

# 硬質膜コーティングの塑性加工工具への応用に関する研究

日本工業大学 機械工学科  
 助教授 古閑伸裕  
 (平成9年度研究開発助成A F- 97019)

キーワード: 硬質膜, コーティング, 深絞り加工, 亜鉛めっき鋼板, プレコート鋼板

## 1. 研究の目的と背景

工具寿命向上や製品精度悪化防止の観点から、窒化チタンなどの硬質膜をコーティングした切削工具が広く用いられている。これに比べ、塑性加工工具への硬質膜コーティングの応用<sup>1)</sup>は極めて少ないのが現状である。これは、熟練作業者の創意工夫により、何とか製品化が行われることも大きな理由の一つと考えられるが、被加工材や加工条件が多様な塑性加工においては、それぞれについて工具寿命向上や製品精度の悪化防止に有効な硬質膜が未だ見いだされていないことが最大の理由と考えられる。

本研究では、塑性加工の一つである、深絞り加工における硬質膜コーテッド工具の有効性について実験的に調査検討を行う。具体的には、まず、深絞り加工時にかじり、剥離およびパウダリングなどの表面損傷が発生しやすい<sup>2)</sup>、亜鉛めっき鋼板の深絞り加工工具への硬質膜コーティングの有効性を調査する。さらに、最近、需要が高まりつつあるプレコート鋼板<sup>3)</sup>の深絞り加工において問題となっている、製品表面傷発生防止や底部穴縁割れ発生防止などに有効な硬質膜を見いだすための調査実験研究を行う。

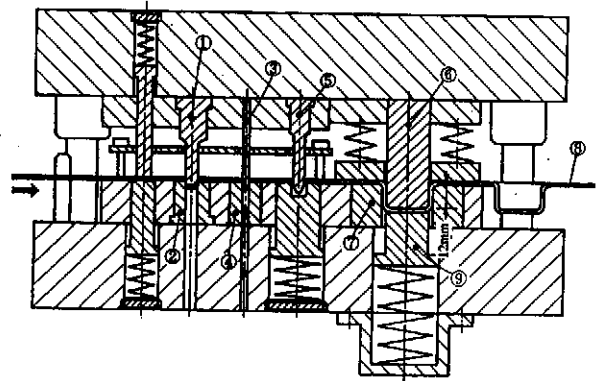
## 2. 亜鉛めっき鋼板の硬質膜コーテッド工具による深絞り加工

### 2.1 実験条件および方法

アルミニウム合金板の深絞り加工<sup>1)</sup>において、工具(ダイ)寿命効果が顕著に認められた、表1に示す3種類の硬質カーボン膜をコーティングした正方形工具と比較のためのノンコーテッド工具の計4つの工具について、図1に示す連続深絞り金型を用いた5000回の連続深絞り試験を行う。工具Aは比較のためのノンコーテッド工具(工具A)、DLCコーテッド工具(工具B)、WC/C膜コーテ

表1 亜鉛めっき鋼板深絞り試験工具

工具名	膜厚 / μm	膜硬さ / μm	表面粗さ / μm	基材
A ノンコーテッド工具	—	—	6.4	SKD11
B DLCコーテッド工具	1.0	3000	6.3	SKD11
C WC/Cコーテッド工具	1.5	1000	5.4	SKD11
D TiN + WC/Cコーテッド工具	2.0 +1.5	2300 1000	5.3	SKD11



①パイロットピン穴打抜き用パンチ ②パイロットピン穴打抜き用ダイ ③深絞りブランク打抜き用パンチ ④深絞りブランク打抜き用ダイ ⑤パイロットピン ⑥深絞りパンチ ⑦深絞りダイ ⑧被加工材 ⑨ストリッパー

図1 連続深絞り試験金型

ッド工具(工具C)、および基材との付着力を高めるため、TiN膜上にWC/Cをコーティングした工具(工具D)である。この場合、ダイは、穴の一辺が20mmのSKD11(HRC 61)を基材とした正方形輪郭工具とし、パンチは一辺が18.6mm(片側クリアランス:0.7mm)のSKD11製正方形輪郭ノンコーテッド工具とした。被加工材には、塑性変形時において亜鉛層の剥離は発生しにくい、パウダリングは発生しやすい<sup>2)</sup>とされている、表2に示す機械的性質の公称板厚 $t=0.7\text{mm}$ (実測板厚:0.73mm)の両面に亜鉛をめっきした合金化熔融亜鉛めっき鋼板(めっき附着量:片面 $44\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )を用いる。なお工具と材料間は無潤滑とする。

