

図-6.4 測定値の比較 (I)

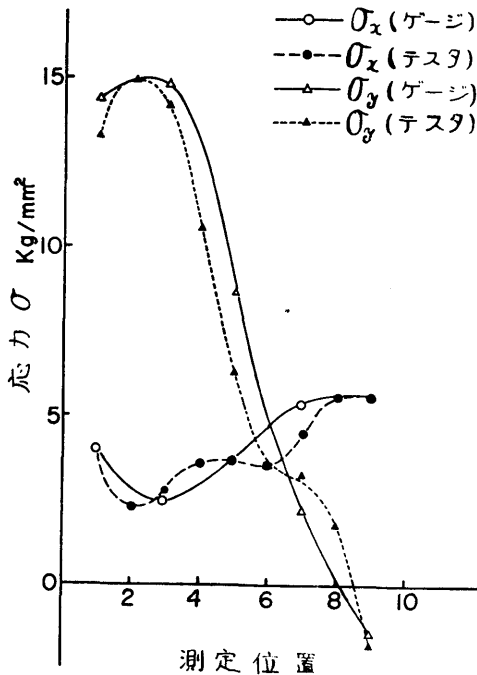


図-6.5 測定値の比較(II)

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

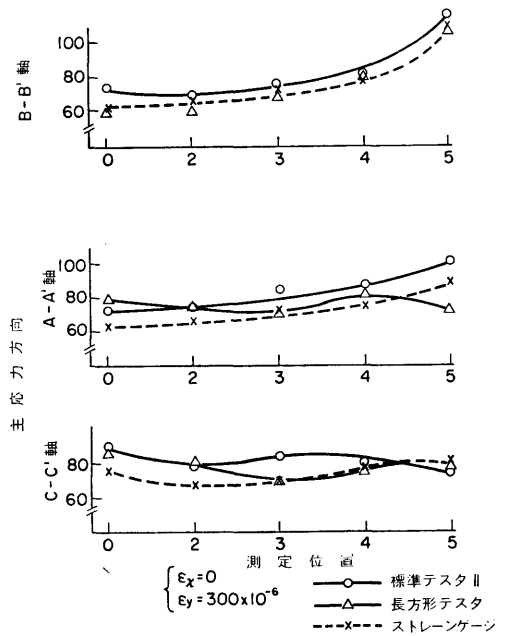


図-6.6(a) 主応力方向 θ の測定

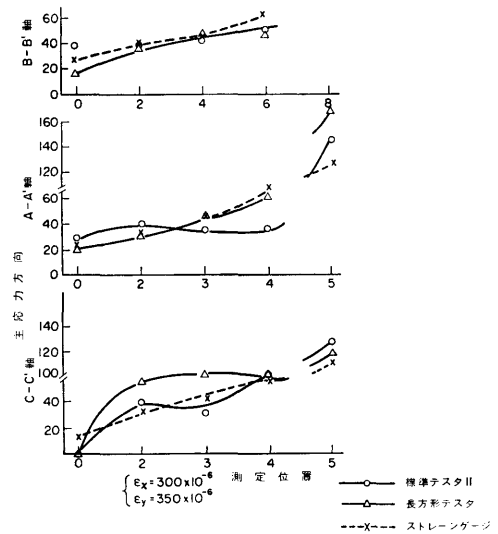


図-6.6(b) 主応力方向 θ の測定

で測定し、せん断応力差積分法で解析した値 (σ_{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、 σ_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

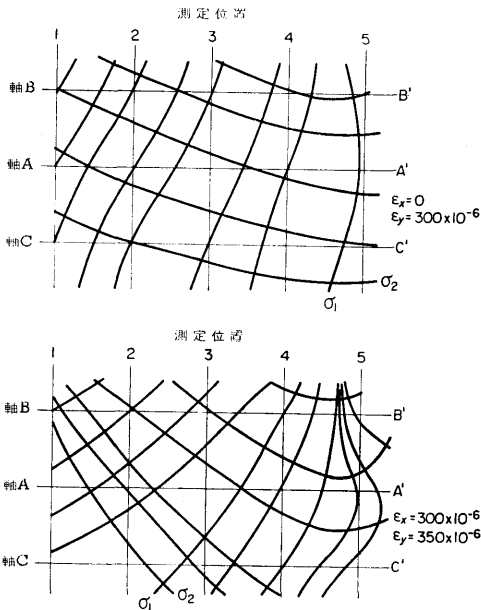


図-6.7 ロゼットゲージによる主応力線図
は約 $\pm 1.5 \text{ kg/mm}^2$ である。

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 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° 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° 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 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、 σ_y で 5 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

