

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

Nov. 2022 Vol. 53 No. 6

特集 「社会を支える分離技術」

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目次

特集「社会を支える分離技術」

【巻頭言】

「社会を支える分離技術」発行にあたって 飯尾昭一郎 238

【解説】

高性能液体サイクロン技術 福田 寛人 239

マイクロバブルを用いた水溶性加工油からの異物分離 谷井 章寛 243

信大クリスタルを用いた汚染水からの重金属イオン分離 手嶋 勝弥 246

河川水からの最新^{じんかい}塵芥除去技術 牧志 龍男 251

下水処理における膜処理技術 新井 喜明 255

建設機械油圧回路中の気泡の分離と除去 石塚 信 260

固体吸収材による火力発電所からのCO₂分離回収実証 西部 祥平 266

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る ―学生時代の経験が未来の自分を作る― 今村 亮介 270

【研究室紹介】

香川大学 佐々木研究室 佐々木大輔, 門脇 惇 273

【企画行事】

春季講演会 伊藤 和寿 276

【会告】

日本フルードパワーシステム学会2022年度受賞候補者募集のお知らせ 259

日本フルードパワーシステム学会2022年度フェロー認定者推薦のお願い 259

会員移動 277

理事会・委員会報告 278

英文論文へのCCライセンス付与のお知らせ	278
共催・協賛行事のお知らせ	279
2022年度オータムセミナー「フルードパワーシステム開発におけるMBD活用」	280
資料一覧表	281
フルードパワーシステム総目次（第53巻）	286
次回予告	288

■表紙デザイン：浅賀美希 勝美印刷株

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Separation Technology Supporting a Society"

[Preface]

On the Special Issue "Separation Technology Supporting a Society"	Shouchiro IIO	238
---	---------------	-----

[Review]

High Performance Liquid Cyclone Technology	Hiroto FUKUDA	239
Filtration of Foreign Material from Water-soluble Cutting Fluid using Micro Bubble	Akihiro TANII	243
Separation of Heavy Metal Ions from Contaminated Water using Shindai Crystal	Katsuya TESHIMA	246
State of the Art Dust Removal Technology from River Water	Tatsuo MAKISHI	251
Membrane Treatment Technology in Wastewater Treatment	Yoshiaki ARAI	255
Separation and Removal of Air Bubbles in Hydraulic Circuits of Construction Machinery	Makoto ISHIZUKA	260
Demonstration of CO ₂ Capture with Solid Sorbent at Coal-fired Power Plant	Shohei NISHIBE	266

[Topics]

Seniors talk to students- What you are now makes what you will be in the future - Ryosuke IMAMURA	270
---	-----

[Laboratory Tour]

Kagawa University, Sasaki Laboratory	Daisuke SASAKI, Jun KADOWAKI	273
--------------------------------------	------------------------------	-----

[JFPS Activities]

A brief report on Spring Conference 2022	Kazuhisa ITO	276
--	--------------	-----

[JFPS News]

259, 277, 278, 279, 280, 281, 286, 288

「社会を支える分離技術」発行にあたって

著者紹介



いい お しょういちろう
飯尾 昭一郎

信州大学工学部機械システム工学科
〒380-8553 長野市若里4-17-1
E-mail: shouio@shinshu-u.ac.jp

2004年宮崎大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年信州大学助手、助教を経て、2011年同大学工学部准教授。小水力発電用水車、水圧駆動システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、ターボ機械協会、日本機械学会などの会員、博士（工学）。

混合物から目的成分を取り出す、または不要物を取り除く「分離技術」は、フルードパワーシステムにおいては作動油中からの気泡や不純物の分離で利用されている。そのほか、海水の淡水化、各種排水の浄化、都市鉱山からの目的金属の分離、火力発電所や製鉄所から生じるCO₂の分離、人工透析による体内の老廃物などの除去、海中からの有用成分の抽出、水中からの重金属除去など、きわめて幅広い分野で利用されており枚挙にいとまがない。人口増加が進むなか飲料水をはじめとする水資源の確保や循環利用などは喫緊の課題であり、分離技術はSDGsの達成にも寄与する重要な技術である。

分離は古くから取組まれている技術であるが、現在も分離の方法や性能は日進月歩で進化しており、非常に興味深い。本特集号では、多岐にわたる分離技術のうち流れや流体に関係するものを中心に最新情報を紹介する。

はじめに、福田寛人氏（株式会社industria）には、「高性能液体サイクロン技術」と題して、液体サイクロンの設計と高精度化に向けた取り組みと、産業分野での実用例について解説いただいた。

つぎに、谷井章寛氏（株式会社スギノマシン）には、「マイクロバブルを用いた水溶性加工油からの異物分離」と題して、水溶性加工油の洗浄装置を対象としたマイクロバブルによる異物分離技術において、その分離メカニズムとその効果について解説いただいた。

手嶋勝弥氏（信州大学）には、「信大クリスタルを用いた汚染水からの重金属イオン分離」と題して、フラックス法をはじめとする結晶育成方法、それにより創製された金属イオン交換体結晶と陰イオン交換体結晶の構造や機能の詳細、さらにそれらを社会実装した例について解説いただいた。

牧志龍男氏（日本エンヂニヤ株式会社）には、「河川水からの最新塵芥除去技術」と題して、河川水に含まれるゴミ（塵芥）の分離装置として、メッシュスクリーンを利用する無動力の塵芥除去技術について解説いただいた。逆洗作用によるスクリーン面の洗浄機能は単純ながら目から鱗の技術である。

新井喜明氏（株式会社明電舎）には、「下水処理における膜処理技術」と題して、膜処理技術の概要、セラミック平膜エレメントを下水処理に利用した場合の長期連続運転結果、膜洗浄風量の最適化事例について解説いただいた。

石塚信氏（ヤマシンフィルタ株式会社）には、「建設機械油圧回路中の気泡の分離と除去」と題して、油中の気泡について、その発生源と油圧回路に及ぼす影響、サクシオンフィルタのろ材精度と分離・除去効果について解説いただいた。

西部祥平氏（川崎重工業株式会社）には、「固体吸収材を用いた火力発電所からのCO₂分離回収実証」と題して、潜水艦などの閉鎖空間における呼気由来CO₂の吸収技術から発展してきたとする固体吸収材を用いた分離技術について、火力発電所をはじめとする大規模プラントに適した移動層システムの原理と実用化に向けた開発状況について解説いただいた。

本特集号で紹介した技術は今後ますますの発展が期待されるものであり、さまざまな観点から持続可能な社会の実現を支える重要な技術であると感じた。今後ますますのご発展を期待したい。

末筆ながら、非常にご多忙な中で執筆をご快諾いただき、非常に興味深い解説記事をご提供いただいた皆様に心より厚く御礼申し上げます。

（原稿受付：2022年10月4日）

高性能液体サイクロン技術

著者紹介



ふく だ ひろ と
福田寛人

株式会社 industria
〒358-0014 埼玉県入間市宮寺2700
E-mail : fukuda@industria.co.jp

2008年工学院大学大学院工学研究科博士後期課程修了。大学助手、高等専門学校客員研究員を経て、2010年株式会社industriaに入社、現在に至る。液体処理関連の技術開発等に従事。日本化学会、応用物理学会の会員。博士(工学)。

1. はじめに

サイクロンは、1885年にアメリカのJohn. M. Finchにより発明された技術であり、円筒内で旋回流を発生させることで流体中に含まれた微粒子を遠心分離するものである。近年、このサイクロン技術を利用した産業機器や家電製品などが販売され、特にフィルターや分級装置として広く活用されている。処理対象の流体が気体の場合のサイクロン装置はガスサイクロンと称され、液体の場合はハイドロサイクロン、液体サイクロンと称される(表1)。

表1 ガスサイクロンと液体サイクロンの実用例

ガスサイクロン	家庭用掃除機
	工業用集じん装置
	トナー顔料の分級装置
液体サイクロン	工場エアアの圧縮空気用除湿フィルター
	工作機械用切削液用フィルター
	研磨材料の分球装置
	薬液中の金属回収装置

産業機器や家電製品で使用される大半が、気体中の微粒子の分離分級を目的としたものである。これは流体と微粒子の密度差(比重差)が分離精度に大きく依存しており、気体中の微粒子を分離、分級する方が容易に対応できることによる。

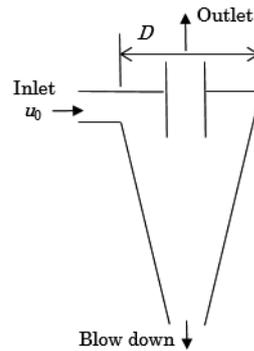
本稿では、液体サイクロンに焦点を当て、その基本的設計と高精度化に向けた取り組みについて述べさせていただく。さらに、液体サイクロンの産業的

実用例の一部も合わせて紹介させていただく。

2. サイクロンについて

2.1 サイクロンの原理

一般的なサイクロンと呼ばれる機器の内部構造は、図1に示すようなテーパ構造であり、処理対象の流体はサイクロンの横方向から加圧する形で流入される。サイクロン内に流入した流体は内部で旋回する。この旋回流により発生する遠心力を利用して流体中に含まれる微粒子と流体の分離が行われている。



D : サイクロン直径 (m)
 u_0 : 流入速度 (m/s)

D_{p50} : 50%分離サイズ (μm)
 μ : 液体の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
 ψ_{50} : 慣性係数 (-)
 ρ_p : 粒子比重 (kg/m^3)
 ρ : 液体比重 (kg/m^3)

図1 サイクロンの構造

サイクロン原理を利用したフィルターや分級装置の理論的分離性能は式(1)にて算出される。この式からわかるように、サイクロン原理を利用したフィルターの分離性能は、液体(流体)と粒子(固体)の比重差、対象液(流体)の粘度に依存する。式(2)は特に粘性係数に関して着目するため式(1)を変換した式であるが、液体サイクロンを実際に機器として使用する場合、この液体の粘度の依存が大きく関与するケースが多い。

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{18\mu D \psi_{50}}{(\rho_p - \rho) u_0}} \quad (1)$$

$$D_{p50} = K \mu^{1/2} \quad (2)$$

液体サイクロンは分離された粒子を液体とともに下部へブローダウン(排出)しなければ機能せず、特にフィルターとして使用する際は、対象液の一部を損失し続けながら対象液をろ過しなければなら

い。この点は、サイクロンをフィルターとして使用する上で、最大のデメリットとなる。このデメリットを改善させるべく、種々の取り組みが成されている。具体的には、一般的なサイクロン構造下部の形状を変化させ、分離された粒子を回収できるスペースを設けるなどの試みが取られている。図2にその構造イメージを記したが、分離物を回収する下部の構造については、製造企業などの特許範囲でもあるため、構造の詳細表記は割愛させていただくが、単純にスペースを設けるのみでは、サイクロン内部で形成されている旋回流が乱れ、分離された粒子がOutlet側に流出する事象が発生する。

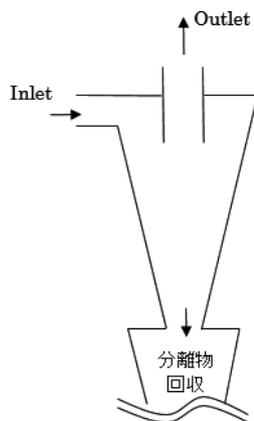


図2 エレメントレス・フィルターの構造 (イメージ)

この機能により、ろ過対象液を損失することなくフィルタリングを実施することができるため、液体サイクロンが産業的に使用される領域が広がっている。

サイクロン原理を利用したこれらのフィルターなどの機器の分離精度はサイクロンの直径と流入速度にも依存する。言い換えると、フィルター内部のろ過対象液の回転速度に依存する。図3に示したのは、サイクロンフィルター上部から見た断面図であるが、内部の分離対象固形物には流入回転速度に応じた外周への力と中心への力が働く。この力のバランスが、 $u_r < u_c$ となる際にサイクロンの固液分離現象が働く。回転速度を上げるほど分離精度が向上することになる。

流入速度に関してはサイクロンフィルターへろ過対象液を加圧流入させるポンプ、すなわち外部の因子によるため、サイクロン現象を利用したフィルター設計にはサイクロンの直径が重要な因子となる。しかしながら、直径を小さくすると、 u_r と u_c の差の許容値が近接してくるため、一概に直径を極端に小さく設計するとサイクロンによる固液分離現象が働かなくなることがある。また、処理対象に含まれる粒子の濃度も影響される。流体中の粒子濃度が高くなると、図3で、 $u_r < u_c$ の条件となった場合でも、粒子同士の衝突により粒子が u_c 方向に移動できずに

サイクロンのOutlet部より粒子が流出する現象が起こることがあるとされている。

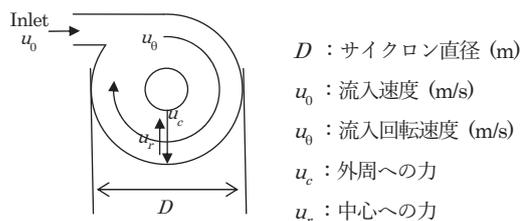


図3 サイクロンフィルター内部の固形物の挙動

サイクロンの分離現象は、遠心力によるものといわれることがあるが、図4に示した一般的な遠心力の考え方とは異なるため、一概に一般的な計算式で論じることは困難である。

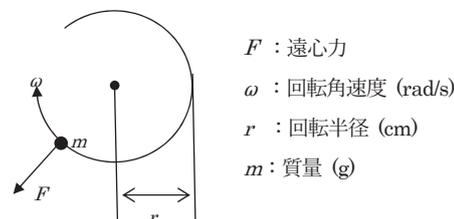


図4 一般的な遠心力の考え方

2.2 サイクロンの基本設計と高精度化

サイクロン技術はガスサイクロンより発明されたこともあり、液体サイクロンの技術はガスサイクロン、気体中の固形物の分離技術から応用されている。したがって、液体サイクロンとガスサイクロンの基本的形状は類似している。基本的な設計値については、専門誌などに記載されているものもあり^{1,2)}、代表的な設計基準について図5に示した。液体サイクロンの分離効率にはその直径が重要な因子となると前述したが、基本的設計基準値についても、その直径を基準として表すことが一般的である。なお、入口部の流速は5～10 m/sec前後で処理対象液を圧入させて使用されるケースが多い。

産業的に使用されている液体サイクロン式フィルターや分級装置の直径は一部の特殊なものを除き、75～300 mm程度であり、これはガスサイクロンと比較するときわめて小型のサイズとなる。これは、サイクロンの分離精度が、その分離対象の流体の粘度に大きく依存し、ガス(気体)の粘度と液体の粘度を比較すると、約50倍以上の粘度差があることによる。

サイクロン原理を利用したフィルターの分離性能は10～30 μmであり、大型のものは30～100 μm程度である。その性能向上のための研究が大学含め各企業で日々実施されている³⁻⁵⁾。サイクロン原理を利用したフィルターに影響してくる因子は内部構

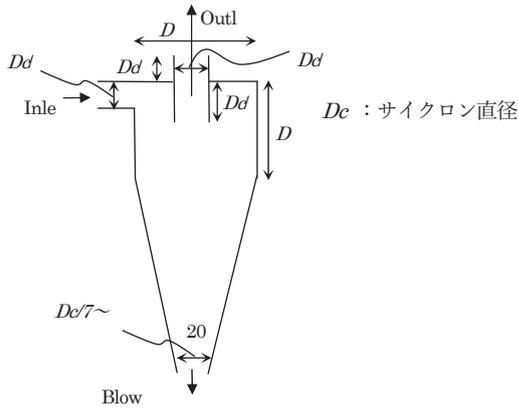


図5 液体サイクロンの基本設計値

造・形状と式(1)に登場する各パラメータがあげられるが、フィルター内部に電荷をかけ、ゼータ電位を変化させて分離性能を向上させるという興味深い取り組みもなされている。試験レベルでは、数 μm 程度までの分離が報告されている⁵⁾。

液体サイクロンの高精度化において、内部構造が重要と記載したが、加圧流入した流体をいかに効率的に旋回させるかも重要な因子となる。液体サイクロンの流入口は圧力エネルギーを速度に変換するためにノズル形状とすることが一般的であり、ノズル設計の技術も応用されている。ノズル設計の基本的な内容については割愛するが、加圧流入した流体が、エネルギー的にロスがなく、サイクロン内で拡散することなく、旋回流速に変換させられるかがサイクロンの分離効率に関与する。経験的知見も含めると、内部構造としては、サイクロン直径の他にサイクロンのテーパ角度も重要な因子であるが、ブローダウン部の内径とOutlet部の内径、Outlet部の長さのバランスが重要であり、一概に数値で表すことが現状は困難である。私の知る限り、液体サイクロンを理論的かつ計算的に設計できる技術は未だ確立されておらず、各企業、研究機関などが試作実験評価を繰り返し、高精度化を進めているのが実態である。ハイドロサイクロンなどを利用した湿式分級の学問領域では、サブミクロンレベルの分級技術に大きな関心が寄せられており、活発な研究がなされている。近い将来サイクロン技術を応用した新しい技術などにより、サブミクロン分級が達成される日が来るかもしれない。

3. 液体サイクロンフィルターの実用事例

液体サイクロンの実用事例として、過去5年余りで急速に実用実績が伸びている工作機械での使用方法、要求精度、使用例について紹介させていただく。

工作機械での液体サイクロンの実用事例について述べる前に、工作機械とその機械に使用される水溶

性切削液（水溶性クーラント液）について簡単に説明させていただきたい。時をさかのぼること1950年代にNC工作機械が世に登場し、金属加工の自動化がスタートした。その後、金属加工技術は加速度的に発展し、現在に至っている。NC工作機械の導入により、従来は工具と加工対象物（ワーク）の潤滑性向上の目的で使用されていた切削油は、高速で行われるNC加工時に発生する摩擦熱の冷却を求められるようになる。水溶性切削油、すなわち水溶性クーラントの誕生である。

水溶性切削油剤はJIS規格でエマルジョン、ソリュブル、ケミカルソリューションの3種に大別されている。鉱油や脂肪油、合成油と界面活性剤を主成分とするエマルジョンタイプは潤滑性に優れ、主に鋳鉄、鋼、アルミ、銅やそれらの合金の切削加工に使用され、ソリュブルタイプは冷却性に優れ、主に鋳鉄、鋼、アルミ、銅やそれらの合金の切削加工、研削加工に使用されている。水溶性無機塩を主成分としたケミカルソリューションタイプは冷却性に優れ、主に鋼の研削加工に使用されている。

これらの水溶性切削油剤は文字通り水に希釈して使用されるが、液の経年劣化にともない、入替えが必要となる。水溶性クーラントのpHはワークへの防錆性を考慮してpH9~10の弱アルカリ性に設定されているものが多い。クーラント液の劣化は経年仕様による酸化、主成分中エステル部位のアルカリ加水分解による成分の分解があげられるが、実際のところは腐敗による劣化現象が大半を占める。劣化した液は廃油・廃液として処理する必要があり、水溶性切削油剤の購入コストの他にも、これらの産廃コスト、液入替え時の人件費も加わり、工作機械のメンテナンス代として無視できないものとなる。よって、水溶性クーラントの寿命を延長することはトータルのコスト削減につながるため、近年重要視されている。水溶性クーラントの寿命延長にはその液の劣化防止処理が必要不可欠となるが、生産性に直接関与しないクーラント液の処理には、消耗品がなく、または安価であり、可能な限りメンテナンス頻度が少ない機器・装置を使用することが求められている。水溶性クーラントタンク中に堆積するスラッジは、時としてワークに傷を与え、生産そのものに関与することがある。なお、間接的にはあるが、堆積したスラッジは腐敗・液の劣化にも関与している。

金属加工時に排出される加工屑はタンク中に堆積する。一般的な金属加工時は水溶性クーラント液（以降クーラント液と略記）を循環ポンプにて工具とワークに直接吹付けながら行うため、金属微粒子などの加工屑（スラッジ）が混入することにより、

時としてワークへのスクラッチ傷等の問題が発生する。この問題回避、加工精度向上のためには、クーラント液をろ過し、スラッジを除去することが必要となる。単純に液をろ過するだけの物理的処理であるため、その手法は比較的容易であるが、一般的な産業用フィルターを使用すると、エレメント（ろ材）が消耗品として発生し、コストアップにつながるばかりではなく、メンテナンスを行う時間を要する。先述したように、いかにメンテナンス頻度が少ない機器・装置を組み合わせ、トータル的なスラッジ処理・管理を実施するかがポイントとなる。

一般的なクーラント液のスラッジ除去・管理方法を図6に示した。ここで行われるろ過工程はつぎの4つのステップを経て循環使用される。まず、コンベアによる粗大屑のタンク外排出を行い、つぎにドラムフィルターによるスラッジの1次ろ過を実施し、その後、液体サイクロンによる微細スラッジの2次ろ過を行い、最終的に必要に応じてラインフィルターによる微細スラッジの流出保護を行う。

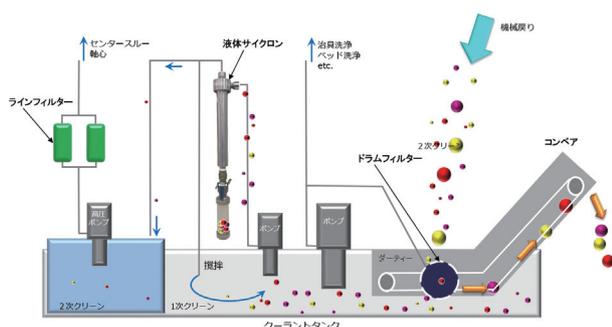


図6 一般的な水溶性切削液のスラッジ除去・管理方法

まず、加工時に噴霧された液は大小さまざまな切削屑とともに、ダートイー槽へ貯留される。ダートイー槽はスクレーパー式、またはヒンジ式コンベアが内蔵されており、粗大屑はこのコンベアによりタンク外へ排出される。ここで排出される粗大屑はmm～cmレベルで、人の手でもつまむことのできるサイズである。つぎにドラムフィルターと呼ばれる逆洗式のフィルターにより1次ろ過された液が1次クリーン槽へ送液される。ドラムフィルターはメッシュタイプの筒状のエレメントがコンベアのチェーンを介して設置されており、筒状のエレメントが回転しながら常時逆洗浄を行っている。ここで使用されるメッシュの開口サイズによりろ過精度が選択できるが、30 μ m～100 μ m程度のものが使用されるケースが多い。この2次ろ過では、ドラムフィルターではなく単純なメッシュ式プレートを使用することもあるが、逆洗浄機構がないため定期的な清掃メンテナンスが必要となる。その後、液体サ

イクロンを使用して2次ろ過された液が2次クリーン槽へ送液される。

液体サイクロンをフィルターとして使用される以前は、この2次ろ過工程にも通常のフィルターが使用されるケースが大半であり、エレメントの目詰まりによる定期的なメンテナンスを要していた。

液体サイクロンにより数十 μ m以上の微細スラッジが除去されたクーラント液は2次クリーン槽へ貯留される。10 μ mのレベルまでろ過処理された液であれば、一般的な加工工程の上で各機器含めて問題が出ることはないと言われていた。最終段階で加工時に噴霧するラインの直前にコンタミ混入保護用としてラインフィルターを設置することもあるが、ここで使用されるエレメントのろ過精度は5～30 μ m程度が多い。機械側に送液する液の清浄度のベースとして、一般的研削工程20 μ m以上、一般的切削工程50 μ m以上をろ過する必要があるという考えがあるが、加工内容の詳細により必要ろ過精度が大きく変わるため、一概に必要なろ過精度を設定することは困難であり、特殊な加工内容であるほど、高い加工精度が要求されるほど、事前の確認が重要となる。

4. 液体サイクロン技術の今後の課題

液体サイクロン技術の普及により、工作機械でのクーラント液の処理・管理は急速な発展を遂げており、本稿で述べた液体サイクロン技術は工作機械業界のみならず、工作機械を使用した各産業界にも生産性の向上に関する点で間接的ながら多大なる貢献をしてきている。今後はさらなる分離精度の向上による液体サイクロン技術の適用範囲の拡大が期待される。液体サイクロン技術を利用したフィルターや分級装置は、消耗品が発生しないという点で、地球環境保護、SDGs、カーボンニュートラルが推奨される現在において、さらなる社会的貢献が期待できる。

参考文献

- 1) 吉岡直哉；化学工法, 20,495 (1956)
- 2) 吉岡直哉, 堀田豊；化学工法, 19,632 (1956)
- 3) H. Yoshida, T. Takashina, K. Fukui, T. Iwanaga: Effect of inlet shape and slurry temperature on the classification performance of hydro-cyclones, *Powder Technology*, Vol. 140, p. 1-9 (2004)
- 4) H. Yoshida, Y. Hayase, K. Fukui, T. Yamamoto: Effect of conical length on separation performance of sub-micron particles by electrical hydro-cyclone, *Powder Technology*, Vol. 219, p.29-36 (2012)
- 5) T. Yamamoto, T. Oshikawa, H. Yoshida, K. Fukui: Improvement of particle separation performance by new type hydro cyclone, *Separation and Purification Technology*, Vol. 158, p. 223-229 (2016)

(原稿受付：2022年9月26日)

