

# 薄板のせん断加工における効率的な反り変形低減手法の提案

九州工業大学 工学研究院 物質工学研究系

准教授 廣田 健治

(平成24年度一般研究開発助成AF-2012020)

キーワード：せん断加工，反り変形，加工精度

## 1. 緒言

プレスせん断加工では加工品の反りを抑制するために板押えや逆押えのような拘束力が負荷されるが、板厚に対して幅が狭いような低剛性部品やハイテンのような高強度材では反り変形が大きくなり、その抑制には通常より大きな材料拘束力が必要となる。拘束力は順送加工ではばねやガスクッションを介してプレスの加圧力に加算されるため、反り抑制に必要な材料拘束力が大きい場合には総荷重の増加をまねく。

反り変形はクリアランス部に作用する曲げモーメントにより生じ<sup>1)</sup>、材質、打抜き形状、せん断条件によって変化する。このうち、材質とせん断条件については円形打抜きを対象とした報告があり、クリアランスや工具エッジRが大きいほど反り変形（わん曲）が増加し、その影響は高強度材ほど顕著であることが示されている<sup>2),3)</sup>。また、材料拘束条件についてはファインブランキングのような精密せん断法では板押えの形状や逆押え力に関する報告<sup>4),5)</sup>があるが、材料特性との関わりについては十分に記述されていない。一方、打抜き形状に関しては、大半の研究事例は剛性の高い円形輪郭を対象としており、低剛性品に対してはリードフレームに対してねじれ変形を調べた報告<sup>6),7)</sup>が見られる程度である。

以上の状況をふまえ、本研究では低剛性品として薄板

のリング部品を取り上げ、リング幅および材質を変えた実験から反り変形挙動を調査する。そして、効率的に反り抑制をはかるために、反り抑制に必要な最小逆押え力を求め、リング幅や材質に対してどのようにしてその値が決まるのかを考察する。

## 2. 実験方法

### 2.1 被加工材

被加工材には板厚0.8mmの3種類の鋼板を用いた。引張試験により得られた機械的性質を表1に示す。SPCC1は冷間圧延鋼板SPCCの標準調質材であり、SPCC2は板厚1.4mmの同材料を0.8mmに冷間圧延したものである。また、SK85は炭素工具鋼SK85の焼き鈍し材であり、SPCC1とn値が近く、SPCC2と引張強さが近い材料として用いた。

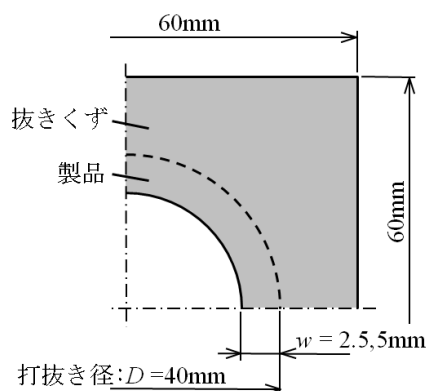
表1 被加工材の機械的性質

材料	引張強さ (MPa)	全伸び (%)	n値	備考
SPCC1	326	46	0.22	標準調質材
SPCC2	605	2	$\approx 0$	圧延材*
SK85	535	32	0.2	焼き鈍し材

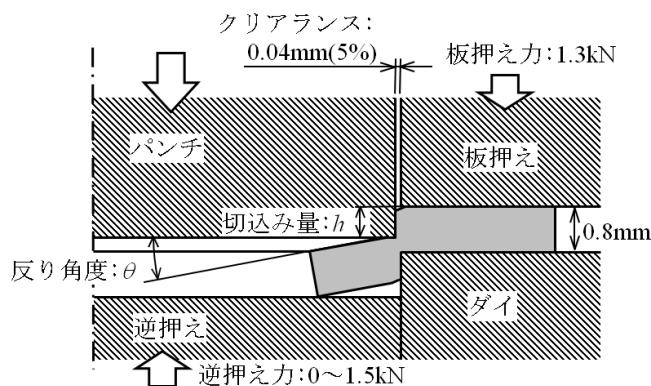
\*: SPCC1を圧下率43%で圧延したものである。

### 2.2 実験条件

図1に実験条件を示す。本研究では1辺60mmの正方形試



(a) 試片の寸法形状



(b) 工具条件

図1 実験条件

片から外径  $D=40\text{mm}$ ，幅  $w=2.5\text{mm}, 5\text{mm}$  のリング形状を打ち抜く．工具クリアランスは5%とし，潤滑剤として低粘度のプレス加工油を塗布した．材料拘束力は圧縮コイルばねにより付与し，板押え力は1.3kN，逆押え力は反り変形抑制に必要な最小値を見積もるため0～1.5kNの範囲で材料毎に適宜変化させた．

