

モアレ法による溶接部の塑性変形挙動の観察

大阪大学工学部	佐	藤	邦	彦
"	松	井	繁	朋
"	瀬	尾	健	二

1. ま え が き

近年モアレ法による歪測定が材料力学分野において大きな関心がよせられるようになり、これを使った研究報告が急激に出るようになって来た。

モアレ (Moiré) は仏語で絹布、レーヨンまたは金属面の波形模様、木のもくめなどの意であって、すだれやレースのカーテンが重なった時にみられる明暗の縞模様をモアレ縞 (Moiré Fringe) と呼んでいる。モアレ縞は相似の線列や点列を二枚重ね合わせた時に相互のわずかの間隔や角度の差によって出来る光学的な干渉縞であって、その微小変化が大きく拡大されて出て来る。重ねた線列や点列と縞模様の間には一つの幾何学的な関係が存在し、これから二つの線列や点列の相対変位を拡大して測定することが出来る。このためこれを利用して歪や変位を測定しようとの試みは古くからなされてきた。この方法を用いると例えば切欠をもつ試験片の切欠底部付近における歪集中の状態を、従来の測定法に比べてより正確にしかも大きな歪まで求めることができるという利点があるため、最近わが国でもモアレ法による歪測定法に関心がたかまってきた^{*}。ところがモアレ法をたとえば金属材料の歪測定に適用するためには、金属表面に一定間隔の極めてこまかい線列や点列を描く必要がある。この細線列を描く簡単で正確な方法がなく、これが最近までモアレ法を利用発展させるための難点となっていた。最近写真その他の技術が進歩してきたため、この難点が徐々に改良され種々の方法が開発されて来た。

現在知られている方法としては写真製版処理によって線列 (グリッドと呼ぶ) を試料表面にエッチングする方法^{1)~7)}があるが、技術的にも経済的にも簡便な方法であるとは必ずしもいい難い。米国の Photo lastic 社のカタログによると Transferable Grid Method と称するグリッドを直接試料に付着させる方法が考案されているようである^{3), 7)}が、詳細は明らかでない。

* モアレ法に関する解説としてはたとえば文献1)~4)がある。

筆者らは、数年前に電気抵抗線歪ゲージを試料表面に貼付することによって試料の歪を測定するというよく知られた方法にヒントを得て、次のような方法を考案した⁸⁾。すなわち、あらかじめ所要のグリッドライン (Grid line) を印刷した薄片 (グリッドシート) を試料に貼付し、ベースをはがして試料表面に極めて薄いグリッド膜のみを残すいわゆる「うつし絵方式」によって、試料表面にグリッドを作る方法である。そしてまた歪を与える前後においてグリッドラインと基準グリッドとの干渉によってできるモアレ縞測定用装置を考案した。そしてこの目的のために共和電業 (株) に依頼してグリッドシートとモアレ法歪測定用光学装置を試作し、これを用いて約1年にわたり種々の実験と検討を行なってきた。その結果試作したグリッドシートと装置を使用すれば、比較的簡便に歪測定ができることを確かめた。その後、これを使って筆者らは数種の研究を行なってきた。

本報告ではモアレ法による歪測定法の紹介をし、その応用例として筆者らが最近行なった研究成果のうちモアレ法による歪測定を利用したものの研究概要と歪測定の結果を紹介する。各研究の詳細は末尾の参考文献欄にあげておいたので参照されたい。

2. モアレ法の原理と歪解析

モアレ法によって試料の歪を測定するためには試料表面に描かれたグリッドと基準となるグリッド (以下これをマスターグリッドと呼ぶ) とを光学的に重ね合わせて出来るモアレ縞を変形の各段階において観察し、これから歪を解析するのであるが、これについて簡単に述べる。

2.1 グリッドに垂直な歪

まず最も基本的な場合として試料に描かれたグリッドに垂直な方向に一樣に歪を与えられた場合について考えてみる。図1では右側のグリッドは試料表面に描かれたグリッドに垂直な方向に引張られて、一樣な伸びによって規則的にグリッドピッチが増えた状態を、また左側のは試料のグリッドと重ねる基準グリッドを表わしている。中央の明暗は重ねてできたモアレ縞である。両グリッド

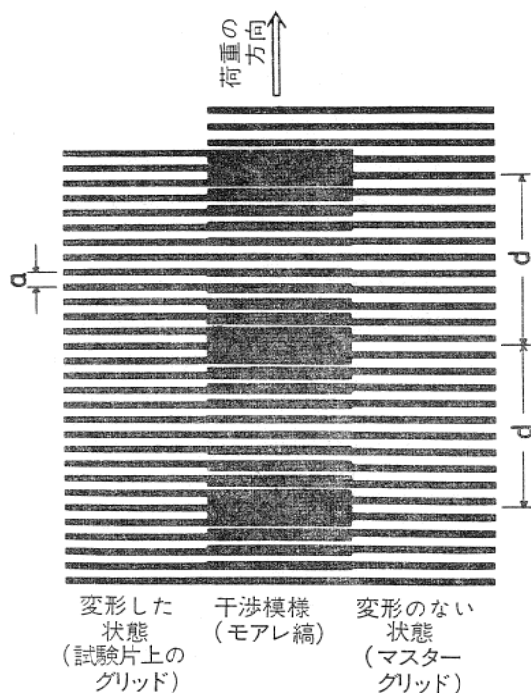


図1 グリッドに垂直に一樣な歪を与えたときのモアレ縞

の基線を一番下の線で合わせると、今左側のピッチ a に対して、右側では一樣の伸び e によってピッチは $a(1+e)$ に伸びているから、結局左側の n 番目と右側の $(n-1)$ 番目が合致して、その間隔はモアレ縞のピッチ d に等しい。すなわち

$$na = d = (n-1)a(1+e) \quad (1)$$

したがって

$$e = \frac{a}{d-a} \quad (2)$$

圧縮の場合には

$$e = -\frac{a}{d+a} \quad (3)$$

微小なひずみ ($a \ll d$) の場合には次のように示される

$$e = \pm \frac{a}{d} \quad (4)$$

ただし符号 $+$ は伸びをあらわし、 $-$ は収縮をあらわすものとする。

2.2 剛体的な回転変形

試料に何ら変形を与えず、マスターグリッドを試料上のグリッドに対して単に回転したらモアレ縞は図2のようになる。図において、出来たモアレ縞の図の水平方向にはかったピッチを h 、 a をグリッドピッチ、 α を回転角とすると、簡単な幾何学的関係から

$$h = \frac{a}{\tan \alpha} + a \tan \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

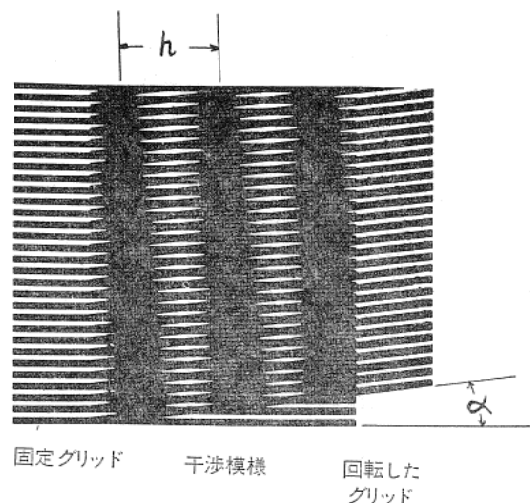


図2 剛体的な回転によるモアレ縞

なる関係がある。
したがって

$$\sin \alpha = \frac{a}{h} \quad (6)$$

がえられる。今 α が微小であると

$$\alpha = \frac{a}{h} \quad (7)$$

で近似することができる。

2.3 二次元変形

平面材料においてその表面で二次元的な歪を求めようとする場合には、図3、図4に示すように一つの要素 OA BC において二方向（例えば x および y 軸方向）のグリッドによるモアレ縞を得る必要がある。

まず図3において、モアレ縞の y 方向にはかった縞間隔を d_y 、軸方向にはかった間隔を h_x 、変形前後のグリッドの傾き α_x 、 y 軸方向にはかった単位長さ当りの伸びを e_y 、グリッドの初期ピッチを a とすると、 y 方向の歪関数を $v(x, y)$ としたとき(4)および(7)式より

