

研究状況の概要【中間報告】

氏 名	秦 隆志
1.研究題目	給湯器に特化したファインバブル発生器の要素把握に関する研究
2.研究内容	
日本提案の元、2017 年に国際標準化においてファインバブルの基本規格が国際規格として発行された（2019 年には日本産業規格（JIS）化もなされた）。これによると気泡径 100 μm 未満の気泡をファインバブルと呼び、目視が容易な mm や cm サイズの気泡とは異なる物理的・化学的な特性を示すことから、現在、多くの産業分野において活用の検証や導入が進んでいる。この活用の流れは水を扱うガス燃焼器（給湯器）にも進んでいる一方、給湯器内で起こる燃焼での急激な水温度の上昇といった過程でのファインバブルの挙動に関する知見はまだ得られていない。そこで本研究では、給湯器に特化したファインバブル発生器の開発を目的に、以下の実施項目に注目し、検討をおこなう。	
【実施項目①】温度変化下のファインバブルの挙動観察 100 μm 未満で定義されたファインバブルは、さらにその内訳として 1～100 μm 未満をマイクロバブル、1 μm 未満をウルトラファインバブルと呼ぶ。現在、その双方において温度変化による粒子径変化は測定されていない。特にマイクロバブルは周囲の水の状況によって大きく変動を受ける。そのため、水温の上昇の他、流速を変数とし、マイクロバブルの粒子径変化（実際の給湯器の使用を考え、加温後、5 m 程度の状況も把握する）、および（マイクロバブルの収縮挙動に影響を与える）溶存酸素量の変化を測定する。他方、ウルトラファインバブルにおいては周囲の水の影響を過渡的には強く受けないため、作製時の温度、また加温した場合で個々に測定し、その差異から評価する。当該項目によってマイクロバブル及びウルトラファインバブル双方の温度変化による挙動観察を実施し、それらの知見獲得をおこなう。	
【実施項目②】ファインバブルが給湯配管に与える影響 潰食の原因は主に配管近辺での気泡の崩壊によって生じ、マイクロバブルといった大きさの気泡は潰食を促進するといった既報がある。しかしながら、ウルトラファインバブルに対する知見はない。そこでファインバブルが給湯配管に与える影響として、圧力シートを配管内に入れ、原水（コントロール水）、マイクロバブルを含むファインバブル、あるいはウルトラファインバブルのみを通水させ、配管に掛かる応力を評価する（変数としてはファインバブルの数密度、および水流速とする）。さらに、例えば銅配管を用いた場合における銅イオンの溶出、配管内表面の走査型電子顕微鏡（SEM）観察といった知見も合わせて取得し潰食現象を確認する。これまでのウルトラファインバブルの研究から（ウルトラファインバブルは）高い安定性を有すると考えられており、潰食の原因が気泡の崩壊に起因した場合、ウルトラファインバブルは崩壊し難いため潰食が生じない（抑制する）可能性がある。	
【実施項目③】給湯器に特化したファインバブル発生器の要素探索 加温によって気体の飽和溶存量は低下するため、原理的には給湯器後にその低下分に相当する過剰な気体が気泡となって表れる。その気泡をファインバブル化させることができれば、給湯器に特化したファインバブル発生器の検討も可能である。ここでは、実施項目①・②で得られた知見をもとに、マイクロバブルの有無による効果（マイクロバブルの存在が negative か positive か ?）、またこれまで変数として取得した知見から最適な構成を探索する。	

3.研究成果、課題等

先に示した実施項目について、以下のように計画・予定した。

	令和6年度				令和7年度			
	上半期1	上半期2	下半期1	下半期2	上半期1	上半期2	下半期1	下半期2
実施項目①	→			まとめ				
実施項目②			→			まとめ		
実施項目③					→			まとめ

