

合金化溶融亜鉛めっき鋼板のフレーキング現象に及ぼす加工条件とめっき層構造の影響

浦井正章(工博)*・岩谷二郎*・岩井正敏*・有村光史**

*加古川製鉄所・技術研究センター **加古川製鉄所・薄板部

Effects of Press-forming Conditions and Coating Structure on Flaking Phenomenon in Galvannealed Steel Sheets

Dr. Masaaki Urai・Jiro Iwaya・Masatoshi Iwai・Mitsushi Arimura

Coating exfoliation phenomenon in galvanized steel sheet was investigated. The flaking phenomenon during actual press forming in automotive application was simulated under laboratory conditions through the use of high forming speed and high sliding pressure. Flaking can be prevented by reducing titanium to less than 0.03 mass% in the base steel, which results in the suppression of Γ phase growth in coating layer.

まえがき = 合金化溶融亜鉛めっき鋼板は優れた耐食性、塗装性および溶接性を有するため、近年、自動車車体への使用量が急増している。しかしながら、本めっき鋼板は過酷な条件下でプレス成形がおこなわれた場合、めっき層が剥離し易いという欠点を有している。剥離しためっき層はプレス金型へ堆積し、プレス品の表面品質を損なうため、頻繁な金型清掃が必要となり、いちじるしくプレス作業性の低下を招く。

これまで、めっき層の剥離挙動と加工変形様式の関係については、曲げなどの単純な変形による試験が実験室的にかなり検討されている^{1,2)}が、複雑な変形が加わる実プレス成形における報告は少なく、不明な点が多い。

本研究では、自動車パネル部品の実プレス成形をおこない、剥離形態が従来からよく知られているパウダリング(粉末状剥離)ではなく、フレーキング(薄片状剥離)が新たに発生することを明らかにし、これを実験室試験にて再現し、その発生メカニズムを考察するとともに、その防止策をめっき層構造、原板成分の観点より明確にしたので、これらの結果を報告する。

1. 実験方法

1.1 供試材

実プレス成形および実験室におけるフレーキング現象再現試験には、生産設備で製造した第1表に示すTi添加IF鋼を原板とした合金化溶融亜鉛めっき鋼板(板厚0.8mm)を供試した。さらに、めっき剥離に及ぼす原板成分の影響を調査するため、Ti添加量を0~0.04mass%の範囲で変化させて製造しためっき鋼板をもちいた。原板のTi以外の成分およびめっき性状などは第1表とほぼ同じである。

第1表 供試材の原板成分とめっき層性状
Table 1 Chemical composition and coating layer of specimen

Chemical Composition						mass%		Coating Layer	
C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Coating Weight	Fe Content	
0.002	0.01	0.15	0.010	0.007	0.035	0.055	60 g/m ²	12 mass%	

1.2 成形試験法

実プレスで第1図に示す自動車のフロントフェンダーパネルの成形をおこない、絞り変形部(a)およびビード通過部(b)における剥離形態を調査した。

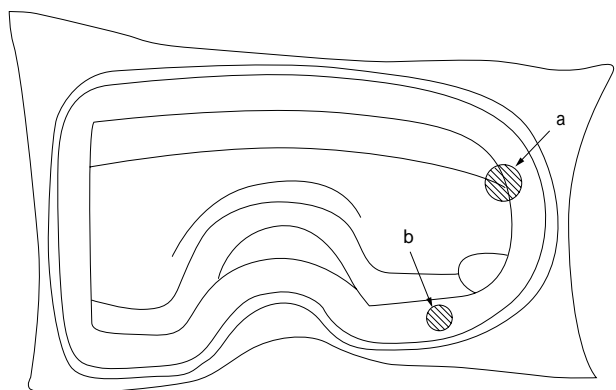
次に、フレーキング再現のため、第2表に示すV曲げ、しごきU曲げおよびビード付U曲げの3種類の変形様式の試験をおこない、剥離の形態や量を調査した。なお、一部の試験では成形速度の影響も調べた。また、剥離防止策の検討にはビード付U曲げ試験を適用した。