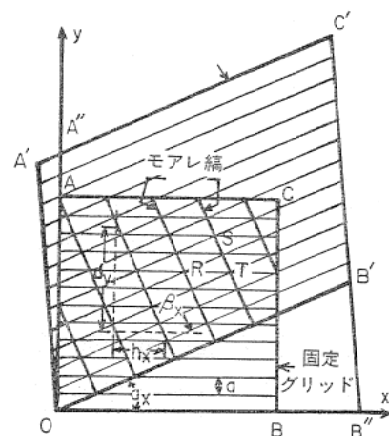


図3 水平グリッドによるモアレ縞

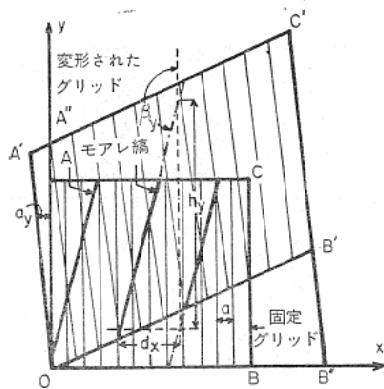


図4 垂直グリッドによるモアレ縞

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{a}{d_y} \quad (8)$$

$$\alpha_x = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{a}{h_x} \quad (9)$$

がえられる。同じようにして図4より、 x 方向の歪関数を $u(x, y)$ とすると、

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{a}{d_x} \quad (10)$$

$$\alpha_y = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{a}{h_y} \quad (11)$$

となる。また0点における剪断歪 γ_{xy} は

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \tan(\alpha_x - \alpha_y) \approx \alpha_x - \alpha_y \\ &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (12)$$

で与えられる。

以上のようにして、材料上の各点における e_x , e_y , γ_{xy} が求められる。これらの結果から主歪 ε_1 , ε_2 およびその方向 θ は周知のごとく次式によって計算される。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1, \varepsilon_2 &= \frac{1}{2} \{ (e_x + e_y) \pm \sqrt{(e_x - e_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \} \\ \tan 2\theta &= \frac{\gamma_{xy}}{e_x - e_y} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

したがって、これから任意の方向の歪は求めることが出来る。以上の考察はいずれも歪の量が小さいとしたときの近似式である。歪が大きい場合はさらに複雑な関係になるがここでは省略する。

3. モアレ法による歪測定に使用できるグリッドシートと光学装置の試作

試作したグリッドシートは厚さ30 μ 、大きさは約10 cm 平方のマイラ製フィルム上に5~10 μ の薄い感光膜を作

り、これに平行な直線群（グリッドライン）を写真印刷したものである。（二次元歪を測定する場合には直交する二方向グリッドラインを印刷したものを使用する。）グリッド間隔は現在の技術では1000 lines/cm 程度まで可能であるが、現在は一応200 lines/cm のものを使用している。

グリッドシートを金属試料の表面に貼付するには、種々の予備実験の結果常温硬化型のシアノアクリレート系接着剤が適当であることがわかったので、これを使用した。

グリッドシートを使用する場合にまず問題になるのは、試料に歪を与えた場合にグリッドシートが、これに追従するかどうかという点である。そこで種々の剥離実験の結果、図5(a)に示す方式が最も良いことがわかった。すなわち、グリッドシートをその膜面を内側にして試験片上に貼付した後、2~3時間放置してからグリッドシートのベースになっているマイラフィルムを剥がす。そして試験片表面には非常に薄い感光膜だけを残す。この操作は容易に出来る。このような「うつし絵方式」でグリッドシートを貼付した試験片に歪を与えたところ軟鋼材料では100%以上の破断寸前の大歪でも剥離せず歪測定が出来ようになった。またこのシートの使用温度範囲は低温では液体窒素温度（-198°C）でも十分使用出来ることも予備実験で確かめた。またアルコールに対して大丈夫である。高温測は現在のところ感光膜自身の材料の問題で100°Cぐらいまで使用できる。これ以上の高温域では時間はかかるが写真腐食法によってグリッドを描く方法をとる必要がある。

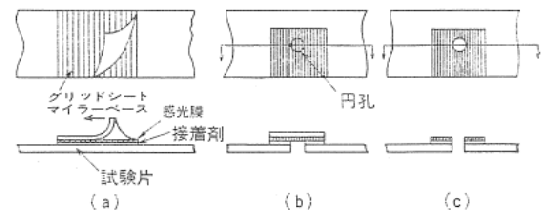


図5 うつし絵方式

「うつし絵方式」は非常に簡便に鮮明なグリッドを得ることが出来ることと、当然のことながらモアレ縞のコントラストも良好である。また「うつし絵方式」を採用すると次のような利点がある。すなわち、切欠をもつ試験片たとえば円孔をもつ試験片の円孔周辺の歪分布を測定するといった場合には、まず図5(b)に示すように円孔部分をも含んでグリッドシートを貼付する。次にマイラベースを剥離すると、図5(c)に示すように円孔部分のグ

リッドシーは完全に剥離し、試験片上にだけグリッドシートが残る。したがってグリッドシートを切欠の輪郭線の形に仕上げる必要は全くない。これは実験操作上きわめて便利である。

次に試料表面に描かれたグリッド（モデルグリッドと呼ぶ）と基準グリッド（マスターグリッド）と光学的に干渉させてモアレ縞をつくるのであるが、従来から行なわれて来た方法は、①試料表面に直接透明のマスターグリッドをのせて干渉させる方法で、グリッド間隔が小さくなってモアレ縞が小さくなって来ると測定が困難で精度上問題がある。②二重露出法や③写真付焼時にマスターグリッドと干渉させるやり方があるがモアレ法による歪測定の精度を高めめる上で問題がある。

そこで筆者らは、モアレ縞の測定精度を向上させる目的でモアレ縞を拡大して測定することを考え、図6に示すようなモアレ縞測定用の拡大投影機を試作した。図7はその光学系の概略図である。拡大投影機に備え付けの

光源ランプCから出た光線は、試験機Aにて負荷され伸ばされた試験片B上のモデルグリッドに当り、その反射光線を拡大投影機のレンズEがとらえ、投影面F上にモデルグリッドを結像させ、これにマスターグリッドを重ねて、投影面F上でモアレ縞を作る。これをカメラHGで撮影する。試作した拡大投影機は5倍、10倍、20倍の3種に拡大され、投影面の大きさは直径が27 cmである。図6では、たて型の引張試験機による負荷中の歪を測定するため投影機のレンズは水平型になっているが、例えば横型の引張試験機などで負荷中に歪を測定する場合は垂直型のアダプターを取りつけることも出来る。また投影機は3軸方向に移動することが出来、測定位置が簡単に変えられる。投影面上のマスターグリッドは歪の増加にしたがって交換することが出来る。また直交グリッドによる二次元歪測定、および回転量を測定するためにマスターグリッドは回転出来るようになっている。

4. モアレ法による円孔付帯板ならびに溶接部の塑性変形挙動の観察

うつし絵方式によるモアレ式歪測定法が十分に実用に足りることがわかったので、筆者らの研究室では特に金属の塑性変形挙動を把握する有効な手段として利用して来た。ここではその中の二例についてその研究の概要とモアレ法による歪測定の実際を簡単に紹介する。

4.1 円孔付帯板の引張りによる塑性変形挙動の観察⁹⁾

円孔付帯板の引張りはおける変形挙動についてはすでに多くの研究がなされている。これらの研究では弾性域および全面降伏に達するまでの弾塑性域における変形挙動が明らかにされているが、全面降伏以後の塑性変形挙動については未知の点が多い。筆者らは上述の研究では求められていない全面降伏以後破壊に至るまでの塑性変形挙動について観察を行なった。

実験は厚さ1.5 mmの軟鋼板（化学組成と機械的性質を図8に示す）を用い表1に示す、A, B, C 3系列の試験片を製作した。図6に示すようなオルセン型10 Ton引張り試験機により試片に引張り荷重を加え各荷重時におけるひずみを測定した。ひずみ測定はうつし絵方式のモアレ法によった。なおグリッドは200本/cmの平行グリッドを荷重方向と直交するように貼付した。

