

軟鋼軸の塑性ねじりに関する実験

第1報 U形 円周みぞを有する軸

機械工学科 伊 藤 実

Plastic Torsion Tests with Mild Steel Shafts

No.1. Shafts with U-Notched Circumferential Grooves

Minoru ITō

U形円周みぞ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最小断面の径 d およびみぞ底の曲率半径 ρ をことにする12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、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、降伏点ねじりモーメントを測定して、拘束係数を求め、みぞ底の曲率半径 ρ 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示した。

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^(1,2)、基礎的な問題として実用上重要な研究課題である。特に市販され日常使用される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⁽³⁾の断面形状を有し、断面積を同一とする軟鋼軸の塑性ねじり実験を取扱い、リューダース帯の撮影、ひずみ模様を検出より、塑性域の発達とねじりモーメントとの関係を詳細に観測して、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、U形円周みぞ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、丸軸の最小断面の径および底の曲率半径をことにする12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、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と^(4,5)比較した。U形円周みぞによる切欠き形状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調べた。従来の研究としてはA.NADAI⁽⁶⁾により円周溝を有する丸軸の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及び縦断面における塑性域の発達により詳細な観測をなした。

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90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。本実験では丸軸の最小断面の径(3種類)および曲率半径(4種類)を変えて12種類のU形円周みぞをもつ丸軸を用い、円周みぞは研磨し、曲率は投影器を使用して検査し良好なものを使用した。図1に試験片の形状を示す。ここに各部の称呼寸法は、

$$D=24.00\text{ mm}, l=50.00\text{ mm}.$$

$$d=14.00\text{ mm}, 16.00\text{ mm}, 18.00\text{ mm}.$$

$$\rho=1.00\text{ mm}, 4.00\text{ mm}, 16.00\text{ mm}, 64.00\text{ mm}$$

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

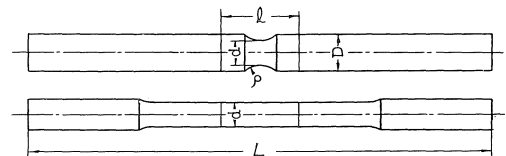


図1 試験片の形状

2.2 実験方法 実験には、容量50Kgの振り重錘傾桿式精密振り試験機を用い、ねじり角の測定は光挺子によった。荷重は手動によって静かに加え、各荷重段階にお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ごとにねじり角を測定し、以後は降伏域の発達状態にともなって荷重設定を行いそのつどねじり角を測定した。降伏域がある程度広がると、試験片内の局部的なねじ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、ねじり角の測定をし、さらに荷重を増すようにした。負荷終了後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⁽⁷⁾。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。

表 1 化学成分 (%)

| C | S _i | M _n | P | S | F _e |
|------|----------------|----------------|-------|-------|----------------|
| 0.37 | 0.31 | 0.72 | 0.012 | 0.021 | 残余 |

表 2 機械的性質

| 縦弾性係数 E Kg/mm ² | 横弾性係数 G Kg/mm ² | 降伏点 σ_s Kg/mm ² | 引張強さ σ_B Kg/mm ² | 伸び φ % | 絞り ψ % |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------|
| 2.11×10^4 | 8.21×10^3 | 40.8 | 61.9 | 21.2 | 68.2 |