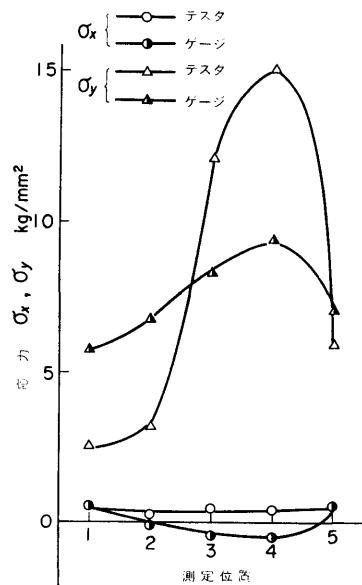


図-6.8 測定値の比較(Ⅲ)

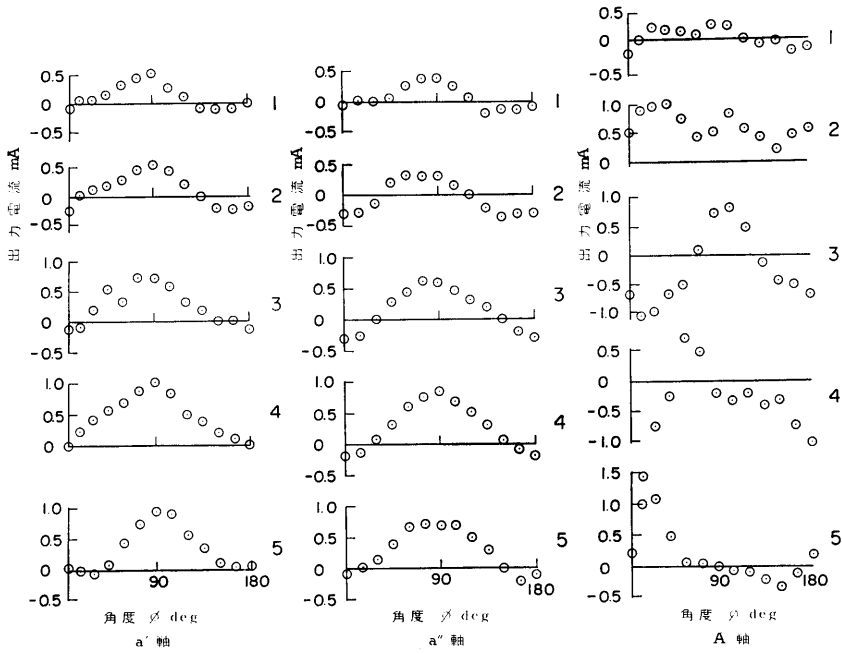


图-6.9 角度—出力電流曲線 I

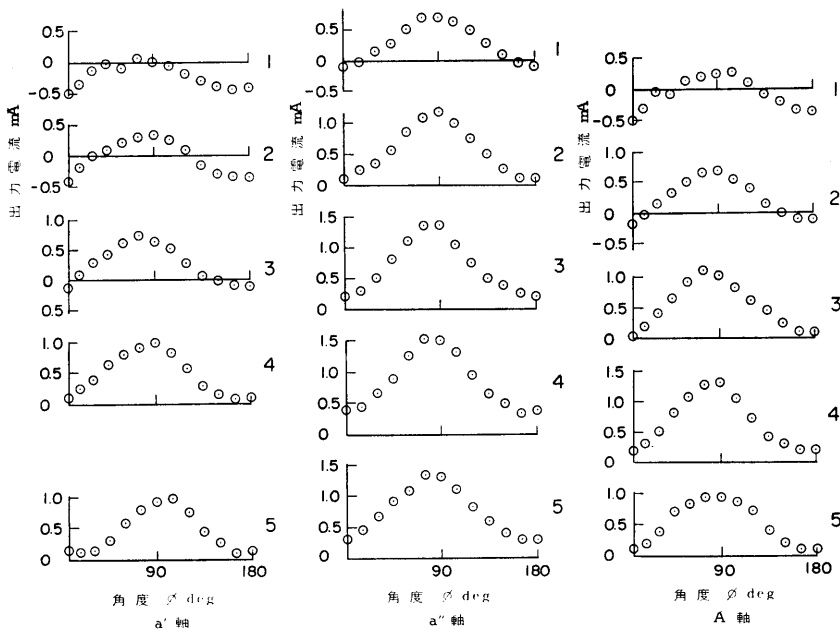


图-6.10 角度—出力電流曲線 II

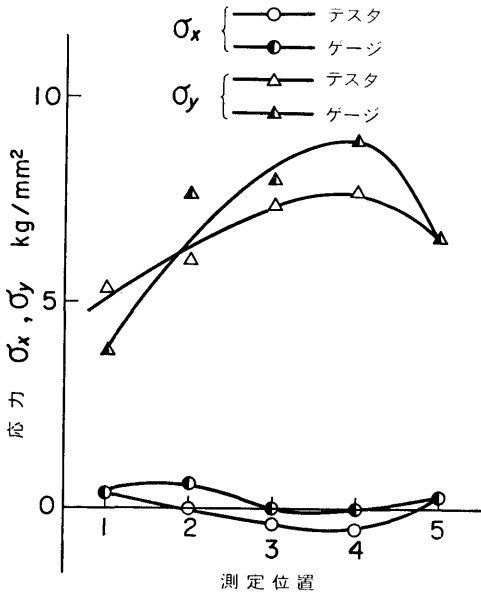


図-6.11 測定値の比較(IV)

