

超音波による磁気イメージングを利用した残留応力評価法の開発

東京農工大学 大学院 工学研究院 准教授 生嶋健司

1. はじめに

超音波計測は工業製品・インフラ構造物の非破壊検査として広く利用されている。その重要な利点のひとつは、光にとって不透明な金属やコンクリートに対して超音波は比較的内部への透過性が高いことである。また、音速と光速の大きな違いに起因して、音波は電磁波に比べて同一周波数で波長が約 5 桁短い。これは、実時間波形の取得が容易な MHz 周波数帯においてサブミリメータスケールの空間分解能が可能であることを意味する。しかしながら、超音波のこれらの利点にもかかわらず、その多くの利用は対象物の質量密度分布や弾性率などの力学物性の計測に限られている——すなわち、電気的、或いは磁気的な性質をプローブしない。そこで研究者らは、超音波による電気・磁気物性の可視化技術を提案し、鉄鋼検査への応用可能性を示してきた[1-4]。

弾性変調は、逆磁歪効果を通して、対象物の磁気分極に時間変調を加えることができる。このことは、超音波照射により、超音波に同期した電磁波（音響誘起電磁応答：ASEM 応答）が発生し得ることを意味する（図 1）。特に、サンプル周辺では、磁気双極子放射の近接場成分である交流双極子場が発生する。共振ループアンテナを通してこの双極子場を検出することにより、超音波を通して局所的な磁気情報を取得できる。言い換えると、超音波集束ビームは、その焦点領域において平均化された磁気分極 ($\bar{m}(t)$) に時間変調を加え、双極子場の形で外部に磁気情報を発信させる役割を担う。励起箇所は超音波照射スポットサイズに限定されるため、たとえば周波数 10 MHz の場合、波長 30 m の電波計測でありながら、空間分解能は電波に比べて波長が約 5 桁短い音波の波長（150 μm in water）で決まる。画像化は超音波スキャンニングにより可能であるから、比較的高い空間分解能をもつ新しい磁気計測手法になりうる。さらに、超音波を利用するため、被膜やコンクリートで覆われた鋼材に対しても適用可能である。これまで研究者らは、一般鋼、電磁鋼板、ステンレス鋼、およびフェライトを試料として、超音波による磁気イメージング[2]（図 2 左）、磁気トモグラフィ[2]、および磁気ヒステリシス測定（図 2 中央）[3]を実証してきた。また、周

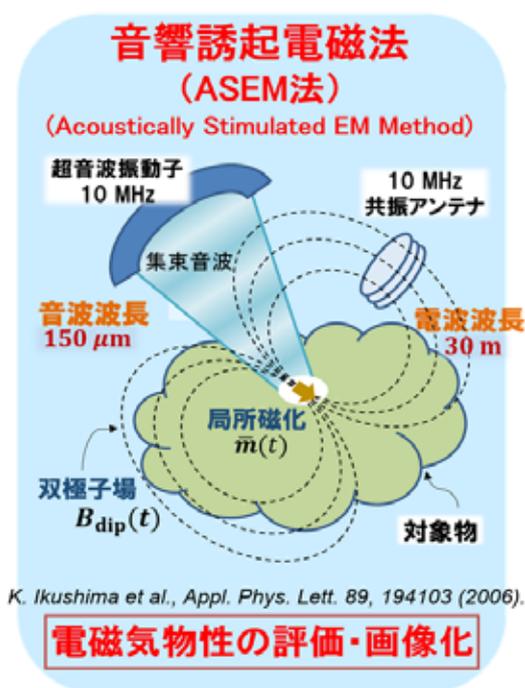


図 1 計測概念図

波数を 200 kHz まで下げると、かぶり 50mm のコンクリート内鉄筋でさえも磁気測定が可能である[4]。さらに最近では、位相検波により磁気機械特性（圧磁係数）の実部と虚部の分離を行い、静的なヒステリシス損失と高周波磁気損失を独立に評価することが可能となっている（図2右）[5]。