各実施項目別に下記に示す。なお、今回、ファインバブルの作製には加圧溶解方式を用いた。

【実施項目①】温度変化下のファインバブルの挙動観察

・マイクロバブルの作製に対する温度および溶存酸素量の影響

給湯器仕様のファインバブル発生器では、発生器を給湯器前後どちらに具備するかでファインバブルに熱を与える（加熱する）工程が替わる。特に、ファインバブルのうち、マイクロバブルは周囲の水の状況によって大きく変動を受けるため、まずはマイクロバブルの作製に対する温度の影響を調査した。結果、マイクロバブル作製後（給湯器前にファインバブル発生器具備の場合）に加熱した場合、そのマイクロバブルの粒度分布や数密度に大きな変化は確認されなかった。その一方、マイクロバブル作製の場を加熱した場合（給湯器直後にファインバブル発生器具備の場合）、それら加熱温度によって作製されるマイクロバブルの粒度分布のピークは小さくなり（図1）、数密度も減少した（図2）。なお、溶存酸素量は加熱により絶対値では減少したものの、外層から空気を導入する加圧溶解式を用いたため、当該実験系では各温度の飽和値を基準とした%換算で大きな変動は確認されなかった。しかしながら、給湯器を念頭にした場合、瞬間的な加熱処理となるため、溶存酸素量の変動が生じる可能性があり、今後の検討課題に加える。

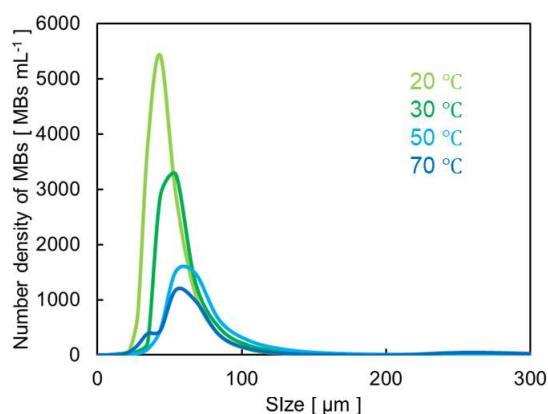


図1 マイクロバブル作製時における温度の影響（粒度分布）

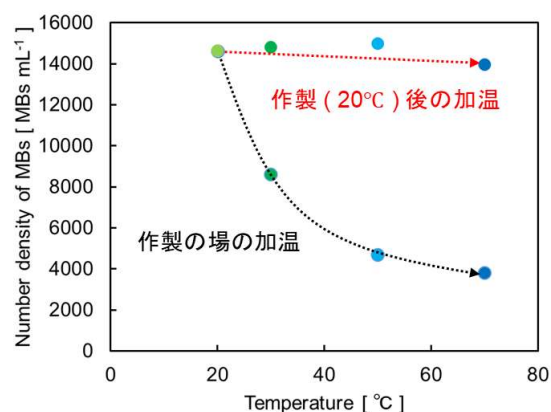


図2 マイクロバブル作製時における温度の影響（マイクロバブルの数密度。なお、赤線箇所はマイクロバブル作製後に加熱した場合）

・ 作製されたマイクロバブルの粒子径に与える温度の影響

給湯器の後段、つまり作用の場にマイクロバブルを供給するためには、作製されたマイクロバブルの粒子径に与える（その後の）温度の影響に関する知見も重要である。そこで、作製したマイクロバブル周囲を加温（昇温）、あるいは降温し、粒子径を測定した。昇温過程の影響を図 3・4 に、また降温過程の影響を図 5・6 にそれぞれ示す。

（昇温過程）図 3 からマイクロバブルの膨張と（膨張による浮上分離からの）消失が目視的にも確認できる一方、図 4 に示した粒子径の変化からは膨張・収縮する異なる両方の傾向が見られた。これは作製されたマイクロバブルが多分散であり、オストヴァルト熟成（微小な粒子が溶解し、より大きい粒子に再沈着）が生じる他、膨張挙動においては昇温による気体の飽和溶解度の低下でマイクロバブルの溶解挙動から、溶存気体量の過剰化、それによって再気泡化に転じたことが主要因と考えられる。

