

博士学位論文

高周波焼入れシミュレーションによる
熱処理変形と残留応力の予測技術に
関する研究

平成27年3月

茨城大学大学院理工学研究科
応用粒子線科学専攻

堀野 孝

Study on Prediction Technology of Heat Treatment Distortion and Residual Stress using Induction Hardening Computer Simulation

Takashi Horino

Abstract

Induction hardening is a case hardening method that features induction heating, rapid heating method, spray cooling, rapid cooling method. In recent years, it has attracted attention as W-Eco[®] (Ecological and Economical) heat treatment method since it uses clean electric energy and has higher economic efficiency. In addition, there are excellent features such as capability of rapid heating, localized quenching, application of high compressive residual stress due to case hardening and automatic in-line processes. It has been applied to improve the wear resistance, the fatigue endurance and the toughness of steel parts such as automotive, construction equipment and machine tools.

The heat treatment distortion caused by induction hardening has a large effect on the final quality and performance of products and the cost of post-process for improving the processing accuracy. Reducing the amount of heat treatment distortion is required by the industry. Therefore, it is necessary to predict heat treatment distortion and optimize the conditions of heat treatment, but the heat treatment distortion is a complicated phenomenon that involves various factors due to temperature and phase transformation changes during heating and cooling, and also includes occurrences of strain and stress. Understanding the generation mechanism of heat treatment distortion is a difficult problem. Prediction with high accuracy of heat treatment distortion is a great challenge for the industry. On the other hand, due to the significant progress of numerical analysis technology and

computer processing performance in recent years, computer simulation techniques and software of heat treatment is showing a great development and improvement, so that heat treatment distortion is becoming predictable by a computer simulation. In order to further reduce the amount of heat treatment distortion, we need to predict the distortion with high accuracy. For this, it is necessary to establish numerical analysis technology that accurately predicts the amount of various strains such as elastic and plastic occurred during the heating and cooling processes. Also, it is essential to understand the mechanism of heat treatment distortion in a computer simulation.

In this paper, with the aim of establishing the prediction techniques of heat treatment distortion and residual stress in the induction hardening process, I describe my studies using computer simulations to clarify the distortion mechanism of heat treatment.

First, for purpose of achieving high accuracy in induction hardening simulation, high accuracy methods of heating and cooling processes were investigated. In the heating process, the new method of magnetic field analysis considering the BH curves with a temperature dependence was developed, and it was verified that heating curves and temperature distribution at the end of the heating process is closer to the actual measurements in an induction heating simulation considering the magnetic saturation of the steel parts surface. In research related with the above, the measurement method of high-temperature magnetism properties in steel was developed, and BH curves of JIS-S45C steel from room temperature to 750 degree C were measured. Also, by performing the induction hardening simulation while incorporating changes in the air gap between the induction coil and the workpiece during the heating, we verified that it is possible to predict the

temperature distribution of the large steel parts with high accuracy. On the other hand, in the cooling process, the heat transfer coefficient greatly influences the accuracy of induction hardening simulation. Therefore, it was showed that the heat transfer coefficient curve could be automatically calculated with high accuracy from the cooling curves by an inverse analysis method using optimized support software.

Next, we examined whether it is possible to explain the generating mechanism of heat treatment distortion and residual stress using an induction hardening simulation. Then, it was showed that the generation mechanism of heat treatment distortion could be clarified by analyzing the simulated distribution changes of the various strains. It was confirmed that this technique could be utilized to the investigation of the method of reducing heat treatment distortion in production components, since it was possible to clarify the degree of contribution of the various strains of heat treatment distortion. In addition, because induction hardening used rapid heating and rapid cooling methods, plastic and transformation plastic strains occur only near the heated region. In particular, since the scanning induction hardening involved local heating and local cooling, it was identified that residual stress distribution was different in stationary induction hardening.

Finally, an induction hardening simulation was applied to resolving the problem of quenching cracks; the relationship between quenching crack generation and the concentration of tensile stress was clarified; and an investigation of how quenching cracks are generated was performed. An induction hardening simulation was applied to the quenching crack tests using steel bar specimens with a ring groove to promote quenching crack generation. Additionally, distributions of

temperature, stress and various strains obtained from the simulated results were analyzed at different points during cooling. Our result showed that the occurrence position of the quenching crack was generated by high tensile stress after the martensitic transformation. It was confirmed that volume expansion in the inside region during the martensitic transformation was involved in the concentration of tensile stress on the surface of the specimen.

Using the induction hardening simulation technique according to these research results, it was possible to predict with high accuracy heat treatment distortion and residual stress in the induction hardening process. In addition, clarifying the mechanism of generating heat treatment distortion and residual stress could be utilized for reducing the amount of heat treatment distortion in induction hardening, and also for improving heat treatment quality, developing new heat treatment technology and avoiding failure in advance.

学位論文要旨

高周波焼入れは、誘導加熱(IH: Induction Heating)による急速加熱と、噴射冷却を主とする急速冷却を使用する表面熱処理法であり、クリーンな電気エネルギーを使用し、エネルギー効率が良く経済的で、近年では地球環境にやさしい W-Eco[®] (Ecological and Economical) 熱処理として注目されている。また、急速短時間加熱や部分焼入れ、表面焼入れによる高い圧縮残留応力の付与、自動インライン処理などの優れた特徴があり、耐磨耗性や耐疲労特性、強靱性の向上を目的として、自動車部品や建設・工作機械部品などに数多く適用されている。

高周波焼入れ時に生じる熱処理変形は、製品の最終品質や性能、後工程の高精度化加工コストに大きな影響を与えることから、変形量の低減が求められている。そのためには、熱処理変形の予測と熱処理条件の最適化が必要となるが、熱処理変形に影響をおよぼす要素は多く存在するため、熱処理変形の予測は歴史的に課題とされながらも難題であった。一方、近年の数値解析技術とコンピュータ性能の著しい進歩により、コンピュータによる熱処理シミュレーションを用いて熱処理変形が予測可能となりつつある。ただ、研究開発途上であり、さらに高精度に熱処理変形を予測して熱処理変形をより一層低減させるためには、加熱冷却中に発生する応力やひずみ量を精度良く予測出来る数値解析技術の確立と、シミュレーションによる熱処理変形発生メカニズムの解明が必要不可欠である。

本論文では、高周波焼入れにより生じる様々な現象の高精度な数値解析手法を検討し、高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の予測技術を確立するとともに、シミュレーションによる熱処理変形の発生メカニズム解明のために実施した研究の成果をまとめている。

最初に、高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、加熱過程および冷却過程の高精度化手法について検討した。加熱過程では、温度依存性を有する B-H 曲線を考慮した磁場解析手法を開発し、部品表面の磁気飽和を考慮した高周波加熱シミュレーションにより、昇温曲線や加熱終了時の加熱温度が試験結果に近づくことを実証した。これと関連して、鉄鋼材の高温磁気特性測定手法を開発し、常温から 750℃までの S45C 材 B-H 曲線を作成した。また、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施すれば、大型部品の温度分布を高精度に予測できることを実証した。一方、冷却過程では、高周波焼入れシミュレーションの解析精度に大きく影響を及ぼす熱伝達率を、最適化支援ソフトを活用した逆解析法により冷却曲線から自動的に算出できることを示した。

次に、高周波焼入れシミュレーションにより熱処理変形および残留応力の発生メカニズムが解明可能かどうかを検討し、シミュレーション結果から得られた各種ひずみ量の時間変化を詳細に分析すれば、熱処理変形の発生メカニズムを明らかできることを示した。この分析手法は、熱処理変形への各種ひずみ量の寄与の程度を明確にできるため、熱処理変形の低減方法の検討に活用できることを確認した。また、短時間加熱で急速冷却である高周波焼入れは、塑性ひずみや変態塑性ひずみが加熱部近傍のみに発生し、特に移動焼入れは局所加熱と局部冷却であるため、定置一発焼入れとは異なる残留応力分布になることを明らかにした。

最後に、焼割現象に対して高周波焼入れシミュレーションを適用し、焼割発生と引張応力の集中との関係を明確にするとともに、焼割発生メカニズムの検討を行った。まず、焼割れを助長するため円周状のリング溝を加工したリング溝付試験片による焼割試験を対象に高周波焼入れシミュレーションを実施し、シミュレーション結果から得られた温度や応力、各種ひずみ量を

時系列で分析した。その結果、焼割れの発生位置ではマルテンサイト変態後に高い引張応力が生じており、部品内部のマルテンサイト変態による体積膨張が部品表面の引張応力の集中に関与していることを明らかにした。

本研究の成果である高周波焼入れシミュレーション手法を用いて、高周波焼入時の熱処理変形および残留応力を高精度に予測することを可能にした。また、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムを解明することで、高周波焼入れでの熱処理変形をより一層低減させることだけでなく、熱処理品質の向上や熱処理の新技術開発、不具合の事前回避などにも活用出来ると考える。

目次

第1章 緒論	14
1.1 本研究の背景	15
1.2 高周波焼入れの特徴	16
1.3 熱処理シミュレーション技術の発展	17
1.4 高周波焼入れシミュレーションの報告事例	20
1.5 本研究の目的	22
1.6 本論文の構成および内容	22
第1章の参考文献	24
第2章 高周波焼入れの数値解析法	27
2.1 緒言	28
2.2 高周波焼入れシミュレーション方法	28
2.2.1 誘導加熱の原理	28
2.2.2 高周波焼入れシミュレーションの構成	30
2.2.3 磁場解析手法	32
2.2.4 熱処理解析手法	33
2.2.5 熱処理変形・応力とひずみの関係	35
2.3 シミュレーションに必要な材料データベース	36
2.3.1 材料特性データ	36
2.3.2 熱伝達率係数	38
2.4 適用事例	39
2.4.1 加熱コイルの設計	39
2.4.2 熱処理品質の予測	42

2. 4. 3	最近の傾向	44
2. 5	結言	44
	第2章の参考文献	45
第3章	高周波焼入れシミュレーションの高精度化	48
3. 1	緒言	49
3. 2	高温磁気特性を考慮した磁場解析法の開発	49
3. 2. 1	背景と目的	49
3. 2. 2	磁場解析における磁気特性の取り扱い	50
3. 2. 3	解析手法	51
3. 2. 4	磁気特性の測定	53
3. 2. 5	試験結果とシミュレーション結果の比較	56
3. 2. 6	小結	63
3. 3	高温磁気特性測定方法の開発	64
3. 3. 1	開発の背景	64
3. 3. 2	試験片の製作	64
3. 3. 3	測定方法	65
3. 3. 4	測定結果	67
3. 3. 5	小結	69
3. 4	コイルギャップ変動を考慮した高周波焼入れシステム開発	69
3. 4. 1	背景と目的	69
3. 4. 2	試験方法	70
3. 4. 3	シミュレーション手法	71
3. 4. 4	シミュレーション条件	73
3. 4. 5	試験結果とシミュレーション結果の比較	74

3. 4. 6	小結	77
3. 5	熱伝達率の逆解析による算出	78
3. 5. 1	背景と目的	78
3. 5. 2	水噴射冷却について	78
3. 5. 3	熱伝達率の同定手法の検討	79
3. 5. 4	逆解析の手法	80
3. 5. 5	精度検証	83
3. 5. 6	適用事例	84
3. 5. 7	小結	87
3. 6	結言	88
	第3章の参考文献	89
第4章	焼入変形と残留応力の予測	91
4. 1	緒言	92
4. 2	リング形状部品の高周波焼入れシミュレーション	93
4. 2. 1	背景と目的	93
4. 2. 2	熱処理変形シミュレーション手法	93
4. 2. 3	試験方法とシミュレーション条件	94
4. 2. 4	試験結果とシミュレーション結果の比較	97
4. 2. 5	変形メカニズムに関する考察	100
4. 2. 6	焼入変形量の低減方法の検討	105
4. 2. 7	小結	107
4. 3	丸棒の高周波移動焼入れシミュレーション	108
4. 3. 1	背景と目的	108
4. 3. 2	高周波焼入試験方法	108

4. 3. 3	シミュレーションの条件および結果	109
4. 3. 4	試験結果とシミュレーション結果との比較	114
4. 3. 5	残留応力の発生メカニズム	114
4. 3. 6	小結	116
4. 4	高周波移動焼入れシミュレーションによる 水噴射冷却状況の検討	117
4. 4. 1	背景と目的	117
4. 4. 2	試験方法	118
4. 4. 3	熱伝達率同定の予備試験	120
4. 4. 4	シミュレーション手法および条件	122
4. 4. 5	試験結果とシミュレーション結果の比較	126
4. 4. 6	小結	134
4. 5	結言	135
	第4章の参考文献	136
第5章	焼割れの予測	139
5. 1	緒言	140
5. 2	試験方法と試験結果	140
5. 3	シミュレーションの手法および条件	145
5. 4	試験結果とシミュレーション結果の比較	147
5. 5	焼割発生位置近傍のシミュレーション結果	150
5. 6	焼割れの発生メカニズム	151
5. 7	結言	154
	第5章の参考文献	155

第 6 章 総括 -----	157
謝辞 -----	162
著者の発表論文 -----	163

第 1 章

緒 論

第 1 章 緒論

1. 1 本研究の背景

高周波焼入れは、誘導加熱 (IH: Induction Heating) による急速加熱と、噴射冷却を主とする急速冷却を使用する表面熱処理法であり、近年ではクリーンな電気エネルギーを使用し、エネルギー効率が良く経済的で、地球環境にやさしい W-Eco[®] (Ecological and Economical) 熱処理⁽¹⁾⁽²⁾として注目されている。また、急速短時間加熱や部分焼入れ、表面焼入れによる高圧縮残留応力の付与、自動インライン処理などの優れた特徴があり、耐磨耗性、耐疲労特性の向上を目的として、自動車部品や建設機械・工作機械部品などに数多く適用されている。

熱処理変形は、製品の最終品質や性能、後工程の製造コストに大きな影響を与えるため、ひずみ量を最小限にとどめる低変形焼入れが求められている。高周波焼入れは単品処理のため加熱・冷却の制御が容易で均一性に優れ、さらに短時間加熱で部品表層のみを硬化することから、浸炭焼入れに比べて熱処理変形の低減が可能であるが、自動車をはじめとする鉄鋼部品の小型化および形状の複雑化に伴い、更なる低変形化が求められている。そのためには、熱処理変形の予測と熱処理条件の最適化による変形量の低減が必要であるが、熱処理変形に影響をおよぼす要素は多く存在するため発生メカニズムは複雑であり、熱処理変形の予測は非常に困難とされてきた。

しかし、近年の数値解析技術とコンピュータ性能の著しい進歩により、熱処理シミュレーションは大きく進歩発展しており、熱処理変形が予測可能となりつつある。ただ、熱処理変形を低減させるためには、焼入中に発生する応力やひずみ量をさらに精度良く予測出来る数値解析技術の確立と、熱処理変形および残留応力の発生メカニズム解明が重要な課題である。

1. 2 高周波焼入れの特徴

高周波焼入れは、主に周波数 1kHz から 200kHz の高周波電磁誘導作用による誘導加熱(IH: Induction Heating)を使用し、秒単位で高温まで急速加熱した後に急速冷却することで、鉄鋼部品の表面を硬化させる表面熱処理法である。

表 1-1 に高周波焼入れの材料技術面の特徴を示す。高周波焼入れは、高い表面硬さや高い表面圧縮残留応力、微細結晶粒、少ない変形量などが挙げられ、自動車や建設土木機械、工作機械などの鉄鋼部品の耐摩耗性、疲労強度および靱性の向上を目的に幅広く使用されている。次に、表 1-2 に加熱技術面の特徴を示す。高周波焼入れは、非接触の自己発熱による短時間の表面加熱である点や、熱サイクルの自由度の高さ、自動化・インライン化が容易などの優れた特徴を有している。いずれも鉄鋼部品の小型・軽量化、長寿命化に役立っており、電気エネルギーを用いる IH 技術により浸炭焼入れなどの表面熱処理法より高効率で消費エネルギーも少なく、かつ CO₂ 排出量が少ない環境に優しい W-Eco[®] (Ecological and Economical) 熱処理⁽¹⁾⁽²⁾として近年注目されている。

また、高周波焼入れは単品処理であるため、熱処理の前組織を安定化させれば熱処理変形のバラツキの小さい「定(さだ)まる」変形となる。また、この変形量を予測し前加工寸法にフィードバックすれば、熱処理後に高い寸法精度が得られる「低(ひく)い」変形となり、W-テイ[®] (定・低)変形⁽¹⁾⁽²⁾が実現する。

表 1-1 高周波焼入れの材料技術面の特徴

(◎:効果大 ○:効果中 △:効果小 ×:悪影響 —:関係小)

長所	主な機械的性質			
	疲労	摩擦	靱性	コスト
①高い表面硬さ	◎	◎	×	—
②深めで調整可能な硬化層深さ (対浸炭・窒化)	表面破壊○ 内部破壊◎	転動 ○	—	—
③高い表面圧縮残留応力	◎	転動 ◎ 表面 △	○	—
④微細組織 (1)結晶粒径 (2)焼戻炭化物	○	○	◎	—
⑤少ない脱炭	◎	○	—	○
⑥少ない変形(W-ティ(定・低)変形)	—	—	—	○
⑦安い材料費	—	—	—	○

表 1-2 高周波焼入れの加熱技術面の特徴

長所	主なポイント
①優れた熱効率	自己発熱、秒単位での1000°Cまでの表面急速加熱 → 高い経済性
②大きな熱サイクル設定自由度	周波数、出力、加熱コイル、冷却システムの組み合わせ → 種々の加熱・冷却条件設定
③清潔な環境 (CO2排出量少)	電気をを用いた直接加熱 → 環境に優しい
④迅速な運転・停止	電気をを用いた直接加熱
⑤容易な自動化	コンピュータ盛業の導入・インライン化 → 安定した処理が可能
⑥少ないスペース	高効率なトランジスタ式発振機の発達

1. 3 熱処理シミュレーション技術の発展⁽³⁾⁽⁴⁾

熱処理シミュレーションは、近年の数値解析技術である有限要素法の発展とコンピュータ性能の向上により確立した技術である。1950年代に数値解析技術の進展に伴って開発された有限要素法は、1970年代に当初の弾性線形解析から、熱伝導や弾塑性、クリープなどの非線形解析に拡張された。1980年代に入ると、コンピュータの発展に伴い、過去の熱処理現象に関する様々な理論的研究成果を多数用いて有限要素法に相変態モデルや複合則を

付加し、熱処理のような相変態を含む問題に関する研究例が現れるようになった。高周波焼入れでは、1985 年に Melander が磁場と熱伝導、相変態、弾塑性の連成解析による丸棒の定置一発焼入れおよび移動焼入れのシミュレーション結果を報告している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

有限要素法の熱処理現象への適用が進む中で、1984 年に熱処理分野におけるはじめての国際会議” Calculation of internal stress in heat treatment of metallic materials”⁽⁷⁾がスウェーデンのリンシェーピングで開催され、17ヶ国から約 100 名の参加者があった。会議では、熱処理応力の計算に関する発表がほとんどを占め、実験と計算の結果を良好に一致させるためには、弾塑性解析に変態塑性効果を考慮する必要があると総括された⁽⁸⁾。

1990 年代に入るとワークステーション性能の著しい向上やパーソナル・コンピュータの出現によって、熱処理シミュレーションの実用化への機運が生じてきた。そして、1992 年に井上らが、熱処理シミュレーションソフト”HEARTS (HEAt tReAtment Simulation program) の構築と鉄鋼部品の 2 次元解析の成果を発表⁽⁹⁾し、CRC 総合研究所(現、伊藤忠テクノソリューションズ)から販売開始された。同時期にフランス ESI 社からも SYSWELD が販売された。これをきっかけとして、いつかの商用ソフト(米国 DEFORM-HT、米国 DANTE、日本 GRANTAS、日本 FINAS/TPS、日本 COSMAP など)の開発が行われて現在に至っている。また、ABAQUS や Marc などの汎用の有限要素法ソフトにユーザ・サブルーチンを付加することで、熱処理シミュレーションを実現しているケース⁽¹⁰⁾も見られる。高周波焼入れでは、商用の熱処理シミュレーションソフト(米国 DEFORM-IH、仏国 SYSWELD)や鍛造シミュレーションソフト(仏国 FORGE)に磁場解析が組込まれ、単一パッケージでシミュレーションが可能なものが出てきている。

2000 年代に入ると、熱処理シミュレーションは商用ソフトの時代になり、

複雑な実部品形状によるシミュレーションが試みられているが、シミュレーションを実施するには材料特性や冷却剤および冷却条件に関するデータなどが多く必要となる。材料特性については、(公社)日本材料学会塑性工学部門委員会の材料データベース研究分科会において、熱処理シミュレーションのための材料データベースを構築し、この成果の一部として 2002 年に MATEQ (MATERials database for Quenching) を公開した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、金属合金の化学成分から機械的、熱力学的物性値を計算するソフトとして、イギリス Sente Software 社から JmatPro⁽¹³⁾ が 2001 年から販売されており、いつかの商用熱処理シミュレーションソフトへの直接出力インターフェイスを備えている。一方、熱伝達特性をはじめとする冷却剤の冷却能データは、(一社)日本熱処理技術協会の焼入関連の研究部会活動において、鋼円柱や歯車などの焼入実験とベンチマークシミュレーションが実施され、シミュレーション精度の検証と改善活動が続けられており⁽¹⁴⁾、現在も冷却特性データの収集とデータベース化に関する活動が進められている。最近では、商用の熱流体 (CFD) シミュレーションソフト (米国 FLUENT など) による部品周囲での冷却剤の流れ情報から熱伝達率を求め、これを熱処理シミュレーションの熱的境界条件として与えることで、熱処理変形や硬さ分布などを予測する研究例⁽¹⁵⁾ が徐々に増えている。しかし、焼入れに多く用いられている油やポリマー水溶液などの沸騰性冷却剤では、蒸気膜や沸騰などの非常に複雑な冷却現象を再現する必要があり、実用化までにはまだ時間がかかると思われる。

海外の熱処理シミュレーションに関する国際的な活動としては、ドイツ・ブレーメンの IWT (Institut für Werkstofftechnik : 材料生産技術研究所) が中心となって、2001 年から 2011 年にかけて実行された共同研究プロジェクト SFB570 が挙げられる。このプロジェクトは、熱処理変形を含めたすべての加工プロセスにおける変形の制御に関する研究が実施された。

この成果の発表を含めた変形に関する国際会議 IDE (International Conference on Distortion Engineering)が 2005 年と 2008 年、2011 年にドイツのブレーメンにて開催され、熱処理シミュレーションを含む変形制御に関する研究成果が多数報告された。また、ドイツでは Robert Bosch 提案の C.A.S.H. (Computer Aided Simulation of Heat treatment) プロジェクトも実施されている。一方、アメリカでは、1992 年から焼入れとひずみ制御国際大会 (Quenching and Control of Distortion) が開催され、この会議にて熱処理シミュレーションに関する発表が多数なされている。熱処理関連の国際会議の開催は年々増加しており、熱処理シミュレーションに関する報告も増えている。

1. 4 高周波焼入れシミュレーションの報告事例

高周波焼入れは、主に周波数 1kHz から 200kHz の高周波電力を用いた誘導加熱 (IH) が用いられる。電磁誘導によって非接触で鉄鋼部品表面にうず電流を発生させ、材料の電気抵抗によるジュール熱によって自己発熱させることで、焼入可能な温度まで鉄鋼部品を加熱する。そのため、高周波焼入れシミュレーションでは、電磁誘導やうず電流によるジュール発熱を考慮する必要がある。現在では、誘導加熱による被加熱物の発熱を精度良く予測するために、有限要素法による磁場解析が用いられており、磁場と熱処理の連成解析が必要となる。

高周波焼入れシミュレーションの報告事例としては、1985 年に Melander が磁場と熱伝導、相変態、弾塑性の連成解析による丸棒の定置一発焼入れおよび移動焼入れのシミュレーション結果を報告している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。国内では、1994 年に小田らが磁場と熱伝導、弾塑性の連成解析を丸棒焼入れ時の残留応力の計算⁽¹⁶⁾に適用している。磁場解析ではなく内部発熱による熱伝導と相変態、

弾塑性の連成解析としては、1994 年に有本らがリング部品の焼入変形の計算⁽¹⁷⁾を、1998 年に猪俣らがクランクシャフトの 3 次元モデルによる焼入変形の計算⁽¹⁸⁾を報告している。

高周波熱錬株式会社では、1998 年に生田らが熱伝導と相変態、弾塑性の連成解析により長尺丸棒の移動焼入れシミュレーションを実施し、加熱冷却中の伸び量変化と焼入変形量、残留応力への移動速度の影響を明らかにした⁽¹⁹⁾。1998 年には、磁場と熱伝導、相変態、弾塑性の連成解析による高周波焼入れシミュレーションを実現するために、CRC 総合研究所(現、伊藤忠テクノソリューションズ)製の商用磁場解析ソフト”MAGNA/FIM”と熱処理シミュレーションソフト”HEARTS”の連成解析プログラムを開発した。このプログラムを使用して、1998 年に堀野らが薄肉中空部材の高周波焼入れにおける硬化層深さと焼入変形の関係⁽²⁰⁾を、1999 年には井上らがギヤの高周波焼入れと超急速短時間焼入れ SRIQ[®]⁽²¹⁾における焼入変形および残留応力の違い⁽²²⁾を、2001 年には生田らが S45C 材鋼円柱試片の高周波焼入れにおける硬化層深さが変形に与える影響⁽²³⁾を報告している。

最近の高周波焼入れシミュレーションの報告事例としては、国内では 2005 年に高垣らが誘導加熱と熱弾粘塑性損傷、相変態の連成による損傷の影響を考慮した丸棒および角棒の残留応力解析⁽²⁴⁾を、2007 年に大田らがステアリングラックの二周波加熱法による熱処理低変形化の検討事例⁽²⁵⁾を、2013 年に吉田らが丸棒の高周波焼入れを対象に熱伝達特性の焼入変形量への影響⁽²⁶⁾を報告している。一方、海外では、2011 年に Nemkov がリング形状部品の移動焼入れシミュレーション結果⁽²⁷⁾を、2013 年には Zhichao がアクスルシャフトの移動焼入れシミュレーション結果⁽²⁸⁾を報告している。これらは、いずれも商用の熱処理シミュレーションソフト DANTE と磁場解析ソフト FLUX 2D/3D の連成解析にて実施されている。

1. 5 本研究の目的

熱処理変形と残留応力の予測技術の確立は、熱処理変形の低変形化が可能な熱処理条件を検討するための非常に重要な課題である。そこで本研究の目的は、高周波焼入れにより生じる様々な現象の高精度な数値解析手法を検討し、高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の高精度な予測技術を確立するとともに、シミュレーション結果から得られた温度や応力、各種ひずみ量を時系列で分析することで熱処理変形および応力発生メカニズムを解明し、熱処理変形の更なる低減や焼割れなどの不具合の事前回避を実現することにある。

1. 6 本論文の構成および内容

本論文は、緒論、結論を含めて、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と高周波焼入れの特徴、過去の熱処理シミュレーションに関する研究について述べた後に、本研究の目的を示した。

第 2 章では、高周波焼入れの数値解析手法として、有限要素法による磁場解析並びに熱処理解析の手法、磁場と熱伝導、相変態、弾塑性の連成解析による高周波焼入れシミュレーション・システムの構成、シミュレーションに必要な材料データベースの順で述べた後に、実際の活用事例として加熱コイルの設計や熱処理品質の予測について示した。

第 3 章では、高周波焼入れシミュレーションの高精度化について、加熱過程および冷却過程の高精度化手法を主体に検討した。加熱過程に関しては、鋼材の高温磁気特性の測定方法および高温磁気特性を考慮した磁場解析法の

検討を行い、加熱試験結果との比較により高周波加熱解析の高精度化が図れること実証した。また、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した磁場と熱処理の逐次相互連成解析手法を検討し、大型部品の加熱試験結果との比較により本連成解析手法が妥当であることを実証した。一方、冷却過程に関しては、熱処理解析の高精度化に必要な熱伝達率係数について、最適化手法を用いた算出方法の検討を行った。

第 4 章では、高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の予測について検討した。まず、リング形状部品の高周波焼入れシミュレーション結果から得られたひずみ量を時系列で分析することで、熱処理変形の発生メカニズムが解明出来ることを明らかにした。また、この熱処理変形の発生メカニズムが明らかになれば、熱処理変形量の低減が可能であることを示した。次に、丸棒の高周波焼入れシミュレーションにより、移動焼入れと定置一発焼入れの熱処理変形および残留応力の違いを明確し、移動焼入れでの残留応力の発生メカニズムを述べた。最後に、丸棒の高周波移動焼入れにて実測結果と一致するシミュレーション結果を得るためには、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却境界条件を使用する必要があることを示した。

第 5 章では、リング溝付丸棒の焼割現象について高周波焼入れ試験を対象としたシミュレーションを実施し、シミュレーション結果から得られた温度や応力、ひずみ量を時系列で分析することにより焼割発生メカニズムの解明が可能であることを示した。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で得られた知見を要約して、本論文の総括とした。

第 1 章の参考文献

- (1) 川寄一博, 三阪佳孝, 生田文昭: 高周波熱処理の高性能化、W-Eco のさらなる進化を目指して, 熱処理, 50, 4, p. 368-376, (2010)
- (2) 川寄一博, 三阪佳孝, 清澤裕, 生田文昭 : W-Eco(Ecological & Economical) を特徴とする高周波熱処理とその話題, 精密工学, 78, 5, p. 385-388, (2012)
- (3) 井上達雄: 熱処理シミュレーションの歴史と現状, 熱処理, 42, 5, p. 304-305, (2002)
- (4) 有本享三: 熱処理シミュレーション(第 2 回) -システムの開発と適用-, 熱処理, 51, 5, p. 265-267, (2011)
- (5) Melander, M.: Theoretical and experimental study of stationary and progressive induction hardening, J. Heat Treating, Vol 4, p. 148-166, (1985)
- (6) Melander, M.: Computer predictions of progressive induction hardening of cylindrical components, Materials Science and Technology, Vol 1, p. 877-882, (1985)
- (7) Material Society Tech., Vol. 1, (1985)
- (8) Fletcher, A. J.: Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment, Elsevier Applied Science, (1989)
- (9) Inoue, T., Arimoto, K. and Ju, D.Y.: Metallo-thermo-mechanical simulation of quenching process - theory and implementation of computer code "Hearts", Proc. 1st Int. Conf. on Quenching and Control of Distortion, Chicago, p. 205-212, (1992)
- (10) Okamura, K. and Kawashima, H.: Analysis of Residual Deformation of a Gear during Quenching, 32nd Japan Congress on Materials Research, p. 323-329, (1989)

- (11) Inoue, T. and Okamura, K.: Material Database for Simulation of Metallo-Thermo-Mechanical Fields, Proc. of 5th International Symposium on Quenching and Distortion Control, ASM, St. Louis, p. 753-760, (2000)
- (12) 日本材料学会塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会:熱処理シミュレーションのための材料特性データベースの構築, 材料, 51, 3, p. 350-355, (2002)
- (13) Sente Software 社 Web ページ: <http://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro.aspx>
- (14) 奈良崎道治:熱処理シミュレーションの現状と展望, 熱処理, 50, 4, p. 332-338, (2012)
- (15) 大木力:熱処理へのコンピュータシミュレーションの適用, NTN technical review, 69, p. 61-68, (2001)
- (16) 小田哲, 宮近幸逸:高周波焼入れによる丸棒の残留応力の計算, 日本機械学会論文集 C, 60, 573, p. 370-375, (1994)
- (17) 有本享三, 生田文昭, 井上達雄:高周波焼入れ・焼戻し変形の有限要素法による連成シミュレーション, 熱処理, 34, 6, p. 332-338, (1994)
- (18) 猪狩敏秀, 紀 博徳, 森田鴻司, 下河内寛子:大型鍛造材の熱処理変形解析予測技術の実用化, 三菱重工技報, 35, p. 306-309, (1998)
- (19) Ikuta, F. and Inoue., T.:Simulation of residual Stresses/distortion and Structural Change in the Course of Stationary and Scanning Induction Hardening Processes for Steel Rings and Cylinders, Proc. 17th Heat Treating Society Conference and Exposition and the 1st International Induction Heat Treating Symp., Indianapolis, p. 541-550, (1998)
- (20) 堀野孝, 古賀久喜, 清澤裕, 生田文昭, 川寄一博, 山崎隆雄:薄肉・中空部材の高周波熱処理変形, 日本熱処理技術協会 学術講演会講演論文集, No. 46, p. 5-6, (1998)

- (21) 三阪佳孝, 清澤裕, 川寄一博: 超急速短時間加熱焼入れについて, 工業加熱, Vol. 39, No. 1 p. 54-60, (2002)
- (22) Inoue, T., Inoue, H., Ikuta, F., and Horino, T.: Simulation of Dual Frequency Induction Hardening Process of a Gear Wheel, 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion, ASM Heat Treating Society, Prague, p. 243-250, (1999)
- (23) 生田文昭, 堀野孝: 材鋼円柱試片の高周波焼入れ硬化層深さが変形に与える影響, 日本熱処理技術協会, 学術講演会講演論文集, 53, p. 49-50, (2001)
- (24) 高垣昌和, 都井裕: 誘導加熱・熱弾粘塑性損傷・相変態の連成を考慮した 3次元有限要素法による高周波焼入れ解析, 日本機械学会、日本機械学会論文集(A編), 71巻, 702号, p. 233-240, (2005)
- (25) 大田敦彦, 木澤克彦, 福本学, 岡村一男: ステアリングラックの高周波焼入れシミュレーション, 日本熱処理技術協会, 学術講演会講演論文集, 65, p. 55-56, (2007)
- (26) 吉田大志, 奈良崎道治, 小河原稔, 白寄篤, 生田文昭, 堀野孝: 高周波焼入れシミュレーションにおける解析精度の検証, 日本熱処理技術協会, 学術講演会講演論文集, 76, p. 17-18, (2013)
- (27) Nemkov, V., Goldstein, R., Jackowski, J., Ferguson, B.L. and Li, Z.: Stress and Deformation during Induction Hardening of Tubular Products, Proc. 26st ASM HTS, Cincinnati, p. 34-44, (2011)
- (28) Zhichao (Charlie) Li, Z., Ferguson, B. L., Nemkov, V., Goldstein, R., Jackowski, J. and Fett, G.: Effect of Spray Quenching Rate on Distortion and Residual Stresses during Induction Hardening of a Full-Float Truck Axle, Proc. 27st ASM HTS, Indianapolis, p. 113-124, (2013)

第 2 章

高周波焼入れの数値解析法

第 2 章 高周波焼入れの数値解析法

2. 1 緒言

高周波焼入れは、主に周波数 1kHz から 200kHz の高周波電流を加熱コイルに印加し、電磁誘導作用による誘導加熱 (IH: Induction Heating) により鉄鋼部品表面にうず電流を発生させ、材料の電気抵抗によるジュール熱によって自己発熱させることで、焼入可能な温度まで鉄鋼部品を急速に加熱する。そのため、高周波焼入れシミュレーションは、熱伝導と相変態、弾塑性の連成による熱処理解析の他に、電磁誘導やうず電流によるジュール発熱を考慮する必要がある。現在では、複雑な部品形状の発熱分布を精度良く予測するために有限要素法による磁場解析が用いられており、磁場解析と熱処理の逐次連成解析が実施されている。

本章では、高周波焼入れシミュレーションに必要な数値解析手法と材料物性データについて説明した後に、実際の実施事例を紹介する。

2. 2 高周波焼入れシミュレーション方法

2. 2. 1 誘導加熱の原理

高周波焼入れの加熱手法には、短時間で高温まで急速加熱が可能な誘導加熱 (IH: Induction Heating) を用いている。図 2-1 に、誘導加熱の原理を示す。被加熱物の周囲に配置された銅製の加熱コイル (図 2-1 では螺旋状コイル) に高周波電流を流すと、加熱コイル近傍の空間には交番磁束が発生する。これにより、被加熱物内部には周波数や加熱コイル電流に応じたうず電流が誘起され、被加熱物表面はジュール損失により自己発熱する。

誘導加熱は、非接触で金属部品を直接加熱できるのが特徴で、このような原理は出力電力が異なるものの、家庭用や厨房用として使用される IH 調理器や IH 炊飯器と同じである。

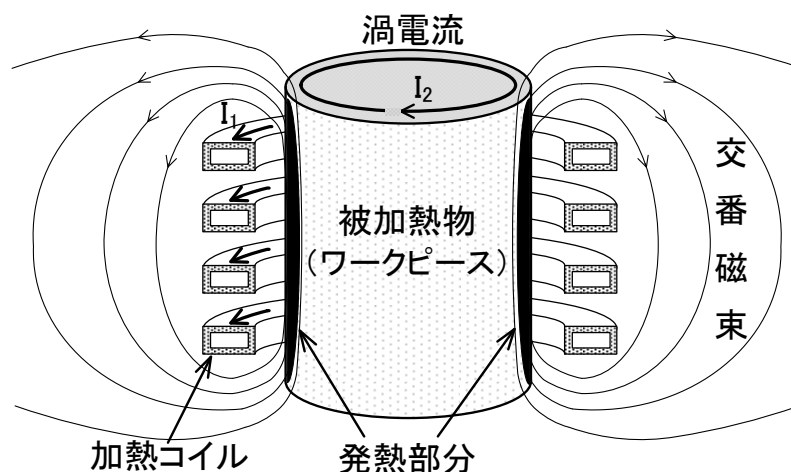


図 2-1 誘導加熱の原理

被加熱物内部に発生するうず電流は、表皮効果により被加熱物の表面が最も大きく、表面から内部に向かって指数関数的に減少する。その減少量は、加熱コイル電流の周波数が高くなるほど大きくなる。表面の電流密度の $1/e$ に減少する深さを電流透過深度 δ [m] と呼び、式 2.1 で与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.1)$$

ここで、 σ : 導電率 [$1/(\Omega \text{ m})$]、 μ : 透磁率 [H/m]、 f : 周波数 [Hz] である。

電流透過深度 δ の領域にはうず電流全体の 63% が流れ、そこで全発熱量の 86% が発熱する。そのため、高周波焼入れの加熱条件を設定する際には、電流透過深度 δ が目安の一つとなる。

2. 2. 2 高周波焼入れシミュレーションの構成

コンピュータによる高周波焼入れシミュレーションは、熱処理時の温度変化や金属組織変化、熱処理変形などの挙動を、数値解析手法である有限要素法 (FEM: Finite Element Method) にて予測する。

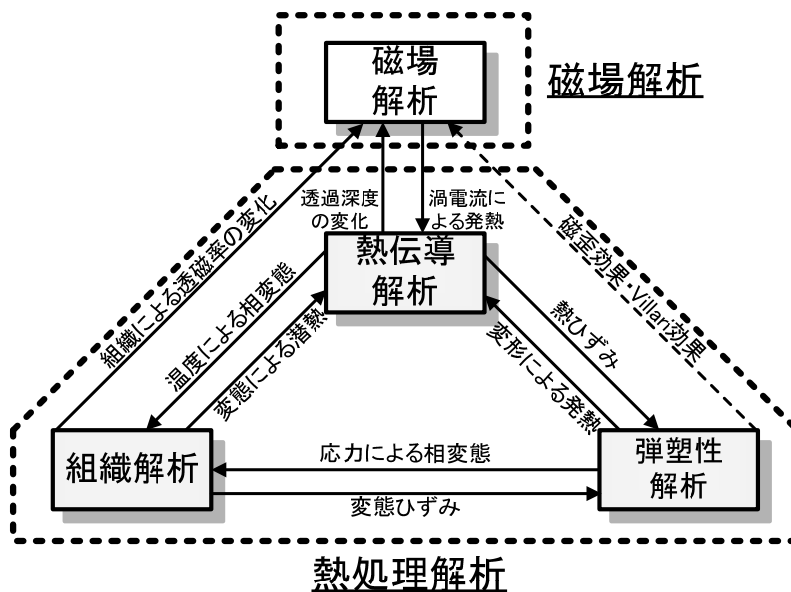


図 2-2 高周波焼入れシミュレーションの連成関連図

図 2-2 に、高周波焼入れシミュレーションの連成関連図⁽¹⁾を示す。高周波加熱により鉄鋼部品の表面が発熱し、温度に大きな変化が起きると、材料に相変態が生じる。この際、部品内部の温度分布や相変態の発生が不均一の場合には部品内部に応力やひずみが生じる。また、相変態挙動は部品内部に発生した応力に影響を受ける。相変態が開始すると潜熱の発生および吸収が起こり温度分布に影響を与えるし、部品が塑性変形を伴う場合には発熱が生じる。このときの温度や材料組織、応力の変化は、透磁率や電気伝導率など磁場の材料特性にも影響を与える。

熱伝導解析と組織解析、弾塑性解析の間には強い相互作用があり、連続体熱力学の立場からこれら複数の現象を統一的にとらえて、一つの系として

厳密に解く必要がある。これを井上らは変態-熱-力学⁽²⁾と呼んでおり、熱処理シミュレーションソフトでは強連成による解析を行っている。一方、磁場解析と熱伝導解析にある相互作用については、磁場解析ソフトと熱処理シミュレーションソフトを交互に実行し、温度と発熱密度量の結果データのみを逐次交換する弱連成による解析を行っている。弱連成は、一般的に強連成に比べて精度は若干落ち、物理量のマッピング機能を備えたカップリングソフトが必要であるが、解析の収束性に優れ、計算コストを低く抑えることが出来る。最近では、磁場との連成解析用インターフェイスを備える商用の熱処理シミュレーションソフトも出てきている。

磁場解析と弾塑性解析の間は磁歪効果あるいは Villari 現象があるが、一般的な高周波焼入れではその影響は無視出来るので考慮していない。

高周波焼入れシミュレーションは、図 2-2 に示すように 4 つの解析モジュールが使用される。それぞれの解析モジュールから得られる主な結果を下記に示す。これらは、加熱や冷却の途中でも得ることが可能であり、温度や組織、応力分布などのコンター図(等値線図)では、アニメーションで視覚的に表示することが出来る。

<シミュレーション結果>

- (1) 磁場解析 — 電流分布、発熱分布、磁束密度分布
- (2) 熱伝導解析 — 温度分布
- (3) 組織解析 — 金属組織分布、硬さ
- (4) 弾塑性解析 — 応力分布、ひずみ分布

2. 2. 3 磁場解析手法

高周波焼入れシミュレーションで使用する磁場解析は、次式で示す Maxwell の電磁方程式から基本式が導かれる。

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho \quad (2.5)$$

ここで、 \mathbf{B} : 磁束密度 [Wb/m²]、 \mathbf{H} : 磁界強度 [A/m]、 \mathbf{D} : 電束密度 [C/m²]、 \mathbf{E} : 電界強度 [V/m]、 \mathbf{J} : 電流密度 [A/m²]、 ρ : 電荷密度 [C/m³]である。

