

## 電気防錆加工法の研究開発 —水循環システムの提案—

西川尚宏<sup>\*1</sup>, 佐藤佳則<sup>\*1</sup>, 加藤将<sup>\*1</sup>, 刈田清貴<sup>\*1</sup>, 井山俊郎<sup>\*1</sup>, 水野雅裕<sup>\*1</sup>, 吉原信人<sup>\*1</sup>, 萩原義裕<sup>\*1</sup>, 塚本真也<sup>\*2</sup>

Development of electric rust preventive machining method  
-Proposal for a machining water recycling system-

Naohiro NISHIKAWA, Yoshinori SATO, Tasuku KATOU, Kiyotaka KARITA, Toshirou IYAMA, Masahiro MIZUNO,  
Nobuhito YOSHIHARA, Yoshihiro HAGIHARA and Sinya TSUKAMOTO

生産現場において、従来機械加工では油剤・極圧添加剤・乳化剤などを含んだ加工液が利用されている。しかし、使用後の廃液は焼却・埋立てや凝集沈殿といった処理が必要であり、温室効果ガス25%削減目標をはじめ環境規制強化から削減が望まれる。本研究では水のみを加工液として使用する電気防錆加工法を開発している。本論文では鉄系切りくずの錆による水汚染を解決し、加工水を再利用する水循環システムについて提案し開発を行った。水循環システムは使用後加工水から切りくずを除去し、かつ沈殿させつつ切りくずを防錆する切りくず沈殿防錆システムと沈殿除去できなかった微細切りくずと溶出したイオン類を除去して水を浄化する水再生システムから構成される。切りくず沈殿防錆システムにおいて72時間の大きな切りくず防錆を実現し、沈殿槽水質を検証した。また、逆浸透膜を使用した水再生システムにおいて、汚染水を用いて水再生浄化検証を行い、水の再生を実現した。

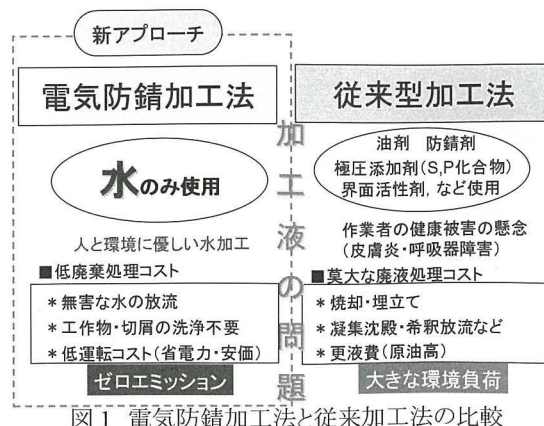
Key words: electric rust preventive machining method, environmental harmonic machining, effluent treatment, water machining, electric rust preventive chip sedimentation, water recycling, reverse osmosis membrane, grinding, machining fluid, chip

### 1. 緒言

従来、切削加工や研削加工では、油剤・極圧添加剤・防錆剤・乳化剤などの多数の薬剤を含む加工液（切削油・研削液）が加工性能を向上させるため<sup>1)</sup>に使用されている。しかしながら、使用後の廃液処理が必要となり、焼却・埋立てや凝集沈殿といった処理<sup>2)3)</sup>がなされて、多大な処理費と温室効果ガス排出など環境負荷を余儀なくされている。また、各種法規制の強化、さらに、温室効果ガス25%削減目標など、環境への世界的意識が高まっている。

本研究では、これを解決すべく、水（水道水）のみを加工液に使用する電気防錆加工法<sup>4)~10)</sup>の研究開発を行っている。もし、水のみでの加工が実現すれば、図1に示すように、排水は無害な水が主であるため廃液処理が大きく軽減される。また、工作物は加工液油分等が付着しないため次工程・出荷において洗浄工程が不要となり、生産のトータル時間削減による生産性向上も期待できる。また、図2に実用化を目指した開発段階を示す。これまでは水使用において解決しなければ実用不可能であった問題である工作物の防錆および工作機械自身の防水・防食に取り組んだ。次に、より効率的に実

