

令和4年度

戦略的基盤技術高度化支援事業(Go-tech 事業)

「繊維配向と充填密度の最適化により凝集剤フリーで

水中の $5\mu\text{m}$ 未満の微粒子を除去する

原水変動に対応した高性能繊維濾過装置の開発」

研究開発成果等報告書

令和5年5月

担当局 九州経済産業局

補助事業者 事業管理機関 公益財団法人長崎県産業振興財団

研究実施機関 協和機電工業株式会社

研究実施機関 国立大学法人長崎大学

研究実施機関 公立大学法人北九州市立大学

目次

第1章 研究開発の概要

| | |
|-----------------------|----|
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 | 1 |
| 1-2 研究体制 | 7 |
| (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者) | |
| 1-3 成果概要 | 11 |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口 | 12 |

第2章 本論

| | |
|------------------------------------|-----|
| 2-1 凝集剤フリーで微粒子を除去する繊維エレメントの開発 | 13 |
| 2-1-1 繊維の三次元充填モデルの構築 | 13 |
| 2-1-2 濾過要素モデル式の構築 | 42 |
| 2-1-3 繊維濾過装置の多孔質流シミュレーションモデルを構築・解析 | 66 |
| 2-1-4 繊維濾過エレメントの試作試験と濾過特性予測モデルの確立 | 76 |
| 2-2 性能低下を抑えた繊維モジュールの開発 | 98 |
| 2-2-1 長寿命濾過繊維の開発 | 98 |
| 2-2-2 複層化繊維濾過モジュールの開発 | 105 |
| 2-3 充填密度を可変制御する機構の開発 | 110 |
| 2-3-1 繊維充填密度の可変機構の開発 | 110 |
| 2-3-2 水質変動追従型の自動制御システムの開発 | 117 |
| 2-4 大型実証試験機の開発 | 131 |
| 2-4-1 実用規模の実証試験機での性能検証 | 131 |
| 最終章 全体総括 | 157 |

<本開発と政策との関連>

世界的な水資源不足や、SDGs(目標 6:すべての人々に水と衛生へのアクセスと持続可能な管理を確保する)に関連して、国連世界水発展報告書 2017では、下水処理水は水不足の深刻化への対処のために安全に利用できる資源であると発表している。日本では 2014 年の水循環基本法にて、水循環の維持又は回復のための取り組みとして、下水処理水の再利用が推進されている。一方、九州経済産業局を軸とした九州・沖縄地方産業競争力協議会では九州・沖縄 Earth 戦略として産業競争力を飛躍的に高めるための取り組みを行っている。協和機電工業も九州環境・リサイクル産業交流プラザ(K-RIP)の会員企業として、保有する水処理技術によって「アジアにおける“環境・エネルギー関連企業の先導”(クリーン分野)」の活動の一役を担っている。本事業で開発する繊維濾過装置は、高性能かつ安価で、排水処理や再利用等の広い範囲での事業展開を狙った戦略的な拡販製品として重要な役割を果たす。

<川下ユーザーの課題とニーズ>

- 1) 本事業のニーズは、食品工場や化学製品工場、製鉄所、容器製造工場、自動車関連工場等の多分野にわたる(⑥事業化計画【川下企業(顧客)ニーズ】参照)。
- 2) 特に、排水処理設備から放流する処理水に含まれる微粒子を除去したいという要望が多い。理由としては、水質基準値以下の量ではあるが、着色した微細な粒子を含んでいるため、色がついて見えることによる周辺住民からの苦情問題や、その水を再利用する際には製品や機械に不具合が生じるという問題がある。
- 3) 図 1-1.2 はその一例であるが、従来の砂濾過や繊維濾過で除去できない $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子を多く含んでおり、色の問題となる $5\mu\text{m}$ 未満の粒子も含んでいる。そのため、 $5\mu\text{m}$ 未満の微粒子を除去することが望ましい。
- 4) 砂濾過や繊維濾過を使って上記の微粒子を除去するため、凝集剤を使用して除去率を向上させる対応を取っている。これはランニングコスト増加につながり、維持管理の手間も増え、処理水に凝集剤が残留するリスクも含む。
- 5) 本事業では、これらの課題を保有し早期に解決したいと希望されている山口県の飲料工場における排水処理設備からの放流水で実証試験を行い、課題を解決できる凝集剤フリーの高性能繊維濾過装置を開発する。



図 1-1.2 山口県の飲料工場の排水の放流水に含まれる微粒子の粒子径分布データ

＜従来技術の特徴＞

従来技術である砂濾過装置と繊維濾過装置の特徴を表 1-1.1, 図 1-1.3 に記す。

上記のように、10 μ m 未満の微粒子は除去できないため、濾過時に凝集剤を使って微粒子サイズを大きくしてから濾過する対策が講じられている。

表 1-1.1 従来技術である砂濾過装置と繊維濾過装置の技術的特

| 項目 | 砂濾過装置 | 繊維濾過装置 |
|--------------|---|--|
| 濾過材(濾過内の充填物) | 直径0.6~2mmの砂 | 直径10~50 μ mの繊維 |
| 濾層の空隙率 | 40~50% | 80~90% |
| 濾過速度 | 8~12.5m ³ /m ² /時 | 20~80m ³ /m ² /時 |
| 濾材の閉塞度 | すぐに閉塞、洗浄が面倒 | 閉塞しづらく洗浄が簡単 |
| 除去可能な微粒子サイズ | 10 μ m以上 | 15 μ m以上 |

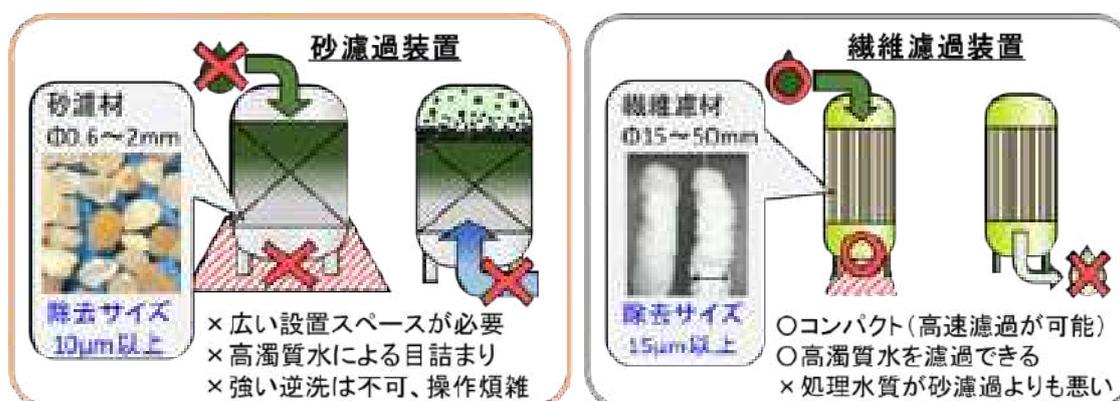


図 1-1.3 砂濾過装置と繊維濾過装置

＜他社の研究開発動向＞

他社が繊維濾過を世に出したのは1990年頃からであり、技術課題は研究開発当初から効率的な繊維洗浄方法についてであった。他社がこれまでに実現した繊維濾過に関する特許の約半数が、運転方法や薬剤使用などによって繊維を短時間で洗浄する改良についての出願であった。次いで濾過性能の向上に関する出願が多い。

各社の装置の比較を表 1-1.2 に示す。

砂濾過よりもコンパクトで濁りの強い原水

にも対応することを重視している一方で、微粒子の除去性能が砂濾過よりも低いため多量の凝集剤を使用しなければいけないという弱点は共通している。また、近年は海外企業による新型の繊維濾過装置の開発も見られ、この分野の開発競争は激化の様相を見せている。

| 企業名 | A社, B社, C社 | D社 | E社 | |
|----------------------|---|--------------------------------------|-------------------------|-------------|
| 方式 | 下向流式濾過 | 下向流式濾過 | 上向流式濾過 | |
| 構造 | ろ材 長毛繊維 長さ1000,1500mm | 円柱体の繊維塊 ϕ 5mm \times L10mm | 浮上性繊維 | |
| | 形状 | 円筒濾過塔 | 円筒濾過塔もしくは角型土木槽 | |
| | 塔高さ | 2000~1600mm | 3000~4000mm | 2600~4500mm |
| | 濾過速度 | 20~80m/h | 40m/h | 40m/h |
| 技術的特長 (参照:各社カタログ) | 従来の砂濾過と比較して濁質捕捉量・濾過速度は5倍となる。 | ろ材層の充填密度が小さく、濾過速度を大きい。装置がコンパクトである。 | 洗浄に攪拌翼を利用し、繊維の洗浄力を高めている | |
| 技術課題 | 砂濾過よりも悪い処理水質しか得られない。 特にA社,B社は凝集剤の併用を標準的に推奨している | | | |

表 1-1.2 他社の繊維濾過装置の性能と特徴

<既往の研究開発の来歴>

協和機電工業では 2014 年より従来技術である砂濾過装置、繊維濾過装置の持つ課題を解決する新しい濾過技術として、独自の繊維濾過装置の開発を開始した。2017 年には凝集剤無しで微粒子を除去可能で、なおかつ、従来よりも優れた洗浄による回復効果を発揮することができる独自の濾過塔内部構造を考案した(特許第 6325746 号)。

この繊維濾過装置は図 1-1.4 に示す独自の CAP 部品を活用した構造により、 $10\mu\text{m}$ 未満の微粒子も凝集剤無しで除去可能であった。また、更なる性能向上のため、新しい内部構造と複数種の繊維を用いる内容での特許も出願した(PCT/JP2020/014499)。

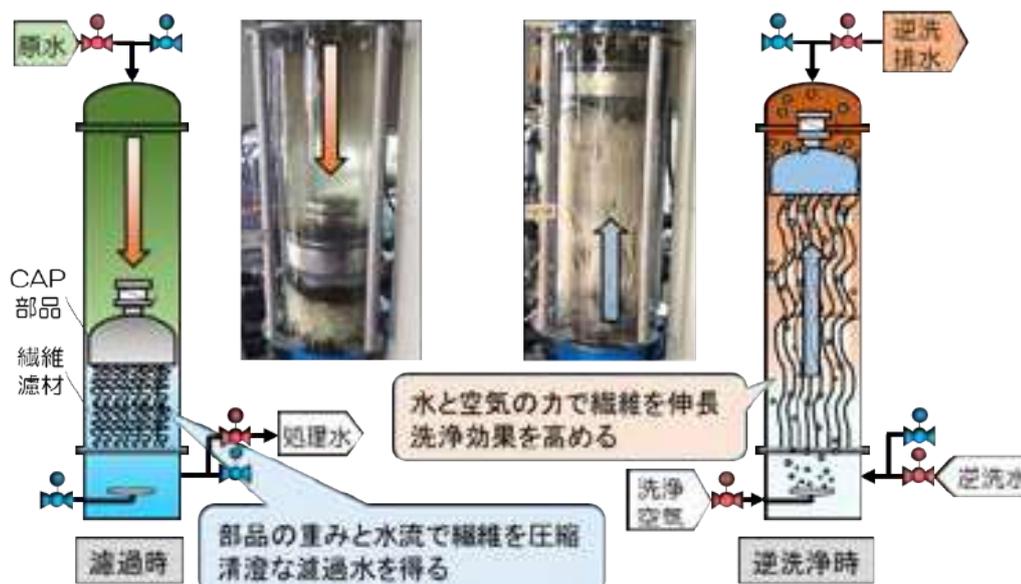


図 1-1.4 協和機電工業の繊維濾過装置の特徴

<コア技術の技術課題>

協和機電工業は他社にない CAP 部品を使い、濾過時に繊維を圧縮し微粒子除去率を上げ、洗浄(逆流洗浄)時には伸展させて高効率で洗浄を行うことができる繊維濾過装置を開発している(特許第 6325746 号)。CAP 部品を用いることで、従来の濾過では除去できなかった $10\mu\text{m}$ 未満の微粒子を除去可能とし、洗浄を短時間・低エネルギーで高頻度に行うことで濾過層の目詰まりの心配がない濾過技術であるが、さらなる性能の高度化が必要である。技術課題を以下に記す。

- 1) ユーザーニーズに応えるためには凝集剤無しで $5\mu\text{m}$ 未満の微粒子を除去するための更なる性能向上が必要である。そのため、繊維配向と充填条件を調整した繊維エレメントを開発する。
- 2) 濾過装置は長期間使用すると、高い除去率を維持できる時間が短くなるために頻繁に洗浄をしなければいけない状態となる。洗浄を繰り返していくと、繊維は劣化していき、濾過性能も低下する。そのため、性能低下を抑えた新繊維と複層化繊維濾過モジュールを新たに開発する。
- 3) 濾過原水の水質が変動すると従来の濾過装置では濾過できなくなるので、濾材の変更や人為的な濾過運転の調整操作が必要であった。人材不足の問題が各所で表面化しており、自動制御システムの導入が望まれている。そのため、繊維の充填密度を自動で可変制御できる機構を開発する。

4)本装置は繊維を複雑な状態(絡み合い・押し合い)で濾過塔内に充填するが、濾過塔を大きくするためにはスケールアップ効果によって生じる諸問題を実際に確認(実証)しておく必要がある。特に協和機電工業では、製作・性能確認が完了しているのは濾過塔の直径が 500mm までの装置までである。そのため、大型実証機を試作して実証試験でその性能や耐久性を検証する。

＜新技術を実現するために解決すべき研究課題と開発のキーポイントおよび目標＞

本研究開発は、特定ものづくり基盤技術高度化指針において以下の項目に対応する。

| |
|---------------------------|
| (四)製造環境に係る技術に関する事項 |
| 1 製造環境に係る技術において達成すべき高度化目標 |
| (4)川下分野特有の事項 |
| 2)環境・エネルギー分野に関する事項 |
| ① 川下製造業者等の特有の課題及びニーズ |
| オ. 省エネルギーの実現 |

本研究開発ではこれまでの濾過器では対応できなかった排水処理水に含まれる微粒子を凝集剤フリーで濾過可能で、長期的に濾過性能を持続し、原水の水質変動にも対応して省力化も可能な高性能繊維濾過装置を開発し、市場が望む規模での実証試験で性能を確認する。これらの高機能化を実現する上で、本研究では以下の4つの課題があるため、対応した以下の研究開発項目を具体的な4つのサブテーマとして設定して開発に取り組んだ。

1)除去可能な微粒子サイズを小さくすべきという課題

課題：凝集剤なしで、 $5\mu\text{m}$ 未満の微粒子を除去することが可能な繊維濾過エレメントの開発。濾過時の抵抗を高めずに性能を向上するため、繊維の“材質、太さ、長さ、本数、充填高さ”の設計条件を最適化する必要がある。

技術開発のキーポイント：繊維の配向、充填密度をベースに要素試験データをもとにした流動シミュレーションと、濾過性能予測モデルを構築し、膨大な組み合わせの設計条件から最適条件を迅速に見出す。

開発目標：凝集剤なしで $1\mu\text{m}$ 以上 $5\mu\text{m}$ 未満の微粒子を90%以上除去可能であること

2)1年間で濾過性能が20%低下するという課題

課題：長期間安定した性能を発揮するための、伸縮の繰り返し負荷に対して耐久性が高い繊維濾材の開発。さらに、ベースとなる濾過性能を向上するために複数種の繊維を組み合わせる最適条件を設定する必要がある。

技術開発のキーポイント：繊維の高分子素材、紡糸条件の検討と、加速試験による高頻度伸縮時の弾性復元力低減の評価。粒子サイズに応じて最適化した繊維エレメントを、さらに最適に複層化(組み合わせ)。

開発目標：1年相当の使用後で10%未満の弾性復元力低下の繊維モジュールを試作

3) 原水の水質変動に対応できないという課題

課題: 繊維濾過に流入する原水の懸濁物質濃度の変動に応じて自動的に複層濾過構造を可変することができる機構の開発。また、最適な濾過条件に自動調整可能な無人化運転を実現するシステムの開発も必要である。

技術開発のキーポイント: 繊維充填密度を可変するための CAP の位置制御(ストッパー構造)の開発。原水の変動を予測し最適化するための AI を使った自動制御システムの導入と、遠隔監視のための IoT 化。

開発目標: 原水の水質変動が 1~100mg/L に変動しても対応可能

4) スケールアップした繊維濾過装置における濾過性能の検証

課題: 新規繊維濾過エレメント、新規充填密度調整機構と自動制御システムを使った新しい高性能繊維濾過装置を、大規模の実用装置とした場合のスケールアップ時に発生する諸問題を解決する必要がある。その上で目標としている除去率や耐久性などのユーザーニーズに対応した性能発揮の確認が必要。

技術開発のキーポイント: 多くのユーザーから要望されている、実用サイズの装置を用いての微粒子の除去率やランニングコストのニーズに対応できることを示す実証試験データを得る。

開発目標: 処理容量が 2000m³/日以上を発揮

従来技術の砂濾過器、繊維濾過の課題と、本事業で取り組んだ高性能繊維濾過装置の開発内容を図 1-1.5 に示す。

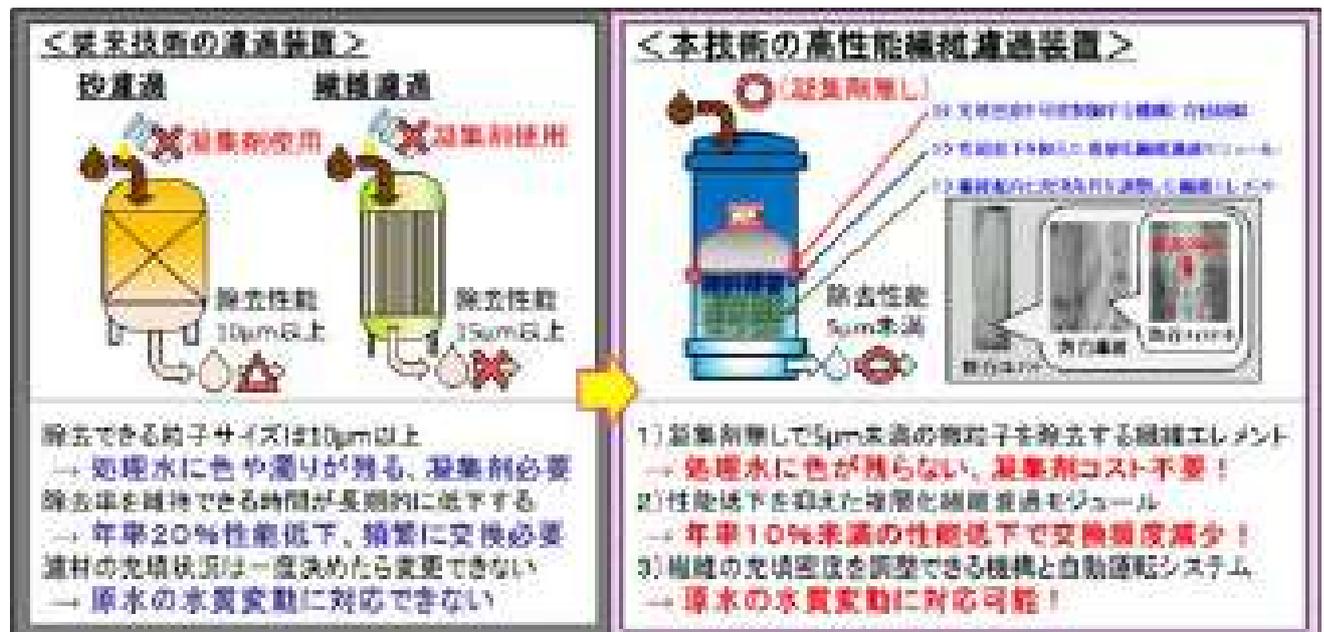
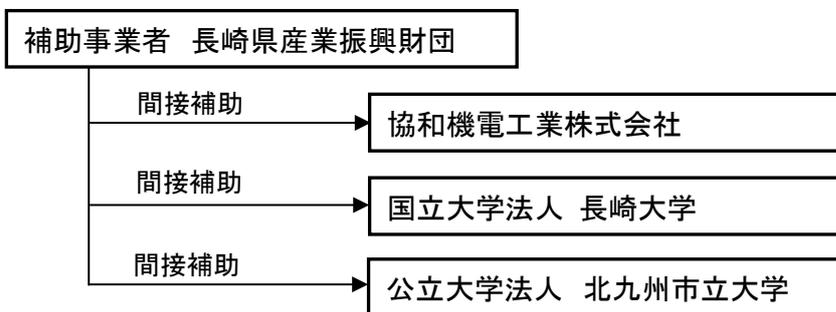


図 1-1.5 従来技術での課題と新技術(高性能繊維濾過装置)の開発内容

1-2 研究体制

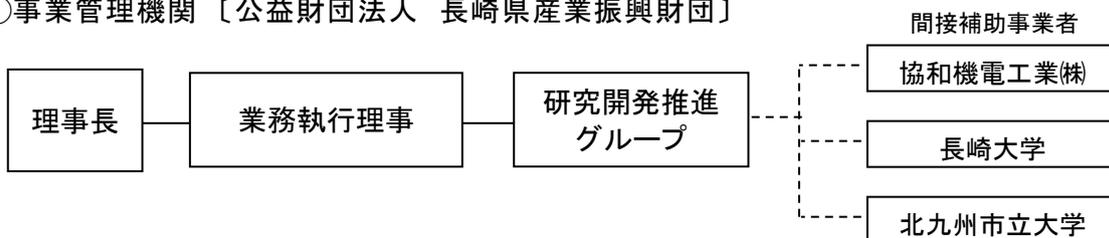
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織

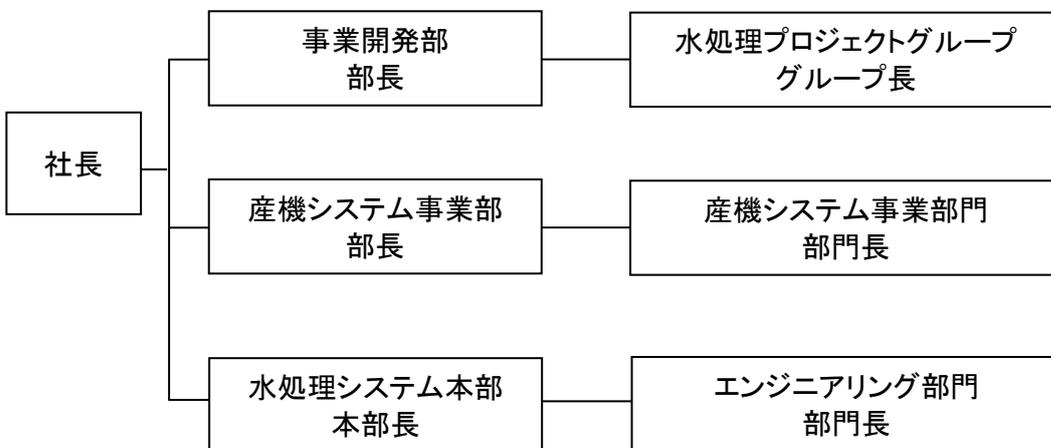


2) 管理体制

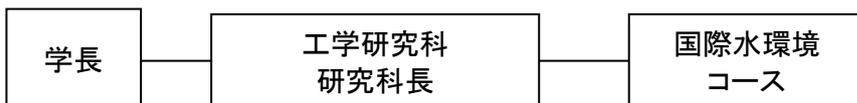
① 事業管理機関〔公益財団法人 長崎県産業振興財団〕



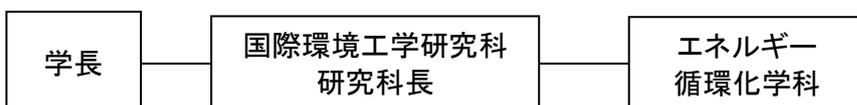
② 研究実施機関〔協和機電工業株式会社〕



〔国立大学法人 長崎大学〕



〔公立大学法人 北九州市立大学〕



(2) 研究員及びプロジェクト管理員(役職・実施内容別担当)

【総括研究代表者(PL)】(プロジェクト管理者)

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|---|
| 上山 哲郎 | 協和機電工業株式会社 事業開発部 水処理プロジェクトグループ グループ長 |

【副総括研究代表者(SL)】

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|----------------------------|
| 板山 朋聡 | 国立大学法人 長崎大学 大学院工学研究科 教授 |

実施内容

- ① 凝集剤フリーで微粒子を除去する繊維エレメントの開発
- ② 性能低下を抑えた繊維モジュールの開発
- ③ 充填密度を可変制御する機構の開発
- ④ 大型実証試験機の開発
- ⑤ プロジェクトの管理・運営

【事業管理機関】 公益財団法人 長崎県産業振興財団

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 |
|-------|--------------------------------------|------|
| 有富 雄二 | 理事(研究開発支援担当) | ⑤ |
| 横尾 啓介 | 研究開発推進グループ GM | ⑤ |
| 川原 芳彦 | 研究開発推進グループ 技術相談・事業化支援チーム 産学官連携 CD | ⑤ |
| 伊東 英樹 | 研究開発推進グループ 技術相談・事業化支援チーム 産学官連携 CD | ⑤ |
| 渡辺 正弘 | 研究開発推進グループ 技術相談・事業化支援チーム 技術支援 CD | ⑤ |
| 佐々野 実 | 研究開発推進グループ 技術相談・事業化支援チーム CM | ⑤ |
| 永橋 法昭 | 研究開発推進グループ 総務管理チーム CM | ⑤ |
| 高月 誓子 | 研究開発推進グループ 総務管理チーム スタッフ | ⑤ |

【研究実施機関(研究員)】

協和機電工業株式会社

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 |
|-------|------------------------------|---------|
| 上山 哲郎 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ グループ長 | ①、②、③、④ |
| 眞壁 良 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ 主任 | ①、③、④ |
| 並内 完美 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ | ④ |
| 宮崎 悠 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ | ①、②、③、④ |
| 波多 晃希 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ | ①、②、③、④ |
| 末吉 麟 | 産機システム事業部 産機システム部門 | ③、④ |
| 入江 守裕 | 水処理システム本部エンジニアリング部門 | ③、④ |
| 峯 須美子 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ 事務補助員 | ①、②、③、④ |
| 尾田 寛文 | 事業開発部 水処理プロジェクトグループ 実験補助員 | ①、②、④ |

国立大学法人 長崎大学

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 |
|---------------------------------|-------------|---------|
| 板山 朋聡 | 大学院工学研究科 教授 | ①、②、③、④ |
| 田邊 秀二 | 大学院工学研究科 教授 | ①、② |
| 蔣 宇静 | 大学院工学研究科 教授 | ① |
| 村上 裕人 | 大学院工学研究科 教授 | ③、④ |
| 松尾 香織 | 事務補助員 | ①、②、③、④ |
| Obey Gotore (オベイ ゴトレ) | 実験補助員 | ① |
| Huynh Van Vu (ファン バン ブ) | 実験補助員 | ① |
| Nguyen Tan Duc (ニャン タン デュック) | 実験補助員 | ① |
| Somsri Saenchan (ソムスリ セチャン) | 実験補助員 | ① |
| 室之園 崇 | 実験補助員 | ④ |
| 末廣 奏 | 実験補助員 | ① |
| 網中 裕理 | 実験補助員 | ① |

公立大学法人北九州市立大学

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 |
|-------|-------------|------|
| 寺嶋 光春 | 国際環境工学部 准教授 | ① |
| 上村 康太 | 実験補助員 | ① |
| 山田 夏生 | 実験補助員 | ① |
| 狩野 喬則 | 実験補助員 | ① |
| 河原 翔太 | 実験補助員 | ① |

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属・氏名

【事業管理機関】 公益財団法人 長崎県産業振興財団

(経理担当者) 研究開発推進 G 総務管理チーム

CM 永橋 法昭

(業務管理者) 研究開発推進 G 技術相談・事業化支援チーム

産学官連携 CD 伊東 英樹

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|-------------------------------------|
| 谷岡 明彦 | 東京工業大学 名誉教授 |
| 重光 保博 | 長崎県工業技術センター 応用技術部 工業材料・環境科 専門研究員 |
| その他 | 民間企業より選任 |

1-3 成果概要

最終目標である高性能繊維濾過装置の高度化及び大型化に関する開発事項について、令和2年7月から令和5年3月までの2年9ヶ月で、4つの研究開発項目について取り組んだ。その成果を以下に記す。(表 1-3.1)

表 1-3.1 目標達成度一覧表

| サブテーマ | 目標値 | 達成度 | 達成根拠 | 達成に係るコメント |
|------------------------------|--|------|--|--|
| 1. 凝集剤フリーで微粒子を除去する繊維エレメントの開発 | 凝集剤なしで1 μ m以上5 μ m未満の微粒子を90%以上除去可能 | 100% | <ul style="list-style-type: none"> ・CT スキャンデータを解析し、繊維の三次元充填モデルを作成し、それを用いて流体シミュレーションモデルを作成した。 ・PMMA 標準粒子では、1.5μm 粒子を62%、3μmと5μm 粒子を100%除去する繊維条件を設定し、個数存在割合が10:5:1の場合の平均除去率は98.6%を達成した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・凝集剤を使わずに、5μm 未満の粒子を90%以上除去できることが判明したが、実際の濾過対象水の場合は繊維が補足した濁質が濾過中に細かくなって流出する現象も見られた。 |
| 2. 性能低下を抑えた繊維モジュールの開発 | 1年相当の使用後での繊維モジュールの弾性復元力低下が10%未満 | 100% | <ul style="list-style-type: none"> ・複層化繊維モジュールの開発が完了し、濾過対象水に応じて繊維の組み合わせを設定した。 ・有機系の排水処理水に対応する従来比1.5倍の太さの繊維を使用して、10%未満の弾性復元率低下率となった。 | <ul style="list-style-type: none"> ・1.5倍太さでも、繊維充填条件を調節することで、従来と同等の微粒子除去性能を得ることができた。 |
| 3. 充填密度を可変制御する機構の開発 | 原水の懸濁物質濃度が1~100mg/Lに変動しても対応できるシステム | 90% | <ul style="list-style-type: none"> ・低濁度~高濁度の範囲の上限を濁度で10NTU程度までとして、充填密度を3段階に調整できる可変制御システムを構築した。 ・ニューラルネットを用いた深層学習によって、濾過対象水の濁度を予測するシステムを構築した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・濾過対象水の濁度予測システムを実際の繊維濾過ユニットの制御盤内に実装するように開発を継続する。 |
| 4. 大型実証試験機の開発 | 大型実証機の処理容量が2000m ³ /日以上 | 80% | <ul style="list-style-type: none"> ・濾過塔直径1200mmの大型実証機を製作し、日処理量2000m³相当の流量でも運用できることを確認した。 ・実証場所の有機系排水処理水では連続稼働において濾過差圧が高くなる問題が顕著に表れ、新たに有機系排水用の繊維を採用した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・濾過対象水に合わせた逆洗条件の設定が必要となり、補完研究を継続。 ・まずは井水・河川水の濾過、工業用水の濾過、無機系排水処理水の用途に展開を進める。 |

1-4 当該研究開発の連絡窓口

協和機電工業株式会社

事業開発部 水処理プロジェクトグループ

グループ長 上山 哲郎

Tel: 095-881-2589 Fax: 095-801-2056

E-mail: ueyama@kyowa-kk.co.jp

公益財団法人 長崎県産業振興財団

研究開発支援室

産学官連携コーディネーター 伊東 英樹

Tel: 0957-52-1138 Fax: 0957-52-1140

E-mail: ito.hideki@joho-nagasaki.or.jp

第2章 本論

2-1 凝集剤フリーで微粒子を除去する繊維エレメントの開発

(除去可能な微粒子サイズを小さくすべきという課題への対応)

【開発目標：凝集剤なしで1 μ m以上5 μ m未満の微粒子を90%以上除去可能】

- ✓ 図2-1.1に繊維濾過エレメントの構造を示す。濾過時に圧縮された繊維は異なる配向や充填密度を各所で示し、微粒子除去率と圧力損失に関係する。その空間分布は、エレメント設計条件の繊維材質、太さ、長さ、繊維本数、繊維充填高さに依存し、エレメント設計条件の最適化には膨大な組み合わせ試験が必要。
- ✓ 新しい繊維濾過エレメントを早期に開発することが必要であるが、膨大な組み合わせの試作・試験を実施することは実質不可能に近いため、統計的最適化手法による開発促進を行う。これは、現在の材料工学でも同種の問題解決のために、マテリアルインフォマティクス手法として導入され始めている技術を簡素化して応用するものである。これによって実験総数を絞り、効果的な繊維濾過エレメントの最適化を実現する。



図 2-1.1 繊維濾過材の構造

2-1-1 繊維の三次元充填モデルの構築 協和機電工業・長崎大学

1) 目的

繊維濾過塔内の繊維密度と配向に関する繊維の三次元充填モデルを構成し、繊維濾過塔内の流動解析などの基礎データとする。そのために、工業用 X 線 CT で濾過塔の繊維画像を取得し内部構造を可視化し、X 線 CT 画を数値データ化し、繊維空隙率(充填密度)と配向データを取得することを目的とする。

2) 実施内容と結果の要約

長さ 200mm、直径 100mm の透明塩ビ管をモデル濾過塔とし、繊維濾材(PET 樹脂)を異なる条件でこのモデル濾過塔に充填した。マイクロフォーカス X 線 CT 装置(XTH 225ST,ニコン)でこの内部を撮影し、その画像を2値化した。この2値化の閾値には繊維の PET 樹脂密度と繊維のグラム充填量から計算した全体の充填密度と一致するように設定した。また、X 線 CT の三次元画像を正方形のブロック(BOX)に分割し、各 BOX の充填密度と繊維配向のデータを求めた。BOX の充填密度は2値化した後の BOX 中の画素の1の割合とした。繊維配向は、新たにフーリエ変換と主成分分析を用いた推定アルゴリズムの開発を行なった。このアルゴリズムが正しいことは、1辺が 5cm のアクリルキューブ内に密度と繊維配向を制御し充填した繊維を X 線 CT 撮影し、そのデータを開発したアルゴリズムで解析し正しく繊維の向きが推定できてい

ることを検証した。モデル濾過塔の充填密度と配向のデータをもとに、さらに空間分割と平均化を行い、繊維密度や配向の空間分布の解析を実施した。また、繊維の充填において繊維長さと充填量が繊維密度の空間分布特性に影響を与えることがクラスター解析の結果から判明した。

また、繊維が濡れている場合の充填密度の変化や、モデル濾過塔上下のフランジの影響を受けなくするための濾過塔内の改良等を行い、より実際の運転状況に近い状態での CT データの取得を試みた。上下フランジの影響を受けなくするための改良は成功したが、濾過塔内に水も充填した場合には十分な CT データを得ることはできなかった。

3) 具体的な実施内容

3-1) X線 CT の撮影と画像の前処理

図 2-1-1.1 に示すように、長さ 100mm、直径 100mm の透明塩ビ管をモデル濾過塔として繊維を充填した。各種条件を設定するための予備撮影を行った上で、最終的には表 2-1-1.1 に示した充填条件のサンプルで撮影を実施した。ここに示すように、繊維の充填密度は繊維束の本数と各繊維束の繊維長を調整することで実現できる。



図 2-1-1.1 X線 CT 撮影用のモデル濾過塔

表 2-1-1.1 X線 CT 撮影用の繊維サンプルの充填条件

| データ名 | 繊維密度 (g/L) | 繊維の束の本数 (本) | 繊維の長さ (mm) |
|------|------------|-------------|------------|
| 80-1 | 80 | 5 | 910 |
| 80-2 | 80 | 10 | 460 |
| 80-3 | 80 | 20 | 230 |

| | | | |
|-------|-----|----|------|
| 110-1 | 110 | 5 | 1260 |
| 110-2 | 110 | 10 | 630 |
| 110-3 | 110 | 10 | 630 |
| 110-4 | 110 | 10 | 630 |
| 110_5 | 110 | 20 | 310 |

| | | | |
|-------|-----|----|------|
| 140-1 | 140 | 5 | 1600 |
| 140-2 | 140 | 10 | 800 |

X線CTの空間の解像度はX線ビームやエネルギーをコントロールすることで調整するが、対象物の空間サイズや物質の密度差(電子密度差)によって決定される。今回、長さ100mm、直径100mmの透明塩ビ管を使った濾過塔内においては、繊維が乾燥した条件での測定解像度は1pixelで0.06mmが最小解像度であった。それぞれの画素は32bit階調(-2147483648~2147483648)のモノクロデータとして、さらに縦(濾過塔の長さ)方向に1807枚に分割されたスライスデータが得られた。そのスライスデータ(RAW画像)の一例を図2-1-1.2(a)に示す。さらに、図2-1-1.2の(b),(c),(d)には、塩ビ管の部分であるRAW画像の縁の部分除去するプロセスを示した。2値化で白の部分を読み出し、その領域をゼロ化した。完全ではなかったため、さらに内側に半径で2mmの部分除去した。その結果、実質的な半径は48mmの画像となった。

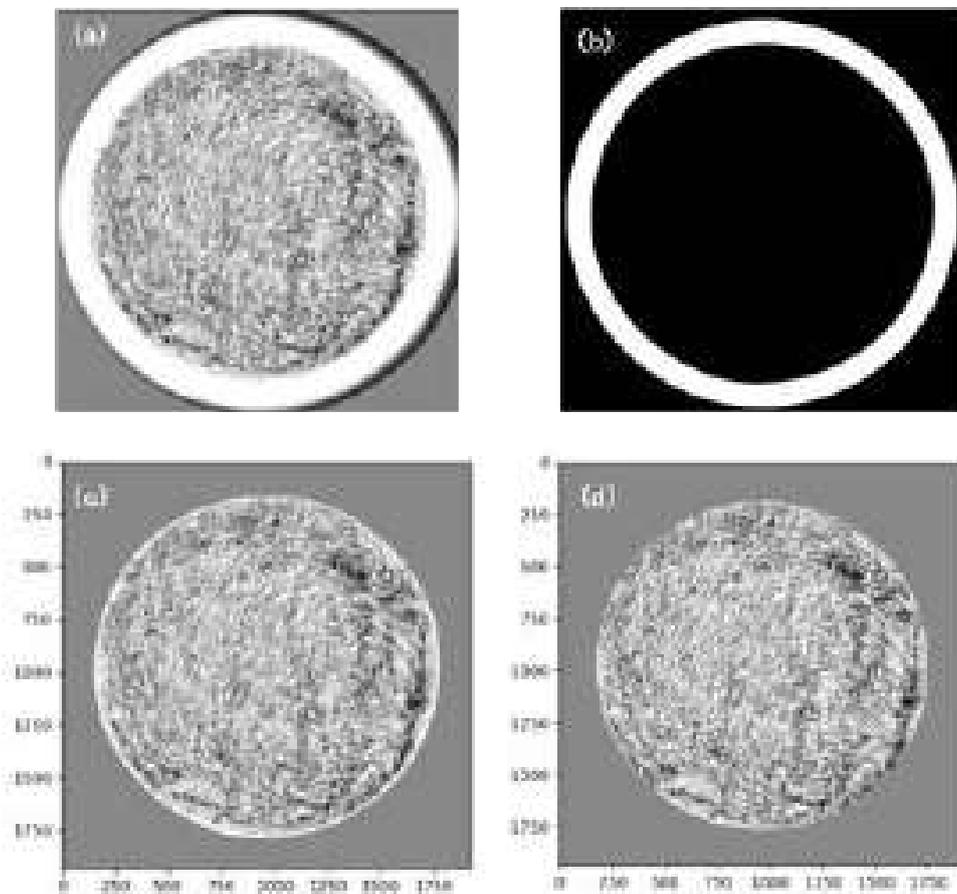


図 2-1-1.2 X線CTのRAW画像と塩ビ管部分の除去プロセス

(a)RAW画像、(b)2値化で判別した塩ビ管の部分、(c)塩ビ管部分を除いた画像、(d)さらに外周の内側2mmを除去した画像

3-2) X線 CT 画像の2値化と繊維濾過塔内の空隙率分布の推定手法

X線 CT 画像をもとに、繊維のある部分と繊維の無い空隙部分に分けて図 2-1-1.3 は塩ビ管の濾過塔部分を除いた 1807 枚の X線 CT 画像の各画素の階調に対するヒストグラムを示す。横軸は 32bit の階調で黒側が負で最小値が $-2,147,483,648(=-2^{32}/2)$ で、白側が正で最大値が $2,147,483,648$ である。縦軸は画素数である。

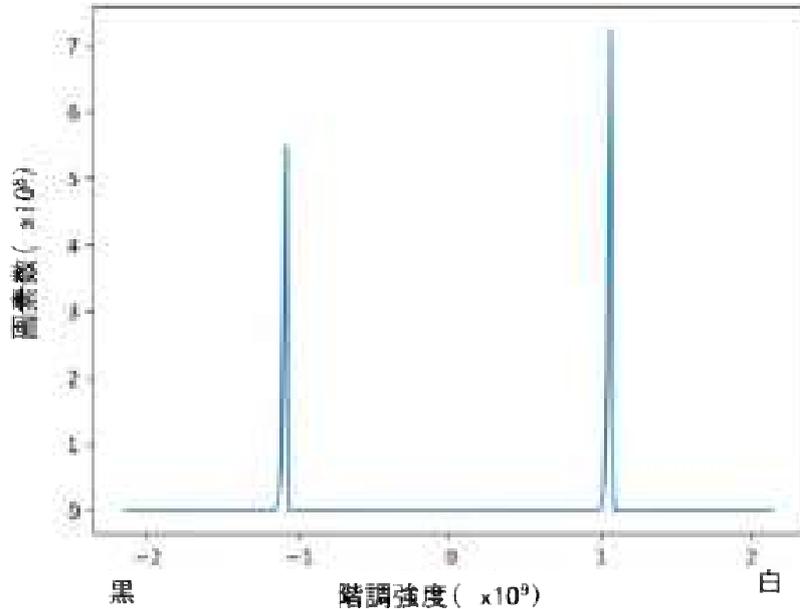


図 2-1-1.3 X線 CT の RAW 画像からの画素ヒストグラム

2つの特徴的なピークがあるが、空隙になっている部分が黒側の -1×10^9 付近にあるピークに対応しており、繊維が詰まった部分が白側の 1×10^9 近くのピークに対応する。2値化画像では、閾値を設定して、それ以下を黒(繊維がない)で、それ以上を白(繊維部分)とみなした上で、繊維の空隙率 ε は式(1)で表すことができる。しかし、この2つのピークの間で2値化したのでは、繊維の比率が大きくなりすぎる。

$$\varepsilon = \frac{\text{黒の画素数}}{\text{全画素数}} \quad (1)$$

実際の空隙率は、体積 $V[\text{L}]$ あたりの充填重量 $m[\text{g}]$ で、 $PD=m/V[\text{g/L}]$ は繊維の重量充填密度である。さらに繊維材質の密度 $\rho[\text{g/L}]$ が分かれば式(2)で計算できる。

$$\varepsilon = 1 - PD/\rho \quad (2)$$

繊維材質はPET樹脂で密度は $1.34 \text{ g/cm}^3 = 1340 \text{ g/L}$ である。表 2-1-1.1 に示したように、 m/V は繊維の重量充填密度で 80g/L 、 110g/L 、 140g/L と条件設定したので、空隙率は、それぞれ 0.9403 、 0.9179 、 0.8955 となる。これに、一致するように2値化の閾値を設定し2値化を行う。その結果、図 2-1-1.4 に示す2値化した画像が得られる。また、 $1 - \varepsilon$ は繊維が占める体積を示す体積充填率である。なお、これらの計算はすべてPythonプログラムで実施した。

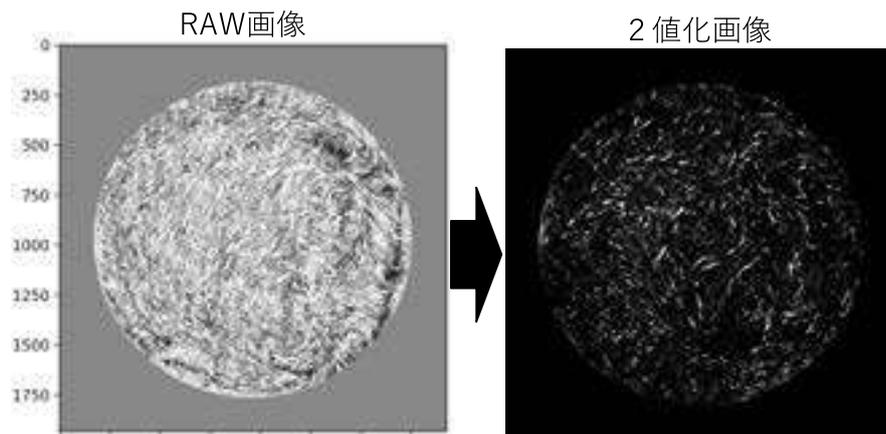


図 2-1-1.4 RAW 画像と2値化画像の比較

2値化スライス画像の約 1800 枚を重ねて全体の三次元の2値化した画像を構成する。その結果を図 2-1-1.5 に示す。さらに、この三次元画像を図 2-1-1.6 のように 50pixelX50pixelX5 スライスに分割する。1pixel(X,Y 方向)、1スライス(Z 方向)はそれぞれ 0.06mm であるので、1ブロック (BOX)は 3mm 辺の立方体である。この BOX で式(1)を適用し、各 BOX の空隙率 ε を計算する。BOX の位置は BOX 数を単位とした X、Y、Z 軸方向の INDEX 座標か、実際の物理座標 (BOX の中心座標) で設定できる。図 2-1-1.7 は BOX 内の繊維構造の例を示す。繊維は 13 μm の太さであるが、BOX 内には 50 μm 程度の太さの繊維束が観察されるが、繊維の方向は明確に見えるので、配向もこの BOX 毎に推定することができる。

図 2-1-1.8 は BOX 毎に体積充填率 $(1 - \varepsilon)$ を計算して、階調プロットしたものである。階調プロットから、密度分布が一様にランダムに分布しておらず、分布特性に一定の傾向があることが見て取れる。しかし、定量的に三次元の密度分布の特徴を掴むには、空間分布を統計的特徴として捉えるためのプロットや統計解析が必要である。

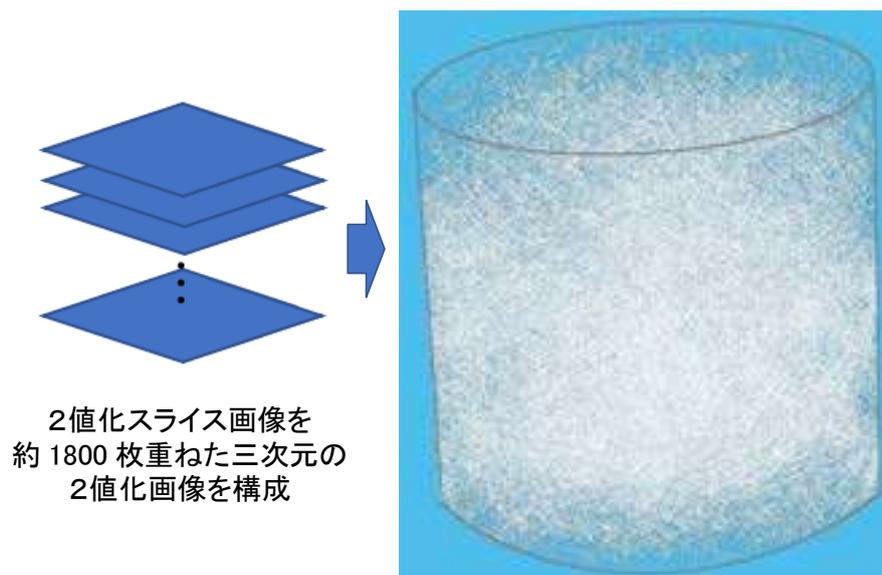


図 2-1-1.5 2値化スライス画像を重ねた三次元の2値化画像

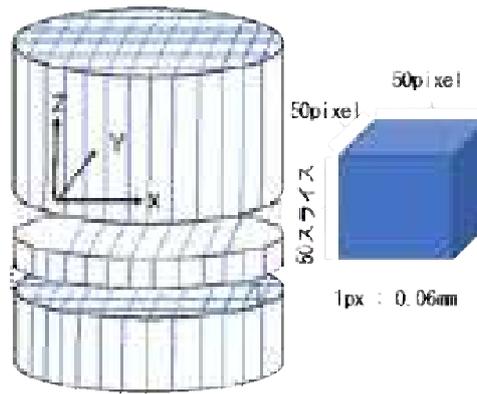


図 2-1-1.6 立方体のブロック(BOX)に分割

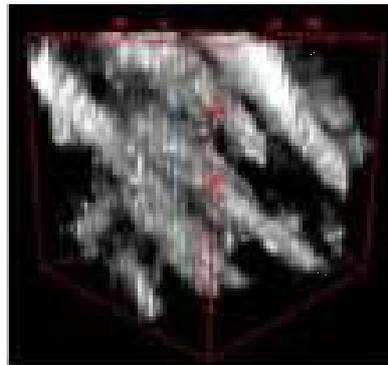


図 2-1-1.7 ブロック(BOX)の中の繊維

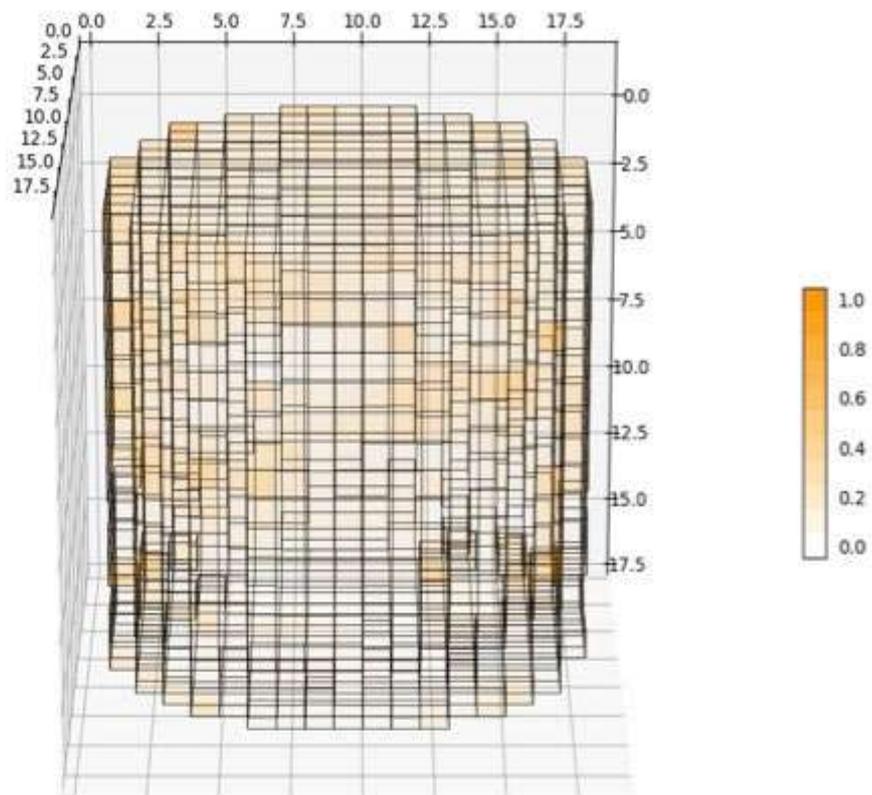


図 2-1-1.8 体積充填密度の分布の例(充填密度 110g/L, 繊維長 630mm, 10 束のサンプル)

3-3) 繊維濾過塔内の配向分布の推定アルゴリズムの開発

二次元や三次元の画像からの物体の向きや場の方向性を推定する配向解析のアルゴリズムとして直交フィルタ法が知られている。これは画像をフーリエ変換して(空間)周波数空間内の画像に変換して、そのフーリエ変換画像に対しての基準となる空間ベクトルに対する方向を決定する。この時、求める配向の空間スケールに応じて、空間周波数の低い領域のみを通過させる所謂ローパスフィルタで細かな空間的変動に対応する高周波成分をカットしておく必要がある。この方法は空間周波数に対するフィルタ関数のパラメータなどの設定が難しいとされている。実際に、この手法を予備研究で検証した結果、今回のような三次元画像に対しては、安定的に配向を求めることができる同一のパラメータを得ることができなかった。また、三次元であるためデータ数が膨大で効率に良い配向を推定するアルゴリズムが新たに必要とされた。そこで、フーリエ変換と主成分分析を組み合わせたアルゴリズムを新たに開発した。その概要を以下に説明する。今回のアルゴリズムを説明するために、二次元ガウス分布楕円の画像を用いる。二次元離散的フーリエ変換を式(3)に、二次元離散的フーリエ逆変換を式(3')に示す。

$$F(Kx, Ky) = 1/N \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} f(k, l) \exp\left(-\frac{2\pi i(Kx k + Ky l)}{N}\right) \dots (3)$$
$$f(k, l) = 1/N \sum_{Kx=0}^{N-1} \sum_{Ky=0}^{N-1} F(Kx, Ky) \exp\left(\frac{2\pi i(Kx k + Ky l)}{N}\right) \dots (3')$$

$f(k, l)$ は実空間の二次元(三次元)画像で、 k, l は X 座標、Y 座標の index、N は X 方向、Y 方向の画素数である。 $F(Kx, Ky)$ は $f(k, l)$ のフーリエ変換であるが、複素数であるので、その絶対値 $|F(Kx, Ky)|$ をフーリエ変換画像とする。ここで、 Kx, Ky は空間周波数である。図 2-1-1.9 には実空間の二次元モデル画像とそのフーリエ変換画像との対応関係を示す。この図から、実空間の画像の配向方向(長軸方向)に対してフーリエ変換画像は周波数空間では縮む(実空間の長軸は周波数空間で短軸)、実空間の長軸に直行する短軸方向に対して周波数空間で伸張した画像(周波数空間での長軸)になっていると判断できる。さらに、実空間では同一方向の複数の物体の位置がずれて配置されていても、周波数空間では中心付近に集中する。また、空間周波数の低周波領域が領域全体に広がる空間情報を与え、高周波領域(フーリエ変換画像の端に近い部分)は細かな画像の変化に対応する。すなわち、対象となる実空間の解析領域内(BOX 内)の全体的な配向情報は、フーリエ変換画像の中央付近の画像の配向から解析できることになる。今回の解析では、BOX 内の平均的な配向を推定したいので、低周波領域にあたる中央付近のデータのみを選択する。次に、この周波数空間内のフーリエ変換画像を楕円体とみなしたときに楕円体の長軸と短軸を求めることができれば実空間の配向情報を得ることができる。そのために、統計学における主成分分析のアルゴリズムを用いる。

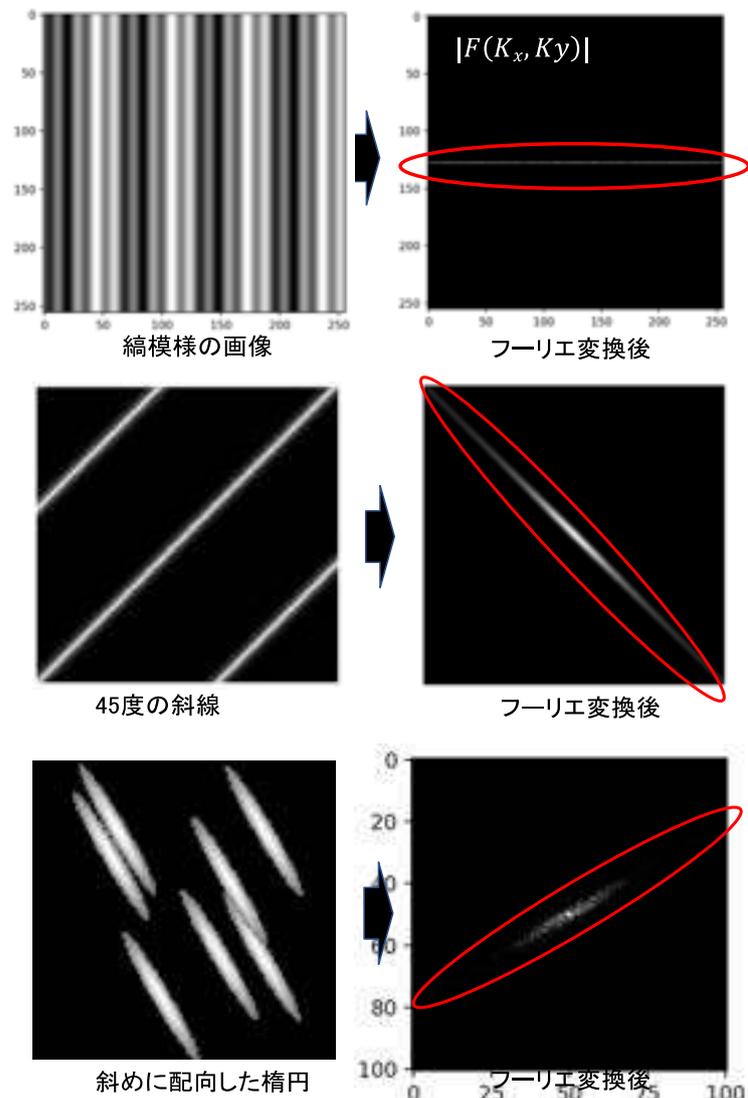


図 2-1-1.9 繊維を模擬した二次元楕円画像のフーリエ変換

図 2-1-1.10 に示すように、フーリエ変換画像を周波数空間内のデータ点集合とみなし主成分分析を適用すると、データの分散が最大となる方向を第1主成分ベクトルとして求め、また、それと直交する方向で次に分散が大きいものが第2主成分ベクトルとなり、三次元の場合は第3主成分ベクトルが最も分散が小さい方向である。

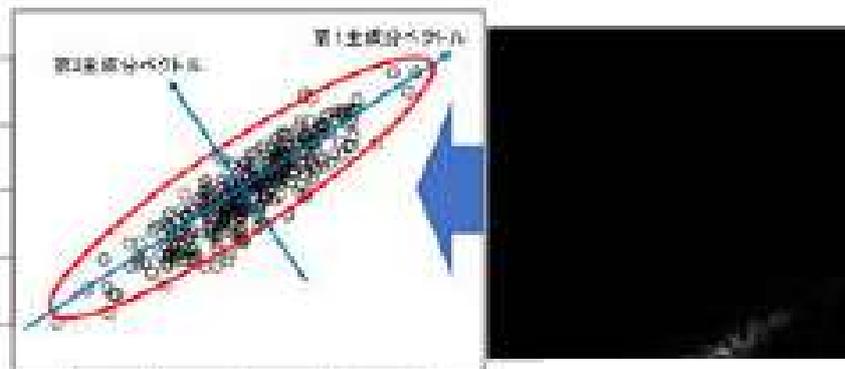


図 2-1-1.10 二次元楕円のフーリエ変換画像の主成分分析

この主成分分析ではデータ点集合を多次元(=成分数)のガウス分布楕円体とみなしており、その楕円体の各軸を固有ベクトルとして求め、軸の長さは固有値に対応している。

図 2-1-1.11 では実際に二次元のモデル画像を用いて、実際にフーリエ変換と主成分分析の組み合わせによる配向解析を実施した。

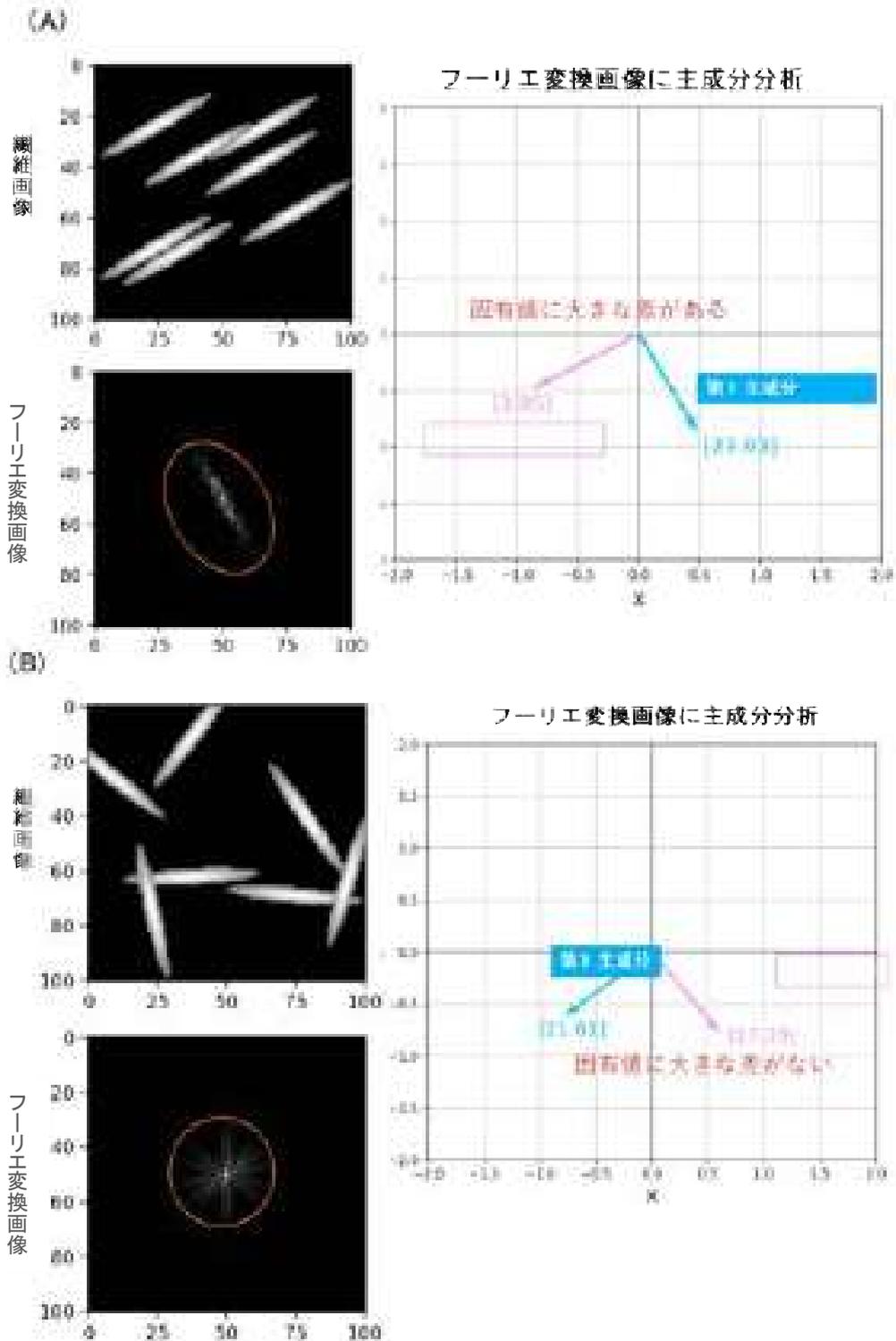


図 2-1-1.11 配向度が強い(1方向に揃っている)場合と弱い(方向にバラツキがある)場合の二次元モデル画像のフーリエ変換と主成分分析の結果

図 2-1-1.11(A)では、複数の楕円が同じ斜め方向に配向しており、フーリエ変換画像もそれと直交する方向の一つの楕円となっており、第1主成分ベクトルはこの楕円の長軸方向に一致しており、第2主成分ベクトルは、それと直交する楕円の短軸方向となっている。楕円の長軸と短軸のそれぞれの長さ、主成分分析による第1主成分ベクトルと第2主成分ベクトルに対応するそれぞれの固有値の大きさが対応している。また、図 2-1-1.11(B)では、同じ複数の楕円がランダムに配向しており、平均化すると配向が弱い。この場合は、フーリエ変換画像も明確な楕円を示さない。主成分分析による第1主成分ベクトルと第2主成分ベクトルに対応するそれぞれの固有値の大きさの比が1に近づいている。従って、各主成分ベクトルの方向と固有値の大きさの比から実空間の配向情報を得ることができる。すなわち主成分ベクトルの方向から配向ベクトルを、楕円体の二次形式として異方性テンソル(配向テンソル)として表す(図 2-1-1.12 参照)。