（降温過程）図 5・6 からマイクロバブルの収縮が一様に起こることが分かる。つまり、降温過程では膨張・収縮の両挙動を起こすオストヴァルト熟成よりも、降温による気体の飽和溶解度の回復からマイクロバブル内の気体においては気相→液相といった物質移動、つまり溶解挙動が促進された結果と考えられる。

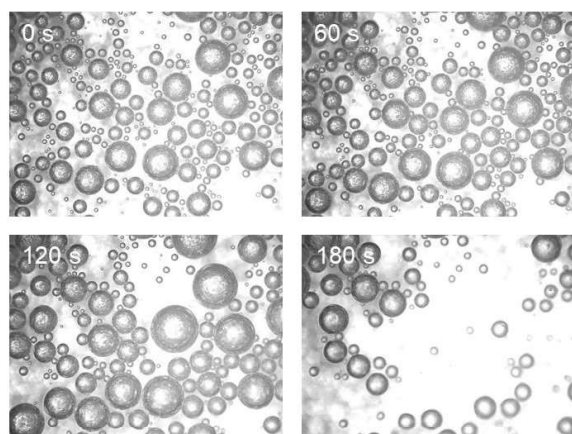


図 3 昇温過程でのマイクロバブルの挙動

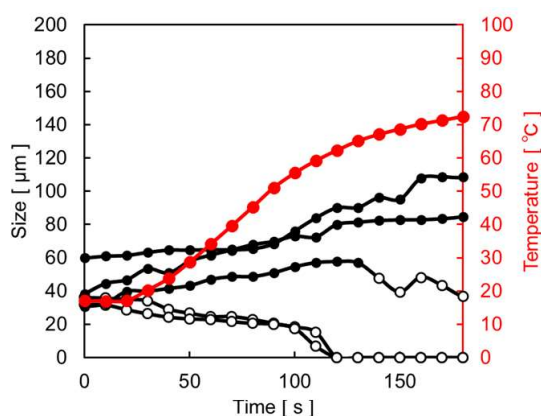


図 4 昇温過程でのマイクロバブルの粒子径変化（赤色箇所は温度を示す）

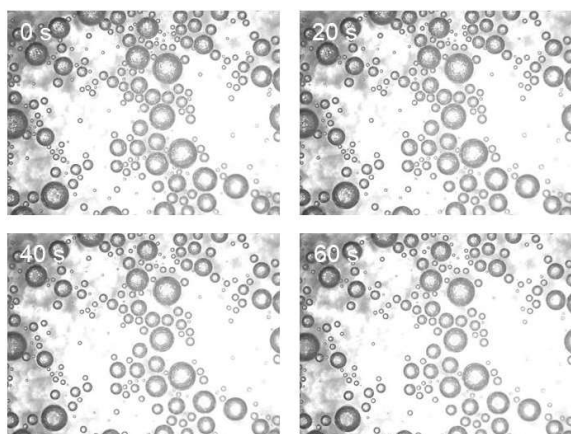


図 5 降温過程でのマイクロバブルの挙動

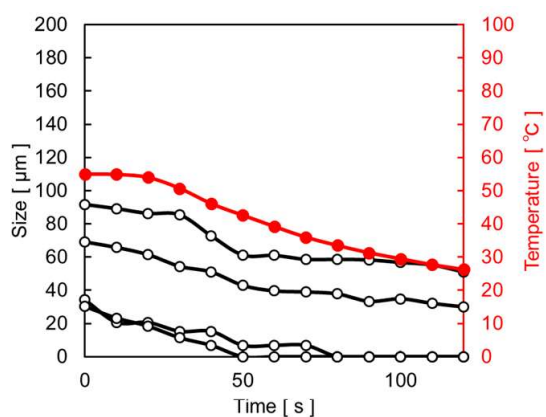


図 6 降温過程でのマイクロバブルの粒子径変化（赤色箇所は温度を示す）

・ 作製されたマイクロバブルの粒子径に与える水流速および配管長の影響

前項目同様に、作用の場にマイクロバブルを供給するためには、作製されたマイクロバブルの粒子径に与える水流速および配管長の影響に関する知見も重要である。水流速の影響を図 7 に、また配管長の影響を図 8 にそれぞれ示す。

