

# 軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

## 第2報 横孔を有する丸軸

機械工学科 伊 藤 實

### Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

#### No.2, Shafts with Transverse Holes

Minoru ITO

横孔を有する軟鋼丸軸について弾塑性ねじり実験を行なった。試験片の形状としては丸軸の径  $D$  および横孔の径  $d$  をこととする8種類の切欠き形状を選び、塑性ねじりの各段階において丸軸内に生ずる塑性域の発達とねじりモーメントとの関係を観測し、 $d/D$  の変化が塑性域の発達に及ぼす影響を及ぼすかを明らかにした。さらに降伏点ねじりモーメントを測定して、拘束係数を求め横孔の径  $d$  の変化によって塑性域に及ぼす弾性域の拘束がどのように変化するかを調べた。又平滑試験片の場合には完全塑性材料として計算された理論値と比較し、実験値と一致することを明らかにした。

#### 1. 緒 言

降伏点荷重を求める問題は、材料の塑性変形機構の解明ならびに塑性設計に関する基礎的資料を得るための重要な課題である。したがって、降伏振りを受ける切欠き部材の降伏点荷重を求める問題は、<sup>(1, 2)</sup> 基礎的な問題として実用上重要な研究課題である。特に実在の材料の特質を考慮に入れる場合には、実験的手段によらねばならない。さきに、円形、正方形及び長方形<sup>(3)</sup>の断面形状を有し、断面積を同一とする軟鋼軸、およびU形円周みぞ<sup>(4, 5)</sup>を有する軟鋼軸の塑性ねじり実験を取扱い、塑性域の発達とねじりモーメントとの関係を詳細に観察して、塑性変形機構を明らかにすると共に、降伏点ねじりモーメントの測定を行なった。

本研究では、横孔を有する軟鋼丸軸の弾塑性ねじり実験を行なった。ここでは、丸軸の径および横孔の径をこととする8種類の切欠き形状を選び、塑性ねじりの各段階において丸軸内に生ずる塑性域の発達とねじりモーメントとの関係を観察し、切欠き形状の相違が塑性域の発達に及ぼす影響を及ぼすかを明らかにした。さらに近似的な降伏点ねじりモーメントを測定し、とくに平滑試験片の場合には完全塑性材料として計算された理論値<sup>(6, 7)</sup>と比較した。横孔の径の変化によって塑性域に及ぼす弾性域の拘束の割合がどのように変化するかを明らかにした。従来の研究としては A. NADAI<sup>(8)</sup> により横孔を有する丸軸の表面に於ける塑性域の一部が示されている。本実験では本邦にて製造・市販されている実在の材料を使用し丸軸の表面、横断面及び縦断面における塑性域の発

達のより詳細な観察をなした。

#### 2. 実験方法

2.1 試験片 素材としては、S35C 引抜鋼材を880°Cで135分焼ならししたものを用いた。この材料の化学成分および機械的性質を表1, 2に示す。本実験では丸軸の径(2種類)および孔径(4種類)を変えて8種類の横孔をもつ丸軸を用い、孔の内面は種油に800番コランダム粉を混入した液で研磨し、孔径の誤差は±0.5%以内のものを使用した。図1に試験片の形状を示す。ここに各部の称呼寸法は、

$$D=20.00 \text{ mm}, 16.00 \text{ mm}, \quad \ell=50.00 \text{ mm}.$$

$$d=2.00 \text{ mm}, 4.00 \text{ mm}, 6.00 \text{ mm}, 8.00 \text{ mm}.$$

であり、 $\ell$ は標点間距離を、 $L$ は全長で $300 \pm 1 \text{ mm}$ である。

2.2 実験方法 実験には、容量50kgmの振子重錘槓桿式精密ねじり試験機を用い、ねじり角の測定は光挺子によって、荷重は手動によって静かに加え、各荷重段階にお

表1 化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0.36	0.23	0.64	0.014	0.032	0.19	0.06	0.12	残余

表2 機械的性質

縦弾性係数 E kg/mm <sup>2</sup>	横弾性係数 G kg/mm <sup>2</sup>	降伏点 $\sigma_s$ kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ $\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	伸び $\phi$ %	絞り $\psi$ %
$2.10 \times 10^4$	$8.16 \times 10^3$	39.6	59.4	34.4	65.0

