

# せん断加工における焼付き発生機構の解明

近畿大学 工学部 機械工学科

助教 山田 智裕

(平成 27 年度奨励研究助成 AF-2015045)

キーワード：焼付き，せん断加工，熱化学

## 1. 研究の目的と背景

塑性加工において、せん断加工は初期の工程で材料を分離して後工程へつなげる役割や、順送型の最終工程で材料を分離する等、量産に欠かせない加工法である。せん断加工により得られる切口面はだれ、せん断面、破断面、バリからなり、せん断面以外は製品によっては欠陥として扱われる。これら欠陥を防ぐためにこれまで様々な精密せん断法が開発されてきた。代表的な精密せん断法として、シェーピング加工<sup>1)</sup>、対向ダイスせん断法<sup>2)・3)</sup>、ファインブランキング<sup>4)</sup>、仕上げ抜き法<sup>5)</sup>などがある。現在、最も簡易的にせん断面割合を増加させる精密せん断法として仕上げ抜き法が注目されている。これは図1に示すように小さなクリアランスで工具刃先を丸み形状または面取り形状とするだけの簡便な加工法である。

仕上げ抜き法は表面積拡大を抑制する特性をもっているため、クラッド材等において表層の異種材料を切口面に引張り込み、切口面を異種材料で覆うせん断被覆法<sup>6)</sup>としても利用されている。図2に酸化膜の追従を有限要素法により解析した結果を示す。加工開始前のパンチの刃先直下に位置する被加工材表面にポイントをつけ、ポイントの移動を追跡した。ポイントが酸化膜と仮定すると、仕上げ抜きの方が酸化膜の追従性が高いことがわかる。したがって、慣用の直角刃で鋼板をせん断加工すると、パンチと被加工材内部の鉄との接触となり、仕上げ抜き法では被加工材表面の酸化膜との接触となることが推定される。

一般に材料の強度が上がるほど、被加工材が金型に付着・積層する焼付き現象が起きやすくなる。この状態でせん断加工を行うと、成形品に引っ掻いたようなキズが発生し、製品価値が低下する。上記の問題から、せん断加工における焼付きの発生機構を明らかにすることが求められている。同種材料同士の加工では焼付きが起りやすいため一般的には工具にTiCNコーティングを施して鉄鋼材料をせん断加工することが行われているが、仕上げ抜き加工と直角刃加工では接触する物質が異なるため、仕上げ抜きにおいてもTiCNコーティングが有用であるかは判明していない。

焼付きの発生機構の解明のアプローチとして、今日までは物理的なパラメーター（温度、すべり距離、面圧）で整理する試みが多くなされているが、本研究では熱化学解析により焼付き発生機構を解明することを試みる。また、熱化学解析による結果が実際に起こっているかを実証するために実験と分析を行った。

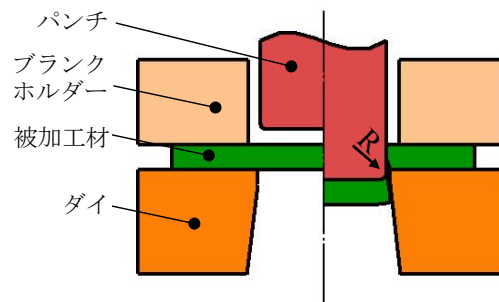


図1 仕上げ抜き法の模式図

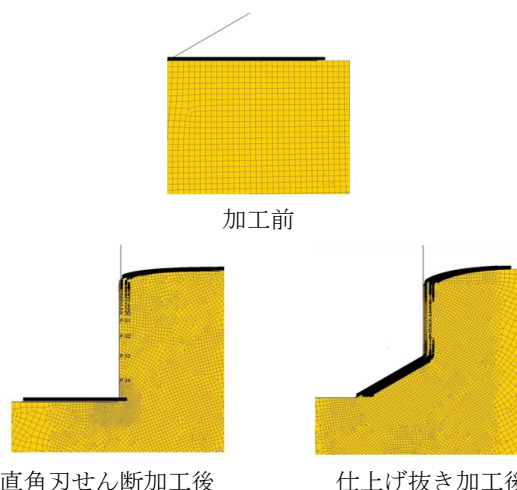


図2 直角刃せん断と仕上げ抜きの接触の違い

## 2. 解析方法

解析には熱化学計算等を行うためのデータベースソフト MALT・Gaussian を使用した。ギブスエネルギー最小化法により、データベースから各物質・各温度のギブスエネルギーを抽出し、化学反応が進み切った状態の熱化学計算を行うことができる。

