

端面耐食性向上ソリューション —初期端面耐食性向上のための切断技術の開発—

Cutting Technologies to Improve Early Corrosion Resistance on the Cut Edge Surface of a Zn Alloy Coated Steel Sheet

小林 亜暢* 乗田 克哉 安富 隆
Akinobu KOBAYASHI Katsunari NORITA Takashi YASUTOMI

抄 録

めっき鋼板は、めっきが鋼板の腐食を抑制するため、赤錆が発生しにくいことから様々な用途に使用されている。しかし、めっき鋼板を使用する際、加工先で所定の寸法に切断してから使用されることが多いが、従来のシャー等で切断した端面はほとんどめっきに被覆されていない。よって建材向け等の比較的板厚が厚いめっき鋼板の場合、切断後の端面部の赤錆が目立つことがある。そこで日本製鉄(株)では切断技術を新たに開発することでこの問題への解決に取り組んだ。傾斜端面工法、端面防錆せん断技術の異なる2種類の技術を検討し、従来の切断方法に対して、端面では耐食性向上効果が認められた。さらにめっきをZnめっきから、Zn-Al-Mg系の高耐食めっきにすることで、さらなる性能向上が認められた。新しい切断技術と高耐食めっきを組み合わせることで、端面の赤錆抑制や補修頻度を低減できる可能性がある。

Abstract

Zn alloy coated steel sheets are used for multiple applications because the Zn alloy coating inhibits rusting of the steel (red rust). However, because in many cases Zn alloy coated steel sheets are used after cutting, conventionally the cut edge surfaces of a Zn alloy coated steel sheet are not covered with the coating. Red rust which is on the edge surface is sometimes conspicuous, especially when the Zn alloy coated steel sheet is thick. Nippon Steel Corporation attempted to resolve this problem by developing two new cutting technologies: the KT method in which KT means inclined edge surface (Keisha-Tanmen in Japanese) and Shearing technology to prevent rust of edge surface. These cutting technologies improved early corrosion resistance on the cut edge surface of a Zn alloy coated steel sheet. In addition, by changing the Zn alloy coating to a Zn-Al-Mg alloy coating that has a higher corrosion resistance than the Zn alloy coating, the corrosion resistance on the edge surface was also improved with these cutting technologies. The developed cutting technologies combined with the Zn-Al-Mg alloy coated steel sheet will inhibit rusting of the cut edge surfaces of the coated steel and reduce the repair frequency.

1. 緒 言

めっき鋼板は建材、自動車、家電、容器などの分野で、鋼板の耐食性向上を目的に使用される。めっき鋼板を使用する際、加工先で所定の寸法に切断してから使用されることが多いが、従来のシャー等で切断した端面はほとんどめっきに被覆されていない。よって建材向け等の比較的板厚が厚いめっき鋼板、特に3.2mm以上の場合、切断後の端面部の赤錆が目立つことがある。そのため切断後の端面に刷毛塗りやスプレーによって防錆剤を塗装する補修工程

が必要となる場合がある。

めっきにより端面耐食性を向上させるためには、図1のようにめっきの溶解性を高めて、溶解成分を端面へ回り込ませる必要がある²⁾。一方で、めっきの溶解性が高くなると一般的に平面部の耐食性が低下してしまうため、平面と端面の耐食性を両立させるのは容易ではない³⁾。また、施工直後といった、初期の段階では、端面にめっきの溶解成分が十分回り込んでいないため、端面から赤錆が発生しやすい。

一方、Zn-Al-Mg系の高耐食めっき鋼板として、日本製鉄(株)では、SuperDyma® (SD)、ZAM®、ZEXEED®などを

* 鉄鋼研究所 表面処理研究部 めっき研究室 研究第二課 主任研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

