

6 研究活動報告

環境科学国際センターでは様々な調査研究活動を実施している。それらの成果については積極的に発表し、行政、県民、学会等での活用に供している。学術的な価値のあるものについては論文にまとめて学術誌へ投稿することにより発表しているが、それ以外にも比較的まとまった成果は多い。ここではこれらの調査研究成果のうち、論文や種々の報告書に掲載されていないものを紹介する。今号では、当センターで研究活動を実施しているもののうち、令和7年度に取りまとめた成果や情報について報告する。

6.1 研究報告

ラベル台紙の循環利用促進に向けた実態把握と事業者意識調査……………川嵯幹生、磯部友護、長森正尚、茂木守

6.2 資料

埼玉県の水田における非灌漑期の利用形態が土壌水分とタニシの生息に及ぼす影響……………
……………王効挙、安野翔、米倉哲志、三輪誠、磯部友護
天然ゼオライトの塩類によるアンモニア態窒素吸着阻害影響について―廃棄物最終処分場浸出水の窒素除去に対する基礎的検討―……………長谷隆仁
八潮市で発生した下水道管破損に伴う河川への下水緊急放流に係る水質調査……………
……………田中仁志、木持謙、池田和弘、見島伊織、渡邊圭司、宮崎実穂
断水時の水問題を考えるセミナー（第3回）「大規模災害時の断水に備える―民間井戸を活用した生活用水確保の実践と課題―」の開催概要報告……………柿本貴志、濱元栄起、石山高、高沢麻里

〔研究報告〕

ラベル台紙の循環利用促進に向けた実態把握と事業者意識調査

川寄幹生 磯部友護 長森正尚 茂木守

要 旨

サーキュラーエコノミー推進は資源確保、CO₂排出量の削減、新たなビジネス機会の創出といった複数の環境的・経済的メリットがあることから、国家戦略として位置付けられている。本研究では、サーキュラーエコノミーへの対応として、自治体の焼却施設で処理されている燃えるごみに着目し、分別された状態で廃棄されているラベル台紙を対象とした事業者意識調査を実施した。結果として、回答企業の約51%が焼却処分、約9.8%がリサイクルを選択していた。廃棄量を把握している企業の約73%は産業廃棄物として焼却やリサイクルを実施しており、認識は料金体系に依存していた。ラベル台紙のリサイクルプロジェクトに対する認知度は約12%に留まり、多くの企業が認知していなかった。循環型ラベル台紙の採用要因としては、経済性および環境価値の可視化、不採用要因としては業務負担の増加が挙げられた。本研究の結論として、ラベル台紙の循環利用の推進には、企業内での環境意識の統一と複数の情報発信経路からの啓発活動が重要であることが示唆された。また、持続可能な資源循環システムの構築に向け、市町村と県が連携し、再生可能資源の利用促進を促すために、廃棄物焼却施設への搬入禁止措置や事業系一般廃棄物手数料の引き上げといった規制的手段を含めた総合的な施策の導入が効果的であると考えられた。

キーワード：ラベル台紙、事業者意識、リサイクルの推進、サーキュラーエコノミー

1 はじめに

気候変動抑制対策としてCO₂排出量削減および資源循環の推進は、行政にとって重要な課題である。政府は、資源循環を通じた環境問題への対応強化と温室効果ガス排出削減を図るため、サーキュラーエコノミーの推進を国家戦略として位置づけている¹⁾。行政が対応可能な具体的施策の一つとして、焼却ごみ量の削減が挙げられる。図1に埼玉県内30団体の45施設における可燃ごみ処理施設での可燃ごみ組成調査結果（乾重量率）を示した。

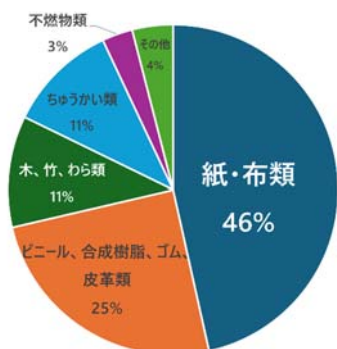


図1 可燃ごみ組成調査結果（令和5年度）

図1に示すように、可燃ごみの約46%は紙・布類で占められている。本研究では、事業系可燃ごみの減量対策として、これらの紙類に着目した。特に、分別された状態でま

とまって廃棄されているラベル台紙に注目した。

1.1 ラベル台紙について

ラベルやシールには粘着剤が付いており、その台紙であるラベル台紙（はく離紙またはセパレーターとも称される）は、図2に示すように、紙の表面にポリエチレンおよびシリコンがコーティングされている構造である。そのため、ラベル台紙は一般的にリサイクルできない紙として認識されている。

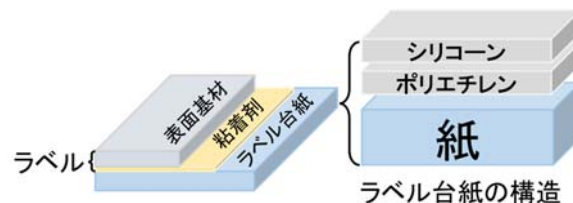


図2 ラベル台紙の構造

1.2 ラベル台紙の廃棄量

ラベル台紙の年間排出量²⁾は13.9億m²、埼玉県の面積（約3,798 km²）の約40%に相当する。ラベル台紙の単位面積当たりの質量は50～80g/m²である³⁾ことから、年間約69～111千トンが廃棄されていると推定される。この廃棄量は、一般廃棄物の総排出量の0.2～0.3%であるが、無視することはできない。

1.3 ラベル台紙の紙リサイクル原料としての評価

公益財団法人古紙再生促進センターが公表している「製紙原料に適さない紙類⁴⁾」および、一般社団法人日本印刷産業連合会が公表している「印刷物資材『古紙リサイクル適正ランクリスト』規格⁵⁾」によると、ラベル台紙は、シリコーンを完全に分離できず、印刷に支障をきたすため、古紙リサイクルに適さないが、分別回収が実施されれば、板紙（段ボールの芯材等で使用可能）としてのリサイクルが可能であることがわかった。

1.4 ラベル台紙リサイクルに関する最近の取組

サーキュラーエコノミー推進に伴い、ラベル台紙のリサイクルに関して新たな取組みが開始されている。一つは、令和2年度に設立された「資源循環プロジェクト²⁾」である。本プロジェクトは、再生可能なペット樹脂を基材とした循環型のラベル台紙を開発し、各ステークホルダーが参加することでラベル台紙の循環を構築している。ラベル台紙の製造から使用、廃棄、回収、再生使用まで、全てのステークホルダーが参画している。

もう一つは、令和5年度に設立された「一般社団法人ラベル循環協会⁶⁾」である。本協会は、従来型のラベル台紙のリサイクル推進を目的とし、リサイクルの普及促進、リサイクル個別スキームの確立支援、リサイクル状況の可視化・情報発信を実施している。また、欧州においても「CELAB (Toward a Circular Economy for Labels)⁷⁾」というプロジェクトが発足し、活動を開始している。これらの動向から、ラベル台紙のリサイクルに関する取組は今後、世界規模で拡大していくと予想される。

1.5 ラベル台紙リサイクル推進の課題

現在、ラベル台紙のリサイクルが開始されたばかりの段階である。本研究では、ラベル台紙のリサイクル推進に向けた課題の整理を行った。現状における課題として以下の4点が考えられた。

- 1) ラベル台紙がリサイクルできないという先入観：「表面がツルツルした紙はリサイクルできない」という情報や先入観がユーザーおよび業界関係者に存在する。
- 2) ラベル台紙の性質に対する認識不足：ラベルは有用物であり、ラベルを剥がした台紙は不要物（ごみ）と認識されている。その名称から紙類であるとの判断により、産業廃棄物ではなく、事業系可燃ごみとして処分されてしまいがちである。
- 3) ラベル台紙の廃棄量の相対的小ささ：ラベル台紙の廃棄量が他のごみと比べ相対的に少ないため、問題として認識されていない。
- 4) ラベル台紙リサイクルに関する情報不足：ラベルユーザーおよび古紙回収業者におけるリサイクル情報の不足が、推進を阻害している。

そこで、本研究では、これらの課題に対応するため、ラベルユーザー（排出事業者）およびラベル台紙を回収する役割を担うと考えられる古紙回収事業者を対象にアンケート調査を実施、ラベル台紙廃棄の現況把握とリサイクルに関する情報提供を行うとともに、ユーザーを対象にインタビューを実施し、ラベル台紙のリサイクル推進に向けた要因を探索した。

2 方法

2.1 ラベルユーザーに対するアンケート調査

ラベル台紙の処理処分に関する現況を把握するため、およびラベル台紙のリサイクルに関わる取組を周知するため、ユーザー企業を対象にアンケート調査を実施した。調査対象とした企業は、資源循環プロジェクトの協力の下、「彩の国工場一覧⁸⁾」からラベルの使用が想定される企業200社を抽出した。各企業のホームページの「お問い合わせ」からアンケートを配信した。アンケートでは、調査目的を「事業系焼却ごみ削減対策の一環として、ラベル台紙の処分に関する現況の把握するため」と明記した。

調査項目は、以下の3つとした。

問1：ラベルを剥がした台紙（ラベル台紙）の処理・処分方法について、次の選択肢から該当するものを選択してください。

- a)一般廃棄物として焼却処分
- b)産業廃棄物として焼却処分
- c)RPF 原料としてリサイクル
- d)製紙原料としてリサイクル
- e)その他（具体的に記述）

問2：廃棄するラベル台紙のおおよその月間廃棄量を把握していますか。

- a)50 kg/月末満
- b)50～100 kg/月程度
- c)100～500 kg/月程度
- d)500 kg/月以上
- e)わからない

問3：ラベル台紙のリサイクル推進に向けた取組として、資源循環プロジェクトおよびラベル循環協会の存在を知っていますか。

- a)既に利用している
- b)知っている
- c)知らない

アンケートは145社に配信した。ホームページにお問い合わせフォームやメール連絡先の無い企業、及び商品に関するお問い合わせのみを受け付けている企業は調査対象から除外した。回答のあった企業は41社であり、回答率は28%であった。なお、回答のあった企業に対しては、後日、ラベル台紙のリサイクルについて紹介した。

2.2 古紙回収業者に対するアンケート調査

ラベル台紙の回収に関する現況を把握するため、古紙回収事業者を対象にアンケート調査を実施した。調査対象とした企業は、「廃棄物再生事業者登録一覧⁹⁾」から古紙の圧縮梱包を行う企業および埼玉県内に本社を有する古紙回収専門事業者20社を抽出した。各事業者のホームページの「お問い合わせ」からアンケートを配信した。

調査項目は以下の3つとした。

問1：ラベル台紙を収集していますか。

問2：ラベル台紙を回収している場合、どのようにリサイクルされていますか。

問3：令和5年度に設立された一般社団法人ラベル循環協会の存在を知っていますか。

アンケートは20社に配信し、7社から回答があり、回答率は35%であった。

2.3 インタビュー調査

資源循環プロジェクトにも協力を得て、各ステークホルダー18社を対象に半構造化インタビューを実施した。ヒアリング対象とした企業は、(1) アンケート説明後に問い合わせのあった企業、(2) 資源循環プロジェクトの個別説明を受けた企業、(3) セミナー等での対面した企業、(4) 調査の都合がつかなかったプロジェクト参加企業(6社)については、業界新聞、ホームページ等の公開情報^{10)・14)}からプロジェクト参加に至ったキーワードを抽出した。

インタビューでは、循環型ラベル台紙の採用・不採用の要因、採用の動機づけ、情報入手元等について、回答を得た。得られた回答はテーマごとに分類し、定性的に分析した。

3 結果と考察

3.1 ラベルユーザーに対するアンケート調査

3.1.1 アンケート結果_問1：ラベル台紙の処分方法

図3にラベル台紙の処分方法の結果を示した。

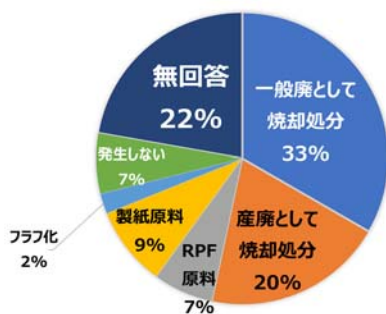


図3 ラベル台紙の処分方法

一般廃棄物(事業系可燃ごみ)として自治体の焼却施設で焼却処分している企業は約30%(13社)であった。産業

廃棄物として焼却処分している企業を合わせると、約50%(21社)の企業がラベル台紙を焼却ゴミとして処分していた。一方、燃料としてのリサイクルは約10%であった。RPF原料としてのリサイクルは3社、フラフ化は1社であった。RPF原料としている3社のうち1社は、「他のプラスチック類と一緒にRPFとしてリサイクル」と記載していた。フラフ化している1社は、「RPF原料化を選択した場合、RPF燃料の利用先を決定できないためフラフ化を選択した」と記載していた。製紙原料としてリサイクルしている企業は約10%(4社)であり、既にマテリアルリサイクルを実施している企業が存在することが判明した。

3.1.2 アンケート調査結果_問2：ラベル台紙の月間廃棄量の認識

図4に廃棄量の認識結果を示した。

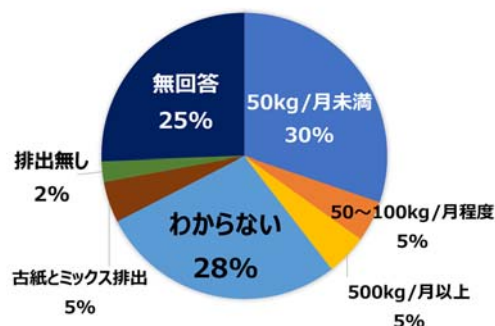


図4 ラベル台紙の廃棄量

廃棄量を把握している企業(選択肢a、b、d))は15社であり、そのうち11社(73%)は産業廃棄物として焼却処分またはリサイクルを実施している企業であった。この結果は、産業廃棄物処理費およびリサイクル費が従量制であることに起因すると考えられた。一方、「わからない」を選択した企業は12社であり、その内9社(75%)は一般廃棄物として焼却処分している企業であった。この理由は、事業系ごみの料金設定において定額制を選択している排出業者が多いためと考えられた。

3.1.3 アンケート調査結果_問3：リサイクル推進の取組に関する認知度

資源循環プロジェクトおよびラベル循環協会に関する認知度の結果は以下の通りであった。

- ・既に利用している：0社(0%)
- ・知っている：5社(12%)
- ・知らない：28社(68%)
- ・無回答：9社(20%)

資源循環プロジェクトの専用台紙回収開始、およびラベル循環協会設立準備団体の発足から既に1年以上経過していたが、無回答を含めると約90%の企業がラベル台紙のリサイクル推進に関する取組を認知していないことが明らかとなった。

3.2 古紙回収業者に対するアンケート調査結果

古紙回収業者からの有効回答は7社であり、その内6社（86%）がラベル台紙を収集していないと回答した。この内2社は「製紙会社より禁忌品として混入禁止されているため」と理由を記載していた。一方、1社は既にラベル台紙を分別収集し、製紙会社に製紙原料として搬入していると回答した。ユーザーアンケート結果と一致し、埼玉県内の一部ではラベル台紙のリサイクルルートが既に確立されていることが判明した。しかし、当該企業においてもラベル循環協会の発足について認知していなかった。

3.3 ラベルユーザーに対するヒアリング調査結果

3.3.1 ヒアリング調査結果_情報入手元

図5にユーザーへのヒアリング調査より得られた情報入手元を示した。

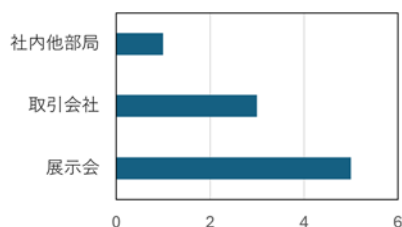


図5 リサイクル等に関する情報入手元

企業の環境対策として、CO₂排出量削減、カーボンニュートラルの推進、廃棄物削減等の目標を有する場合、担当者は展示会やセミナー等で情報収集を行っていることが明らかとなった。したがって、ユーザーへの啓発活動は展示会等での情報提供が初期段階として重要であることが示唆された。一方、グループ企業や関連企業からの情報は信頼性が高いという指摘も得られた。また、得意先企業からの問合せによってプロジェクトを認知した企業も存在したため、多様なステークホルダーを通じた情報発信の必要性が示唆された。

3.3.2 ヒアリング調査結果_循環型ラベル台紙採用・不採用の要因

ヒアリング調査により得られた循環型ラベル台紙の採用・不採用を左右する要因を分類し、図6および図7に示した。

3.4 リサイクルの普及について

以上のことから、リサイクルの普及について考察する。

3.4.1 経済性

循環型ラベル台紙は、資源循環プロジェクトにより買取の対象となるため、廃棄物から有価物（原則20円/kg）への転換が実現する。この転換は、参加企業のモチベーション向上に寄与していることが明らかとなった。一方、既存ラベルの購入価格が極めて廉価である場合（大口取引等）、循環型ラベル台紙の買取りがあったとしても、ラベル購入

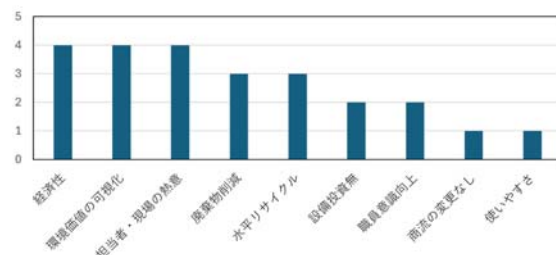


図6 循環型ラベル台紙採用の要因

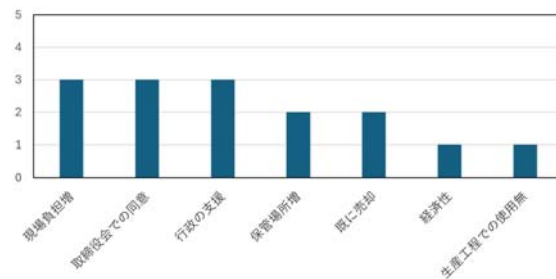


図7 循環型ラベル台紙不採用の要因

に関わる費用のみを考慮するとマイナスになる可能性がある。特に、ラベル台紙を分別せず、他の可燃性廃棄物と一緒に定額制の事業系一般廃棄物として廃棄している場合は、廃棄物量の減少が処理費削減に直結しないため、参加のモチベーションにはならないことが判明した。

3.4.2 二酸化炭素排出量の可視化

電力、ガス、石油、省エネ等のエネルギー関連のCO₂排出量の削減を優先する企業は非常に多い。現在、エネルギー関連以外のCO₂排出抑制に取り組む企業の割合が増加している。循環型ラベル台紙採用企業の中には、環境価値の可視化を採用理由として挙げた企業も存在した。今後、サプライチェーンにおける温室効果ガス排出量（Scope3）算定の重要度が増すに伴い、循環型ラベル台紙採用のモチベーションが向上する可能性が示唆された。

3.4.3 現場業務の負担増加

循環型ラベル台紙をリサイクルする場合、有価物として回収されるため、「混ぜない」「汚さない」「無駄にしない」「ラベルは完全に除去する」といった厳格な取扱規則が存在する。そのため、作業工程の増加、分別保管スペースの確保等、現場の業務負担が増加することが避けられず、不採用の一員となることが明らかとなった。さらに、自動ラベル貼付機械の設定調整に課題を抱える場合もあり、ラベルの貼付工程が製品生産に直結する場合、特に循環型ラベル台紙採用に向けたハードルが高くなることが示唆された。現場作業員との対話から、組織内の階層を超えた良好な人間関係の構築が、新たな施策導入を推進するための重要なキーポイントであることが明らかとなった。

4 まとめ

ラベル台紙の循環利用推進の現況を分析すると、環境保全よりも経済性および作業効率を重視する企業が多数派を占めていることが明らかとなった。ラベル台紙の循環利用をさらに推進するためには、企業内での環境意識の統一を推進する必要があり、複数の情報発信経路からの啓発活動がコンセンサス形成に有効であることが示唆された。

「第五次循環型社会形成推進基本計画」における循環型社会形成に向けた行政の役割は、地域のコーディネーターとしての機能を果たし、地域資源循環システムの構築を図ることとされている。行政がコーディネーター機能を果たすには、情報提供およびステークホルダー間の連携促進が不可欠である。一方、「連携」を「行政による推進」と同義と捉え、これを「財政支援（補助金等）」と結びつける企業が多く見受けられることから、注意が必要である。持続可能な資源循環システムへの関心を高めるためには、市町村と県が連携し、以下のような施策の導入が効果的であると考えられた。

○資源化施設への誘導：廃棄物焼却施設への搬入禁止措置

○処理手数料の見直し：事業系一般廃棄物処理手数料の引き上げ

これらの施策は、平成26年度に上尾市西貝塚環境センターによる「事業系廃棄物減量大作戦：資源の搬入禁止」や、令和6年4月1日のさいたま市による「事業系一般廃棄物処理手数料の改定」といった先進事例を参考として設計することが重要である。このような規制的手段を含めた総合的な施策により、ラベル台紙を含む資源循環システムの実装が促進されると予想される。

文 献

1) 環境省循環型社会形成推進基本計画、
<https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html/>(2026.5.8アクセス)。

- 2) 資源循環プロジェクト、
<https://www.shigenjunkan.com/>(2026.5.8アクセス)。
- 3) 日榮進化株式会社製品情報、
<https://www.neion.co.jp/products.html>(2026.5.8アクセス)。
- 4) 製紙原料に適さない紙類、公益財団法人古紙再生促進センター、
http://www.prpc.or.jp/wp-content/uploads/Prohibitive_materials.pdf(2026.5.8アクセス)。
- 5) 印刷物資財「古紙リサイクル適正ランクリスト」規格、一般社団法人日本印刷産業連合会、
https://www.jfpi.or.jp/recycle/print_recycle/file/201409recycle_list.pdf(2026.5.8アクセス)。
- 6) 一般社団法人ラベル循環協会、<https://www.j-ecol.or.jp/>(2026.5.8アクセス)。
- 7) CELAB (Toward a Circular Economy for Labels)、
<https://celabglobal.org/>(2026.5.8アクセス)。
- 8) 彩の国工場一覧、埼玉県、
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0812/a14.html>(2026.5.8アクセス)。
- 9) 廃棄物再生事業者登録一覧、埼玉県、
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0506/saiseijigyosya.html>(2026.5.8アクセス)。
- 10) まず化粧箱の封緘シール、化学工業日報、2023年11月8日号。
- 11) 封かんシールから採用目指す、ラベル新聞、2023年10月1日号。
- 12) SHIONOGIジャーナル、
<https://www.shionogi.com/jp/ja/company/journal/20240409.html>(2026.5.8アクセス)。
- 13) 資源循環友の会（創刊号）、資源循環プロジェクト、2024.10。
- 14) 資源循環プロジェクトに参画、ラベル新聞、2023年7月15日号。

Investigation of the Current Status for Promoting the Circular Use of Label Liners

Mikio KAWASAKI, Yugo ISOBE, Masanao NAGAMORI and Mamoru MOTEGI

Abstract

Circular economy promotion is positioned as a national strategy due to its multiple environmental and economic benefits, including resource procurement, reduction of CO₂ emissions, and creation of new business opportunities. This study investigated the response to circular economy initiatives by focusing on combustible waste processed at municipal incineration facilities, with particular attention to label liners that are discarded in separated form. Results showed that approximately 51% of the companies surveyed opted for incineration, while approximately 9.8% selected recycling. Among companies aware of their waste volume, approximately 73% either treated label substrates as industrial waste or implemented recycling; this recognition was found to be dependent on fee structures. Awareness of label substrate recycling projects remained limited at approximately 12%, with most companies demonstrating lack of recognition. Regarding factors promoting adoption of circular label substrates, both economic viability and visualization of environmental value were identified; conversely, increased operational burden was cited as a deterrent. This study concludes that promoting circular use of label substrates requires unified environmental consciousness within organizations and awareness-raising activities through multiple information dissemination channels. Furthermore, toward establishing a sustainable resource circulation system, it is considered effective to implement comprehensive measures—including regulatory approaches such as prohibition of incineration facility intake and increased disposal fees for business-generated general waste—coordinated between municipalities and prefectures to facilitate the promotion of renewable resource utilization.

