

磁気ひずみ効果を利用した残留応力測定に関する研究

吉 永 昭 男*

Study on the Measurement of the Residual Stress by the Magnetostriction Method

By
Akio Yoshinaga

Abstract

Macroscopic analysis of initial and residual stress is necessary for design and inspection of steel structures for safety's sake. The X-ray method has been employed for such analysis, though it requires extensive experience and high skill together with rather expensive apparatus. A magnetic method is developed here with a U-shaped probe for the purpose which is based on the "magnetostriction effect".

Since the permeability is a function of the stress of a steel test piece due to the effect, the inductance of a coil around the U-shaped probe, made of high permeability material, is a function of the stress of the piece to which the probe is attached. The change in the inductance is detected effectively by an alternating current bridge having the probe on the piece and another probe on a dummy test piece as bridge sides. The dummy piece has to be of the same material and stress-free by heat treatment. A calibration curve of the bridge output and the stress should be prepared employing two test pieces after heat treatment.

Comparison of stress data with the probe, σ_m , and those with wire strain gauges, σ_s , gives fairly good accordance as shown below:

$$\sigma_s = (1 \pm 0.06)\sigma_m + (0.6 \sim 2) \text{ kg/mm}^2.$$

The second term, $0.6 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$, depends on kinds of steel.

Though this method allows simple and handy measurement of the compressional stress, the method cannot be applied directly for the case of tensile stress since the output is a two-valued function of the stress. Therefore, another method is devised to overcome the defect. Since the output of the transversal stress is found to be about three times larger than the output of the tensile stress and it is one-valued function, the tensile stress can be measured by rotating the probe by 90 degrees and employing another calibration curve. The method gives results which is fairly close to those measured with strain gauges with differences of the same order stated above.

Above study leads to the measurement of two-dimensional stress by rotating the probe around its axis. Therefore, the "shear-difference method", developed in the analysis of the photo-elasticity, is studied and examined here for its application to this method the-

oretically. Since this indicates possibility of obtaining two-dimensional stress distribution by measuring the directions of principal axes and the difference of two principal stresses, experiments have been performed for the cases of compression-compression, compression-tension and tension-tension using various kinds of steel.

Comparison of the results with those by the strain gauge method also shows good accordance with 2 kg/mm^2 for stress less than 30 kg/mm^2 . Similar comparison is also made for welded test pieces and this gives somewhat larger difference of about 4 kg/mm^2 .

Above studies indicate that magnetic non-destructive measurements with the probe developed here is effective for practical usage in macroscopic measurements of initial and residual stresses.

<目 次>

要 旨	3	2.6.3 イニシャル誤差のまとめ	23
第1章 緒 論	4	2.7 ま と め	23
1.1 緒 言	4	第3章 単軸初期応力の測定	24
1.2 本研究と磁気ひずみ効果	5	3.1 緒 言	24
1.3 従来の研究の展望	7	3.2 単軸圧縮初期応力の測定	24
第2章 磁氣的応力測定の基礎	8	3.3 単軸引張初期応力の測定	24
2.1 緒 言	8	3.3.1 出力特性	25
2.2 測定原理	8	3.3.2 応力の実験整理	26
2.2.1 記 号	8	3.4 圧縮と引張の出力特性(I)	27
2.2.2 測定原理	9	3.4.1 横感度について	27
2.3 測定装置	10	3.4.2 圧縮と引張の比較	28
2.3.1 ストレステスタ	10	3.5 縦横の出力電流差をとる方法	28
(i) ストレステスタの設計	10	3.6 曲げ応力の測定	29
(ii) ストレステスタの作装	11	3.7 塑性域の応力	29
2.3.2 測定回路	12	3.8 ま と め	31
2.4 基礎実験	13	第4章 平面応力測定の基礎	31
2.4.1 測定方法	13	4.1 緒 言	31
2.4.2 実験結果	15	4.2 基礎理論	32
(i) 出力特性	15	4.2.1 記 号	32
(ii) 温度の影響	16	4.2.2 ストレステスタの磁界	32
(iii) 測定点近傍の強磁性体の影響	16	4.2.3 基礎式の誘導	34
(iv) 試験片形状の影響	16	4.3 磁束分布と応力の関係	37
2.5 磁気ひずみ感度に影響を及ぼす因子	17	4.3.1 磁束分布の測定	37
2.5.1 感度と金属成分の関係	17	4.3.2 応力測定範囲	39
2.5.2 感度と熱処理との関係	18	4.4 磁氣的ポアソン比	41
2.5.3 感度と圧延方向の関係	19	4.4.1 磁束分布と横感度係数	41
2.5.4 感度と粒度との関係	19	4.4.2 応力とテスタのインピーダンス	43
2.6 イニシャル誤差について	21	4.4.3 磁氣的ポアソン比の測定	44
2.6.1 イニシャル誤差とは	21	4.5 ま と め	45
2.6.2 イニシャル誤差の値	21	第5章 均一な平面残留応力の測定	46

5.1 緒 言	46	6.3.2 接触面と測定電流の安定	60
5.2 二軸圧縮残留応力の測定	46	6.4 測定結果および考察	60
5.2.1 二軸圧縮試験	46	6.4.1 実験結果	60
5.2.2 主応力方向の決定	47	6.4.2 出力曲線が正弦曲線にならぬ場合	62
5.2.3 主応力値の決定	48	6.4.3 補助軸の位置について	64
5.2.4 巨視的な二軸圧縮残留応力の 測定方法	50	6.5 イニシャル誤差について	65
5.3 二軸引張残留応力の測定	50	6.6 磁気ひずみ感度の決定法	67
5.3.1 二軸引張試験	50	6.7 ま と め	68
5.3.2 主応力の決定	51	第7章 溶接材の残留応力の測定	68
5.3.3 巨視的な二軸引張残留応力の 測定方法	51	7.1 緒 言	68
5.4 任意の均一な平面応力の測定	52	7.2 使用試験片と測定方法	68
5.5 主応力方向および主応力差と出力電流差	53	7.3 実験結果	71
5.6 圧縮と引張の出力特性(II)	54	7.3.1 応力解放した場合との比較	71
5.6.1 理論値による考察	54	7.3.2 校正曲線	73
5.6.2 実験による考察	56	7.4 小形テスト	74
5.7 ま と め	58	7.5 ビード上の測定	76
第6章 不均一な平面残留応力の測定	58	7.5.1 連続と考えた測定	76
6.1 緒 言	58	7.5.2 小形テストを併用した測定	76
6.2 せん断応力差積分法の導入	58	7.6 ま と め	77
6.3 不均一な応力場における巨視的残留 応力の測定	59	第8章 結 論	77
6.3.1 測定方法	59	8.1 緒 言	77
		8.2 磁気ひずみ効果を利用した応力の測定法	77
		8.3 測定精度, 出力と応力の関係等	78
		参考文献	79

要 旨

大型船の海難事故の原因の一つに、建造時に船体のブロックの継手附近の溶接部に生じる残留応力が考えられている。この残留応力を非破壊で実物測定する方法は、現在ではX線応力測定法が一般的であるが、この方法は高価な装置と高い技術が要求される。

本研究は、この種の応力を磁気ひずみ効果を用いて、非破壊で実物測定する方法について、理論的検討をおこない、応力と磁気的な量との関係を求めて、単軸および平面応力など、種々の応力状態における測定法を提案し、実用上、最も有利なプローブ型の磁気ひずみ変換器を用いて、この種の残留応力を実測し、この方法が有用であることを確かめた。

以下、各章別にその概要を述べる。

第一章に於ては、本研究の意義と目的について述べ、磁気ひずみ効果について、簡単な説明を行い、この効果を用いた、従来の研究について、本論文の学問

上の位置をあきらかにした。

第二章では、本論文で用いるプローブ型変換器による測定で、残留応力の非破壊測定の可能性を調べ、測定原理と実験とから、測定可能であることを確認した。出力特性が単純な圧縮応力状態について、真の残留応力と測定値の関係を与えた式を示し、この測定に特有な、零バランスをとるための標準片、補償片の寸法、近傍の強磁性体の影響などについて検討した。

測定誤差に影響を与える緒因子と磁気ひずみ感度との関係を求め、とくに金属成分と熱処理状態が大きな影響を与えるので標準片(校正用試験片をかねる)補償片によってこの影響を除去しなければならぬことをあきらかにした。

第三章では、種々の単軸応力についてその残留応力の非破壊測定法を研究した。単軸圧縮については、第二章で実用可能なことがわかったので、従来の研究から、磁気出力と応力の対応が複雑と思われる単軸引張応力を周波数や磁化電流を変化させる方法、横感度を

測定する方法、縦横の出力電流差をとる方法によって測定した。その結果、横感度を測定する方法が、単軸圧縮と同じ精度の実用的な方法であることをあきらかにした。

曲げ応力の測定と、塑性域における応力の測定についても実験考察した。

また、この磁氣的測定において、横感度係数（横感度／縦感度）が正の符号をとり、引張と圧縮とで異なることをあきらかにした。

第四章では、平面残留応力の測定の可否を理論と実験の両面より検討した。平面残留応力状態の鋼板上に測定用プローブを当てた場合について、理論式を導き、磁気出力と主応力の方向、主応力差などの関係を求めた。また、この場合の磁束分布を実測し、測定用プローブの応力測定範囲は、プローブの磁極間の距離を半径とする円であることを見出した。測定用プローブのインピーダンスを測定する方法によっても、横感度係数の磁氣的特徴を確めた。磁束が応力と直交または、平行のみの状態の横感度係数を磁氣的ポアソン比と名付け、二軸圧縮の場合の、磁氣的ポアソン比を求めた。

第五章では、均一な平面残留応力状態の非破壊測定法と、第四章までであきらかになった磁氣的測定特有の横感度係数が正の符号をとり、引張と圧縮で値が異なることについて、あらゆる方面から検討した。その結果前者については、主応力方向は、測定用プローブを回転させることにより、出力最大最小の方向として、求まることがわかり、主応力値は、校正用応力線図を求めることにより平面残留応力も測定可能であることをあきらかにした。

後者では、ミクロ的な磁氣挙動より求めた高木（通泰）の理論式と、実験的には丸棒を直流で磁化し、応力に対するB-H曲線を求める方法によって、これを確認した。不均一応力場における平面残留応力の測定は、第五章の測定方法では困難である。しかし主応力方向と主応力差が正しく求まることが、第四章の理論式とこれまでの実験によってわかったので、第六章では、このような応力状態の解折に、光弾性実験で使用されているせん断応力差積分法を用いる方法を採用し、主応力を分離した。この方法は、主応力差をとるので、零バランスをとるための標準片は不要となり測定が簡単化される。

また、測定用プローブを測定点を中心に、回転させて得られる、角度と出力の関係よりこの測定が正確か

否か判別する方法を見出し、このことより安定した測定が可能となった。

第七章では、第六章の具体的な例として、種々の溶接材の残留応力を、この磁氣的方法で、非破壊測定し、ひずみゲージを貼り、応力解放を行って、破壊測定した場合とを比較した。

溶接ビード附近を測定するため、小形のプローブを試作し、応力勾配が急で、正負の応力が錯綜している不均一応力場の測定を試みた。

第八章は、本論文の結論と、種々の応力状態の場合の、磁氣ひずみを利用した初期応力と巨視的な残留応力の非破壊測定法をまとめて述べた。

第1章 緒 論

1.1 緒 言

機械部材や構造部材が、その材料の製造工程または、部材組立の時に、応力を生じ、この応力を簡単に零にできない場合、このような部材には、外力が加わらなくても、内部に応力を生じる。

この種の組立応力のように、外部からの荷重の作用によらずに、内部に応力が閉じこめられた状態は、それを初期状態と考えると、元応力または初期応力と呼ばれ、なんらかの操作や処理の結果により残存するものと考えたとき、残留応力とよばれる。

残留応力には、いわゆる巨視的分布を持つものと、結晶の粒子毎に変化し、一粒子内においてさえも異なる分布をなす、いわゆる微視分布を持つもの、2種類に分けて考えることができる。

本論文では、初期応力（元応力）と、残留応力のうち、巨視的分布を持つものを、主として対象とした。

この種の応力が破壊に及ぼす影響は、これまでの研究であきらかにされていることだけでも、(1)静的荷重の場合、表面に引張残留応力が存在していると亀裂が発生しやすく、残留応力のない場合より低い荷重で破壊する。(2)ぜい性破壊において、引張残留応力の存在する溶接構造物は、低応力で破壊する。(3)疲れ破壊に対して、著しく影響を与える。疲れ破壊は、塑性変形による残留応力の減少、あるいは、し緩は、ほとんどおこなわれない場合が多いと考えてよいので、残留応力は、外力にそのまま加算されて、材料に作用すると思われる。(4)クリープでも、残留応力は外力に加算されて作用し、この力が、特に結晶のすべり易い方向に作用すれば急速に塑性変形が起る。(5)偏心、初期たわみとともに、座屈の原因となる。(6)腐食におよぼす影

響は、きわめて顕著で、応力腐食疲労割れが生じやすい等々の事があり、これらを考えると、この種の応力が、材料強度、破壊強度に重要な役割を持っていることがわかる。

このように、重要な応力なので、以前から多数の研究者によってこの種の応力の測定法の研究がおこなわれてきたが、多くの場合、その測定法は、応力解放による破壊測定であり、鉄橋、船舶等の実物測定には、非破壊測定をおこなわねばならないので不適當である。

現在、残留応力を非破壊で測定する方法では、最も一般的なものは、X線応力測定法⁽¹⁾であり、その他には、光弾性材料を用いるもの⁽²⁾や、ロゼットゲージを用いるもの⁽³⁾、超音波を利用するもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが、最近二、三発表されているだけである。X線応力測定法は、残留応力の測定に広く使用されて、もっとも良い方法であるが、高価な装置と高い技術とが必要であり、しかもその測定層は、表面から数 10μ の薄い層の応力である。強度に影響するのは、表面の応力のみではなく、内部の残留応力も関係する。

光弾性材料を用いるものは、光弾性材料の小薄片を測定部に貼りつけ、その中央に、キリで小孔をあけ、その応力縞模様から測定材の残留応力を見出そうとするものであり、ロゼットゲージを用いるものも、ロゼットゲージを測定点に貼り、その中央に、やはりキリで孔をあけ、そのひずみ分布より残留応力を求める方法である。超音波によるものは超音波の音速の変化を利用するものであるが、これらX線以外の三つの方法は、現在まだ研究の段階である。

最近、問題になっている、石油タンクの破損、荒天時における大型船の沈没事故などから、石油タンクの満タン時の底板、側板の応力、船体の側板、底板の残留応力、新幹線レールの熱応力などの実際の構造物の初期応力や、巨視的な残留応力の測定が、各方面より要望されている。しかし、石油タンクの鋼板や、船体には、建設時の溶接などによる残留応力の他に、石油の自重による応力、または波浪による外力が、加わっている。

この種の応力は、建設時に、ひずみゲージを貼るか、標点を打つか、何らかの操作がなされていなければ、現在どれだけの応力を生じているかを測定する方法は、これまでにはX線応力測定法しかなかった。

しかし、X線による測定は、結晶格子間のひずみの測定なので、微視的な残留応力の測定では、最も有効

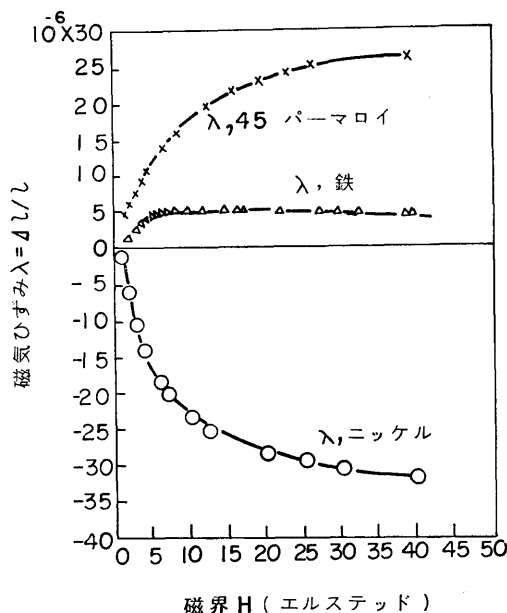


図-1.1 磁気ひずみ曲線

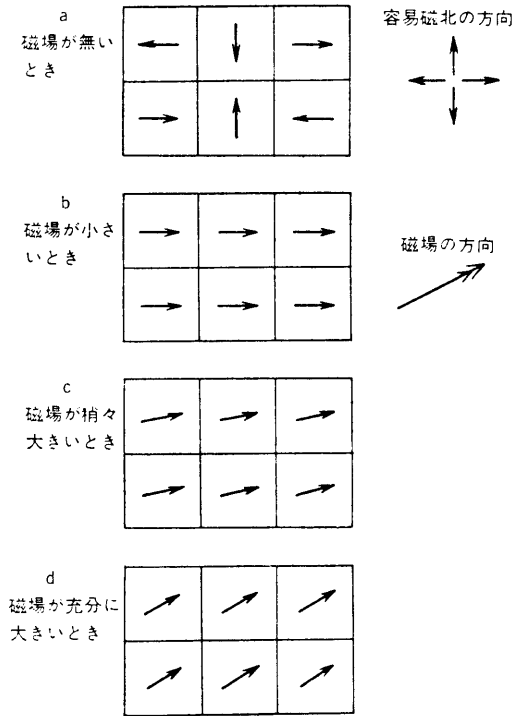
な方法であるが、このような、巨視的な残留応力の測定には不適當ことが多い。

そこで、今まで、測定困難であったこの種の応力を、はじめて磁気ひずみ効果を利用して、非破壊で実物測定することを主眼として本研究に着手した。

1.2 本研究と磁気ひずみ効果

磁気ひずみ効果とは、強磁性体を磁化したとき、その寸法が変化する現象である。その時生じるひずみを磁気ひずみといい、その値は、最も大きい材料でも、 10^{-4} 程度である。

