

## 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,  $\sigma_m$ , and those with wire strain gauges,  $\sigma_s$ , 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  $2 \text{ kg/mm}^2$  for stress less than  $30 \text{ kg/mm}^2$ . Similar comparison is also made for welded test pieces and this gives somewhat larger difference of about  $4 \text{ kg/mm}^2$ .

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<sup>(1)</sup>であり、その他には、光弾性材料を用いるもの<sup>(2)</sup>や、ロゼットゲージを用いるもの<sup>(3)</sup>、超音波を利用するもの<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>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 $10\mu$ 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

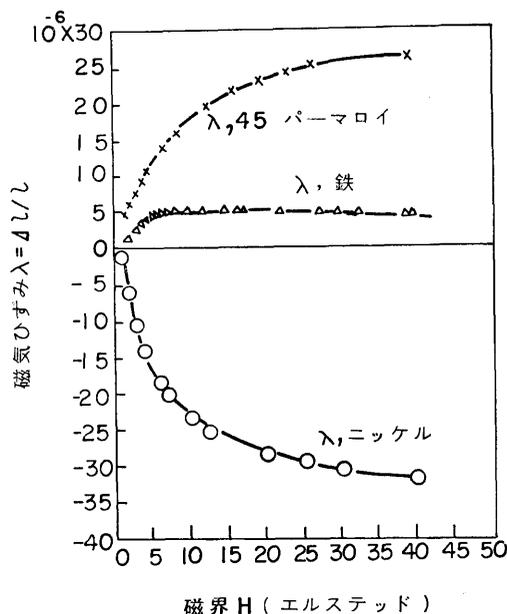


図-1.1 磁気ひずみ曲線

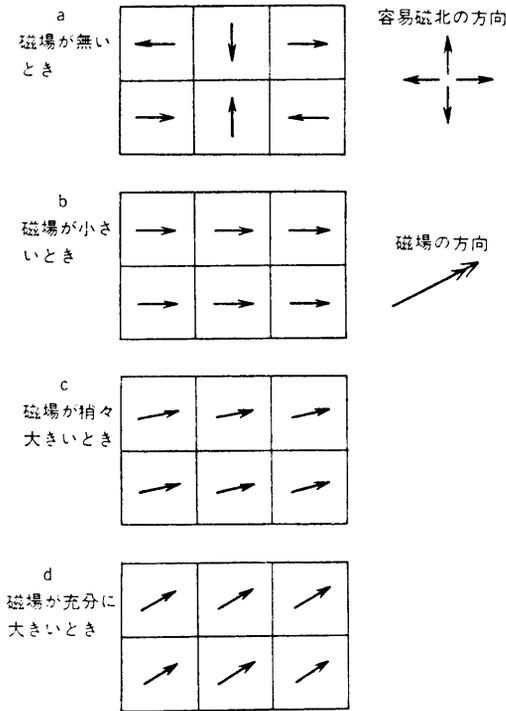
な方法であるが、このような、巨視的な残留応力の測定には不適當ことが多い。

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<sup>(6)</sup>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 $1\text{ kg/mm}^2$ の応力で、数10%の磁束密度の変化を生じる<sup>(7)</sup>鋼材は比較的小さいが、それでも $1\text{ kg/mm}^2$ 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<sup>(9)</sup>。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<sup>(9)</sup>。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<sup>(10)</sup>。

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

ここに， $\lambda_s$ ；磁気ひずみ飽和値， $\sigma$ ；応力， $\phi$ ；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<sup>(11)</sup>

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<sup>(11)</sup>

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。

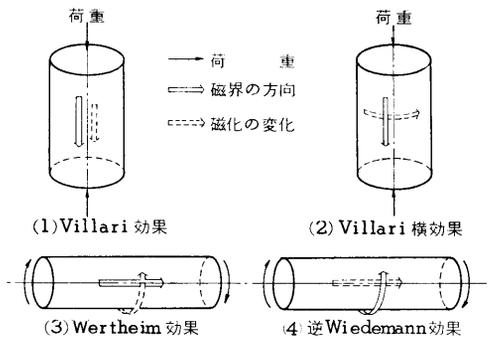
#### (3) Wertheim 効果<sup>(10)</sup>

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<sup>(12)</sup>

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<sup>(13)</sup><sup>(14)</sup>効果、Guillemin効果<sup>(15)</sup>、Wiedemann効果<sup>(12)</sup>、Villari効果<sup>(11)</sup>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<sup>(16)</sup>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<sup>(17)</sup>および W. F. Brown<sup>(18)</sup>などによりおこなわれた。実験的には、本多, 茅, 増山<sup>(19)</sup><sup>(20)</sup>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<sup>(21)</sup>などが世界的に有名である。これらの結果は、Becker, Döring の著書<sup>(22)</sup>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ことがニッケルやパーマロイについて研究され<sup>(23)</sup><sup>(24)</sup>、Smith, Sherman<sup>(25)</sup>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<sup>(26)</sup><sup>(27)</sup>。

Becker, Döring<sup>(22)</sup>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<sup>(28)</sup><sup>(7)</sup>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<sup>(29)</sup>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<sup>(7)</sup><sup>(29)</sup>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<sup>(26)</sup>、<sup>(27)</sup>は主として(1)の方法であるが、1940年代に Förster ら<sup>(30)</sup>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<sup>(31)</sup>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<sup>(32)</sup><sup>(33)</sup>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<sup>(34)</sup>らによって発表された。

篠田, 川崎<sup>(35)</sup><sup>(36)</sup>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<sup>(37)</sup>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<sup>(38)</sup><sup>(39)</sup>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<sup>(40)</sup>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<sup>(41)</sup>らは、Förster<sup>(42)</sup>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<sup>(43)</sup>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<sup>(44)</sup>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礎

### 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<sup>(45)</sup>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。

単軸圧縮の基礎実験を行い、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

$\mu$ ; 透磁率

$\phi$ ; 磁気回路に流れる磁束

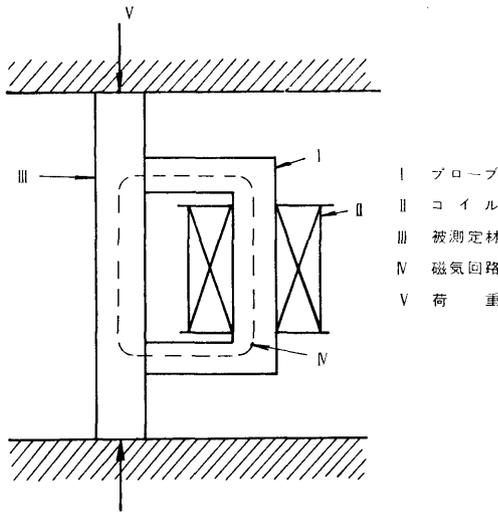


図-2.1 測定原理図

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  $\phi$  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、

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

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

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

測定用プローブのインピーダンスを  $Z_1$  とする。 $Z_1 = Ec/Ic$  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  $\mu_m$  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

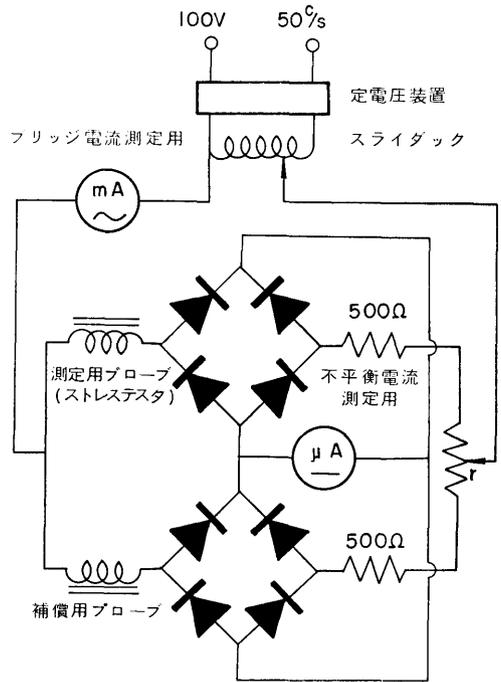


図-2.2 測定回路(I)

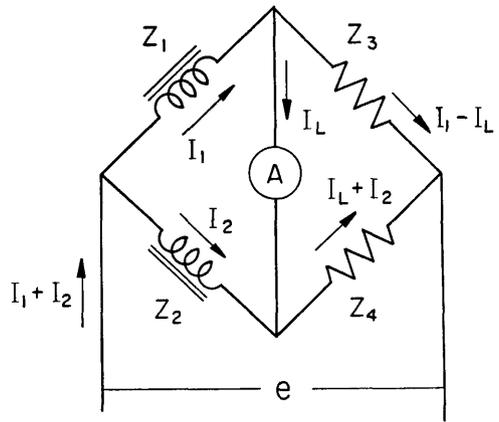


図-2.3 交流ブリッジ

$\Delta Z_1$  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<sup>(46)</sup>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、 $\Delta Z_1$  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  $\mu_m$  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  $\mu_s$  を有するものをえらばなければならない。

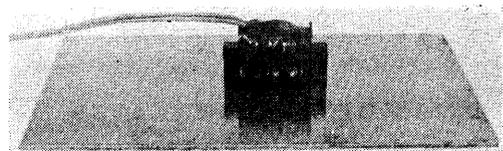


写真-1 ストレススタ

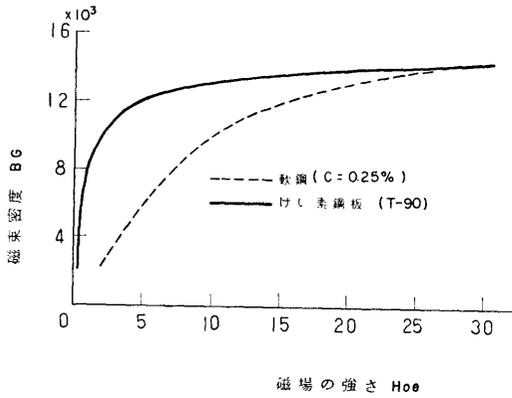


図-2.4 軟鋼とけい素鋼板のB-H曲線

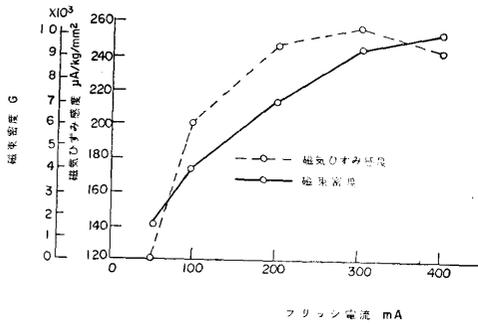


図-2.5 ブリッジ電流と磁束密度および磁気ひずみ感度の関係

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<sup>(47)</sup>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うことがいえる。

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 <sup>2</sup>	100	600	100	50	30
総巻数	1,600	1,600	600	400	240
1cm当たりの巻数	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均衡電流は、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  $\mu_s/\mu_m$  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<sup>(47)</sup>(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<sup>(48)</sup>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)

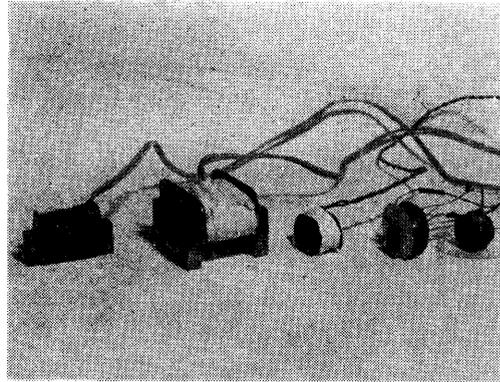


写真-2 各種ストレステスタ

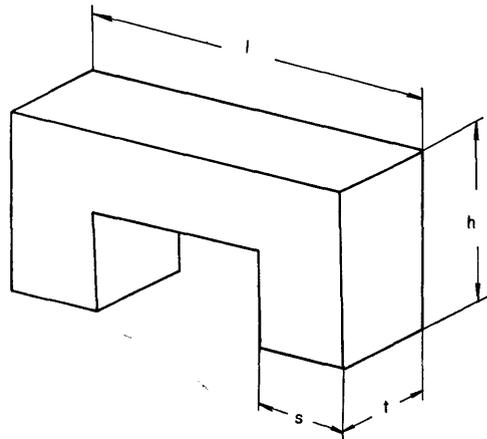


図-2.6 プローブの寸法

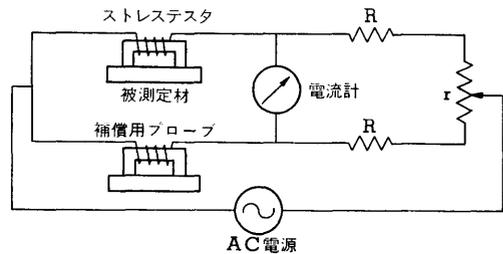


図-2.7 ブリッジの原理図

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 $\Delta Z_1$ を省略すると

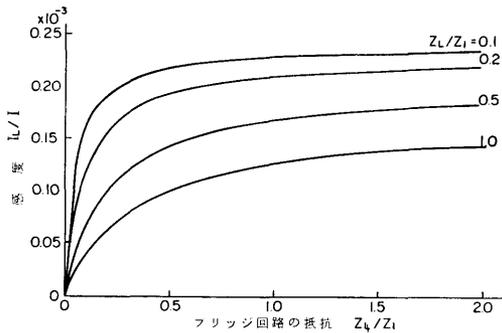


図-2.8 ブリッジ回路の抵抗一感度曲線

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

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

……(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  $\mu_m$  のときの磁気抵抗を  $R_{m0}$  とし、 $\mu_m$  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

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

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

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

$Z_L / Z_1 = 0$  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

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

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<sup>(49)</sup>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、

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

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

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

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

この実験では、 $I = 300 \text{ mA}$  で、 $I_L$  の値は、被測定材の応力が、 $15 \text{ kg/mm}^2$  以内(弾性域内)では、だいたい  $3 \text{ mA}$  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

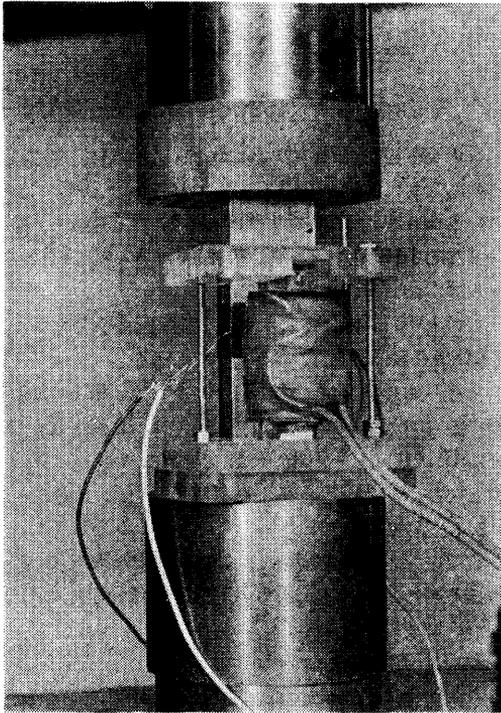


写真-3 ストレステスタによる垂直面の測定

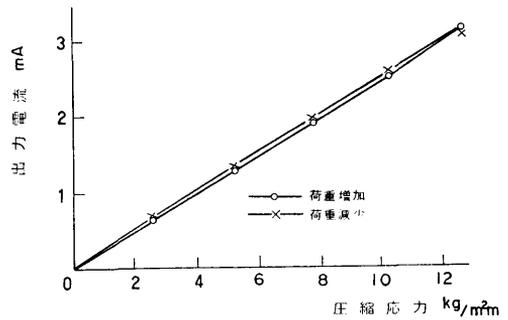
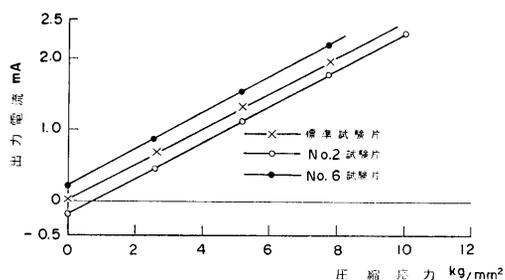


図-2.9 出力曲線

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 100×30×13mm 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ると，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  $0.6 \text{ kg/mm}^2$  (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考えられる。

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、 $\sigma_0$  は出力電流に相当する校正曲線上の応

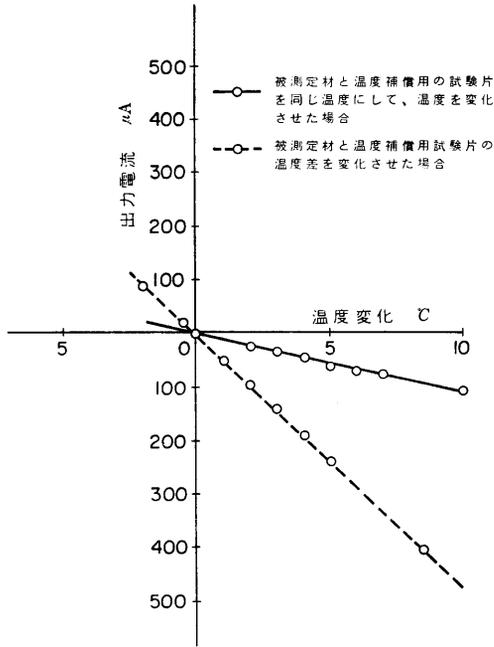


図-2.11 温度特性

力の値で第二項は、第一種試験片の場合は  $0.6\text{kg/mm}^2$ 、第二種試験片のときは、 $2\text{kg/mm}^2$  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、 $0.6\text{kg/mm}^2$  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)

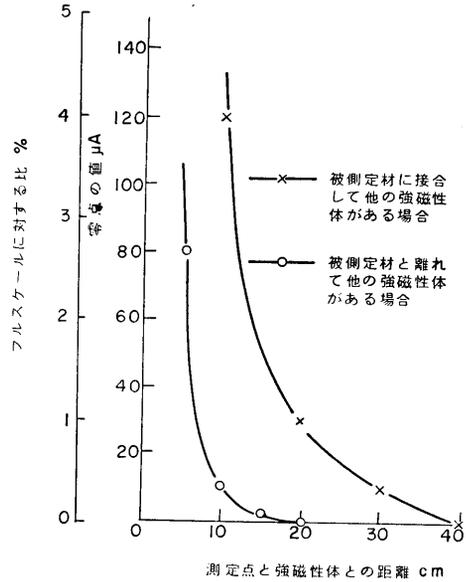


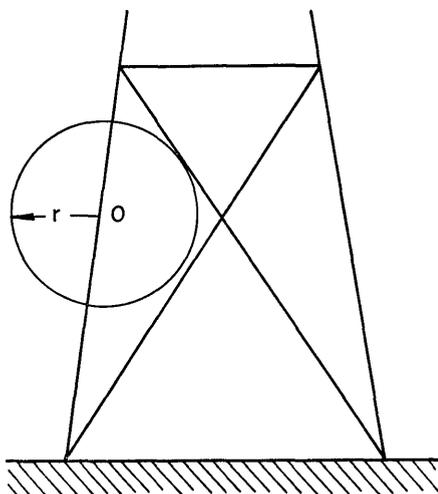
図-2.12 近傍の強磁性体の影響

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  $300\text{mA}$  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  $10\text{cm}$  以上また、測定鋼材に接合して他の鋼材がある場合でも  $20\text{cm}$  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  $300\text{mA}$  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  $20\text{cm}$  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  $20\text{cm}$  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-1



O; テスタの測定位置

図-2.13 磁束の影響する範囲

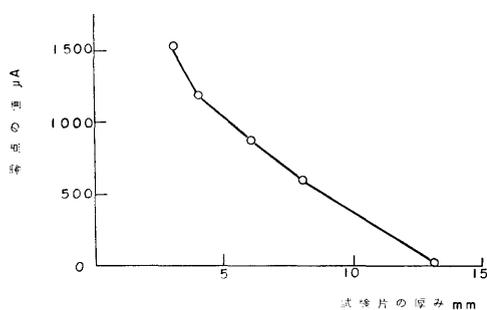


図-2.14 試験片の厚みの零点の値におよぼす影響

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 $0.3\text{kg/mm}^2$ 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、 $\rho$ 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、 $\mu$ 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

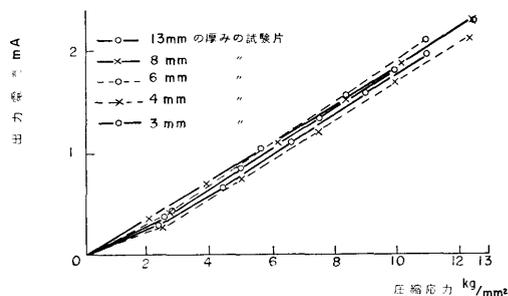


図-2.15 厚さの異なる試験片の出力-応力曲線

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。

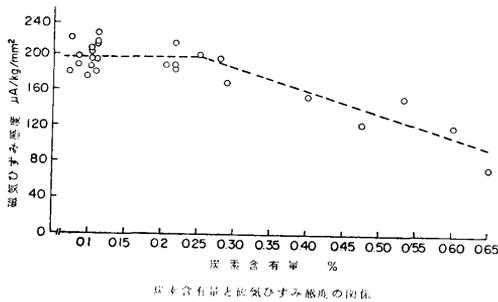
以上のことから、標準片、補償片を作るときには、あまり厳密に、被測定材と同じ寸法に作る必要はなく、長さ、幅、厚さともに、±5%ぐらいの誤差はあってもよいという事がわかった。ただし、厚さが3mmより薄い場合、長さ、幅がテストの寸法の1.5倍以下の場合には、磁束分布からみても正確に作らなければならない。

## 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 ( $900^\circ\text{C}$ ) 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

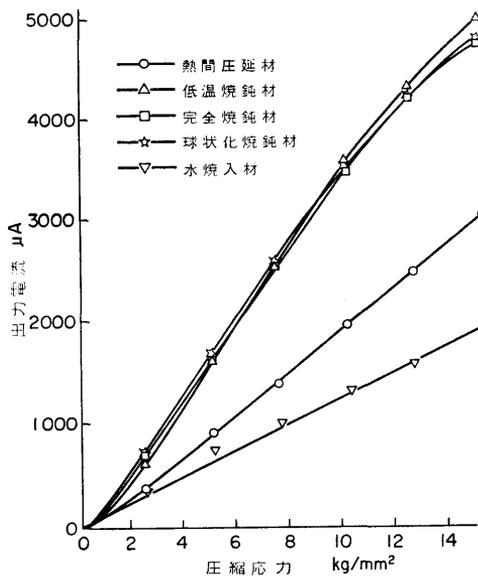
鋼のセメントイトを球状化して塑性加工、切削加工を容易にする。ここでは、 $A_1$ 点 ( $730^\circ\text{C}$ 附近) 以上に加熱して徐冷した。

#### (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、 $850^\circ\text{C}$ に加熱して、 $12^\circ\text{C}$ 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 $\epsilon$	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)

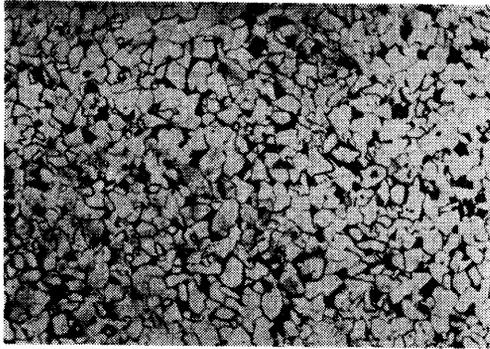
れと磁気ひずみ感度との関係を検討した。

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  $\epsilon$  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A<sub>2</sub>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。

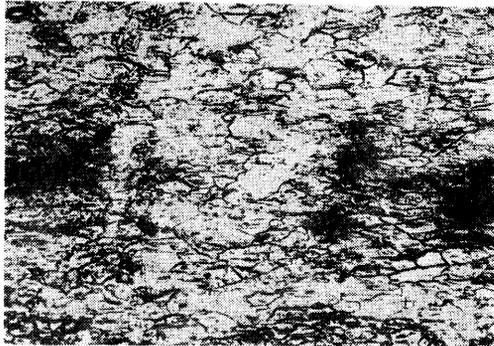
被測定材が冷間圧延材の場合には、それと同じ冷間圧延材で校正曲線を作ってやらなければならない。

### 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。

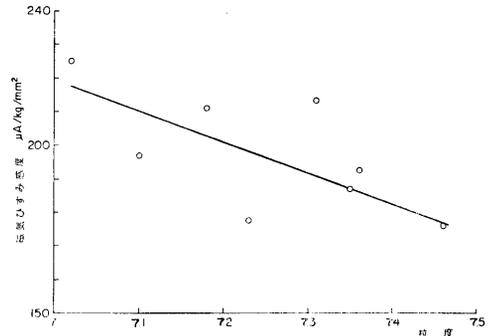
第一種試験片では、粒度の差は0.1~0.2粒度ぐらいであり、出力で、15~25 $\mu$ Aなので、この場合にはあまり粒度の事を考える必要はない。

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 $\mu$ A/kg/mm <sup>2</sup>
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 $\mu$ A/kg/mm <sup>2</sup>
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 $\mu$ 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 $\mu$ Aなので軟鋼で考えると約0.2kg/m<sup>2</sup>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 試片を補償片にNo.2 試片を標準片とした。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。

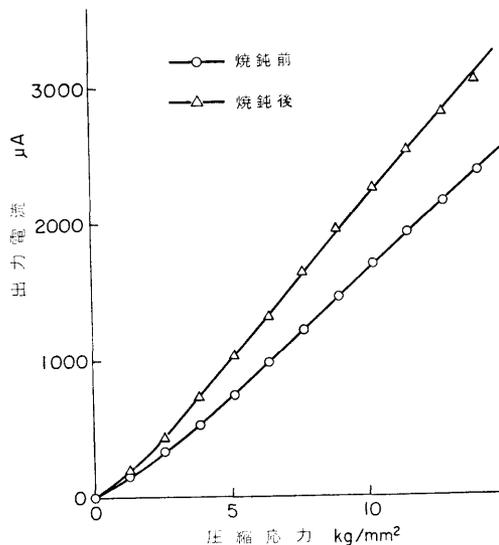


図-2.19 試験片の磁気ひずみ感度

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:  $\mu\text{A}$ 

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<sup>(51)</sup>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:  $\mu\text{A}$ 

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:  $\mu\text{A}$ 

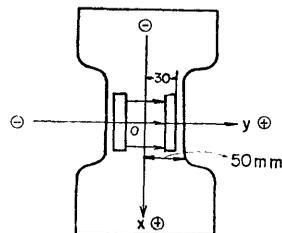
回数	No. 1		No. 2		No. 3	
	表	裏	表	裏	表	裏
1	0	65	170	80	205	140
2	5	70	175	80	192	130
3	5	65	170	80	195	130
4	6	75	170	72	195	120
5	6	75	170	50	190	120
6	5	75	170	80	195	100
7	0	70	170	84	190	100
平均	6	71	170	75	194	120
最大値-最小値	6	10	5	24	15	40

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: $\mu A$				
中心からの距離	不平衡電流 $\mu A$	$x \oplus$	$x \ominus$	$y \oplus$	$y \ominus$	
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。パフ研磨をすると表面が平らになり、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 $0.1\text{kg/mm}^2$ 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 $0.3\text{kg/mm}^2$ 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 $\pm 0.6\text{kg/mm}^2$ 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 $\pm 1\sim 2\text{kg/mm}^2$ 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。

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

$\sigma_0$  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<sup>(52)</sup>の測定や新幹線レールの熱応力の測定<sup>(53)(54)</sup>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<sup>(45)</sup>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)

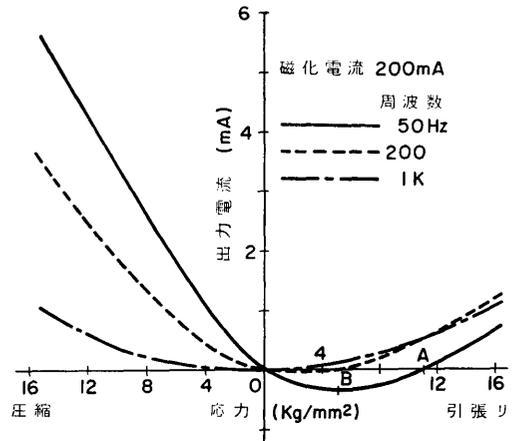


図-3.1 周波数による出力特性(引張と圧縮)

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<sup>(27)</sup>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

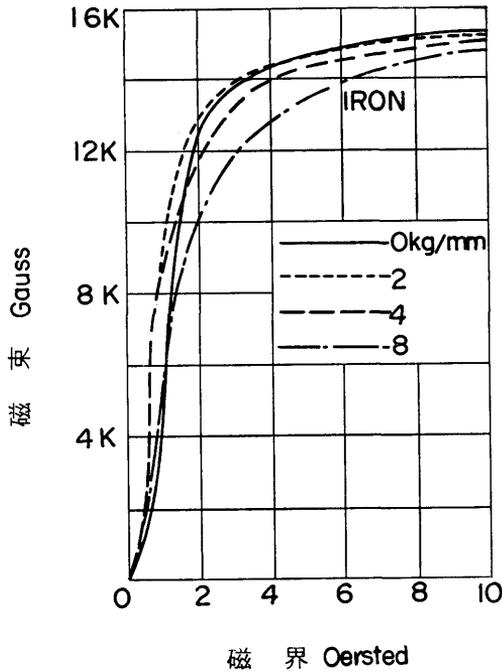


図-3.2 引張におけるB-H曲線

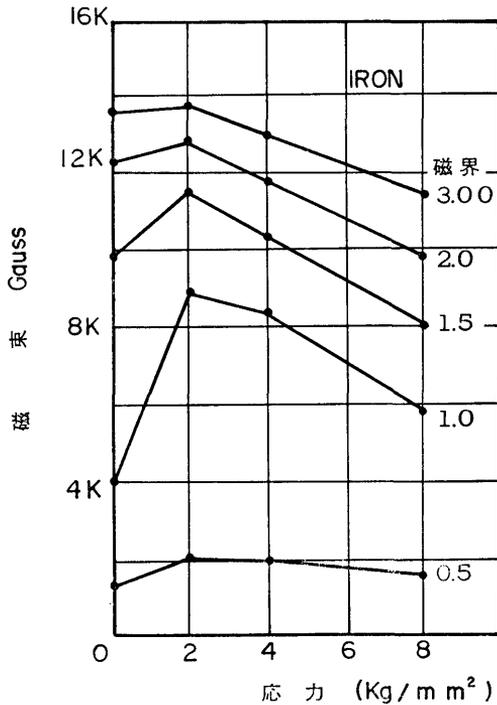


図-3.3 磁束と引張応力の関係

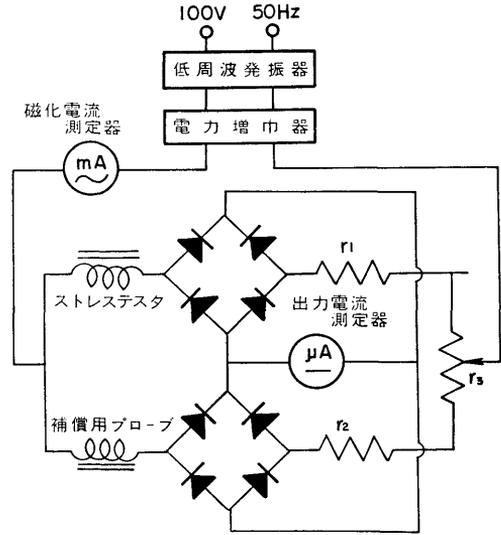


図-3.4 測定回路 (II)

究<sup>(27)</sup>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<sup>(45)</sup>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。

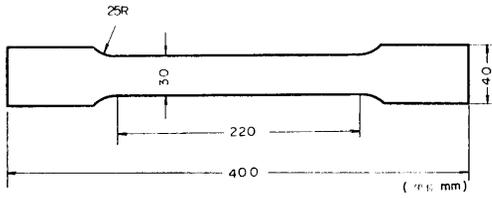


図-3.5 引張り試験片

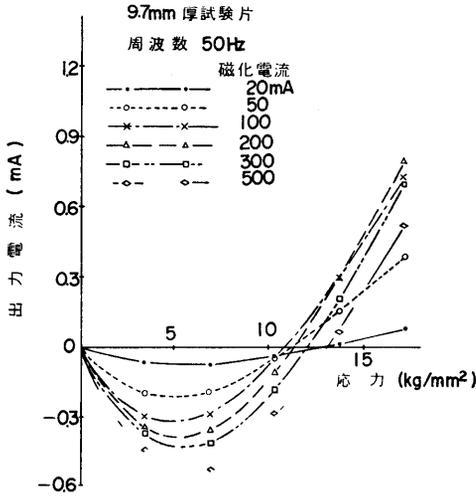


図-3.6 出力特性 (磁化電流変化)

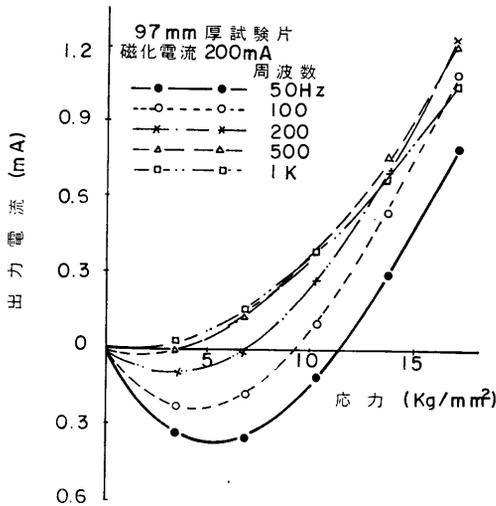


図-3.7 出力特性 (周波数変化)

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 )

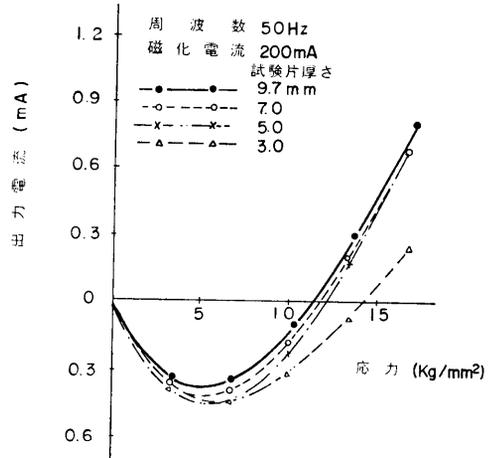


図-3.8 出力特性 (試験片厚さ変化)

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 近くにしなくてもその出力曲線は, 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 $-0.3\text{mA}$ とすると，これに対応する応力は， $3.5\text{kg/mm}^2$ と $7\text{kg/mm}^2$ となる。しかし，200Hzで測定した場合に，その出力電流が $-0.1\text{mA}$ になるか， $0.001\text{mA}$ 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のである。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。