表2 亜鉛めっき鋼板の機械的性質

降伏点強さ / $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	引張強さ / $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	伸び / %	n 値	r 値
153	299	45.8	0.235	1.600

### 2.2 実験結果および考察

まず、ノンコーテッド工具(工具A)による深絞り試験を行った。その結果、アルミニウム合金板の無潤滑深絞り試験の場合<sup>1)</sup>のように、少ない試験回数時点で材料破断が発生することなく、5000回の深絞り加工が行えた。しかし、図2に示すように、5000回目に得られた深絞り容

器には、試験初期段階では認められなかった、フランジ部からダイス肩アール部に相当する部分にしわの発生が認められた。これは試験後のダイ端面上に多量の金属粉の発生が認められたことから、この粉の発生により、被加工材とダイ端面との接触が不安定となり、しわ押え力が被加工材に均一に作用しなくなったことが原因として考えられる。

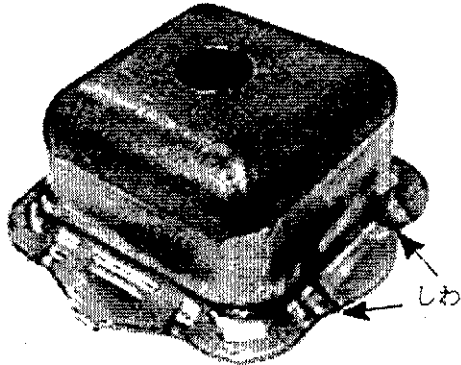


図2 5000回目に得られた深絞り容器 (ノンコート工具)

上記発生(脱落)した粉を採取し、走査型電子顕微鏡(SEM)の波長分散型検出装置で定性分析したところ、FeとZnが検出された。さらに、これらの分布を同装置で測定したところ、ZnのほうがFeに比べ広く分布していることがあった。これらの結果から、この粉は、いわゆるパウダリングと呼ばれる表面損傷の発生により、亜鉛めっき鋼板の表面から脱落したものと判断される。またこれらの粉をSEM観察したところ、図3に示すように、上下面に圧痕のある(つぶれた)形状のある粉であることもわかった。この圧痕は、加工時に脱落した粉がダイ端面上に残存し、以後の深絞り加工時にダイと材料間で強圧されたことにより発生したものと推測される。

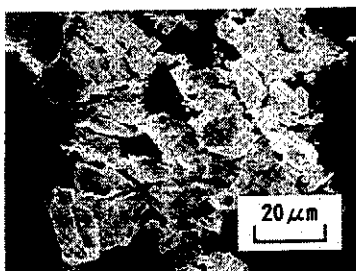


図3 ダイ端面に脱落した粉のSEM観察結果 (ノンコート工具)

つぎに、DLCコート工具(工具B)による試験を行った。この場合は、300回程度の極めて少ない試験回数時点から、ダイの端面と肩アール部のつなぎ部付近の一部にコーティング膜の剥離発生が認められるようになり、3000回試験後には肩アール部に大きな膜の剥離部が認められるようになった。このように工具Bにおいて試験早期にコーティング膜が剥離した原因は、被加工材に亜鉛めっき鋼板を用いると、アルミニウム合金板の場合<sup>1)</sup>に比べ

ダイに作用する圧力が増大し、ダイ基材(SKD11)の弾性変形量が大きくなり、この変形に追従するに十分な変形能がDLC膜になかったためと考えられる。

最後に、WC/Cコート工具(工具C)と、TiNコーティング膜上にWC/Cをコーティングした工具(工具D)についてそれぞれ深絞り試験を行った。これらの工具の場合は、いずれも5000回の試験終了時まで膜の剥離などの工具不良の発生は一切認められなかった。なお、WC/Cコート工具によるアルミニウム合金板の無潤滑深絞り試験においては、わずかな試験回数後にWC/C膜が剥離し、この部分にアルミニウムが凝着したことで、材料破断が発生し、加工が行えなくなった。これに対し、上述したように、アルミニウム合金板の場合より工具に作用する面圧が大きくなる亜鉛めっき鋼板の深絞り加工において、いずれのWC/Cコート工具(工具C、D)でも工具不良が発生することなく5000回の加工が行えた。この原因は、アルミニウム合金板の加工時には、被加工材から脱落する粉は硬いアルミニウムの酸化物と考えられるのに対し、亜鉛めっき鋼板加工時に脱落する粉は、図3からわかるように、加工中に工具と材料間で圧縮されることで圧痕が発生する程度の比較的柔らかな粉であったことから、アルミニウム酸化物粉のようなひっかかり作用が軽減されたことによるためと考えられる。

