様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２１年　５月２７日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
研究期間：2007～2008
課題番号：１９８６０００３
研究課題名（和文）　水中加工を適用した電気防錆加工法の開発

研究課題名（英文）　Development of Under Water Machining applied to Electric Rust Prevention Machining Method

研究代表者
西川　尚宏（NISHIKAWA NAOHIRO）
岩手大学・工学部・助教
研究者番号：１０４３１４６２

研究成果の概要：
機械加工において加工液に水のみを使用する電気防錆加工法では，これまで水による加工機筐体自身の錆が問題になっていた．また，工作物を水中加工する際，水の飛散による足場悪化・漏電の危険があった．そこで，水加工に対応するため，飛散防止対策をし，コーティングや配管・ポンプ・水槽などの防食素材への変更，筐体への電気防錆適用を実施し，その防錆効果の評価を行った．また，水中加工による加工性能を評価すべく，防水型計測系の構築をおこなった．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００７年度	1,030,000	0	1,030,000
２００８年度	1,330,000	399,000	1,729,000
年度			
年度			
年度			
総　計	2,360,000	399,000	2,759,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学
キーワード：環境調和型加工法，機械工作・生産工学，二酸化炭素排出削減，廃液処理削減，水加工，電気防錆加工法，研削加工・切削加工，腐食・防食

１．研究開始当初の背景

生産現場において，切削・研削といった機械加工では，加工性を向上させるため油剤・極圧添加剤(硫黄系，リン系，塩素系：※現在，国内では塩素系はJIS規格改訂のためあまり用いられておらず主に海外で使用されている)・防錆剤・乳化剤などの化学物質を含んだ加工液を使用している．この加工液の廃棄は毎年，国内外の事業所で大量に発生している．京都議定書など環境規制強化がされる中，加工廃液の処理は凝集沈殿など１次処理後に希釈放流，もしくは廃液を重油と混合して焼却し，残灰の埋立て処理をしなければならず，処分地や大量の二酸化炭素排出，ダイオキシンの懸念など多大な環境負荷を強いられており，その処理には莫大な費用を要している．そのため，廃液を出さない，あるいは，減少させる加工法の開発が急務となっている．そこで，現在，以下に示すような各種の加工法が先行して研究されている．まず，冷風加工であるが，冷凍機と圧縮機によって圧縮冷凍空気を作りだし，切削や研削において工作物を加工する際に吹き付けることで，加工液の替わりとして用いている．また，MQL

加工は，加工時に大量の加工液を使用せず，微量の潤滑油ミストを使用している．

一方，本研究では，加工液に水（水道水）のみを使用する電気防錆加工法を提案している．

後述の問題を有するが，もし，加工液に環境に無害な水のみを使用できれば油分・薬剤等を含まないため廃液処理を大幅に削減できる環境保全性を有する．

しかし，現在使用される工作物の大部分を占める産業の中心的素材である鉄系材料は水ですぐに錆びて使用不能になってしまうため水のみを用いる加工は不可能であった．そこで，船舶や海洋構造物の防錆に用いられる電気防錆（カソード防食）を機械加工に応用することで水のみでの加工を実現する電気防錆加工法を開発した．これは，陰極とした工作物に外部直流電源を接続し，冷却水を介して電子を供給することで，水中において鉄系工作物の錆を電気化学的に抑制し，水での加工を実現している．

本研究ではこれまでに，円筒研削・平面研削・内面研削やエンドミル切削において本加工法の適用を検討し，その省電力での防錆効果等を検証してきた．また，加工のみならずトータルに加工現場において油剤の使用を削減するため，工作物保管において再洗浄の必要な防錆剤や油剤を使用せず，水のみを用いて長期間保管する電気防錆水中保管法の開発も実施した．

本研究ではこの電気防錆加工法の実用化を目指し，以前の研究より判明している問題の解決に取り組む．水のみで従来加工液使用加工に匹敵する加工性能を有し，加工機自身の防錆を実現することを目指し，また，これらを実現させる水中加工による加工性能を向上させる要因の解明も検討する．

