

研究成果報告書

研 究 題 目		鋼板の熱処理により変化する磁気応答特性の解明 と非破壊検査への応用	実 施 年 度
			平成 28 年度
代 表 研 究 者	所 属	岡山大学大学院自然科学研究科	
	氏 名	堺 健 司	印

1. 研究の目的・背景

鋼板の硬度は鋼板の特性を決める重要なパラメータの 1 つであり，使用目的に合わせて鋼板の硬度を制御する必要がある。硬度は一般的に熱処理により制御することが可能であり，鋼板の使用目的に合わせて熱処理条件を細かく制御して，所望の硬度を持つ鋼板の作製が一般的に行われている。これは鋼板の特性が熱処理により変化するためであり，これまでに熱処理後の鋼板の組織と硬さとの相関性が明らかにされている。しかし，熱処理が正しく行われ所望の硬度が実現できているかを検査するには，鋼板内部の組織観察や硬度測定が一般的であり，測定時間や労力を要する。また，これらの検査法は破壊検査であるため，全数検査を行うことが困難である。近年は自動車分野における高機能鋼板の要求が高まり，1 枚の鋼板内に硬度の異なる部分を作製する新規の熱処理技術も開発されている。このような鋼板では，硬度が異なる領域の位置を評価することも必要であり，多数の点で迅速に硬度を評価する手法が求められている。

本研究では，熱処理により変化する鋼板の磁気特性に着目し，磁気的非破壊検査法により鋼板の硬度の違いを評価することを試みた。磁気検査法は，非破壊・非接触で測定を行うことが可能で測定時間も短い特徴がある。このような特徴を活かすことで熱処理を行った鋼板の全数検査や多点計測によるマッピングが可能となり，製品の信頼性向上や硬度が異なる部分の位置評価が期待できる。このような磁気を用いた熱処理鋼板の非破壊検査を実現するには，熱処理条件を変えた場合に磁気応答がどのように変化するか，また磁気応答の変化と鋼板の硬度や組織，電磁気特性との相関性を調べる必要がある。そこで，これらのことを明らかにすることを目的とし，以下の 3 点について研究を行った。

- ① 鋼板の組織が変化し硬度が変化する 700℃～1000℃の範囲で熱処理を行った試料を準備し，鋼板の熱処理温度変化に対する磁気応答変化を調べる。
- ② 熱処理条件が異なる領域の硬度，透磁率，導電率を測定し，熱処理により変化するこれらの値と磁気応答の変化との相関性を明らかにする。
- ③ 1 枚の鋼板内に硬度が異なる部分を作製した鋼板を使用し，各領域や境界部における磁気応答がどのように変化するかを明らかにする。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

鋼板の熱処理温度による磁気応答の変化を調べるため、鋼板を 700, 800, 900, 940, 1000℃ で熱処理した鋼板を準備した。測定には磁気的非破壊検査法の 1 種である渦電流探傷法を用い、交流磁場を印加した際に試料から発生する磁場の強度と位相の変化を測定した。印加磁場の周波数は 10 Hz～5 kHz とした。熱処理温度が 940℃ を超えると磁場強度は減少、位相は増加し、周波数が低い場合は磁場強度の変化量が大きく、周波数が高くなると位相の変化量が大きくなることが分かった。一般的に 940℃ 以上で熱処理し急冷することで、鋼板内の組織が変化し硬度が高くなることが知られており、940℃ 以上の熱処理で磁気応答が変化した結果と対応している。

そこで、磁気応答に違いが見られた 700℃ と 940℃ で熱処理した鋼板の組織観察と透磁率および導電率を測定した。組織観察の結果、700℃ の鋼板はパーライトとフェライト、940℃ の鋼板はマルテンサイトとフェライトであり、それぞれの組織が異なっていることが確認できた。磁気特性の違いは、各熱処理温度で作製した鋼板の $B-H$ 特性を測定することで調べた（図 1）。図 1 より、700℃ と 940℃ で熱処理した鋼板の磁気特性が大きく異なっていることが分かり、熱処理温度が高くなると $B-H$ 特性の傾きである透磁率が低くなることも分かる。また導電率の測定値は、700℃ の熱処理鋼板で 4.30×10^{-6} [S/m]、940℃ の熱処理鋼板で 3.91×10^{-6} [S/m] となった。以上の結果より、熱処理温度の違いにより変化する鋼板の組織に対応して、鋼板の電磁気特性が変化することが明らかになり、この電磁気特性の違いにより渦電流探傷法における磁気応答の変化が見られたと考えられる。