図-1.1⁽⁶⁾は、鉄、ニッケル、45パーマロイの磁気ひずみ曲線を示す。磁気ひずみには材料によって磁化すると、その方向に伸びる場合と、ニッケルのように、その方向に縮む場合と、正負二つの場合がある。これらの強磁性体は、逆に応力またはひずみが加えられると、その磁氣的性質が変化する。この逆の効果も磁気ひずみ効果と呼ばれる。この研究では、この逆効果を利用している。この磁氣的性質の変化はパーマロイなどの磁気ひずみ材料では 1 kg/mm^2 の応力で、数10%の磁束密度の変化を生じる⁽⁷⁾鋼材は比較的小さいが、それでも 1 kg/mm^2 の応力で0.1~0.2%の磁束密度の変化を生じる。これは、電気抵抗など、他の物理的性質の応力による変化にくらべると、非常に大きな値である。磁束密度などの磁氣的性質は、磁界、材料



図一1.2 素磁域と磁化ベクトル分布

の組成，加工，熱処理などによって定まるが，応力による変化もこれらの因子による変化と同じオーダーなので他の因子の変化の影響を小にすれば，応力による影響だけを取り出すことができる。このことが，この効果を用いて，鋼材の残留応力を非破壊で測定しようとする本研究の根拠である。

強磁性体の性質は，普通，磁区とよばれる小さい領域によって説明されている。各磁区は，飽和まで磁化されており，その磁化は磁界が作用しないときは，いくつかの容易磁化の方向（もっとも小さい磁界の強さで飽和磁化に達する結晶軸方向）に向いている⁽⁹⁾。たとえば，鉄は6通りの容易磁化の方向があり，そのいづれかの方向をむいている。これに外から磁界を与えると，図一1.2に示すように磁区の磁化ベクトルは，磁界の方向に最も近い方向の特定の容易磁化の方向に向き直り，さらに磁界が強くなると磁界の方向に向いてくる。

ここでは，磁気ひずみ効果を磁区を用いて考えてみる⁽⁹⁾。磁区の中では，原子のモーメント相互間のエネルギーがひずみに関係しているので，これと，ひずみの弾性エネルギーとが平衡し，磁区自身が適当な値だ

けひずんで安定している。図一1.2(a)から(b)になるとき，磁化方向が180°回転する場合には，その寸法は変化しないが，90°の回転をおこなうときには，磁化ベクトルの方向に伸びると考えられ，磁気ひずみ効果すなわち，磁化するとその寸法が変化する現象を説明することができる。なお磁気ひずみが負の材料は磁化の方向にちぢむ。

一方，このような材料にさらに外部より張力が作用する場合には，磁気ひずみにもとづく異方性エネルギー E_a が生じる⁽¹⁰⁾。

$$E_a = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cdot \cos^2 \phi \quad \dots\dots (1.1)$$

ここに， λ_s ；磁気ひずみ飽和値， σ ；応力， ϕ ；磁化と応力とのなす角

式(1.1)において， $\sigma > 0$ で $\lambda_s > 0$ ならば， $\phi = 0$ が安定の位置であり， $\lambda_s < 0$ ならば $\phi = \pi/2$ が安定の位置である。すなわち，磁気ひずみが正ならば，引張力の方向に磁化かむこうとして，磁化が増大し，磁気ひずみが負ならば，引張と直角の方向にむかうとして，引張の方向の磁化は減少する。

このようにして，磁気ひずみ効果と，その逆効果は説明されるが，この逆効果には，磁界の方向と荷重の種類により，いくつかの種類がある。その主な効果は，次の四つである。

(1) Villari 効果⁽¹¹⁾

磁界の方向と荷重の方向が一致している場合にその荷重によって生じるひずみによって，その方向の磁化の変化を生じる現象。

(2) Villari 横効果⁽¹¹⁾

磁界の方向と荷重の方向が一致している場合に，その荷重によって生じるひずみによって，それと直角方向の磁化の変化を生じる現象。

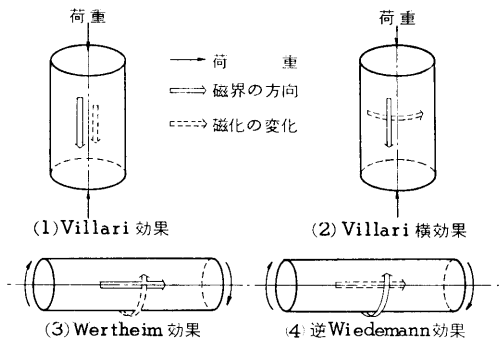
(3) Wertheim 効果⁽¹⁰⁾

軸方向に磁化された棒をねじることにより円周方向の磁化を生じる現象。

(4) 逆 Wiedemann 効果⁽¹²⁾

円周方向に磁化された棒をねじることにより，その軸方向の磁化を生じる現象

本研究では，(1)と(2)を使用している。以上述べたように，磁気ひずみ効果は，応力による，磁束密度などの磁氣的性質の変化が非常に大きい，図一1.1，図一1.2から，予測されるように非直線性，ヒステリシスなどに問題がある。本論文では，これらの長所をいかに欠点は，磁界の強さ，周波数，ピックアップ部の



図一.3 磁気ひずみ効果

磁気ひずみ材料などを適当に選ぶことによって除いている。図一.3に、4つの効果を図解で示している。

1.3 従来の研究の展望

磁気と応力の関係に関する研究は、1840年代よりおこなわれ、磁気ひずみ効果は、見かけ上の形によって、発見者の名前をとり Joule⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾効果、Guillemin効果⁽¹⁵⁾、Wiedemann効果⁽¹²⁾、Villari効果⁽¹¹⁾等と呼ばれている。しかし、磁気ひずみ現象発生 の基礎に関する理論的な考察は、種々の論議が物理学の範囲において重ねられているが、まだ十分完成の域に達していない。

1900年代に P. Weiss⁽¹⁶⁾によって、磁区 の概念が提唱され、磁性物質の単結晶の磁気ひずみ特性についても、理論的には、磁区 の概念を根幹とした統計力学的方法による研究が、Akulov, Heisenberg, 高木⁽¹⁷⁾および W. F. Brown⁽¹⁸⁾などによりおこなわれた。実験的には、本多, 茅, 増山⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾等の測定 Becker, Kersten, によるニッケルの磁化曲線の応力による変化の研究⁽²¹⁾などが世界的に有名である。これらの結果は、Becker, Döring の著書⁽²²⁾にまとめられ磁気と応力の関係が詳しくのべられている。

磁気ひずみ効果の大きい、強磁性体において、応力によって、磁化曲線が大きく変化するということがニッケルやパーマロイについて研究され⁽²³⁾⁽²⁴⁾、Smith, Sherman⁽²⁵⁾によって、引張と圧縮による磁化曲線の変化のちがうことが、たしかめられた。この現象が、応力やひずみなどの力学量を電気量に変換して測定する磁気ひずみ変換器の利用に発展していった⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。

Becker, Döring⁽²²⁾の著書において、軟磁性材料の透磁率が、有限の値しかもち得ないのは材料内部の不規則な応力分布が、磁壁移動を妨げるためであり、この応力を内部応力と呼んでいる。

Bozorth⁽²⁸⁾⁽⁷⁾らは、鉄・ニッケル合金の磁気ひずみ効果について研究し、応力による磁束密度の変化を、磁区理論を用いて計算し、実験もおこない、よい一致をみた。磁気ひずみ効果が等方的であるニッケルに対して、鉄は異方性がきわめて大きいので、岩柳⁽²⁹⁾は、この事を考慮して理論的考察をおこなった。これらの研究⁽⁷⁾⁽²⁹⁾が本研究の基礎となっている。

磁気ひずみ効果の利用は、(1)磁気ひずみ変換器による計測法、(2)強磁性体である鋼材等の被測定材の磁気ひずみ効果を利用する測定法に大別される。文献⁽²⁶⁾、⁽²⁷⁾は主として(1)の方法であるが、1940年代に Förster ら⁽³⁰⁾は磁気ヒステリシスを測定することにより、加工を受けたニッケル線の内部応力の測定や鋼材の材質検査法、欠陥検査などの研究を行っている。また、安積, 岩柳⁽³¹⁾は、はじめて、ピアノ線の応力の非破壊測定を、磁気的方法によって可能であることを示した。これらは(2)の方法である。当時は、抵抗線ひずみ計が、まだ十分に発達していない時代で、磁気ひずみ効果による測定は、応力測定の重要な一分野であった。また、疲労の検出にも適用され多くの論文⁽³²⁾⁽³³⁾が出されている。1950年代後半に、はじめて残留応力と強磁性体の磁気的性質との関係が L. Reimer⁽³⁴⁾らによって発表された。

篠田, 川崎⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾は、炭素鋼を引張った場合の磁束密度の増加は、磁界の強さと無関係に、ある応力で最大となり、その応力は、表面における圧縮残留応力の尺度として使用できることを、直流による磁気測定によって明らかにした。

桜井, 川崎⁽³⁷⁾は、被測定材に、磁化コイルとサーチコイルとを巻く方法によって残留応力を測定した。

一方、磁気ひずみ効果と塑性ひずみの関係について、清田, 緒方⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾は、初透磁率は、引張応力および、ねじり応力の場合、弾性範囲の応力に対しては、連続的に変化するが、降伏点を越えるときには非常に大きな不可逆的变化が生じることを示した。岩柳⁽⁴⁰⁾らは、高磁界では、可逆透磁率の変化が、塑性ひずみの影響を受けず、塑性域までの応力と直線関係があることを発表した。

また、岩柳⁽⁴¹⁾らは、Förster⁽⁴²⁾によって始められた渦流探傷法におけるように、磁気的測定において、その使用交番磁界の周波数を変化させることによって磁界の浸透深さを変化させ、応力分布を求めた。

応力と磁化曲線との関係が、引張と圧縮とで異なるため、これに関する研究が二、三発表されている。

L. I. Mendelsohn⁽⁴³⁾らは、引張応力と透磁率の関係を、鉄、ニッケル等について、応力の方向と、これに直角方向の透磁率の変化をしらべた。その結果、応力と直角方向の透磁率の変化が、応力の変化に比例していることを見出した。

Birss, Faunce, Isaac⁽⁴⁴⁾は、鉄と低炭素鋼について、低磁界では磁化—応力曲線が、引張と圧縮とは非対称であることを示している。

以上のように、磁気ひずみ効果を用いた応力測定に関する従来の研究により、応力および残留応力と材料の磁氣的性質がきらかにされたが、その測定方法は、殆んど、被測定材にコイルを巻く方法をとっており、巨視的な残留応力の実物測定の場合には、種々、難点があった。また、平面応力の、実物測定に関する研究は、これまで殆んど、おこなわれていない。

本研究は、初期応力と、巨視的な残留応力の場合に、実用上最も有利なプローブ型の磁気ひずみ変換器を用いて、被測定材の測定点にこれを当て、その部分の応力を非破壊で測定する方法について、理論と実験の両方より研究を行った。

第2章 磁氣的応力測定の基本

2.1 緒言

本章では、プローブ型変換器を用いて、残留応力の非破壊測定の可能性の有無を確かめる、本論文の基礎となる実験を行った。

磁氣的測定では、圧縮応力と引張応力に対応する、磁気出力の挙動が異なることが、従来の研究⁽⁴⁵⁾で明らかにされており、圧縮応力の場合が、感度、直線性共によいので、磁気ひずみ型計器なども、圧縮型を使用している。この章においても、実験はすべて、最も出力特性が単純な、単軸圧縮応力状態について実験した。

本章では、まず、プローブ型変換器を用いる測定原理を解析し、応力と磁気出力との関係を明確にした。測定装置では、最適のプローブと測定回路の作製について述べた。

単軸圧縮の基本実験を行い、残留応力の基本的な非破壊測定法を考え、その精度を検討した。また、磁氣的測定に特有な、近傍の強磁性体の影響、被測定材自身の形状による影響などについても測定した。

磁束密度などの磁氣的な性質は、材料の組成、加工、熱処理などによって定まるが、応力による変化は、これらの因子の影響をコントロール、または、補

正すれば、応力の影響のみを取り出すことができる十分な大きさを持っている。しかし、磁性に与える前述の諸因子の影響も大きいので、応力を精度よく測定するためには、これらの影響をできるだけ小さくおさえる必要がある。そこで、これら諸因子と磁気出力との関係を求めた。

この測定上の誤差は、大別して、磁気ひずみ感度のばらつきと、零点の値のばらつき (§2.4.2(i)参照)の二つなので、それらの誤差に影響を与えと思われる因子について、実験考察を行った。

なお、この章では、測定用プローブは、標準テスト1を用い、磁化電流は、50Hz, 300mAを使用した。また、試験片も特にことわらない限り、S25C(軟鋼)材で、形状は、直方体(長方形試験片)の圧縮試験片とした。

2.2 測定原理

2.2.1 記号

この章で用いる記号は、とくに明記しない限り、下記の通りとする。

B ; 磁束密度

E_G ; コイルの両端の電圧

e ; ブリッジ両端の電圧

f_G ; コイルに流れる電流の周波数

I ; ブリッジ電流

I_1 ; 測定用プローブ(ストレステスタ)に流れる電流

I_2 ; 補償用プローブに流れる電流

I_G ; コイルに流れる電流

I_L ; 不平衡電流

l ; 磁気回路の有効長さ

添字 m ; 被測定材

添字 s ; 測定用プローブ(ストレステスタ)

N ; コイルの総巻数

n ; 単位長さ当りのコイルの巻数

R ; 磁気回路の磁気抵抗

S ; 断面積

Z_1 ; 測定用プローブ(ストレステスタ)のインピーダンス

Z_2 ; 補償用プローブのインピーダンス

Z_3 ; } ブリッジ対辺のインピーダンス

Z_4 ; }

Z_L ; 不平衡電流指示計器の内部抵抗

μ ; 透磁率

ϕ ; 磁気回路に流れる磁束

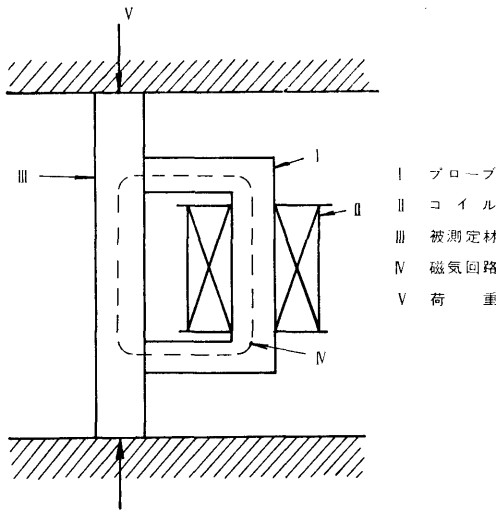


図-2.1 測定原理図

2.2.2 測定原理

図-2.1 に示すように、被測定材の表面に、コの字形の高透磁率の材料にコイルを巻いたプローブを当てると、閉じた磁気回路ができる。コイルに電流を流すと磁界を生じる。この磁界の中で強磁性体である被測定材に力を加えると、磁気ひずみ効果により、透磁率が変化する。透磁率と、プローブに巻かれたコイルのインピーダンスとの関係は、次のように求められる。

図-2.1 に示す磁気回路において、漏れ磁束がないと仮定すると、磁気回路に流れる磁束 ϕ は

$$\phi = \frac{Ec}{2\pi f c N} \quad \dots\dots(2.1)$$

一方、測定用プローブおよび、被測定材の磁気抵抗を、 R_s , R_m とすれば、

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_s S_s}, \quad R_m = \frac{l_m}{\mu_m S_m} \quad \dots\dots(2.2)$$

