

レーザーシュリーレン法による 鋼構造部材の降伏域の可視化

VISUALIZATION OF YIELDED ZONES IN STEEL MEMBERS
BY LASER SCHLIEREN METHOD

崎元達郎* 平井一男* 宮崎靖男** 山尾敏孝***

By Tatsuro SAKIMOTO, Itio HIRAI, Yasuo MIYAZAKI and Toshitaka YAMAO

Since efficient computer programs have been developed, it is not difficult to compute and display the yield zones or plastic zones of structural members, if you do not doubt the validity of the assumptions on yielding or plasticity used in the theory. But, if you want to examine the validity of the computer results on the yielded zones experimentally, you will find no efficient experimental method. The Schlieren method, which is a method to make Lüders' lines visible by optical equipments, is one of the promising methods. Herein, the Schlieren method is improved by using a He-Ne laser beam instead of a usual lamp as a source of light. By the improved Schlieren method, Lüders' lines on various specimens are photographed and videotaped. The test results are compared with the results of finite element analysis and validity and problems of the analysis are discussed.

1. まえがき

構造物の終局限界状態や使用限界状態を基準にして構造物の設計を行なおうとする限界状態設計法の採用が世界的趨勢であるが、設計法の確立のためには、構造物の終局強度や耐荷力を知ることが重要である。構造物の終局強度を知るためには、その弾塑性域や破壊域における挙動を明らかにすることが必要となる。ところで、大型コンピュータと有限要素法等の数値解法の発達により構造物の弾塑性挙動が一応解析できるようになったと考えられているが、これらの理論解は、なんらかの仮定の上に成り立っており、最終的には、実験での現象の確認が必要とされる。特に塑性現象の取り扱いにおいては、降伏条件、応力-ひずみ関係、曲げひずみの平面保持等が仮定されており、解析結果が降伏域の進展等の現象をうまく説明し得ているかを実験的に確認する必要がある。

実験において降伏または塑性を確認する手段としては、まず抵抗線ひずみゲージが考えられるが、離散的にしか接着し得ないひずみゲージでは、その供試体全体の降伏域の進展状況、分布状況を知ろうとする時無力に近い。その他、一定限以上のひずみが生じると亀裂が入る応力塗料による塑性域の可視化の試みや、化学的処理によるフリーの方法、加熱して酸化皮膜を生じさせる方法、物体の表面に皮膜を接着して、光弾性によりひずみを測定する光弾性皮膜法等が試みられている¹⁾。これらの方法は、温度、湿度等の環境条件や

* 工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科 (860 熊本市黒髪2丁目39-1)

** 文部技官 熊本大学工学部土木環境工学科 (860 熊本市黒髪2丁目39-1)

*** 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 (860 熊本市黒髪2丁目39-1)

薬品処理技術に依存する、間接測定である、なんらかの計算を必要とする、载荷中の計測ができない、動的変化が計測できない、等のいずれかの欠点を有している。

降伏現象は、金属学的には、構成原子の転位またはすべりとして説明されており、金属の表面を鏡面の様に研磨した後負荷すると金属の原子間にすべりを生じ、その形跡が光の乱反射による模様（リュウダース線模様、Lüders' lines, Flow figures）としてその表面に観察できることは古くから知られている。この模様は、肉眼でも見る角度によっては見失う程度のコントラストしか無く、通常の写真機による直接撮影はハレーションなどのために困難である。

Nadai²⁾は、シュリーレン法という光学的方法でリュウダース線模様の像をつくり、写真画像を作成することに成功している。著者らは、種々の試みの後、シュリーレン法の光源にレーザーを用いると同時に、最近の画像機器を応用して、静止固定画像及び動画像を撮影する方法を開発した。本法の特長は、次の様にまとめることができる。

- i) 温度、湿度等の環境条件や薬品処理技術に左右されず、誰が、いつ、どこで、行なっても安定した結果が得られ再現性がある。
- ii) 薬品、皮膜、ゲージ等を介在させる間接的測定でなく、降伏域と考えられるリュウダース線模様を直接撮影することができるので正確、確実である。
- iii) したがって、計算などは必要とせず、すぐその場でリアルタイムの結果が得られる。
- iv) 試験片をとりはずすことなく载荷状態で撮影が可能であり、連続的な動的変化を記録することができる。

本報告では、まず開発したシステムの概要、実験方法を述べる。次に得られたリュウダース線模様の画像と、並行して行なった有限要素法による弾塑性解析結果とを比較し、理論解析法の妥当性と問題点を議論し、降伏及び塑性現象の本質の一端を明らかにした。検討に用いた供試体は、引張試験片（有孔、V ノッチ付き、スリット付き）、長方形断面はり、隅角部の曲率半径を変化させた L 型鋼板の引張及び圧縮供試体である。特に、まだあまり明らかにされていない応力集中による降伏域の進展状況を可視化することを主眼とし、本システムの有用性を示す例題としてこれらの供試体を選んだ。