実験結果の考察には次の記号を使用している。

σ_{av} ：最小断面の平均（公称）応力

σ_B ：円孔縁が最初に降伏するときの σ_{av}

σ_Y ：全面降伏応力（円孔縁からななめ4方向に板の両外縁までひずりを生じた時の σ_{av} ）

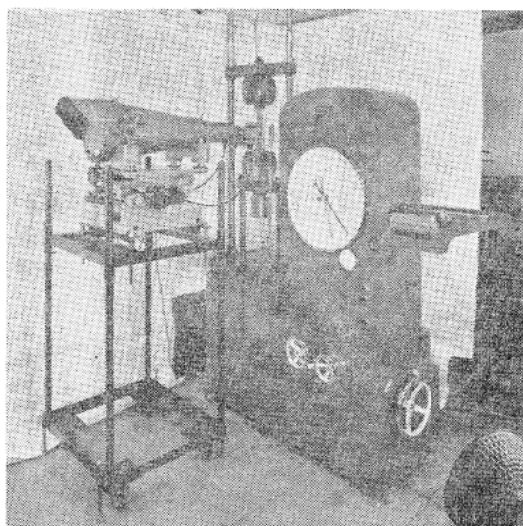


図6 モアレ法歪測定用拡大投影機と引張試験機

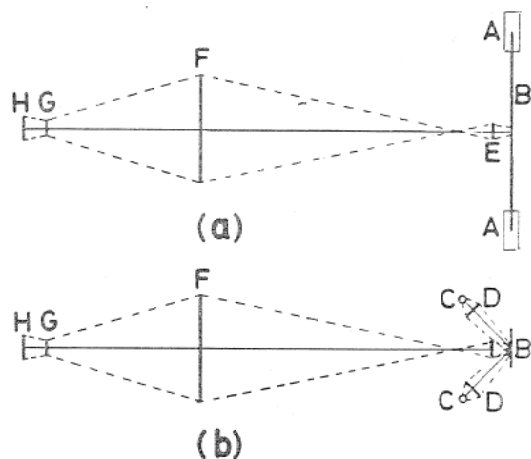


図7 光学系の概略図

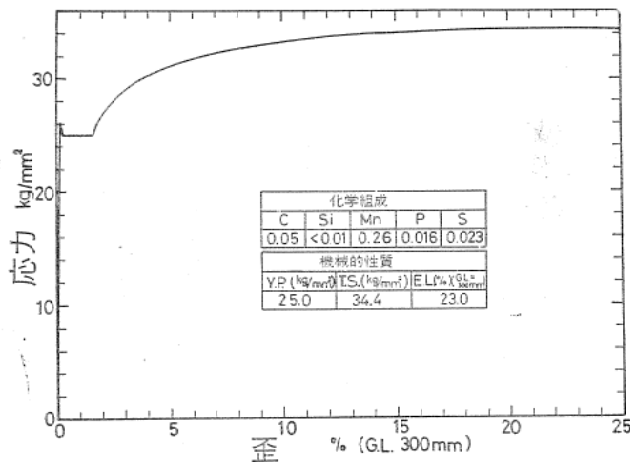


図8 試験材料の応力-歪曲線

試験片番号	B	D	D/B	Kσ	試験片番号	B	D	D/B	Kσ
A-25	25	5	0.2	2.5	C-100	100	10	0.1	2.7
A-50	50	10	0.2	2.5	C-50	50	10	0.2	2.5
A-75	75	15	0.2	2.5	C-33	33	10	0.3	2.35
A-100	100	20	0.2	2.5	C-25	25	10	0.4	2.25
B-5	50	5	0.1	2.7	C-20	20	10	0.5	2.15
B-10	50	10	0.2	2.5					
B-15	50	15	0.3	2.35					
B-20	50	20	0.4	2.25					
B-25	50	25	0.5	2.15					

表1 試験片寸法

σ_P ; 最小断面が完全に降伏したときの σ_{av}

σ_M ; 最大荷重時の σ_{av}

ε_{av} ; 最小断面における荷重方向の(対数)ひずみの
平均値

ε_{max} ; 円孔縁の(対数)ひずみ

ε_0 ; σ_{av} なる平均応力が単純引張り状態で働いた場合の(対数)ひずみ

$K\sigma$; 弾性応力集中率(形状係数)

$K\varepsilon_{av}$; 円孔縁のひずみ集中率 ($=\varepsilon_{max}/\varepsilon_{av}$)

$K\varepsilon_0$; " ($=\varepsilon_{max}/\varepsilon_0$)

変形の進行にともなうモアレ縞の変化とひずみ分布

試片の荷重と全伸び(標点距離400 mm)の関係から求めた平均応力 σ_{av} と平均ひずみの関係の一例として、試験片 C-100 ($K\sigma=2.7$) の結果を図9に示す。図中の②は $\sigma_{av}=\sigma_E=9.6 \text{ kg/mm}^2$, ④は $\sigma_{av}=\sigma_Y=26.0 \text{ kg/mm}^2$, ⑦は $\sigma_{av}=29.0 \text{ kg/mm}^2$ (グロス断面降伏), ⑧は $\sigma_{av}=\sigma_M=35.1 \text{ kg/mm}^2$ の位置である。図に示した①~⑨の荷重段階におけるモアレ縞を図10に示す。(この時のグリッドは荷重方向に垂直であり、写真は試験片中央より片側だけを示している。) $\sigma_{av}=\sigma_E$ の状態(写真②)では試験片の大部分が弾性状態にあり、本実験に

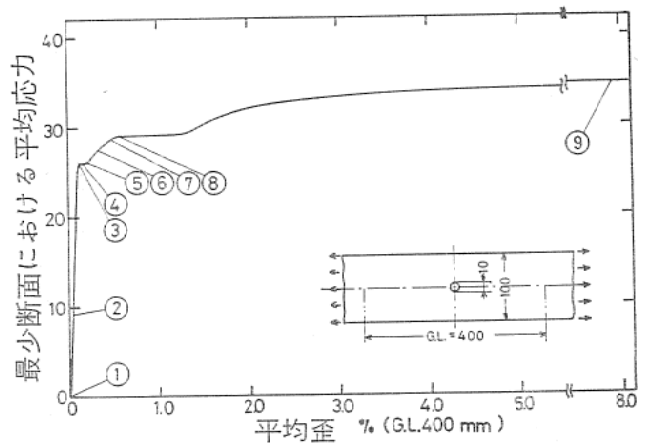
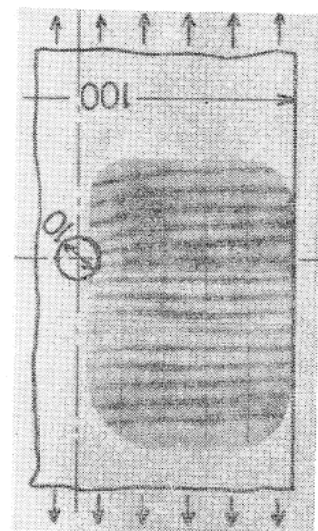


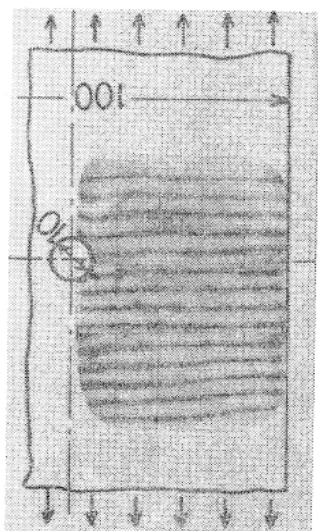
図9 円孔付帯板の引張における平均応力と平均歪の関係(試験片C-100)

使用した200本/cmのグリッドでは、試験片の初期状態(写真①)と比較して肉眼では目立った変化は表われていない。平均応力が σ_E を越えて全面降伏応力 σ_Y に近づくと写真③に見られるように円孔縁付近でモアレ縞にわずかなゆがみを生ずる。写真④は全面降伏の状態であって、円孔縁から荷重軸とはほぼ 50° 方向に試験片の外縁までモアレ縞の大きなゆがみが認められる。このようなモアレ縞のゆがみは、円孔縁から外縁までほとんど瞬間的に生じた。写真⑤は最小断面の反対側にもモアレ縞の大きなゆがみが認められた状態を示している。このようにモアレ縞のゆがみが4方向に同時に生ずることは稀であって時期的にずれる場合が多い。平均応力が σ_Y を越えると写真⑥⑦⑧に示すように、モアレ縞のゆがみは最初に生じた4方向のモアレ縞のゆがみを核として広がり、モアレ縞の間隔は特に円孔縁付近でいちじるしくせまくなり最大荷重時では写真⑨のようにさらにせまくなる他の試験片についてもモアレ縞の変化の様相は図10とはほぼ同様であった。