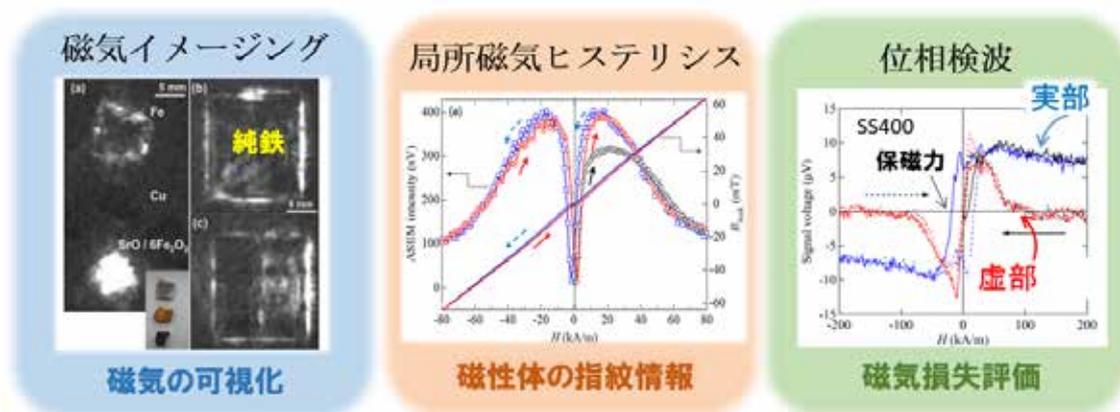


図2 超音波による磁気計測

そこで本研究の目的は、ASEM 法による磁気ヒステリシスの局所プローブの特徴を活かして、鋼材検査、特に残留応力を評価する手法を開発することである。磁気・磁歪物性は応力に敏感であることが知られているため、鋼材のヒステリシス曲線に含まれる各種パラメータ（保磁力、透磁率、ヒステリシス損など）と応力との相関データを蓄積することにより、残留応力を画像化する計測システムの実現が期待される。

近年の高品質・安全管理に対する意識の高まりにより、正確で簡便な残留応力測定は益々強く要望されている。現在、実用化されている主な残留応力測定法を表1に示す。X

表1 代表的な残留応力測定との比較

検査名	穿孔法	X線法	磁歪法	音弾性法	ASEM法
破壊／非破壊	一部破壊	非破壊	非破壊	非破壊	非破壊
測定される物理量	開放時の歪み	原子間距離	磁気歪み	音速	音響誘起電磁応答
画像化	×	×	×	×	○
手間・コスト	×	△	○	○	○
その他特徴	* 破壊試験 * 表面処理が必要	* 結晶粒が小さい鋼材に制限 * 表面処理が必要	* 応力への相関データ必要	* 応力への相関データ必要	* 応力への相関データ必要 * 被膜下やコンクリート内部の鋼材でも測定可能

線法は、鋼材の表面処理が必要、結晶粒径が大きな鋼材（典型的には 50 μm 以上）では信頼性が下がる、などの制約があり、被曝への配慮も必要である。一方、穿孔法は破壊試験という欠点をもつ。その他、磁歪法や音弾性法など、磁気や超音波による手法も開発されているが、残留応力を空間マッピングすることは困難である。ASEM 法は、被膜やコンクリートで覆われた鋼材に対しても局所的な磁気情報（正確には磁歪情報）をマッピングできるため、残留応力評価においても従来手法にはない大きなアドバンテージが期待される。

本研究では、引張試験により ASEM 法で得られる磁気ヒステリシス特性と応力との相関を調べ、残留応力評価に適した指標パラメータが見出された。

2. 実験方法

鉄鋼試験体（サイズ：490 mm × 70 mm × 6 mm）は 25mm 厚の炭素鋼板（S25C, JIS G4051:2009）からフライス加工により作製された。図 3 に測定セットアップを示す。試験体の圧延方向に引張応力を加え、電磁石によって印加される磁場方向もその引張応力に平行である。

パルス超音波はポリスチレン遅延材が備わった 4MHz 超音波振動子により発生された。ASEM 信号は、超音波周波数にチューニングされた共振ループアンテナ（コイル）によってピックアップされる。試験体を交流電流により消磁後、ヒステリシス曲線を取得した。図 3(b)に引張応力-ストローク曲線を示す。本鋼材の場合、降伏点は通常、250 – 300 MPa の範囲にある。