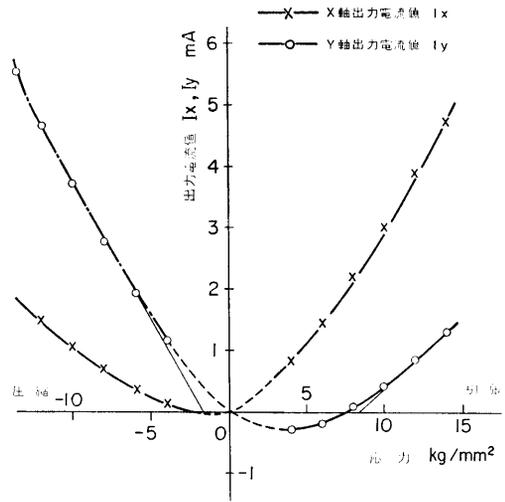
3.4 圧縮と引張の出力特性(I)

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

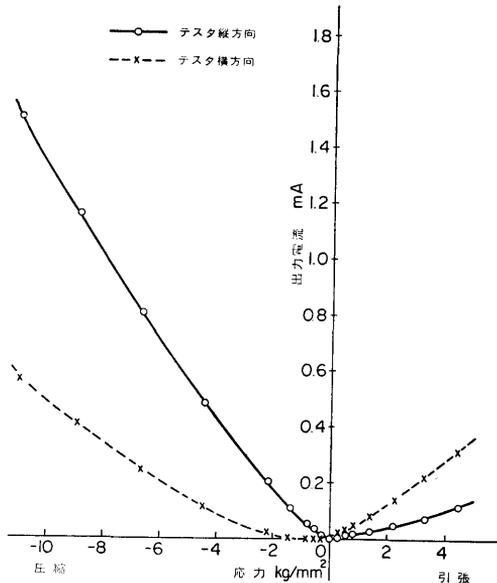


図-3.10 一つの試験片の圧縮-引張試験

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

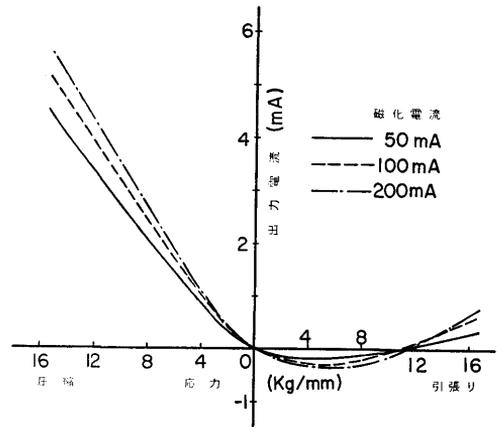


図-3.11 引張から圧縮までの出力特性 (磁化電流変化)

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

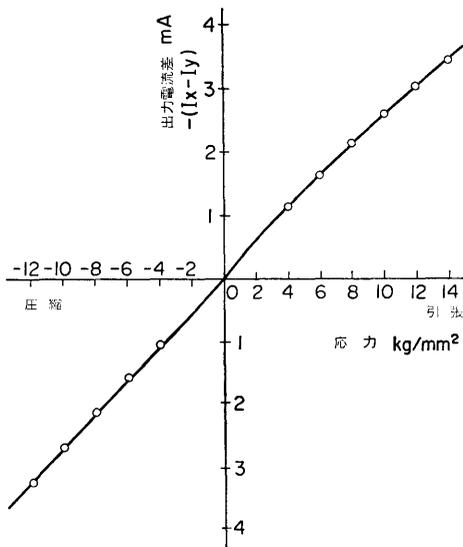


図-3.12 縦、横の出力電流差一応力曲線

は § 3.4.1 で使用した  $300 \times 50 \times 10 \text{ mm}$  の試験片 4 枚で、標準テスタ 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、標準テスタ 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

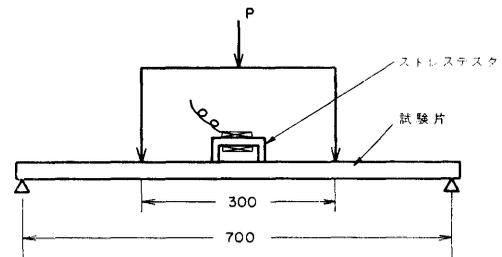


図-3.13 曲げの測定方法

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 $\mu\text{A}$	表	裏側 $\mu\text{A}$	裏		
80	$-9.5 \times 10^{-6}$	$100 \times 10^{-6}$	-40	$-90 \times 10^{-6}$	$102 \times 10^{-6}$
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

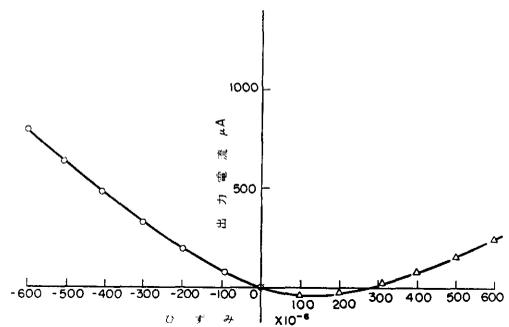


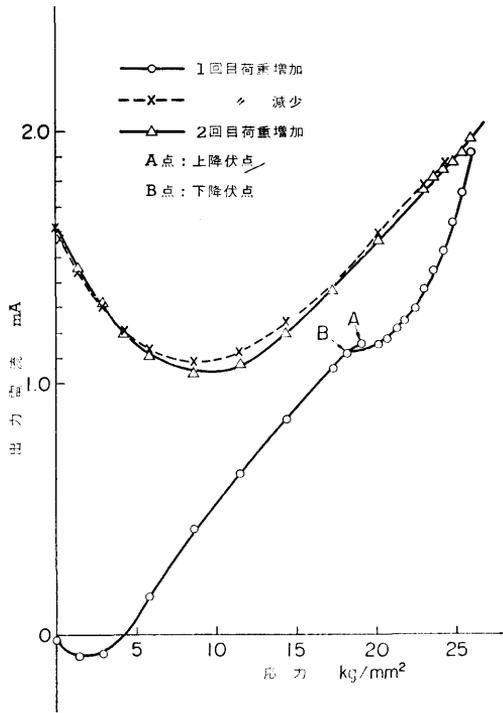
図-3.14 曲げによるひずみと出力電流の関係

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。テスタでは、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。

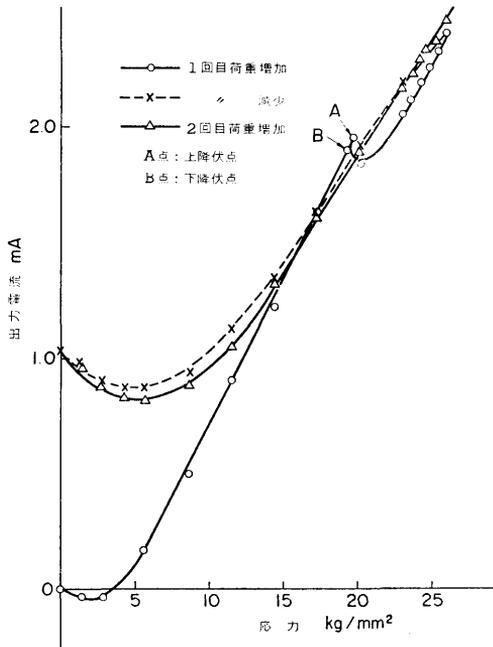
被測定材に曲げが生じているか、否かは、被測定材の表、裏について、応力方向とこれと直角方向を測定することにより、引張応力か、圧縮応力かの判断ができるので、曲げの存在を測定できる。

### 3.7 塑性域の応力

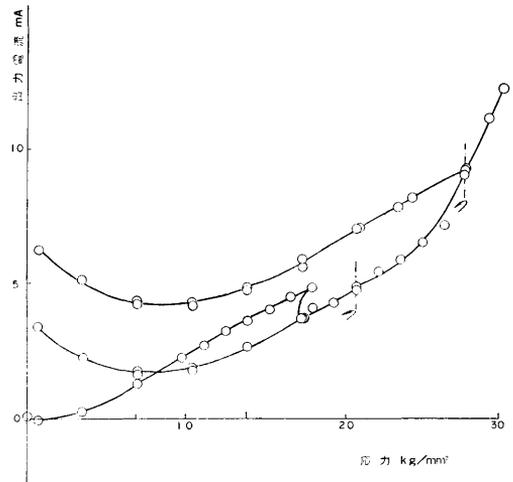
この測定法は、主として弾性域の応力測定を目的としているが、部分的には塑性応力が生じている部材を



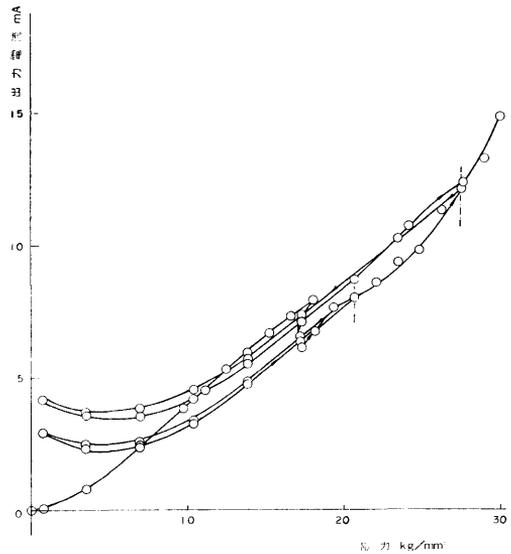
図—3.15 塑性域までの引張試験Ⅰ（縦方向）



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、310×60×3mm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400×60×3mmの引張試験片

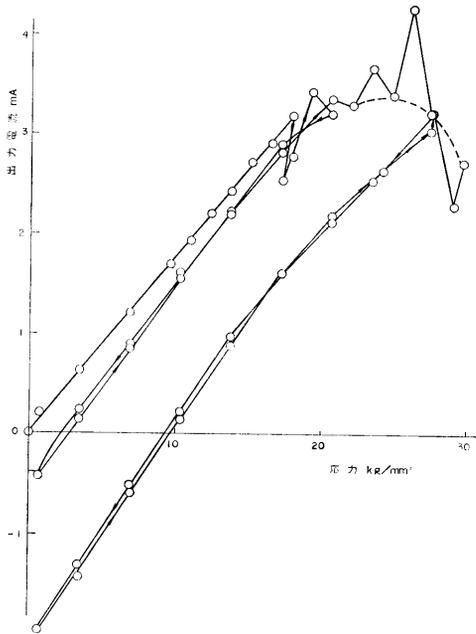


図-3.19 塑性域までの引張試験Ⅱ  
(縦横の出力電流差曲線)

で、すべて実験方法も図-3.15、図-3.16と同じであるが、降伏点を越えると一度応力をさげ、再び荷重をかけていき破断近くまで引張り、再び荷重を零にして、最後は破断まで引張試験をした。その時の出力電流を測定した結果が図-3.17、図-3.18である。図-3.17が荷重方向、図-3.18がこれと直角方向を示す。

図-3.19は、§3.5で述べた、出力電流差をとる方法で図-3.17、図-3.18をもとにした縦横の出力電流差曲線である。この曲線を見ると、塑性まで引張っても除荷すると、荷重を加えた場合に得られる直線と平行に下っていくことがわかる。これは図-3.15、図-3.16の場合もまったく同じで、出力電流差曲線は直線になり、除荷の場合にもこの直線と平行になっている。

図-3.19をみると、弾性域を越えると、この出力曲線は直線から曲線に変わり、一つの出力電流に対して二つの応力値となる、この二つの応力値の判別は、図-3.17、図-3.18をみればわかるが、塑性域では出力電流が非常に大きくなるのでまちがえることはない。

塑性域の応力が一部解放されたままの状態の場合には、図-3.19からわかるように、塑性域でその測定材に加えられた最大応力がわかれば、校正曲線を作ることによって、この場合の応力を求めることができる。

### 3.8 まとめ

本章においては、軟鋼の単軸応力状態の測定結果より、つぎのような結論を得た。

(1) 単軸圧縮初期応力の測定は、第二章に述べた測定方法にしたがえば、式(2.22)に示す誤差の範囲で測定できる。

(2) 単軸引張初期応力の測定は、周波数を変える方法、出力電流差をとる方法、横感度を測定して引張応力を推定する方法の三つがある。横感度を測定する方法が、圧縮の場合と同じ精度で測定でき、測定も簡単で実用的には最適な方法である。

(3) 磁気出力と引張、圧縮の関係は、本実験では引張、圧縮、両方の場合とも、一部引張の低応力の部分を除いて、応力の増大とともに、インピーダンスは減少する。磁気ひずみ感度は、圧縮の場合は引張の約3倍の感度があることがわかった。

(4) 引張と圧縮では横感度係数が異なり引張の場合は3~4、圧縮の場合は約0.3となり、引張と圧縮の両方とも正の符号をとる。

(5) 引張か圧縮かの応力の識別方法は、周波数を変化する法と(出力感度と引張は比例、圧縮は反比例、横感度を測定する方法(圧縮は縦感度の方が大、引張は小)とがある。

(6) 応力方向(縦)とこれと直角方向(横)の出力電流の差をとると、引張から圧縮まで直線性のよい応力-出力電流差曲線(図-3.12)が得られる。この方法は、単軸引張応力の測定、引張、圧縮の識別などに有効である。

(7) 曲げ残留応力の測定も、引張、圧縮両側の測定ができれば、単軸の場合と同様に測定することができる。

(8) 塑性域の残留応力の測定は、弾性域の場合と同様に測定できるが、塑性域の応力が一部解放された場合には、その測定材に加えられた最大応力(塑性応力)が既知ならば測定できる。

## 第4章 平面応力測定の基礎

### 4.1 緒言

前章では、単軸初期応力の測定が可能となった。磁気出力と引張、圧縮応力との関係、横感度なども明確となった。これらの事を基礎として、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。

平面応力状態の鋼板上にテストを当てた場合について、理論的考察をおこない、導いた理論式より、磁束

密度の変化と平面応力および測定方向との関係を求めた。また、この場合の磁束分布を実測して理論式と比較し、磁気出力と磁束分布の関係からテストの応力測定範囲を求めた。

テストの応力測定範囲を求める事は、磁気ひずみを利用する、この測定では、重要な事項なので、ひずみゲージとの同時測定による方法にとってこれを確認した。

横感度係数が磁氣的測定では、引張と圧縮で異なるが、平面応力の測定には、ポアソン比が必要なので、横感度係数が異なることをテストのインピーダンスを測定することによってこれを確かめ、ポアソン比に相当する。磁氣的ポアソン比を求めた。

本章では、テストは、標準テストI、正方形テスト、標準テストIIおよび長方形テストを使用しており、特に指定しない限りは、磁化電流は50Hz、300mAとした。使用試験片は長方形試験片と引張試験片である。

4.2 基礎理論

4.2.1 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。

$a$  ; 原点と磁極との距離 (テストの両極の半分の距離)

$B$  ; 磁束密度

$f(r)$  ; 磁極分布

$H$  ; 磁界の強さ

$H_1$  ;  $\sigma_1$  方向の磁界の強さ

$H_2$  ;  $\sigma_2$  方向の磁界の強さ

$H_L$  ;  $k=1$  の直線上の磁界の強さ

$K$  ; 感度係数

$k$  ; 等ポテンシャル面の定数

$m$  ; 磁極の強さ

$S_t$  ; テスタ方向の応力の磁気ひずみ感度

$S_c$  ; テスタと直角方向の応力の磁気ひずみ感度

$\mu$  ; 透磁率

$\mu_0$  ; 応力が生じていない場合の透磁率

$\sigma_1, \sigma_2$  ; 主応力

$\phi$  ; ポテンシャル

$\varphi$  ;  $k=1$  とおいた直線と軸とのなす角

$\Phi_1$  ;  $\sigma_1$  方向にテストを当てたとき、テストの中を流れる磁束の変化

$\Phi_2$  ;  $\sigma_2$  方向にテストを当てたとき、テストの中を流れる磁束の変化

$\Phi$  ; 磁界  $H$  の方向の磁束 (テストの中を流れる) の変化

$\varphi'$  ;  $\sigma_2$  方向と磁界の強さ  $H$  とのなす角

$\Delta\Phi_1$  ;  $H_1$  によって生じる単位長さ当りの磁束の変化

$\Delta\Phi_2$  ;  $H_2$  によって生じる単位長さ当りの磁束の変化

$\xi, \eta$  ; テンソル主軸の方向

$\theta$  ;  $x$  軸と  $\xi$  軸のなす角

$\delta(x)$  ; デルタ関数  $\delta(x)$

$\nu_m$  ; 磁氣的ポアソン比  $\nu_m = S_t/S_c$

4.2.2 ストレストестаの磁界

平面応力の生じている平板 (鋼板) の上にストレストестаを当てた場合について考える。テストに電流を流すと、テストの両足が磁極となる。図-4.1のように座標軸をとると、 $x$  軸がストレストестаの方向で、 $\pm a$  の位置に  $\pm m$  の強さの磁極が生じる。

平面応力が作用していると、磁気ひずみにより磁界が変化すると考えられる。 $B$  と  $H$  との間には、 $\mu$  をテンソルとすると、次の関係がある。ここでは、二次元で考えるので、 $B_z, H_z$  はともに零である。

$$\left. \begin{aligned} B_x &= \mu_{11}H_x + \mu_{12}H_y \\ B_y &= \mu_{21}H_x + \mu_{22}H_y \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.1)$$

源泉のある場合の Maxwell の方程式は

$$\text{div } B = \sum mf(r) \dots\dots(4.2)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} \\ H_y &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.3)$$

(4.1), (4.3) より

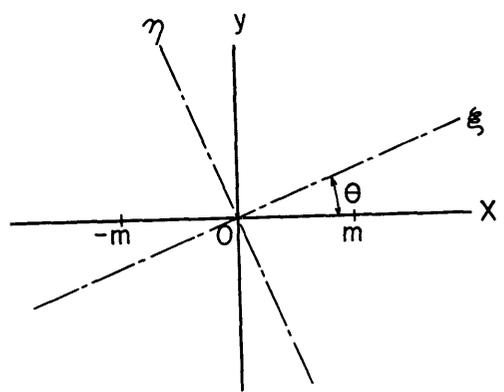


図-4.1 磁極の位置

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial x} &= -\mu_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \mu_{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial B_y}{\partial y} &= -\mu_{21} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} - \mu_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4.4)$$

$$\text{div } B = - \left[ \mu_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (\mu_{12} + \mu_{21}) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial x} + \mu_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right] \dots\dots (4.5)$$

いま、磁極分布は、 $\delta_{(x)}$ 、 $\delta_{(y)}$  をデルタ関数とする。 $\delta_{(x-a)} = \delta_{x(a)}$ 、 $\delta_{(y-0)} = \delta_{y(0)}$  と書くと、図-4.1より

$$\Sigma m f(r) = m \delta_{x(a)} \delta_{y(0)} - m \delta_{x(-a)} \delta_{y(0)} \dots\dots (4.6)$$

(4.2), (4.5), (4.6) より

$$\begin{aligned} \mu_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (\mu_{12} + \mu_{21}) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + \mu_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ = -m \delta_{x(a)} \delta_{y(a)} + m \delta_{x(-a)} \delta_{y(0)} \end{aligned} \dots\dots (4.7)$$

座標をテンソル主軸方向 ( $\xi$ ,  $\eta$ ) に変換する。図-4.1に示すように、 $x$  軸と  $\xi$  軸とのなす角を  $\theta$  とすると、

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ \eta &= -x \sin \theta + y \cos \theta \\ \tan 2\theta &= \frac{\mu_{21} + \mu_{12}}{\mu_{11} - \mu_{22}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4.8)$$

の関係があり、新座標系における透磁率の成分、 $\mu_\xi$ 、 $\mu_\eta$  は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \mu_\xi &= \mu_{11} \cos^2 \theta + \mu_{22} \sin^2 \theta \\ &\quad + (\mu_{21} + \mu_{12}) \cos \theta \sin \theta \\ \mu_\eta &= \mu_{11} \sin^2 \theta + \mu_{22} \cos^2 \theta \\ &\quad - (\mu_{21} + \mu_{12}) \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots (4.9)$$

$m$  点は、 $x$ - $y$  座標系では  $(a, 0)$  だが、新座標  $\xi$ - $\eta$  座標系では、 $(a \cos \theta - a \sin \theta)$  となる。 $-m$  点は、同様に  $\xi$ - $\eta$  座標系では  $(a \cos \theta, a \sin \theta)$  である。

また、 $\xi$ 、 $\eta$  はテンソル主軸方向にとったのだから、式 (4.7) の左辺の第二項が消えて次式となる。

$$\begin{aligned} \mu_\xi \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + \mu_\eta \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} &= -\delta_x(a \cos \theta) \delta_y(-a \sin \theta) \\ &\quad + m \delta_x(-a \cos \theta) \delta_y(a \sin \theta) \end{aligned} \dots\dots (4.10)$$

つぎに、 $\xi = \xi' \sqrt{\mu_\xi}$ 、 $\eta = \eta' \sqrt{\mu_\eta}$  とおく、すなわち  $\xi$ - $\eta$  軸を  $1/\sqrt{\mu_\xi}$ 、 $1/\sqrt{\mu_\eta}$  だけ縮めて、これを  $\xi'$ 、 $\eta'$  とおいたと考える。

$m$  点の座標は、 $\xi$ - $\eta$  座標では、 $a \cos \theta$ 、 $-a \sin \theta$  だが、 $\xi'$ - $\eta'$  座標では、 $a \cos \theta / \sqrt{\mu_\xi}$ 、 $-a \sin \theta / \sqrt{\mu_\eta}$

となる。また、 $\delta(a \cos \theta / \sqrt{\mu_\xi}) = \sqrt{\mu_\xi} \delta(a \cos \theta)$  であるから、式 (4.10) は、次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi'^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta'^2} &= -m \delta_x(a \cos \theta / \sqrt{\mu_\xi}) \\ &\quad \delta_y(-a \sin \theta / \sqrt{\mu_\eta}) / \sqrt{\mu_\xi \mu_\eta} \\ &\quad + m \delta_x(-a \cos \theta / \sqrt{\mu_\xi}) \\ &\quad \delta_y(a \sin \theta / \sqrt{\mu_\eta}) / \sqrt{\mu_\xi \mu_\eta} \end{aligned} \dots\dots (4.11)$$

ここで、 $\xi' = \xi$ 、 $\eta' = \eta$  と書きかえると、上式の解は、

$$\phi = \frac{m}{2 \sqrt{\mu_\xi \mu_\eta}} \log \frac{(\xi' + a \cos \theta)^2 / \mu_\xi + (\eta - a \sin \theta)^2 / \mu_\eta}{(\xi' - a \cos \theta)^2 / \mu_\xi + (\eta + a \sin \theta)^2 / \mu_\eta} \dots\dots (4.12)$$

ゆえに、等ポテンシャル面は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{(\xi + a \cos \theta)^2 / \mu_\xi + (\eta - a \sin \theta)^2 / \mu_\eta}{(\xi - a \cos \theta)^2 / \mu_\xi + (\eta + a \sin \theta)^2 / \mu_\eta} \\ = \text{一定} = k \end{aligned} \dots\dots (4.13)$$

これを書きかえると

$$\begin{aligned} \frac{\left( \xi + a \cos \theta \frac{1+k}{1-k} \right)^2}{\mu_\xi \cdot \frac{4k}{(1-k)^2} \left( \frac{a^2 \cos^2 \theta}{\mu_\xi} + \frac{a^2 \sin^2 \theta}{\mu_\eta} \right)} \\ + \frac{\left( \eta - a \sin \theta \frac{1+k}{1-k} \right)^2}{\mu_\eta \frac{4k}{(1-k)^2} \left( \frac{a^2 \cos^2 \theta}{\mu_\xi} + \frac{a^2 \sin^2 \theta}{\mu_\eta} \right)} \end{aligned} \dots\dots (4.14)$$

すなわち、だ円となる。等ポテンシャル面の式 (4.13) において、 $k=1$  とおくと

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu_\xi} (\xi + a \cos \theta)^2 + \frac{1}{\mu_\eta} (\eta - a \sin \theta)^2 \\ = \frac{1}{\mu_\xi} (\xi - a \cos \theta)^2 + \frac{1}{\mu_\eta} (\xi + a \sin \theta)^2 \end{aligned} \dots\dots (4.15)$$

$$\therefore \eta = \frac{\mu_\eta \cos \theta}{\mu_\xi \sin \theta} \xi \dots\dots (4.16)$$

この式 (4.16) の直線と、 $\xi$  軸とのなす角を  $\varphi$  とすると、図-4.2と式 (4.16) より、

$$\tan \varphi = \frac{\eta}{\xi} = \frac{\mu_\eta \cdot \cos \theta}{\mu_\xi \cdot \sin \theta} \dots\dots (4.17)$$

$$\left. \begin{aligned} H_\xi &= \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \\ H_\eta &= -\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4.18)$$

であるから式 (4.12) を  $\xi$ 、 $\eta$  で偏微分すると、

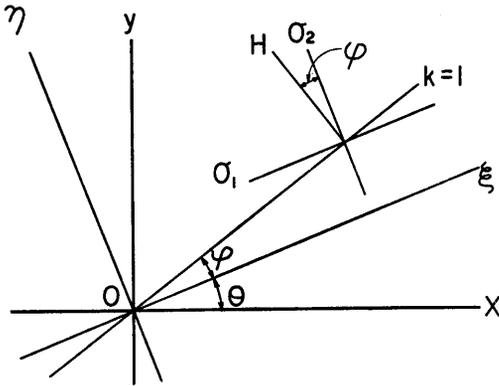


図-4.2 テンソルの主軸と磁界の方向

$$H_{\xi} = \frac{-m}{2\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \left\{ \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta-a\sin\theta)^2} - \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta+a\sin\theta)^2} \right\}$$

$$H_{\eta} = \frac{-m}{2\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \left\{ \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\eta-a\sin\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta-a\sin\theta)^2} - \frac{\frac{2}{\mu_{\eta}}(\eta+a\sin\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta+a\sin\theta)^2} \right\}$$

.....(4.19)

この式が任意の点の磁界の強さを与える式である。  
 $k=1$  の直線上の磁界の強さ  $H_L$  を求めるために、  
 式 (4.19) を変形して、

$$H_{\xi} = \frac{-m}{2\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \left\{ \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta-a\sin\theta)^2} - \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta+a\sin\theta)^2} \right. \\ \left. + \frac{1}{\mu_{\xi}}(4a\xi\cos\theta) - \frac{1}{\mu_{\eta}}(4a\eta\sin\theta) \right\}$$

.....(4.20)

$H_{\eta}$  も同様である。  
 $k=1$  の直線上では、式 (4.16) が成立つので、これを用いると、

$$\frac{1}{\mu_{\xi}}(4a\xi\cos\theta) - \frac{1}{\mu_{\eta}}(4a\eta\sin\theta) = 4a \left( \frac{\xi\cos\theta}{\mu_{\xi}} - \frac{\eta\sin\theta}{\mu_{\eta}} \right) = 0$$

これを式 (4.20) に代入すると

$$H_{\xi} = \frac{-m}{2\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \cdot \frac{\frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta) - \frac{2}{\mu_{\xi}}(\xi-a\cos\theta)}{\frac{1}{\mu_{\xi}}(\xi+a\cos\theta)^2 + \frac{1}{\mu_{\eta}}(\eta-a\sin\theta)^2} \\ = \frac{-2ma\cos\theta}{\mu_{\xi}\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \left\{ \frac{1}{\frac{(\xi+a\cos\theta)^2/\mu_{\xi}}{+(\eta-a\sin\theta)^2/\mu_{\eta}}} \right\} = H_{L\xi}$$

同様に

$$H_{\eta} = \frac{-2ma\sin\theta}{\mu_{\eta}\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \left\{ \frac{1}{\frac{(\xi+a\cos\theta)^2/\mu_{\xi}}{+(\eta-a\sin\theta)^2/\mu_{\eta}}} \right\} = H_{L\eta}$$

.....(4.21)

$k=1$  の直線上の  $|H_L|$  を求めると

$$|H_L| = \sqrt{H_{L\xi}^2 + H_{L\eta}^2} \\ = \frac{2ma}{\sqrt{\mu_{\xi}\mu_{\eta}}} \frac{\sqrt{(\cos\theta/\mu_{\xi})^2 + (\sin\theta/\mu_{\eta})^2}}{(\xi+a\cos\theta)^2/\mu_{\xi} + (\eta-a\sin\theta)^2/\mu_{\eta}}$$

.....(4.22)

として求めることができる。

### 4.2.3 基礎式の誘導

平面応力状態において、直交する二つの主応力を  $\sigma_1, \sigma_2$  とし、その一つの主応力、例えば  $\sigma_1$  方向にテストを当てると、 $\sigma_1, \sigma_2$  による  $\Phi_1, \Phi_2$  は

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= S_l\sigma_1 + S_t\sigma_2 = S_l \left( \sigma_1 + \frac{S_t}{S_l}\sigma_2 \right) \\ &= S_l(\sigma_1 + \nu_m\sigma_2) \\ \Phi_2 &= S_l(\sigma_2 + \nu_m\sigma_1) \end{aligned} \right\} \text{.....(4.23)}$$

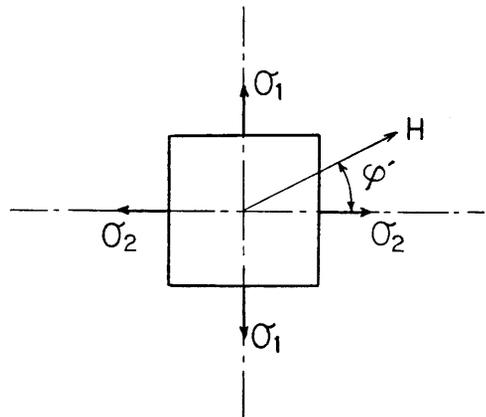


図-4.3 主応力と磁界の方向

いま、平面応力状態において、弾性体内の微小部分を考え、主応力と磁界の方向が、図-4.3に示すような場合を考える。式(4.23)は、主応力方向と磁界の方向が一致している場合である。図-4.3より

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= H \sin \varphi' \\ H_2 &= H \cos \varphi' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.24)$$

一般に

$$S_l = K \cdot H^{(55)} \quad \dots\dots(4.25)$$

ここに  $K$  は、感度係数で、正しくは磁界の強さ  $H$  の関係であるが、ここでは簡単のために式(4.25)のように近似する。

$\sigma_1$  方向について考えると、主応力方向であるから、その方向の応力は  $\sigma_1$  だけであり、磁界の強さは  $H_1 = H \sin \varphi'$  である。また  $\sigma_2$  方向についても同様である。

$\sigma_1$  方向の磁界の強さ  $H_1$  によって生じる単位長さ当りの磁束の変化  $\Delta\Phi_1$  は、式(4.23)、(4.24)、(4.25)より

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Phi_1 &= KH_1(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \\ &= K(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \cdot H \cdot \sin \varphi' \\ \text{同様に } \sigma_2 \text{ 方向では} \\ \Delta\Phi_2 &= K \cdot (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \cdot H \cos \varphi' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.26)$$

ゆえに、磁界  $H$  によって生じる、単位長さ当りの磁束の変化  $\Delta\Phi$  は、

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Delta\Phi_1 \sin \varphi' + \Delta\Phi_2 \cos \varphi' \\ &= K[(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \sin^2 \varphi' \\ &\quad + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \cos^2 \varphi' \cdot H \quad \dots\dots(4.27) \end{aligned}$$

いま、テストを図-4.1に示すように、 $x$  軸上におくと、テストの両磁極間の全磁束は、式(4.13)に示す等ポテンシャル面に直交するように通る。すなわち、図-4.2からもわかるように、両極間の全磁束は  $k=1$  の直線等ポテンシャル面を通過する。そこで  $\Delta\Phi$  を  $k=1$  の直線等ポテンシャル面上で積分する。

$\sigma_1, \sigma_2$  は  $\xi, \eta$  方向であり、 $k=1$  の直線上では、磁界の強さ  $H$  の方向(ここでは  $H_L$ )は、この直線に対して直交しているので、図-4.2、図-4.3からわかるように  $\varphi' = \varphi$  となる。 $k=1$  の直線上で積分するので、式(4.27)に式(4.22)で求めた  $H_L$  を代入すると

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \frac{2maK}{\sqrt{\mu_\xi \mu_\eta}} \{ (\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \sin^2 \varphi \\ &\quad + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \cos^2 \varphi \} \\ &\quad \times \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu_\xi} \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{\mu_\eta} \sin \theta\right)^2}}{(\xi + a \cos \theta)^2 / \mu_\xi + (\eta - a \sin \theta)^2 / \mu_\eta} \\ &\quad \dots\dots(4.28) \end{aligned}$$

全磁束変化を  $\Phi$ 、 $k=1$  の直線上の線分を  $l$  とする

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta\Phi dl, \quad dl = \frac{d\xi}{\cos \varphi} \quad \dots\dots(4.29)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{2maK}{\sqrt{\mu_\xi \mu_\eta}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\mu_\xi} \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{\mu_\eta} \sin \theta\right)^2}{\cos \varphi} \\ &\quad \{ (\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \sin^2 \varphi + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \cos^2 \varphi \} \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\xi}{\frac{1}{\mu_\xi} (\xi + a \cos \theta)^2 + \frac{1}{\mu_\eta} (\eta - a \sin \theta)^2} \\ &\quad \dots\dots(4.30) \end{aligned}$$

$k=1$  の直線上では  $\eta = \mu_\eta \cos \theta / \mu_\xi \sin \theta$ 、 $\xi = \xi \tan \theta$  だから、

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\xi}{\frac{1}{\mu_\xi} (\xi + a \cos \theta)^2 + \frac{1}{\mu_\eta} (\eta - a \sin \theta)^2} \\ &= 2 \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{\frac{1}{\mu_\xi} a^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{\mu_\eta} a^2 \sin^2 \theta + \left(\frac{1}{\mu_\xi} + \frac{1}{\mu_\eta} \tan^2 \varphi\right) \xi^2} \\ &= \frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu_\xi} a^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{\mu_\eta} a^2 \sin^2 \theta\right) \left(\frac{1}{\mu_\xi} + \frac{1}{\mu_\eta} \tan^2 \varphi\right)}} \\ &\quad \dots\dots(4.31) \end{aligned}$$

式(4.30)に式(4.31)を代入すると

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{2\pi mK}{\sqrt{\mu_\xi \mu_\eta}} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu_\xi} \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{\mu_\eta} \sin \theta\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu_\xi} \cos^2 \theta + \frac{1}{\mu_\eta} \sin^2 \theta\right)}} \cdot \\ &\quad * \frac{[(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \sin^2 \varphi + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \cos^2 \varphi]}{\left(\frac{1}{\mu_\xi} \cos^2 \varphi + \frac{1}{\mu_\eta} \sin^2 \varphi\right)} \\ &\quad \dots\dots(4.32) \end{aligned}$$