解説

マイクロバブルを用いた水溶性加工油からの異物分離

著者紹介



たに い あき ひろ
谷 井 章 寛

(株)スギノマシン
〒936-8577 富山県滑川市中野島1800
E-mail : a.tanii@sugino.com

1999年長岡技術科学大学材料開発工学専攻修了、同年(株)スギノマシン入社、現在、精密機器事業本部 技術統括部 営業技術部に所属。

表1 一般的な加工液中の異物分離方法

	ろ過による分離	遠心分離	比重差による分離
メリット	フィルタを選べば高精度な分離が可能	遠心力を大きくすれば高精度な分離が可能	液を静置することで浮上・沈降する異物を分離可能
デメリット	フィルタ費用がコストとなるうえ、最終的には廃棄物になる。	油分など加工液より比重が小さい成分の分離が難しい	分離に時間を要するため、処理能力に限界あり

1. はじめに

近年、カーボンニュートラルなど環境保護が問題となり、省エネや廃棄物低減に強い関心が向けられている。工作機械業界でも同様の傾向が強く、それらは最終的にコストとしてユーザが負担することになるため、工作機械メーカーとしてはユーザから対策を求められることが多い。

当社ではそれらの要求に応えるため、マイクロバブルを用いた水処理ユニットを開発した。本製品を紹介する。

2. これまでの水溶性加工油の浄化方法

現在、一般的に用いられる水溶性加工油（ここでは水溶性の切削液，研削液，洗浄液を指す）の浄化方法について表1にまとめた。いずれもメリット・デメリットがあるが、ユーザとしては以下の要望がある。

- ① 切粉を除去してタンク内のスラッジ堆積を防ぎ、メンテナンス工数の低減を図りたい。
- ② 油分を除去して加工物表面の油残りをなくしたい。

他にも切粉・油分の存在による問題点は複数あり、図1にまとめた。これらの問題に対して理想的なのは、「切粉と油分を低コストで、新たに廃棄物を発生させずに除去する」となる。だが表1のとおり、従来の方法ではすべてを満足するものはなく、客先の要望に完全な形で応えることはできていなかった。

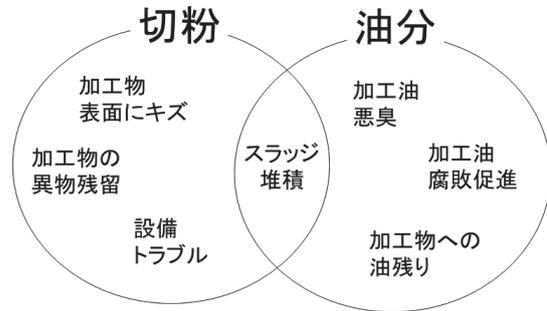


図1 水溶性加工油中の異物残留による問題点

3. 当社の水処理ユニットについて

当社では、マイクロバブルを洗浄装置の洗浄性能向上のために活用すべく検証を行っていた。その際、テスト装置の洗浄液タンクの液面に多くの異物が浮上しているのを見て「洗浄液をきれいにする事ができるのでは」と思い立ち、マイクロバブルを使った水処理ユニットの開発を進めた。

商品化した水処理ユニットの構成図と仕様を、図2および表2に示す。以下の特長を持つ。

- ① マイクロバブルで効率的に異物・油分を除去。
フィルタ不使用で産業廃棄物が発生しない。
マイクロバブルとコアレスサによって異物・油分を積極的に浮上・分離させ、それらを回収槽に集める

ことで液中の油分を回収するユニークな構造である。

不水溶性の油分を多く含む加工油をフィルタでろ過すると、フィルタの寿命を大幅に短くし廃棄量が多くなるが、本ユニットではそういった問題が発生しなくなる。

② エアだけで稼働可能。電源不要。

加工現場では100Vや200Vの電源よりも圧縮エアを供給するカプラを探す方が容易であることから、エア駆動のダイヤフラムポンプを採用し、電源が必要ない仕様とした。

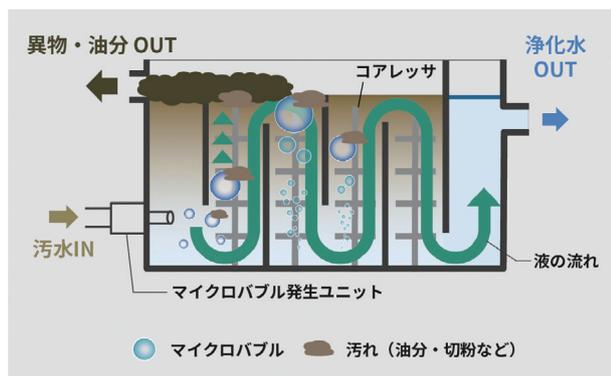


図2 当社の水処理ユニットの構成図

表2 当社の水処理ユニットの仕様

処理能力	13L/min
エア消費量	40L/min (ANR)
対応液温	Max.50℃
質量	35kg
ユーティリティ	圧縮エア (0.15MPa)

4. マイクロバブルによる異物分離メカニズム

マイクロバブルがなぜ効果的であるか、理由を以下に記す。

4.1 マイクロバブル表面の帯電

マイクロバブルの表面はマイナスの電荷を帯びている。そのため、プラスの電荷を帯びた成分を表面に引き付ける性質を持つ。この性質を利用して、以下の順番で液中の異物・油分を集めることができる。

- ① 異物・油分を含む液にマイクロバブルを混ぜると、マイクロバブルが帯びる電荷により、異物・油分がマイクロバブルに付着する。
- ② マイクロバブルが付着することで、異物・油分が受ける浮力が大きくなり、短時間で液面に浮上する。
- ③ さらに、マイクロバブルの粗大化を促進するため、

処理槽内にコアレッサを設置し、短時間かつ省スペースで油分等を集める構造となっている。

- ④ 液面に浮上したマイクロバブルが時間の経過に伴い縮小・消滅し、異物・油分だけが液面に残る。
- ⑤ 液面の異物・油分を回収することで液の浄化が可能になる。

4.2 マイクロバブル粒径

異物を「浮上」分離するため、異物の浮上速度が重要になる。その際、泡の浮上速度はつぎのストークスの式により算出できる。

$$V = 1/18 \times D^2 (\rho_p - \rho_f) g / \eta$$

V : 浮上速度 (m/s) D : 粒子径 (m)

ρ_p : 粒子の密度 (kg/m³) ρ_f : 流体の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²) η : 流体の粘度 (Pa·s)

この式によると、浮上速度は粒子径の2乗に比例することがわかる。そのため本件の用途では気泡の粒径は大きい方が、浮上速度は速くなる。さらにマイクロバブル径を大きくするため液中にコアレッサを設置し、表面にマイクロバブルを付着させる。コアレッサ表面で至近距離に付着した気泡は相互にくっつき、大きな気泡となる。結果、浮上速度の向上が促進される。

5. マイクロバブルの異物・悪臭除去効果

5.1 水溶性加工油中の切粉除去

つぎに実際の異物除去性能を示す。図3に鋳鉄の切粉を含む水溶性加工油を処理したときの液中異物量の推移を示す。これによると処理時間3minで約80%の切粉を除去できていることがわかる。

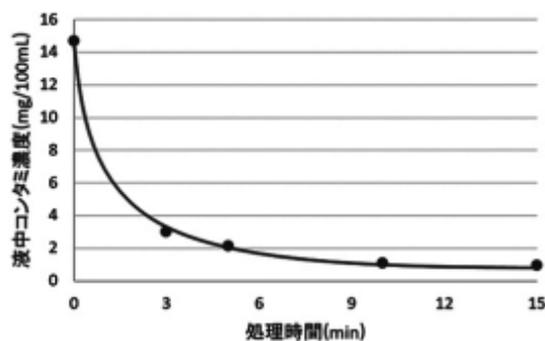


図3 切削油中の鋳鉄切粉除去事例

一般的な被削材として使われている金属材料は同様に分離可能で、鋼材、鋳鉄、アルミ、マグネシウム、真ちゅうといった金属材料は問題なく除去可能だ。切粉および金属粉除去により図1記載の諸問題の解消が期待できる。

5.2 水溶性加工油からの油分除去

近年、水溶性切削油のアルカリ性が強くなっている傾向が見られる。これは加工ワーク表面の残留油分を加水分解により除去することが目的と考えられ、それだけ油分除去に関するユーザからの要望が強いと推察される。

図4で、洗浄装置に設置した当社の水処理ユニットを1週間稼働したときの、洗浄液中の油分量の推移を示す。

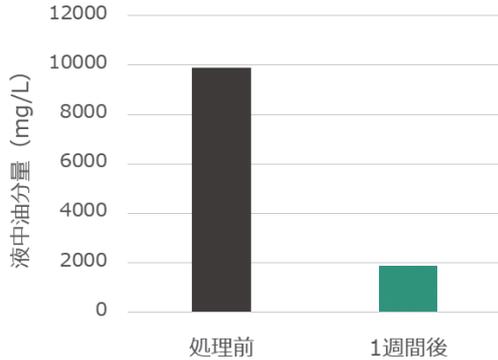


図4 水溶性洗浄剤中の油分量推移

液中に分散する油分は金属粉と同様に除去が可能だ。油分除去により、図1のように加工ワーク表面の油残りを低減するほか、タンク液面の浮上油を減らすことで、次項に示す加工油の腐敗臭低減にも効果を発揮する。

5.3 水溶性加工油の腐敗臭低減

水溶性加工油を長く使うと、腐敗臭の発生に悩まされることが多い。原因としては以下の経過をたどることが一般的である。

- ① 加工油内に不水溶性の油分（加工設備の潤滑油・前工程から持ち込まれた油分など、発生源は多岐にわたる）が多く堆積し、液面に浮くことで水溶性加工油を空気から遮断する。
- ② 水溶性加工油内に嫌気性細菌が増殖し、その際に悪臭成分を発生させる。

マイクロバブルを水溶性加工油に供給することで加工油を「ばっ気」する。その結果、液中の溶存酸素量を高め、嫌気性細菌の増殖を抑制し、悪臭の発生を抑える。事例を図5に示す。なお、「におい」という官能的に評価しがちな要素を定量的に評価するため、市販のにおいセンサを使って測定した。

測定値の目安として、ヒトの嗅覚で「許容可能なにおいの値」が400とされている。テスト開始前の600超の測定値はひどい悪臭だった。これを1か月のテストでほとんど気にならないにおいまで低減することができた。ただし、マイクロバブルの力で臭

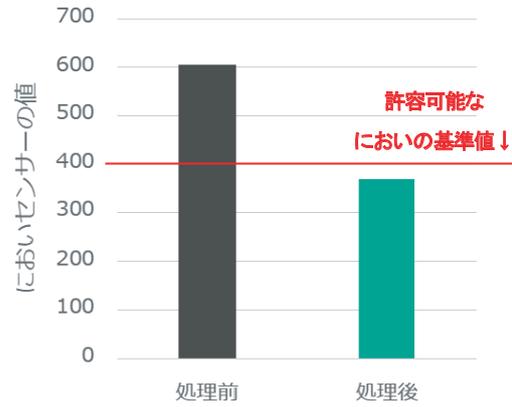


図5 水溶性洗浄剤のにおい推移

気を抑制できるのは腐敗臭だけで、持ち込まれる油分そのものにおいや、薬品臭のようなものには効果を発揮しない。

6. まとめ

水溶性加工油に含まれる切粉（金属粉）・油分・臭気を除去した事例を紹介することで、当社の水処理ユニットの有用性を示した。

- ① 金属粉・切粉を高精度で除去しながら、油分も同時に分離が可能。従来品より適用範囲が広い
- ② フィルタを使わずに異物・油分を分離可能。その結果、各種加工油を長く使えるようになり、さらに使用済フィルタのような廃棄物も発生しない
- ③ 加工液の腐敗臭を抑制可能。

生産工程で発生する廃棄物の削減は、SDGsのような今日的な考えにのっとった「持続可能な生産ラインの構築」にとって重要な要素と言える。それに加えて、コスト的にも有利なのは言うまでもない。

「におい」を抑える方法としては、現状は薬品を投入するか、加工液を交換するかのいずれかを選ぶしかない。そこにもうひとつの対策を提示できたことの意義は大きく、しかも薬品のように作業者の健康に悪影響を及ぼさない点は重要と言える。

ここでは主に加工液に関する効果について紹介したが、実際には製造現場で使われる水溶液は他にも多数あり、すでいくつかの事例では有用な結果が得られている。今後の用途拡大に期待したい。

(原稿受付：：2022年8月5日)

信大クリスタルを用いた汚染水からの重金属イオン分離

著者紹介



てしま かつや
手嶋 勝 弥

信州大学先鋭材料研究所/工学部物質化学科
〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1
E-mail: teshima@shinshu-u.ac.jp

2003年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。信州大学助手、助教、准教授を経て、2011年同大学工学部教授。結晶工学、材料科学の研究に従事。日本フラックス成長研究会、日本結晶成長学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

SDGsという言葉は、最近では日常生活においても耳馴染みのある言葉になっている。SDGsとは、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals）の略で、2015年9月の国連サミットで採択された「2030年までに持続可能な世界をめざす国際目標」である。17のゴール、169のターゲットで構成され、これに日本も積極的に取り組んでいる。外務省では「持続可能な開発目標（SDGs）達成に向けて日本が果たす役割」を2022年5月に発表した¹⁾。水に関連する課題は、SDGs 6に「安全な水とトイレを世界中に」として掲げられている。水道水をそのまま安全・安心に飲用できる国は世界でも10か国程度（9か国、14か国、15か国など数え方はさまざま）と言われ、日本はそのひとつにあげられる。しかし、最近の気象変化により、日本でも毎年、種々の災害を経験し、渇水や断水などの水問題に直面する機会が圧倒的に増えている。このような環境のもと、さまざまな水問題のうち、われわれは水をキレイにする化学という視点において、結晶材料を活用した取り組みに注力している。具体的には、イオン交換反応を指導原理とし、さまざまな水源の水に溶解する汚染物質（陽イオンや陰イオン）を吸着除去する結晶材料を研究開発している。本稿では、水に溶解する（重）金属イオン（鉛・鉄・マンガン・カドミウム・ニッケル・アルミニウムイオンなど）、や陰イオン（フッ化物や硝酸・亜硝酸イオンなど）を高効率にイオン交換（吸着除去）する結晶

材料“信大クリスタル”に焦点を当てて概説する^{2,3)}。

2. 信大クリスタルとフラックス法

信大クリスタルとは、フラックス法およびその関連技術により育成した結晶材料のことである。2022年、信州大学内に信大クリスタルラボを設置し、このブランディング活動を強力に推進している。信大クリスタルの理解を深めるために、まず、基盤技術のフラックス法^{4,5)}を説明する。

本稿の読者の皆さんは、フラックスを流束として用いる場合が多いのではないだろうか。結晶工学の分野では、フラックスを融剤（あるいは溶媒）として用いる。つまり、フラックス法とは液相からの結晶育成技術の一種であり、融解するフラックスの中で、溶質成分の過飽和状態を制御することでさまざまな結晶を晶出させる。一般に、フラックスとして塩（酸化物やハロゲン化物など）や金属などが用いられる。これらのフラックスを用いることで、水を溶媒にした結晶育成に比べ、高温溶液を実現できるため、多様な結晶種を育成できる。図1に、結晶A-フラックスBの共晶型擬二成分系状態図を例示する。フラックス法の原理や長所をこの状態図から読み取ることができる。結晶とフラックスの融点はそれぞれ T_A と T_B であり、その混合物の共晶温度は T_E となる。つまり、適切な組成で混合した場合（組成 X_E ）、結晶Aの溶解温度は融点よりもはるかに低い温度となる。これが特長の一つであり、目的物質の融点よりもはるかに低い温度でその単結晶を育成できることにつながる。ここで、この状態図を少し詳しく説明する。組成 X_a の混合物を温度 T_1 まで加熱すると、点aの液相になる。冷却を駆動力に結晶を成長させる場合（下向き矢印）、 T_2 まで冷却すると点bで溶解度曲線（液相線）と交わる。通常、この点bでは、結晶は晶出しない。溶液のまま、さらに温度が T_3 （点c）まで低下すると、溶解度よりも過剰な溶質を含む過飽和溶液となる。点線を過溶解度曲線といい、両曲線の間領域を準安定領域と呼ぶ。この過飽和溶液は不安定な状態であり、過剰に溶解した溶質を晶出することで平衡状態（飽和状態）にな

る。この晶出がフラックス結晶成長の基本原理である。フラックス法の長所には、先述の結晶成長温度の低温化だけでなく、育成結晶が結晶構造を反映した平坦な結晶面で囲まれた自形をもつことや、熱歪みが少なく高品質な結晶を育成できることなどもある。さらに、結晶育成装置が簡便で、実験操作が容易なことも特長といえる。比較的低温で結晶を育成できるメリットは、CO₂排出量やエネルギー使用量の削減のみならず、高融点の物質・分解溶解する物質・多形転移がある物質など、さまざまな物質の結晶を育成できることである。

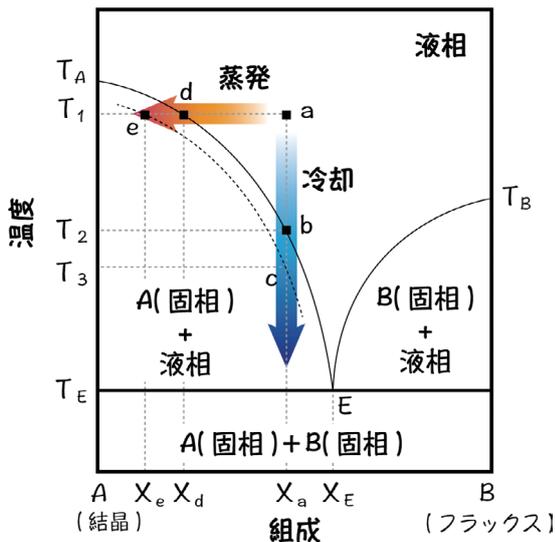


図1 結晶A—フラックスBの共晶型擬二成分系状態図（概念図）

当研究室では、このフラックス法を用いて、高品質な単結晶粒子や薄膜・複合体を育成している。特に、環境やエネルギー問題解決に資する結晶材料の創製に注力している。具体的には、水・空気・土壌を浄化する吸着（イオン交換）結晶、リチウムイオン二次電池（LIB）や次世代蓄電池の正極や負極活物質、ならびに固体電解質の結晶材料、可視光で水を分解して水素を作る可視光応答型光触媒用結晶材料、あるいはバイオマテリアルや機能性フィラーなどを例示できる。図2に、フラックス育成したLIB用正極活物質結晶粒子を示す [LiCoO₂, LiMn₂O₄, Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂, Li(Ni_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3})O₂]。いずれの結晶粒子も結晶面（自形）が発達する様子を確認できる。たとえば、右上のLiMn₂O₄結晶粒子の場合、八面体を基本形状とし、スピネル型構造をよく反映している⁶⁾。しかし、左上のLiCoO₂結晶粒子では、少し様子が異なる。固相反応法やその他の方法で作製したLiCoO₂粒子は、一般に六角板（c面発達）を基本形状とするのに対し、フラックス育成した

LiCoO₂結晶粒子は切頂六角両錐形（六角樽型；c軸成長）を基本とした⁷⁾。フラックス法では、成長する結晶の安定形状はフラックス種やその他結晶育成条件に依存するため、このような特徴が現れる。なお、LiCoO₂の結晶構造にかんがみると、今回のc軸成長したフラックス育成結晶粒子はリチウムイオン伝導に優れると期待できる。

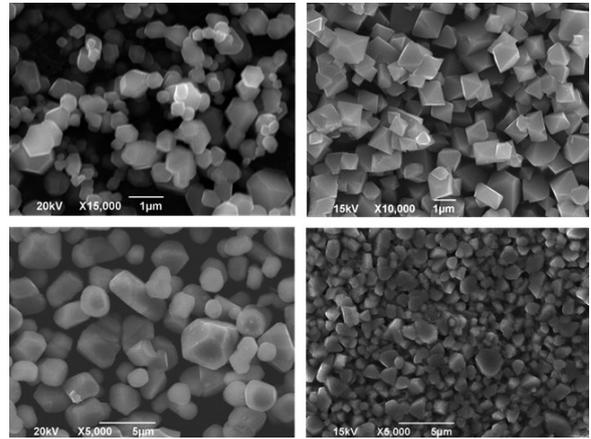


図2 フラックス法で育成したリチウムイオン二次電池用正極活物質結晶粒子のFESEM像 [(左上) LiCoO₂, (右上) LiMn₂O₄, (左下) Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂, (右下) Li(Ni_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3})O₂] ^{6,7)}

3. (重) 金属イオン交換体結晶

当研究室では、300を優に超えるフラックス結晶育成条件（レシピ）を保有し、さまざまな分野で活躍できる結晶・薄膜・複合体を創製してきた。なかでも、水中に溶解する（重）金属イオンをイオン交換反応により吸着除去するチタン酸ナトリウム（Na₂Ti₃O₇；NTOと略記）は、当研究室の社会実装第1号のフラックス育成結晶である。重金属イオンによる水源汚染は、開発途上国のみならず、世界のいたるところで問題視されている。たとえばPbイオンによる水汚染については、米国ミシガン州フリントで起きた公害が、まだ記憶に新しい（2014年～）。詳細は割愛するが、鉛管からの溶出が起源となった。ミシガン州政府は、2020年、水道水の鉛汚染に関する住民訴訟において、賠償金を支払うこととようやく住民合意できたと発表した。日本にも鉛管は残存するため、このような問題が起きる可能性はゼロとは言えない。また、ユニセフと環境NGOピュアアースの報告書⁸⁾には、世界全体で最大8億人の子どもたちに鉛中毒が広がっている可能性がある」と記載されている（約半数は南アジア）。ただし、この鉛中毒の原因は、汚染水からのPbイオンの摂取だけでなく、鉱業やリサイクルなどの産業由来、ならびにさまざまな工業製品からの溶出など

であるといわれている。なお、CdやCrイオンなどによる公害もたびたび話題にのぼっている。

図3に、NTOの結晶構造とフラックス育成した結晶の拡大表面FESEM像を示す²⁾。NTOは単斜晶系(空間群 $P2_1/m$)に属す化合物である。3つの TiO_6 八面体が稜を共有する基本単位をもち、これが頂点や稜をさらに共有して連なり、主骨格となる負帯電シート構造を作る。このシート間にNaイオンが存在することで、電荷を補償して安定な層状構造となる。

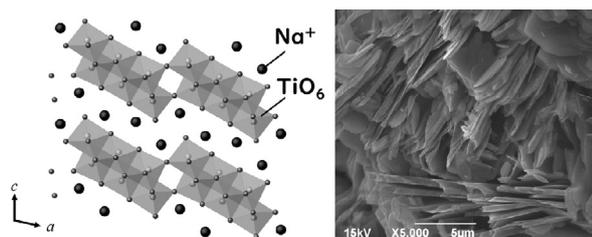


図3 (左) $Na_2Ti_3O_7$ の結晶構造と(右)フラックス育成した結晶粒子の拡大表面FESEM像²⁾

層間のNaイオンは他の陽イオンと容易に入れ替わる特徴があるため、イオン交換体として機能する。このNTOを $NaNO_3$ フラックスから育成すると、図のようなミルフィーユ形状の結晶粒子を育成できることを見いだした。ミクロにもマクロにも特長的な層状化合物となるため、優れた性能を発現できる。他の合成手法ではこのような結晶形状を実現できないため、フラックス法の長所であると言える。

図4に、JIS規格にもとづいて実施した9種類の(重)金属イオンのバッチ式吸着試験結果を示す。(重)金属イオンの初期濃度を100ppbに調製し、NTO結晶材料を1g/Lで添加した。約10時間の振とう後、9種類の(重)金属イオンを99%以上除去できた²⁾。振とう1分間以内でも同等の除去性能を発現している。

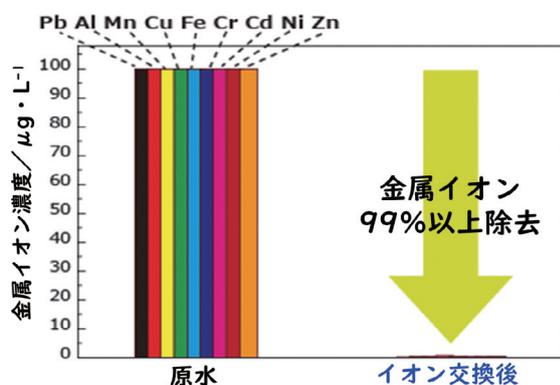


図4 フラックス育成した $Na_2Ti_3O_7$ 結晶の(重)金属イオン吸着性能[JIS規格評価, 9種類(Pb, Al, Mn, Cu, Fe, Cr, Cd, Ni, Zn)の金属イオン]

