

博士論文

音響誘起電磁応答法を利用した 鉄鋼における残留応力の非破壊評価

Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Steel
using Acoustically Stimulated Electromagnetic Response

2022年3月

東京農工大学 工学府 電子情報工学専攻

学籍番号 17834103

鈴木 優平

指導教員： 生嶋 健司 教授

目次

第1章	序論.....	1
1.1	研究背景 ～残留応力測定の必要性～	1
1.2	現状の残留応力・ひずみ測定技術	6
1.3	残留応力測定法の種類.....	8
1.3.1	測定深さによる残留応力測定技術	8
1.3.2	切断法(全解放法)	9
1.3.3	穿孔法(部分解放法)	10
1.3.4	X線回折法	12
1.3.5	超音波法	14
1.3.6	磁歪法	15
1.3.7	光弾性法	15
1.4	従来の磁気ヒステリシス測定技術	16
1.5	新しい磁気計測技術.....	18
1.5.1	ASEM 応答の原理	18
1.5.2	ASEM 応答の検出	20
1.5.3	超音波による磁気イメージング.....	21
1.5.4	超音波による磁気ヒステリシス測定	22
1.5.5	超音波による磁気ダイナミクスの測定(位相検波)	25
1.6	本研究の目的.....	27
1.7	参考文献.....	28
第2章	鉄鋼材料の磁気ヒステリシスの圧延方向依存性	30
2.1	緒言.....	30
2.2	実験サンプル.....	31
2.2.1	研究対象の鉄鋼材料	31
2.2.2	実験サンプルの製作	32
2.3	実験サンプルの磁気特性.....	35
2.4	鉄鋼材料の内外層の結晶粒径.....	39
2.5	ASEM 測定	41
2.6	ASEM ヒステリシス曲線	43
2.7	分析と議論	44

2.8	結言	47
2.9	参考文献	48
第3章	鉄鋼材料の磁気パラメータの引張応力依存性	49
3.1	緒言	49
3.2	技術的バックグラウンド	51
3.3	実験サンプルおよび実験装置	53
3.4	実験セットアップ	54
3.5	引張荷重下における ASEM 測定と測定結果	56
3.6	分析	59
3.7	議論	62
3.8	結言	64
3.9	参考文献	65
第4章	溶接試験体を用いた検証実験	69
4.1	緒言	69
4.2	保磁力による定量評価	71
4.2.1	実験サンプル	71
4.2.2	ASEM 測定	73
4.2.3	局所的な磁気ヒステリシスと引張応力依存性	75
4.2.4	ASEM 測定結果	76
4.2.5	穿孔法による残留応力測定	77
4.2.6	分析と議論	78
4.3	残留応力イメージング	81
4.3.1	実験セットアップ	81
4.3.2	実験結果および分析	81
4.4	結言	83
4.5	参考文献	84
第5章	結論	86
第6章	今後の課題と展望	87
6.1	導入	87
6.2	圧縮残留応力の評価	88
6.3	ピーニング処理の有効性検査	90

6.4 他磁性材料への適用拡大.....	92
6.5 イメージングの高速化と自動化.....	93
6.6 実製品・実橋梁への適用.....	95
6.6.1 表面処理.....	95
6.6.2 実用的な死荷重応力測定に向けて.....	96
6.6.3 溶接止端部の亀裂調査.....	97
6.7 金属材料以外への拡大.....	98
6.8 参考文献.....	99
付録.....	100
応力ひずみ線図(サンプルI _{//} とII _⊥).....	100
引張試験サンプルII _⊥ の各引張荷重での ASEM ヒステリシス曲線(PSD 前後).....	102
EBSD の全データ(GAM, GOS, GROD, KAM 高ひずみ, KAM 低ひずみ, IPF).....	103
研究業績.....	107
謝辞.....	109

第1章 序論

1.1 研究背景 ～残留応力測定の必要性～

鉄鋼材料は機械、自動車、建築物さらにはインフラ全般で利用されている重要な要素である。これらを構成する部材が想定外の応力環境下に置かれると、亀裂が発生・進展し、製品・構造物全体が不安全な状態になる場合がある。想定外の応力環境とは、部材が元々有する応力や供用中に周囲の環境から受ける応力が重量されたものである。特に、部材が元々有する応力は残留応力と呼ばれ、一般的には「対象物に外力が作用していない状態で内部に存在している応力」として定義されている。

鋼板には圧延製造時に発生する残留応力が存在するが、溶接・曲げ・切削などの加工時や、組み立て時の製造プロセスに起因した応力も発生する。例えば、回転機械製品などの時間的に変化する負荷に対して残留応力がもたらす影響や、橋梁やプラント供用時に想定以上に変化する荷重レベルによっても応力場が有害なレベルに達する場合がある。これらは、一般的に図 1-1 の応力の時間的変化を利用して説明される。今、使用している部材に図に示すような平均応力が存在していたとする。この平均応力は時間変化しないので一定である。この平均応力を中心として回転や振動による応力変動(黒線)が生じている。ここで、部材に引張の残留応力が存在する場合は、平均応力が上側にシフトするため、赤点線の応力変動になる。この応力変動曲線は一部が材料の許容応力を超えてしまっている。引張残留応力がない状態では部材が破壊損傷する危険性がないのにも関わらず、引張残留応力が要因として部材および構造物全体が応力的に危険サイドにシフトしている。逆に、部材に圧縮応力が生じていれば、平均応力が下側にシフトし、青点線の応力変動になる。それによって、許容応力に対して余裕が生まれるため、応力的に安全サイドに持っていくことが可能である。このように、一般的には引張残留応力は悪いもの、圧縮残留応力は良いものとして扱われており、

熱処理による引張残留応力の緩和や、意図的に圧縮応力を加えることによって、引張残留応力の低減を図っている。また、部材を応力に耐えられる素材へ変更することや、部材の追加により製品・構造物の発生応力を低下させる対策も取られている。

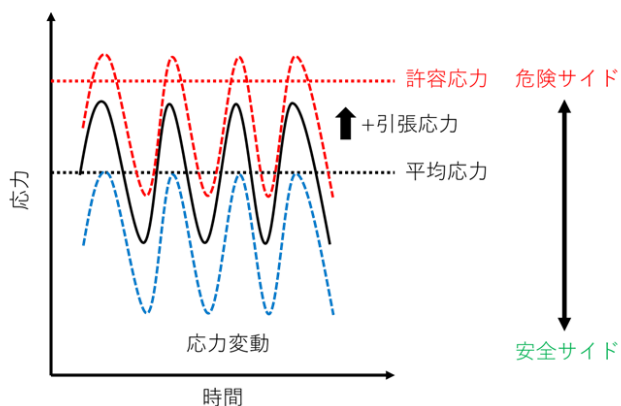


図 1-1 応力の時間変化

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、製品寿命、運用中の安全性、損傷調査、早期補修などに対して非常に有効であると考えられる。対象物の残留応力状態を把握するためには、点での測定では十分ではない。残留応力は広範囲に複雑に存在し、ピンポイントの測定では高応力位置を見逃してしまう可能性が非常に高い。また、製品・構造物が運用中である場合は、測定時にそれらの形状に変更を加えないことも重要である。さらに、部材表面のめっきや塗装、水や油が付着した状態でも測定できれば、測定対象は非常に広範囲になる。

供用中の道路橋（鋼橋）の安全性を知るためには、死荷重（自重）による応力と、活荷重（主に自動車荷重）による応力の合計を発生応力とし、その値と鋼材に応じた許容応力を比較することで安全率が求まり、その結果から鋼橋の耐荷力を判定できると考えられる。2007年にアメリカ・ミネソタ州の鋼製トラス橋が突然落橋し、13名の死者を出す大事故が起こった。その原因の一つに、数度の改修による橋梁自重の増加[1]が挙げられている。このことから、自重による発生応力を正確に知ることは非常に重要といえる。

実際に鋼橋の桁に作用している活荷重に相当する応力は、一般的には橋梁上にトラックなどを載荷し、桁に発生するひずみをひずみゲージにより測定し、鋼材のヤング率を掛けて求められる。死荷重（自重）による応力は、設計図書があれば、その設計値を使うことができる。設計時の死荷重応力は、コンクリートや鋼材の単位重量を用いて、梁理論による断面力から算定している。

しかし、例えば完成後50年以上経過しているような古い鋼橋では、設計図書がないものもある。その場合には、死荷重応力は分からない。実際に死荷重を測定するには、以下の方法が考えられる。工場制作時の桁に応力が発生しない状態のときに、桁の下フランジにひずみゲージを貼り付け、その時の値を初期値とする。橋梁の架設が完了後、再度、ひずみの測定を行い、両者のひずみ差を使い、死荷重による発生応力を求める。しかし、すでに架設されている鋼橋には、このような方法は取れない。

したがって、実際の死荷重を測定する方法が必要になる。後述する穿孔法や磁歪法では、ある1点の死荷重応力＋溶接による残留応力が測定される。死荷重応力だけの値を求めるためには、例えば、単純梁では発生応力がほぼ0となる支点と、最大の発生応力となる支間中央の測定値の差を取ることで、溶接による残留応力分を除去できる。しかし、より正確に死荷重応力を求めるためには、1点ではなく、ある領域での応力分布の測定値が必要となる。

鉄鋼製品についても設計通りの応力状態であるかどうかは、測定しなければ分からない。

特に、溶接部周辺は降伏応力に迫る残留応力が発生することが知られている。また、溶接の熱影響部は、周囲の母材部とは金属組織が異なるため、結晶の状態に影響を受けにくい残留応力評価技術が必要である。

表 1-1 のように工業製品や鋼構造物における破壊の種類と残留応力の影響度は、広く研究されている[2]。ここでは、代表的な 5 つの破壊(延性破壊, 脆性破壊, 座屈破壊, 疲労破壊, 環境破壊)について、それぞれの特徴を簡単に説明する。事前に図 1-2 に示す応力ひずみ線図を説明しておく。鉄板を引っ張った時の応力を縦軸, 発生したひずみを横軸にプロットする。徐々に引張応力を増やしていくと、応力とひずみが線形的に増加していき、応力を除去するとひずみもゼロに戻る。鉄板は応力除去後に元の寸法に戻るため、この領域は弾性領域と呼ばれている。さらに、引張応力を増加させると、ひずみは増加していくが、応力の増加が緩くなる。この状態では、鉄板は応力除去後に元の寸法に戻らなくなる。この領域は塑性領域と呼ばれている。最終的には鉄板が伸びきることによって破断に達する。

(1) 延性破壊

材料が目に見えて伸びるので最もイメージしやすい破壊形態であり、応力ひずみ線図(図 1-2)の塑性領域において破断の形で現れる。発生するひずみ量は非常に大きい。残留応力は降伏ひずみのオーダーであるので、破壊に対する影響としては小さい。延性破壊を起こす材料は、ステンレス鋼やアルミニウム合金などがある。

(2) 脆性破壊

塑性変形をほとんど伴わない破壊形態である。加わる応力が限界まで達すると突然亀裂を生じ、それが伝搬して破壊が生じる。応力ひずみ線図(図 1-2)の弾性領域と塑性領域の境界付近で生じるため、残留応力の影響が大きい。脆性破壊を起こす材料は鋳鉄、セラミックス、コンクリートなどがある。

(3) 座屈破壊

圧縮応力が加わった際に載荷方向に対し垂直方向に湾曲するように変形する破壊形態である。一般的な許容応力は座屈を考慮し、引張よりも圧縮の方が小さく、設計時は注意する必要がある。構造物の破壊原因の代表的なものである。

(4) 疲労破壊

材料に繰返し応力がかかることによって、表面の割れや内部欠陥を起点として亀裂が徐々に進行し破壊に至る現象である。材料の引張強さよりも大幅に小さい応力でも亀裂が進行することが特徴であり、破壊形態の中でも最も件数が多いといわれている。

(5) 環境破壊

応力だけが直接の原因ではなく、周囲の環境条件が重畳することによって破壊する形態である。代表的なものとして、応力がかかっている部材を腐食環境下に置いた際に発生する応力腐食割れ、鋼材が水素を吸収することによって靱性が低下して割れが発生する水素脆化割れがある。

これらの破壊形態については、素材的・形状的条件にも影響を受ける。例えば、図 1-3 のように、板に穴が開いているとき、切り欠きがあるときは、その周囲で応力が集中する。図の矢印のように穴・切り欠きに近づくと応力が急激に大きくなる。残留応力・素材・形状の条件が破壊に対してどのように影響するかを単一で評価することは非常に難しい。その中でも、残留応力は製品や構造物の破壊強度に非常に重要な影響を与えるものである。

表 1-1 破壊形態と残留応力の影響 [2]

種類	残留応力の影響度	特徴
延性破壊	小	<ul style="list-style-type: none"> ・大きな塑性変形を起こし、破断までに材料が著しく伸びる ・残留応力は降伏ひずみのオーダーであり、破壊に至る伸び量より十分小さいため、残留応力の影響は小さい
脆性破壊	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ほとんど塑性変形が起こらず瞬時に破壊する ・高弾性領域で突然発生する場合あり
座屈破壊	中	<ul style="list-style-type: none"> ・圧縮応力が原因 ・薄板で発生しやすい ・減肉・溶接による板厚変化で発生する
疲労破壊	大	<ul style="list-style-type: none"> ・高サイクルで考慮する ・引張残留応力により疲労強度が低下する ・残留応力による破壊のメイン
環境破壊	大	<ul style="list-style-type: none"> ・応力腐食割れ(SCC), 水素脆化割れ

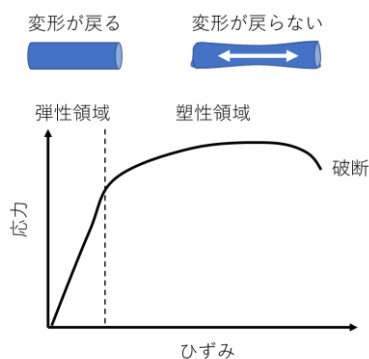


図 1-2 応力ひずみ線図

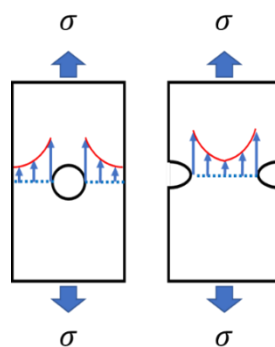


図 1-3 応力集中

以上のような、様々な破壊形態が鉄鋼材料に現れてくる際には、対象の電気・磁気的特性の変化も伴うと考えられる。したがって、鉄鋼材料の残留応力の評価のためには、電気・磁気的特性を取得・画像化する技術が必要である。

現在までに、超音波を利用した計測は人体や構造物に対して非侵襲・非破壊検査として広く利用されている。超音波は弾性波であるため、真空を除くあらゆる物体に対して適用が可能である。さらに、音波は電磁波に比べて同一周波数で波長が約5桁短い。つまり、周波数10MHz

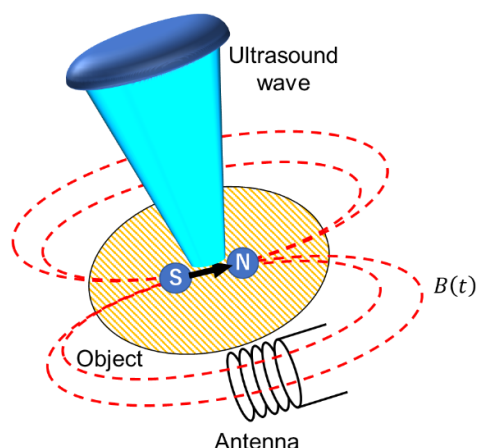


図 1-4 音響誘起電磁応答の概念図[3]

のとき、水中音波の波長は150 μm であるが、電磁波の波長は30mである。これは、汎用な装置によって、波形取得や解析が容易なMHz/GHz周波数帯で、mm/ μm スケールの空間分解能が実現可能であることを示している[3]。現状では、このような利点を有する超音波は、対象物の質量密度や弾性率などの力学特性の計測を通して、測定対象の存在や形状、硬さなどを判別するに留まっている。つまり、電気・磁気的な特性を計測するために超音波が利用されることが少なかったといえる。しかしながら、近年、生嶋らによって超音波を利用した電気・磁気特性の検出技術が提案された[3]。この技術の概念図を図1-4に示す。音波は弾性波であるため、電磁波のように直接的に物体の電気・磁気特性と結合しない。しかしながら、音波による弾性変調は、固体の格子ひずみや液体の密度変化を引き起こし、対象物の電気・磁気分極に時間的変調を与える。このことは、超音波照射によって電気・磁気双極子を通して超音波と同一周波数の電磁波が周囲へ向かって発生することを意味している。このように、超音波によって励起される電磁気的な応答を音響誘起電磁(Acoustically Stimulated ElectroMagnetic (ASEM))応答と呼ぶ。

ASEM法を金属の非破壊検査へ応用するため、下記で説明するいくつかの実験が、山田らによってなされている。超音波による磁気イメージングに関しては、非磁性のオーステナイト相から強磁性のマルテンサイト相への転移による磁性の発現を通して、塑性変形などの材料力学的な挙動の画像化に成功している[4]。また、磁気ヒステリシスループを超音波で測定し、ASEMヒステリシス曲線の最小値が保磁力に相当すること、鋼板に導入した人工欠陥による磁束密度の特異なパターンを可視化し、ASEM法が非破壊材料検査の有力な方法であることも示している[5]。さらに、ASEM応答の位相敏感検波を発展させ、複素圧磁係数の実部と虚部を導入することで、磁気ダイナミクスの評価への応用も示されている[6]。このような先行研究が、ASEM法によって金属の磁気特性を非破壊で取得し、鉄鋼材料の残留応力評価や画像化へ応用できるのではないかという発想につながった。さらに詳しいASEM法の原理や先行研究については、1.5節にて取り扱うことにする。

1.2 現状の残留応力・ひずみ測定技術

表 1-2 に現在一般的に利用されている残留応力測定法を示す。残留応力測定の方法は、2 つに大別できる。1 つ目は対象物を破壊することによって、内部に保存されている応力を解放させ、その際の対象物の寸法変化を測定する方法である。この寸法変化は対象物に直接ひずみゲージを取り付けることによって測定されるため、精度が高く、残留応力測定の基準（正解）として利用されることが多い。この方法は比較的早い時期から実施されており、切断法と穿孔法に分類される。

2 つ目は対象物を破壊しないで測定する方法である。最も代表的な手法は X 線回折法である。電解研磨によってわずかに測定面を除去する場合は、準破壊法に相当する。X 線回折法は金属のような結晶質なものに広く適用可能であるが、強い集合組織が存在する場所では適用が難しい。特に、溶接部など金属組織が変化するような大きな熱量が加わった場所では、実施できない傾向がある。また、磁気や超音波単体の技術を使用した方法は、測定領域が磁場や超音波の伝搬領域の平均的な情報しか得られない。本研究において着目した音響誘起電磁(Acoustically Stimulated ElectroMagnetic (ASEM))応答法は、強磁性体の磁性が応力に敏感であることを利用して、超音波によって対象の局所的な磁気特性を取得し、残留応力の評価へつなげていく方法である。

表 1-2 残留応力測定法の比較

測定法	切断法・穿孔法	X 線回折法	磁歪法 超音波法	ASEM 法 (超音波+磁気)
	破壊・準破壊	非破壊・準破壊	非破壊	非破壊
測定される 物理量	ひずみ	原子間距離	磁性変化 音速変化	電磁応答 (磁性変化)
面内 空間分解能	1 mm ~ 5 mm	1 mm 程度	10 mm~	1 mm 程度
特徴	・精度が高い	・結晶質材料に広く 適用可 ・集合組織不可 ・被ばく管理	・平均的な情報	・強磁性体対象 ・集合組織可 ・内部(沈埋物)の情報 が得られる

次に、残留応力の測定はできないが、応力・ひずみ分布を画像化する技術を簡単に紹介する[7], [8]. これらの技術は全て光学技術を利用しており、代表的な方法には、Holographic Interferometry (ホログラフィック干渉)法, Digital Image Correlation (DIC, デジタル画像相関)法, PhotoStress (光弾性)法などがある. ここで、DIC 法と ASEM 法との違いについて混乱する可能性があるため、少し説明を行う. 表 1-3 は DIC 法と ASEM 法の比較である. DIC 法[9]は図 1-5 示すように、対象

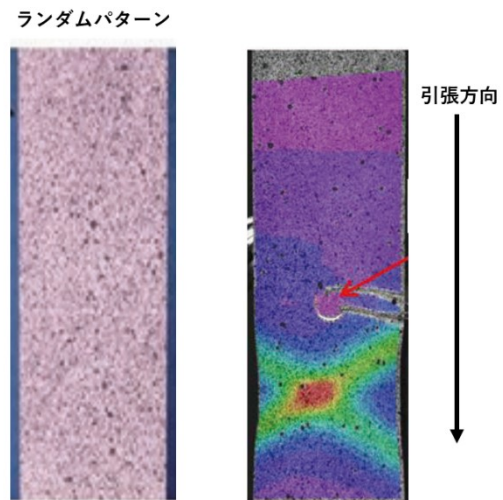


図 1-5 デジタル画像相関法によるひずみ分布[9]

物表面にランダムパターンを作成し、負荷がかかった際のパターンの変位量を画像的に算出する方法である. したがって、対象物が変形するように負荷を加える必要があり、活荷重のみが測定可能である. 一方、ASEM 法は DIC 法のような変位計測ではないので、負荷は必要なく、構造物の自重のような死荷重による発生応力の測定が可能である.

表 1-3 活荷重と死荷重測定

測定法	DIC 法 (デジタル画像相関法)	ASEM 法 (音響誘起電磁応答法)
分類	3次元変位計測	電磁気計測
測定される物理量	変位量・ひずみ量 (X, Y, Z 座標)	電磁応答 (磁性変化)
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突, 振動など動的測定 ・変形させる必要がある ・塗装でパターン作製が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・変形させる必要がない →残留応力, 死荷重を測定可能

1.3 残留応力測定法の種類

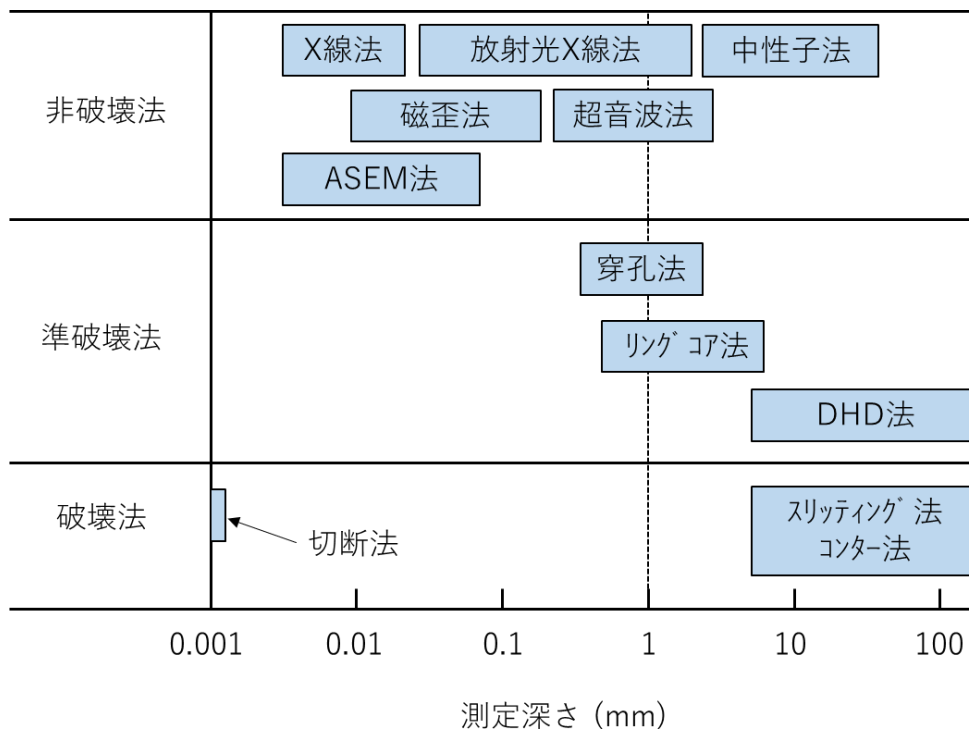
1.3.1 測定深さによる残留応力測定技術

表 1-4 に様々な残留応力測定法と適用される深さを示す[10]. 残留応力測定を細かく分類すると、非破壊法、破壊法、その中間の準破壊法になる。非破壊法は粒子・電磁波の回折を利用するもの、磁気異方性や音速異方性を利用するものに分けられる。非破壊法において、最も利用されている手法は X 線法であり、深さ 10 μm 程度までの情報が得られる。放射光 X 線法や中性子法は実験室レベルで利用するものであり、適用範囲がかなり制限される。磁歪法・超音波法は磁場・音波の伝搬範囲の平均情報である。本研究で利用している音響誘起電磁応答法 (ASEM 法) は、使用する超音波周波数にもよるが、X 線法や磁歪法と同程度の深さの情報を取得できる。

一方、破壊・準破壊法は、対象物の形状を変更する方法である。準破壊法においては、形状変更を部分的に抑えることが可能であり、供用中の製品・構造物への適用が容易である。特に、穿孔法を大規模構造物に対して適用する場合、穴のサイズは構造物のサイズに対して無視できるほど小さいため、破壊というデメリットが小さくなる。他にも、コンター法は切断面全面の法線方向の応力分布が分かるが、高度な切断技術や FEM 解析技術が必要となる。

次節から、いくつかの代表的な残留応力測定法について説明を行う。

表 1-4 残留応力測定法の適用深さ



1.3.2 切断法(全解放法)

切断法は対象物を細切れにすることによって、全ての応力を解放させ、測定位置に存在していた残留応力を推定する方法である。図 1-6 を参考に、切断の手順を示す。(1)元の対象物の残留応力を測定したい位置にひずみゲージを貼り付ける(赤点)。(2)ひずみゲージを含めた周囲の部材を切り出す。ハンドリングしやすいサイズにする。(3)さらに、小さな塊に切り出す。(4)最後に、切断できなくなる大きさにする。以上のように、徐々に部材を小さくし、ひずみゲージの指示値の変化を記録する。得られた 3 方向のひずみ値 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 を使用すれば、式(1.1)より元々その位置に存在していた残留応力(最大主応力 σ_{max} 、最小主応力 σ_{min})を求めることができる[11]。

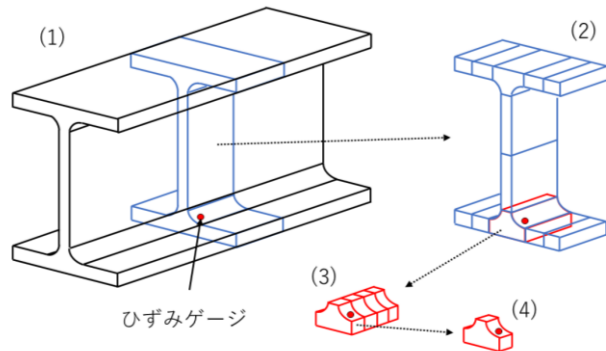


図 1-6 切断手順

$$\sigma_{max,min} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left\{ (1+\nu)(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \pm (1-\nu) \cdot \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right\} \quad (1.1)$$

ここで、 E 、 ν はそれぞれヤング率、ポアソン比である。

ひずみゲージはゲージ長間の平均的なひずみを検出するが、測定場所が切り欠き部など、応力が集中し、急激な応力勾配が存在する場合、1つのひずみゲージでは高応力位置を見逃してしまう。その対策として、図 1-7 に示す特殊なひずみゲージを使用する。これは、小さなひずみゲージが複数配置されたものである。

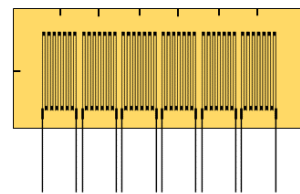


図 1-7 応力集中測定用ひずみゲージ

切断法は様々な材料に適用することが可能であり、その他の残留応力測定装置が設置できないような狭隘部においても実施できる手法である。しかし、対象物を完全に破壊するため、供用中の構造物や製品には使用することができない。したがって、実際には本手法を利用する機会はそれほど多くない。

1.3.3 穿孔法(部分解放法)

穿孔法は表面から深さ 2 mm までの残留応力を測定する方法である。本手法では対象物に穴を開けた際に解放されるひずみから残留応力を求める。測定対象は金属、複合素材、樹脂素材、さらには、ガラスやセラミックスなど多岐にわたる。

最大の特徴は、深さ方向の残留応力測定が可能となることである。穿孔法は ASTM E837-13a 規格[12]によって、実施手順が定められており、以降では概要を説明する。図 1-8 に示す穿孔装置を使用して、図 1-9 に示すロゼットひずみゲージの中心に対して段階的に穿孔を実施し、各深さで得られた 3 方向のひずみ値 ε_1 , ε_2 , ε_3 を応力計算で使用する。計算手順としては以下の式から各深さの組み合わせひずみ p , q , t を求める。

$$p = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2} \quad (1.2)$$

$$q = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2} \quad (1.3)$$

$$t = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)}{2} \quad (1.4)$$

次に各深さの組み合わせひずみ p , q , t から、測定対象のヤング率 E , ポアソン比 ν および ASTM E837-13a に規定されている校正係数 \bar{a} , \bar{b} を用いて、以下の式から各深さの組み合わせひずみ P , Q , T を求める。

$$\bar{a}P = (E/1 + \nu) \cdot p \quad (1.5)$$

$$\bar{b}Q = E \cdot q \quad (1.6)$$

$$\bar{b}T = E \cdot t \quad (1.7)$$

各深さの応力成分 σ_x , σ_y , τ_{xy} と P , Q , T には次のような関係がある。

$$P = \frac{(\sigma_y + \sigma_x)}{2} \quad (1.8)$$

$$Q = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2} \quad (1.9)$$

$$T = \tau_{xy} \quad (1.10)$$



図 1-8 穿孔装置

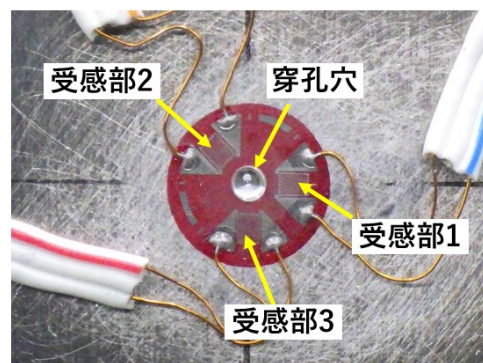


図 1-9 ロゼットひずみゲージ

最後に以下の式を用いて、各深さの最大主応力 σ_{max} 、最小主応力 σ_{min} 、主応力角度 β を求める。

$$\sigma_x = P - Q \quad (1.11)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (1.12)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (1.13)$$

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (1.14)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{-T}{-Q} \right) \quad (1.15)$$

図 1-10 にロゼットひずみゲージと各応力成分を示す。 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 は3方向の各ひずみゲージで得られるひずみである。 σ_x はX軸方向の応力、 σ_y はY軸方向の応力、最大主応力 σ_{max} は最小主応力 σ_{min} と直交し、 σ_x に対して β 回転した方向に向いている。

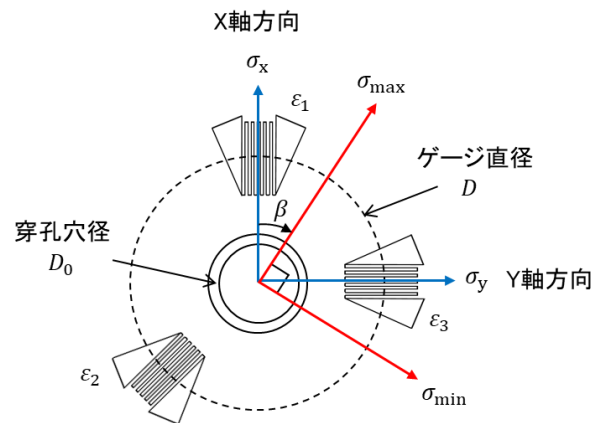


図 1-10 ロゼットひずみゲージと主応力方向

穿孔法は非常に低速で穿孔を実施する。これは穿孔という行為自体によって対象物に新たな応力を与えないこと、発熱や加工硬化を防ぐこ

とを目的としている。したがって、1ヶ所当たりの測定時間は長くなる。また、穿孔穴を開けるため、穴周囲は応力の再配分が発生する。よって、各測定点の間隔は数十 mm 程度離す必要がある。この理由から穿孔法による面内の残留応力分布測定は非常に難しくなる。

材料的には均質材料を対象としており、異方性材料に関しては現在のところ深さ方向の残留応力測定は適用できない。また、穿孔位置とひずみゲージ受感部は同じ材料上に配置される必要がある。これは、穿孔位置と受感部の材料物性が異なるとひずみの伝搬の仕方が異なるからであり、このことを考慮すると、穿孔法 1ヶ所当たりに必要な面積はドリルの直径 D_0 ではなく、ひずみゲージの直径分 D (5 mm~10 mm 程度)が必要となる。

実際の運用では、測定箇所の手出し、適したドリルや穿孔スピードの選択、複雑な応力算出手続きが必要となる。また、対象物を微破壊することから再測定が不可能である。そのため、様々な残留応力測定法の中では難易度が高いが、適用可能な素材や結晶状態が非常に多く、深さ方向の分布が分かることなど実用的な手法である。

1.3.4 X線回折法

X線回折現象を利用した残留応力測定装置を図 1-11 に示す。図 1-12 は結晶粒が規則正しく配置された金属材料に対して一軸引張の応力が生じている場合、格子面間隔 d がどのように変化するかを示している。図の左側は応力方向と格子面が平行な場合、右側は応力方向と格子面が傾いている場合を表している。格子面の法線方向が応力方向に近くなると、 d が広くなること分かる。試料面の法線方向と格子面の法線方向のなす角を ψ とすると、 ψ が大きいほど、 d の変化量も大きくなる。つまり、格子面が試料面に対してある程度傾いている方が、 d の変化を精度よく測定できることになる。このように X線残留応力測定法は ψ に対する d の変化を測定する手法である[13]。



図 1-11 X線残留応力測定装置

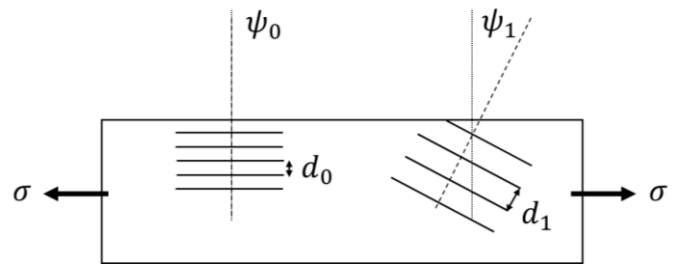


図 1-12 一軸引張応力と結晶格子間隔

回折条件式 Bragg's Law は

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1.16)$$

両辺を θ 、 d で偏微分すると、

$$2 \sin \theta \cdot \Delta d + 2d \cos \theta \cdot \Delta \theta = 0 \quad (1.17)$$

無負荷時の回折面間隔を d_0 、回折角を θ_0 として整理すると、

$$\frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta_0 \cdot \Delta \theta \quad (1.18)$$

ひずみ ε とは、もともとの長さからの変化量なので次のようになる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta_0 \cdot \Delta \theta \quad (1.19)$$

ここで、X線残留応力測定の基本式[13]

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1 + \nu_{hkl}}{E_{hkl}} \sigma_x \sin^2 \psi - \frac{\nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \quad (1.20)$$

について、 $\varepsilon_{\varphi\psi}$ を $\sin^2 \psi$ で偏微分すると($\varepsilon_{\varphi\psi}$ は回折面法線が試料面法線に対して ψ 傾いているときのひずみ),

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1 + \nu_{hkl}}{E_{hkl}} \cdot \sigma_x \quad (1.21)$$

さらに式(1.19)を $\varepsilon_{\varphi\psi}$ と考えて代入し、回折角を 2θ に書き換え、 σ_x について整理すると、

$$\sigma_x = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = -\frac{E_{hkl}}{2(1 + \nu_{hkl})} \cot \theta_0 \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \psi)} \quad (1.22)$$

機械的物性 E_{hkl} 、 ν_{hkl} や測定角 θ_0 は一定であるため、応力定数 k としてまとめると、応力は以下の式で求めることができる。

$$\sigma_x = k \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \psi)} \quad (1.23)$$

式(1.23)の右辺は図 1-13 に示すように傾きを表しており、1 次関数であるので、応力は直線的な挙動を示すことが分かる。式(1.22)の hkl は X 線の回折面を示しており、微視的な特定の結晶回折面の E_{hkl} 、 ν_{hkl} を使用する。そのため、ひずみゲージを利用して求める巨視的な物性とは意味合いが異なる。

本手法は、X 線の照射によって測定することが可能であり、非破壊法に分類され、測定が簡易であり、様々な状況で利用されている。特に鉄鋼製品に対しては最も多く利用されている方法である。また、式(1.20)は等方性の材料に適用される式であるので、結晶粒が粗大ではないもの、結晶が強く配向していないもの、集合組織でないものに対して利用が推奨される。精度については、図 1-12 で示したよう