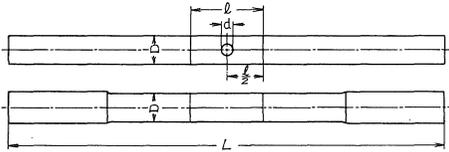


図1 試験片の形状

ける荷重速度は常に一定になるように注意した。降伏域に達するまでは荷重が一定量増加することに捩れ角を測定し、以後は降伏域の発達状態ともなつて荷重設定を行いそのつど捩れ角を測定した。降伏域がある程度広がると、試験片内の局部的にりが著しくなるために荷重が不安定になる。この場合には荷重が安定してから、捩れ角の測定をし、さらに荷重を増すようにした。負荷終了はひずみ硬化が明らかに認められる時とした。次に試験片の一部を切り取り、エッチングを施してひずみ模様を検出した。(9) また一部の試験片は断面の降伏域の発達状態を観察するため適当な荷重段階で除荷し同様の処置を施した。

3. 実験結果および考察

横孔の直径  $d$  の各値について、丸軸の直径  $D$  をパラメータにとり、実験結果を示せば図2~5のような捩りモーメント ( $T$ ) - 捩れ角 ( $\theta$ ) 図となる。図2'~5'に横孔を持つ丸軸の表面及び縦断面の塑性域の発達状態を示した。図は  $d$  の各値について一例 ( $D=20$ ) づつ挙げたものでその番号は図中の番号に対応する。図6及び図6'は平滑試験片の  $T-\theta$  図及びその横断面の塑性域の発達の模様を示したものである。

3.1  $T-\theta$  図と塑性域の発達

横孔を有する試験片では、最初に塑性域に達するのは弾性捩りにより応力が集中しせん断応力が最大となる個所、即ち孔の中心軸を含む横断面上にあって、孔の縁から少し離れた4個の点  $m$  である(図7)。弾性捩りにおいては  $n$  点にも応力が集中する(10)が、弾塑性捩りにいたってもこの点には、塑性域の発生はみられなかった。図2~5中の①は塑性域の発達の初期の状態を表わすが、孔径が小さくなるに従つてこの点が次第に上昇することがわかる。  $T$  が増加して降伏が進むと  $T-\theta$  図は直線はずれ、横孔の最小断面付近のこつた領域は巾を増しながら周辺に発達し、さらに内部に向つて進む(1')②。この段階における塑性変形は弾性変形とほぼ同じ程度の大きさにと

