技術論文

研削加工へのウルトラファインバブル適用

Application of Ultrafine Bubbles to Grinding Processes

畑　山　陽　介　・　水　谷　正　義
HATAYAMA Yousuke・MIZUTANI Masayoshi

要　　旨

ウルトラファインバブル（以下UFB）は，直径1μm以下の微小気泡である．近年では，研削加工のクーラントにUFBを含むクーラント（以下UFBクーラント）を用いることで，研削性能や加工精度が向上することが多数報告されている．しかし，その効果発生メカニズムは解明されていない．既存研究では，UFBクーラントは通常のクーラントよりもぬれ性が良いため研削性能が変化すると考察している．UFBを含むことでクーラントの液特性そのものが変化するのであれば，UFBクーラントを使用して研削した場合，どんな被削材でも効果が得られるはずである．しかし，UFBの効果が得られないケースも存在する．よって，ぬれ性はUFBの効果発生の主要因ではないと考えられる．UFBの一般的な特徴として，崩壊する際にOHラジカルが発生することが知られており，相手材の酸化が促進すると考えられる．本報では，被削材表面の酸化の視点から，研削加工におけるUFBの効果発生メカニズムを検討・考察する．UFB水の場合，気体種類が変わると被削材表面の酸化度合いが異なることがわかった．また，生成される酸化物の組成が異なることがわかった．さらに，研削加工を模擬した摩擦・摩耗試験を行い，UFBクーラントの気体種類により摩擦係数に差が生じることがわかった．UFBクーラントの気体種類は研削性能に影響を及ぼし，その傾向は摩擦・摩耗試験の結果と整合した．UFBによる被削材表面の酸化が摩擦・摩耗特性に影響し，その結果，研削特性が変化していることが示唆された．

Abstract

Ultrafine bubbles（UFBs）are microbubbles with diameters below 1 μm. Recent studies have shown that using a coolant containing UFBs（UFB coolant）in grinding processes can improve grinding performance and machining accuracy. However, the mechanism behind this effect remains unclear. While some studies attribute the improved performance to the superior wettability of UFB coolant compared to conventional coolant, this alone cannot fully explain the effects, as there are instances where UFB coolant does not provide significant benefits.

One notable property of UFBs is their ability to generate hydroxyl radicals（OH）upon collapse, which may promote oxidation on workpiece surfaces. This study explores the role of surface oxidation in the grinding performance of UFB coolant. Experiments revealed that the degree of surface oxidation and the composition of oxides vary depending on the type of gas used in UFB water. Friction and wear tests further demonstrated that the gas type in UFB coolant affects the coefficient of friction, which aligns with differences in grinding performance. These findings suggest that the oxidation induced by UFBs influences the friction and wear characteristics of workpieces, leading to changes in grinding performance.

1 緒言

ファインバブルは直径100μm以下の微小気泡の総称で，直径が１μmより大きい気泡はマイクロバブル，直径が１μm以下の気泡はUFBと呼ばれており，その名称はISOで定義されている[1]．

UFBの特徴の１つとして，無色透明で水中に長時間残存することが挙げられ，この特徴を利用して，洗浄，殺菌，水質浄化などの分野で実用されている[2]．近年では，研削加工にUFBを含むUFBクーラントを用いることで，研削性能および加工精度の向上が多数報告されている[3)~8)]．これらの研究では，効果発生メカニズムとして，主にぬれ性の観点から考察・検討がなされている．小林らは通常のクーラントに対して，UFBクーラントは接触角が[6]，渡辺らは滑落角と表面張力が低下することを報告している[7)8)]．

一方，著者らは，通常のクーラントとUFBクーラントのぬれ性にはUFB有無による有意差がないことを示し，その場合でも研削特性が変化することを確認している[9]．すなわち，この結果を踏まえると，研削加工でのUFBの効果発生にはぬれ性以外にも別の要因が影響していると考えられ，著者らはそれがUFBの崩壊に起因するものだと考えている．

UFBが崩壊する際，内部が断熱圧縮により高温・高圧状態となり，周囲の水分子が破壊され強力な酸化剤であるOHラジカル[注１)]が発生するほか[10)11)]，周囲の物体に高圧エネルギーが放出されることが知られている．著者らはこの現象に着目し，精製水およびUFB水に炭素鋼を浸漬した場合，UFB水のほうが被削材表面の酸化が促進すること，また，生成された酸化物の摩擦特性にはUFB有無で差があることも確認している[9]．

以上の知見を踏まえ本報では，被削材表面の酸化の観点から研削加工におけるUFBの効果発生メカニズムを検討・考察した．具体的には，気体種類によりUFBの崩壊のしやすさが異なり，そのUFB崩壊が被削材に影響を及ぼすのであれば，気体種類により酸化の仕方が変化する可能性があるという仮説に基づき，まずは，気体種類の異なるUFB水やUFBクーラントに試験片を浸漬・静置し，表面性状の変化を観察した．次に，生成された酸化物の組成変化と，それが材料の摩擦・摩耗特性に及ぼす影響を調べた．さらに，実加工を想定し，未処理（UFB水・UFBクーラントへの浸漬・静置なし）の試験片をUFBクーラントに浸漬した状態で摩擦・摩耗試験を行い，その変化を調べた．最後に，一般砥石による平面研削実験を行い，仮説の妥当性を検証した．