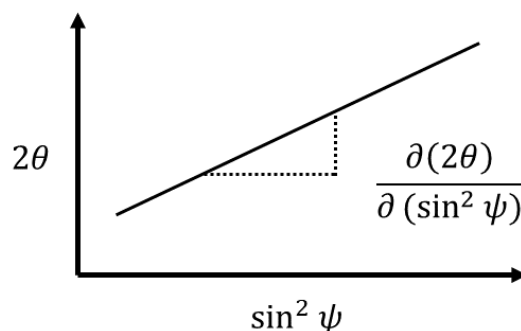


図 1-13 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図

に高回折角を有する材料の必要がある。実際の運用では、測定箇所が綺麗に面出しされている必要があること、X 線の被爆管理を行うことも必要である。

1.3.5 超音波法

物質内部の応力の有無によって、物質内を伝搬する音波の速度がわずかに変化する。このような現象は音響弾性効果と呼ばれている。その音速変化を正確に測定することによって、残留応力を評価することが可能になる。図 1-14 は応力印加方向と音波の伝搬方向の関係性を示している[14]。音速の変化を最も観察しやすい状態とは、応力方向と音波の伝搬方向が同じ場合である。つまり、応力 σ を測定する場合は、音速 V_{11} を精度良く測定すればよい。逆に、音速 V_{12} 、音速 V_{13} を測定したとしても、 σ に対して感度が低い成分であるため、正確な残留応力を得ることが難しい。

音速測定に対する誤差要因として代表的なものは、(i)等方・均一材料でないこと、(ii)超音波探触子接触面が平らでないこと、(iii)カプラント(接触媒質)など調査対象物以外の要因が含まれることが考えられる。(i)については、音波が伝搬する領域内に音響材料的に異なる物質が含まれた場合、単一材料と比べて音速が変化する。この音速変化には残留応力成分と材料変化成分が含まれるため、残留応力成分のみを抜き出すことは難しい。(ii)については、接触面にわずかに凹凸が存在するだけで、音波伝搬距離が変化する。(iii)については、ウェッジやカプラントを介して音波が物質内に入るため、両者の音速を把握しておかなければならない。図 1-14 の応力印加方向の応力変化 $\Delta\sigma$ は以下の式から求める[14]。

$$\Delta\sigma = \frac{E(\Delta V_{11}/V_{11})}{L_{11}} \quad (1.24)$$

ここで、 E 、 ΔV_{11} 、 L_{11} はそれぞれ、材料のヤング率、音速変化、音響弾性係数である。

本手法によって、精度良く音速変化を測定できた場合は、非常に簡便に残留応力測定が可能であるが、音波が伝搬した範囲の平均値を測定していることに注意が必要である。

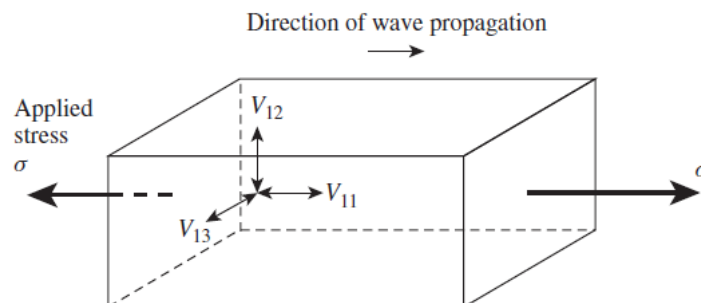


図 1-14 応力印加方向と音波の伝搬方向の関係性[14]

1.3.6 磁歪法

鉄鋼のような強磁性体は磁場を受けると、材料がひずむ現象(磁歪効果)が発生する。その逆として、材料内部にひずみ(応力)が生じている場合は、磁性が変化すること(逆磁歪効果)が知られている。本手法は図 1-15 に示すようなプローブを使用する。これは対象物への励磁コイル(1と2)と、磁性変化を検出するコイル(3と4)から構成される。応力が無い場合は、励磁コイル間を大部分の磁束が流れるが、応力が生じると、その方向の透磁率が増加し、一部の磁束が検出コイル側へ流れる。鋼板に作用する主応力を σ_1 、 σ_2 とすると、プローブの出力電圧 V は次の式で与えられる[16]。

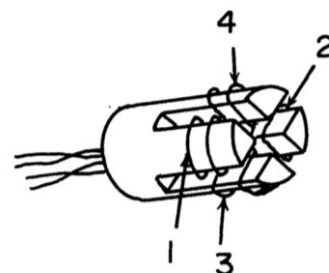


図 1-15 磁歪法[15]

$$V = k(\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \quad (1.25)$$

ここで、 k 、 θ はそれぞれ磁歪感度、 σ_1 方向とプローブ方向のなす角を表す。3方向以上で測定を実施することで、主応力差と主応力角度が分かる。本手法は磁気を利用した測定のため、非磁性の塗膜上から測定を実施することが可能である。また、プローブのリフトオフが大きく出力電圧に影響する。測定領域は磁場印加および検出範囲であり、局所的な情報を取得することは難しい。

1.3.7 光弾性法

光弾性法[17]は透明な材料(高分子材料、ガラスなど)を対象としたものである。光学的に等方均質材料に荷重を加えると屈折率の異方性を生じる。この現象を利用して物体に生じる応力を求める方法を光弾性応力測定(Photoelastic stress measurement)法と呼ぶ。特徴としては、2次元的な応力分布観察ができることであるが、深さ方向の平均的な情報であること、定量的評価については光学的に適した実験室レベルの環境が必要であることから、実際の屋外の作業環境で鉄鋼材料に適用することは難しいと考えられる。不透明な鉄鋼部材に適用する場合は、実物の縮尺模型を透明材料で作成し、実応力と相似の負荷を加えて行う。または、部材表面に透明薄膜を貼り付け、部材に発生するひずみを薄膜を介して測定することが必要となる。

1.4 従来の磁気ヒステリシス測定技術

本研究で注目した ASEM 法は、超音波を利用して対象物の磁気特性を取得する方法である。ここでは、従来、材料の磁気特性をどのように取得していたかを説明する。

鉄鋼材料の磁気特性を評価するために、様々な磁気計測手法が存在するが、最もオーソドックスな手法は、磁気ヒステリシス曲線を測定することであると考えられる。これは、対象物に外部から磁場を作用させ、その磁場を増減させることにより、対象の磁化をプロットしていく方法である。強磁性体では、プロットしていく

曲線は現在印加している磁場だけでは決まらず、以前の状態に関して決まってくる。そのため、プロットした曲線は直線にはならず、図 1-16 に示すようなループを描く。このように、印加磁場を増減させて描いた磁化曲線を磁気ヒステリシス曲線 ($B-H$ 曲線) と呼ぶ。この $B-H$ 曲線には、初期磁化曲線の傾きである透磁率、印加磁場をゼロに戻した際に対象に残留する磁化、対象の磁化方向を反転させるために必要な磁場 (保磁力)、一連のループを描いた時のループ面積 (ヒステリシス損失) などの磁性材料を評価する際に重要な磁気パラメータが含まれている [18]。

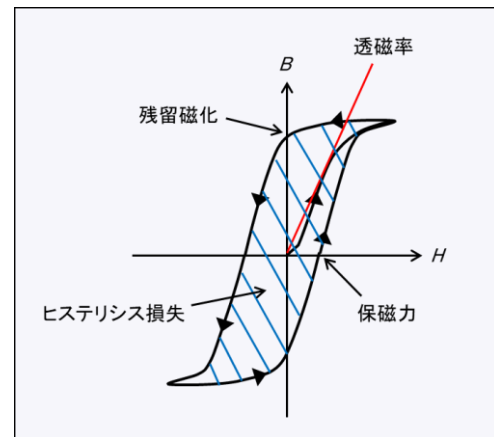


図 1-16 磁気ヒステリシス曲線

磁気ヒステリシス曲線を取得する方法として一般的に普及しているものとしては、表 1-5 に示すような、サーチコイルまたは振動試料型磁力計 VSM (Vibrating Sample Magnetometer) を使用する方法が挙げられる。また、比較的簡易に磁気計測を行うために利用されるガウスメーターについても参考として記載した [19]。図 1-17 左図に示すサーチコイル式では、リング状に加工した測定試料に対して励磁を行い、生じた磁化による誘導起電力を検出コイルで取得している。右図に示す VSM 式では、磁化した測定試料を振動させることにより、外部磁場が作る磁束の変化を検出する方法である。どちらの方法においても、測定したい試料をリング状に加工すること、VSM 装置に収まるような寸法にする必要があり、試料破壊型の磁気ヒステリシス測定法である。また、測定対象にコイルを巻き付けることによって、励磁と磁化検出を行う方法が、実際の橋梁用ケーブルで報告されている [20]。しかし、局所的な磁気情報は得ることができないこと、鋼板に対しては、そもそもコイルを巻き付けることは現実的ではないことなど、従来の磁気計測では実際の鉄鋼製品やインフラ構造物の磁気ヒステリシス特性を

非破壊に計測・画像化することは非常に困難である。一般的な磁気センサであるガウスメーターでは、対象物の表面に漏れ出てくる磁束(漏洩磁束)を検出する。そのため、低磁場領域では大部分の磁束が対象内部に留まるため、この領域の磁気情報を得ることは困難になると考えられる。しかしながら、ASEM法では物質内部の本質的な磁化を変調することによる電磁放射を観測しているため、低磁場領域を含む磁気ヒステリシス曲線の取得が可能になる。また、超音波を利用した変調であるため、局所的な磁気ヒステリシス測定からの磁気情報の画像化も可能である。

さらに、ASEM法の検出コイルに関する実用的な測定上のメリットとしては、漏洩磁束は距離による減衰が大きく、対象物と磁気センサの距離(リフトオフ)が大きい場合は、十分な検出が難しくなる。一方、電磁波は漏洩磁束に比べて、明らかに遠方まで到達できる利点を有しており、検出コイルのリフトオフを大きくすることが可能である[21]。

表 1-5 代表的な磁気ヒステリシス取得方法

測定タイプ	サーチコイル	VSM	(ガウスメーター)
原理	電磁誘導	電磁誘導	ホール効果
測定する物理量	磁束量	磁束量	表面磁束密度
測定可能な特性	$B-H$ 曲線	$B-H$ 曲線	表面磁束分布
特徴	リング形状のサンプル	小径, 粉末サンプル	漏れ磁場の検出

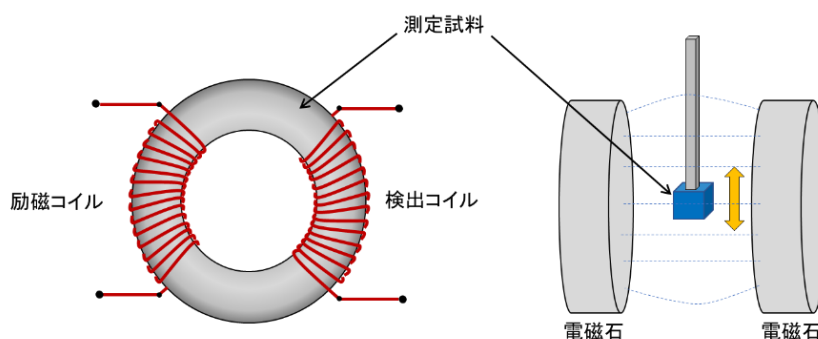


図 1-17 磁気ヒステリシス曲線測定方法
(左:サーチコイル式, 右:VSM式)

1.5 新しい磁気計測技術

本節では、新しい磁気計測手法として、超音波によって生じる電磁放射とその検出技術について、先行研究に基づいて説明を行う。

1.5.1 ASEM 応答の原理[4], [22]

ここでは、ASEM 応答の原理について、数式を用いて簡単に解説を行う。物質中に進入した音波が電磁波を生成し、それがアンテナで検出されるまでの過程を追っていく。

音波によって物質に微小応力が加わった場合の力学的応答を考える。ここで、物質が断熱状態で、熱との相互作用を無視した場合、磁性体に成り立つ式は以下のように示され、この(1.26), (1.27)式を圧磁基本方程式と呼ぶ。

$$S_m = s_{mn}T_n + d_{jm}H_j \quad (1.26)$$

$$B_j = d_{jm}T_m + \mu_{ji}H_j \quad (1.27)$$

ここでは、ひずみ S 、磁束密度 B 、弾性コンプライアンス定数 s 、圧磁係数 d 、応力 T 、透磁率 μ 、磁場 H を表している。また、 $i, j = 1, 2, 3$ 、 $m, n = 1, 2, \dots, 6$ である。ここに、超音波によって、応力 $T_m(t) = T_0 \sin \omega t$ で時間的変調を加えると、磁束密度 B の時間的変化は以下のように微分形で表すことができる。

$$\frac{dB_j(t)}{dt} = d_{jm} \frac{T_m(t)}{dt} = d_{jm} T_0 \omega \cos \omega t \quad (1.28)$$

これは、超音波で励起された領域の磁気双極子モーメント $\mathbf{m}(t)$ が弾性周波数で振動しているとみなすことができる。次に、この時間的に変調する磁束密度 B から生じる磁気双極子放射による電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} は以下のように表される。

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{\dot{\mathbf{m}} \times \mathbf{n}_0}{r^2} + \frac{\ddot{\mathbf{m}} \times \mathbf{n}_0}{cr} \right) \quad (1.29)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{n}_0(\mathbf{n}_0 \cdot \dot{\mathbf{m}}) - \dot{\mathbf{m}}}{r^3} + \frac{3\mathbf{n}_0(\mathbf{n}_0 \cdot \ddot{\mathbf{m}}) - \ddot{\mathbf{m}}}{cr^2} + \frac{\mathbf{n}_0(\mathbf{n}_0 \cdot \ddot{\mathbf{m}}) - \ddot{\mathbf{m}}}{c^2r} \right) \quad (1.30)$$

ここで、単位ベクトル $\mathbf{n}_0 = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$ は磁気双極子モーメントの位置から距離 r だけ離れた観測点に向けたベクトル、 μ_0 は真空の透磁率、 c は光速である。ASEM 応答の実験セットアップでは、対象とアンテナ間の距離は電磁波の波長に比べて十分小さいため、近接場成分を検出していると考えられる。式(1.29), (1.30)のうち、近接場の成分を表す r^{-3} の項を抜き出すと、

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (1.31)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{n}_0(\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}}{r^3} \right) \quad (1.32)$$

このように、磁気分極が変調される場合、近接場項は磁場成分だけが残る。

磁気双極子 $\mathbf{m} = (0, 0, m(t))$ から r 離れた位置における磁束密度 \mathbf{B}_{near} は式(1.32)から、

$$\mathbf{B}_{\text{near}}(r, t) = \frac{\mu_0 m(t)}{4\pi r^3} (3 \sin \theta \cos \theta \cos \varphi, 3 \sin \theta \cos \theta \sin \varphi, 3 \cos^2 \theta - 1) \quad (1.33)$$

となる。この式の各成分は、アンテナを各成分の方向に向けたときに検出する磁束密度を表している。アンテナを貫く磁束 Φ 、アンテナの断面積 S 、コイルの巻き数 N とすると、アンテナに誘起される電圧は、

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \right) = -NS \frac{d}{dt} \mathbf{B}_{\text{near}} \quad (1.34)$$

この時、 r 離れた位置における磁気双極子 \mathbf{m} と同方向の磁束密度変化によって誘起される電圧は、

$$V = -\frac{\mu_0 NS m(t)}{4\pi r^3} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (1.35)$$

アンテナを磁気双極子モーメント $m(t) = m_0 \sin \omega t$ のベクトルと同一軸から離れた位置において得られる電圧は、

$$V = \frac{\mu_0 NS \omega m_0}{4\pi r^3} \cos \omega t \quad (1.36)$$

となる。実際の誘起電圧は実験装置の構成による損失があり、正確に見積もることが難しいが、式(1.37)のように、ASEM 応答によりアンテナに誘起する電圧 V_{ASEM} が N 、 S 、 ω 、 m_0 に比例し、距離 r の 3 乗に反比例することが分かる。

$$V_{\text{ASEM}} \propto \frac{NS \omega m_0}{r^3} \quad (1.37)$$

以降はアンテナに誘起する電圧 V_{ASEM} を ASEM 信号電圧とし、様々な分析により対象物の電磁気特性を明らかにしていく。

1.5.2 ASEM 応答の検出[3]

生嶋らは圧電材料(GaAs), 生体材料(骨), 木材, プラスチック, フェライトに対する超音波照射による電磁応答の検出技術について報告している. 例えば, 固体物質なら圧電効果や圧磁効果(磁歪効果)を通して周辺に電磁場が発生することを利用する. 図 1-18 は圧電材料である GaAs から ASEM 応答が観測された結果である. ちなみに, 非圧電材料である Si から ASEM 信号は得られていないことが分かる. 水中の音速は 1500 m/s であるので, 例えば, 超音波振動子と対象物との距離が 60 mm とすると, 対象物からのエコーは往復の時間で 80 μs に生じる. 一方, ASEM 信号は超音波が対象物に当たった瞬間に発生する電磁波であるため, 復路の時間は無視できるほど短い. したがって, エコー信号の半分の時間 40 μs で ASEM 信号が生じる. また, 図 1-18 の各 ASEM 波形には, 励起パルスによるノイズ(0 μs 付近)およびエコーにより発生する超音波振動子の電磁ノイズ(80 μs 付近)が含まれている. これらのノイズは, 対象物からの目的信号よりもはるかに強大であり, 目的信号と同じ周波数であることから, 狭帯域のアンテナを使用したとしても避けることができない. よって, 振動子と対象物の間に音波媒体(遅延材)を設けることや, 音波伝搬時間より十分短い超音波励起パルスを用いることにより, 目的の ASEM 信号を時間的に分離することを可能にしている. また, 圧電的に活性な GaAs 結晶の[110]方向に超音波照射方向を合わせると, 著しく大きな ASEM 信号が観測されている. これは, ASEM 信号が GaAs 結晶の圧電性を介して生成されたものであることを明示している.

さらには, 生体材料(骨), 木材, プラスチック, フェライトからも ASEM 信号が生じることも報告され(図 1-19), 繊維・高分子・強誘電体材料の物性評価や画像化への応用の可能性が示された.

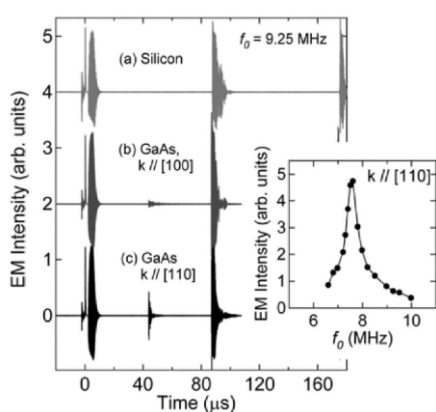


図 1-18 Si と GaAs の ASEM 信号波形[3]

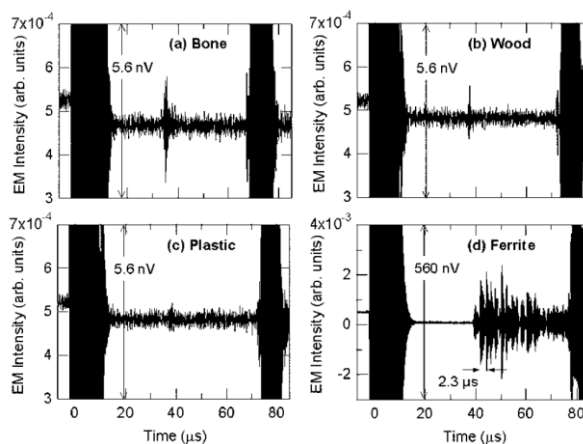


図 1-19 様々な材料の ASEM 信号波形[3]

1.5.3 超音波による磁気イメージング[4]

物質の磁気特性は様々な手法でイメージングが行われてきた。例えば、高感度接触式磁界センサー、電子顕微鏡を利用した方法(ローレンツカによる電子の動きの変化を検出する方法)、カー効果を利用した光学的手法などである。電子顕微鏡や光学技術は、大がかりな設備が必要とされるため、実験室での使用に限られている。そこで、全く新しい手法として、ASEM 応答を利用した磁気イメージングが報告された。図 1-20(a)は ASEM 法を用いた磁気イメージングである。測定試料は、挿入写真に示すように上から、鉄箔、銅箔、フェライト磁石 (SrO/6Fe₂O₃) である。イメージング画像は ASEM 信号電圧の Peak to Peak 電圧 (V_{pp}) の強度をプロットしたものである。白領域は高い ASEM 信号強度を表している。フェライト磁石からは明確な ASEM 信号が得られ、鉄箔からは

端部に沿った弱い信号が観測されている。これは試料加工による磁化の発現だと考えられる。銅箔については、強磁性体ではないので信号は観測されない。図 1-20(b)は別の鉄箔を利用した磁気イメージングである。この鉄箔を半分に折り曲げることによって、意図的に歪みを与えると、折り目に沿って信号が観測されることがわかる(図 1-20(c))。

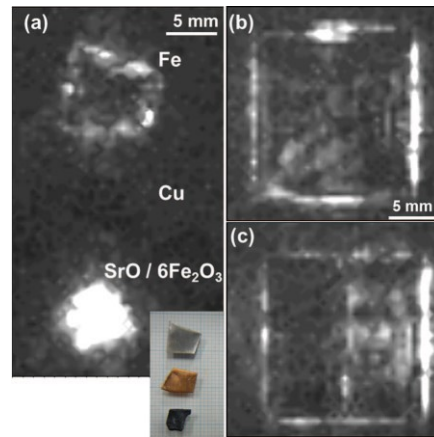


図 1-20 (a) ASEM 法による磁気イメージング。鉄箔の ASEM イメージ (b)折り曲げ前 (c)折り曲げ後[4].

図 1-21 はトモグラフィ(断層像)測定結果である。通常の超音波エコー信号のトモグラフィ(図 1-21(a))によって、内部に埋め込まれている物体の存在や形状を確認できる。図 1-21(b)に示すエコー トモグラフィと同時に実施した ASEM トモグラフィでは、物体が強磁性体かどうか判断することが可能である。超音波周波数を大きく下げれば、コンクリートなどに埋め込まれた鉄鋼材料に対しても同様の測定が可能である。

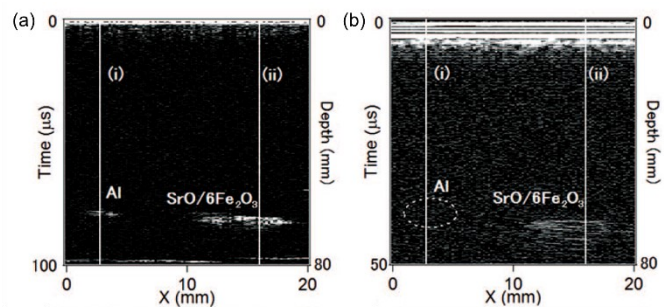


図 1-21 (a)通常の超音波エコーのトモグラフィ (b) ASEM トモグラフィ[4].

次に、塑性変形を起こしたステンレス鋼 (SUS304) の ASEM イメージングを図 1-22 に示す。左図は応力を与えていない試料である。ASEM 信号は試料の端部に沿って観測されている。これは前述のように、加工製造時の残留磁化だと考えられる。ここで、600 MPa の引張応力を印加すると試料の中央部からも ASEM 信号が観測されるようになる(図 1-22 右)。ASEM 信号が発現した理由としては、応力印加によって、非磁性のオーステナイト相から強磁性のマルテンサイト相への転移によるものだと考えられている。このように、磁気イメージングによって、塑性変形などの材料力学的な挙動を画像化することに成功している。

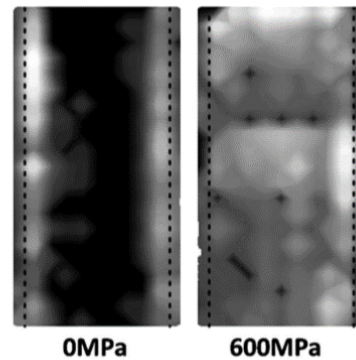


図 1-22 オーステナイトステンレス鋼の ASEM イメージ (左) 塑性変形前 (右) 塑性変形後[4].

1.5.4 超音波による磁気ヒステリシス測定[5]

全ての強磁性体は、磁場 H に対する磁束密度 B のヒステリシスを示す。透磁率、保磁力、残留磁化、ヒステリシス損失などのヒステリシス特性は、ひずみや応力の影響を受けることが知られている。前節 1.5.3 では空間的な磁気分布を超音波イメージングで取得できることを示した。しかしながら、磁気ヒステリシス測定は、材料の独立した多数のヒステリシスパラメータを得ることができるため、対象物の磁気特性を正確に把握する際には必要になると考えられる。線形応答領域における微小な可逆変化に対して、圧磁係数 d_{jm} は

$$d_{jm} = \left(\frac{\partial B_j}{\partial T_m} \right)_H = \left(\frac{\partial M_j}{\partial T_m} \right)_H \quad (1.38)$$

$j = 1, 2, 3, m = 1, 2, \dots, 6$ と書ける。ここに音圧 $T_m(t)$ が加わると、対象物の磁束密度の変化は以下のように表される。

$$\frac{dB_j}{dt} = \left(\frac{\partial M_j(H_j, T_m)}{\partial T_m} \right)_H \frac{dT_m}{dt} = d_{jm}(H) \frac{dT_m}{dt} \quad (1.39)$$

ASEM 法では、磁束密度の時間微分によって生じる磁気双極子場を検出しているため、ASEM 信号電圧 $V_{\text{ASEM}}(H, t)$ の磁場依存性は圧磁係数 $d_{jm}(H)$ の磁場依存性を測定していることになる。

ここで、従来の磁気計測で得られる磁気ヒステリシス曲線 ($B-H$ 曲線) と ASEM 測定から得られる ASEM ヒステリシス曲線の関係性を図 1-23 を使用して説明する。従来の磁気計測

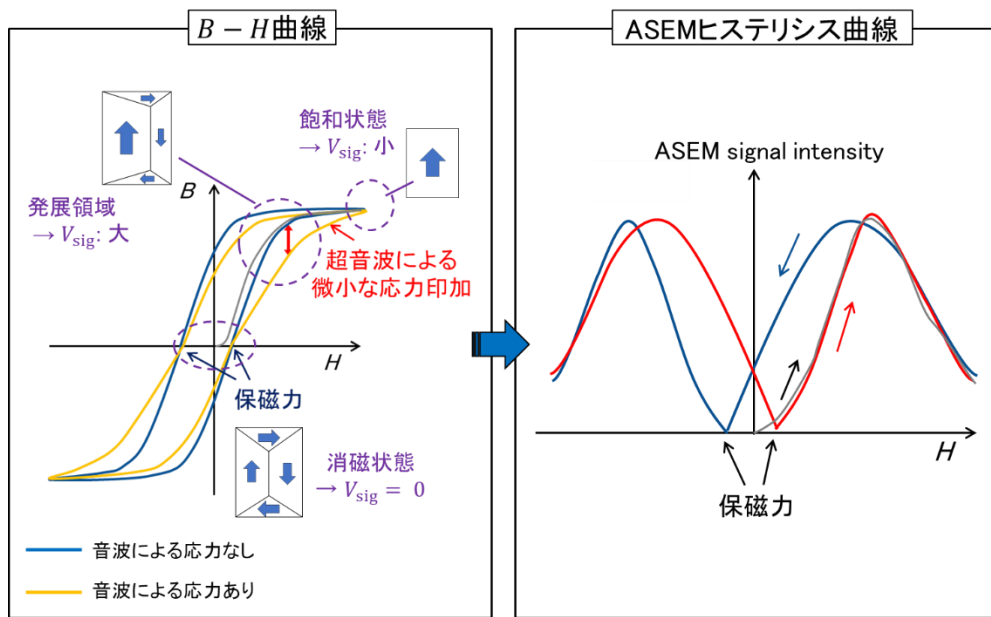


図 1-23 $B-H$ 曲線と ASEM ヒステリシス曲線の関係[5]

から得られる $B-H$ 曲線において、強磁性体に超音波による応力がない場合は青線のループを描く。次に、超音波によって応力を与えると、対象物に非常に微小な歪が生じ、局所的な圧磁係数 d_{10c} に応じて、磁化が変化する。磁化が変化したことによる $B-H$ 曲線を黄線で示した。青線と黄線の差が超音波照射による磁化変化分である。このように、超音波による変調によって生じる磁化変化が、周囲へ向けて電磁放射を発生させ、それによってコイルに誘起される電圧を観察していることになる。

このような現象を磁区の挙動から考えてみると、対象物が消磁しているとき ($B = 0$) は、各磁区がランダムな方向に向いているため、マクロ領域では微分磁化は正味でゼロと考えられる。よって、検出アンテナに生じる電圧 V_{sig} (ASEM signal intensity) はゼロになると考えられる。徐々に外部磁場 H を増やしていくと、ある方向に磁区が揃っていく場合 (発展領域) では、系が磁場と応力に対して敏感な状況のため、磁壁移動が起こりやすく、 V_{sig} が増大すると考えられる。さらに磁場を増やすと、磁区が一方向に安定的に揃う (飽和状態) ことになる。この状態では、10 kPa 程度の音圧では磁化の変調を起こすことができず、逆に V_{sig} は小さくなると考えられる。以上のように、外部磁場 H を増減させると、図 1-23 右図のような ASEM 応答によるヒステリシス曲線を描くことができる。この ASEM ヒステリシス曲線は、超音波が照射された局所的な位置の圧磁係数 d_{10c} の外部磁場 H 依存性を表している。

図 1-24(a) は、ASEM 強度と漏洩磁束密度のヒステリシスループを示している。また、黒線、青線、赤線はそれぞれ初期上昇磁化、下降磁化、再上昇磁化を表している。図 1-24(b) に示

すように、ヒステリシスループの最小値 $H_{\min} \cong \pm 2 \text{ kA/m}$ で得られる信号強度は、消磁状態の強度とほぼ等しいので、 H_{\min} は通常の $B-H$ 曲線から得られる保磁力 H_c に相当する磁場であることがわかる。図 1-24(c) では、漏洩磁束のヒステリシスループと初期磁化曲線はほぼ同じ挙動であり、 H_c の正確な評価は難しいと考えられる。これは、低磁場では大部分の漏洩磁束が物質内部に閉じ込められていることに起因している。一方、ASEM 法では、物質内部の本質的な磁化を変調しているため、ヒステリシス全体を明らかにすることが可能である。

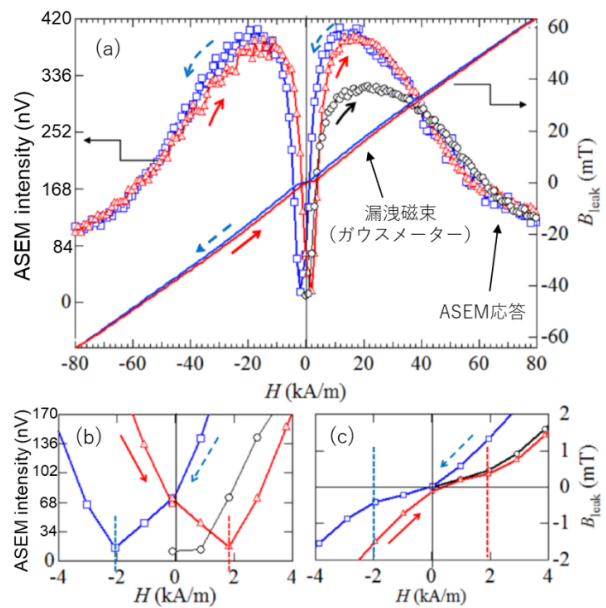


図 1-24 (a) ASEM 強度と漏洩磁束密度のヒステリシスループ (b) ASEM 強度の低磁場拡大図 (c) 漏洩磁束密度の低磁場拡大図[5].

図 1-25 は ASEM 法による鉄板の磁気イメージングである。図 1-25(a) は人工欠陥のない鉄板、図 1-25(b) は人工欠陥のある鉄板である。また、人工欠陥は黒丸で示した。欠陥のない鉄板では、走査領域における ASEM 強度は一様な状態である。一方、欠陥のある鉄板では ASEM 強度の明確なコントラストが観察されている。欠陥の存在によって引き起こされる磁束の変化は、実際の欠陥の幾何学的なサイズよりも大きな領域に拡大することから、通常の超音波による調査よりも、明らかに有効性を示している。また、母材の透磁率と十分に異なる領域がある場合は、同様の ASEM パターンが期待できる。このように、ASEM 法は一般的なエコー検査の適用範囲を超える可能性を秘めている。

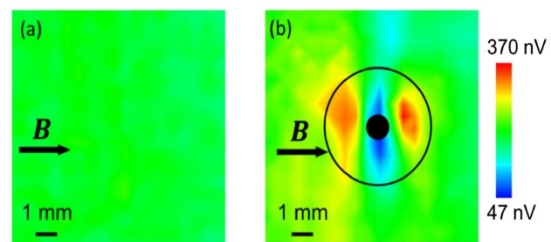


図 1-25 鉄板の ASEM イメージ。
(a) 欠陥なし (b) 欠陥あり[5].

1.5.5 超音波による磁気ダイナミクスの測定(位相検波)[6]

前節 1.5.4 までは, ASEM 測定で信号振幅のヒステリシスを得ていた. つまり, 位相遅れは無視していた. 山田らは, ASEM 応答の位相敏感検波(PSD : Phase Sensitive Detection)を發展させ, 複素圧磁係数の実部と虚部を導き出している. ASEM 応答の信号振幅は音響的に励起された領域の局所的な圧磁係数の大きさによって決定され, ASEM 信号成分を音波の位相に対して「同相成分 d' 」と「直交成分 d'' 」に分けて考えている. 線形応答理論に基づくと, 局所的な複素圧磁係数は $d_{loc} = d' + id''$ と表される.

ここでは, 鉄板の異なる表面状態におけるヒステリシス測定を実施している. ASEM 信号の発生領域は, 電磁波のスキンドープス(10 MHz で深さ 10 μm 程度)に制限される. つまり, ASEM 応答は鉄板の表面状態に非常に敏感であるといえる.

図 1-26(a), (b)は鉄板のミルスケール(酸化鉄層)面と鉄鋼(酸洗した領域)面における ASEM ヒステリシス曲線である. サンプル写真の丸は ASEM 測定位置を示している. ミルスケール面では $H_1 \cong 10 \text{ kA/m}$ において異常な鋭いピークが観察されている. PSD によって, 実部 $V_x \propto d'$ と虚部 $V_y \propto d''$ に分離すると(図 1-27(a), (b)), (i)ミルスケール面では, 実部のヒステリシスループの保磁力が $H_0 = 18 \text{ kA/m}$ まで広がっていること, (ii)低磁場領域で虚部 d'' の寄与が大きいことがわかる. ミルスケール面で観測されたヒステリシスループの広がり, 酸化鉄(マグネタイト)の保磁力が鉄鋼よりも高いことに起因していると考えられる. また, PSD により, ミルスケール面で観測された異常な鋭いピークが, ASEM 応答の著しい位相シフトに起因していることが明らかとされている.

低磁場領域では, 磁壁の動きが磁気特性に大きく影響することが知られている. ゆえに, 磁壁の動きが ASEM 応答の虚数部をもたらすと考えられる. 磁場 H_1 では磁壁の動きに顕著な変化が起きていると推察され, ドメインダイナミクスにおける臨界磁場である可能性を示している. また, 鉄鋼面で虚数部 d'' が現れる理由として, 鉄鋼表面の状態における特性緩和時間が強く影響している可能性がある.

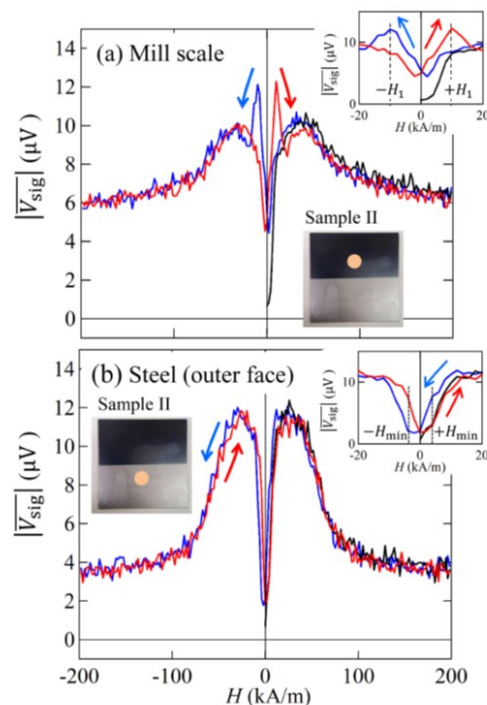


図 1-26 ASEM ヒステリシス曲線.
(a) ミルスケール面 (b) 鉄鋼面[6].

