

鋼板のプレス成形性に及ぼす表面形態変化の影響

森川 恭臣*・加藤 淳*・入江 広司*²・清水 正文*²

Effect of Change of Surface Morphology on Press-formability of Steel Sheets

Yasuomi MORIKAWA, Jun KATO, Hiroshi IRIE and Masafumi SHIMIZU

Synopsis : To clarify the influence of plastic deformation of asperities under contact with forming tool on press-forming behavior, the relationship between drawing force and bead holding force was evaluated for various types of steel strips. The result showed that the friction coefficient between the steel strip and the forming-tool decreased as the bead holding force was increased. However it was found that, particularly for low-strength steel strips, the friction coefficient decreased considerably as contact pressure became near to the yield-strength. A number of micro-holes were observed after the drawing tests of low strength steels, which were formed by the plastic deformation during the drawing process. We conclude that these holes acted as micro oil reservoirs during the drawing and were responsible for drop of the friction coefficient. The above-mentioned dependency of friction coefficient on bead holding force was not observed for galvanized steels (GA) and organic lubricant film coated GA. To evaluate the effect of contact pressure dependent friction coefficient on the drawing force, a finite element method analysis, which incorporated the effect of contact pressure dependent friction coefficient was developed. Using this finite element analysis, we confirmed that the increment of the drawing force could be suppressed by choosing a suitable range of the bead holding force.

Key words: sheet metal forming; friction; plastic deformation; galvanized steel sheet; drawbead.

1. はじめに

合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA) や潤滑鋼板, それらの基材でもある高強度鋼板等, 多種多様な鋼板の自動車分野等における適用比率, 適用部位拡大とともに, プレス成形技術の高度化が進みつつあり, 同時にプレス成形シミュレーションに対する精度向上ニーズも強まっている。現在の3次元プレス成形シミュレーション技術は十分実用の域に達しているが, 鋼板種類の増加に伴って精度向上に向けた幾つかの課題が明らかになっている¹⁾。特に自動車分野等のシミュレーションが多用される分野において, その精度に及ぼす影響が大きい課題は, 鋼板種類に応じた絞りビード引抜力の最適設定である。ここで, 鋼板のプレス成形加工において, ビード金型部を通過する際の引抜力は, 変形抵抗成分と摩擦力成分から構成される。変形抵抗成分の影響に関しては有限要素法等による解析が進んでいるが^{2,3)}, 摩擦力成分の影響に関する解析はあまり報告されていない。一方, 小豆島らが提示した塑性加工の潤滑モデルから, 鋼板表面が金型と接触することで生じる微細突起部の塑性変形が潤滑挙動に影響し, 摩擦係数の変化をもたらすことが示唆される^{4,5)}。そこで, 本研究においては, 鋼板表面の微細突起部の塑性変形が摩擦係数に及ぼす効果に着目し, 各種鋼板について表面塑性変形がビード引抜力に及ぼす影響を評価した結果を報告する。

2. ビード成形試験

2.1 供試材

Table 1に本研究で用いた供試材を示す。降伏強度の異なる冷延鋼板 (Cold), GA 鋼板 (GA), 有機系潤滑被膜付き GA 鋼板 (GA-R) を用いた。ここで, GAの付着量は 45 g/m^2 である。また, 有機系潤滑被膜は, GA 鋼板 (No. 5) 上に 1 g/m^2 を塗布・乾燥した。板厚は約 $0.7, 1 \text{ mm}$, 表面粗度 Raはダル仕上げにより約 $1.0 \mu\text{m}$ に調整した。供試材の幅は摩擦係数評価の場合には 10 mm , ビード引抜力評価の場合には 20 mm とした。潤滑油は極圧剤等の添加剤の作用を無視するためにパラフィン系ベースオイルを用い, ビード成形試験直前に両面塗布後30分間立てかけて放置し, 油膜厚さをほぼ一定としてから供試した。

Table 1. Materials tested.

