

---

 技術資料
 

---

# プレコートステンレス鋼板のせん断加工におけるエナメルヘア発生挙動

中村浩茂\* 河原業穂\*\* 上田耕一郎\*\*\* 杉田修一\*\*\*\*

## Behavior of Paint Loss at the Sheared Edge of Pre-painted Stainless Steel Sheet

Hiroshige Nakamura, Naho Kawahara, Koichiro Ueda, Shuichi Sugita

### Synopsis:

Paint loss at the sheared and punched edge of pre-painted steel sheet, so called enamel-hair, can cause dent and poor appearance of the paint film.

For enamel-hair that occurs to sheared pre-painted stainless steel plate, effect of shear droop by step punching on the paint loss was investigated. The results are summarized as follows:

- (1) Formation of enamel-hair of pre-painted SUS430 was observed by direct observation.
- (2) The rotation of crystal orientation was observed on surface or shear droop in bare SUS430. It is considered that step-shaped shear band occurs at the sheared section.
- (3) The deformation band was observed on surface of shear droop in bare SUS430 under Pre-treatment layer.
- (4) XPS analysis on interface of enamel-hair revealed that there are chemical components of pre-treatment layer on both enamel-hair interfaces. It is considered that cohesion failure in pre-treatment layer leads to enamel-hair.
- (5) It is considered that enamel-hair on pre-coated stainless steel by shearing occurs as follows. First, pre-treatment layer was compressed in the early stage of the formation of shear droop, and couldn't follow the formation of stainless steel. It leads to cracks and cohesion failure. Then, along with the formation of shear droop, stress changes from compressed one to stretching one. Cohesion failure crack grows in pre-treatment layer and the flaking of paint film leads to enamel-hair.

## 1. 緒言

プレコート鋼板をせん断加工した場合、せん断面に沿ってエナメルヘアと称される塗膜剥離が発生し、プレス成形時にプレコート鋼板表面への打痕や付着により、意匠性を損なうことがある。

エナメルヘアの発生挙動については、これまでに合金化溶融亜鉛めっき鋼板を原板としたプレコート鋼板に関して、発生部分の元素分析などから、塗膜の存在下においてめっき層と母材の界面近傍から剥離することが明らかとなっている<sup>1)~5)</sup>。しかし、めっき金属を被覆して

いない無垢の鋼板を原板としたプレコートステンレス鋼板について研究された例<sup>6)</sup>はほとんどない。そのため、本研究ではプレコートステンレス鋼板を対象としてエナメルヘアの発生挙動を明らかにするとともにせん断加工時のダレ部形成挙動と塗装前処理（クロメート）皮膜の破壊形態の影響について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

表1に原板であるステンレス鋼板の成分を、表2に供

---

\*技術研究所 塗装・複合材料研究部 機能性材料研究チーム 主任研究員

\*\*技術研究所 塗装・複合材料研究部 塗装第二研究チーム

\*\*\*技術研究所 塗装・複合材料研究部 塗装第二研究チーム チームリーダー

\*\*\*\*技術研究所 塗装・複合材料研究部 機能性材料研究チーム チームリーダー

表1 ステンレス鋼板の成分

Table 1 Chemical compositions of SUS430 (mass%)

steel	C	Si	Mn	Cr	N
SUS430	0.068	0.52	0.82	16.2	0.040

表2 供試材の構成

Table 2 Specimens

	ステンレス鋼板	塗装前処理皮膜	塗膜
SUS430無垢材	SUS430(BA仕上げ, 板厚0.4mm)	-	-
塗装前処理材		クロメート (付着量20~145mg/m <sup>2</sup> )	-
プレコート材		アクリル(膜厚6μm)	

試材の構成を示す。ステンレス鋼板には板厚0.4mmのSUS430 (BA仕上げ) を用いた。供試材の種類として、SUS430無垢材と塗装前処理のみ行った塗装前処理材、塗装まで行ったプレコート材の三種類とした。塗装前処理として、Siを含有したクロメート液を皮膜付着量20~145mg/m<sup>2</sup>と変化させて塗布した後に、100℃で乾燥させた。プレコート材は、塗装前処理後にアクリル系塗料を乾燥膜厚で6μmとなるように塗装し、到達板温230℃で乾燥させた。

2.2 せん断加工方法および加工部の観察方法

せん断加工におけるエナメルヘアの発生挙動を調査するため、シャー切断での直接観察を実施した。観察方法は、高速度カメラをメカニカルシャーに設置し、撮影速度は毎秒1000フレームとした。

表3にシャー切断での加工条件を示す。上刃と下刃とのクリアランスをSUS430の板厚比率で10%とし、加工速度は0.2m/sとした。

表3 シャー切断条件

Table 3 Shearing conditions

	条件
せん断クリアランス	10% (SUS430板厚比率)
せん断速度	0.2m/s

また、せん断加工過程での挙動を調査するため、図1に示す金型を用い、パンチの供試材への押込み量を変化させたせん断加工を行った。表4に加工条件を示す。条件としては、パンチ径Dpを20.00mm、ダイ内径Ddを20.08mm、パンチとダイとのクリアランスをSUS430の板厚比率で