２．研究の目的

本研究の最終目的は水のみを使用した電気防錆加工法の実用化である．そのためには以下で述べる２つの電気防錆加工法の抱える問題解決を実施しなければならない．

■加工機自身の水による腐食

ここで，特に実用化のためには鉄材で製作されている加工機自身の錆を防ぐことが不可欠である．

■油剤・極圧添加剤不使用による潤滑性低下

また，通常，研削液に比べ潤滑性が劣る水では同じ加工速度において加工品質が悪化してしまう．しかし，工作物を完全に水中に没した状態で行う水中加工（研削）の場合，必ずしも潤滑性が劣ることによる加工品質(工作物表面粗さ)の低下が起こるわけではないことが以前の研究から示された．これは加工点への水供給の効率化と工作物全体が常に多量の水と触れていることによる冷却性増加のためと考えられる．

本研究では電気防錆加工法に水中加工を併用し，これらの問題点を克服し，加工性能においても加工液使用の従来加工に匹敵する水のみを使用した環境調和加工の実現を目指す．そのため，以下に本件で取り組む主な目的を示す．

(1) 電気防錆加工法に適した水中研削を行う錆びない加工機の開発

水中加工を行うにあたり，加工機の錆や，加工時における激しい水の飛散による作業性悪化を解決する密閉型・防水・防食型の加工機を開発する．さらに，防錆困難部位に対して，加工機自身への電気防錆を実施し検証を試みる．

(2) 加工機の防錆対策評価

防水コーティング等の加工機への防錆の効果を検証し最適な加工機防錆を目指す．

(3) システムの最適防錆電流検証

工作物防錆・省電力の観点から電気防錆加工法を実施する上で必要な本加工システム系における工作物への最適防錆電流を解明する．

(4) 実用化のための加工性能の解明

研削液使用の従来加工と比較して通常使用範囲の加工速度・加工品質のとき，工具寿命（砥石寿命：砥石磨耗量）および加工品質（工作物表面粗さ），加工時の力（主分力・背分力）と工作物温度を測定し性能上実用的か比較検討し，また，水中加工による品質向上の原因の解明を試みる．

３．研究の方法

(1)水中加工に適した加工機の開発

図１に水中加工における電気防錆加工法モデルを示す．水中に沈めた陰極工作物に対して直流電源から電流を供給して錆を防ぎつつ，機械加工を実施する．通常の研削盤の加工液供給はノズルのみであるが，水中加工（研削）の場合，工作物を水中に沈めるプールの設置が必要であり，また，プールへの砥石突入による激しい水飛散防止のための研削盤を覆うケースの設置，水に濡れる部分の

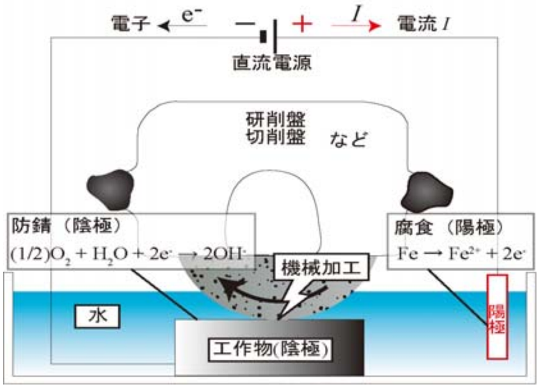

図１　電気防錆加工法の原理

防水コーティングといった研削盤の防水・防錆に抜本的な改変が必要である．

①加工機防錆：通常，加工機はペンキにより防錆を施されているが，長期に渡る使用や水使用などの過酷な条件下では十分ではない．そこで，長期にわたる防水・防錆を可能にするため金属部表面へのシリコン・ビニールなど簡単・安価な樹脂により加工機をコーティングする．しかし，研削盤には電磁チャックや可動部などで防水コーティングが困難な部分がある．また，加工機生産コストの面から，すべてを錆びないステンレスなどへの変更は難しいが，強度が必要な部位などにのみ限定利用する．さらに，研削盤自体を陰極として電気防錆を施すことを考案した．

　これにより，低導入コスト・省電力で水だけを用いて比較的大面積の防錆を実現できると考えられる．

②工作物防錆と加工品質を向上させる水中加工：工作物の電気防錆に関しては，直流電源装置に接続された工作物を陰極とし，電磁チャック上に配したプール電極（電磁チャックとは絶縁）を陽極とし，プールに満たされた水を介し通電することで工作物表面全体に電流を供給でき，効果的な防錆を実現すると共に，水中研削による加工品質向上が得られると期待される．即ち，水中加工が電気防錆加工法に適する所以である．