No.	Type	YP (MPa)	Ra (μm)	Thickness (mm)
1	Cold	140	1.01	1.0
2		310	1.06	1.0
3		370	0.86	1.0
4		710	0.93	1.0
5	GA	160	1.09	0.7
6	GA-R	160	1.09	0.7

平成14年4月30日受付 平成14年7月18日受理 (Received on Apr. 30, 2002; Accepted on July 18, 2002)

* (株) 神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Lab., Kobe Steel, Ltd., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku Kobe 651-2271)

*2 (株) 神戸製鋼所加古川製鉄所技術研究センター (Research & Development Lab., Kobe Steel, Ltd.)

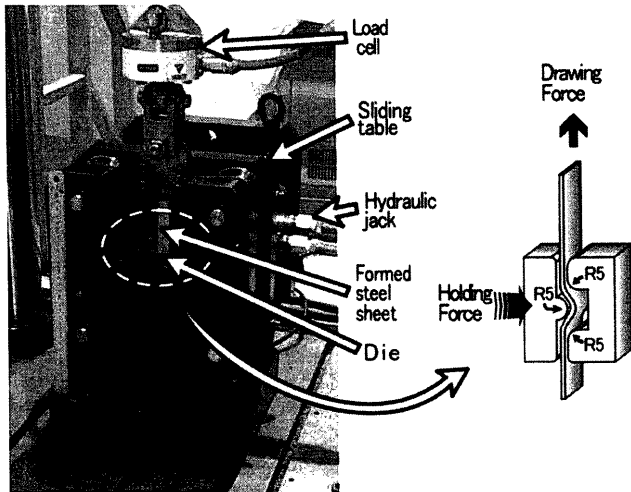


Fig. 1. Appearance of press forming tester and schematic drawing of forming method.

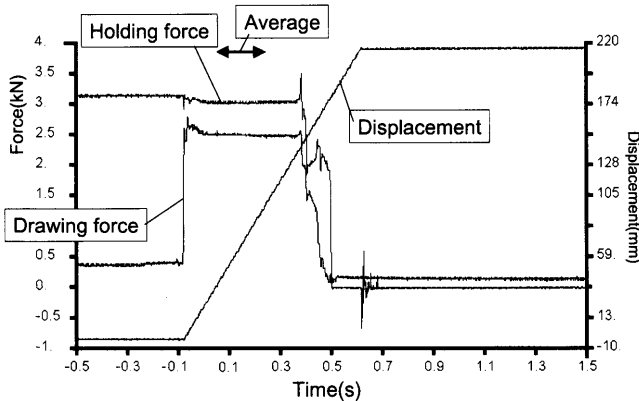


Fig. 2. Example of sampling data for press forming tester.

2.2 ビード成形試験方法

引抜試験を行った成形性シミュレータを Fig. 1 に示す。本装置は池らによるシミュレーション試験法⁹⁾を参考に作成したシミュレータであり、高速衝撃試験機に据え付けて使用した。高速衝撃試験機を使用することにより、実プレス機相当の安定した速度で鋼板引抜が可能である。ビード金型の押付は油圧により行い、引抜力および押付力の両方をロードセルで測定した。引抜力、押付力および試験材の変位はストレージスコープに取り込み、データを GPIB インターフェイスで接続されたパソコンで受信し、引抜力、押付力の平均値の算出を行った。データ受信ソフトによる、これらデータの表示例を Fig. 2 に示す。本研究では、押付力 max.20 kN、引抜速度 300mm/sec の条件によって試験した。なお、引抜力、押付力の平均値は、Fig. 2 に示す様な安定領域から算出した。

Fig. 3(a), (b) に、本研究で用いたビード金型の形状を示す。金型の表面粗度は $R_a 0.04 \mu\text{m}$ であり、表面硬度は $H_{RC} 65\sim 68$ である。金型(b)は、後述する様に、摩擦係数の面圧依存性を評価する際に用いた。

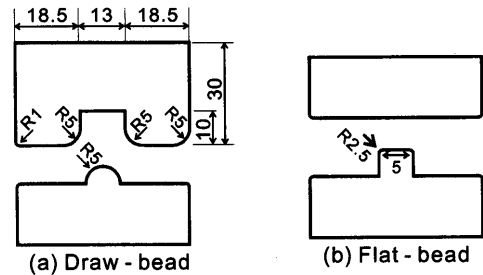


Fig. 3. Bead shape for evaluation of formability.