ヒステリシス損失は、従来の $B - H$ 曲線の閉ループから得られるもので、これは欠陥に磁壁がピン止めされることで生じる準静的な磁気損失に起因する。ASEM 測定では、同相成分 $\overline{V}_X(H)$ (または $d'(H)$) のループは、磁気機械効果に関連した準静的な損失とみなしている。さらに、ASEM 法では交流磁場が印加されないため、古典的な渦電流損失は優位にはならない。そのため、磁壁の動きによって引き起こされる微視的な渦電流効果を含む異常損失が、導電性の強磁性体中を伝搬する超音波の減衰の原因の一つと考えられている。直交成分 $\overline{V}_Y(H)$ (または $d''(H)$) のループについては、このような微細な散逸プロセスに起因する異常損失に由来すると考えられている。

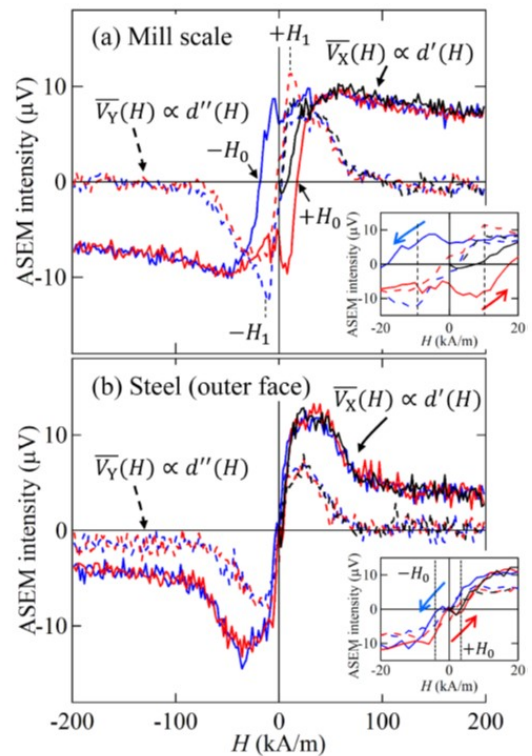


図 1-27 \overline{V}_X (実線) と \overline{V}_Y (破線) の磁気ヒステリシス. (a) ミルスケール面 (b) 鉄鋼面[6].

1.6 本研究の目的

従来の鉄鋼製品の製造プロセスや新規の研究開発において、製品の出来栄えに影響する残留応力を把握するニーズが引き続きあることや、近年では橋梁などのインフラの長寿命化に向けた死荷重測定に対して、非破壊の残留応力評価技術の要求が高まっている。

本研究では、鉄鋼材料のような強磁性体の残留応力を評価するために、磁性が応力に敏感に応答することを利用しようと考えた。磁気特性の評価は磁気ヒステリシス曲線($B-H$ 曲線)を取得し、そこに含まれる磁気パラメータを利用することが最適だと考えられる。

先行研究[3]-[6]によって、ASEM 法の物理的メカニズムが明らかにされ、超音波によって誘起される電磁応答と検出される信号とを関係づけることにより、ASEM 法による強磁性体の局所的な磁気ヒステリシスを非破壊で取得することが可能になった。さらに、磁気イメージングによって、塑性変形などの材料力学的な挙動を明らかにし、ASEM 法が強磁性体の磁気計測へ応用できることを実証した。

そこで本研究の目的は、ASEM 法を強磁性体金属の残留応力評価に応用するために、鉄鋼材料の力学的挙動と ASEM 応答から得られる磁気特性を定量的に結び付けることである。特に製品に悪影響を与える引張残留応力について注目した。

鉄鋼材料に対して ASEM 法による残留応力評価を実施するにあたり、現状では以下のような課題があった。(i)応力と ASEM 応答から得られる磁気特性が定量的に結び付けられていないこと、(ii)その定量性は既存の残留応力測定法と比べて妥当であるかどうか、である。

これらの課題を解決するため、以下の手順(1)~(3)で研究を進めた。

- (1) 鉄鋼材料の異なる表面状態における局所的磁気ヒステリシス特性を調査する(第2章)。
- (2) 引張応力と ASEM 法で取得した磁気パラメータを定量的に結び付け、残留応力評価に対して有望な磁気パラメータを探し出す(第3章)。
- (3) 意図的に引張応力分布を与えたサンプル(溶接試験体)を利用して、既存の残留応力測定法と ASEM 法の結果を比較し、妥当性の検証を行う(第4章)。

第4章の最後では、ASEM 法による残留応力イメージングを実施し、鉄鋼材料に対して、実用に向けた残留応力評価のガイドラインを提案する。

1.7 参考文献

- [1] 羽田野 英明, 村上 茂之, 六郷 恵哲, 依田 照彦, ミネアポリス I-35W 橋崩壊事故に関する NTSB の報告書の概要, 橋梁と基礎, 44 巻, 7 月号, p. 37-42, 2010.
- [2] 望月 正人, “残留応力と保全-第 2 回- 溶接残留応力が強度・破壊に及ぼす影響,” 保全学, vol. 5, No.3 (2006).
- [3] K. Ikushima, S. Watanuki, and S. Komiyama, “Detection of acoustically induced electromagnetic radiation”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 19, pp. 194103(1-3), 2006.
- [4] H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, and Y. Ishizawa, “Magnetic sensing via ultrasonic excitation,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 4, pp. 044903(1-5), 2013.
- [5] H. Yamada, K. Watanabe, and K. Ikushima, “Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns measured by acoustically stimulated electromagnetic response in a steel plate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 8, pp. 086601(1-4), 2015.
- [6] H. Yamada, J. Yotsuji, and K. Ikushima, “Phase-sensitive detection of acoustically stimulated electromagnetic response in steel,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 7S1, pp. 07LB09(1-5), 2018.
- [7] François Hild and Stéphane Roux, “Digital Image Correlation,” in *Optical Methods for Solid Mechanics: A Full-Field Approach*, Wiley-VCH, 2012, p. 183.
- [8] Schajer, G. S., Winiarski, B., Withers, P. J. “Hole-Drilling Residual Stress Measurement With Artifact Correction Using Full-Field DIC.” *Experimental Mechanics*, 53(2), 2013, pp. 255-265.
- [9] 朝倉 悠太, 及川 秀行, “デジタル画像相関法を用いたひずみ分布計測,” IIC REVIEW, 2020/10, No.64, pp. 46-51.
- [10] G.S. Schajer and C. O. Ruud, “Overview of residual stresses and their measurement,” in *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, p. 8, 2013.
- [11] 非破壊検査技術シリーズ, ひずみゲージ試験 II, 日本非破壊検査協会, pp. 15-17, 2017.
- [12] ASTM E837-13a, “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method” .

- [13] *Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction. SAE J784, Society of Automotive Engineers Handbook Supplement*, SAE International, Warrendale, PA, USA, pp. 17-18, 2003.
- [14] Don E. Bray, "Ultrasonics," in *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, pp. 259-277, 2013.
- [15] S. Abuku, "Magnetic Studies of Residual stress in iron and steel induced by uniaxial deformation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 7, pp. 1161-1170, 1977.
- [16] 村井 亮介, 柳沢 栄一, 岡 俊蔵, 廣江 哲幸, 安福 精一, "磁歪法による鋼橋の動的応力測定ならびに実橋鋼材感度校正方法に関する検討," *溶接学会論文集*, vol. 22, No. 3, pp. 411-416, 2004.
- [17] 河田 幸三, "光弾性, 光塑性の実験法," *高分子*, vol. 8, No. 3, pp. 153-157, 1959.
- [18] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* (Taylor & Francis, London, 3rd ed., p. 86, 2016).
- [19] 太田 恵造, *磁気工学の基礎 I*, 共立出版, pp. 56-65, 1990.
- [20] C. Cappello, D. Zonta, H. Ait Laasri, B. Glisic, and M. Wang, "Calibration of Elasto-Magnetic Sensors on In-Service Cable-Stayed Bridges for Stress Monitoring," *Sensors*, vol. 18, Issue 2, pp. 466-480, 2018.
- [21] J. Yotsuji, K. Ikushima, and H. Yamada, "Flaw Detection for Thin Sheet Using Acoustic Stimulated Electromagnetic Wave Technique," *ISIJ International*, vol. 60, no. 5, pp. 948-953, 2020.
- [22] 山田 尚人, "超音波誘起電磁応答を利用した磁気測定と非破壊検査への応用," 東京農工大学, 博士論文, pp. 19-30, 2014.

第2章 鉄鋼材料の磁気ヒステリシスの圧延方向依存性

2.1 緒言

本章の目的は、鉄鋼材料に対して ASEM 法を適用するにあたり、対象の局所的な磁気特性の圧延方向依存性を把握することである。実用面においては、圧延方向によって著しい磁気特性の違いが生じる場合、実際の鉄鋼製品に対して ASEM 法を適用するには、その製品の圧延方向を事前に知っておく必要がある。鉄鋼材料の製造過程では、個々の結晶粒の磁化容易軸が圧延方向に沿って配向される傾向がある。つまり、鉄鋼材料の結晶構造が異方性であるならば、外部から印加した磁場に対する磁化応答は、圧延方向とその垂直方向で異なるはずである。結晶方位と磁化曲線の関係性については、既に報告されており、図 2-1 に示すように、[100]方位が最も磁化しやすく、[111]方位は磁化しにくいことが分かる。体心立方晶(Body Centered Cubic : Bcc)の鉄鋼材料の磁化容易軸は[100]方向であることが報告されており[1]、一般的な市販の鋼板であったとしても、圧延方向と垂直方向の磁気特性が異なる可能性があるため、容易軸を事前に把握しておくことが必要である。実際の磁化容易軸の応用としては、方向性電磁鋼板の圧延方向の優れた磁気特性を利用した電気製品の省エネルギー化などがある[2]。

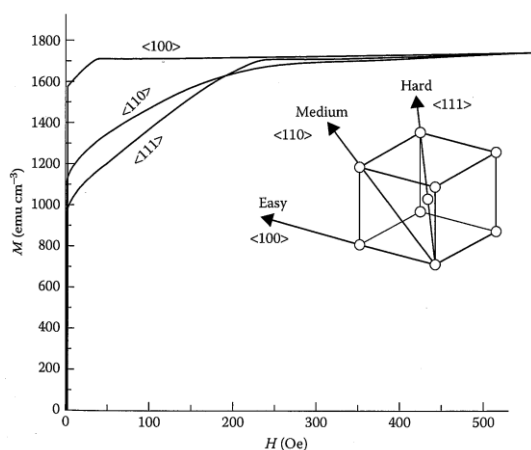


図 2-1 鉄単結晶の磁化曲線[1]

また、磁気特性への影響については、鉄鋼材料の内層と外層でも同じではない

と考えられる。鉄鋼材料の内外層では、圧力のかかり方が異なり、圧延の影響は通常、鉄鋼材料の外層で顕著に表れやすいと考えられる。また、内外層で熱処理温度、冷却過程が異なるため、結晶粒径の差としても違いが現れると考えられる[3]。意図的に結晶粒径を制御する方法として、鉄鋼材料に対して、急速加熱と急速冷却工程によってオーステナイトの粒径を微細化させる技術[4]が報告されている。これは温度履歴が結晶粒径を決める重要な要素であることを示している。

本章では鉄鋼材料をリング状に加工した試験体を用意した。これは磁気ヒステリシス曲線(B-H曲線)の測定において、反磁場の影響を受けないようにするためである。

本章の流れを以下に示す。

- (1) 研究対象となる鋼種を選定し、 $B-H$ 曲線取得のための実験サンプルを製作する(2.2節)。
 - (2) 鉄鋼の磁気ヒステリシス特性を把握するために、 $B-H$ 曲線を取得する。これは、従来の磁気ヒステリシス測定であるため、バルクとしての測定である(2.3節)。
 - (3) 鉄鋼の内外層の結晶粒径を確認する(2.4節)。
- 上記の項目を実施し、実験サンプルの基本的な磁気・材料特性を明らかにした上で、以下のように評価を進めていく。
- (4) 鉄鋼内外層の圧延方向の異なる位置において、ASEM 測定を実施する(2.5節)。
 - (5) 得られた ASEM ヒステリシス曲線と $B-H$ 曲線との比較・分析を行う(2.6節～2.7節)。

2.2 実験サンプル

2.2.1 研究対象の鉄鋼材料

本研究のターゲット材は、機械構造用炭素鋼材 S25C である。25 とは炭素含有量が 0.25 % であることを示している。表 2-1 に機械構造用炭素鋼材の種類を示す。炭素量を変化させることで鋼材の硬さや切削性を調整することが可能である。S25C は化学的成分が日本工業規格 JIS G4051:2009 によって規定されており、C(炭素)、Si(ケイ素)、Mn(マンガン)、P(リン)、S(硫黄)の含有率が表 2-2 に示すように定められている。化学的成分が規定されているため、品質が高く、炭素量も多いため切削性が高いことが特徴で、鉄鋼機械製品などに使用される。

鋼構造物で最も一般的に利用されている鋼材は一般構造用圧延鋼材 SS400 (Structural Steel)であり、400 とは鋼材の引張強さ 400 MPa(下限値)を表している。この鋼材は鋼板や棒鋼のような形状で建築物や土木構造物に広く使われている。また、含有する炭素量が低いいため低炭素鋼(軟鋼)に分類され、焼き入れによって機械的特性を向上させることが難しい。また、JIS によって機械的強度が規定されている。つまり、降伏応力、耐力、引張強さ、伸びなど外力に対する機械的特性が決められているが、化学的成分(いくつかの主要元素)についての規定がない。強度が保証されている SS400 は、コストパフォーマンスが高く、橋梁などに大量に使用されている。

表 2-1 機械構造用炭素鋼材の炭素元素割合 [5]

0.08-0.13	0.18-0.23	0.22-0.28	0.37-0.43	0.52-0.58
S10C	S20C	S25C	S40C	S55C
軟 ←-----→ 硬				

表 2-2 S25C の化学的成分 [5]

	Si	Mn	P	S
S25C	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030以下	0.035以下

本研究では鋼材の磁気特性を評価するにあたり、含有されている元素の種類や分量が磁気特性に影響を与えると考え、化学的成分が定められている S25C を研究対象として選定した。詳しく述べると、鋼材の磁気特性は主として含まれる Fe(鉄)と、含有量は圧倒的に少ないが、C, Si, Mn, P, Sによって決まってくると考えられる。単体で磁性を有するものとしてFe, Ni, Co が代表的だが、そこに不純物として他元素が入ることで、磁性が大きく変化する可能性がある。したがって、磁気特性の研究では鋼材の強度より、化学的成分を優先すべきである。機械構造用炭素鋼材は、表 2-1 に示すように炭素量によって明確に分類されている。同じ機械構造用炭素鋼材であっても、S10C（炭素含有量:0.10%）とS55C（炭素含有量:0.55%）では炭素量が大きく異なるので、両者の磁気特性に差が現れることは自然と予想される。実際に鋼材の磁性が炭素量によって影響を受けることが分かっており、様々な鋼種、熱処理条件による磁気的性質が報告されている[6]。例えば、焼鈍後の S10C と S55C の保磁力(抗磁力)はそれぞれ 2.2 Oe (エルステッド), 8.1 Oe であり、SI 単位表示では、175 A/m, 646 A/m である。両者には約 3.7 倍の開きがある。

2.2.2 実験サンプルの製作

実験サンプルの材質は S25C であり、市販のミルスケール(酸化鉄膜)付きの厚さ 25 mm の板(図 2-2)から加工した。図 2-3 に製作手順を示す。まず、厚さ 25 mm の板材からガス溶断で厚さ 25 mm, 直径 50 mm, 内径 35 mm となるようにリング状に切り出した。次に、図 2-3 の下図に示すように、切り出したリングの片面を 6 mm だけ機械加工で除去し、19 mm 厚のサンプルにした。さらに、初期残留応力を低減するために焼鈍を実施した。大気中での焼鈍は鋼材表面に酸化膜や錆が強く付着するため、水素雰囲気中で実施している。水素ガスは還元

性ガスであるので、サンプル表面の微量な酸化物を除去し、金属光沢を取り戻す効果がある。熱処理条件としては、図 2-4 に示すように、2 時間かけて昇温し、680°Cで 3 時間保持、その後、6 時間程度かけて自然降温した。ここで、図 2-3 機械加工図に示すように、リングの機械加工面は元の板材の内部に存在していたので「内部側」と定義し、未加工の面は元の板材の表面側なので「表層側」とした。最後に、表層側については酸洗によってミルスケールを除去している。完成したリングサンプルを図 2-5 に示す。圧延方向については図 2-3 の機械加工図に示すように、サンプル完成後に側面に刻印を入れて判別できるようにした。



図 2-2 市販の S25C 鋼板

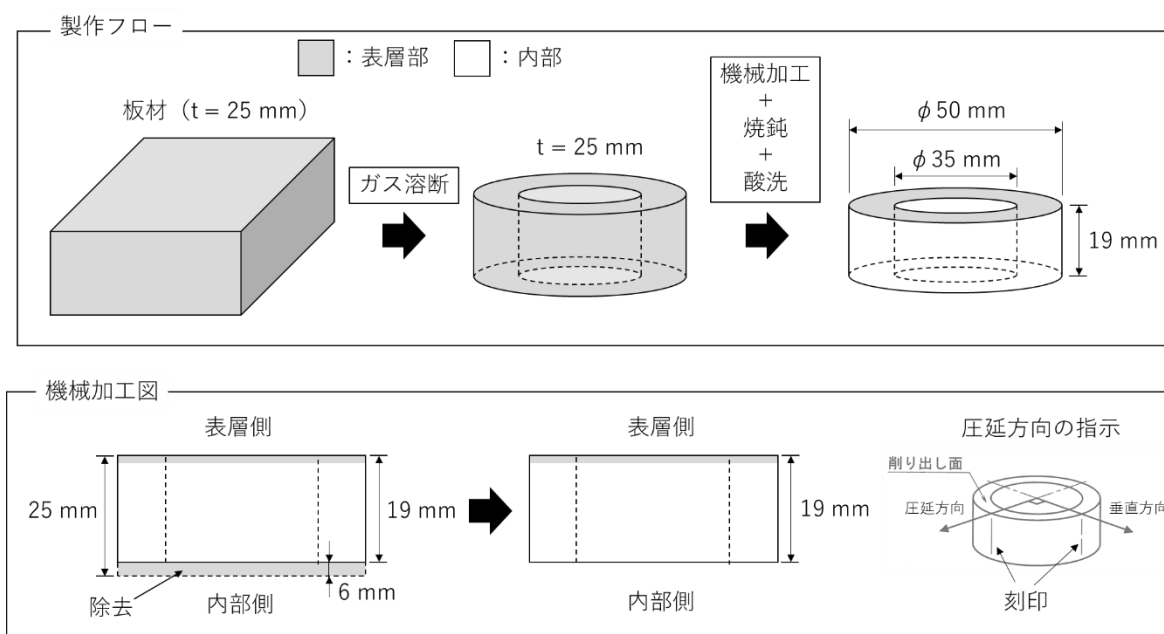


図 2-3 実験サンプルの製作手順

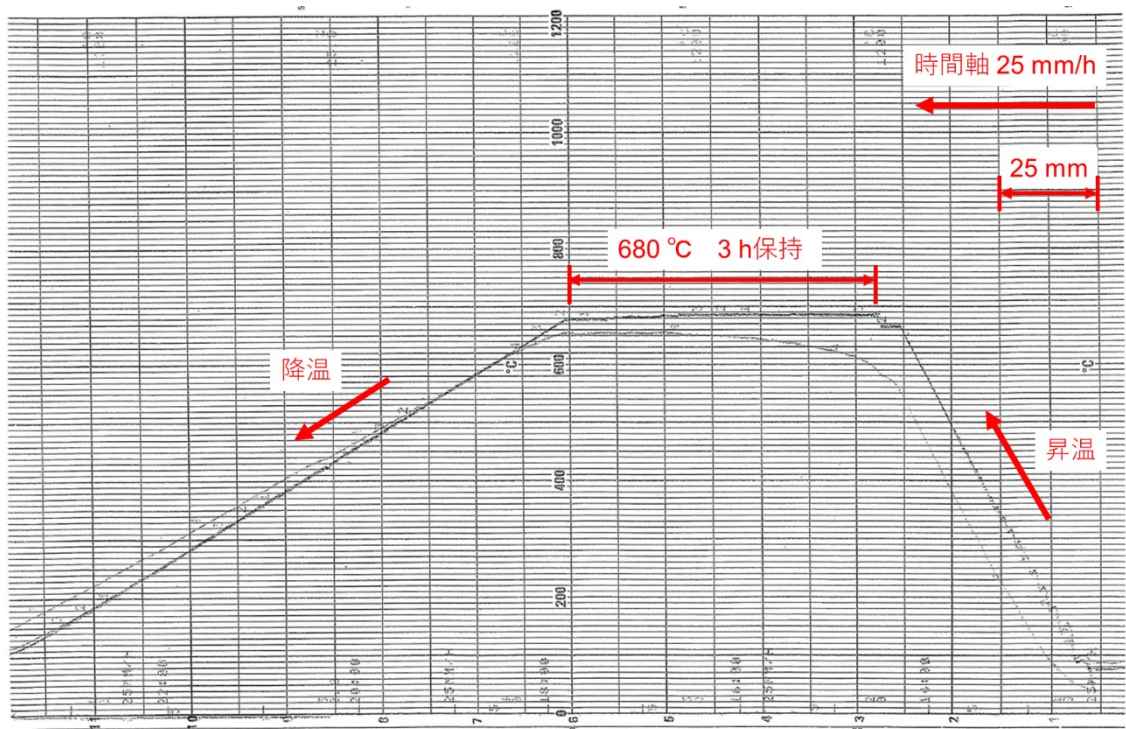


図 2-4 熱処理温度フロー

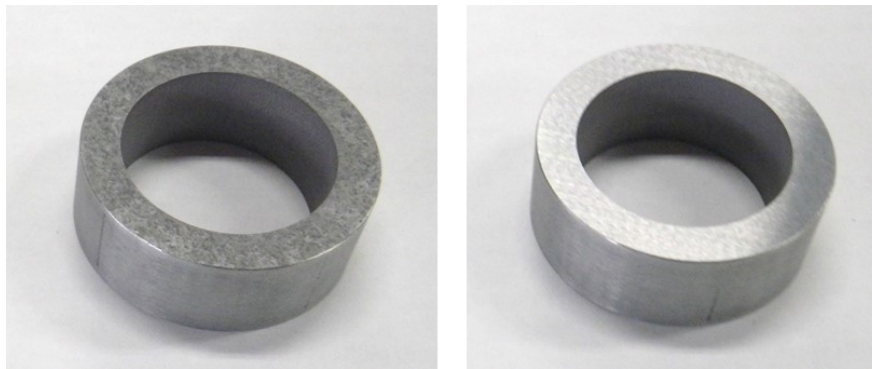


図 2-5 リングサンプル完成品
(左:上面が未加工面, 右:上面が加工面)

2.3 実験サンプルの磁気特性

ターゲット材である S25C の磁気特性を把握するために、前述した方法で製作したリング状サンプルの $B-H$ 曲線を測定した。リング状サンプルにコイルを巻いた後の状態を図 2-6 に示す。リング状サンプルに対して励磁用のコイル(300 回巻)と、誘起された磁界を検出するためのコイル(50 回巻)を取り付けた。また、コイルはリング全周には巻いていない。この理由は、圧延方向とその垂直方向の位置で、ASEM 測定を行うための空間を確保するためである。

$B-H$ 曲線の形状は、励磁磁場の最大印加磁場、印加時間によって変わってくる。励磁条件は、ASEM 測定側の磁場印加条件を考慮して決める必要がある。つまり、 $B-H$ 測定と ASEM 測定それぞれから求めた磁気パラメータを比較する場合は、励磁条件を統一させるべきである。この励磁条件を決定するために、まずは表 2-3 の条件を基準として最大印加磁場、印加時間(掃引速度)を変化させて保磁力の変化を観察した。

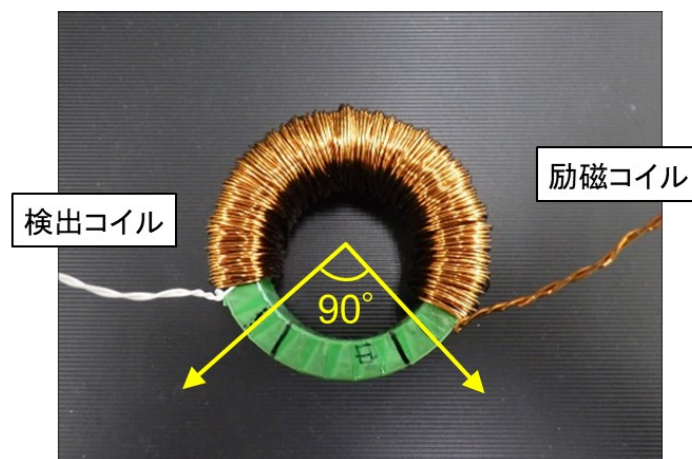


図 2-6 $B-H$ 曲線測定サンプル

図 2-7 から最大印加磁場が 4,000 A/m 以上では、保磁力が一定の範囲内で留まることが分かる。次に、図 2-8 に示すように印加時間を 7.5 秒から 500 秒の間で変化させると、印加時間が 250 秒あたりで下げ止まる傾向が見られる。これは最大印加磁場 4,000 A/m、8,000 A/m どちらでも変わらない。ASEM ヒステリシス曲線を 1 回取得するための時間は約 300 秒なので、図 2-8 の 300 秒の値を取ると保磁力は約 250 A/m となる。つまり、S25C のバルクとしての保磁力は 250 A/m とみてよいと考えられる。

表 2-3 励磁条件の基準値

最大印加磁場	印加時間	掃引速度	保磁力
16,000 A/m	30 s	2667 A/m/s	463 A/m

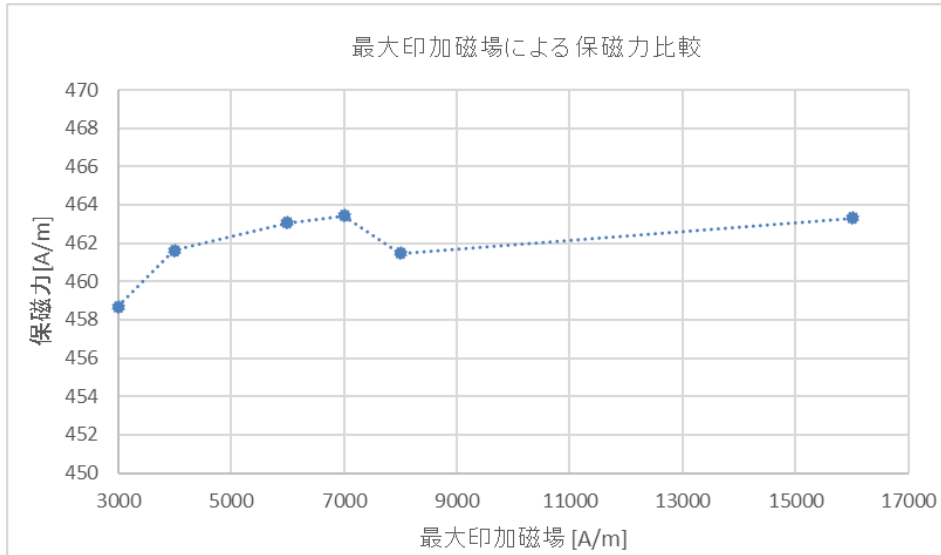


図 2-7 最大印加磁場による保磁力比較

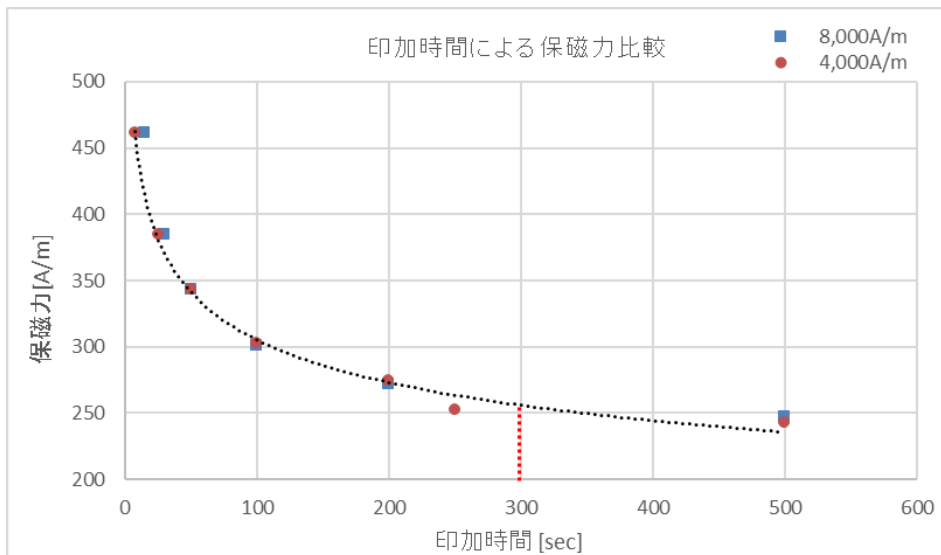


図 2-8 印加時間による保磁力比較

外形 50 mm, 内径 35 mm のリング状サンプルの磁路長 l は, リング中心の円周を代表値 r として使用すると, $l = 2\pi r = 133$ mmとなる. そこに最大磁場 $H = 4,000$ A/mを印加するのに必要な電流値 I を式(2.1)より求めた. ここで励磁コイルの巻き数 n は 300 回巻である.

$$I = 2\pi r \cdot \frac{H}{n} \quad (2.1)$$

励磁コイルへの印加電流値 I を計算すると, 1.78 A と求まる.

以上の実験結果から, 代表的に, 最大印加磁場 4,000 A/m, 印加時間 500 秒の励磁条件で, 実際に $B - H$ 曲線を測定した結果を図 2-9 に示す. $B - H$ 曲線から S25C のバルクとしての保磁力は, 243 A/m であった.

計測時刻 : 2017/05/19 15:53:43
 印加磁界ファイル名 : DC(任意) 4000Am_500sec_bhm
 高透磁率モード : ON
 印加時間[sec] : 500

設定値		測定値	
励磁方法	: コイル	Bmax[T]	: 1.600
磁化J	: Hシャント抵抗法	Bmin[T]	: -1.668
最大印加磁界[A/m]	: 4000.000	Jmax[T]	: 1.595
最大印加電流[A]	: 1.800	Jmin[T]	: -1.663
Hcal	: 1.000	Hmax[A/m]	: 3996.160
Bcal	: 1.000	Hmin[A/m]	: -3991.431
形状	: リング	Br 残留磁束密度[T]	: 1.253
外径[mm]	: 50.010	Jr 残留磁化[T]	: 1.253
内径[mm]	: 35.930	B 角型比	: 0.767
高さ[mm]	: 19.030	J 角型比	: 0.769
反磁界係数	: -	Hob 保磁力[A/m]	: 243.192
断面積[mm ²]	: 133.971	HoJ 保磁力[A/m]	: 243.227
磁路長[mm]	: 134.994	W ヒステリシス損[J/m ³]	: 2416.786
1次巻数[turns]	: 300	μ_i 初比透磁率[Hi = 100.000]	: 883.876
2次巻数[turns]	: 50	μ_m 最大比透磁率	: 2209.998
		コメント	: リング2-2
			: 1回目

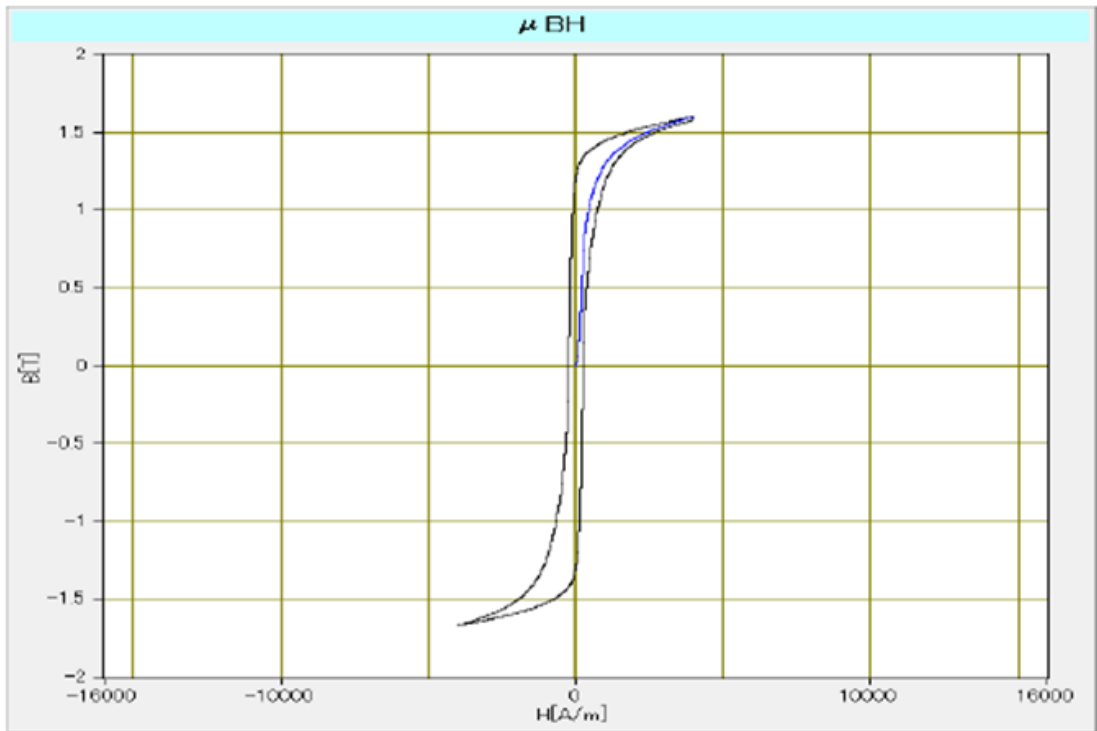


図 2-9 S25C の B - H 曲線

2.4 鉄鋼材料の内外層の結晶粒径

本節では鉄鋼材料の内層と外層の結晶粒径の差を確認した。図 2-10 に製作したリング状サンプルの内層と外層の光学顕微鏡写真を示す。内層の平均粒径は約 22 μm 、外層では約 15 μm であり、1.5 倍程度の差があった。この粒径の差については、鋼板の製造時に表面側から冷却され、外層の粒子が成長できないため、粒径が小さくなったと考えられる。内層については、結晶成長により比較的大きくなったと考えられる。

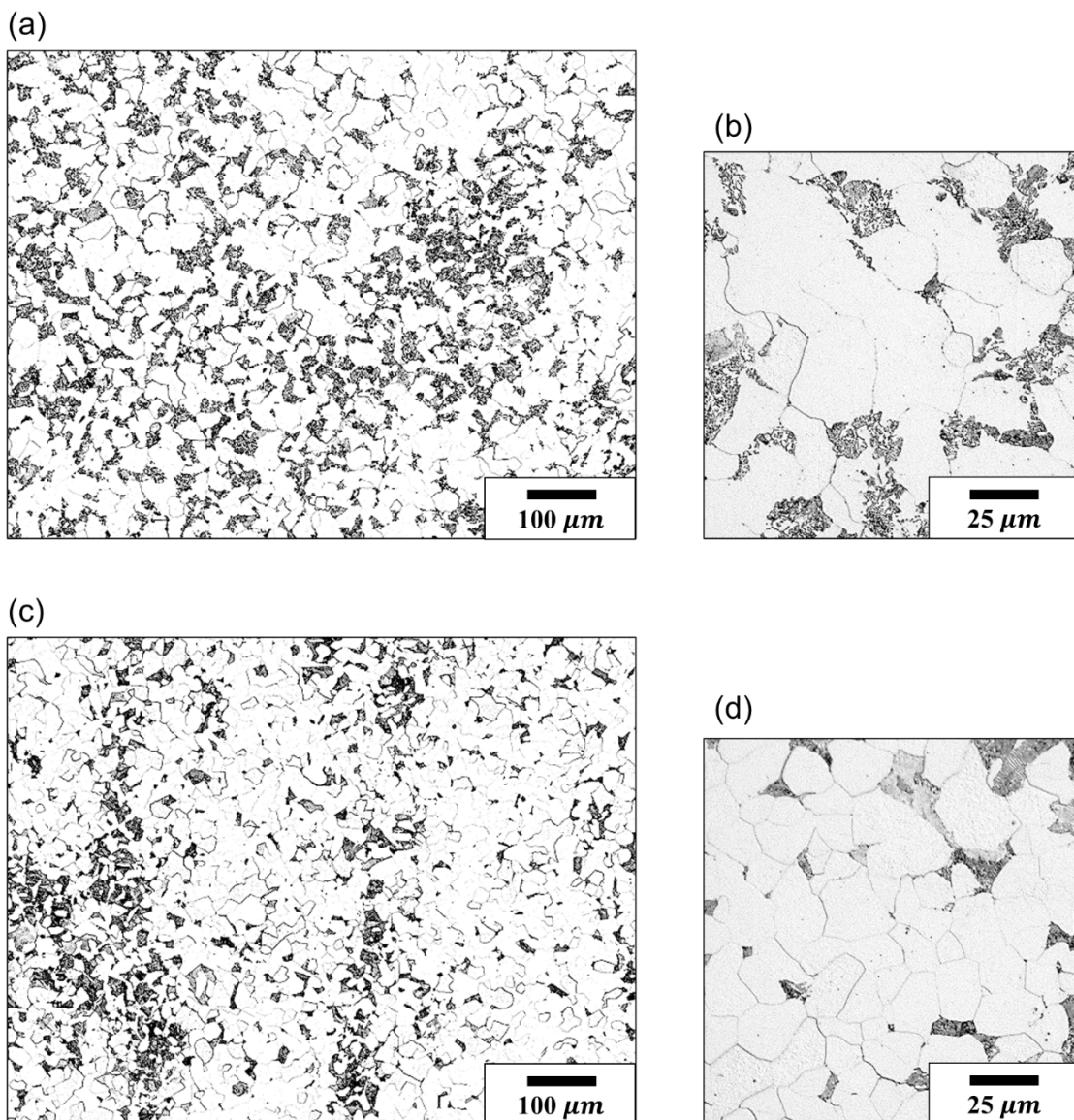


図 2-10 サンプル内外層の光学顕微鏡写真

(a) 内層(低倍率), (b) 内層(高倍率), (c) 外層(低倍率), (d) 外層(高倍率)