　図２に上述の改良を加えて開発した水中研削盤の構成を示す．

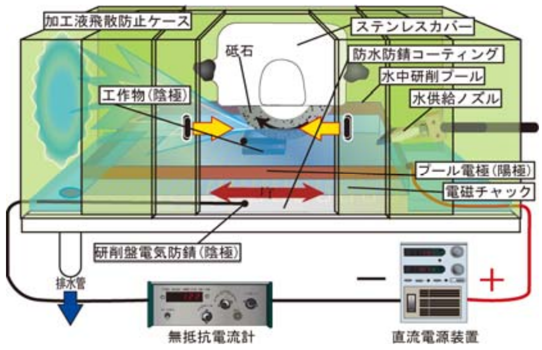

図２　提案の水中加工機構成

(2)加工機の防錆対策評価

　期間中，時間を追って機械の防錆状態の観察を実施する．そのため，コーティングする樹脂はなるべく透明なものを使用し，透過して金属面を見ることで浸水等による錆が発生していない確認する．これにより，どのような部分が浸水し錆びやすいか評価できる．また，電気防錆されているチャックなど剥き出しの金属面への電流供給を制御し，加工機金属面の防錆を達成する必要電流を測定する．

(3)必要・最適防錆電流の検討

　電気防錆加工を実施するに当たり工作物・加工機の防錆のため必要・最適防錆電流を検証する．この必要・最適防錆電流は電極形状・水流などの影響によりそのシステム系固有の値を示す．そのため，これを実験的に解明する必要があり，錆の発生時間と供給電流の関係を測定し，必要・最適防錆電流値を決定してこの水中研削装置において防錆状態を明確にする

(4)加工品質向上の解明

　水中研削による砥石寿命の測定を実施し，従来加工に実用上匹敵するか検証を試みる．また，加工品質向上に関して加工時の工作物温度を測定し，熱的見地から解明を試みる．以下に各測定項目とその測定手段について示す．

①加工品質（粗さ）：触針式粗さ計で加工後の工作物表面を測定する．

②工具寿命（砥石寿命）：一定量加工後，砥石寿命を判定するため砥石磨耗量測定する．砥石断面プロファイルをアクリル板に転写し，それを粗さ計で測定することで計測する．

③工作物温度：水中加工の性能向上の要因として周囲に満たされた水の加工点（砥石中の砥粒が工作物に接触するし加工を行う点）への浸入が考えられる．工作物温度を測定することにより冷却性との関連を解析する．供給工作物にコンスタンタン線（熱伝対）を埋め込み，高速デジタルオシロスコープを使用することで高速な現象である加工点温度（砥粒研削点温度）を，さらに，高応答周波数直流アンプを使用することで工作物表面温度を計測する．

④加工力（主分力，背分力）：工作物を動力計（ひずみゲージ式）に設置し，ひずみアンプを介して測定する．

４．研究成果

(1)水中加工機の開発

　はじめに，水中加工に対応した水中加工機を，従来研削盤をベースに改造して開発した．図３に開発の水中加工機を示す．

　研削盤の上部に加工液飛散ケースを設置したことにより，周囲に水を飛散させること

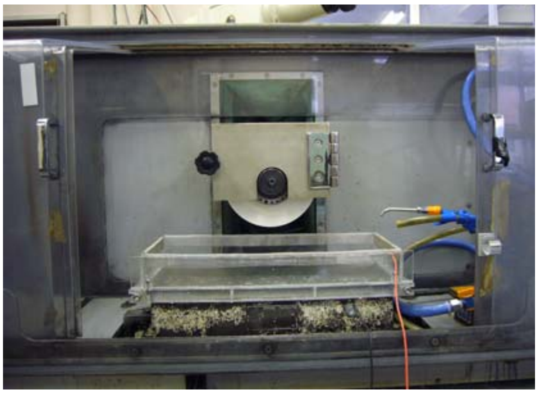

図３　開発の水中加工機

なく加工が可能となった．また，研削盤上のむき出しの金属面には樹脂シートとシリコンにより防水コーティングを施した．砥石カバーは当初コーティングを予定していたが，長期にわたる脱落砥粒や切屑による擦過への耐久性が懸念されるため，主な素材にSUS304ステンレスを用いて作成した．電磁チャックはコーティングによる防錆では工作物吸着力を下げるため困難であるので，周囲に水槽とプール電極（陽極）を設置し，工作物および電磁チャックを陰極として電流を供給し，電気防錆を行うようにした．設置したプールと電極は以下の通りである．