（水流速）低速の場合、配管内上部で気液分離が起こる一方、高速の場合はマイクロバブルが真円形状にならないため、バブルとして解析上認識することが難しい。ただし、これらは解析上の問題であり、現状では、気液分離が起こらない水流速があればマイクロバブルの作用の場への供給は可能と考える。

（配管長）配管長が長くなるにつれて、マイクロバブルの粒子径のピーク位置は大きくなり、またピーク（数密度）も小さくなった。配管長が長くなる、つまり通過する時間が長くなるため、例えば先の図 4 のような挙動が起こり、当該マイクロバブルの挙動に繋がったと考えられる。

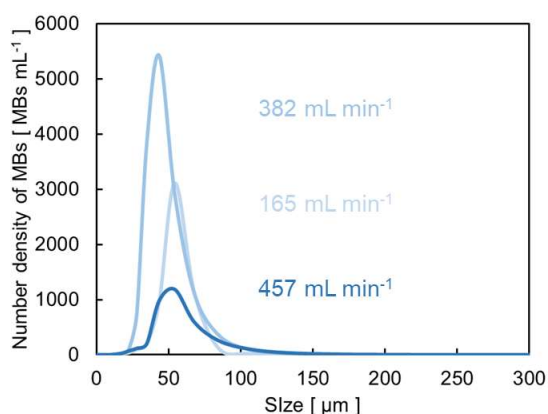


図 7 マイクロバブルの粒子径に与える水流速の影響（配管長：1.5 m）

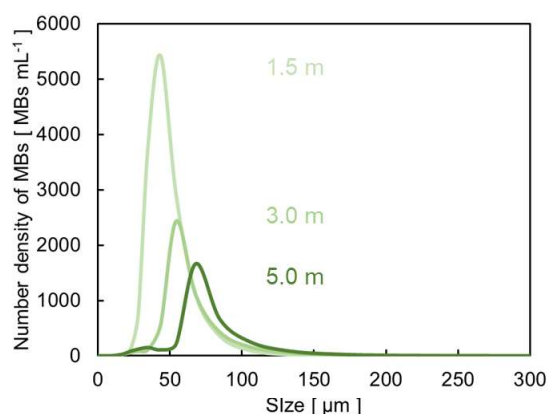


図 8 マイクロバブルの粒子径に与える配管長の影響（水流速：382 mL min⁻¹）

・ 作製されたウルトラファインバブルの粒度分布に与える温度の影響

ウルトラファインバブルにおいては周囲の水の影響を過渡的には強く受けないため、作製時の温度（25℃）、また加温処理（40・60・80・100℃で 1 時間）後で個々に測定（25℃）し、その差異から評価した。図 9 に加温処理後のウルトラファインバブルの粒度分布を示す。粒度分布の形において、40℃および 60℃の加温では 25℃と大きな差異は見られないが、80℃および 100℃の加温においてはピーク位置が大きな粒子径へと移動した。これらの粒度分布からそれぞれの実験系でのウルトラファインバブルの数密度を求め、加温温度に対して図 10・11 に示した（図 11 は UFB / UFB₀ 値であり、1.0 を区切りとして作製時に対する増加・減少割合を示す）。これらの図から、ウルトラファインバブルの数密度は加温温度の上昇でいったん増加を示し、次いで減少に転じることが分かる。さらに、これらの結果と溶存酸素（DO）量との関係性を得るため、各加温後の DO 値を図 12 に示した。これらの図から、仮説として、ファインバブル発生器によってウルトラファインバブルが作製される他、「加温によって DO が下がることから、その DO を元にしたウルトラファインバブルの 2 次的発生が起こる。ただし、加温によるウルトラファインバブルの合一化等による粒子径の巨大化により減少に転じる。」といった関係性が検討できる。