$R = R_s + R_m$, $\phi = NI_c / R$ であるから

$$\phi = \frac{NI_c}{l_s / \mu_s S_s + l_m / \mu_m S_m} \quad \dots\dots(2.3)$$

測定用プローブのインピーダンスを Z_1 とする。 $Z_1 = Ec / I_c$ であるから、式 (2.1), (2.3) より

$$Z_1 = \frac{2\pi f c N^2}{l_s / \mu_s S_s + l_m / \mu_m S_m} = 2\pi f c N^2 \cdot \frac{\mu_s \cdot \mu_m \cdot S_s \cdot S_m}{\mu_m S_m l_s + \mu_s S_s l_m} \quad \dots\dots(2.4)$$

被測定材に力が作用したとき変化するののは被測定材の透磁率 μ_m のみである。この変化を $\Delta\mu_m$ とすれば、測定用プローブのインピーダンス Z_1 の変化分

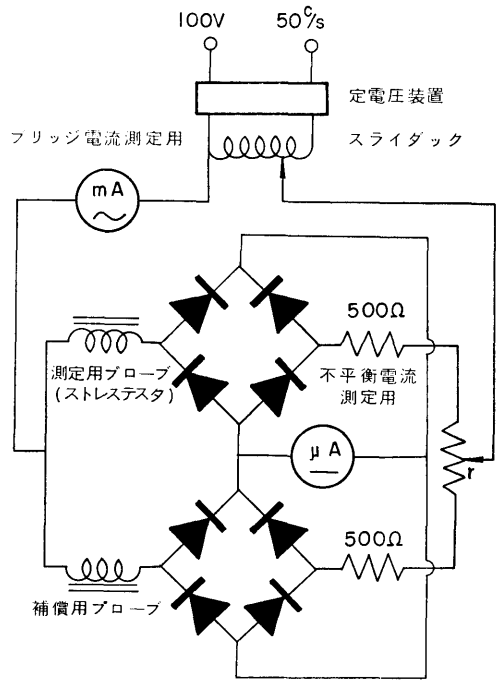


図-2.2 測定回路(I)

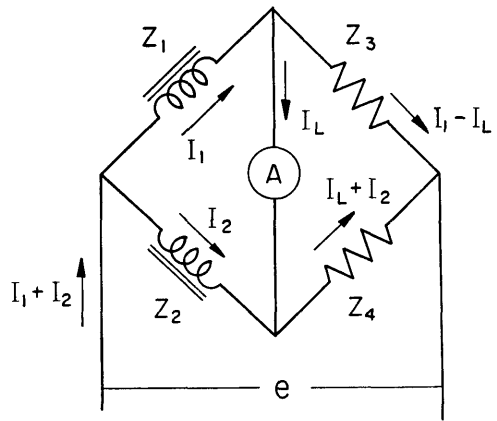


図-2.3 交流ブリッジ

ΔZ_1 は、 $\Delta\mu_m$ が小さいときには、

$$\Delta Z_1 = 2\pi f c N^2 \cdot \frac{\mu_s^2 \cdot S_s^2 \cdot S_m \cdot l_m}{(\mu_m S_m l_s + \mu_s S_s l_m)^2} \cdot \Delta\mu_m \quad \dots\dots(2.5)$$

上式より、インピーダンスの変化は透磁率の変化に比例していることがわかる。

ゆえに、被測定材に力が加わると、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。したがって、プローブに巻かれたコイルのインピーダンスが変わることがいえる。

図-2.2は、測定回路⁽⁴⁶⁾を示す。この回路を図-2.3のような簡単な回路におきかえて考える。測定用プローブのインピーダンス Z_1 が変化すると、ブリッジの平衡状態が破れて不平衡電流が生じる。この不平衡電流を I_L とし、電流計(A)の内部抵抗を Z_L とすると、Kirchhoff の法則より、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} Z_1 I_1 + Z_3 (I_1 - I_L) &= e \\ Z_1 I_1 + Z_L I_L - Z_2 I_2 &= 0 \\ Z_3 (I_1 - I_L) - Z_4 (I_2 + I_L) &= 0 \\ -Z_L I_L &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.6)$$

式(2.6)を I_L について解くと、

$$I_L = \frac{(Z_1 Z_4 + Z_2 Z_3)(I_1 + I_2)}{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)Z_L + (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}$$

いま、 $Z_3 = Z_4$ 、 $Z_2 = Z_1$ 、ブリッジ電流 $I = I_1 + I_2$ の時に、測定用プローブのインピーダンス Z_1 が、 ΔZ_1 だけ変化して $Z_1 + \Delta Z_1$ になったとすると、

$$I_L = \frac{\Delta Z_1 \cdot Z_4}{(2Z_1 + 2Z_4 + 4Z_1)Z_L + 2Z_4 \cdot (2Z_1 + \Delta Z_1)} \cdot I \dots\dots(2.7)$$

$$\frac{I_L}{I} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_L}{Z_1} \left\{ \frac{Z_1}{Z_4} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right) + 1 \right\}^* \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)}} \dots\dots(2.8)$$

ここで $Z_L/Z_1 \approx 0$

$$\frac{I_L}{I} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1}} \dots\dots(2.9)$$

$Z_1 \gg \Delta Z_1$ の範囲では

$$I_L = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \cdot I \dots\dots(2.10)$$

式(2.4)、(2.5)より、

$$\frac{\Delta Z_1}{Z_1} = \frac{\mu_s \cdot S_s \cdot I_m \cdot \Delta \mu_m}{(\mu_m \cdot S \cdot I_s + \mu_s \cdot S_s \cdot I_m) \mu_m} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_m}} \cdot \frac{\Delta \mu_m}{\mu_m} \dots\dots(2.11)$$

ゆえに、式(2.10)、(2.11)より

$$\frac{I_L}{I} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_m}} \cdot \frac{\Delta \mu_m}{\mu_m} \dots\dots(2.12)$$

(10)

式(2.12)より不平衡電流 I_L を測定すれば被測定材の透磁率の変化 $\Delta \mu_m$ を求めることができる。このことから、不平衡電流を測定すれば、磁気ひずみ効果の逆効果により、被測定材に加えられた力を見出すことができるわけである。また、式(2.12)より電流の変化の割合が、透磁率の変化に比例し、 R_s/R_m を小さくするようにとれば感度がよくなることもわかる。以上に述べたことから、図-2.1に示すように、コの字型のプローブを被測定材に当てると、磁気ひずみ効果の逆効果を用いて被測定材に加えられた力を求めることができる。

2.3 測定装置

2.3.1 ストレススタ

測定装置は、この実験の特徴の一つでもあるが、非常に簡単で、二つのプローブ(測定用プローブと補償用プローブ)と、測定回路のみである。

測定用のプローブをストレススタと名づける。被測定材の上にストレススタを置いた写真を写真1に示す。補償用のプローブについても、寸法、その他、ストレススタと全く同じものである。

(i) ストレススタの設計

磁気回路の磁気抵抗 R は、 $R = R_s + R_m = l_s / \mu_s S_s + l_m / \mu_m S_m$ 被測定材の応力は μ_m だけを変化させるので、ブリッジで検出される磁気抵抗の変化 $\Delta R/R$ は

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_m}{R} = - \left(\frac{\Delta \mu_m}{\mu_m} \right) \left(\frac{R_m}{R} \right) \dots\dots(2.13)$$

すなわち、ストレススタの感度を大きくするためには、ストレススタの磁気抵抗 R_s を被測定材の磁気抵抗 R_m に比して小にし、同時に磁気ひずみ感度 $\Delta \mu_m / \mu_m$ を大きくすればよい。このことは、式(2.12)から得られたことと同じである。

磁気ひずみ効果は、磁束密度の低いところでは小さいので、ストレススタは、被測定材に高い磁束密度を与える必要がある。それゆえ、スタ(以後単にスタと記した場合はストレススタのことである)の材料としては、高磁束密度において、高透磁率 μ_s を有するものをえらばなければならない。

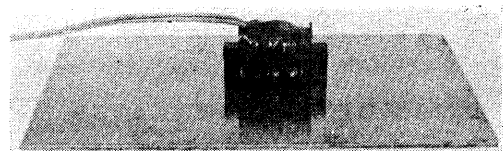


写真-1 ストレススタ

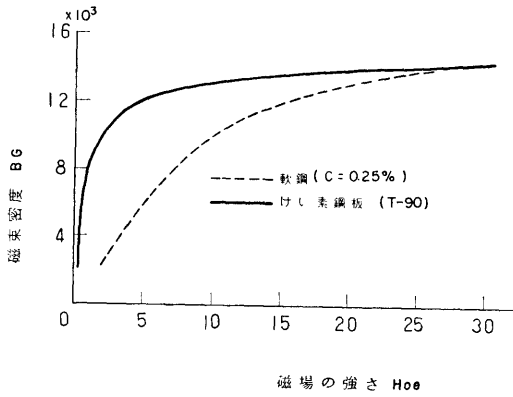


図-2.4 軟鋼とけい素鋼板のB-H曲線

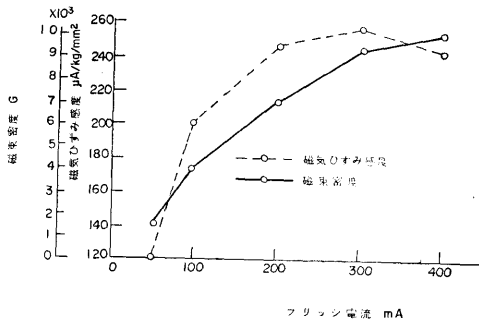


図-2.5 ブリッジ電流と磁束密度および磁気ひずみ感度の関係

一例として、この章で使用した、写真-1に示すような標準テストIで、軟鋼を測定する場合を考えてみる。

図-2.4は、このテストの材料である、けい素鋼板⁽⁴⁷⁾と、被測定材の軟鋼のB-H曲線である。

磁気抵抗を小さくするためには、透磁率 $\mu = B/H$ が大でなければならない。図-2.4の6~8 KGのところでは、けい素鋼の透磁率は、軟鋼の透磁率の約8倍になっている。しかし、磁束密度Bが大きいところでは、この二つの透磁率の比は、次第に小さくなり、12 KGでは約3倍になってしまっている。一方、磁気ひずみは、磁界の低いところでは、起りにくいので、結局Bが6~8 KGのところが一番よいといえる。

このテストを軟鋼の試験片に当てて電流を流し、電圧を測定すると、磁束密度Bは、漏れ磁束がないとすると、式(2.1)より

$$B = \frac{Ec}{2\pi f c \cdot S \cdot N} \quad \dots\dots(2.14)$$

表-2.1 ストレステストの寸法と巻数

寸法および巻数	標準テストI	正方形テスト	標準テストII	長方形テスト	小形テスト
S mm	10	10	5	5	3
L mm	10	60	20	10	10
A mm	20	20	15	20	15
L mm	60	60	25	20	12
S mm ²	100	600	100	50	30
総巻数	1,600	1,600	600	400	240
1cm当りの巻数	400	400	400	400	400

式(2.14)から求めたBと磁化電流(ブリッジ電流)との関係を、図-2.5に示す。

また、図-2.5の破線に示すように、一定の応力の下におけるブリッジの不平衡電流は、磁化電流の関数として得られるが、この曲線では、磁化電流が200~300 mAの間が最も磁気ひずみ感度が大きくなっている。

さらに、図-2.5からこの場合のBは7~9 KGになっていることがわかる。これは、前に軟鋼とけい素鋼のB-H曲線から推定した値(6~8 KG)とほぼ一致している。そこで、この標準テストIを使用した、この章の実験では特に定めた場合をひぞいて磁化電流は300 mAとした。

以上のことから、テストを設計するときは磁束密度の低いところでは、磁気ひずみは、小さいので、高磁界において、高透磁率を有する材料を用い、磁気ひずみ感度 $\Delta\mu/\mu$ ができるだけ大となるような磁界であることと同時に、 R_s を R_m にくらべて小さくするため、テストの材料と被測定材のB-H曲線から μ_s/μ_m が大となる最適の磁場を被測定材に与えなければならない。

この最適の磁場を与えるためにテストの寸法、コイルの巻数等を考慮しながらテストを製作すればよいのである。

(ii) ストレステストの作製

この実験で使用したストレステストは、表-2.1に示す。ここでは、一例として、この章で使用した、標準テストIの作製について説明する。

(1) ストレステストは、高磁界において高透磁率を有する材料が最適なので、パーマロイなどよりも、図-2.4に示すけい素鋼板⁽⁴⁷⁾(八幡T-90)を用いる。

(2) 熱処理をすると磁束密度が増大するので⁽⁴⁸⁾け

い素鋼板を850°Cで1時間焼なましをし、これを積層して、アラルダイトで接着して作った。

(3) テスタの寸法であるが、 R_s を R_m にくらべて、小さくするためには、テスタの高さを小にしなければならない。しかし、 h を小にすると、コイルを巻くスペースが少なくなる。これをおぎなうために、コイルの巻線の径を小さくすると、流す電流を小にしなければならない。これらの事を考えて寸法を表-2.1のように決定した。

(4) 図-2.1のような磁気回路の磁界の強さ H は、簡単に考えると $H=0.4\pi ni$ とみなすことができる。ここに、 i は回路に流す電流 A 、 n は単位長さ当りの巻数である。しかし実際には、被測定材とテスタの材質の異なることや、漏れ磁束があることなどより、 H の値はこの式で得られる値よりもはるかに大きい値が必要である。しかし、この式をみればわかるように、いま、 $n=400$ 回と定めて、 i を500mA~10mAまで変化させると、 H は、 $250O_e \sim 5O_e$ まで変えることができる。ここで500mAとは0.29mmφのホルマル線に、数分間電流を流すための最大の電流容量であり、0.29mmφ以上の太さのホルマル線では、(3)で定めたスペースの関係から、 $n=400$ 巻くことはできない。

(5) 以上のようにして作製したストレステスタを被測定材にあて、磁化電流を変化させて、 E_c を求め、式(2.14)より、 B が6~8KGになるように磁化電流を決定すればよい。

このテスタでは、300mAとなり、前項でも述べたが図-2.5に示すように、実験結果と一致した。

次に、このテスタの直流抵抗、インピーダンス、リアクタンスを測定する。この標準テスタIを試験片上に当てて測定した場合、インピーダンスは265Ω、リアクタンスは256Ω、直流抵抗は24Ωであった。

写真-2にこの論文で使用したすべてのテスタを示す。左より、標準テスタI、正方形テスタ、標準テスタII、長方形テスタ、小形テスタの順である。図-2.6と表-2.1には、これらのテスタの寸法とコイルの巻数を示す。

2.3.2 測定回路

図-2.7は、測定回路の原理図である。ブリッジ回路の一辺にストレステスタが接続され、補償用プローブは反対の辺に接続されており、二つの抵抗 R と共にブリッジを作っている。 r はブリッジのバランスをとるための可変抵抗である。

(12)

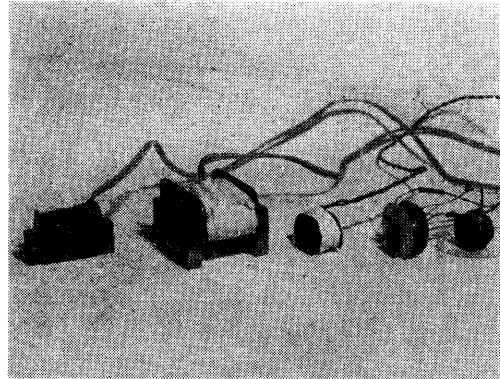


写真-2 各種ストレステスタ

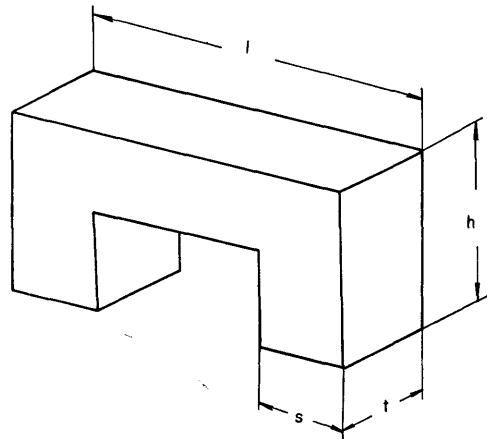


図-2.6 プローブの寸法

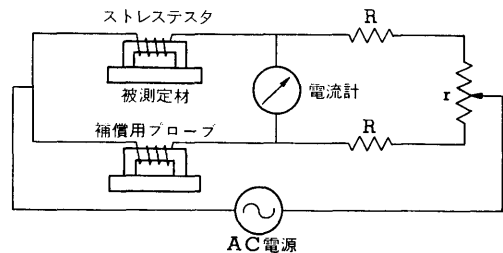


図-2.7 ブリッジの原理図

図-2.2は実際に使用した回路である。このブリッジの特徴は、(1)バランスが非常にとり易い。(2)正負弁別ができる。(3)温度変化による零点の変動が少ない。等である。

