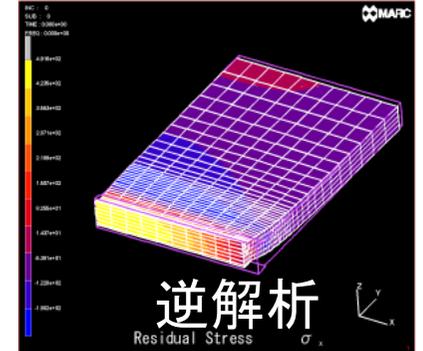
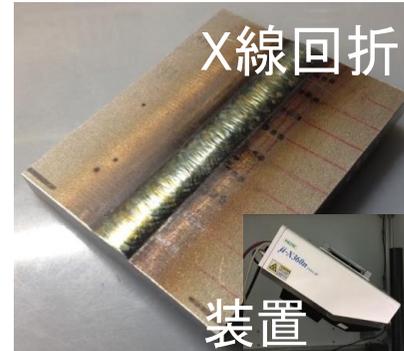
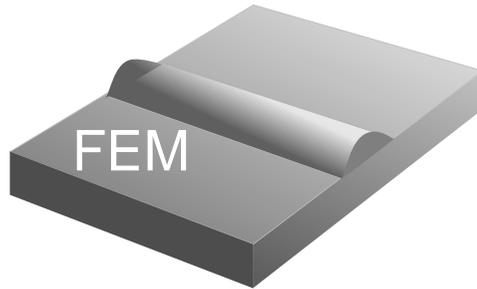
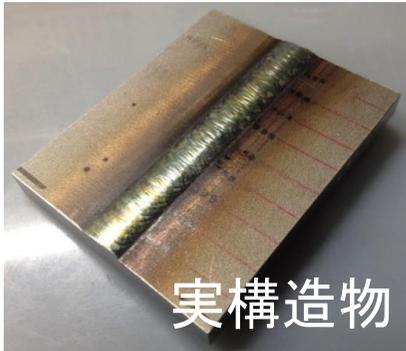
- 新たな装置が不要：
 - X線装置は既に現場利用済み
- パラメータの設定が容易：
 - 寸法と材質がわかればよい



溶接、溶射、表面改質、機械加工など
疲労寿命やSCC寿命を予測



本手法(内部応力・ひずみの可視化)の手順



① モデル化

② X線表面計測

③ 内部の可視化



寸法と材質がわかればよい。



中性子不要。非破壊に現場計測できる。

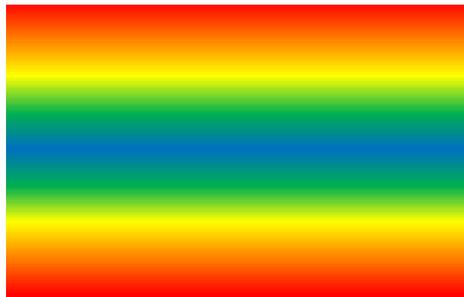


複雑な加工プロセスは不明でよい。FEMにより評価できる。

モデル化した範囲の全域の3次元評価が可能

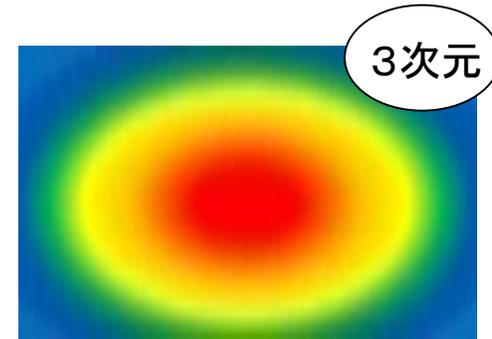
本手法(内部応力・ひずみの可視化)の原理

[原因]



順解析
FEMモデルに
固有ひずみを入力

[結果]



