

熱加工プロセスの解析に関する アクティビティの紹介

高倉 大典 * 前田 朝樹 ** 波多野 暢亮 ***

Takakura Daisuke

Maeda Tomoki

Hatano Yosuke

工業製品の製造過程では、溶接や熱処理などの熱加工プロセスが多用され、その解析技術は製造プロセスの改善や品質の向上に大きく寄与する技術である。本稿では、著者らの熱加工プロセス解析技術について紹介する。

キーワード：熱加工、溶接、熱処理、線状加熱、熱伝導、応力、変形、FEM、CFD

1. 製品製造における熱加工プロセス

工業製品には溶接により組み立てられて製造されるものが多く、溶接中に生じる急激な温度勾配に起因する変形が生じてしまうという問題がある。溶接変形は、後続の組立て工程において悪影響を及ぼし、変形を修正する必要があるなどコスト増の要因となるため、変形を予測し適切に対応することが求められる。また、溶接部の変形に起因して溶接部近傍には内部応力（溶接残留応力と呼ぶ）が生じ、しばしば割れの発生原因となることがあるため、原子力関連機器などの高い信頼性が求められる製品においては、溶接後の残留応力分布を予測することが重要となる。

一方、船の外板の板曲げ加工で用いられている線状加熱は、板を局所的に加熱することによって生じる変形を使って板を目的形状に曲げるプロセ

スであるが、熟練技能を必要とするため、曲げ加工の自動化が進められている。

また、真空浸炭などの熱処理においても炉内環境の不均一さが原因で品質にばらつきが生じることがあるため、ガスの流れや熱伝達、温度などの予測が重要である。

2. 解析事例

2.1 オーバーパック溶接部残留応力解析

使用済核燃料の再処理の際に生じる高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体にした上でオーバーパックと称する容器に封じ込めて溶接し、最終的には地層処分することが基本方針となっている。IHIは公益財団法人・原子力環境整備促進・資金管理センター殿からの委託により、このオーバーパック溶接部の残留応力に関わる予測・低減手法

* 研究開発事業部 解析技術部 次長

** 研究開発事業部 解析技術部 課長

*** 研究開発事業部 解析技術部

について研究を行っている。⁽¹⁾⁽²⁾

オーバーパックは厚さ 190mm の炭素鋼製の容器であり、円形の落とし蓋を SEDAR-TIG 溶接する手法が、施工方法の一つとして検討されている。

図 1 にオーバーパック蓋部溶接試験体の写真を示す。溶接施工は 61 層 107 パスで行われ、溶接残留応力解析についても、汎用 FEM コードの ABAQUS を用いて、以下の手順にてこの全パスを模擬する解析が行われた。

- ① ガラス固化体の発熱を考慮した定常熱伝導解析による初期温度分布計算
- ② 溶接入熱を考慮した非定常熱伝導解析による過渡温度分布計算
- ③ 計算した過渡温度分布を荷重として与える熱弾塑性解析による応力計算

図 2 にオーバーパックの FEM 解析モデル、図 3 に溶接残留応力解析結果（等価応力分布図）を示す。溶接後には図 3 に示すような残留応力が生じるが、これを低減するために溶接後熱処理（PWHT 法）や溶接部近傍を加熱後に表面を急冷する EIHSI 法による残留応力低減手法について検討されている。IIC は、本研究に関わる FEM 解析作業の実施などに関して協力している。

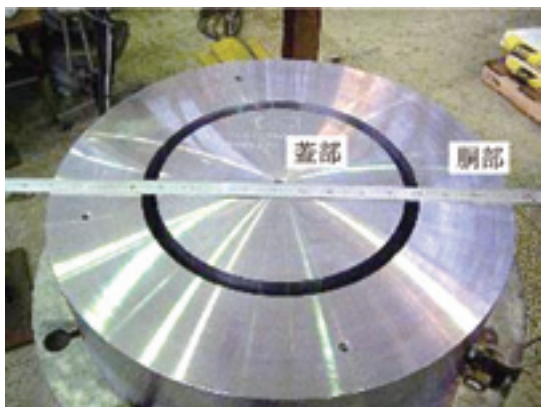


図 1 オーバーパック蓋部溶接試験体⁽¹⁾

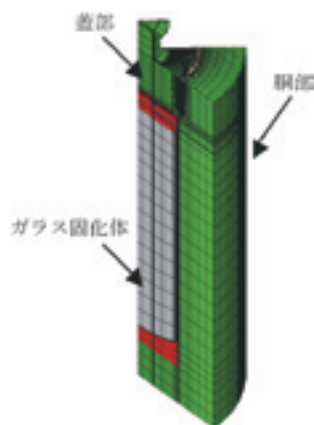


図 2 オーバーパック FEM 解析モデル⁽²⁾
(30 度モデル)

