

電気防錆加工法の開発研究 —各地の水による防錆への影響—

西川尚宏^{*1}, 佐藤佳則^{*1}, 工藤圭太^{*1}, 村瀬貴俊^{*1}, 萩原義裕^{*1}, 吉原信人^{*1}, 加藤大雅^{*1}, 大川井宏明^{*1}, 刈田清貴^{*1},
井山俊郎^{*1}, 水野雅裕^{*1}, 塚本真也^{*2}

Development of electric rust preventive machining method
-Evaluation of influence on rust prevention with water of different regions-

Naohiro NISHIKAWA, Yoshinori SATO, Keita KUDO, Takatoshi MURASE, Yoshihiro HAGIHARA, Nobuhito YOSHIHARA,
Hiromasa KATO, Hiroaki OKAWAI, Kiyotaka KARITA, Toshiro IYAMA, Masahiro MIZUNO and Shinya TSUKAMOTO

近年、産業の発展の裏で環境問題がとくに大きな問題となっている。加工現場に焦点をあてると、化学物質等を多量に含んでいる切削油や研削油が使用されており、加工液に含まれる化学物質による環境負荷が大きな懸念事項となっている。そこで、本研究では従来加工液の代替として無害な水を加工液とした電気防錆加工法の研究を行っている。電気防錆において使用する水は、含有成分の比率など採水地によってさまざまな違いがあり、水の種類を変更したときの影響などの検証が不十分であった。そこで本報では、5種類の水を用意し、それぞれについて防錆実験を実施した。その結果、水の種類を変えても省電力で防錆は可能であった。また、陰極表面に白い付着物が発生する場合が確認された。さらに、各水の電気的特性を測定し、水質の防錆への影響を検証した。

Key words : electric rust preventive machining method, water machining, effluent treatment, machining fluid, water quality, water hardness, scale, using in various regions of the world, industrial water, cathodic protection

1. 緒言

私たちの暮らしを支える多くの製品は工作機械を用いて作られている。より利便性の高い製品を製作するために産業機械は目覚ましい進歩を遂げてきたが、その一方で環境問題が大きな重要課題として挙げられる。工作物と工具間の摩擦低減、摩擦熱吸収などの効果¹⁾を見込み、切削油や研削油が一般的に使われる。一方で、処理時(焼却、凝集沈殿など)²⁾³⁾に二酸化炭素の大量排出などが環境負荷を引き起こすとして問題となっている。そこで本研究では、加工の利便性、環境への配慮を両立する加工法として電気防錆加工システム^{4)~12)}を提案している。この加工法は従来加工液に代わり、入手が容易・安価な水を使ったものである。本加工法が確立されれば、廃液処理削減に大きく貢献できると考えられる。この加工に使用する水はその採水地が違えば、含有成分や硬度などが異なる¹³⁾¹⁴⁾。そこで、国内外各地の水を使用して、モデル実験を行い、水質による防錆や電気的特性への影響を検討した。また、電気伝導度変化時の電圧・電流・電力を検証し推定式を求めた。さらに、定電圧・定電流制御による防錆検証と水質変動抑制・スケール防止を検討した。各地の水で安定した防錆が検証できれば水の違う国内外さまざまな場所において電気防錆加工

法加工機が利用可能となると考えられる。

2. 電気防錆原理および実験装置・条件

本報では水質の異なる水で電気防錆を実施した場合の影響を評価する。図1に使用するモデル実験装置を示す。試験水を満たした樹脂製容器内に、陰極となる工作物(鉄材)および工作物に電流を供給するための金属底網、ならびに陽極電極を図中(b)で示す定位置に設置し、外部直流電源から後述の方式で給電を行う。底網・陽極電極は加工のしやすさから SUS304 の金網を使用している。実験装置および工作物の詳細を以下に示す。

- ・容器 : 内寸 152×152×h146mm, 材質: ポリプロピレン
- ・電極 : 底網: 60mm×60mm (正方形型)
陽極: $h1 = 100\text{mm}$, $h2 = 30\text{mm}$

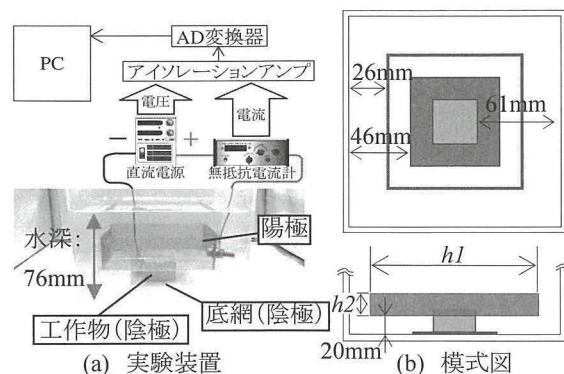


図1 実験装置

*1 岩手大学工学部: 〒020-8550 岩手県盛岡市上田三丁目18番8号
Faculty of Engineering, Iwate University

*2 岡山大学工学部: 〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1
Faculty of Engineering, Okayama University

〈学会受付日: 2011年7月4日〉

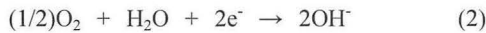
材質:SUS304 (φ0.29mm, #1mm 金網)