ここで、加温処理でのウルトラファインバブルの挙動を確認するために、80℃加温時の（ウル

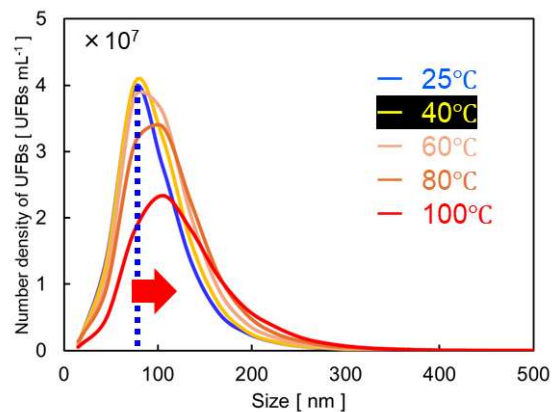


図 9 ウルトラファインバブルの粒度分布に与える温度の影響

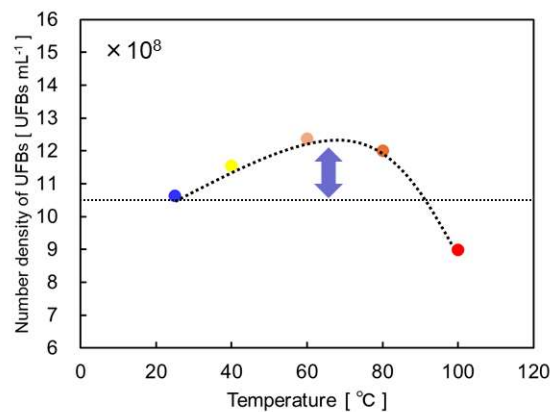


図 10 ウルトラファインバブルの数密度に与える温度の影響

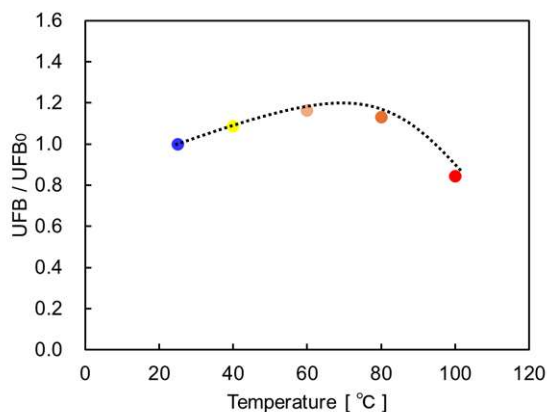


図 11 ウルトラファインバブル (UFB) の数密度に与える温度の影響 (UFB : 処理後の UFB 数、UFB₀ : 処理前の UFB 数)

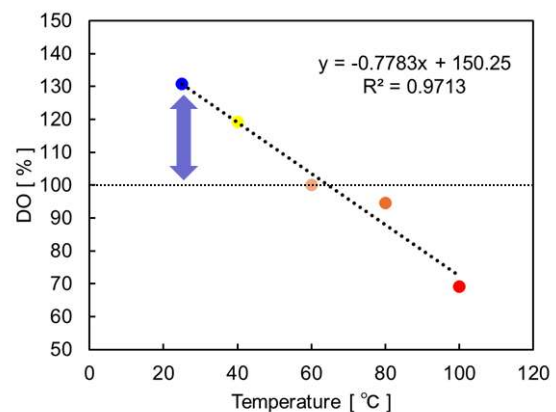


図 12 溶存酸素量 (DO) に与える温度の影響

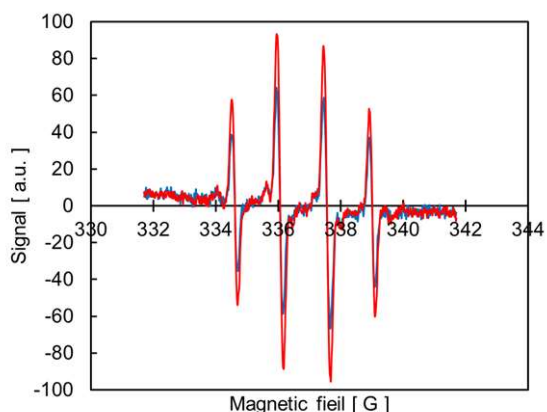


図 13 原水およびウルトラファインバブル水の ESR スペクトル (原水 : 青線、80°C加温時のウルトラファインバブル水 : 赤線)