$k=1$  の直線上では、式(4.16)が成立つので、式(4.17)より

$$\left. \begin{aligned} \cos^2 \varphi &= \frac{\mu_\xi^2 \sin^2 \theta}{\mu_\xi^2 \sin^2 \theta + \mu_\eta^2 \cos^2 \theta} \\ \sin^2 \varphi &= \frac{\mu_\eta^2 \cos^2 \theta}{\mu_\xi^2 \sin^2 \theta + \mu_\eta^2 \cos^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.33)$$

式(4.32)に式(4.33)を代入し整理すると、

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{2\pi mK}{\sqrt{\mu_\xi \mu_\eta}} \cdot \frac{\frac{1}{\mu_\xi \mu_\eta} \sqrt{\mu_\eta^2 \cos^2 \theta + \mu_\xi^2 \sin^2 \theta}}{\frac{1}{\mu_\xi \mu_\eta} \sqrt{(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \mu_\eta^2 \cos^2 \theta + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \mu_\xi^2 \sin^2 \theta}} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_\xi \mu_\eta} \sqrt{(\mu_\eta \cos^2 \theta + \mu_\xi \sin^2 \theta)}} \\ &\quad \cdot \frac{(\mu_\xi^2 \sin^2 \theta + \mu_\eta^2 \cos^2 \theta)}{(\mu_\xi \sin^2 \theta + \mu_\eta \cos^2 \theta)} \\ \Phi &= \frac{2\pi mK}{\mu_\xi \mu_\eta} \cdot \frac{[(\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \mu_\eta^2 \cos^2 \theta + (\sigma_2 + \nu_m \sigma_1) \mu_\xi^2 \sin^2 \theta]}{\mu_\xi \sin^2 \theta + \mu_\eta \cos^2 \theta} \\ &\quad \dots\dots(4.34) \end{aligned}$$

これが求めようとする基礎式である。

いま、テストを主応力方向  $\sigma_1$  においた場合を考えると、式 (4.34) で  $\theta=0$  であるから

$$\Phi_1 = \frac{2\pi m K}{\mu \epsilon} (\sigma_1 + \nu_m \sigma_2) \quad \dots\dots(4.35)$$

となる。

式 (4.34) に、 $\mu \epsilon$ 、 $\mu \eta$ 、 $\nu_m$  を実測して代入してみる。一番実験しやすい二軸圧縮の場合について求めてみる。磁氣的ポアソン比  $\nu_m$  は§4.4.3に述べるが、 $\nu_m=0.3$  という値が求まっているので、これを使用する。つぎに  $\mu \epsilon$ 、 $\mu \eta$  であるが、これは、次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \mu \epsilon &\doteq K'(\sigma_1 + 0.3\sigma_2) + \mu_0 \\ \mu \eta &\doteq K'(\sigma_2 + 0.3\sigma_1) + \mu_0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.36)$$

式 (4.36) は式 (4.23)、式 (4.25) より求められる。ここに  $K'$  は比例定数であり、 $\mu_0$  は応力が生じていない場合の透磁率である。 $\mu_0$  は次のようにして実験により近似的に求められる。図-2.2の測定回路において、ブリッジのインピーダンスは約  $400\Omega$  であり、応力を  $0\sim 12\text{kg/mm}^2$  変化させたときのインピーダンスの変化は  $16\Omega$  であった。このことより、式 (4.36) の右辺の第一項と第二項の比を次のように仮定する。

$$\frac{K'(\sigma_1 + 0.3\sigma_2)}{\mu_0} = \frac{12K'}{\mu_0} = \frac{16}{400} \quad \dots\dots(4.37)$$

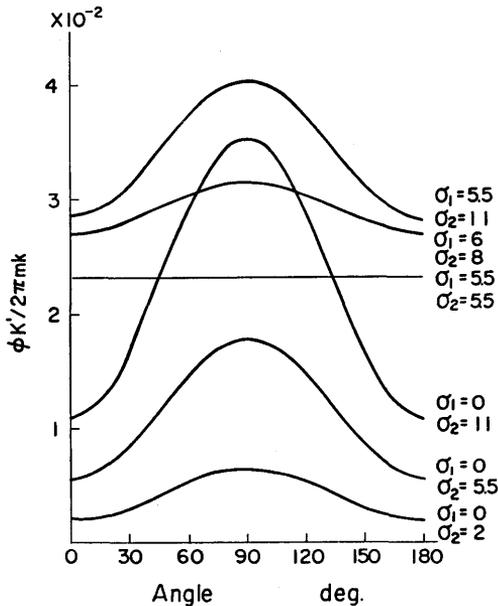


図-4.4 理論値 (式4.34)

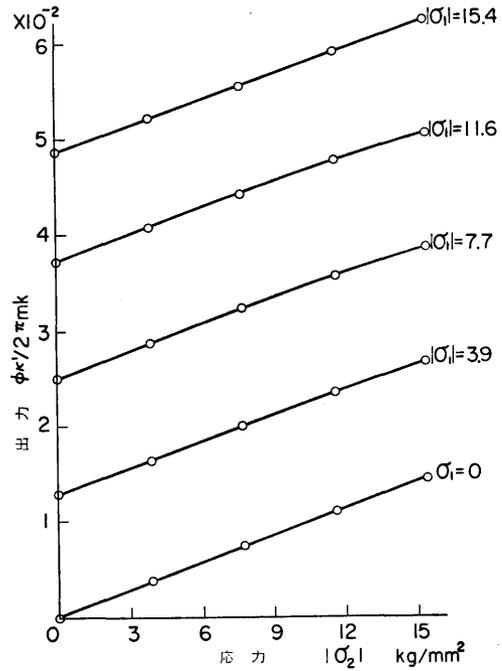


図-4.5 論値式 (4.35)

上式より  $\mu_0=300K'$  と求まる。ゆえに、式 (4.36) は、

$$\left. \begin{aligned} \mu \epsilon &\doteq K'(\sigma_1 + 0.3\sigma_2 + 300) \\ \mu \eta &\doteq K'(\sigma_2 + 0.3\sigma_1 + 300) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.38)$$

これらの値を式 (4.34) に代入すると、図-4.4 となる。この図で縦軸は  $\Phi K' / 2\pi m k$  であり、横軸は、テストを測定点の周りに回転させた角度  $\theta$  を示す。主応力方向は  $\theta=0, 90^\circ$  の方向である。

また、図-4.5は式 (4.35) に、 $\nu_m=0.3$  と式 (4.38) から求まる、 $\mu \epsilon$ 、 $\mu \eta$  を代入した、二軸圧縮の場合である。この図も縦軸は  $\Phi K' / 2\pi m k$  であり、横軸に  $\sigma_2$ 、パラメータに  $\sigma_1$  をとっている。これは、テストを主応力方向に置いた場合であるが、詳細は§5.2で述べる。ここでは図-4.4について考える。

図-4.4からあきらかなように、この曲線群はすべて主応力方向の  $90^\circ, 0^\circ$  で出力が最大、最小となる。また主応力差と、その二つの方向の出力電流差は一対一に対応し、比例していることがわかる。たとえば  $\sigma_1=0, \sigma_2=2$  の場合、主応力差2で、 $90^\circ$  方向(最大値)と  $0^\circ$  方向(最小値)の出力電流差は0.0046となっており、 $\sigma_1=6, \sigma_2=8$  の場合も主応力差2、出力電流差0.0044となっている。

表-4.1  $\Phi K'/2\pi mK$  の値 ( $\sigma_1=\sigma_2$ )

$\sigma_1 = \sigma_2$ の値	$\Phi K' / 2 \pi m K$
1	$0.4314 \times 10^{-2}$
2	0.8592
4	1.7038
6	2.5391
8	3.3351
10	4.5136
15	6.1033
20	7.9756
25	9.7741
30	11.5044

また、二つの主応力が等しい場合には、いわゆる円応力状態となり、どの角度でも等しい値をとる。この場合、 $\sigma_1=\sigma_2$  の大きさによって表-4.1 のように  $\Phi K'/2\pi mK$  の値は変化する。これは式 (4.34) に  $\sigma_1=\sigma_2$  を代入すると、式 (4.36) より  $\Phi K'/2\pi mK = (\sigma_1 + \nu_m \sigma_1) / (\sigma_1 + \nu_m \sigma_1 + 300)$  となり、分母が分子にくらべて大きいので、 $\sigma_1$  が2倍になれば  $\Phi K'/2\pi mK$  の値も約2倍になる。しかし、表-4.1 からわかるように、 $\sigma_1=1$  の場合と  $\sigma_1=10$  の場合では、10倍ではなく9.636倍となっている。

これらのことから、磁気ひずみ効果を利用した測定の場合には式 (4.34)、図-4.4 からわかるように、主応力方向と、主応力差を正しく求めることができる。このことが正負が不明で不均一な応力状態の場合の残留応力を測定する場合に、せん断応力差積分法を用いて解析をおこなう理論的な基礎となる。

### 4.3 磁束分布と応力の関係

#### 4.3.1 磁束分布の測定

一軸引張りにおいて、磁気的な測定独特の出力特性を示し、試験片の形状によっても、その出力特性が異なる場合があるので、複雑な平面応力を測定する前に、ストレステスタによる磁束分布を求めてみた。

抵抗線ひずみゲージは、ゲージ長間のひずみのみを示すが、ストレステスタは、写真-5 のように、磁束が二極間だけでなく、被測定材の中にひろがるので、テスタの出力は、ある程度の強さの磁束が生じている部分の応力の平均を示すと思われる。そこで、テスタを鋼板に当てた場合、各点の磁束の方向および大きさを求め、テスタからどれだけ離れた部分の応力がテスタの出力にどのような影響を与えるかをしらべるために、その磁束分布を測定した。

写真-5 は紙面上に鉄粉をおき、下からテスタを当

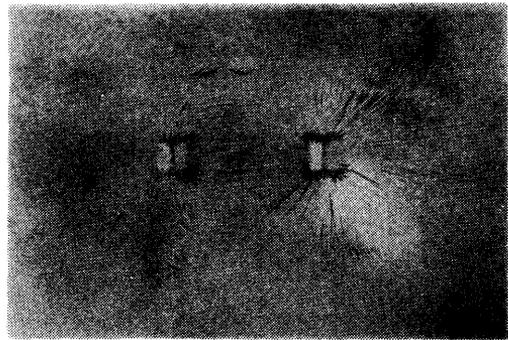


写真-5 テスタの磨束分布

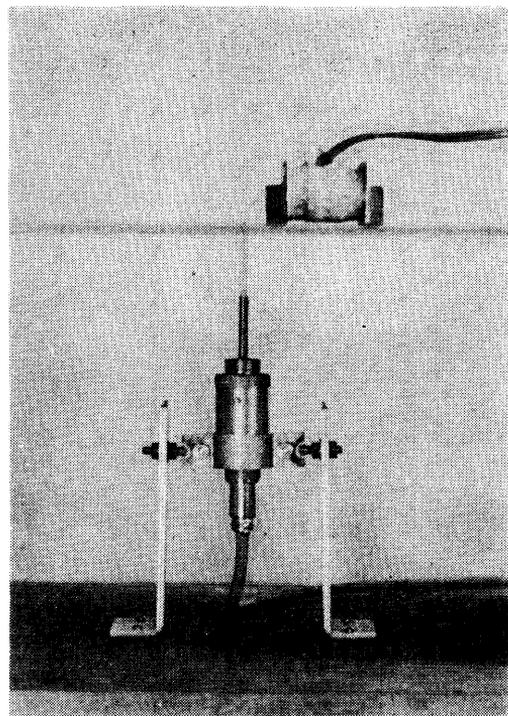


写真-6 磁束密度の測定方法

てた場合で、写真-6 は磁束分布を測定している写真である。鋼板 (500×500×3) の中央にスリット (3.5×1×3) をあけ、磁束計のホールプローブ (厚さ0.8 mm、幅3 mm) を挿入し、ストレステスタを動かして、テスタとホールプローブとの距離を変えて磁束分布を測定した。鋼板に写真-7 のように、1 cm 間隔で縦横に線を引き、各交点を測定点とした。ホールプローブを鋼板中央に固定し、ストレステスタに対して、プローブが同方向および直角方向を向いた時の磁束密度をそれぞれ、 $B_x$ 、 $B_y$  とすれば、その点における磁

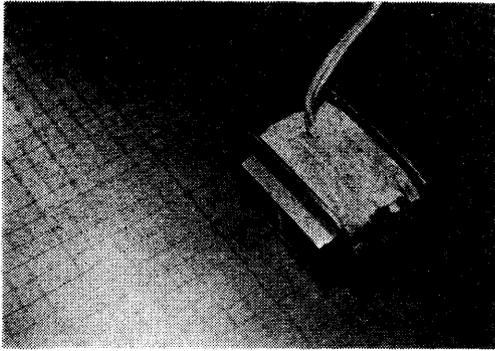


写真-7 磁束密度の測定

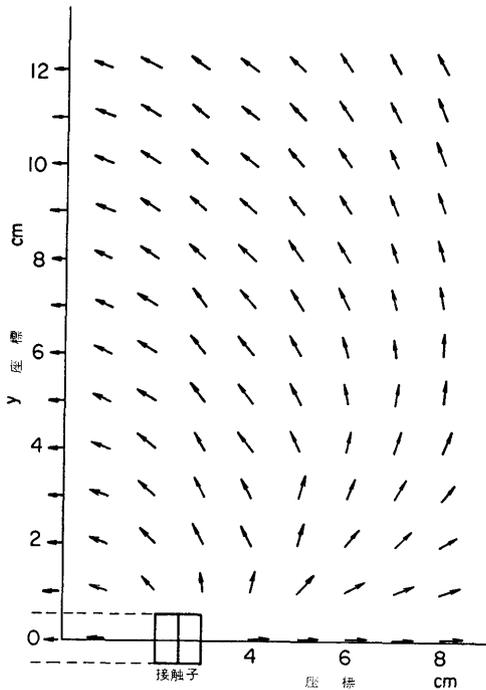


図-4.6 標準テスト I の磁束の方向

束密度の大きさは、 $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  その方向は  $\tan^{-1}(B_x/B_y)$  で求められる。図-4.6 に標準テスト I の場合の磁束の方向、図-4.7 に磁束密度を示している。左右前後は対称なので、第 1 象限のみを示している。図-4.7 で磁束密度の値が非常に小さく出ているが、これはホールプローブを挿入するために、やむをえず鋼板にスリットをあけたからである。しかし、図-4.7 が写真-5 と同じ形を示していることから考えても、この図が鋼板の各位置の磁束密度の相対的な値を示していると考えてさしつかえないと思う。

図-4.7 から、測定点から 3 cm 離れると磁束密度は

( 38 )

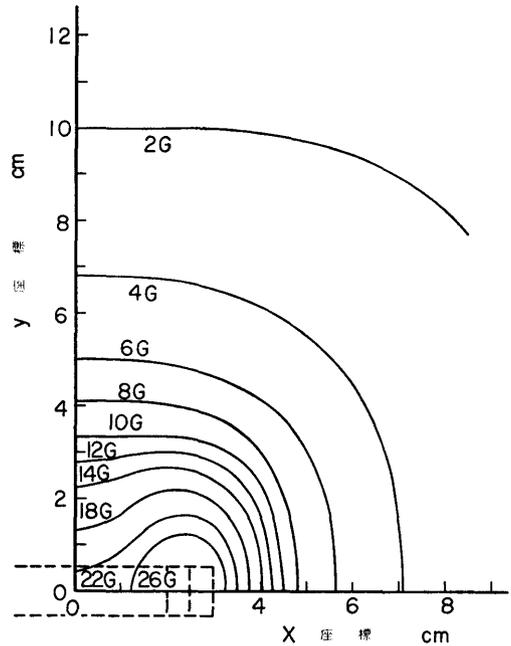


図-4.7 標準テスト I の場合の磁束分布図

約 1/2, 5 cm (テストの磁極間距離) で、1/5, 10cm で 1/13 になっていることがわかった。

つぎに、§4.2 で求めた理論式より、測定点からの距離と磁界の強さとの関係を探ってみる。式 (4.22) において  $\theta=0$  すなわち、テストの方向が主軸の方向と一致した場合には、

$$|HL| = \frac{2ma\mu_\xi}{\sqrt{\mu_\eta\mu_\xi \{ \mu_\eta(a+\xi)^2 + \mu_\xi\eta^2 \}}} \dots\dots(4.39)$$

$\theta=0$  としたので式 (4.17) より  $\varphi=\pi/2$  となる。すなわち、 $k=1$  の直線は、 $\eta$  軸と一致する。いま、無応力状態のときを考えると  $\mu_\xi=\eta$ 、このとき  $\eta=\xi=0$  すなわち、原点の  $|HL|_0$  と、原点からの距離  $\eta=2a(\xi=0)$  の  $|HL|_{\eta=2a}$  との比は式 (4.39) より

$$\frac{|HL|_0}{|HL|_{\eta=2a}} \doteq 5$$

となる。このことは、原点から  $2a$  離れると磁界の強さは 1/5 に減少することが理論式 (4.22) からわかる。 $2a$  は磁極間の距離であるから、標準テスト I では 50mm であり、標準テスト II および長方形テストでは、20mm である。これは、磁束分布の実測結果と一致している。

つぎに、試験片の厚さ方向の磁束分布を測定した。厚さ方向の測定は、正確に測定するには非常に困難な

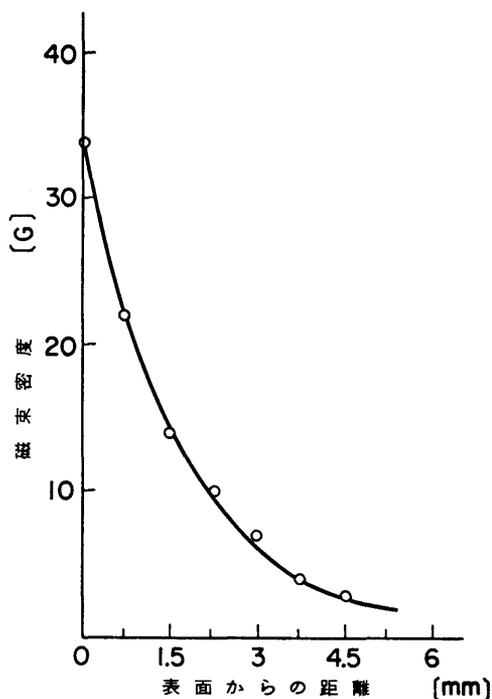


図-4.8 試験片の厚さ方向の磁束分布図

ので、ここでは最も簡単な方法を用いた。試験片は145×14×520mmで、中央にスリット(3.5×1×20)をもうけている。実験は試験片の中央スリットの上に、標準テストIIをおき、300mAの電流を流す、磁束計のホールプローブをスリットの中で上下させて、試験片の厚さ方向の磁束密度を測定した。その結果を図-4.8に示す。この図より、表面から1.5mm内側では、表面の磁束密度の約1/3になっており、式(2.23)の値や、§2.42(iv)の実験結果等と、ほぼ一致してい

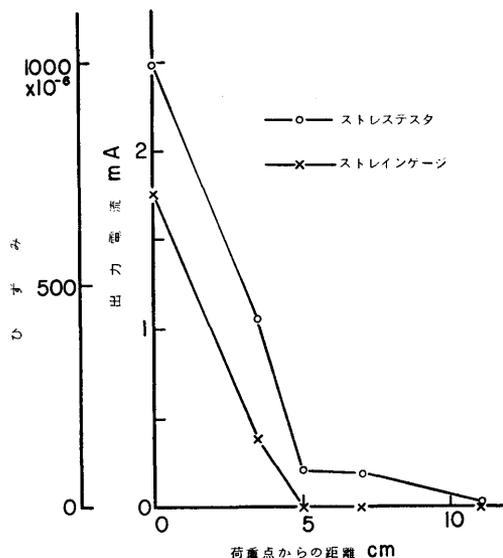


図-4.9 応力分布と出力電流の関係

る。しかし、この方法は、磁束がスリットの側面にも流れてしまうため、実際の鋼材中の磁束分布よりも少し大きい値になったと思われる。

#### 4.3.2 応力測定範囲

磁気ひずみ効果は、磁束密度の非常に小さいところでは起りにくい。したがって、ある程度以上離れたところの応力はテストの出力にはほとんど影響を与えないと考えてよい。このことを確かめるために、次の実験をおこなった。

220×100×13mmの長方形試験片の中央に集中荷重を加える。その荷重点から試験片の端までの応力分布を、標準テストIとひずみゲージとで同時測定をおこなった。その結果を図-4.9に示す。テストからの出力とひずみゲージの読みとの関係は、荷重点を中心に

表-4.2 ひずみゲージとテストの値

荷重点からの距離 (cm)	① ひずみ $10^{-6}$	② 応力に対応する出力電流 (mA)	③ 各点から5cmはなれたところのひずみ値 $10^{-6}$	④ 応力に対する電流 / ひずみゲージの値 $\mu A / 10^{-6}$
0 (A点)	700	2400	—	3.5
3 (B点)	220	1150	—	5.2
5 (C点)	0	150	$700 \times 10^{-6}$	9.5
7 (D点)	0	120	380	
8.5 (E点)	0	60	150	
10 (F点)	0	0	0	

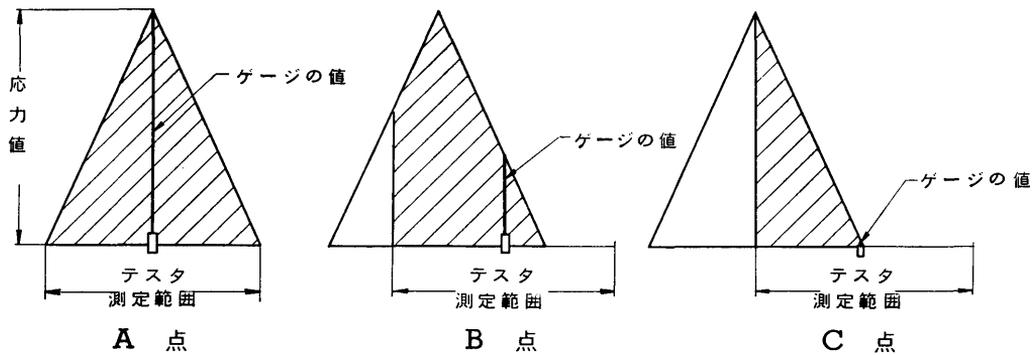


図-4.10 ゲージの値とテストの値の比較

左右対称になるので片側のみ示した。この図からわかるように応力は荷重点を頂点に、二等辺三角形の型をなしており、荷重点から5 cmはなれたC点では、零となっている。

表-4.2は、これをまとめたもので、この表の②③からわかることは、測定点から5 cm以上離れたところの応力値は出力電流にほとんど影響を与えない。たとえば、C点を中心に5 cmの半径の円をかくとすると、

一方の端には  $700 \times 10^{-6}$  のひずみを生じているが、他方のひずみは零である。C点のテストの出力は  $150 \mu A$  を示している。しかし、F点では5 cmの半径の円内にはひずみは零である。したがってテストの出力はほとんど零となっている。F点から6 cmの所（原点から4 cmの所）には、約  $80 \times 10^{-6}$  のひずみを生じているが、これがF点の出力にきいてきていない。また、この表の④から、比率が荷重点より離れるにしたがって大と

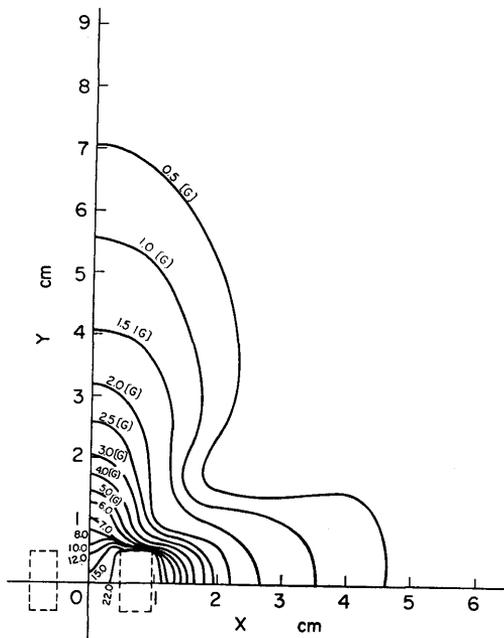


図-4.11 長方形テストの磁束分布図

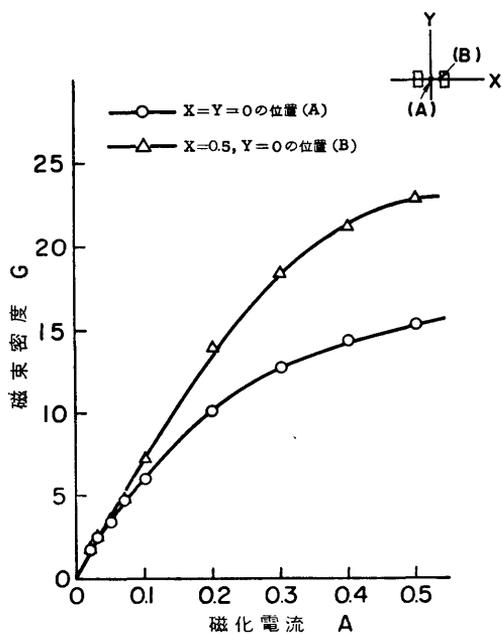
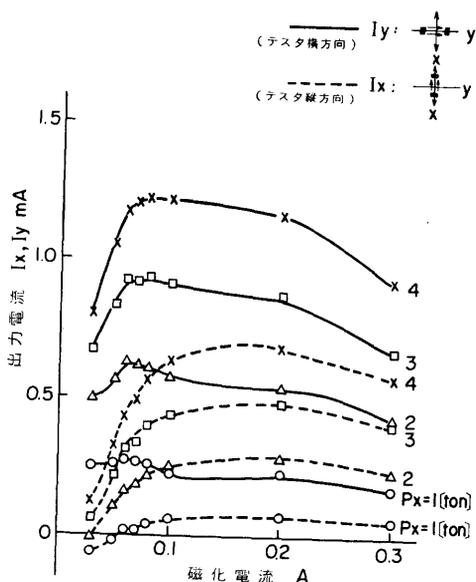


図-4.12 磁化電流と磁束密度の関係

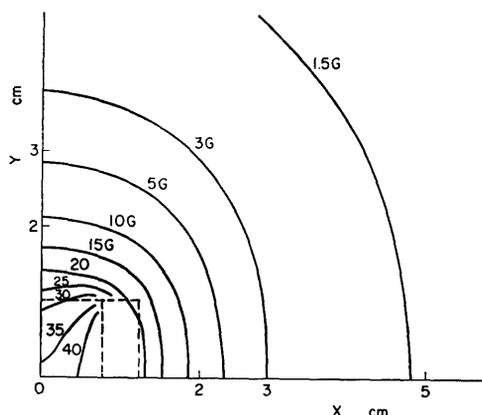


図—4.13 磁化電流特性

なっている。これは、テストが測定点を中心に半径5cm以内の応力の平均を表わしているとすると、図—4.10のようになり、ゲージとテストの比率が大なる理由が説明できる。

テストが、どの範囲の応力の影響を受けるかということは、磁気ひずみ測定では非常に重要なことなので、長方形テストを用いて、次のような実験によっても、応力範囲を測定してみた。図—4.11は長方形テストの磁束密度分布である。実験方法は前項に述べたと同じ方法である。図—4.12は、図—4.11の磁束分布において、もっとも磁束密度の大きい点、すなわち $X=0.5$ 、 $Y=0$ の点の磁束密度と磁化電流の関係を求めたものである。また、この長方形テストで、一軸引張の場合の、出力電流と磁化電流の関係を求めた図—4.13をみると、磁化電流が0.04Aで出力が急激に低下していることがわかる。この磁化電流が0.04Aのときの $X=0.5$ 、 $Y=0$ の点の磁束密度を図—4.12で求めると、2.5Gとなる。このことから、このテストで測定する場合には、磁束密度2.5G以下の点では、出力にあまり影響しないと考えると、測定範囲は、図—4.11の2.5Gの線以内となり、測定点を中心に半径25mmの円内となる。

以上2つの方法で、テストの出力に影響する応力の測定範囲を求めたが、そのいずれの場合にも、磁化電流を300mAとした場合には、範囲が、使用したテス



図—4.14 標準テストIIの磁束分布図

タの磁極間の距離を半径とした円内であることを示している。

標準テストIについては、図—4.7をみるとやはり磁束分布は、テストの磁極間の距離50mm測定点から離れると急速に磁束密度が減少している。標準テストIIの場合には、図—4.14に示すように、また、長方形テストの場合には図—4.11のように、どちらも測定点から25mm（磁極間距離）はなれると磁束密度は急速に減少しており、この測定範囲は磁束分布からも、正しいことがわかる。

応力の測定範囲が明確になると、残留応力の測定の場合に、式(2.22)よりあきらかなように、磁気ひずみ感度に関する項とイニシャル誤差は、重畳するだけなので、零バランスをとるための標準片は、§2.4.2(iii)に示す寸法が必要である。しかし、感度を決定する校正曲線を作るための校正用試験片としては、縦横の寸法にテストの応力の測定範囲、すなわち、テストの磁極間の距離の2倍以上あればよく、試験片の厚さも3mm以上あればよい。校正用試験片が小形ですむことは、校正曲線が非常に作りやすくなる。

#### 4.4 磁氣的ポアソン比

平面応力の測定には、ポアソン比が必要であるが、§3.4.1に述べたように、磁氣的な測定では、縦感度と横感度が同じ符号であり、横感度係数が、引張と圧縮とでは異なる。このことを、この節で種々の方面から考えていく。

##### 4.4.1 磁束分布と横感度係数

テストを用いて測定する場合、その磁束分布が図—4.7のようになるので、磁束と応力の方向が平行、または直行しているだけでなく、あらゆる角度をなして

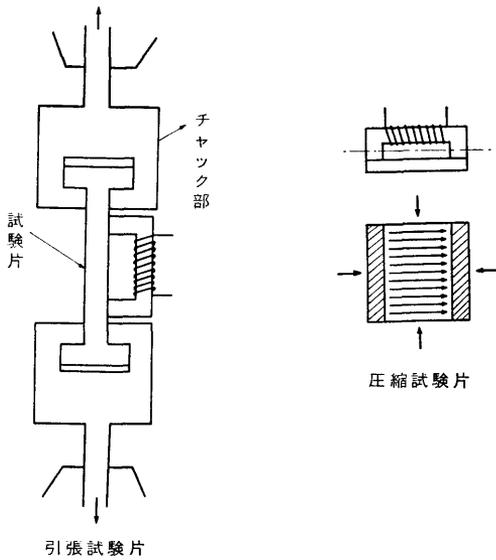


図-4.15 磁氣的ポアソン比の測定

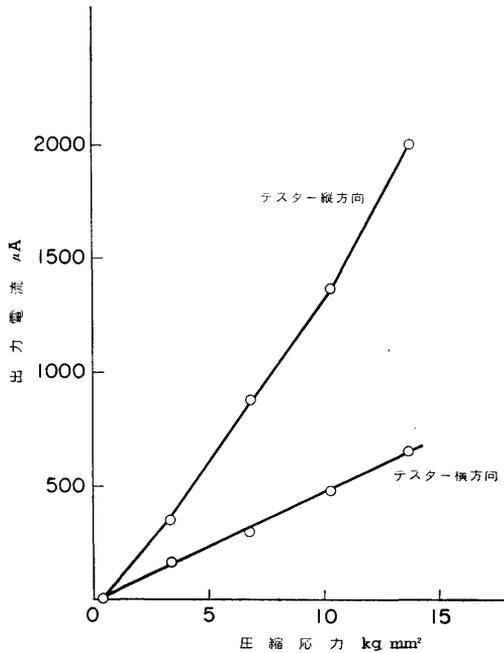


図-4.16 横感度係数 (圧縮の場合)

いる部分が多に多い事がわかる。このため磁気測定の場合に特殊なことが起ってくるのではないかと思います。次の実験をおこなった。

正方形テスタを用い、このテスタと同じ大きさの長方形試験片60×60×13mmを用いて、まず圧縮で実験

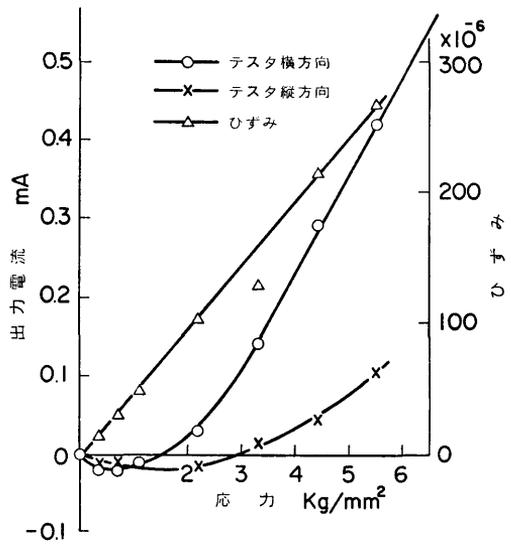


図-4.17 横感度係数 (引張の場合)

をした。この場合には、磁束と応力の関係は図-4.15 のようになり、ほとんどの磁束は、応力と平行または、直交していることとなる。このようにして、まず一軸圧縮で磁気出力を測定した。その結果は、図-4.16である。横感度係数  $C_m = S_t / S_l \approx 0.33$  となった。各試験片とも  $C_m$  は正符号となり、値のバラツキも小さかった。同一材料の試験片、数本で実験をおこなったところ、 $C_m$  のバラツキは非常に小さかった。したがって、この  $C_m$  の値は、相当に信頼できる値であると思われる。

つぎに、一軸引張であるが、圧縮のように簡単ではなく、図-4.15に示すように、チャック部分の影響で、圧縮の場合よりも磁束と応力との関係がやや複雑になる。それでも大部分の磁束は、応力と平行または、直交していると思われる。その結果を図-4.17に示す。この結果から  $C_m$  を求めると  $C_m \approx 3.4$  となり、一軸圧縮の場合の逆数となっている。そして、圧縮のときは、磁気出力はほとんど直線であると考えてよいが、引張の場合は曲線である。

以上のことは、一軸圧縮の場合と、一軸引張の場合とは、テスタの方向を変えただけのような形になっている。すなわち、一軸圧縮の場合の  $S_t$  を  $S_{ct}$ 、 $S_l$  を  $S_{lc}$  として、横感度を  $C_{mc}$  一軸引張の場合を  $S_{tl}$ 、 $S_{ll}$ 、 $C_{ml}$  とすると、 $S_{lc} \approx S_{lc}$ 、 $S_{lc} \approx S_{lc}$  となる。したがって  $C_{mc} \approx 1/C_{ml}$  という関係になっているようである。この結果は、§3.4の場合と大差がなく、た