また、物質の磁気的關係式より次式が導かれる。

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (2.8)$$

ここで、 μ : 透磁率 [H/m]、 σ : 導電率 [A/m]、 ε : 誘電率 [F/m]である。

うず電流問題では、磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} [Tm]および電気スカラーポテンシャル ϕ [V]を導入すると、 \mathbf{B} と \mathbf{E} は次のように表される。

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad}\phi \quad (2.10)$$

以上の式から、式 2.11 に示す A- ϕ 法の基本方程式が得られる⁽³⁾。

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}_0-\sigma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}-\sigma\operatorname{grad}\phi \quad (2.11)$$

電流が時間的に正弦波状に近似出来るのであれば、時間微分の項は交流定常解析として複素数近似法(j ω 法)で解くことができる。

2. 2. 4 熱処理解析手法

熱処理シミュレーションの手法は、前述のように熱伝導および弾塑性問題の有限要素法に相変態モデルを組み込んで解析を行う。本研究では、Melander⁽⁴⁾や Denis ら⁽⁵⁾などの研究によって実績のある手法を用いる。

(1)相変態モデル

焼入処理における相変態のモデル化のために、フェライトやパーライトなどの拡散型変態については式 2.12 に示す TTT (Time-Temperature-Transformation) 線図に基づく JMAK (Jonson & Mehl⁽⁶⁾-Avrami⁽⁷⁾-Kolmogorov⁽⁸⁾) 式を、無拡散変態(またはマルテンサイト型変態)については式 2.13 に示す Koistinen - Marburger⁽⁹⁾の式を使用する。

$$\xi_i = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2.12)$$

ここで、 ξ_i : 拡散型変態での体積分率、 k と n : 拡散型変態特性に対する材料パラメータである。

$$\xi_M = 1 - \exp\{-k(M_S - T)\} \quad (2.13)$$

ここで、 ξ_M : 無拡散型変態での体積分率、 k : 実験データに基づく係数、 M_S : マルテンサイト変態の開始温度である。

オーステナイト変態は、フェライトとセメンタイトの混合組織からのセメンタイトの溶解や、その後の炭素原子の拡散や固溶が伴うことになるので、オーステナイト変態開始および終了温度は昇温速度により変化する。本研究では、Melander⁽⁴⁾と同様に、式 2.12 に示す TTA (Time-Temperature-Austenitization) 線図⁽¹⁰⁾に基づく JMAK 式を使用するが、昇温速度が遅い場合には、オーステナイト変態の進展を温度のみで決定する式 2.14 に示す JMAK 簡略式を使用する。

$$\xi_A = 1 - \exp \left[A \left(\frac{T - T_s}{T_e - T_s} \right)^B \right] \quad (2.14)$$

ここで、 ξ_A : オーステナイト変態での体積分率、 A と B : 伸び-温度線図より設定される係数、 T_s : オーステナイト変態の開始温度、 T_e : オーステナイト変態の終了温度である。

(2) 変態塑性モデル

変態塑性とは、応力が存在する状況で相変態が発生すると不可逆のひずみが生じる現象であり、熱処理変形や残留応力に大きく寄与することが明らかにされている⁽¹¹⁾。変態塑性現象に関しては、さまざまなモデルが提案されているが、本研究では Denis ら⁽⁵⁾によって示されたモデルを使用する。

変態塑性ひずみ ε_{ij}^{TP} は、式 2.15 にて表される。変態塑性係数 K_{ij} は、変態塑性ひずみと負荷応力の関係において、その勾配に相当するものである。

$$\varepsilon_{ij}^{TP} = \frac{3}{2} K_{ij} h(\xi_{ij}) S_{ij} \quad (2.15)$$

ここで、 ξ_{ij} : 相 I から相 J への相変態における体積分率、 K_{ij} : 変態塑性係数、 $h(\xi_{ij})$: 変態塑性と相変態の進行を関係づける関数、 S_{ij} : 偏差応力である。

2. 2. 5 熱処理変形とひずみの関係

熱処理中の物体内部の微小領域には、時刻 t において式 2.16 に示すひずみの釣り合い式が成立する⁽¹²⁾。

$${}^t\varepsilon_{ij} = {}^t\varepsilon_{ij}^E + {}^t\varepsilon_{ij}^{TH} + {}^t\varepsilon_{ij}^{TR} + {}^t\varepsilon_{ij}^P + {}^t\varepsilon_{ij}^{TP} \quad (2.16)$$

ここで、 ${}^t\varepsilon_{ij}^E$: 弾性ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$: 熱ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$: 変態ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^P$: 塑性ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$: 変態塑性ひずみである。

${}^t\varepsilon_{ij}$ は全ひずみで、実際の変形に直接寄与するものである。この全ひずみは、式 2.16 に示すように各種ひずみを加算することで求められる。熱ひずみと変態ひずみは体積変化から派生する量であるので方向性がなく、3 方向成分が同じ値を持つ。また、高周波焼入れは非常に短時間加熱であるので、クリープひずみは考慮していない。

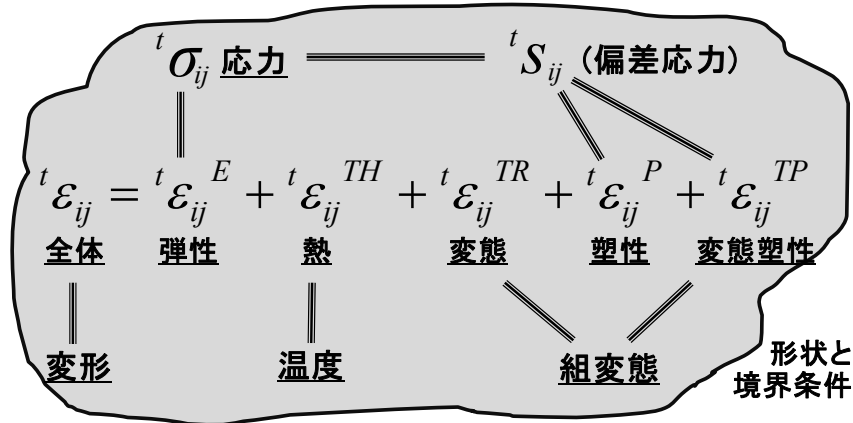


図 2-3 熱処理変形・応力とひずみの関係⁽¹³⁾

図 2-3 に、時刻 t における各種ひずみの発生要因を示す。熱ひずみと変態ひずみは、温度と相変態による膨張および収縮と関係がある。弾性ひずみは、応力と線形の関係があり、この応力成分から平均応力を差引いた偏差成分は、塑性ひずみと変態塑性ひずみに関係する。なお、変態塑性ひずみは、相変態

が生じることが発生の条件となる。以上の各種ひずみを加算したものが全ひずみとなり、これが部品の熱処理変形として現れる。

2. 3 シミュレーションに必要な材料データベース

2. 3. 1 材料特性データ

高周波焼入れシミュレーションでは、常温から 1,000℃までの幅広い温度範囲を扱うため、温度依存性と組織依存性を考慮した多くの材料特性データが必要となる。以下に、高周波焼入れシミュレーションの実行に必要な材料特性データを説明する。

(1) 磁場解析

磁場解析に必要な材料特性データとしては、導電率 σ (抵抗率 $\rho_e = 1/\sigma$) と比透磁率 μ_r があり、これらの値により電流透過深度 δ が決まる(式 2.1 参照)。図 2-4 に、炭素鋼における導電率 σ と比透磁率 μ_r 、電流透過深度 δ の典型的な温度変化を示す⁽¹⁴⁾。

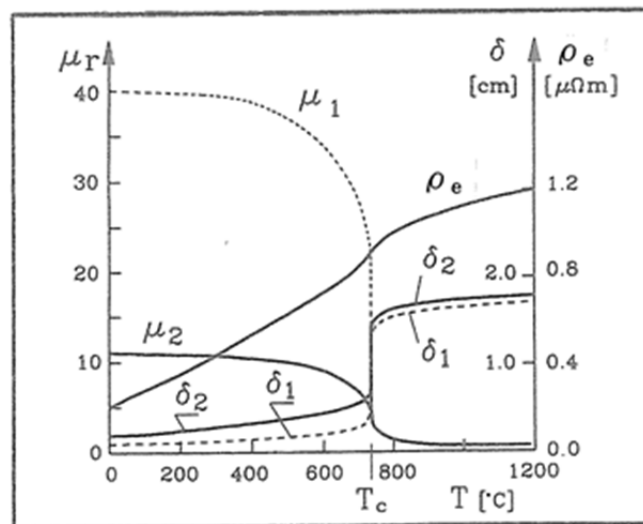


図 2-4 炭素鋼の比透磁率、電気抵抗率および電流透過深度の温度変化

図 2-4 に示すように、導電率 σ と比透磁率 μ_r は温度による値の変化が大きく、特に磁気変態点であるキュリー点(例えば、S45C 材で約 763°C)近傍では、比透磁率 μ_r が急激に減少するために、電流透過深度 δ が急激に増加する。また、鉄鋼材の比透磁率 μ_r は、磁場の強さ H にも依存する。磁場の強さ H と比透磁率 μ_r の間の関係式については、Brown⁽¹⁵⁾および Simpson⁽¹⁶⁾などが関係式を提案している。また、森下ら⁽¹⁷⁾によって、リング試料を用いて常温から磁気変態点までの磁気特性を測定した報告もなされている。

(2) 熱処理解析

熱伝導解析に必要な材料特性データは、熱伝導率 λ と比熱 c 、密度 ρ である。弾塑性解析では、ヤング率 E やポアソン比 ν 、応力-ひずみ線図、線膨張係数 α 、変態膨張係数、変態塑性係数が必要である。また金属組織解析では、図 2-5 に示す TTT 線図や CCT (Continuous Cooling Transformation) 線図のような相変態曲線が必要となる。また、高周波焼入れは、短時間加熱で昇温速度が非常に速く、オーステナイト変態の開始温度および終了温度が通常の平衡状態図よりも上昇するために、TTA 線図⁽¹⁰⁾が必要となる。

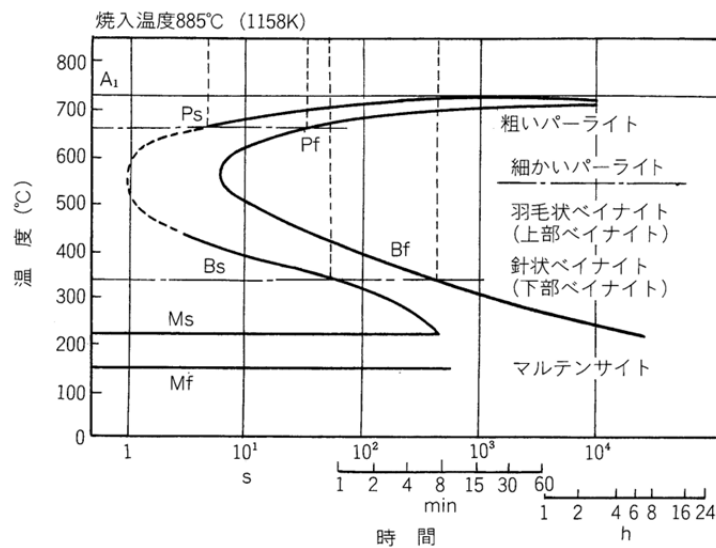


図 2-5 共析炭素鋼の TTT 線図⁽¹⁸⁾

熱処理解析に必要な材料特性データは、常温から高温まで金属組織ごとに用意する必要がある。これらすべてのデータを収集、測定することは容易でないので、(公社)日本材料学会塑性工学部門委員会にて熱処理シミュレーションに必要な代表鋼種の材料特性データを集めたデータベースMATEQ⁽¹⁹⁾や、商用の鉄・非鉄金属のデータベース Total METALS⁽²⁰⁾が使用できる。また、金属合金の化学成分から物理的、熱力学的および機械的物性値を計算するソフトであるイギリス Sente Software 社 JmatPro⁽²¹⁾を利用することができる。

2. 3. 2 熱伝達率係数

熱処理シミュレーションでは、FEM モデルの熱的境界条件として熱伝達率を設定することで冷却過程の解析を行っているが、熱伝達率は冷却方法や冷却剤の種類、液温によって大きく変化する。熱処理変形や残留応力の解析精度を向上させるためには、適切な熱伝達率を設定する必要があるが、その測定は非常に難しい。(一社)日本熱処理技術協会の焼入関連の研究部会では、熱処理シミュレーションのために熱伝達率を集めた焼入冷却剤の冷却能データベースを構築する活動が進められている。

高周波焼入れの冷却方法には、主として噴射冷却が使用される。噴射冷却は冷却能が高く、均一性や再現性に優れるなどの特徴があるが、現状では浸漬冷却に比べて熱伝達率データが少ない。図 2-6 には、丸棒の銀試験片と集中熱容量法による逆解析にて算出した水噴射冷却(流量 100L/min)の熱伝達率⁽²²⁾を示す。

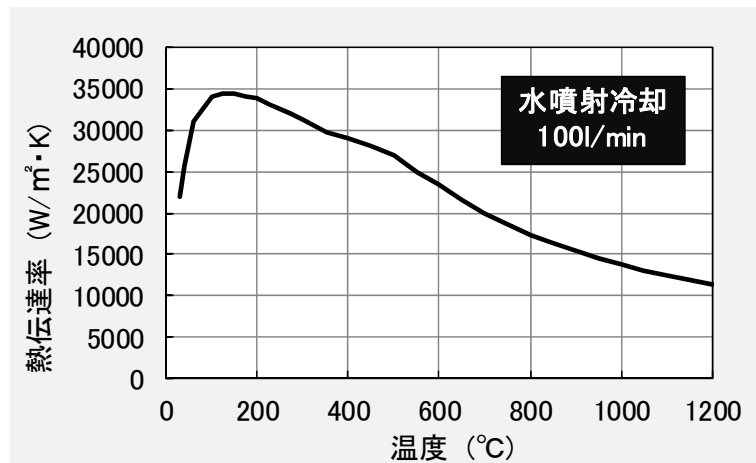


図 2-6 水噴射冷却における熱伝達率

2. 4 適用事例

2. 4. 1 加熱コイルの設計

産業機械用エンジンのクランクシャフト・ジャーナル部を高周波焼入れする際に、加熱コイル形状を高周波焼入れシミュレーションにて設計した事例を紹介する。本解析には、ジャーナル部の断面形状による 2 次元軸対称モデルを用いた。図 2-7(a)に CAD モデルを、図 2-7(b)には FEM モデルを示す。

(1) 焼入仕様

- ・ 硬化層深さ ジャーナル面および R 部を 0.5～3.5mm

(2) 解析条件

- ・ 材質 SMn438 材 ・ 周波数 100kHz
- ・ 加熱時間 4.0s ・ 加熱温度 950°C (ジャーナル面中央)
- ・ 冷却時間 60.0s

(3) 解析方法

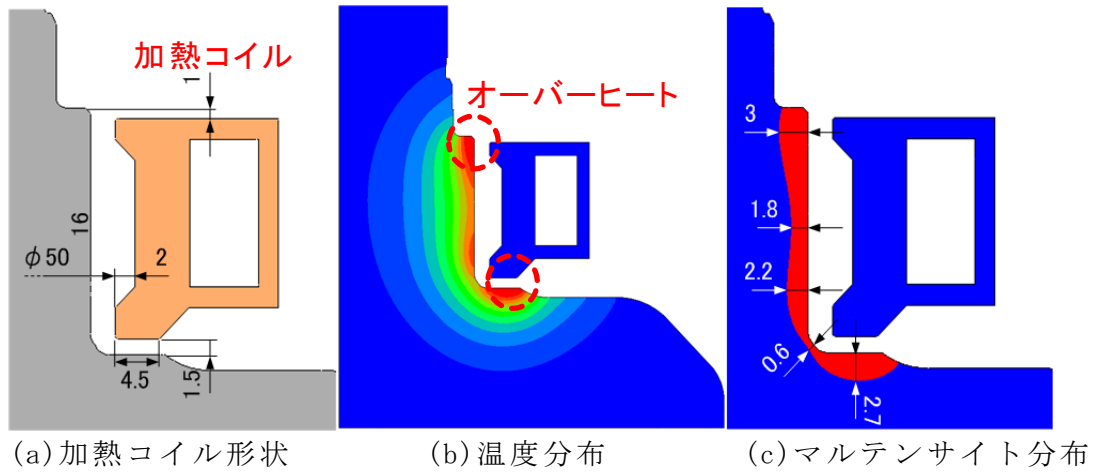
- ・ 解析方法 2 次元 FEM モデルによる磁場と熱の連成解析
- ・ 解析ソルバ (株)JSOL 製” JMAG-Designer Ver.12”



図 2-7 解析モデル

図 2-8 に、クランクシャフト・ジャーナル部の高周波焼入れシミュレーション結果を示す。はじめに、図 2-8(a)に示す加熱コイル形状(初回設計形状)にて、高周波焼入れシミュレーションを実施した。シミュレーション結果は焼入仕様を満足しているものの、R 部の硬化層深さが 0.6mm と焼入仕様の下限に近く、また外径面エッジ部およびカウンターウェイト側面の温度が 1,000℃以上のオーバーヒートとなり、これら部位の硬化層深さが焼入仕様の上限に近くになっていた。そこで、R 部の硬化層をさらに深くし、外径面エッジ部およびカウンターウェイト側面のオーバーヒートを解消するために、加熱コイル形状を再検討した。磁場解析から得られた磁束分布を検討し、図 2-8(d)に示すような、R 部に磁束をより集中させ、かつ、オーバーヒート部位の磁束密度を低減させるような加熱コイル形状(最終設計形状)とした結果、硬化層深さのバラツキが少なく焼入仕様を満足する加熱コイルが設計できた。

< 初回設計形状 >



< 最終設計形状 >

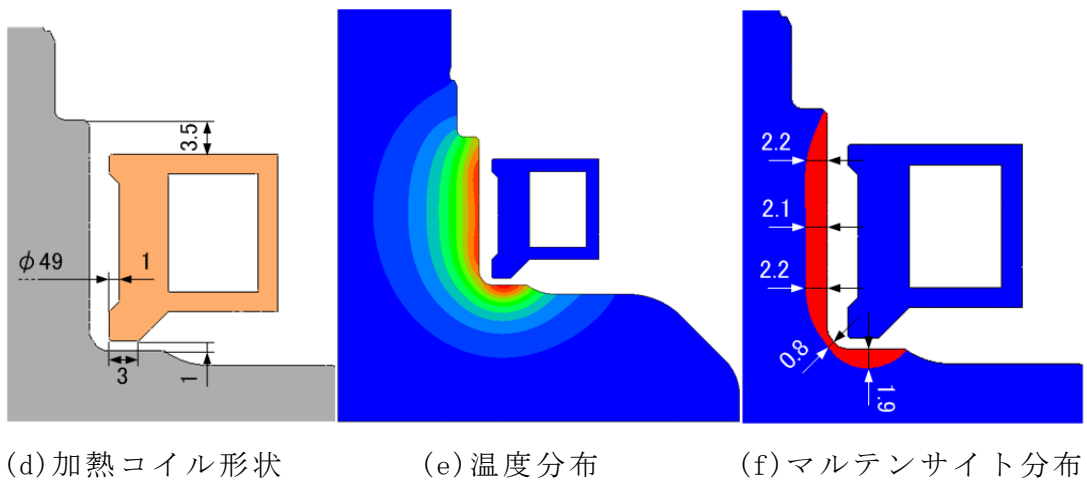


図 2-8 クランクジャーナル部の高周波焼入シミュレーション結果

高周波焼入れシミュレーションでは、加熱コイル形状だけでなく、コア（軟磁性体）や治具の形状、材質も検討可能である。特にコアは複雑な形状の金属部品を高周波加熱するには必要不可欠な部品で、加熱コイルに直接取り付けることで加熱面に磁束を集中して加熱効率を向上させたり、逆に熱処理部品と加熱コイルの空間に設置して、磁気シールド効果により熱処理部品のオーバーヒートを防止することができる。

2. 4. 2 熱処理品質の予測

自動車用足回り部品のハブ外輪内面を高周波焼入れする際に、焼入変形と残留応力の事前検討を目的として、高周波焼入れシミュレーションを実施した事例を紹介する。解析には、部品縦断面形状による 2 次元軸対称モデルを用いた。図 2-9(a)に CAD モデルを、図 2-9(b)には FEM モデルを示す。

(1) 焼入仕様

- ・ 硬化層深さ 1.5～3.5mm

(2) 解析条件

- ・ 材質 S53C 材
- ・ 周波数 50kHz
- ・ 加熱時間 7.0s
- ・ 冷却方法 水噴射冷却
- ・ 冷却時間 15.0s

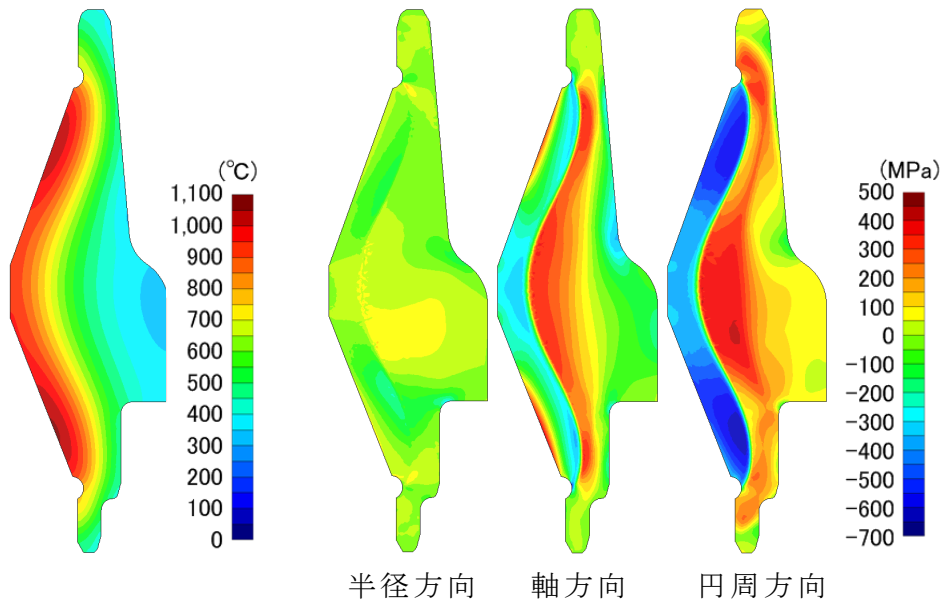
(3) 解析方法

- ・ 解析方法 2次元 FEM モデルによる磁場と熱処理の連成解析
- ・ 解析ソルバ (株)JSOL 製” JMAG-Designer Ver.12”
伊藤忠テクノソリューションズ(株)製” FINAS/TPS”



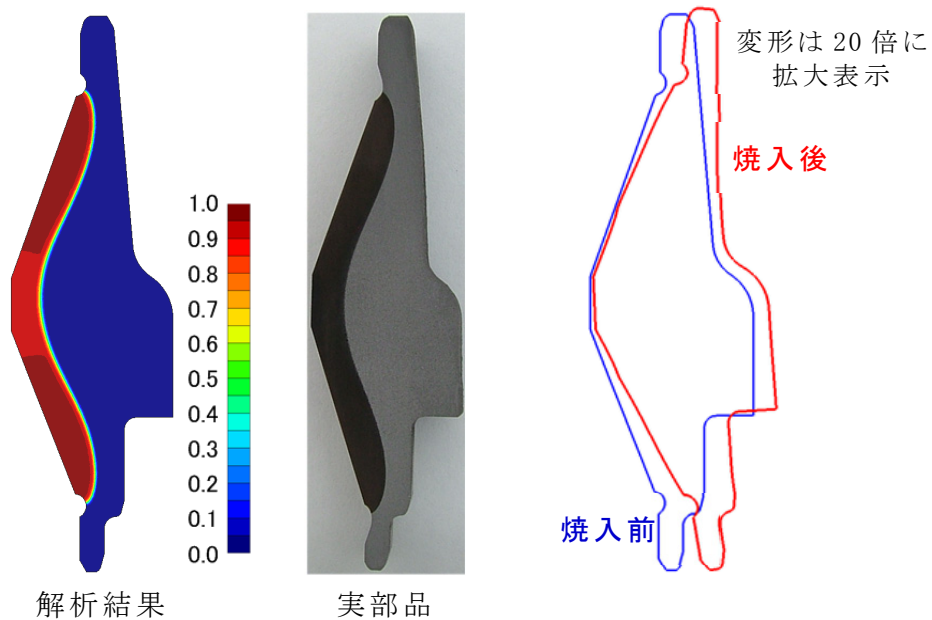
図 2-9 解析モデル

図 2-10 に、ハブ外輪の高周波焼入れシミュレーション結果を示す。
 図 2-10(a)と(b)には加熱終了時における部品断面の温度分布と残留応力分布を、
 図 2-10(c)と(d)には、焼入れパターンと焼入変形量を示す。



(a)加熱終了時温度分布

(b)残留応力分布



解析結果

実部品

(c)焼入れパターン

(d)焼入変形量

図 2-10 ハブ外輪の高周波焼入れシミュレーション結果

図 2-10(c)より、シミュレーションから得られた冷却終了時のマルテンサイト体積分率と実部品の硬化パターンには非常に良い一致が見られた。図 2-10(b)より、焼入領域表面では円周方向に -500MPa 程度の圧縮残留応力となっており、また、図 2-10(d)より焼入変形は薄肉である部品端部が厚肉の中央部よりも半径方向により膨張する結果が得られた。

2. 4. 3 最近の傾向

最近では、数値解析技術の進歩とコンピュータ処理能力の大幅な向上、並列解析手法の実用化により、実部品形状にて解析を実施する 3次元高周波焼入れシミュレーションの実用化が進んでいる。また、自動車用シャフトや工作機械用レールなどの長尺部品では、部品を並行移動させながら回転運動させる高周波移動焼入れシミュレーションも実施可能となり、複雑な熱処理条件でも温度や熱処理変形などの予測が可能になりつつある。

2. 5 結言

本章では、高周波焼入れシミュレーションに必要な数値解析手法として、有限要素法による磁場解析並びに熱伝導、相変態、弾塑性から構成される熱処理解析の手法、磁場と熱処理の連成解析による高周波焼入れシミュレーション・システムの構成について述べ、シミュレーション実施に必要な材料物性データについても述べた。次に実際の活用事例として、加熱コイルの設計手法や金属組織や熱処理変形、残留応力や熱処理品質の予測事例について説明し、シミュレーションを使用することで熱処理設備および熱処理条件の事前検討が可能であることを示した。

第 2 章の参考文献

- (1) 生田文昭: 高周波熱処理のコンピュータシミュレーション, 熱処理, 53, 4, p. 212-217, (2014)
- (2) Inoue, T., Arimoto, K. and Ju, D. Y. “Metallo-Thermo-Mechanical Simulation of Quenching Process - Theory and Implementation of Computer Code HEARTS”, Proc. 1st Int. Quenching and Control of Distortion, ASM International, p. 205-212, (1992)
- (3) 高橋則雄: 三次元有限要素法 磁場解析技術の基礎, オーム社, (2006)
- (4) Melander, M.: Computer Predictions of Progressive Induction Hardening of Cylindrical Components, Mats. Sci. Tech., Vol. 1, p. 877-882, (1985)
- (5) Denis, S., Gautier E., Simon A., Beck, G.: Stress-phase-transformations -basic principles, modelling, and calculation of internal stresses, Mats., Sci. Tech., Vol. 1, p. 805-814, (1985)
- (6) Johnson, W. A., Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. Trans., AIME, Vol. 135, p. 416-458, (1939)
- (7) Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. I, II, III. J. Chem. Phys., Vol. 7, (1939), p. 1103-1112, (1939), Vol. 8, p. 212-224, (1940), Vol. 9, p. 177-184, (1941)
- (8) Kolmogorov, A. N.: Statistical Theory of Crystallization of Metals. Izvestia Akademii Naul SSSR, Vol.1, p. 355-359, (1937) (in Russian)
- (9) Koistinen, D. P., Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, Acta Met., Vol 7, p. 59-60, (1959)
- (10) 大和久重雄, 赤須英夫: 炭素鋼の T-T-A 曲線, 鉄道技術研究報告, No. 305, p. 1-28, (1962)

- (11) 山中茂, 坂之上隆行, 吉井聡一, 井上達雄: 浸炭焼入れ後の変形に及ぼす変態塑性の影響, 材料, Vol. 48, p.733-739, (1999)
- (12) Arimoto, K.; Horino, T.; Ikuta, F.; Jin, C.; Tamura, S.; Narazaki, M: Verification of Distortion Characteristics in Water Quenched Cylinders by Computer Simulation, 1th International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, p. 425-435, (2005)
- (13) Arimoto, K., Horino, T., Ikuta, F., Jin, C., Tamura S. and Narazaki, M.: Explanation of the Origin of Distortion and Residual Stress in Water Quenched Cylinders Using Computer Simulation. Journal of ASTM International, Vol. 3, Paper ID: JAI14204, (2006)
- (14) U.I.E.編: 誘導加熱, 日本電熱協会, 11, (1993)
- (15) Brown, G. H.: Theory and Application of Radio Frequency Heating, D. Van Nostrand Co., (1947)
- (16) Davis, J. and Simpson, P.: Induction Heating Handbook, McGraw-Hill, p. 311, (1979)
- (17) 森下真之, 宮城大輔, 中野正典, 高橋則雄: キュリー温度までの経験温度が無方向性電磁鋼板の室温での磁気特性に及ぼす影響の検討, 電気学会, MAG, マグネティックス研究会, p. 29-34, (2009)
- (18) 熱処理技術入門, (一社)日本熱処理技術協会/日本金属熱処理工業会, 大河出版, p. 5, (2004)
- (19) 日本材料学会 塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会: 材料, Vol.51, No.3, p. 300-355, (2002)
- (20) Total Metal 社 Web ページ: <http://www.keytometals.com/JP/>
- (21) Sente Software 社 Web ページ: <http://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro.aspx>

- (22) 生田文昭, 堀野孝, 古賀久喜, 奈良崎道治: 噴射冷却による高周波焼入過程のシミュレーション, 日本熱処理技術協会, 学術講演会講演論文集, 48, p. 329-330, (1999)

第 3 章

高周波焼入れシミュレーションの 高精度化

第 3 章 高周波焼入れシミュレーションの高精度化

3. 1 緒言

現在、高周波焼入れシミュレーションは、高周波焼入れの予測ツールとして活用されている。特に、経験を要する加熱コイル設計では、現場での試作熱処理を実施することなく、コンピュータ上で複雑な加熱コイル形状であっても設計することが可能である。これにより、試作回数の低減や設計・開発期間の短縮による合理化や効率化、熱処理品質の向上に役立っている。また、シミュレーション結果を詳細に分析することで、熱処理変形の低減や不具合の事前回避などにも活用している。高周波焼入れの熱処理変形や残留応力をさらに高精度に予測し、焼入変形が低減可能な熱処理条件を得るためには、加熱冷却中における部品内部の温度や金属組織、応力やひずみ量を高精度で予測出来る数値解析技術の確立と材料物性データが必要である。

本章では、高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、加熱および冷却過程の高精度化に関する研究内容について報告する。加熱過程の高精度化として、高温磁気特性を考慮した磁場解析法を説明した後に、高温磁気特性測定手法の検討、コイルギャップ変動を考慮した高周波焼入れシミュレーション手法の検討の順で報告する。次に、冷却過程の高精度化として、冷却曲線から逆解析問題による熱伝達率の同定手法について報告する。

3. 2 高温磁気特性を考慮した磁場解析法の開発

3. 2. 1 背景と目的

一般的な高周波焼入れシミュレーションの磁場解析は、鉄鋼部品の磁気特性を温度-比透磁率データとして取り扱っている。その値は過去の経験値から設定しており、加熱時間などの解析条件によって適宜その値を変更する

必要がある。しかし、実際は磁界の強さ H によって比透磁率は大きく変化し、加熱コイルに近い部品表面では磁気飽和により比透磁率が減少するが、温度-比透磁率データではこれらを考慮した解析ができない。また、複雑形状部品で加熱領域にエッジ部がある場合には、実際よりも多くのうず電流が加熱部表面に集中することで、エッジ部の温度は測温結果よりも 50°C から 100°C 高い傾向となる。この問題を解決し、加熱中の温度分布を精度良く計算するためには、FEM モデル内部により精密に比透磁率を設定する必要がある。

そこで、高周波加熱解析の更なる精度向上を目的に、磁気特性である B-H 曲線 (B: 磁束密度、H: 磁界の強さ) から鉄鋼部品内部の比透磁率を求める磁場解析手法を検討した。

3. 2. 2 磁場解析における磁気特性の取り扱い

通常の高周波焼入れシミュレーションにおける磁場解析は、コイル電流を正弦波とした周波数応答解析 (交流解析) を使用するが、鉄鋼部品の磁気特性として比透磁率 μ_r を使用する。実際には、熱処理解析から得られた部品内部の温度分布から、図 3-1 に示す温度-比透磁率データより FEM モデルの要素単位に比透磁率を設定する。温度-比透磁率データは、これまでの経験値からその値を設定しており、磁気変態点以下はほぼ一定値である。しかし、実際の鋼材の磁気特性は、図 3-2 に示すように磁界の強さ H と磁束密度 B の関係がある。比透磁率は、磁界の強さ H と磁束密度 B の関係における比例定数 (式 2.6 参照) であり、磁気特性である B-H 曲線の傾きである。磁界の強さ H が低いと比透磁率は大きく、逆に磁界の強さ H が高いと比透磁率は低くなるが、図 3-1 のような温度-比透磁率データを用いた磁場解析では、磁界の強さ H による比透磁率の変化を考慮できない。特に磁界の強さ H が非常に高い加熱部表面では、磁気飽和による比透磁率の減少を正しく表現することが

できず、加熱条件によっては鉄鋼部品の発熱量(ジュール損失)を正しく求められない場合がある。

そこで、高周波焼入れシミュレーションにおける磁場解析精度の更なる向上を目的に、磁気特性測定試験から各温度域の B-H 曲線を求めるとともに、(株)JSOL 製電磁場解析ソフト“JMAG-Studio Ver.12”にて、FEM モデルの要素単位に磁界の強さに応じた比透磁率を設定する機能を検討した。

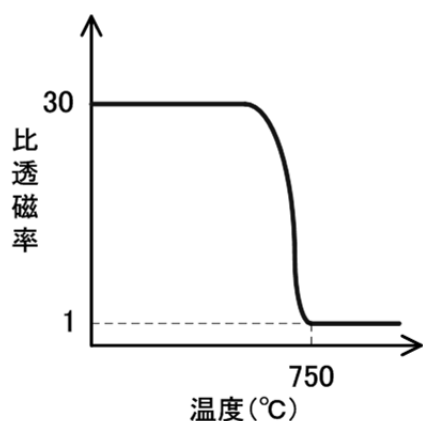


図 3-1 温度-比透磁率データ

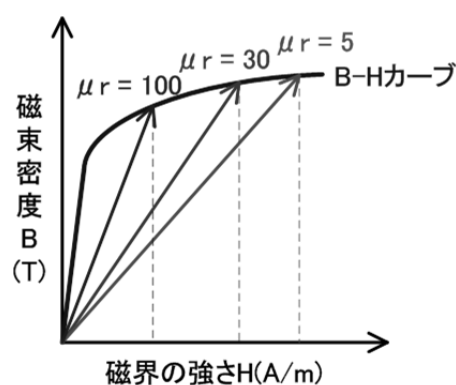


図 3-2 磁気特性(B-H 曲線)

3. 2. 3 解析手法

B-H 曲線を考慮した磁場解析を実施するには、過渡応答解析(ステップバイステップ法⁽¹⁾)を実施する必要がある。しかし、過渡応答解析は周波数 1 サイクルごとに複数回の解析を行うする必要があり、解析時間が非常に長くなることから現実的ではない。そこで、周波数応答解析にて温度依存性を有する B-H 曲線を考慮する手法を検討した。“JMAG-Studio Ver.12”の周波数応答解析では、温度依存性を有する B-H 曲線を考慮する解析には対応していないので、ユーザ・サブルーチンにて機能追加し、比透磁率を求めるために必要な反復計算法にはニュートン・ラフソン法を用いた。なお、ユーザ・サブルーチンの作成には、(株)JSOL の協力を得た。以下に具体的な解析手順を、図 3-7 にその解析フロー図を示す。

< 解析手順 >

- ① 温度ごとの B-H 曲線から、FEM モデルの要素温度にあった B-H 曲線を参照する。該当温度のデータがない場合は線形補完する。【図 3-3】
- ② 要素単位に磁束密度 $B=0$ での比透磁率 μ_{r1} を初期値に設定し、周波数応答解析を実施する。【図 3-4】
- ③ ②解析結果の磁気ベクトルポテンシャル A から、磁束密度 B を要素単位に求める。【図 3-5】
- ④ 要素単位に磁界の強さ H と磁束密度 B が B-H 曲線上になるように比透磁率 μ_{r2} を設定し、周波数応答解析を実施する。【図 3-6】
- ⑤ 磁束密度 B と磁界の強さ H の結果が磁気特性データ上に乗るまで μ_{rn} を修正しながら、周波数応答解析を実施する。

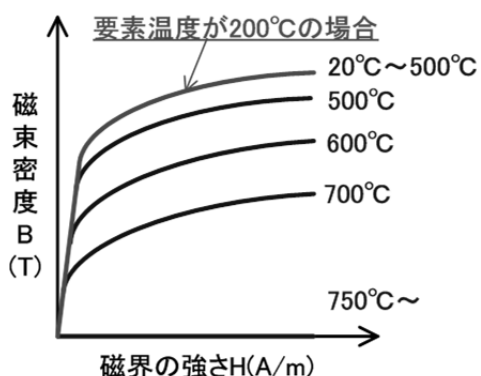


図 3-3 温度依存性を考慮した磁化曲線

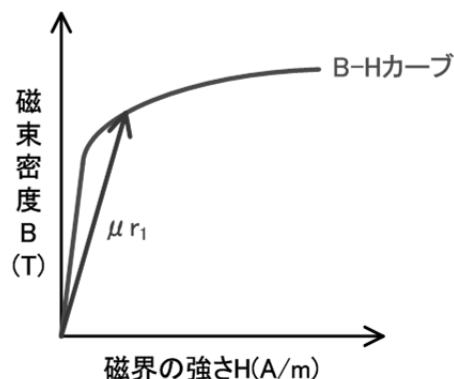


図 3-4 比透磁率の初期値

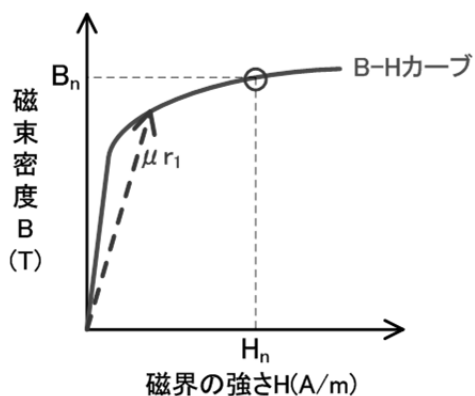


図 3-5 比透磁率の探索

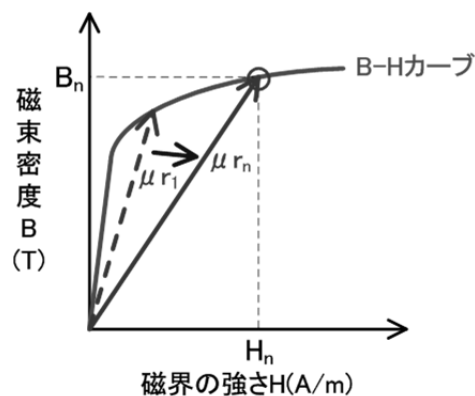


図 3-6 比透磁率の決定

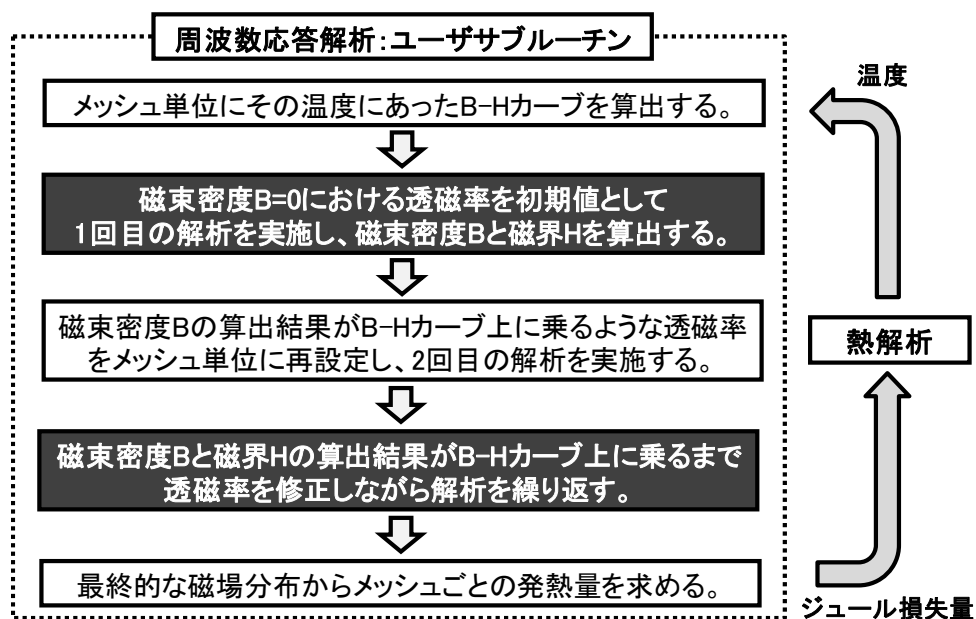


図 3-7 解析フロー

3. 2. 4 磁気特性の測定

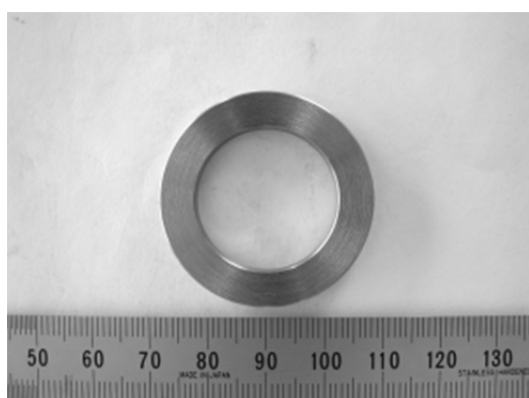
誘導加熱における被加熱物の発熱は、磁気ヒステリシスによるエネルギー損失であるヒステリシス損失とうず電流によるジュール損失から生じる。ヒステリシス損失は、磁束密度 B と磁界の強さ H のヒステリシス曲線で囲まれる面積(残留磁束)で表されることから、磁界の強さ H もしくは磁束密度 B の値を逐次変化させた B - H 曲線の測定が必要となる。しかし、一般的な高周波焼入れは、ジュール損失による発熱がほとんどを占めており、ヒステリシス損失を考慮した磁場解析を実施する必要はない。そこで、図 3-9 に示す理研電子(株)製直流磁気測定装置(直流 BH トレーサ)にて初期磁化曲線と測定設備で発生できる最大磁界での磁気履歴曲線を測定した。