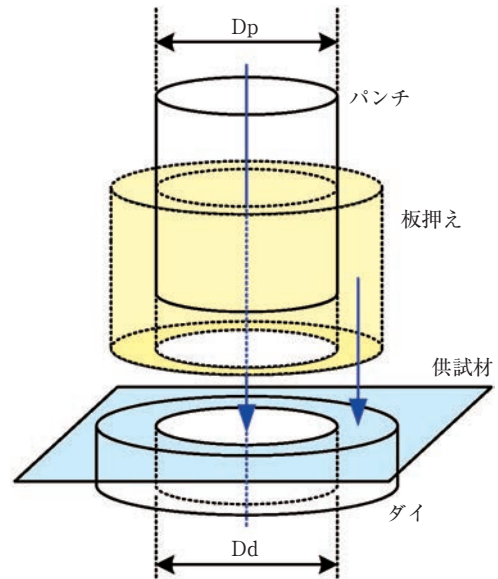


図1 せん断加工方法

Fig. 1 Schematic of punching test.

表4 せん断加工条件

Table 4 Punching conditions

	条件
パンチ径(Dp)	20.00mm
ダイ径(Dd)	20.08mm
打抜きクリアランス	10% (SUS430板厚比率)
打抜き速度	0.4m/s
しわ押え力	8kN

10%、加工速度を0.4m/s、板押え力を8kNとした。

せん断加工によって作製したせん断過程材は、断面を光学顕微鏡観察、表面をSEM観察し、図2に示すように、ダレ幅および塗膜剥離幅を測定した。

パンチの供試材への押込み量は、パンチ先端が供試材の表面に接する位置を基点とし、20, 30, 45, 130μmと完全に供試材をせん断するまでの条件に変化させた。

塗装前処理材のせん断過程材の表面SEM観察は、塗装前処理皮膜では加速電圧を1kVにし、同位置のSUS430表面では加速電圧を15kVにして、前処理皮膜を透過させることにより行った。

2.3 せん断加工に関する有限要素法解析

せん断加工でのダレ部の変形挙動と応力状態を推定するため、有限要素法解析を行った。表5に解析条件を示す。解析は2次元軸対称の弾塑性体モデルとし、図1に示したパンチの押込み量が20, 30, 45μmの場合について

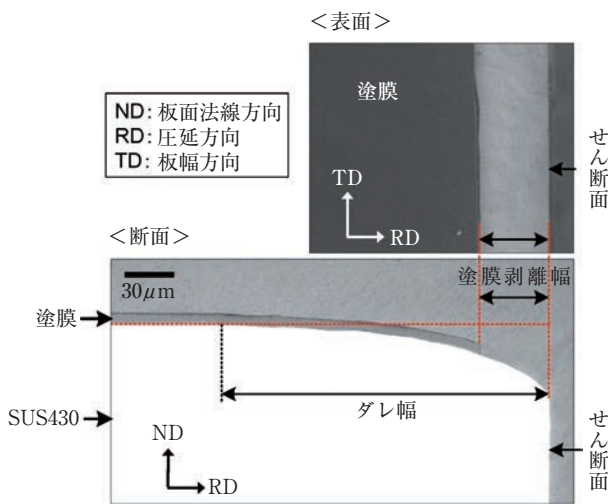


図2 ダレ幅および塗膜剥離幅  
Fig. 2 Definition of shear droop width and paint loss width.

て行った。

### 2.4 EBSD法によるダレ部の結晶方位解析

せん断加工で発生したダレ部の表面で観察される変形帯について、ステップ状に起伏を伴ったせん断帯であ

ば、結晶粒内でのステップ直下で結晶回転が発生すると考え、FE-SEMにてダレ部を拡大観察し、そのステップ直下部位を結晶方位解析した。結晶方位解析は従来の報告例<sup>7)</sup>を参考にしてTSL社製OIM (Orientation Imaging Micro-scope) を用いたEBSD (Electron Back Scatter Diffraction Patterns) 法により行い、逆極点図に従った板面法線方向の方位マップ (Normal Direction-Inverse Pole Figure) 像 (以下、ND-IPFマップと記す) を作図した。

### 2.5 塗膜剥離界面の分析

図3にエナメルヘアが発生した剥離界面のXPS分析に関するサンプル作製方法を示す。図1に示した金型で完全にせん断加工したサンプルのダレ部を粘着テープで強制剥離し、ステンレス鋼板側および塗膜側の剥離界面について、XPSにより深さ方向の元素分布状態を分析した。分析成分として、塗装前処理皮膜中に含まれるSiを選定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 塗膜の剥離状態の直接観察

図4に高速度カメラで観察したプレコート材をシャープ切断した際のダレ部における挙動変化を示す。プレコートステンレス鋼板のシャープ切断では、エナメルヘアが発生し、その発生挙動は、プレコート材に上刃が押込まれることにより、SUS430のダレ形成を伴って塗膜剥離が発生した。さらにプレコート材が切断されると、切断面は上刃側面と擦れはするが、塗膜剥離幅に変化は生じなかった。

