

AI 線状加熱による板曲げ作業支援・自動化システムの研究

Research of work support and automation system
for plate bending by AI line heating

船舶・海洋・エンジニアリング事業本部 生産センター
丹後 義彦 TANGO Yoshihiko

概 要

船体前後部の曲がり外板の曲げ加工方法として、国内外の多くの造船所で線状加熱が用いられている。習得に 10～20 年を要する「匠の技」で、近年の生産年齢人口の減少により、曲がりブロックの組立精度に影響する外板曲げ加工の精度向上が喫緊の課題となっている。外板曲げ加工精度向上の重要なファクターである処理能力を向上させるために、鋼板上を自由に走行可能な小型自動線状加熱ロボット（以下「小型ロボット」と称する）と、AR（拡張現実）技術を活用した板曲げ作業支援システムを開発した。さらにシミュレーション技術と AI 技術を融合して、匠の経験やノウハウに依存してきた加熱方案の生成を自動化する AI 加熱方案生成システムを開発した。

Summary

Line heating has been used, in many Japanese and overseas shipyards, as a method of steel plate bending for the curved shell plates. However, it takes 10 to 20 years for workers to learn "craftsmanship" to bend steel plate in any form, and so improvement of processing accuracy, which affects the accuracy of curved block assembly, has become an urgent issue due to declining working population. In order to improve processing capacity, which is an important factor in bending accuracy, we developed a small automatic heating robot that can move freely on curved steel plates and a work support system using AR (augmented reality) technology, to assist unskilled workers. In addition, by combining simulation technology and AI technology, we have developed an "AI heating plan generation system" that previously depended on the experience and know-how of craftsmen.

1. 緒 言

線状加熱とは、鋼板の局所的な加熱によって発生する塑性変形を組合わせて目的の 3 次元曲面を形成する造船固有の鋼板曲げ加工法である。曲り外板のサイズや形状、板厚は多種多様で、鋼板の搬入、盤木による鋼板高さ調整（台上げ）、裏面加熱時の鋼板反転、加熱位置の策定、追加加熱線のマーキングなど事前の段

取り作業も多岐にわたる。

従来の線状加熱曲げの作業状況を図 1 に示す。作業者に事前に与えられる情報は、各断面の形状に合わせて製作された曲げ型のみで、鋼板上のどこを、どの方向に、どれくらいの入熱で、どの順序で加熱するか（以下「加熱方案」と称する）は作業者の経験とノウハウに委ねられてきたため、作業者によって作業時間や精度のばらつきが大きく、自動化が難しい高度な技

能である。

作業者は、断面曲げ型を鋼板上の所定位置に立てて目視で横曲りと縦曲りと捻れを確認しながら加熱と冷却を繰り返す。



(a) 加熱と冷却



(b) 台上げ作業



(c) 仕上げ加熱

図1 線状加熱による従来の鋼板曲げ作業
Fig.1 Conventional steel plate bending by line heating

これまでも、熟練作業者のノウハウを形式知化する試みは多数行われてきた。加熱位置や加熱速度をインプットすると加熱後の形状を計算して表示するシミュレータを技能教育に活用する研究¹⁾や、プレスによる冷間曲げ^{2)~4)}、線状加熱による全自動曲げ加工システムの開発^{5)~9)}に関する報告がある。一方、船体を構成する曲り外板は、長さ数メートルから 20 メートル、重さは1 トン未満~20 トン、大型商船1 隻で 400~1,000 枚もある上に、曲りの形状が全て異なる。そのため自動化設備は大型で複雑なものとなり、導入コスト的にも採算が厳しく、いずれも実用化には至っていない。

そこで、持ち運び可能で、加熱方案に基づいて熟練作業者と同等の位置精度で加熱する世界初の小型ロボットと、非熟練作業でも曲げ加工可能な AR 板曲げ作業支援システムを開発した。

さらに、AI 加熱方案生成システムを開発し、実船外板と同等の2 方向の曲率をもつ複数の異なる数値曲面を目的形状とする曲げ実証試験を行って、AI 加熱

方案の曲げ加工精度と、小型ロボットの耐久性および制御性能を確認した。

本稿では、開発システムの全体像、AI 加熱方案生成システムで教師データ生成の入力データとなる「加熱 - 変形」データベースと熟練作業者の加熱データ、AI 加熱方案を施工する線状加熱システム、および小型ロボットによる曲げ実証試験について、これまでの成果を報告する。