施するために必要となるのは水のみによる加工性能向上と水の再生循環である。そこで、水使用を前提とした電気防錆加工法システムにおいて、今までなかった新しい水循環システムのプロトタイプシステム全般の提唱と開発を行った。この水循環システムはこれまでの電気防錆加工法システムにおいて掛け流しにしていた加工水を再利用できるよう再生するもので、主に加工後の切りくず（鉄等）を含んだ水から切りくずを分離して錆びさせずに沈殿除去する部位と、切りくずによって汚染された水から微細切りくずやイオン成分を除去する浄化再生部位に分かれる。本報では、このシステムの提案・開発と基礎的な検証を中心として述べる。



\*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: 2010年7月5日)



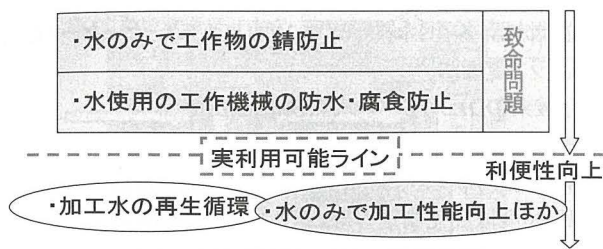


図2 電気防錆加工法の開発段階

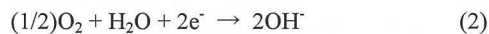
## 2. 電気防錆加工システム

### 2.1 水使用を前提とした電気防錆加工システム

これまで水のみ加工液とする廃液処理・環境負荷の削減を目指した電気防錆加工システムの提唱・開発を行ってきた。図3に電気防錆加工システムを示す。図中(1)は水を使用することを前提とした耐水・耐食加工機<sup>9)</sup>である。水のみを使用しても、工作物を錆びさせず、また、同時に鉄材である加工機筐体の錆も防がれる。通常、鉄系工作物は、水中においては式(1)の反応によりイオン化溶出し、腐食(錆)を発生して使用不能となってしまうため、水加工は困難であった。



一方、本研究で開発の電気防錆加工法は、切削や研削といった機械加工時に、水中の工作物に直流電源一極を接続して陰極として、微弱電流を供給する電気防錆<sup>11)</sup>を適用し、式(1)の反応を次式(2)に変化させ、まったく油剤や防錆剤を使用せず防錆を実現し、水のみでの加工を可能にした。