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 σ_x 、 σ_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番程度のエメリーペ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

わかった。理論的にも平面上の一点の周りの応力は、平面応力と考えてよい場合には、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

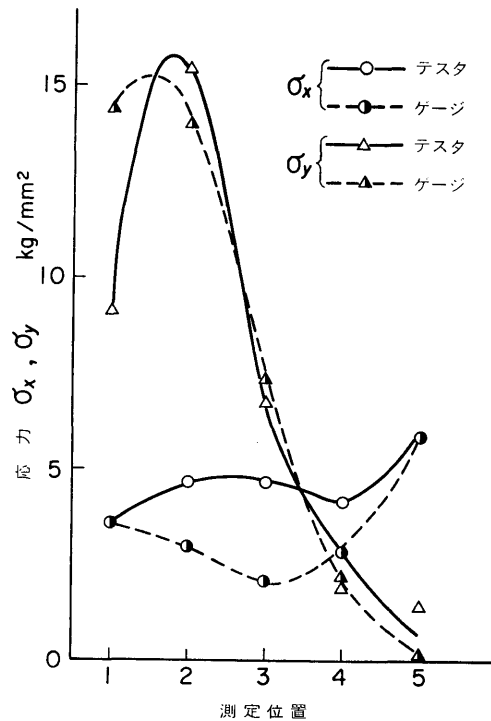


図-6.12 測定値の比較(VII)

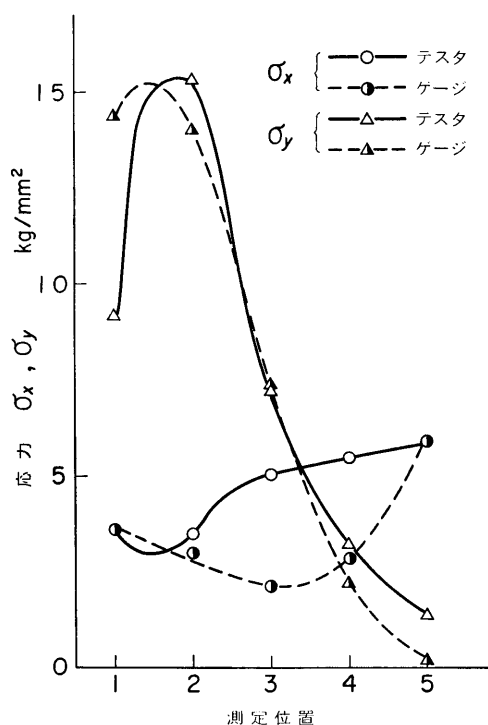


図-6.13 測定値の比較(VIII)

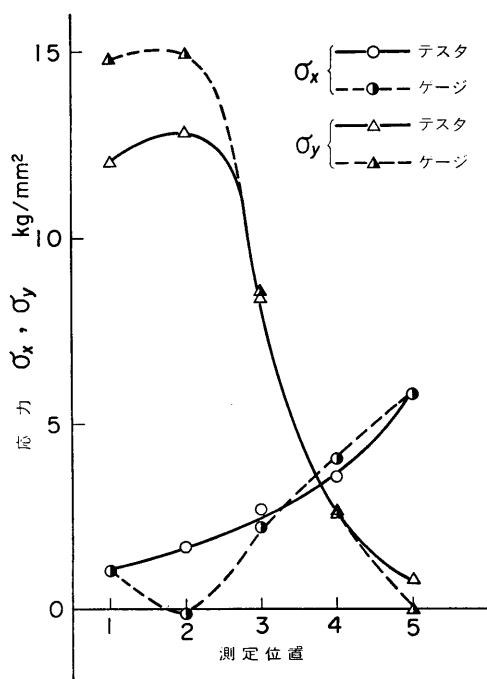


図-6.14 測定値の比較(IX)

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、 ΔY を 12.5mm 、 25mm 、 50mm 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 σ_x とゲージとの差が非常に大きくなっている。また、 σ_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。 ΔY を 50mm 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 $\Delta Y=50\text{mm}$ (ΔY 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、 Δx 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、 ΔX 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
: μA