この測定回路において、ブリッジ抵抗と感度との関係を考えてみる。

式(2.7)において、 $Z_1 \gg \Delta Z_1$ として、分母の ΔZ_1 を省略すると

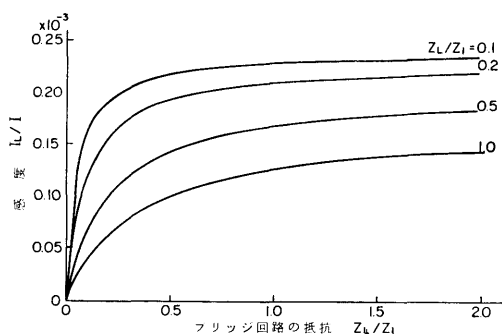


図-2.8 ブリッジ回路の抵抗一感度曲線

$$I_L = \frac{\Delta Z_1 \cdot Z_4}{2 \cdot (Z_1 + Z_4) Z_L + 4 Z_1 Z_4} \cdot I$$

$$= \frac{\Delta Z_1 / Z_1 \cdot Z_4 / Z_1}{2(1 + Z_4 / Z_1) \cdot Z_L / Z_1 + 4 \cdot Z_4 / Z_1} \cdot I$$

……(2.15)

$\Delta Z_1 / Z_1 = 1\%$ として、 Z_L / Z_1 をパラメータとした Z_4 / Z_1 と I_L / I の関係を求めると、図-2.8 となる。この図からわかるように、ブリッジ電流 I と Z_1 を一定にすると、ブリッジ抵抗 Z_4 の大きい程感度がよく、また、指示計の内部抵抗 Z_1 が低い程感度が良いということがわかる。しかし、ブリッジ抵抗を大にすると、同一電流を流すためには、電源電圧を上げねばならない。

また、図-2.8 からわかるように $Z_4 / Z_1 = 1.0$ 以上では、この曲線はやや飽和に近く、抵抗の増加に比べて、感度の増加は僅少なので、内部抵抗の低い指示計を使用して、ブリッジ抵抗 Z_4 は、ストレススタのインピーダンス Z_1 と等しい、すなわち、 $Z_1 = Z_4$ となるような固定抵抗を用いて、ブリッジを作っている。

つぎに、この測定回路の、この実験の場合の非直線性を求める。

いま、被測定材の透磁率が μ_m のときの磁気抵抗を R_{m0} とし、 μ_m が $\mu_m + \Delta\mu_m$ に変化したときの磁気抵抗を R_m とすれば

$$R_m = R_{m0} \cdot \frac{\mu_m}{\mu_m + \Delta\mu_m} \quad \dots\dots(2.16)$$

また、 R_s の値は変化しないので R_{s0} とおき、式(2.11)に、式(2.16)を代入すると

$$\frac{\Delta Z_1}{Z_1} = \frac{1}{1 + \frac{R_{s0}}{R_{m0}} \left(1 + \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m}\right)} \cdot \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m} \quad \dots\dots(2.17)$$

$Z_L / Z_1 = 0$ なので式(2.17)を式(2.9)に代入すると、

$$\frac{I_L}{I} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{s0}}{R_{m0}} \left(1 + \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m}\right)} \cdot \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m}$$

$$\cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + \frac{R_{s0}}{R_{m0}} \left(1 + \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m}\right)} \cdot \frac{\Delta\mu_m}{\mu_m} \right\}}$$

……(2.18)

いま、 $I_L / I = y$ 、 $\Delta\mu_m / \mu_m = x$ 、 $R_{s0} / R_{m0} = k$ とおくと、式(2.18)は

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{2 \cdot \{1 + k(1+k)\} + x} \quad \dots\dots(2.19)$$

磁束は、試験片の表面に多く流れ、その深さ方向の浸透深さは、表皮効果⁽⁴⁹⁾が働くために交番磁界の周波数によって変わってくる。例えば、50Hzの交番磁界の場合には、この表皮効果のために、1.5mm以上内部は、磁束が浸透しない。式(2.2)より k を求めると、

$$k = \frac{R_{s0}}{R_{m0}} = \frac{l_s}{l_m} \cdot \frac{\mu_m}{\mu_s} \cdot \frac{S_m}{S_s} \quad \dots\dots(2.20)$$

ここで標準テスト I を使用して、軟鋼板に当てた場合を考える。たとえば $\mu_m / \mu_s = 1/6$ とおき、磁束は表面に拡がるので、 $S_m = 1 \times 0.15 = 0.3 \text{ cm}^2$ とすると、 $k = 1.8 \times 1/6 \times 0.3 = 0.1$ となる。これを式(2.19)に代入すると

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{2.2 + 1.2x} = \frac{1}{4.4} \cdot \frac{x}{1 + 0.54x}$$

$$= \frac{x}{4.4} (1 - 0.54x + \dots\dots) \quad \dots\dots(2.21)$$

この実験では、 $I = 300 \text{ mA}$ で、 I_L の値は、被測定材の応力が、 15 kg/mm^2 以内(弾性域内)では、だいたい 3 mA を越えない。(§2.4参照)そこで、 $y = I_L / I = 1/100 = 1\%$ とする。式(2.21)に於て第二項が零ならば、非直線性はなくなる。

このとき、 $x = 0.044 = 4.4\%$ 、非直線性を求めると、 $0.54 \times 4.4 = 2.3\%$ となる。

また、この計算は、 $Z_L / Z_1 = 0$ として計積したが、これを省略しないで、すなわち、式(2.17)を、式(2.8)に代入して、非直線性を計算しても、3%以内となり、前の結果とほとんど変わらない。

2.4 基礎実験

磁気ひずみ効果を用いて初期応力を測定することが可能か否かを調べるために最も単純な単純圧縮の場合について実験を行った。

2.4.1 測定方法

まず簡単に、一般的な測定方法について述べる。

(1) 測定は、まず被測定材と同じ成分、同じ形状、

同じ加工，熱処理状態の試験片，数個のうちから，標準片，補償片をえらぶ。

(2) 被測定材および標準片，補償片の表面（ストレステスタの当る部分）を，ひずみゲージを貼る程度（0番のペーパーでみがいた程度）にみがく。

(3) 標準片にストレステスタを，補償片に補償用のプローブを当て，図-2.2に示す測定回路を使用して，磁化電流を流しブリッジのバランスをとる。

(4) 実際に，すでに力がかかっている被測定材にストレステスタを当て，その不平衡電流を測定する。

(5) 校正曲線を作るために，再び標準片と補償片で，ブリッジのバランスをとり，標準片に荷重をかけていき，出力-荷重曲線を求める。

(6) この校正曲線より，(4)で求めた不平衡電流に対する応力を求める。

標準片の代りに被測定材の切れはしが得られれば最もよい。また，被測定材の一部であきらかに無応力の場所があれば，そこにストレステスタを当て，補償片との間で，ブリッジのバランスをとると精度が多くなる場合が多い。

また，被測定材とテスタとの接触面は被測定材も標準片，補償片ともに同じ仕上げ程度であることが必要

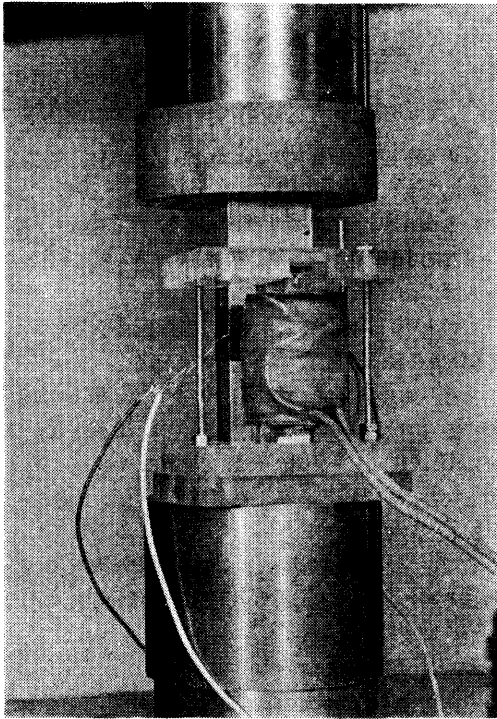


写真-3 ストレステスタによる垂直面の測定

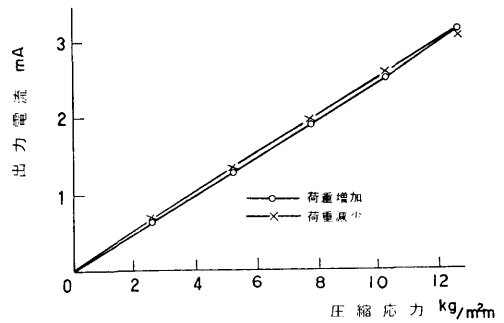
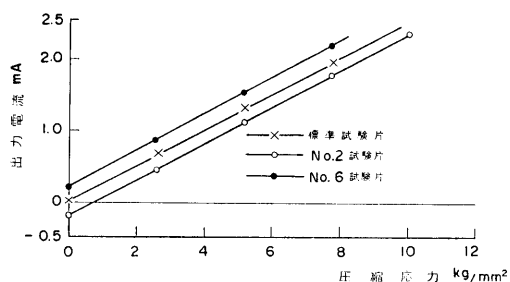


図-2.9 出力曲線

である。そしてアセトンその他で接触面をふき，異物が入らないようにする。テスタに，磁化電流を流すとテスタ自身が電磁石のようになり被測定材に吸着するので，通常は接触圧力としてはこの吸引力を利用するだけで十分である。垂直面の測定を行うときは，自重（標準テスタ I は 200 g）のために接触が不安定になるので，写真-3 に示すような非磁性体（写真-3 ではベークライト）の支持台で自重を支えてやる必要がある。

つぎに，校正曲線について述べる。標準片にストレステスタを当て，補償用プローブとでブリッジの零バランスをとって，標準片に万能試験機で荷重をかけてゆく。試験片と試験機の間を磁氣的に絶縁するために試験片の上下に黄銅製の台座をおく，標準片に純粋な圧縮応力を与えるということは困難なので，試験片（長方形）の両面にストレステスタを当て，その平均の値を出力とした。また，抵抗線ひずみゲージも試験片の両側に貼り，テスタと同時に測定をおこなった。図-2.9 は校正曲線の一例で，1%程度のヒステリシスはあるが，殆んど完全な直線となっている。使用した試験片は，寸法 $100 \times 30 \times 13$ mm の S25C 材で，均一な成分を持ち，均一に熱処理したと思われる一本の丸棒から削り出されたグループ（これを第一種試験片とよぶ）と同じ製法で同時に作られ，同じ成分，同じ熱処理した数個の丸棒（例えば，S25C と指定して一度に購入したもの）から削り出されたグループ（第二種試験片）の 2 種類である。

使用したテスタは，標準テスタ I（単軸用）を用い磁化電流は 300mA 一定とした。まず，第一種試験片 11本のうち，一本を補償片として他の 10本の試験片の出力-荷重曲線を求めた。つぎに，初期応力を測定する場合を考えて，10ヶの試験片のうち，最も標準的な出力特性を持つ試験片を標準片として，補償片との間



図—2.10 出力—応力曲線の平行移動

で磁化電流 300mA を流してブリッジのバランスをとる。そして、他の 9 本の試験片のうちの 1 本に、万能試験機で、一定荷重をかけ（たとえば 1 ton）、ストレステスタを標準片から離して、この試験片に当て、磁化電流 300mA を流して、その不平衡電流を測定する。つぎに、テスタを標準片に戻し、荷重を 2 ton にして、再びテスタを当て、電流を流して、その不平衡電流を測定する。以下同じことをくりかえす。このとき、時々電源電圧、その他の変化をチェックするために、標準片上でバランスを取り直す。このようにして求めた出力曲線の例を図—2.10 に示す。この図において、試験片 No. 2 試験片 No. 6 というのが、以上述べたようにして測定した例である。標準片とは標準片の校正曲線を示している。つぎに、第二種の試験片についても、これと同じ実験をおこなった。

2.4.2 実験結果

(i) 出力特性

この測定において測定誤差のうち、最も大きいと思われるものは、つぎの(1)と(2)である。

(1) 実験の性質上、被測定材の代わりに標準片で校正曲線を作らなければならない。同じ形状、同じ熱処理状態の試験片間の磁気ひずみのばらつきが誤差となる。

(2) 本実験では、まずはじめに、ブリッジのバランスをとる場合にも被測定材の代わりに標準片でバランスをとらねばならないので、標準片と被測定材の零点の値のちがいが誤差となる。

そこで、第一種の試験片 10 本を使用して、磁気ひずみ感度のばらつきをしらべた。この実験は圧縮試験であるので、試験片の表と裏に貼ったひずみゲージの平均の値をその試験片のその部分の応力とみなす。また、同時にストレステスタを試験片の表に当てた時の値と裏から当てた時の値の平均値を求め、前述のひず

表—2.2 磁気ひずみ感度のばらつき

試験片 No.	S_r				
	1.28	2.56	5.13	7.19	10.25
1	1.018	1.050	1.042	1.033	—
2	0.900	0.938	0.939	0.920	0.939
3	—	0.981	0.972	0.939	0.949
4	1.021	1.006	0.959	0.952	0.962
5	—	1.036	0.973	0.969	0.970
6	—	1.055	1.047	1.036	—
7	0.908	1.045	1.075	0.975	—
8	—	1.002	1.052	0.982	—
9	1.020	1.060	1.110	1.055	—
10	—	1.006	1.060	1.055	—

みゲージによる値との比を求める。さらに、この比の値の 10 本の試験片の平均値からの誤差を求めた。これを表—2.2 に示す。この数字が磁気ひずみ感度のばらつきを示している。すなわち、

$$S_r = \frac{\text{ストレステスタの値}}{\text{ひずみゲージの値}} \div \frac{1}{n} \sum \text{テスタの値} / \text{ゲージの値}$$

ここに、 S_r は比磁気ひずみ感度、 n は実験データの総数である。このばらつきは、約 ±6% (標準偏差) である。この磁気ひずみ感度のばらつきは第二種の試験片でも殆んど変わらなかった。

次に、零点の値 [標準片と補償片とでブリッジのバランスをとり、その後、テスタを他の試験片 (no load) に当てた値] のばらつきを多くの試験片についてしらべた。その結果、第一種の試験片では、ばらつきは応力に換算すると 0.6 kg/mm^2 (標準偏差) フルスケールの ±5.5%、第二種の試験片で、 $1.2 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$ 、フルスケールの ±10% ~ ±16% となった。この零点の値のばらつきの原因は、同じ材質でも、炭素、けい素などの含有量のわずかなちがいや、材質の粒度、組織のちがひ、および、試験片の表面とテスタとの接触の状態などのわずかなちがひによると思われる。

図—2.10 は、前項で述べたように、標準片を使用した校正曲線と、この標準片でバランスをとり、すでに荷重のかかっている試験片にテスタを当てて求めた出力—応力曲線の一例で、この図からわかるように、零点の値の影響は荷重をかけていっても、零バランスをとった荷重曲線の値 ± 零点の値、で平行移動をしている。

ゆえに、全体としての真の応力の式は、次式となる

$$\sigma = (1 \pm 0.06) \sigma_0 \pm (0.6 \sim 2) \text{ kg/mm}^2 \quad \dots\dots (2.22)$$

ここに、 σ_0 は出力電流に相当する校正曲線上の応

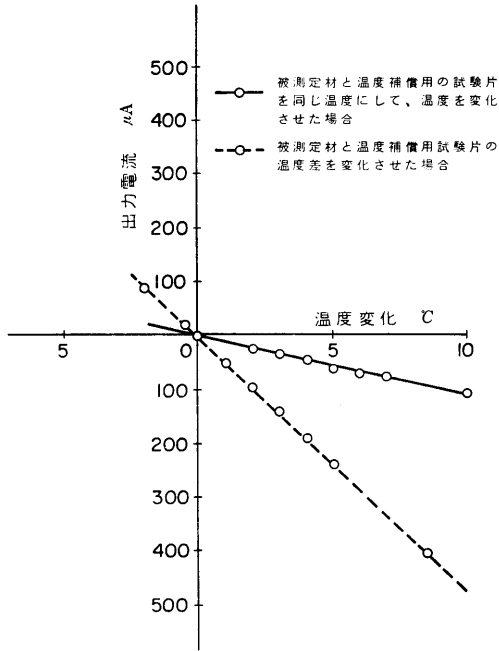


図-2.11 温度特性

力の値で第二項は、第一種試験片の場合は 0.6kg/mm^2 、第二種試験片のときは、 2kg/mm^2 を使用すればよい。

また、被測定材に、明らかに無応力と思われる部分があり、標準片を使用せずに、この点と測定点との間に零バランスがとれる場合には、零点のバラツキは小さくなり、 0.6kg/mm^2 をとれば十分である。

(ii) 温度の影響

この測定は、原則として、温度補償用試験片を被測定材と同じ温度にしておこなうのであるが、この場合には、温度のゼロドリフトは、応力に換算して $0.05\text{kg/mm}^2/^\circ\text{C}$ 、フルスケールに対して $0.4\%/^\circ\text{C}$ であった。実際に測定する場合と、校正曲線を作る場合の温度のちがいは、これで補正してやればよい。また、被測定材の補償用試験片の温度が異なる場合、すなわち、被測定材のみを加熱した場合の零点の変化は、応力に換算して $0.19\text{kg/mm}^2/^\circ\text{C}$ フルスケールの $1.6\%/^\circ\text{C}$ である。図-2.11で実線の場合は、同じ温度にした場合、点線は被測定材のみを加熱した場合である。抵抗線ひずみゲージの抵抗温度係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、とくらべてみると、この実験は、試験片には軟鋼を使用しているので、だいたい同じと考えてよい。