プール内寸：

410x160xh50mmx 厚さ 5mm, アクリル

プール電極（陽極）：

h20mm, Φ0.29#1mm(金網)，SUS304

また，防錆時には，無抵抗電流計により供給電流をモニタリングしている．さらに，通常の研削液ポンプの代わりにステンレス製混濁汚水用ポンプを導入することで水加工液供給時におけるポンプの錆を防止した．また，加工液タンク等を樹脂製に変更することで水供給周りの防錆を実現した．このように水を加工液に使用することを念頭に耐水・防食された機械加工系の開発はこれまで無かったと考えられる．

(2)防錆評価

次に，各種防錆評価を行った．

①コーティング部位の防錆評価：電磁チャックの側面は,水槽からもれた水があたるが,水に触れる間隔,量などが一定でないために,電流が一様に流れないために錆が発生してしまう.そこで,側面全体を,厚さ 1mm の塩化ビニルとシリコンでおおい,水から完全に絶縁し,防錆を行った.

図４にコーティング部位の実験前の状態と,約半年の実験後，約１年の状態を示す．コーティングを施した部位には錆による劣化が見られないことから,コーティングにより露出面に対して防水・防食をすることを可能であることが示された.一方，コーティングを施していない下の部位は腐食が進行していることがわかる.経過観察はさらに長期にわたって行うため現在も継続中である．

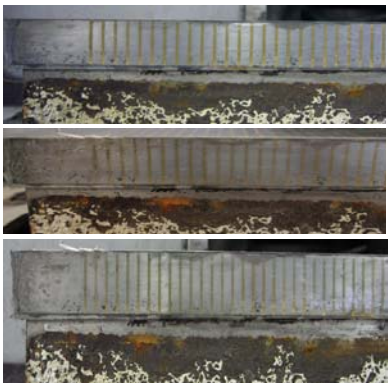

図４　コーティング部位と剥き出し面の時間経過に伴う変化

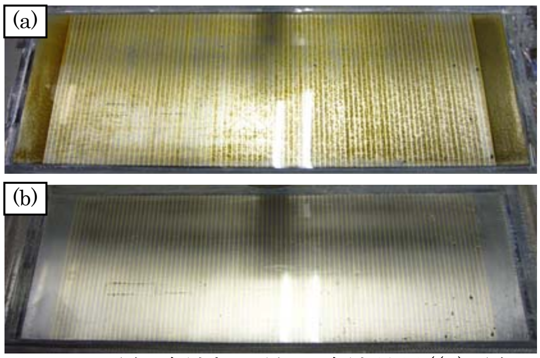

図５　電気防錆加工法の防錆効果((a)電気防錆なし，(b)電気防錆 30Vx0.17A)

②電気防錆部位の防錆評価：次に，加工機筐体の防錆困難部位である電磁チャック上面における電気防錆の評価を行った．電磁チャックを長時間の加工に見立て，プール水中にて最長３時間に渡る防錆試験を行った．図５に(a)電気防錆を実施していない場合と，(b)電気防錆(定電圧 30V)を実施した場合の電磁チャックの腐食状態を示す．電気防錆を行っていない場合は上面全面に激しい腐食（錆）が見られるが，電気防錆を行った方は全く錆びておらず大面積の金属面の防錆に成功していることがわかる．この際の供給電流は0.17Aで消費電力は約5Wと防錆運転コストが低いことが示された．このように加工機筐体への電気防錆適用という試みは従来無かったのではないかと考えられる．

(3)必要・最適電流の検証および防錆補助電極の開発と評価

筐体（電磁チャック）と工作物について

①電磁チャック面の最適電流：次に電流値と錆発生時間の関係をより詳細に計測し,最適電流値を出した.実際の加工に見立てて水を入れ耐久防錆試験を行った．防錆時間１時間において,わずかでも錆が発生した時点で実験終了として電流値を変化させ,錆発生時間T,供給電流値Ｉの関係を測定した．図６に錆発生時間 T,供給電流値Ｉの関係を表す.電流

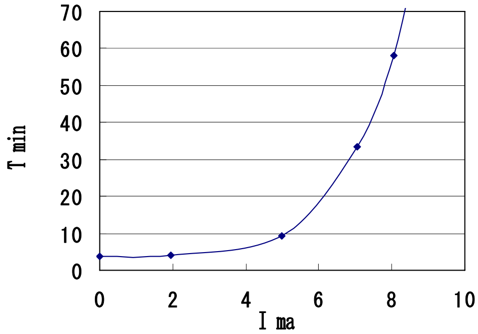

図６　錆発生時間Ｔと供給電流Ｉの関係

値が低いとわずか数分で錆は発生するが，錆発生時間Ｔは電流Ｉが増加するにつれ急速に増加し，9mAを超えるときに１時間の防錆を達成した．これにより１時間の防錆であれば，必要電力はわずか0.009A×3.1V=0.028Wと極僅かであり，極めて低運転コストであることが示された．このような加工機への電気防錆最適電流の評価は全く新しい試みであると考えられる．