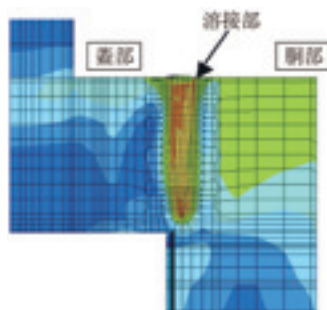


図 3 溶接残留応力解析結果⁽²⁾
(溶接部近傍の等価応力分布図)

2.2 線状加熱板曲げ加工解析

船舶の外板、特に船首部は航行時の抵抗を減らすため、図 4 に見られるような複雑な 3 次元形状が用いられている。前述したように、鋼板は局所的に加熱されると加熱部に収縮と曲げ変形が生じる（図 5 参照）。線状加熱板曲げ加工はその性質を利用し、作業者がガスバーナーと冷却用の水ホースを使って板曲げ加工を行ってきた（図 6 (a) 参照）。しかし、この作業には熟練した技能が必要で、その習得には多くの年数を要するため、近年 IHIMU では線状加熱自動板曲げ装置（IHIMU-a：図 6 (b) 参照）の開発に取り組んでいる。⁽³⁾⁽⁴⁾ IHIMU-a は、板の目的形状データと加熱条件-変形量のデータベースから、目的形状に加工するための加熱線の組み合わせを算出し、高周波誘導加熱

コイルで加熱を行うシステムである。データベースを構築するために、これまでは様々な加熱条件で実際に板を加熱し、変形量を計測することによりデータを収集してきた。しかし、加熱試験には多大な時間と手間を要するため、IHIMU 殿より FEM 解析によるデータベース構築支援の依頼があり、IIC は FEM 解析の他、温度計測試験の実施などで協力している。図 7 に平板に 2 本の加熱線を交差させたときの変形と等価応力の解析事例を示す。



図 4 船舶外板の曲がり形状
(船首部)

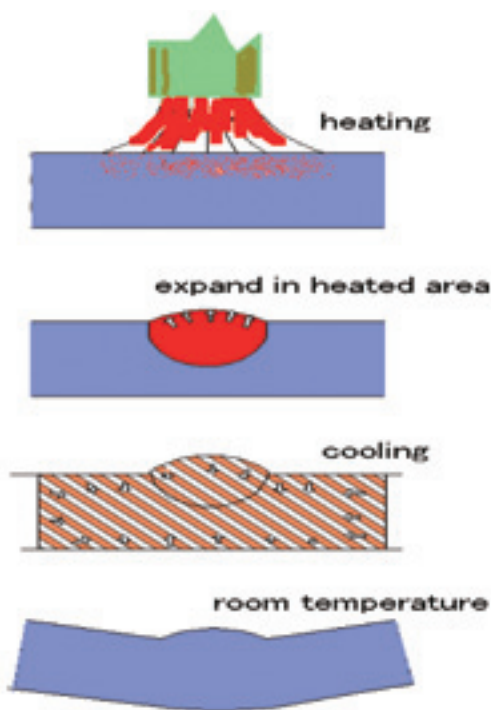


図 5 線状加熱による板曲げの原理



(a) 従来：熟練技能者による加工



(b) 近年：自動曲げ加工装置 (IHIMU-α)

図 6 線状加熱板曲げ加工

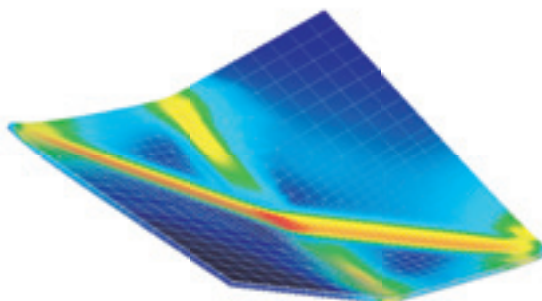


図 7 線状加熱シミュレーション (交差加熱の例)