固有ひずみ (加工ひずみ)
3次元

逆解析

残留応力
弾性ひずみ
表面

X線回折で測定

完全非破壊

3次元の残留応力分布を表面の弾性ひずみから推定

固有ひずみの関数表現

- 表面の情報から, 全域の固有ひずみを推定

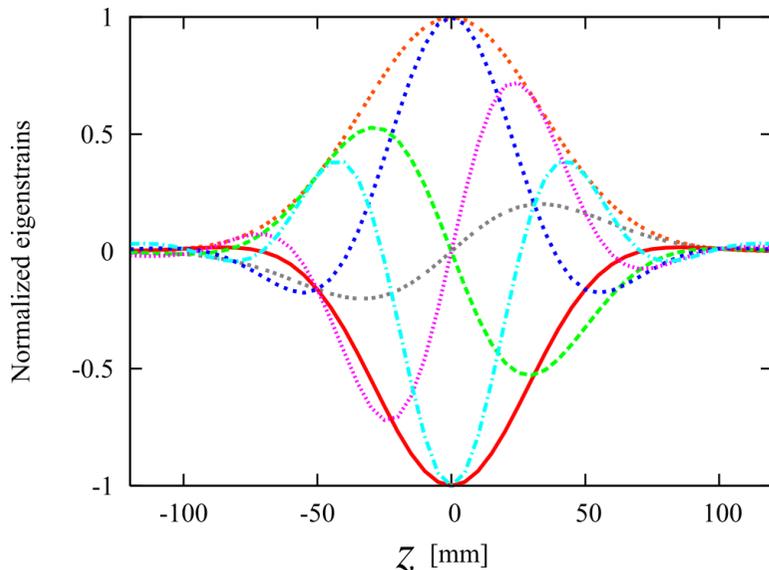
(2D)

(3D)

「計測数」 < 「未知数」 ⇒ 推定精度: 低

関数表現

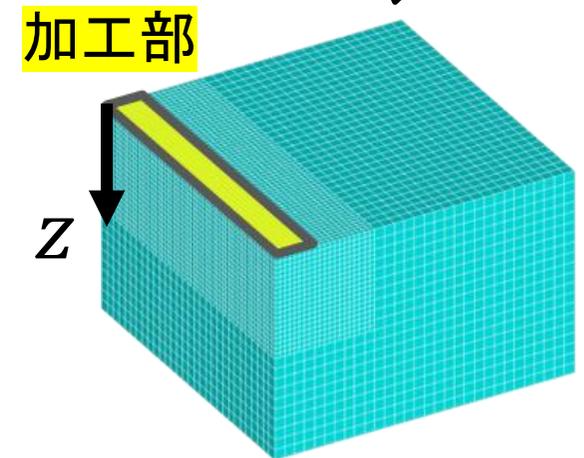
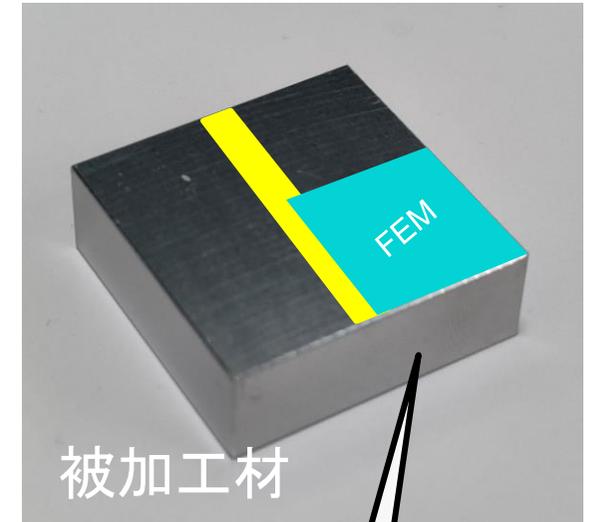
「計測数」 > 「未知数」 ⇒ 推定精度: 高



加工ひずみの発生箇所が特定可

加工ひずみが均一に発生

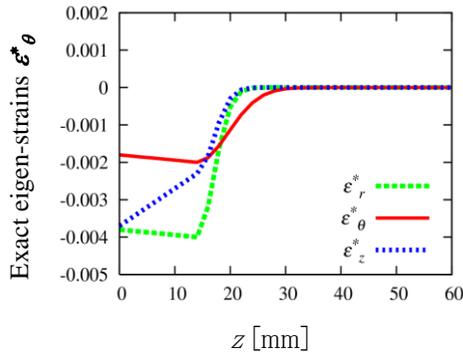
⇒ 推定しやすい



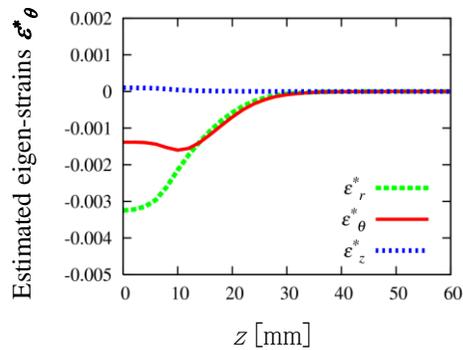
有限要素モデル

数値解析による本手法の推定精度の評価

[原因]