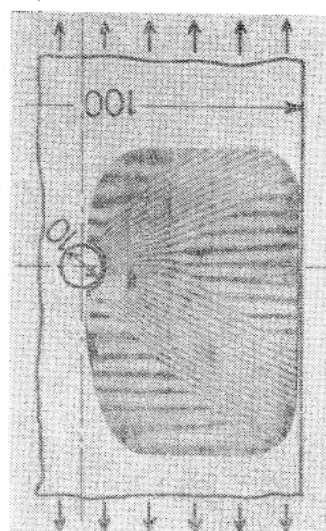
次に試験片の最小断面における塑性変形の進行の様相を知るため最小断面上でのひずみ ε_y (荷重方向のひずみ)の分布を種々の荷重段階に対して求めた。図11はその一例で試験片 C-100 ($K\sigma=2.7$) の実験結果である。図のひずみ分布は弾性状態($\sigma_{av}<\sigma_E$)におけるものとはかなり異なっていることが認められる。まず曲線①では円孔縁付近のAB間でのひずみは $\varepsilon_y \approx 1\%$ 、すなわち材料の引張り試験における降伏状態の終端付近のひずみ ε_0 (この材料ではおよそ 1.7%) のオーダーでありC点から右側のひずみは弾性ひずみのオーダーになっている。これは平均応力 σ_{av} が σ_E を越えると、円孔縁付近のある有限の領域のみひずみは弾性ひずみのオーダーから急激に ε_0 のオーダーまで飛び移り、じりをおこしたいわ



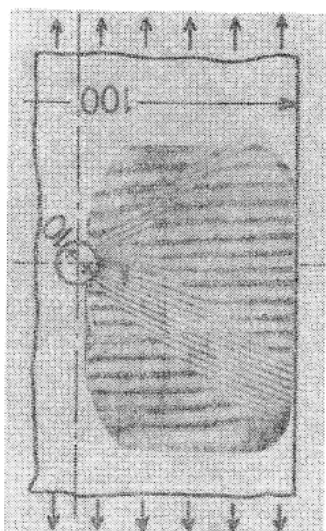
① $\sigma_{av} = 0$



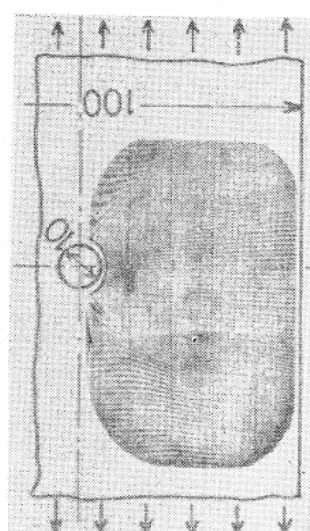
② $\sigma_{av} = \sigma_x = 0.37 \sigma_y$



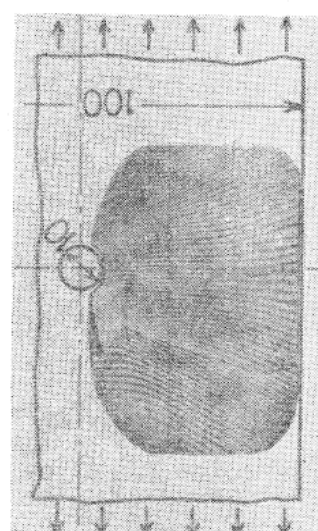
③ $\sigma_{av} = \sigma_y$



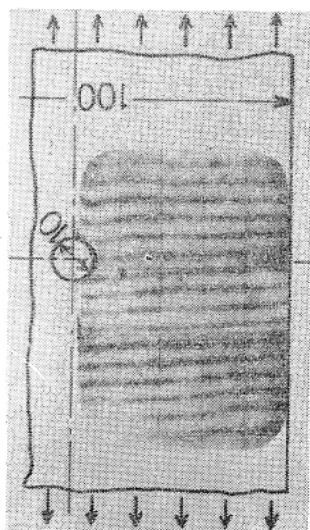
④ $\sigma_{av} = \sigma_y$



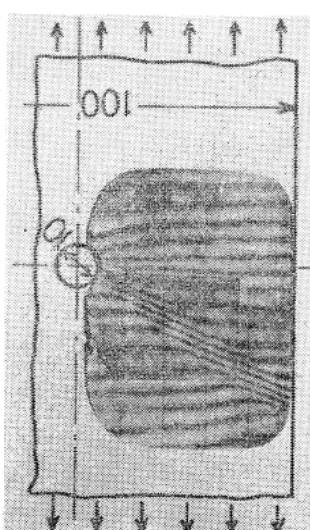
⑤ $\sigma_{av} = 1.06 \sigma_y$



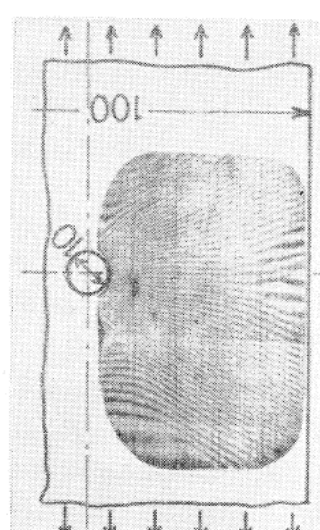
⑥ $\sigma_{av} = 1.11 \sigma_y$



⑦ $\sigma_{av} = 1.10 \sigma_y$



⑧ $\sigma_{av} = 1.10 \sigma_y$



⑨ $\sigma_{av} = \sigma_m = 1.35 \sigma_y$

図10 荷重増加に伴うモアレ縞の変化（グリッドは荷重方向に垂直）

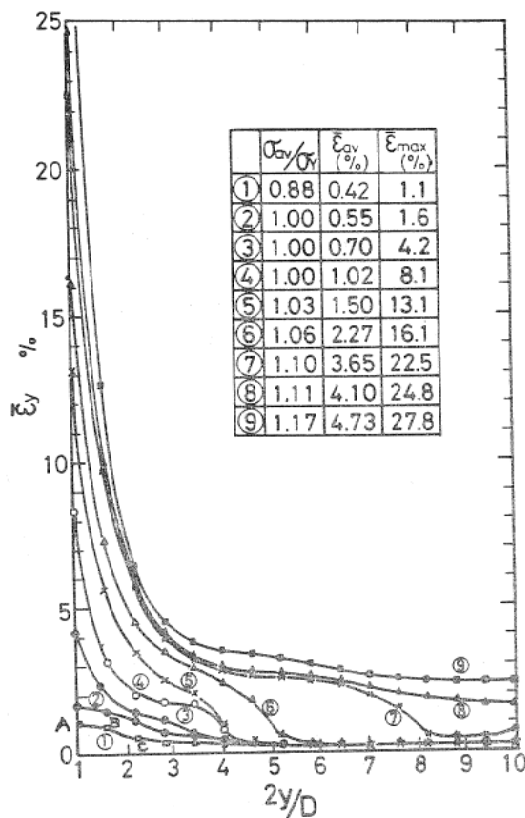


図11 各荷重段階の最小断面における荷重方向の歪分布 (試験片 C-100)

ゆる塑性域と弾性域との間でひずみの急変があらわれたのであろう。

次に図11に示した曲線②③④はともに $\sigma_{av} = \sigma_Y$ の状態であるが、ひずみ分布は全く異なっている。この場合のモアレ縞の写真観察によれば、曲線②の状態 (図10の写真③) では円孔縁付近にわずかのモアレ縞のゆがみが認められるに過ぎないが、曲線③の状態 (図10の写真④) では円孔縁からななめ50°方向に試験片の外縁までモアレ縞の大きなゆがみが認められた。すなわち曲線②はいわば全面降伏直前のひずみ分布であって、円孔縁の付近で塑性域は曲線①の状態よりわずかに広がっているとはいえ、この付近のひずみは依然として ϵ_0 のオーダー (1.5%) にとまっている。一方曲線③は全面降伏直後のひずみ分布であって、塑性拘束の急激な低下のため円孔縁のひずみは4.2%まで急激に上昇し、さらに他方にもすべりを生じた④の状態 (図10の写真⑤) では円孔縁のひずみは8.7%まで上昇する。そして塑性域も曲線②の状態の2倍程度に拡大する。さらに載荷をつづけると曲線⑤、⑥ (図10の写真⑥)、⑦ (図10の写真⑦) に示すように円孔縁の最大ひずみは次第に上昇し塑性域は試験片の外縁に向かって拡大する。そして曲線⑧ (図10の写真⑧) の状態では試験片の外縁のひずみは ϵ_0 ($\approx 1.5\%$) に達し最小断面で弾性域はなくなる。この時の平均応力を