### 2.3 解析条件

軸対称変形として半断面をモデル化して商用有限要素コードMSC-Marcを用いて二次元のFEM解析を行った．工具は剛体，被加工材は弾塑性体とし，工具と被加工材の間の摩擦係数は  $\mu=0.1$  とした．せん断域付近では大変形を受けるため要素分割を細かくし，且つ，要素のゆがみに応じてリメッシングが行われるように設定した．また，延性破壊は考慮せず板厚の80%まで計算を行い，実験における破断面の位置から推定したパンチストロークにおいて反り角度を比較した．応力ひずみ曲線は引張試験結果を用いてSwiftの式で近似したが，伸びがほとんど見られなかったSPCC2については  $n$  値を0とした．

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 逆押え力を負荷しない場合の実験結果

図2に加工後の反り角度の測定結果を示す．反り角度は圧延方向を基準に  $90^\circ$  毎に4箇所測定し平均値とばらつきを記載している．反り角度はリング幅が小さいほど大きく，同じリング幅ではSPCC2，SK85，SPCC1の順に大きくなった．

反り角度は破断分離のタイミングにも影響を受けると考えられるため破断発生位置を調査した．本実験条件では製品側が反るため破断き裂はパンチ側から先に生じる．このため，スクラップ側のせん断面と破断面の境界位置を測定して比較を行った．図3にその結果を示す．破断発生は位置  $hf$  の値はSK85，SPCC2，SPCC1の順に高くなり，リング幅が変わってもこの順序は同じであった．

この結果をもとに，各材料において破断発生までの切込み量以下の範囲で加工を停止して反り角度を測定した．図4に半せん断時の切込み量に対する反り角度の変化を示す．右端のプロットは図2に示した破断後の反り角度であるが，いずれの材料でも破断後に大きく反り角度が減