試験片には、図 3-8 に示す S45C 材のリング形状部品(外径 $\phi 36 \times$ 内径 $\phi 24 \times$ 高さ 4mm)を用いて、磁気飽和近くまで連続的に磁場を印加しながら、 B - H 曲線を測定した。測定温度は、コイル銅線表面の絶縁皮膜の耐熱温度を考慮

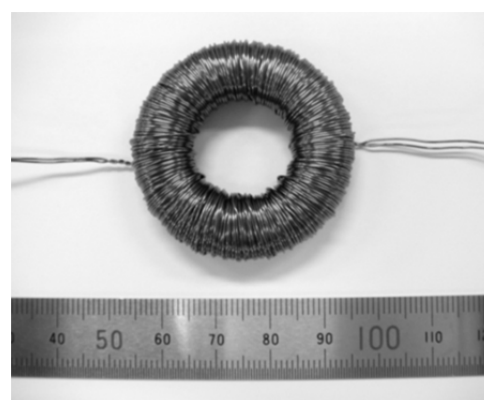
して、室温、100℃、180℃の 3 水準とし、180℃以上の磁化曲線については文献⁽²⁾で公開されているデータを参考に決定した。

<測定方法>

測定方法	直流磁気測定装置による直流磁気特性の測定
試験片寸法	リング形状：外径 $\phi 36$ ×内径 $\phi 24$ ×高さ 4mm
試験片材質	S45C 材
測定装置	理研電子(株)製 “model BHS-40 ⁽³⁾ ”
測定温度	室温、100℃、180℃の 3 条件
最大印加磁場	室温：20kA/m 100℃：18kA/m 180℃：15kA/m
励磁コイル	600 ターン
検出コイル	20 ターン
雰囲気	室温：大気中、100℃と 180℃：シリコンオイル中
測定項目	初磁化曲線および磁気履歴曲線
測定依頼先	コベルコ科研(株)



(a) S45C リング試料



(b) 印加および励磁コイル取り付け後

図 3-8 直流磁気特性測定用試験片



図 3-9 理研電子(株)製直流磁気測定装置 Model BHS-40⁽³⁾

(コベルコ科研(株)所有)

図 3-10 に室温と 100℃、180℃における S45C 材の初期磁化曲線を、図 3-11 に磁気履歴曲線を示す。S45C 材の磁気変態点を 765℃とし、初期磁化曲線から線形近似することで、図 3-12 に示す室温から 765℃までの B-H 曲線を算出した。

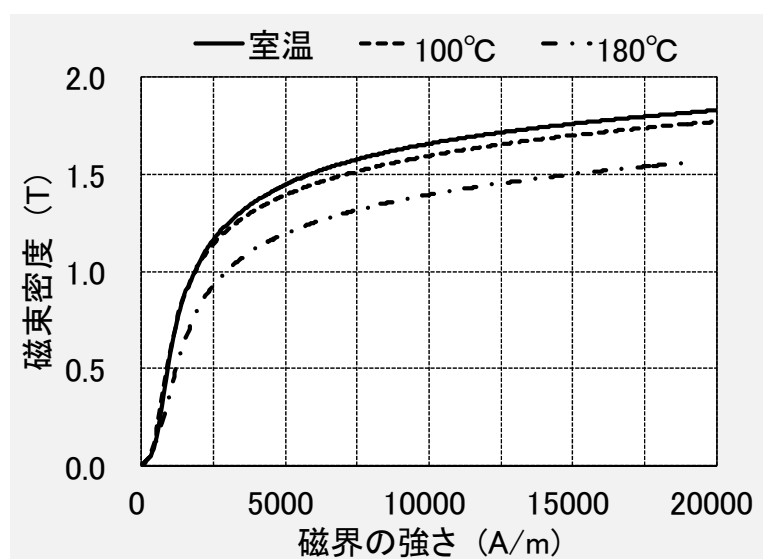


図 3-10 初期磁化曲線

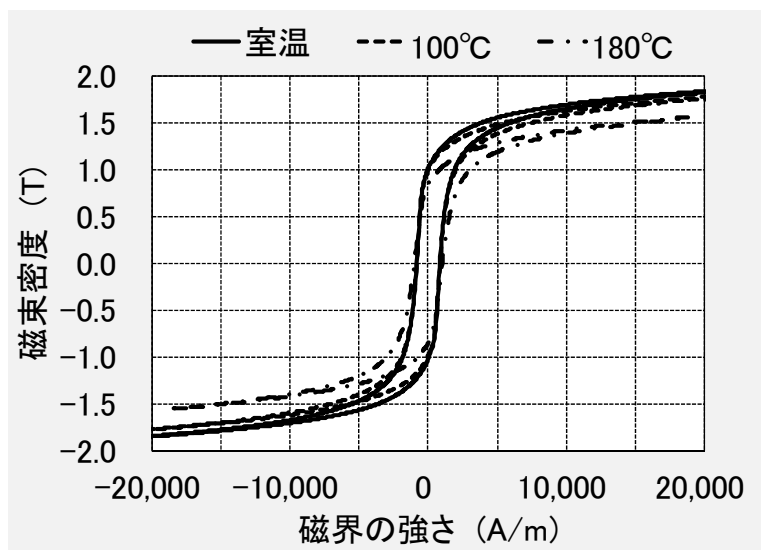


図 3-11 磁気履歴曲線

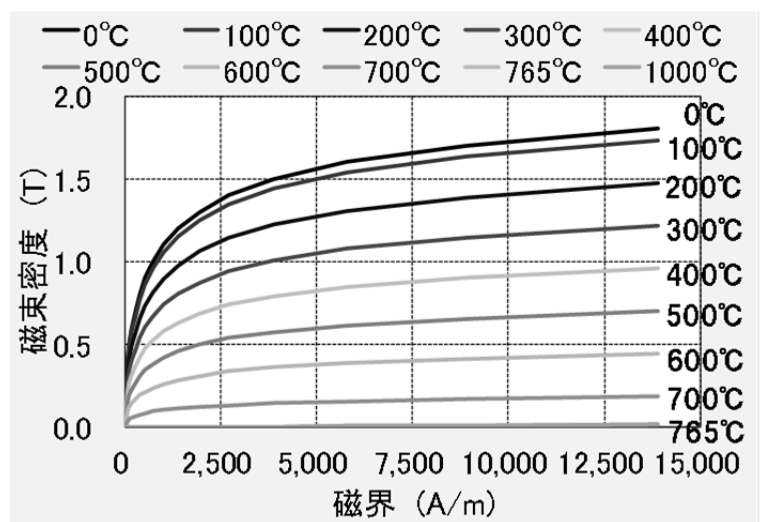


図 3-12 温度依存性を考慮した B-H 曲線

3. 2. 5 試験結果とシミュレーション結果の比較

室温から高温までの磁気特性を考慮した高周波焼入れシミュレーションの精度検証として、リング形状部品の高周波加熱試験を実施し、前述の磁気測定試験から求めた温度依存性の有する B-H 曲線を考慮した高周波加熱シミュレーション結果と比較することで、解析手法の妥当性について検討した。具体的には、S45C 材のリング形状部品を対象に、温度依存性の有する

B-H 曲線「考慮有り」と「考慮無し」の高周波加熱シミュレーションを実施し、加熱試験結果と比較することで、解析精度を検証した。

図 3-13 に試験片と加熱コイルの寸法および位置関係を示す。試験片は、外径 $\phi 105\text{mm}$ 、内径 $\phi 30\text{mm}$ 、高さ 15mm のリング形状部品で、材質は S45C 材である。表 3-1 に試験片の化学組成を示す。試験片上面には外表面から 3mm 、 5mm 、 10mm 、 20mm 位置に、シース型 K 熱電対挿入用として直径 $\phi 1.1\text{mm}$ 、深さ 7.5mm の縦穴をあけた。加熱コイルは 1 ターン形状で、コイル断面は横 24.5mm 、縦 18mm の矩形であり、図 3-1 に示すように試験片の外側に設置した。また、加熱コイル内表面には、噴射冷却用として外径 $\phi 2.0\text{mm}$ の穴を千鳥状に配置した。

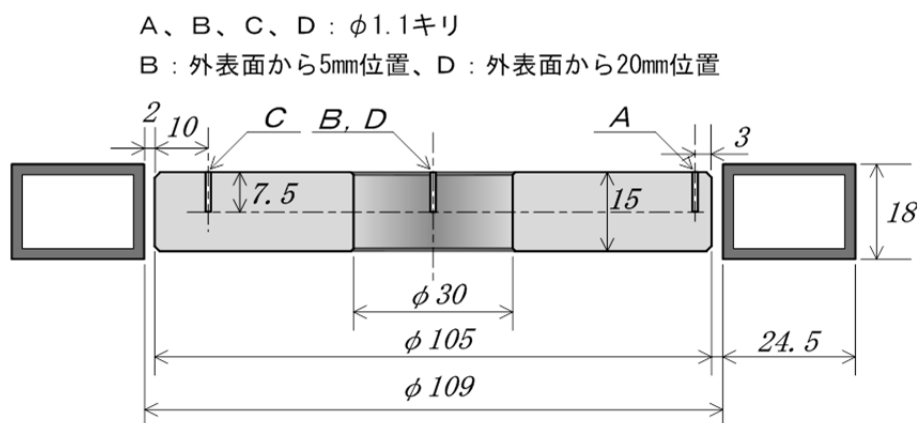


図 3-13 試験片と加熱コイルの寸法および位置関係 (単位 : mm)

表 3-1 試験片の化学組成 (mass %)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
S45C	0.47	0.21	0.76	0.013	0.021	0.04	0.12	0.02

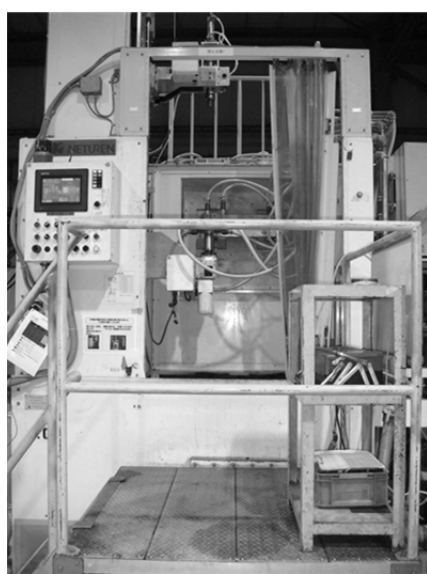
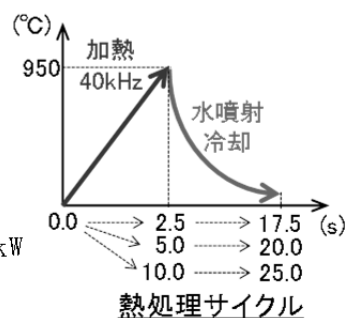
以下に、試験条件を示す。試験設備は、高周波熱錬株式会社湘南事業所内にある汎用の縦型高周波焼入装置を使用した。図 3-14 に設備外観を示す。

加熱時間は 2.5s 、 5.0s 、 10.0s の 3 水準とし、試験片に取り付けられた

シース型 K 熱電対により加熱中の内部温度を測定した。また、加熱後直ちに水を用いた噴射冷却を実施した。図 3-15 に試験での加熱冷却状況を示す。

< 試験条件 >

- (1) 加熱方式 定置一発焼入れ
- (2) 試験片 形状：外径 ϕ 105×内径 ϕ 30×高さ 15mm
材質：S45C 材
- (3) 加熱時間 2.5s、5.0s、10.0s
- (4) 周波数 40kHz
- (5) 投入電力 2.5s：74kW、5.0s：54kW
10.0s：36kW
- (6) 最高温度 950℃（外径面中央部）
- (7) 冷却方法 水噴射冷却（加熱コイル自己噴射方式）
- (8) 冷却条件 流量 60L/min、水温 22℃
- (9) 冷却時間 15.0s（加熱終了と同時に冷却開始）



縦型焼入装置



加熱コイル



リング試験片と加熱コイルの位置関係

図 3-14 汎用縦型焼入設備

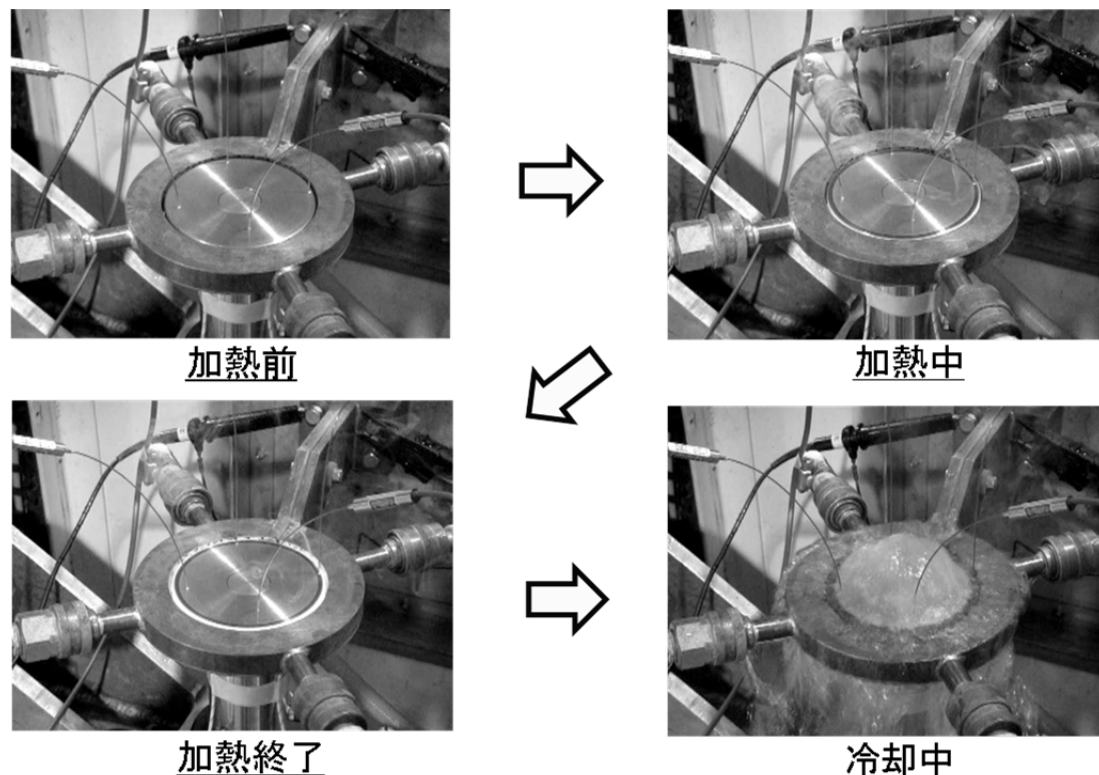


図 3-15 試験における加熱冷却状況

以下に、高周波加熱シミュレーションの解析条件を示す。試験片形状の対称性から解析は 2 次元軸対称問題とし、図 3-16 に示す FEM モデルを使用した。

加熱条件は、加熱時間 5.0s、周波数 40kHz とし、加熱コイル断面には試験中に測定したコイル電圧値を設定した。また、磁気特性による温度分布の違いを確認するために、図 3-17 に示す 2 種類の磁気特性データを使用した。図 3-17(a) は前述の磁気特性測定試験から得られた温度ごとの B-H 曲線、図 3-17(b) は従来の温度-比透磁率曲線である。なお、冷却過程の解析は実施していない。

< 解析条件 >

- (1) 加熱時間 5.0s
- (2) 周波数 40kHz
- (3) コイル電圧値 実測値を使用
- (4) 解析方法 磁場と熱の逐次連成解析
- (5) 連成回数 50回 (0.1s/STEP)
- (6) 解析範囲 加熱過程のみ
- (7) 輻射考慮 あり
- (8) 解析ソルバー (株)JSOL 製 “JMAG-Studio Ver.12”

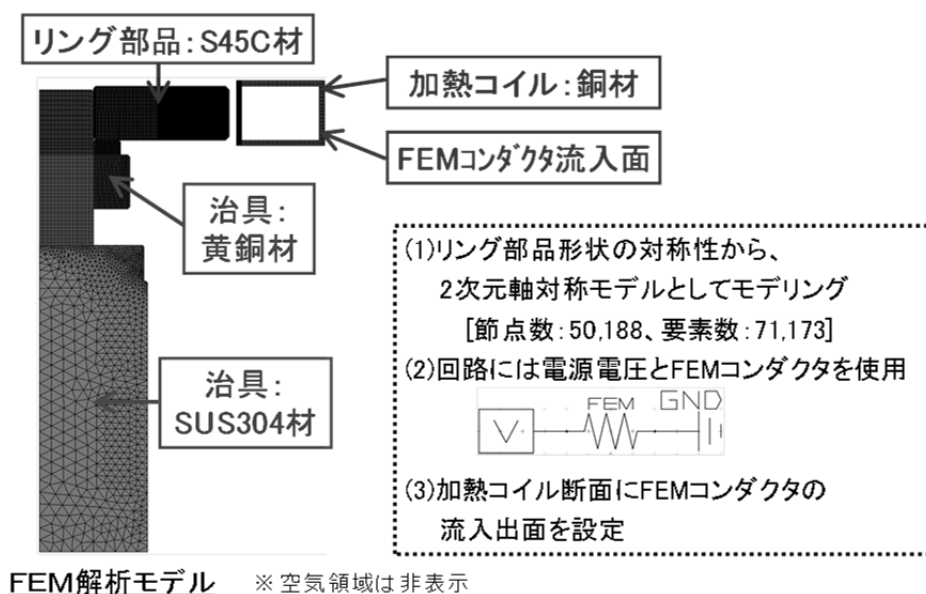
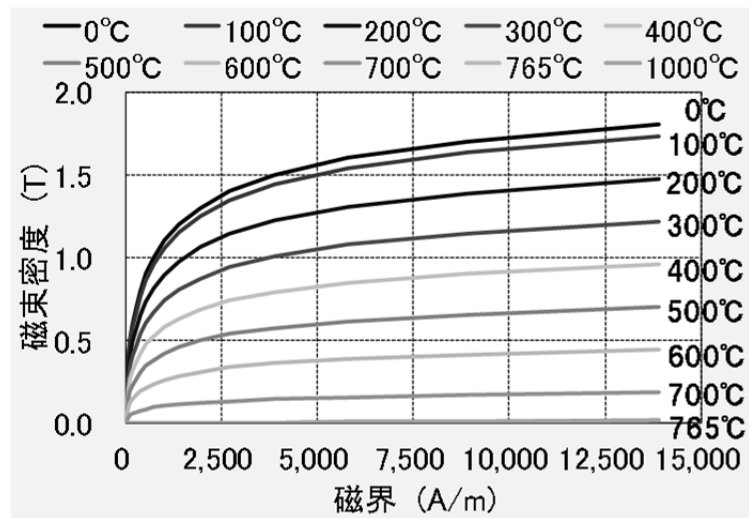
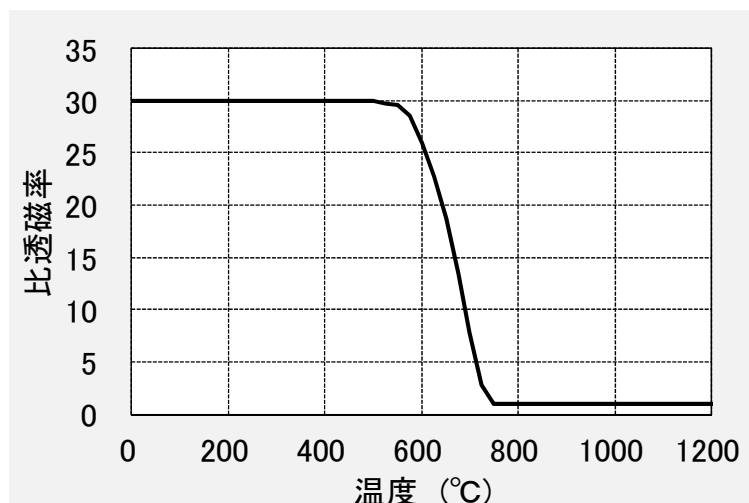


図 3-16 FEM モデル



(a) B-H 曲線考慮有り条件：温度依存性あり B-H 曲線

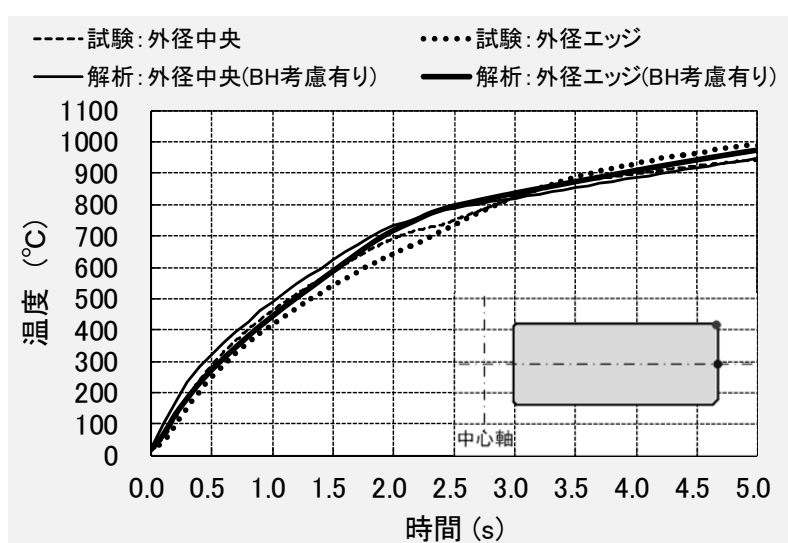


(a) B-H 曲線考慮無し条件：温度-比透磁率曲線

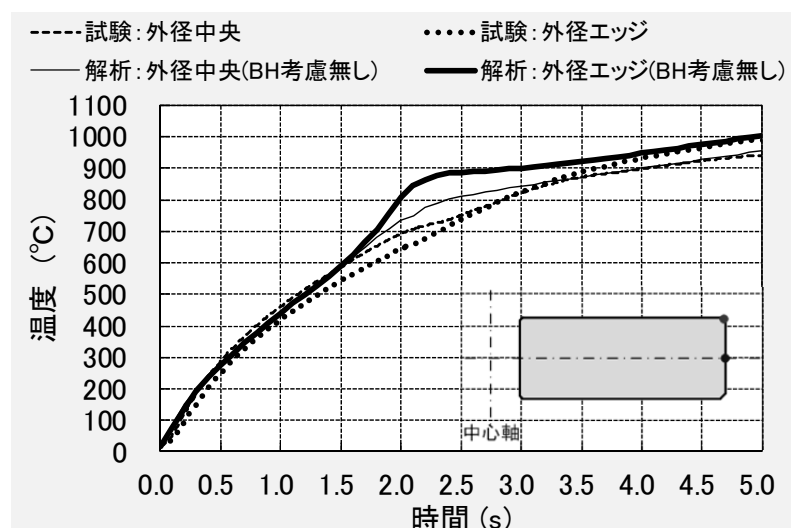
図 3-17 解析に用いた磁気特性

図 3-18 に、試験片の外径面中央部および外径エッジ部における試験結果とシミュレーション結果の比較を示す。図 3-18(a)には、測温結果と B-H 曲線考慮有り条件のシミュレーション結果を示す。加熱中の温度変化は一致しており、また加熱終了時の温度にも良い一致が見られた。一方、図 3-18(b)には、測温結果と B-H 曲線考慮無し条件のシミュレーション結果を示す。

外径エッジ部の温度変化は測温結果より全体的に温度が高い傾向が見られた。特に加熱温度 600℃以上で差が大きくなり、磁気変態点近傍では昇温速度が測温結果よりも速くなる傾向が見られた。この原因は、磁気特性に温度-比透磁率曲線を用いることで、加熱部表面の磁気飽和による透過深度の変化を再現できず、外径エッジ部近傍に実際よりも多くのうず電流が集中したためだと考えられる。



(a)B-H 曲線考慮有り条件



(a)B-H 曲線考慮無し条件

図 3-18 試験結果とシミュレーション結果の比較

図 3-19 には、加熱終了時の試験片中央縦断面における試験結果とシミュレーション結果の温度分布を示す。B-H 曲線考慮有り条件のシミュレーション結果の方が試験結果に近い結果が得られた。

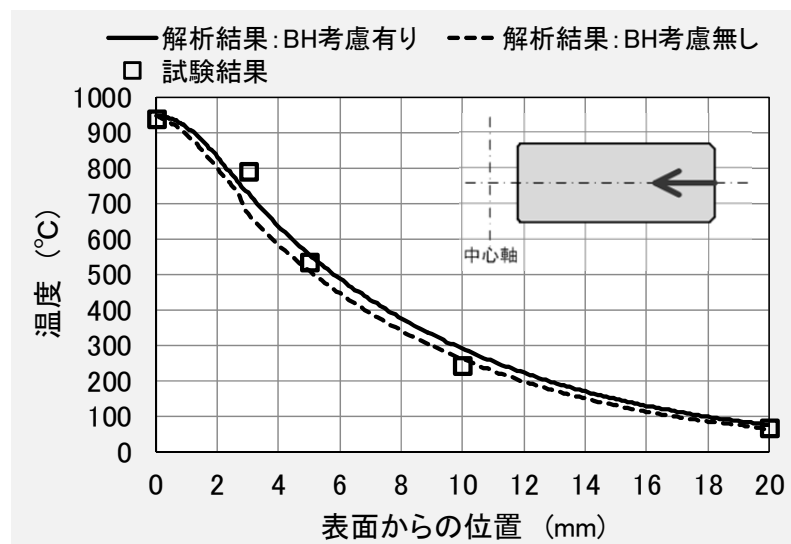


図 3-19 加熱終了時における試験片縦中央断面での温度分布

3. 2. 6 小結

本研究では、温度依存性を考慮した B-H 曲線から鉄鋼部品内部の比透磁率を求める磁場解析手法を検討した。得られた知見について、以下に示す。

- (1) 温度依存性を有する B-H 曲線を考慮した磁場解析を実施することで、温度と磁界の強さ H による鉄鋼部品内部の比透磁率の変化を連続的に取り扱うことが出来た。
- (2) 部品表面の磁気飽和を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施することで、昇温カーブや加熱終了時の加熱温度が実測値に近づくことを確認出来たので、本解析手法は有効であると考えられる。
- (3) 解析精度の更なる向上を図るためには、 300°C から 800°C までの B-H 曲線を測定することが必要である。

3. 3 高温磁気特性測定手法の開発

3. 3. 1 開発の背景

高周波焼入れシミュレーション加熱過程の解析精度を向上させるためには、磁場解析による鉄鋼部品表面の発熱密度分布を高精度に求める必要がある。このためには、前節に示すように常温域から高温域までの磁気特性(以下、高温 B-H 曲線)を使用して、鉄鋼部品表面の磁気飽和を考慮した磁場解析が必要である。しかし、高周波焼入れで用いられる鉄鋼材の高温 B-H 曲線に関する研究⁽²⁾⁽⁴⁾は非常に少なく、そのデータ⁽²⁾⁽⁵⁾もほとんど無い状態である。

そこで、本研究では、鉄鋼材の高温磁気特性の測定手法および測定設備に関する検討を行い、S45C 材試験片による高温 B-H 曲線の測定を実施した。

3. 3. 2 試験片の製作

図 3-20 に、試験片の形状および寸法を示す。B-H 曲線を測定するためには、リング試料に励磁および検出の銅線コイルを巻き付ける必要があるが、銅線の絶縁被覆は 200℃以上になると剥がれるので、800℃までの高温まで絶縁を保つ工夫が必要である。そこで銅線には、セラミック繊維製耐熱絶縁テープを巻いた。また、800℃までの高温になっても磁気特性が測定出来るように、リング試料はセラミック製保護容器の中に設置した。セラミック繊維製耐熱絶縁テープとセラミック製保護容器の耐熱温度は 1,000℃であり、保持温度 800℃まで十分に耐えることが出来る。

保護容器内には、外径 ϕ 100mm、内径 ϕ 80mm、厚さ 5mm の S45C 材リング試料を設置した。リング試料の製作は、加工応力の影響を考慮して放電加工で行った。磁束密度 B および磁界の強さ H の算出に必要な試料断面積を求めるために、保護容器の上から励磁コイルと検出コイルは巻きつけた。また、励磁コイルと検出コイルには、耐熱絶縁テープ巻付けた銅線を使用

することで、高温時の巻線間の絶縁を保つようにした。検出コイルは、直径 $\phi 1.0\text{mm}$ の銅線で 20 ターン、励磁コイルは、直径 $\phi 1.4\text{mm}$ の銅線で 70 ターンとした。

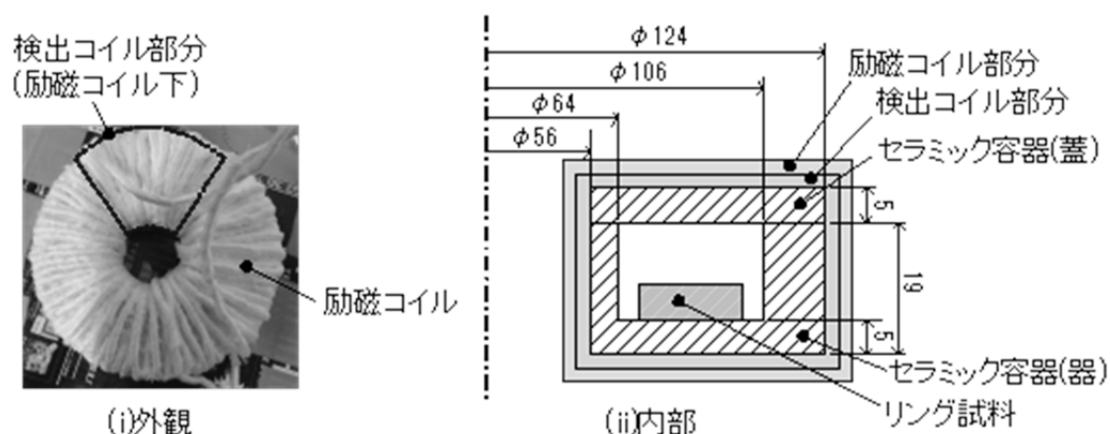


図 3-20 試験片の形状および寸法

3. 3. 3 測定方法

図 3-21 に、測定機器の構成を示す。変圧器は松永製作所(株)製 SD1320、電流計は横河電機(株)製 AC 電流計 5/25A、波形測定器は日置電機(株)製メモリハイコーダ MR8870 を使用した。また、電源には商用周波数 50Hz を使用した。

試験片は磁気変態点直前の 750°C まで加熱する必要があるので、加熱には図 3-22 に示す富士電波工業(株)製抵抗加熱式真空加圧焼結炉 FVPS-R を使用した。測定試験では、試験片のみを焼結炉内に設置し、焼結炉の覗き窓から検出コイルと励磁コイルを炉外に配線できるようにした。また 500°C 以上の高温になるので、加熱前にリング試料が酸化しないように炉内を真空ポンプで真空状態にしてからアルゴンガスで置換した。

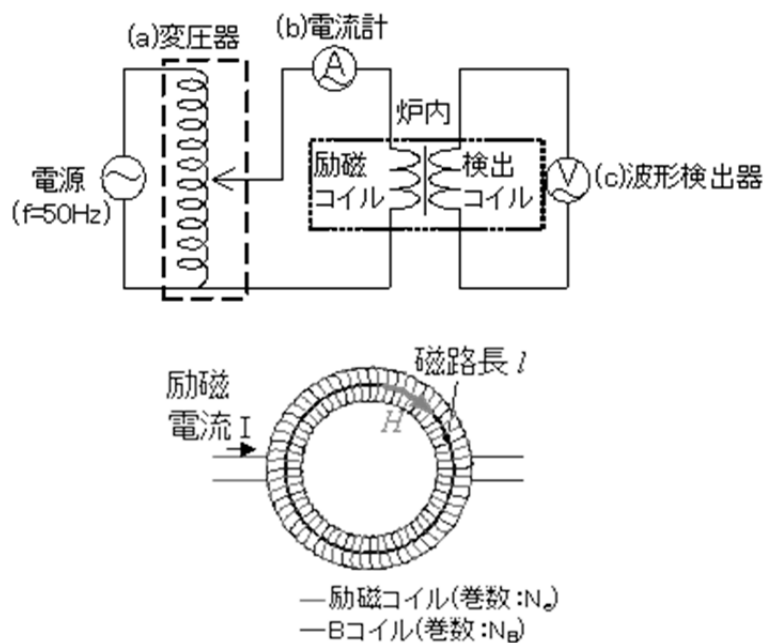


図 3-21 測定機器の構成



図 3-22 富士電波工業(株)製抵抗加熱式真空加圧焼結炉

FVPS-R-150/200

測定手順としては、まず、商用電源に接続された変圧器によって励磁コイルに電流を流し、試料に磁界を印加する。磁界の強さ H は、以下の式 3.1 より求められる。

$$H = \frac{N_e}{l} I \quad (3.1)$$

ただし、 N_e : 励磁コイルの巻き数 [N]、 l : 磁路長 [m]、 I : 励磁電流 (A) である。

次に、検出コイルでは、磁界の印加によって、誘導起電力が発生する。磁束密度 B は、以下の式 3.2、式 3.3 より求められる。

$$\phi = -\frac{1}{N_B} \int V dt \quad (3.2)$$

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (3.3)$$

ただし、 ϕ : 試料内に生じる磁束 [Wb]、 N_B : 検出コイルの巻き数 [N]、 V : 検出コイルに発生する電圧 [V]、 S : リング試料の断面積 [m²] である。

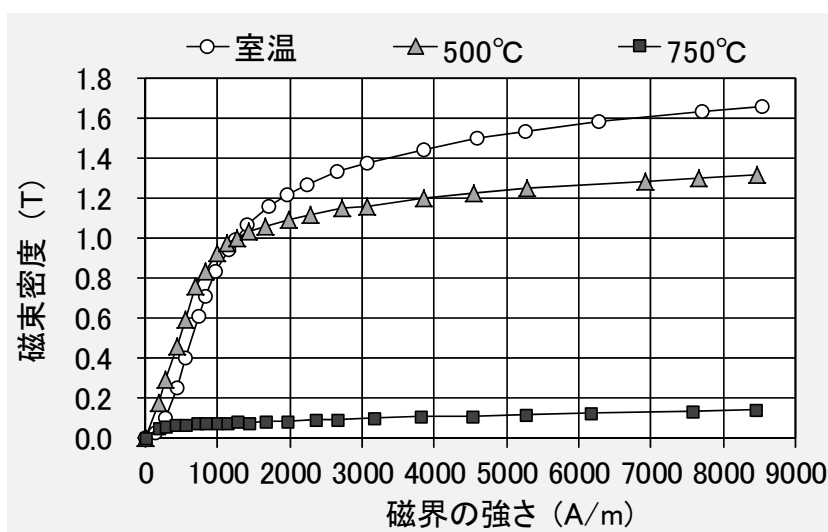
実際の測定は、励磁電流を徐々に上げていき、その都度、磁界の強さ H に対する磁束密度 B を測定することで B - H 曲線を作成した。この作業を室温から 750°C まで 100°C ピッチで実施した。

3. 3. 4 測定結果

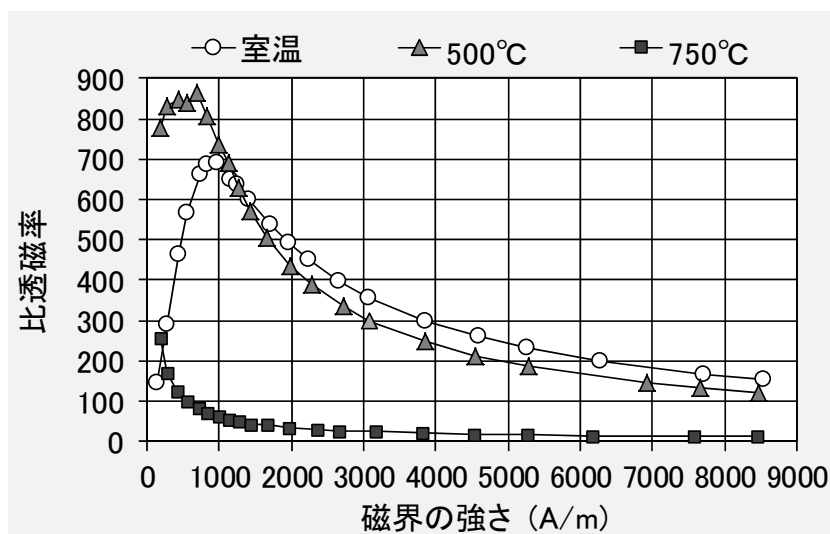
図 3-23(a) に、S45C 材における室温と 500°C、750°C の B - H 曲線測定結果を示す。磁界の強さ 8,500 A/m での磁束密度は、室温時の約 1.7T から 750°C の約 0.18T まで低下し、試料の温度上昇に従って磁化が低下する傾向となった。これは、温度上昇に従って磁気モーメントの熱振動が大きくなり、磁区が揃いにくくなることで、全体としての磁化が低下するためである。特に、750°C

は急激に磁化が低下する結果となった。これは、磁区が消失し磁化が失われる温度である磁気変態点(S45C 材では約 763℃)に近づくためである。

図 3-23 (b)に、S45C 材の B-H 曲線測定結果から算出した室温と 500℃、750℃の μ_r -H 曲線を示す。室温での最大比透磁率は約 700 であったが、500℃では約 900 まで上昇し、750℃では磁気変態点に近づくため約 250 まで急激に低下する結果となった。



(a) 各温度域での B-H 曲線



(b) 各温度域での μ_r -H 曲線

図 3-23 S45C 材の高温 B-H 曲線測定結果

3.3.5 小結

本研究では、高温 B-H 曲線の測定手法および測定設備を検討した。得られた知見について、以下に示す。

- (1) 800℃まで昇温可能な試験片および磁気特性測定装置を製作することにより、室温から 750℃までの S45 材 B-H 曲線が測定できた。
- (2) 高周波焼入れシミュレーションの実用化には、様々な鉄鋼材の高温 B-H 曲線を測定し、磁気特性データベースを構築することが必要である。

3.4 コイルギャップ変動を考慮した高周波焼入れシステムの開発

3.4.1 背景と目的

建設機械や工作機械などの大型部品を高周波焼入れする際、硬化層深さを確保するためには低い周波数による加熱が必要となり、部品表面だけでなく熱移動を含めて内部温度も大きく上昇する。複雑な部品形状の場合、加熱中に不均一な熱膨張による半径方向や上下方向のねじれ、非対称な反り変形が生じ、加熱コイルと熱処理部品の相対位置(以下、コイルギャップ)が変動する。これにより、加熱中の熱処理部品の発熱分布および発熱量は大きく変化し、焼入れパターンや焼入変形量などの熱処理品質に影響を及ぼす。しかし、この現象は現状の高周波焼入れシミュレーションでは考慮されておらず、解析精度向上を図るための大きな課題となっている。

本研究では、大型部品における高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、まずは加熱中の部品変形によるコイルギャップ変動が考慮可能な高周波焼入れシミュレーション・システムを構築した。次に、大型リング部品の高周波焼入れ試験を対象としたシミュレーションを実施し、試験結果との比較を行うことで、本システムの解析精度を検討した。

3. 4. 2 試験方法

図 3-24 に試験片と加熱コイルの形状と寸法、および設置状況を示す。試験片は、外径 $\phi 430\text{mm}$ 、内径 $\phi 350\text{mm}$ 、高さ 60mm のリング形状で、外周部の上下非対称位置に V 字状のリング溝を設けてある。試験片の素材は S45C 材とし、表 3-2 にその化学組成を示す。加熱コイルは外径 $\phi 345\text{mm}$ 、高さ 59mm の 1 ターン形状で、試験片の内側に配置している。また、加熱コイル内側には、空間への磁束の広がりを防ぎ、試験片加熱面に磁束を集中するためのフェライトコアを設置している。

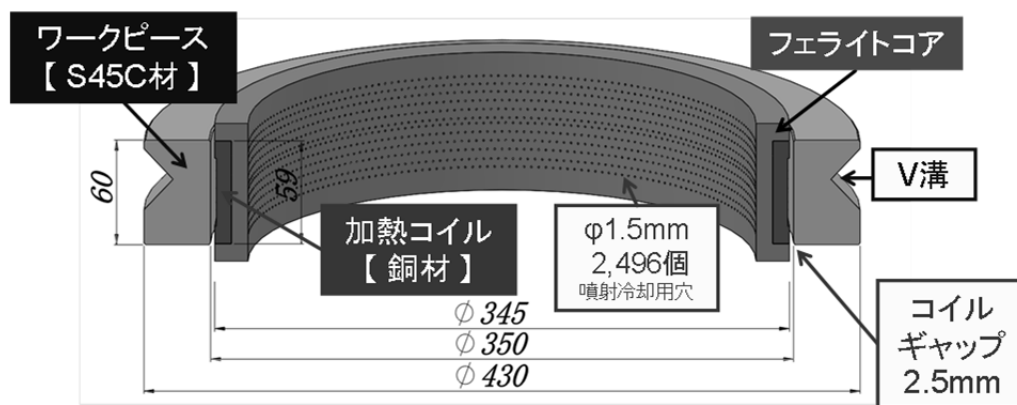


図 3-24 リング形状試験片と加熱コイルの寸法および位置

表 3-2 試験片の化学組成 (mass %)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
S45C	0.46	0.17	0.63	0.020	0.017	0.04	0.13	0.09

試験では、試験片内径中央部の有効硬化層深さが 2.5mm となるように焼入条件を設定した。加熱条件は、周波数 10kHz 、加熱時間 50s 、加熱温度 950°C 、電源出力 205kW 、回転数 6rpm とし、加熱中に試験片表面および内部の温度、加熱コイル電流波形の測定を実施した。また、加熱中における試験片の変形量を測定するために、外径面の 2 箇所、上端面の 1 箇所をキーエンス製

レーザ式変位計 IK-100 で測定した。一方、冷却条件は、加熱コイル内部に千鳥状に設けられた直径 $\phi 1.5\text{mm}$ 穴による水噴射冷却とし、流量 $380\text{L}/\text{min}$ 、冷却時間 180s とし、加熱後直ちに冷却を開始した。図 2-25 に、試験中の加熱冷却状況を示す。

