

# 電気防錆法を利用したウォータージェット表面処理技術の開発

松葉 朗, 大川正巳<sup>\*1</sup>, 宗廣修興, 塚本真也<sup>\*2</sup>, 佐々木秀和, 兼広二郎<sup>\*3</sup>

## Development of Waterjet Blasting Technique Using Electricity Rust Preventive Method

MATSUBA Akira, OHKAWA Masami<sup>\*1</sup>, MUNEHIRO Shukou, TSUKAMOTO Shinya<sup>\*2</sup>, SASAKI Hidekazu and KANEHIRO Jirou<sup>\*3</sup>

In this study, a technique is proposed to prevent steel surfaces from rusting during waterjet blasting, where electric current is supplied through the water flowing from an auxiliary nozzle with an anode electrode attached above the blasting area. As a result of an investigation in which current density distribution was measured on a steel surface under flowing water, the current density was high on the surface near the outlet for water beneath the anode electrode, but decreased extremely with the distance from the electrode. Consequently, it was found that rust can be prevented only within relatively small area on the steel surface near by the anode electrode under flowing water condition, unlike conventional cathodic protection method which can be applied for large area in static water.

Finally, a waterjet blasting was carried out on the surface of a steel specimen with large area, where the auxiliary nozzle was moved to follow the waterjet nozzle so that the blasting point would not go out of the rust preventive area. As a result, rusting was prevented successfully in whole the blasting area on the specimen surface.

本研究では、ウォータージェットを用いた表面処理過程における錆の発生を抑制するために、表面処理領域の上部に設置した補助ノズルから電圧を印加した水を供給しながら加工を行う、電気防錆表面処理方法を提案する。補助ノズルから供給される流水下において、鋼材表面上の電流密度分布を測定した結果、電流密度は陽極直下の流水出口付近では高いが、電極からの距離の増加とともに大幅に減少した。これより、静水条件下で大面積に対応可能な一般の手法とは異なり、流水を介した電気防錆法では、錆の抑制は陽極付近の比較的狭い領域に限定されることがわかった。

そこで、表面処理加工点が防錆領域から出ないように、補助ノズルをウォータージェットノズルに追従・移動させながら加工を行った結果、処理領域の全域において錆の発生を抑制できることを示した。

キーワード：ウォータージェット，表面処理，電気防錆，電流密度

### 1. 緒 言

ウォータージェット加工は、高圧水を単体あるいはアブレシブ（研磨材）を混入した状態で細いノズルから噴出し、その衝撃力およびエロージョン特性によって、材料の切断やはつり・洗浄などの表面処理を行う加工法である。最近の造船業界では、環境負荷低減の目的から、従来のサンドブラストに代わる船体塗装下地処理としてウォータージェット表面処理法が注目されている。しかし、水を使用するため、加工後には鋼材表面上に錆が発生しやすく、加工時間の制限や処理後の錆除去が必要とされているのが現状である。

そこで、本研究では、電気防錆法<sup>1), 2)</sup>を適用することにより、ウォータージェット表面処理加工における錆発生を抑制を試みた。加工用ウォータージェットノズルの後方から電圧を印加した水を供給することにより、加工後の表面を保護する手法を提案し、その効果を実験的に検討した。