・工作物:30×30×20mm, 材質:S50C ・水量:1.5L, 容器水深:76mm

また, 工作物に施す電気防錆¹⁵⁾の原理であるが, 図1のように水中に置かれた鉄鋼材料は電流供給をしない状態(すなわち, 自然の状態)であると下記(1)式のイオン化溶出反応を起こし, 表面が錆びてしまう。なお, この反応は電気防錆時に陽極においてより促進される。



一方, 外部直流電源より工作物を陰極として水を介して陽極との間に電流を供給すると, 陰極側では下記(2)式の反応に(1)式が変化し, イオン化溶出が抑制される。



これにより, 陰極側の鉄鋼材料は水の中でも防錆剤や油剤を用いずに錆びを防ぐことが可能となる。この状態で工作物に対し機械加工を施す手法が電気防錆加工法である。

実験において, 1種類の水に対して, 電気の供給なし(すなわち自然状態), および2つの電源制御方式による電流供給を行い, 防錆状態を検証した。電圧電流計測は図1に示す直流電源と電流計出力を, AD変換器を介してPCに取り込み測定を実施した。使用した電源および電流計類を次に示す。

- * 直流電源装置: KX-100H, (株)高砂製作所
- * 無抵抗電流計: HM-104, 北斗電工(株)
- * AD変換器: AIO-160802AY-USB, (株)CONTEC
- * アンプ: AL1101, (株)NEC 三栄

また, 電源制御は次の2つの方式で実施した。

・定電圧制御, 設定電圧:30V ・定電流制御, 設定電流:0.07A

定電圧制御は電圧一定にした制御であり, 一般的に用いられる制御法である。一方, 定電流制御は供給される電流を一定にするよう電圧を変動させる制御法である。定電流制御時の設定電流については後述する。さらに, 使用する各水の実験前後の水質項目(pH, DO, 電気伝導度, 濁度, 色度, 全鉄量, 温度)の測定を下記測定装置で行った。

- * 水質測定器: 多項目水質計WQC-24型(東亜ディーケーケー(株))
 - ・pH: ガラス電極法
 - ・溶存酸素(DO): ガルバニ式隔膜電極法
 - ・電気伝導率: 交流4電極方式
 - ・温度: 白金薄膜抵抗体
 - ・濁度: 90度散乱光測定方式(赤外線)
- * pH測定器: pH600型, Milwaukee Instruments, Inc.
- * 電気伝導度測定器: COM-100型, HM Digital, Inc.
- * 全鉄測定器: 鉄イオンメーターMi408型(ミルウォーキーージャパン(株)), フェナントロリン吸光光度法
- * 濁度・色度計: プローブ型濁度・色度センサーTCR-5z型(笠原理化工業(株))・濁度: 吸光光度法
- ・色度: 吸光光度法

また, 本実験で使用した日本国内・海外の各地の水は次の通りである。

- ・実験水1: 水道水, 採水地(日本, 岩手県盛岡市), カルシウム: 8.1mg/L, マグネシウム: 2.2mg/L, 硬度: 29.27, pH: 平均7
- ・実験水2: 市販飲料水1, 採水地(日本, 山梨県), ナトリウム: 4~10mg/L, カルシウム: 6~15mg/L, マグネシウム: 1~3mg/L, カリウム: 1~5mg/L, 硬度: 30, pH: 約7
- ・実験水3: 市販飲料水2, 採水地(海外, アメリカ), ナトリウム: 11.3mg/L, カルシウム: 6.4mg/L, マグネシウム: 5.4mg/L, カリウム: 1.8mg/L, 硬度: 38, pH: 7.6
- ・実験水4: 市販飲料水3, 採水地(海外, フランス), ナトリウム: 11.6mg/L, カルシウム: 11.5mg/L, マグネシウム: 8.0mg/L, カリウム: 6.2mg/L, 硬度: 60, pH: 7.0 (値は100mlあたり)
- ・実験水5: 市販飲料水4, 採水地(海外, フランス), ナトリウム: 7mg/L, カルシウム: 80mg/L, マグネシウム: 26mg/L, カリウム: 0mg, 硬度: 304, pH: 7.2

なお, 通常, 国内外に於いて, 産業利用される工業用水は河川を原水とする工業水道, 地下水, 上水道(水道水)等である¹⁶⁾¹⁷⁾。業種によっては工業用水に殺菌や高度濾過, 脱イオン等を施して使用されるが, コストがかかるため, できるだけそのまま使用できれば好都合である。本実験で使用の各地の水は, ある程度清浄で地域由来による成分変化(多くは, その土地の土壌による鉱物分で, とくに各地の水では硬度の違いがある)があり, また入手が容易な市販飲料水(実験水2~5: 主に地下水)を, 加工水と見立てて用いた。なお, 実験水1以外の成分は容器の表示に従っている。

3. 各地の水の防錆試験・電気的特性試験および水質試験

前述の実験装置を使用し, 各地の水について, 防錆試験, ならびに電気特性試験および, 防錆実験前後の水質評価を実施した。実験時間は3時間とし, 電気防錆なしの状態と, 各電源制御方式による電気防錆を実施した際の各水の水質による防錆への影響を検証した。また, その際, 各水の電圧・電流特性を測定した。

