

磁気ひずみ効果を利用した応力測定法に関する研究 (その1)

—鋼材の塑性変形と磁化特性について—

石 川 登

§ 1. はじめに

構造物が、施工時や使用時に設計に考慮されないような外力を受けたと予想される場合や、既存の構造物の継続的な使用の可否を検討する場合、実稼動下にある構造物の応力とその判断資料として必要となる。実構造物の応力測定には、建設時にひずみゲージを貼るか、標点を打つなどの操作を施し、その後に加わった応力変化を読み取る方法が採用されていた。しかし、これらの方法では事前に測定点を決定する必要があることや、すでに荷重を受けている構造物の応力を知ることができない等の欠点があり、応力変動によらない非破壊的な応力測定法が適当と考えられる。

鋼材の非破壊的な応力測定法としては¹⁾、①応力によって変化した金属の原子間距離をX線回折を用いて測定し、その距離から応力を求める「X線回折法」²⁾、②応力により超音波の音速が変化する性質を利用して、超音波の音速から応力を求める「超音波法」³⁾、③鋼材に小さな穴をあけ、その時の応力解放によって生じる表面応力の変化をストレインゲージで測定する「穿孔法」⁴⁾や「リングコア法」⁵⁾、④強磁体を磁化させたときに生じる磁気再配向の数と大きさを測定し、そのパルスから応力を推定する「パルクハウゼン効果法」⁶⁾、および⑤磁気ひずみ効果を利用して磁気抵抗測定から応力を求める「磁気ひずみ応力測定法」⁷⁾等が提案されている。このうち、磁気ひずみ応力測定法は建築鉄骨や橋梁などの鋼構造物の応力測定に対して、装置の簡便さ、コスト、安全性等の観点から実用化が期待されている。

§ 2. 測定原理と研究の目的

「磁気ひずみ効果」とは、鋼などの強磁性体を磁化させるとその寸法が変化し、ひずみが生ずる現象である。この逆効果として、強磁性体に応力またはひずみを加え

ると、その磁気的性質が変化する。この逆効果を利用して応力に加わった状態にある鋼材の磁気的性質を測定することにより、その応力を非破壊的に測定することが可能である。図-1に示すように、被測定材の表面にコの字形の高透磁率のコアにコイルを巻いたプローブを接触させ、閉じた磁気回路を作る。被測定材に応力を加えると、磁気ひずみ現象により、その透磁率が変化して磁気回路の磁気抵抗が変わる。この磁気抵抗を、プローブに巻かれたコイルのインピーダンス変化として取り出す。鋼材における磁気ひずみ効果は小さなものであるため、図-2に示す測定回路を用いて不平衡電流として測定を行う⁷⁾。

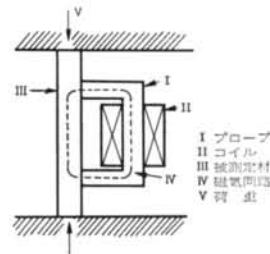


図-1 測定原理図

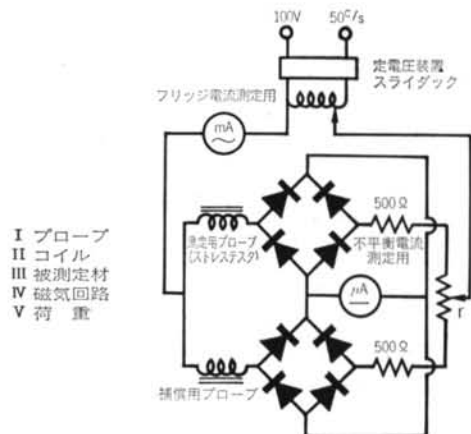


図-2 測定回路

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	V
19	34	83	1.2	1.0	3.8	2.4	0.4	0.1	3.5

表-1 化学成分 (×10²%)

試験体記号	塑性ひずみ (%)
EE-1	0
PTM-1	1
PTM-2	2
PTM-3	3
PTM-4	5

表-2 目標塑性ひずみ量

磁気ひずみ応力測定法は、実験室的にはすでに吉永らによって詳細な検討がなされている⁷⁾。しかし、実構造物への適用に当っては、幾つかの問題点が残されている。

本研究は、鉄骨・橋梁等の鋼構造物への磁気ひずみ応力測定法の実用化を最終的な目標としたものである。本報は、鋼材の磁氣的性質と磁気ひずみ出力との関係を実験的に検討し、より合理的な測定手法を確立するための基礎的な資料を得ることを目的とする。また、供試材料として種々の塑性ひずみを与えた材料を使用し、鋼材の“塑性化の有無”を判別する手法を併せて検討する。