図4には、深絞り品側壁部(深絞り方向に対し垂直な方向)の表面粗さ(Ry)測定結果を示す。工具Aや工具Bにより加工されたものは、試験回数の増加に伴い表面粗さも大きく悪化し、工具Aにより成形された容器は5000回試験後には、14 μmRy程度まで悪化した。これに対し、工具Cと工具Dにより加工されたものは、試験初期時の表面粗さが5.1 μmRyであり、5000回試験後においても8~9 μmRy程度の良好な深絞り品が得られることが判明した。

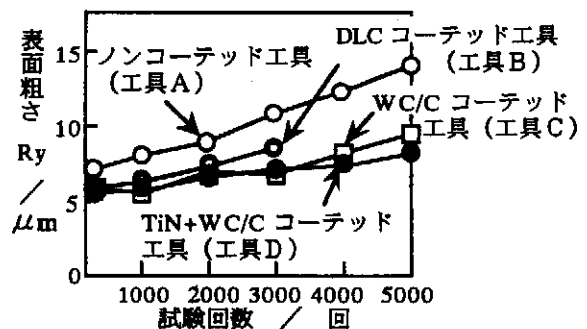


図4 試験回数増加に伴う深絞り品側壁部の表面粗さの変化

そこでつぎに、WC/Cコート工具(工具C、工具D)を用いた深絞り加工において表面粗さ悪化防止効果が得られる原因を明らかにするため、種々の観察や調査実験を行った。

図5には、工具Aと工具Dでそれぞれ5000回目に得ら

れた深絞り容器側壁部のSEM観察結果を示す。いずれの工具により得られた容器側壁部表層においても、亜鉛めっき鋼板ではある程度不可避免的に発生するき裂が認められ、しかもその程度は両者ともほぼ同じであった。しかし、深絞り方向へのすり傷の発生は工具Dにより得られた容器のほうが工具Aの場合に比べ少なかった。このことから、上記工具Cや工具Dにおいて得られた容器の表面粗さの悪化が軽減できた原因は、このすり傷発生の程度が少なかったためであることがわかった。

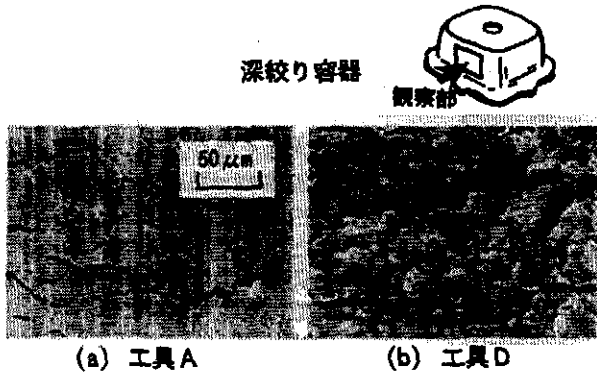


図5 深絞り品側壁部のSEM観察結果

上述のように、容器側壁部でのすり傷発生に差異が生じた原因としては、第1に被加工材の工具への凝着が考えられる。そこで、5000回試験後のそれぞれのダイ表面のSEM観察を行った。その結果、図示はしないが、容器側壁部に傷発生に影響を及ぼすような凝着物の発生はいずれの工具にも認められなかった。従って、これが主たる原因であるとは考えにくい。