注１）酸素原子と水素原子からなる反応性が非常に高い化学種．酸化反応を引き起こす力が強い物質．

2 実験方法

2.1 UFB生成条件

本報では，カヤバが独自開発したUFB生成装置を使用した[9)12)]．UFBの生成原理にはさまざまな種類があり[13]，本装置は高密度大流量化を図るため，スタティックミキサ方式をベースに，回転せん断方式を採用している．本報で使用した評価液は，①精製水，②UFB水，③精製水または水道水希釈クーラント，④UFBクーラントの計４種類である．クーラントは水溶性のシンセティックソリューションタイプで，濃度2.5％である．②は精製水をベースにUFBを生成したものである．③は，浸漬および摩擦・摩耗試験では精製水，研削実験では水道水で所定の濃度となるように希釈したクーラントを，気体を送入せずにUFB生成装置内を循環（攪拌）させて作製したものである．④は，③に気体を送入し，UFB生成処理したものである．表１にUFB生成条件を示す．ここで，気体濃度は液体流量に対する気体流量（標準状態での体積流量）の比率，パス回数は液体の循環回数である．UFB生成のパス回数は次の理由で表１のように設定した．水は後述のUFB密度が約10億個/mLとなるように360回，クーラントは実加工において研削比の改善を確認している40回とした[9]．気体の種類は，以下の理由で３水準設定した．Airは，広く利用されており実用性が高いためである．O_2は，積極的に相手材を酸化させるにはO_2リッチな環境が適していると考えたためである．CO_2は，既存研究においてUFB生成後30分で密度が90％減少し，崩壊しやすいことが確認されている[14]．UFB崩壊時にはOHラジカルが発生するため[10)11)]，相手材の酸化が促進されると考えたためである．

UFB水の初期密度は，Air-UFBが11.4億個/mL，O_2-UFBが9.6億個/mL，CO_2-UFBが1.1億個/mLである．同一条件でUFBを生成してもCO_2は他の気体の約１/10となる．これは，CO_2-UFBは生成直後の段階で崩壊しやすく，気泡として安定して長期間存在できないためと考えられる．

UFB密度の測定方法にはさまざまな手法があり[15]，本報では粒子トラッキング解析法（NanoSight NS300 NTA3.4，マルバーン）を使用した．この方法では，液中に浮遊する粒子がレーザ照射を受けて発する散乱光を対物レンズで捉えて動画撮影し，画面上のすべての粒子をトラッキングし，ブラウン運動速度から粒子径と粒子数を計測できる[16]．なお，この測定方法では，測定原理上，クーラント自体に

表１　UFB生成条件

液体	種類	水	クーラント
気体	種類	Air，O_2，CO_2	
	濃度	2.5%	
円板回転数		2400rpm	
パス回数		360	40

含まれる粒子とUFBを区別して認識できない．そのため，UFBクーラント中に含まれるUFBの数を定量的に把握できないことに留意が必要である．

2.2　試験片

本報で使用した試験片の材質はS50C（後述の腐食度およびXPSによる成分分析はS45C）で，焼入れ焼戻し処理を行い，硬さは504.1～591.3HV（N＝10測定）となっている．寸法は縦50㎜×横50㎜（厚み10㎜）で，浸漬および摩擦・摩耗試験にはこれを15㎜×15㎜に切断して使用した．浸漬および摩擦・摩耗試験の評価面は研削し，切削痕や酸化スケールを除去してから使用した．研削後の表面粗さはR_a 0.36～0.48μm（N＝10測定）である．

2.3　浸漬試験

UFBの崩壊と気体の種類が試験片表面の酸化に及ぼす影響を調べるため，各種評価液に試験片を浸漬し，その変化を目視観察した．図１に浸漬試験の概略図を示す．ガラス瓶に評価液を400mL入れ，試験片の評価面が上となるよう浸漬，静置した．５日間にわたって試験片表面を目視観察した．表面が酸化した試験片は，その酸化物の組成と腐食度を評価した．

酸化物の組成は，X線分光分析法（以下，XPS）[注２）]で分析した[17]．組成の分析にはXPS分析装置（Thete Probe，Thermo Scientific）を使用した．

腐食度は金属が一定時間あたりにどれくらい腐食したかを示す指標である．酸化の深さ方向への進行を確認するために腐食度を評価した．腐食の種類によっては浸食が局所的に進み，厚みの減少がわかりにくいため，質量の減少量を基準とすることが一般的である．腐食度は以下の式で求められる[18]．

$$W=\frac{M_1-M_2}{S\times T} \quad (1)$$

ここで，W：腐食度［mdd］，M_1：試験前の試験片質量［mg］，M_2：試験後の試験片質量［mg］，S：試験片の表面積［dm^2］，T：試験日数である．腐食度が大きいほど腐食が進行していることを示す．本報では，浸漬から３日後に腐食度を評価した．

注２）試料にX線を照射した際に発生する光電子を検出・分光し，材料表面の元素の定性分析や表面の化学組成や化学結合状態を分析する方法．

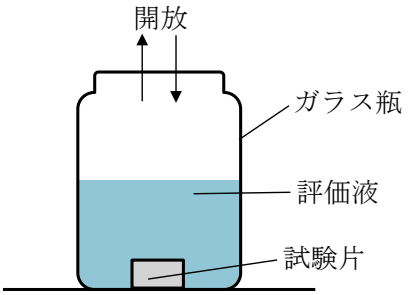


図１　浸漬試験の概略図

2.4　摩擦・摩耗特性評価

研削加工への適用を想定し，被削材と砥粒の摩擦・摩耗現象を解明するための摩擦・摩耗試験を行った．同試験にはボールオンディスク型の試験機を使用した．図２に実験系を示す．実験には摩擦摩耗試験機（FPR-2000，レスカ）を使用した．同図に示すように，試験片を受け皿に取り付け，受け皿はテーブルに固定されている．テーブルが左右に直線往復運動し，試験片とボールを摺動させる．この時，ボールと試験片間の摩擦力により，ボールは摺動方向に引っ張られる．この力を試験機内のロードセルで測定検出し，おもりの重さ（印加荷重）で割ることで摩擦係数を算出する．ボールは，後述の研削実験で使用する砥石の砥粒に合わせてアルミナボールを使用した．