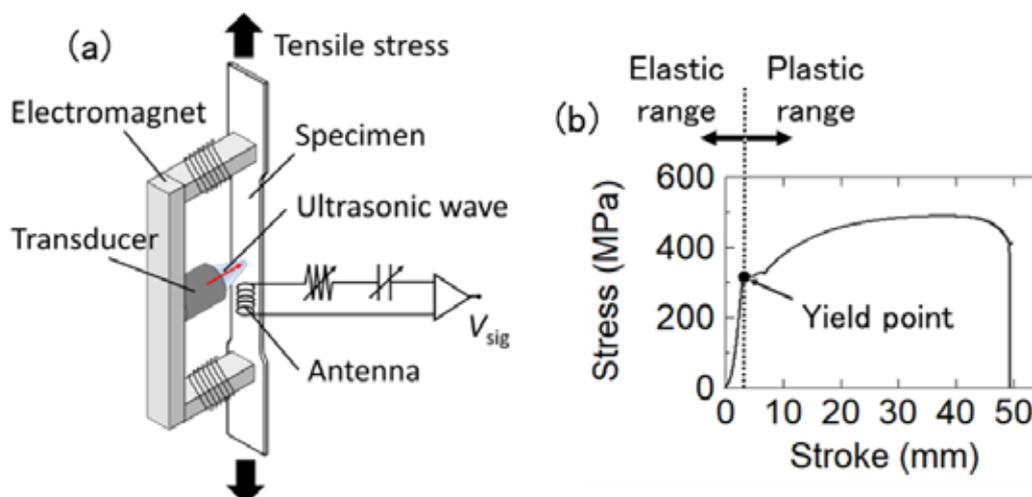


図 3 (a) 引張試験における ASEM 測定セットアップ (b) 試験に用いた鋼材 (S25C)の引張応力-ストローク曲線

3. 結果

図 4(a)に典型的な ASEM 波形を示す。試験体の表面からのエコー信号は $\tau_{\text{echo}} = 24.4 \mu\text{s}$ で観測され、ASEM 信号はエコー遅延時間の半分の時間で観測される ($\tau_{\text{echo}}/2 = 12.2 \mu\text{s}$)。ASEM 信号強度の典型的なヒステリシス曲線を図 4(b)に示す。ここで、ASEM 信号強度は、信号振幅の絶対値 $|V_{\text{sig}}(H, t)|$ を時刻 $t = \tau_{\text{echo}}/2$ から $t = \tau_{\text{echo}}/2 + \Delta\tau$ まで積分した値として定義されている ($\Delta\tau = 2 \mu\text{s}$)。線形応答の範囲内では、磁歪（逆磁歪）効果と圧磁効果は現象論的に等価であるため、この ASEM ヒステリシス曲線は、超音波照射スポット領域（直径 2mm 程度）の局所的な圧磁係数 $|d_{\text{loc}}(H)|$ のヒステリシス曲線とみなすことができる [3,5]。

図 4(b)に示すように、我々は初期カーブの傾きを m 、保磁力に対応する極小値を示す磁場の値を H_c 、残留磁化に起因する超音波変調信号（残留信号）を V_r と定義した。

図 5 に引張応力の下での ASEM ヒステリシス曲線の結果を示す。今回の引張試験における降伏点は 300 MPa 近傍であり、図 5(a)-(h)は弾性域、図 5(i)は塑性域におけるヒステリシス曲線である。これら結果から、保磁力 H_c および残留信号 V_r が引張応力の増加に伴い減少することが見出された。また、降伏点ではヒステリシス曲線が顕著に変化していることがわかる。

