

2023年度ロボット学会オープンフォーラム OF-15 製造・加工業における熟練者技術のDX化～AI化

線状加熱熟練者の技とシミュレーションを 組み合わせてAI化する

2023年9月11日

大阪公立大学大学院

博士後期課程

○加藤 拓也

大阪公立大学大学院

生島 一樹, 野津 亮 柴原正和, 丹後義彦

JMU株式会社

1. 研究開発の背景・狙い

2. 開発システム (AI線状加熱システム)

- システム概要
- 画像計測装置
- AR作業支援システム (動画)
- 小型ロボット

3. AI線状加熱システムによる曲げ加工試験

- 曲げ加熱実証試験結果
- 小型自動加熱ロボットを用いた実証試験 (動画)

4. 報道実績

- テレビ報道実績
- 新聞掲載実績

5. おわりに

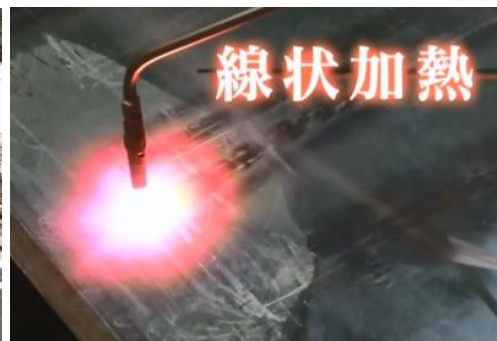
研究開発の背景

船などの大型建造物の曲面形成には「**線状加熱**」が用いられている。



※北京五輪会場「鳥の巣」

線状加熱：ガストーチによる加熱と水ホースによる冷却を繰返しながら任意曲面を成形する。



※曲げ型による精度評価

習得に10年以上を要する「**匠の技**」で**技能伝承、作業支援（自動化）**が課題。

**研究開発
の目的:**

AI技術、シミュレーション技術、ICT技術をインテグレートすることにより
暗黙知である“**匠の技**”を支援/自動化する技術を開発する

本研究開発の対象は大型商船の**外板曲げ加工** 船の建造フロー(ブロック工法)



※ブロック組立の
基準 (ベース)

外板曲げ加工方法

一次曲げ(冷間曲げ)



仕上げ(線状加熱)



●対象鋼板の特徴

- 板厚：15~50mm
- 枚数：数百枚/隻
- サイズ：数m~20m/枚(本研究の対象は最大長さ10m)
- 形状：任意の3次元曲面で同じものは無い → 人手作業

●曲げ型で精度を確認しながらガストーチによる加熱と水ホースによる冷却を繰り返しながら任意3次元曲面に加工

●習得に10年以上を要する「**匠の技**」

技能伝承、作業支援・自動化が課題

**超高速の理想化陽解法
FEM（有限要素法）**

融合

**熟練作業者の経験を
インテグレートしたAI**

大阪公立大：20社以上にライセンス供給

	提案技術	先行技術（世界初・唯一の全自動曲げ加工）
加熱方案の算出	効率的 AIにより加工時間および精度・品質的に 最適な加熱方案 が求まる	非効率（時間） 鋼板全面を両面から加熱 しながら修正
最適解探索の 高速性	速い AIが 瞬時 に加熱方案を求める	遅い 逐次、弾性FEM解析 で加熱方案を算出 ※計算時間は15～30分/枚
社内データベース の活用	容易 ニューラルネットワークを採用しているので活用しやすい。 不足データに関しては高速熱弾塑性解析 を基に非線形データベースを作成する	困難 板厚毎に入熱量を変えて 要素加熱試験を行って作成する
厚板・大曲率板の 曲げ加工	可能 高速熱弾塑性 解析結果を教師データとして学習 させることにより 非線形性の強い大曲率板・厚板 にも適用可能	非対応 対象は線形足し合わせが成り立つ緩曲率板であり、 厚板・大曲率板 では加工精度が得られない
変形誤差の修正	速い カメラ計測 をシステムに組み込んでいるため、 目的形状との誤差を瞬時に定量化 して加熱方案を自動作成して 再加熱 が始まる（ 所要時間:1分 ）	遅い 算出された全ての加熱を施工した後に計測し、弾性 FEM解析で修正加熱方案を算出 するため 再加熱開始までに15～30分かかる

熟練作業者を超える線状加熱を実現し、曲面形成の生産現場を革新する

1. 研究開発の背景・狙い

2. 開発システム (AI線状加熱システム)

- システム概要
- 画像計測装置
- AR作業支援システム (動画)
- 小型ロボット

3. AI線状加熱システムによる曲げ加工試験

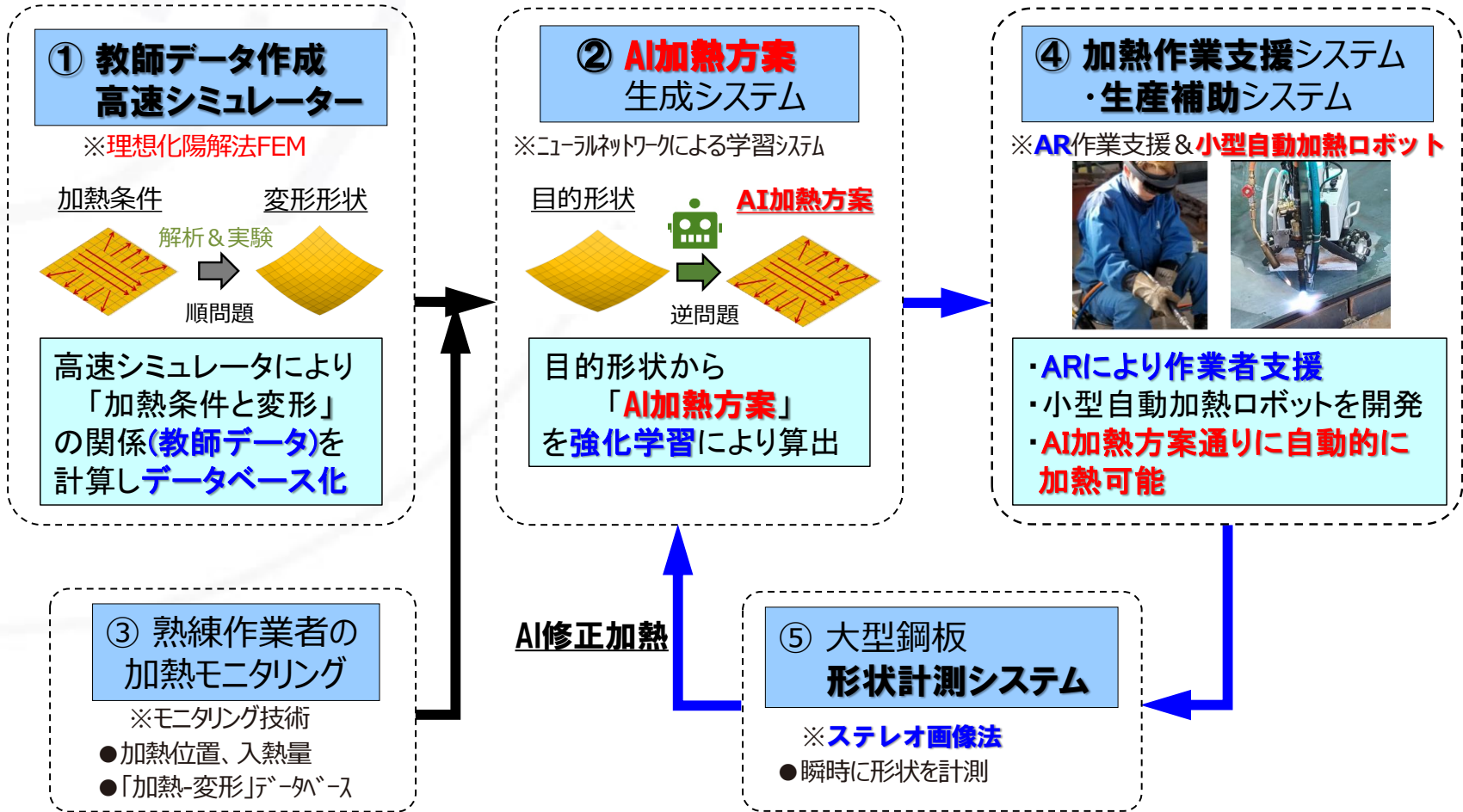
- 曲げ加熱実証試験結果
- 小型自動加熱ロボットを用いた実証試験 (動画)