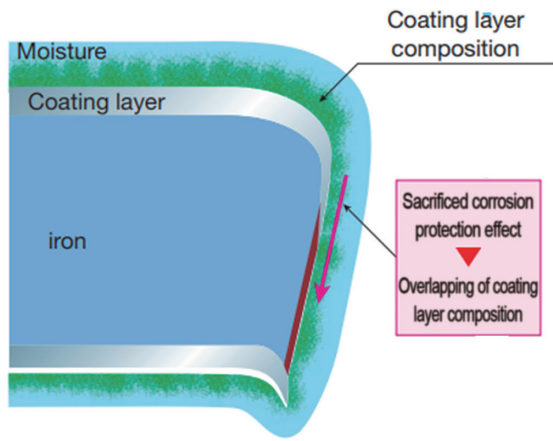


図1 めっきによる端面防錆機構²⁾

The mechanism of corrosion resistance for a cut edge surface by a Zn alloy coating²⁾

開発、製造している⁴⁻⁶⁾。また後処理も開発し⁷⁾、従来のZnめっきに比べて平面耐食性、端面耐食性ともに改善してきているが、厚板や使用環境によっては対応しきれていない場合もある。

そこで日本製鉄では端面耐食性を向上させる技術を検討してきた。本報で、そのうち、切断により端面耐食性を向上させる以下2種類の技術について紹介する。

- 傾斜端面工法 (KT工法)
- 端面防錆せん断技術

2. 端面耐食性向上切断技術

開発した2種類の技術について、技術概要、切断した端面形状やめっきの被覆状態、端面耐食性評価結果についてそれぞれ紹介する。

2.1 KT工法

2.1.1 KT工法の概要

図2(a)に従来せん断加工の模式図を示す。従来せん断加工では端面の大半は鉄が露出した破断面が高い割合を占め、鋼板がめっきで被覆されている面積の割合は低くなることが報告されている⁸⁾。そこで、端面において破断面が占める割合を下げ、めっき被覆率を向上させる切断技術を開発することで、端面耐食性の向上を図った。

図2(b)に今回開発した傾斜端面工法(以降KT工法と略す)の模式図を示す。KT工法は、上下の切断金型に突起状の刃を設けており、鋼板を押しつぶすようにして切断する工法で、主に以下の2点を狙った。

1. 切断中は刃がめっきを切断端面に押し出して、端面のめっき被覆率を高める。
2. ブランク材へ圧縮力を作用させることで材料の延性が向上する静水圧効果を利用し、鋼板の破断タイミングを遅れさせて、破断面を減少させる⁹⁾。

この狙いで金型を設計し、狙い通りの切断端面になるか検

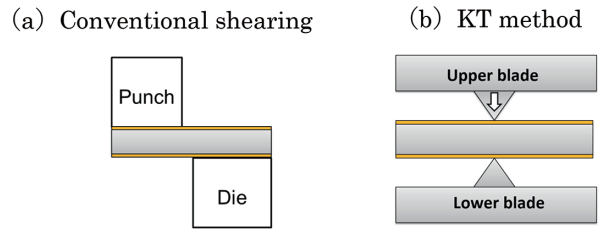


図2 金型の概要

(a) 従来せん断加工, (b) KT工法
The diagrams of cutting dies using
(a) Conventional shearing, (b) KT method

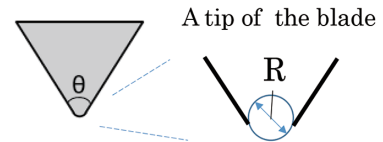


図3 KT工法用金型の刃先形状
The shape of the KT method's die blade

討した。

2.1.2 端面形状の観察

(1) KT工法の条件および観察方法

切断にはサーボプレス機(ZENformer:(株)放電精密加工研究所製)を用いた。本検討では図3に示すように、刃先角度 θ が 60° 、曲率半径Rが 0.05mm の刃がついた金型をプレス機の上下に設置した。比較とした従来のせん断は、先端が直角で鋭利であり、パンチとダイのクリアランスが板厚の10%(0.32mm)の金型をプレス機の上下に設置した。