固有ひずみ(正解)



固有ひずみ(推定)

順解析



[結果]

残留応力(正解)

弾性ひずみ(正解)

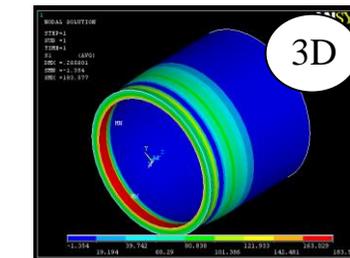
+ 測定誤差

計測弾性ひずみ

表面

逆解析

順解析

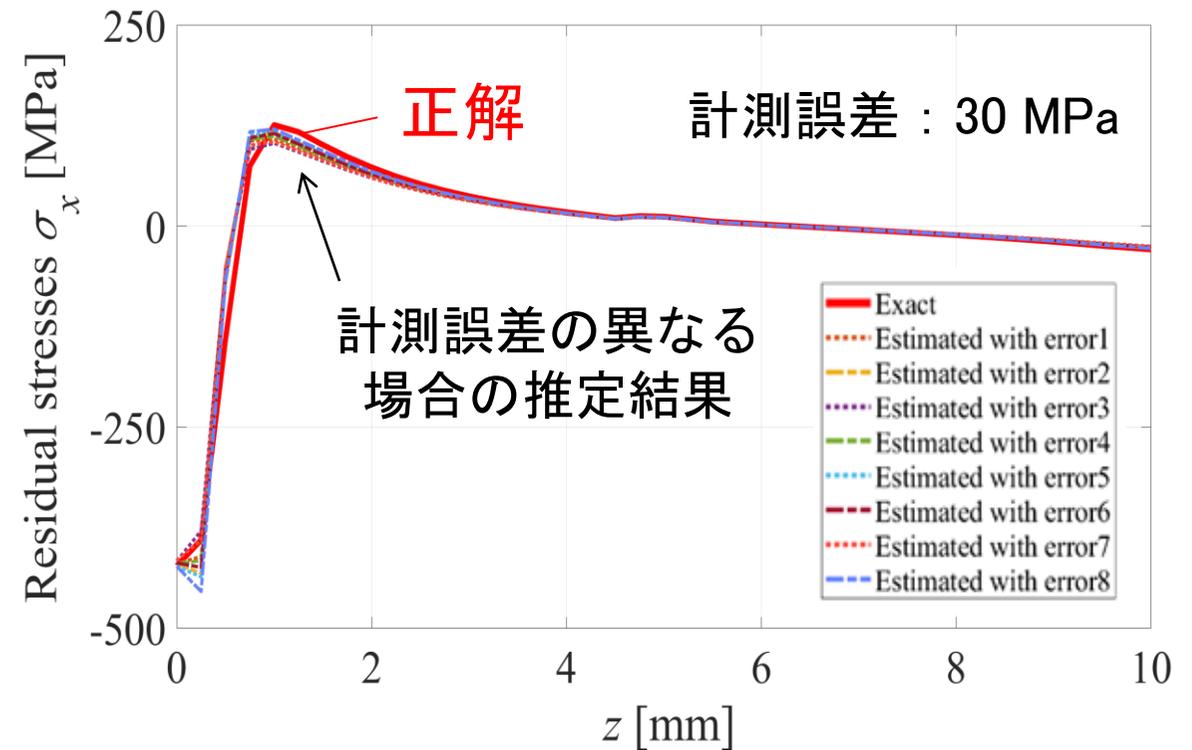
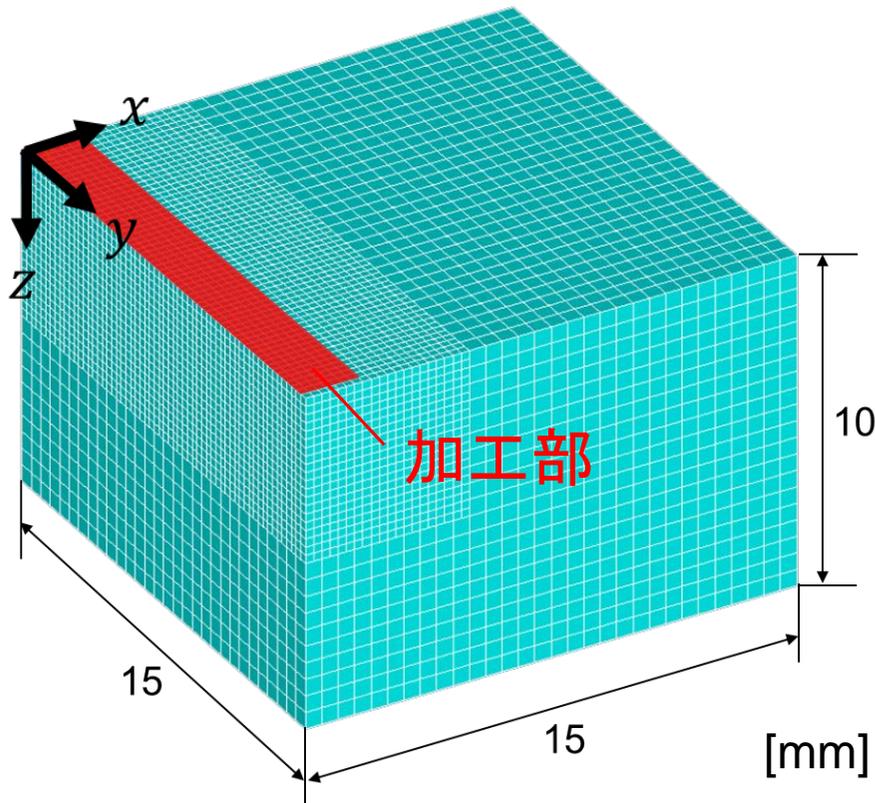