②補助電極なしの工作物防錆

次に，電磁チャック上に工作物を設置した際の防錆を検証した．まず工作物が１個の状態で電流値を変化させた．プール電極幅はh20mmまたはh40mmで60分の防錆実験を行った．工作物(S50C：30×30×15mm)は１個または２個を使用し，防錆電流を0.01～1.0Aと変化させ，計測時間を60分として実験を行った．工作物を置いた場合，電磁チャック単体で防錆可能な電流値でも，工作物との隙間に電流が十分に行き届かずに，電磁チャックと工作物両方の接する隙間部位に錆が発生した．図７に電気防錆失敗時の生じた錆を示す．

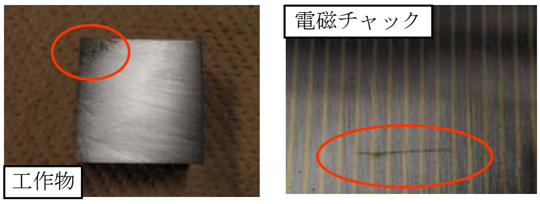

図７　隙間における錆発生状態（0.05A×20V，60分(h=20mm)）

プール電極幅h20mmで工作物が１個の時，0.3A以上の電流値で１時間の工作物の防錆が可能となった．しかし工作物と電磁チャック両方防錆可能となったのは0.8Aの時であった．また，このときの必要電力は，約0.8A×120V＝96Wと大きな電力が必要であった．また，陽極幅がh40mmのときでも同様の結果が得られ，0.8Aで電磁チャックと工作物の防錆が可能となった．陽極の幅がh40mmの場合，水に触れる表面積が大きいため，h20mmよりも小さな電圧で電流が流れやすいため，１時間の防錆における必要電力は約0.8A×80V＝64Wで若干低くなった．

次に，工作物２個の場合は陽極h40mmのみで実験を行った．これは直流電源装置の最大供給電力値が100Wであったため，電力上限を超えると推測されたからである．工作物が２個の場合，電流が十分でないと工作物と電磁チャックの接触面だけでなく，工作物同士の接触面にも錆が発生した．工作物２個の防錆が可能となったのは電流値が0.4Aの時で，電磁チャック，工作物の両方の防錆が可能となったのは，0.8Aの時であった．そのときの必要電力は0.8A×80V＝64Wと大きな値となった．工作物と加工機の両方の防錆評価は初めての試みであると考えられ，隙間における防錆性の悪化が明確となった．

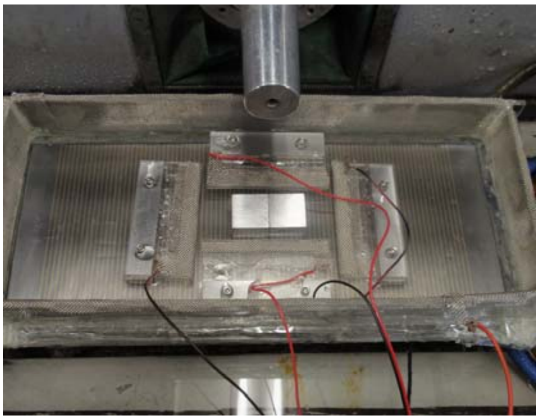

図８　補助電極を利用した防錆

③開発した補助電極による工作物防錆：上述では大きな電力が必要となるため，効果的に電流を供給し，必要電力値を大幅に低下させる陽極の補助電極を新たに開発し，検証実験を行った．補助電極にはプール電極と同様のSUS304金網を使用し，アクリル板に固定して他と絶縁し，電源装置陽極に接続した．また，電磁チャックへの固定のため，磁性があるステンレスSUS430を別個アクリル板に取り付けている．補助電極の寸法は以下の通りである．

絶縁材：200x50×幅5mm，アクリル

固定板:100×20×10mm，SUS430

電極:20mm×100mm，SUS403

図８に補助電極を利用した際の実験装置図を示す．工作物を囲むよう，補助電極を４つ配置して電気防錆を行った．なお，実験における撮影の便宜上，砥石カバー・砥石などはスピンドルを残して取り除いている．