NTOの層間に存在するNaイオンと(重)金属イオンがイオン交換することで、水中から(重)金属イオンを除去可能となる。

さらに、家庭用浄水器溶解性鉛ろ過能力試験(JIS S 3241)にて、NTO結晶、市販の無機系吸着剤およびイオン交換繊維の鉛イオン除去性能(80%除去率)を通水試験で比較したところ、同じ体積ではNTO結晶は市販剤の約1.5倍、イオン交換繊維の約3倍の通水量(浄化量)を実現した。このNTO結晶の通水試験結果は、浄水器用カートリッジで要求される性能基準を十分に達成するとともに、市場で用いられている鉛イオン除去剤よりも優れた性能を示した。

浄水器应用到際し、フラックス育成したNTO結晶は別の大きな特長を備えていることがわかった。一般的な陽イオン交換体は、水中に溶解するイオンに対する選択性は乏しく、上述の9種類のイオン種などとCaやMgなどの硬水に多く含まれる成分を区別することなくイオン交換(吸着)する。そのため、硬水環境では、人体に有害な(重)金属イオンを高効率に選択除去することが難しい。それに対し、フラックス育成したNTO結晶は、KやMg, Caなどのミネラル成分はほとんど除去することなく、(重)金属イオンを選択的に交換(吸着)できるため、硬水環境において優れた(重)金属イオン交換性能を発揮することを明らかにした。海外の浄水器应用到際し、特に優位性があると期待する。

4. 陰イオン交換体結晶

われわれは、前段で述べた陽イオン交換体だけでなく、陰イオン交換体結晶も創製し、環境問題に挑戦している。本稿では、陰イオンのうち、東アフリカで大きな問題となっているフッ素汚染(フッ化物イオン)対策を紹介する。東アフリカのタンザニア・ケニア・エチオピアなどは大地溝帯に位置し、火山活動の影響により、地下水に多量のフッ素が溶け込んでいる。実は、多量のフッ素の摂取は人体に大きな悪影響を及ぼす。微量のフッ素は、歯の再石灰化を促進するため、我が国でも歯科治療で用いられ、歯磨き粉に含まれることもある。世界に目を向けても、水道水に微量のフッ素を添加(フロリデーション)している国もある。しかし、タンザニアの場合、地下水に含まれるフッ化物イオン濃度は10ppmを優に超え、多いところでは40ppmに達する。WHOが定める基準値は1.5ppm以下であり、その値をはるかに超える。このような水を摂取し続けると、さまざまなフッ素症[斑状歯、骨フッ素症(骨の奇形)、奇形フッ素症(間接強直)など]を引

き起こすことが知られている。このフッ素汚染を解決するために、タンザニアでは牛の骨を焼いて作る骨炭が利用されている。しかし、フッ素濃度が高すぎることや骨炭を安定製造できないことなどにより、解決にはいたっていない。

当研究室では、陰イオン交換結晶として、層状複水酸化物 (LDH) を提案している。図5に、NiCo系LDHの結晶構造 (左) とフラックス援用トポケミカル法で作製したLDH結晶粒子 (右) を示す³⁾。このLDHは、ホスト層の金属水酸化物シート $\{[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}\}$ と陰イオン・水分子 $[(A^{n-})_{x/n} \cdot H_2O]$ が交互に積層した構造である。陰イオン・水分子は、ホスト層に存在するOH基と水素結合や静電引力を介して相互作用することで、その層内に留まることができる。このような構造をもつため、層間に存在する陰イオンは、条件次第で水中に溶解する他の陰イオンと交換される。イオン交換容量や速度などは、金属水酸化物シートに存在する2価と3価の金属イオンの種類、比率や配列に大きく依存する。

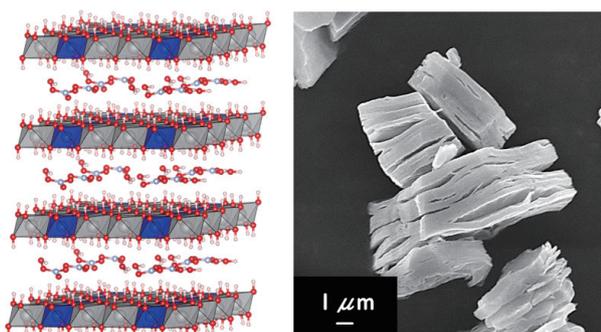


図5 (左) NiCo系LDHの結晶構造と (右) フラックス援用トポケミカル変換法で作製した結晶粒子のFESEM像

NiCo系LDH結晶粒子を育成する際には、まず、フラックス法で前駆体結晶 $NaNi_{0.7}Co_{0.3}O_2$ を育成した。引き続き、酸化的加水分解処理と還元処理を施すことで、図5右のような層状結晶粒子を育成できた。特に、前駆体母構造の積層形状を維持するように、トポタクティック反応させることが重要となる。このような積層形状を一般的なLDH製造方法 (共沈法など) で実現することはむずかしく、われわれの結晶育成技術の特長となっている。

図6に、NiCo系とNiFe系LDH結晶粒子のフッ化物イオン吸着試験結果を示す⁹⁾。なお、これらのLDHは、フッ化物イオン交換後、単純な操作で初期状態に戻すことができる。そのため、今回は6回のサイクル試験を実施した。具体的には、初期のフッ化物イオン濃度を8 ppm (タンザニア・アルーシャ州の代表的な濃度域) とし、固液比1 g/L、反応時間1時間、室温で吸着試験を実施した。グラフから

も明らかなように、そのほとんどで95%以上のフッ化物イオン除去率を示した。つまり、この固液比にて、8 ppmからWHO基準値の1.5 ppm以下を容易に実現できる。より高濃度のフッ化物イオンが存在する地域では、LDH添加量 (固液比) を調整すれば対応できる。また、サイクル後も初期性能を維持できるため、造水コストの削減も大いに期待できる。現在は、さらに改良したLDHを活用し、タンザニアでの小型プラント実証試験を準備している。

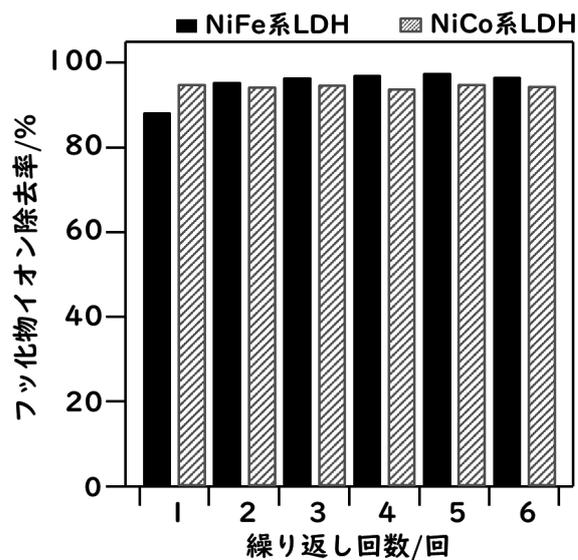


図6 NiCo系 (赤) とNiFe系LDH (青) を用いたフッ化物イオン吸着試験 (繰り返し性能評価)

5. 大学発の社会実装

当研究室でフラックス育成したNTO結晶粒子は、2018年に社会実装 (上市) を実現している。30ml 程度の結晶育成にはじまり、1L、5Lとスケールアップに成功し、材料メーカーでの量産化を実現した (ライセンス供与)。材料自体や結晶製法の安全性評価もクリアし、世界的認証機関の米国衛生基金 (NSF) の認証も3種 (結晶単体、結晶造粒体、結晶/活性炭複合体) で取得した。現在、NTO結晶粒子を世界中で飲料水用途に使用できる。この結果、住宅設備メーカーと共同で携帯型浄水ボトルを開発 (図7左) し、販売するにいたっている。また、2020年には家庭用浄水器のカートリッジに搭載され、2022年2月にはティーバッグ型も販売を開始した。

さらに、NTO結晶の量産化を実現した材料メーカーと共同で産業用カートリッジを開発し、日本酒の酒蔵の浄水設備に採用された。先述のとおり、醸造に必須のミネラル成分 (CaやMgなど) を除去することなく、FeやMnなどの酒造りに悪影響を及ぼ

す重金属イオンを選択的に除去でき、地元の個性を生かした水を提供できた。この信大クリスタルにより磨かれた天然水を用い、2021年2月、日本酒が誕生した(図7中)。現在では第3弾の製品が販売されるとともに、クラフトビールメーカーからはフラックスを冠する製品(図7右)が生まれた。長野県の地域に密着した加工食品分野や農業分野などでも信大クリスタルを搭載した浄水設備の活用が始まっている。もちろん、産業排水や資源回収の分野に応用するための共同開発も多数開始している。汚染水の浄化はもとより、地域の魅力としての水を供給する活動にまで展開できており、この信州の地に“水を中心としたエコシステム”が生まれた。



図7 (左) 携帯型浄水ボトルとそのカートリッジ(挿入図)、(中) 日本酒、(右) クラフトビール

6. おわりに

本稿では、イオン交換反応を指導原理とし、水に溶解するさまざまな有害イオン種を除去する結晶材料の創製から社会実装までを概説した。特に、結晶育成技術としてフラックス法を用いることで、他の材料にはない特長を備えた結晶となることを示した。フラックス法は古くて、単純・ニッチな結晶育成技術であるが、環境調和型プロセスとしても優れている。最近、環境・エネルギー・半導体分野において注目を集めていると実感する。国内外の水に関わる広い分野において、信大クリスタルは分離技術として社会を支える第一歩を踏み出し始めた。フラックス法による結晶育成技術は、現在話題のDXとの相性がきわめてよく、新次元の結晶育成を提案できる下地が整いつつある(これについては今後の報告を待たれたい)。われわれは今後もフラックス結晶育成技術を深化させ、ニッチ領域から、学術的・産業的な材料フロンティアに挑み続ける。

最後に、当研究室では、水・エネルギー問題に関し、人々の行動変容に関する取り組み“Team swee”を開始した¹⁰⁾。これはShinshu Water for Ecology & Environmentの頭文字をとった活動で、信大クリスタルを搭載した浄水器を備えた無料アクアスポットを長野県内に2022年8月現在、約10か所設置した(駅、空港、市役所やその他公共施設など)。信大クリスタルで水道水を地元のミネラルウォーターに変えて提供する場である。ボトル水の課題である水を運ぶエネルギーとプラスチックの削減に貢献できる。水との新たな関わり方を、8つの水源をもつ“水の上流県”信州から市民一体となって発信することを推進している。

参考文献

- 1) 外務省 国際協力局 地球規模課題総括課: 持続可能な開発目標(SDGs)達成に向けて日本が果たす役割, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2022)
- 2) 鈴木清香, 手嶋勝弥, 清原瑞穂, 上川秀哉, 大石修治: 層状 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 結晶の NaNO_3 フラックス育成と浄水特性, *Journal of Flux Growth*, Vol. 6, p. 8-11 (2011)
- 3) Sudare, T., Tamura, S., Hayashi, F., Teshima, K.: Highly crystalline Ni-Co layered double hydroxides with hierarchical structures prepared via topotactic transformation: High capacity for removal of nitrate ions, *Inorganic Chemistry*, Vol. 58, p. 15710-15719 (2019)
- 4) 大石修治, 穴戸統悦, 手嶋勝弥: フラックス結晶成長のはなし, 日刊工業新聞社 (2010)
- 5) 日本フラックス成長研究会編: 液相からの結晶成長入門, 日刊工業新聞社 (2021)
- 6) Zettsu, N., Onodera, H., Handa, N., Kondo, H., Teshima, K.: Growth of hollow-structured LiMn_2O_4 crystals starting from Mn metal in molten KCl through the microscale Kirkendall effect, *CrystEngComm*, Vol. 18, p. 2105-2111 (2016)
- 7) Teshima, K., Lee, S.H., Mizuno, Y., Inagaki, H., Hozumi, M., Kohama, K., Yubuta, K., Shishido, T., Oishi, S.: Environmentally friendly growth of well-developed LiCoO_2 crystals for lithium-ion rechargeable batteries using a NaCl flux, *Crystal Growth & Design*, Vol. 10, p. 4471-4475 (2010)
- 8) ユニセフレポート, <https://www.unicef.org/reports/toxic-truth-childrens-exposure-to-lead-pollution-2020>
- 9) Tiplook, M., Sudare, T., Shiiba, H., Seki, A., Teshima, K.: Single-step topochemical synthesis of NiFe layered double hydroxides for superior anion removal from aquatic systems, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 13, p. 51186-51197 (2021)
- 10) <https://shindaicrystal.com/swee/>

(原稿受付: 2022年8月5日)

解説

河川水からの最新じんかい塵芥除去技術

著者紹介



まき し たつ お
牧 志 龍 男

日本エンジニア株式会社
〒480-1137 愛知県長久手市下川原15-1
E-mail : t-makishi@nippon-engineer.co.jp

1988年信州大学大学院工学研究科修了，2000年日本エンジニア株式会社入社現在に至る。

1. はじめに

日本は年平均1,718mmと世界平均の2倍近い降水量があり水に恵まれている¹⁾。降雨となって大地にもたらされる水の多くは河川水となって地表を流れ下る。河川水は、飲料水、工業用水、農業用水、水力発電など多岐にわたって活用されており、われわれ日本国民の生活を支える重要な資源となっている。

しかしながら日本は国土が狭く急峻な地形から降った雨水は短時間で海に到達し、季節によって降水量の変動が大きく、近年ではゲリラ豪雨と呼ばれる局地的に短時間で非常に多くの雨を降らせる気象現象も頻発し、水資源確保の上で不安定要因となっている。

ひとたび豪雨が発生すると増水により多量の土砂が河川水に混入する。また、日本の国土面積の約3分の2は森林であり²⁾、そのうち35%が落葉広葉樹である³⁾。落葉広葉樹は落葉期になると一斉に落葉し、風雨によって河川に流れ込む。

これらの土砂や落葉、倒木などの流木、さらには人の捨てるゴミといった塵芥（じんかい：ちりとごみ）はわれわれの想像以上に河川に流れ込んでおり、取水口や水路、管路の閉塞原因となり水道や農業用水の断水、水力発電の停止といった被害をもたらしている。

資源として河川水の有効活用を図るうえで、河川水に混入する塵芥の分離除去は大きな課題となっている。

2. 従来からの河川水からの塵芥除去技術

これまで、河川水の取水における塵芥の除去技術には、ふるい分け作用と沈降分離作用を用いた技術が採用されている。

ふるい分け作用とは、ふるいの目幅あるいはフィ

ルターの孔径よりも大きい固形物の通過を阻止し、液体を通過させ仕組みである。

沈降分離作用とは、液体の比重よりも大きい比重の固体粒子を重力的作用によって沈降する現象を利用して固体と液体を分離する仕組みである。

河川水を取り込むにあたり、大規模な場合はダム、小規模な場合は取水堰（せき）を河川に設け、一旦堰止めた水を取り込むことが広く行われている。

ダムの場合、貯水量が多いことから河川水の滞留時間が長く土砂などの沈降分離効果が得られる。取水口にはバースクリーンと呼ばれるふるい分け作用を用いた構造物を設置し、流木やゴミなどの浮遊物の流入を防ぐことで塵芥除去を行っている。

取水堰の場合、貯水量が少なく河川水の滞留時間が短いので土砂などの沈降分離効果は期待できない。取水口にはダムと同様にバースクリーンを設置することでふるい分け効果を得ているが、バースクリーンのスリット幅よりも小さい土砂の流入は避けられない。そこで一旦取り込んだ水を沈砂池と呼ばれる水槽を設けることで滞留時間を確保し、沈降分離効果で土砂を沈降させることで塵芥除去を行っている。

3. 小規模取水施設における塵芥除去技術

本稿では、小規模取水施設における多様な塵芥除去技術を中心に取り上げ紹介する。

3.1 バースクリーン

バースクリーンとは、板状ないし丸棒状のバーを一定間隔で配置し、水の流れを受け止めふるい作用で河川水と塵芥を分離する。河川水はバーとバーの間を通過し、バーの間隔より大きな塵芥はバーに捕捉される仕組みとなっている。

主に取水堰近くに設けられた取水口に設置する（写真1）。

さらに沈砂池からの流出側に取水口に設置したバースクリーンよりも間隔の狭いバースクリーンを追加で設置することもある。バーのピッチは水の用途や河川の状態を考慮のうえ決定する。

設備の大きさに対して多くの取水量を得ることができるが捕捉した塵芥の行き場がなく、時間の経過とともに閉塞し必要な水量が得られなくなる。特に落葉期は短時間で閉塞する（写真2）。



写真1 バースクリーン設置例



写真2 バースクリーン閉塞状況

メンテナンスは捕捉した塵芥の掻き揚げといった清掃作業が中心であるが、水圧で押し付けられた塵芥の除去は重労働で容易ではない。除去作業によって掻き揚げた塵芥は適切に廃棄処分する必要がある。

3.1.1 バースクリーンの応用例

バースクリーンは塵芥による閉塞を抑制するためさまざまな改良がなされている。バースクリーンの応用例として、チロル型式、バックストリーム型式、チロルⅡ型式が紹介されており、特徴や機能についてわかりやすく解説しているので⁴⁾、一部引用して掲載する(図1)。

3.2 機械式除塵機

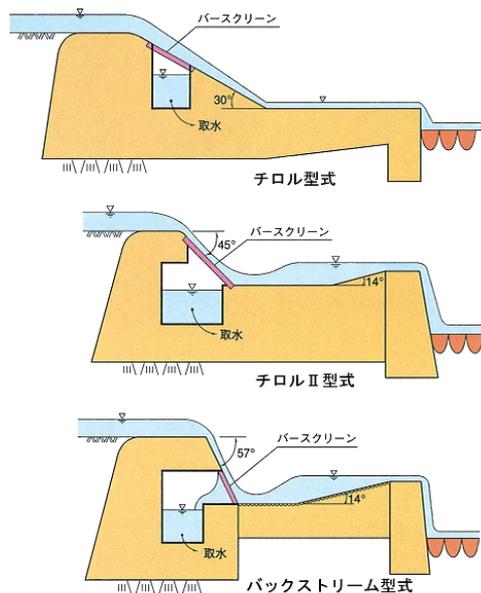
機械式除塵機とは、電気などの動力源を得て機械的に塵芥を除去するものであり、さまざまなタイプが存在する。主に塵芥を捕捉するスクリーン、捕捉した塵芥を掻き揚げるレーキ、掻き揚げた塵芥を搬送するコンベア、塵芥を貯留するホッパ、機械装置を制御する機側操作盤で構成される(図2)⁵⁾。

ふるい作用による塵芥分離の仕組みはバースクリーンと同様である。

バースクリーンと比較し、掻き揚げ動作が自動化できるのでバースクリーンの欠点である時間の経過による閉塞、捕捉した塵芥の除去作業が重労働といった清掃負担が軽減される。

主に沈砂池の流出側に設置される(写真3)。取水堰に設けられた取水口には大きな転石や流木で破損の恐れがあることから設置を避ける。

メンテナンスは、機械の可動部に塵芥が挟まった



溪流取水工の型式

図1 バースクリーンの応用例⁴⁾

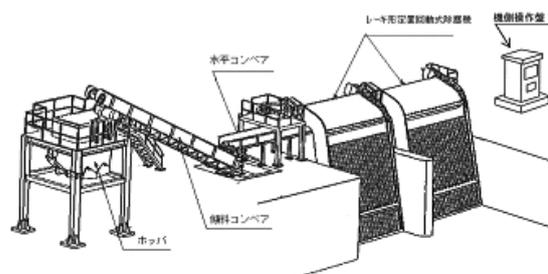


図2 機械式除塵機の構成例⁵⁾



写真3 機械式除塵機設置状況

り過度な塵芥が流れ込んだ時に破損した場合の修繕や摩耗部品の交換に加え、しゅう動部への定期的な注油といった保全作業が必要となる。

塵芥除去動作によって掻き揚げた塵芥の処分が必要なのはバースクリーンと同様である。

なお、動力を必要とするため、設置場所は電源の引き込みが可能な地点に限定され、山間部の奥深い場所では電源の引き込み工事がコストアップ要因となる。

3.3 従来型メッシュスクリーン

バースクリーンのチロル型式を発展させたものとして、バースクリーンに代わりスリット幅1mm程度

のメッシュを用いたメッシュスクリーン取水装置が製品化され（写真4）、水道施設を中心に普及が進んでいる⁶⁾。



写真4 メッシュスクリーン取水装置⁶⁾

通常バースクリーンのスリット幅は、河川の取水口では100mm前後、沈砂池など河川からの取り込み後では20mm前後と比較すると、メッシュスクリーン取水装置は極めて小さな1mmのスリット幅となっている（図3）。

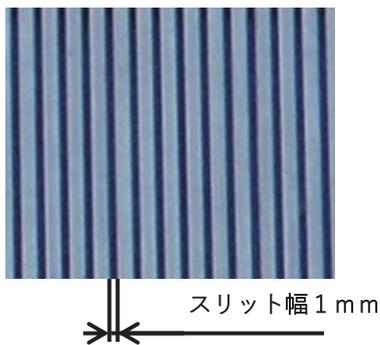


図3 メッシュスクリーンのスリット幅

スリット幅が小さいのでより多くの塵芥が除去でき、流木、土砂、落葉などの塵芥に対する除去能力はきわめて優れている。

チロル式ではバーの配置が下方勾配15度～30度であるのに対し、メッシュスクリーン取水装置ではメッシュスクリーンが45度前後と大きな下方勾配で配置されている。下り勾配を流れる水流でメッシュ表面を常に洗い流しながら水を取り込み、塵芥はメッシュ表面に沿って余剰水とともに下流に流されるので、スリット幅が小さいにも関わらず閉塞しにくく長期間安定して取水量が維持できる（図4）。

主に河川に設けられた取水堰に設置し（写真5）、堰堤上部を越流した水が取水面に配置されたメッシュスクリーン表面を流れ下る際にメッシュに設けられたスリットから装置内部に取り込まれる仕組みとなっている。

メンテナンスはメッシュ表面をブラシでこする程度の清掃作業で負担が小さいことに加え、数か月間隔の清掃作業で十分に取水量が維持できる。なお、塵芥は河川の下流に流れていくので掻き揚げ作業は

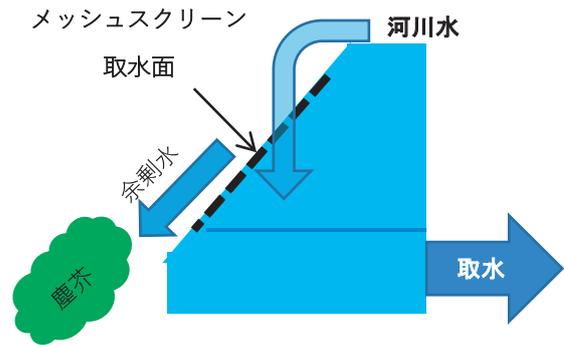


図4 メッシュスクリーン取水装置の仕組み



写真5 メッシュスクリーン取水装置設置状況

不要である。

可動部がないので、機械式除塵装置と比較すると故障の発生が少なく信頼性が高い。

4. 最新のメッシュスクリーン取水装置

近年、従来型のメッシュスクリーン取水装置の発展型として、取水面であるメッシュを水流方向に二分割し下方勾配が45度前後の取水面と水平に近い取水面で構成された新型メッシュスクリーン取水装置が開発され（写真6）、小水力発電施設を中心に導入が進んでいる⁷⁾。



写真6 新型メッシュスクリーン取水装置

新型メッシュスクリーン取水装置は、2つの取水面を持つ構造から水車発電機との協調運転により取水面を逆流洗浄する機能を発揮する。

取水面に用いられるメッシュスクリーンは従来型メッシュスクリーン取水装置と同様のものが用いられている。

逆洗機能について以下に述べる。

平常時には、流下する水は下方勾配が45度前後の取水面と水平に近い取水面の双方からすべて取り込まれ余剰水が発生しないので従来型メッシュスクリーン取水装置と比較すると取水効率の向上が図られている。塵芥は下方勾配が45度前後の取水面では洗い流され水平に近い取水面で捕捉される仕組みとなっており、時間の経過とともに塵芥が堆積する(図5)。

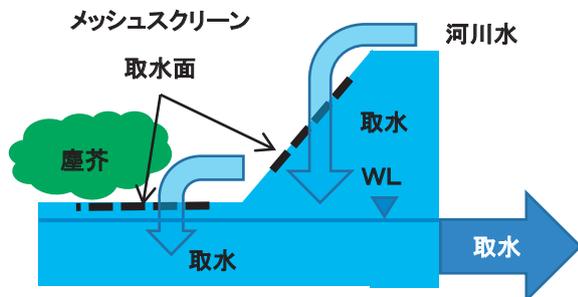


図5 平常時の取水状況

逆流洗浄時には、ある程度塵芥が堆積したら水車のガイドベーンやバルブの操作で沈砂池やヘッドタンクから流出する水量を一時的に絞ることでヘッドタンクや沈砂池の水位を上昇させる。水位が水平に近い取水面を上回ると、下方勾配45度前後の取水面から流入した水が水平に近い取水面から逆流する。この逆流によって塵芥を浮き上がらせ、下方勾配45度前後の取水面に取り込めなかった水の水流で余水吐きに押し流し排出する効果を発揮する(図6)。塵芥の排出が完了したらガイドベーンやバルブの開度を元の状態に戻すことで平常運転に移行する。