残留応力(推定)

比較

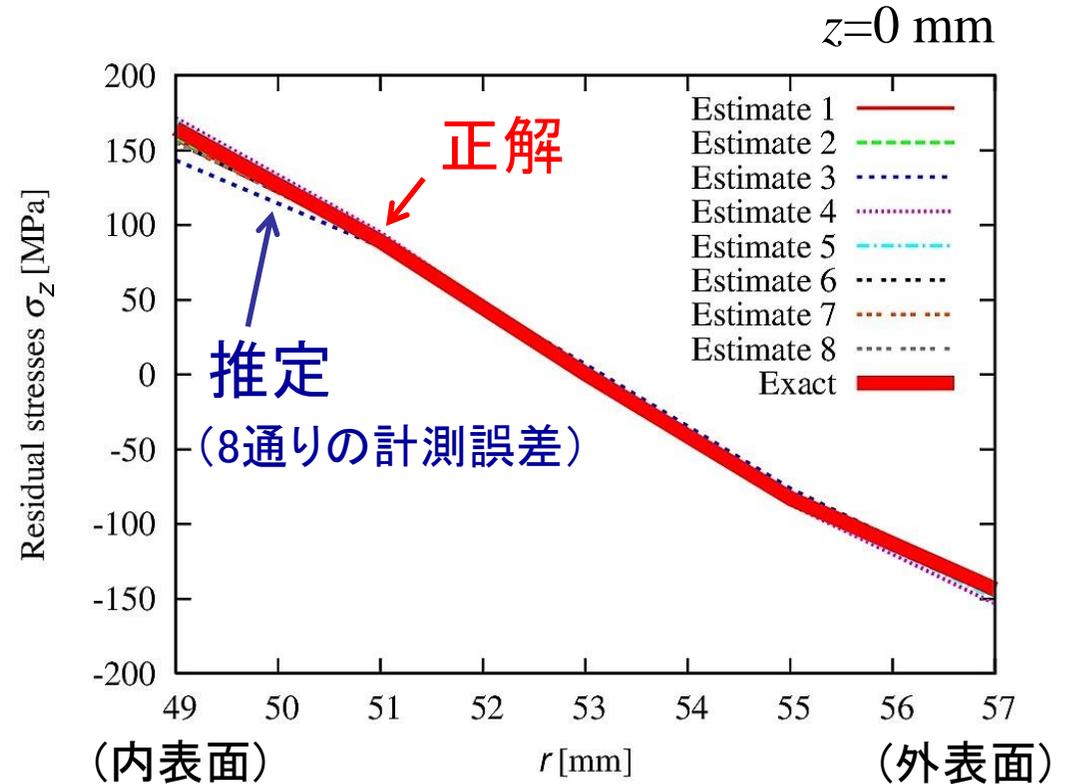