(iii) 測定点近傍の強磁性体の影響

(16)

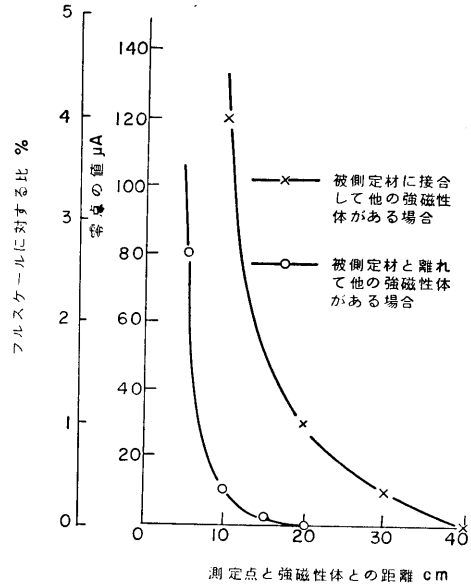


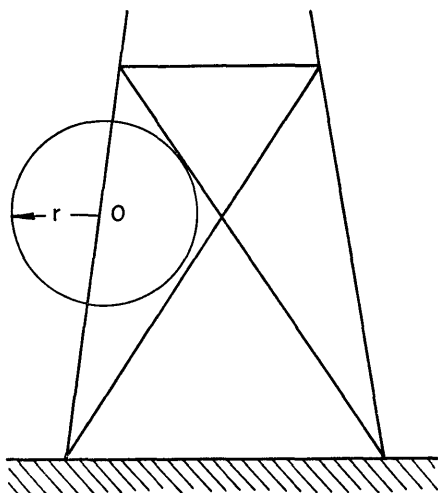
図-2.12 近傍の強磁性体の影響

鋼材鋼板の応力を測定するとき、測定点の近くに他の強磁性体がある場合、これらの鋼材のストレススタにおよぼす影響（零点の値に対する影響）をしらべた。

実験は十分に広い鋼板 ($500 \times 500 \times 3$) または、長い鋼材 ($1000 \times 30 \times 13$) の中央にテストを当て、磁化電流 300mA を流しブリッジのバランスをとってのち十分に大きな鉄片 ($300 \times 300 \times 100$) を測定鋼板に接合して近づけていく場合と、測定鋼材とは離れて鉄片を近づけて行く場合について実験し、その零点の変化をしらべた。これが図-2.12である。この図からわかるように、測定材と離れて強磁性体があるときは 10cm 以上また、測定鋼材に接合して他の鋼材がある場合でも 20cm 以上離れているときには、標準テスト I (単軸用) で磁化電流 300mA 流して測定する場合には、影響は殆んどないといってよい。またこのことは、測定点から 20cm 以上離れたところでは、鋼材はどんな形をしていてもよいということになるので、長い鋼材、広い鋼板を測定する場合でも、その補償用、標準用の試験片としては、図-2.13のように、測定点を中心に半径 20cm の球面内と同じ形のものを作って校正曲線を作ればよいということがわかった。

(iv) 試験片形状の影響

標準片、補償片を作る鋼材鋼板の厚さは、被測定材と、どれくらいの誤差が許されるかをしらべた。図一



O; テスタの測定位置

図-2.13 磁束の影響する範囲

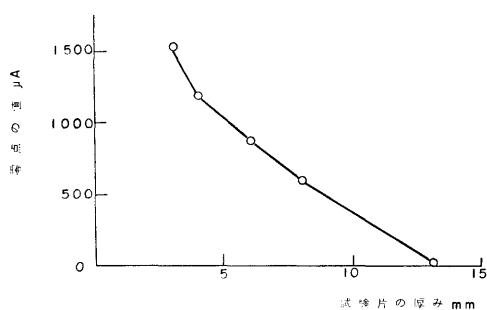


図-2.14 試験片の厚みの零点の値におよぼす影響

2.14は、13mmの厚さの試験片を標準片および補償片としてバランスをとり、幅および長さは同じで厚さだけ異なる試験片にテストを当てたときの零点の値で、厚さが10%変化しても、その影響は応力に換算して 0.3kg/mm^2 しか変動しないことがわかった。また、磁束は、表皮効果のため、あまり深く浸透しないと思われるが、文献(49)によると、磁束の浸透する深さは次式で計算される。

$$S = \frac{5030}{\sqrt{\mu \cdot f / \rho}} \quad \dots\dots (2.23)$$

ここに、 ρ は被測定材の固有抵抗 $\Omega \cdot \text{cm}$ 、 f は磁化電流の周波数 Hz、 μ は透磁率、 S は磁束の浸透する深さ cmである。この実験の場合は、被測定材は軟鋼であり、周波数は50Hzであるから、 $\rho = 10 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $\mu = 300$ とすると S は約1.3mmとなる。実際に厚さ

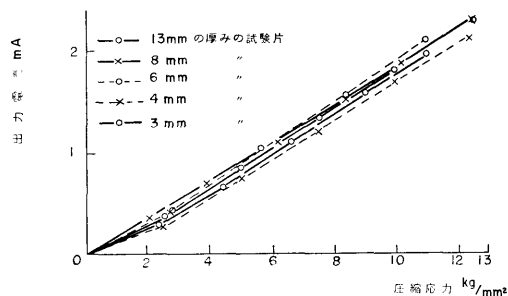


図-2.15 厚さの異なる試験片の出力-応力曲線

を変えて実験した結果を図-2.15に示す。この図からもわかるように、応力が一定の場合、3mmまでの厚さの試験片では磁気ひずみ感度は殆んど変わらない。このことは、式(2.23)から計算した結果や§4.3.1の実験とも一致する。

つぎに、試験片の幅の影響をみるために、試験片(100×30×13)の中央でバランスをとって置いて、テストを左右に少し動かしてみる。

その結果、幅の約±5%左右に動かしても、零点の変化は殆んど無視できる程小さいが、試験片の端に近づくると急激な変化をする。また、テストを試験片の前後にうごかしてみるとやはり左右と同じように、試験片の長さの約±5%前後にうごかしても、端の影響はまったくない。これらの事については、§2.6その他で詳しく述べる。

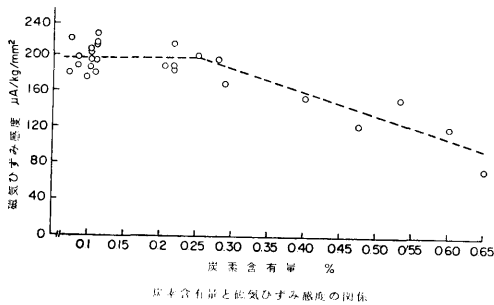
以上のことから、標準片、補償片を作るときには、あまり厳密に、被測定材と同じ寸法に作る必要はなく、長さ、幅、厚さともに、±5%ぐらいの誤差はあってもよいという事がわかった。ただし、厚さが3mmより薄い場合、長さ、幅がテストの寸法の1.5倍以下の場合には、磁束分布からみても正確に作らなければならぬ。

2.5 磁気ひずみ感度に影響を及ぼす因子

前節において述べたように、この測定法では、被測定材と標準片、補償片の磁気ひずみ感度のちがいが非常に大きな問題となる。この節では、磁気ひずみ感度に影響を及ぼすと思われるすべての因子について実験した。

2.5.1 感度と金属成分の関係

磁気ひずみ感度は、鋼材の金属成分により異なるが、そのうちでも炭素の含有量の多少が最も影響する。これを調べるために同じ形状(100×30×13)、同じ加工、熱処理状態で、炭素の含有量の異なる20本の



図—2.16 炭素含有量と磁気ひずみ感度の関係

試験片を用いて、磁気ひずみ感度をしらべ、その分析結果と比較した。その結果を図—2.16に示す。炭素量が増加すると0.1%当り約 $25\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$ 磁気感度は低くなる。この傾向は、炭素の含有量が0.25%をこえと特に著しい。フェライト相にくらべパーライト相は磁氣的に硬い（透磁率小、保磁力大）ので、鋼材はフェライト相が多い程磁気ひずみ感度が大きいと思われる。鋼材の炭素量が増加すると、亜共析鋼ではフェライトの量が減じパーライトの量が増加してくる。また、過共析鋼では、フェライトがなくなり、パーライトの周壁に遊離セメントイトが現われてくる。いづれにしても、炭素量がふえると、フェライト相の占める割合が下り、このため、磁気ひずみ感度が低下するものと思われる。しかし、炭素量が0.07~0.25%ぐらいまでは、磁気ひずみ感度はある傾向は示さずほぼ一定であることが図2.16からわかる。これは一般に、よく使用される軟鋼の範囲では、磁気ひずみ感度は炭素量のわづかな変化では、あまり影響がないということで、この実験にとっては、好都合である。

炭素以外の成分は、いわゆる一般の炭素鋼 (S_2 : 0.4以下, Mn : 0.9以下, P : 0.05以下, S : 0.06以下) においては、磁気ひずみ感度に及ぼす影響は非常に少ない。けい素は他の成分にくらべるとやや影響があるようである。表—2.3からわかるように炭素の含有量が同じ場合には、けい素の大きいものほど磁気ひずみ感度が大きい。これは、けい素鋼が一般炭素鋼より透磁率が大きいことから想像できる。しかし、これは定性的に云えるだけであって、磁気ひずみ感度に及ぼす影響はけい素の含有量などより他に大きい因子が多くある。一般的に云って、炭素鋼では、金属成分では、炭素の含有量だけが影響すると思えてよいと思う。

2.5.2 感度と熱処理との関係

(18)

表—2.3 化学成分の磁気ひずみ感度に及ぼす影響

試験片 板	C %	Si %	Mn %	S %	感 度 $\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$
21	0.25	0.32	0.38	0.017	262
22	0.28	0.41	0.44	0.021	243
23	0.28	0.25	0.58	0.018	207
24	0.22	0.32	0.38	0.018	269
25	0.21	0.24	0.45	0.025	252
26	0.11	0.22	0.37	0.016	226
27	0.11	0.15	0.35	0.020	211

磁気ひずみ感度に影響を及ぼす大きな因子の一つに熱処理状態がある。ここでは、軟鋼の熱処理状態により感度がどのように変化するかを次の4つの場合について測定した。

(1) 低温焼鈍

主として残留応力を除去するためにおこなうが、ここでは変態点以下 $600\sim 650^\circ\text{C}$ に、1.5時間加熱した後炉中放冷した。

(2) 完全焼鈍

軟鋼は、熱処理したままでは、結晶粒が粗大で不均一なことが多いので、 A_3 変態点 (900°C) 以上に加熱して、均一なオーステナイト組織にしたのち徐冷して、均一なフェライトとパーライトからなる組織にし、内部応力を除去する。

(3) 球状化焼鈍

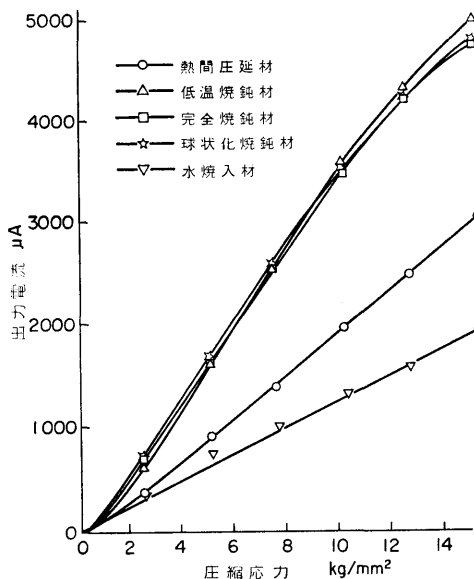
鋼のセメントイトを球状化して塑性加工、切削加工を容易にする。ここでは、 A_1 点 (730°C 附近) 以上に加熱して徐冷した。

(4) 焼入れ

鋼を高温から急冷して、 A_{r1} 変態を阻止して、硬度を増す操作を焼入れというが、ここでは、 850°C に加熱して、 12°C の水で焼入れをおこなった。

これらの実験の結果を図—2.17に示す。この図からわかることは、同じ熱処理状態では、磁気ひずみ感度の相異はわづかであるが、熱処理状態が異なると、感度が大きく異なるということである。熱間加工したままの材料を機械加工して作った試験片（末焼鈍材）の磁気ひずみ感度は $194\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$ であるが、低温焼鈍して加工ひずみを除去したものは、感度が約1.5倍に増加している。また、水焼入れをおこなうと、磁気ひずみ感度は大きく減少し末焼鈍材の約0.5倍まで下ってしまう。一方低温焼鈍、完全焼鈍、球状化焼鈍の間には感度の相違は見られない。

以上のことより、磁気ひずみ感度は、表面の残留応力にもっとも影響されるのではないかと思われる。末



図—2.17 熱処理の違いによる出力曲線

焼鈍材では、表面加工その他による多軸方向の正負の残留応力により磁束の流れがみだされ、感度が低い。これが、焼鈍により応力が除去されると障害がのぞかれ感度が上るものと思われる。そして、低温焼鈍と他の焼鈍との間に、感度の差がないことにより残留応力以外の違いは、あまり影響がないようである。しかし、焼入れの場合には、感度が非常に低下している。これは、金属顕微鏡でみると、全体にはパーライトであるが、マルテンサイトの部分がところどころに存在している。文献50によるとマルテンサイトの磁気ひずみ感度はフェライトの約1/10であり、パーライトを前項で述べたようにフェライトより感度が低いので、このように感度が低くなっている。

一般に、機械部品の実物測定をする場合、材質としては、未焼鈍材が多いのであるが、以上の結果からわかるように、熱処理による感度の相異が非常に大きいので、同じ熱処理をした材料で、校正曲線を作らなければならないという事がわかる。

2.5.3 感度と圧延方向の関係

圧延により炭素鋼の粒子が変形を受けると金属材料の透磁率が変わるため、磁気ひずみ感度が変わることが予測される。そこで、圧延方向と、これに直角方向に切り出された試験片(100×30×13)、20本を使用し、試験片の金属粒子の変形状態より圧延状態をしらべ、こ

表—2.4 圧延方向と磁気ひずみ感度

試験片番号	測定方向	伸展度 ϵ	磁気ひずみ感度 $\mu A/Kg/mm^2$
1	圧延方向	—	198
2	"	—	202
3	"	—	206
4	"	—	191
5	"	—	193
6	"	—	200
11	直角方向	—	199
12	"	—	180
13	"	—	193
14	"	—	201
21	圧延方向	1.02	226
22	"	0.97	213
23	"	0.96	225
31	直角方向	1.00	218
32	"	1.04	212
33	"	0.96	216
冷間圧延材 No.1	圧延方向	2.83	7.4(引張)
" No.2	直角方向	2.80	5.6(引張)

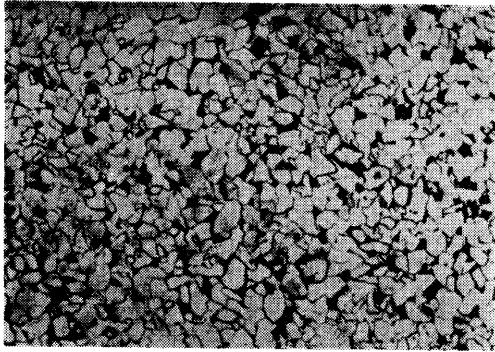
れと磁気ひずみ感度との関係を検討した。

圧延状態は、金属顕微鏡を用い試験片の表面と側面の結晶粒子の状態をしらべた。この方法は、結晶粒子の展伸された方向に直角(圧延方向と直角)な一定の長さ(たとえば、30mm)の線分により切断された結晶粒子の数を n_1 、結晶粒子の展伸された方向(圧延方向)に平行に同一長さ(30mm)の線分より切断された数を n_2 とすると、圧延された鋼材は、その粒子が圧延方向に押しつぶされ変形しているの、展伸度 ϵ は、 $\epsilon = n_1/n_2$ と表わすことができる。表—2.4 に測定した展伸度と磁気ひずみ感度の一例を示す。この表からわかるように、普通の鋼材は一般に熱間圧延されており、圧延終了温度は、約800°Cであり、これはA₂変態点をこえているため、圧延による粒子の変形がなくなり、この試験片のように、圧延方向と、これに直角方向との結晶粒子の数に差が出なかったわけである。したがって、圧延方向とこれに直角方向で、磁気ひずみ感度の差がほとんどあらわれなかったのだと思う。ただ、冷間圧延された試験片(引張片300×30×1.2)は、熱間圧延材とは全く異なり、試験片表面の顕微鏡写真の写真—4に示すように、圧延された方向に結晶粒が押しつぶされているのがわかる。したがって、展伸度も大きくなっており、磁気ひずみ感度も、圧延方向で異なっている。