結果の考察を簡略化できるように TiCN を TiC と TiN に分けて解析を行った。実際の TiCN コーティングは Ti, C と N の 3 種により NaCl 型の構造をとっている<sup>7)</sup>ため、この解析条件は妥当であると考えられる。各種反応物を 1mol と設定し、圧力 100atm、温度を 323,453,1273K の条件でギブスエネルギー最小化法による計算を行った。323K は冷間加工での温度を、453K は酸化膜の性状が変化するとされる温度<sup>8)・9)</sup>、1273K は工具と被加工材の真実接触部で発生する閃光温度<sup>10)</sup>をそれぞれ想定している。

### 3. 実験条件

本研究では被加工材として板厚 6mm, 引張強さ 780MPa の高張力鋼板 WEL-TEN 780RE を使用した。図 3 にパンチ形状を示す。一般的な直角刃のパンチと刃先に 1.5mm のフィレットをとった 2 種類を比較した。両パンチとも TiCN をコーティングし、クリアランスを 0.5%*t* と設定した。加工前にパンチをアセトンで脱脂し、無潤滑の状態で行った。

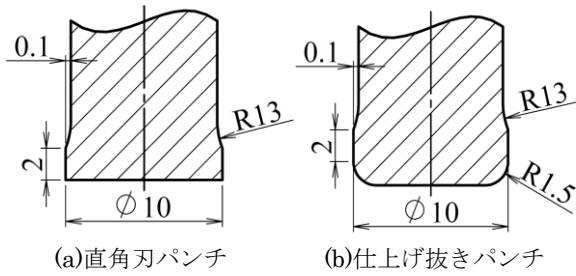


図 3 パンチ形状

### 4. 分析条件

島津製作所の EPMA-1720 を用いて、実験後のパンチと被加工材の元素分布を分析した。焼付きが発生した後、パンチの断面の分析を行った。加速電圧 15V, 試料電流 100nA に設定しマッピング分析を行った。被加工材についても、せん断面への酸化膜の流入状況を分析するため、断面の分析を行った。

### 5. 解析結果

#### 5. 1 コーティングと被加工材母材(Fe)との接触

図 4・5 に TiN・TiC と Fe の熱化学解析結果をそれぞれ示す。TiN・TiC 共に Fe とはすべての温度で反応は起こっていない。したがって、TiCN と被加工材母材の Fe との摩擦条件下では焼付きは発生しないと推定される。

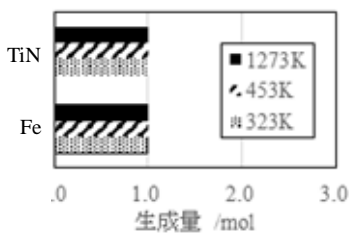


図 4 TiN:1mol, Fe:1mol の反応物による熱化学解析結果

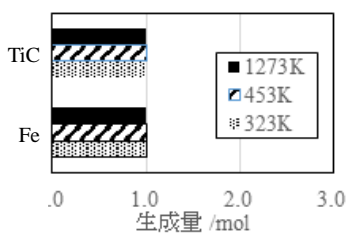


図 5 TiC:1mol, Fe:1mol の反応物による熱化学解析結果

#### 5. 2 コーティングと酸化鉄: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> との接触

図 6・7 に TiN・TiC と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の熱化学解析結果をそれぞれ示す。TiN・TiC 共に Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とすべて反応して消失し、Fe が生成している。また、両コーティング共に新たな化合物 FeTiO<sub>3</sub> が生成していることから、TiCN の焼付きの起点に FeTiO<sub>3</sub> が存在するのではないかと推定できる。

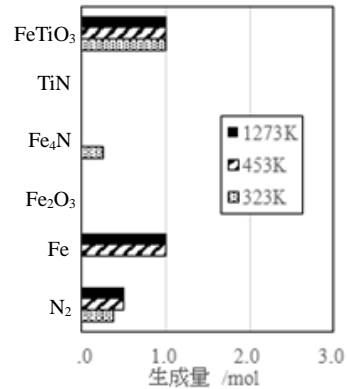


図 6 TiN:1mol, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:1mol の反応物による熱化学解析結果