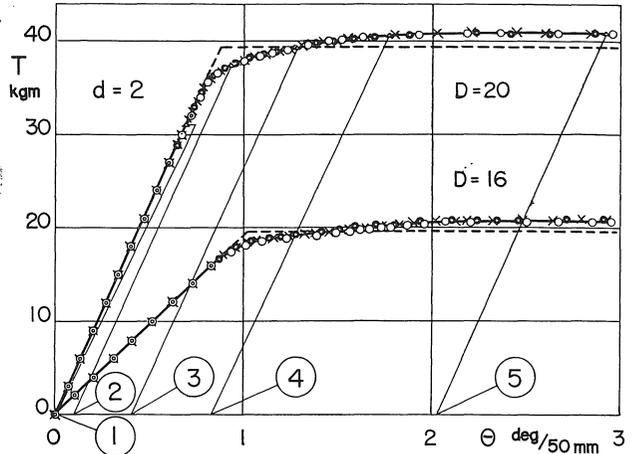


図2  $T - \theta$  図

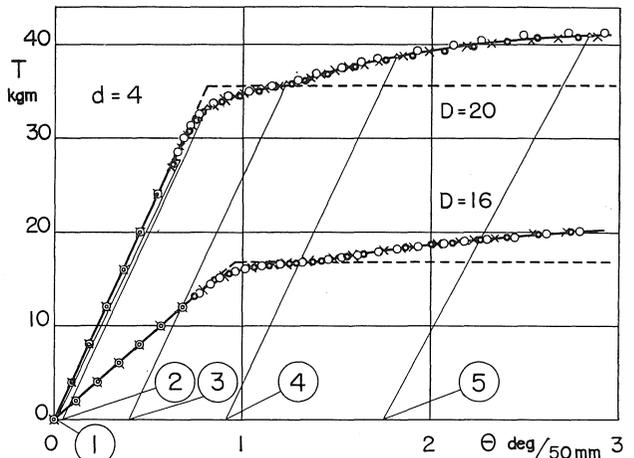


図3  $T - \theta$  図

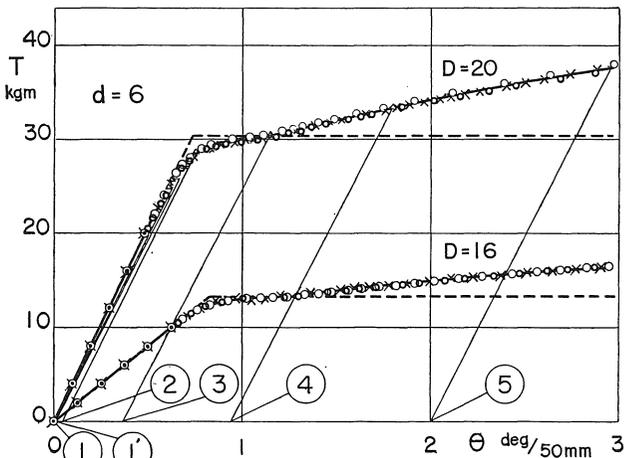


図4  $T - \theta$  図

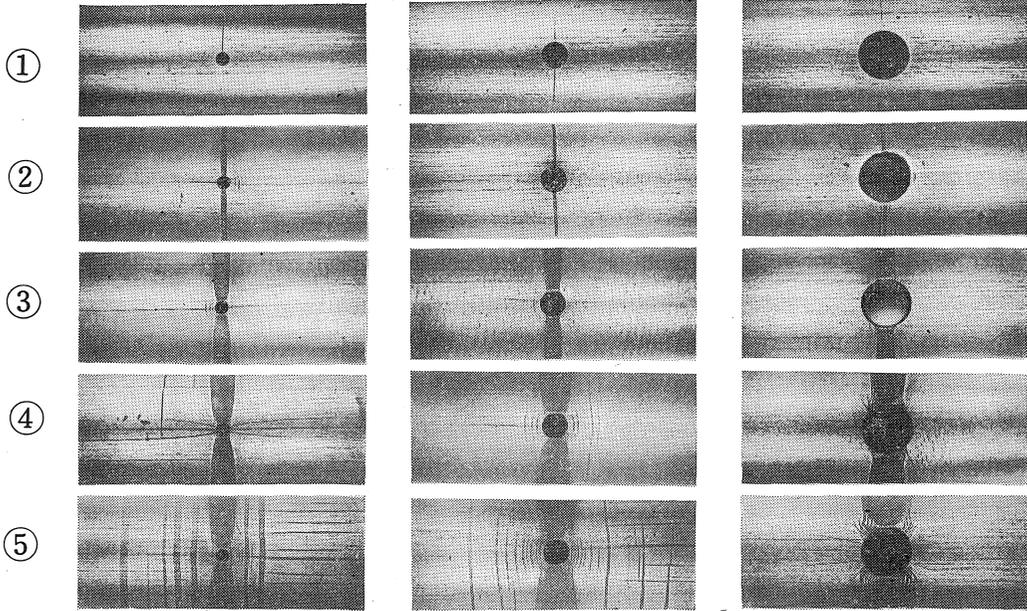


図 2'

図 3'

図 5'