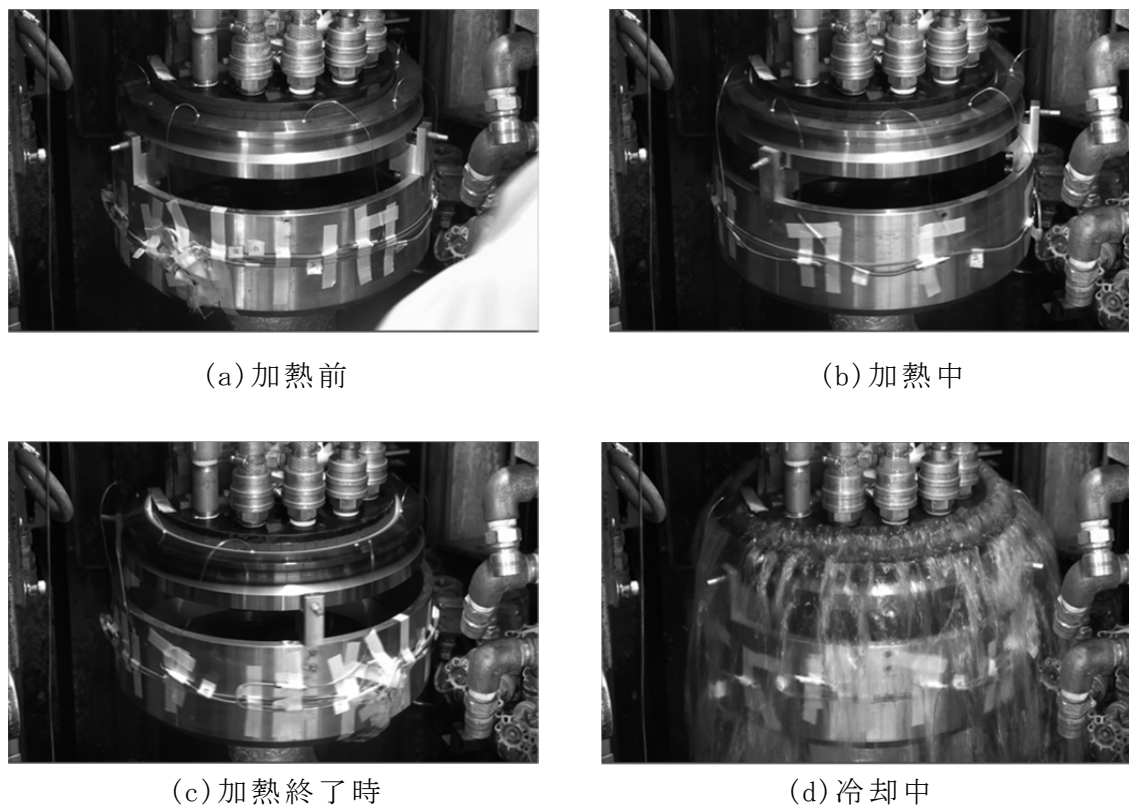


図 3-25 試験中の加熱冷却状況

3. 4. 3 シミュレーション手法

高周波焼入れのシミュレーション手法には、有限要素法(以下、FEM)による磁場と熱処理の逐次相互連成解析⁽⁶⁾を使用した。図 3-26 に解析フローを示す。

解析手法としては、まず磁場の周波数応答解析よりうず電流密度を求め、発熱分布および発熱量を決定する。熱処理解析では、磁場解析から得られた各要素の発熱密度量からワークピース領域の熱伝導解析を実施後、弾塑性と金属相変態の連成解析を行う。この解析にて得られる変形量および温度を

節点情報として次ステップの磁場解析に引き渡す。この際、磁場解析の FEM モデルに対しメッシュ・モーフィング処理¹を行い、変形量からワークピースとその周辺の空間領域の形状のみを変更させることで、コイルギャップ変動を考慮した磁場の周波数応答解析を実施する。

以上の処理を予め決められたステップ時間、連成回数に基づいて繰り返し実行することで高周波焼入れシミュレーションを実施した。電磁場解析ソフトには(株)JSOL 製“JMAG-Designer Ver.13”を、熱処理シミュレーションソフトには相変態モデルを組み込んだエムエスシーソフトウェア(株)製“Marc 2013.1”を使用した。

相変態モデルは、拡散型変態には TTT 線図をベースとした JMAK 式 (Johnson & Mehl⁽⁷⁾ - Avrami⁽⁸⁾ - Kolmogorov⁽⁹⁾) を、無拡散型変態には Koistinen - Marburger 式⁽¹⁰⁾ を、オーステナイト変態については、変態の進展を温度のみで決定する JMAK 簡略式を用いた。また、材料特性については、各要素における各相の体積分率から複合則で算出した。

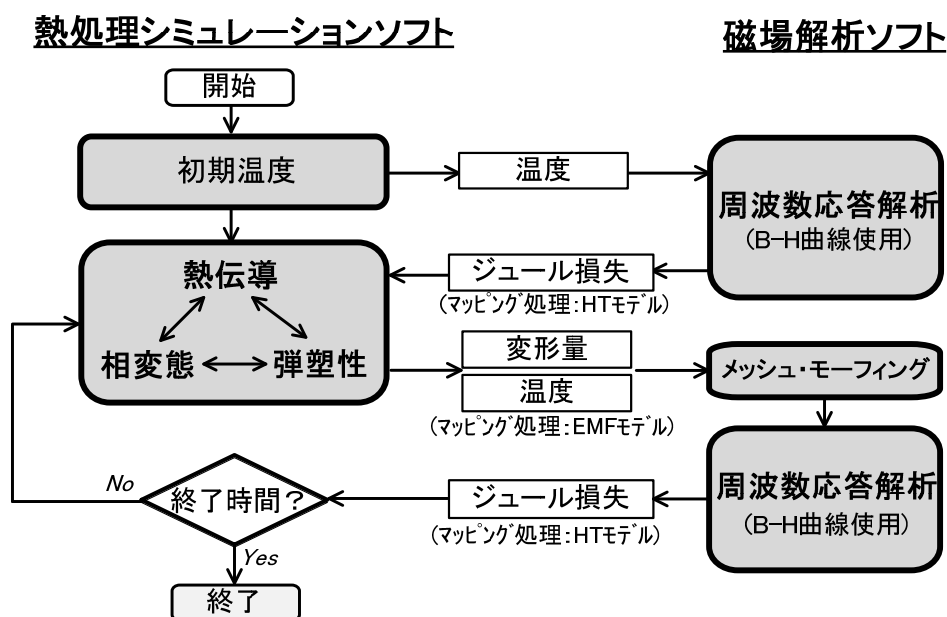


図 3-26 解析フロー

¹ 既存のメッシュモデルを利用して、節点座標や要素形状だけを変えて形状変更する手法。

3. 4. 4 シミュレーション条件

前述のシミュレーション手法を用いて、コイルギャップ「変動有り」と「変動無し」の 2 水準にて、高周波焼入れシミュレーションを実施した。今回は、コイルギャップ変動による試験片内部温度への影響を調査することが目的であるから、加熱過程のみをシミュレーションの対象とした。

FEM モデルは、試験片および加熱コイル形状の対称性から 2 次元軸対称問題として取扱い、図 3-27 に示すメッシュ分割を行った。要素数は 18,265、節点数は 13,823 であった。解析条件は、図 3-28 に示す実測のコイル電流および周波数を図 3-27 の加熱コイル断面に設定し、加熱時間は 50s とした。ワークピースの磁気特性としては温度依存性を有する B-H 曲線を使用し、温度および磁場の強さによる比透磁率の変化を考慮した。拘束条件は、ワークピース受け治具を剛体としてライン要素にてモデル化を行い、ワークピースと受け治具のすべり接触を考慮した。熱的境界条件として、熱輻射と静止大気中への熱伝達を考慮した熱伝達率をすべてのワークピース表面に設定した。

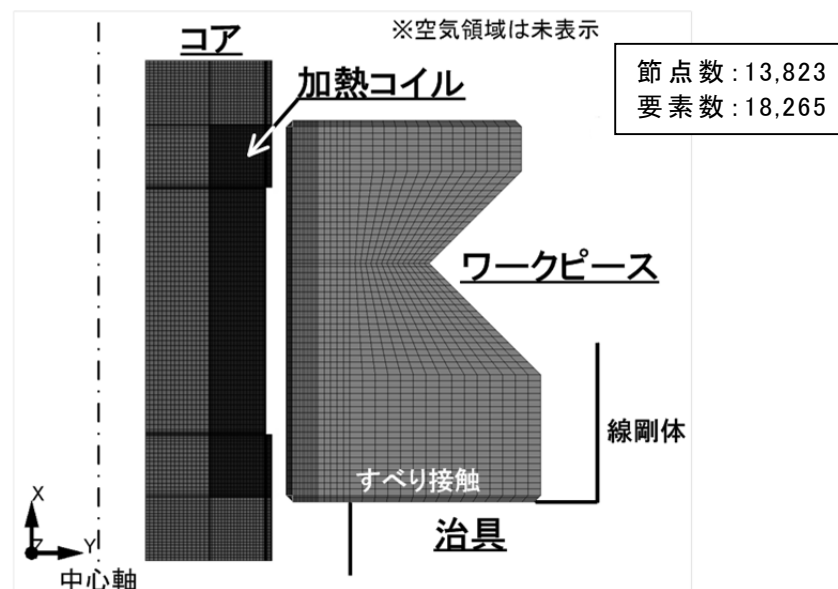


図 3-27 FEM モデル(空気領域非表示)

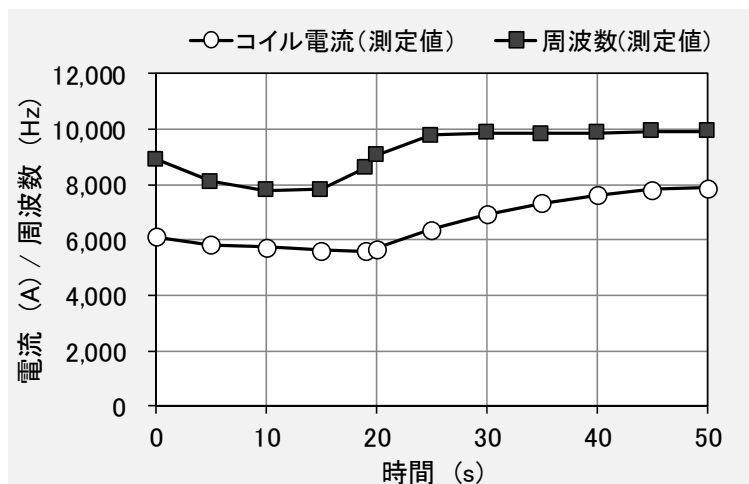
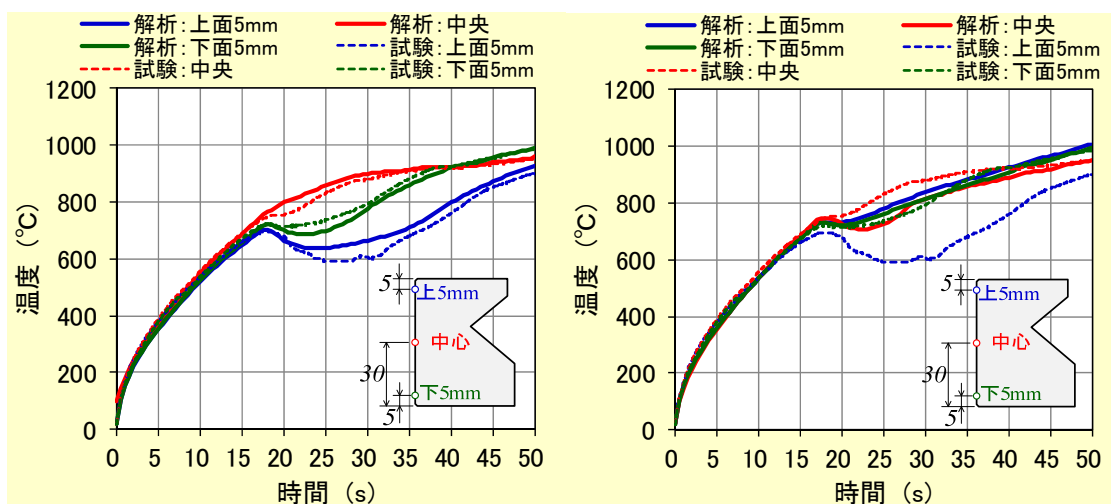


図 3-28 焼入試験での加熱コイル電流および周波数

3. 4. 5 試験結果とシミュレーション結果の比較

図 3-29(a)および図 3-29(b)に、試験片内表面 3 箇所(上5mm、中心、下5mm)の温度変化を示す。実線はシミュレーション結果、破線は試験結果を示す。コイルギャップ変動有りのシミュレーション結果は試験結果と全体的に良い一致が見られた。一方、変動無しの場合には、試験片上端面から 5mm 位置表面の温度変化に大きな相違が見られ、試験結果における加熱開始 18s からの温度低下が見られず、加熱終了時の温度も高い結果であった。



(a) コイルギャップ変動有り

(b) コイルギャップ変動無し

図 3-29 加熱中の試験片内表面の温度変化

図 3-30 に、試験片上端面から 5mm 位置における内部 4 箇所の温度変化を示す。実線はシミュレーション結果を、破線は試験結果を表す。コイルギャップ変動有りのシミュレーション結果は、すべての測定位置において試験結果と良い一致が見られた。一方、変動無しの場合には、試験結果より全体的に温度が高く、内径表面に近い位置ほど差が大きくなる結果であった。これは、加熱中の内径表面近傍の発熱密度が試験時より高いことが原因と考えられる。

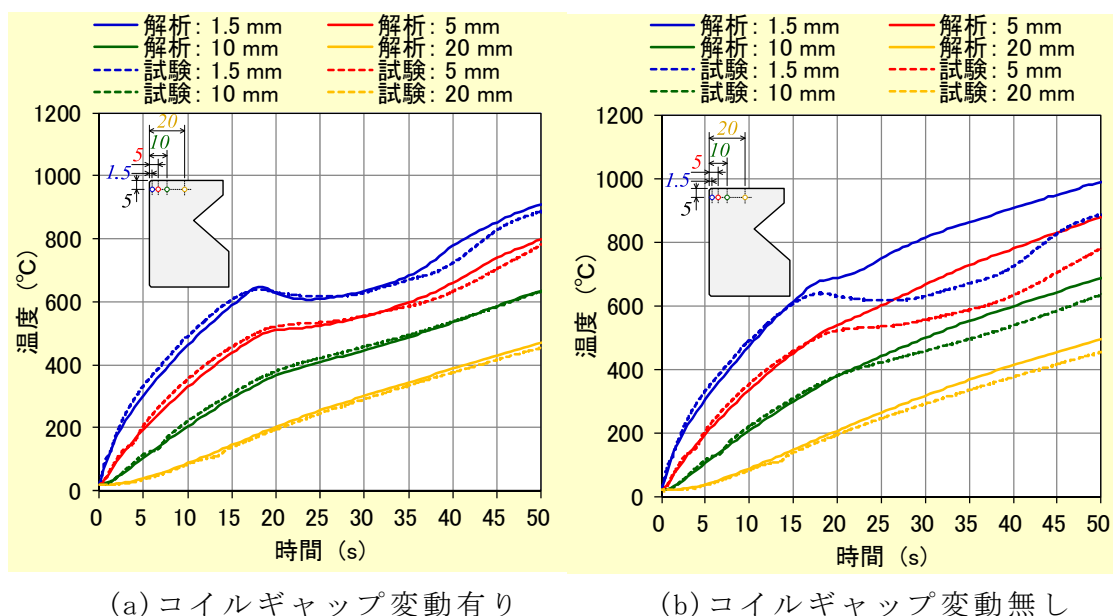
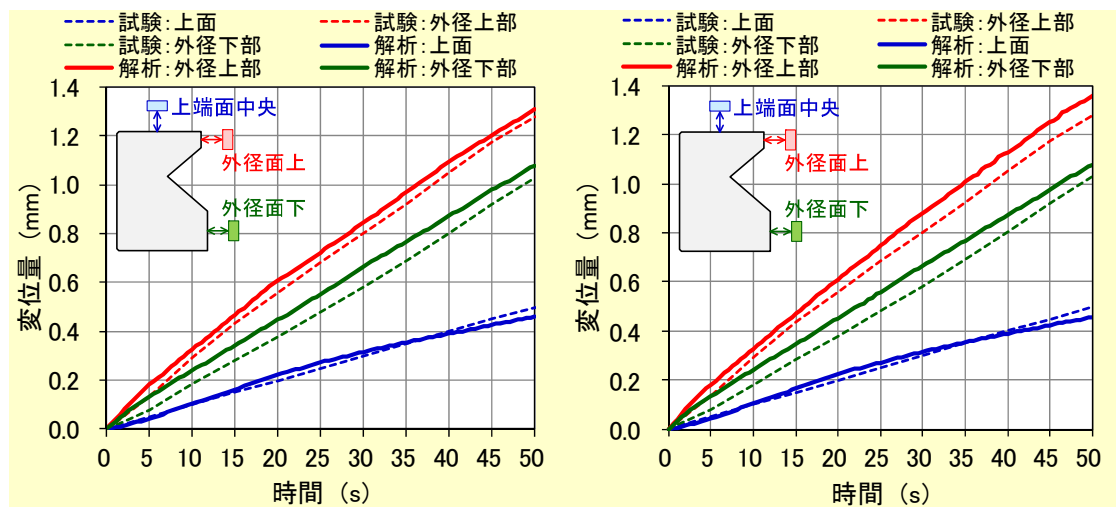


図 3-30 加熱中における試験片内部の温度変化

図 3-31 に、試験結果とシミュレーション結果における上端面中央の高さと外径面上部および下部の半径の時間変化を示す。実線はシミュレーション結果、破線は試験結果を表す。試験結果とシミュレーション結果ともに外径面は半径方向に膨張しており、V 字溝上部の変位量は下部よりも常に大きく、また上端面中央の高さは加熱中において常に増加していた。外径面の変形量は、試験結果とシミュレーション結果に多少の差が見られるものの、コイルギャップ変動有りのシミュレーション結果の方が試験結果に近かった。



(a) コイルギャップ変動有り

(b) コイルギャップ変動無し

図 3-31 加熱中における試験片変形の温度変化

図 3-32 にシミュレーション結果から得られたオーステナイト分布、および試験片のマクロパターンを示す。試験片のマクロパターンは、5%ナイトールで腐食させたものであり、黒い着色部はマルテンサイトすなわち加熱中にオーステナイト変態した領域である。コイルギャップ変動有りのシミュレーション結果は、試験片中央部よりも上端部のオーステナイト層深さが浅くなっており、試験結果と良い一致が見られた。一方、変動無しの場合には、上端部のオーステナイト層深さが中央部よりも深くなっており、試験結果との相違が見られた。

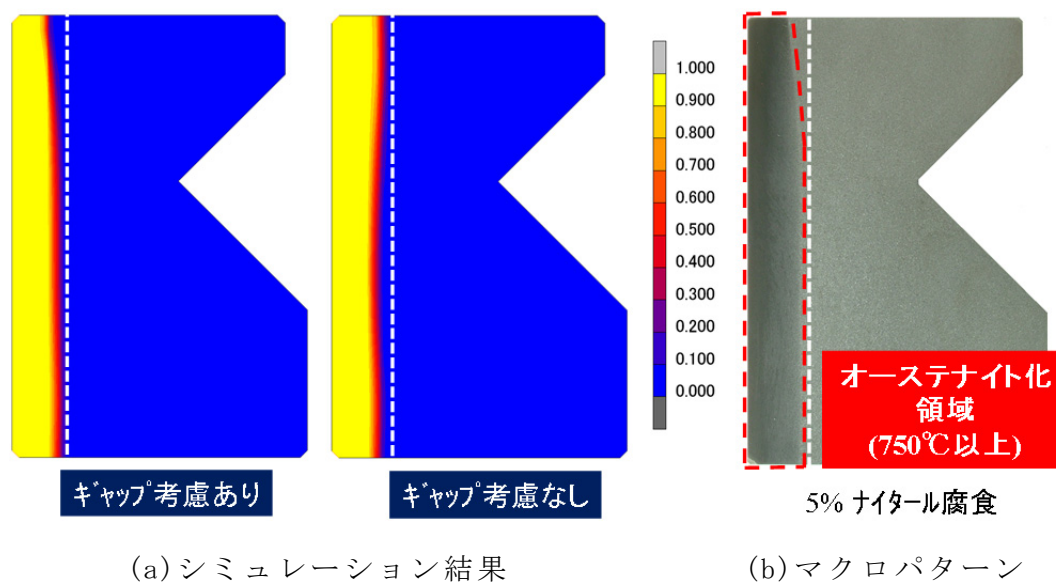


図 3-32 加熱終了時のオーステナイト分布

3. 4. 6 小結

本研究では、大型リング部品の高周波焼入試験を対象として、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施した。これにより、以下の知見が得られた。

- (1) 外径部に V 字溝を有する大型リング部品の高周波焼入試験を対象に、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施した結果、試験結果と良い一致が見られた。
- (2) 大型部品だけでなく薄肉部品や長尺部品、超大型部品など、加熱中にコイルギャップが大きく変化する部品に対して、本手法は有効である。
- (3) 本手法により、さらに高精度な高周波焼入れシミュレーションが可能となったことで、加熱コイルの設計や実設備での熱サイクルの設定への活用が可能である。

3. 5 熱伝達率の逆解析による算出

3. 5. 1 研究の背景

高周波焼入れシミュレーションを用いた鉄鋼部品焼入時の変形や残留応力、硬さの予測精度を左右する重要な因子の一つとして熱伝達率の精度が挙げられる。高周波焼入れでは、水もしくはポリマー水溶液による噴射冷却が主に用いられ、浸漬冷却に比べて均一性や再現性、冷却能が高いなど優れた特徴があるが、噴射冷却の計測は非常に難しく、熱伝達率データも少ない。

そこで、鉄鋼部品の冷却能測定試験から得られた冷却曲線から逆解析手法により自動的に熱伝達率を算出する手法について検討した。

3. 5. 2 水噴射冷却について

水噴射冷却は水量密度が非常に高く、単位時間における抜熱量が多いことから、他の冷却方法に比べて冷却能が格段に高い。またノズルからの噴射水が高温個体に衝突する際の噴射衝撃によって、蒸気膜が薄くなることによる冷却界面の不安定状態から蒸気膜の崩壊が促進されることも冷却能が高い原因の一つと考えられる。図 3-33 に、スプレー冷却時の基本プロセス⁽¹¹⁾を示す。噴射衝撃により蒸気膜の厚さは薄く波打つようになり、部品表面が高温でも噴射水との断続的な部分接触が発生すると考えられる。

冷却メカニズム自体は浸漬冷却などと同じと考えられるが、高温部品の同一面上に膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰、単相強制対流熱伝達が共存する複雑な非定常冷却であり、流体力学的には自由表面乱流に分類される。

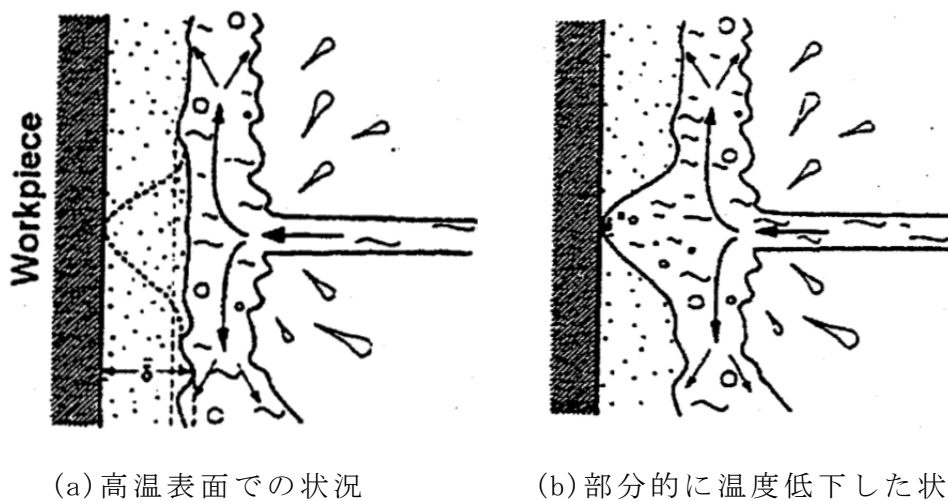


図 3-33 スプレー冷却におけるワーク表面で起こる基本プロセス

3. 5. 3 熱伝達率の同定手法の検討

銀円柱試験片(直径 $\phi 20 \times$ 長さ 60mm)による噴射冷却能試験を実施し⁽¹²⁾、試験片中央位置の冷却曲線から集中熱容量法により求めた熱伝達率を図 3-34 に示す。この結果から、浸漬冷却に比べて噴射冷却の熱伝達率は高温域から低温域まで熱伝達率が非常に高いことがわかった。

JIS 法(JIS K2242)のように、相変態や酸化スケールが生じない銀を試験片の材料に使用し、試験片中心の冷却曲線から集中熱容量法により得られる熱伝達率曲線は、焼入冷却剤の冷却能を評価する上で重要なデータと考えることができる。しかし、試験片寸法が大きい場合や鉄鋼材のように熱伝導率がそれほど高くない場合には、集中熱容量法を適用することができないので、焼入れの冷却曲線から逆解析問題により熱伝達率を求める必要がある⁽¹³⁾。

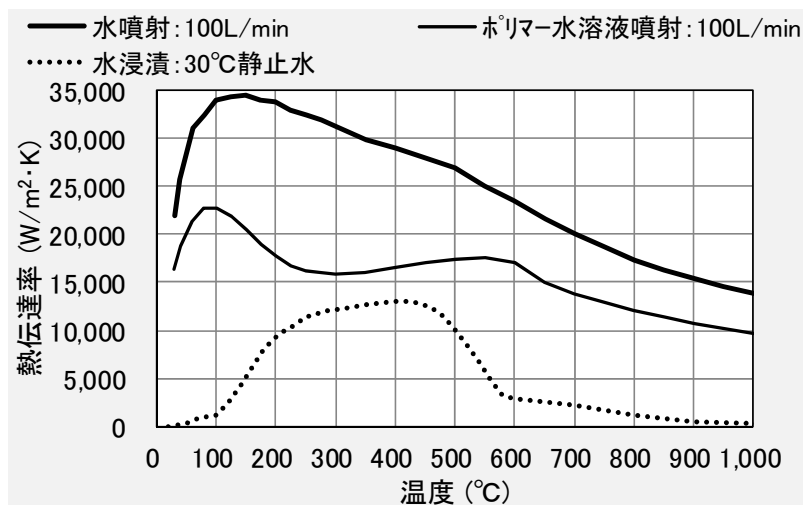


図 3-34 銀試験片を使用した噴射冷却試験で得られた熱伝達率

噴射冷却の場合、部品表面の形状や冷却液の流量、噴射角度、噴射ノズルの位置などで冷却能が大きく変化することが知られている。これらの影響を考慮した熱伝達率を求めるためには、実際の鉄鋼部品による噴射冷却試験で得られた冷却曲線から逆解析法で求める必要となる。しかし、冷却曲線から熱伝達率を逆解析で求めるには、FEM 解析から得られた冷却曲線が実測と一致するまで各温度の熱伝達率を修正する反復計算を手作業で行う必要がある。この場合、作業工数が非常に大きくなることや、作業者によって熱伝達率が変わることなどの問題が生じていた。そこで、イタリア ESTECO 製最適化支援ソフト “modeFRONTIER” を用いた自動逆解析システムを開発して、前述の問題点の解決を図った。

3. 5. 4 逆解析の手法

図 3-35 に、FEM 解析による冷却曲線の逆解析フローを示す。本手法は、冷却曲線と冷却速度曲線を一致させる作業を最適化手法を用いて自動的に処理することで、逆解析の精度を向上させている。以下に、その手順を示す。

< 解析手順 >

- ① 実部品の冷却曲線および冷却速度曲線を作成し、多項式近似曲線を算出する。この多項式近似曲線は、FEM 解析結果から得られる冷却曲線および冷却速度曲線との相関比較に用いる。
- ② 類似の冷却条件の熱伝達率曲線を最適化自動計算の初期デザインとして与える。
- ③ ②で作成した熱伝達率曲線を FEM 解析ソフトの冷却境界条件として設定し、焼入解析を実行する。
- ④ FEM 解析結果から冷却曲線および冷却速度曲線を作成し、①で作成した実測データと比較することで、以下の 3 項目を評価パラメータとして算出する。
 - a) 実測値と計算値との温度差の二乗和
 - b) 冷却曲線の相関係数
 - c) 冷却速度曲線の相関係数
- ⑤ 解析値と実測値の冷却曲線および冷却速度曲線を一致させるため、以下の最適化条件に従って、熱伝達率曲線を修正する。
 - a) 実測値と計算値との温度差の二乗和 $\Rightarrow 0$: 最小化
 - b) 冷却曲線の相関係数 $\Rightarrow 1$: 最大化
 - c) 冷却速度曲線の相関係数 $\Rightarrow 1$: 最大化
- ⑥ ③～⑤の処理を計算反復回数(初期デザイン×進化させる世代数)に従って繰り返す。
- ⑦ 最適化計算終了後、条件を最も満足するデザインを最適解とし、その結果を熱伝達率として決定する。
- ⑧ 終了。

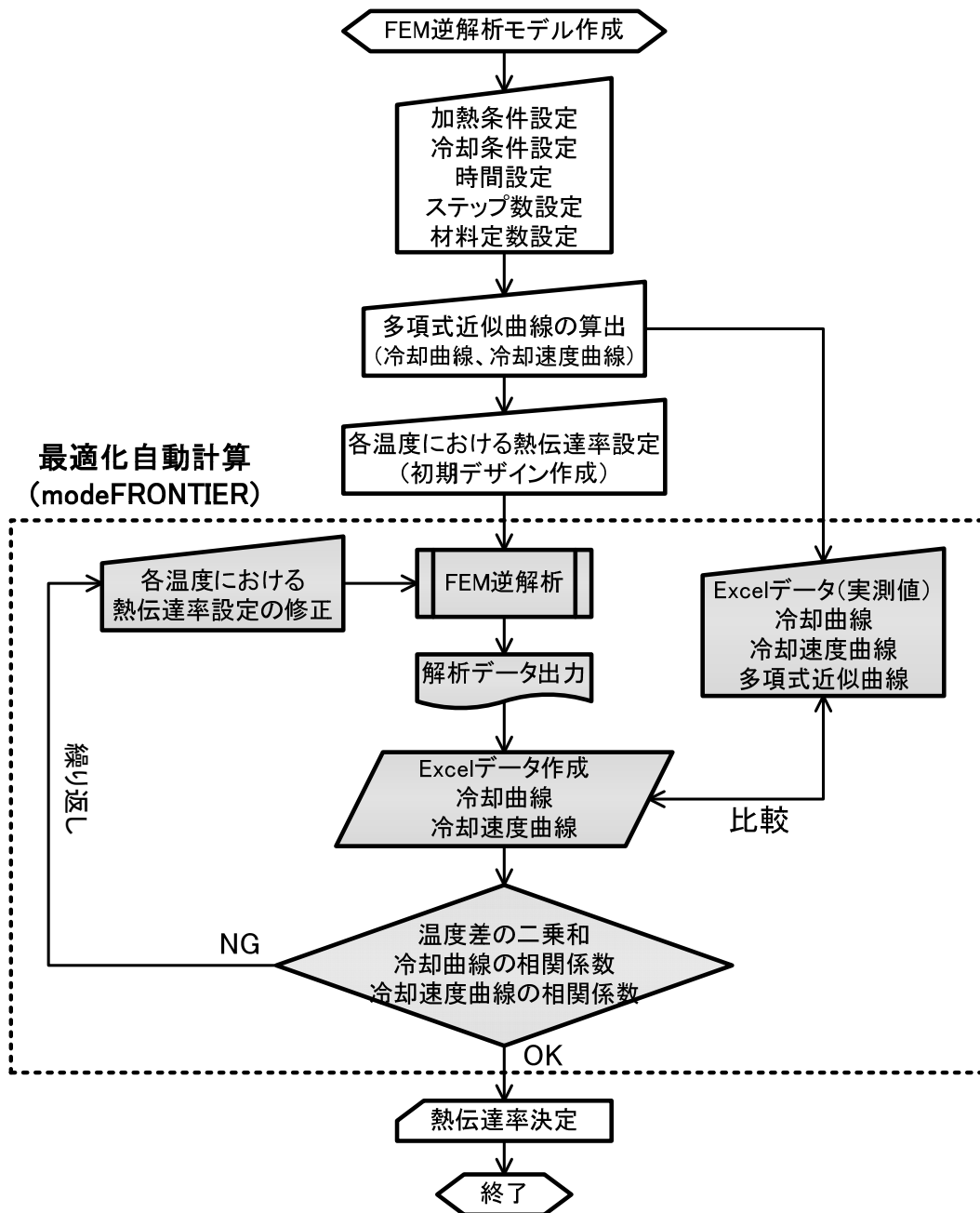
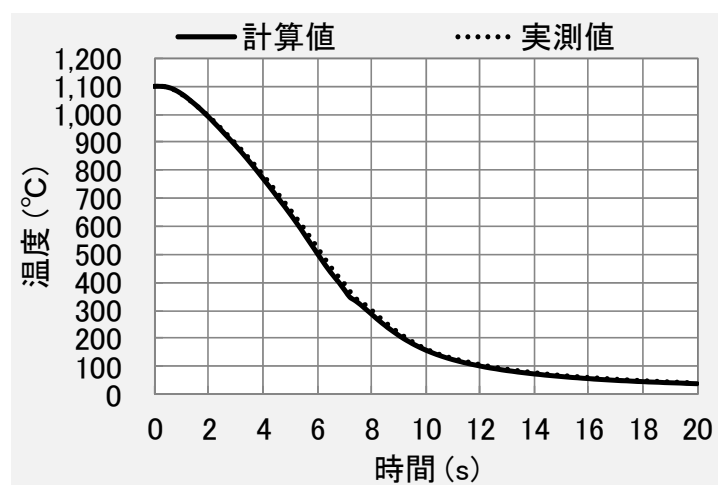


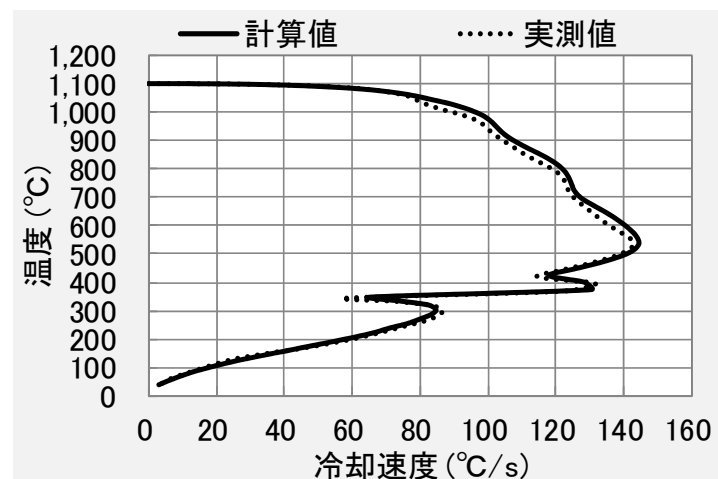
図 3-35 冷却曲線の逆解析フロー

3. 5. 5 精度検証

図 3-36 に、冷却曲線および冷却速度曲線について、実測値と前述の逆解析手法で得られた計算値を比較した事例を示す。この事例は、過去に実施された S45C 材中空試験片(外径 $\phi 70 \times$ 内径 $\phi 60 \times$ 長さ 70mm)の高周波焼入試験⁽¹⁴⁾での水噴射冷却(流量 120L/min)のデータであり、実測値と計算値に良い一致が見られた。



(a) 冷却曲線



(b) 冷却速度曲線

図 3-36 実測値と計算値の比較

図 3-37 に、熱伝達率について、逆解析手法により得られた計算値と手作業により求めた手動値を示す。計算値と手動値はほぼ一致する結果となり、本手法の計算精度を確認することができた。また、熱伝達率の算出に要する期間は、手動計算では 1 週間程度必要であったが、本手法では 2 日程度となり、短期間で熱伝達率を得ることが可能となった。

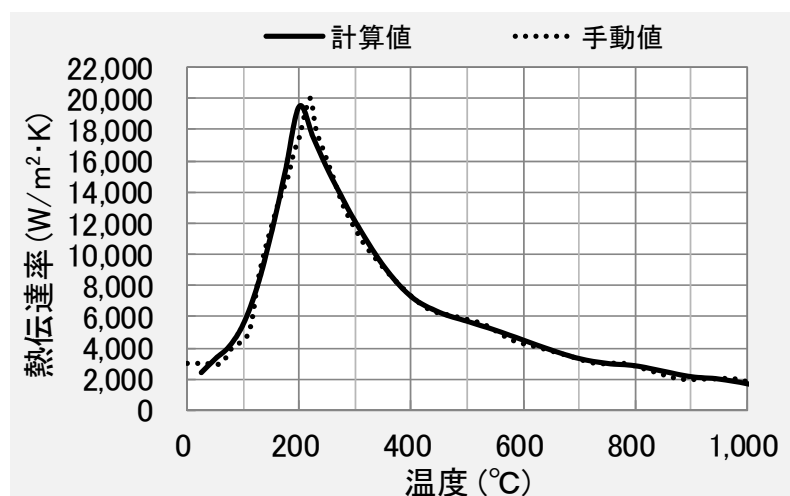


図 3-37 計算値と手動値の熱伝達率

3. 5. 6 適用事例

過去に磯村さによって実施された高周波焼入試験⁽¹⁵⁾の水噴射冷却特性を把握するために、SUS304 材の中空試験片を用いた水噴射冷却試験を実施し、逆解析手法により熱伝達率を求めた。

高周波焼入試験の焼入方式は移動と定置一発の 2 種類であり、図 3-38 に示す試験片と加熱コイルを使用した。試験片は、両方式とも直径 ϕ 18.3mm、長さ 100mm、材質 S40C の中実丸棒である。移動焼入れの加熱条件は、周波数 30kHz、移動速度 12.5mm/s、加熱温度 1,000°C、回転数 800rpm とし、加熱開始時に 0.7s の停止加熱を実施した。冷却は加熱コイルからの水噴射方式で、流量 21L/min、加熱終了後の冷却は 10s とした。一方、定置一発焼入れの

加熱条件は、周波数 30kHz、加熱時間 3.0s、加熱温度 1,000°C、回転数 800rpm で、冷却は専用ジャケットによる 3 方向からの水噴射方式を使用し、流量 93L/min、冷却時間 15s とした。

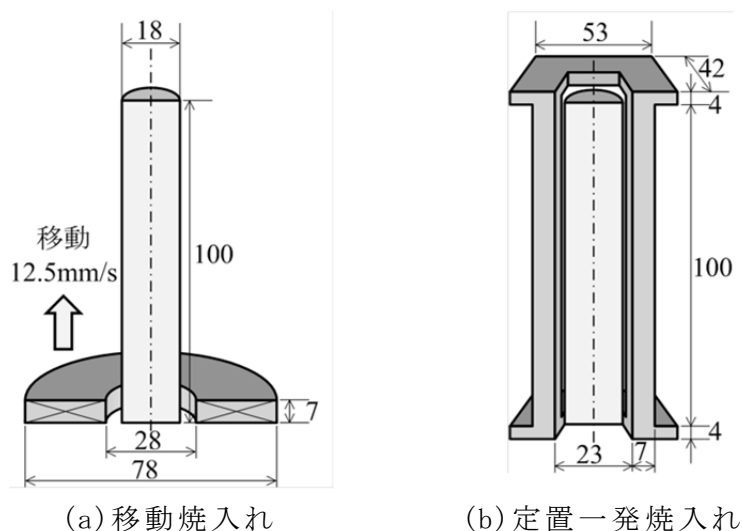


図 3-38 焼入用試験片と加熱コイル形状

焼入試験の冷却特性を正確に把握するために、焼入試験設備と中空試験片を用いた水噴射冷却試験にて冷却曲線を測定し、逆解析手法により熱伝達率を求めた。図 3-39 に冷却試験での設置状況を示す。移動焼入れでは、加熱コイル移動中の冷却曲線は測定困難なので、噴射水が直接衝突もしくは表層流になる位置に、外径 $\phi 17.3\text{mm}$ 、肉厚 3mm、長さ 15mm 材質 SUS304 (高温での表面酸化が少なく相変態がない) の中空試験片を設置した。一方、定置一発焼入れの場合は、外径 $\phi 17.3\text{mm}$ 、肉厚 3mm、長さ 100mm の中空試験片を焼入試験と同じ位置に設置した。

冷却試験では、焼入試験で使用した加熱コイルにて中空試験片を 1,000°C に均一加熱し、加熱終了後直ちに噴射冷却して、試験片内面に溶着した K 熱電対により冷却曲線を測定した。

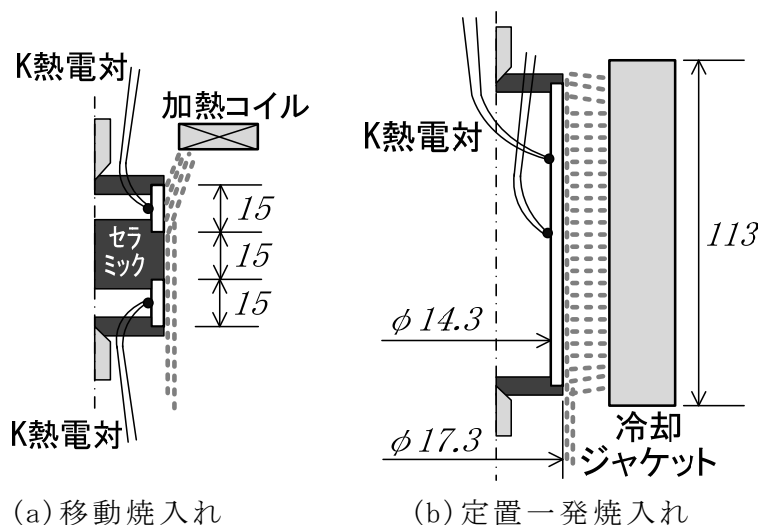


図 3-39 冷却試験状況 (冷却時)

中空試験片内面の冷却曲線から逆解析手法にて得られた熱伝達率を、図 3-40 に示す。定置一発焼入れの噴射面および移動焼入れの表層流面の熱伝達率曲線は 300℃がピークなのに対し、移動焼入れの噴射面ではピークが 550℃と高温側にシフトしていた。この原因は、加熱コイルからの噴射水が試験片外表面に斜めに衝突することで、冷却時に発生する蒸気膜の崩壊が促進されたためと推測できる。

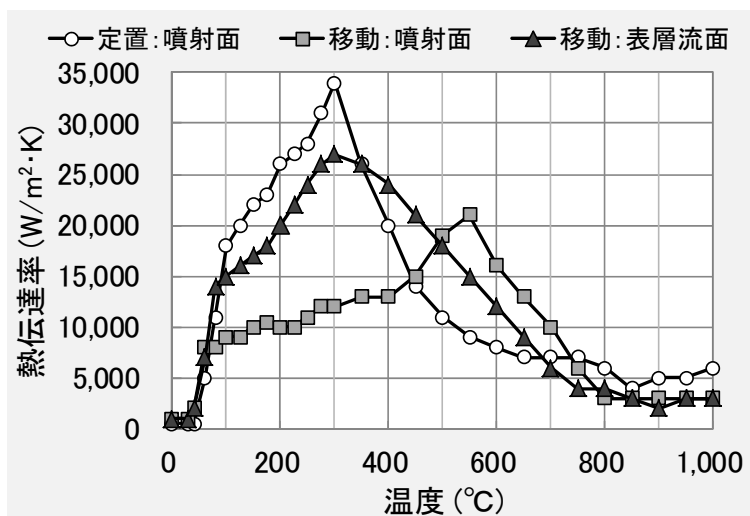


図 3-40 逆解析手法で求めた熱伝達率

3. 5. 7 小結

本研究では、鉄鋼部品の噴射冷却能試験から得られた冷却曲線より熱伝達率を算出する手法について検討した。これにより、以下の知見が得られた。

- (1) 水噴射冷却能試験から得られた冷却曲線から逆解析手法により自動的に熱伝達率を算出することができた。
- (2) 最適化支援ソフトを用いた自動逆解析システムを構築することで、短期間で精度良く熱伝達率を同定できることを確認した。
- (3) 高周波焼入れシミュレーションにおける焼入変形の更なる精度向上のためには、冷却剤や部品形状や表面状態などを考慮した熱伝達率を求める必要がある。

3. 6 結言

本章では、高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、加熱過程および冷却過程の高精度化手法を検討した。以下に、得られた知見について示す。

- (1) 温度依存性を有する B-H 曲線を使用した磁場解析により、部品表面の磁気飽和を考慮した高周波加熱シミュレーションが可能となり、昇温カーブや加熱終了時の加熱温度が試験結果に近づくことが実証できた。
- (2) 800℃まで測定可能な高温磁気特性測定手法を開発することにより、常温から 750℃までの S45C 材 B-H 曲線が明らかになった。
- (3) 外径部に V 字溝を有する大型リング部品の高周波焼入れ試験を対象に、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施した結果、試験結果と良い一致が見られた。
- (4) 最適化支援ソフトを活用した逆解析法により、冷却能測定試験にて得られる冷却曲線から自動的に熱伝達率を算出することが可能なことを示した。

以上の研究成果から、従来よりも高精度な高周波焼入れシミュレーションが可能となり、加熱コイル設計や実設備での最適な熱サイクルの設定、熱処理変形や残留応力、組織分布などの熱処理品質の予測がより高精度に可能となった。

第3章の参考文献

- (1) 高橋則雄:三次元有限要素法 磁場解析技術の基礎, オーム社, (2006)
- (2) 高橋則雄, 宮城大輔, 内田直喜, 川中啓二:鍛造前加熱用誘導加熱装置の電磁場・温度場連成解析, 三井造船技法, No. 196, p. 31-37, 2009
- (3) <http://www.rikendenshi.co.jp/>:理研電子(株)Web ページより
- (4) 竹内裕久, 与語康宏, 服部毅, 中西広吉:高温磁化特性計測技術の開発, 日本鉄鋼協会, CAMP-ISIJ 学術講演会講演論文集, Vol. 22, p. 1050, (2009)
- (5) 竹内裕久, 与語康宏, 服部毅, 田中浩司:磁化特性の温度依存性を考慮した高周波誘導加熱解析, 日本鉄鋼協会, CAMP-ISIJ 学術講演会講演論文集, Vol. 24, p. 397, (2011)
- (6) Inoue, T., Inoue. H., Ikuta. F. and Horino, T.: Simulation of Dual Frequency Induction Hardening Process of a Gear Wheel, 3th International Conference on Quenching and Control of Distortion, ASM Heat Treating Society, p. 243-250, (1999)
- (7) Johnson, W. A. and Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. Trans., AIME, Vol 135, p. 416-458, (1939)
- (8) Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. I, II, III. J. Chem. Phys., Vol 7, p. 1103-1112, (1939), Vol 8, p. 212-224, (1940), Vol 9, p. 177-184, (1941)
- (9) Kolmogorov, A. N.: Statistical Theory of Crystallization of Metals. Izvestia Akademii Naul SSSR, Vol 1, p. 355-359, (1937) (in Russian)
- (10) Koistinen, D. P. and Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, Acta Met., Vol 7, p. 59-60, (1959)
- (11) "Water Spray and Water Film Cooling", Hans M. Tensi and George E. Totten

- (12) 生田文昭, 堀野孝, 古賀久喜, 奈良崎道治: 噴射冷却による高周波焼入過程のシミュレーション, 日本熱処理技術協会 学術講演会講演論文集, No. 48, p. 329-330, (1999)
- (13) 奈良崎道治: 焼入冷却と焼入れシミュレーション, 不二越 NACHI TECHNICAL REPORT, Vol. 15 A1, (2008)
- (14) 堀野孝, 古賀久喜, 清澤裕, 生田文昭, 川寄一博, 山崎隆雄: 薄肉・中空部材の高周波熱処理変形, 日本熱処理技術協会 学術講演会講演論文集, No. 46, p. 5-6, (1998)
- (15) 磯村良蔵: 鋼の熱処理と残留応力, アグネ, (1966).