2. 撮影法の原理と実験手順

図-1a に実験装置の模式図を、図-1b に実験装置の写真を示している。撮影法の原理と実験手順は以下のようである。

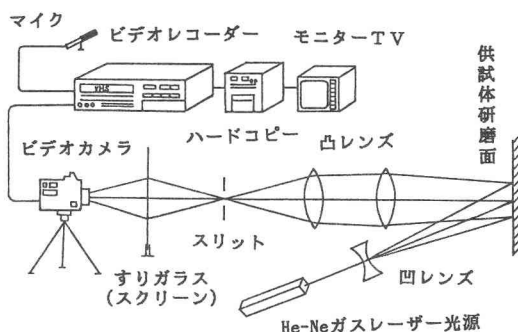


図-1a 実験装置の模式図

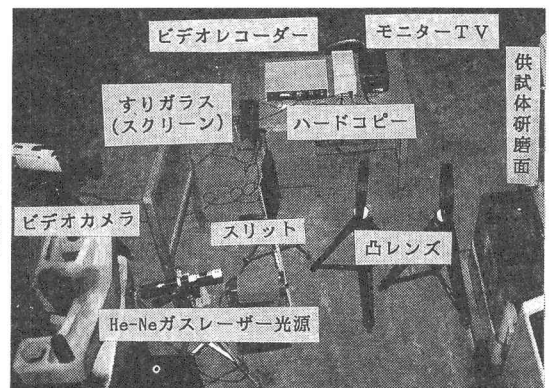


図-1b 実験装置の全景写真

- 1) まず負荷前に供試体の観察する部分をエメリー研磨紙により研磨し鏡面のように仕上げる。
具体的には、供試体上に水を流しながら木片に巻き付けたエメリー紙を押しあてて往復運動させむらなく研磨する。機械仕上げ後の供試体ならcc600番程度より順次目を細かくしてcc1200番程度で仕上げる。cc800番程度でも十分であるが細かいもので仕上げるほうが像はより鮮明になる。
- 2) 次に、供試体を加力のための試験機などにセットし、レーザー光を当てる。このとき、撮影領域を十分な明度で照射できる程度に凹レンズで光束を広げる。本研究で使用したレーザー光源は、5mW の He-Ne ガスレーザー発生器であるが、直径約 20 cm の円の領域が撮影可能な明るさで照射できる。レーザーの出力が大きいほど広い領域を高い明度で照射できるので、その点を考慮して、レーザー発生器の出力を決めれば良い。当然ながら出力が大きくなるほど装置は高価になる。
- 3) 研磨面で反射された光を 2 枚の凸レンズで集光する。この時、リュウダース線模様の部分は、原子間のすべりにより表面が荒くなっているので、この部分に照射された光は乱反射する。撮影可能な領域は、集光のために使用する凸レンズの口径の大きさにも依存する。本研究では、光弾性に用いられる有効直径 29 cm、焦点距離 80 cm のもの 2 枚を用いた。2 枚用いたのは、焦点距離を短くするためで、光路距離が長く取れる場合は、1 枚でも良い。
- 4) 光束が最も細くなった点にスリットを置き、リュウダース線模様で乱反射した光を遮断し正反射した光のみを通過させる。本実験では矩形のスリットとし、上下および左右の板をスライドさせてスリット孔の大きさを調節できる構造のものを試作して使用した。
- 5) すりガラス製のスクリーン上に像を結ばせる。乱反射した光はスリットで遮られるので、リュウダース線模様の部分は暗くその他の部分は明るく写る。スクリーンは透過性のものなら材質を問わないが、画像の質を高めるためにはきめ細かな表面を有するものが望ましい。
- 6) 供試体に対して反対側からビデオカメラで透過性スクリーン上の像を撮影しビデオテープに収録する。カメラを光軸上に置き透過した光を直接撮影することが重要で、このようにすると周囲を暗くする必要がなく昼光下での撮影が可能となる。
- 7) ビデオ画像は、実験中も実験後も随時ブラウン管でモニターでき、必要に応じて、ハードコピー（白黒 64 階調）を取ることができる。

3. 実験供試体

供試体は、引張供試体、曲げ供試体、隅角部供試体の三つのグループよりなる。それぞれの供試体の寸法を図-2、3、4に示す。引張供試体は、幅 60mm 板厚 8.75mm の JIS 1 号試験片を加工したもので、中央に直径 10mm の孔を有するもの（有孔引張供試体）、中央部両側に開角 90° 深さ 5mm の V ノッチを有するもの（切欠き付引張供試体）、中央部両側に幅 1mm 深さ 5mm の長方形スリットを有するもの（スリット付引張供試体）の 3 種類である。曲げ供試体は、幅 8.85mm 高さ 50mm の長方形断面で、中央 1 点集中荷重の場合と中央 2 点集中荷重の場合を考えた。隅角部供試体は、幅 50mm 厚さ 8.80mm の L 形の板で、隅角部の R 部の曲率半径が、0mm、5mm、25mm、50mm のもの及び 45° 方向の直線ハンチを有するものの 5 種類をおのの 2 体作成し、それぞれを圧縮と引張の 2 種の荷重条件で実験を行なった。図-4 に示すのは引張荷重用の隅角部供試体で、圧縮荷重用は、両端の孔の位置を荷重作用点为中心軸線上に来るように変えたもので、他の寸法は引張荷重用と同じである。供試体名は、最初の文字で圧縮 (C) か引張 (T) かを表わし、次ぎに曲率半径の大きさなどを示すこととし、CR0、TR0、CR5、TR5、CR25、TR25、CR50、TR50、CH、TH とした。

材質は、すべて SS41 鋼で、リュウダース線模様が顕著に現われる材料であることをあらかじめ確認して用いた。引張試験の結果得られた応力-ひずみ曲線を図-5 に破線で示す。