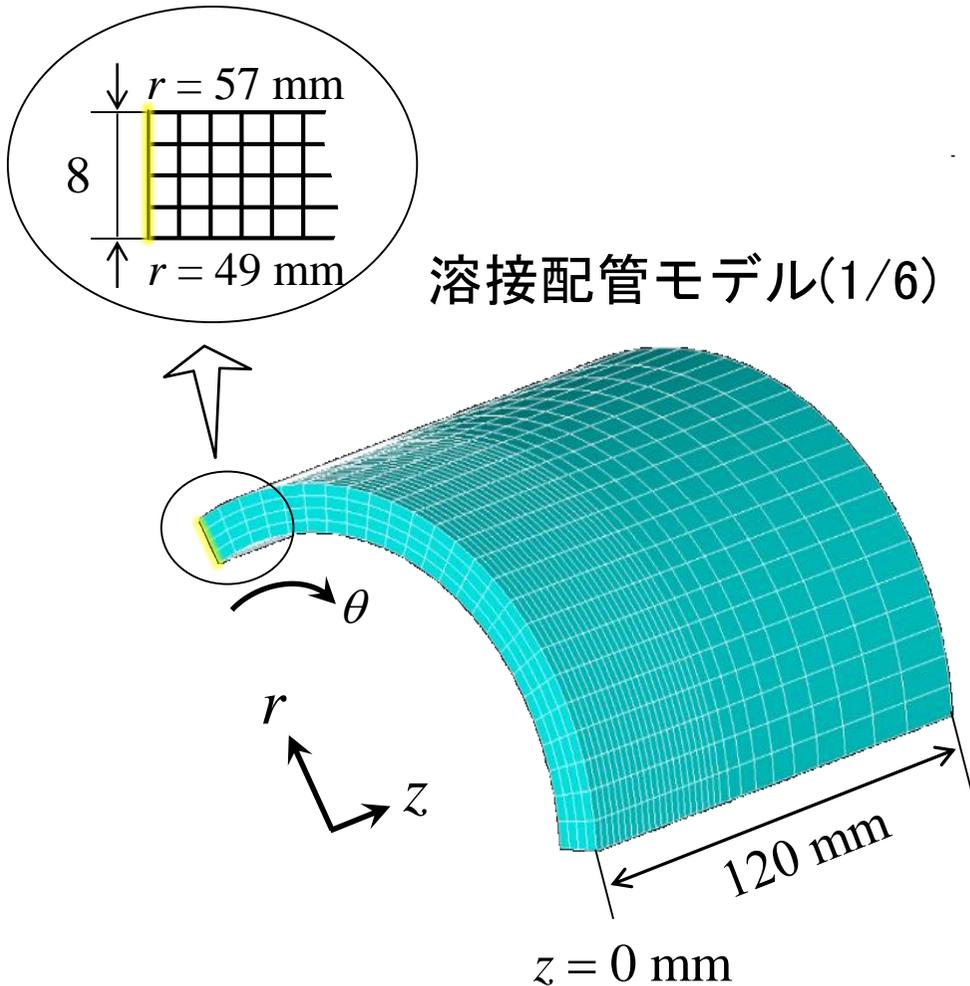
ピーニング処理材の残留応力評価

