

# 薄板の二次塑性加工における表面損傷と そのメカニズム

池

浩\*

## Mechanisms of Sheet Surface Damage in Secondary Metalworking Processes

Hiroshi IKE

### 1. はじめに

表面損傷 (Surface damage) とは一般的には材料表面に生じる損傷の総称であろうが、本稿では力学的作用による素材の加工、それも2次塑性加工において被加工材表面に生じる損傷を対象とする。

典型的な表面損傷は「焼付き」(Seizure, Scuffing)あるいは「かじり」(Galling, 擦りむくの意)などと呼ばれる肉眼的にも認められる大規模なものである。しかし製品の表面仕上げに対する要求の度合いは千差万別であり、問題となる表面損傷の程度も場合によっては微視的なものになってくる。またかじり・焼付きもトライボロジック的観点から言えば微細な“表面損傷”の延長線上にあるとも言える。さらに、最近では表面処理鋼板にみられるような特殊な表面損傷も生産技術の面からは大きな問題となっている。

このような背景を考慮して、本稿では代表的な表面損傷である大規模な焼付き・かじりに限らず、被加工材に力学的作用によって生じる変化を平滑化等も含め表面損傷として広く問題をとらえてみる。

なお本稿は個別の表面損傷を独立に解説するのではなく、一般的なトライボロジックの観点から現象を整理し、その例として個別の表面損傷をとらえようとするものである。

### 2. 板材成形のトライボロジックと表面損傷の特徴

薄板の塑性加工における表面損傷は塑性加工のトライボロジック、なかでも板材のプレス成形の次のような特徴に影響を受ける。

(1) 鍛造などに比べれば平均接触面圧は一般的には低い、局部的には板材の1軸降伏応力の程度までは達する。接触面圧の高い部分は曲げ変形と組み合わされていることが多い。

(2) 加工が板厚断面内の引張応力により駆動され、また板厚が小さい。したがって主たる成形不良現象である引張破断やしわ発生(および面形状不良)などの抑制を中心にトライボロジック的条件を決定することが多い。

(3) 板材は(体積あるいは板厚に比して)比表面積が大きく、また加工中に工具と接触する面積が大きい。表面積拡大率はしごき加工とせん断加工を除き大きくはない。そのため板材の初期の表面の性質(表面あらさ、化学組成、下地への密着性、延性、硬さなど)が大きな影響を及ぼす。

(4) 工具と被加工材は一般に間欠的にすべり接触する。摺動は被加工材の特定箇所注目すれば数回繰り返して行われることがある。工具では数千、数万回以上の繰返し摺動が行われる。一回の摺動距離は通常100 mm程度までである。

(5) 加工力の大きさそのものが問題になることは少ないので、摩擦を下げることに對する要求は上記の破断やしわの発生を回避するための間接的な必要性、および表面損傷の回避と表裏一体のものであることが多い。

(6) 加工力を下げる要求度が小さく、生産性や表面仕上がりへの優れた加工が好まれるので、冷間加工が主体である。したがって通常、接触面温度は室温から200°C以下と考えて良い。

(7) 加工速度は $0. X \text{ ms}^{-1} \sim X \times 10 \text{ ms}^{-1}$ の範囲が多い。したがって動水的潤滑効果もかなりの役割を果たす。

(8) 潤滑剤は後処理の容易さを重視して低粘度の油性のもの、あるいは防錆油付着のまま用いられることが多い。しごき加工のように冷却能が重視される場合は水性潤滑剤が用いられる。

(9) 用途、部位によっては表面仕上げに対する要求が非常に厳しく、表面損傷の回避は成形技術全体の中で主要な課題となる。

平成元年10月25日受付 (Received Oct. 25, 1989) (依頼解説)

\* 理化学研究所素形材工学研究室研究員 工博 (Materials Fabrication Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1 Hirosawa Wako 351-01)

Key words: surface damage; sheet metal; galling; ploughing; micro-cutting; cracking.

### 3. 表面損傷の分類とそのメカニズム

#### 3.1 表面損傷機構の分類

表面損傷の分類はいくつかの観点から可能であるがここではメカニズムによって分類する。表面損傷機構を広義にとらえればその発生原因は次の3種類に大きく分けられよう。

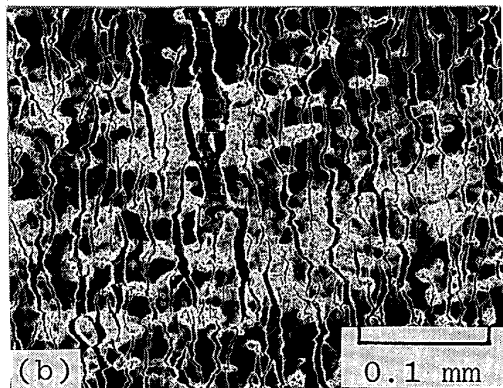
(a) 塑性変形 (板材表面内の圧縮/引張ひずみ) によるもの

(b) 板材表面の垂直応力によるもの

(c) 摩擦せん断応力およびその作用したもとの摺動によるもの

以下ではこの大分類にしたがって損傷の分類とメカニズムを述べる。

(a1) 塑性変形により表面層が破壊し、クラックを生じるかあるいは粉末状態で脱落する表面損傷。表面(層)の延性が乏しく、または表面層と下地の密着性が乏しいような場合に生じる。変形様式別にみると板面内の2軸引張りあるいは1軸引張りではクラック発生にとどまる傾向があるが、引張り・圧縮 (あるいは2軸圧縮) では表面層が剥がれて脱落しやすい<sup>1)</sup>。したがって板材成形でしばしば生じる曲げ・曲げもどし変形では、表面層の



←→ 引張り/摺動方向

(a) 1軸引張り<sup>2)</sup> (b) ビード引抜き

写真1 パウダリングを生じた鋼板表面の走査型電子顕微鏡像 (合金化溶融亜鉛めっき鋼板)