ASEM 測定の特ランスデューサーの超音波スポットサイズを調べた結果を図 2-11 に示す。この測定では、水中の鋼線に超音波を照射し、特ランスデューサーを徐々に真横に移動させ、エコー強度をプロットした。プロット波形の半値幅から、スポットサイズは約 1.4 mm であった。この値は内外層の結晶粒径より圧倒的に大きい。つまり、内外層の粒径は差がみられるが、スポットサイズに対しては、ほぼ同じくらい小さいともいえる。この粒径差が実用面から見て、どの程度磁気特性に影響を与えているかについては、今後の課題として、ASEM ヒステリシス曲線の粒径依存性を調査する必要がある。

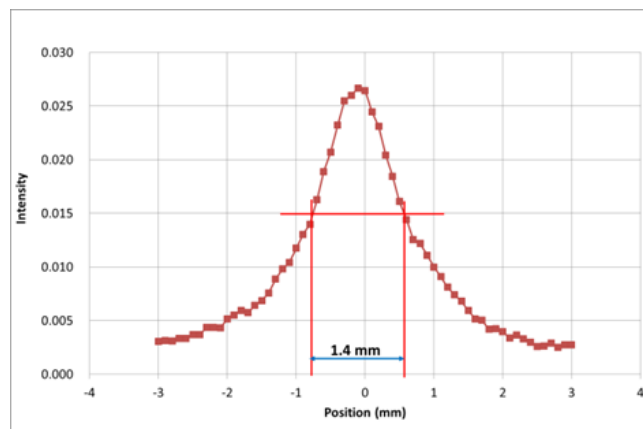


図 2-11 トランスデューサーの超音波スポットサイズ

2.5 ASEM 測定

図 2-12(a)に ASEM 測定サンプルを示す。測定サンプルの圧延方向を Y 軸とし、その垂直方向を X 軸とする。サンプルに巻いた励磁コイル(Magnetization coil)によって誘起される磁場は、サンプルの形状に合わせて円形に発生している。なお、ASEM 測定では検出コイル(Search coil)は使用しない。

図 2-12(a)中の表に示すように、ASEM 測定の位置は全 4 か所である。サンプルの内層側の圧延方向 Y に磁場方向 H が平行(測定点 A)、垂直(測定点 B)になる位置の 2 ヶ所、同様に、外層側においても C、D の 2 ヶ所となっている。

図 2-12(b)は ASEM 測定のセットアップの概略図である。ASEM 測定で最も危惧すべき点は、超音波トランスデューサーの励起パルスや、サンプルからのエコー信号による超音波振動子が発する電磁信号である。この振動子由来の電磁ノイズは、測定サンプルから発せられる目的信号よりも遥かに強大であると考えられる。つまり、トランスデューサーと測定対象が接触状態だと目的信号がノイズに隠れてしまう。さらに、目的信号は超音波の振動数と同じ周波数成分を有することから、アンテナ等の受信側で周波数帯域を限定するなどして工夫したとしても、この電磁ノイズを避けることはできない。したがって、超音波の送信側で対策を採ることによって、電磁ノイズを避けることとした。具体的に述べると、超音波によって発生する目的の ASEM 信号と、電磁ノイズが時間的に重ならないければよいことになる。そこで著者らはポリスチレン製の遅延材を備えたトランスデューサー(10 MHz, Japan Probe Co., Ltd.製)によって音波の遅延時間を利用し、目的信号とノイズの分離を可能にしている。この方法では、超音波の伝搬時間を計算し、目的信号とノイズの発生時間を事前に予想しておくことが重要である。また、超音波の減衰を防ぐために、遅延材とサンプルの間には接触媒質(ソニコート、太陽日酸ガス&ウェルディング株式会社製)を設けている。発生した目的の ASEM 信号は、近傍に設置した共振ループアンテナ(共振周波数 9.7 MHz)を介して検出される。

図 2-13(a)は ASEM 信号とエコー信号の実時間波形を示している。ポリスチレン遅延材(音速 2,340 m/s)の長さが 27 mm、遅延材とサンプル表面のリフトオフが 1 mm 弱であり、そこに接触媒質(音速 1,847 m/s)が存在している。これらの条件からエコー伝搬時間を計算すると、測定サンプル表面からのエコー信号のピーク時間 $\tau_{\text{echo}} = 24 \mu\text{s}$ は妥当であることが分かる。また、エコー信号による振動子が発するノイズ信号も、ASEM 波形において同じ時間に発生している。

目的の ASEM 信号は、サンプル表面からのエコー信号のピーク時間 $\tau_{\text{echo}} = 24 \mu\text{s}$ の半分の時 $\tau_{\text{echo}}/2 = 12 \mu\text{s}$ で生じている。この理由は、超音波は振動子とサンプルの往復時間

を考慮する必要があるのに対して, ASEM 信号は超音波がサンプル表面に到達した瞬間に発生する電磁波であり, 電磁波の伝搬時間は無視できるほど短いからである. この遅延時間を検証する作業は, ピーク信号が目的の ASEM 応答であることを確認するために重要である.

図 2-13(b)は目的の ASEM 信号の拡大図である. ASEM 信号強度のヒステリシス曲線 ($|d_{loc}(H)|$ に対応)は, 信号振幅 $|V_{sig}(H, t)|$ を $\tau_{echo}/2$ から $\tau_{echo}/2 + \Delta t$ の間で積分し, 平均した値として定義している. 本実験では, $\Delta t = 1 \mu s$ とした.

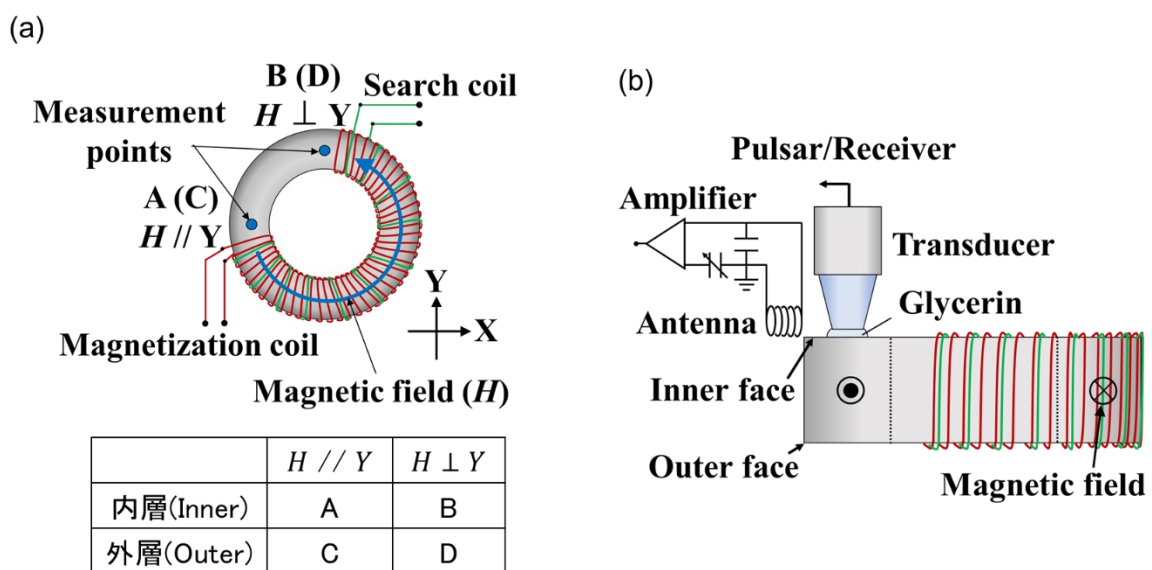


図 2-12 (a)測定サンプル(Y 軸と圧延方向は平行) (b)ASEM 測定セットアップ [7]

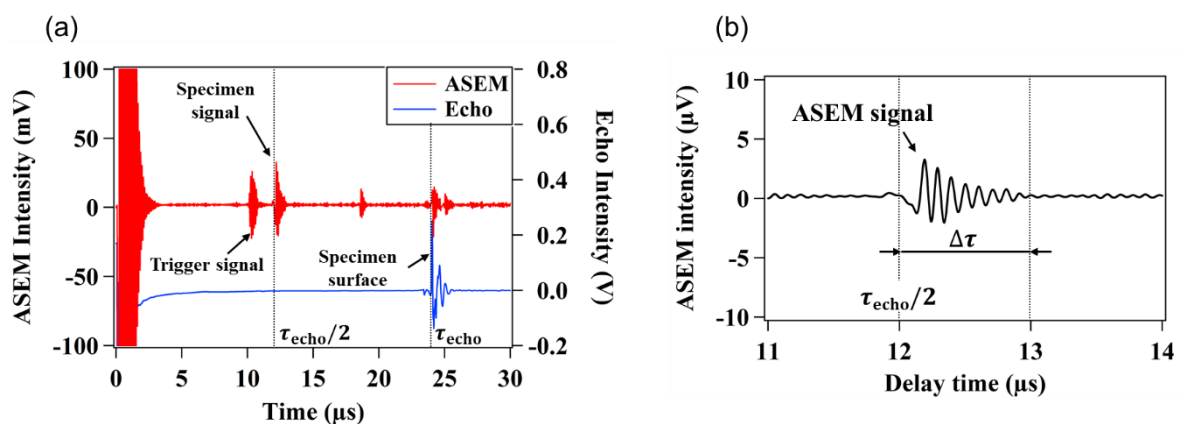


図 2-13 (a)ASEM 信号と Echo 信号の実時間波形 (b)ASEM 信号の拡大波形 [7]

2.6 ASEM ヒステリシス曲線

図 2-14 に各測定位置の ASEM ヒステリシス曲線を示す。黒線、青線、赤線は、それぞれ初期の上昇磁場、下降磁場および再度の上昇磁場に対する ASEM 信号強度を示す。緑点線はリングサンプルの $B-H$ 曲線を示す。各 ASEM ヒステリシス曲線の極小値 H_{\min} は、270 ~ 490 A/m の範囲の値をとっている。また、 H_{\min} は超音波が照射された局所的な位置の消磁状態を反映している。つまり、保磁力を示しているといえる。得られた H_{\min} の値は、先を取得した $B-H$ 曲線から評価された保磁力 $H_{\min} = 250$ A/m と大きくは乖離していない。ASEM ヒステリシス曲線の挙動としては、保磁力が観測された後に印加磁場を大きくすると、ASEM 信号が急峻に増加し、4 kA/m で最大強度をとる。また、D 点でのヒステリシス曲線が、炭素鋼板で報告されている通常の挙動と大きく異なっていることが特徴的である[8]。

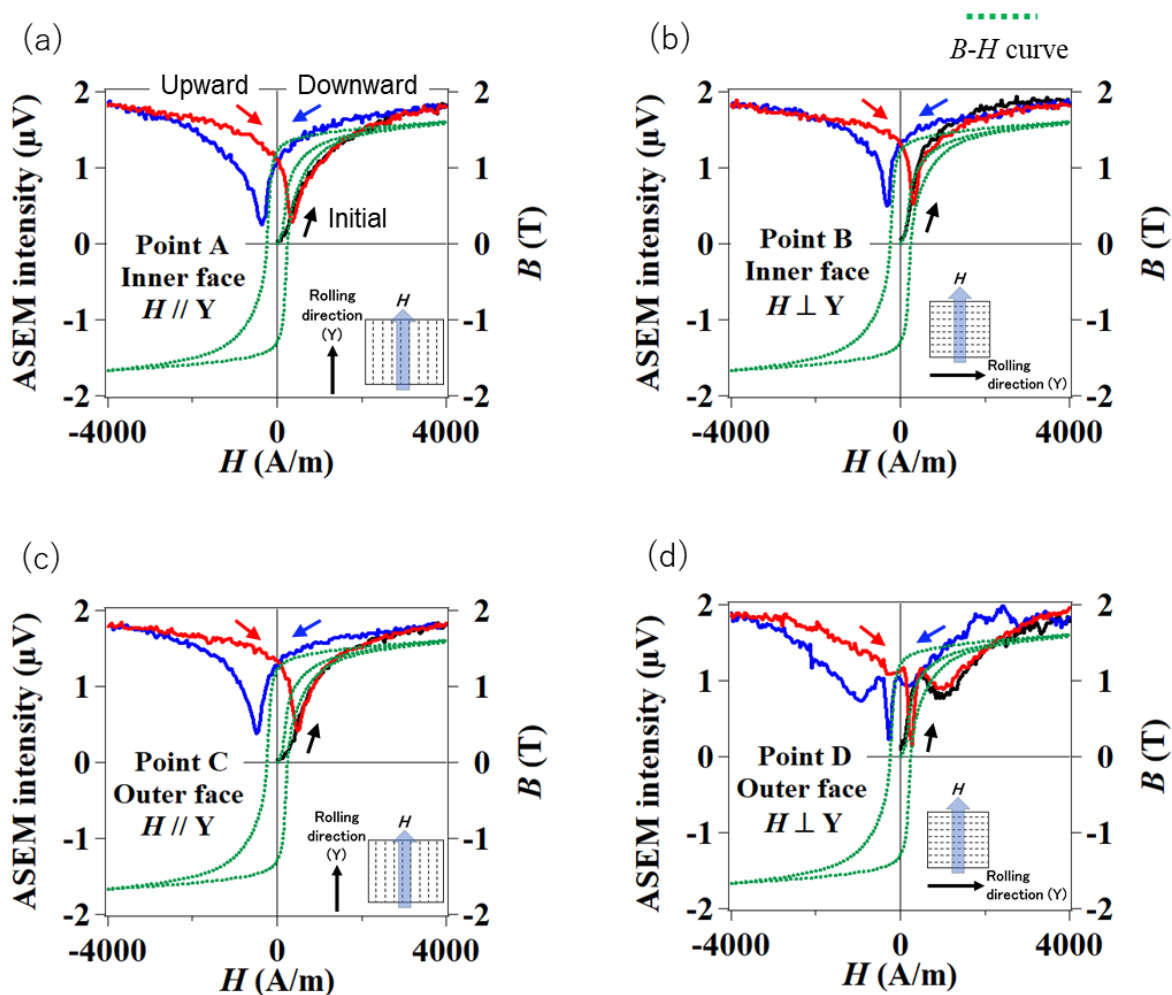


図 2-14 各測定点の ASEM ヒステリシス曲線 (a)位置 A, (b)位置 B, (c)位置 C, (d)位置 D [7].

2.7 分析と議論

図 2-15(a)は、ASEM ヒステリシス測定から得られた各測定点の保磁力の比較である。ASEM ヒステリシス曲線の保磁力は、図 2-15(b)に示すように下降磁場と上昇磁場における 2 つの最小値の平均値としている。内層では圧延方向と印加磁場方向が平行の場合、垂直に比べて 14 %高い保磁力であった。外層においては、平行の方が 84 %高く観測された。このことから、鋼材内層においては圧延方向にかかわらず、保磁力が比較的一定であると考えられる。鋼材内層部は外層部に比べて、鋼板製造時の圧延や温度変化が強く加わるわけではない。そのため、内層部の磁気特性は比較的均一に近いと考えられる。このことは、保磁力を利用した磁気物性計測などの基礎的な材料試験では、内層部を利用した方が評価しやすいことが予想される。一方、外層部においては、保磁力の差が大きく、鋼板製造時の複雑な圧延履歴や熱履歴の影響が残存していることが予想される。

本実験では、リングサンプルの全ての測定位置の保磁力は、バルクとしての保磁力より高く測定された。これは、ASEM 法が対象表面の局所的磁気特性を取得していることに起因していると考えられる。

図 2-16(a), (b)は、ASEM ヒステリシス曲線の初期磁化曲線の傾きを比較した結果である。図 2-16(c)に示すように、初期磁化曲線の初期の傾き(低磁場での傾き)と、外部磁場の発展領域である最大の傾きの 2 種類について比較・評価した。初期の傾きについては、内層ではエラーバー範囲内で同程度の値を示した。外層では明確な差が現れたが、エラーバーが非常に大きい。エラーバーが大きい理由は、低磁場の現象を測定しているからである。低磁場では ASEM 信号強度が非常に小さく、外部印加磁場に対して、滑らかな上昇とはならない。したがって、低磁場部分の曲線の接線の傾きは安定せずに誤差が大きくなる。エラーバーが大きいために、初期の傾きの定量的評価は難しいが、定性的には、内層では圧延方向に関わらず傾きが同程度であり、外層部では圧延方向の影響が大きいといえる。

最大傾きについては、エラーバーが小さいため、定量的評価が現実的である。最大傾きである磁場領域では、超音波による音圧で磁気双極子が変調されやすい特徴をもっている。したがって、磁区の発展に伴い、ASEM 信号強度の増加が目覚ましく、ASEM ヒステリシス曲線が滑らかに増加していく。このことがエラーバーを小さくする要因となる。内層および外層について、圧延方向に対して垂直に磁場を印加する方が傾きが大きくなることが分かる。内層側では 1.8 倍、外層側では 2.3 倍の割合で増加している。同じ圧延方向で比較すると、内外層で同程度の値を示した。以上のことから、今回のサンプルにおいては、磁場発展領域の最大傾きは、鉄鋼材料の内外層の影響よりも、圧延方向の影響を大きく受けることが分かった。

高い磁場(約 500 A/m 以上)では、磁区増加が飽和していく過程となる。したがって、ASEM 信号強度の増加スピードも減少していく。図 2-16(c)から分かるように、ASEM 信号強度は増減を繰り返しながら、増えていくことが分かる。よって、この領域の傾きは、低磁場領域と同じようにエラーバーが大きくなると考えられる。また、ある程度の磁場を印加しなければ評価できない領域であるため、低磁場領域・磁場発展領域と比べて、測定時間が必要になり、高磁場の傾きを採用する実用上のメリットは大きくないと考えられる。

図 2-14(d)に示す測定点 D において、940 A/m 付近で観測された二次的な極小値を説明する明確なアイデアはない。この異常な挙動は鋼材表層部で発生しており、粒径が小さくなったことや、外周面に形成されたマルテンサイト変態に起因するものなど、材料的な変化を捉えていると考えられる。また、鋼材のミルスケールにおいても ASEM ヒステリシス曲線に異常を生じさせることが分かっており、金属組織を詳細に分析して ASEM 応答との関係性を調査する必要がある。

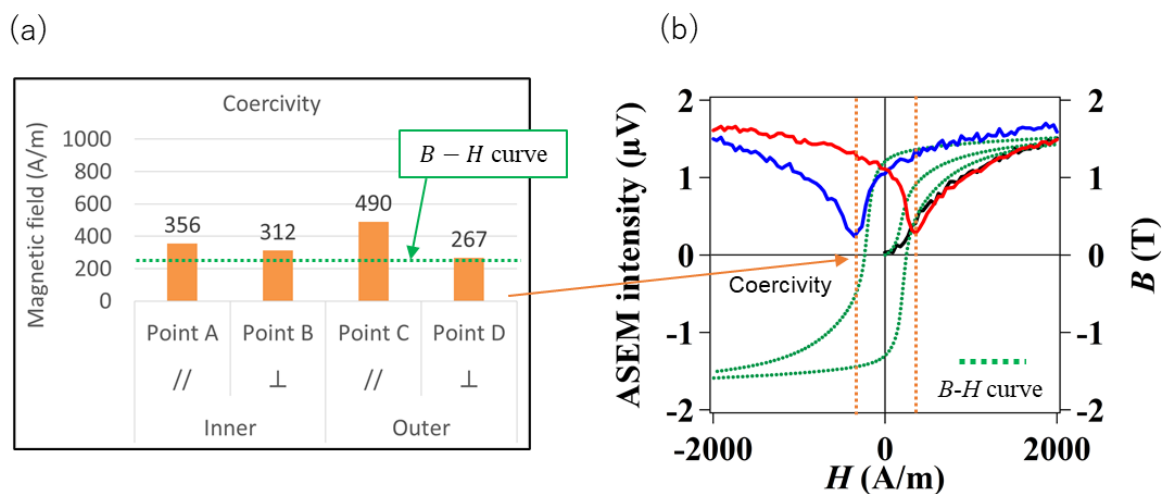
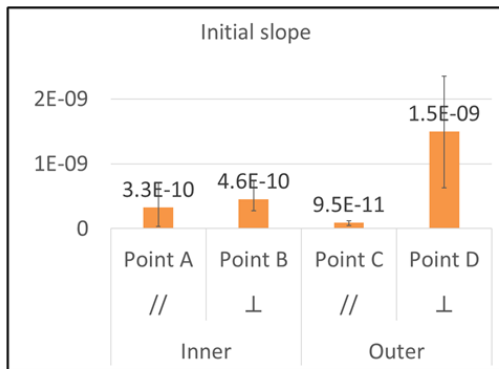
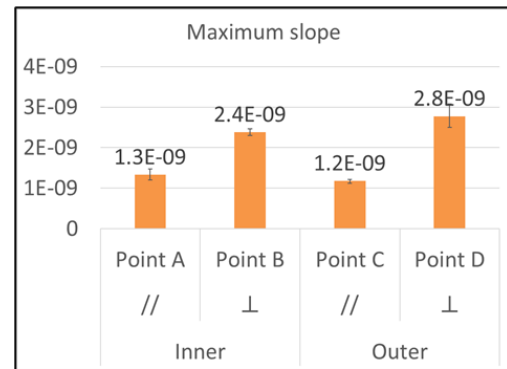


図 2-15 (a)各測定点の保磁力の比較 (b)ASEM ヒステリシス曲線の保磁力の位置 [7].

(a)



(b)



(c)

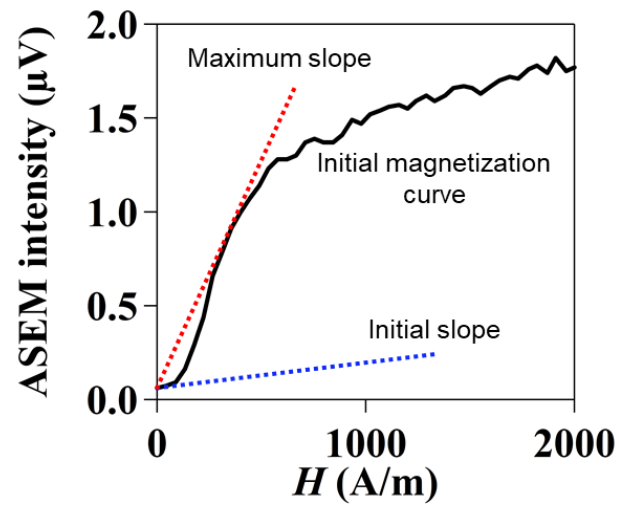


図 2-16 (a)各測定点の初期磁化曲線の初期傾きの比較 (b)各測定点の初期磁化曲線の最大傾きの比較 (c)ASEM ヒステリシスの初期磁化曲線と傾きの説明図 [7].

2.8 結言

本章では、鋼材の圧延方向が局所的な磁気ヒステリシス特性にどのように影響を与えるかに注目して実験を行った。実験サンプルの鋼種は S25C である。実験の結果以下のことが明らかとなった。

- (1) S25C のバルクとしての保磁力は約 250 A/m である。
- (2) 鋼材内層の平均粒径は約 22 μm 、外層では約 15 μm であり、内層の粒径の方が大きい。
- (3) ASEM ヒステリシス曲線から局所的な保磁力は、270 ~ 490 A/m であった。これらはバルクの保磁力相当である。
- (4) 内層では圧延方向にかかわらず保磁力は、ほぼ一定と考えられる。外層では圧延方向によって保磁力に差が現れた。
- (5) 初期磁化曲線の傾きについては、低磁場領域では内層を利用すれば圧延方向の影響は少ない。磁場発展領域では内外層ともに圧延方向に影響を受けた異なる磁気特性が観測された。

以上のように、ASEM 応答により、鋼材の局所的な磁気特性が得られることから、表面状態に応じた磁気特性が得られていると考えられる。傾きを残留応力測定の定量的評価の指標として利用する場合は、極力エラーバーを低減する必要があることが判明した。特に低磁場での傾きは、ASEM 信号がノイズより十分に大きくなければならない。したがって、ノイズ低減対策を採りつつ、ASEM 信号強度を増加させるための測定装置改良が必要になってくる。例えば、超音波トランスデューサーの周波数を下げることにより、超音波強度の減衰を防ぐこと、共振アンテナ等の受信回路をアルミケースで覆うことによるノイズ対策などが必要になってくると考えられる。

今回の実験から鉄鋼内層を利用すると、保磁力においては圧延方向の影響が小さいといえる。これは実験サンプルの製作において重要な指標となる。次章では、鉄鋼の磁気特性が引張応力に対してどのように応答するか調査している。引張応力の影響を調べるためには、応力以外の影響因子を極力排除しなければ、応力のみの影響を分析・評価することは難しくなる。つまり、引張試験用の実験サンプルは鋼材内層から加工して取り出すべきと考えられる。

2.9 参考文献

- [1] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* (Taylor & Francis, London, 3rd ed., p. 243, 2016.
- [2] 松岡 英夫, 電磁鋼板の歴史, 電氣學會雜誌, 106 卷, 3 号, pp. 247-250, 1986.
- [3] S. Preston, G. W. Johnson, “Effect of grain size and orientation on the initial permeability of 36 wt % Ni-Fe alloys,” *J. Mater. Sci.*, vol. 19, pp. 4099-4105, 1984.
- [4] R. A. GRANGE, “The Rapid Heat Treatment of Steel,” *METALLURGICAL TRANSACTIONS.*, vol. 2, pp. 65-78, 1971.
- [5] 日本工業規格 JIS G4051:2009.
- [6] 加藤 哲男, 富岡 達也, 電氣製鋼, 第 36 卷, 第 3 号, pp. 107-115, 1965.
- [7] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, K. Noguchi, M. Iwata, and K. Ikushima, “Local probing of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response,” in *Proc. Symposium on Ultrasonic Electronics (USE)*, Vol. 38, 2017, pp. 1-2.
- [8] H. Yamada, K. Watanabe, and K. Ikushima, “Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns measured by acoustically stimulated electromagnetic response in a steel plate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 8, pp. 086601(1-4), 2015.

第 3 章 鉄鋼材料の磁気パラメータの引張応力依存性

3.1 緒言

鉄鋼材料は、機械、自動車、建築物、インフラなどで使用される主要な要素である。残留応力は、通常、鉄鋼材料の製造時、溶接などの製品の製作過程で発生する。製品供用時に発生する応力が、そのものの初期の残留応力と重畳すると、材料的な許容応力を超え、その製品が損傷する応力レベルに達する可能性がある[1]-[3]。損傷リスクを回避するためには、実際の製品における応力分布を把握することが重要である。このような応力分布情報は、製品の早期の修理を可能にし、設計や製造の指針にも活用できる。

一般的に残留応力は、切断法(破壊的)[4]や穿孔法(準破壊的)[5]、[6]を用いて、ひずみ緩和を測定することで得られる。代表的な非破壊による残留応力評価法として、X線回折法が用いられるが、この方法は結晶粒が小さい鉄鋼材料に限られる[7]-[9]。また、従来の超音波や磁気測定を用いた応力検査技術も研究されているが[10]-[14]、非破壊による残留応力の定量的評価やその空間的マッピングについては、いまだ開発途上である。

強磁性体は、磁場 H に対して、変化する磁束密度 B のヒステリシスを示す。透磁率、保磁力、残留磁化、ヒステリシス損失などのヒステリシス特性は、強磁性体に生じる応力に敏感である[15]-[17]。したがって、磁気測定は鉄鋼材料の残留応力の評価に使用できる可能性がある。しかし、従来の磁気ヒステリシス曲線 ($B-H$ 曲線) の測定では、電磁誘導により、試料全体のバルク特性を得るため、局所的なヒステリシス特性を調べることができず、応力評価に対する磁気特性の利用には限界があった。

しかしながら、超音波の集束と走査によって、局所的な磁気ヒステリシス挙動の空間マッピングが可能になってきている[18]-[20]。この技術は、音響誘起電磁(ASEM)応答の生成と検出に基づいている。ASEM法では、試料に超音波を局所的に照射して、磁気分極を変調させる[18]-[22]。超音波の焦点範囲から放出される電磁応答は、狭帯域の同調アンテナを用いて検出されることになる。このとき、ラジオ周波数(Radio frequency : RF)帯の1次高調波成分は、超音波の励振周波数と等しくなる。この方法の利点の一つは、空間分解能が磁場の集束範囲ではなく、超音波の集束範囲で決まることである。そのため、超音波を使用することによって、磁気特性の明瞭な空間的マッピングが可能となる。ASEM応答の信号強度は、対象物の音響的に励起された局所領域における圧磁係数 d_{loc} で表される[18]-[20]。つまり、ASEM強度のヒステリシス曲線は、 $d_{loc}(H)$ のヒステリシス曲線に相当する。このことから、ASEMヒステリシス曲線は引張応力に敏感であると考えられる。本章では、鉄鋼材料のASEMヒステリシス曲線の引張応力依存性を明らかにし、ASEM法を用いた定量的な応力評価の指針を

示す.

本章の流れを以下に示す.

- (1) 音響圧力による磁束密度の変調が周囲に発する電磁波とそれによって誘起される ASEM 信号電圧を関連付け, 圧磁係数によって表すことが可能であること. さらに, 圧磁係数を拡張し, 位相遅れ成分について説明する(3.2 節).
- (2) 引張試験用のサンプルについて説明を行う. また, 前章では実験サンプルを励磁コイルによって磁化させていたが, 本章以降からは, 電磁石を利用して磁化を行っている(3.3 節).
- (3) ASEM 測定と得られた波形について説明する(3.4 節).
- (4) 引張荷重を与えながら ASEM 測定を実施した結果の報告. また, 各引張荷重における ASEM ヒステリシス曲線の一覧を示す(3.5 節).
- (5) ASEM ヒステリシスパラメータについて, 引張応力との関係性を示す. ヒステリシスパラメータとしては, 様々な指標が存在するが, 本章では応力評価として比較的有望と考えられる 4 種類を取り上げて説明する(3.6 節).
- (6) ASEM ヒステリシスパラメータから引張応力へ変換する際の, 変換パラメータを導出し, 引張応力と磁気特性の関係について, その磁氣的メカニズムを磁気エネルギーと磁壁移動の観点から議論する(3.7 節).

3.2 技術的バックグラウンド

音圧は 10 kPa のオーダーであるため、応力によって誘起される磁化は線形応答を示す [18]. バイアスを有する磁歪は、線形応答領域では現象的に圧磁と同等であり [23], ここでの議論では両者を区別しないこととする. 磁気機械結合での線形応答式は次のように表される ($i, j = 1, 2, \dots, 6$ and $k, m = 1, 2, 3$).

$$S_i = \left(\frac{\partial S_i}{\partial T_j} \right)_H T_j + \left(\frac{\partial S_i}{\partial H_m} \right)_T H_m \quad (3.1)$$

$$B_m = \left(\frac{\partial B_m}{\partial T_i} \right)_H T_i + \left(\frac{\partial B_m}{\partial H_k} \right)_T H_k, \quad (3.2)$$

ここで, S, T, H および B はそれぞれ, ひずみ, 応力, 磁場, および磁束密度である. $d_{mi} = (\partial B_m / \partial T_i)_H$ と $\mu_{mk} = (\partial B_m / \partial H_k)_T$ の量を関係づける係数は, それぞれ圧磁定数と透磁率である. 磁束密度 B は非線形ヒステリシス関数 $B(H, T)$ で表される. 強磁性体に音響応力 $T(t)$ を加えると, 磁束密度 $B(t)$ は式 (3.2) により一時的に変調された状態で表すことができる. その結果, 交流双極子場が周囲に放出される [18]. したがって, 同調ループアンテナで検出される ASEM 信号電圧 V_{sig} は次のようになる.

$$V_{\text{sig}} = \eta \left(\frac{dB_m}{dt} \right) = \eta d_{mi} \left(\frac{dT_i}{dt} \right), \quad (3.3)$$

ここで, η は測定における検出効率を表す.

一般的に, 圧磁係数は複素数に拡張することができる [20]. 音響応力 $T(\omega_0) = T_0 e^{-i\omega_0 t}$ を材料の局所領域に加えると, 誘導磁束密度は $B(\omega_0, H) = B_0 e^{-i(\omega_0 t - \delta(H))}$ と表すことができる. ここでの $\delta(H)$ は T に対する B の位相遅れである. $B(\omega_0, H)$ と $T(\omega_0)$ の比から, ω_0 における局所圧磁係数 $d_{\text{loc}}(H)$ は次のように表される.

$$\begin{aligned} d_{\text{loc}}(H) &= \frac{B_0(H)}{T_0} [\cos \delta(H) + i \sin \delta(H)] \\ &= d'(H) + i d''(H). \end{aligned} \quad (3.4)$$

位相差 δ は, ω_0 でのエネルギー損失を特徴づける虚数部 d'' を生じさせる.

次に, ASEM 信号と複素数の圧磁係数の関係について説明する. 式 (3.3) より, ASEM 信号 V_{sig} は次のように表される.

$$\begin{aligned}
V_{\text{sig}}(t, H) &= \eta \frac{dB(t, H)}{dt} \\
&= \eta \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (-i\omega)B(\omega, H)e^{-i\omega t} d\omega.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

また, フーリエ成分 $V_{\text{sig}}(\omega, H)$ は次のように書ける.

$$\begin{aligned}
V_{\text{sig}}(\omega, H) &= -i\eta\omega B(\omega, H) \\
&= -i\eta\omega d(\omega, H)T(\omega) \\
&= \eta\omega[d''(\omega, H) - id'(\omega, H)]T(\omega).
\end{aligned} \tag{3.6}$$

ここでは, $V_{\text{sig}}(\omega, H)$ は, 物質に誘起される $B(\omega, H)$ に対して直交位相のシフトをもっている. その結果, $T(\omega_0) = T_0 e^{-i\omega_0 t}$ という正弦波の場合, $V_{\text{sig}}(\omega, H)$ の第1高調波成分は次のように表される.

$$V_{\text{sig}}(\omega, H) = \eta\omega B_0(H)e^{-i(\omega_0 t - \delta(H) - \phi + \pi/2)}, \tag{3.7}$$

ここで, ϕ は測定システムに起因する調整可能な位相シフトである.

次に, PSD (Phase-Sensitive Detection, 位相敏感検出) スキームを用いて, $V_{\text{sig}}(\omega, H)$ を同相成分の V_X (実部)と直交成分の V_Y (虚部)に分離する. ϕ を $\pi/2$ に調整すると, これらの成分は次のように記述される.

$$V_X = \eta\omega_0 B_0(H) \cos \delta(H) = \eta\omega_0 T_0 d'(H), \tag{3.8}$$

$$V_Y = \eta\omega_0 B_0(H) \sin \delta(H) = \eta\omega_0 T_0 d''(H). \tag{3.9}$$

同相成分 ($V_X \propto d'$) は, 磁気機械的効果に関する準静的な損失である. 直交成分 ($V_Y \propto d''$) は, 渦電流効果のような, 磁壁移動によって生じる微視的なエネルギー散逸プロセスに起因すると考えられている[19], [24]-[26].

