

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 9日現在

機関番号：11501
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560814
 研究課題名（和文）
 環境対策とコストが調和した加工油剤循環システムのデザイン実践
 研究課題名（英文）
 A Practical Design of Environmental Conscious Coolant Recycling System
 研究代表者
 近藤 康雄 (KONDO YASUO)
 山形大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：50304241

研究成果の概要（和文）：

アミンフリー加工液の複数回リサイクル使用の有効性を検討した。アミンフリー加工液の回収処理性は汎用エマルジョンに比べて高く、防錆性能以外の観点では、性状変化、加工特性は繰り返しリサイクルを行っても性能の低下がみられないことを明らかにした。また、防錆性については、希釈濃度を高くすると改善できることも見出した。さらに、水溶性加工液の長寿命化を支援することを目的に、水溶性油剤の状態変化を非破壊的に計測する技術に関する検討を行い、赤色 LED 光と青色 LED 光の拡散反射率から油剤濃度と着色成分を区別して認識できる可能性があること示した。

研究成果の概要（英文）：

We examined the possibility of multiple recycle use of amine-free water soluble coolants. The recycle amine free coolant showed an excellent lubricating and cooling performance compared to the amine-containing coolant except for the rust control. The rust control can be improved by increasing the oil concentration. In addition, an observation technique using red, green and blue LED lights was proposed as a nondestructive measured method to detect the oil concentration and turbidity change.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：廃棄物発生抑制・ライフサイクル

1. 研究開始当初の背景

工作機械による金属加工における技術課題は、昔から加工精度の向上と加工能率のアップに決まっており、高品位な製品を効率よく生産することに集中していた。しかし、近年では環境問題が全地球的な課題となり、切

削加工分野においても環境への配慮が大きなテーマとなっている。

金属加工における加工プロセスの中で、材料が投入されてから製品が完成するまでの間に、以下の排出を伴うが、いずれも環境を阻害するもので、低減または抑止することが望まれている。

(1) 電力・エアなどの使用を通じて、化石燃料燃焼による CO₂ 排出

(2) 潤滑油・切削液消費による廃液排出

(3) 加工に伴って発生する切削・消耗工具排出

(4) 騒音・振動、ミスト類の排出

これら環境負荷を低減することを目的に提案されている方法は、切削液または工具の選択方法に集約される。このうち、切削液からの対応に着目すると、ドライ加工、冷風加工、MQL といった切削液を使用しない、または、使用量を最小限にする加工法が次々と提案されているが、加工内容や使用工具が限定されない汎用工作機械では、加工精度の確保、工作物の熱変位の抑制、切りくず処理といった問題の、切削液に勝る一般解は確立されていないのが現状である。

こうした背景から、近年、切削性の向上および環境負荷低減・安全性の向上を両立させる観点から、水溶性切削液の積極的利用に拍車がかかりつつある。最近の切削加工においては、NC機械の普及により自動化・省人化のニーズが高まり、これに対応するため、切りくずの除去・排出に効果が大きく、しかも作業者に害を及ぼすことや火災の心配のない水溶性切削液は最適な切削液といえる。

一方、エコマシニングの観点から見た場合、水溶性切削液は、使用後の廃液処理に多大の費用がかかるばかりでなく、廃棄処理に伴う汚染物質の発生が指摘され、使用においては、対象ワークによっては、水溶性切削液では加工できない、加工能率が著しく低下するなどが指摘され、不水溶性（油性）切削液との併用を迫られる場合も少なくない。

2. 研究の目的

アミン系加工物を賢く(Smart)利用して、ライフサイクル全体で環境負荷を最小化する水溶性加工油剤の循環システムを提案する。現状の加工油剤では、油剤の長寿命化を目的にアミン系加工物が多用されているが、アミンは水に対して無限大の溶解度を持つため廃液処理の際に除去できない。