また、工作機械自身の防錆においては、水に触れる部位を

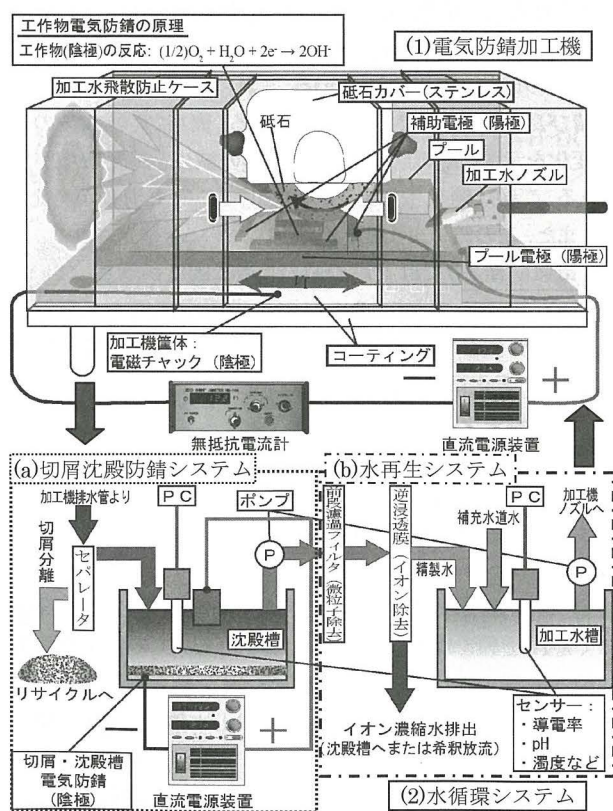


図3 電気防錆加工システム

厚い樹脂によるライニングを行い、また、強度が要求される一部には素材をステンレス等に変更している。また、タンクや配管は腐食しない樹脂製にし、ポンプは樹脂・ステンレス製耐食ポンプを使用し、長期の水使用を念頭に改良された。さらに、加工水飛散防止ケースを設置し、水飛散による漏電や足場不良といった作業性を改善している。また、電磁チャック表面のような水と接するがコーティングができない筐体部位においては電気防錆を適用して防錆を実施している。なお、図の装置では電磁チャックから工作物へ給電が行われ、双方陰極となって防錆されている。また、防錆部位へ効率的に給電を行うため陽極補助電極<sup>10)</sup>も設置している。以前の研究では、使用した水は再生せずに排出する掛け流しを行っていた。我が国では水が安価であるが、浄水の安定・安価な供給が困難な地域での利用、また、将来における人口増加・資源減少に備えた省資源の観点から、水の循環再生利用を検討する。図3(2)において、水循環システムを示す。加工機から排出される切りくずを含んだ水をセパレータによって大まかに切りくずを分離し、取り切れなかった微細な切りくずを図中(a)の沈殿槽において沈漬させ除去する。通常、水中では鉄材の切りくずが錆びて溶け出し、いわゆる赤水となって水が汚染する。これを防ぐために本システムでは切りくずを陰極として電気防錆を施している。次に、沈殿槽の水を図中(b)の前段濾過フィルタおよび逆浸透膜<sup>12)13)</sup>を通して微細切りくず、および溶出イオン類を除去し、加工水槽に回収し、再び加工機へ供給して循環利用する。次項以降において、水循環システムの各システムについて提唱・開発し、実験的に検証している。

### 2.2 切りくず沈殿防錆システム

図3(a)に示した水循環システムの切りくず沈殿防錆システムにおいて切りくず防錆ならびに水汚染を検証した。図4に開発した切りくず沈殿防錆システムのプロトタイプを示す。本装置の防錆沈殿槽は工作物の水中での長期保管を可能とした電気防錆水中保管法装置<sup>7)</sup>を参考に開発している。なお、使用した機材は次の通りである。