表２に試験条件を示す．同試験ではまず，生成された酸化物の特性を調べるため，2.3節で述べた浸漬試験で得られた各試験片を使用し，ドライ環境下で試験を行った．次に，実加工を想定し，UFBによる試験片の酸化と材料除去の関係と，それが摩擦・摩耗現象に及ぼす影響を調べるため，何も処理を行っていない試験片を各評価液中に浸漬しながら摩擦・摩耗試験を行った．なお，試験後の摩耗痕はデジタルマイクロスコープ（VHX-5000，キーエンス）で観察し，撮影画像から摩耗痕面積を求めた．

2.5　研削実験

浸漬および摩擦・摩耗試験で検討した研削加工におけるUFBの効果発生メカニズムの仮説の妥当性を検証するため，実加工で研削性能を評価した．表３に研削条件を示す．研削盤は精密平面研削盤（EPG-63S，ナガセインテグレックス）を，砥石はWAレジノイド砥石（WA100M8B，三井研削砥石）を使用した．切込量と研削速度は２水準設定し，以降，切込量0.004㎜・研削速度83.3㎜/sの組み合わせを加工負荷小条件，切込量0.010㎜・研削速度104.2㎜/sの組み合わせを加工負荷大条件とする．これは，UFBによる酸化層は切込量に対して非常に薄いと考えられ，酸化スピードと材料除去スピードのバランスで

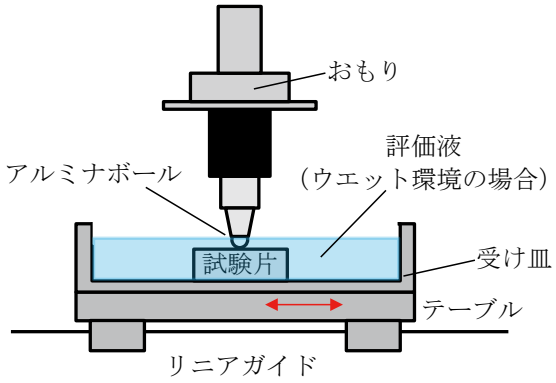


図 2　摩擦・摩耗試験の実験系

表 2　摩擦・摩耗試験の試験条件

試験環境	ドライ	ウエット
往復幅	5 mm	
線速度	5 mm/s	
おもりの重さ	100g	
試験時間	1800s	5400s

表 3　研削条件

項目		単位	加工負荷小	加工負荷大
砥石	寸法	[mm]	$\phi 300 \times 30$	
	周速度	[m/s]	28	
切込量		[mm]	0.004	0.010
研削速度		[mm/s]	83.3	104.2
取代		[mm]	0.8	
研削回数		[回]	200	80

UFBによる効果に差があるかどうかを確認するためである．

図 3 に研削抵抗測定の模式図を示す．研削抵抗は多成分動力計（9257B，KISTLER）で測定した．法線抵抗F_nと接線抵抗F_tは，式(2)および(3)で表される[19]．

$$F_n = C_p \left(\frac{\pi V_W t b}{2 V_G} \right) \tan \alpha \qquad (2)$$

$$F_t = C_p \left(\frac{V_W t b}{V_G} \right) \tan \alpha + \mu F_n \qquad (3)$$

ここで，V_W：研削速度，t：切込量，b：研削幅，V_G：砥石周速度，μ：砥石と被削材間の摩擦係数，α：砥粒半頂角，C_p：比研削エネルギーである．F_nをF_tで割った値は二分力比となる．二分力比の減少は切れ味や食いつきの良化，増加は摩擦係数の低減を示す．

図 4 に研削比測定の模式図を示す．研削比は除去体積を砥石減耗体積で割った値で，研削比の増加は砥石摩耗量の低減を示す．図 4 に示すように，砥石幅よりも幅の狭い被削材を研削すると，砥石使用面

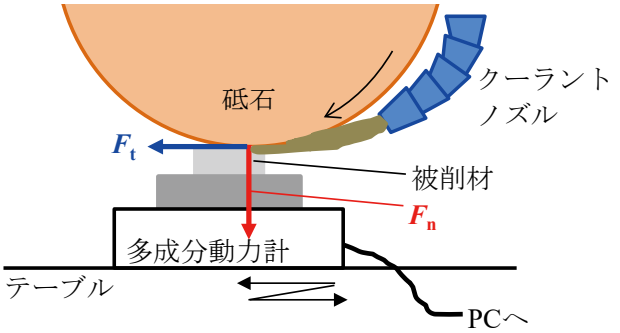


図 3　研削抵抗の測定系

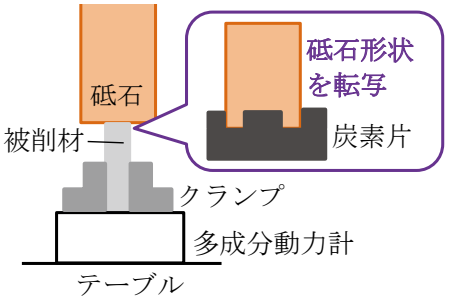


図 4　研削比の測定系

に段差ができる．この段差を炭素片に転写させ，転写面のプロファイルから段差を測定し，砥石の減耗体積を算出した．

3　結果および考察

3.1　UFBによる試験片表面の酸化挙動

表 4 に水のグループ（精製水，UFB水）に 1 日浸漬した試験片の外観写真を示す．いずれも表面に錆が発生し，酸化していることが目視で確認できる．このとき，気体種類による外観の違いに着目すると，精製水とAir-UFB水は類似の変化を示しているが，精製水に比べて，Air-UFB水のほうが酸化されている領域は若干広くなった．O_2-UFB水は試験片のエッジ付近にわずかに錆が発生するものの，ほとんど酸化されなかった．これは，O_2-UFBの崩壊のしにくさ，すなわち，安定性に起因するものであると考えられる．つまり，O_2-UFBは水中で安定的に存在し，崩壊が起きにくいため[20]，崩壊に起因して生じる酸化が起きにくかったのではないかと考えられる．また，O_2-UFB水中の高い溶存酸素量も影響していると考えられる．溶存酸素量が高い環境下では，鋼は不動態化が進み，腐食速度が大きく低下する[21]．O_2-UFB水生成中の溶存酸素量を測定した結果，最大で約38mg/Lであった．これは，飽和溶存酸素量の約4.5倍である．すなわち，高濃度の溶存酸素が試験片表面の不動態化を促し，材料表面の腐食（酸化）を抑

表 4　試験片の外観（水グループ，1 日浸漬後）

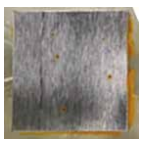
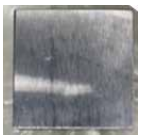
精製水	Air-UFB水	O_2-UFB水	CO_2-UFB水
			

表 5　試験片の外観（クーラントグループ，5 日浸漬後）

精製水希釈クーラント	Air-UFB クーラント	O_2-UFB クーラント	CO_2-UFB クーラント
			

制したと考えられる．

これらに対して，CO_2-UFBは他の気体とは全く異なる変化を示した．精製水とAir-UFB水，あるいはO_2-UFB水に浸漬した試験片には部分的に赤錆が発生しているのに対して，CO_2-UFB水に浸漬した試験片は全体が黒色を示していた．このことは，CO_2-UFBが崩壊しやすいという特徴を持ち[14]，相手材の酸化を促進させやすく，また，CO_2が水に溶解すると炭酸となり溶液は酸性を示すことに起因していると考えられる．これにより，試験片表面の酸化が促進されるとともに，特徴的な組成の酸化物が生成したと考えられる．

表 5 にクーラントのグループ（精製水希釈クーラント，UFBクーラント）に 5 日浸漬した試験片の外観を示す．いずれも目視でわかる酸化は見られない．これはクーラント自体の防錆効果が効いていると考えられる．したがって，クーラントの場合は単に浸漬・静置するだけでは酸化しないといえる．

3. 2　試験片の腐食度

図 5 にUFB水で酸化させた試験片の腐食度の測定結果を示す．図 5 中のエラーバーは，N = 3 測定の最大最小範囲を示している．精製水の腐食度を基準に取ると，各UFBの腐食度は，Air-UFBが2.4倍，O_2-UFBが1.0倍，CO_2-UFBが8.9倍となる．このことから，各UFBが本報で使用した試験片（S50C）の酸化を促進させていると考えられる．またこのとき，O_2-UFBの酸化面積は精製水よりも狭いが（表 4），精製水と同等の腐食度となっている．これは，O_2-UFBの場合，目視可能な表面の酸化は少ないものの，深さ方向には酸化が進行しているためであると考えられる．

3. 3　酸化物のXPS分析

図 6 にUFB水で酸化させた試験片の酸化物に関するXPSスペクトルを，図 7 に酸化物に関するスペクトルの成分比率を示す．図 6 のグラフの横軸は化学結合エネルギーを示しており，元素およびその化学結合状態によって固有の値を取る．図中のmeasuredは，実際に測定された生データで，試料から放出された光電子の強度を結合エネルギーに応じてプロットしたものである．backgroundは二次

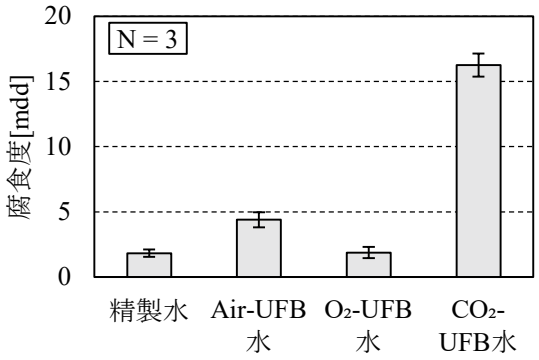
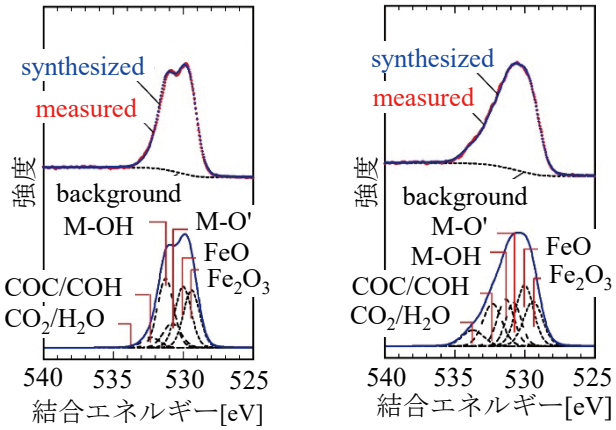
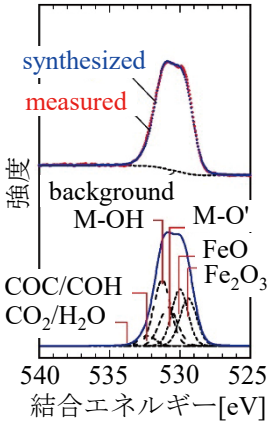


図 5　試験片の腐食度



（a）Air-UFB水　　（b）O_2-UFB水



（c）CO_2-UFB水

図 6　酸化済試験片の酸化物に関するスペクトル

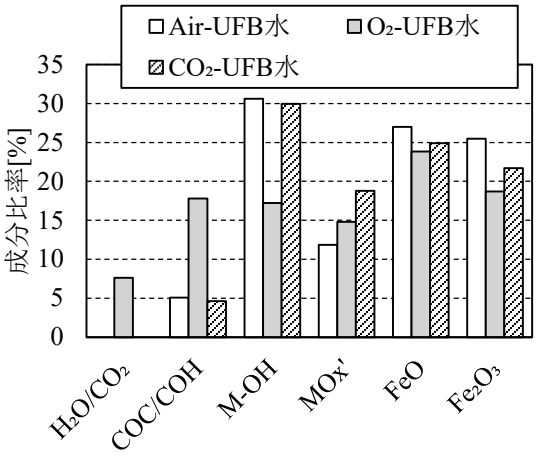


図7　酸化物に関するスペクトルの成分比率

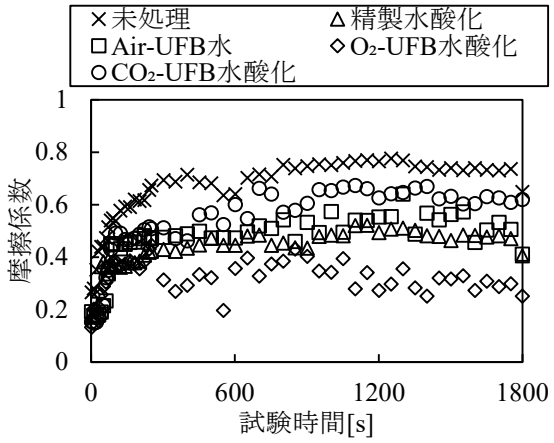


図8　酸化した試験片の摩擦係数

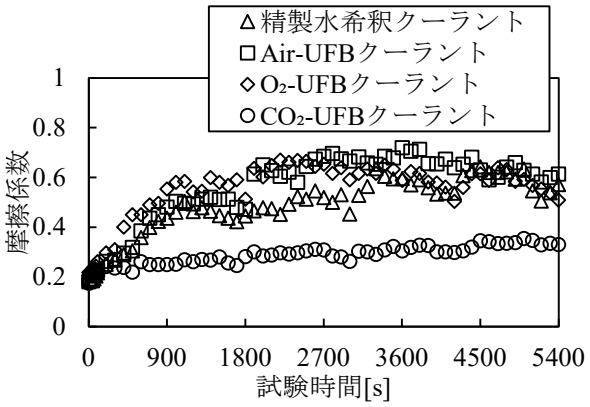


図9　未処理の試験片の摩擦係数

電子や散乱した電子による不要な信号を示している．synthesizedはmeasuredからbackgroundを除去し，ピークを複数のモデル関数に分解・合成した結果である．これにより，測定データのピークを再現しながら各元素や化学状態の寄与を分析する[22)23)]．

同図より，気体種類によりピーク形状や分離後の組成が異なっていることがわかる．具体的には，Air-UFBはFeOやFe_2O_3の割合が多い右上がりのスペクトル形状，CO_2-UFBは結合エネルギーの大きいM-OH'やMOx'の割合が多い右下がりのスペクトル形状となっている．なお，黒錆に関するFe 2pスペクトルも観察したが，UFBの気体種類によるスペクトル形状の差は見られなかった．UFBの気体種類により，試験片の酸化の仕方には目視可能な差があり，生成される酸化物の組成も異なることが確認された．

3.4　各種UFBにより生成された酸化物の摩擦特性

3.1節で生成された酸化物に対して摩擦・摩耗試験を行った．その結果を図8に示す．なお，試験は各水準につきN＝3～5行い，ばらつきが少ないことを確認したうえで，その中の代表的なデータを示している．同図より，未処理の試験片に対して，各種UFBにより酸化された試験片はいずれも摩擦係数が小さくなることがわかる．その摩擦係数は，CO_2-UFBがもっとも高く，精製水とAir-UFBが同等，O_2-UFBがもっとも小さい値を示した．これは，O_2-UFBは目視ではほぼわからないほどの狭い酸化面積において（表4），深さ方向へ深い酸化が進むことにより，摩擦係数が小さくなったと考えられる．したがって，ドライ条件の摩擦・摩耗試験ではO_2-UFB水中で生成された酸化物がもっとも小さくなるということがわかった．

3.5　実加工を模擬した摩擦特性

図9に，実加工を模擬し精製水希釈クーラントおよび各種UFBクーラントに未処理の試験片を浸漬しながら行った摩擦・摩耗試験の摩擦係数の推移を示す．3.4節同様に，試験は各水準につきN＝3～5行い，その中の代表的なデータを示している．浸漬・静置するだけでは目視可能な酸化は見られないが（表5），図9より，摩擦係数には気体種類による顕著な差が現れた．浸漬しながらの摩擦・摩耗試験では，CO_2-UFBの摩擦係数がもっとも小さく，酸化物自体の評価でもっとも摩擦係数が小さいO_2-UFB（図8）は，浸漬しながらの試験ではAir-UFB同等となった．

図10に摩耗痕の一例，図11に摩耗痕面積の測定結果を示す．図11中のエラーバーは，N＝3測定の最大最小範囲を示している．有意水準5％で検定を行ったところ，摩耗痕面積には有意差が認められた．よって，この実験系ではUFBクーラントの摩耗痕面積は精製水希釈クーラントと同等かやや大きくなることが確認された．これは，UFBによる酸化で材料が除去されやすくなったと考えられる．

3.1節および本節の結果を踏まえ，クーラント中でUFBの効果が発生するメカニズムを考察する．クーラントグループの評価液に試験片を浸漬・静置しただけでは，外観に目視可能な変化は生じないも

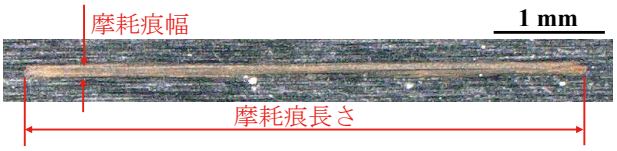


図10　摩耗痕の一例（Air-UFBクーラント）

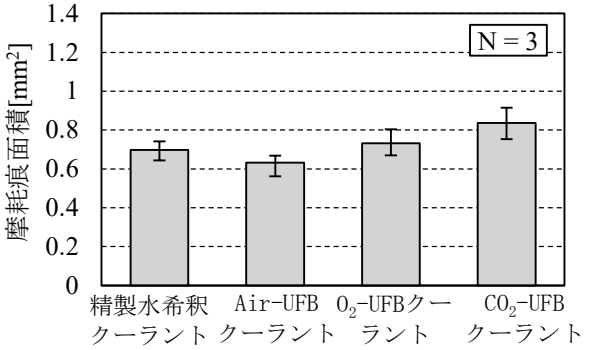
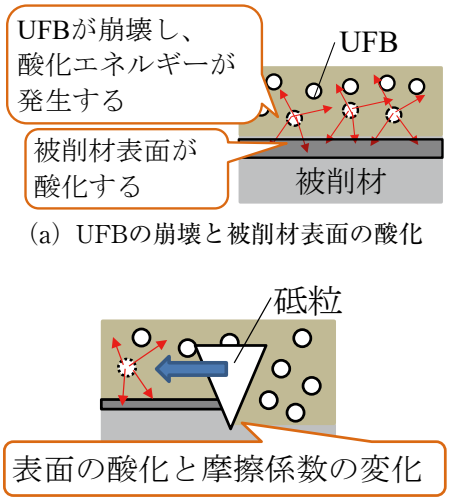


図11　摩耗痕面積の測定結果



（a）UFBの崩壊と被削材表面の酸化

（b）被削材表面の酸化による摩擦係数の変化

図12　研削加工におけるUFBの効果発生メカニズムの概念図

のの，摩擦・摩耗試験では気体種類による顕著な差が現れたことから，クーラント中でUFBの効果を得るためには，加工点近傍で攪拌されるような動きが必要と考えられる．そこでの動的刺激でUFBの崩壊が促進され，試験片表面の酸化が継続的に起こり，摩擦・摩耗特性が変化したと考えられる．

以上の考察を模式的にまとめたのが図12である．加工点近傍では，砥石の高速回転などの影響でUFBが崩壊する．このUFB崩壊によるOHラジカルの発生が被削材表面を酸化させ，表面性状が変化する（図12(a)）．とくに研削中の被研削面は材料除去により表面エネルギーが高くなり[24]，表面は酸化されやすい状態となっている．研削加工は被削材表面と砥粒の摩擦・摩耗現象であり，UFBの崩壊で被削材表面が酸化し，摩擦・摩耗特性が変化した結果，研削特性が変化すると考えられる（図12(b)）．

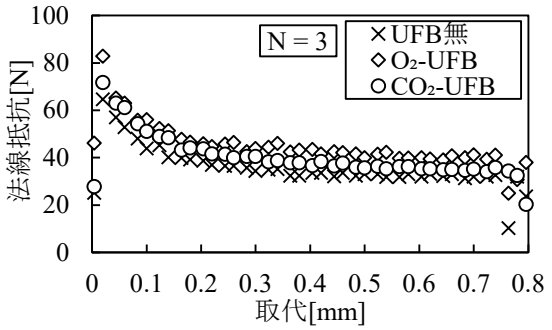
3.6　UFBクーラント使用下の研削特性

本節では，3.4節および3.5節で特徴的な摩擦・摩耗特性となったO_2-UFBクーラントおよびCO_2-UFBクーラントを用いて平面研削実験を行った．

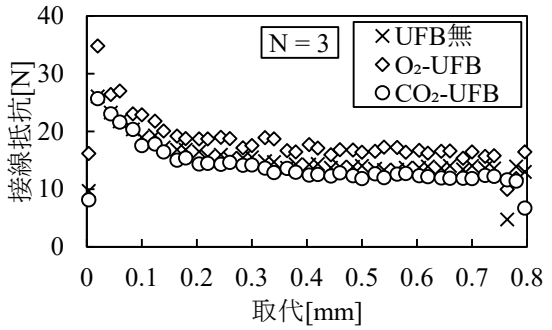
図13および図14に研削抵抗の測定結果，図15に二分力比の算出結果を示す．加工は各水準につきN＝3行い，その平均値を示している．加工負荷小条件の場合，法線抵抗はO_2-UFB＞CO_2-UFB＞UFB無，接線抵抗はO_2-UFB＞UFB無＞CO_2-UFBとなる（図13）．加工負荷大条件の場合，取代0.1㎜以降の法線抵抗はUFB無＞O_2-UFB＞CO_2-UFB，接線抵抗はUFB無＞O_2-UFB＞CO_2-UFBとなる（図14）．二分力比は，どちらの研削条件ともCO_2-UFB＞O_2-UFB≒UFB無となることから（図15），砥石と被削材間の摩擦係数の低減を示唆している．このことは，ウエット条件での摩擦・摩耗試験の結果とも整合している（図９）．

図16に研削比の測定結果を示す．図16中のエラーバーは，N＝３測定の最大最小範囲を示している．研削抵抗は気体種類によって低減する場合と増加する場合があったが，研削比はいずれの条件ともUFB無に対して改善した．加工負荷小条件では気体種類による差はなく，O_2-UFB，CO_2-UFBともUFB無に対して1.3倍となる．一方，加工負荷大条件では，O_2-UFBは1.2倍，CO_2-UFBは1.7倍となり，CO_2-UFBの効果が大きい．この理由は生成される酸化物の違いによるものだと考えられる．金属材料表面に形成される錆である酸化鉄は，硬さは大きいが[25]，脆くて剥がれやすい性質がある．そのため，UFBによる酸化で被削材表面は除去されやすい状態となっていると考えられる．O_2-UFBで生成される酸化物は摩擦係数が大きく砥粒が被削材によく食いつき，見かけ上はドレス直後の目が立った状態に近く，切れ味が良いと考えられる．一方，CO_2-UFBで生成される酸化物は摩擦係数が小さい．そのため，砥粒の摩滅が抑制され，研削比が改善したと考えられる．

また，気体種類により摩擦係数の大小関係がドライ条件とウエット条件で異なり，研削比の改善度合いに差が生じた理由について次のように考察する．これは，気体種類によるUFBの崩壊のしやすさに起因していると考えられる．浸漬試験のように時間を掛けて表面を酸化させるのであればO_2-UFBが適していると言えるが，研削加工中のように短時間で連続的に被削材表面を酸化させる場合にはCO_2-UFBを使用することが適していると言える．具体的には，

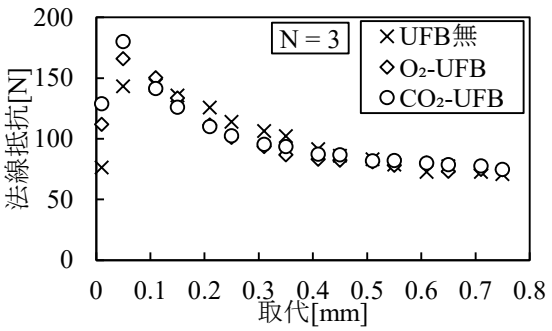


（a）法線抵抗

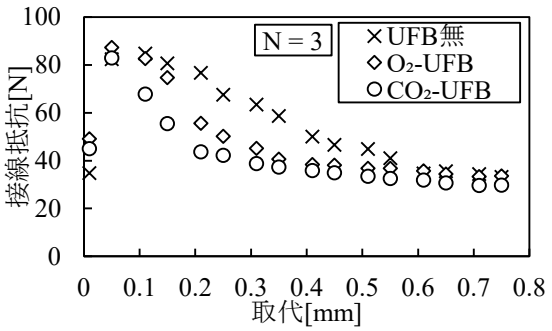


（b）接線抵抗

図13　研削抵抗測定結果（加工負荷小）



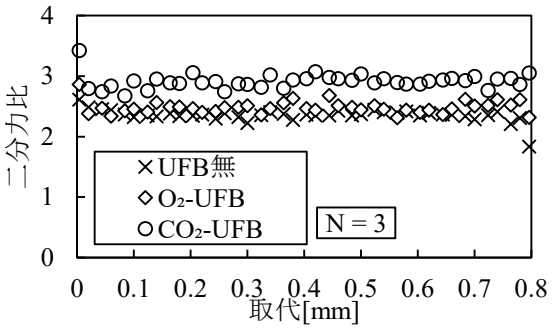
（a）法線抵抗



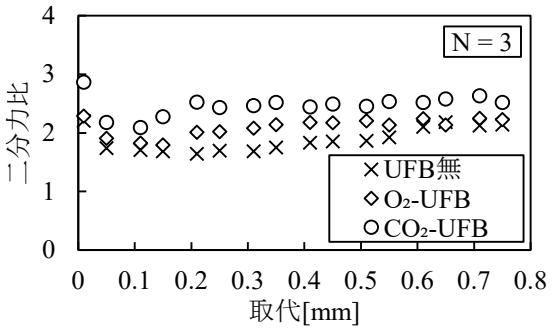
（b）接線抵抗

図14　研削抵抗測定結果（加工負荷大）

摩擦係数の低下により研削抵抗のうちの接線抵抗が低下し，被削材が除去されやすくなることにより研削比が改善すると考えられる．



（a）加工負荷小



（b）加工負荷大

図15　二分力比の算出結果

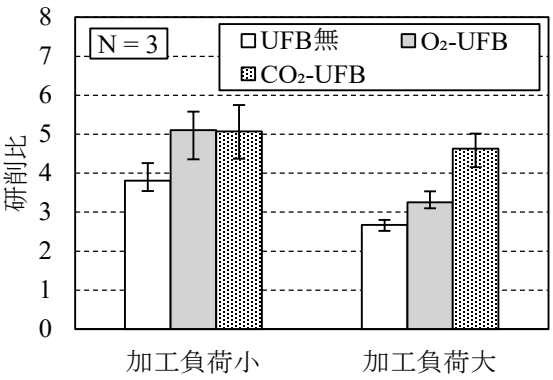


図16　研削比の測定結果

4　結言

本報では，UFBの崩壊による被削材表面の酸化の観点から，浸漬試験と摩擦・摩耗試験を行い，UFBクーラントを使用した研削加工での効果発生メカニズムを検討・考察した．さらに，検証実験として研削実験を行い，以下の知見を得た．

(1)水中では，UFBの気体種類が変わると表面の酸化度合いや生成される酸化物の組成が変化することを明らかにした．

(2)クーラント中では，試験片を浸漬・静置するだけでは表面は酸化しない．しかし，攪拌などの動的刺激を付加することで，摩擦・摩耗特性に差が生じることを明らかにした．

⑶UFBクーラントの気体種類は研削性能に影響を及ぼし，その変化は摩擦・摩耗試験の結果と整合する．

⑷UFBによる被削材表面の酸化が摩擦・摩耗特性に影響し，その結果，研削特性が変化していることが示唆された．これが，研削加工におけるUFBの効果発生メカニズムであることを示した．

5　謝辞

本報は，一部改変のうえ，以下の論文より許諾転載したものである．

1）畑山陽介，大越広夢，森輝海，吉田太志，厨川常元，水谷正義：高密度ウルトラファインバブル生成装置の開発と研削への適用，砥粒加工学会誌，Vol. 67，No. 12，pp. 657-663，（2023年）．

2）畑山陽介，大越広夢，寺田悠一郎，森輝海，吉田太志，厨川常元，水谷正義：ウルトラファインバブルクーラントによる炭素鋼表面の酸化と摩擦・摩耗特性，精密工学会誌，Vol. 90，No. 2，pp. 253-258，（2024年）．

本研究の一部は，文部科学省・科学研究費・基盤研究（B）（課題番号 22H01827）の助成および工作機械技術振興財団「最先端プロジェクト研究」（RU-14）を得て行ったものであることを記し，感謝の意を表する．また，表面分析にご協力いただいた東北大学工学部・工学研究科技術部合同計測分析班　赤尾昇氏，大比良由紀絵氏に感謝の意を表する．

参　考　文　献

1）ISO 20480-1: 2017. Fine bubble technology –General principles for usage and measurement of fine bubbles– Part 1: Terminology.

2）経済産業省　九州経済産業局：ファインバブル活用事例集　微細な気泡・ファインバブルが日本の産業を変える，（2017年）．

3）岩井学：はじめてのウルトラファインバブルクーラント，精密工学会誌，Vol. 87，No. 10，pp. 809-812，（2021年）．

4）稲澤勝史，江面篤志，篠原直也，加藤克紀，大森整，伊藤伸英：ファインバブルクーラントのバブル条件が研削加工に及ぼす影響，2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp. 262-263，（2018年）．

5）稲澤勝史，江面篤志，篠原直也，加藤克紀，大森整，伊藤伸英：各種気体を用いたファインバブルクーラントが研削加工に及ぼす影響，2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp. 33-34，（2019年）．

6）小林秀彰，上條雄樹，平野正浩，荒木和成：ウルトラファインバブル生成技術のクーラントへの適用と研削加工の高能率化，2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp. 717-718，（2020年）．

7）渡辺剛，鈴木浩文，高田亮，深見信吾，毛利茂樹，竹下朋春：ウルトラファインバブルクーラントを用いた高精度・高能率研削技術の開発　第1報：気泡が超硬合金の研削特性に及ぼす影響，砥粒加工学会誌，Vol. 65，No. 5，pp. 248-253，（2021年）．

8）渡辺剛，鈴木浩文，高田亮，深見信吾，毛利茂樹，竹下朋春：超微細孔方式によるファインバブルクーラントを用いた高能率研削，砥粒加工学会誌，Vol. 66，No. 9，pp. 530-535，（2022年）．

9）畑山陽介，大越広夢，森輝海，吉田太志，厨川常元，水谷正義：高密度ウルトラファインバブル生成装置の開発と研削への適用，砥粒加工学会誌，Vol. 67，No. 12，pp. 657-663，（2023年）．

10）芹澤昭示：マイクロ／ナノバブルの基礎，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 46，No. 6，pp. 56-61，（2011年）．

11）M. Takahashi, Y. Shirai and S. Sugawa: Free-Radical Generation from Bulk Nanobubbles in Aqueous Electrolyte Solutions: ESR Spin-Trap Observation of Microbubble-Treated Water, Langmuir, 37, pp. 5005-5011, (2021).

12）KYB株式会社：気泡含有液体製造装置，気泡含有液体製造方法及び気泡含有液体製造システム，特許7033901号，（2022年3月11日）．

13）荒木和成：ファインバブル生成装置の開発動向，砥粒加工学会誌，Vol. 66，No. 2，pp. 79-82，（2022年）．

14）H. Yamada, K. Konishi, K. Shimada, M. Mizutani and T. Kuriyagawa: Effect of Ultrafine Bubbles on *Pseudomonas Aeruginosa* and *Staphylococcus Aureus* During Sterilization of Machining Fluid, International Journal of Automation Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 99-108, (2021).

15）前田裕貴：ファインバブルの粒子径分布測定方法，砥粒加工学会誌，Vol. 66，No. 2，pp. 67-70，（2022年）．

16）入江文子：粒子軌跡解析法によるナノ粒子のサイズ測定，粉体技術，Vol. 7，No. 7，pp. 632-635，（2015年）．

17）小西友弘：X線光電子分光法（XPS）の紹介，JXTG Technical Review, Vol. 60, No. 2, pp. 58-62，（2018年）．

18）JIS K 0100-1900，工業用水腐食性試験方法．

19）庄司克雄：研削加工学，養賢堂，P. 88，（2004年）．

20）M. Yamaguchi, T. Ma, D. Tadaki, A. Hirano-Iwata, Y. Watanabe, H. Kanetaka, H. Fujimori, E. Takemoto and M. Niwano: Bactericidal Activity of Bulk Nanobubbles through Active Oxygen Species Generation, Langmuir, 37, pp. 9883-9891, (2021).

21）三沢俊平：環境と腐食，色材協会誌，Vol. 54, No. 5，pp. 309-319，（1981年）．

22）吉原一紘：AES/XPS/SIMSの基礎，Journal of Surface Analysis，Vol. 25，No. 2，pp. 122–135，（2018年）.
23）當麻肇：バックグラウンド処理の実際，Journal of Surface Analysis，Vol. 8，No. 1，pp. 49–54，（2001年）.
24）長谷亜蘭：トライボロジーの基礎，精密工学会誌，Vol. 81，No. 7，pp. 643–647，（2015年）.
25）南口誠：鉄鋼材料に生成する酸化スケールの機械的性質，FORM TECH REVIEW, No. 19, Vol. 1, pp. 52–55,（2010年）.

著　者

畑山　陽介

2013年入社．技術本部生産技術研究所第一研究室．博士（工学）．研削加工技術に関する研究開発に従事．

水谷　正義

東北大学　教授．グリーン未来創造機構グリーンクロステック研究センター兼大学院工学研究科兼医工学研究科．