Key words: label liners, business awareness, promote recycling, circular economy

埼玉県の水田における非灌漑期の利用形態が土壌水分と タニシの生息に及ぼす影響

王効拳 安野翔 米倉哲志 三輪誠 磯部友護

1 はじめに

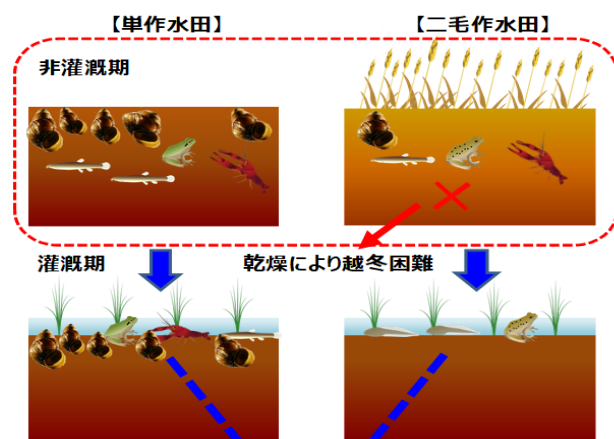
水田は、生物多様性の高い農業生態系である。日本の水田とその周辺に、これまでわかっているだけで5000種以上の生物が生息している¹⁾。灌漑期には、多様な動植物が生息し、非灌漑期には巻貝や甲殻類等の水生生物が土壌中で越冬場所として利用している。近年の圃場整備に伴う乾田化により、土壌中で越冬する種の個体数減少を招いていると考えられている²⁾。

埼玉県では、小麦が主要農産物の1つであり、特に北部・利根地域では米の裏作として栽培される二毛作農業が盛んである。事例として、図1は加須市における単作水田および米麦二毛作水田の5月の状況を示す。単作水田では、4月から5月にかけて灌水およびイネの田植えが行われるのに対し、米麦二毛作水田では、小麦の生育が著しい時期である。図2に示すように、非灌漑期に麦を栽培すると、麦が土壌中の水分を吸収すること等により、土壌中の水分が減少し、越冬している水生生物の生存に影響することが考えられる。しかし、非灌漑期の土壌環境と土壌中で越冬する水生生物の関係については、これまで調査されてこなかった。

そこで本研究では、非灌漑期における単作水田と二毛作水田における土壌水分と土壌中でタニシ等の水生生物の越冬状況を比較する。これにより、水田における生物多様性保全のための基礎的情報を得る。



図1 単作水田（左）と米麦二毛作水田（右）の様子（埼玉県加須市平永・R4年5月17日撮影）



裏作の有無が灌漑期の水生生物群集にまで影響？

図2 単作水田と二毛作水田における水生生物群集への影響の仮説概念図

2 研究方法

2.1 水田調査

埼玉県加須市内の米麦二毛作水田8枚(二毛作1～8) および単作水田10枚(単作1～10)を調査対象とした(表1、図3)。水田は同一の農家が管理しており、施肥や農薬散布等の条件は同じである。なお、各水田の調査は、二毛作1、2と単作1、2、3、4をR3年度に、二毛作3、4、5と単作5、6、7をR4年度に、二毛作6、7、8と単作8、9、10をR5年度にそれぞれ行った。また、同一地点でタニシ生息の年間推移を把握するため、単作3、4の水田でR3～R5まで3年連続してタニシの生息状況を調査した。

表1 水田面積と調査日

	面積(m ²)	調査日
二毛作1	8415	R3.10.28
二毛作2	7617	R3.10.25
二毛作3	6954	R4.11.4
二毛作4	5765	R4.11.4
二毛作5	4052	R4.11.4
二毛作6	5777	R5.11.6
二毛作7	3539	R5.11.7
二毛作8	6046	R5.11.6
単作1	6885	R3.10.28
単作2	5413	R3.11.1
単作3	7838	R3.11.4
		R4.11.8
		R5.11.6
単作4	4694	R3.11.4
		R4.11.8
		R5.11.6
単作5	7338	R4.10.28
単作6	11831	R4.10.20
単作7	14697	R4.10.21
単作8	1852	R5.11.6
単作9	5484	R5.11.7
単作10	2419	R5.11.6

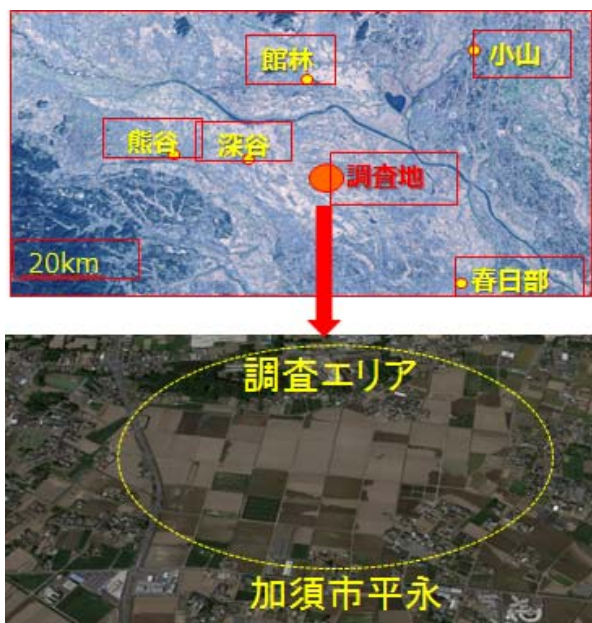


図3 野外水田の調査地域

2.2 タニシの調査方法

水田のタニシの個体数は、コドラート法を用いて調査した。水田の縦横をそれぞれ三等分し、その交点にあたる9地点にコドラート（方形枠：50 cm×50 cm）を設置した³⁾。各コドラート内の個体数を計数することで、水田全体の分布を均等に把握できるようにした。各調査点にコドラートを杭で固定した後に、目視とハンドソーティグ法により土壌表面のタニシ（生体と死体）を採集した^{3,4)}。また、コドラート内の土壌（0～3 cm）をスクレイパー（Scraper）により採取し、無地白色のビニール製シートを薄く広げ、ハンドソーティグによりタニシを採集した^{3,5,6)}。採集したタニシをジッパー式ポリ袋に入れて丁寧に保管し、実験室で速やかにタニシの個体数、種、サイズ（殻高）を調べた。調査終了後、採集したタニシは元の生息場所に速やかに戻した。また、タニシの採取時に各水田の土壌試料を採取し、土壌水分量を測定した。

土壌水分量（%）は、重量法（gravimetric method）により測定した⁷⁾。現地において、体積100 mLのステンレス製サンプリングコアを用いて土壌試料を採取し、採取後は水分の蒸発を防ぐため速やかに密閉した。実験室に持ち帰った試料は、採取直後の湿重量を測定した後、105℃に設定した乾燥機内で恒量に達するまで加熱乾燥した⁸⁾。その後、乾燥重量を測定し、湿重量と乾燥重量の差から土壌中の水分量を算出した。土壌水分量は湿重量に対する水分重量の割合（湿量基準）として、以下の式により求めた。

$$\text{土壌水分量（\%）} = (\text{土壌湿重量} - \text{土壌乾燥重量}) / \text{土壌湿重量} \times 100$$

2.3 水田の土壌体積含水率の経時変化調査方法

各調査年度の非灌漑期（12月17日から翌年3月3日まで）において、調査した単作水田と二毛作水田の中心部に土壌の表層から深さ5 cmにSMEC300センサー（Spectrum Technologies Inc., USA）を設置し、土壌体積含水率（%）の経時変化をモニタリングした。土壌水分データは、試験期間中60分間隔で記録した。

2.4 データ解析

二毛作水田（n = 8）および単作水田（n = 10）におけるタニシの個体密度、殻高および土壌水分の差を検討するため、各群のデータ分布を確認した。その結果、正規性が満たされなかったため、ノンパラメトリック手法であるMann-WhitneyのU検定を用いて群間差を検定した。また、土壌水分とタニシ個体密度との関係性を評価するため、両者の相関について回帰分析を実施した。さらに、単作水田3（ヒメタニシ）および単作水田4（マルタニシ）における個体密度の年次間差を検討するため、一元配置分散分析（one-way ANOVA）を実施した。以上の統計解析はすべて両側検定とし、有意水準は5%（ $p < 0.05$ ）とした。

3 研究結果

3.1 水田土壌中のタニシの生息状況と土壌水分量

非灌漑期において、調査した18枚（二毛作8枚、単作10枚）の野外水田土壌中のタニシの個体密度、殻高と土壌水分量を表2に示す。90%の単作水田（10枚単作水田中の9枚）、38%の二毛作水田（8枚二毛作水田中の3枚）の土壌中にそれぞれタニシの生息が確認された。また、タニシが確認された3枚の二毛作水田は、すべて単作水田から転換された1年目の水田であった。本研究により、当該調査地域のほとんどの単作水田土壌中にタニシが生息していることが確認できたが、2年以上の二毛作利用により、土壌中のタニシが生息しなくなる可能性が示された。

表2に示したとおり、単作水田土壌中のタニシの個体密度は、平均で24.9個体/m²（0～101.7個体/m²）であった。これに対して、二毛作水田土壌中のタニシの個体密度は、平均1.5個体/m²（0～6.7個体/m²）であった。二毛作水田と単作水田のタニシ個体密度を比較した結果、単作水田において有意に高い値が認められた（Mann-WhitneyのU検定, $p < 0.05$ ）。

単作水田の土壌水分量は、平均35.3%（26.1～39.6%）で、二毛作水田の平均27.4%（25.8～28.9%）に比べて明らかに高かった（Mann-WhitneyのU検定, $p < 0.05$ ）。これらのことから、土壌水分量が高い水田ほどタニシの密度が高い傾向が示唆された（表1）。

表2 非灌漑期における野外調査水田のタニシの生息及び土壌水分量

水田	水田類型	利用年数	タニシ類		土壌水分量 (%)
			密度 (個体/m ²)	殻高 (mm)	
二毛作1	3		0.0	—	26.1
二毛作2	1		1.6	17.5	27.5
			1.2*	18.2*	
二毛作3	1		2.7	16.3	27.1
二毛作4	3		0.0	—	27.6
二毛作5	2		0.0	—	28.9
二毛作6	1		6.7	14.1	27.6
二毛作7	3		0.0	—	25.8
二毛作8	>5		0.0	—	28.6
単作1	>5		0.0	—	26.1
単作2	>5		0.6	17.6	29.3
単作3	>5		12.4	16.9	37.7
単作4	>5		16.9*	19.9*	39.6
単作5	>5		25.8	17.2	37.2
単作6	>5		101.7	17.6	36.6
単作7	>5		6.7	16.9	35.9
単作8	>5		34.2	17.6	35.4
単作9	>5		20.0	16.8	36.1
単作10	>5		30.7	16.1	38.8

「*」はマルタニシ、それ以外はヒメタニシ

現地調査により得られたデータを散布図（図4）として解析した結果、土壌水分量の増加に伴いタニシの個体密度が増加する傾向が確認された。土壌水分量とタニシ個体密度との関係の評価するため、土壌水分量を説明変数、タニシ個体密度を目的変数とした単回帰分析を実施し、土壌水分量とタニシ個体密度の間に有意な正の相関が認められた ($r = 0.58, p < 0.05$)。すなわち、土壌水分量が高いほどタニシの個体密度が増加する傾向が示された。特に土壌水分量が35%以上の条件下ではタニシの個体密度は増加傾向を示したが、ばらつきが大きく、一部の地点では100個体/m²を超える高密度が観察された。一方、土壌水分量が30%未満では個体密度はほぼゼロに近く、低水分条件ではタニシの生息が著しく制限されたことを示唆した。したがって、水田において適切な水分条件を維持することは、タニシの生息環境の保全に極めて重要であると考えられる。

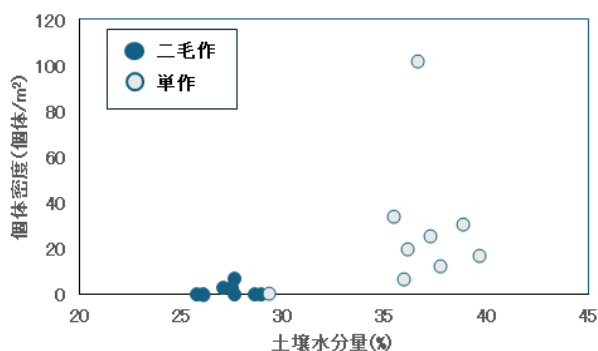


図4 二毛作水田と単作水田の土壌中のタニシの平均個体密度と土壌水分量の関係

3.2 タニシの種類とタニシ個体密度の年間変化

二毛作水田2と単作水田4において、環境省レッドリスト2020⁹⁾と埼玉県レッドデータブック動物編¹⁰⁾で絶滅危惧II類に指定されているマルタニシ (*Cipangopaludina chinensis laeta*) の生息が確認された（図5）。その他の水田では、全てヒメタニシ (*Sinotaia quadrata histrica*) のみが確認された。

マルタニシの殻高はそれぞれ19.9 mm（単作4）と18.2 mm（二毛作2）であり、ヒメタニシの殻高は14.1～17.6 mmであった（表1）。単作でやや高い傾向が見られたが、Mann-WhitneyのU検定において有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。なお、今回の非灌漑期の調査では、殻頂部が摩耗したタニシが多く見られたが、本研究では野外個体の実態を反映させる観点から、これらの個体も除外せず、殻高は実際の形状のまま測定した。

埼玉県平野部でのマルタニシの生息記録は乏しく、本事例は貴重な記録となった。そこで、発見された水田単作4におけるマルタニシを対象とし、立地条件（水系、土壌条件および水管理方法）が類似し、かつ近接する水田単作3を対照水田として設定し、ヒメタニシとの生息個体密度の3年間の動態を調査した。

その結果、図6に示すように、非灌漑期の土壌中におけるヒメタニシとマルタニシの個体密度は、年間を通じて概ね安定した水準を維持することが明らかとなった。なお、ヒメタニシおよびマルタニシの個体密度について年次間比較を行った結果、一元配置分散分析において、いずれの年次間にも有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。



図5 単作4水田土壌中で越冬するマルタニシの様子

3.3 土壌体積含水率の経時変化

野外調査水田において、毎年二毛作水田と単作水田の土壌体積含水率の経時変化をモニタリングした。図7は事例として、R3とR5年度の非灌漑期（12月～3月）の土壌体積含水率を示す。

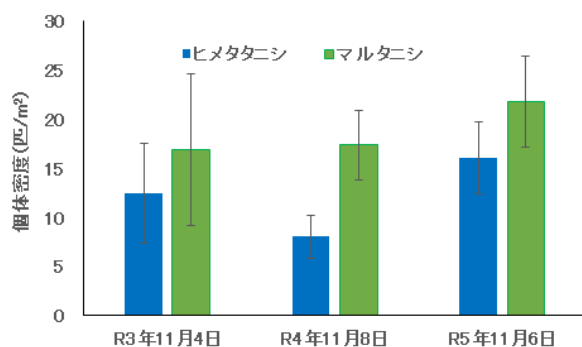


図6 非灌漑期におけるヒメタニシ（単作3）とマルタニシ（単作4）の個体密度の年間推移

土壌体積含水率は、二毛作水田よりもタニシの個体密度が高い単作水田で明らかに高く、水田の間で大きな差が確認された。非灌漑期の土壌体積含水率平均値は、単作1～4、8～10では18.1～56.1%、二毛作1～2、6～8では9.6～24.6%の範囲にあった。

各調査水田の調査期間の平均土壌体積含水率とタニシの個体密度との関係をグラフにした（図8）。また、土壌体積含水率とタニシ個体密度との関係について回帰分析を行った。両者の間には有意な正の相関関係が認められた（ $r = 0.56, p < 0.05$ ）。この結果は、土壌体積含水率が高いほどタニシ個体密度が増加する傾向を示しており、水分条件がタニシの生息および分布に重要な影響を及ぼしていることが示唆された。特に、高含水率条件下では個体密度のば

らつきはあるものの、全体として密度が高くなる傾向が確認された。一方、低含水率条件では個体密度は概して低く抑えられていた。さらに、タニシ個体密度が高い単作水田では、他の水田と比較して土壌がより長期間にわたり高い含水率を維持していることが示され、持続的な高含水環境が個体群の維持に寄与していることが示唆された。

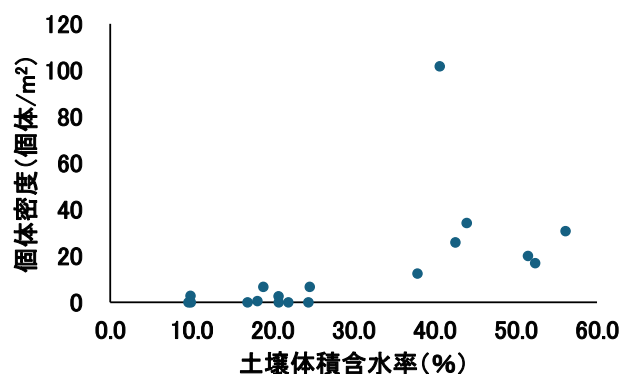


図8 非灌漑期における水田土壌の平均土壌体積含水率とタニシ個体密度の関係

4 まとめ

本研究では、同一農家が管理する単作水田と二毛作水田において、非灌漑期での土壌中のタニシの生息状況と土壌水分の関係を調査したところ、主に以下の成果が得られた。

- ① 非灌漑期における単作水田と二毛作水田の土壌中のタニシの平均個体密度は、それぞれ24.9、1.5個体/m²であった。単作水田は二毛作水田より高いことが明らかになった。
- ② ほとんどの水田ではヒメタニシが生息していたが、絶滅危惧種のマルタニシも一部の水田で生息が確認された。埼玉県平野部での記録は乏しいため、貴重な記録となった。また、非灌漑期土壌中のヒメタニシやマルタニシの個体密度について、経年変化は少ないことが分かった。
- ③ 非灌漑期の土壌体積含水率は水田間で大きく異なり、その差は約5倍にも及んだことが分かった。
- ④ 土壌水分量や土壌体積含水率の多い水田でタニシの個体密度が高い傾向が認められた。二毛作水田は単作水田に比べて土壌含水率が低い傾向にあり、タニシの個体密度も明らかに低かった。

謝辞

本研究は、有限会社早川農場から調査水田及び管理情報を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 大塚大介, 嶺田拓也 (2020) なぜ田んぼには多様な生き物がすむのか, 京都大学学術出版会。

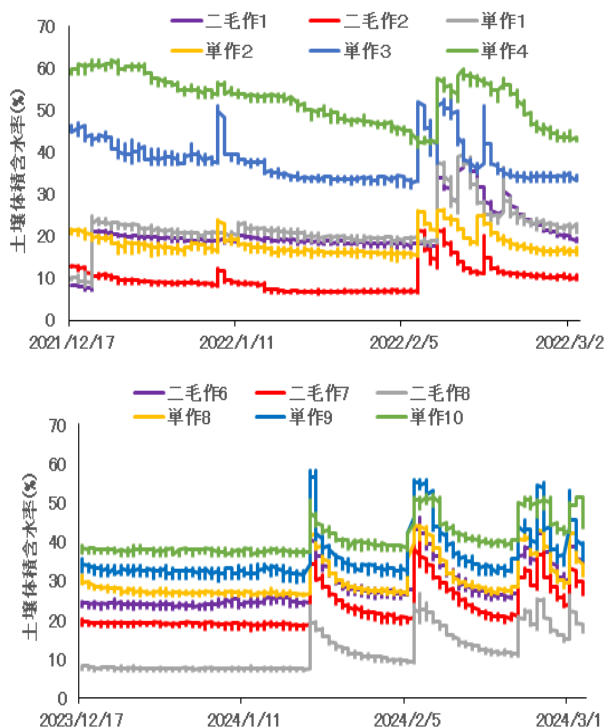


図7 R3年度（上）とR5年度（下）における二毛作水田と単作水田の土壌体積含水率の経時変化（深さ5 cm）

- 2) 田和康太, 中西康介, 村上大介, 西田隆義, 沢田裕一 (2013) 中山間部の湿田とその側溝における大型水生動物の生息状況, 保全生態学研究, 18(1), 77-89.
- 3) 日本土壌動物学会 (2007) 土壌動物学への招待「採集からデータ解析まで」, 東海大学出版社.
- 4) 市川志野, 中島貴幸, 片野田裕亮, 富山清升, 山本温彦, 鈴木英治 (2016) トカラ列島口之島の陸産貝類相の構成と環境との関係, 日本生物地理学会会報, 71, 53-68.
- 5) 古郡憲洋, 岸本圭子, 本間航介 (2020) 里山景観における森林と水田畦畔との接続性の違いが土壌動物群集に与える影響, 農業農村工学会論文集, No.310 (88-1), I_165- I_177.
- 6) D. C. Raheem, F. Naggs, R. C. Preece, Y. Mapatuna, L. Kariyawasam, and P. Eggleton (2008) Structure and conservation of Sri Lankan land-snail assemblages in fragmented lowland rainforest and village home gardens, *Journal of Applied Ecology*, 45, 1019-1028. doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01470.x
- 7) 田中治夫, 村田智吉 (2018) 土壌環境調査・分析法入門, 講談社.
- 8) L.S. Matula, K. B. ková, and W.L. Legese (2016) Laboratory performance of five selected soil moisture sensors applying factory and own calibration equations for two soil media of different bulk density and salinity, *Sensors*, 16, 1912. doi:10.3390/s16111912
- 9) 環境省 (2020) 環境省レッドリスト 2020. (<https://www.env.go.jp/press/files/jp/114457.pdf>).
- 10) 埼玉県 (2018) 埼玉県レッドデータブック動物編2018. (<https://www.pref.saitama.lg.jp/b0508/saitamakennoyouseiseibutu/reddatebook2018.html>).