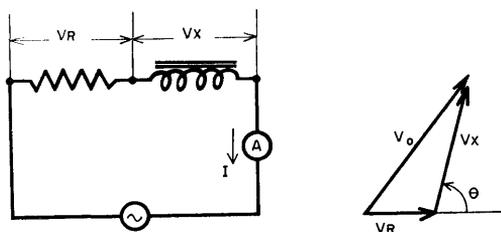


図-4.18 テスタのインピーダンス測定回路

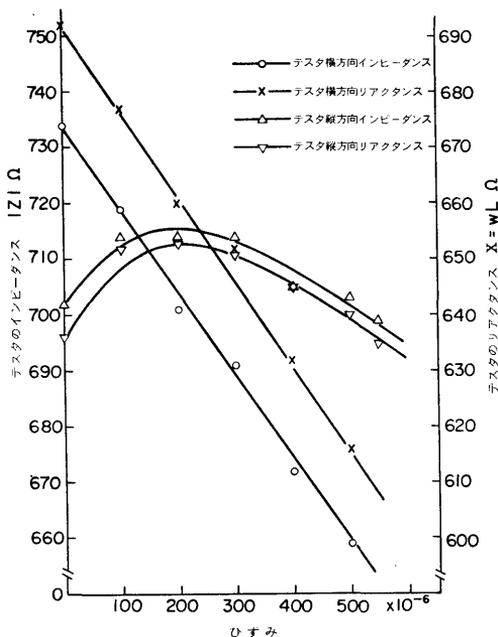


図-4.19 応力によるテストのインピーダンス変化  
だ、横感度係数の値が安定しているということである。

また、この値は試験片の材質、形状、テストの材質、形状などが異なっても大きく変えることはなく、ストレステスト（双極子）のような形をした磁気利用測定器では、本質的なことのように思われる。そこで、次項においてストレステストの応力によるインピーダンスの変化を測定してみた。

#### 4.4.2 応力とテストのインピーダンス

試験片に一軸引張応力を与えた場合、試験片上にセットして、正方形テストのインピーダンスがどのように変化するかを、図-4.18の回路で測定した。この方法は、電源電圧  $V_0$ 、抵抗の端子電圧  $V_R$ 、テストの端子電圧  $V_x$ 、回路電流  $I$ 、 $V_R$  と  $V_x$  のベクトルのなす角を  $\theta$  とすると、正方形テストのインピーダ

ンス  $Z$  の実部  $R$  と虚部  $X$  は、次式で示される。  
(図4.18)

$$R = \frac{V_x \cos \theta}{I}, \quad X = \frac{V_x \sin \theta}{I} \quad \dots\dots(4.40)$$

但し、 $\cos \theta = (V_0^2 - V_x^2 - V_R^2) / 2V_R V_x$

これより、正方形テストの抵抗部  $R$  と、リアクタンス  $X$  が求まる。これによってインピーダンスを求めた。その結果を図-4.19に示す。この図からわかるように、テストを荷重方向と直角にした場合は、非常に直線性がよく、感度も大きいですが、テストを荷重方向に当たった場合のインピーダンス変化は、直線性が悪く感度も小さい。このことは、実験は一軸引張で行っているのでテスト縦方向（荷重方向）は、引張の場合の出力に関係し、テスト横方向（荷重と直角方向）は、圧縮の場合の出力と同じ型になると考えると、一軸圧縮は、感度が大きく直線性もよいという事が、インピーダンスの変化と一致する。したがって、この現象は、測定回路によるものではなく、テストのインピーダンスそのものが、このように変化しているということである。

つぎに、このテストを使用し、同じ試験片で、図-2.2の測定回路によって、磁化電流300mA（テストにはその半分約150mA）流したときの応力-出力電流

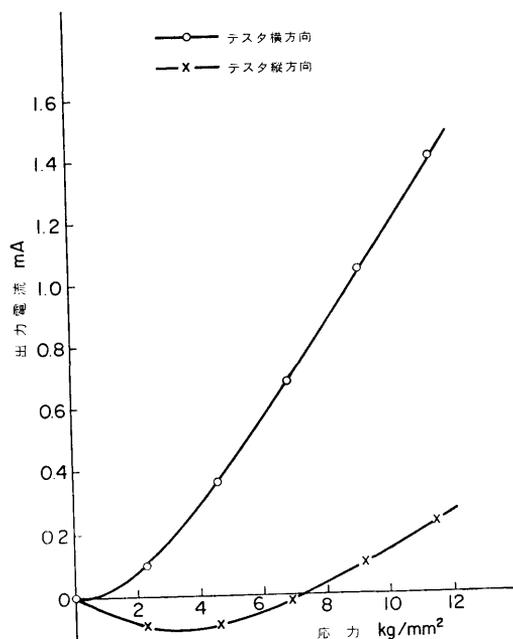


図-4.20 応力-出力電流曲線  
(テスト縦と横の場合)

曲線を求めた。測定は、テストの荷重方向（テスト縦方向）と、これに直角方向（テスト横方向）の場合についておこなった。結果を図-4.20に示す。インピーダンスの測定は、テストに50mAの電流を流しておこなったので、直接比較できないが、図-4.19、図-4.20をくらべてみると、テストの応力によるインピーダンスの変化は、出力電流に比例していると言える。このことは、§2.22の式(2.10)が、実験の結果と一致していることを示している。

4.4.3 磁氣的ポアソン比の測定

この節の始めに述べたように、平面応力の測定には、ポアソン比を求めることが必要である。

一軸引張の応力-出力曲線（縦感度）が直線的でなく、テストのインピーダンスを測定しても、引張応力に対しては曲線的である。また、一軸圧縮も横感度を測定すると、やや曲線的である。また、次章でのべるが、二軸応力の場合には、一軸の場合よりも非直線性が大きくなるようである。磁束分布をみると、応力と磁束とが斜交している部分が多いほど出力は曲線になるようである。これに対して正方形テストを用いた同面積の試験片での実験 (§4.4.1参照)では、比較的に出力直線が直線的に出ている。一軸引張にくらべ、一軸圧縮が直線的になるのも、試験片の形状から、磁束と応力が斜交する機会が少ないからで、引張試験片は、チャック部分があるのでどうしても磁束がみだされる。

そこで、ここでは、正方形テストと同面積の試験片

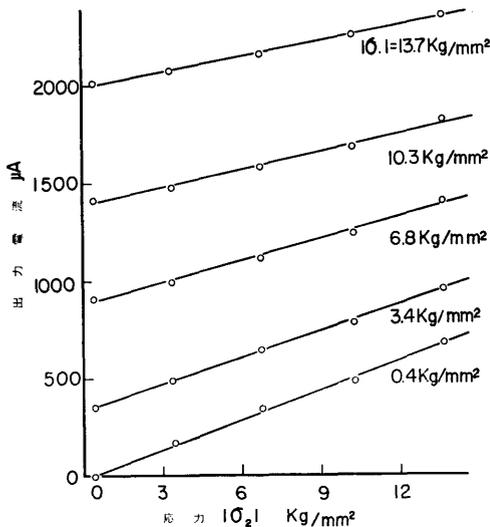


図-4.21 出力-応力曲線（正方形テスト）

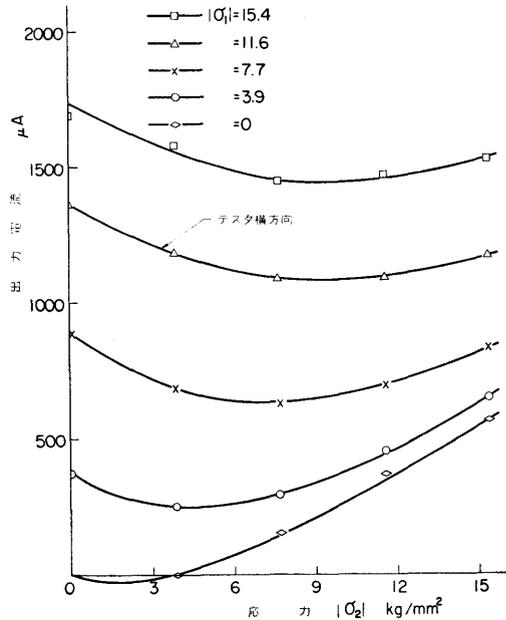
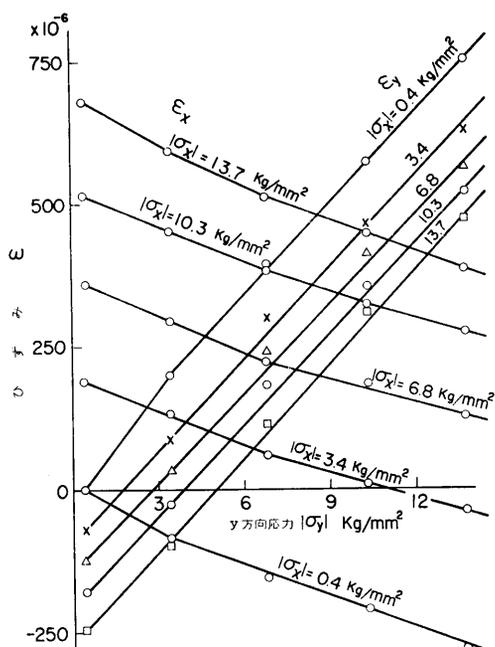


図-4.22 出力-応力曲線（標準テストI）

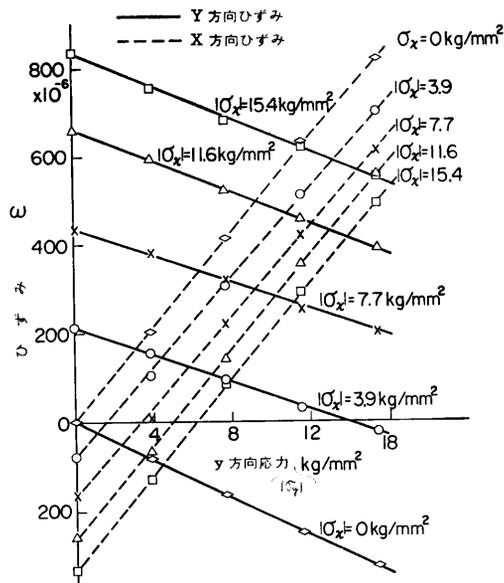
を用い、二軸応力でただ一つ、実験が可能な二軸圧縮の場合について、磁束分布が応力と直交または平行のみの場合の実験をおこなった。同面積試験片（60×60×13mm）に二軸圧縮試験機で荷重をかけ、二軸圧縮応力の場合の応力-出力曲線を求めた。二軸試験機や二軸の実験方法については詳細は次章でのべる。その結果が図-4.21であり、標準テストを用い、100×100×13mmの長方形の普通二軸圧縮試験片での実験結果が図-4.22である。これらの図は、テストを当てた測定方向の主応力  $\sigma_1$  をパラメータに、縦軸にその出力電流、横軸に、もう一つの主応力（テストと直角方向の主応力） $\sigma_2$  をとった線図である。（§5章参照）

また、図-4.23と、図-4.24は、上の二つの実験をおこなった同じ試験片で、同じ実験方法で測定した。試験片中央にはった抵抗線ひずみゲージによる、ひずみ-応力線図で  $\sigma_x = \sigma_1$ 、 $\sigma_y = \sigma_2$  である。この二つの線図より、試験片中央では正しく、二軸圧縮が生じていたことがわかる。

以上、4つの図から考えて、二軸の場合でも、磁束が応力と直交または、平行のみの場合には、横感度係数は一定になる。一般の場合には、図-4.22からわかるように、応力の関数となっており、一定にはならない。また、図-4.23と図-4.21を比較してみると、横



図—4.23 ひずみゲージによる測定 (図4.23の場合)



図—4.24 抵抗線ひずみ計による測定(図4.24の場合)

感度係数が、ひずみゲージで測定した場合と符号が逆になっていることがわかる。また、その値は、一軸圧縮の場合の図—4.16と同じく約0.3である。図—4.21

の場合は、理論式より求めた図—4.5ともよく一致している。

これらのことより、磁束が応力と直交または平行のみの場合の横感度係数を、磁氣的ポアソン比と名付け、圧縮の場合には、磁氣的ポアソン比  $\nu_m \approx 0.3$  とする。また、磁氣的ポアソン比は磁界の強さ、テストの形状、被測定材の材質等には無関係な定数である。ただ試験片の形状によっては、多少上下するが、精密測定でない限り、実用上の残留応力の測定の場合には、 $\nu_m \approx 0.3$  として差しつかえないことが、以後の実験からあきらかである。

引張の場合には、前にのべたように、正確な測定ができないが、この論文では、実験から求めた  $\nu_m' \approx 1/0.3 = 3.3$  として、圧縮の場合の逆数を用いることとする。

磁氣的ポアソン比  $\nu_m$  がほぼ一定の値をとったので、平面応力の測定が可能となり、§4.2の理論解析の場合も、次章以後の実験も、この  $\nu_m$  の値を使用した。

#### 4.5 まとめ

本章においては、平面応力の測定の可否について、理論と実験の両面より検討し、次の結果を得た。

(1) 鋼板にストレステストを当てた場合の任意の点の磁界の強さを与える、式(4.19)を求め、この鋼板に平面応力が生じている場合の理論式(4.34)を導いた。

(2) 式(4.34)より磁気出力は、主応力方向で最大、最小となり、主応力差は、出力電流差に比例するということが、理論的に求められた。

(3) ストレステストによる鋼板上の磁束分布を測定し、測定点からテストの磁極間の距離だけ離れたところの磁束密度は、測定点の磁束密度の約1/5になった。また、このことは基礎式(4.22)から求めた値と一致した。

(4) テスタの磁束は広範囲に広がるが、テストによる応力測定範囲を、磁気出力とひずみゲージによる測定との関係、磁気出力と磁束分布との関係から求めた結果、いずれのテストでも、テストの出力は、テストの磁極間の距離を半径とした、円内の応力を示しているという事が判明した。

(5) テスタの応力測定範囲が明確になったので、残留応力測定の場合の校正曲線を求めるための校正用試験片は、縦、横の寸法は使用テストの磁極間の2倍以上あればよく、また、厚さも3mm以上あればよい。

(6) この測定では、横感度係数が単軸圧縮の場合約0.3、単軸引張の場合3~4と、非常に異なる値をとったので、テストのインピーダンスを測定してみたが、やはり、この値と一致した。

(7) 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たが、この場合は、材質、応力に無関係に定数となり、二軸圧縮の場合、磁氣的ポアソン比は0.3となった。

以上の理論と実験の結果、平面残留応力の測定は可能と思われるので、次章の実験を進める。

## 第5章 均一な平面残留応力の測定

### 5.1 緒言

本章では、平面残留応力の測定法を確立するとともに、平面応力と磁気ひずみの関係を考究した。

平面応力は、二つの主応力方向と二つの主応力値を求めればよい。主応力方向は、前章で、理論的には磁気出力が最大、最小となる方向であることが判明しているので、種々の応力状態において、実験的にこの事実を確かめた。

主応力方向が判明すると、一つの主応力  $\sigma_1$  方向にテストを当てた場合、主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  によるテストの出力  $C_1, C_2$  は、テスト方向の応力の磁気ひずみ感度を  $S_t$ 、直角方向の応力に関する磁気ひずみ感度を  $S_l$  とすれば、式(4.23)より

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= S_t \sigma_1 + S_l \sigma_2 = S_t (\sigma_1 + S_l / S_t \sigma_2) \\ C_2 &= S_l (S_t / S_l \sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5.1)$$

となる。そこで、 $S_l$  および  $C_m = S_l / S_t$  (横感度係数)を知っておけば、 $C_1, C_2$  を測定することにより主応力値  $\sigma_1, \sigma_2$  を求めることができる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{S_t} \cdot \frac{1}{1 - C_m^2} (C_1 - C_m C_2) \\ \sigma_2 &= \frac{1}{S_l} \cdot \frac{1}{1 - C_m^2} (C_2 - C_m C_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5.2)$$

この式からわかるように横感度係数が関係してくるので、複雑になることが予測されるが、各応力状態においてこれを解明した。そして本論文の主目的である均一な(テストの測定範囲内における応力が均一)平面残留応力の非破壊測定法を見出した。

また前章で述べたように引張と圧縮で、 $C_m$  の値が異なるので、引張と圧縮が錯綜した応力状態の場合には、式(5.2)から求めることができない。

しかし主応力差が出力電流差に比例することが、前章で理論式より求められたので、このことを実験で確

認し、このような応力状態の場合にこれを用いて解析した。

ストレステストを用いるこの測定で、一般のひずみ測定と異なる現象は、引張と圧縮に対する出力が、同符号になることと、横感度係数が異なることの二つである。

この事を、本論文と異なる立場から検討するために、強磁性体結晶のミクロ的磁気挙動より求めた、強磁界、低磁界における磁化と応力の高木の関係式を用いて検討考察した。

また、実験的には、丸棒をソレノイドコイルで直流磁化し、引張および圧縮荷重におけるB-H曲線を求めて、応力と磁界の強さと磁束密度の関係を実測し、上述の二つの事項を解明した。

この章では、使用テストは主として標準テストIIを用い、磁化電流は、50Hz、300mAを使用した。試験片は、二軸引張試験片(図-5.8)と、一軸引張試験片(図-5.14)を主として用いた。圧縮用は長方形試験片である。

### 5.2 二軸圧縮残留応力の測定

単軸の場合と同じように、圧縮が最も測定しやすいので、まず二軸圧縮の場合についてのべる。平面応力状態においては、二つの主応力とその方向が求めれば、その点における応力が決定される。一般には、三軸ロゼットゲージ(主として電気抵抗ひずみゲージ)を用いて、任意の三方向のひずみを求め、モール円にて二つの主ひずみとその方向を決定する。しかし、この方法では、残留応力の非破壊測定はできない。ここでは、§1.1に述べたように、組立応力のような簡単に応力を零にできない応力(初期応力)と、巨視的な残留応力の場合について、磁氣的な測定方法による、二軸応力の非破壊測定法を検討する。

#### 5.2.1 二軸圧縮試験

上に述べた実験をおこなうために、まず、平板に平面応力(この節では二軸圧縮)を生じさせる二軸圧縮試験機を試作した。これを写真-8に示す。この装置は正方形の平板に、直交二方向より圧縮荷重をかけることができ二方向の荷重は、バルブにより互に独立に自由にかえることができる。また、この装置にセットされた試験片は、二軸圧縮荷重により少し曲げも生じるので、試験片の表と裏にストレステストを当て、その平均の値をテストの出力としている。そのため、この装置はその荷重状態を一定に保ったままの状態、表裏を逆転させることができ、両面を測定するように

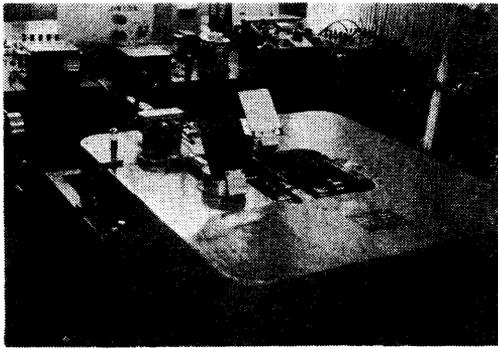


写真-8 二軸圧縮試験装置

なっている。試験片は $100 \times 100 \times 13$ mmの試験片で材質はS25Cの平板であり、テスタは標準テスタIを用いる。測定回路は図-2.2と同じである。磁化電流は300mAである。

この試験機によって加えた応力を、初期応力または、巨視的残留応力とみなして、つぎのような手順で圧縮試験をおこなった。

(1) 試験片を二軸圧縮試験機にセットする。試験片の表裏には、ひずみゲージを貼り、同時測定をするが、試験片を加圧したときゲージにより試験片に曲げを生じたか否かもチェックする。

(2) 補償用テスタを補償片（一軸の場合と同様に、同じ材質、同じ加工熱処理状態、同じ形状のもの）に当て、測定片にはストレステスタを正しく荷重方向にセットする。

(3) 無荷重状態で300mAの磁化電流を流す。そして、ブリッジのバランスをとる。測定中は、磁化電流は一定とする。

(4) 荷重をかけ、出力電流 $C_1$ をよむ、つぎにテスタを $90^\circ$ 回転させて出力電流 $C_2$ をよむ、また、この時のひずみゲージ（二軸ゲージ）の値もよむ。荷重は零を基準にすべきであるが、完全に零にすると、つぎに加圧の際、変形モードが変わる恐れがあるということがわかったので、この実験では0.2tかけた状態を零とした。

(5) 荷重の加圧の方法は、二軸のうち一軸たとえば、X軸の荷重をパラメータとして一定に保ち、Y軸の荷重を徐々に加圧して測定し、終了したら0.2tまでもどし、つぎにX軸方向の荷重を上げて、再び一定にし、Y軸方向を加圧していくという方法をくりかえした。

(6) 試験片の表面の測定が全部終わったら、表裏を逆

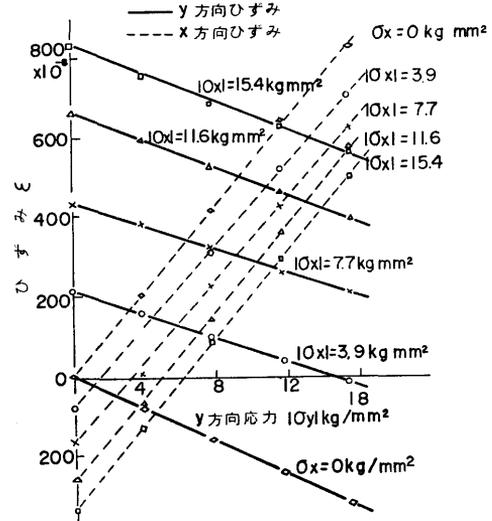


図-5.1 抵抗線ひずみ計による測定（二軸圧縮）

転して（この時はX、Y軸とも0.2tぶつかけたまま逆転する）、裏面についても同様な実験をおこなった。

図-5.1は、試験片中央部にひずみゲージを貼り同時測定した測定結果である。この図から、試験片の中央部には曲げが入らず正しく二軸圧縮応力が生じていることがわかる。ポアソン比は約0.35となっている。

### 5.2.2 主応力方向の決定

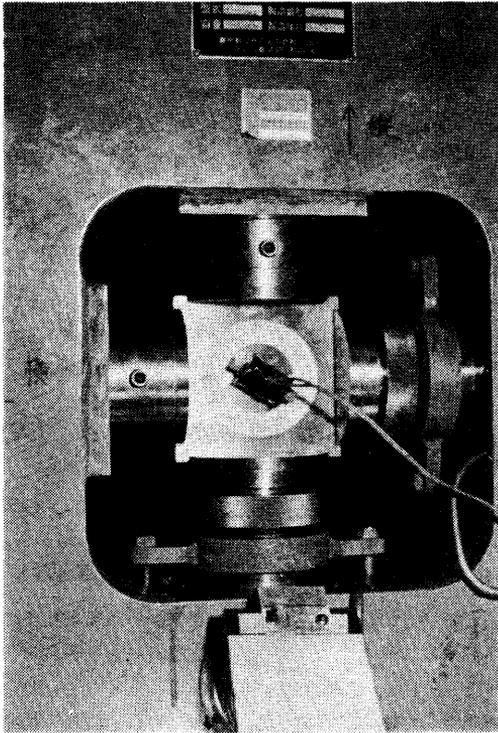
二軸応力を測定する場合、主応力方向が不明の場合には、まず、主応力方向を見出さなければならない。ストレステスタは、ひずみゲージとは異なり、平板の自由表面で自由に回転できるという大きな特徴をもっている。

そこで、測定点を中心にテスタを $180^\circ$ 回転させたときの各方向の出力と主応力との関係を探ってみた。

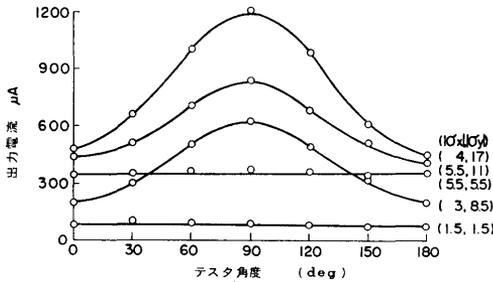
実験方法は、写真-9に示す。これは二軸圧縮試験機で、試験片に任意の二軸圧縮応力を加えた。試験片上には角度を記した円形紙を貼り、ストレステスタを $30^\circ$ づつ回転させて、その出力電流をよんだ。その結果を図-5.2に示す。この図からつぎの事がわかる。

(1) 最大主応力の方向で、テスタの出力電流は、いつも最大値をとっている。もう一つの主応力方向では、出力は最小となる。このことから主応力の方向は、テスタを被測定材上で $180^\circ$ 回転すれば、出力が最大、最小の方向が主応力の方向である。

(2)  $\sigma_x = \sigma_y$  すなわち、等荷重のときは、いわゆる円



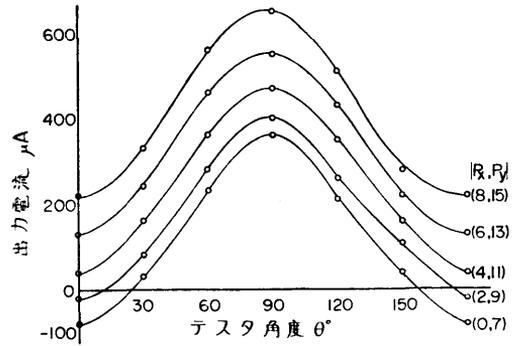
写真—9 主応力方向の決定



図—5.2 テスタの回転と出力電流(I) (二軸圧縮)

応力状態となり、どの角度でも等しい値をとっている。

(3) また、このことは、試験片の形状がかりに円形状であれば、テスタを回転させても磁束分布が変化しないから、試験片に方向性がない限り、その磁気抵抗は一定となり、円応力状態では一定値をとって当然である。しかし、ここで使用した試験片は、前項で述べたように、正方形板であるから、テスタが試験片の対角線の方向をむいたときは、磁束分布が異なるはずで



図—5.3 テスタ回転と出力電流(II)

ある。それにもかかわらず出力電流が一定であるということは、§ 4.3.2 で述べたように、テスタから 5 cm (テスタの磁極間の距離) 以上はなれると、被測定材の形状は、テスタの出力に影響を与えないということを示している。

すなわち、テスタの出力は測定点を中心に半径 5 cm の円内の応力を示しているという事が、ここでも証明される。また、主応力差と出力電流差とが比例関係にあるのではないかという事が、前章の理論結果から予想される。そこで主応力差を一定にして実験をおこない 図—5.3 の結果を得た。この図から主応力差が一定ならば、テスタを回転させた出力電流—テスト角度の曲線は、同じ形の曲線が得られることがわかり、主応力差が一定ならば、出力電流差も一定であるということが示された。

### 5.2.3 主応力値の決定

図—5.4 は、荷重一定の方向 (たとえば Y 軸) に、ストレステスタをおき、テスタと直角方向 (X 軸) の応力を変化させて、これを横軸にとり、そのときのテスタの出力を縦軸にとった曲線である。そして、テスタ方向の応力  $\sigma_1$  (荷重一定方向 Y 軸) をパラメータとしている。図—5.1 のひずみゲージの場合と比較すると、ゲージが右下りの直線となっているのに、テスタは右上りの曲線となり、横感度係数が逆になる。しかも応力の関数となっていることがわかる。

ひずみゲージは、二軸ゲージを使用したので、一度の実験で 図—5.1 をかくことができるがテスタでは、一方向づつしか測定できないので、テスタを荷重一定の方向 (Y 軸) と直角方向におき、その方向の応力  $\sigma_2$  (X 軸) を変化させて、これを横軸にとり、ストレステスタの出力を縦軸にとって、荷重一定方向の応力  $\sigma_1$

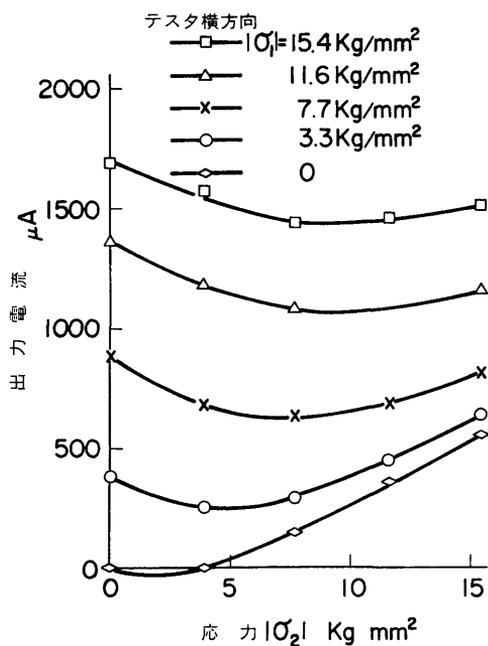


図-5.4 出力-応力曲線 (テスト荷重直角方向)

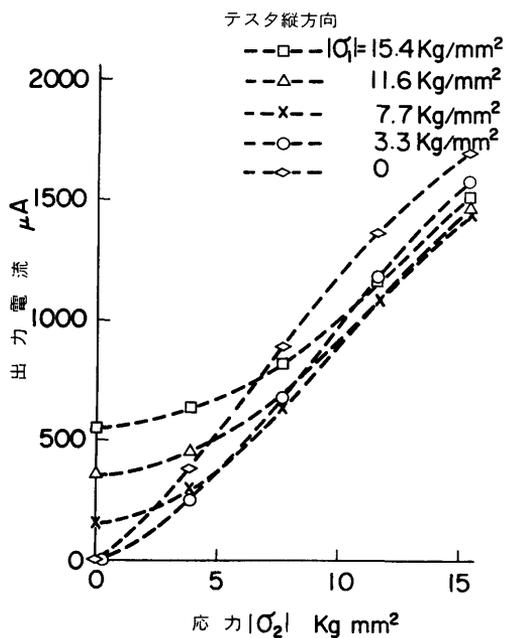


図-5.5 出力-応力曲線 (テスト荷重方向)

をパラメータにして測定をおこなった。その結果を図-5.5に示す。図-5.4とのちがいは、テストの方向が

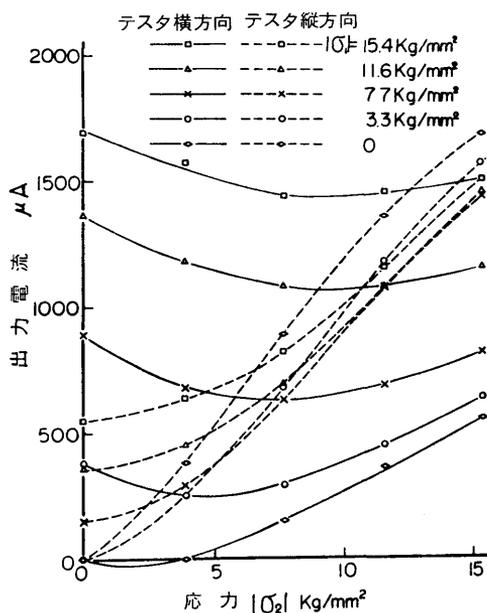


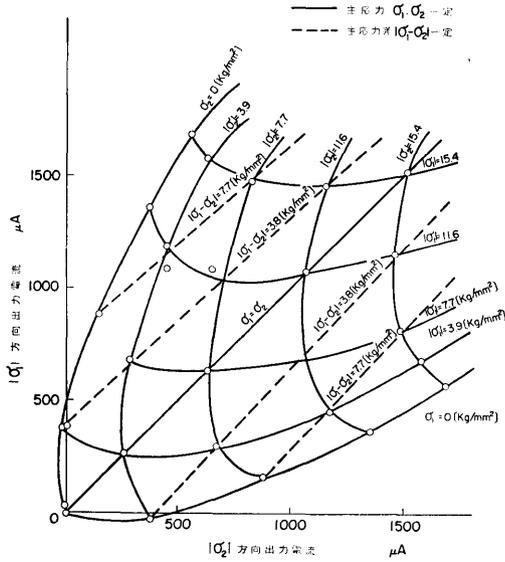
図-5.6 出力-応力曲線 (標準テスト I)

90° ちがうだけである。この二つの図は、本質的には同じである。ひずみゲージの場合と比較するために、図-5.6は図-5.4と図-5.5を同時に図示したもので、図-5.6と図-5.1は非常に異なり、横感度係数が一定でないことがわかる。この実験結果は、五枚の試験片についてほとんど同じであった。

図-5.4, 図-5.5から直接主応力値を求めることもできるが、解析が複雑になるので、次のような応力線図を考える。ある二軸応力状態に対して出力電流は、テストを  $\sigma_1$  方向に向けたときの出力  $C_1$  と、 $\sigma_2$  方向に向けたときの出力  $C_2$  の二つがある。この  $C_1, C_2$  をそれぞれ縦軸、横軸にとると図-5.7が得られる。この図は図-5.4, 図-5.5から作ったものである。たとえば、図-5.7の最右下の点について説明する。図-5.4の最右下の点  $\sigma_1=0, \sigma_2=15.4$  の場合の出力電流  $C_1$  は  $550\mu A$  なので、これを縦軸に図-5.5の最右上の点  $\sigma_1=0, \sigma_2=15.4$  の場合の出力電流  $C_2=1700\mu A$  を横軸にとった点である。

このようにして、各点をプロットし、 $\sigma_1, \sigma_2$  がそれぞれ一定になる線をむすぶと、図-5.7となるのである。また、破線は主応力差  $|\sigma_1 - \sigma_2| = \text{一定}$  の線を示しており、直線になっていることがわかる。

この応力線図を用いると、テストを回転させたとき、出力最大、最小となる出力電流の値、すなわち、



図一5.7 校正曲線（二軸圧縮）

$C_1, C_2$  を測定すればこの図からすぐに主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  の値を求めることができる。

5.2.4 巨視的な二軸圧縮残留応力の測定方法

以上述べたことをまとめて、この種の二軸圧縮応力の測定方法を示す。

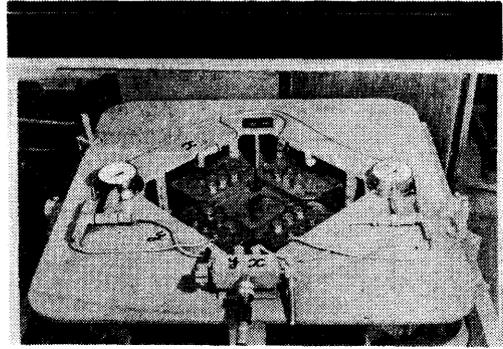
- (1) 一軸の場合と同じように、被測定材と同じ材質、同じ加工、熱処理状態の試験片で標準片、補償片を数個つくる。この場合形状は、零バランスをとるための標準片および補償片としては、測定点を中心に半径20cmの範囲と同じ形状にする。また、校正用の試験片としては、標準テストIの場合は100×100mm以上の広さがあればよいわけである。（§2.4.2と§4.3.2参照）