(1) 使用するアミン系化合物の種類および量を制御することによって、水溶性加工油剤の長寿命化と廃液処理性を両立できる加工油剤およびリサイクル技術の開発を目指す。

(2) 一度投入した水溶性加工液を常にモニタリングし長寿命化を図ることを目的に、水溶液の色や汚れが、光の反射・透過・吸収に大きな影響を及ぼすことを利用して、水溶性油剤の状態変化を非破壊的に計測する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 長寿命化と廃液処理性を両立できる加工油剤およびリサイクル技術の開発

アミンフリー加工液の複数回リサイクル使用の有効性を検討するために、市販されているアミンフリーエマルジョン水溶性加工液を用いて実験を行った。図1に供試水溶性加工液の希釈濃度とBrix(屈折率)、pHの関係を示す。水溶性加工液の希釈濃度とBrixは比例関係にあり、Brixを測定することによって濃度を簡易測定できる。また、アミンフリー加工液のpHは8~9程度の弱アルカリ性に調製されている。

実験に使用した工作機械はOKK製マシニングセンタPCV-40IIであり、米子高専で実験実習等に使用され、アルミ合金や鋼、樹脂などの切削加工が行われ、断続的に水溶性加工液が使用された。水溶性加工液は、使用状況や周囲環境などによって濃度、pHなどが変動する。そこで、水溶性加工液の性状変化を測定するために、次の4項目の試験を7~9日毎に行った。

- ① 屈折率(Brix)測定による水溶性加工液の濃度測定
- ② pHの測定
- ③ DIN51360-02Aに準拠した防錆試験
- ④ 簡易測定キットを用いた総菌数・硫化物産菌等の微生物数の測定

また、水溶性加工液は経時変化に従って冷却性、潤滑性が変化し、加工特性に影響する可能性がある。そこで、加工特性を評価するために次の2項目の加工実験を行った。

5. 穴あけ加工試験による工具磨耗測定

直径8mmの高速度鋼製ソリッドドリルを用いてS50C材の穴あけ加工試験を行った。加工条件は、切削速度40m/min,送り0.15mm/revとし、深さ25mmの貫通穴を100穴加工した。本実験では、5穴加工ごとに切れ刃外周部近傍の逃げ面磨耗幅をビデオマイクロスコープによって測定した。

6. 側面切削加工における仕上げ面粗さ測定

直径32mmのインサートエンドミルを用いてアルミニウム合金(JIS A5052P相当品)の側面加工を行った。工具は超硬P20相当品を用い、エンドミルボディに工具1個を取り付けた状態で加工を行った。加工条件は、切削速度25, 50, 100, 200m/min, 送り速度0.1mm/tooth, 半径方向切込み2mm, 軸方向切込み10mm, ダウンカットとした。

(2) 水溶性油剤の状態変化を非破壊的に計測する技術の開発

① 水溶性加工油剤

エマルジョンタイプ(JIS A-1種)の切削油剤を水道水で0.5, 2, 5, 10%に希釈した水溶性加工油剤を調整し試験に供した。使用前は透明感のある白色の液体であるが、使用により淡黄色または茶褐色に変色する傾向がある。また、腐敗劣化が進むと最終的には油

剤成分が分離し、水相部分は透明感のない白色または茶褐色の液体となる傾向がある。

② 吸光度測定

0.5, 2, 5, 10%水溶性加工油剤および使用中の汚れを模擬するために各濃度の水溶性加工油剤に水溶性の黄色インクを0.1および0.5%添加した着色水溶性加工油剤を調整した。これら水溶性加工油剤の可視光域(350~700nm)での吸光度を分光光度計により測定し、油剤濃度および汚れの程度が吸光度分布に及ぼす影響を調べた。

③ 拡散反射率測定

すべての物質は、光を反射、透過、吸収する性質を持つが、エマルジョン系水溶性加工油剤では油剤濃度が2%以上となると可視光波長領域の透過率はほぼゼロとなることを筆者らは確認している。したがって、エマルジョン系水溶性加工液の場合、光の吸収と反射だけを考えれば良いと考えられる。仮に、光の反射だけで油剤濃度や汚れの程度が推定できれば、加工油剤の片側からのアクセスだけで測定が可能となるため、簡易・簡便な計測技術に一步近づくことになる。