第 4 章

焼入変形と残留応力の予測

第 4 章 焼入変形と残留応力の予測

4. 1 緒言

高周波焼入れは単品処理のため加熱・冷却の制御が容易で均一性に優れ、さらに短時間加熱と急速冷却にて部品表層を硬化することから、浸炭焼入れなどの表面熱処理法比べて、熱処理変形の低減や高い圧縮残留応力の付与が可能である。焼入変形は、製品の最終品質や性能、後工程の製造コストに大きな影響を与えるため、ひずみ量を最小限にとどめる低変形焼入れが求められている。そのためには、熱処理変形の予測と熱処理条件の最適化による変形量の低減が必要だが、熱処理変形に影響をおよぼす要素は多く存在するため、熱処理変形の予測は非常に難題である。しかし、近年の熱処理シミュレーションの出現とその進歩発展により、従来の手法では困難であった複雑な部品形状における焼入変形と残留応力の予測が行えるようになった。焼入中に発生する応力やひずみ量を精度良く予測して、熱処理条件の最適化や部品形状の変更により、焼入変形をさらに低減させるためには、焼入変形および残留応力の発生メカニズムの解明が必要である。

本章では、まずリング形状部品の高周波焼入試験を対象としたシミュレーションを実施し、シミュレーション結果から得られた応力や各種ひずみ量を時系列で分析することで、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムが検討可能であることを説明する。次に、丸棒の高周波移動焼入試験とそのシミュレーションを実施し、リング形状部品と同様の手法を用いることで、高周波移動焼入れにおける熱処理変形および残留応力の発生メカニズムについて検討可能であることを説明する。最後に、丸棒の高周波移動焼入れシミュレーションでは、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却境界条件の使用が必要であることを説明する。

4.2 リング形状部品の高周波焼入れシミュレーション

4.2.1 背景と目的

高周波焼入れは、クリーンで短時間加熱やインライン処理が可能であるなどの優れた特徴を持っている。また、単品処理ということで加熱・冷却の制御が容易であり、熱処理後の低変形および定変形の実現には適した手法であると考えられる。熱処理変形は、加熱・冷却中の温度変化および相変態、さらにそれらによる各種ひずみや応力の発生などが関連する複雑な現象であり、これを高精度で制御するためには、その発生メカニズムを十分に理解しておくことが不可欠となる。

本研究では、焼入変形の発生メカニズムの解明を目的として、過去に井上らが実施したリング試験片の高周波焼入試験⁽¹⁾を対象に高周波焼入れシミュレーションを実施した。リング試験片の高周波焼入試験は、複数の鋼種で内径の異なるリング試験片を用いて実施されたが、ここでは1種類の組合せのみをシミュレーションの対象とした。そして、シミュレーション結果から得られた応力や各種ひずみ量を時系列で分析することで、焼入変形および残留応力の発生メカニズムが検討可能であることを明らかにした。

4.2.2 熱処理シミュレーション手法

本研究で用いた熱処理シミュレーションの手法は、熱伝導および弾塑性問題の有限要素法に相変態モデルを組み込んで連成解析を行なうもので、Denisら⁽²⁾やMelander⁽³⁾などによって、すでに実績のあるものを使用した。

冷却過程の相変態のモデル化のために、フェライトやパーライトなどの拡散型変態についてはTTT線図に基づくJMAK(Jonson & Mehl⁽⁴⁾ - Avrami⁽⁵⁾ - Kolmogorov⁽⁶⁾)式、マルテンサイト変態についてはKoistinen - Marburger⁽⁷⁾の式を使用した。オーステナイト変態では、フェライトとセメンタイトの

混合組織からのセメンタイトの溶解や、その後の炭素原子の拡散や固溶が伴うことから、加熱速度によってオーステナイト変態の開始温度および終了温度が変化するので、Melander⁽³⁾と同様な TTA 線図に基づく JMAK 式を使用した。また、変態塑性現象に関しては、Denis ら⁽²⁾によって示されたモデルを用いた。熱物性値や密度については、BISRA⁽⁸⁾のデータブックや Jablonka ら⁽⁹⁾あるいは Miettinen⁽¹⁰⁾の経験式を用いている。また、応力・ひずみ特性については過去の同種の鋼に関する実験データを参考にして決定した。

4. 2. 3 試験方法とシミュレーション条件

図 4-1 には、高周波焼入試験におけるリング試験片と加熱コイルの形状と寸法、およびそれらの設置状況を示す。試験片は、外径 $\phi 100\text{mm}$ 、内径 $\phi 25\text{mm}$ 、高さ 24mm で、材質は S45C 材である。表 4-1 にその化学組成を示す。加熱コイルは断面 $20\text{mm} \times 14\text{mm}$ の 1 ターンで、図 4-1 に示すようにリング試験片の外側に傾斜をつけて配置した。

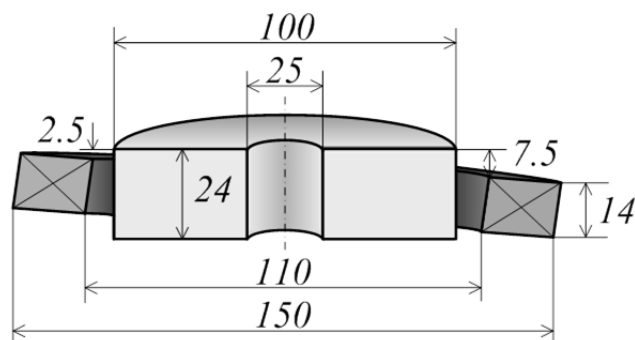


図 4-1 試験片と加熱コイルの形状および寸法

表 4-1 試験片の化学組成 (mass %)

鋼種	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr
S45C	0.47	-	0.69	0.07	0.23	0.14

焼入条件は、リング試験片の外径面からの硬化層深さが2mmとなるように設定した。図4-2に熱サイクルを示す。具体的には、周波数30kHz、最大出力150kW、加熱時間4.0s、冷却遅れ時間0.6s、冷却時間15.0s、回転数663rpmであり、外径面の最高温度は980℃であった。冷却方法は噴射冷却で、冷却剤には水を使用した。図4-3(a)に加熱状況を、図4-3(b)に冷却状況を示す。

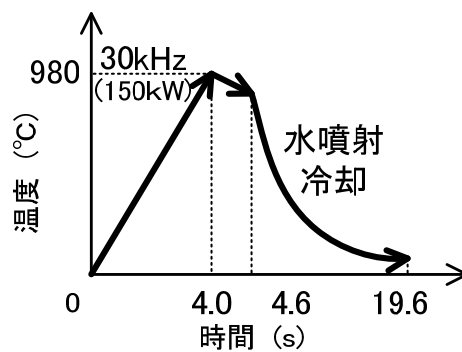
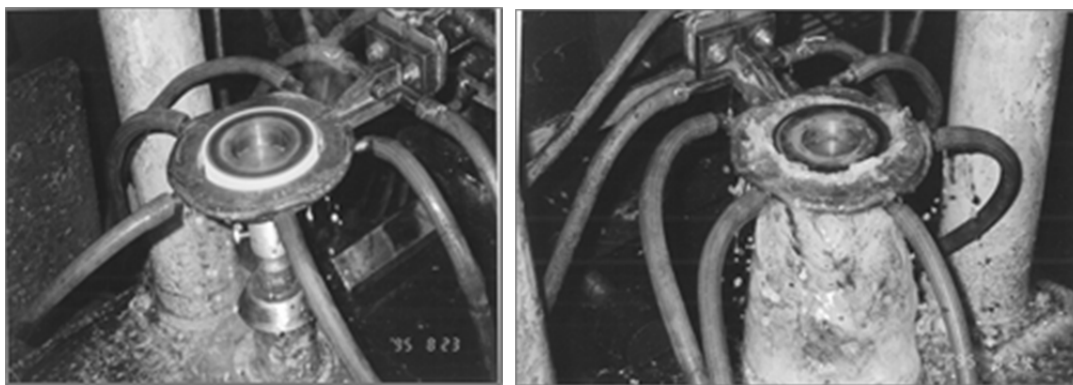


図4-2 熱サイクル



(a)加熱終了時

(b)冷却中

図4-3 試験状況

シミュレーションは、試験片形状の対称性から 2 次元軸対称問題とした。図 4-4 に示す縦断面の網掛け領域に対してメッシュ分割を行った。要素数は 2,040 で節点数は 2,150 であった。

この解析では、試験片がリング状の単純形状であり、電源周波数からうず電流発生領域および発熱領域が分かるので、FEM モデルに発熱を直接指定する簡易法を使用した。具体的には、高温でのうず電流発生が予想される外径面から深さ 2mm 領域に対し、4.0s で最高温度が 980℃に達する内部発熱量 $3.23 \times 10^9 \text{W/m}^2$ を一様に指定した。その他の解析条件としては、加熱時間 4.0s、冷却遅れ時間 0.6s、冷却時間 250s で、外径面に境界条件を指定し熱伝達率 $20,000 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 一定値を与えることで、冷却過程を解析した。なお、シミュレーションは、伊藤忠テクノソリューションズ(株)熱プロセスシミュレータ“FINAS/TPS”を使用した。

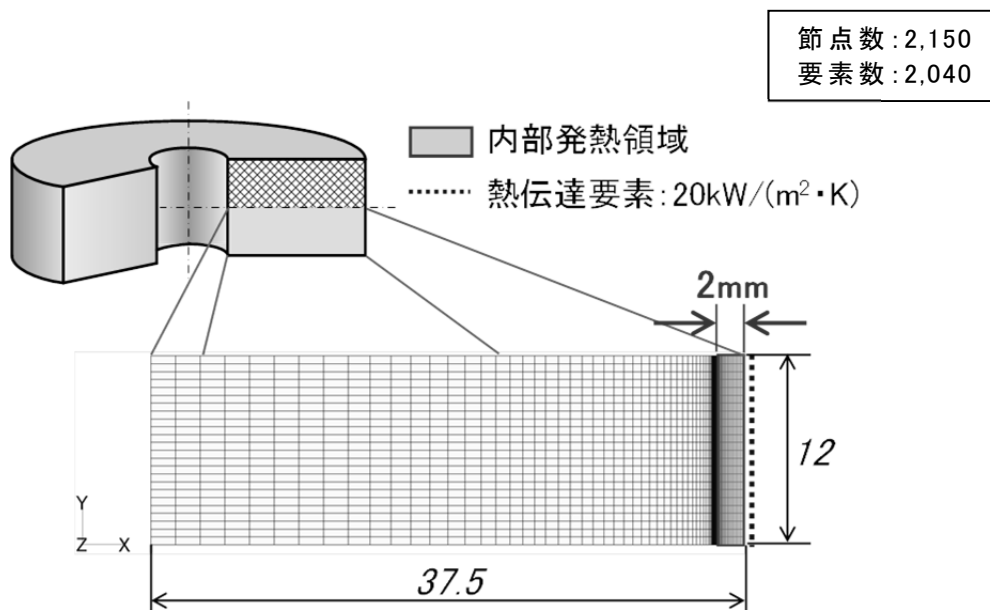


図 4-4 FEM モデル

4. 2. 4 試験結果とシミュレーション結果の比較

図 4-5 には、シミュレーションから得られた焼入後の変形図を示す。三角マーカの頂点は内外径部と高さの変化の実測値を示しており、[]と()内の数値(単位は μm)はそれぞれ実測値とシミュレーション結果による変位である。焼入後の試験結果とシミュレーション結果には良い一致が見られるが、シミュレーション結果の方が外径部上面の隆起が大きく、内径の収縮量が少ない結果となった。全体的な変形傾向としては、外径面中央では半径方向の変化が少ないが、外径部上面ではかなりの隆起が見られた。一方、内径面は全体的に収縮しているが、内径部上面にはほとんど変化が生じなかった。

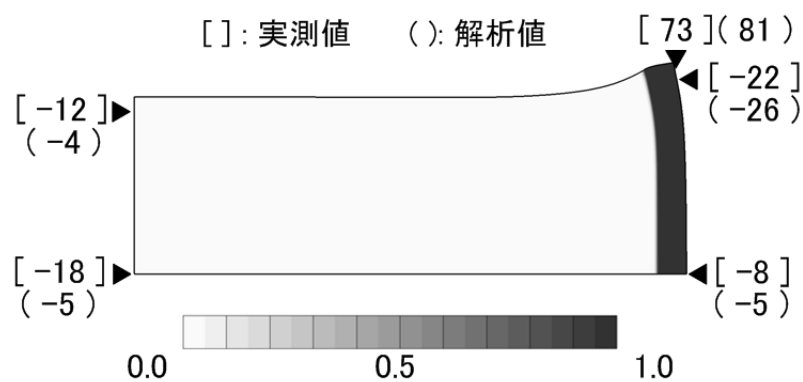


図 4-5 焼入後の変形量

図 4-6 には、シミュレーションから得られた冷却終了時のマルテンサイト体積分率と硬さ分布測定結果を示す。実線はシミュレーション結果、マーカと破線は測定結果で、リング試験片の上下対称面上での値である。シミュレーションは、外径面から深さ約 2mm の領域がマルテンサイト組織に変態したのに対し、試験片の硬さは若干広い領域で上昇していた。

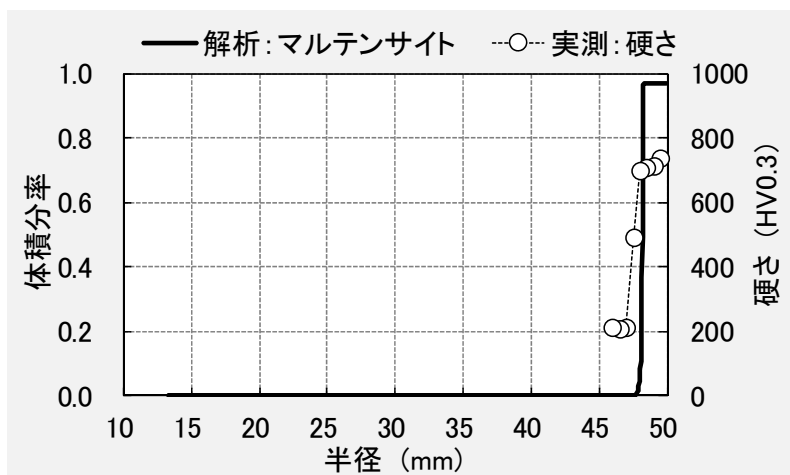


図 4-6 焼入後の硬さとマルテンサイト体積分率

図 4-7 には、上下対称面上での残留応力分布を示す。実線、破線および太線はシミュレーション結果、マーカは測定結果(X 線回折法)を示す。実測結果とシミュレーション結果を比較すると、両者とも外径面は高い圧縮応力を示しているが、シミュレーション結果の方が絶対値が大きく、円周方向と軸方向成分の大小が逆転しているなど若干の相違が見られた。

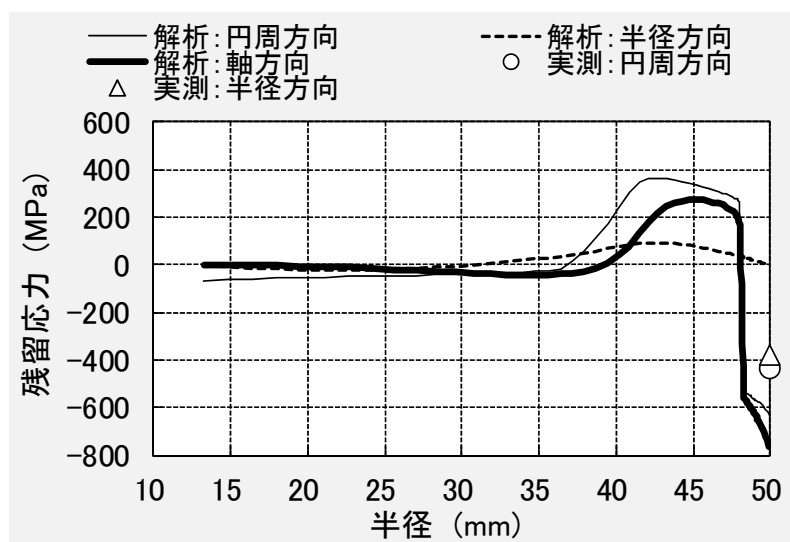
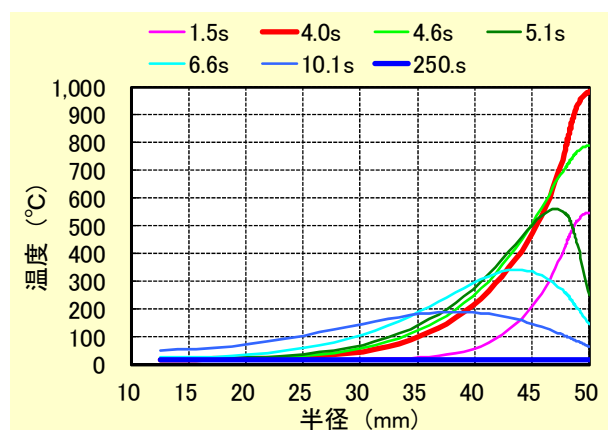
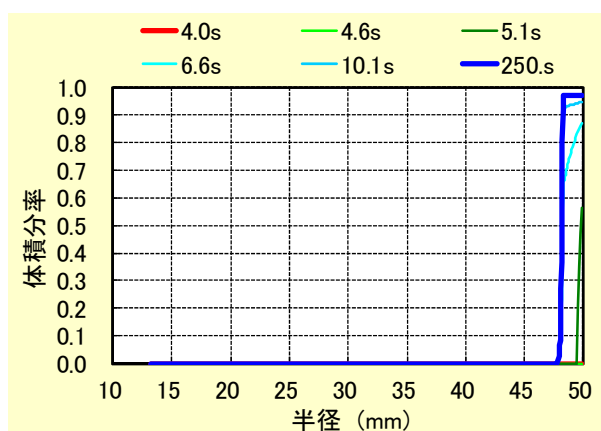


図 4-7 残留応力

図4-8(a)には、上下対称面での加熱冷却中における温度変化のシミュレーション結果を示す。4.0sの加熱終了時に外径面は980℃となり、その後は冷却により急激に温度は低下した。また、内径面から半径45mmまでの領域は、冷却中にその位置での最高温度に達していた。図4-8(b)には、上下対称面でのマルテンサイト体積分率変化のシミュレーション結果を示す。5.1sから外径面にマルテンサイト変態が生じ始め、時間経過とともに外径から内部に向かってマルテンサイト変態が進行し、最終的には外径面から深さ2mm範囲にマルテンサイト組織が生成した。冷却後の外径面の上下対称面位置では、マルテンサイトと残留オーステナイトの体積分率が97%および3%であった。



(a) 温度変化



(b) マルテンサイト体積分率の変化

図4-8 温度および金属組織の変化

図4-9には、シミュレーション結果における外径面中央と内径面中央(上下対称面位置)、外径面の上面高さ、内径面の上面高さにおける変位の時間変化を示す。図4-9より、4.0sの加熱終了時に膨張量が最大になり、冷却開始(4.6s)から加熱前の形状に戻ろうと収縮し始めるが、外径面の上面高さは5.1sから多少変動するものの大きな変化が見られなかった。また、内径面の上面高さは焼入中でも若干の収縮を示していた。全体的な傾向としては、外径部の変化量に比べ内径部の変化量が非常に小さいことが明らかになった。

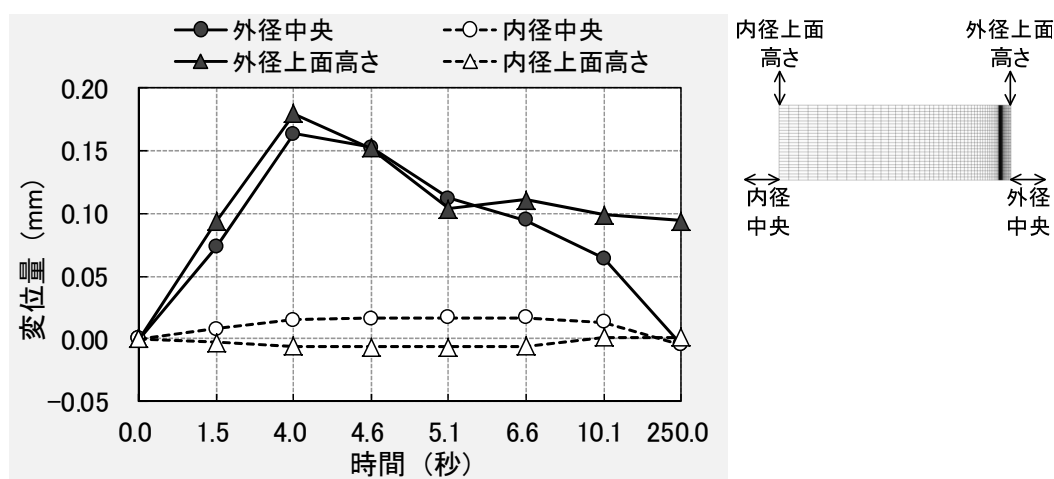


図4-9 変形量の時間変化

4.2.5 変形メカニズムに関する考察

熱処理中の個体内部の微小領域においては、時刻 t において、以下の式 4.1 に示すひずみの釣り合い式が成立する。

$${}^t\varepsilon_{ij} = {}^t\varepsilon_{ij}^E + {}^t\varepsilon_{ij}^{TH} + {}^t\varepsilon_{ij}^{TR} + {}^t\varepsilon_{ij}^P + {}^t\varepsilon_{ij}^{TP} \quad (4.1)$$

ここで、 ${}^t\varepsilon_{ij}$ は全ひずみで実際の固体の変形に直接寄与するものであり、右辺の ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^P$ および ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$ は、それぞれ弾性ひずみ、熱ひずみ、変態ひずみ、塑性ひずみおよび変態塑性ひずみを表す。

本研究では、ミュレーション結果から得られた熱ひずみと変態ひずみの加算量、弾性ひずみ、塑性ひずみ、変態塑性ひずみおよび全ひずみの時間変化を分析することによって、リング試験片の熱処理変形発生メカニズムを検討する。

(1) 円周方向の各種ひずみの時間変化

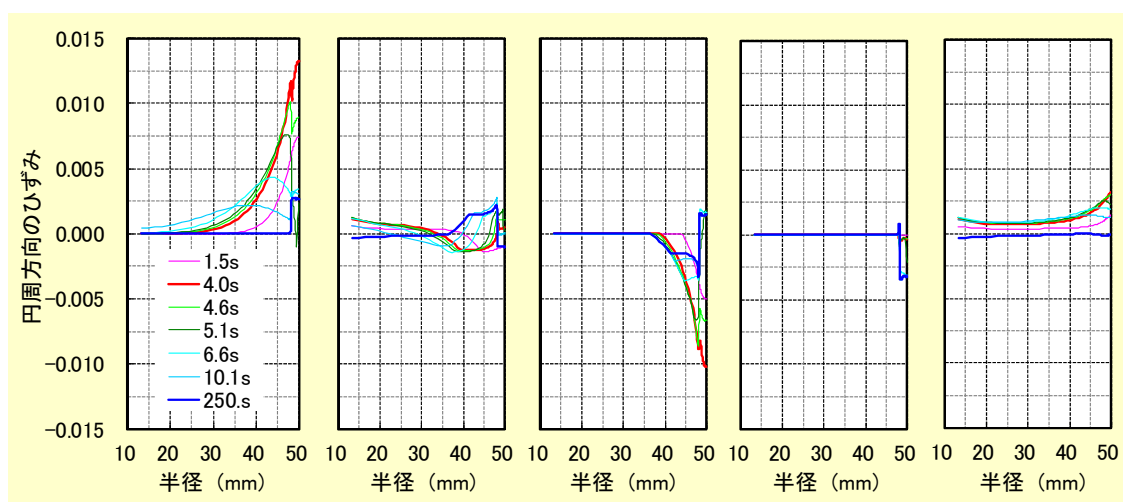
図 4-10 には、上下対称面での加熱冷却中の円周方向ひずみ分布の時間変化を示す。図 4-10(a) は熱ひずみと変態ひずみの加算量(以下“熱+変態”ひずみ)であり、加熱中には外径側で大きな正の値となる。このひずみは冷却により低下するが、最終的にはマルテンサイトの変態による膨張によって、外径面から深さ 2mm 領域では正の値となる。リング形状における円周方向の膨張・収縮は、その形状から形状保持の拘束を受ける。これによって、図 4-10(e)の全ひずみ分布は、いずれの時刻においても水平に近い分布を保とうとする。式 4.1 のひずみの平衡条件にて明らかのように、“熱+変態”ひずみの局所的な変化は、塑性ひずみと弾性ひずみ、変態塑性ひずみにより補完されることになる。

加熱が開始されると外径面近傍の急激な温度上昇により、“熱+変態”ひずみは外径側で大きな正の値となるが、図 4-10(e)に示す全ひずみは形状保持の拘束から水平に近い分布を保とうとする。その結果、図 4-10(b)と図 4-10(c)に示すように、外径側にて負の弾性および塑性のひずみにより補完される。加熱終了時において、外径面での“熱+変態”ひずみおよび塑性ひずみの絶対値は最大となる。

冷却が開始されると外径面近傍の温度は急激に低下する。これにより、外径面近傍の正の“熱+変態”ひずみは、図 4-10(a)のように外径側から値が減少するが、全ひずみには大きな変化は見られない。また、冷却開始時の

外径面での急激な収縮の影響から、外径面近傍では負の塑性ひずみが大きく減少し、外径面から深さ 2mm 領域では正、半径 35mm から 47.5mm では負の状態となる。一方、外径面からマルテンサイト変態が生じることにより、図 4-10(d)に示すように外径面から深さ 2mm 領域では負の変態塑性ひずみが発生する。さらに冷却が進むと、部品内部の温度低下により正の“熱-変態”ひずみはさらに減少するが、マルテンサイト変態が外径表面から 2mm の領域で生じることで、この領域の“熱-変態”ひずみは正の値となる。全ひずみは外径面近傍の正の値が減少し、水平に近い分布に近づく。この結果、弾性ひずみの分布は、図 4-10(b)に示すように、外径面から深さ 2mm の範囲で負の値、半径 35mm から 47.5mm は正の値となる。

冷却終了時(250s)の全ひずみ分布は、外径側はほとんど 0、内径側は若干の負の値を示しており、これは図 4-5 に示すリングの内外径の寸法変化の傾向と一致している。以上のように、円周方向の各種ひずみ分布の時間変化を分析することで、リング径の変形メカニズムが明らかとなった。



(a)熱 + 変態ひずみ (b)弾性ひずみ (c)塑性ひずみ (d)変態塑性ひずみ (e)全ひずみ

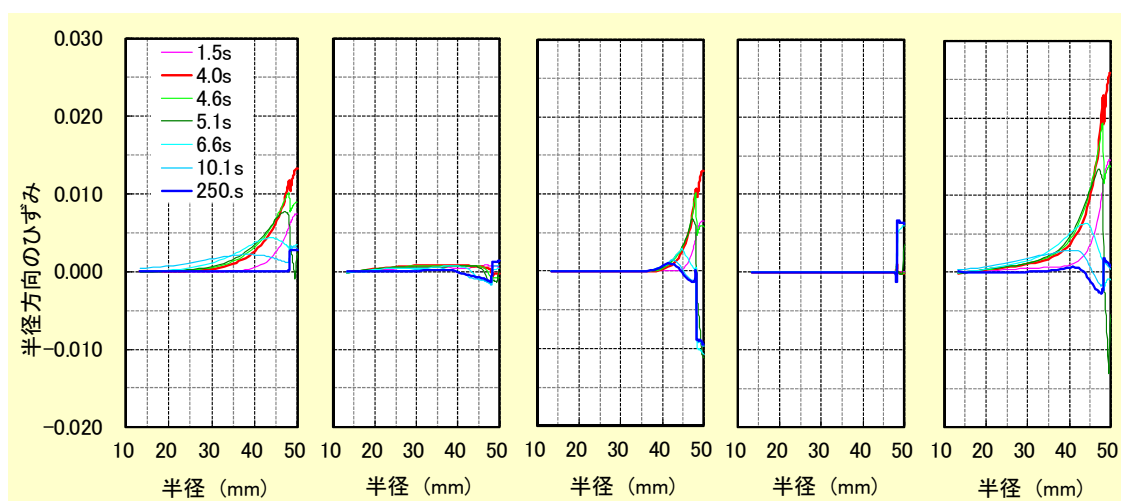
図 4-10 円周方向の各種ひずみ分布の時間変化

(2) 半径方向の各種ひずみの時間変化

図 4-11 には、上下対称面での加熱冷却中の半径方向ひずみの時間変化を示す。“熱-変態”ひずみ分布は、体積変化から派生する量で等方性があるので、図 4-11(a)は円周方向成分の図 4-10(a)と同じ値である。

図 4-11(c)より、加熱終了時には外径面近傍に“熱+変態”ひずみとほぼ同程度の正の塑性ひずみが生じている。冷却が開始されると、外径表面近傍の温度が急激に低下することで、外径面近傍に負の塑性ひずみが発生するとともに、外径面からのマルテンサイト変態によって外径面から深さ 2mm 領域に正の変態塑性ひずみが生じている。図 4-11 (e)の全ひずみ分布より、半径方向への膨張・収縮に関しては、リング形状からの拘束は少ないことを示している。

冷却終了時の全ひずみは、外径面から半径 35mm 付近において分布の平均値はほぼ 0 であるので、半径方向ひずみの変形への寄与は非常に小さいことが明らかになった。



(a)熱+変態ひずみ (b)弾性ひずみ (c)塑性ひずみ (d)変態塑性ひずみ (e)全ひずみ

図 4-11 半径方向の各種ひずみ分布の時間変化

(3) 軸方向の各種ひずみの時間変化

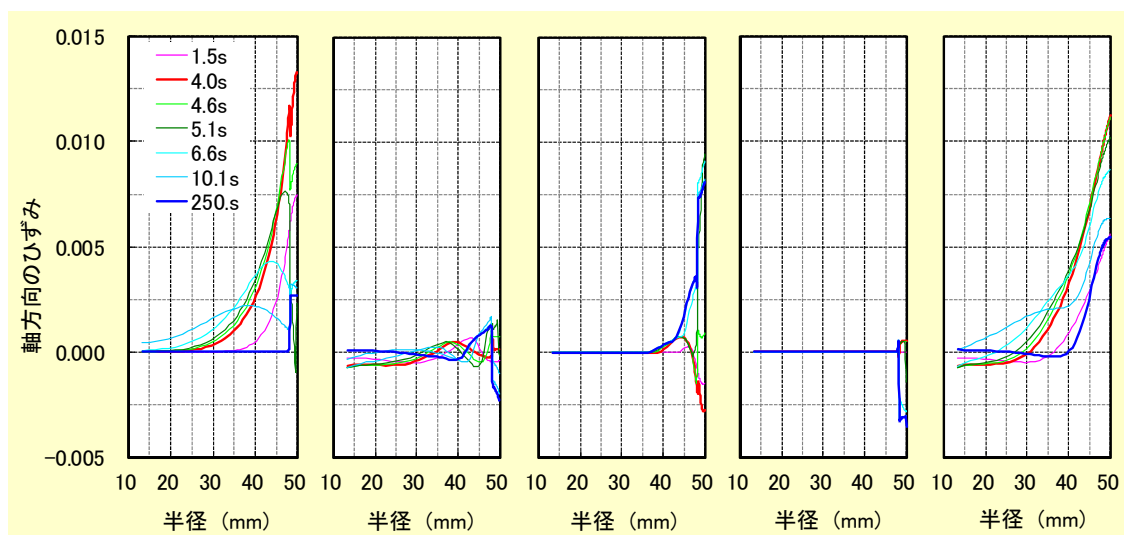
図 4-12 には、上下対称面での加熱冷却中の軸方向ひずみの時間変化を示す。“熱-変態”ひずみ分布は、体積変化から派生する量で等方性があるので、図 4-12(a)は円周方向成分の図 4-10(a)と同じ値である。

リング形状では、上下対称条件による拘束はあるものの上下端面は無拘束であり、軸方向の膨張・収縮はかなり自由に行うことが出来る。このことは、加熱中における外径面近傍での“熱+変態”ひずみの増加により、図 4-12(e)の全ひずみが追従して増加していることから明らかである。しかし、軸方向は完全な無拘束ではなく、リング内部により膨張が制限されるので、図 4-12(c)に示すように外径面近傍には負の塑性ひずみが発生する。加熱終了時において、外径面での“熱+変態”ひずみ、塑性ひずみおよび全ひずみの絶対値は最大となる。

冷却が開始されると外径表面近傍の温度は急激に低下するが、図 4-12(e)の全ひずみはほとんど追従していない。この結果として、外径面近傍の塑性ひずみの値は負から正へと変化する。冷却がさらに進むと、外径面からマルテンサイト変態が進行し、外径面から深さ 2mm の領域での正の“熱+変態”ひずみが増加するが、図 4-12(d)に示すように変態塑性ひずみはその分変化して、外径面から深さ 2mm の領域で負の分布となる。弾性ひずみの分布は、図 4-12(b)に示すように外径面から深さ 2mm の範囲で負の値、半径 42mm から 47.5mm は正の値となる。

焼入終了時の全ひずみは、外径面近傍において大きな正の値を示す。この上昇には、冷却開始直後に外径面で生じた塑性ひずみの寄与が非常に大きいことがわかる。一方、内径側ではほとんど全ひずみは発生していない。この変化は、図 4-5 に示すリング上面における高さの寸法変化の傾向と一致する。

以上のように、軸方向の各種ひずみ分布の時間変化を分析することで、リング高さの変形メカニズムが明らかとなった。



(a)熱＋変態ひずみ (b)弾性ひずみ (c)塑性ひずみ (d)変態塑性ひずみ (e)全ひずみ

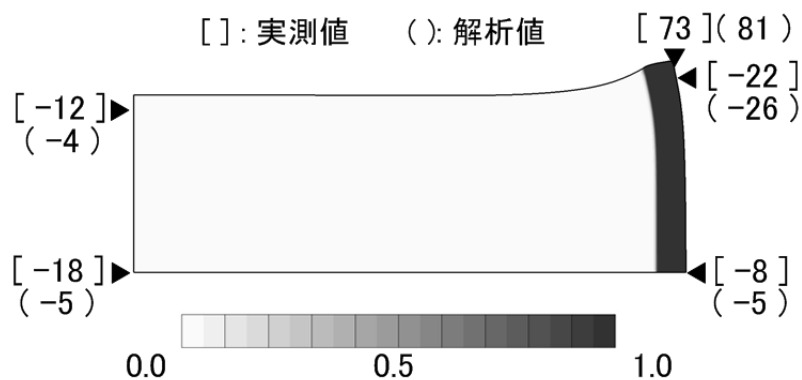
図 4-12 軸方向の各種ひずみ分布の時間変化

4. 2. 6 焼入変形量の低減方法の検討

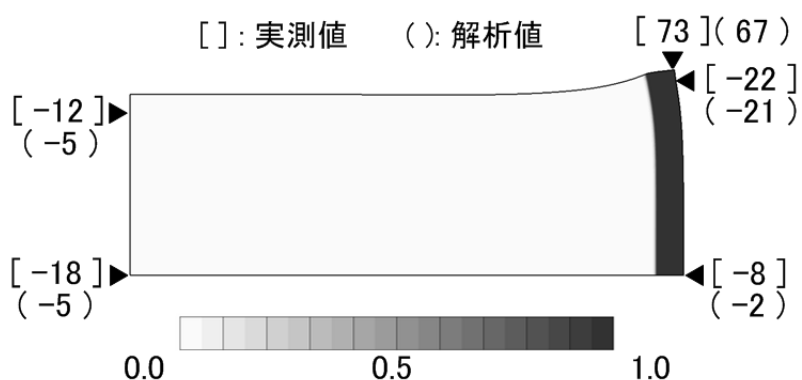
図 4-10 から図 4-12 の各ひずみ量の時間変化を分析することで得られたリング形状部品の変形発生メカニズムから、焼入変形の主な原因は冷却中に生じたマルテンサイト変態による体積膨張と加熱冷却中に生じた塑性ひずみによるものと考えられる。特に、外径部上端面の大きな隆起は、冷却開始直後に外径面で生じた大きな負の塑性ひずみの影響が非常に大きいことから、リング高さ方向の変形量を低減するには、冷却開始直後の冷却能を低減すれば良いと考えられる。そこで、熱処理シミュレーションにて、冷却時の外径面に境界条件として設定する熱伝達率を下げることで、焼入れパターンの変化無しに変形量の低減が可能かどうかを検討した。

図 4-13(a)には、熱伝達率 $20,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ のシミュレーション結果から得られた焼入変形量およびマルテンサイト体積分率分布を、図 4-13(b)には

熱伝達率 $10,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ のシミュレーション結果を示す。なお、図 4-13(a) は、図 4-5 と同じものである。



(a) 熱伝達率 $20,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$



(b) 熱伝達率 $10,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

図 4-13 焼入後の変形量およびマルテンサイト体積分率分布

外径面の熱伝達率を $20,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ から $10,000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ へと 50%減少させると、マルテンサイト体積分率分布の変化なしに、外径面上部の高さ方向の膨張量を $81\mu\text{m}$ から $67\mu\text{m}$ へと 17%低減することが出来た。