3.3 実験サンプルおよび実験装置

図 3-1(a)に示すように、引張試験用サンプル(サイズ:490×70×6 mm³)は、厚さ 25 mm の炭素鋼板(S25C, JIS G4051:2009)から加工して製作した。鉄鋼材料の圧延工程では再結晶や結晶粒の変形が起こることにより、個々の結晶粒の磁化容易軸は圧延方向 R に沿って配向される傾向がある[27]-[29]。このような結晶粒の配向は、機械的、磁氣的異方性の原因となる。そこで、著者らは圧延方向が異なる 2 つのサンプル(サンプル $I_{//}$ と I_{\perp})を用意した。サンプル $I_{//}$ と I_{\perp} の圧延方向 R は、それぞれ実験サンプルの長手方向に平行と垂直の 2 種類である。また、応力と磁気特性の関係性を明らかにするためには、材料の機械的特性が急激に変化する降伏応力点を知っておく必要がある。したがって、応力ひずみ線図を取得する必要があり、そのための破壊用のサンプルを別に準備した。このサンプルの圧延方向についても、引張試験サンプルと同様に、2 種類の両方を用意した。

図 3-1(b)に実験サンプルに外部磁場を印加するための電磁石を示す。ヨーク(継鉄)部分は、ケイ素鋼板を積層することにより製作した。磁場を発生させるコイルは、200 回巻を 2 ヶ所に配置している。

(a)

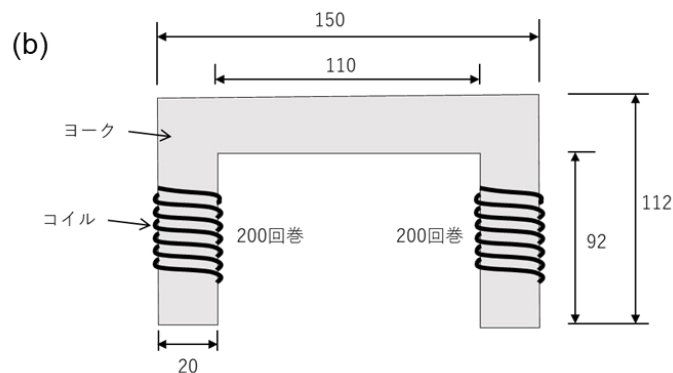


図 3-1 (a)引張試験用サンプル (b)電磁石概略図

3.4 実験セットアップ

図 3-2(a)および(b)に、引張試験を実施した際の ASEM 測定セットアップの概略を示す。ASEM 測定は、トランスデューサの励起パルスと ASEM 信号を分離するための遅延材(長さ 27 mm のポリスチレン製)を備えた 4 MHz の集束トランスデューサ(Japan Probe Co., Ltd.製)を用いて行った[21]。焦点スポットサイズの直径は約 1.7 mm である。ASEM 信号は 4.1 MHz に調整した共振ループアンテナで検出した。また、電磁石を用いて、試験体の長手方向に沿って、外部磁場を印加した。外部磁場は $H = NI/L$ から計算した。ここで、 N 、 I 、 L はそれぞれ、電磁石コイルの総巻数(400 回巻)、印加電流、電磁石と試験体からなる磁気回路の長さ(470 mm)である。

一例として、圧延方向がサンプルの長手方向である試験体の応力ひずみ線図を図 3-2(c)に示す。このサンプルの降伏応力点 T_Y は、約 290 MPa であった。

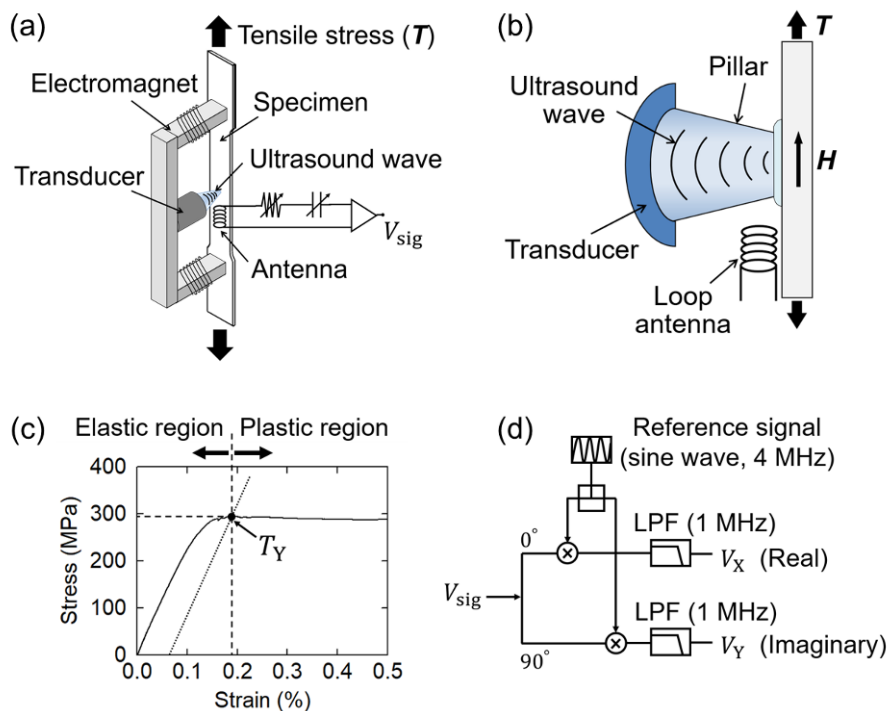


図 3-2 (a)引張試験における ASEM 測定のセットアップの模式図 (b)トランスデューサとループアンテナの構成を示す模式図 (c)鋼板(S25C)の引張応力-ひずみ曲線 (d)数値的 PSD スキームのブロック図 [30].

ASEM 測定で得られた典型的な実時間波形を図 3-3 に示す。鋼材表面からのエコー信号は、 $\tau_{\text{echo}} = 24.4 \mu\text{s}$ で観測された(図 3-3(a))。ASEM 応答の直接 RF 信号 $V_{\text{sig}}(t)$ は、エコー遅延時間の半分($\tau_{\text{echo}}/2 = 12.2 \mu\text{s}$)で観測された(図 3-3(b))。PSD スキーム(図 3-2(d))を用いて、直接 RF 信号を PSD 信号に数値変換した。PSD 後の ASEM 波形を図 3-3(c)に示す。

ASEM ヒステリシス測定結果は、 $V_{\text{sig}}(t)$ 、 $V_X(t)$ 、および $V_Y(t)$ の信号電圧の時間平均強度としてプロットしている。振幅 $|\overline{V_{\text{sig}}}| = \sqrt{(\overline{V_X})^2 + (\overline{V_Y})^2}$ 、同相成分 $\overline{V_X}$ 、直交成分 $\overline{V_Y}$ は $\tau_{\text{echo}}/2$ から $\tau_{\text{echo}}/2 + \Delta\tau$ の間で積算した[19], [20]。また、積分時間 $\Delta\tau$ は $2 \mu\text{s}$ とした。ヒステリシス測定の初期状態では、電磁石を用いて交流電流を印加することで試験体を消磁した。

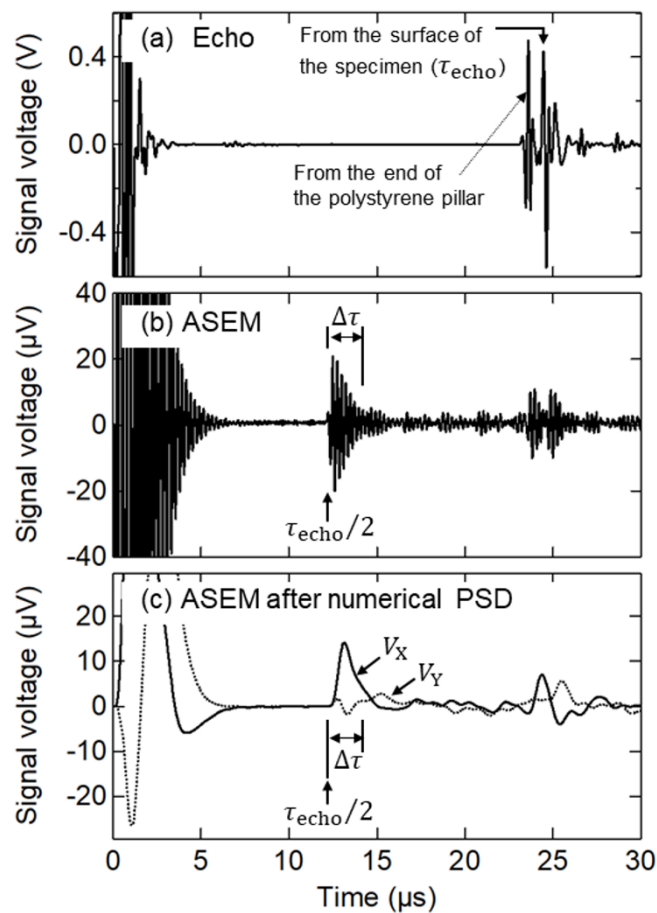


図 3-3 (a)実時間のエコー波形 (b)実時間の ASEM 波形 (c)数値的 PSD 後の同相成分 V_X (実線) と直交成分 V_Y (点線) [30].

3.5 引張荷重下における ASEM 測定と測定結果

図 3-4(a)-(f)は、サンプルI_{//}の引張試験における ASEM 測定で得られた振幅 $|\overline{V}_{sig}|$ のヒステリシス曲線を示す。黒線、青線、および赤線はそれぞれ初期磁化曲線、下降磁化曲線、上昇磁化曲線を示す。引張応力を加えるために使用した引張試験機は、応力制御と変位制御の 2 種類の設定が可能である。本実験では、一定の応力を加え続ける必要があるため、応力制御方式を採用した。ちなみに、変位制御方式では、変位を一定に保つため加わる応力は一定にはならない。引張応力は、無応力 0 MPa から徐々に増加させ、最終的には 333 MPa まで印加した。引張応力を 333 MPa に固定すると、印加応力が固定されているにもかかわらず、変位(ひずみ)が増加し続けていた。これは塑性変形の振る舞いと考えられ、この時点で塑性領域に入ったと考えられる。

このように、サンプルI_{//}の降伏応力点 $T_Y^{I//}$ は、292 MPa から 333 MPa の間であり、応力ひずみ線図を取得した別サンプルの値と一致している。同様に、サンプルII_⊥の降伏応力点 $T_Y^{II⊥}$ は、250~292 MPa であり、サンプルI_{//}の値に対して、わずかに低いがほぼ同程度であった。今回の実験サンプルにおいて、圧延方向によって降伏応力が大きく変わらない理由としては、鉄鋼メーカーから入手した元々の鉄板が比較的厚かったため(厚さ:25 mm)、それから加工したサンプルでは圧延工程に起因する結晶粒の配向性が比較的小さかったためと考えられる。

図 3-4(a)-(f)に示すように、実験で得られた ASEM ヒステリシス曲線は、印加応力に対して曲線形状が明らかに変化しており、引張応力に依存することが明確に示された。特に、保磁力 $\pm H_c$ の大きさが明らかに変化していることが分かる。応力依存性を明確にするために、PSD 処理を行った結果を図 3-4(g)-(l)に示す。ここでは、各固定応力に対する $\overline{V}_x(H)$ と $\overline{V}_y(H)$ のヒステリシス曲線を示している。ASEM 信号強度 $|\overline{V}_{sig}|$ のヒステリシス曲線は、左右に対象のバタフライ型であるが、PSD 処理を実施したヒステリシス曲線は、原点対象の形状であり、従来の $B-H$ 曲線と同様な形式であるため、視覚的にも理解しやすいメリットがある。このメリットは、従来の磁気計測に触れてきた者には取り扱いが容易であり、新たに ASEM 法に携わる際には技術的・心理的な障壁が大きく低下すると思われる。ASEM 信号の応力依存性は同相成分である $\overline{V}_x(H)$ のループ構造でより明確になると考えられる。直交成分である \overline{V}_y は、このサンプルでは無視できるほど信号強度が小さいので、 \overline{V}_x ループから得られたヒステリシスパラメータに注目する。

ヒステリシスパラメータは図 3-4(g)に定義されている。保磁力 H_c と残留磁化信号 V_r は、それぞれ $\overline{V}_x(H)$ ヒステリシスループの横軸と縦軸の切片から決定される。信号電圧 V_r は残留磁化

に起因する ASEM 強度である. さらに 2 つのパラメータ, つまり, ヒステリシスループの面積 W と初期磁化曲線の初期勾配 m_0 を導入する. 面積 W は式 (3.10) のように表わされる.

$$W = \oint \bar{V}_x(H) dH \propto \oint d'(H) dH = \oint \left(\frac{dB}{dT} \right) dH \approx \frac{d}{dT} \oint B dH = \frac{d}{dT} W_{B-H} \quad (3.10)$$

ここで, W_{B-H} は, 標準的な $B-H$ 曲線におけるヒステリシス損失に相当する. 同様に, 初期勾配は, 式 (3.11) のように表わされる. ここで μ' は複素透磁率の実部である.

$$m_0 = \frac{d\bar{V}_x}{dH} \propto \frac{d}{dH} d'(H) = \frac{d^2}{dHdT} B \approx \frac{d}{dT} \mu'(T) \quad (3.11)$$

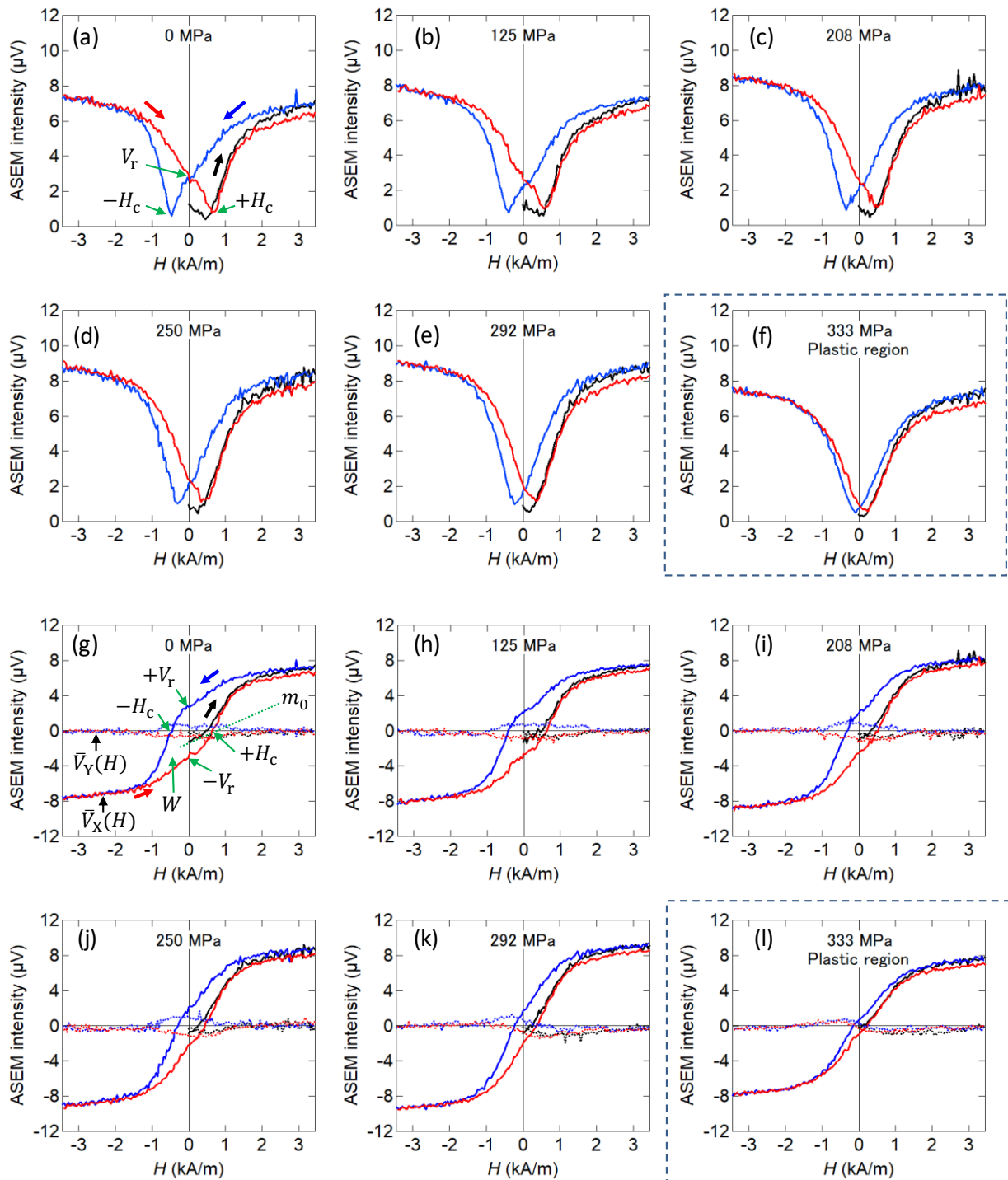


図 3-4 サンプル1₇のヒステリシス曲線 (a)–(f) $\bar{V}_{\text{sig}}(H)$ (g)–(l) 同相成分 $\bar{V}_x(H)$ (実線) および直交成分 $\bar{V}_y(H)$ (点線) [30].

3.6 分析

本節では、ASEM ヒステリシス曲線に含まれるヒステリシスパラメータの引張応力依存性を評価する。ヒステリシスパラメータは前節で述べたように、保磁力 H_c 、残留磁化信号 V_r 、ヒステリシス面積 W 、初期磁化曲線の初期勾配 m_0 の4種類である。

保磁力の応力依存性 $H_c(T)$ を図 3-5 に示す。点線は降伏応力より小さい応力範囲でフィッティングした近似曲線を示す。サンプル $I_{//}$ と II_{\perp} では、応力依存性に著しい違いは見られなかった。保磁力 $H_c(T)$ は、引張応力の増加に伴い、弾性領域($T < T_Y$)で二次関数的に減少した。このような実験結果によって、保磁力から引張応力への明確な変換関数を導くことが可能である。降伏応力点を超えると、ヒステリシス曲線は応力に対して鈍感になる。この現象は次のように説明できる。塑性領域では、材料の内部応力がその材料内へ解放されるので、外部応力に対して変形し続け、外部から加えられる応力が増加しても内部応力は増加しない。

ASEM 応答の信号電圧は超音波照射の音圧や入射角に依存するため、ASEM 強度は測定の設定条件に敏感である。なお、保磁力 H_c は、ASEM 応答の信号電圧や超音波照射条件には依存しないため、応力依存性を評価するには利用しやすいパラメータである。しかしながら、残留磁化信号 V_r の値から応力マッピングを得ようとする場合には、マッピング領域全体で超音波の照射条件を一定にする必要がある。その照射条件は、エコー遅延時間やエコー信号強度を測定することで、確認することができる。 V_r を介した応力マッピングを実現するためには、エコー信号によって超音波トランスデューサーの距離や角度を調整する機械的なフィードバックシステムが必要となる。

ここでは、 $V_r(T)$ 、 $W(T)$ 、および $m_0(T)$ の応力依存性について、ゼロ応力($T = 0$)時の値で割ることによって規格化した $V_r/V_r(0)$ 、 $W/W(0)$ 、および $m_0/m_0(0)$ を用いて議論を進める(図 3-6, 図 3-7)。点線は降伏応力以下でフィッティングした最適近似曲線を示す。破線部分は目安の曲線である。保磁力と同様に残留磁化信号 $V_r(T)$ は、引張応力の減少関数である。ヒステリシスループ面積 $W(T)$ もまた引張応力の増加とともに単調に減少している。初期勾配 $m_0(T)$ については、引張応力の増加とともに、増加する傾向を示した。

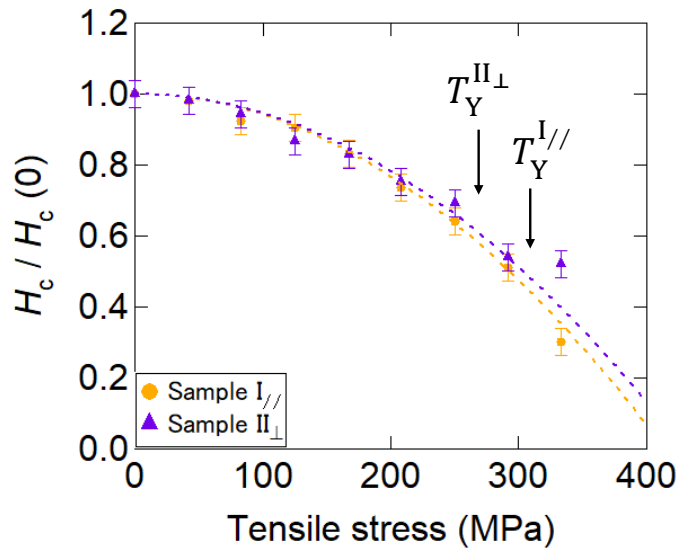


図 3-5 規格化した保磁力 $H_c/H_c(T=0)$ の応力依存性 [30].

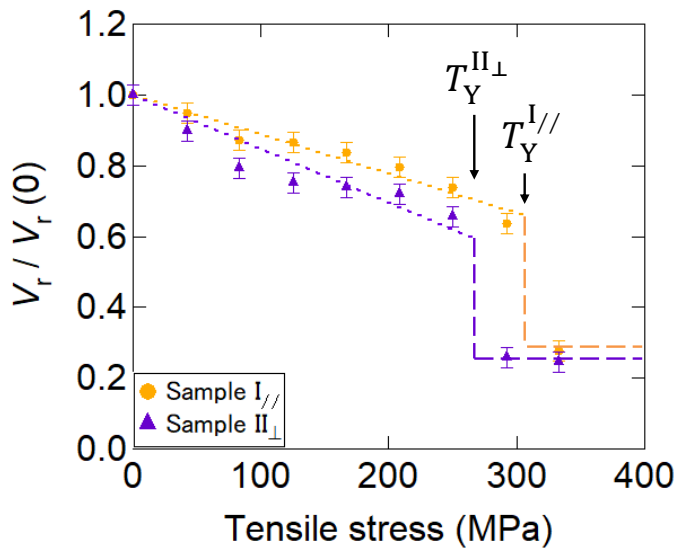


図 3-6 規格化した残留磁化信号 $V_r/V_r(T=0)$ の応力依存性 [30].

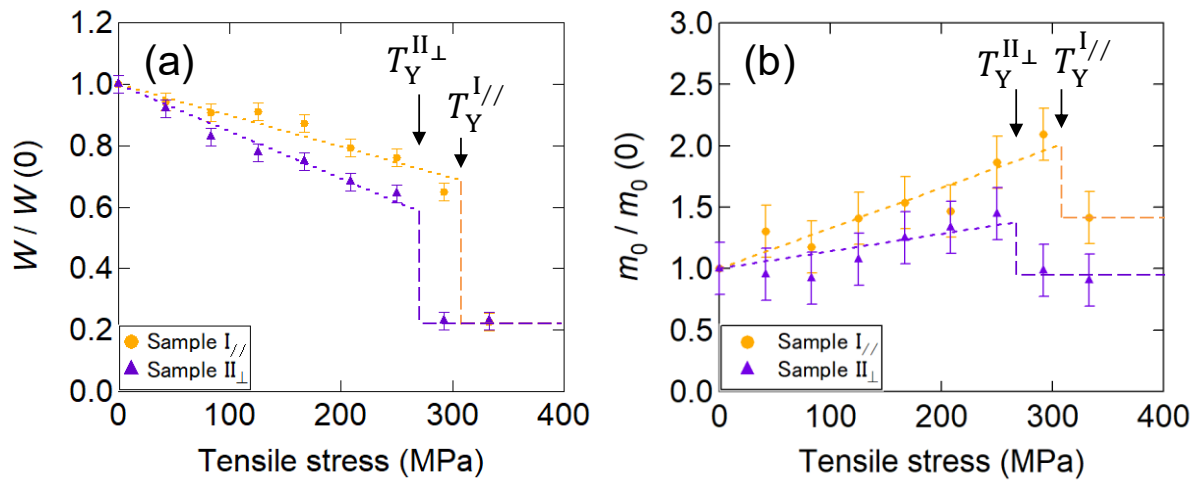


図 3-7 (a)規格化したループ面積 $W/W(T = 0)$ の応力依存性 (b)規格化した初期磁化曲線の初期勾配 $m_0/m_0(T = 0)$ の応力依存性 [30].

3.7 議論

著者らは、鉄鋼材料の局所的な磁気ヒステリシスの応力依存性を ASEM 応答から求めた。特に、保磁力は、応力を定量的に評価する指標として最も有望なヒステリシスパラメータであると考えられる。保磁力は通常、材料内部の微小な欠陥や磁壁の動きの影響を受ける。塑性領域では、引張応力増加にともなう塑性ひずみの導入により、材料内部に新たな欠陥が生じる。一方、弾性変形領域では、応力を加えても新たな欠陥は発生しないと考えられ、保磁力の応力依存性においては、磁壁運動が支配的な役割を果たしていると考えられる。

ここでは、Landau と Lifshitz が提案した[31]Gibbs 自由エネルギーに基づいて、引張応力下での磁壁運動を定性的に説明する。物質の磁壁構造は、交換エネルギー、静磁場エネルギー、磁気弾性異方性エネルギー、結晶磁気異方性エネルギー、ゼーマンエネルギーからなる Gibbs 自由エネルギーを最小化する結果で決まってくる。応力を変数とした場合、磁気弾性異方性エネルギー E_T は、全自由エネルギーの重要な項となる。磁気弾性異方性エネルギーは等方性磁歪の場合、 $E_T = -3/2 \lambda T \cos^2 \theta$ と表され、 $T (> 0)$ は引張応力、 λ は磁歪係数、 θ は磁化と応力方向のなす角である[32], [33]。鉄鋼材料は正の磁歪 ($\lambda > 0$) をもつため、引張応力を加えると E_T が減少する。

また、外部磁場方向に引張応力を加えると、 E_T が最小化されるため、磁化は引張応力の方向(すなわち $\theta \rightarrow 0$) に向く傾向がある[33], [34]。そのため、引張応力下では、 180° 磁区の体積は増加し、 90° 磁区の体積は減少する(図 3-8)[33]-[35]。 180° 磁区の移動は 90° 磁区の移動に比べて低磁場で起こるため[36], [37]、 180° 磁区の拡大によって、 H_c 、 V_r 、および W が減少し、初期勾配 m_0 が増加すると考えられる。

定量的な応力評価には、これらのヒステリシスパラメータと引張応力 T との変換係数が必要である。著者らは、規格化したヒステリシスパラメータ $H_c/H_c(T=0)$ 、 $V_r/V_r(T=0)$ 、 $W/W(T=0)$ 、および $m_0/m_0(T=0)$ の応力特性曲線(図 3-5 から図 3-7)に対して、応力のべき乗関数 $1 + C_1 T + C_2 T^2$ としてフィッティングを行った。 H_c では $C_1 = 0$ 、その他のパラメータでは $C_2 = 0$ とすれば、単一のフィッティングパラメータの関数として表すことができる。

実用上最も重要なのは、降伏応力点付近の弾性領域の応力評価であると考えられる。これは応力による損傷リスクは、低応力領域では高くないと想定されるからである。その応力範囲は $150 \sim 250$ MPa である。

各応力特性曲線の近似曲線から、弾性領域における最適な近似パラメータは、サンプル I_{//} (サンプル II_⊥) では以下のように求められた。

H_c では $C_2 = -5.83 \times 10^{-18} \text{ Pa}^{-2}$ ($-5.42 \times 10^{-18} \text{ Pa}^{-2}$),
 V_f では $C_1 = -1.11 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ($-1.52 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$),
 W では $C_1 = -1.02 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ($-1.54 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$),
 m_0 では $C_1 = 3.29 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ($1.42 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$)

保磁力 H_c は、弾性領域における定量的な評価に最も適したパラメータである。一方、降伏応力点での V_f と W の急激な低下は、鉄鋼材料の塑性変形領域の特定に適していると考えられる。

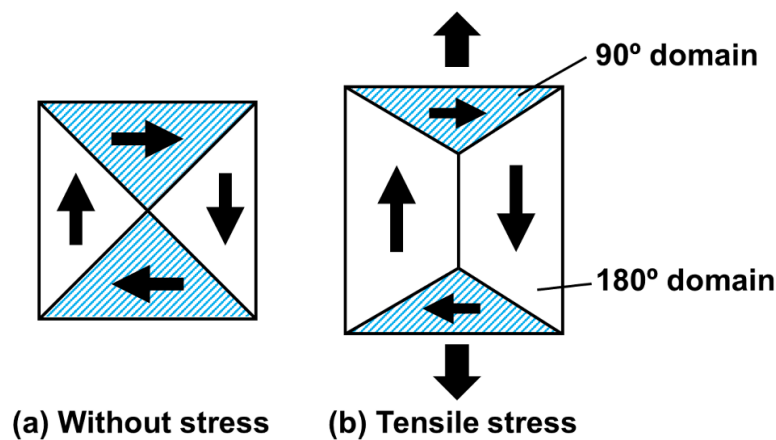


図 3-8 180° 磁区と90° 磁区の動きに関する模式図 (a)応力なし (b)引張応力あり [30].

図 3-8 の補足説明

強磁性体内部には、一様な方向に磁化している領域が存在し、それを磁区(domain)と呼ぶ。複数の磁区の集合がその物質の巨視的な磁性を決めることになる。また、磁区と磁区の境界部において、磁化方向が徐々に変化する領域を磁壁(domain wall)と呼んでいる。磁壁の両側の磁化方向が180°変化しているときは180°磁壁、90°変化しているときは90°磁壁である。外部磁場 H と逆向きの磁化は、 H から最も大きな力を受けるため[36]、最初に180°磁区が増加する。また、引張応力を印加したとしても、鉄鋼材料全体として磁化は発現しない。それは、180°磁区を構成する上矢印と下矢印の体積は同様に变化するからである。90°磁区についても同様な現象が生じる[38].

3.8 結言

本章では、ASEM 法を用いて、鉄鋼材料の磁気ヒステリシス特性の応力依存性を測定した。保磁力や残留磁化信号は、弾性領域では、引張応力の関数として単調に減少した。引張応力が降伏応力点を超えると、これらヒステリシスパラメータは応力に依存しなくなることが判明した。また、ヒステリシスパラメータを引張応力に換算するための換算係数も得ることができた。このように、超音波励起によって局所的な磁気ヒステリシス特性を調べる手法は、残留応力の非破壊評価に対する新しい方法になると考えられる。

3.9 参考文献

- [1] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 1 - Measurement techniques,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 355–365, Apr. 2001.
- [2] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 2 - Nature and origins,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 366–375, Apr. 2001.
- [3] G.S. Schajer and C. O. Ruud, “Overview of residual stresses and their measurement,” in *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2013, pp. 1-27.
- [4] N. Tebedge, G. Alpsten, and L. Tall, “Residual-stress measurement by the sectioning method,” *Exp. Mech.*, vol. 13, no. 2, pp. 88–96, Feb. 1973.
- [5] B. Zuccarello, “Optimal calculation steps for the evaluation of residual stress by the incremental hole-drilling method”, *Exp. Mech.*, vol. 39, no. 2, pp. 117–124, Jun. 1999.
- [6] D. George and D. J. Smith, “Through thickness measurement of residual stresses in a stainless steel cylinder containing shallow and deep weld repairs,” *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, vol. 82, no. 4, pp. 279–287, Apr. 2005.
- [7] *Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction. SAE J784, Society of Automotive Engineers Handbook Supplement*, SAE International, Warrendale, PA, USA, 2003.
- [8] K. Hiratsuka, T. Sasaki, K. Seki, and Y. Hirose, “Development of measuring system for stress by means of image plate for laboratory x-ray experiment, ” *JCPDS-International Centre for Diffraction Data*, vol. 46, pp. 61-67, 2003.
- [9] I. C. Noyan and J. B. Cohen, *Residual stress: measurement by diffraction and Interpretation*, New York, NY, USA, Springer, 1987, p. 94.
- [10] T. Leon-Salamanca and D. F. Bray, “Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (L_{CR}) waves,” *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 7, no. 4, pp. 169–184, Dec. 1996.
- [11] S. Abuku, “Magnetic Studies of Residual stress in iron and steel induced by uniaxial deformation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 7, pp. 1161-1170, 1977.
- [12] A. Mitra, L. B. Sipahi, M. R. Govindaraju, D. C. Jiles, and V. R. V. Ramanan, “Effects of tensile stress on magnetic Barkhausen emissions in amorphous Fe-Si-B alloy,” *J. Magn. Mater.*, vol. 153, no. 1-2, pp. 231–234, Feb. 1996.

- [13] T. Inaguma, H. Sakamoto, and M. Hasegawa, “Stress dependence of Barkhausen noise in spheroidized cementite carbon steel,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 4, pp. 1310–1317, Apr. 2013.
- [14] J. W. Wilson, G. Y. Tian, and S. Barrans, “Residual magnetic field sensing for stress measurement,” *Sens. Actuators A: Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 381-387, Apr. 2007.
- [15] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2016, p. 421.
- [16] S. Abuku and B. D. Cullity, “A magnetic method for the determination of residual stress,” *Exp. Mech.*, vol. 11, no. 5, pp. 217-223, May 1971.
- [17] J. M. Makar and B. K. Tanner, “The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 222, no. 3, pp. 291-304, Dec. 2000.
- [18] H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, and Y. Ishizawa, “Magnetic sensing via ultrasonic excitation,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 4, pp. 044903(1-5), 2013.
- [19] H. Yamada, K. Watanabe, and K. Ikushima, “Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns measured by acoustically stimulated electromagnetic response in a steel plate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 8, pp. 086601(1-4), 2015.
- [20] H. Yamada, J. Yotsuji, and K. Ikushima, “Phase-sensitive detection of acoustically stimulated electromagnetic response in steel,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 7S1, pp. 07LB09(1-5), 2018.
- [21] K. Ikushima, S. Watanuki, and S. Komiyama, “Detection of acoustically induced electromagnetic radiation”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 19, pp. 194103(1-3), 2006.
- [22] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, and K. Ikushima, “Stress dependence of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response in steel,” in *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, Oct. 2018, pp. 1–4.
- [23] D. A. Berlincourt, D. R. Curran, and H. Jaffe, “Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers,” in *Physical Acoustics*, New York, USA, Academic Press, 1964, vol. 1, Part A, pp. 169-270.

- [24] G. Bertotti, "Space - time correlation properties of the magnetization process and eddy current losses: Applications. I. Fine wall spacing," *J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 12, pp. 4339-4347, 1984.
- [25] G. Bertotti, "Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations," *J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 6, pp. 2110-2117, 1985.
- [26] D. Jiles, "Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 10, pp. 5849-5855, 1994.
- [27] Y. Shimizu, Y. Ito, and Y. Iida, "Formation of the Goss orientation near the surface of 3 pct silicon steel during hot rolling," *Metall. Trans. A*, vol. 17, no. 8, pp. 1323-1334, Aug. 1986.
- [28] D. Dorner, S. Zaeferrer, L. Lahn, and D. Raabe, "Overview of microstructure and microtexture development in grain-oriented silicon steel," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 304, no. 2, pp. 183-186, Sep. 2006.
- [29] H. Kikuchi, I. Shimizu, K. Sato, and K. Iwata, "Nondestructive evaluation of material degradation and sub-millimeter sized defect detection in steel using magnetic measurements," *Case Stud. Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 1, pp. 25-31, Apr. 2014.
- [30] Y. Suzuki, H. Yamada, and K. Ikushima, "Tensile-Stress Dependence of Magnetic Hysteresis Properties Measured by the Acoustically Stimulated Electromagnetic Response in Steel," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 67, no. 4, pp. 825-831, Apr. 2020.
- [31] I. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Physik Z.*, Sowjetunion, vol. 8, 153, 1935.
- [32] R. Langman, "Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 4, pp. 1246-1251, Jul. 1990.
- [33] T. Liu, H. Kikuchi, K. Ara, Y. Kamada, and S. Takahashi, "Magnetomechanical effect of low carbon steel studied by two kinds of magnetic minor hysteresis loops," *NDT&E Int.*, vol. 39, no. 5, pp. 408-413, Jul. 2006.
- [34] C. G. Stefanita, D. L. Atherton, and L. Clapham, "Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel," *Acta Mater.*, vol. 48, no. 13, pp. 3545-3551, Aug. 2000.

- [35] X. Kleber and A. Vincent, “On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel,” *NDT&E Int.*, vol. 37, no. 6, pp. 439-445, Sep. 2004.
- [36] S. Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, 2nd ed., New York, NY, USA, Oxford Univ. Press, 2009, p. 468.
- [37] M. S. Amiri, M. Thielen, M. Rabung, M. Marx, K. Szielasko, and C. Boller, “On the role of crystal and stress anisotropy in magnetic Barkhausen noise,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 372, pp. 16-22, Dec. 2014.
- [38] 山崎 友裕, 山本 真史, 平尾 雅彦, “磁歪特性を利用した軟鋼の非破壊残留応力測定,” *日本機械学会論文集*, 63 巻, 611 号, pp. 1489-1494, 1997.