天然ゼオライトの塩類によるアンモニア態窒素 吸着阻害影響について —廃棄物最終処分場浸出水の窒素除去に対する基礎的検討—

長谷隆仁

1 はじめに

廃棄物最終処分場（以下処分場）の埋立廃棄物に起因して発生する浸出水の汚濁物質やガスの発生量等は、基本的には自然減衰していく。維持管理を終え、処分場の廃止をするにあたっては、こうした自然減衰によって、環境上の支障が生じない状態に達したと判定する廃止基準が、1997年の法改正によって設置された。廃止基準には、浸出水水質、ガス発生量等様々な項目が含まれるため、廃止基準未達が一項目であっても、廃止する事ができない。

先述したように、浸出水の汚濁成分の濃度は、埋立中に排出のピークを迎え、以降減衰していくといった工場排水とは異なる特徴があるが、浸出水のアンモニア態が主とする窒素の減衰は比較的遅く、維持管理が長期化する一因となっている。処分場の浸出水処理施設は、汚濁ピーク時でも対応できるように設計されているが、維持管理の長期化に伴って、浸出水水質が設定水質と乖離していき、設備過剰となる事態が生じ、過大な負担となっており、水質に対応した設備更新・簡素化が望まれる。

吸着材処理は、生物処理に比べて管理上だけでなく設備追加上も容易である。ゼオライトは非常に多様な機能を有する資材であり、アンモニア態窒素の吸着材としても古くから知られている^{1,2)}。日本でも水質汚濁等の公害問題が起これば、ゼオライトによる水処理の研究は活発となり³⁻⁶⁾、今でも検討は続いているものの⁷⁻⁹⁾、浸出水の処理技術として普及しているとはいえない。ただし、当時はなかったが、廃止基準設置に伴い発生した維持管理の長期化という最近の問題、設備簡素化の課題を鑑みるに、埋立終了後の後期、窒素処理が必要で、高い除去率は求めない低濃度などという特定の状況に限れば、ゼオライトによる吸着材処理の有効性を再度検討しても良いと考えられる。

浸出水は高塩類のものも多く、塩類がゼオライトの吸着阻害となる事も知られている^{3,10-12)}。そのため、ゼオライトの利用可能性を検討する上で、塩類による吸着阻害を把握する事は重要である。そこで、本研究では、上記の様に時期・状況を限定した上での適用を念頭に、塩類による吸着阻害の把握を行った。

ゼオライトには、天然ゼオライトや人工ゼオライトなど多様なものがある^{13,14)}が、高い除去率を求めず、維持管理

費等負担削減のための処理設備簡素化を目的とした利用を鑑みれば、安価な天然ゼオライトの利用が適していると考えられる。天然ゼオライトは、天然鉱物であり、日本国内でも多くの産地があり、産地によっても吸着性能等は異なるので¹⁵⁾、各産地の天然ゼオライトを調達した比較検討が必要となる。また、塩類による吸着阻害の把握を行う上では、吸着実験が必要となるが、実験系の確立のために、吸着実験に影響する因子等の検討を行う。

2 材料

2. 1 ゼオライト

実験用材料として各地で算出される市販の天然ゼオライトを収集した（表1）。

表1 ゼオライトの産地・種別

記号	産地	種別
N	飯坂(福島県)	モルデナイト
T	板谷(山形県)	クリノプチロライト
Z	愛子板嵐(宮城県)	モルデナイト
S	二ツ井(秋田県)	クリノプチロライト/モルデナイト
I	仁摩(島根県)	モルデナイト

2. 2 試薬

アンモニウム塩としては、塩化アンモニウムと酢酸アンモニウムを用いた。アンモニウム塩は吸湿性があり、特に酢酸アンモニアは揮散性が強く（アンモニア臭がする）、Na置換処理や一部実験に限り、吸着実験には塩化アンモニウムを主に使用した。他塩類阻害の実験には、塩化ナトリウム、塩化カリウム、塩化カルシウムを使用した。

3 交換性塩基とその置換処理

3. 1 交換性塩基含有量・陽イオン交換容量^{16,17)}

結晶構造による分子ふり作用と結晶構造内の陽イオンの作用によるイオン交換能をもった選択的な吸着がゼオライト吸着の特徴である¹⁾。そこで、ゼオライトの吸着性能の目安として、交換性塩基含有量、陽イオン交換量を測定した。

(1) 方法

試料を粉碎後、1M酢酸アンモニウムで15分間振盪後遠心分離し、さらに2回、沈殿物に1M酢酸アンモニウムを添加、振盪後遠心を繰り返す(計3回)、それぞれ上澄み液を集め、交換性塩基としてNa、K、Mg、Caを測定した。その後、沈殿物を2回80%エタノールで軽く振盪し遠心する事を2回、10%塩化カリウム液で20分間振盪し遠心する事を3回行った。塩化カリウム液の遠心分離後の上澄み液を集め、陽イオン交換容量(以下CECと略す)として NH_4^+ を測定した。 NH_4^+ を含むNa、K、Mg、Caはイオンクロマトグラフ法で測定した。

(2) 結果

図1に交換性塩基含有量を電解質量として100 gあたりの単位ミリ当量(meq)で示す。塩基含有量総量が最も多いのはZ、最少はSである。組成のNa、K、Caは主成分であるが、割合にも差がみられ、30%以上含む上位2成分は、ZでCa-K、NでCa、IでNa-Ca、TでNa、SでNa-Kとなる。

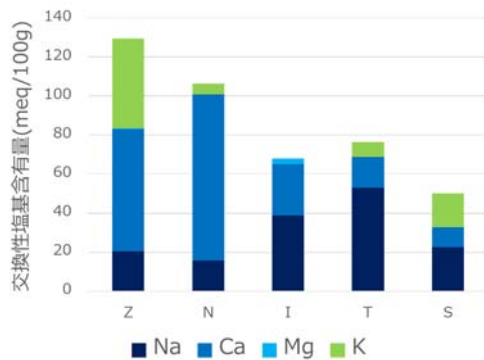


図1 産地別交換性塩基含有量

図2にCECと交換性塩基含有量の散布図を示す。図2では交換性塩基含有量とCECが等しい対角線上に点線を引いている。交換性塩基含有量が高いものは、CECが高い傾向が認められるが、Zを除けば、CECはこの点線より上方にあり差は大きい。交換性塩基含有量を測定する際、高濃度の酢酸アンモニウムで処理する事で、陽イオンを NH_4^+ で置換している。これをKClで処理する事で置換された

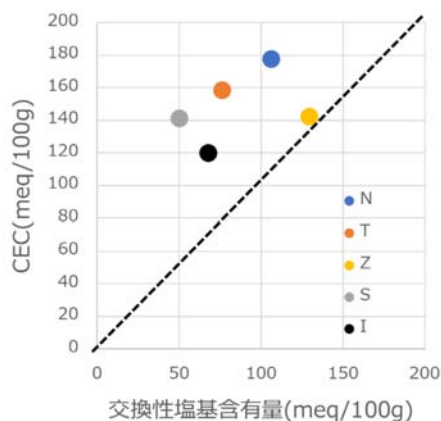


図2 CECと交換性塩基含有量の関係

NH_4^+ からCECを求める。 NH_4^+ で置換された交換性塩基としてはNa、K、Ca、Mgを測定するが、H、Al等の他成分の陽イオンが含まれる場合は、陽イオンが解離する実験条件の差などの要因によって、土壌においては交換性塩基含有量とCECの値は異なる事が知られている。特に、Sについては、交換性塩基含有量の約3倍のCECであり、差が大きかった。NやTのCECが比較的高かったが、交換性塩基含有量ZのCECは高いとは言えず、KはCECに寄与していないようである。

3. 2 Na置換処理法の検討

(1) 方法

交換性塩基をNaで置換処理することで、アンモニア吸着量が向上することが知られており、Na置換法はいくつもの方法がある^{3,10,18)}(図3)。ここでは、処理の手間の小さい土研法と和嶋法で置換処理を行った。

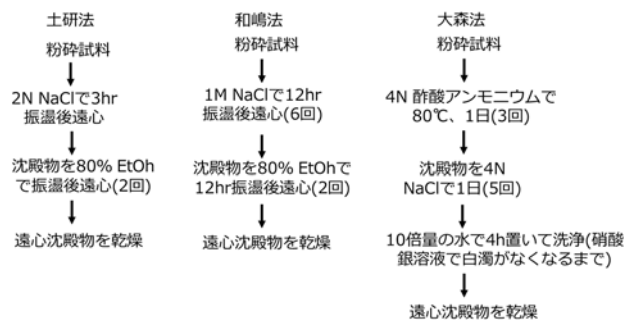


図3 Na置換処理法

(2) 結果

図4には、交換性塩基含有量を示す。産地別に、先述したNa置換処理を行っていないもの、土研法、和嶋法によってNa置換を行ったものを示している。

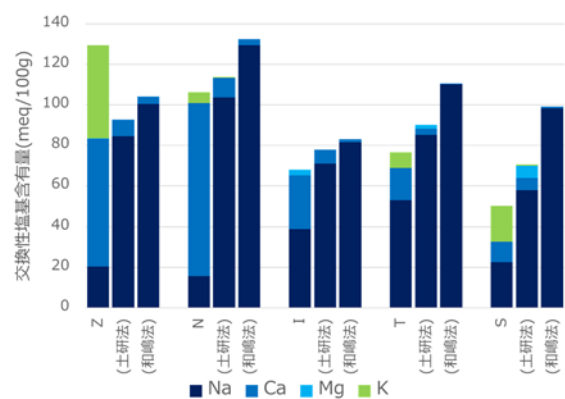


図4 産地別交換性塩基含有量

Na置換処理により、塩基含有量の主成分はNaとなるだけでなく、総量も増加している。和嶋法の方が、Naの割合が高く、総量の増加が認められた。ただし、Zについては、総量が減少した。先述したように、交換性塩基含有量

を測定する際、高濃度の酢酸アンモニウムで処理する事で、陽イオンを NH_4^+ で置換している。CECが高いという事は、Na、K、Ca、Mg以外のその他陽イオンが NH_4^+ で置換されたと推測される。Na置換処理によって、その他陽イオンがNaに交換されたため、総量が増加したと推測される。ただし、Zについては、逆に交換分が減少しており、原因は不明である。

図5にはNa置換処理前後のCECを示す。CECとNa置換後CECが等しい対角線上に点線を引いている。土研法、和嶋法ともに、Na置換処理後のCECは対角線の上方にあり、Na置換処理によりCECが増加している。Na置換後のCECは、Sを除けばあまり差はなかったが、和嶋法の方が土研法より高い傾向があり、特に断らない場合は、和嶋法にNa置換体を用いる事とした。ただし、土研法はより簡易な作業で同程度の処理効果を得られる方法である。

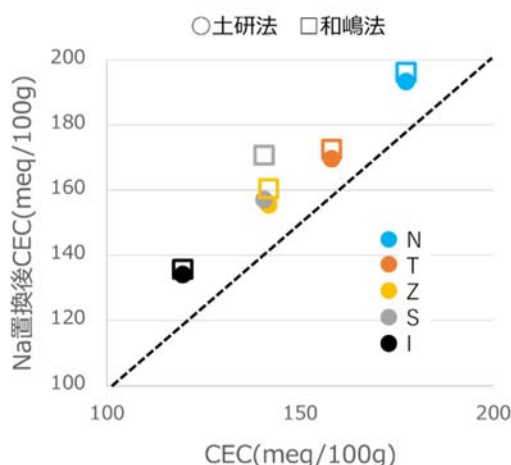


図5 Na置換処理前後のCEC

吸着によってCEC分が全て NH_4^+ に置換されるとして、吸着量の推計値を表2に示した。CEC値からの推計ではNa置換に関わらず、Nの吸着量が比較的高く、Iの吸着量が比較的低いと推測された。

表2 CEC から推定した NH_4^+ 吸着量(N-mg/g)

名称	Na非置換	和嶋法
N	24.8	25.9
T	22.2	22.8
Z	19.9	21.2
S	19.7	22.6
I	16.8	17.9

4 吸着量測定—バッチ試験

ゼオライト吸着に対する塩分阻害を評価する実験系の確立のため、まず、一般的な測定方法であるバッチ試験について、実験因子の影響の把握を行う。バッチ試験は、既存の文献の手法を参考にして行ったが、既に確立されたものであり、実験系の確立に必要な影響因子の検討過程自体

は報告される事は少ない。試験を実施する上で、試験に影響する可能性がある因子の把握は重要であると考えられる。試験に影響する可能性のある因子として、ゼオライトの添加量、液中の NH_4^+ 濃度、反応時間、粒径、温度、試薬(pH)、ゼオライト(T)の添加量と溶液量の組合せ(液固比)などが考えられ、これらの影響について検討した。

特に記載しない限り、バッチ試験には、粉碎後乾燥(105°C)した天然ゼオライトを用いた。50 mL容の遠沈管で、ゼオライトを濃度調整した塩化アンモニウム溶液と混合後、20°C、3h、横振り速度90回/minの条件で振盪機を用いて振盪した。実験後の混合液は3000rpmで遠心後、上澄み液を0.2 μm でろ過し、イオンクロマトグラフ法により測定した。本報では、吸着反応後の液濃度に対して、吸着反応前の液濃度を初期濃度とする。

実験で用いる塩化アンモニウム溶液の濃度は、初期濃度をC[N-mg/L]とした場合、Cの4倍量を水1Lの比で溶かし作成し、濃度をイオンクロマトグラフ法で測定して確認した。これは、実験数が多く、毎回、厳密に初期濃度Cになるように試薬重量を測定する事が難しい事、計算間違いを防ぐためである。

4. 1 添加量と NH_4^+ 濃度の影響

4. 1. 1 ゼオライト添加量による影響

(1) 方法

塩化アンモニウム溶液(12.4 N-mg/L) 40 mLに、ゼオライト添加量を25、50、100、200 mgと変えて吸着実験を行った。各産地のゼオライトについて、和嶋法によりNa置換処理を行ったものと、未処理のものを用いた。

(2) 結果

図6には NH_4^+ 濃度、図7には除去率を示した。除去率は、添加時の初期濃度を100%とし、吸着によって低下した割合として求めた。

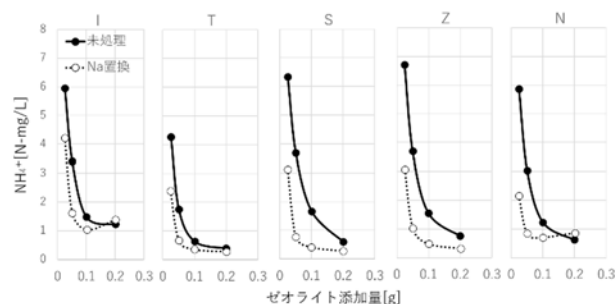


図6 添加量の影響

ゼオライト添加量の増加に伴い残存 NH_4^+ 濃度は低下し、Iはやや低い除去率は90%以上であった。除去率の飽和がみられる添加量では未処理とNa置換体では差がないが、それ以下では、Na置換体の除去率が高い傾向があり、非処理物に比べて、Na置換体はより少ない量で同程度の除去率を達成できた。

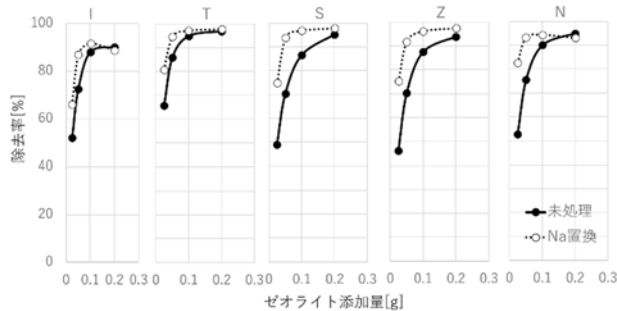


図7 添加量に対する除去率の関係

4. 1. 2 NH₄⁺初期濃度による影響

(1) 方法

塩化アンモニウム溶液(初期濃度44.8 N-mg/L)を1、2、4、8倍希釈して作成した各溶液をゼオライト (T) 50 mg に添加し、バッチ試験を行った。

(2) 結果

図8には初期濃度を横軸として除去率を示した。また、図9には、初期濃度を横軸に、ゼオライトの単位重量あたりの吸着量を示した。

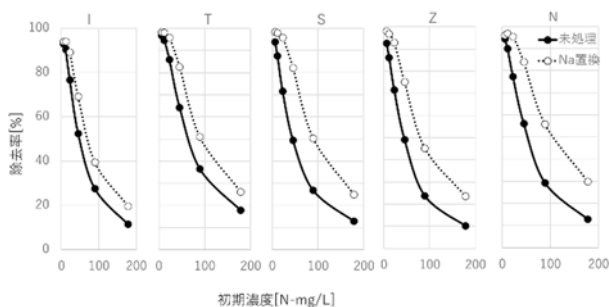


図8 初期濃度に対する除去率の関係

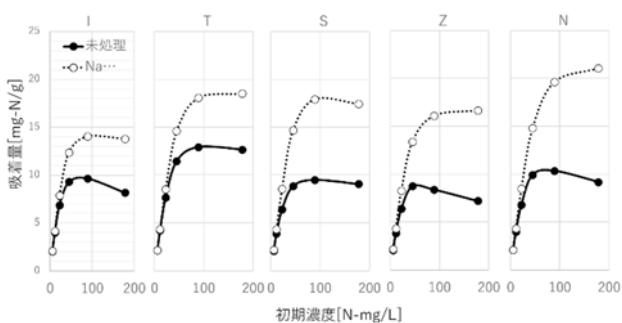


図9 初期濃度に対する吸着量の関係

初期濃度上昇に伴い、除去率は低下していく。吸着量も初期濃度上昇に伴い増加するが、漸減的である。吸着量が有限で、飽和すると吸着能力を失うが、このような場合、吸着平衡時の平衡濃度Cと吸着量Qの間に、吸着等温式として知られる関係が成立する。吸着等温式にはLangmuir式やFreundlich式などが知られているが、反応後の濃度を平衡濃度Cとすると、Langmuir式がよく適合することが分

かった。Langmuir式は、吸着平衡定数K、q_mをパラメータとして、以下の式で表される。

$$Q = q_m K C / (1 + K C) \quad (1)$$

C : NH₄⁺ [N-mg/L] Q : 吸着量 [N-mg/g]

q_m : [N-mg/g]

C→∞とした時の吸着量がQ→q_mとなるq_mは吸着飽和量と呼ばれる。相当する吸着等温式を求める場合、一般的に、式(1)の変形式を用いた線形回帰によって求められる。図10には、式(1)の変形式(2)を用いた回帰結果を示した。また、表3には、回帰パラメータを示した。

$$C/Q = (1/q_m)C + (1/q_m K) \quad (2)$$

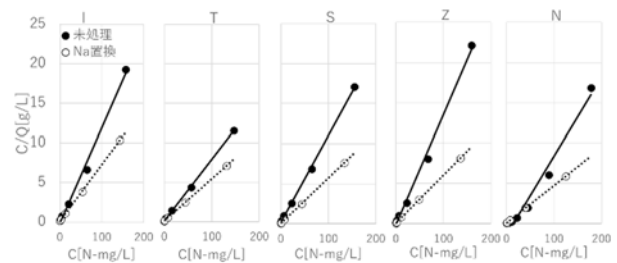


図10 吸着等温線回帰

q_mは、Na置換によって増加した。特にS、Z、NではNa置換によって、q_mが約2倍に増加している。Na置換体では、q_mが最も大きいのはNであり、TとZがこれに続く。Tのq_mは、未処理物では最も大きく、Na置換体としても、Nにやや劣る程度であり、Na置換処理の有無にかかわらず、吸着性能は高い吸着材である。コストを考慮して、TのNa未処理物を浸出水処理の吸着材として使用する事を想定して、実験材料としては、主にNa置換処理をしていないTを用いる事とした。

表3 回帰パラメータ

	未処理		Na置換	
	q _m	K	q _m	K
I	9.94	0.57	14.0	0.66
T	12.8	0.81	18.7	0.83
S	9.20	0.82	17.6	1.42
Z	8.64	0.71	16.8	0.62
N	10.7	0.53	21.4	0.44

4. 1. 3 反応時間の影響

(1) 方法

ゼオライト (T) 100 mg に対し、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度25.6、46.5、95.9 N-mg/L) 40 mL を添加し、ビーカーで攪拌し、時間経過(0、0.5、1、2、4、6、8h)後にそれぞれ2.5 mL採取して0.2 μmでろ過し、イオンクロマトグラフ法により測定した。

(2) 結果

図11には、経過時間0の時の NH_4^+ 濃度を初期濃度とする、時間経過による NH_4^+ 濃度の推移を示した。 NH_4^+ 濃度は、どの初期濃度でも、1hでほぼ一定となっており、反応時間がそれ以上であれば、吸着反応は平衡に達すると考えられる。

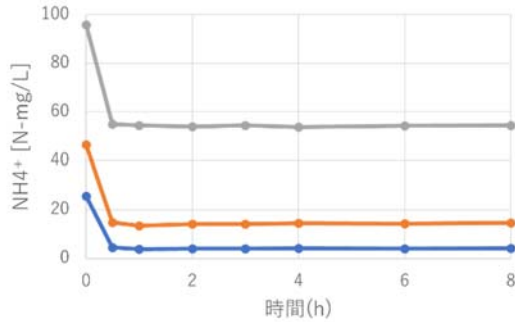


図 11 NH_4^+ 濃度の初期濃度別時間経過

4. 1. 4 粒径の影響

(1) 方法

非粉碎のゼオライト (T) を1~2 mm、2~5 mm、>5 mm に篩分けし、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度94 N-mg/L) の入ったビーカーに添加した後、試料が破碎されないよう、30分毎に穏やかに攪拌し、1h、3h、6h、9h、1d、2d、3d の経過時間後に一部を採取して0.2 μm でろ過し、イオンクロマトグラフ法により測定した。

(2) 結果

図12には時間経過による NH_4^+ 濃度の推移を示した。

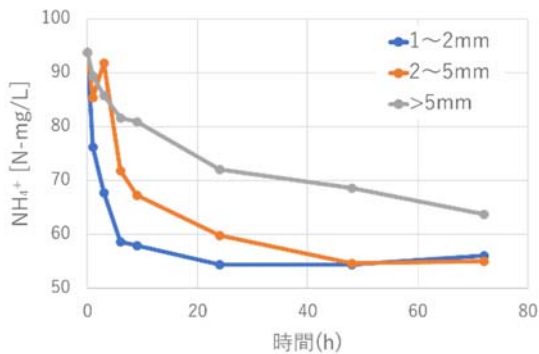


図 12 NH_4^+ 濃度の粒径別時間経過

粒径が大きいほど NH_4^+ 濃度の低下が遅く、ほぼ一定になるまでの時間が延びる傾向がみられる。5 mm超の場合、3日後でも平衡に達していないと考えられる。

4. 1. 5 温度の影響

(1) 方法

ゼオライト (T) 又はそのNa置換体50 mgに、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度180 N-mg/L) を1、2、4、8、16、32 倍希釈して作成した各溶液20 mLを添加して、反応温度を変えてバッチ試験 (10℃、30℃) を行った。

(2) 結果

図13には初期濃度に対する除去率を示している。実際の処理条件を想定して10℃、30℃の温度で実験を行ったが、この温度範囲では吸着量に大きな差は生じないと考えられる。

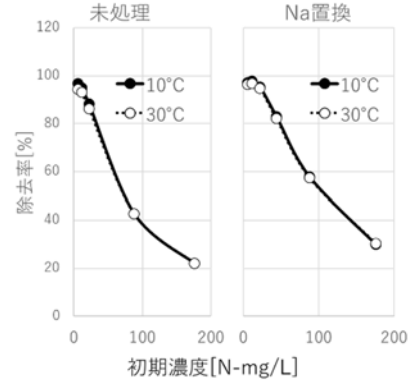


図 13 除去率への温度影響

4. 1. 6 試薬 (又は pH) の影響

(1) 方法

表4に示した初期濃度の塩化アンモニウム溶液又は酢酸アンモニウム溶液を1、2、4、8、16倍希釈して作成した各溶液20 mLをゼオライト (T) 50 mgに添加してバッチ試験を行った。

表 4 調整 NH_4^+ 溶液

名称	NH_4^+ [N-mg/L]	pH
塩化アンモニウム溶液 (NH_4Ac)	172	6.56
酢酸アンモニウム溶液 (NH_4Cl)	186	4.99

(2) 結果

図14には初期濃度を横軸として、除去率を示した。表5には、吸着実験後のpHを示した。塩化アンモニウム溶液と酢酸アンモニウム溶液の1倍希釈液のpHは、実験前後で変化した。両溶液の初期濃度には、最大で8%程度の差があ

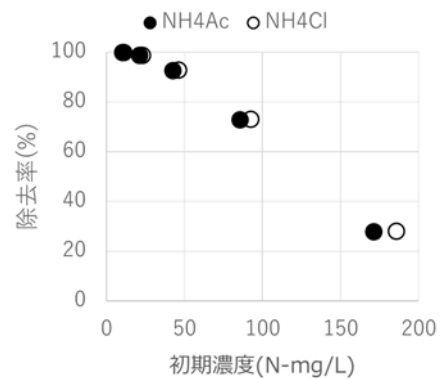


図 14 除去率の試薬差

るものの、各濃度の除去率の差は2%未満であり、試薬(又はpH)による差はないと考えられた。

表 5 吸着実験後の pH

名称	塩化アンモニウム溶液 (NH ₄ Cl)	酢酸アンモニウム溶液 (NH ₄ Ac)
1倍希釈*	5.65	6.77
2倍希釈	5.87	7.78
4倍希釈	6.17	7.00
8倍希釈	6.46	7.43
16倍希釈	6.54	7.69

*表 5 に示した希釈系列の元とした液濃度の溶液

4. 1. 7 液固比一定下での実験規模

(1) 方法

ゼオライト (T) 添加量と塩化アンモニウム溶液量は異なるが、液固比を同一として (50 mg に対し溶液 20 mL、100 mg に対し溶液 40 mL)、塩化アンモニウム溶液(初期濃度 330 N-mg/L)を 1、2、4、8、16 倍希釈して作成した各液に対してバッチ実験を行った。

(2) 結果

それぞれの実験スケールの各初期濃度に対する除去率を図 15 に示す。液固比が同一であれば、除去率に差は見られず、液量とゼオライト量の規模は関係ないと考えられる。

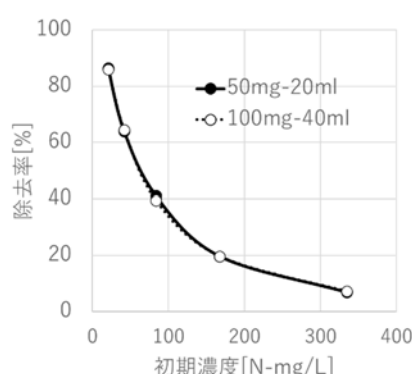


図 15 初期濃度に対する除去率の関係

4. 1. 8 液量の影響

(1) 方法

また、ゼオライト (T) 添加量を 100 mg とし、液固比（液量）を変えた条件で、バッチ試験を行った（5、10、20、40 mL）。塩化アンモニウム溶液は、初期濃度 200 N-mg/L のものを 2、4 倍希釈して作成した。

(2) 結果

図 16 には液量を横軸として除去率を示した。液量の増加に対して、除去率は低下している。ゼオライト一定で液量を増加させる操作は、相対的にゼオライト添加量を減らす事であるが、ゼオライト量の減少に伴い、除去率が低下している図 7 の結果と整合的である。

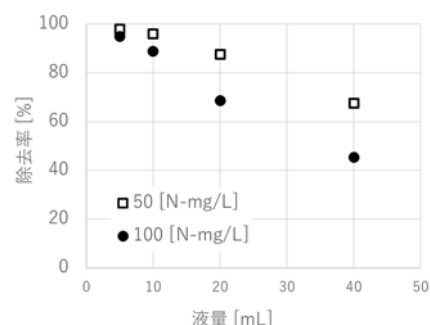


図 16 液固比を変化させたバッチ試験での除去率

4. 1. 9 バッチ試験についての考察

バッチ試験の結果は、平衡状態に達するまで大きく変化する。また、平衡状態に達するまでの時間には、粒径が大きく影響した。平衡状態に達した場合、今回検討した範囲においては試薬、温度はほとんど影響しなかった。