粉碎と脱落まで進む危険性が高い。

典型的な例としては亜鉛系表面処理鋼板のパウダリングがあげられる。写真1 (a)<sup>2)</sup> は合金化溶融亜鉛めっき鋼板の1軸引張り試験片の破断部近傍、写真1 (b) は同種材料のビード引抜き試験片のSEM写真である。(a) は自由変形、(b) は摺動と曲げ・曲げもどしの結合した変形であるが、両者とも表面層が引張り・圧縮方向あるいは引抜き方向に直角にひび割れし、一部は脱落している。パウダリング (Powdering) はその脱落粉末の集合体が工具表面に付着あるいは介在して、ピンブルと呼ばれる (b1) で述べる別の肉眼的な表面損傷を生じること、またはその防止のために頻繁な工具表面の手入れを要すること、さらに使用時の耐食性を低下させることが特に問題となる。工具との接触と関わりのない変形、いわゆる自由変形がその主因であるので<sup>3)</sup>、単なる引張りあるいは圧縮の変形 (あるいはその組合せ) でも生じ得る。

(a2) 肌荒れと呼ばれるような自由表面の粗化。これは通常表面損傷の中には入れない場合が多いが被加工材の表面仕上げを問題にするならば同等な扱いをする必要がある。肌荒れのメカニズムは塑性変形に伴う結晶粒集合体のグルーブ運動と考えられ、その原因は活動すべり系の違いと考えられる。肌荒れは工具面に境界接触している部分ではその拘束のため発生せず、逆に厚膜の流体潤滑域では非接触域と同様に発生の危険性がある。なお肌荒れの程度 ( $R_a$ ) は相当塑性ひずみ  $\bar{\epsilon}$  と結晶粒径  $d$  に依存し、 $R_a = kd\bar{\epsilon}$  で表されるとされている<sup>4)</sup>。

その他材質に起因する表面損傷 (表面不良) として自由変形で現れるものとしてはストレッチャー・ストレイン、リジニングなどもあるがここでは触れない。

(b1) 巨視的板材形状の不整。板面垂直方向に加えられた力で生じる損傷には板厚全体にわたる変形によるものと、表面層にほぼ限定された損傷とがある。前者には板材のハンドリング中に局所的な打撃によって生じるものが多いが、(a) と関連するものとしては星目またはピンブル (Pimple, 吹出物の意) と称する板材の所部的変形による不良 (図1参照) があげられる。これは工具表面に存在する微細な異物に起因して発生したパネル裏面の微小な局所的盛り上がりをいう。

(b2) ほぼ表面層に限定された微視的な表面形状不整。

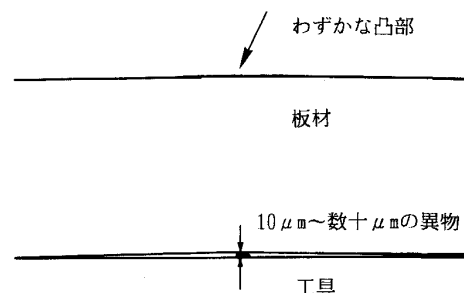


図1 ピンブル発生 の 模式図

微細な異物の押し込み傷であるとか、局部的に他の物体との接触で生じた表面あらさの不整がある。他の物体の表面あらさの方が小さい場合は局部的平滑化となるが周囲の表面性状との違いが問題になれば表面損傷である。

(b3) 潤滑剤の封じ込めによる表面の粗化。接触界面に取り残された液体潤滑剤が異物の役割を果たし、被加工材表面に“押し込み”の跡(くぼみ, Pit)を残す。圧延などでは通称“オイルピット”呼ばれ、混合潤滑機構と表裏一体の関係にある。被加工材の表面あらさに対する要求が厳しい場合は問題となる。

(c) この項が一番問題となる。巨視的摩擦力の作用の元で表面を“損傷する”方法としては一般的に微視的塑性変形、切削、掘り起こし、クラック発生というメカニズムが考えられる。以下項目ごとに述べる。

(c1) 微視的変形 (Microscopic plastic deformation of surface)

被加工材の表面突起を平滑化 (Flattening) あるいは押しつぶし (Squash) するなどの微視的な塑性変形である。目的・状態によっては、表面損傷というよりは表面加工といえる。

(c2) 切削 (Cutting) (図 2(a))

工具前方に切り粉を生成しつつ溝を掘る。巨視的な切削を微視的な機構に置き換えたものである。

(c3) 掘り起こし (Ploughing) (図 2(b))

鋤 (Plough) で土を掘り起こすように材料を周辺に流動させながら溝を掘る。定常的な長い溝と工具凝着物発生期の間欠的な溝(写真 2(b)<sup>5)</sup>)がある。後者は微細な掘り起こしの初期的な段階であり、白色に見える。掘り起こしの鋤に相当するものは工具に凝着した被加工材(著しく加工硬化したものの<sup>6)</sup>)自身であるので、一種の“ともがね”の組合せによる摺動を生じることとなる。なお掘り起こしの際に工具凝着物が板材に戻る現象(再移着, Back transfer)が頻繁に生じることも観察される<sup>7)</sup>。

(c4) クラック発生 (Cracking)

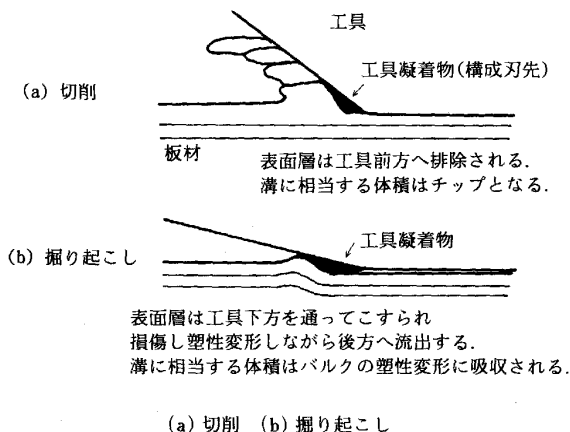
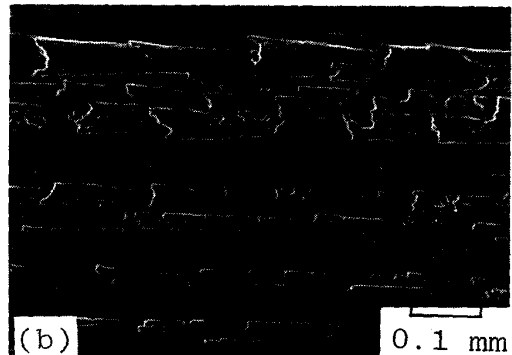
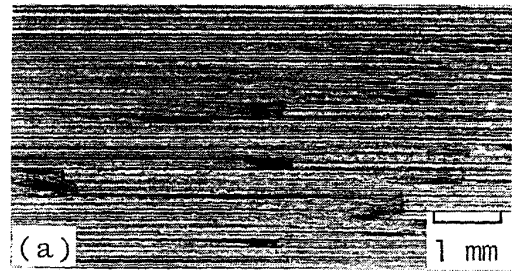