部材表面 ($z = 0$ mm) の弾性ひずみから 3次元残留応力を推定



現在、実際の表面加工材に対する実証実験を実施中。

溶接配管の3次元残留応力評価

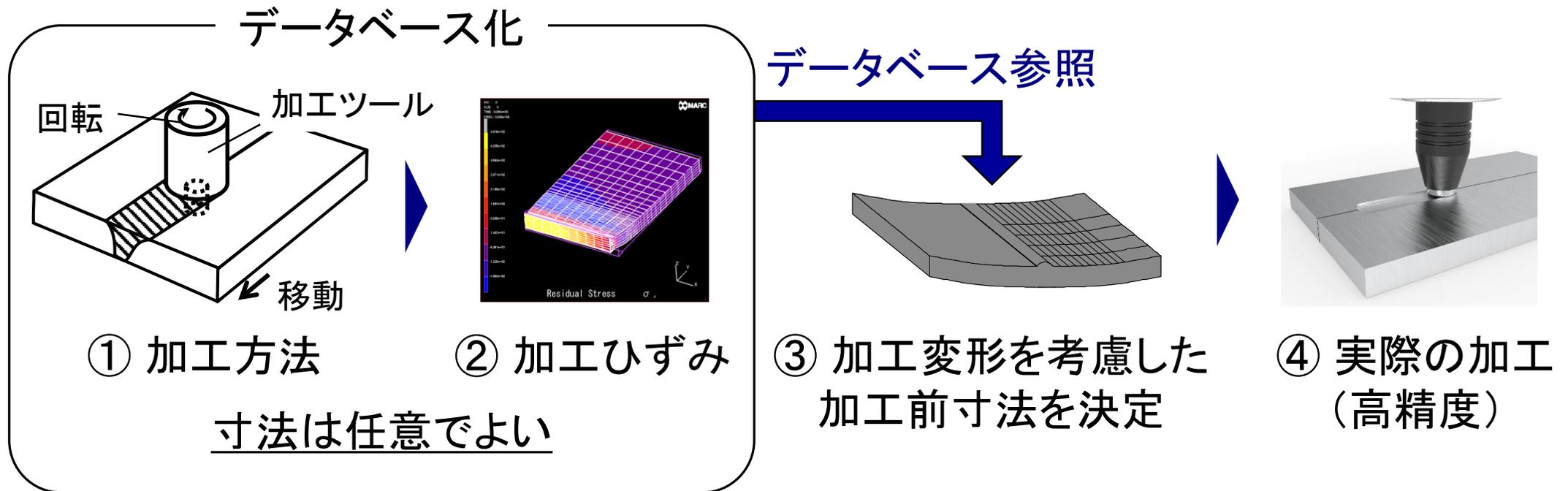


残留応力の正解と推定値

配管外表面を計測 → 内部の残留応力がわかる

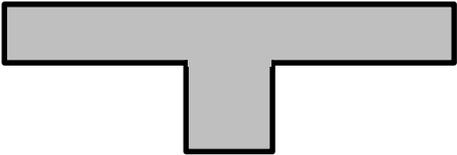
加工ひずみの可視化利用した 加工精度の向上

本手法(加工精度の向上)の手順

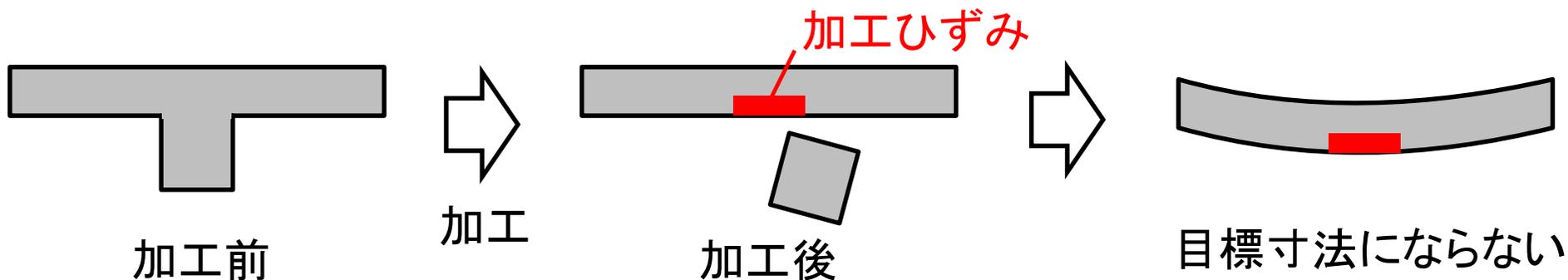


- 「加工方法と変形との関係」は寸法ごとに異なる → データベース化困難
- 「加工方法と加工ひずみとの関係」は単純(寸法依存性が低い)

加工ひずみによる変形の考慮

課題:  を、加工して  にしたい。
(目標寸法)