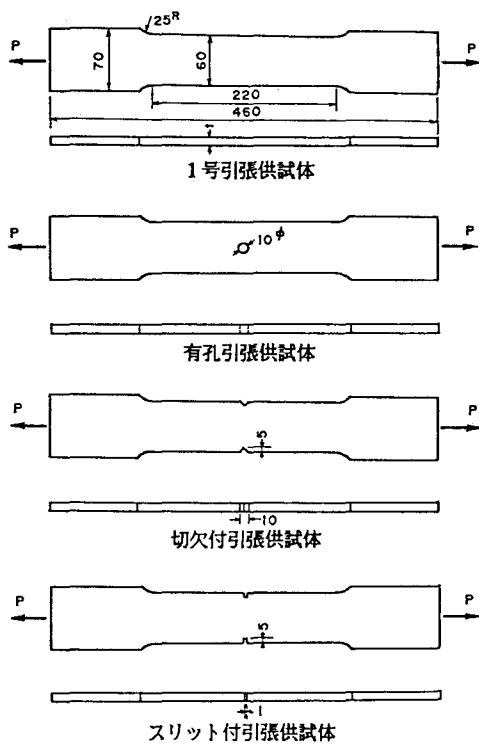


図-2 引張供試体の寸法図

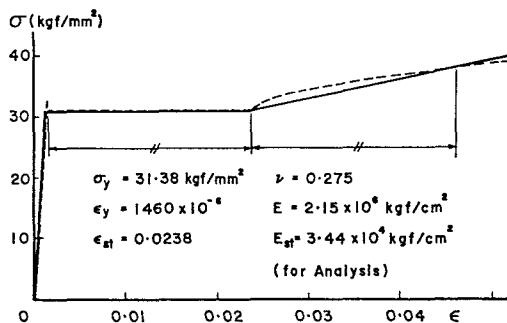


図-5 引張試験による応力-ひずみ関係（破線）と解析に用いたTri-linear型の応力-ひずみ関係（実線）

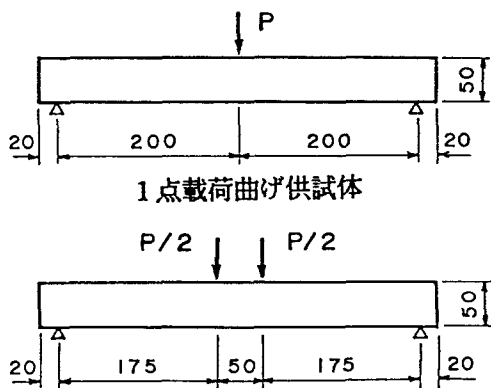


図-3 曲げ供試体の寸法図

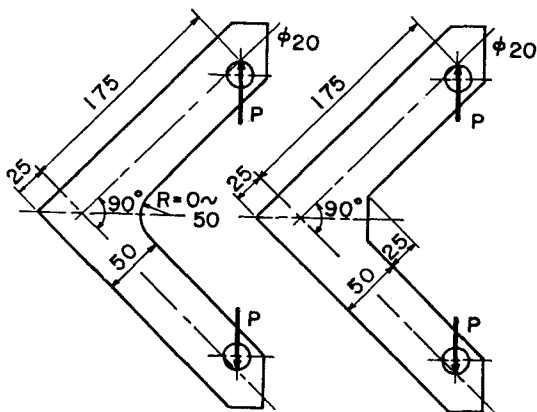


図-4 隅角部供試体の寸法図

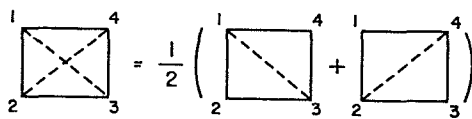


図-6 4個のひずみ一定三角形要素の平均による剛性の評価

4. 数値解析法

有限要素法³⁾により降伏域の進展状況を数値解析し、実験で得られるリュース線模様と比較検討した。応力-ひずみ関係は、図-5に示すように引張試験から得られた関係（図中破線）をTri-linear 関係に近似したもの（図中実線）を用いた。降伏は次式で表わされるvon Mises の降伏条件で判定した。

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2 = \sigma_0^2$$

数値モデルの分割要素は、図-6に示すような三角形のひずみ一定要素の組み合わせからなる四辺形要素を単位と考える。三角形毎に降伏を判定し、三角形123と三角形341および三角形234と三角形412の平均値とし

て四角形1234の剛性を評価した。二軸対称である引張供試体はその1/4を解析し、一軸対称である曲げ供試体と隅角部供試体は、その1/2を解析した。後に示す解析による降伏域の図は、引張供試体と曲げ供試体については、4個の三角形がすべて降伏した時に四角形単位に黒く塗り、隅角部供試体については、三角形ひとつひとつを黒く塗り降伏域を表示した。

5. 引張供試体の結果

1) 抵抗線ひずみゲージによる測定結果

軟鋼の引張試験片に抵抗線ひずみゲージを接着して、応力-ひずみ関係を描くと、図-5中の破線のような線図が得られる。金属の降伏現象は、金属学的には、原子の転位（すべり）に起因する事は先に述べた。ひずみは、二点間の距離の変化率であるが、二点間の距離を原子の寸法のオーダーに考えれば、その二点間の原子がすべり（転位）を生じた時に、すべる前のひずみ値 ϵ_1 からすべった後のひずみ値 ϵ_2 まで瞬間的に変化する（Dynamic jump）と考えるべきであろう。すなわち、二点間の距離が原子の寸法のオーダーであれば、 ϵ_1 から ϵ_2 の間の値は、静止したひずみ値としては存在しないことになる。ところで、ひずみの測定に用いる抵抗線ひずみゲージの接着面積は、小さくとも数 mm^2 のオーダーであり、これにより測定されるひずみは、接着された領域の平均ひずみと考えられる。したがって、ゲージ領域の一部ですべりが生じたとしても、 ϵ_1 と ϵ_2 の間の値が、ある点のひずみとして存在するがごとく測定される。軟鋼の応力-ひずみ関係の ϵ_y から ϵ_{st} の間の平坦部はこのように測定された平均的ひずみと考えられる。これらの応力-ひずみ関係を用いて、通常の構造物の強度解析を行なう場合は、この点を問題にする必要はないと考えられるが、応力集中などゲージ領域に対して比較的小さな領域を問題にする場合、この事実を想起する必要がある。

さて、リュウダース線の模式図は図-7のようになるが、マクロなひずみ測定の観点で疑問になるのは、すべりが発生する時のひずみ ϵ_1 は ϵ_y と考えて良いか、リュウダース線の内部のひずみはいくらか、 $\epsilon_2 = \epsilon_{st}$ と考えて良いか、リュウダース線の内部のみを降伏域と考えて良いか、といった点である。そこで、以上の点を明らかにすべくリュウダース線模様を撮影する面の裏面にゲージを接着し、載荷後リュウダース線が貫通したひずみゲージを選び出し、その時のひずみ値 ϵ_1 、除荷時のひずみ値 ϵ_0 そしてゲージを横切っているリュウダース線の平均幅 r とゲージの方向となす角 θ を測定した（図-8）。リュウダース線の幅は、コンパレーター（最小読み0.01mm）により測定した。

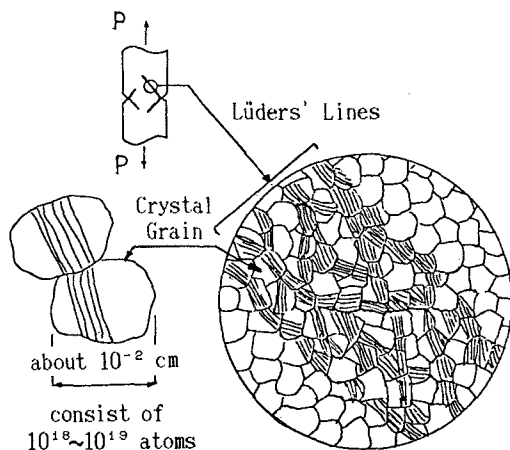


図-7 リュウダース線の模式図

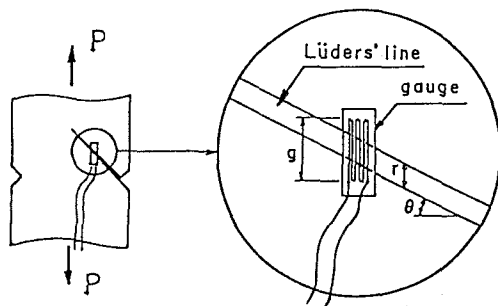


図-8 リュウダース線の幅 r とゲージの方向となす角 θ

今リューダース線内のひずみの平均値とそれ以外の部分のひずみの平均値を考え、載荷時のそれぞれを ϵ_r 、 ϵ_o とする。さらに、ゲージ領域内に異なったひずみ値の領域が混在する時のひずみの測定値は、各部分領域の面積（長さ）に按分比例すると考えると、ゲージ長を g として次の関係が成り立つ。

$$\epsilon_r \cdot r/g + \epsilon_o \cdot (g-r)/g = \epsilon_s$$

ここで、リューダース線内のひずみは、除荷後 $\epsilon_y (= 0.001382)$ だけ回復するが、リューダース線以外の部分は、弾性で除荷後ひずみが0となるという仮定のもとでデータを整理してみると、除荷後のひずみの値が ϵ_o と測定されたのだから上式において $\epsilon_o=0$ として、

$$(\epsilon_r - \epsilon_y) \cdot r/g = \epsilon_o$$

すなわち

$$\epsilon_r = \epsilon_o \cdot g/r + \epsilon_y$$

となる。使用したゲージのゲージ長は $g=30\text{mm}$ であるから、 r と ϵ_o を測定して ϵ_r を求めると、表-1に示すように、 $\epsilon_r = 0.72 \epsilon_{st}$ の関係をj得る。このことは、ゲージの抵抗線の部分のすべてがリューダース線内に含まれた時のひずみを測定してみるとやはり ϵ_{st} の70%程度になる事実と一致する。以上の検討結果とひずみ測定により確認されたその他の事実を総合すると次のように考えられる。