図 2 切削と掘り起こしの機構の比較



← 工具の移動方向

(a) 軟鋼 (b) 半硬質アルミニウム<sup>5)</sup>  
写真 2 工具凝着物の再移着

工具出口後方から斜め前方にかけての深さ方向のクラックを発生する。これは表面層における引張応力の作用によるものである。

### 3・2 かじり・焼付きのメカニズム

実際の表面損傷は上記の基本的な機構およびその他の補助的な機構が組み合わせられて生じる。また被加工材(特に表面層)の材質の特徴と組み合わせられて実際の不良現象となる。ここでは表面損傷の中で最も重要な損傷メカニズムであるかじり・焼付きについてやや詳しく述べる。

#### 3・2・1 工具凝着物 (Pick up) の発生

かじりの発生している場合、必ず工具凝集着物が生じている。(写真 3 参照) 小さいものはサブミクロン、大きいものは数 mm の幅の被加工材表面層の塊となって摺動中に工具に付着し、構成刃先 (Built-up edge) のように作用する。(ただし摺動を停止して工具と被加工材を分離すると被加工材の方に戻り、観察しにくい場合もある。) この工具凝着物の発生条件はまだ解明されていないと言ってもよいが、それはどこまで微視的な工具凝着物を対象とすべきか判然としないことにもよっている。通常問題とされない製品表面でも顕微鏡でみれば工具凝着物とそれによる掘り起こしが生じている。むしろ潜在的には工具凝着物の“種(原子レベルに近い金属移着)”は癌遺伝子のようにどこにでもあると考え、その成長条件あるいは発現条件を検討すべきであろう。被加工材の初期の表面仕上げにもよるが、肉眼的に光沢の変化等の

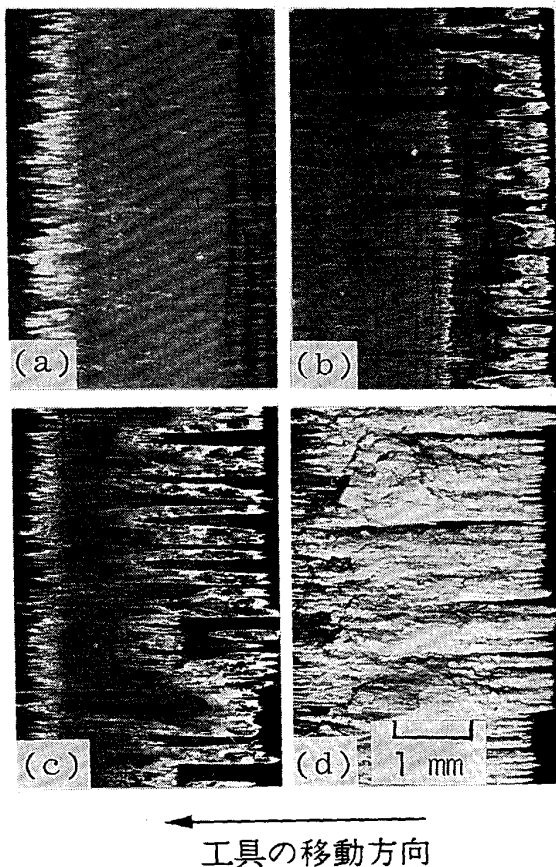


写真3 損傷の発達に伴う工具凝着物の変化<sup>13)</sup>. 半硬質アルミニウム板材, WC 工具. シリンダー油潤滑. 接触弧(左側 1.5mm)にベアリング部(4mm)が接続している

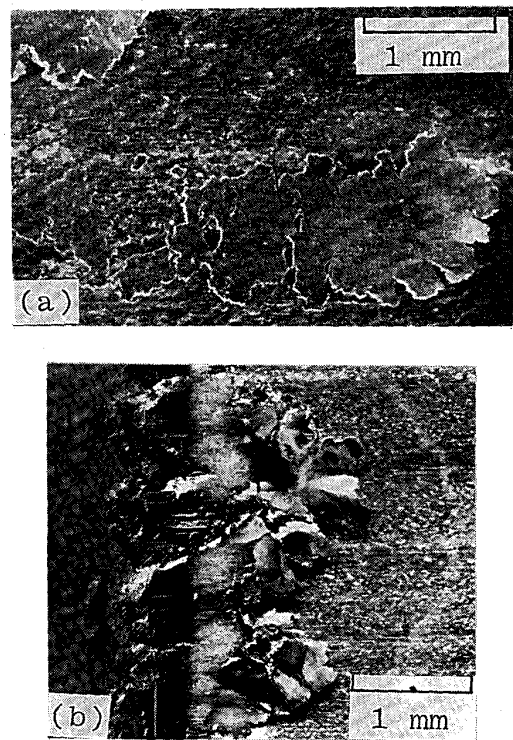
形で表面損傷発生と確認できるのは,  $R_{max}$  で  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  程度の掘り起こし溝である. したがって工具凝着物もその大きさに成長することが工学的には“発生”と認定すべきことのようにある.

工具凝着物を発生させる駆動力は工具と被加工材の間の金属結合力, すなわち相互の固溶限などで表される化学的親和性<sup>8)~10)</sup>と考えられている. それに対する補助的因子として工具の表面あらし(微視的切削および捕獲作用による工具凝着物発生促進), 被加工材の表面あらし, 潤滑作用などがある.

### 3.2.2 掘り起こし

掘り起こしは切削とは異なり, チップを出さないで塑性変形で溝付けをする(図2参照). 塑性変形中の体積一定条件を考慮すると, 溝中にあった材料は周辺に押しやられていなければならない. その変形パターンは十分には明らかになっていないが, 表面突起の押しつぶしの研究<sup>11)</sup>を参考にすると, バルクが塑性変形して掘り起こし溝にあった材料の体積分を吸収していると推定される.

