

公益財団法人 旭酒造記念財団

2025 年度 研究助成 報告書

雨水（あまみず）の積極的上水利用に向けた
水質浄化手引きの策定と水質管理アプリの開発

2025 年度 研究報告書（最終報告）

研究代表 中央大学 社会理工学部 人間総合理工学科

山 村 寛

2026 年 7 月

目 次

1. Introduction.....	4
1. 1 本研究の背景.....	4
1. 2 2024 年度（初年度）の到達点.....	4
1. 3 2025 年度（最終年度）の位置づけと本報告の構成.....	5
2. 水質管理アプリ「WATER IN」の開発.....	6
2. 1 開発の背景と要求仕様.....	6
2. 2 測定フローの全体設計.....	7
2. 3 照明正規化 — 「真の色」の復元.....	8
2. 4 呈色アルゴリズムと色空間の選択.....	10
2. 5 アプリの基本設計.....	14
2. 6 精度の検証.....	17
2. 7 今後の展開 — 遊離残留塩素および硝酸態窒素.....	18
3. 雨水ろ過装置の新規製作・導入とモバイル型装置の開発.....	21
3. 1 設計思想.....	21
3. 2 構築した 5 系統の概要.....	22
3. 3 水質検査による検証.....	25
3. 4 浄水処理システム選定フローに向けて.....	25
4. 新規導入候補地点における貯留雨水の水質評価.....	26
4. 1 調査の目的.....	26
4. 2 方法.....	26
4. 3 結果.....	27
4. 4 考察.....	28
5. 研究成果の国際発信 — Springer 単行本の執筆・出版.....	30
5. 1 書籍の概要.....	30
5. 2 章の構成と分担.....	30
5. 3 執筆・出版の経緯.....	31
5. 4 本章で提示した限界（Limitations）.....	32
5. 5 本章で提示した今後の研究課題.....	33
6. 総合考察 — 本研究の最終成果と展望.....	33
6. 1 申請時に掲げた 4 課題に対する到達状況.....	33

6. 2 本研究が明らかにした 3 つの本質的知見.....	34
6. 3 残された課題.....	36
6. 4 展望 — 雨水を中心とした新たな水循環に向けて	37
7. Conclusion	37
参考文献	38
付録.....	40
付録 A 新規導入候補地点（武蔵野市・立川市 10 地点）の金属濃度 全測定値.....	40
付録 B WATER IN 検量モデルの全係数.....	41
付録 C 構築した雨水ろ過システム 一覧.....	42
付録 D 2025 年度 主要な活動記録.....	43
謝辞.....	44

1. Introduction

1. 1 本研究の背景

地球温暖化に伴う海水温の上昇は、大気中の水蒸気量を増加させる一因と考えられている。日本の年間降水量はほぼ横ばいであるものの、1 時間あたり 100 mm を超える短時間強雨の発生回数は増加傾向にあり、降雨の局地化・集中化・激甚化が進行しつつある。都市部において特に問題となるのが内水氾濫であり、その対策として、雨水を発生源で貯留する流域対策の重要性が高まっている。

東京都墨田区では、区内 801 箇所・総容量 26,780 m³ に及ぶ雨水タンクが設置されており、理論上、東京都の豪雨対策目標（10 mm/hr）の 2 割に相当する約 2 mm の降雨を抑制するポテンシャルを持つ。しかし、この治水ポテンシャルは、タンクに空き容量があってもはじめて発揮されるものであり、利用が進まず満水状態のままでは流出抑制は機能しない。

雨水利用が進まない根本的な原因は、衛生上の懸念と、それに根差した文化的・心理的な抵抗にある。この課題に対し、本研究は「雨水タンクによる流出抑制効果の最大化」を目的として、ハード（技術）とソフト（人の意識）の両面から 2 か年にわたるアプローチを行ってきた。

1. 2 2024 年度（初年度）の到達点

初年度である 2024 年度は、主として貯留雨水の「リスクの見える化」に取り組み、以下の成果を得た。

1. **心理的阻害要因の特定**：2024 年 8 月開催の「雨水フェスティバル」来場者 121 名を対象とした自由記述式アンケートをテキストマイニング（KH Coder）により解析し、雨水利用に対する不安が①ガス由来の大気汚染物質、②微粒子由来の大気汚染物質、③化学物質由来の大気汚染物質、④病原性微生物の 4 カテゴリーに大別されること、なかでも「微粒子由来の大気汚染物質（PM2.5、黄砂など）」への懸念が最大であることを明らかにした。
2. **科学的リスク因子の抽出**：墨田区内の公共雨水タンク 29 基（路地尊 12 箇所、区・都管理 17 箇所）を 8 区画に分けて網羅的に水質分析した結果、水道水質基準を超過しうるリスク因子が「濁度」「pH」「溶存態アルミニウム（Al）」「溶存態マンガン（Mn）」の 4 項目に集約されることを特定した。一方で、鉛やカドミウム等の重金属による健康リスクは極めて低いことも確認した。
3. **簡易リスク評価手法の提案**：Al 濃度は pH と比較的高い相関（相関係数 = 0.66）を示し、pH ≤ 8.2 を確認することで Al の基準値超過を推定できる可能性を示した。Mn については、濁度と溶存酸素（DO）から基準値超過を推測できる可能性を示した。
4. **飲用レベルへの到達可能性の実証**：適切な水源（タンク）を選定し、衛生管理下で UF 膜（孔径 100 kDa、PAN 製中空糸膜）処理を施すことにより、貯留雨水が水道水質基準 51 項目をすべて満たす飲用水レベルに到達可能であることを、代表 5 試料を用いた外部機関委託分析により実証した。

初年度の成果は、「どのタンクの水が、どのようなリスクを持ち、どう処理すれば飲めるようになるか」という問いに、科学的な回答を与えるものであった。しかしながら、この知見を市民が日常的に活用するためには、なお2つの大きな隔たりが残されていた。

第一に、**リスク評価の担い手の問題**である。初年度に特定したリスク因子のうち、pH や濁度は市民でも測定可能である一方、その測定には試験紙の目視読み取りという主観的な工程が介在し、記録・共有・時系列比較のいずれもが困難であった。「誰でも、どこでも、正確に」水質を把握する手段がなければ、リスク評価の知見は研究者の手元に留まってしまう。

第二に、**浄水技術の実装の問題**である。UF 膜処理が有効であることを実験室レベルで示したとしても、それが実際の生活の場に設置され、市民の手で運用され、その処理水が継続的に安全であることが確認されなければ、社会実装とは言えない。

1. 3 2025 年度（最終年度）の位置づけと本報告の構成

以上を踏まえ、最終年度である 2025 年度は、初年度に得た科学的知見を「市民の手に渡る道具」へと変換することを主眼とし、以下の3つの柱に取り組んだ。

第一の柱は、水質管理アプリ「WATER IN」の開発である（本報告 第 2 章）。これは申請時の課題 3「リスク項目を簡易かつ高精度にスマートフォンで評価できる水質測定アプリの開発」に対応する、本年度の中核的成果である。本章では、比色定量のモデル式をゼロから構築した経緯、呈色アルゴリズムと色空間の選択、アプリの基本設計、精度検証、そして今後の残留塩素・硝酸態窒素への展開について詳述する。

第二の柱は、雨水ろ過装置の新規製作・導入と、モバイル型装置の開発である（本報告 第 3 章）。申請時の課題 2「小型分散型浄水処理により、貯留雨水を上水に水質変換するための技術を確立し、手引きとしてまとめる」に対応する。定置式 4 系統に加え、可搬式（モバイル型）1 系統を新たに開発し、実地で運用した。

第三の柱は、研究成果の国際発信である（本報告 第 5 章）。Springer Nature 社の書籍シリーズ Springer Water の単行本の 1 章として、東京における雨水活用に関する成果を執筆・出版した。申請時の課題 4「市民との交流を通じて、雨水の上水利用における社会的許容を決定する因子を探索」の成果を、国際的な学術コミュニティに向けて発信するものである。

これらに加え、新規導入地点における貯留雨水の水質評価（第 4 章）を実施し、初年度の墨田区（低地）とは異なるリスクプロファイルが武蔵野台地側に存在することを新たに見出した。第 6 章では、申請時に掲げた 4 課題に対する 2 か年の到達状況を総括し、本研究の最終的な成果と今後の展望を述べる。

2. 水質管理アプリ「WATER IN」の開発

2. 1 開発の背景と要求仕様

2. 1. 1 なぜアプリなのか

初年度の調査により、貯留雨水を飲用利用する際のリスク因子として、濁度・pH・Al・Mn の4項目が抽出された。このうちAlはpHから、Mnは濁度と溶存酸素から推定できる可能性が示されたことは、裏を返せば、**pHと濁度さえ市民が正確に測定できれば、機器分析なしにリスクの大半を管理できる**ことを意味している。

pHの簡易測定手段として最も普及しているのは、pH試験紙である。安価（1枚あたり数円）で、電源も校正も不要であり、市民が日常的に用いるうえで理想的な特性を持つ。しかし試験紙には、次の3つの本質的な弱点がある。

1. **主観性**：発色したパッドの色を、パッケージに印刷された基準色票（カラーチャート）と目視で照合するため、判定は読み手の色覚特性、照明条件、経験に左右される。同じ試験紙を複数人が読めば、しばしば1pH単位以上の差が生じる。
2. **粗い分解能**：基準色票は通常1pH刻みであり、それ以上の分解能を目視で得ることは難しい。しかし本研究で問題となるpH8.2（Al基準値超過の閾値）やpH8.6（水道水質基準の上限）といった判断は、まさにその「刻みの間」で行われる。
3. **記録の欠落**：読み取った値は紙に書き留めるほかに、時系列の変化や、地域全体での空間分布を把握することは事実上不可能である。

これらはいずれも、「試験紙の色」というアナログ情報を、「数値」というデジタル情報に変換する工程が人間の目に委ねられていることに起因する。スマートフォンのカメラは、この変換工程を機械化できる。すなわち、**試験紙を撮影するだけで、pHを数値として得て、日時・位置情報とともに自動的に記録・共有することができれば、上記3つの弱点は同時に解消される**。これが本アプリ「WATER IN」の開発動機である。

2. 1. 2 先行技術の限界と、本研究が乗り越えるべき壁

スマートフォンによる比色定量そのものは、新規なアイデアではない。しかし、既往の試みの多くは実用に耐えていない。Topping & Kolok (2021) は、市販の硝酸試験紙とスマートフォンアプリを組み合わせた測定において、アプリによる判定が**目視判定よりも有意に不正確**であったことを報告している。とりわけ15ppmの試料では、目視の正答率が100%であったのに対し、アプリの正答率は24~44%にとどまった。

この失敗の原因は明確である。**照明条件と撮影角度に対する脆弱性**である。同じ試験紙であっても、電球色の室内、曇天の屋外、蛍光灯下では、カメラが記録するRGB値は大きく異なる。スマートフォンのオートホワイトバランスは、この差を「補正」しようとするが、その補正量は撮影シーンの内容に依存して変動するため、かえって予測不可能な色ずれを生む。撮影された色をそのまま濃度に換算すれば、照明が変わるたびに答えが変わってしまう。

したがって、本アプリが乗り越えるべき壁は、次の一点に集約される。

その場の照明がどのようなものであっても、試験紙の「真の色」を復元できること。

この壁を越えるために本研究が採った方策が、次節以降で述べる「参照色票併写方式」である。

2. 1. 3 要求仕様

以上の分析に基づき、アプリの要求仕様を以下のように定めた。

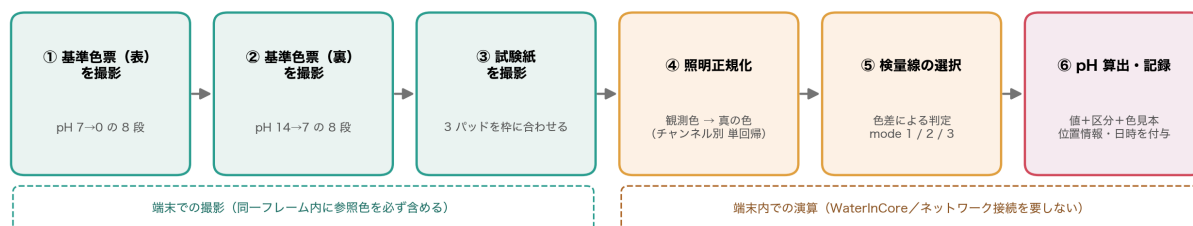
項目	要求仕様	根拠
測定対象	pH（第一段階）、遊離残留塩素・硝酸態窒素（拡張）	初年度に抽出したリスク因子と、その簡易代替指標
測定原理	市販 pH 試験紙の比色定量	安価・無電源・入手容易。市民が日常的に使える
照明ロバスト性	屋内外・時刻を問わず同一の値を返すこと	先行技術の最大の失敗要因を排除する
端末非依存性	機種・画面サイズによらず同一の値を返すこと	市民の多様な端末での利用を想定
演算場所	端末内で完結（ネットワーク接続を要しない）	災害時・屋外での利用を想定
記録	日時・位置情報を自動付与し、履歴として保存	時系列変化と空間分布の把握
共有	測定点を地図上で共有	地域全体での水質マップの形成
判定不能の明示	信頼できない測定は値を返さず、撮り直しを促すこと	誤った安心を与えないため
費用	利用者負担なし	市民への普及を最優先

最後の 2 項目は、水質という「安全に直結する情報」を扱うアプリとして、とりわけ重視した。誤った値を自信ありげに表示することは、値を返さないことよりも有害である。

2. 2 測定フローの全体設計

図 2-1 に、WATER IN の測定フローを示す。利用者が行う操作は「3 回の撮影」のみであり、それ以降の 4 工程はすべて端末内で自動的に実行される。

図 2-1 WATER IN の測定フロー（撮影 3 ステップ + 演算 3 ステップ）



特徴的なのは、**測定のたびに、試験紙パッケージに印刷された基準色票を必ず撮影させる点**である（ステップ①②）。一見すると冗長な手順であるが、これこそが照明ロバスト性を担保する中核的な仕組みである。基準色票は「その色が何であるべきか」が既知の物体であり、これを対象試験紙と同じ照明条件下で撮影することで、**その場の照明が色をどれだけ歪めているかを、その場で実測できる**。

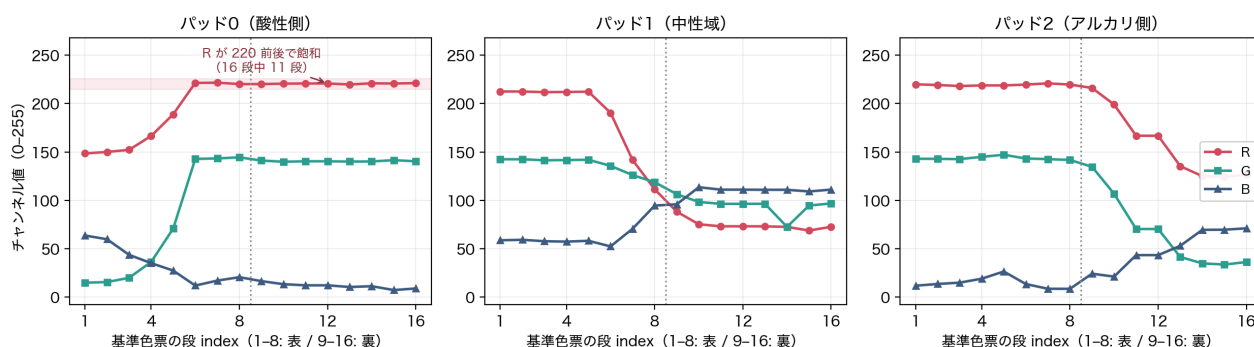
撮影された基準色票は、表面（pH 0～7 側の 8 段）と裏面（pH 7～14 側の 8 段）を合わせて計 16 段となる。各段には 3 つのパッド（酸性側・中性域・アルカリ側に対応）が並んでおり、したがって 1 回の測定で 3 列 × 16 段 = 48 セルの参照色が取得される。