σ_P とあらわしている。C-100試験片では $\sigma_P = 1.11\sigma_Y \approx 29\text{kg/mm}^2$ であった。また他の試験片についても上とほぼ同様の特性が認められた。

歪集中率

ひずみ集中率 K_{ϵ_0} が荷重増加とともに変化する様相の一例を図12の実線で示している。図はC-100試験片についての結果である。試験片の全領域が弾性の時 ($\sigma_{av} < \sigma_E$) は K_{ϵ_0} は弾性応力集中率 K_σ に等しいが、 $\sigma_E < \sigma_{av}$ となり円孔縁に降伏が生ずると K_{ϵ_0} は K_σ より大きくなる。そして $\sigma_{av} = \sigma_Y$ でピークに達し降伏直後急に低下する。これは $\sigma_{av} = \sigma_Y$ で ϵ_0 が急増するためである。そして σ_{av} が σ_Y より大きくなると再び K_{ϵ_0} は増加し $\sigma_{av} \approx \sigma_P$ 付近で再びピークに達する。

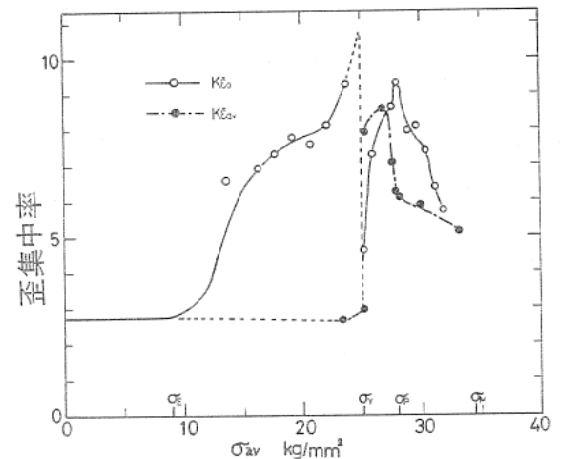


図12 荷重増加にともなう歪集中率の変化 (試験片 C-100, $K_\sigma = 2.7$)

ひずみ集中 K_{ϵ_0} は本実験の軟鋼板のように顕著な降伏現象を示す材料では $\sigma_{av} = \sigma_Y$ 付近で ϵ_0 の値が不確定となるためひずみ集中率 K_{ϵ_0} の意味があいまいとなるので、 ϵ_{av} を分母に用いたひずみ集中率 $K_{\epsilon_{av}}$ を図12に一点鎖線で示している。このように定義したひずみ集中率 $K_{\epsilon_{av}}$ は全領域弾性の時は弾性応力集中率 K_σ より数%大きくなる。そして σ_{av} が σ_Y よりやや小さいところでは $K_{\epsilon_{av}}$ は K_σ より小さくなっている。全面降伏直後には $K_{\epsilon_{av}}$ は急上昇し、 σ_{av} が σ_P の少し手前になった時ピークを生じ $\sigma_P < \sigma_{av}$ では低下する。このように図12に示した、 K_{ϵ_0} 、 $K_{\epsilon_{av}}$ の特性から明らかなように K_{ϵ_0} と $K_{\epsilon_{av}}$ の特性は異なっている。したがって真の意味のひずみ集中の程度は K_{ϵ_0} の大小では判断できない。

ひずみ集中率 $K_{\epsilon_{av}}$ を形状係数に対してプロットすると図13のようになる。曲線①は弾性状態 ($\sigma_{av} < \sigma_E$) におけるひずみ集中率でこれは K_σ よりも数%大きい程度である。曲線②は変形過程の中で表われる最大ひずみ集

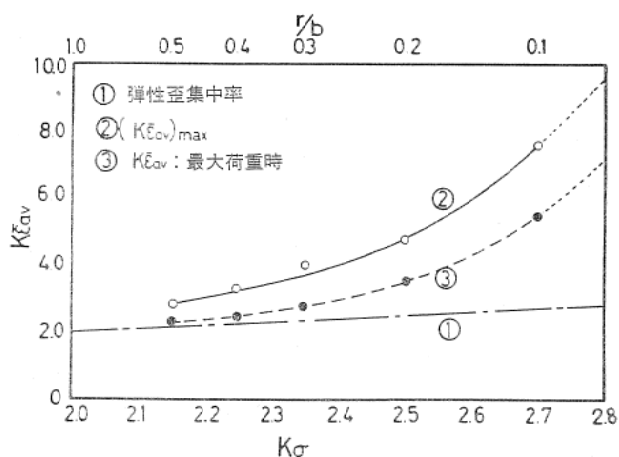
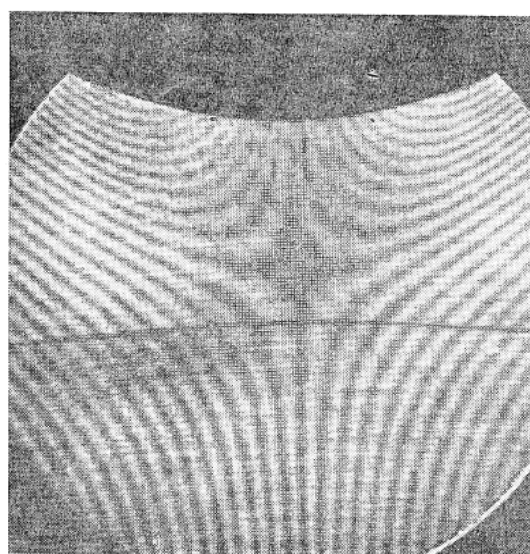


図13 歪集中率と形状係数の関係

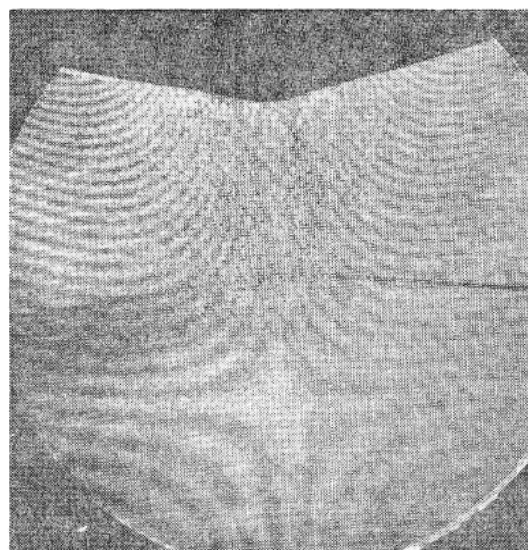
中率でこれは σ_{av} が σ_P より少し小さい時に表われる。曲線③は最大荷重点 ($\sigma_{av} = \sigma_M$) におけるひずみ集中率である。ひずみ集中率は塑性変形の進行とともに曲線①から②まで上昇した後、最大荷重点では曲線③まで低下する。 $K_\sigma = 2.7$ の場合の最大ひずみ集中率 $(K\bar{\epsilon}_{av})_{max}$ は7~8, $K_\sigma = 2.5$ の場合は $(K\bar{\epsilon}_{av})_{max} = 4.5 \sim 5$, $K_\sigma = 2.15$ の場合は $(K\bar{\epsilon}_{av})_{max} = 2.5 \sim 2.8$ であって曲線②と①の差すなわち塑性変形にともなうひずみ集中率の上昇は形状係数が3に近いものほど大きい。

最大荷重点以後の変形

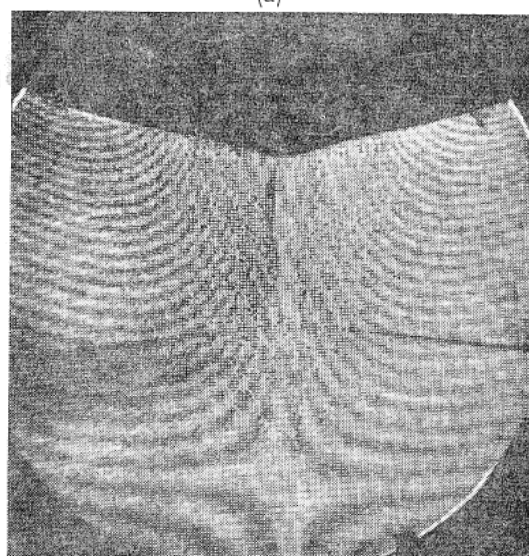
最大荷重点以後の円孔縁付近のモアレ縞の一例を図14に示す。図はC-100試験についての結果である。円孔縁