2. 開発システムの全体像

開発システムの全体像を図2に示す。

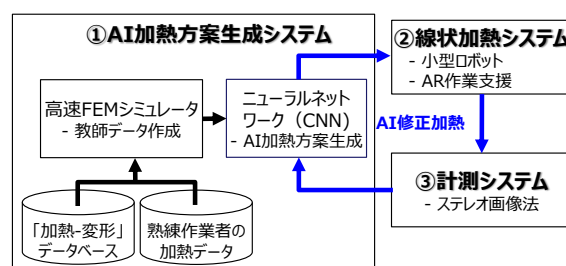


図2 システムの構成

Fig.2 System configuration

- ①高速 FEM シミュレータ^{10,11)}で作成した教師データを CNN (畳み込みニューラルネットワーク) が学習して AI 加熱方案を生成する
- ②AI 加熱方案に基づいて、小型ロボットが自動曲げ加工を行う。あるいは非熟練者が AR 板曲げ作業支援システムを活用して曲げ加工を行う
- ③ステレオ画像計測¹²⁾で加熱後の鋼板形状を短時間で計測して評価し、目標の加工精度を下回る場合は計測結果を①にフィードバックする。

鋼板支持状態や鋼板冷却水の流れる方向、気温、鋼板物性値などの変動は避けられないので、開発した AI 加熱方案生成システムは、曲げ加工の途中の計測形状から目的形状に向かって補正する修正加熱方案生成機能を有しており、①、②、③を繰り返すことにより目的形状に仕上げる。

3. AI 加熱方案生成システム

高速シミュレータと AI を統合したサイバー空間上で加熱と変形の関係を学習し、現在の状態から目的形状に曲げるための加熱方案を生成する AI 加熱方案生成システムを開発した。

3.1 「加熱 - 変形」データベース

線状の加熱では、加熱線に対して直交方向と接線方向それぞれに面外曲げと面内収縮が生じる (図 3)。直交方向の曲げ成分を横曲り、収縮成分を横収縮、接

線方向の曲げ成分を縦曲り、収縮成分を縦収縮と呼ぶ。

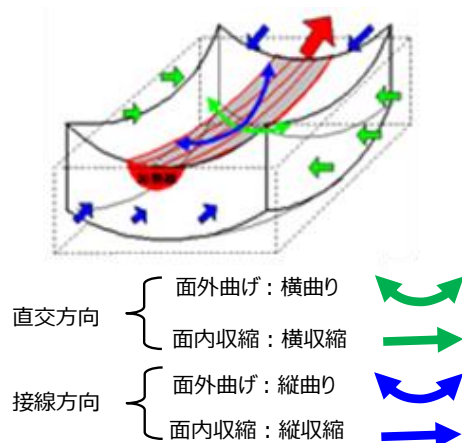


図3 線状加熱による変形成分
Fig.3 Deformation components by line heating

この4つの変形量を板厚、材質および熱源ごとに整理したものを「加熱 - 変形」データベースと呼ぶ。教師データを作成する変形シミュレーションでは、このデータベースを参照し、加熱条件（速度）に対応したひずみに変換して加熱後の形状を計算する。

プロパンガスと天然ガスでは発熱量が異なるのでこのデータベースもガスの種類ごとに準備する。現在、国内の多くの造船所でプロパンガスが使用されているので、本研究ではプロパンガスによる熱源で、「加熱 - 変形」データベースを開発した。一例として、板厚16mmの横収縮成分を図4に示す。

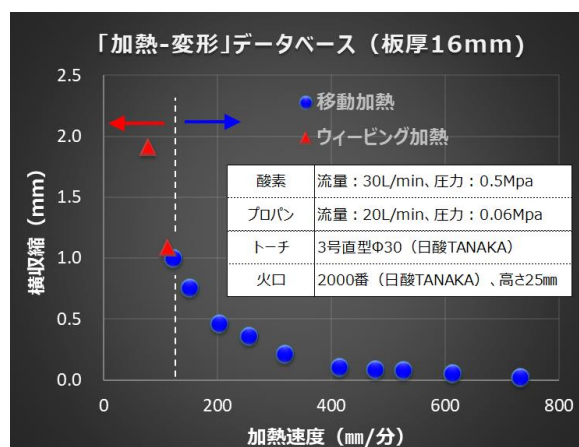


図4 「加熱 - 変形」 データベース
Fig.4 "Heating-Deformation" Database

なお、低速度領域のウィービング加熱（図4の▲）は、大入熱による鋼板表面の溶融を回避するためにトーチ先端を左右に振りながら一定速度で前進する加熱方法である。これにより、面外曲げ変形を抑えて、大きな面内収縮のみを与える大入熱のデータベースも併せて開発した。