4. 報道実績

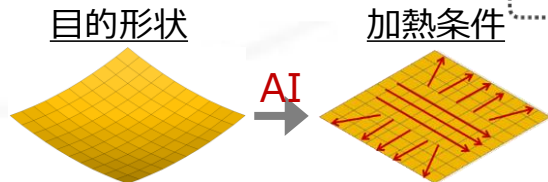
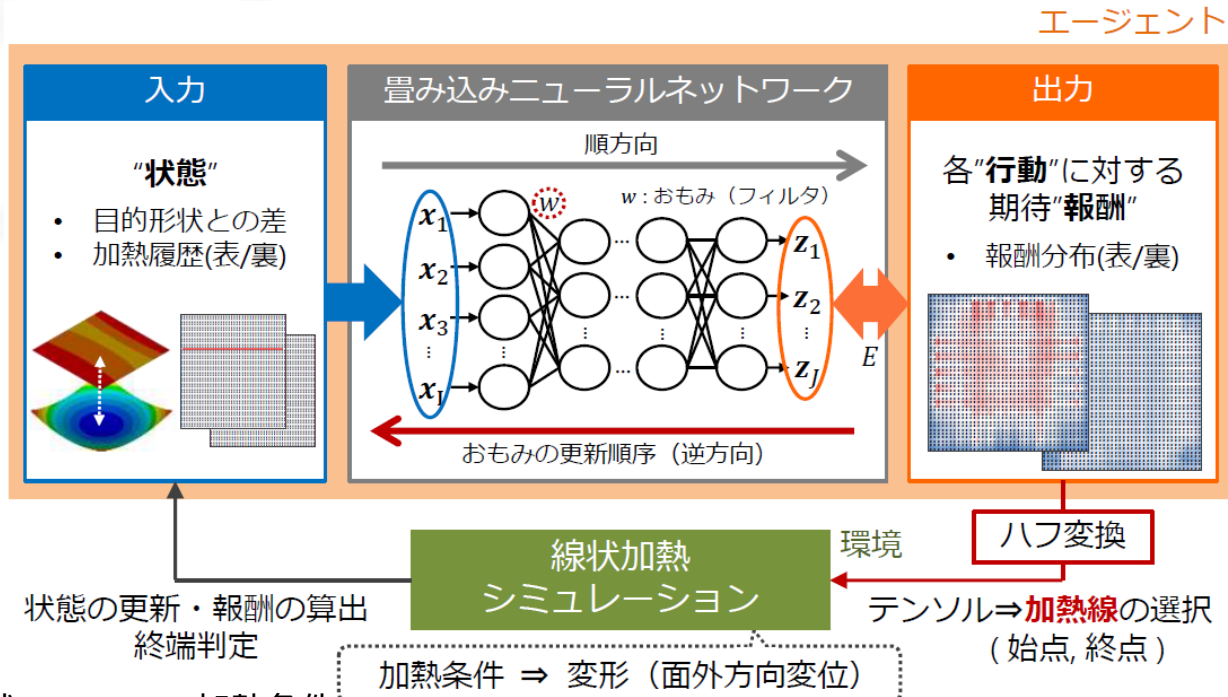
- テレビ報道実績
- 新聞掲載実績

5. おわりに

AI線状加熱システム(開発システム)



AI線状加熱システム(開発システム)



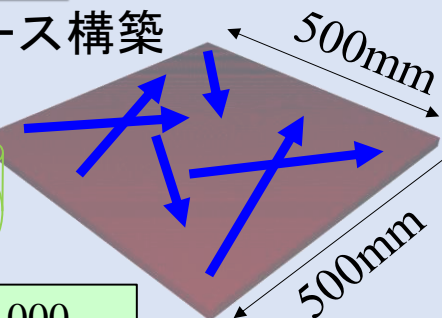
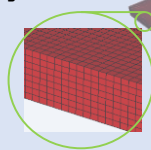
強化学習と線状加熱シミュレーションを組み合わせることにより、加熱位置と変形の間をAIに自律的に学習させるAI線状加熱方案生成システムを構築

AI + FEMシミュレーションの組合せにより、最も目的形状に近づく加熱方案を出力する

高速解析システムを用いた教師データ自動生成

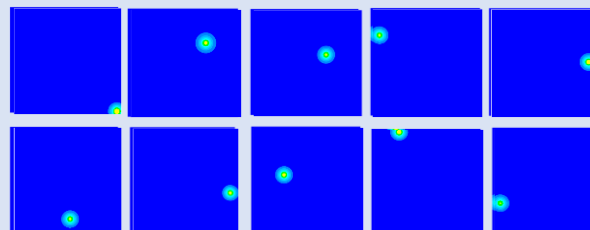
加熱線と変形の関係についてのデータベース構築

板厚16mm



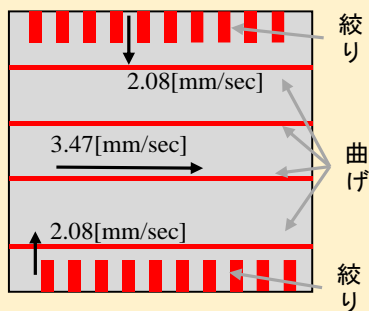
要素数: 375,000
ステップ数: 数万

40分×10,664解析
(解析日数: 4PC×10日)

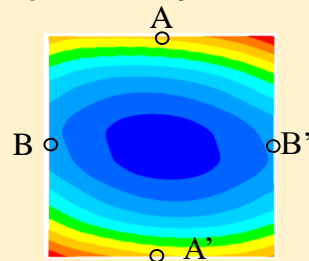


※理想化陽解法FEMを利用

教師あり学習による高速な変形予測(加熱線: 24本)