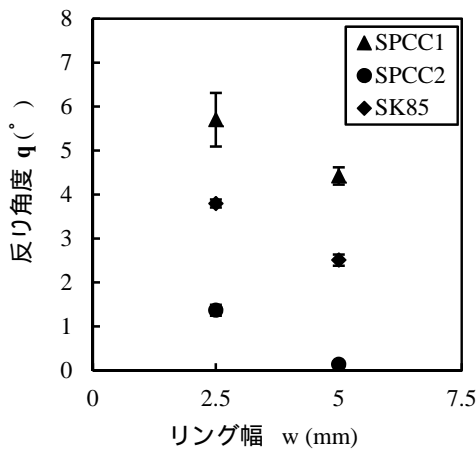


図2 破断分離後のリングの反り角度

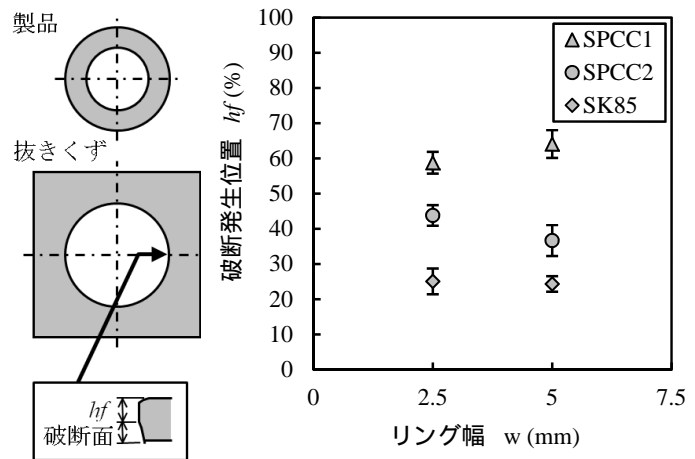
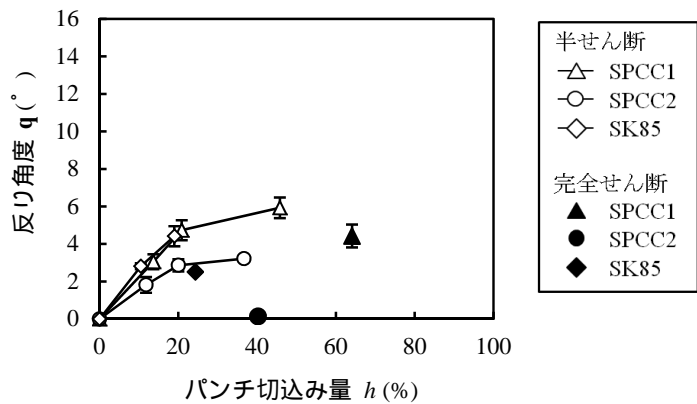
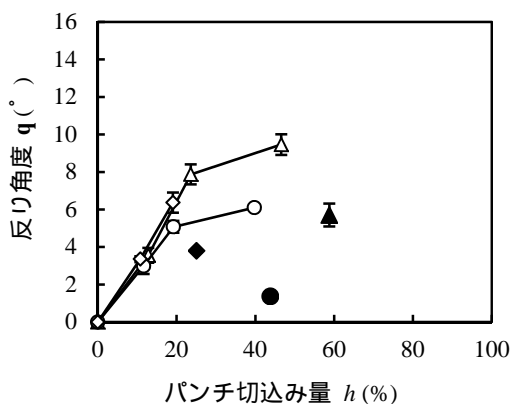


図3 破断発生位置の比較



(a)  $w=2.5\text{mm}$

(b)  $w=5\text{mm}$

図4 パンチ切込み量に対する反り角度の変化（実験結果）

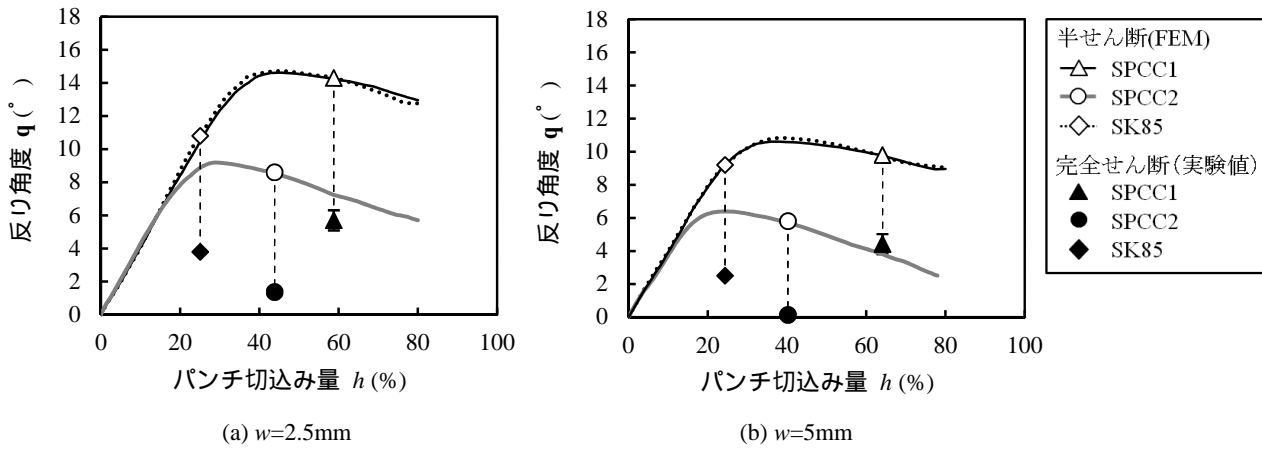


図5 パンチ切込み量に対する反り角度の変化 (解析結果, 破断なし)

少しており, 破断分離による弾性回復が大きいことがわかる.