第4章 溶接試験体を用いた検証実験

4.1 緒言

残留応力は鉄鋼材料の破壊強度を評価する上で重要な要素であり、橋梁、ビル、自動車、航空機などの土木インフラや鉄鋼製品の構造的な健全性に対して影響を与える。残留応力は溶接、鋳造、曲げなどの加工プロセス中に発生する。特に、引張の残留応力は物体に亀裂を発生させる要因となるため、一般的には有害なものとして扱われる。引張残留応力と時間的に変動する供用荷重が重畳することによって、部材の疲労破壊を引き起こし、その部材を使用している構造物自体が、深刻な損傷や破壊を起こすことにつながる可能性がある[1]-[4]。したがって、物体の引張残留応力の大きさと空間的分布を把握することが、損傷のリスクを予測し、構造設計や製造プロセスを改善することにつながる。

前章で述べたように、残留応力測定は一般的には、切断法(破壊法)[5]や穿孔法(準破壊法)[6]、X線回折を利用した残留応力測定(非破壊法)[7]-[8]などがある。しかし、定量評価や空間的マッピングについては開発途上である。

磁気ヒステリシスループには、強磁性体の保磁力、透磁率、残留磁化、ヒステリシス損失など、複数の独立した磁気パラメータが含まれている。これらヒステリシスパラメータは、材料に生じる応力に敏感に応答し[9]-[11]、鉄鋼材料の残留応力を評価する指標として利用できることが示唆される。しかし、従来の電磁誘導によるヒステリシスループ測定(磁束密度 B と磁界 H の曲線)から得られるバルク特性は、試料全体の情報であり、局所的なヒステリシス特性ではないため、磁気特性を利用した残留応力の非破壊評価には限界があった。

近年、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の空間的マッピング結果が報告されている[12]、[13]。この手法は、磁気機械結合による音響誘起電磁(ASEM)応答の生成と検出に基づいている[14]。ASEM法では、照射された超音波のラジオ周波数(RF)で磁化を一時的に変調させる。超音波の焦点範囲から放出される1次高調波のRF帯の磁界を、共振ループアンテナを用いて検出する。この方法の利点の一つは、空間分解能が磁場のフォーカシングではなく、超音波のフォーカシングによって決まることであり、超音波走査によって磁気ヒステリシス特性の明確な空間イメージングを実現することができる。ASEM応答の信号強度は、対象物における超音波で励起された領域の圧磁係数 d_{10c} で表され、ASEM強度のヒステリシスループは $d_{10c}(H)$ の外部磁場依存性に対応する[13]、[15]。

ASEM法を残留応力の評価に適用するために、著者らは先に、引張試験機を利用して、ASEM応答から、局所的な磁気ヒステリシスが応力にどのように依存するか調査した[16]-[18]。その結果、ヒステリシスループの応力依存性において、2つの大きな特徴を見出した。

一つは、保磁力 H_c や残留磁化信号 V_r のようなヒステリシス特性が、弾性領域において引張応力 T の関数として単調に減少することである。このことから、 H_c を引張応力に変換するための係数を得ることができた。もう一つの特徴は、降伏応力点 T_Y において、ヒステリシスパラメータが大きく低下し、塑性変形によって材料内部に応力が解放されても、パラメータは低いままとなることである。

本章では、ビードオンプレート溶接試験体を用いて、ASEM 法による引張残留応力の評価結果を検証した。弾性領域の高引張応力では、 H_c から得られた応力値は、準破壊法の穿孔法を用いて測定された結果とよく一致している。また、検証結果の特徴的なこととして、塑性変形領域(溶接終端部)で評価した応力値は、穿孔法で測定した値と大きく異なっていた。これは、結晶粒の再配列によって、材料内部へ応力が解放された後も、鋼材に加わった過剰な応力の履歴が、磁気パラメータとして保持されていることを示唆している。さらに、超音波の集束ビームを走査することによって、 V_r の空間的なイメージングを行った。得られた画像は、妥当な応力値を有する残留応力分布として解釈することができる。最後に、鉄鋼材料に対して、ASEM 法を用いた引張残留応力の非破壊評価(Non-Destructive Evaluation : NDE)のガイドラインを提案する。

本章の流れを以下のように、大きく2つの項目に分けて説明を進める。

I. ASEM 法による残留応力定量評価

- (1) 実験サンプルの製作手順とASEM 測定のセッティング方法を説明し、得られたASEM 波形とASEM ヒステリシス曲線を示す(4.2.1 節～4.2.2 節)。
- (2) 局所的な磁気ヒステリシスと引張応力依存性を領域分けし、実際の応力評価に対する各領域の特徴を説明する(4.2.3 節)。
- (3) 各測定位置の ASEM 測定によって得られた保磁力 H_c と残留磁化信号 V_r について説明し、穿孔法による残留応力測定手順と測定状況についても述べる(4.2.4 節～4.2.5 節)。
- (4) ASEM 法と穿孔法の残留応力測定結果を比較・分析し、両結果の異なる箇所についても議論を行う(4.2.6 節)。

II. ASEM 法による残留応力イメージング

- (1) 溶接始端周辺の残留磁化信号 V_r の空間的イメージングにおける、測定セットアップと結果の説明を行い、 V_r イメージングから得られた残留応力分布の妥当性を評価する(4.3 節)。

4.2 保磁力による定量評価

4.2.1 実験サンプル

本章では、ASEM 法による残留応力評価を検証するために、異なる大きさの残留応力が分布した試験体を準備する必要がある。残留応力の大きさとしては、前章の実験結果から、弾性応力範囲かつ降伏応力に近いほど高精度の ASEM 測定が期待できる。また、残留応力の分布としては、中央部に向かって大きくなるような、単純な応力勾配を有していれば、検証結果を評価しやすいと考えられる。

そこで、本実験では意図的に引張の残留応力を導入した 2 体のビードオンプレート溶接試験体を用意した。ビードオンプレートとは、別々の 2 体の鉄板を溶接によって接合したのではなく、1 体の鉄板の片面に溶接金属を接着して作成したものをいう。このような溶接状態の試験体は、残留応力測定法の検証用として広く採用されている。試験体 1 体目は準破壊法の穿孔法と比較することによって、残留応力を定量的に評価するためのものである。2 体目は残留磁化信号 V_r を介して、残留応力分布を画像化するために使用した。試験体 (サイズ: $490 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$) は、厚さ 25 mm の S25C 鋼板 (JIS G4051:2009) から加工して製作した。著者らが以前報告したように、S25C 鋼板の降伏応力は 292~333 MPa である [16], [18]。試験体は、鋼板の片面の中心線に沿って部分的に溶接した (図 4-1(a)-(d))。溶接方向は試験体の左から右である。溶接開始点 (溶接始端部, Weld start) と溶接終了点 (溶接終端部, Weld stop) は、図 4-1(b) の溶接範囲両端の黒ずんでいる部分である。試験体を拘束していないことによって、溶接加熱後の降温過程で溶接金属部 (Weld bead) が収縮し、反対側の面には引張残留応力が発生すると考えられる (図 4-1(d))。また、材料の相変態を避けるために、溶接の反対側の面 (測定面) の温度が 550°C を超えないように、ロボット溶接で慎重に溶接を実施した。

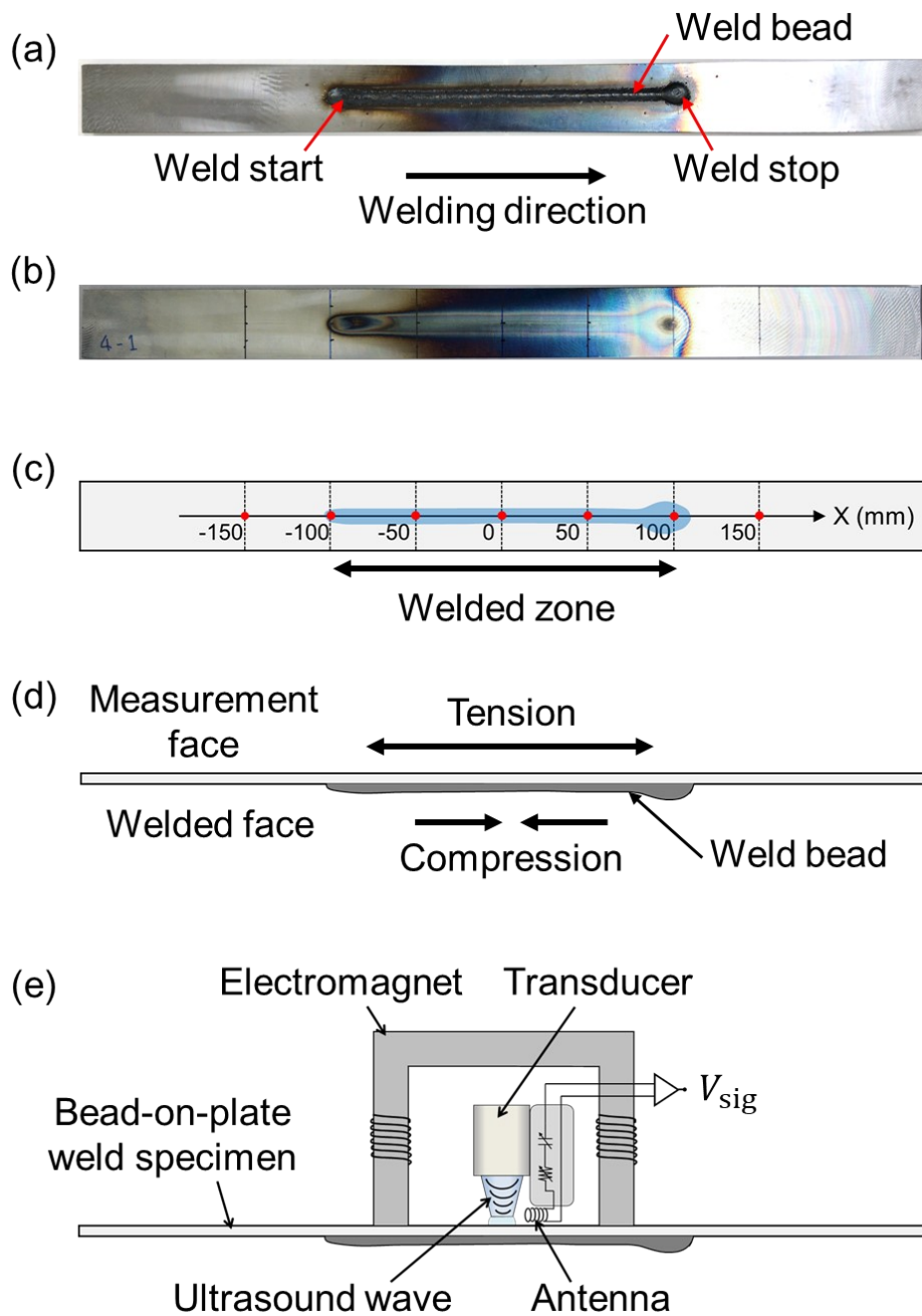


図 4-1 (a) ビードオンプレート試験体の溶接面の写真 (b)試験体の溶接面の反対面の写真
(c)試験体の溶接面の反対面の模式図(赤点は測定点) (d)試験体の側面から見た模式図(溶接面の反対面が測定面) (e)ASEM 測定セットアップ図 [19].

4.2.2 ASEM 測定

図 4-1(e)は、ビードオンプレート溶接試験体の ASEM 測定セットアップの概略図を示している。試験体の長手方向に沿った中心線を X 軸と定義し、溶接を実施した面に対して、反対側の面の 7 つの測定位置(図 4-1(c)の赤点)において、ASEM ヒステリシスループを測定した。

ASEM 測定は、トランスデューサの励起パルスと目的の ASEM 信号を分離するための遅延材(長さ 27 mm のポリスチレン製)を備えた 4 MHz の集束トランスデューサ(Japan Probe Co., Ltd.製)を用いて実施した[14]。超音波の焦点サイズは直径約 1.7 mm である。ASEM 信号は、4 MHz にチューニングした共振ループアンテナ(コイル)で検出した。

また、前章で使用した電磁石を引き続き用いて、試験体の長手方向に対して外部磁場を印加した。外部印加磁場については、 $H = NI/L$ を用いて計算を行っている。ここで、 N , I , L はそれぞれ、コイルの総ターン数(400 ターン)、印加電流、電磁石と試料で形成される磁気回路の長さ(470 mm)である。

図 4-2(a)は、エコー信号と ASEM 応答のラジオ周波数帯信号の典型的な波形を示してい

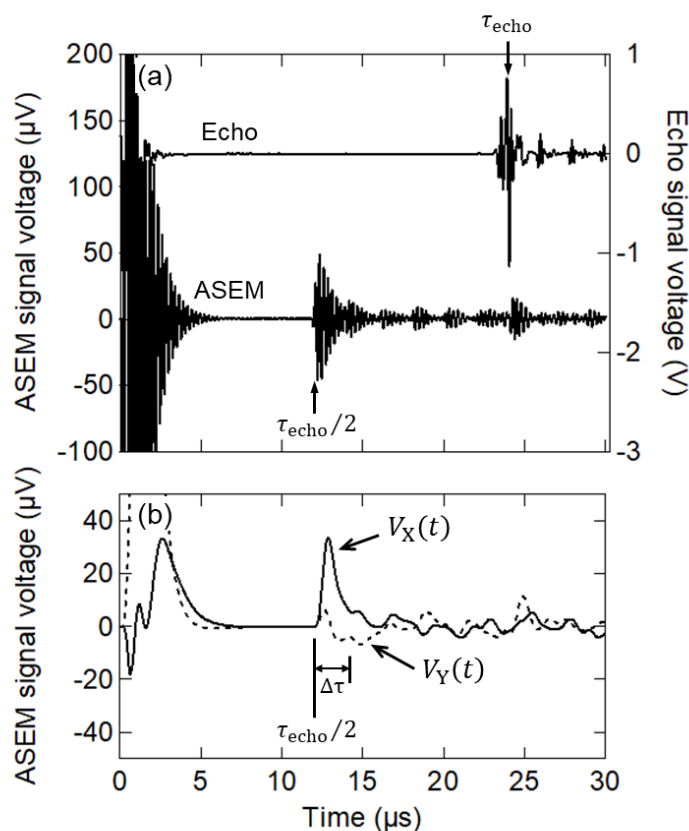


図 4-2 (a) エコー信号と ASEM 信号の実時間波形 (b) PSD 後の同相成分 V_X (実線)と直交成分 V_Y (破線) [19].

る。試験体表面からのエコー信号は、 $\tau_{\text{echo}} = 24 \mu\text{s}$ で観測された。ASEM 応答はエコーの遅延時間の半分の時間 $\tau_{\text{echo}}/2$ で発生するため、 $12 \mu\text{s}$ に観測された信号が試験体からの目的のASEM 応答であることが分かる。PSD(Phase Sensitive Detection)を用いて、ダイレクトなRF信号を、“同相成分 $V_X(t)$ ”と“直交成分 $V_Y(t)$ ”に数値的に変換した[15], [18]。PSD 後の時間波形を図 4-2(b)に示す。ヒステリシス測定では、 $V_X(t)$ と $V_Y(t)$ の信号電圧を、 $\tau_{\text{echo}}/2$ から $\tau_{\text{echo}}/2 + \Delta\tau$ の間で積分した時間平均強度 \overline{V}_X , \overline{V}_Y としてプロットした[13], [15], [18]。また、積分時間 $\Delta\tau$ は $2 \mu\text{s}$ とした。各測定位置において、ヒステリシス測定前に電磁石を用いて交流電流を流すことによって試験体を消磁している。

図4-3(a)と(b)は、実験サンプルの測定位置 $X = -150$, $X = 0$ における同相成分 \overline{V}_X (実線)、直交成分 \overline{V}_Y (破線)のヒステリシス曲線である。黒線、青線、赤線はそれぞれ初期の上昇磁化、下降磁化、再度の上昇磁化のデータを示している。直交成分 $\overline{V}_Y(H)$ は無視できるほど小さい。同相成分 $\overline{V}_X(H)$ のヒステリシスループから得られるヒステリシスパラメータ(保磁力 H_c と残留磁化信号 V_r)に注目する。

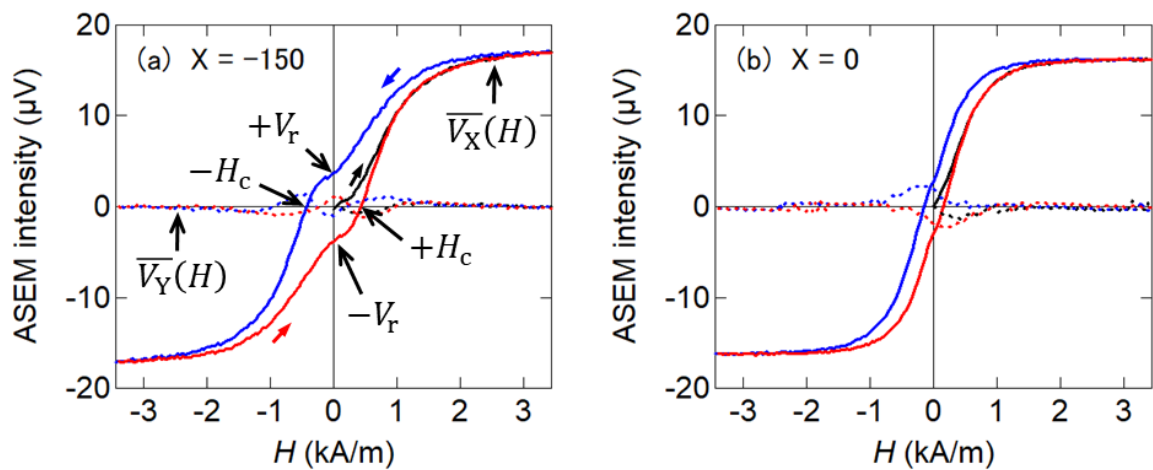


図 4-3 ビーオンプレート溶接試験体の ASEM ヒステリシスループ (a) $X = -150 \text{ mm}$ (b) $X = 0 \text{ mm}$ [19].

4.2.3 局所的な磁気ヒステリシスと引張応力依存性

先の研究[18]では、引張試験機を用いて、 $H_c(T)$ および $V_r(T)$ の引張応力(T)依存性を測定した(図 4-4)。弾性領域では、引張応力の増加に伴い、ヒステリシスパラメータは単調に減少した。このようにして、弾性領域における、ヒステリシスパラメータと引張応力との間の、明確な変換関数が得られた。特に、2 次関数的な応力依存性を示す保磁力 H_c は、高引張応力領域を定量的に評価するのに適した指標であると考えられる。著者らは規格化した保磁力 $H_c/H_c(T=0)$ の応力特性曲線を、応力のべき乗関数 $1 + C_1T + C_2T^2$ としてフィッティングした。ここで、 $C_1 = 0$ であるならば、 C_2 単一のフィッティングパラメータとすることができる。弾性領域での最適なフィッティングパラメータは、 $C_2 = -5.83 \times 10^{-18} \text{ Pa}^{-2}$ となった。一方、残留磁化信号 V_r は、各測定位置において、ヒステリシスループ全体を測定する必要がないため、残留応力の空間的なイメージングに有用であると考えられる。

ヒステリシスパラメータと引張応力の関係を考慮して、図 4-4 に示すように応力領域を以下の 3 つのカテゴリに分類した。領域 I ($T \leq 100 \text{ MPa}$)では、 $H_c/H_c(0) - T$ 曲線が放物線状であるため、定量的評価の精度が低下してしまう。しかし、この低応力領域は、鉄鋼製品の大きな損傷のリスクに直結しないため、実際には重要な応力検査領域にはならないと考えられる。したがって、領域 II の降伏応力点に近い高応力($100 \text{ MPa} < T < T_Y$)が、実際の検査では重要な領域になると考えられる。よって、 $H_c/H_c(0) = 1 + C_2T^2$ の関係性から、残留応力の定量的評価が期待できる。さらに、ヒステリシスパラメータは、降伏応力点 T_Y で低下し、 T_Y 以上の応力には鈍感になることも図から読み取れる。塑性領域(領域 III ($T_Y < T$))では、物

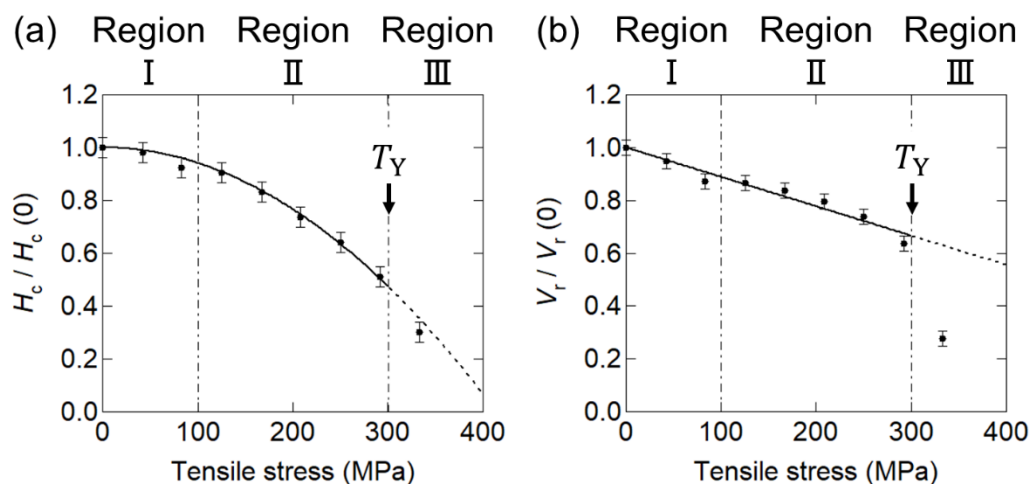


図 4-4 S25C 鋼板における(a)規格化した保磁力 $H_c/H_c(T=0)$ と(b)規格化した残留磁化信号 $V_r/V_r(T=0)$ の引張応力依存性 [18], [19].

体に加わる内部応力が、塑性変形によって物体内部へ解放されたとしても、物体の変形量は増加し続ける。したがって、塑性領域に入ると、残留応力値を、損傷リスクを示す指標として単純に扱うことはできない。しかし、磁気ヒステリシスパラメータでは、塑性変形したという事実が鉄鋼材料の磁気特性に保存されていると考えられる。この特徴は、塑性変形した部分のスクリーニングに利用できる可能性がある。

4.2.4 ASEM 測定結果

図 4-5(a)は、ASEM ヒステリシスループから求めた保磁力の一次元プロファイルを示している。溶接部では保磁力 H_c が低下しており、引張残留応力の存在を示している。また、残留磁化信号 V_r のプロファイルは、 $X = 100$ mm で明らかな最小値を示している(図 4-5(b))。図 4-4(b)に示すように降伏応力点を超えると V_r が急激に低下することを考慮すると、最小値を示した $X = 100$ mm では、溶接終端周辺で塑性変形が発生していることを意味している。 V_r のような信号強度は超音波照射条件に左右されやすいため、精度の高い定量的な評価には、 V_r よりも H_c の方が有望なパラメータと考えられる。

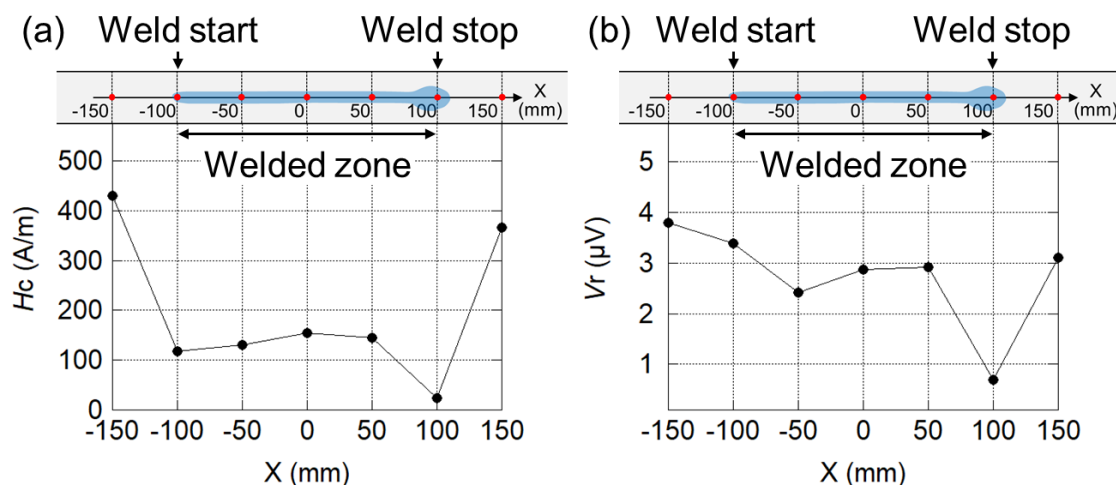


図 4-5 ASEM 測定で得られた溶接範囲に沿った(a)保磁力 H_c と(b)残留磁化信号 V_r のプロファイル [19].

4.2.5 穿孔法による残留応力測定

ASEM 測定を実施後、穿孔法を用いて残留応力を確認した。言うまでもなく、穿孔法は準破壊法であるため ASEM 法の実施後に実施する必要がある。また、穿孔法は、物質の表面近傍の残留応力を測定するために標準化された方法 (ASTM E837-13a) であり、ひずみゲージを用いて直接的にひずみ緩和量を測定するため、残留応力測定法としては精度の高い方法として扱われる。

穿孔法の測定状況を図 4-6(a), (b) に示す。実験サンプルの ASEM 測定実施箇所と同じ場所に対して、穿孔穴を開けることができるように、穿孔法用の 3 軸ひずみゲージを接着した。次に、逆円錐形のタングステンカーバイドコーティングのドリルをセットした穿孔システム (MTS3000, Sint Technology S.R.L. 製) を使用して、試験体に段階的に穴を開け、その際に発生するひずみ変化を取得・解析し、残留応力値として算出した。図 4-6(c) に穿孔後のひずみゲージを示す。穿孔穴の直径は約 1.2 mm であった。試験体の深さ 0.013 mm から 0.1 mm の間の残留応力値を平均化して評価を実施した。

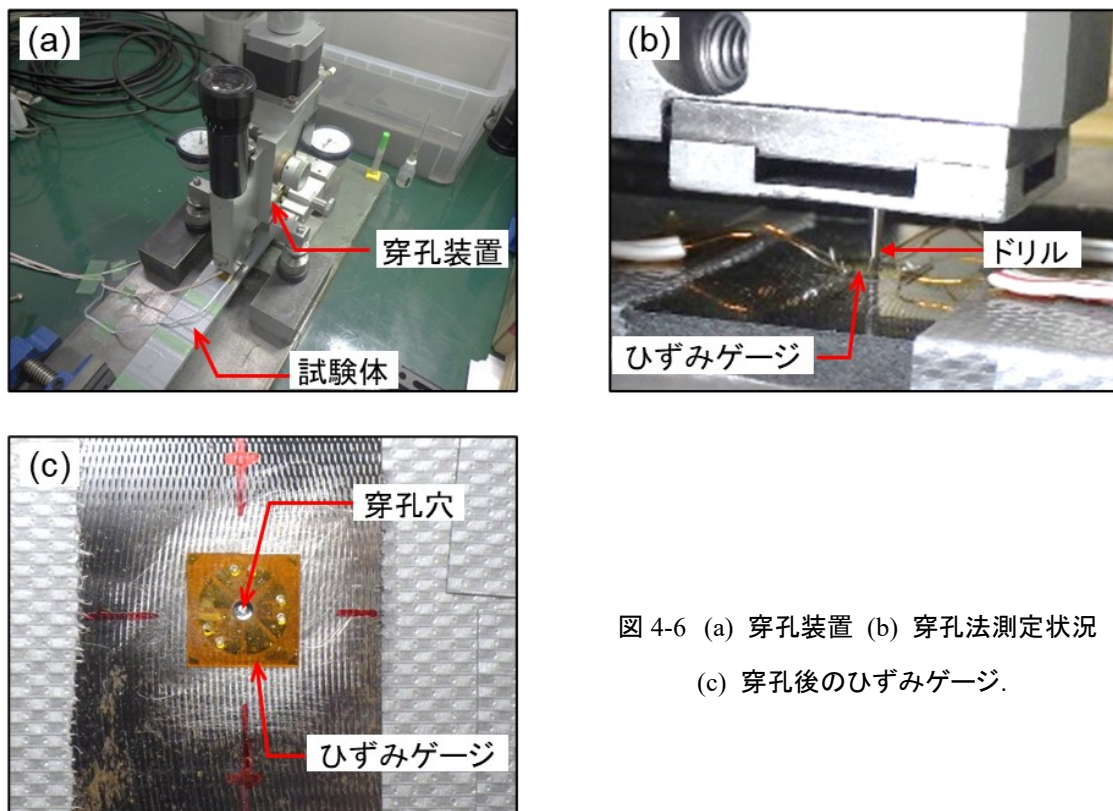


図 4-6 (a) 穿孔装置 (b) 穿孔法測定状況
(c) 穿孔後のひずみゲージ。

4.2.6 分析と議論

$H_c/H_c(0) = 1 - 5.83 \times 10^{-18} T^2$ を用いて保磁力を引張応力に変換した。ここで、 $H_c(0)$ は溶接部の外側($X = -150$ および 150 mm)で測定した保磁力である。得られた溶接部に沿った残留応力のプロファイルを図 4-7 に示す。2 種類の保磁力から換算した残留応力 T_{H_c} プロファイルについては、溶接始端と終端($X = -150$ および 150 mm)でそれぞれ規格化を行っている。

まず、溶接部の中央部($-50 \text{ mm} \leq X \leq 50 \text{ mm}$)の残留応力について説明する。穿孔法の結果から、一様な残留応力が分布していることを確認した。穿孔法で推定した応力値 T_{HD} は約 300 MPa であり、本研究で検査対象とする応力領域(4.2.3 節で述べた領域 II)に相当する。図 4-7 に示す測定結果を見ると、 T_{H_c} は T_{HD} とよく一致している。また、 T_{H_c} は、 $X = -150$ および 150 mmで測定した規格化係数 $H_c(0)$ には大きく依存しないことも分かる。

次に、溶接部の端部 $X = 100$ mm, -100 mmに注目する。溶接終端 ($X = 100$ mm)において、 T_{HD} と T_{H_c} の間には大きな乖離が見られる。これは、(i)評価した T_{H_c} が領域 III に相当する材料の降伏応力点 T_Y を明らかに超えていること、(ii)図 4-5(b)において、 V_r の急激な低下が見られること、(iii)塑性ひずみにより、内部応力が解放されるため、穿孔法で測定されるひずみ解放が小さくなると予想されることから、塑性変形に起因するものと考えられる。

上記の解釈を検証するために、電子後方散乱回折法 (Electron backscatter diffraction, EBSD)を用いて結晶学的特性を調べた。塑性変形は、しばしば結晶粒の再配列や大きさの変化を伴って発生する。EBSD 法は、結晶特性を調べるために一般的に用いられている走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)を利用した技術である。本研究では、EBSD システム (HIKARI, TSL solutions 製)を搭載した SEM (SU5000, Hitachi High-Technologies 製)を用いて、各測定位置で EBSD 測定を行った。塑性変形の解析には、GAM (Grain Average Misorientation)パラメータを利用した。EBSD データから得られた GAM は、各結晶粒に対して平均された方位差として定義される[20], [21]。また、個々の結晶粒内の塑性ひずみは、GAM の値からマッピングされている。

図 4-8(a)~(e)は、各測定位置における GAM マップである。溶接終端 ($X = 100$ mm)では、2つの顕著な特徴が見られた。(i)図 4-8(f)に示すように、結晶粒の大きさが小さくなっていること、(ii)図 4-8(d)に示すように、各結晶粒内の方位差が明らかに大きくなっていることである(図 4-8(d)の画像は緑がかって見える)。これらの結果は、塑性ひずみによって結晶粒が劇的に変化したことを示しており、著者らの解釈をさらに裏付けるものである。また、溶接のオーバーヒートによる過大な応力と、温度による複雑な材料変質に起因している可能性もあるが、そ

の変化の履歴が磁気パラメータに記録されていることは注目すべきことである。溶接始端 ($X = -100$ mm) については, T_{Hc} の値は, T_Y に非常に近い。GAM マップ(図 4-8(b)) では明確な変化は見られないが, T_{HD} がわずかに減少していることから, 微細な変形によって内部応力が部分的に解放されていると考えられる。

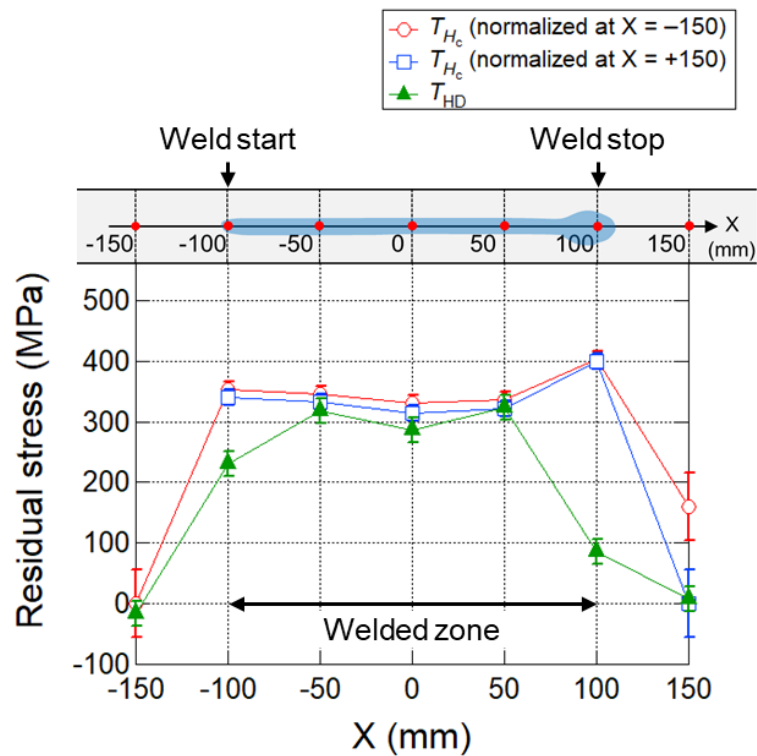


図 4-7 保磁力から変換した残留応力 T_{Hc} のプロファイルと穿孔法によるひずみ緩和から見積もられた残留応力 T_{HD} のプロファイル [19].

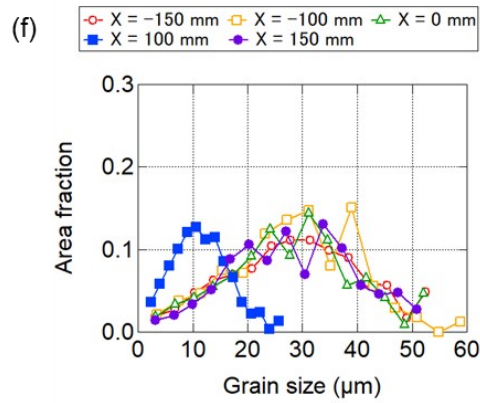
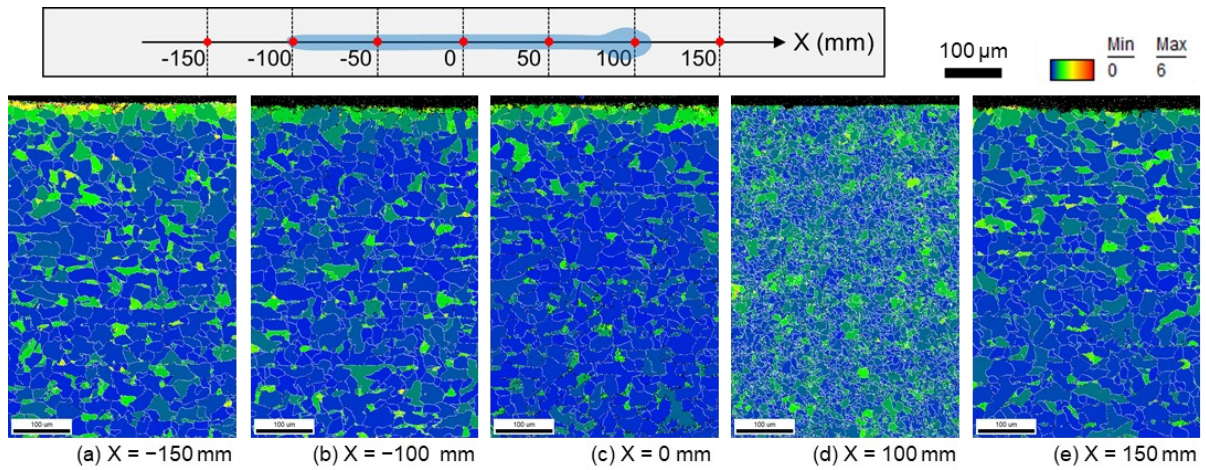


図 4-8 試験体の表面から深さ 600 μm までの GAM マップ (a)X = -150 (b)-100 (c)0 (d)100 および (e)150. (緑領域は結晶粒の方位差が大きいことを示す(単位:度)). (f)各測定位置の粒径分布のチャート [19].