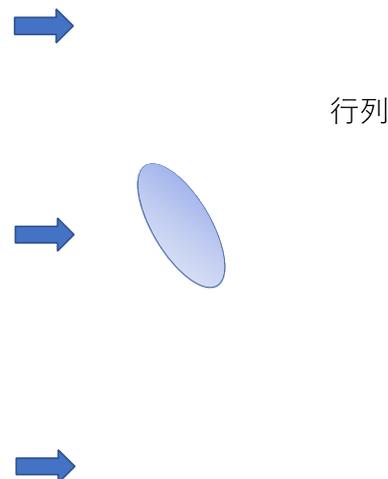


図 2-1-1.12 二次元ガウス分布楕円体の二次形式と異方性テンソル

図 2-1-1.13 には二次元モデル画像の配向解析の結果を示す。この図の配向ありでは、X 軸に対して 30 度±15 度の角度分布で7つの二次元ガウス分布の楕円をランダムに配置した画像を 1000 個生成、それらのフーリエ変換画像の主成分分析を行い、その第1主成分ベクトルと第2主成分ベクトル、さらに固有値を求めた。この主成分ベクトルから配向ベクトルの X 軸との角度を求め、さらに、直交座標系の異方性テンソルを求めた。その結果、1000 個の画像に対して、平均の配向角度である 30 度が再現できている。さらに、明確な配向がある(異方性がある)場合の異方性テンソルの特徴が再現できている。すなわち、長軸と短軸の長さが異なる楕円体が配向して(方向を揃えて)いるので、長軸と短軸の長さに対応する a と

以上の結果から、今回のアルゴリズムにより X 線 CT の配向情報を得ることが出来る。実際の対象は三次元の X 線 CT 画像である。そこで、三次元モデルとして図 2-1-1.14 に三次元ガウス分布楕円体とそのフーリエ変換画像(絶対値)を示した。

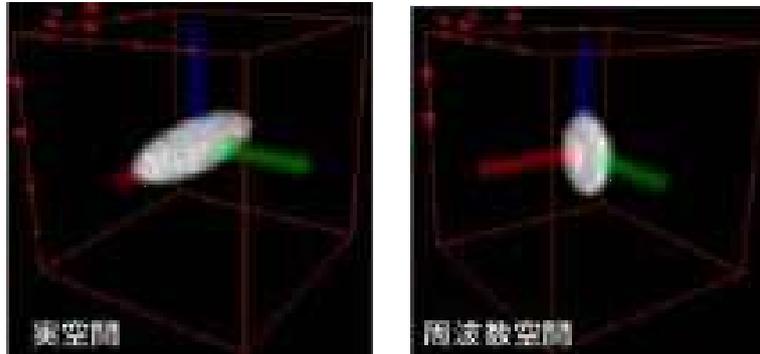


図 2-1-1.14 三次元ガウス分布楕円体画像のフーリエ変換

この図から実空間の楕円体は長軸方向に対して伸びたラグビーボール型であるが、フーリエ変換後は軸の長さが逆数になるので長軸が最も短くなり、ラグビーボールが潰れて煎餅型となっている。二次元と同様に三次元の異方性テンソルを楕円体の二次形式の対称行列表現で3X3の行列として表現する。

$$T = \begin{pmatrix} a & p & q \\ p & b & r \\ q & r & c \end{pmatrix}$$

楕円の主軸が座標軸に平行になっている場合は非対角項 p、q、r は 0 であり、並行でない場合は 0 ではない。また、異方性がある場合は楕円体の長軸と短軸の差があるが、楕円体の軸の長さは行列 T の固有値の逆数の平方根であるので、

配向強度(異方性の強さ): $SA = 1 - \sqrt{\frac{\text{最小固有値}}{\text{最大固有値}}}$ (4) で定義することができる。

3-4) 開発した配向推定アルゴリズムの濾過試験キューブモデルによる検証

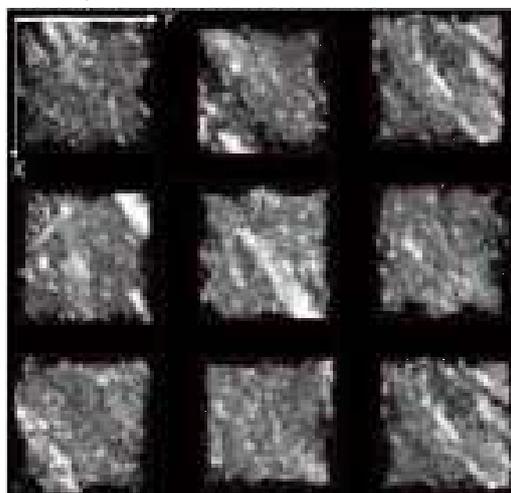
次に、3-3)で開発した推定アルゴリズムが実際の繊維濾過塔内の繊維集合体に対しても機能することを検証した。そのために、実際の繊維濾過塔内の繊維密度と同程度で繊維の配向を揃えて実際に繊維を充填した濾過試験キューブモデルを用いた(図 2-1-1.15)。これは、課題 1-2 濾過要素モデル式の構築で作成したものであり、ここでは作成方法は述べない。ここでは、濾過用の PET 樹脂の繊維束を重量充填密度 80g/L でアクリルキューブ内に、配向角度 45 度で充填した。この配向角度は立方体の一辺(X 軸)からの角度であるが、X-Y 面に対しては並行となるように充填した。図 2-1-1.15 には、この X 線 CT 画像から抽出した 9つの 50pixel(3mm) BOX の実空間画像(X 線 CT 画像)を示した。各 BOX ともに確かに繊維が X 軸に 45 度に配向していることが分かる。また、各 BOX を開発した配向推定アルゴリズムで解析した結果(配向ベクトル)を、その右側に対応するように配置してある(ピンク色の線)。この図から、BOX 内の配向ベクトルが 45 度程度となっており正しく推定されているようである。



濾過試験キューブモデル

X線CT用にアクリル ケースに濾過用繊維を方向を揃えて充填し撮影した。
* サイズは一辺が50mmで充填密度は80g/L、配向角度は45度
(作成の都合上、写真のラベルは2Lの中の繊維重量が160gで表記)

濾過試験キューブモデルのX線CT画像中の50pixel(3mm)サイズのBOX画像



各BOX画像の配向ベクトルの推定結果

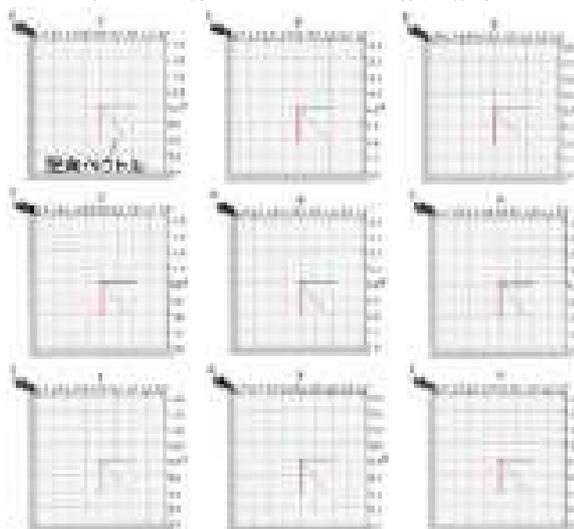


図 2-1-1.15 濾過試験キューブモデル(45 度配向)内の各 50pixel BOX に対して推定された配向ベクトル

45 度の配向以外でも、推定の精度を確認するために、実際の繊維の充填方向に対する差をコサイン類似度(図 2-1-1.16 参照)の絶対値を指標として評価する。

コサイン類似度は以下の内積の(5)式で定義される。すなわち、 \vec{a} 、 \vec{b} を2つのベクトルとして

$$\cos(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \quad (5)$$

この指標が1に近いほど、推定が正しく行われていることになる。図 2-1-1.16 の結果では、正解ベクトルが(1,0,0)のキューブは、キューブの X 軸の辺に平行に繊維を充填したものであるが、それに対して推定した配向ベクトルは(-0.99, 0.04, 0.03)となり、この方向は正解ベクトルとは反対であるが、繊維には向きはないので、正しく推定できており、コサイン類似度も 0.9984 となっている。キューブの Y 軸に平行な (0,1,0)の正解ベクトルの場合、Z 軸に平行な (0,0,1)の場合のコサイン類似度は、それぞれ 0.9984 と 0.0034 となり高い精度で推定された。また、XY 軸に対して 45 度の(1,1,0)の正解ベクトル、YZ 軸に 45 度の場合では、それぞれ 0.9989, 0.9961 と、同様に高い精度で推定できている。これらの結果から、今回の推定アルゴリズムは、実際に充填された繊維に対しても正しく繊維方向を推定することに成功している。図 2-1-1.17 には繊維濾過塔内の繊維充填密度と配向解析の計算の流れを示す。

| 正解ベクトル | 求めた配向ベクトル | コサイン類似度の絶対値 |
|-----------|----------------------|-------------|
| (1, 0, 0) | (-0.99, 0.04, 0.03) | 0.9984 |
| (0, 1, 0) | (0.03, -0.99, -0.04) | 0.9984 |
| (0, 0, 1) | (0.09, 0.05, -0.99) | 0.9934 |
| (1, 1, 0) | (-0.69, -0.71, 0.04) | 0.9989 |
| (0, 1, 1) | (0.01, -0.76, -0.64) | 0.9961 |



図 2-1-1.16 異なる配向を持つ濾過試験キューブモデル内の50pixel BOX 内の推定された配向ベクトルと正しい方向(正解ベクトル)との間のコサイン類似度による評価

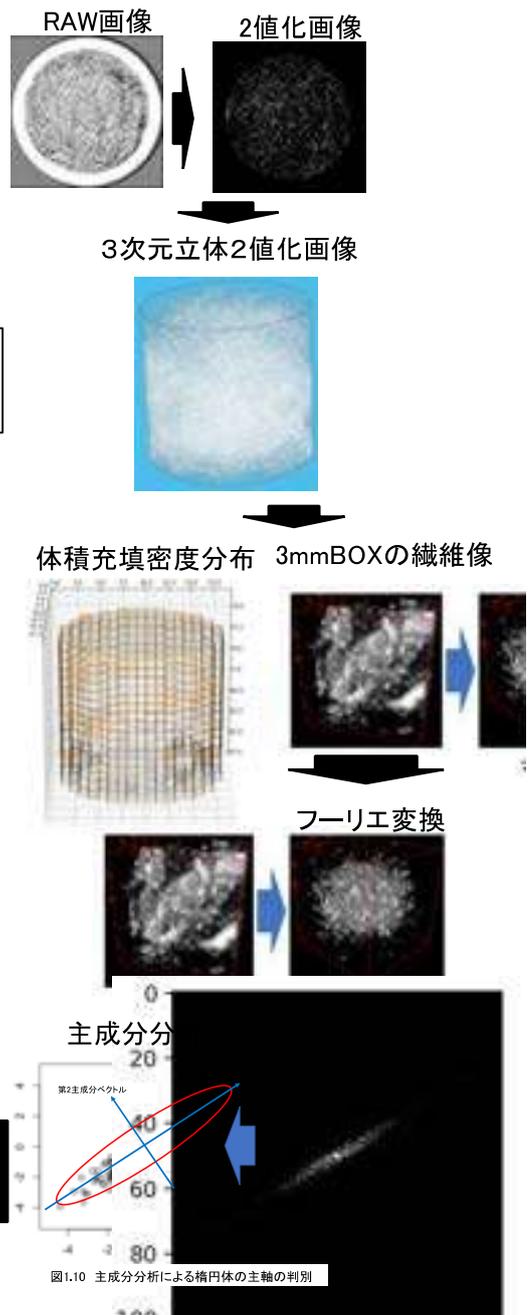
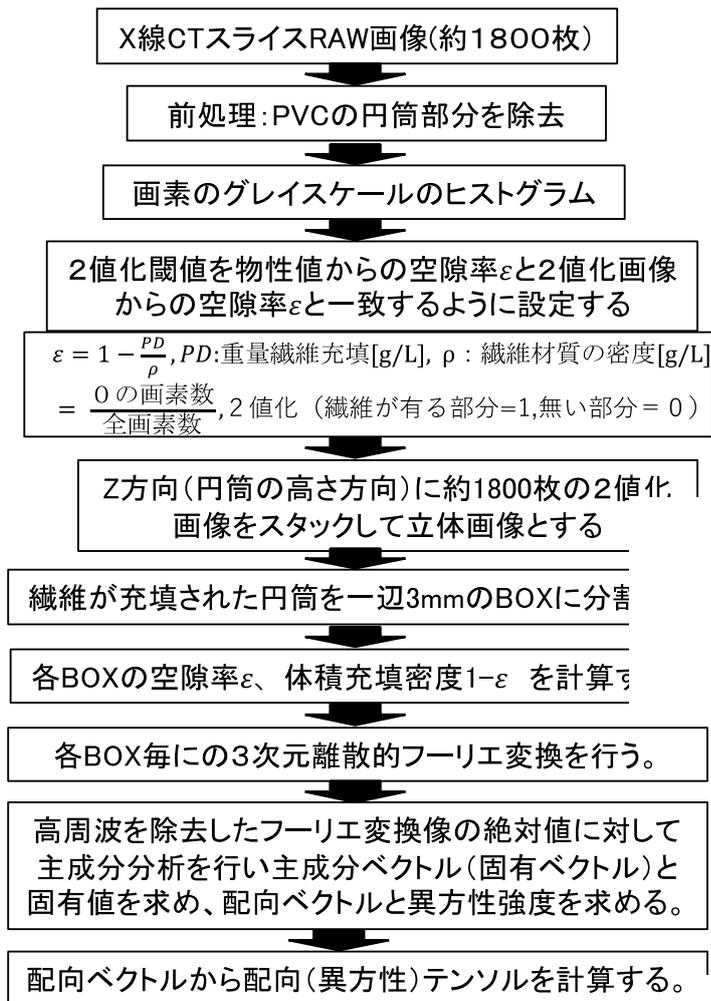


図 2-1-1.17 繊維濾過塔内の繊維充填密度と配向解析の計算の流れ

3-5) PVC 濾過塔に充填した繊維の X 線 CT 画像の解析結果

3-5-1) 充填条件と空間密度分布の関係

充填密度は後述するように繊維濾過の圧力損失や除去特性に最も影響する因子である。また、実際の繊維濾過塔内では繊維の充填密度が場所ごとに異なり空間分布を示すことは実機の透明 PVC 濾過塔内の繊維の外見からも分かるが、実際に空間分布を知るには、先述した X 線 CT の画像解析を行う必要がある。また、同じ充填密度であっても長い繊維を少ない束数で充填するか、また、短い繊維を多くの束数で充填するかにより空間分布が異なると考えられる。そこで、表 2-1-1.1 の各充填条件に対して、空間分布特性が異なるかに関する解析を行った。

繊維の空間分布特性の差異を見出すには、それぞれの X 線 CT 画像からの繊維の空間分布 $\rho(x,y,z)$ を比較する必要がある。また、三次元の濾過塔内に分布しているので円筒座標系による密度分布 $\rho(r,\theta,z)$ に変換することが都合がよい。ここで、 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, z = z$ である。しかし、回転方向に対しては角度の原点 $\theta=0$ の取り方に任意性があり、一定の角度だけずれた空間分布であるかを判別することが難しい。そこで、今回は異なる充填条件の空間分布を比較する場合に、角度方向では平均化した空間分布、すなわち $\rho(r,z)$ で判別した。この場合は、 r 方向で年輪状に分割するので、半径が大きくなると体積も大きくなり存在する繊維の数も多くなる。そこで密度として年輪状の輪切りの体積あたりの繊維の存在確率で評価する(図 2-1-1.18)。次に、2つの繊維の存在確率密度の空間分布の比較では、ヒストグラム交差法を用いる。これは、図 2-1-1.19 に示したように、2つの確率密度分布関数(ヒストグラム)の重なり部分の割合で類似度を判定する。判定方法としては、図 2-1-1.19 で2つの分布関数が完全に重なった場合は類似度 1 で、重なりが全くない場合は類似度 0 となる。

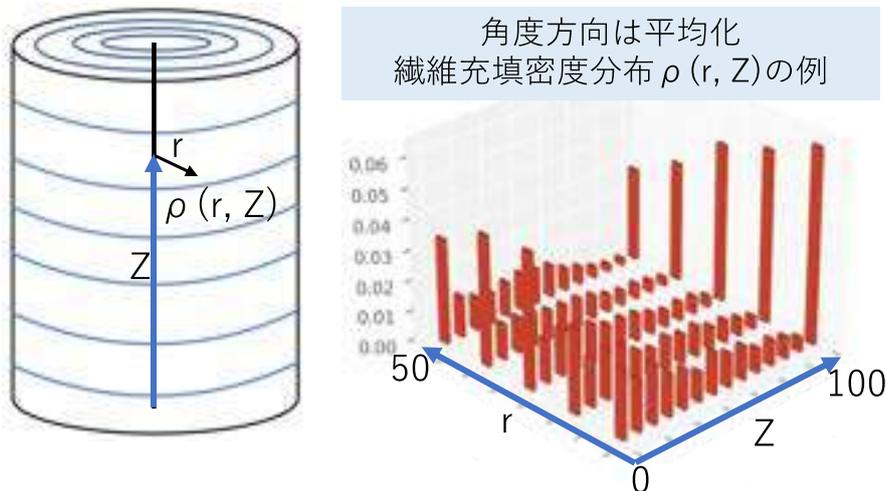


図 2-1-1.18 角度方向で平均化したモデル濾過塔内の繊維密度分布

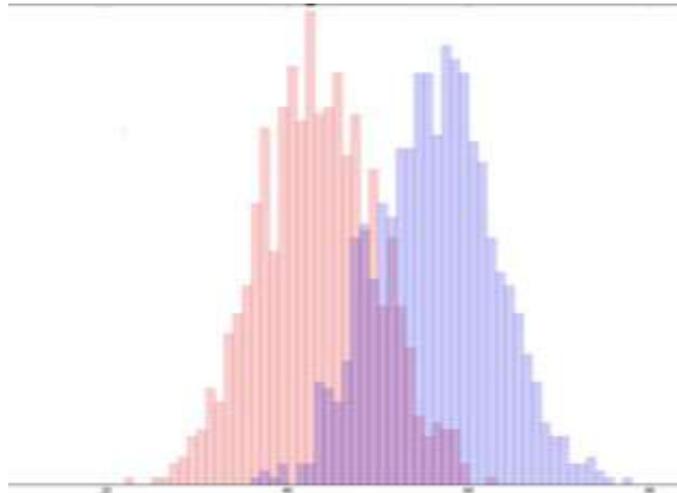


図 2-1-1.19 ヒストグラム交差法
(類似度 = 重なった部分の割合)

表 2-1-1.2 類似度マトリックス
(80-1 などのサンプル名は表 2-1-1.1 を参照)

| | 80-1 | 80-2 | 80-3 | 110-1 | 110-2 | 110-3 | 110-4 | 110-5 | 140-1 | 140-2 |
|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 80-1 | 1 | 0.688978 | 0.521849 | 0.761221 | 0.762841 | 0.743928 | 0.720324 | 0.684402 | 0.882121 | 0.702 |
| 80-2 | | 1 | 0.711802 | 0.862438 | 0.728741 | 0.910314 | 0.887419 | 0.838091 | 0.751381 | 0.874779 |
| 80-3 | | | 1 | 0.685147 | 0.656151 | 0.710056 | 0.738926 | 0.805107 | 0.578729 | 0.758262 |
| 110-1 | | | | 1 | 0.740743 | 0.903547 | 0.889106 | 0.824944 | 0.814416 | 0.838742 |
| 110-2 | | | | | 1 | 0.759482 | 0.725741 | 0.776821 | 0.8001 | 0.766775 |
| 110-3 | | | | | | 1 | 0.920369 | 0.855647 | 0.800362 | 0.874092 |
| 110-4 | | | | | | | 1 | 0.863712 | 0.761396 | 0.857321 |
| 110-5 | | | | | | | | 1 | 0.744182 | 0.887108 |
| 140-1 | | | | | | | | | 1 | 0.763008 |
| 140-2 | | | | | | | | | | 1 |

類似度マトリックスで分かるように最大の類似度は 0.92 で、同じ充填密度と同じ束数、同じ繊維長の条件である。また、類似度が 0.6 以下は繊維充填条件 80-3 と 80-1、また 80-3 と 140-1 の間である。80-3 と 140-1 は充填密度が異なるので、類似度が下がることは考えられるが、80-3 と 80-1 は両方とも 80g/L の充填密度である。しかし、80-3 は表 2-1-1.1 から繊維の長さが 230mm と非常に短く、また、繊維束数も 20 本と多く特異な充填である。従って、80-3 の充填条件のサンプルは、全体的に他との類似度が低い傾向にある。より、系統的に充填条件間の差異を評価するためにクラスター解析を実施した。クラスター解析ではデータ間の距離を定義し、クラスターに分類する。ここでは、類似度を距離とする。

クラスター解析の結果は図 2-1-1.20(a)に示すように樹形図として表現される。樹形図では類似度が高いほど左で(早く)接続され、類似度が低いほど右で接続される。その結果、80-1 と 140-1 の類似度は高いと判断される。

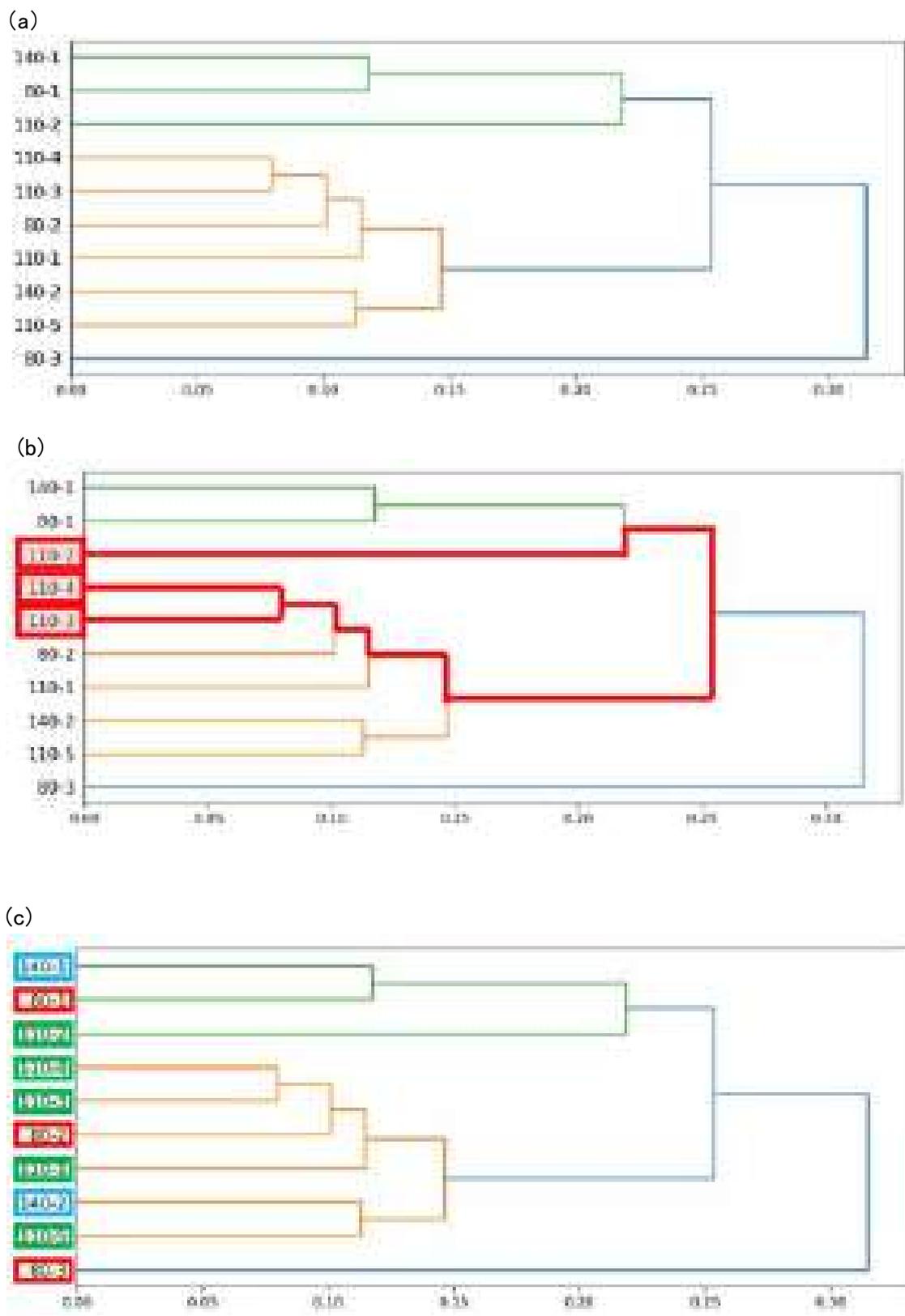


図 2-1-1.20 類似度マトリックスに基づくクラスター解析の結果

今回の解析では、まず次の基本的な点を明らかにする。すなわち、①同じ繊維の充填条件

(充填密度、繊維長さ、束数)であれば、似た繊維密度の空間分布を持つのか、あるいは、②異なる繊維の充填条件であれば異なる繊維密度の空間分布を持つのかという点である。①に関しては、充填条件 110-2、110-3、110-4 の 3 つに着目した。表 2-1-1.1 から分かるように、この3つは全く同じ充填である。実際には 110-3、110-4 は類似度 0.92 と高く、図 2-1-1.20(b)の樹形図上でも隣接している。一方で 110-2 と 110-3、110-4 の類似度は 0.76、0.73 と低くなっており、図 2-1-1.20(b)の樹形図上でも離れている。今回は、充填は人手で実施しており習熟度が異なる、あるいは、充填時の圧縮具合のクセのようなものに影響されたと推察される。一方で、②に関しては、80g/L の充填密度であっても、表 2-1-1.1 から分かるように、他の充填条件が異なる。その場合、図 2-1-1.20(c)に示されたように樹形図上で離れたクラスターに位置していることがわかる。また、110g/L の場合、140g/L の場合でも、充填密度が同じでも、他の充填条件が異なる場合は、離れたクラスター上にある。以上のことから、充填条件として充填密度、繊維長さ、束数に空間分布は影響されること、また、充填条件が同じでも、充填時の圧縮具合などの加減で変わることも推察された。一方で、実機の繊維濾過装置では機械的に圧縮されるので、人手によるよりも再現性が高く充填条件で空間密度分布が決定されると考えられる。

3-5-2) 繊維密度の空間分布の統計解析

次に、繊維密度の空間分布に関して Z 方向、半径 r 方向、角度 θ 方向に関する分布の特徴を検討する。代表例とし 110-4 (110g/L、繊維長 630mm、10 本)について高さ Z 方向、半径 r 方向、角度 θ 方向に関する分布を図 2-1-1.21 に示した。

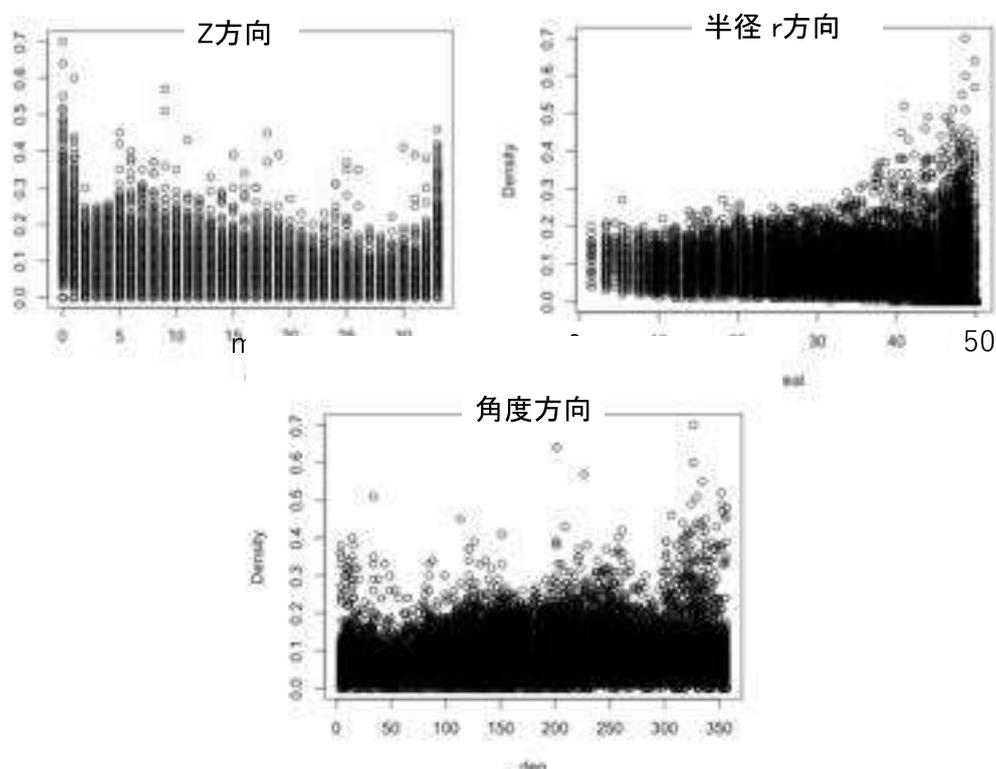


図 2-1-1.21 充填条件 110-4 の空間密度分布

Z 方向に関しては r 方向と θ 方向に対しては積分した。また、全面積が 1 には規格化していないので、確率密度分布ではない。Z 方向では 0mm 付近と 100mm 付近で繊維密度の最大値が高くなっている。これは他の充填条件でも同じ特徴である。また、半径方向では、濾過塔の中心付近で低く、縁に近い方の繊維密度が高くなる傾向にある。また、角度分布を見ると一周する間に 4 つの繊維密度のピークが見られる。これらの特徴を踏まえ、密度の対数として次式を回帰式とする。

$$\log(\rho) \sim R(r) + \Theta(\theta) + Z(z) + Ir(z, r) + I\theta(z, \theta) \quad (6)$$

図 2-1-1.21 から、半径方向 $R(r)$ に関しては二次関数で近似し、高さ方向 $Z(z)$ に関しては増減ピークが繰り返されており高次の多項式が必要となるので四次関数で近似する。角度方向 $\Theta(\theta)$ にもピークがあり、三角関数を基底関数とし $\theta, 2\theta, 3\theta$ の関数で近似した。高さ毎に半径や角度への依存性が異なると予想されるので交互作用 $Ir(z, r) + I\theta(z, \theta)$ を取り入れた。その結果、以下の式(7)を多変量線型回帰式とした。密度 0 になる部分には十分小さな値を入れ対数変換した。

$$\log(\rho) \sim Z + Z^2 + Z^3 + Z^4 + r + r^2 + s1 + c1 + s2 + c2 + s3 + c3 + Z:r + Z:s1 + Z:c1 + Z:c2 + Z:s2 + Z:c3 + Z:s3 \quad (7)$$

ここで、 $s1 = \sin(\theta), c1 = \cos(\theta), s2 = \sin(2\theta), c2 = \cos(2\theta), s3 = \sin(3\theta), c3 = \cos(3\theta)$ である。また、 $Z:r$ などは交互作用項を示している。この式で定数項と各項の計数は省略してある。

式(7)による線型回帰を、統計解析ツールである R で実行した結果、以下の結果を得た(表 2-1-1.2)。ここで、図 2-1-1.21 から分かるように、繊維密度分布の分散は大きい。したがって、表 2-1-1.2 の決定係数 R, R^2 は高くなく、0.35 程度となっている。しかしながら、全ての項の係数の推定値は全て有意($p < 0.01$)で回帰式が有意である。

表 2-1-1.2 対数変換した密度に対する線型回帰の結果

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-------------|------------|------------|---------|--------------|
| (Intercept) | -1.587e+00 | 2.991e-02 | -53.069 | < 2e-16 *** |
| Z | -2.436e-01 | 6.246e-03 | -39.001 | < 2e-16 *** |
| Z2 | 3.308e-02 | 7.781e-04 | 42.488 | < 2e-16 *** |
| Z3 | -1.665e-03 | 3.571e-05 | -46.623 | < 2e-16 *** |
| Z4 | 2.658e-05 | 5.369e-07 | 49.508 | < 2e-16 *** |
| r | -1.868e-02 | 1.572e-03 | -11.882 | < 2e-16 *** |
| r2 | 1.809e-04 | 2.455e-05 | 7.365 | 1.82e-13 *** |
| s1 | 2.297e-01 | 9.200e-03 | 24.970 | < 2e-16 *** |
| c1 | 3.949e-01 | 9.442e-03 | 41.821 | < 2e-16 *** |
| s2 | -1.268e-01 | 4.713e-03 | -26.900 | < 2e-16 *** |
| s3 | 1.116e-01 | 9.218e-03 | 12.103 | < 2e-16 *** |
| c3 | -1.488e-01 | 9.417e-03 | -15.906 | < 2e-16 *** |
| Z:r | -2.397e-04 | 2.997e-05 | -7.998 | 1.31e-15 *** |
| Z:s1 | -4.920e-03 | 4.806e-04 | -10.238 | < 2e-16 *** |
| Z:c1 | -1.570e-02 | 4.933e-04 | -31.816 | < 2e-16 *** |
| Z:c2 | 3.890e-03 | 2.525e-04 | 15.404 | < 2e-16 *** |
| Z:c3 | 6.964e-03 | 4.919e-04 | 14.156 | < 2e-16 *** |
| Z:s3 | -2.623e-03 | 4.818e-04 | -5.445 | 5.21e-08 *** |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 Multiple R-squared: 0.3579 Adjusted R-squared: 0.3575

3-5-3) 繊維配向空間分布の特性

実機の透明 PVC 濾過塔内の繊維が曲がりながら空間分布しているのを、繊維配向が場所毎に異なることは明らかであり、その定量的な解析のために、PVC 濾過塔内の充填繊維の X 線 CT の画像解析に対して、図 2-1-1.17 の推定アルゴリズムを適応した。例として、ここでは空間密度解析の場合と同じ、110-4 の充填条件の画像サンプルを用いた。図 2-1-1.22 には、50pixel の BOX の画像の 4 例が上段に示してあり、図 2-1-1.17 の推定アルゴリズムで求めた対応する配向ベクトルの結果を下段の 4 列に示した。目視による繊維の配向方向と配向ベクトルの方向は一致しているように見える。次に、図 2-1-1.23 にはそれぞれの BOX の配向と強度を表すために楕円体で表した。楕円体が球に近い場合は配向強度が弱く繊維がランダムに分布している。また、楕円体がラグビーボール形状の場合は長軸が繊維の配向方向である。

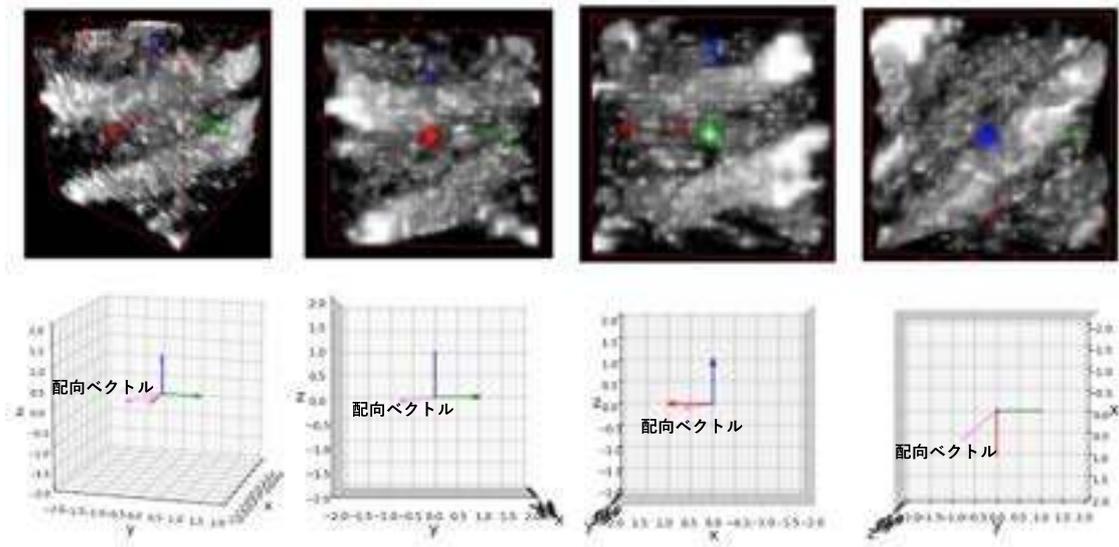


図 2-1-1.22 50pixel BOX の X 線 CT 画像(上段)と推定した配向ベクトル(下段)

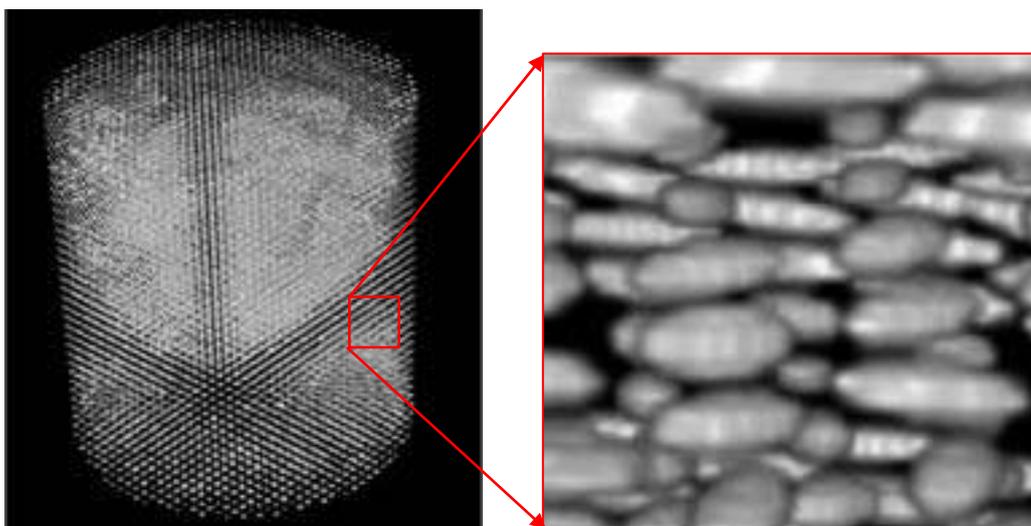


図 2-1-1.23 充填条件 110-4 の繊維配向の空間分布の楕円体による表示

次に配向ベクトルの方向と強度の解析を行うが、濾過塔内に分布した繊維であるので、配向ベクトルも円筒座標系に変更する。図 2-1-1.24 に示すように、配向ベクトルの方向は半径方向のベクトルとなす角度、および、Z 軸方向のベクトルとなす角度で定義される。また、配向強度は式(4)で定義した。

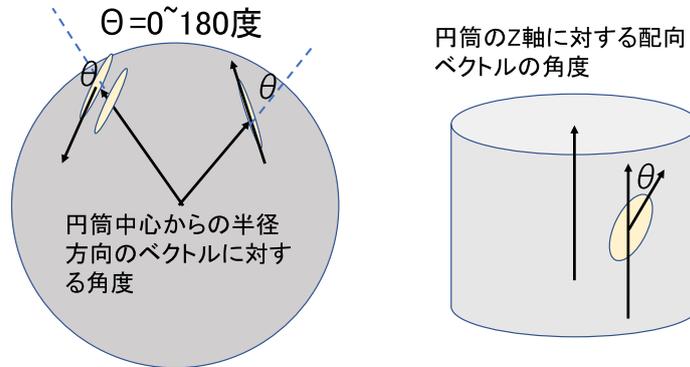


図 2-1-1.24 円筒座標系における繊維の配向ベクトルの方向(角度)の定義

図 2-1-1.25 には充填条件 110-4 のサンプル内の各 BOX での配向強度ヒストグラムを示す。

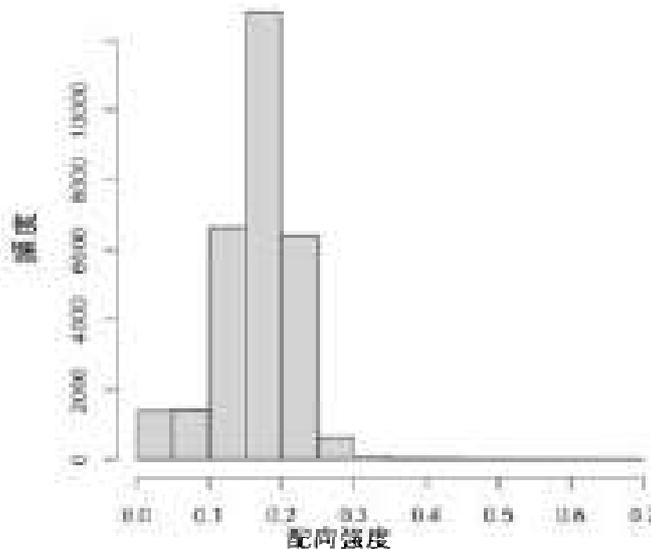


図 2-1-1.25 充填条件 110-4 サンプルの 50 pixel BOX 内繊維の配向強度のヒストグラム

配向強度は 0.2 以下が多く、3mm の BOX 内では繊維は弱く配向していたことがわかる。濾過用の繊維束は一本が $19\mu\text{m}$ の細い繊維を撚り合わせたものであり、それが束となって充填されているが、その撚り合わせの段階で完全なストレートな繊維ではなく、ある程度の縮れた状態にある。それが、充填の際にランダムに折りたたまれて詰められるので、繊維の縮れの部分が塊になってしまうので、配向強度が低下すると考えられる。また、この配向強度の濾過塔の Z 方向(高さ方向)の分布は図 2-1-1.26(左図)にしたように、ほぼ一様である。一方で半径方向(右図)では、半径方向で外側の部分が配向強度の分散が大きくなり、高い配向強度が見られる。これは、濾過塔内壁に繊維が押し付けられるので、一定の配向を持つ繊維が多いためと考えられる。

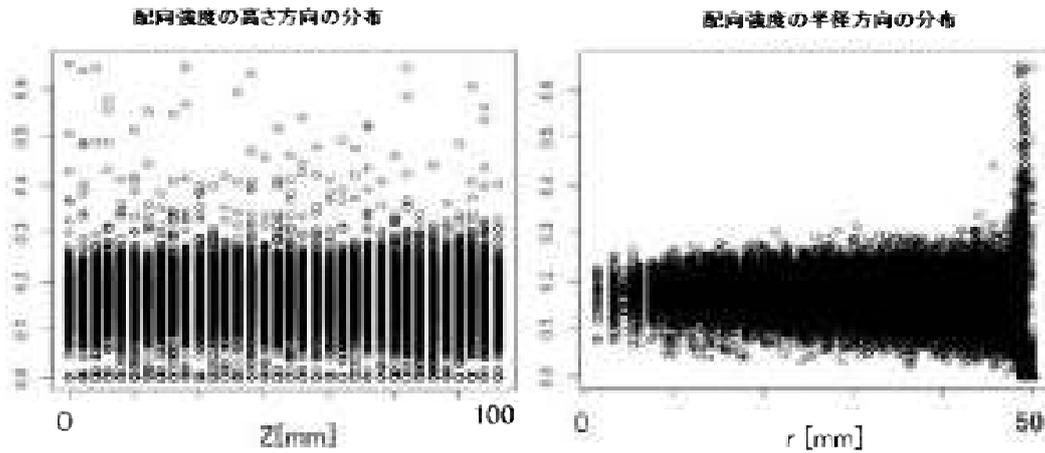
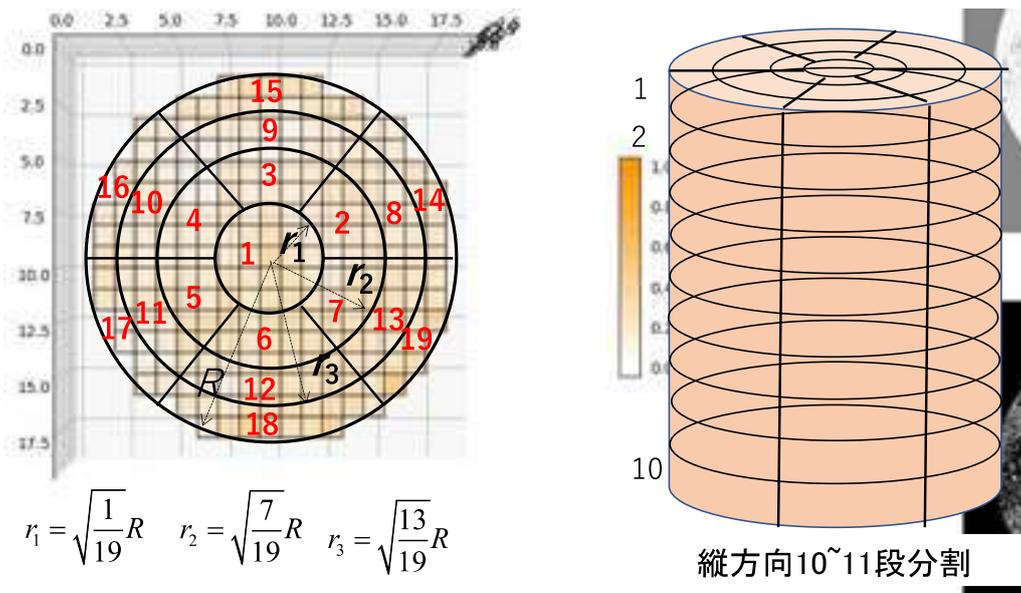


図 2-1-1.26 充填条件 110-4 の高さ(Z)方向と半径(r)方向に対する異方性の強さ

次に、配向の角度に関する分布を検討するが、分散が大きいのので平均化操作をさらに行なった上で検討する。そこで、後述する流動シミュレーションで用いる分割様式を用い、繊維の配向に関する平均化を行う。これは、図 2-1-1.27 に示すように分割を行う。また、分割した要素は同じ体積である。



$$r_1 = \sqrt{\frac{1}{19}}R \quad r_2 = \sqrt{\frac{7}{19}}R \quad r_3 = \sqrt{\frac{13}{19}}R$$

縦方向10~11段分割

図 2-1-1.27 角度 6 分割、半径方向 4 分割、高さ 10~11 分割の円筒モデル

本来は、この分割した要素に対してフーリエ変換を行い、配向ベクトルを求めることが必要であるが、矩形でない領域に対するフーリエ変換の数値計算は難しい。そこで、50pixel の BOX で求めた密度と配向の情報をもとに以下のような方法で平均化した。

まず各要素の配向テンソルから、以下の式(8)に示した。それぞれの領域の体積充填密度による加重平均の方法で平均化配向テンソル \bar{T} を求めた。

$$\bar{T}(p, Z) = \sum_{k,l,m \in \text{Area}(p,Z)} \rho(k, l, m) T(k, l, m) \quad (8)$$

ここで、 $\rho(k, l, m)$ 、 $T(k, l, m)$ は各 50pixel BOX の体積充填密度と配向テンソルである。 k, l, m

は BOX の X, Y, Z 座標での位置を示すインデックスである。Area(p, Z)は断面で示した XY 面内の領域と高さ方向(段数)で指定した平均する領域とする。p は X, Y 面内の分割を示すインデックスで $p=1\sim 19$ で、Zは濾過塔の高さのインデックスで 10 か 11 分割であるので、 $Z = 1\sim 10, 11$ である。次に、 $\bar{T}(p, Z)$ から再度、平均配向ベクトルと平均配向強度を計算した。

図 2-1-1.28 には Z 方向に対する平均配向ベクトルの角度(Z 方向角度)のヒストグラムを示した。明らかに、90 度付近に高いピークがある。すなわち、繊維は折たたまれて充填されているので、濾過塔の軸方向に対して直角、すなわち濾過塔の底面に並行な方向に配向している。

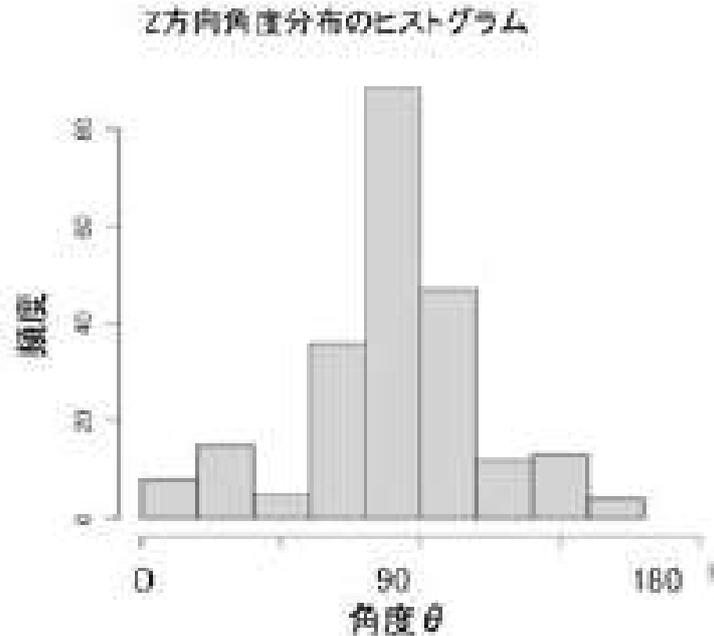


図 2-1-1.28 Z 方向に対する平均配向ベクトルの角度(Z 方向角度)のヒストグラム

次に、図 2-1-1.29 には Z 方向の格段における平均配向ベクトルの Z 方向角度の分布を示した。明らかな高さ方向依存性はなく、どの段も 90 度付近に点が集中しており、どの高さでも繊維の配向は濾過塔の底面に並行な方向となっている。

高さ方向(分割段数) 毎のZ方向角度分布

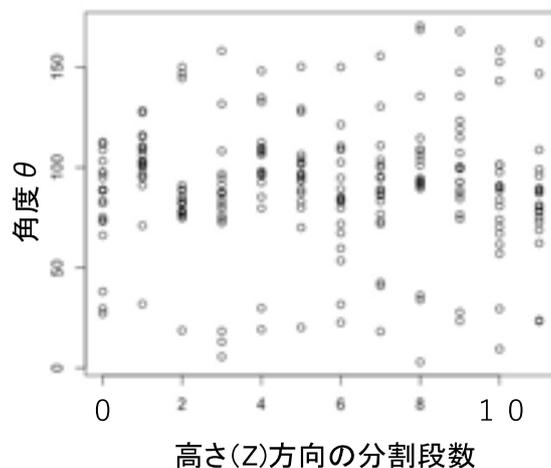


図 2-1-1.29 Z 方向の格段における平均配向ベクトルの Z 方向角度

さらに、**図 2-1-1.30**には各扇型領域 $p=1\sim 19$ における Z 方向角度分布を示している。この図から、半径方向で Z 方向角度分布を比較すると Z 方向角度の分布の傾向が現れることがわかる。**図 2-1-1.26**で示したように第3層は p が 14~19 の領域で、一番外側の濾過塔の壁に近い部分であるが、ここでは Z 方向角度分布の分散が大きくなっており、90 度から外れた 0 度や 180 度、すなわち Z 方向に並行に配向している部分が多くなっている。繊維が壁際で折りたたまれて方向を変えるようである。

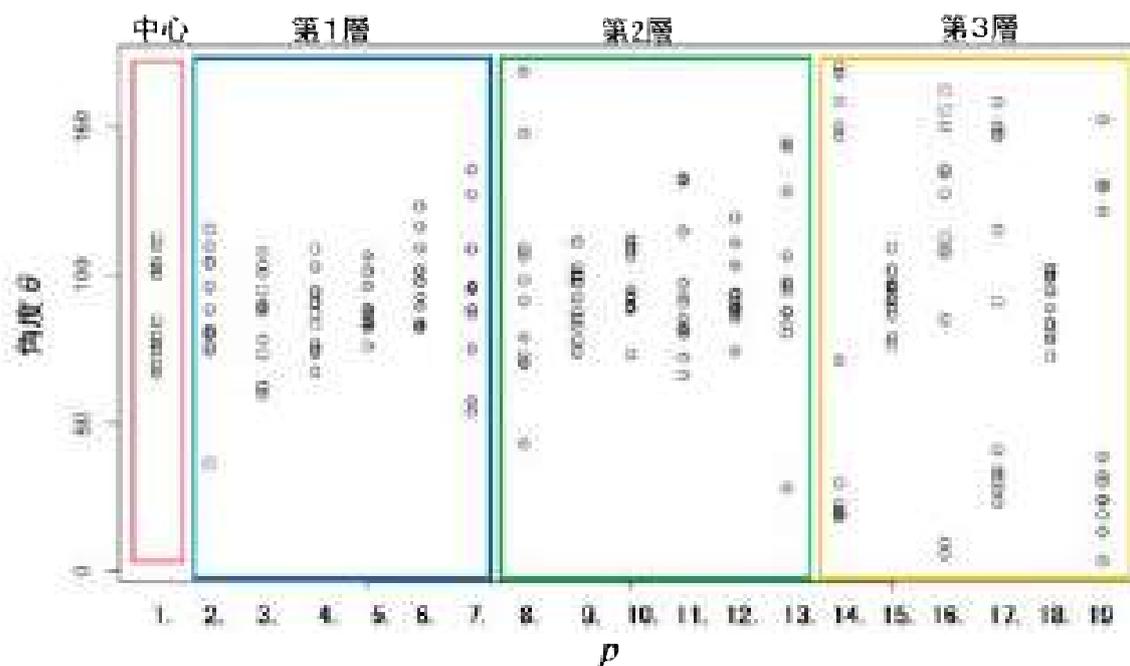


図 2-1-1.30 各扇型領域 $p=1\sim 19$ における Z 方向角度分布

最後に、濾過塔の底面 (xy 面)における平均配向ベクトルの配向角度の分布の特徴を評価する。この配向角度は、**図 2-1-1.23**に示したように平均配向ベクトルの xy 面内の半径方向に対する角度 (r 方向角度)分布のヒストグラムを計算し**図 2-1-1.31**に示した。このヒストグラムからは明らかに一様分布しており、xy 面内ではランダムに配向しているように見える。しかし、**図 2-1-1.32**に示すように、半径方向に対する角度ではなく、X 軸に対する角度の分布で見ると、0 度付近に明らかに分布が偏っている。これは、X 軸に並行に繊維が配向していることを伺わせている。この X 軸の取り方は任意であるので、X 軸に並行な配向は偶然であるが繊維束が充填されていく場合には一方向で折りたたまれながら、充填されていると考えられる。また、X 軸に並行に繊維が配向した場合、半径方向に対する角度で見ると一様な分布になることは数学的に示すことができる(詳細は省略)。

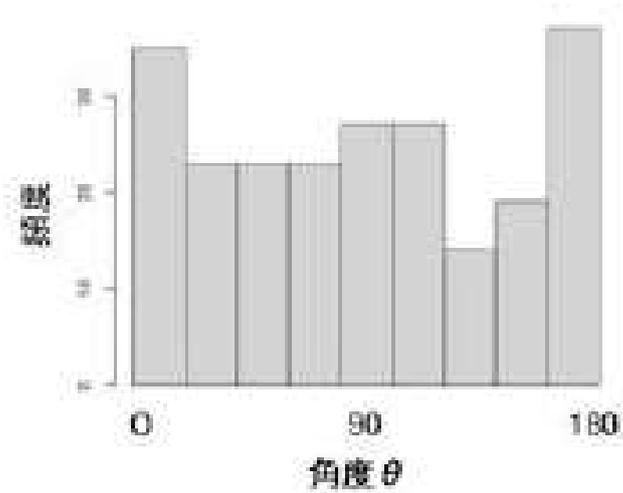


図 2-1-1.31 平均配向ベクトルの XY 面内の半径方向に対する角度分布のヒストグラム

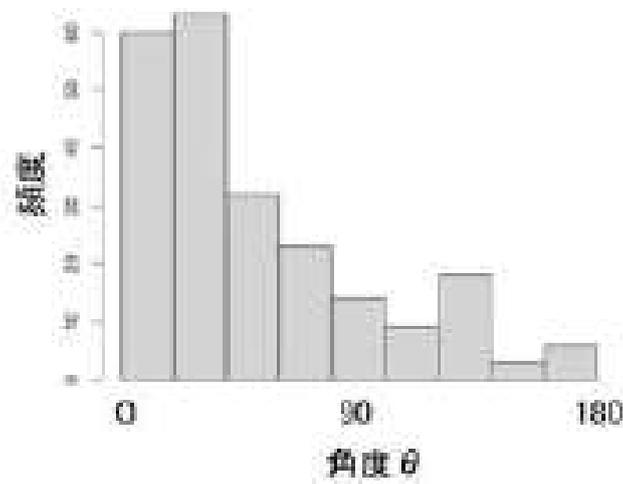


図 2-1-1.32 平均配向ベクトルの XY 面内における X 軸に対する角度分布のヒストグラム

3-6) 本節のまとめ

本節では、繊維の三次元充填モデルの構築を目標として、X線CT画像解析を行い繊維密度分布と繊維配向分布のデータを得た。また、繊維配向の解析においては、フーリエ変換と主成分分析を組み合わせた新たな推定アルゴリズムを開発した。この推定アルゴリズムで正しく配向が推定できていることは繊維方向と充填密度を設定した濾過試験キューブモデルを用いて検証した。次に、充填条件として充填密度、繊維長さ、繊維束の本数を変えたモデル繊維濾過塔(約100mm高さ、直径100mm)のX線CT画像を用い、繊維充填密度の空間分布と繊維配向を解析した。その結果、繊維充填密度の空間分布として濾過塔のZ方向、半径方向、角度方向に関しての傾向を明らかにできた。特にZ方向では、上端と下端の密度が高く、また、濾過塔の壁の内側で密度が高くなっていた。しかし、繊維充填密度の分散は大きく繊維密度は確率分布モデルで表現する必要がある。例として解析した110-4の条件の充填条件では、繊維の三次元充填モデルとして、式(7)のような繊維充填密度 ρ を対数変換した経験的な回帰式を用いた。しかし、繊維充填密度は0~1の間の分布となるので、logit変換した上で線型モデルにすることが適しており、以下のモデルが充填モデルに提案できる。また、分散が明らかに濾過塔の縁や上面や底面で異なることを考慮すると分散も変動することを考慮した推定が必要になる。、 r 、 θ 、 Z の円筒座標を用いて

$$Y = \text{logit}(\rho(r, \theta, Z)) = \log\left(\frac{\rho}{1-\rho}\right) \dots \dots (9)$$

$Y \sim N(\mu, \sigma)$: logit変換したYが平均 μ 標準偏差 σ の正規分布にしたがう。

$$\mu = \sum_n [a_n Z^n + b_n r^n + c_n Z^n r^n + d_n \sin(n\theta) + e_n \cos(n\theta) + f_n Z^n \sin(n\theta) + g_n Z^n \cos(n\theta)] \dots (10)$$

$\sigma = \sigma(r, Z) \dots (11)$: 分散項も空間位置に依存する。

配向強度SAも、0~1で分布するので、充填密度と同様なlogit変換モデルが使える。

$$Lsa = \text{logit}(SA) \dots \dots (12)$$

$$Lsa \sim N(\mu, \sigma), \mu = \text{const.}, \sigma = \sigma(r) \dots \dots (13)$$

図2-1-1.26に示した結果によると、高さZ方向などの依存性はなく、濾過塔の壁際で分散が大きくなるので、分散の半径方向依存性のみを考慮すれば良い。

また、配向ベクトルも、Z軸に対しては、垂直な方向では90度の周りで分散している。また、水平方向に対しては、折りたたみの方向で決まる軸に対して、その周りで分散しているようである。そこで、それをX軸とすれば、そのX軸の周りの角度分散から統計モデルを構成できる。角度分布に関しては、Von Mises分布が用いられ、その一般型は複雑であるが、近似型の確率密度関数としては角度 θ の確率分布として次式が用いられる。

$$VM(\theta; \mu, \kappa) = \exp(\kappa \cos(\theta - \mu)) \dots \dots (14)$$

μ は平均、 κ は分布の広がり分散に対応(分散ではない)

このVon Mises分布を用いて、配向ベクトルの確率分布は次のように記述できる。濾過塔

の Z 軸に対する配向ベクトルの角度 θ の分布は半径方向にのみ空間依存性があるとして (図 2-1-1.31)、

$$\theta \sim VM(\mu_\theta, \kappa_\theta), \kappa_\theta = \kappa_\theta(r) \dots \dots (15)$$

濾過塔の水平面内の配向ベクトルの角度 ϕ の分布は、折りたたみの方向を X 軸として、その X 軸に対する角度分布として (図 2-1-1.32)、

$$\phi \sim VM(\mu_\phi, \kappa_\phi), \kappa_\phi = \kappa_\phi(r) \dots \dots (16)$$

で推定することができる。

一方で、通常の統計パッケージを用いた計算手法では、分散の空間依存性を求めることは難しい。しかし、ベイズ推定の手法を用いることでこれは可能である。ただし、三次元充填モデルは非常に多量のデータ数であるので、ベイズ推定を通常のパソコンで解析することは計算時間の関係で非常に困難であり、今回は結果を得ることができなかった。そこで、より高速な計算機環境を利用した三次元充填モデルのパラメータ推定が必要である。一つは計算の並列化を行い GPU 計算の手法や、産業用スパコンなどの利用を検討する必要があるが、適当な並列計算に対応した統計解析パッケージがない場合は並列化を専門とする数値計算や統計計算の専門家の支援のもとで新たに解析プログラムを書き下す必要があり、今後の課題である。

2-1-2 濾過要素モデル式の構築 長崎大学・協和機電工業

1) 目的

2-1-1で検討したように、繊維濾過塔内の繊維密度と繊維配向は空間的に一様ではない。そのために、充填条件が砂濾過の場合と異なり、このような不均一性を考慮した濾過モデルが必要になるが、その前提として、繊維密度と繊維配向が一定な状態で濾過の基本的特性である圧力損失と粒子除去率の特性解析を行う必要がある。そこで、繊維充填密度と繊維配向が空間的に均一な濾過試験キューブモデルを作成して、様々な繊維充填密度と繊維配向条件下での濾過特性試験を行い、濾過要素モデル式を構成した。

2) 実施内容と結果の要約

一辺が 50mm の立方体で、繊維充填密度と繊維配向を揃えた濾過試験キューブモデルの作成方法として、一定重量の繊維束を 50mm 厚で方向を揃えて充填し、水を入れて凍結し、その凍結平板をウォータージェットで幅 50mm × 奥行 50mm × 高さ 50mm に切り出す方法を開発した。その際に、角度を変えて切り出すことで繊維配向が斜めの濾過試験キューブも作成できた。繊維充填密度と繊維配向の異なる条件に対して、流速を変化させた時の圧力損失から、濾過抵抗を求め、繊維充填密度と流れに対する繊維配向角度、温度の関数として濾過抵抗のモデル式を構築できた。次に、 $5\mu\text{m}$ のアクリル粒子の除去に対する繊維充填密度と繊維配向角度の影響を検討した。実験結果を砂濾過などの深層濾過で使われる Yao の理論式を使い解析し、粒子付着確率を繊維充填密度と繊維配向角度に対する線型モデル式で表した。また、最大付着量に対しても繊維充填密度と繊維配向角度に対する線型モデル式で表し濾過要素モデル式とした。