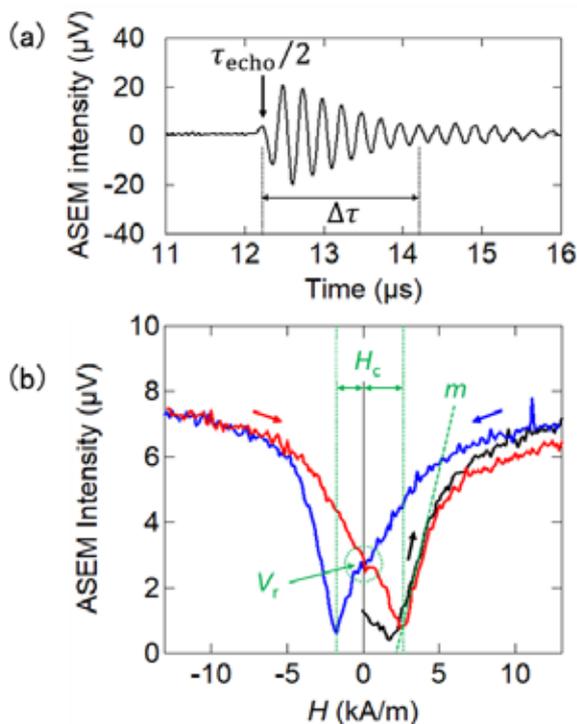


図 4 (a) 典型的な ASEM 波形 (b) ASEM ヒステリシス曲線（黒線、青線、赤線は、それぞれ初期磁化カーブ、磁場ダウン、アップの曲線を示す）

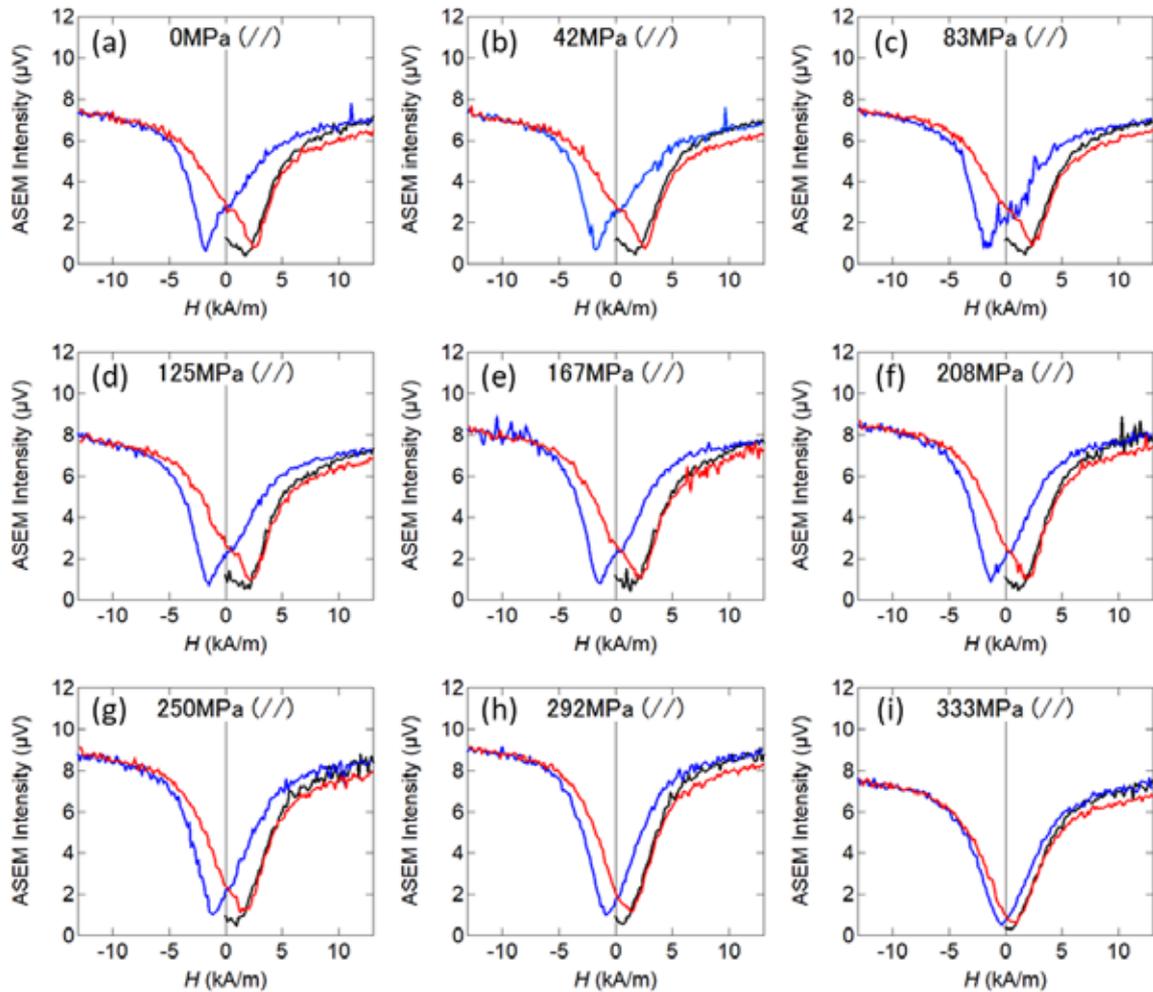


図5 弾性域(a)-(h)から塑性域(i)の各引張応力における ASEM ヒステリシス曲線

最も興味深い結果は、保磁力 H_c の引張応力依存性である (図 6)。残留応力評価のニーズにおいて重要な引張応力 150 MPa 以上において、保磁力 H_c が顕著に変化している。これは、保磁力が磁気-応力変換パラメータとしてよい指標であることを示唆している。一方、残留磁化による信号 (残留信号) V_r は、引張応力により顕著な依存性は示していないが、単調に減少しているため、降伏点近傍の高リスク状況をスクリーニングするため