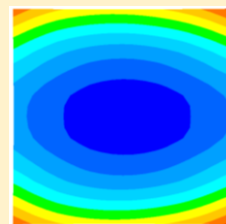


加熱方案



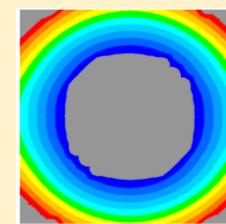
熱弾塑性解析

8~9時間

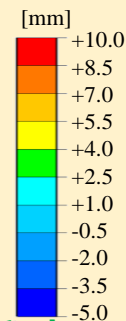


提案手法

約2秒

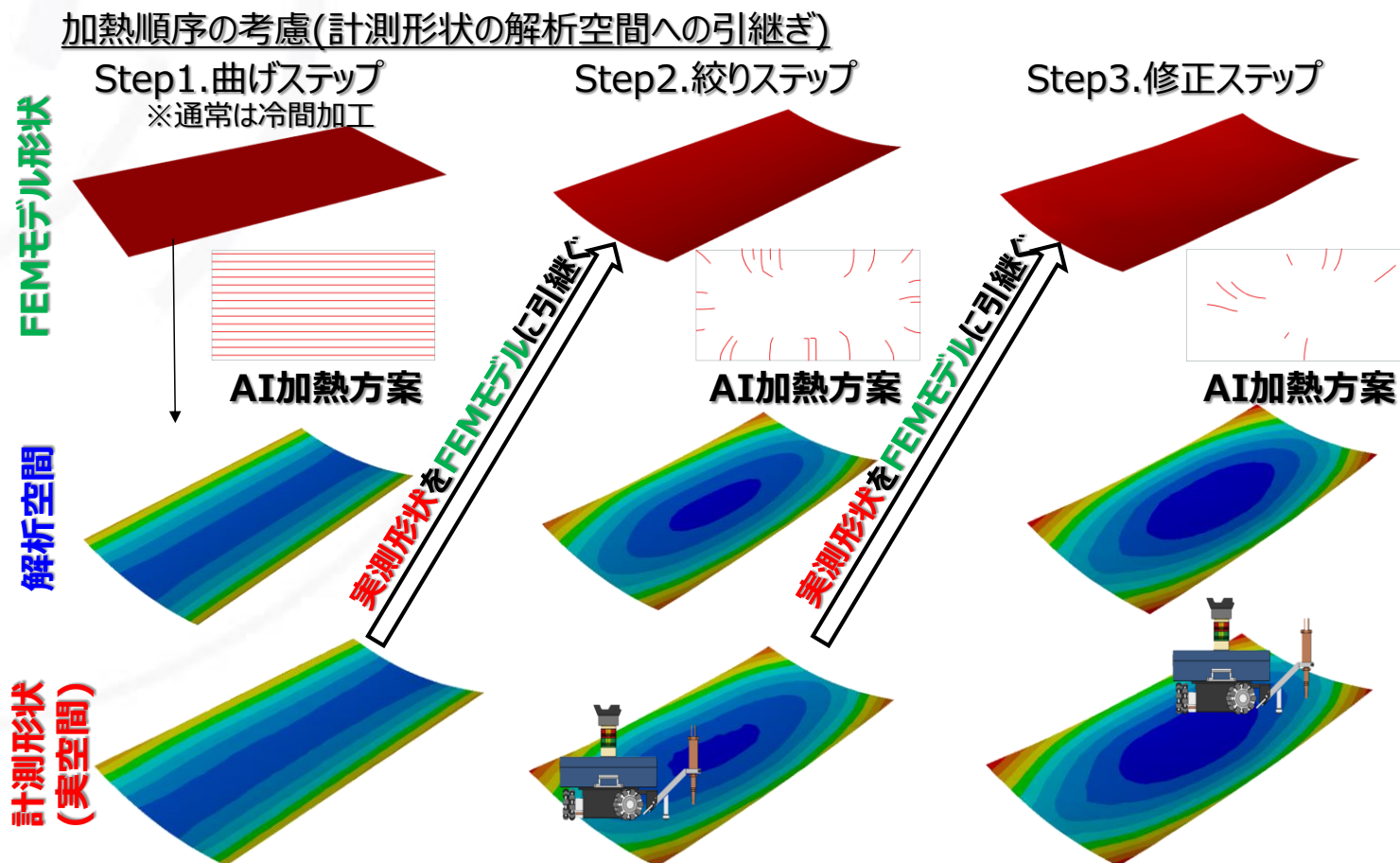


従来の簡易手法



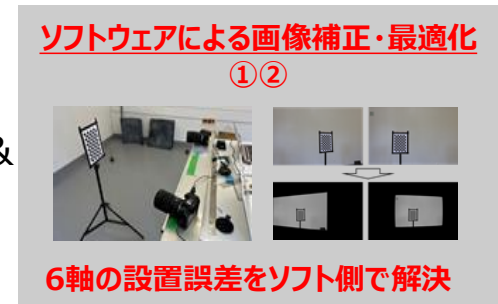
加熱位置ごとの複雑な変形を再現できる高速な解析手法を開発

実用化に向けた取り組み(解析-実空間の同期)



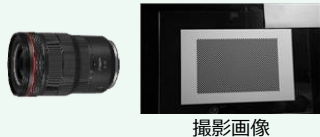
形状計測結果を次のステップのFEMモデルに引き継ぐ機能を実装
⇒数回の修正加熱で、解析空間と実空間の変形が許容精度で一致した