表5 有限要素法解析条件  
Table 5 FEM analysis conditions

	条 件
1) 解析ソルバー	LS-DYNA
2) 解析モデル	2次元軸対称モデル
3) 材料モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>弾塑性体モデル</li> <li>鋼種SUS430の引張試験データを使用</li> <li>YS = 321MPa</li> <li>TS = 526MPa</li> <li>EL = 29%</li> <li>硬さ166HV</li> </ul>
4) 工具モデル	剛体(変形しない)と仮定
5) 材料・工具間の摩擦条件	クーロン摩擦モデル(摩擦係数 $\mu = 0.1$ )
6) 材料破壊条件	材料は破断しないと仮定
7) 加工条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ブランク径: 40mm</li> <li>・板厚: 0.4mm</li> <li>・パンチ径: 20mm</li> <li>・ダイ内径: 20.08mm</li> <li>・板押え: ダイと同一領域</li> <li>・パンチとダイのクリアランス: 10% (SUS430板厚比率)</li> <li>・板押え力: 8kN</li> </ul>

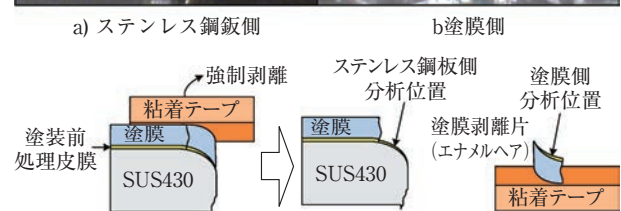
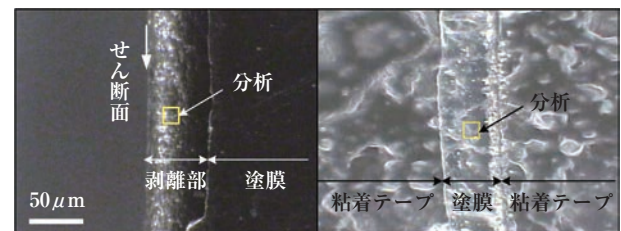


図3 塗膜剥離界面のXPSサンプル作製方法  
Fig. 3 Preparation of XPS sample for paint loss interface.

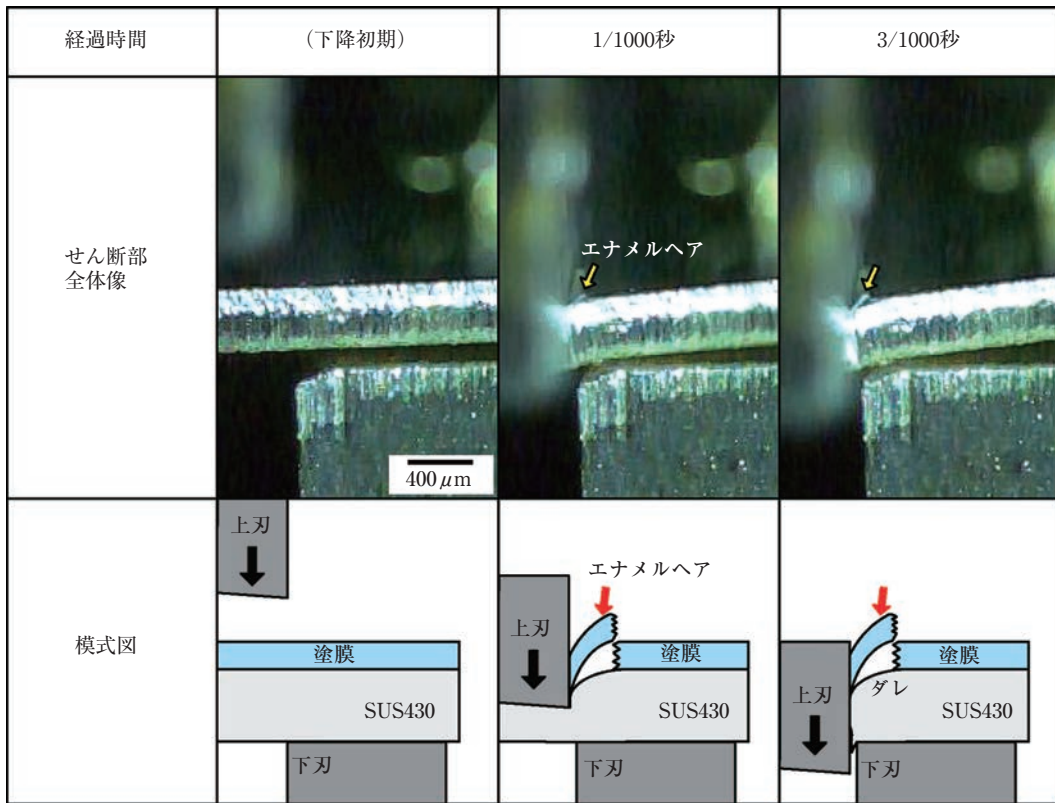


図4 シャー切断の連続写真  
Fig. 4 Sequential photographs of shearing.