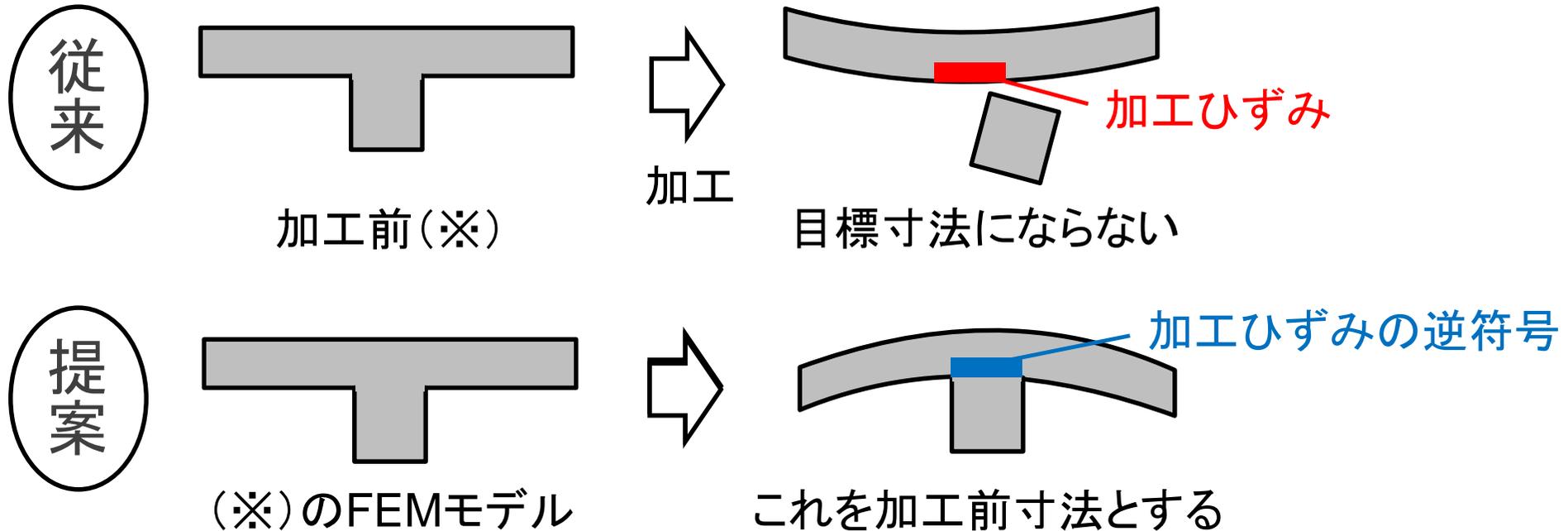
従来



問題点: 加工ひずみによって、変形してしまう

▽
本手法: 加工による変形を考慮した加工前寸法にする

加工ひずみによる変形の考慮



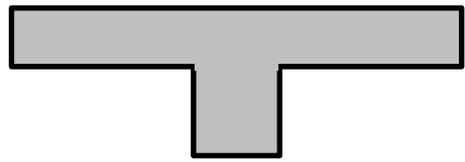
「加工方法と加工ひずみとの関係」は予め取得可能

↓ (内部ひずみ・応力の可視化手法)

ほぼ寸法に依存しない. データベース化しやすい.

