

# 音響誘起電磁応答法を用いた鉄鋼材料の非破壊検査 ～残留応力評価とイメージング技術～

鈴木 優平<sup>\*1</sup> 生嶋 健司<sup>\*2</sup>  
Suzuki Yuhei Ikushima Kenji

強磁性体である鉄鋼材料は、工業製品やインフラ構造物で広く利用されている。これら鉄鋼製品を構成する鉄鋼部材の残留応力は、製品の健全性や余寿命に影響を与えるため、測定し、管理する必要がある。本稿では、超音波照射によって磁気情報を取得する方法である音響誘起電磁応答法を利用して、鉄鋼の残留応力の評価・画像化を実施した結果を報告する。

キーワード：超音波、電磁応答、非破壊評価、残留応力、鉄鋼材料

## 1. はじめに

鉄鋼製品や鋼構造物に用いられる鉄鋼材料（強磁性体材料）は、圧延、溶接、曲げ、切削などさまざまな製造過程を経ることにより、内部に残留応力が蓄積されていく。また、その部材を組み合わせた機械製品では、周囲の部材からの拘束や自重による応力も加わり、複雑な応力状態となる。例えば、回転機械や橋梁のような時間的に負荷が変化する物体では、残留応力を低減させることで、部材が想定以上の応力レベルに達することを防ぐことが可能である。過大な引張応力は、一般的に部材表面に亀裂を誘発・進展させるため、表面の引張残留応力を監視することが、品質管理の点から非常に重要になる。

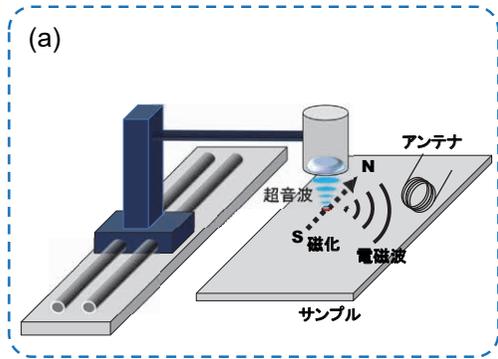
実際には、どの位置にどの程度の残留応力が存在するかを把握することが、製品の設計・製造プロセスの改善や早期補修に対して非常に有効であ

り、実用的な空間分解能をもって測定することが重要になる。また、日常の定期検査や製造ラインでの検査、さらには傷を付けられない製品に対しては、非破壊で測定することが求められる。

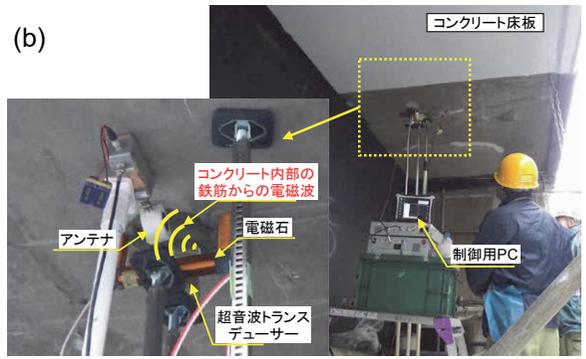
そこで、本研究では、強磁性体である鉄鋼材料の磁気特性が応力に敏感に応答することを利用して、超音波によって非破壊に磁気特性を取得する方法である音響誘起電磁応答（Acoustically Stimulated ElectroMagnetic (ASEM) response）法に着目した。**図1 (a)**はASEM法の概念図である。ASEM法では、超音波照射が逆磁歪効果を通して、磁化部分に時間的変調を与えることによって、音波照射した局所的領域から電磁波が発生することを利用して<sup>(1)</sup>。この電磁波信号は、超音波が照射された局所的位置の磁気情報を運搬する役割を果たしている。発生した電磁波は近傍に設置したアンテナによって検出される。本技術は、音波が到達すれば適用が可能であるため、コンクリートや塗装

\*1：研究開発センター 研究開発グループ 博士(工学)

\*2：国立大学法人東京農工大学 大学院先端理工学部部門/工学部 生体医用システム工学科 教授 博士(理学)



(a) 概念図



(b) 物体内部からの電磁波発生と検出の例

図1 ASEM法の原理

などの非磁性体の内部に埋め込まれた、鉄鋼材料の調査も非破壊で可能である(図1(b))。つまり、調査対象物を暴露する必要がないことがASEM法の利点の一つである。

本稿では、ASEM法の応用例の一つとして、鉄鋼材料の磁気特性を通して、残留応力を評価した研究概要を紹介する。特に、本技術の定量性や超音波計測ならではのイメージングについて説明する。