剥離の形態や量の調査はテープテストにてテープに付着しためっき層のSEM観察、塩酸溶解後の原子吸光によるZnおよびFe量の定量分析にて実施した。さらに、成形後のめっき層の表面および断面の光学顕微鏡観察や板厚測定による材料の変形量調査をおこなった。

2. 実験結果および考察

2.1 自動車実プレスにおける剥離形態

テープテスト後にテープに付着しためっき層の形態を写真1に示す。絞り変形部(a)とビード通過部(b)における剥離物の大きさは明らかに異なっており、前者では従来からよく知られている5~50 μ m程度の細かい粉末状の剥離(パウダリング)となっている。これに対し、後者では大きな面積を持った薄片状の剥離(フレーキン

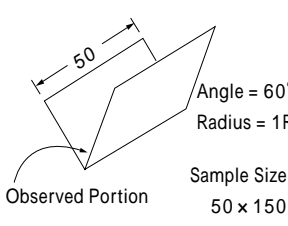
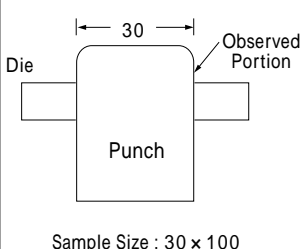
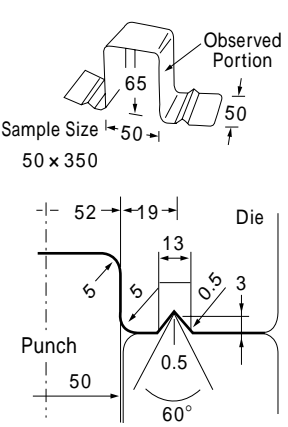


a : Drawn Portion b : Bead-slided Portion

第1図 フロントフェンダーの外観
Fig. 1 Appearance of front fender

第2表 成形試験の概要

Table 2 Outline of forming test

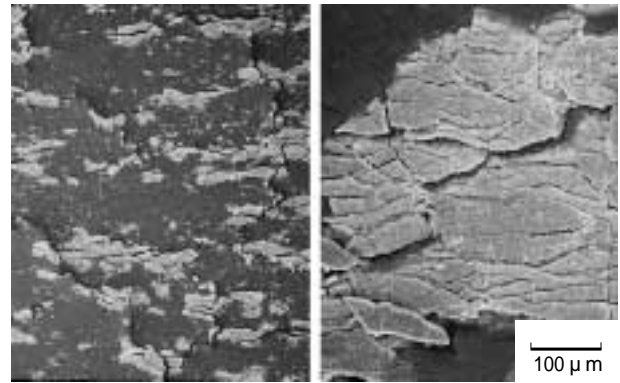
Forming Mode	Press Type	Press Speed m/min	Forming Condition mm
V-bending	Hydraulic Press	0.2	 <p>Angle = 60° Radius = 1R Sample Size 50 x 150</p>
U-bending with Ironing	Hydraulic Press	0.2	 <p>Die Punch Sample Size : 30 x 100</p>
	Mechanical Press	19.2	
Hat-channel Drawing with Bead	Hydraulic Press	0.2	 <p>Observed Portion Sample Size 50 x 350 Die Punch 60°</p>
	Mechanical Press	19.2	

グが発生している。なお、フレーキングとパウダリングを厳密に区別するのは困難であるが、ここでは剥離物面積が2mm²以上のものをフレーキング、0.01mm²以下のものをパウダリングとして区別した。これらの中間サイズの剥離は量的にごくわずかであった。

このように、フレーキングはパウダリングにくらべ剥離物の形状が大きいので、プレス金型への堆積がいちじるしくなり、生産性をより阻害することとなる。

2.2 めっき層の剥離挙動と加工変形様式の関係

フロントフェンダー用実プレスで発生したフレーキング現象を実験室試験にて再現するために、3種類の変形様式の試験をおこなった。剥離形態を写真2に示すが、剥離物の大きさは変形様式により異なっている。V曲げ試験では細かい剥離物が認められ、パウダリングが発生している。いっぽう、しごきU曲げおよびビード付きU曲げ試験では剥離物の面積が大きく、フレーキングが発生している。なお、剥離物には細かいクラックが多数観察される。以上より、フレーキングは高面圧下の高速撻動によって発生すると推察される。