大型鋼板の高精度画像計測装置の開発

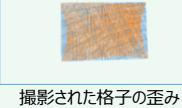


①自動レンズ歪曲収差補正

Canon RF15-35mm F2.8 L IS USM

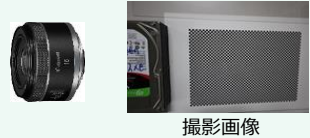


倍率100倍で表示



撮影された格子の歪み

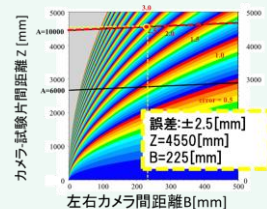
Canon RF16mm F2.8 STM



倍率100倍で表示

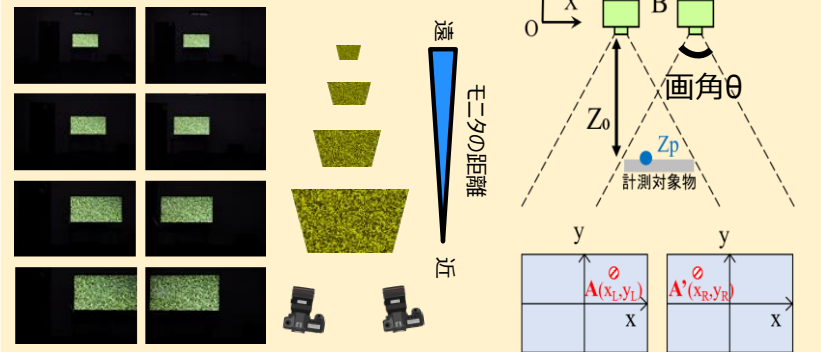


撮影された格子の歪み

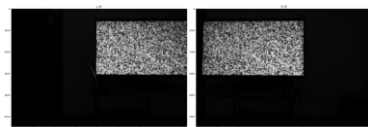


カメラ間距離
カメラ-物体間距離
を最適化

②ステレオ画像の平行化

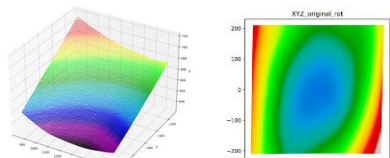


平行化実施後の平面計測の検証



撮影ステレオ画像

従来：平行化なし

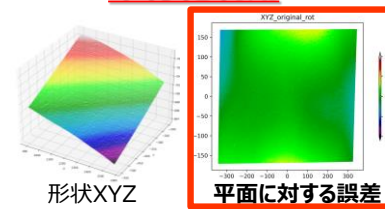


形状XYZ

平面に対する誤差



平行化利用



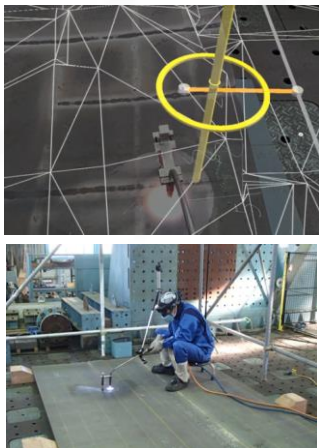
形状XYZ

平面に対する誤差

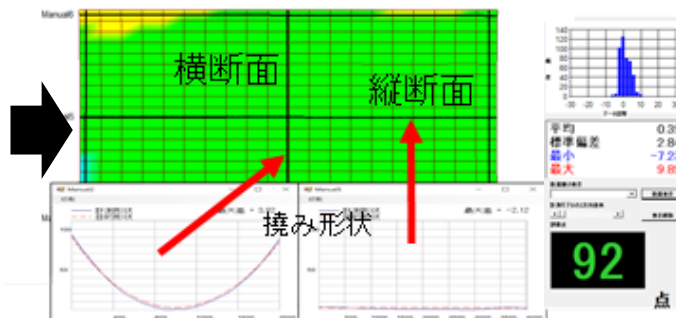
本計測システムにより約500mm四方の領域を奥行き±0.5mm精度で測定できた

AR加熱作業支援システム

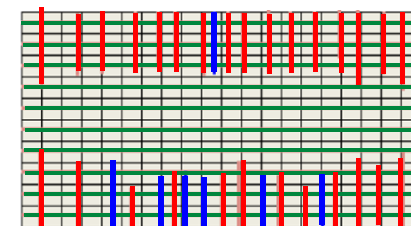
素人が加熱



主な作業 支援機能:



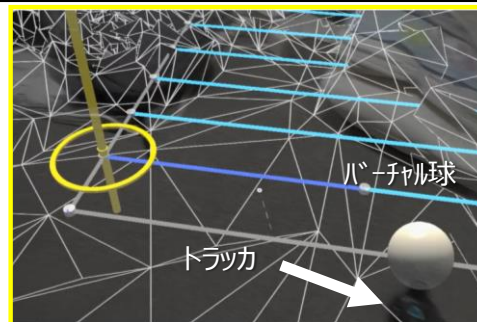
AI加熱方案



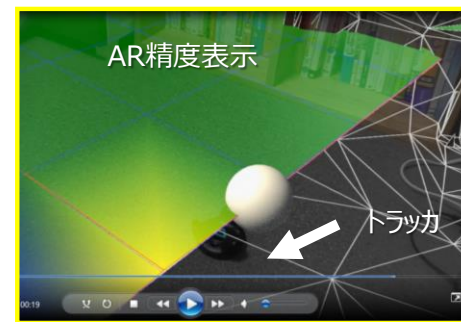
曲げ加熱線10本を加熱後の計測結果が
解析結果と高い精度で一致 ($\sigma=2.8\text{mm}$)

- 曲げ加熱 10本
- 絞り加熱 28本
- 仕上(修正) 絞り加熱 7本

Viveトラッカとの組み合わせ (SLAM精度改善)



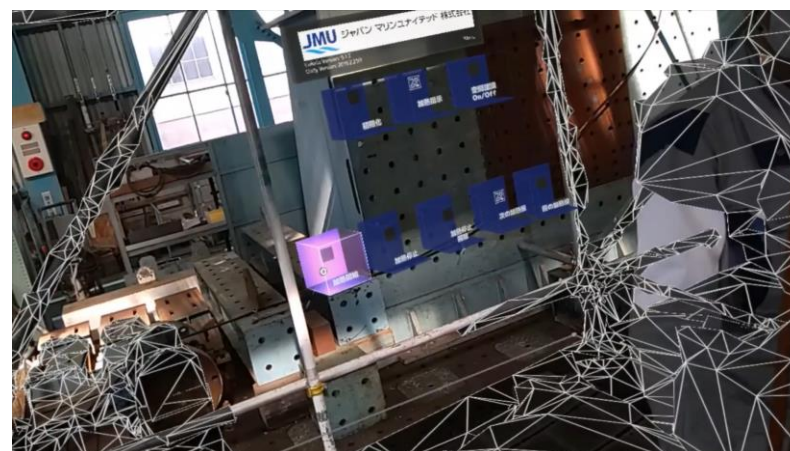
AR焼き線指示



AR計測結果表示

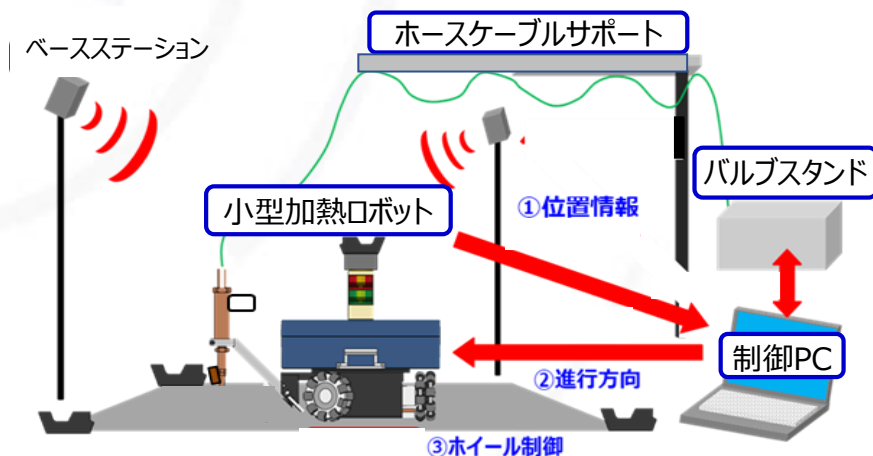
AI加熱方案通りの加熱作業をサポート

AR加熱作業支援システム

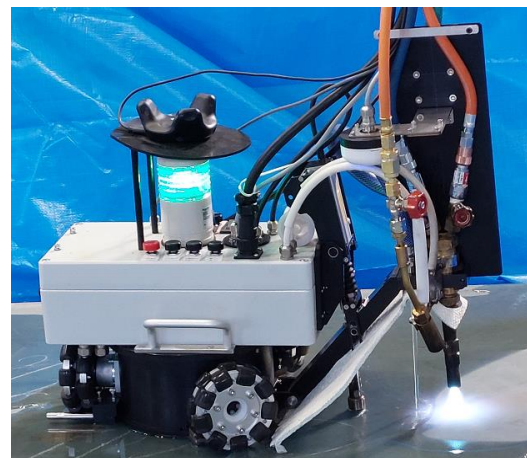


AI加熱方案通りの加熱作業をサポート

小型ロボットの構成と制御系



小型自動加熱ロボット



- ① ロボットが、ベースステーションが発するレーザ光を受信して制御PCへ位置情報を送信
- ② 制御PCは目標位置とロボットの位置の差分を0.1秒ピッチでロボットに送信
- ③ ロボット内CPUが、3つの車輪の回転を制御して目標位置に移動
- ④ 着火／消火の誤作動は、火炎センサーで検知して制御PCが異常停止する