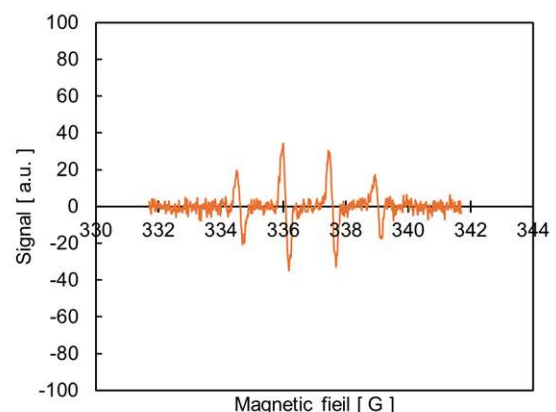


図 14 図 13 の差分スペクトル (スピントラップ剤 : 5, 5'-dimethyl-1-pyrroline-N-oxide (DMPO))

トラファインバブル水) の電子スピン共鳴 (ESR) を測定した (図 13)。ESR 評価ではラジカルの有無を確認できる。結果、ウルトラファインバブル存在下では加温により酸化力の極めて高いヒドロキシルラジカル ($\cdot\text{OH}$) の発生を確認した (図 14)。

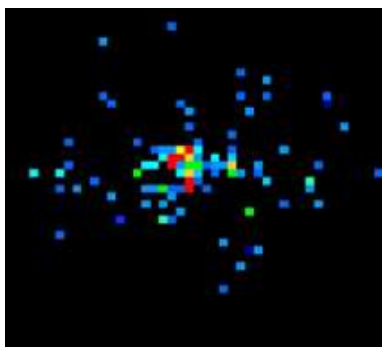
【実施項目②】ファインバブルが給湯配管に与える影響

・ファインバブルが配管応力に与える影響

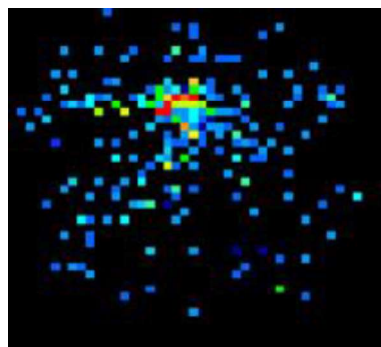
配管に掛かる応力に対し、ファインバブルがどのような影響を与えるか調査するため、まず、圧力によって破壊・発色するマイクロカプセル化された発色剤を封入した圧力測定フィルム プレスケールを検討したものの、耐水性や感度的な課題が確認された。そのため、他の評価手法について検討した結果、感圧導電性インクをコーティングした面圧分布測定システムでファインバブルの有無により圧力の差異を見い出せたことから、本手法の有用性を確認中である。

具体的にはファインバブル有無の水を高圧洗浄機に導水し、噴射面（1.5 m 先）に上記の面圧分布測定システムを設置、圧力変化を確認した。結果を図 15 に示す。図のようにマイクロバブル、ウルトラファインバブルの存在によって噴射面の拡充が確認された。さらに、当該拡充の可視化のため、オイルレッドで着色したグリスを金属板に均一塗布し、噴射洗浄をおこなったところ、グリスが押し出された（盛り上がった）領域が拡がり、噴射領域に対応した挙動を示した（図 16）。