(a) Drawn Portion (b) Bead Slided Portion

写真1 フロントフェンダーパネルの剥離めっき層
Photo.1 Exfoliated coating layer of front fender panel

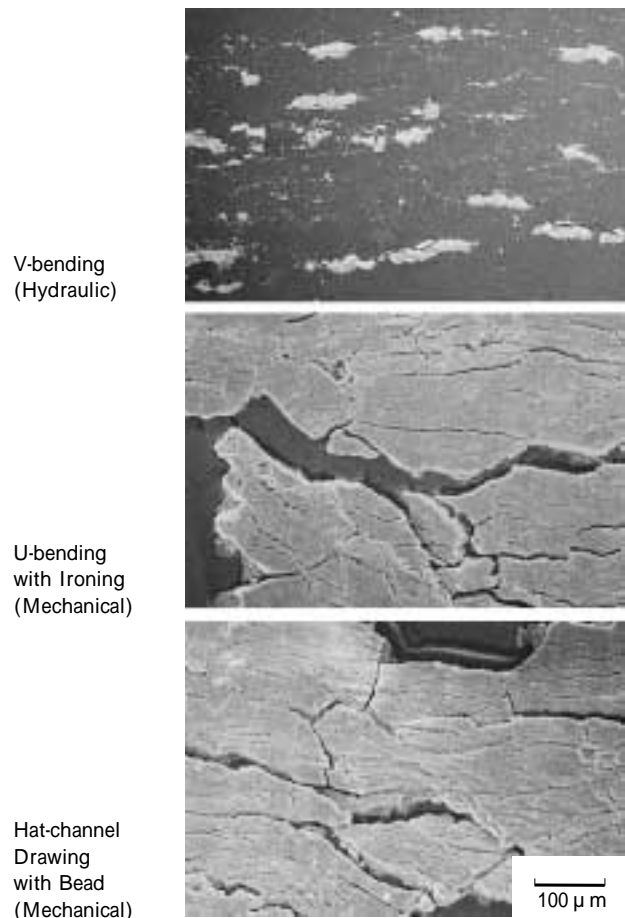


写真2 各種変形様式におけるめっき剥離形態

Photo. 2 Exfoliated coating layer subsequent to various types of forming

フレーキング現象をさらに詳細に究明するために、前記実プレスのビード通過部の変形様式により近いビード付きU曲げ試験法を選択して、以下の調査をおこなった。

まずフレーキングの発生過程を検討した。写真3はビードを通過して曲げ・曲げ戻しのみを受けた部位Aとビード通過後さらに金型表面を撻動して曲げ・曲げ戻しおよび撻動を受けた部位Bにおけるめっき層表面を示す。白い部分はめっき層であり、黒い部分はめっき層が剥離して露出した地鉄を示す。部位Aではクラックが多数認められるが、めっきの剥離は少なくかつ、細かい剥離が局部的に起こっている。いっぽう、部位Bでは広い面積にわたってめっき剥離が発生している。以上

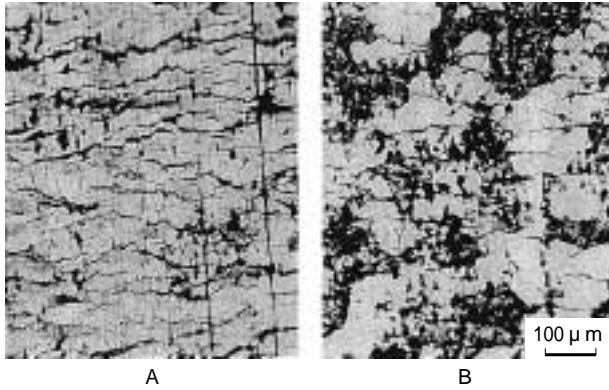
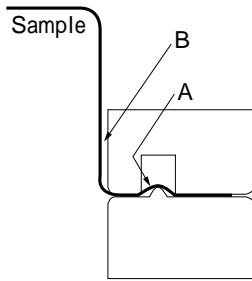