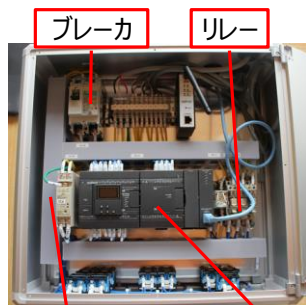
主要機器／機能

- 小型加熱ロボット：加熱トーチ、パイロットトーチ、イグナイタ、遮熱板、逆止弁、火炎センサ
- ロボットCPU：線状加熱/ウィング加熱、着火/消火、トーチ昇降、非常停止
- バルブスタンド：自動着火/消火、流量制御（一定）、逆火防止、非常停止
- 制御PCソフト：着火/消火、冷却水バルブ制御、アラーム表示、非常停止
- ホースサポート：酸素/LPGホース、電源/LAN/USBケーブル、冷却水ホース

小型ロボット周辺装置の開発

バルブスタンド

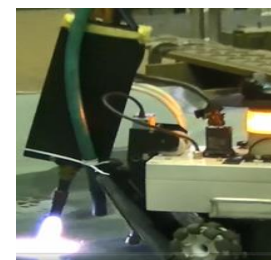
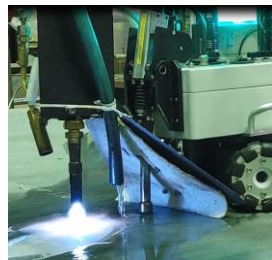
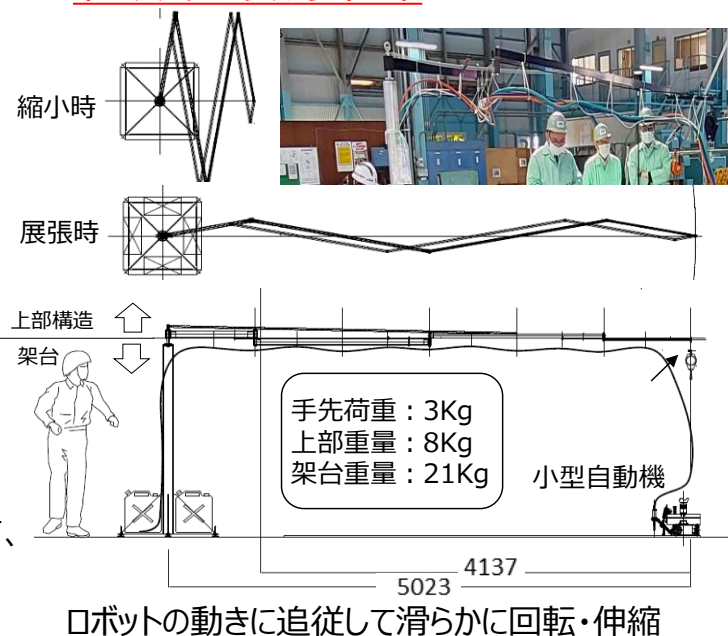
非熟練者でも扱えるよう安全を最優先し
ガス装置メーカーで設計、製作



ACDCコンバータ PLCユニット

バルブスタンド内部の機器
構成と制御フローを見直して、
実用化に向けたコストダウンを実施

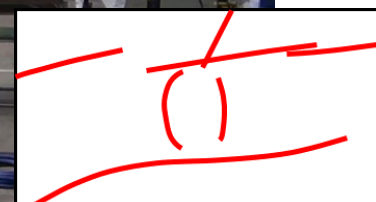
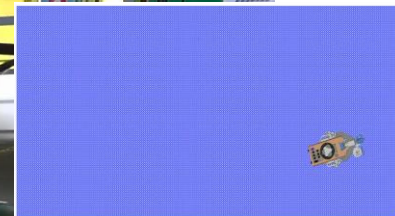
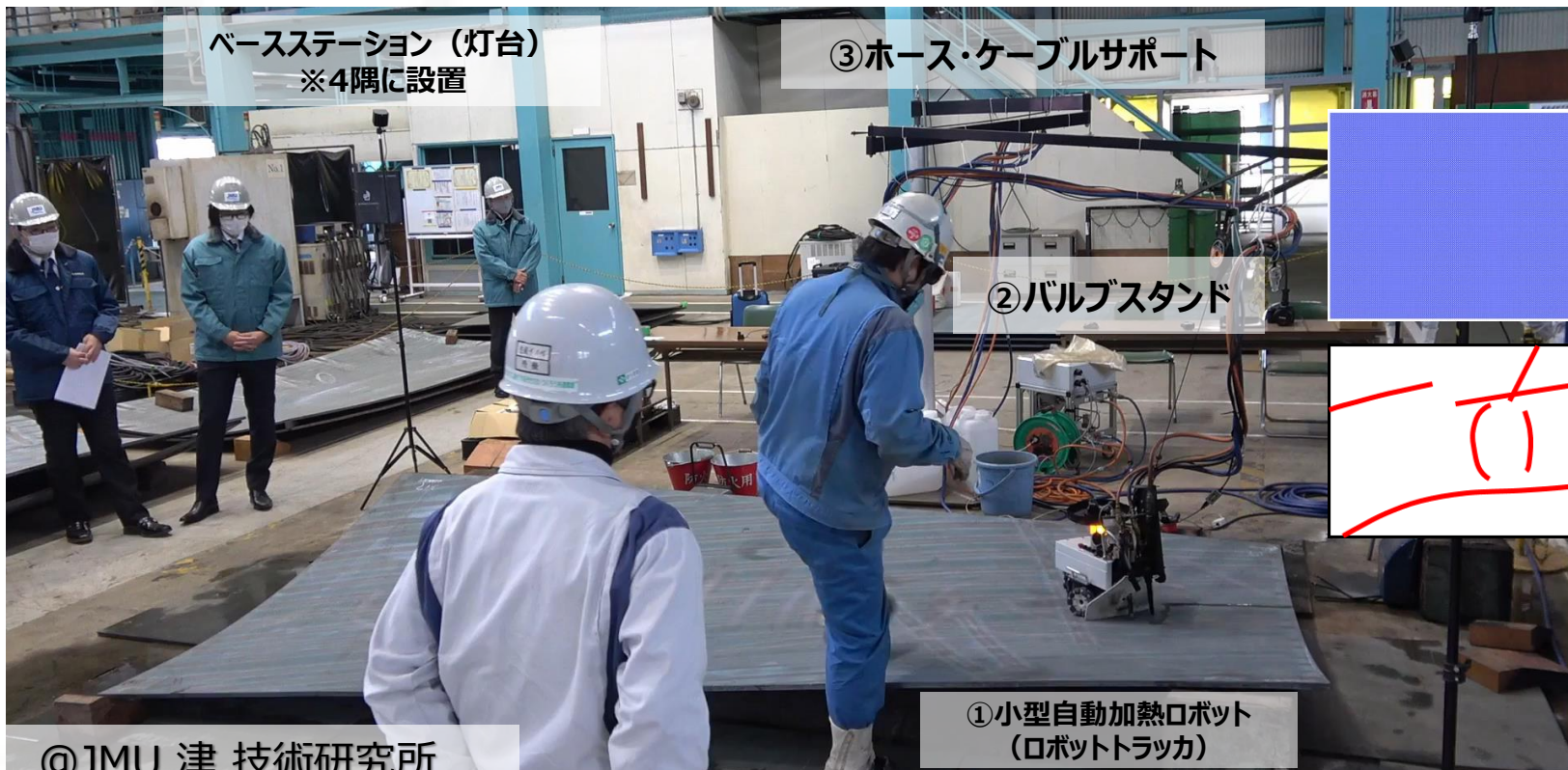
ホース・ケーブルサポート