3.1 各水の水質検証

表1は測定した実験前の各水の水質を示す。pHはいずれも8付近である。実験前の水の濁度はいずれの場合も0.00以下の値となっている。また, 水の汚れによる呈色(とくに溶出鉄イオンによる)を示す色度においても0.00の値を示している。DOに関しては, いずれも同じ程度の値を示している。また, 水温は測定した日の気温により若干変動している。さらに全鉄量はいずれも0.1程度以下とほぼ鉄分を含んでいないことが示された。また, pH, 濁度, 色度, 全鉄量はいずれも水道法の基準値(pH: 5.8~8.6, 濁度=2度, 色度=5度, 全鉄量=0.3mg/L)とおおむね清浄な水であるといえる。一方, 電気伝導度は実験水4が若干高く, また, 実験水5においてはか

表1 実験前における各水の水質

	pH	電気伝導度 [μS]	濁度[度]	色度[度]	DO [mg/L]	水温[°C]	全鉄量[mg/L]
実験水1	8.3	104	0.00	0.00	5.07	20.9	0.10
実験水2	7.8	110	0.00	0.00	4.29	21.9	0.01
実験水3	8.1	137	0.00	0.00	5.07	23.2	0.02
実験水4	8.4	215	0.00	0.00	5.13	20.2	0.13
実験水5	8.3	567	0.00	0.00	4.69	22.2	0.04

なり高くなっている。これは水中に含まれる導電性不純物により増加する電流の流れやすさを示している。各水成分を見ると主にその水に含まれるカルシウムとマグネシウム量が多く、いわゆる硬度(水中のカルシウム・マグネシウム量を炭酸カルシウム量に換算した値)が高く、それに伴う導電性イオンが多いためであると考えられる。ちなみに、実験水 5 に関しては水道法の基準値(硬度=300mg)を超える。このように、各採水地により成分が変化するため、電気防錆時に導電率による電流特性や成分による防錆特性などでの影響が考えられる。

3.2 各水の電気的特性

上述で述べたように、水成分が異なり電気伝導度等変化すると電気防錆時の電流供給ならびに消費電力に影響するため、各実験水の電気的特性を測定した。図 2, 図 3, 図 4 にそれぞれ実験水 1 から実験水 5 の電圧を増加させた場合の電流特性ならびに消費電力を示す。電源能力から、電圧最大値:92V, 電流最大値:920mA に制限して測定を実施した。実験水 1 は電気伝導度が 5 つの中で 104 μ S/cm と一番低く、電流が流れにくいと考えられる。また、それに伴い電力も一番増加量が少なくなっている。一方、実験水 5 は電気伝導度が 567 μ S/cm と最も大きく、わずかな電圧で大きな電流が供給でき、電力も大きくなる傾向にある。実験水 1~5 を見るに電気伝導度と電圧・電流直線の勾配(dI/dE), すなわち電流の流れやすさの大きさは比例しているように見える。図 5 に各水の電気伝導度 S と電圧・電流の勾配(dI/dE)の関係を示す。おおむね電気伝導度に比例して dI/dE が増加していることがこれらの図からわかる。本来、より正確な解析は、液体は誘電率を持ち、イオンの移動や電解反応などあるため、これらを考慮した計算が必要になるが、ここで、大まかな分析として、一般に電気伝導度 S は抵抗の逆数に比例するのでオームの法則から電圧・電流との関係は以下(3)のようになる。

$$E = I \times R = I \times (L/A) \times (1/S) \propto I \times (1/S) \quad (3)$$

※ $R = \rho \times (L/A)$, $S = 1/\rho$, ρ : 比抵抗, L : 導体の長さ, A : 断面積
 すなわち, $S \propto I/E$ となり, 図 5 もこれに従って直線関係で比例することが示された。ここで, L/A の逆数は水槽や電極の形状による係数で, 測定系ごとに異なり, また, これが図 5 の S と dI/dE の直線の勾配になる。ここで, この勾配を各実験値より最小自乗法で求め, D_{cell} [$A \cdot cm/V \cdot \mu S$]としている。このように比例関係のため, 地域の水の変化による電気伝導度の変化があっても, 電圧・電流・電力の推定や補正が容易にできる。また, 同図中に電気伝導度を変化した際の特定期間(30V)の電力を示す。これは $P = I \cdot E = D_{cell} \cdot S \cdot E^2$ となり計算される。消費電力についても, 各水の勾配・電気伝導度が大きくなるほど, 増加していることがわかる。電気伝導度が大きい場合, 電気が流れやすいため, 消費電力が大きいことが懸念される。また, 同図内に後述定電圧実験により S が変化した際, 得られた実際のデータ(実験開始・終了時と表記)をプロットした。 dI/dE において, ほぼすべてのデータが近似線上近くに分布している。 $S(dI/dE)$ 線図と実際のデータのずれは 0.5%~11%であった。また, 消費電力 P においても同様のことがいえる。 $S-P$ 線図とのずれは 0.6%~11%であった。電圧値は定電圧制御によって一定であるので, D_{cell} と電気伝導度 S が判明していれば, ある程度電流・消費電力の推測が可能である。しかし, 図 5 から電気伝導度が

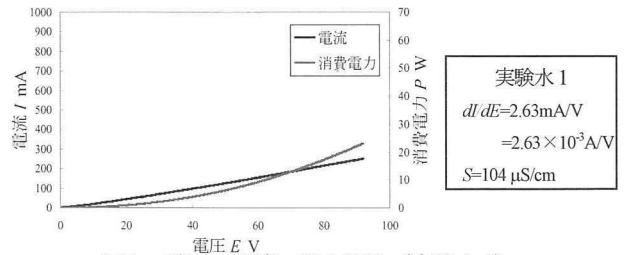


図 2 電圧・電流・電力特性 (実験水 1)