2. 3 照明正規化 — 「真の色」の復元

2. 3. 1 真の色の基準（教師データ）

照明補正の基準となるのは、**理想的な照明条件下で実測した、基準色票 48 セルの「真の RGB 値」**である。これはアプリ内に定数表として保持される、本研究における唯一の実験由来の色資産である。図 2-2 に、3 つのパッド列それぞれについて、16 段にわたる R・G・B の真値を示す。

図 2-2 pH 試験紙パッケージの基準色票から取得した「真の RGB」表（照明正規化の教師データ）



この図からは、3 つのパッドがそれぞれ異なる pH 域で応答することが読み取れる。パッド 0（酸性側）は段 index 1～6（pH 0～5 相当）で急峻に変化した後、それ以降は一定値に飽和する。パッド 1（中性域）は段 index 5～10（pH 4～9 相当）で最も大きく変化する。パッド 2（アルカリ側）は段 index 9～16（pH 8～14 相当）で変化する。3 つのパッドの応答域を重ね合わせることで、pH 0～14 の全域をカバーする設計となっている。

同時に、この図は**モデルの精度を制約する物理的な限界**も示している。パッド 0 の R チャンネルは、16 段のうち 11 段で 220 前後に飽和しており（図中の網掛け領域）、この領域では R チャンネルが pH の情報をまったく持たない。すなわち、パッド 0 の R チャンネル単独では、pH 5 以上を判別することが原理的に不可能である。これは試験紙の発色特性と sRGB の 8 ビット量子化に由来する制約であり、後述する「複数の色差を平均する」設計は、この制約を回避するための工夫である。

2. 3. 2 正規化のアルゴリズム

照明正規化は、**チャンネルごとに独立な一次式（単回帰）**によって行う。これは色順応理論における von Kries 型の変換に相当する、最も単純かつ頑健な定式化である。

いま、対象パッドが属する列 p について、同一フレーム内で撮影された基準色票 16 段の観測 RGB 値を $x_1, \dots, x_{16}$ 、対応する真の RGB 値を $y_1, \dots, y_{16}$ とする。R・G・B の各チャンネルについて、最小二乗法により

$$y = a \cdot x + b, \quad a = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\text{Var}(x)}, \quad b = \bar{y} - a\bar{x}$$

を求め、この式を対象試験紙のパッド色 x_{target} に適用することで、正規化後の色

$$\hat{x}_{\text{target}} = a \cdot x_{\text{target}} + b$$

を得る。図 2-3(a)に、この回帰の概念を示す。照明差がまったくなければ回帰直線は $y = x$ （傾き 1・切片 0）に一致し、暖色系の照明下では R チャンネルの傾きが 1 を下回る、といった形で照明の影響が定量化される。

図 2-3 参照色票併写方式による照明正規化（チャンネル別・単回帰）（概念図）

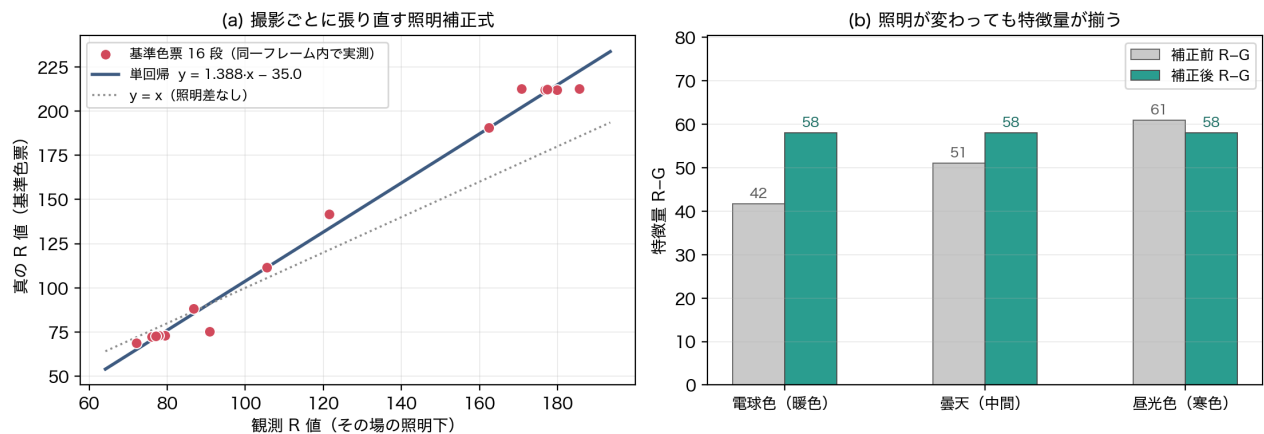


図 2-3(b)は、この正規化がもたらす効果を示している。同一の試験紙を電球色・曇天・昼光色の 3 条件で撮影した場合、補正前の特徴量 (R-G) は 42・51・61 と大きくばらつくが、補正後はいずれも同一の値に収束する。この「撮影ごとに補正式を張り直す」設計こそが、先行技術が越えられなかった照明の壁に対する本研究の回答である。

なお、この方式の有効性は国外の先行研究とも整合する。基準色を同一フレームに併写する手法により、機種をまたいだ比色定量の決定係数が $R^2 = 0.76 \sim 0.89$ から $0.89 \sim 0.95$ へと改善したことが報告されている (Analytica Chimica Acta, 2026)。

2. 3. 3 撮影領域 (ROI) の決定 — パッド検出をしない設計

比色定量アプリの多くは、画像認識によって試験紙のパッド位置を自動検出する。本アプリはこれを採用せず、画面上の撮影ガイド枠に対する固定比率でパッド領域を切り出す方式を採った。利用者は、画面に表示された枠に試験紙を合わせて撮影する (図 2-8 の「撮影ガイド枠」を参照)。

この設計を選んだ理由は 3 点ある。

1. 失敗モードが利用者に見える：パッド検出が失敗した場合、利用者にはその事実が分からない。一方、枠合わせであれば、ずれていることは撮影時に本人が視認できる。

2. **演算が軽量・確定的**：画像認識の推論が不要であり、旧機種でも遅延なく動作する。同じ写真からは常に同じ値が得られる。
3. **端末サイズに依存しない**：切り出し座標をすべてガイド枠の幅 W に対する比率で定義したため、画面サイズが異なっても抽出位置は相対的に不変となる。実測により、プレビュー幅 324～402 pt の範囲で出力が完全に一致することを確認している（スケール不変性）。

対象試験紙の 3 パッドは、枠幅 W に対して $x = 41.53\%W$ の位置に、 $y = 40.48 / 52.61 / 65.08\%W$ 、サイズ $8.99\%W \times 8.11\%W$ の矩形として切り出される。基準色票側も同様に、3 列 $\times$ 8 段の各セルが固定比率で定義されている。ガイド枠の描画に用いる座標と、色を抽出する座標が完全に一致していることは、自動テストによって恒常的に検証している。

2. 4 呈色アルゴリズムと色空間の選択

本節は、本研究において最も試行錯誤を要した部分である。

2. 4. 1 なぜ色相（HSV）ではなく、RGB チャンネル差なのか

試験紙の発色を数値化する際、直感的には HSV 色空間の**色相（Hue）**を用いることが有力な候補となる。色相は「色味」を 1 次元の角度で表現し、明るさ（Value）や鮮やかさ（Saturation）から分離されているため、照明の明暗の影響を受けにくいと期待されるからである。実際、本研究でも開発の初期段階において色相ベースの定式化を検討した。

しかし、**最終的に実装されたアルゴリズムは、色相を使用していない**。用いているのは、sRGB 空間における 3 つの**チャンネル差**、すなわち

$$\Delta_{RG} = R - G, \quad \Delta_{RB} = R - B, \quad \Delta_{GB} = G - B$$

である。この選択に至った理由は以下のとおりである。

理由 1：本試験紙の発色は、色相環上の回転ではなく、チャンネル間コントラストとして現れる。図 2-2 を再度参照されたい。パッド 0 の変化は、 R が $148 \rightarrow 221$ へ上昇する一方で G が $15 \rightarrow 144$ へ上昇するという、 **R と G が同方向に動きながら、その差が縮まる形をとる**。パッド 2 では R が $220 \rightarrow 125$ へ下降し、 G が $143 \rightarrow 36$ へ下降する。このような「両チャンネルが同方向に動き、差が変化する」応答は、色相角では十分に表現されない。色相は R, G, B の最大値・最小値のみから計算されるため、中間チャンネルの情報が捨てられてしまうためである。

理由 2：差分をとることで、**輝度成分が部分的に相殺される**。照明が全体に明るくなった場合、 $R \cdot G \cdot B$ はいずれも増加するが、その差 $R - G$ の変化は相対的に小さい。すなわち、チャンネル差は色相ほどではないにせよ、輝度に対して一定の頑健性を持つ。しかも、色相と異なり全チャンネルの情報を保持している。

理由 3：照明正規化を先に行うため、**色空間による輝度不変性への依存度が低い**。本アプリは前節の参照色票併写方式により、色そのものを真値へ還元している。この工程を経た後であれば、輝度不変性は正規化によってすでに担保されているため、色空間側でそれを重ねて確保する必要がない。むしろ、情報を捨てない素直な特徴量のほうが望ましい。

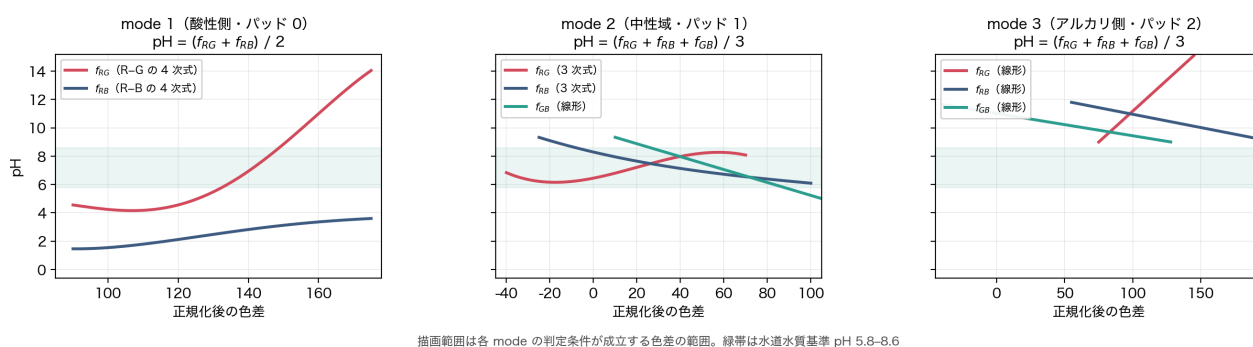
理由 4：判定不能の検出が容易である。 3 つのチャンネル差を独立に監視することで、「どの検量線にも当てはまらない色」を検出できる（後述の mode 4）。色相角のみを見る場合、無彩色（灰色）に近い色でも何らかの角度が算出されてしまい、失敗を検出しにくい。

なお、HSV の彩度（S）および L*a*b*色空間の a* 成分については、後述する硝酸態窒素版のモデル構築において、有力な候補特徴量として検討対象に含めている（2.7 節）。硝酸試験紙は Griess 反応に基づくピンク～赤紫の単調な発色を示すため、pH 試験紙とは発色の性質が異なり、色相系の特徴量が有効に機能する可能性がある。色空間の選択は、対象とする呈色反応の性質に応じて行うべきものであり、普遍的な最適解は存在しないというのが、本研究を通じて得られた知見である。

2. 4. 2 検量モデルの構築

正規化後の色差から pH を算出する検量モデルは、**3 本の検量線を色差によって切り替える**構造をとる。図 2-4 に、実装されている 3 本の検量線を示す。

図 2-4 正規化後 RGB の色差を説明変数とする pH 検量モデル（3 本の検量線を色差で切り替える）



各検量線は、対応するパッドの 3 つのチャンネル差を説明変数とする多項式回帰の**平均**として定義される。

mode 1（酸性側・パッド 0）：R チャンネルの飽和（2.3.1 節）を避けるため、G-B を用いた推定を平均から除外し、2 式の平均をとる。

$$\text{pH} = \frac{f_{RG}(\Delta_{RG}) + f_{RB}(\Delta_{RB})}{2}$$

$$f_{RG}(x) = -4 \times 10^{-7}x^4 + 2 \times 10^{-4}x^3 - 0.0347x^2 + 2.5171x - 60.471$$

$$f_{RB}(x) = 5.907 \times 10^{-8}x^4 - 3.687 \times 10^{-5}x^3 + 8.307 \times 10^{-3}x^2 - 0.7737x + 26.811$$

mode 2（中性域・パッド 1）：3 式の平均をとる。水道水質基準（pH 5.8～8.6）が含まれる、実用上最も重要な領域である。

$$\text{pH} = \frac{f_{RG}(\Delta_{RG}) + f_{RB}(\Delta_{RB}) + f_{GB}(\Delta_{GB})}{3}$$

$$f_{RG}(x) = -1 \times 10^{-5}x^3 + 6 \times 10^{-4}x^2 + 0.0303x + 6.4479$$

$$f_{RB}(x) = -6 \times 10^{-7}x^3 + 2 \times 10^{-4}x^2 - 0.0360x + 8.2927$$

$$f_{GB}(x) = -0.0456x + 9.7907$$

mode 3（アルカリ側・パッド 2）：3 式の平均をとる。すべて線形式である。

$$f_{RG}(x) = 0.087267x + 2.452448$$

$$f_{RB}(x) = -0.018725x + 12.833116$$

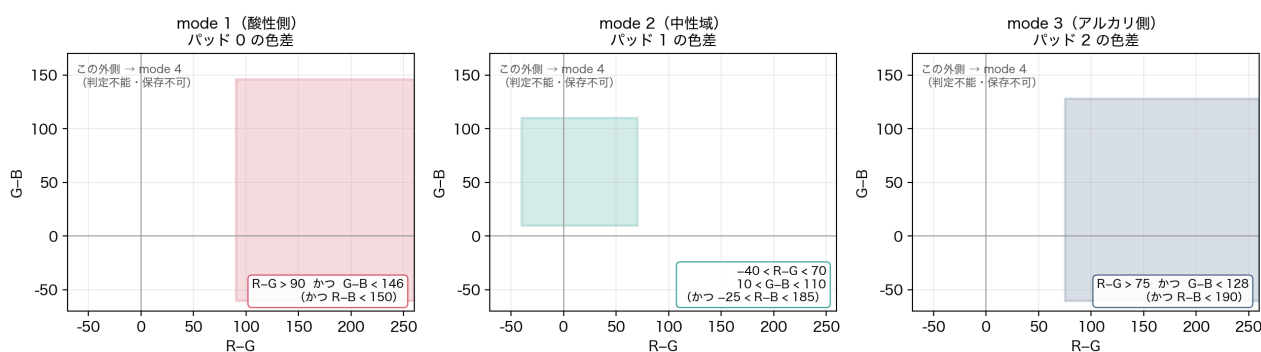
$$f_{GB}(x) = -0.015696x + 11.013066$$

複数の式の平均をとる設計は、単一のチャンネル差に依存することのリスク（特定チャンネルの飽和、印刷ムラ、局所的な反射）を分散させるためのものである。とりわけ **mode 1** において G-B を明示的に除外している点は、本研究における重要な設計判断であり、その経緯を 2.4.4 節で述べる。