### 3.2 SUS430無垢材のせん断ダレ部の表面状態

図5にせん断加工したSUS430無垢材のダレ部断面を、図6にダレ部表面を示す。せん断面から100 $\mu$ m離れたa部位およびせん断面近傍の変形が著しいb部位には結晶

粒毎に一方向に変形している領域(以下、変形帯と記す)および結晶粒界が観察され、せん断面に近いb部位では

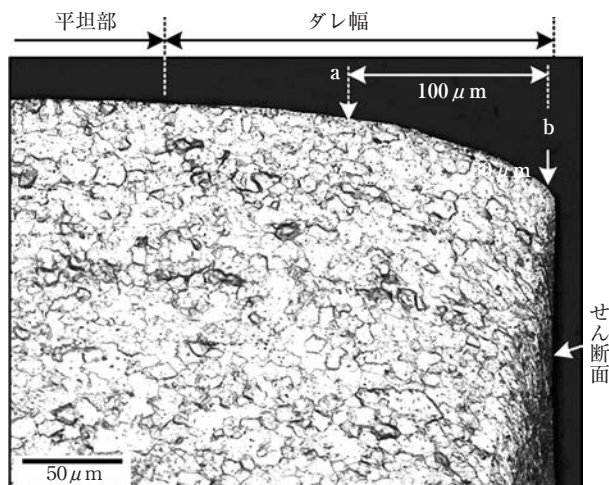


図5 SUS430無垢材のダレ部断面状態  
Fig. 5 Cross-sectional image of shear droop on bare SUS430.

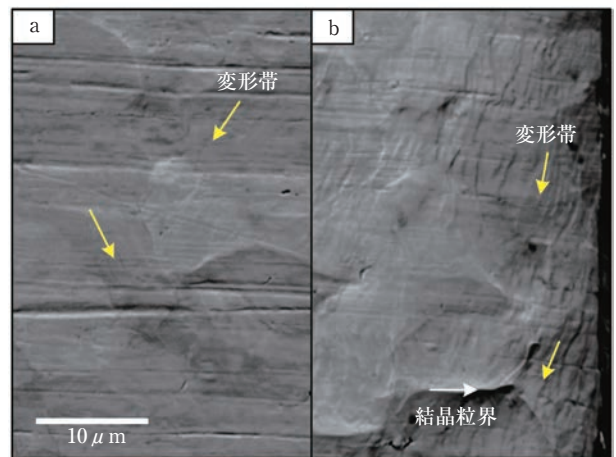
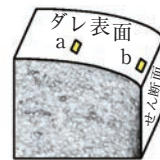


図6 SUS430無垢材のダレ部表面状態  
Fig. 6 Surface image of shear droop on bare SUS430.

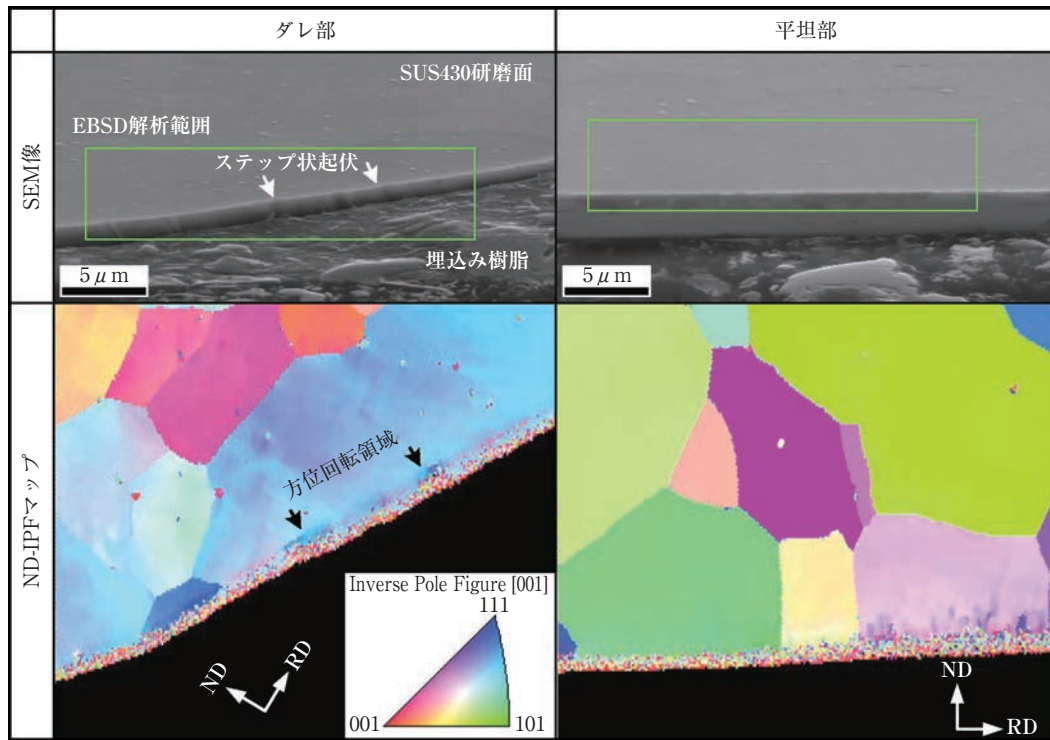


図7 SUS430無垢材のダレ断面のSEM像およびND-IPFマップ  
 Fig. 7 SEM image and ND-IPF map of shear droop on bare SUS430.