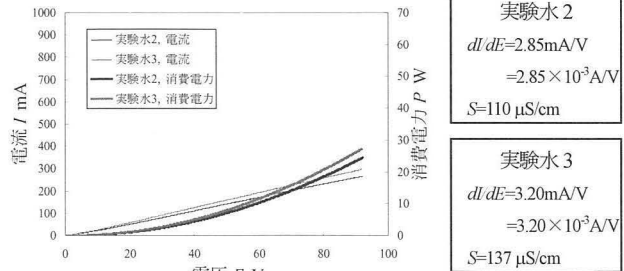


図 3 電圧・電流・電力特性 (実験水 2, 3)

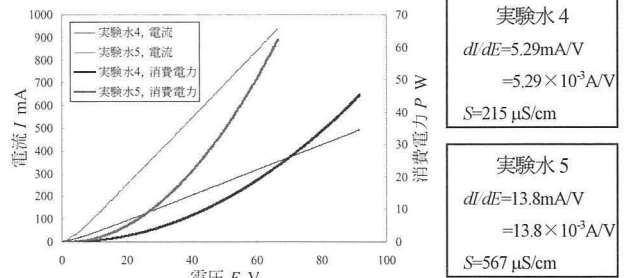


図 4 電圧・電流・電力特性 (実験水 4, 5)

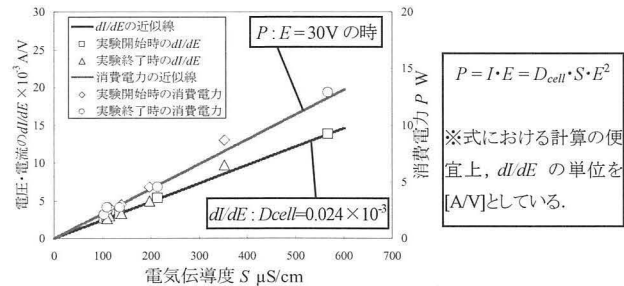


図 5 各水の電気伝導度と dI/dE の関係 (定電圧制御時)

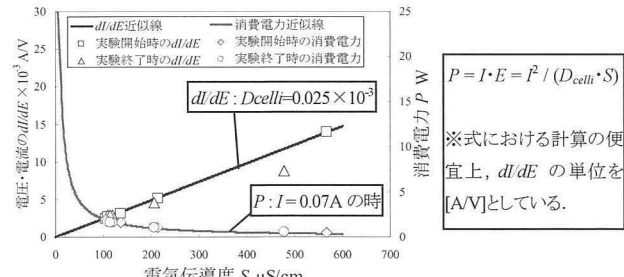


図 6 各水の電気伝導度と dI/dE の関係 (定電流制御時)

大きくなるとその実験値とのずれは大きくなるが示されている。よってこの方法で補正を行う場合には注意が必要である。

また, 図 6 に定電流制御時の電気伝導度 S と電圧・電流の勾配(dI/dE)の関係を示す。 D_{cell} は図 5 と同様に各水を定電流制御時における特性から導出した。 dI/dE においては定電圧のとときと同様に電気伝導度 S の増加とともに増加している。一方, 消費電力については, $P = I \cdot E = I^2 / (D_{cell} \cdot S)$ となり, 電気伝導度 S の増加に伴って減少している。定電流制御を行っ