- i) その点の計算上のひずみ値（応力値）が降伏値に達していても、リューダース線がゲージの抵抗線部を横切らないかぎり測定ひずみ値は降伏ひずみを超えない。
- ii) リューダース線がゲージの抵抗線部を横切った瞬間、ひずみは降伏ひずみ値を超える。即ち、リューダース線の部分のみが降伏域（後述するように塑性域はこれより若干広い）であることが確認された。
- iii) リューダース線内の平均ひずみは、発生当初ひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st} の70%程度以上で、ひずみが進行してあらゆる方向の転位が完了して後 ϵ_{st} に近づくと考えられる。
- iv) リューダース線の領域内では、弾性境界との遷移領域（Plastic front）も存在すると考えられ、領域内で一樣なひずみ状態と限らない。
- v) リューダース線がゲージの抵抗線を横切らない（ひずみ値は降伏ひずみ値以下の）場合でもゲージがリューダース線近くにある場合は、影響を受けて除荷後もひずみが残留し塑性的挙動をする。塑性域は、リューダース線領域とその拘束の影響を受ける周辺領域を加えた領域とを考えられるが、一義的にはリューダース線の部分を塑性域と考えて良い。

表-1 リューダース線が横切ったゲージのひずみ ϵ_o （測定値）とリューダース線内のひずみ値 ϵ_r （計算値）

Cases	Specimen	$\theta(\text{deg.})$	$r(\text{mm})$	$\epsilon_s \times 10^6$	$\epsilon_r \times 10^6$	ϵ_r/ϵ_{st}
1	with notch	38.6	8.2	4659	18427	0.78
2	“	35.8	10.98	6574	19344	0.81
3	with slit	38.3	2.68	1240	15262	0.64
4	“	44.6	1.88	3744	15405	0.65
		37.2	6.13			
5	“	44.1	2.17	8038	17278	0.73
		40.0	13.10			
					Average	0.72

$$\epsilon_r = \epsilon_o \cdot g/r + \epsilon_y, \quad g = 30 (\text{mm})$$

$$\epsilon_{st} = 0.02376, \quad \epsilon_y = 0.001382$$

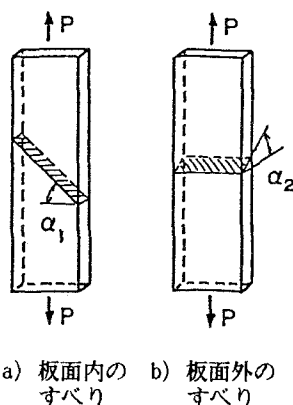
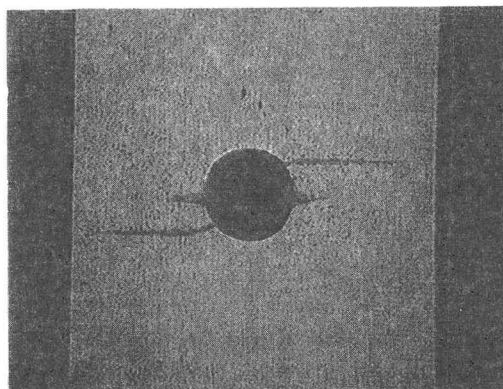
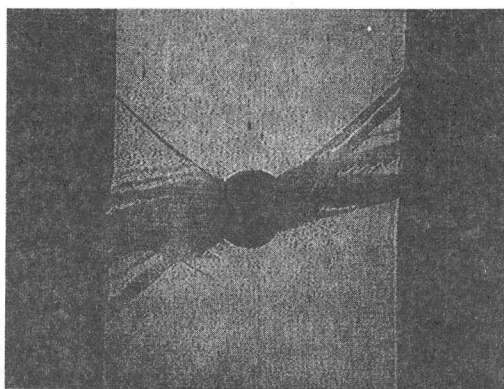
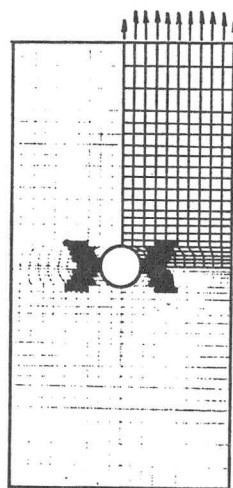


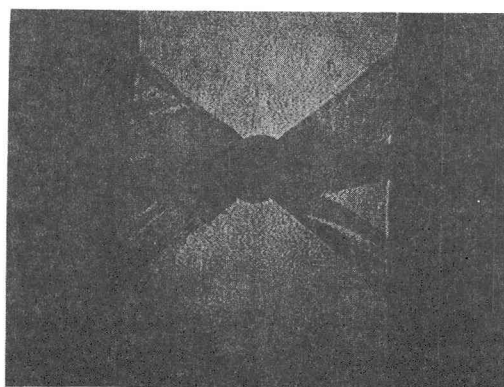
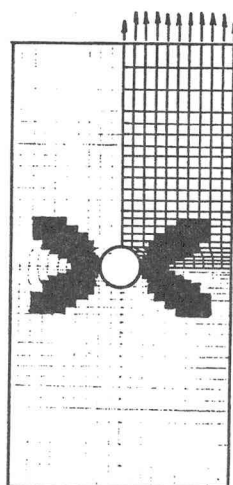
図-9 板面内のすべりと板面外のすべり



a) $P=13.4 \text{ ton} \cdot f$



b) $P=14.2 \text{ ton} \cdot f$



c) $P=14.6 \text{ ton} \cdot f$

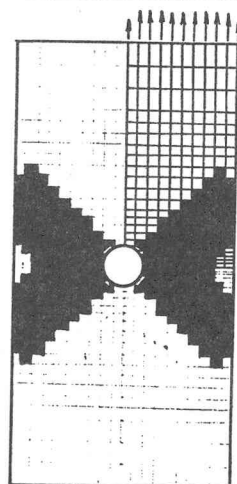


図-10 有孔引張供試体のリュウダース線写真と解析による降伏域

2) 板面内のすべりと板面外のすべり

通常の引張試験を行なうと引張りの軸方向と約45°の方向をなす主せん断応力度の方向にすべりを生じるとされている(図-9a)。これは、板厚方向の影響がない二次元的な場合である。実際の供試体は板厚方向も含め三次元的物体であるから、板厚方向にも主せん断面を有する。切欠きを有する板や有孔板の場合は、これらの欠陥を含む断面の面積が小さく応力度が大きい上に、形状による応力集中が加わるため図-9bに示す様に板厚方向でのすべりが先に生じる。このことは、実験前に気づかず、後に示すこの実験により初めて確認された。ここでは、前者(図-9a)を板面内のすべり、後者(図-9b)を板面外のすべりとよぶ。