以上の結果から、冷却能の低減により冷却開始直後の冷却面に生じる負の塑性ひずみ量を低減させることで、焼入変形量の低減が可能になることが明らかになった。

4. 2. 7 小結

リング試験片の高周波焼入れを対象に熱処理シミュレーションを行ない、その結果に基づいて変形発生メカニズムの解明および焼入変形量の低減手法の検討を行った。これにより、以下の知見が得られた。

- (1) 熱処理変形に直接寄与する全ひずみ分布の発生メカニズムは、“熱+変態”ひずみ、弾性ひずみ、塑性ひずみおよび変態塑性ひずみの時間変化から説明できることが明らかとなった。
- (2) シミュレーション結果より、塑性ひずみや変態塑性ひずみが加熱部近傍のみに発生する高周波焼入れは、低変形および定変形の制御には適した熱処理手法であると考えられる。
- (3) 本研究で示された変形発生メカニズムの分析手法は、変形への各種ひずみの寄与の程度を明確にできるため、熱処理変形の低減策検討に活用できる。
- (4) 焼入変形シミュレーションのさらなる精度向上のためには、精密な各種材料データの収集、モデルの改善、実験との比較検証の継続などが必要である。

4. 3 丸棒の高周波移動焼入れシミュレーション

4. 3. 1 研究の背景

過去に磯村らによって実施された高周波焼入れ試験(以下、磯村試験)⁽¹¹⁾では、材質および形状が同一の試験片を使用しても、移動焼入れと定置一発焼入れでは深さ方向の残留応力分布が異なることを指摘している。特に移動焼入れでは、局所的な加熱および冷却領域が焼入面に同時に存在することで、焼入変形および残留応力の発生メカニズムは定置一発焼入れよりも複雑だと考えられる⁽¹²⁾。そこで本研究では、磯村試験の条件に基づき S40C 鋼円柱による移動焼入れと定置一発焼入れの高周波焼入れ試験およびシミュレーションを実施⁽¹³⁾し、シミュレーション結果から得られた各ひずみ量の時間変化を詳細に分析することで、高周波移動焼入れの残留応力発生メカニズムを検討した。

4. 3. 2 高周波焼入れ試験方法

焼入方式は移動焼入れと定置一発焼入れの 2 種類とし、図 4-14 に示す試験片と加熱コイルを使用した。試験片は、両焼入方式とも同一で、直径 $\phi 18.3\text{mm}$ 、長さ 100mm 、材質 S40C の中実丸棒である。表 4-2 に試験片の化学組成を示す。

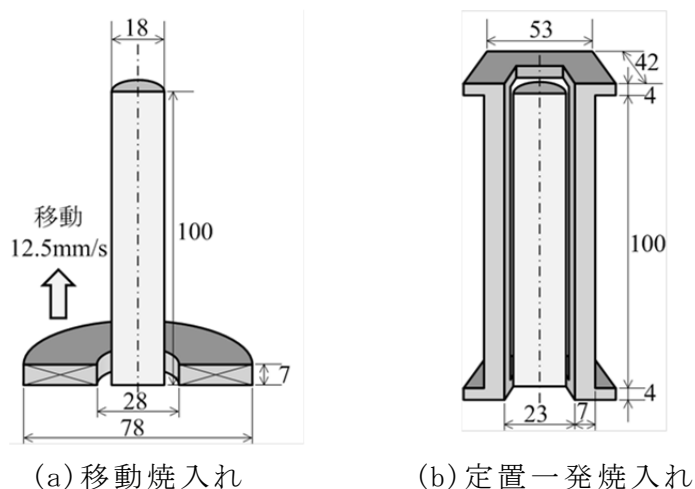


図 4-14 試験片と加熱コイル形状

表 4-2 試験片の化学組成 (mass %)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
S40C	0.39	0.21	0.73	0.014	0.010	0.13	0.17

移動焼入れの加熱条件は、周波数 30kHz、移動速度 12.5mm/s、加熱温度 1,000℃、回転数 800rpm とし、加熱開始時に 0.7s の停止加熱を実施した。冷却は加熱コイルからの水噴射方式で、流量 21L/min、加熱終了後の冷却は 10s とした。一方、定置一発焼入れの加熱条件は、周波数 30kHz、加熱時間 3.0s、加熱温度 1,000℃、回転数 800rpm で、冷却は専用ジャケットによる 3 方向からの水噴射方式を使用し、流量 93L/min、冷却時間 15s とした。

4. 3. 3 シミュレーションの条件および結果

試験片形状の対称性から 2 次元軸対称問題とした。図 4-15 に空間部分を除いた FEM モデルを示す。

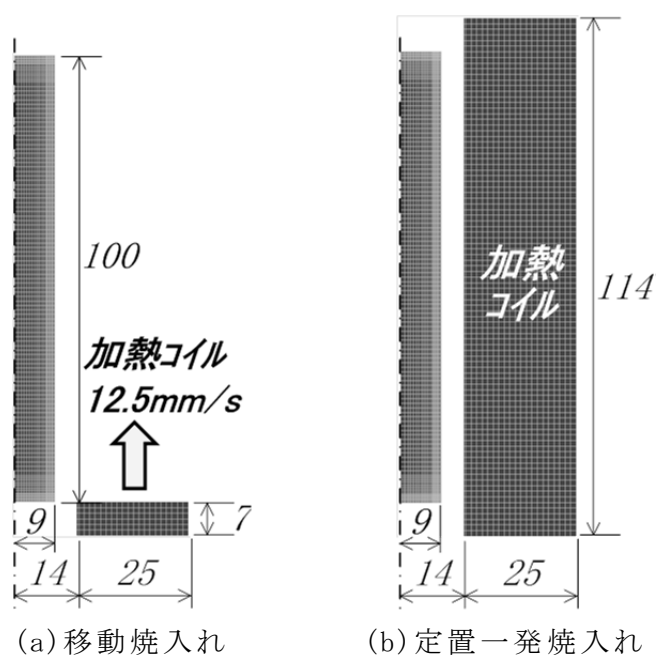


図 4-15 FEM モデル

加熱条件は、両焼入方式とも周波数 30kHz にて試験片中央の表面温度が 1,000℃に達する加熱コイル電流を設定した。移動焼入れでは、加熱コイル移動速度 12.5mm/s、定置一発焼入れでは加熱時間 3.0s と設定した。一方、冷却条件は、水による噴射冷却とし、第3章(3.5.6)の水噴射冷却試験で求めた熱伝達率(図 3-39)を基本に、測温結果に一致するように係数を乗じて補正したデータを使用した。図 4-16 には補正した熱伝達率を示す。定置一発焼入れでは、試験片の上下端面にも外表面の熱伝達率の 50%値を与えた。一方、移動焼入れでは、噴射面の熱伝達領域を加熱コイル位置と同期しながら移動させ、これ以外の冷却領域には表層流面の熱伝達率を与えた。また、両条件ともワークピースが常温になるまで冷却を継続させた。

計算は、CRC 総合研究所(現、伊藤忠テクノソリューションズ)製の磁場解析ソフト”MAGNA/FIM”と熱処理シミュレーションソフト”HEARTS”の連成解析を使用した。

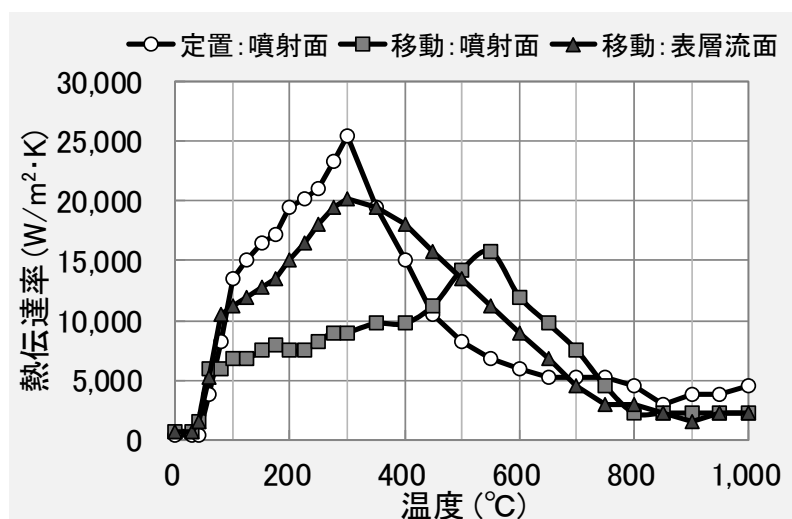


図 4-16 熱伝達率

図 4-17 に、試験結果とシミュレーション結果の試験片内部における温度曲線を示す。両者には非常に良い一致が見られた。

図 4-18 に、実部品のマクロパターン(5%ナイトール腐食)とシミュレーション結果から得られたマルテンサイト体積分率分布を示す。両者には端部近傍で一部相違が見られるものの、全体的には良い一致が見られた。

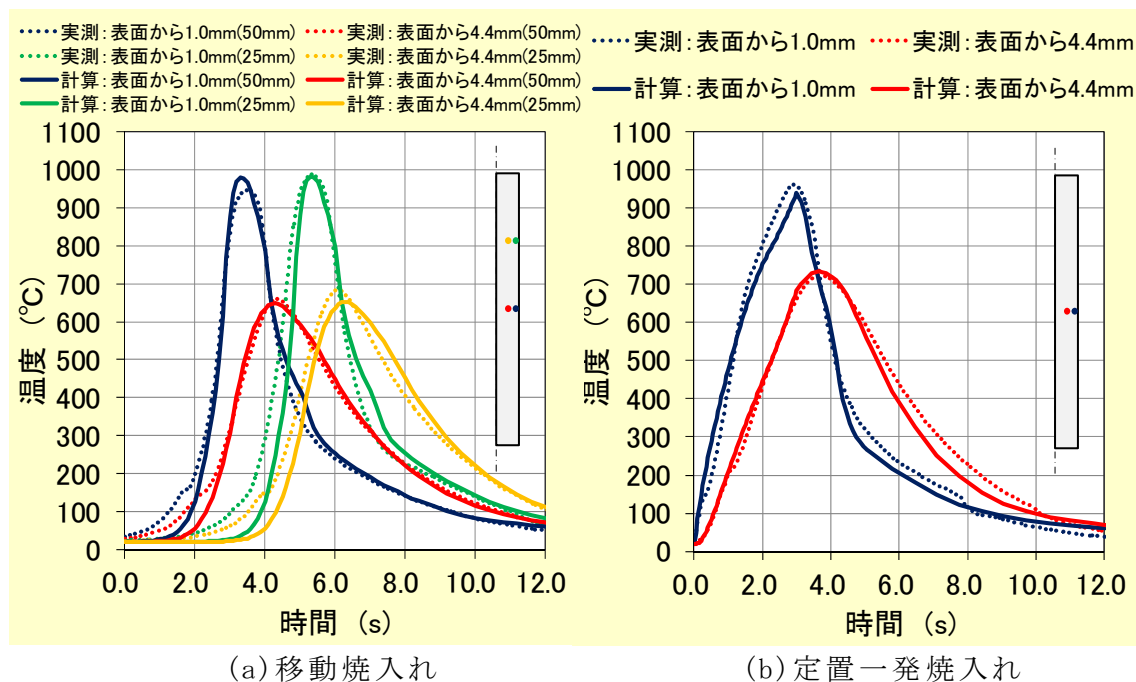


図 4-17 試験片内部温度の時間経過

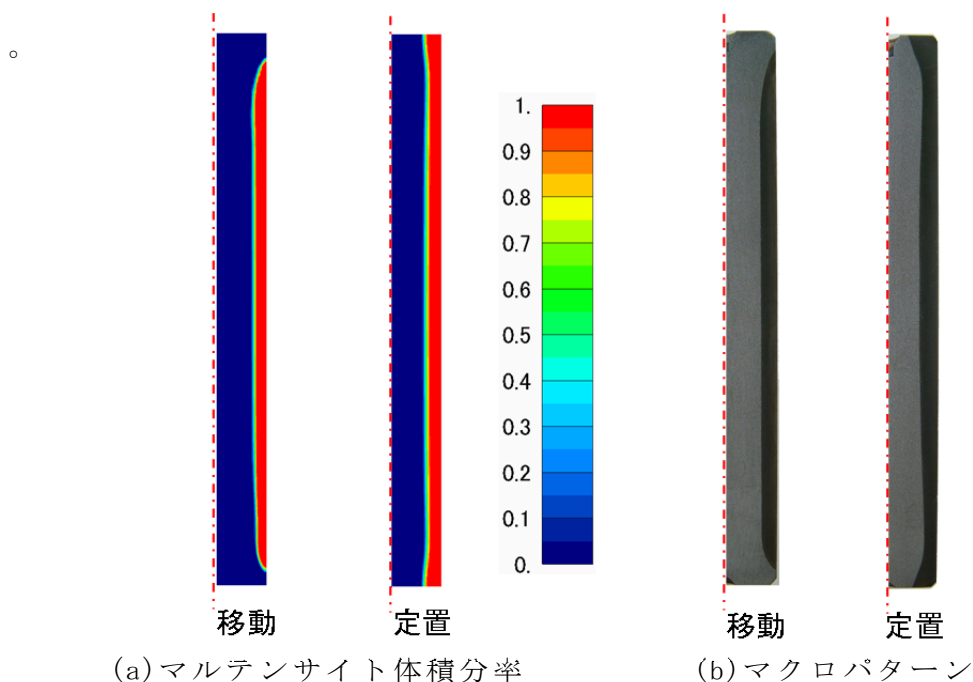


図 4-18 硬さパターン

図 4-19 に焼入後の試験片外表面における有効硬化層深さを示す。有効硬化層深さは、実測値は 400HV 以上、計算値はマルテンサイト体積分率 50%以上と定義した。実測値と計算値を比較すると、試験片の端部近傍に一部相違が見られるが、全体的には良い一致が見られた。

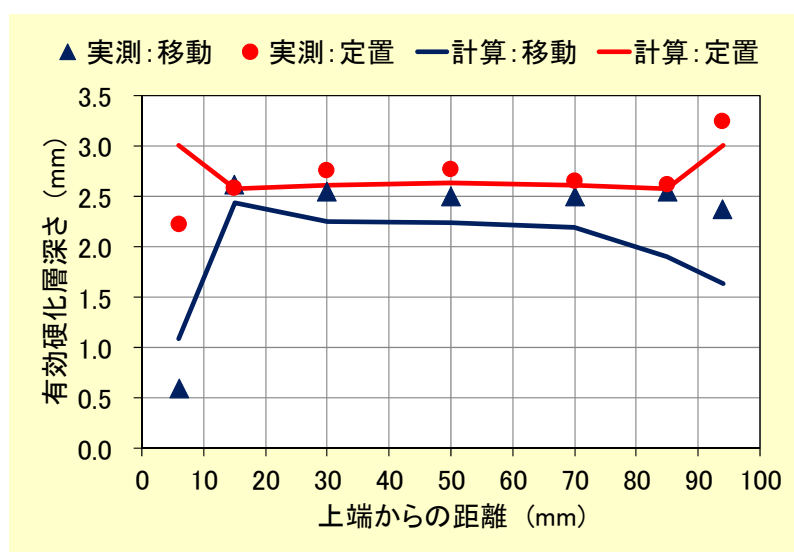


図 4-19 有効硬化層深さ

図 4-20 に、焼入後の試験片における直径変化量および長さ変化量を示す。実測値と計算値のいずれにおいても、移動焼入れでは若干の膨張、定置一発焼入れでは若干の収縮となり両者の傾向は合致したが、最大値が発生する箇所およびその絶対値は多少異なっていた。焼入後の長さ変化については、実測値よりも計算値の方が良く伸びていた。

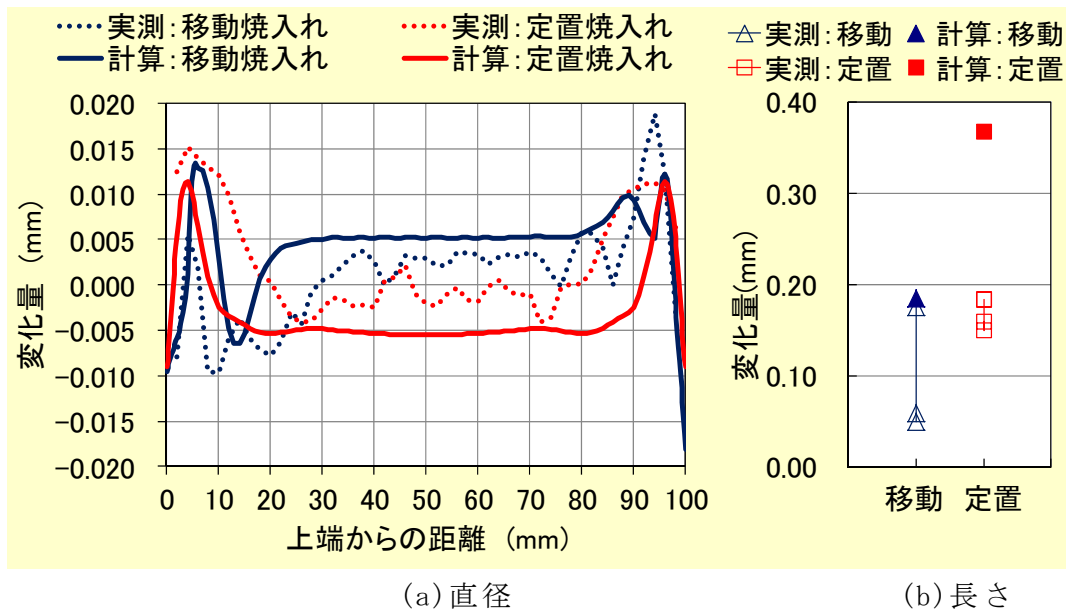


図 4-20 焼入後の変形量比較

図 4-21 に試験片外表面における残留応力を示す。移動焼入れでは、実測値と計算値に良い一致が見られたが、定置一発焼入れでは実測値の絶対値が大きい結果となった。また、実測値では焼入方式による差はあまり見られないが、計算値ではその差が大きい結果となった。

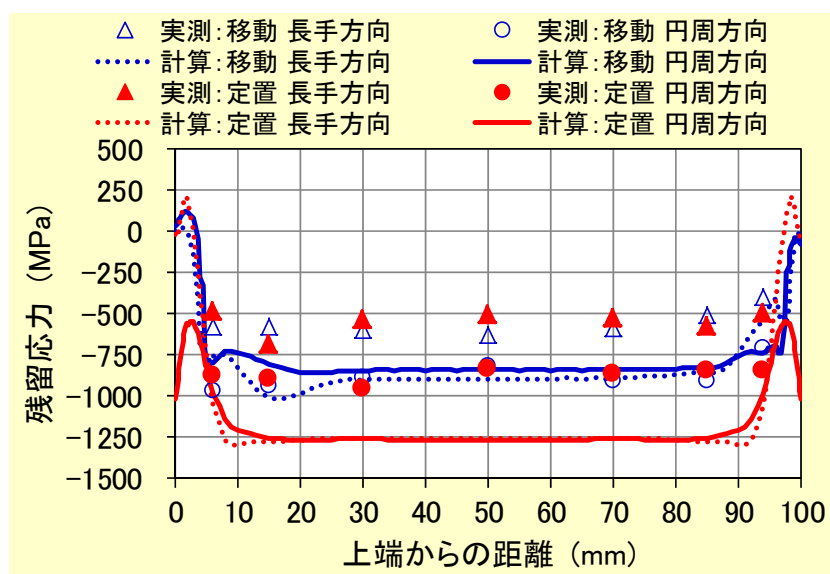


図 4-21 残留応力分布

4.3.4 試験結果とシミュレーション結果との比較

図 4-22 に磯村試験結果とシミュレーション結果の試験片中央断面における軸方向と接線方向、半径方向の残留応力分布を示す。シミュレーションでは、全体的に残留応力分布の傾向を再現できたが、内外表面の絶対値がやや異なるなど一部に相違が見られた。

シミュレーション結果の移動焼入れと定置一発焼入れの残留応力分布を比較すると、移動焼入れでは表面近傍の圧縮残留応力と内部の引張残留応力が定置一発焼入れより小さい傾向が見られた。また、軸方向の圧縮残留応力は、定置一発焼入れでは内部から外表面に近づくに従って増加するのに対し、移動焼入れでは表面近傍で増加量が小さくなる傾向が見られた。

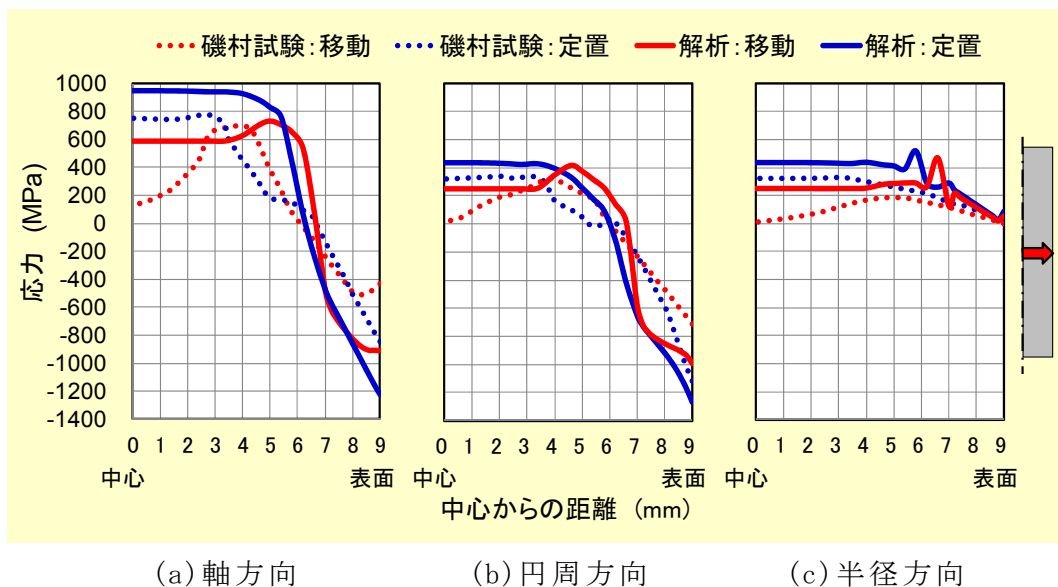


図 4-22 残留応力分布の比較(縦方向中央断面)

4.3.5 残留応力の発生メカニズム

本研究では、シミュレーション結果から得られた熱ひずみと変態ひずみの加算量、弾性ひずみ、塑性ひずみ、変態塑性ひずみおよび全ひずみの分布の時間変化を分析することによって、S40C 鋼円柱の高周波移動焼入れにおける

軸方向の残留応力発生メカニズムについて検討する。

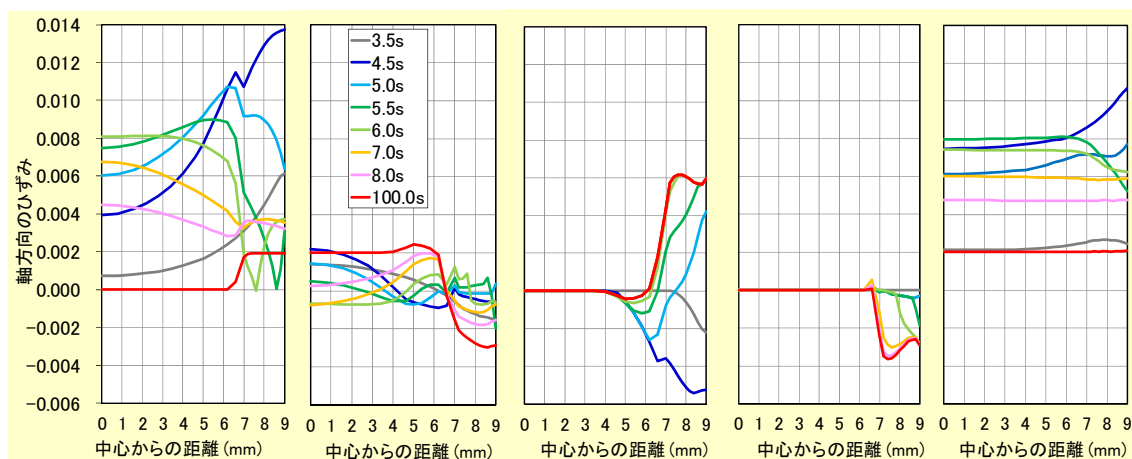
図 4-23 には、軸方向の中央断面における加熱冷却中の軸方向の各種ひずみ分布の時間変化を示す。加熱が開始されると外表面近傍の急激な温度上昇(0s から 4.5s)により、図 4-23(a)に示す“熱+変態”ひずみは外表面から大きく増加する。高周波移動焼入れは局所加熱であり、加熱領域を挟む低温領域(加熱前および冷却領域)が軸方向の膨張・収縮を拘束するので、図 4-23(e)に示す全ひずみ分布はいずれの時刻においても水平に近い分布となる。これを補完するために、図 4-23(b)と図 4-23(c)に示すように、外表面近傍には負の塑性ひずみが、中心領域には正の弾性ひずみが生じる。

冷却開始(5.0s)に伴う外表面の急激な温度低下により“熱-変態”ひずみは外表面から減少するが、前述の軸方向の拘束により外表面近傍の塑性ひずみは負から正に変化する。冷却が進み外表面からマルテンサイト変態し始めると(5.5s-8.0s)、外表面近傍では“熱-変態”ひずみの回復が起こるとともに、図 4-23(d)に示すように外表面から負の変態塑性ひずみが発生する。しかし、全ひずみ分布は水平に近い形状を保とうとするため、外表面近傍の弾性ひずみは負に変化するとともに、その内部領域の弾性ひずみは正に変化する。

冷却終了時(100s)の弾性ひずみ分布は、外表面から 2.5mm 深さまでは負の値、その内部では正の値を示している。第 2 章の図 2-3 のように弾性ひずみと応力には線形の関係があるので、冷却終了時の外表面では圧縮応力、内部では引張応力となり、図 4-22(a)に示す残留応力分布と一致している。

高周波移動焼入れは、加熱領域と冷却領域が同一面上に存在し、局所的な膨張と収縮により両領域の境界近傍が軸方向に引張りを受けることで、外表面では局所的に正の塑性ひずみが増加して負の弾性ひずみが減少する。その結果、図 4-22(a)に示すような残留応力分布となると考えられる。

以上のように、各種ひずみ分布の時間変化を分析することで、軸方向の残留応力発生メカニズムが明らかとなった。本手法を用いれば、円周方向および半径方向の残留応力発生メカニズムも明らかすることができる。



(a)熱＋変態ひずみ (b)弾性ひずみ (c)塑性ひずみ (d)変態塑性ひずみ (e)全ひずみ

図 4-23 軸方向の各種ひずみ分布の時間変化

4. 3. 6 小結

磯村試験の高周波焼入れシミュレーション結果から得られた加熱冷却中の各種ひずみ分布を時系列で分析することで、高周波移動焼入れの残留応力発生メカニズムを検討した。これにより、以下の知見が得られた。

- (1) 局所加熱である移動焼入れでは、加熱領域と冷却領域の境界近傍が引張力を受けることにより正の塑性ひずみが発生することから、定置一発焼入れとは異なる残留応力分布になることがわかった。
- (2) 本研究により、高周波移動焼入れにおける加熱冷却中の軸方向応力の発生状況を詳細に明らかにすることができた。
- (3) 今回検証した軸方向に加えて、円周方向および半径方向の応力についても、本手法にて発生メカニズムの検討が可能である。

4.4 高周波移動焼入れシミュレーションによる水噴射冷却状況の検討

4.4.1 背景と目的

高周波焼入れ時に生じる熱処理変形や残留応力は、製品の最終品質や性能に大きな影響を与えることから、近年では熱処理変形および残留応力の予測と熱処理条件の最適化を目的として、コンピュータによる熱処理シミュレーションが活用されている。熱処理シミュレーションの予測精度を左右する重要因子に、冷却時の熱的境界条件として与える熱伝達率があるが、熱処理変形や残留応力をさらに高精度に予測するためには、部品形状や冷却液特性、冷却方法などに応じた熱伝達率データを用いることが重要である⁽¹⁴⁾。

高周波焼入れは、大きく分けて定置一発焼入れと移動焼入れに分類出来るが、いずれの冷却にも均一性に優れ、高い冷却能が得られる噴射冷却が多く用いられている⁽¹⁵⁾。移動焼入れの場合、被加熱物寸法より短い加熱コイルが用いられ、被加熱物もしくは加熱コイルと噴射冷却用ジャケットが一方向に移動し、焼入面に対して加熱と冷却が連続的に行われるために冷却状況は複雑で、被加熱物が冷却される領域での温度計測は定置一発焼入れよりも難しい。

そこで、本研究では、移動焼入れ中の熱伝達率をより正確に求めるため、過去に徳田らが実施した SCM440 材丸棒の高周波移動焼入れ試験⁽¹⁶⁾の再現試験を実施するとともに、SUS304 材の中空試験片を用いた噴射冷却試験⁽¹⁷⁾を新たに実施し、冷却曲線の逆解析から熱伝達率を求めた。そして、この熱伝達率を高周波移動焼入れシミュレーションに適用し、加熱冷却中の温度変化や熱処理変形、残留応力などについてシミュレーション結果と実験結果を比較することにより、高周波移動焼入れにおける冷却状況について、より詳細な検討を行い、シミュレーション精度の向上を試みた。

4. 4. 2 試験方法

図 4-24 に試験片と加熱コイルの形状と寸法、および設置状況を示す。試験片は、外径 25mm、長さ 200mm の中実丸棒形状で、鋼材は表 4-3 に化学組成を示すクロムモリブデン鋼 SCM440 を用いた。加熱コイルは内径 29mm、外径 69mm、高さ 10mm の 1 ターン形状で、下端面には噴射冷却用として直径 1.5mm 噴射穴を千鳥状に 46 個設けた。

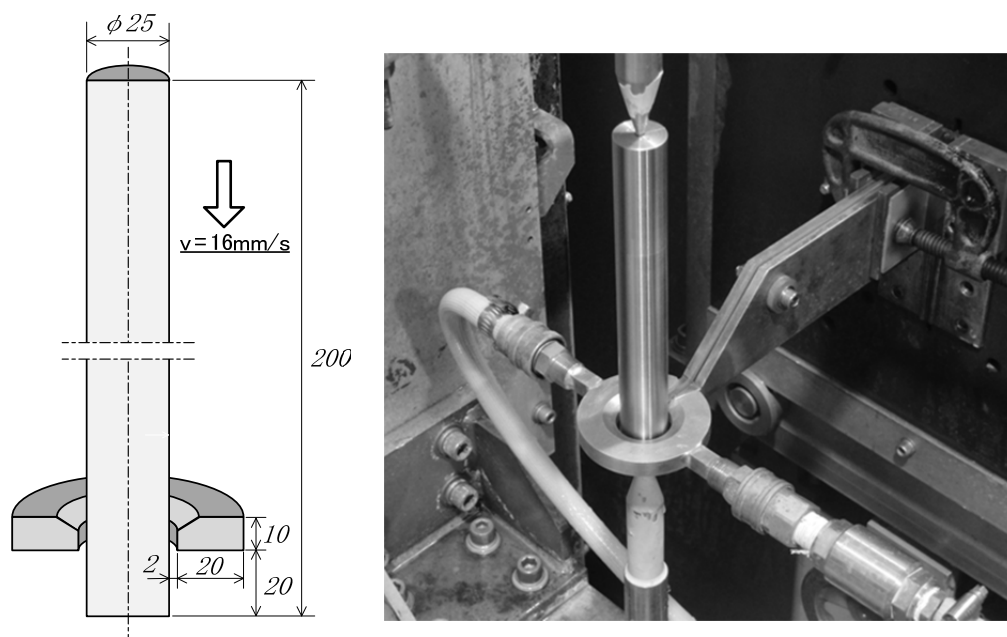


図 4-24 試験片と加熱コイルの形状および寸法



図 4-25 試験状況

表 4-3 化学組成 (mass %)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SCM440	0.41	0.20	0.78	0.017	0.016	0.10	1.00	0.15	0.14

焼入試験では、試験片下端から 20mm 位置に加熱コイル下端面を配置し、試験片を移動速度 16mm/s、回転数 200rpm で 114mm 下降させて、試験片下端から 20mm 位置より幅 120mm を高周波焼入れした。加熱条件は、周波数 10kHz で軸方向の焼入範囲中央の有効硬化層深さが 2.5mm となるように高周波電源の出力電圧を調整した結果、最高加熱温度は 930℃であった。また、焼入範囲の有効硬化層深さを均一にするために、移動加熱前に予熱として 0.5s の停止加熱を実施した。一方、冷却は冷媒に水を用いた加熱コイルからの噴射方式で、試験片の移動直後から流量 38L/min にて噴射を開始し、加熱終了後 10s まで噴射を継続した。図 4-25 に加熱開始 2s 後の冷却状況を示す。

加熱冷却中の試験片内部の温度変化を確認するために、外径 25mm で長さ 120mm の測温用試験片を用意した。外表面から 1.3mm、2.7mm、6.0mm 位置に、上端面から長さ中央部まで直径 ϕ 1.0mm の縦穴をあけ、その中にシーstype K 熱電対を挿入して、試験片内部 3 箇所の温度変化を測定した。また、測温用試験片の外表面には K 熱電対をスポット溶接し、外表面の温度変化も測定した。

試験結果の確認として、焼入前後での外径寸法はレーザ変位計を用いて測定し、焼入後の試験片外表面および中心軸方向の垂直断面でのビッカース硬さ分布を測定し、試験片外表面の残留応力は X 線回折法測定装置 (LXRD) を用いて測定した。

4.4.3 熱伝達率同定の予備試験

移動焼入れでは、移動中に冷却状況が変化することから、焼入試験での冷却特性を把握するため、焼入試験で使用した加熱コイルおよび焼入設備を用いて予備冷却試験を実施し、まず基本的な熱伝達率を求めた。

図4-26に試験方法を、図4-27に試験での加熱冷却状況を示す。試験片を移動させながらの温度測定は困難なので、図4-26に示すように加熱コイルからの噴射水が試験片に直接衝突(以下、噴射領域)する位置および表層流(以下、層流領域)になる位置に、外径25mm、長さ15mm、肉厚2mm、材質SUS304の中空試験片を2個設置した。また、他部品への接触熱伝達による温度低下と試験片内部へ噴射水の浸入を防止するために、試験片の上下位置に円盤状のセラミック製断熱部品を配置した。

試験片を上下移動させながら両試験片を1,000℃まで30sで均一加熱し、加熱終了後直ちに焼入試験と同じ冷却条件にて冷却を開始して、試験片内面にスポット溶着したK熱電対により冷却曲線を測定した。冷却時間は合計で60sとした。

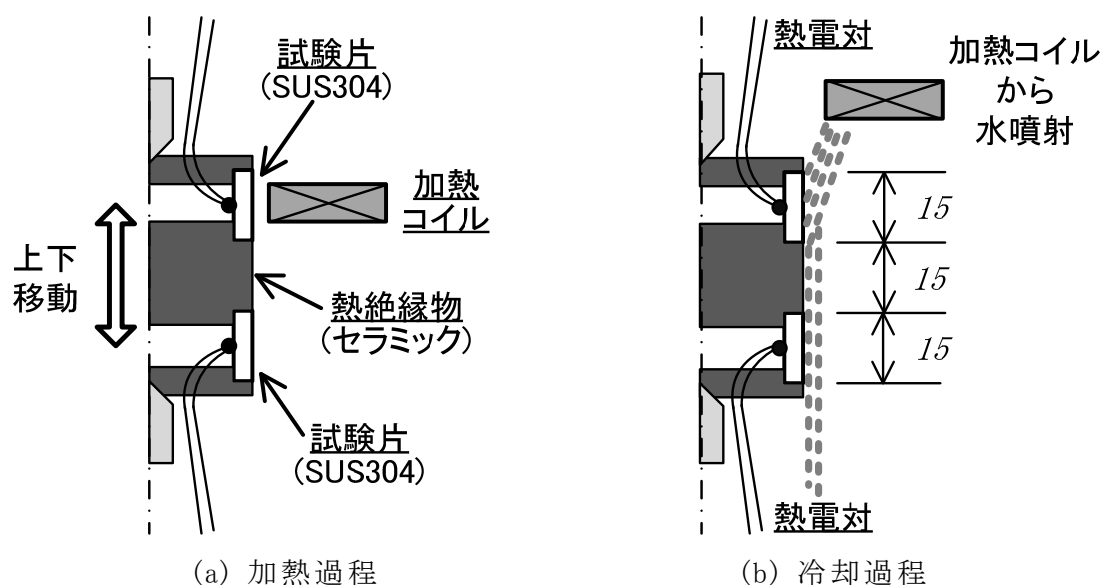
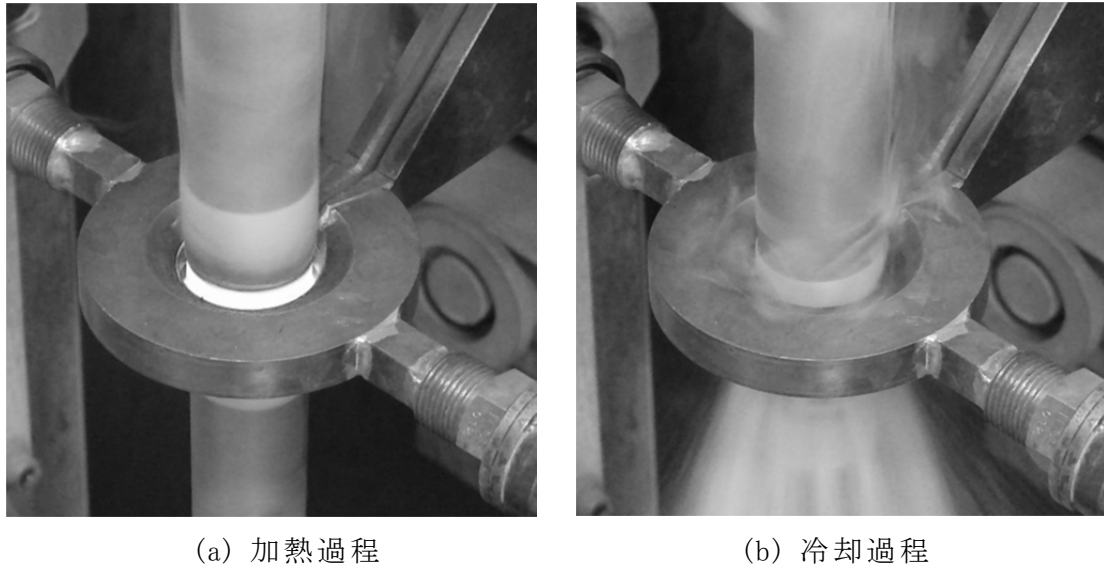


図4-26 冷却試験方法



(a) 加熱過程

(b) 冷却過程

図 4-27 加熱冷却状況

冷却曲線から 1 次元 FEM モデルを用いた逆解析により、試験片外表面の熱伝達率を求めた。図 4-28 に噴射領域および層流領域での熱伝達率を示す。噴射領域では 250°C にて最大値を示し、その値は $50,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と非常に大きな値であった。これは、噴射水の流速が 6.3m/s と速いために、冷却表面の蒸気膜の崩壊が促進されたためと推測する。一方、層流領域では噴射領域に比べて最大値が 175°C と低温側にシフトし、その値も $23,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ に減少したが、噴射領域と温度に関わる変化傾向に大きな差は見られなかった。

過去に同様な手法で実施された噴射冷却試験⁽¹⁷⁾では、噴射領域での最大熱伝達率は 550°C 、層流領域では 300°C で発生しており、本件よりも高温側であった。この差には、噴射速度や噴射水の衝突角度、移動速度などが影響すると思われるので、今後詳細に検討する予定である。

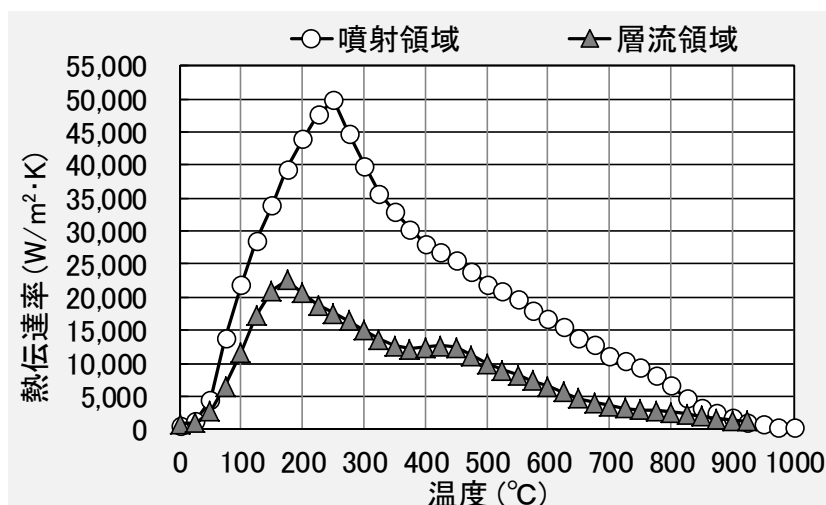


図 4-28 噴射領域および層流領域の熱伝達率

4. 4. 4 シミュレーション手法および条件

高周波焼入れのシミュレーション手法には、有限要素法による磁場と熱処理の逐次相互連成解析⁽¹⁸⁾を使用した。解析方法としては、まず磁場解析の周波数応答解析よりうず電流密度を求め、発熱分布および発熱量を決定する。熱処理解析では磁場解析から得られた各要素の発熱密度量から被加熱物領域の熱伝導解析、弾塑性および金属相変態の連成解析を行う。この解析にて得られた被加熱物の温度データを次ステップの磁場解析に引き渡す。以上の処理を予め決められたステップ時間、連成回数に基づいて実行することで高周波焼入れシミュレーションを実施した。

熱処理解析での相変態モデルとして、フェライトやパーライトなどの拡散型変態には TTT 線図をベースとした JMAK 式 (Johnson & Mehl⁽⁴⁾ - Avrami⁽⁵⁾ - Kolmogorov⁽⁶⁾) を、マルテンサイトの無拡散型変態には Koistinen - Marburger 式⁽⁷⁾ を、オーステナイト変態には、変態の進展を温度のみで決定する JMAK 簡略式を用いた。硬さについては、各要素における各相の体積分率から複合則を用いて算出した。

FEM モデルは、試験片形状と加熱コイル形状の対称性から縦断面形状を 2 次元軸対称問題として取扱い、図 4-29 に示すメッシュ分割を行った。節点数は 127,723、要素数は 170,559 であった。