2. 4. 3 どの検量線を使うかの判定

3 本の検量線のうちどれを用いるかは、3 つのパッドすべての色差を評価する決定木によって決まる。図 2-6 に、判定条件を色差空間上の領域として図示する。

図 2-6 どの検量線を使うかを定める判定条件（3 パッドの色差による決定木）



判定は上から順に評価され、最初に条件を満たした **mode** が採用される。

- **mode 1**：パッド 0 について、 $(R-G) > 90$ かつ $(G-B) < 146$ かつ $(R-B) < 150$
- **mode 2**：パッド 1 について、 $-40 < (R-G) < 70$ かつ $-25 < (R-B) < 185$ かつ $10 < (G-B) < 110$
- **mode 3**：パッド 2 について、 $(R-G) > 75$ かつ $(R-B) < 190$ かつ $(G-B) < 128$
- **mode 4**：上記のいずれにも該当しない場合 → 判定不能

mode 4 は、単なる「その他」ではなく、**積極的な安全機構**である。試験紙が正しく写っていない、照明が極端に偏っている、白飛びしている、といった状況では、色差はいずれの正常な領域にも入らない。このときアプリは pH 値を算出せず、「判定できませんでした。撮り直してください」と表示し、記録への保存を拒否する。

この設計は、旧版 (v1) からの重要な改善点である。旧版では判定不能時に内部的な番兵値 0.0 が返され、これが「pH 0.0 = 強酸性」としてそのまま画面に表示されていた。すなわち、測定に失敗しているにもかかわらず、利用者には「極めて危険な水である」という誤った情報が提示されていたことになる。安全に関わる情報を扱うアプリとして、これは看過できない欠陥であり、新版では判定不能を型として明示的に扱うよう改めた。

これに加えて、**過剰な光量に対する警告機構**を設けている。基準色票の特定セル（青チャンネルの平均値）が閾値を超えた場合、「強い光が当たっています」との注意を表示し、続行するか撮り直すかをユーザーに選ばせる。白飛びした基準色票は、色差が正常範囲に収まってしまうため mode 4 では捕捉できず、誤った pH を返すためである。

2. 4. 4 検討して棄却した手法 — 開発の経緯

現在の実装に至るまでには、いくつかの失敗と修正があった。これらは本研究の実質的な内容であるため、記録として残す。

(a) mode 1 における G-B 項の除外 当初、mode 1 の pH は 3 つの色差すべての平均として算出していた。しかし、2.3.1 節で述べたとおり、パッド 0 の R チャンネルは pH 5 以上で飽和しており、加えて B チャンネルも低値で変動が小さい。その結果、G-B に基づく推定式は酸性域で不安定な挙動を示した。検証の結果、G-B を平均から除外し、R-G と R-B の 2 式の平均とすることで、酸性域の推定が安定することが判明した。現在のコードでは、G-B に基づく値は計算されるものの、最終的な平均には算入されない。

(b) 判定条件における論理演算子の誤り mode 判定の条件式において、本来 AND で結合すべき条件を OR で記述していた時期があった。この誤りにより、実際には「いずれか 1 つの条件を満たせば」その mode が採用される状態となっており、**判定木が事実上機能していなかった**。すべての条件を AND に修正したことで、判定が意図どおりに動作するようになった。

(c) 色差の符号の取り違い パッド 1 の G-B を算出する箇所で、誤って B-G を計算していた。符号が反転していたため、検量式が正しい入力を受け取っていなかった。

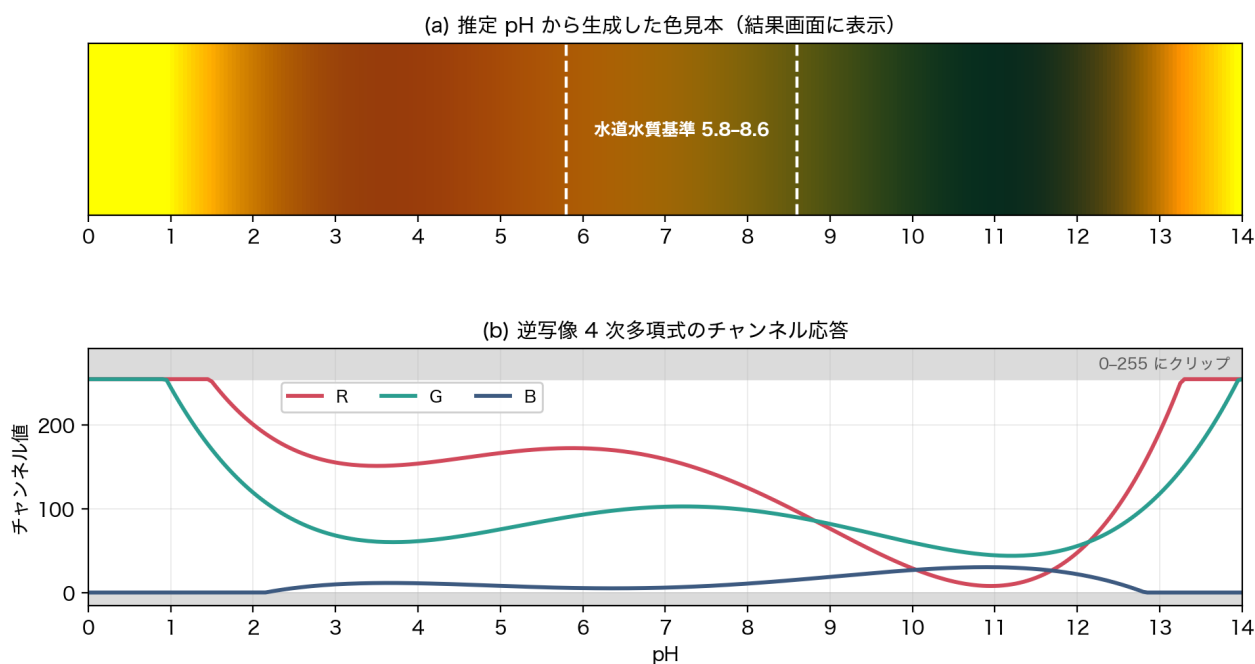
(d) 高次項の追加による破綻 推定精度の向上を狙って多項式の次数を上げた結果、**pH 5 の試料を測定すると -0.5 付近の値が返る**という破綻を招いた。多項式回帰は、データが疎な領域で容易に発散する。この経験から、判定条件の閾値を含めてモデル全体を再設計し、線形式で足りる領域（mode 3）では線形式を用いる方針に改めた。

(e) 機械学習モデルの不採用 文献上、比色定量に機械学習（アンサンブル学習等）を適用して $R^2 = 0.95$ に達したとの報告がある。しかし本研究では、これを**採用しないという判断**を下した。理由は 2 点である。第一に、学習済みモデルはブラックボックスであり、「なぜその値になったのか」を利用者にも研究者にも説明できない。水質という安全情報を扱う以上、説明可能性は精度と同等に重要である。第二に、モデルの再現性を担保する試験（後述のゴールデンテスト）に載せることが難しく、将来の改修時に挙動が変化していないことを保証できない。**単純で、検証可能で、説明できるモデルを選ぶ**というのが本研究の立場である。

2. 4. 5 結果の可視化 — pH から色への逆写像

推定された pH は、数値と判定区分（強酸性 / 弱酸性 / 中性 / 弱アルカリ性 / 強アルカリ性）に加えて、**色見本**として表示される。これは pH から RGB への逆写像（4 次多項式）によって生成される（図 2-5）。

図 2-5 pH → RGB の逆写像（利用者に「色」で結果を返す）



$$R = 0.384 \text{ pH}^4 - 10.405 \text{ pH}^3 + 94.606 \text{ pH}^2 - 345.79 \text{ pH} + 591.15$$

$$G = 0.2544 \text{ pH}^4 - 7.505 \text{ pH}^3 + 75.852 \text{ pH}^2 - 304.58 \text{ pH} + 481.23$$

$$B = -0.0819 \text{ pH}^4 + 2.2833 \text{ pH}^3 - 21.677 \text{ pH}^2 + 82.922 \text{ pH} - 98.95$$

（各値は 0～255 にクリップされる）

この機能の意図は、**利用者が自分の目で妥当性を確認できるようにすること**にある。アプリが表示した色見本と、手元の試験紙の色が明らかに異なっていれば、利用者はその測定を疑うことができる。数値だけを返すアプリは、誤りを利用者に隠してしまう。

ただし図 2-5(b)から分かるとおり、この逆写像は pH 1 未満および pH 13 超の領域でチャンネル値がクリップに達しており、両端では実際の試験紙の色を忠実に再現していない。実用上、雨水の pH がこの範囲に入ることは考えにくい、モデルの限界として記録しておく。

2. 5 アプリの基本設計

2. 5. 1 アーキテクチャ

WATER IN v2.0 は、以下の 3 層構造で構成される。

層	役割	実装
Core 層	測定エンジン（色抽出・照明正規化・検量演算）	UI から独立した純粋な計算モジュール。テスト可能性を最優先
Data 層	測定記録の永続化と同期	端末内データベース （SwiftData）を「真実の源」とし、クラウド（Supabase）へは

層	役割	実装
		ベストエフォートで同期。再送キューを備える
UI 層	画面表示・撮影	SwiftUI。カメラのみ低レベルAPI をラップ

この分離により、測定エンジンは端末にもネットワークにも依存せず、単体で検証できる。実際、後述するゴールデンテストは Core 層のみを対象として実行される。

クラウド同期を「ベストエフォート」としたのは意図的である。災害時や屋外での利用を想定する以上、ネットワークが繋がらないことを理由に測定できない、という事態は許容できない。測定は常に端末内で完結し、記録も端末内に保存される。クラウドへの送信は、接続が回復した時点で再試行される。

2. 5. 2 画面構成

図 2-8 に、実装された 6 画面を示す。

図 2-8 WATER IN v2.0 の画面構成



- ホーム：最新の測定値と、測定開始ボタン
- 測定（撮影ガイド枠）：基準色票および試験紙を合わせる枠を表示
- 結果：pH 値（小数第 1 桁）、判定区分、色見本、カテゴリ選択、保存
- 記録：測定履歴の一覧と、期間別のグラフ（縦軸を pH 0～14 に固定し、pH 7 に破線を表示）
- 地図：全利用者の測定点を pH に応じて色分けして表示（週/月/全期間で絞り込み可）
- 設定：カテゴリ管理、各種ポリシー、バージョン情報

「記録」画面のグラフで縦軸を常に 0～14 に固定しているのは、意図的な設計である。自動スクーリングを行うと、pH 7.0 と 7.1 の差が画面いっぱいに拡大表示され、実際にはごく僅かな変動が重大な変化であるかのように見えてしまう。水質の可視化においては、「基準に照らしてどの位置にあるか」を常に一定の尺度で示すことが重要である。

2. 5. 3 データ構造とプライバシー設計

測定記録は、以下の項目からなる。

id / user_id / 測定項目 / 測定値 / 試験紙の種類 / カテゴリ / 緯度 / 経度 / 測定日時 / 作成日時

位置情報は、取得できた場合のみ付与される。位置情報の許可を得られない場合や、5 秒以内に測位できない場合は、**位置情報なしで測定を続行する**。位置が取れないことを理由に測定をブロックしない、という方針である。

プライバシーについては、次の二段構えとした。

1. **認証は匿名認証とする**。利用者はメールアドレスもパスワードも登録せず、アプリを開いた瞬間から使い始められる。市民への普及において、登録の手間は最大の障壁となるためである。
2. **地図で共有される情報を限定する**。測定記録の本体テーブルは、行レベルのアクセス制御により本人しか読み書きできない。地図に表示されるのは、専用のビューを経由した「測定項目・値・試験紙の種類・緯度・経度・測定日時」のみであり、**利用者 ID とカテゴリ（＝「自宅の雨水タンク」等の私的なラベル）は一切公開されない**。この分離は、2 つの匿名アカウントを用いた実機試験により検証済みである。

また、撮影された 3 枚の画像（基準色票 2 枚＋対象試験紙 1 枚）は、研究用の生データとしてクラウドに保存される。これにより、将来モデルを改良した際に、過去の測定を遡って再計算することが可能となる。

2. 5. 4 旧版からの再構築

WATER IN の原型は、2020 年 12 月に中央大学野島記念ビジネスコンテストにおいて、本研究室のチーム「RePublicWater」（石井崇晃・前田寛明・山本迅平）が水質測定アプリ「WaterChecker」で優勝したことに始まる。その後 2021 年から 2023 年にかけて学生の手により iOS アプリとして実装された（v1）が、2023 年 2 月を最後に開発が停止していた。

v1 は、位置情報の利用宣言が実行ファイルに欠落していたため、**結果画面に到達した時点でアプリが強制終了する**という致命的な不具合を抱えており、実質的に使用不能な状態にあった。また、当時のクラウド基盤や課金基盤への依存が技術的負債となっていた。

そこで 2025 年度に、v2.0 として全面的な再構築を行った。主な変更点は表のとおりである。

項目	v1（2021–2023）	v2.0（2025 年度）
UI 基盤	UIKit + Storyboard	SwiftUI
クラウド	Firebase	Supabase（東京リージョン）
認証	ログイン／パスワード	匿名認証
課金	サブスクリプション	全廃・無料
保存	クラウドのみ	端末内が真実の源＋クラウド同期

項目	v1（2021–2023）	v2.0（2025 年度）
判定不能時	pH 0.0 を「強酸」と表示	保存不可+撮り直しを促す
状態	位置情報の不備で起動後クラッシュ	App Store 審査へ提出済

課金を全廃した点は、研究成果の社会還元という観点からの判断である。市民が水質を把握するための道具に、金銭的な障壁を設けるべきではない。

再構築にあたって最も重視したのは、**測定値が 1 ビットも変わらないこと**である。UI も基盤もすべて入れ替える一方で、Core 層の演算結果は旧実装と完全に一致させる必要があった。そのために「ゴールデンテスト」を構築した（次節）。

2. 6 精度の検証

2. 6. 1 実装の同値性検証（ゴールデンテスト）

旧実装と新実装の数値的な同一性を担保するため、319 通りの入力ケースについて、5 項目（3 パッドの正規化後 RGB、判定された mode、算出された pH、表示色、判定区分）のすべてが一致することを検証した。結果は**全 319 ケース・全項目で完全一致**であった。判定された mode の分布は mode 1 が 10 件、mode 2 が 289 件、mode 3 が 10 件、mode 4 が 10 件であった。

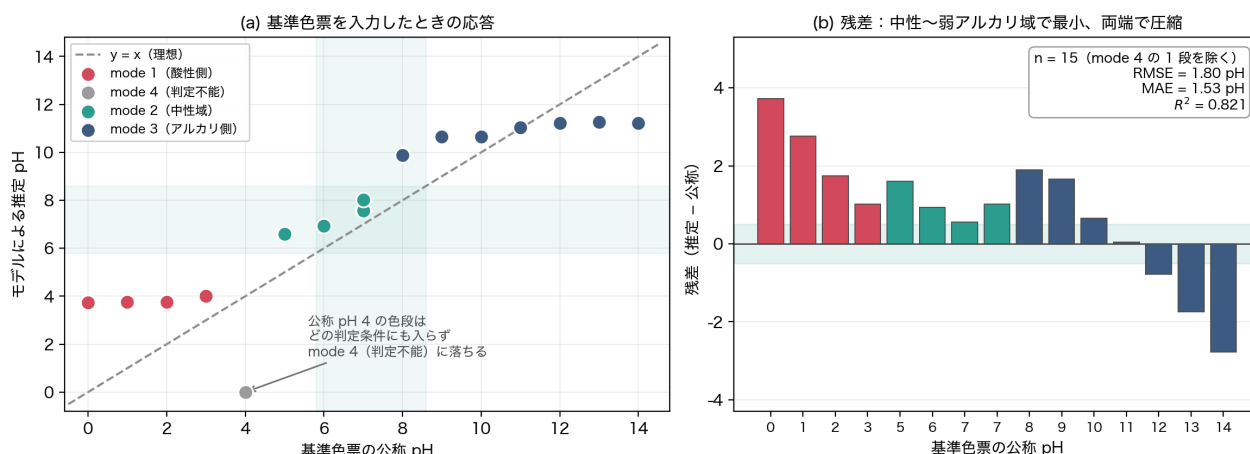
さらに、第三者が Python で独立に再実装したモデルとの比較を行い、最大誤差は 3.4×10^{-13} にとどまった。これは倍精度浮動小数点数の丸め誤差の範囲であり、実装の一致は確実である。