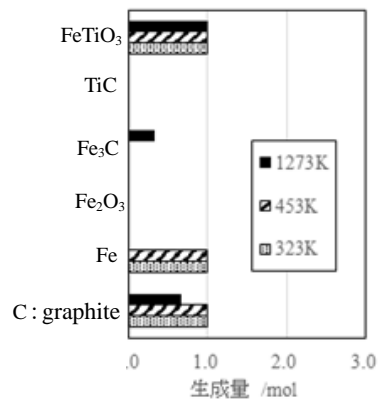


図 7 TiC:1mol, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:1mol の反応物による熱化学解析結果

#### 5. 3 コーティングと酸化鉄: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> との接触

図 8・9 に TiN・TiC と Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の熱化学解析結果をそれぞれ示す。TiN・TiC 共に Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> と反応を起こし、323K と 453K のとき Fe と FeTiO<sub>3</sub> が生成している。また、1273K では Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> が生成している。

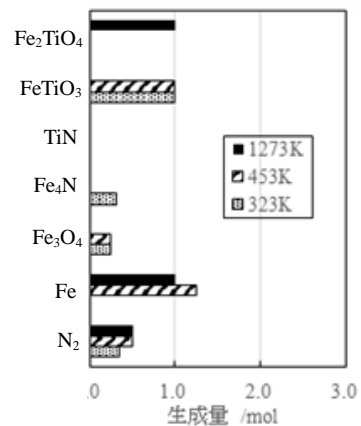


図 8 TiN:1mol, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:1mol の反応物による熱化学解析結果

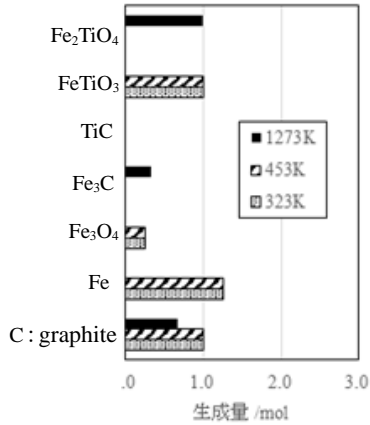


図 9 TiC:1mol, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:1mol の反応物による熱化学解析果

## 6. 実験結果

図 10 に加工回数 1 回後の仕上げ抜きパンチの写真を示す。図 8 より、R の終端からすぐ上の平行部に焼付きが発生していることが分かる。直角刃パンチについては加工回数 100 回後でも焼付きが発生せず、熱化学解析の予測通りとなった。

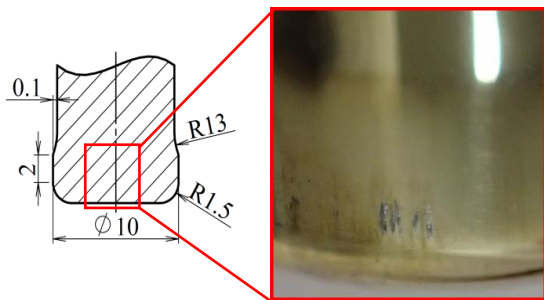


図 10 仕上げ抜きパンチの焼付き写真 (加工回数 1 回)

## 7. 分析結果

### 7. 1 被加工材の酸化膜の流入

図 11 に被加工材の仕上げ抜き加工後断面写真を示す。また、図 12 に分析位置を示す。O と Fe の EPMA による仕上げ抜き加工後被加工材の断面の分析を被加工材の表面、A 点、B 点、C 点、D 点で行った結果を図 13～図 17 に示す。

表面にあった約 20 $\mu$ m の酸化膜が D 点のせん断面の終端まで全面に流入していることがわかる。このことから、仕上げ抜きパンチではパンチとせん断面は酸化膜と TiCN コーティングとの接触であることが判明した。

A 点、B 点では安定して酸化膜が表面の酸化膜の厚みと同等の厚みで流入しているのに対し、C 点の箇所ではまばらで一定の厚みで酸化膜が付着していない。このことから、仕上げ抜きでの酸化膜の流入は、不均一にパンチの導入部からバリ部まで酸化膜が流入していることが判明した。