## 2. 磁気ヒステリシス特性の応力依存性

磁気特性から残留応力へ変換するためには、両者を行き来するための変換式が必要である。この変換式を求めるために、図2に示す引張試験機を用いて、引張応力下の磁気特性の変化を観察した。照射超音波の焦点スポットサイズは直径約2mmである。つまり、この局所的な領域の磁気特性を、測定していることになる。引張応力は、無応力(0MPa)から材料の降伏応力(約300MPa)を超えるまで段階的に加えた。各応力において、電磁石により外部磁場を増減させた際に、アンテナに誘起されるASEM信号電圧をプロットすると、図3に示すようなASEM信号のヒステリシスループが得られる。このヒステリシスループが横軸と

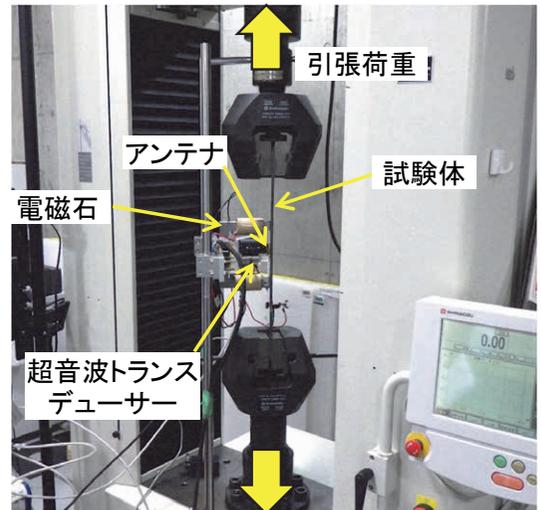


図2 引張試験

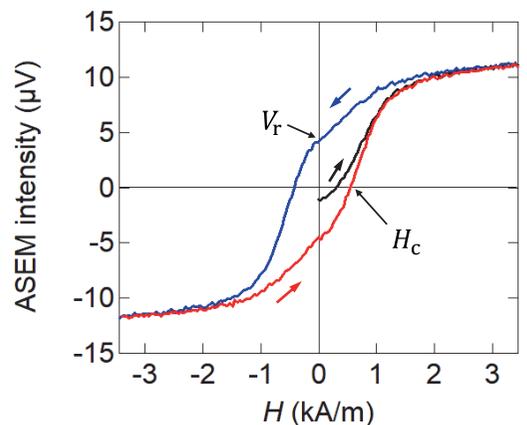


図3 典型的なASEM信号のヒステリシスループ  
(黒線：初期磁化、青線：下降磁化、赤線：上昇磁化)

交わる点を保磁力  $H_c$ 、縦軸と交わる点を残留磁化信号  $V_r$  として、2つの磁気パラメータを設定し、引張応力によって、このパラメータがどのように変化するかを調べた。

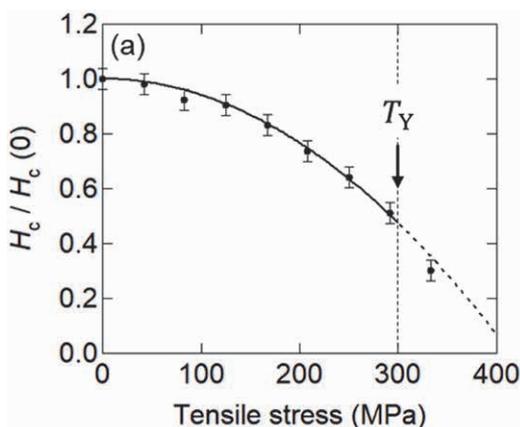
図4は  $H_c$ 、 $V_r$  の引張応力依存性である。各荷重で得られた ASEM 信号は無応力 0 MPa の値で規格化している。引張応力を増加させると、 $H_c$ 、 $V_r$  ともに減少することがわかる。 $H_c$  については、引張応力が約 150 MPa より大きくなると、顕著に変化量が大きくなることわかる。これは、弾性応力範囲の中でも降伏応力  $T_Y$  に近いような高応力領域では、応力評価の精度が高くなることを意味し

ている。一般的には、高い引張応力は高い損傷リスクへつながりやすいので、保磁力  $H_c$  は定量的な残留応力評価の指標として期待できる。一方、残留磁化信号  $V_r$  は、降伏応力  $T_Y$  を超えると急激な信号低下がみられる。この特徴は、弾性領域と塑性領域を明確に区別できることを意味しており、塑性した箇所を見つけ出すためのスクリーニングとしての指標として期待できる。これらの結果から、弾性領域では、保磁力については2次関数(図4(a))、残留磁化信号については1次関数(図4(b))で近似することによって、磁気-引張応力変換式を取得した。