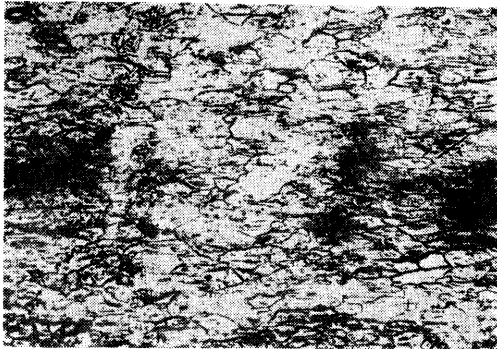
被測定材が冷間圧延材の場合には、それと同じ冷間圧延材で校正曲線を作ってやらなければならない。

2.5.4 感度と粒度との関係

磁気ひずみ感度に影響を及ぼすと思われる因子の一つに、低炭素鋼の常温におけるフェライト結晶粒の大きさによる違いをしらべてみた。



写真—4 (a)熱間圧延材の顕微鏡写真



写真—4 (b)冷間圧延材の顕微鏡写真

ここでは、第一種試験片20本を用いて、まずその磁気ひずみ感度を測定してのちその中央部、数ヶ所の顕微鏡写真(倍率100)を撮って、その粒度を比較法と切断法(J I S・G・0552)をもちいて調べた。その結果を表—2.5に示す。この表からわかるように、これらの試験片の金属成分による磁気ひずみ感度は\$2.5.1に述べたように、炭素の含有量が0.11~0.07ぐらいは一定であり、けい素による値も、これぐらいならば感度に差はない。次項にのべるが、これらの試験片も残留応力の値は一定と考えられるので、磁気ひずみ感度に影響を与えるものは、粒度が一番大きいと考えられる。この関係を図—2.18に示すが、粒度と感度とはほぼ比例している。これは、磁束が結晶粒子を通過する場合、粒界で一番磁気損失が多いと思われるので、粒度番号が小さいもの(一定区内に存在する結晶粒数が少ない)ほど磁気損失が少なく、したがって磁気ひずみ感度が大きいと考えてよい。

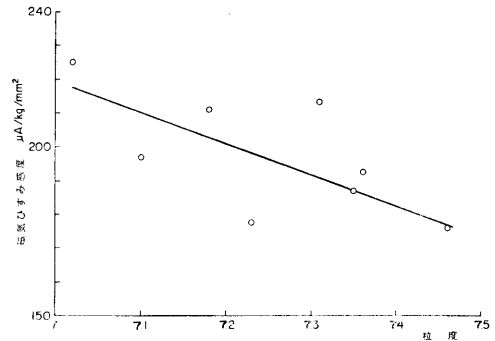
第一種試験片では、粒度の差は0.1~0.2粒度ぐらいであり、出力で、15~25 μ Aなので、この場合にはあまり粒度の事を考える必要はない。

つぎに、第二種試験片の実験および分析結果を表—

(20)

表—2.5 粒度と成分と磁気ひずみ感度の関係(第一種)

試験片番	粒度切断法(比較法)	C %	Si %	磁気ひずみ感度 μ A/kg/mm ²
63	7.46(7)	0.09	0.22	176
66	7.35(7)	0.08	0.25	187
72	7.36(7)	0.07	0.29	193
76	7.10(7)	0.08	0.24	197
83	7.23(7)	0.11	0.17	178
84	7.02(7)	0.11	0.22	225
94	7.18(7)	0.11	0.18	212
97	7.13(7)	0.11	0.15	213



図—2.18 粒度と磁気ひずみ感度の関係

表—2.6 粒度と成分と磁気ひずみ感度の関係(第二種)

試験片番	粒度	C %	Si %	磁気ひずみ感度 μ A/kg/mm ²
101	8.25	0.11	0.30	220
102	6.78	0.13	0.06	310
103	6.88	0.13	0.05	300
104	8.37	0.09	0.30	221
105	6.75	0.15	0.03	252

2.6に示す。これは、第一種試験片と異なり粒度が相当異なっている。Cも多少違うが、\$2.5.1に述べたように0.1%近傍では感度に対する影響は少ないと考えてよいので、この表の感度のちがいは、粒度による差と考えてよい。この結果も、No.105試験片以外は粒度と感度は比例しており、試片の数が少ないので、断定的なことは云えないが、一粒度当り50~60 μ Aぐらい感度が減少する。No.105は粒度の割に感度がひくいのは炭素が少し多く、けい素が非常に少ないことも原因の一つだと思われる。

結論としては、第一種試験片のように同じ製法で作られ、同じ熱処理状態の試験片では、粒度も0.1~0.2ぐらいしか変わらないので問題にする必要はないが製法の不明な試験片では、精密測定をする場合は、金属成分だけでなく粒度も測定する必要がある。しかし、一粒度当り50~60 μ Aなので軟鋼で考えると約0.2kg/m²に相当するが、粒度が3~4も異なるということ

は同じ製法, 同じ熱処理状態の場合には考えられないことである。

2.6 イニシャル誤差について

2.6.1 イニシャル誤差とは

測定の際に, 零バランスをとる場合, 被測定材のvariに, 標準試験片でバランスをとらなければならないという事は, §2.4.2(i)において述べた。このことから標準片と被測定材の零点の値に差がでることになり, これが大きな誤差の一つとなる。この誤差について考えよう。まず, 標準片, 補償片は被測定材と同じ材質, 同じ形状, 同じ加工, 熱処理状態のもので, これを作らなければならないが, この試験片を数多く作って, その平均的な値をとるものを標準片, 補償片とすると, 零点の値をある程度少なくすることができる。また, この測定ではバランスをとった後, 被測定材にテストを当てて測定するが, その測定回数をふやして, 平均値をとることにより接触誤差を減少させる。

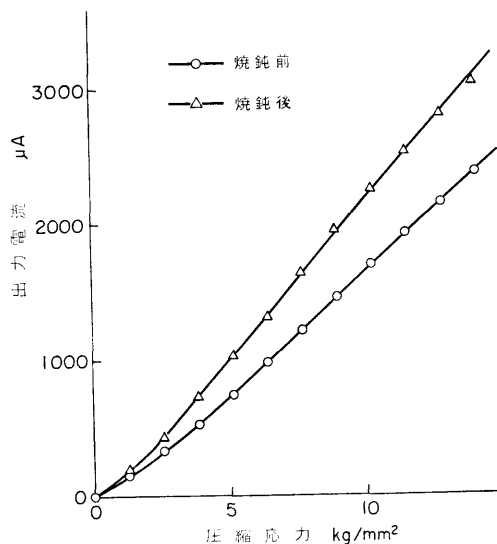
イニシャル誤差としては, 以上述べたような, 試験片相互間の零点の値に差があることから生じる誤差と同一試験片での接触誤差との2つが考えられ, 測定時にはかならず生じる誤差である。

標準片, 補償片を作る場合, その形状は, §2.4.2(iii), (iv)に述べたような寸法に作ればよい。これは相当許容度があるので簡単に作ることができる。しかし, 同じ材質でない場合には, §2.5に述べたように, 磁気ひずみ感度に影響を及ぼす多くの因子があり, これらが皆この零点の値にきいてくるので, とうてい測定は不可能である。また, 加工, 熱処理状態も同じにせねばならないが, 実際の測定の場合には, 熱間圧延

材の未焼鈍材が大部分なのでこれで標準片, 補償片を作ればよい。

2.6.2 イニシャル誤差の値

イニシャル誤差のうち, 零点の値は §2.4.2(i)で, 第一種と第二種の試験片について求めたが, この項において, その他の誤差との関連をみるために, イニシャル測定用大型試験片(140×140×13mm)7枚を使用して, 無荷重状態の零点の値を測定した。この場合, No.1 試験片を補償片にNo.2 試験片を標準片とした。そして, 同一試験片で10回測定し, 最大と最小の値のものは除き, その他のものをデータとした。



図—2.19 試験片の磁気ひずみ感度

表—2.7 イニシャル測定用試験片の測定結果 (焼鈍前) 単位: μA

回数	No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6		No. 7	
	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら
1	0	-40	20	-30	-70	-40	-130	-50	-40	-160	-60	-40
2	20	-80	40	-40	-40	-30	-110	-100	-50	-160	-60	-70
3	20	-80	40	-50	-80	-40	-140	-80	-40	-160	-70	-80
4	20	-90	70	-20	-100	-40	-120	-100	-40	-170	-80	-80
5	20	-80	50	-60	-60	-20	-160	-70	-20	-170	-80	-40
6	10	-80	20	-50	-100	-40	-160	-90	-50	-180	-80	-60
7	20	-100	40	-60	-100	-60	-150	-90	-40	-180	-60	-60
8	20	-90	20	-50	-50	-40	-130	-80	-40	-170	-80	-80
9	30	-90	20	-20	-70	-20	-140	-80	-80	-160	-80	-50
10	20	-80	68	-30	-100	-10	-140	-30	-90	-140	-70	-50
平均	18	-81	38	-41	-77	-34	-138	-77	-49	-165	-72	-61

表-2.8 イニシャル測定用試験片の測定結果(焼鈍後) 単位: μA

回数	No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6		No. 7	
	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら	表	うら
1	0	-40	80	20	20	0	-10	-50	-40	-20	20	20
2	20	-20	80	0	20	0	-20	60	-30	0	20	-10
3	0	-10	50	0	40	0	-40	20	-50	-10	10	0
4	10	-20	60	20	20	0	-10	-40	-20	-20	20	0
5	0	-20	50	30	10	0	0	-20	-20	-30	0	0
6	-10	-10	80	20	20	20	-30	-40	-50	-50	0	0
7	-10	-40	60	30	10	0	-40	-40	-40	-40	0	-20
8	-10	-40	50	0	0	0	-10	-50	-40	-40	0	-10
9	0	-20	40	20	0	0	-20	20	-10	-30	10	-20
10	20	-40	50	0	0	0	-40	-40	-50	0	0	-30
11	0	-10	60	40	0	10	-40	-10	-40	-30	0	0
12	-10	10	60	20	20	20	0	-40	-40	-20	0	0
平均	0	-23	60	16	12	3	22	-27	-37	-24	6	-7

データの整理は、正規分布をするものとして、母集団の平均値、標準偏差を最尤推定法⁽⁵¹⁾により求めた。表-2.7にその結果を示す。図-2.19に示すようにこの試片の磁気ひずみ感度 $181\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$ であった。この表からわかるように、同じ試験片に数回当てて測定した接触誤差のパラッキは、標準偏差で約 $15\mu\text{A}$ 、応力に換算すると $0.08\text{kg}/\text{mm}^2$ である。また、ここで用いた試験片間の零点の値のパラッキを平均値から求めると、標準偏差で $59\mu\text{A}$ 、応力に換算すると $0.33\text{kg}/\text{mm}^2$ であった。

つぎに、この7枚の試験片を応力除去焼鈍(600°C一時間)して、イニシャル誤差をしらべてみた。その結果を表-2.8に示す。磁気ひずみ感度は、図-2.19に示すように、 $231\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$ に上昇した。

焼鈍した場合の接触誤差は $11\mu\text{A}$ 、応力換算すると $0.05\text{kg}/\text{mm}^2$ で、やはり、未焼鈍の場合よりへっている。零点の値のパラッキは $25\mu\text{A}$ で応力に換算して $0.11\text{kg}/\text{mm}^2$ と未焼鈍の場合の1/3に減少している。これは、焼鈍により、組織が均一化されたともいえるが、主として残留応力が減少したためと考えてよい。

第一種、第二種試験片よりも、この項で使用したイニシャル測定用大型試験片の方が好結果を得たのは、試験片が大型で端の影響が無くなったことが原因の一つであると思われる。

前にものべたように、標準片、補償片としては、被測定材と同じ材質、同じ形状、同じ加工、熱処理状態のもので作らなければ測定は不可能なので、この条件を前題としてイニシャル誤差を考えていくとつぎのこ

表-2.9 試験片の表面状態と接触誤差(研磨前) 単位: μA

回数	No. 1		No. 2		No. 3	
	表	裏	表	裏	表	裏
1	0	186	-492	-528	18	155
2	6	204	-504	-480	30	150
3	24	200	-480	-492	40	165
4	12	198	-485	-480	45	160
5	12	210	-450	-455	30	155
6	18	208	-475	-485	48	155
7	12	205	-485	-480	35	155
平均	12	204	-486	-486	36	156
最大値-最小値	24	24	51	73	30	15

(研磨後) 単位: μA

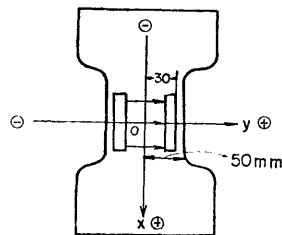
回数	No. 1		No. 2		No. 3	
	表	裏	表	裏	表	裏
1	0	65	170	80	205	140
2	5	70	175	80	192	130
3	5	65	170	80	195	130
4	6	75	170	72	195	120
5	6	75	170	50	190	120
6	5	75	170	80	195	100
7	0	70	170	84	190	100
平均	6	71	170	75	194	120
最大値-最小値	6	10	5	24	15	40

とが問題となる。(1)接触面の仕上げの状態、(2)圧延方向、(3)試験片におけるテストの位置などである。

まず、(1)について、試験片表面をシェーパーで仕上げたままの場合と、バフで研磨した場合とについて、接触誤差と、零点の値のパラッキとについてそれぞれ測定をした。その結果を表-2.9に示す。接触誤差は、シェーパー仕上げの方は $34\mu\text{A}$ で、バフ研磨の場合は

表-2.10 テスタの位置とイニシャル誤差

		単位: μA				
中心からの距離	不平衡電流 μA	$x \oplus$	$x \ominus$	$y \oplus$	$y \ominus$	
0	0	0	0	0	0	
2	0	-2	2.0	-2		
4	-1.0	-4	1.6	-3		
5	-1.0	-1.0	5	0		
7	-2.0	-3	2	1.5		
10	-2.7	-1.5	0	2.7		
15	-2.6	-2.8	0	5.2		
20	-2.2	-2.0	8.3	17.0		



この半分以下となっている。また零点の値のバラツキもやはり、半分以下になっている。パフ研磨をすることで表面が平らになり、キズその他がなくなったため、このことから表面を平らに仕上げなければならない。

つぎに、(2)の場合だが、この実験では一軸引張用試験片(図-5.14参照)で幅100mmのもので圧延方向がわかっている試験片数枚について、その圧延方向とこれに直角方向にテストを当てて測定した。その結果熱間圧延材では、圧延方向によるイニシャルの違いは小さく、特に考慮する必要はない。しかし、冷間圧延材では、§2.5.3に示したように、磁気ひずみ感度がちがうので圧延方向を測定して、同じ方向にしなければならない。

(3)の場合も(2)と同じ寸法の試験片を用いて、表2.10に示すように試験片上で中央でバランスをとってのち、 x 、 y 方向に移動させて零点の値を測定した。その結果は、表-2.10に示すように、中央で5mm前後移動させても(端までの距離の10%)、零点の値は約 $20\mu A$ で応力に換算して $0.1\text{kg}/\text{mm}^2$ ぐらいである。試験片の厚さのちがいによる、零点の値のちがいは、§2.4.2(iv)に述べた。厚さが10%変化しても零点の値は応力に換算して $0.3\text{kg}/\text{mm}^2$ ぐらいである。

以上の場合、無荷重の場合のイニシャル誤差であるが、実際の測定の場合には、応力を生じている被測定材にテストを当てるので荷重時のイニシャル誤差も測定してみたが、無荷重の場合と殆んど変わらなかった。

2.6.3 イニシャル誤差のまとめ

この章で述べた実験方法で測定する場合のイニシャル誤差についてまとめてみると、まず標準片、補償片としては被測定材と同一、または同じ材質のもので作り、加工熱処理状態も被測定材と同じ無応力のものとする。(実物測定では、殆んど熱間圧延未焼鈍材)そ

して形状については、§2.4.2(iii)、(iv)を参照して同じ形状のものを作ればよい。

測定は、被測定材標準片、補償片ともに表面をできるだけ平にし(0番位のエメリーペーパーで位上げる)接着誤差のバラツキを少なくするために数回、同じ測定をし、最大最小の値をカットして、平均値をデータとする。また、零点の値のバラツキを少なくするために、補償片、標準片は、少なくとも5~6ヶ作りそのうち平均的なイニシャルの値、磁気ひずみ感度を示すものを補償片、標準片とする。また、両片にテストを当てる位置は厳密でなくてよい。被測定材の測定点とほぼ同じ位置であれば、大きな誤差は生じない。ただし、鋼材の端を測定する時には厳密にしないと大きなイニシャル誤差を生じる。被測定材が冷間加工の薄板でない限り圧延方向、粒度等は考慮しなくてよい。

被測定材と同一材料(第一種試験片、被測定材の切れ端、被測定材の無応力部分など)を用いた場合のイニシャル誤差は約 $\pm 0.6\text{kg}/\text{mm}^2$ 同じ材質、同じ熱処理、加工状態(第二種試験片、その他)のものでは $\pm 1\sim 2\text{kg}/\text{mm}^2$ ぐらいと考えてよい。

2.7 まとめ

以上の解析ならびに実験結果より、つぎのような結論を得た。

- (1) プローブ型の変換器を用いて、マクロな残留応力が、非破壊で測定可能であることを確認した。
- (2) 鋼材測定用の最適のストレステストの作製方法と測定回路の非直線性を計算した。
- (3) 鉄骨構造物の死荷重のような、単軸圧縮応力は被測定材と同じ部材で、標準片、補償片を作ることができる場合には、真の応力は次式で示される。

$$\sigma = (1 \pm 0.06) \sigma_0 \pm (0.6 \sim 2) \text{kg}/\text{mm}^2$$

σ_0 は、出力電流に相当する校正曲線上の応力

- (4) 標準片および補償片は、測定点を中心に半径20cmの球形内の被測定材と同じ形状のものをつくればよ

い。

(5) 金属成分で、磁気ひずみ感度に大きく影響するのは炭素の含有量で、軟鋼の範囲(0.07~0.25%)では、あまり変化しないが、炭素量が増すと、0.1%当り約 $25\mu\text{A}/\text{kg}/\text{mm}^2$ 感度が低下する。

(6) 実物測定では、未焼鈍材が多いが、熱処理により、磁気ひずみ感度は大きく影響を受けるので校正曲線は、被測定材と同じ熱処理をおこなった材料で作らなければならない。

(7) 磁気ひずみ感度には、その他圧延方向結晶粒度なども関係するが、熱間圧延材で、同じ製法で作られた鋼材の場合には、これらの影響は無視してよい。

(8) イニシャル誤差は、式(2.22)の右辺第二項であるが、被測定材と同一部材の場合には約 $\pm 0.6\text{kg}/\text{mm}^2$ 、同じ材質、同じ加工、熱処理状態の標準片を使用する場合には、約 $\pm 2\text{kg}/\text{mm}^2$ と考えるとよい。

なお、この方法を用い、実際に熱間圧延H形鋼の残留応力⁽⁵²⁾の測定や新幹線レールの熱応力の測定⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾などが行われている。

第3章 単軸初期応力の測定

3.1 緒言

第2章で単軸圧縮応力の場合については、十分に実用できることが判明したが、本章では、従来の研究⁽⁴⁵⁾から、磁気出力と応力の対応が複雑であることがわかっている、単軸引張応力の測定について磁化電流だけでなく周波数も変化させて実験をおこなった。

同一試験片に、引張りから圧縮まで、連続的に荷重をかけて、磁気出力の挙動を考究し、横感度を測定して、最適の単軸引張応力の測定法を求めた。

また、曲げ応力と出力特性との関係、圧縮と曲げが同時に生じた場合の測定について検討した。

塑性域の応力に対する磁気出力の挙動についても、実験結果を考察した。以上本章においては、単軸応力について圧縮、引張、曲げなどすべての場合について、非破壊測定法を確立した。

本章でも特に指定しない限り、標準テストIを用い磁化電流は50Hz、300mAを使用した。この章では、試験片の寸法の関係で、標準テストIIも多く使用した。試験片は、長方形試験片の他、引張試験片(図-3.5参照)を使用した。

3.2 単軸圧縮初期応力の測定

単軸圧縮の場合は、§2.4基礎実験のところ述べてるので、ここでは概要だけにとどめる。単軸圧縮の場合

(24)

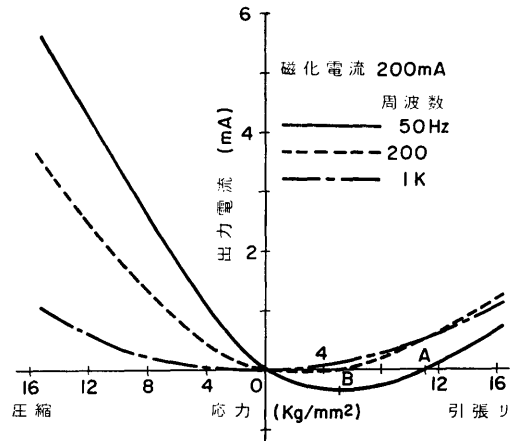


図-3.1 周波数による出力特性(引張と圧縮)

は、図-3.1に示したように、磁化電流、周波数を少し変化させても、出力曲線は、ほぼ直線となり、感度のみが上下するだけである。単軸圧縮については、実用的な磁気ひずみ計器⁽²⁷⁾の研究で、種々実験されている。軟鋼の場合には、一般に磁化電流を大にすると感度は上昇するが、大きな応力の場合(約 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上)に、出力曲線がねる傾向にある。磁化電流が低くすぎると、低い応力($1\text{kg}/\text{mm}^2$ 以下)で出力曲線の直線性が悪くなり、ヒステリシスが大となる欠点が出てくる。この傾向は、ストレススタを使用する本実験では磁気回路が異種の二つの材質(被測定材とストレススタ)からできているので、そのまま適用はできないが、概略は一致している。

この実験では磁化電流はテストに使用しているコイルの巻線の許容電流の関係で500mAまでしか流せなかったが、図-2.5に示すように、300mAまでは、感度は上昇している。また、50mA以下では、ヒステリシスが明かに増大する。

周波数については、図-3.1に示したように周波数の増加とともに感度は減少している。しかし、直線性はあまり変わらないようである。ただ、この実験で周波数を2000Hz以上にすると、試験片が熱をもち測定が不安定になった。

結局、単軸圧縮の場合には、適当な磁界で適当な周波数を使用して(§2.4の基礎試験の場合は、300mA、50Hz)測定すれば、§2.4で述べた誤差範囲で測定できる。

3.3 単軸引張初期応力の測定

磁気ひずみ効果を利用する計測の場合は、従来の研

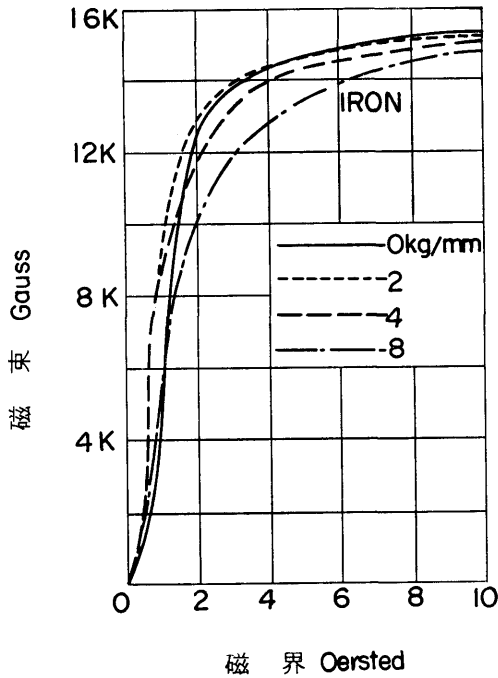


図-3.2 引張におけるB-H曲線

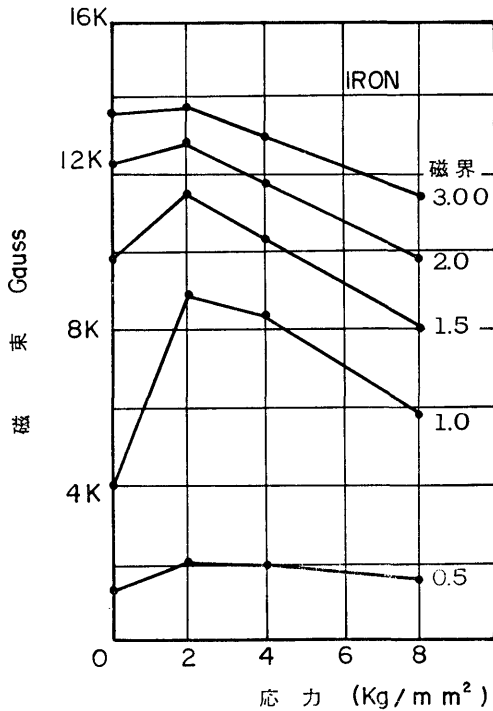


図-3.3 磁束と引張応力の関係

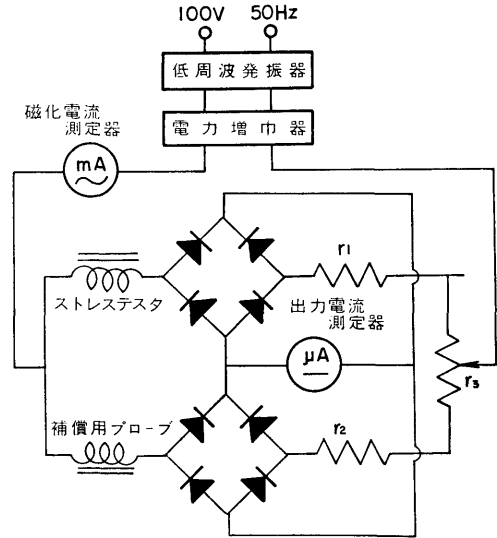


図-3.4 測定回路 (II)

究⁽²⁷⁾においても、磁わい計器等ほとんどが圧縮型となっている。これは、引張応力では鉄の場合出力特性が圧縮の場合と全く異なり、直線性も悪いからである。以下、ストレステスタを用いた引張応力の測定について述べる。

3.3.1 出力特性

純鉄に引張応力が生じているときのB-H曲線は、文献⁽⁴⁵⁾によると、図-3.2のようになっている。この図からあきらかなように、低磁界(5 Oe以下)では応力の大きさと磁束の変化は比例していない。図-3.2を、磁界をパラメータとして書き直すと図-3.3となる。これは純鉄の場合で軟鋼においても低磁界では、引張応力に対する磁気ひずみ出力は、圧縮応力の場合と異なって図-3.3のように直線性が悪くなることが予測できる。ことに本実験のように、ストレステスタで被測定材に一定磁界を与えている場合には、簡単な装置では低磁界になるので低磁界特性が出力にきてくることが考えられる。

実験は、標準テスタ I を使用し、図-3.4の測定回路を用いておこなった。これは、ブリッジ回路に、所用の磁化電流を供給するため、電力増幅器(出力300 W)と低周波発振器が接続され、磁化電流の周波数と電流の大きさを自由に変えるようになっているが、その他は図-2.2の測定回路と全く同じである。試験片は図-3.5に示す寸法で、材質は S25C 材、厚さは 9.7mm である。実験結果を図-3.6、図-3.7に示す。

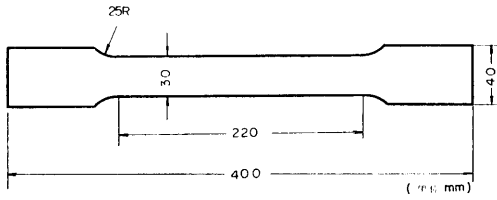


図-3.5 引張り試験片

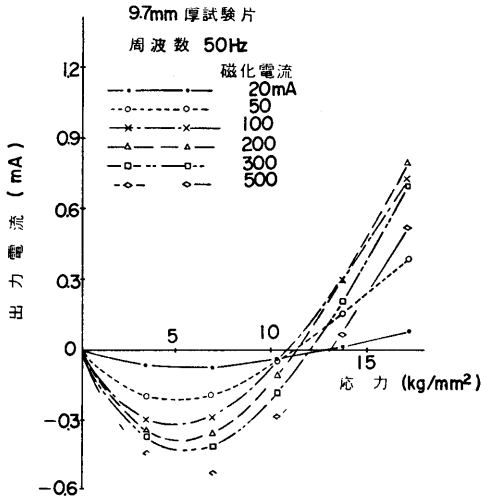


図-3.6 出力特性 (磁化電流変化)

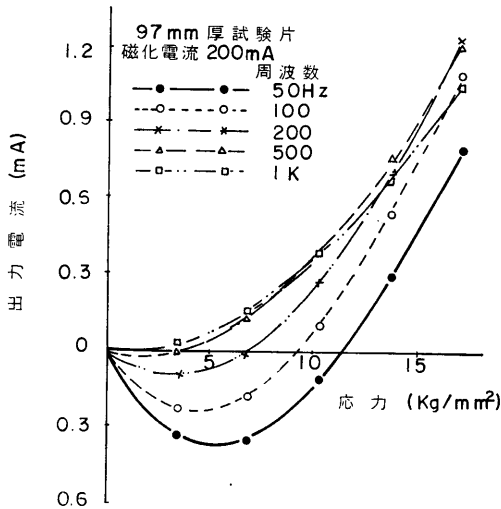


図-3.7 出力特性 (周波数変化)

図-3.6は周波数50Hz, 一定で, 磁化電流を20~500mAと変化させた場合で, 図-3.7は, 磁化電流を200mA一定として周波数を50~1000Hzまで変化させた場合

(26)

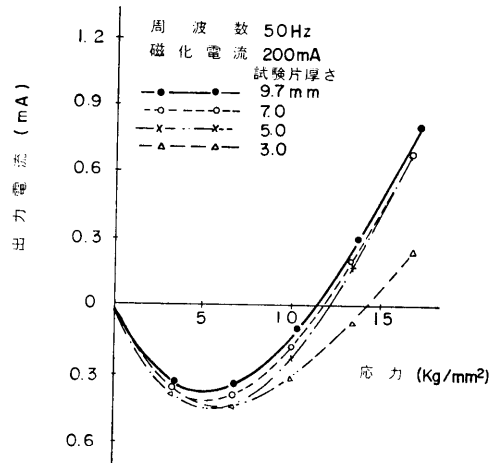


図-3.8 出力特性 (試験片厚さ変化)

である。この結果より, 引張応力に対しては予測したように, 標準テスタで与える磁界の範囲では, 磁界の強さ周波数を変化させても, その出力特性は, 圧縮応力のような直線性は得られないことがわかった。また, 周波数を1 kHz 近くにしなるとその出力曲線は, 低応力の場合に負となる特性をもつ, これも, 圧縮の出力特性にはみられないことである。また, 図-3.1 からわかるように, 引張の場合にも, 圧縮の場合と同じように応力が大きくなるとインピーダンスが減少する。つぎに, この試験片を用いて同一試験片を測定後 7 mm, 5 mm, 3 mm と削っていき試験片の厚さによる出力特性を求めてみた。圧縮の場合には, すでに, §2.4.2(iv)で求めているが, 引張は圧縮と出力特性が異なったので引張の場合について求めてみた。その結果を図-3.8に示す。この図からわかるように引張の場合にも, 厚さが3 mm以下になると厚さの影響が出てくる。これは磁束が浸透する深さが原因で, 薄い試験片の場合には, このことを考慮せねばならない。

3.3.2 応力の実験整理

前項に示したように, 引張の場合は, 圧縮応力のように単純ではないので磁化電流, 周波数を変えて予備実験をおこない, その測定の場合に最適の条件を見つけなければならない。測定方法は, 圧縮の場合と同じように被測定材と同じ状態の標準片, 補償片を作り磁化電流周波数をかえて予備実験をおこなう。このとき, 図-3.6のように一つの出力電流に対して応力値が二つ存在する部分があると測定が複雑になる。図-3.7の周波数1 kHz 磁化電流200mAのときのように,

直線性は悪いが一つの出力電流に対して応力が一義的に決まるような磁化電流，周波数を見出して測定をおこなうようにすれば，低い応力では精度が少し悪くなるが測定できる。

しかし，材料によっては，応力を一義的にきめうる曲線を得ることが困難なものもあるので，このときは例えば図3.7の場合には，周波数50Hzのときと200Hzのときと両方で測定すれば，応力を一義的に求め得る。今50Hzで測定したとき，出力電流が -0.3mA とすると，これに対応する応力は， 3.5kg/mm^2 と 7kg/mm^2 となる。しかし，200Hzで測定した場合に，その出力電流が -0.1mA になるか， 0.001mA になるかによって，応力がどちらかが区別できる。

結論として，一軸引張の内部応力を測定する場合には，周波数，磁化電流を変えて校正曲線を作り，応力が一義的に決まる磁界（周波数，磁化電流）を求めて測定するか，異なる二つの周波数または磁化電流を測定し，その校正曲線より応力を決定する方向を用いるかである。また，後述するがストレステスタを応力軸に直角に当て横感度を測定して，引張応力を推定する方法と，§3.5に示す出力電流差をとる方法によっても，一軸引張応力は測定することができる。

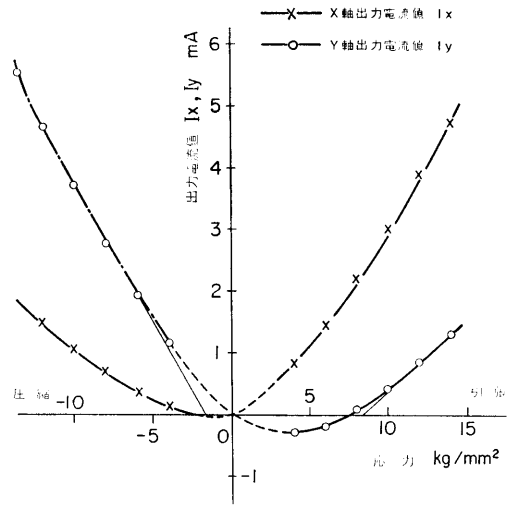
3.4 圧縮と引張の出力特性(I)

3.4.1 横感度について

単軸引張応力の場合の出力曲線が，単軸圧縮の場合と非常に異なるので，まず，横感度を測定してみた。試験片に，一軸方向の応力を生じさせ，その応力方向にストレステスタを当てた場合の磁気ひずみ感度を S_i ，これと直角方向にテスタを当てたときの感度を S_l とすると， $C_m = S_l/S_i$ は横感度係数に相当する。

表一3.1 磁気ひずみにおける横感度係数 C_m

試験片番号	材質	寸法 mm	C_m
11	S20C	100×80×13	0.22
12	"	"	0.29
13	"	"	0.28
14	"	"	0.32
15	"	"	0.28
16	S25C	100×100×13	0.10
17	"	"	0.25
18	"	"	0.24
19	"	"	0.24
20	"	"	0.32



図一3.9 応力方向（Y軸）および応力と直角方向（X軸）の出力特性

実験は，表一3.1に示すような二種類の試験片を用い，一軸圧縮応力状態で標準テスタIを荷重方向と，それと直角方向の二つに当て，それぞれの値を測定して，横感度係数 C_m を求めた。この場合も，ひずみゲージをはり同時測定した。ひずみゲージで測定したひずみは，もちろん直角方向と垂直方向とでひずみの符号が異なり，横感度は約1/3になっている。磁気ひずみの測定では，表一3.1に示すように，同じ符号で， C_m の値は約0.25~0.3となり，材質に無関係に同じ値をとるようである。

つぎに，単軸引張応力の場合の横感度を求めた。試験片寸法の関係で標準テスタIIを使用した。試験片は $300 \times 50 \times 10\text{mm}$ の試験片4本を用いた。その結果の一例を，図一3.9に示す。この図からわかるように，引張の場合には，テスタを荷重方向に向けた場合より，これと直角方向に向けた場合の方が感度が大きい。すなわち，引張の場合の横感度係数は1よりかなり大きな値であり，3~4の値をとっている。この同じ試験片を用いて，圧縮の場合の横感度係数を測定した。座屈を考えて4本の試験片はすべて $100 \times 50 \times 10\text{mm}$ に切断し，横感度係数を測定した。図一3.9はその一例である。結果は，圧縮の場合 $C_m = 0.2 \sim 0.3$ となった。さらにテスタを変えて種々測定したが，双極子の磁界をもつストレステスタのような変換器で測定する場合には，この傾向は変わらず，圧縮，引張ともに同じ方向で（引張の低応力の所のみ負となる場合が多

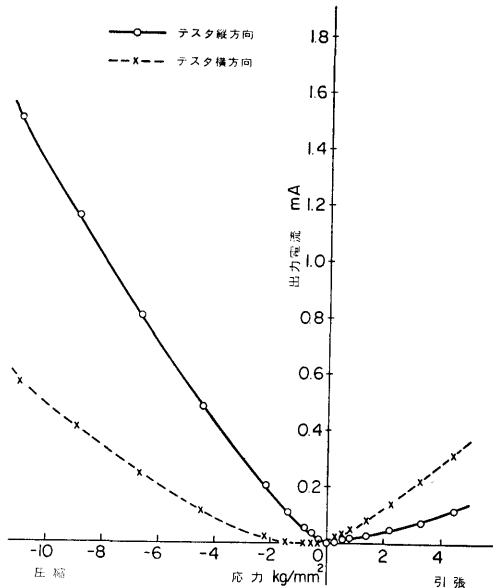


図-3.10 一つの試験片の圧縮-引張試験

い) 横感度係数は、圧縮の場合は約 0.3, 引張の場合は 3~4 ぐらいの値になることがわかった。しかし、横感度係数は、材質には無関係であるが、被測定材の形状、テスタの大小種類などにより異なる。詳細は §4.3, §4.4 で述べる。

また、図-3.9 をみるとわかるように、一軸引張の場合、横感度は殆んど直線なので、一軸引張応力が生じている場合、テスタをその応力方向と直角に当てて、その横感度を測定し、これに対応する引張応力をこの校正曲線(図-3.9)から求めてやればよい。この方法を用いると、一軸圧縮の場合と同じように精度よく求めることができる。

3.4.2 圧縮と引張の比較

圧縮と引張の出力挙動が相当に異なるので、一つの試験片で圧縮から引張まで荷重をかけて、その出力特性を測定してみた。その結果を図-3.10に示す。しかし、この方法に、圧縮の場合にすぐ曲げが入り、座屈を生じるので、試験片は 100×30×30mm を用いた。しかし今度は引張の場合、試験片の上下をそれぞれ 25mm ほどチャックにかませたが、試験片の厚さが厚いのでスベリ、その他により大きな応力をかけることができなかった。図-3.10の出力は、試験片側面 4 つの平均の出力を示している。テスタは標準テスタ II を用いた。

そこで前項で述べた 300×50×10mm の引張試験片

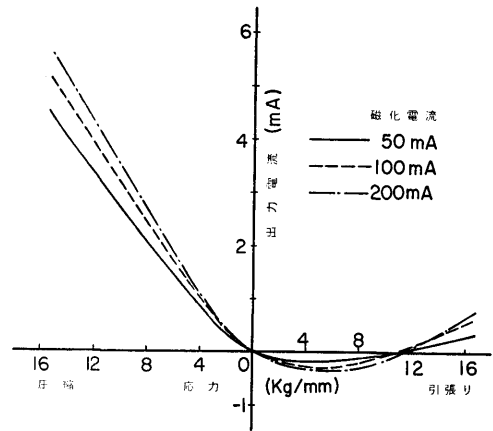


図-3.11 引張から圧縮までの出力特性 (磁化電流変化)

でまず引張試験をし、標準テスタ II で、縦感度、横感度を測定した。つぎに試験片中央部を中心に長さ 100mm に切断して、圧縮試験をおこない、引張試験の時と同様にテスタで縦感度、横感度を測定した、その結果が図-3.9である。これは一つの試験片で測定した結果の、図-3.10と同じ傾向である。また、同一材料から、圧縮試験片(100×30×13mm)と引張試験片(図-3.5参照)を別々に作り、実験をおこなった結果である図-3.11とも同じ傾向を示している。以上のことから、出力曲線は引張から圧縮まで連続的に変化しており、引張も圧縮も正の出力である。すなわち、応力の増加とともにインピーダンスが減少しており、感度は圧縮の方が引張よりもはるかに大きいといえる。

残留応力を非破壊で測定するためには、応力を変えることはできないので、周波数、磁化電流、テスタの種類、テスタの方向などを変えて測定せねばならない。図-3.1から明らかなように、周波数を上げると圧縮では出力電流は下り、引張では出力電流が上るので、引張応力と圧縮応力との見わけがつく。しかし、この方法で測定すると誤差が多くなるので好ましくない。そこで、次節で述べる、出力電流差をとる方法を考えた。

3.5 縦、横の出力電流差をとる方法

前節までに判明したことより、引張応力を簡単に測定する方法の一つとして、単軸引張の場合にも、単軸引張方向とこれに直角方向の二方向の出力電流を求め、その出力電流差と応力の線図を求めてみは。実験

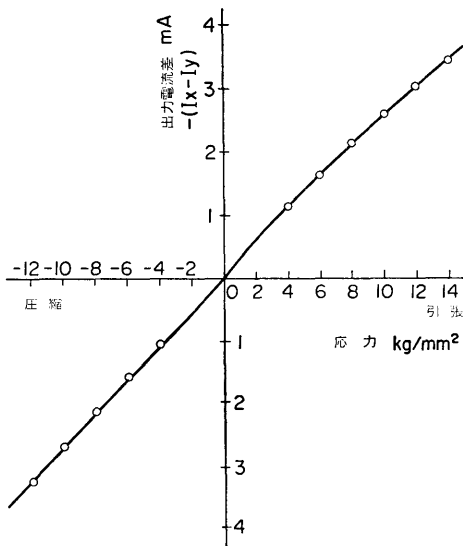


図-3.12 縦、横の出力電流差一応力曲線

は § 3.4.1 で使用した $300 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ の試験片 4 枚で、標準テスト II を使用して同じ実験をおこない、引張の場合、圧縮の場合の応力方向（縦感度）、応力と直角方向（横感度）の二つの方向を測定した。その結果を図-3.9、図-3.12 に示す。図-3.9 が測定結果でこれより縦、横の出力電流差を求めたのが図-3.12 である。この図からわかるように、引張から圧縮まで、校正曲線として、直線性のよい引張と圧縮の符号が反対の直線を得ることができた。ただ、引張応力が $0 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ ぐらいまでは、少し直線からずれている。これは、図-3.9 の引張応力の縦感度が、この部分で出力が負となっているところであり、§ 3.3.2 に示すように、この部分になるべく少くなる磁化電流、周波数を与えてやれば減少するものであるが、図-3.12 ぐらいの非直線性は問題ではない。他の 3 本の試験片についても、これと殆んど同じ直線を得ることができた。欠点は、感度が減少することである。しかし、一方、差をとるので誤差、その他が相殺される利点もある。この方法についての詳細は § 6 で述べる。

3.6 曲げ応力の測定

単軸引張と圧縮の出力特性が対称ではないので、曲げ応力の場合の挙動を測定する必要がある。そこで、 $700 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ の試験片に、図-3.13 に示すように、4 点曲げを万能試験機で与え、標準テスト I で測定した。その結果を表-3.2 と図-3.14 に示す。結果は予測した通り表の圧縮側は一軸圧縮の特性を、裏の引張

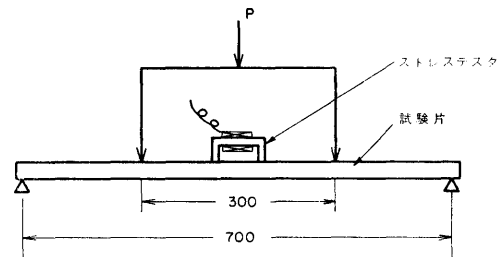


図-3.13 曲げの測定方法

表-3.2 曲げによる出力電流

出力電流	ひずみ	出力電流	ひずみ		
表側 μA	表	裏側 μA	裏		
80	-9.5×10^{-6}	100×10^{-6}	-40	-90×10^{-6}	102×10^{-6}
195	-201	200	-30	-194	202
345	-305	300	20	-308	300
480	-410	401	80	-421	400
640	-510	500	160	-530	500
810	-608	600	240	-632	600

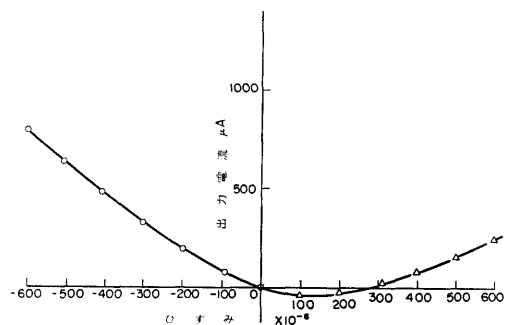


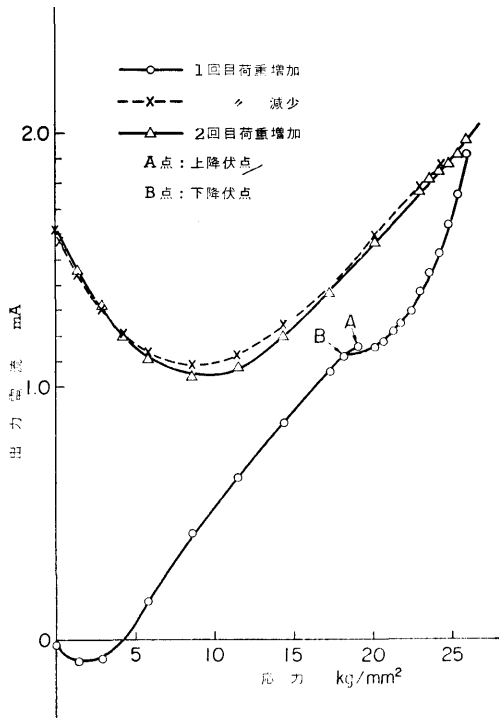
図-3.14 曲げによるひずみと出力電流の関係

側は一軸引張の特性そのままを示している。この実験もゲージを表と裏に貼り、同時測定をおこなった。このように、ひずみゲージは、完全に表と裏とで対称であり、曲げ応力が生じていることを示している。テストでは、図-3.14 のような特性を示すことは注意せねばならない。曲げ応力を測定する場合も、これまでと同様に、曲げに対する校正曲線を作っておけば、これによって測定することができる。

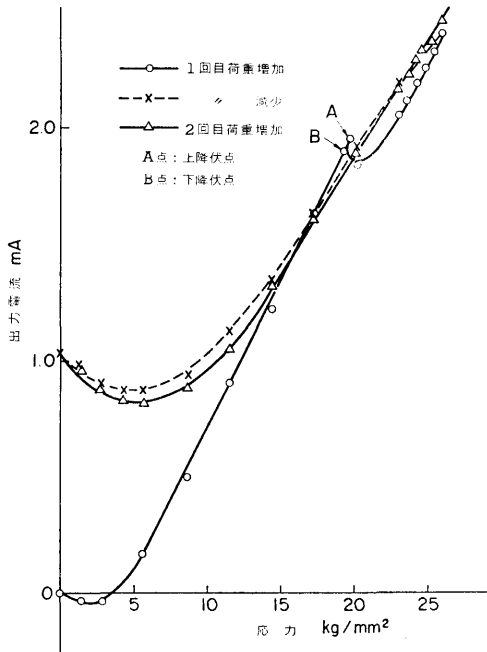
被測定材に曲げが生じているか、否かは、被測定材の表、裏について、応力方向とこれと直角方向を測定することにより、引張応力か、圧縮応力かの判断ができるので、曲げの存在を測定できる。

3.7 塑性域の応力

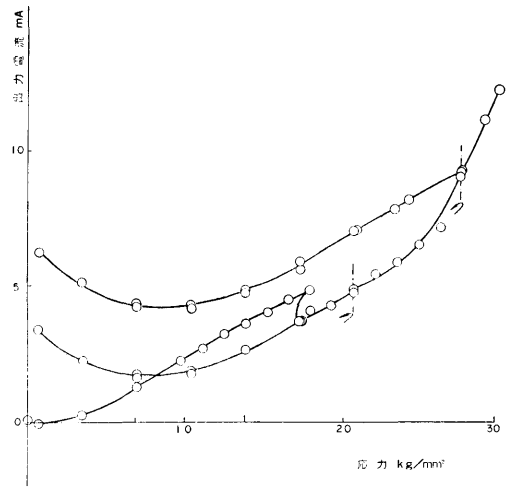
この測定法は、主として弾性域の応力測定を目的としているが、部分的には塑性応力が生じている部材を



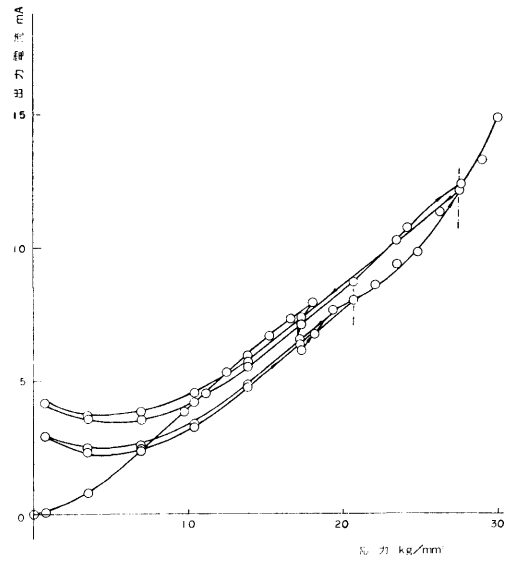
図—3.15 塑性域までの引張試験Ⅰ（縦方向）



図—3.16 塑性域までの引張試験Ⅰ（横方向）



図—3.17 塑性域までの引張試験Ⅱ（縦方向）



図—3.18 塑性域までの引張試験Ⅱ（横方向）

測定する場合もあるので塑性域では、ストレステストの出力がどのようになるかを実験してみた。

まず、 $310 \times 60 \times 3$ mmの引張試験片を塑性域まで引張り、標準テストⅡで荷重方向およびこれと直角方向を測定した、結果を図—3.15、図—3.16に示す。この図からわかるように塑性域の残留応力でも、この応力が変化しない限り（図において一回目荷重増加の場合）測定できることがわかった。

図—3.17、図—3.18も $400 \times 60 \times 3$ mmの引張試験片