3.2 材料による反り角度の違いに関する考察

図5にFEM解析により求めたパンチの切込みに伴う反り角度の変化を示す. グラフ中には黒塗りプロットで破断後の実験値を示し, 対応する切込み量での解析結果を曲線上に白抜きプロットで示している. 解析結果は延性破壊を考慮しておらず, 除荷をしない連続的な変化であるため実験結果との定量的な比較はできないが, 白抜きプロットと黒塗りプロットでは材料やリング幅に対する反り角度の大小関係は一致していることがわかる. このことから, 破断分離後も破断分離前の反り角度の大小関係が維持されていると考えて考察を加える. 白抜きプロットの示す破断前の反り角度は切込みに対する反り角度の変化と破断時期により決まる. 材質による違いを見ると,  $n$  値の近いSPCC1とSK85は曲線がほぼ重なっているが, 反り角度の増加が止まる前に破断したSK85の方が白抜きプロットの示す値は低くなっている. 一方,  $n$  値の小さいSPCC2は反りの増加が早期に止まり, 切込み量20%以上ではSPCC2の曲線が他の2つの材料よりも下方に位置している. このためSPCC2では切込み量20%以上で破断しているSPCC1,SK85よりも白抜きプロットが低い値となっている. 以上のことを整理すると, 加工硬化特性が類似したSPCC1とSK85の反り角度の違いは破断時期の違いが原因であり, SK85よりも破断時期が遅いSPCC2の方が反り角度が小さいのは加工硬化特性の違いによるものと推察できる.

加工硬化特性による反り変形の差に関して, 同一切込み量におけるせん断域の相当ひずみ分布を図6に示す.  $n$  値の小さいSPCC2ではせん断域に局部的にひずみの高い領域が生じているのに対し,  $n$  値の大きいSPCC1と

SK85ではせん断域でのひずみが小さく, 且つ, パンチ面に沿ったひずみの広がりも大きいことがわかる. パンチ面付近のひずみに関して, 図7にSPCC1の切込み量30%における径方向および板厚方向の垂直ひずみ分布を示す.

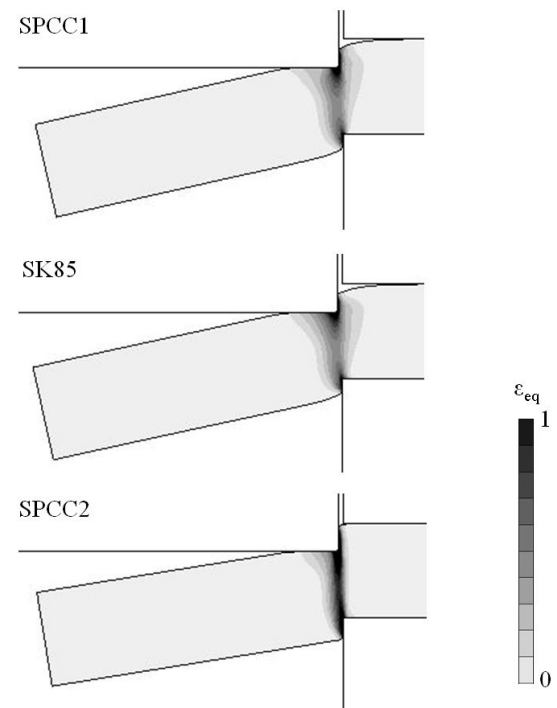


図6 せん断域付近の相当ひずみ分布 ( $w=2.5\text{mm}$ ,  $h=30\%$ )

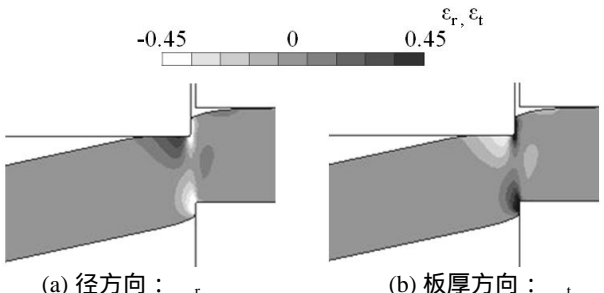


図7 せん断域付近の垂直ひずみ分布(SPCC1,  $w=2.5\text{mm}$ ,  $h=30\%$ )

パンチ面に沿った部位は切込み方向に圧縮され径方向に伸ばされていることがうかがえる。この変形が反りに及ぼす影響に関して、パンチ面付近に設定した参照点の変位を追跡した。SPCC1とSPCC2について比較した結果を図8に示す。パンチの対面側に設定したB点はクリアランス部に引き込まれ右へ移動しており、その位置は両材料でほとんど変わらない。これに対し、パンチ面側に設定したA点はパンチ面に沿って圧縮を受けて伸ばされるため左へ移動しているが、 $n$  値の大きいSPCC1の方が変位が大きい ( $dx1 > dx2$ )。したがって、SPCC1の方が表裏面の径方向の変位差が大きく、反り角度が大きくなったと考えられる。