ここで用いた解析は二次元のひずみ一定要素による取り扱いであるから、板面内のすべりによる降伏しか解析され得ない。したがって、実験結果と解析結果の比較には上記の点に起因する差が生じるが、これは解析法の不十分さによるもので、両者をより完全に比較可能にするためには、三次元立体要素を用いた解析を行なう必要が有る。

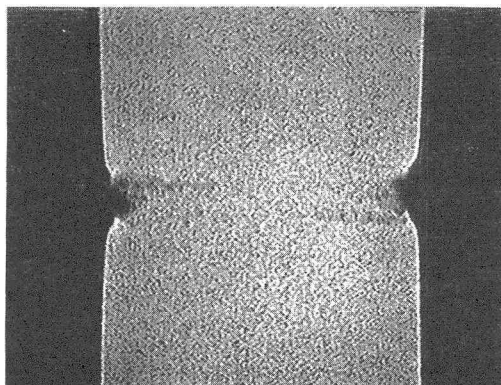
3) 有孔引張供試体(図-10)

応力集中係数を3.0とした単純計算では、降伏開始荷重は $b \cdot t \cdot \sigma_y / 3 = (6-1) \times 0.875 \times 3.138 / 3 = 4.58 \text{ t}$ となるが、実験及び解析では、9tで降伏が確認される。降伏の開始位置は、円孔の内側左右縁の応力集中部である。その後、実験では $P=12.6\text{t}$ で円孔左下及び右上より新たなすべり線が発生し $P=13.8\text{t}$ までの間に幅方向両縁へ水平に広がる(図-10a)。これは、先に述べた板面外へのすべり($\alpha_s \approx 37^\circ$)が生じた結果、そのすべり面の切り口が表面に現われたものであり、平面応力解析では得られない。解析では、この間、主応力方向と考えられる軸と $\alpha_1 \approx 35^\circ$ の4方向に降伏域が進展する。実験では、面外のすべり面がある程度幅を増した後、 $P=14.0\text{t}$ で孔の左上 $\alpha_1 \approx 35^\circ$ 方向にすべり線が発生し、幅方向に進展し $P=14.4\text{t}$ までの間に $\alpha_1 \approx 35^\circ$ の4方向とそれらに囲まれる部分が急激に降伏する(図-10b)。実験では、 35° の4方向で囲まれる領域も、孔の縁より発生する放射状の降伏線として降伏域が広がるが、解析では、 $\alpha_1 = 35^\circ$ 方向の四つの降伏線が太くなるようにして降伏域が広がっている。また、当然ながら、現象は必ずしも対称に生じないので、対称性を仮定した解析結果とはこの点で一致しない。 $P=14.4\text{t}$ で解析の $\alpha_1 = 35^\circ$ 方向の降伏域も両縁に達し、 $P=14.6\text{t}$ 以降では、実験と解析結果の降伏域は、非常に良く一致したバタフライ(蝶)の形状を示す(図-10c)。

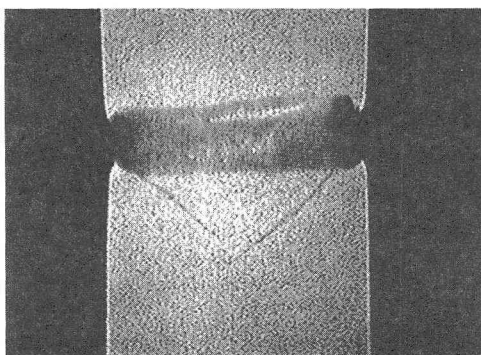
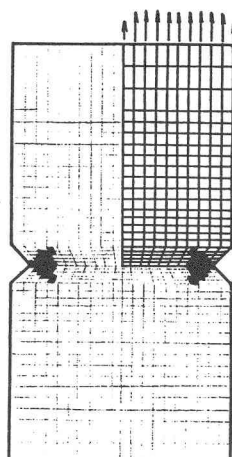
4) 切欠き付引張供試体(図-11)

実験、解析とも $P=10.0\text{t}$ でノッチの先端の応力集中部分に降伏が確認される。実験では、 $P=13.0\text{t}$ から左ノッチの上部、右ノッチの下部より降伏線が発生し、 $P=14.2\text{t}$ までの間に二本の水平な降伏線が幅方向に貫通する(図-11a)。これも先に述べた板面外へのすべり面が板表面に現われたものであり、平面応力解析では解析できない。この二本の降伏線の幅が広がった後、 $P=14.4\text{t}$ で左側ノッチの下側より右下へ向けて約45°方向に降伏線が伸び、 $P=14.6\text{t}$ では右から左下に向けて降伏線が進展する(図-11b)。 $P=15.2\text{t}$ までには、右ノッチから左上及び左下へ進展した降伏線が板幅方向に貫通する。左ノッチからの降伏線は、板幅中央で右ノッチから進展した降伏線に行手をはばまれそれ以上進展しない(図-11c)。これは、原子のすべり(転位)の機構に関係する現象と思われるが、ここで行なった程度の解析では説明され得ない。解析の方は、両側のノッチ先端より上下約40°方向に計4本の降伏線が進展し、 $P=15.0\text{t}$ で左右から進展した降伏線が閉合する(図-11c)。この形状は、実験結果と良く一致しているが、実験と異なってこれ以上40°方向の降伏線は、板幅方向には進展せず $P=15.6\text{t}$ まで全体が太くなるように広がる。実験の方は、 $P=15.2\text{t}$ 以降降伏線の幅が広がり線状のものが帯状、面状になり最終的には、エンジェルフィッシュ形の非対称な降伏線となる。もちろん対称性を仮定している解析では、この非対称性は、解析されないし、最終の降伏域形状は、有孔板の結果ほどよく一致したものにはなっていない。