- (2) 標準片と補償片でブリッジのバランスをとってから、主応力の方向を知るために、二軸圧縮応力の生じている測定材の測定点を中心に、テストを180°回転させる。そして出力最大の方向と値を読む、つぎにこれと直角方向にテストを当て（出力最小の方向となる）。その値を読む。これより主応力の方向がわかる。

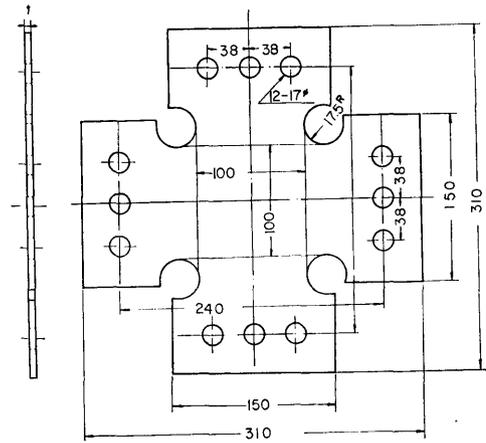
- (3) 校正用の試験片で、二軸圧縮試験をおこない。図一5.7のような校正用応力線図をつくる。

- (4) (2)で求めた出力最大方向の出力電流値  $C_1$  と、これと直角方向の出力電流値  $C_2$  を用い、校正用応力線図より主応力  $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  を求めればよい。

以上の操作をすることにより、測定点の二つの主応力とその方向を求めることができる。



写真一10 二軸引張試験機



図一5.8 二軸引張試験片

この実験で用いた、5本の試験片による結果とひずみゲージによる測定結果等を総合して考えると、この種の二軸圧縮残留応力を測定する時の誤差は約 ±2.5 kg/mm<sup>2</sup> と考えてよい。

5.3 二軸引張残留応力の測定

5.3.1 二軸引張試験

二軸引張応力を生じさせるために、二軸引張試験機を試作した。この試験機の機構は、だいたい二軸圧縮試験機と同じで、チャック部が引張りのために異っているだけである。写真一10は、この試験機を上から写したものである。二軸圧縮と同じように、試験片の表裏にストレステストを当て、その平均の値をテストの出力とし、この装置も荷重状態を一定に保ったままで、表裏を回転しうようになっている。

試験片も、図一5.8に示すように、チャック部に各3本ずつボルトを通して、四方より引張るようにしてある。隅の部分は大きくカットして、中央10×10cmの

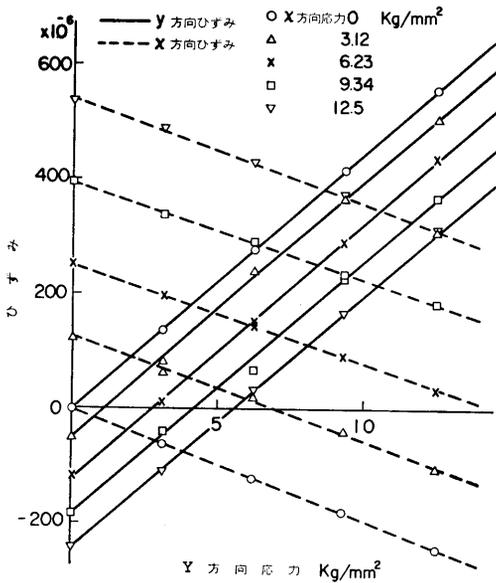


図-5.9 抵抗線ひずみ計による測定 (二軸引張)

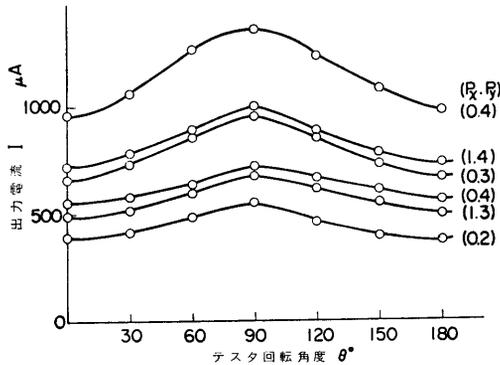


図-5.10 テスタの回転と出力電流(Ⅲ) (二軸引張)

平面で純粋な二軸応力を生じるような形にしてある。

二軸の試験機で特に重要なのは、引張でも圧縮でも、試験片の中央点が荷重前と後とで移動しないように、もし移動しても、もとに戻すようにすることで荷重時の振り、曲げ等をかかなり少なくすることができる。この節も、使用したテスタは標準テスタⅠ、磁化電流は300mAを使用している。図-5.9はこの試験片の中央に貼ったひずみゲージによる、応力-ひずみ線図で、中央ではほぼ正しい二軸引張応力が生じていることがわかる。

### 5.3.2 主応力の決定

まず、主応力方向であるが、圧縮の場合と同様に、

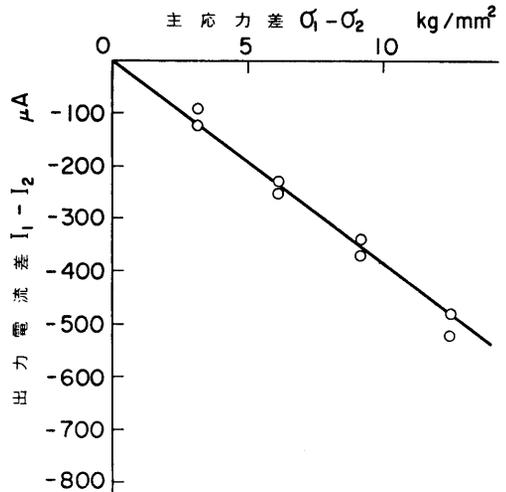


図-5.11 主応力差-出力電流差曲線 (二軸引張)

二軸引張試験片に、二軸引張応力状態を生じさせ、その中央部でテスタを180°回転させ、その出力曲線を求めてみると、図-5.10となる。これからわかるように、二軸引張のときも、主応力方向では出力電流は最大または最小となる。しかし、二軸圧縮と異なるところは、二軸圧縮では絶対値が最大の主応力方向で、最大出力電流、最小主応力で、最小出力電流が生じていた。二軸引張ではそれが逆になり、最大主応力のところで出力は最小となり、最小主応力で出力は最大となっている。等応力状態では、殆んど直線になっている。これは、一軸応力のところで述べたように、引張応力では横感度係数が1より大となるので、このようなことが生じると思われる。しかし、符号をつけて考えると、引張でも圧縮でも、最小主応力で最大出力電流が生じているということである。

また、主応力差と出力電流差は、二軸圧縮の場合と同じように直線となるが、図-5.11に示すように、圧縮の場合とくらべ、出力電流差の符号が逆になっている。(σ<sub>1</sub>>σ<sub>2</sub>)

つぎに、平板に二軸引張応力が生じている場合の、二つの引張主応力と出力との関係を二軸圧縮の場合と同じ方法で求めた結果を図-5.12に示す。テスタを変え、試験片をかえてもこの図と大体同じ傾向であった。また、この図は二軸圧縮の場合の図-5.5に相当する。圧縮の場合と異なって、σ<sub>1</sub>=constの時の曲線が重り合い、予想していた通り複雑な形である。

### 5.3.3 巨視的な二軸引張残留応力の測定方法

これも、前節の二軸圧縮の場合と全く同じでよい

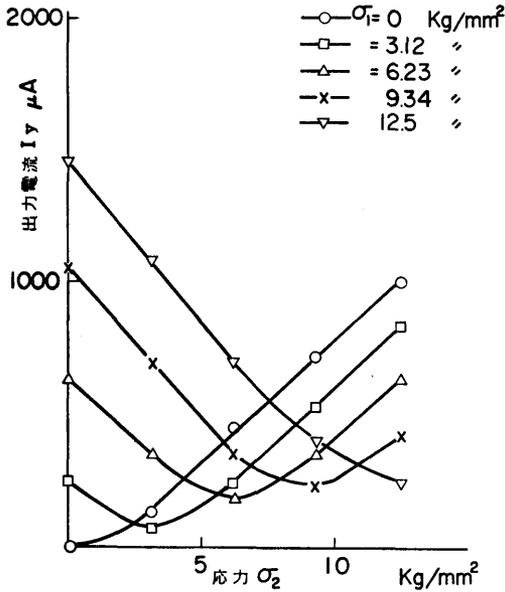


図-5.12 出力-応力曲線 (二軸引張)

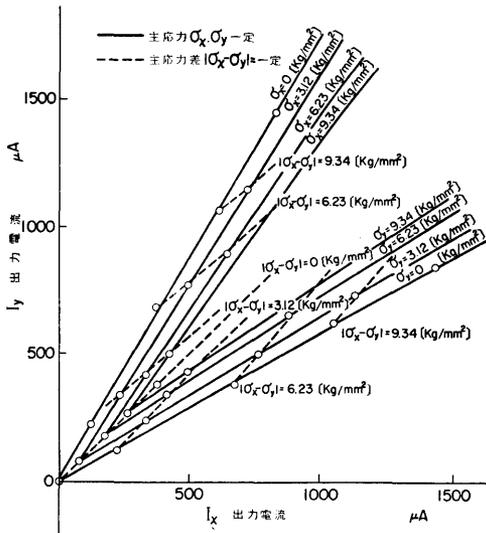


図-5.13 校正曲線 (二軸引張)

が、校正曲線が図-5.12のように複雑となるので、§5.2.3で求めた応力線図をかく方法で求めた。その応力線図が図-5.13である。

この図からわかるように、主応力差は直線的に出ているが、圧縮の場合の図-5.7とは異なっている。

二軸引張応力のときも、応力線図を書くことができたので、テストを測定点を中心に180°回転させ、その

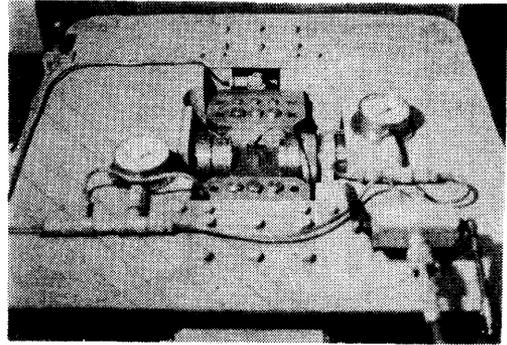


写真-11 一軸引張一軸圧縮試験機

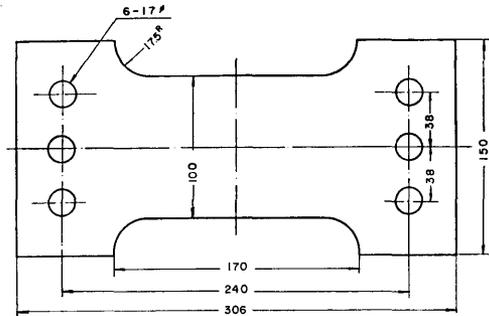


図-5.14 一軸引張試験片

出力最大、最小となる出力電流  $C_1$ 、 $C_2$  を測定すれば、主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  をこの線図から求めることができる。ただ最大主応力  $\sigma_1$  は最小出力電流の方向であるということは注意を要する。この応力線図は試験片をかえても、テストを変えても二軸引張である限り、大体図-5.13のようになった。

#### 5.4 任意の均一な平面応力の測定

均一な平面応力の場合で二軸圧縮、二軸引張についてはすでに述べた。この節では最後に残った一軸引張、一軸圧縮の場合について実験をおこなった。

実験装置は、二軸圧縮試験を改造して、写真-11のようにx方向に圧縮、y方向に引張荷重がかかるようにした。試験片の形状は一軸引張の場合と同じで図-5.14に示した。試験片厚さは圧縮を考え5 mmにした。圧縮の実験を考慮すると、試験片はどうしても小型になり、チャックの形も引張と圧縮とは、非常に異なるので、それらの影響を考えて、テストは標準テストIIおよび長方形テストを使用した。

テストを測定点を中心に180°回転させると主応力方向で最大、最小の出力電流を生じるので、主応力方向は容易に知ることができる。この場合も引張応力方向

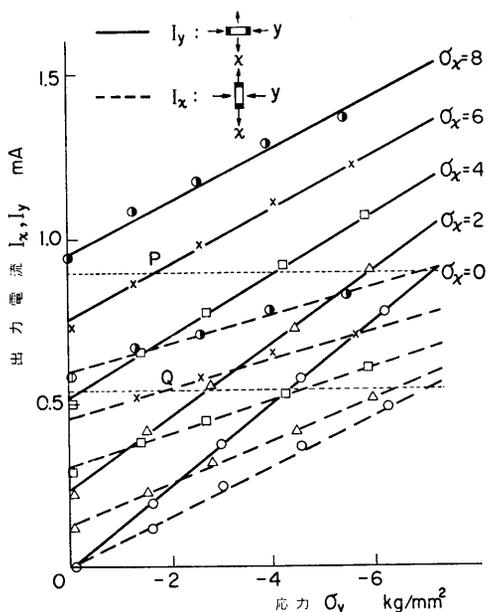


図-5.15 出力一応力曲線（一軸引張一軸圧縮）

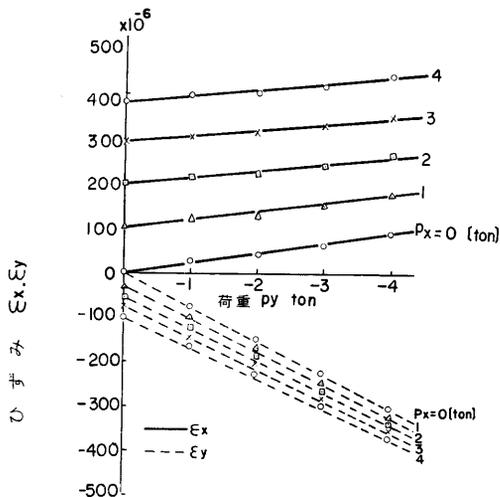


図-5.16 抵抗線ひずみ計による測定（一軸引張，一軸圧縮）

で，出力電流は最小となり，圧縮応力方向で最大となる。

引張の  $S_i$  は，圧縮の場合の  $S_i$  の  $1/3 \sim 1/4$  となるが，式 (5.1) からみても，弾性域内では納得できることである。

実験方法は，二軸圧縮の場合とほとんど同じである。その結果を図-5.15に示す。試験片の中央には，

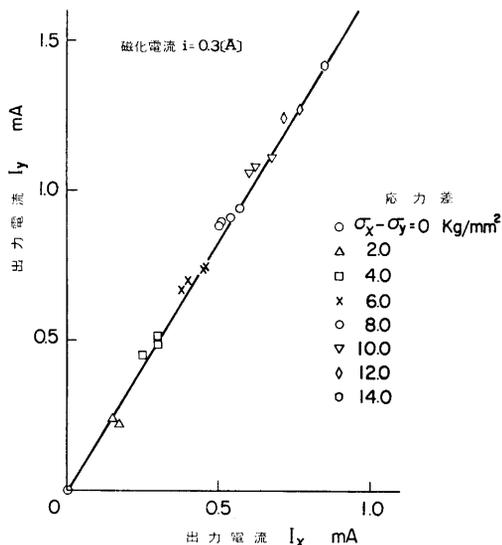


図-5.17 応力線図（一軸引張軸，一軸圧縮）

ひずみゲージを貼って同時測定をおこなった。その結果が図-5.16である。

図-5.16からも試験片の中央では，純粹な二軸引張，圧縮の応力が生じていることがわかる。この理論値は， $\nu \approx 0.3$ ， $\epsilon_x = 1/E \cdot (\sigma_x - \sigma_y/m)$ ， $\epsilon_y = 1/E \cdot (\sigma_y - \sigma_x/m)$  より求めた。

この場合も，テストおよび試験片を変えて測定しても，図-5.15の傾向は変らなかった。図-5.15は，二軸圧縮の場合の結果である図-5.4，図-5.5に相当する。

図-5.17が求めた応力線図である。この図からわかるように，一軸引張一軸圧縮の場合には，殆んど直線となっており，二つの主応力を求めることは困難である。また，主応力差は，出力電流差に比例している。

5.5 主応力方向および主応力差と出力電流差

主応力方向の測定は，これまでたびたび述べたように，この測定法の特徴の一つである。テストを自由表面上で測定点を中心に  $180^\circ$  回転させることにより，その出力最大，最小の方向として容易に，正しく求めることができる。任意の平面応力状態の場合に，共通していえることは，符号を含めて最大主応力方向で出力が最小となり，最小主応力方向で出力が最大となることと，角度一出力曲線は正弦曲線に近い曲線となることである。このことは，理論的にも式 (4.34) で証明されている。

つぎに，これまでの実験ではっきりしていたこと

は、二つの主応力差と、これに対応する出力電流差とが比例していることである。二軸圧縮の場合には図-5.3, 図-5.7をみればあきらかであり、二軸引張の場合も図-5.11, 図-5.13にあらわれている。いずれも直線となる。主応力差が正の場合は、出力電流差は負に、主応力差が負のときは、出力電流差は正になっている。引張と圧縮では符号が逆になっている。また、一軸引張一軸圧縮の場合も図-5.15, 図-5.17に示すように比例している。この場合は、引張から圧縮までの応力を測定している。図-5.15について考えると、たとえば  $\sigma_y = -2\text{kg/mm}^2$  のとき、主応力差  $\sigma_x - \sigma_y = 8\text{kg/mm}^2$  であるとする、 $\sigma_x = 6\text{kg/mm}^2$  で、そのときの出力電流差は  $I_x - I_y = 0.52 - 0.92 = -0.4\text{mA}$  である。つぎに、 $\sigma_x = -4\text{kg/mm}^2$  ならば  $\sigma_x = 4\text{kg/mm}^2$  で、 $I_x - I_y = 0.5 - 0.9 = -0.4\text{mA}$  となる。また  $\sigma_y = -6\text{kg/mm}^2$  ならば、 $\sigma_x = 2\text{kg/mm}^2$  で、 $I_x - I_y = 0.5 - 0.9 = -0.4\text{mA}$  となる。このように、主応力差  $8\text{kg/mm}^2$  のときは、出力電流差は常に  $-0.4\text{mA}$  となっている。このことは、引張から圧縮まで二軸の場合も、主応力差と出力電流差は比例しているといえるということである。また、理論式(4.34)から求めた図-4.4によっても、このことはあきらかである。これまでの磁氣的測定において、引張と圧縮の出力が、同じ方向に出てくることによって、測定上いろいろ困難なことが起ってきた。

この節に述べた二つの事柄(主応力の方向と差)は引張と圧縮で対称で、一般的な応力一ひずみの関係と矛盾しない挙動である。これを用いることにより、次章にのべる複雑な応力状態の解析が可能となった。

## 5.6 圧縮と引張の出力特性(II)

### 5.6.1 理論値による考察

前にものべたように、磁氣的な応力測定において、圧縮と引張に対する出力が、同方向に出ること、磁氣的なポアソン比が、圧縮と引張とは異なった値になること等の問題が生じている。このことについて少し深く考えてみる。

これまでに、おこなった実験に関する上述の事柄は、§4.4.2において、テストのインピーダンスの測定からも圧縮と引張では出力の符号が同じであること、また、圧縮のほうが引張よりも感度が数倍大きいことという二つの実験事実より説明できる。

ここでは、高木(通泰)の磁界と機械的な力とが同時に作用した場合の、強磁性体結晶の磁氣的挙動を求めた文献<sup>5)</sup>の次式(5.3)にしたがって考えてみる。

磁界の方向に引張または圧縮が生じている場合の、結晶の磁界に平行な磁化の成分和は鉄の単結晶の場合、低磁界では次式で与えられる。

$$j_{11} = \frac{\alpha e^{\gamma} a^2 \sin[h\alpha] + \beta e^{\gamma} \beta^2 \sin[h\beta] + \gamma e^{\gamma} \gamma \sin[h\gamma]}{e^{\gamma} a^2 \cos[h\alpha] + e^{\gamma} \beta^2 \cos[h\beta] + e^{\gamma} \gamma^2 \sin[h\gamma]} \quad \dots\dots(5.3)$$

ここに、 $\alpha, \beta, \gamma$  は容易磁化方向の方向余弦、 $h, \tau_1$  は磁界と応力に関する項である。

また、強磁界では [110] 方向では

$$h = 4k(2j^2 - 1)j - 2\tau_2 j^{(57)} \quad \dots\dots(5.4)$$

[111] 方向では、

$$h = \frac{2}{3}k\{7j^3 - 3j + (4j - 1)(\sqrt{2(1-j^2)})\} - 2\tau_2 j^{(57)} \quad \dots\dots(5.5)$$

ここに

$$h = \lambda J_{\infty} H, \quad k = \lambda K, \quad \tau_1 = \lambda t_1 T, \quad \tau_2 = \lambda t_2 T \quad \dots\dots(5.6)$$

$\lambda$  は強磁性体の磁区統計理論における定数

$K$  は結晶磁気異方性定数

$J_{\infty}$  は飽和磁化、 $t_1, t_2$  は飽和磁気ひずみ式(5.6)で鉄の場合には  $\lambda = 3.6 \times 10^{-4}$ ,  $J_{\infty} = 1716$ ,  $K = 2 \times 10^5$ ,  $t_1 = 20.7 \times 10^{-6}$ ,  $t_2 = -21.2 \times 10^{-6}$  なので、これらを式(5.6)に代入すると、

$$h = 0.62H, \quad k = 72, \quad \tau_1 = 7.45 \times 10^{-9} \cdot T, \\ \tau_2 = -7.6 \times 10^{-9} \cdot T \quad \dots\dots(5.7)$$

ここに、 $T$  は応力で単位は  $[\text{kg/mm}^2]$ ,  $H$  は磁界の強さで単位は  $[Oe]$  である。

これは、単結晶の場合だが、多結晶を構成している各結晶体に、単結晶としての物理的性質を与え、多結晶体の物理的性質は、前者のベクトルの合成値であると考え<sup>(58)</sup>。鉄の場合には [100], [110], [111] の三方向で合成をおこなうと、多結晶体の特性は、単結晶の場合の [100], [110], [111] の物理特性にその寄与の確率、鉄の場合には [100] 方向 6/26, [110] は 12/26, [111] は 8/26 であるが、これを掛けて加えあわせればよい。以上の簡単な操作で、多結晶体の性質を表すことにすれば、単結晶で考えた場合と定性的には、あまり変わらないと考えてよい。

図-5.18は、上式で計算した場合の  $j$  と  $h$  との関係で、鉄の三つの容易磁化方向 [100] [110] および [111] について求めたものである。

この三つの図をみると、[100] では弱磁界で応力によって変化しており、[111] では弱磁界では変化せず、強磁界で変化している。

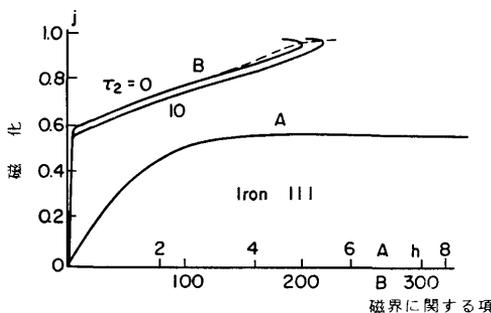
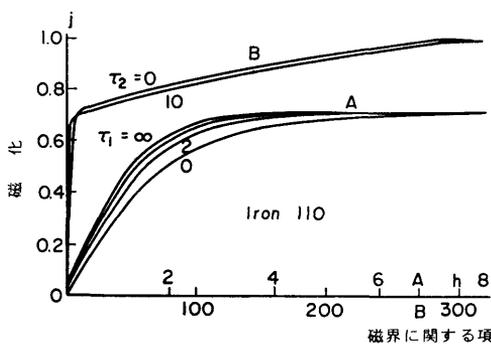
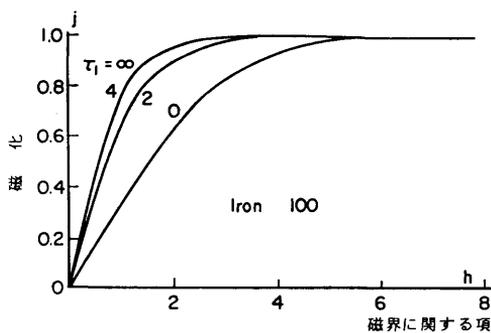


図-5.18 式(5.3)より求めた容易磁化方向の  $j$  の  $h$  関係 (A: 低磁界, B: 高磁界)

そこで〔110〕では、その中間と考えられるので、今簡単なため〔110〕をもって全体を代表させ、〔110〕について計算をしてみた。弱磁界の場合、式(5.3)に、 $\alpha=1/\sqrt{2}$ 、 $\beta=1/\sqrt{2}$ 、 $\gamma=0$ を代入し、応力と磁界の強さを変化させて図-5.19、図-5.20を得た。

つぎに、〔110〕の場合の強磁界について、式(5.4)に、式(5.7)の定数を入れ整理すると

$$H=4645(2j^2-1)j+1.52+j \quad \dots\dots(5.8)$$

となる。単位にはC. G. S.を使用しているので1kg/

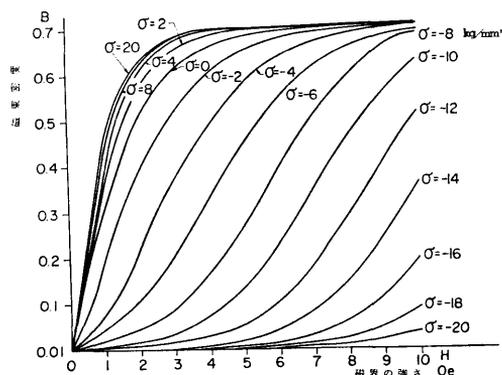


図-5.19 式(5.3)より求めた〔110〕方向のBとHの関係

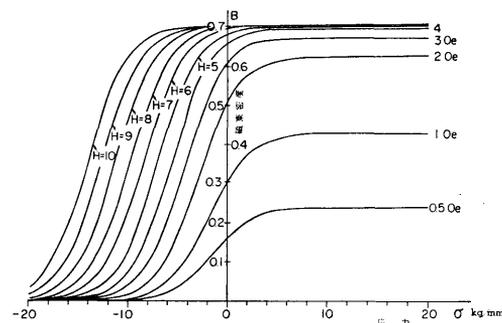


図-5.20 式(5.3)より求めた〔110〕方向のBと応力との関係

$\text{mm}^2 \div 10^8 \text{dyn/cm}^2$ として、この式より求めた結果が図-5.21である。

図-5.19、図-5.20からわかるように、低磁界では、圧縮で大きく減少するが、引張では変化が小さく、増加している。また、図-5.21より、強磁界では圧縮も引張も同じ割合で変化している。圧縮では  $B$  がふえ、引張では  $B$  が減少している。

ストレステストで応力を測定する場合、磁束は §4.3.1の図-4.7に示すように、ある範囲に広がるので、強磁界と弱磁界が複雑に入りまじっており、出力はこれらの合成になっていると考えられる。そこで引張では、弱磁界だけならば図-5.19に示すように低応力で少し変化し、それ以後は変化しないはずである。強磁界がこれに加わると、引張側で  $B$  が減少することになる。また、圧縮では強磁界で  $B$  が増大するが、弱磁界では図-5.20に示したように、応力が働くと  $B$  が非常に大きく減少するので、その合成と

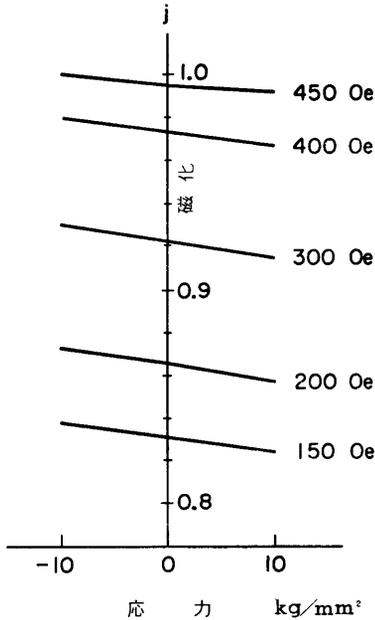


図-5.21 式 (5.8) より求めた  $j$  と応力の関係

して、全体としても圧縮でも、 $B$  が減少するものと考えられる。

以上のことを考えると、引張と圧縮とが同じ方向に変化するということは、理論式から考えてもありうる事であり、引張にくらべ圧縮の方が感度が良いことも、図-5.19, 図-5.20, 図-5.21からわかる。

また、文献69でも強磁界の場合には、図-5.21と同じ結果がでており、文献40でも軟鋼の  $B$  の変化が引張と圧縮とで、ともに同じ方向に変化しているという実験結果が得られている。

5.6.2 実験による考察

前項にのべた事や、これまでの実験事実を確かめるため、今度は実験によって、丸棒を引張または圧縮した場合の磁束密度を、磁界の強さを変えた場合について測定した。

実験装置の大略を図-5.22に示す。使用した炭素鋼は、 $8\phi \times 400\text{mm}$  の S45C 材で、磁化コイルは長さ 250mm のソレノイドコイルで、 $H=460i\text{Oe}$  の磁界を与える、ここに  $i$  は磁化電流である。この状態で引張荷重を加えると、磁束は磁気ひずみ効果により  $\Delta\phi$  だけ変化する。試験片に巻かれた検出コイルには、このため電圧が誘起される。この電圧を積分器で積分し、X-Y レコーダの Y 軸に入れる。積分器の出力電圧  $E$  は、次式で与えられる。

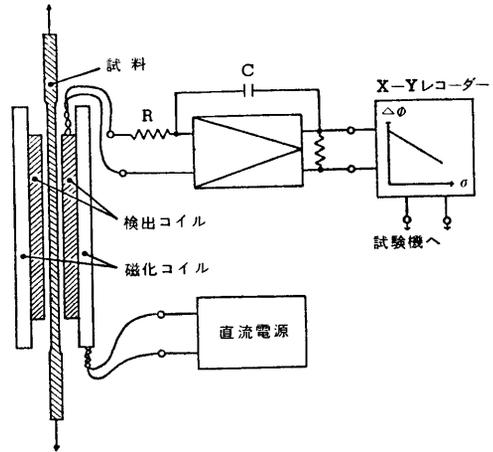


図-5.22 実験装置 (直流磁界)

$$E = \frac{N}{CR} \int \frac{d\phi}{dt} dt = \frac{N\Delta\phi}{CR} = \frac{N \cdot \Delta B \cdot S}{CR} \dots\dots (5.9)$$

但し、 $N$ ; 検出コイルの巻数 (470回)

$S$ ; 試験片の断面積

であり、 $C, R$  は、図-5.24に示した容量と抵抗とでここでは、 $C=1\mu\text{F}, R=50\text{k}\Omega$  である。これより

$$\Delta B = \frac{RC}{NS} \cdot E \dots\dots (5.10)$$

磁束密度は、 $E$  に比例する、磁界の強さは磁化コイルに流す電流に比例するので、これを  $x$  軸に入れると、図-5.23のような  $B-H$  曲線がえられる。このコイルでは、1 A の磁化電流で磁界の強さは  $460\text{Oe}$  となった (実測)。

まず、試験片にサーチコイルをセットして、試験片

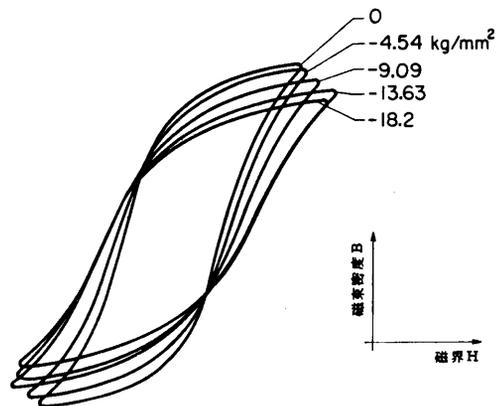


図-5.23 応力による  $B-H$  曲線の変化 (II)

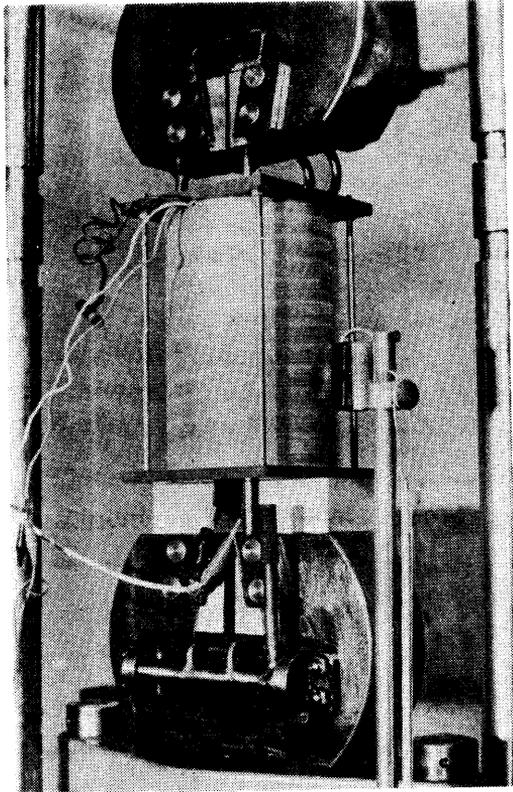


写真-12 直流コイルと試験片

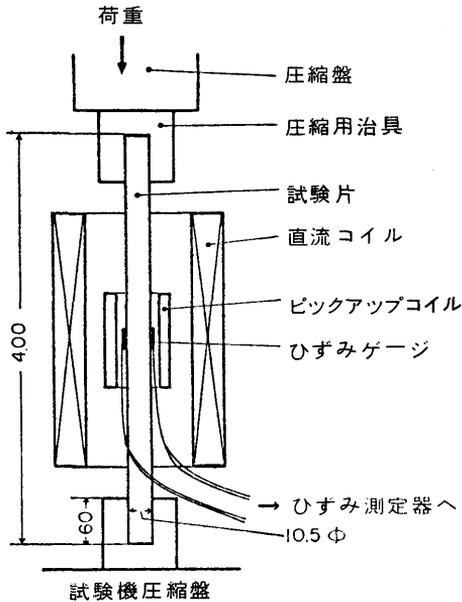


図-5.24 圧縮試験の方法

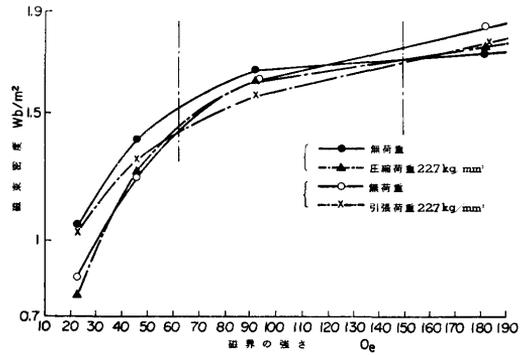


図-5.25 丸棒を直流磁化した場合の荷重による B と H の関係

を磁化コイルの中に入れ、オルセン式万能荷重試験機に取りつける。写真-12にこれを示す。測定回路を図-5.22に示す。B-H曲線を求める方法は、たとえば、まず、無荷重のときに、磁界の強さを