この検証により、「**再構築によって測定値が変わっていない**」ことが証明された。これは、過去の測定記録との連続性を保証するうえで不可欠な条件である。

2. 6. 2 検量モデルの自己整合性検証

次に、検量モデルそのものの妥当性を検証した。照明正規化の教師データとして用いている基準色票 16 段の真値を、そのまま検量モデルに入力し、公称 pH がどの程度再現されるかを調べた。結果を図 2-7 に示す。

図 2-7 検量モデルの自己整合性検証（教師に用いた基準色票そのものを入力した場合の応答）



得られた結果は次のとおりである。

- **単調性は成立している。**公称 pH の上昇に対して推定 pH は単調に増加しており、モデルが pH を正しい向きに追跡していることが確認された。
- **精度は、mode 4 に落ちた 1 段を除く 15 段で RMSE = 1.80 pH、MAE = 1.53 pH、 $R^2 = 0.821$ であった。**
- **両端で圧縮が生じる。**公称 pH 0～3 の 4 段はいずれも 3.7～4.0 と推定され、公称 pH 12～14 の 3 段はいずれも 11.2 前後と推定された。すなわち、強酸性側・強アルカリ性側では pH の分解能が失われている。これは 2.3.1 節で述べたチャンネル飽和の直接的な帰結である。
- **公称 pH 4 の色段が mode 4（判定不能）に落ちる。**判定木の 3 つの条件のいずれにも該当しない「隙間」が pH 4 近傍に存在することが明らかとなった。

最後の点は、本検証によって新たに発見された欠陥である。実用上、貯留雨水の pH が 4 近傍となることは稀であり（初年度の墨田区調査では、むしろコンクリート製タンクによる pH 上昇が問題であった）、直ちに測定不能となる場面は限定的と考えられる。しかし、判定木に隙間があること自体はモデルの不備であり、次年度の校正実験において判定条件を再設計する必要がある。

2. 6. 3 本検証の限界 — 明確にしておくべきこと

前項の検証結果を解釈するにあたり、**2 つの重大な限界**を明確にしておかなければならない。

限界 1：これは「自己整合性」の検証であって、独立した精度検証ではない。 入力に用いた基準色票の真値は、照明正規化の教師データそのものである。したがって、この検証が示しているのは「モデルが自らの教師データに対してどう応答するか」であって、「未知の試料に対してどの程度正確か」ではない。真の精度は、これより悪化する可能性が高い。

限界 2：基準色票は「印刷された色」であり、実際に呈色したパッドの色とは系統的に異なりうる。検量式の係数は、緩衝液に浸漬した実際の試験紙を測定して構築されたものである。一方、本検証で入力したのはパッケージに印刷された基準色票の色である。印刷インクの発色と、化学反応による発色は、分光特性が異なる。したがって、図 2-7 に見られる残差の一部は、モデルの誤差ではなく印刷色と実パッド色の系統差に由来する可能性がある。

これらの限界を踏まえると、**実際の試験紙と標準 pH 緩衝液を用いた独立の精度検証は、依然として未実施である**と言わざるを得ない。申請書には既存の pH 測定アプリについて「平均誤差 0.2」との記載があるが、この数値の根拠となる実測データは、本年度の資料整理を通じても発見できなかった。旧版の開発過程で得られた検量データが失われている可能性が高い。

したがって、「**WATER IN の pH 測定精度は $\pm X$ pH である**」と断定的に述べることは、現時点では科学的に不誠実である。本報告では、この点を明確な残課題として記録する。次年度に実施すべき検証を、2.7.3 節で述べる校正実験計画の一部として設計済みである。

2. 7 今後の展開 — 遊離残留塩素および硝酸態窒素

2. 7. 1 なぜこの 2 項目か

pH に続いて実装すべき項目として、遊離残留塩素と硝酸態窒素を選定した。理由は以下のとおりである。

遊離残留塩素は、雨水を飲用利用する際の消毒管理において決定的な指標である。UF 膜ろ過により病原微生物を物理的に除去したとしても、貯留・配管過程での再汚染を防ぐには消毒剤の残留が有効である。また、残留塩素の測定は、水道水と雨水処理水を比較する際の基本的な指標でもある。

硝酸態窒素は、大気汚染に由来する雨水汚染の代表的指標である。申請時には、亜硝酸態窒素とフェノール類が墨田区の雨水タンクから基準値を超えて検出されており、これらのモデル化を優先課題として掲げていた。初年度の調査では、ディーゼル車規制等による大気環境の改善を反映して、硝酸態窒素は全区画で水道水質基準を満たしていたが、地点・季節による変動を継続的に監視する必要がある。実際、2025 年度に導入したろ過系統のひとつ（系統③）の原水からは亜硝酸態窒素が検出されており、地点によっては依然として管理対象であることが示唆されている。

2. 7. 2 遊離残留塩素 — v1 の実装とその課題

実は、遊離残留塩素の測定機能は旧版（v1）に実装されていた。用いていた試験紙は Serim MONITOR FOR CHLORINE であり、基準色票は 0 / 0.5 / 1.0 / 2.0 / 5.0 / 10.0 mg/L の 6 段構成であった。図 2-9 に、その基準色票の実測 RGB と、実装されていた検量式を示す。

図 2-9 v1 に実装されていた遊離残留塩素モデルとその課題（v2.1 で再設計する）

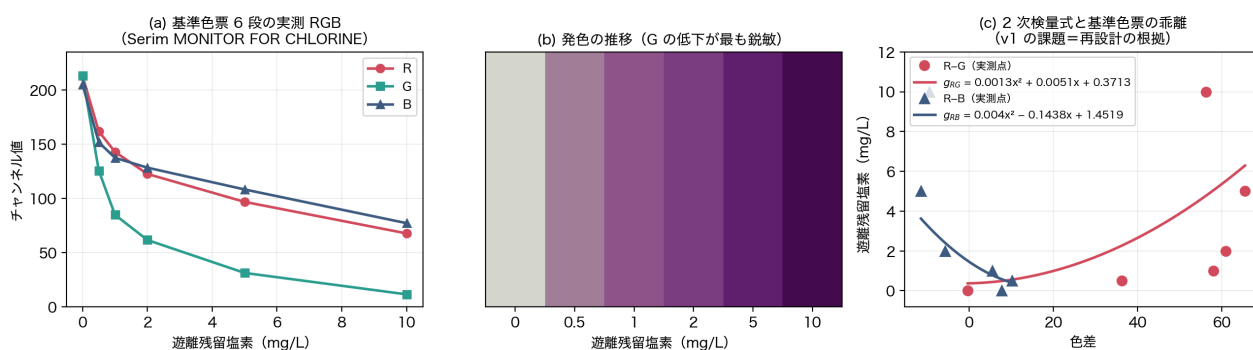


図 2-9(a)(b) から、**G チャンネルが塩素濃度に対して最も鋭敏に応答することが読み取れる**（0 mg/L で 213、10 mg/L で 11 まで低下）。これは呈色が緑の補色方向へ進むことを反映しており、比色定量の特徴量として G チャンネルが有望であることを示している。

しかし、この実装には看過できない問題があった。

1. **検量式が基準色票から乖離している**（図 2-9(c)）。実装されていた 2 次式に基準色票の色差を入力しても、公称濃度は再現されない。
2. **コード上に明白な誤りが残存していた**。G-B を用いるべき箇所で R-B が使われていた。また、正規化の回帰において、説明変数を 5 点しか与えていないにもかかわらず目的変数を 6 点与えており、切片が系統的にずれていた。
3. **判定不能の棄却が機能していなかった**。判定条件を外れた場合でも同じ式で値を返していたため、信頼できない測定を排除できていなかった。

こうした状態のまま機能を移植することは、誤った安全情報を提供するリスクを伴う。そこで v2.0 では**残留塩素機能を意図的に移植せず**、次バージョン（v2.1）で較正から再設計する方針とした。

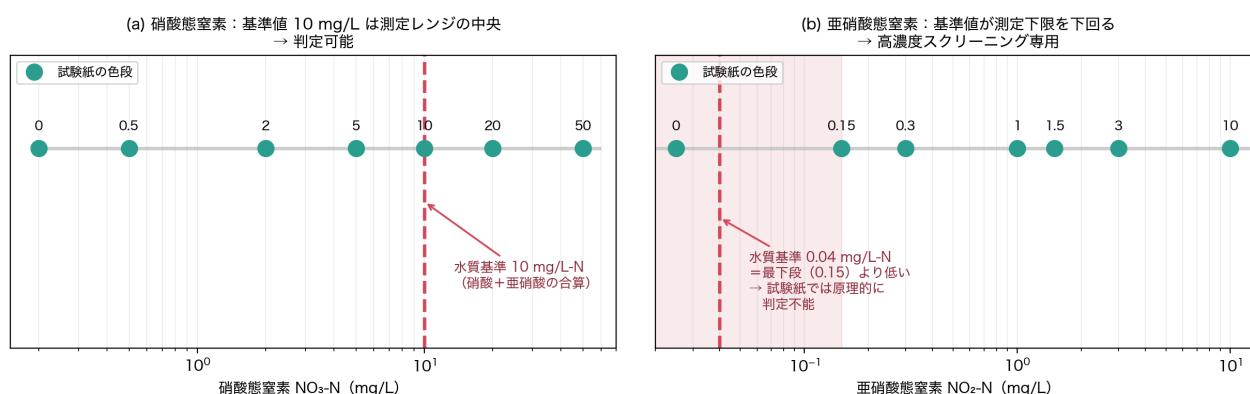
再設計にあたり、試験紙を **SenSafe Free Chlorine Water Check (ITS 481026)** に変更することを決定した。この試験紙は、米国環境保護庁（EPA）が飲料水のコンプライアンス監視用に承認した唯一のディップストリップ（Method D99-003）であり、0 / 0.05 / 0.1 / 0.2 / 0.4 / 0.6 / 0.8 / 1.2 / 1.5 / 2.0 / 2.6 / 4.0 / >6.0 mg/L の 13 段という細かい分解能を持ち、モノクロアミンによる干渉に耐性がある。旧版で用いていた 6 段の試験紙と比べ、低濃度域の分解能が大幅に向上する。

2. 7. 3 硝酸態窒素・亜硝酸態窒素 — 較正実験の設計

硝酸・亜硝酸については、**ITS WaterWorks Nitrate/Nitrite (480009)** を選定した。硝酸態窒素は 0 / 0.5 / 2 / 5 / 10 / 20 / 50 mg/L、亜硝酸態窒素は 0 / 0.15 / 0.3 / 1 / 1.5 / 3 / 10 mg/L の各 7 段であり、1 枚の試験紙上に 2 つのパッドを持つ。

ここで、測定原理に由来する重大な制約を明らかにしておく必要がある。図 2-10 に、試験紙の測定レンジと水道水質基準の関係を示す。

図 2-10 硝酸・亜硝酸試験紙の測定レンジと水道水質基準の関係（ITS WaterWorks 480009）



制約 1：亜硝酸態窒素の水質基準は、市販ディップストリップでは原理的に測定できない。 亜硝酸態窒素の水道水質基準は 0.04 mg/L-N であるが、市販試験紙の最下段は 0.15 mg/L-N である（他社製品でも 0.15～0.3 mg/L-N）。すなわち、**基準値が測定下限を下回っている**。これは特定の製品の性能不足ではなく、Griess 法の発色感度と目視比色の分解能に由来する原理的な限界である。したがってアプリでは、亜硝酸態窒素について「基準適合の判定はできない。高濃度の存在をスクリーニングする用途に限る」ことを明示する UI 要件を課す。この制約を利用者に隠したまま数値を表示することは、誤った安心を与える行為に他ならない。

制約 2：硝酸パッドは、硝酸と亜硝酸の合算値を読んでいる。 この試験紙は、亜鉛による還元（NO₃⁻ → NO₂⁻）を経て Griess 反応で発色させる間接法であるため、硝酸パッドの読み値には元々存在した亜硝酸も含まれる。しかしこれは、必ずしも欠点ではない。日本の水道水質基準もまた「**硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素**」の合算値として **10 mg/L-N** と定められているからである。したがって、合算値を主たる測定目標に据えることは、基準との整合性という観点からむしろ合理的である。

両パッドの読み値を f_3^{-1} 、 f_2^{-1} と表し、亜鉛の還元効率を η ($k = 1/\eta \geq 1$) とすると、

$$\text{合算値} = f_3^{-1}(\text{硝酸パッド}) - (k - 1) \cdot f_2^{-1}(\text{亜硝酸パッド})$$

$$\text{NO}_3\text{-N 単独} = f_3^{-1}(\text{硝酸パッド}) - k \cdot f_2^{-1}(\text{亜硝酸パッド})$$

と定式化される。較正実験により k の 95%信頼区間が $[0.8, 1.2]$ に収まることが確認できれば、「硝酸パッドの読み値をそのまま合算値とみなす」という簡略形を採用できる。

この較正実験は、以下の設計により全 18 ブロック・撮影 652 枚・15~20 実験日の規模で計画済みであり、実験手順書 (SOP) も学生向けに整備済みである。

- **真値の担保**：試験紙の公称値を真値とせず、イオンクロマトグラフ (IC) による実測値を真値とする。IC の検量線は、試験紙とは独立の認証標準液で作成し、トレーサビリティの循環参照を断つ。
- **標準液の調製**： KNO_3 7.218 g/L (= 1000 mg N/L)、 NaNO_2 0.4926 g/100 mL。
- **色基準の同梱**：ColorChecker を常にフレーム内に含めて撮影する。
- **段階的な実施 (フェーズゲート方式)**：予備検討 (撮影 0 枚) → コア較正 (163 枚) → ロバスト性検証 (238 枚) → 独立検証 (251 枚) と段階を分け、各段階の受入基準を満たさない場合は次に進まない。
- **受入基準**：合算値 10 mg/L の適否判定について、30 試料中の誤判定 0 (95%信頼下限 90.5%)、真度の中央値 $\leq 20\%$ 、判定不能の適切な棄却率 $\geq 95\%$ 、添加回収率 80~120%。
- **設計上の必須要件**：pH で用いた「判定不能 = 0.0」という番兵値の方式を硝酸に持ち込むことを禁止する。硝酸において 0 mg/L は「安全である」という意味を持つため、「測定できなかった」とことと区別できなくなるためである。測定結果は「値」または「棄却理由」のいずれかを返す型として設計する。

この較正実験は、2.6.3 節で述べた **pH モデルの独立精度検証** (実試験紙・標準 pH 緩衝液による検証) と併せて、次年度の最優先課題である。

3. 雨水ろ過装置の新規製作・導入とモバイル型装置の開発

3. 1 設計思想

初年度の成果として、「適切な水源を選定し、UF 膜処理を施せば、貯留雨水は水道水質基準 51 項目を満たしうる」ことを実証した。しかしこれは、大学の実験室において、訓練された研究者が実施した結果である。同じことを、地域の市民が、自らの手で、継続的に行えるかどうかは、まったく別の問題である。