より鮮明に変形帯が観察された。

図7にSUS430無垢材のSEM像およびEBSD法によるND-IPFマップを示す。変形帯がステップ状のせん断帯

であることを確認するために、結晶粒内の変形帯を拡大観察した結果、ステップ状の起伏であることを確認した。さらに、ステップ直下の結晶方位を確認したところ、平坦部にみられない方位回転が確認されたことから、図8の模式図に示すようにダレ部表面ではステップ状のせん断帯が発生していると考えられる。

### 3.3 塗装前処理材のせん断ダレ部の表面状態

図9に塗装前処理材のせん断面近傍の表面SEM写真を示す。ダレ部では、図9(b)に示したように塗装前処理皮膜に微細なクラックと一部脱落部が観察された。また、クラック部位直下のSUS430表面では、図9(c)に示したようにクラックに沿って変形帯が観察された。

これらの結果から、せん断帯のステップ形成時に塗装前処理皮膜がせん断され、皮膜クラックが発生したと推察される。

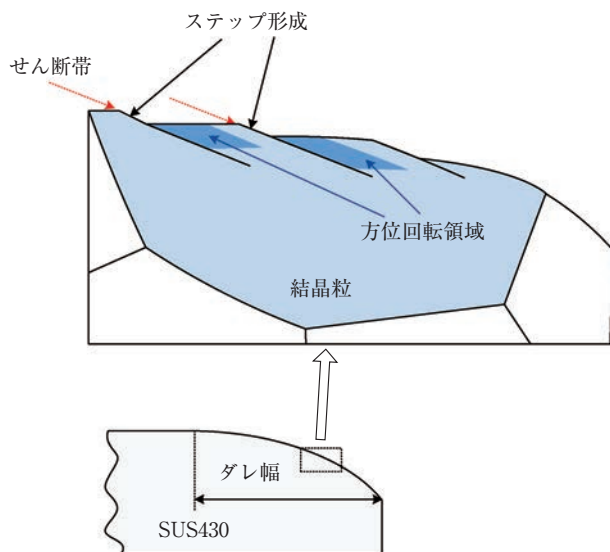


図8 SUS430無垢材のダレ断面構造の模式図  
 Fig. 8 Schematic cross-sectional structure of shear droop on bare SUS430.

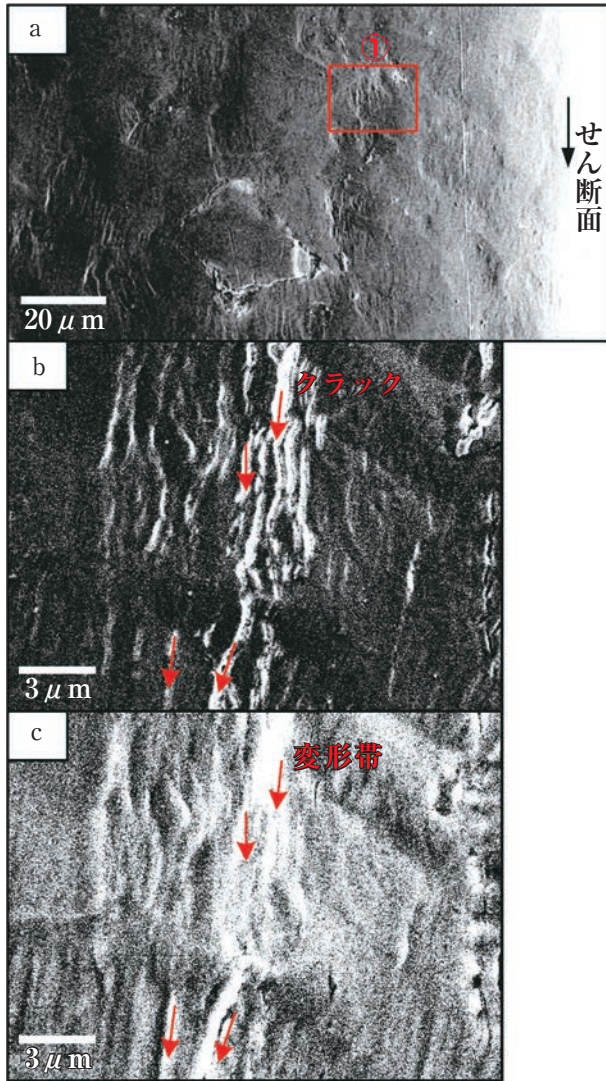


図9 せん断近傍の表面状態  
 a) せん断近傍の外観  
 b) 塗装前処理材 (①位置)  
 c) SUS430 (①位置)

Fig. 9 SEM image of sheared edge on pre-treated stainless steel sheet.