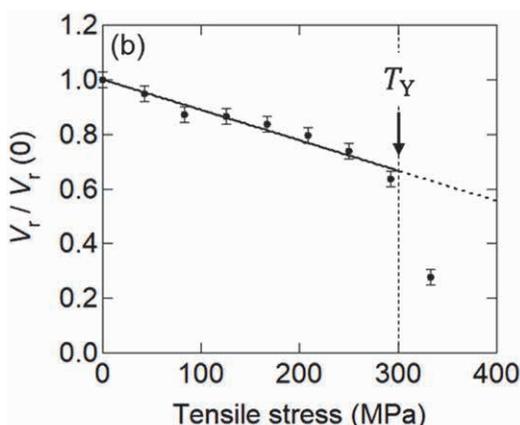
### 3. ASEM 法による残留応力評価

次に、ASEM 法と既存の残留応力測定法である穿孔法を比較し、ASEM 法による残留応力評価の妥当性を検証した。検証で利用した試験体は、鉄板の片側に溶接金属を載せたビードオンプレートである(図5(a))。ASEM 法、穿孔法ともに溶接金属の反対面を測定した。

残留応力評価の結果については、代表的に、図5(a)赤丸で示した2ヶ所(非溶接部と溶接部)について説明する。ここでは示していないが、穿孔法の結果では、非溶接部では、ほぼ残留応力がないことが判明した。一方、溶接部では 300 MPa 程度の高い引張応力が観測された。ASEM 測定によって、同じ2ヶ所で得られたヒステリシスループを図5(b)、(c)に示す。明らかにループ面積が変化しており、保磁力  $H_c$  と残留磁化信号  $V_r$  が両方の測定位置で異なることから、残留応力状態も異なることが予測される。残留応力ゼロの位置(図5(b))を基準にして、引張試験から得られた磁気-引張応力変換式を使用すると、溶接部(図5(c))の残留応力値は約 320 MPa であり、穿孔法の結果と同等であった。