横孔を含む軸表面のひずみ模様

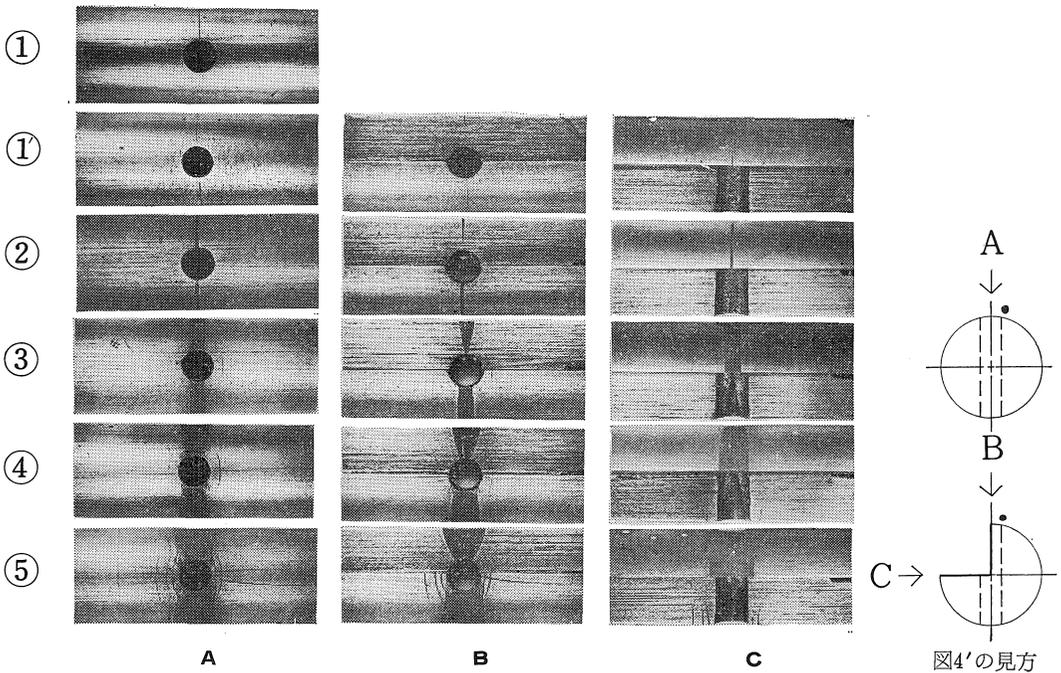


図 4' 横孔を含む軸表面，縦断面及び横孔の内部表面のひずみ模様

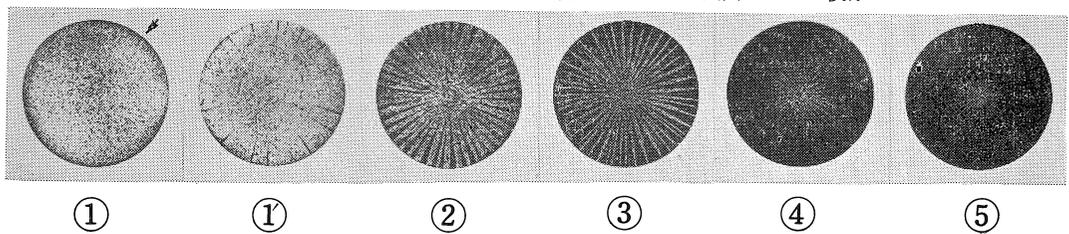


図 6' 平滑試験片のひずみ模様 (横断面)

どまるものと考えられる。さらにTが増加し塑性域が発達するについて、 $T-\theta$ 図は急激な曲りを示し、隣接する部分に迂りが盛んに起り、塑性域は巾を増す。従つて $\theta$ の増加が著しくなり、 $T-\theta$ 図の曲りがゆるやかになってほぼ水平部分を生ずるようになる。③に到ると最小断面の応力状態は一定な降伏応力 $\sigma_s$ に等しくなり、この時表面では降伏完了点に達するものと考えられる。次の段階④⑤ではくさび形に成長した降伏領域(図4'のB③)が次第にその巾を増すとともに、ひずみ硬化を伴うため振りに対する抵抗が大きくなり $\theta$ に対してTは徐々に増加する。このとき横孔の径が大きいほど硬化の影響が早く生じ、 $T-\theta$ 図の立上りが大きくなることが図2~5より明らかである。なお、試験片表面の