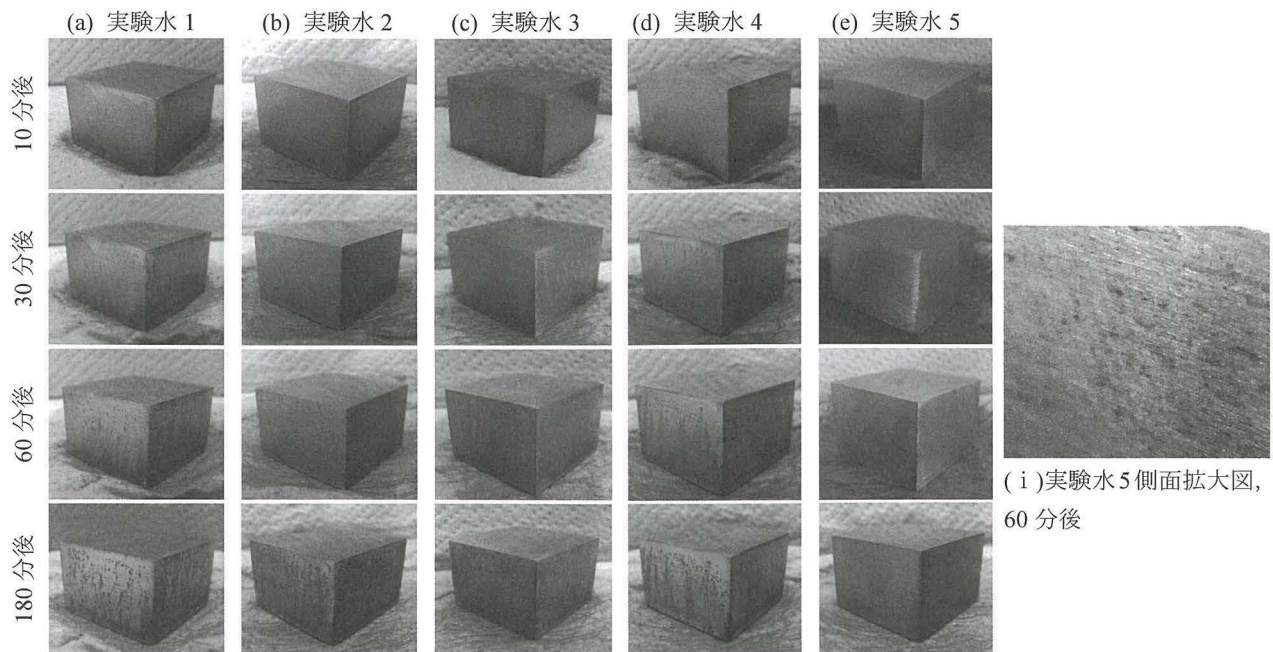


図7 各実験水における電気防錆なしの工作物の腐食状態

表2 3時間実験後における各水の水質と電圧・電流・電力

		pH	電気伝導度 [μS]	濁度 [NTU]	色度 [unit]	DO [mg/L]	水温[°C]	全鉄量 [mg/L]	電圧[V]	電流[A]	電力[W]
実験水1	定電圧	7.8	115	0.98	16.2	7.86	22.8	0.68	30.0	0.09	2.70
	定電流	7.9	109	1.00	12.0	7.73	22.6	0.59	24.0	0.07	1.68
	電気防錆なし	8.5	99.0	0.00	5.18	5.08	18.8	0.35			
実験水2	定電圧	8.1	140	0.67	4.60	7.42	23.0	0.63	30.0	0.10	3.00
	定電流	8.0	119	0.57	1.05	7.43	22.6	0.44	23.8	0.07	1.67
	電気防錆なし	8.0	115	2.54	0.32	4.52	18.7	0.49			
実験水3	定電圧	8.1	110	0.85	2.34	6.85	24.1	0.49	30.0	0.08	2.40
	定電流	8.4	115	0.53	1.65	7.04	23.3	0.49	23.8	0.07	1.67
	電気防錆なし	8.1	134	1.15	6.17	5.15	17.1	0.46			
実験水4	定電圧	8.3	198	3.04	8.94	7.77	23.4	0.54	30.0	0.15	4.50
	定電流	8.3	207	1.54	2.13	7.79	22.2	0.34	15.1	0.07	1.06
	電気防錆なし	8.3	202	1.14	5.01	5.19	15.8	0.39			
実験水5	定電圧	8.0	353	11.8	33.6	7.59	26.1	1.57	30.0	0.29	8.70
	定電流	8.3	478	1.63	0.40	7.63	22.5	0.31	7.94	0.07	0.56
	電気防錆なし	8.5	589	2.71	10.6	4.84	17.5	0.61			

ているため、電気伝導度が小さくなると電圧が大きくなり、その結果消費電力が増加していくためだと考えられる。また、前述と同様に同図中に後述定電流実験により S が変化した際、得られた実際のデータ(実験開始・終了時と表記)をプロットした。dl/dE について、実験水 1~4 については S-(dl/dE)線図とのずれは 0.8%~8%程度であったが、実験水 5 については実験開始時のずれは 0.6%と小さいものの、実験後のデータは 33%と大きいずれが生じた。これは水の成分変化が大きく、さらに電解など複合されたためと考えられる。また、消費電力においても同様であり、実験水 1~4 でのずれは 0.2~12%であるが、実験水 5 では、実験開始時で 28%、実験終了時で 25%のずれであった。

3.3 防錆試験1:電気防錆の防錆効果検証

各実験水を用いて防錆試験を実施した。図7に電気防錆を実施していない状態の各水における工作物の腐食変化状況を示す。また、表2に3時間の実験後の各水の水質を示す。実験水1の場合、電気防錆なしの時、10分で工作物表面に錆が発

生し、時間が経つごとに錆が多量に発生していることが示された。また、実験後の水質であるが、実験前に比べ、この錆のため全鉄量が増加している。これに伴い、電気伝導度および色度が増加していると考えられる。実験水 2~4 についても、最初の10分で錆が生じはじめ、3時間目では前面に夥しい腐食が見られる。とくに、実験水2が顕著であった。実験後の水質は、実験水2, 3, 4で鉄の増加と濁度、色度の増加が見られる。一方、実験水5であるが、図7(i)に示すように開始後30~60分でわずかに錆が生じ始め、徐々に錆が増加し前面に錆が見取れるが、3時間経過時においても他の実験水の30分頃の腐食状態程度に錆が抑えられている。この原因として、水の硬度が極めて大きいことが要因として考えられる。通常、硬度成分(炭酸カルシウム)は水の腐食性を低下させる作用¹⁸⁾があり、これが多量に含まれたためであると考えられる。しかしながら、錆びにくいといっても鉄の溶出はあり、水質においてこの5つの水の中で一番全鉄量の増加がみられ、濁度と色度も増加している。なお、