主に河川から取り込んだ後の沈砂池や小水力発電施設のヘッドタンクなどに設置される(写真7)。

この新型メッシュスクリーン取水装置は株式会社藤巻建設が事業主となっている一般財団法人新エネルギー財団の「米子北の沢用水発電所水車等実証モデル事業」に採択され、現在長期実証試験を継続している。

塵芥除去能力は、長さ約100mmの大きい広葉樹の葉、長さ約50mmの中程度の広葉樹の葉に対する除去率は各々100%、長さ20mm、太さ約0.5mm程度の小さい針葉樹の葉に対する除去率は92%と非常に優れた結果が得られている。これにより塵芥に起因する水車発電機の故障が皆無となり、水車発電機の設備利用率向上に寄与している。

メンテナンスは、従来型メッシュスクリーン取水装置と同様にメッシュ表面をブラシでこする清掃作業で済む。清掃間隔を3カ月としても十分な取水能力を維持でき、補足した塵芥も自動的に行う逆流洗浄機能により余水吐きへ排出されるので、掻き揚げ作業といった重労働から解放され維持管理負担の著しい軽減が図られている。

新型メッシュスクリーン取水装置は、水車発電機

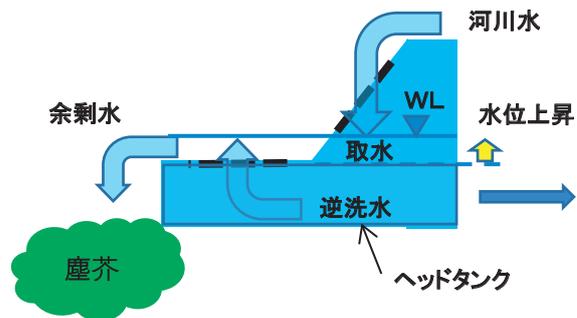


図6 逆流洗浄の仕組み



写真7 新型メッシュスクリーン取水装置設置状況

の設備利用率向上と維持管理負担の軽減によって小水力発電施設の採算性向上に大きく貢献している。

5. まとめ

これまで河川水における塵芥分離除去技術について代表的なものを紹介した。実際に導入し適切な塵芥除去効果を得るには、どの方法も長所と短所を持ち合わせていることを理解し、実際の現場状況に適した方法を選択する、あるいは複数の手段を組み合わせて短所を補完することが重要である。

謝辞

最後に、バースクリーンの応用例として溪流取水工の型式のイラストを提供いただいた独立行政法人水資源機構三重水管理所様、米子北の沢用水発電所水車等実証試験モデル事業のデータを提供いただいた株式会社藤巻建設様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平成16年版日本の水資源：国土交通省土地・水資源局水資源部
- 2) 令和3年度森林及び林業の動向：林野庁
- 3) 森林生態系多様性基礎調査(第3期)：林野庁
- 4) <https://www.water.go.jp/chubu/mieyosui/keiryuu/index.html>
- 5) 農業水利施設の機能保全の手引き「除塵設備」：農林水産省農村振興局整備部設計課
- 6) <https://www.nippon-engineer.co.jp/product/1818/>
- 7) <http://jyoin.com/products.html>

(原稿受付：2022年8月24日)

下水処理における膜処理技術

著者紹介



あら い よし あき
新 井 喜 明

株式会社 明電舎
〒141-6029 東京都品川区大崎2-1-1
E-mail : arai-yo@mb.meidensha.co.jp

1980年 株式会社明電舎に入社、水処理システム、バイオマス発電、膜処理技術の研究に従事。日本エネルギー学会などの会員、技術士（上下水道部門）、修士（工学）。

1. はじめに

膜処理技術は、分離機能を持つ固体の薄膜を利用し、対象物質と溶液をその大きさで分ける（サイズ分離）ことや溶解-拡散現象などを利用して分離する技術である。膜の分離機能のみを利用して処理することや、それ以外の処理法と組み合わせて処理することを区別する場合もあるが、ここでは、いずれも膜処理技術とする¹⁾。膜処理技術は、1800年代に細胞膜の透析現象が発見され、1960年代以降に開発が進み、1980年代から普及し始めた。膜処理技術において膜表面の閉塞が問題となるが、膜素材の開発が進み、海水淡水化、工業排水処理・再生水化、下水処理・再生水化等の幅広い分野で適用が拡大されつつあり、水ビジネスにおいて最近注目されている技術のひとつとなっている。本報告では、膜処理技術の概要と下水処理への導入効果やその事例を紹介する。

2. 膜処理技術について

2.1 膜処理技術の概要

膜処理技術は、膜に供給水を通し、汚濁物質を分離する技術である。特に、下水処理分野では膜処理技術は膜種類の選定と生物処理等の組み合わせによって、従来の下水処理プロセスの代替技術としてさまざまな適用可能性が期待される。

膜処理技術の応用範囲としては、

- ・各種製造業（精製、濃縮、分離、回収、脱水）
- ・医療用（血液透析、人工肺）

- ・水処理（海水淡水化、水道、排水処理、排水クローズドシステム）
 - ・燃料電池
 - ・その他
- 等がある²⁾。

2.2 膜の種類

水の浄化のための膜分離処理に使用される膜の種類には、分離対象の大きい順に、精密ろ過（micro filtration, MF）膜、限外ろ過（ultra-filtration, UF）膜、ナノろ過（nano filtration, NF）膜、逆浸透（reverse osmosis, RO）膜がある。

MF膜（公称孔径0.1～0.4 μm ）は主に懸濁物質等の固液分離、UF膜（公称孔径0.01～0.1 μm ）は中～高分子量の物質の分離、RO膜はさらに低分子量のイオンまでの分離を目的とする。NF膜はUF膜とRO膜の中間に位置付けられ、硬度成分等の分離に使用される。膜分離活性汚泥法（以下、MBR；Membrane Bio-reactor）においては、一般にMF膜ないしはUF膜が適用されている。

3. 膜処理技術の下水処理への導入

3.1 MBRの概要

MBRは、下水処理において処理水と活性汚泥の固液分離に膜処理技術を適用した方法である。現在、日本国内では20を超える下水処理場でMBRが稼働中である。

MBRに使われる膜エレメントには、その膜部分の素材により有機膜と無機膜の2種類に大別される。有機膜はポリエチレン（PE）、ポリフッ化ビニリデン（PVDF）等の高分子化合物を素材とし、無機膜はセラミック等の無機化合物の焼結体を素材としている。また膜エレメントに組み込む膜の形状には平膜（板状膜）、中空糸膜、管型膜などがあり、膜エレメントへの型式としては平膜型、平膜積層型などがある。

3.2 MBRの特長

- 1) 運転管理項目が少なく、維持管理が容易

従来の活性汚泥法において、生物処理工程後に汚泥と処理水を分離する工程を、最終沈殿池での沈殿

分離に代えて膜ろ過で行う。MBRでは最終沈殿池が不要となるため通常の下処理場の最終沈殿池で発生するバルキング（バルキング：活性汚泥が分散し、圧密性が悪化することで、沈降しにくくなり、固液分離ができにくくなる現象。最終沈殿池での沈降性が悪くなり、処理水に汚泥が混じり処理水の基準値を超過する原因となる）や汚泥界面に注意を払う必要がなく汚泥管理の負担が少なくなること、また膜の維持管理（ファウリング対策等、ファウリング：処理対象に含まれる物質が時間経過とともに膜表面や流路に付着蓄積し、流路が閉塞あるいは狭小さくすることにより、ろ過能力が低下する現象）が加わるが主な運転管理項目は自動計測による処理水量や膜差圧であることから自動制御運転が可能となり、運転管理が容易となる。

2) 省スペース

最終沈殿池等の処理工程を省略することができ、処理施設の設置スペースを大幅に削減することができる。

3) 処理水質が良好かつ安定

MF膜やUF膜でろ過するために、孔径より大きな浮遊物質（SS：Suspended Solid）や大腸菌を検出されないまでに除去した処理水が得られる。処理水の用途によってはオゾン処理等の再生水処理施設を必要とせず処理水の再利用が可能となる。また、膜処理によるSS除去にともない、窒素やリンなどのうちSSに含まれる部分の除去も期待できることから、かんがい用水などの農業利用への活用も考えられる。

3.3 MBRの研究事例

MBRは、既設の下処理場の改築更新や高度処理化、下水処理水の再利用や下水道未普及地域の解消など、わが国の下水道事業が抱えるさまざまな課題を同時に解決し得る優れた技術である。しかし、さらなるMBRの導入を図る上で、省エネルギー化と中大規模の合流式下水道（合流式下水道：汚水と雨水をひとつの下水管で集める方式、分流式下水道：汚水と雨水をそれぞれ別の下水道管で集める方式。下水道の整備に早く着手した都市では合流式で、東京23区の約8割は合流式で整備されている。多くの都市では分流式である）への適用が課題となっている。

MBRでは、連続的にろ過運転を行うために膜の表面を物理的に洗浄する必要があり、これに粗大気泡を用いる方法（ばっ気洗浄）が一般的である。このため、従来の活性汚泥法と比べて、送風動力に係る電力使用量が大きいことから、MBRシステムのさらなる省エネルギー化が課題となっている。

さらに、MBRの適用先を、従来の小規模下水処

理場の新設から、中大規模下水処理場の既設改築等へ拡大するためには、合流式下水道への適用性が求められる。しかしながら、現時点で国内での導入実績は、堺市三宝下水処理場の仮施設（2011年3月～2014年3月運用³⁾を除き、すべて分流式下水道であり、雨天時の流入水量変動（処理能力の0.5～1.5倍程度の変動範囲）への対応方法については、知見が十分でないことが課題である。

研究事例^{4),5),6)}として、無機膜であるセラミック平膜を用いたMBRシステム（以下、「本MBRシステム」という）について、実規模の膜ユニットを用いた実証プラントを実処理場に設置し、省エネ化や合流対応について検討・検証を行った事例を紹介する。

本MBRシステムはセラミック平膜の特性である膜表面の平滑性による汚泥の付着量の低減および高い剥離性により、膜洗浄風量を削減できる可能性がある。また、膜自体が堅固なことから、逆洗（膜洗浄の一形態。ろ過方向とは逆方向に処理水を流して膜面の付着物質を除去する方法、ろ過膜の閉塞および狭さくの抑制を図る）やインライン洗浄（膜洗浄の一形態。ろ過方向とは逆方向からろ過膜中に次亜塩素酸ナトリウム溶液等の薬液の混和水を注入することにより膜付着物質を溶解ないし剥離させ、ろ過膜の閉塞および狭さくからの回復を図る）を繰り返すこともできるため、高いフラックス（フラックス：膜の単位表面積あたりの処理水の量。通常は m^3/d または $m^3/(m^2 \cdot d)$ で表す）で運転を行っても、安定的な膜の処理性能が期待できる。

本研究事例^{5),6)}では、本MBRシステムについて、膜ばっ気洗浄の削減による消費エネルギーの削減効果や、合流式下水道への適用性を実証することを目的とした。なお、省エネルギー化の目標は、処理水量 $1 m^3$ あたりの消費電力量 $0.4kWh$ 以下（従来の標準活性汚泥法+砂ろ過設備の消費電力量）と設定した。

3.3.1 セラミック平膜

本MBRシステムで使用するセラミック平膜エレメントの基本特性を表1に示す。また、セラミック

表1 セラミック平膜エレメントの基本特性

材質	セラミック部：アルミナ
種類	精密ろ過膜（MF膜）
公称孔径	0.1 μ m
外径寸法	W281×H1,046×T12mm
質量（乾燥）	1.8kg
有効膜面積	0.5 m^2
純水透過性能	40 $m^3/(m^2 \cdot d)$ (100kPa, 25°C)

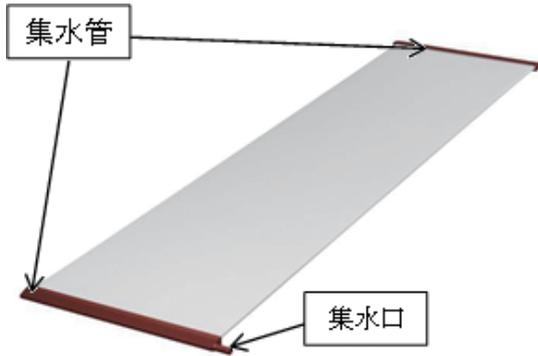


図1 セラミック平膜エレメント

平膜エレメントの写真を図1に示す。

本セラミック平膜は、高い透水性を有するセラミック支持体の表面にアルミナを主成分とするろ過膜を厚さ数十 μm で積層させた二層構造で、外周表面すべてがろ過膜として機能する。支持体の内部にチューブ状の空洞があり、これがろ過水の集水路として機能する。膜エレメントは、セラミック膜エレメントの両端の集水路に集水管を取り付けたもので、本MBRシステムにおける膜の最小単位とする。

研究に使用した膜ユニットは、膜エレメントを20枚ずつ垂直に立てて並べ、2段組みにしたものを1ユニットとし、これを反応タンクに浸漬させた。市販の膜ユニットは100枚ずつ垂直に2列に並べ、2段組みにしたものを1ユニットとしている。市販の膜ユニットの写真を図2に示す。



図2 膜ユニット

3.3.2 研究結果

1) 長期連続運転結果

膜処理性能の安定性を確認するために長期連続運転を行った。膜差圧は、実験期間中10～30kPaの範囲で推移し、低水温期（1月～3月：平均水温15.3 $^{\circ}\text{C}$ 、最低13.2 $^{\circ}\text{C}$ ；2015年実績）を含め、安定していた。

表2に実験期間中の水質分析結果を示す。処理水

BOD（有機物による水の汚れの指標、Biochemical Oxygen Demand：生物学的酸素要求量）濃度は平均1.0mg/L以下、処理水T-N（全窒素）濃度は平均6.7mg/Lと良好であった。同時凝集試験期間（凝集剤を添加してT-P（全りん）を除去した期間）を除いて、処理水T-P濃度は平均3.2mg/Lであった。実験期間中を通じて、本MBRシステムは、下水道法施行令に示された循環式硝化脱窒型MBRの計画放流水質（BOD 10mg/L以下、T-N 10mg/L以下）を満足していた。同時凝集試験期間中の処理水T-P濃度は平均0.4mg/Lであり、循環式硝化脱窒型MBRに凝集剤を添加した処理を行う際の計画放流水質区分（T-P 1.0mg/L以下）を満足していた。なお、表2中の水質分析結果は、期間内の最小～最大とし、かっこ内はその平均値を表す。

また、ろ紙ろ過量（汚泥のろ過性を表す指標、ろ紙ろ過量が10mL/5min以上あれば、活性汚泥のろ過性は良好であると判断される）は、実験期間中常に10mL/5min以上であり、汚泥の膜ろ過性は良好であった。

表2 水質分析結果（2014/6/1～2016/3/31；n=77）

項目	原水 (初沈越流水)	処理水
BOD [mg/L]	26～140 (83)	<1～2 (<1)
SS [mg/L]	27～110 (56)	<1
T-N [mg/L]	13～89 (31)	1.8～9.7 (6.7)
T-P [mg/L]	1.5～8.8 (4.7)	1.6～6.7 (3.2)
大腸菌群数 [個/100mL]*	—	<10
大腸菌数 [MPN/100mL]	—	<1.8
項目		好気タンク汚泥
ろ紙ろ過量 [mL/5min]		10.5～33.0 (24.0)

注) *メンブレンフィルター法による測定

2) 膜洗浄風量の最適化

MBRで消費エネルギーに寄与がもっとも大きい膜洗浄風量の削減を目的として運転条件の検討を行った。ろ過・逆洗時間10分間の内8分間を膜洗浄風量の基本条件（0.24 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ ）から75%（0.18 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ ）まで削減し、逆洗時間を含む残りの2分間を基本条件の125%（0.30 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ ）とする「断続膜洗浄実験」（基本条件の85%（0.20 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ ）と、膜洗浄風量を一律基本条件の75%（0.18 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ ）に削減する「膜洗浄風量削減実験」を行った。

「断続膜洗浄実験」, 「膜洗浄風量削減実験」の各実験における膜差圧の測定結果の例を図3, 図4に示す。長期連続運転期間中に、断続膜洗浄実験を2回、膜洗浄風量削減実験を4回実施した。膜差圧上昇速度は、基本条件の運転時の平均値が1.3kPa/dであったのに対し、断続膜洗浄実験では平均0.2 ~ 0.6kPa/d, 膜洗浄風量削減実験では0.1 ~ 0.5kPa/dと、基本条件での運転時と同等かそれ以下となっていた。以上の結果から、膜洗浄風量を基本条件の75%に削減しても膜ろ過機能の低下は認められず、安定運転が可能であることが示唆された。

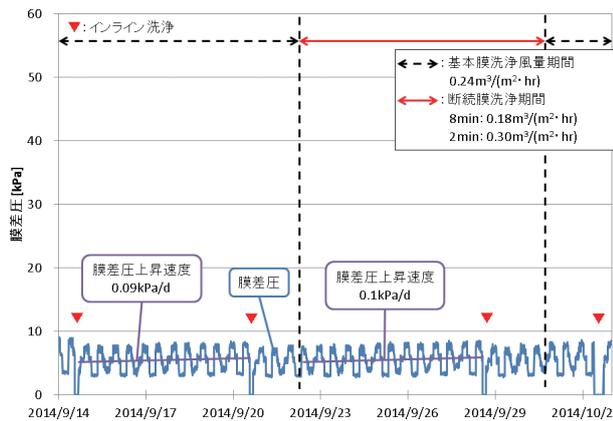


図3 断続膜洗浄実験における膜差圧変動の例

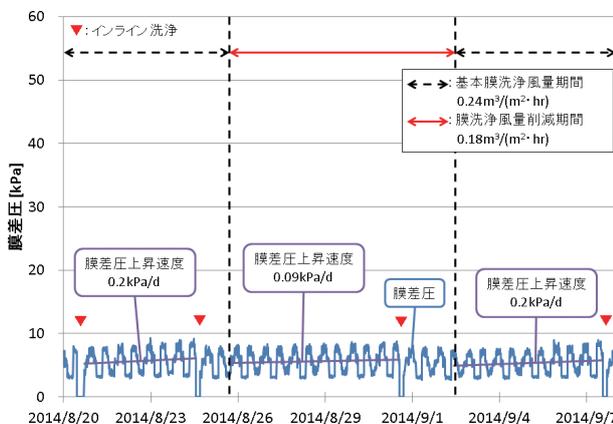


図4 膜洗浄風量削減実験における膜差圧変動の例

3) ピークフラックス運転

合流式下水道を想定して、降雨時にMBRの処理流量を一時的に増大させて対応するピークフラックス運転時の処理機能の安定性を評価することを目的として、一時的にフラックスを基本条件から増大させる「処理流量増大実験」を行った。

長期間の降雨を想定して、日平均フラックスの2倍で24時間の連続運転を週1回行う「パターン1」と、急な降雨を想定した日平均フラックスの3倍で4時間の連続運転を週2回行う「パターン2」を行った。

図5にパターン1, 図6にパターン2における膜差圧の変動の例を示す。パターン1においては実験中を含むインライン洗浄までの期間、膜差圧は管理限界値(30kPa)を超えることなく運転を行うことができた。パターン2においては、実験中は膜差圧が上昇し管理限界値を超えたが、実験終了後は回復し、インライン洗浄までに管理限界値を超えることはなかった。パターン1は5回、パターン2は2回実施したが、膜差圧はいずれの実験においても同様の挙動を示した。また、実験前後の処理水質は安定しており、水処理機能への影響は認められなかった。

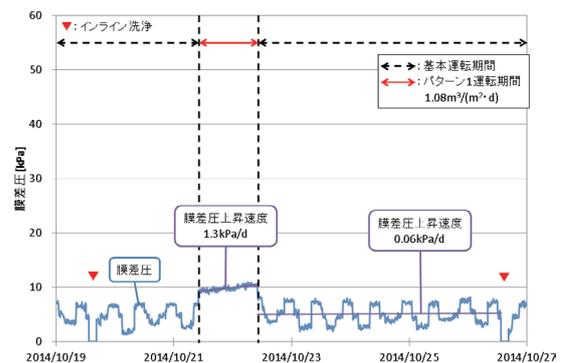


図5 パターン1における膜差圧変動の例

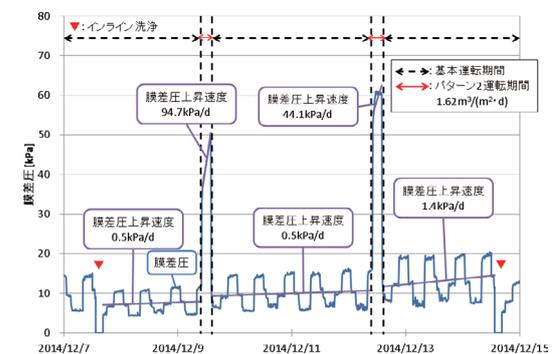


図6 パターン2における膜差圧変動の例

4. まとめ

セラミック平膜を用いた浸漬型MBRシステムについて、パイロットプラントを用いた実証試験を行った。22ヶ月間の長期運転を実施し、処理機能の安定性を確認した。

さらに、MBRで消費電力量のもっとも大きな膜洗浄風量を基本条件の75%である0.18m³/(m²・hr)まで低減しても、膜差圧上昇速度は基本条件での運転時と同程度かそれ以下で、膜ろ過機能の低下は認められなかった。この条件下での処理水量1m³当たりの消費電力量は0.39kWhと試算され、0.4kWh/m³の省エネ化目標が達成された。

また、MBRを合流式下水道処理流量に適用する

にあたり、雨水の影響を想定して処理流量を2倍に増大して24時間、もしくは3倍に増大して4時間運転しても膜処理機能に影響はなく、処理水のBOD濃度は1 mg/L以下が維持された。これにもとづき、既設の合流式下水処理場の改築においてMBRを導入し、雨天時に処理水量を増大させた運転を行うと、簡易放流量はおよそ55%削減されると試算された。さらにその時のBOD流出負荷量は、処理場の寄与は約20%、処理区全体の寄与は数%削減されると試算された。以上より、合流式の既設処理場にMBRを導入することで、合流改善効果が期待できることが示唆された。

最後に、膜処理技術は、少子高齢化や脱炭素社会、循環社会の実現に向けて、①敷地が少ない都市部の処理場などにおける施設の改築・更新や地域との広域化・共同化にあわせたコンパクト化、②水環境の改善や水の再利用、③病原微生物などによる水系リスクの低減など大きく貢献できる技術である。今後

の研究開発の進展に期待したい。

参考文献

- 1) 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第2版], 国交省 下水道膜処理会議, p. 2 (2011)
- 2) 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第1版], 国交省 下水道膜処理会議, p. 6 (2009)
- 3) 柳瀬仁志ら, 堺市三宝下水処理場におけるMBR設備の運転状況の総括, 第51回下水道研究発表会講演集, p. 250-252 (2014)
- 4) 財団法人下水道新技術推進機構(編), セラミック平膜を用いた循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法技術資料, 日本下水道新技術機構, p. 1-123 (2012)
- 5) 新井喜明ら, セラミック平膜を用いた浸漬型MBRの省エネルギー化・合流対応の研究, 第15回下水道研究発表会講演集, p. 271-273 (2014)
- 6) 打林真梨絵ら, セラミック平膜を用いた浸漬型MBRシステムの省エネ化と合流式下水道への対応に関する研究, 下水道協会誌, Vol. 55, No. 665, p. 66-75 (2018)

(原稿受付: 2022年8月2日)

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) をご覧ください。

日本フルードパワーシステム学会 2022年度受賞候補者募集のお知らせ

当学会は、わが国の油圧・空気圧・水圧工学の振興と発展の奨励を目的として毎年優れた研究・技術を表彰しております。本年も当学会の「表彰規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会2022年度受賞候補者を募集いたします。

つきましては、独創的な研究、画期的な新技術、累積効果抜群な研究者、技術者などについて、適格な受賞候補者をご推薦ください。

募集要項など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

日本フルードパワーシステム学会 2022年度フェロー認定者推薦のお願い

日本フルードパワーシステム学会フェローは、フルードパワー技術の進展に貢献した正会員、本学会の諸活動に貢献した正会員に贈られる名誉ある称号です。認定された本人には本学会より認定証を交付します。

本年も当学会の「フェローに関する規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会フェロー認定者の推薦をお願いいたします。

推薦の方法など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

建設機械油圧回路中の気泡の分離と除去

著者紹介



いしづか まこと
石塚 信

ヤマシンフィルタ株式会社
〒239-0847 横須賀市光の丘6-4
E-mail : makoto_ishizuka@yamashin-filter.co.jp

1988年横浜国立大学工学部機械工学課卒。同年、トキコ株式会社（現日立製作所）入社。1990年デュボンジャパン入社。1996年山信工業（現ヤマシンフィルタ）入社。現在に至る。

1. はじめに

建設機械は油圧で動いていることによって多くのメリットを得ている反面、デメリットも有している。油圧は作動油を媒体として動いているのだが、作動油中に異物が入りやすい。油圧回路の故障の原因の7割が油中の異物といわれており、回路に異物が入りやすいことは大きなデメリットになる。油圧回路中の異物は大きく分けて「固形ダスト」「気泡」「水分」「油劣化生成物」の4種類ある。油圧回路を守るためには、これらの異物を作動油から分離し除去する必要がある。