- a) appearance of sheared edge
- b) pre-treated stainless steel sheet (Point①)
- c) SUS430 (Point①)

### 3.4 エナメルヘアの発生状況

図10にエナメルヘア発生部のXPS分析結果を示す。塗装前処理皮膜成分であるSiは、ステンレス鋼板側ではSUS430表層濃度以上に、さらにSiを含まない塗膜側においても検出され、両者とも深さ方向に向かうにしたがい減少する傾向であった。この結果より、エナメルヘアの剥離界面は、塗装前処理皮膜内での凝集破壊面に位置すると推察される。

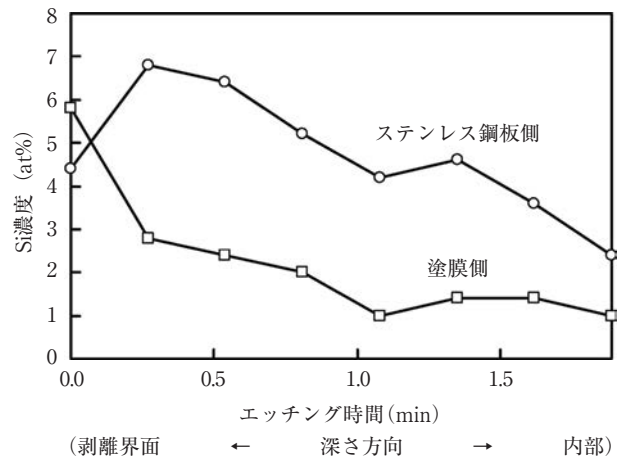


図10 Si濃度の深さ方向プロファイル  
 Fig.10 XPS depth profile of Si concentration.

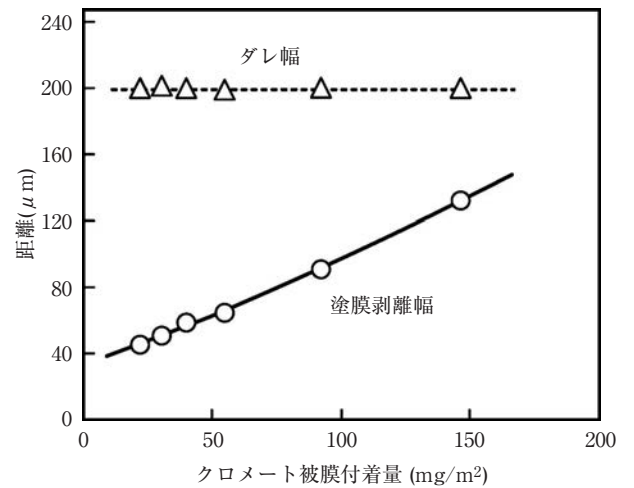


図11 塗膜剥離幅に及ぼすクロメート皮膜付着量の影響  
 Fig.11 Effect of chromate coating weight on paint loss.

図11に塗膜剥離幅に及ぼすクロメート皮膜付着量の影響を示す。ダレ幅はいずれの皮膜付着量においてもほぼ一定であったが、塗膜剥離幅は付着量が増加すると広がった。

つまり、図12の断面模式図に示すように塗装前処理皮膜は硬質のため、SUS430のダレ部形成に追従できずにクラックが入り、さらにダレ部の形成が進行することで、皮膜付着量が多いほど塗装前処理皮膜の凝集破壊を誘発して、エナメルヘアが発生したと考えられる。

### 3.5 エナメルヘア発生機構

シャー切断の直接観察の結果、切断と同時に塗膜浮

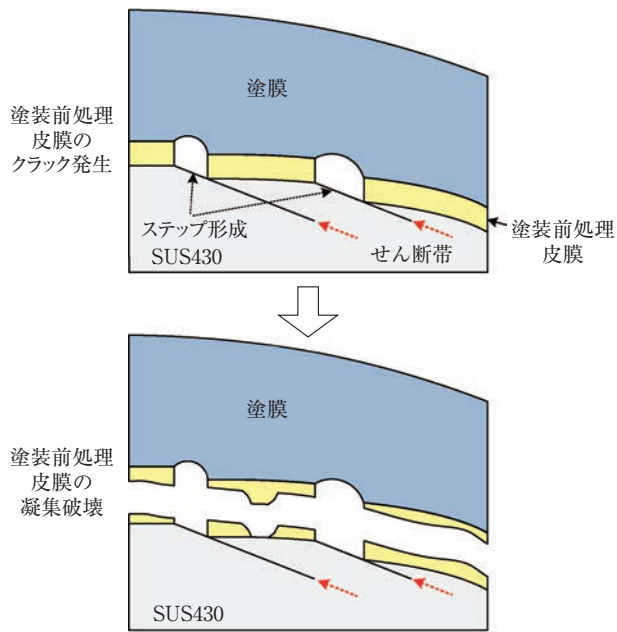


図12 塗膜剥離界面の断面模式図  
Fig.12 Schematic cross-sectional structure of paint loss interface.

きが発生したことから、せん断加工完了までのパンチ押込み量を変化させて、せん断変形挙動を詳細に観察した。

図13にせん断過程材の表面およびせん断面との直交断面の観察結果を示す。パンチ押込み量 $20\mu\text{m}$ では、SUS430および塗膜に盛り上がった変形部位が観察された。押込み量 $30\mu\text{m}$ では、塗膜はSUS430から浮き上がり、盛り上がった変形部位が残存し、SUS430には盛り上がりのないダレ部が観察された。押込み量 $45\mu\text{m}$ 以降では、塗膜浮き部やダレ部の変形が増加し、せん断加工が完了するとエナメルヘアが発生した。