供試材は、板厚 3.2mm の溶融亜鉛めっき鋼板(GI:両面めっき付着量約 900g/m^2)を用いた。

KT工法および従来せん断加工で切断後、めっき鋼板端面を断面および正面から、光学顕微鏡で観察した。断面は、試料を樹脂に埋め込み研磨してから観察した。

(2) 端面形状の観察結果

図4(a),(b)に従来せん断加工で切断した端面の正面および側面を観察した結果をそれぞれ示す。従来せん断加工の端面は、だれ(Roll over)、せん断面(Burnished surface)、破断面(Fracture surface)から構成されていた。図4(a),(b)から、従来せん断加工で切断した端面はせん断面が約10%と低い割合を占め、破断面が約80%と高い割合を占めていた。図4(b)から、だれはめっきで被覆されていることが確認できたが、せん断面についてはこの観察倍率では断定が難しかった。

図5(a),(b)にKT工法で切断した端面の正面および側面を観察した結果をそれぞれ示す。KT工法の端面は、だれ(Roll over)、傾斜面(Inclined plane)、破断面(Fracture surface)から構成されていた。この傾斜面を有するという特徴から、この切断技術を傾斜端面(KT)工法と命名した。

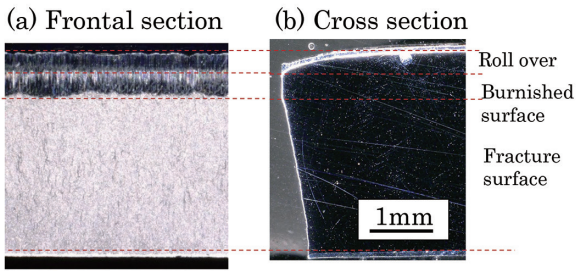


図4 従来せん断加工で切断した試料断面の光学顕微鏡観察像
(a) 正面, (b) 側面
Optical microscope images of conventional shearing-samples
(a) Frontal section, (b) Cross section

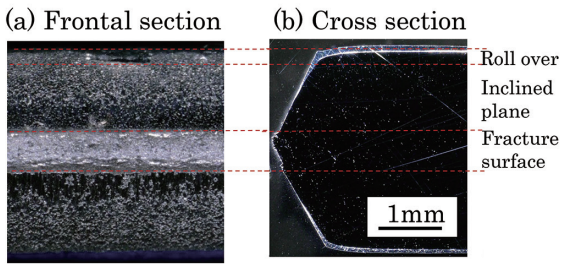


図5 KT工法で切断した試料断面の光学顕微鏡観察像
(a) 正面, (b) 側面
Optical microscope images of KT method-samples
(a) Frontal section, (b) Cross section

図5 (a), (b) から、KT工法で切断した端面は傾斜面が約70%と高い割合を占め、破断面が約20%と低い割合を占めた。図5 (b) から、黒色の銅板の上下傾斜面それぞれの中心付近まで灰色のめっき層を確認した。

2.1.3 端面のめっき被覆状態

(1) 端面のめっき被覆状態の測定方法

端面がどの範囲までめっきで被覆されているのかを確認するために、マイクロ蛍光X線分析 (μ -XRF) (ORBIS PC: アメテック社製) を用いて、端面正面からめっき付着状態を測定した。XRFは電圧20kV、電流20 μ A、ビーム径は約30 μ m ϕ に設定した。KT工法の端面は平滑ではないため、各測定点でのZn検出強度の絶対値は比較できない。そこで、ZnのK α (8.6eV) と、FeのK β (7.06eV) のピーク強度比 (Zn/Fe) から、切断端面におけるZnの多寡を確認した。比較として従来せん断加工の断面についても同様に確認した。図6の測定箇所A~Gの、白丸の範囲をそれぞれ測定した。

(2) 端面のめっき被覆状態の測定結果

μ -XRFによる各切断端面のピーク強度比 (Zn/Fe) の測定結果を図7に示す。従来せん断加工のだれ (A) とKT工法のだれ (D) はZn/Feの強度比が高く、どちらもめっきが多く付着していた。KT工法について、だれ (D) と比べると、傾斜面 (E) や (F) ではZn/Feの強度比が低くなっていた。