第2に考えられる原因としては、めっき層下の鋼材（バルク）の変形に追従できずに脱落した粉や工具との摺動により派生した粉がダイ端面面上に残存し、その後の加工中に工具と被加工材間で強圧された状態で移動し、これによりかじりが発生することが考えられる。すなわち、工具Cや工具Dを用いた場合のほうが工具Aの場合に比べ、工具との摺動によるパウダリングの発生が少ないため、すり傷発生の程度が軽減できたと考えられる。そこで、5000回の深絞り試験を行った工具Aと工具Dについて、それぞれ再度深絞り試験を行い、30回の深絞り加工毎にダイ端面に脱落した粉を採取しながら600回の深絞り試験を行った。その結果、工具Aの場合は6.2mg、工具Dでは4.4mgの剥離粉がそれぞれ発生した。また600回目に得られた深絞り容器側壁部の剥離粉の発生状況をテープテスト<sup>4)</sup>により調査したところ、図6に示すように、工具D

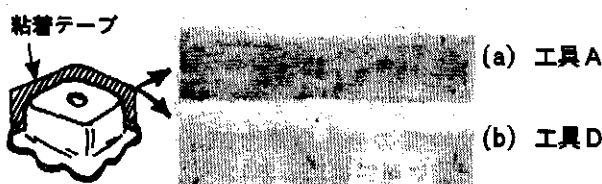


図6 テープテスト結果

により得られたもののほうが、明らかに黒化率が低い（剥離粉が少ない）ことがわかった。さらにボールオンディスクタイプの摩擦摩耗試験機を用い、亜鉛めっき鋼板と、深絞り工具を想定した各種ボール（SUJ2製、HRC62）間の摩擦係数測定実験を行ったところ、ノンコートボールと亜鉛めっき鋼板間の摩擦係数が0.5程度であったのに対し、WC/CやTIN+WC/Cコーティングしたボールを用いた場合の摩擦係数は0.15~0.18の低い値であった。

以上の結果から、WC/CやTIN+WC/Cコーテッド工具（工具C、工具D）において、表面粗さ悪化防止効果が得られた原因は、WC/C膜を被加工材（亜鉛めっき鋼板）とダイ間に介在させたことで、両者間の摩擦係数が低減でき、その結果として、被加工材と工具との摺動により生ずるパウダリングの発生を低減できたためと考えられる。なお、本実験においては、工具Cと工具Dの差異は特に認められなかった。

### 3. プレコート鋼板の硬質膜コーテッド工具による深絞り加工

#### 3.1 実験条件および方法

プレコート鋼板による深絞り成形が行われているレジャー用の液体燃料缶の製作を想定し、種々のコーテッド工具による円筒容器の深絞り加工実験を行う。

具体的には、まずどのような硬質膜を工具にコーティングすれば、すり傷発生などの問題解決に有効であるかという点を調査するため、表3に示す3種類のコーテッド工具（いずれも基材はSKD11、HRC58）と比較のためのノンコート工具を準備し、それぞれの工具について、無潤滑深絞り加工を行う。すなわち、まずそれぞれの工具について、上記問題の発生とも関連性が深いと考えられる、限界絞り比（LDR）と最大深絞り荷重（Fmax）を調査する。この場合、パンチ（ノンコート、SKD11、HRC58）の直径はφ26.84mmとし、いずれのダイも穴径はφ27.70mmクリアランスC=0.43mm/slide一定とする。加工機械には深絞り試験機（加工速度V=3.8mm/s）を用いる。被加工材には上記液体燃料缶材料として利用されているSnめっき鋼板の片面にビニール系樹脂（白色）を塗装し、この上面と鋼板裏面にワックスを表面被覆した、総板厚t=0.36mmのプレコート鋼板（引張強さ：319MPa、伸び：45%、n値：0.201）を用いる。

表3 プレコート鋼板深絞り試験工具

工具名	膜厚 /μm	表面粗さ /μmRy	膜硬さ /Hv	基材
TiCNコーテッド 工具	4	1.40	2500	SKD11
CrNコーテッド 工具	2.5	1.43	1800	SKD11
WC/Cコーテッド 工具	1	1.36	1100	SKD11
ノンコート 工具	—	1.36	HRC 58 (SKD11)	

つぎに上記実験でプレコート鋼板の深絞り加工に最も有効性の認められたコーテッド工具について、12000回の無潤滑連続深絞り試験を行い、その実用性を評価することとする。この試験には、前章の亜鉛めっき鋼板の深絞り試験に用いた金型（図1）を用い、これに直径φ22.5mmの円形ノンコーテッドパンチと、穴径φ23.24mmのダイをセットした（C=0.37mm）。なお、燃料缶の生産においては、金型の温度がかなり上昇する点を考慮し、本実験ではこの現象をシミュレートするため、型内に埋め込んだヒータによりダイを50℃に加熱した状態で深絞りを行うこととした。被加工材には前述の実験と同一のプレコート鋼板を用いる。