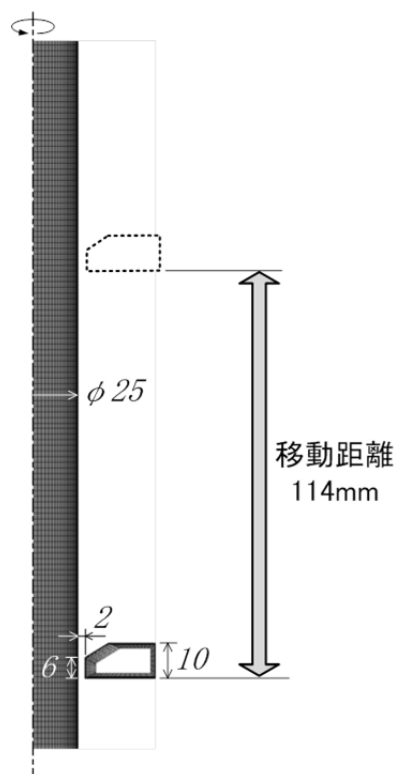
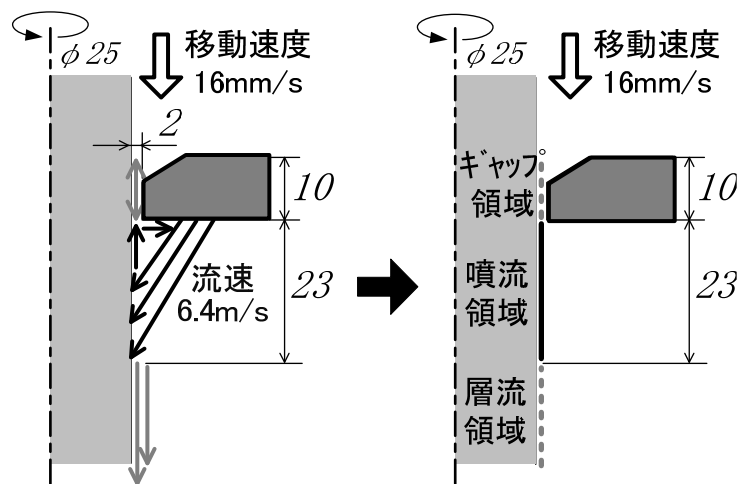


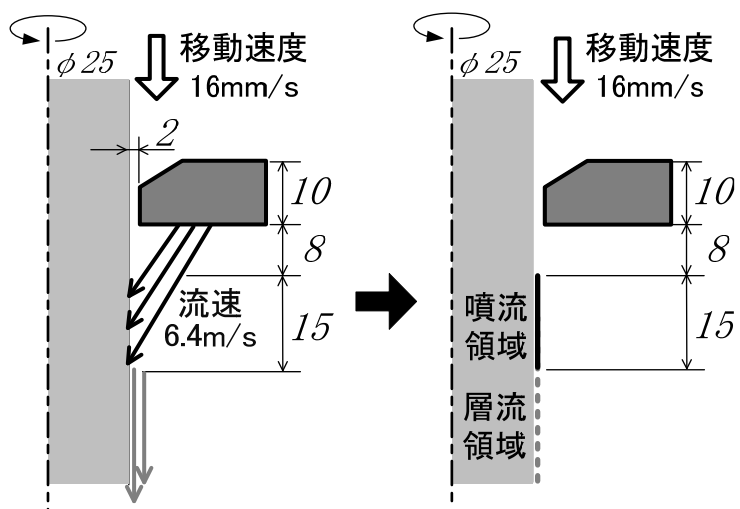
図 4-29 FEM モデル

加熱条件は、焼入試験と同じ周波数 10kHz、移動速度 16mm/s とし、加熱コイル断面に焼入範囲中央の表面温度が 930℃に達する電圧値を設定した。加熱開始時には 0.5s の停止加熱を実施し、移動範囲は 114mm とした。磁場解析では、被加熱物の磁気特性として温度依存性を有する B-H 曲線 (B: 磁束密度、H: 磁場の強さ) を使用し、被加熱物の表面温度および磁場の強さによる比透磁率の変化を考慮した。一方、冷却条件は、加熱コイルと冷却開始位置の距離が常に一定になるように、被加熱物表面の熱的境界条件として設定している熱伝達領域を移動させ、加熱終了後に被加熱物全体が常温になるまで冷却した。

移動焼入れにおける冷却状況を検討するために、図 4-30 に示す 2 種類の冷却境界条件を使用した。



(a) 噴射水跳ね返り有条件



(b) 噴射水跳ね返り無条件

図 4-30 冷却境界条件

図 4-30(a)は、焼入試験での噴射状況を考慮したものである(以下、噴射水跳ね返り有条件)。すなわち、焼入試験では加熱コイル下端面から冷却水が試験片表面に噴射されるが、冷却水の流速が 6.3m/s と速いため、衝突した冷却水の加熱コイルへの跳ね返りが生じ、またその一部が被加熱物と加熱

コイル間の狭い空間であるコイルギャップ領域に連続的に浸入する様子が観察された(図 4-25 参照)。この噴射水の流れと試験片が移動することから、コイルギャップ領域には噴射水が滞留するものとして水浸漬冷却の熱伝達率を設定するとともに、噴流領域の開始位置は加熱コイル出口とした。一方、図 4-30(b)は、加熱コイルに設けられた噴射穴位置および噴射角度のみで冷却状況を決定したもので、噴射水の跳ね返りなどを考慮していない条件(以下、噴射水跳ね返り無条件)である

図 4-31 に最適化した熱伝達率を示す。最適化は、予備冷却試験で求めた図 4-28 に示す熱伝達率を基本に、焼入試験の冷却速度と合致するように冷却領域ごとに係数を乗じた。

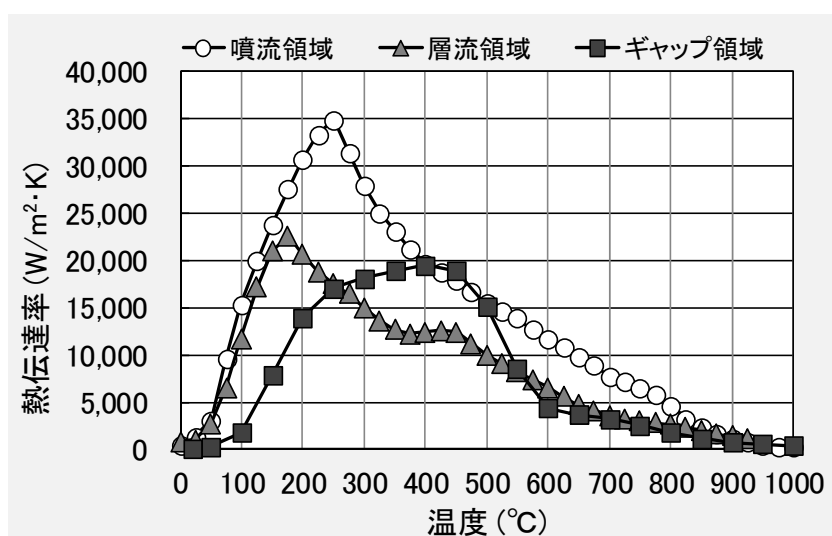
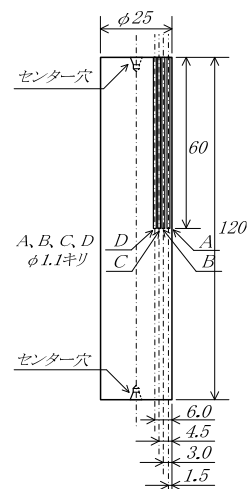
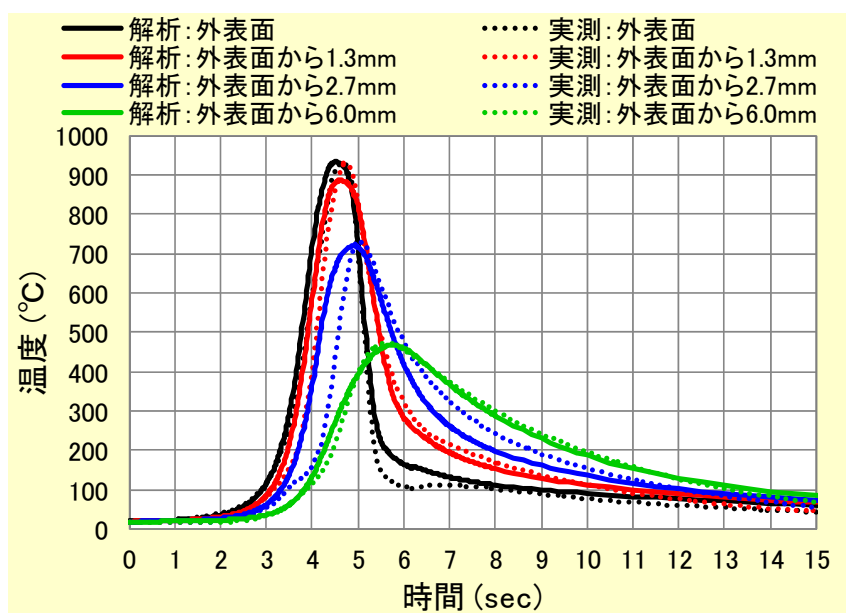


図 4-31 シミュレーションに用いた熱伝達率

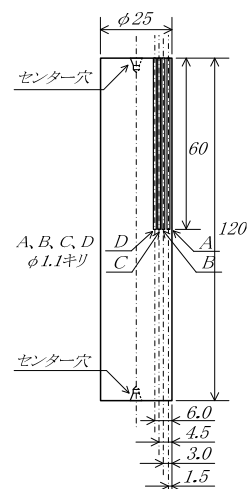
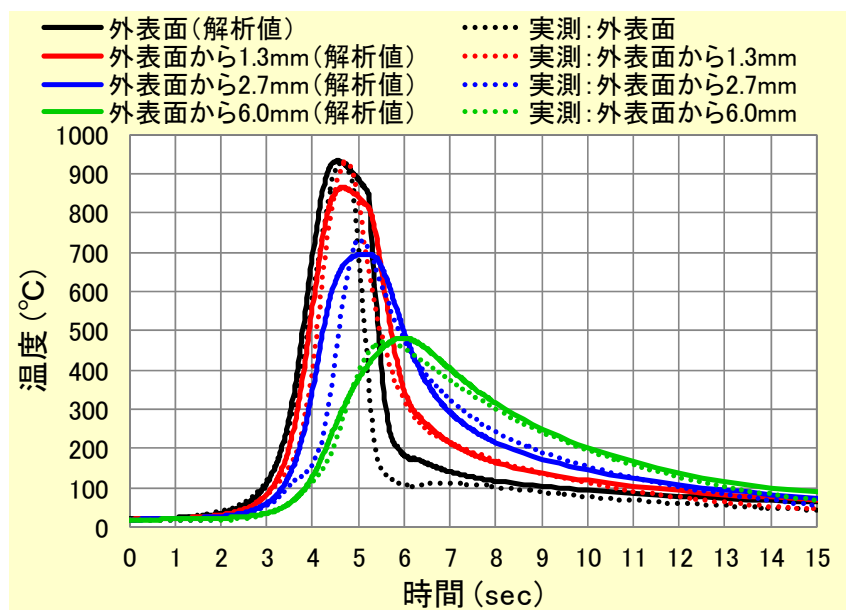
なお、本研究で用いたソフトウェアは、磁場解析は(株)JSOL 製” JMAG-Designer Ver.13”を、熱処理解析は伊藤忠テクノソリューションズ(株)製” FINAS/TPS”である。

4. 4. 5 試験結果とシミュレーション結果の比較

図 4-32 に、試験片表面および内部 3 箇所 の温度変化を示す。実線はシミュレーション結果、破線は測温結果を示す。図 4-32(a) に示す噴射水跳ね返り有条件のデータでは、外表面から 2.7mm 位置の試験結果とシミュレーション結果に一部相違が見られるものの、全体的には良い一致が見られた。一方図 4-32(b) に示す噴射水跳ね返り無条件のデータでは、外表面から 1.3mm 位置と 2.7mm 位置での最高温度は、試験結果よりシミュレーション結果の方が低くなった。また、シミュレーション結果の冷却開始時間が測温結果に比べて遅いなどの相違が見られた。



(a) 噴射水跳ね返り有条件



(b) 噴射水跳ね返り無条件

図 4-32 温度の時間変化

図 4-33 に、焼入後に実測した縦断面での硬化パターンとシミュレーション結果から得られた冷却終了時のマルテンサイト体積分率分布を示す。実測の硬化パターンは、縦断面の表面を研磨後に 5%ナイタールで腐食したものである。試験結果およびシミュレーション結果のいずれも、外表面形状に並行な焼入硬化パターンを示した。

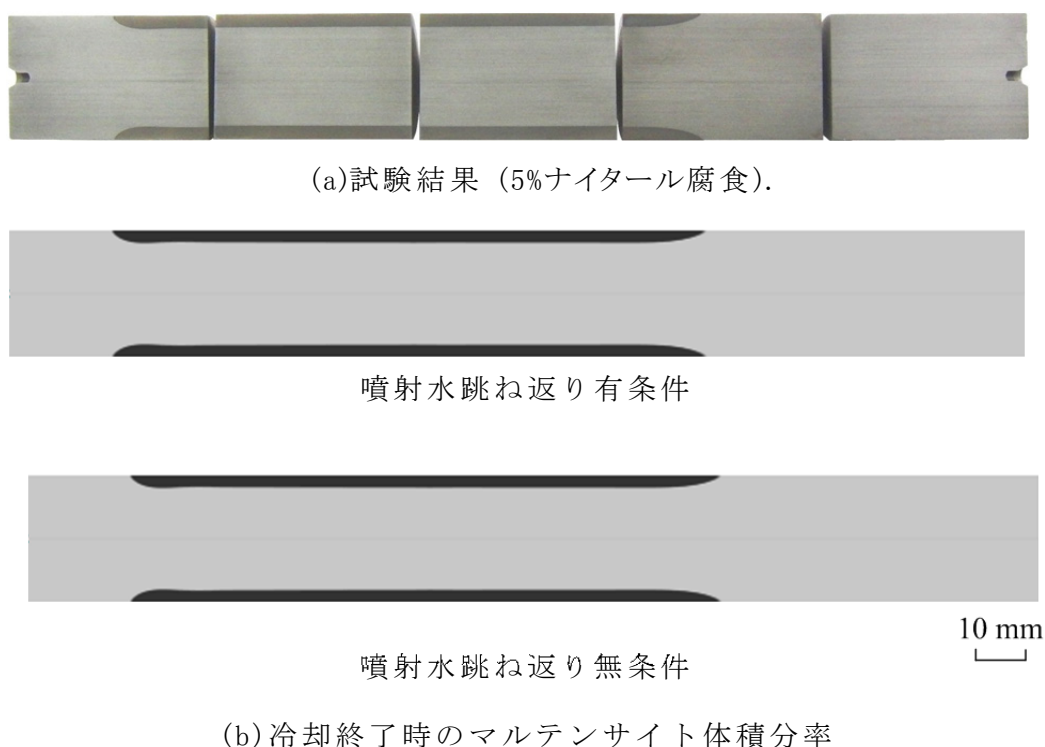
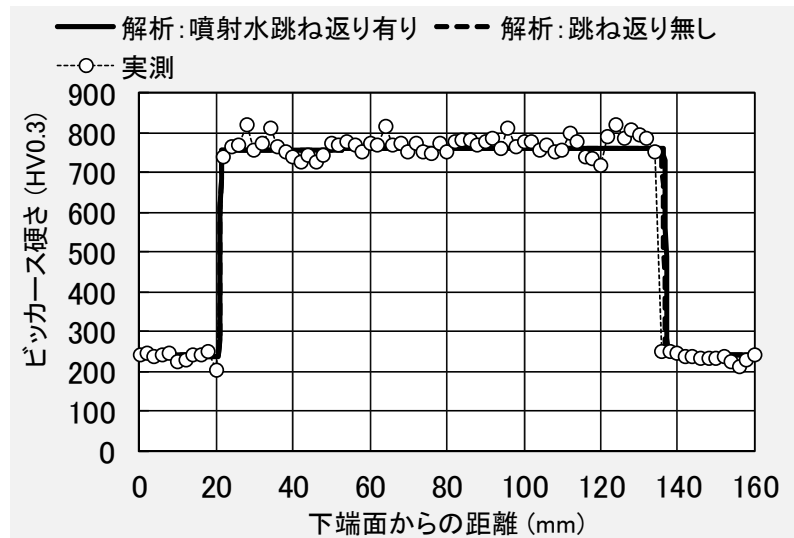


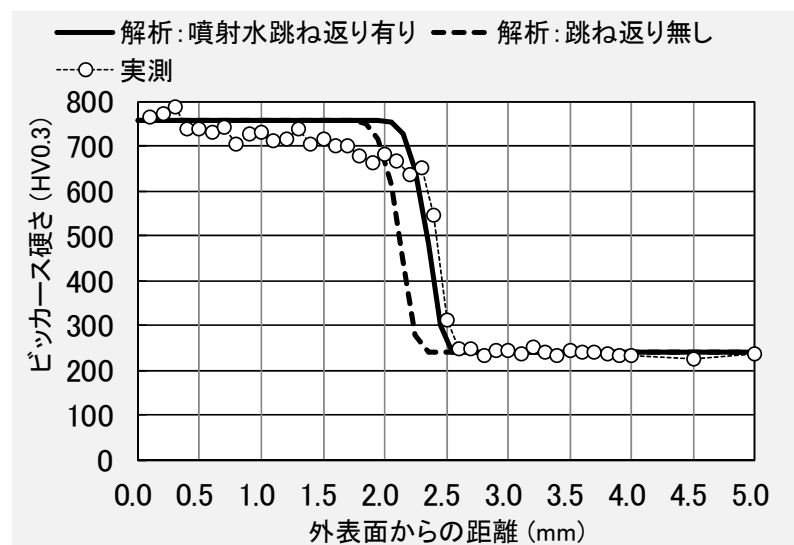
図 4-33 焼入硬化パターン

図 4-34 に、硬さ分布の試験結果とシミュレーション結果を示す。実線は噴射水跳ね返り有条件のシミュレーション結果、破線は噴射水跳ね返り無条件のシミュレーション結果、マーカは試験結果を示す。図 4-34(a)の焼入表面における硬さ分布は、試験結果とシミュレーション結果で良い一致が見られており、シミュレーション結果の噴射水跳ね返り有条件と噴射水跳ね返り無条件に差は見られなかった。次に、図 4-34(b)の焼入範囲中央における半径方向の硬さ分布での有効硬化層深さは、試験結果では 2.5mm、

噴射水跳ね返り有条件のシミュレーション結果では 2.4mm で、両者に良い一致が見られた。一方、噴射水はね返り無条件のシミュレーション結果の有効硬化層深さは 2.2mm となり、試験結果よりも 0.3mm 浅い結果であった。



(a) 外表面



(b) 縦中央断面

図 4-34 焼入後の硬さ分布

図 4-32 の試験片内部の温度変化および図 4-34 の半径方向の硬さ分布において、試験結果と噴射水跳ね返り有条件のシミュレーション結果には良い一致が見られた。このことから、高周波移動焼入れシミュレーションでは、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却の境界条件の使用が必要であることがわかった。そこで、以下で検討する熱処理変形および残留応力については、試験結果と噴射水はね返り有条件のシミュレーション結果を比較した。

図 4-35 に、焼入前後での直径変化量を示す。実線はシミュレーション結果、マーカは試験結果を示す。試験結果およびシミュレーション結果のいずれも試験片中央では半径方向に膨張しており変形傾向は合致していたが、シミュレーション結果の膨張量の方が $5\mu\text{m}$ 程度大きかった。一方、焼始部および焼終部では、試験結果とシミュレーション結果には差が見られ、試験結果では焼始部で半径方向に $35\mu\text{m}$ の膨張、焼終部で $10\mu\text{m}$ の収縮が見られたが、シミュレーション結果は逆の変形傾向を示した。

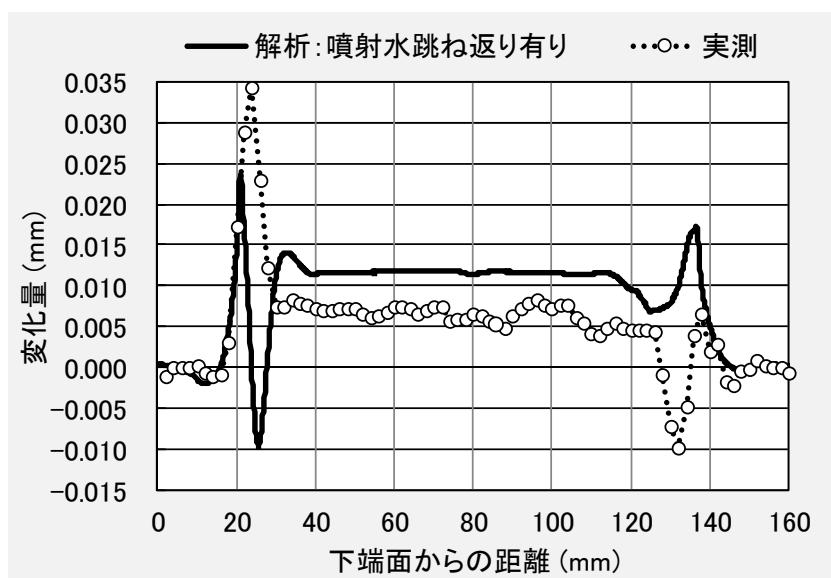


図 4-35 焼入前後での直径変化量

図 4-36 に、試験片外表面における軸方向および円周方向の残留応力分布を示す。実線はシミュレーション結果、破線は試験結果を示す。試験結果とシミュレーション結果のいずれも焼入表面の残留応力は高い圧縮値を示し、試験片下端面から 10mm 位置の焼始側焼境部と 130mm 位置近傍の焼入部に若干の相違が見られたものの、両者の傾向に良い一致が見られた。

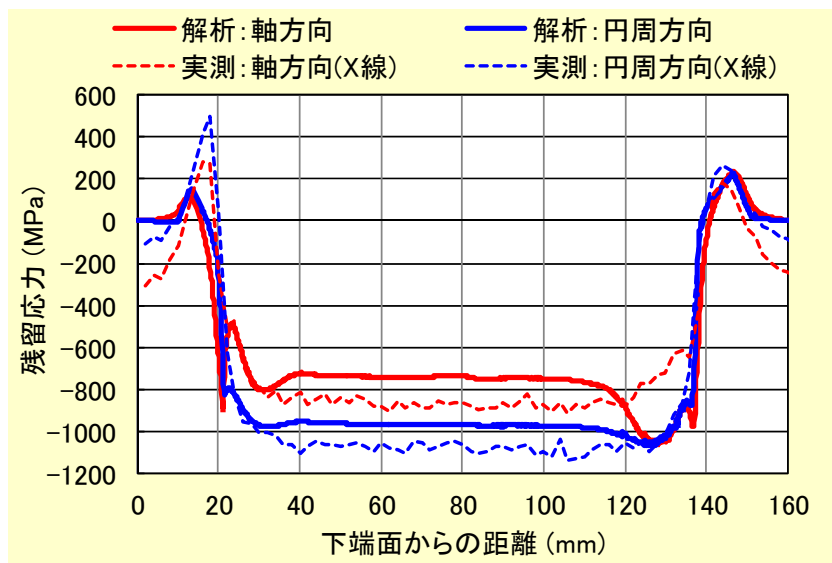


図 4-36 試験片外表面の残留応力

図 4-37 に、焼入範囲中央断面における軸方向および円周方向の残留応力分布を示す。実線はシミュレーション結果、破線は X 線回折法測定結果、マーカは中性子線回折法測定結果を示す。

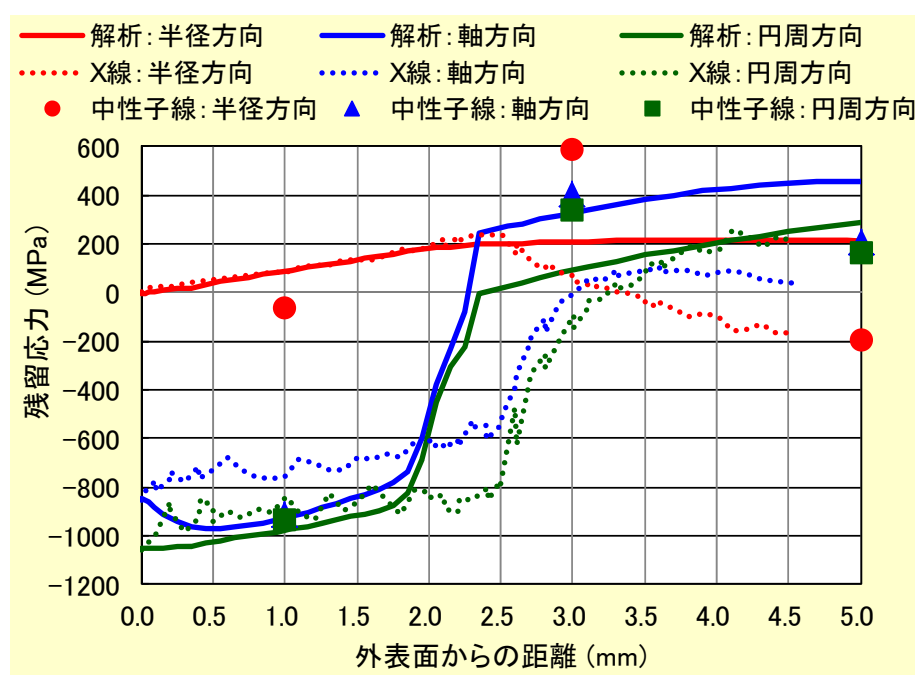


図 4-37 中央断面における軸方向および円周方向の残留応力分布

X 線法および中性子線法により測定した残留応力は、過去に徳田らが同じ焼入条件で実施した SCM440 材丸棒の高周波移動焼入試験⁽¹⁶⁾にて測定した値である。X 線法による残留応力は、焼入中央部表面において電解研磨を連続的に繰り返して深さ方向に残留応力測定を行い、表面層除去による応力開放の影響を修正すべく、3 軸方向の応力状態を計算した結果であった。一方、中性子線法を用いた残留応力は、焼入部分を 30mm 円柱に切り出し、JAERI (日本原子力研究所研究 3 号炉付設)の残留応力測定装置 RESA を用いて中性子線回折を行い、3 方向のひずみ測定結果から 3 軸方向の応力状態を求めた結果であった。

X線回折と中性子線回折による応力測定結果を比較すると、焼境部である外表面から3mm位置にて若干傾向の差が見られるものの、良い一致を示していた。一方、X線回折による応力測定結果とシミュレーション結果を比較すると、X線回折に使用した試験片の有効硬化層深さが2.7mmと若干深いため、圧縮応力から引張応力へと変化する位置は少し異なるものの、全体的な応力分布には良い一致が見られた。軸方向と円周方向の残留応力は、X線法測定結果とシミュレーション結果ともに、外表面から2mm位置まで高い圧縮値を示していた。測定結果は、軸方向と円周方向ともに外表面にて最大の圧縮値を示したが、シミュレーション結果は傾向が異なり、軸方向の最大圧縮応力は外表面から深さ0.7mm位置に存在し、外表面の圧縮応力の絶対値は最大値より約150MPa減少していた。半径方向の残留応力は、外表面から深さ2.5mm位置まではX線法測定結果とシミュレーション結果ともに引張応力を示し良い一致が見られたが、外表面から2.5mmより深い領域では相違が見られた。この原因については、シミュレーション結果から得られた各ひずみ量を時系列で分析する手法⁽¹⁹⁾を用いて調査する予定である。

以上に示した試験結果とシミュレーション結果の比較から、高周波焼入時の正確な噴射水の流れを考慮して、噴射冷却の状況に応じた熱伝達率を用いた高周波焼入れシミュレーションを実施することで、実測結果と合致する高精度なシミュレーション結果を得た。この手法を様々な部品に適用することで、焼入後の硬化領域や変形、残留応力などを高精度に予測するシミュレーション技術を確立出来ると考える。

4. 4. 6 小結

本研究では、過去に実施した SCM440 材丸棒の高周波移動焼入試験の再現試験および高周波移動焼入れシミュレーションを行い、その結果に基づいて高周波移動焼入時のより精密な冷却状況の検討を試みた。

- (1) 噴射冷却試験から熱伝達率を噴流領域と層流領域に分け、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却境界条件を高周波焼入れシミュレーションに適用することで、実測結果と一致するシミュレーション結果を得た。
- (2) 本研究で開発したシミュレーション手法を実部品に活用することで、焼入後の硬化パターンや変形、残留応力などを精度良く予測可能であると考える。
- (3) 今後、さらなるシミュレーション精度向上のためには、部品形状や噴射角度、噴射穴位置、被加熱物の移動・回転運動などを考慮した熱伝達率を求める必要があり、本研究で開発したシミュレーション手法を用いて、噴射水の流れおよび冷却状況を考慮した熱流体(CFD)解析により、熱伝達率およびその分布を求める予定である。

4.5 結言

本章では、高周波焼入れシミュレーション結果から得られた応力や各種ひずみ量を時系列で分析することで、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムが解明可能かどうかを検討した。以下に、得られた主な結論を示す。

- (1) 熱処理変形に直接寄与する全ひずみ分布の発生メカニズムは、“熱+変態”ひずみ、塑性ひずみ、変態塑性ひずみ、弾性ひずみ分布の時間変化から説明できることを明らかにした。
- (2) 移動焼入れは局所加熱であるため、加熱領域と冷却領域の境界近傍に軸方向の正の塑性ひずみが発生することから、定置一発焼入れとは異なる残留応力分布になることを明らかにした。
- (3) 丸棒の高周波移動焼入れにて実測結果と一致するシミュレーション結果を得るためには、熱伝達率を噴流領域と層流領域に分け、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却境界条件を使用する必要があることを実証した。
- (4) 本研究で示された変形発生メカニズムの分析手法は、熱処理変形への各種ひずみの寄与の程度を明確にできるため、熱処理変形の低減や焼割れなどの不具合の事前検討などに活用することが可能である。

第 4 章の参考文献

- (1) Inoue, T., Inoue, H., Uehara, T., Ikuta, F., Arimoto, K. and Igari, T.: Simulation and Experimental Verification of Induction Hardening Process for Some Kinds of Steel, Proc. 2nd Int. Conf. Quenching and Distortion, (1996)
- (2) Denis, S., Gautier E., Simon A. and Beck, G.: Stress-phase-transformations -basic principles, modelling, and calculation of internal stresses, Mats. Sci. Tech., Vol. 1, p. 805-814, (1985)
- (3) Melander, M.: Computer Predictions of Progressive Induction Hardening of Cylindrical Components, Mats. Sci. Tech., Vol. 1, p. 877-882, (1985)
- (4) Johnson, W. A. and Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. Trans., AIME, Vol. 135, p. 416-458, (1939)
- (5) Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. I, II, III. J. Chem. Phys., Vol. 7, p. 1103-1112, (1939), Vol. 8, p. 212-224, (1940), Vol. 9, p. 177-184, (1941)
- (6) Kolmogorov, A. N.: Statistical Theory of Crystallization of Metals. Izvestia Akademii Naul SSSR, Vol.1, p. 355-359, (1939) (in Russian)
- (7) Koistinen, D. P. and Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, Acta Met., Vol 7, p. 59-60, (1959)
- (8) The British Iron and Steel Research Association: Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures. Butterworths Scientific Publications, London, (1953)
- (9) Jablonka, A., Harste, K. and Schwerdtfeger, K.: Thermomechanical Properties of Iron and Iron-Carbon Alloys: Density and Thermal Contraction, Steel Research, Vol. 62, p. 24-33, (1991)

- (10) Miettinen, J.: Calculation of Solidification-Related Thermophysical Properties for Steels. *Met. Mat. Trans. B*, Vol. 28B, p. 281-297, (1997)
- (11) 磯村良蔵:鋼の熱処理と残留応力, *アグネ*, (1966).
- (12) 生田文昭、堀野孝、井上達雄:高周波移動焼入れ過程における残留応力・ひずみおよび組織のコンピュータ・シミュレーション, *材料*, Vol.47, No.9, p. 892-898, (1998)
- (13) 堀野孝、生田文昭:高周波焼入れシミュレーションにおける水噴射冷却の特性, 第 67 回 H21 年春季日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, p. 55-56, (2009)
- (14) Narazaki, M., Shichino, H., Sugimoto, T., and Watanabe, Y.: Validation of Estimated Heat Transfer Coefficients during Quenching of Steel Gear, *Proc. of the 5th International Conference on Quenching and the Control of Distortion*, Berlin, Germany, p. 111-117, (2007)
- (15) 生田文昭, 堀野孝, 古賀久喜, 奈良崎道治:噴射冷却による高周波焼入れ過程のシミュレーション, 第 48 回日本熱処理技術協会講演大会, p. 329-330, (1999)
- (16) 徳田玄聖, 友田陽, 鈴木徹也, 川寄一博, 盛合敦, 皆川宣明, 森井幸生:中性子回折による高周波焼入れ棒鋼の残留応力測定, *鉄と鋼*, 90, 12, p. 56-60, (2004)
- (17) 堀野孝, 生田文昭:高周波焼入れシミュレーションにおける水噴射冷却の特性, 第 67 回日本熱処理技術協会講演大会, p. 21-22, (2009)
- (18) Inoue, T., Inoue, H., Ikuta, F. and Horino, T.: Simulation of Dual Frequency Induction Hardening Process of a Gear Wheel, *3th International Conference on Quenching and Control of Distortion*, ASM Heat Treating Society, p. 243-250, (1999)

- (19) Horino, T., Ikuta, F., Arimoto, K., Jin, C., and Tamura, S.: Explanation on the Origin of Distortion in Induction Hardening Ring Specimens by Computer Simulation, 1th International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, p. 203-212, (2005)

第 5 章

焼割れの予測

第 5 章 焼割れの予測

5. 1 緒言

鉄鋼部品の熱処理において、焼割れは最も注意すべきトラブルの一つである。焼割れが発生した部品は製品として使用出来ず、材料および製造コストの増大に繋がる。しかし、焼割れには複雑な要因が関係しており、事前に予測することは非常に困難である。焼割発生にはマルテンサイト変態と引張応力の集中が関与することが、円柱や偏心穴付き鋼円盤など様々な部品形状の熱処理シミュレーションによって確認されており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、焼割現象の理解と焼割れの予測および防止には、熱処理シミュレーションの活用が有効である。しかし、高周波焼入れでの焼割現象について、シミュレーションによる焼割れの予測と発生を検討している研究は見当たらない。

本章では、高周波焼入れにおける焼割発生メカニズムの解明による焼割防止を目的として、リング溝付試験片⁽⁵⁾による焼割試験およびシミュレーションの実施内容について説明する。次に、リング溝部表面の応力や各種ひずみ量などのシミュレーション結果を時系列で分析することで、焼割発生時間と焼割発生メカニズムが説明可能であるかどうかを検証する。

5. 2 試験方法と試験結果

図 5-1 に試験片と加熱コイルの形状と寸法、および設置状況を示す。試験片は、外径 ϕ 20mm、高さ 60mm の円柱形状で、焼割れを助長するために機械加工により中央部に幅 2mm、深さ 3mm のリング溝を設けてある。試験片素材は S55C 材、S45C 材、S35C 材の 3 鋼種とし、表 5-1 にその化学組成を示す。加熱コイルは、内径 ϕ 26mm、外径 ϕ 68、高さ 60mm の 1 ターン形状で、図 5-1 に示すように試験片の外側に配置している。

本試験では、試験片上端部から 14.5mm 位置において外表面からの硬化層深さが 5mm となるように、加熱条件として周波数 10kHz、加熱温度 1,000℃、回転数 250rpm を設定した。加熱時間は、S55C 材：4.5s、S45C 材：4.8s、S35C 材：5.0s とした。一方、冷却条件は、加熱コイル内面に千鳥状に設けられた直径 ϕ 1.5mm 噴射口による水噴射冷却で、冷却時間 15.0s、流量 50L/min、冷却媒体は水とした。試験結果の確認として、磁粉探傷法により試験片表面に発生した割れを目視検査した。また、焼入前後での試験片の寸法変化（レーザ変位計で測定）、焼入後のビッカース硬さ分布、および残留応力（X 線回折法）を測定した。

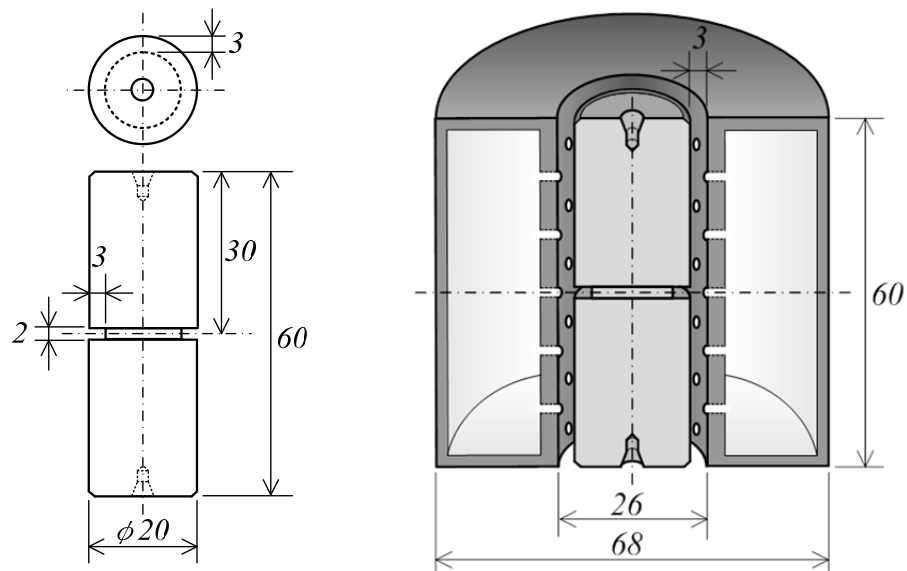


図 5-1 試験片と加熱コイルの形状および寸法（単位:mm）

表 5-1 試験片の化学組成（mass %）

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
S55C	0.55	0.20	0.73	0.019	0.023	0.04	0.13	0.11
S45C	0.47	0.20	0.80	0.021	0.024	0.02	0.17	0.01
S35C	0.35	0.20	0.72	0.019	0.025	0.05	0.13	0.11

表 5-2 に、焼割試験での鋼種ごとの割れ発生の有無を示す。試験片に割れが発生した場合は×印、発生しなかった場合は○印にて示す。なお、試験時の焼入本数は各鋼種 3 本とした。

表 5-2 より、割れは炭素量が多い S55C 材の試験片のみに発生しており、その発生部位はリング溝側面であった。図 5-2 に焼割発生状況を示す。次に、焼割れが発生した S55C 材の試験片について、割れ部の組織観察を行った。図 5-3 の金属顕微鏡を用いた組織写真より、割れ発生個所はリング溝底から約 0.8mm 位置のリング溝側面で円周状に発生していた。このことから、リング溝側面の半径方向に高い引張応力が発生したと推測できる。また、割れは旧オーステナイト結晶粒界に沿って進展しており、図 5-4 に示す電子線マイクロアナライザ(EPMA)による元素マッピングの結果からも、C や Cr、P などの割れ発生を助長しそうな偏析は見られないことから、焼割れであると考えられる。

表 5-2 焼割試験での割れ発生状況 (N=3 本)

鋼種	×：割れ発生、○：発生せず			
	No. 1	No. 2	No. 3	割れ位置
S55C	×	×	×	リング溝側面
S45C	○	○	○	—
S35C	○	○	○	—

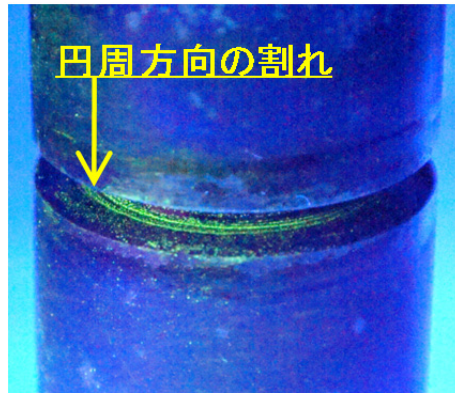


図 5-2 焼割発生状況(磁粉探傷)