3) 具体的な実施内容

3-1) 繊維濾過試験キューブモデルの作成方法

一辺が 50mm の立方体で、繊維充填密度と繊維配向を揃えた濾過試験キューブモデルの作成を次の手順で行った(図 2-1-2.1)。

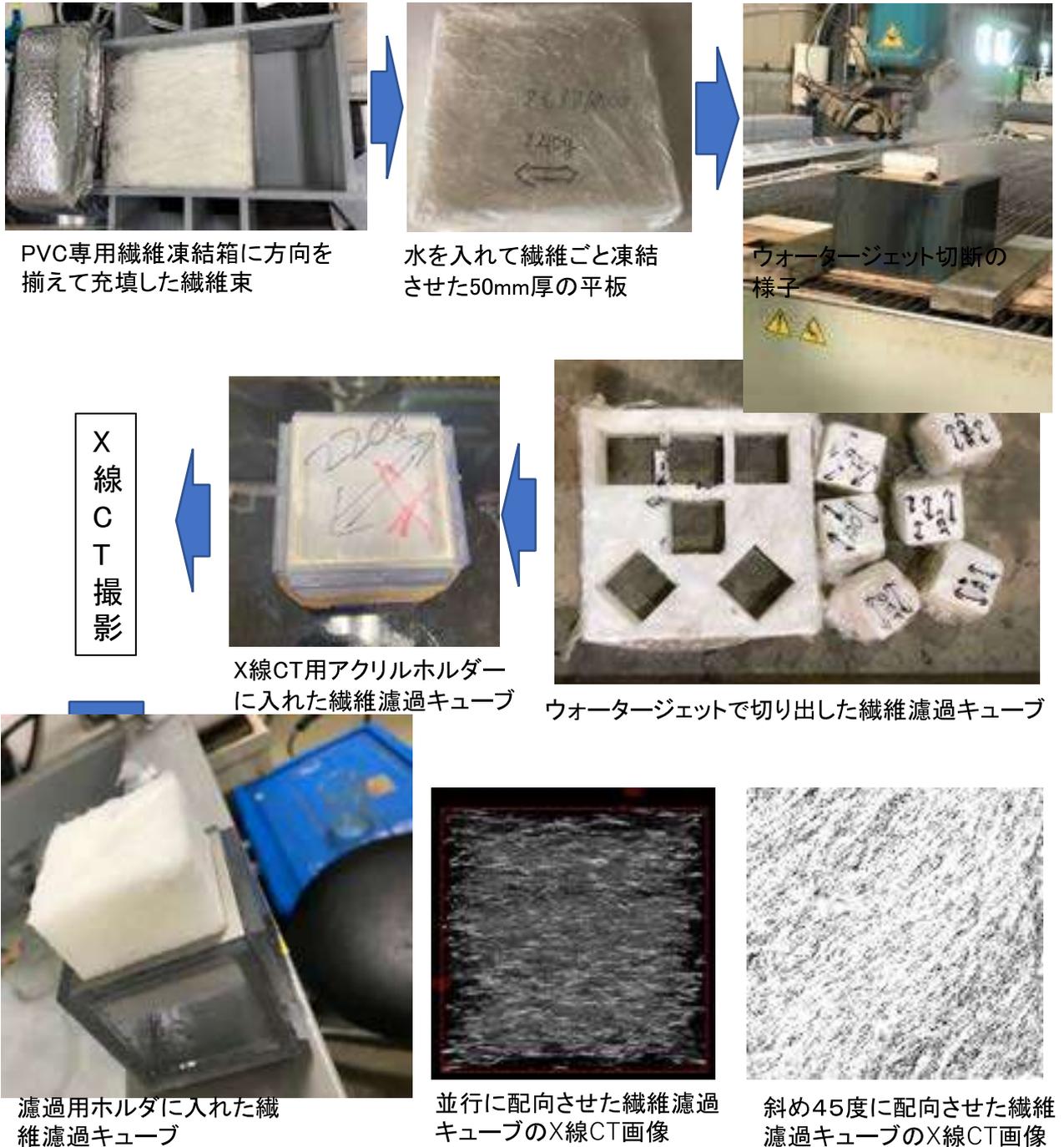


図 2-1-2.1 繊維濾過試験キューブモデルの作成手順

- ✓ 濾過用の繊維の準備として、繊維束をイソプロピルアルコールと純水で繰り返し十分洗浄し、製造時の油分などを完全に除去。洗浄後は 80°C で乾燥する。
- ✓ PVC 板で作成した専用繊維凍結箱を試作した。この試作箱は内寸で 200mm(幅) X400mm(長さ) X50mm(厚さ)であり、この 400mm の長さの部分の中央の 200mm の長さ部分(両端 100mm)をステンレスの穴あきパンチングメッシュで両脇を仕切り、この中央の 200mm(幅)X200mm(長さ) X50mm(厚さ)の部分(体積 2L)に一定の重量の繊維束の方向を揃えて丁寧に充填する。繊維充填条件は、繊維重量密度で 80g/L, 110g/L, 140g/L, 160g/L となっている。
- ✓ 上から、ステンレスの押さえを入れて厚さが正確に 50mm とした状態で冷凍庫で凍結する。水の凍結時の膨張はパンチングメッシュを通し、水を逃がす。
- ✓ この凍結した平板をウォータージェットで切り出す。切り出しは、繊維方向に並行な切り出しと、45度の斜めでの切り出しを行い、再度、凍結させて保存する。
- ✓ 50mmX50mmX50mm の濾過試験キューブは凍結したいくつかをアクリル箱に入れて、一度乾燥させ X 線 CT で内部を観察し、適切に配向していることを確認する。
- ✓ X 線 CT の後は、再度、アクリル箱に水を入れて、再度凍結させて取り出す。取り出したものは、専用の濾過用ホルダーに入れる。

3-2) 繊維濾過試験キューブモデルを用いた濾過抵抗測定試験

3-2-1) 実験システムの構成

濾過抵抗(圧力損失)を測定するための実験システムを構築した。その概要を図 2-1-2.2 に示す。今回用いた DC ダイアフラムポンプは脈動が少ない仕様であるが、無視できない程度の圧力変動があり、その緩和のために圧力変動の平滑化装置を一旦通した。これは、空気層と繊維層で圧力変動を吸収する機構である。これを通すことで無脈動の流れとできた。温度はリザーバータンクの水をチラーで設定し一定の温度条件に設定した。

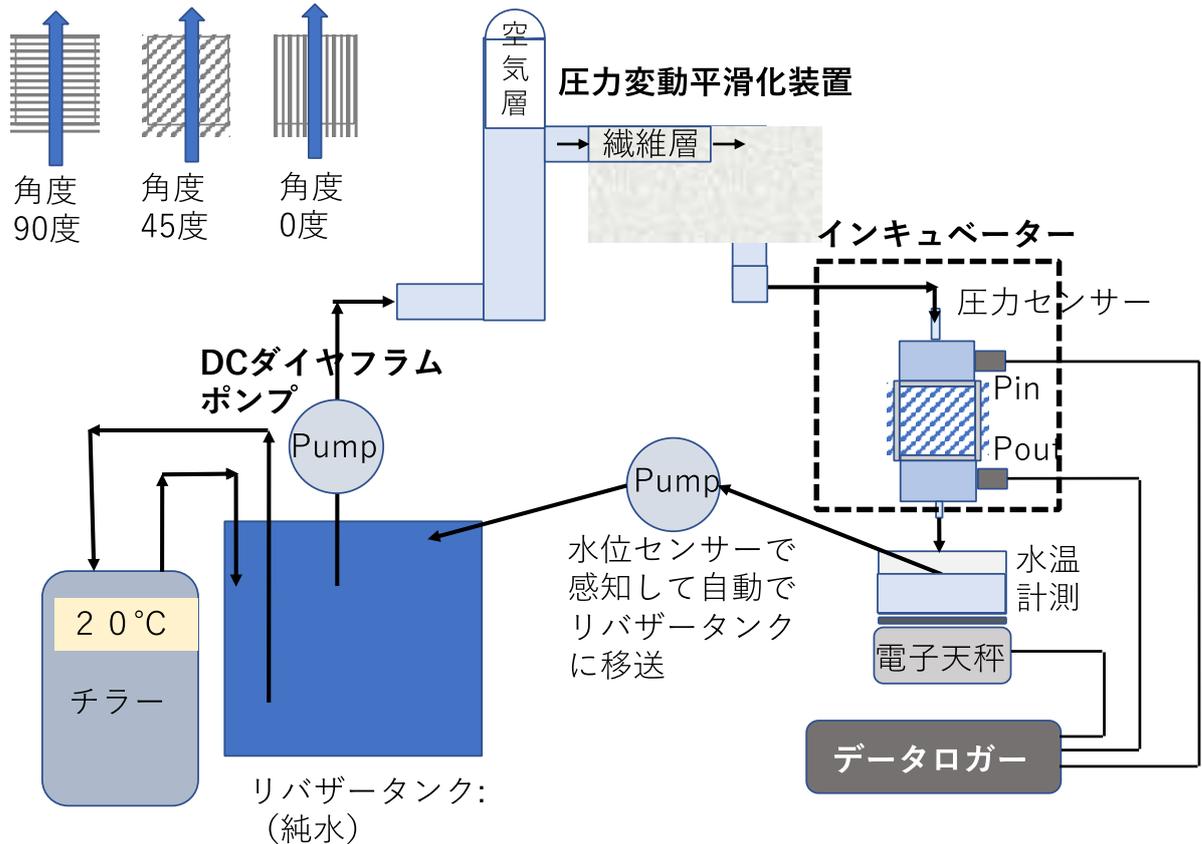


図 2-1-2.2 繊維濾過試験キューブモデルを用いた濾過抵抗測定試験システム

図 2-1-2.1 に示したように、繊維充填密度と繊維の配向を揃えた繊維サンプルを濾過用ホルダーに装填し、チラーと同じ温度に設定したインキュベータに入れた。濾過用ホルダーには圧力センサーを取り付けた(図 2-1-2.3)。流量は小流量から大流量までを測定するために電子天秤の重量変化から流量を測定した。電子天秤には水の重量測定用の容器を置くが、容量が 2L と少なく、すぐに溢れるので水位センサーで自動的に感知してポンプでチラーのリザーバータンクに戻した。

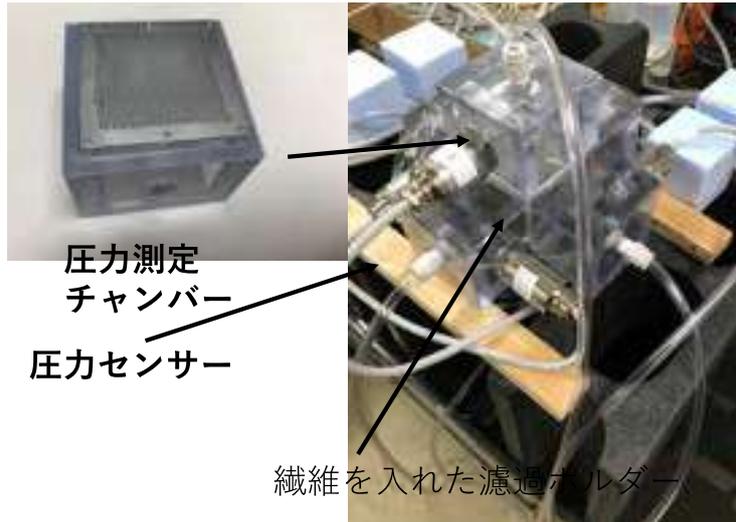


図 2-1-2.3 繊維濾過試験キューブの圧力損失測定の設定写真

測定条件は、繊維充填密度の 80g/L, 110g/L, 140g/L, 160g/L に対して、流速を 0～0.2m/sec の範囲で変化させ測定した。流速は DC ダイアフラムポンプの印加電圧で調整できる。温度はそれぞれの条件で 15°C、20°C、25°C の設定とした。圧力はセンサーで流入側と流出側で測定したが、水の流速を 0 m/sec にしたときの両圧力センサーの値を平衡値として、そこから差を計測した。

3-2-2) 濾過抵抗 R_f の測定試験の結果

流量は電子天秤上の容器に入る水の重量変化から計算する。重量変化の例を図 2-1-2.4 に示した。

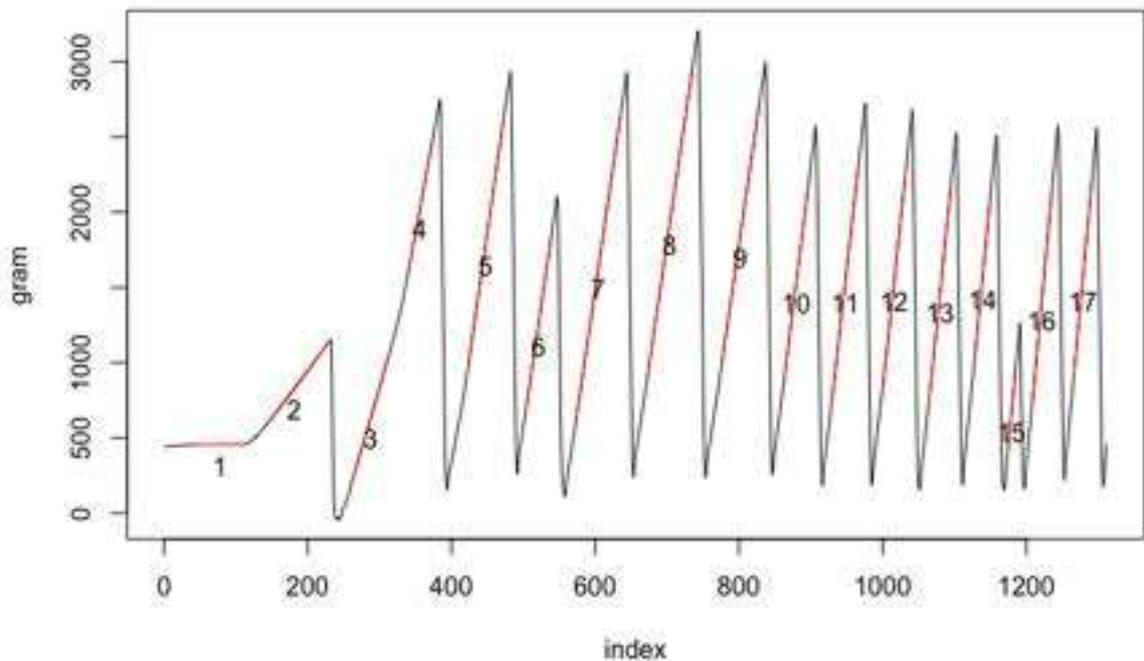


図 2-1-2.4 濾過試験時の電子天秤の重量変化

この図で、横軸の Index は 1 秒の時間に対応しているので、直線部分の傾き (= 天秤の上の容器中の水の重量変化) から流量 (g/sec) を求め、さらに Darcy 流速 U [m/sec] を計算する。Darcy 流速 U は次式で定義される。

$$U = Q/A \quad (1)$$

ここで、重量変化から水の密度を求めて流量 Q [m³/sec]、濾過断面積 A [m²] = 50mmX50mm = 2.5x10⁻³ m² を用いて、計算することができる。図 2-1-2.4 から明らかなように、ポンプへの印加電圧を上げたことに対応して、流量が増加し、傾きが大きくなっている。この時の圧力損失 (差圧) を計測し、その流速の変化に対してプロットし、流速と圧力損失の関係を求める。充填密度 110g/L で 45 度の繊維配向角度の場合の結果を図 2-1-2.5 に示す。

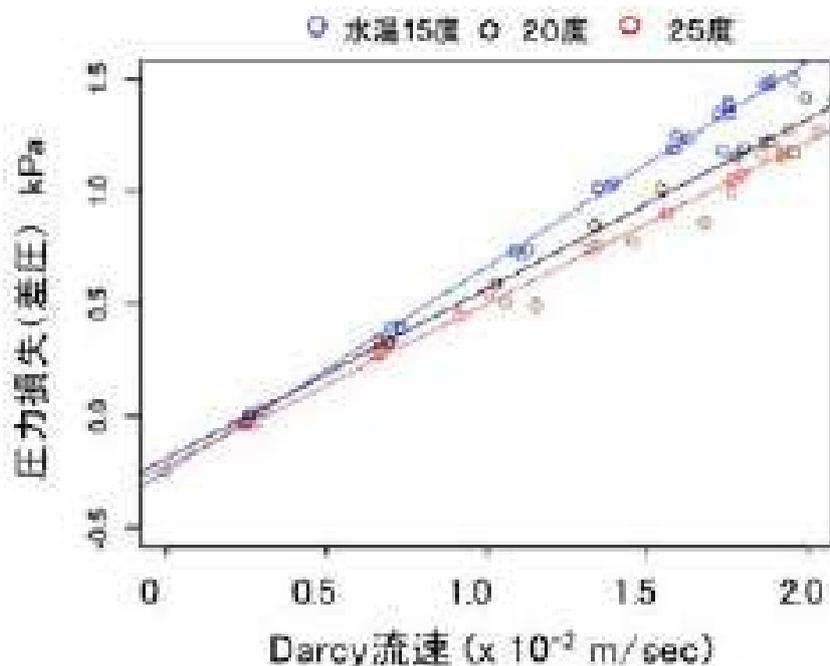


図 2-1-2.5 110g/L の繊維充填密度で 45 度配向角度の場合における Darcy 流速と圧力損失の関係

これで見えてわかるようにほぼ、直線上にあることがわかる。すなわち、地下水や砂濾過槽中の流れは、いわゆる多孔質流であるが、この流れに対しては次の Darcy の法則が成立することが知られている。

$$\Delta P = Rf \cdot U \quad (2)$$

ここで、 U は Darcy 流速、 ΔP は圧力損失 (差圧) で、 Rf は濾過抵抗である。圧力単位は Pa (=N/m²) で、 U [m/sec] とした場合、 Rf の単位は Pa m⁻¹sec [kg m⁻² sec⁻¹] となる。図 2-1-2.5 から、各温度で直線回帰 (線型) されることが分かる。実験データでは圧力センサーの位置の差による圧力 (水頭圧) 差があるので、流速 0 でも圧力は 0 ではなく、負の切片の値がある。一方で、実機による実験では、圧力損失 ΔP と流速の関係は Forchheimer-extended Darcy 則 (拡張 Darcy 則) で表す必要があった。すなわち、 U の 2 次の項までを取り入れた以下の式 (3) となる。

$$\Delta P = Rf \cdot U + c U^2 \quad (3)$$

(2)式を使って、実際に各充填条件や配向角度、温度で式(2)と式(3)の回帰を比較した。結果は省略するが、結論として、式(3)を使った場合には Rf が負になることもあり(物理的に無意味)、また、多くの場合で(2)が回帰モデルとしては優れていたため、今回の解析では通常の Darcy 則を基礎として解析した。

各繊維充填条件と配向角度の繊維濾過試験キューブに対して、流速と圧力損失との実験を 3 回繰り返したデータに関して線型回帰をおこなった。回帰の決定係数 R^2 は 0.99 以上であり、十分な精度で回帰できたので、その結果を図 2-1-2.6 に温度ごとに(a),(b),(c)に表示した。

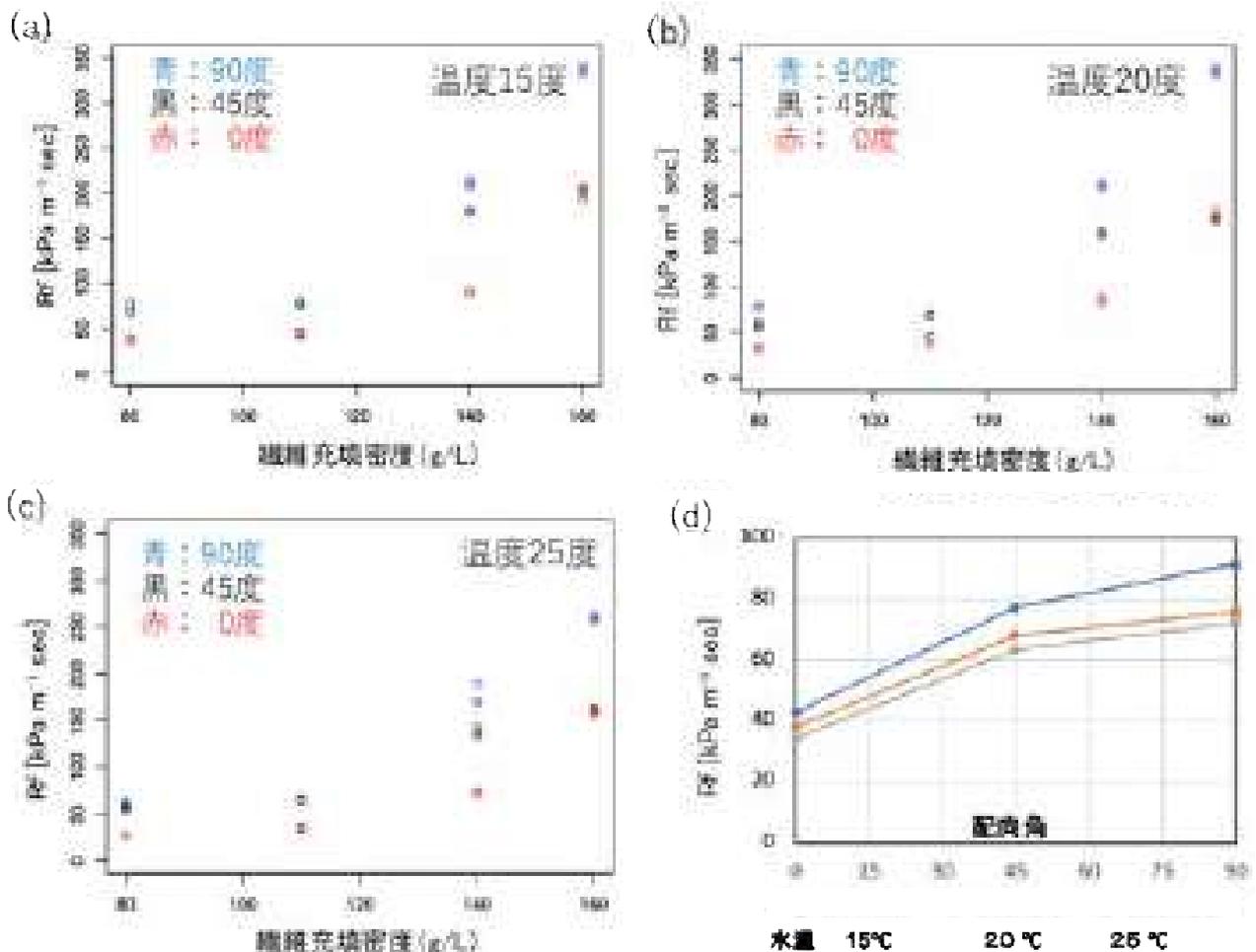


図 2-1-2.6 各温度における繊維充填密度と配向角度と濾過抵抗 Rf との関係

明らかに充填密度が高くなると、濾過抵抗は高くなった。また、温度が高いと水の粘性率が低下するので、 Rf も小さくなっている。角度の影響はこの図の(d)からも分かるように、濾過抵抗は 90 度の場合に大きく、0 度で小さく、45 度で中間の値となっている。すなわち、配向角度 0 度が流れと繊維が並行であり、90 度のお互いに直交する方向である。したがって、90 度の場合に一番濾過抵抗が高く、並行となる 0 度が流れやすい。

表 2-1-2.1 には、濾過抵抗 Rf に対する配向角度 ($Angle$)、温度 (Tc)、充填密度 (PD) の重回帰分析の結果を示す。

表 2-1-2.1 濾過抵抗 Rf に対する配向角度 ($Angle$)、温度 (Tc)、充填密度 (PD) の重回帰分析

| Rf ~ Angle + Tc + PD | | | | |
|----------------------|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | -124.3968 | 24.9694 | -4.982 | 2.52e-06 *** |
| Angle | 0.7437 | 0.1038 | 7.162 | 1.18e-10 *** |
| Tc | -2.7279 | 0.9345 | -2.919 | 0.00431 ** |
| PD | 2.1413 | 0.1259 | 17.012 | < 2e-16 *** |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 Multiple R-squared: 0.7705, Adjusted R-squared: 0.7639
 F-statistic: 116.4 on 3 and 104 DF, p-value: < 2.2e-16

係数の推定の有意性を示す p 値は充填密度 (PD) に対する p 値が最も低く、これが最も精度良く決定されていることがわかる。次に角度、そして温度の順になっている。これは、明らかに濾過抵抗は繊維が充填されれば、抵抗が高くなることは自明である。また、回帰全体の有意性を示す F 値に基づく p 値も十分低い、しかし、決定係数 R^2 は 0.76 と高くなく、線型な関係では表すことができないことを示唆している。

そこで、砂濾過などの深層濾過で使われる Ergun モデルを適用することとした。Ergun モデルの式は、流速 u の 2 次の項も含むが、今回の解析では 1 次項のみの次式 (4) を用いる。

$$\Delta P = K_V \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu L}{\varepsilon^3 d^2} u \quad (4)$$

ここで、 u は Darcy 流速 [m/sec]、 μ は水の粘性係数、 L は濾過層の長さ、 d は砂濾過では砂の平均粒径であるが繊維直径とした (今回の繊維は $d=19\mu\text{m}$)。 ε は空隙率である。また、砂濾過では K_V は無次元定数として扱う。空隙率 ε は、前節 2-1-1 の式 (2) から充填密度 PD と繊維の物性値としての密度 ρ から求めることができる。Darcy の式 (3) と比較して、

$$Rf = K_V \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu L}{\varepsilon^3 d^2} \quad (5)$$

この Rf は ε が 0 に近い場合、 $1/\varepsilon^3$ で ε に対して急速に減少し、1 に近付くと 0 になる、 ε に対する減少関数である。そこで、水温 15 度、角度 0 度の場合の濾過抵抗 Rf を ε に対してプロットすると、図 2-1-2.7 に示すようになり、 ε に対する減少関数が示されたが、(5) の関数形かどうかは決定できない。

そこで、 Rf を $\frac{(1-\varepsilon)^2 \mu L}{\varepsilon^3 d^2}$ で割り算すると、その値は K_V なる。 ε の関数として K_V をプロットした場合、 L 、 d は定数であり、温度が一定の場合は μ も定数であるので、 K_V が定数なら、 ε に対して一定となると考えられる。実際には、図 2-1-2.8 に示したように定数にならず、明らかに ε に対する強い依存性を残している。従って、濾過抵抗 Rf の ε に対する依存性は、式

(5)と異なると判断できる。そこで、改めて ε に対する関数形を推定することにする。

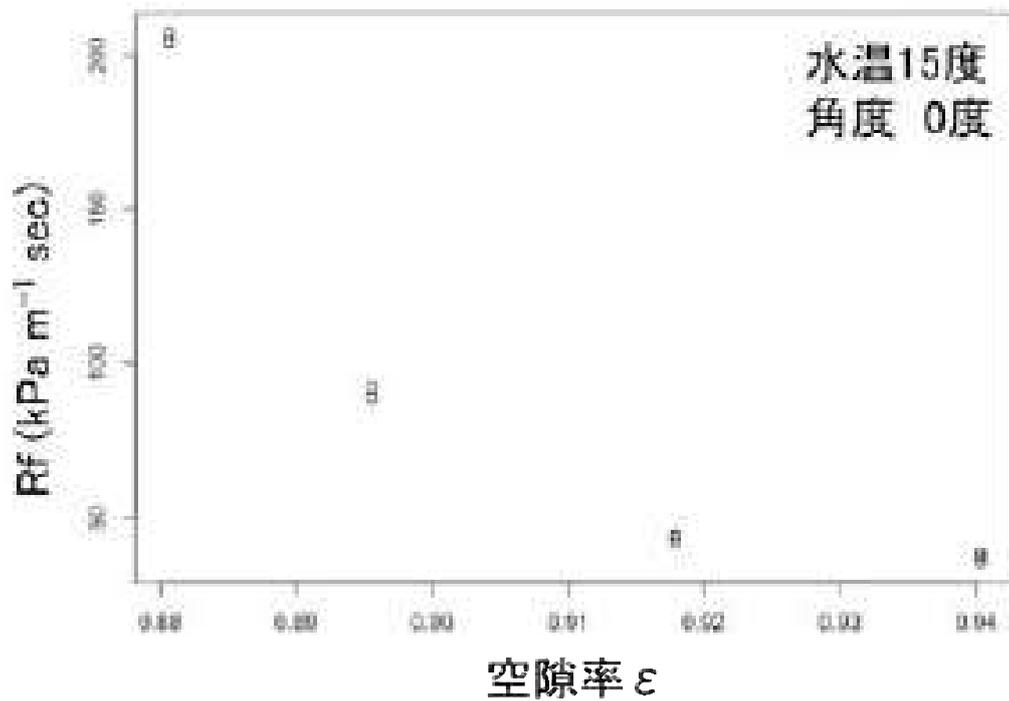


図 2-1-2.7 濾過抵抗 R_f と空隙率 ε の関係

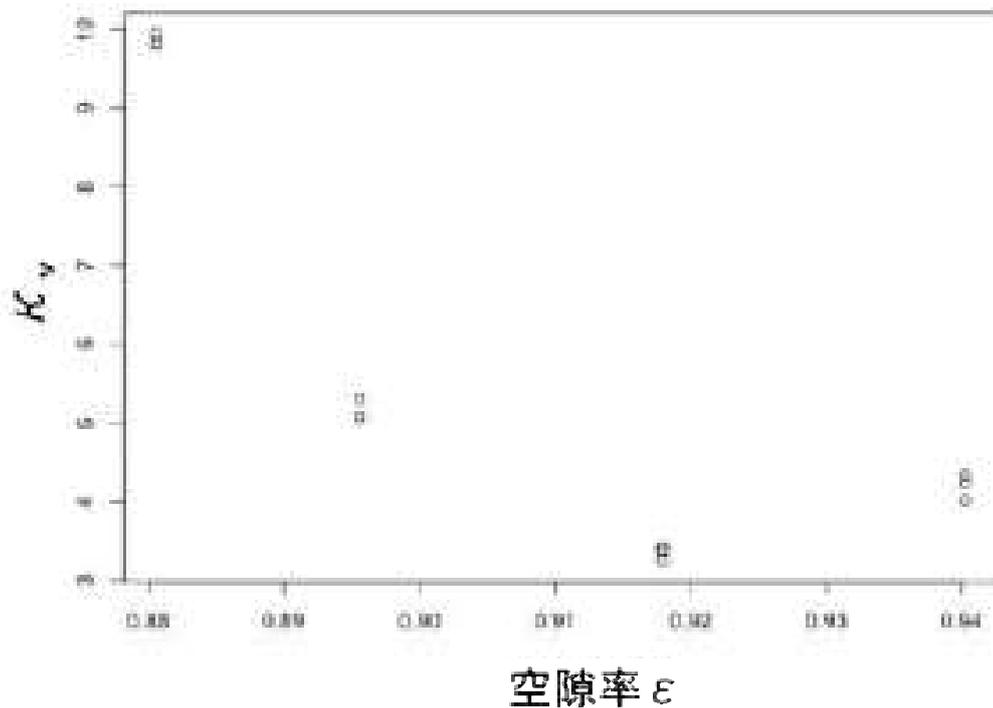


図 2-1-2.8 K_v と空隙率 ε の関係

ここでは、新たに、空隙率から式(6)から計算される、 δ を変数として考え R_f が δ の関数とする(図 2-1-2.9)。

$$\delta = \frac{1}{\varepsilon} - 1 \quad (6)$$

これは、空隙率 $\varepsilon=1$ で 0 となり、濾過抵抗は 0 に対応し、また、 $\varepsilon=0$ は完全に詰まった状態で隙間がないので、当然、濾過抵抗は無限大になるが、この場合、 δ も無限大となる。従って、 ε そのものよりも、 Rf の δ に対する関数形を求める。

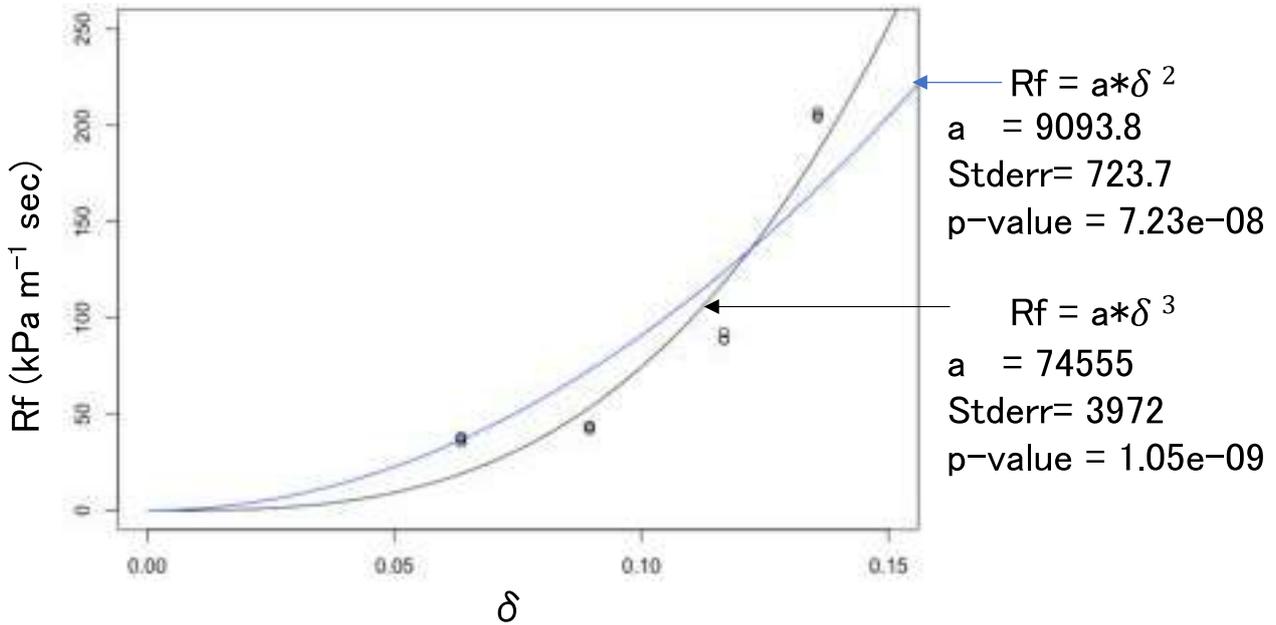


図 2-1-2.9 Rf と δ との関係

実験式としての扱いやすさと δ の意味を考え、 Rf を δ の 2 次の項、または 3 次の項のみの式で単回帰した。その結果、 p 値は明らかに 3 次の場合が小さく、係数の推定相対誤差も小さかった。そこで、 Rf は δ の 3 条に比例するとした。さらに次の回帰式(7)を考え、異なる温度 15°C、20°C、25°C に対しての κ_V の値を比較した。

$$Rf / \left(\frac{\mu L}{d^2}\right) = \kappa_V \delta^3 \quad (7)$$

温度は水の粘性のみに影響すれば、 κ_V は一定の値となる。なお、水の粘性係数 μ は、15°C、20°C、25°C に対して、1.1378 mPa sec、1.0016 mPa sec、0.8899 mPa sec である。回帰の結果を表 2-1-2.2 に示した。

表 2-1-2.2 回帰式(7)の係数 κ_V の推定結果

| 温度 (°C) | κ_V 推定値 | StdErr | P-value |
|---------|----------------|--------|----------|
| 15 | 1179.46 | 62.83 | 1.05e-09 |
| 20 | 1190.61 | 53.63 | 1.74e-10 |
| 25 | 1048.1 | 50.1 | 3.3e-10 |

κ_V は約 1000 前後の一定値となっており、濾過抵抗への温度の影響のほとんどは水の粘性を通してのみであると考えられるが、完全に定数ではなく若干の温度依存性の余地はあると考えられる。また、配向角度に対する濾過抵抗の影響は、まだ、考慮していないが、配向角度依存性はこの κ_V の中に含まれると考えて解析を進める。

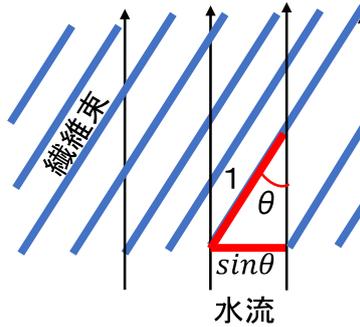


図 2-1-2.10 繊維配向方向と水流との関係

配向角度を流れに対しての角度 θ として考えた場合、図 2-1-2.10 に示したように繊維に対して水流が横切る断面積の割合は明らかに $\sin(\theta)$ に比例する。すなわち、 θ が小さくなると繊維と並行な流れとなり、繊維の濾過抵抗が小さくなり、 θ が大きくなると水流が横切る断面積が大きくなるので、濾過抵抗も大きくなる。実際、図 2-1-2.6(d) の実験結果はこのことを示唆している。そこで、 κ_V は $\sin(\theta)$ に対しての依存性があると考え、 κ_V の回帰式を検討した結果、以下に示す式 (8) が実用的にも簡明で、信頼性も高いことが判明した。

$$\log(\kappa_V) = K + a \sin \theta + b \sin^2 \theta + c Tc \quad (8)$$

表 2-1-2.3 回帰式 (8) の各係数の推定結果

| 係数 | 推定値 | StdErr | t value | P-value |
|----|-----------|----------|---------|--------------|
| K | 7.254537 | 0.068924 | 105.254 | 1.47e-09 *** |
| a | -0.374700 | 0.135862 | -2.758 | 0.03993 * |
| b | 0.949459 | 0.139693 | 6.797 | 0.00105 ** |
| c | -0.010897 | 0.003249 | -3.354 | 0.02024 * |

Multiple R-squared: 0.9852, Adjusted R-squared: 0.9762
 F-statistic: 110.6 on 3 and 5 DF, p-value: 5.442e-05

表 2-1-2.3 に示したように、回帰式 (8) の全体の回帰の F-Statistics (F 統計量) からの p 値は 5×10^{-5} と十分に低く、また、決定係数 R^2 も約 0.98 であるので回帰の信頼性は十分に高いと判断できる。一方、繊維の配向角度依存性は $\sin \theta$ そのものよりも、その二乗の項への依存性が強いことが判明した。また、温度に対しては、すでに粘性への影響として取り込まれているので、 κ_V への影響がないはずであるが、実際には、ここに示すように温度の係数 c の推定値は負で p 値も $0.02 < 0.05$ で有意である。式 (7) と式 (8) を組み合わせて、濾過抵抗の推定モデル式としては、最終的に以下の式 (9) が得られる。

$$Rf = \exp(K + a * \sin(\theta) + b * \sin^2(\theta) + c * Temp) \frac{(1 - \varepsilon)^3 \mu L}{\varepsilon^3 d^2} \quad (9)$$

図 2-1-2.11 には、 θ と ε の関数としての Rf (20 度の場合) の関数形をプロットした。

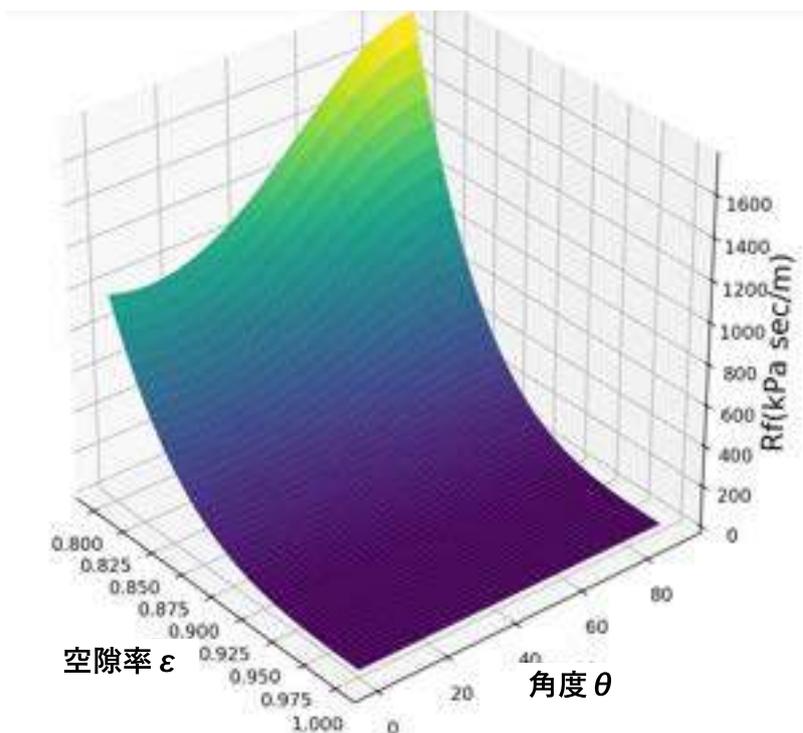


図 2-1-2.11 濾過抵抗 R_f に対する繊維配向角度 θ と空隙率 ε との関係

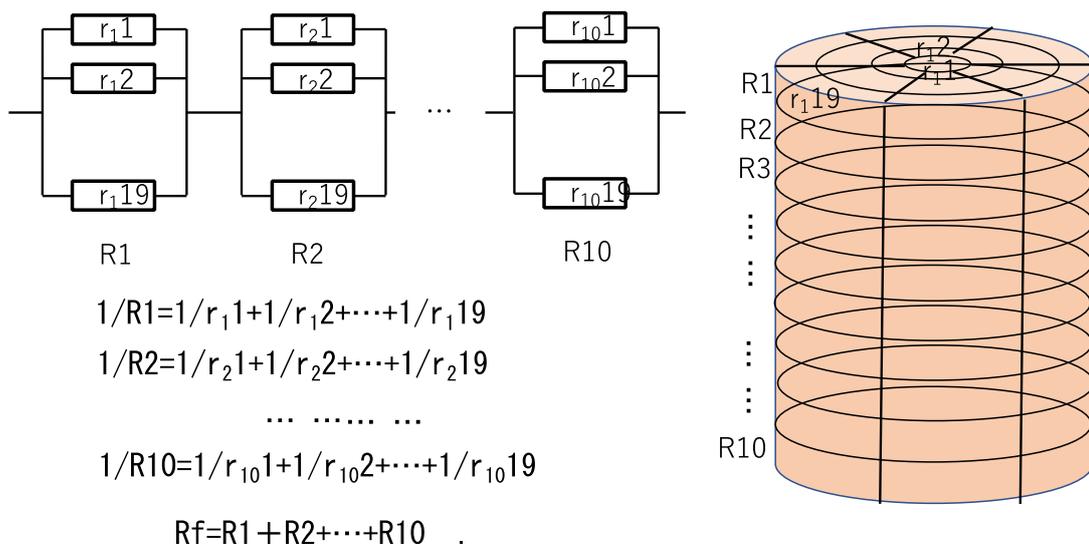


図 2-1-2.12 10 段 19 分割した濾過円筒モデルの濾過抵抗の並列—直列モデル

ただし、段数は 10 段の場合と 11 段の場合がある

この、式(9)は繊維濾過筒の圧力損失を計算する上で重要な濾過要素モデル式の一つである R_f のモデル式である。そこで、この式と前節 2-1-1 で得られた結果を組み合わせ、濾過筒の濾過抵抗に関する予測値を計算する。そのために、近似的に図 2-1-2.12 に示したような 10 段 19 分割した濾過円筒モデル(図 2-1-1.27 参照)の濾過抵抗の並列—直列モデルで近似計算を行う。図 2-1-2.13 には、例として 5_910_80_2 の濾過筒サンプル(910mm の繊維を 5 束充填し 80g/L の充填密度としたもの)、10_630_110_1 の濾過筒サンプル、10_800_140_2 の濾過筒サンプルの段ごとの濾過抵抗の変化を示す。

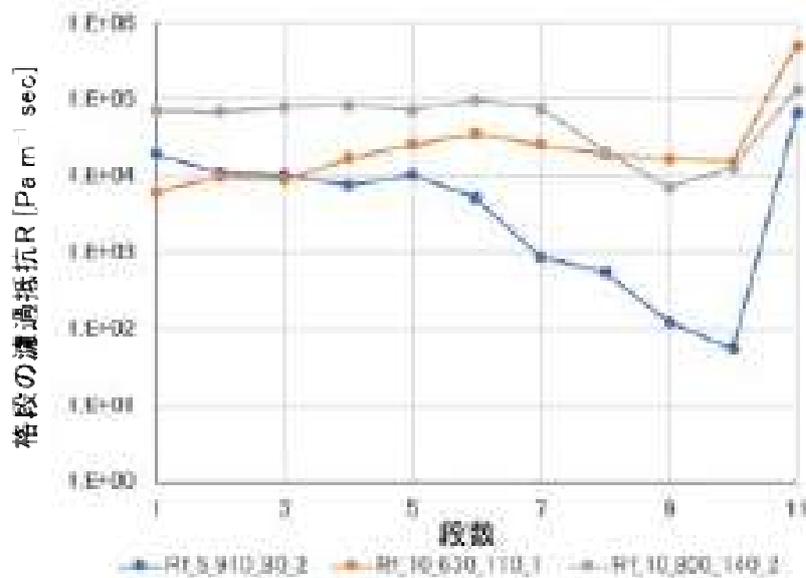


図 2-1-2.13 段ごとの濾過抵抗 R の変化

この3つの例では 11 段目で濾過抵抗が顕著に上昇した。さらに、充填密度が低い場合が段ごとの濾過抵抗の変化が大きい傾向にあることが分かった。この段ごとの濾過抵抗の全ての和を取り濾過筒全体の濾過抵抗 R_f を計算し、表 2-1-2.4 に示す。

表 2-1-2.4 各充填条件の濾過筒サンプルの濾過抵抗予測値

| 濾過筒 サンプル名 | 充填密度 | 繊維長 | 繊維束数 | R15°C (Pa sec/m) | Rf 20°C | Rf 25°C |
|--------------|------|------|------|------------------|----------|----------|
| 10_460_80_2 | 80 | 460 | 10 | 8.36E+04 | 6.02E+04 | 5.70E+04 |
| 20_230_80_2 | 80 | 230 | 20 | 2.41E+05 | 2.28E+05 | 2.16E+05 |
| 5_910_80_2 | 80 | 910 | 5 | 1.38E+05 | 1.31E+05 | 1.24E+05 |
| 10_630_110.1 | 110 | 630 | 10 | 7.20E+05 | 6.82E+05 | 6.45E+05 |
| 10_630_110.4 | 110 | 630 | 10 | 1.70E+05 | 1.61E+05 | 1.53E+05 |
| 10_630_110.5 | 110 | 630 | 10 | 2.80E+05 | 2.65E+05 | 2.51E+05 |
| 20_310_110.4 | 110 | 310 | 20 | 6.41E+06 | 6.07E+06 | 5.75E+06 |
| 5_1260_110.2 | 110 | 1260 | 5 | 5.37E+05 | 5.08E+05 | 4.81E+05 |
| 10_800_140.2 | 140 | 800 | 10 | 7.59E+05 | 7.19E+05 | 6.81E+05 |
| 5_1600_140.2 | 140 | 1600 | 5 | 1.19E+06 | 1.13E+06 | 1.07E+06 |

同じ、繊維充填密度であっても、濾過抵抗は数倍異なることが示されている。一方で濾過抵抗を実際の繊維濾過装置から実験的に求めた場合、100mm 長の濾過層長さに対して、典型的な充填密度の 110g/L の場合で $2.87 \times 10^5 \text{ Pa m}^{-1} \text{ sec}$ (25°C) と推定されている。表 2-1-2.4 の中で、110g/L の充填密度である 10_630_110_5 のサンプルの計算値が $2.51 \times 10^5 \text{ Pa m}^{-1} \text{ sec}$ (25°C) となっており、非常に近い値である。他の 110g/L サンプルも数倍異なるもの 10^5 のオーダーである。この結果から、濾過要素モデルとともに、前節 2-1-1 で構成した、三次元充填モデルがほぼ正しく内部構造を推定できていることを示している。

3-2-3) 繊維濾過試験キューブモデルを用いた粒子除去試験

1) 実験システムの全体構成

図 2-1-2.14 に実験システムの構成を示した。濾過抵抗測定試験と類似の構成であるが、いくつかの点で異なる。まず、DC ダイアフラムポンプを小型の DC 水中ポンプに変更した。DC ダイアフラムポンプを使う場合に必要な圧力変動平滑化装置内の繊維でも粒子が除去されるので、正確な測定ができないためである。しかし、この DC 水中ポンプでは 0.002m/sec と濾過抵抗測定試験より 1/10 の流速しか設定できなかった。ステンレス製の原水タンクにはアクリル微粒子(5 μ m)の懸濁水(原水粒子濃度は約 100mg/L)を入れたが、沈殿しないように水中ポンプで常に攪拌した。さらに、チラーで温度を設定したが、懸濁水への影響を避けるために、銅パイプを用いた簡単な熱交換器を作成し、それにチラーからの水を通して温度設定を行った。また、繊維濾過試験キューブはインキュベータ内に設置して実験した。また、濁度センサーは適当な市販品がなかったので、3D プリンターで製作した(後述)。また、濁度センサーを流入側と流出側に設置してそれぞれの電圧変化を測定し、その値から濁度(粒子濃度 mg/L)に変換した。また、流量センサーも取り付け、流速の変化をモニターした。

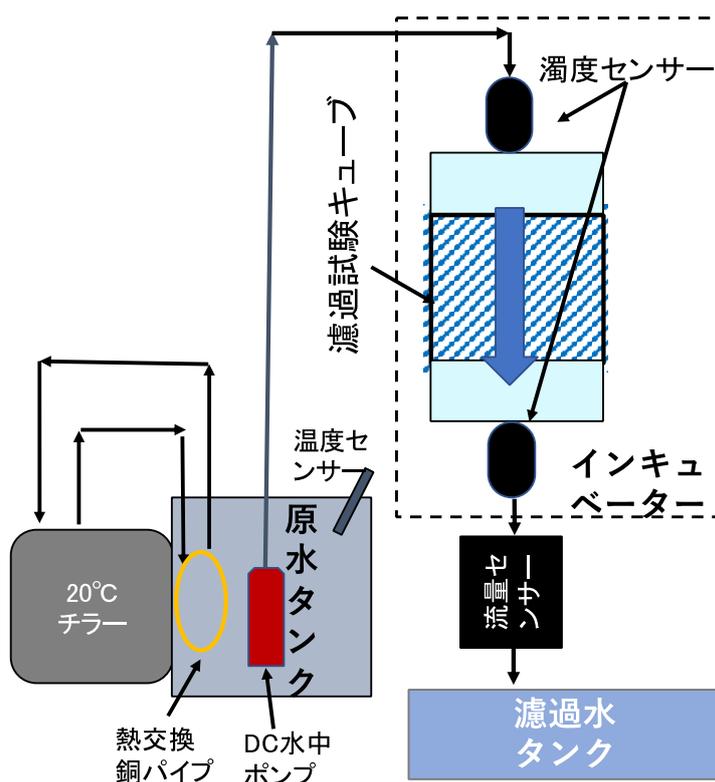


図 2-1-2.14 粒子除去試験用の実験システム

2) 連続濁度センサーの試作

今回の試験では、濁度を連続的に測定することが重要であるが、適当な市販品がないので連続濁度センサーを自作した。基本構成を図 2-1-2.15(a)に示した。赤色発光ダイオード(定電流ダイオードで 2mA を供給)からの光を直径約 2mm の穴を通した光ビームとして連続光学セルを通過させ、その反対側で光ファイバーを通してフォトダイオードで受光する構造とした。また、50mL のホールピペットで文字の刻印が無い部分を避けると、高い透明性と十分な光学長を持つ連続光学セルとして利用できることが判明した。さらにホールピペットの内壁は滑らかで粒子の付着も最小限に抑えられることが判明した。ホールピペットと発光ダイオード、光ファイバー受光部をセットできる黒色樹脂のホルダーを3D プリンターで試作した(図 2-1-2.15(b))。次に、今回用いるアクリル微粒子(直径 5 μ m)を 100mg/L、60mg/L、40mg/L、20mg/L に調整した懸濁水を調整し、図 2-1-2.14 の試験濾過キューブが無い状態で懸濁水を循環させた。この時のフォトアンプの電圧出力をモニターして校正曲線を作成した。その一例を図 2-1-2.16 に示した。これは以下の二次式で近似できた。

$$\text{粒子濃度 } C(\text{mg/L}) = -7557.4V^2 + 532.6V + 104, (R^2 = 0.997) \quad (10)$$

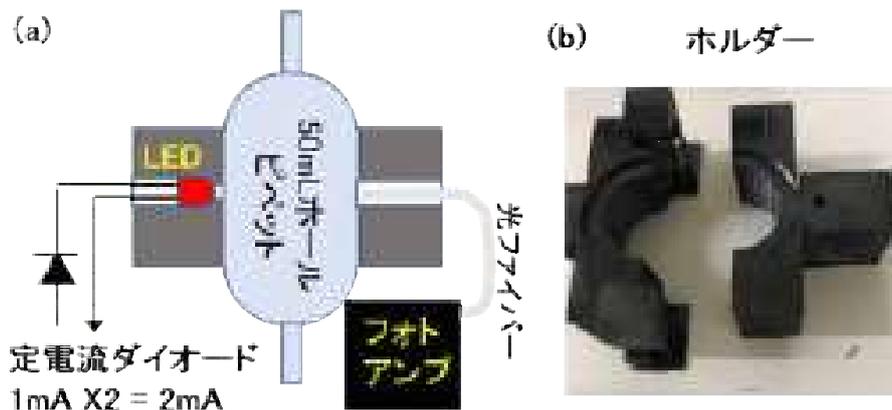


図 2-1-2.15 自作の濁度センサーの構造

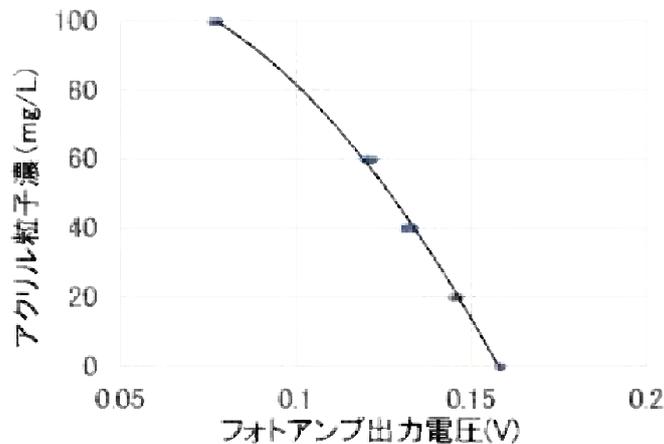


図 2-1-2.16 濁度センサーの校正曲線

3) 微粒子除去試験の結果

実際の濁度の測定では、濁度センサーの内壁に徐々に粒子が堆積することで感度に変化することを考慮し、流入水(原水)と流出水(濾過水)のサンプルを定期的に採取して、分光高度計で濁度を測定し、その測定値を粒子濃度に変換して濁度センサーの感度を補正した。この補正を行った上で、繊維濾過キューブ(110g/L, 配向角度 90 度)の流入側と流出側の濁度(粒子濃度)の変化の例を図2-1-2.17(a)に示す。この流入水の濃度が徐々に高くなっており、原水タンクで底に溜まったことが原因と考えられる。流出水(濾過水)の濁度も徐々に高くなっている。これは、流入水の濁度が高くなることと、除去率が低下したこととに起因すると考えられる。図 2-1-2.17(b)には、除去率の変化を示す。除去率 R_{mv} は次式(11)で定義される。

$$R_{mv} [\%] = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \quad (11)$$

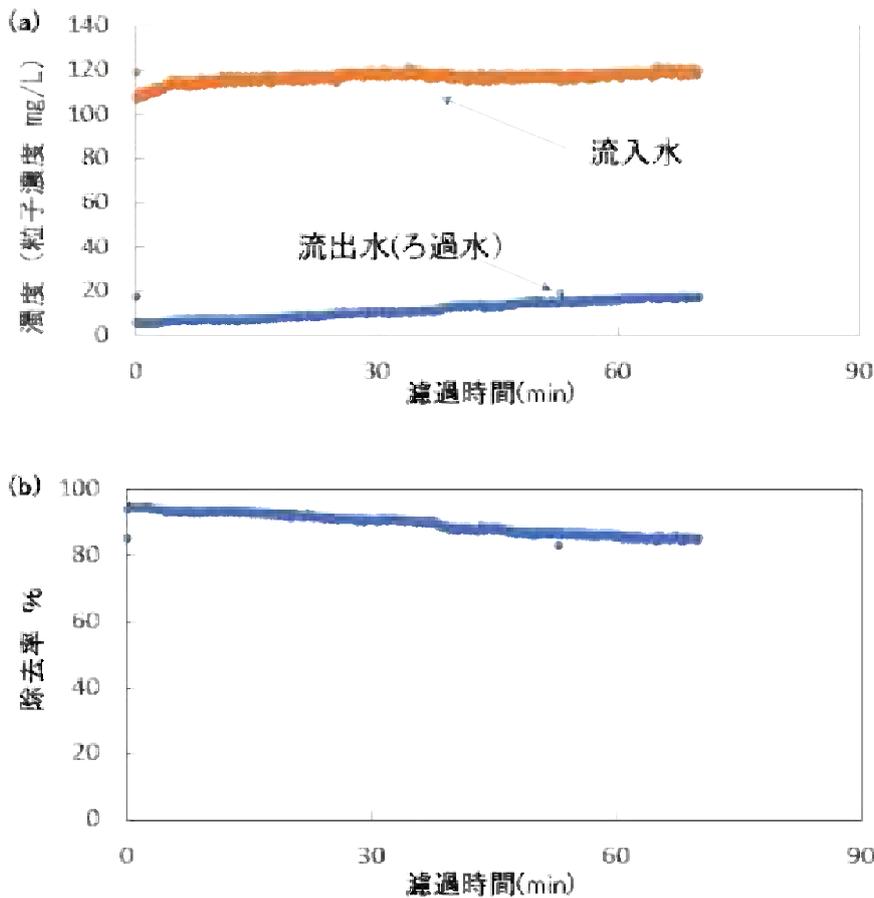


図 2-1-2.17 流入水と流出水の濁度の時間変化(a)と微粒子除去率の時間変化(b)

明らかに、約 70min の濾過の間に除去率はすぐに単調に減少した。繊維濾過は、後述する深層濾過の一種であると考えられるが、流れに沿って輸送される粒子が繊維に付着していくことで、濾過層を進む間に除去されると考えられる。また、粒子が繊維を覆うと付着確率が著しく低下すると考えられるので、繊維による粒子除去が行われるにつれ、流入側から繊維を粒子が覆って行き、粒子を除去可能な表面が少なくなる。そのため、すぐに除去率が低下したと考えられる。

これらの粒子の除去率は、充填密度や配向角度によって変化する。表 2-1-2.5 にはその結果を示す。

表 2-1-2.5 各充填条件の濾過試験キューブの除去率

| 密度 | 80 g/L | | 110 g/L | | 130 g/L | | 160 g/L | |
|-----|--------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | 0~5min | 25~30min | 0~5min | 25~30min | 0~5min | 25~30min | 0~5min | 25~30min |
| 0° | 92.0% | 75.8% | 95.0% | 83.8% | 97.6% | 85.8% | 94.8% | 92.5% |
| 45° | 94.0% | 76.7% | 95.4% | 84.2% | 96.7% | 85.8% | 95.4% | 93.0% |
| 90° | 94.5% | 75.3% | 96.1% | 84.5% | 95.9% | 86.0% | 99.2% | 97.1% |

この表から繊維充填密度が高いほど除去率が大きく、さらに時間が経過すると除去率が減少している。しかし、除去率の減少程度は、繊維の充填密度が高いほど少ないようである。実際に、図 2-1-2.18 に示すように充填密度 PD に対して、0~5min 後の除去率から 25~30min の除去率を差し引いた値(除去率の差)をプロットすると、明確な減少傾向を示している。これは、粒子が付着せずに残っている繊維表面は充填密度が高いほど多いので、除去能の低下量は充填密度が大きいほど小さくなる。また、配向角度に対する依存性は、流れの方向に対しての角度が大きいほど除去率が大きくなる傾向がある。

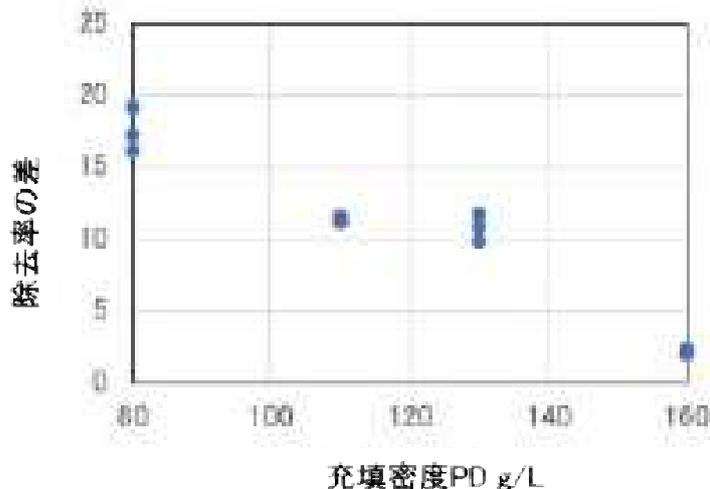


図 2-1-2.18 充填密度に対する 0~5min 後の除去率と 25~30min の除去率の差

これらの傾向を明確にするために、線型回帰モデルに対するモデル選択を行った。目的変数は除去率 Rmv で、説明変数として、配向角度 $Angle$ 、充填密度 PD 、濾過時間 $time$ として、さらに説明変数間の交互作用を取り入れて、赤池情報量基準 AIC が最小となる最も優れた線型回帰モデルを探索した。表 2-1-2.6 にその結果を示した。Model48 がこの中では最も AIC が小さく優れたモデルで、線型モデル式は

$$Rmv \sim Angle + PD + time + Angle:PD + PD:time \quad (12)$$

となる。この回帰の結果の要約を表 2-1-2.7 に示す。この結果を見ると、 PD と $Angle$ の p 値は大きく有意性が低いので、以下のモデル式でさらに回帰を行い AIC を比較した(表 2-1-2.8)。

$$Rmv \sim time + Angle:PD + PD:time \quad (13)$$

表 2-1-2.6 AIC を用いた除去率 R_{mv} に対するモデル選択の結果

(下記に示したものは AIC が小さい順の上位 10 のモデル)

| model | (Int) | Ang | PD | tin | Ang:PD | Ang:tin | PD:tin | Ang:PD:tin | df | logLik | AIC | delta | weight |
|-------|-------|----------|------------|---------|-----------|------------|----------|------------|----|---------|-------|-------|--------|
| 48 | 98.85 | -0.03274 | -0.0159100 | -1.2910 | 4.036e-04 | | 0.007255 | | 7 | -38.343 | 90.7 | 0.00 | 0.374 |
| 40 | 96.67 | 0.01569 | 0.0022550 | -1.2910 | | | 0.007255 | | 6 | -39.818 | 91.6 | 0.95 | 0.232 |
| 64 | 98.74 | -0.03021 | -0.0159100 | -1.2840 | 4.036e-04 | -0.0001444 | 0.007255 | | 8 | -38.306 | 92.6 | 1.93 | 0.143 |
| 128 | 96.88 | 0.01124 | -0.0003627 | -1.1780 | 5.817e-05 | -0.0025130 | 0.006367 | 1.974e-05 | 9 | -37.703 | 93.4 | 2.72 | 0.096 |
| 56 | 96.56 | 0.01822 | 0.0022550 | -1.2840 | | -0.0001444 | 0.007255 | | 7 | -39.785 | 93.6 | 2.88 | 0.088 |
| 39 | 97.38 | | 0.0022550 | -1.2910 | | | 0.007255 | | 5 | -42.063 | 94.1 | 3.44 | 0.067 |
| 7 | 82.15 | | 0.1292000 | -0.4203 | | | | | 4 | -60.340 | 128.7 | 37.99 | 0.000 |
| 8 | 81.44 | 0.01569 | 0.1292000 | -0.4203 | | | | | 5 | -59.885 | 129.8 | 39.08 | 0.000 |
| 16 | 83.62 | -0.03274 | 0.1111000 | -0.4203 | 4.036e-04 | | | | 6 | -59.622 | 131.2 | 40.56 | 0.000 |
| 24 | 81.33 | 0.01822 | 0.1292000 | -0.4138 | | -0.0001444 | | | 6 | -59.879 | 131.8 | 41.07 | 0.000 |