2.3 炉内シミュレーション

機械部品の浸炭処理は、製品表面における炉内ガスとの表面反応で炭素が鋼に浸入し内部に拡散する現象を利用しているため、炉内のガスの不均一な流れは製品の品質を大きく左右する。また、ろう付けと呼ばれる金属接合は、接合面にろう（接合する母材よりも融点が低い合金）を置き、炉に入れて加熱することにより接合する方法であるが、製品表面で不均一な熱伝達が起きたりすると熱変形が生じ、うまく接合できないことがある。

IICではCFD解析技術を用いてこのような炉内環境をシミュレーションすることが可能であり、炉内ガスの流れや炉内の製品配置を変えた解析を行うことにより、製品の不具合防止や品質の均一化の検討を行うことができる。以下に、炉内シミュレーションと同様の手法で行ったIIC磯子事業所建屋3階の室内環境のシミュレーション結果(図8)、およびシミュレーションに用いた計算条件(表1)を示す。

2.4 その他

これらのほかにも、熱加工プロセスシミュレーションには以下のような実績がある。

① 压力容器円筒胴の溶接シミュレーション

厚板円筒胴の多層溶接シミュレーションによる変形量予測と、変形量(真円度からの外れ量)の小さい開先の検討

② 溶接部の局部焼鈍シミュレーション

溶接後の応力除去焼鈍を局部的に行うときの温度分布予測と加熱ヒータ配置検討、応力除去の効果確認

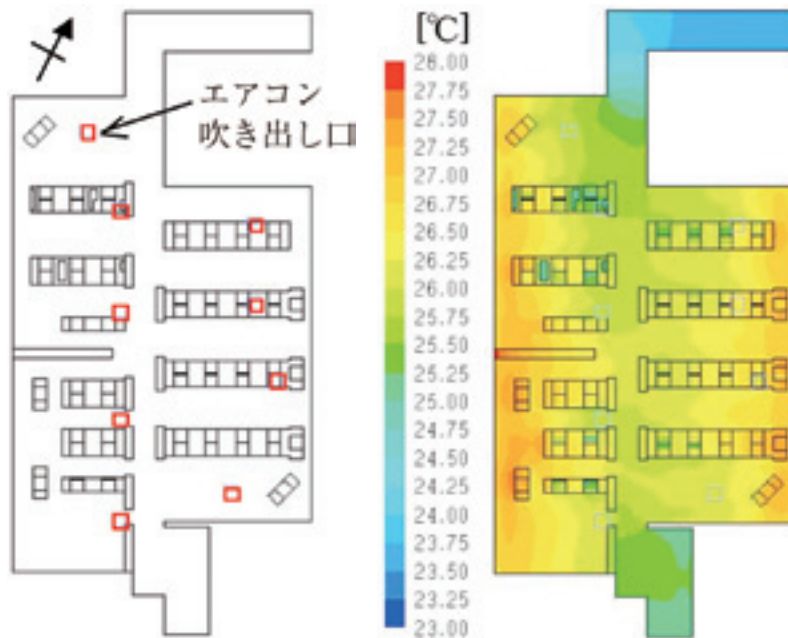


図8 IIC 磯子事業所3階の室内環境(温度分布)解析結果

3. まとめ

熱加工プロセスは、多くの工業製品に関わりがある技術である。IICは今後とも溶接や熱処理などの熱加工プロセスにシミュレーション技術を適用し、製造プロセスの改善や品質向上の取り組みを支援していく。

表1 計算条件

外気温	30℃
窓ガラス熱伝達率	10 W / m ² · K
エアコン空気温度	20℃
エアコン空気流速	0.1m / sec

参考文献

- (1) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書－遠隔操作技術高度化開発－、2008
- (2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書－人工バリア品質評価技術の開発－、2011
- (3) 高倉、小林、與倉：船体外板の 3 次元曲げ加工技能のシステム化：FEM 解析の線状加熱への応用、日本機学会材料力学部門講演会講演論文集、2000
- (4) 丹後、石山、鈴木：船殻外板の全自動曲げ加工システム "IHIMU-*a*" の開発、IHI 技報、51 (1)、2011



研究開発事業部
解析技術部 次長
高倉 大典
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2119



研究開発事業部
解析技術部 課長
前田 朝樹
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2119



解析技術部
波多野 暢亮
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2119