2025 年度は、この隔たりを埋めることを目的として、実際の生活の場に浄水装置を製作・設置し、市民が運用する体制を構築した。設計にあたっての基本方針は以下の 4 点である。

方針 1：膜ろ過を中核とし、多段処理を極力簡素化する。 初年度の知見により、雨水の主要リスクである濁質と病原微生物は、膜ろ過によってほぼ完全に除去できることが分かっている。一方、pH・Al・Mn については、酸注入・生物処理・酸化吸着といった処理が必要となるが、これらは高度な制御を要し、分散型の小規模施設には不向きである。したがって、「処理で何とかする」のではなく、「そもそもリスクの低いタンクを選ぶ」ことを前段に置き、処理は膜ろ過に絞るという設計思想を採った。この考え方が、第 4 章で述べる導入前の水質スクリーニングにつながっている。

方針 2：飲用を前提とした資材選定を行う。 水に接触するすべての部材は、飲用適合性を満たすものでなければならない。とりわけポンプの選定は難航した。市販の送液ポンプの多くは、可動部にグリースが塗布されており、飲用水系統には使用できない。重量、ホース径、接液部の材質、グリースの有無といった条件を満たすポンプの探索とテストに、相当の時間を要した。この点については、共同研究者である雨水市民の会からも「ポンプの選定は山村がかなりの調査とテストを重ねた結果である」との評価を得ている。

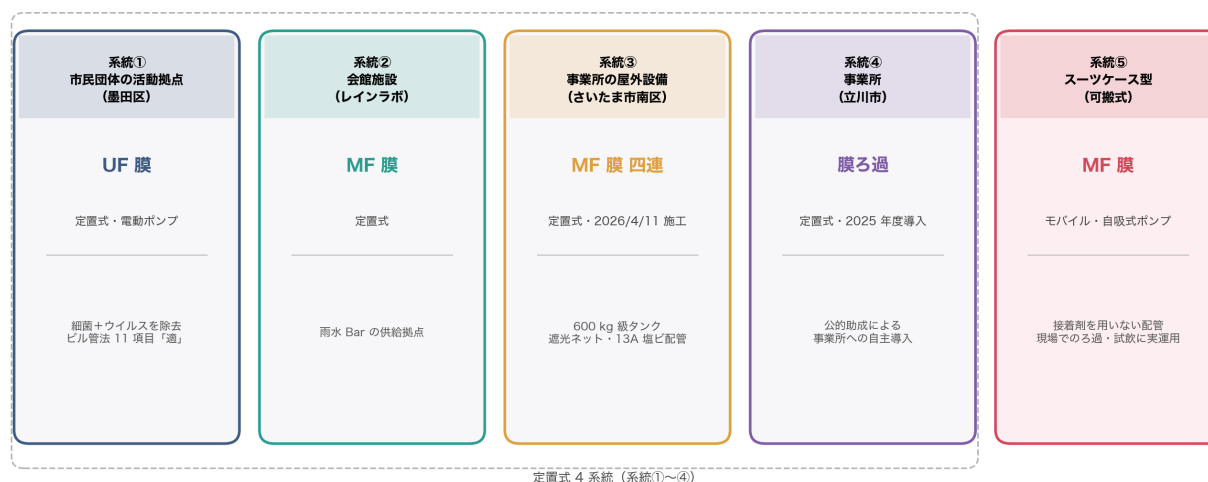
方針 3：接着剤に頼らない配管とする。 塩ビ配管の接着には有機溶剤系の接着剤が用いられるが、飲用系統においては溶出の懸念がある。可搬式装置においては、接着剤を使用しない機械的接合による配管を採用した。

方針 4：災害時の運用を想定する。 電力供給が途絶した状況でも使用できることは、雨水を災害時の水源と位置づける以上、必須の要件である。手押しポンプによる運用の可能性を常に確保しておく。

3. 2 構築した 5 系統の概要

2025 年度末までに、定置式 4 系統と可搬式（モバイル型）1 系統、計 5 系統の雨水ろ過システムを構築・運用した。図 3-1 にその全体像を示す。

図 3-1 本研究で構築した雨水ろ過システム（定置式 4 系統 + モバイル型 1 系統）



3. 2. 1 系統① 市民団体の活動拠点（東京都墨田区）－UF 膜

NPO 法人雨水市民の会が管理する拠点に設置された系統であり、本研究における**基準系統**と位置づけられる。5 系統のうち唯一 **UF 膜（限外ろ過膜）**を採用しており、他の系統が用いる MF 膜（精密ろ過膜）と比較して孔径が小さい。この差は決定的である。MF 膜が細菌を除去できるのに対し、**UF 膜は細菌に加えてウイルスも十分に除去できる**。初年度に水道水質基準 51 項目をすべて満たす処理水を得たのも、この UF 膜による処理水であった。

本系統には、方針 2 に基づいて選定した飲用適合の電動ポンプが組み込まれている。運用面では、2025 年 7 月にポンプの故障を経験しており、可動部を持つ機器の維持管理が分散型システムの弱点であることが実地で確認された。

2026 年 6 月に実施したビル管法 11 項目の水質検査では、**すべての項目で「適」の結果を得た**。共同研究者からは「タンクの中が相当に汚れているのが気になっていたので安心した。膜の力はすごい」との評価が寄せられている。これは、**原水の汚れの程度によらず、膜ろ過が安定した処理水質を与える**という、膜分離の本質的な利点を実地で裏づけるものである。

3. 2. 2 系統② 都内の会館施設（レインラボ）－MF 膜

都内の会館施設内に設けられた「レインラボ」に設置された系統である。本系統の処理水は、後述する「雨水 Bar」における提供水として用いられており、市民が雨水を口にする体験の場を支える基盤となっている。

2026 年 6 月のビル管法 11 項目検査において「適」の結果を得ている。

3. 2. 3 系統③ 事業所の屋外設備（埼玉県さいたま市南区）－MF 膜 四連

2025 年度に新規に製作・施工した系統であり、本年度の装置開発における中心的な成果である。

施工は 2026 年 4 月 11 日（土）に実施した。施設側の担当者、配管施工業者、雨水市民の会、および中央大学（山村）の協働による作業である。

システム構成は、雨水タンク（プラスチック製、80 L ボックスを含む）→ストレーナー→MF 膜四連ろ過システムであり、13A 塩ビ管により接続した。ポンプは中央大学から送付した。

施工にあたっての技術的な検討事項として、**荷重の問題**があった。タンクが満水となった場合の総重量は約 600 kg に達すると見積もられ、設置予定の物置の耐荷重を超過する懸念があった。当日、耐荷重を実測のうえ、超過する見込みであればタンク数を減らすか、オーバーフロー孔の位置を下げ、満水時の貯留量を制限する、という対応方針を事前に定めて臨んだ。

5 月 3 日には、タンクの遮光と飛散防止のため、遮光ネット（3 m × 4 m）を設置し、ろ過システムとタンクの接続を完了した。**遮光は、藻類の増殖を抑制するうえで本質的に重要である**。透光性のタンクに雨水を貯留すれば、藻類が繁殖し、有機物濃度と濁度が上昇する。これは膜の目詰まりを加速させるだけでなく、初年度に問題となった Mn の嫌氣的溶出を促進する要因ともなりうる。

系統③については、**2026 年 7 月に不具合が顕在化した**。試運転の結果、ポンプを用いず位置水頭のみで通水した場合、最大流量でもごく僅かな流量しか得られず、ポンプを用いた場合の圧力計指示値は 0.08 にとどまった。四連構成のうち右側 2 本の MF 膜への**空気の侵入**が疑われ、屋外暴露を避けて倉庫に再保管した。原因については、**四連構成における圧力配分の不均衡**であり、バルブによる調整が必要であるとの見立てを得ている。

この不具合は、**多段・並列構成のろ過システムを市民が運用するうえでの本質的な難しさ**を示している。膜が並列に接続されている場合、各膜への流量配分は圧力損失の差によって決まる。ある膜が目詰まりを起こせば、そこへの流量が減り、他の膜への負荷が増す。一度エアを噛んだ膜は、通常の通水では容易には復旧しない。単一の膜モジュールで構成された系統（①②）ではこの問題が生じないことを考えると、**冗長性を高めるための四連構成が、かえって運用の難易度を上げている**という逆説がある。この知見は、次節で述べる「手引き」の重要な内容となる。

3. 2. 4 系統④ 事業所への自主導入（東京都立川市）

東京都立川市の事業所への導入である。東京都中小企業振興公社の助成金を活用した、**事業所による自主的な導入事例**であり、本研究の成果が研究プロジェクトの枠を超えて社会に展開しつつあることを示している。

3. 2. 5 系統⑤ スーツケース型（可搬式）－MF 膜【モバイル型装置】

本年度に新規開発した、モバイル型の雨水ろ過システムである。

開発の契機は、2026 年 3 月 13 日に開催された「雨水 Bar」における議論であった。雨水を活用する現場は必ずしも装置の設置場所とは限らず、イベント会場、災害時の避難所、あるいは醸造所といった「装置のない場所」で雨水をろ過する必要があるが生じる。定置式のシステムはこの要求に応えられない。

この議論を受けて、必要資材をリストアップし、中央大学（山村研究室）において製作した。主要な仕様は以下のとおりである。

- **膜**：MF 膜（精密ろ過膜）
- **形態**：スーツケースに収納した可搬式
- **配管**：**接着剤を用いない機械的接合**（方針 3）。飲用適合性を確保するための設計判断である
- **ポンプ**：自吸式ポンプ

ポンプの選定は、本装置の開発における最大の技術的争点であった。当初検討していたポンプは**非自吸式**であったため、地上に置いたポリバケツから水を汲み上げることができなかった。自吸式マグネットポンプ等の市販品を複数検討したが、飲用適合性（方針 2）を満たすものが見つからず、最終的に**中央大学の研究室が保有する自吸式ポンプを貸与すること**で解決した。「ポンプも飲用に適したものでなければならない」という制約が、選択肢を大きく狭めたのである。

この点は、本研究が明らかにした**重要な実装上の障壁**である。膜そのものは市販品として容易に入手でき、価格も低下している。しかし、飲用適合かつ自吸式という条件を満たすポンプは、市場に十分な選択肢がない。分散型の雨水浄水システムを普及させるうえでのボトルネックは、膜ではなくポンプにある。

3. 2. 6 実地運用 — 醸造所におけるろ過作業

2026 年 6 月 23 日、東京都内の醸造所において、雨水クラフトビール醸造のための雨水ろ過作業を実施した（9:30～15:00）。この作業には、**スーツケース型（モバイル型）と、系統③の四連ろ過システムの 2 系統を用いた**。四連システムは、この作業のために配管業者の協力を得て改良を施し、自立式とすることは時間的制約から断念して、1.8 m の脚立 2 脚に番線で吊り下げる方式で運用した。

ろ過した雨水は、参加者による**試飲**にも供された。翌 6 月 24 日には、同醸造所においてクラフトビールの仕込みを実施した。

スーツケース型装置の処理水については、2026 年 7 月にビル管法 11 項目の水質検査結果が得られ、「適」と判定された。これにより、本年度に構築した全系統について 11 項目検査が完了し、**すべての系統で「適」という結果を得たことになる。**

3. 3 水質検査による検証

構築した各系統の処理水について、外部の登録検査機関に委託し、建築物における衛生的環境の確保に関する法律（ビル管法）に基づく 11 項目の水質検査を実施した。検体は 4 系統（系統①②③⑤）から採取し、検体は冷蔵便により輸送した。分析の調整は、本研究室の大学院生が担当した。

系統	膜	結果	備考
系統①（墨田区・市民団体拠点）	UF	適	原水のタンク内は目視で汚れが目立つ状態であったが、処理水は全項目適合
系統②（会館施設・レインラボ）	MF	適	—
系統③（事業所・さいたま市）	MF 四連	適	初回採取時、誤ってろ過前の排水口から採水したため一般細菌が多数検出された。 再採取により適合を確認
系統⑤ スーツケース型（モバイル）	MF	適	2026 年 7 月に結果受領。これをもって全系統の検査が完了

系統③における初回の採水ミスは、記録に値する教訓である。「どこから採るか」を誤れば、**どれほど優れた処理系であっても検査は不合格となる。**市民が運用する分散型システムにおいて、正しい採水手順の周知は、装置の性能そのものと同等に重要である。この経験は、後述する手引きの内容に反映すべき事項である。

なお、2026 年 6 月 23 日のクラフトビール醸造時には、食品衛生法に基づく食品製造用水の 26 項目検査のため、①ろ過前、②ろ過後、③ろ過かつ煮沸後の 3 検体を採取した。この結果は本報告の執筆時点では未着であり、次報にて報告する。採水のタイミングについては、醸造設備の管理者から「煮沸処理後・麦芽投入前に採水すべき」との助言を得て設計した。

3. 4 浄水処理システム選定フローに向けて

申請書において、2025 年 9 月までに「浄水処理システム選定フロー図」を作成し、2026 年 1～3 月に「冊子への取り纏め」を行うことを計画していた。本年度の 5 系統の構築・運用を通じて、この選定フローの骨格となる知見が得られた。

知見 1：処理の前に、水源の選定を行う。 pH・Al・Mn が基準を超過するタンクは、膜ろ過では対処できない。導入前にこれらをスクリーニングし、適合するタンクのみを飲用系統に接続する。この考え方は、第 4 章で述べる新規導入候補地点の水質評価として実行に移した。

知見 2：膜の選定は、目標とする除去対象に応じる。 細菌の除去で足りる場合は MF 膜、ウイルスまで除去する場合は UF 膜を選定する。飲用を前提とするならば、**UF 膜を推奨する**。①系統が UF 膜であり、かつ最も汚れた原水から適合水質を得ていることは、この推奨を支持する。

知見 3：構成は単純であるほど良い。 四連構成における圧力配分の問題（3.2.3 節）が示すとおり、並列多段化は運用の難易度を上げる。市民が運用する系統においては、単一モジュール構成を基本とすべきである。

知見 4：ポンプが最大の制約である。 飲用適合かつ自吸式のポンプの選択肢が乏しいことが、実装上の最大のボトルネックである。手引きにおいては、適合するポンプの具体的な型番と入手経路を示すことが、最も実務的な貢献となる。

知見 5：遮光と採水手順を必ず記載する。 タンクの遮光（藻類抑制）と、正しい採水位置の周知は、装置の性能を実際の水質に結びつけるための必須事項である。

これらの知見に基づく選定フロー図および冊子の取り纏めは、次年度の課題として残されている（第 6 章）。

4. 新規導入候補地点における貯留雨水の水質評価

4. 1 調査の目的

第 3 章 知見 1 のとおり、飲用系統を導入する前に、当該タンクの水質が膜ろ過で対処可能な範囲にあるかを確認する必要がある。とりわけ、pH・Al・Mn といった溶存成分は膜ろ過では除去されないため、**これらが基準を超過するタンクは、そもそも飲用系統の水源としてはならない**。

2025 年度、武蔵野市を舞台とする新たな地域プロジェクトが立ち上がり、複数の公共施設・個人宅の雨水タンクが飲用系統の候補地点として挙がった。これらの地点について、導入前スクリーニングとしての金属分析を実施した。

この調査は、初年度の墨田区調査を**地理的に拡張する**という意味も持つ。墨田区は海拔ゼロメートル地帯を含む東京の低地であり、武蔵野市・立川市は武蔵野台地上に位置する。地形、市街地の性格、建物の構造、屋根材が異なるこれらの地域で、貯留雨水のリスクプロファイルが同一である保証はない。