-23, 0, 23, -0, 23[ $O_e$ ]と変化させて、そのときのB-H曲線を求める。つぎに、荷重を0.4tonにしたときに、無荷重の場合と同様に磁界の強さを変化させB-H曲線を求める。このようにして磁界の強さが、最大の23 $O_e$ のときの荷重変化に対するB-H曲線を求めたのが、図-5.23である。

このようにして、最大磁界の強さを46, 92, 184, 322, 460, 515 $O_e$ と変化させ、荷重はそれぞれ応力に換算して、0, 45, 9, 13.5, 18, 22.5kg/mm<sup>2</sup>と6通り測定をした。

また、圧縮応力の場合には、図-5.24に示すように、棒試験片の上下に75φ×75の軟鋼製、円筒補助ジグをつけて、座屈を防ぎ0~22.5kg/mm<sup>2</sup>までの応力をかけて測定した。図-5.25は、その実験結果である。各B-H曲線の最大磁界の強さ  $H_{max}$  における、磁束密度  $B_{max}$  を求めて、これをy軸に、 $H_{max}$  をx軸にとり、荷重の値をパラメータとしている。磁束は荷重と共に増大または減少するので、途中の荷重の場合は省略し、図-5.25では引張荷重22.7kg/mm<sup>2</sup>と無荷重の場合、圧縮荷重22.7kg/mm<sup>2</sup>と無荷重の場合のみえがいた、無荷重の場合の二つの曲線が一致していないのは、引張と圧縮とでは、万能試験機のチャック部が異なっていることと、圧縮の場合には図-5.24に示すように、座屈防止のジグをつけているので試験片そのものの形状が変っているため、磁束がやや異

なるのだと思われる。

以上の事から、図—5.25からもわかるが、実験によっても低磁界では、圧縮荷重で  $B$  が減少し、引張荷重の場合は増加する。変化の割合は圧縮の方が大きい。ところが、 $60O_e$  から  $160O_e$  ぐらいの磁界では、引張も圧縮とともに、荷重の増大につれて  $B$  が減少している。ストレススタの磁界としては、この辺が一番効いてくる所なので、引張と圧縮とが同じ方向にでてくることは、これからも説明できる。高磁界では、低磁界の場合と逆転し圧縮で  $B$  が増大、引張で  $B$  が減少している。そしてこのことは、前項の高木の理論式の結果や、これまでの実験結果とも一致している。

### 5.7 まとめ

本章においては、種々の応力状態の平面応力を測定し、次の結果を得た。

(1) 主応力方向は、平面応力状態では、すべて最大主応力方向（符号を含めて）で出力電流は最小となり、最小主応力方向で最大となるので容易に決定することができる。

(2) 二軸圧縮応力の測定でも、横感度係数は正となり、応力の関数となっている。

(3) 二軸圧縮の場合の（初期応力および巨視的残留応力）の測定は、単軸の場合と同じように、被測定材と同じ材質、同じ加工、熱処理状態の試験片で、標準片と補償片を作る。主応力方向とその方向の磁気出力を測定すると校正用応力線図より、二つの主応力を、誤差約  $\pm 2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$  で測定することができる（応力  $20 \text{ kg/mm}^2$  以内）。

(4) この種の二軸引張、応力の測定も、二軸圧縮と同様に校正用応力線図より求めることができる。

(5) 任意の平面応力の場合には、引張、圧縮の判別が困難な場合が多いので、次章でのべるせん断応力差積分法を用いる方がよい。

(6) 平面応力の場合に、主応力差と出力電流差が、引張から圧縮まで比例していることが、実験結果から確認され、前章の理論式（4.34）の結果が実験的に証明された。

(7) 主応力差と出力電流差の曲線は、平面応力の場合にも引張と圧縮とで、正負対称になっている（図—5.7、図—5.13、図—5.15参照）。

(8) 高木（通泰）のミクロ的な磁気挙動より求めた理論式に、本論文で使用した磁界の強さ応力等を代入して計算した。その結果、論文で用いた磁界の強さで

は、磁束密度は引張圧縮の両応力とも、応力の増大とともに減少し、しかも感度は圧縮のほうが引張よりも大きいという事がわかった。これは本研究の結果と一致する。

(9) 実験的には、丸棒をソレノイドコイルで直流磁化し、応力に対する  $B-H$  曲線を求めた結果、ストレススタの磁界として一番感度に効いてくる  $60 \sim 160 O_e$  では、引張、圧縮ともに荷重の増大にともなって磁束密度は減少していることがわかった。また、これより低磁界では、圧縮で磁束密度が減少し、引張で増加する。この測定では、磁束が被測定材のある範囲にひろがるので低磁界も影響を与えることを考えると、圧縮が引張よりも感度が大きいことも、実験から予測できる。

## 第6章 不均一な平面残留応力の測定

### 6.1 緒言

前章までの研究で、単軸応力と平面応力の二軸圧縮、二軸引張については、測定可能であることが判明した。しかし、任意の平面応力の場合、複雑な応力分布の場合、とくに、テストの測定範囲内で応力変動がある場合には、これまでの方法では測定が困難である。

前章の実験で、平面応力の場合にも、主応力方向と、主応力差が、精度よく求まることがわかった。本章では、上述の測定困難な応力状態の場合に、せん断応力差積分法を用いてこれを求めその精度を検討した。

せん断応力差積分法は、主応力方向と主応力差より主応力を分離する方法である。この方法は、主応力差をとるので、零点のバラツキの誤差が消去されることと、引張圧縮の識別ができることが利点である。

本章において、この方法を用いた場合のイニシャル誤差を実験考察して、この種の応力を測定する場合にせん断応力差積分法を用いた応力測定法を確立した。この方法により、すべての平面応力状態の残留応力の非破壊測定が可能となった。

この章では、使用テストは殆んど標準テスト II を用い磁化電流は、 $50 \text{ Hz}$ 、 $300 \text{ mA}$  を使用した。試験片も主として、二軸引張試験片で、その他に、一軸引張試験片、長方形試験片も用いた。

### 6.2 せん断応力差積分法の導入

前章までの実験で、テストを測定点を中心に  $180^\circ$  回転させると、二つの主応力の方向はその出力最大最小

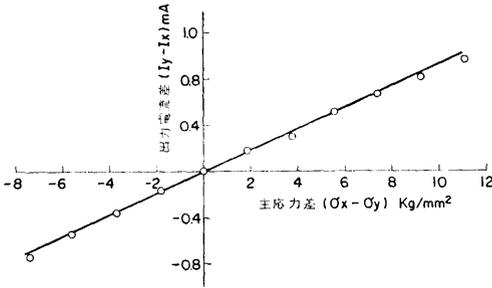


図-6.1 主応力差と出力電流

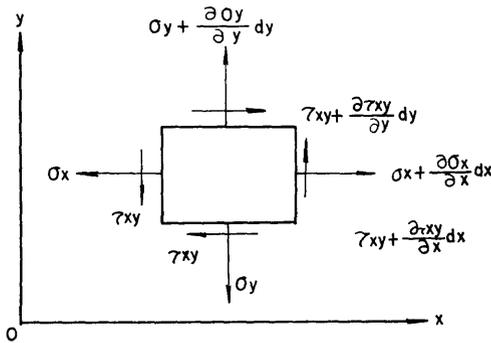


図-6.2 平面応力での応力の平衡

の方向として図-5.2に示すように、簡単に求まること  
 がわかっている。そして最大主応力（符号まで含め  
 て）の方向が、最小出力電流の方向であり最小主応力  
 が最大出力の方向となる。また、二つの主応力差と、  
 そのそれぞれの方向の出力電流の差が 一対一 に対応  
 し、引張から圧縮にかけて図-6.1に示すように、直  
 線性のよい比例関係を得ることができた。このこと  
 は、理論的にも第四章で証明されており光弾性実験で  
 使用されている、せん断応力差積分法<sup>(60)</sup>を利用すべ  
 ば主応力を分離できるのでこれを解析に用いることと  
 する。この方法は、主応力差をとるので誤差のうち、  
 最も大きい零点の誤差が除去され精度が向上する。以  
 後の説明を容易にするためにせん断応力差積分法につ  
 いて簡単に説明する。

平面応力の平衡を、図-6.2のような長形要素につ  
 いて考える。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(6.1)$$

二つの主応力のうち、代数的に大きいほうを  $\sigma_1$  と

し、 $\sigma_1$  と  $x$  軸とのなす角を  $\alpha$  とすると  $\sigma_x, \sigma_y$  は  
 次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{x0} - \int_{x_0}^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx - \sigma_{x0} - \sum \frac{d\tau_{xy}}{dy} dx \\ \sigma_y &= \sigma_{y0} - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy = \sigma_{y0} - \sum \frac{d\tau_{xy}}{dx} dy \end{aligned} \right\} \dots\dots(6.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha \dots\dots(6.3)$$

ここに、 $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}$  はそれぞれ  $x=x_0, y=y_0$  での  
 $\sigma_x, \sigma_y$  の値で、通常自由周辺や、既知の応力を生じ  
 ている場所など直接、実験で得られる値をとる。 $\tau_{xy}$   
 は式(6.3)より、主応力差と主応力の方向がわかれば  
 求まるので  $x$  軸に平行な線上で、式(6.2)により  
 逐次積分をすることによって、同線上の  $\sigma_x$  の値を知  
 り得る、そこで各測定点の  $\sigma_x, \sigma_y$  を求めることが  
 できるわけである。

### 6.3 不均一な応力場における巨視的残留応力の測定

#### 6.3.1 測定方法

測定は、従定の測定のように絶対値が必要ではな  
 く、相対値でよいのでいろいろな零点のちがいが相殺  
 される。このため特別な場合をのぞいて、零バランス  
 をとるための標準片は不要となる、後述のように校正  
 用試験片としての寸法は、使用テストの磁極間距離  
 (標準テスト  $l=25\text{mm}$ ) の 2~3 倍でよい。測定は、  
 ストレステストを直接被測定材に当て、ブリッジのバ  
 ランスをとる、特別な場合には従来のように標準片で  
 バランスをとらねばならないときもある。測定点を中  
 心に、テストを  $180^\circ$  回転させ出力最大最小の方向と値  
 を測定する。

その具体的な測定例を以下に示す。実験に用いた二  
 軸引張試験片を図-6.3に示す。測定点は、このよう  
 に  $A-A'$  軸上で数点測定した。その補助軸としてそ  
 の上下  $12.5\text{mm}$  のところに  $a-a, a'-a'$  軸をとる。  
 測定は、たとえば  $[A, 2]$  点を測定する場合には、そ  
 の点とその上下  $[a, 2], [a', 2]$  の二点とにおいてテ  
 スタを  $180^\circ$  回転させる。そうすると、これらの測定値  
 より、せん断応力差積分法によって  $[A, 2]$  点の  $\sigma_x,$   
 $\sigma_y$  の値が求められる。

この実験では、図-6.3に示す試験片の測定点に二  
 軸ひずみゲージをはり、写真-10に示すような二軸引  
 張試験機で荷重をかけこれを二軸残留応力とみなし、  
 テスタとひずみゲージで同時に測定をおこなった。ま  
 た、図-6.3のように測定点をとったので、この  $A-A'$   
 軸上には、自由周辺がない。そこで式(6.2)の

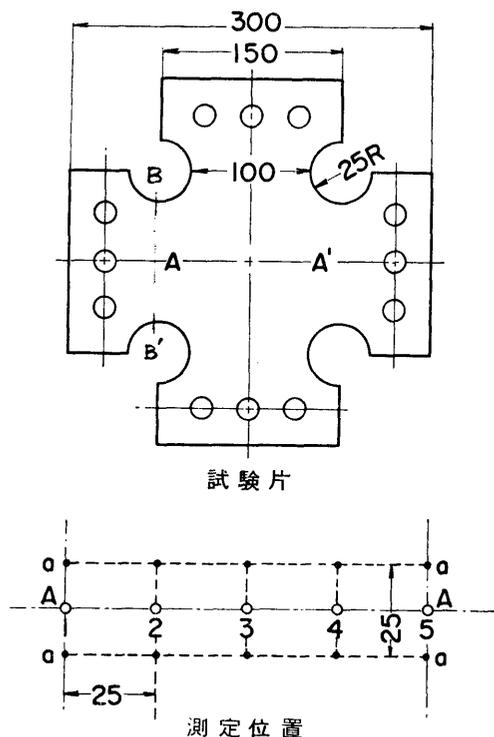


図-6.3 試験片と測定位置

$\sigma_{x0}$  は図-6.3 の [A, 1] の所のひずみゲージの値を採用した。しかし実際には、たとえば 図-6.3 の  $BB'$  軸より解析して [A, 1] の所の応力を求めてやればよい。

そして最後に、校正用試験片と補償片とで引張から圧縮までの主応力差と出力電流差との校正曲線を作っておくとこれから応力の値を求めることができる。

つぎに、校正用の試験片と補償片とについて考える。テストの出力は、§4.3.2にも述べたが、磁化電流 300mA の場合には、標準テストの場合、測定点を中心に半径 25mm の円内の応力の平均を示していると考えてよい。また磁束の板厚方向に浸透する深さは、文献(49)や §4.3.1 からあきらかなように、表面から 1.5mm 以下であると思われる。§2.4.2 の (i), (iii) や §2.6 等に示した測定点近傍の強磁性の影響その他による零点の値のちがいは、出力電流差をとるので消去される。これらのことより、校正用試験片補償片としては、半径 25mm 以上、厚さ 1.5mm 以上あればよいわけである。§7 の溶接材の残留応力の測定の標準片、補償片は圧縮用としては  $100 \times 60 \times 17$ mm 引張用とし

ては、 $280 \times 60 \times 17$ mm を使用した。またこの寸法は、§4.3.1 に述べているように理論式 (4.39) からあきらかである。

### 6.3.2 接触面と測定電流の安定

実際に測定する場合、重要なことは一軸応力の場合も同じであるが、テストと被測定材の接触面の仕上げの状態である。とくに、この方法はテストを一回転させるので、その範囲の被測定材の表面がテストの足と密着することが必要である。

まず、エメリーペーパーなどで機械的に被測定体の測定点を平らにする、つぎに、測定装置にテストをおき磁化電流を流してからテストを数回回転させると出力電流が安定する。この操作をおこなうことができた。この理由は、種々考えられるが電流を流し被測定材を磁化すると測定面の磁区方向が、容易磁区方向にむき変るがテストを数回同じ方向に回転させることにより磁区の回転方向が安定することが考えられる。もう一つの理由は、テストと被測定材の接触面が数回の回転により、密着性がよくなり狭雑物がとり払われることなどが関係していると思われる。

テストと接触面間の安定性をチェックする方法として、テストを  $y$  軸に合せそれから回転させ  $180^\circ$  になると再び  $y$  軸に一致する。このとき出力が応力のみに関係するとすれば、 $0^\circ$  のとき  $180^\circ$  のときに出力は一致するはずである。テストを数回回転すると、この二つの位置の出力の差は殆んど  $\pm 20 \mu A$  以内になった。応力に換算すると約  $0.1 \text{ kg/mm}^2$  である。この状態で測定するとよい結果が得られた。出力差がこれより大きい値のときは、結果がよくない。その原因は表面の状態が悪い場合や配線の接触不良等測定装置、方法に欠点があり、これを直すとは殆んど  $\pm 20 \mu A$  以下となった。

測定前の準備として、まず、機械的に表面を正しく平面になるように磨き、テストを当て、磁化電流を流す。テストを測定点を中心に、数回回転させ  $0^\circ$  と  $180^\circ$  との出力電流の差が  $\pm 20 \mu A$  以下ならば、測定をおこない  $20 \mu A$  以上異なった場合には、接触面をみがき直したり測定装置を点検しなおして、 $20 \mu A$  以内に出力差が納まるようにした。このことは測定が正しいか否かをきめる目安とすることができ、実際の測定上非常に有効であった。

## 6.4 測定結果および考察

### 6.4.1 実験結果

前節の測定方法により、図-6.3 に示す二軸引張試験片に、二軸引張応力をかけて測定した結果を、図-

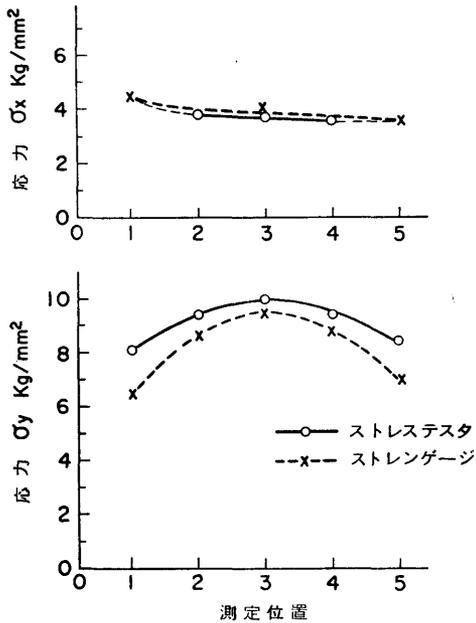


図-6.4 測定値の比較 (I)

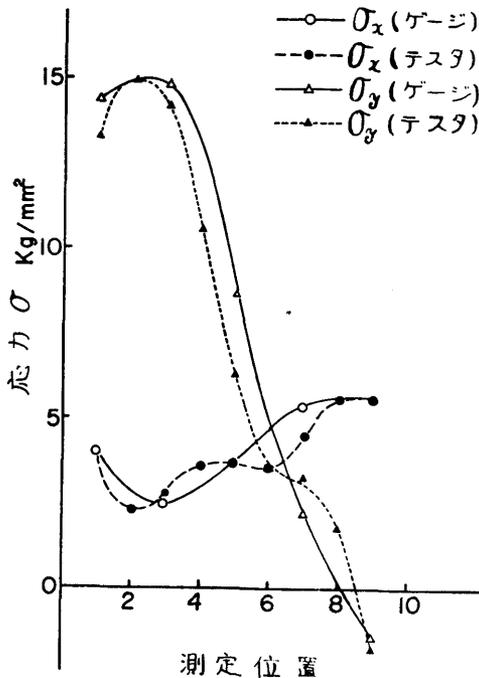


図-6.5 測定値の比較(II)

6.4に示す。これは  $x, y$  方向にそれぞれ異った荷重をかけ、 $x$  方向および  $y$  方向の応力をストレステスタ

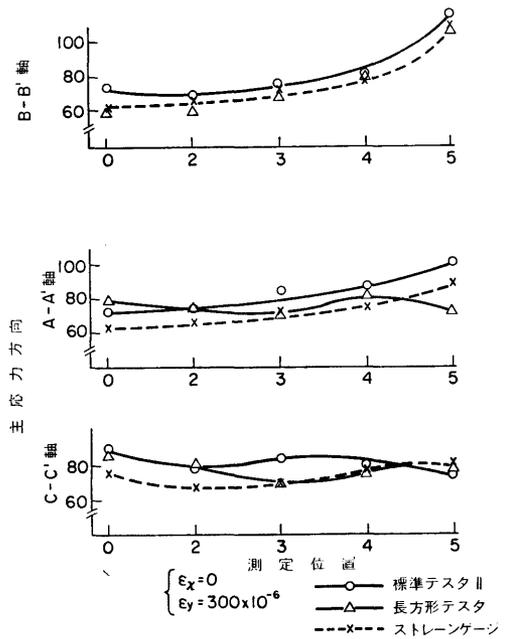


図-6.6(a) 主応力方向  $\theta$  の測定

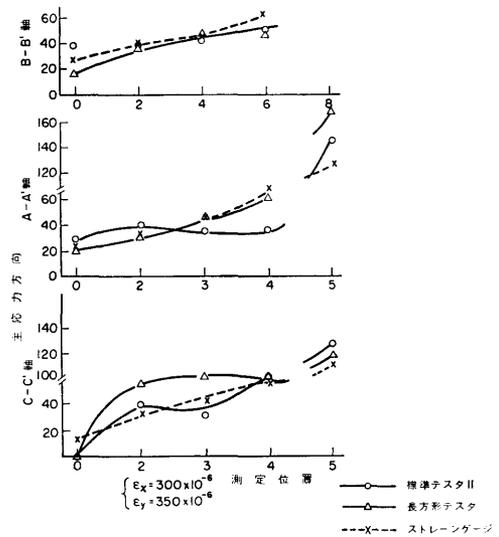


図-6.6(b) 主応力方向  $\theta$  の測定

で測定し、せん断応力差積分法で解析した値 ( $\sigma_{20}$  はゲージからの値を使用) とその測定点にはられたひずみゲージにより求めた値を比較したものである。両端は、試験片の端の影響と応力の不均一のために、 $\sigma_y$  方向の応力に差が出たと思われる。このように、比較的単純な応力状態の時はひずみゲージとテスタとの差

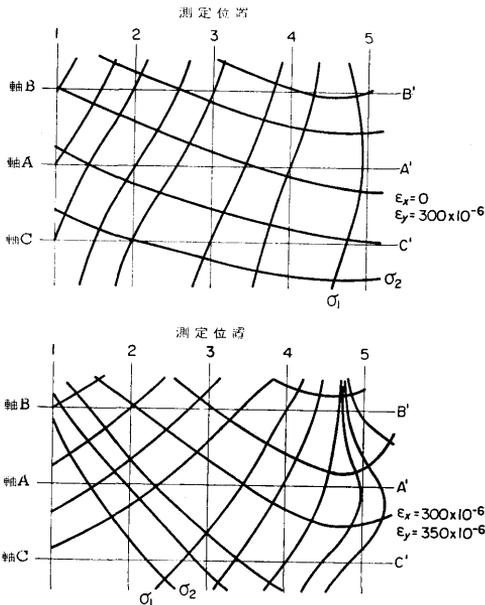


図-6.7 ロゼットゲージによる主応力線図  
は約  $\pm 1.5 \text{ kg/mm}^2$  である。

つぎに、同じ試験片に二軸引張応力をかけるが、 $x, y$  方向に、それぞれ異なった荷重でしかも、 $x, y$  軸ともに応力勾配を生じるような、偏心荷重をかけたときの、 $x, y$  方向の応力を、ストレステスタとひずみゲージで測定した値と比較したものが図-6.5である。このように、応力勾配のある場合でもこの方法で測定すると、ひずみゲージによる値との差は約  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$  と考えてよい。この実験ではひずみゲージの値を残留応力とみなしテスタで非破壊測定した値と比較している。

このひずみゲージによる値とテスタによる値との差について考える。図-6.3に示す二軸引張試験片で  $A-A'$  軸の上下  $25 \text{ mm}$  のところに  $B-B'$  軸、 $C-C'$  軸を設け、三軸ストレインゲージと、テスタで各点の主応力方向を測定した。結果を図-6.6に示す。この図からわかるように  $\epsilon_x=0$ 、 $\epsilon_y=300 \times 10^{-6}$  即ち  $\sigma_x=0$ 、 $\sigma_y=6 \text{ kg/mm}^2$  の場合には、ゲージとテスタで測定した主応力方向の差は、最大  $10^\circ$  ぐらいである。しかし、 $\epsilon_x=300 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon_y=350 \times 10^{-6}$  即ち  $\sigma_x=6$ 、 $\sigma_y=7 \text{ kg/mm}^2$  の場合は、測定位置(4)、(5)付近で非常に大きな差約  $30^\circ$  を生じている。図-6.7は、上記二つの場合のひずみゲージより求めた主応力線図であるが、これを見るとわかるように  $\epsilon_x=0$ 、 $\epsilon_y=300 \times$

$10^{-6}$  の主応力線図の方が、 $\epsilon_x=300 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon_y=350 \times 10^{-6}$  の場合の線図より直線的であり、特に後者の線図は測定位置(4)、(5)で、非常にまがっている。出力はストレステスタの測定範囲(標準テスタは半径  $25 \text{ mm}$  の円内)内の平均を示しているの、その範囲内におこる主応力線が直線的であれば、主応力方向の誤差は小さくなるが、曲線的であればひずみゲージの測定範囲とテスタの測定範囲の大きさが異なるので、その差が大きくなるはずである。

テスタの測定範囲内において、主応力線が直線的であるが、測定精度がよくなる一つの原因であることが実験的にもわかった。このためには、応力勾配がゆるやかであればよく、また、テスタが小型である方がよい。このことから安定性のよい小形テスタの必要な事がわかる。

#### 6.4.2 出力曲線が正弦曲線にならぬ場合

この実験は、同じ二軸引張試験片10ヶ(S S41-5ヶ、S45C 5ヶ)を用いておこなった。ひずみゲージとテスタとの差が、前項で述べた範囲に入ったのは8ヶであとの2枚は、たとえば図-6.8に示すようにある測定点で、この場合には、測定位置(4)付近で、ゲージとテスタの応力曲線が、 $\sigma_y$  で  $5 \text{ kg/mm}^2$  もちがっている。この場合も、他の8枚の試験片の場合と全く同じ測定方法でおこない不適当な点は無かったが、8枚の試験片とちがうところは図-6.8を求めるための

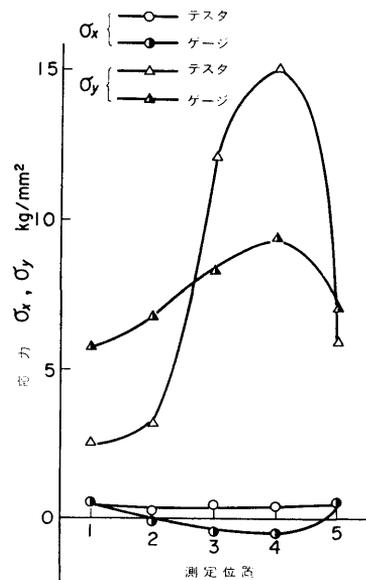
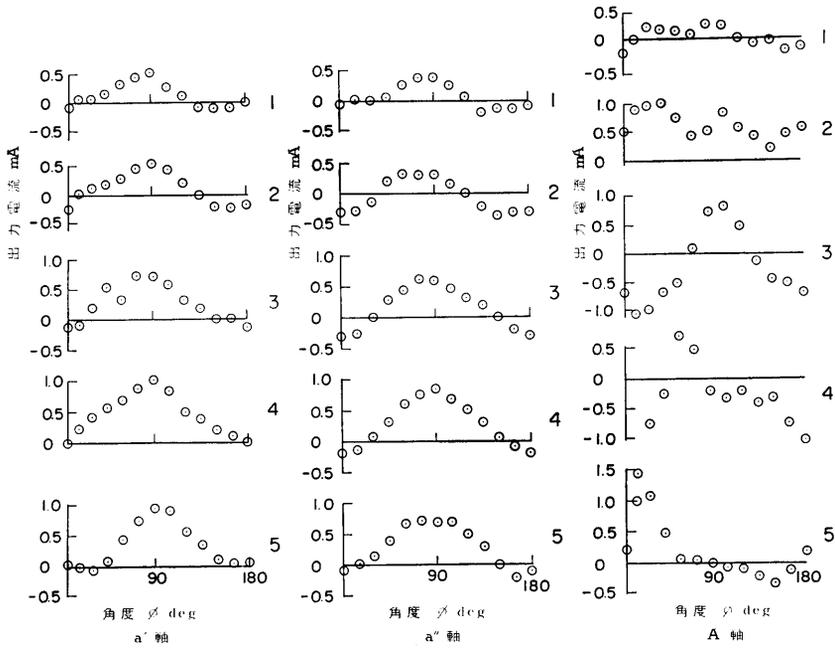
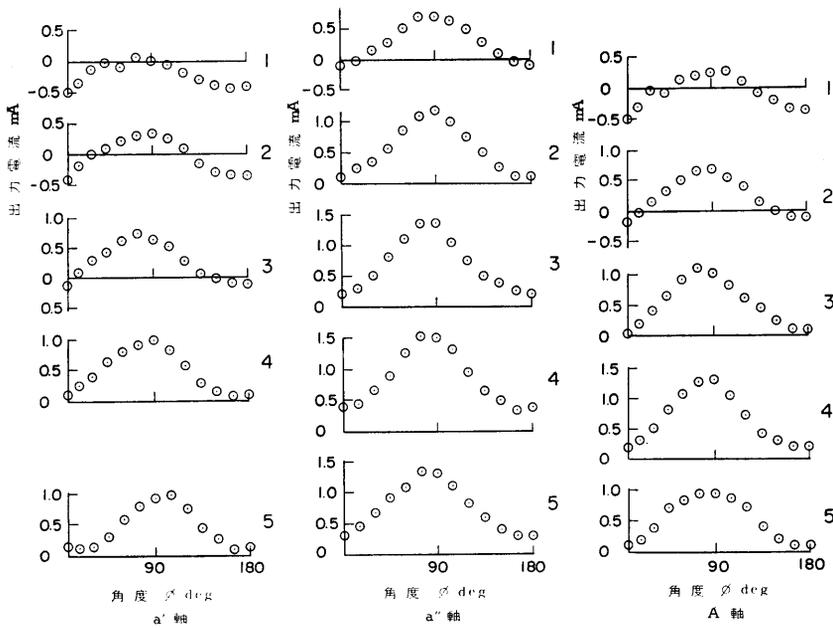


図-6.8 測定値の比較(Ⅲ)



圖—6.9 角度—出力電流曲線 I



圖—6.10 角度—出力電流曲線 II

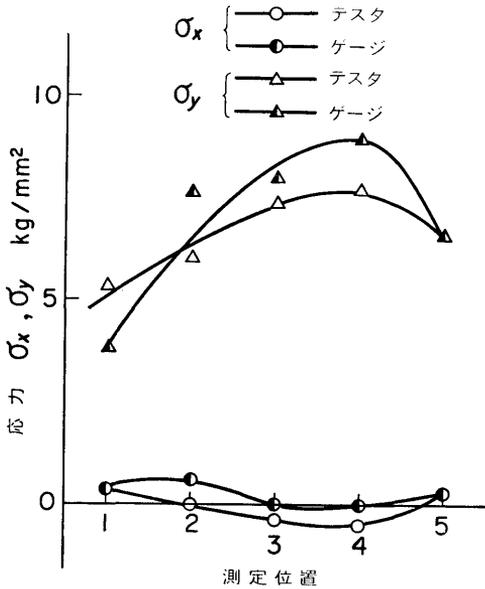


図-6.11 測定値の比較(IV)

角度出力電流曲線（各測定位置でのテストを回転させた場合の角度と出力の関係）が図-6.9に示すように、なめらかな正弦曲線ではなかった。

そこで、もう一度、この試験片（S45C）を測定位置(4)を中心に、平らに磨き直して測定したその結果を図-6.10に示す。この図と図-6.9を比べてみると、各測定位置の角度—出力電流曲線はなめらかな正弦曲線となっておりとくに、一番重要なA軸で非常によくなっている。図-6.11は、これから求めた $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ でひずみゲージの値とよく一致した曲線となっている。この場合のゲージとテストの測定値の差は、 $\sigma_x = -0.6 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_y = -1.6 \sim 1.5 \text{ kg/mm}^2$ である。同様にもう一枚、一致しなかった試験片（SS41）の場合も、同様であったがここでは省略する。

いま、例として、S45Cの場合について述べたが後の実験でもまず、測定する角度—出力電流曲線が正弦曲線より大きくずれる場合には、他の測定方法に誤りがなければ試験片の表面とテストの接着面の密着をよくするために、試験片表面を磨き直すと正弦曲線に近い線図をうることができた。そのためには、粒度240番程度のエメリーパーで仕上げる必要がある。そして、角度—出力電流曲線を正弦曲線に近い線のみになると、得られた応力値は、ゲージで測定した値に近い値となり、前項で述べた誤差の範囲内にはいることが

(64)

わかった。理論的にも平面上の一点の周りの応力は、平面応力と考えるとよい場合には、このような曲線になるはずである。

以上のことがわかったが、このことは測定が正しい値か否かを判断する有力な方法と考えてよい。まず、測定する角度—出力電流曲線が正弦曲線よりも大きくずれる場合にはその測定点近傍を磨き直して、テストとの密着性をよくすることにより、ひずみゲージによって、求まる値との差を約 $\pm 1.5 \text{ kg/mm}^2$ 以内に修正することができる。あとは、応力測定範囲の違い材質の不均一などが原因で、このちがいはやむをえない。

#### 6.4.3 補助軸の位置について

せん断応力差積分法を用いる場合、問題となるもの一つに最適の補助軸の位置決定がある。 $\partial\tau_{xy}/\partial y$ をなるべく正確に求めるためには、一見測定軸と補助軸との間隔 $\Delta Y/2$ を極力小さくとした方がよいように思われるが、主応力方向のデータが測定軸とはっきり差が表れないと解析できない。したがって補助軸は、主応力方向のデータの差がはっきりわかる程度の最短間隔がよいとされている。

補助軸の取り方によって、解析結果がどれぐらい異

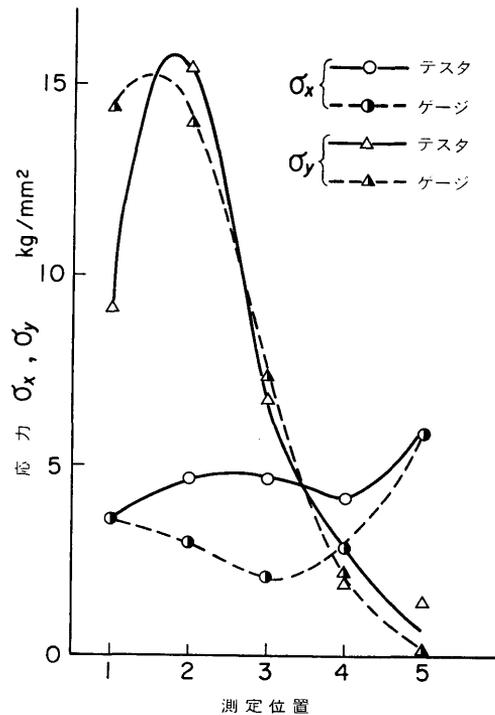


図-6.12 測定値の比較(VII)