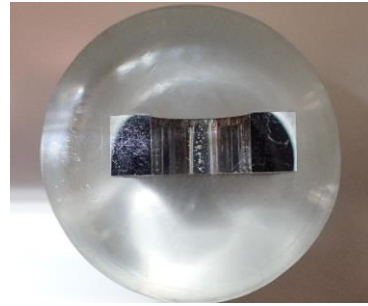


図 11 被加工材の仕上げ抜き加工後断面

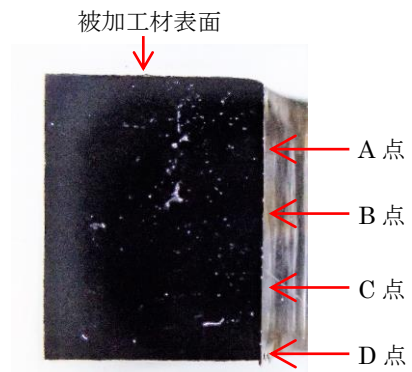
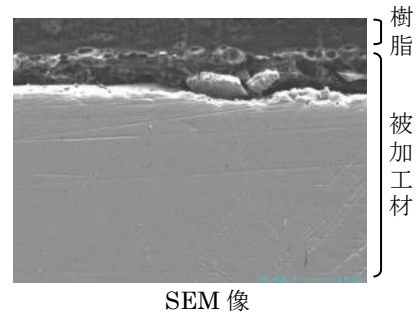
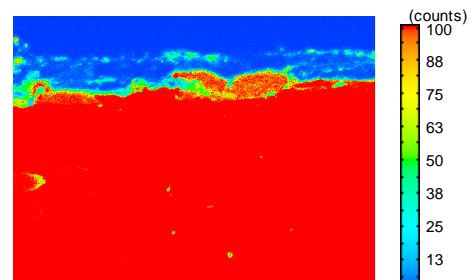