4. 2 方法

武蔵野市および立川市に所在する 10 地点の雨水タンクから試料を採取した。なお、初年度の墨田区調査と同様に、各地点の水質情報と所在は、公表に伴って所有者・管理者へのリスクコミュニケーションが必要となること、および個人宅を含むことから、本報告では地点 A～J の記号により表記す

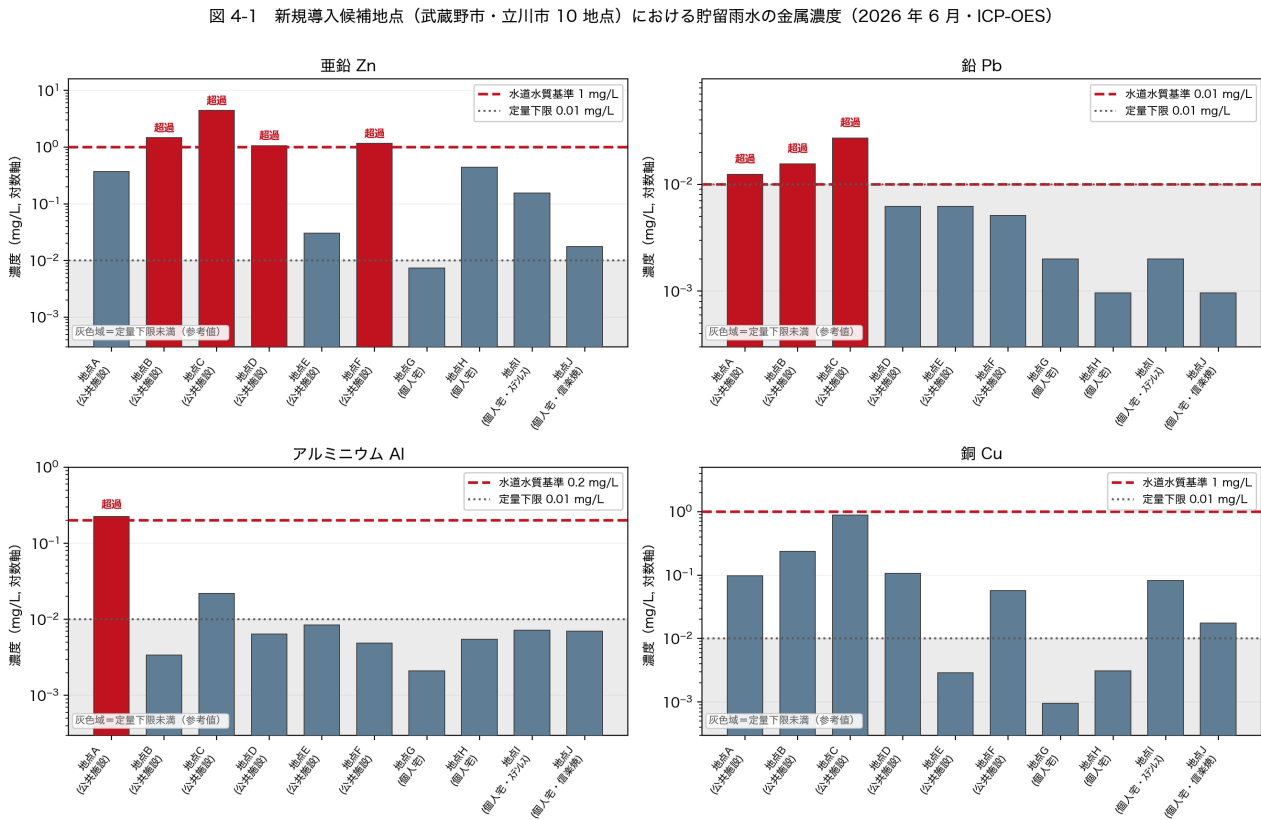
る。試料は 0.45 μm のフィルターでろ過した後、ICP 発光分光分析装置（ICP-OES）により Mg, Al, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb の 9 元素を定量した。

- 標準溶液：多元素混合標準液 W-VI（各 100 mg/L）
- 検量線：7 点（0, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 mg/L）
- 定量下限値：既知濃度（0.0001, 0.01, 1 mg/L）を未知試料として測定し、定量値が設定濃度と一致した最低濃度を定量下限値として採用した。結果として、Mg, Cr, Mn, Fe は 0.0001 mg/L、Al, Ca, Cu, Zn, Pb は 0.01 mg/L となった。

なお、採取した試料のうち「地点 H」のろ過前試料には、**黒色の粒子**が目視で確認された。

4. 3 結果

図 4-1 に、水道水質基準の設定されている主要 4 元素（Zn, Pb, Al, Cu）の測定結果を示す。



基準値を超過した地点は以下のとおりであった。

地点	タンク	超過元素	実測値
地点 A	150 L	Al, Pb	Al 0.226 mg/L（基準 0.2）、Pb 0.012 mg/L（基準 0.01）
地点 B	200 L	Zn, Pb	Zn 1.47 mg/L（基準 1）、Pb 0.016 mg/L
地点 C	200 L	Zn, Pb	Zn 4.42 mg/L、Pb 0.027

地点	タンク	超過元素	実測値
			mg/L、Cu 0.879 mg/L (基準 1・準基準値)
地点 D	200 L	Zn	Zn 1.07 mg/L
地点 F	200 L	Zn	Zn 1.16 mg/L
地点 E	200 L	なし	—
地点 G	瓶	なし	—
地点 H	ペットボトル	なし	ろ過前に黒色粒子を確認
地点 I	ステンレス製タンク	なし	Ca 12.2 mg/L (10 地点 中最高)
地点 J	信楽焼タンク	なし	—

4. 4 考察

4. 4. 1 低地と台地でリスクプロファイルが異なる

本調査の最大の発見は、**武蔵野台地側のリスク因子が、墨田区（低地）のそれとは明確に異なること**である。

	墨田区（2024 年度）	武蔵野市・立川市（2025 年度）
主要リスク因子	濁度、pH、 Al 、 Mn	Zn 、 Pb （一部で Al）
推定される起源	コンクリート製タンクからの溶出（Al, pH 上昇）、堆積粘土粒子の嫌氣的溶出（Mn）	金属製の屋根材・雨樋からの溶出（Zn, Pb）

墨田区で問題となったのは、コンクリート製タンクからのセメント成分の溶出（pH 上昇と Al 溶出）および、タンク底部に堆積した粘土粒子からの嫌気条件下での Mn 溶出であった。すなわち、**リスクの起源はタンクの側にあった。**

これに対し武蔵野市では、Zn と Pb が 5 地点で基準を超過した。Zn は 10 地点中 3 地点で基準値の 1 mg/L を超え、地点 C では 4.42 mg/L と基準の 4 倍を超える値を示した。この分布は、**亜鉛めっき鋼板（トタン）の屋根材や雨樋からの溶出**を強く示唆する。亜鉛めっきは犠牲防食のために積極的に溶出する設計となっており、雨水と接触すれば Zn が溶け出すことは避けられない。Pb についても、古い金属屋根の塗料や、はんだ、雨樋の継手部などが起源として考えられる。すなわち、**リスクの起源は集水面（屋根・雨樋）の側にある。**

この違いは重要な実務的含意を持つ。**墨田区型のリスク（タンク起源）は、タンクを樹脂製に交換するか、定期的な清掃によって低減できる。**一方、**武蔵野市型のリスク（集水面起源）は、タンクを交換しても解消しない。**屋根材そのものを変更するか、当該集水系統を飲用用途から除外するほかない。

この知見は、第3章 知見1「処理の前に水源を選定する」という原則を、より具体的なものにする。すなわち、導入前スクリーニングにおいては、タンクの材質だけでなく、集水面（屋根・雨樋）の材質を必ず確認しなければならない。

4. 4. 2 鉛（Pb）の判定にあたっての重大な留保

Pbの結果については、慎重な解釈が必要である。本分析におけるPbの定量下限値は0.01 mg/Lであり、これは水道水質基準値（0.01 mg/L）と完全に一致する。

すなわち、「基準値を超過した」と判定された3地点（地点A 0.0124、地点B 0.0156、地点C 0.0270 mg/L）は、いずれも定量下限をわずかに上回る領域での測定である。定量下限近傍の測定値は相対誤差が大きく、これらを「確実に基準超過である」と断定することはできない。逆に、定量下限未満と判定された地点についても、「Pbが存在しない」ことを意味するものではない。

したがって、Pbについては本調査を「スクリーニング」と位置づけ、より低い定量下限を持つ手法（ICP-MS等）による確認分析を行うべきである。この留保を明記せずに「基準超過」とのみ報告することは、科学的に不誠実である。

なお、図4-1において灰色で示した領域は定量下限未満であり、その領域の値は参考値である。Al、Zn、Cuについても、多くの地点の測定値が定量下限（0.01 mg/L）を下回っていることに留意されたい。

4. 4. 3 スクリーニングの結果と導入判断

以上の結果に基づき、飲用系統の導入候補として適格性を判断した。Zn・Pbがいずれも基準を下回った地点（地点E、地点G、地点H、および地点I・J）が、金属の観点からは第一段階のスクリーニングを通過したことになる。

ただし、以下の点は追加の確認を要する。

- **地点H（個人宅）**：ろ過前試料に黒色粒子が確認された。Mn酸化物である可能性があり、初年度に墨田区で問題となったMnの嫌氣的溶出と同じ機序が働いている懸念がある。溶存Mn濃度は0.0040 mg/Lと基準（0.05 mg/L）を十分に下回っているが、貯留期間が長期化した際の挙動を監視すべきである。
- **地点I（ステンレス製タンク）**：Ca濃度が12.2 mg/Lと10地点中で最も高い。硬度の観点から問題となる水準ではないが、他地点（0.96～5.19 mg/L）と比較して顕著に高く、原因の確認が望ましい。

4. 4. 4 初年度の結論に対する修正

初年度の報告において、本研究は「鉛やカドミウム等の重金属による健康リスクは極めて低い」と結論した。この結論は、墨田区の29タンクを対象とした調査に基づくものであり、当該地域については妥当である。

しかし本年度の調査は、この結論を東京全域に一般化してはならないことを示した。集水面に金属材が用いられている地域においては、ZnおよびPbが現実的なリスク因子となる。初年度の結論には、「調査地域（墨田区）においては」という限定を付す必要がある。

このことは、より一般的な教訓を含んでいる。雨水の水質は、地域・建物・集水面の個性に強く依存する。したがって、「雨水は（一般に）安全である／危険である」という一般命題を立てること自体が誤りであり、個々のタンクについて確認するほかない。これは、本研究がスマートフォンによる水質測定アプリの開発に注力してきたことの、まさに根拠である。誰もが自分のタンクの水質を確認できる手段があってはじめて、雨水利用は安全になる。

5. 研究成果の国際発信 — Springer 単行本の執筆・出版

5. 1 書籍の概要

本研究の成果を国際的な学術コミュニティに発信するため、Springer Nature 社の書籍シリーズ **Springer Water** の単行本の 1 章として、東京における雨水活用に関する成果を執筆・出版した。

項目	内容
書名	<i>Sustainable Rainwater Harvesting Systems: A Paradigm Shift in Rainwater and Stormwater Use</i>
シリーズ	Springer Water (Springer Nature)
編者	Tamim Younos (Green Water-Infrastructure Academy)、Tammy E. Parece (Ohio State University)、Juneseok Lee (Manhattan University)
担当章	第 9 章 “Rainwater Harvesting and Management in Central Tokyo”
著者	屋井裕幸 (公益社団法人 雨水貯留浸透技術協会)、笹川みちる (NPO 法人 雨水市民の会)、山村寛 (中央大学・責任著者)
ISBN	978-3-032-30025-6
書籍 DOI	10.1007/978-3-032-30026-3
章 DOI	10.1007/978-3-032-30026-3_9

本章は、行政・技術者（雨水貯留浸透技術協会）、市民（雨水市民の会）、研究者（中央大学）という三者の協働によって執筆された点に特色がある。これは本研究プロジェクトそのものの体制を反映したものであり、雨水管理が技術のみでも市民活動のみでも成立しないという、本研究の基本的な主張を、執筆体制そのもので体現している。

5. 2 章の構成と分担

本章は 5 節から構成される。

1. Introduction 東京の地理・気候（人口約 1,400 万人、面積約 2,194 km²、23 区の人口密度約 15,000 人/km²、年降水量約 1,500～1,600 mm）を提示し、ロンドン（約 600 mm）やパリ（約 650

mm) を大きく上回る降水量を持ちながら、一人あたりの空地面積が主要都市中最低水準にあるという、東京の構造的困難を示す。徳川家康の江戸入府（1590 年）以来の湿地開発と治水の歴史から説き起こし、「流せば洪水、貯めれば資源」という思想の系譜を辿る。

2. Flood Control (治水) [屋井氏担当] 東京都の豪雨対策の政策枠組みと、雨水貯留浸透施設の実態を整理する。9 つの重点河川流域において、目標とする流出抑制容量の約 66% が達成されていることを示し、公共施設・民間住宅・道路における代表的な事例を提示する。

3. Small-Scale Rainwater Harvesting (小規模雨水活用) [笹川氏担当] 東京の低地（墨田区）と台地（武蔵野市）という対照的な 2 地域における、市民主体の雨水活用の実践を比較する。墨田区の路地尊（コミュニティ雨水タンク）が近隣の交流と防災力を育み、武蔵野市の市民参加型レインガーデンが住民を地域の水循環に結びつけている様を描く。過去 40 年にわたる行政と市民の協働が、日本における分散型雨水管理を前進させてきた経緯を記録する。

4. Active Utilization of Rainwater as Drinking Water (雨水の積極的飲用利用) [山村担当] 本研究の成果を中核とする節である。以下の 7 項に分かれる。

- 4.1 雨水飲用利用の背景と意義（災害レジリエンス、人口減少下の分散型水道）
- 4.2 水道水質基準と法的枠組み（51 項目の構造、水道法・雨水利用推進法における雨水の位置づけ、飲用井戸等衛生対策要領に準じた管理の考え方）
- 4.3 大気環境と雨水の水質（東京都のディーゼル車規制の効果：PM2.5 が 10 年間で約 55% 減少、2023 年度の年平均濃度は一般局 8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。NOx は 1997 年比で約 50% 減少）
- 4.4 雨水の飲用利用における課題（水質面・意識面）
- 4.5 調査：心理的要因とリスク因子の特定（初年度の成果：121 名のアンケート、29 タンク・8 区画の水質分析）
- 4.6 課題への対応（初年度の成果：UF 膜処理による 51 項目適合、pH を AI の代替指標とする簡易評価）
- 4.7 雨水飲用の実践例（福井工業大学の「あまみずサイダー」、東京の「雨水ビール」、オランダ Hemelwater、豪州 Cloud Juice）

5. Outlook and Conclusion [山村担当] 3 つの視点（大規模インフラによる治水、小規模な市民実践、飲用利用の可能性）を統合し、「ハードウェア（技術）＋ソフトウェア（人の意識）」という新しい雨水管理モデルを提示する。あわせて、本研究の限界（後述）と今後の研究課題を明示する。

5. 3 執筆・出版の経緯

時期	事項
2025 年 10 月	Rain 本の打ち合わせ（章構成の検討）
2026 年 2 月	編者より Springer Water の書式サンプルを受領。 原稿を提出
2026 年 3 月	査読 1 回目を受領。指摘事項：①要旨・キーワードの追加、②一部の図の問題、③各図への出典明記、④章末セクションの再構成

時期	事項
2026 年 4 月	最終版を提出。 技術査読が完了し、原稿が Springer Water へ転送された
2026 年 5 月	制作部門より照会：①表が画像形式であるため編集可能形式で再提出すること、②一部の図に判読不能なフォントが含まれること。いずれも対応
2026 年 6 月 14 日	校正刷り（eProof）が公開 され、共著者 3 名で分担して校正
2026 年 6 月 29 日	校正の提出を完了 （以降の修正は不可）
2026 年 7 月	出版社スタイルに関する最終確認（数値のカンマ表記）を承認