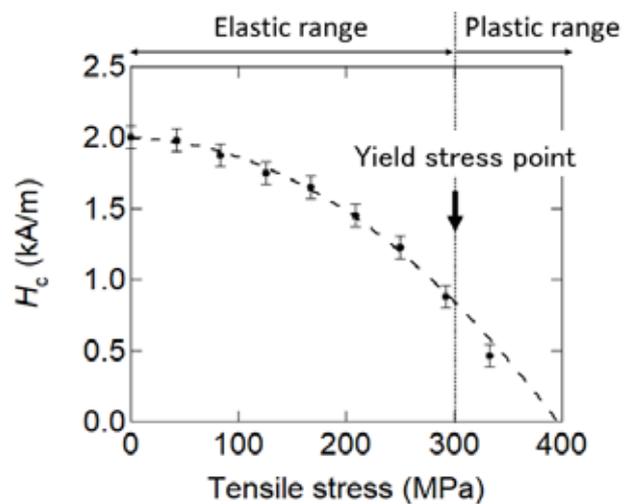


図6 保磁力 H_c の引張応力依存性 (点線は降伏点 (300 MPa) を表す。破線は2次曲線でフィッティングしたガイドラインである。)

の指標として使えるであろう (図 7(a))。残念ながら、初期カーブの傾き m は今回の実験では応力依存性が小さく、残留応力の評価指標として使うにはより精度の高い測定が必要であることがわかった (図 7(b))。

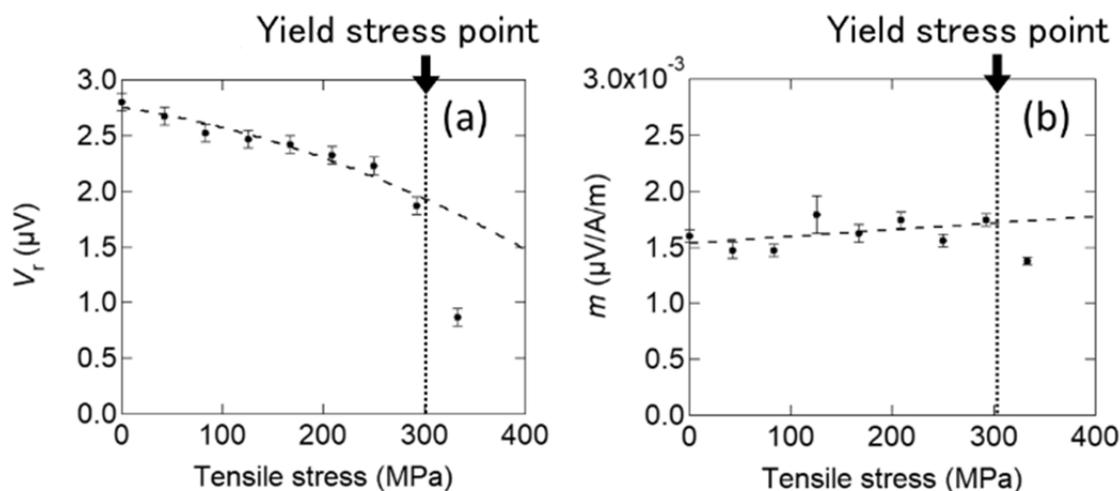


図 7 (a) 残留信号 V_r および (b) 初期磁化カーブの傾き m の引張応力依存性 (破線はガイドラインを示す。)