幅10mm、奥行き10mm、30mm、50mmの断面を有する珪酸ガラス製のセルに水溶性加工油剤または着色水溶性加工油剤を満し、赤(波長帯域600~700nm)、緑(456~575nm)、青(400~500nm)LED光を反射体に照射した際の拡散反射率を測定した。拡散反射率の測定条件は図1に示す通りで、センサーおよびアンプにはOMRON E3Xシリーズを用いた。

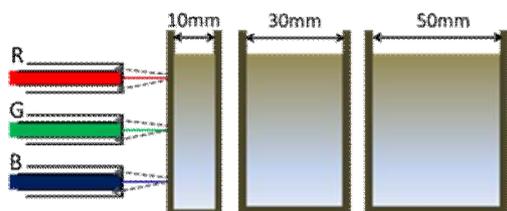


図1 拡散反射率の測定条件

4. 研究成果

(1) 長寿命化と廃液処理性を両立できる加工油剤およびリサイクル技術の開発

① 回収処理

アミンフリー加工液の回収処理は反電荷界面活性剤を用いる方法(4)を用いて行った。反電荷界面活性剤を用いる方法は、使用済み水溶性加工液から油分などをほぼ完全に除去した無色透明のリサイクル水を得ることが可能であり、その回収率は90%以上である。従来の汎用エマルジョン水溶性加工液では、回収処理過程におけるろ過工程において川

砂利、粉末活性炭、ろ紙からなるろ過槽を構成し、油剤成分を分離した廃液をろ過槽から真空吸引することによって回収水を得る。一方、アミンフリー加工液の回収処理では、ろ過工程において油剤成分を分離した廃液に粉末活性炭を混合し、重力ろ過で回収処理を行うことが可能である。なお、汎用エマルジョンでアミンフリー加工液と同様の回収処理を行った場合、2ろ過工程を行ってもアミンフリー加工液の回収水と同等のBrix, pHは得られなかった。反電荷界面活性剤を用いる方法においてもっとも時間を要するのがろ過工程であり、アミンフリー加工液は汎用エマルジョン水溶性加工液に比べて時間を短縮することができる。約1ヶ月程度工作機械で使用したアミンフリー加工液から得られた回収水のBrixは0.4程度であり、pHは7.3程度であった。さらに、この回収水で希釈したアミンフリー加工液と水道水で希釈したアミンフリー加工液を1:1の割合で混合し、それを工作機械で約3ヶ月使用した。このアミンフリー加工液から得られた回収水のBrixは0.7程度であり、pHは7.3程度であった。二回目の回収処理によって得られた回収水の方が一回目の回収処理によって得られた回収水に比べてBrixが高く、希釈水としての品質がやや劣ると考えられる。なお、回収処理に必要なコストは水溶性加工液の廃液1Lあたり20~30円であった。

② リサイクル性

実験は水道水で希釈したアミンフリー加工液、そこから一回目のリサイクルによって得た回収水で希釈したアミンフリー加工液、さらにそこから二回目のリサイクルによって得た回収水で希釈したアミンフリー加工液の3種類を用いて行った。各実験とも希釈濃度は5vol%, タンクへの初期投入量は120Lであり、性状変化を測定するにはクーラントポンプで水溶性加工液を10分間循環させた後に測定した。

図2に供試水溶性加工液のBrix, pHの変化に及ぼす経過日数の影響を示す。水道水で希釈したアミンフリー加工液(以下水道水希釈と表記する)を用いて2011年5月18日から41日間にわたって実験を行った。水溶性加工液はクーラントポンプを用いての循環や加工への供給を行う際の散逸や、水分の蒸発等によって液量が減少する。この期間中タンクの液量は約19L減少し、クーラントポンプの稼働時間は193分であった。Brixは4.4~5.0の間で推移し、pHは8.61~8.30の間で推移した。2011年5月18日から41日間にわたって工作機械で使用したアミンフリー加工液を回収処理することによって回収水を得た。この回収水で希釈したアミンフリー加工液と水道水で希釈したアミンフリー加工液を1:1の割合で混合したアミンフリー加