査読・制作過程で得られた指摘のうち、「**各図に出典を明記せよ**」という指摘は、**本研究の性格に照らして重要な意味を持った**。本章の図表の多くは、市民団体が長年にわたり蓄積してきた記録や、行政の公表資料に由来する。国際的な学術書として出版するにあたり、これらの出典を厳密に明示する作業は、**市民活動の記録を学術的な引用可能性のある形に変換する作業**でもあった。

また、本章で提示する水質データについては、**個別の採水場所が特定されない表現とする方針**を採り、墨田区とも事前に共有した。これは初年度の報告書と同じ方針であり、各自治組織へのリスクコミュニケーションおよびセキュリティ上の配慮に基づく。

5. 4 本章で提示した限界（Limitations）

学術書としての誠実性を担保するため、本章では以下の限界を明示的に記載した。これらはそのまま本研究全体の限界でもある。

1. **地理的範囲の限定**：本章の対象は東京都心部であり、極めて高い人口密度、豊富な降水量、長い治水の歴史という固有の条件を持つ。これらの知見を、制度的枠組みの異なる途上国の都市などに移転する際には、慎重な検討を要する。
2. **水質分析の統計的検出力**：29 基のタンクを 8 区画に分け、区画ごとの最大値として報告した集約手法は、地点情報の秘匿という実務上の要請に基づくものであるが、統計的検出力を制限する。51 項目の全項目検査は、基準を満たした 5 基のタンクのみを対象としており、これは**最良のケースを示すものであって、タンク全体の状態を代表するものではない**。
3. **簡易評価手法の妥当性**：pH と Al の相関（ $r = 0.66$ 、 $R^2 = 0.44$ ）は、観測された分散の半分未満しか説明していない。この簡易評価手法を市民に広く推奨するには、独立したデータセットによる検証が必要である。また、UF 膜処理水から一般細菌が検出された事例（採水時のコンタミネーションと推定）は、**市民が運用する分散型システムにおいて水質を維持することの難しさ**を浮き彫りにしている。
4. **アンケートの代表性**：心理的阻害要因の調査は、雨水フェスティバルの来場者を対象としたものであり、彼らは一般市民よりも雨水利用に好意的である可能性が高い。結果は示唆的なものであって、東京都民全体を代表するものではない。

5. 5 本章で提示した今後の研究課題

1. 季節・年をまたぐ雨水水質の長期モニタリング（気候変動が降雨化学に及ぼす影響の把握）
2. 分散型雨水飲用システムの経済性評価（膜ろ過・維持管理・水質監視のコストを、集中型水道と比較する）
3. 市民が利用可能な、低コスト・リアルタイムの水質センサーの開発（簡易評価手法と信頼できる安全性保証の間隙を埋める）
4. タンク種別・コミュニティ環境ごとの事前排水管理戦略の比較介入研究
5. 同様の都市水課題を持つ他のメガシティ（ソウル、上海、シンガポール等）との比較研究

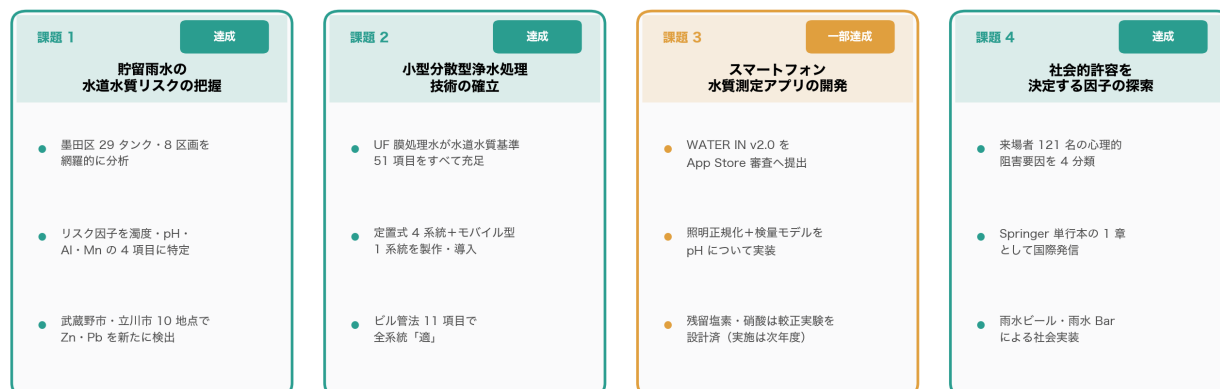
このうち第3項は、まさに本報告第2章で述べた **WATER IN** の開発が目指すものである。国際的な学術書において「今後必要である」と位置づけた課題に対し、本研究はすでに実装を進めているという関係にある。

6. 総合考察 — 本研究の最終成果と展望

6. 1 申請時に掲げた4課題に対する到達状況

本研究は申請にあたり、4つの課題を掲げた。2か年を終えるにあたり、その到達状況を総括する（図6-1）。

図6-1 申請時に掲げた4課題に対する到達状況（2か年の総括）



課題1 貯留された雨水について、水道水質項目の観点から上水利用時のリスクを把握する【達成】

墨田区内の公共雨水タンク 29 基を 8 区画に分けて網羅的に分析し、リスク因子を「濁度」「pH」「溶存態 Al」「溶存態 Mn」の 4 項目に特定した（初年度）。さらに、代表 5 試料について水道水質基準 51 項目の全項目分析を外部機関に委託し、UF 膜処理により全項目が基準を満たすことを実証した。

本年度はこれを地理的に拡張し、武蔵野市・立川市の 10 地点について金属分析を実施した。その結果、**武蔵野台地側では Zn および Pb が新たなリスク因子として浮上することを見出し、リスクの起源が墨田区（タンク由来）と武蔵野市（集水面由来）で本質的に異なることを明らかにした。**

この拡張は、単なる追加データの取得にとどまらない。**初年度の結論に「調査地域においては」という限定を付す必要があることを、自ら発見したという点で、研究の自己修正として重要である。**

課題 2 小型分散型浄水処理による水質変換技術を確立し、手引きとしてまとめる【達成（手引きの完成は残課題）】

定置式 4 系統（系統① UF 膜／系統② MF 膜／系統③ MF 膜四連／系統④）およびモバイル型 1 系統（系統⑤ スーツケース型 MF 膜）、計 5 系統を構築・運用した。ビル管法 11 項目の水質検査を全系統について実施し、**すべての系統で「適」の結果を得た。**

実地運用を通じて、選定フローの骨格となる 5 つの知見（水源選定の優先、UF 膜の推奨、単純構成の優位、ポンプというボトルネック、遮光と採水手順の重要性）を得た。

ただし、これらを冊子として取り纏める作業は完了していない（6.3 節）。

課題 3 リスク項目を簡易かつ高精度にスマートフォンで評価できる水質測定アプリを開発する【一部達成】

水質管理アプリ **WATER IN v2.0** を開発し、App Store の審査に提出した。参照色票併写方式による照明正規化、色差ベースの検量モデル、判定不能の明示的な棄却、位置情報付きの記録と地図共有を実装した。旧版との数値的同一性は 319 ケースのゴールドンテストにより完全一致を確認した。

一方で、**実際の試験紙と標準 pH 緩衝液を用いた独立の精度検証は未実施である（2.6.3 節）。**また、遊離残留塩素および硝酸態窒素については、試験紙の選定と校正実験の設計・手順書の整備までを完了したが、実験そのものは未実施である。したがって本課題は「一部達成」と評価するのが誠実である。

課題 4 市民との交流を通じて、雨水の上水利用における社会的許容を決定する因子を探索する【達成】

初年度に、雨水フェスティバル来場者 121 名を対象とした自由記述式アンケートをテキストマイニングにより解析し、心理的阻害要因を 4 カテゴリーに分類した。本年度は、この成果を **Springer Water の単行本の 1 章**として国際発信した。あわせて、雨水 Bar、雨水ビール（2026 年 6 月に醸造完了、8 月 14 日に乾杯イベントを予定）、雨ともカフェといった実践を通じ、市民が実際に雨水を口にする機会を継続的に創出した。

6. 2 本研究が明らかにした 3 つの本質的知見

個別の成果を超えて、本研究が 2 か年を通じて明らかにした、より一般的な知見を 3 点にまとめる。

知見 1 雨水の水質は一般化できない。ゆえに「測れること」が本質である。

本研究の出発点にあった問いは、「雨水は飲めるか」であった。2 か年を終えた現在、この問いの立て方自体が誤っていたと考えている。

墨田区の低地では、コンクリート製タンクからの Al 溶出と pH 上昇が問題となった。武蔵野の台地では、金属屋根からの Zn・Pb 溶出が問題となった。同じ東京の、直線距離で 20 km と離れていない地域である。屋根材、雨樋、タンクの材質、貯留期間、清掃頻度、周辺の大気環境——これらの組み合わせは、タンクごとに固有である。

したがって、「雨水は飲める」という一般命題も、「雨水は危険である」という一般命題も、ともに誤りである。正しい問いは「このタンクの水は飲めるか」であり、その問いに答えられるのは、そのタンクを測った者だけである。

この認識が、本研究の重心を「水質を調べる研究」から「水質を測れるようにする研究」へと移動させた。WATER IN の開発は、単なる副次的な道具作りではなく、**本研究が到達した認識の必然的な帰結**である。

知見 2 分散型浄水システムのボトルネックは、膜ではなくポンプと運用にある。

膜ろ過技術は成熟している。UF 膜モジュールは市販品として容易に入手でき、価格も低下している。本研究が 5 系統すべてで 11 項目検査「適」を得たことは、膜の性能に疑問の余地がないことを示している。

実装を阻んだのは、膜ではなかった。

- **ポンプ**：飲用適合（接液部にグリースを含まない）かつ自吸式という条件を満たす市販ポンプの選択肢が乏しい。最終的に研究室保有のポンプを貸与せざるを得なかった。
- **配管**：接着剤の溶出を避けるため、機械的接合を選ばざるを得ない。
- **運用**：四連構成における圧力配分の不均衡（3.2.3 節）、採水位置の誤り（3.3 節）、タンクの遮光不足による藻類増殖——いずれも、装置の性能ではなく運用に起因する問題である。

分散型雨水浄水システムの普及を論じる際、議論は膜性能に集中しがちであるが、**真のボトルネックは周辺機器と運用にある**。この知見は、次年度に取り纏める手引きの中核をなすべきものである。

知見 3 安全情報を扱うシステムは、「判定できない」と言えなければならない。

WATER IN v1 は、測定に失敗した際に内部的な番兵値 0.0 を返し、それを「pH 0.0 = 強酸性」として表示していた。すなわち、**測定できていないにもかかわらず、「極めて危険な水である」と断言していた**。

同様の構造的欠陥は、旧版の残留塩素モデルにも存在した。判定条件を外れた場合でも同じ式で値を返しており、信頼できない測定を排除できていなかった。

これらは単なる実装上のバグではなく、「常に答えを返さなければならない」という設計思想そのものの誤りである。水質という安全情報において、誤った値を自信ありげに提示することは、値を返さないことよりも有害である。

この認識に基づき、v2.0 では判定不能を型として明示的に扱い、保存を拒否し、撮り直しを促す設計に改めた。硝酸態窒素の設計においても、「0 mg/L (安全)」と「測定できなかった」が区別できなくなることを避けるため、番兵値の使用を明示的に禁止する要件を課した。また、亜硝酸態窒素については、水質基準 (0.04 mg/L-N) が試験紙の測定下限 (0.15 mg/L-N) を下回るという原理的制約を、利用者に隠さず明示する方針とした。

測れないことを、測れないと言う。これは技術的には後退に見えるが、市民が自らの水を管理する道具として信頼を得るためには、譲れない一線である。

6. 3 残された課題

本研究は最終年度を終えるが、以下の課題が残されている。これらは次年度以降、他の資金源も活用しつつ継続する。

課題 A WATER IN の独立精度検証【最優先】

実際の試験紙と標準 pH 緩衝液を用いた、独立の精度検証を実施する。2.6.2 節で示した自己整合性検証は、教師データに対する応答を示すものであって、未知試料に対する精度を示すものではない。加えて、同検証により発見された公称 pH 4 近傍における判定木の隙間 (mode 4 に落ちる) を解消するため、判定条件を再設計する必要がある。

課題 B 残留塩素・硝酸態窒素の較正実験の実施

2.7.3 節で述べた較正実験 (全 18 ブロック・撮影 652 枚・15~20 実験日、イオンクロマトグラフによる真値担保) を実施し、モデルを構築してアプリに実装する。試験紙は選定済み、実験計画書および学生向け手順書は整備済みであり、試験紙の発注をもって着手できる状態にある。

課題 C 浄水処理システム選定フロー図と冊子の取り纏め

第 3 章で得た 5 つの知見に基づき、選定フロー図を完成させ、冊子として取り纏める。とりわけ、飲用適合かつ自吸式のポンプについて、具体的な型番と入手経路を示すことが、最も実務的な貢献となる。

課題 D 系統③ 四連ろ過システムの不具合解消

圧力配分の不均衡に起因すると見られる流量低下について、バルブによる調整を行い、正常な運転状態を回復する。あわせて、同システムの原水から亜硝酸態窒素が検出されたことを踏まえ、当該地点の水を飲用に供するか否かの判断を、共同研究者と協議のうえ決定する。この判断は、本研究が繰り返し述べてきた「測定に基づく水源選定」の原則を、自らに適用する試金石である。

課題 E Pb の確認分析

4.4.2 節で述べたとおり、本調査における Pb の定量下限は水道水質基準値と一致しており、超過判定は検出限界近傍で行われている。ICP-MS 等、より低い定量下限を持つ手法による確認分析を実施する。

課題 F 食品衛生法 26 項目検査の結果確認

2026 年 6 月の雨水クラフトビール醸造時に採取した 3 検体（ろ過前・ろ過後・ろ過かつ煮沸後）の検査結果を確認し、食品製造用水としての適合性を評価する。

6. 4 展望 — 雨水を中心とした新たな水循環に向けて

本研究は、雨水タンクの治水ポテンシャルを最大化するという課題設定から出発した。タンクに空き容量がなければ流出抑制は機能せず、空き容量を作るには水を使うほかなく、水を使うには安全でなければならない。この論理の連鎖を、科学的に裏づけることが目的であった。

2 か年を経て、この連鎖は実証されたと考えている。適切なタンクを選び、膜ろ過を施せば、貯留雨水は水道水質基準 51 項目を満たす。その水は、実際に市民の口に入り、ビールとなり、日常の一部となりつつある。

しかし本研究が同時に明らかにしたのは、この連鎖が「個別性」という壁の上に成り立っているという事実である。どのタンクでも成り立つわけではない。低地と台地でリスクは異なり、屋根材ひとつで結論は変わる。したがって、雨水利用を社会に広げるには、「安全な雨水利用の方法」を配布するだけでは足りず、「自分の雨水が安全かを確かめる手段」を配布しなければならない。

WATER IN は、そのための道具である。無料で、登録不要で、ネットワークがなくても動き、測れないときは正直に測れないと言う。この道具が市民の手に渡り、各地の雨水タンクの水質が地図上に蓄積されていくとき、雨水は初めて「管理された水源」となる。

本研究の最終的な貢献は、雨水が飲めることを示した点にあるのではない。**雨水が飲めるかどうかを、誰もが自分で確かめられるようにした点にある。**

その先には、内水氾濫の抑制、災害時の代替水源の確保、人口減少社会における自立分散型水インフラの実現、そして輸送に依存した水供給からの脱却による脱炭素化という、申請時に掲げた社会的意義が広がっている。それらはいずれも、一つひとつのタンクの水質が、その所有者自身によって把握されることの上にしか成立しない。