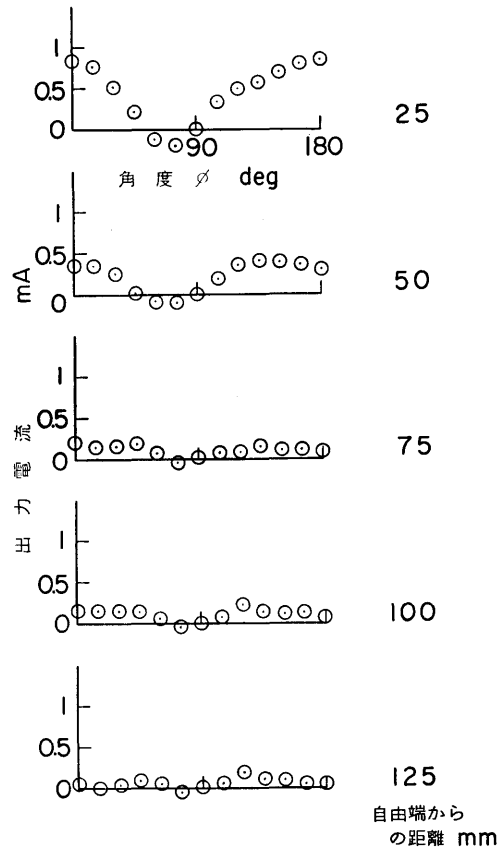
試験片 番	SS41 未焼鈍	S45C 未焼鈍	SS41 焼鈍
1	100	150	
2	240	10	140
3	380	440	170
4	140	0	130
5	160	—	—
6	60	—	30
平均	180	165	118
応力換算 kg/mm^2	1.1	1.2	0.6

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末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 10kg/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 1.5mm 以上は浸透しないので 3mm 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 180mm 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

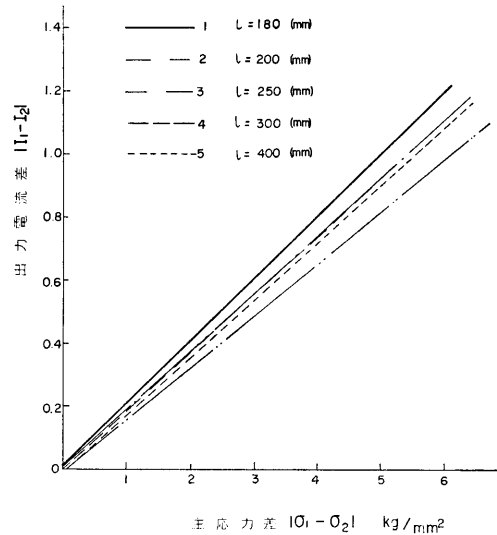


図-6.16 磁気ひずみ感度と長さの変化

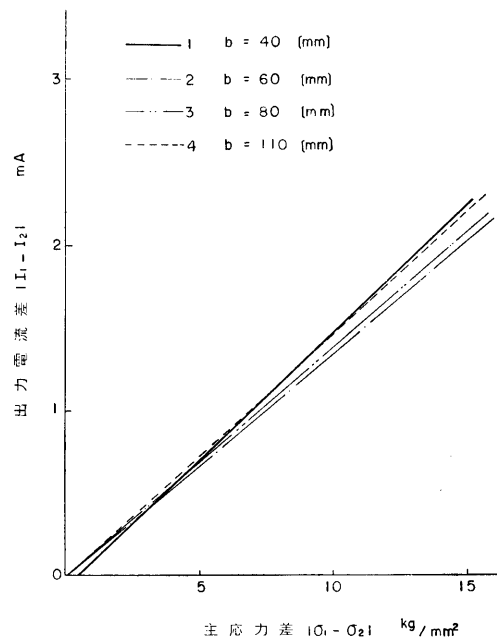


図-6.17 磁気ひずみ感度と試験片の幅

は、 180mm 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/mm²、不均一応力場のときは約±2.5kg/mm²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/mm²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⁽⁶¹⁾。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

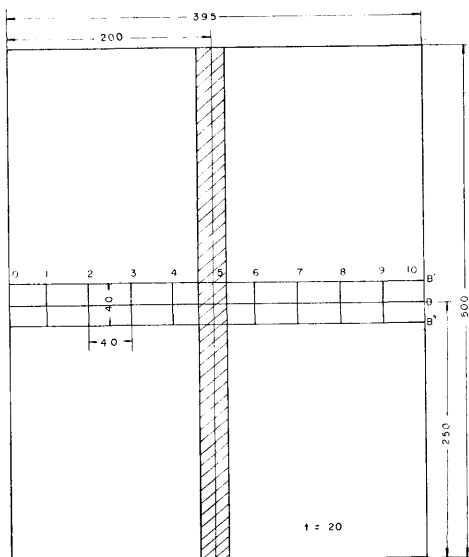


図-7.1 高張力鋼試験片(A)の測定位置

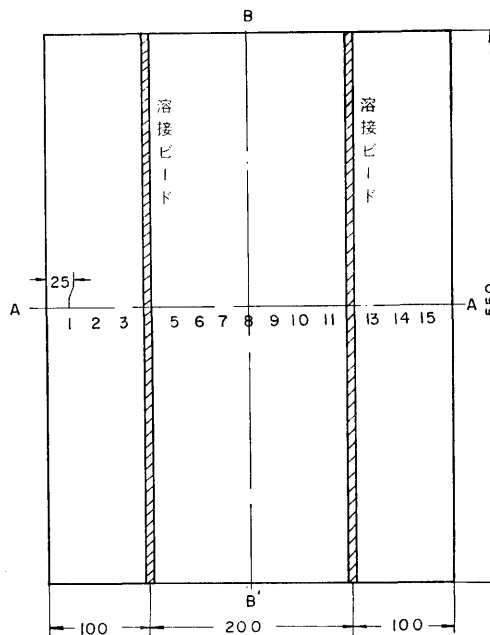


図-7.2 溶接材の測定位置(2列ビード)