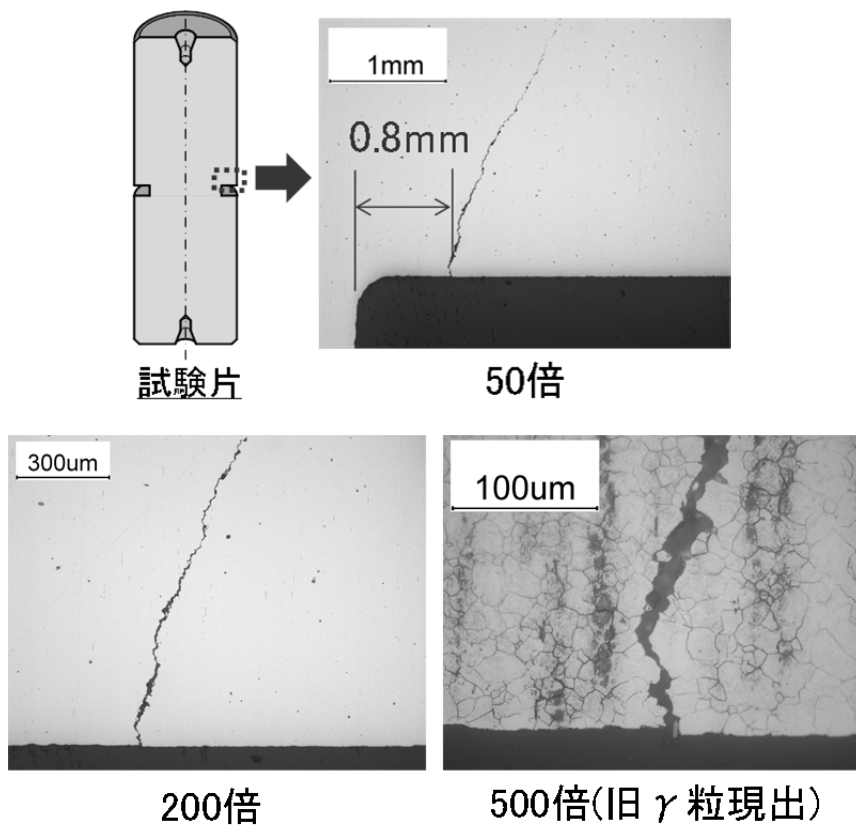


図 5-3 割れ発生位置の組織写真

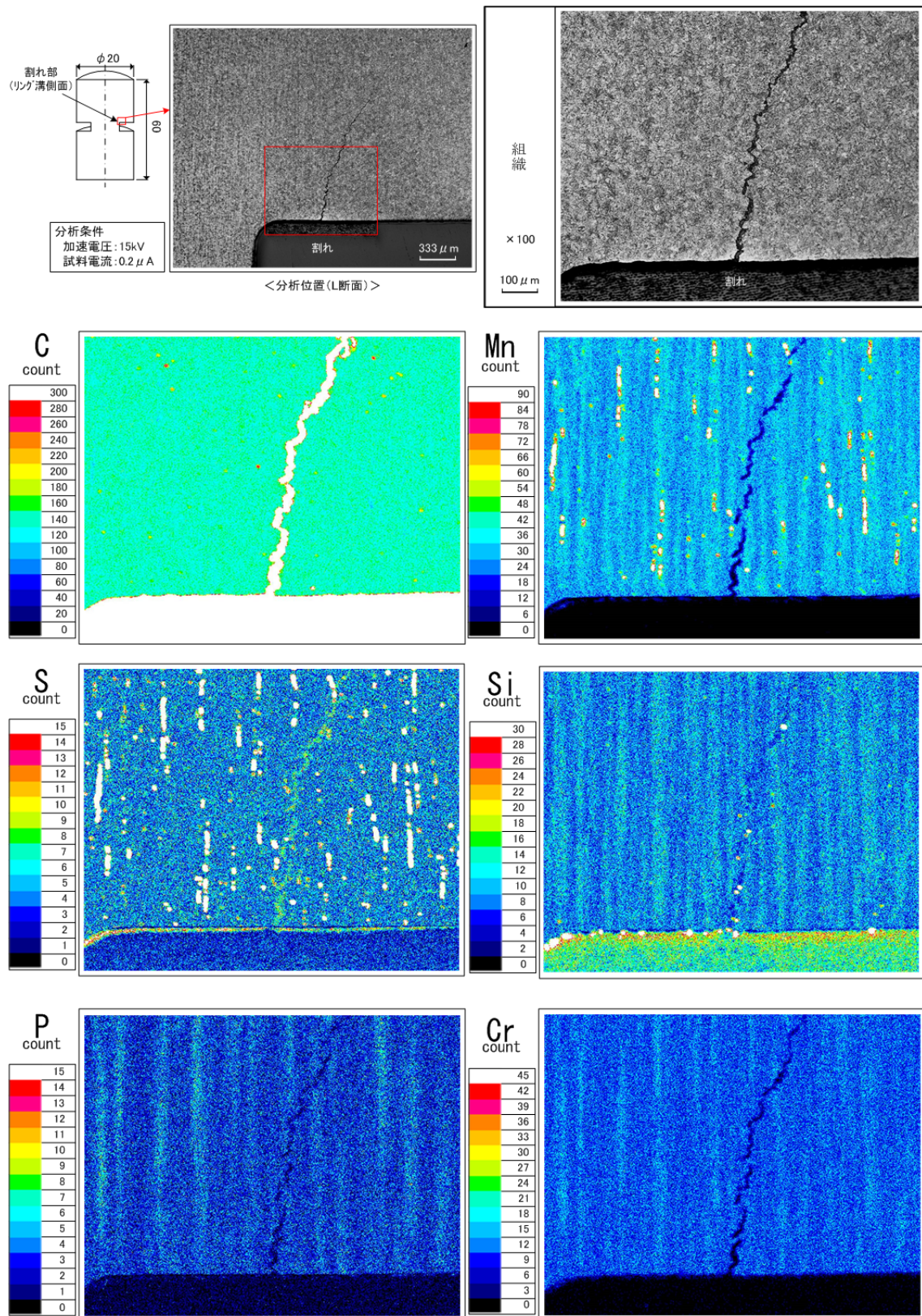


図 5-4 EPMA 分析結果

5. 3 シミュレーションの手法および条件

焼割れが発生した S55C 材について高周波焼入れシミュレーションを実施し、シミュレーション結果を時系列で分析することで、焼割発生メカニズムの検討を行った。

高周波焼入れのシミュレーション手法として、有限要素法による磁場解析と熱処理解析の逐次連成解析⁽⁶⁾を使用した。磁場の周波数応答解析より、電流密度を求め、時々刻々の発熱分布および発熱量を決定した。熱処理解析では、磁場解析から得られた各要素の発熱密度量から熱伝導解析を行い、相変態と弾塑性の連成解析を行った。

相変態モデルは、フェライトやパーライトなどの拡散型変態については TTT 線図に基づく JMAK (Jonson & Mehl⁽⁷⁾ - Avrami⁽⁸⁾ - Kolmogorov⁽⁹⁾) 式、マルテンサイト変態については Koistinen - Marburger⁽¹⁰⁾ の式を使用した。変態塑性現象に関しては、Denis ら⁽¹¹⁾ のモデルを用いた。なお、本研究のシミュレーションでは、(株)JSOL で開発された磁界解析用ソフト “JMAG-Designer Ver.12” と、伊藤忠テクノソリューションズ(株)で開発された熱プロセスシミュレータ “FINAS/TPS” を使用した。

試験片形状の対称性から 2 次元軸対称問題として取扱い、磁場解析および熱処理解析を対象として図 5-5 および図 5-6(a) に示すメッシュ分割を行った。加熱条件は、加熱コイル断面に実測したコイル電圧を設定し、周波数 10kHz、加熱時間 4.5s を指定した。次に冷却条件は、加熱コイルからの水噴射冷却を想定し、試験片表面に熱的境界条件として図 5-6(b) に示す熱伝達率曲線を設定した。この熱伝達率曲線は、別途実施した冷却能測定試験から得られた冷却曲線より逆解析手法にて求めた熱伝達率を基本に、測温データと合致するように冷却面ごとに係数を乗じたものである。冷却時間は 15.0s を設定した。

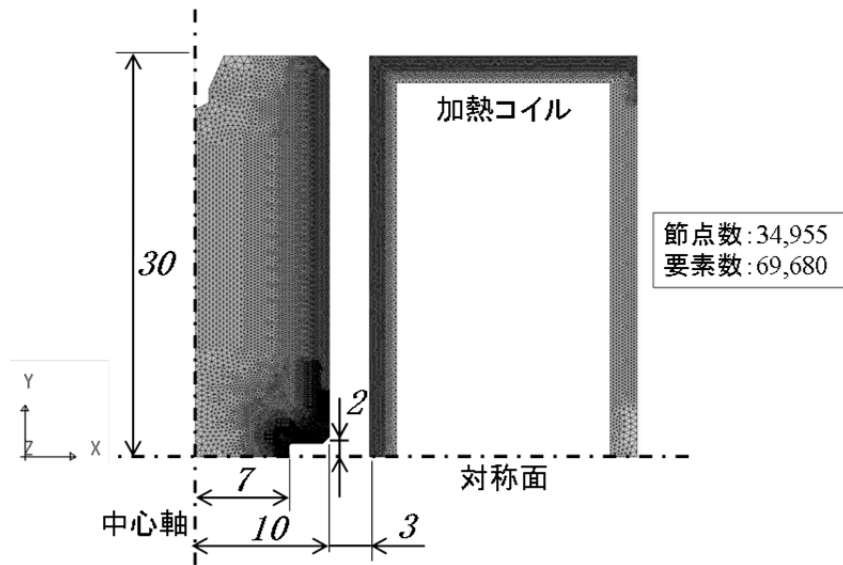
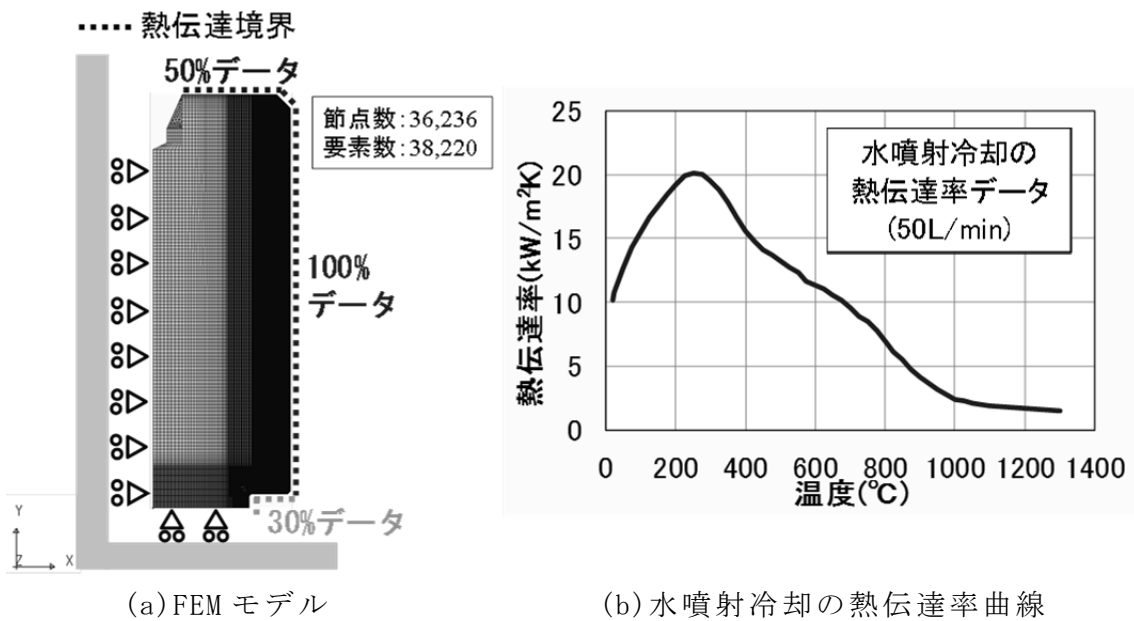


図 5-5 磁場解析の FEM モデル (空気領域は非表示)



(a) FEM モデル

(b) 水噴射冷却の熱伝達率曲線

図 5-6 熱処理解析の FEM モデル

5. 4 試験結果とシミュレーション結果の比較

図 5-7 に、試験片内部 4 箇所での温度変化を示す。実線はシミュレーション結果、破線は試験結果を表す。試験結果とシミュレーション結果に一部相違は見られるものの、全体的に良い一致が見られた。

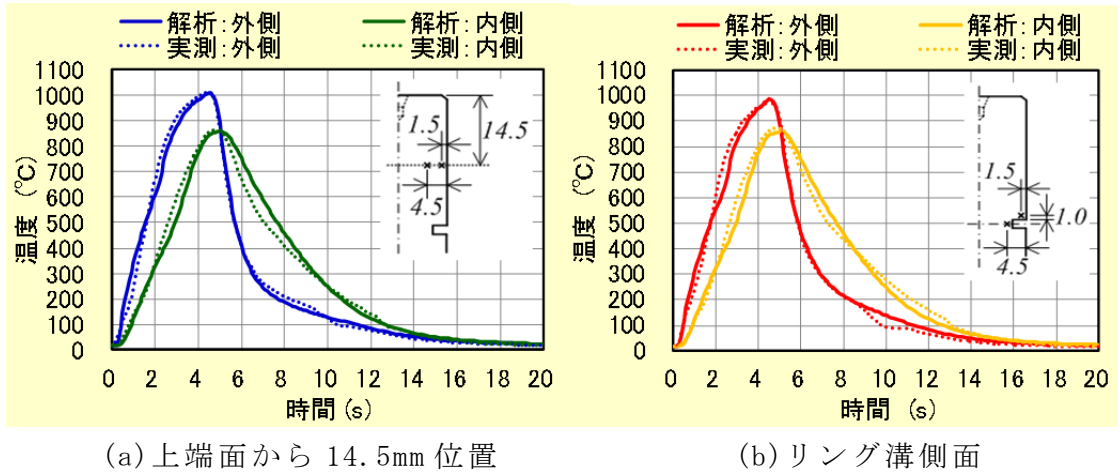


図 5-7 試験片内部温度の時間変化

図 5-8 に試験片の硬化パターン、およびシミュレーション結果から得られたマルテンサイト分布を示す。いずれも縦断面上部を表している。試験結果およびシミュレーション結果のいずれも外表面形状に沿って焼入れされているが、端部近傍では若干の相違が見られた。

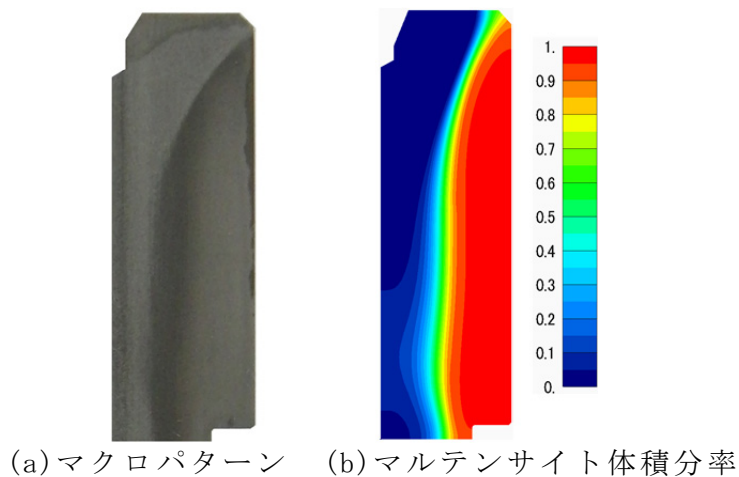
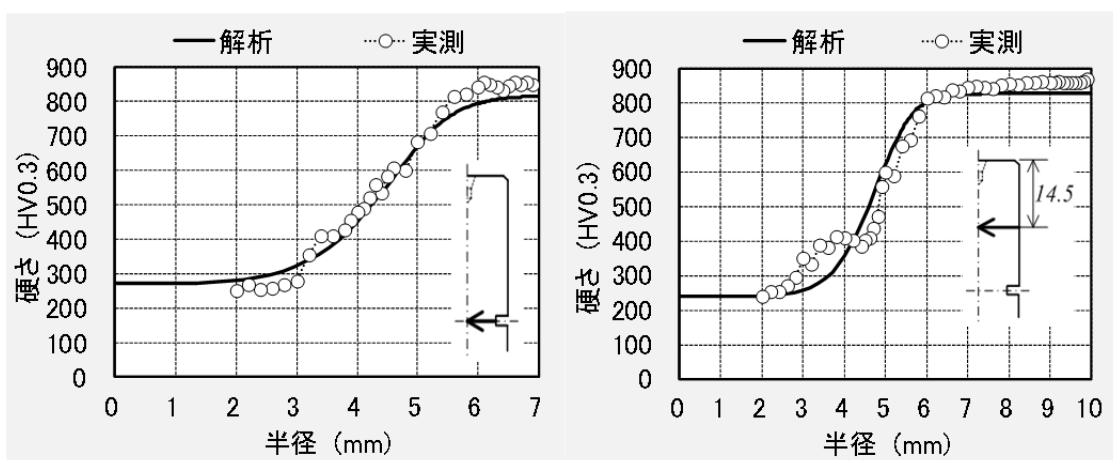


図 5-8 焼入領域

図 5-9 に、焼入後の半径方向の硬さ分布を示す。実線はシミュレーション結果、マーカは試験結果を示す。図 5-9 (a)のリング溝底中央部では、試験結果およびシミュレーション結果ともに有効硬化層深さは 2.7mm で、両者に良い一致が見られた。一方、図 5-9 (b)の上端面から 14.5mm 位置では、試験結果の有効硬化層深さ 5.2mm に対し、シミュレーション結果は 5.5mm と若干深い結果となった。



(a) リング溝底

(b) 上端面から 14.5mm 位置

図 5-9 半径方向の硬さ分布

図 5-10 に、試験片外表面における軸方向および円周方向の残留応力分布を示す。実線はシミュレーション結果、マーカは試験結果を示す。試験結果とシミュレーション結果では、両端部を除く外表面の残留応力がいずれの方向も圧縮値を示しており、両結果には良い一致が見られた。しかし、軸方向において最大圧縮残留応力が発生する位置に若干のずれが見られた。

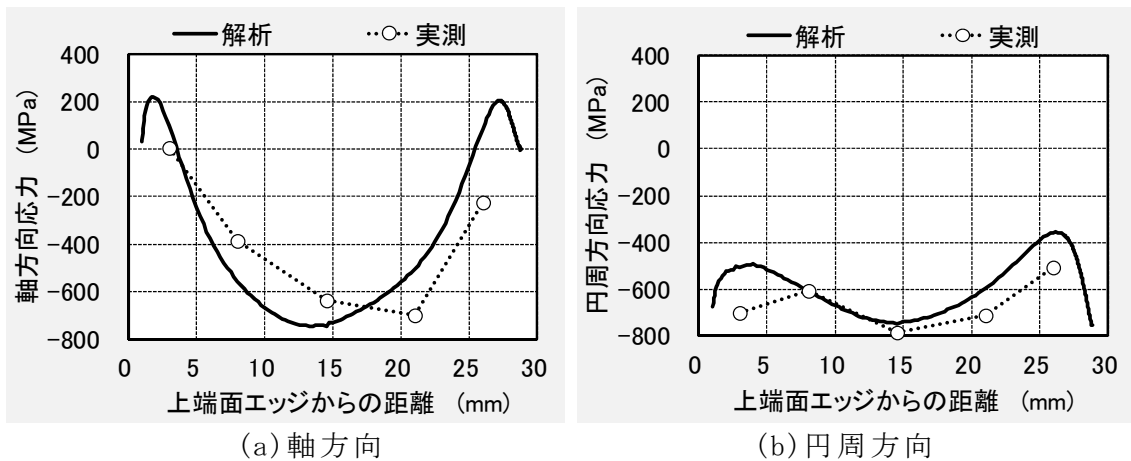


図 5-10 残留応力分布

図 5-11 に、焼入後の試験片における直径変化量および長さ変化量を示す。図 5-11 (a) より、試験片は全体的に半径方向に膨張しており、リング溝部近傍にて最大の膨張量が見られた。試験結果とシミュレーション結果では上端部近傍の変形傾向に相違が見られるものの、全体的には良い一致が見られた。図 5-11 (b) の焼入後の長さは、試験結果とシミュレーション結果のいずれも軸方向に膨張しているが、シミュレーション結果の方が絶対値が大きくなった。

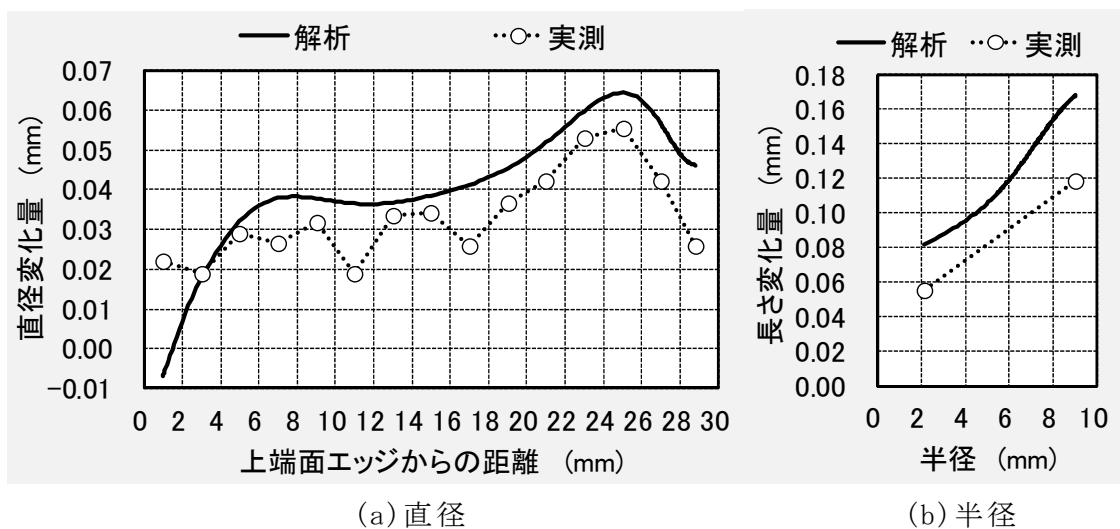
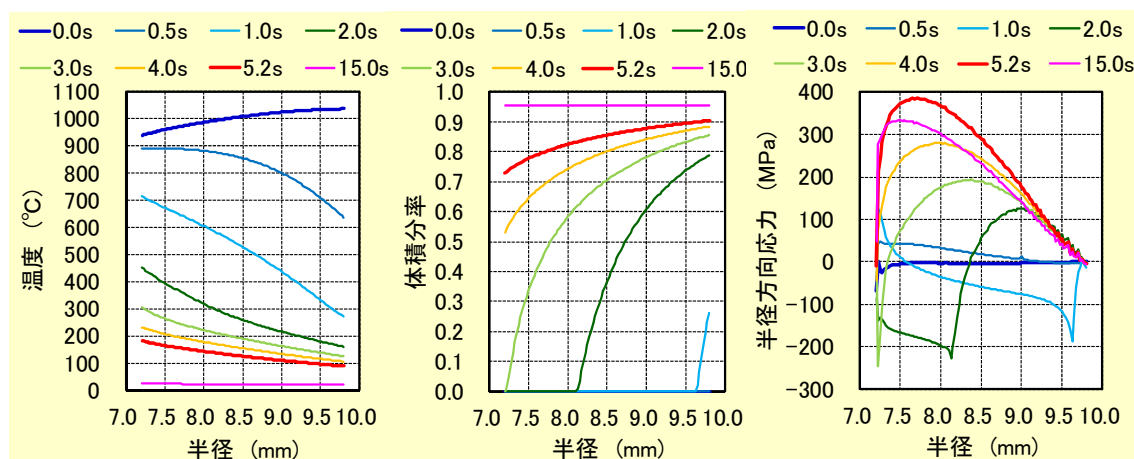


図 5-11 焼入変形量

5. 5 焼割発生位置近傍のシミュレーション結果

図 5-12 に、焼割れが発生したリング溝側面における冷却開始からの温度、マルテンサイト体積分率、半径方向応力との時間変化を示す。

外表面側からの温度低下に伴い、マルテンサイト変態は外表面側から順次開始される。これに伴い、マルテンサイト変態が開始された領域から引張応力に順次変化する。図 5-12(c) より、冷却開始 5.2s 後に半径 7.7 mm 位置 (リング溝底から 0.7 mm 位置) において最大の引張応力+393 MPa が発生する。この位置は図 5-3 で示した割れ発生位置とほぼ合致することから、この半径方向の最大引張応力が円周状の焼割れを誘発したと考えられる。



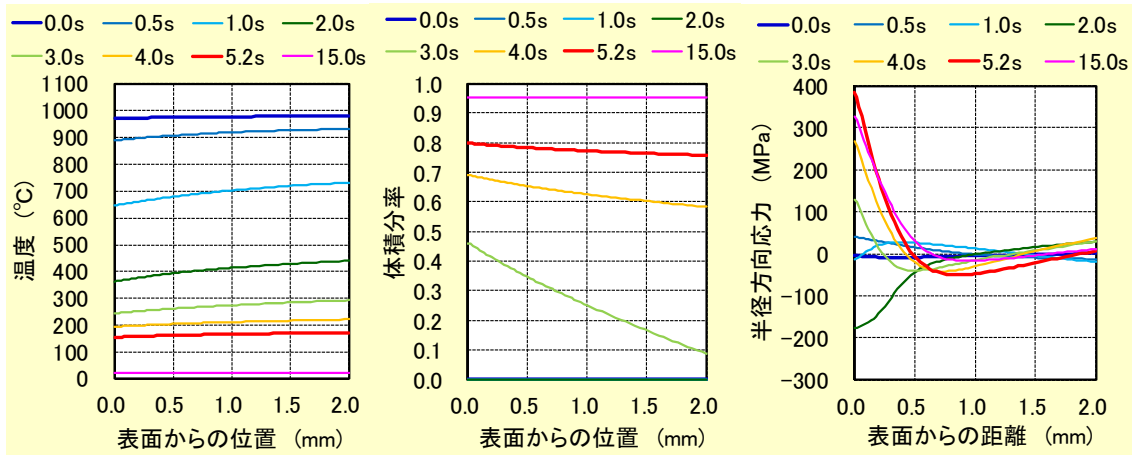
(a) 温度 (b) マルテンサイト体積分率 (c) 半径方向応力

図 5-12 リング溝上側面のシミュレーション結果

図 5-13 に、リング溝側面の半径 7.7mm 位置から軸方向に深さ 2.0mm までの温度とマルテンサイト体積分率、半径方向応力との時間変化を示す。

図 5-13(b) より、内部は表面に比べてマルテンサイト変態開始は遅れている。リング溝側面からマルテンサイト変態が開始されると、リング溝側面は圧縮応力から引張応力に変化する。マルテンサイト体積分率の増加に伴い引張応力は増加し、冷却開始 5.2s 後において最大の引張応力+393 MPa が

発生する。また、リング溝側面に近い領域ほど応力の時間変化量は大きい、深さ 1.0mm 以上の領域では大きな変化は見られない。



(a) 温度 (b) マルテンサイト体積分率 (c) 半径方向応力

図 5-13 リング溝上側面の半径 7.7mm 位置から深さ 2.0mm のシミュレーション結果

5. 6 焼割れの発生メカニズム

熱処理シミュレーションでは、熱処理中の部品内部に発生する微視的変形をひずみという巨視的な連続量として取り扱う。高周波焼入れでは、時刻 t における固体内部の微小領域において、式 5.1 に示すひずみの平衡式が成立する。

$${}^t\varepsilon_{ij} = {}^t\varepsilon_{ij}^E + {}^t\varepsilon_{ij}^{TH} + {}^t\varepsilon_{ij}^{TR} + {}^t\varepsilon_{ij}^P + {}^t\varepsilon_{ij}^{TP} \quad (5.1)$$

すなわち、固体の変形に直接寄与する全ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}$ は、同じ時刻での ${}^t\varepsilon_{ij}^E$: 弾性ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$: 熱ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$: 変態ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^P$: 塑性ひずみおよび ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$: 変態塑性ひずみを加算することで求められる。これらの各種ひずみは、基本的に加熱と冷却中の温度変化と相変態によって生じるものである⁽¹²⁾。

試験結果と良い一致が見られたシミュレーション結果から、冷却過程における応力および各種ひずみ分布の時間変化を分析することによって⁽¹³⁾、リング溝付試験片の焼割発生メカニズムを解明する。また、応力と弾性ひずみの間には線形の関係が成立することから、焼割発生メカニズムを検討するために、シミュレーションから得られる弾性ひずみ分布の経緯を調査解析した。

図 5-14 には、リング溝側面における冷却中の半径方向ひずみの時間変化を示す。リング溝側面は端面であることから、半径方向への膨張・収縮に関しては形状による制限は少ない。図 5-14(a)より、冷却が開始されると外径表面側から温度の急激な低下が生じ、“熱+変態”ひずみは急減する。これにより外表面近傍は中心に向かって急激に収縮しようとするが、内部領域に変形が阻止され圧縮状態となり、負の塑性ひずみが発生する。一方、溝底部近傍では、リング溝形状により半径方向の収縮が阻害されるために大きな正の塑性ひずみが生じる。

冷却開始 1.0s 後から、外表面側よりマルテンサイト変態が開始されると、図 5-14(b)と(c)に示すように、負の塑性ひずみとほぼ同じ量の正の変態塑性ひずみが生じる。さらに冷却が進むと、外径表面側から“熱+変態”ひずみが回復し始めるのに伴い、正の弾性ひずみが発生するとともに、“熱+変態”ひずみは正の水平分布に近づき、これにより、弾性ひずみは全ての領域で正の値となる。

最大の引張応力が発生した冷却開始 5.2s 後では、図 5-14(e)に示すように、弾性ひずみは半径 7.5mm 位置を頂点とする緩やかな山状の分布となる。この分布の傾向は、最終的に冷却終了まで保たれるが、試験片内部の温度差の減少により全体的に絶対値が減少する。

以上の結果から、マルテンサイト変態と同時にリング溝側面には正の弾性ひずみが生じ、冷却が進むに伴い絶対値は増加することがわかった。つまり、半径方向の高い引張応力が発生した原因は、リング溝内部のマルテンサイト変態による体積膨張により、リング溝側面が半径方向に引き伸ばされたためだと推測できる。

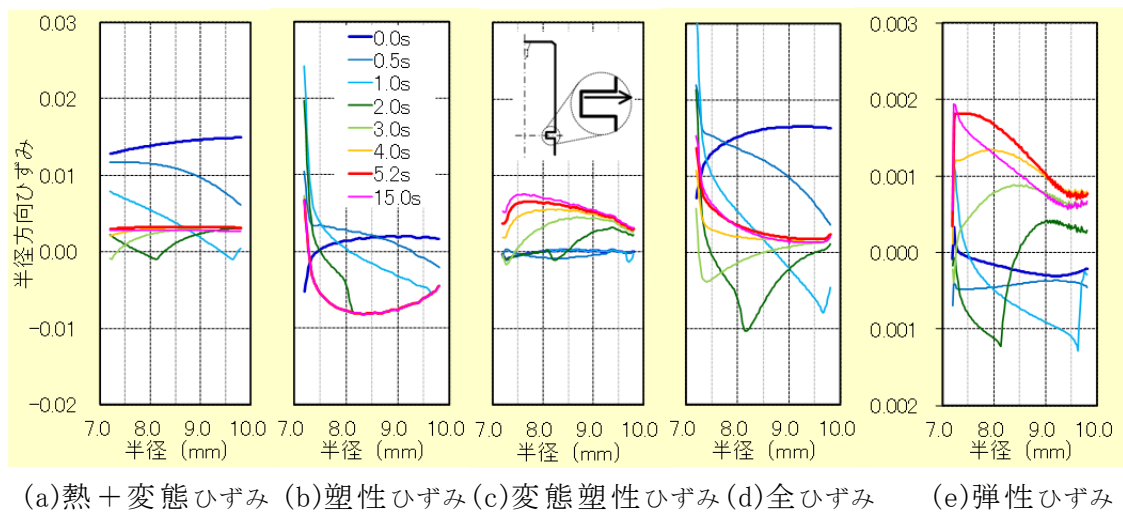


図 5-14 冷却中の半径方向ひずみの時間変化

5. 7 結言

リング溝付試験片の焼割試験に対して高周波焼入れシミュレーションを実施し、焼割発生と引張応力の集中との関係を明確にするとともに、シミュレーション結果を時系列で分析することで、焼割発生メカニズムの解明を行った。これにより、以下に示す知見が得られた。

- (1) 焼割れを助長するため円周状のリング溝を加工したリング溝付試験片を用いた焼割試験の結果、炭素量が最も高い S55C 材にて焼割れが発生した。焼割れの発生個所はリング溝底から約 0.8mm 位置のリング溝側面で円周状に発生していた。
- (2) 高周波焼入れシミュレーションの結果から、焼割れの発生位置にはマルテンサイト変態後に高い引張応力が生じており、焼割発生には引張応力の集中が寄与していることが確認された。
- (3) 本研究で示されたシミュレーション手法によって、焼割れの発生メカニズムと発生時期を把握出来ることが可能である。また、焼割れの防止策の検討に、本手法の活用は有効である。
- (4) 今後は、様々な部品形状や鋼種、焼入方法に対して焼割試験と熱処理シミュレーションを実施し、焼割発生メカニズムの解明および定量的な評価法の確立が必要である。

第 5 章の参考文献

- (1) Arimoto, K., Li, G., Arvind, A. and Wu, W.: The Modeling of Heat Treating Process, Proc. 18th Heat Treating Conference, ASM International, p. 22-30, (1998)
- (2) Arimoto, K., Lee, K. and Lambert, D.: Wu, W.: Prediction of Quench Cracking by Computer Simulation, 19th Heat Treating Conference, ASM International, p. 435-440, (1999)
- (3) Arimoto, K., Ikuta, F., Horino, T., Tamura, S., Narazaki, M. and Mikita, Y.: 14th Congress of IFHTSE, Shanghai, China, 486, (2004)
- (4) 内田富士夫, 後藤正治, 進藤亮悦, 永田新: 熱処理シミュレーションを活用した低合金鋳鋼材の焼割れ発生の解析, 鋳造工学, 第 77 巻, 第 7 号, p. 437-444, (2005)
- (5) Ishikawa, N., Shiragami T. and Shiroto H.: Study of Quenching Cracks due to Induction Hardening, 39th Heat Treatment Conference, Japan Society Heat Treatment, p. 73-74, (1994) (in Japanese)
- (6) Inoue, T., Inoue H., Ikuta F. and Hroino T.: Simulation of Dual Frequency Induction Hardening Process of a Gear Wheel, 3th International Conference on Quenching and Control of Distortion, ASM Heat Treating Society, p. 243-250, (1999)
- (7) Johnson, W. A. and Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. Trans. AIME, Vol 135, 1939, p. 416-458, (1939)
- (8) Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. I, II, III. J. Chem. Phys., Vol 7, p. 1103-1112, (1939), Vol 8, p. 212-224, (1940), Vol 9, p. 177-184, (1941)
- (9) Kolmogorov, A. N.: Statistical Theory of Crystallization of Metals. Izvestia Akademii Naul SSSR, Vol.1, p. 355-359, (1937) (in Russian)

- (10) Koistinen, D. P. and Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, *Acta Met.*, Vol 7, p. 59-60, (1959)
- (11) Denis, S., Gautier E., Simon A. and Beck, G.: Stress-Phase-Transformations -Basic Principles, Modelling, and Calculation of Internal Stresses, *Mats. Sci. Tech.*, Vol 1, p. 805-814, (1985)
- (12) Arimoto, K., Horino, T., Ikuta, F., Jin, C., Tamura S. and Narazaki, M.: Explanation of the Origin of Distortion and Residual Stress in Water Quenched Cylinders Using Computer Simulation. *Journal of ASTM International*, Vol. 3, Paper ID: JAI14204, (2006)
- (13) Horino, T., Ikuta, F., Arimoto, K., Jin, C. and Tamura, S.: Explanation on Origin of Distortion in Induction Hardened Ring Specimens by Computer Simulation, 1th International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, p. 203-212, (2005)

第 6 章

総 括

第 6 章 総括

6. 1 総括

高周波焼入れは、急速加熱で制御性が高い誘導加熱 (IH: Induction Heating) と、強冷却にもかかわらず均一で再現性が高い噴射冷却を使用することで、浸炭焼入れなどの他の表面硬化熱処理に比べて熱処理変形量が少なく、高い圧縮残留応力の付与が可能である。このことから、耐磨耗性や耐疲労特性、強靱性の向上を目的として、自動車部品や建設・工作機械部品などに数多く適用されている。

高周波焼入れ時に生じる熱処理変形は、製品の最終品質や性能、後工程の高精度化加工コストに大きな影響を与えるが、近年では部品形状の複雑化や薄肉化、軽量化などが進み、更なる高強度化と低変形化が求められている。熱処理変形を低減させるためには、熱処理変形の予測と熱処理条件の最適化が必要となるが、熱処理変形に影響をおよぼす要素は数多く存在し、その発生メカニズムは複雑である。一方、近年の数値解析技術とコンピュータ処理性能の著しい進化により、熱処理シミュレーションは大きく進歩発展し、熱処理変形が予測可能となりつつあるが、いまだ研究開発途上である。

本研究では、高周波焼入れにおいて高精度に熱処理変形および残留応力を予測することを目的として、まず高周波焼入れシミュレーションに関する数値解析の高精度化について検討し、加熱過程および冷却過程での高精度解析手法を確立した。次にシミュレーション結果を時系列で分析する手法により、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムが解明可能であることを明らかにした。また、本手法を使用することで、熱処理変形の低減や焼割れの予測に活用可能であることも示した。

これらの研究から得られた結論は、本論文にて各章ごとに次のようにまとめられている。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景と高周波焼入れの特徴、過去の熱処理シミュレーションに関する研究を述べた後に、本研究の目的について記述した。

第 2 章「高周波焼入れの数値解析法」では、高周波焼入れシミュレーションに必要な数値解析手法として、有限要素法による磁場解析並びに熱伝導、相変態、弾塑性から構成される熱処理解析の手法、磁場と熱処理の連成解析による高周波焼入れシミュレーション・システムの構成について説明した後に、シミュレーション実施に必要な材料物性データについて述べた。次に実際の活用事例として、加熱コイルの設計手法や金属組織、熱処理変形、残留応力などの熱処理品質の予測事例について説明し、熱処理設備および熱処理条件の検討が可能であることを示した。

第 3 章「高周波焼入れシミュレーションの高精度化」では、高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、加熱過程および冷却過程の高精度化手法について検討した。加熱過程では、温度依存性を有する B-H 曲線を使用した磁場解析により、部品表面の磁気飽和を考慮した高周波加熱シミュレーションが可能となり、昇温カーブや加熱終了時の加熱温度が試験結果に近づくことを実証した。これと関連して、800℃まで測定可能な高温磁気特性測定手法を開発することにより、常温から 750℃までの S45C 材 B-H 曲線を明らかにした。また、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施すれば、大型部品の温度分布を高精度に予測できる

ことを明らかにした。一方、冷却過程では、高周波焼入れシミュレーションの熱処理変形と残留応力の予測精度に大きく影響を及ぼす熱伝達率を、最適化支援ソフトを活用した逆解析法により冷却曲線から自動的に算出できることを明らかにした。

第 4 章「焼入変形と残留応力の予測」では、高周波焼入れシミュレーション結果から得られた応力や各種ひずみ量を時系列で分析することで、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムが解明可能であるかどうか検討した。まず、シミュレーション結果から得られた熱と変態、弾性、塑性、変態塑性の各種ひずみ量と、これからの総和で熱処理変形に直接寄与する全ひずみ量の時間変化を分析することで熱処理の変形メカニズムを明らかにし、部品形状に対して硬化層深さが浅い場合には、加熱冷却によって部品表面に発生する塑性ひずみの変形量に影響を及ぼしていることを明らかにした。この変形発生メカニズムの分析手法は、熱処理変形への各種ひずみの寄与の程度を明確にできるため、熱処理変形の低減に活用できることを示した。短時間加熱で急速冷却である高周波焼入れは、塑性ひずみや変態塑性ひずみが加熱部近傍のみに発生することを明らかにし、特に移動焼入れは局所加熱であるため加熱領域と冷却領域の境界近傍に正の塑性ひずみが発生することから、定置一発焼入れとは異なる残留応力分布になることを、過去に実施された磯村試験と比較することによって確認した。また、丸棒の高周波移動焼入れにて実測結果と一致するシミュレーション結果を得るためには、熱伝達率を噴流領域と層流領域に分け、噴射水の跳ね返りを考慮した冷却境界条件を使用する必要があることを実証した。

第 5 章「焼割れの予測」では、焼割現象に対して高周波焼入れシミュレーションを実施し、焼割発生と引張応力の集中との関係を明確にするとともに、焼割発生メカニズムの検討を行った。まず、焼割れを助長するため円周状のリング溝を加工したリング溝付試験片による焼割試験を対象に高周波焼入れシミュレーションを実施し、シミュレーション結果から得られる温度や応力、各種ひずみ量を時系列的に解析した。その結果、焼割れの発生位置ではマルテンサイト変態後に高い引張応力が生じており、焼割発生には部品内部のマルテンサイト変態による体積膨張が部品表面の引張応力の集中に関与していることを確認した。また、本研究で示されたシミュレーション手法によって、焼割れの発生時期と発生メカニズムを把握出来るため、焼割回避策の検討が可能なことを示した。

以上より、本研究の成果である高周波焼入れシミュレーション手法を用いて、高周波焼入時の加熱温度や組織分布、熱処理変形および残留応力を高精度に予測することを可能にした。また、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムを解明することで、高周波焼入れでの熱処理変形をより一層低減させることが可能になると思われる。また、熱処理変形の低減だけでなく、熱処理品質の向上や熱処理の新技术開発、不具合の事前回避などにも活用出来ると考える。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導とご鞭撻を賜りました茨城大学 大学院理工学研究科 友田陽教授に心より感謝の意を表します。

また、本論文への数々の有益なご指導、ご助言を頂いた同大学 大田弘道教授、鈴木徹也教授、佐藤成男教授、西野創一郎准教授に謹んで謝意を表します。

本研究のご指導と本論文の作成にあたり、貴重かつ多大なご助言と、励ましの言葉を頂きました高周波熱錬株式会社 専務取締役 川寄一博 博士には、甚大なる謝意を表します。

1994年の入社以来、現在に至るまでご指導、ご助言を頂き、また本論文の作成にも多大なご指導を頂きました高周波熱錬株式会社 研究開発センター 生田文昭 氏には厚く感謝の意を表します。

本研究は、高周波熱錬株式会社 研究開発センター 三阪佳孝 博士、井上宏樹 博士、福田恭平 氏、櫻井健太 氏をはじめとする研究開発センター各位のご協力のもとで遂行できたものである。この場をお借りして、厚く感謝申し上げます。

また本研究は、上記以外の方々の他にも多数の方々のご協力を頂き実施できたものである。ご協力頂いた皆様には、厚くお礼を申し上げます。

最後に、いつも温かく見守ってくれた両親と、本研究の遂行と本論文のまとめを実施するにあたり、いつも明るく応援をしてくれた妻 桂子、いつも元気を分けてくれた息子 裕翔に心から感謝します。

2015年3月 堀野 孝

著者の発表論文

公刊論文(掲載決定)

- ・題名：高周波移動焼入れシミュレーションによる水噴射冷却状況の検討
- ・著者：堀野 孝、生田文昭、三阪佳孝、川寄一博、友田 陽
- ・掲載誌：日本熱処理技術協会 学術誌「熱処理」

2014年12月19日掲載決定(55巻(2015)、4月に掲載)

口頭発表など(2011年以降)

- (1) 「高周波移動焼入れシミュレーションによる変形・応力発生メカニズムの検討」
 - ・2011年5月発表
 - ・(一社)日本熱処理技術協会 第71回講演大会 (東京工業大学)
 - ・井上宏樹、堀野 孝、生田文昭、川寄一博
- (2) 「Explanation by Computer Simulation about Quenching Crack Generation in Induction Hardening Process of Cylindrical Specimens with a Ring Groove」
 - ・2011年9月発表
 - ・3rd International Conference on Distortion Engineering 2011
(Bremen, Germany)
 - ・Takashi Horino, Hiroki Inoue, Fumiaki Ikuta, Kazuhiro Kawasaki
- (3) 「大型リング部品の加熱変形を考慮した高周波加熱シミュレーション」
 - ・2013年12月発表
 - ・JMAG ユーザ会 2013 (東京)
 - ・堀野 孝

(4) 「Computer Simulation of Induction Hardening Incorporating Thermal Deformation of Large Ring Metal Parts」

•2014年5月発表

•21rd IFHTSE Congress (Munich, Germany)

•Takashi Horino, Fumiaki Ikuta, Yoshitaka Misaka, Kazuhiro Kawasaki,
Hiroshi Hashimoto

(5) 「加熱変形を考慮した大型リング部品の高周波焼入れシミュレーション」

•2014年5月発表

•MSC Software User Conference 2014 (東京)

•堀野 孝