自走式の小型加熱ロボットと周辺装置を開発

1. 研究開発の背景・狙い
2. 開発システム (AI線状加熱システム)
 - システム概要
 - 画像計測装置
 - AR作業支援システム (動画)
 - 小型ロボット
3. AI線状加熱システムによる曲げ加工試験
 - 小型自動加熱ロボットを用いた実証試験 (動画)
 - 曲げ加熱実証試験結果
4. 報道実績
 - テレビ報道実績
 - 新聞掲載実績
5. おわりに

小型自動加熱ロボット

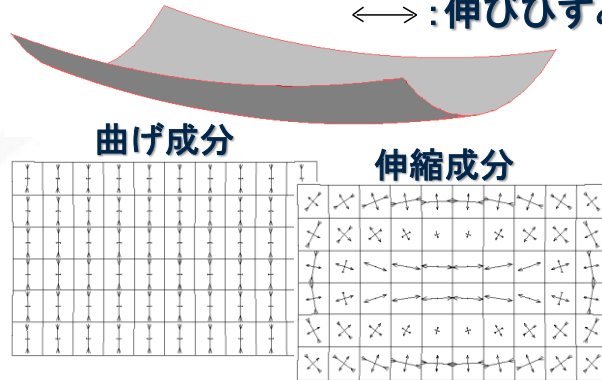


**本加熱58本＋修正加熱16本を自動で行い
許容精度内に収まることを確認**

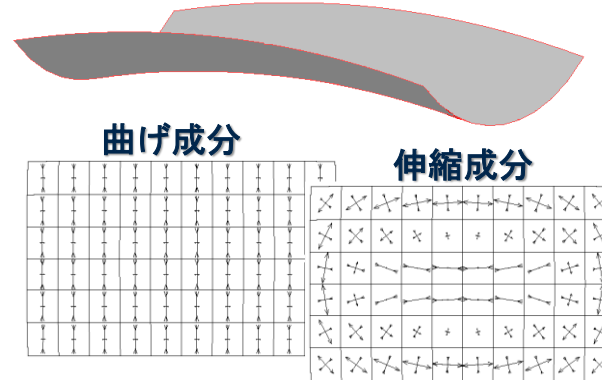
目的形状の分類(参考資料)

椀型形状

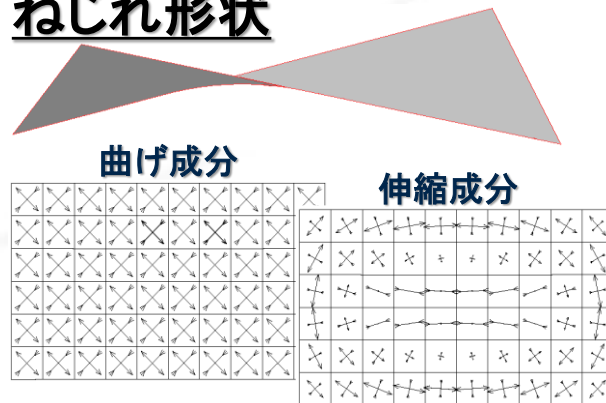
>< : 収縮ひずみ
 <> : 伸びひずみ



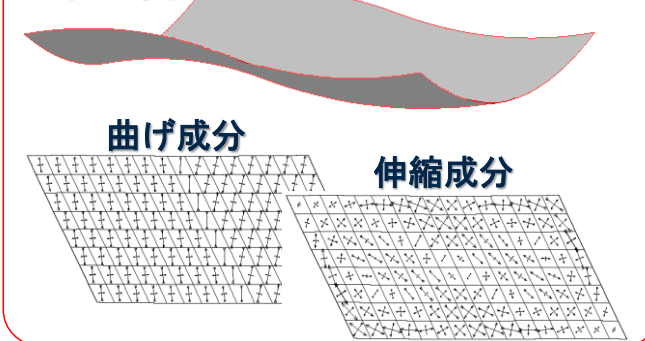
鞍型形状



ねじれ形状



<鞍&椀&ねじれ>

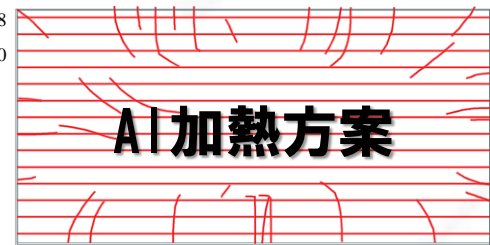
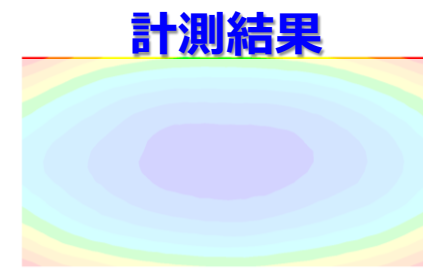
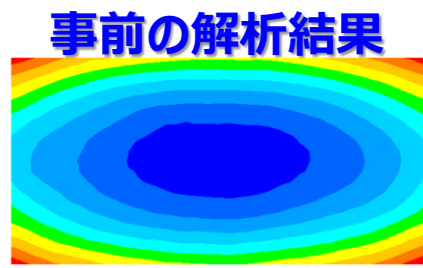
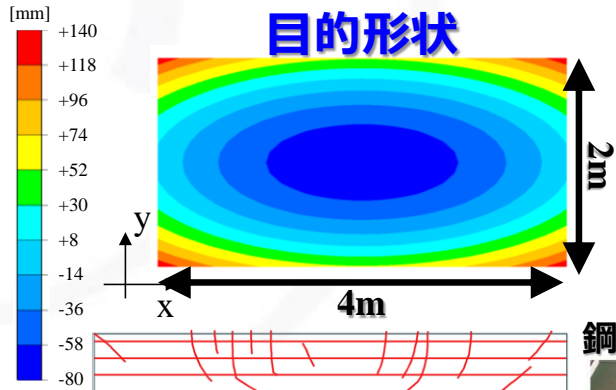
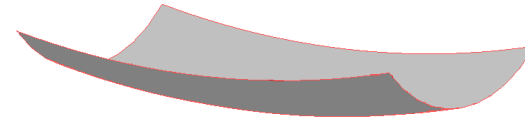


実船板はすべて違う形状

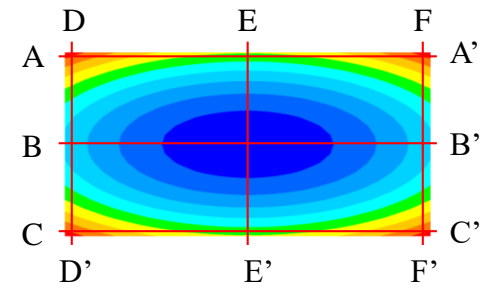
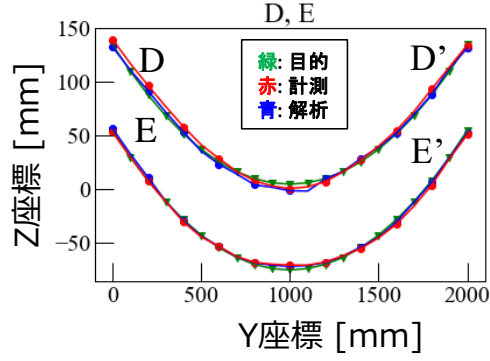
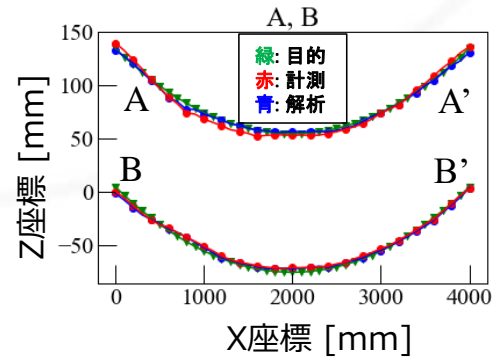
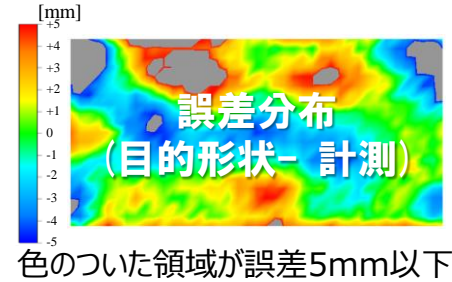