表 2-1-2.7 式(12)による回帰結果の要約

| Model: $R_{mv} \sim PD + time + Angle + PD:time + PD:Angle$ | | | | |
|---|------------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 98.8542402 | 2.5209492 | 39.213 | < 2e-16 *** |
| PD | -0.0159069 | 0.0204140 | -0.779 | 0.446 |
| time | -1.2909216 | 0.0954963 | -13.518 | 7.25e-11 *** |
| Angle | -0.0327369 | 0.0324885 | -1.008 | 0.327 |
| PD:time | 0.0072549 | 0.0007733 | 9.382 | 2.36e-08 *** |
| PD:Angle | 0.0004036 | 0.0002631 | 1.534 | 0.142 |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 Multiple R-squared: 0.9718, Adjusted R-squared: 0.964
 F-statistic: 124.2 on 5 and 18 DF, p-value: 2.657e-13

表 2-1-2.8 式(13)による回帰結果の要約

| Model: $R_{mv} \sim time + PD:time + PD:Angle$ | | | | |
|--|------------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 9.688e+01 | 5.733e-01 | 168.985 | < 2e-16 *** |
| time | -1.272e+00 | 5.839e-02 | -21.781 | 2.11e-15 *** |
| time:PD | 7.096e-03 | 4.507e-04 | 15.745 | 9.81e-13 *** |
| PD:Angle | 1.434e-04 | 5.983e-05 | 2.396 | 0.0265 * |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 Multiple R-squared: 0.9701, Adjusted R-squared: 0.9657
 F-statistic: 216.5 on 3 and 20 DF, p-value: 2.062e-15

表 2-1-2.7 と表 2-1-2.8 の結果から、式(12)の回帰モデルより式(13)の回帰モデルでは R^2 はほとんど変わらないが、回帰の信頼性である F 統計量からの p 値が小さくなっている。また、全ての係数の p 値が <0.05 より小さく有意である(有意水準 0.05 に設定)。さらに、式(13)のモデルの AIC は 88.1 で、式(12)の回帰モデルの AIC90.7 より小さい。従って、粒子除去率 Rmv は、濾過時間が長くなると減少するが、 $time:PD$ が正なので、充填密度 PD が高くなると除去率は高まる傾向にあり、特に、濾過時間が長くなるとその傾向は強くなる。また、配向角度も充填密度が高いほど、その効果は大きく角度が大きいくほど除去率は高くなる傾向にある。

この繊維濾過は深層濾過であるので、同じ深層濾過の典型である砂濾過に対する理論である Yao のモデルを適用してさらに解析を行う。Yao のモデルは以下の式(14)で表される。

$$C_{out} = C_{in} \exp \left(-3(1 - \epsilon) \frac{\alpha \eta L}{2d_c} \right) \quad (14)$$

ここで、 ϵ は空隙率、 L は濾槽長(厚さ)、 d_c は繊維直径、 α は付着確率、 η は粒子と繊維の接触頻度(衝突確率)である。また、2-1-1節の式(2)から空隙率は ϵ は充填密度 $PD(g/L)$ と繊維材料の物質密度 ρ から、 $\epsilon = 1 - PD/\rho$ となる。なお、今回用いている PET 樹脂繊維では $\rho = 1.34 g/cm^3 (=1340 g/L)$ 、また $d_c = 19\mu m$ である。これにより、式(14)は以下の式(15)に変形できる。

$$C_{out} = C_{in} \exp \left(-\alpha \eta \frac{3L PD}{2d_c \rho} \right) \quad (15)$$

さらに、Yao のモデルでは粒子と繊維の接触頻度には、主に3つの独立な機構(効果)が想定されている。一つは遮り効果 η_I 、二つ目は重力沈降 η_G 、そして三つ目はブラウン運動による拡散 η_D である。全体の接触頻度は $\eta = \eta_I + \eta_G + \eta_D$ と3つの効果の和で表される。特に、今回の粒子径 $5\mu m$ のアクリル粒子の場合について、これらの3つの効果を評価すると、 $\eta_I \sim 10^{-1}$ 、 $\eta_G \sim 10^{-6}$ 、 $\eta_D \sim 10^{-4}$ のオーダーであることが示され、ほとんど遮り効果 η_I のみであることがわかる。また、重力沈降 η_G とブラウン運動拡散 η_D は流速に依存するが、遮り効果は、以下の(16)式のように粒子の直径 d_p と繊維の直径 d_c で決まり流速には依存しない。

$$\eta_I = \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^2 \quad (16)$$

今回の条件では $\eta_I = 0.104$ となる。式(15)を変形して、

$$\alpha = -\ln \left(\frac{C_{out}}{C_{in}} \right) \frac{2d_c \rho}{3\eta_I L PD} = -\ln(1 - Rmv[\%]/100[\%]) \frac{2d_c \rho}{3\eta_I L PD} \quad (17)$$

となる。ここで、 $-\ln(C_{out}/C_{in}) = -\ln(1 - Rmv/100)$ は粒子除去の比速度に比例する。この値に対する充填密度、配向角度、濾過時間の影響を見るために、図 2-1-2.19 に箱ひげ図を示す。表 2-1-2.5、表 2-1-2.7、表 2-1-2.8 から充填密度 PD が増加すると粒子の除去率 Rmv は高くなることは明らかであるが、それと相関する粒子除去の比速度に比例する $-\ln(C_{out}/C_{in})$ の値も、充填密度が高くなると増加し、濾過時間に対しては減少した。配向角度に対しては、増加傾向にあるが、統計的に有意かどうかは判別できない。式(18)で計算する α は、この値を充填密度 PD で割っ

ているので、濾過媒体そのものが増加することによる除去率の増加分は除かれているので、 α に対する充填密度 PD の影響は小さいと予想される。また、配向角度に対しての影響は弱いと予想される。

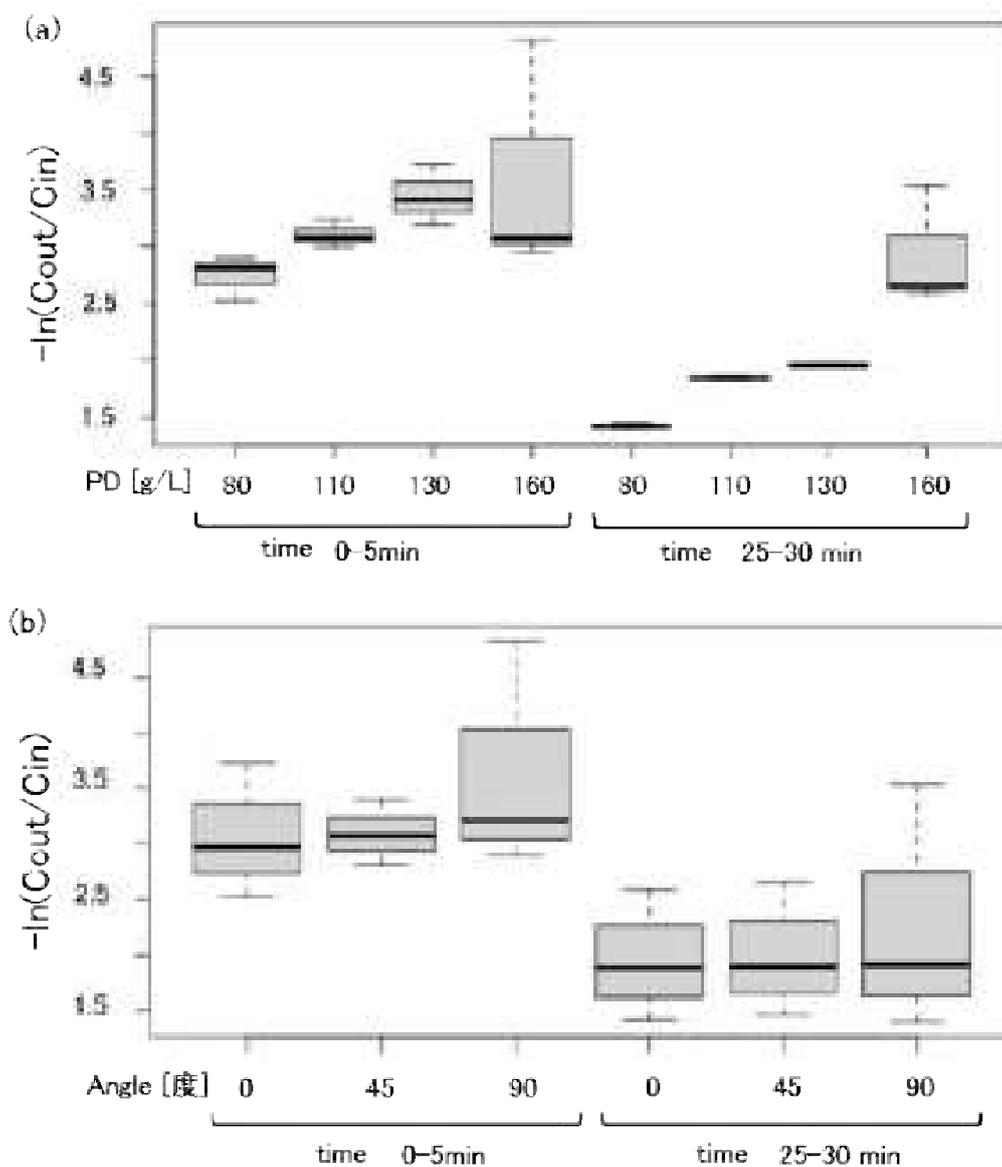


図 2-1-2.19 粒子除去の比速度に比例するに対する充填密度、配向角度と時間の影響

式(17)で計算した付着確率 α に対する充填密度、配向角度と時間の影響を図 2-1-2.20 にプロットした。その結果、 α は充填密度 PD が増加すると著しく減少し、また濾過時間に対しても減少することが判明した。一方で、充填密度が高いと濾過時間に対する α の減少度合いは低下した。配向角度に対しては、弱い増加傾向にある。そこで、除去率に対する線型回帰モデルと同様にモデル選択を行った結果、以下の回帰式が最も優れていた。

$$\alpha \sim PD + time + PD:time + Angle:PD \quad (18)$$

このモデルに対する回帰の結果の要約を表 2-1-2.9 に示す。粒子付着確率 α に対する充填密

度の影響は負で有意性も高い。また、濾過時間に対しても負であるが、充填密度と濾過時間の交互作用は正であり、濾過時間に対する減少度は、充填密度が高い場合に小さくなることを意味している。また、充填密度と配向角度の交互作用も正であるので、充填密度が高い場合は配向角度が大きい(流れに直交する)場合に粒子付着確率 α が高くなる傾向があり、これは統計的に有意であった。

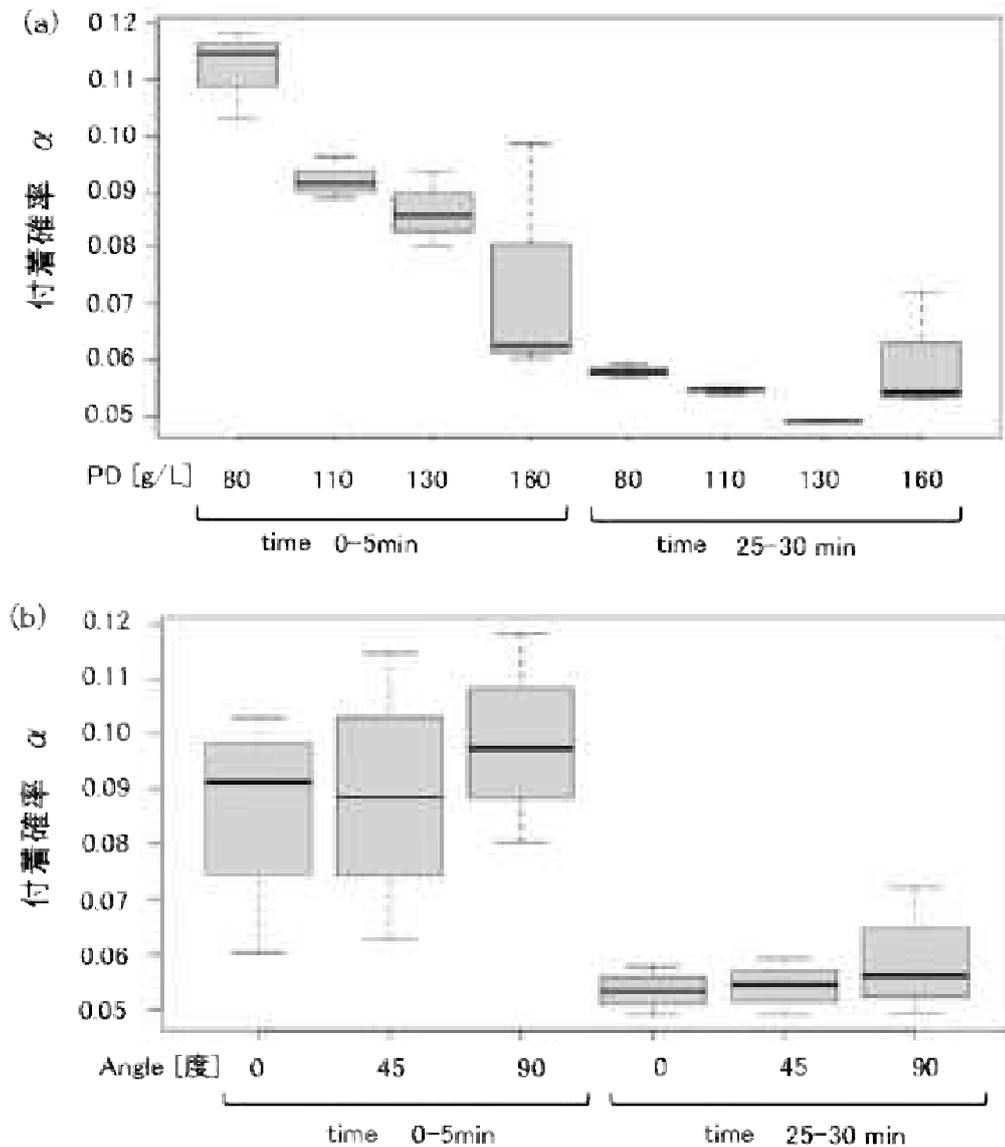


図 2-1-2.20 付着確率 α に対する充填密度、配向角度、時間の影響

表 2-1-2.9 式(18)による回帰結果の要約

| Model: $\alpha \sim PD + time + PD:time + Angle:PD$ | | | | |
|---|------------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.655e-01 | 1.220e-02 | 13.562 | 3.20e-11 *** |
| PD | -5.991e-04 | 1.002e-04 | -5.980 | 9.36e-06 *** |
| time | -3.680e-03 | 5.673e-04 | -6.486 | 3.25e-06 *** |
| PD:time | 1.876e-05 | 4.594e-06 | 4.083 | 0.000634 *** |
| PD:Angle | 8.762e-07 | 3.690e-07 | 2.375 | 0.028251 * |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 Residual standard error: 0.008202 on 19 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.8891, Adjusted R-squared: 0.8658
 F-statistic: 38.09 on 4 and 19 DF, p-value: 7.962e-09

次に粒子除去速度 $k(t)$ [mg/min]を計算する。これは流量 $Q(t)$ [mL/min]、流入と流出の濁度(微粒子濃度) $C_{in}(t)$ と $C_{out}(t)$ から次式で計算できる。

$$k(t) = Q(t)[C_{in}(t) - C_{out}(t)] \quad (19)$$

そこで、流量計で連続計測した流量 $Q(t)$ を図 2-1-2.21 に示す。

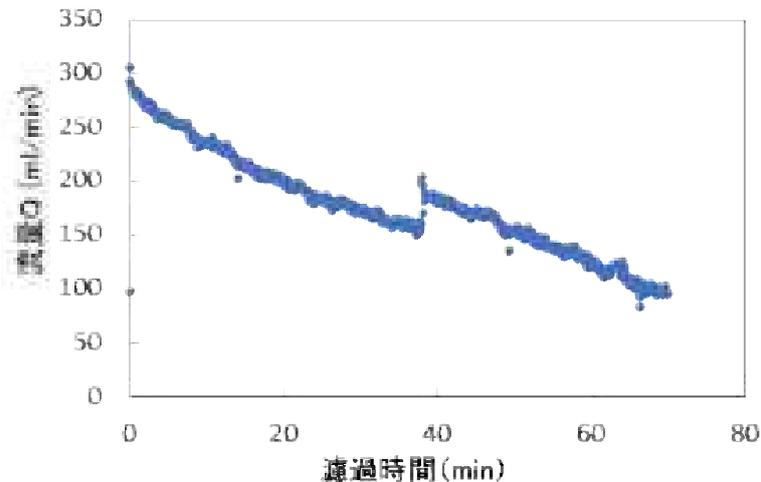


図 2-1-2.21 流量(流速)の時間変化

時間とともに流量 $Q(t)$ は減少しており、70 分間で約 1/3 の流量となった。今回のポンプは定流量ポンプではないので、粒子が付着するにつれて濾過抵抗が増加したためと考えられる。また、40 分あたりで流量が一度、急激に増加している。これは、内部の繊維が流動圧力により内部で少し動くことで、流路が変化した可能性がある。すなわち水路が変化したと考えられる。また、この時、詰まっていた粒子が一部流出した可能性がある。実際、この時の流速増加に対応して流出水の濁度がわずかに上昇している。この流量 $Q(t)$ を(19)式に適用して粒子除去速度 k の時間変化を計算した結果を図 2-1-2.22 に示す。

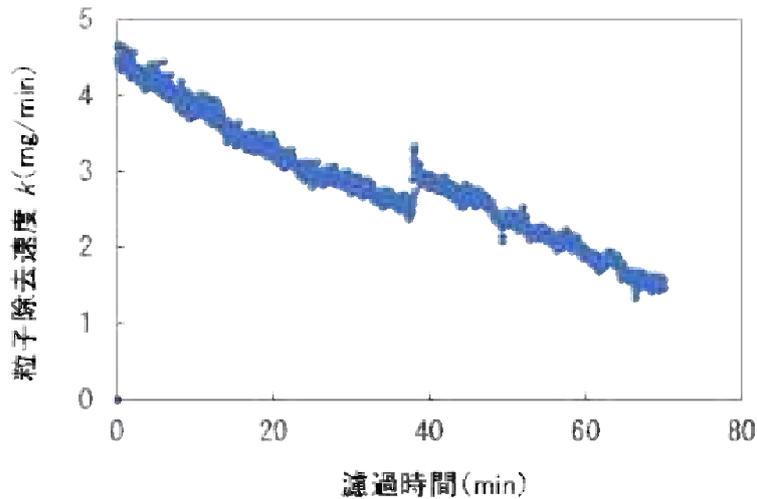


図 2-1-2.22 粒子除去速度の時間変化

除去率の減少は 70min で 10%以下であったが、粒子除去速度は、流量の減少のために大きく減少する。この粒子除去速度 $k(t)$ がわかれば、次に積算除去量 $CR(t)$ を以下の式(20)で求めることができる。

$$CR(t) = \int_0^t k(\tau) d\tau \quad (20)$$

次に、積算除去量のプロットを図 2-1-2.23 に示す。

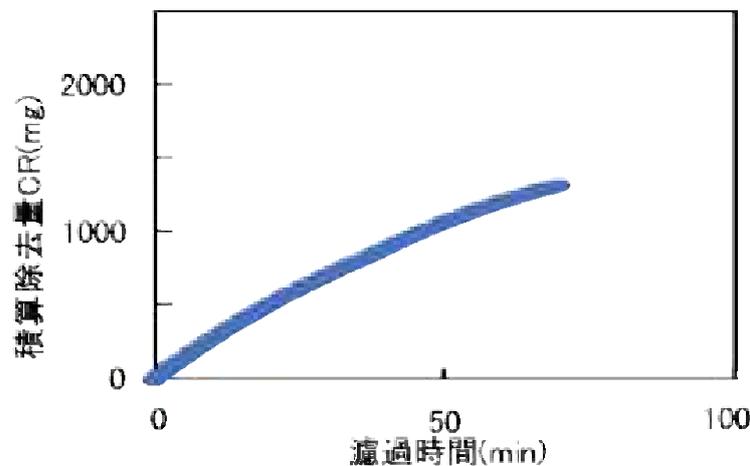


図 2-1-2.23 積算除去量の時間変化

繊維が除去できる粒子総量は有限であるため、積算除去量は濾過時間が経過すると次第に一定値に近づくと考えられる。そこで、指数的な変化を仮定して、次の式(21)を非線形回帰した。 a は粒子の最大除去量(付着量)である。

$$CR(t) = a \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \quad (21)$$

その結果、 $a = 2252.6 \pm 3.5(\text{Std Error}) \text{ mg}$ 、 $b = 78.7 \pm 0.2(\text{Std Error}) \text{ min}$ が推定され、それぞれの p 値は 2×10^{-16} 以下であり、この例については高い精度で推定できている。

他に関しては、十分な時間の濁度計測ができずに非線形回帰の精度が悪いものもあった。最大除去量と充填密度 PD 、配向角度に対してまとめた結果を表 2-1-2.10 に示す。

表 2-1-2.10 式(21)による回帰結果の要約

| 充填密度 | 80g/L | 110 g/L | 130 g/L | 160g/L |
|------|----------------|---------|---------|--------|
| 配向角度 | 最大除去量mg / 繊維1g | | | |
| 0° | 362.7 | 382.0 | 259.5 | NA |
| 45° | 453.4 | 291.0 | 373.2 | 279.4 |
| 90° | NA | 103.9 | 261.3 | 219.5 |

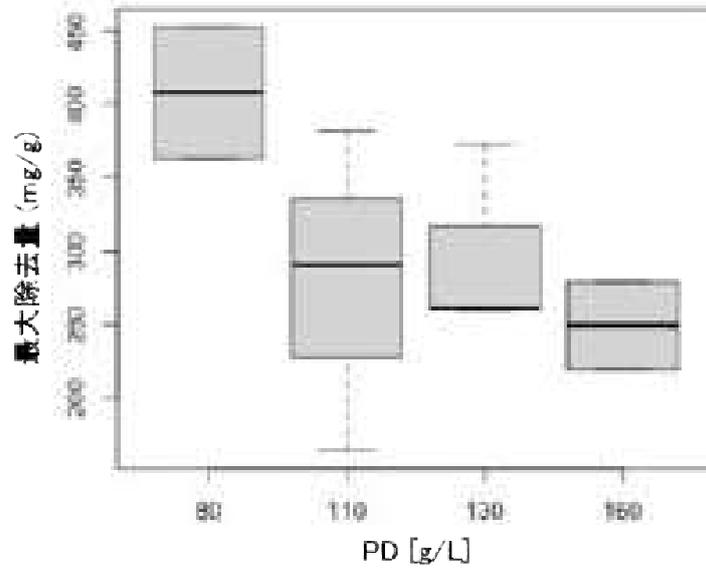


図 2-1-2.24 充填密度 PD に対する繊維1g 当たりの粒子最大除去量 (mg/g)

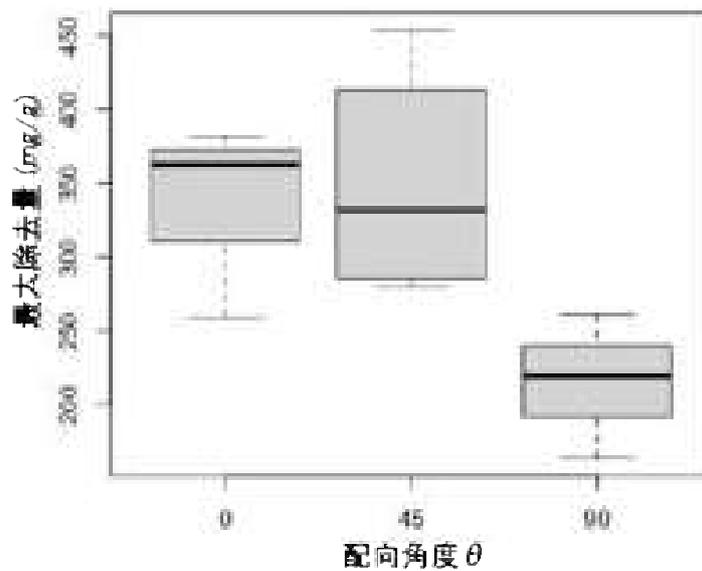


図 1-2.25 充填密度 PD に対する繊維1g 当たりの粒子最大除去量 (mg/g)

2-1-3 繊維濾過装置の多孔質流シミュレーションモデルを構築・解析 北九州市立大学

1) 目的

繊維濾過装置内部の水の流れは圧力損失や微粒子の除去率の性能に大きな影響を与える。しかしながら、繊維濾過装置の水の流れ的課題に取り組むために必要な多孔質流シミュレーションモデルはこれまで開発されていない。そこで、ここでは、本プロジェクトの全体目標の達成のために、繊維濾過装置の多孔質流シミュレーションモデルを構築・解析することを目的とする。

2) 実施内容と結果の要約

「繊維の三次元充填モデル」および「濾過要素モデル式」を CFD モデルに導入して繊維部の流動を解析した。原水 LV と全体圧力損失の測定結果を反映させ、全体圧力損失を良好に再現する繊維部充填不均一流れ偏り計算モデルを実現した。これにより空隙の空間分布の有無が解析結果に及ぼす影響を明らかにした。CT 測定結果を反映させた充填率分布モデルでは、均一モデル(従来法)に比べてトレーサー1%流出時間が約 3%も早くなった。従来法では極めて性能が良いと誤解を与える極めて危険な見積もりがされていることが明らかとなった。

3) 具体的な実施内容

3-1) 流体シミュレーション準備

流体シミュレーションの準備として、繊維濾過装置内の水の流れ構造に基づき、繊維濾過装置の流動の課題を抽出し整理した。繊維濾過装置内の水の流れの模式図と水の流れる課題の発生状態を図 2-1-3.1 に示す。

まず被処理水は濾過塔の上部の上部流入管出口から流入し繊維充填部の上側に存在する空間を自由に下降する。繊維部上部のキャップ部に至るとキャップ部の内側と外側に分かれてそれぞれ繊維部の上端に流入する。繊維部を下降しながら汚濁物質が取り除かれ、繊維部を通過して処理水となり、下部集水管から繊維濾過装置の外に出る。

一つ目の水の流れる課題はキャップ部の水の分配である。キャップ部で内側と外側に分配された水はそれぞれ繊維部に流入する。繊維部に流入する流束ができるだけ均一となるためには、このキャップ部で内側と外側に分配された水量の比率が、キャップ部の内側から繊維部上端に流入する箇所の面積(キャップ部内側繊維部面積)とキャップ部の外側から繊維部上端に流入する箇所の面積(キャップ部外側繊維部面積)の比率にできるだけ等しい比率となる必要がある。

二つ目の水の流れる課題は、繊維部の水の流れる均一性である。繊維部における繊維の充填が不均一であると、流れの偏り、つまり、繊維の充填が疎である箇所を通じて偏流が発生し、繊維部上部から繊維部下部に短い滞留時間で水が流れてしまう。これにより、繊維部全体として短い滞留時間で流出する流体成分が発生することになり、汚濁物質の除去性能の悪化を招く。本研究開発における流体シミュレーションではこれら二つの水の流れる課題の解決に寄与するシミュレーション手法を開発した。

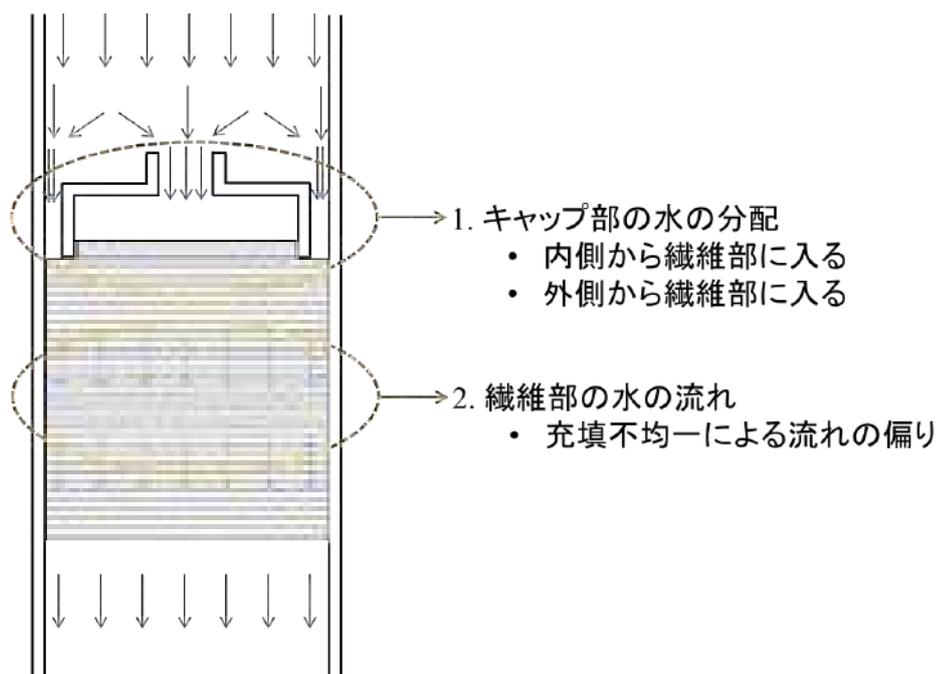


図 2-1-3.1 繊維濾過装置内の水の流れの模式図と水の流れる課題の発生

3-2) 流体シミュレーションによるCAP部分の最適化

1) 解析対象とした繊維濾過装置

実規模の繊維濾過大型実証機（濾過塔の内径 1200mm）を計算対象とした。この繊維濾過装置の全体構造とキャップ部構造を図 2-1-3.2 に示す。この繊維濾過装置にはキャップ部上部にはキャップ部内側に至る通水部が 80A フランジで 4 か所存在する。また、キャップ部内側繊維部面積は 1.08 m²、キャップ部外側繊維部面積は 0.06 m² である。標準的な原水流量は 25 kg/s である。よって、キャップ内側外側の理想的な原水の配分量は、キャップ部内側が 23.7 kg/s、キャップ部外側が 1.3 kg/s である。

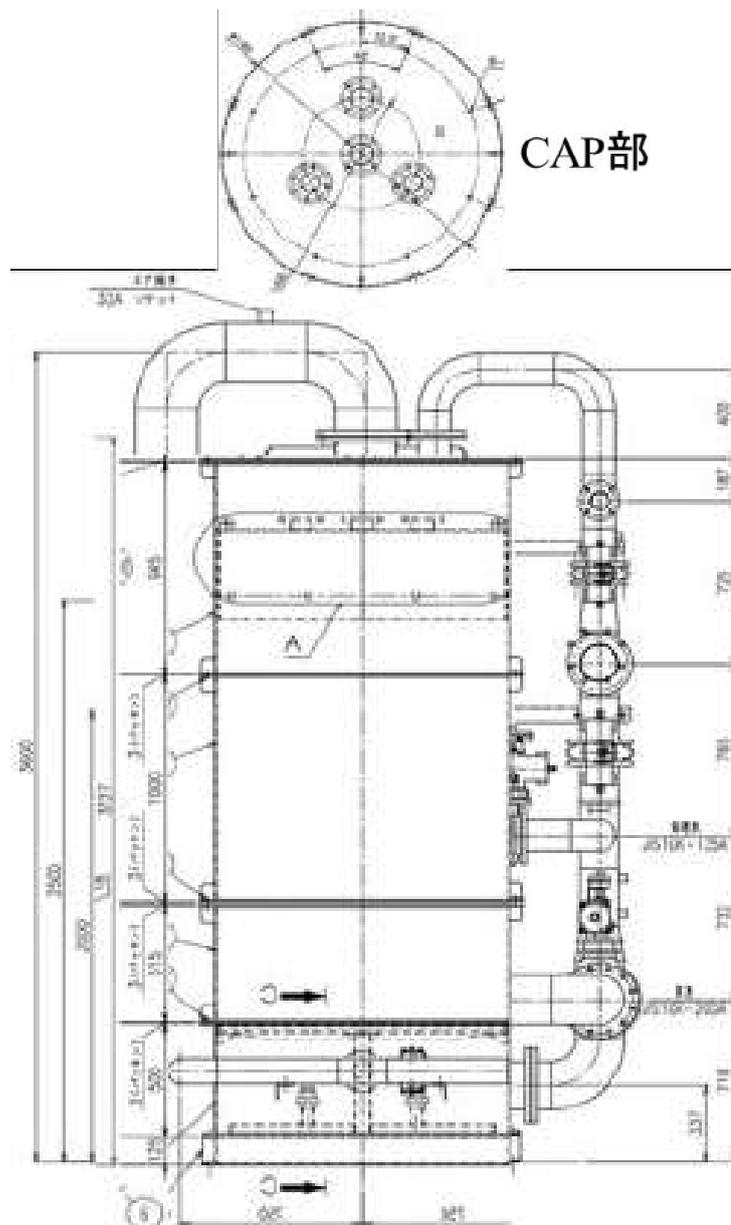


図 2-1-3.2 内径 1200mm 繊維濾過装置の全体構造とキャップ部構造

2) キャップ部の流体解析の方法

キャップ部の流体解析を実施した構造を図 2-1-3.3 に示す。解析した構造は、軸対称を考慮した一部構造(全体構造の 6 分の 1、中心角 60°)とした。解析構造の上端は通水部フランジの上 300 mm、解析構造の下端はキャップ部の内側は繊維濾層上部網の上端、キャップ部の外側はキャップの下端とした。流体解析の入口、キャップ部内側出口およびキャップ部外側出口を図 2-1-3.3 に合わせて示した。現構造は、キャップ上部流路として 80A フランジが 4 か所あり、側面に通水孔がある。この比較構造として、側面の孔の大きさ(孔幅)を 4 倍、8 倍および 12 倍に変化させた構造、キャップ上部流路を 80A フランジ 1 か所に減じた構造(以下、上部流路 1 か所構造)をそれぞれ検討した。流体解析のソフトウェアには、ANSYS CFX 2022 R2 (ANSYS、米国)を用いた。

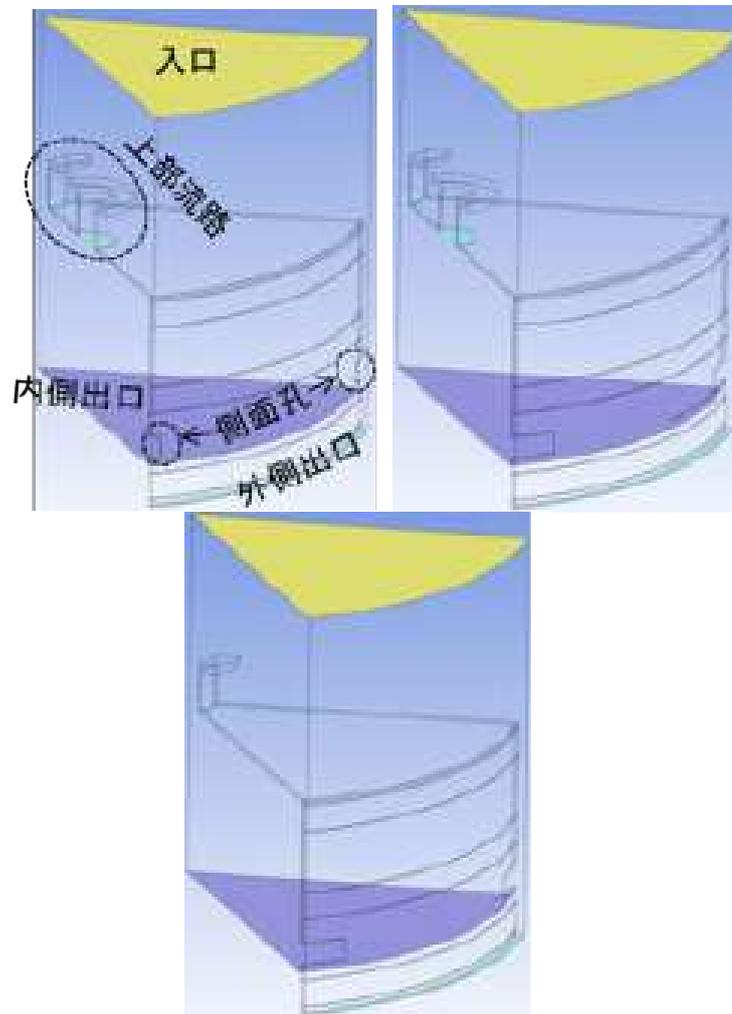


図 2-1-3.3 内径 1200mm 繊維濾過装置の全体構造とキャップ部構造(左:現構造、中:側面孔の幅を拡大した構造および右:上部流路 1 か所構造)

3) キャップ部の流体解析の結果

キャップ部の流体解析を実施した結果(流速ベクトル図)を図 2-1-3.4 に示す。実装置の 6 分の 1 の軸対象構造について、繊維部面積比率から計算したキャップ内側外側の理想的な原水の配分量は、キャップ部内側が 3.95 kg/s、キャップ部外側が 0.22 kg/s である。キャップ部内側外側の流体解析結果では、キャップ部内側の流量は 1.53 kg/s、キャップ部外側の流量は 2.66 kg/s であった。理想流量に対する内側流量の割合は約 40% であった。側面孔の通過流量は 0.10 kg/s であり、側面孔を通じて外側から内側に移動した水の流量は内側流量のわずか約 7% しかなくとても小さかった。

側面孔サイズを拡大した構造および上部流路 1 か所構造の解析結果を図 2-1-3.5 に示す。側面孔を大きくして、内側流量を増大することを狙った構造では、孔サイズを 12 倍にすると孔通過の流量は約 4 倍になった。しかし元々寄与が小さいので内側流量の増大へのインパクトは小さかった。上部流路を 1 か所にすると、内側の流量は半減するものの、側面の孔通過の寄与する割合が相対的に大きくなり、また、側面孔を大きくすることによるその通過流量の増大も大きい。内側流量の理想に対する割合は、現構造が約 0.4 である。側面孔サイズを増大させるとこれが微増し、上部流路を 1 か所にするとこれが半減する。以上のことから、繊維濾過層上面流束を均一化させるために、現構造よりも内側流量を増加させて、内側外側流量比を理想に近づけるには、上部流路を増やす効果が大きく、側面孔の効果は小さいことが明らかになった。

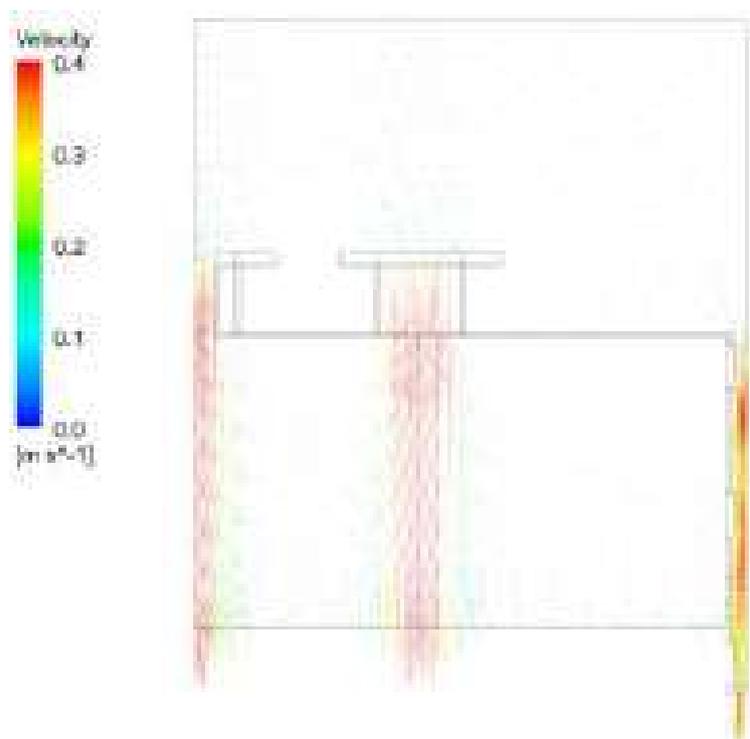


図 2-1-3.4 内径 1200mm 繊維濾過装置のキャップ部周辺の流体解析結果(流速ベクトル)

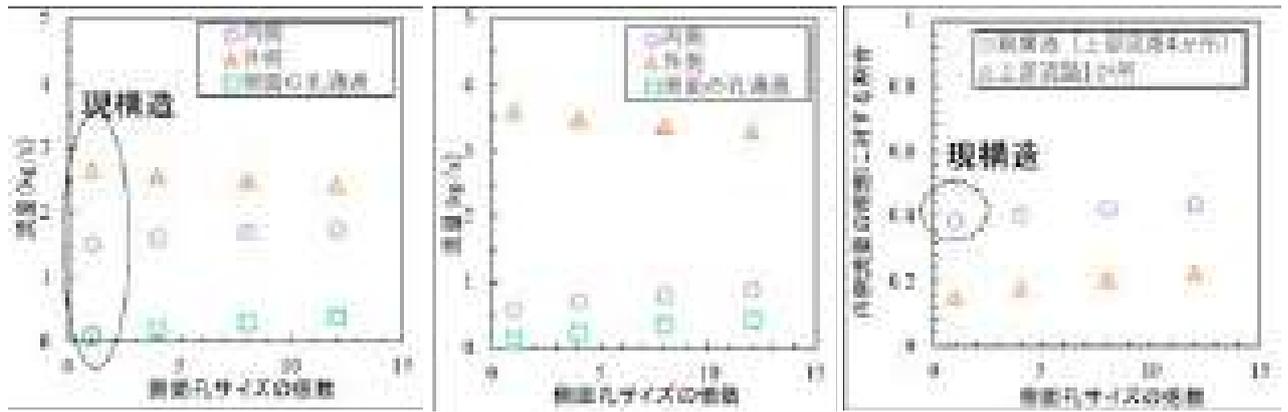


図 2-1-3.5 側面孔サイズを拡大した構造および上部流路 1 か所構造の内側と外側の流量解析の結果(左:側面孔サイズの影響、中:上部流路 1 か所構造および右:内側流量の理想値に対する割合)

3-3) 繊維濾過エレメントの多孔質流シミュレーション

1) 流体解析方法

解析対象とした繊維濾過装置は、内径 $\phi 100$ であり、濾層高さは 200 mm である。エレメント数 5、巻き数 125、エレメント長 1260 mm、充填密度 110 g/L の条件で充填した濾層を CT スキャンしたデータの空隙率に基づき、水平面 19 領域 \times 高さ方向 10 段に分割して、それぞれの領域に CT で得られた空隙率 (ε_{CT}) を定義した。解析の構造および解析のためのメッシュ構造を図 2-1-3.6 に示す。



図 2-1-3.6 繊維濾過エレメントの多孔質流シミュレーションの
解析構造(左)およびメッシュ構造(右)

繊維は約 6 分の 1 の長さに屈曲して充填されているため、大部分(斜めを無視すると 6 分の 5、約 83%)の繊維が水平方向になっていると考えられることから、垂直方向の水流に対して繊維横断方向流を仮定して、圧力損失式を導入した。過去の著者らの研究結果から式(1)を用いて繊維部圧力損失 S_M を計算した。

$$S_M = \frac{7}{6} \frac{\rho}{\left(d_c \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)} u^2 + \frac{150\mu}{\left(d_c \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^2} u \quad (1)$$

$$\varepsilon = \alpha \varepsilon_{CT} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体密度、 u は流速、 d_c は繊維径、 ε は空隙率、 μ は流体粘度、 ε_{CT} は CT スキャンで得られた空隙率、 α は補正係数である。流体解析で得られた濾層部圧力損失 (ΔP_F) を対応する測定結果と比較することで補正係数 α を決定した。

実験で測定される圧力損失には、繊維以外の箇所が発生する慣性抵抗(外部慣性抵抗、 ΔP_O) が加わっていると考えられるため、実験で測定された合計圧力損失 (ΔP_T) からこの外部慣性抵抗 (ΔP_O) を減じて、濾層部の圧力損失の測定結果(以後単に測定結果と呼ぶ)を得た。繊維部以外の外部慣性抵抗 (ΔP_O) は式(3)で計算した。

$$\Delta P_O = K_O u_A^2 \quad (3)$$

ここで、 K_O は外部慣性抵抗の抵抗係数、 u_A : カラム内線流速(LV)である。流体解析による流体解析のソフトウェアには、ANSYS CFX 2022 R2 (ANSYS、米国)を用いた。

2) 流体解析結果

繊維濾過エレメントの多孔質流シミュレーション結果の流速の流線表示と流速の等値線図を図 2-1-3.7 に示す。CT スキャンによる空隙率分布の測定結果を反映させることで、充填不均一による流れの偏りの計算結果を得ることができた。 $K_O=2.1 \times 10^{-3}$ (Pa hr² m⁻²)としたときの、測定結果と流体解析結果 ($\alpha=0.069$) の比較を図 2-1-3.8 に示す。流体解析結果と測定結果はよく一致し $\alpha=0.069$ が決定した。

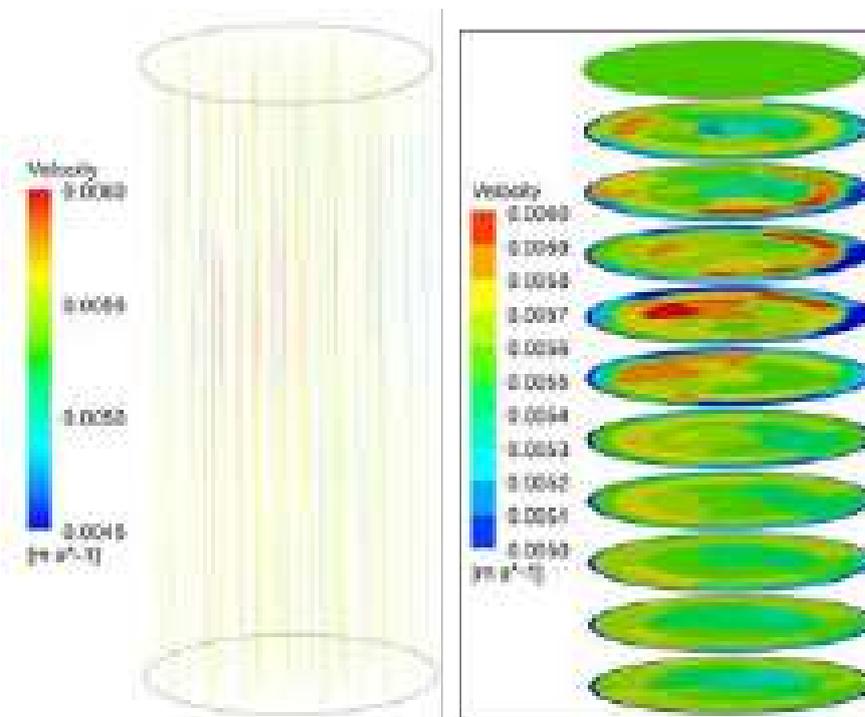


図 2-1-3.7 繊維濾過エレメントの多孔質流シミュレーション結果
(左: 流速の流線表示、右: 流速の等値線図)

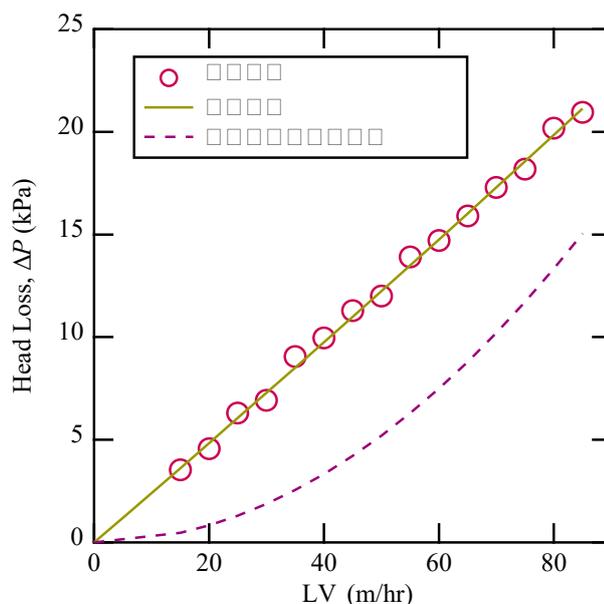


図 2-1-3.8 濾層部圧力損失の測定結果と計算結果の比較

3) 空隙率偏在が解析結果に及ぼす影響

CT スキャンによる空隙率分布(空隙率の偏在)を CFD 解析条件に反映させることが、解析結果に与える影響を評価するために、トレーサー解析を実施した。空隙率が濾層内で分布が無く濾層内において空隙率が均一であると設定した従来のモデル(均一モデル)と本プロジェクトで開発した空隙率の不均一を導入したモデル(不均一モデル)の両方について、それぞれ、定常状態になっている計算結果を初期条件とし、入口から階段状に模擬トレーサー物質を投入し、出口におけるトレーサー物質の濃度の経時変化を得た。トレーサー解析の結果およびそのトレーサー出現時付近の拡大図を合わせて図 2-1-3.9 に示す。

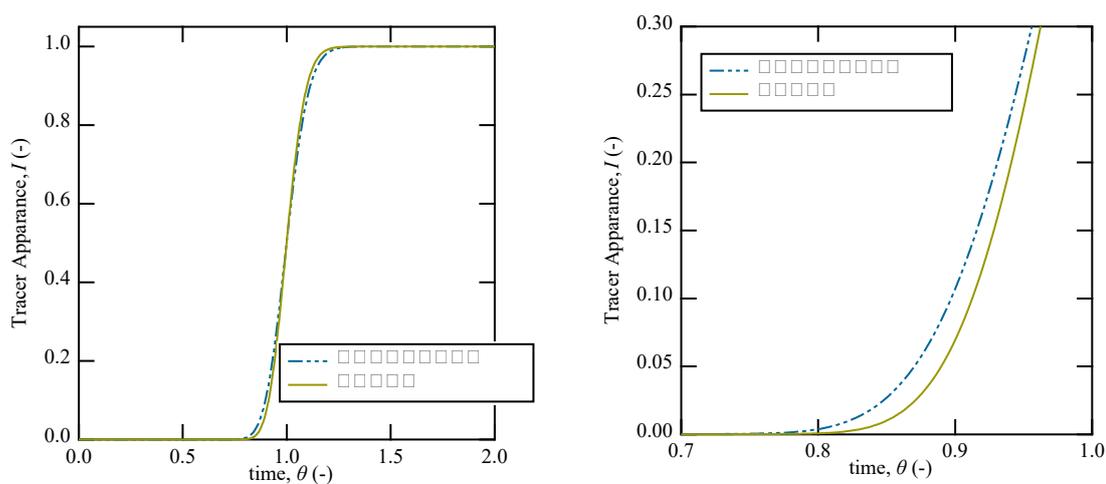


図 2-1-3.9 繊維濾過濾層部のトレーサー解析結果

処理性能に影響を与える短滞留時間流出度合いを示すパラメータとして、トレーサー1%流出時間(θ_{01})やトレーサー10%流出時間(θ_{10})が広く活用されている。本トレーサー解析における θ_{01} および θ_{10} の計算結果を表2-1-3.1に示す。トレーサー1%流出時間は、空隙率均一モデル(従来モデル)が $\theta_{01} = 0.82$ であるのに対して、CT測定結果を反映させた充填率不均一モデルは $\theta_{01} = 0.85$ であり、トレーサー1%流出時間が約3%も早くなった。

表 2-1-3.1 繊維濾過濾層部のトレーサー解析結果
(1%流出時間および10%流出時間)

| | 1%流出時間、 θ_{01} | 10%流出時間、 θ_{10} |
|------------|-----------------------|------------------------|
| 不均一モデル | 0.82 | 0.90 |
| 均一モデル(従来法) | 0.85 | 0.91 |

2-1-4 繊維濾過エレメントの試作試験と濾過特性予測モデルの確立;2021年度 協和機電工業・長崎大学

1)目的

凝集剤なしで1~5 μ mの微粒子を90%以上除去できる繊維濾過装置の製品化のために、各種の繊維を様々な充填条件で使用した場合の濾過特性を評価する。評価においては、スケールアップや違うタイプの濾過対象水へ適切に対応できるようにするために小型の実験装置を用いて基礎データを十分に収集する。また、早期の事業展開を進めるために、実規模の実験機を用いて実際のユーザーニーズがある水での濾過特性評価と耐久性の確認を行う。このような形で、粒子除去率と圧力損失の試験データを評価して、高い微粒子除去率が得られるエレメント条件を設定する。

2)実施内容と結果の要約

濾過塔直径が100mmの小型実験機及び小型モデル機等を使用して、様々な繊維条件での濾過差圧と微粒子除去性能を調査した。アクリル標準粒子を用いた試験では5 μ mまでの粒子の除去性能を確認し、1.5 μ mと3 μ mと5 μ mの個数を基準とした存在割合が10:5:1の場合の濾過対象水を想定した場合は、エレメント長さが1.2mの場合には、懸濁物質量全体としての除去率は98.6%となると算出された。実用的な試験条件で実際の水で性能を確認するために、繊維濾過中型実験機を導入して工業用水の濾過における長期性能を確認した。その結果、1年間は濾過差圧の上昇や除去率の低下は見られずに良好な性能を維持できることを確認した。2-2-1で実施した組み合わせ繊維による繊維エレメントの耐久性能向上と同時に、組み合わせ繊維での微粒子除去性能を確認した。PET繊維にナイロン繊維を1:1の割合で撚り合わせた場合には、PET繊維のみと同等以上の微粒子除去性能を確認した。

3) 具体的な実施内容

3-1) 繊維濾過小型機を使った粒子除去率と圧力損失の確認試験

本事業では様々なタイプの繊維エレメントを試作し、それを使って小規模の装置での通水試験を行い、微粒子の除去性能と濾過時の圧力損失(濾過差圧)を確認し、最終的には粒子径が $5\mu\text{m}$ 未満の粒子を90%以上除去できる性能を目指した。

実験データを得るため、図 2-1-4.1 に示した濾過塔の直径が100mmの繊維濾過実験機を使用し、標準条件では繊維エレメントを10エレメント設置して流速(LV)を40から80m/hに設定して性能評価を行った。つまり、標準的な濾過流量としては5.2L/minから10.5L/minの条件となる。



図 2-1-4.1 濾過塔直径が100mmの繊維濾過実験機の外観

得られた実験データの一例として、長さが0.7mの繊維エレメントを10エレメント使用し、CAPで繊維を圧縮して充填密度を80,110,140g/Lとしたときの、濾過流量を変化させた際の濾過差圧の変化を確認した結果を図.2-1-4.2に、長さが1.0mの繊維エレメントを10エレメント使用した場合の同様の結果を図 2-1-4.3に示す。

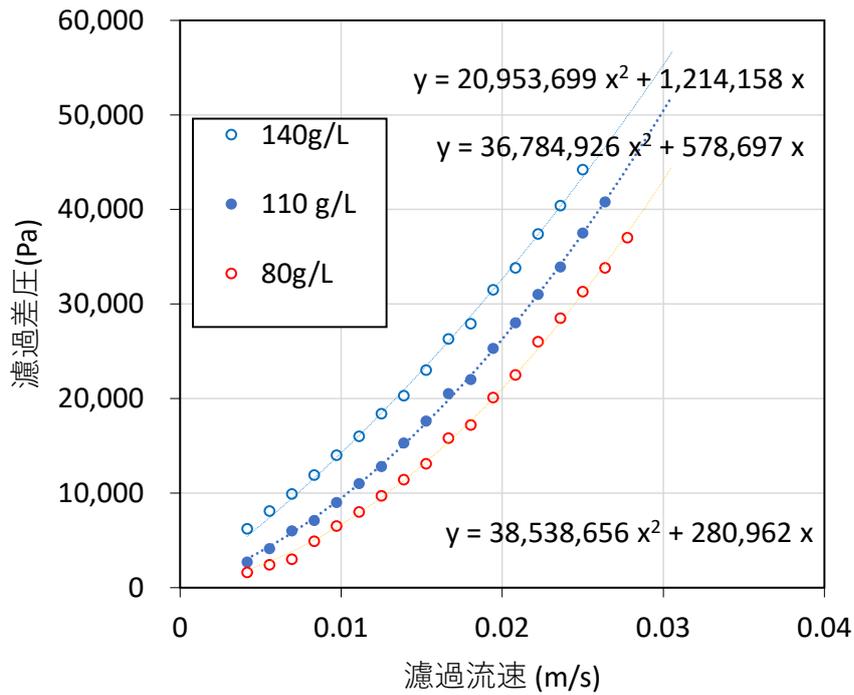


図 2-1-4.2 濾過塔直径が 100mm の繊維濾過実験機での繊維エレメント長さ 0.7m の場合の濾過流速と濾過差圧の関係

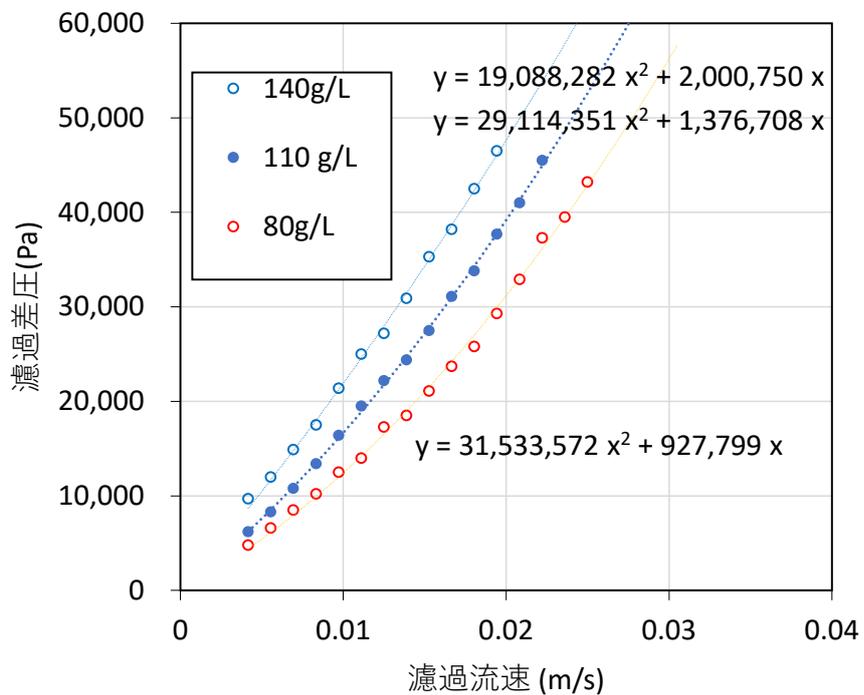


図 2-1-4.3 濾過塔直径が 100mm の繊維濾過実験機での繊維エレメント長さ 1.0m の場合の濾過流速と濾過差圧の関係

得られた結果のように、同じ充填密度で同じ濾過流速でも、もともとの繊維エレメントの長さが長く設置本数は少ない代わりに圧縮率（もともとのエレメント長さに対する圧縮後の濾層高さ）が高い方が、濾過差圧は高くなることが確認できた。これは2-1-3でも示唆されているように、圧縮率が高いとその分だけ濾過の流れに対して繊維が横向きになっている率が高くなるため、繊維を横切る形での水の流れになるために抵抗が高くなるためだと考えられ、その推論が正しいことが証明された。つまり、少ない消費エネルギーで濾過を行うためには、繊維エレメントの長さを短くして、設置本数を多くして圧縮率を低下させた方が良いこととなるが、微粒子除去率の観点ではその逆となると考えられる。微粒子除去においては、微粒子を繊維に接触させる確率が高いほどに除去率が高くなると考えられるため、圧縮率が高く繊維が流れに対して横向きになっている方が適していると考えられる。これまでの研究においても、繊維エレメントの長さが 0.7m のように短い場合には、充填密度を高くしても高い除去率は得にくいことがわかっているため、本事業においても繊維エレメントの長さは 1.0m 以上を基本とすることとした。

次に、長さが 1.0m の繊維エレメントを使って、設置本数を変えた場合の、充填密度別の濾過流速に対する濾過差圧を確認した。結果を図 2-1-4.4 に示す。

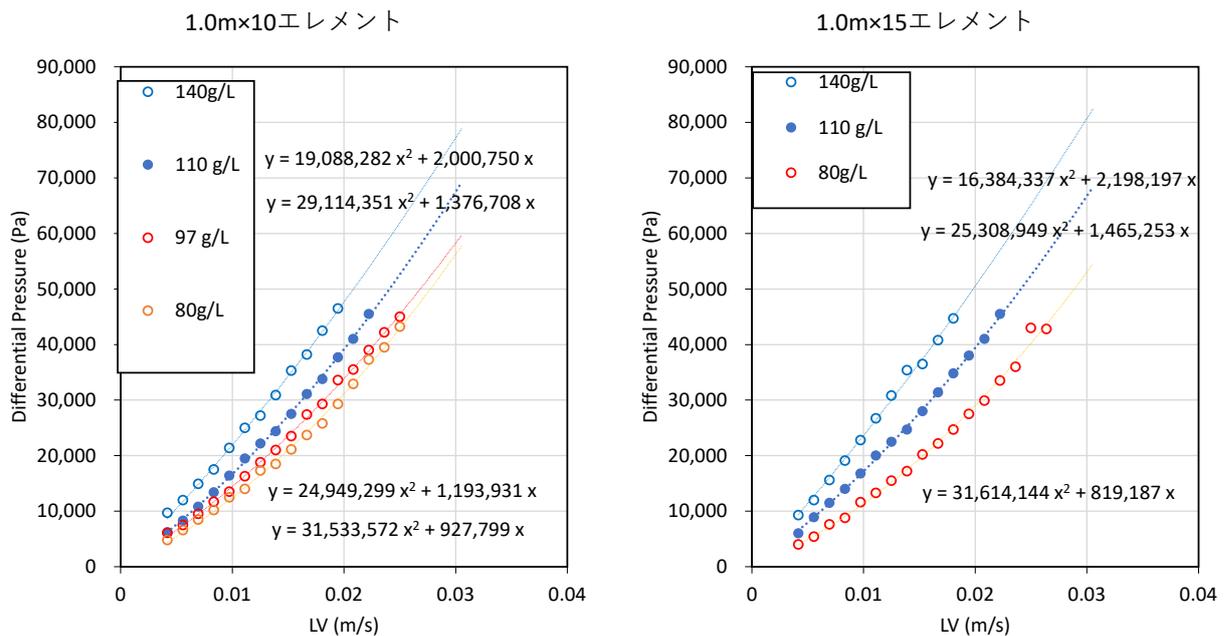


図 2-1-4.4 濾過塔直径が 100mm の繊維濾過実験機での繊維エレメント長さ 1.0m の場合の濾過流速と濾過差圧の関係(左: 10 エレメント、右: 15 エレメント)