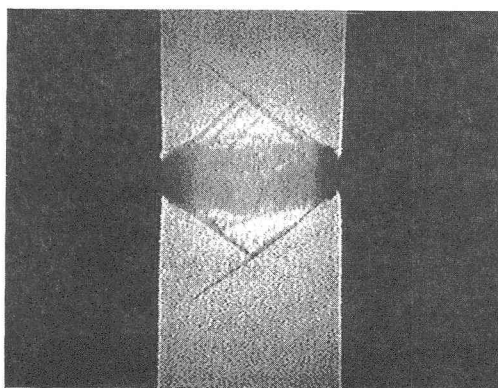
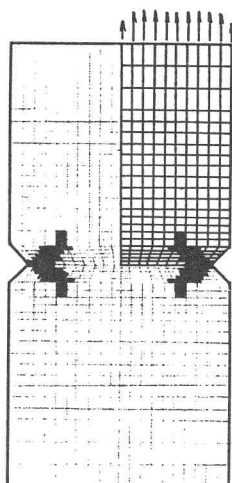
スリット付引張供試体もほぼ同様の経過をたどるので写真と考察は省略する。



a) $P=13.8 \text{ ton} \cdot f$



b) $P=14.6 \text{ ton} \cdot f$



c) $P=15.0 \text{ ton} \cdot f$

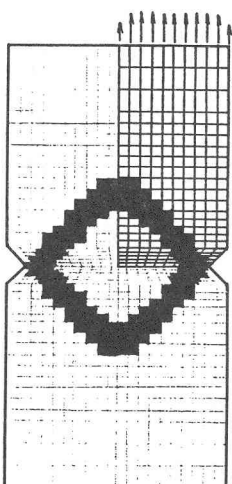


図-11 切欠き付引張供試体のリュウダース線写真と解析による降伏域

6. 曲げ供試体の結果

1) 一点載荷曲げ供試体 (図-12a)

単純はり理論による降伏荷重は、 $P=1.16t$ であるが、実験及び解析では $P=1.2t$ で降伏域が確認される。降伏は荷重直下の圧縮域で開始するが、引張降伏は、 $P=1.4t$ までは現われない。 $P=1.5t$ で実験、解析とも引張降伏が現われ長手方向に広がる。 $P=1.6t$ 以後では、実験、解析とも降伏域は長手方向と深さ方向に進展していく。実験では、上側圧縮部は点荷重による応力集中の影響も有って、あまり長手方向に広がらず、数本の楔状の降伏域が中立軸方向に瞬間的に進展する。したがって、降伏域の長手方向の分布長さは解析結果と対応しない。降伏域のはりの高さ方向への進展の程度は、全般に実験の方が大きく解析結果は控え目に評価する。両者の間で明らかに異なる点は、現象(実験)の降伏域が線状で長手方向に不連続で有り、荷重と共に太くはなっていくが、必ずしも解析のように連続的な面積領域として降伏域が拡大しない点である(図-12a)。しかし、実験においてリュウダース線の先端を結ぶ包絡線内を塑性域と考えることにすれば、最終状態に近い荷重について見れば両者は良く一致した対応を示しているといえる。さらに、当然のことではあるが、現象においても、解析においても、中立軸の位置では降伏は生じず、したがって、塑性ヒンジというのは、あくまで全体挙動の解析のための理論上のモデルにすぎないことが、視覚的に確認される。

2) 二点載荷曲げ供試体 (図-12b)

単純はり理論による降伏荷重は、 $P=1.32t$ であるが、実験及び解析では、 $P=1.4t$ 以降で降伏が確認される。他の経過は一点載荷の場合に類似している。 $P=1.6$ Py の状況を図-12b に示す。

7. 隅角部供試体の結果

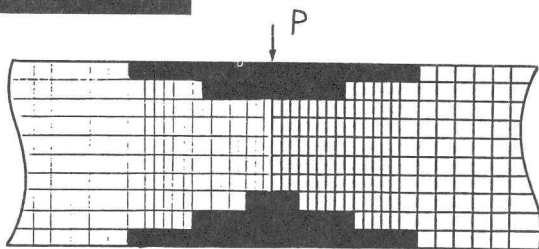
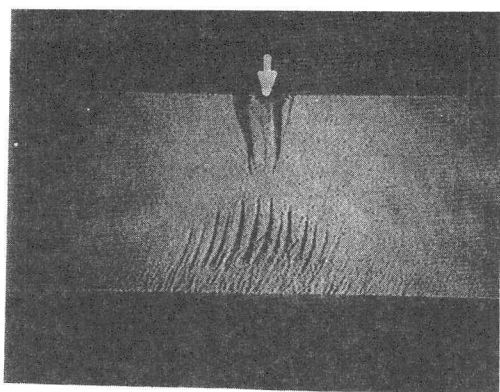
1) TRO 及び CRO 供試体 (R部 曲率半径 $R=0$ mm) (図-13)

解析では、 $P=500$ kgf 以下で、実験では $P=600$ kgf 前後で、隅角部内側の応力集中部から降伏が開始する。その後解析では、連続的領域として降伏域が拡大するが、実験では、隅角部の両側に針状のリュウダース線が不連続に生じる。実験では、 $P=1270$ kgf で外側にもリュウダース線が発生するが、解析でもほぼ同じ荷重で降伏域が計算されている。この分布状態を見ると、実験では、針状のリュウダース線が中立軸方向に向かって不連続に数本発生するが、解析の降伏域は、長手方向に広く分布する(図-13b)。 $P=1485$ kgf 以降は、実験では、隅角部四辺形の中央部にもリュウダース線がおよぶが、解析では、この領域に降伏域は現われない(図-13c)。また、引張供試体(TRO)と圧縮供試体(CRO)は、ほぼ同じ降伏性状を示す。

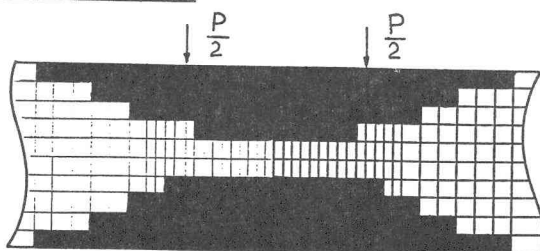
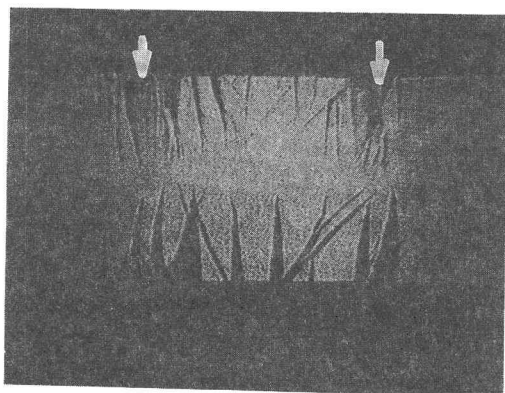
2) TR25, CR25 供試体 (R部 曲率半径 $R=25$ mm) (図-14)