4. 議論

鉄鋼の磁気ヒステリシス曲線が応力に敏感であることは古くからよく知られている。Landau と Lifshitz の Gibbs free energy における議論に基づくと、交換エネルギー、静磁場エネルギー、磁気弾性エネルギー、磁気異方性エネルギーおよびゼーマンエネルギーが競合し、系の全エネルギーが最も低くなるように磁区が配列される。ここで、応力によって影響を受ける鉄鋼の磁気弾性エネルギーは磁化と引張応力が平行であるとき最小になる。したがって、応力が加わると、磁気弾性エネルギーが最小になるよう磁区構造は再配列され、 0° と 180° ドメインが拡張され、 90° と 270° ドメインが縮小される。引張応力により 180° ドメインが拡張した状態において、比較的低い磁場により巨視的磁化が反転する (すなわち、保磁力が減少する) ことは上記の観点から定性的に理解できる。

本研究を通して我々は局所的な磁気ヒステリシス曲線の各パラメータが明確な応力依存性を示すことを見出した。特に、保磁力は応力評価のパラメータとして最有力候補である。今回用いた 25mm 厚から切り出した S25C 試験体においては、複数のサンプルで同様の結果が再現されており、また、圧延方向に対して垂直に引張応力と磁場を印加しても保磁力はほぼ同じ圧力依存性を示すことが確認されている。

従来型の磁気測定では、保磁力近辺を含む全ヒステリシス特性を局所的に測定することは困難であった。たとえば、ホール素子により漏洩磁場を測定する方法では、飽和磁場よりずっと小さな保磁力近辺の評価が困難である。過電流による複素透磁率測定でも保磁力

の評価は困難である上に、微小なコイルでリフトオフを精度よく制御しなくては交流磁場のフォーカッシングは難しいだろう。超音波フォーカッシングを利用して磁気イメージングや磁気ヒステリシスを測定できる ASEM 法のアドバンテージは明確であろう。

残留応力検査の実施において我々が想定する検査プロセスを以下に述べる。

- ① 測定したい鉄鋼の広い領域に磁場を飽和磁場まで印加し、断熱的に磁場をゼロに戻す。
- ② 超音波スキャンニングにより、残留信号 V_r を空間マッピングしてスクリーニングする。
残留信号 V_r が小さい領域は残留応力が大きい可能性が高い。
- ③ 上記スクリーニングにより見出された要注意箇所超音波をフォーカッシングし、その場所での局所ヒステリシス曲線を測定し、保磁力を導出する。
- ④ 事前に当該鋼材に対して求めた変換係数（図 6 におけるフィッティング曲線の係数）を用いて保磁力から残留応力を見積もる。
- ⑤ より正確な残留応力の絶対値が必要な場合、同一部材の残留応力がないと考えられる箇所において保磁力を測定し、規格化する。

5. まとめ

我々は、ASEM 法を用いて、鉄鋼における局所的な磁気ヒステリシス特性の圧力依存性を測定した。その結果、保磁力および残留磁化に起因した信号（残留信号）が応力評価に対して適切な指標であることが見出された。この超音波励起による磁気ヒステリシス測定法は、残留応力の非破壊検査に対して新しい可能性を切り開くだろう。

最後に、実用化に向けて残された 3 つの課題について触れたい。第一の課題は、鋼材表面処理の問題である。超音波は鉄鋼内部まで到達するが、超音波によって誘起される電磁信号は電波の表皮深さ δ 程度の表面近傍の磁気情報が反映される。表皮深さ δ は、鉄鋼の電気抵抗率 ρ 、透磁率 μ 、および電波の角振動数 ω を用いて $\delta = \sqrt{2\rho/(\omega\mu)}$ と表される。鉄鋼の典型的な電気抵抗率 $\rho = 2 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ 、高周波における比透磁率を 100 とすると、4 MHz の周波数をもつ電波の表皮深さは高々 10 μm 程度である。鉄鋼表面に被膜やコンクリートなどの非金属・非磁性材料が存在していても、ASEM 法にとって大きな問題にならない。しかしながら、鉄鋼表面にマグネタイトを含む錆や黒皮等の磁性酸化膜が存在していると、その酸化膜の磁性が ASEM 応答に大きく影響する。この酸化膜を除去するために、たとえば紙やすり等で表面処理をすると、ASEM 磁気ヒステリシス曲線は図 4(b)のような明確な極小値を示さず、ブロードニングした異常なヒステリシス曲線が得られることが確かめられている。これは研磨処理により、表面に塑性変形した加工変質層が生じ、母材の特性が得られなくなることを示唆する。今回の試験体のようにフライスによる切削加工をした表面では理想的なヒステリシス曲線が得られたが、部品によっては切削加工以外の表面処理方法を模索する必要があるだろう。第二の課題は、様々な鉄鋼材料における応力変換データベースの構築である。磁気パラメータの圧力依存性は、タイプの異なる鋼材によって異