このように、エレメント長さが 1.0m の場合では、10 エレメントと 15 エレメントでの明確な差は見られなかった。特に標準的な充填密度である 110g/L の場合にはほぼ同じ値を示していることから、実際の装置の場合でも 10 エレメント相当と 15 エレメント相当では濾過差圧及び微粒子除去性能には大きな差は生じないと考えられる。

次に、長さが 1.3m の繊維エレメントを用いた場合の結果を図 2-1-4.5 に示す。

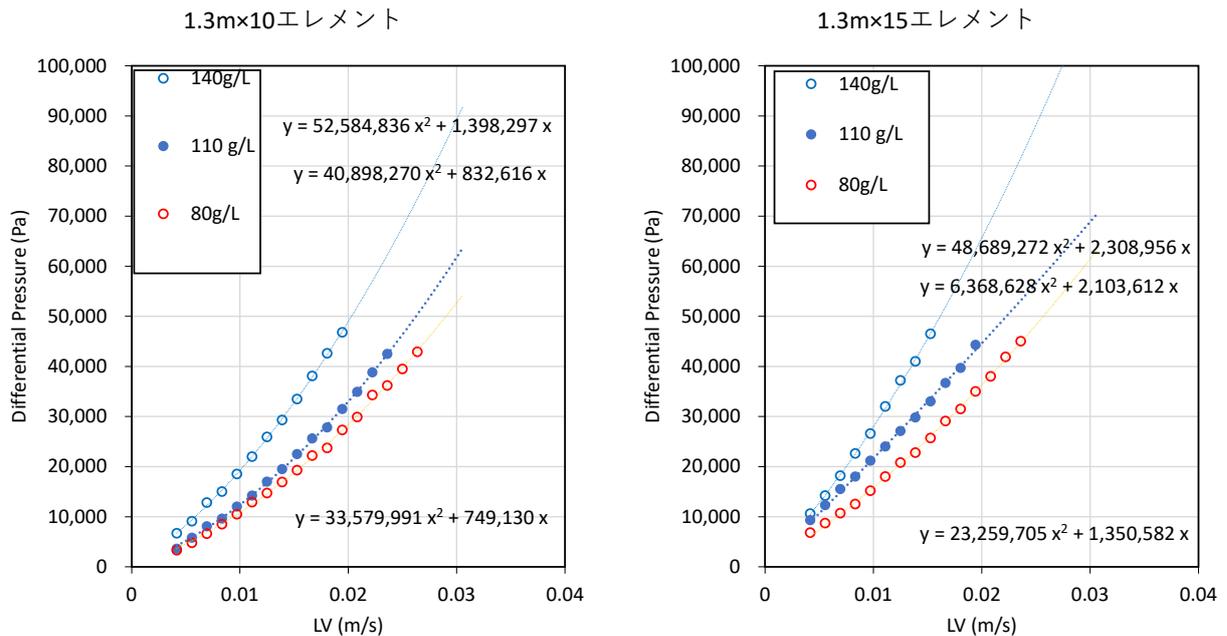


図 2-1-4.5 濾過塔直径が 100mm の繊維濾過実験機での繊維エレメント長さ 1.3m の場合の濾過流速と濾過差圧の関係(左: 10 エレメント、右: 15 エレメント)

この結果においては、より低い充填密度の方が、10 エレメントと 15 エレメントの差が小さくなることが分かった。また、15 エレメントではグラフがより直線的な比例関係に近づいていると判断することが出来た。これは先のエレメント長さ 1.0m の場合でも同様のことが言える。このことは、繊維濾層内の空隙(ポイド)の有無によるものだと考えられる。ポイドは、流体が加速する距離を作ってしまうため、流体の速度の二乗に比例する慣性抵抗を生じる。繊維設置本数が増えると、圧縮率が低くても繊維間距離が小さくなる。つまり、圧縮前の状態においても繊維は密になることから、圧縮前の状態でも繊維の充填状況がより均一になろうとして、その状態で圧縮をかけるため、圧縮後の状態も濾層全体が均一な状態に近づくため、濾層内にポイド(空隙)が発生しにくいのだと推測する。

また、図 2-1-4.4 と図 2-1-4.5 を比較すると、15 エレメントの場合には明確な差は判断できないが、10 エレメントの場合では 1.3m の方が濾過差圧は低くなっていることがわかる。0.7m と 1.0m の比較では、エレメント長さが長い方が濾過差圧は高くなる傾向であったが、1.0m と 1.3m の比較では、エレメント長さが短い方が濾過差圧が高いということになったため、実験状況によっては繊維充填のムラが発生しやすく、一定の性能を発揮しづらいのではないかという懸念が生じた。

次に、濾過塔直径が 100mm の小型実験機と、濾過塔直径が 16mm のミニモジュールでの性能の違いを確認した。濾過塔サイズが異なる場合においても、その濾過塔サイズの比率に応じて繊維設置本数を調節するだけであるため、濾過塔サイズの違いによる性能の差は、濾層そのものの条件によるものではなく、断面積当たりの壁面長の影響によるものの方が大き

いと考えられる。断面積当たりの壁面長が長い場合には、壁面を沿う形で繊維に接触する頻度が低い流れの割合が大きくなると考えられ、それによって濾過時の圧力損失も低くなると予想される。繊維エレメント長さを 1.0m として、濾過塔直径が 100mm の濾過塔には 10 エレメントの繊維を設置する条件を基本として、断面積当たりの繊維設置本数が同等となるように濾過塔直径 16mm の濾過塔に繊維を充填した場合の濾過流速当たりの濾過差圧の確認試験結果を図 2-1-4.6 に示す。

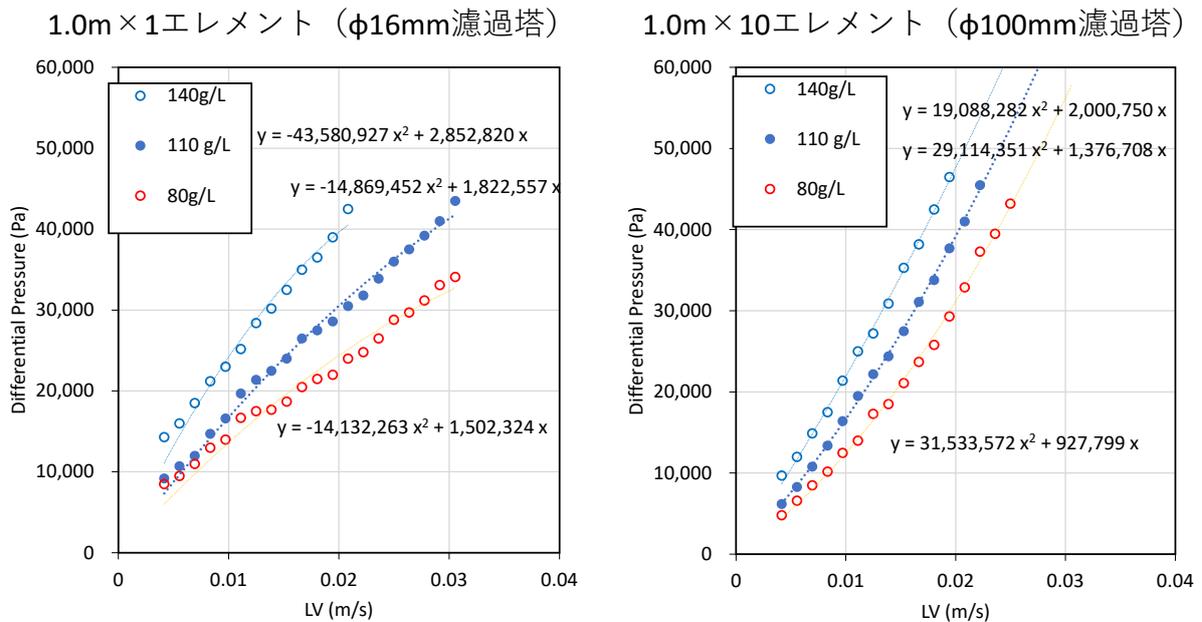


図 2-1-4.6 濾過塔直径が 16mm と 100mm での繊維エレメント長さ 1.0m の場合の濾過流速と濾過差圧の比較(左:濾過塔直径 16mm、右:濾過塔直径 100mm)

結果としては、予想通りに濾過塔直径が小さい 16mm の方が濾過差圧は低くなった。特に低い充填密度の場合にはその差が顕著となった。このことから、濾過塔直径を大きくしていくと濾過水量当たりの壁面流の比率は小さくなることから、処理水質は向上すると考えられる。この変化は、濾過塔サイズが大きくなればなるほどにというものではなく、ある程度の大きさ以上ではほぼ一定の性能に集約されると予想される。これまでの試験結果から、濾過塔直径が 300mm 以上ではそのように性能が一定値に近づくと予想しており、今後の研究でその検証を進めたい。

これらの繊維条件別の濾過特性を評価するためには、無数の条件での濾過試験を行う必要がある。そのため本事業では、以前より使用していた小型実験機とは別に、繊維濾過小型モデル機として、全自動運転と遠隔でのデータ取得が可能な濾過塔の直径が 100mm の実験機を導入した。その外観を図.2-1-4.7 に示す。



図 2-1-4.7 繊維濾過小型モデル機の外観

微粒子除去性能の確認試験については、上記の濾過差圧の確認試験と並行して実施した。エレメント長さは従来使用していた設定値を基本としたため、0.62m、0.94m、1.2m として、エレメント設置本数は 10 エレメントとした。濾過流速は LV=40m/h 相当の 5.2L/min として、充填密度を 80g/L、110g/L、140g/L とした場合の除去率を調査した。その結果を表 2-1-4.1 に示す。エレメント長さが 0.92m 以上であれば、 $3\mu\text{m}$ 以上のアクリル粒子は 100%除去することが確認できた。 $1.5\mu\text{m}$ の粒子の除去率は下がり、エレメント長さが 0.92m の場合は平均で 54%、エレメント長さが 1.2m の場合は平均で 62%となった。

一般的に、実際の濾過対象水においては、粒子の存在割合は体積比率では大きな粒子の比率が高く、個数比率では小さい粒子の比率が圧倒的に高い。一例として、 $1.5\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ の個数を基準とした存在割合が 10:5:1 の場合の濾過対象水を想定した場合、エレメント長さが 1.2m の場合には、懸濁物質量全体としての除去率は 98.6%となると算出される。(エレメント長さが 0.92m の場合は 98.3%)

表 2-1-4.1 繊維長さが 0.62m、0.94m、1.0m の場合の濾過塔直径 100mm での

アクリル粒子を使った除去率確認試験の結果

| | エレメント長さ 0.62m の場合の除去率 (%) | | | | |
|--------|---------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| | 1.5 μ m | 3 μ m | 5 μ m | 10 μ m | 20 μ m |
| 80g/L | 37.8 | 98.5 | 100 | 100 | 100 |
| 110g/L | 38.6 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 140g/L | 59.1 | 98 | 100 | 100 | 100 |

| | エレメント長さ 0.94m の場合の除去率 (%) | | | | |
|--------|---------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| | 1.5 μ m | 3 μ m | 5 μ m | 10 μ m | 20 μ m |
| 80g/L | 50 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 110g/L | 42.5 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 140g/L | 70 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | エレメント長さ 1.2m の場合の除去率 (%) | | | | |
|--------|--------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| | 1.5 μ m | 3 μ m | 5 μ m | 10 μ m | 20 μ m |
| 80g/L | 48.9 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 110g/L | 63.6 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 140g/L | 74.5 | 100 | 100 | 100 | 100 |

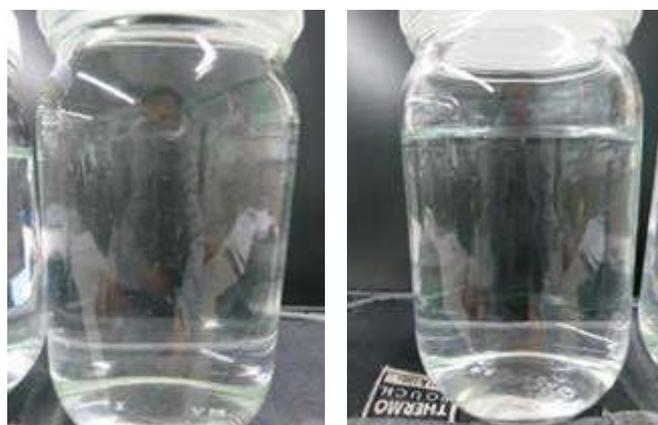
3-2) 繊維濾過中型実験機を使った実際の工業用水での性能確認

実用的な使用条件で、実際の濾過対象水での微粒子除去性能および濾過差圧の状況を確認するため、**図 2-1-4.8** に示す濾過塔の直径が 490mm の繊維濾過中型実験機を構築し、福岡県内の容器製造工場で、工業用水に含まれる微粒子除去を目的とした実証試験を行った。この工業用水は周辺の貯水池及び河川水を原水として凝集・砂濾過処理が行われて作られた工業用水であるため、降雨時には水質の悪化が懸念されていた。実際にこの工業用水を工場内の製品のプレ洗浄に使用するために、限外濾過膜(UF 膜)で濾過してから使用していたのだが、工業用水の悪化タイミングに起因してこの UF 膜が頻繁に目詰まりするという問題が発生していた。



図 2-1-4.8 繊維濾過中型実験機の外観

実験機を設置する前の事前調査では、濾過対象水の水質調査及び小型実験機を使った事前試験によって、繊維濾過処理による小型での性能確認を行っていた。**図 2-1-4.9** には、濾過対象水と小型機での繊維濾過処理水の外観を示し、**図 2-1-4.10** にはそれぞれの水を濾紙で濾過した際の濾紙の外観と電子顕微鏡での微粒子の観察結果を示す。



| | 濾過対象水 | 繊維濾過処理水 |
|----------------|-------|---------|
| 懸濁物質 (mg/L) | 2.4 | 0.9 |
| 濁度 (NTU) | 2 | 1 |
| TOC (mg/L) | 1.352 | 0.827 |

図 2-1-4.9 左:濾過対象水、右:繊維濾過処理水 の外観及び水質

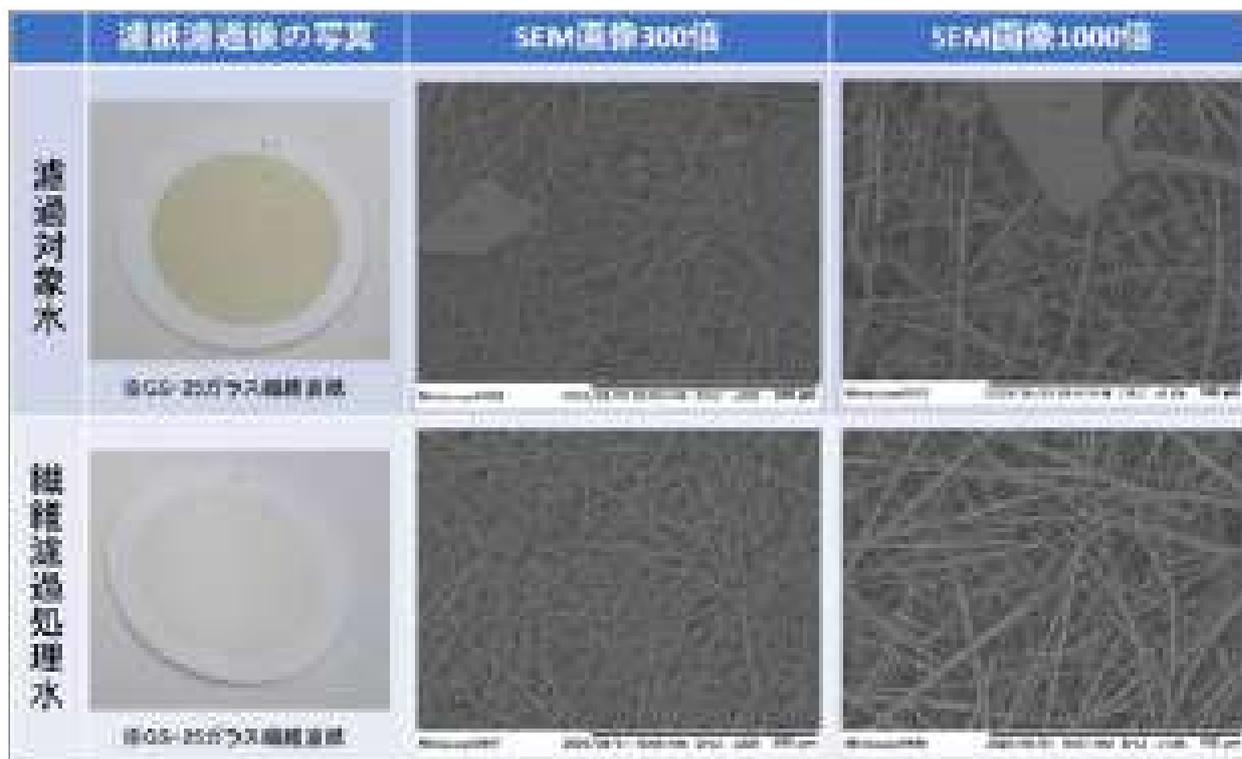


図 2-1-4.10 濾過対象水と繊維濾過処理水の微粒子観察結果

濾過対象水は、通常の濁度は 2NTU 程度で清澄な水ではあるが、電子顕微鏡での観察結果からわかるように、大小さまざまな粒子を含んでいることが分かった。これを繊維濾過小型実験機で処理すると、ほとんどの粒子が除去され、懸濁物質量としては除去率 62.5% となった。前項でも明らかとなったが、小型の濾過塔では高い除去率は得にくいことが示唆されているため、実用サイズの濾過塔直径 490mm の繊維濾過中型機での性能評価を実施した。

1) 繊維濾過中型実験機の濾過性能の確認

繊維濾過中型実験機は、2021 年 1 月に福岡県内の実証場所に設置した。試運転後には運転当初の濾過性能を確認した。この装置は、直径 490mm の濾過塔に、2-2-1 に示す複層化繊維濾過モジュールとして、上層が繊維直径 $38\mu\text{m}$ で、下層が繊維直径 $19\mu\text{m}$ の繊維エレメントを充填した。濾過性能の要となる下層の繊維はエレメント長さ 1m の繊維を、濾過時には充填密度が 110g/L となるように CAP で圧縮している。標準の濾過流速は $45\text{m}^3/\text{h}$ として、濾過流量 $8.5\text{m}^3/\text{h}$ での運転を行った。事前の濾過対象水の水質分析結果から、濾過工程時間は 6 時間以上を確保できると判断したため、濾過工程時間 6 時間、逆洗時間 6 分で連続的に自動運転できるシステムを構築し、遠隔監視システムによって運転データを取得した。

図 2-1-4.11 には初期の濾過特性を表す運転データを示し、図 2-1-4.12 には、下層繊維の、運転時の汚れの付着状況を示す。

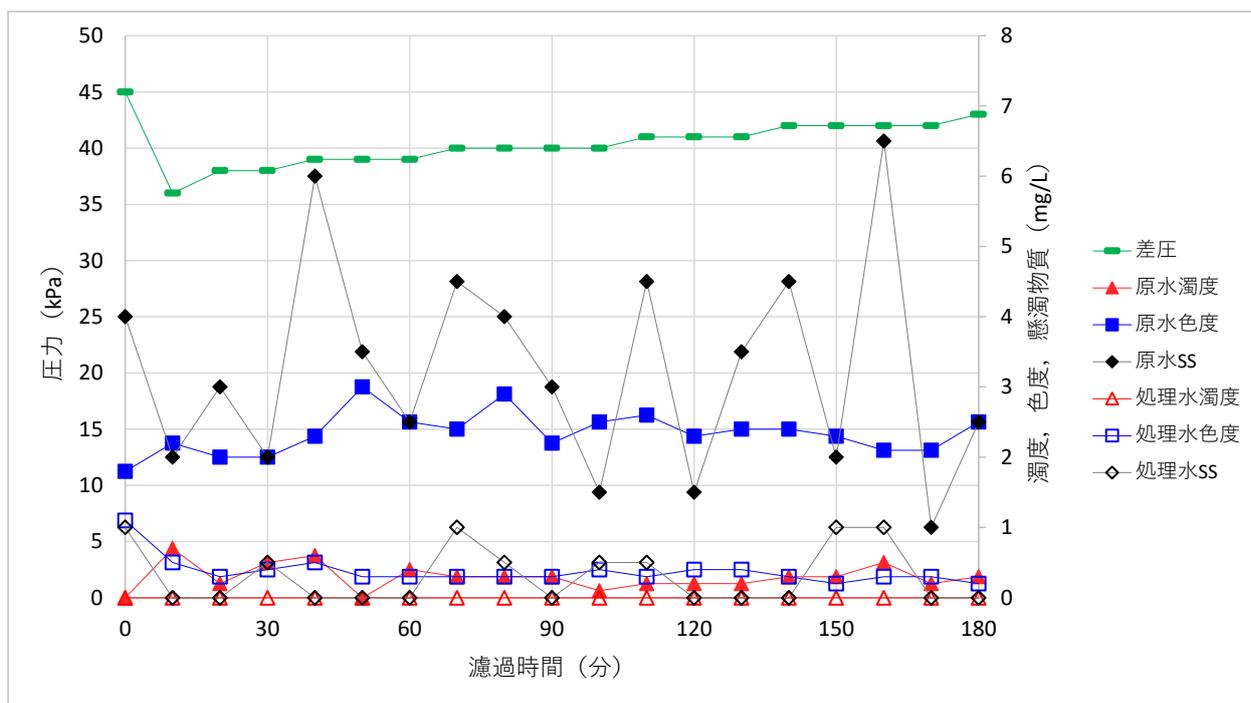


図 2-1-4.11 運転初期の濾過特性データ

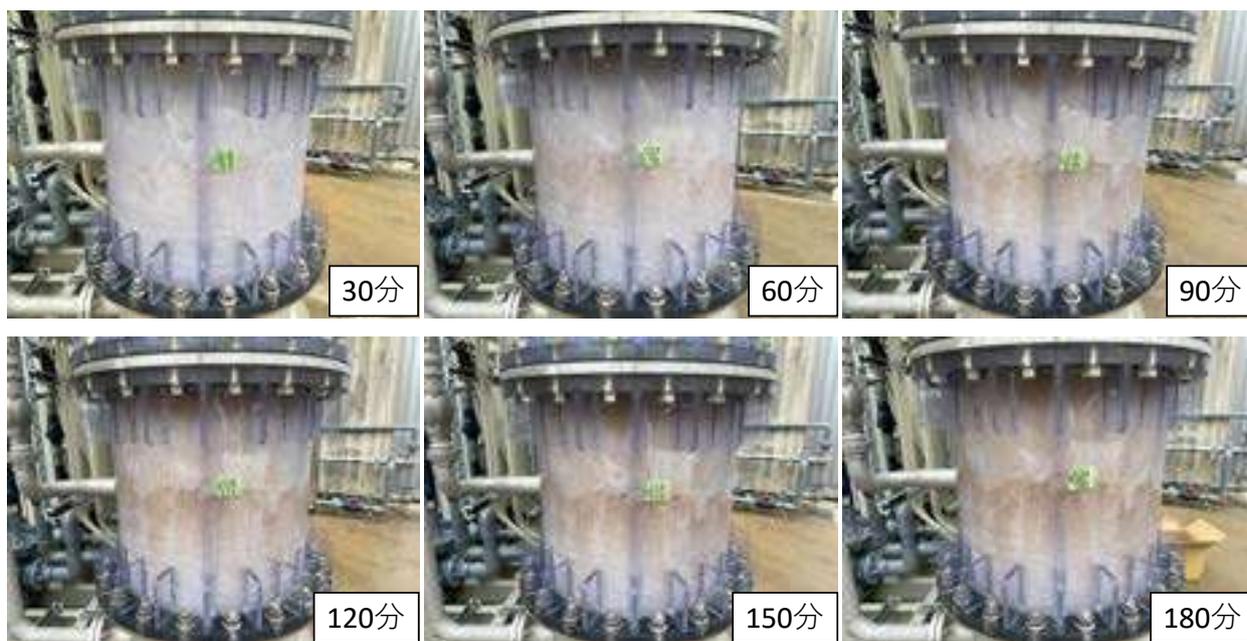


図 2-1-4.12 運転初期の繊維の汚れ進行状況

上記の結果の通り、運転初期の濾過特性としては、懸濁物質濃度の除去率は97.5%となり、濾過開始時の濾過差圧がおよそ36kPaで、180分後の濾過差圧はおよそ43kPaとなった。これらは運転初期としては適切な性能を示し、小型実験機で得られたテスト結果を上回る性能であることが確認できた。繊維への汚れの付着状況の観察では、上層の太い繊維に比べて下層の細い繊維が汚れを多く補足していることが確認され、全体的に概ね均一に濾層が使われていると判断できた。

この濾過対象水に含まれる成分の分析を行った結果を図 2-1-4.13 に示す。分析方法としては、濾過対象水を濾紙濾過し、走査型電子顕微鏡の元素分析機能を用いて濾紙上の微粒子の分析を行った。

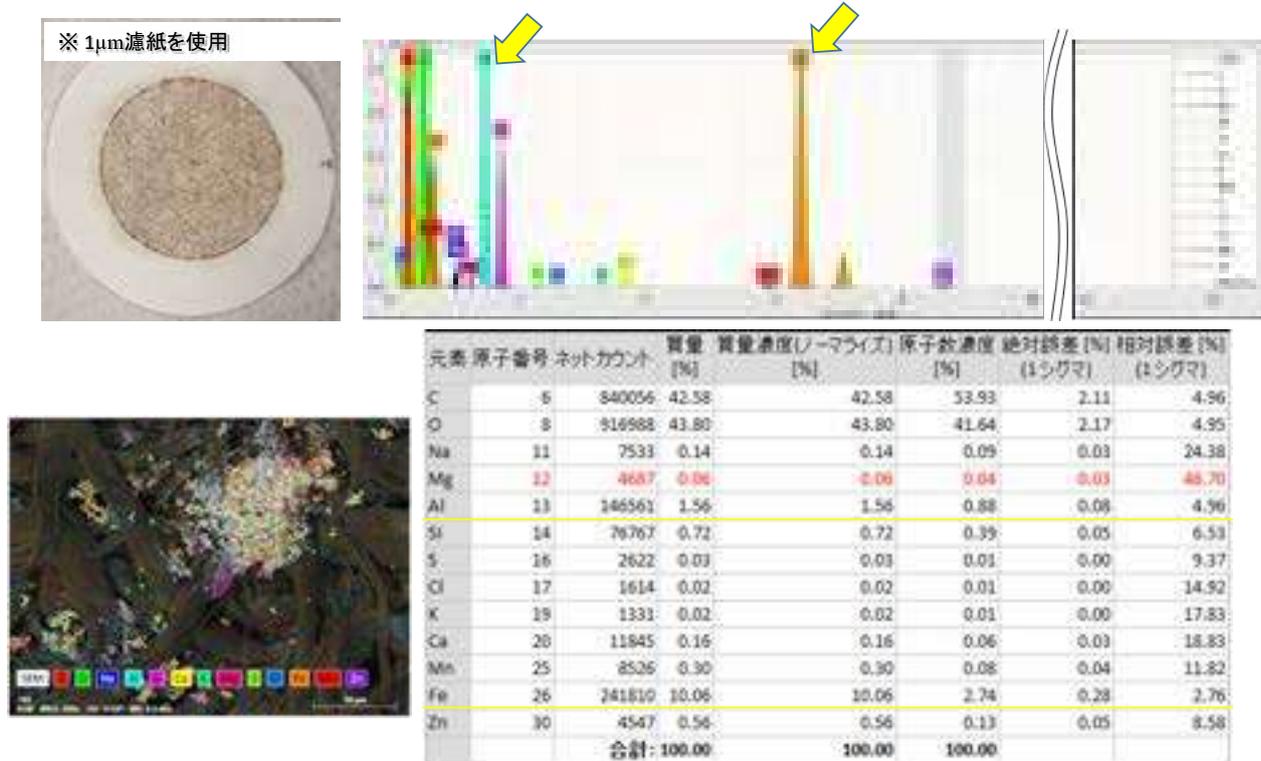


図 2-1-4.13 濾過対象水の元素分析結果

分析の結果、濾過対象水に含まれる微粒子の成分としては、塩類とアルミニウムおよび鉄分が多く検出された。濾過対象水及び濾紙の色を見ても赤茶色であることから鉄やマンガンなどによる着色であると推測される。この水は周辺の河川水及び貯水池の水を凝集砂濾過して作られた工業用水であるため、凝集剤由来のアルミニウムが混入していることが予想される。

次に、初期の逆洗による性能回復特性を評価した。これは、逆洗排水の懸濁物質濃度を測定し、逆洗時間が満了するまでに逆洗排水の濃度が十分に低下しているかを確認するものである。逆洗時には繊維濾過処理水を濾過塔の下部へ供給し、同時に逆洗用空気も供給して繊維の下から上の上向流で洗浄を行う。上記のように、本実証場所の濾過対象水に含まれる微粒子は無機系の固体粒子が主要なものである。それらは通常の逆洗による物理的な洗浄効果のみでも排出されやすいと考えられるため、逆洗時には濾過塔内の藻の繁殖を抑制するための微量の次亜塩素酸ナトリウム(NaClO)のみしか添加していない。

6 分間の逆洗工程中に得られた逆洗排水の分析結果を図 2-1-4.14 に示す。6 分間の逆洗時間が満了する頃には逆洗排水の懸濁物質濃度は 10mg/L 程度まで低下しており、繊維に付着した汚れがほとんど除去されたと判断できた。

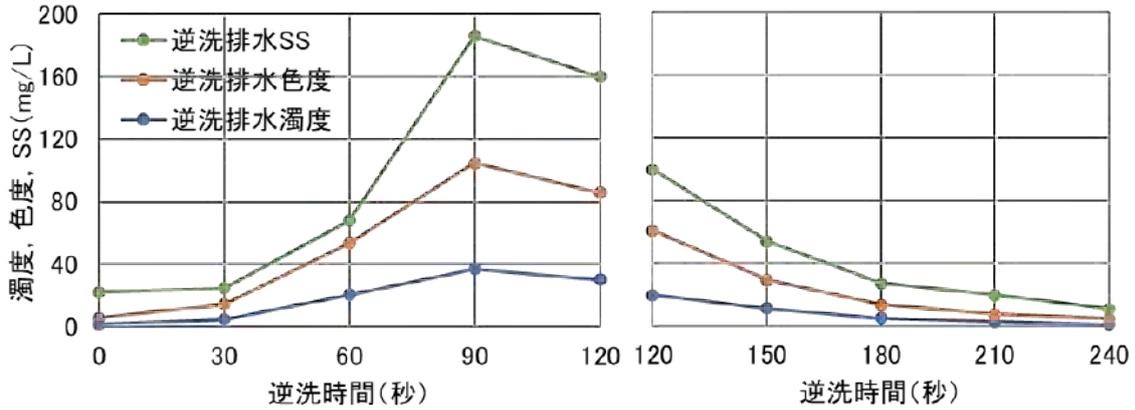
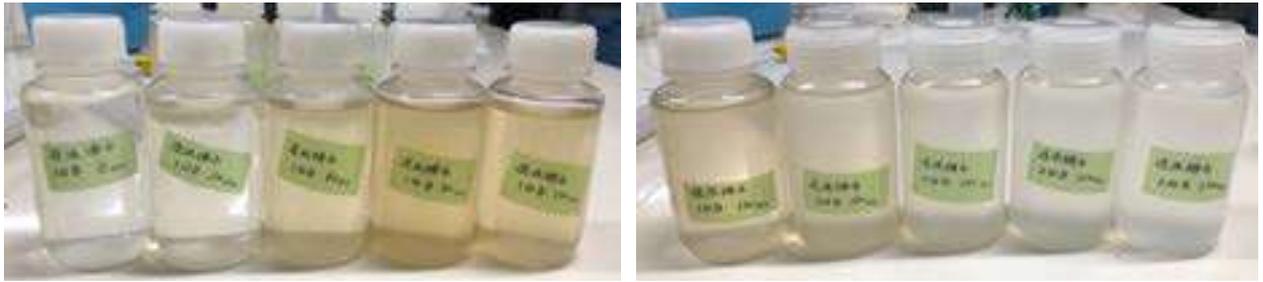


図 2-1-4.14 逆洗排水の分析結果

これらの確認によって、繊維濾過中型実験機の初期性能は問題なく発揮できていると判断できたため、連続運転での性能評価に移行した。連続運転は2021年1月13日から2021年12月31日を評価対象として、データ整理を行った。得られた結果を図2-1-4.15に示す。

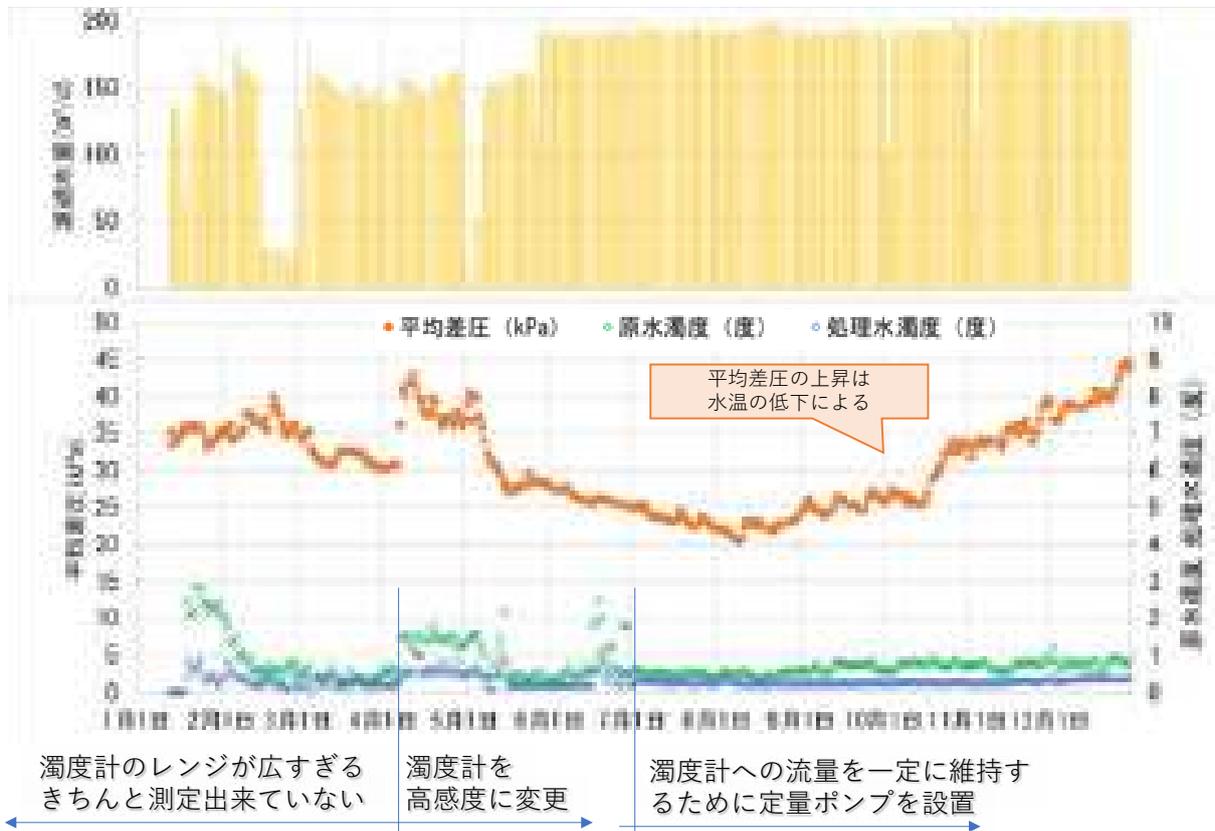


図 2-1-4.15 2021年1月13日から2021年12月31日までの連続運転データ

懸濁物質濃度は、連続的に計測可能な光学式のセンサーでは正確に測ることができず、手作業での分析が都度必要となる。そのため、連続運転では濁度センサーによる濾過特性の評価を基本として、定期的な手作業での懸濁物質濃度の確認を行った。濁度センサーについては、2021年4月までは通常の感度のセンサーをしており、通常濁度が2NTU以下の水では安定して測定できないことが分かったため、2021年4月以降は高感度のセンサーに交換して計測を続けた。

図 2-1-4.15 のように、1 年間で微粒子除去性能は大きくは変化していないことが確認されたが、濾過差圧については、水温の変化による水の粘度の変化に応じた増減が表れているため、水温補正を行った結果を図 2-1-4.16 に示す。水温補正では、気象庁が提供している気象データより、実証場所周辺の気温データを用いて、得られた平均差圧の月の水温を 25°C に換算したときの水の粘度に置き換えて濾過差圧を表した。

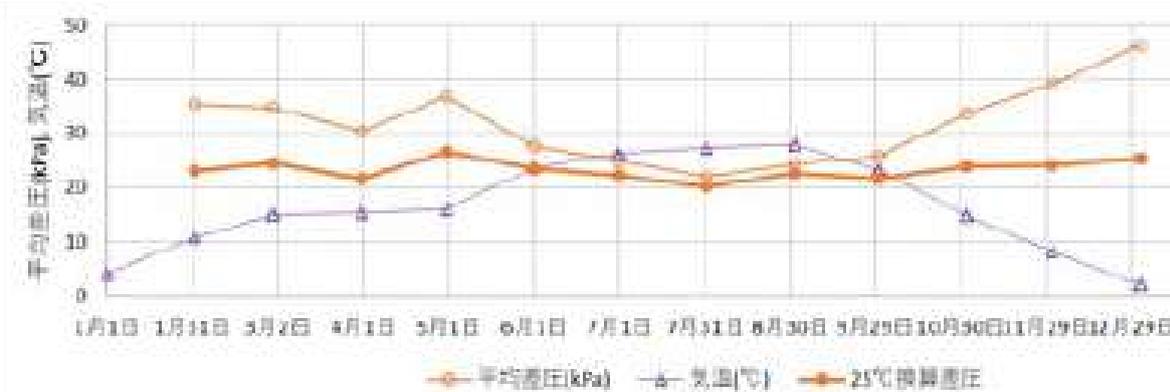


図 2-1-4.16 気温データを用いて水温補正した差圧のデータ

この結果、濾過差圧の変化は水温の変化に依存したものがほとんどであり、繊維の目詰まり等による差圧上昇は進行していないことがわかる。つまり、自動運転条件及び逆洗条件が適切であり、繊維濾過の性能を長期間維持することができていると判断できた。

また、連続運転中には、濾過対象水の濃度が日によって異なることを確認した。特に降雨後には濃度が高くなる傾向があることがわかった。連続運転開始から1か月が経過した2021年2月16日(降雨翌日)には濾過対象水と繊維濾過処理水の水質の確認を行った。測定結果を図 2-1-4.17 に示す。測定結果では、濾過対象水の懸濁物質濃度が 3.8mg/L で、繊維濾過処理水は 0.3mg/L となった。これにより、連続運転後1か月の時点でも、懸濁物質濃度の除去率では 91% が得られていることを確認した。

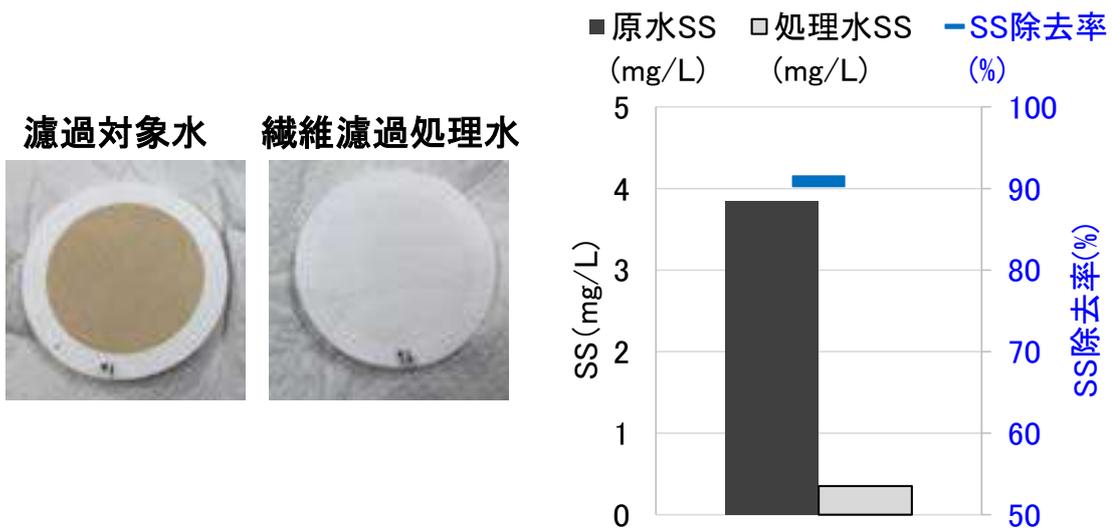


図 2-1-4.17 2021 年 2 月 16 日の水質測定結果

3-3) 組み合わせ繊維や繊維条件変更による性能向上

2-2-1などにも関係するが、繊維の耐久性の向上を進める際に、微粒子の除去性能が低下することは、望ましいことではない。そのため、2-2-1で取り組んだ組み合わせ繊維による耐久性の向上と並行して、組み合わせ繊維を使った場合の微粒子除去性能を確認することとした。

組み合わせ繊維は、従来の PET 繊維にナイロンの繊維を組み合わせることで、長期的な繊維の耐久性を向上することを狙ったものである。微粒子除去の観点では、PET とナイロンでは表面のゼータ電位が異なるため、物質間相互作用による粒子除去性能は異なると考えられる。一般的に、無機物質や金属粒子はプラスの電荷となっており、自然界に存在するような有機物等はマイナス電荷となっていることが多い。ナイロン繊維はマイナス電荷が高めの PET 繊維に比べてゼータ電位がニュートラル寄りであるため、PET 繊維では除去しづらいマイナス電荷の微粒子の有機物などの除去では有利であると考えられる。

PET 繊維とナイロン繊維の組み合わせについては、各種の方法で試作を行い、独自の組み合わせ繊維としての知見を得ることができた。本事業内では、従来の PET 繊維 1 に対して 0.5~1 のナイロン繊維を組み合わせることで、従来の PET 繊維と同等以上の微粒子除去性能を確保できることを確認した。図 2-1-4.17 には、組み合わせ繊維の外観を示す。

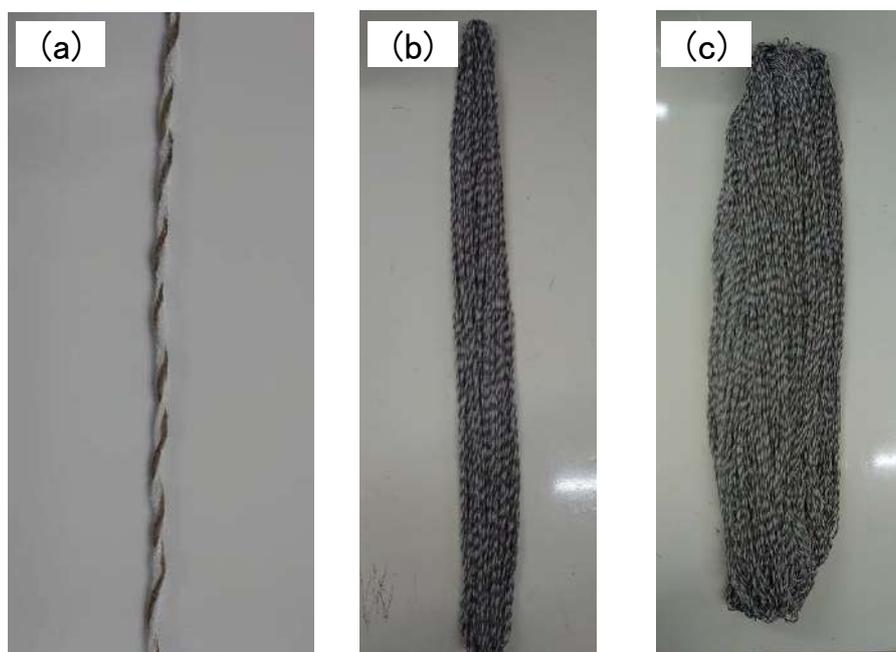


図 2-1-4.17 組み合わせ繊維の外観

(a)1 本の組み合わせ繊維、(b)繊維エレメント、(c)繊維濾過モジュール

このように、組み合わせの繊維は、繊維を単に並べるのではなく、撚り合わせる形で配置している。この内容については、本事業内で特許出願を行い、特許登録された(特許第 7122053 号)。

この組み合わせ繊維を使って、濾過塔直径が 16mm のミニモジュールで微粒子除去性能を確認した結果を図 2-1-4.18 に示す。

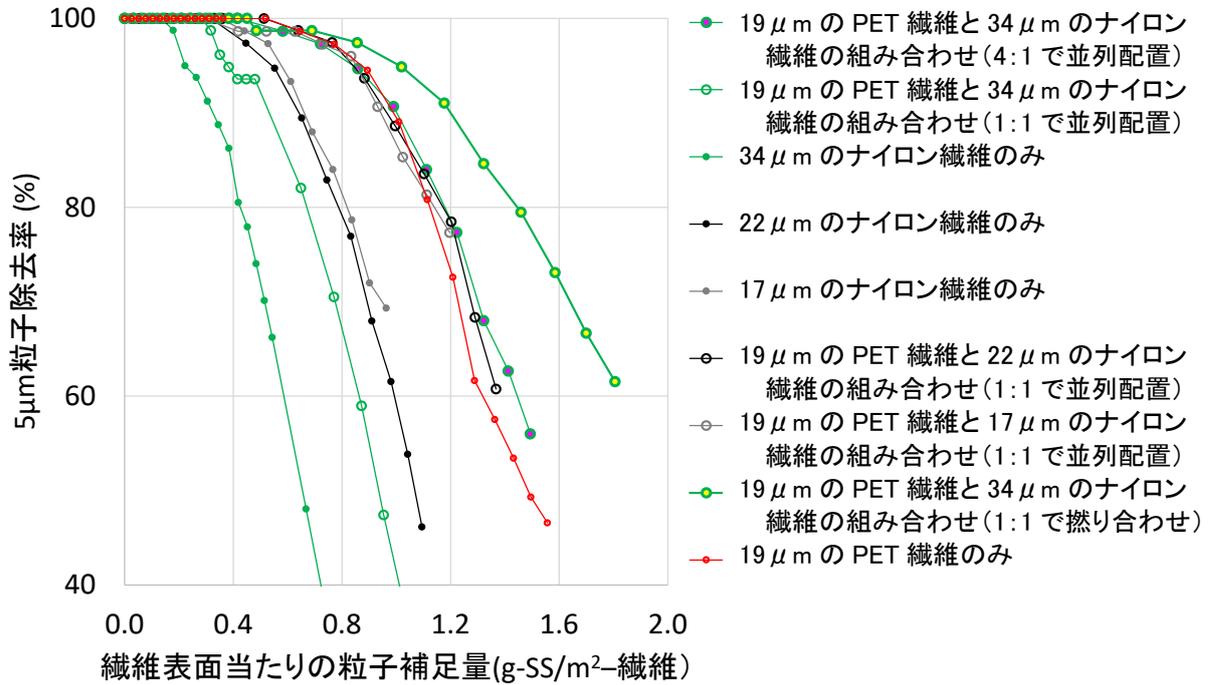


図 2-1-4.18 PET 繊維、ナイロン繊維と組み合わせ繊維の微粒子除去性能の比較

このように、ナイロン繊維だけでは繊維表面積当たりの微粒子補足量が少ない段階から除去率が低下していくが、PET 繊維とナイロン繊維を撚り合わせたものでは PET 繊維のみの場合を上回る微粒子除去性能を確保することができた。

同様に、濾過塔直径が 100mm の小型実験機で、19μm の PET 繊維と 22μm のナイロン繊維の組み合わせ（撚り合わせ）繊維を使った場合の微粒子除去性能を確認した結果を図 2-1-4.19 に示す。

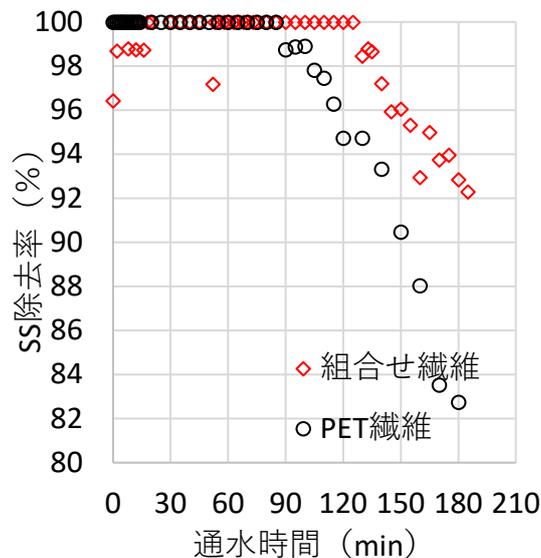


図 2-1-4.19 PET 繊維と組み合わせ繊維での微粒子除去性能の比較

このように、濾過塔直径が 100mm の場合においても、PET 繊維のみよりも組み合わせ繊維の方が優れた性能を発揮することを確認した。

本項では、このような形で繊維の充填密度や繊維配置の調査を行い、シミュレーション技術も併用して濾層全体が有効に活用できる条件を設定した。従来の繊維濾過塔では濾過塔内部の CAP 部の構造に改良の余地があることが分かったが、濾過対象水によっては高い微粒子除去特性を得ながら逆洗による繊維の洗浄効果も十分に得られ、長期的に安定した性能を発揮することが可能であることも確認された。繊維の充填条件を調整することで 3 μm の粒子も 100% 除去できることが示され、実用的な粒子の存在比率を想定した場合には、1.5 から 5 μm の微粒子を含む濾過対象水を濾過した場合に、懸濁物質量として 98% の除去率を得ることができると判明した。さらには、有機系排水を処理するための太い繊維の採用や、マイナス電荷の対象物を濾過する際に有効な高耐久性の組み合わせ繊維による性能向上にも取り組み、それぞれの条件での微粒子除去性能が従来の PET 繊維と同等以上となる条件を見出すことができた。

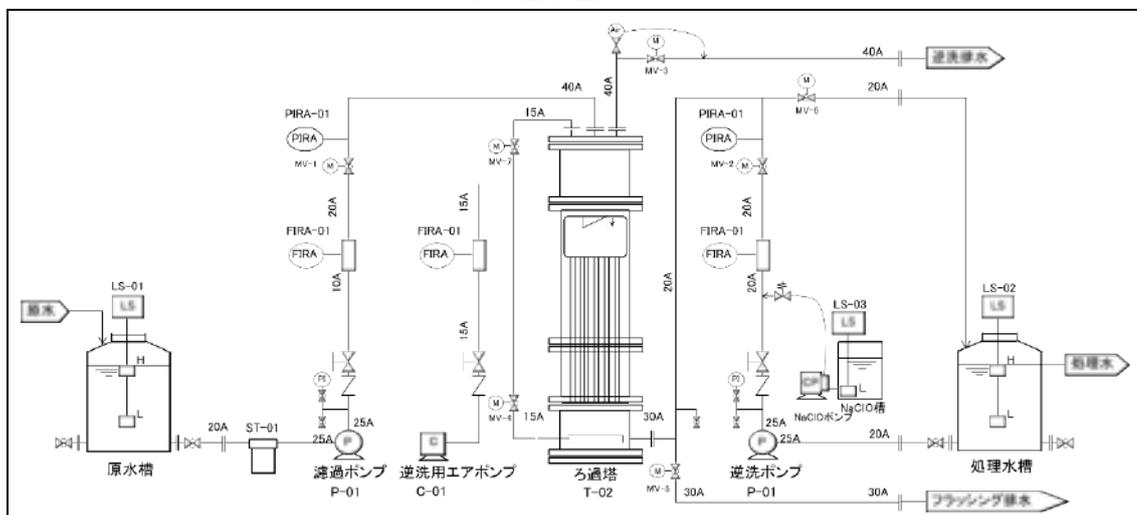
4) 付録 本章で使用した主要な機器を以下に記す。

4-1) 繊維濾過小型モデル機の導入

令和2年度に協和機電工業(株)に繊維濾過小型モデル機を導入した。

表 2-1.付録 1 に機器の仕様を示し、図 2-1.付録 1 に3D モデルを示す。

表 2-1.付録 1 繊維濾過小型モデル機の仕様



| |
|---|
| 濾過ポンプ : 10.4L/min × 15m 荏原 25SCD6.25 |
| 濾過ポンプ用インバーター : 三菱 FR-D710W-0.4K |
| 逆洗ポンプ : 15.7L/min × 11m 荏原 25SCD6.25 |
| 逆洗ポンプ用インバーター : 三菱 FR-D710W-0.4K |
| 逆洗用コンプレッサー : 72L/min × 0.2Ma アネスト岩田 FIT13093B |
| NaClO 注入ポンプ : タクミナ PW30 |
| NaClO タンク : 市販の薬品タンクを流用 |
| 電動弁 : 樹脂製 旭有機材電動ボール弁 21 型 15A:2 個, 20A:3 個, 30A:1 個, 40A:1 個 |
| 流量センサー : キーエンス FD-Q10C + OP-75722 |
| 濾過塔一次側圧力センサー : キーエンス GP-M010 + OP-75722 + OP-87280 |
| 濾過塔二次側圧力センサー : キーエンス GP-M010 + OP-75722 + OP-87280 |
| 空気流量計 : 10~100L/min コフロック RK2000-20-0-S-Air-100L/min-N |
| 濾過塔:アクリル製 肉厚 10mm 外径 φ 120 × 527mm + φ 120 × 1000mm + φ 120 × 398mm |
| 濾過塔上下部品:透明 PVC 製 曝気管:PVC |
| 内部部品:ステンレス製 |
| 制御盤 : 屋外壁掛け盤 PLC 制御 + タッチパネル(三菱) |

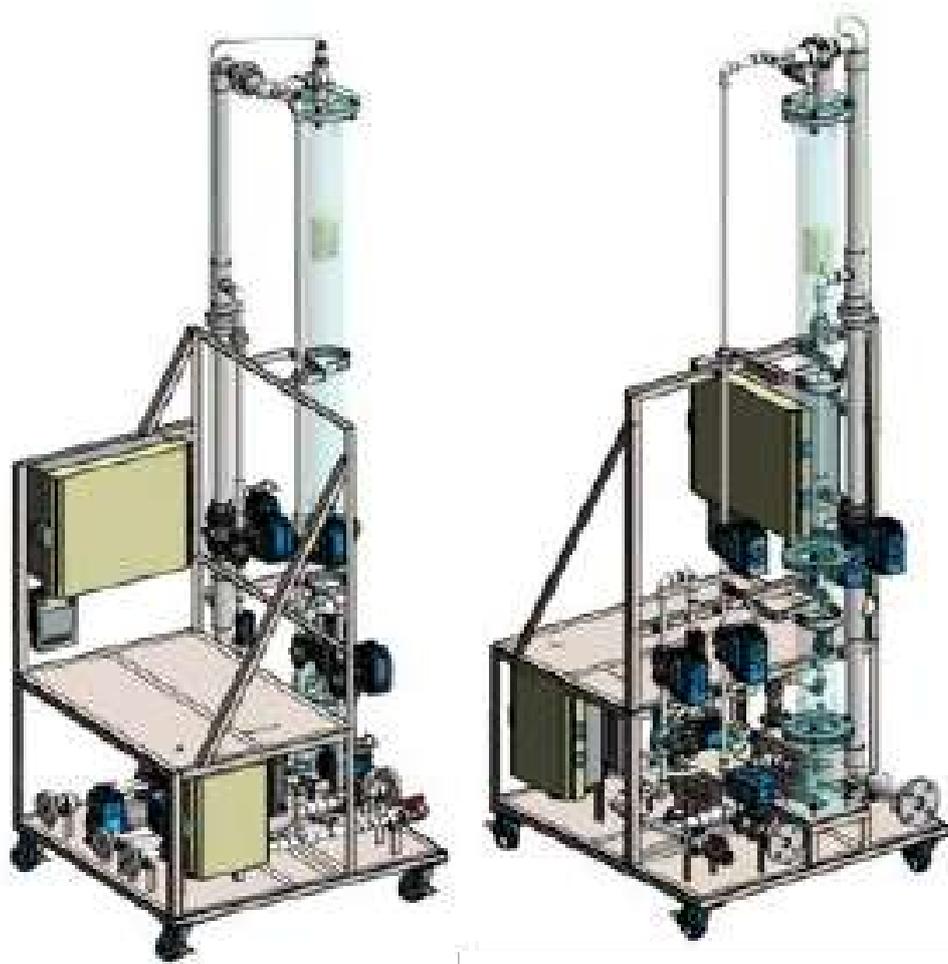


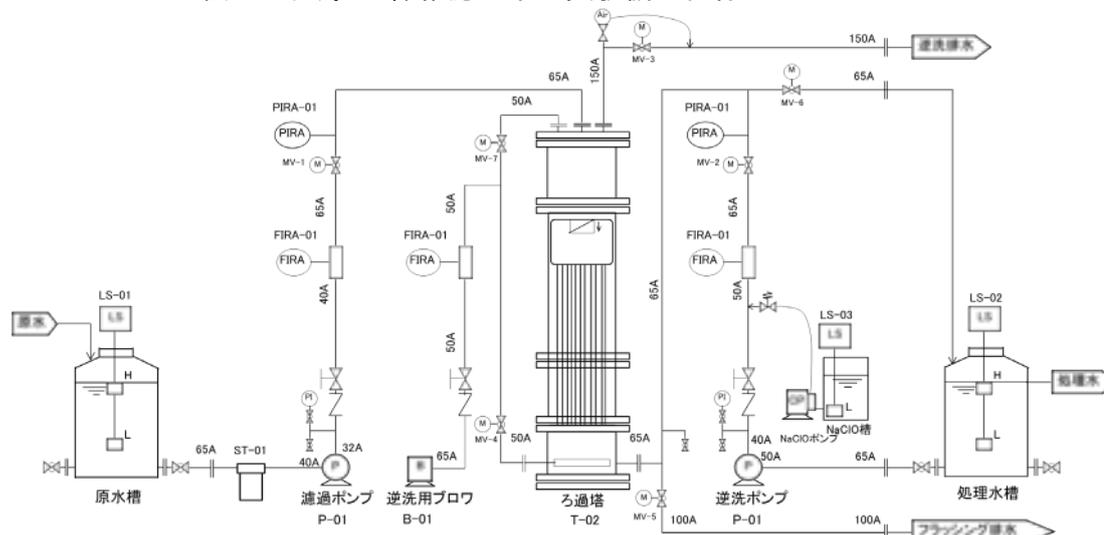
図 2-1.付録 1 繊維濾過小型モデル機の3D モデル

4-2) 繊維濾過中型実験機の導入

令和2年度に協和機電工業(株)に繊維濾過中型実験機を導入した。

表 2-1.付録 2 に機器の仕様を示し、図 2-1.付録 2 に3D モデルを示す。

表 2-1.付録 2 繊維濾過中型実験機の仕様



濾過ポンプ : 251L/min×18m 荏原 40×32FSFD61.5E

濾過ポンプ用インバーター : 三菱 FR-D720W-1.5K

逆洗ポンプ : 376L/min×15m 荏原 50×40FSED61.5E

逆洗用ブロウ : 1.72m³/min×80kPa アンレット BE65H 5.5kW

ブロウ用インバーター : 三菱 FR-D720W-5.5K

NaClO 注入ポンプ : タクミナ PW30

NaClO タンク : タクミナ 100L 角型槽(水位計付き)

KITZ 電動ボール弁 EAB200-UTE 65A:2 個

原水流量センサー : キーエンス FD-R50 + OP-88068:1 式

逆洗水流量センサー : キーエンス FD-R50 + OP-88068:1 式

濾過塔上下部品・ストッパー・曝気管:SUS304 製

内部部品:SUS304 製

制御盤 : 屋外自立盤 PLC 制御+タッチパネル(三菱)

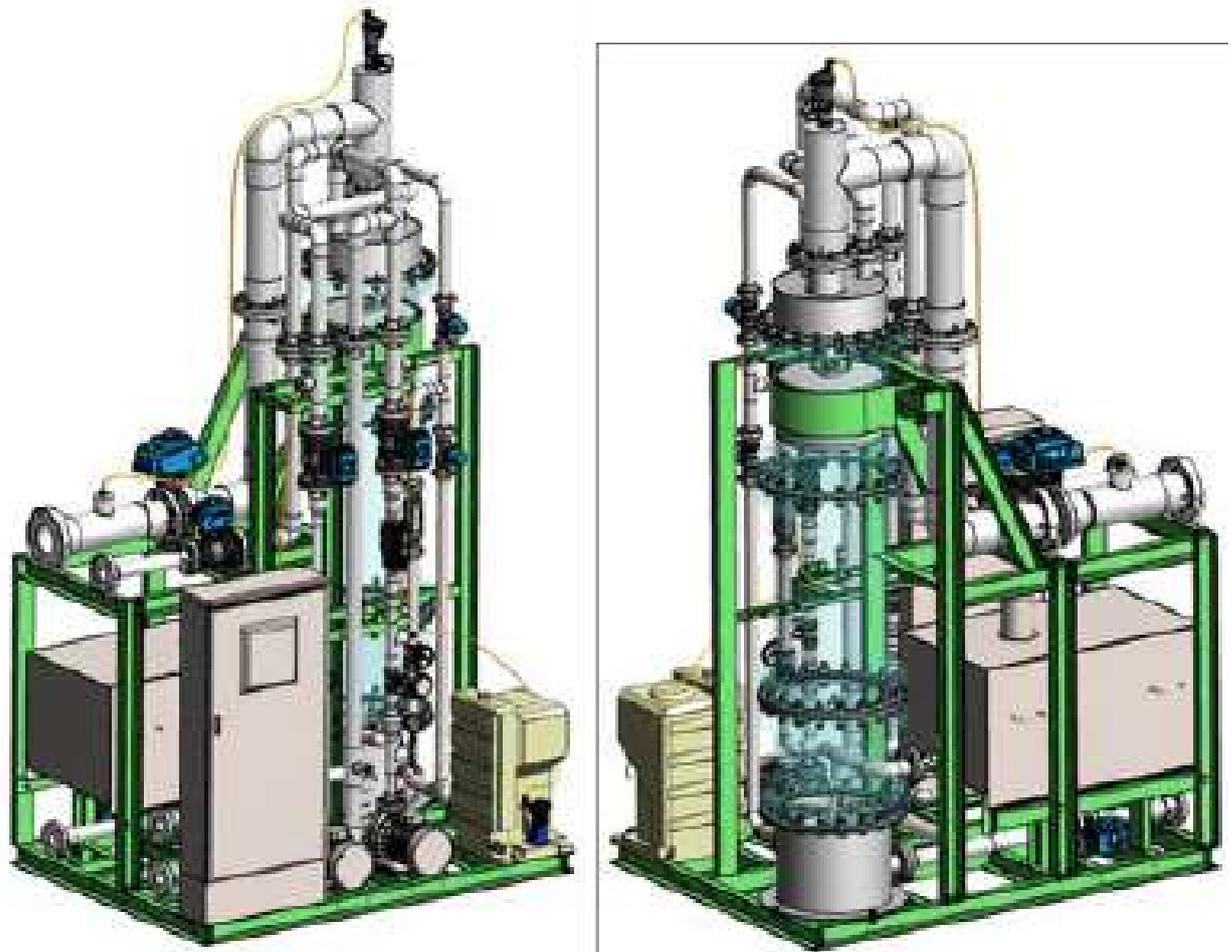


図 2-1.付録 2 繊維濾過中型実験機の3D モデル

2-2 性能低下を抑えた繊維モジュールの開発

(1年間で濾過性能が20%低下するという課題への対応)

【開発目標：1年相当の使用後での繊維モジュールの弾性復元力低下が10%未満】

- ✓ 繊維の弾性復元力低下で濾過時の充填密度が過剰に高くなり圧力損失が上昇するため、繊維の弾性復元力向上の長寿命化によって、性能低下率が年率10%未満の長寿命繊維濾過モジュールを開発する。
- ✓ 濾過原水には大きなサイズの粒子も混入し、逆洗で除けない繊維の目詰まり(濾過閉塞)が生じる。そこで、目詰まりに強い最適な濾過エレメントを組み合わせた複層化繊維濾過モジュールの最適化を行う。

2-2-1 長寿命濾過繊維の開発 協和機電工業・長崎大学

1)目的

高性能繊維濾過装置 F-CAP では、濾過時に繊維を圧縮して粒子除去性能を向上し、逆洗時には繊維を引き延ばして展開し、逆洗効率を向上するための CAP 構造を用いている。この CAP による繊維濾過エレメントの高頻度な伸縮によって、繊維素材の高分子鎖の欠陥が次第に増加すると考えられ、弾性復元力(所謂コシ)が次第に低下する。この弾性復元力の低下によって、繊維濾層内で部分的に充填密度が高くなりすぎて濾過時の圧力損失が上昇してしまうため、従来よりも耐久性能が高い繊維が必要である。その際には微粒子除去性能を低下させずに耐久性を向上することが必要であるため、様々な繊維種類と充填条件における微粒子除去特性と圧力損失特性を評価しながら最適な繊維を選定する。

2)実施内容と結果の要約

微粒子除去性能を低下させることなく、繊維の耐久性を向上させるために、繊維の種類別に微粒子除去性能、耐へたり性、強度を総合的に検討して使用すべき繊維を $19\mu\text{m}$ の繊維と $22\mu\text{m}$ もしくは $17\mu\text{m}$ のナイロン繊維の組み合わせとすることを考案した。2-1-4の性能評価で明らかとなったように、微粒子除去性能は PET 繊維のみの場合と同等以上を発揮することができ、この組み合わせ繊維について特許出願・登録を果たした。また、PET 繊維の連続使用における強度低下度合いを確認し、従来から使用している $19\mu\text{m}$ の PET 繊維では、濾過と逆洗の繰り返しによる強度低下ではなく、濾過塔内壁との摩擦による強度低下が著しいことを確認した。

3) 具体的な実施内容

3-1) 繊維の選定

繊維の耐久性を上げるためには、繊維の物理的強度が高く、切れにくいことの他にも、長期間の圧縮・展開の繰り返し後にも反発力(弾性力)を持って濾層を所定の充填密度に維持できることが必要となる。この反発力(弾性力)の測定については、水中での繊維の使用を想定した計測方法が定められておらず、測定が難しい。そのため、本事業では繊維そのものの引張強度と引張伸度に着目して、新品の状態での繊維の強さを比較し、それが使用後にどのような値に低下するかを確認し、へたり度とすることとした。

本事業では協和機電工業が中心となって長崎大学、アドバイザーの意見を取り入れながら、繊維メーカーとの素材ごとの性能評価を行った。

太い繊維は物理強度が高いため、耐へたり性を上げるためには太い繊維を使用することが望ましいが、当然ながら微粒子除去性能は低下してしまう。本事業の目的である、 $5\mu\text{m}$ 以下の粒子を効率良く除去するというコンセプトのためには、微粒子除去性能を低下させることは適切でないため、太い繊維でも高い微粒子除去性能を発揮することができる充填条件(充填密度、エレメント長さ、設置本数)を調節する必要がある。2-1の節で取り組んだように、除去対象物に応じてその条件を変えることも重要であるが、本事業では特に新規の $29\mu\text{m}$ のPET繊維を使った場合でも、有機系排水を対象とした場合には従来の $19\mu\text{m}$ のPET繊維と同等の微粒子除去性能を発揮することができると確認した。また、 $17\mu\text{m}$ のナイロン繊維については、適切な初期洗浄を施すことでPET繊維と同等の微粒子除去性能を得る条件は見つけれられたが、繊維本来の強度は低いため、太い繊維を使う必要がある。

このようなことから、本事業では表2-2-1.1に示す評価結果を元にして、耐へたり性が高い $34\mu\text{m}$ のナイロン繊維を、従来の $19\mu\text{m}$ のPET繊維に組み合わせることで、微粒子除去性能を低下させることなく耐へたり性を向上させることとした。

表 2-2-1.1 繊維の種類別の各性能

| 繊維の材質 | 繊維径 | $5\mu\text{m}$ 粒子除去率 | 耐へたり性 | 強度 | 評価 |
|----------|-----------------|----------------------|-------|----|----|
| PET(既存) | $38\mu\text{m}$ | × | ○ | ◎ | × |
| PET(新規) | $29\mu\text{m}$ | ○ | ○ | ◎ | ○ |
| PET(既存) | $19\mu\text{m}$ | ◎ | △ | ◎ | ○ |
| PET(新規) | $17\mu\text{m}$ | ◎ | × | ○ | △ |
| ナイロン(新規) | $34\mu\text{m}$ | × | ◎ | ○ | △ |
| ナイロン(新規) | $22\mu\text{m}$ | ○ | ○ | △ | △ |
| ナイロン(新規) | $17\mu\text{m}$ | ◎ | ○ | △ | ○ |

また、濾過対象水には大小さまざまな粒子が含まれていることが多く、そのため、細い繊維のみを用いた繊維濾過モジュールでは、繊維濾層の上層に大きな粒子も小さな粒子も同時に補足されていくため、濾層上部が急激に閉塞して濾過差圧が上昇することが懸念される。

そのため、協和機電工業㈱の高性能繊維濾過装置 F-CAP では、濾過対象水に応じて二種類以上の太さの繊維を使って濾層を複層化したモジュールを用いることとしている(特許第 6832603 号)。これは上層に太い繊維を使うことで、上層で大きな粒子を補足し、下層に細い繊維を用いることで小さな粒子を補足するという形で、上下で役割を分けることで、濾過差圧の急激な上昇を抑制する者である。本事業でも、濾過対象水が大小の粒子を含む水の場合には複層化繊維濾過モジュールを使うこととしており、その組み合わせについても検討した。

3-2) 従来繊維の耐久性の評価

2-1-4で示した繊維濾過中型実験機を用いて、1年間の運転を行った後の繊維について、引張強度及び引張伸度を測定し、新品の繊維に比べてどの程度性能が低下しているかを確認することとした。図 2-2-1.1 には1年間の運転後の繊維サンプル採取時の様子を示す。



図 2-2-1.1 1年間使用後の繊維サンプル採取時の様子

ここで得られた下層の細い繊維の測定結果を表 2-2-1.2 に示す。

| | 表 2-2-1.2 繊維 新品繊維 | 繊維サンプルの物性 使用後の繊維 | | | |
|--------------------|----------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| | | 中心付近 | | 外周付近 | |
| | | 測定値 | 低下率 | 測定値 | 低下率 |
| 引張強度 (N/繊維 1 本) | 37.4 | 26.4 | 29.4% | 27.2 | 27.4% |
| 引張伸度 (%) | 30.4 | 26.26 | 13.6% | 27.17 | 10.6% |

このように、濾過塔の中心部の繊維と、濾過塔付近に存在する繊維での明確な差は見られず、均一に物性が低下していることが確認された。なお、本事業以前には、加速試験によって5年相当の濾過・逆洗を実施した後の繊維サンプルについて、物性の測定を行っていた。今回得られた性能低下率と以前に得られた5年相当の加速試験で得られた性能低下率を示したグラフを図 2-2-1.2 に示す。

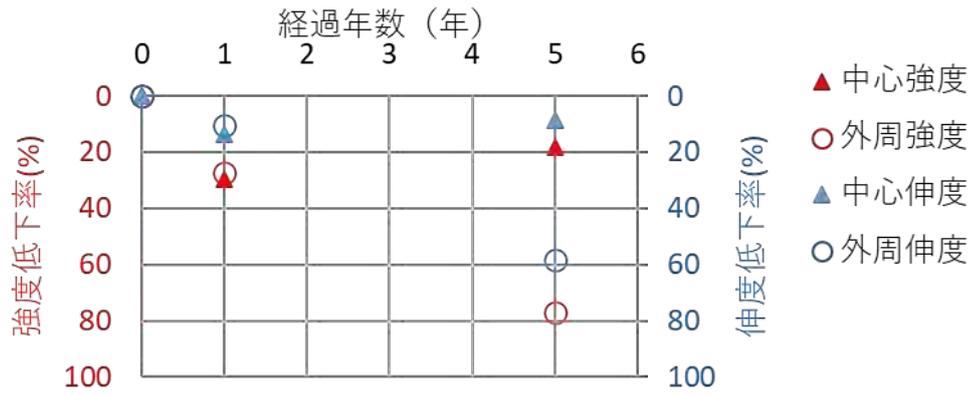


図 2-2-1.2 1 年と 5 年相当の物性低下率グラフ

このように、以前に調査した 5 年相当の物性評価では、外周の性能低下率が進行していることが確認されたが、中心部では今回得られた 1 年相当の性能低下率と同等レベルの値であったため、水中での繰り返しの圧縮・展開による性能低下というよりは、濾過塔との摩擦による性能低下が進行していくと言える。

3-3) 組み合わせ繊維の製作

これまで標準的に使用していた $19\mu\text{m}$ の PET 繊維の、長期的な耐へたり性を向上するため、ナイロン繊維を組み合わせた繊維を用いることとした。内容については2-1-4に示した通りで、図 2-1-4.17 に示した繊維エレメント及び繊維濾過モジュールを製作した。これは $19\mu\text{m}$ の PET 繊維と $22\mu\text{m}$ のナイロン繊維を撚り合わせて使用したものである。これを、濾過塔直径が 100mm の小型実験機に図 2-2-1.3 に示すように充填し、通水性能を確認した。



図 2-2-1.3 組み合わせ繊維を充填した様子(左: 充填密度 80g/L 、右: 充填密度 200g/L)
通水性能の確認では、従来の $19\mu\text{m}$ の PET 繊維のみを使った場合との比較を行った。その比較結果を図 2-2-1.4 に示す。

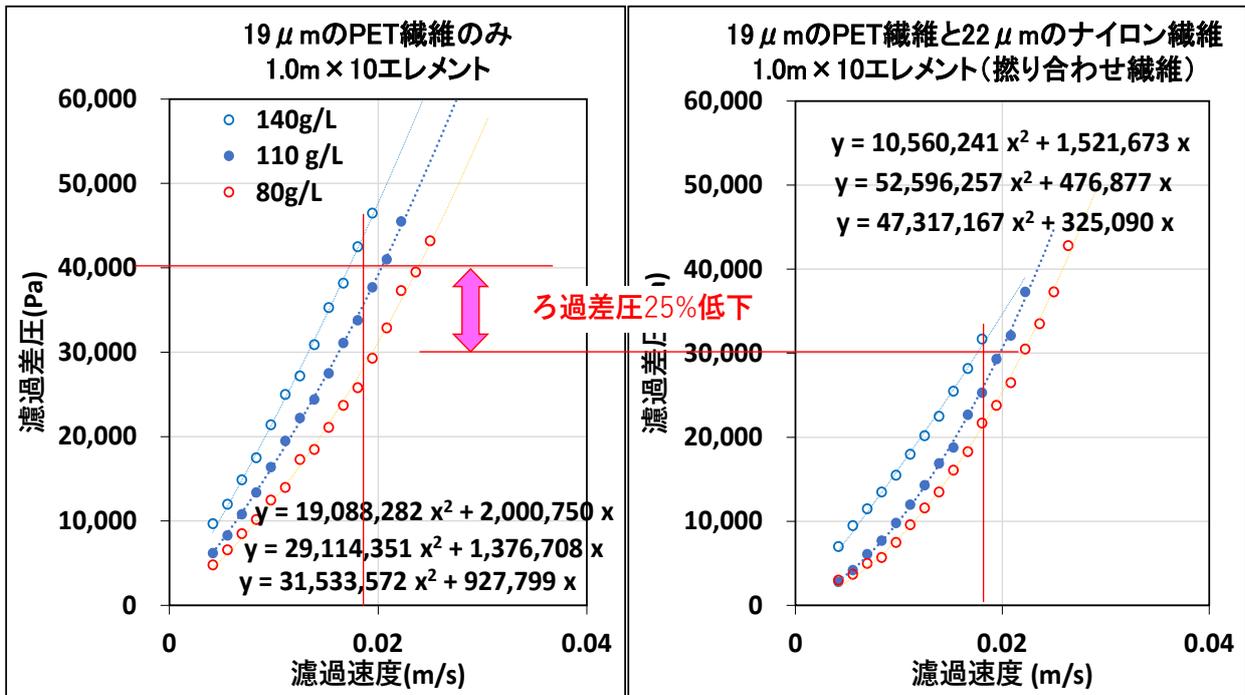


図 2-2-1.4 組み合わせ繊維での濾過差圧の確認(左: PET 繊維、右: 組み合わせ繊維)

このように、組み合わせ繊維とすることで、充填密度が同じであっても濾過差圧は低下することが確認された。繊維径は1割程度しか差は無いものであるため、この濾過差圧の差は繊維径によるものではなく、繊維の充填状況が異なるためであると推測される。つまり、PET 繊維だけでは部分的に密になっている場所が、ナイロン繊維を組み合わせることで均一となつて、その分だけ濾過差圧が低下しているのではないかと考えられる。このような異種の繊維の撚り合わせによる効果は、それぞれの繊維の特徴を把握したうえで比較評価を行う必要があり、長期の評価期間を要するため、補完研究にて性能を明らかにする。

しかしながら、本研究で目指していた長期性能での耐へたり性として、弾性復元率の低下度合いが10%未満を達成するという目標については、2-4-1に示すように、有機系排水では直径が1.5倍の太い繊維を使用するという改善方法を採用することで、断面積で2.25倍となることから、繊維の強度もそれに応じて向上することとなった。よって、ナイロン繊維を組み合わせた製品化を進めるのではなく、濾過対象水に応じて繊維径と充填条件を変え、粒子除去性能を優先する場合と耐久性能を優先する場合で対応方針を分けていくこととした。

その他には、繊維の種類別で繊維製造時の加熱条件と洗浄条件を変えることで、初期の微粒子除去性能と長期的なへたり性を改善することができることが分かった。これについては協和機電工業(株)内のノウハウ事項として取り扱うこととした。

2-2-2 複層化繊維濾過モジュールの開発; 2021~2022 年度 協和機電工業・長崎大学・北九州市立大学

1) 目的

長期間の使用によって次第に濾過差圧が上昇していくことは、2-2-1の繊維の弾性復元率が低下して濾層内で部分的に充填密度が高くなることが主要な要因であると考えられる。しかし、元来の濾過差圧の上昇は、繊維濾材に様々な微粒子が付着して流路を狭めることが根本的な要因であり、特に濾層上部で大半の微粒子を補足してしまうと上部濾層が一気に目詰まりして急激な濾過差圧の上昇につながる。そのため、濾層全体での濾過精度を長時間維持し、濾層上部の急激な目詰まりを抑制するためには、粗大粒子を除去する上部の濾過エレメント、微細粒子を除去する下部の濾過エレメントの組み合わせが効果的である。本項目ではこの複層化繊維濾過モジュールとしての繊維の組み合わせを検討し、繊維 1kg 当たりの微粒子除去量が 60g を以上となる複層化繊維濾過モジュールの条件を設置する。

2) 実施内容と結果の要約

繊維の複層化に際して、各繊維条件における繊維 1kg 当たりの微粒子除去量を確認した。従来から使用している $19\mu\text{m}$ の PET 繊維では充填密度が 110g/L もしくは 140g/L の場合には安定した性能を発揮し、目標としていた繊維 1kg 当たりの微粒子除去量が 60g 以上となることを確認した。有機系排水処理水用として今回新たに採用した $29\mu\text{m}$ の PET 繊維についても性能を確認し、充填密度が 160g/L の場合には繊維 1kg 当たりの微粒子除去量が 110g を超えることを確認した。また、繊維の初期洗浄方法について新たにアルコールを用いた方法を採用し、優れた初期性能が発揮されることを確認した。

3) 具体的な実施内容

3-1) 繊維重量当たりの微粒子除去量の調査

濾層が局所的に目詰まりして濾過差圧が上昇することを防ぐため、上層と下層で太さの異なる繊維を用いて濾過対象粒子径を分けることができる複層化繊維濾過モジュールの条件の設定を行うため、まずは標準としている $19\mu\text{m}$ の PET 繊維についての微粒子補足量を調査することとした。これは、これまで標準的に使用している $5\mu\text{m}$ のアクリル粒子を除去する性能評価試験を行った場合には、濾過の継続によって濾過差圧が上昇することは見られなかったため、下層繊維で $5\mu\text{m}$ 以下の粒子を補足することに専念すれば、ここでは差圧上昇は進行しないと考えられるためであり、上層にどのような繊維を組み合わせても、下層の繊維条件によって最終的な微粒子除去性能が決まるためである。

実験方法としては、2-1-4と同様の方法で濾過塔直径が 100mm の小型実験機を用いて、標準の繊維である $19\mu\text{m}$ の PET 繊維を各種条件で充填し、 $5\mu\text{m}$ のアクリル粒子を含む水を濾過したときに、繊維 1kg 当たりどの程度の粒子が付着したら除去率が 98% を下回るかを計測した。繊維条件は表 2-2-2.1 に示す組み合わせでデータを収集した。

表 2-2-2.1 $5\mu\text{m}$ アクリル粒子除去性能確認試験の繊維条件

| 繊維種類 | エレメント長さ | 充填密度 |
|-------------------------|---------|------|
| $17\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1000 | 110 |
| $17\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1000 | 120 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 620 | 80 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 620 | 110 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 620 | 140 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 700 | 80 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 700 | 110 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 700 | 140 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 940 | 80 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 940 | 110 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 940 | 140 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1200 | 80 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1200 | 110 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1200 | 140 |
| $19\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1500 | 140 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 588 | 100 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 764 | 130 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 783 | 100 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 940 | 160 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1018 | 130 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1175 | 100 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1253 | 160 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1528 | 130 |
| $29\mu\text{m}$ mPET 繊維 | 1880 | 160 |

19 μm の PET 繊維について、繊維エレメントの設置本数を 10 エレメントで固定し、繊維エレメントの長さで濾過時の充填密度を変えた場合の実験データを図 2-2-2.1 に示す。

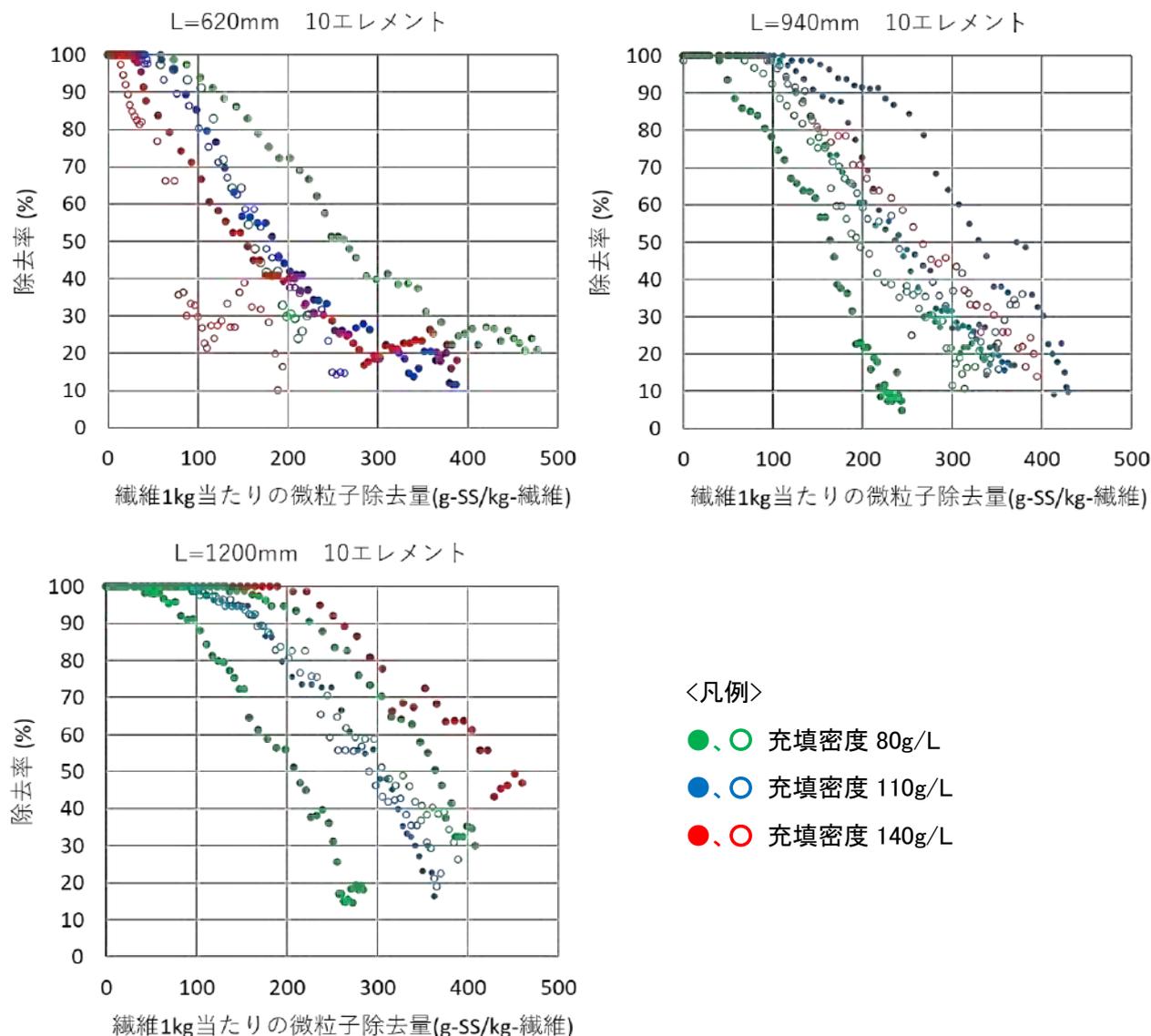


図 2-2-2.1 19 μm の PET 繊維での 5 μm アクリル粒子除去性能確認試験結果

この結果からわかるように、繊維エレメント長さが短いものでは、繊維 1kg 当たりの微粒子除去量が少ないところから除去率が低下していく傾向があることがわかる。これは繊維が短いとその分濾層高さも低くなるため、上層を下層が支える＝下層は充填密度が高くなるという構図の中で下層繊維の量が減るために、除去性能も低下してしまうのではないかと考えられる。また、充填密度が 80g/L の時にはバラつきが大きく出ることも分かった。これは充填密度が低い際には濾層が均一になりにくいいため、繊維をセットするたびに異なる性能が出やすいためではないかと推測される。

次には 29 μm の PET 繊維の結果を図 2-2-2.2 に示すが、この 29 μm の PET 繊維の試験を行うにあたり、繊維の初期洗浄条件を見直した。これは、繊維のロット等によっては新品

の繊維でも表面に汚れが多く付着していることが確認されたため、これまで行っていた通常の逆洗では初期の汚れが除去できないと判断し、主にアルコールを使った浸漬工程を設けた後に逆洗を行うこととした。なお、洗浄効果の確認においても上記の微粒子除去性能の値での評価を行っているが、過去に得られた繊維 1kg 当たりの微粒子除去量と同等程度が得られる洗浄条件を、適切であると判断している。最も良い洗浄条件は、20 分以上、繊維を手で揉み洗いするという方法であったが、これは繊維量が多くなると実施が限りなく難しくなるため、薬品を使った浸漬工程を採用することとした。

また、29 μm の PET 繊維の試験の際には、異なる充填密度の条件であっても、濾層高さが同じになるように繊維設置本数を調節して試験を行った。結果を図 2-2-2.2 に示す。

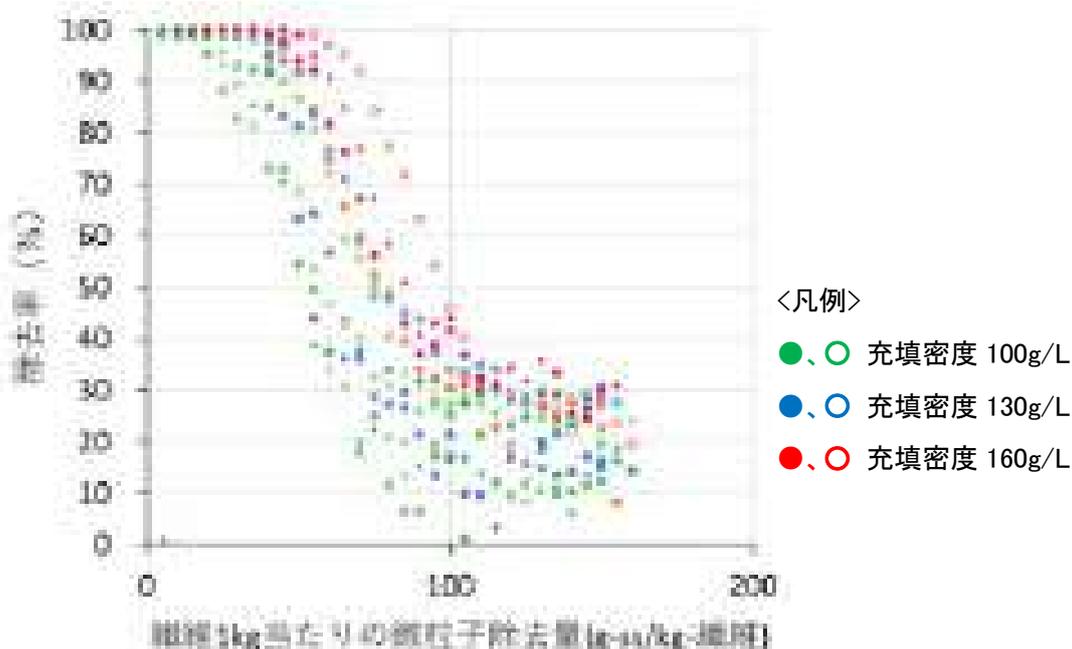


図 2-2-2.2 29 μm の PET 繊維での 5 μm アクリル粒子除去性能確認試験結果

この結果からわかるように、直径 29 μm の PET 繊維の場合には、19 μm の繊維に比べて高い充填密度の方が除去性能が向上することが分かった。160g/L の場合には安定した性能を示しており、この条件であれば複層化しなくても耐久性が向上し、微粒子除去においても 110g-SS/kg-繊維を確保することができた。最後に表 2-2-2.2 に本節の結果をまとめる。

表 2-2-2.2 5 μ m アクリル粒子除去性能確認試験の結果

| 繊維種類 | エレメント長さ (mm) | 充填密度 (g/L) | 繊維 1kg 当たりの微粒子除去量 (g-SS/kg-繊維) |
|------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|
| 17 μ mPET 繊維 | 1000 | 110 | 97 |
| 17 μ mPET 繊維 | 1000 | 120 | 171 |
| 19 μ mPET 繊維 | 620 | 80 | 58 |
| 19 μ mPET 繊維 | 620 | 110 | 40 |
| 19 μ mPET 繊維 | 620 | 140 | 33 |
| 19 μ mPET 繊維 | 700 | 80 | 48.5 |
| 19 μ mPET 繊維 | 700 | 110 | 20 |
| 19 μ mPET 繊維 | 700 | 140 | 35 |
| 19 μ mPET 繊維 | 940 | 80 | 49 |
| 19 μ mPET 繊維 | 940 | 110 | 109 |
| 19 μ mPET 繊維 | 940 | 140 | 94 |
| 19 μ mPET 繊維 | 1200 | 80 | 83 |
| 19 μ mPET 繊維 | 1200 | 110 | 116 |
| 19 μ mPET 繊維 | 1200 | 140 | 199 |
| 19 μ mPET 繊維 | 1500 | 140 | 153 |
| 29 μ mPET 繊維 | 588 | 100 | 97 |
| 29 μ mPET 繊維 | 764 | 130 | 118 |
| 29 μ mPET 繊維 | 783 | 100 | 74 |
| 29 μ mPET 繊維 | 940 | 160 | 110 |
| 29 μ mPET 繊維 | 1018 | 130 | 109 |
| 29 μ mPET 繊維 | 1175 | 100 | 87 |
| 29 μ mPET 繊維 | 1253 | 160 | 132 |
| 29 μ mPET 繊維 | 1528 | 130 | 118 |
| 29 μ mPET 繊維 | 1880 | 160 | 157 |

2-3 充填密度を可変制御する機構の開発

(原水の水質変動に対応できないという課題への対応)

【開発目標： 原水の懸濁物質濃度が 1~100mg/L に変動しても対応できるシステム】

- ✓ 濾過原水の懸濁物質濃度が大幅に増加した際には早期に目詰まりを起こして濾過不能となるため、水質変動時には濾材の空隙を多くするように充填密度を低下させることができる機構を開発する。
- ✓ 自動化や遠隔制御が強く求められているので、原水水質を自動的にセンシングし、濾過条件を AI を用いて適応的に制御し、さらに IoT 化で遠隔制御も可能なシステムを開発する。



図 2-3.1 充填密度の可変調整機

2-3-1 繊維充填密度の可変機構の開発; 2020~2021 年度 協和機電工業

1) 目的

現状の繊維濾過装置では、繊維濾過エレメントの濾過時の圧縮と逆洗時の伸展を制御する CAP 構造とストッパー構造を有している。ストッパーは固定式であり、濾過対象水の水質に応じて調整できるようなにはなっていない。そのため、通常時には適切な充填密度であっても、突発的な高濁度水が流入してきた際には濾層が短時間で目詰まりしてしまい、濾過を継続できなくなるために逆洗を頻繁に行う必要が生じる。あまりにも頻繁に逆洗を行うことは、濾過水以上に逆洗排水を発生させることに繋がるため、高濁度時には繊維の充填密度を下げた濾層が急に目詰まりしないような充填密度の調整機能が必要であるため、CAP の高さを任意に調整可能な新機構(図 2-3.1)を開発する。

2) 実施内容と結果の要約

最初に、ステンレス製の濾過塔の内部に存在するステンレス製の CAP の位置を濾過塔外から検出するため、磁気センサーを用いた CAP 位置検出方法を考案し、繊維濾過大型実証機に組み込んで実用性を確認した。次に、充填密度可変制御のためのストッパー形状を検討して繊維濾過小型モデル機と繊維濾過中型実験機に組み込んだ。それぞれの濾過対象水は濁度がさほど高くない水であったため、それぞれ濁度が 10NTU 以下で 3 段階の設定値として上段ストッパー、中段ストッパー、固定ストッパーの 3 段階で、それぞれ充填密度を 80,110,140g/L に調節できるような制御システムとして、実用性を確認した。

3) 具体的な実施内容

3-1) CAP の位置検出機構の開発

最初に、CAP の位置を検出できる機構の開発に取り組んだ。大型の濾過塔の場合には、透明な素材で濾過塔を作ることは難しく、通常はステンレス鋼で濾過塔を製作する。その場合には、のぞき窓を設置することは可能ではあるが、のぞき窓は内部から汚れていき、最終的には内部の状態を目視できなくなることから、CAP の高さがどこにあるかを検出できる機構が必要である。

濾過塔内部の CAP の素材は、通常はステンレス鋼で製作するため、ステンレスの濾過塔内に存在するステンレスの CAP の位置を正確に検出する必要がある。初めに使用したセンサーは金属センサーと呼ばれる、磁界を使って鉄系の金属の厚みや枚数の変化を検出するものだが、ステンレス鋼ではこの磁界へ与える変化が小さく、採用することはできなかった。

次には、あらかじめ CAP 内に磁石を取り付け、その位置を磁気センサーで検出するという方法を考案し、図 2-3-1.1 に示すような試作機での検証を行った。

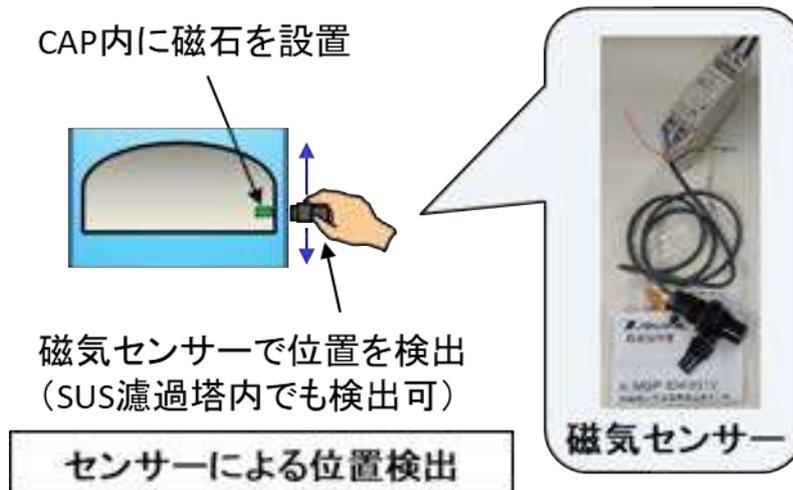


図 2-3-1.1 磁気センサーを用いた CAP 位置検出機構のイメージ

実際にこの機構を図 2-3-1.2 および図 2-3-1.3 に示すように繊維濾過大型実証機へ取り入れ、実用評価を行った。



図 2-3-1.2 繊維濾過大型実証機の CAP への磁石取り付け位置



図 2-3-1.3 繊維濾過大型実証機での CAP 位置検出の確認試験

結果としては図 2-3-1.3 に示したように、CAP 内の磁石の位置を高さ 35mm の精度で検出することができた。磁石自体の高さは 20mm であるため、必要十分な精度で高さを検出できた。よって、今後の充填密度可変制御機構の開発において、CAP 位置検出機構は本方式を採用することとした。

3-2) 可変ストッパー機構の開発

次に、充填密度を可変するための、可変ストッパー機構の開発を行った。開発のコンセプトを図 2-3-1.4 に示す。



図 2-3-1.4 充填密度可変機構のコンセプト図

つまり、これまでの高性能繊維濾過装置 F-CAP に採用している、濾過時の CAP 下降高さを設定するストッパーは固定式であるが、これを水質に応じて可変させ、特に高濁度時には充填密度を低くするためにストッパー高さを高くすることができる機構を目指した。

可変するためには、図 2-3-1.4 に示したように、ストッパーが出入りするピストン形状が適していると考え、図 2-3-1.5 に示すようなピストン部の形状を考案した。

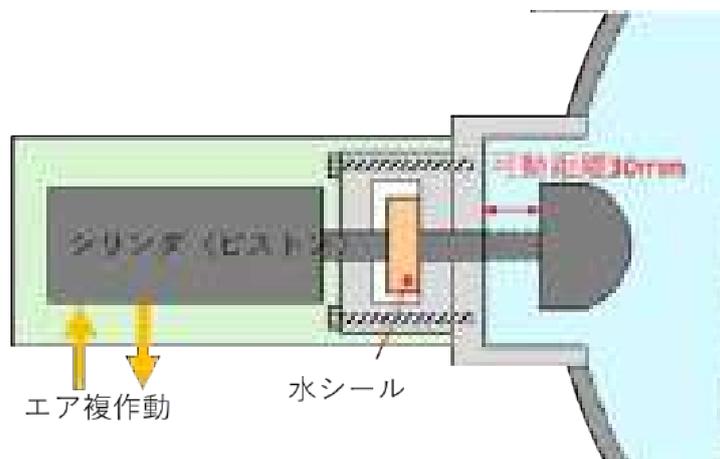
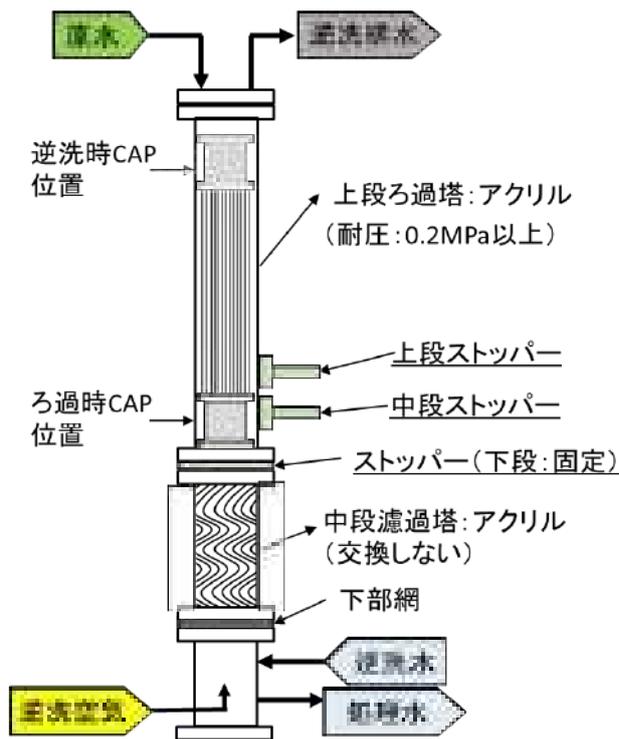


図 2-3-1.5 充填密度可変機構のピストン部のコンセプト図

これらのアイデアを採用して、2-1-4 で導入した繊維濾過小型モデル機へ本機構を取り入れることとした。具体的には、図 2-3-1.6 に示す内容となる。



ろ過開始時の原水の濁度によって、ストッパー位置を選択する(ろ過時のCAP高さを変える)

低濁度) 原水濁度2未満 { 上段ストッパー OFF
→下段ストッパーを使用 { 中段ストッパー OFF

中濁度) 原水濁度2以上8未満 { 上段 OFF
→中段ストッパーを使用 { 中段 ON

高濁度) 原水濁度8以上 { 上段 ON
→上段ストッパーを使用 { 中段 OFF

図 2-3-1.6 繊維濾過小型モデル機への充填密度可変機構の導入コンセプト

実際に充填密度可変制御機構を導入した繊維濾過小型モデル機の外観を図 2-3-1.7 に示す。



可変ストッパー部

図 2-3-1.7 充填密度可変機構を導入した繊維濾過小型モデル機

この繊維濾過小型モデル機での充填密度可変機構の稼働状況を確認し、コンセプト通りに原水の濁度に応じてストッパー高さが変わることを確認した。

次に、繊維濾過中型実験機にも同様に図 2-3-1.8 に示すコンセプトで充填密度可変制御機構を取り入れた。

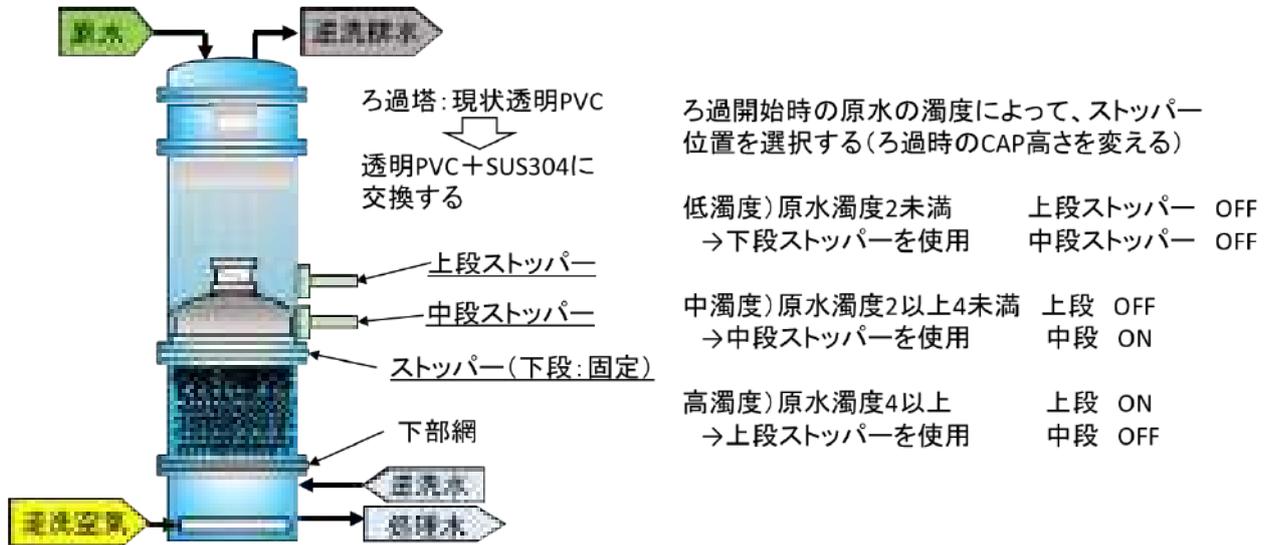


図 2-3-1.8 繊維濾過中型実験機への充填密度可変機構の導入コンセプト

実際に導入した後の繊維濾過中型実験機の外観を図 2-3-1.9 に示す。



図 2-3-1.9 充填密度可変機構を導入した繊維濾過中型実験機

これら繊維濾過小型モデル機および繊維濾過中型実験機では、上記に示したように原水濁度が比較的低い水を対象として運用したが、それぞれ、原水濁度の変動に応じて、充填密度が 80, 110, 140g/L に自動制御できることを確認した。

2-3-2 水質変動追従型の自動制御システムの開発; 2021~2022 年度 協和機電工業・長崎大学

1) 目的

繊維濾過システムを長期間、安定に運転するためには適切な逆洗浄、さらに、濾過時の繊維の圧縮率を設定する必要がある。そのために、特に、繊維濾過に流入する原水が急激に濁度上昇する場合などは、事前に圧縮率を下げて運転し、また逆洗浄工程を長く設定し、繊維が高負荷に耐えられるような運転条件に設定しておく必要がある。そうでない場合、目詰まりが激しく通常の逆洗浄では繊維から濁質を除くことができない場合がある。その場合は一旦、通常運転を停止し薬剤洗浄などの工程を実施する必要がある、処理全体に影響が出てしまう。そこで、事前に流入原水の濃度変化を予測できれば対策が可能となり、安定で低コストな繊維濾過システムの運転が可能となる。今回は、工場排水を流入原水とした場合の濃度変化を機械学習の手法で予測する技術を確立することを目標とする。

2) 実施内容と結果の要約

今回の対象とする工場排水処理への繊維濾過システムの適用試験では、流入原水は、活性汚泥処理システムにより生物処理を実施した後に、さらに凝集剤を投入して最終沈殿池で濁度成分を除去した処理水である。この処理水をさらに最終処理として繊維濾過を適用する試験を実施している。そこで、生物処理システムとしての活性汚泥法の処理水質がニューラルネットワークを用いた深層学習(ディープラーニング)により学習し予測可能かを試験するために活性汚泥モデル ASM1 によるシミュレーションデータを用いた試験を実施し、活性汚泥による処理水の COD 変化を学習し、予測できる可能性を示すことができた。

実際の活性汚泥処理システムの運転では、通常は運転管理の技術者が得た水質などの日々の管理データを日報の形で纏められ Excel データとして入力されていることが多い。これは、繊維濾過に流入する数時間前の事前データとして予測に使うことが可能である。そこで、山口県の飲料工場の排水処理設備の日報 Excel データのフォーマットを解析して、自動的に必要な時系列データを生成するプログラムを作成した(Python)。特に沈殿池における凝集剤(硫酸バンド)の投入量が、繊維濾過の目詰まり(圧力損失上昇)に影響する流入原水の水質と関係しており、その予測の可能性を機械学習としての線型回帰モデルを用いて試験した。その結果、硫酸バンドの投入量を流入水量、糖度(Bx)、また COD 値から予測できる可能性を示唆できた。

3) 具体的な実施内容

3-1) 水質変動に追従できる自動制御システムの概要

開発を目指す機械学習による予測制御システムを取り入れた繊維濾過の自動制御システムのコンセプトを図 2-3-2.1 に示している。工場排水は通常は生物学的処理手法である活性汚泥法で処理しており、そこでは微生物(活性汚泥)を増殖させる曝気槽と、その微生物と処理水を分離する沈殿槽で構成されている。沈殿槽では凝集剤を添加して微生物を沈降させるが、完全ではなく、一部の微生物が残り、処理水の濁度が十分でないことも多い。

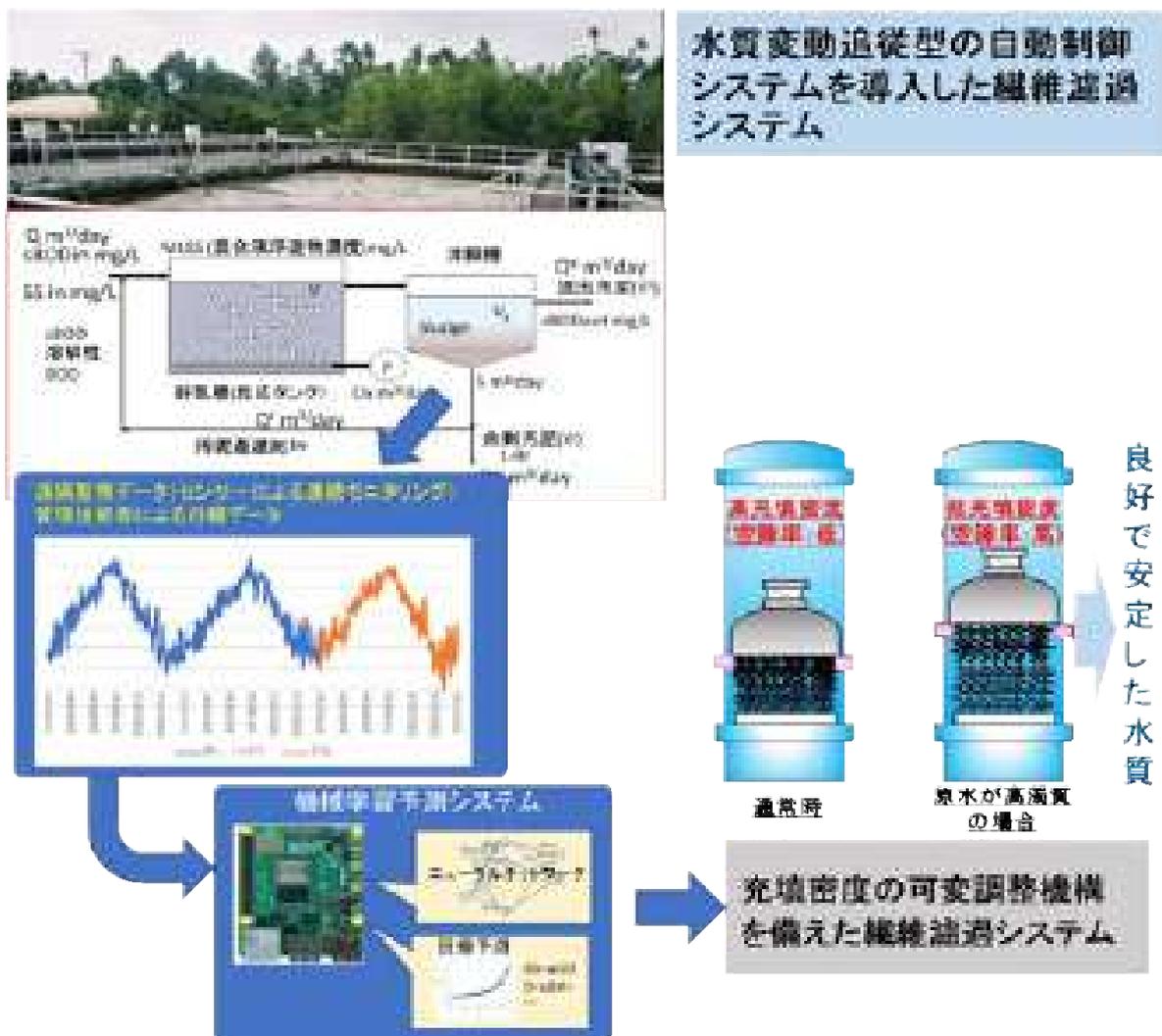


図 2-3-2.1 機械学習予測を導入した繊維濾過システム

そこで、活性汚泥の処理水を繊維濾過で最終処理することで、濁質を低減させ処理水質を向上させることができれば、水域の環境保全や、特に再生水として利用する場合に効果的である。しかし、運転コストの最小化は重要である。特に、この繊維濾過システムは流入する懸濁物濃度が高すぎる場合には、急激な濾過の圧力(差圧)上昇が起こり、高濁度水が流入し酷い場合には、不可逆的な目詰まりが生じ通常の逆洗浄では繊維を十分に回復できないことがある。

そのため、図 2-3-2.2 に示すように圧力が上昇する前に逆洗浄を行えばこのことを回避できる。

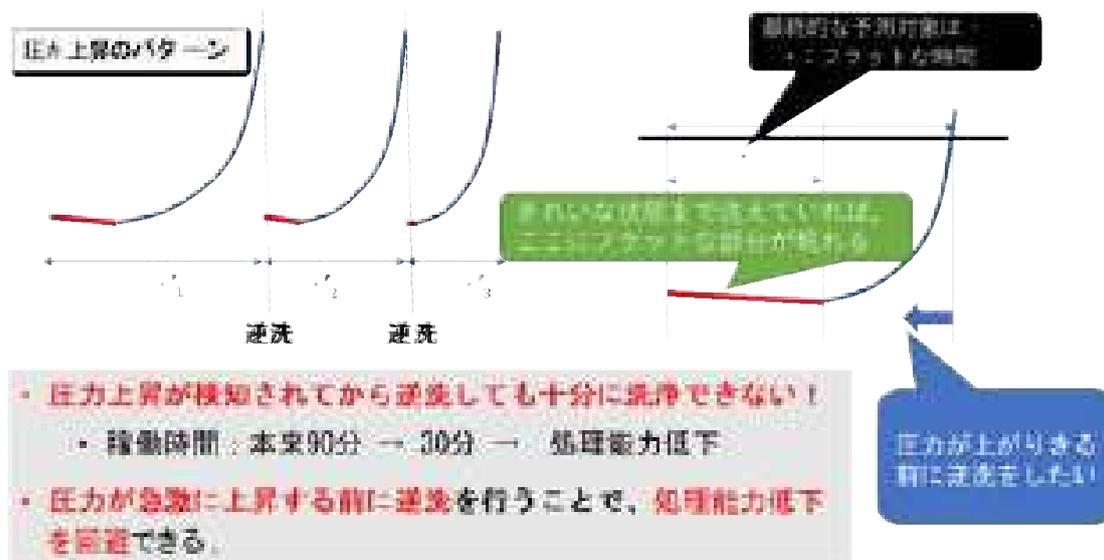


図 2-3-2.2 繊維濾過システムの逆洗浄のタイミングと予測

また、流入原水の懸濁物濃度が高い場合には、図 2-3-2.1 に示したように、事前に予測して繊維濾過システムの繊維充填密度をあえて低下させることで、目詰まりを起きにくくすることもできる。この場合は一時的に処理水質が低下するが、処理をストップして繊維の薬品洗浄を行う場合に比べると全体としては処理性能を高く維持できることになる。

したがって、この水質変動に追従できる自動制御システムの開発において、もっとも重要な技術課題は、繊維濾過システムに流入する原水の水質の予測である。例えば、この例に示したように、工場排水の活性汚泥処理水が流入原水となる場合は、活性汚泥法による処理水の水質予測という課題になる。活性汚泥法の水質予測では、活性汚泥の数理モデル(ASM)をベースとした予測手法が考えられる。そのモデル複雑な非線形微分方程式で構成されているが、その中の多くのパラメータに対して適切な推定ができれば、実際の活性汚泥の処理機能を再現できることが知られている。しかし、通常は、現場の活性汚泥に適合するように、多くのパラメータを推定することが困難であることが多い。そこで、現在は AI の手法の一つである機械学習などを適用して得られるデータから直接に活性汚泥などの水処理システムの水質を予測することが研究されている。簡単な場合には、従来の統計における線型回帰モデルも機械学習の一つの手法で予測に用いられる。しかし、対象が活性汚泥のような非常に複雑な場合には、線型回帰モデルやその時系列データへの適用である自己回帰型の線型モデルでは短期予測でも不十分である。

現在、非線形で複雑な対象のシステムの機械学習に対してはニューラルネットワーク(NN)を基盤とした深層学習の手法が研究開発されている。そこで、今回の研究においても、水質変動に追従できる自動制御システムの開発においてニューラルネットワークを基盤とした深層学習が適用可能であるかについて検討を行った。画像データなどの場合には最近応用が活発な畳み込みニューラルネットワークの深層学習の適用事例多くあるが、水質データの場合には時間的変動

の要素がある時系列データである。その場合には、再帰的ニューラルネットワーク(RNN)が必要になる。図 2-3-2.3 に通常の NN と RNN の構造を対比して示す。

画像などを判別するニューラルネットワーク

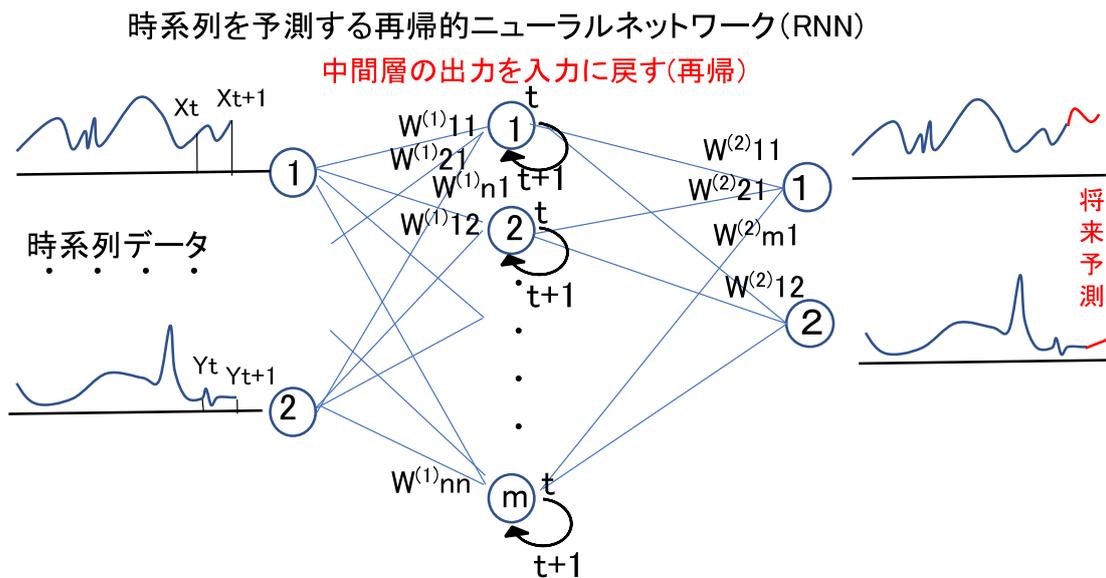


図 2-3-2.3 通常のニューラルネット(NN)と再帰的ニューラルネットワーク(RNN)

この中で丸はニューロン素子であり、多数の入力の重みつき和を受けて、その非線形変換(シグモイド関数や正規化線形関数などの活性化関数)された値を出力する。例えば画像から車か猫かを判定するために、沢山の車や猫の写真のデータを入力層に与え、また、学習時には正解データ(教師信号)を同時に与えながら、正解と出力層のデータの差を損失関数(平均二乗誤差関数など)が最小となるように重み W_{ij} を調整する。学習後は写真から車か猫を判定できるようになる。しかし、これは時間発展の構造を含まないので、時系列データには不向きである。

そこで、RNN タイプのニューラルネットワークでは、例えば活性汚泥の処理水質の時系列データを入力して将来の水質を予測ができるように、再帰的な構造を中間層に持たせる。実際に活

性汚泥系などの複雑な系から生じる時系列の学習では、中間層に多くのもつニューラルネットワーク構造が必要となるが、この図に示した RNN ではこのような時系列を学習することができないことが知られている。この構造では、常に t と $t+1$ の再帰的な更新が行われた結果、過去の情報を全て受け継ぐことになり、実質的に極端に多層化されたニューラルネットワークと同様な構造となっていることが、その原因とされている。そこで、過去の情報を適切に忘れる仕組みを導入した。その一つが長・短期記憶の特性を持つメモリーユニットの導入である (LSTM: Long Short-Term Memory) である。これにより、無限に多層化されていくことを防ぐことができる。その構造を図 2-3-2.4 に簡単に示す。

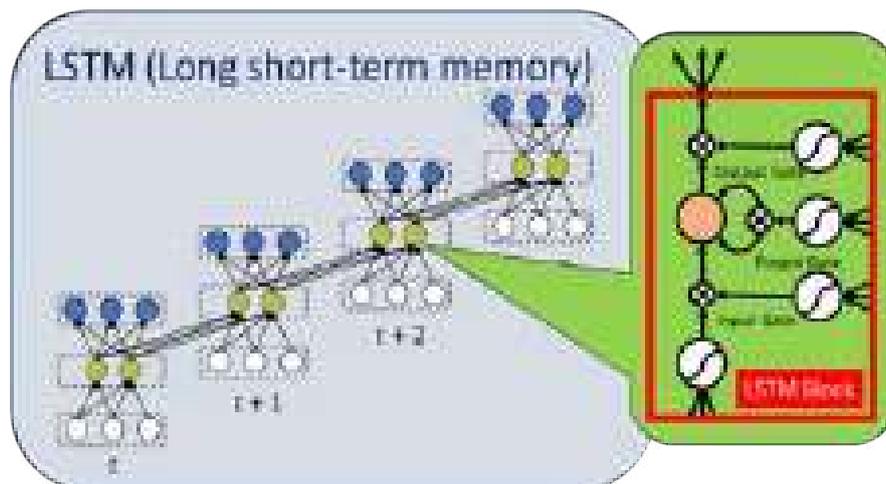


図 2-3-2.4 LSTM を導入した再帰的ニューラルネットワークの構造

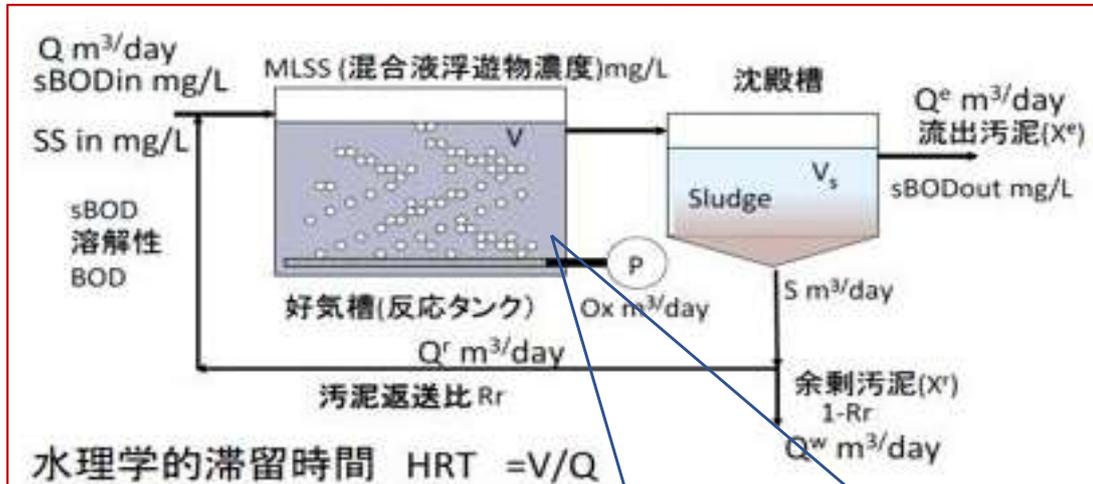
この図で示した LSTM を導入した RNN の構造では、再帰的な構造による時間発展をわかりやすくするために、時間的に展開 ($t, t+1, t+2, \dots$) した形で記述してある。その中で、注目すべきは中間層の構造であるが、その通常の中間層の素子の代わりに、内部構造 (LSTM ブロック) がある素子となっている。この LSTM ブロック中には記憶ユニットがあり、一定時間は情報が保持されるが (短期記憶)、この時間をすぎると情報が消去される仕組みとなっている (Forget Gate)。このことにより、適度に過去の情報を捨てながら重みを更新 (学習) していくことで、長い時系列の学習が可能となる。

LSTM-RNN を実装する上では、様々なニューラルネットワークや他の機械学習の研究開発が、主に python をベースとした計算環境で TensorFlow のライブラリーなどを用いて実施できる。この TensorFlow は google が開発した機械学習のためのライブラリー集であり、最もよく使用されているが、さらに使いやすくするために Keras という深層学習用ライブラリーがある。今回の時系列予測では、この Keras を用いて、python で LSTM-RNN を実装した。また、今回の試験では、学習データとしては活性汚泥モデル (ASM) のシミュレーションデータを用いて、LSTM-RNN による予測がどの程度可能であるかを検証した。一方で、実際の活性汚泥による排水処理システムでは中間にさまざまなタンク系が並んでおり、流入と処理水 (流出) までには大きな時間遅れがある。そこで、この遅れを活用することで、流入に近い部分の水質データを用いれば、処理水の水質が

簡単な機械学習の方法で予測できる可能性がある。この場合には、線型回帰モデルで十分かもしれない。そこで、水質予測における線型回帰モデルの適用についても実データを用いて検討した。

3-2) LSTM—RNN の活性汚泥処理の水質予測への適用試験

活性汚泥モデル (Activated Sludge Model: ASM)は、主に都市下水を対象にした活性汚泥法における生物反応プロセスを微分方程式系で表しており、国際水協会(IWA)により幾つかの標準モデルが典型的なパラメータ値とともに提示されている。その中で最も基本となる ASM1 を図 2-3-2.5 に示す。



水理的滞留時間 $HRT = V/Q$

固形物 (Solids) 滞留時間 $SRT = MLSS \cdot V / (Q^w \cdot X^r + Q^e \cdot X^e)$

$= MLSS \cdot HRT / (a \cdot sBODin + b \cdot Ss \cdot c \cdot HRT \cdot MLSS)$

a: sBODからの汚泥転換率, b: SSからの汚泥転換率

ASM1の生物反応プロセスモデル

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \mu_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} X_{B,H} + \eta_N \mu_H \frac{S_N}{K_S + S_S} \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{B,H} - b_H X_{B,H}$$

$$\frac{dS_S}{dt} = \left[-\frac{\mu_H}{Y_H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_N \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} + k_b \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X + (X_S/X_{B,H})} \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_N \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} \right] X_{B,H}$$

$$\frac{dX_S}{dt} = (1-f_p)(b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) - k_b \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X + (X_S/X_{B,H})} \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_N \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{B,H}$$

.....

図 2-3-2.5 標準活性汚泥モデル ASM1 の基本構造

このモデルでは曝気槽(好気槽)と沈殿槽をもち、沈殿槽の下部から汚泥返送(後期層へ)と余剰汚泥の排出プロセスが組入られている。また、好気槽は生物反応プロセスのモデルが ASM の中核である。ASM1 では汚泥(微生物)の増殖過程と有機物(COD)除去、硝化反応や酸素消費などが主にモデル化されており、13 の状態変数と8つの反応プロセスからなる微分方程式系で構成されている。今回、この微分方程式モデルを Python 上で実装した。この ASM1 を用いて、流入流出がないバッチ式の活性汚泥法の計算結果の例を図 2-3-2.6 に示す。

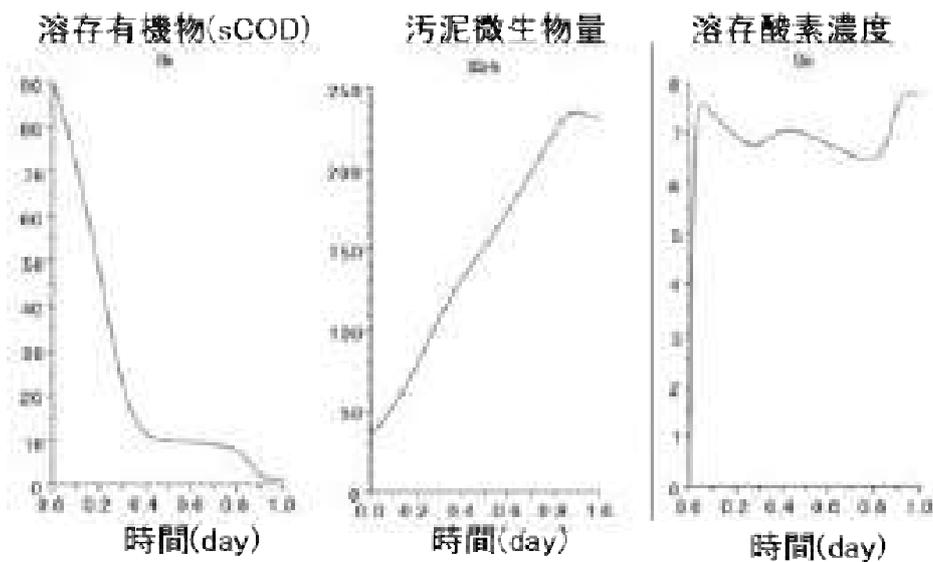


図 2-3-2.6 ASM1 によるバッチ式活性汚泥処理のシミュレーション結果の例

ここに示すように、汚泥微生物が増殖するにつれ、汚水(排水)中の溶存有機物が減少する、すなわち、微生物が栄養として有機物を取り込み生物学的酸化分解している。その結果、溶存酸素濃度も変動している。

次に、実際の連続的な排水の流入がある場合についてシミュレーションを行った。流入水量や流入濃度、曝気流量などが現実の系では時間的に変動するが、これらが一定の定常的な運転におけるシミュレーションを行った。溶存有機物 sCOD などの結果を図 2-3-2.7 に示す。

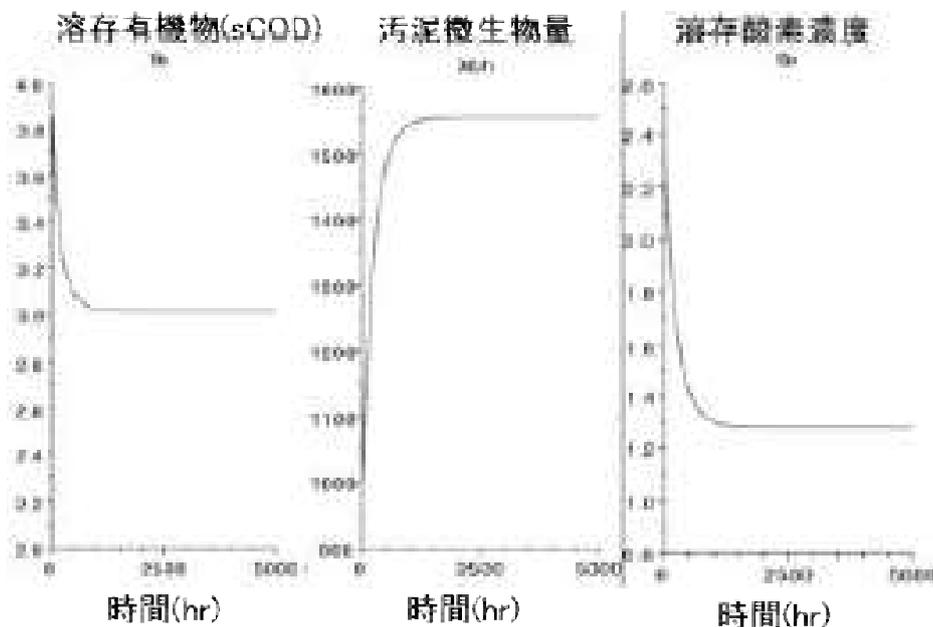


図 2-3-2.7 ASM1 による連続プロセス活性汚泥処理のシミュレーション結果の例

この図に示したように、それぞれの状態変数は、初期値から定常値に変化しており、この変動は指数関数的である。定常値に達した後は一定の値となる。

次に、実際の流入排水の濃度は一定ではなく変動しているため、流入原水の溶存 COD 濃度

(sCOD)に対して、乱数を使い一定の平均水質を中心にランダムに変動させた。その時の流入 sCOD と処理水質の sCOD を図 2-3-2.8 に示す。流入 sCOD の変動に対応して、処理水の sCOD も変動している。両者の間には相関はあるが、完全な比例的な関係ではない。活性汚泥モデルで計算される動力学的な変化が加わっている。

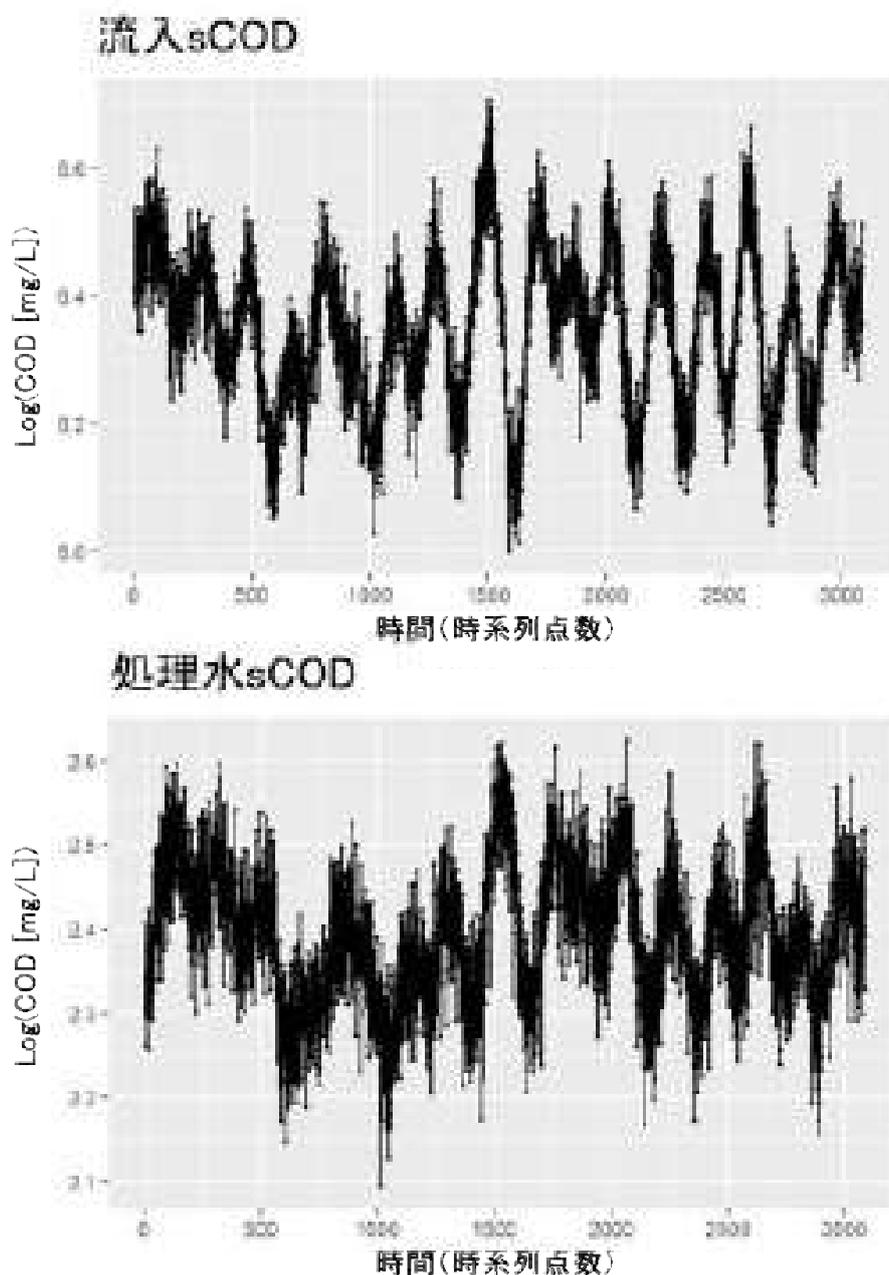


図 2-3-2.8 ASM1 による流入水質が変動する場合の処理水の水質予測

次に、この流入水と処理水の時系列を用いた LSTM-RNN による時系列予測を行う。図 2-3-2.8 に示した 3060 点を用いて学習を行う。この LSTM-RNN は、Tensorflow ライブラリーの中の Keras パッケージの中の LSTM レイヤーで実装されているので、それを用いる。今回の LSTM-RNN モデルでは、隠れユニット数(中間層)を4とした。また、5 つ前までの時系列点までを予測に

用いた(LookBack=5)。また、ニューラルネットの学習期間(訓練期間)における損失関数は平均2乗誤差関数を用いた。

LSTM-RNN モデルによる予測シミュレーションの試験結果を図 2-3-2.9 に示す。

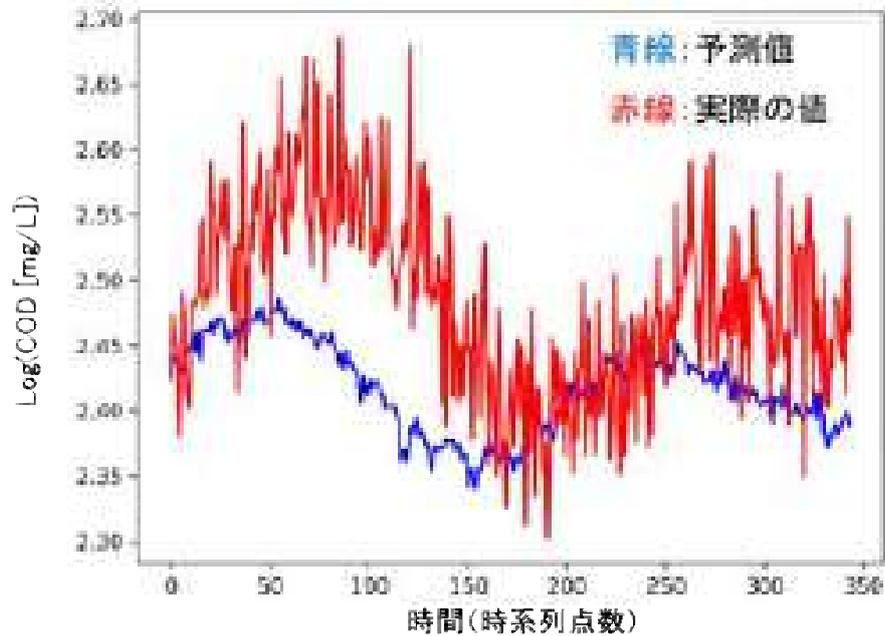


図 2-3-2.9 ASM1 のシミュレーション結果を LSTM-RNN モデルによる予測結果

赤いプロットが ASM のシミュレーション値であり、実際の計測データに対応する。青が LSTM-RNN モデルによる予測時系列である。今回は約 350 時系列点の先であるが、大きなトレンドは予測している。一方、赤線の実測値は短時間に大きな不規則変動を示しているが、青の予測時系列では、この不規則変動は少ない。短時間で大きな不規則変動は乱数による変動であり、実際には測定誤差やノイズなどに対応する。これは、LSTM-RNN でも完全なランダムデータを予測することは原理的に不可能である。むしろ、ノイズの中に隠れた動的特性を抽出することが重要である。ただし、今回の試験では変化のトレンドは再現できているが、一定のバイアスのズレが生じている。LSTM-RNN モデルでは学習で 1000 点以上が必要とされているが、今回は 3000 点あるので、十分な学習時間である。隠れユニットを増やすこと、LookBack を増やすことなどでこのバイアスの誤差を小さくできる可能性がある。

3-3) 山口県の飲料工場で得られたデータを用いた機械学習予測手法の検討

STM-RNN モデルを適用するには、学習データとして 1000 点以上が必要であり、さらに十分に水質の変化パターンを捉える必要がある。特に、山口県の飲料工場の排水は、製造している製品に対応して大きく活性汚泥への流入水質が変動し、それに伴い活性汚泥の操作条件、例えば沈殿池での凝集剤の添加量などが代えられている。したがって、通年でデータを取得する必要があるが、実際に設置した大型繊維濾過装置の運転は、通年での運転には至らず、予測したい繊維濾過への流入原水の濁度データを取得できなかった。一方で、凝集剤の添加量は繊維濾過の圧力損失に関係していることが、これまでの解析で判明している。そこで、凝集剤の添加量に関して、山口県の飲料工場で毎日取得されている水質管理の日報データ(Excel シート)から、自動的に必要なデータを抽出し、時系列データとする Python プログラムを開発した。図 2-3-2.10 に今回、必要な抽出データの時系列を示す。

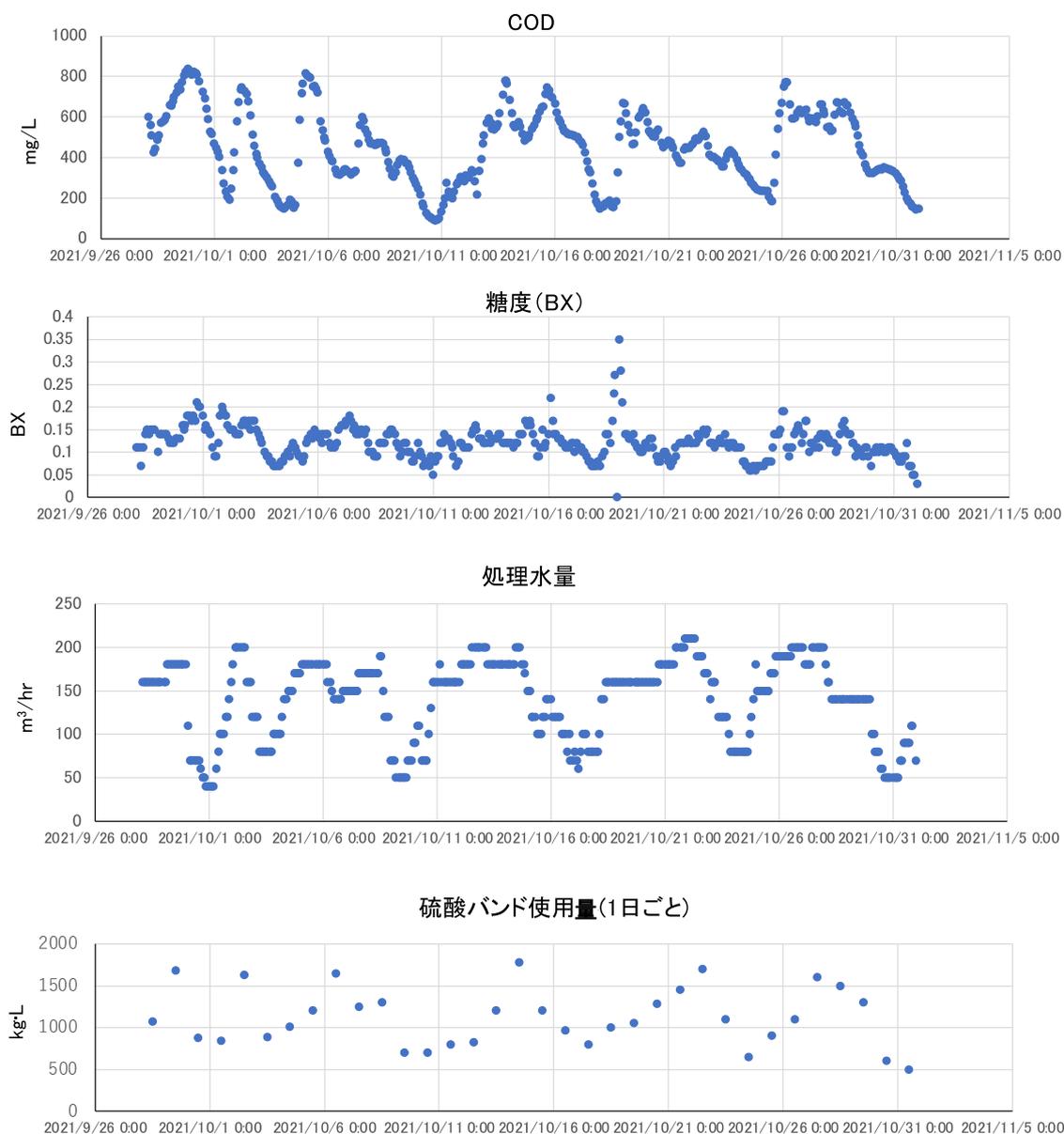


図 2-3-2.10 日報から抽出した水質の時系列データ

図 2-3-2.10 に示したように、凝集剤の硫酸バンドは1日1回の使用量が日報に記載されており、また、COD や糖度、流入水量は2時間おきにデータが得られている。そこで、硫酸バンドの使用量 S が COD や糖度 BX、処理水量 FLOW から予測が可能か否かを検討した。LSTM-RNN は、時系列のデータ点が同じ間隔で取得されている必要がある。また、他の時系列モデルも時間間隔が異なる場合は補間や平均化で合わせる必要があり厄介である。今回は、当日と前日の COD や糖度 BX、処理水量 FLOW の各々24 点のデータから予測することにした。最も簡単な機械学習予測法は線型回帰モデルである。

$$S = a + \sum_{i=1}^{24} b_i COD_i + \sum_{i=1}^{24} c_i BX_i + \sum_{i=1}^{24} d_i Flow_i \quad (1)$$

ここで、 $i=1 \dots 24$ は2時間単位で2日分の時系列で硫酸バンドの投入時点から遡った時系列点に対応する。合計、定数 a も含め 73 個のパラメータ(係数)を決定することになる。その結果を表 2-3-2.1 に示す。硫酸バンドのデータ数は 1125 点あるので、73 個の係数も十分に決定(学習)可能である。

表 3-2.1 推定した回帰式(1)の係数値

| | | | | | |
|----------|----------|---------|----------|--------|----------|
| 流入水量(1) | -1.00108 | COD(1) | 0.619644 | Bx(1) | 1119.1 |
| 流入水量(2) | 2.102706 | COD(2) | -0.40235 | Bx(2) | -9.55403 |
| 流入水量(3) | 0.951204 | COD(3) | 0.184097 | Bx(3) | 475.3832 |
| 流入水量(4) | -2.08815 | COD(4) | -0.24875 | Bx(4) | -303.14 |
| 流入水量(5) | 1.724023 | COD(5) | 0.111049 | Bx(5) | 745.0077 |
| 流入水量(6) | -1.2459 | COD(6) | 0.090598 | Bx(6) | 20.85006 |
| 流入水量(7) | 0.825314 | COD(7) | 0.622861 | Bx(7) | 327.8199 |
| 流入水量(8) | -1.2758 | COD(8) | -0.3808 | Bx(8) | -755.63 |
| 流入水量(9) | -0.66436 | COD(9) | -0.45146 | Bx(9) | 753.8347 |
| 流入水量(10) | 1.438395 | COD(10) | 0.751594 | Bx(10) | 1045.225 |
| 流入水量(11) | 0.468964 | COD(11) | 0.111085 | Bx(11) | -809.247 |
| 流入水量(12) | -1.36097 | COD(12) | -0.13180 | Bx(12) | 131.0974 |
| 流入水量(13) | 1.35361 | COD(13) | -0.12966 | Bx(13) | -459.708 |
| 流入水量(14) | 1.104932 | COD(14) | 0.576671 | Bx(14) | 369.9105 |
| 流入水量(15) | 2.188446 | COD(15) | -0.5328 | Bx(15) | 152.4347 |
| 流入水量(16) | -0.11326 | COD(16) | 0.056727 | Bx(16) | 41.92833 |
| 流入水量(17) | 2.363201 | COD(17) | 0.05188 | Bx(17) | -592.087 |
| 流入水量(18) | -1.7450 | COD(18) | -0.21643 | Bx(18) | 328.042 |
| 流入水量(19) | 1.8335 | COD(19) | 0.552928 | Bx(19) | 1523.385 |
| 流入水量(20) | -0.4328 | COD(20) | -0.12487 | Bx(20) | -834.779 |
| 流入水量(21) | 0.292006 | COD(21) | -0.88334 | Bx(21) | 450.8877 |
| 流入水量(22) | 1.542326 | COD(22) | 0.502542 | Bx(22) | 748.2468 |
| 流入水量(23) | 0.35362 | COD(23) | 0.500114 | Bx(23) | -1572.89 |
| 流入水量(24) | -0.85381 | COD(24) | -0.22318 | Bx(24) | 164.8243 |

表 2-3-2.1 に示したように推定した係数値はプラスとマイナスの値が頻繁に交代するような結果であるが、一方で表 2-3-2.2 に示すように、推定値の有意性はあまり高くない。有意水準 0.1(10%)以下で推定された係数は 11 個である。

表 2-3-2.2 推定した係数値の p 値

| | | | | | |
|----------|----------|---------|----------|--------|----------|
| 流入水量(1) | 0.181437 | COD(1) | 0.000000 | Bx(1) | 0.071738 |
| 流入水量(2) | 0.054132 | COD(2) | 0.470000 | Bx(2) | 0.889534 |
| 流入水量(3) | 0.384107 | COD(3) | 0.718004 | Bx(3) | 0.070168 |
| 流入水量(4) | 0.085453 | COD(4) | 0.448900 | Bx(4) | 0.568561 |
| 流入水量(5) | 0.211707 | COD(5) | 0.770446 | Bx(5) | 0.387346 |
| 流入水量(6) | 0.441601 | COD(6) | 0.887346 | Bx(6) | 0.67466 |
| 流入水量(7) | 0.604901 | COD(7) | 0.240000 | Bx(7) | 0.884829 |
| 流入水量(8) | 0.41574 | COD(8) | 0.34846 | Bx(8) | 0.609923 |
| 流入水量(9) | 0.66976 | COD(9) | 0.389038 | Bx(9) | 0.00946 |
| 流入水量(10) | 0.329422 | COD(10) | 0.209229 | Bx(10) | 0.170867 |
| 流入水量(11) | 0.716823 | COD(11) | 0.810882 | Bx(11) | 0.305127 |
| 流入水量(12) | 0.233869 | COD(12) | 0.7088 | Bx(12) | 0.800164 |
| 流入水量(13) | 0.209042 | COD(13) | 0.783664 | Bx(13) | 0.580766 |
| 流入水量(14) | 0.314757 | COD(14) | 0.350001 | Bx(14) | 0.616054 |
| 流入水量(15) | 0.000000 | COD(15) | 0.325038 | Bx(15) | 0.568829 |
| 流入水量(16) | 0.627165 | COD(16) | 0.853186 | Bx(16) | 0.642311 |
| 流入水量(17) | 0.084575 | COD(17) | 0.881094 | Bx(17) | 0.409474 |
| 流入水量(18) | 0.287168 | COD(18) | 0.884093 | Bx(18) | 0.6739 |
| 流入水量(19) | 0.291368 | COD(19) | 0.20017 | Bx(19) | 0.007114 |
| 流入水量(20) | 0.746169 | COD(20) | 0.747613 | Bx(20) | 0.174867 |
| 流入水量(21) | 0.645145 | COD(21) | 0.080236 | Bx(21) | 0.270260 |
| 流入水量(22) | 0.243622 | COD(22) | 0.386212 | Bx(22) | 0.344714 |
| 流入水量(23) | 0.780369 | COD(23) | 0.283477 | Bx(23) | 0.000000 |
| 流入水量(24) | 0.249801 | COD(24) | 0.200028 | Bx(24) | 0.887164 |

一方で、F 統計による回帰全体の有意性は表 2-3-2.3 に示すように、 10^{-173} であり、十分に有意である。さらに、この回帰モデルの予測性能を決める決定係数 R は 0.697 とおよそ 0.7 であった。R が 0.5 以下の場合には、予測能はほとんどないと考えられる。R が 0.7 以上であれば、ある程度の良好な予測が期待できる。今回は 0.697 と約 0.7 であるので、一定の予測性能が期待できる。また、今回、予測に用いた説明変数である COD や BX は硫酸バンドを投入する沈殿池までの遅延時間(滞留時間)を考慮する必要があり、滞留時間に応じて(1)式の係数に重み係数を導入することで、線型回帰モデルでも適切な時系列予測が可能であると考えられる。

表 2-3-2.3 線型回帰モデルの精度と有意性

| | |
|---------------------|-----------|
| R-squared: | 0.697 |
| Adj. R-squared: | 0.672 |
| F-statistic: | 27.08 |
| Prob (F-statistic): | 2.91e-173 |
| Log-Likelihood: | -6324.2 |
| AIC: | 1.279e+04 |
| BIC: | 1.315e+04 |

3-4) 本節のまとめと今後の課題

繊維濾過システムの流入原水が活性汚泥法による処理水であることに鑑み、活性汚泥モデル ASM1 によるシミュレーションデータを用い、再帰的ニューラルネットワークに長期短期記憶ユニットを適用した LSTM-RNN を用いた深層学習(ディープラーニング)を試験した。その結果、活性汚泥シミュレーションによる流入水と処理水の COD 変化を学習し、処理水質のトレンド(時間変化の傾向)を学習し一定の予測ができること示した。

さらに、実際の山口県の飲料工場の排水処理施設の日報データ(Excel データ)から自動的に必要な時系列データを抽出するプログラムを作成した(Python)。それを使い流入水の COD、糖度、流入水量、凝集剤(硫酸バンド)の投入量の時系列データを取得し、硫酸バンド投入量が機械学習としての線型回帰モデルによる予測性能を評価した。その結果、硫酸バンドの投入量を流入水量、糖度(Bx)、また COD 値から予測できる可能性を示唆できた。

以上の結果からニューラルネットワークによる深層学習だけでなく、より簡明で実用的な線型回帰モデルも機械学習として活用し、繊維濾過システムの適正運転で重要な水質予測に使用できる可能性が判明した。もちろん、LSTM-RNN は極めて強力な手法で、複雑な動態も学習し予測することができる。しかし、十分なデータが必要になるので、実用化においては、オンラインで必要な水質の自動計測が十分にできることが、重要になってくる。それでも、実際の運転データでは、時系列が途切れることがある。このような場合も含めた時系列の学習手法を開発する必要がある。

その上で、実際に予測データを繊維濾過装置の制御に使用し、このような予測が有用であることを実証することが、残された大きな課題である。

2-4 大型実証試験機の開発

(スケールアップした繊維濾過装置における濾過性能の検証の対応)

【開発目標： 大型実証機の処理容量が 2000m³/日以上】

これまでにない大型の繊維濾過装置を開発し、実際の排水での実証試験で長期間の性能を確認する。

- ✓ 実機に近いスケールでの試験データの提示は、ユーザーから最も多い要望事項である。
- ✓ 実用規模の繊維濾過装置を開発し、協力企業であり最初の予定顧客である山口県の飲料工場の排水処理設備(図 2-4.1)で、実際の排水処理水を原水とした長期間の実証試験を行い、長期間の微粒子除去性能、性能低下度、ランニングコストの検証を行う。



図 2-4.1 飲料工場の排水処理設備

2-4-1 実用規模の実証試験機での性能検証 協和機電工業・長崎大学

1) 目的

原水槽の水位、粒子濃度(濁度計測)と繊維濾過装置の濾過水量、圧力損失、処理水質(濁度)をモニターし、自動運転制御を行う。この制御では、サブテーマ1)と2)で得た繊維濾過性能の予測式で原水水質と濾過経過時間に適応して各槽(複層)の繊維充填密度を CAP 位置と複層の格段の位置で制御するが、ユーザー毎の要求処理水量の変化を予測して制御を行うことが必要となる。そこで、時系列の深層学習モデル(AI)を用いた適応制御系を構築することで、自動制御可能なシステムを開発する。

2) 実施内容と結果の要約

これまでに製作した経験がある最大の濾過塔直径は 490mm であるが、本事業では濾過塔直径が 1200mm の繊維濾過大型実証機を設計・製作して実証試験を行った。重量が従来の 6 倍となった CAP の強度を保つための内部構造の設計と、濾過塔のクリアランスの設定においてノウハウを得ることができた。実証では、山口県の飲料工場から排出される、微生物処理と凝集沈殿処理がされた排水処理水を濾過対象水として、試験を行った。連続運転では濾過塔ののぞき窓部の強度不足が確認された対応を行ったが、それ以外では構造的な問題は生じず、直径 1200mm 高性能繊維濾過装置 F-CAP が構造的に問題なく運用できることを確認できた。この濾過対象水はリンやアルミニウムを多く含み、特有の粘性があり濾過差圧が上昇しやすいという問題に直面した。そのため、繊維濾過小型モデル機を用いて繊維の充填条件と洗浄条件の設定に取り組んだ。その結果、このような有機系排水では従来から使用していた 19 μ m の PET 繊維では濾過時の通水抵抗で濾層が押しつぶされて充填密度が高くなりすぎる問題が判明したため、新たに 29 μ m の繊維を採用し、濾過及び洗浄条件を調整して濾過時間が 60 分間を維持できる条件を設定した。継続研究により更なる濾過時間の延長を目指す。

3) 具体的な実施内容

3-1) 大型実証機の設計・製作

これまでの高性能繊維濾過装置 F-CAP での製作実績としては、濾過塔の直径が 500mm までの中型機相当であったが、市場・顧客ニーズ調査の結果からは、一日の処理能力が 1000m³ や 2000m³ の水量でも処理可能な大型の濾過器必要であることが分かった。そのため、本事業では実際に本濾過装置のニーズがある、山口県の飲料製造工場での排水処理水を対象に、日量 2000m³ を処理可能な濾過塔直径が 1200mm の高性能繊維濾過装置 F-CAP を開発し、実証試験を行って実用性能を確認するとともに、本事業で取り組んだ各個別技術を取り入れた製品化を目指すこととした。

協和機電工業(株)の高性能繊維濾過装置 F-CAP は、先述の通りに濾過塔内に繊維濾材を充填して、その上部を独自の内部構造である CAP 部品に連結して、濾過時には CAP の重量で繊維濾材を所定の充填密度に圧縮することで高い微粒子除去性能を発揮し、逆洗時には CAP 内に逆洗空気を貯めることで浮力を発生させて浮き上がることで繊維濾材を展開し、短い逆洗時間で高い濾材洗浄効果を得るといったコンセプトの構造となっている。これまでに製作実績がある最大の濾過塔である直径 490mm の装置では、CAP の重量は 20kg 程度で、繊維エレメントの設置本数も 200 エレメント程度であったが、これを直径 1200mm にすると、面積比 6 倍となり、CAP の重量も 6 倍の 120kg 程度となる。そのため、所定の重量としながら強度を確保するための構造設計が必要となった。

また、繊維濾材の設置本数もこれまでの 250 本程度から 1200 本程度に増えることになり、繊維濾材と CAP が均一に上下に作動するための濾過塔内のクリアランスの確保の設計も重要となった。

濾過塔自体も、可能な限り重量を抑えて低コスト化を図りつつ、強度を確保し、実証設備としての作業性も考慮する必要があった。

それらの条件を踏まえつつ、令和 2 年度前半で設計を行い、年末には図 2-4-1.1 に示した形状の濾過塔および CAP 部品等を製作した。



図 2-4-1.1 濾過塔直径 1200mm の繊維濾過大型実証機の製作写真
(左:組み立て途中の繊維濾材とCAP 部品、右:濾過塔組み立て完了後)

繊維濾材は、2-2-2に記載したように、複層化繊維濾過モジュールを採用した。

上層は直径約 $38\mu\text{m}$ の繊維で、下層は直径約 $19\mu\text{m}$ の繊維を連結したものとなる。これによって、上層で大きな粒子を補足し、下層で微粒子を補足するというような役割分けを測ることで、局所的な濾材の閉塞によって短時間で濾過差圧が上昇してしまうという問題を回避するようにした。

最下部のベース部以外の、繊維濾材が収納される部分となる上段、中段、下段の濾過塔の側面には、内部の状況が確認できるようにのぞき窓を設置した。

繊維濾材は初期の洗浄が必要となるため、工場内で組み立て後に洗浄用ラインを構築して、洗浄用液を用いた初期洗浄を行い、水道水でのリンスを行った後に実証場所へ出荷した。

3-2) 大型実証機の設置場所の選定と濾過対象水の概要

大型実証機は、ニーズを有している山口県の飲料工場に設置することとした。ここでは、製品製造によって発生する排水が1日に最大で5000m³発生し、それを排水処理設備で浄化処理したのちに処理水を河川へ放流していた。排水処理設備のフローとしては、図2-4-1.2に示すように、pH調整→好気性微生物処理→嫌気性微生物処理、活性汚泥の沈殿処理、pH調整剤+凝集剤添加+高分子凝集助剤の添加による凝集処理、沈殿処理の流れとなっている。

しかし、その処理水は、水質基準は十分に満たしているものの、沈殿しきれない微量の凝集フロックを含んでいるために、放流先の河川で堆積物の発生につながっていると考えられており、自主的な再処理を検討されている工場であった。

本来、食品や飲料の製造工場の排水は、発生量や水質が日々変化するために微生物処理の状況も刻々と変化するため、凝集沈殿処理水の水質も変化しやすいものである。また、その処理水には微小な凝集フロックしか含まないため、一般的な砂濾過や繊維濾過では補足不可能なサイズであるために、再度凝集剤を添加してから濾過を行うというような対策が必要であるうえ、そのような水は濾材に蓄積しやすく、濾過差圧を早く上昇させる問題があるため、一般的な濾過装置では対処できないことが多い。しかし、協和機電工業(株)の高性能繊維濾過装置 F-CAP は、その独自の内部構造によって、凝集剤を使わずに微粒子を除去可能で、物理的に強い逆洗が可能であるため、この濾過対象水でも処理が可能である可能性があると考え、この水を実証試験に用いることとした。

よって、実証試験場所は山口県内の飲料製造工場で、濾過対象水は飲料工場の排水の処理水となり、平均的な水質としては、濁度が8~10NTU程度、懸濁物質濃度が5~15mg/L程度の、微生物処理後の凝集沈殿処理水となった。

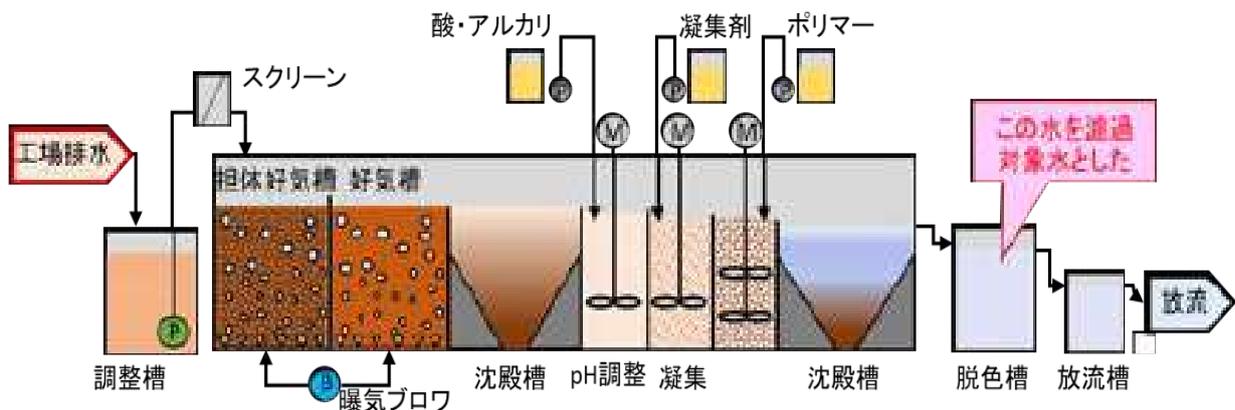


図 2-4-1.2 山口県の飲料工場の排水処理設備フロー

3-3) 大型実証機での短期性能の確認

3-1)の大型実証機は、2021年の2月に実証場所へ設置した。設置後の現地の状況を図2-4-1.3に、実験設備のフローを図2-4-1.4に、実証設備の配置図を図2-4-1.5に示す。



図2-4-1.3 濾過塔直径1200mmの繊維濾過大型実証機の設置状況

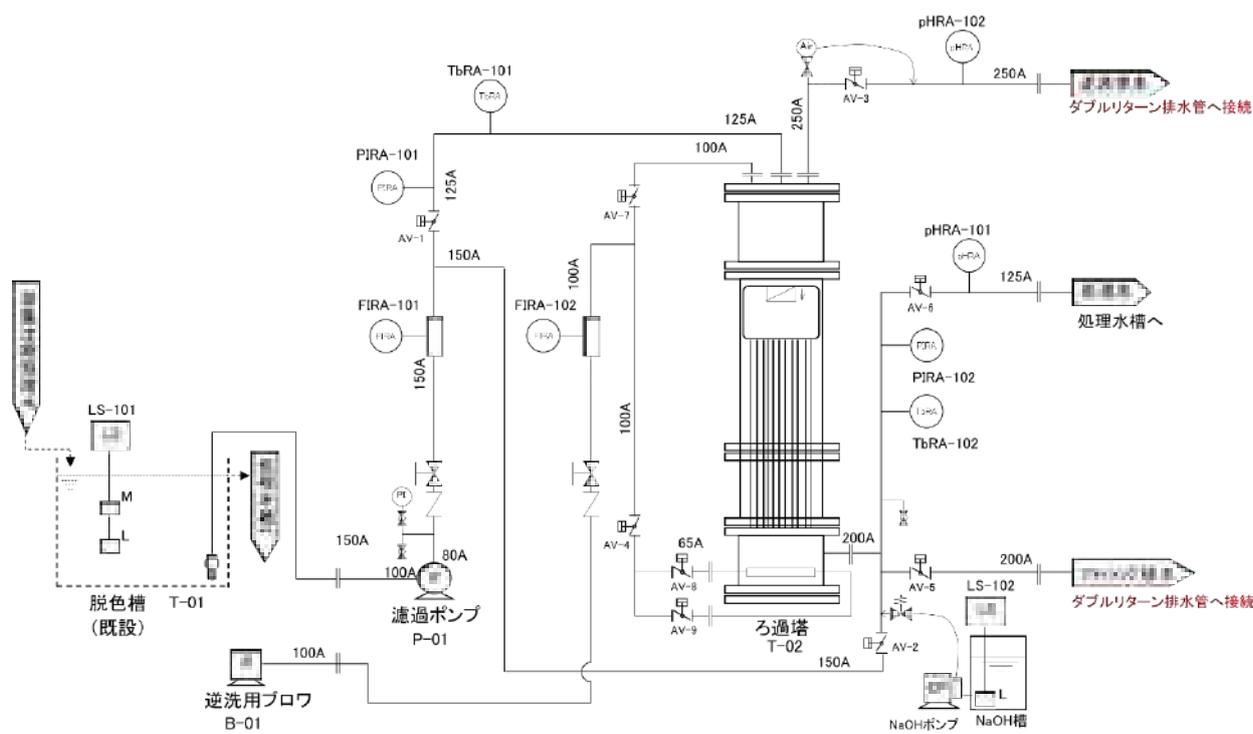


図2-4-1.4 繊維濾過大型実証機のシステムフロー図

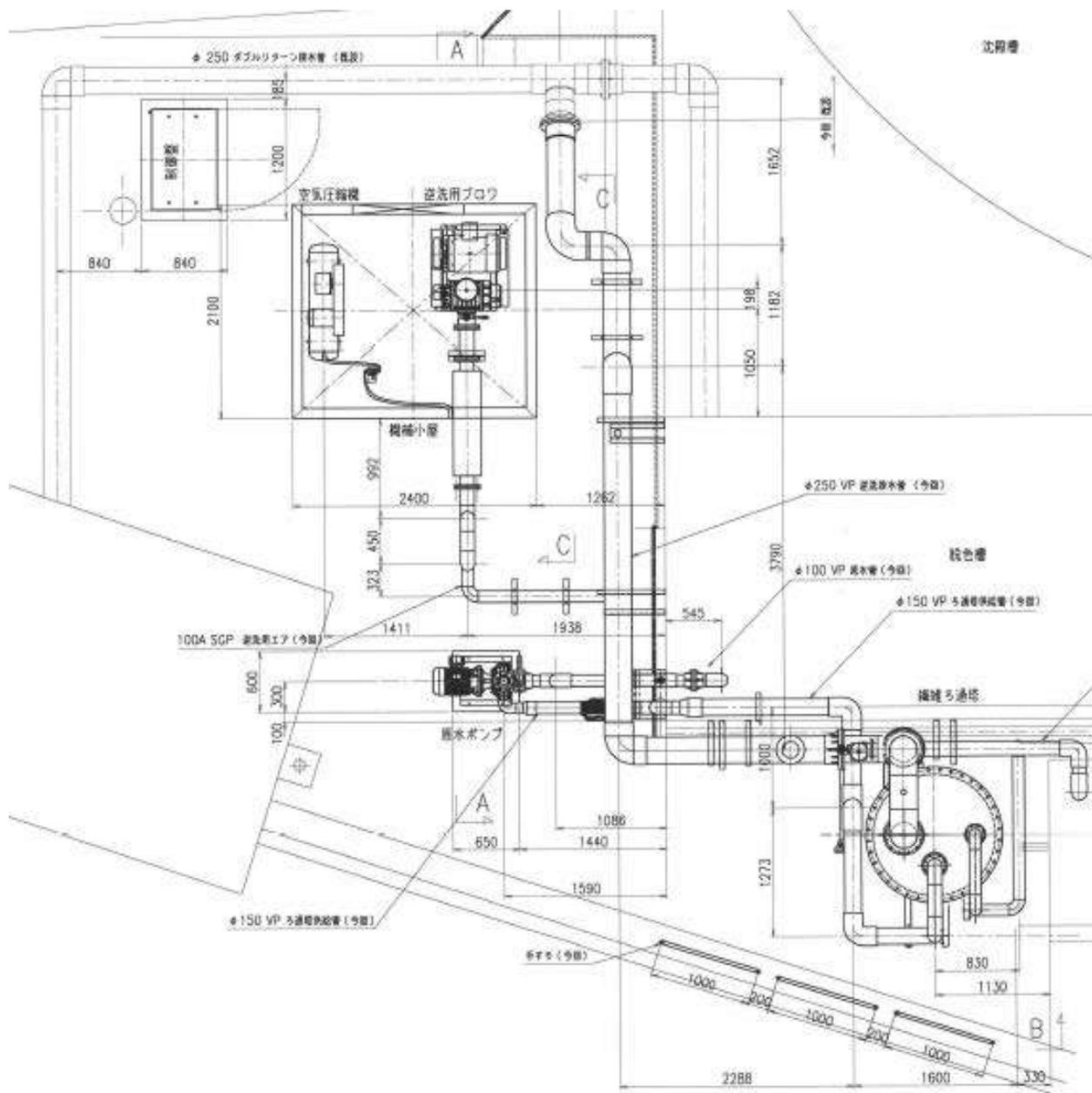


図 2-4-1.5 繊維濾過大型実証機の配置図

実証では、直径 1200mm の高性能繊維濾過装置 F-CAP に対して、濾過流速が 40m/h から 80m/h に調整したときの性能を確認することとした。つまり、処理水量としては 45m³/h から 90m³/h となる。

実際には、2021 年 2 月頃から短期性能の確認試験を開始し、2021 年 9 月にはその確認を完了した。この時には、濾過流速を変えた場合の濾過差圧の変化の確認と、それぞれの濾過流速における処理水の濁度を確認した。

2021 年 3 月 2 日の繊維濾材が汚れていない状況で得られた濾過差圧と水質を図 2-4-1.6 に示す。この時の濾過流量は 60m³/h であったため、濾過速度は 53m/h である。

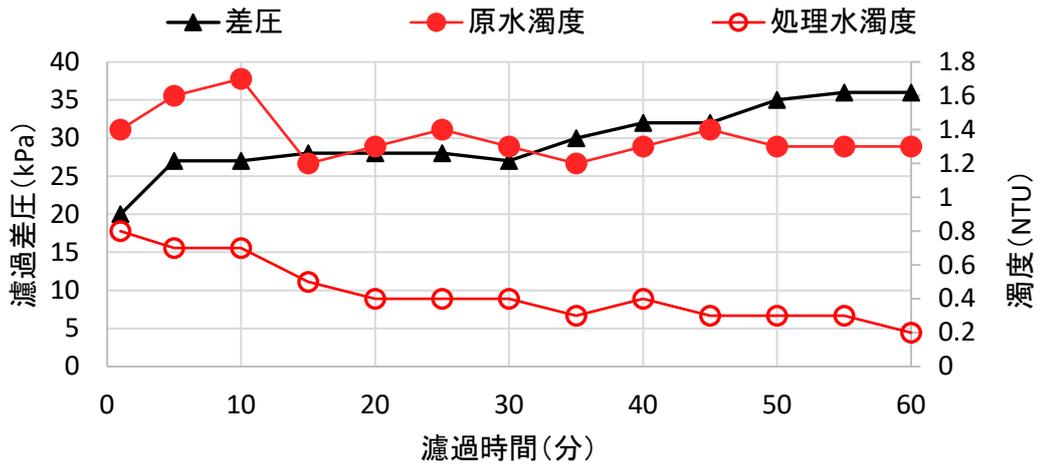


図 2-4-1.6 2021 年 3 月 2 日の繊維濾過大型実証機での実験データ

このように、繊維濾材がまだ新品に近い状況であったことと、原水の濁度が非常に低い 1~2NTU 程度と清澄な状況であったことから、濾過差圧の上昇率は低く、濾過 60 分の時点でも 36kPa 程度であった。また、処理水質も 0.2~0.8NTU となり、除去率は 43~85% が得られた。しかし、この後に逆洗を行い、再度濾過を行うという連続運転を行うと、濾過差圧の上昇が早くなり、2021 年 3 月 9 日の実証試験では濾過流量を 45m³/h (濾過流速 40m/h) に落としたにも関わらず、1 回目濾過では濾過時間 120 分で濾過差圧 180kPa に達し、逆洗後の 3 回目濾過では濾過時間 60 分で濾過差圧 180kPa に達した。この時、逆洗時には濾過原水を使った所謂原水逆洗を採用しており、濾過塔に供給する直前で NaOH を所定量添加して洗浄効果を得るように設定していた。2021 年 3 月 9 日の運転状況を図 2-4-1.7 に示す。

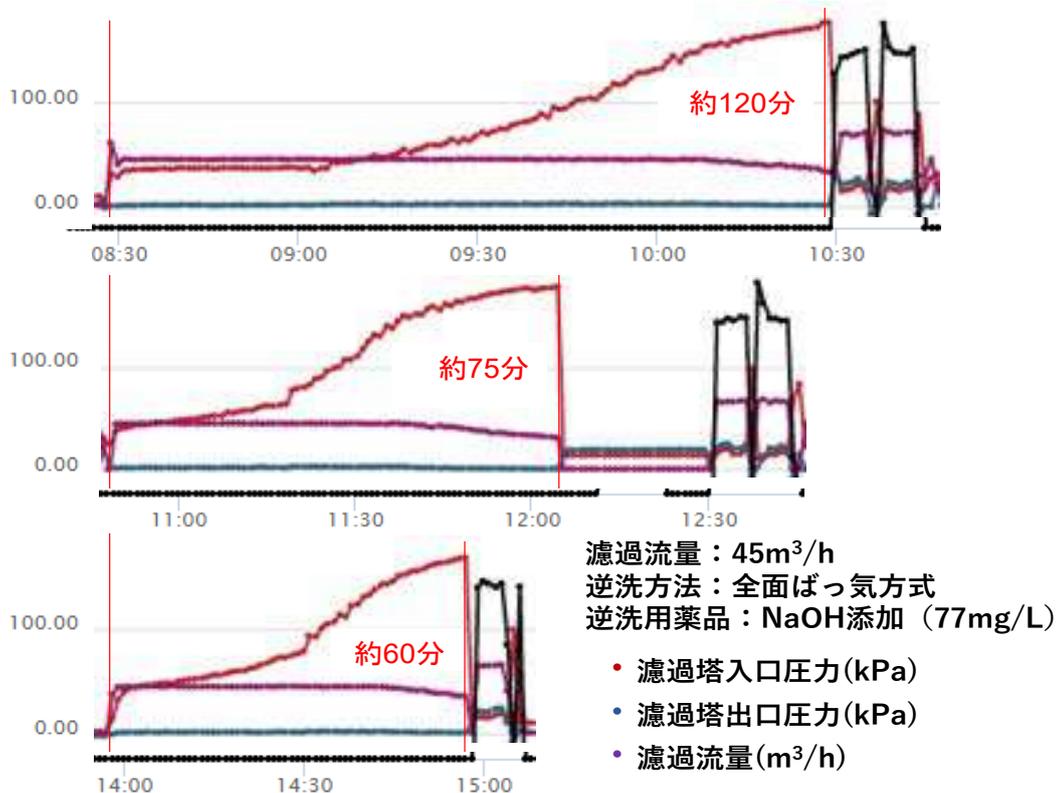


図 2-4-1.7 2021 年 3 月 9 日の繊維濾過大型実証機での実験データ

このように、濾過と逆洗を行って連続運転していくと、次第に濾過差圧の上昇が早くなり濾過時間が短くなるという問題が顕著に表れるという問題が生じることが明確になった。

そのため、大型実証機を使った本格的な連続運転のためには、濾過及び逆洗の条件設定が重要になると考え、以降はその条件設定のための実証試験に注力することとなった。

2021年2月から4月に実施した運転条件と、その時の原水濁度、処理水濁度の結果を表2-4-1.1にまとめる。

表 2-4-1.1 2021年2月～4月の繊維濾過大型実証機での実験条件と結果

| 日付 | 濾過流量 | ろ過時間 | 逆洗前差圧 | 逆洗流量 | ブロウ流量 | 薬品注入濃度 | 原水濁度 | 処理水濁度 |
|-----------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|---|------|-------|
| | m ³ /h | 分 | kPa | m ³ /h | m ³ /h | mg/L | NTU | NTU |
| 2021/2/12 | 70 | テスト運転(30) | 20 | 70 | 500 | 0 | 6.7 | 1.2 |
| 2021/3/2 | 60 | 60 | 36 | 70 | 500 | 0 | 1.8 | 0.4 |
| 2021/3/3 | 60 | 30 | 150 | 70 | 500 | (NaOH) 30 | 1.5 | 0.5 |
| 2021/3/3 | 45 | 100 | 180 | 70 | 500 | (NaOH) 30 | 1.7 | 0.5 |
| 2021/3/9 | 45 | 120 75 60 30 | 180 | 70 | 500 | (NaOH) 77 | 1.8 | 0.8 |
| 2021/3/23 | 45 | 30 | 150 | 70 | 500 | (NaOH) 77 | 3.7 | 1.5 |
| 2021/3/23 | 45 | 30 | 150 | 70 | 500 | 0 | 4.1 | 1.7 |
| 2021/4/1 | 60 | 15 | 120 | 70 | 500 | (H ₂ SO ₄) pH 4 | 10.6 | 4.8 |
| 2021/4/1 | 60 | 80 | 120 | 70 | 500 | (NaOH) pH 11.5 | 10 | 2.5 |
| 2021/4/8 | 60 | 80 40 50 | 114 38 140 | 70 | 500 | (NaOH) pH 10.8 pH 11.6 pH 11.7 | 6.5 | 2.5 |
| 2021/4/9 | 60 | 150 110 | 130 130 | 70 | 500 | (NaOH) pH 10.8 pH 11.7 | 3.4 | 1.1 |

2021年7月には、ポンプの吐出量を多くするために、ポンプ吸い込み側の配管の口径を大きくする改造を行い、濾過流量を90m³/hとして試験を行った。その結果を表2-4-1.2に示す。濾過流量を1.5倍から2倍程度多くしたが、繊維を浸漬洗浄した後の初回濾過(1回目濾過)時は、90分間程度の濾過時間を得ることができた。また、逆洗後の2回目濾過では濾過時間が短くなると予想していたが、毎回短くなるわけではなく、日によってその変化が大きく異なることがわかった。これはつまり濾過対象水の排水処理水の水質が都度変化していることに起因していると考えられる。

表 2-4-1.2 2021 年 7 月前半の繊維濾過大型実証機での実験条件と結果

| 日付 | 濾過流量 | ろ過時間 | 逆洗前差圧 | 逆洗流量 | ブロウ流量 | 薬品注入 | 原水濁度 | 処理水濁度 |
|----------|-------------------|----------|-------|------|-------------------|-------------------|------|-------|
| | m ³ /h | | 分 | kPa | m ³ /h | m ³ /h | mg/L | NTU |
| 2021/7/7 | 90 | 94 91 | 123 | 110 | 500 | (NaOH) | 6.3 | 1.6 |
| | | | 156 | | | pH 11.8 | 5 | 1.3 |
| 2021/7/7 | 90 | 97 44 | 142 | 110 | 500 | なし | 6.2 | 1.3 |
| | | | 92 | | | | 5 | 1.6 |
| 2021/7/8 | 90 | 88 71 | 165 | 110 | 500 | なし | 6.7 | 1.8 |
| | | | 187 | | | | 3.7 | 1.6 |
| 2021/7/8 | 90 | 90 90 | 178 | 110 | 500 | (NaOH) | 5.7 | 1.5 |
| | | | 181 | | | pH 11.5 | 4.4 | 1.2 |
| | | | | | | pH 11.6 | | |

連続運転のためには、濾過時間を 90 分以上にすることが、水回収率を高く維持するためには必要であるため、濾過流量を下げても運転するべきであると判断した。そのため、2021 年 7 月後半には濾過流量を 60m³/h 及び 45m³/h に下げても運転し、濾過と逆洗の繰り返しで 1 回目濾過から 2 回目濾過、3 回目濾過と推移した際に、差圧上昇がどのように変化するかを確認するための試験を行った。その結果を表 2-4-1.3 に示す。

表 2-4-1.3 2021 年 7 月後半の繊維濾過大型実証機での実験条件と結果

| 日付 | 濾過流量 | ろ過時間 | 逆洗前差圧 | 逆洗流量 | ブロウ流量 | 薬品注入 | 原水濁度 | 処理水濁度 | |
|-----------|-------------------|------|-------|------|-------------------|-------------------|------|-------|-----|
| | m ³ /h | | 分 | kPa | m ³ /h | m ³ /h | mg/L | NTU | NTU |
| 2021/7/26 | 60 | 90 | 90 | 110 | 500 | (NaOH) | 3.6 | 1.6 | |
| | 60 | | 95 | | | | pH12 | 3.4 | 1.6 |
| 2021/7/27 | 60 | 63 | 163 | 110 | 500 | (NaOH) | 5.8 | 2.4 | |
| | 50 | 60 | 163 | | | | pH12 | 5.9 | 2.6 |
| | 45 | 79 | 173 | | | | 6.2 | 2.7 | |
| | 45 | 90 | 177 | | | | 6.3 | 2.6 | |
| | 45 | 101 | 174 | | | 5.2 | 2.4 | | |
| 2021/7/28 | 60 | 174 | 159 | 110 | 500 | (NaOH) | 3.2 | 1.6 | |
| | 60 | 111 | 159 | | | | pH12 | 4.0 | 1.8 |
| | 60 | 90 | 148 | | | | 4.2 | 1.7 | |
| | 60 | 80 | 160 | | | | 3.8 | 1.4 | |
| 2021/7/29 | 60 | 110 | 160 | 110 | 500 | (NaOH) | 3.5 | 1.5 | |
| | 60 | 104 | 152 | | | | pH12 | 3.4 | 1.4 |
| | 60 | 94 | 155 | | | | 4.0 | 1.5 | |
| | 60 | 90 | 155 | | | | 3.8 | 1.4 | |

この結果から、原水濁度が 6NTU 程度であれば濾過時間を 90 分程度確保するためには流量を 45m³/h とし、原水濁度が 4NTU 程度であれば濾過時間を 90 分程度確保するためには流量を 60m³/h とすべきであると判断した。

3-4) 大型実証機での連続運転

大型実証機を使った連続運転の前に、濾過塔の不具合が発生し、対応を行った。

内容は、CAPの上下動の不具合で、2021年5月に発生した。逆洗後に濾過工程に戻る際に、上昇したCAPが濾過塔内に引っかかり、下降しないという不具合であった。これは、これまで製作した直径500mmまでの濾過塔とは違い、濾過塔直径が2倍以上となったため、ステンレスで製作する際の製作誤差がその比率で大きくなり、濾過塔内部部品であるCAPがスムーズに上下するための濾過塔内部のクリアランスが確保できないことが原因であると判断した。そのため、改良品では製作誤差を減らすための加工を追加するとともに、逆洗時に濾過塔の継ぎ目を跨がないように濾過塔の分割ポイントを変更した(図2-4-1.8)。改良品は2021年6月末に実証機に取り付けた。

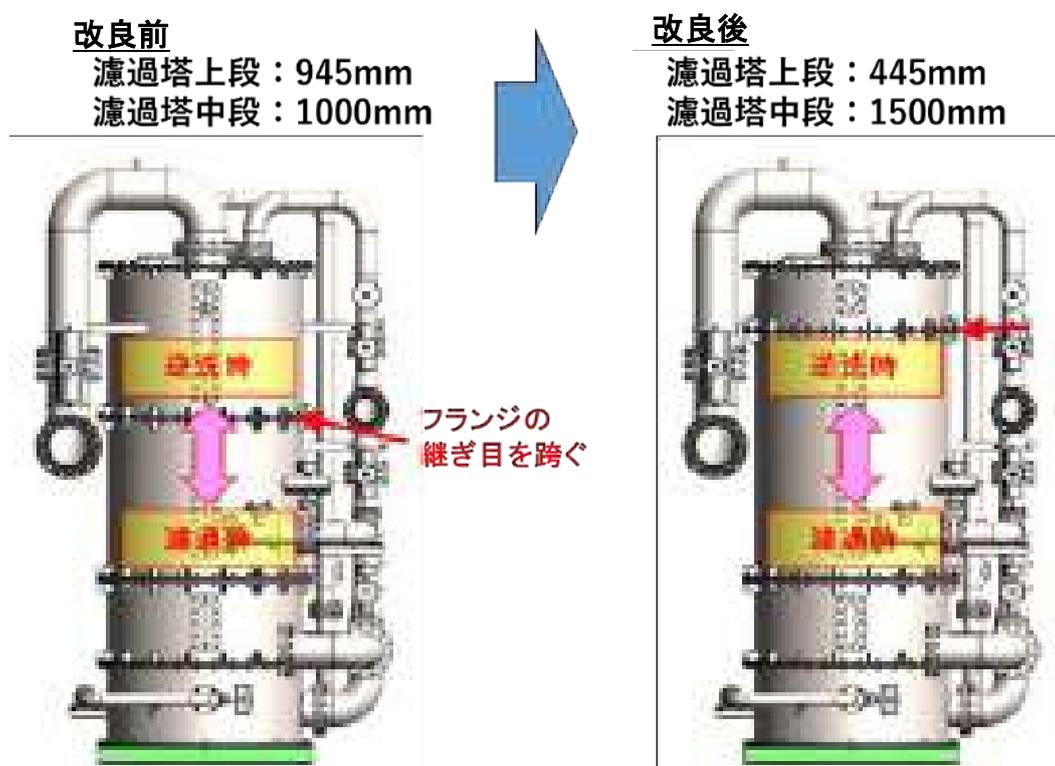


図 2-4-1.8 大型実証機の分割ポイントの変更内容

改良後はCAPの上下動に不具合が生じることは無く、連続運転できる状態だと判断し、2021年9月28日より連続運転を実施した。

3-5) 大型実証機での連続運転

3-3) および3-4)の結果から、連続運転のための運転条件を設定できたため、濾過流量を濾過対象水の濁度に応じて $45\text{m}^3/\text{h}$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ 、 $90\text{m}^3/\text{h}$ に自動的に調整するシステムを組み込み、2021年9月末から2021年10月末までの1か月間の連続運転を行った。

得られた結果を図2-4-1.8に示す。

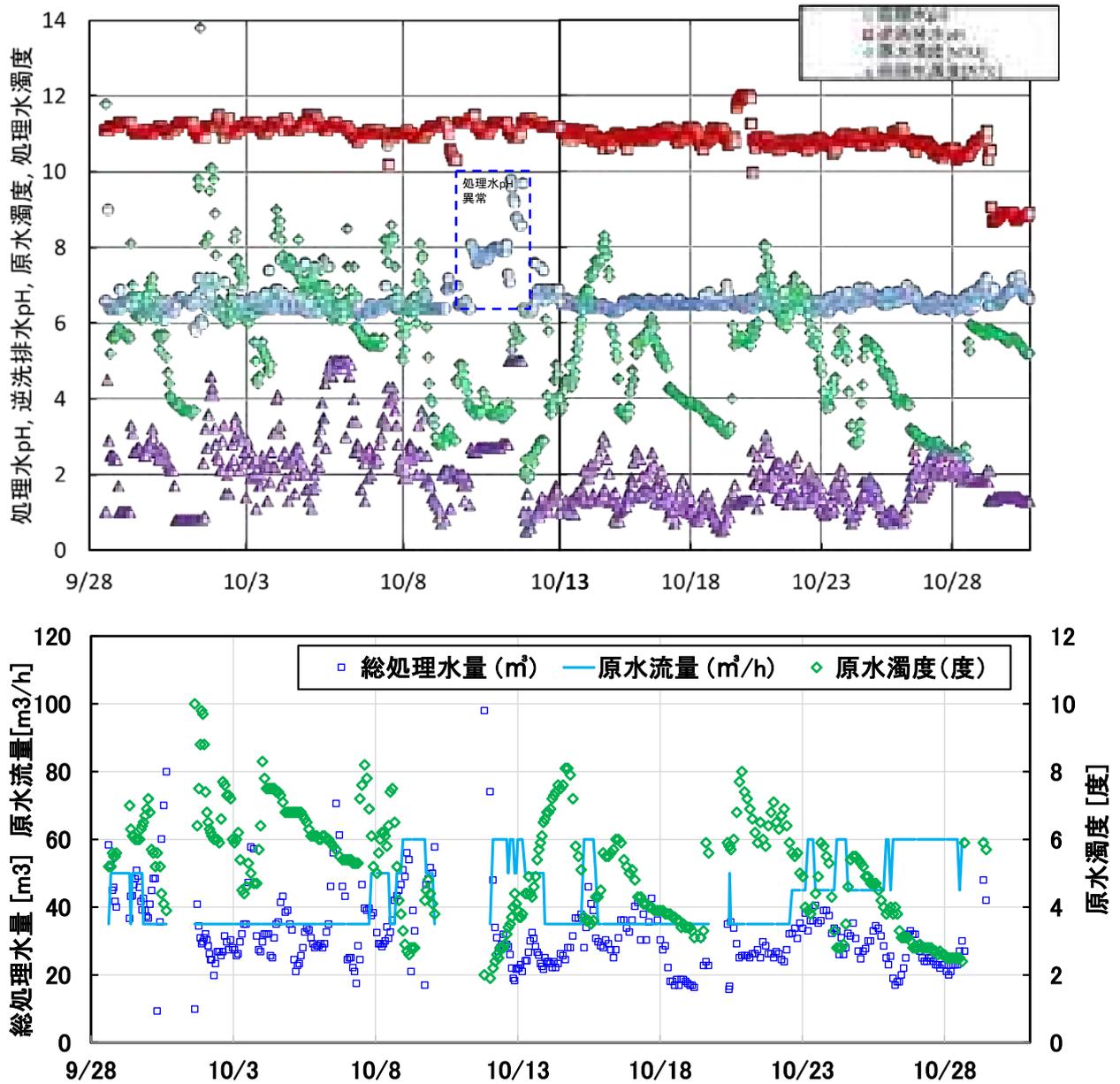


図2-4-1.8 2021年9月末から2021年10月末までの連続運転の結果

(上段:pH および濁度、下段:水量および原水濁度)