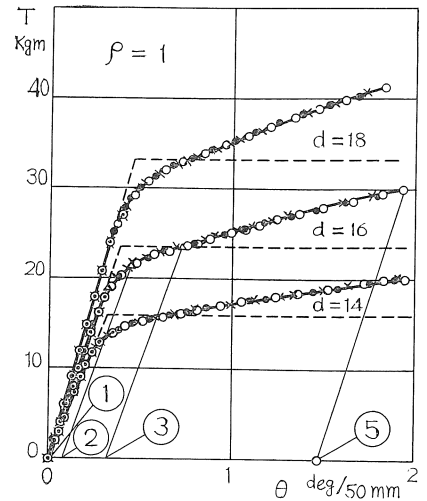


図 2 T - θ 図

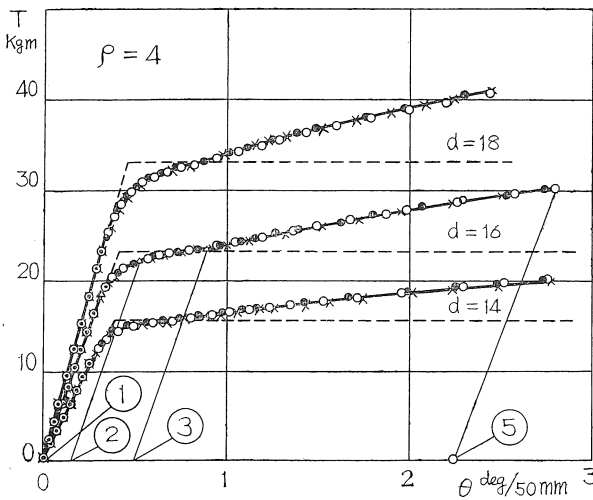


図 3 T - θ 図

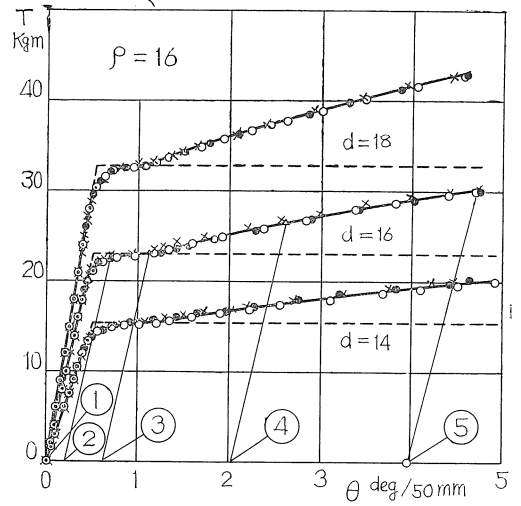


図 4 T - θ 図

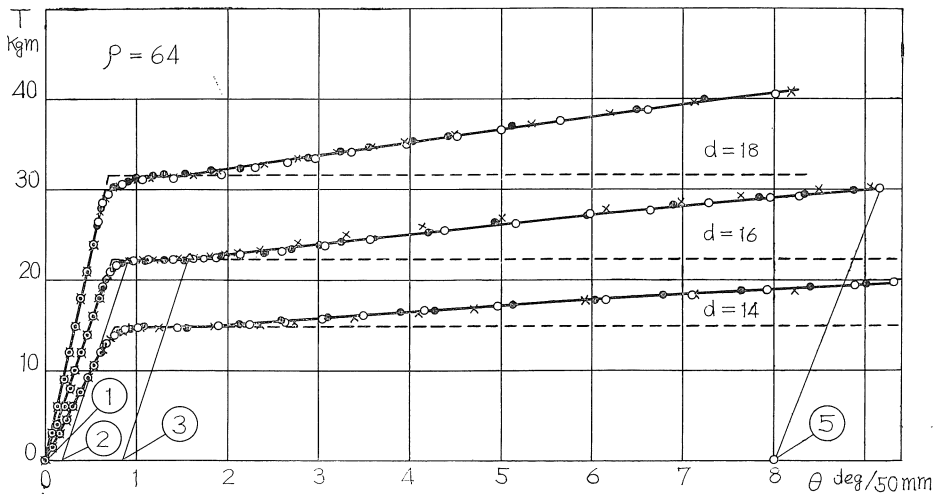


図 5 T - θ 図

3. 実験結果および考察

円周みぞの底の曲率半径 ρ の各値について、最小断面の直径 d をパラメータにとり、実験結果を示せば図2~5のような振りモーメント (T) - 振れ角 (θ) 図となる。図2'~5' にU形円周みぞを持つ丸軸の縦断面及び表面の塑性域の発達の状態を示した。図は ρ の各値について一例 ($d = 16$) 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8は平滑試験片の T - θ 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 - θ 図と塑性域の発達