3.2 熟練作業者の加熱データ

AI 加熱方案生成システムの概要を図5に示す。

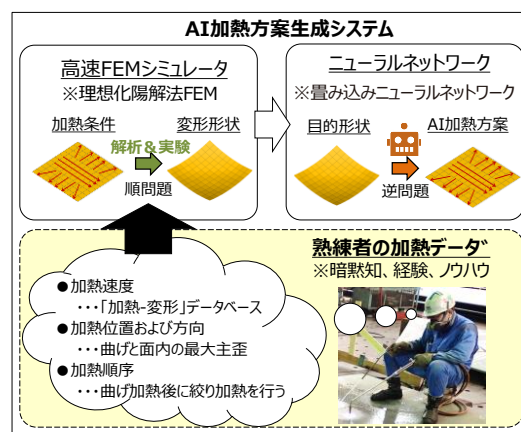


図5 加熱方案生成システム
Fig.5 AI heating plan generation system

教師データの質は AI の学習精度および学習効率に影響を与える。熟練作業者が各加熱線に対してイメージしている加熱の目的（面外曲げか面内収縮か）、加熱位置および方向、順序など、実際に熟練作業者が行っている加熱要領を教師データに取込んだ。

具体的には、平板から目的形状への強制変形シミュレーションで求まる目的固有ひずみを曲げひずみ成分と面内ひずみ成分に分解し、曲げひずみ成分に対して引いた線を曲げ加熱の候補線、面内ひずみ成分に対し引いた線を絞り加熱の候補線として教師データを作成（図6）し、それらを AI が学習する。実際の加熱順序も熟練作業者に倣って、最初に Step1 として曲げ加熱を行った後、Step2 として絞り加熱を行う。

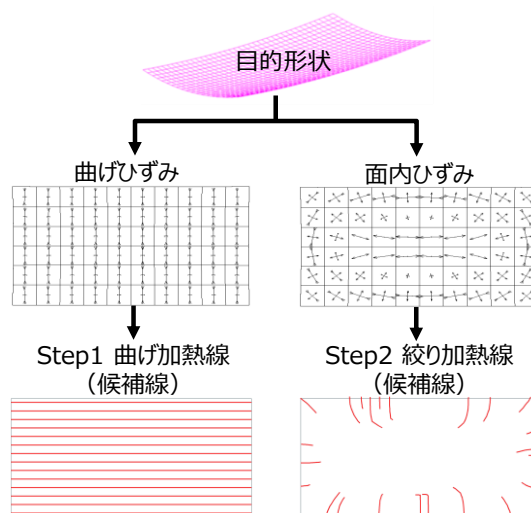


図6 目的固有ひずみの分解
Fig.6 Inherent strain separation

4. 線状加熱システム

4.1 小型自動加熱ロボット

小型ロボットと付帯装置の特徴を以下に示す。

① 小型自動機としての可搬性

小型ロボットのサイズは、トーチも含めて $L500\text{mm} \times B300\text{mm} \times H380\text{mm}$ 、重量は 13kgf なので容易に持ち運びが可能である。

② 簡便で制御性の高い熱源

ホースやケーブル類が軽量かつハンドリングも容易で、さらに従来インフラが流用可能なガス加熱を採用し、一次側に設けたバルブスタンド（図 7）で入熱量や着火、消火を自動制御する。

③ 小型ロボットの走行性

小型ロボットには、複数のホースやケーブルが接続される。これらを空中でサポートし、ロボットの動きに追従して回転、伸縮するホース・ケーブルサポート（図 7）により、ロボットは曲面鋼板上を自由に走行可能である。