\*水槽(沈殿槽):アクリル製、内寸w588×d438×h445mm、

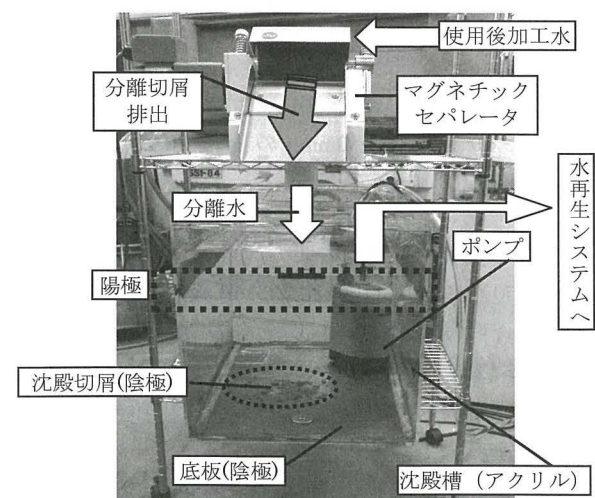


図4 切りくず沈殿防錆システム



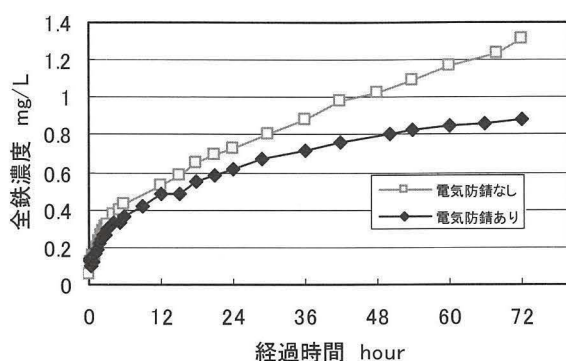
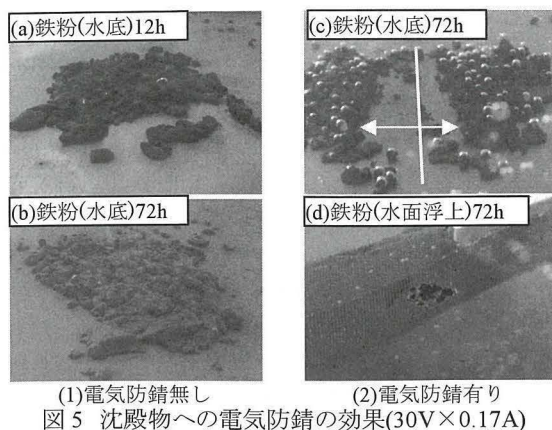


図6 経過時間に伴う水中の全鉄量の変化

表1 実験前後の水質変化

	pH	DO mg/L	電導度 mS/m	濁度 NTU	水温 ℃
電気防錆あり(72h)	7.39	13.91	8.3	3.2	24.2
電気防錆なし(72h)	7.25	9.79	8.5	4.5	22.2
水道水(実験前)	7.15	11.54	8.2	1.7	19.3

水深h355mm, 容量:91.4L(h355mm)

\*セパレータ:マグネチックセパレータMS2-4-U((株)リタケカンパニーリミテド), SUS304製, 処理量:40L/min, 除去率:70%以上(平均粒径10μm)・85%以上(平均粒径30μm), スラッジ含水率:10%以下

切りくず防錆沈殿槽は, 水槽の底部に直流電源を接続されたステンレス底板(SUS304)陰極を設置し, 沈殿してこれに接触する切りくずを同時に陰極とする。また, 水槽内壁四面に電気防錆のための電極(陽極)であるステンレス金網(SUS304, φ0.29#1mm, h50mm)の上端を水槽底部からh345mmの位置に固定している。

次に, 本装置を用いて切りくずの沈殿防錆効果を実験的に検証した。本実験では実際の切りくずに見立てて鉄粉(粒径約84μm(300メッシュ))を100g沈漬し, 直流電源から30Vの電圧を印加し, 時間経過における錆と水汚染を検証した。なお, 水は水道水(盛岡市, 平均20℃)を使用し, 水深を355mmとし, 循環はさせていない。各時間に水槽中心部から採水して, 全鉄濃度(鉄・鉄イオン)および以下で示す水質項目を測定した。使用した水質測定器・各測定項目・分析法は次の通りである。