工液(以下回収水希釈(R1)と表記する)を用いて2011年8月1日から84日間にわたって実験を行った。この期間中タンクの液量は約33L減少し、クーラントポンプの稼働時間は294分であった。このときBrixは4.2~6.1の間で推移した。pHは29日目と36日目に7.4程度を記録したが、それ以外は8.72~8.19の間で推移した。2011年8月1日から84日間にわたって工作機械で使用した回収水希釈(R1)のアミンフリー加工液を回収処理することによって再び回収水を得た。この回収水で希釈したアミンフリー加工液と水道水で希釈したアミンフリー加工液を1:1の割合で混合したアミンフリー加工液(以下回収水希釈(R2)と表記する)を用いて2011年8月1日から84日間にわたって実験を行った。この期間中タンクの液量は約21L減少し、クーラントポンプの稼働時間は219分であった。このときBrixは4.4~5.3の間で推移した。pHは8.83~8.45の間で推移した。

アミンフリー加工液は防錆性能が不安視されている。今回の3回の実験でも希釈液の種類にかかわらず、実験期間中に工作機械に錆が発生する危険性があるほどに防錆試験において錆が発生した。水道水希釈、回収水希釈(R1)においては日数の経過に伴って防錆性能には改善が見られたが、回収水希釈(R2)では改善が見られなかった。なお、どの加工液においても実験期間中に工作機械に錆の発生は見られなかった。日数の経過に伴って防錆性能の改善が見られたのは、濃度が増加傾向にあったことが原因と考えられる。

図3にエンドミルを用いた側面切削加工(切削速度100m/min)における仕上げ面粗さに及ぼす経過日数の影響を示す。この実験は主に水溶性加工液の潤滑性を評価するために行った。いずれの加工液においても切削速度が100m/min以下の条件では、ドライ加工に比べ仕上げ面粗さが向上しており、希釈水や経過日数によって仕上げ面は大きく変化しなかった。なお、切削力は主に低切削速度ときに水溶性加工液による切削力低減効果が見られた。

(2) 水溶性油剤の状態変化を非破壊的に計測する技術の開発

① 吸光度分布

0.5, 2, 5, 10%水溶性加工油剤の可視光領域における吸光度分布を図4に示す。油剤濃度が2%以下の場合、青色波長領域での吸光度が油剤濃度とともに上昇する傾向がみられるが、油剤濃度が5%以上となると散乱の影響が強くなり吸光度は全波長領域で飽和しており吸光度は油剤濃度に依存しない状態となる。また、油剤濃度にかかわらず390nmおよび470nm付近で吸光度の谷が見られる。