基本形状の組合せ

曲げ加熱実証試験結果(椀形)

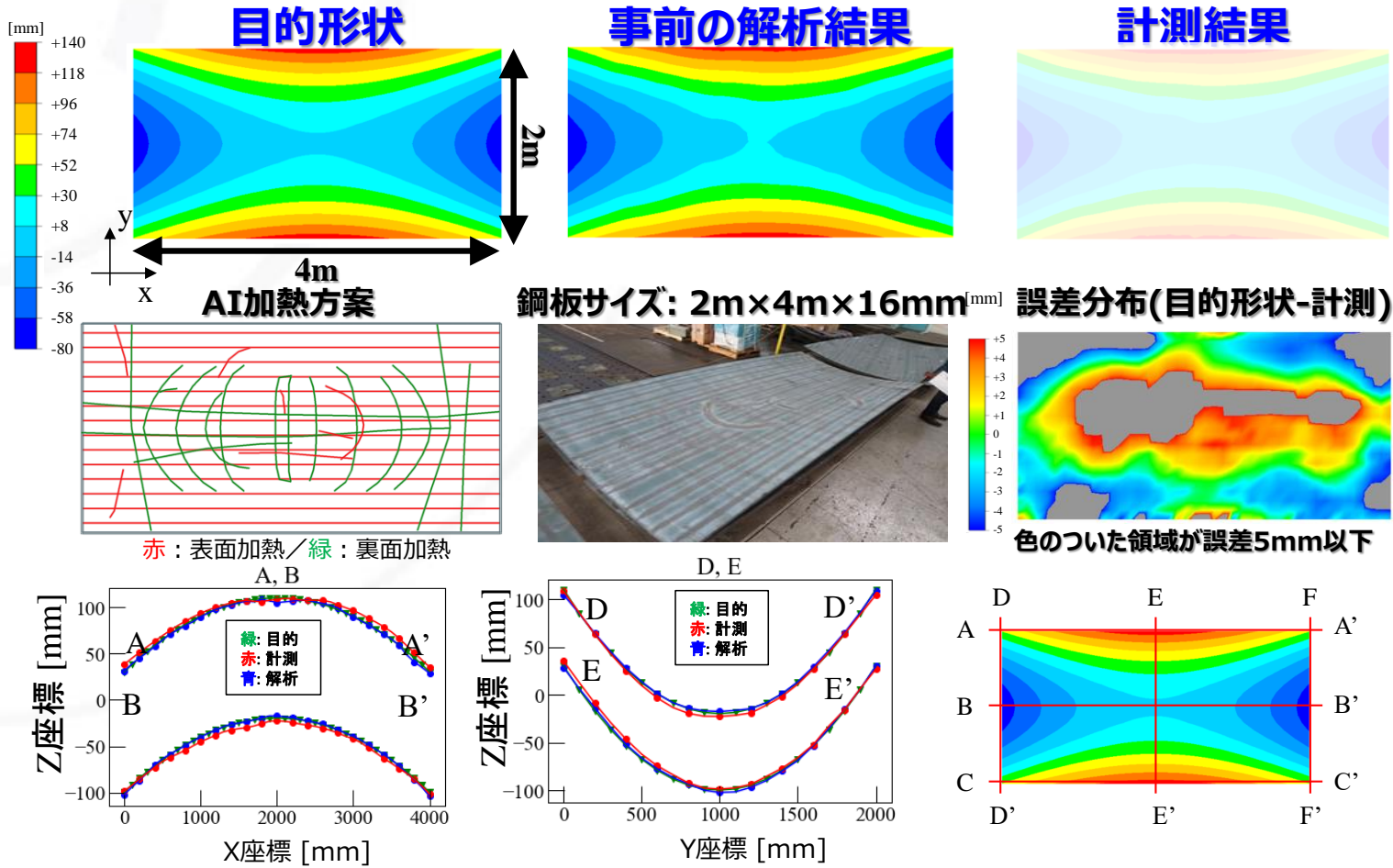
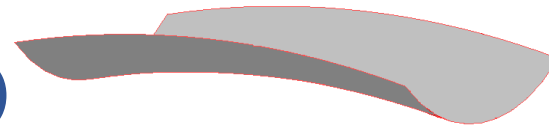