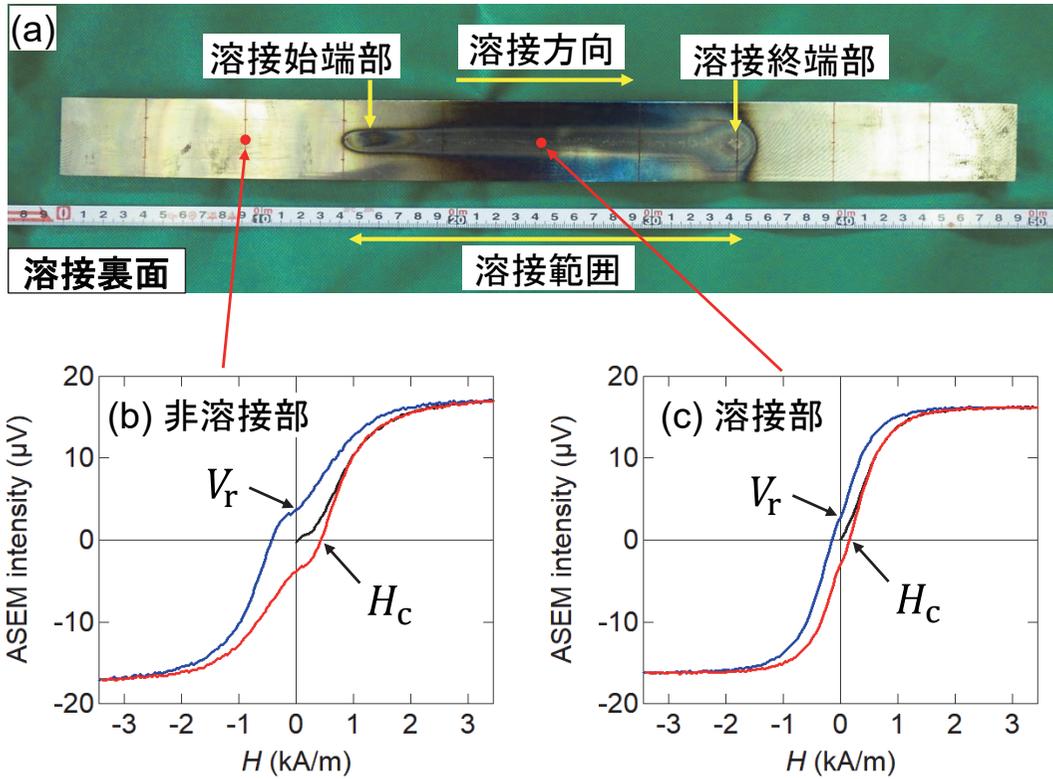
(a) 保磁力  $H_c/H_c(T=0)$



(b) 残留磁化信号  $V_r/V_r(T=0)$

図4 磁気パラメータの応力依存性<sup>(2)</sup>

材質: S25C, サイズ: 490 × 40 × 6 mm<sup>3</sup>



(a) ビードオンプレート試験体

(b) 非溶接部のASEMヒステリシスループ

(c) 溶接部のASEMヒステリシスループ

図5 ASEM法による残留応力の定量性評価

#### 4. ASEM法による残留応力イメージング

次に、集束超音波を走査することによって、局所的な磁気ヒステリシス特性を2次的にマッピングし、残留応力分布を画像化した。使用した試験体は、3章と同様のビードオンプレートである(図6(a))。画像化の範囲は、溶接範囲の左側半分で行った(赤枠範囲)。イメージングでは残留磁化信号  $V_r$  を利用している。この理由は、ASEMヒステリシスループ全体を得る必要がないため、 $H_c$  よりも  $V_r$  の方が短時間で測定が可能だからである。図6(b)は、 $V_r$  により残留応力分布をイメージングした結果である。白い部分は引張残留応力

が小さい領域、赤い部分は高い引張残留応力が存在する領域、暗赤色の部分は塑性した領域を表している。このように、磁気情報をマッピングすることにより、高引張残留応力領域と塑性領域を一度に可視化することが可能である。

#### 5. おわりに

本研究では、磁気特性を引張応力へ変換することによって、ビードオンプレート試験体の残留応力を定量的に評価し、妥当な結果を得ることができた。さらに、磁気特性をマッピングすることにより、引張残留応力の高低や分布の可視化に成功した。ASEM法は、磁性から応力への換算係数が

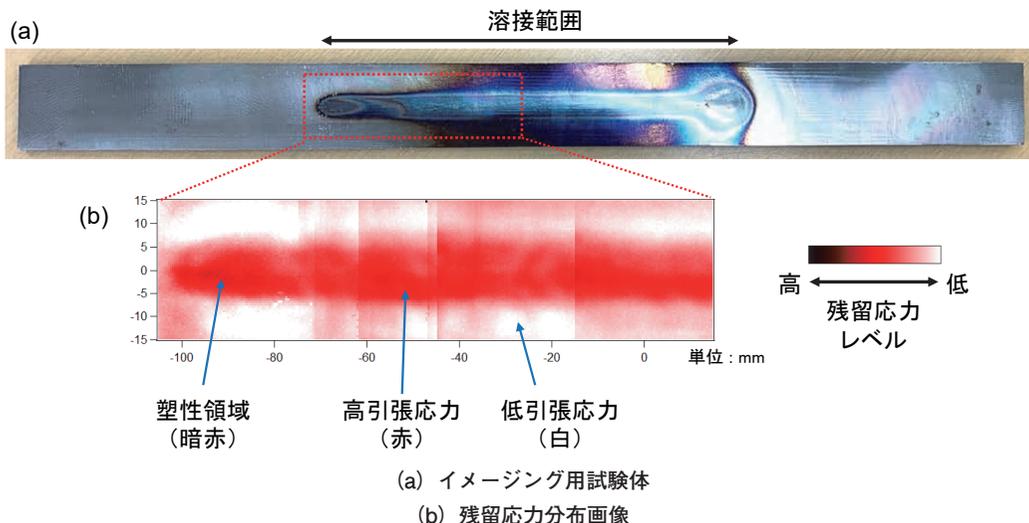


図6 ASEM法による残留応力イメージング

わかっているならば、どのような強磁性体に対しても適用が可能であり、今回の材料以外にもさまざまな鉄鋼材料への拡大が期待できる。

本技術は、応力評価以外にも磁気特性を利用したさまざまな調査に対して、応用が可能である。また、非破壊法であるため、実機への適用が容易である。利用先としては、航空機や自動車の部品検査、インフラ構造物の健全性診断、さらには近年研究開発が盛んな電気自動車のモーターなどの電磁部品の調査などが期待できる。鉄鋼業界のみならず工業界全体で利用可能な新たな検査・計測手法として、さらなる研究開発を進めていきたい。

#### 参考文献

- (1) K. Ikushima, S. Watanuki and S. Komiyama : Detection of acoustically induced electromagnetic radiation, Applied Physics Letters, Vol.89, No.19, 2006, pp.194103 (1-3)
- (2) Y. Suzuki, H. Yamada and K. Ikushima : Tensile-Stress Dependence of Magnetic Hysteresis Properties Measured by the Acoustically Stimulated Electromagnetic Response in Steel, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.67, No.4, Apr. 2020, pp.825-831



研究開発センター  
研究開発グループ  
博士(工学)  
鈴木 優平

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



国立大学法人東京農工大学  
大学院先端理工学部門/工学部  
生体医用システム工学科 教授  
博士(理学)  
生嶋 健司

TEL. 042-388-7120  
FAX. 042-388-7120