### 2. 電気防錆法の原理とウォータージェット表面処理への適用

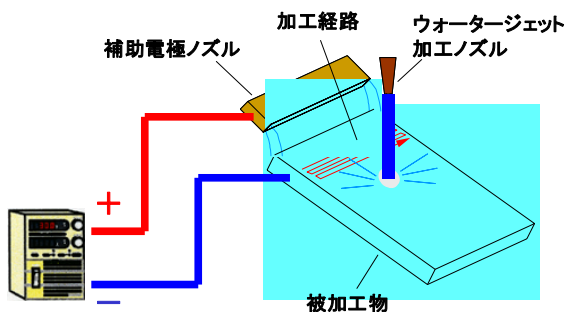
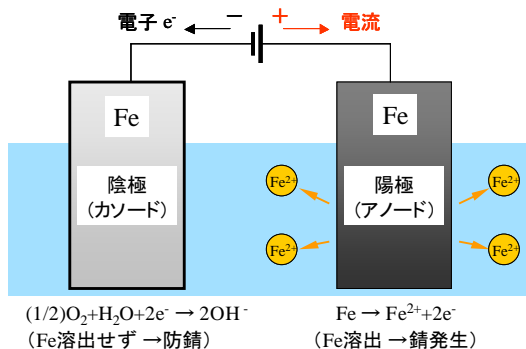
まず、電気防錆の原理を図1に示す<sup>2)</sup>。一般の鋼材を水中に浸漬すると、鉄がイオンとして溶出し ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ )、その後化合物を形成して錆が発生する。そこで、図中に示すように鋼材試料に対して外部より電圧を負荷すれば、陰極側試料では供給される電子のためにFeのイオン化が阻止され、防錆効果が得られる。これは、電気防食（カソード防食）法として大型構造物などでは広く使用されており<sup>3)</sup>、これを切削および研削などの機械加

2008. 6. 30 受理 加工技術研究部

\*1 総務部営繕室

\*2 岡山大学工学部機械工学科

\*3 宮奥エンジニアリング



工中に応用した電気防錆加工法が報告されている<sup>1), 2)</sup>。

さて、大気中でウォータージェット表面処理を行うと加工後の表面は大気に曝露され、表面上の残存水分との反応によって錆が発生する。そこで、加工後の表面を錆から保護するため、図2に示す方法により電気防錆法が適用できないかと考えた。試料(被加工物)を傾斜させて設置し、被加工面(上面)に対してウォータージェット表面処理加工を行う。その際に、試料の上側から電極を取り付けたノズル(以下、補助電極ノズルと呼ぶ)から低速で一定量の水を供給し、試料を陰極に、補助電極ノズルを陽極にそれぞれ接続して電圧を印加すれば、表面処理が終了した上流側表面での錆発生を抑制できる可能性が考えられる。そこで、まず、この補助電極ノズルによる電気防錆効果を次節で示す手法により検討した。

### 3. 補助ノズルによる電気防錆効果の検討

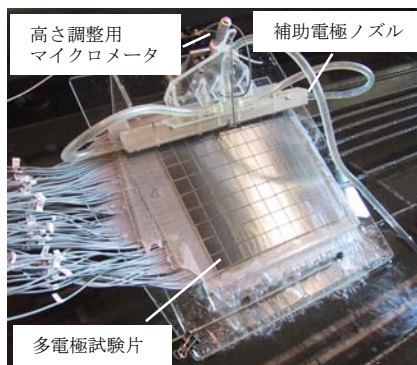
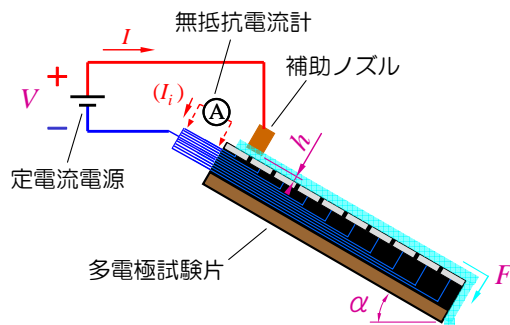
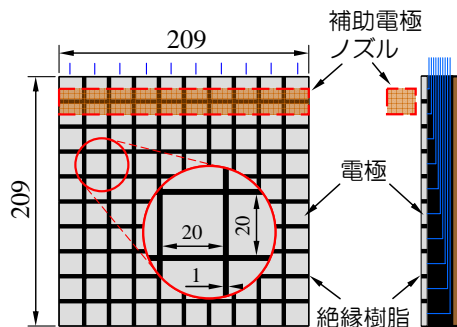
#### 3.1 実験方法