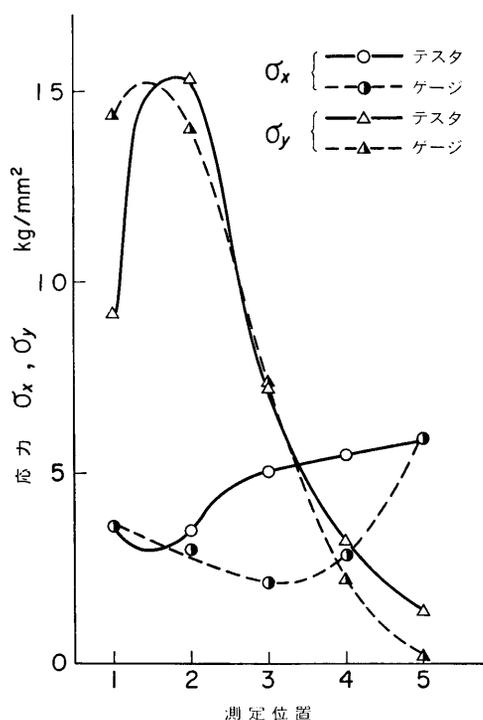


図-6.13 測定値の比較(VIII)

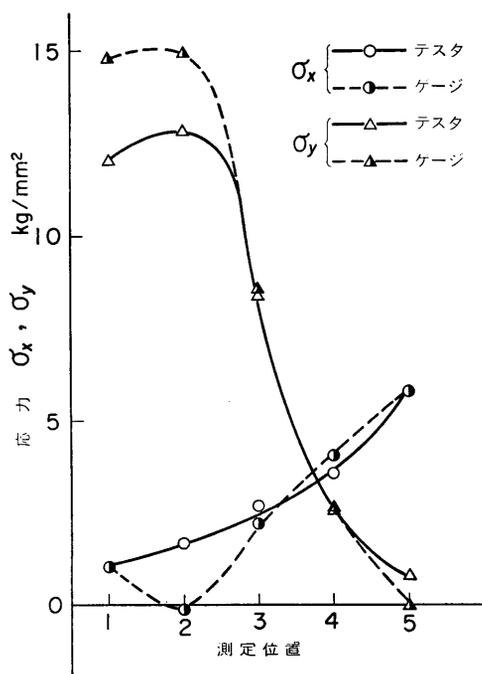


図-6.14 測定値の比較(IX)

るかを調べるために、次のような実験をおこなった。二軸引張試験片を用い  $\Delta X=25\text{mm}$  一定として、 $\Delta Y$  を  $12.5\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 、 $50\text{mm}$  と変化させた。その結果は図-6.12、図-6.13、図-6.14をみるとわかるように、 $\Delta Y=50\text{mm}$  (図6.14) の場合が最もゲージの値と一致しており、図-6.12、図-6.13では、主応力方向が対称的ではないため  $\sigma_x$  とゲージとの差が非常に大きくなっている。また、 $\sigma_y$  の値は測定軸の出力電流差に大きく依存するようである。

以上のことを考えると、この実験では測定軸は中央ですべてこの軸を中心に対称のはずであるから、主応力方向が対称に出てこなくてはならない。 $\Delta Y$  を  $50\text{mm}$  に広げた場合にはじめて対称に出てきており、主応力方向の値は信頼できる。したがって、前のべたが主応力方向のデータの差がはっきりわかる程度の最短間隔は  $\Delta Y=50\text{mm}$  ( $\Delta Y$  とは二つの補助軸間の距離) と考えてよい。もちろんこの値は、応力状態その他で左右されるが標準テスト II の場合には、この位の値でよいようである。

また、 $\Delta x$  の値も、応力勾配の大きい所では小さくとらねばならないが、応力勾配の少ない時には、小さくすることは誤差をかさねることになるのでよくない。結論として補助軸の位置は、標準テスト II の場合には  $\Delta Y=50\text{mm}$  前後にとれば、だいたい良く、 $\Delta X$  は被測定材の大きさ、応力勾配によって決定すればよい。

### 6.5 イニシャル誤差について

主応力差を測定する方法の大きな特徴の一つは、§2.6でのべたイニシャル誤差をほとんど考えなくてよいということである。

従来の方法では、まずブリッジの零バランスをとるのに、標準片と補償片でとり、その標準片を被測定体と同じとみなして測定することからくる誤差が、イニシャル誤差の大部分である。主応力差をとる方法では、被測定材でとり、測定点を中心にテストを一回転したときこれらすべての点が測定レンジの中にあればよく、その出力の絶対値は不要で二つの主応力方向の出力電流差のみが必要であり、従ってイニシャル誤差が減少する。また、主応力差をとる方法でも磁気ひずみ感度を求めるためには、被測定体の一部を切り取ることが可能な場合以外は、別の試験片で校正曲線を作らねばならない。このとき関係するのは、磁気ひずみ感度によるちがいがいだけでイニシャル誤差には関係しない。

表—6.1 応力零の場合の最大, 最小の出力電流差  
:  $\mu A$

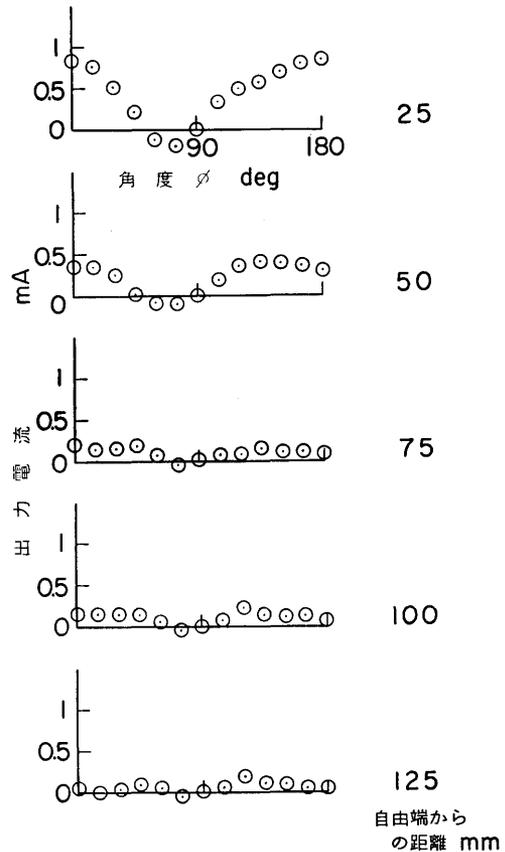
試験片 番	SS41 未焼鈍	S45C 未焼鈍	SS41 焼鈍
1	100	150	
2	240	10	140
3	380	440	170
4	140	0	130
5	160	—	—
6	60	—	30
平均	180	165	118
応力換算 $kg/mm^2$	1.1	1.2	0.6

結局, この方法では, 測定点を中心にテストを一回転させるので, その微小部分のちがいが, イニシャル誤差となってきていく。この微小部分 (標準テストでは約半径25mmの円内) は材質, 粒度などは同じとみてよいと思われるが, 表面の接触の状態や磁束の方向の変化によるちがいなどによると思われる。テストの測定点の近傍に, 被測定材の端など形状, 材質の変化があるときは, もちろん影響するがこのときは, 同じ形状の試験片をつくり (寸法が小形の試験片なので簡単につくれる) 無応力の状態であらかじめ変化の影響を測定しておけば, これを除くことができる。これらのことを考えると主応力差をとる方法では, イニシャル誤差は, テスタを回転させたときの誤差を考えればよい。実験は, 二軸引張試験片の中央でテストを回転させ, 最大, 最小の出力電流差を求めた。使用した試験片は, SS41 6枚, S45C 4枚を使用し, SS41は測定後に650°Cで2時間, 応力除去焼鈍をおこなった。その値を表—6.1に示す。また, 各試験片の磁気ひずみ感度は, SS41が $163\mu A/kg/mm^2$ , S45Cは $131\mu A/kg/mm^2$ でSS41を焼鈍した場合は, $190\mu A/kg/mm^2$ であった。

実際の測定では, 末焼鈍材を扱う場合が多いので未焼鈍材について測定をおこなったが焼鈍した場合でも, 表—6.1に示すように $0.5kg/mm^2$ 末焼鈍の場合には約 $1kg/mm^2$ の誤差は除くことができないと思われる。

つぎに, 測定点からどれだけ離れた部分がイニシャルに影響を与えるかを測定した。従来の方法では § 2.4.2(iii) にのべたように, 測定点より200mm以内は影響を与えることがわかっているので, この測定法の場合について実験をおこなった。

使用した試験片は,  $500 \times 250 \times 2mm$ の残留応力の



図—6.15 自由端からの距離による出力電流値

ない鋼板を使用し, 端から25, 50, 75, 100, 125mmと変化させた位置で, テスタを180°回転させ, その出力電流値をしらべた。その結果を図—6.15に示す。この図をみると, 端の影響が, だんだん中央にいくにしたがい無くなっていくのがわかる。端から50mm以内は, 端の影響が表われるので, 同じ寸法で残留応力がない鋼板を補償片にし, 補償用のプローブを, ストレステストと同じ端からの距離において端の影響を打ち消さなければならない。75mm以上離れると, 影響が無くなり, 曲線は平らになっている。この実験に用いた鋼板二枚は, X線応力測定により, 測定点で残留応力が, ほとんど零であることを確認した。

以上のことを考えると, 主応力差をとるこの方法の場合は, 測定点を中心に50mmの半径内で被測定材に形状の変化がなければ, 端の影響は考えなくてよい。イニシャル誤差としては, 巨視的な残留応力が存在しない場合でも, ミクロの残留応力や種々の機械的, 磁

気的な原因から生じる磁気異方性などにより、回転による誤差だけは考えなければならない。

### 6.6 磁気ひずみ感度の決定法

ストレステストで、二軸平面応力の測定が終ると最後に、被測定材と同じ材料で試験片を作り磁気ひずみ感度を決定せねばならない。いままでにものべたように、磁気ひずみ感度は、材質、熱処理、加工、寸法等によって異なるので最良の方法としては、同じ材料で、磁気ひずみ感度に影響を与えない程度の寸法に切り出された試験片で、一軸引張圧縮試験をおこない、主応力差—出力電流差曲線を求め、単位応力当りの出力電流をもって磁気ひずみ感度とすればよい。

しかし、これまでの実験で、主応力差—出力電流差曲線は、引張から圧縮まで直線と考えてよいので、引張試験のみで代用させてもよい。しかし、§3.5でのべたように、引張の低い応力値では、主応力差—出力電流差曲線が、少し直線よりずれるので磁気ひずみ感度を決定するには、応力 $10\text{kg/mm}^2$ 以上の所から求める方がよい。この感度の決定は、以後の解析に非常に重要なので、この実験の場合も試験片の縦、横方向を単に測定するだけでなく、各荷重において、テストを回転させその出力電流曲線がなめらかに正弦曲線からはなだしく値がはずれる時には、表面をみがき直して、丁寧に測定しなければならない。また、どうしても、被測定材の一部を切り出すことのできない場合でも、同じ材質、同じ熱処理状態同じ加工で試験片を作り、その寸法は、以下にのべるように作ればよい。この寸法を決定するためにつぎの実験をおこなった。

試験片の長さによる感度のちがいは、§4.3.1にものべたように、磁束は表皮効果のため表面から $1.5\text{mm}$ 以上は浸透しないので $3\text{mm}$ 以上の厚さの試験片では、応力が一定の場合磁気ひずみ感度は殆んど変らない。

つぎに、試験片の縦、横の幅を変化させた場合の磁気ひずみ感度を測定した。

まず、幅と厚さが一定で ( $b=50$ ,  $t=3\text{mm}$ ) で長さが $180, 200, 300, 400\text{mm}$ と変化させた場合、この試験片の中央の表裏で、テストを回転させ、主応力差と出力電流差を測定した。これを図-6.16に示す。この値は、表と裏の平均の値である。この図をみると、多少バラツキはあるが、長さに対し系統的ではなく実験誤差と考えた方がよさそうである。長さが $180\text{mm}$ より短くなると、応力分布が不均一となること以外にテストの取付けや測定に無理を生じる。引張の場合に

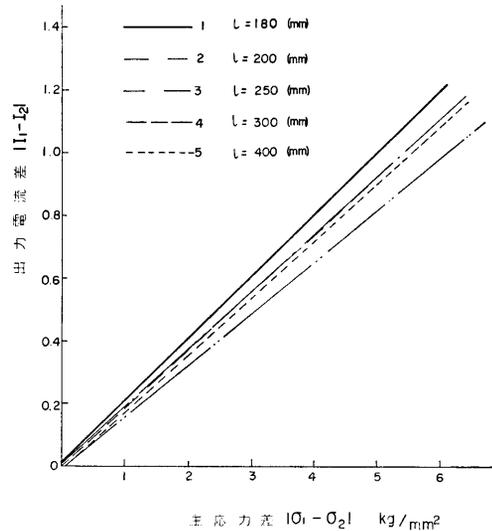


図-6.16 磁気ひずみ感度と長さの変化

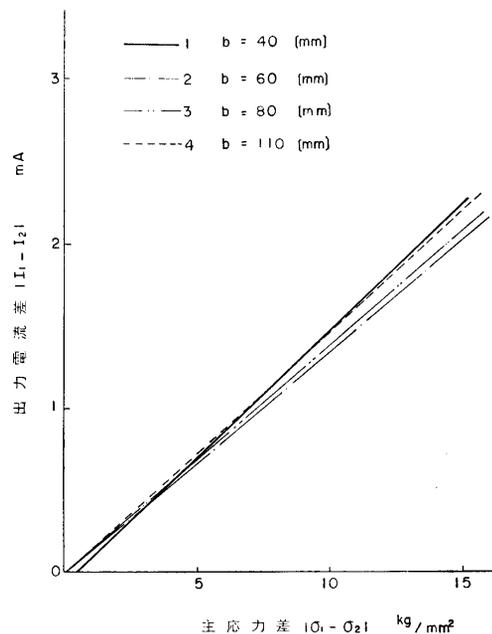


図-6.17 磁気ひずみ感度と試験片の幅

は、 $180\text{mm}$ 以上の試験片を使用しなければならない。

つぎに、長さとは一定 ( $t=3$ ,  $l=300\text{mm}$ ) で幅を $40, 60, 80, 110\text{mm}$ と変化させ、二軸引張試験

機で単軸引張り試験をおこない磁気ひずみ感度を同じ方法でしらべた。試験片の形は、一軸引張試験片である。その結果を図-6.17に示す。この図からも幅が40mm以上あれば応力さえ一定ならば磁気ひずみ感度は変わらないということがわかる。

幅も標準テストⅡの幅が25mmあるので、テストの回転を考えると、これよりもせまい幅は無理である。

以上のことより標準テストⅡを使用し、磁化電流300mA流した場合には、磁気ひずみ感度を決定する引張試験片の寸法は、長さ180mm以上、幅40mm以上、厚さ3mm以上あればよいということである。

### 6.7 まとめ

不均一な応力場における残留応力の非破壊測定に、せん断応力差積分法を用いて実験しつぎの結果を得た。

(1) 二軸引張応力状態において、テストで測定しせん断応力差積分法で解析した値とひずみゲージで測定した値を比較すると、均一応力場のときその差は約±2kg/mm<sup>2</sup>、不均一応力場のときは約±2.5kg/mm<sup>2</sup>と良好な結果をえた。

(2) テスタの測定範囲内で主応力線が直線であれば主応力方向の角度の誤差は少ないが、曲線の場合には大となる。

(3) 角度一出力電流曲線が正弦曲線に近い曲線になるか否かにより、測定が正しいか否かが判別できる。正弦曲線にならない場合は、その点の表面処理をやり直し、正弦曲線にすると精度よく測定できることがわかった。この事柄は実際の応力測定の場合に非常に有効で、これを用いることにより安定した測定が可能となった。

(4) この方法を用いる測定では、零バランスをとるための標準片は不要で、校正用試験片として、180×40×3mm以上の引張試験片を被測定材と同じ材料で作ればよい。

(5) イニシャル誤差は、主としてテスト回転による誤差であるが、約±0.5~1.5kg/mm<sup>2</sup>である。また、測定点を中心に半径50mm以内に被測定材の形状に変化がある場合には、補償用の試験片をこれと同じ形状に作って、補償用のプローブを当て、この影響を除かなければならない。

## 第7章 溶接機の残留応力の測定

### 7.1 緒言

前章において、不均一応力場でもせん断応力差積分法(68)

法を用いると、応力の非破壊測定が可能であることが判明した。また、正しい測定がされたか否かをチェックする方法(§6.7の(3))が前章で確認されたので安定した測定ができるようになった。

その具体的な例として、今まで非破壊測定が困難とされていた溶接材の残留応力を測定した。溶接材では、溶接線方向および直角方向で大きな残留応力を生じる<sup>(61)</sup>。ストレステストで、この残留応力を非破壊で測定しその後、この溶接材の各測定点に、ひずみゲージを貼り応力解放をおこなって残留応力を破壊測定し、その値を比較考察しどれくらいの誤差で、非破壊測定できるかを検討した。

溶接材は、ビード付近で応力勾配が急である。しかも、正負の応力が錯綜しており、ビードの部分は材質が異なるので、測定範囲の狭い小形テストを試作して、ビード付近の測定の精度の向上を図った。小形テストⅡと標準テストを併用して、溶接材を測定した。

ビードという不連続体と熱影響部があり、応力勾配が急で、正負の応力が錯綜している溶接材の残留応力の測定が可能ということはほとんどすべての平面残留応力の非破壊測定が可能といえることである。

本章においても、使用テストは、主として標準テストⅡであり前述のように、小形テストもビード付近の測定に使用した。標準テストⅡ用をいたときの磁化電流は、50Hz、300mA小形テストは、50Hz、200mAである。

### 7.2 使用試験片と測定方法

この節で使用した試験片は次の通りである。

#### (1) 一列ビード試験片

##### A) 高張力鋼試験片

これは、500×200×20mmの高張力鋼板2枚を、中央で突合せ溶接した500×400×20mmの鋼板(図-7.1参照)

##### B) 軟鋼試験片

500×250×25mmの軟鋼板2枚を中央で突合せ溶接した。500×500×25mmの鋼板(図-7.3(b)参照)2枚。

#### (2) 二列ビード試験片

##### C) 高張力鋼試験片

1250×200×20mmの高張力鋼板3枚を突き合せ溶接し、図-7.2のように500×400×20mm(二列ビード)の板に、ガス切断した鋼板

##### D) 軟鋼試験片

これは、C)試験片と全く同じ方法、寸法でつくら

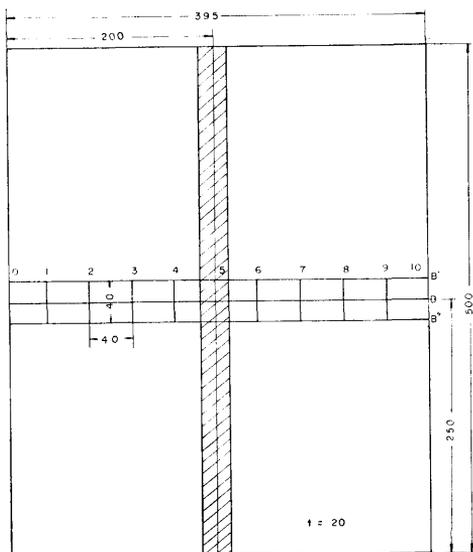


図-7.1 高張力鋼試験片(A)の測定位置

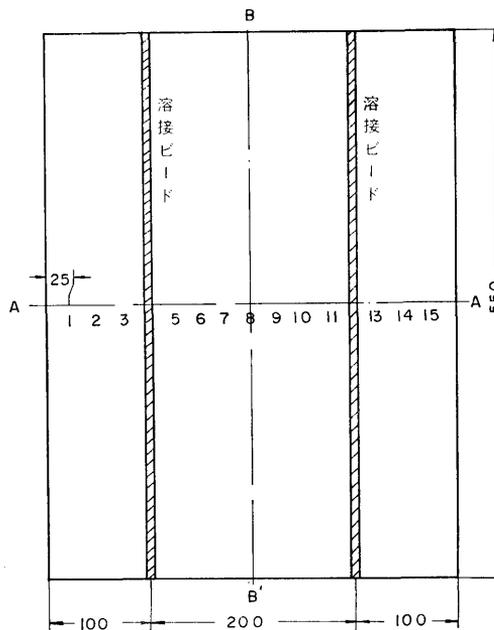


図-7.2 溶接材の測定位置(2列ビード)

れたもので、軟鋼板3枚を使用した試験片、2枚。

E) 応力除去試験片

D) 試験片を、600℃で1時間、応力除去焼鈍した試験片

(3) 大形溶接試験片……(F)

写真-13のように、中央に1列ビードのある1042×977×25mmの大形試験片

以上A)～F)まで6種類の溶接材で、その材質および機械的性質を表-7.1に示す。また表-7.2に溶接条件を示している。大形溶接試験片(F)以外は、すべてサブマージアク溶接で開先形状はX形開先、開先角度約80°のど厚6mmで、溶接は表裏各1層盛りで、

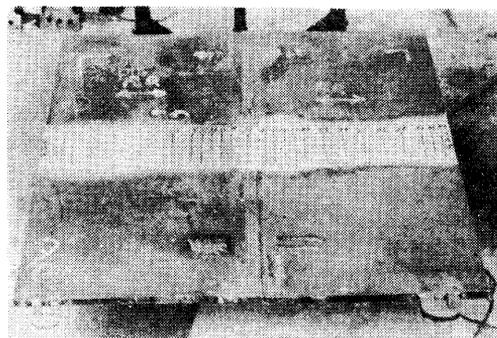


写真-13 大形溶接試験片

表-7.1 試験片の化学成分と機械的性質

試験片		化学成分%										機械的性質		
材質	性質	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	V	Ce <sup>*</sup> g	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強 kg/mm <sup>2</sup>	伸び %	
軟鋼(SMA1B)	D, E	0.12	0.25	1.02	0.016	0.017	—	—	—	—	27	43	29	
高力鋼(BT60)	A, C	0.11	0.26	1.18	0.015	0.009	0.02	0.17	0.03	0.35	58	63	42	
軟鋼	B	0.16	0.37	0.46	0.015	0.027	—	—	—	—	27	46	—	
大形溶接材	F	0.15	0.32	1.41	0.021	0.006	—	—	—	—	35	53	35	

表-7.2 溶 接 条 件

試 験 片		電 流 A	電 圧 V	速 度 cm/min	入 熱 量 Joul/cm	溶 接 心 線	フ ラ ッ ク ス	消 耗 電 極
材 質	記 号							
軟 鋼	D.E.B	750	38	40	42.750	Y C ※ 径4.8mmφ	Y-15A※	—
高力鋼(HT60)	A.C	750	38	40	42.750	Y-DM※ 径4.8mmφ	Y-15K※	—
大形溶接材	F	470	37	2.2	474,000	ES-50※ 径2.4mmφ	Y-15A※	SES-15※

( \* 印は日鉄溶接工業製 )

溶接順序は、溶接材を水平にならべて、その表を、図-7.2に示す。B から B' の方向に溶接し、つぎに溶接材の裏をやはり B から B' の方向に溶接した。

大形溶接材は、消耗電極式エレクトロスラグ溶接で、二つの母材を縦にして、仮溶接し bottom から head まで、下から溶接を行った。

以上の溶接材は、図-7.1に示す。溶接ビードに直角に測定軸を設け、測定軸に沿って10点以上の測定点で、溶接方向とこれに垂直な方向について、テストで測定した。また、すべて鋼板の表と裏で測定し、その平均値を測定値としている。

つぎに測定方法についてのべる。その一例として、図-7.1に示す(A)試験片の場合を考える。まず、測定部分の表面をサンドペーパー、オイルストーンで、方向性がないように、テストと被測定面が密着するように平にみがく。とくにビードと母材の接合部図-7.1では測定点(4)(5)(6)の部分をも十分に平にする。表面の仕上げ程度はだいたいひずみゲージを貼る程度と考えればよい。

測定軸をまず定め、その上下に2つの補助軸を定める補助軸の定め方は§6.4.3を参照して次項でのべる。図-7.1では、B 軸が測定軸、B', B'' 軸が補助軸である。測定点は B 軸上1~9の9ヶ所とする。測定は§6.3でのべたように、各測定点上と2つの補助軸上でテストを180°回転させ、出力最大と最小の方向と、その出力電流差を求める。結局、この場合は、測定点と補助軸上で17ヶ所測定するということになる。測定点0と10では、x 方向の応力を0とし、ビード上で不連続と考えて、測定点0~5までと、10~5までについてせん断応力積分法で解析し各測定点上の溶接線方向(y 方向)と溶接線直角方向(x 方向)の応力を求めた。裏面についても、これと同じ方法で測定し

た。このようにして、非破壊で測定点上の残留応力を測定した。

つぎに、これと応力解放の場合を比較するために、B 軸の測定点1~9の9点に、三軸ひずみゲージ(ゲージ長5mm)をはり、測定点を中心に、25×25×20mmの直方体に被測定材を切り出して応力解放し、各測定点の x, y 方向のひずみを求めた。

最後に、この溶接材と同一材質で、校正用の試験片をつくる。(A)試験片の場合は、引張用として280×60×17mm圧縮用として100×60×17mmの試験片を作り、万能オルセン式荷重試験機で主応力差—出力電流差の校正曲線を求め、磁気ひずみ感度を決定した。二列ビード試験片の場合の測定は、§7.5.1でのべる。

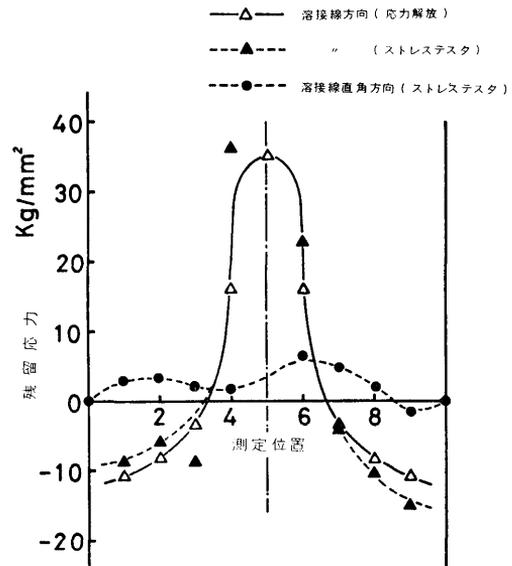
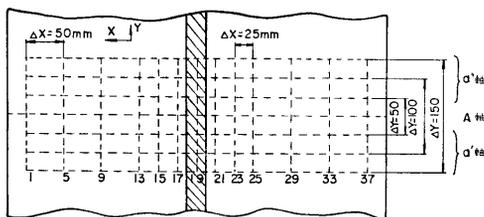
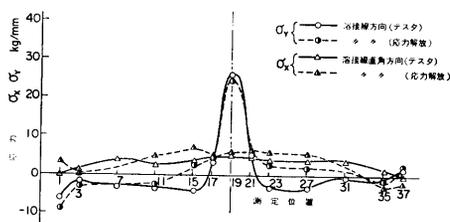


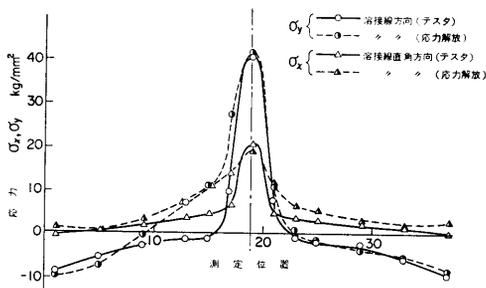
図-7.3(a) 溶接材(A)の残留応力の測定



図一7.3(b) B試験片の測定位置



図一7.4 溶接材(B)の残留応力の測定 (I)



図一7.5 溶接材(B)の残留応力の測定 (II)

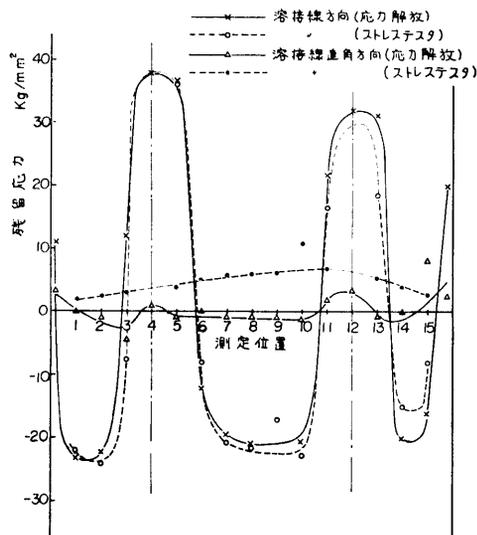
### 7.3 実験結果

#### 7.3.1 応力解放した場合との比較

(A)試験片の測定結果は、図一7.3(a)で、この図からわかるように、ストレステストで非破壊測定した場合と、ひずみゲージを貼り破壊して応力解放した場合とは、この試験片のように単純な場合には、比較的良好に一致しており、その差は約±2 kg/mm<sup>2</sup>であった。

(B)試験片の場合の測定位置を示したのが図一7.3(b)で、その結果を図一7.4、図一7.5に示す。(A)試験片の場合と大差なく、応力解放して測定した場合との差は約±2 kg/mm<sup>2</sup>である。図一7.5は、熱影響部で少し大きな差が出ているが、ビード上では比較的良好に合っている。

(C)試験片の場合は図一7.6に示している。これは、溶接線方向は比較的良好に一致しているが直角方向では、±3 kg/mm<sup>2</sup>ぐらいの差が出ている。この試験片

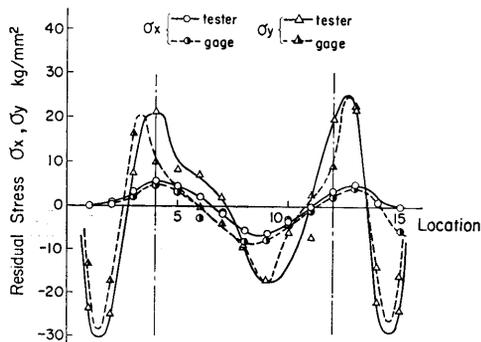


図一7.6 溶接材(C)の残留応力の測定

は、溶接前にインシャルの値を測定することができたので、測定したが、その値は溶接後の測定値にくらべ小さかった(約1/5)のでこれを省略した。一般的には、残留応力の測定では、インシャルの値は、測定できないのでここでも、実際の測定の場合を考え、溶接後の値のみで解析をおこなった。

(D)試験片の場合が図一7.7、図一7.8でこの試験片もインシャルの値は小さかったので、無視して解析した。

図一7.7の場合は、試験片の表面状態が良好で、きず、その他が少なかったので比較的良好に一致している。しかし、図一7.8は溶接後表面に塑性ひずみのしま模様を生じており、しかも、表面に傷が多くペーパーで取り去ることが困難でグラインダを使用した。写真



図一7.7 溶接材(D)の残留応力の測定

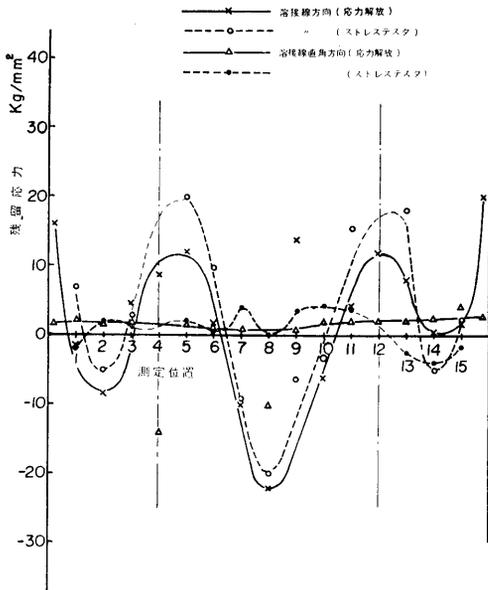


図-7.8 溶接材(D)の残留応力の測定 (II)



写真-14 塑性ひずみの縞模様

—14にこの表面の様子を示す。これらのことより図-7.6、図-7.7などと比較して、ひずみゲージとの差が

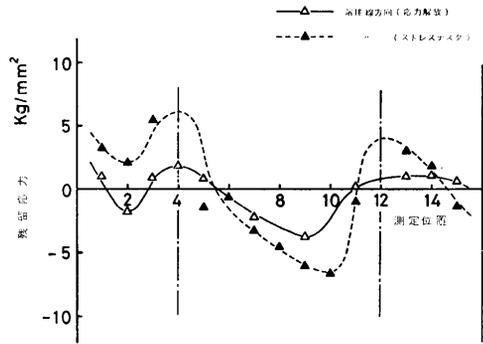


図-7.9 溶接材(E)の残留応力の測定

大きく出たのだと思われる。なお、(C)、(D)試験片で端に大きな引張応力が生じているのは試験片を作る場合のガス切断によるための残留応力である。

(D)試験片を応力除去焼鈍をした場合、はたしてどれだけの応力が解放されるか、また、低い応力の場合にも、磁気ひずみ測定ができるかをしらべるために、(E)試験片で測定をした。図-7.9がその結果である。この図をみると、やはりテスタでの測定と応力解放した場合は、傾向は比較的良好に合っており、このような低い応力の場合でも一応測定できることがわかった。この原因は、主応力差が小さいと考えられるので、インシャルの影響を減ずるために、グラインダは使用せず、エメリペーパーだけで表面をみがいたこと応力除去により応力状態が単純になったことおよび焼鈍により、磁気ひずみ感度が大きくなったことなどがあげられる。

(F)試験片の測定結果を図-7.10に示しているこの試験は、船用鋼板で、このような実物大型試験片の測定としては、予想以上にひずみゲージとよく一致している。これは、ビードが中央のみということの他に、測

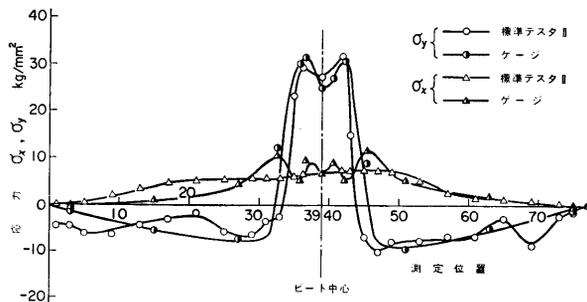


図-7.10 溶接材(F)の残留応力の測定

定を前章に述べたように、注意深くおこない、正弦曲線にならぬ場合には、幾度も表面を磨き直して、正弦曲線になるまで丁寧に測定したことが原因である。また、この実験により、§6.4.2にのべたように、角度一出力曲線が正弦曲線にさえなれば、相当な精度で測定できることが確認された。このような大型の溶接材では、ビード部分の幅が30mm以上で、標準テストの回転半径よりも大きいので、ビードと母材の境界部の凹凸の影響を受けずに、ビード上を測定できたことも、ひずみゲージとよく一致した一因と思われる。

以上の実験結果を考えると、溶接材の測定では、テストとひずみゲージの測定範囲が異なることが、大きな原因だと思われるが、応力解放してひずみゲージで測定した場合と、磁気ひずみを利用して、ストレステストで非破壊測定した場合との差は、約 $\pm 3 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ あると考えなければならない。また、溶接材のように、応力勾配が急な鋼板を測定する場合には、もっと測定範囲の小さいテストを使用しなければならないということもわかった。また、主応力差は小さくても、測定出力電流値が大きい場合には、大きな主応力が二つ存在しており、その差が少ないということであり、解析の場合にもこのことを考えておこなえば解析しやすい。