鋼板サイズ: 2m×4m×16mm



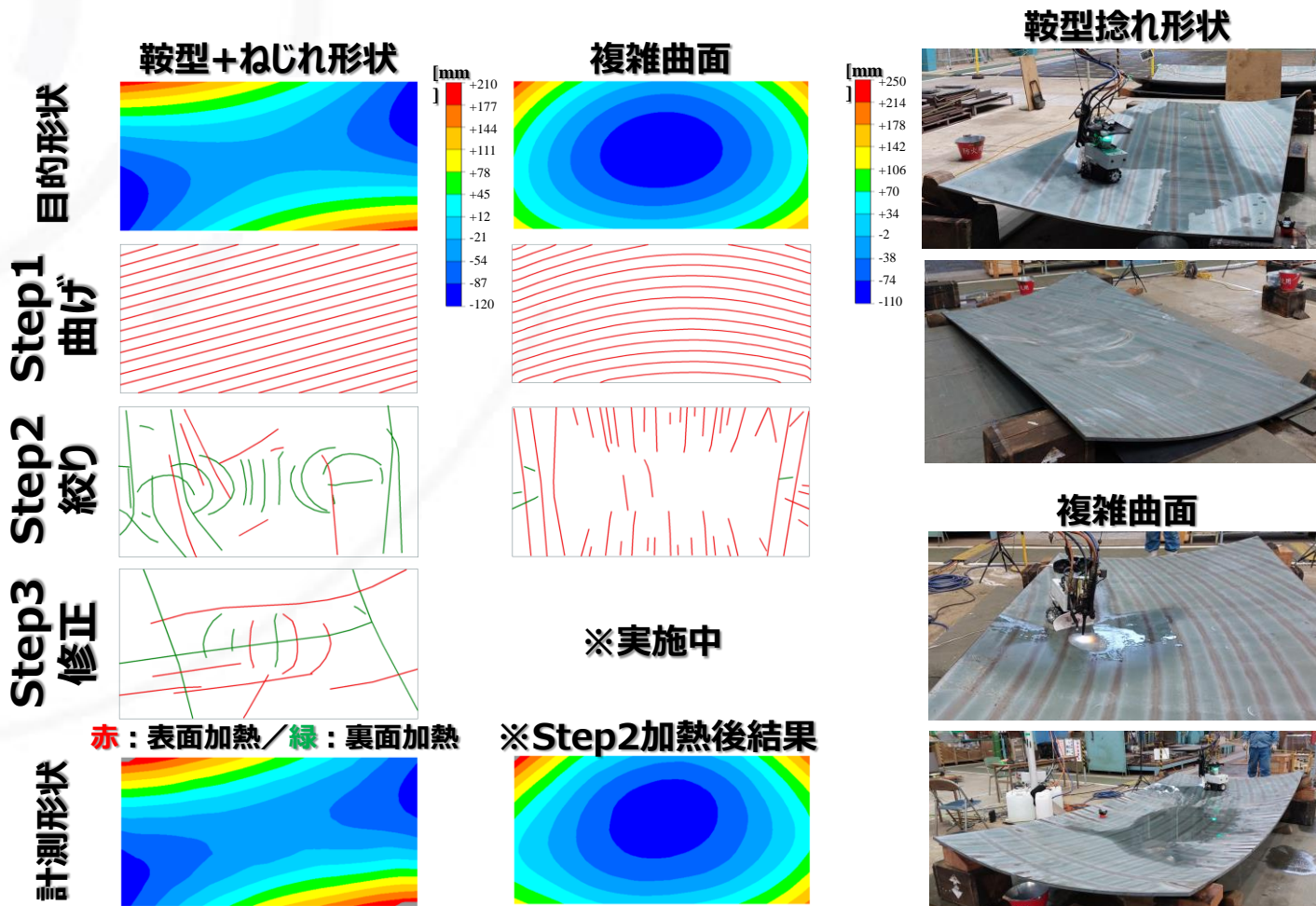
計測の結果、実用上十分な精度で目的形状に一致

曲げ加熱実証試験結果(鞍形)



計測の結果、実用上十分な精度で目的形状に一致

複雑曲面の実証試験



造船現場で使われるすべての形状が作成可能か検証中

1. 研究開発の背景・狙い
2. 開発システム (AI線状加熱システム)
 - システム概要
 - 画像計測装置
 - AR作業支援システム (動画)
 - 小型ロボット
3. AI線状加熱システムによる曲げ加工試験
 - 小型自動加熱ロボットを用いた実証試験 (動画)
 - 曲げ加熱実証試験結果
4. 報道実績
 - テレビ報道実績
 - 新聞掲載実績
5. おわりに

令和元年12月20日 NHK総合 「ニュースほっと関西」、
令和2年1月21日 NHK総合 「ニュースおはよう日本」(関西版)にて、

「造船の”匠の技”にAIが挑む」として取り上げて頂く。

番組内では、

- 1) **500**パターンの鉄板の変形シミュレーション結果をAIで活用している様子、
- 2) 大阪府立大(当時)柴原正和准教授の「**10年20年を5年3年**と短い期間で新しい熟練技能者ができるようにしたい」とのコメント、
- 3) JMU丹後義彦氏の「**ベテランの人がやめられたあとの補充が難しい、短期間で効率よく伝承していく仕組みが課題**」とのコメント、

等が紹介された。

令和元年7月24日
大阪府立大プレスリリース

“造船の匠”の技をAIが製造の現場に繋ぐ！—NEDOの「AI技術の早期社会実装に向けた研究開発プロジェクト」に採択—

ツイート いいね! 5,387

更新日：2019年7月24日

大阪府立大学大学院 工学研究科 柴原 正和 准教授、人間社会システム科学研究科 野津 亮 准教授 およびジャパン マリンユナイテッド株式会社の共同チームが、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）の「AI技術の早期社会実装に向けた研究開発プロジェクト（事業費：申請209百万円／5年、当初契約92百万円／2年）」に採択されました。

本研究のポイント

- 加熱方案の決定が非常に困難なことから、これまで暗黙知であった大型鋼板の曲面成型の線状加熱加工技術を数値解法と熟練技能者の経験を集約したAIを融合することで、非熟練技能者の線状加熱加工作業の判断支援を行うシステムの研究開発をめざす
- 本取り組みは本学の工学研究科（構造力学）と人間社会システム科学研究科（情報学）の教員らが分野の枠組を越えて取り組む、学内リソースを最大限に活用した産学連携プロジェクト



造船会社での線状加熱作業

左記プレスリリースを、計5紙にとりあげていただく

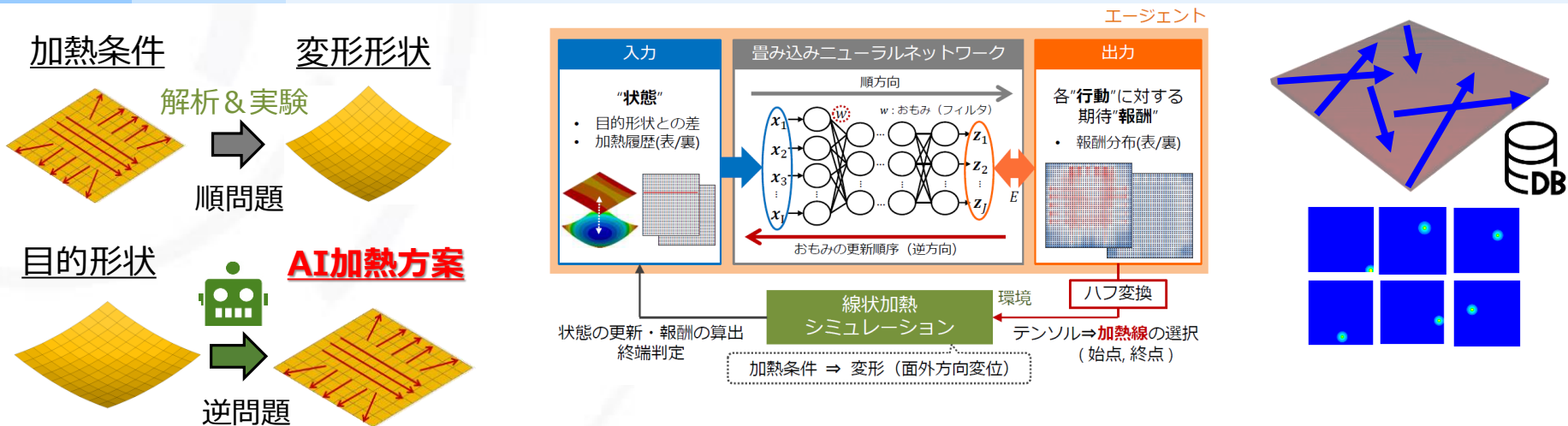
（令和元年7月24日）

- ・ 日本海事新聞 第2面
JMU A I で鋼板曲げ支援
「匠の技」をシステム化へ
- ・ 日刊産業新聞 第2面
JMU A I 「線状加熱」板曲げ
システム開発受託
- ・ 鉄鋼新聞 第2面
鋼板曲げ加工に A I 活用
J M U が新システム開発へ
- ・ 熔接ニュース 第2面
J M U / 大阪府立大が共同で開発へ
A I 鋼板曲げ作業支援システム

（令和元年8月5日）

- ・ 日刊工業新聞 第9面
A I で鋼板加工伝承
J M U ・ 大阪府大 N E D O プロ受託

まとめ



本研究でのAI化の要点

解析結果のデータベースを活用して逆問題を高速に解く手法・ツールの開発

実用化の計画

2025年の実用化に向けて新たに4台のロボットで運用性・耐久性の検証を予定

その他:

AI・FEMの開発⇒公立大学、ロボット装置の開発⇒JMU で各強みを生かした

END