一般に電気防食法では、金属の材種と環境に依存して定まる一定以上の電流密度を供給することにより完全防食が可能であり、流動淡水中で鋼の防錆に必要な電流密度の目安として、 $0.05A/m^2$ が必要との報告がなされている<sup>4)</sup>。しかし、図2で示した補助電極ノズル近辺の上流側とノズルから離れた下流側では電流密度は同一ではなく、表面上における実際の電流密度は不均一であると予想される。電気防錆表面処理加工の適用限界を把握し、より大きい処理領域へ対応させるためには、表面上の電

流密度分布を正しく知る必要がある。そこで、多数の小片電極を相互に絶縁・固定した多電極試験片を製作し、各電極に流れる電流値を個別に測定することにより電流密度分布を求めた。

小電極としてSM400A板材を20mm四方×厚さ6mmの形状に加工し、縦横ともに10個ずつ計100個の電極を図3のように配列し、それらをエポキシ樹脂で接着・固定した。各電極は相互に厚さ1mmのエポキシ樹脂層により絶縁されており、それぞれに流れる電流値を測定するためにリード線を接続している。なお、万一実験中に電極と樹脂がはく離しても電流密度の測定に影響を及ぼさないよう、電極表面にはあらかじめ溶射による絶縁コーティング処理を行っている。

製作した多電極試験片を、図4に示すように定電流電源および無抵抗電流計と接続した。定電流電源には高砂製作所製KX-100Hを、無抵抗電流計には北斗電工製



HM-104 をそれぞれ使用した。ここで、多電極試験片中の任意の1電極のみに流れる電流値を計測できるように、配線上の工夫を行った。さらに、多電極試験片を図4のように傾斜させ、上から1列および2列目の小片電極間の中央に補助電極ノズルを配置し、水を供給して図中の極性により電圧を与えた。そして、各電極間に流れる電流値を個別に測定し、電極の面積(400mm<sup>2</sup>)で除して得られる値を各電極における平均的な電流密度値とした。さらに、電流密度分布に関連する因子として、印加電圧  $V$ 、補助ノズル高さ  $h$ 、水流量  $F$ 、試験片傾斜角度  $\alpha$  をそれぞれ変えて測定を行った。実際に製作した多電極試験片および補助電極ノズルの外観を図5に示す。補助電極ノズルには、水が均等に排出されるよう等間隔に穴をあけたアクリル製パイプにステンレス電極を取り付けたものを用いており、実際に電圧印加水を供給した状態で試験片の幅方向に各小片電極の電流密度を測定するとその差は小さいことを確認している。

### 3.2 実験結果および考察

補助ノズルに近い電極と遠い電極における電流密度の違いを調べるため、図3に示した補助ノズルからの距離  $y$  に注目して、各小片電極における電流密度を測定した。その結果の例として、試験片中央部の縦一列(10個)に

ついて得られた印加電圧  $V=30, 40, 50, 60V$  における電流密度分布を図6に示す。ここで、補助ノズル高さは  $h=2mm$ 、水流量は  $F=6l/min$ 、試験片傾斜角度は  $\alpha=30^\circ$  で一定とした。なお、図中には試験片と補助ノズルを水浴に完全水没させ、同一条件の下で測定した結果を比較のために示している。まず、気中で行った結果に注目すると、補助ノズルに最も近い二つの電極 ( $y=\pm 10mm$ ) の電流密度は大きい、それ以降の電極ではノズルからの距離の増加とともに電流密度は急激に低下している。印加電圧が増加すれば電流値も増加するが、縦軸を対数としてプロットした図6では電圧の違いは大きな影響として現れていないことがわかる。さらに、印加電圧  $V=30V$  および  $60V$  の条件において本電気防錆処理を1時間連続で行い、その後試験片表面において錆発生の有無を調べた。補助ノズルに最も近接して生じた錆の  $y$  値 ( $y_r$ ) は  $V=30V$  で  $y_r=49mm$ 、 $V=60V$  で  $y_r=58mm$  であった。この  $y_r$  値こそが本電気防錆法の適用限界を示しており、気中で完全に防錆加工を実現するには  $y_r$  値以下、すなわち、補助ノズルより約45~55mm以内の区間(完全防錆領域)で加工を行う必要があることを示唆している。なお、図6より、この  $y_r$  値以下の領域であるにもかかわらず、補助ノズルから25mm以上の領域では電流密度が小さく、通常の流動