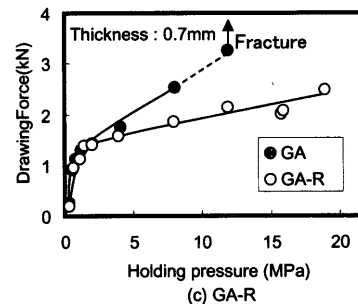
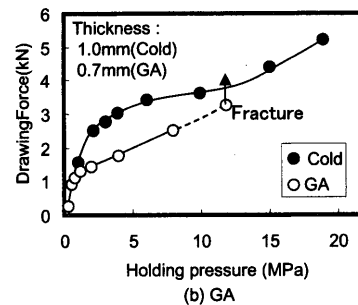
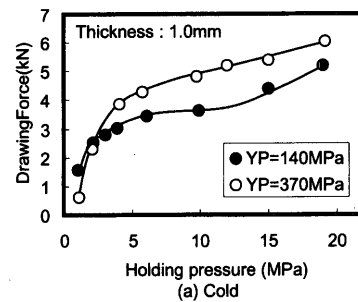


Fig. 4. Effect of yield stress of steel sheet and holding pressure on drawing force. (a) Cold, (b) galvanized steel sheet (GA), (c) organic lubricant film coated GA (GA-R).

2.3 実験結果

2.3.1 ビード引抜力

Fig. 4 に、2 種類の降伏強度 (YP) を有する冷延鋼板の引抜試験結果(a), GA 鋼板の引抜試験結果(b), および有機系潤滑被膜の有無による引抜力の違いを示した結果(c)を示す。

まず降伏強度の異なる鋼板(a)では、どちらの鋼板も金型押付力の増加に伴って引抜力が急激に増加し、ある押付力以上では緩やかに増加する。また低強度鋼板(YP=140 MPa)では、押付力 7~15 MPa の領域において、押付力の

増加量が抑えられる現象が見られる。

GA被膜を有する鋼板(b)では、比較のために示した140MPaの降伏強度を有する冷延鋼板(No. 1)と同様の傾向で引抜力が増加するが、低強度鋼板で見られたような押付力の増加量が抑えられる現象は見られない。約3MPa以上の押付力では、押付力にほぼ比例して引抜力が増加する。なお、押付力3~5MPa付近における引抜力の差は、冷延鋼板とGA鋼板の板厚差によるものである。

同様に、(c)に示したように有機系潤滑被膜付きGA鋼板においても、約3MPa以上の押付力では、押付力にほぼ比例して引抜力が増加しているが、その増加傾向は被膜無しGA鋼板と比較すると抑制されている。

2.3.2 摩擦係数

Fig. 5に、冷延鋼板(a)、GA鋼板(b)、および有機系潤滑被膜を有するGA鋼板(c)の摩擦係数の面圧依存性をフラットビード金型を用いて測定した結果を示す。

まず(a)について、いずれの強度の鋼板も、接触面圧の増加とともに全体的に減少する傾向にあるが、特に低強度鋼板(YP=140MPa)の場合、130~160MPaの面圧域で摩擦係数が0.06近く、約1/2に減少する。また、YP=310MPaの場合も、より高面圧側で、より幅広い面圧にわたって減少する傾向が見られる。

次に(b)のGA鋼板の摩擦係数の面圧依存性測定結果は、降伏強度がほぼ同じ冷延鋼板(No. 1)と比較すると、GA鋼板の摩擦係数は面圧上昇に伴う低下傾向が顕著であり、広い面圧域において冷延鋼板よりも低い摩擦係数を示す。また、冷延鋼板で見られた様な摩擦係数が狭い接触面圧域で減少する現象は見られない。