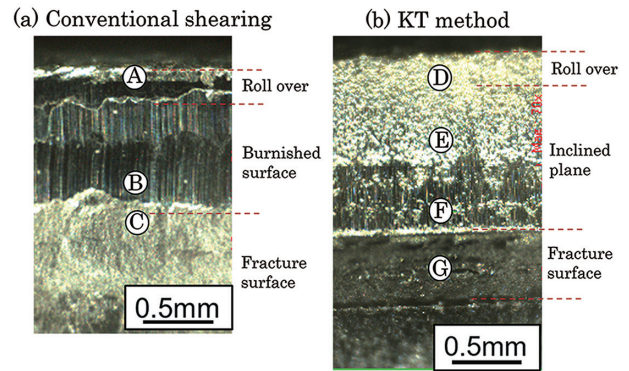


図6 端面の μ -XRF測定箇所
Measured points of μ -XRF

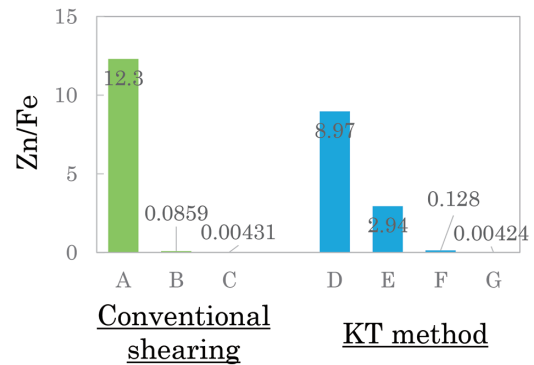


図7 μ -XRFによる各切断端面のピーク強度比 (Zn/Fe)
Measured points of μ -XRF and Zn/Fe ratio

KT工法の傾斜面における破断面付近 (F) は、KT工法の端面の中で比較的Zn/Feの強度比が低い箇所である。しかし、傾斜面 (F) は従来せん断加工のせん断面 (B) のZn/Feの強度比よりも値が高かった。従来せん断加工の破断面 (C)、KT工法の破断面 (G) ではともにZn/Feの強度比が0.01以下であることから、破断面にはめっきは存在していないと判断した。 μ -XRFの結果から、KT工法は破断面以外がめっきで被覆されており、その厚みも厚いと判断した。

KT工法は開発の狙い通り、端面における破断面の占める割合が低く、端面のめっき被覆率が高くなっていることを確認した。

2.1.4 大気暴露による端面耐食性の評価

(1) 端面耐食性の試験方法

2.1.2項記載の板厚3.2mmのGIをKT工法 (金型: $\theta 60^\circ$, R0.05mm) と従来せん断加工 (クリアランス0.35mm) で切断した試料について、大気暴露試験により端面耐食性を評価した。

評価したい端面以外の端面の腐食の影響を排除するために、評価端面以外の3か所の端面を塗装で被覆した。試料は、めっき鋼板の平面部分の成分が評価部に流れていかなないように、評価端面は上向きで、地面に対し垂直に設置した。試料は千葉内房の沿岸から約0.5km離れた場所にて、2017

年8月～2018年9月の約1年の期間、日照の大気暴露にて端面耐食性を評価した。さらに評価端面からの流れ錆による、平面部の外観不良を評価するため、平面部も観察した。端面耐食性を評価する定量化指標として、赤錆面積率を、

赤錆面積率 = (端面における赤錆面積) / (端面全体の面積)
と定義した。また、試料はN=2ずつ評価し、赤錆面積率はその平均値とした。

(2) 端面耐食性の結果

大気暴露した後の端面外観を図8に示す。KT工法材の方が、従来せん断加工材よりも端面耐食性が向上し、KT工法材の赤錆面積率は従来せん断加工の1/3以下であった。

従来せん断加工材は暴露10日以降、暴露終了まで赤錆面積率は65%以上であった。時系列で見ていくと、暴露から10日では赤錆面積率は約80%であった。暴露日数が経過するにつれ、白錆が徐々に端面を被覆していき、200日では赤錆面積率は約65%となり、365日まで同程度に維持された。

KT工法材は暴露10日以降、暴露終了まで赤錆面積率は約20%であった。暴露期間においてめっきが被覆していた傾斜面では赤錆は発生しなかった。時系列で見ていくと、暴露から10日では破断面を中心に赤錆面積率は約18%で