工具凝着物が板材質や他の摺動条件によって発達する場合, 摩耗片(Wear debris)の発生としてそれ自体が



(a) 薄片状<sup>2)</sup> (b) 塊状

写真4 巨視的はく離片(フレーク Flake)の発生. 電気亜鉛めっき鋼板

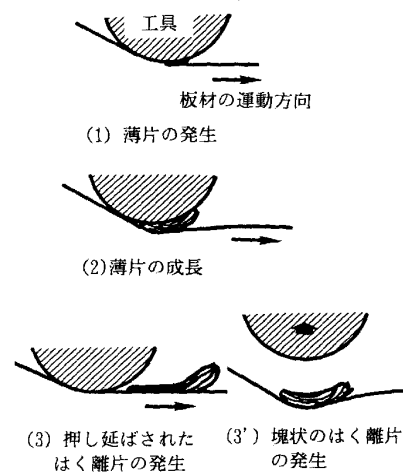


図3 はく離発生(フレーキング)のメカニズム<sup>2)</sup>

表面損傷の一種となる. 写真4<sup>2)</sup>は電気亜鉛めっき鋼板における巨視的はく離片の発生(フレーキング)の例を示す.

この場合も一見切削的な機構のように見えるが, 図3<sup>2)</sup>に示すように層状の工具凝着物の堆積と脱落という点で掘り起こしと共通するメカニズムである.

また潤滑状態が良くない場合, 掘り起こしは工具入り口手前での板材のバルジ変形と層状の工具凝着物の発生と結合して行われる(写真5<sup>12)</sup>参照).

### 3.2.3 クラック発生

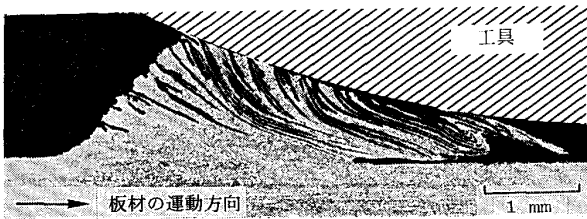
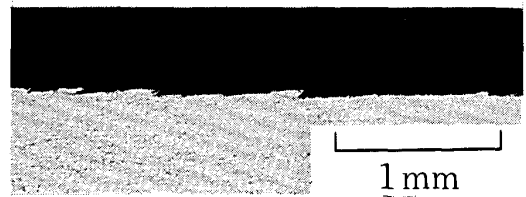
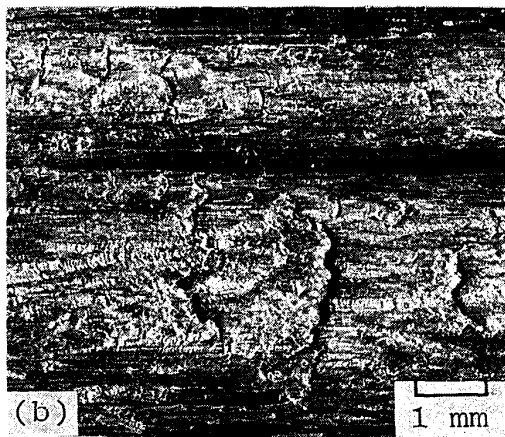
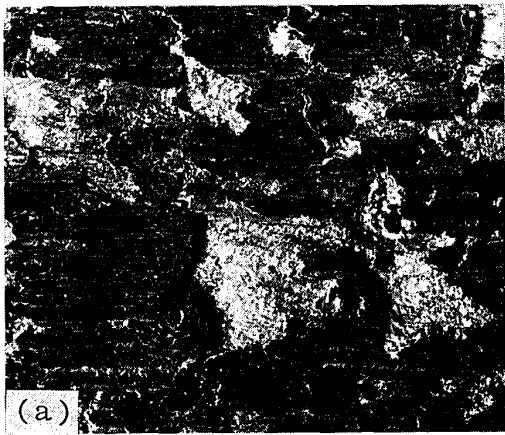


写真5 巨視的工具凝着物の断面構造とバルジ変形. 半硬質アルミニウム板材. 平板引抜実験 (NaOH 水溶液にて腐食)<sup>12)</sup>



工具の移動方向

写真7 巨視的クラックの断面<sup>12)</sup>. アルミニウム板



工具の移動方向

(a) 軟鋼板 (b) アルミニウム板  
写真6 巨視的クラックの発生

前項で述べた掘り起こしの発生は必ずしもクラック発生を意味するものではない. 掘り起こしの溝内で境界潤滑が成立し, なめらかな掘り起こし溝となる段階もある. 工具凝着物が成長し始め, 付着脱落を繰り返すような状況に至ると掘り起こしの溝内部に微細なクラックが観察される. さらに工具凝着物が成長すると, 肉眼的にも認められる巨視的クラックが生じる (写真6参照). その断面観察 (写真7<sup>12)</sup>) からするとクラックは工具出口近

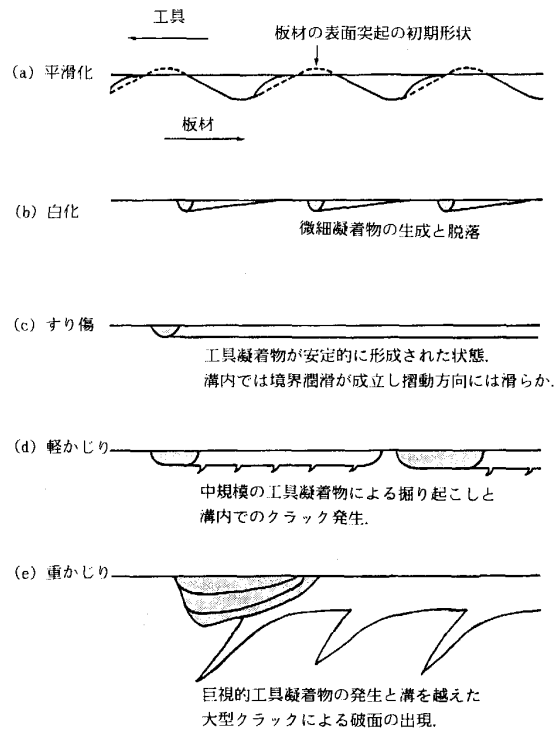


図4 掘り起こしタイプの表面損傷発達過程・断面図<sup>5)</sup>

傍から工具の進行方向に向かって 20~45° 程度の角度で侵入している. この状態は激しいかじりという意味で「むしれ」と呼ばれることもある. 表面における延性破壊の一種であり, その方面からの詳しい検討が望まれるが, 工具出口近傍で工具接触面圧が低下していること, すべり線場法の見方からすれば速度不連続線を通るせん断ひずみの大きな領域であること, 出口近傍にある工具凝着物による掘り起こしを受けること<sup>13)</sup>などの要因が関係していると考えられる.