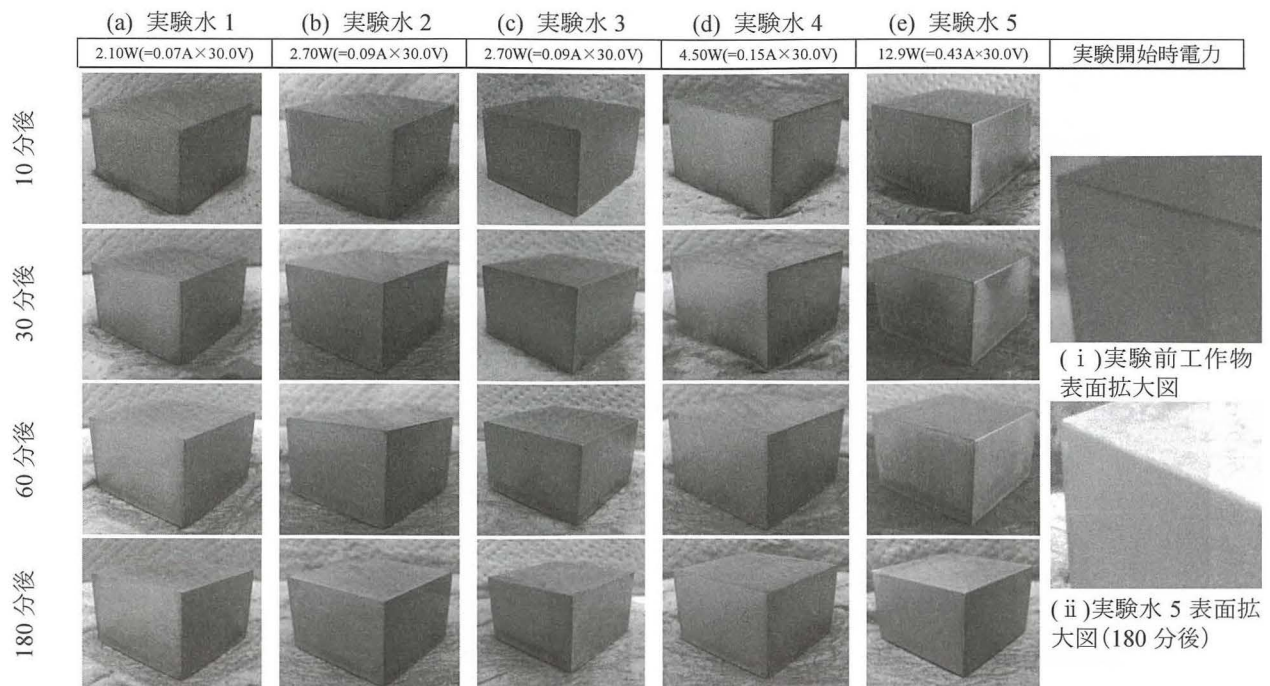
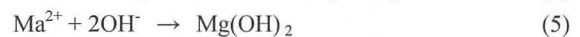


図 8 各実験水における電気防錆有り: 定電圧制御(30V)の工作物防錆状態

pH と DO は、実験前後でいずれの水での変化はとくにない。

次に、図8において各水で定電圧制御(30V)によって電気防錆を実施した際の防錆効果を示す。実験水 1～5 までいずれにおいても 3 時間の防錆を達成し、工作物表面に錆がないことがわかる。その際、実験水 1 の防錆電力は 2.1W(30V×0.07A)、実験水 2 では 2.7W(30V×0.09A)と小さい。また、表 2 から、3 時間実験後の水質は実験水 1 において工作物の錆がないにもかかわらず、全鉄量が大きく増加しており、色度においては 16.2 と大幅に増え、合わせて電気伝導度も電気防錆なしに比べ約 14%増加している。この原因として陽極電極であるステンレス金網が上述(1)式の反応により腐食し溶出がおこったためと考えられる。さらに、水槽が小さく、また、実際の流水中での使用と異なり蓄積され続けることが影響している。なお、このように溶出とそれに伴う陽極損耗が懸念されるので、実用において陽極は難溶性材料¹⁹⁾²⁰⁾の使用が望まれる。また、実験水 2 も同様の理由で鉄・色度、電気伝導度、さらに濁度も増加していると見られる。3 時間実験後の実験水 1, 2 の電流値はこのため、実験開始時に比べ微増している。ここで、実験水 3 において、3 時間時点で写真では判別できないが工作物表面に白い皮膜様の極薄い付着物が発生した。これは手で拭いてみてかすかにわかる程度であった。また、防錆電力は 2.7W(30V×0.09A)と小さかった。一方、実験水 4 であるが、開始後 1 時間～2 時間の間頃に白いわずかな付着物が発生し始め、3 時間目においてうっすらと表面を白く覆っているのが写真に見取れる。防錆電力は 4.5W(30V×0.15A)と微増している。さらに実験水 5 においては 10 分で立方体工作物の角部から白くなり始め、60 分で全面を覆い、3 時間では一種コーティングされたかのようにになっている(図 8 (ii))。この付着物は電気防錆により生じている電解被覆²¹⁾といわれるスケールであると考えられる。このスケールの要因は水中の硬度成分である炭酸カルシウムなどの Ca^{2+} 、 Mg^{2+} イオンが上述(1)式により生じた OH^- により、下記(4)式、(5)式の反応により