図9は同一材料、同一切込み量でリング幅による径方向の垂直ひずみ分布を比較した結果である。リング幅が大きい方がパンチ面付近のひずみの値が小さく反り角度も小さくなっている。リング内はほぼ弾性状態と推察でき、リング幅が大きいほど面内曲げに対する剛性が高いためパンチ面付近の変形が小さくなったものと考えられる。

### 3-3 逆押え力を負荷した場合の実験結果および考察 圧縮コイルばねにより逆押え力を負荷して打抜きを行

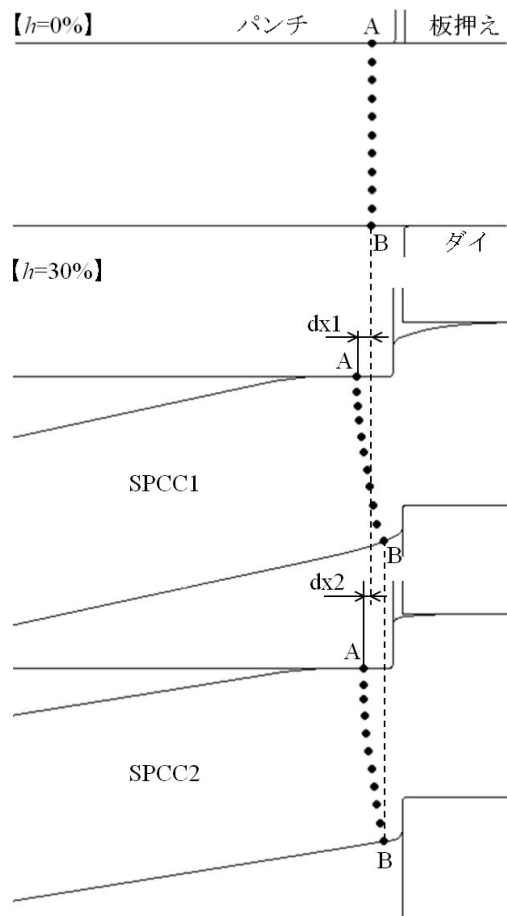


図8 せん断域付近の変位 ( $w=2.5\text{mm}$ )

った。逆押え力を変化させた際の反り角度の変化を図10に示す。(a)はリング幅2.5mmで材質を変えた場合、(b)はSPCC1においてリング幅を変えた場合である。(a),(b)ともに反り角度は逆押え力に対して線形的に減少し一定以上の負荷でほぼ抑制されることがわかる。また、(b)よりリング幅が大きくなると初期の反り角度は小さくなるが反り角度の減少率が増加するため、反りが抑制される最小逆押え力はほぼ同じになった。(a)の近似直線の傾きから