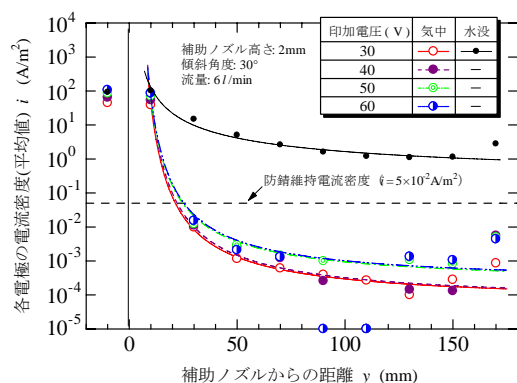


図6 補助電極ノズルからの距離と電流密度の関係 (印加電圧が異なる場合)

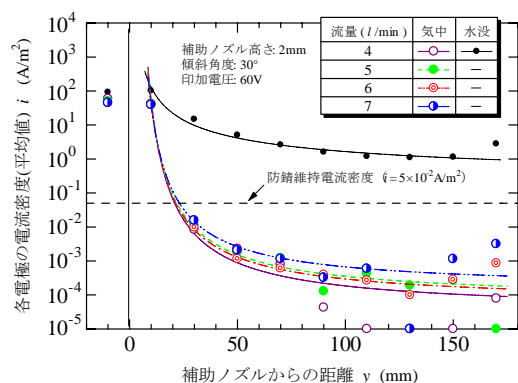


図8 補助電極ノズルからの距離と電流密度の関係 (水流量が異なる場合)

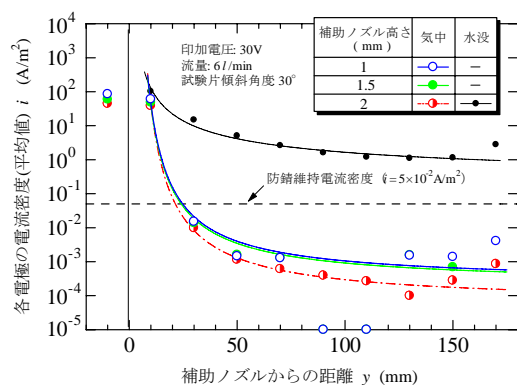


図7 補助電極ノズルからの距離と電流密度の関係 (補助電極ノズル高さが異なる場合)

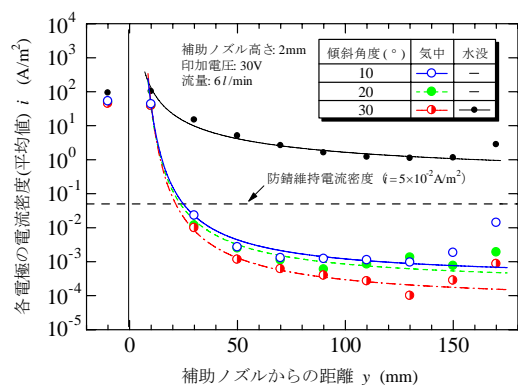


図9 補助電極ノズルからの距離と電流密度の関係 (試験片傾斜角が異なる場合)