次に自動車部品で使用する鋼板の検査へ適用可能であるかを検討するため、1 枚の鋼板内に硬度が異なる領域を作製した鋼板を作製し、その磁気応答を測定した。この鋼板は図 2 に示すように、中心部を 700℃、その両側を 940℃ で熱処理しそれぞれの領域で鋼板の硬度が異なるように作製している。この熱処理条件で作製した鋼板について、図 2 に示した鋼板中央部とその上下 10 mm 離れた 3 つのライン上でビッカース硬度を測定した。その結果、図 3 に示すようにどのライン上でも高温の焼入れ部では硬度が高く、低温の焼入れ部では硬度が低いことが分かった。この結果より、熱処理条件の違いにより各領域で組織が変化し、異なる硬度を持つ領域ができていることを確認した。

この鋼板を用いて、渦電流探傷法による磁場応答を図 2 に示した 3 つのライン上で行った。各ラインでの測定間隔は 10 mm、印加磁場の周波数は、透磁率、導電率の測定結果より印加磁場が表皮効果の影響を受けず鋼板内に十分に侵入できる 100 Hz とした。

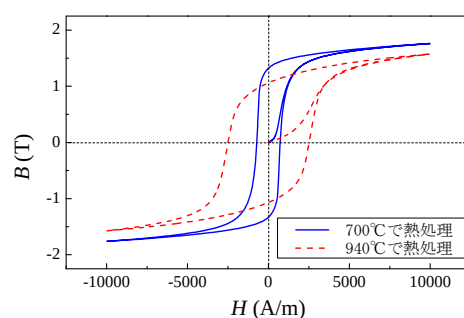


図 1 700℃ と 940℃ で熱処理した鋼板の $B-H$ 特性

図4に各ラインの磁場強度と位相の測定結果を示す。磁場強度、位相ともに中央部の700℃で熱処理した部分で変化が見られることが分かった。この変化は初めに述べた鋼板の熱処理温度と磁場応答の関係と一致しており、各領域の電磁気特性の違いにより硬度の違いを磁気的非破壊検査法により判別できる可能性が示された。しかし、図4(a)より、測定位置の値が大きくなると、磁場強度の値が大きくなる現象も見られた。この原因を考察した結果、鋼板の反りにより磁場検出の磁気センサと鋼板との距離が変化し、磁場応答に影響を与えていることが分かった。図4(b)の位相でも測定位置200 mm以上で位相の値が大きくなっていることは確認できるが、強度の変化よりも顕著ではない。磁気センサと測定試料の距離変動による磁場の位相変化は磁場強度よりも小さくなることは明らかにされており、鋼板の反りなどが見られる実際の製品検査では、磁気センサを接触させて試料との距離変動をなくす、もしくは磁気センサと試料との接触が困難な場合は、磁場の位相を用いて評価することが適切であることも分かった。

以上は、申請時に目的とした3点についてそれぞれについて実験を行い得られた結果であり、申請時の計画を概ね達成したが、測定位置のバラつきなどの評価は未達成であった。従って、申請時の計画に対する達成度合いは90%程度である。