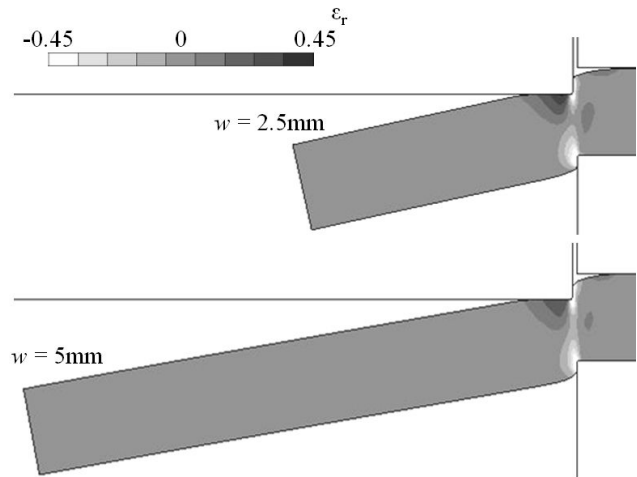
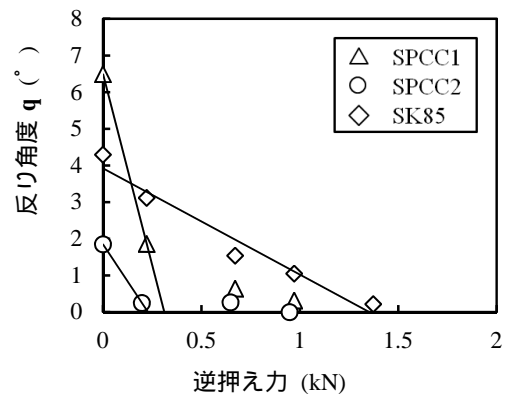
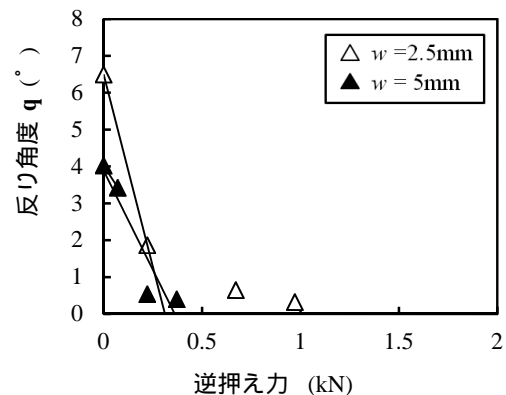


図9 リング幅による径方向の垂直ひずみ分布の違い (SPCC1,  $h=30\%$ )



(a)  $w=2.5\text{mm}$



(b) SPCC1

図10 逆押え力による反り角度の変化

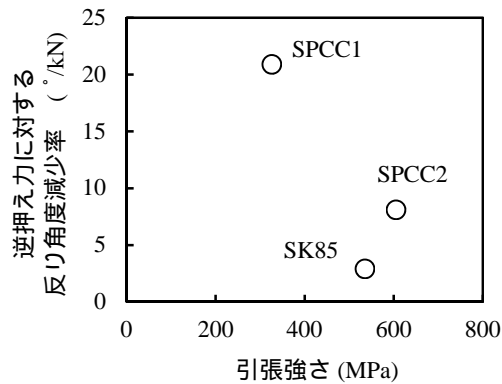


図11 逆押え力に対する反り角度減少率と引張強さとの相関

各材料における反り角度減少率を求め引張強さに対してプロットすると図11のように負の相関が認められ、初期の反り角度が同じならば高強度材よりも低強度材の方が反り低減に必要な力が少なく済むといえる。

図10においてプロットを直線近似して横軸と交わる点から反り抑制に必要な最小逆押え力を見積もるとSPCC1とSPCC2に対してSK85がかなり大きくなっている。これはSPCC1とSPCC2は初期の反り角度と反り角度減少率のどちらか一方が小さいのに対し、SK85は両方とも比較的大きいためである。すなわち、反り抑制に必要な逆押え力は初期の反り角度と逆押え力による反り角度の減少率の双方に影響されて決定づけられると考えられる。

#### 4. 結言

反りが生じやすい細幅リング状部品のせん断特性に関して、3種類の鋼板を用いリング幅を変えた打抜き実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 同一材料ではリング幅が小さいほど反り角度は小さくなった。
- (2) 材料毎の反り角度の大小関係について、FEM解析結果をもとに破断時期と破断までの反り角度の観点から考察を行った。
- (3) 逆押え力を変化させて打抜き実験を行った場合、いずれの材料でも反り角度は逆押え力に比例して減少し、一定以上の逆押え力でほぼ抑制された。また、その比例係数となる反り角度減少率は高強度材ほど大きいことがわかった。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人天田財団より一般研究開発助成（AF-2012020）を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：せん断加工，(1992)，10-14，コロナ社。
- 2) 森田稔，音田一造：塑性と加工，2-6，(1961)，79-81。
- 3) 和田和夫，小松広之：塑性と加工，13-134，(1972)，204-211。
- 4) 近藤一義，塑性と加工，29-324，(1988)，21-25。
- 5) 前田禎三，中川威雄，塑性と加工，9-92，(1968)，627-636。
- 6) 神馬敬，関根文太郎，関谷健助，勝瑞真一，森本亘：塑性と加工，28-315，(1987)，355-362。
- 7) 神馬敬，関根文太郎：塑性と加工，32-369，(1991)，1280-1285。