また(c)に示したように有機系潤滑被膜付きGA鋼板の摩擦係数は広い面圧域にわたって、ほぼ0.04の安定した値を保っており、面圧依存性は見られない。

2.3.3 表面塑性変形

Fig. 6(a)は、フラットビード金型による摺動試験を行った後の冷延鋼板の表面形態とその模式図を示している。いずれも微細突起部が平坦に押しつぶされている様子が観察され、高強度材(YP=710MPa)では表面の塑性変形域は点在してお互いに独立している。一方、低強度材(YP=140MPa)では接触面圧の増加に伴って微細突起部が拡大し、160MPa付近で塑性変形域が繋がって閉領域を形成し始め、260MPaでは面上の塑性変形域の中に点上の凹部が点在する状態となる。

Fig. 6(b), (c)はGA鋼板、および有機系潤滑被膜付きGA鋼板の摺動後の表面形態とその模式図である。接触面圧によって特徴的な形態差はいずれも認められない。有機系潤滑被膜の有無によらずGA被膜の塑性変形部表面には微細な窪みやクラックが多数生成されており、大きな凹部の面積率はあまり変化していない。また、有機系潤滑被膜は表面に残存している。

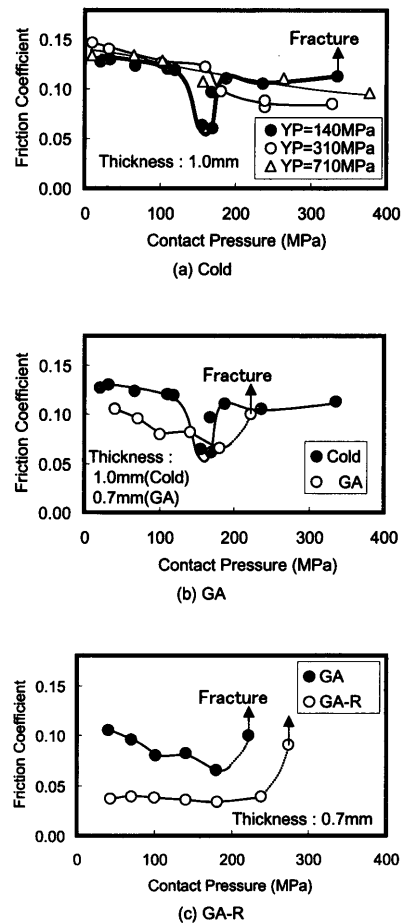


Fig. 5. Relation between friction coefficient and contact pressure. (a) Cold, (b) galvanized steel sheet (GA), (c) organic lubricant film coated GA (GA-R).

3. ビード成形シミュレーション

3.1 シミュレーションモデル

前項の結果を基に、鋼板の摩擦係数変化がビード引抜力に及ぼす影響を評価するために、低強度鋼板(YP=140MPa)について接触面圧を変数とする関数として摩擦係数を扱った有限要素法によってシミュレーションを行った。ここで摩擦係数はFig. 5(a)の結果を単純化し、Fig. 7の関数を仮定した。

有限要素プログラムとしてABAQUS 5.8 Explicit を使い、Fig. 7に示した摩擦係数を計算するプログラムを別途FORTRANにより作成し、外部サブルーチンとして組み込んだ。計算に用いたビード成形モデルとして、Fig. 3(a)に示した成形金型と同形状の剛体を取り扱った。計算手順は、Step 1) 上金型(凹形状)を固定して下金型(凸形状)を上金型に接近する方向に変位させ鋼板を挟むように押し付け、Step 2) 鋼板がビード形状に変形完了した後に金型に所定の荷重をかけ、Step 3) 鋼板の端を固定して両金型を引抜方向と逆方向に変位させた。引抜力は、Step 3)において鋼板の端部(固定端)に現れる反力の合計値を平均して求め