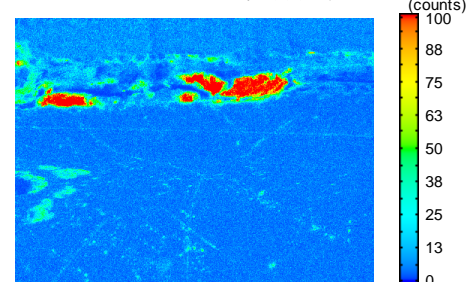
図 12 被加工材の分析箇所



SEM 像



Fe のマッピング分析結果



O のマッピング分析結果

図 13 被加工材表面の EPMA 分析結果

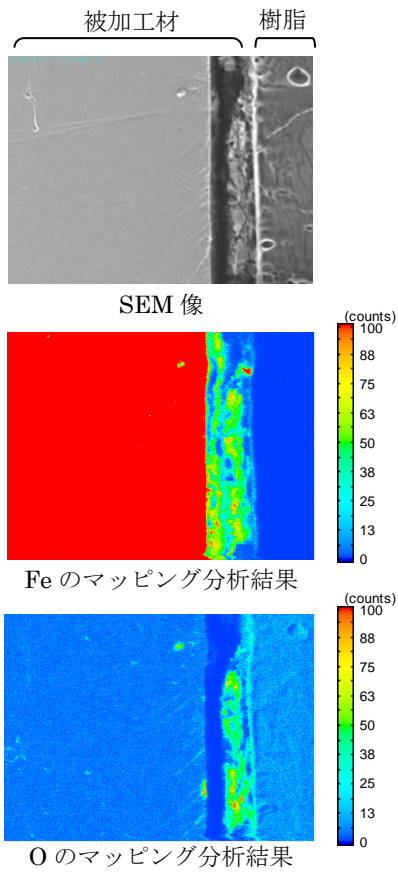


図 14 被加工材 A 点の EPMA 分析結果

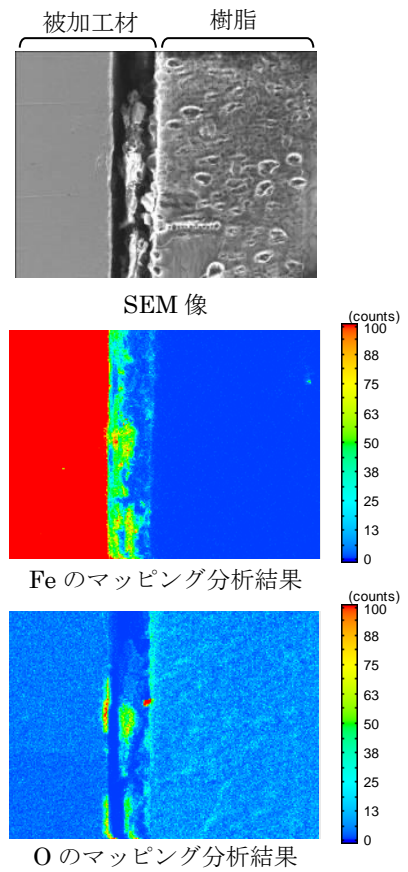


図 16 被加工材 C 点の EPMA 分析結果

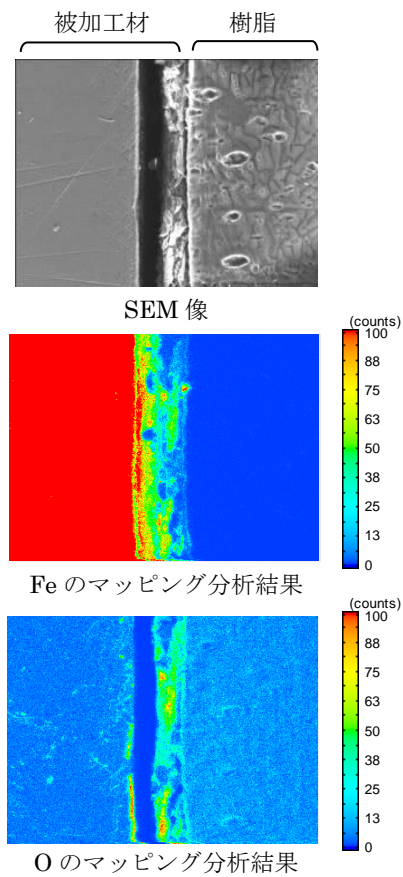


図 15 被加工材 B 点の EPMA 分析結果

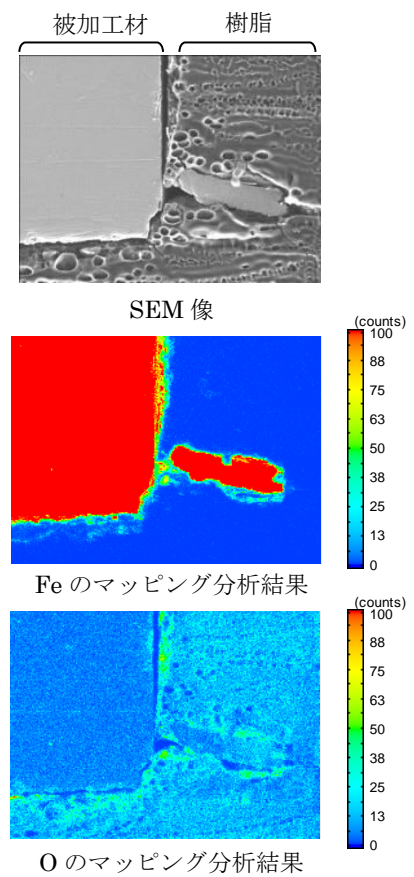


図 17 被加工材 D 点の EPMA 分析結果



## 7. 2 仕上げ抜きパンチの焼付き部の分析結果

図 18 に仕上げ抜きパンチの焼付き部の断面の SEM 像と元素 (Ti, C, N, Fe, O) のマッピング分析結果を示す。N の分布によりコーティングの剥離は起こっておらず、コーティングの表面に付着物がついていることが確認できた。5 章の熱化学解析結果から、TiCN と酸化鉄が反応した結果、 $\text{FeTiO}_3$  と  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  が発生すると推定したとおり、焼付きの起点となる箇所に Fe, Ti, O が検出されていることが分かる。これらの結果から、せん断加工、さらには塑性加工一般において、工具の表面物質と被加工材の表面または内部の母材との接触を双方考慮し、塑性加工特有のトライボロジー現象を物理化学的知見で整理できる可能性がある。