陰極である工作物表面でメッキのように付着し析出しているものと思われる。



また、この析出するスケールの量は水中に含まれる硬度成分の量に比例し、また、メッキと同様であると供給される電流量に比例した析出になっていると考えられる。これは実験水 1, 2 に比べ、実験水 3 の硬度が大きいので、析出があったと考えられ、また、実験水 4, 5 においては硬度ならびに電気伝導度がより大きいため供給電流も大きくなり、肉眼で確認できるほどにスケールが成長したものと推定される。とくに、実験水 5 においては消費電力が 12.9W(30V×0.43A)と大きくなっている。実験水 3, 4, 5 の実験後の水質だが、先と同様、鉄・色度・濁度の増加が見られるが、これまでと違い、電気伝導度が減少している。この理由として、硬度成分が陰極に析出しその濃度が低下したためと推察され、析出量が多いほど、電気伝導度の低下も大きいことが示されている。また、陽極溶出による全鉄増加に伴う電気伝導度増加より低下幅の方が大きいため総じて減少していると考えられる。実験開始時に比べ、実験後の実験水 3, 4 の電流値は横ばいであるが、実験水 5 では元の約 67%まで低下している。なお、pH は、実験前後でいずれの水での変化はとくにない。しかし、DO においてはいずれの水でも増加が起こっている。これは陽極において式(1)の溶出以外に水の電解反応(6)が起こり、わずかに生じる酸素が水中に溶け込むためと考えられる。その証左に陽極には気泡が発生していた。



3. 4 防錆試験2:消費電力とスケールの改善検討

次に、定電圧制御での電気防錆時、電気伝導度の大きな水において問題となった電流増加による消費電力増加と陽極腐食による水質変化、硬度を多く含む水でのスケールの低減を検討した。まず、定電流制御時に供給する電流を、一番低い

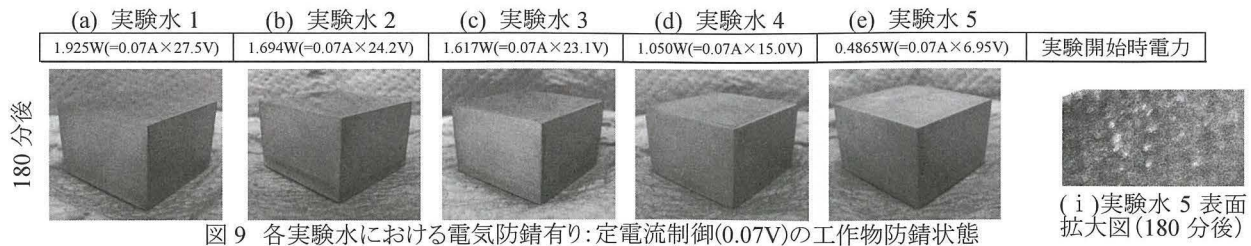


図9 各実験水における電気防錆有り:定電流制御(0.07V)の工作物防錆状態

電流で3時間の防錆達成した実験水1の電流値0.07Aとした。工作物表面において水中では一定以上の必要電流値²²⁾を超えていれば錆びないため、他の実験水においてもこの値は変わらないと予想して実験を行った。図9に各実験水において、定電流制御で3時間経過後の工作物防錆状態を示す。いずれの水でも工作物に錆の発生は見られない。また、実験水3~4で、定電圧供給時において生じたスケールであるが、少しは薄くなったものの然程かわらずに付着していた。なお、それ以前の時間の途中過程の写真是錆を生じておらず、とくに顕著な変化もなかったので割愛した。また、消費電力はそれぞれ図9に示す通りである。電力の削減率(定電圧実験と定電流実験の値の差をとり、これを定電圧実験の値で除して%で示す)は実験水1:8.33%, 実験水2:37.26%, 実験水3:40.11%, 実験水4:76.67%, 実験水5:96.23%であり、電流低減のとくに多かった実験水4,5の削減率が高い。また、表2に示す本実験後の水質であるが、全鉄量、色度、濁度、DOは定電圧の時と同様の増加傾向を示す。しかし、定電流制御であるため、実験水1~2のように電気伝導度が増加する場合、定電圧では電流も増加させ陽極電極溶出を促進し時間とともに、より全鉄・電気伝導度増加をさせるであろうが、定電流では常に電流一定なので(一方で実験終了時の電圧は低下している)そのような加速的促進が起らず定電圧に比べ低減していると考えられる。実験水3~5(とくに4,5)では供給電流量が低く一定に保たれるため析出が抑えられ電気伝導度の下げ幅が小さくなっていると考えられる。これにより実験水5で実験後電圧の増加が示された。またそれに伴い、濁度・色度・全鉄量が大きく減少し、若干上述のようにスケールが薄くなったが、図9(i)で示す通り、表面にスケールの発生を確認できる。今後はこのスケール付着を防ぎつつ防錆を行うことについて検討する。

4. 結 言

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- さまざまな地域で採水した水について電気防錆が適用できるか検証を行った。その結果、定電圧制御(30V)および定電流制御(0.07A)において、どの水を使っても防錆が達成された。また、硬度の高い水では工作物表面に電解被覆と考えられる白い付着物(スケール)を確認した。
- 各水において電気的特性について測定を行った。どの水においても電気伝導度・硬度に比例して電流が増加する傾向が示された。また、電気伝導度による推定式を検討した。
- 定電流制御において工作物防錆しつつ供給電力削減と電流変動による水質変質抑制、スケール防止を試みた。実験水5において、最小防錆電力0.49W(6.95V×0.07A)で定電圧制御に比べ最大96.23%の電力削減をし、陽極が原因と考え