円周みぞをもつ試験片では、最初に塑性域に達するのは弾性ねじりにより応力が集中しせん断応力が最大となる円周みぞのみぞ底の図心より最も近い点である。図2~6中①は塑性域の発達の初期の状態を表わすが、 ρ が大きくなるに従って応力集中が減少するためこの点が次第に上昇することが判る。 T が増加して降伏が進むと T - θ 図は直線をはずれる。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と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れて、みぞ底の通った領域は巾及び数を増しながら図心に向かって発達する、と同時にみぞ表面に沿って成長して行く②。降

伏がさらに進むとみぞ底の最小断面及びこれらに隣接する部分に局部的なすべりが盛んに起り弾性域は狭まる。したがって θ の増加が著しくなり、 T - θ 図の曲がりか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弾性変形をなす図心付近を除き一定降伏応力 σ_s に等しくなりやがて表面では降伏完了点に達するものと考えられる。次の段階ではくさび形に成長した降伏領域が図心に向かって次第に進むと同時にみぞ表面に沿って発達しその巾を増してゆく。その間、ひずみ硬化を伴うため振りに対する抵抗が大きくなり θ に対して T は徐々に増加する。このとき図心付近は弾塑性共存の状態にあるが弾性域は減少し、 T の増加に従い迂り領域が互いに接近しつつ一部の先端が連絡するようになり、又一方表面より図心に向かってひずみ硬化が進む④。このことは T - θ 図の示す如く明らかである。更に T が増すと⑥のように弾性域が狭くなり、応力はその中で急激に変化し、 $\theta \rightarrow \infty$ の極限においては弾性核は点状化し応力の不連続線⁽⁸⁾ となることが予想される。

3.2 降伏点振りモーメント

図2'~5' に示す塑性域の発達の状態より③においては塑性域はほぼ最小断面の全域にわたって発達した状態に

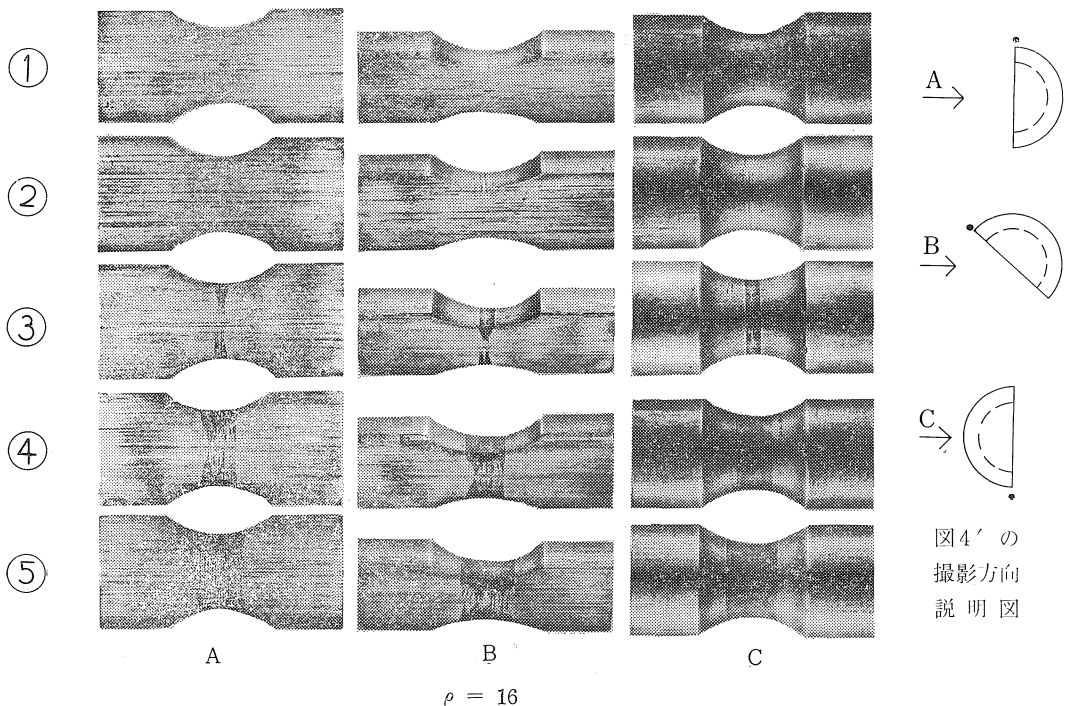


図4' 切欠試験片、軸表面及び縦断面(中央)のひずみ模様

あることが解る。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 θ 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、すなわち、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、U 形円周みぞ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仮定した最大振れ角 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振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⁽²⁾によれば、降伏点振りモーメント T_{th}^* および T_{th}^* によって弾性的に振られると仮定した振れ角 θ_{th}^* は、夫々 (1) 式で与えられる。