4.3 残留応力イメージング

4.3.1 実験セットアップ

残留磁化信号 V_r は、信号強度が超音波照射と印加磁場のセッティングに影響されるため、離れた位置同士の定量的な評価は難しい可能性がある。しかし、 V_r は測定点ごとにヒステリシスループを取得することなく得られるため、イメージングには非常に有効な指標である。

図 4-9(a)は、溶接面とは反対面の溶接始端付近の写真である。本測定では、 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ (図 4-9(a)の黄色の点線の四角)の範囲内であれば、超音波照射と印加磁場について一様なセッティングが可能である。そこで、 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ の走査領域で V_r 画像の取得を試みた。エコー信号および残留磁化信号 V_r は、各走査領域について、溶接部外の位置を基準にして規格化した(図 4-9(a)の赤い×印)。

4.3.2 実験結果および分析

図 4-9(b), (c)はそれぞれ、規格化したエコー強度と V_r の空間イメージングを示している。規格化したエコー信号では一様なコントラスト画像が観察されるのに対し、 V_r では溶接部の高コントラストな画像が得られた。図 4-9(c)の赤い部分は、高い引張残留応力の存在を示唆している。変換関数 $V_r/V_r(0) = 1 + C_1 T$ ($C_1 = -1.11 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, 図 4-4(b)の点線)を用いて、応力値を定量的に推定してみると[18], $X = -50$ における応力は 330 MPa ($V_r/V_r(0) = 0.63$)となり、 T_{H_c} および T_{HD} と合理的に一致している。一方、暗赤色の領域の応力値 ($V_r/V_r(0) < 0.6$)は、明らかに過大評価されている。例えば、 $X = -100$ における $V_r/V_r(0)$ は 0.52 であり、これは 430 MPa に相当する。この矛盾は、塑性領域において、 $V_r/V_r(0)$ の値が $V_r/V_r(0)$ 対 T の最適近似曲線(図 4-4(b)の領域 III)から大きくシフトしていることによって説明できる。したがって、暗赤色の領域は、局所的な応力が過度に加わって塑性変形した部分を示している。

最後に、ASEM 法を用いた引張残留応力の NDE のガイドラインを提案する。まず、鋼材の測定領域で磁場が飽和するまで磁化させる。その後、磁場を徐々にゼロまで減少させる。次に、測定のセッティング状況を一定に保持した上で、その領域の V_r 画像をスキャンする。このプロセスの目的は、塑性変形した部分や残留応力の高いリスクのある部分をスクリーニングすることである。リスクが見込まれる部分では、ASEM ヒステリシスループから保磁力を測定し、応力値を定量的に確認する。なお、ヒステリシスパラメータ H_c および V_r は、ゼロ応力が予想される位置を基準にして規格化する必要がある。

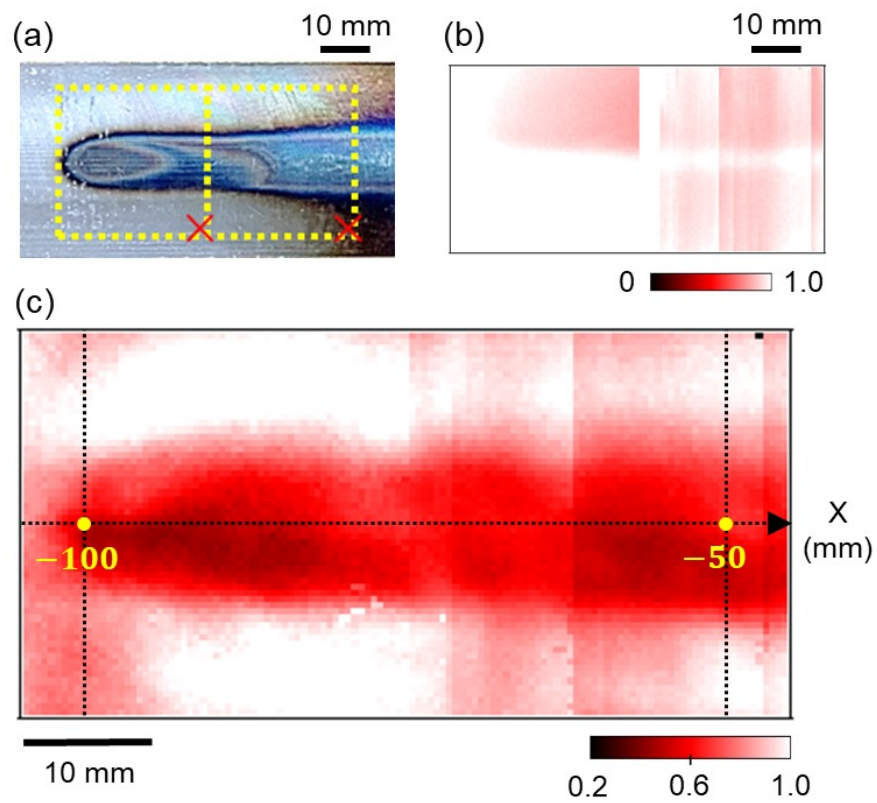


図 4-9 (a)溶接面の反対側の溶接始端部周辺の写真 (b)規格化したエコー強度の画像
(c)規格化した V_r の画像 [19].

4.4 結言

ASEM 法で得られた局所的な磁気ヒステリシス特性を用いて、ビードオンプレート溶接試験体の引張残留応力を評価した。その結果、高弾性領域では、穿孔法と ASEM 法による保磁力から換算した残留応力を比較するとよく一致していた。さらに、局所的な磁気ヒステリシスパラメータは、塑性変形による結晶粒の急激な再配列が生じた箇所を探ることもできる。よって、残留磁化信号 V_r をイメージングすることによって、高引張応力領域のみならず、塑性領域の分布を可視化することが可能であることを示した。

4.5 参考文献

- [1] D. V. Nelson, “Effects of residual stress on fatigue crack propagation,” *Residual stress effects in fatigue*, ASTM STP 776, pp. 172-194, 1982.
- [2] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 1 - Measurement techniques,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 357-358, Apr. 2001.
- [3] M. A. S. Torres and H. J. C. Voorwald, “An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel,” *Int. J. Fatigue*, vol. 24, no. 8, pp. 877-886, Aug. 2002.
- [4] D. Löhe, K.-H. Lang, and O. Vöhringer, “Residual stresses and fatigue behavior,” in *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, Materials Park, OH, USA, ASM International, pp. 27-53, 2002.
- [5] N. Tebedge, G. Alpsten, and L. Tall, “Residual-stress measurement by the sectioning method,” *Exp. Mech.*, vol. 13, no. 2, pp. 88–96, Feb. 1973.
- [6] B. Zuccarello, “Optimal calculation steps for the evaluation of residual stress by the incremental hole-drilling method,” *Exp. Mech.*, vol. 39, no. 2, pp. 117–124, Jun. 1999.
- [7] I. C. Noyan and J. B. Cohen, *Residual stress: measurement by diffraction and Interpretation*, New York, NY, USA, Springer, 1987, p. 94.
- [8] Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction. SAE J784, Society of Automotive Engineers Handbook Supplement, SAE International, Warrendale, PA, USA, 2003.
- [9] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2016, p. 421.
- [10] S. Abuku and B. D. Cullity, “A magnetic method for the determination of residual stress,” *Exp. Mech.*, vol. 11, no. 5, pp. 217-223, May 1971.
- [11] J. M. Makar and B. K. Tanner, “The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 222, no. 3, pp. 291-304, Dec. 2000.
- [12] H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, and Y. Ishizawa, “Magnetic sensing via ultrasonic excitation,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 4, pp. 044903(1-5), 2013.

- [13] H. Yamada, K. Watanabe, and K. Ikushima, "Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns measured by acoustically stimulated electromagnetic response in a steel plate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 8, pp. 086601(1-4), 2015.
- [14] K. Ikushima, S. Watanuki, and S. Komiyama, "Detection of acoustically induced electromagnetic radiation", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 19, pp. 194103(1-3), 2006.
- [15] H. Yamada, J. Yotsuji, and K. Ikushima, "Phase-sensitive detection of acoustically stimulated electromagnetic response in steel," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 7S1, pp. 07LB09(1-5), 2018.
- [16] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, and K. Ikushima, "Stress dependence of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response in steel," in *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, Oct. 2018, pp. 1-4.
- [17] Y. Suzuki, Y. Ichikawa, H. Yamada, and K. Ikushima, "Nondestructive evaluation of residual stress through acoustically stimulated electromagnetic response in welded steel," in *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, Oct. 2019, pp. 1-3.
- [18] Y. Suzuki, H. Yamada, and K. Ikushima, "Tensile-Stress Dependence of Magnetic Hysteresis Properties Measured by the Acoustically Stimulated Electromagnetic Response in Steel," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 67, no. 4, pp. 825-831, Apr. 2020.
- [19] Y. Suzuki, D. Hosokawa, and K. Ikushima, "Evaluation of Tensile Residual Stress in Welded Steel Plates Using Acoustically Stimulated Electromagnetic Response," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, DOI:10.1109/TUFFC.2022.3149386, (To be published).
- [20] L.N. Brewer, D.P. Field, and C.C. Merriman, "Mapping and Assessing Plastic Deformation Using EBSD," in *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*, Springer, Boston, MA, 2009, pp. 251-262.
- [21] S. Suwas and R.K. Ray, *Crystallographic Texture of Materials*, Springer, London, 2014, pp. 255-260.

第 5 章 結論

鉄鋼業界やインフラ業界で使用されている鉄鋼材料を対象に、非破壊による残留応力評価技術を開発したいというモチベーションをもって本研究を実施した。鉄鋼材料のような強磁性体の磁気特性は応力に敏感に応答することから、応力と ASEM 応答から得られる磁気特性を定量的に結び付け、その定量性が既存の残留応力測定法と比べて、妥当性を有するかどうかを検証する必要があった。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 第 2 章では、ターゲットの鋼種として S25C を選定し、圧延方向と局所的な磁気ヒステリシス特性の関係性に注目した。鉄鋼内層は外層に対して、圧延方向が保磁力に与える影響は小さいと考えられる。外層は圧延方向によって磁気特性(保磁力と勾配)に明らかな差が生じた。これは鋼板製造時の複雑な熱履歴や圧延履歴の影響が現れていると考えられる。ASEM 応答では、鋼材の局所的な磁気特性が得られることから、表面状態に応じた磁気特性が得られていると考えられる。
- (2) 第 3 章では、ASEM 法を用いて鉄鋼材料の磁気ヒステリシス特性の応力依存性を調査した。複数の磁気ヒステリシスパラメータの中で、保磁力は精度の高い応力評価への利用が期待できる。残留磁化信号は引張応力が降伏応力を超えると、急激に減少することから、塑性領域の調査への利用が期待できる。また、残留応力評価技術の実現に向けて、磁気ヒステリシスパラメータを引張応力に変換するための校正曲線と変換係数を取得することができた。
- (3) 第 4 章では、意図的に引張応力分布を与えた溶接サンプルを利用して、既存の残留応力測定法と ASEM 法の結果を比較した。高引張弾性領域では、穿孔法と ASEM 法による保磁力から換算した残留応力を比較するとよく一致していた。また、残留磁化信号 V_r をイメージングすることによって、高引張応力領域のみならず、塑性領域の分布を可視化することが可能であることを示した。最後に、ASEM 法による残留応力イメージングにおける、実用に向けた NDE のガイドラインを示した。

以上のようにターゲット鋼種の選定から残留応力のイメージングまで、理想的な流れで研究を実施することができた。今後、他の鉄鋼材料に ASEM 法を適用する場合は同様の手順で校正曲線と変換係数を取得・蓄積すればよい。企業としては、その蓄積されたデータ自体がノーハウとなり、より安全で快適な独自の製品の提供が可能となる。

第 6 章 今後の課題と展望

6.1 導入

第 2 章から第 4 章までで実施してきた内容としては、ターゲットとする鋼種の選定、局所的な磁気ヒステリシスパラメータから引張応力への変換、その変換係数を使用して、残留応力分布を計測し、既存の残留応力測定法との比較による妥当性検証である。さらには、超音波トランスデューサーを走査し、残留応力イメージングまでたどり着いた。この時点では、一般的な炭素鋼材の単純な形状のものなら、残留応力イメージングを通して、損傷リスクの評価が可能であると考えられる。しかしながら、実際の業務での利用や適用拡大のためには、いくつかの課題が残っている。以下に、これらの必要性と実施に向けた提案を行う。

- (1) 圧縮残留応力の評価(6.2 節)
- (2) ピーニング処理の有効性検査(6.3 節)
- (3) 他磁性材料への適用拡大(6.4 節)
- (4) イメージングの高速化と自動化(6.5 節)
- (5) 実製品・実橋梁への適用(6.6 節)
- (6) 金属材料以外への拡大(6.7 節)

(1), (2)については、圧縮応力の導入確認のために必要な技術であるが、それぞれ圧縮の入り方が異なる。(1)については、周囲から作用する応力の合計が圧縮側にある場合であり、圧縮の降伏応力を超えた評価を行っているのではない。本研究では、引張応力側の評価のみであったが、この圧縮応力側の評価は技術的には本研究の延長線上に位置するものである。(2)は大きな引張残留応力が存在する溶接部を塑性変形させることによって、圧縮応力を導入する方法である。これは、塑性領域の詳しい研究を必要とする。

(3)については、引張と圧縮応力両方の校正曲線について、本研究と同様な手順でデータを蓄積する作業になる。

(4)については、第 4 章で述べたイメージング技術を大面積へ適用する際に必要となる技術である。基本的には、機械による全自動を目指すことになる。

(5)については、様々な寸法や複雑形状の物体に対する必要技術であり、磁気シミュレーションや測定治具のオプションを用意する必要がある。

(6)では、金属以外への ASEM 法のさらなる適用拡大への可能性を示す。

6.2 圧縮残留応力の評価

引張残留応力は、亀裂の拡大につながるため、避けなければならない要素である。一方、圧縮残留応力は、亀裂の進展を抑え込むため有用な要素であると考えられるが、インフラ構造物において、過度な圧縮応力は座屈を引き起こす原因となる。インフラ構造物では、部材の組立てや、経年による全体的な荷重バランスにより、部分的に強い圧縮が発生する場合がある。この圧縮応力が弾性域内でも、部材が面外にはらみ出して、座屈と呼ばれる不安定現象が生じる(図 6-1)。

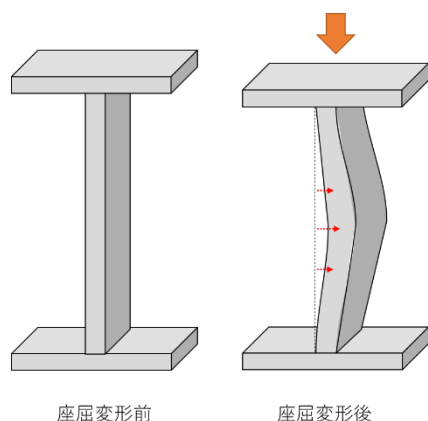


図 6-1 座屈現象

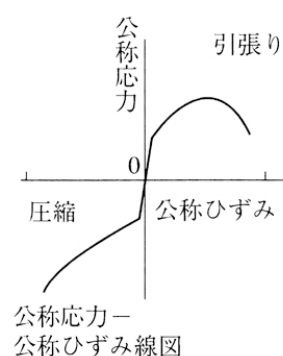


図 6-2 引張と圧縮の応力ひずみ線図 [1]

図 6-2 は、引張応力と圧縮応力両方の応力ひずみ線図を組み合わせたものである。弾性領域では、引張側と圧縮側で大きな違いはなく、応力とひずみは線形の関係である。一般的には、圧縮側の許容応力は、座屈を考慮し引張側より小さくなる。例えば、両縁支持板の局部座屈に対する許容応力度は、長さ b 、厚さ t の寸法を有する SS400 材の柱では、式(6.1)、(6.2)で表される[2]。

$$1,400 \text{ kgf/cm}^2 : \frac{b}{t} \leq 39.6f \quad (6.1)$$

$$2,200,000 \left(\frac{ft}{b}\right)^2 \text{ kgf/cm}^2 : 39.6f < \frac{b}{t} \leq 80f \quad (6.2)$$

今、長さが厚さの 50 倍 ($b/t = 50$) である柱に純圧縮 ($f = 1$) が働いている場合、圧縮応力度は式(6.2)から、 880 kgf/cm^2 (約 88 MPa) となり、引張許容応力度 ($1,400 \text{ kgf/cm}^2$, 140 MPa) [3] より小さい値となる。このように、板の長さが厚さより大きければ大きいほど、小さい圧縮応力で座屈が生じる恐れがある。

実際に圧縮応力の定量的評価が必要とされる場面としては、部材減肉(板厚減少)部の調査がある。鋼部材の減肉は、腐食や流体の浸食によって発生し、板厚 t を減少させる向きに

働く。式(6.2)によると、 t が減少すると、部材の長さ b が変わらない場合は、圧縮許容応力度が小さくなる。現状では、減肉量が大きい部分を座屈リスクが高い場所として判断するしかなく、実際にその場所に働いている圧縮応力が不明なため、リスクの高低が十分には把握できていない。減肉部が数多くある場合、限られたメンテナンス費用のため、補修の優先順位と安全性の確保は必ずしも一致しないことも考えられる。減肉している部分や、補修により新たに部材が取り付けられた箇所の作用圧縮応力分布がイメージングにより測定できれば、効率的な補修作業が行える。

表 6-1 は現在の代表的な減肉調査方法である。大きく分類すると、超音波または渦電流を利用する方法に分類できる。参考として、比較的新しい手法である電磁超音波法を記載した。それぞれの方法は、現在でも研究開発が盛んに行われているが、これら全ての方法は、結局のところ厚さを測定していることは昔も今も変わらない。

表 6-1 減肉調査方法

測定の種類	超音波厚さ計	渦流探傷計	(電磁超音波法)[4]
測定項目	エコー時間	渦電流	エコー時間
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易で一般的 ・接触媒質が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触可 ・塗膜上から可 	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触可 ・接触媒質が不要

板厚測定による座屈リスク評価は、間接的な評価であり、正確な評価には、その部位が圧縮許容応力度を超えているかどうかを調べなければならない。圧縮応力と局所的な磁気パラメータの相関は、本研究では明らかにすることができなかったが、引張応力による効果とは逆の磁気特性を示すことが予測される。座屈リスク評価では、第 3 章で示したような圧縮側の校正曲線と変換係数が必要になるが、例えば ASEM 法によって得られる保磁力値、残留磁化信号値は引張応力の増加と共に減少することが分かっている。したがって、残留応力ゼロの時の保磁力値、残留磁化信号値より大きい値を示す測定位置は、圧縮側に入っているという判断が可能かもしれない。

圧縮試験は引張試験とはセッティングが異なるため注意が必要である。引張試験体と同じものを圧縮する場合は、試験体中央部が湾曲し、正確に圧縮されない可能性がある。そのため、角柱の鋼材を利用する必要がある。また、鋼材の厚みが増加するため、表面に十分な磁場が印加されているかを磁気シミュレーション等で確認する必要がある。

6.3 ピーニング処理の有効性検査

前節では鋼構造物の圧縮応力評価の必要性を述べたが、鋼構造物と比べると小型の鉄鋼製品では、座屈を考慮する必要性は小さい。それは、周囲の部材の自重が寄与する分が小さいためである。むしろ、鉄鋼製品では引張残留応力が強く影響する疲労破壊に注意する必要がある。疲労破壊は、表面の微小な割れや内部欠陥を起点として亀裂が徐々に進行し、破壊に至る現象であり、亀裂部分に引張応力場が存在している必要がある。このように、一般的には引張応力は製品表面の亀裂を誘発するので、過大な引張応力集中を避けなければならない。その対処として、圧縮応力を意図的に導入することによって、表面の残留応力を圧縮側へ変化させようとする考えが生じる。この圧縮応力の働きは、図 6-3 を利用すると理解しやすい。例えば、対象物に微小な亀裂が生じている場合に、外部からの引張応力が継続的に加わり、疲労限度を超えた場合、亀裂は引き続き進展していくと予想される。しかしながら、応力場を圧縮状態にすれば亀裂が発生した後でも、その進展を抑え込むことができる。

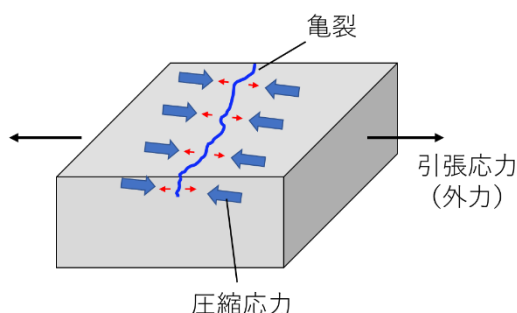


図 6-3 圧縮応力による亀裂進展の防止

代表的な圧縮応力の導入法としては、粒子やレーザーを衝突させる方法[5], [6]があり、ピーニングと呼ばれている。種類としてはショットピーニングやレーザーピーニングがある。他には、鋼材表面からの炭素の拡散浸透により硬化させる浸炭焼入れが挙げられる[6], [7]。これらの方法は、鋼材表面を材料改質することにより達成されるため、前節のような純粋な圧縮作用とは異なる現象である。

ピーニングは、図 6-4(a)に示すように、塑性変形を利用した方法である。鋼材表面に鉄球を衝突させることにより、表面部分が広がろうと体積膨張する。しかし、内部の体積は変化しないため、この表面膨張を押し返す働きにより、表面に大きな圧縮が発生する。ピーニング効果を調査するためには、弾性領域だけではなく、塑性領域の材料力学的現象も理解しておく必要がある。本研究では、引張応力側において塑性変形が生じると、残留磁化信号が急激に変化することが判明した。もし、圧縮応力側でも同様な現象が生じれば、ASEM 法による圧

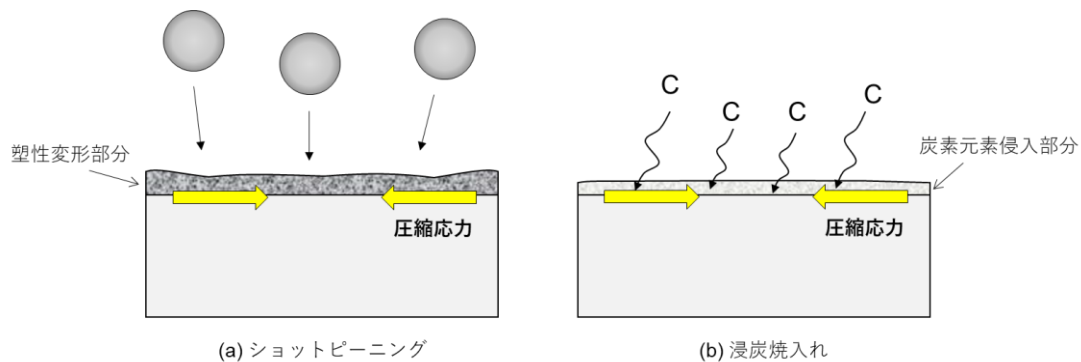


図 6-4 (a)ピーニング および (b)浸炭焼入れ処理

縮塑性変形領域のイメージングによって、効果的に圧縮応力が導入されているかを確認できると考えられる。

浸炭焼入れについては、図 6-4(b)に示すように、鉄鋼を高温にすることで、フェライト(体心立方構造)からオーステナイト(面心立方構造)に変化させ、余裕のできた空間に炭素が入る。その後、急冷することによってマルテンサイト化し、体積膨張を引き起こす[8], [9]。この膨張を押し返そうとする力が圧縮応力を発生させる。浸炭焼入れは、先に述べたピーニングによる塑性変形とは異なり、化学的現象を利用しているが、押し戻す作用を圧縮力に利用する点は同じである。浸炭処理効果を調査するためには、結晶構造の異なる材料同士の磁気特性を比較・評価する必要がある。磁気特性は結晶構造や化学的成分量に影響を受けると考えられるため、浸炭処理が均一であれば、残留応力分布の取得が比較的容易である。しかし、浸炭処理が不均一である場合は、磁気特性の変化が、残留応力によるものか、結晶構造および化学的成分量の違いによるものか判断が難しくなる。その場合は、磁気特性のイメージングにより、画像にムラがあれば均一に浸炭処理ができていないことが分かる、つまり、圧縮残留応力が均一に導入されていないことを、間接的に評価できる可能性がある。

6.4 他磁性材料への適用拡大

本研究で選定した鋼種 S25C 以外にも、残留応力評価が可能な磁性体材料は数多く存在する。表 6-2 に残留応力管理を必要とする磁性材料を示す。橋梁など大量の鋼材を使用する場合は SS 材、機械製品・部品など精密性が求められる場合は高級鋼材である SC 材が使用される。SC 材は炭素量を増加させることによって硬化し、切削性向上のメリットが生じる。その他にも、ボイラ鋼管などではクロムモリブデン鋼 SCM 材が使用される。この鋼材は一般的な機械構造炭素鋼よりも優れた強度重量比を有しており、焼き入れや溶接などの施工性にも優れている[10]。本研究では、精度の高い残留応力評価に向けて、保磁力の利用が有望であることを示した。鉄鋼材料中に炭素(C)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)などの元素が入ることによって、鉄鋼単体では実現できない性能を引き出すことが可能となる。C, Cr, Mo を添加すると磁壁移動のピン止め効果が大きくなり、保磁力が大きくなると考えられる。保磁力が大きい場合は、微小な応力変化を測定しやすくなり、S25C に比べて残留応力評価のさらなる精度向上が期待できる。

また近年、電気自動車(Electric Vehicle)が注目を浴び始めており、モーターやコア材料には、板厚面内の磁気特性が優れている無方向性電磁鋼板[11]や低い鉄損の高効率軟磁性材料[12]が用いられている。これらは自動車の動力部分に利用されるメイン材料であり、材料に加わる応力によって性能が変化するため、残留応力管理が非常に大切である。

さらには、鉄元素のような正の磁歪係数を有する材料では、本研究のように引張応力増加に伴い、局所的な保磁力と残留磁化信号は減少すると予想される。しかしながら、ニッケル(Ni)、コバルト(Co)のような負の磁歪係数[13]を有する材料では、真逆の磁気応答を示す可能性があり、これら元素を含む材料に対しての残留応力評価は注意する必要がある。

表 6-2 残留応力管理が必要な様々な磁性体

磁性体の種類	SS 材	SC 材	SCM 材	電磁鋼板	軟磁性材
用途例	インフラ構造物	機械製品	ボイラ鋼管	モーター	鉄心(コア)

6.5 イメージングの高速化と自動化

1ヶ所の残留応力(磁気特性)を測定する場合は、本研究で使用した超音波探触子と共振アンテナを使用すれば問題ない。しかしながら、イメージングを実施する場合は超音波励起と電磁波検出が一式では非常に時間がかかる。そこで、複数の超音波探触子と共振アンテナを利用すれば、ある程度の面積を一度に測定することが可能である。このような複数の超音波探触子を利用する技術は、すでに超音波検査の分野では実用化されており、フェーズドアレイ探触子と呼ばれている。図 6-5(a)にフェーズドアレイ探触子の超音波照射イメージ図を示す。フェーズドアレイ探触子は、一筐体の中に超音波振動子が連続的に配置された構造をしている。最近のフェーズドアレイ探触子は数十個の振動子を有するものまで販売されている。また、図 6-5(b)に示すように、個々の振動子に加える電圧パルスのタイミングを制御することにより、超音波ビームを任意の位置に収束させることが可能である。これによって、強力な音圧を測定位置に加えることが可能になり、ASEM 信号強度の増加による S/N (Signal-to-Noise ratio) の改善効果が期待できる。さらに、超音波ビーム自体を連続的に移動させることも可能であり、時間のかかる超音波探触子の機械的制御・移動が必要なくなる。

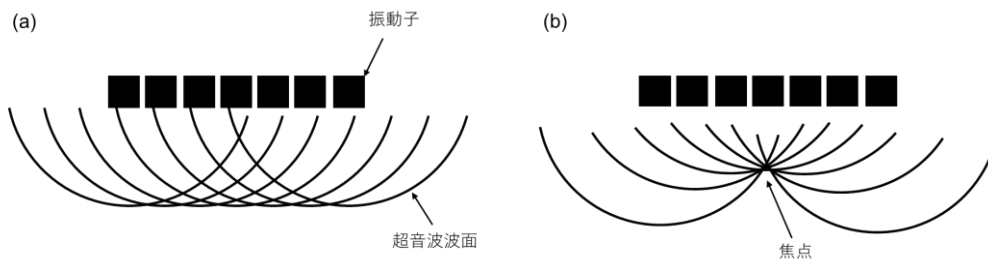


図 6-5 フェーズドアレイ探触子

アレイ化技術を ASEM 測定へ適用する場合は、受信のための共振アンテナもアレイ化することにより、アンテナの位置制御を最小限にすることが可能である。具体的には、図 6-6 のようにフェーズドアレイ探触子(アレイ型超音波トランスデューサー)とアレイ化共振アンテナを一体化させて、一度にスキャンすることが、残留応力イメージ

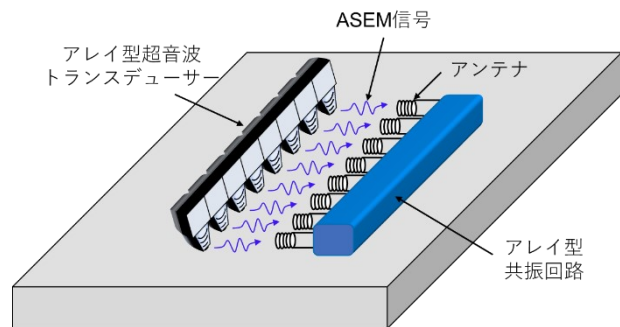


図 6-6 ASEM 測定のアレイ化

グ高速化に有効であると考えられる。このようなフェーズドアレイ探触子は既に高い完成度の製品が販売されており、ASEM 法に利用することに対して、大きな障壁は無いと考えられる。

自動化技術については現在では、図 6-7 に示すような比較的高性能な多軸ロボットが安価で導入できる。穿孔法はドリルを押し付けることによる反力に対抗しつつ、正確に掘り進める必要があるため、ロボットによる多数点の自動測定は専用ロボットの開発が必要になるため簡単ではない。一方、

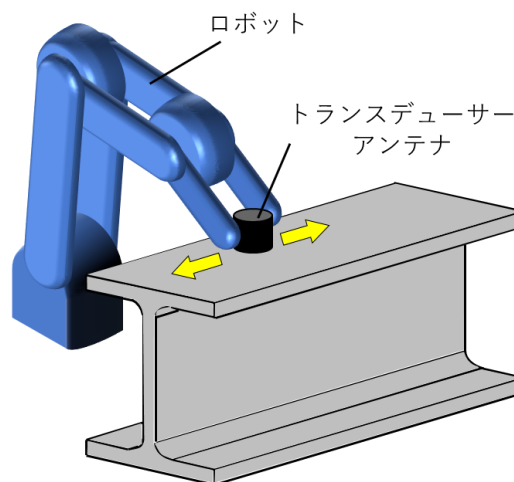


図 6-7 ASEM 測定の自動化

ASEM 法は超音波照射と電磁波の検出を行うが、どちらも反力は生じないため、軽量で簡易なロボットを利用できる。したがって、第 4 章で述べたイメージングのように、超音波トランスデューサーと試験体との距離や角度を一定に保つためのフィードバックシステムを備えることにより、全ての測定位置をロボットへ入力さえすれば、自動的に測定が実施・完了する。

その他の測定高速化に向けた提案を以下に示す。

- (1) 超音波トランスデューサーの周波数を下げることによって、超音波の音圧の減衰を抑えることが可能である。第 2 章では 10 MHz のトランスデューサーを使用しているが、第 3 章以降では 4 MHz へ周波数を下げた。これにより、音圧の低下が小さくなり、ASEM 信号強度が増大したため、1 回の ASEM ヒステリシス測定時間が 80 分から 5 分へ大幅に短くなっている。周波数の低下は空間分解能の低下につながるが、測定結果に影響を及ぼさない程度に周波数を下げれば問題ないと考えられる。
- (2) 現状の超音波照射面積は $\phi 1.7$ mm 程度である。したがって、照射面積が重ならないようにスキャンすれば、2 mm 間隔で残留応力イメージングが可能である。小型の鉄鋼製品においては、面内では高い分解能でなければ応力集中部を見逃す可能性があるが、大型の鋼構造物では、それほど高い分解能を常に求められるわけではない。溶接近傍や隅角部以外の一般部であれば、数ヶ所の測定でも十分である。残留応力信号を利用する場合は、ASEM ヒステリシス曲線全体を取得する必要がない。したがって、1ヶ所当たりの残留応力評価は、装置の改良によって数秒～数十秒を目指すことが可能であると考えられる。

6.6 実製品・実橋梁への適用

6.6.1 表面処理

ASEM 法は測定対象物の表面に磁性体が付着していなければ、特に表面処理を行うことなく残留応力評価が可能である。しかし、錆などの強磁性体が付着している場合や、表面の加工応力を除去したい場合は、表面処理が必要である。以下に、表面処理方法や表面状態に影響を受けにくくするための提案を行う。

- (1) 非破壊残留応力測定として代表的な X 線法では、対象の表面処理を電解研磨で行なう。これは、電気化学的に金属を溶かして除去する方法である。この方法によって、測定面に応力を加えずに綺麗にすることができる。また、対象表面が除去されるので、加工応力や微細な凹凸も取り除くことが可能である。イメージングのためには大面積の電解研磨方法を開発する必要があるが、電解研磨により磁気特性が変化する場合は、実施の検討が必要となる。
- (2) 穿孔法による残留応力測定では、対象表面にひずみゲージを貼り付けるが、表面に凹凸がある場合は、紙やすりやリューターを使用して平らにする。これらの使用は、対象表面に加工応力が入ること、研磨した部分が塑性化する可能性があることから、極表層部のみを測定する ASEM 法には採用できないと考えられる。対策としては、ひずみゲージ貼り付け時に使用する粒度番号#80～#320 の紙やすりでは、応力が入る可能性があるため、#5000 などの粒子の細かい液状研磨剤の使用が考えられる。また、表面凹凸が大きい場合は、電解研磨などを組み合わせる必要が生じるとされる。
- (3) 表面状態に影響を受けにくくする対策としては、超音波周波数を下げることが有効である。超音波周波数の低下は、超音波の減衰を防ぐこと以外にも、深い部分からの電磁放射にもつながる。超音波は物質中の弾性波の伝搬なので、金属中の深い位置まで到達する。しかしながら、圧磁効果による電磁放射は、表皮深さ(スキンデプス) d より深い位置からは出てこない。 d は以下の式から求められる[14]。

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (6.3)$$

ここで、 ρ は電気抵抗率、 μ は透磁率、 ω は角周波数($= 2\pi f$)、 f は電磁波の周波数であるが、ASEM 法では超音波の周波数と同じである。第 3,4 章では超音波周波数は 4 MHz であるが、100 kHz や 100 Hz まで下げれば、さらに深さ方向の平均的な情報が得られるようになり、屋外の過酷な状況で使用されている表面が粗い部材の測定に対しては、表面状態の影響を小さくできると考えられる。

- (4) 残留応力値が表面によってばらつくことを防ぐためには、超音波スポットサイズを大きくすることが有効である。本研究において、超音波トランスデューサーに取り付けた遅延材先端でのスポットサイズは、 $\phi 1.7 \text{ mm}$ 程度である。 $\phi 5 \text{ mm}$ 程度まで大きくすることによって、超音波照射面積の平均的な残留応力値を取得することができ、部分的な材料変質などによる測定値のばらつきを抑えることが可能になると考えられる。

6.6.2 実用的な死荷重応力測定に向けて

実際の橋梁の死荷重応力を測定するためには様々な制約が生じる。1つ目は、腐食防止、景観保護のために施された塗装は、供用中の橋梁では除去が難しいことである。しかしながら、ASEM 法においては、超音波と電磁波を利用するため非磁性の塗装下の母材金属の残留応力測定が可能である。

2つ目は、部材表面の局所的な加工応力や材料変質が生じている位置を偶然に測定してしまう可能性があることである。図 6-8 にトラス橋の概略図を示す。最も死荷重応力測定が必要な位置は、自重による曲げモーメントが最大になる桁の中央部である。この位置で磁気特性に影響を与える要素は、「死荷重応力、加工応力、材料変質」の3種類がメインであると考えられる。一方、桁端部では死荷重応力がほぼゼロと考えると、磁気特性に影響を与える要素は、「加工応力、材料変質」の2種類になる。したがって、中央部から端部の磁気情報を引き算すれば、死荷重応力の磁気情報のみが残ることになる。しかし、加工応力や材料変質は不均一に発生していると考えるのが自然である。したがって、桁中央部から端部の磁気情報を単に引いただけでは正確な死荷重応力を求めることはできない。この対策としては、ある程度の面積の磁気イメージングを取得し、平均的な値をその位置の磁気情報として扱うこと、また、イメージングから特異なデータを取り除いた上で評価を行うことで、実用的な死荷重応力測定が可能になると考えられる。

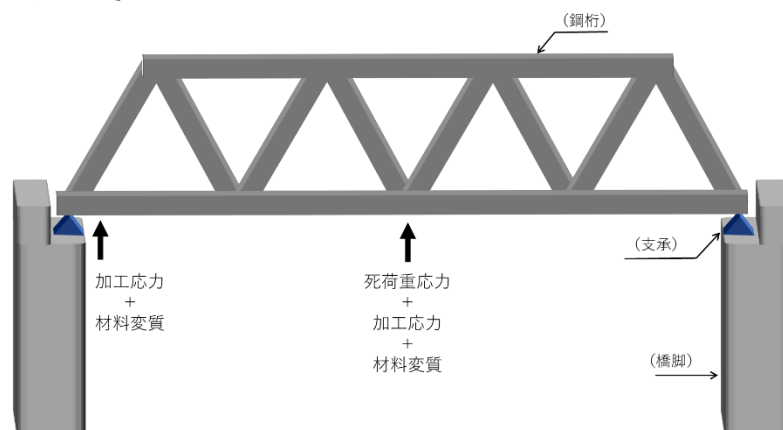


図 6-8 実用的な死荷重測定

6.6.3 溶接止端部の亀裂調査

溶接止端部の亀裂の調査において、一般的に用いられている MT(磁粉探傷試験)では、塗装を剥がす必要があり、時間や手間がかかることが問題となっている。しかし、現在では塗装上から調査可能な ET(渦流探傷)装置も開発されているが、イメージングには対応していない。図 6-9 は鋼板の溶接止端部に亀裂が生じている状況を表している。亀裂部に外部から磁場を印加すると、亀裂を避けるように磁束が流れていく。したがって、亀裂が有る部分と無い部分で磁束密度が異なり、この磁気特性の違いを検出することによって、亀裂探査を行っている。磁気特性の違いを検出する点では、MT, ET どちらでも同じであるが、ASEM 法では、さらに、磁気分布の画像化まで可能である。分布画像によって視覚的に確認できれば、手間をかけずに精度の高い調査が可能になると考えられる。このような、亀裂部では応力が開放されるため低残留応力になり、明瞭な残留応力イメージが得られない可能性がある。したがって、磁気イメージングを通して評価を実施する必要があるかもしれない。また、切り欠き部や部材端部など形状が大きく変化する部分では、残留応力の有り無しに関わらず、磁束線が急激に変化するため残留応力評価が難しくなる。穿孔法においても測定位置は端部からある程度離すことが推奨されるように、ASEM 法においても磁気シミュレーションを利用して、端部への適用の可否を決めるべきである。

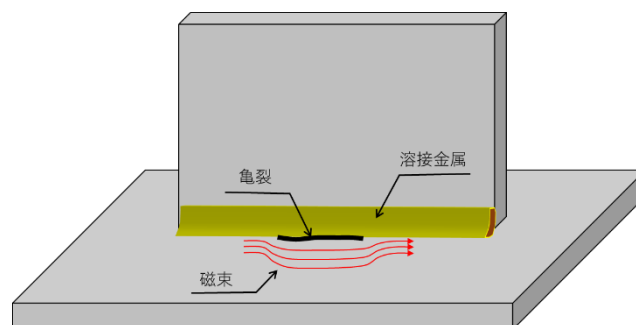


図 6-9 溶接止端部の亀裂調査

6.7 金属材料以外への拡大

本研究では、磁気分極を超音波で変調することによって発生する電磁波(交流磁場)を検出し、対象の磁気情報を取得・イメージングしている。このような磁気分極を起こす材料は、鉄鋼材料や磁石が挙げられる。他にも、生嶋らは超音波照射により、生体材料の電気分極をイメージングすることに成功している[15]。これは、超音波照射によって材料へ歪みを与えることで、プラス電荷とマイナス電荷のバランスが崩れ、電気分極が生じることを利用している。その電気分極により、近傍に設置した金属板には電荷が誘起され、対象の電気的情報の取得を可能にしている。このような圧力によって電気分極が生じる材料は圧電材料[16]と呼ばれ、この電気的特性は、動脈硬化や老化などに関係するため[17]、生理学的現象の解明に対して ASEM 法の利用が期待されている。

本研究において磁気情報と力学的現象を関連付けたように、電気情報と力学的現象を関係づけることで、ASEM 法は、さらに多くの材料まで適用拡大できるようになると考えられる。表 6-3 に示すように、ASEM 法の適用が期待できる材料としては、磁気分極を利用する強磁性材料、電気分極を利用する圧電材料などが挙げられる。強磁性材料(鉄鋼材料)は、機械・重工メーカーが適用先となる。一方、圧電性を示す高分子材料やセラミックス材料は、電子機器や超音波センサ・圧力センサなどに含まれている圧電素子という形で利用されており、鉄鋼業界以外への ASEM 法の適用が期待できる。

高分子材料(プラスチック)やセラミックスに対して、X 線を利用した非破壊残留応力測定の適用例は少ない。一般的に普及しない理由は、これらの材料が非晶質であり、鉄鋼材料のような高回折角かつ高回折強度を有していないからである[18]。これは、第 1 章の X 線回折法(1.3.4 節)で述べたように、高回折角は精度の高い残留応力測定に必要な要件である。

以上より、ASEM 法は現状では発展途上であるが、電気・磁気分極を有する非常に多くの材料に対して適用できるため、今後、超音波を利用した電気・磁気特性の計測技術の発展が期待される。

表 6-3 ASEM 法の適用が期待できる材料

物理的現象	材料	用途
磁気分極	鉄鋼材料・磁石	インフラ構造物, 機械部品
電気分極	圧電性高分子・圧電性セラミックス	圧電センサ・アクチュエーター

6.8 参考文献

- [1] 日本機械学会, 機械工学辞典, 日本機械学会, p. 153, 1997.
- [2] 中井 博, 北田 俊行, 例題で学ぶ橋梁工学, 共立出版, p. 86, 1997.
- [3] 山寺 徳明, 大貫 一生, 高野 晴夫, 池内 武文, 小田桐 直幸, 吉原 忠, 鋼桁橋の設計計算例, 山海堂, p. 31, 1995.
- [4] M. Gori, S. Giamboni, E. D'Alessio, S. Ghia, and F. Cernuschi, "EMAT transducers and thickness characterization on aged boiler tubes," *Ultrasonics*, vol. 34, Issues 2-5, pp. 339-342, June 1996.
- [5] 内藤 武志, 浸炭焼入れの実際, 日刊工業新聞社, pp. 268-286, 1999.
- [6] 西島 敏, 金属疲労のおはなし, 日本規格協会, pp. 111-123, 2007.
- [7] 西川 精一, 金属工学入門, アグネ技術センター, pp. 317-325, 2001.
- [8] 米谷 茂, 篠原 俊英, 高橋 克明, 浸炭焼入鋼の残留応力について, 日本金属学会誌, 44 巻, 5 号, pp. 467-473, 1980.
- [9] 田中 実, 鋼の熱処理変形, 電気製鋼, 40 巻, 4 号, pp. 328-333, 1969.
- [10] 日原 政彦, 鈴木 裕, 技術大全シリーズ 機械構造用鋼・工具鋼大全, 日刊工業新聞社, p. 72, 2017.
- [11] 早川 康之, 無方向性電磁鋼板の最近の開発動向, 鉄と鋼, vol. 106, no. 10, pp. 683-696, 2020.
- [12] 吉沢 克仁, 軟磁性材料の開発動向と展望, まてりあ, 56 巻, 3 号, pp. 186-189, 2017.
- [13] 近角 聰信, 強磁性体の物理 (下) -磁気特性と応用-, 裳華房, pp. 124-125, 1984.
- [14] 近角 聰信, 強磁性体の物理 (下) -磁気特性と応用-, 裳華房, pp. 315, 1984.
- [15] K. Ikushima, T. Kumamoto, K. Ito, and Y. Anzai, "Electric Polarization of Soft Biological Tissues Induced by Ultrasound Waves," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, 238101, 2019.
- [16] 日本 AEM 学会, 無鉛圧電セラミックス・デバイス, 養賢堂, p. 154, 2008.
- [17] 田實 佳郎, 高分子圧電材料と無機圧電セラミックスの基礎から応用, シーエムシー出版, p. 100, 2021.
- [18] 鈴木 賢治, 田中 啓介, セラミックスの残留応力の X 線的解析, 材料, 48 巻, 10 号, pp. 1147-1154, 1999.

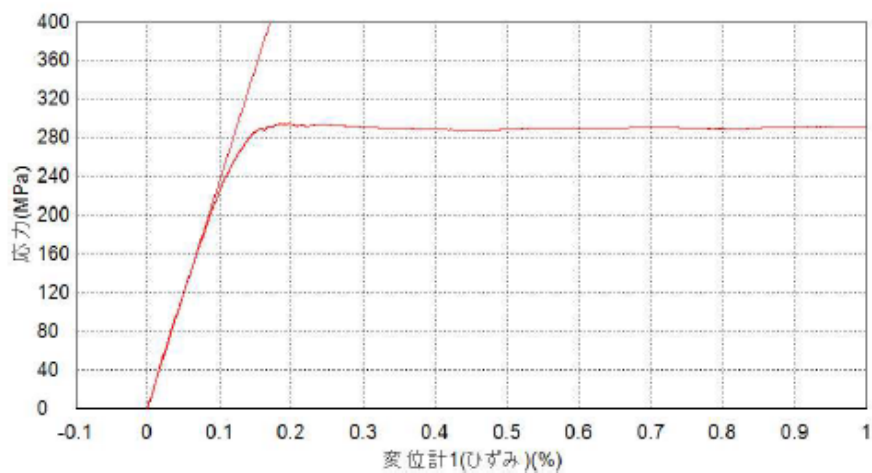
付録1 応力ひずみ線図(サンプルI_{//}とII_⊥)

付図 1-1, 1-2 に, サンプルI_{//}とII_⊥が破断に至るまでの応力ひずみ線図を示す.

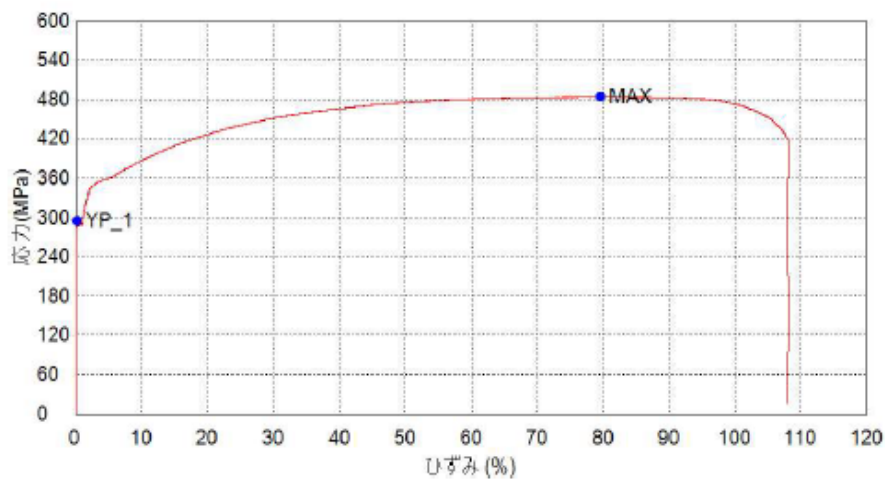
試験結果

名前 パラメータ 単位	厚さ mm	幅 mm	弾性率_Standard 応力 50 - 90 MPa GPa	上降伏点(NFS)応力 0.1 % MPa	最大点応力 全エリアで計算 MPa
2	5.89	40.62	234	294	484

応力-ひずみ線図(伸び計)



応力-ひずみ線図(全体)



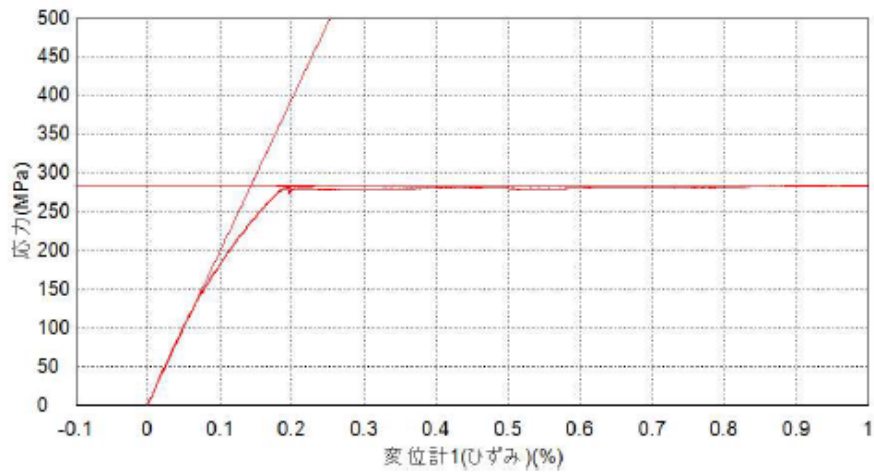
試験速度: 0.5mm/min

付図 1-1 サンプルI_{//}の応力ひずみ線図

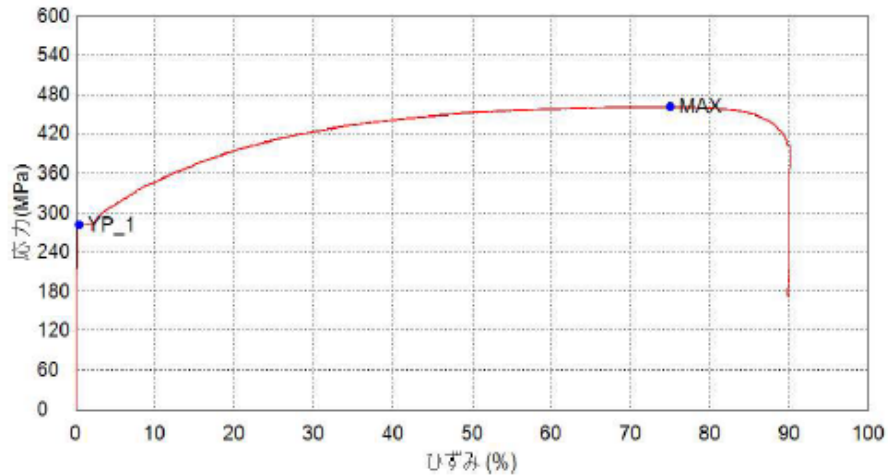
試験結果

名前 パラメータ 単位	厚さ mm	幅 mm	弾性率_Standard 応力 50 - 90 MPa GPa	上降伏点(NFS)_応力 0.1 % MPa	最大点_応力 全エリアで計算 MPa
1	5.99	40.58	197	282	462

応力-ひずみ線図(伸び計)



応力-ひずみ線図(全体)

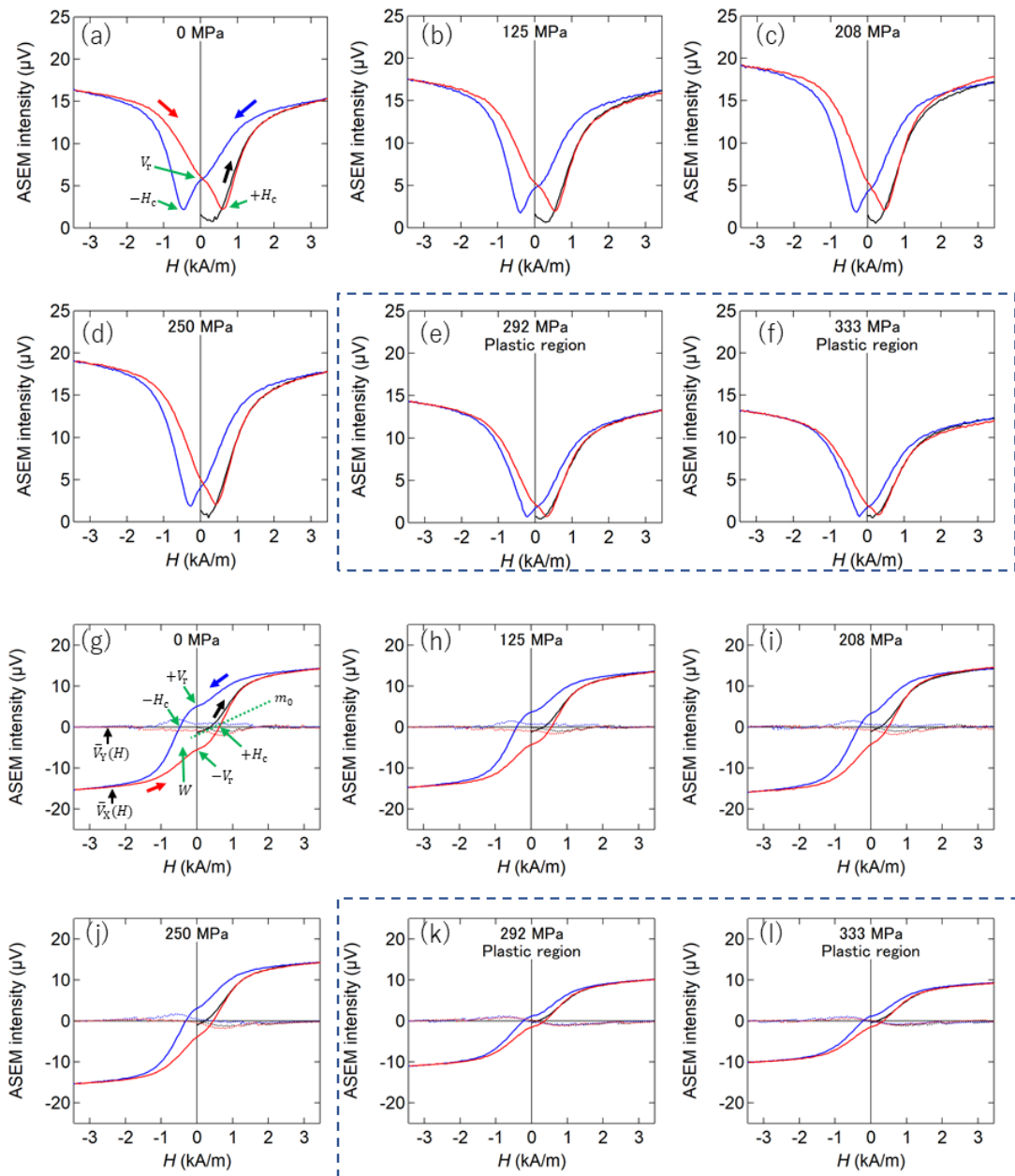


試験速度: 0.5mm/min

付図 1-2 サンプルII₁の応力ひずみ線図

付録 2 引張試験サンプルII_⊥の各引張荷重での ASEM ヒステリシス曲線 (PSD 前後)

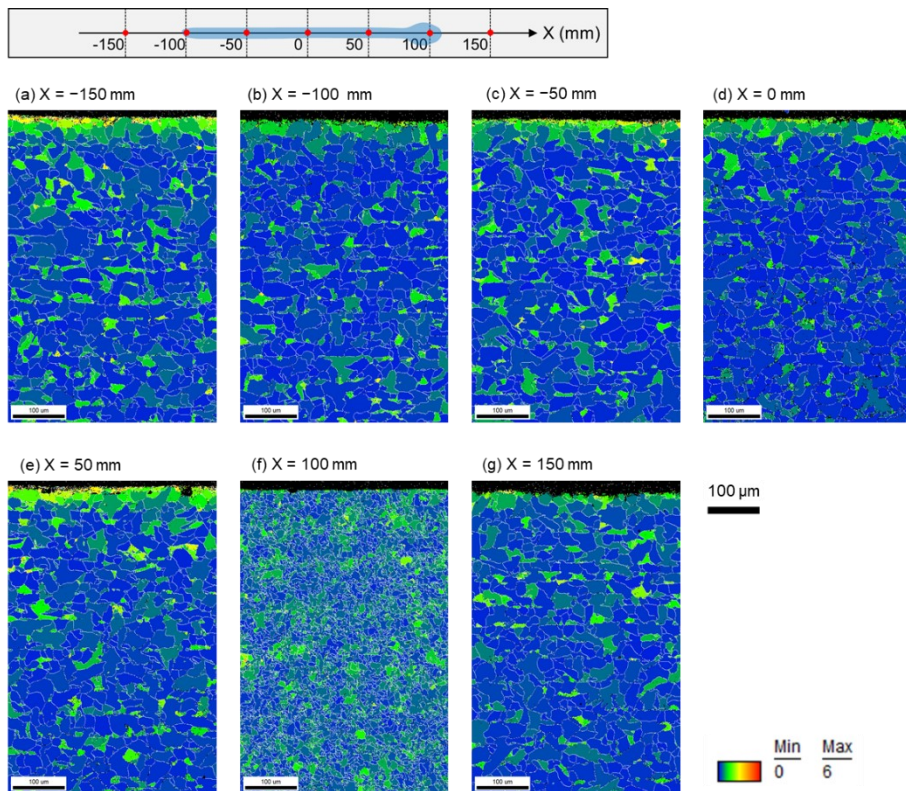
付図 2(a)-(f)には、サンプルII_⊥の引張試験における ASEM 測定で得られた振幅 $|\bar{V}_{\text{sig}}|$ のヒステリシス曲線を示す。また、PSD 処理を行った結果を付図 2(g)-(l)に示す。



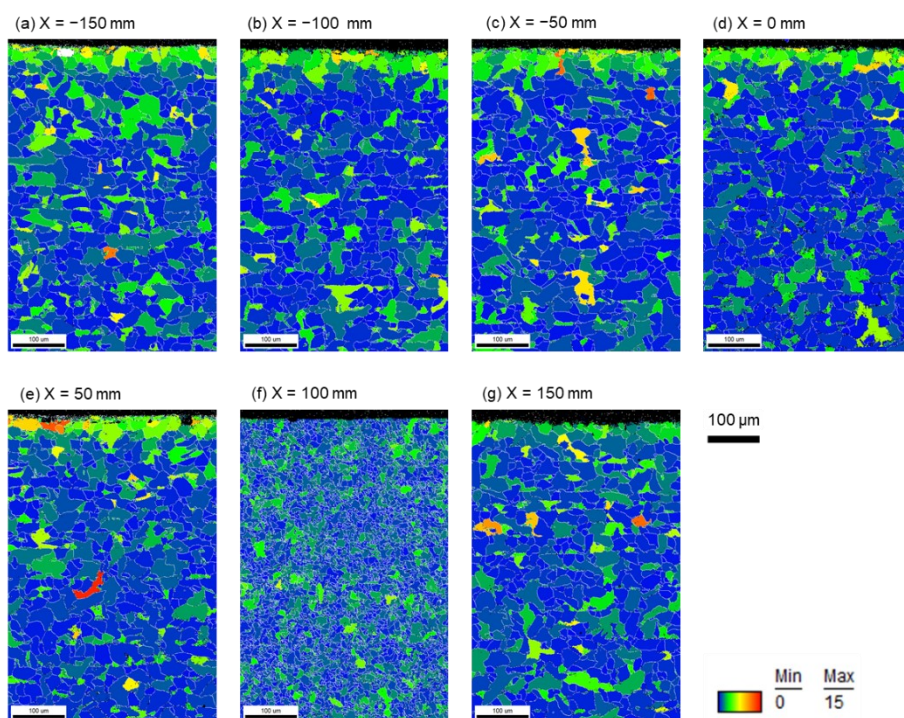
付図 2 サンプルII_⊥の ASEM ヒステリシス曲線 (a)-(f) $\bar{V}_{\text{sig}}(H)$ (g)-(l) 同相成分 $\bar{V}_x(H)$ (実線) および 直交成分 $\bar{V}_y(H)$ (点線).

付録3 EBSD の全データ

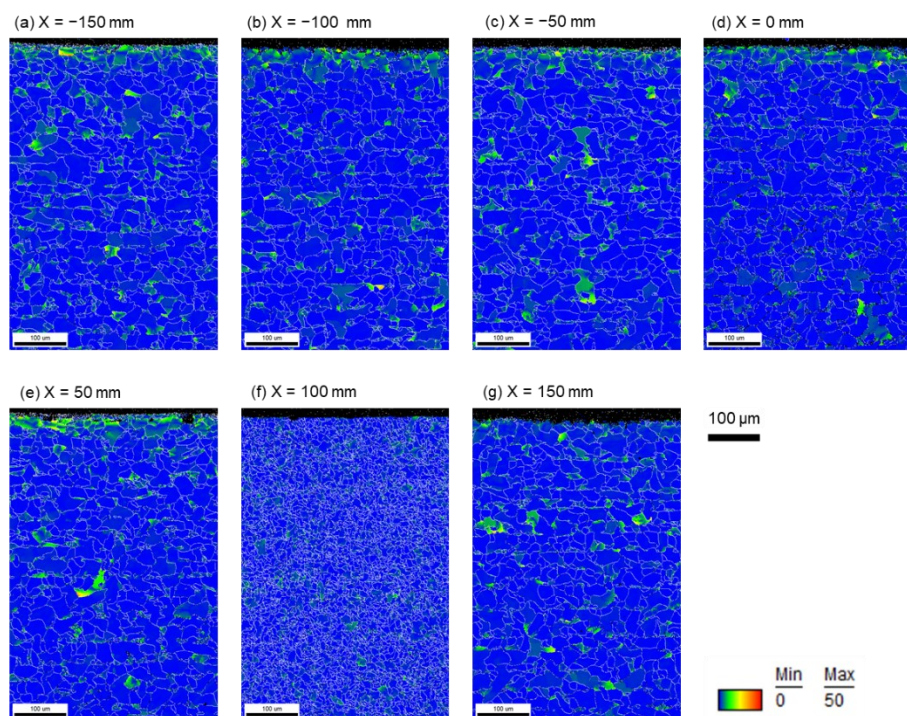
第4章では、結晶の再配列を検証するために、代表的に GAM (Grain Average Misorientation)を用いて説明を行った。付図 3-1 から 3-6 には、 $-150 \text{ mm} \leq X \leq 150 \text{ mm}$ の範囲における GAM マップ、GOS (Grain Orientation Spread) マップ、GROD (Grain Reference Orientation Deviation) マップ、KAM (Kernel Average Misorientation)の高ひずみマップ及び低ひずみマップ、IPF (Inverse Pole Figure) マップを示す。



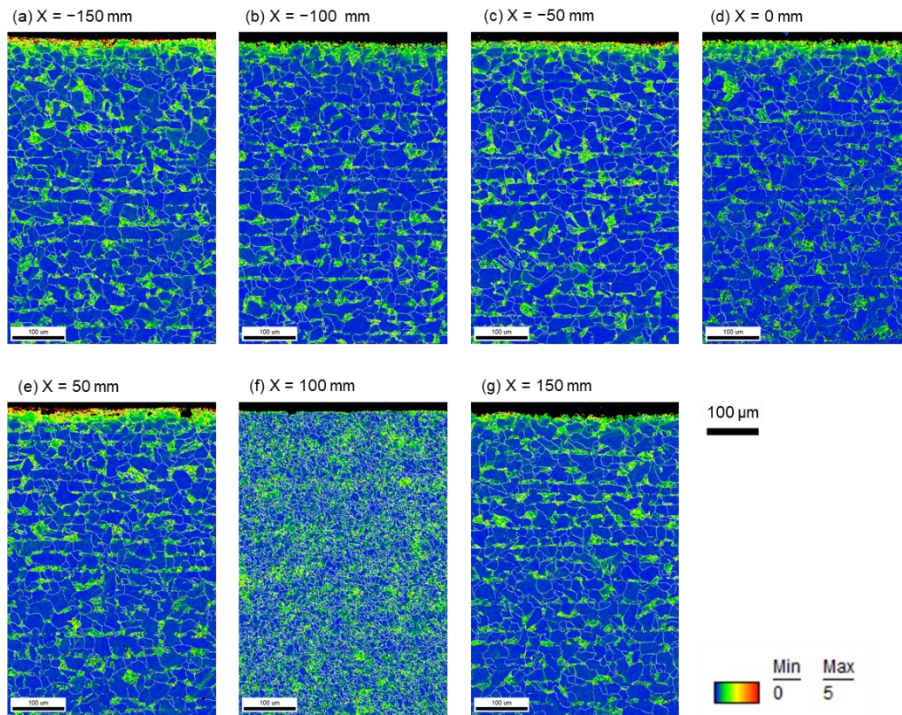
付図 3-1 試験体の表面から深さ 600 μm までの GAM マップ (a) $X = -150$ (b) -100 (c) -50 (d) 0 (e) 50 (f) 100 および (g) 150 .



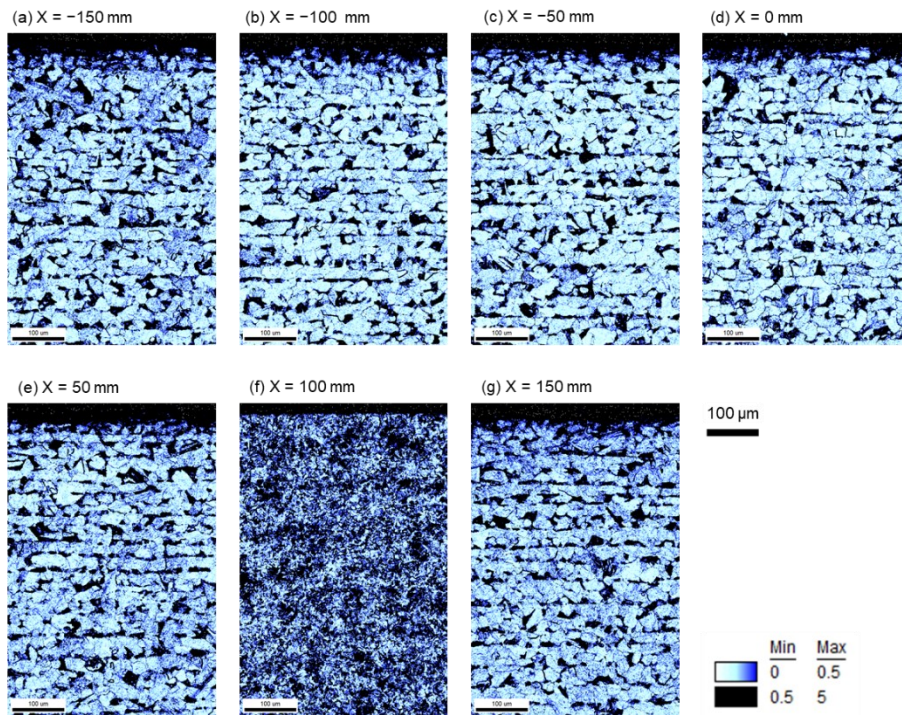
付図 3-2 試験体の表面から深さ 600 μm までの GOS マップ (a) $X = -150$ (b) -100 (c) -50 (d) 0 (e) 50 (f) 100 および (g) 150 .



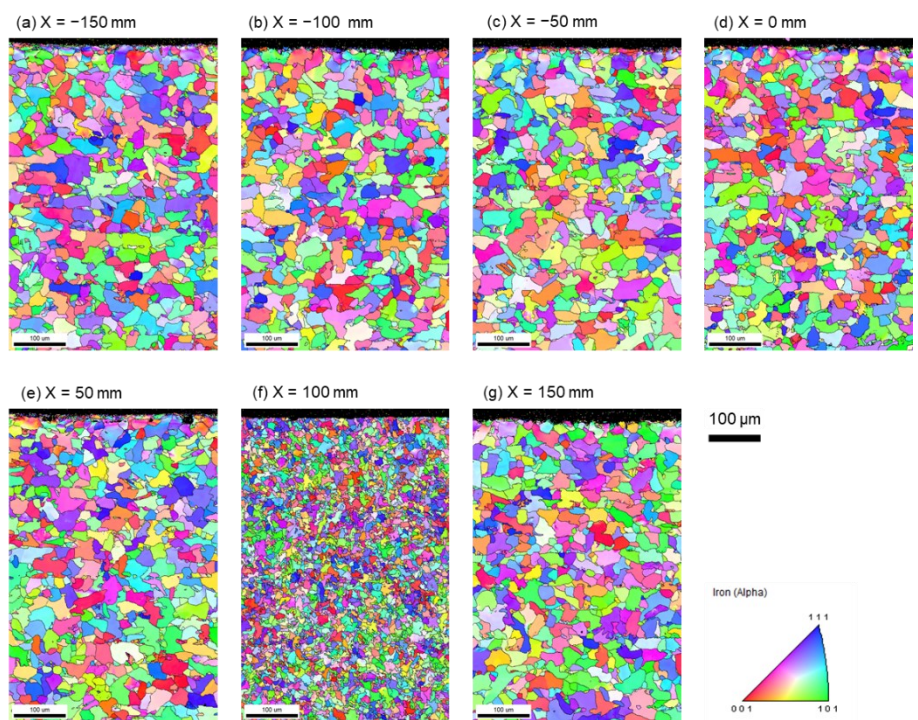
付図 3-3 試験体の表面から深さ 600 μm までの GROD マップ (a) $X = -150$ (b) -100 (c) -50 (d) 0 (e) 50 (f) 100 および (g) 150 .



付図 3-4 試験体の表面から深さ 600 μm までの KAM 高ひずみマップ (a)X = -150 (b)-100 (c)-50 (d)0 (e)50 (f)100 および (g)150.



付図 3-5 試験体の表面から深さ 600 μm までの KAM 低ひずみマップ (a)X = -150 (b)-100 (c)-50 (d)0 (e)50 (f)100 および (g)150.



付図 3-6 試験体の表面から深さ 600 μm までの IPF マップ (a)X = -150 (b)-100 (c)-50 (d)0 (e)50 (f)100 および (g)150.

研究業績

発表論文

- [1] Y. Suzuki, D. Hosokawa, and K. Ikushima, "Evaluation of Tensile Residual Stress in Welded Steel Plates Using Acoustically Stimulated Electromagnetic Response," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, DOI:10.1109/TUFFC.2022.3149386, (To be published).
- [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 Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 67, no. 4, pp. 825-831, Apr. 2020.
- [3] Y. Suzuki, Y. Ichikawa, H. Yamada, and K. Ikushima, "Nondestructive evaluation of residual stress through acoustically stimulated electromagnetic response in welded steel," in *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, Oct. 2019, pp. 1-3.
- [4] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, and K. Ikushima, "Stress dependence of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response in steel," in *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, Oct. 2018, pp. 1-4.
- [5] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, K. Noguchi, M. Iwata, and K. Ikushima, "Local probing of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response," in *Proc. Symposium on Ultrasonic Electronics (USE)*, Vol. 38, 2017, pp. 1-2.

国際学会

- [1] Y. Suzuki, Y. Ichikawa, H. Yamada, and K. Ikushima, “Nondestructive evaluation of residual stress through acoustically stimulated electromagnetic response in welded steel,” IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 8 Oct. 2019 (Poster).
- [2] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, and K. Ikushima, “Stress dependence of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response in steel,” IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, 23 Oct. 2018 (Poster).

国内学会

- [1] 鈴木 優平, 市川 裕一, 山田 尚人, 生嶋 健司, “音響誘起電磁法を用いた溶接鋼材における残留応力分布の評価,” 第 66 回 応用物理学会 春季学術講演会, 東京工業大学, 2019/ 03/09 (Oral).
- [2] 鈴木 優平, 山田 尚人, 尾崎 智裕, 生嶋 健司, “音響誘起電磁法による鋼材の残留応力検査技術の開発,” 第 79 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2018/ 09/18 (Oral).
- [3] 鈴木 優平, 山田 尚人, 尾崎 智裕, 野口 一彦, 岩田 成弘, 生嶋 健司, “鉄鋼における音響誘起電磁応答の応力依存性,” 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 早稲田大学, 2018/ 03/18 (Oral).
- [4] Y. Suzuki, H. Yamada, T. Ozaki, K. Noguchi, M. Iwata, and K. Ikushima, “Local probing of magnetic hysteresis properties through acoustically stimulated electromagnetic response,” The 38th Symposium on UltraSonic Electronics, Tagajo City Cultural Center, 25 Oct. 2017 (Oral).

招待講演

- [1] 鈴木 優平, 山田 尚人, 生嶋 健司, “Non-destructive inspection using acoustically stimulated electromagnetic method,” 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 京都大学, 2019/ 09/26 (Oral).

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をいただきました東京農工大学 電子情報工学・物理応用工学専修 生嶋健司教授に深く感謝致します。また、本研究の審査委員を務めていただいた電子情報工学・物理応用工学専修 前橋兼三教授、箕田弘喜教授、村山能宏准教授、共同サステナビリティ研究専攻 香取浩子教授に感謝致します。

共同研究者である日本ニューマチック工業株式会社 内田友樹氏には研究サンプルの作成にご尽力いただき感謝致します。電子磁気工業株式会社 尾崎智裕氏には電磁石製作や技術的、実験的サポートいただきお礼申し上げます。

東京農工大学 生嶋研究室 山田尚人博士、市川裕一氏、細川大介氏には研究全般にわたり、サポートしていただき感謝致します。また、大変有意義な時間を共に過ごした同研究室の諸氏にお礼申し上げます。

会社業務を進めつつ、社会人ドクターとして研究業務に携わることに理解を示していただいた株式会社 IHI 検査計測 柏崎昭宏前社長、田中康仁社長、中川博勝取締役および技術的なサポートをしていただいた 計測事業部 計測技術部 上島秀作博士、研究開発センター 西土隆幸博士、武正文夫氏に感謝致します。

また、応力ひずみ線図取得、金属組織観察、穿孔法による残留応力測定でご協力いただいた関連各部署にお礼申し上げます。

最後に、社会人ドクターに理解・応援していただいた筆者の両親に深く感謝致します。