あった。このときめっきで被覆されていた傾斜面では赤錆は確認されなかった。50日では、傾斜面の破断面付近の一部で赤錆は確認されたがその範囲は狭く、赤錆面積率は約20%のまま変化はなかった。以降200日までは白錆が破断面の一部を徐々に覆ったため、赤錆面積率は約17%まで低下した。365日では、傾斜面の破断面付近で再び赤錆が発生しはじめ、赤錆面積率は約23%であった。

2.1.5 高耐食めっき鋼板へのKT工法適用

(1) 高耐食めっき鋼板の端面耐食性の試験方法

KT工法は、平面部のめっきで端面が被覆されるため、めっきの耐食性が端面防錆機能に影響を与えると考えられる。また、金型形状をめっき種や用途に合わせて最適化すればさらなる性能向上が見込める¹⁰⁾。板厚3.2mmのZn-Al-Mg系合金めっき鋼板のSuperDyma® (SD：両面めっき付着量約270g/m²)に対し、KT工法の金型を最適形状に変更して切断した。従来せん断加工は2.1.2項と同様の金型を用いた。暴露は2.1.4項の暴露と同様の環境で、2017年12月～2019年1月の約1年の期間、日照の大気暴露にて端面耐食性を評価した。

(2) 高耐食めっき鋼板の端面耐食性の結果

暴露の結果を図9に示す。SDの場合もKT工法材の方が、

Cutting	10 days	50 days	100 days	200 days	365 days
Conventional shearing					
Red rust rate(%)	80 %	75 %	70 %	65 %	65 %
KT method					
Red rust rate(%)	18 %	20 %	17 %	17 %	23 %

図8 GIを各方法で切断した端面の大気暴露後の外観
Appearances of the GI sample edge surface after atmospheric exposure

Cutting	50 days	100 days	365 days
Conventional shearing			
Red rust rate(%)	40 %	35 %	65 %
KT method			
Red rust rate(%)	3 %	3 %	3 %

図9 SDを各方法で切断した端面の大気暴露後の外観
Appearances of the SD sample edge surface after atmospheric exposure

従来せん断加工材よりも端面耐食性が向上した。KT 工法材は暴露 50 日以降、暴露終了まで赤錆面積率は約 3% であり、一瞥しただけでは赤錆がわからない程度まで抑制することができた。

腐食試験の開始時期が 2.1.4 項とは同一ではないので、単純な比較はできないが、図 8 と図 9 を比較すると、従来せん断加工材同士を比較した場合、100 日までは SD の方が GI の赤錆面積率が小さく、その差は大きかったが、365 日ではその差はなくなった。一方、KT 工法材同士を比較した場合、暴露 50 日では SD の方が GI よりも赤錆面積率が小さく、365 日後でも暴露 50 日の赤錆面積率の差と同程度であった。これらのことから、KT 工法と高耐食めっき鋼板の組み合わせは端面耐食性の向上に有効であると考えられる。

以上のように、高耐食めっき鋼板と KT 工法を組み合わせることで、端面耐食性の向上が確認できた。

2.2 端面防錆せん断技術

2.2.1 端面防錆せん断技術の概要

端面防錆せん断技術のコンセプトを、“①金型構成が従来せん断加工と同様、②切断端面形状が従来せん断加工と同等、③直線形状・穴形状にも適用が可能”とし、めっき鋼板の切断端面に防錆力を付与できる切断刃の開発を行った。

図 10 (a) に従来せん断加工、(b) に端面防錆せん断技術の金型の構成例を示す。従来せん断加工は、先端が直角であり鋭利な刃先先端を有するパンチ/ダイを用いるが、端面防錆せん断技術ではパンチ/ダイの一方の刃先先端の肩部に段差および曲率半径 R を付与し、他方は従来せん断加工と同様の刃を用いる。このように、端面防錆せん断技

