COMSOL Multiphysics[®] 金属プロセスモジュールを用いた高 周波焼入れ解析と深層学習適用の事例紹介

篠崎明ⁱ

A Case Study of Induction Hardening Simulation Using COMSOL Multiphysics[®] and Investigation of Reduced Order Modeling by Deep Learning.

Akira SHINOZAKI

2019 年にリリースされた COMSOL Multiphysics[®]バージョン 5.5 では,新しいモジュールとして,相変態を 扱う,金属プロセスモジュールが追加された.金属プロセスモジュールを活用することで相変態に関わる マルチフィジックス解析が可能となる.本報では金属プロセスモジュールの機能紹介,金属プロセスモジ ュールを用いた高周波焼入れの解析事例,最後に,深層学習活用の検討について紹介する.

(キーワード): 相変態, 高周波焼入れ, COMSOL Multiphysics, Metal Processing Module, 深層学習

1 はじめに

2019 年にリリースされた COMSOL Multiphysics[®] バージョン 5.5 では,新しいモジュールとして金属 プロセスモジュールが追加された.金属プロセスモ ジュールを使用することで相変態に関わるマルチフ ィジックス解析が可能となる.

相変態は鉄鋼の特性の改質によく活用される.例 えば、自動車や産業用機器に用いられるシャフトや ギアなどの動力伝達部品には高い負荷が作用する. このため、高い疲労強度、靭性、および耐摩耗性を 確保することが重要となる.鉄鋼製のシャフトやギ アなどは、加熱し、その後、冷却することで相変態 が生じ、金属としての特性を変化させることができ、 疲労強度、靱性、摩耗性を向上させられる.

シャフトやギアの加熱によく用いられる方法の一 つに高周波焼入れがある.高周波焼入れは,高周波 誘導電流を利用してシャフトやギアを加熱する.高 周波焼入れの条件設定は熟練者によるノウハウや試 行錯誤的な実験によって導出されることが多く,条 件設定の負荷を低減するためシミュレーションの活 用が試みられている.

高周波焼入れは電磁場、伝熱、応力、相変態、流 体といった物理現象が含まれており、解析対象とし て見た場合,複雑なマルチフィジックス問題である. 複数の物理を同時に扱わなければならないマルチフ ィジックス問題の解析では、考慮する物理現象それ ぞれに専用の解析ソフトを揃えなければならなかっ たり、それらの計算を相互に連動するようにつなが なければならなかったりと、単一の物理現象を解析 するよりも煩雑であり、解析実施の敷居は高い. し かし、当初からマルチフィジックス専用ソフトウェ アとして開発されてきた COMSOL Multiphysics®で は、単一のソフトウェア上で、非常に簡単な操作で、 複数の物理現象の解析を相互に連動できる.従来, COMSOL Multiphysics[®]では電磁場, 伝熱, 応力, 流 体を扱っており、ここに相変態が加わることで、高 周波焼入れに関する各物理現象を考慮したシミュレ ーションが可能となった.

本稿では、高周波焼入れの条件出しの低減に活用 できるシミュレーションモデルの作成を目的に、 COMSOL Multiphysics[®]を用いた、誘導電流による加 熱のプロセスと、冷却による相変態のプロセスをシ ミュレーションした事例を紹介する.

ⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム 主任コンサルタント 博士 (工学)

以降では、まず、相変態を計算する金属プロセス モジュールの機能について紹介する.続いて、高周 波焼入れのシミュレーションモデルについて、解析 手法を説明し、円筒形状のクロムモリブデン鋼 (SCM440)を対象にした加熱プロセスと冷却プロ セスのシミュレーションの結果を示す.また、シミ ュレーションの効率化の検討として、最後に深層学 習を用いた、加熱プロセスの温度分布を予測するモ デルを作成し、真値と予測値の差を比較した.本検 討が今後の高周波焼入れのシミュレーション活用の 一助になれば幸いである

2 金属プロセスモジュールの機能紹介

金属プロセスモジュールでは相変態のモデルとし て,拡散型変態に適した Leblond-Devaux 式, Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK)式,無拡散型変態に 適した Koistinen-Marburger 式が用意されている. そ の他にもユーザー指定の相変態を表す任意の数式を 設定できる.相変態の潜熱や,相変化により生じる ひずみも考慮できる.各相の熱物性(熱伝導率など), 力学物性(ヤング率など)を入力することで,相の 割合に応じて式(1)により,相の変化状態に応じた 物性の変化を考慮できる.ここでPはバルク状態の 物性値, P_i は各相の物性値, ξ_i は各相の存在割合, nは考慮する相の総数を表している.