## 8. まとめ

直角刃のせん断加工と仕上げ抜き加工を想定した熱化学解析と実験・分析を行うことにより、以下の知見を得た。

- (1) TiN, TiC と Fe の接触は熱化学的に安定であり、これらコーティング材と被加工材母材の Fe との摩擦条件化では付着物が生成されない。
- (2) 化学反応により新たに生成した化合物が焼付きの起点となり、そこに被加工材が堆積し焼付きに至るモデルが示唆された。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの奨励研究助成 (交付番号 AF-2015045) を受けて実施されました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：せん断加工, (1992), 85, コロナ社.
- 2) 近藤一義：塑性と加工, 10-99 (1969), 236.
- 3) 近藤一義・渡辺亮・高田久於男・吉田元昭：塑性と加工, 12-129 (1971), 733-741.
- 4) 中川威雄：ファインブラッキング, (1988), 40, 日刊工業新聞社.
- 5) R. Tilsley・F. Howard: Sheet Metal Ind., 35 (1958), 817-828.
- 6) 前田禎三：プレス技術, 8-7 (1970), 3-9.
- 7) 山口正治：金属間化合物, (1984), 12.
- 8) F. Hirano: Proc. 6th Leeds-Lyon Symp., (1980), 298
- 9) 山本雄二：トライボロジー, (2010), 206.
- 10) Bowden, F. P.: 固体の摩擦と潤滑, (1961), 31.

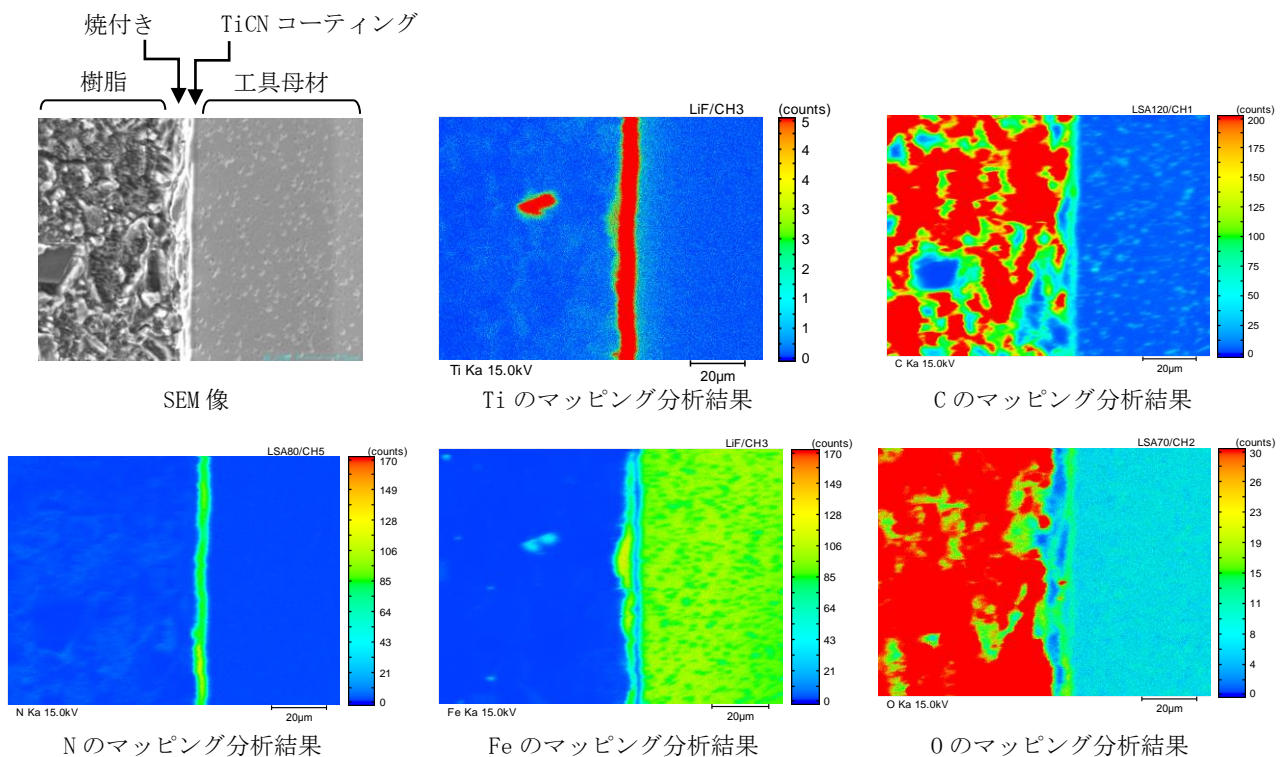


図 18 仕上げ抜きパンチ焼付き部断面の SEM 像と EPMA 分析結果