淡水中で防錆を維持するのに必要な値 ( $0.05\text{A}/\text{m}^2$ )<sup>4)</sup>以下となっていることがわかる。このように、補助電極ノズルの近辺において通常より低い電流密度でも錆が発生しない理由は現在明らかではないが、試料表面を流れる水膜の速度や流れの形態など、本手法固有の因子が関係していると考えられる。

これに加えて、補助ノズル高さ  $h$ 、水流量  $F$ 、試験片傾斜角度  $\alpha$  を変えて行った結果を図 7, 8, 9 にそれぞれ示す。これらより、補助ノズル高さが小さいほど、水流量が大きいほど、傾斜角度が小さいほど電流密度は増加するが、電気防錆の適用限界 ( $y_c$  値) は、いずれも既に述べた印加電圧を変えた場合の結果とほぼ同等であった。

#### 4. 単一材試験片による表面処理実験

前節で述べたように、補助電極ノズルを用いる場合には完全防錆領域が補助ノズルの比較的近傍に限定されるため、この領域外で表面処理を行うと電気防錆効果は期待できない。そこで、完全防錆領域内で表面処理加工を行った後、補助電極ノズルを移動させて再び加工を行うことを繰り返すことにより、ある一定の面積を段階的に加工することを試みた。これにより得られる錆抑制効果を、電気防錆の有無において比較検討した。

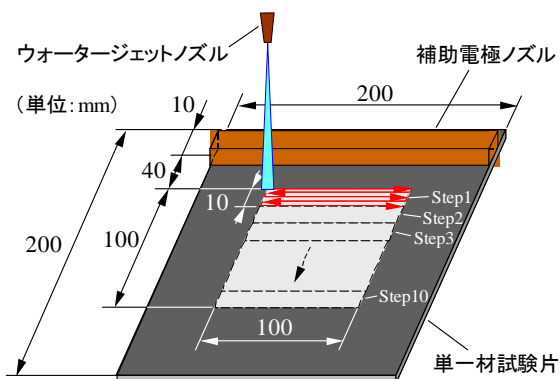


図 10 電気防錆表面処理加工の実験方法

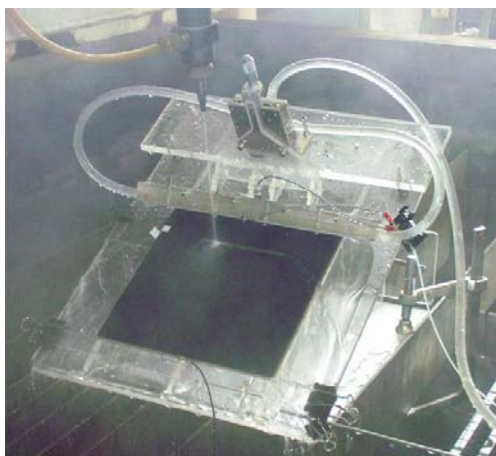


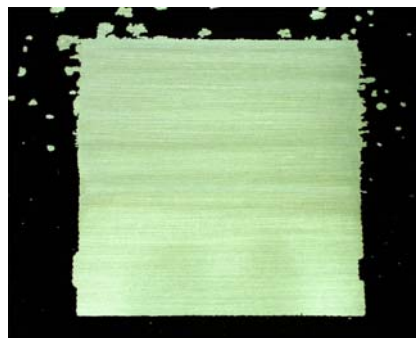
図 11 表面処理加工実験時の撮影写真

#### 4.1 実験方法

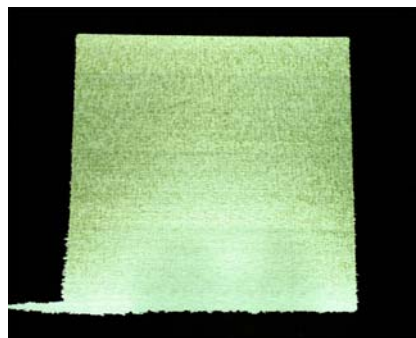
前節で用いた多電極試験片と同一の表面積を有する 200mm 四方×厚さ 6mm の SM400A 単一材を試験片として使用した。まず、試験片表面に市販の黒色塗料を塗布した後、試験片を図 10 に示すように傾斜角度  $30^\circ$  にて傾けて設置し、上端より 10mm の位置に補助電極ノズルを取り付ける。そして、電圧印加水を供給しながら補助電極ノズルより 40mm 下方の幅 100mm×長さ 10mm の領域をウォータージェット表面処理 (はつり) 加工し、表面の塗料を除去する。この加工を 1 ステップとして、さらに、補助電極ノズルの取り付け位置と加工開始点を 10mm 下方に移動させ、再度 1 ステップ分の加工を行う。これを計 10 回繰返し、最終的に幅 100mm×長さ 100mm の面積を表面処理加工した。電気防錆条件は、印加電圧  $V=60\text{V}$ 、補助電極ノズル高さ  $h=2\text{mm}$ 、水流量  $F=7\text{L}/\text{min}$ 、ウォータージェット加工条件は、噴射圧力  $18\text{MPa}$ 、送り速度  $100\text{mm}/\text{min}$ 、スタンドオフ (ワークディスタンス)  $150\text{mm}$ 、加工ピッチ  $1\text{mm}$  とした。電気防錆加工中に撮影した写真の一例を図 11 に示す。

#### 4.2 実験結果および考察

電気防錆および未処理の両条件で行ったそれぞれの表面処理領域 (100mm×100mm) の観察写真を、図 12 に比較して示す。これより、図 12 (a) の電気防錆加工面では全域において錆は発生していないが、電気防錆を行っていない図 12 (b) では多くの領域で錆が生じている。これより、完全防錆領域内で表面処理加工を実施すれば、加工



(a) 電気防錆加工面



(b) 未処理 (電気防錆なし) 加工面

図 12 表面処理加工領域の観察写真

後の表面を錆から保護できることがわかる。このように、補助電極ノズルを用いる今回の方法では、完全防錆領域が比較的補助ノズル近辺に限定されるが、加工ノズルに追従して補助電極ノズルも移動できるような自動化システムを構築することにより、大面積領域へも適用することが可能であると思われる。最近では、船体の壁面を自動で走行しウォータージェット処理を行う表面処理ロボットが開発・市販されており、そのようなシステムと今回の電気防錆法を融合することにより、錆びないウォータージェット表面処理の実用化が期待できる。

## 5. 結 言

ウォータージェット表面処理工程における錆の発生を防ぐため、加工ノズルの後方から電極を取り付けた補助ノズルより電圧印加水を供給することで、加工後の表面における錆発生を抑制する手法について検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

1) 多電極試験片により補助電極ノズル使用時の電流密度分布を測定した結果、補助ノズル直下の領域には大きな電流が流れるものの、補助ノズルから遠ざかるに従っ

て電流密度は急激に低下することがわかった。電気防錆の条件を種々変えて測定を行った結果、完全防錆が維持できる範囲は補助ノズル直下から45～55mm下方の比較的狭い領域に限定されることがわかった。

2) 補助電極ノズルを併用して実際にウォータージェット表面処理を行った実験では、補助電極ノズルを加工の進行に伴って段階的に追従・移動させることにより、ウォータージェット表面処理後の錆発生を防止できることがわかった。

## 文 献

- 1) S. Tsukamoto, N. Nishikawa, K. Okamoto and K. Ohashi, *Advances in Abrasive Technology VI* (2003), pp. 483-488.
- 2) 塚本真也, ほか5名, *精密工学会誌*, Vol. 71, No. 3 (2005), pp. 337-341.
- 3) 例えば, *電気化学的防食工法 設計施工指針 (案)*, (2002), 土木学会編.
- 4) H. H. ユーリック, R. W. レヴィー, *腐食反応とその制御*, p. 225 (2002), 産業図書.