写真3 ビード付U曲げ試験後のめっき鋼板表面
Photo. 3 Surfaces of galvanized steel sheet after hat channel drawing with bead test

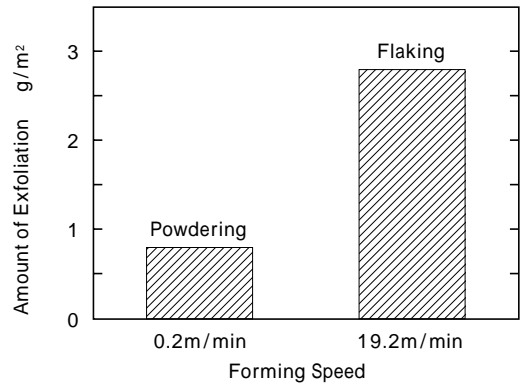
より、フレーキングは曲げ・曲げ戻しのみで起こるのではなく、これに摺動が加わることによって発生すると考える。すなわち、材料には変形と表面摺動が作用することとなる。

次にフレーキングの発生に及ぼす成形速度の影響を調査した。成形速度は油圧プレスもちいた 0.2m/min とクランクプレスもちいた 19.2m/min の 2 水準とした。めっき剥離量と剥離形態に及ぼす成形速度の影響を第 2 図に示す。成形速度が高いと剥離量が急増するとともに、剥離形態がパウダリングからフレーキングへ移行する。写真 4 はめっき層の断面組織を示す。低速成形の場合、めっき層は γ_1 (FeZn₇) 相の層の中間あるいは一部 Γ (Fe₃Zn₁₀) 相と地鉄の界面から剥離しているのに対し、高速成形では Γ 相と地鉄の界面から大きく剥離している。

2.3 フレーキング発生メカニズム

これまでの試験結果より、フレーキングは高面圧下の高速摺動によって発生することが判明した。ここでは成形速度の観点を中心にその発生機構を考察した。成形速度の変化によって、材料の変形量が異なることが考えられる。そこで、異なる速度で成形された材料の縦壁部の板厚を測定し、成形による材料各部の伸び率分布を算出した。その結果を第 3 図に示す。

低速成形の場合、縦壁部の伸びはほぼ均一であるのに対し、高速成形では局部伸びが発生しており、縦壁の底部より約 15mm 上の部分で最大となっている。この部分はめっき剥離の評価対象位置であり、ビードによる曲げ・曲げ戻しおよび金型による摺動を受けている（これより上部は曲げ・曲げ戻し加工を受けていないため伸び率は低い）。この局部伸びは、成形速度が高くなると、材料が金型に流入して変形を開始するまでの静摩擦係数が増加し、高い成形荷重が必要となり、その結果、材料



第 2 図 めっき剥離量に及ぼす成形速度の影響
Fig. 2 Effect of forming speed on amount of coating exfoliation

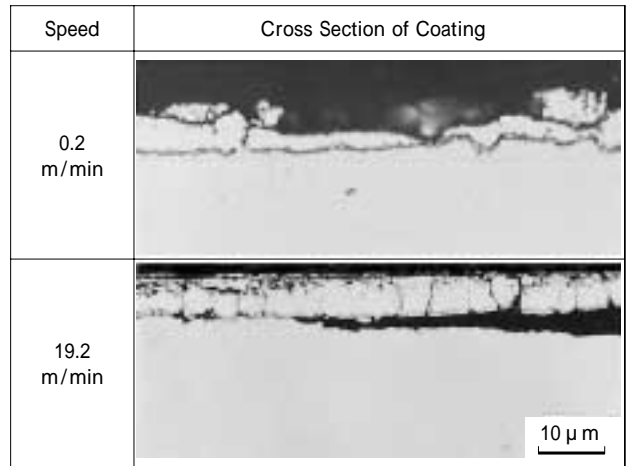
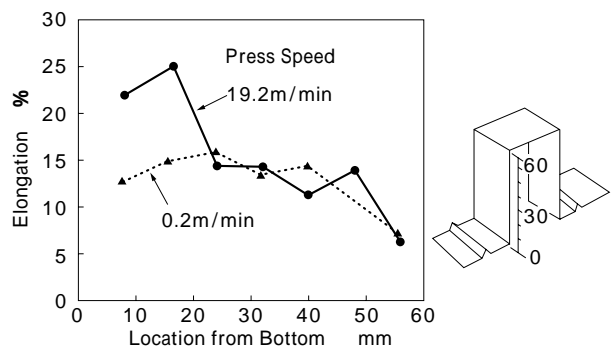


写真 4 成形後のめっき層断面
Photo. 4 Cross section of coating after forming



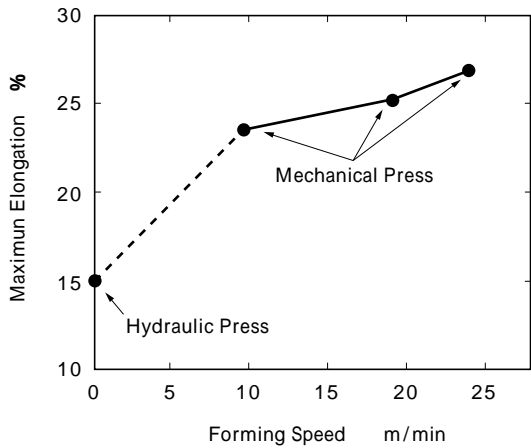
第 3 図 縦壁部における材料の伸び率分布
Fig. 3 Distribution of elongation at vertical sliding wall

が金型から受ける面圧が大きくなるために発生すると考えられる。第 4 図はこの最大局部伸びに及ぼす成形速度の影響を示す。成形速度の増加とともに最大局部伸びは大きくなっている。

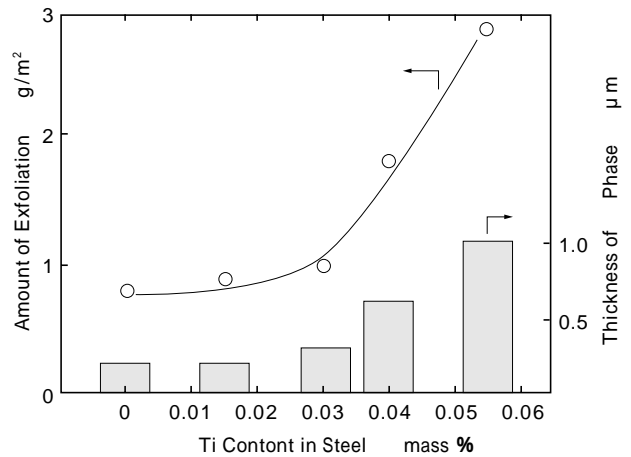
以上の結果より、実プレスおよび実験室試験にて認められたフレーキングの発生機構は次のように考察される。

成形初期の段階では材料はビードを通過し曲げ・曲げ戻し変形を受ける。めっき層は硬くて脆いため、地鉄の変形に追従できず、その応力を緩和すべく細かいクラックが発生する。この段階ではめっき剥離量はきわめて少なく、剥離片は細かく分離したいわゆるパウダリングが発生する。