固形ダストの分離・除去については、本誌の「固形ダストによる油圧回路の不具合とその対処法（2016年Vol. 47）」で述べているので参照されたい。今回は、油中の気泡、について発生源、油圧回路に及ぼす影響と分離・除去について説明していきたい。

2. 油中気泡の発生源

油圧回路は複数の油圧機器が鋼管やホースで配管されている。配管接合部は完全にシールされており、外から空気が回路内に侵入することはない。それにもかかわらず、油圧回路の作動油の中には細かい空気（気泡）が多数入っている。では、油圧回路のどこから空気・気泡が入ってくるのか。侵入か所は「リターンフィルタ」「減圧によるキャビテーション」「振動による作動油タンク内の空気かみ込み」の3つに大別できる。

2.1 リターンフィルタ

建設機械の油圧回路には、作動油中の固形ダストを除去するためのフィルタが所々に設置されている。回路のスタート地点であるポンプの手前の吸い込み口にサクションフィルタ、ポンプの直後の吐出口にインラインフィルタ、回路の最終地点にリターンフィルタがある。その中で固形ダスト除去にもっとも関与しているのがリターンフィルタである。そのため過面積が大きく、サイズも大きい。

固形ダストを除去するために設置されているリターンフィルタは気泡を発生させる要因の一部になっている。フィルタは流れの方向により「内外」と「外内」の2種類あるが、気泡を発生させるメカニズムが異なる。

2.1.1 外内流れリターンフィルタ

外内流れのリターンフィルタは作動油タンクの近辺、あるいは作動油タンクの中に専用のケースが設置されている。リターンフィルタは定期的、あるいは固形ダストで目詰まった時に交換する必要がある。フィルタ交換の時は、ケース上部のカバーを外すことになるのだが、リターンフィルタケースは油圧回路の上部にあるため、カバーを外すとケース内に外気が入ってくる。機械の大きさにもよるがリターンフィルタのサイズは大きく、フィルタケースの容量は数リッターに及ぶ。フィルタ交換が終わり、カバーを閉め、機械を動かす（ポンプを回す）と、図1のようにリターンフィルタケースの中の空気が作動油タンク内に一気に流れ込む。その後、ポンプに吸われ、油圧回路を循環することになる。これがリターンフィルタ交換の時に毎回発生する。

2.1.2 内外流れリターンフィルタ

イニシャルエアはケースを持たないリターンフィルタでも発生する。油面からろ材が出ているタイプの内外流れのリターンフィルタがそれである。

フィルタろ材には通過抵抗があるため、内外フィルタ内部に流れ込んだ戻り油（リターン油）によりフィルタ内部の油面は上昇し、タンク内に排出される。建設機械のリターン流量は大きく、油面の上昇速度は速い。そのため、上昇した油は、ろ材近傍の

空気の一部を巻き込み、タンク内に排出され、気泡となる。

また油圧ショベルのようにアクチュエータに油圧シリンダを多く使用している機械は、リターン流量の変動が激しい。流量が多い場合、ポンプが大量にタンク内の油を吸うため、タンク内の油面は急激に下がる。反対に、内外フィルタの内部には大量のリターン油が流れ込むため、フィルタ内の油面は急激に上がる。タンク内とフィルタ内の油面に落差が生じ、内外フィルタから排出された油は滝のように流れ落ち、タンク油面を叩く。その結果、空気を巻き込み、気泡を発生させる。この現象は建設機械が稼働している間、ずっと続くことになる。

弊社ではこのリターンフィルタケースの空気の排出を「イニシャルエア」と呼んでいる。

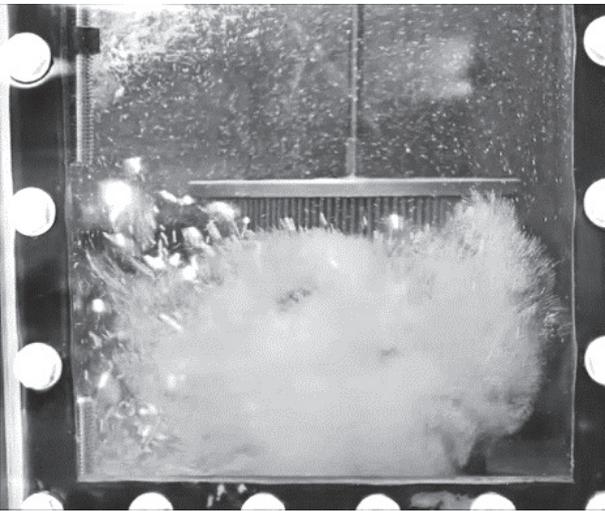


図1 タンク内に発生したイニシャルエア

2.2 減圧によるキャビテーション

作動油には大気圧下で通常 6 vol% ほどの空気が溶け込んでいる。大気圧で作動油に溶けていた空気は減圧されると気泡となって作動油中を浮遊する。これを「キャビテーション」という。図2はサンプル瓶に入った作動油を-80kPaに減圧したものである。減圧前は気泡はなかったが、減圧することにより作動油中から気泡が発生した。

われわれはキャビテーションに似た現象を身近に経験している。夏にうまいビールは栓を抜くと泡が発生する。この泡はビールの中に溶け込んでいた二酸化炭素（炭酸）である。ビールはビンや缶の中では高圧をかけられているため単なる液体でしかない。しかし、栓を開けると大気圧になる（減圧される）ため、高圧によって押さえつけられていた二酸化炭素が気体（泡）となり、あの飲みごちとなるわけである。

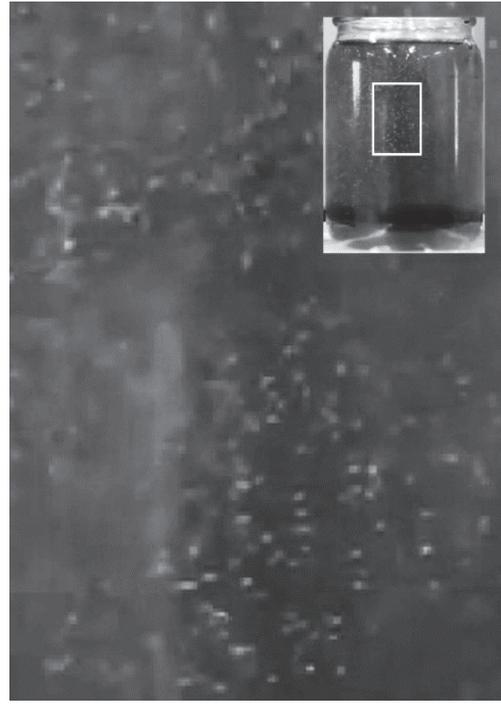


図2 減圧によるキャビテーション

油やビールに限らず、流体が減圧されると、気泡が発生する可能性がある。建設機械の油圧回路中に作動油が減圧するところがある。初めに思いつくのが油圧ポンプの吸い込み側である。油圧ポンプの吸い込み側にはサクシヨンストレーナが設置されており、油圧ポンプに固形ダストが侵入するのを防いでいる。そのため、サクシヨンストレーナのろ過部（ろ材）の精度を細かくし、より多くの固形ダストを除去したいところだ。しかし精度を細かくすると油の通過抵抗（負圧）が大きくなりキャビテーションが発生してしまう。

油圧回路の中で、吐出側（正圧側）でも減圧が発生する場所がある。それは流速が大きくなる場所である。ベルヌーイの定理によると、同じ流線上にある流体の「圧力エネルギー」と「運動エネルギー」と「位置エネルギー」の総和は等しい。今、流体の圧力をP、密度をρ、流速をV、高さをZ、重力加速度をG、位置を1, 2とすると、おなじみのベルヌーイの式は下記となる。

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho G Z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho G Z_2 = \text{const}$$

1と2の位置エネルギー（高さ）ρGZが同じとすると、流速Vが大きくなると1と2の総エネルギー量は同じなのだから圧力エネルギーPは小さくなる。

「霧吹き」はこのベルヌーイの定理を理解する身近な現象である。図3のように、水を入れたビーカーに細いパイプの下端を深く漬け、パイプの上端にエアブローで空気のジェット流を作る。ジェット

流によりパイプ上面の流速は早くなり、パイプ内の圧力は低くなる。その結果、ビーカーの水を押す圧力（大気圧）が相対的に高くなり、パイプ内の水を押し、パイプ内の水面を上昇させる。その後さらに水面は上昇し、パイプの上端に達し、ジェット流によって水は霧状となって噴霧する。これが霧吹きのカラクリである。



図3 霧吹きの実験

建機の油圧回路は詳しくないが、流速が大きくなる（つまり断面積が小さくなる）か所はコントロールバルブではないだろうか。コントロールバルブ内は回路が狭くなるため、流速は大きくなり、キャビテーションが発生しやすいのではないかと考えている。

弊社では減圧によって発生する気泡のように、回路が稼働することによって生じる気泡を「ランニングエア」と呼んでいる。

2.3 振動による作動油タンク内の空気噛み込み

ご存知のように、建設機械が稼働している地面は平坦ではない。起伏があれば、石や廃材物もある。建設機械はその中を走行しているため、振動が大きい。また、内燃機関から発生する振動、ブーム、アームの上下動による振動、旋回による揺れもある。それらさまざまな振動によって、作動油タンク内の油面は波打ち、空気をかみ込み、気泡になる。図4は作動油タンクを模したアクリルタンクに作動油を入れ、ポンプによって循環させ、タンクだけを振動試験機で振動させたものである。使用している作動油は本来透明で、向こう側が透けて見えるのだが、気泡で透明度が失われているのがわかる。

2.4 実機における油中気泡

図5はエアレーション状態の悪い実機の油圧回路中の作動油の画像である。実機でも作動油に多くの気泡が存在していることが確認できる。

3. 油中気泡による不具合

油中の固形ダストの成分は珪砂、鉄、アルミなど、硬度が高く硬いものが多い。そのため油圧機器を傷

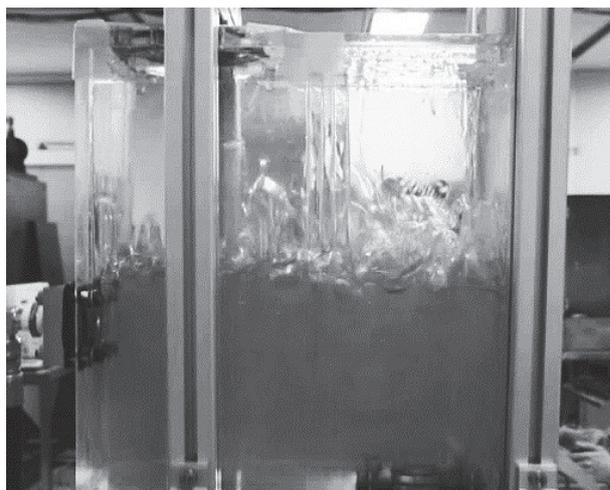


図4 振動による空気噛み込み



図5 実機作動油中の気泡

つけることは容易に想像が付く。油中気泡はどうであろうか。たかが空気の粒である。それが油圧機器に悪影響を与えるとは想像がつかないのではないだろうか。ところが、油中の気泡は固形ダスト以上に厄介な存在なのである。

3.1 ポンプ破損

気泡が油圧ポンプに入ると、図6のように、気泡の周りにはポンプが発生する圧力が加わる。圧力は、その性質上、接線に対し垂直方向に向かう。気泡は真球と考えることができるので、気泡の周りの圧力は気泡の中心部に向かうことになる。

キャビテーション、つまり減圧により発生した気泡はポンプにより加圧され、再び油中に溶ける。残



図6 気泡周り加わる圧力

された圧力は気泡があった場所の中心部に向かい衝突することになる。これが衝撃波となってポンプ壁面を破損させる。この破損を「エロージョン」と呼ぶ。

図7はエロージョンにより破損した実機のポンプシリンダブロックの内部の写真である。本来シリンダブロック表面は滑らかであるが、左上にエロージョンによって表面が削られた跡がある。また欠落も生じている。



図7 エロージョンによるポンプ破損

3.2 油中気泡による作業効率の低下

作動油は圧力を伝達させるという役割から、圧縮性がないのが望ましい。油中の気泡は空気の粒であるから、圧縮率は非常に高い。そのため、作動油中に気泡が混入してしまうと油は圧縮性が悪くなってしまふ。その結果、圧力の伝達が遅くなり、作業効率が落ちることになる。

図8はアクチュエーターに見立てた耐圧ケースに加わる圧力波形を測定するために作成した簡単な油圧装置の回路図である。作動油中の気泡の量により圧力波形がどのように変わるか測定した。ポンプ手前からマスフローコントローラで空気を圧入し、その後のポンプで砕くことによって空気を気泡化させた。加えた空気量は0, 5, 10, 20, 50mL/minの5種類。圧力計測のサンプリング周波数は計測装置最大の10kHzにした。

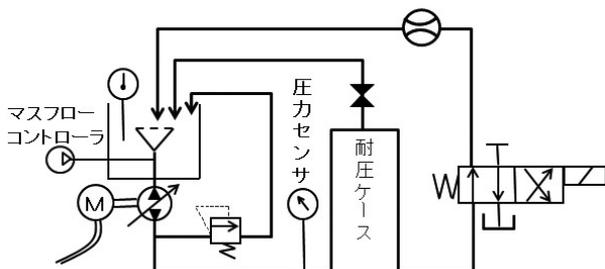


図8 試験回路

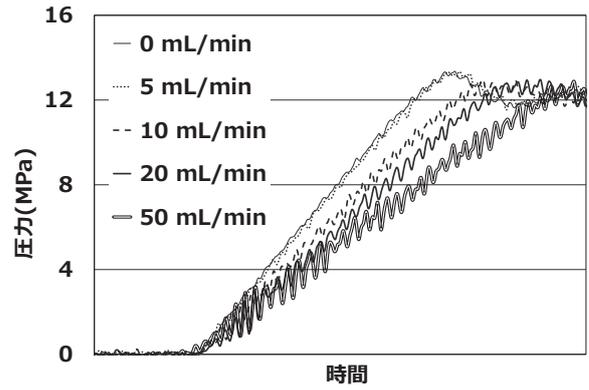


図9 空気添加量別圧力波形

図9からわかるように、空気圧入量が多くなるに従い、圧の立ち上がりが鈍くなっていることがわかる。その結果、アクチュエーターの動きは遅くなり、作業効率は低下することになる。

3.3 油中気泡による油温上昇

熱力学第一法則から、流体は断熱圧縮すると温度が上がる。手押しポンプで自転車のタイヤに空気を入れるとポンプが熱くなるのがそれである。

図10は、図8の試験装置を使用し、耐圧ケースに0⇔10MPaの圧力を繰り返し加え、回路の油温の時間変化を記録したグラフである。加えた空気量は0, 20, 40mL/minの3種類。

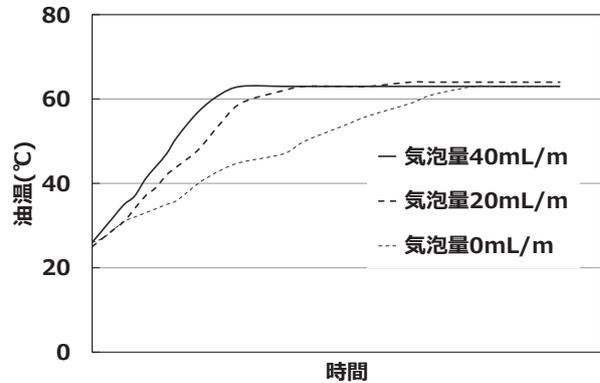


図10 空気添加量別油温変化

加える空気量が多いほど、油温上昇が早いことが分かる。気泡の発生が多い回路ではオイルクーラーを大型化する必要があると考える。

4. サクションによる気泡の分離・除去

前述してきたように、油中気泡は油圧回路に多くの問題を発生させる。そのため、固形異物同様に気泡を分離・除去する必要がある。

油中気泡を分離・除去する方法はさまざまあるが、もっとも有効な方法はサクシオンフィルタによる気

泡分離・除去だと考えている。リターンフィルタで油中気泡を除去する手段もあるが、その後の作動油タンク内で振動によって気泡が発生してしまうため、実用的な手段とは思えない。サクシオンフィルタは、その後にある油圧ポンプまでは作動油で満たされた配管で接続されているため空気に接しておらず、振動による空気のかみ込みは発生しない。理想的な気泡分離・除去のアイテムといえる。

油に溶けていた空気は、気泡になった時点で界面を持つ異物となる。そのため固形ダスト同様、ろ材による除去が可能となる。固形ダストの分離・除去はろ材の精度が細かい、つまり繊維間の目開き（空間）のサイズが小さいほど、より多く固形ダストが除去できる。油中気泡も同様で、精度が細かいほど、多くの気泡を分離・除去できる。図11はサクシオンフィルタのろ材（金属メッシュ）の精度別の気泡数の時間推移である。建設機械の油圧回路をモデル化した試験回路に、一定流量で油を流し、ポンプ手前から一定量の空気を添加し続けた。

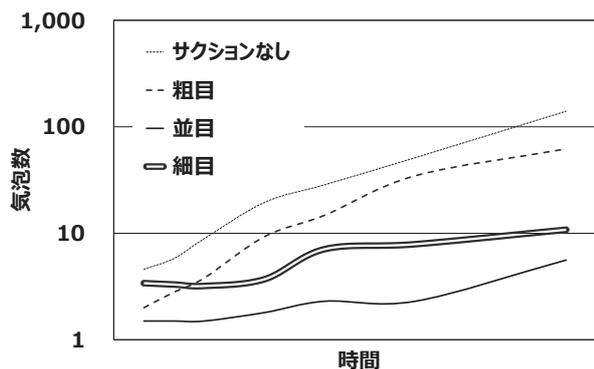


図11 メッシュ別気泡除去効果

精度の粗い粗目は気泡除去の効果が薄く、より精度の細かい並目は気泡除去効果が高い。ここまでは前述理屈通りなのだが、問題なのが細目である。グラフを見てわかるように、細目は並目より精度が細かいにも関わらず気泡数が多くなっている。これは精度が細かすぎて油の通過抵抗が高くなり（つまり減圧が大きくなり）キャビテーションが発生しているからである。図12は試験回路に空気を入れないで気泡をカウントした結果である。キャビテーションの発生を明確にするため、流量を上げた。

空気を添加していないため、サクシオンフィルタがないもの、粗目、並目は気泡が測定されていないが、細目は気泡をカウントしている。これは明らかにキャビテーションによる気泡である。後半、気泡数が横ばいになっているが、発生気泡数とメッシュによる気泡除去のバランスが取れているためである。

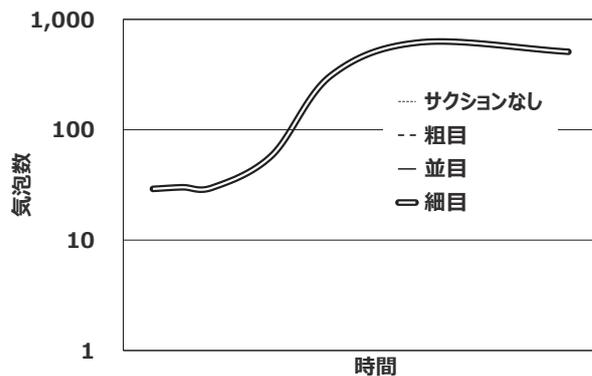


図12 細目のキャビテーション（気泡がカウントされていないものは線がない）

図13は、サクシオンフィルタのメッシュ表面の大半を接着剤で埋め（写真右側部を残した）、通過抵抗を高めた状態で通油した試験の様子である。空気は添加していない。サクシオンフィルタ取付用配管（写真下）を透明の亚克力パイプにして内部の状況がわかるようにした。写真を見てわかるように、サクシオン出口の左側から気泡が排出され始めているのが分かる。空気は添加していないことからキャビテーションによる気泡であることがわかる。

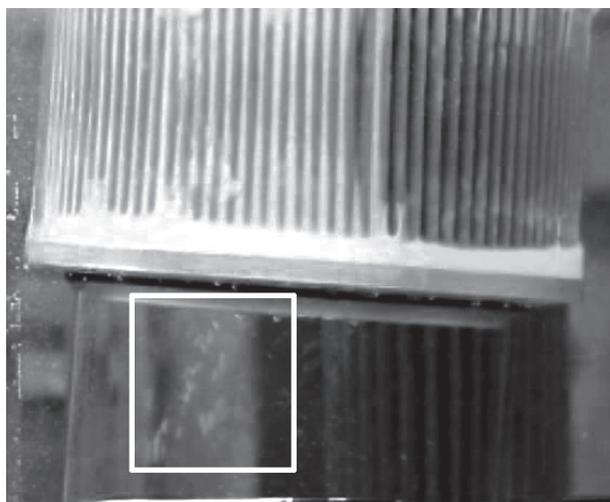


図13 サクシオンのキャビテーション

固形異物の分離・除去という観点からサクシオンフィルタにもより細かいろ材を付けたいところだが、細かいろ材を付けてしまうと、上述のようにキャビテーションが発生する危険がある。サクシオンフィルタのろ材にあえてメッシュ（金網）付けているのは、油の通過抵抗を抑え、キャビテーションの発生をなくすためである。ただし、メッシュとはいえ、目の細かいものはキャビテーションの観点からだめであり、粗いメッシュは気泡除去の効果が薄いことから、並目のような適切なメッシュが必要である。

ここで、さらに流量を上げてみる。

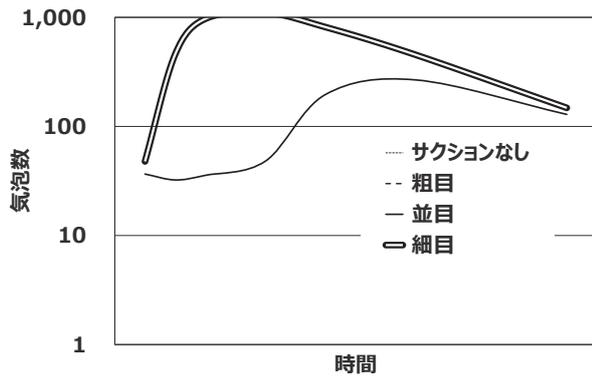


図14 並目のキャビテーション

図14からわかるように、並目でも気泡が測定されるようになった。並目でも流量が大きくなると油の通過抵抗が大きくなり（減圧が大きくなり）、キャビテーションが発生することがわかる。これを防ぐためにはメッシュの面積を大きくし、メッシュの単位面積当たりの流量（流速）を落とすことである。サクシオンフィルタの選定では、キャビテーションの観点から、適切な精度のメッシュ、適切な面積の設定が必要である。

5. 終わりに

弊社は流体中の固形ダストを除去するフィルタのメーカーである。私も入社してから固形ダスト除去のフィルタの開発・試験業務に就いてきた。7年ほど前に油中気泡の分離・除去の仕事の言い渡されたのだが、何もわからない状態からスタートしたので、試行錯誤しながら業務を進めていった。新分野の業務は非常におもしろかった。そして、最終的に行き着いたのが「サクシオンフィルタによる気泡の分離・除去が理想」であった。もともとサクシオンフィルタは固形ダストからポンプを守るために付けられていた。ただし、ろ材を細かくするとキャビテーションが発生するため粗くせざるをえない。「固形ダストを取るか、キャビテーションを取るか」建機メーカーは選択を迫られ、メーカーは独自の設定（メッシュサイズ、ろ過面積、など）を決めてきたと思う。そのためメーカーにより設定がかなり異なる。ここに、メーカーの哲学が出ているようでおもしろい。

（原稿受付：2022年7月12日）

解説

固体吸収材を用いた火力発電所からのCO₂分離回収実証

著者紹介



にしべ しょうへい
西部 祥平

川崎重工業株式会社技術開発本部
エネルギーシステム研究部主任研究員
〒673-8666 明石市川崎町1番1号
E-mail : nishibe_shohei@khi.co.jp

2010年愛媛大学工学部卒、2012年愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程修了、2012年川崎重工業株式会社に入社後、現在まで固体吸収材を用いたKCCの開発に従事。

1. はじめに

20世紀以降、世界の平均気温は年々上昇しており、地球温暖化が進行しているといわれている（図1）。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価では地球温暖化の主な原因はCO₂などの温室効果ガスの増加であるとされた。また、2015年に開催されたCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）におけるパリ協定ではCO₂の排出削減は世界的に取り組むべき課題とされ、各国の温室効果ガス排出量の削減目標が設定された。現在においてはCO₂排出削減にとどまらず、CO₂排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラルの達成に取り組む国が増加し、日本政府も2050年までにカーボンニュートラルをめざすことを宣言している。このように、世界規模で脱炭素に向けた取組みが進む中、排ガスなどからCO₂を分離回収して貯留または利用する技