解析では、引張、圧縮とも $P=900$ kgf でR部内縁の広い範囲にわたって降伏が開始するが、実験では少し遅れて $P=1100$ kgf (TR25), $P=970$ kgf (CR25) で降伏が開始する。しかも、実験の降伏域(リュウダース線)は針状に数本生じるのみである(図-14a)。供試体外側の降伏は、実験、解析とも $P=1500$ kgf 程度で生じる。解析結果の内側の降伏域は、R0, R5 供試体と異なり、上下対称線上では発達しない二山の形状を示している(図-14b)。これは、応力集中効果より曲げに対する断面係数の増大による縁応力度の低減効果がまさったためと考えられる。実験の降伏域は、不連続なため荷重の小さい間はこのことは確認できないが、最終荷重($P=1880$ kgf 以降)になりリュウダース線が密になるとこの様子が確認できる(図-14c)。このように R25 の場合は、R部の応力集中は緩和され、両側平行部付け根近辺での曲げの様相が強くなっている。

直線ハンチ付き供試体もハンチ角部より降伏が開始する以外TR25, CR25 とほぼ同様の様相を呈する。

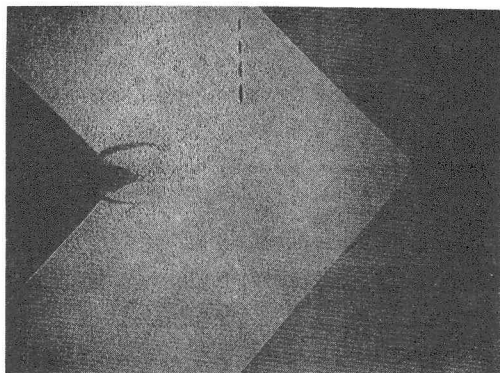


a) 一点載荷 $P=1.75 \text{ ton} \cdot \text{f}$

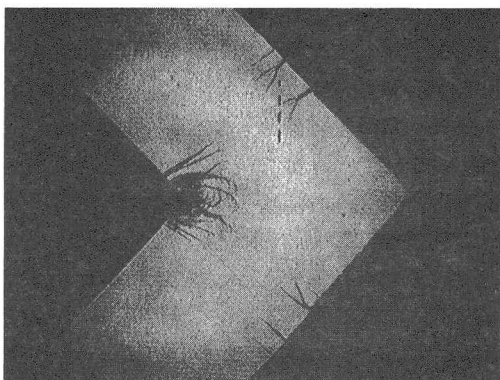
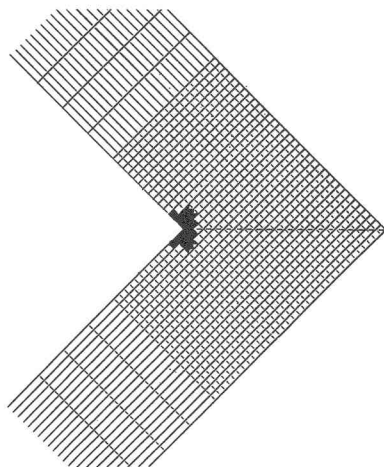


b) 二点載荷 $P=2.1 \text{ ton} \cdot \text{f}$

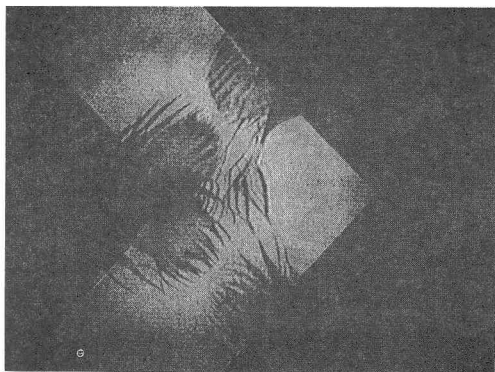
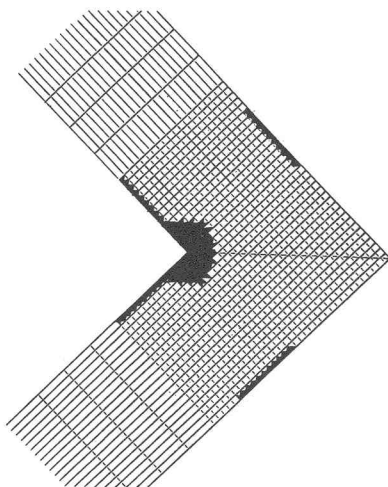
図-12 曲げ供試体のリュウダース線写真と解析による降伏域



a) $P=1061 \text{ kgf}$



b) $P=1345 \text{ kgf}$



c) $P=1626 \text{ kgf}$

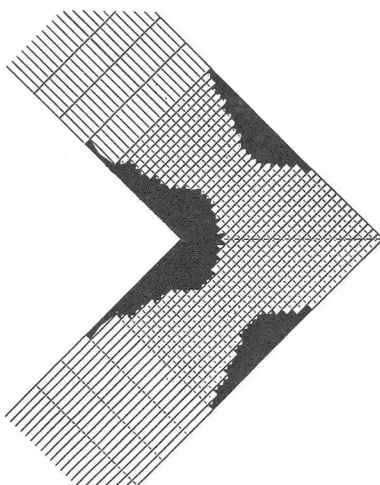
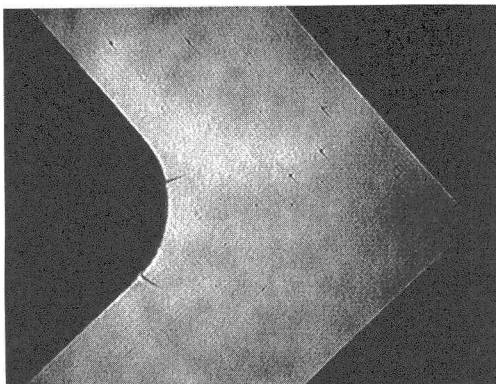
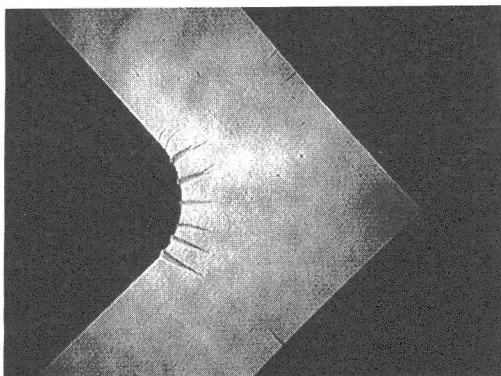
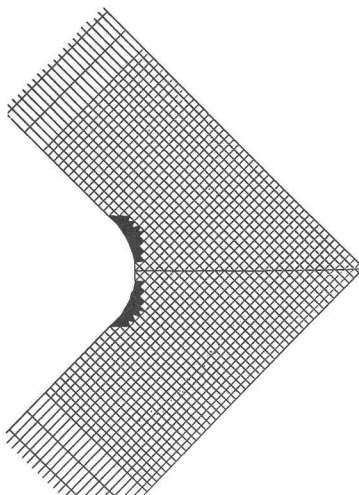