図4<sup>5)</sup>は以上のような損傷による損傷の発達状況をまとめたものである.

#### 4. 表面損傷の力学

##### 4.1 表面層の塑性変形

表面突起の押しつぶしと摺動による変形は塑性加工の

分野では摩擦則との関連で注意をひいた。WANHEIMら<sup>14)~16)</sup>はすべり線場法を用いた解析と実験をおこない、接触率は被加工材の降伏応力の1.3ないし1.5倍程度までの範囲ではみかけの接触面圧に比例するが、それ以上では接触率は頭打ちになってくることを示した。また境界接触面での摩擦せん断応力は押しつぶしを促進することを示した。ただし以上の研究には被加工材バルクの塑性変形は考慮されていない。

最近では塑性加工を意識して表面突起の押しつぶしに及ぼすバルク塑性変形の影響が注目されている。弾塑性有限要素法を用いて解析<sup>17)</sup>では、バルクの塑性変形を伴う場合、表面突起の押しつぶされた分の体積はバルクの圧縮変形で吸収する成分が多く、谷部が盛り上がるというバルジ変形成分は少ないこと、またバルクの塑性変形を抑制した場合に比べ、同一のみかけ接触面圧下で高い接触率を与えることが明らかにされた。またバルクの塑性変形を伴った表面突起の押しつぶしについては上界法<sup>18)19)</sup>やすべり線場法を用いた研究<sup>20)</sup>もなされている。さらに潤滑機構との関連で液体潤滑剤の封じ込められた状態(混合潤滑)での微視的塑性変形<sup>21)~23)</sup>に注目が集まっている。

#### 4.2 切削など

これらの損傷メカニズムを力学的基礎の立場から検討した例としてはすべり線場法を利用したもの<sup>24)25)</sup>がある。CHALLENGERらは被加工材の表面突起(Asperity)の角度(すなわち工具の表面突起の傾斜角)と摩擦係数の2軸座標系において塑性変形(定在波)と摩耗(工具付着物発生)と切削の様式がどの範囲で生じるか接触面の摩擦因子をパラメーターとして計算した。AVITZURら<sup>26)27)</sup>は上界法を用いて被加工材の表面突起の摺動中の変形挙動を波のように移動していくものとしてモデリングし、さらに界面に封じ込められた液体潤滑剤の渦流れによるエネルギーの消散を取り扱っている<sup>28)</sup>。被加工材の表面突起の変形および破壊が摩擦力の起源であるとするこの種の考え方には疑問もあり、筆者は工具の表面あらさによる副次的効果と考えているが今後の評価をみたい。また以上の研究は平面ひずみモデルに基づいたものであり、実際の3次元掘り起こしを解析したとは言いがたい面がある。

一方、実験的には一本の棒状の工具で被加工材をこする場合に切削と掘り起こしのどちらの損傷が生じるかについては3次元的な検討もある<sup>29)30)</sup>。ただし接触面積が広くわたって工具面による拘束のため盛り上がり許されない実際の場合については事情はやや異なると推定される。なお加藤<sup>31)</sup>は実験観察に基づき硬い材料と軟らかい材料の組合せにおいて生じた表面損傷の分類をおこなっている。

以上のように掘り起こしと破壊の力学解析はまだ十分になされているとはいえず、破壊力学と結合した検討は

今後の課題の一つといえよう。

### 5. かじり・焼付きの発生条件

かじり、焼付きは図3に示したように上記(b)(c)(d)が複合した表面損傷である。またその基本的メカニズムは第3章に述べた。第4章ではかじり・焼付きの生じている(進行している)状態について力学的な検討を紹介した。しかしかじり・焼付きは発生と成長の過程を含むものでありその発生条件の物理的条件は別に考察が必要であろう。そこで次に発生条件の諸説を紹介するが、残念ながら発生条件と上に述べた進行過程の力学とは現段階ではつながっていない。なお以下の発生条件についてはバルクが塑性変形を受けつつある接触についての考察はされていないものも含む。

#### (1) 臨界温度条件

接触部最高温度 $\theta_{max}$ (本体温度 $\theta_b$ と真実接触部の瞬間最高温度上昇 $\theta_f$ の和)が潤滑剤と材料によって決まる臨界温度 $\theta_{cr}$ に達したときに焼付きが生じる。臨界温度の性格は一義的には決め難いが境界潤滑膜が配向を失う転移温度、あるいは極圧剤(Extreme pressure agent)による表面皮膜の融点などがそれに相当するものと考えられてきた。この考え方の優勢な領域は圧延における鋼板のヒート・スクラッチ(ヒート・ストリーク)発生であり、巻取り後のコイル温度で $140\sim 160^\circ\text{C}$ <sup>32)</sup>、ロールバイト出口での鋼板温度で $160^\circ\text{C}$ <sup>33)</sup>が発生条件という報告などがある。

#### (2) 熱的不安定条件

これはEHL状態などにおいて粘性損失による発生熱が消散しきれない場合や、摩擦面近傍の温度勾配によって潤滑油の導入不足が生じる場合に、安定な潤滑膜の形成が不可能になり焼付きに移行する、という考え方である。

#### (3) 臨界膜厚条件

摩擦面の合成表面あらさ $\sigma = \sqrt{R_w^2 + R_t^2}$ に対する流体潤滑膜の厚さ $h$ の比 $\Lambda = h/\sigma$ が、ある境界値以下になると焼付きが発生するという説である。 $\Lambda$ の値によって2面間の接触状態が推定できるとされ、 $\Lambda \leq 1$ になると表面突起どうしの直接接触が主体となる。板材の引抜きタイプのシミュレーション試験で潤滑剤の粘度によらず限界油膜厚さが $0.2\ \mu\text{m}$ でほぼ整理できたという報告もある<sup>34)</sup>。臨界膜厚条件は界面に導入された潤滑膜の平均油膜厚さの減少、すなわち混合潤滑の終焉に注目するものであるが、しごき加工などで極限的な平滑化を達成している境界潤滑状態がどのような膜厚となるかなど不明な点も多い。