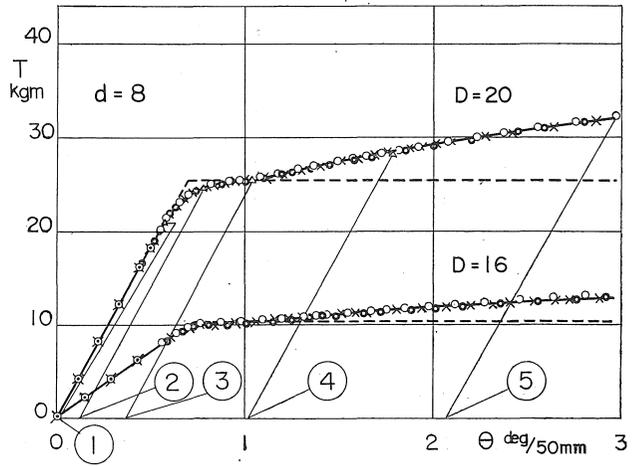


図 5  $T-\theta$  図

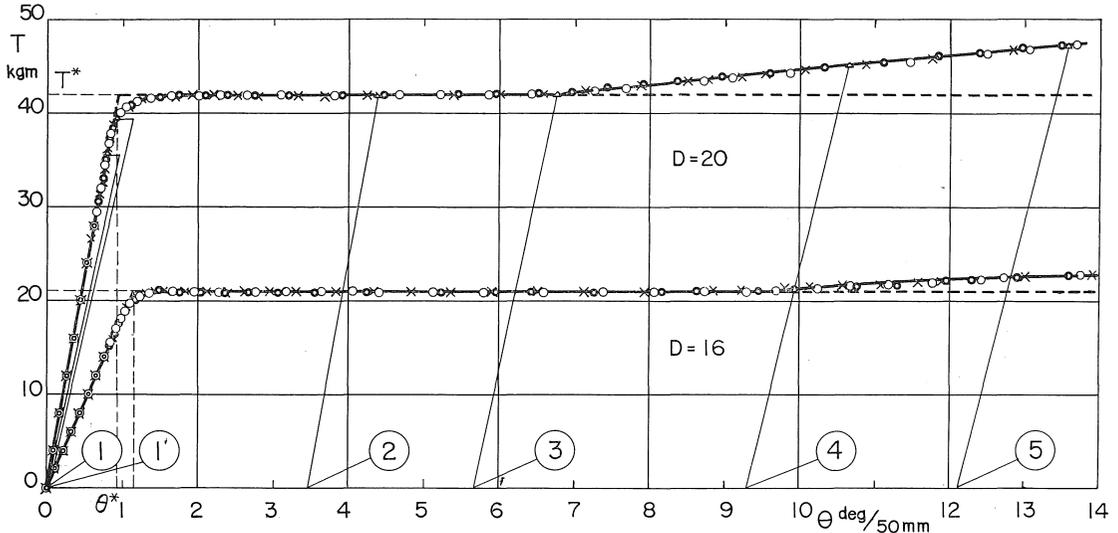


図 6 平滑試験片の  $T-\theta$  図

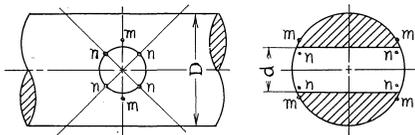


図 7 応力最高点

孔縁の近傍には、軸方向に発達する直線状の塑性域および孔縁を囲むように発達する曲線状の塑性域がそれぞれ数本ずつ現われることが観察された。

3.2 降伏点振りモーメント

図2'~5'に示す塑性域の発達状態より③においては塑性域はほぼ横孔の最小断面全域にわたって発達した状態にあることが解る(図4',③A,B,C)。一方図2~5の実験

結果から③の点を越えて変形を進めるには、さらに大きな振りモーメントを必要とする。即ちひずみ硬化を伴うため、③の点を越えると、 $T-\theta$ 図の $\theta$ 軸に対する勾配が急に増加することが認められ③の点の位置は容易に求まる。

かくしてひずみ硬化を起す直前、即ち③に対する振りモーメントは近似的に完全塑性材料に対する降伏点振りモーメント  $T_0$  を与えるものである。すなわち図2~6に破線で示したごとく③の点を通る水平線と弾性部分の延長とを結ぶ  $T-\theta$ 図は本実験で用いた軸材を完全塑性材料と考えた場合を表わすものとみなしてよい。表3は  $T-\theta$ 図を用いて、横孔を有する試験片の降伏点振りモーメント  $T_0$  を求めたものである。平滑試験片の降伏点振りモーメント  $T^*$  および  $T^*$  によって弾性的に振られると

表 3 降伏点ねじりモーメント

		T <sub>0</sub> kgm	
D mm		20	16
d mm			
2		39.42	19.60
4		35.70	16.99
6		30.30	13.25
8		25.36	10.26

表 4 平滑試験片の降伏点ねじりモーメント、  
ねじれ角、弾性的最大ねじれ角

D mm	T* kgm	T <sub>th</sub> kgm	T <sub>th</sub> /T*	θ* deg/50mm	θ <sub>th</sub> deg/50mm
20	41.93	41.47	0.99	0.926	0.927
16	21.04	21.23	1.01	1.150	1.159