### 3.2 結果および考察

まず、各種硬質膜コーテッド工具による深絞り試験を行い、LDRとFmaxの測定を行った。図7にLDR測定結果を、図8に絞り比DR=2.2のときのFmax測定結果をそれぞれ示す。WC/Cコーテッド工具を用いると、ノンコーテッド工具の場合に比べ、LDRが0.15向上すること、またノンコーテッド>TiCN>CrN>WC/Cの順でFmaxが減少することがわかった。

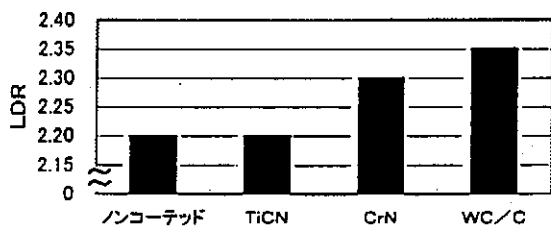


図7 限界絞り比 (LDR) 調査結果

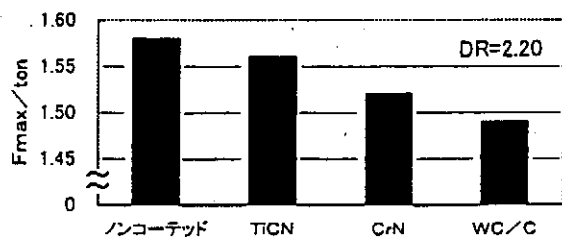
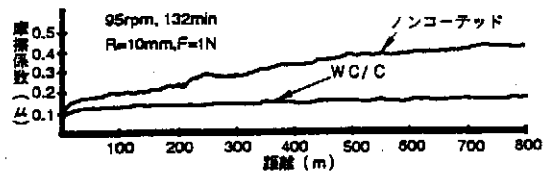


図8 最大深絞り荷重 (Fmax) 調査結果

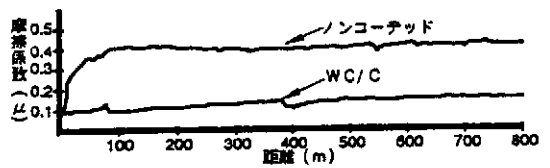
上述の結果において、コーテッド工具（特にWC/Cコーテッド工具）を用いた場合に、LDRが向上したりFmaxが減少する原因を探るため、WC/Cコーテッド工具を想定したWC/Cコーテッドボール（ダイと同程度の硬さのSUJ2製）と、プレコート鋼板間の摩擦係数を、ボールオンディスクタイプの摩擦摩耗試験により測定した。この場合の試験温度は、室温と、燃料缶製造時において工具や製品がかなり加熱されるということを考慮し、50℃での加熱状態での試験も行った。その結果、図9に示すように、ノンコーテッドボールの場合には、いずれの試験温度においても摩擦係数が0.4程度まで上昇すること、また50℃の条件では試験開始直後から摩擦係数が増大する結果になっ

た。これらに対し、WC/Cコーテッドボールの場合は、いずれの試験温度においても、試験終了時まで0.1~0.15程度の小さな摩擦係数のままであった。

この結果より、前述の深絞り試験において、WC/Cコーテッド工具を用いた場合にLDRが向上し、Fmaxが減少した原因の1つとして、工具と被加工材間の摩擦係数の減少が考えられる。



(a) 室温



(b) 50℃

図9 摩擦摩耗試験機による摩擦係数測定結果

最後に、WC/Cコーテッド工具と比較のためのノンコーテッド工具によるプレコート鋼板の無潤滑連続深絞り試験をそれぞれ行った。図10に試験途中および試験後の工具（ダイ端面）表面粗さ（Ry）と、深絞り品側壁部の表面粗さ（Ry）測定結果を示す。ノンコーテッド工具の場合には、試験回数の増加に伴いRyが徐々に増大する傾向が認められたが、WC/Cコーテッド工具の場合には、12000回試験後においても、工具の表面粗さはほとんど変化が認められなかった。また深絞り加工された成形品の表面粗さについては、燃料缶の生産において問題となるような大きな傷が発生する加工回数まで試験を行っていないため、それほど大きな差異は認められなかったが、WC/Cコーテッド工具により12000回目に得られた深絞り品の表面粗さは、初回に得られたものとほぼ同程度の粗さであることがわかった。