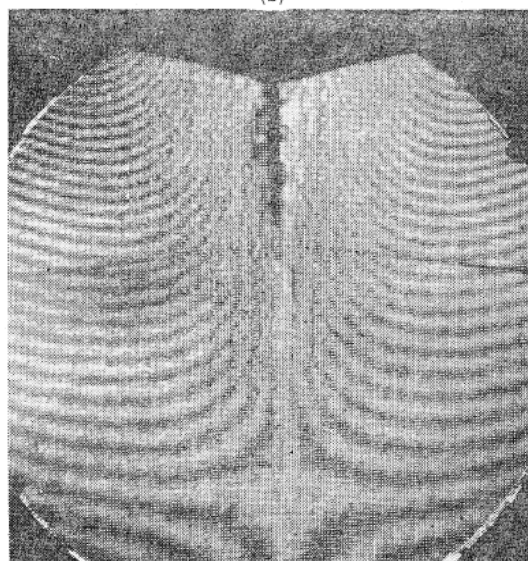
最大荷重時
 $\epsilon_{max} = 55\%$
(a)



割れ発生前
 $\epsilon_{max} = 120\%$
(b)



割れ発生直後
割れ先端の歪112%
(c)



割れ進行中
割れ先端の歪112%
(d)

図14 最大荷重点以後の変形とモアレ縞

ではひずみが非常に大きくなるためモアレ縞は不鮮明となり間隙を測定することは困難であるが、ある標点距離内にモアレ縞が何本入っているかということより円孔縁のひずみを求めた。ひずみ量を図の下に示している。クラックの入る直前ではひずみは100%以上にもなっている。なお写真(C)(D)にはすでにクラックが発生しているがこの時のひずみ量はクラックの先端と思われる部分のひずみである。

4.2 引張りをうける十字型すみ肉溶接継手模型の塑性変形挙動と強度

すみ肉溶接継手では継手部分における幾何学的形状の不連続のため力の流れが複雑となり、ルート部や止端部に歪集中を生ずることは、よく知られている。すみ肉溶接部における力の流れを光弾性を利用して求めた例(例えば A. G. Solakian : W. J. 1939 No. 2 P. 22)は古くから知られているが継手の破壊に至るまでのすみ肉溶接内部の塑性変形挙動については十分な知見が得られていない。本研究は「うつし絵方式」によるモアレ法を利用してすみ内部の変形挙動と破壊特性を明らかにすることを目的として行なった。

実験は厚さ1.6 mm の軟鋼板(降伏強さ18.3 kg/mm², 最大強さ28.8 kg/mm², 伸び13% (G. L.=50 mm))より十字すみ肉溶接継手の模型試験片(その一つを図15の中に示す)を作製し、十字すみ肉継手の強度および塑性挙動におよぼす脚長、とけ込み量およびすみ肉形状の影響を調査した。実験方法は4.1で述べたのと同じである。

得られた実験結果から、その代表例として下部の脚長10 mm, すみ肉角度60°の試験片を取り上げて荷重動加にともなうすみ内部のモアレ縞の変化と塑性変形挙動について述べる。試験片の荷重(単位板厚当り)と伸び(すみ内部をはさんで標点距離80 mm)の関係は図15に

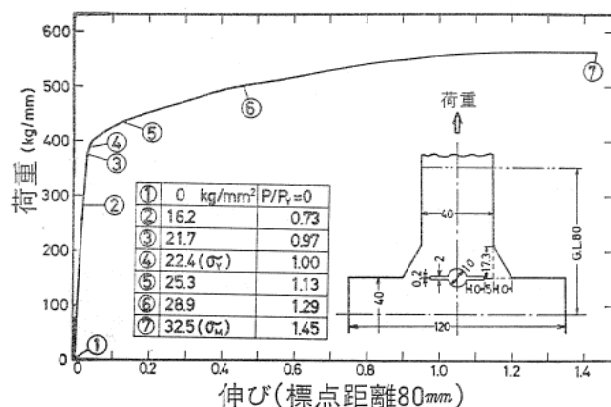


図15 十字型すみ肉溶接部の荷重—伸び曲線

示すように変化した。図中①～⑦までの各荷重段階におけるモアレ縞およびその時のすみ内部の荷重軸方向ひずみ ϵ_y の分布を図16(a)および(b)に示す。点①は負荷前の初期状態, ④は全面降伏時, ⑦は最大荷重時を示している。写真②では初期状態の写真①に比べてルート部のモアレ縞間隔がわずかに小さくなっているが肉眼ではほとんど変化は認められない。写真③ではルート部のモアレ縞間隔が小さくなっていることは明らかであるが他の部分ではモアレ縞にはほとんど変化は認められない。この時の荷重軸方向のひずみ分布はルート部付近には0.5%以上の歪が生じており、そこから荷重軸方向に対して約30°方向に0.1%以上のひずみが広がっている。また上止端部には0.3%以上のひずみの集中が見られる。写真④は写真③に比して荷重の増加はわずかであるが、荷重方向に垂直なグリッドによるモアレ縞はルート部から荷重軸に対して約30°方向に階段状に大きくゆがんでいる。本研究ではこのようにモアレ縞がルート部からすみ肉表面まで大きな歪を生じた瞬間の荷重をもって全面降伏荷重、またこの歪を生じている30°方向をもって降伏角度と決めた。図15の、荷重—伸び曲線で点④以後のびが急増する事、ひずみ分布がルート部より30°方向に大きくひろがりすみ肉表面でのひずみが0.3%以上(一軸引張における弾性ひずみの限界は約0.2%)であることを考慮するとこの決定は妥当であろう。さらに荷重を増すと写真⑤⑥に示すようにモアレ縞は大きく変化し、大きなひずみが生じる。写真⑦は最大荷重時のモアレ縞を示している。ひずみ分布はやはりルート部より表面へ広がるが、広がる方向の角度は降伏時の場合よりやや大きくなり、荷重軸に対して約35°である。またルート部のひずみは非常に大きくなっているためモアレ間隔が小さくなり測定することは困難であるが、ルート部の切欠の口ひらき量からひずみを算定すると約150%ぐらいであった。なお最高荷重以後さらに載荷を続けると破断は最小断面すなわち荷重軸方向に対して約60°方向に生じ、最大荷重時のひずみの広がっている方向とは一致していない。以上述べたようにすみ内部の塑性変形特性を調査することにより、より強度の大なるすみ肉形状を決定することが可能であろう。以下にその一例を示す。

図17は下部の脚長一定ですみ肉角度が変化した不等脚十字すみ肉継手模型について行なった引張実験結果である。図は最小断面での平均降伏応力および平均最大応力とすみ肉角度との関係を示している。両平均応力とも、すみ肉角度が大きい場合ほど大きくなっており、特に $\theta_f = 60 \sim 70^\circ$ 付近で急増している。これは各試験片の最大荷重時について求めたひずみ分布図の図18より説明す

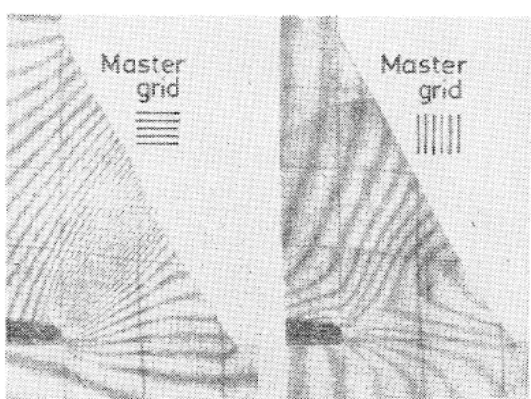
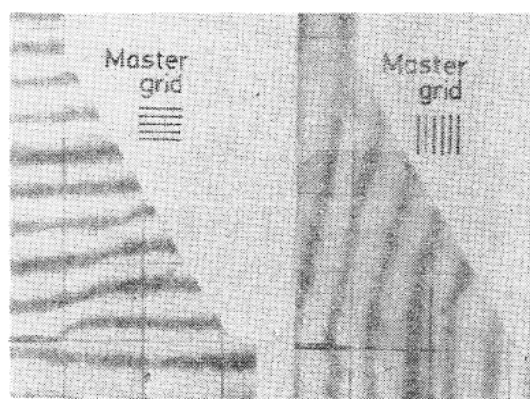
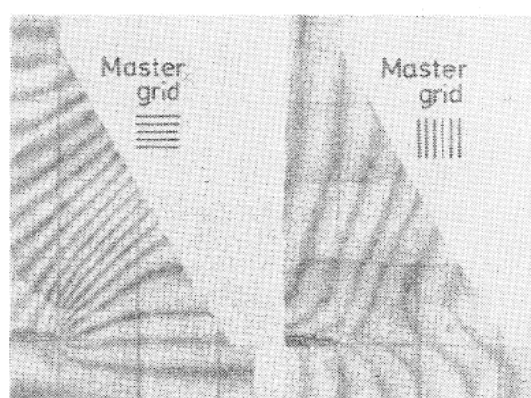
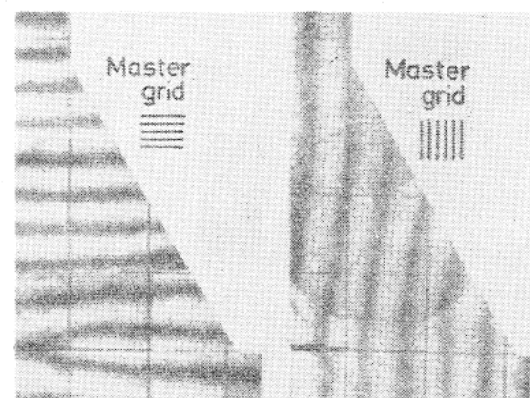
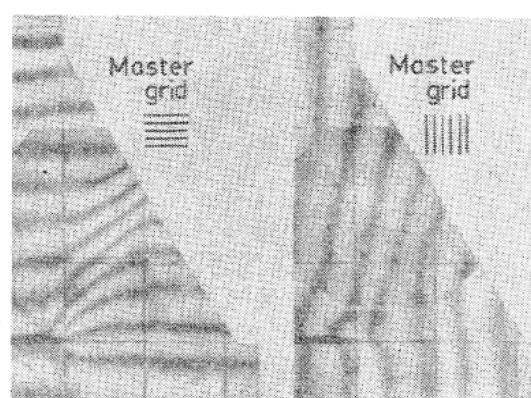
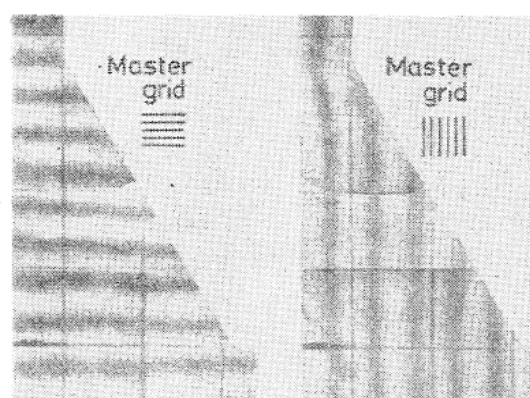
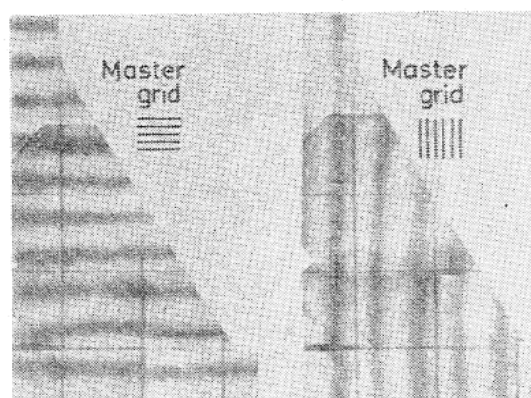
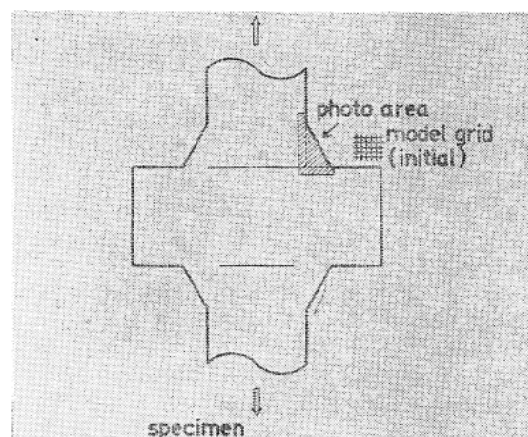


図16(a) 荷重増加に伴うモアレ縞の変化

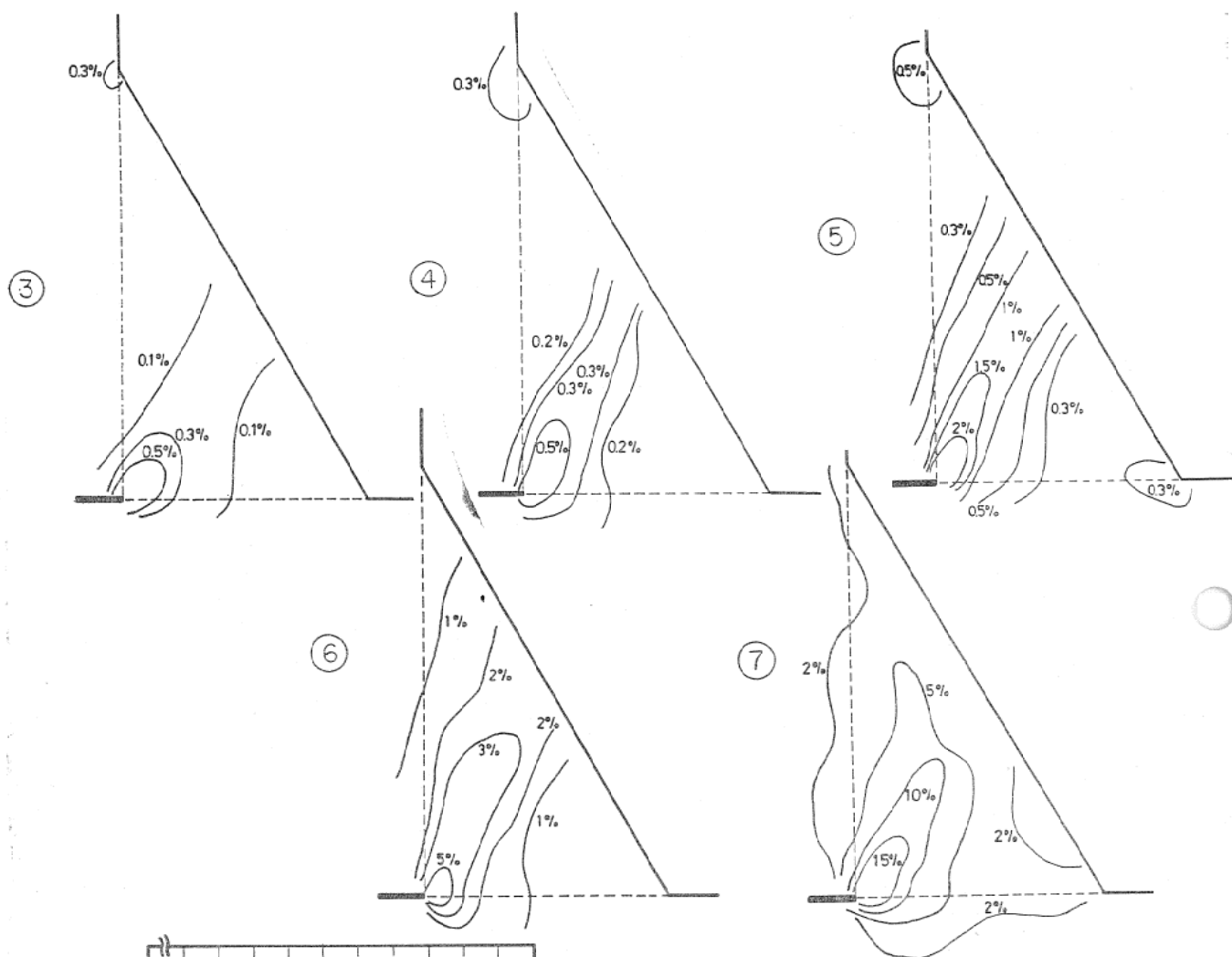


図16(b) 荷重増加にともなう溶接部の歪分布（荷重方向）の変化

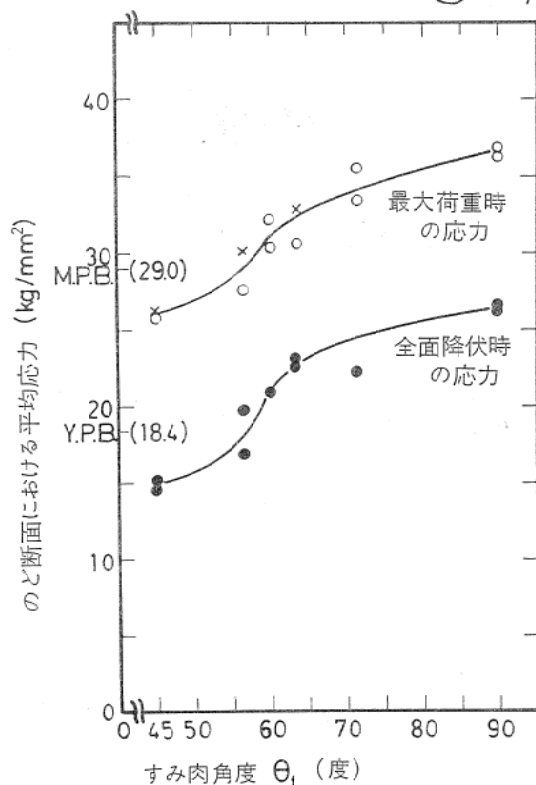


図17 すみ肉継手強度におよぼすすみ肉角度の影響（下部脚長一定10mmの場合）

ることが出来る。すなわち θ_f が 45° の試験片では全く見られなかった下止端部のひずみ集中が $\theta_f = 63.5^\circ$ の試験片にあらわれ出し θ_f が大きくなるに従ってこの下止端部のひずみ集中が大きくなっている。この下止端部のひずみ集中は横板の拘束であり、拘束が強い程強度が大きくなる。このような現象を考慮するとすみ肉角度を大きくするほどよいと思われるが、すみ肉角度を大きくする事は溶着金属量が急増するため実用的でない。そこで次に実用上最も効率のよい、すなわち溶着金属量を一定にして最大強さを得るすみ肉形状を得るため、溶着金属一定ですみ肉角度を変化させた試験片についての実験結果を図19に示す。図より降伏、最大荷重ともにすみ肉角度 θ_f が $55 \sim 65^\circ$ ぐらいが最も効率が良いことが明らかで、なおすみ肉継手の強度におよぼす脚長、とけ込み量の影響については文献10を参照されたい。

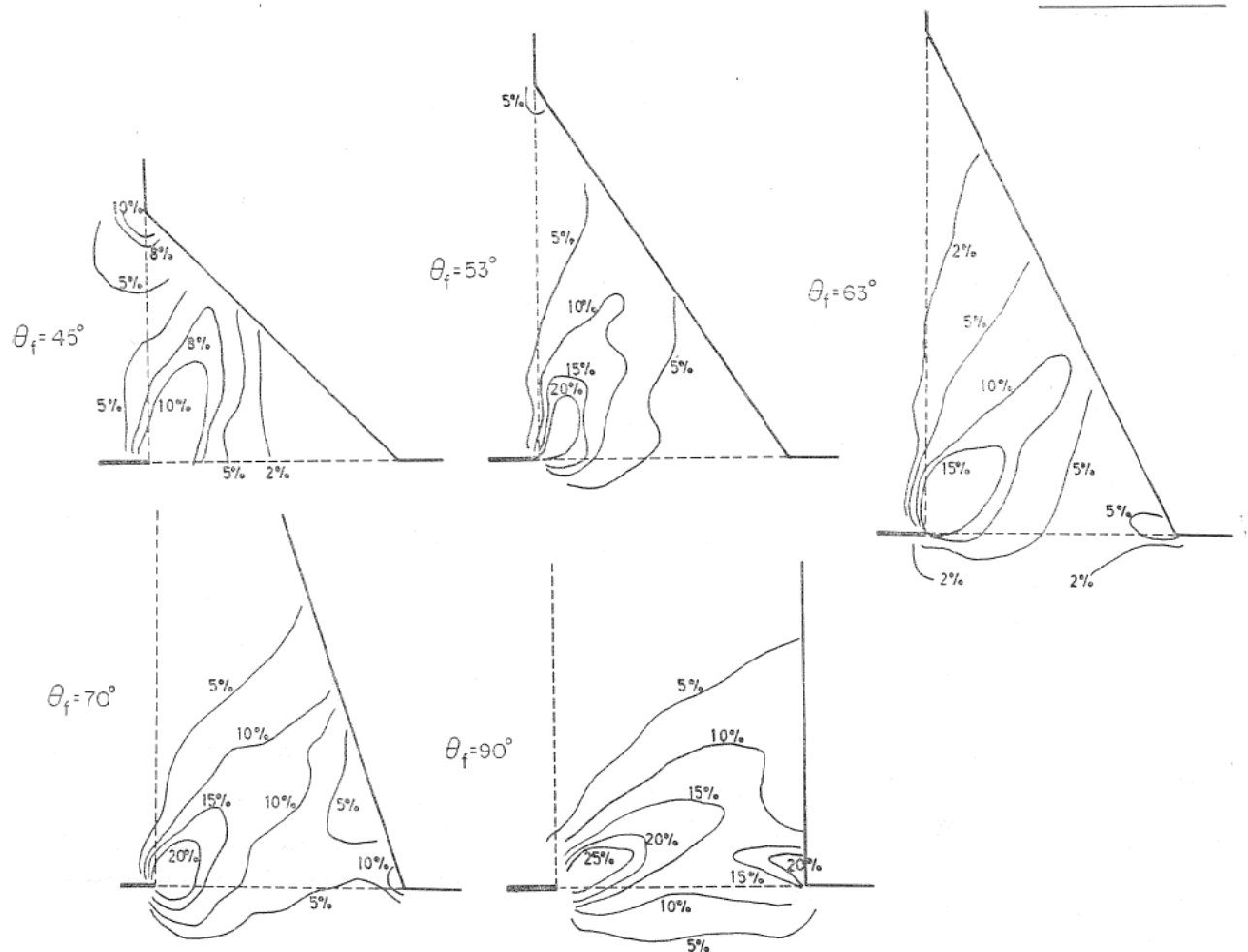


図18 最大荷重時における溶接部の歪分布（荷重方向）におよぼすすみ肉角度の影響

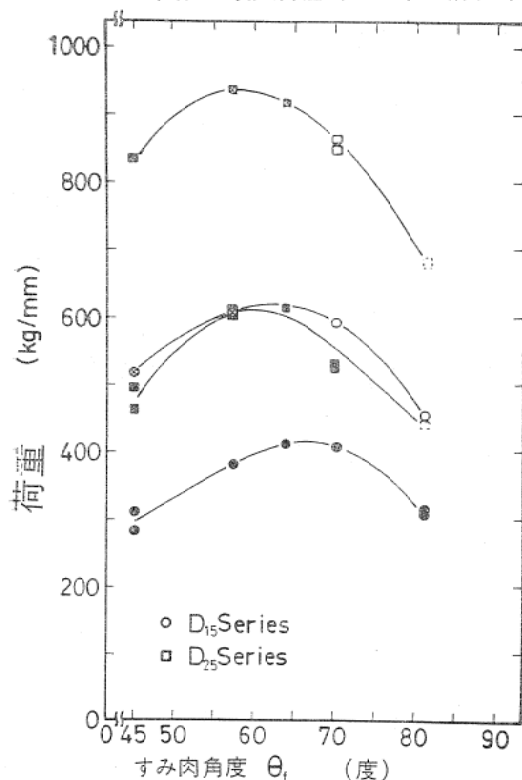


図19 すみ肉継手強度におよぼすすみ肉角度の影響（溶着金属量一定の場合）

5. あとがき

以上モアレ法による歪測定の実理と、これを簡便に使用出来る筆者らが考案したうつし絵方式について紹介し、その応用例についても述べたが、最近わが国における材料専門家からもモアレ法を利用した研究報告が出されるようになって来た。モアレ法の実理は本報告での述べたような平面歪の問題以外にたわみ変形の問題や長さ測定等の種々の利用法があり、現在各分野で盛んに使われるようになって来た。高温あるいは低温における金属材料の歪分布なども試みられている。モアレ法は大きな利点を有するだけに今後現在使われている電気抵抗線歪計とともに歪測定の大きな分野を占めるものと考えられる。

参考文献

- 1) A. Vinckier and R. Dechaene; "Use of the Moiré Effect to Measure Plastic Strains", Trans. ASME June (1966)
- 2) 清水; "モアレ法によるひずみ測定" 非破壊検査15 (1966)
- 3) 成岡, 川本; "モアレ法による模型解析の最近のう勢" 機械学会誌, 第68巻 (1965)

以下17頁に続く