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、

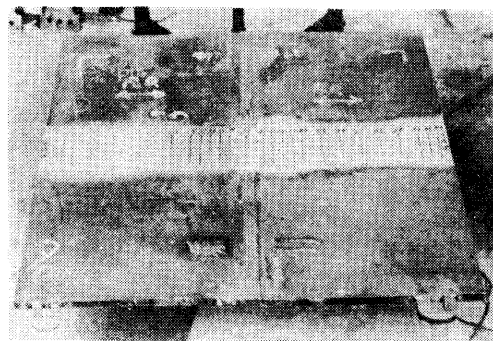


写真-13 大形溶接試験片

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 [*] g	降伏点 kg/mm ²	引張強 kg/mm ²	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。

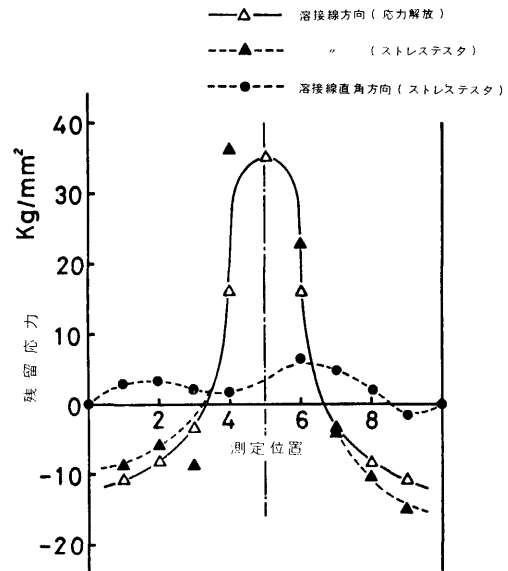


図-7.3(a) 溶接材(A)の残留応力の測定

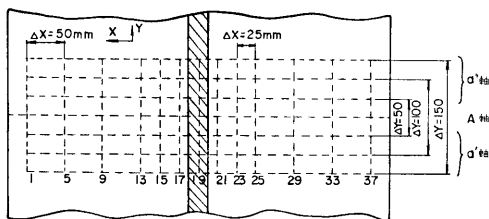


図-7.3(b) B試験片の測定位置

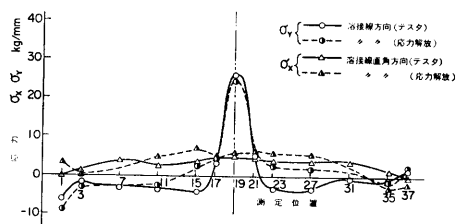


図-7.4 溶接材(B)の残留応力の測定 (I)

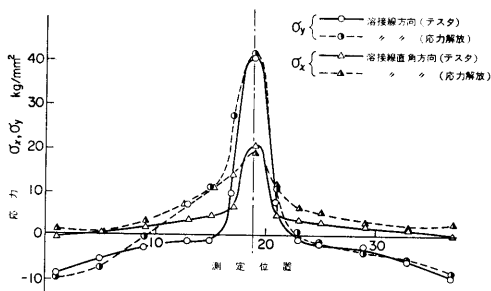


図-7.5 溶接材(B)の残留応力の測定 (II)

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-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/mm²であった。

(B)試験片の場合の測定位置を示したのが図-7.3(b)で、その結果を図-7.4、図-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/mm²である。図-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-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/mm²ぐらいの差が出ている。この試験片

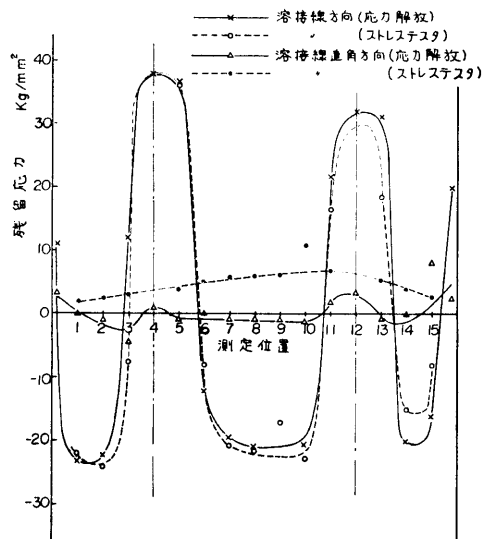


図-7.6 溶接材(C)の残留応力の測定

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-7.7、図-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-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-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

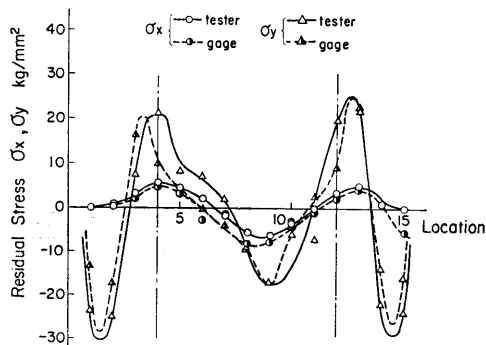


図-7.7 溶接材(D)の残留応力の測定

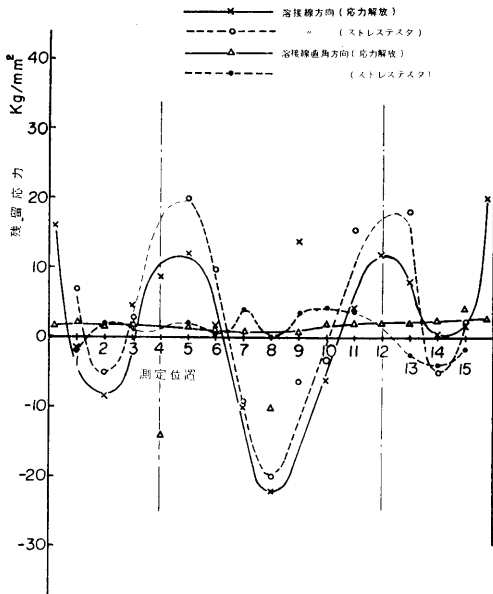


図-7.8 溶接材(D)の残留応力の測定 (II)



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

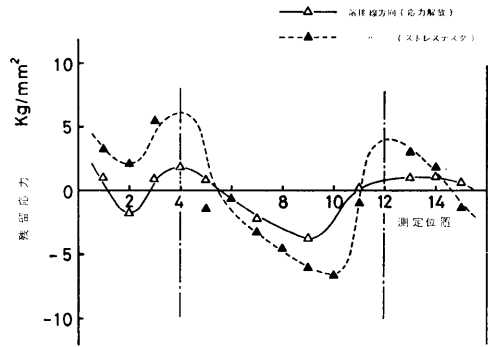


図-7.9 溶接材(E)の残留応力の測定

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

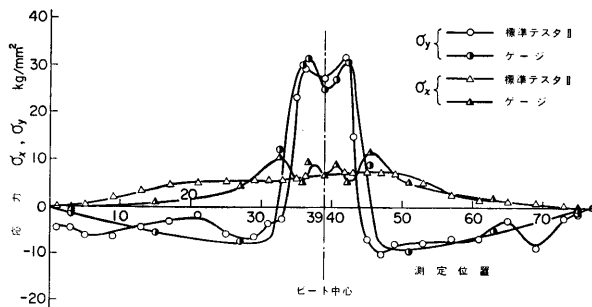


図-7.10 溶接材(F)の残留応力の測定

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一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

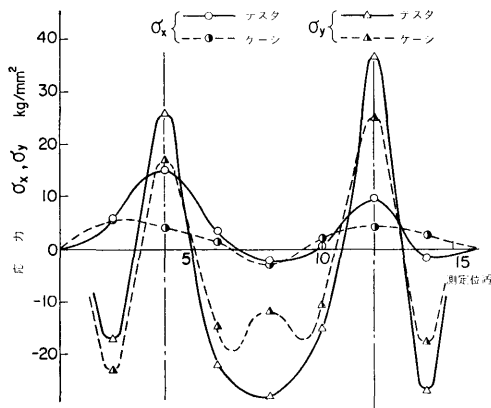


図-7.11 溶接材(D)の残留応力の測定(Ⅲ)

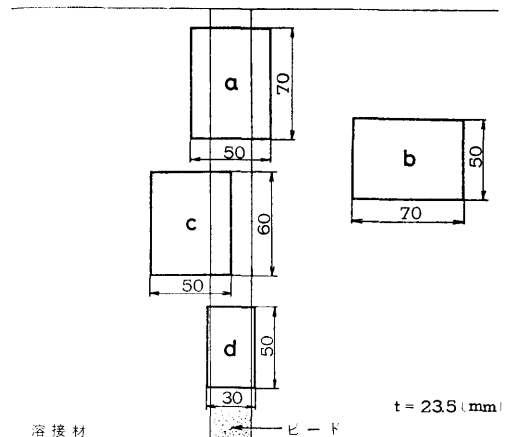


図-7.12 校正用試験片の切り取った位置

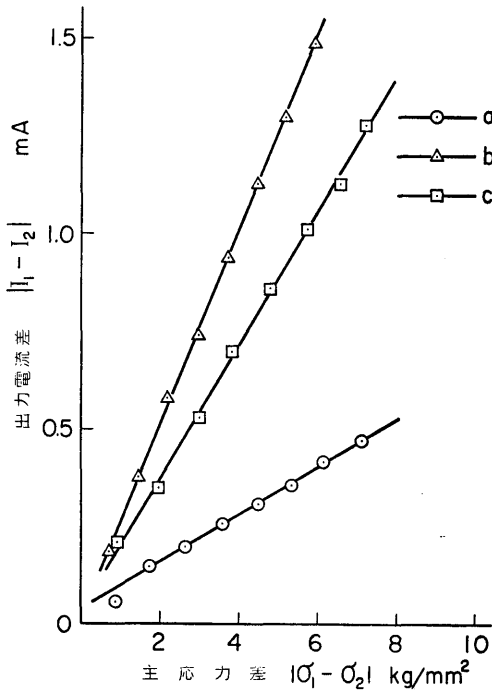


図-7.13 標準テストIIによる校正用試験片の出力曲線

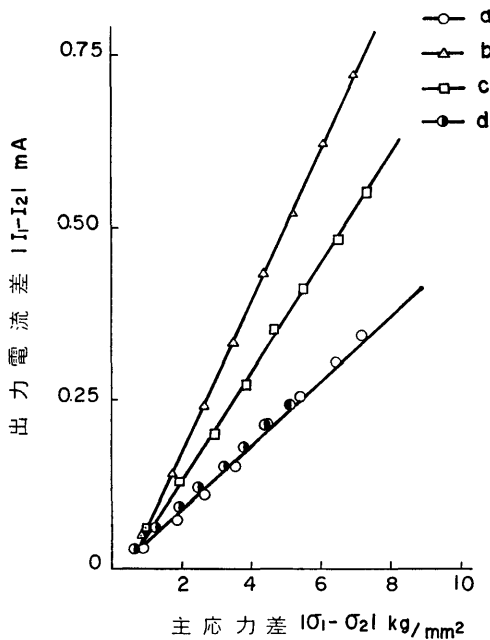


図-7.14 小形テストによる校正用試験片の出力曲線

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

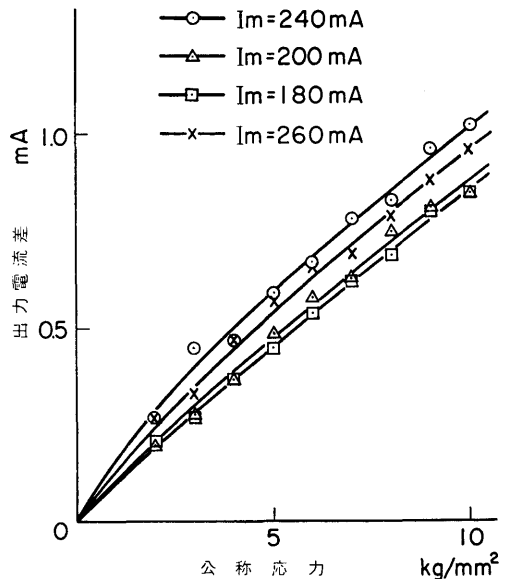


図-7.15 小形テストの磁化電流による出力曲線

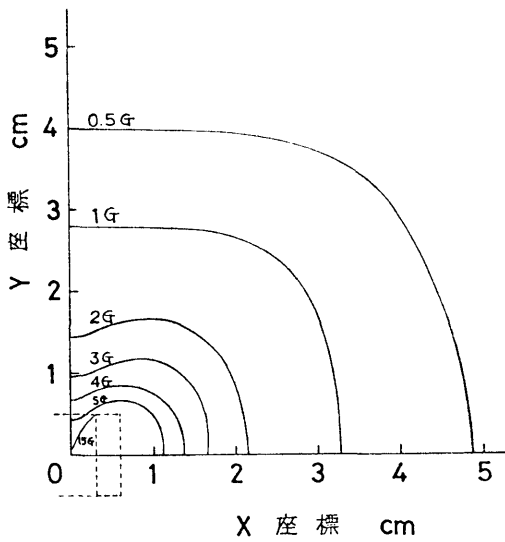


図-7.16 小形テストの場合の磁束密度分布

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。

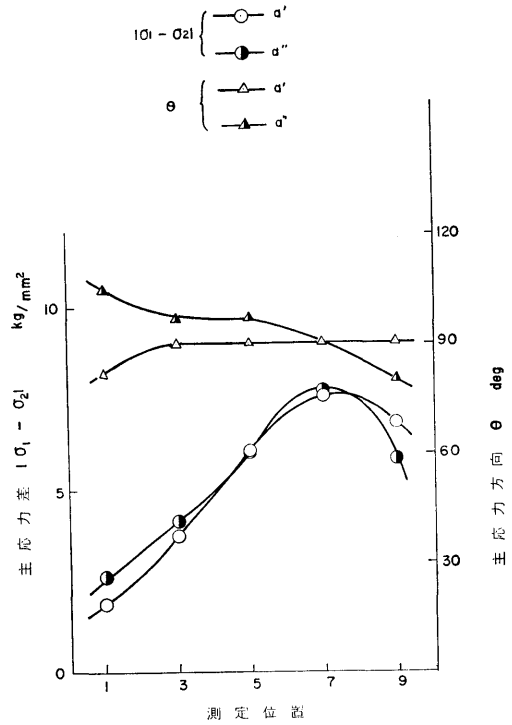


図-7.17 小形テストの主応力差と主応力方向

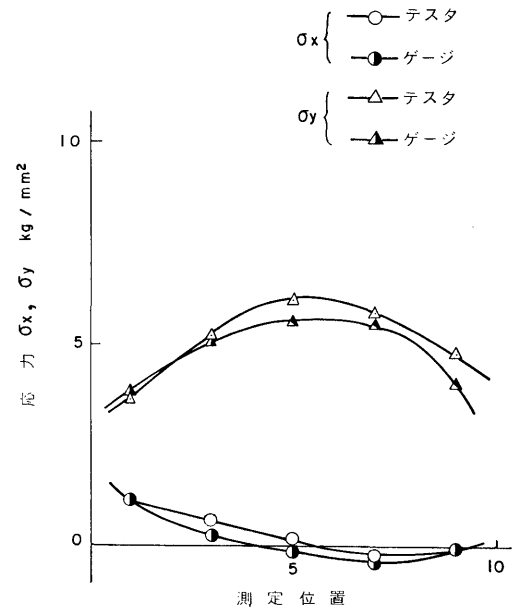


図-7.18 小形テストの場合の測定値の比較

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、 σ_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 σ_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

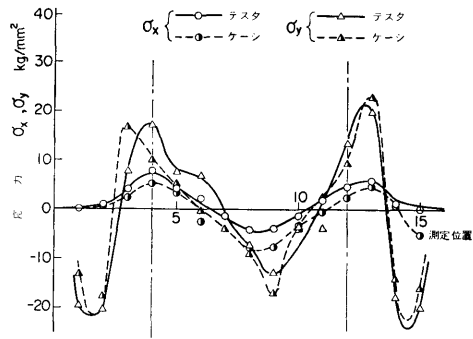


図-7.19 溶接材(D)の残留応力の測定(連続的方法)

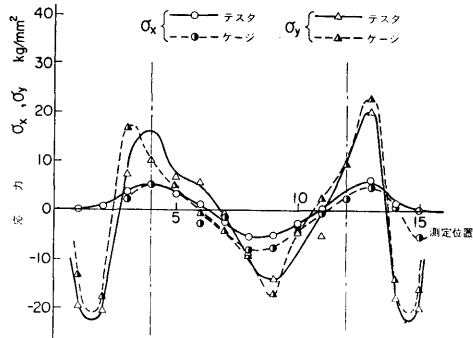


図-7.20 溶接材(D)の残留応力の測定(不連続的方法)

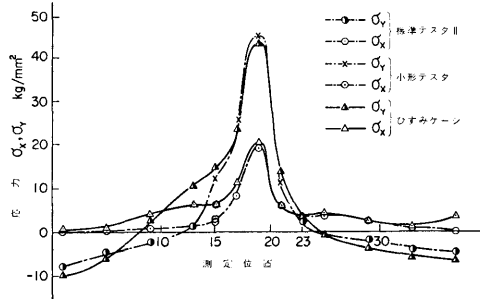


図-7.21 溶接材(B)の残留応力の測定(標準テストと小形テストを併用)

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 σ_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

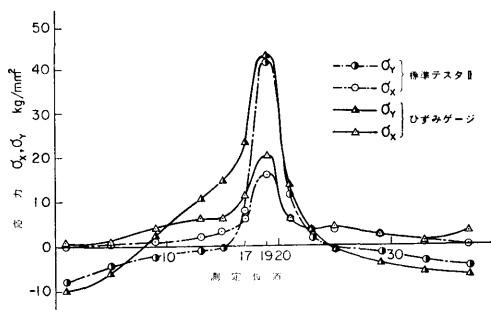


図-7.22 溶接材(B)の残留応力の測定
(標準テストII)

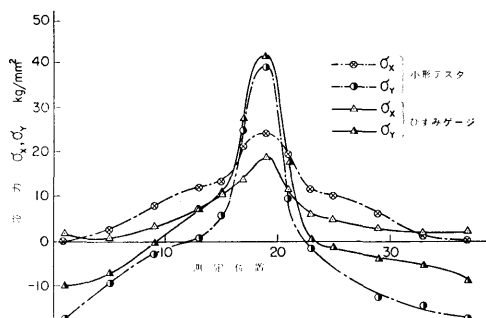


図-7.23 溶接材(B)の残留応力の測定 (小形テスト)

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 σ_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一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。角度一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。このときも角度一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 σ_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 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。