補助電極を使用しての実験では，工作物が１個の場合，電磁チャックと工作物の防錆が0.1A×15V＝1.5Wで可能となった．工作物が２個の場合でも0.2A×20V＝4Wと前述に比べ大幅に少ない電力で防錆が可能となった．

また，補助電極自身と電磁チャックの接触面にも錆は発生せず，補助電極の使用上では問題は見られなかった．なお，隙間への水侵入をシールすればこの問題は特に無いが，隙間においても低い電力で防錆が可能であることがはじめて示され，これらにより，電気防錆加工法の実用化に近づいたと考える．

(4)加工性能評価系の構築

前述２．(4)で示した加工性能検証の目的を達成すべく，水中加工における加工性能を検証するための，計測系の構築を行った．図９に主な計測システムを示す．水中加工の場合は，従来と大きく異なり，各種装置も工作物と一緒に水中に沈むため，完全防水対応である必要があり，大幅な改良を施した．加工時の研削力を測定する際は，装置寸法の都合

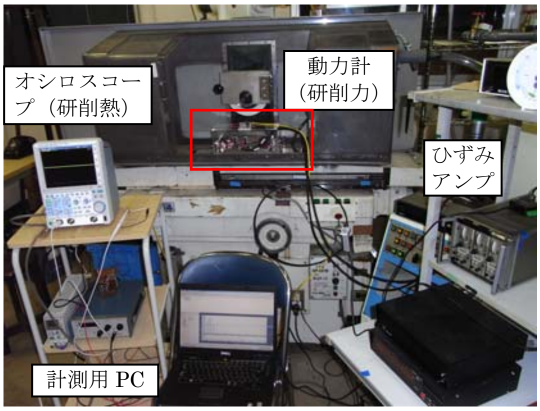

図９　研削測定システム

上，電磁チャックを取り外し，その部位に工作物を取り付けた八角リング動力計を配置し，ひずみアンプに接続してさらに AD 変換器を通して計測用 PC に取り込み，背分力・主分力を測定するようになっている．また，この動力計は水中加工の際，完全に水没するため，アクリルケースに封入密閉し防水対応型に改造している．（なお，図９の写真撮影の都合上，盤上の動力計が沈む水槽はつけていない）さらに，動力計に固定された工作物には熱電対を埋め込んでおり，加工時にデジタルオシロスコープに入力され研削温度を測定するようになっている．工作物表面粗さは加工後に工作物を外して粗さ計により測定を行う．砥石摩耗量も加工後に砥石形状を，転写用アクリル板を削ることで転写して，これを粗さ計によって計測することで測定する．

今後はこの測定系を適宜改良しつつ，研削実験を実施し，研削力・研削温度・工作物表面粗さ・砥石摩耗量を検証し，水中加工と従来加工の比較を実施する．

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計３件）

① N. NISHIKAWA, T. IYAMA, M. MIZUNO, H. MIFUNE：Development of Electric Rust Preventive Machining Method for New Environmental Harmonic Machining Only Using Water, Conference Proceedings 2009 9th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology, Volume II, pp.542-545, 2009，査読有り

② 西川尚宏，塚本真也，大橋一仁，中島利勝，井山俊郎，水野雅裕，大田康史，久保孝典：環境調和型加工法の基礎的研究―各種低公害加工法の検討と半水中研削法の有効性検証―，環境技術学会誌，2009，査読有り，掲載確定

③ 西川尚宏，塚本真也，大橋一仁，三宅隆介，井山俊郎，水野雅裕：エンドミル切削における電気防錆加工法の開発―切削加工における水のみを使用した環境調和型加工法―, 環境技術学会誌, vol.37, No.4, pp.274-281, 2008，査読有り

〔学会発表〕（計１件）

① 西川尚宏，井山俊郎，水野雅裕，三船英伸：電気防錆加工法の開発―加工機筐体の防錆―，2008 年度日本機械学会年次大会，講演論文集，第 8-1 号,第 4 巻,pp.257-258, 2008,8/4，横浜・横浜国立大学

〔図書〕（計０件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）

○取得状況（計０件）

６．研究組織
(1)研究代表者
西川　尚宏（NISHIKAWA NAOHIRO）
岩手大学・工学部・助教
研究者番号：１０４３１４６２

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし