マイクロバブルを活用した 水溶性加工液の清浄化技術*

Purification Method of Water-Soluble Coolant Utilizing Microbubbles

二ノ宮進一** 岩井 学*** 鈴木 清**

Shinichi NINOMIYA, Manabu IWAI and Kiyoshi SUZUKI

Key words

water-soluble fluid, coolant purification, microbubbles, ultrasonic waves, PGA flocculation, anti-bacteria, minute swarf

1. 緒 言

近年、機械加工に用いられる加工液は、環境への配慮、引火防止およびコスト面などから水溶性加工液が使用され、特に研削加工では広く用いられている。一方、95%以上が水である水溶性加工液は、腐敗しやすいことが問題視されており、特に夏季の工場内の悪臭は、訪問者への企業イメージの低下につながることもあるため、無視できない状況である。しかしながら、環境への配慮から防腐剤等の乱用はできない。使用後の加工液は、産業廃棄物として処理されるが、焼却処理が難しい水溶性加工液は、一般に油性加工液と比較して処理費用が高く、可能な限り長く循環使用できることが望ましい。また、精密加工では、加工液中の微細切り屑や機械油などの分離作業が欠かせず、高価で特殊な過装置等が必要となる場合も多く、多大な労力が必要である。

著者らは、除去加工用加工液に直径 20~50 μm の微細気泡を混入したマイクロバブルクーラント (MBC) 法を提案し、穴開け加工、旋削加工および研削加工において工具寿命が向上することを明らかにしている^{1)~3)}。なお、マイクロバブル (MB)・マイクロナノバブル (MNB) は、湖沼の水質改善や部品の洗浄など、幅広い分野で効果を発揮することが知られている^{4)~6)}。この性質を利用して、マイクロバブルで加工液自体を浄化させるという二次的な効果が得られることを明らかにしてきた⁷⁾。

ここでは、著者らが取り組んできたマイクロバブルを活用した水溶性加工液の清浄化技術について解説する^{7)~11)}。マイクロバブルの特性を活かして、加工液中の微細な切り屑や脱落砥粒等を取り除き、さらに、液の腐敗要因である細菌類やその死骸等までを積極的に除去する方法をいくつか紹介する。

2. マイクロバブルクーラントおよび発生装置

マイクロバブルクーラントは、加工機械に標準装備の給水ポンプを使用して、クーラントタンク内にマイクロバブルを発生させるだけなので、装置のシステム構築が容易かつ安価である。以下にマイクロバブル自体の特徴⁵⁾を列挙すると、まずは、通常の泡と比較して浮上速度が極めて遅く、単一気体のままで水中に長時間とどまり、その寿命は比較的長いことが挙げられる。電氣的帯電をしているため、液中懸濁物質に対する吸着・凝集効果をもつ。また、物理的な刺激を与えることで圧壊することができ、その結果、超高压で超高温な領域 (ホットスポット) を形成する。さらに、自己加圧効果によるバブル圧壊時のフリーラジカルの発生やオゾンなどの利用により、除菌効果をもつことなどが知られている。壁面付近を流れる流体の乱流制御作用があり、摩擦抵抗の低減効果をもつともいわれている。

マイクロバブルの発生方法としては、旋回流方式、加圧溶解方式、オリフィスやベンチュリ管方式、超音波利用、微細孔フィルタ利用など、多くの方式^{4)~6)}が存在するが、主に本用途では、工作機械標準ポンプのような小型の給水ポンプを利用するだけで、簡便かつ低コストでマイクロバブルを発生できる 2 種類の方式 (ベンチュリ管方式、旋回流方式) のマイクロバブル発生装置を採用している (図 1、表 1)。水溶性加工液に対して、ベンチュリ管方式の場合は液中に溶け込んでいる空気のみを利用して、旋回流方式の場合はノズル後方から $Q_{\text{air}}=0.3 \text{ L/min}$ で自吸させてマイクロバブルを発生させた場合、いずれの装置でも、バ

(a) ベンチュリ管方式

(b) 旋回流方式

図 1 使用した MB 発生ノズルの外観

*原稿受付 平成 29 年 4 月 20 日

**正 会 員 日本工業大学 (埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)

***正 会 員 富山県立大学 (富山県射水市黒河 5180)

表 1 実験装置の仕様および条件

MBC 装置	ベンチュリ管方式 (試作装置)
	$\phi 50 \times 100$ mm, 吐出口径: $\phi 14$ mm, テーパー角: 9°
供給ポンプ	旋回流方式 (ナノプラネット)
	$\phi 35 \times 72$ mm, 吐出口径: $\phi 6.8$ mm
研削液	空気混入量 $Q_{\text{air}} = 0.3$ (1.6) L/min
	ソリュション (シタイル 9954, 1~2%, カストロール), 水道水 (東京都), タンク内研削液量: 20 L
供給条件	循環流量: $Q = 5$ L/min

図 2 CCD カメラによる MB の観察 (水道水, 旋回流方式)

図 3 MB の縮小および消滅 (水道水, 旋回流方式)

ブル径の平均値が約 $\phi 20 \sim 30 \mu\text{m}$ のバブルが多く発生する。

ピペットでシャーレにマイクロバブル混入液を注水して飽和させ、その水面を透明フィルムで蓋をして、ゆっくりと上浮するバブルを上部から CCD カメラで観察すると、マイクロバブルはゆっくりと上昇してフィルム下面で停留する (図 2)。後続で上昇してきたマイクロバブルは、先行したマイクロバブルと結合することなく、反発してとどまる。また、いくつかのマイクロバブルが自己加圧によって、ゆっくりと縮小し、最後は消滅する現象も観察された (図 3)。

3. マイクロバブルクーラントの除菌作用

マイクロバブルクーラントのもつ除菌作用について検討するため、いったん細菌を繁殖させた研削液を使って、何もしない場合、ポンプで循環させた場合、マイクロバブルを混入した場合についての細菌数の変化を調べた。研削液の希釈率は細菌が繁殖しやすいように通常よりも薄い 1% とした。加工液をしばらく大気中に放置して細菌を発生さ

図 4 MBC 中の細菌検出実験の流れ

(a) 放置した研削液に浸漬後 (b) ポンプのみで循環した液に浸漬後 (c) MBC 混入液に浸漬後

図 5 旋回流方式による細菌の繁殖状況
(水溶性研削液: 1%, $Q = 5$ L/min, 細菌検出器: バイオチェッカ, MB 混入時間: 30 min)

せているため、加工液中に混在している細菌は一般的な常在菌の一種であると思われる¹²⁾。実験では、それぞれの加工液中に一般細菌用検出器を浸漬したのち 37°C の恒温槽中に 24 時間放置した。細菌検出実験の流れを図 4 に示す。細菌の検出は、細菌の総数を簡易的にチェックできる一般細菌用検出器バイオチェッカを用いた。細菌検出器の浸漬位置は、加工液容器の高さの中間付近である。なお、本検出方法では細菌の種類までは特定できないが、ここでは細菌の繁殖を抑制できた場合を除菌 (消菌) と呼ぶ。

図 5 に、事前に細菌を繁殖させて放置した研削液、細菌の繁殖した液をポンプで 30 分間循環した液、さらには旋回流方式で細菌が繁殖した研削液中にマイクロバブルを 30 分間混入した液に、それぞれ一般細菌検出器を浸した後、24 時間恒温槽中で培養した後の細菌の残存状況を示す。赤い斑点が細菌の存在状況を示している。放置した研削液と同様に、ポンプのみで研削液を循環しただけでは、非常に多くの細菌の存在が確認された。一方、マイクロバブルを混入した後は、検出器に細菌はまったく検出されなかった。マイクロバブルを混入した後は、20 日後も細菌は見られず、除菌された状態であった。

また、研削液中へのマイクロバブルの発生による pH の低下が懸念されたが、いずれのサンプルでも経過日数に伴う pH の変化は僅少で、すべてが 9.0 付近を示していた。

図6 マイクロバブルによる加工液臭気の変化

4. マイクロバブルクーラントの消臭作用

臭気測定器 (XP-329ⅢR: 新コスモス電機) を用いて、細菌が混入した加工液から放出される臭いを測定した。加工液面から 50 mm 離れた位置での臭いの強さを臭気 LEVEL として比較した。センサの特性上、臭いの質 (良い匂い, 悪い臭い) は判断していない。マイクロバブルを混入する前, 混入直後, および混入後 1 時間後の臭気測定結果を図 6 (a) に示す。マイクロバブル混入直後で水温と臭気 LEVEL が共に増加したが、マイクロバブル混入後 1 時間放置した後では水温が混入前まで戻り、臭気 LEVEL が 60 から 20 程度に低下した。マイクロバブルによって細菌が減少して、臭気 LEVEL が低下していると思われる。実際に人間の嗅覚でも、不快な臭い成分が消えていることを確認した。

マイクロバブル混入直後の臭気 LEVEL が水温の上昇とともに増加したため、水温と臭気との関係を調査した。未使用の加工液 (2%) に対し、パイプヒータで加熱した加工液 (43°C) と常温の加工液 (16°C) とで臭気 LEVEL を比較した。その結果、加工液自体の臭いは、温度が 27°C 上昇したときに臭気 LEVEL が約 80 上昇することが確認できた (図 6 (b))。夏季の工場内等で加工液の悪臭が問題視されるのは、加工液が温度上昇して、細菌の繁殖が顕著になり腐敗しやすくなることに加え、腐敗臭自体も著しく増加することに起因すると考えられる。

さらに、著者らは、マイクロバブルとして混入させる気体の種類を、市販のイオン発生器から放出されるイオン混入空気を利用することによって、臭気レベルを効果的に減少させ得ることも示している¹³⁾。

5. マイクロバブルによる液中懸濁物質の浮選除去作用

著者らは、加工液の効果的な供給法について研究し、加工液の使用量を大幅に低減できるいくつかの方策 (フローティングノズル法, フレキシブル導液シート法等) を開発してきた¹⁴⁾¹⁵⁾。その結果、節水に加え、加工液タンクの省スペース化が可能になり、かつ循環使用中の加工液を清浄化するための労力を大幅に低減できるようになった。そこ

図7 MBCによる微細屑の吸着状況 (BaCO₃: 平均径 0.1 μm)

図8 MBC 研削液浄化システムの一例

で、加工液の清浄化法として、マイクロバブルを活用した浄化システムについて検討している。加工液中の微細な切り屑や脱落砥粒等を取り除き、さらに、水溶性加工液の腐敗要因である細菌類やその死骸等までを積極的に除去できる方法を紹介する。

加工液中に切り屑や機械油を投入したタンク内で、マイクロバブルを発生させると、液中に混入した微細切り屑や機械油が浮上し、液面に凝集する。マイクロバブルは、帯電効果で水中浮遊物に吸着する性質をもつため、加工液中の微細切り屑や機械油等を容易に分離できる。

油分などの不純物を含んだ液中にてマイクロバブルを発生させた後、図 2 と同様に CCD カメラで上部から観察すると、一部のバブルどうしが結合する現象が生じることが確認された。バブルが結合すると、バブル自体の体積が増加して浮力が増すため、水中浮遊物を液面に運ぶ作用が強くなる。擬似的な微細遊離砥粒・切り屑として炭酸バリウム (BaCO₃: 平均粒径 0.1 μm) 粉末を入れたビーカー内にマイクロバブルクーラントを注いで攪拌し、採取した液を CCD カメラで観察した結果、図 7 のように、ほとんどのバブルの周りに、炭酸バリウム粒子が吸着していた。なお、この浮遊物吸着作用は、その他の応用として、鏡面ポリッシング用スラリーの微細砥粒の分散性向上や凝集の抑制にも効果的である。

マイクロバブルクーラントによる水溶性加工液浄化システムの一例を図 8 に示す。オーバーフロー用タンクから加工液を間欠供給すると、追加した加工液は、タンク 2 の液面に浮遊した微細切り屑や機械油などと同時にタンク 3

図9 PGA凝集剤とマイクロバブルによる研削液浄化工程

へ飽和移動する。実際に簡易システムを試作した結果、容易に研削液の浄化が可能であることを確認した。また、オーバーフロー除去ではなく、簡易的な吸引装置で液面の不純物混入加工液を吸い取る装置も試作し、有効性を確認している。詳細は割愛するが、本技術の一部は実生産にも応用されている。

6. 凝集剤とマイクロバブルを併用した加工液浄化

その他の水溶性加工液の清浄化法として、PGA（ポリグルタミン酸）凝集剤とマイクロバブルを用いた浄化システムを提案している。フィルタを用いずに、かつ、懸濁物質の種類を選ばずに、加工液中の懸濁物質を99%以上の回収率で除去することが可能である^{7)~10)}。PGA凝集剤とマイクロバブルによる研削液浄化工程の概略を図9(a)~(d)に示す。工作機械内で加工に使用された後の水溶性加工液中には微細な切り屑と、砥石から離脱した遊離砥粒等が混在している。この液中にPGA凝集剤を投入して攪拌すると、凝集剤は、切り屑や砥粒を捕捉してフロックを形成する。磁性を有する凝集剤であれば、このフロックは脱磁可能なマグネットにより液中から容易に除去できる。加工された切り屑が鉄鋼材料の場合は、磁性をもたない凝集剤であってもフロックのマグネット吸着除去が可能である。このマグネット吸着除去で、加工液中のほとんどの懸濁物質が除去できるが、わずかに残存物質が滞在する。例えば、軟水の加工液でマグネット吸着除去すると90%弱の回収率で、残存物質は10数%である。これをマイクロバブルに吸着させて浮上させ、オーバーフロー除去することで、残存する懸濁物質の磁性の有無にかかわらず、かつ比重や体積が小さい物質であっても容易に液中から除去することが可能である。

図10 超音波重量マイクロバブル浮上実験方法と浮上速度（38 kHz）

7. 超音波重量マイクロバブル浮選浄化の提案

7.1 超音波重量によるマイクロバブルの浮上速度

マイクロバブル混入液に超音波重量（Ultra Sonic：US）すると、マイクロバブルが瞬時に消滅していく。これは、微細気泡に超音波を重量すると secondary Bjerknes forces¹⁶⁾によってバブルどうしが引きつけ合って集合し、見掛け上の体積が増加することで浮力が増して水面から大気へ開放されるためである。この性質を利用すれば、バブルの液中浮上速度が飛躍的に向上して、除去効率を向上させ得ると考えた。本研究で提案する技術は、図9(d)の浄化工程で、外部からマイクロバブルに超音波を重量させる方法である（図9(d')）。マイクロバブルを集合させ、積極的に懸濁物質を浮上させる。

超音波重量の有無によるマイクロバブルの液中浮上速度を実験的に求めるため、水を張った超音波洗浄器（38 kHz）の槽内に、供試加工液が入った容器の底部を浸漬させ、供試液内にマイクロバブルを充填した（図10）。マイクロバブルに超音波重量すると、加工液中のマイクロバブルの浮上速度は、超音波重量なし時の70倍以上になった。

超音波装置の振動スイッチをon/offした際のマイクロバブルの挙動を高速度カメラで撮影すると、超音波重量直後に直径 $\phi 30 \mu\text{m}$ 程度の微細気泡から、数百 μm 径の気泡に変化するものが現れた。超音波重量を継続（1秒後）すると、数百 μm 径の気泡がさらに集合し、一つの固まりになった。ここで、超音波振動をoffにすると、気泡の集合体は直ちに数百 μm 径の気泡に分裂して、拡散する。すなわち、超音波重量初期には、微細気泡のもつ負電荷の斥力（クーロン力）に泡の表面張力が打ち勝って結合し、数百 μm 径になった気泡は比較的強い負電荷に帯電しているため、気泡が集合しても合体せずに群をなす。これによって、加工液中の微細懸濁物質とバブルが引き付けられ、一緒に液面へ搬送する作用が強くなるので、液中懸濁物質を

図 11 超音波重畳マイクロバブルの凝集模式図

図 12 硬水に対する超音波重畳マイクロバブルの効果
(P 剤 + 砥粒 1 g + 切り屑 1 g, 液量 1 L, オーバーフロー 100 mL, 38 kHz)

容器外へ排出する作用が促進される (図 11)。なお、バブルが凝集するのは、本実験の超音波振動の場合、振動波形の腹の箇所である¹⁷⁾。

一方、あらかじめ大きな径の気泡を加工液に混入することも考えられるが、クーロン力 (斥力) が弱く、十分に懸濁物質に吸着する前に急浮上し、懸濁物質の捕捉率は低下してしまう。

7.2 超音波重畳マイクロバブルの加工液浄化作用

世界各国の水に対応すべく、軟水に比べて比較的残存物質が多く残る硬水の加工液で、磁性をもたない PGA 凝集剤 (P 剤) を用いて金属切り屑と砥粒を凝集させ、形成したフロックをマグネット吸着で液外に除去した後に、残存物質を超音波重畳 (38 kHz) マイクロバブルで浮選浄化した (図 12)。超音波重畳マイクロバブルを適用することで、液中の懸濁物質の残存量を示す SS 濃度は低下し、加工液中の懸濁物質の回収率が向上した。懸濁物質の回収率は、P 剤 1 g のときに 96.9%、同 2 g のときに 99.4% になった。マイクロバブルだけで浮選浄化するよりも、超音波振動をマイクロバブルに重畳することで、液中に残存する微細懸濁物質を積極的に浮選浄化できることを示した。

当然ではあるが、この超音波重畳マイクロバブルによる浮選浄化法は、水路を工夫することで 5 章で示したような凝集剤を用いないシステムにも利用できる。

8. 結 言

マイクロバブルを活用した水溶性加工液の清浄化技術について、著者らが行ってきた研究内容を中心に解説した。

その他の特徴として、マイクロバブルクーラントとして加工液を供給した場合、工作機械内や加工液タンク内部の壁面がきれいになっていることが確認できる。つまり、本報で示した加工液自体の清浄化のみにとどまらず、例えば研削砥石の目詰まり抑制や工作機械全体の洗浄作用も期待できる。現在は、マイクロバブルクーラントが加工の一次性能にもたらす効果の発現メカニズムの解明と、除去加工に適したマイクロバブルまたはマイクロ・ナノバブルの発生装置を兼ね備え、かつ加工点へ確実かつ安定的に供給する方法についての研究を行っており、近日中に成果を報告したい。

参 考 文 献

- 鈴木清, ニノ宮進一, 岩井学, 植松哲太郎ほか: マイクロバブルクーラントによる切削加工, 精密工学会秋季学術講演会講演論文, (2004) 101.
- 岩井学, ニノ宮進一, 植松哲太郎, 鈴木清ほか: マイクロバブルクーラントによる旋削加工, 精密工学会秋季学術講演会講演論文, (2006) 447.
- K. Suzuki, M. Iwai, S. Ninomiya, T. Shimizu et al.: Effect of micro bubble coolant on grinding with cBN wheel, International Symposium on Advances in Abrasive Technology 2007, USA, Abrasive Technology, **10** (2007) 25.
- トータルビジョン研究所: マイクロ・ナノバブル応用商品実用化動向/用途別潜在ニーズ/研究開発動向実態調査, (2004) 1.
- 高橋正好ほか 37 名: 微細気泡の最新技術, NTS 出版, (2006) 6.
- 高木周: マイクロバブルを用いたさまざまな応用技術, 日本機械学会誌, **109**, 1049 (2006) 299.
- ニノ宮進一, 清水俊晴, 岩井学, 鈴木清: マイクロバブルクーラントの研削液浄化効果, 砥粒加工学会誌, **56**, 7 (2012) 465-469.
- ニノ宮進一, 岩井学, 鈴木清: 研削加工高度化のための周辺技術—マイクロバブルクーラントおよび新しい研削液供給技術について, 機械と工具, **53**, 7 (2009) 10-16.
- S. Ninomiya, M. Iwai and K. Suzuki: Filter-Less Purification of Grinding Fluid by Using PGA Based Flocculant, Advanced Materials Research, **325** (2011) 213-218.
- S. Ninomiya, K. Komuro, M. Iwai and K. Suzuki: Filter-less purification of a water-soluble coolant by using PGA based flocculants and microbubbles, Advanced Materials Research, **565** (2012) 412-418.
- ニノ宮進一, 野地駿輔, 岩井学, 鈴木清: 超音波重畳マイクロバブルを利用した水溶性加工液の浄化に関する研究, 砥粒加工学会学術講演会講演論文, (2013).
- K. Nishikawa: The Mechanism of Bacteria Inactivation by Positively and Negatively Charged Cluster Ions, Sharp Technical Journal, **94** (2006) 20 (in Japanese).
- S. Ninomiya, M. Iwai, K. Takano, T. Shimizu and K. Suzuki: Odor suppression of putrid water-soluble coolant using home ion generator, Advanced Materials Research, **55**, 2 (2010) 441-446.
- ニノ宮進一, 岩井学, 鈴木清: 節水と高効率・高精度加工を両立する新加工液供給法, 砥粒加工学会誌, **55**, 2 (2011) 78-81.
- ニノ宮進一, 鈴木清, 白石陽一, 岩井学, 清水俊晴, 植松哲太郎: フレキシブル導液シート法による研削液供給法の開発—第 1 報 フレキシブル導液シート法の提案と基本研削液供給性能—, 精密工学会誌, **72**, 8 (2006) 1006-1011.
- 例えば, 藤川貴彬, 吉田憲司, 渡辺好章: 超音波駆動された二気泡間に働く secondary Bjerknes force に関する実験的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, US, **108**, 19 (2008) 45-50.
- D. Kobayashi, Y. Hayashida et al.: Effect of ultrasound on agglomeration and redistribution of microbubbles, Proceeding of

symposium on ultrasonic electronics, **30** (2009) 143-144.

二ノ宮進一

1999年職業能力開発総合大学校工学研究科修士課程修了。博士（工学）富山県立大学。1994年雇用・能力開発機構講師。2007年武蔵工業大学工学部機械工学科講師を経て、2009年日本工業大学工学部機械工学科准教授。2016年より同大学教授。現在に至る。

岩井 学

2002年富山県立大学大学院工学研究科機械システム工学専攻後期課程修了。博士（工学）。2003年富山県立大学工学部助手。2008年同大学講師。2013年同大学工学部知能デザイン工学科准教授。現在に至る。

鈴木 清

1968年東京理科大学第2理学部物理学科卒業。1986年工学博士（東京大学）。1970年東京大学生産技術研究所文部技官。1988年同大学文部教官講師。1988年日本工業大学工学部システム工学科助教授。1993年同大学教授。2012年同大学名誉教授。現在は鈴木清新加工技術研究所代表。