実際の現象は温度と潤滑膜厚の複合条件で支配されるという2円筒すべり/転がり試験での研究<sup>35)36)</sup>もある。さらに温度上昇の著しい圧延などでは臨界温度条件を裏付けるデータも多いが、一方では極めて低速の摺動実験

表 1 自動車車体成形における表面損傷発生機構<sup>38)</sup>

No.	発生機構	かじりの状態	潤滑状態その他
1	被加工材と型の間に混入した異物が研磨材の役目を果たし、両者を削るタイプ	すりきず	弾性流体潤滑 異物混入
2	異物混入が引き金となり、被加工材が削りとられて型に付着し、さらに被加工材を削るタイプ	激しいむしれ傷 掘り起こし傷	混合潤滑 異物混入
3	絞りビードやダイアール部等で接触面圧が高い場合金属接触による溶着や型表面の摩耗による表面あらさ増大のため、被加工材が損傷をうけるタイプ	すり傷 むしれ傷 掘り起こし傷	境界潤滑
4	型表面の仕上げ粗さが大なる場合あるいは肉盛補修によるピンホール等の表面欠陥がある場合、その部分が被加工材を削るタイプ	型表面凹凸の転写 掘り起こし傷	ざらつき摩耗
5	プレス成形上発生する余肉やしわが接触面圧を著しく高めかじり発生となるタイプ	むしれ傷	極圧潤滑

でも潤滑が乏しいとかじり発生が経験される。したがって熱的条件だけでは論じられない問題があると考えられ、これらを整理するため“熱的焼付き”と“機械的焼付き”<sup>†</sup>の二つを区別する2元論的な考え方がある。例えば水野<sup>37)</sup>は「低速加工では①平均油膜厚さが小さい(接触率が大きい)、②工具表面があら、③ミクロプールの圧力 $q$ が小さい-あるいは境界接触部の面圧 $p$ との差 $p-q$ が大きい、の3条件が組み合わされた“機械的焼付き”が生じ、高速加工では機械的なものがきっかけで局部的に高摩擦の部分が生じ温度が上昇してさらに境界潤滑が維持しにくくなるというメカニズムで凝着が広がり“熱的焼付き”が生じる。」と述べている。しかし3・2・1項で述べたように機械的焼付き(かじり)に関しては工具凝着物の発生条件という観点から不明な点も多い。筆者は境界接触面での摺動による原子レベルでの移着、移着層の成長と破壊という動的な過程の中から急成長を可能とする状態の出現がかじり発生であると推定している。

さて実際の生産現場ではこのような基礎的なメカニズム以外に関連する周辺の諸条件によって表面損傷発生が左右されていると考えられる場合も多い。表1<sup>38)</sup>は自動車車体成形の場合の問題を整理した例を示す。

## 6. 各種の影響因子と表面損傷の防止法

### 6.1 潤滑の効果

上に述べた潤滑機構ならびに表面損傷の発生機構を背景として、潤滑剤の基本的役割は次のように分類されよう。[ ]内は有利な性質または対策を示す。

(1) 流体潤滑効果を高める(潤滑膜厚さを増加)[粘度大]

(2) 混合潤滑効果を高める(接触率上昇を抑える、ミクロプールの加圧能力を高める)[体積弾性率大]

(3) 境界潤滑効果を高める(油性・極圧性大)[添加物の利用]

<sup>†</sup> “機械的焼付き”の概念では何ら温度上昇を本質的なものと考えていないので“焼付き”と呼ぶのは適当でない感じがする。筆者はその意識を含めて“かじり”という用語を多用している。

(4) 冷却する(水の冷却能の利用)[エマルジョン系の潤滑剤]

### 6.2 板材の性質の影響

(1) 表面層の硬さあるいは変形抵抗

表面層の機械的性質として第1義的には硬さあるいは変形抵抗が大きいことがトライボロジーの観点から有利といえよう<sup>39)40)</sup>。これは表面層での掘り起こしや凝着が生じにくいことによる。ただし塑性加工では当然下地の塑性変形が前提となるので表面層と下地との密着性、表面層の延性が確保されていることが前提となる。

(2) 表面あらさ[あるいは表面の微視的トポグラフィ]

潤滑剤の機械的捕捉効果(被加工材の微視的な表面凹部に潤滑剤がトラップされる機構)を考慮すれば $R_{max}$ で数ミクロン程度の表面あらさがあることが混合潤滑に有利である<sup>41)43)</sup>。ただし $R_{max}$ や $R_a$ だけで表面の微視的トポグラフィが十分表せるとは言えず、アボットの負荷曲線あるいはそれを簡易的に扱った相対負荷長さ(JIS B0601 解説参照)を利用する必要がある。これは負荷の増大に伴う接触率 $R$ や境界接触部の接触面圧、流体潤滑剤の微視的プールの圧力の変化が摩擦や表面損傷に影響を及ぼすためである。

(3) 表面層の化学組成

板材の表面層の組成はバルクの組成と著しく異なることが多い。例えば冷延鋼板の表面近傍 $10^2$  nmの範囲にはSi, Mn, Cr, P, Alなどが濃化して存在する<sup>44)</sup>。これらの元素はFeより強い酸化傾向をもっているので焼なまし時に表面に拡散してくるためと考えられる。この表面濃化現象の著しい板材のほうが耐かじり性に優れる場合もある<sup>12)</sup>。また鋼板の酸洗方法では塩酸酸洗より硫酸酸洗が耐かじり性が良い。これは硫酸酸洗の場合、 $Fe_3C + Fe_3O_4$ が生成するためと言われる<sup>45)</sup>。

(4) バルクの化学組成/微視的削り取り作用

硬く適度な大きさの粒子がバルクに生成していると工具表面の凝着物を微視的に削りとる作用が期待される。実際、アルミの絞り・しごき加工ではA3004系の材料でAl-Mn-Fe系の金属間化合物がその効果を発揮している