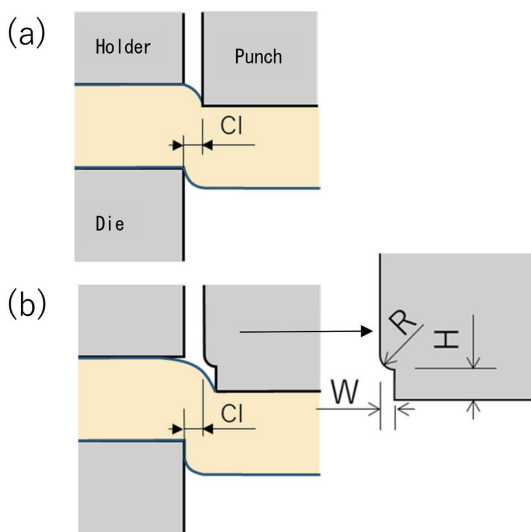


図 10 金型の概要

(a) 従来せん断加工, (b) 端面防錆せん断技術

The diagrams of shearing tools

(a) Conventional shearing, (b) Developed shearing

術は、従来せん断加工と金型構成は同様であるが、一部の切断刃の先端形状が異なる。以降、端面防錆せん断技術に用いる切断刃の形状を段付き刃、従来せん断加工に用いる切断刃の形状を従来刃と称す。

段付き刃では、先端に付与した段差部によりめっき鋼板の切断部に曲げ変形を加え傾斜させた後に、R 部を食い込ませしごきを加えながら切断する。刃先の R 部によりめっき層を分断せず、しごきにより静水圧を発生させ破断を遅れさせるためせん断面率が向上する。

2.2.2 CAE を用いためっき移動の簡易予測

切断中にめっき層の動きを観察することは難しいため CAE (Computer Aided Engineering) を用いた簡易予測手法を検討した。各切断刃における切断時のめっき層の動きの予測結果を図 11 に示す。CAE には MSC.Marc を使い、2 次元モデルを作製した。材料表面に $20\mu\text{m}$ 間隔で設定した観察点の動きを追跡することで加工中のめっき層の移動状態を表現した。また、設定した点間隔の広がりによりめっき層の厚み変化を予測した。CAE の結果から鋭利な刃先を有する従来刃では切断初期にめっき層が分断されることが確認でき、刃先に R を付与した段付き刃ではめっき層を分断せずにせん断面を形成できるため、せん断面へのめっき被覆率が向上することが確認できた。

2.2.3 端面のめっき被覆状態

図 12 に Zn-Al-Mg 系合金めっき鋼板 (ZAM[®]: 板厚 3.2 mm, 両面めっき付着量約 $275\text{g}/\text{m}^2$) を段付き刃で切断した端面の断面写真を示す。段付き刃による切断端面は鉄の露出した破断面の割合を小さくでき、せん断面にはめっきが被覆できていることが確認できた。破断面近傍のせん断面はめっき層が薄くなっており被覆状態が断面観察では確認し難かったため表面から EPMA を用いた元素分析により

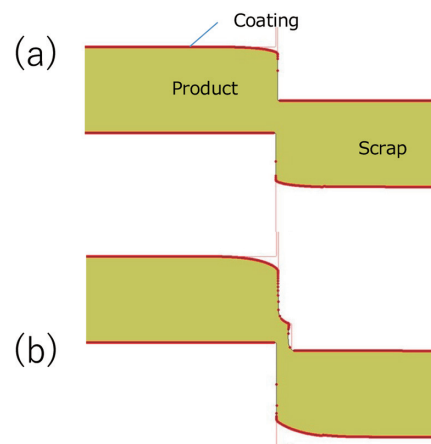


図 11 CAE によるめっきの動き予測

(a) 従来せん断加工, (b) 端面防錆せん断技術

Movement prediction of coating

(a) Conventional shearing, (b) Developed shearing

めっき成分の被覆状態を確認した。図13にZAM®(板厚3.2mm, 両面めっき付着量約275g/m²)を従来刃および段付き刃を用いて切断した端面のZn分布の比較結果を示す。