一方、ゼオライトの添加量、初期濃度、液量などは影響した。図 16 のように、初期濃度・液固比が同一であれば、除去率に差は見られず、液量・ゼオライト量のスケールは結果に影響しなかった。一方、同一の初期濃度下で、ゼオライト添加量、液量を変える実験は、除去率に大きく影響したが、これらの実験は、液固比を変える実験とみなす事ができる。以上の事から初期濃度が一定であれば、液量・ゼオライト量のスケールに関わらず、液固比が除去率等の実験結果に影響する重要な因子であると考えられる。初期濃度は除去率・吸着量等結果に影響するが、この時の平衡濃度と吸着量の関係は、Langmuir 式によって近似された。

Langmuir 式が液固比に関らずパラメータが同一であるならば、どの液固比でも、初期濃度に対する吸着量、平衡濃度は一致する事になるが、同一の初期濃度下で、ゼオライト添加量、液量を変える実験で除去率が変化する事からもわかるように、液固比が異なると Langmuir 式のパラメータは異なると推測される。図 17 には、図 16 の実験結果から、液固比別（50、100、200、400）に、縦軸を吸着量、横軸を初期濃度（左図）または平衡濃度（右図）としてプロットし直したものを示した。実際に、左図のように初期濃度が同一であっても、液固比が異なると吸着量は異なる。Langmuir 式を近似するにはデータ数が少ないが、右図において、各液固比の 2 点が結ぶ直線は、重ならず、成立している Langmuir 式が別である事を伺わせる。

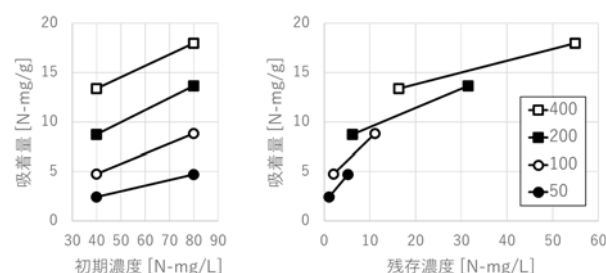


図 17 液固比別吸着量

図18には、図16の実験結果から、液濃度と溶液量を元にゼオライトの単位重量当たりの窒素添加量を算出して、窒素添加量に対する吸着量をプロットして示した。例えば、10 mLの50 N-mg/Lと5 mLの100 N-mg/Lでのバッチ試験は、窒素添加量としては同じであるが、その結果としての吸着量はほぼ同じである。図18からは、ゼオライト一定条件下、初期濃度、液固比に関わらず、添加量が同一であれば吸着量が等しい事、吸着量が添加量によって決まる関係にある事が示唆される。

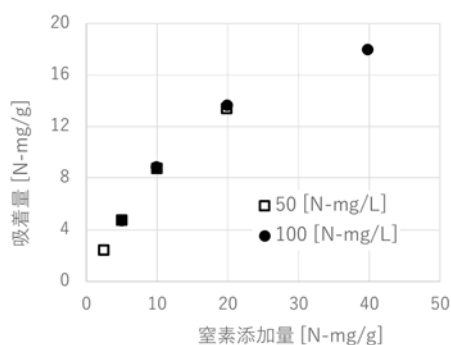


図 18 窒素添加量に対する吸着量の関係

図19には、横軸を窒素添加量、縦軸を吸着率（＝吸着量/窒素添加量）でプロットしたものを示す。図中の点線は、添加量0で切片1、傾き-0.142の回帰曲線である。天然ゼオライトの吸着は、添加量によって吸着量が決まる反応で、その時、吸着率が添加量に比例するような関係にあると推測される。ただし、バッチ試験では吸着平衡に達する十分な時間で行っているの、吸着平衡が成立しないような短時間の反応では成立しない可能性はある。

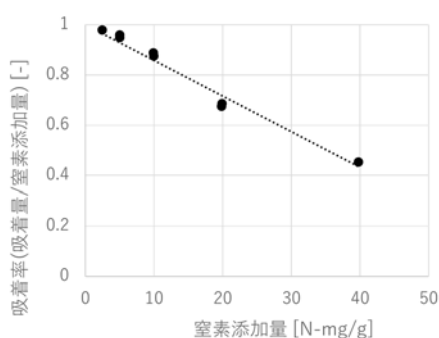


図 19 窒素添加量に対する吸着率の関係

5 吸着量測定—シリアルバッチ試験

実際のゼオライト処理は、ゼオライトに連続的に通水するような方法となる事が予想される。バッチ試験では、吸着平衡が成立しているが、ゼオライトに連続的に通水するような場合、吸着平衡が常に更新されるような連続的な吸

着反応が行われる。こうした状況は、カラム試験によって再現できるが、シリアルバッチ試験はカラム試験に似た状態を簡易に再現できる方法である。

5. 1 初期濃度一定下のシリアルバッチ試験

(1) 方法

シリアルバッチ試験は、遠心後上澄み液を除去して、沈殿物に塩化アンモニウム溶液を添加するバッチ試験を繰り返して行った。添加量は毎回、同じ20 mLである。上澄み液は0.2 μmでろ過し、イオンクロマトグラフ法により測定した。

ゼオライト (T) の添加量 (100、200、400 mg)、初期濃度 (190 N-mg/Lの塩化アンモニウム溶液を1、2、4倍希釈して作成) の組合せのうち、表6中○を記した5種類の条件で、繰り返し回数8回 (RUN1～RUN8) のシリアルバッチ試験を行った。従って、初期濃度95 N-mg/L、200 mgのゼオライトを添加したものを基本とし、濃度やゼオライト添加量を変化させた形式の実験となる。また、Na置換処理ゼオライト200 mg、初期濃度95 N-mg/Lの条件でも、シリアルバッチ試験も行った。

表6 シリアルバッチ試験実験条件

添加量	100 mg	200 mg	400 mg
初期濃度			
47 N-mg/L		○	
95 N-mg/L	○	○	○
190 N-mg/L		○	

(2) 結果

得られた結果のうち、初期濃度95 N-mg/Lで、添加量を変えた組合せについて、各RUNのNH₄⁺濃度推移を、図20に示した。加えて、Na置換体を使用した結果についても示している。

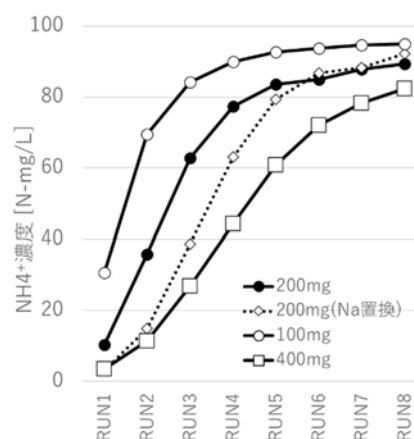


図 20 濃度推移

(初期濃度 95 N-mg/L、ゼオライト量 100、200、400 mg)

初期濃度95 N-mg/L、ゼオライト量200 mgの条件で見ると、回数を重ねるにつれ液濃度は増加していくがRUN5以降は徐々に増加のスピードが遅くなり、頭打ちになっている。これと、Na置換体、400 mgの場合と同じRUNで比べると、液濃度の低下が認められた。これは、Na置換の場合は飽和吸着量増加により、400 mgの場合は重量増加により、吸着量が増加した事によると推測される。逆に100 mgでは、重量低下による吸着量により、液濃度は上昇し、頭打ちが早まっている。

次に、得られた結果のうち、ゼオライト200 mgで、初期濃度を変えた組合せについて、各RUNのNH₄⁺濃度を、図21に示した。加えて、Na置換体を使用した結果についても示している。

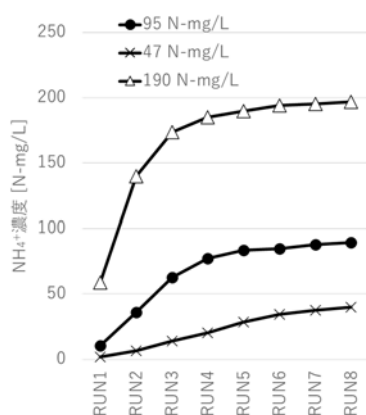


図21 濃度推移

(ゼオライト量 200 mg、初期濃度 47、95、190 N-mg/L)

初期濃度を190 N-mg/Lとすると、95 N-mg/Lの場合と比べ、液濃度は高い。図では明確な差は認められないが、一つ前のRUNに対し、液濃度の増加率を比べると、5%以下になったのは190 N-mg/LではRUN4、95 N-mg/LではRUN5以降なので、頭打ちはやや早まっているようである。一方、47 N-mg/Lでは、95 N-mg/Lの場合と比べ、液濃度は低く、頭打ちが遅延している。

シリアルバッチ試験において、ゼオライト重量や初期濃度を変えると、液濃度の推移、頭打ちの時期などに影響していた。バッチ試験において、液固比が重要な因子である事を確認した。そこで、横軸をLs (= 累積供試液量 (RUN数×供試液量) [mL] / ゼオライト量 [g]) に変換をしたものを図22に示した。図では初期濃度95 N-mg/Lで、添加量を変えた組合せについて示している。一方、図23には、ゼオライト量200 mgで、初期濃度を変えた組合せを示した。なお、バッチ試験の液固比とシリアルバッチ試験のLsは、液量と固体重量の比としては共通している概念ではあるが本報では、区別した。

図22に示したように、ゼオライト量を変えた同一初期濃度のシリアルバッチ試験では、Lsが異なれば、NH₄⁺濃度は異なる一方、Lsが同じであれば、図中点線の○で囲んだ

400 mgでのRUN2、200 mgでのRUN1のように、RUN数が異なっても、NH₄⁺濃度はほぼ等しく、Lsに応じて同一の液濃度推移を描いていることが伺われた。同一初期濃度のバッチ試験においては、液固比が結果に強く影響し、液固比が同一ならば添加ゼオライト量に関わらず結果は等しくなったが、同一初期濃度のシリアルバッチ試験においても、Lsが結果に強く影響し、Lsが同一ならば添加ゼオライト量に関わらず結果がほぼ等しく、Lsが結果を決定する重要な因子である事が伺われる。

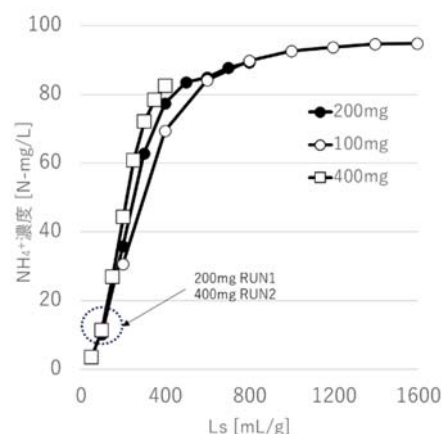


図22 濃度推移(横軸 Ls)

(初期濃度 95 N-mg/L、ゼオライト量 100、200、400 mg)

一方、横軸をLsに変換した図23で示したように、同一のゼオライト量のシリアルバッチ試験では、初期濃度が異なると濃度推移の曲線は異なり、上述したような、Lsの結果に対する決定性は崩れている。

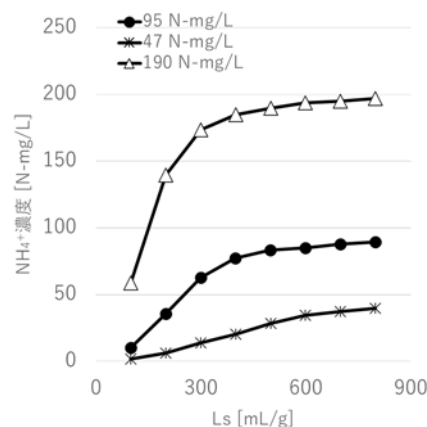


図23 濃度推移(横軸 Ls)

(ゼオライト量 200 mg、初期濃度 47、95、190 N-mg/L)

図24では、同一初期濃度のシリアルバッチ試験について、横軸をMs (= 累積窒素添加量 (RUN数×初期濃度×液量) [N-mg] / ゼオライト量 [g]) に変換をし、それに対する累積吸着量をプロットして示した。一方、図25では、同一ゼオライト量 (200 mg) のシリアルバッチ試験について、同

様にプロットしたものを示した。なお、図25には、Na置換体を用いた結果も示している。

先に同一ゼオライト量のバッチ試験においては、窒素添加量と吸着量の間に、または、窒素添加量と吸着率の間に、液固比・初期濃度に関わらず成立するような強い関係性が確認された。図24ではゼオライト量に関わらず、図25では初期濃度に関わらず、同じMsであれば、ほぼ等しい累積吸着量となり、ほぼ同一の濃度推移経過をたどっており、バッチ試験同様に、Msと累積吸着量の間に強い関係性がある事が伺われる。

ただし、Na置換体は、他の濃度推移と大きく異なるが、Na置換体はゼオライトの嗅覚性能が別の資材と考える事ができるので、逆にこの違いをきちんと区別できていると考えられる。

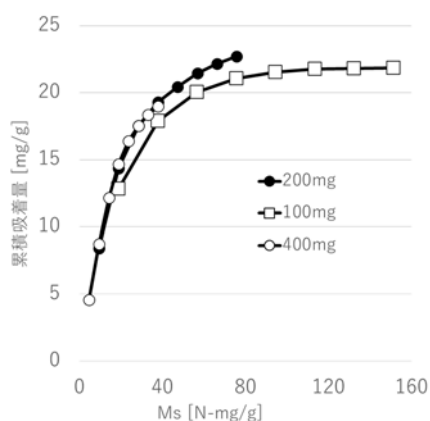


図 24 累積吸着量推移(横軸 Ms)
(初期濃度 95 N-mg/L、ゼオライト量 100、200、400 mg)

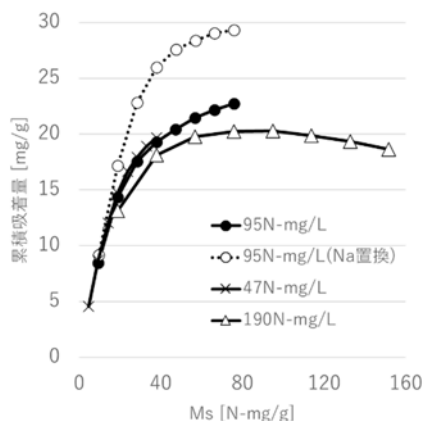


図 25 累積吸着量推移(横軸 Ms)
(ゼオライト量 200 mg、初期濃度 47、95、190 N-mg/L)

シリアルバッチ試験の上澄み液中をイオンクロマトグラフ法で測定した際に、NH₄⁺以外の陽イオンも測定した。ただし、NH₄⁺を測定するための分析であり、必ずしも他のイオンの測定に適した試料希釈を行っていないので精

度は劣るが、図26～28には、同時測定した陽イオンについて推移を示した。各図、RUN毎の陽イオンをイオン量としてNH₄⁺は線で、その他は累積棒で示している。図示したのは、ゼオライト量200 mgで、初期濃度95 N-mg/Lと190 N-mg/Lのケースである。ほかに、Na置換体のケースも示している。

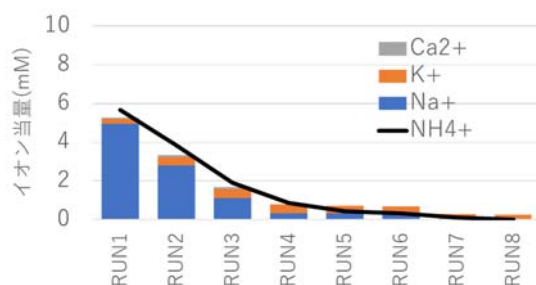


図 26 液中陽イオン濃度推移
(初期濃度 95 N-mg/L、ゼオライト量 200 mg)

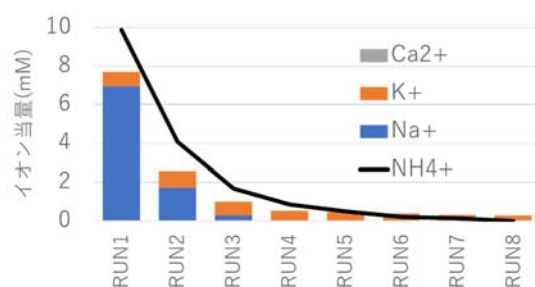


図 27 液中陽イオン濃度推移
(初期濃度 190 N-mg/L、ゼオライト量 200 mg)

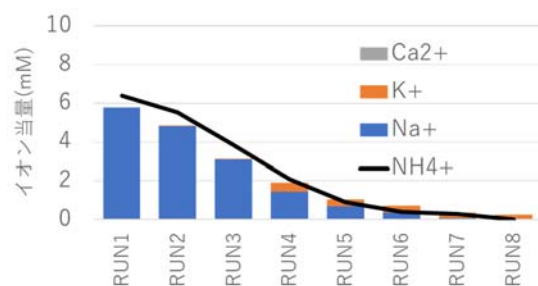


図 28 液中陽イオン濃度推移
(Na 置換体、初期濃度 95 N-mg/L、ゼオライト量 200 mg)

95 N-mg/Lの実験条件では、NH₄⁺吸着相当のNa⁺、K⁺が溶出していることから、天然ゼオライトの吸着がイオン交換を伴う事が推測される。RUN2以降もNa⁺、K⁺溶出が継続している。初期濃度が190 N-mg/Lの実験条件でも、同様であるが、RUN1では、吸着量の増加に伴い、Na⁺、K⁺溶出量も増加している。溶出はNa⁺が先に減衰し、後半ではK⁺溶出が優越している。Na置換体を用いた場合では、Na

置換されているので、ほぼ溶出するのは Na^+ である。 Na 置換により吸着量が增大するが、95 N-mg/Lの場合に比べ、RUN1の吸着量、 Na^+ 溶出量が大きく増加するというより、RUN2以降の吸着量、 Na^+ 溶出量の増加が継続する事が特徴的であり、後半になると K^+ 溶出がやや認められる。

5. 2 初期濃度変動下のシリアルバッチ試験

(1) 方法

浸出水中の NH_4^+ 濃度は通常変動する。 NH_4^+ 濃度が変動した場合の吸着反応の挙動を調べるため、以下のように行った。ゼオライト (T) 50、250、1250 mgに対し、それぞれ、繰り返し回数8回 (RUN1～RUN8) のシリアルバッチ試験を行った。この時、 NH_4^+ 濃度を表7のように変化させた。

表7 濃度変動

	NH_4^+ 濃度[N-mg/L]
RUN1	180
RUN2	180
RUN3	90
RUN4	90
RUN5	20
RUN6	20
RUN7	180
RUN8	180

(2) 結果

RUN毎に採取した上澄みの NH_4^+ 濃度推移を図29に示した。図中、供試液の濃度推移は点線で示している。図30には、累積吸着量の推移を示した。また、初期濃度から求めた累積窒素添加量を点線で示している。

50 mgの実験条件では早々に吸着能力を失い、液濃度は供試液濃度の変動と同じである。250 mgの実験条件では、RUN4頃には、ほとんど吸着能力を失い、それ以降の液濃度は供試液濃度の変動とほぼ同じであるが、それ以前では、供試液濃度と連動してより低い濃度で変動しながら推移している。1250 mgの実験条件では、RUN8でも吸着能力は失われず、RUN6以降から供試液に連動して液濃度の上昇が認められるが、それまでは、ほとんど供試液濃度とは連動せず、低濃度でとどまっている。

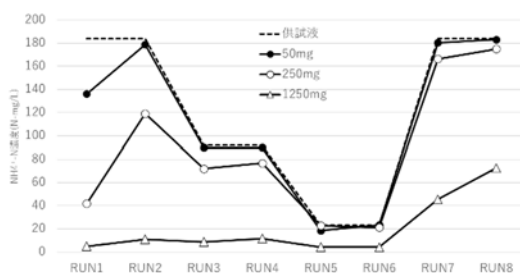


図29 液濃度推移

(初期濃度変動、ゼオライト量 50、250、1250 mg)

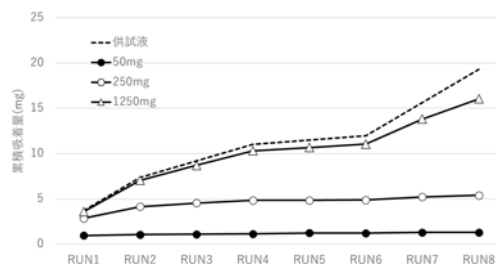


図30 累積吸着量推移

(初期濃度変動、ゼオライト量 50、250、1250 mg)

前節と同様、図31に横軸を M_s に変換したものを示した。ゼオライト量を変えたシリアルバッチ試験で、初期濃度を変動させた場合であっても、横軸を M_s に変換すると、累積添加量が異なる段階の差として異なるだけで、ほぼ同一の濃度推移経過をたどっていると考えられる。

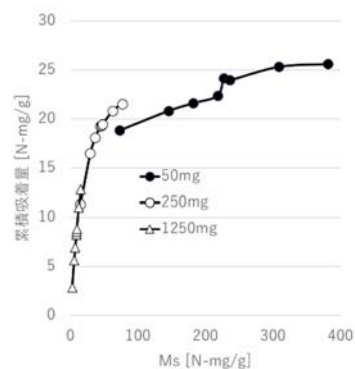


図31 累積吸着量推移(横軸 M_s)

(初期濃度変動、ゼオライト量 50、250、1250 mg)

5. 3 シリアルバッチ試験についての考察

先に、初期濃度一定の場合において M_s と累積吸着量の間に強い関係性がある事が確認されたが、図32では、初期濃度が変動する場合も含め、横軸を M_s とする累積吸着量の推移を示した。累積吸着量は漸減的に増加し、一定値に近づいていく。濃度一定、濃度変動の条件のいずれの場合でも、ほぼ同じ推移曲線を描いており、初期濃度が変動する場合も含め、初期濃度やゼオライト量に関わらず窒素添加量と吸着量の間に強い関係性がある事が伺われた。

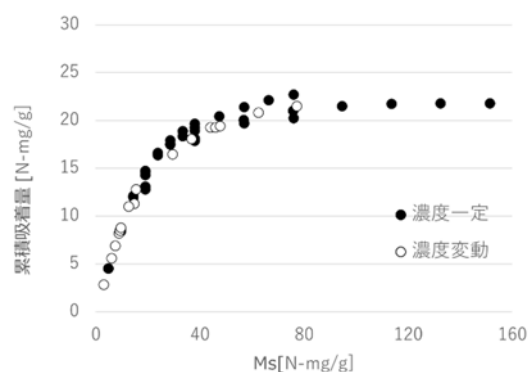


図32 シリアルバッチ試験吸着量推移(横軸 M_s)

図33には、濃度一定時の M_s と吸着率の関係をプロットした。吸着率の求め方については、 n 番目RUNにおける吸着量を Q_n 、累積吸着量を $Q_{Sn}(=Q_1+\cdots+Q_n)$ 、窒素添加量を M_n 、累積窒素添加量 $M_{Sn}(=M_1+\cdots+M_n)$ としたとき、 Q_{Sn}/M_{Sn} で求める方法と、RUN毎に Q_n/M_n で求める方法が考えられる。後者の方法は、シリアルバッチ試験でのRUN毎の吸着反応を評価する事ができ、図34では吸着率は後者の方法で求めた。

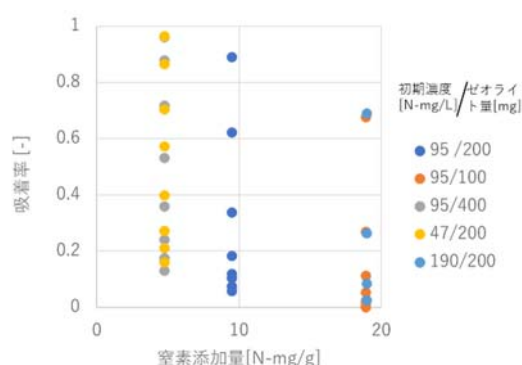


図 33 窒素添加量に対する吸着率の関係

バッチ試験では、窒素添加量に対する吸着率には負の比例関係が認められたが、シリアルバッチ試験の場合、同じ添加量でも吸着率が異なった。シリアルバッチ試験は、バッチ試験の繰り返しなので、実験因子に関して確認された事はバッチ試験同様成立すると考えられるが、異なるのは、バッチ試験を繰り返す中で、吸着平衡の状態が更新され、吸着量が増加している事である。

そこで図34に、各RUNの累積吸着量 Q_{Sn-1} に対する吸着率 Q_n/M_n をプロットしたものを示した。このとき Q_{S0} はシリアルバッチ試験前の吸着量ゼロの状態を指す。

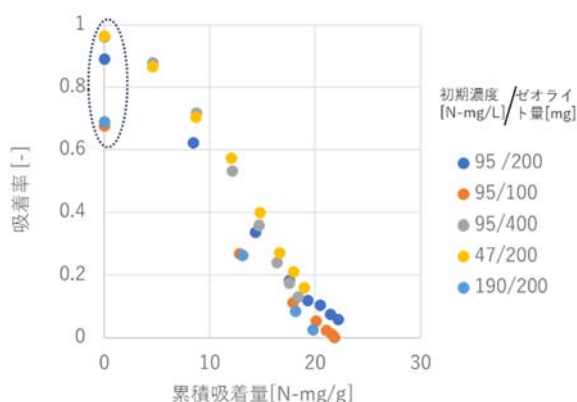


図 34 累積吸着量に対する吸着率の関係

シリアルバッチ試験の場合、吸着率は累積吸着量と負の比例関係が認められる。図中、点線の○で囲んだ、累積添加量0の点群は、RUN1に相当するが、これはバッチ試験における吸着量ゼロのゼオライトの状態にも対応する。点線