と言われる<sup>46)</sup>。

#### (5) 板厚

大きいと変形に要する力が大きく、したがって変形や摩擦による発熱が大きく表面損傷防止が大きな課題となる。一方箔のように薄い板ではしわが発生しやすく粘度の高い潤滑剤は使えないなどの制限が出てくる。

#### (6) バルクの強度

同一の形状に加工する場合は材料強度の高いほうが、接触面圧が高く熱発生や工具摩耗が大きく表面損傷の危険性が高い。しかし接触面圧一定での試験を比較すると塑性変形が生じない範囲(低面圧)では材料強度の高い方が表面およびバルクの塑性変形が抑えられ表面損傷は小さく、高面圧では逆に材料強度の高い方が表面損傷が大きい<sup>41)</sup>。

### 6.3 型材の影響

金属学的親和性が低く、硬く、靱性に富み、(表面処理を施した場合は)母地との結合が強固であり、表面あらさが極めて小さく( $R_{max}$ で $0.05\ \mu\text{m}$ 以下に)仕上げられることが理想である。軟鋼およびアルミニウムの板材に対しては、SKD11などの工具鋼の上にTiC、TiN、VCなどの被覆処理をすること、 $\text{ZrO}_2$ 、SiCをはじめとするセラミックスを利用することで改善がなされる方向にある<sup>47)~50)</sup>。またステンレス鋼の引抜きに対してセラミックスを工具として用いると表面損傷の防止に対して有効である<sup>51)52)</sup>。

### 6.4 加工条件の影響

#### (1) 接触長さ

工具と板材の接触長さを大きくすると発熱が大きくなると凝着物の成長が促進されるので損傷しやすい<sup>53)</sup>。しかし工具摩耗を考慮すると0にはできない。しごき加工でのダイのベアリング長さは $0.5\sim 1.0\ \text{mm}$ 程度が多い<sup>54)</sup>。

#### (2) 摺動距離

工具表面への凝着物の蓄積および発熱をおさえるため、摺動距離は小さいほうが良い。実際に板材成形の方式を深絞りから浅絞りに変えて、損傷の回避が図られている<sup>6)</sup>。

#### (3) 新生面発生率あるいは表面積拡大比

接触下で新生面が発生する場合、境界潤滑が保たれなくなる危険性があり、かじりが発生しやすい<sup>55)</sup>。そこに速やかに潤滑剤が供給されなければならないが、その部分の接触面圧が隣接の潤滑剤のプールの圧力より高く困難である場合が多い。

#### (4) 絞りビード形状

大型パネルの成形で用いられる絞りビードの形状<sup>56)</sup>については、角ビードすなわちビード丸み半径の小さなビードで表面損傷が発生しやすい。曲げ・曲げもどしによる表面層およびバルクの塑性変形を大きくするため、および接触面圧が高くなるためである。

#### (5) 工具系の剛性

潤滑の乏しい場合、工具系の剛性が高いと損傷が発生しやすく、定圧・一定力で押し付けているタイプでは損傷が局所的で発生・成長・衰退・移動(別の位置への飛び移り)などが生じやすい<sup>57)</sup>。

#### (6) 型の温度

冷却・放熱により低く抑えると損傷発生は著しく抑制される<sup>58)</sup>。これは第1義的には型の温度上昇に伴う潤滑剤の粘度低下を抑制する効果と考えられる。

#### (7) 型の精度および仕上げ

適性クリアランスを確保して局部的なしごき加工の生じないようにすることは重要である。また溶接境界など形状不整部で損傷発生の危険が高い<sup>59)</sup>。

#### (8) 成形速度

潤滑剤の動的引込みの面では高い方が良いが、熱の蓄積により界面温度が上昇する副次的影響を抑制する必要がある。

#### (9) 環境

バリや異物の混入はアブレイシブな損傷を増し、通常のかじり・焼付き発生の引き金にもなる<sup>38)</sup>。

## 7. おわりに

製品の表面仕上げに対する要求が厳しくなりつつある趨勢をふまえ、表面損傷を広くとらえてそのメカニズムを述べた。トライボロジーは多因子現象の曲型のような世界であり、表面損傷の対策に関しても、特に実際の生産現場では考慮しなければならない因子が多い。基礎的な分野では掘り起こしの前提条件となる工具への凝着物の冷間加工での発生条件が、十分には解明されていないことが全体的な展望を不明瞭にしている感がある。

また接触面での面圧、摩擦せん断応力、温度、微視的表面凹凸、およびそれらの時間的変化に関してより詳しい情報が蓄積されることが、かじり・焼付きの発生条件の予知や対策をより定量的かつ見通しの良いものにしていくものと期待される。

## 文 献

- 1) プレス成形難易ハンドブック(薄鋼板成形技術研究会編)(1987), p. 245 [日刊工業新聞社]
- 2) H. IKE: Proc. 1st ICTP (1984), p. 180 [JSTP]
- 3) 小野寺健次, 池 浩: 塑性と加工, **26** (1985), p. 416
- 4) 小坂田宏造, 大矢根守哉: 日本機械学会論文集(第3部), **36** (1970), p. 1017
- 5) 池 浩: 塑性と加工, **27** (1986), p. 63
- 6) 古林 忠, 山口克暁, 平坂正人, 吉原直武: 塑性と加工, **19** (1978), p. 9
- 7) D. A. RIGNEY, L. H. CHEN and M. G. S. NAYLOR: Wear, **100** (1984), p. 195
- 8) C. L. GOODZEIT, R. P. HUNNICUTT and A. E. ROACH: Trans. ASME, **78** (1956), p. 1669
- 9) E. RABINOWICZ: J. Inst. Met., **95** (1967), p. 321
- 10) E. RABINOWICZ: ASLE Trans., **14** (1971), p. 198
- 11) 池 浩, 牧野内昭武, 木村美喜雄: 第39回塑性加工連