\*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<sup>14)</sup>

\*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<sup>15)</sup>

・溶存酸素(DO):ガルバニ式隔膜電極法<sup>16)</sup>

・電気伝導率:交流4電極方式<sup>17)</sup>

・温度:白金薄膜抵抗体<sup>18)</sup>

・濁度:90度散乱光測定方式(赤外線)<sup>19)</sup>

図5に鉄粉を水中に最長72時間沈漬した際の鉄粉への電気防錆の効果を示す。(1)電気防錆無しでは, 錆は20分経過後から確認でき, (a)12時間経過で表面全体に錆を発生し, (b)72時間では完全に赤褐色に腐食し, また, 水も黄赤色に変色した。一方, (2)電気防錆有りでは, (c)72時間経過後, 鉄粉表面に錆は後述の泡発生部位の一部以外には見られず, 大部分の防錆を達成した。また, 水はほぼ透明であるが極薄い濁りが確認された。防錆消費電力は5.1W(30V×0.17A)と省電力であった。なお, 実験後に(c)図中のラインで沈漬鉄粉の山を図中矢印方向に分断して山内部も観察できるようにしているが, 内部には錆は発生していないのがわかる。わずかに表面に錆が出た原因としては, 電気防錆時, わずかな水の電解によって発生する泡(水素)により鉄粉は電流が遮断される, または周囲の鉄粉・陰極底板から泡表面に浮いたためと考えられる。また(d)に示すように水面に泡により鉄粉が浮上し, 給電が断たれて錆が発生した。また, この腐食溶出により水が若干濁って色づいたと考えられる。図6に最長72時間における鉄粉沈漬時, 水中に溶出した全鉄濃度の変化を示す。全鉄濃度はいずれも時間に伴い対数的に増加している。電気防錆を実施した方が, 実施していないものに比べ濃度増加が低く, 電気防錆により鉄のイオン化が阻止されているためと考えられる。一方で, 上述のように電流供給が断たれた鉄粉からの溶出に伴い, 時間と共に濃度が増加しているが24時間以降での増加率が低下している。これは泡により浮いた鉄粉が錆び尽くしたためであると考えられる。表1に実験前後の水質変化を示す。電気防錆なしではDOの減少と濁度増加が見られる。これは錆発生による鉄の酸化での酸素消費が考えられ, また, この錆により濁度が増加していると推定される。一方, 電気防錆ありでは上述の錆のために濁度が増加しているが, DOが増加しており, その原因は陽極電極での水電解による酸素発生が一因と考えられる。また, pHおよび電気伝導度はとくに変化は見られなかった。

## 2.3 水再生システム

次に図3(b)に示した水循環システムの水再生システムにおいて再生水質を検証した。図7に開発した水再生システムを示す。本装置は前述2.2の沈殿槽からポンプで送られた水から除去できなかった微細切りくず・イオン類を除去するもので, 濾過フィルタと活性炭フィルタからなる前段濾過フィルタ部位にて逆浸透膜を痛めないために粒径5μm以上の粒子を除去している。その後, より微細な粒子やイオン類を除去する逆浸透膜を通過し, 浄化された再生水を加工水槽に回収し, 加工機に再度加工水として使用する。なお, 逆浸透膜からは別に不純物が濃縮された濃縮水が分離され, 再度沈殿槽に戻されるか希釈放流される。本システムの特徴として加工液に水のみを使用するため, 従来加工液に対しては油分により適用



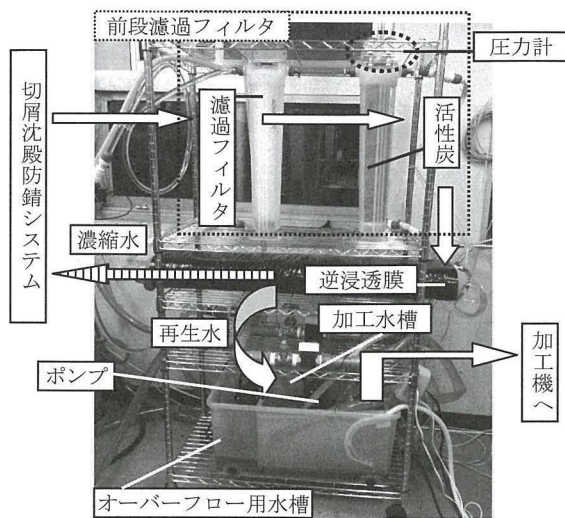


図7 水再生システム

表2 各水の水質

	全鉄 mg/L	pH	DO mg/L	電導度 mS/m	濁度 NTU	水温 ℃
沈殿槽水	0.96	7.01	8.63	8.7	4.6	20.5
再生水	0.02	6.91	11.09	3.5	1.2	21.6
水道水	0.05	7.15	11.54	8.2	1.7	19.3

不能である逆浸透膜を使用することができるため、イオン～イオンサイズの微粒子までの除去により浮遊する切りくずによるスクラッチ発生や仕上げ面あらさ精度の低下など<sup>20)</sup>を防ぐことができるので高価な除去設備を用いずに安価な超高精度加工実現可能性が期待できる。次に、本装置で使用したフィルタ類を以下に示す。

\* 濾過フィルタ: デプスカートリッジフィルタ TCPD-02A-D1FE (ADVANTEC社), ポリプロピレンフィラメント, 除去率: 99%以上 (条件: 粒子径  $1\mu\text{m}$ , 10L/min)