図14にSUS430のせん断加工におけるダレ部形成過程に対する有限要素法解析結果を示す。押込み量増大と共にパンチ肩部とダイ肩部を結ぶライン上で相当応力と相当塑性ひずみが増大した。静水圧では、ダレ部において押込み量 $20\sim 45\mu\text{m}$ で圧縮領域が存在し、押込み量増大と共に引張-圧縮境界線がせん断面側に移動した。

以上の結果から、塗装前処理皮膜に及ぼすステンレス鋼板のダレ部の形成挙動を基にして、プレコートステンレス鋼板のエナメルヘア発生機構を推定した。

塗膜表面からパンチが押込まれると、パンチ押込み $30\mu\text{m}$ までは、ステンレス鋼板のダレ形成によって、その周辺の塗膜と塗装前処理皮膜は圧縮応力を受ける。これにより塗装前処理皮膜は、ステンレス鋼板のダレ部形成に追従できず、クラックや凝集破壊が発生したと考え

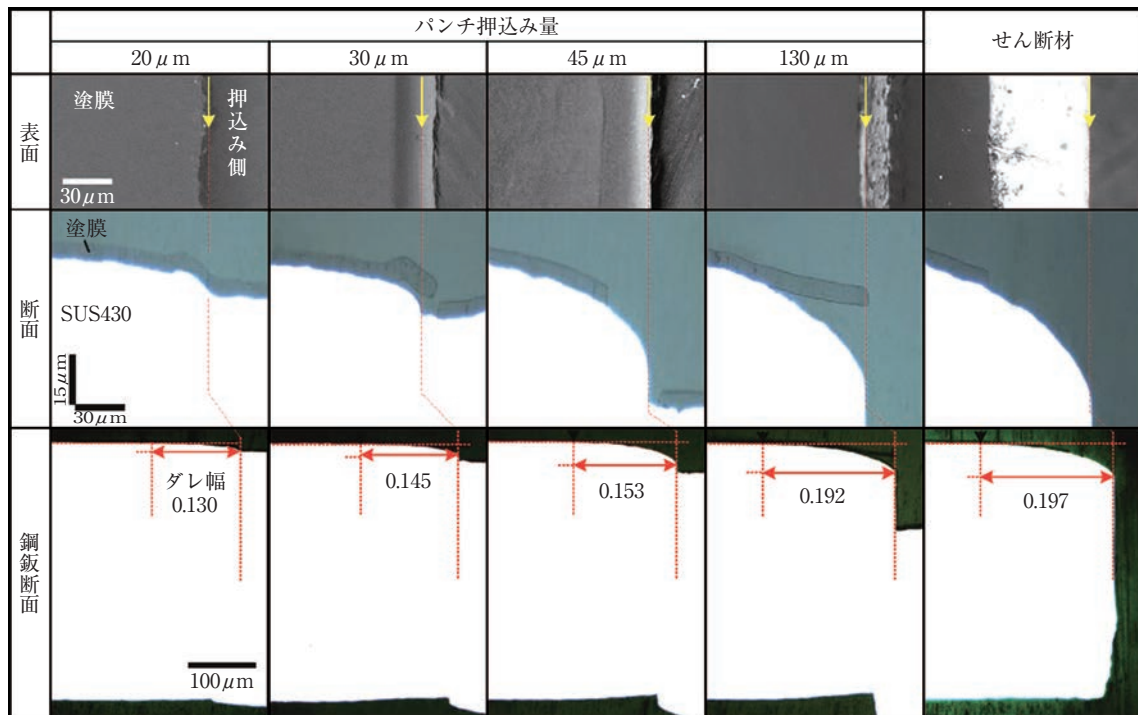


図13 パンチ押し込み量とダレ部形状の関係  
Fig.13 Relationships between punch stroke and shape of shear droop.