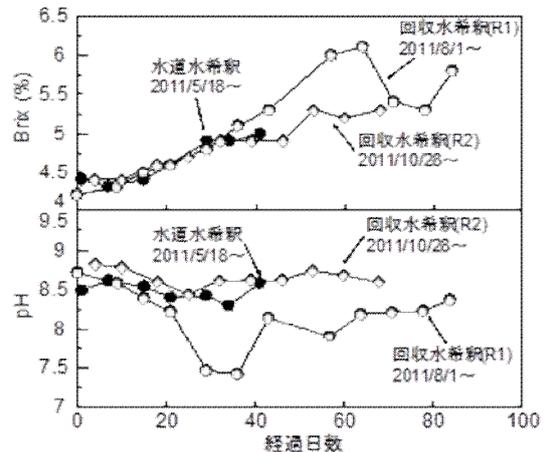


図2. Brix, pHの変化に及ぼす経過日数の影響

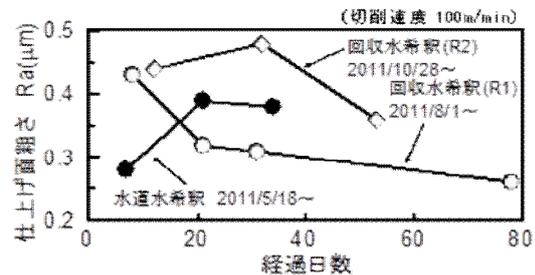


図3. 仕上げ面粗さの変化に及ぼす経過日数の影響

0.5%水溶性加工油剤に、水溶性の黄色インクを0.1および0.5%添加した着色水溶性加工油剤の吸光度分布を図5に示す。水溶性加工油剤を着色すると、吸光度は全波長領域で上昇する傾向にあるが、青色波長領域では吸光度は黄色インク濃度によって大きく変化するが、赤色波長領域では黄色インク濃度によって吸光度が大きく変化するのではない。このように油剤濃度および汚れの程度は、青色波長領域の吸光度に大きな影響を与えることが分かる。

② 油剤濃度と拡散反射率

幅10mm, 奥行き10mm, 30mm, 50mmの断面を有する硼珪酸ガラス製のセルに0.5, 2, 5, 10%水溶性加工油剤を満たし、赤(波長帯域600~700nm), 緑(456~575nm), 青(400~500nm)LED光を反射体に照射した際の拡散反射率と油剤濃度の関係を図6に示す。水溶性加工油剤の濃度測定に現在汎用的に使用される屈折率による測定結果であるBrix%も同時に示した。照射した赤, 緑, 青のLED光の波長帯域は図5に示すように、吸光度が油剤濃度や着色の影響を受ける波長帯域を持つのが青色LED, 受けにくい波長帯域を持つのが赤色LED, 緑色LEDはこれらの中間の波長帯域を持つ。

油剤濃度とLED光の拡散反射率の関係は光の色にはあまり依存せず、セル厚さに依存した。セル厚さが10mmと薄い場合には、Brix%同様に拡散反射率は油剤濃度と比例関係にあり拡散反射率によって油剤濃度測定が可能となるが、セル厚さが厚くなると油剤濃度

が5%以上で拡散反射率は飽和した。これは油剤中での光の散乱が大きく影響していると考えられるが、拡散反射率が飽和する油剤濃度は吸光度が飽和する濃度と一致している。

③ 着色が拡散反射率に及ぼす影響

水溶性加工油剤の使用中の汚れを模擬するために、0.5, 2, 5, 10%水溶性加工油剤に黄色インクを0.1および0.5%添加した着色水溶性加工油剤を調整し、赤、緑、青色LED光を奥行き10mm, 30mmおよび50mmの反射体に照射した際の拡散反射率とインク濃度の関係を図7, 図8および図9に示す。油剤濃度およびセルの奥行きが大きくなると、LED光の色によらず拡散反射率は着色によって小さくなるが、着色の程度には依存しないことが分かった。

一方、油剤濃度が低くセルの奥行きが10mm小さいとLED光の色によって着色に対する感度が異なった。この現象は、0.5%および2%水溶性加工油剤の場合に顕著で、赤色と緑・青色のLED光で拡散反射率の着色程度依存性が異なった。赤色LED光の場合、拡散反射率は着色程度に依存せずほぼ一定値を示すのに対し、緑および青色LED光の拡散反射率は黄色インク濃度にほぼ比例して減少する傾向を示し、油剤濃度は赤色LED光の、不純物濃度は青または緑色LED光の拡散反射率から推定できる可能性があることを表している。

これらは図5に示す吸光度の着色依存性と矛盾しない。すなわち、青色波長領域の吸光度が着色によって大きく上昇することは青色波長領域の反射率を下げることになり、逆に赤色波長領域では着色が吸光度に及ぼす影響が小さいことは赤色波長領域での反射率の変化が小さいことを意味している。同様に、油剤濃度およびセルの奥行きが大きくなると、LED光の色によらず拡散反射率は着色によって小さくなるが着色の程度には依存しないことも、吸光度の着色程度依存性と矛盾しない結果となっている。これらの事実は、油剤濃度が低い場合、条件によっては赤色LED光と青色LED光の拡散反射率から油剤濃度と着色成分を区別して認識できる可能性があることを示唆している。