- 合講演会講演論文集 (1988), p. 135
- 12) 池 浩: 塑性と加工, **24** (1983), p. 179
  - 13) 池 浩: 塑性と加工, **24** (1983), p. 933
  - 14) T. WANHEIM: *Wear*, **25** (1973), p. 225
  - 15) T. WANHEIM, N. Bay and A. S. Petersen: *Wear*, **28** (1974), p. 251
  - 16) N. Bay and T. WANHEIM: *Wear*, **38** (1976), p. 201
  - 17) A. MAKINOCHI, H. IKE, M. MURAKAWA and N. KOGA: *Wear*, **128** (1988), p. 109
  - 18) S. SHEU and W. R. D. WILSON: *Proc. 11th NAMRC* (1983), p. 172 [SME]
  - 19) W. R. D. WILSON and S. SHEU: *Int. J. Mech. Sci.*, **30** (1988), p. 475
  - 20) M. P. F. SUTCLIFFE: *Int. J. Mech. Sci.*, **30** (1988), p. 847
  - 21) 片岡征二, 菅野恵介, 木原諄二: 塑性と加工, **29** (1988), p. 368
  - 22) 池 浩: 塑性と加工, **29** (1988), p. 471
  - 23) 小豆島明, 坪内昌生, 工藤英明, 古田憲明, 峯村 憲: 塑性と加工, **30** (1989), p. 1631
  - 24) J. M. CHALLEN and P. L. B. OXLEY: *Wear*, **53** (1979), p. 229
  - 25) J. M. CHALLEN and P. L. B. OXLEY: *Wear*, **100** (1984), p. 171
  - 26) B. AVITZUR, C. K. HUANG and Y. D. ZHU: *Wear*, **95** (1984), p. 59
  - 27) B. AVITZUR and Y. NAKAMURA: *Wear*, **107** (1986), p. 367
  - 28) B. AVITZUR: *Wear*, **126** (1988), p. 227
  - 29) T. KAYABA, K. HOKKIRIGAWA and K. KATO: *Wear*, **110** (1986), p. 419
  - 30) K. HOKKIRIGAWA, K. KATO and Z. Z. LI: *Wear*, **123** (1988), p. 241
  - 31) 加藤康司: 日本金属学会会報, **22** (1983), p. 302
  - 32) 鐘田征雄, 北村邦雄, 北浜正法, 片岡健二, 中川吉左衛門, 青木茂雄, 松田 修, 吉田昭茂: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 2152
  - 33) 細野弘夫: 潤滑, **27** (1982), p. 588
  - 34) 中村 保, 松井伯夫: 日本機械学会論文集C, **52** (1986), p. 3332
  - 35) 山本雄二: 塑性と加工, **24** (1983), p. 108
  - 36) 山本雄二: 日本機械学会論文集C, **50** (1984), p. 1260, **51** (1985), p. 2571
  - 37) 水野高爾: 技術懇談会「加工を中心とした各種分野のトライボロジ問題討論」テキスト (1985), p. 34 [日本塑性加工学会]
  - 38) 岩崎誠夫: 第 51 回塑性加工シンポジウムテキスト (1975), p. 52
  - 39) 池 浩, 宮内邦雄, 吉田清太: 理化学研究所報告, **54** (1978), p. 1
  - 40) T. HERAI, M. EJIMA, K. YOSHIDA, K. MIYAUCHI and H. IKE: *Scientific Papers of the I. P. C. R.*, **72** (1978), p. 1
  - 41) 堀田 孝, 青木 至, 佐藤泰一: 塑性と加工, **19** (1978), p. 17
  - 42) A. BRAGGARD, V. LEROV, H. BONNARENS, J. RICHELMI, C. MARIQUE and C. EMOND: *Proc. 10th Biennial Congress of I. D. D. R. G.* (1978), p. 253 [Portcullis Press]
  - 43) L. M. BERNICK, R. R. HILSEN and C. L. WANDREI: *Wear*, **48** (1978), p. 323
  - 44) 吉岡 治, 西篠謹二, 乾 恒夫: 鉄と鋼, **64** (1978), A163
  - 45) 林 豊, 須藤忠三, 西原 実: 住友金属, **29** (1977), p. 305
  - 46) 碓井栄喜, 稲葉 隆: プレス技術, **23** (1985)3, p. 47
  - 47) 河合 望, 堂田邦明, 安田彰男: 日本機械学会論文集C, **50** (1984), p. 1664
  - 48) 新井 透, 土屋能成: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1986), p. 143
  - 49) 堂田邦明, 鶴飼直行, 土屋能成, 新井 透: 第 40 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1989), p. 231
  - 50) 佐藤悌介, 多田吉宏, 筒井 功: 塑性と加工, **26** (1985), p. 196
  - 51) 佐藤悌介, 多田吉宏: 塑性と加工, **26** (1985), p. 1170
  - 52) 佐藤悌介, 多田吉宏: 塑性と加工, **28** (1987), p. 1289
  - 53) 島 進, 山本憲隆: 塑性と加工, **28** (1987), p. 799
  - 54) 碓井栄喜, 稲葉 隆: 軽金属, **34** (1984), p. 317
  - 55) 河合 望, 中村 保, 岩田政成: 日本機械学会論文集 (第 3 部), **43** (1977), p. 1947
  - 56) 坂本達治, 氏原 新, 古林 忠: 塑性と加工, **30** (1989), p. 206
  - 57) H. IKE, K. YOSHIDA and M. MURAKAWA: *Wear*, **72** (1981), p. 143
  - 58) 平坂正人: 塑性と加工, **28** (1987), p. 799
  - 59) 古林 忠: 塑性と加工, **19** (1978), p. 25
- なお塑性加工のトライボロジに関する一般的な参考書としては次のものがある。
- a) 塑性加工におけるトライボロジ (日本塑性加工学会編) (1988) [コロナ社]
  - b) J. A. SCHEY: *Tribology in Metalworking-Friction, Lubrication, and Wear*-(1983)[ASM]  
また表面損傷を中心とした参考書としては次のものがある。
  - c) *Metal Transfer and Galling in Metallic Systems*, ed. by H. D. MERCHANT and K. J. BHANSALI (1987) [TMS-AIME]
- その他, 次の「塑性と加工」特集号が参考になろう。
- 板材成形における表面損傷と型材料, **19** (1987) 1, p. 1
- 塑性加工におけるトライボロジ, **20** (1979) 12, p. 1053
- 塑性加工における焼付き現象, **24** (1983)2, p. 91
- 塑性加工におけるトライボロジ, **25** (1984) 10, p. 861