応力解放の場合これまでは、 $25 \times 25 \times 20 \text{ mm}$ の直方体に切り出していたが、前にのべたように、標準テストⅡの応力測定範囲が半径25mmの円内の応力を示すので、こんどは、 $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ の直方体に切り出して、 $25 \times 25 \times 20 \text{ mm}$ の場合と比較してみた。この実験は、同一試験片でやるわけにはいかないの、同じよ

うに作られた。二つの試験片をつかったが、その結果は、図-7.11と図-7.7に示している。図-7.11の場合が $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ に切り出した場合で、図-7.7は、 $25 \times 25 \times 20 \text{ mm}$ の場合である。図-7.7と図-7.11の場合を比較してみるとあきらかに、図-7.7の方がよく一致している。これは $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ の場合には、ゲージ長10mmの大きいゲージを使用した方が、50mm平方の面をもつ直方体なので、まだ十分に応力解放されていないために、ゲージの値が、テストの値より低く出ているのではないかと思われる。

### 7.3.2 校正曲線

校正曲線は、溶接材の母材と同じ材質のもので校正用試験片を作り、これについて主応力差—出力電流差曲線を作ればよい。また、この校正試験片の寸法は、§6.6に述べた寸法であればよい。しかし、溶接材はビード上では材質が異なり、ビードと母材の中間の熱影響部も材質が異なっている。

ここでは、図-7.5の(B)試験片の場合を例にとって、校正曲線の作り方について述べる。本当は、引張試験片の方がよいが、ここでは寸法の関係から、図-7.12に示すように、ビード上からa、dを母材からb熱影響部からcと、4つの試験片を切り出して、圧縮試験をおこなった。d試験片は、幅が30mm（ビードの幅が約30mm）しかないの、次節でのべる小形テストのみで測定した。その結果を図-7.13、図-7.14に示す。図-7.13が標準テストの場合で感度は母材が一番大きくビードが一番小で、C材が中間の値をとることは考えられる。図-7.14は、小形テストで測定した場合で小形テストの測定範囲（半径13mm詳しくは

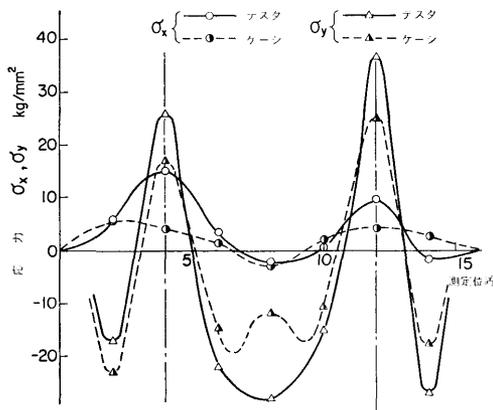


図-7.11 溶接材(D)の残留応力の測定(Ⅲ)

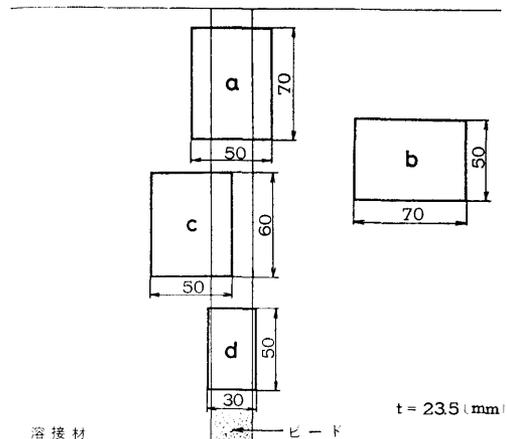


図-7.12 校正用試験片の切り取った位置

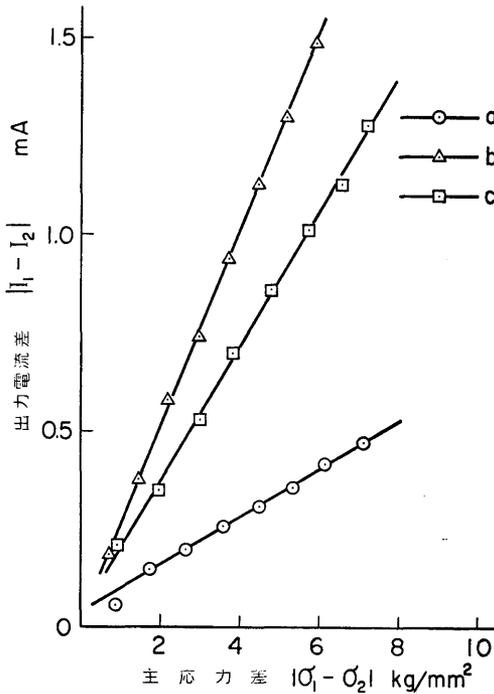


図-7.13 標準テストIIによる校正用試験片の出力曲線

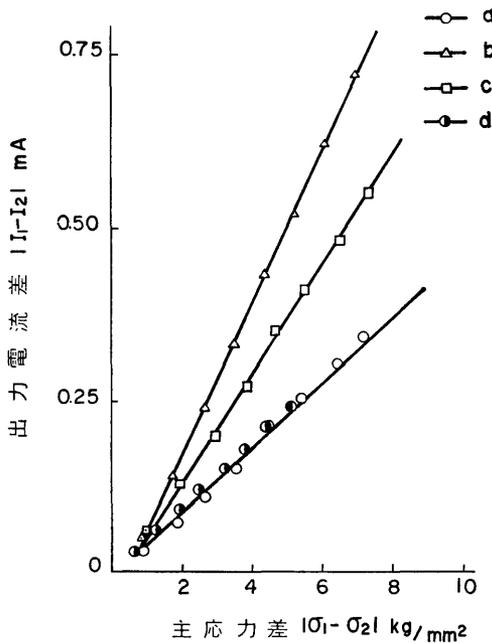


図-7.14 小形テストによる校正用試験片の出力曲線

次節でのべる) から考えて、a と d 材が同じ感度に出てきており、a 材の母材の部分には、小形テストの磁束が及んでいないことが、この実験からもわかる。

このように溶接材の場合には、母材、熱影響部、ビードの三つの部分で磁気ひずみ感度が異なる。それぞれの磁気ひずみ感度を用い出力電流を応力に変換し、解析せねばならない。このようにして求めた磁気ひずみ感度を用いて測定した結果が図-7.5である。他の溶接材もみな、このようにして校正曲線をつくり解析をおこなった。

7.4 小形テスト

溶接ビード附近のように、応力勾配が急で複雑に変化しているところでは、どうしても測定範囲の小さいテストが必要である。しかし、テストを小形化すると、磁束の減少やテストと被測定材の接触面積の減少による不安定などのほかに、コイルを巻くスペースが少ないことから、絶縁が不完全になりやすい等の欠点が生じる。このため、これまで幾度か小形テストを試作したが成功しなかった。そこで少し接触面積を大きくした小形テストを試作した。これを写真-2に示す。寸法は、表-2.1に記した。この小形テストに、磁化電流180~260mA流したときの主応力差-出力電流差曲線を図-7.15に示す。磁化電流を200mA以下にすると、感度、ヒステリシスともに悪くなる。300

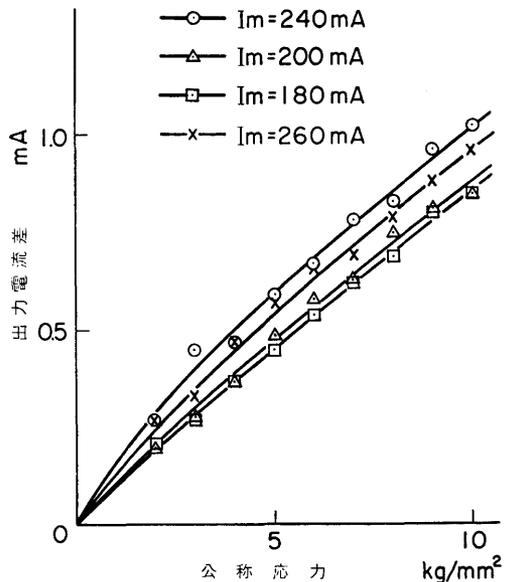


図-7.15 小形テストの磁化電流による出力曲線

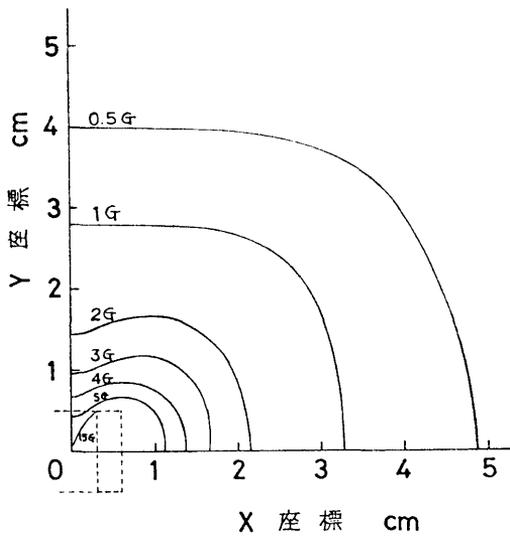


図-7.16 小形テストの場合の磁束密度分布

mAにするとテストが熱をもったので、ここでは磁化電流は、200mAとした。

図-7.16は、磁化電流200mA流したときの磁束分布である。この図をみると、磁束密度は10mm離れると、約1/3、13mmで約1/5になっている。このことは、式(4.39)からも証明される。小形テストでは、13mm以上離れたところは、テストの出力には殆んど影響しないと考えてよい。また、このことは前節の実験からも説明される。

以上のことから、小形テストは、測定点を中心に、半径13mmの円内の応力の平均を示していると考えてよい。テストを小形化すればより局所的な応力の測定も可能と思われるが、安定性、測定誤差などを考えるとテストの小形化には限度がある。

小形テストを使用して、二軸引張応力状態の測定をおこなった。実験は、§5.3.1の実験と同様に、二軸引張試験片に二軸引張試験機で応力勾配をつけ、小形テストで測定しひずみゲージによる応力分布と比較した。補助軸の位置は、 $4X=25\text{mm}$ 、 $4Y=50\text{mm}$ と標準テストIIの場合と同じにした。図-7.17が主応力差と主応力方向を示し、図-7.18は、その解析結果を示している。ひずみゲージで測定した場合とよく一致している。

この小形テストは、丁寧に正しく測定すれば、ひずみゲージとの差は、 $\pm 2\text{ kg/mm}^2$ ぐらいで測定でき、実用可能であることがわかった。

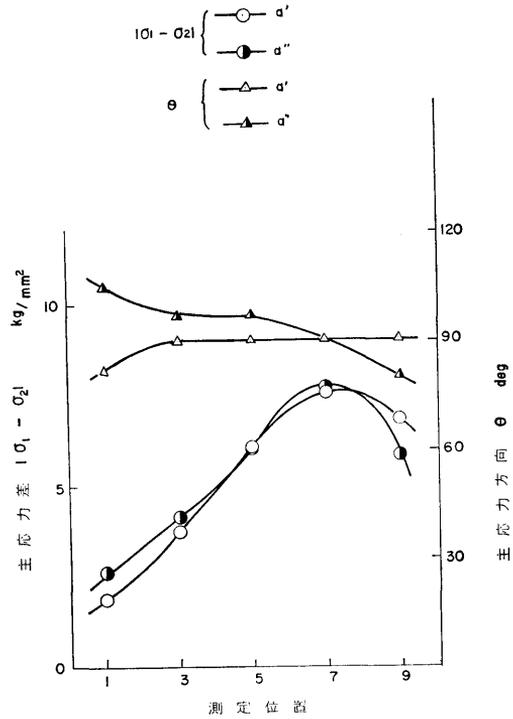


図-7.17 小形テストの主応力差と主応力方向

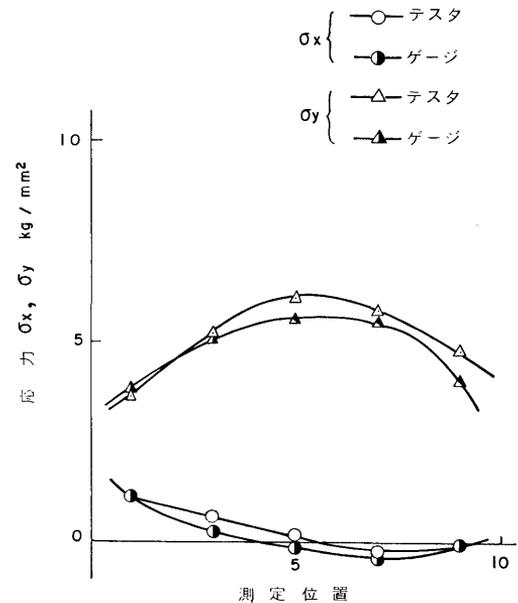


図-7.18 小形テストの場合の測定値の比較

表面を電解研磨して測定すると、一般に誤差が減少するが、標準テストの場合には、電解研磨する面積が大きくなり、いろいろ問題があったが、小形テストの場合には、研磨する面積が標準テストⅡの場合の1/4以下なので、標準テストの場合より有効であり、小形テストで測定する場合は、電解研磨をおこなった方がよい。

7.5 ビード上の測定

溶接材の測定では、ビード上の測定が一番困難であり、しかも重要である。ビードの部分は、材質が異なり、母材との境界はいわゆる熱影響部で、磁気ひずみ感度も異なる。また、製作上、表面に凸凹や不純物、きずなどができやすく、測定がむづかしい。応力も、ビード上で普通最大となるのでこの部分の測定について考える。

7.5.1 連続と考えた測定

一列ビードの試験片は、両端に自由端があるので、せん断応力差積分法で求める場合、両端から求めていけばよいが、二列ビードの場合には図-7.2からわかるように、A-A軸上〔5〕～〔11〕までは自由端がないので、溶接ビード上で不連続と考えると、B軸上でも同様な測定をおこなってA軸との交点〔8〕の値を求めて解析をおこなった。

せん断応力差積分法では、どうしても、少しずつ誤差が入ってくるので、この方法のように複雑になると、この解析の誤差が多くなってくる。そこで、ビード上でも連続であると考えて、一列ビードの場合のように、左端と右端からビードを越えて、 $\sigma_x$ の値を求めていき中央の点〔8〕で両者を一致させ、比例配分によって修正したのち $\sigma_y$ を求める方法（連続的方法という）でも解析した。両方の結果を図-7.19、図-7.20に示した二つの方法で測定解析した結果である。これらの図をみるとわかるように、ひずみゲージで測定した値との差は、ほとんど同じである。結果に大差がないので、測定が簡単な連続的方法がすべての点で安定なのでこの方法を採用した。

7.5.2 小形テストを併用した測定

溶接ビード上のように、小部分の材質が異なる所や、応力勾配が急変する所などの応力状態が複雑な所では、測定範囲の狭い小形テストを使用した方がよいが、前項にも書いたように、小形テストにも欠点があり、せん断応力差積分法は、誤差を少しずつ加えて行くので、小形テストだけで大きな溶接材の端から端までの測定には不適である。そこで、大部分は、安定性

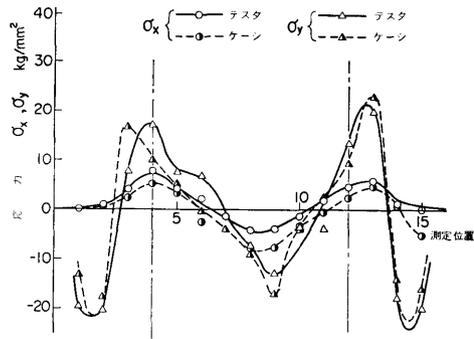


図-7.19 溶接材(D)の残留応力の測定（連続的方法）

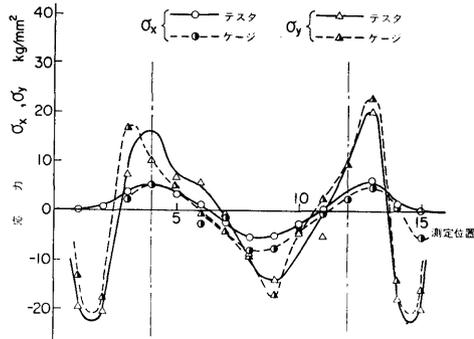


図-7.20 溶接材(D)の残留応力の測定（不連続的方法）

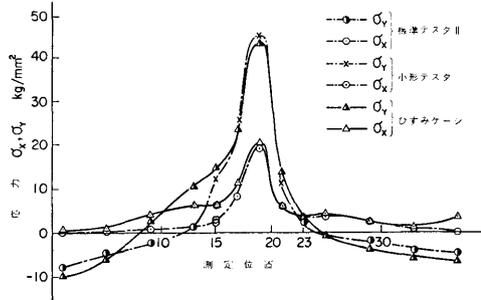


図-7.21 溶接材(B)の残留応力の測定（標準テストと小形テストを併用）

のよい精度の高い標準テストを用い、ビード上と熱影響部だけ小形テストで測定する方法で実験をした。

測定結果を図-7.21に示す。これは、母材は標準テストⅡで測定し、標準テストⅡの〔15〕および〔23〕の $\sigma_x$ の値を用いて〔15〕～〔23〕までは小形テストで測定した場合を示す。図-7.22は、全部標準テストで測定した場合の測定値を示している。試験片は(B)試

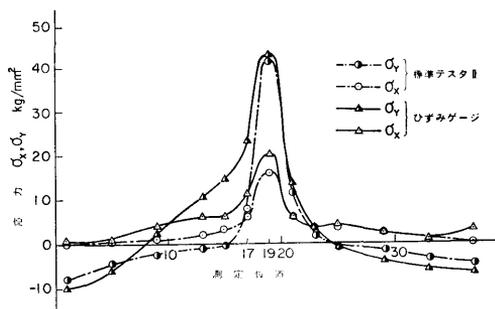


図-7.22 溶接材(B)の残留応力の測定  
(標準テストII)

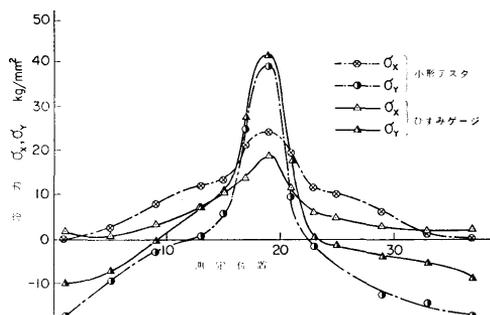


図-7.23 溶接材(B)の残留応力の測定 (小形テスト)

試験片を使用した。

これらの図からわかるように、全部標準テストIIで測定した場合には、ビード上の点〔19〕の $\sigma_x$ の値や、熱影響部と思われる〔17〕点で、ひずみゲージの値と大きな差を生じているが、小形テストで測定した場合は、各点でよく一致しており、ひずみゲージとの差は $\pm 2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$ となっている。

また、同種の試験片を、小形テストで全部測定した場合は、図-7.23となり、全体として標準テストIIで測定した図-7.22より悪い。これは、前にのべたように、小形テストの不安定さ、精度の悪さ等による誤差が、解析の途中で積み重ねられたためだと思われる。

溶接材の測定は、以上の実験より標準テストIIと小形テストを併用する方法が一番精度もよく、安定性のよい測定法といえる。

#### 7.6 まとめ

不均一応力場の残留応力測定の具体的な例として、溶接材を測定し、つぎの結果を得た。

(1) 種々の溶接材について測定したが、ビード附近のように、応力勾配が急で複雑な応力状態の場合に

は、ストレステストで非破壊測定した場合と、ひずみゲージをはり、破壊して(応力解放)測定した場合との差は、約 $\pm 3 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ であり、応力状態を十分に握ることができる。

(2) 溶接材の場合には、母材、熱影響部、ビードの三つの部分の校正試験片を作り、それぞれの校正曲線を作らなければならない。

(3) 測定範囲が半径13mmの小形テストを試作することができ、精度も $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ ぐらいで実用可能である。

(4) 母材の部分は、安定性のよい標準テストIIを使用し、ビード上のように、小部分の材質が異なる所や、応力勾配が急変する所などは、測定範囲の狭い小形テストを併用する方法によって、精度のよい測定ができることがわかった。

以上の結果より、殆んどすべての巨視的な平面残留応力が、約 $\pm 3 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ の誤差で測定可能となり、実用的な応力範囲が非常に拡大された。

## 第8章 結 論

### 8.1 緒 言

一般の機械や構造物の初期応力や巨視的な残留応力を、磁気ひずみ効果を利用して、簡単な装置で非破壊測定することを目的として本研究を行った。

その結果、この種の応力の測定にもっとも実用的なプローブ型の変換器を用いて、材料の強度に大きな影響を及ぼすと思われる。表面より1.5mm程度までの深さの応力を、非破壊測定する方法を見出したので、この方法を各応力状態について、§8.2で述べた。

§8.3では、この測定の精度、理論値、磁気出力と応力の関係等測定法以外に得た主な結論について述べた。

### 8.2 磁気ひずみ効果を利用した応力の測定法

本論文では、始めに述べたように、死荷重や組立応力などのように、この応力を簡単に零にできない場合の応力(初期応力)と、巨視的な残留応力の非破壊測定を目的としているので、本実験で得られたこの種の応力の非破壊測定法を各応力状態について述べる。

#### (1) 単軸初期応力の測定法

標準試験片にストレステストを、補償片に補償用プローブを当てて、ブリッジのバランスをとった後は、被測定材にストレステストを、圧縮応力の場合は、応力方向に引張応力の場合には直角方向に当てて、その不平衡電流をよむ、圧縮、引張の判別が不明のとき

は、横感度を測定すればよい。標準片、または、校正用試験と補償片で応力—出力電流より初期応力を求めることができる。

標準片；被測定材と同じ材質、同じ加工熱処理材で無応力のもの、形状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。被測定材と同じ形状のもの。被測定材の一部、または、あきらかに無応力の部分があれば、それをを用いた方がよい。

補償片；標準片と全く同じもの

校正用試験片；被測定材と同じ材質、同じ熱処理材で無応力のもの、縦横の寸法は使用テストの磁極間距離の2倍の長さ以上、厚さ3mm以上の形状のものを使用する。

#### (2) 均一な平面残留応力の測定法 (二軸圧縮、二軸引張の場合)

標準試験片にストレステストを、補償片に補償用のプローブを当てて、ブリッジのバランスをとり、ストレステストを測定点に当てて、測定点を中心に、表面で180°回転させその出力の最大最小の方向として主応力方向を求め、主応力を求めるためにその二つの方向の不平衡電流値を求める。主応力値を求めるためにその二つの方向の不平衡電流値を求める。角度—出力曲線がなめらかな正弦曲線にならぬときは、表面をみがき直し、正弦曲線にして、主応力方向を正しく求める。標準片、または、校正用試験片と補償片で、平面応力用の応力線図 (§5.2.3と§5.3.2) をつくり、さきに求めた二つの不平衡電流直より、主応力値を求めればよい。標準片、補償片、校正用試験片はすべて、単軸測定の場合と同じである。

#### (3) 不均一応力場における平面残留応力の測定法 (応力の符号が不明の場合、一軸引張、一軸圧縮の場合も含む)

被測定材の測定点にストレステストを補償片に補償用のプローブを当てて、ブリッジのバランスをとる。被測定材上の応力の既知の点または、応力零の点から測定点まで測定軸を設ける。この測定法の場合は、標準片は不用である。その測定軸の上下に、二本の補助軸を設定し、測定点とその上下の補助軸上の二点と計三点において、テスト180°回転させ、出力最大、最小の方向と、その値を求める。このときも角度—出力曲線がなめらかな正弦曲線に近い曲線になるまで、表面をみがき、正しい主応力方向とその値を求め、せん断応力差積分法を用いて解析する。校正用試験片と補償

片で主応力差と出力電流差の校正曲線をつくって、これから応力を求める。

校正用試験片；単軸初期応力の場合と全く同じ  
補償片；校正用試験片と全く同じ

### 8.3 測定精度、出力と応力の関係等

前節にのべたように、すべての応力状態の平面残留応力の測定が、プローブ形の磁気ひずみ変換器により可能となったが、その測定精度および磁気出力と応力との関係などにつき、つぎのような結論を得た。

(測定精度)

(1) 単軸初期応力は、被測定材と同じ部材で、標準片、補償片、校正用試験片をつくると、真の応力は、次の式で求められる。

$$\sigma = (1 \pm 0.06) \sigma_0 \pm (0.6 \sim 2.0) \text{ kg/mm}^2$$

ここに  $\sigma_0$  は出力電流に相当する校正曲線上の応力。

(2) 二軸圧縮または、二軸引張の均一な巨視的な平面残留応力は、単軸と同じように、被測定材と同じ部材で標準、補償、校正の試験片をつくる、誤差約  $\pm 2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$  (応力  $20 \text{ kg/mm}^2$  以内の場合) で測定することができる。また、せん断応力差積分法を用いると、測定、解析は、やや複雑になるが約  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$  の誤差で測定できる。

(3) 不均一応力場でも、せん断力差積分法を用いることによって、応力の符号もわかり、精度も約  $\pm 2.5 \text{ kg/mm}^2$  である。

(4) 溶接材のように、応力勾配が急で複雑な応力状態の場合でも、誤差約  $\pm 3 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$  であり、応力状態を十分に握ることができる。

(5) せん断応力差積分法を用いる測定では磁気ひずみ感度のバラツキは約  $\pm 5\%$ 、イニシャル誤差は、約  $\pm 0.5 \sim 1.5 \text{ kg/mm}^2$  と考えてよい。

(理論式)

(6) 網板にストレステストを当てた場合の任意の点の磁界の強さを与える式 (4.19) を求め平面応力を生じている場合の理論式 (4.34) を導いた。

(7) 式 (4.24) により、磁気出力は、主応力方向で最大、最小となり主応力差は出力電流差に比例するということが、理論的に証明された。

(8) 網板上の磁束分布を式 (4.39) から求めたがガウスメータによる磁束分布の実験値と一致し、測定点からテストの磁極間の距離だけ離れると、磁束密度は測定点の約  $1/5$  になった。

(測定法関係)

(9) ストレステスタによる応力測定範囲はテスタの磁極間の距離を半径とした円内である。

(10) 実験でも、主応力方向は、平面応力状態では、最大主応力方向（符号を含めて）で出力電流は最小となり、最小主応力方向で最大となり容易に求めることができる。

(11) 主応力差と出力電流差が、引張から圧縮まで比例していることが、実験結果からも確認された。

(12) 平面応力の場合、角度一出力電流曲線が正弦曲線になるか否かにより、測定が正しいか否かが判別できる。正弦曲線にならぬ場合は、その点の表面処理をやりなおし、正弦曲線にすると、精度よく測定できることがわかった。

(13) 溶接材の場合には、応力変化の少ない母材の部分は、安定性のある標準テスタⅡを使用し、ビード附近のみは、測定範囲の狭い小形テスタ（測定範囲半径13mm）を併用する方法によって、良い精度の測定ができる。

（磁気出力と応力の関係）

(14) 磁気ひずみ感度に、大きく影響する因子は金属成分のなかの炭素の含有量と、熱処理状態のちがいで、圧延方向結晶粒度などは、熱間圧延材では、影響を無視してよい。

(15) 磁気出力と、引張、圧縮の関係は一部引張の低応力の部分を除いて両応力とも応力の増大とともに、磁気出力は同じ方向に変化し、ストレステスタのインピーダンスも両応力の増大とともに減少する。磁気ひずみ感度は、圧縮は引張の約3倍の感度がある。

(16) 本実験では、横感度係数が正の符号をとり、引張と圧縮で、その値が異なり引張の場合は3~4、圧縮では約0.3となった。この事を確認するため、テスタのインピーダンスを測定してみたが、やはりこの値と一致した。

(17) 磁束が応力と直交または平均のみの場合の横感度係数を磁氣的ポアソン比と名付けたが、磁氣的ポアソン比は、材質、応力とは無関係な定数となり、二軸圧縮の場合0.3となった。

(18) ミクロ的な磁気挙動から求めた高木の理論式によって計算した結果も、磁束密度は引張、圧縮の両応力とも、応力の増大とともに減少ししかも、感度は圧縮が引張よりも大きく本実験結果と一致した。

(19) 丸棒をソレノイドコイルで直流磁化し応力に対するB-H曲線を求めた実験においても、ストレステスタの磁界では、引張、圧縮ともに磁束密度は減少し、

圧縮が引張より感度が大きいことも確認された。

本論文は、著者が運輸省船舶技術研究所において実験した、磁気ひずみ効果を利用した残留応力の非破壊測定に関する研究結果をまとめたものであります。

本研究を遂行するに当たり、始終懇切な御指導をいただいた、共通工学部岩柳順二郎長、早稲田大学林郁彦教授に深甚な感謝の意を表します。

磁気ひずみ効果の研究に御指導をいただいた電子航法研究所安積健次郎所長と、この研究の遂行に大きな便宜を与えていただき、また適切な御指導をいただいた交通公害研究所花島政人所長に衷心より御礼を申し上げます。

また本論文に関し、適切な御助言、御指導をいただいた九州大学工学部井上順吉教授、早稲田大学奥村、松浦両教授、電子航法研究所藤井弥平研究企画官、機関性能部堀保広室長に深く感謝します。

終りに、この研究に終始協力し、困難な実験と計算に協力された共通工学部吉井徳治技官、滝沢千嘉子技官、ならびに有益な助言と討論をいただいた共通工学部渡辺健次室長、溶接工作部藤井英輔室長、共通工学部安福精一前主任研究官（現岡山大学助教授）とこの論文作製に協力していただいた金子裕子所員の諸氏に深く感謝します。 以上

## 参 考 文 献

- (1) たとえば、日本材料学会編；X線応力測定法（1966）養賢堂。
- (2) 西田；応用物理31（昭37）825。
- (3) 渡辺、北川；非破壊検査協会資料4431（50—1），1。
- (4) 季，鳥飼；生産研究21，1969，379。
- (5) Hsu, N. N, Ezp. Mech., 14—5（1974），169。
- (6) R. M. Bozorth, Ferromagnetism,（1951），631 Van Nostrand。
- (7) 文献(6)の p 596。
- (8) 近角；強磁性体の物理，（1963），83，裳華房。
- (9) 岩柳；非破壊検査，15—3（昭41—3），102。
- (10) 日本非破壊検査協会編，非破壊検査便覧，（昭42—5），835，日刊工業。
- (11) E. Villari, Ann. phys. Chem., 126,（1886），87。
- (12) G. Wiedemann, Pogg. Ann., 117,（1862），501。
- (13) J. P. Joule, Ann. Electr. Magn. Chem., 8,（1842），219。
- (14) J. P. Joule, Phil. Mag., [3], 30(1847), 76。
- (15) A. Guillemin, Compt. rend., 22,（1846），264。

- (16) P. Weiss, *J. phys.*, [4], 6, (1907), 661.  
 (17) M. Takagi, 東北大学理科報告, 28-1, (1939), 20.  
 (18) W. F. Brown, *Phys. Rev.*, 52, (1937), 325.  
 (19) 茅, 東北大学理科報告, 17, (1928), 639.  
 (20) 増山, 東北大学理科報告, 17, (1928), 945.  
 (21) R. Becker, M. Kersten; *Z. Phys.*, 64, (1930), 389.  
 (22) R. Becker, W. Pöring, *Ferromagnetismus*, (1939), Springer.  
 (23) 文献(21).  
 (24) F. Preisach, *phys. Z.*, 33, (1932), 913.  
 (25) Smith, Sherman, *phys. Rev.* 4, 267-73 (1914).  
 (26) ブリール(岡修一部他訳), 機械量の電氣的計測, (1942), 45コロナ社。  
 (27) 安積, 磁わい計測とその応用, (1962), オーム社。  
 (28) R. M. Bozorth, H. J. Williams, *Rev. Mod. phys.*, 17, (1945), 72.  
 (29) 岩柳, 船舶技術研究所報告, 12-2, (昭50-3)。  
 (30) F. Förster, K. Stambke, *Z. Metallkd.*, 33, (1941), 97.  
 (31) 安積, 岩柳, 応用物理, 16, (1947), 179.  
 (32) 津田, 日本金属学会誌, 11, (昭21), 6。  
 (33) 永井, 応力物理, 20-5, (1951), 177。  
 (34) F. Bader, L. Reimer, *Beiträge zur Theorie des Ferromagnetismus und der Magnetisierungskurve*, (1956), Springer-Verlag.  
 (35) 篠田, 川崎, 日本金属学会誌, 16, (1952), 139.  
 (36) 篠田, 川崎, 日本金属学会誌, 18, (1954), 305.  
 (37) 桜井, 川崎, 機械の研究, 9-12, (1957), 33.  
 (38) 清田, 緒方, 第9回材料試験連合前刷集, [1], 965, 45.  
 (39) K. Kiyota, N. Ogata, *JSME 1967 Semi-international Symposium, TOKYO*, (1967), 205.  
 (40) 岩柳, 安福, 滝沢, 非破壊検査, 23-3, (昭49-3), 147.  
 (41) 岩柳, 安福, 滝沢, 非破壊検査, 23-4, (昭49-4), 198.  
 (42) F. Förster, *Z. Metallkd.*, 43, (1952), 163.  
 (43) L. I. Mendelsohn *J. Appl. phys.*, 35-3, (1964-3), 863.  
 (44) R. R. Birss 他, *J. phys. D: Appl. phys.*, 4, (1971), 1040.  
 (45) 文献(6)の p 602.  
 (46) 藤井, 運輸技術資料, No. 14, (1958).  
 (47) 高橋, 製鉄研究, 205, (昭28-10), 77.  
 (48) 村川, 強磁性材料, (昭19), 123, 工業図書。  
 (49) 文献(6)の p 771.  
 (50) 文献(27)の p 144.  
 (51) 日本国有鉄道, オペレーションズ・リサーチ I, (昭36), 111, 静和堂。  
 (52) 日下部, 三原, 非破壊検査協会資料, 4349, (昭47-1)。  
 (53) 岩柳, 吉永, 日本鉄道技術協会資料, (昭40-10)。  
 (54) 和田, 非破壊検査協会資料, 4231, (昭42-5), 1。  
 (55) K. Honda, *Magnetic Properties of Matter*, (1972), 67, 裳華房。  
 (56) Mitiyasu, Takagi, *The 459th report of Research Institute for Iron Steel and other Metals*, (1939-4), 88.  
 (57) 文献(52)の p 89.  
 (58) 菊池, 磁歪振動と超音波, (昭27), 303, コロナ社。  
 (59) 岩柳, 船舶技術研究所報告, 12-2, (昭50-3), 40。  
 (60) 辻, 西田, 河田, 光準性実験法(昭40), 141, 日刊工業。  
 (61) 溶接学会編, 溶接便覧, [3], (1977), 135, 丸善。