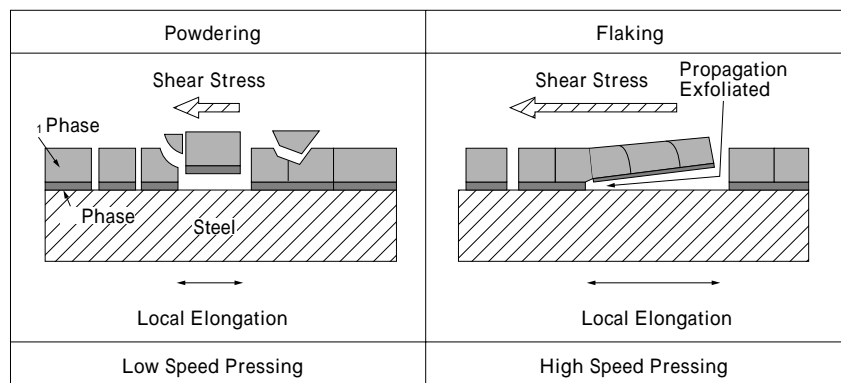
次の段階で、材料は上下の金型の間およびその後の上金型とポンチ間を摺動する。ここで材料は金型から面圧



第4図 成形速度と最大伸び率の関係
Fig. 4 Relation between forming speed and maximum elongation



第6図 めっき剥離量とT相厚さに及ぼす鋼中Ti濃度の影響
Fig. 6 Effect of Ti content in steel on amount of exfoliation and thickness of T phase



第5図 剥離過程のモデル図
Fig. 5 Schematic model for exfoliation process

を受けるとともに伸び変形が加わる。地鉄とめっき層の変形能が異なるため、両者の間に剪断力が発生し、めっき剥離が多量に生じることになる。この剪断力は面圧および伸び率が大きい高速成形で高くなる。

ここで成形速度の違いによるめっき層の剥離機構を第5図に示す。成形速度が低い場合、地鉄とめっき層間の剪断力は小さいため、剥離量は少なく、かつ、めっき層は、T相の層の間あるいは一部T相と地鉄の界面からパウダー状に剥離する。いっぽう、成形速度が高くなると、剪断力が大きくなり、めっき層の中でもっとも硬くて変形能の小さいT相と地鉄界面で剥離が発生し、高速成形下にて地鉄の大きな伸びをともなう変形にめっき層の変形が追従できなくなり、この界面で剥離が高速で伝播する。このため、剥離が界面全体に拡大して、広い範囲でめっき層が剥離するいわゆるフレーキングが発生すると考える。

2.4 フレーキング発生防止策

フレーキングによるめっき剥離を防止するには、その発生機構より、めっき層中のT相の厚さを抑制することが必要であると推察される。著者らはこれまで、T相の厚さはめっき原板中のTi濃度によって支配され、Ti濃度の低下によってT相が薄くなることを明らかにしてきた³⁾。そこで、Ti濃度を変化させて製造しためっき鋼板について、T相の厚さおよびフレーキング発生量をピード付きU曲げ試験法により、成形速度19.2m/minで調査した。その結果を第6図に示す。Ti濃度の低下とと

もにT相はその成長が抑えられて薄くなっており、剥離量は減少している。フレーキングの発生を抑制するには、めっき原板中のTi濃度を約0.03%以下に制限することが必要であると考えられる。

むすび

合金化溶融亜鉛めっき鋼板のフレーキング(薄片状剥離)発生と成形条件の関連ならびにその防止策を検討し、次の結果をえた。

- 1) 自動車実プレス成形試験にて、ピード通過部では剥離形態が従来からよく知られているパウダリングではなくフレーキングが発生する。
- 2) フレーキングはクランクプレスによるピード付きU曲げ試験などの高面圧下的高速摺動をともなう条件で加工することによって再現することができる。
- 3) フレーキングは地鉄の大きな伸びをともなう変形にめっき層の変形が追従できなくなり、T相と地鉄界面に大きな剪断力が発生し、これが伝播して発生する。
- 4) フレーキングを防止するには、T相の成長を抑制するために、めっき原板中のTi濃度を約0.03%以下に制限する必要がある。

参考文献

- 1) 須藤忠三ほか: 鉄と鋼, Vol.66 (1980) p.73.
- 2) 浦井正章ほか: 鉄と鋼, Vol.77(1991), p.971.
- 3) 浦井正章ほか: 材料とプロセス, Vol.4 (1991) p.1635.