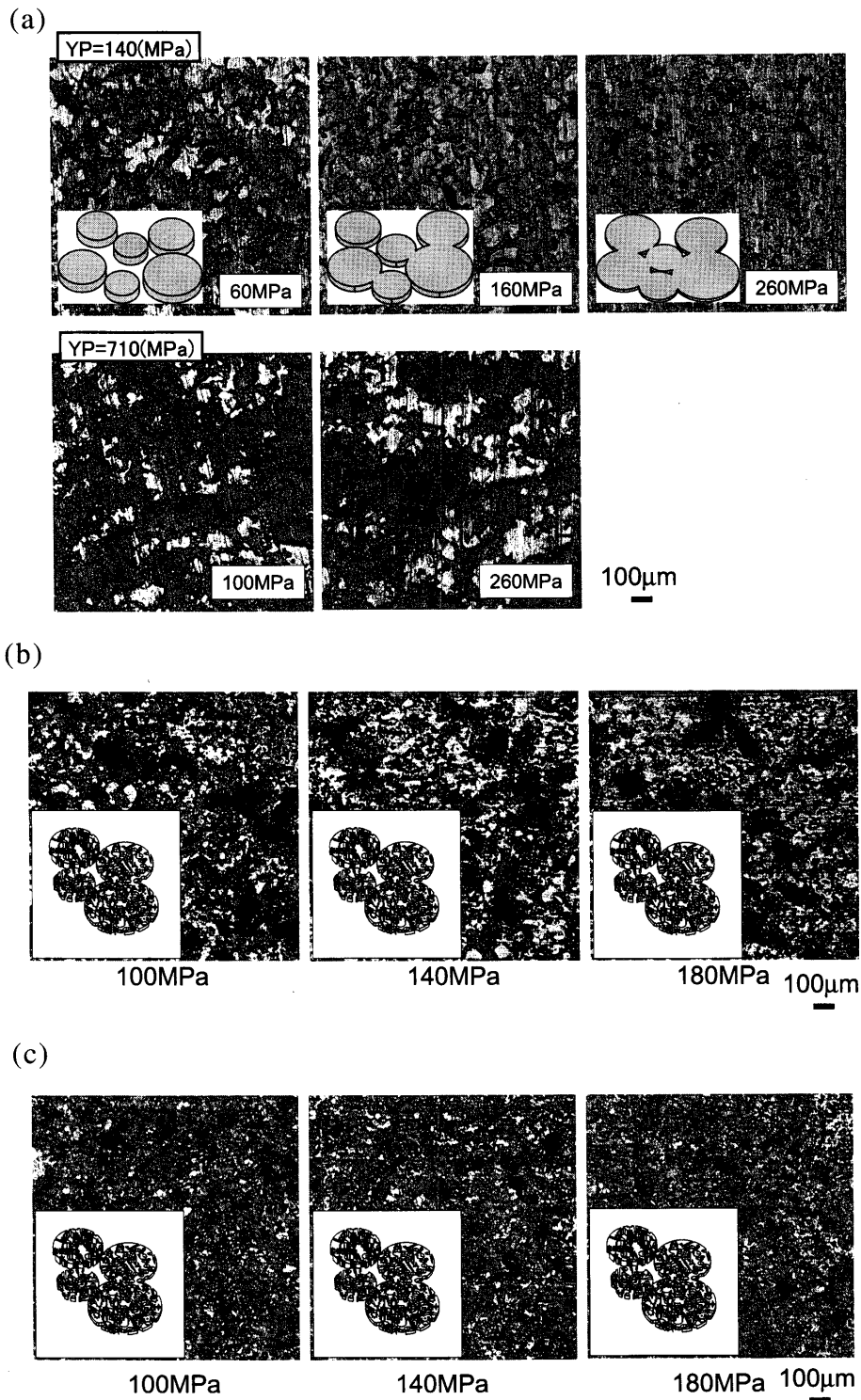


Fig. 6. Surface morphologies of steel sheets and the schematic drawing after the forming test with different conditions. (a) Cold, (b) galvannealed steel sheet (GA), (c) organic lubricant film coated GA (GA-R).

た。

3.2 シミュレーション結果

Fig. 8に、金型押付力が14 MPaの場合にビード金型内部に発生する接触面圧を示す。流入側では広い範囲で面圧が発生しているが、ビードの山を越えた流出側では板厚が減少して接触面圧の発生は局所的である。流入側の接触面圧の最大値はほぼ100~200 MPaの範囲であり、ビード近傍

の局所的な接触域では300 MPaを越える計算結果も得られた。

Fig. 9に、引抜力のシミュレーション結果を示す。摩擦係数一定とした場合は、鋼板がビード形状に沿って変形する押付力を越えるとほぼ直線上に引抜力が増加する。一方、摩擦係数としてFig. 7の関数を使用した場合には、Fig. 4(a)に示した様な引抜力の増加量が抑えられる傾向が、押付力