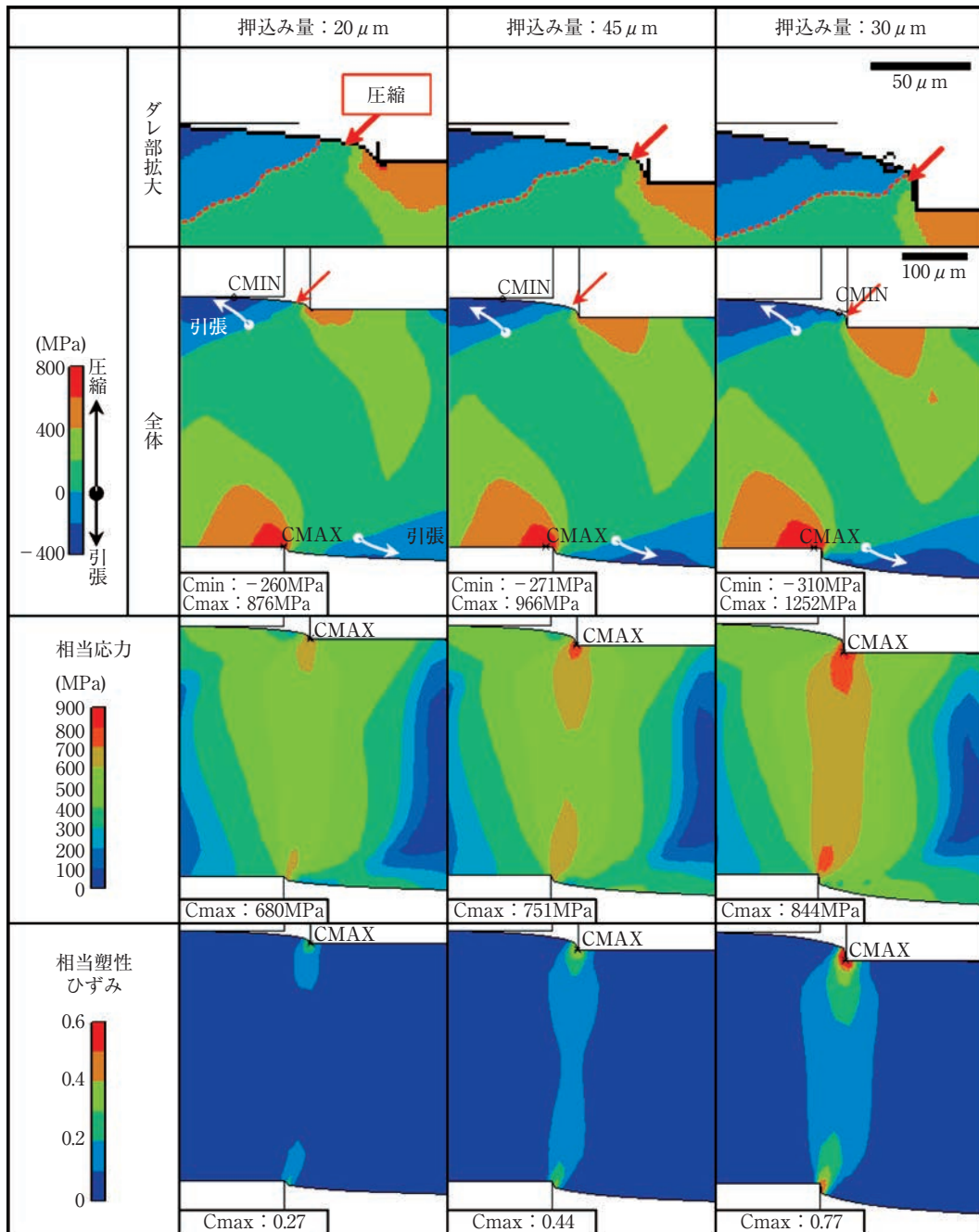


図14 せん断加工の有限要素法解析結果  
Fig.14 FEM analysis of punching.

られる。

パンチ押込み45 μm以上では、ステンレス鋼板のダレ部の変形形態が圧縮から引張に変化すると考えられ、塗装前処理皮膜は凝集破壊面が内部へと伝播することで、塗膜浮き部が拡大したと考えられる。さらに、せん断加工終了までに、浮き塗膜が脱落した場合はエナメルヘアとなり、塗膜が破断しない場合はそのまま浮

き塗膜として残存すると考えられる。

#### 4. 結 言

プレコートステンレス鋼板をせん断加工した場合に発生するエナメルヘアについて、塗装前処理皮膜に及ぼすステンレス鋼板のダレ部形成挙動の影響を調査し、以下



の結果を得た。

- (1) プレコートSUS430は、せん断加工部の直接観察によってエナメルヘアが発生することが明らかとなった。
- (2) SUS430無垢材のせん断加工により発生したダレ部の表面状態を調査した結果、平坦部にみられないステップ直下での結晶方位回転が確認されたことから、ダレ部ではステップ状のせん断帯が発生していると考えられる。
- (3) 塗装前処理材のダレ部の表面状態を調査した結果、発生した皮膜クラックに沿って、その直下のステンレス鋼板表面には変形帯が観察された。
- (4) エナメルヘアの発生界面をXPS分析した結果、剥離塗膜側およびステンレス鋼板側に塗装前処理皮膜成分が確認できたことから、エナメルヘアの剥離界面は、塗装前処理皮膜内での凝集破壊面に位置すると推察される。
- (5) せん断加工によるプレコートステンレス鋼板のエナメルヘア発生機構は次のように推察できる。まずダレ部形成初期に圧縮応力を受けた塗装前処理皮膜は、ステンレス鋼板のダレ部形成に追従できず、クラックや凝集破壊が発生する。さらにダレ部形成が進行すると、変形形態が圧縮から引張に変化すると考えられ、塗装前処理皮膜では凝集破壊面が内部へと伝播することで、塗膜浮き部が拡大しエナメルヘアが発生すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) R.Pearce and A.A.Mazhar : Met.Technol. (1976), 338.
- 2) G.Riontino, C.Antonione, L.Battezzati, F.Marino and M. C. Tabasso : J.Mater.Sci.,14 (1979), 86.
- 3) 塩田明俊, 野村伸吾, 小久保一郎 : 鉄と鋼, 70 (1984), S472.
- 4) 中森俊夫, 渋谷敦義 : 鉄と鋼, 70 (1984), S1125.
- 5) 中森俊夫, 渋谷敦義 : 鉄と鋼, 71 (1985), S1273.
- 6) 中村浩茂, 河原菜穂, 上田耕一郎 : CAMP-ISIJ, 25 (2012), 1068.
- 7) 秀嶋保利, 富村宏紀, 平松直人 : 日新製鋼技報, 90 (2009), 9.