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

(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 $\kappa = \tau_s = \sigma_s/2$ の値で計

算した結果を表 4 に示したが、実験値とよく一致する。したがって他の U 形円周みぞを有する試験片の場合も、いちおう信頼される値であると考えられる。

3.3 拘束係数

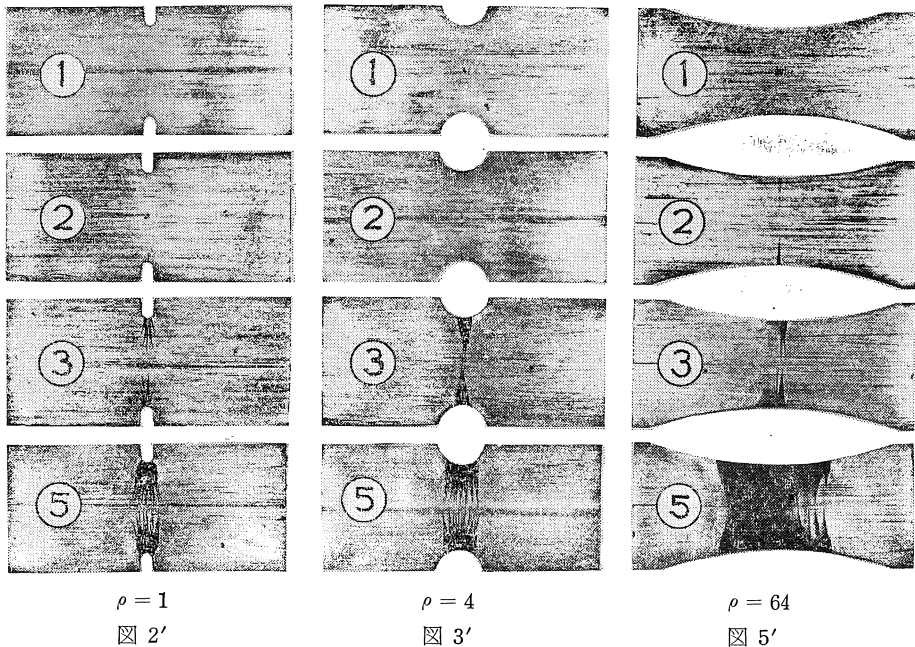
表 3 の T_0 および表 4 の T^* の値を用いて、切欠き形状の変化によって塑性域の発達に及ぼす弾性域の拘束の割

表 3 降伏点ねじりモーメント

| | | T_0 Kgm | | | |
|--------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| d mm | ρ mm | 1 | 4 | 16 | 64 |
| 18 | | 33.30 | 33.10 | 32.70 | 31.50 |
| 16 | | 23.50 | 23.25 | 22.95 | 22.10 |
| 14 | | 15.90 | 15.60 | 15.40 | 14.85 |

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_{th}^* Kgm | $\frac{T_{th}^*}{T}$ | θ^* deg/50mm | θ_{th}^* deg/50mm |
|--------|-----------|----------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| 18 | 31.10 | 31.15 | 1.002 | 1.06 | 1.055 |
| 16 | 21.80 | 21.88 | 1.004 | 1.19 | 1.186 |
| 14 | 14.60 | 14.65 | 1.003 | 1.37 | 1.356 |



切欠試験片, 縦断面 (中央) のひずみ模様

合, すなわち拘束係数 T_0/T^* を求め, 曲率半径 ρ との関係が求めれば図7のようになる. 表3, 図7より円周みぞの曲率半径 ρ が大になるにつれて, すなわち, 切欠きが広くなるに従って振りに対する抵抗が減少し T_0 は次第に T^* に接近することがわかる.