なるはずである。本研究では、汎用鋼のSS400に類似し、成分規定がより厳格なS25Cを対象にしたが、モリブデン鋼などのより硬度の高い鋼材についても磁気-応力変換パラメータを確定していく必要がある。第三の課題は、応力分布の画像化と検査現場の要望に応じた計測システムの設計である。画像取得は高速化が要求される。現状では、ASEM信号の取得において、1点当たり0.1秒以下で測定可能であるが、機械ステージで超音波ビームをスキャンしているため、画像化には時間を要する。残留応力の画像化を実用的に利用する上で、アレイプローブによる超音波スキャンニングの技術導入は欠かせないだろう。一方、計測したい部品のサイズ・形状に応じて、電磁石・超音波振動子および検出部を最適化する必要があるかもしれない。特に、溶接によって生じる残留応力評価のニーズは高いが、多くの場合、溶接部分は平坦な形状ではない。磁気シミュレーションにより、サイズ・形状に応じた適切な磁場印加方法を確立する必要がある。

上記の多くの課題を克服するためには、産学連携によるオープンな共同開発が効率的であることは言うまでもない。現在、残留応力検査を共通目的とする複数の企業と大学でコンソーシアムを立ち上げ、共同開発の推進を始めたところである。残留応力評価のニーズをもつ企業、装置を製造・販売することを目標とする企業、検査サービスに導入することを想定している企業、それぞれ競合しない異なるビジネスモデルをもつ企業と協力して大学の知的成果を実社会に活かすことを目指している。ASEM法の計測装置は決して大がかりなものではない。本質的に重要でかつ苦労が必要なことは、装置そのものではなく、各鋼材に対して磁気-応力変換パラメータのデータベースを構築すること、および状況に応じた計測ノウハウの蓄積であろう（第二、第三の課題）。たとえば、磁気シミュレーションソフトを想像して欲しい。磁束密度分布を有限要素法により計算するという確立したアルゴリズムは容易に模倣できるが、各鉄鋼メーカーが製造する膨大な素材の磁気特性データはそう簡単に収集できるものではない。磁気シミュレーションソフトにおいても、各鋼材の磁気特性データベースそのものが大きな価値を生む。農工大で立ち上げた残留応力コンソーシアムに参加する企業とは、苦労を共にして取得した各種鋼材のデータベースと計測ノウハウを可能な範囲で共有化し、その知見を利用して各企業が想定する事業へと展開する方針で同意している。オープンイノベーションを目指すこのコンソーシアムはまだ立ち上がったばかりの小規模なものであるが、残留応力の定量的非破壊評価と画像化は、鉄鋼に関わる広い産業分野においてニーズがあると信じており、今後も共同開発に参画して頂ける企業を募り、広く社会貢献する計測技術の確立を目指したいと考えている。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて行われた。残留応力評価の可能性を追求する基礎研究に支援して頂き、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] K. Ikushima, S. Watanuki and S. Komiyama, "Detection of acoustically induced electromagnetic radiation", Appl. Phys. Lett. 89, 194103 (1-3) (2006).
- [2] H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, and Y. Ishizawa, "Magnetic sensing via ultrasonic excitation" Rev. Sci. Instrum. 84, 044903 (2013).
- [3] H. Yamada, K. Ikushima, K. Watanabe, "Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns measured by acoustically stimulated electromagnetic response", Jpn. J. Appl. Phys. 54, 086601 (2015).
- [4] M. Uehara, M. Kuroda, H. Yamada, Y. Kawano, K. Ikushima "Piezomagnetic effect of steel bars in cement composite structures", Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 37 2P2-9 (2016).
- [5] H. Yamada, J. Yotsuji, K. Ikushima "Phase-sensitive detection of acoustically stimulated electromagnetic response in steel", Jpn. J. Appl. Phys. 57, 07LB09 (2018).