で囲んだ部分の吸着率が分散しているのは、バッチ試験で確認された、窒素添加量に対する負の比例関係を反映したものと考えられる。この事も含めて考えると、恐らく、吸着率は、窒素添加量と累積吸着量の複合的關係によって定まるものと推測される。窒素添加量の影響が大きい累積添加量0の点群を除いたものについて、回帰を行った結果が図35となる。

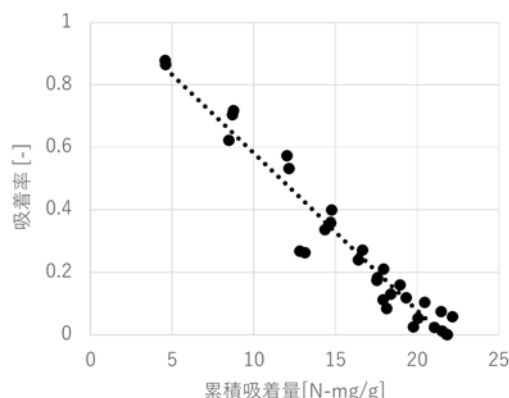


図 35 累積吸着量に対する吸着率の関係

図35において、吸着率が次式のように累積吸着量に対して比例関係にある事が伺われる。

$$Q_n/M_n = a(b - Q_{Sn-1}) \quad (n \neq 0) \quad (3)$$

図35中の点線は、 $a=0.05$ 、 $b=21$ とした式(3)による回帰結果である。 $Q_n/M_n = Q_{Sn} - Q_{Sn-1} / M_{Sn} - M_{Sn-1}$ の關係から、 dQ/dM_s は吸着率に相当し、次のような微分方程式として表現する事ができる。

$$dQ/dM_s = a(b - Q) \quad (Q \neq 0) \quad (4)$$

これを、 Q について解くと、

$$Q = b(1 - \exp(-aM_s)) \quad (5)$$

が得られる。 $a=0.05$ 、 $b=21$ とした式(5)による計算値と実験値を比較した結果を図36に示した。先述したように、吸着率は、窒素添加量と累積吸着量の複合的關係によって定まる可能性が考えられるが、累積吸着量だけの関数として考えても十分近似できている。式(4)、式(5)より、

$$dQ/dM_s = ab \exp(-aM_s) \quad (6)$$

となる。ただし、図32では初期濃度が変動した場合も同一の推移曲線上にあるように見えるので、初期濃度が変動するようなより一般的な条件でも式(3)が近似的に成立している可能性はある。

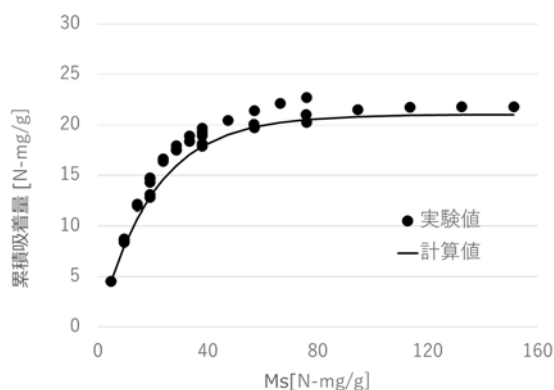


図 36 回帰曲線による累積吸着量計算結果

式(5)では $Q \rightarrow b$ のとき、 $dQ/dMs \rightarrow 0$ となり、この値 b は、飽和吸着量 q_m に相当し、吸着率は $Q-q_m$ に比例する形となる。一方、Langmuir式を理論的に導出する際に吸着速度が $Q-q_m$ に比例するという関係も現れ¹⁹⁾、式(4)の関係性は、そうした吸着量 Q と飽和吸着量の差を駆動力とする吸着と何らかの関連性を反映したものである事が示唆される。吸着量において式(4)または(5)が近似的に成立するならば、シリアルバッチ試験によるゼオライトの飽和吸着量は、21 N-mg/Lと推測できる。なお、同様にNa置換体について推測した最大吸着量は30 N-mg/gである。

吸着等温線からは、飽和吸着量は、Na置換未処理では13 N-mg/g、Na置換体は19 N-mg/gと推測された。これらの値と比較すると、シリアルバッチ試験からの飽和吸着量推定値は高い。ゼオライト (T) の NH_4^+ 吸着量をCECから推定した場合、23 N-mg/gであったが、シリアルバッチ試験による推定値に近かった。

ゼオライト吸着は、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 間のイオン交換を伴うが、シリアルバッチ試験では、 Na^+ が、次いで K^+ が溶出するような段階的なものとして起きている。従って、等温吸着式から推測した、単回反応による飽和吸着量は過小であり、シリアルバッチ試験による飽和吸着量の推計値の方が、CECによる推計値により近く、現場で連続的に吸着処理する際の、実際の飽和吸着量に近い推計となっているのではないかと考えられる。

6 カラム試験

カラム試験は、ゼオライトによる連続的な水処理の状況を再現できる。このカラム試験を簡易に再現できる方法がシリアルバッチ試験であるが、試験上振盪を行うため、ゼオライトを粒子状のまま試験を行う事ができない。先のシリアルバッチ試験では、吸着飽和に至るまで L_s 1000の通水が必要であったが、バッチ試験と同様に滞留時間を3時間とすると、高精度・低速度ポンプでない限りゼオライト数百g、通水量数百Lと大規模なものとなり容易には行えない。そこで、断続的に通水するカラム試験を行った。

(1) 方法

2-5 mm篩下のゼオライト粒体 (T) 10.5 gを $\phi 1.5 \times 5$ cmガラス製カラムに充填後、蒸留水を通水して粒体表面の粉末等を洗浄除去した。次にカラム内を満たした蒸留水を排出してその量を測り、空隙量とした。空隙量の数倍量の塩化アンモニウム溶液を流して、カラム内の蒸留水を置換した後、カラム試験を開始した。ペリスタリックポンプで3時間おきに空隙量相当の塩化アンモニウム溶液（初期濃度74 N-mg/L）を通水し（2時間58分間ポンプ停止後2分間通水）、滞留時間3時間として、排出液をフラクションコレクターで分取した。分取した試料は10本おきに、イオンクロマトグラフ法で分析した。

(2) 結果

カラムを通水した後の排出液中の NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ の液濃度の推移を図37に示す。

排出液中の NH_4^+ 濃度は通水後徐々に増加し、60日後、初期濃度よりやや低い約63 N-mg/L（除去率15%）で安定した。排出液中の Na^+ は時間ゼロをピークとして60日後にはほぼ消失するが、 K^+ は40日前後をピークとして漸減的に出続けており、イオン交換を伴う吸着反応が、60日以降も継続している事が推測され、吸着飽和に達したため安定したのではないと考えられる。

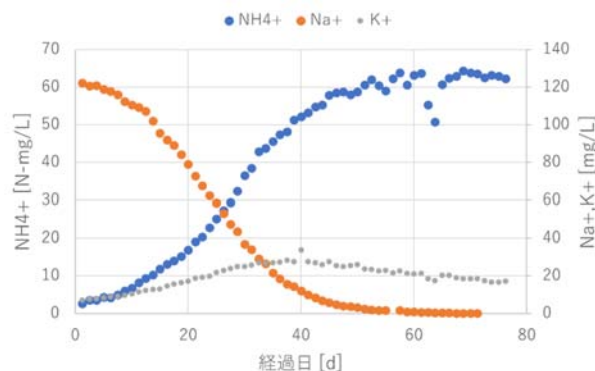


図 37 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 濃度の推移

こうした Na^+ ・ K^+ とのイオン交換を伴う、弱い吸着での持続は、シリアルバッチ試験でも見られた現象であった。60日後 (Ms で約20) の吸着量は約11 N-mg/gと推測され、吸着余地はあると考えられるが、図36での式(5)による Ms 20での計算値13 mg/gに対して低い値となっている。低くなった一因として、カラムに充填したゼオライトの粒径が2~5mmであり、図12に示したように、 NH_4^+ 吸着が粒径の影響を受けている事が考えられる。

7 塩類による吸着阻害

7. 1 バッチ試験による評価

Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} が共存した場合のバッチ試験を行った。同じ1 mg/Lでも Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} ではイオン濃度が異なる。ゼオライトの吸着反応は、イオン交換基での反応を主因と

しており、塩類による阻害が知られている。そのため、Na⁺等塩類の阻害効果と同じイオン濃度で比較できた方が良く考えられる。

そこで、本報では、Na⁺等塩類濃度を、その塩化物 (NaCl 等) として結合する同じCl濃度として換算した (表8)。

表8 Na⁺等塩類の塩化物イオン換算と単位表記

	mg/L	meq/L	Cl-mg/L
Na ⁺	23	1	35.5
K ⁺	39	1	35.5
Ca ²⁺	20	1	35.5

例えば、Na⁺濃度23 mg/Lは、1 meq/Lであるが、Cl換算値としては35.5 mg/Lと考える事にする (この場合、Na⁺等の濃度[mg/L]と区別して[Cl-mg/L]と表記する)。Cl換算値として同じ35.5 Cl-mg/Lであれば、Na⁺、K⁺、Ca²⁺は同じイオン濃度1 meq/Lという事になる。Cl換算値[Cl-mg/L]を使うのは、通常浸出水等のイオン類は塩化物塩を主成分とし、単位[mg/L]で測定しており、直感的に塩類濃度の把握ができ、実験で比較可能な濃度設定も容易で、塩化物試薬(NaCl等)を用いて調整するので、試料調整上も便利と考えたためである。

7. 1. 1 Na⁺単独の吸着阻害

(1) 方法

ゼオライト (T) 50 mgに対し、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度83 N-mg/L)を1、2、4、8倍希釈して作成した濃度の異なる溶液を用いてバッチ試験を行った。この際、Na⁺による吸着阻害を調べるために、溶液中に共存するNa⁺濃度を複数 (0、400、800、1600、3200 Cl-mg/L) 用意して実験に供した。

(2) 結果

図38には、共存Na⁺濃度に対するNH₄⁺濃度、除去率を示した。下横軸には、共存Na⁺のCl換算値を、上横軸には参考として共存Na⁺の実濃度も示している。共存Na⁺濃度の増加によって除去率は低下する。Cl換算共存Na⁺濃度の増加によって除去率は低下する。Cl換算値で800 Cl-mg/L

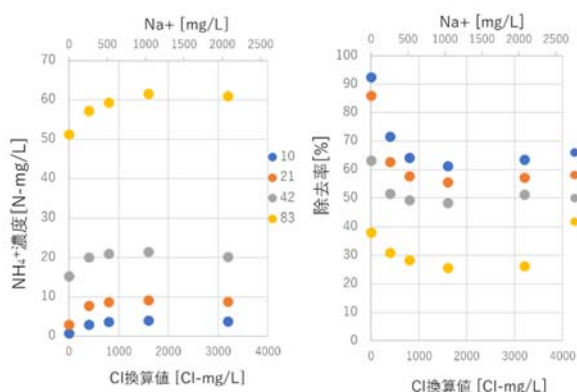


図38 Na⁺単独の吸着阻害(Na⁺濃度依存)

(Na⁺濃度で518 mg/L) より高くなると阻害効果は増加せず高止まりしている。Na⁺非共存下であってもNH₄⁺濃度が高くなると除去率は低下するので、除去率が低い場合は、より除去率が低下する事になる。Na⁺非共存下の除去率を100%とすると、いずれの初期濃度の場合でもNa⁺共存による除去率低下は、阻害効果が高止まりした状態で、ほぼ同じ3割強となる。

7. 1. 2 K⁺単独の吸着阻害

(1) 方法

ゼオライト (T) 50 mgに対し、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度82 N-mg/L)を1、2、4、8倍希釈して作成した濃度の異なる溶液を用いてバッチ試験を行った。この際、K⁺による吸着阻害を調べるために、NH₄⁺溶液中に共存するK⁺濃度を複数 (0、400、800、1600、3200 Cl-mg/L) 用意して実験に供した。また、溶液中に共存するK濃度が400 Cl-mg/L以下の濃度範囲 (0、50、100、200、400 Cl-mg/L) として、ゼオライト (T) 50 mgに対し、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度94 N-mg/L)を1、2、4、8倍希釈して作成した各溶液を用いたバッチ試験も行った。

(2) 結果

図39には、共存K⁺濃度に対するNH₄⁺濃度、除去率を示した。下横軸には、共存K⁺のCl換算値を、上横軸にはK⁺の実濃度も示している。

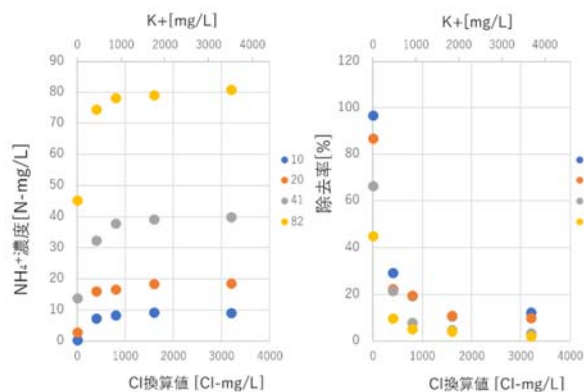


図39 K⁺単独の吸着阻害(K⁺濃度依存)

Na⁺の場合と同様に、K⁺濃度の増加によって除去率が低下するが、除去率の低下がNa⁺の場合より大きい。K⁺濃度が高くなると阻害効果は増加せず高止まりするのはNa⁺と同様である。Cl換算値で400 Cl-mg/L (K⁺濃度で439 mg/L) でもKの最大阻害は強い。K⁺非共存下の除去率を100%とすると、いずれの初期濃度の場合でもK⁺共存による除去率低下は、阻害効果が高止まりした状態で、ほぼ同じ9割以下となり、Na⁺の3倍以上の阻害である。阻害が9割以下となるとほぼ実用性はないと考えられる。

K⁺の場合は、K⁺濃度による阻害の許容範囲が重要となる。そこで、Cl換算値で、400 Cl-mg/L (K⁺濃度で110 mg/L)

以下のより低い濃度範囲で同様の実験を行ったが、その結果を図40に示した。K⁺による阻害はCl換算値400 Cl-mg/L以下になると除去率の低下は緩和される。K⁺非共存下の除去率を100%とすると、100 Cl-mg/Lで3割減少となり、この濃度であれば、Na⁺との最大阻害程度の阻害となる。

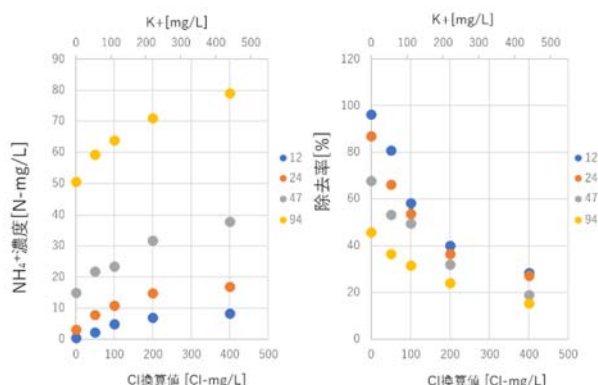


図40 K⁺単独（低濃度）の吸着阻害(K⁺濃度依存)

7. 1. 3 Ca²⁺単独の吸着阻害

(1) 方法

ゼオライト (T) 50 mgに対し、塩化アンモニウム溶液（初期濃度93 N-mg/L）を1、2、4、8倍希釈して作成した濃度の異なる溶液を用いてバッチ試験を行った。この際、Ca²⁺による吸着阻害を調べるために、溶液中に共存するCa²⁺濃度を複数（0、400、800、1600、3200 Cl-mg/L）用意して実験に供した。

(2) 結果

図41には、共存Ca²⁺濃度に対するNH₄⁺濃度、除去率を示した。下横軸には、共存Ca²⁺のCl換算値を、上横軸には共存Ca²⁺の実濃度も示している。

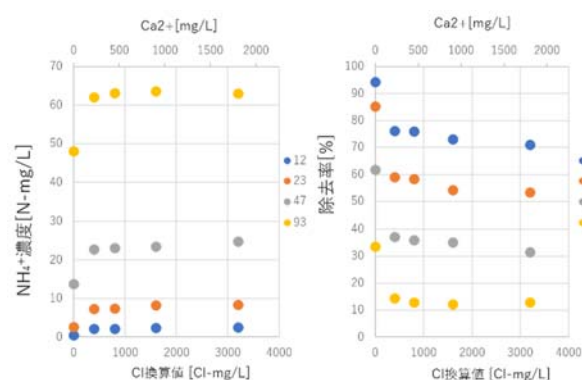


図41 Ca²⁺単独の吸着阻害バッチ(Ca²⁺濃度依存)

Ca²⁺濃度の増加によって除去率が低下し、Ca²⁺濃度が高くなると阻害効果は増加せず高止まりした。これは Na⁺、K⁺の場合と同様である。Ca²⁺非共存下の除去率を100%とすると、2割から6割の幅があった。イオンクロマトグラフ法による Ca²⁺測定精度は Na⁺、K⁺より劣り、阻害効果

についての評価結果についても、精度的に劣っている可能性がある。ただし、浸出水では、Na⁺、K⁺に比べ、Ca²⁺濃度が高い場合は稀で、特に K⁺の阻害効果が重要であるので、以降は K⁺と、浸出水中で一番濃度が高い事の多い Na⁺を中心に行う。

7. 1. 4 Na⁺・K⁺による産地別の吸着阻害

(1) 方法

各産地のゼオライト50 mgに対し塩化アンモニウム溶液（初期濃度74.2 N-mg/L）を用いて吸着阻害試験を行った。さらに、Na⁺濃度（100、400 Cl-mg/L）、K⁺濃度（100、400 Cl-mg/L）を変化させた場合の実験も行った。

(2) 結果

図42には、共存阻害塩なし（図中0）、Na⁺共存（図中Na100、Na400）、K⁺共存（図中K100、K400）の条件で行った各産地の吸着量の結果を示した。無阻害で吸着量が比較的多い産地は、阻害のある場合でも比較吸着量も多い傾向がある。

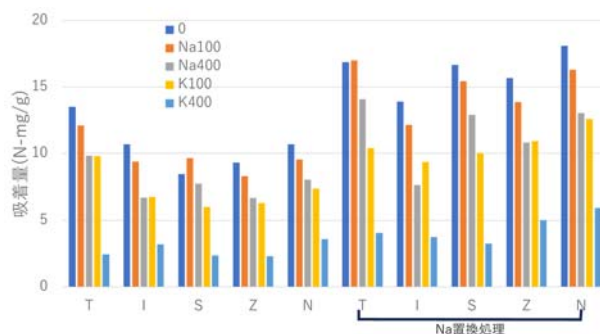


図42 Na⁺・K⁺による産地別吸着阻害影響

7. 1. 5 Na⁺・K⁺同時共存時の吸着阻害

(1) 方法

ゼオライト (T) 50 mgに対し、でNa⁺とK⁺が共存する塩化アンモニウム溶液濃度（初期濃度 45 N-mg/L）20 mLを添加してバッチ試験を行った。共存する塩類濃度は、Na⁺(0、200、400、800 Cl-mg/L)の4種類、K⁺(0、100、200、400 Cl-mg/L)の4種類の組合せ16通りとした

(2) 結果

図43、図44 にNH₄⁺濃度、除去率、吸着量を示した。図43では、横軸をK⁺濃度として各Na⁺濃度別に、図44では、横軸をNa⁺濃度として各K⁺濃度別に表示している。

表9にはNa⁺・K⁺が共に0 Cl-mg/Lの無阻害時を基準100%とした時の吸着量の相対値を表示した。表10には、K⁺濃度0-Cl-mg/Lを基準100%として、各Na⁺濃度の吸着量の相対値を表示した。表11には、Na⁺ 0 Cl-mg/Lを基準100%として、各K⁺濃度の吸着量の相対値を表示した。

表9に示したように、吸着率は共存塩の組合せによって16～81%と幅があった。図43で示したようにK⁺濃度が上昇すると、共存Na⁺濃度にかかわらず除去率は低下した。表10で示したようにK⁺が400 Cl-mg/Lの時、阻害が最も大

きかったが、吸着量は、共存Na⁺がない場合で4割減である一方、共存Na⁺が800 Cl-mg/Lの時でも4割減にとどまり、Na⁺の同時共存により、単純に阻害が加算される訳でなかった。図44で示したようにNa⁺濃度が上昇すると、共存K⁺濃度によって、除去率は減少している。表11で示したように、Na⁺が800 Cl-mg/Lの時、阻害が最も大きかったが、吸着量は、共存K⁺がない場合で4割減である一方、共存K⁺が400 Cl-mg/Lの時でも3割減にとどまり、K⁺の同時共存により、

表 11 Na・K 共存濃度の吸着量比率

Na K	0	200	400	800
0	100	84	74	61
100	100	88	84	62
200	100	86	79	75
400	100	84	89	72

Na⁺0 Cl-mg/Lを100%とした相対値（単位%）表示。Na⁺、K⁺の単位はCl-mg/L

単純に阻害が加算される訳でなかった。

Na⁺とK⁺が同時に存在した場合、それぞれ単独の場合の阻害とは異なる挙動を示す原因は不明である。先述したように、天然ゼオライトでのNH₄⁺吸着は、Na⁺とK⁺のイオン交換を伴うが、塩類が共存した場合、このイオン交換の際、Na⁺とK⁺の相互作用、共存Na⁺とK⁺とゼオライト中のNa⁺とK⁺とのイオン交換など複雑な反応が起こる事が推測され、このような状況が影響しているかもしれない。

いずれにせよ、Na⁺とK⁺の同時共存による阻害は、Na⁺とK⁺による阻害効果の単純な加算ではないと考えられる。

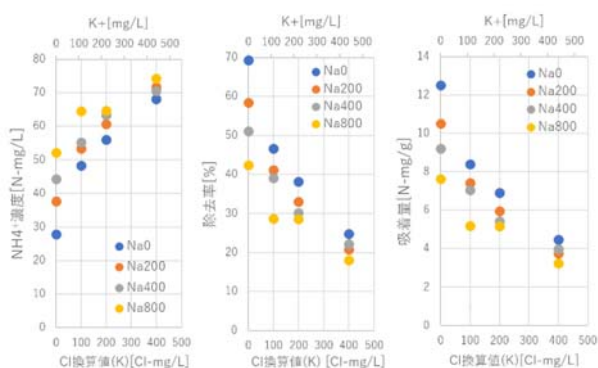


図43 Na⁺・K⁺共存の吸着阻害(K⁺濃度依存)

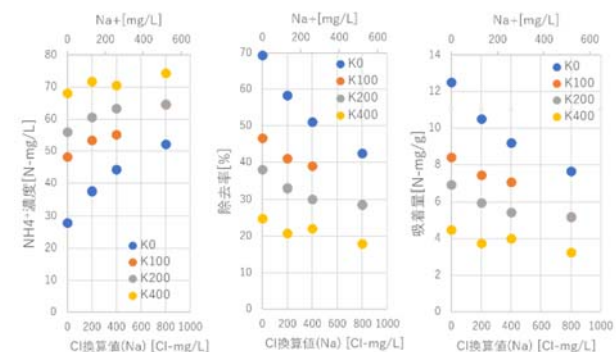


図 44 Na⁺・K⁺共存の吸着阻害(Na⁺濃度依存)

表 9 Na・K 共存濃度の吸着量比率

Na K	0	200	400	800
0	100	84	74	61
100	67	59	56	41
200	55	48	43	41
400	36	30	32	26

Na⁺・K⁺が共に0 Cl-mg/Lを100%とした相対値（単位%）表示。Na⁺、K⁺の単位はCl-mg/L

表 10 Na・K 共存濃度の吸着量比率

Na K	0	200	400	800
0	100	100	100	100
100	67	71	77	68
200	55	57	59	68
400	36	36	43	42

K⁺0 Cl-mg/Lを100%とした相対値（単位%）表示。Na⁺、K⁺の単位はCl-mg/L

7. 1. 6 浸出水のバッチ試験と吸着阻害の検証

(1) 方法

浸出水の陽イオン濃度をイオンクロマトグラ法により測定し、浸出水と同濃度のNH₄⁺濃度の塩化アンモニウム溶液、浸出水と同濃度のNH₄⁺、Na⁺、K⁺濃度の模擬溶液を調整した。これらの浸出水、塩化アンモニウム溶液、模擬溶液、それぞれ20 mLを各産地のゼオライト50 mgに添加し、バッチ試験により吸着量を測定した。各産地のゼオライトはNa置換処理のものと、無処理のものをを用いた。実験に用いた浸出水のイオン組成は表12のとおりである。

