HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	熱間薄板圧延向け誘導加熱装置の数値解析および制御モデル構築に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	下谷, 俊人
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第14139号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/78318
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Toshihito_Shimotani_abstract.pdf (論文内容の要旨)

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　下谷俊人

学　位　論　文　題　名

熱間薄板圧延向け誘導加熱装置の数値解析および制御モデル構築に関する研究
（Study on numerical analysis and control model of induction heater in hot strip rolling）

熱間薄板圧延 (熱延) は, 金属の鋼片を高温に加熱し, 薄板を製造してコイルに巻取る圧延方法である。熱延で製造される薄板は, 自動車や船舶・車両・産業機械等の製造業や, 橋・ビル等の建築物の材料等, 社会を支える用途として用いられる。また, 下流工程にあたる冷間圧延 (金属材料を再結晶温度以下で圧延する加工法) の母材となり, 家電や飲料缶等の身の回りの生活用品の材料として用いられる等, 我々の生活に欠かせないものとなっている。

熱延プロセスにおいて, 製品品質の向上および, 安定操業の観点から, 圧延材の温度制御が非常に重要である。近年では多くの熱延設備で, 高効率で急速・局所加熱に秀でた誘導加熱装置 (Induction Heater：IH) を用いた温度制御が導入され, 熱延ラインの付加価値の向上に貢献している。しかし,IH は装置規模の大きさや使用環境の特殊性から, 実機から特性データを採取することが難しく, オンライン制御に耐える厳密な数理モデルが構築されていない現状がある。そのため,IH の実運用においては, 簡易な計算式を用いた設定計算・制御が行われているに留まり, より正確な数理モデルの構築が望まれていた。

これに関連して, 近年の計算機の演算能力向上に伴い, 数値解析の産業応用が普及している。中でも有限要素法 (Finite element method : FEM) は, その汎用性の高さから電磁界分野でも広く普及し, 電磁機器の設計・開発に関する研究が盛んに行われている。一般に,FEM の解析精度と解析時間はトレードオフの関係にあり, 特に 3 次元 FEM の場合は解析時間の長大化が問題となる。そのため, 大規模問題の解析縮約手法であるモデル縮約法や,FEM をベースとした機器の等価回路生成手法が研究されている。

また, ここ数年で AI・IoT 技術の産業応用が急激に普及している。プラントから得られる多量で非線形なデータは, 深層学習などの機械学習によるデータ分析と親和性が高い。熱延プロセス制御においても, これらのデータを活用し, 熱延中の多様な因子の影響を精度よく表現できるデータ駆動型の数理モデルが注目され, 従来の理論ベースの数理モデルによる制御との融合が研究されている。

上記の背景から, 本研究では,IH の高精度な数理モデル構築を目的とし,FEM をベースに以下の検討を行った。

(1)　固有直交分解法を用いた IH の解析縮約

(2)　IH の等価回路生成

(3)　機械学習を用いた IH の制御モデル構築

3 章では,(1) として,IH の特性解析高速化のため,IH に特化した準静磁場-熱伝導解析の効率的な連成解析手法を提案した。また, モデル縮約法の一種である固有直交分解法 (Proper orthogonal decomposition: POD) を用いた,IH の準静磁場解析高速化について検証した。3 次元 FEM による IH の特性解析には, 長大な解析時間を要するという問題があったが, 提案手法および POD を用いた解析縮約により,FEM と同等の解析精度を維持しながら,IH の特性解析に要する時間を大幅に短

縮できることを示した。
4 章では,(2) として,IH と電源系の応答解析を高精度かつ高速に実行可能な等価回路の生成手法を提案した。近年では, 準静磁場を精度よく表現できる等価回路として,Cauer 回路と呼ばれる梯子回路に関する研究が盛んに行われている。しかし, 従来の Cauer 回路は解析対象に導電性材料が複数ある場合, 各導電性材料のジュール損失を分離して評価できないという問題があった。そこで本研究では, 複数の導電性材料に生じるジュール損失を分離して考慮可能な修正 Cauer 回路の生成手法を提案した。提案手法で生成した回路により,FEM と同等の精度で,IH の誘導コイルと被加熱材にそれぞれ生じるジュール損失を計算できることを示した。また,IH の周波数応答・過渡応答解析を, 高精度かつ, オンラインに適用可能な時間内で行えることを示した。
5 章では,(3) として, 機械学習を用いたデータ駆動型の IH 制御モデルを構築した。実際の熱延における IH 制御では, 被加熱材の板厚や板幅, 鋼種等の材料諸元に加え,IH 進入時の速度・温度分布, 熱放射率等の周囲環境条件を考慮する必要がある。そこで, 機械学習の一種であるニューラルネットワークを用いた, データ駆動型の IH 制御モデルを構築した。構築した制御モデルにより, 所望の条件における IH 加熱後の被加熱材の温度分布や, 被加熱材を所望の温度分布に制御するために必要な IH の出力電力を, 従来制御で必要であった繰返し計算を要さず,FEM と同等の精度で求められることを示した。