られる鉄溶出の低下と電気伝導度増減の減少は示されたが、スケールの低減に留まり完全防止には至らなかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、科研費(若手研究(B), 課題番号: 21760092, 課題「電気防錆加工法の開発—水循環系の開発と潤滑性改善, 加工後工作物耐食性付与の検討—」)の助成を受けたことを記す。

5. 参考文献

- 1) 中島利勝, 嶋瀬則彦: 機械加工学, コロナ社, (1983) 181.
- 2) 広井進, 中山康夫: 切削油剤と研削油剤, 幸書房, (1982) 244.
- 3) (財)機械振興協会 技術研究所: 加工技術データファイル 基礎編(研削研磨加工), (財)機械振興協会 技術研究所, (2002) 32.
- 4) S. TSUKAMOTO, K. OHASHI, N. NISHIKAWA, M. SUDOU, T. KUBO and T. NAKAJIMA: Proposal of Electricity Rust Preventive Machining Method in Cylindrical Grinding-Antirust Effect of Workpiece in Grinding with Water-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 71, 3 (2005) 337 (in Japanese).
- 5) S. Tsukamoto, N. Nishikawa, K. Okamoto and K. Ohashi: Development of the Electricity Rust Preventive Machining Method in Surface Grinding, Adv. Abras. Technol. VI Key Eng. Mater., Vols. 257-258, (2004) 483.
- 6) N. NISHIKAWA, K. OHASHI, K. YOSHIHARA and S. TSUKAMOTO: Development of electric rust preventive machining method in internal grinding-Proposal on an environment-friendly machining using water instead of grinding fluid-, J. Environ. Conserv. Eng., 35, 6 (2006) 452 (in Japanese).
- 7) N. NISHIKAWA, S. TSUKAMOTO, K. OHASHI, R. MIYAKE, T. IYAMA and M. MIZUNO: Development of Electric Rust Prevention Machining Method in End Mill Cutting-Environmental Harmonic Machining Using Water in Cutting Machining-, J. Environ. Conserv. Eng., 37, 4 (2008) 274 (in Japanese).
- 8) N. NISHIKAWA, K. OHASHI, M. SUDOU and S. TSUKAMOTO: Development of electric rust preventive storage method in water-Proposal of metal parts storage using water without rust preventive agent or oil-, J. Environ. Conserv. Eng., 35, 5 (2006) 371 (in Japanese).
- 9) N. NISHIKAWA, Y. SATO, T. KATO, K. KARITA, T. IYAMA, M. MIZUNO, N. YOSHIHARA, Y. HAGIHARA and S. TSUKAMOTO: Development of electric rust preventive machining method Rust prevention of workpiece and machine body, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 55, 3 (2011) 167 (in Japanese).
- 10) N. Nishikawa, Y. Sato, T. Katou, K. Karita, Y. Hagihara, N. Yoshihara, H. Okawai, H. Kato, T. Iyama, M. Mizuno and S. Tsukamoto: Development of electric rust preventive machining method-Verification of the Optimized Rust Prevention Current and Electrical Characteristic with Supporting Electrode in the Grinding-, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 55, 5 (2011) p.290-297 (in Japanese).
- 11) N. NISHIKAWA, Y. SATO, T. KATOU, K. KARITA, T. IYAMA, M. MIZUNO, N. YOSHIHARA, Y. HAGIHARA, S. TSUKAMOTO: Development of electric rust preventive machining method-Proposal of the machining water recycling system-, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 54, 10 (2010) 603 (in Japanese).
- 12) 西川尚宏, 佐藤佳則, 加藤将, 刈田清貴, 萩原義裕, 大川井宏明, 吉原信人, 井山俊郎, 水野雅裕, 塚本真也: 電気防錆加工法の開発研究 加工水再生流量の増加について(速報), 精密工学会大会学術講演会講演論文集, Vol.2011 春季(CD-ROM)(2011), Page.ROMBUNNO.D62.
- 13) 日本学術振興会編: 金属防錆技術便覧, 日刊工業新聞社, (1972) 169.
- 14) 日本材料学会編: 先端材料シリーズ 水利用の最前線, 裳華房, (1999) 135.
- 15) H.H.ニューリック, R.W.レヴィー: 腐食反応とその制御(第3版), 産業図書株式会社, (1989) 59, 217.
- 16) 肥田 登: 日本の工業用水供給, 多賀出版株式会社, (1982) 9.
- 17) 伊藤雅喜編: 水循環システムのしくみ: 史上最強カラー図解, ナツメ社, (2010) 26, 80.
- 18) 日本材料学会編: 先端材料シリーズ 水利用の最前線, 裳華房, (1999) 141.
- 19) 日本学術振興会編: 金属防錆技術便覧, 日刊工業新聞社, (1972) 585.
- 20) 佐藤栄一: 外部電源用電極材料について, 防錆管理, 25, 11(1981) 18.
- 21) 日本学術振興会編: 金属防錆技術便覧, 日刊工業新聞社, (1972) 580.
- 22) H.H.ニューリック, R.W.レヴィー: 腐食反応とその制御(第3版), 産業図書株式会社, (1989) 225.