連続運転期間中の濾過原水は、平均濁度が 5.2NTU で、一日の濾過水量は平均 541m^3 であった。これを繊維濾過した処理水は平均濁度が 1.6NTU で、濾過中の平均の濾過差圧は 70.5kPa となった。濾過原水の濁度が 6NTU を超えることが多くあったので、濾過水量は

45m³/hとなることが多く、平均では濾過工程＋逆洗工程＋停止工程のサイクルの中での平均の瞬間濾過水量はおよそ 50m³/h 程度となった。

問題となったのは、濾過差圧の異常な上昇である。逆洗後の初期の濾過差圧は 10kPa 程度から始まり、濾過運転が進むにつれて差圧が上昇していく。連続運転開始当初は 60～90 分で最大差圧に達していたが、10 月後半には 20～30 分で最大差圧に到達する状態となった。図 2-4-1.9 には 2021 年 10 月 1 日から 10 月 5 日の濾過流量と濾過差圧の状況を示し、図 2-4-1.10 には 2021 年 10 月 24 日から 10 月 28 日の状況を示す。

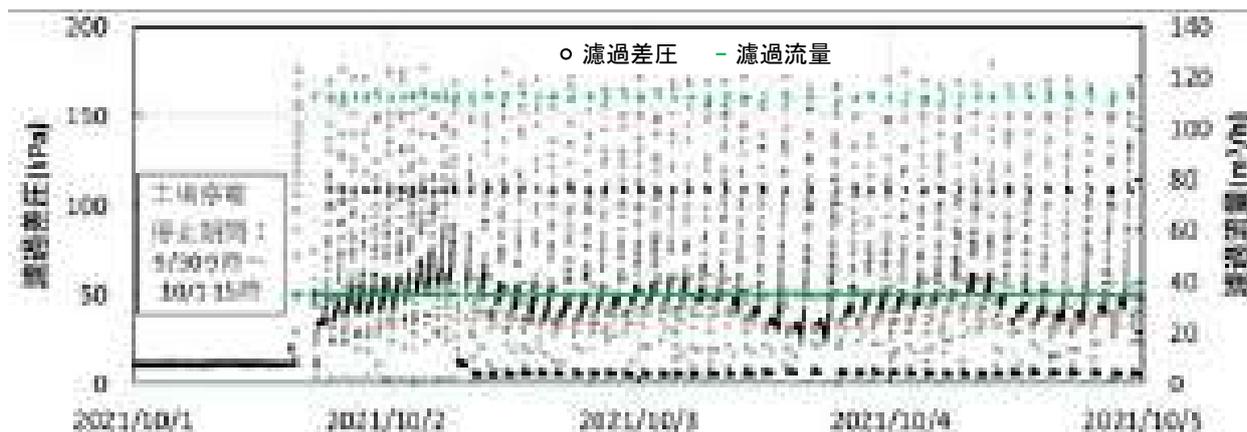


図 2-4-1.9 2021 年 10 月 1 日から 2021 年 10 月 5 日の濾過差圧と濾過流量の推移

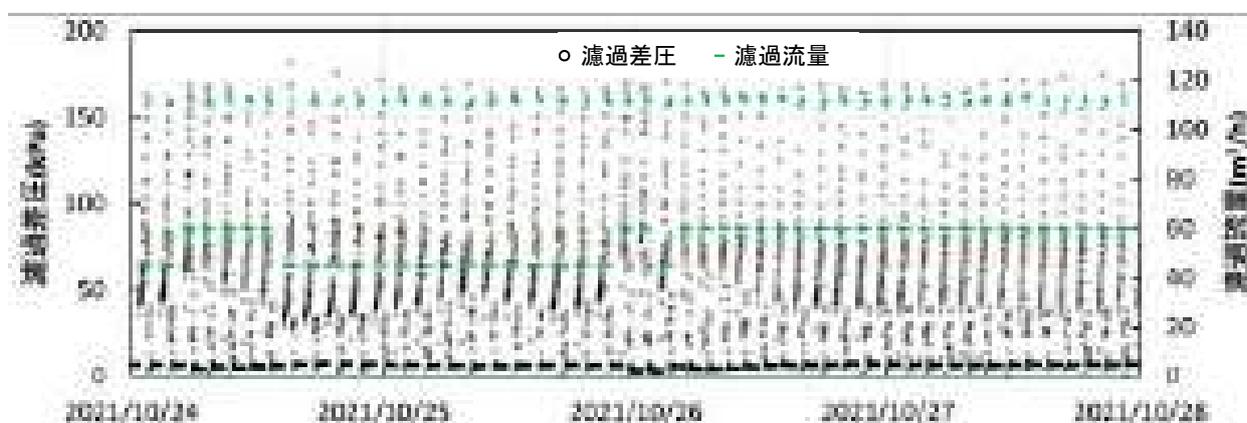


図 2-4-1.10 2021 年 10 月 24 日から 2021 年 10 月 28 日の濾過差圧と濾過流量の推移

このため、頻繁に逆洗を行う必要が生じるとともに、それに伴う逆洗用水、電気、薬品コストが増加してしまうため、この濾過対象水を継続的に処理するためには、逆洗条件を変更して繊維の差圧上昇を抑制する必要があると判断した。

一方で、濾過システムの構造・機能面での評価としては、運転期間中は制御システム及び CAP の動作は問題なく、濾過時に繊維を圧縮して繊維の充填密度を高め、逆洗時には繊維を展開して逆洗を容易に行うという機能を発揮し、大型機として運用できることを確認した。しかし、連続運転中に濾過塔ののぞき窓部にクラックが入るという不具合が発生したため、次項にて内容と対策を記載する。

3-6) 連続運転中の大型実証機の不具合と対応内容

連続運転中の 2021 年 10 月 13 日に、濾過塔ののぞき窓部にクラックが入る不具合が発生した。本実証機では、最大濾過圧力が 180kPa 程度まで達することがあるが、その際に濾過塔ののぞき窓部が縦に大きな開口となっているために、濾過塔を膨らまそうとする圧力に耐えきれず、のぞき窓が横に広がる形で変形した結果、のぞき窓にクラックが入ったというものである(図 2-4-1.11)。

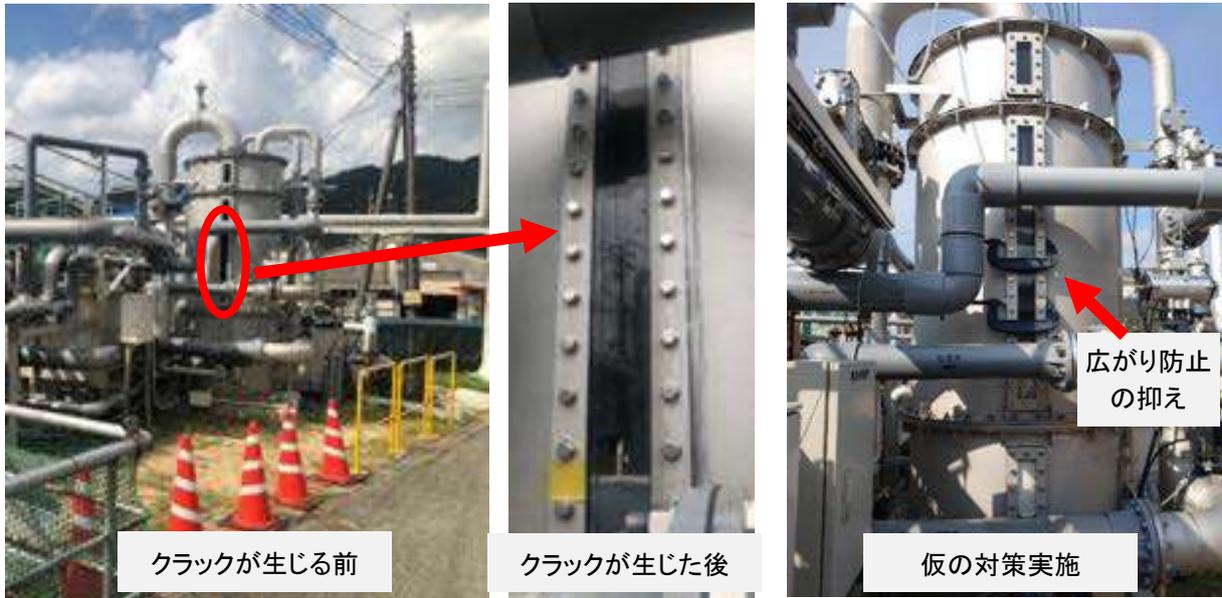


図 2-4-1.11 濾過塔ののぞき窓部に生じたクラックとその仮対策

これについては、当初は運用圧力を最大で 150kPa 程度で、通常時は 100kPa 未満で運転することを予定していたのだが、実際にはのぞき窓部の中段に補強板を追加して濾過塔が膨らまないようにすることで対応を行った。図 2-4-1.12 にその追加溶接部の写真を示し、図 2-4-1.13 には補強前後の構造解析の結果を示す。

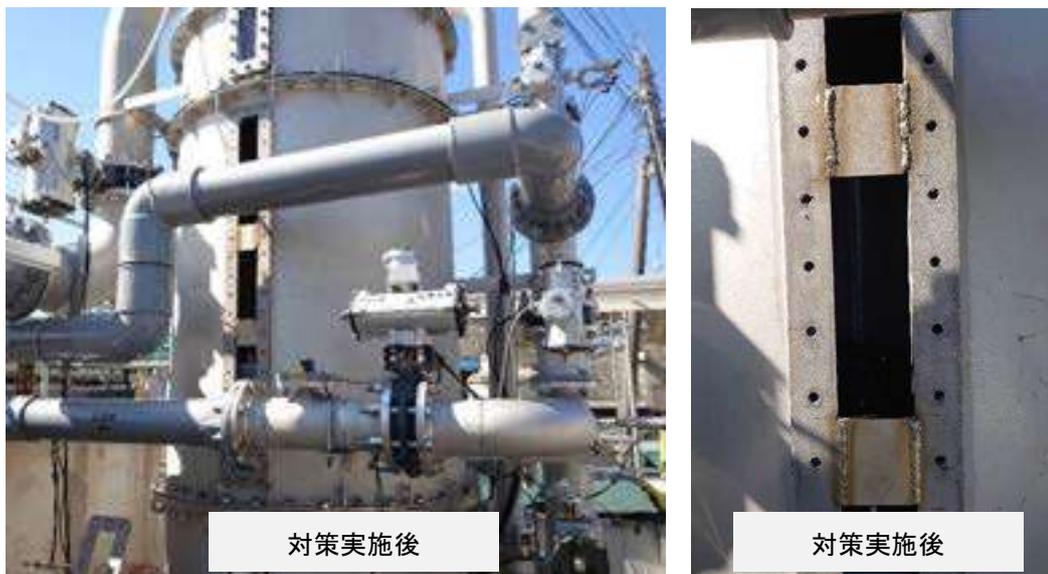


図 2-4-1.12 濾過塔ののぞき窓部への補強対策実施後の写真

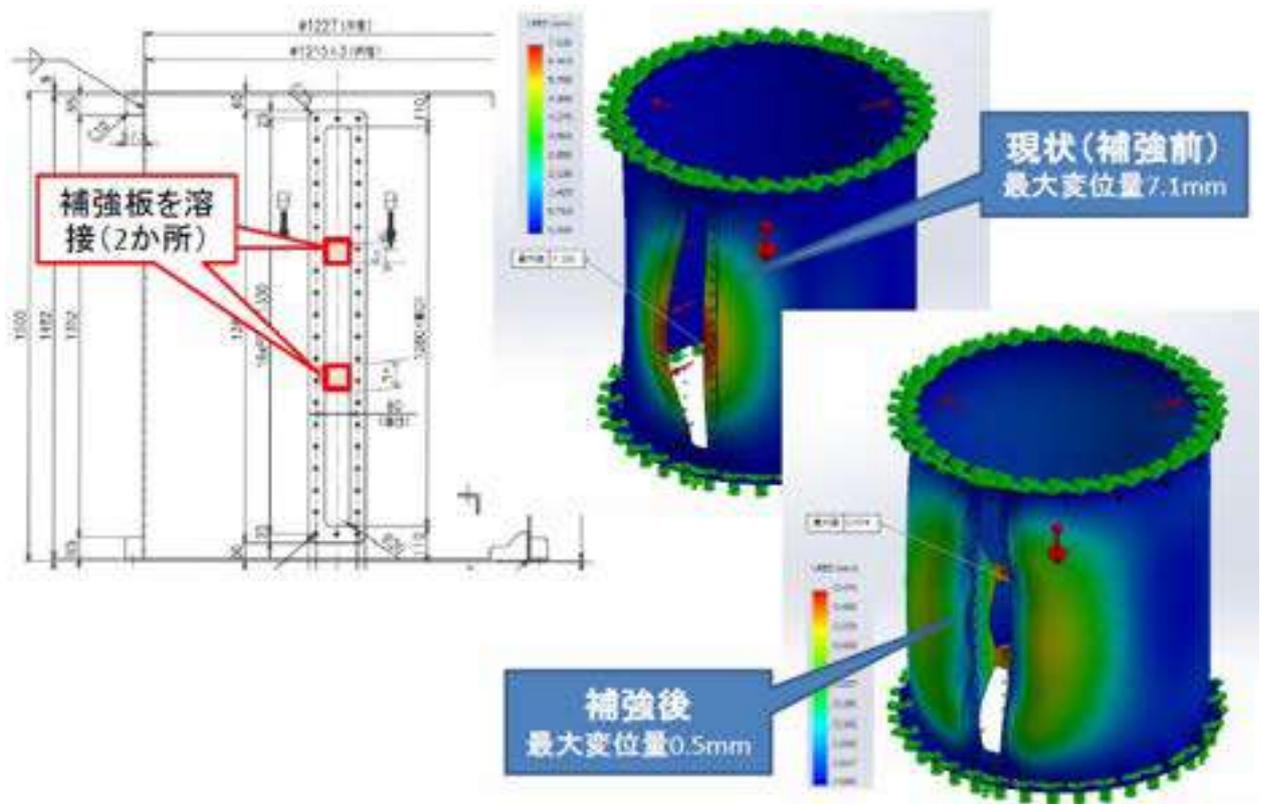


図 2-4-1.13 濾過塔ののぞき窓部の構造解析結果

3-7) 有機系排水での運転条件の調査

繊維濾過大型実証機の連続運転において、濾過差圧が急激に上昇するために濾過時間が短くなり、頻りに逆洗を行う必要が生じることが問題となった。これは、濾過対象水である排水処理水に含まれる除去対象物が繊維に複雑に付着してしまうため、逆洗でも十分に除去できずに流路を閉塞してしまうことが原因であると考えられた。そのため、濾過対象水に含まれる物質を調査し、それに適した洗浄方法や繊維濾材の条件設定を行うべきであると考え、本項目に取り組んだ。まず、濾過対象水に含まれる微粒子の元素分析を行い、どのような成分が含まれているかを検討した。方法としては、濾過対象水を濾紙で濾過し、濾紙上の微粒子について卓上走査型電子顕微鏡の元素分析機能を用いて分析を行った。得られた結果を図 2-4-1.14 に示す。

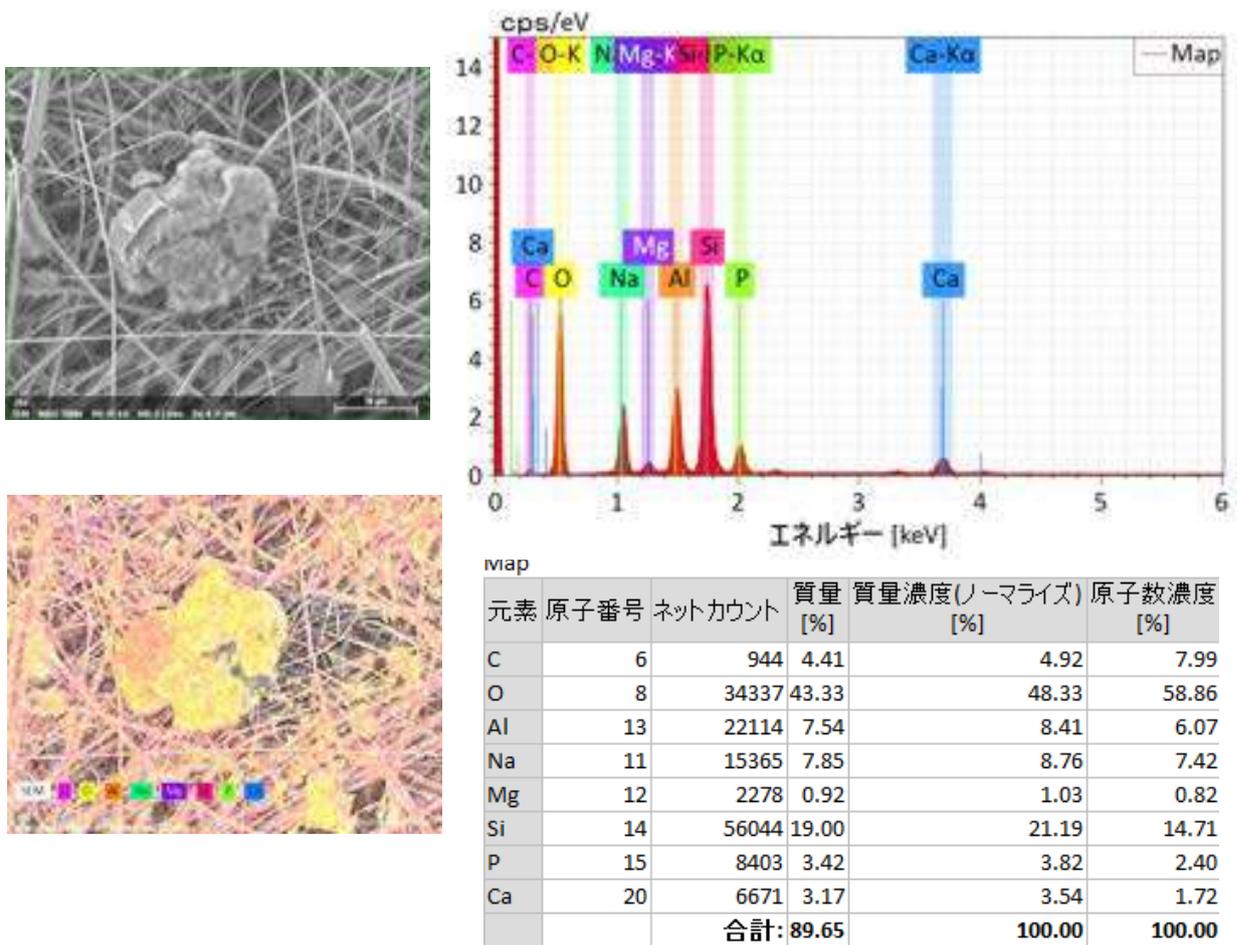


図 2-4-1.14 濾過対象水に含まれる微粒子の元素分析結果

図 2-4-1.14 の右下の表が得られた元素の割合などを示しているが、濾紙の元素情報も含まれているため、セルロースに含まれる炭素、シリカなどは無視するとして、アルミニウムやリン、塩類が検出されていることが特徴的であると言える。この微粒子は飲料工場の排水を微生物処理したのちに硫酸アルミニウムと高分子凝集剤を添加して凝集沈殿した後の微細フロクである。そのため、排水に含まれる塩類と、微生物処理した結果残留するリン、そして

凝集剤のアルミニウムの成分が検出されていると判断した。つまり、濾過対象水に含まれる微粒子のほとんどはこのような微生物処理後のリンやアルミニウム及び塩類を多く含む成分であり、それは pH にも依存するが、水中では容易にゲル状物質を形成するものである。

この濾過対象水を繊維濾過処理した結果得られる繊維濾過処理水には、このような粗大な微粒子は確認できず(図 2-4-1.15)、ほとんどが繊維に付着していると考えられる。

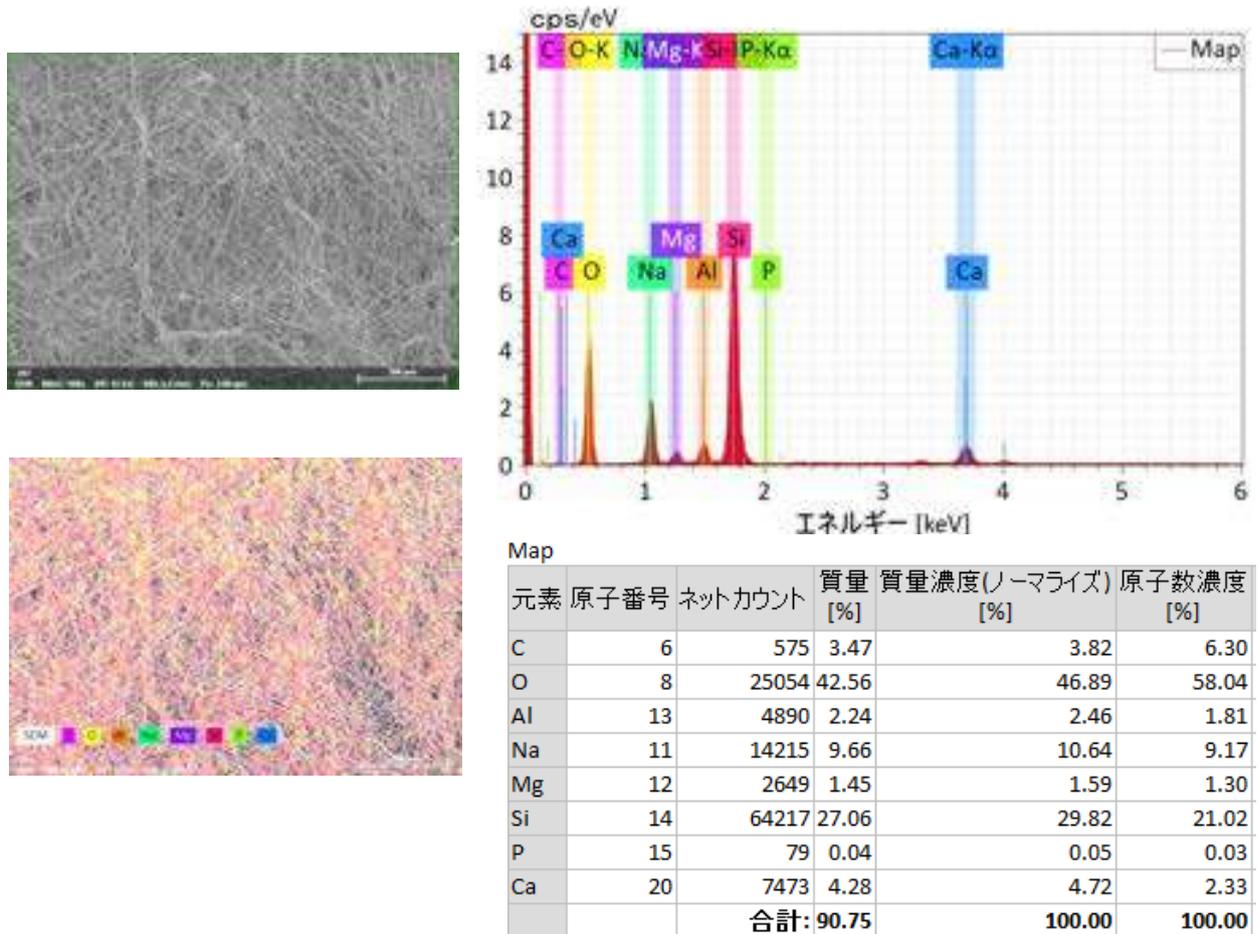
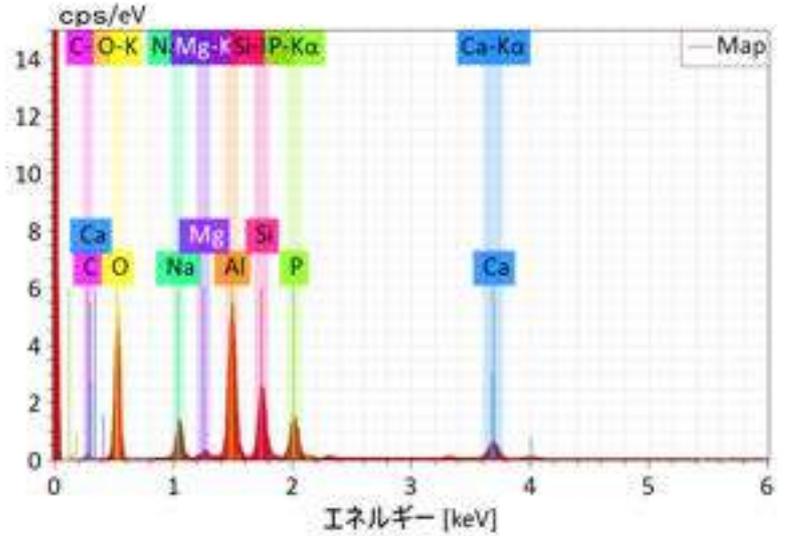
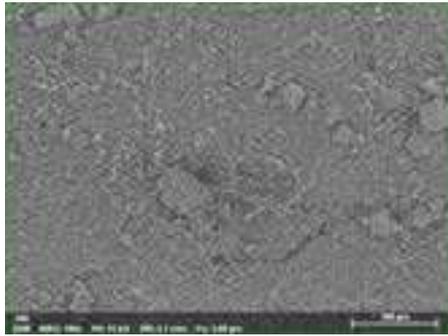


図 2-4-1.15 繊維濾過処理水の元素分析結果

さらには、繊維濾過装置を逆洗した際の初期に排出される逆洗排水を同様に分析した結果を図 2-4-1.16 に示す。この中には相当量の凝集フロックのような微粒子が存在しており、元素分析結果でもリンやアルミニウムの存在割合が高くなっている。そのため、やはり繊維濾過装置が濾過対象水から補足している物質は、凝集剤を多く含む有機物と無機物の混合物であると考えられる。

よって、このような有機・無機の混合したゲル状物質を効果的に濾過可能な繊維濾材の条件設定と、そのような物質を効果的に洗浄排出できる洗浄方法の確立が必要になる。



Map

| 元素 | 原子番号 | ネットカウント | 質量 [%] | 質量濃度(ノーマライズ) [%] | 原子数濃度 [%] |
|-----|------|---------|--------|------------------|-----------|
| C | 6 | 1227 | 6.11 | 6.93 | 11.10 |
| O | 8 | 28770 | 42.61 | 48.33 | 58.13 |
| Al | 13 | 40817 | 15.20 | 17.24 | 12.30 |
| Na | 11 | 8782 | 5.10 | 5.79 | 4.85 |
| Mg | 12 | 1489 | 0.65 | 0.74 | 0.59 |
| Si | 14 | 21697 | 8.82 | 10.01 | 6.86 |
| P | 15 | 13244 | 5.75 | 6.52 | 4.05 |
| Ca | 20 | 7315 | 3.91 | 4.44 | 2.13 |
| 合計: | | | 88.17 | 100.00 | 100.00 |

図 2-4-1.16 繊維濾過装置の逆洗排水の元素分析結果

3-8) 有機系排水に適した繊維条件と逆洗条件の設定と検証

前項までの結果によって、繊維濾過大型実証機の構造・システム的な検証はできたものの、濾過対象水が飲料工場の排水処理水で有機物を微生物処理した後の残渣と凝集剤などを多く含むという特徴によって、濾過差圧が急激に上昇し、逆洗によって回復が難しいことが分かった。そのため、そのような有機物・無機物の混合物で、具体的にはリンやアルミニウムを多く含むゲル状物質を効果的に補足するための繊維濾材の条件と、繊維濾材で補足した後の逆洗条件の設定を行った。

最初に、現地に性能評価用の小型モデル機を持ち込み(図 2-4-1.17)、大型実証機を使った連続実証で採用していた繊維濾材と逆洗条件を用いて、濾過・逆洗の繰り返し試験を実施した。図 2-4-1.18 には、逆洗水として濾過対象水に NaOH を添加して pH を 10.5 とした水で逆洗を行った場合の、濾過時間と濾過差圧の推移を示す。



図 2-4-1.17 実証設備に設置した小型モデル機

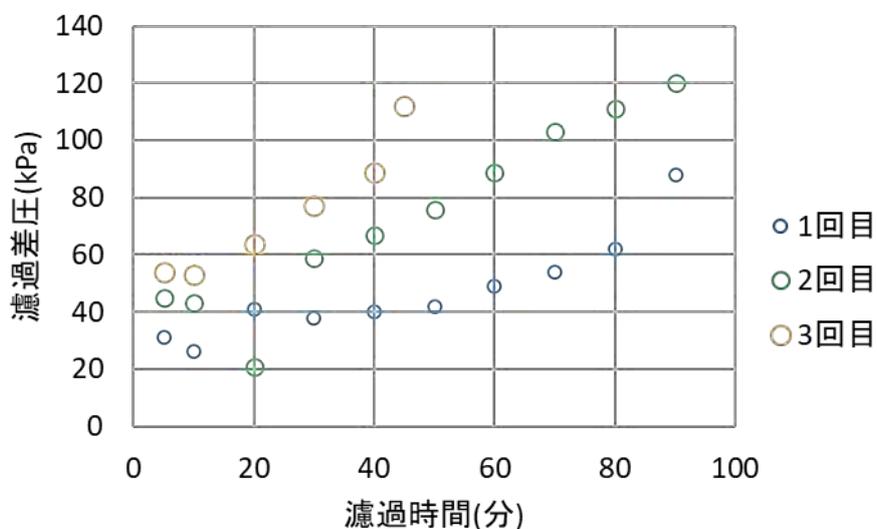


図 2-4-1.18 小型モデル機での逆洗 pH が 10.5 の際の濾過差圧の推移

このように、大型実証機と同じ繊維条件及び逆洗条件では、新品の繊維の時の差圧上昇に比べて、逆洗後の2回目濾過、その後の逆洗後の3回目濾過では差圧上昇が早くなることが確認された。そのため、小型機を用いて繊維条件及び逆洗条件を変更して、差圧上昇を抑制できる条件を調査することとした。

有機汚れを除去する際には、酸化剤を用いて汚れ成分を分解することが効果的である。例えば、洗濯時に使用する漂白剤がその一例である。そのため、逆洗用の薬品として、アルカリ剤であるNaOHの代わりに酸化剤であるNaClOを500mg/Lの濃度で用いた場合の、差圧上昇の推移を図2-4-1.19に示す。

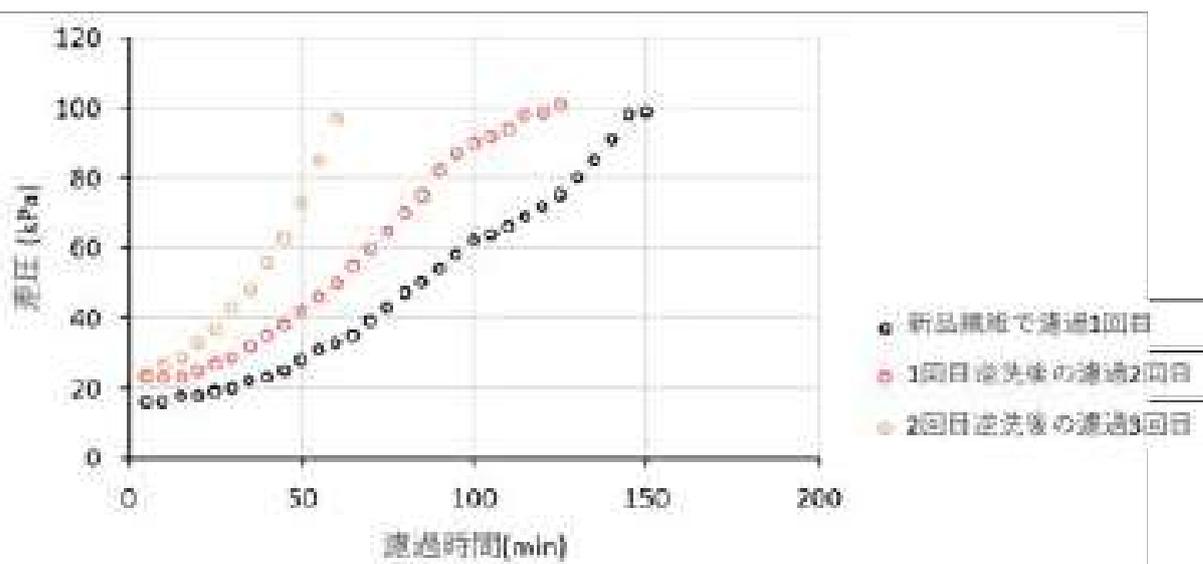


図 2-4-1.19 小型モデル機での逆洗に NaClO を用いた際の濾過差圧の推移

また、除去対象物にはアニオン系の高分子凝集剤が含まれているのだが、この凝集剤は pH が低い時に粘度が低下することが知られているため、逆洗時に pH を下げることも一つの方法であると考えた。よって、逆洗用の薬品に、硫酸(H_2SO_4)を用いて pH を 3 とした場合の、濾過時の差圧上昇の推移を図 2-4-1.20 に示す。

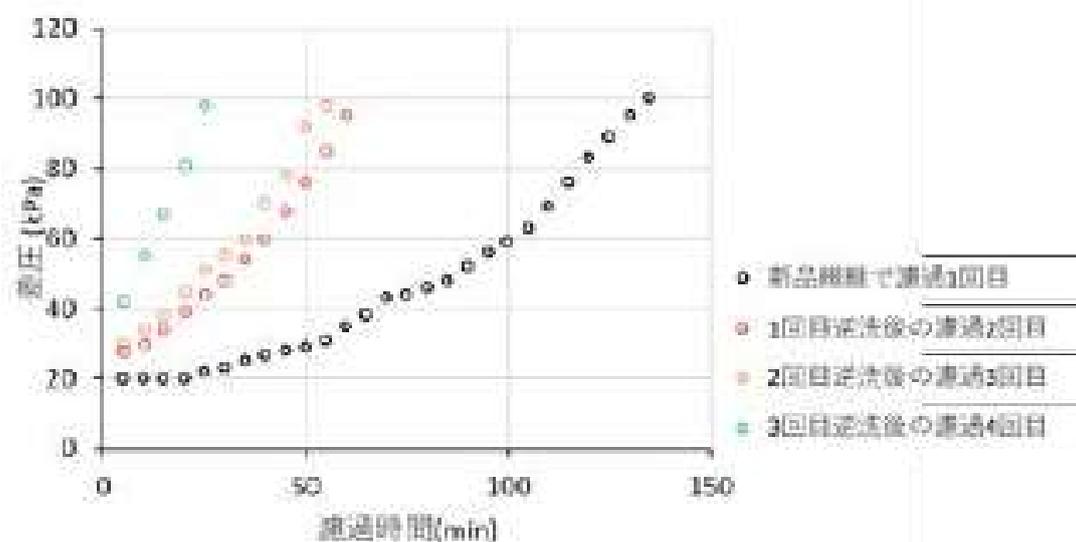


図 2-4-1.20 小型モデル機での逆洗に硫酸を用いた際の濾過差圧の推移

図 2-4-1.21 には、硫酸を用いた洗浄試験を行った際の小型モデル機の様子を示す。

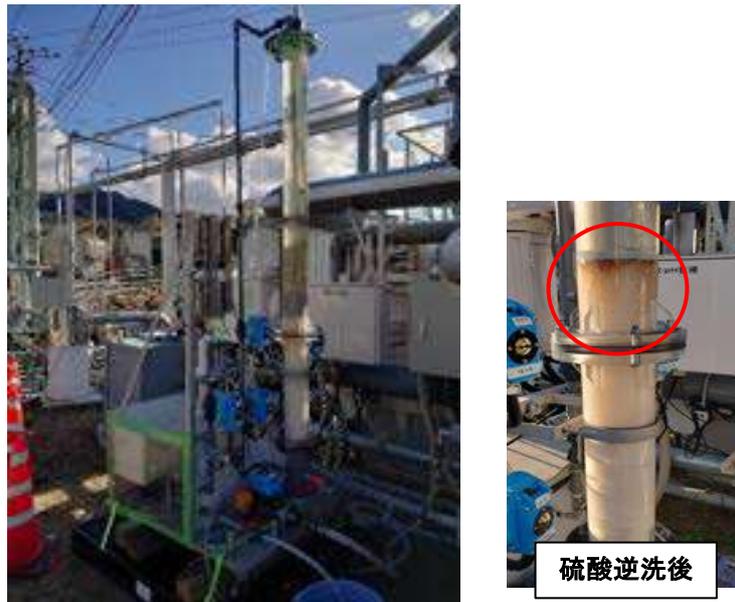


図 2-4-1.21 小型モデル機での試験の様子(右は繊維部の拡大)

上記のように、酸化剤を用いた場合も、pH を 3 にした場合も、どちらも逆洗効果は十分に得られないという結果になった。洗浄条件を変更しても良い結果は得られなかったため、繊維条件を変更することとした。

濾過対象水は、リンやアルミニウムと塩類を多く含み、ゲル状物質を含有しているために、粘度が通常の水よりも高い。そのため、濾過時に繊維濾材が想定以上に流体抵抗を受けて潰れてしまい、それによってさらに流路が狭くなり、更なる抵抗を発生させて潰れるという悪循環が発生していると考えた。そのため、繊維を潰れにくくする工夫が必要である。図 2-4-1.22 には、繊維を伸ばした状態で濾過を行い、逆洗では濾過対象水に硫酸を添加して pH を 3 とした場合の、濾過差圧の推移を示す。図 2-4-1.23 はその時の試験状況を示す。

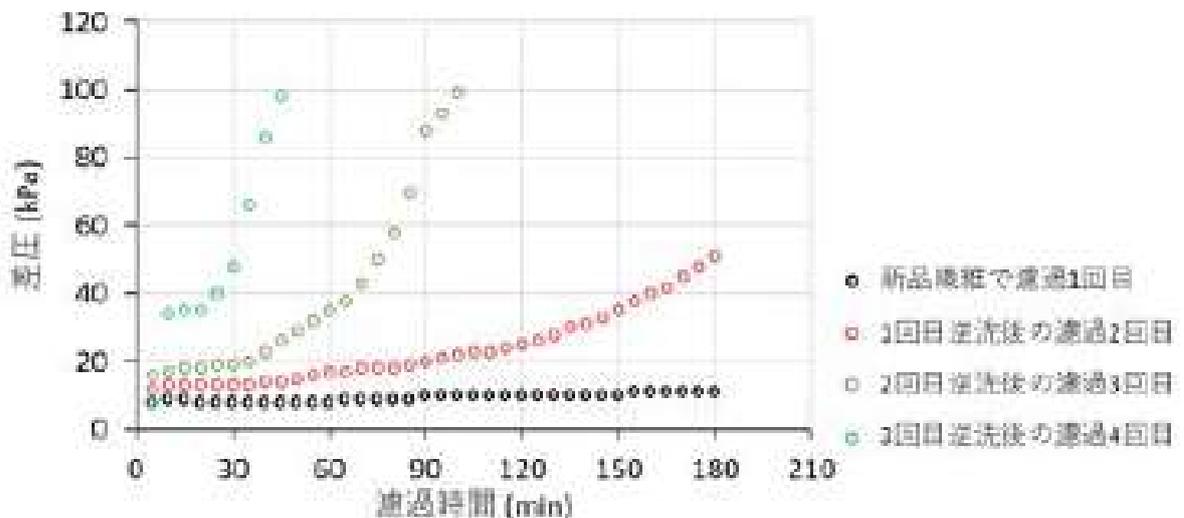


図 2-4-1.22 小型モデル機で逆洗 pH3、繊維を伸ばして濾過した際の濾過差圧の推移



図 2-4-1.23 小型モデル機で逆洗 pH3、繊維を伸ばして濾過した際の試験状況

このように、繊維を伸ばした状態で濾過を行うと、最初の濾過差圧はほとんど上昇しなかったのだが、やはり逆洗後の 2 回目濾過では差圧上昇がみられ、その後の逆洗後の 3 回目濾過では 90 分ほどで差圧が 100kPa に達した。さらに 4 回目濾過では差圧上昇が早くなった。このことから、現状の繊維では伸ばした状態でセットしても、問題の解決には至らなかった。

次に、最も良い洗浄効果が得られるように、洗浄時に繊維を取り外して、洗浄用水としては清澄な水に硫酸を添加して pH を 3 とした水に浸漬し、更には手で揉み洗いを行った場合の洗浄効果を確認する試験を行った。その結果を図 2-4-1.24 に示す。

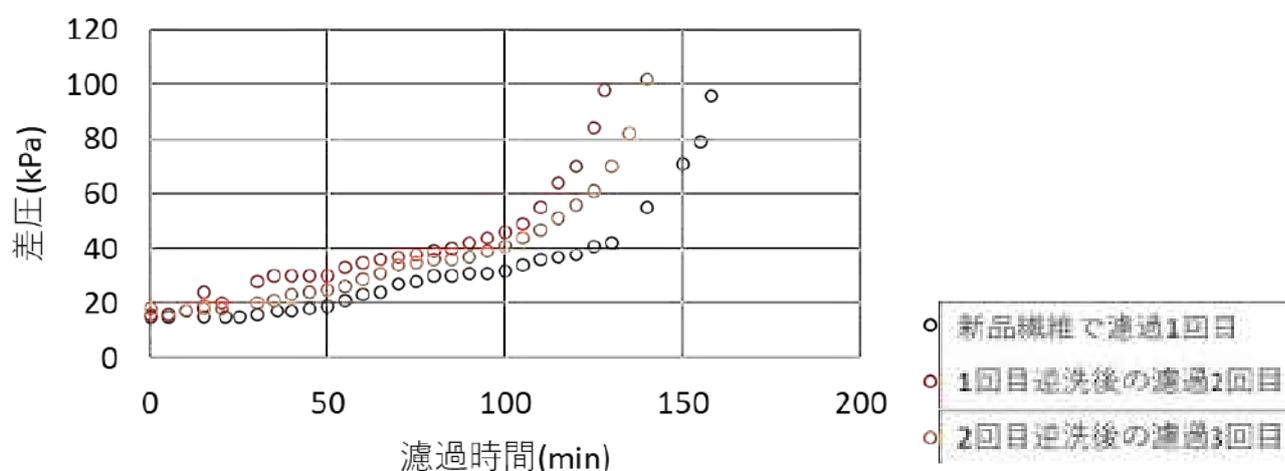


図 2-4-1.24 小型モデル機で繊維を取り外して pH3 で浸漬・手洗いした際の濾過差圧の推移

この結果、清澄な水を使って洗浄用水を作り、浸漬および手で揉み洗いを行うと洗浄効果が得られると判断できた。しかしながら、実用的な繊維濾過装置としては濾過後に毎回繊維

を取り外して洗浄することはできないため、引き続き効果的な洗浄条件と適切な繊維条件を調査することとした。

今回のような粘度の高い水を処理するためには、繊維表面での流体抵抗によって繊維自身が押しつぶされ、それによって濾過差圧が極端に上昇することが問題であると考えられるため、潰されにくい繊維となるように、従来比 1.5 倍の太さの繊維を使用することとした。繊維直径は太くしたが、充填密度は従来と同等になるように調整し、濾過後は清澄な水に硫酸を添加して pH を 3 とした水で逆洗を行った際の濾過差圧の推移を確認した。結果を図 2-4-1.25 に示す。

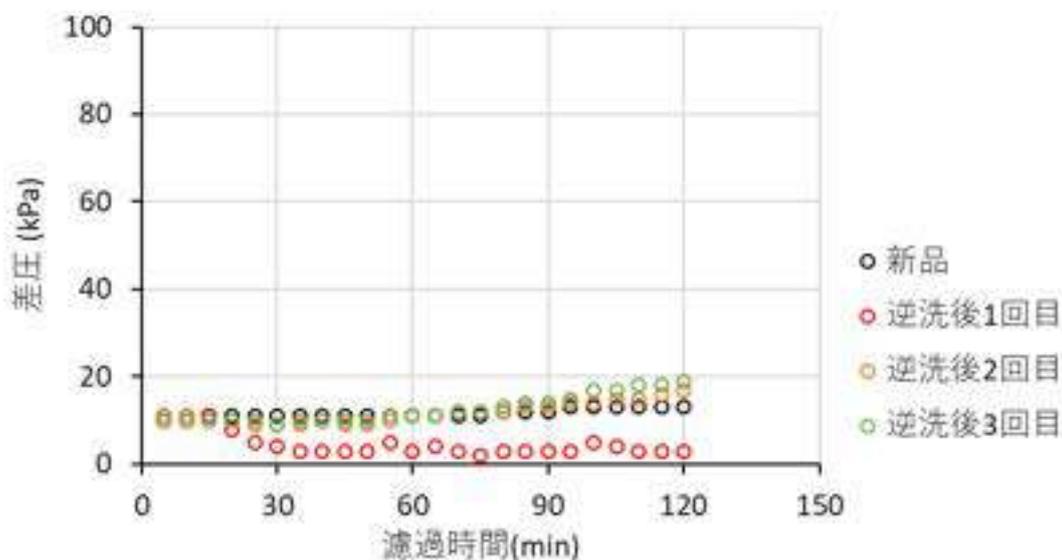


図 2-4-1.25 小型モデル機で繊維を取り外して pH3 で浸漬・手洗いした際の濾過差圧の推移

このように、従来比 1.5 倍の太さの繊維を使用すると、濾過差圧の上昇は抑えられる可能性があることが分かった。しかし、この時の濁度の除去率は 20~40%程度であり、当初の目的である 5 μ m 未満の微粒子を効果的に除去するという点においては、性能が十分ではない。そのため、この太い繊維を使って濾過塔内の充填条件を調整し、高い除去率が得られる条件を見つけることとした。その結果、充填量を従来比 1.2 倍程度とすることで、濾過差圧の上昇を抑えながら除去率を高くすることに成功したため、大型実証機にもこの条件の繊維を適用して性能を確認することとした。大型実証機では、これまでの設備では濾過原水に薬品を添加して逆洗に用いるような設備となっていたが、一部を改良し、清澄な水を貯留できるタンクを設けて、小型モデル機と同様に清澄な水に硫酸を添加した水で逆洗を実施した。図 2-4-1.26 にはその際の設備の改造内容(配置図)と、図 2-4-1.27 には設備の状況を示す。この改造した状態で得られた濾過差圧の推移を図 2-4-1.28 に示す。この時、濁度除去率としては 60%で、懸濁物質濃度の除去率では平均 70%程度の除去率が得られた。

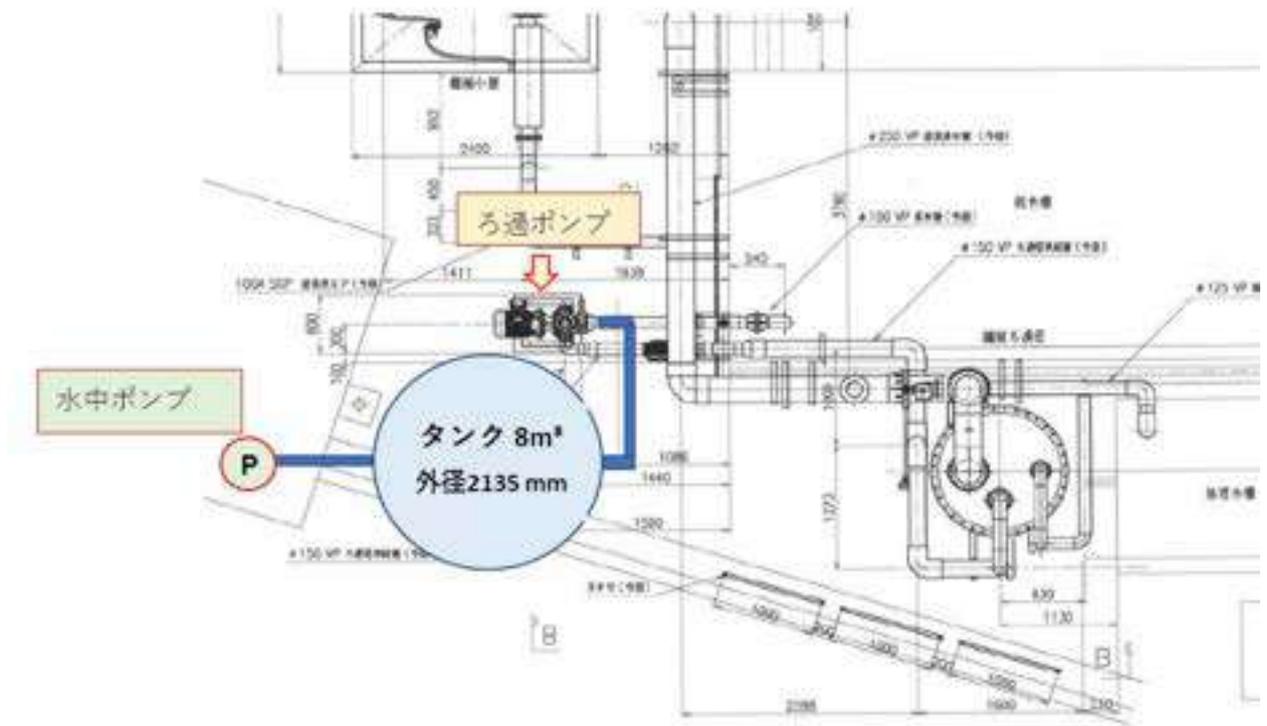


図 2-4-1.26 繊維濾過大型実証機の洗浄用タンク設置配置図



図 2-4-1.27 改造後の繊維濾過大型実証機の状況

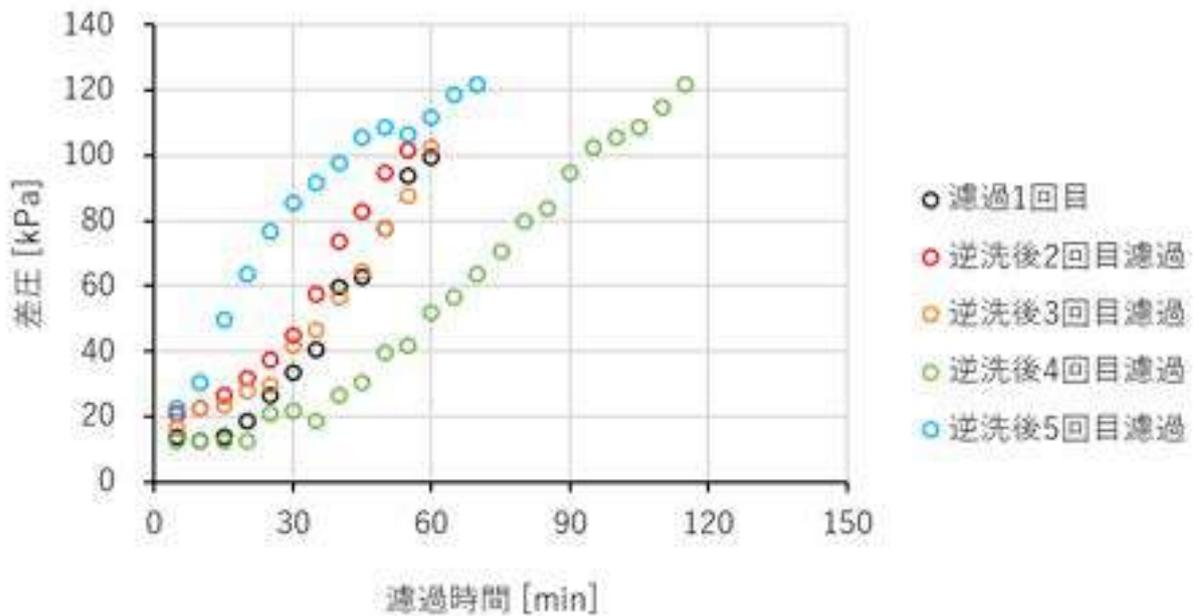


図 2-4-1.28 改造した繊維濾過大型実証機で得られた濾過差圧の推移

この結果、大型実証機でも濾過時間を 60 分ほどは確保しながら濾過ができることは確認できた。濾過時の差圧上昇は濾過対象水の濁度等によって変化があり、逆洗後 4 回目には濾過時間は 120 分に達している。濾過対象水の状況に応じて濾材の充填密度を調整することができれば、濾過時間を維持することができると考えられるため、継続研究で水質に応じた充填密度可変制御機構の構築を進め、事業化を目指す。

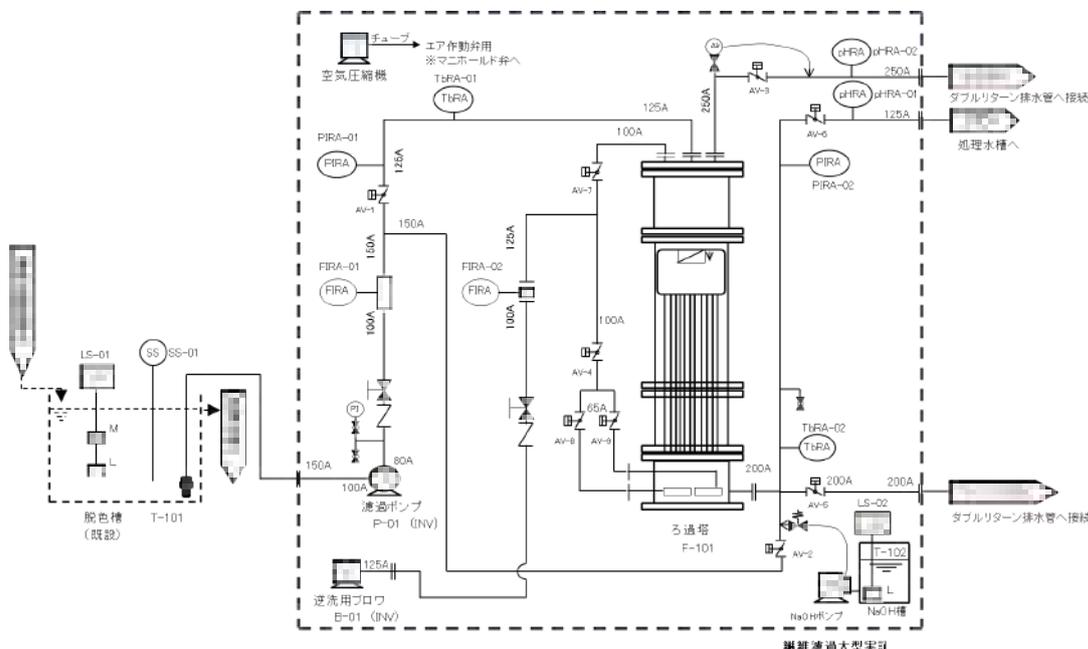
4) 付録 本項で使用した主要な機器を以下に記す。

4-1) 繊維濾過大型実証機の導入

令和2年度に協和機電工業(株)に繊維濾過大型実験機を導入した。

表 2-4.付録 1 に機器の仕様を示し、図 2-4.付録 1 に外観を示す。

表 2-4.付録 1 繊維濾過大型実証機の仕様



- 濾過・逆洗ポンプ : 2.261m³/min × 15m 荏原 100 × 80FSD4H67.5 7.5kW
- 濾過ポンプ用インバーター : 三菱 FR-D720-7.5K
- 逆洗用ブロワ : 10.36m³/min × 80kPa アンレット BE125H 22kW
- 逆洗ブロワ用インバーター : 三菱 FR-D720-22K
- NaOH 注入ポンプ : イワキ EHN-C31-V
- NaOH タンク : 300L 角型槽 イワキ MT-N300 (水位計・ポンプ座付き)
- 自動弁 : 旭有機材 エア作動バタフライ弁 57 型 125A:2 個, 150A:1 個, 200A:1 個, 250A:1 個、KITZ エア作動バタフライ弁 FA-10XJME 65A:2 台、100A:2 個
- コンプレッサー: 165L/min × 0.93MPa 日立産機システム 1.5OP-9.5GP6 1.5kW
- ポンプ流量センサー : キーエンス FD-R80 + OP-88068:1 式
- 空気流量計 : 東京計装 オリフロメータ(100A) 35~2000m³/h HDT1 100-J1F 1-1 N1
- 濾過塔一次側圧力センサー : キーエンス GP-M010 + OP-88068 + OP-87280
- 濾過塔二次側圧力センサー : キーエンス GP-M010 + OP-88068 + OP-87280
- 濾過ポンプ圧力計 : 長野計器 GV-50-173-0.4MPa R1/4 接続
- 処理水 pH センサー : オプテックス SC-PH:1 個, KNTP-1K(1.0M):1 個
- 逆洗排水 pH センサー : オプテックス SC-PH:1 個, KNTP-1K(1.0M):1 個
- 原水 SS センサー : オプテックス TS-1000:1 個
- 処理水 SS センサー : オプテックス TS-1000:1 個
- 濾過塔: SUS304 製 内径 φ 1200 × 515mm + φ 1200 × 1000mm + φ 1200 × 945mm
- 濾過塔上下部品・曝気管: ベース φ 1200mm × 500mm SUS304 製、曝気管 4 分割式
- 内部部品: キャップ, 上部網, 下部網, 下部網ベース, ストッパー SUS304 製
- 制御盤 : 屋外自立盤 PLC 制御 + タッチパネル(三菱)



図 2-4.付録 1 繊維濾過大型実証機(濾過塔部)の3D モデル

最終章 全体総括

令和2年度から令和4年度の3ヶ年で、協和機電工業(株)の独自製品である高性能繊維濾過装置 F-CAP の高度化及び大型化に関する開発に取り組んだ。研究課題を1)凝集剤フリーで微粒子を除去する繊維エレメントの開発、2)性能低下を抑えた繊維モジュールの開発、3)充填密度を可変制御する機構の開発、4)大型実証試験機の開発、の4つに分け、長崎大学、北九州市立大学との共同で課題解決に取り組んだ。

研究課題1)では、繊維充填状況をマイクロフォーカス X 線 CT 装置で撮影してデータ化し、繊維の三次元充填モデルを構築した。並行して、5cm 角のキューブに所定の条件で繊維を充填したキューブモデルを製作して濾過特性を調査し、濾過要素モデル式を構築した。濾過塔内の多孔質流シミュレーションを行い、濾過塔内の CAP 部の構造の改良が必要であることや、CT スキャンで得られたように不均一な充填モデルで性能を推算することが必要であることが示された。これらの結果は今後の繊維濾過装置の事業展開において重要なプロセスシミュレーターの基礎データとなる。また、実際に濾過塔直径が 100mm の小型モデル機と濾過塔直径が 490mm の中型実験機を導入し、様々な水での濾過特性を評価した。その結果、1 μ m から 5 μ m の粒子を含む濾過対象水について、懸濁物質除去量としては 98.6%の除去率を得ることができると推算された。

研究課題2)では、繊維濾過を長期間運用した際に生じる繊維のへたりに着目し、このへたりが素材の強度低下によるものだと考え、PET 繊維とナイロン繊維の組み合わせによって耐へたりに性を向上する方法と、PET 繊維の太さを増すことで強度を向上することを考案した。PET 繊維とナイロン繊維の組み合わせでは、組み合わせ比率と撚り合わせの条件を設定することで、PET 繊維のみの場合と同等以上の微粒子除去性能を発揮することを確認した。粘度が比較的高い有機系の排水処理水を濾過する場合のために、本事業で新たに 29 μ m の PET 繊維も採用した。これは初期洗浄条件と繊維の充填条件を調節することで、低い濾過差圧と高い微粒子除去性能を発揮することができた。これらの成果により、繊維 1kg 当たりの微粒子除去量が 110g を上回ることを確認し、繊維弾性復元率低下度合いが年率 10%未満となる繊維条件を設定した。

研究課題3)では、濾過対象水の水質変動による濾過差圧の急激な上昇を抑制するために、水質変動に応じて充填密度を可変制御する機構の開発に取り組んだ。充填密度を可変させるために、従来から採用している CAP の最小高さを設定する固定ストッパーの他に、新たにピストン形状の可変ストッパーを採用した。濾過差圧の急激な上昇を抑制するためには数時間後の濾過対象水の水質を予測する必要があるため、ニューラルネットを用いた深層学習システムを採用して、実際の排水処理設備の運用データを学習させて AI システムを構築した結果、排水の有機物濃度と凝集剤添加量および流入水量等から数時間後の濾過対象水の濁度を予測することができると確認できた。充填密度の可変制御では濾過対象水の濁度に応じて充填密度を 80,110,140 g/L に可変制御することが確認できたため、この AI 予測システムと組み合わせることで制御盤内に実装できるように補完研究で製品化を目指す。

研究課題4)では、山口県の飲料工場に濾過塔直径 1200mm の繊維濾過大型実証機を設置

し、長期間の試験に取り組んだ。この排水は有機物を多く含んでいるため、微生物処理と凝集沈殿処理されて放流されているが、この水にはリンやアルミニウムが多く含まれて粘度が高い水であった。この水を1か月間の連続運転で処理したところ、濁度の除去率は70%程度であった。しかし、濾過差圧の上昇が顕著であり、小型モデル機を用いて繊維洗浄条件と繊維充填条件を調査した。その結果、このような有機系排水の処理水には、繊維径をこれまでよりも太くすることが適切だと判断し、29 μ mのPET繊維を新たに採用した。これによって継続運転でも濾過差圧の上昇を60分間程度は抑えることができた。懸濁物質の除去率は70%程度であったが、これは濾過対象水に含まれる粒子が3~10 μ m程度であり、濾材で補足した粒子が分解して流出していることも懸念されたため、このような水での除去率の向上のための補完研究に取り組んでいる。

以上のように、それぞれの研究課題について共同体内で協力して取り組み、アドバイザーや顧客の意見も取り入れながら早期の製品化のための開発を行った。今回得られた成果を基にして、高性能繊維濾過装置F-CAPの更なる事業拡大を進めていく。