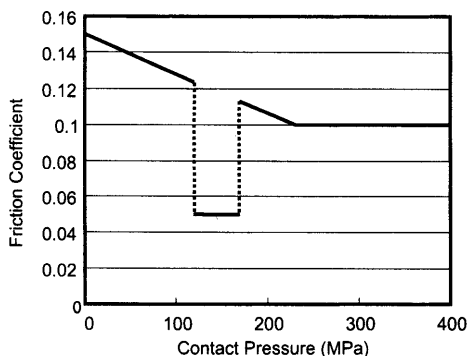


Fig. 7. Approximate function of friction coefficient for FEM simulation.

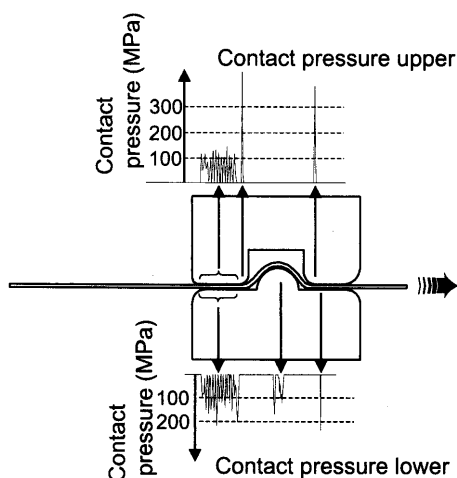


Fig. 8. Distribution of contact pressure on mold under drawing of steel sheet.

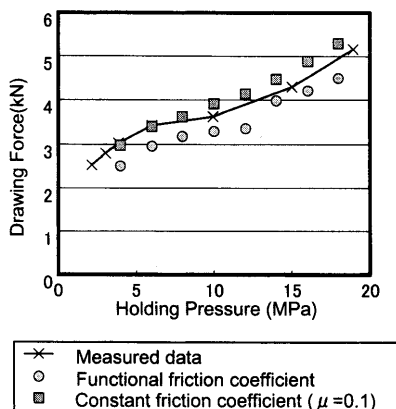


Fig. 9. Comparison of drawing force between measure and FEM simulation with two friction coefficient.

7~12 MPaの領域において見られる。実測データとの差異は、摩擦係数として関数を用いた方が大きいですが、関数の設定によってより幅広い接触面圧域において実測値との差異を最小化することが可能である。

4. 考察

Fig. 5(a)に示した様な、低強度材において局所的な面圧域で摩擦係数が急激に低下する現象は、小豆島らが提案している潤滑モデル⁴⁾によると、微細突起部の塑性変形によって形成された閉領域から平坦部に滲み出した潤滑油によるマイクロEHL効果が作用したと考えられる。このような機構は、局所的な摩擦係数の低下が、(1) 材料の降伏応力に近い面圧域で起こり降伏応力の上昇によって高面圧側にシフトすること、(2) 潤滑油を閉じこめる閉領域の生成前後の面圧で起こること、(3) 僅かな面圧の変化で起こり低下量が大きいこと、から示唆される。

一方、GA鋼板や有機系潤滑被膜付きGA鋼板では、低強度鋼板の様な摩擦係数変化は起こらない。GA鋼板の場合には、有機系潤滑被膜の有無によらず、面圧の上昇によってGA被膜表面に窪みやクラックが生成しており、潤滑油を維持する効果が高まると推察される。しかし、窪みやクラックは全面に細かく分散しており、潤滑油が滲み出す効果が特定の面圧から急激に作用しうる表面形態ではないと考えられる。なお、有機系潤滑被膜の有無に係わらず窪みやクラックの様な表面損傷の発生状況はほぼ同じであり、摩擦による剪断応力よりもビード通過時の曲げ曲げ戻し変形によって生じている可能性が高い。さらに、潤滑被膜がGA鋼板上にある場合には潤滑被膜自体の潤滑特性の影響が大きく、表面形態や面圧に依存した潤滑油の作用効果が現れにくいと思われる。