仮定した最大ねじれ角 θ\* を図 6 から求めれば表 4 のようになる。無限に大きな相対的ねじれ角に対して現われる純塑性応力状態を仮定して計算された理論値<sup>(2)</sup>によれば、降伏点ねじりモーメント T<sub>th</sub> および T<sub>th</sub> によって弾性的にねじられると仮定したねじれ角 θ<sub>th</sub> は、夫々(1)式で与えられる。

$$T_{th} = \frac{2}{3} \pi \kappa \left( \frac{D}{2} \right)^3, \quad \theta_{th} = \frac{32 T_{th} \ell}{\pi D^4 G} \dots (1)$$

(1)式に於て κ は塑性条件によって定まる定数であり最大せん断応力一定の条件にもとづく κ = τ<sub>s</sub> = σ<sub>s</sub>/2 の値で計算した結果を表 4 に示したが、実験とよく一致する。<sup>(3)</sup> したがって他の横孔を有する試験片の場合も、いちおう信頼される値だと考えられる。

### 3.3 拘束係数

表 3 の T<sub>0</sub> および表 4 の T\* の値を用いて、横孔の径

の変化によって塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束の割合、すなわち拘束係数 T<sub>0</sub>/T\* を求め、d/D との関係を求めれば図 8 のようになる。表 3、図 8 より横孔の径 d が大になるにつれて、ねじりに対する抵抗がしだいに減少し、逆に d が減少すれば T<sub>0</sub> は次第に T\* になることがわかる。

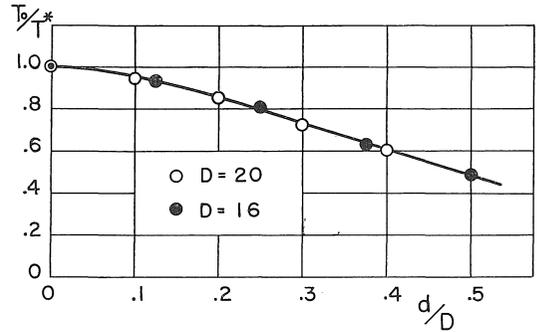


図 8 拘束係数

## 4. 結 言

横孔の径を異にする丸軸の弾塑性ねじり実験を行い、T-θ 図を得、丸軸の表面、縦断面及び横孔の表面のひずみ模様を検出することによって、塑性域の発達とねじりモーメントとの関係を明らかにした。また、実在の軸材についての近似的な降伏点ねじりモーメントを求め、とくに平滑試験片の場合には、純塑性応力状態を仮定した理論値との比較を行い最大せん断応力が一定の塑性条件のもとに計算された理論値と良く合うことを明らかにした。また、塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束をあらゆる拘束係数を求めた。

終りに、終始懇切な御指導を賜った名古屋大学の久保 肇名誉教授及び清家政一郎教授に感謝するとともに、本研究が名古屋大学工学部における生駒昇、稲野昌夫君の卒業研究の一部であることを付記する。

## 文 献

- (1) 山田嘉昭, 中原益次郎, 塑性学 日本機械学会 (1960), p. 207.
- (2) B. B. ソコロフスキー, 大橋誠, 塑性学, 朝倉 (1959), p. 93.
- (3) 伊藤., 機械学会東海支部第15期支部総会学術講演会前刷, (昭41-3), p. 17.
- (4) 伊藤., 機械学会・精機学会東海支部講演会前刷, (昭41-10), p. 1.
- (5) 伊藤., 愛知工業大学研究報告 No. 7 (1972), p.175.
- (6) 大久保 肇., 最新材料力学, 朝倉 (1957), p.159.
- (7) W. Prager & P.G. Hodge, Jr.  
Theory of Perfectly Plastic Solid (Wiley, 1951):  
安倍・宮本訳, W. プラガー, P.G. ホッジ著, 塑性学, 丸善 (1954), 緒論及び第1章.
- (8) A. Nadai., Plasticity. (McGraw-Hill, 1931), p. 156.
- (9) 清家・伊藤., 機械学会論文集, 28-194 (昭37-10), 1353.
- (10) 大久保 肇., 銅めっき応力測定法, 朝倉 (1965), p. 94.