表 12 浸出水のイオン組成

NH ₄ ⁺ (N-mg/L)	95
Na ⁺ (mg/L)	795
K ⁺ (mg/L)	94
Ca ²⁺ (mg/L)	87
Mg ²⁺ (mg/L)	45

(2) 結果

バッチ試験の結果を表13に示した。表13には吸着量のほか、阻害塩のない塩化アンモニウム溶液の吸着量を100%とした、浸出水、模擬水の吸着率も示した。

いずれの産地においても、浸出水の吸着量は、塩化アンモニウム溶液に対する吸着量に比べて4～6割に低下している。浸出水においてもNa置換を行わない場合に比べて吸着量は高いが、吸着率でみると、無処理のものと同程度の阻害を受けている。模擬水も、浸出水と同程度の吸着阻害を受けており、浸出水における吸着阻害は、Na⁺、K⁺等共存塩によるものであると説明できる。

表 13 浸出水と模擬水の吸着量

	吸着量(N-mg/g)			吸着率(%)	
	NH ₄ Cl	浸出水	模擬水	浸出水	模擬水
N	9.4	5.6	4.8	59.2	50.9
(Na 置換)	13.6	7.1	5.9	53.4	47.0
T	10.8	5.4	4.6	51.7	48.2
(Na 置換)	13.6	6.2	6.2	46.4	49.6
S	8.8	4.1	3.5	48.6	46.1
(Na 置換)	13.3	7.3	6.9	55.9	55.2
Z	8.2	4.0	3.9	51.0	54.9
(Na 置換)	12.6	5.9	4.9	47.9	43.3
I	8.6	3.4	2.4	42.2	35.9
(Na 置換)	11.3	4.5	3.7	41.5	39.6

7. 2 シリアルバッチ試験による評価

7. 2. 1 濃度一定時の吸着阻害

(1) 方法

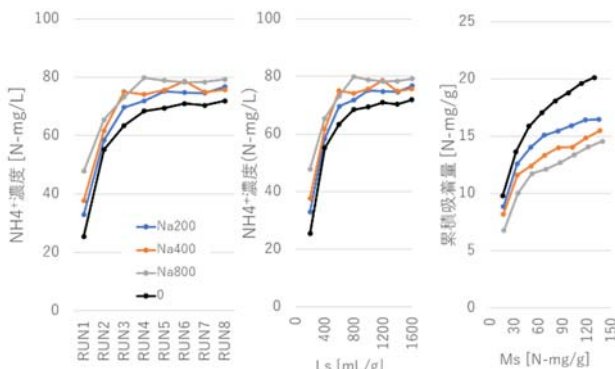
ゼオライト (T) 100 mgに対し、表14に示した共存Na⁺濃度の異なる塩化アンモニウム溶液を用いて、吸着実験を8回繰り返したシリアルバッチ試験を行った。

表 14 アンモニウム溶液

NH ₄ Cl溶液	初期濃度 [N-mg/L]	Na ⁺ [Cl-mg/L]
Na0	75	0
Na200	76	200
Na400	77	400
Na800	78	800

(2) 結果

図45にはNa⁺共存の塩化アンモニウム溶液を用いた条件でのNH₄⁺濃度推移、横軸をLsとしたNH₄⁺濃度、横軸をMsとした累積吸着量の推移を示した。NH₄⁺濃度は、Na⁺濃度が高いほど、高く推移した。吸着量もNa⁺共存により減少した。RUN8 (Ls約1600、Ms約130) の累積吸着量は、Na⁺無阻害時20 N-mg/gであったのに対し、Na⁺200 Cl-mg/Lでは2割低下、800 Cl-mg/Lでは3割低下している。

図 45 シリアルバッチ試験 NH₄⁺濃度推移

7. 2. 2 濃度変動時の吸着阻害

(1) 方法

浸出水中のNH₄⁺濃度は通常変動する。この実験では、

共存塩が存在下でNH₄⁺濃度が変動した場合の吸着反応の挙動を調べるため、ゼオライト (T) 50 mgに対し、塩化アンモニウム溶液 (初期濃度 83 N-mg/L) を用い、繰り返し

RUN1 塩化アンモニウム溶液(83 N-mg/L)

RUN2 純水(洗浄) ↓

	NH ₄ Cl溶液 [N-mg/L]	共存Na ⁺ [Cl-mg/L]
RUN3	0	0、800、1600
	42	0、800、1600
	83	0、800、1600

RUN4 純水(洗浄) ↓

RUN5 塩化アンモニウム溶液(83 N-mg/L)

図 46 シリアルバッチ試験条件
回数5回 (RUN1

～RUN5) のシリアルバッチ試験を行った (図46)。

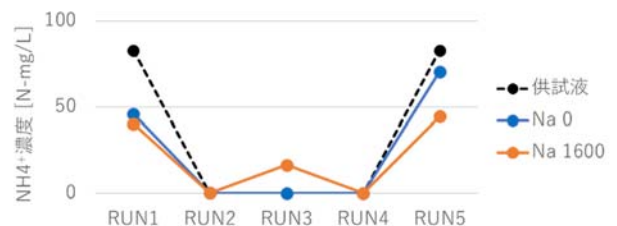
この際、途中のRUN3のNH₄⁺濃度を3種類 (初期濃度0、42、83 N-mg/L)、共存Na濃度を3種類 (0、800、1600 Cl-mg/L) 設定し、その組合せ、計9通りの溶液に変えた。また、RUN3の前のRUN2、RUN3の後のRUN4は1回ずつ純水として洗浄を行った。

(2) 結果

共存Na⁺が800 Cl-mg/Lの時と1600 Cl-mg/Lの時の差はあまりなかったため、共存Na⁺が0、1600 Cl-mg/Lの結果を図47～図49に示す。図47はRUN3の初期濃度が0 N-mg/L、図48は42 N-mg/L、図49は83 N-mg/Lの結果である。図中、黒の点線は供試液中のNH₄⁺濃度変動を示す。

図47では、RUN3でNa⁺ 0 mg/Lの時、NH₄⁺は確認されないが、Na⁺共存1600 mg/Lでは、供試液にNH₄⁺が含まれないにもかかわらず、NH₄⁺濃度の上昇が確認された。図48では、Na⁺ 0 mg/Lの時、RUN3でNH₄⁺濃度の上昇が確認できるが、供試液の初期濃度より低く、吸着が起こっていた。一方、Na⁺共存1600mg/Lでは、RUN3で確認されたNH₄⁺濃度は、Na⁺ 0 mg/Lの時より高かった。図49では、Na⁺ 0 mg/Lの時、RUN3で供試液の初期濃度とほぼ同じで、ほとんど吸着していない。Na⁺共存1600 mg/Lでは、供試液中のNH₄⁺濃度よりわずかに高かった。

以上の結果において、RUN毎に供試液中の初期濃度と上澄み液中のNH₄⁺濃度から吸着量を計算したものを図50～図52に示した。ただし、この時の吸着量は、単位重量当たりではなく、そのまま吸着量を計算して示しており、溶脱と考えられるマイナス値もそのまま表示している。

図 47 濃度変動時の NH₄⁺濃度推移

(RUN3 初期濃度 0 N-mg/L、Na⁺ 0、1600 mg/L)



図 48 濃度変動時の NH_4^+ 濃度推移
(RUN3 初期濃度 42 N-mg/L、 Na^+ 0、1600 mg/L)



図 49 濃度変動時の NH_4^+ 濃度推移
(RUN3 初期濃度 83 N-mg/L、 Na^+ 0、1600 mg/L)

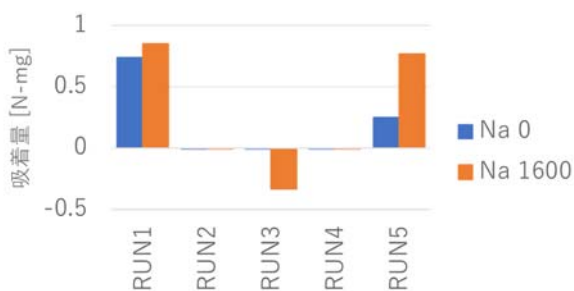


図 50 濃度変動時の吸着量推移
(RUN3 初期濃度 0 N-mg/L、 Na^+ 0、1600 mg/L)

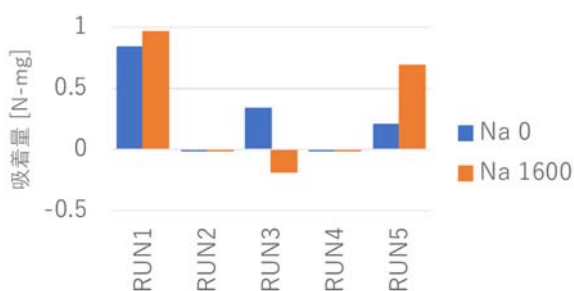


図 51 濃度変動時の吸着量推移
(RUN3 初期濃度 42 N-mg/L、 Na^+ 0、1600 mg/L)

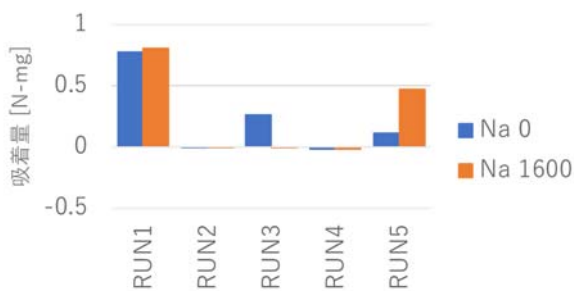


図 52 濃度変動時の吸着量推移
(RUN3 初期濃度 83 N-mg/L、 Na^+ 0、1600 mg/L)

図50では、 Na^+ 共存1600 mgのとき、RUN3で溶脱が起き、RUN5の吸着量は、 Na^+ 無共存のときより増加している。これは、RUN3でのNa置換 (Na^+ とのイオン交換) を伴う溶脱により、吸着能力が回復したためと推測される。図51でも同じ状況が確認できるが、図50に比べて、RUN3での溶脱量は減少し、RUN5における吸着量の回復はやや低下している。図52では、そうした傾向がより確認でき、RUN3で溶脱量は確認できない。ただし、溶脱量がないのにNa共存1600 mg/Lで吸着量の増加が確認できる。 Na^+ 共存時、 Na^+ のイオン交換を伴う NH_4^+ 溶脱による吸着量回復のほか、先述したNa置換処理で吸着量が増加する効果が同時に生じており、RUN5における吸着量の増加は、その総合的な効果と考えられる。そのため、図52のように溶脱が起こらなくても、その総合的な効果により吸着量の増加が生じたのではないかと推測される。

基本的に塩類阻害は、ゼオライトの使用期間に悪影響を及ぼす。ただ、塩類を含む浸出水において NH_4^+ 濃度が変動するような状況下では、吸着だけでなく溶脱を含む Na^+ 等置換が起こり、ゼオライトの吸着量の回復も起こる可能性が示唆された。

7. 3 カラム試験による評価

(1) 方法

カラム (空隙6 mL) に、 Na^+ (1000 Cl-mg/L) が共存する塩化アンモニウム溶液 (初期濃度 74 N-mg/L) 6.2 mL を繰り返し通水 (2時間58分間ポンプ停止後2分間通水) した。

(2) 結果

図 53 には、通水後の排出液中の NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 濃度の推移を示した。

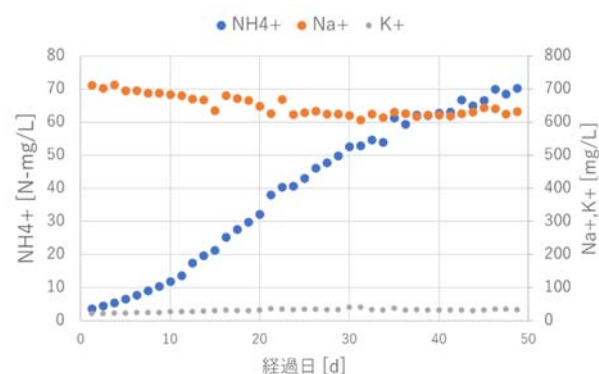


図 53 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 濃度の推移

供試液自体が高濃度の Na^+ を含むため、傾向が把握しにくい、時間ゼロをピークとして25日後には供試液中 Na^+ 濃度に近い濃度で安定した。 K^+ は30日前後をピークとして溶出が長期間継続している。この違いは、シリアルバッチ試験でも確認された、吸着時のイオン交換の優先度の違いによるものと推測される。

図54には、比較のため、図37で示した第6節のカラム実験の結果も併せて示した。全量採取して分析していないので概算となるが、Na⁺非共存でLs約350の時点で、累積吸着量は約12 N-mg/gで、除去率約15%となっていた。一方、Na⁺共存でLs約220の時点で、累積吸着量は約8 N-mg/gとなり、Na⁺非共存の場合より累積吸着量が低いにもかかわらず、除去率は約5%となった。60 N-mg/L前後で、NH₄⁺濃度の推移挙動がかなり異なっており、Na⁺非共存時では、NH₄⁺濃度が60強で停滞するが、Na⁺共存時では、さらに濃度が上昇した。例えば、50 N-mg/Lに達したLsは、Na⁺非共存下では約180で、Na⁺共存時は約40早まって約140であったが、60 N-mg/Lに達したLsは、Na⁺非共存下では約260で、Na⁺共存時は約100早まって約160となっており、差が拡大している。

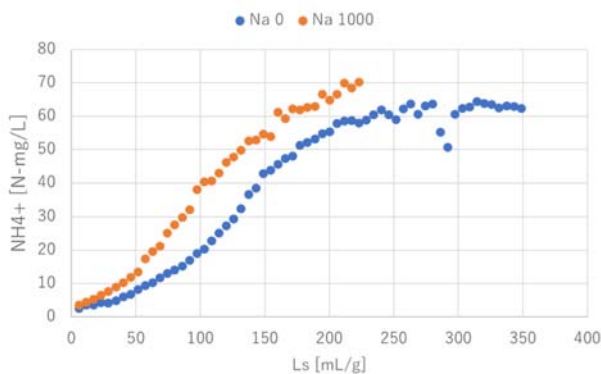


図 54 カラム試験結果比較 (Na 共存有無別)

7. 4 塩類阻害シリアルバッチ試験についての考察

塩類阻害がある場合も、吸着率と累積吸着量の間に式(4)、式(5)のような関係性があるかを確認するため、図55に阻害塩濃度別に、吸着率と累積吸着量をプロットしたものを示す。点数が少ない問題はあるものの、比例関係が認められたことから、図では点線として示したような回帰関係を求め、表15には得られた結果を式(5)の形で示した。(4)において飽和吸着量に相当する係数bは、阻害塩濃度に応じて飽和吸着量が減少するような影響が見られた。

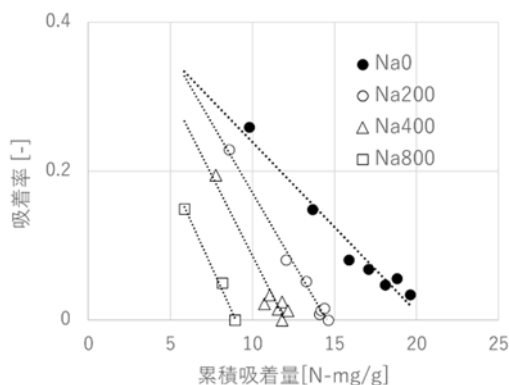


図 55 累積吸着量に対する吸着率の関係

表 15 回帰曲線

NH ₄ Cl溶液	回帰式
Na0	$Q = 21(1 - \text{Exp}(-0.035Ms))$
Na200	$Q = 15(1 - \text{Exp}(-0.04Ms))$
Na400	$Q = 12(1 - \text{Exp}(-0.05Ms))$
Na800	$Q = 9(1 - \text{Exp}(-0.05Ms))$

8 おわりに

ゼオライトのNH₄⁺吸着は、イオン交換を伴う吸着反応であるので、CEC、交換性陽イオン含有量は、ゼオライト吸着能の指標となる可能性がある。図56には、吸着バッチ試験で推定した飽和吸着量と対応するNH₄⁺を単位meqに換算した上でCECと比較したものを示した。同様に図57ではNa含有量と比較したものを示す。

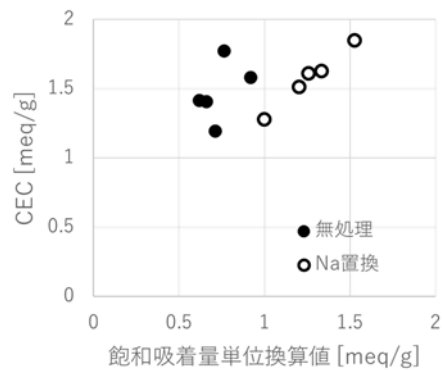


図 56 飽和吸着量と CEC の相関

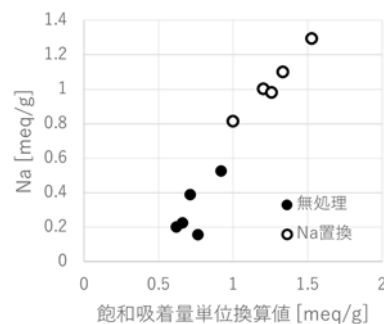


図 57 飽和吸着量と Na 含有量

バッチ試験により推計した飽和吸着量は、必ずしもCECと相関があるものでなく、あくまで大まかな指標に留まる。ただし、Na置換体については、相関性が高かった。一方、Na含有量との相関性はNa置換処理に関係なく高く、天然ゼオライトに限っては、CECよりNa含有量の方が飽和吸着量の指標として有効となっている。

また、シリアルバッチ試験により推計した飽和吸着量は、バッチ試験による飽和吸着量より高く、むしろCEC値から推計した吸着量に近かった。Langmuir式は、均一な吸着面で起こる単分子層吸着を仮定として理論的に導出される

式であり、天然ゼオライトのように多孔質結晶鉱物への適応はバッチ試験の短期間の実験条件で近似的に成立している可能性がある。

シリアルバッチ試験あるいはカラム試験では、その試験初期、Naイオン交換を伴うNH₄⁺吸着が優勢となる事が確認されたが、以上の点を踏まえるとバッチ試験は、このNa⁺のイオン交換を伴う吸着反応を反映したもので、飽和吸着量の推計値はやや過少評価している可能性がある。従って、天然ゼオライトに限っては、バッチ試験よりシリアルバッチ試験の方が実際の飽和吸着量に近い有効な推計を与えられと考えられる。ただし、バッチ試験には実験を短時間で簡易に行える利点があり、天然ゼオライトにおいては吸着量を過少評価する傾向がある可能性があるという実験的特性を踏まえた上で使用するのならば、有益な実験系と考えられる。

実験因子の影響を検討した中で影響が大きかったのは、反応時間、粒径、初期濃度、液固比であった。反応時間と粒径はバッチ試験における吸着平衡に達する時間にかかわる重要な因子である。吸着平衡の状態においては、初期濃度と液固比が重要な実験因子である。液固比が同一であれば、初期濃度に対する平衡濃度、吸着量は一意に決まり、Langmuir式で近似できた。初期濃度が同一でも、液固比が変わると、平衡濃度と吸着量が変わるが、この事はLangmuir式によるパラメータが液固比によって変化する事を示唆する。一方、平衡濃度 $C \rightarrow \infty$ の際の極限值である q_m は、液固比の影響を受けにくいパラメータである。窒素添加量と吸着量、あるいは窒素添加量と吸着率の関係も、初期濃度や液固比の影響を受けにくい関係性を示した。

Na⁺、K⁺、Ca²⁺による吸着阻害試験を行ったところ、塩濃度が上昇するに従い阻害は強くなるが、漸減的なもので、やがて一定となる。この時の最大値は、塩の種類によって異なり、K⁺が最も阻害が強く、除去率が約9割低下した。共存塩がNa⁺とK⁺の2種類存在した場合の濃度依存性は、単独の場合と異なり、複雑で加算的なものではなかった。同じイオン濃度でも、K⁺の方が吸着量は大きく低下するが、吸着量の低下自体は、塩濃度による。すなわち、K⁺が低ければ、Na⁺濃度が高い事の阻害が強くなる。浸出水と近いイオン組成を持つ模擬水による阻害試験では、同様の阻害が確認された事から、浸出水の吸着阻害は、塩類濃度、各塩の阻害効果の複合的な影響としてほぼ説明できると考えられた。

シリアルバッチ試験の場合、初期濃度に関らず成立する可能性のある関係として、飽和吸着量を介した吸着量と吸着率との比例関係が確認できた。この実験的に得られた関係は、式(3)～(5)のように表現できるが、この関係式を初期濃度に関らず成立するような一般性の高い関係と考えれば、関係式をもとに、任意初期濃度の吸着を推測し、以下に述べるような、天然ゼオライトによる浸出水処理への利用可能性を考察する事も可能である。

まず、初期濃度を C_0 としたとき、 $M_s = C_0 L_s$ の関係から、式(6)は

$$dQ/dM_s = ab \text{Exp}(-aC_0 L_s) \quad (7)$$

が導かれる。これにより、 L_s に対する吸着率 dQ/dM_s のプロットが任意の初期濃度に対してプロットできる。図58では、 $a=0.05$ 、 $b=21$ として、初期濃度が80、100、120 N-mg/Lのケースを試算したものをプロットしている。吸着率 dQ_s/dM_s は、溶液中で考えれば除去率に等しいので、初期濃度を設定した目標値とする除去率を満たす L_s を求める事ができる。図58では、各初期濃度を60 N-mg/Lまで落とすための除去率と、その除去率が維持される限界の L_s を、点線で示した。ゼオライト単価を50円/kgとすると、浸出水処理単価^{20,21)}を250円/m³以下となるような L_s は200以上である事から、初期濃度100 N-mg/L以下であれば、天然ゼオライト利用の可能性はあるという推察がこの図から得られる。

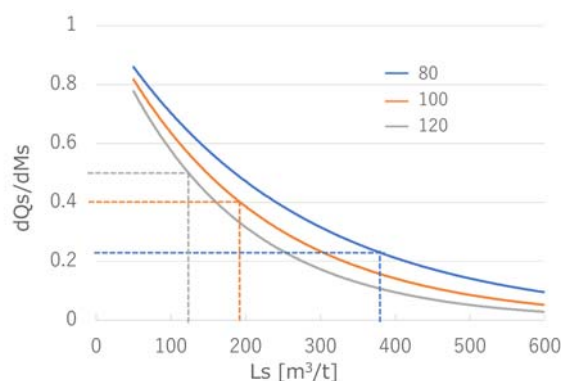


図 58 L_s に対する吸着率推移計算

塩類阻害がある場合、飽和吸着量が低下するが、図59では、初期濃度80 N-mg/Lとして、飽和吸着量が21 N-mg/L、25%阻害、50%阻害されたケースを試算したものをプロットした。

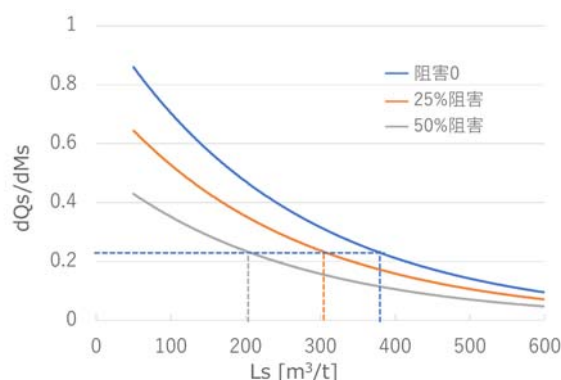


図 59 塩類阻害時の L_s に対する吸着率推移計算

阻害率によって、目標の除去率を満たすLsは、それぞれ異なる。高濃度のK⁺を含む浸出水など50%以上の阻害があった場合、Lsが200以下となるので、天然ゼオライト利用は可能であるものの、その適用条件はかなり限定される事が予想される。

以上、実験式(6)をもとにゼオライトの利用可能性を検討したところ、埋立終了後の後期、窒素処理が必要で、高い除去率は求めない低濃度(100 N-mg/L以下)というような特定の状況であれば、天然ゼオライトによる吸着材処理は可能であると考えられた。ただし、実際に浸出水を処理する場合は、粉体ではなく粒体を用いる事が考えられるほか、浸出水には、SS等の他の共存汚濁物質が含まれており、その影響の検討が必要であることから、実際の浸出水を用いた実証等の検討が必要である。

浸出水に対するゼオライト利用は、一定の限定された条件において可能であると考えられたが、塩類阻害による影響を緩和し、利用可能性を向上させるための方法の検討も課題である。図58、図59にも見られるように、ゼオライトによる除去率は、Lsの増加に伴い減少していくが、逆に言えば初期の除去率は、必要とする除去率より過大となっている。そこで、粒径や反応時間などの検討などにより、初期の除去率を下げる事ができれば、ゼオライトが延命化すると考えられる。そのほか、雨水浸透削減による浸出水量削減や、ゼオライトの再生など他の技術との併用を検討する事で、利用可能性向上が期待できることから、こうした方法の検討が必要であると考えられる。

文 献

- 1) 原伸宜, 高橋浩 (1975) ゼオライトー基礎と影響, 講談社.
- 2) 小野嘉夫, 八嶋建明 (2000) ゼオライトの科学と工学, 講談社.
- 3) 建設省土木研究所 (1979) 窒素の除去に関する調査報告書(2), 土木研究所資料, 1490, 1-84.
- 4) 高橋浩 (1977) 水中のアンモニウムイオン除去材料としてのゼオライト, 生産研究, 29(3), 24-27.
- 5) 河紀成, 鈴木基之 (1984) 天然ゼオライトを用いた排水中のアンモニウムイオンの除去, 水質汚濁研究, 7(7), 448-460.
- 6) 稲村江里 (1988) 物理化学的窒素除去に関する研究, 埼玉県公害センター研究報告, 15, 113-117.
- 7) 津野洋, 西村文武, 宗宮功 (1994) 生物ゼオライトを用いたアンモニア性窒素の除去特性に関する研究, 土木学会論文集, (503) II-29, 159-166.