このような摩擦係数の面圧依存性が引抜力に及ぼす影響を定量的に評価するために、低強度鋼板 (No. 1) について有限要素法によるシミュレーションを行った結果、Fig. 8に示した様にビード金型の内部で発生する面圧が主に100~200 MPaの間で分布することを確認した。これは、Fig. 5(a)で示した様な局所的な摩擦係数低下が起こる面圧域(130~160 MPa)を含んでおり、ビード引抜力に摩擦係数の面圧依存性が影響しうることを示していると考えられる。

Fig. 4(a)に示した引抜力と押付力の関係において、両者の関係は2つの領域に分けて考えることができる。一つは変形抵抗成分が支配的な領域であり、押付力が増加するとビード形状に沿った鋼板の変形が完了するまで引抜力は急激に増加する。この領域では押付力が低いために摩擦成分の影響は僅かである。もう一つは摩擦成分が支配的な領域であり、変形抵抗成分がほぼ一定(面圧上昇とともに板厚が減少して微減)であるために押付力の増加による引抜力の増加は摩擦成分の増加分にほぼ相当する。Fig. 4(a)に示した様に、低強度鋼板において押付力の増加量が抑えられた現象は、近似的な摩擦係数関数を用いたシミュレーション結果と傾向がほぼ一致し、摩擦成分が支配的な領域である押付力7~12 MPaで摩擦係数変化の影響が現れていると考えられる。一方、局所的な摩擦係数の低下現

象が起こらないGA鋼板や有機系潤滑被膜付きGA鋼板においては、押付力の増加にほぼ比例して引抜力が増加することを実験的に確認している。従って、鋼板表面の塑性変形の結果として生じた摩擦係数の面圧依存性はビード引抜力に影響し、その影響は摩擦力成分が支配的な押付力範囲において観察されると言える。同様の現象は、プレス加工時の局局面圧によってはより高強度の鋼板においても起こる可能性がある。

低強度鋼板における特異な摩擦係数変動が起こる接触面圧範囲は狭く、面圧の上昇によってマイクロEHL効果が弱くなる機構等は必ずしも明らかではない。このような現象の発現機構を明確にすることは、プレス成形技術の高度化やシミュレーション技術の高精度化に寄与するだけではなく、例えば現行よりもはるかに薄い潤滑被膜でも潤滑性が得られる潤滑鋼板の研究開発等においても有益な知見となる。従って、表面の塑性変形挙動と関連付けてマイクロEHLの作用機構を定量的に解明することが今後の課題になると考えられる。

5. まとめ

鋼板と金型の接触による鋼板表面の塑性変形がプレス成形挙動に及ぼす影響を明らかにするために、ビード成形部の押付力と引抜力の関係および接触面圧と摩擦係数の関係を実験的に評価した。また、鋼板表面の塑性変形が摩擦係

数に影響する機構に関して考察し、ビード引抜力に及ぼす摩擦係数の影響を評価するために有限要素法によるシミュレーションを行った。得られた結論を以下に示す。

(1) 鋼板の降伏強度付近の接触面圧で摩擦係数が局部的に低下する現象が起こる。同様の現象はGA鋼板や有機系潤滑被膜付きGA鋼板では認められず、表面の塑性変形の形態と潤滑油の特性に依存する現象であると考えられる。

(2) 摩擦係数の面圧依存性はビード引抜力に影響する。影響は摩擦力成分が支配的な押付荷重域に現れ、ビード引抜力の増加率が抑制される。

(3) 摩擦係数を関数として扱った有限要素計算によって摩擦係数の面圧依存性を考慮したビード成形シミュレーションが可能である。

文 献

- 1) 栗山幸久：第175・176回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(2001)，1.
- 2) H.Sunaga and A.Makinouchi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 67.
- 3) Y.Nagai: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 755.
- 4) A.Azushima, T.Uchida, K.Imai, H.Yamagishi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **37** (1996), 1149.
- 5) A.Azushima and M.Sato: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **38** (1997) June, 61.
- 6) H.Ike: *Proc. of 1991 Jpn. Spring Conf. for Technol. of Plast.*, Vol. I, (1991), 259.