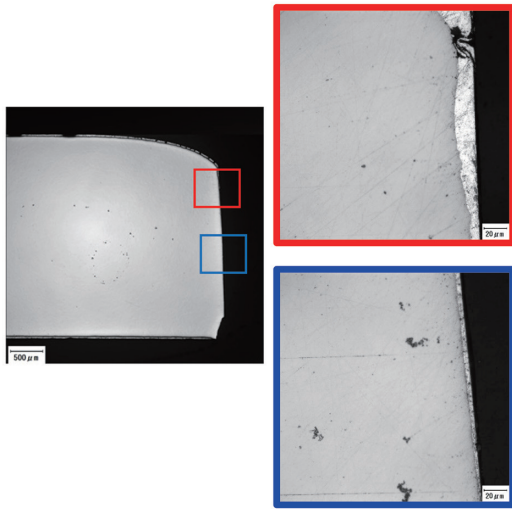


図12 端面防錆せん断技術で切断した試料断面の光学顕微鏡観察像
Optical microscope image of edge surface rust protection shearing sample

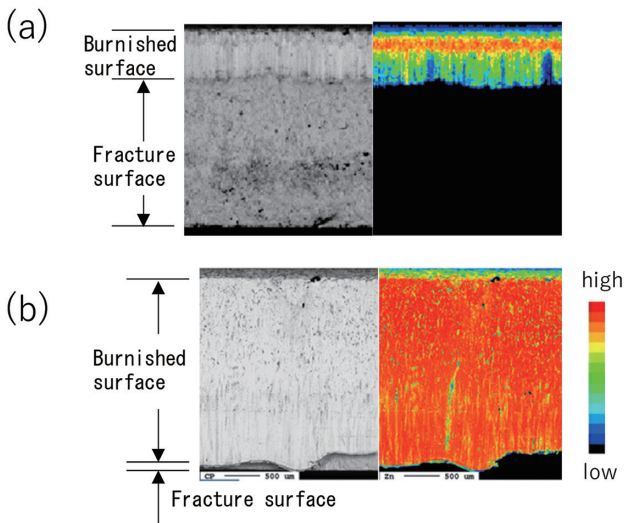


図13 切断端面の亜鉛分布(EPMA)
(a) 従来せん断加工, (b) 端面防錆せん断技術
Zinc distribution on shearing edge surface
(a) Conventional shearing, (b) Developed shearing

端面の分析により、従来刃で形成したせん断面は下方でZn成分が薄くなっているが、段付き刃により形成したせん断面は全域にZn成分が多く被覆していることが確認できた。従来刃での切断端面のめっき被覆率(板厚に対するだとせん断面合計の割合)は30%程度であるが、段付き刃での切断端面のめっき被覆率は90%程度であり鋼板の鉄が露出する破断面の割合は極めて小さくなった。

2.2.4 大気暴露による端面耐食性の評価

(1) 端面耐食性の試験方法

ZAM®(板厚3.2mm, 両面めっき付着量約275g/m²)を従来せん断加工(CI8%(0.26mm), 従来刃)と端面防錆せん断技術(CI2%(0.06mm), R0.5mm, W0.5mm, H1.0mm, 段付き刃)により40×40mmの四角形を打抜き、大気暴露試験により端面外観を観察した。試料は大阪府堺市の沿岸部で、2021年4月～10月の期間、図14に示すように35°に傾斜させ設置し側面を観察した。端面耐食性の評価は、2.1.4項記載の赤錆面積率により比較した。

(2) 端面耐食性の結果

大気暴露後の端面外観写真を図15に示す。従来刃での切断端面は、先述の通り破断面率が高いことから大気暴露開始後30日経過で赤錆面積率67%と広範囲に端面が赤錆で覆われたのに対して、段付き刃での切断端面はめっきが被覆したせん断面が拡大したことで180日経過後も赤錆面積率1%と赤錆の発生を大幅に抑制できた。

以上より、せん断加工に用いる切断刃の刃先形状を変更することで、鋼板表面のめっき層で端面が被覆できるため、端面の初期防錆力の向上が確認できた。

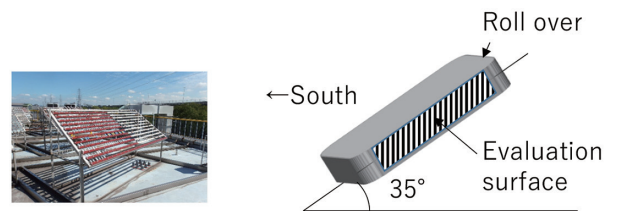


図14 大気暴露試験条件
Atmospheric exposure test condition

Cutting	7 days	30 days	60 days	90 days	180 days
Conventional shearing					
Red rust rate(%)	11%	67%	64%	59%	57%
Developed shearing					
Red rust rate(%)	3%	2%	4%	4%	1%