- 8) 富谷信一, 三浦泰忠, 植松亜紀子 (2021) 畜舎排水の窒素低減処理技術の開発, 中小畜産試験場研究報告, 62, 1-5.
- 9) 飯田拓史, 松尾保成, 田中慎一郎, 原裕, 三島悠一郎, 荒木宏之 (2013) ガラス系ゼオライトのセシウムならびにストロンチウムの吸着特性把握と浸出水処理への応用に関する研究, 低平地研究, 22, 44-50.
- 10) 和嶋隆昌, 池上康之 (2005) 天然ゼオライトを用いたアンモニア除去に関する基礎的研究 (海水中でのアンモニア吸着挙動とイオン交換による改質), 佐賀大学海洋エネルギー研究所報告, 10, 50-55.
- 11) 和嶋隆昌, 志水倫恵, 大和武彦, 池上康之 (2006) 海水中におけるゼオライトのイオン交換に関する基礎的実験, 佐賀大学海洋エネルギー研究所報告, 12, 51-56.
- 12) 和嶋隆昌, 志水倫恵, 大和武彦, 池上康之 (2007) 産地の異なる天然ゼオライトのNaCl溶液中におけるイオン交換に関する基礎的実験, 佐賀大学海洋エネルギー研究所報告, 13, 63-68.
- 13) 富永博夫, 辰巳敬 (1991) ゼオライトの科学と技術, 資源と素材, 107(1), 2-7.
- 14) 梶敏治 (1985) ゼオライトの科学, 石膏と石灰, 1988(196), 169-175.
- 15) 佐藤徹雄 (1987) 我が国における天然ゼオライトの生産、利用、開発の現状, ゼオライト, 4(3), 10-16.
- 16) 野田修司 (1980) 天然ゼオライトの簡易塩基交換容量測定法, 粘土科学, 20(3), 78-82.
- 17) 日本学術振興会鉱物新活用第 111 委員会・天然ゼオライト利用研究分科会 (2006) 天然ゼオライトー利用にあたっての品質評価基準一, 日本学術振興会鉱物新活用第 111 委員会.
- 18) 大森保幸, 細井由彦, 奥村稔, 藤永薫, 清家泰 (1999) 天然ゼオライトを充填したアンモニウムイオン除去装置の簡易設計, 水環境学会誌, 22(10), 845-853.
- 19) 竹内雍 (1999) 吸着分離, 講談社.
- 20) 澤部咲余, 中山裕文, 島岡隆行 (2010) 一般廃棄物最終処分費用の増減要因に関する一考察, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2010, 871-872.
- 21) 遠藤和人, 小野雄策, 山田正人, 井上雄三 (2010) 廃棄物最終処分場のライフサイクルコストに関する一考察, 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 21, 263-263.

八潮市で発生した下水道管破損に伴う 河川への下水緊急放流に係る水質調査

田中仁志 木持謙 池田和弘 見島伊織 渡邊圭司 宮崎実穂

1 はじめに

1.1 事故の概要と関係機関の対応の経過

令和7年1月28日に埼玉県八潮市で発生した下水道管破損事故に際し、人命救助を最優先として道路陥没現場への汚水流入を極力抑制するため、埼玉県は春日部中継ポンプ場（図1）から近傍水路・新方川（図2）を経由して中川へ緊急放流を実施した。下流の取水施設には事前に連絡し、取水への影響がないことを確認するとともに、放流する汚水には可能な限り応急処理（塩素投入）を行った¹⁾。放流は1月29日22時から3月3日まで継続した²⁾。この間、当センター（以降、CESS という）は緊急放流に伴う河川水質（pH、SS、BOD、大腸菌数）のモニタリングを担当した。この間の関係機関及び環境科学国際センターの対応を表1に示す。なお、近年では平成24年5月中旬に、利根川表流水を原水とする浄水場でホルムアルデヒドが水道水質基準を超過した事故³⁾に匹敵する規模の体制を構築し、今回も同等の体制で対応した。本報では、得られた知見を記録し、今後の業務の参考とする。

表1 汚水放流における関係機関及び環境科学国際センターの対応

日時	事柄	当センター対応
令和7年 1月28日	陥没事故発生	
1月28日 18時30分現在	県は復旧するまでの間、中川流域下水道に関連する流域市町で公共下水道を利用者に風呂、洗濯などの排水の抑制を要請 ²⁾	
1月29日 22時	春日部中継ポンプ場から近傍の水路・新方川を経由し中川への下水緊急放流開始 応急処理（塩素投入） ²⁾ （図3）	
1月30日	環境未来局長からセ	

8時30分頃	ンター長へ水質調査 対応準備の指示	
1月30日 10時00分頃		センターにおける 水質調査体制構築
1月30日 15時15分頃	水環境課からセンタ ーへ3地点（①新方川 合流点（F494橋）、② 新方川昭和橋、③新中 川水管橋）（図1、図 2）の大腸菌数分析依 頼	
1月31日	環境管理事務所採水 開始	水質分析開始 （BOD、大腸菌数、 pH、SS 計4項目、独 自の情報として残留 塩素DPD法およびEC）
1月31日 21時00分現在	企業局において希釈 水を新方川上流水路 に放流を実施 ²⁾ （図4）	
2月1日 19時	放流点に塩素混和槽 を設置し、効率的な塩 素混合を実施 ⁵⁾	
2月3日	県民に対して特に4日 14～17時の時間帯で 風呂、洗濯等の排水を 控えるよう要請 ²⁾	
2月9日 15時00分現在	元荒川から河川水を 取水し新方川上流水 路に希釈水として放 流を開始 ²⁾ （図4）	
2月12日 12時	下水道の使用自粛の 依頼終了 ⁴⁾	
3月3日	春日部中継ポンプ場 から下水の放流終了 ²⁾	
3月26日	サンプル搬入終了	水質モニタリング 終了
3月31日		水質分析（分析に5 日を要したBOD）お よび報告終了



図1 埼玉県春日部中継ポンプ場(上)と下水が排水された水路(下) (2025年3月5日撮影)



図2 採水地点①新方川F494 (2025年2月20日撮影)

1.2 分析体制の構築

水環境課との調整により、BOD は採水日から 6 日後、大腸菌数・SS は 1 日後、pH は当日 17 時まで（当初 15 時まで）に速報する体制とした。分析担当者は結果と分析野帳を共有フォルダに保存し、連絡係が取りまとめ、研究推進室長または副室長の確認後、行政準備の結果報告用ファイルに記入して回答した。分析結果は夕刻の災害対策本部

会議で使用され、県庁幹部も注目する中、当日夕方に県 HP で公開された。速報性と正確性が高度に求められる状況下での体制整備であった。

1.2.1 委託分析の導入

モニタリングが土日を含む毎日実施となり、長期化が見込まれたため、2 月 5 日採水分から BOD および SS について民間分析機関へ委託することとした。さらに、3 月 11 日採水分からは全項目を委託分析とした。ただし、委託先は土曜日、日曜日および祝日が原則休業であるため、一部試料は CESS で分析した。特に、大腸菌数は仕込み日と翌日に作業が必要となることから、いずれかが休業日に当たる場合は CESS が担当する必要があった。BOD については、報告期限が採水日の 6 日後であることから、仕込み日と 5 日後ができるだけ休業日とならないように日程調整し、委託できない場合は CESS が担当した。

分析結果の行政への回答は、CESS が取りまとめて実施した。委託契約内容は研究推進室副室長が調整した。委託分析機関に対しては、報告値に加えて分析野帳の提出を義務付け、毎回データの精査を行った。途中から、試料 ID について採取日が判別できる形式へ修正を指示した。

分析委託により業務負荷は一定程度軽減された一方で、出勤日数自体は大きく減少しなかった。

1.2.2 役割分担

業務は、次の 3 担当体制で実施した。

- ・試料の受領・引渡し、電話対応、残留塩素の測定、結果の取りまとめを行う連絡係
- ・大腸菌数および SS の測定係
- ・pH・EC・BOD の測定係

必要な試薬・機器の手配、培地の調製等の分析準備は、水環境担当の会計年度任用職員が担当した。

モニタリング終了後の連絡業務を含め、分析・連絡・データ確認に係る業務従事日は 58 日、受領試料数は 144 検体、延べ参加職員数は 259 名に達した。

1.3 試料の受け取りと引き渡し

試料採取は環境管理事務所がおおむね 10 時～11 時に実施し、原則として 3 検体を 12 時～13 時に CESS へ搬入した。このうち、委託分析用の試料瓶は 13 時に CESS にて引き渡した。祝日採取分については、BOD および SS の仕込みを翌日午前中に実施したため、9 時に試料を引き渡す日もあった。

すべての項目を委託分析とした日は、CESS を経由せず、採水現場にて直接引渡しを行った。

1.4 その他

採水に必要な試料瓶は、原則として CESS で購入・準備し、検体搬入時に適宜まとめて環境管理事務所へ引き渡した。試料瓶や試薬の購入、委託費を含む予算確保は、水環境担当職員を中心に実施した。支払い手続きについては、土壌・地下水・地盤担当の会計年度任用職員に協力をいただいた。予算は、センター長が CESS 全体から調整すると

ともに、水環境課から追加の令達により確保した。

CESS は分析業務を担当したが、水環境課等から科学的助言を求められる可能性を踏まえ、国立保健医療科学院(当時)の島崎大先生をはじめ、塩素消毒の専門家数名にヒアリングを行い、知見の蓄積に努めた。

初期段階においては、塩素消毒の有効性評価のためアンモニア等の測定を実施した。また、報告依頼はなかったが、水質状況の把握を目的としてECの測定も併せて行った。

なお、モニタリング開始時点で、採水時に必要となるDO計が環境管理事務所で不足していたため、CESS から2台を提供した。

2 水質調査

2.1 調査地点

- ・調査地点：①新方川合流点(F494橋)、②新方川昭和橋、③新中川水管橋の計3地点(図3、図4)



図3 下水放流に係る調査地点



図4 下水道の汚水の河川への緊急放流の状況について⁵⁾

2.2 方法

- ・分析試料 水試料 3検体(①新方川合流点(F494橋)、②新方川昭和橋、③新中川水管橋)
- ・調査項目 pH、SS、BOD、大腸菌数
- ・試料搬入日 令和7年1月31日(金)～3月26日(水)計48日(採取日と同一日)
- ・分析対応期間 令和7年1月31日(金)～3月31日(月)

- ・試料採取者 環境管理事務所等

- ・分析方法

(1) pH

JIS K0102 12.1に従って実施した。

(2) SS

環境庁告示第59号付表9に従って実施した。

(3) BOD

JIS K0102 21に従って実施した。通常BOD分析にあたっては、河川水は在来微生物が十分に存在するためそのまま分析し、工場排水等については微生物が乏しい場合が多いため生分解を確実にする目的で植種源(微生物)を添加して分析する。今回の現場では殺菌目的で塩素が添加されている(地点①の検体を中心に検出もされている)ことから、河川水ではあるものの全ての検体に植種源(市販の植種製剤)を添加して分析した。

(4) 大腸菌数

JIS K0102-5 5.6.2の「特定酵素基質培地平板培養法およびメンブレンフィルター法」により測定を行った。特定酵素基質寒天培地は、CHROMagar ECC(関東化学株式会社)を使用した。採水容器は、主にハイポ入りの1L容量の滅菌採水瓶(サンセイ医療器材)、メンブレンフィルターは、主にセルロース混合エステルタイプの孔径0.45 μm、直径47 mmの格子入りのものを使用した(ADVANTEC)。1日に使用する消耗品の量が膨大だったため、メーカー在庫の情報を逐一確認し、確保に努めた。調査開始時は、最適な希釈範囲が不明だったため、1倍～10,000,000倍の段階希釈系列の測定を行った。繰り返し測定は、各希釈系列につき2連で行った。数日測定を行った後は、残留塩素濃度の情報を基に、ある程度希釈系列の範囲の予測が可能となった。終日測定の体制は、3名でシフトを組んで行った。調査開始時には、同一試料を用いて3名で精度管理も行った。併せて、工場排水試験法では、特定酵素基質寒天培地を用いた平板培養法を用いるが、搬入されたサンプルを用いてメンブレンフィルター法と比較した結果、オーダーレベルで一致することを確認した。

(5) 遊離残留塩素及び結合残留塩素

水道法施行規則第十七条第二項の規定に基づき環境大臣が定める遊離残留塩素及び結合残留塩素の検査方法(別表第1 ジエチル-p-フェニレンジアミン法(DPD法))により測定を行った。実際には、キット化された残留塩素測定器(SIBATA)を利用した。アンモニア濃度が高い中で塩素での消毒であったため、結合残留塩素の測定が重要であり、遊離塩素のみを測定対象とした残留塩計は使用できなかった。適用した測定法では、時間とともに呈色が進むため、呈色反応時間を厳格に守ることが重要であった。残留塩素はBOD測定にも参考にされることが、保存ができないこと、また現場の消毒状況の確認にも参考になることから、試料搬入次第速やかに

測定を行い、チャットで、関係者（CESSおよび行政）に速報し情報共有した。

3 結果

(1) pH

分析結果は別表 1 にまとめた。

(2) SS

分析結果は別表 2 にまとめた。

(3) BOD

分析結果は別表 3 にまとめた。

(4) 大腸菌数

分析結果は別表 4 にまとめた。

(5) 結合残留塩素

分析結果は別表 5 にまとめた。

実験室に持ち込まれた試料中から残留塩素が検出されたのは①新方川合流点（F494橋）1試料のみであった（表4）。この試料の分析時の残留塩素（結合塩素）濃度と大腸菌数の関係を図5に示す。結合塩素<0.05 mg/Lは、0.05 mg/Lとして作図している。その結果、結合塩素が0.2 mg/Lより高い濃度では大腸菌数が10～1,000 CFU/100 mlのオーダーであったのに対して、0.05 mg/L以下の試料では100～1,000,000 CFU/100 mlであったことから、残留塩素（結合塩素）は大腸菌数の減少に効果があったことが示唆された。

ただし、塩素注入時の残留塩素量が不明なこと、採水から実験室搬入まではクーラーボックスを用いているものの、少なくとも1時間以上は経過していることを考慮して、参考にすべきである。

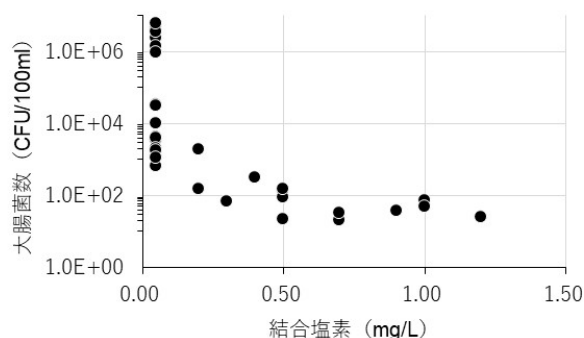


図5 総残留塩素(DPD法)と大腸菌数の関係(F494橋)

4 おわりに

今回の水質調査対応では、水環境担当職員がウェルビーイングに配慮しつつ、休日を含め課題解決に全力を尽くした。

県民の健康・生活に直結する案件であり、極めて迅速性が求められていたが、所内の決裁もスムーズに行われたこともあり、行政の的確かつ迅速な対応に貢献したものと総括できる。

本件は、下水の河川への直接放流というこれまで対応事例がない中、日頃からの研究活動、水質分析の技術研鑽、そして情報収集能力の蓄積が、その基盤となった。

今回の八潮下水道放流への対応は、当センターの存在意義と役割を改めて示すものであり、今後も平時・緊急時双方で県民の安全・安心に資する体制を一層強化していく。最後に、本道路陥没事故によりお亡くなりになられた方のご冥福を心よりお祈り申し上げるとともに、関係者の皆様に深くお見舞い申し上げます。

文 献

- 1) 埼玉県ホームページ, 埼玉県八潮市で発生した下水道管破損により、下水道の汚水を河川に放流します(第1報(速報)), <https://www.pref.saitama.lg.jp/c1502/news/page/news2025012903.html> (2026. 2. 16 アクセス)。
- 2) 埼玉県ホームページ, 経過について, <https://www.pref.saitama.lg.jp/c1502/news/nakagawa0312.html> (2026.2.27 アクセス)。
- 3) 高橋基之ら, 利根川水系ホルムアルデヒド水質事故における対応の記録, 埼玉県環境科学国際センター報 第13号、85-91。
- 4) 埼玉県報道発表資料, 流域下水道管に起因する道路陥没事故の発生について(第15報)(令和7年3月3日), <https://www.pref.saitama.lg.jp/c1502/news/page/news2025030301.html> (2026.2.28 アクセス)。
- 5) 下水道の汚水の河川への緊急放流の状況について, <https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/264005/kinkyuhoruyusyuryo.pdf> (2026.2.28 アクセス)。

別表1 pH分析結果一覧

日付	pH			日付	pH		
	F494 橋	昭和橋	新中川水管橋		F494 橋	昭和橋	新中川水管橋
2025/1/31	7.5	8.0	8.1	2025/3/1	7.7	8.2	8.6
2025/2/1	7.6	7.9	8.1	2025/3/2	7.7	8.4	8.8
2025/2/2	7.8	7.9	8.0	2025/3/3	7.6	8.3	8.6
2025/2/3	7.5	7.7	7.9	2025/3/4	7.6	7.6	7.8
2025/2/4	7.4	7.7	7.9	2025/3/5	7.6	7.6	7.6
2025/2/5	7.3	7.7	7.9	2025/3/6	7.6	7.5	7.7
2025/2/6	7.4	7.8	8.0	2025/3/7	7.6	7.6	7.6
2025/2/7	7.2	7.7	7.9	2025/3/8	7.7	7.6	7.7
2025/2/8	7.7	7.7	7.8	2025/3/9	7.8	7.6	7.6
2025/2/9	7.5	7.6	7.9	2025/3/10	7.6	7.6	7.6
2025/2/10	7.4	7.6	7.8	2025/3/11*	7.7	7.4	7.7
2025/2/11	7.5	7.7	7.9	2025/3/12*	7.7	7.5	7.6
2025/2/12	7.4	7.8	7.9	2025/3/13*	7.4	7.4	7.5
2025/2/13	7.4	7.8	7.9	2025/3/14	7.6	7.5	7.5
2025/2/14	7.4	8.1	8.1	2025/3/15	7.7	7.6	7.7
2025/2/15	7.5	8.0	8.2	2025/3/16	7.6	7.6	7.7
2025/2/16	7.4	8.0	8.1	2025/3/17*	7.6	7.6	7.7
2025/2/17	7.4	8.0	8.2	2025/3/18*	7.6	7.5	7.6
2025/2/18	7.5	8.0	8.3	2025/3/19	7.5	7.4	7.6
2025/2/19	7.4	7.9	8.4	2025/3/20	7.5	7.5	7.4
2025/2/20	7.4	7.8	8.4	2025/3/21	7.5	7.4	7.4
2025/2/21	7.5	7.7	8.3	2025/3/22	7.7	7.5	7.4
2025/2/22	7.4	7.7	8.3	2025/3/23	7.7	7.5	7.5
2025/2/23	7.4	7.6	7.8	2025/3/24*	7.8	7.6	7.5
2025/2/24	7.4	7.7	7.8	2025/3/25*	8.0	7.5	7.5
2025/2/25	7.4	7.6	7.8	2025/3/26	7.8	7.6	7.7
2025/2/26	7.4	8.2	8.1				
2025/2/27	7.4	8.2	8.1				
2025/2/28	7.5	8.2	8.3				

*: 測定委託日

別表2 SS分析結果一覧

日付	SS (mg/L)			日付	SS (mg/L)		
	F494 橋	昭和橋	新中川水管橋		F494 橋	昭和橋	新中川水管橋
2025/1/31	27	9	12	2025/3/1	11	16	35
2025/2/1	25	7	8	2025/3/2*	12	18	33
2025/2/2	16	10	6	2025/3/3*	24	24	30
2025/2/3	39	14	10	2025/3/4*	16	13	18
2025/2/4	23	11	9	2025/3/5	36	12	11
2025/2/5*	18	10	8	2025/3/6	18	9	9
2025/2/6*	16	9	8	2025/3/7	9	11	14
2025/2/7*	16	10	6	2025/3/8	6	8	18
2025/2/8	11	9	7	2025/3/9*	14	11	6
2025/2/9*	13	10	7	2025/3/10*	11	11	13
2025/2/10*	11	8	8	2025/3/11*	15	16	21
2025/2/11*	12	10	13	2025/3/12	16	20	23
2025/2/12*	10	8	12	2025/3/13*	43	21	33
2025/2/13*	1,800**	17	15	2025/3/14*	13	19	26
2025/2/14*	14	12	14	2025/3/15	12	27	35
2025/2/15	27	14	18	2025/3/16*	53	21	27
2025/2/16*	14	17	18	2025/3/17*	34	15	13
2025/2/17*	13	18	10	2025/3/18*	13	13	11
2025/2/18*	13	24	17	2025/3/19	59	36	37
2025/2/19*	12	14	13	2025/3/20	18	18	18
2025/2/20*	12	9	12	2025/3/21	13	11	12
2025/2/21*	13	6	9	2025/3/22	13	9	10
2025/2/22	16	8	11	2025/3/23	14	10	8
2025/2/23	15	8	9	2025/3/24	17	12	11
2025/2/24	15	8	9	2025/3/25	59	13	15
2025/2/25*	10	11	7	2025/3/26	30	23	21
2025/2/26*	13	17	17				
2025/2/27*	12	20	21				
2025/2/28*	14	17	24				

*：測定委託日

**：採水場所付近で橋りょう工事が行われていた。

別表3 BOD 分析結果一覧

日付	BOD (mg/L)			日付	BOD (mg/L)		
	F494 橋	昭和橋	新中川水管橋		F494 橋	昭和橋	新中川水管橋
2025/1/31	89	3.6	4.3	2025/3/1	5.6	6.1	7.7
2025/2/1	85	3.7	4.3	2025/3/2*	4.6	4.9	7.4
2025/2/2	25	4.3	4.4	2025/3/3*	9.4	5.9	7.8
2025/2/3	62	4.5	3.7	2025/3/4*	5.8	5.1	6.1
2025/2/4	74	4.8	3.8	2025/3/5*	6.8	5.2	4.3
2025/2/5*	35	4.5	4.2	2025/3/6*	4.7	4.5	4.5
2025/2/6*	71	3.7	4.1	2025/3/7*	5.3	3.8	4.1
2025/2/7*	72	7.7	4.1	2025/3/8	3.9	3.4	4.0
2025/2/8	8.1	6.4	4.5	2025/3/9*	4.6	3.7	2.9
2025/2/9*	40	9.1	4.5	2025/3/10*	3.7	3.7	4.1
2025/2/10*	43	7.6	4.6	2025/3/11*	3.9	3.4	5.7
2025/2/11*	22	6.4	4.2	2025/3/12*	5.1	4.4	5.2
2025/2/12*	32	3.8	4.1	2025/3/13*	5.6	5.5	5.5
2025/2/13*	30	5.0	5.0	2025/3/14*	2.3	3.8	5.1
2025/2/14*	32	5.0	4.6	2025/3/15	4.3	4.5	5.7
2025/2/15	50	4.0	5.8	2025/3/16*	7.7	4.7	5.5
2025/2/16*	31	5.9	6.1	2025/3/17*	4.4	3.7	4.0
2025/2/17*	45	6.9	5.4	2025/3/18*	3.6	3.6	3.6
2025/2/18*	39	7.4	6.1	2025/3/19*	5.8	10	6.7
2025/2/19*	38	5.0	6.7	2025/3/20*	3.1	4.1	5.4
2025/2/20*	35	4.9	6.1	2025/3/21*	3.4	2.8	3.3
2025/2/21*	22	2.6	4.2	2025/3/22	3.2	3.0	3.5
2025/2/22	19	4.4	4.6	2025/3/23*	3.2	3.2	2.5
2025/2/23	19	4.3	4.1	2025/3/24*	4.3	3.5	3.0
2025/2/24	36	5.1	4.5	2025/3/25*	4.8	4.0	4.0
2025/2/25*	39	5.6	4.0	2025/3/26	8.9	3.2	3.5
2025/2/26*	31	8.0	6.9				
2025/2/27*	33	6.7	6.2				
2025/2/28*	35	6.8	6.6				

*: 測定委託日

別表4 大腸菌数分析結果一覧

日付	大腸菌数 (CFU//100mL)			日付	大腸菌数 (CFU//100mL)		
	F494 橋	昭和橋	新中川水管橋		F494 橋	昭和橋	新中川水管橋
2025/1/31	11,000,000	420	270	2025/3/1	3,200	110	38
2025/2/1	7,600,000	320	120	2025/3/2	3,300	35	21
2025/2/2	<1	600	120	2025/3/3	10,000	50	39
2025/2/3	410,000	3,700	340	2025/3/4	1,700	940	820
2025/2/4	4,400,000	9,100	1,100	2025/3/5	4,000	3,400	600
2025/2/5	2,400,000	21,000	1,100	2025/3/6	1,700	1,300	700
2025/2/6	3,600,000	9,900	2,300	2025/3/7	1,600	400	390
2025/2/7	6,000,000	120,000	1,100	2025/3/8	2,000	170	170
2025/2/8	33,000	57,000	13,000	2025/3/9	1,800	240	250
2025/2/9	1,400,000	130,000	12,000	2025/3/10	1,100	200	120
2025/2/10	70	62,000	7,700	2025/3/11*	3,000	1,200	130
2025/2/11	130	26,000	9,100	2025/3/12*	3,100	1,400	150
2025/2/12	1,900	1,700	860	2025/3/13*	2,300	1,200	500
2025/2/13	31,000	1,000	540	2025/3/14	1,400	580	190
2025/2/14	310	400	160	2025/3/15	1,500	200	86
2025/2/15	1300	220	110	2025/3/16	8,300	260	150
2025/2/16	89	200	65	2025/3/17	5,200	1,100	600
2025/2/17	150	190	26	2025/3/18	5,500	500	240
2025/2/18	20	510	40	2025/3/19	2,100	12,000	700
2025/2/19	930,000	220	24	2025/3/20	4,200	5,600	1,400
2025/2/20	66	270	28	2025/3/21	1,400	860	970
2025/2/21	47	110	38	2025/3/22	1,900	430	170
2025/2/22	24	160	47	2025/3/23	2,400	86	73
2025/2/23	36	500	250	2025/3/24*	1,300	110	56
2025/2/24	4,300	230	74	2025/3/25*	3,200	740	84
2025/2/25	21	1,800	52	2025/3/26	11,000	340	320
2025/2/26	150	2,300	98				
2025/2/27	31	1,900	90				
2025/2/28	630	810	77				

*: 測定委託日

別表 5 残留塩素分析結果

日付	残留塩素 (mg/L)			日付	残留塩素 (mg/L)		
	F494 橋	昭和橋	新中川水管橋		F494 橋	昭和橋	新中川水管橋
2025/1/31	<0.05***	<0.05***	<0.05***	2025/3/1	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/1	<0.05***	<0.05***	<0.05***	2025/3/2	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/2	0.1***	<0.05***	<0.05***	2025/3/3	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/3	<0.05***	<0.05***	<0.05***	2025/3/4	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/4	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/5	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/5	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/6	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/6	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/7	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/7	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/8	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/8	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/9	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/9	<0.05	<0.05	<0.05	2025/3/10	<0.05	<0.05	<0.05
2025/2/10	1	<0.05	<0.05				
2025/2/11	0.5	<0.05	<0.05				
2025/2/12	0.2	<0.05	<0.05				
2025/2/13	<0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/14	0.4	<0.05	<0.05				
2025/2/15	0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/16	0.5	<0.05	<0.05				
2025/2/17	0.5	<0.05	<0.05				
2025/2/18	0.7	<0.05	<0.05				
2025/2/19	<0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/20	0.3	<0.05	<0.05				
2025/2/21	1	<0.05	<0.05				
2025/2/22	1.2	<0.05	<0.05				
2025/2/23	<0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/24	<0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/25	<0.05	<0.05	<0.05				
2025/2/26	0.2	<0.05	<0.05				
2025/2/27	0.7	<0.05	<0.05				
2025/2/28	<0.05	<0.05	<0.05				

*** : 遊離塩素のみ測定

[資料]

断水時の水問題を考えるセミナー（第3回） 「大規模災害時の断水に備える－民間井戸を活用した 生活用水確保の実践と課題－」の開催概要報告

柿本貴志 濱元栄起 石山高 高沢麻里

1 第3回セミナー開催の背景

2022年度から開始した自主研究課題(震災時生活用水確保困難地域の推定と防災井戸拡充による対応に関する研究)では、災害による断水時に、家庭や企業が所有する井戸から断水地域の住民に、生活用水を提供する取り組み(災害時協力井戸等の呼称で知られるもの)に対する市町村の考え・対応、井戸所有者の同取り組みに対する捉え方を把握し、災害時の生活用水確保政策に資する知見を得ることを目的としている。

本研究課題に取り組むなかで、市町村の防災担当課は、断水時における飲料水の必要性に関する認識を十分に持っていたこととは対照的に、生活用水の必要性や、生活用水の水源として井戸が有用であることについては、あまり認識されていないと感じられた。

2023年度からは、災害用井戸に関する研究の第一人者である立教大学の遠藤崇浩教授(元大阪公立大学)を研究メンバーに迎え、当センターの客員研究員にもご就任いただいた。客員研究員制度を利用して、遠藤教授には年1回講演を依頼し、断水時の生活用水確保対策の重要性に関する理解促進および対策推進の支援を目的として、主に市町村の防災担当課や関係者を対象としたセミナーを開催することとした。

2023年8月3日に第1回セミナー「井戸は断水時にどのように役立つのか？」を開催した(講演は遠藤教授のみ)。本セミナーに参加した県内のある自治体では、災害時協力井戸の制度導入に向けて動きが始まるなど、情報面での支援は1年目から効果を発揮した。

2024年1月1日に令和6年能登半島地震が発災し、能登半島では水道インフラが甚大な被害を受け、能登地域の多くの自治体で断水が発生した。被災地の一つである石川県七尾市において遠藤教授と筆者は井戸の活用実態を調査し、断水時の生活用水の水源として、井戸が大いに活用され、被災者の日常生活を支えたとともに、被災地の安定にも寄与したことが分かった¹⁾。この調査結果は、今回の第3回セミナーにおいて報告されることとなった。

2025年2月12日には、第2回セミナー「災害発生後におけ

る環境分析の役割―分析機関は災害後に何を求められ、どのように対応したのか―」を開催した。これは2022年度に埼玉県内市町村防災担当課を対象としてアンケート調査を実施したところ、防災担当課では、地下水の水質に対する強い不安を感じ、生活用水としての使用にさえ不安を感じているという結果があったことが背景にある。井戸水を使うならば、水質検査を行い、安全であることを確認できなければ、井戸水の利用を自治体としては進められないということである。生活用水は、発災後すぐに必要になる可能性がある。このため、水質検査も発災後すぐに受検できるようにすることが望ましいが、過去の災害での実態について、情報が十分であるとは言えなかった。このような中、平成30年7月豪雨や令和6年能登半島地震やの際に水質分析を実施した分析機関の方と縁ができたこともあり、第2回セミナーでは、遠藤教授を含む5名の演者から発表していただいた。

- (1) 井戸×防災一次世代レジリエンスのカギを握る地下水管理(大阪公立大学 教授 遠藤崇浩)
- (2) 災害時の遊休井戸等の共助利用に係る水質検査の対応事例((一財)広島県環境保健協会 水道事業課 主査 後藤悠太)
- (3) 平成30年7月豪雨災害に係る土壌環境汚染モニタリング調査((一財)広島県環境保健協会 業務開発課 課長 野田憲弘)
- (4) 令和6年能登半島地震が水質に与えた影響と今後の課題((株)エオネックス 環境事業部 環境営業グループ グループリーダー 竹山駿平)
- (5) 事故時等を想定した河川水中化学物質の調査に関するCESSの取り組み(埼玉県環境科学国際センター 研究推進室 副室長 大塚宜寿)

埼玉県の関係各課、市町村防災担当課の他、民間の分析機関の方にも参加していただき、被災直後の分析室の様子や、分析機能を復旧させるための段取り、不足した物資など分析機関として必要な備えに関する知見が提供されたほか、水質分析・土壌分析が円滑に行われるための仕組み等について、実践的な情報が多数共有され、盛会であった。このようなこれまでの活動を受け、断水時の水問題を考

えるセミナー(第3回)「大規模災害時の断水に備えるー 民間井戸を活用した生活用水確保の実践と課題ー」を開催した。本稿では、セミナーと事後アンケートの結果概要を紹介する。

2 第3回セミナーの概要

令和6年能登半島地震後から開始した石川県七尾市における調査の一部の結果がまとまり、発表できる状態になってきたこと、また災害時協力井戸等の民間井戸を活用した生活用水の確保の取り組みを支援する災害時地下水利用ガイドライン(内閣官房水循環政策本部事務局)が2025年12月に改訂されたこと、上尾市危機管理防災課から同市における事例紹介をしていただけることを受け、断水時の水問題を考えるセミナー(第3回)を開催することにした。

令和6年能登半島地震において顕在化した長期断水の課題を踏まえ、大規模災害時における生活用水確保のあり方、とりわけ地下水・井戸水の活用について最新の知見を共有し、今後の自治体施策に活かしていただくことを期待するセミナーであり、開催日時・プログラムは表1のとおりであった。参加団体数は27(うち市町村は11)であり、参加者数は37名であった。

当センターの植松総長による開会挨拶では、水は生活と社会活動の基盤であり、断水は飲料水のみならず衛生的な環境や日常生活全般に深刻な影響を及ぼすこと、能登半島地震では地下水や民間井戸が重要な役割を果たしたこと

表1 セミナーの開催日時・プログラム

開催日時	2026年2月17日(火)
開催方法	Microsoft TeamsによるWeb会議方式
プログラム	
開会挨拶	埼玉県環境科学国際センター 総長 植松光夫
講演1	石川県七尾市における井戸活用実態調査 大阪公立大学 現代システム科学研究科 教授 遠藤崇浩
講演2	石川県七尾市における断水時の運搬給水 とボトル水提供 埼玉県環境科学国際センター 土壌・地下 水・地盤担当 主任研究員 柿本貴志
講演3	災害時地下水利用ガイドライン改訂の紹介 内閣官房水循環政策本部事務局 国土交通省 水管理・国土保全局 水資源 部 水資源政策課 企画専門官 佐藤直哉
講演4	生活用水確保の取組 一上尾市災害時協力井戸制度についてー 上尾市総務部危機管理防災課 主任 佐久間光瑞
総合討論 閉会	

が述べられた。あわせて、平時からの準備や運用体制整備の重要性を再確認し、本セミナーの成果が具体的な断水対策の推進に繋がることへの期待が示された。以下では、本セミナーで行われた講演の概要を紹介する。

2. 1 講演1「石川県七尾市における井戸活用実態調査」の概要

遠藤教授は、2018年度以降取り組んできた災害時地下水利用研究の一環として、能登半島地震における七尾市での井戸利用実態を報告した。

2. 1. 1 調査の背景と方法

七尾市では約2万戸が断水し、完全復旧まで約3か月を要した。一方、停電は比較的早期に解消され、“水道が使えないが電気は使える期間”が存在した。この期間に、地域の井戸水利用が顕著に拡大した。

調査は、井戸水を提供した「配り手」へのアンケートおよび井戸水の「貰い手」アンケートにより実施され、短期間に終わり、公的な記録に残りづらい災害時井戸利用について、初めて体系的なデータ収集が行われた。

2. 1. 2 主な調査結果

主な調査結果は以下のとおりである。

- ・配り手の約7割が大きなトラブルなく井戸水を提供
- ・井戸所有者の約85%が発災後3日以内に井戸水提供を開始
- ・行政主導ではなく、住民の自主的判断による提供が中心
- ・市民間で井戸情報が掲示や口コミにより共有された
- ・井戸水の用途は、トイレ、洗濯、食器洗いなど生活用水としての利用が中心であり、飲料水はペットボトル水を活用する傾向がみられた。

2. 1. 3 有用性と政策的示唆

井戸水を利用した回答者の約99%が「役に立った」と評価し、約75%が「井戸がなければ自宅生活は困難だった」と回答した。井戸利用は、自宅避難の継続を可能にし、避難所の過密化を抑制する効果を持つと考えられた。

今後の課題として、災害時に利用可能な井戸の事前把握・登録、情報共有の仕組みづくり、井戸所有者への支援や事前登録のインセンティブの検討、平常時からの利用(フェーズフリー)の重要性が指摘された。

2. 2 講演2「石川県七尾市における断水時の運搬給水とボトル水提供」の概要

七尾市総務課・上下水道課等から提供されたデータおよび関係者へのヒアリングを基に、給水車による運搬給水量、ボトル水配布量、給水対象施設、一人当たり給水量の分析を行った。

主な調査結果は以下のとおりであった。

- ・給水車による最大給水量は1日約296立方メートル
- ・ボトル水配布量は最大で1日約40立方メートル
- ・「1人1日3L」の目標給水量には多くの日で到達せず

給水車の運行担当者が、給水所における住民対応を行うことになったことや、交通渋滞などにより給水車の稼働効率が低下することが示唆された。また、病院など重要給水施設への給水量が多く、同施設において断水時の水の備えをしておくことが、市全体の水需給バランスを考えるうえで重要であると考えられた。

また、運搬給水とボトル水配布のみでは生活用水需要を十分に満たすことは困難であり、井戸など分散型水源の併用が不可欠であることが示唆された。

2. 3 講演3「災害時地下水利用ガイドライン改訂の紹介」の概要

能登半島地震での長期断水を受け、地下水を代替水源として円滑に活用するため、自治体向けガイドラインが策定（2024年3月）・改定（2025年12月）された。同ガイドラインでは、防災井戸制度（埼玉県では災害時協力井戸等の名称が多い）を円滑に導入できるように、要綱などのひな型とともに、活用できる補助金を示している。またガイドラインの改定では、公共による新設井戸整備の考え方や、被災後に迅速に井戸を整備するための手順・留意点が充実した。ガイドラインの普及を通じて、防災計画への地下水活用の位置づけを強化し、平常時からの点検や訓練での活用が重要であることが示された。

2. 4 講演4「生活用水確保の取組―上尾市災害時協力井戸制度について―」の概要

2. 4. 1 制度の概要

上尾市では、災害時に生活用水を地域住民に提供する「災害時協力井戸制度」を令和6年9月から開始している。井戸所有者の申請に基づき、市が現地調査と水質検査を行い、登録井戸には標識を設置する仕組みである。

2. 4. 2 運用状況

令和8年2月時点で登録件数は142件に達しており、市ホームページや広報誌、回覧チラシ等を通じた周知が登録井戸数の増加に効果を上げているとのことであった。

上尾市では水質検査を実施しているが、これは井戸所有者の制度登録によるメリット、登録動機として位置付けているものである。井戸水質の結果によって、生活用水としての利用可否を市が判断するために実施しているものではないと説明された。

2. 5 総合討論

水質検査費用（1件約1万円）や予算規模、登録件数の見通しの立て方、協力井戸所有者へのインセンティブについて意見交換が行われた。補助金、感謝状、無料水質検査など、全国の事例紹介を通じて、制度普及に向けた多様な工夫の必要性が共有された。

3 事後アンケートの結果と考察

3. 1 セミナー全体の評価

セミナー後にアンケートを実施し、26の有効回答を得た。本セミナーの満足度を尋ねた結果を図1に示す。「普通」という回答が23%あったが、「満足」、「とても満足」の合計で77%を占め、満足度の高いセミナーになったと考えられた。このほか、内容の分かりやすさ（図2）、内容の理解度（図3）ともに、良好な評価が得られており、プログラム構成や、講演のレベル感ともに、参加者の期待に十分応えられたと思われた。

3. 2 参加者が今後検討してみたいこと

本セミナーを企画した意図は、2に記したとおり、情報を提供することにより、参加者それぞれの立場から断水時の生活用水確保対策を少しでも進めていただくことであった。その観点から、今後検討してみたい内容を尋ねたところ、「関係部署・関係機関との連携強化」、「自治体内での情報共有・意識啓発」、「地下水の災害時利用に関する検討」の活動が上位となり（図4）、何らかの行動の動機形成に資する結果となった。

行動計画理論²⁾によると、行動は行動意図（行動したい気持ち）の影響を受け、行動意図は、①態度（その行動を良いと思っているか）、②主観的な規範（特定の行動を実行するべきか否かに関する周囲の期待についての個人の認識）、③行動統制感（その行動が自分に行えると思うか）の3つの要因の影響を受けるとしている（図5）。

本セミナーでは、①態度を形成する情報として、講演1、講演2を、②主観的な規範を形成する情報として講演3を、③行動統制感を形成する情報として講演4をそれぞれ位置付けて開催した。その結果、何らかの行動を起こそうとする動機形成を支援できたと思われる。

3. 3 参考になった点・印象に残った点

参考になった点・印象に残った点を自由記述により回答していただいたところ、11件のコメントを得た。それらを分類し、要点をまとめた結果を表2に示す。

「被災地の実態調査結果が分かりやすく、地下水の有用性が理解できた」、「被災地事例から自市の災害時協力井戸登録制度の正当性が確認できた」、「地下水利用ガイドラインは、色々な条件を検討して作成されている」など、ポジティブな評価・学習点を挙げる回答があった（分類1、4、5、6）。災害対応の課題として、「給水量の不足」、「運搬効率の悪さ」、「生活用水需要量の増大に対する事前認識の不足」、「民間井戸所有者に対する行政のアプローチが消極的であること」などが指摘された（分類2、3）。応急給水の給水能力が需要量に対して不足していることを十分に認識したと示唆されるコメントが多く、各組織における取組の進展が期待される内容であった。

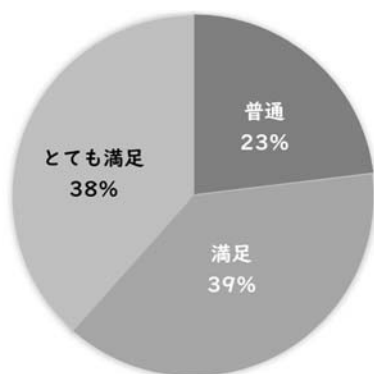


図1 本セミナーの満足

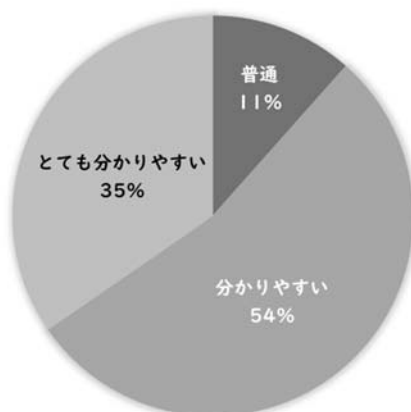


図2 セミナーの内容の分かりやすさ

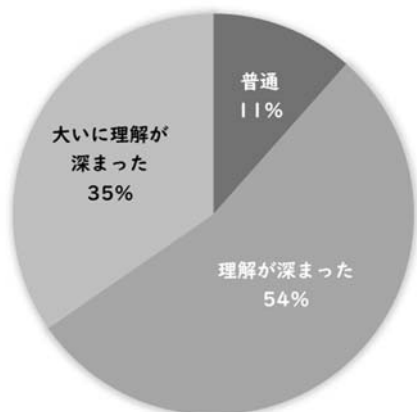


図3 内容の理解度

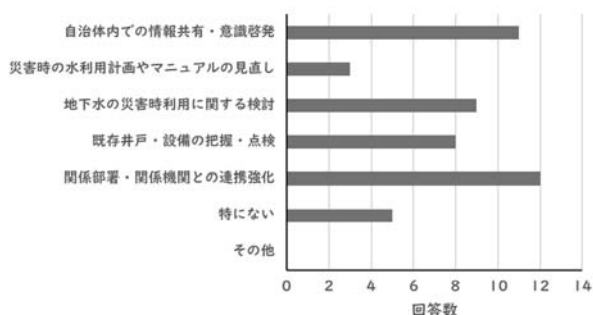


図4 今後検討してみたい内容

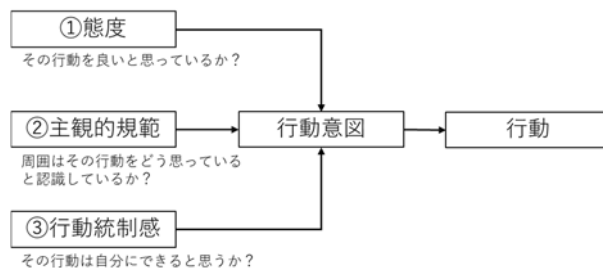


図5 行動意図の形成要因

表2 参考になった/印象に残った点の意見分類と主な内容

	分類	主な内容
1	現地調査・実態把握の価値	被災地や井戸活用実態の詳細な情報提供が良かった
2	給水活動の課題・改善提案	給水量不足、生活用水の需要量が増加すること、
3	井戸活用制度への期待	発災後の民間井戸の自発的開放、行政の取り組み強化への期待
4	行政施策・マニュアル評価	地下水利用ガイドライン策定を評価、上尾市の取り組みの妥当性
5	生活用水対応事例	上尾市の取り組みが参考になる
6	セミナー全般の評価	分かりやすい、有意義

3. 4 課題や悩み、今後知りたいこと

災害時の地下水利用に関する課題や悩み、今後知りたいことを自由回答により回答していただいたところ、10件の回答を得た。これらの回答を整理・分類した結果を表3に示す。

課題としては、部局横断的な連携不足、生活用水確保策に係る予算確保の課題、生活用水確保施策を考える担当課が無いこと、井戸減少、井戸水利用により利用者に被害が発生した場合の法的責任に関することが挙げられた。

悩みとしては、地下水利用による地盤沈下発生に関することや、生活用水として用いてよい水質基準が明らかにされていないことが挙げられた。

今後知りたいこととしては、生活用水確保のための井戸密度、被災地における用途別水量データ等の井戸計画、給水計画に関することが挙げられた。また市町村内で井戸を保有する企業のデータ、井戸所有者の個人情報の取扱いに係る先進的な取り組み、専用水道の活用可能性に係る事例が挙げられた。

これらを構造的に整理し、今後セミナーを企画する際の切り口として参考にする。

表3 課題や悩み・今後知りたいことの意見分類と主な内容

	内容	問題の性質
課題	部局横断的な連携不足、予算化が進まない、生活用水担当課が無い	組織体制 予算の問題
	市街地拡大で井戸減少 井戸水提供による被害の法的責任が不明確	都市計画 法務・責任体制
	内容	対立軸
悩み	地下水利用の推進と地盤沈下	環境保全 vs 地下水利用
	生活用水の水質基準	水需要 vs 衛生
	内容	対応
知りたいこと	人口密度と井戸密度の目安値	井戸計画
	被災地での水利用実態データ（用途別水量データ）	給水計画
	民間企業の井戸情報	協力井戸の拡大
	井戸所有者の個人情報の取り扱い 専用水道の活用可能性	制度設計 水源確保

4 まとめ

令和6年能登半島地震において顕在化した長期断水の課題を踏まえ、災害時における生活用水確保のあり方、地下水・井戸水の活用について最新の知見を共有し、今後の自治体施策に活かすことを目的として、セミナーを開催した。セミナー後のアンケート調査の結果から、参加者からは好評を得ることができ、各々の組織において、生活用水確保のための何らかの検討をするという行動意図の形成にも役立つ内容であったことが示唆された。一方で、災害時の生活用水確保のために井戸を活用する施策は、内閣官房からガイドラインが公表されたものの、基礎自治体においては、まだ解決しなければならない課題があることがうかがわれた。当センターでは、このような基礎自治体の抱える課題に対して、今後も調査・研究・情報発信を行うことにより、断水に対しても強靱性が高い地域を形成することを支援する。

文 献

- 1) 遠藤崇浩、柿本貴志、谷口真人（2025）令和6年能登半島地震：災害時井戸水利用に関する住民アンケート調査報告書（石川県七尾市）https://researchmap.jp/endo.takahiro/misc/51042784/attachment_file.pdf
- 2) Ajzen, I. (1991) The theory of planned behavior. Organizational behavior and human decision processes, Vol.50, Issue 2, pp.179-211.