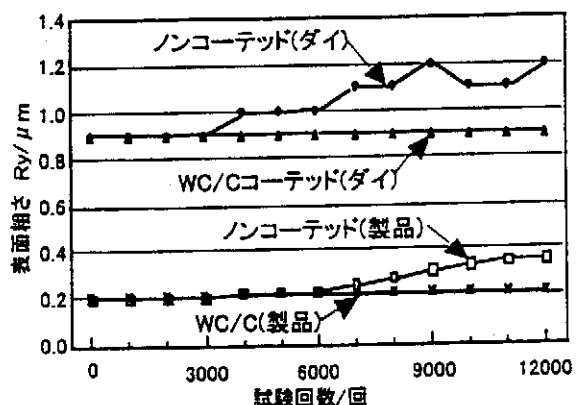
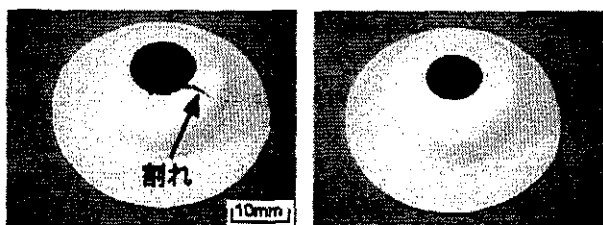


図10 試験回数増加に伴う深絞り品側壁部と工具の表面粗さの変化

なお、ノンコートド工具により成形された、試験末期に得られた深絞り品には、図11 (a) に示すように、深絞り前に位置決め用として穴抜きされた穴が大きく広がり、縁部には割れの発生が頻繁に認められた。これに対し、WC/C コートド工具により成形された深絞り品にはこのような割れは一切認められなかった。

以上の深絞り試験や摩擦摩耗試験の結果から、WC/C コートド工具を用いれば、工具と材料間の摩擦係数が軽減でき、その結果として被加工材の工具への凝着等による粗さの増大が防止できることが判明した。さらに、連続深絞り試験の結果から、WC/C コートド工具を用いればノンコートド工具に比べ、長寿命が得られることがわかった。さらにノンコートド工具により成形された深絞り品にのみ、試験末期に底部穴の周囲に割れの発生が頻繁に認められたことから、工具への WC/C コーティングは燃料缶製造における、底穴部の割れ発生の防止にも効果があることが判明した。



(a) ノンコートド工具により得られた深絞り品 (b) WC/C コートド工具により得られた深絞り品

図10 試験回数増加に伴う深絞り品側壁部と工具の表面粗さの変化

#### 4. 結言 (まとめ)

塑性加工工具の寿命向上や製品精度向上を目的とし、各種被加工材の深絞り工具への硬質膜コーティングの有効性を実験的に調査した。

その結果、パウダリングなどの表面損傷が発生しやすい合金化溶融亜鉛めっき鋼板の深絞り加工においては、反応性スパッタリング法により成膜される、格子間にタングステンカーバイトをもつアモルファスカーボン (WC/C) 膜をコーティングした工具を用いれば、ノンコートド工具を使用した場合に比べ、パウダリングの発生を低減でき、これにより深絞り品のすり傷きの発生程度が低減できる (表面粗さの悪化を防止できる) ことがわかった。

さらに、同膜をコーティングした工具は、プレコート鋼板の深絞り加工においても、製品傷の発生防止効果が高く、限界絞り比も向上できること、そして絞り製品の底部穴周囲の割れ発生の防止にも効果があることが、本研究により明らかになった。

最後に、本研究において深絞り加工工具への硬質膜コーティング有効性が見いだされたことから、工具寿命向上や製品精度悪化防止および離型性向上の観点から、深絞り加工工具以外の塑性加工工具への硬質膜コーティングが応用されることを期待する。

#### 参考文献

- 1) 古閑・熊谷・村川：平9 塑加春講論 (1997), 383
- 2) 例えば、川瀬：塑性と加工, 24-275 (1983), 1248.
- 3) 金井・岡・堤：新日鉄技報 (1994), 26.
- 4) 吉田監・薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック (1985), 272.