図15 各切断刃でせん断した端面の大気暴露後の外観
Appearance of sheared edge surface after atmospheric exposure

3. 結 言

本報では端面耐食性を向上させる2種類の切断技術について報告し、以下の知見を得た。

- KT 工法、端面防錆せん断技術ともに、従来せん断加工に対して端面耐食性向上効果が認められた。
- 従来の Zn めっきよりも、日本製鉄で製造している高耐食めっき鋼板の SD と KT 工法を組み合わせることにより一層、端面耐食性が向上することを確認した。また、ZAM® と端面防錆せん断技術を組み合わせさせた結果、端面耐食性が優れていることを確認した。
- 各技術の特徴を以下の表 1 にまとめる。KT 工法は従来せん断加工と異なる端面形状になってしまうため加工品の仕様決定の際に注意が必要であるが、端面防錆せん断技術は従来せん断加工形状と類似の端面形状であるため、そのような注意は不要である。また、KT 工法は切断した材料の切り落とし側も製品側と同様に端面耐食性が向上するが、端面防錆せん断技術は切り落とし側の鋼板の端面耐食性が向上しないため、切断の向きなどに注意をする必要がある。今回、各技術はプレス装置で検討したが、今後他の切断機構でもプレス装置と同様に切断できるか確認していく。なお、今回の各切断技術の端面耐食性の結果は、めっき種や暴露環境が異なっているため、一概に比較することはできない。また実際に切断を行う顧客や使用用途によって、切断形状、使用環境、コスト等が異なるため、顧客に合った最適な方法や条件を選択する必要がある。

本技術は端面耐食性を保証するものではないが、従来の切断技術よりも性能が向上し、様々な製品に適用可能であ

表 1 各開発切断技術の比較
Comparison of developed cutting technologies

Compared items	KT method	Shearing edge surface rust protection technology
Similarity of edge shape with traditional method	Not similar	Similar
Availability of another cut sample	Available	Not available
Equipment required to cut	Press machine	Press machine

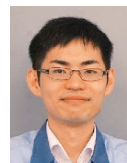
る。また、これまで端面の補修が必要であった材料に対し、これらの技術を適用すれば切断した後の補修頻度を低減できる可能性がある。本切断技術の開発によって、めっき鋼板のさらなる用途拡大が期待され、これらの技術が適用されることで、環境負荷低減、人材の有効活用等につながり、社会に貢献していけると考えている。

参照文献

- 1) 篠原正：表面技術. 162, 1 (2021)
- 2) 日本製鉄(株) スーパーダイマ® カタログ
- 3) 野村広正：表面技術. 70 (12), 588 (2019)
- 4) 森本康秀 ほか：新日鉄技報. (377), 22 (2002)
- 5) 辻村太佳夫：日新製鋼技報. (92), 1 (2011)
- 6) 下田信之 ほか：新日鉄住金技報. (398), 61 (2014)
- 7) 古川博康 ほか：新日鉄住金技報. (398), 29 (2014)
- 8) 小林亜暢 ほか：塑性加工連合講演会講演論文集. 71, 175-176 (2020)
- 9) 山下朋広 ほか：塑性と加工. 58, 678 (2017)
- 10) 小林亜暢 ほか：材料と環境討論会講演集. 67, 175-176 (2020)



小林亜暢 Akinobu KOBAYASHI
鉄鋼研究所 表面処理研究部
めっき研究室 研究第二課 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



安富 隆 Takashi YASUTOMI
名古屋技術研究部 薄板・鋼管研究室
薄板研究課 主任研究員



乗田克哉 Katsunari NORITA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
ソリューション研究第三室 研究第三課
主幹研究員