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i \xi_i \tag{1}$$

相変態の解析は、伝熱解析、構造解析と連成させることで、その適用範囲が広がる.これらの相関を図1に示す.



相変態, 伝熱, 構造を連成させた解析例として, 温度駆動の相変態により歯車に生じる残留応力の計 算¹⁾が COMSOL Multiphysics[®]の開発元である COMSOL Inc.が管理している Web ページ, COMSOL Blog で紹介されている.

3 高周波焼入れシミュレーションモデル

3.1 概要

高周波焼入れには, 被加熱物を加熱する加熱プロ セスと、温まった被加熱物を急冷する冷却プロセス がある.加熱プロセスでは被加熱物の周囲にコイル を配置し、コイルに交流電流を流して誘導加熱によ り被加熱物が加熱される. 冷却プロセスでは被加熱 物を水や油や水溶性焼入れ材等に浸して急冷する. この急冷の時に鉄鋼の温度がどの範囲にどの時間保 持されているかによってオーステナイトから他の相 への変態が変わる.一例として、文献2)より転載の 共析炭素鋼の等温変態線図 (time-temperaturetransformation (TTT)線図)を図2示す.885℃以上に 加熱し、オーステナイト化した鉄鋼を P_s-P_fの間を 通るように冷却するとパーライト変態が生じ、B。-B_fの間を通るように冷却するとベイナイト変態が生 じる、それぞれの温度区間にとどまる時間によって 変態量が変わる.220℃付近まで温度が下がるとマル テンサイト変態が生じる.



本稿では、加熱プロセスでは、電磁場の周波数解 析により被加熱物に流れる電流密度を求める. 求め た被加熱物に流れる電流密度と被加熱物の電気抵抗 から発熱量を求め、伝熱の非定常解析(時間発展) を行う. 冷却プロセスでは熱伝導解析と相変態解析 を連成し、温度、相変態の非定常解析(時間発展) を行っている. 電磁場解析の基礎式はマクスウェル 方程式,熱伝導解析の基礎式は熱伝導方程式である. 電流による発熱はジュール発熱とヒステリシス損を 考慮している.相変態解析では無拡散型変態の進行 として Koistinen-Marburger の式,拡散型変態の進行 として JMAK 式を用いている.

3.2 解析モデル

解析対象は図3に示す模式図のように被加熱物で ある円筒型のクロムモリブデン鋼(SCM440)の周囲 にコイルを配したものとした.図4,図5に加熱プ ロセスと冷却プロセスの解析モデルを示す.両モデ ル共,対称性を利用して2次元軸対称モデルで計算 を行った.



図3 解析対象の形状



図4加熱プロセスの解析モデルおよび境界条件 (赤字は境界条件を表している)



図5 冷却プロセスの解析モデルおよび境界条件 (赤字は境界条件を表している)

3.3 解析条件

1

加熱プロセスの磁場解析と熱伝導解析では、コイ ルは銅、周囲は空気とした.磁場解析の境界として、 図4に示した解析モデルの解析領域の大外は磁場絶 縁とした.軸対称モデルでは、コイルが形状として つながらないため、コイルの各部に紙面方向に一様 の電流が流れる条件を与えて電流の連続性をモデル 化した.印可する電流は周波数 10kHz,最大振幅 2000Aの正弦波交流とした.クロムモリブデン鋼か ら空気への放熱はクロムモリブデン鋼表面での熱伝 達として考慮した.熱伝達計算の外部温度は 27℃と した.また、本検討では、電磁誘導による加熱に着 目しており、コイル、クロムモリブデン鋼間の輻射 による熱のやり取りや、空気を介した熱のやり取り は考慮しないものとし、コイル表面には断熱条件を 設定した.

図5に冷却プロセスの解析条件を示す.冷却プロ セスではクロムモリブデン鋼が水中で冷却されるこ とを想定した.このため、コイルは計算対象から除 外した.クロムモリブデン鋼から水中への放熱は、 クロムモリブデン鋼表面での熱伝達として考慮した. 熱伝達計算の外部温度は20℃とした.冷却プロセス におけるクロムモリブデン鋼の初期の相はオーステ ナイトと仮定した.