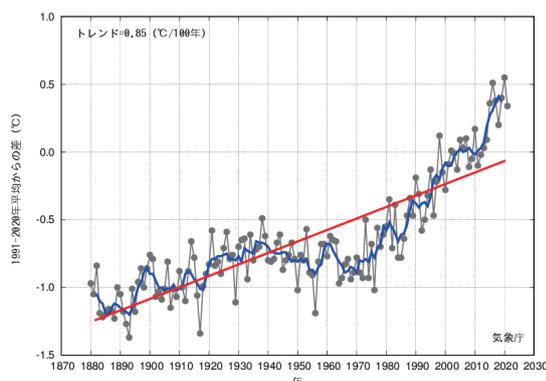


図1 世界の年平均気温偏差¹⁾

術（CCUS：CO₂ Capture, Utilization and Storage）は脱炭素化に必要な不可欠な技術といわれている。一方、CCUSの普及にはCO₂分離回収エネルギーのさらなる低減が必要となっている。

現在、主流となっているCO₂分離回収技術はアミン吸収液を用いた液吸収方式であり、数多くの実証プラント、商用プラントが稼働している。しかし、液吸収方式はCO₂回収時に100℃以上の熱源を必要とするため、CO₂回収時のエネルギー低減が課題といわれている。そのため、液吸収方式のエネルギー低減に向けた開発に加え、他方式によるCO₂分離回収技術の開発も活発化している。その中で、固体吸収材方式は液吸収方式のようにCO₂回収時に水分の蒸発をとまわず、潜熱のロスを削減できるため、省エネルギー型のCO₂分離回収技術として期待されている。

当社では、潜水艦などの閉鎖空間における呼吸由来のCO₂を除去するために、固体吸収材を用いたCO₂分離回収技術（KCC：Kawasaki CO₂ Capture）の開発を約40年以上にわたって行ってきた。そして、2010年から本技術を産業用排ガスや石炭燃焼排ガスへ応用し、低濃度から高濃度までさまざまなCO₂濃度の排ガスに適用可能なシステムの開発に取り組んでいる。これまでに、小規模なCO₂排出源に適したKCC固定層システムと大規模なCO₂排出源に適したKCC移動層システムの両方式の開発を実施している²⁾³⁾。

本報では、火力発電所をはじめとする大規模プラントでのKCC移動層システムの実用化に向けた開発状況について紹介する。

2. KCC：CO₂分離回収システム

2.1 固体吸収材

KCCシステムで用いる固体吸収材は多孔質基材の細孔内にCO₂を吸収するアミンを担持させたものである。この固体吸収材を用いたCO₂分離回収プロセスの概要を図2に示す。固体吸収材を充填した層にCO₂を含むガスを通気すると、CO₂のみが選択的に吸収される。つぎに、低温の蒸気を供給することで

固体吸収材からCO₂を脱離させ、高濃度のCO₂を回収することができる。CO₂を脱離させた固体吸収材は、再びCO₂を吸収することができるため、CO₂の吸収と脱離を繰り返し行うことが可能である。

KCCシステムの特徴は100℃以下の低温蒸気（例えば60℃）を用いてCO₂を回収できることであり、プラントなど未利用排熱を活用できるため、CO₂回収時の省エネルギー化が期待できる。

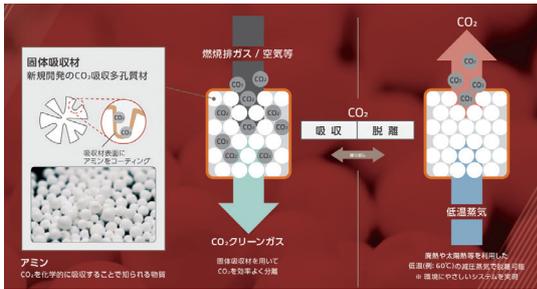


図2 KCC移動層システム概念図

2.2 KCC移動層システム

KCC移動層システムの概念図を図3に示す。本システムは吸収塔、再生塔、乾燥塔の3塔で構成され、その中で固体吸収材が一定速度で循環する。固体吸収材は吸収塔で燃焼排ガスと接触してCO₂を吸収し、その後、再生塔へ移動する。再生塔では低温蒸気を固体吸収材に接触させてCO₂を脱離させ、高濃度のCO₂を回収する。再生塔で蒸気を吸収した固体吸収材は乾燥塔へ移動し、水分を除去する。乾燥後の固体吸収材はコンベアで吸収塔へ移動し、再び燃焼排ガスからCO₂を吸収する。この一連の操作によりCO₂の分離、回収を連続的に行うことができる。

KCC移動層システムはCO₂吸収効率の良い反応層のみで構成されるため、コンパクトな装置設計が可能となる。また、運転中の固体吸収材補充や交換を容易にできるため、メンテナンス性にも優れている。さらに、処理する燃焼排ガス量やCO₂濃度の変化にも固体吸収材の循環速度を変更することで対応可能

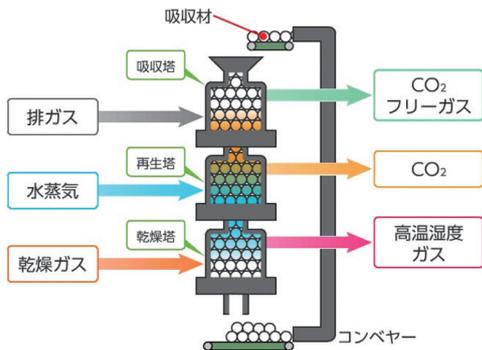


図3 KCC移動層システム概念図

という特徴をもっている。

3. ベンチスケール試験設備でのCO₂分離回収試験

3.1 ベンチスケール試験設備の概要

KCC移動層システムの技術実証およびスケールアップ手法の構築を行うために、2012年に当社明石工場内に移動層ベンチスケール試験設備を建設した（図4）。ベンチスケール試験設備の高さは約20mで5t-CO₂/日規模の試験設備である。また、微粉炭燃焼試験設備が隣接しており、その燃焼排ガスを利用したCO₂分離回収試験を実施できる。

本試験設備を用いて、移動層システムの機器開発、石炭燃焼排ガスからのCO₂分離回収性能評価、さらにスケールアップに向けた設計データの取得を実施した。

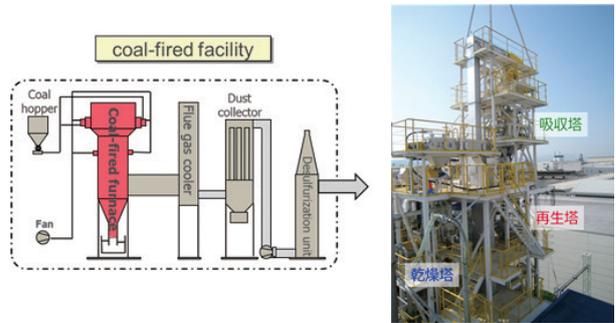


図4 移動層ベンチスケール試験設備

3.2 KCC移動層システムの機器開発および石炭燃焼排ガスからのCO₂分離回収

KCC移動層システムの開発を開始した当初は、固体吸収材のハンドリングに技術的な課題があった。その一例をあげると、固体吸収材を循環させると摩擦による粉化や排出機でのかみ込みによる破砕が多く発生し、図5（左図）のように装置内に堆積し、連続循環運転が困難であった。そこで、破砕の少ない形状、材質へ固体吸収材を改良し、さらに排出機などを改良して固体吸収材のかみ込みを抑制した。その結果、図5（右図）に示すように設備内での粉化および破砕は抑制され、安定した固体吸収材の連続循環を実現した。

安定した循環運転を達成した後、石炭燃焼排ガスを用いたCO₂分離回収試験を実施して多くの試験データを蓄積してきた。ここでは、開発当初に実施した石炭燃焼排ガスを用いたCO₂分離回収試験について紹介する。図6に示すように、微粉炭燃焼設備からの石炭燃焼排ガスは温度と湿度を調整して吸収塔へ供給した。再生用の低温蒸気は、本試験では汎用ボイラで生成された蒸気を60℃の飽和蒸気に調

整して再生塔へ供給し、乾燥ガスは外気の温度と湿度を調整して乾燥塔へ供給した。試験結果を図7に示す。吸収塔入口では13%であった石炭燃焼排ガス中のCO₂濃度は、吸収塔出口で約3%まで低下しており、石炭燃焼排ガスから3.7t-CO₂/日の安定したCO₂吸収を検証した。また、再生塔では吸収塔のCO₂吸収量と同量のCO₂を回収できており、その回収純度は96%以上であった。

これらの結果から、ベンチスケール規模のKCC移動層システムにおいて、石炭燃焼排ガスから低温蒸気(60℃)を用いてCO₂を分離回収できることを確認した。

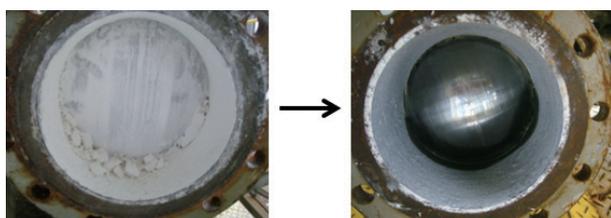


図5 ベンチスケール試験設備内の破碎吸収材堆積状況 (左図：改良前，右図：改良後)

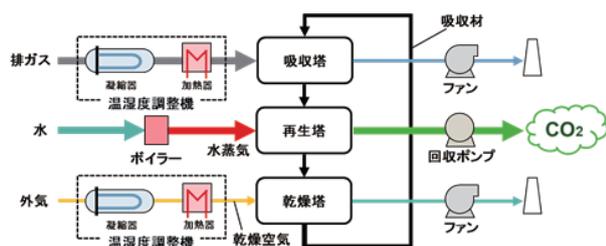


図6 ベンチスケール試験設備のシステムフロー

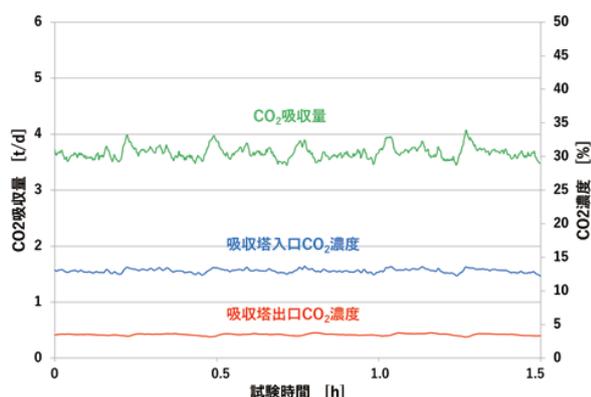


図7 石炭燃焼排ガスからのCO₂分離回収試験結果(吸収塔)

4. 火力発電所でのパイロットスケール実証試験

4.1 実証試験の事業概要

2015年から(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)とともに経済産業省(METI)からの委託事

業(2018年から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に移管)である「二酸化炭素回収技術実用化研究事業」において、当社が開発しているKCC移動層システムにRITEが開発した高性能固体吸収材(RITE材)を適用して、低コスト・低エネルギーでのCO₂分離回収技術の開発を実施した。2015年から2019年にかけて、ベンチスケール試験設備を用いてRITE材の移動層システムにおける性能を確認した後、スケールアップに向けた設計データを取得するために固体吸収材の循環速度や各塔内の層高など多様なパラメータに対するCO₂分離回収試験を実施した。さらに、循環機器やガス導入方法などの装置改良と移動層システムに適したRITE材改良を行い、7t-CO₂/日以上CO₂分離回収にも成功した⁴⁾。なお、2017年からは関西電力株式会社の協力を得て、舞鶴発電所内へのパイロットスケール試験設備設置に関する検討を行い、実証試験実施に向けた準備を進めてきた。2020年からはNEDO委託事業である「先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」において、パイロットスケール試験設備の詳細設計を行い、現在は舞鶴発電所内に試験設備の建設を進めている。

4.2 パイロットスケール試験設備の概要

NEDO委託事業で関西電力株式会社舞鶴発電所に設置するパイロットスケール試験設備のCO₂回収量は、40t-CO₂/日規模として設計している。パイロットスケール試験設備の建設場所は、図8に示す舞鶴発電所北東の煙突近くであり、図9に示す発電所の脱硝装置、電気集塵機、脱硫装置で処理された煙突手前の排ガスを使用する。実証試験では約7000Nm³/時の排ガスを吸収塔へ送ってCO₂を分離回収する計画である。本事業において当社は実証試験設備の設計、建設、運転を担当し、固体吸収材の製造はRITEが担当する。

本委託事業における火力発電所での実証試験では、以下の内容を目的として実施する予定である。

- ・装置内における固体吸収材の破碎などを抑制し、安定した連続循環運転技術の確立
- ・ボイラの負荷変動および起動停止時などを想定した操作性検証
- ・周辺施設に与える環境影響(騒音、振動、排ガス、排水など)の評価
- ・石炭火力発電所に設置した場合の信頼性および経済性評価



資料提供：関西電力株式会社

図8 パイロットスケール試験設備の設置場所

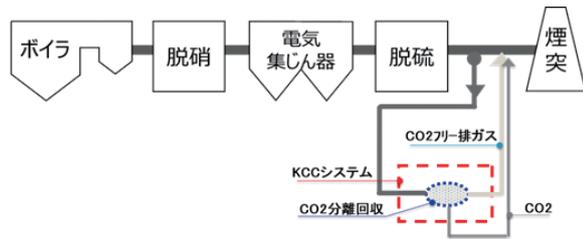


図9 パイロットスケール試験設備の排ガスフロー

4.3 今後の取り組み

実証試験のスケジュールを図10に示す。2021年7月から開始した現地工事は、2022年2月に土建工事が完工し、2022年4月から移動層設備本体の設備建設工事を進めている。工事は遅延なく工程通りに進んでおり、11月から試運転を開始する予定である。試運転では各機器の単体動作確認を実施した後、固体吸収材の充填を行い、固体吸収材の安定した連続循環評価を実施する。そして、2023年4月から2025年3月にかけてCO₂分離回収試験を行い、CO₂回収性能評価、運転安定性評価などを行う。

当社は固体吸収材を用いたKCC移動層システムの実用化をめざしており、本実証試験で得た知見をも



図10 パイロットスケール実証試験のスケジュール

とにさまざまな課題を解決し、本事業が終了する2025年以降の早期事業化・商用化に向けて開発を進める。

5. おわりに

当社は固体吸収材を用いた火力発電所からのCO₂分離回収実証に向けて、KCC移動層システムの開発を進めてきた。その中で、5t-CO₂/日規模のベンチスケール試験設備を用いて、石炭燃焼排ガスから安定してCO₂を分離回収可能なことを検証し、スケールアップに向けた設計データも取得した。そして、現在は、パイロットスケール規模の実証試験設備の建設を実施しており、実証試験を開始できる段階まで進んでいる。今後、KCC移動層システムを商用化することで脱炭素社会の実現に貢献していく。

本報で紹介したパイロットスケール規模の実証事業は、経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構のご支援、そして、共同実施者の地球環境産業技術研究機構、発電所所有者の関西電力株式会社の多大なるご協力により実施するものであり、この場を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ、世界の年平均気温偏差（陸上のみ）の経年変化（1880～2021年）
- 2) 奥村雄志、分離技術 特集「温室効果ガスの排出削減に貢献する分離技術」第47巻3号（2017）、P. 155-157
- 3) 沼口遼平、Adsorption News Vol. 32, No. 4 (January 2019) P. 5-9
- 4) S. Nishibe, K. Yoshizawa, T. Okumura, R. Numaguchi, K. Tanaka, H. Yamada, S. Yamamoto, T. Kinoshita, T. Kiyokawa, and K. Yogo : The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment (CUUTE-1) (2021), Paper No. CUUTE-1 P. 90-91

（原稿受付：2022年8月5日）

トピックス

学生さんへ，先輩が語る —学生時代の経験が未来の自分を作る—

著者紹介



いま むら りょう すけ
今村 亮介

ダイキン工業株式会社
〒566-8585 大阪府摂津市西一津屋1-1

2013年兵庫県立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、プラント系の会社に入社。その後、造船系の会社を経て、2017年8月にダイキン工業株式会社に入社。油機事業部にて、油圧ポンプの設計・開発業務に携わっている。



図1 淀川製作所（大阪府摂津市）

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は幼少のころから絵を描くことや、ものを作ることが好きであった。また、父が機械メーカーでエンジニアとして勤務していたことにも影響を受け、将来は「ものづくり」に携わりたいとの思いから、大学では機械工学を専攻した。大学院卒業後は、業務を通じて環境に貢献したいと考え、プラント系の会社に入社し、国内・海外向けごみ焼却炉の炉・ボイラの設計業務に携わった。その後、造船系の会社において、海外向け船舶の居住設計業務に携わったのち、縁あってダイキン工業株式会社に入社した。ダイキン工業入社後は、油機事業部 技術部 ポンプチームに所属し、産業機械向けの油圧ポンプの設計・開発業務に携わっている。

1.2 会社紹介

弊社は大阪金属工業所として、1924年に飛行機のエンジンを冷却する「ラジエータチューブ」の製造からスタートして以来、数多くの日本初・世界初の技術・製品の開発により、世界をリードする空調総合メーカーとして、人と空間を健康で快適にすることを通じて社会に貢献してきた。2024年に創業100周年を迎える弊社は、これまでに空調事業をはじめ、化学事業、フィルタ事業、油機事業、特機事業など多種多様な事業活動を展開している。

1.3 職場紹介

私が所属する油機事業部は、1929年に日本で初めて造船メーカーやエンジンメーカーの潤滑装置を

手がけて以来、1960年にポンプ・バルブなどの油圧機器を発売するなど、90年以上にわたり、暮らしと産業の発展を支えてきた。電動機高効率規制やIoTなどが世界的に進む中、空調で培った省エネ技術を油圧製品に応用し、油圧制御技術とインバーター・モータ技術を融合した、弊社独自のハイブリッド油圧システムの開発により、現在では一般産業機械、工作機械、成型機、鉄鋼、環境機械など、多様なニーズで弊社の油圧製品をご採用いただいている。

弊社の油圧製品は、淀川製作所（図1）の工場（図2）を生産拠点としている。油圧ポンプ、油圧バルブ、油圧ユニット、冷熱機器などを製造しており、開発品を試験するための試験工場も隣接している。



図2 製造工場（淀川製作所内）

2. 学生生活を振り返って

2.1 研究内容紹介

大学院では粉粒体工学研究室に所属し、「可視光応答性酸化亜鉛の合成と光触媒性能の評価」と題した研究テーマに取り組んだ。環境問題の深刻化を背景に、環境の浄化に効果的な材料として光を照射することで有害物質を分解・無害化できる光触媒に着目したテーマであり、なかでも可視光応答性酸化亜鉛の簡便な方法での合成に取り組んだ。元来、酸化亜鉛は白色粉末であるために可視光に反応しないという特性を持つが、色味を持たせることで可視光を吸収することができる。何色の粒子が可視光を有効に吸収できるか、優れた機能・性能を持つ粒子を合成するにはどのような方法が良いか考え、合成条件を検討しながら研究に取り組んだ。文献を読み、試験計画を立て、試験結果を受けてつぎのアプローチを考える日々を過ごした。

大学での研究分野が社会人になってからの業務に直結することはなかったが、問題に直面した際のアプローチや分析方法などの研究に取り組む過程や考え方は、製品開発を行う上で似た側面があり、当時の経験が生かされていると感じている。

2.2 学生時代に熱中したこと

大学生活は日々の勉学や研究に加えて、興味のある資格の習得や趣味、アルバイトに時間を費やした。振り返ってみると、社会に出るまでの自由に時間を使える充電期間であり、自分の未知なる可能性を探求する期間であったように思う。

資格の面では、将来的に業務を通じて環境に貢献したいと考えていたため、エコ検定を取得し、趣味・業務に生かす目的で色彩検定を取得した。それぞれの資格は、業務を行う際の環境に対する意識の向上や会議資料およびマニュアルなどの資料を見やすく作ることに生かされている。

趣味である絵画についても、大学時代にさまざまな画風に挑戦することで上達し、喜ばしいことに現在ではプライベート・職場での似顔絵のプレゼントで好評をいただいている。また、海外メーカーとやり取りする際は、文章だけよりもイラストによるイメージを共有した方が、相手に理解してもらえることが多く、これまでにたびたび救われたといっても過言ではない。

アルバイトは、雑誌の製本業務や郵便配達、小・中・高校生向けの教科書販売など、異なる職種に挑戦した。なかでも雑誌の製本業務のアルバイトは、自分ひとりで行う業務ではなく、製造ラインに入って見ず知らずの人と協力して進める初めての仕事で

あったため、社会人になる前にそのような経験ができたことは非常に良かった。

学生の皆様においても、社会人になる前に自分の好きなことや興味があること、学生時代だからこそできることに時間を使ってみてはいかがだろうか。

2.3 就職活動

振り返って、私にとって分岐点になったと思えるのが就職活動である。私の場合は活動開始の段階では業種を絞らずに、さまざまな企業の合同説明会や工場見学に参加した。社会人になってからでは、他社を知る機会は限られるため、就職活動を通じて、身の回りの製品や商品、サービスを通じてお世話になっている企業の歴史や行動指針に触れることや会社や工場の空気に触れることは、自分自身が働くことの意義を考えるうえで有意義な経験であった。また、説明会や工場見学の雰囲気やエントリーシートの記載事項などを通じて、各社の特色を肌で感じることができるとも就職活動の楽しみのひとつであった。

コロナ禍の影響により、私が学生のころと比べて就職活動や会社説明会の形態は変わってしまったかもしれないが、就職活動を機にさまざまな会社に触れ、これまでの皆さんの経歴や強み・弱み、なりたい自分を見つめなおす良い機会としていただきたい。

3. 社会人生活を見つめ直す

3.1 業務紹介

私が所属するポンプチームでは、ピストンポンプ、モータポンプ、ロータポンプ、ベーンポンプなどの油圧ポンプの設計・開発業務およびプロダクトサポート業務を行っている。油圧ポンプは、油圧システムに油を供給する動力源として、不可欠な存在であるため、弊社の強みであるハイブリッド油圧製品を生かすべく、省エネや低騒音などの付加価値を持った製品の開発に取り組んでいる（図3）。

設計・開発業務では、商品企画の立案から、先行開発、基本設計、詳細設計、試作試験、量産準備を経て生産移行に至るまで、すべてのプロセスに携わることができる。私はこれまで、新製品の開発業務のサポート、コストダウンや供給課題の解消などのプロダクトサポート業務に携わりながら、各種製品の特長や油圧の知識を学んできた。

3.2 仕事のやりがい

製造業における設計・開発の仕事のやりがいは、これまでに世の中になかった新しいものを生み出せること、試作から量産に至るまでの「ものづくり工程」に立ち会えることである。設計計算から、製図、評価試験、梱包仕様の決定、取扱説明書の作成など業



図3 弊社の油圧製品

務範囲は多岐にわたり、さまざまなことに精通している必要があるために苦労もあるが、自分が書いた図面が形になったとき、製品が実際に動くのを目の当たりしたとき、製造ラインに流れて世の中に出ていくときなどに達成感を味わうことができる。

また、業務を遂行する過程では、同僚だけでなく、営業、購買、製造、品質保証などの専門性の異なるさまざまな方々の協力を得て、量産という共通のゴールに向かっていく。そのような方々に刺激を受け、達成した際に喜びを分かち合えることも、仕事の醍醐味の一つであると感じている。

3.3 前職での経験

自己紹介に記した通り、ダイキン工業株式会社に入社する以前に、2社での業務経験がある。今になって振り返ると、私にとっては他社での業務経験が大いに生かされている場面が多々あると実感している。プラント設計・船舶設計・製品設計と設計対象物はまったく異なるが、すべてに共通して求められると感じるのは、業務を遂行するにあたって、設計だけではなく、規則や法令など多くの専門知識が必要とされること、お客様、調達先メーカー、関連

部署、現場などのさまざまな人とのコミュニケーションが非常に重要であることである。

プラント設計において、国内外の複数案件を同時に担当したことで、優先順位付けや納期を遵守する能力が身についたことも、現職でコストダウンや調達課題などの複数の業務を並行してこなさなければならない場面に遭遇した際に生かされている。これまでに担当した業務の中には、見積りや試作段階で終わり、形にならなかったものもあるが、貴重な経験としてその後の業務に生かしている。今後もプロセスを大事にして取り組んでいきたい。

4. おわりに

コロナ禍を契機に、リモートワークやリモート会議の普及など業務環境も大きく変わることになった。

私にとっても、これまでの働き方や働くことの意義について考え直すきっかけになった。学生の皆さんにおいても、学生生活や就職活動を取り巻く環境が大きく変化したことと思う。思っていたとおりにものが進まず、もどかしいと感じることもあると思うが、変化を肯定的にとらえて、アルバイトや部活、ボランティアや資格の取得など、何でも構わないので夢中になれることを見つけて積極的に挑戦してもらいたい。

私自身も、あれこれ考えずに目の前のことに一生懸命取り組むことを心掛けて、自分の強みを伸ばしていきたい。その結果、社会貢献につながる製品を世に送り出すことができたのなら、これに勝る喜びはない。

(原稿受付：2022年8月3日)