4. 結 言

U形円周みぞを有する軟鋼丸軸の弾塑性振り実験を行い, $T-\theta$ 図を得, 丸軸の縦断面及び表面のひずみ模様を検出することによって, 塑性域の発達と振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振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よ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わす拘束係数

を得た.

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木下武雄, 小島勝及び坂井田壮太郎君の卒業研究の一部であることを付記する.

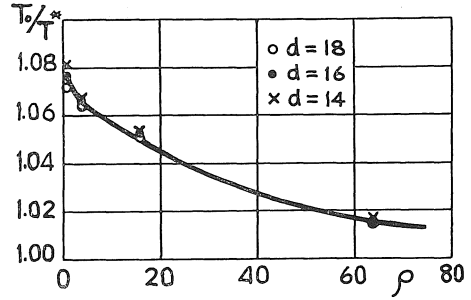


図7 拘束係数

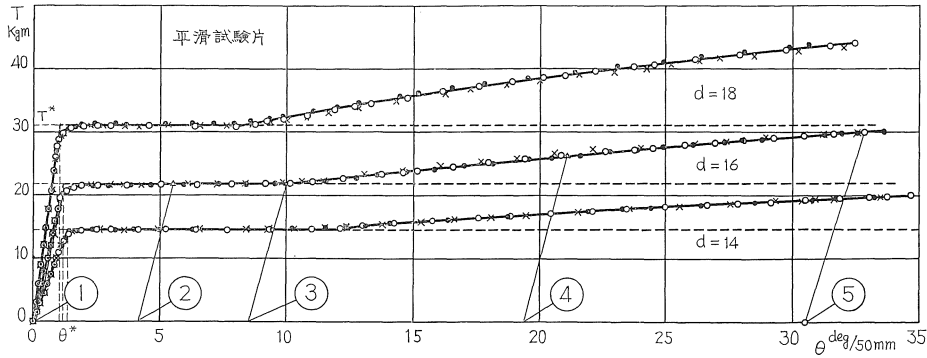


図6 平滑試験片の $T-\theta$ 図

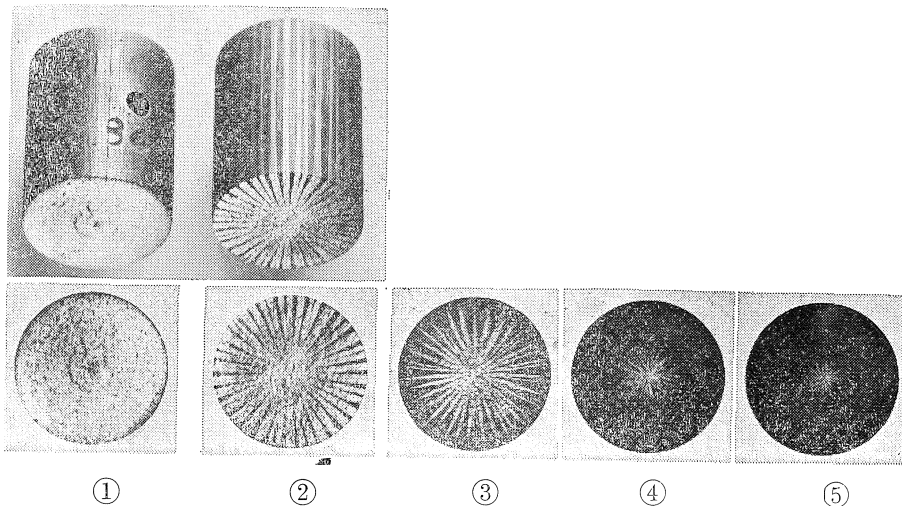


図6' 平滑試験片, 横断面及び表面(①, ②)のひずみ模様

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, 大橋訳, 塑性学, 朝倉
(1959), P. 93.
- (3) 伊藤, 日本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), P17.
- (4) W・Prager & P.G. Hodge, Jr., Theory of
Perfectly Plastic Solid (wily, 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
- (5) 大久保 肇, 最新材料力学, 朝倉 (1957), P. 159.
- (6) A・Nadai., Plasticity, (McGraw-Hill, 1931),
P. 151~155.
- (7) 清家・伊藤, 機械学会論文集, 28-194 (昭37-
10), 1353
- (8) 文献 (2), 第4章