\* 活性炭: 活性炭カートリッジフィルタ TCC-WH-DOCP (ADVANTEC社), ポリエチレンテレフタレート・ポリエチレン (一次フィルタ) および繊維状活性炭 (比表面積  $1500\text{m}^2/\text{g}$ )

\* 逆浸透膜: 超低圧合成複合膜エレメント SUL-G10 (東レ(株)), 架橋全芳香族ポリアミド系複合膜: スパイラル型, イオン除去率: 99.5 ~ 99.0% (条件: 0.75MPa, 25℃, 給水流量 20L/min, pH6.5, 500mg/L as NaCl)

次に、水再生評価のため、水再生システムに汚染水をポンプで送水し再生実験を行った。表2に各水の水質を示す。使用した汚染水 (沈殿槽水) は上述2.2の鉄粉を水槽に投入して長時間放置し、作成した。沈殿槽水は鉄が  $0.96\text{mg/L}$  と、水道水の20倍程度含まれており、これが水再生システムを通すことにより、再生水は  $0.02\text{mg/L}$  と元の水道水より低くなり、また、濁度および水中のイオン性物質による電気伝導度も低下し、水中から不純物が取り除かれているのが見て取れるが、pHやDOはとくに変化がなかった。なお、今回は基礎的検証のため極低圧 (逆浸透膜前で  $0.02\text{MPa}$  程度) で送水実験をしており、配管内の汚染除去不良や、逆浸透膜の低供給圧下では不純物除去率低下するので、期待されるより電気伝導度や濁度の除去割合が低くなっている。

### 3. 結 言

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 電気防錆加工システムにおいて、従来なかった水循環システムを提唱し、開発・検証を行った。
2. 切りくず防錆沈殿システムを提唱・開発し、その防錆効果を検討し、全鉄・pH・DO・電気伝導度・濁度といった水質変化の相関を評価した。72時間にわたる防錆試験を実施し、省電力 ( $30\text{V} \times 0.17\text{A} = 5.1\text{W}$ ) で、泡により離脱・電流遮断された部位以外の防錆沈殿を実現した。
3. 水再生システムを提唱・開発し、水浄化の際の水質変化を評価した。本システムにより汚染水から水道水より不純物の少ない再生水が精製可能となり、水使用の加工システムにおける水リサイクル利用の可能性が示された。

### 謝 辞

本研究を実施するにあたり、科研費(21760092)の助成を受けたことを記す。

### 4. 参考文献

- 1) 中島利勝, 鳴瀧則彦: 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., 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, 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).
- 8) 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).
- 9) N. NISHIKAWA, T. IYAMA, M. MIZUNO, H. MIFUNE: Development of Electric Rust Preventive Machining Method for New Environmental Harmonic Machining Only Using Water, Proc. of 9th euspen Int. Conf., San Sebastian, Spain, Volume II, (2009) 542.
- 10) 西川尚宏, 井山俊郎, 水野雅裕, 三船英伸, 関内陵博: 電気防錆加工法の開発—補助電極による防錆効率化—, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2009, 4, (2009) 231.
- 11) H.H. ユーリック, 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.
- 12) 大矢晴彦: 分離のサイエンスとテクノロジー, コロナ社, (1998) 113.
- 13) 井出哲夫: (第二版) 水処理工学—理論と応用—, 技報堂出版株式会社, (1990) 641.
- 14) たとえば, JIS K0102 57-1
- 15) 日本電気計測器工業会編: 環境計測器ガイドブック (第5版), 公害対策技術同友会, (2000) 99.
- 16) 15)の 119.
- 17) 15)の 112.
- 18) 秦明宏, 荻山正生, 木村豊: PIC マイコンの基礎とセンサ活用入門, CQ出版, (2005) 101.
- 19) 15)の 126.
- 20) H. Sato, M. Doi, A. Nagayama, E. Kasahara: Filtration of Machining Fluids by Microfiltration Membranes. 2nd Report. Cross-Flow Filtration., Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B, 59, 558 (1993) 433 (in Japanese).