§ 3. 実験方法

3.1 供試材料

鋼材の磁氣的性質は磁界、材料の組成、加工、熱処理などによって定まる。本実験では、鋼材に予め塑性変形を加えて磁氣的性質を変化させるようにした。使用した材料の化学組成を表-1に示す。また、加えた塑性ひずみ量を表-2に示す。

3.2 直流磁化特性の測定

予ひずみを与えた供試材料から、図-3に示すリング状の試験片を作製した。試験片には、励磁コイルとして0.5mm径のホルマル銅線を20ターンと、サーチコイルとして0.2mm径のホルマル銅線を20ターン巻き、電磁誘導法により磁化曲線を得る。すなわち、励磁コイルに電流を通じ試験片に±20 Oeの交番磁界をかけ、その際サーチコイルに流れる電流から試験片に生じた磁束密度を測定し、磁化曲線を得る。

磁化特性の測定には、理研電子特製の直流磁化特性自記装置 (BHS-40) を使用した。装置の外観を写真-1に示す。

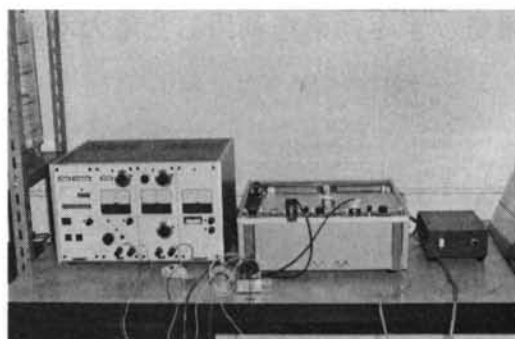


写真-1 直流磁化特性自記装置

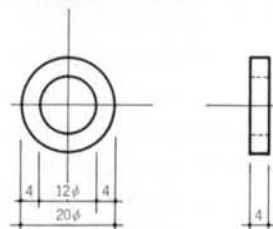


図-3 磁化特性測定用円形試験片

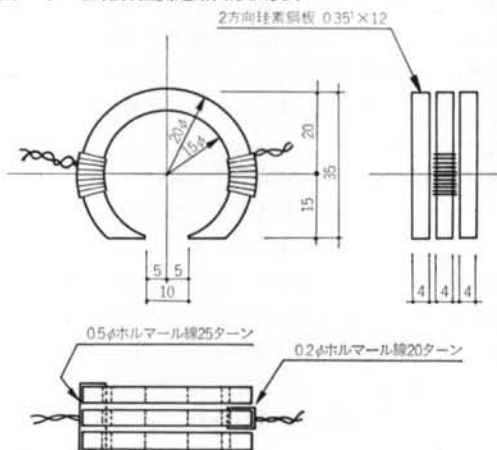


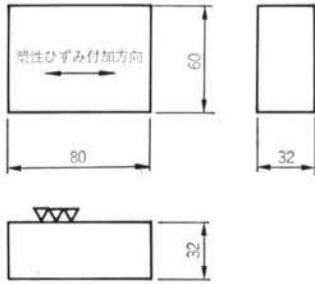
図-4 表面磁化特性変換器

3.3 表面磁化特性の測定

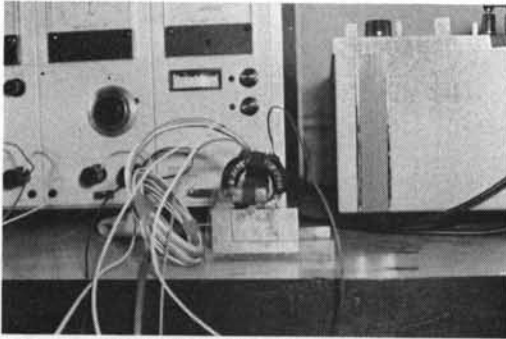
磁気ひずみ応力測定は、鋼材表面にセンサを接触させ、それにより構成された閉磁回路の磁気抵抗変化を測定する手法が採られている。このような励磁法を適用した場合、磁束密度は渦電流のため鋼材内部にあまり深く浸透しない⁸⁾。磁束の浸透する深さは下式で示される⁸⁾。

$$d = (2\rho/\mu\omega)^{1/2}$$

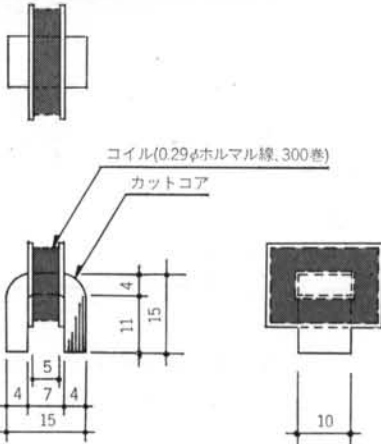
ここで、 ρ は被測定材の固有抵抗 ($\Omega\cdot m$)、 ω は磁化電流の周波数 (Hz)、 μ は透磁率である。炭素鋼では、 d は約0.5mmとなる。これらのことから、磁気ひずみ応力測定で実際上問題となる鋼材表面部の磁化特性を測定することとした。



図—5 表面磁化特性測定用試験片



写真—2 表面磁化特性の測定状況



図—6 プローブの寸法形状

本実験では、図—4に示す馬蹄形の磁化特性変換器を作製した。変換器は、2方向珪素鋼板(0.35t)を12枚1組として積層し、それらを更に3組重ね合わせたものをコアとした。1次側は3重にしたコア全体に0.5mm径エナメル銅線を巻き、2次側は中央のコアにのみ0.2mm径エナメル銅線を20ターン巻いた。これは1次側の3重コアが幅広い磁界を起こし、その中央部分の平行な磁界がかかっている個所の磁化特性を測定することにより、特定方向の磁化特性を得ることを目的としたものである⁹⁾。

使用した試験片を図—5に示す。試験片は表面を精密

仕上げした。測定に際しては表面をその都度脱脂清浄化し、異物が接触界面に介在しないようにした。

変換器を試験片の表面に接触させ、 $\pm 60 \text{ Oe}$ の交番磁界をかけ、その際に中央のコアに流れる電流から平行磁界部の磁束密度を測定した。磁化特性の測定は、磁化方向が塑性ひずみの方向およびその直角方向となるようにした。また、測定器は先に示した直流磁化特性自記装置(BHS-40)を使用した。その測定状況を写真—2に示す。

3.4 磁気ひずみ測定

磁気ひずみ測定用のプローブを図—6に示す。プローブは、珪素鋼板製のカットコアに0.29mm径のホルマル銅線を300ターン巻きとした。

磁気ひずみの測定は、吉永が提案した⁷⁾測定回路を持つ測定器を試作、使用した。試験片および測定方向は、表面磁化特性測定と同じとした。

§ 4. 結果および考察

鋼材内部および表面部の磁化曲線の一例を図—7, 8に示す。磁化特性値として透磁率, 20 Oe 時磁束密度(B_{20}), 残留磁束密度(B_R), 保磁力(H_C)を求めた。

4.1 塑性ひずみの磁化特性に及ぼす影響

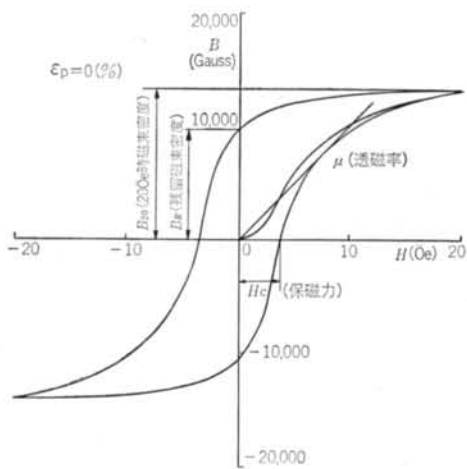
リング状試験片の塑性ひずみと磁化特性の関係を図—9～図—12に示す。磁化特性は、塑性化により急激な変化を示す。塑性化後は、塑性ひずみ量にほぼ比例して漸増、あるいは漸減する。

これらの、塑性化に伴う磁化特性の変化の原因としては、以下のことが考えられる。

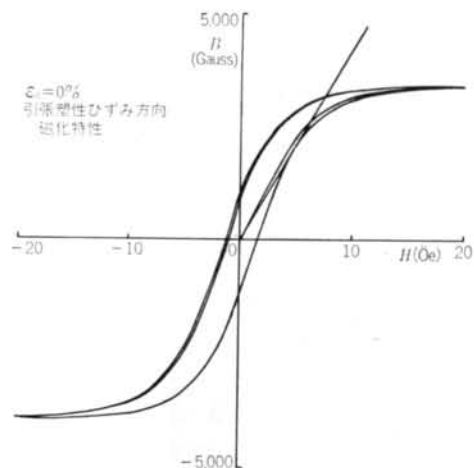
鋼材は結晶内に磁区を形成し、無応力状態では各磁区は容易に磁化方向に磁化されている。塑性変形を受け結晶組織力に転位を生じると、周りには内部応力場が形成される。転位の周りの自発磁化は、応力と磁化方向との磁氣的相互作用のため、結晶エネルギーと外部磁場とによって決定される方向からはずれ、磁化の非一様(磁化分布)が生じる¹⁰⁾。この転位による磁化の非一様性が、塑性化に伴う磁化特性の変化をもたらすものと考えられる。

転位による磁化の非一様は転位の方向と密接に関係することから、転位による内部応力により磁化の異方向性が引き起こされると考えられる。

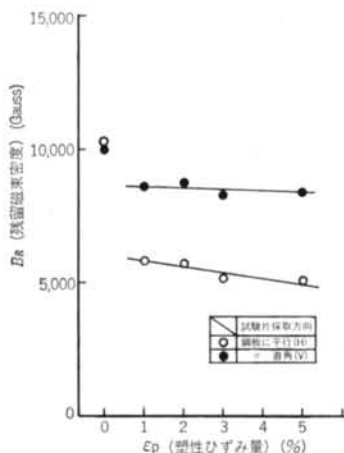
塑性ひずみ方向およびその直角方向を磁化異方向性と



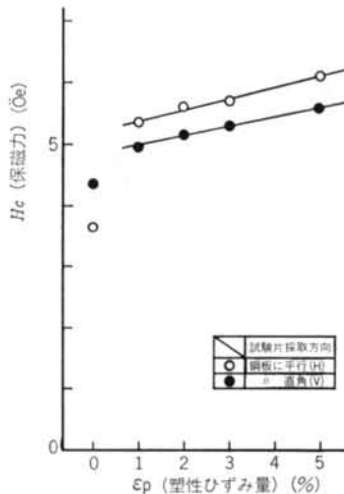
図—7 鋼材内部の磁化特性曲線



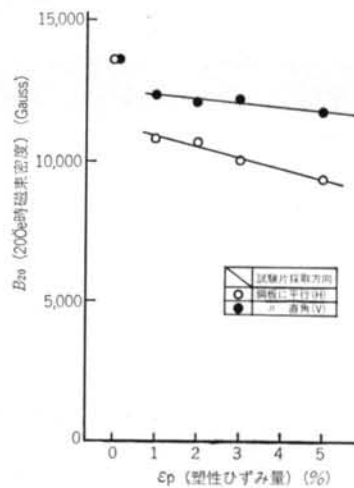
図—8 表面磁化特性曲線



図—9 円形試験片における塑性ひずみ量と B_R の関係



図—10 円形試験片における塑性ひずみ量と B_{20} の関係



図—11 円形試験片における塑性ひずみ量と H_c の関係

考えたときの、塑性ひずみ量と異方性主方向の透磁率を図—13に示す。透磁率は両方向間で顕著な異方性を示し、前者の透磁率は後者の透磁率の約 1/2 を示す。

以上のことから、鋼材内部の磁化特性により「塑性化の有無」を判断し得るものと考えられる。また、塑性化後の磁化特性が顕著な異方性を呈することから、引張塑性ひずみ方向のような磁化特性の変化が大きな方向を選択的に利用することが望ましい。

塑性化後は、塑性ひずみ量にほぼ比例して磁化特性が変化することから、磁化特性の精密測定により塑性ひずみ量の推定は可能である。

4.2 表面磁化特性

表面部の磁化特性と塑性ひずみとの関係を図—14～図—17に示す。 B_R 、 B_{20} は塑性ひずみの影響を余り受けないが、 H_c は増大、 μ は低下の傾向を示す。塑性化に伴う磁化特性の異方性は、表面磁化特性においても保存されており、内部磁化特性と同様な傾向を示した。

表面磁化特性が、内部磁化特性に比較して塑性ひずみの影響を余り受けなかった原因としては、以下のことが考えられる。

リング状の閉鎖形試験片は漏れ磁束が少ないため、鋼材の磁化特性の変化が磁化曲線に直接的に現われる。それに対して、表面磁化特性においては被測定材と変換器

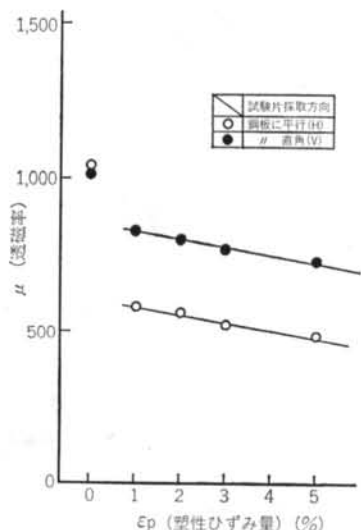


図-12 円形試験片における塑性ひずみ量と μ の関係

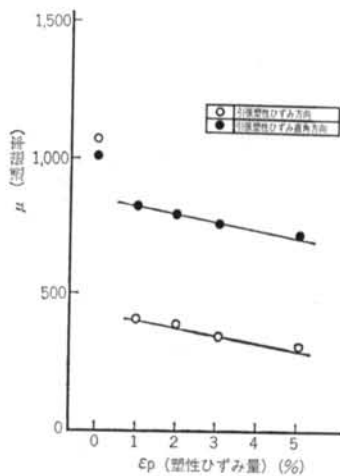


図-13 塑性ひずみによる透磁率の異方性

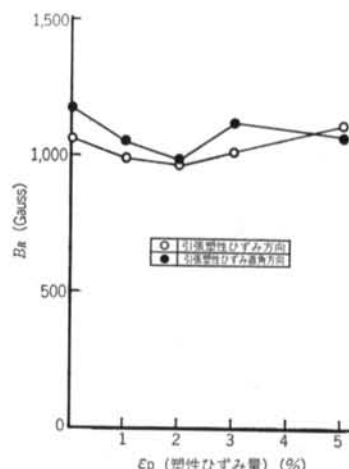


図-14 塑性ひずみと表面磁化特性 (残留磁束密度)

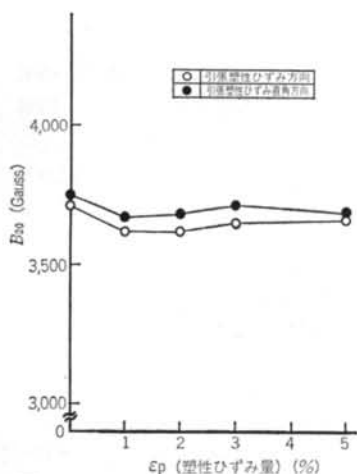


図-15 塑性ひずみと表面磁化特性 (20 Oe 時磁束密度)

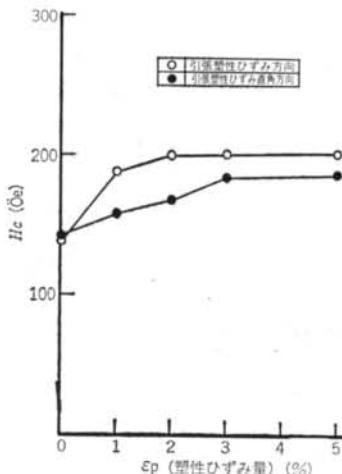


図-16 塑性ひずみと表面磁化特性 (保磁力)

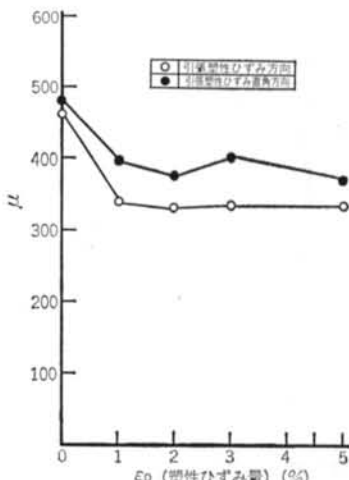


図-17 塑性ひずみと表面磁気特性 (透磁率)

間の漏れ磁束が大きく、これが磁気回路の磁気抵抗として働き、それにより磁化特性の測定感度が低下するものと考えられる。しかしながら、 H_c や μ は塑性化による磁化特性の変化が明瞭であることから、これらの磁化特性を用いることによって、鋼材の「塑性化の有無」や「主塑性ひずみ方向」を知ることが可能と考えられる。

4.3 磁気ひずみ測定

塑性ひずみ量と磁気ひずみ出力との関係を図-18に示す。磁気ひずみ出力は、塑性化により急激に変化するとともに、塑性化後は塑性ひずみ量とほぼ比例して変化する。また、磁化特性と同様に、測定方向による異方性を

示す。

4.4 磁気ひずみ出力と磁化特性

3.2において、表面磁化特性の変化が比較的明瞭に示された H_c と μ について、磁気ひずみ出力との関係を図-19～図-22に示す。

異方性を考慮した透磁率 (μ_L , μ_T) は、引張塑性ひずみ方向とその直角方向の磁気ひずみ出力と良い対応を示す。磁気ひずみ出力は、磁気ひずみ変換器により交流磁界を負荷し、磁気回路の磁気抵抗変化を不平衡電流として測定したものである。一方、磁気抵抗は透磁率の関数 ($R/l\mu S$) である¹¹⁾。したがって、塑性ひずみによる透

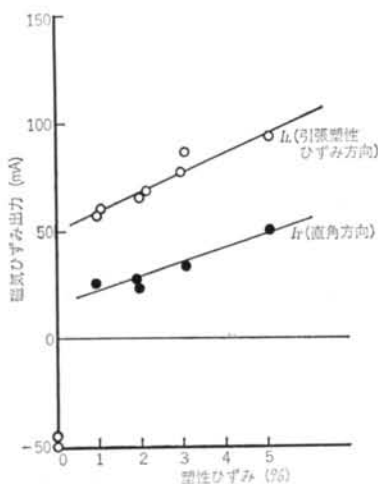


図-18 塑性ひずみと磁気ひずみ出力

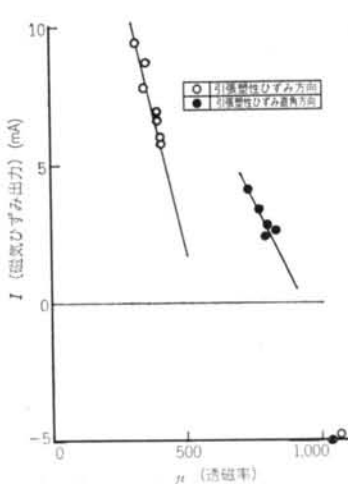


図-19 内部磁化特性と磁気ひずみ出力

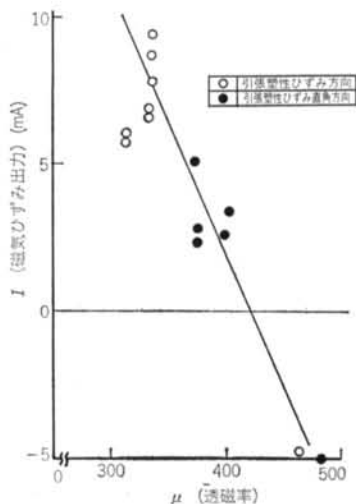


図-20 表面磁化特性と磁気ひずみ出力

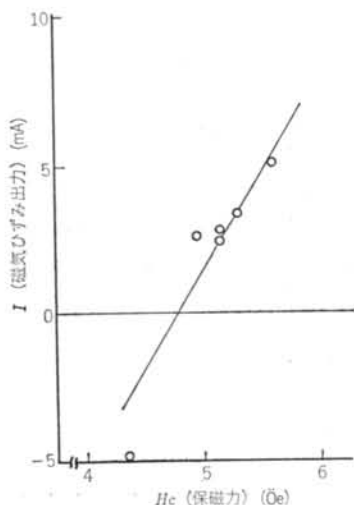


図-21 内部磁化特性と磁気ひずみ出力

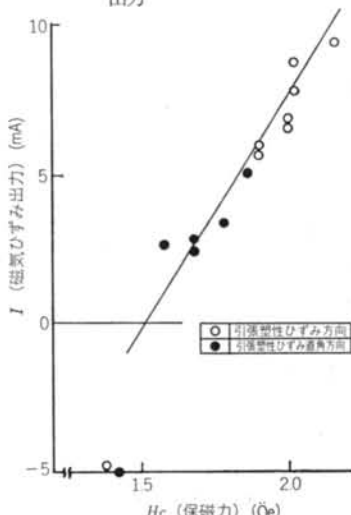


図-22 表面磁化特性と磁気ひずみ出力

磁率の変化は構成する磁気回路の磁気抵抗を変化させ、それによって磁気ひずみ出力を変化させるものと考えられる。

表面磁化特性の透磁率は、全体を通じては磁気ひずみ出力と線形な関係にあるが、同一の測定方向内では良い対応は見られない。これは3.2で示したように、表面磁化測定における透磁率の測定感度が低いことに起因するものと考えられる。

表面磁化特性の保磁力は、両測定方向を通じて磁気ひずみ出力と線形な関係にある。保磁力は非可逆的な磁壁移動の難易度を示すものであり、炭化物などの析出や焼き入れによるひずみにより保磁力が大きくなることが知られている¹²⁾。これは鋼材の強化機構と共通しており、

塑性ひずみによる加工硬化も保磁力と関連するものと考えられる。

一方、正負交番磁界が形成される交流磁界においては、保磁力は透磁率とともに磁化の起こり易さ(磁気抵抗)を決定づける因子である。これらのことから、磁気ひずみ出力と保磁力間に相関関係が生じるものと考えられる。

§ 5. 結言

塑性変形により磁気性質を変化させた鋼材の、磁化特性と磁気ひずみ応力測定を行ない、以下の結論を得

た。

- (1) 鋼材の磁化特性は塑性化により急激な変化を示す。
- (2) 塑性化後の磁化特性は塑性ひずみ量にほぼ比例して変化する。 μ と H_c はこの変化が顕著であるが、 B_R 、 B_{20} は明瞭でない。
- (3) 鋼材は塑性化により、その磁化特性に異方性が生じる。引張塑性ひずみ方向の透磁率は、その直角方向の透磁率に比べて磁化特性の変化が大きい。前者は後者の約1/2となる。
- (4) 鋼材の磁気的性質を測定することにより「塑性化の有無」ならびに「塑性ひずみの方向」を判断し得るものと考えられる。また、 μ や H_c を精密に測定することにより、「塑性ひずみ量」を推定し得るものと考えられる。

(5)鋼材の磁化特性の変化は、 μ と H_c に顕著に現われる。鋼材の磁氣的性質の応力依存性を利用して非破壊的な応力測定を行なう場合、 μ や H_c を捕捉するような測定法が望ましい。

(6)磁気ひずみ応力測定の実出力値と H_c の間には測定方向に関わらず比例関係が成立した。上記(5)に示した観点から、磁気ひずみ応力測定の実出力値は鋼材の磁化特性の変化を把握する代表値として妥当なものと考えられる。

<参考文献>

- 1) C.O.Ruud: NDT International, Vol.15, No.1 (1982) pp.15~23
- 2) 例えば、日本材料学会編: "X線応力測定法" 養賢堂 (1966年)
- 3) 例えば、山本英爾, 茂木良平: 日本機械学会誌 (1979年) pp.1116~1119
- 4) M.T.Flaman: "Experimental Mechanics; 4th International Congress" (1981) pp.304~308
- 5) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: "溶接力学とその応用" 朝倉書店 (1965年)
- 6) G.A.Matzkanin, R.E.Beissner & C.M.Teller: "NTIAC-79-2" Nondestructive Testing Information Analysis Center, San Antonio (1979) pp.1~49
- 7) 吉永昭男: 船舶技術研究所報告 第17巻第1号
- 8) R.Langman: NDT International (April 1982) pp.91~97
- 9) R.Langman: NDT International (October 1981) pp.255~262
- 10) 日本金属学会編: "転位論—その金属学への応用—" 丸善
- 11) 金子秀夫, 本間基文: "磁性材料" 日本金属学会
- 12) 吉谷豊, 大野二郎: 計測自動制御学会論文集 第17巻第1号 pp.100~105