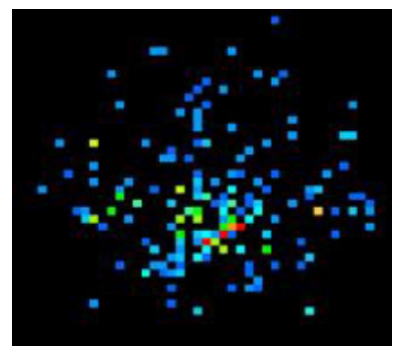
今後は、配管上、応力が最も掛かる L 字継ぎ手（エルボ）を模した形状にて当該評価を実施する。



水道水

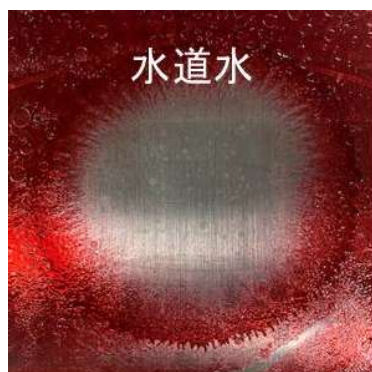


ファインバブル(マイクロバブル+ウルトラファインバブル)

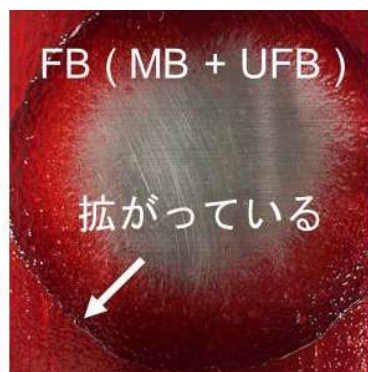


ウルトラファインバブル

図 15 高圧洗浄機からの噴射面・圧に与えるファインバブルの影響（ファインバブル有で噴射面の広がりが見られる）

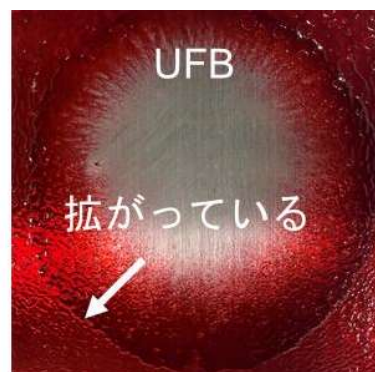


水道水



FB (MB + UFB)

広がっている



UFB

広がっている

図 16 高圧洗浄機を用いたグリスの除去（FB：ファインバブル、MB：マイクロバブル、UFB：ウルトラファインバブル）

【実施項目③】給湯器に特化したファインバブル発生器の要素探索

次年度実施

4. 今後の予定 （助成希望金額とその使途についてもご記入願います）

	令和6年度				令和7年度			
	上半期1	上半期2	下半期1	下半期2	上半期1	上半期2	下半期1	下半期2
実施項目①	→		→	まとめ				
実施項目②			→	→	→	まとめ		
実施項目③					→	→	→	まとめ

上記当初の計画に従い、項目②のまとめ（これまでに判明したラジカルの発生についても検証する。ラジカルは酸化力が極めて強く、配管に与える影響が懸念される）、および項目③を実施する。なお、項目①で確認した点、

（マイクロバブルの作製）給湯器を念頭にした場合、瞬間的な加温処理となるため、溶存酸素量の変動が生じる可能性があり、今後の検討課題に加える。

（マイクロバブルの水流速評価）これらは解析上の問題であり、現状では、気液分離が起こらない水流速があればマイクロバブルの作用の場への供給は可能と考える。

についても今年度内を目途とした追加検討をおこなう。

【実施項目③】給湯器に特化したファインバブル発生器の要素探索

加温によって気体の飽和溶存量は低下するため、原理的には給湯器後にその低下分に相当する過剰な気体が気泡となって表れる。その気泡をファインバブル化させることができれば、給湯器に特化したファインバブル発生器の検討も可能である。ここでは、実施項目①・②で得られた知見をもとに、マイクロバブルの有無による効果（マイクロバブルの存在がnegativeかpositiveか？）、またこれまで変数として取得した知見から最適な構成を探索する（そのための実験系作製費を外注費に含む）。