3.4 物性值

相変態に関する材料定数は文献 3) に記載の SCM440 の TTT 線図を参考に決定した.磁場解析, 熱 伝 導 解 析 に 関 す る 物 性 値 は COMSOL
Multiphysics[®]に内蔵されているデータベースの値を
使用した.表1に磁場解析,熱伝導解析に用いる物
性値を示す.

	コイル(銅)	鉄鋼	空気
電気伝導度 [S/m]	5.998 × 10 ⁷	4.032 × 10 ⁶	0
比熱 [J/kg/K]	385	475	
密度 [kg/m³]	8940	7850	
熱伝導率 [w/m/K]	400	44.5	

表1 物性值

4 解析結果

図6に加熱プロセスにおける磁束密度を示す.ク ロムモリブデン鋼の表面に磁束が集中しており,表 皮効果が表れている.図7に温度の時間変化を示す. 表皮効果により表面から加熱されている.

加熱プロセスの 2700 秒時の温度分布を冷却プロ セスの温度の初期条件とする.3.3 節に示した冷却プ ロセスの解析条件に従い計算を行い,温度低下によ る相変態を求めた.温度変化を図8に示す.表面か らの放熱により,クロムモリブデン鋼の周囲から



図6加熱プロセスの解析結果(磁束密度分布)

温度が低下している. 概ね常温まで冷却された 500 秒の状態の相分布を図9に示す. 図9の色は各 層の存在割合を0から1で表したものである. 比較 的冷却の速い角部ではマルテンサイトが多く析出し, 冷却が遅い内部にいくにつれベイナイトの割合が増 えることが予想された.

ここでは一例を紹介したが、本シミュレーション は材料の種類や加熱、冷却のプロセスを変更した場 合に、各相の分布に依存した表面の硬さの分布を予 測することができ、よりよい製品の製造、材料開発、 生産技術向上に資することができる.



図7加熱プロセスの解析結果(温度分布)



前章までの解析は2次元軸対称を用いた単純な形 状のものであるため解析時間は短い.しかし、実際 に高周波焼入れに用いられる歯車やクランクシャフ トなどの被加熱物は形状が複雑な場合が多い. その ような場合には、空間分割のメッシュも細かくなる ため計算時間は長くなると想定される. そこで計算 を効率化する方法として,深層学習の適用を試みる. 一例としてここでは,前章までに行ってきた加熱

プロセスの温度分布を深層学習で予測する. 深層学 習の対象は加熱プロセスの温度分布とした.図3の 解析体系において様々な形状のクロムモリブデン鋼 における加熱プロセスの解析を行い、得られた温度 分布を学習させ,任意形状における温度分布を機械 学習で得られた関数により予測する. 学習データの 一例として任意形状における温度分布を図 10 に示 す.



(a) 解析形状の 3D 表示



図10 学習データの一例



図8 冷却プロセスの解析結果(温度分布)

300



深層学習モデルの損失関数は MSE, 最適化手法は Adam を用いた. 訓練 1167 ケース, バリデーション 292 ケース, 500 エポックの学習を実施した. 予測誤 差を表2に示す. また, 図 11 に真値, 予測, 両者の 差分を示す. 予測と真値の傾向には相関があり, 今 回行ったような連成計算においても深層学習モデル が構築できることが示唆される. しかし, 定量的に は差があり, 学習モデルの改善や, 学習データの増 強などが今後の課題と考えられる.



6 終わりに

2019 年にリリースされた COMSOL Multiphysics[®] バージョン 5.5 で新しく追加された金属プロセスモ ジュールについて,機能および高周波焼入れ解析の 事例を紹介し,深層学習適用の検討を示した.

高周波焼入れをはじめ、相変態は熱、構造、電磁場、流体などの要素を含むマルチフィジックス問題であり、この領域のシミュレーション活用の拡大に COMSOL Multiphysics[®]は大いに貢献できるものと思われる、本報がその一助になれば幸いである、

引用文献

 Simulating the Carburization and Quenching of a Steel Gear, COMSOL Blog, https://www.comsol.jp/blogs/simulating-thecarburization-and-quenching-of-a-steel-gear/

- 牧正志,鉄鋼の組織制御 その原理と方法,内田 老鶴圃, p. 53
- 2) 上田英明,岡正徳ほか:高周波焼入れした鉄鋼材の自己触媒核生成の考慮による相変態予測精度の向上,日本機械学会論文集,(2015), Vol. 81, No. 830, p. 15-00126