研究室紹介

香川大学 佐々木研究室

著者紹介



さ さ き だ い す け
佐々木 大 輔

香川大学創造工学科
〒761-0396 香川県高松市林町2217-20
E-mail : sasaki.daisuke@kagawa-u.ac.jp

2003年岡山大学大学院博士後期課程中退、同大学 助手、助教を経て、2015年香川大学工学部講師、2016年同准教授、2021年同教授、現在に至る。空気圧ソフトアクチュエータを使ったウェアラブルロボットの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、IEEE、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。



か ど わ き じ ゅ ん
門 脇 惇

香川高等専門学校機械電子工学科
〒761-8058 香川県高松市勅使町355
E-mail : kadowaki-j@t.kagawa-nct.ac.jp

2022年香川大学大学院博士後期課程修了。同年香川高等専門学校機械電子工学科助教、現在に至る。空気圧ソフトアクチュエータやソフトロボットの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

佐々木研究室は、創造工学部創造工学科機械システムコースに所属しています。私の専門は、空圧アクチュエータですが、本コースにはロボティクス関連の先生に加え熱流体工学から人間工学まで、幅広い専門分野の先生方が在籍しています。

2015年に私が香川大学工学部（当時）に着任してから、博士2名、修士11名、学部13名が社会に巣立ち、現在は博士1名、修士5名、学部4名が研究室に在籍しています。

今回は、まず当研究室で取り組む研究の一部を紹介させていただきます。つづいて研究室立ち上げ当時を知り今年3月に社会に巣立った門脇惇氏に当研究室について、そして当時と現在の研究について説明いただきます。

2. 研究紹介

2.1 運動教示用装着型トレーニング装置

本研究では、足首に装着し底背屈動作を矯正する

ことで下肢動作の直接的教示を行う装着型装置を開発しています。

図1のように、開発した装置は下腿固定部と足固定部で構成されています。装置と下腿、足部の固定には、面ファスナーを用い、アクチュエータとして使用しているMcKibben型ゴム人工筋は、下腿固定部両端面から足固定部両端面に計4本設置しています。人工筋によって足首底背屈方向への屈曲トルクが装着者に加えられますが、内外反方向へは装着者の拘束感を低減するため、装置両側面にそれぞれ2節リンク機構を配置する低拘束外骨格構造を構築しています。

使用した人工筋の自然長は、240[mm]であり、底背屈、内外反の可動域は、それぞれ $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ となっています。これらの可動域は、人の歩行周期における関節角度（底背屈、内外反）にもとづいて設計しています。

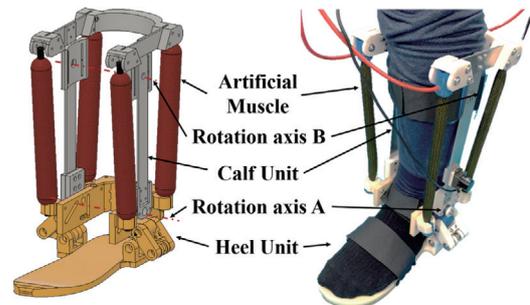


図1 運動教示用装着型トレーニング装置の外観

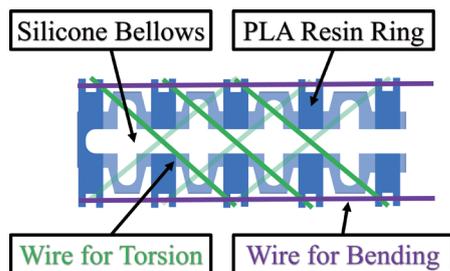
2.2 多自由度ソフトアクチュエータ

本研究で開発した多自由度ソフトアクチュエータは、図2(a)に示すようなシリコンゴム（信越化学工業株式会社製KE-1300T）を用いた蛇腹構造となっています。また、蛇腹の変形を拘束する繊維、繊維のしゅう動部となるPLA樹脂部品を実装しています。

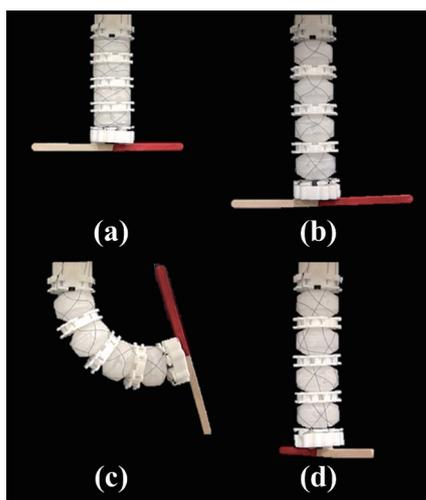
蛇腹構造とすることで、周方向と比較し大きな軸方向への伸長量を得ることができます。また、左右に配置した繊維の片側を拘束するとそちら側の伸長動作が抑制されて湾曲動作を行います。また、ら旋

方向に配置した繊維を拘束すると周方向にトルクを生じ、ねじれ動作を行います。このようにソフトアクチュエータの変形を外部から拘束することで、構造変更をとまわずに運動切り換えができます。アクチュエータに60[kPa]の圧縮空気を供給した時の各動作を図2(b)に示します。

図2(b)は手動で繊維拘束を切り替えた場合の外観ですが、多自由度ソフトアクチュエータに繊維拘束調節機構を実装することで、種々の運動切り換えが可能であることを確認できています。



(a) 構造



(b) 動作の様子

図2 多自由度ソフトアクチュエータの構造と外観

3. 卒業生が振り返る研究室（門脇氏）

3.1 研究室に所属した理由

私が佐々木先生の研究室に所属した理由は、高い柔軟性を有するアクチュエータから構成されるソフトロボット、特に移動や変形のための機構が柔軟構造のみで構成された、特殊な環境下での移動・作業を行う支援ロボットの開発が行えればおもしろいのではないかと考えたためです。端的に言えば、個人的な研究意欲を満足できるのではないかと考えて佐々木研究室への所属を決意しました。私が柔軟アクチュエータを知ったきっかけは、佐々木研究室で湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグ

ローブ¹⁾などの佐々木先生の研究を拝見し、空気圧アクチュエータについての解説を受けたことです。今思い返せば、人間支援ロボットに対して空気圧ゴム人工筋を用いることの利点を熱く語る先生を前に、まったく方向性の異なることを考えていた思想不良学生であったといえます。研究室所属を認めていただいたこと、研究活動のおもしろさを教えていただいたことを考慮すると、今でも感謝の念が尽きません。

3.2 佐々木先生について

先生の人柄は非常に気さくであり、活発な研究ミーティングを行う方です。定期的な報告のみならず、日常的に学生とコミュニケーションを取られていることが多いです。このため、学生側も日常的なコミュニケーションの延長線上にある感覚で研究に関する積極的な発言やアイデア出しを行い、研究活動の活発化につながっていると考えられます。

3.3 研究室時代の研究テーマと現在の研究テーマ

佐々木研究室では、所属から修了までに大まかに2種類の研究を行いました。1つは狭あい空間を移動するソフトロボットの開発です。このロボットは図3に示すように湾曲動作を行う空気圧ゴム人工筋から構成され、中央の人工筋が左右に湾曲することで収縮と伸長を繰り返しながら移動を行うことが可能です。また図4に示す、広かつ空間での移動能力向上を目的としたソフト歩行ロボットの開発も行いました。これらのソフトロボットは動作原理について検証を行い、狭あい・広かつそれぞれの空間で移動が可能であることが確認できました。

2つ目はMcKibben型空気圧ゴム人工筋の収縮特性のモデル化²⁾³⁾です。空気圧ゴム人工筋の動作特性モデルはこれまでもさまざまなモデルが提案されていますが、当モデルは人工筋の設計段階で特性を推定することを目的としており、モデル—実機間

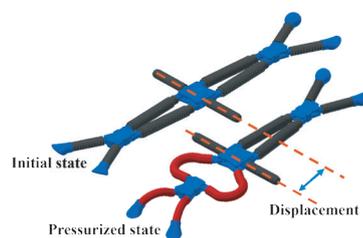


図3 湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた狭あい部移動ロボット



図4 湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた柔軟歩行ロボット

でのパラメータ調整を必要としません。導出された人工筋モデルは、図5に示す人工筋実機の伸縮特性と推定値の比較を行うことで推定精度について検証を行いました。人工筋の構造や製作方法を変更した場合における特性の変化に対応することはむずかしく、汎用的なMcKibben型空気圧ゴム人工筋の特性モデルとして改善の余地は多いといえます。そこで私は現在、ソフトロボット・人間支援ロボットの設計制御における当モデルの応用を目的としてモデル

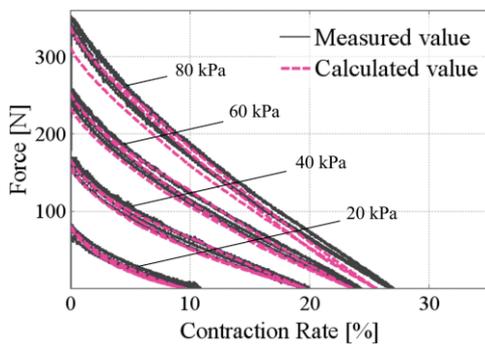


図5 McKibben型空気圧ゴム特性モデルと特性実測値との比較

の精度・汎用性の向上に関する研究を行っています。

4. おわりに

今回は佐々木研究室の研究内容の紹介をさせていただいたのち、卒業生に研究室について紹介をいただきました。門脇氏とは博士課程修了まで毎日顔を合わせていたため、改めてこのような話をする機会もありませんでしたが、研究室立ち上げ時に初めて顔を合わせた当時は懐かしく思い出すことができました。このような機会を頂戴できましたこと、この場をお借りしてお礼申し上げます。

今回の卒業生以外にも、研究室に入る前まで深くは知らなかった空気圧分野の研究を通じて興味を持ち、流体機器関連のメーカーに就職した卒業生、空圧機器メーカーに内定した学生、関連する企業に長期のインターンシップに参加した学生もいます。

私と同じ研究者の道をめざす学生はもちろんうれしいのですが、研究活動を通じてフルードパワーに興味を持ち、学生がその分野の企業に進むと決めたときも、空圧に関わる指導者として大変幸せな瞬間です。

今後も、空圧に関する研究を進めるとともに、フルードパワー分野へ人材を輩出していけるよう頑張っていきたいと思っています。

参考文献

- 1) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘: 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 5, p. 640-646 (2006)
- 2) 八瀬快人, 佐々木大輔, 門脇惇: ゴムの物性を考慮したMcKibben型空気圧ゴム人工筋のモデル化, 日本機械学会論文集, Vol. 88, No. 905, DOI: 10.1299/transjsme.21-00286 (2022)
- 3) 門脇惇, 佐々木大輔, 八瀬快人: ゴムの物性を考慮したMcKibben型空気圧ゴム人工筋のヒステリシス特性のモデル化, 日本機械学会論文集, Vol. 88, No. 906, DOI: 10.1299/transjsme.21-00290 (2022)

(原稿受付: 2022年8月21日)

企画行事

春季講演会

著者紹介



いとうかずひさ
伊藤和寿

芝浦工業大学
〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307
E-mail : kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

1995年上智大学大学院博士前期課程修了、株式会社小松製作所、上智大学助手、鳥取大学准教授を経て、2011年芝浦工業大学教授。日本フルードパワーシステム学会、日本生物環境工学会、計測自動制御学会、電気学会等の会員、博士(工学)。

1. はじめに

5月26日から27日の2日間に渡り、本年度の春季講演会がフルオンライン形式にて開催された。学会創立50周年記念行事が同時開催されてから、はや1年という印象である。本稿では春季講演会について簡単に報告する。

2. 参加者数およびプログラム構成

2.1 講演件数

今回の春季講演会では計31件の講演が行われた。以下はその内訳である。

OS 1 (フルードパワーにおけるパワーソースの高性能化技術とその変遷)	4件
OS 2 (フルードパワーにおける機械学習の応用とモデルベース制御、およびその融合技術)	4件
空気圧 (2セッション)	10件
油圧	6件
水圧	2件
機能性流体	1件
製品・技術紹介	4件

例年春季の講演申込の時期は学生の卒業、修了、在学生の就職活動の本格化あるいは企業でも異動などのある多忙な時期にあたり、また現在でもコロナ禍における活動制限が十分には解かれないう背景を受けてか、講演件数はやや少なめであった。

2.2 参加者数

今回の講演会では、参加者は73名および6団体

であった。昨年の春季講演会から導入された団体参加には企業からの参加申込みが増えており、この料金設定が効果的に活用されていることがうかがえる。

2.3 運営

オンライン上でのビデオ会議システムZoomによる定期講演会は、本学会としてはこれで3回目を数える(昨年開催の国際シンポジウムを含めると4回目)。1月の企画段階では新型コロナウイルス第6波が始まった直後であり、5月の状況やそれに対する高等教育機関・企業の対応が見通せないこと、また対面とオンラインを同時実施するハイブリッド形式での開催準備は企画運営側の負荷が大きいため、フルオンラインでの開催に限定して準備を進めた。参加形式を直前まで確定させない形式よりも早期に明確化することによる効果は、早期割引が適用となる講演会開催3週間前にあたる5月6日までの事前登録者が参加者全体の88.5%となっていることにも表れていると考えられる。

オンラインでの学会開催要領はこの2年間で多くの学会ですでに定着しており、司会、講演およびその後の質疑応答、発表者の交代などにおいてトラブルが起きることはほとんどなくなった。ただしこれには事前の準備が重要で、今回も2021年度春季講演会での運営要領をベースに改善を行うとともに、開催2週間前には企画委員会メンバによる2回の通信チェックが行われた。今回は企画担当者の所属する研究室のデスクトップPC2台をサーバとし、最大接続数を各100ユーザとしても回線の安定性に問題がないか、通信遅延はどの程度か、などを確認した。さらに、適切なソフトウェアを導入することでZoom上で講演時間表示も行えるような設定とした。

また、フルオンライン化にともない優秀講演賞の評価運用方法も一部影響を受けた。優秀講演賞の評価者は、そのセッションの座長および論文発表関係者を除いた中から座長が指名する見識者2名の計3名で構成される。この見識者2名は通常、セッションへの参加者に対してその場で座長から内密に依頼がなされて決定することが多いが、今回のようなフルオンライン開催の場合にはそれができない。した

がってあらかじめ講演会主査が依頼を行って事前に内諾をいただき、委嘱および審査票の送付を行う形式として進めた。また、従来から議論となっていた講演者発表時間の評価についても今回から一部変更が行われたことも付しておく。

3. おわりに

きわめて簡素であるが、春季講演会の実施報告および運営についてご報告させていただいた。この原稿を執筆している8月上旬にはコロナウイルスによる新型コロナウイルスの新規患者数は第7波として過去最高レベルになっており、講演会の対面実施が可能となる時期がますます見通せない状況になっている。一方で7月中旬に訪れたイタリアおよびイギリスの国際学会はほぼ完全にノーマスクで開催されており、各国での考え方に大きな違いが見られる（バンケットは不開催）。2年後の広島での国際シンポジウムに

向け、開催形式の議論はさらに時間をかけて行う必要がある。

末筆ながら、まずパワーソースについてのOSのオーガナイザとして、大変お忙しい中を貴重な知見を含む講演をお集めくださった国立研究開発法人産業技術総合研究所 坂間清子先生に御礼申し上げます。また、講演会運営方法の検討、事前の通信確認、講演時間計測などはいずれも現場をよくご存知の企画委員会の方々の協力なしには難しい案件であり、講演会企画担当者としてこの場をお借りして深く御礼申し上げます。さらに、座長、講演賞審査員、計測担当者への対応を休日返上でご支援くださった学会事務局のスタッフの皆さまにも厚く御礼申し上げます。ありがとうございました。

(原稿受付：2022年8月12日)

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会員数 (10月10日現在)	826	8	115	127
差引き増減	-1	±0	+21	±0

正会員の内訳 名誉員16名・シニア員68名・ジュニア員79名・その他正会員663名

〈新入会員〉

正会員

木下 守克 (株式会社ケー・ティー・システム)

小林信太郎 (日本製鉄株式会社)

学生会員

梶田 隼矢 (徳島大学)

猪狩 拓矢 (芝浦工業大学)

佐藤 淳希 (芝浦工業大学)

前田 大輝 (芝浦工業大学)

原田 悠杜 (岡山理科大学)

槇田 隼也 (岡山理科大学)

川口 智也 (岡山大学)

鈴木 壘偉 (岡山大学)

川中 実久 (岡山大学)

石田 裕己 (中央大学)

青木 裕嗣 (慶應義塾大学)

金子 恵太 (慶應義塾大学)

加賀 一希 (慶應義塾大学)

河内 聖成 (大阪工業大学)

今村 哲朗 (九州工業大学)

細川 翼平 (関西大学)

渥美 拓人 (東京工業大学)

Xu Peimin (東京工業大学)

ZHU YICHUAN (東京工業大学)

矢内 柁平 (東京工業大学)

阿久津 陽 (足利大学)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

9月5日	理事会
9月20日	企画委員会
10月3日	論文集委員会
10月5日	編集委員会

〈理事会報告〉

2022年度第3回理事会

9月5日 15:00～17:00

Web開催（参加者21名）

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2022年秋季講演会開催準備状況
- (3) 会員の推移
- (4) 各委員会からの報告
- (5) その他

〈委員会報告〉

2022年度第2回企画委員会

9月20日 15:00～17:00

Web開催（参加者24名）

- (1) 2022年秋季講演会開催準備状況について
- (2) オータムセミナーについて
- (3) ウィンターセミナーについて
- (4) 日中韓共同ワークショップについて
- (5) 2023年春季講演会について
- (6) その他

2022年度第4回論文集委員会

10月3日 13:00～14:00

Web開催（参加者6名）

- (1) Instructions to Authorsおよび関連事項について
- (2) Copyright Transfer Agreementおよび関連事項について
- (3) JSTジャーナルコンサルティングセミナー
- (4) 審査フローの見直し
- (5) CCライセンスの検討
- (6) HPのキーワードリスト更新
- (7) HPへのEditorial Boardのアップロード
- (8) その他

2022年度第2回編集委員会

10月5日 14:30～15:10

Web開催（参加者16名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.53 No.6「社会を支える分離技術」
 - 2) Vol.54 No.1「フルードパワーとソフトロボティクス」
 - 3) Vol.54 No.2「フルードパワーとハイブリッド」
 - 4) Vol.54 No.3「医療を支えるフルードパワー技術（仮）」
 - 5) Vol.54 No.4「フルードパワーの品質工学と最適化（仮）」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) EBSCO hostへの会誌記事情報の収録について
 - 3) 今後の特集について

会 告

日本フルードパワーシステム学会 英文論文へのCCライセンス付与のお知らせ

本学会英文論文誌「JFPS International Journal of Fluid Power System」に掲載される論文に対して、学術オープンアクセスジャーナルで採用が進んでいる、論文の再利用条件を示す国際的ルールであるクリエイティブ・コモンズ・ライセンスのCC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) の付与を予定しています（2023

年1号から）。合わせて、規程類やテンプレート等につきましても、順次、改定や更新を進めてまいります。ご理解のほど、お願いいたします。

本学会論文誌への積極的なご投稿をお待ちしています。引き続き、よろしくごお願い致します。

論文集委員会

会
告

共催・協賛行事のお知らせ

共催・協賛行事

日本機械学会 第35回計算力学講演会 (CMD2022)

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学部門

開 催 日：2022年11月16日(水)～11月18日(金)

会 場：オンライン開催

U R L：https://confit.atlas.jp/guide/event/cmd2022/top

自動車技術会シンポジウム「動力伝達系の最新技術2022」

主 催：公益社団法人 自動車技術会 動力伝達系/CVT・ハイブリッド部門委員会

開 催 日：2022年11月25日(金)

会 場：東京工業大学 すずかけ台大会館 (神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

U R L：https://www.jsae.or.jp/sympo/2022/no4.php

2022年度 計算力学技術者 (CAE技術者) 資格認定事業

(固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者)

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学技術者資格認定事業委員会

試験日程：2022年12月2日(金) 1級認定試験 (固体力学分野・熱流体力学分野・振動分野)

2022年12月8日(木) 2級認定試験 (熱流体力学分野・振動分野)

2022年12月9日(金) 2級認定試験 (固体力学分野)

会 場：下記HPを確認ください

U R L：https://www.jsme.or.jp/cee/

日本機械学会 第21回機素潤滑設計部門講演会 (MDT2022)

主 催：一般社団法人 日本機械学会 機素潤滑設計部門

開 催 日：2022年12月5日(月)～12月6日(火)

会 場：オンライン開催

U R L：https://www.jsme.or.jp/conference/mdtconf22/

連携講習会 (全4回)「機械-電気の統合モデルによるモデルベース開発」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開 催 日：2022年12月9日(金), 2023年1月11日(水), 2月10日(金), 3月8日(水)

会 場：ハイブリッド開催 (東京飯田橋, ZOOM)

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-80/

連携講習会「つながる機械 ～機械と通信の融合～」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開 催 日：2022年12月14日(水)

会 場：ハイブリッド開催 (東京飯田橋, ZOOM)

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-92/

第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)

主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門

開 催 日：2022年12月14日(水)～12月16日(金)

会 場：幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市美浜区中瀬2-1)

U R L：https://sice-si.org/conf/si2022/

連携講習会 (全2回)「機械のサイバーセキュリティ ～つながる機械の落とし穴～」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開 催 日：2022年12月22日(木), 2023年1月10日(火)

会 場：ハイブリッド開催 (東京飯田橋, ZOOM)

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-90/

<p>講習会「実務者のための騒音防止技術」 主催：一般社団法人 日本機械学会 関西支部 開催日：2023年1月24日(火)～1月25日(水) 会場：オンライン開催 (Webex) URL：https://www.jsme.or.jp/event/22-108/</p>
<p>講習会「ソフトロボット学入門—基本構成と柔軟物体の数理—」 主催：一般社団法人 日本機械学会 機素潤滑設計部門 開催日：2023年1月26日(木) 会場：オンライン開催 (ZOOM) URL：https://www.jsme.or.jp/event/22-108/</p>
<p>Grinding Technology Japan 2023 企画：日本工業出版株式会社, 株式会社産経新聞社 開催日：2023年3月8日(水)～3月10日(金) 会場：幕張メッセ (千葉県千葉市美浜区中瀬2-1) URL：https://gtj-expo.jp/2023/jp/</p>
<p>日本混相流学会 混相流国際会議2023 (ICMF2023) 主催：日本混相流学会 開催日：2023年4月2日(日)～4月7日(金) 会場：神戸国際会議場 (兵庫県神戸市中央区港島中町6-9-1) URL：http://www.jsmf.gr.jp/icmf2022/</p>
<p>日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023 (ROBOMECH2023 in Nagoya) 主催：一般社団法人 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門 開催日：2023年6月28日(水)～7月1日(土) 会場：名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市熱田区熱田西町1-1) URL：https://robomech.org/2023/</p>

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) をご覧ください。

2022年度オータムセミナー 「フルードパワーシステム開発におけるMBD活用」 開催日時：2022年12月15日 (木) 13:00～17:00

モデルベース開発(MBD)は設計自由度の高い構想段階からシステム全体(メカ+フルードパワー+制御)の評価を行い、抜け・漏れ・手戻りなく効率的に設計を行う手法である。本セミナーでは、フルードパワーシステム開発におけるMBDの考え方から、活用事例までを取り上げます。

本セミナーはオンラインでの開催を予定しております(※会場での開催はございません)。詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

会 告

資料一覧表

価格は、(一社)日本フルードパワーシステム学会事務局までお問い合わせください。

資料名	発行年月
〈講演論文集〉	
平成元年春季油空圧講演会講演論文集	平成元年5月
平成元年秋季油空圧講演会講演論文集	平成元年11月
平成2年秋季油空圧講演会講演論文集	平成2年11月
平成3年秋季油空圧講演会講演論文集	平成3年11月
平成4年春季油空圧講演会講演論文集	平成4年5月
平成4年秋季油空圧講演会講演論文集	平成4年10月
平成5年春季油空圧講演会講演論文集	平成5年5月
平成5年秋季油空圧講演会講演論文集	平成5年11月
平成6年秋季油空圧講演会講演論文集	平成6年10月
平成7年秋季油空圧講演会講演論文集	平成7年11月
平成8年春季油空圧講演会講演論文集	平成8年5月
平成8年秋季油空圧講演会講演論文集	平成8年10月
平成9年春季油空圧講演会講演論文集	平成9年5月
平成9年秋季油空圧講演会講演論文集	平成9年10月
平成10年春季油空圧講演会講演論文集	平成10年5月
平成10年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成10年11月
平成11年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成11年5月
平成12年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成12年5月
平成12年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成12年10月
平成13年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成13年5月
平成13年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成13年11月
平成14年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成14年5月
平成15年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成15年5月
平成16年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成16年5月
平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成16年11月
平成17年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成17年5月
平成18年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成18年5月
平成18年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成18年11月
平成19年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成19年5月
平成19年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成19年11月
平成20年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成20年5月
平成21年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成21年6月
平成21年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成21年11月
平成22年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成22年5月
平成22年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成22年12月
平成23年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成23年5月
平成24年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成24年5月