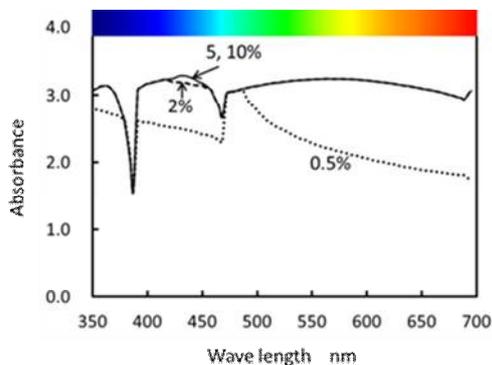


図4 水溶性加工液の可視光域での吸光度

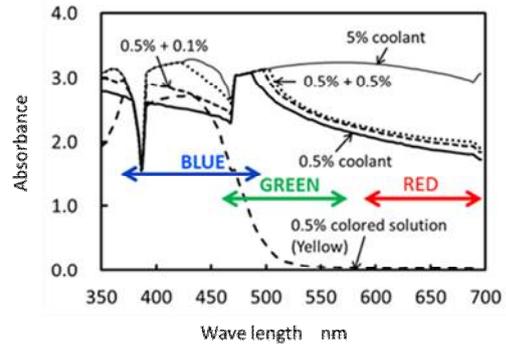


図5 着色が吸光度に及ぼす影響

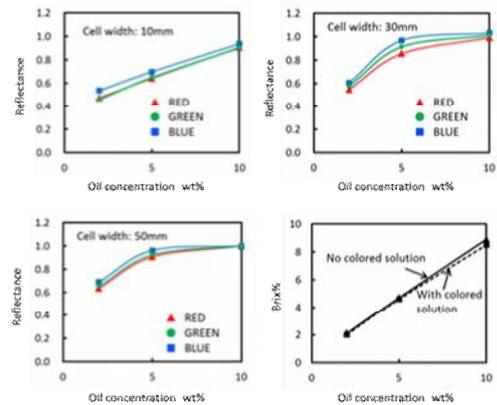


図6 油剤濃度と拡散反射率の関係

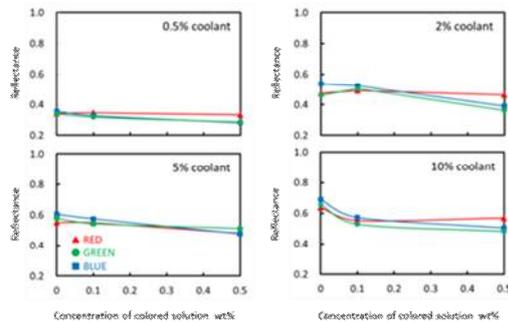


図7 着色が拡散反射率の及ぼす影響 (光路長=10 mm)

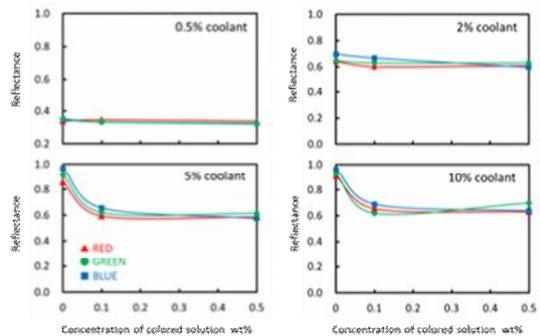


図8 着色が拡散反射率の及ぼす影響 (光路長=30 mm)

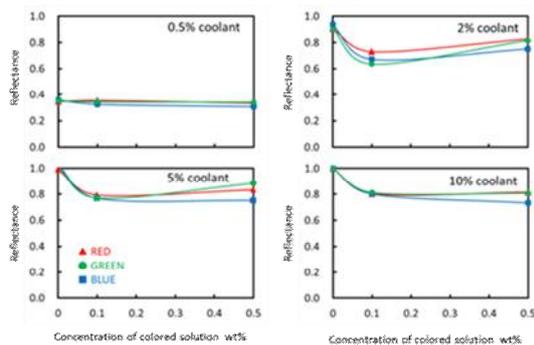


図9 着色が拡散反射率の及ぼす影響
(光路長=50 mm)