④ 防滴・防塵性能

鋼板冷却水や工場粉塵から小型ロボット内部の CPU や他の電子機器を保護するためにロボット筐体は防滴・防塵構造とした。

⑤ 耐熱および耐炎性能

ガス炎からの輻射熱と熱風からロボット筐体および車輪を保護する遮熱板を設置した。



図 7 小型ロボットと付帯装置
Fig.7 Small robot and ancillary equipment

以上、小型ロボット、ホース・ケーブルサポート、バルブスタンドによって安定した再現性の高い曲げ加工が可能になった。

4.2 AR 板曲げ作業支援システム

開発した AR 板曲げ作業支援システムを図 8 に示す。鋼板上に表示されるバーチャルトーチの動きに合わせて現物のトーチを移動させることで小型ロボットと同等の加工精度および加工時間で曲げ加工が可能である。

ハードウェアはコンシューマー製品のスマートグラスとスマートフォンのみなので導入の障壁は低く、作業者不足や操業変動にも柔軟に対応可能である。なお、加熱方案や「加熱 - 変形」データベース、バルブスタンドは小型ロボットと共有可能である。

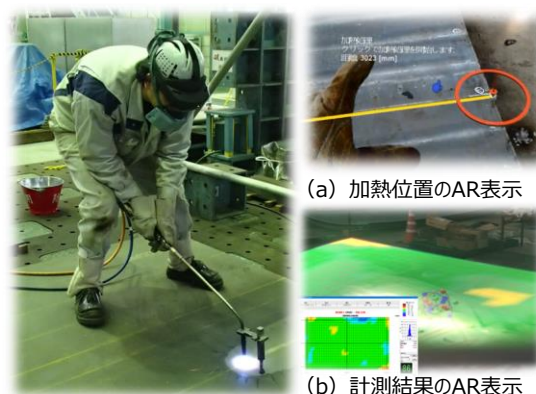


図 8 AR 板曲げ作業支援システム
Fig.8 AR work support system for plate bending

5. 小型ロボットによる曲げ実証試験

5.1 目標形状と全加熱線

図 9 に、曲げ実証試験の目的形状と AI 加熱方案（含む修正加熱方案）を示す。

① 腕型（基本形状） 目的形状 加熱方案	③ 3D 腕型 目的形状 加熱方案
② 鞍型（基本形状） 目的形状 加熱方案	④ 捻れ鞍型 目的形状 加熱方案

※K1：最大主曲率、K2：最小主曲率

図 9 曲げ実証試験の目的形状
Fig.9 Target shape for bending test

曲面上任意点のガウス曲率（最大主曲率 K_1 と最小主曲率 K_2 の積）の符号によって加熱位置が決まる。

プラスの場合は碗型形状（図9①）で、鋼板の外周を加熱して収縮させると最大主曲率と同方向に撓みが生じる。ガウス曲率がマイナスの場合は鞍型形状（図9②）で、鋼板内部を加熱すると最大主曲率とは逆方向の撓みが生じる。複雑な曲面も局所的に見ればこの碗型と鞍型の組合せで形成できる。

5.2 実証試験の目標精度

日本鋼船工作法精度標準（表1）では、曲げ型の製作精度の許容限界を $\pm 3\text{mm}$ とし、外板曲げ加工精度の許容限界を、その曲げ型に対して $\pm 5\text{mm}$ としており、それを作業者が目視で確認している。一方、本研究の計測システムは3次元計測を行って設計データに対して比較・評価する。また、サイズにもよるが鋼板1枚当たり曲げ型はわずか5～10断面に対して、本研究の計測システムでは鋼板全面を計測するため、目標の曲げ加工精度は標準偏差で 5mm とした。

表1 曲げ加工精度標準（JSQS）

Table 1 Accuracy standard for hull plate bending (JSQS)

中区分	小区分	項目		標準範囲	許容限界
曲 な 型 の 箱 誤 型 差	見透型	見通線位置は 正位置に対し	横方向	±1.5mm	±3mm
			縦方向	±1.5mm	±3mm
		型形状は、正形状に対し	±1.5mm	±3mm	
	その他の曲型	型形状は、正形状に対し	±1.5mm	±3mm	
鋼 板	外板曲り	見透線、 <u>見透型</u> に対し（縦曲り）	±2.5mm	±5mm	
		〃（横曲り）	±2.5mm	±5mm	
		横曲り型との隙	±2.5mm	±5mm	

5.3 実証試験の結果

図9④の捻れ鞍型の目的形状のカラーコンタ図と各断面の撓み形状および3回行った修正加熱も含めた全加熱線を図10に示す。加熱線の色は赤が表面、緑が裏面からの加熱線を示している。

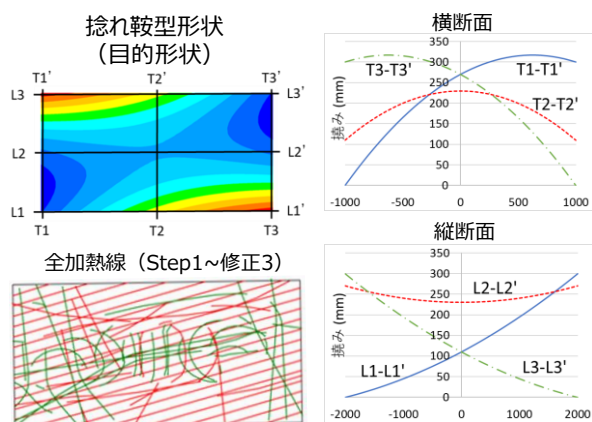


図10 捻れ鞍型の目的形状と全加熱線

Fig.10 Twisted saddle shape and all heating lines

図11にStep1の曲げ加熱とStep2の絞り加熱終了後に3回行った修正加熱の加熱方案と加熱後の計測結

果を示す。

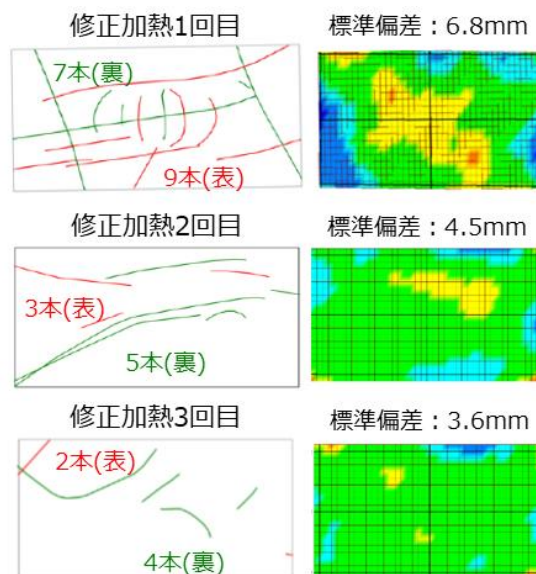


図11 捻れ鞍型の修正加熱方案と加熱結果

Fig.11 Correction heating plan and heating results

カラーコンタ図の色は目的形状との撓み差を示しており、緑色は $\pm 5\text{mm}$ 以下の領域を示している。この板は2回目の修正加熱で、標準偏差 4.5mm 、3回目で 3.6mm と目標の 5mm を大きく上回る精度で曲げる事ができた。

図12に3回目の修正加熱終了後の各断面（図10）の撓みグラフを示す。青線が計測形状、赤線が目的形状の撓みを示している。両者はほぼ重なっており、良好な結果であることがこのグラフからも分かる。

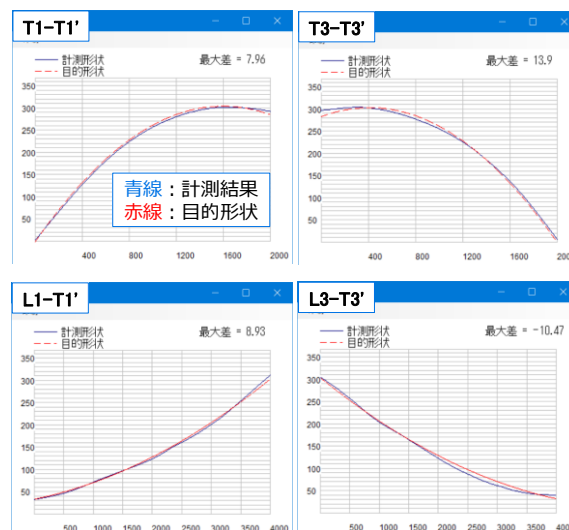


図12 捻れ鞍型の最終結果

Fig.12 Final result of twisted saddle shape

図13に、曲げ加工を行った4枚の板（図9①～④）の全計測結果を示す。グラフの縦軸は標準偏差、横軸は、加熱ステップを示している。

これよりいずれも3回の修正加熱によって目標精度の5mm以下に仕上げる事ができた。

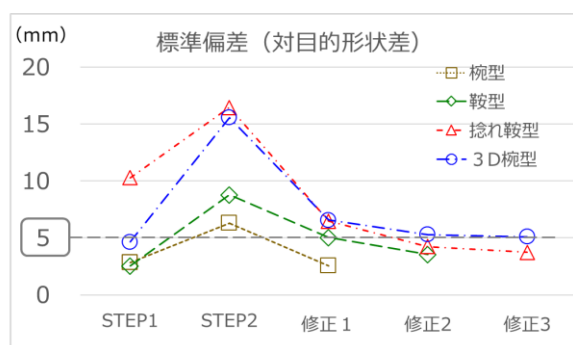


図13 曲げ試験の全結果

Fig.13 All bending test results

6. 結言

生産年齢人口の減少により、板曲げ加工能力および加工精度の維持・向上が切迫した課題になっている。

本研究では AI 加熱方案生成システムと、その AI 加熱方案に基づいて加熱を行う世界初の小型ロボットと、線状加熱曲げの未経験者でも小型ロボットと同等の線状加熱を可能にする AR 板曲げ作業支援システムを開発した。さらに、実船外板相当のガウス曲率をもつ複雑曲面に曲げ加工する曲げ実証試験を実施し、実用上の許容範囲内で曲げ加工ができることを確認した。

今後は、この AI 線状加熱曲げ加工システムを実用化すべく、実船外板での検証と改良を行うと共に、さらなる加工能力向上に向けて小型ロボットの複数台協調加熱システムの開発と実用化に適応可能な体制（日程、設備化など）の構築に取り組む予定である。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、AI 加熱方案生成システムの開発で多大なるご尽力とご指導を頂きました大阪公立大学の柴原先生、野津先生をはじめ大学関係者の方々、小型ロボットの開発でご尽力頂いた当社 OB の駒田周治氏に深く感謝の意を表します。また、この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP18002）の結果得られたものです。この紙面をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

1) 野本敏治、大森拓也、須藤拓、榎沢誠、青山和浩、斎藤政男：線状加熱による板曲げ加工用シミュレータの開発、日本造船学会論文集、第 168 号、pp527-535、(1990)

2) 西岡富仁雄、西牧興、松石正克、田中武、安川度、山内俊雄、東郷修：ユニバーサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究、日本造船学会論文集、第 132 号、pp481-501、(1972)

3) 岩崎安宏、塩田浩、田浦良治、世古成道、熊本盛秀：三条プレスによる加工法、日本金属学会会報、No.5、pp420-422、(1981)

4) 野本敏治、大塚守三、横山保：多点プレス法による船体外板の曲げ加工に関する基礎的研究、日本造船学会論文集、第 170 号、pp587-598、(1991)

5) 上田幸雄、村川英一、Rashwan Ahmed Mohamed、神近亮一、石山隆庸、小川潤一郎：計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発(第 4 報) 加熱位置、方向、加熱条件の決定法、日本造船学会論文集、第 174 号、pp683-695、(1993)

6) 石山隆庸、顧斯美、小川潤一郎、高倉大典：FEM を応用した線状加熱の精度向上の試み、日本造船学会論文集、第 180 号、pp731-738、(1996)

7) 石山隆庸、丹後義彦、中村裕介：FEM を応用した線状加熱自動化の実用化研究、日本造船学会論文集、第 183 号、pp335-342、(1998)

8) 丹後義彦、石山隆庸、永原章二、長島智樹、小林順：線状加熱自動鋼板曲げシステムの実船適用、日本造船学会論文集、第 193 号、pp85-95、(2003)

9) 丹後義彦、石山隆庸：線状加熱による船体曲り外板の曲げ加工技術、塑性と加工 58 巻 679 号、pp661-665、(2017)

10) 柴原正和、生島一樹、伊藤真介、正岡孝治：動的陽解法 FEM を基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案、溶接学会論文集、29 巻 1 号、pp1-9、(2011)

11) 生島一樹、柴原正和、伊藤真介：GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM の開発、溶接学会論文集、31 巻 1 号、pp23-32、(2013)

12) 柴原正和、河村恵里、生島一樹、伊藤真介、望月正人、正岡孝治：ステレオ画像法に基づく三次元溶接変形計測法の開発、溶接学会論文集、28 巻 1 号、pp108-115、(2010)



丹後 義彦