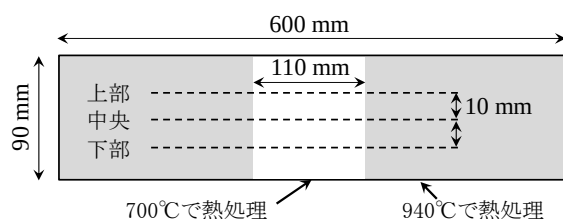


図2 作製した鋼板と測定位置

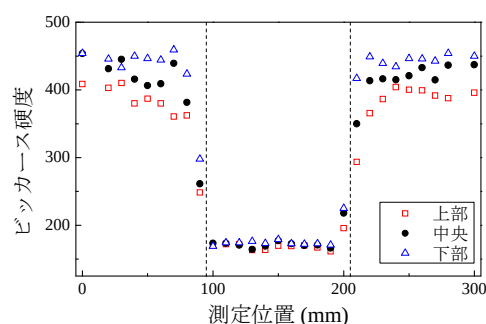
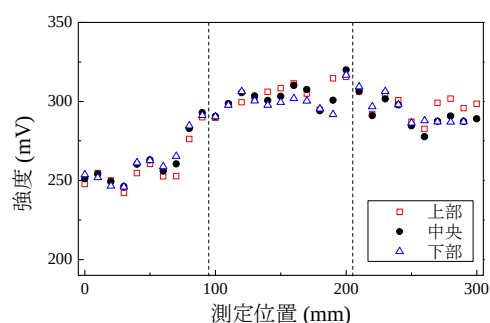
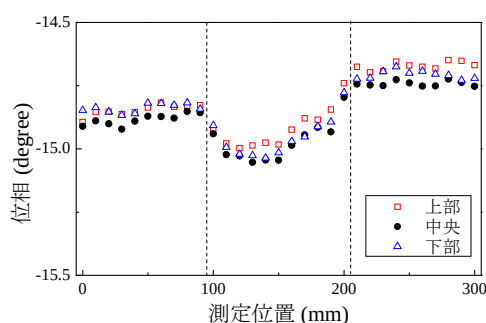


図3 作製した鋼板の硬度



(a) 磁場強度



(b) 位相

図4 渦電流探傷法で測定した鋼板の(a)磁場強度と(b)位相

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

研究を進める過程で、申請時には計画していなかった磁場を計測する自動ステージの改良とデータの取得・解析装置が必要となった。一方、申請時には磁場印加用のバイポーラ電源を購入予定であったが、バイポーラ電源は既存の装置で代用することができ、自動ステージの改良やデータ取得・解析装置の方が、研究を遂行する上での必要性が高くなった。従って、バイポーラ電源の購入を取りやめ、この費用を自動ステージの改良、データ取得・解析装置購入に使用した。

実験に必要な消耗品に大きな変更はなく、ほぼ計画通りに使用した。具体的には、実験に必要な鋼板や測定装置作製のための磁気センサ、電子部品、測定試料を分析するための試料の加工費などに使用した。

旅費として研究成果発表のために2件の出張を計画していたが、日本非破壊検査協会、電気学会が主催する計3件の国内学会に参加し成果発表、情報収集を行い、計画時より1件多くなった。また、情報収集のためセミナーにも参加した。従って、旅費は計画時よりも増額となったが、試料分析のための機器使用料が計画よりも少なかったため、この分を旅費に充てた。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、鋼板の熱処理による組織変化が電磁気特性の変化をもたらすことを明らかにし、鋼板組織と相関性のある硬度を磁気的非破壊検査法で検出できることを示した、また、自動車部品に応用が見込まれている1枚の鋼板内に作製した硬度の異なる領域を、磁気的非破壊検査法により判別できる可能性も示された。

しかし、各領域の磁気応答にバラつきが存在することも明らかになり、非破壊検査法として実用化するには、これらの要因をより詳細に検討する必要がある。また、各領域を判別する際の位置精度など実際の製品検査に要求される項目も検討が必要である。

これらの課題をクリアすることで、鋼板の熱処理状態や硬度を非破壊で判別する装置の開発へ発展させ、現在求められている自動車部品の検査へ応用することが期待できる。今回の研究では自動車部品の測定を対象としたが、高温下で使用する鋼板の組織変化による鋼板の劣化状況判別などへも本研究の成果を適用できることが見込まれ、新たな非破壊検査技術の実用化も見込まれる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

1. 堺健司, 伊藤嵩展, 紀和利彦, 塚田啓二, 「焼入れによる鋼板の材料特性変化と磁気的非破壊検査法による部分非焼入れ部の判別」, 日本非破壊検査協会 平成 28 年度秋季講演大会, 2016, 10. 6, 仙台市, 口頭発表
2. 堺健司, 伊藤嵩展, 紀和利彦, 塚田啓二, 「低周波磁場を用いた酸化膜付き鋼板の焼入れ状態評価」, 日本非破壊検査協会 第 20 回表面探傷シンポジウム, 2017. 3. 8, 岡山市, 口頭発表
3. Kenji Sakai, Takahiro Ito, Toshihiko Kiwa and Keiji Tsukada, “Evaluation of Hardened and Non-hardened Region Using Eddy Current Testing”, ENDE 2017, 2017.9.6-8, accepted