平成24年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成24年11月
平成25年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成25年5月
平成25年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成25年11月
平成26年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成26年5月
平成27年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成27年5月
平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成27年11月
平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成28年5月
平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成28年10月
平成29年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成29年5月
平成30年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成30年5月
平成30年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成30年10月
2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2019年5月
2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2019年11月
2020年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2020年12月
2021年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2021年6月
2022年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2022年5月
2022年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2022年11月
〈IFPEX〉	
平成9年IFPEX 第18回油圧・空気圧国際見本市 大学・研究室展出展内容説明書	平成9年10月
平成11年IFPEXフルードパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	平成11年10月
平成14年IFPEXフルードパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	平成14年6月
平成17年IFPEXフルードパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	平成17年8月
平成20年IFPEXフルードパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	平成17年4月
平成23年IFPEXフルードパワーシステム ワークショップ国際見本市論文集	平成23年7月
平成26年第24回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	平成26年9月
平成29年第25回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	平成29年9月
2021年第26回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集 (CD)	2021年10月
〈フォーラム〉	
フォーラム'91 「賢い電子油圧制御をいかに実現するか」	平成3年7月
フォーラム'92 「ここまできた電子油空圧制御システム」	平成4年7月
フォーラム'93 「水圧システムの現状と課題—作動流体として水はどこまで使えるか」	平成5年7月
フォーラム'94 「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その1」	平成6年7月
フォーラム'95 「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その2」	平成7年7月
フォーラム'96 「油空圧技術を支えるトライボロジー」	平成8年7月
フォーラム'97 「21世紀を見つめた新技術開発」	平成9年7月
フォーラム'98 「オフロードビークル用走行装置の動向」	平成10年7月
フォーラム'99 「技術開発におけるトラブル事例」	平成11年7月
フォーラム2000 「油空圧機器の省エネルギー化はこれだ！」	平成12年7月
フォーラム2001 「自動車における最新油空圧技術の動向」	平成13年7月
フォーラム2002 「電動かフルードか」	平成14年8月
フォーラム2003 「電動かフルードかⅡ」	平成15年5月
フォーラム2004 「最近の緩衝・制振・免振技術」	平成16年5月
〈セミナー〉	
オータムセミナー 「最近の油空圧」	昭和61年10月
オータムセミナー 「表面改質」	昭和62年10月
オータムセミナー 「油空圧技術の将来のために」	昭和63年10月
オータムセミナー 「油空圧のためのセンシング技術」	平成元年10月
オータムセミナー 「メカトロニクス関連センサ」	平成2年10月

オートムセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきか Part1」	平成3年10月
オートムセミナー「油空圧を支える解析技術」	平成4年10月
オートムセミナー「油圧機器・システムにおける振動をいかに克服するか」	平成5年10月
オートムセミナー「油空圧制御と高速インターフェース技術の融合」	平成6年11月
オートムセミナー「油空圧におけるシミュレーション技術の現状と課題」	平成7年10月
オートムセミナー「最新制御理論の超活用法（油空圧システムとロバスト制御の融合）」	平成8年9月
オートムセミナー「油空圧システムに於ける最新制御理論の超活用法 （油空圧システムとロバスト制御の融合）」	平成9年9月
オートムセミナー油圧機器応用「パワーパッケージの現状と動向」	平成10年9月
オートムセミナー「フルイドパワーシステムへの最新制御手法の適用」	平成11年10月
オートムセミナー「環境適合技術の動向」	平成12年9月
オートムセミナー「フルイドパワーシステムに用いられる制御技術の動向」	平成13年9月
オートムセミナー「ハイブリッドカーの現状と将来」	平成14年10月
オートムセミナー「フルードパワーと環境・リサイクル」	平成15年10月
オートムセミナー「食品機械におけるフルードパワーの利用と課題」	平成16年10月
オートムセミナー「レスキューにおけるフルードパワーシステム」	平成17年10月
オートムセミナー「生活に密着したフルードパワー」	平成18年10月
オートムセミナー「鉄道におけるフルードパワー技術」 資料は『油空圧技術』Vol.46 No.4	平成19年4月
オートムセミナー「フルードパワーシステムと環境・省エネルギー」	平成20年10月
オートムセミナー「フルードパワーシステムのためのlinux開催環境」	平成21年10月
オートムセミナー「BOPビジネスの可能性～CSRとビジネスの両立～」	平成22年11月
オートムセミナー「パワートレインにおけるフルードパワー技術」	平成23年11月
オートムセミナー「フルードパワー技術を生かす油圧作動油の最新動向」	平成24年11月
オートムセミナー「鉄道車両とフルードワー技術」	平成25年10月
オートムセミナー「医療・福祉・介護分野でのフルードパワーを利用したロボティクス」	平成26年11月
オートムセミナー「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	平成27年11月
オートムセミナー「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」	平成28年11月
オートムセミナー「ロボティクス分野におけるフルードパワー活用の現状と今後について」	平成29年11月
オートムセミナー「知っておきたい空気圧システム設計技術の新常識」	平成30年11月
オートムセミナー「アディティブ・マニュファクチャリングの最新技術と適用事例 ーフルードパワー分野への活用を考えるー」	2019年12月
オートムセミナー「自動車におけるフルードパワー技術」	2020年11月
オートムセミナー「機能性流体入門ー基礎と応用ー」	2021年11月
ウインターセミナー「油空圧システムの低騒音化のために」	平成2年2月
ウインターセミナー「知っておきたい新しいアクチュエータ」	平成3年2月
ウインターセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきか Part2」	平成4年2月
ウインターセミナー「新素材の油空圧への応用」	平成5年2月
ウインターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」	平成6年2月
ウインターセミナー「人と環境に優しい油空圧ー油空圧機器・システムの低騒音化技術ー」	平成7年2月
ウインターセミナー「油圧システムの高圧化に関する現状と将来」	平成8年2月
ウインターセミナー「フルイドパワーにおける流体の役割」	平成9年2月
ウインターセミナー「ER流体の可能性とその油空圧技術への応用」	平成10年1月
ウインターセミナー「ユーザは語る・自動化機器における駆動方式の現状と将来像」	平成11年1月
ウインターセミナー「水圧システムの現状と応用事例・展望」	平成12年1月
ウインターセミナー「省エネ、環境のためのセンシング」	平成13年1月
ウインターセミナー「油空圧機器・システムにおける省エネルギー化の方法」	平成14年1月
ウインターセミナー「油空圧機器に係わる加工技術～共存する油空圧機器と加工技術～」	平成15年1月
ウインターセミナー「メンテナンスエンジニアリングーランニングコストを安くー」	平成16年1月

ウインターセミナー「医療・福祉におけるフルードパワーシステムの応用動向」	平成17年1月
ウインターセミナー「機械システムの安全性」	平成18年2月
ウインターセミナー「家庭の中のフルードパワー」	平成19年2月
ウインターセミナー「航空機とロケットへの応用」	平成20年2月
ウインターセミナー「海と船のフルードパワー」 資料は『学会誌』Vol.39 No.5	平成21年2月
ウインターセミナー「フルードパワー機器・システムの小型化」 資料は『学会誌』Vol.39 No.5	平成22年2月
ウインターセミナー「福祉・医療環境における空気圧応用の現状と問題」	平成23年2月
ウインターセミナー「圧縮空気エネルギーの有効利用技術」	平成24年2月
ウインターセミナー「アクアドライブシステム（新水駆動圧技術）の現状と将来」	平成25年2月
ウインターセミナー「大型機械と油圧技術」	平成26年2月
ウインターセミナー「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」	平成27年2月
ウインターセミナー「フルードパワー技術を支える要素技術」	平成28年3月
ウインターセミナー「自動車の動力伝達機能を支える油圧技術」	平成29年2月
ウインターセミナー「フルードパワーに利用できるマイコン技術 ～機器の駆動に関わるマイコン技術～」	平成30年3月
ウインターセミナー「フルードパワーシステムと1DCAE」	2019年2月
ウインターセミナー「フルードパワーシステムにおける解析技術」	2020年3月
〈教育講座〉	
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	平成元年8月
教育講座「現代制御理論講座」（大学上級コース）	平成元年10月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	平成2年8月
教育講座「トライボロジー講座」（大学上級コース）	平成3年8月
教育講座「油空圧における鋳造技術講座」	平成5年10月
教育講座「油空圧における最新の制御技術の理論と実際」	平成6年10月
教育講座「トライボロジー講座」	平成9年9月
教育講座「空気圧システム入門」	平成10年6月
教育講座「空気圧システム入門」	平成11年6月
教育講座「フルードパワーシステムへの最新制御手法の適用と コンピュータソフトウェアツールの体験実習」	平成12年8月
教育講座「トライボロジー講座」	平成14年9月
教育講座「空気圧システム入門」	平成15年5月
教育講座「空気圧システムの基礎」	平成15年5月
〈国際シンポジウム論文集〉	
第1回油空圧国際シンポジウム論文集	平成2年1月
第2回油空圧国際シンポジウム論文集	平成5年9月
第3回油空圧国際シンポジウム論文集	平成8年11月
第4回油空圧国際シンポジウム論文集	平成11年11月
第5回油空圧国際シンポジウム論文集	平成14年11月
第6回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（CD-ROM）	平成17年11月
第7回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成20年9月
第8回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成23年10月
第9回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成26年10月
第10回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（HP公開のみ）	平成29年10月
第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（HP公開のみ）	2021年10月
〈書籍〉	
日本フルードパワーシステム学会創立30周年記念出版 3冊セット（分冊頒布可） 「油圧駆動の世界—油圧ならこうする—」 「空気圧システム入門」	平成15年4月

「水圧駆動テキストブック」	
日本フルードパワーシステム学会創立40周年出版 3冊セット（分冊頒布可）	平成23年4月
「油圧システムのモデリングと解析手法」	
「Webシミュレーション解説」	
「アクアドライブ技術の進展」	
新版「油空圧便覧」	平成元年2月
初歩と実用シリーズ 「圧縮性流体の計測と制御—空気圧解析入門—」	平成22年7月
「油圧機関技術—伝承と応用—」	平成26年9月
初歩と実用シリーズ 「機能性流体入門—基礎と応用—」	2021年7月
〈研究成果報告書〉	
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書	平成19年6月
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書II	平成22年5月
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書III	平成25年5月
水圧駆動システム研究委員会成果報告書	平成16年6月
水圧駆動システムの有効利用に関する研究委員会	平成25年5月
空気圧システム省エネルギー研究委員会報告書	平成15年3月
空気圧機器の流量特性評価法に関する研究委員会成果報告書	平成15年9月
空気圧のシミュレーション研究委員会報告書	平成16年2月
空気圧システム及び機器の信頼性に関わる研究委員会成果報告書	平成19年3月
空気圧シリンダ系動特性研究委員会研究成果報告書	平成16年2月
油空圧駆動システムにおける制御手法の適用と評価に関する研究委員会報告書	平成14年2月
油空圧制御系の研究開発力推進に関する研究委員会報告書	平成24年11月
機能性流体の油空圧機器への応用に関する研究委員会報告書	平成14年3月
機能性流体を用いたスマートフルードパワーシステムに関する研究委員会成果報告書	平成18年1月
機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する研究委員会成果報告書	平成22年6月
機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会成果報告書	平成24年9月
機能性流体との融合化によるフルードパワーシステムの新展開	2022年4月
機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開	2022年5月
機能性流体フルードパワーシステムに関する研究委員会（電子版）	2022年9月

フルードパワーシステム 総目次 (第53巻)

	号	通し頁
【挨拶】		
新年のご挨拶	…真田 一志	1 4
新年にあたって	…嶋村 英彦	1 5
会長就任にあたって	…早川 恭弘	4 146
	E1 E1	
副会長のご挨拶	…嶋村 英彦	4 147
	…川上 幸男	E1 E3
特集「IFPEX2021」		
「IFPEX2021」の発刊にあたって	…寺澤 達士	1 6
IFPEX58年のあゆみを振り返る	…荒井 一則	1 7
IFPEX2021における油圧分野の技術動向	…一柳 隆義	1 12
IFPEX2021における水圧分野の技術動向	…鈴木 健児	1 15
IFPEX2021における空気圧分野の技術動向	…佐々木大輔	1 18
IFPEX2021カレッジ研究発表	…五嶋 裕之	1 21
IFPEX2021ロボット・空気圧パイプ紹介コーナー	…香川 利春	1 25
IFPEX2021出展社ワークショップ「CO ₂ 削減と省エネ／BCPへの取り組み」	…妹尾 満	1 27
IFPEX2021出展社ワークショップ「カーボンニュートラル実現に向けた空気圧機器が貢献できること」	…北川 泰章	1 30
特集「JFPSフルードパワー国際シンポジウム函館2020」		
第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウムの実施報告	…田中 豊	2 52
JFPS2020函館会場について	…風間 俊治	2 54
JFPS2020函館会議の運営について	…川上 幸男	2 57
JFPS2020函館会議のプログラムについて	…伊藤 和寿	2 60
JFPS2020函館での招待講演	…竹村研治郎	2 62
JFPS2020函館における講演論文の管理について	…吉田 和弘	2 64
JFPS2020函館における油圧分野の研究動向	…佐藤 恭一	2 67
JFPS2020函館における空気圧分野の研究動向	…高岩 昌弘	2 71
JFPS2020函館における機能性流体分野の研究動向	…中野 政身	2 73
JFPS2020函館における水圧分野の研究動向	…中尾 陽一	2 76
JFPS2020函館展示分科会活動報告	…吉満 俊拓	2 79
JFPS2020函館における表彰について	…塚越 秀行	2 81
JFPS2020函館GFPS Best Paper Awardを受賞して	…坂間 清子	2 84
特集「進化を続ける空気圧機器」		
「進化を続ける空気圧機器」発刊にあたって	…張本 護平	3 100
デジタル化を図った空気圧サーボシステム	…柴山 考司	3 101
空気圧機器の無線通信システム	…阿木 智彦	3 105
エア消費を半減するパルスフロー製品	…森口 翔太	3 109
重量物の搬送をサポートする助力装置	…若杉 論	3 112
小型軽量化を実現した積層樹脂マニホールド	…吉田 豊	3 115
不定形状の吸着に適するバルーンハンド	…津藤 亮介	3 119
ロボット向けハンドリングツール	…塩田 浩司	3 123
窒素ガス精製ユニット	…呉 杉	3 126

	号	通し頁
特集「フルードパワーと音」		
「フルードパワーと音」発刊にあたって	…妹尾 満	4 148
流れにともなう騒音の発生メカニズムや特性	…丸田 芳幸	4 149
プラズマアクチュエータによる空力音制御	…横山 博史	4 154
ファン騒音の音質評価指標と改善について	…中野 武史	4 158
水圧駆動システムにおけるキャビテーション現象の評価と対策	…飯尾昭一郎	4 164
タイの伝統楽器クルイの自動吹奏ロボットによる音色表現	…加藤 友規	4 167
管楽器の空力音響解析	…吉永 司	4 170
	…横山 博史	
【緑陰特集】		
2021年度学会誌のレビュー	…柳田 秀記	E1 E5
2021年度の油圧分野の研究活動の動向	…山田 宏尚	E1 E7
2021年度の空気圧分野の研究活動の動向	…谷口 浩成	E1 E13
2021年度の水圧分野の研究活動の動向	…柳田 秀記	E1 E16
2021年度の機能性流体分野の研究活動の動向	…山本 久嗣	E1 E20
小特集「日本フルードパワーシステム学会賞受賞者および研究委員会の紹介」	…柳田 秀記	E1 E23
2021年度学術論文賞を受賞して	…風間 俊治	E1 E24
技術開発賞受賞について	…齊藤 悠	E1 E27
SMC高田賞を受賞して	…小林 卓巳	E1 E31
学術貢献賞を受賞して（40年間を振り返り）	…田中 豊	E1 E36
技術功労賞を受賞して	…西股 健一	E1 E42
2021年度油圧機器技術振興財団論文顕彰について	…佐藤 恭一	E1 E46
JFPS名誉員を拝命して	…中野 政身	E1 E51
油圧機器のトライボロジーなど基盤技術に関する基盤研究委員会	…西海 孝夫	E1 E61
機能性流体フルードパワーシステムに関する研究委員会	…中野 政身	E1 E64
深層学習を活用したフルードパワーシステムのモデル化と制御に関する研究委員会	…小林 亘	E1 E68
特集「フルードパワーとカーボンニュートラル」		
「フルードパワーとカーボンニュートラル」発刊にあたって	…岩田 将男	5 194
油圧シヨベル向け油圧蓄圧式ハイブリッドシステム	…土方 聖二	5 195
油状態センサを用いた油圧機器向け状態監視システム	…亀田 幸則	5 200
低炭素化社会実現に向けた油圧要素機器の開発	…三枝 直人	5 205
Sustainable Management of CO ₂ —CO ₂ 削減の取組み—	…妹尾 満	5 210
フルードパワーのカーボンニュートラルへの挑戦	…風間 俊治	5 214
特集「社会を支える分離技術」		
「社会を支える分離技術」発行にあたって	…飯尾昭一郎	6 238
高性能液体サイクロン技術	…福田 寛人	6 239
マイクロバルブを用いた水溶性加工油からの異物分離	…谷井 章寛	6 243
信大クリスタルを用いた汚染水からの重金属イオン分離	…手嶋 勝弥	6 246

河川水からの最新 ^{じんかい} 塵芥除去技術 …牧志 龍男	6	251	会員移動	1	44
下水処理における膜処理技術 …新井 喜明	6	255	日本フルードパワーシステム学会論 文集52巻(2021)抄録	1	45
建設機械油圧回路中の気泡の分離 と除去 …石塚 信	6	260	英文論文誌のデザイン—新のお知らせ	1	46
固体吸収材による火力発電所から のCO ₂ 分離回収実証 …西部 祥平	6	266	一般社団法人日本フルードパワーシ ステム学会賛助会員一覧表	1	47
【会議報告】			次回予告	1	48
日本機械学会2021年度年次大会に おけるフルードパワー関連技術の研…谷口 浩成	2	86	2022年春季フルードパワーシステ ム講演会併設セミナー「進化を続け る空気圧機器」	2	59
山梨講演会2021におけるフルード パワー技術研究 …吉田 和弘	3	129	2022年春季フルードパワーシステ ム講演会併設企画「製品・技術紹介 セッション」	2	59
第22回流体計測制御シンポジウムに おけるフルードパワー関連技術の研…川嶋 健嗣	3	131	共催・協賛行事のお知らせ	2	93
日本機械学会第20回機素潤滑設計部 門講演会(MDT2021)におけるフ…吉田 和弘	4	175	理事会・委員会報告	2	94
【トピックス】			会員移動	2	95
学生さんへ、先輩が語る—学生時代…溝上 太裕	2	88	お詫びと訂正	2	95
学生さんへ、先輩が語る—博士、ア カデミックポストに興味がある人に…西川原理仁	3	133	次回予告	2	96
学生さんへ、先輩が語る—フルード パワーシステムに携わる学生さんへ…八木澤 遼	4	177	共催・協賛行事のお知らせ	3	122
学生さんへ、先輩が語る—他分野か ら空気圧機器メーカーに勤めて…江川 千晶	5	220	理事会・委員会報告	3	139
学生さんへ、先輩が語る—学生時代…今村 亮介	6	270	2022年春季フルードパワーシステ ム講演会併設セミナー「進化を続け る空気圧機器」	3	139
Youは日本をどう思う?第19回:留…チャンティレー	1	37	会員移動	3	140
Youは日本をどう思う?第20回:マ…セリン オンフイツ	4	180	一般社団法人日本フルードパワーシ ステム学会賛助会員一覧表	3	141
グローバルドリームの実現をめざし た海外(北米・欧州)駐在員生活…安藤 淳二	1	33	次回予告	3	142
ドイツ駐在日記 …塩見 幸治	4	183	会員移動	4	163
笑顔で活躍—お仕事フルードパ ワー便—技術者として働くという…瀬戸口章絵	2	90	2022年度(第41期)通常総会終了	4	174
笑顔で活躍—お仕事フルードパ ワー便—理系進学を選択して…相良 桃子	5	223	理事会・委員会報告	4	187
【研究室紹介】			2022・2023年度委員会委員長	4	187
東京工業大学工学院 高山研究室 …高山 俊男	1	39	2021年度学会賞表彰	4	188
東京高専機械工学科 原口研究室 …原口 大輔	3	136	日本フルードパワーシステム学会・ 日本機械学会共催2022年度秋季フ ルードパワーシステム講演会	4	188
香川大学 佐々木研究室 …佐々木大輔 門脇 惇	6	273	共催・協賛行事のお知らせ	4	189
【企画行事】			次回予告	4	190
2022年度企画行事紹介 …藤田 壽憲 小林 亘	2	92	2022年度オータムセミナー「フルー ドパワーシステム開発におけるMBD 活用」	5	204
2022年春季講演会併設セミナー「進 化を続ける空気圧機器」…張本 護平	5	226	日本フルードパワーシステム学会・ 日本機械学会共催2022年秋季フ ルードパワーシステム講演会	5	204
春季講演会 …伊藤 和寿	6	276	日本フルードパワーシステム学会 2022年度受賞候補者募集のお知らせ	5	209
【会告】			日本フルードパワーシステム学会2022 年度フェロー認定者推薦のお願い	5	209
共催・協賛行事のお知らせ	1	42	理事会・委員会報告	5	229
日本フルードパワーシステム学会・ 日本機械学会共催2022年度春季フ ルードパワーシステム講演会	1	42	共催・協賛行事のお知らせ	5	230
理事会・委員会報告	1	43	会員移動	5	232
2022年春季フルードパワーシステ ム講演会併設セミナー「進化を続け る空気圧機器」	1	43	一般社団法人日本フルードパワーシ ステム学会賛助会員一覧表	5	233
日本フルードパワーシステム学会 2021年度受賞候補者募集のお知らせ	1	44	次回予告	5	234
日本フルードパワーシステム学会2021 年度フェロー認定者推薦のお願い	1	44	日本フルードパワーシステム学会 2022年度受賞候補者募集のお知らせ	6	259
			日本フルードパワーシステム学会2022 年度フェロー認定者推薦のお願い	6	259
			会員移動	6	277
			理事会・委員会報告	6	278
			英文論文へのCCライセンス付与のお 知らせ	6	278
			共催・協賛行事のお知らせ	6	279
			2022年度オータムセミナー「フルー ドパワーシステム開発におけるMBD 活用」	6	280
			資料一覧表	6	281
			フルードパワーシステム総目次(第 53巻)	6	286
			次回予告	6	288

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーとソフトロボティクス」—

【挨拶】 新年のご挨拶 新年のご挨拶	早川 恭弘 川上 幸男
【巻頭言】 「フルードパワーとソフトロボティクス」発行にあたって	谷口 浩成
【解説】 ソフトロボティクスにおけるフルードパワー ラバーアクチュエータを活用したソフトロボットハンド ソフトロボット技術を用いたぜん動運動機構の事業化 減圧駆動式ソフトグリッパの動作原理と応用例 物体操作を学習するロボットアームの空気圧駆動可変剛性手首 質量・体積可変な水駆動ソフトロボットのロコモーション ソフトロボットのアクチュエーションとセンシング（電界共役流体と光導波路の導入） 外骨格を使用しない空圧式パワーアシストウェアとその周辺機器の開発	鈴木 康一 大野 信吾 中村 太郎、梅田 清 波多野 至 田中 一敏 田熊 隆史 竹村研治郎 佐々木大輔
【会議報告】 日本機械学会2022年度年次大会におけるフルードパワー技術研究	脇元 修一
【トピックス】 学生さんへ、先輩が語る—自分が感じたフルードパワーの魅力について—	横田 雅司
【研究室紹介】 徳島大学 高岩研究室	高岩 昌弘

2022年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記（豊橋技術科学大学）	委員 佐 藤 恭 一（横浜国立大学）
副委員長 山 田 宏 尚（岐阜大学）	妹 尾 満（SMC株）
委員 飯 尾 昭一郎（信州大学）	谷 口 浩 成（大阪工業大学）
飯 田 武 郎（コマツ）	中 野 政 身（東北大学）
岩 田 将 男（CKD株）	中 山 晃（日立建機株）
加 藤 友 規（福岡工業大学）	藤 田 壽 憲（東京電機大学）
北 村 剛（油研工業株）	丸 田 和 弘（コマツ）
窪 田 友 夫（KYB株）	村 岡 裕 之（株コガネイ）
栗 林 直 樹（川崎重工株）	吉 満 俊 拓（神奈川工科大学）
五 嶋 裕 之（株工苑）	担当理事 伊 藤 隆（KYB株）
齋 藤 直 樹（秋田県立大学）	学会事務局 成 田 晋
佐々木 大 輔（香川大学）	編集事務局 竹 内 留 美（勝美印刷株）

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし（公社）日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって、社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：（一社）学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL：03-3475-5618 FAX：03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接本会へご連絡ください。

〒105
0011

東京都港区芝公園三丁目五十一番二機械振興会館別館一〇二一 電話(〇三三)三四三三一八四四一 FAX(〇三三)三四三三一八四四二
編集兼発行人 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇一〇一〇三二二三三六九〇

東京都文京区白山一―二三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社