本提案手法の概要

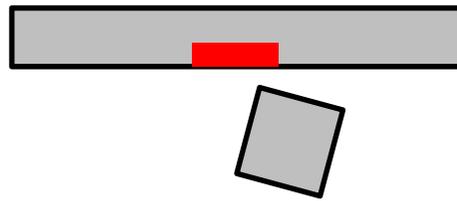
従来



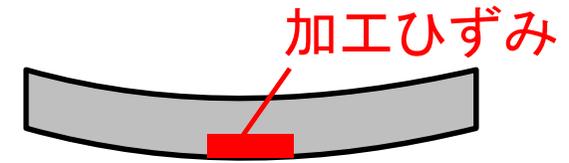
加工前



加工

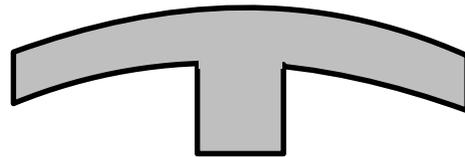


加工後



目標寸法にならない

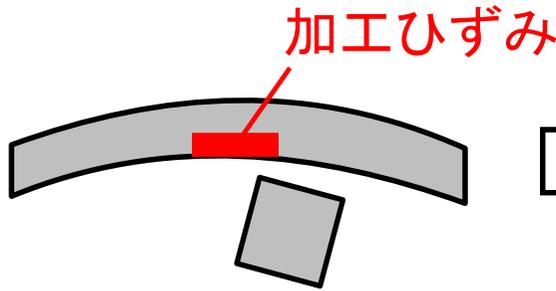
提案



加工前



加工



加工後



目標寸法達成

加工ひずみによる変形を考慮し、高精度な加工を実現
加工前寸法はFEMにより詳細に取得可能

本手法(加工精度の向上)の特徴のまとめ

- 対象物の寸法や材質の制限はない。
 - 異方性材料でも、異種材料の組み合わせでも可能。
 - FEMによるモデル化や構造解析しやすいものがベター。
 - X線回折法により計測しやすいものがよい。
- 加工は機械加工だけでない。
 - 熱処理、表面処理、曲げ加工、溶接接合などでもよい。
- FEMにより加工前形状を再現できる。
 - 詳細な寸法が得られる。
 - 意図した加工前形状に加工するための加工方法を推定することも可能。

従来技術とその問題点 (内部応力・ひずみの可視化)

内部応力やひずみを測定する方法として、放射光や中性子を用いる方法があるが、

専用の施設でしか利用できない

深さ数ミリ～数十ミリまでしか計測できない

全体の分布を計測するためには時間がかかる

といった問題があり、利用の範囲が限定されている。

新技術の特徴・従来技術との比較 (内部応力・ひずみの可視化)

- 従来技術の問題点であった、現場利用を実現するため、X線で表面計測し、内部は推定する。
- 数値シミュレーションでは、膨大なパラメータや複雑な構成方程式を必要とするが、本技術では寸法と材質がわかればよい。
- ダメージが生じた箇所が特定できているほど、推定精度が向上する。

従来の問題点と新技術の特徴 (加工精度の向上)

- 高精度加工のため、加工により生じるひずみや変形を考慮したい

[従来]



現場作業員の勘やコツに依存
→ 人手不足, 個体差大, 作業時間大

デジタル化



加工方法と
加工ひずみとの
関係取得

[提案]



ビックデータを用いた最適化
→ 自動化, 合理化, 作業時間短縮

加工条件の最適化, 加工前寸法の決定, 加工後のひずみ修正を可能に

想定される用途

- 表面加工材の加工ひずみや残留応力がわかるため、品質を評価できる。
- 加工ひずみや残留応力を発生させないための加工条件を最適化できる。
- 加工に伴う変形を予測できるため、加工前寸法を合理的に決定できる。

実用化に向けた課題

- 現在、単純な平板モデルに対して本手法の有効性を確認済み。
- 今後、様々な形状の表面改質材に対して本手法を適用できるように推定プログラムを発展させる。
- 実用化に向けて、本手法の実際の表面処理材に対して推定精度を評価し、その有効性を示す。

企業への期待

- 3次元残留応力評価に関するご要望を賜りたい。
可能であれば、供試材を提供していただきたい。
- 計測システムや品質評価、加工プログラムの最適化など、ソフトウェアの技術を持つ企業は技術移転の可能性大。
- 熟練の経験や勘に依存しすぎることなく、合理的なものづくりへの展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術の導入にあたり、ご要望のある対象物に対し、本手法の推定精度を評価する。
- 本格導入にあたり、技術指導等も行う。
- 本技術に関わらず、技術的な課題があればぜひともご相談いただきたい。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 加工対象物の寸法決定装置及び寸法決定方法並びに加工対象物の寸法決定のためのプログラム
- 出願番号 : 特願2023- 34921
- 出願人 : 工学院大学
- 発明者 : 小川雅

産学連携の経歴

- 2014年-2017年 JST若手研究（B）に採択
- 2016年-2017年 M社と共同研究実施
- 2017年-2020年 JST基盤研究（C）に採択
- 2019年-2021年 E社と共同研究実施
- 2022年-2024年 JST基盤研究（C）に採択

お問い合わせ先

工学院大学
総合企画部 研究推進課

TEL 03-3340-3440

e-mail sangaku@sc.kogakuin.ac.jp