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計8件)

- ① Y. Kondo, A dynamic Observation Concept to Keep Water-soluble Coolant in Normal Condition for Long Time, *Advanced Material Research*, 査読有, vol. 652-654, (2013), 2119-2122.
- ② Y. kondo, M. Yamaguchi, K. Yamaguchi, S. Sakamoto, A Coolant Recycling System to Reduce Environmental Load in Machining Process, *Proc. of 9th ICHMTMD2012*, 査読有, (2012), 14-19.
- ③ Y. Kondo, M. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, S. Sakamoto, A pragmatic Approach to Reduce Environmental Load in Machining Process, *Advanced Mechanics and Materials*, 査読有, vol. 163, (2012), 12-17.
- ④ K. Yamaguchi, T. Kodani, Y. Kondo, Multiple Recycling Use of Amine-Free Water-soluble Coolant, *Proc. of ICPMT2012*, 査読有, (2012), 1-4.
- ⑤ T. Kodani, K. Yamaguchi, Y. kondo, Possibility of Recycling Amine-Free Water-soluble Coolants, *J. of Advanced Mechanical Design, System and Manufacturing*, 査読有, vol. 6, 2012, 65-75.
- ⑥ 近藤康雄, 水溶性加工液リサイクルシステムの特徴と高度化, *砥粒加工学科誌*, 査読有, vol. 55, 2011, 82-85.
- ⑦ Y. Kondo, K. Yamaguchi, S. Sakamoto, Study on Metabolic system for Water-soluble Coolant - Development of Key Technologies to Automate the Surfactant Treatment Process, *Proc. of the 4th Int. conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology*, 査読有, (2011), 43-47.
- ⑧ 近藤康雄, 高田和也, 山口顕司, アミン系化合物が水溶性加工液の廃液処理性に及ぼす影響, *先端加工*, 査読有, vol. 28, 2010, 66-74.

〔学会発表〕(計10件)

- ① 2013年度精密工学会春季大会, 水溶性加工液の動的監視システムに関する研究, 2013年3月14日.
- ② 日本機械学会第9回生産加工・工作機械部門講演会, アミンフリー水溶性加工液の運用とリサイクル性の検討, 2012年10月28日.
- ③ 2012年度精密工学会秋季大会, 水溶性クーラントの組成とリサイクル性, 2012年9月14日.
- ④ 2012年度精密工学会春季大会, 水溶性クーラントの組成とリサイクル性, 2012年3月15日.
- ⑤ 2012年度精密工学会春季大会, 水溶性加工液代謝システムに関する研究-繰り返しリサイクルした加工液のシステム運用-, 2012年3月15日.
- ⑥ 2011年度精密工学会秋季大会, 水溶性加工液の濃度モニタリングセンサーの開発, 2011年9月21日.
- ⑦ 2011年度精密工学会秋季大会, 水溶性クーラントのサービスマネジメントシステムに関する研究, 2011年9月21日.
- ⑧ 精密工学会 2011年度春期大会, 水溶性加工液代謝システムに関する研究(界面活性剤処理工程自動化に関する要素技術開発), 2011年3月16日.
- ⑨ 日本機械学会第8回生産加工・工作機械部門講演会, 水溶性加工液代謝システムに関する研究(アミンフリー加工液のリサイクル使用), 2010年11月19日.
- ⑩ 日本機械学会第8回生産加工・工作機械部門講演会, 食品添加物を利用したオイルフリークーラントに関する研究, 2010年11月19日.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 浮上油回収方法および浮上油回収装置

発明者: 近藤康雄

権利者: 鳥取大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2010-174464

出願年月日: 2010年8月

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://kousakusangaku.jmtba.or.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 康雄 (KONDO YASUO)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50304241