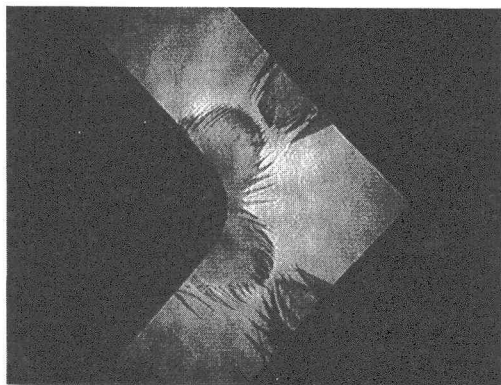
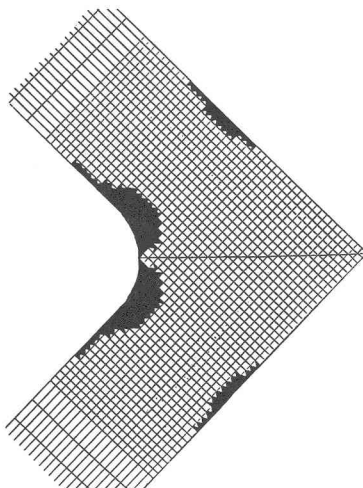
図-13 隅角部供試体(TRO)のリュウダース線写真と解析による降伏域



a) $P=1200 \text{ kgf}$



b) $P=1600 \text{ kgf}$



c) $P=2120 \text{ kgf}$

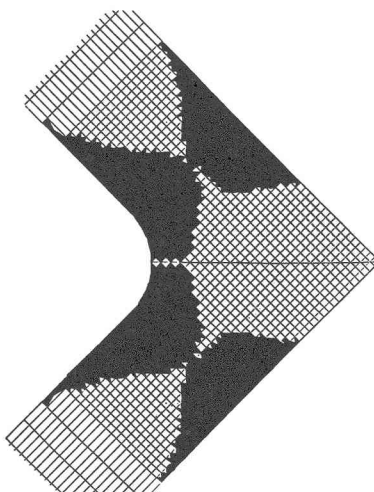


図-14 隅角部供試体(TR25)のリュウダース線写真と解析による降伏域

10. 結論

- 1) シュリーレン法の原理にレーザー光を用いることにより、原子の転位（すべり）の結果鋼材の表面に生じるリュウダース線模様を直接可視化し、固定画像及び動画像として記録するシステムを確立した。
- 2) 本システムは、鋼の表面研磨に手間がかかるが、薬品、皮膜、ゲージ等を用いず降伏域を直接撮影するものであり、温度、湿度等の環境条件や薬品処理技術に左右されぬ安定した再現性を有する、また、計算を必要としない、載荷しながら動的測定が可能である等他の既存の方法にない種々の特長を有する。
- 3) 鋼板で作成した応力集中を生じる種々の供試体について、本システムを用いて撮影したリュウダース線模様と平面応力有限要素弾塑性解析による降伏域（塑性域）の結果を対比し検討した。その結果、降伏開始当初の低い荷重では、リュウダース線の発生メカニズムに起因する不連続性と瞬間的にある長さに生じる性状のために実験における降伏域（リュウダース線模様）と連続体として取扱った解析結果の降伏域は、必ずしも一致しないことが分かった。しかし、荷重が大きくなりリュウダース線が密に生じた状態では、楔状のリュウダース線の包絡線の内側を塑性域と考えれば、解析による降伏域と比較的良く対応する。
- 4) 抵抗線ひずみゲージによるひずみの測定により、以下のことが明らかになった。リュウダース線内のみが降伏域であるが、リュウダース線内のひずみは一樣でなく、その領域の平均ひずみは、発生当初はひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st} の70 % 程度以上で、結晶粒子内の生じ得る種々の方向の転位が完了した後 ϵ_{st} に至ると考えられる。また、リュウダース線近傍のゲージのひずみ値が除荷後も残留することから、リュウダース線の近傍は、ひずみの拘束を受け塑性的挙動をすると考えられる。このことは3) で述べたリュウダース線の包絡線内の領域と解析による塑性域が比較的良く対応することとも符合する。
- 5) ひずみは2点間の距離の変化率で定義されるから、2点間距離を原子間距離程度のオーダーで考えた場合、軟鋼の降伏時のひずみは、降伏ひずみ ϵ_y からひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st} まで瞬間的に変化する。ひずみゲージにより測定されるひずみは、ひずみゲージの接着された領域の平均ひずみである。即ち、ゲージ領域の一部で転位（降伏）のような不連続現象が生じてても、平均化された連続量として測定されてしまう。したがって、応力集中問題等の様に、ひずみを考えている2点間距離の大きさが問題になる場合や、塑性ひずみの測定、解析、評価に際しては、降伏現象本来の不連続性に留意する必要がある。

謝辞

本研究は、昭和61,62年度の科学研究補助金（試験研究2）を受けた。研究に協力いただいた今井克彦氏（川鉄建材工業（株）技術研究所）と横大路桂吾氏（61年度卒業研究、現在五洋建設（株））、及び、数値解析に協力いただいたRicardo M. Pittella氏（62年度文部省国費研究生、ブラジル）に謝意を表します。数値計算には、九州大学大型計算機センターのFACOM M-382 および VP-100 を用いた。

参考文献

- 1) 宇佐美 勉、川本眺万、福本嘯士：光弾性皮膜法による鋼部材の弾塑性域の拡がりに関する研究、土木学会論文集、第152号、昭和43 年4月、pp.16-25.
- 2) Nadai, A.: Theory of Flow and Fracture of Solids, McGRAW-HILL BOOK CO., INC., 1950, p.275-296.
- 3) Yamao, T. and Sakimoto, T.: Nonlinear Analysis of Thin-Walled Structures by a Coupled Finite Element Method, Proc. of JSCE, No.374/I-6, Oct., 1986, pp.57-66.

(1988年10月12日 受付)