雨水を「流せば洪水、貯めれば資源」と表現した先人の言葉に、本研究は一語を加えたい。「測れば、水道」である。

7. Conclusion

本研究は、都市部における雨水タンクの治水能力を最大限に活用するため、雨水の積極的な上水利用に向けた技術と社会システムを、2 か年にわたり研究した。最終年度である 2025 年度は、初年度に得た科学的知見を「市民の手に渡る道具」へと変換することに注力し、以下の結論を得た。

1. **水質管理アプリ「WATER IN」の開発**：pH 試験紙をスマートフォンで撮影するだけで pH を数値化するアプリを開発し、App Store の審査に提出した。中核となるのは、**測定のたびに試験紙パッケージの基準色票を併写し、その場で照明補正を張り直す方式**であり、これにより先行技術の最大の失敗要因であった照明依存性を克服した。検量モデルは、正規化後の RGB チャンネル差 (R-G, R-B, G-B) を説明変数とする 3 本の検量線を、色差により切り替える構造とした。色相 (HSV) を採用しなかったのは、本試験紙の発色が色相環上の回転ではなくチャンネル間コントラストとして現れるためである。
2. **判定不能の明示という設計原則の確立**：旧版が測定失敗時に「pH 0.0＝強酸性」と誤表示していた欠陥を是正し、信頼できない測定は値を返さず保存も拒否する設計に改めた。また、亜硝酸態窒素の水質基準 (0.04 mg/L-N) が市販試験紙の測定下限 (0.15 mg/L-N) を原理的に下回ることを明らかにし、この制約を利用者に隠さず明示する方針を定めた。**安全情報を扱うシステムは、「判定できない」と言えなければならない。**
3. **雨水ろ過装置 5 系統の構築と実地運用**：定置式 4 系統に加え、可搬式 (モバイル型) のスーツケース型ろ過システムを新規に開発した。全系統についてビル管法 11 項目の水質検査を実施し、**すべて「適」の結果を得た**。実装の過程で、分散型システムのボトルネックが膜ではなく**飲用適合格かつ自吸式のポンプおよび運用**にあることを明らかにした。
4. **リスクプロファイルの地域依存性の発見**：武蔵野市・立川市の 10 地点を新たに分析した結果、**亜鉛 (Zn) および鉛 (Pb)** が 5 地点で水道水質基準を超過し、その起源が金属製の屋根材・雨樋であることを示唆した。これは、コンクリート製タンクに起因する Al・pH が主要リスクであった墨田区とは本質的に異なる。**雨水の水質は地域・建物・集水面の個別性に強く依存し、一般化できない**。ただし Pb については、定量下限が水道水質基準値と一致しており、確認分析を要する。
5. **国際発信**：Springer Nature 社の Springer Water シリーズの単行本第 9 章 “Rainwater Harvesting and Management in Central Tokyo” (ISBN 978-3-032-30025-6、章 DOI 10.1007/978-3-032-30026-3_9) として、東京における雨水活用の成果を、行政・市民・研究者の三者協働により執筆・出版した。

本研究の最終的な貢献は、雨水が飲めることを示した点にあるのではなく、**雨水が飲めるかどうかを、誰もが自分で確かめられるようにした点にある**。ハード (技術) とソフト (人の意識) を融合させた新しい雨水管理モデルは、既存インフラの価値を再評価し、持続可能な都市の水環境構築に貢献する実践的な知見となる。

参考文献

- [1] 国土交通省, 気象庁, 日本の年降水量, URL: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn_r.html (2025 年 2 月 26 日最終閲覧)
- [2] 気象庁, 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, 国土交通省, URL: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (2025 年 2 月 26 日最終閲覧)
- [3] 国土交通省, 1 年間の水害被害額の概要, URL: <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001766898.pdf> (2025 年 2 月 26 日最終閲覧)

- [4] 国土交通省. 近年の降雨及び内水被害の状況. 下水道設備の現状について. URL:
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001320996.pdf> (2025 年 2 月 26 日最終閲覧)
- [5] 総務省. 合流式・分流式下水道について. URL:
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/c-gyousei/gesuido_zaisei/pdf/050715_s3-1.pdf
(2025 年 2 月 26 日最終閲覧)
- [6] 森田弘昭. (2003). 都市の水循環における雨天時汚濁負荷流出現象の影響解析. 土木技術資料, 45(5), 42-47.
- [7] 日本下水道協会. (2019). 下水道施設計画・設計指針と解説 前編.
- [8] 東京都. 東京都豪雨対策基本方針.
- [9] 村上道夫, 稲葉愛美, 原本英司, 章希聞, 中村高志, 屋井裕幸, 佐野翔一 ほか. (2012). 低炭素型住宅へ向けた雨水利用の可能性 住宅における用途別雨水利用を目的とした屋根排水の水質評価. 住総研研究論文集, 38, 235-244.
- [10] 近藤晶, 三寺潤, 笠井利浩. (2022). 雨を水資源として再認識するための意識変容ツールの開発—「雨を飲む」という非日常体験を通して. 環境情報科学論文集, Vol. 36 (2022 年度 環境情報科学研究発表大会), 138-143. 一般社団法人 環境情報科学センター.
- [11] 東京都環境局. 東京都の大気環境の現状. URL:
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kankyo/torikumi-pm25_ox-report2019-files-1-1
(2025 年 2 月 26 日最終閲覧)
- [12] 兵頭正浩, 佐藤周之, 桑原智之. (2008). セメント結合材から環境水中へ溶出する重金属類の定量的評価に関する研究 (エコ・緑化コンクリート). コンクリート工学年次論文集, 30(2), 343-348.
- [13] Okui, H., Sasagawa, M., & Yamamura, H. (2026). Rainwater Harvesting and Management in Central Tokyo. In T. Younos, T. E. Parece, & J. Lee (Eds.), *Sustainable Rainwater Harvesting Systems: A Paradigm Shift in Rainwater and Stormwater Use* (Springer Water). Springer Nature. ISBN 978-3-032-30025-6. DOI: 10.1007/978-3-032-30026-3_9
- [14] Topping, A. J., & Kolok, A. S. (2021). Assessing the accuracy of nitrate test strips and a smartphone application for citizen science water quality monitoring. (比色試験紙とスマートフォンアプリによる硝酸測定の精度評価)
- [15] 厚生労働省. 水質基準に関する省令 (平成 15 年厚生労働省令第 101 号) .
- [16] 厚生労働省. 飲用井戸等衛生対策要領 (昭和 62 年 1 月 29 日衛水第 12 号) .
- [17] 雨水の利用の推進に関する法律 (平成 26 年法律第 17 号) .
- [18] 柴早苗. (2019). 雨水活用のもう一つの課題～貯留雨水の水質はどうか? ～. 水利科学, 63(4), 120-137.
- [19] 笹川みちる. (2023). 「雨水活用」と水循環の健全化における小規模な試み：今求められる環境対応. 色材協会誌, 96(12), 395-399.

[20] 建築物における衛生的環境の確保に関する法律（ビル管法）および同施行規則（水質検査 11 項目）。

[21] Environmental Protection Agency (EPA), Method D99-003: Free Chlorine Test Strip Method for Drinking Water Compliance Monitoring.

付録

付録 A 新規導入候補地点（武蔵野市・立川市 10 地点）の金属濃度全測定値

地点は記号（A～J）で表記する。個人宅を含むため、地点名は非公開とする。

単位：mg/L。0.45 μm ろ過後、ICP-OES による定量。網掛けは定量下限値未満（参考値）。太字は水道水質基準超過。

地点	種別	タンク	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
基準値	—	—	300≧ ※	0.2≧	300≧ ※	0.02≧	0.05≧	0.3≧	1≧	1≧	0.01≧
定量下限	—	—	0.000 1	0.01	0.01	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.01	0.01	0.01
A	公共施設	150 L	0.676	0.226	3.689	0.000 15	0.019	0.031	0.098	0.373	0.012
B	公共施設	200 L	0.722	0.003	5.188	0.000 33	0.025	0.026	0.234	1.471	0.016
C	公共施設	200 L	0.510	0.022	3.709	0.002 2	0.021	0.002	0.879	4.420	0.027
D	公共施設	200 L	0.511	0.006	2.719	0.000 08	0.006	0.003	0.107	1.066	0.006
E	公共施設	200 L	0.069	0.008	0.960	0.000 04	0.004	0.004	0.003	0.030	0.006
F	公共施設	200 L	0.382	0.005	3.171	0.000 16	0.009	0.004	0.057	1.163	0.005
G	個人宅	瓶	0.328	0.002	3.276	0.000	0.001	0.000 2	0.001	0.007	0.002
H	個人宅	ペットボトル	0.197	0.006	2.443	0.001 0	0.004	0.001	0.003	0.438	0.001
I	個人	ステ	0.418	0.007	12.17 7	0.001 2	0.005	0.001	0.082	0.154	0.002

地点	種別	タンク	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
	宅	ンレス製									
J	個人宅	信楽焼	0.128	0.007	4.647	0.00088	0.006	0.0005	0.017	0.018	0.001

※ Mg・Ca については硬度（CaCO₃換算）として 300 mg/L 以下の基準が設定されている。Cr については六価クロムとして 0.02 mg/L 以下。

留意事項：Pb の定量下限値（0.01 mg/L）は水道水質基準値（0.01 mg/L）と一致するため、超過判定は検出限界近傍で行われている。確認分析（ICP-MS 等）を要する（本文 4.4.2 節）。

付録 B WATER IN 検量モデルの全係数

B-1 照明正規化

対象パッド列 p について、基準色票 16 段の観測値 x と真値 y から、R・G・B 各チャンネル独立に最小二乗直線を張る。

$$y = ax + b, \quad a = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\text{Var}(x)}, \quad b = \bar{y} - a\bar{x}$$

B-2 mode 判定

mode	対象パッド	条件
1（酸性側）	パッド 0	R-G > 90 かつ G-B < 146 かつ R-B < 150
2（中性域）	パッド 1	-40 < R-G < 70 かつ -25 < R-B < 185 かつ 10 < G-B < 110
3（アルカリ側）	パッド 2	R-G > 75 かつ R-B < 190 かつ G-B < 128
4（判定不能）	—	上記いずれにも該当しない → 値を返さず、保存を拒否

B-3 検量式

mode 1： $\text{pH} = (f_{\text{RG}} + f_{\text{RB}}) / 2$

- $f_{\text{RG}}(x) = -4 \times 10^{-7} x^4 + 2 \times 10^{-4} x^3 - 0.0347 x^2 + 2.5171 x - 60.471$
- $f_{\text{RB}}(x) = 5.906979 \times 10^{-8} x^4 - 3.687084 \times 10^{-5} x^3 + 8.306749 \times 10^{-3} x^2 - 0.7737231 x + 26.81055$
- $(f_{\text{GB}}(x) = 2 \times 10^{-6} x^3 - 2.80 \times 10^{-4} x^2 + 0.022289 x + 3.121426$ は算出されるが平均には算入しない)

mode 2： $\text{pH} = (f_{\text{RG}} + f_{\text{RB}} + f_{\text{GB}}) / 3$

- $f_{\text{RG}}(x) = -1 \times 10^{-5} x^3 + 6 \times 10^{-4} x^2 + 0.0303 x + 6.4479$

- $f_{RB}(x) = -6 \times 10^{-7} x^3 + 2 \times 10^{-4} x^2 - 0.036 x + 8.2927$
- $f_{GB}(x) = -0.0456 x + 9.7907$

mode 3 : $pH = (f_{RG} + f_{RB} + f_{GB}) / 3$

- $f_{RG}(x) = 0.087267 x + 2.452448$
- $f_{RB}(x) = -0.018725 x + 12.833116$
- $f_{GB}(x) = -0.015696 x + 11.013066$

B-4 pH → RGB 逆写像（結果画面の色見本）

- $R = 0.384 pH^4 - 10.405 pH^3 + 94.606 pH^2 - 345.79 pH + 591.15$
- $G = 0.2544 pH^4 - 7.505 pH^3 + 75.852 pH^2 - 304.58 pH + 481.23$
- $B = -0.0819 pH^4 + 2.2833 pH^3 - 21.677 pH^2 + 82.922 pH - 98.95$

（各値は 0～255 にクリップ）

B-5 pH 判定区分

推定 pH 区分

< 5.8	強酸性
5.8 ～ 6.8	弱酸性
6.8 ～ 7.2	中性
7.2 ～ 8.6	弱アルカリ性
> 8.6	強アルカリ性

※ 水道水質基準は pH 5.8～8.6。

付録 C 構築した雨水ろ過システム一覧

#	設置場所	膜	形態	施工・製作	ビル管法 11 項目
①	市民団体の活動拠点（東京都墨田区）	UF	定置式・電動ポンプ	既設（本研究で運用・検証）	適
②	会館施設 レイシラボ	MF	定置式	既設（本研究で運用・検証）	適
③	事業所の屋外設備（埼玉県さいたま市南区）	MF 四連	定置式	2026 年 4 月 11 日 施工／5 月 3 日 遮光ネット設置・接続完了	適
④	事業所（東京都立川市）	膜ろ過	定置式	2025 年度 導入	一

#	設置場所	膜	形態	施工・製作	ビル管法 11 項目
⑤	スーツケース型	MF	モバイル（可搬式）・自吸式ポンプ	2025 年度 中央大学にて製作	適

付録 D 2025 年度 主要な活動記録

時期	事項
2025 年 2 月	路地尊等の水質調査結果の共有
2025 年 5 月	「雨水ドリンクプロジェクト」始動（尾崎昂嗣氏との連携開始）
2025 年 7 月	雨水市民の会 事務所の UF 膜ろ過システム稼働を確認。報道取材の打診
2025 年 8 月	雨水市民の会が令和 7 年度 水資源功績者表彰を受賞
2025 年 9 月	ぼうさいこくたい 2025／第 15 回 雨水ネットワーク全国大会（神戸）出展
2025 年 10 月	Springer 書籍の章構成打ち合わせ
2025 年 11 月	第 6 回 グリーンインフラ大賞 受賞内定
2025 年 12 月	墨田区（環境政策課）との雨水タンク開発に関する協議
2026 年 2 月	武蔵野市「雨とも」プロジェクトへの参画（トヨタ財団助成）。Springer 原稿提出
2026 年 3 月	雨水 Bar 開催。可搬式（スーツケース型）ろ過システムの開発方針を決定。Springer 査読 1 回目
2026 年 4 月 11 日	系統③（事業所の屋外設備）雨水ろ過飲用化システム 施工
2026 年 4 月	Springer 最終版提出 → 技術査読完了
2026 年 5 月	「雨ともカフェ」にて「雨水ドリンク これまで &これから」を発表
2026 年 6 月 2 日	武蔵野市・立川市 10 地点（地点 A～J）の金属分析（ICP-OES）結果
2026 年 6 月 14～29 日	Springer 校正刷りの校正・提出完了
2026 年 6 月 23 日	醸造所にて雨水ろ過作業（スーツケース型＋四連システム）。試飲実施
2026 年 6 月 24 日	雨水クラフトビール 仕込み
2026 年 7 月	スーツケース型のビル管法 11 項目検査「適」。

時期	事項
	全系統の検査完了
2026 年 7 月 12 日	水質管理アプリ「WATER IN」v2.0 を App Store 審査へ提出
2026 年 8 月 14 日（予定）	雨水クラフトビール 乾杯イベント

謝辞

本研究は、公益財団法人 旭酒造記念財団の研究助成によって実施されました。2 か年にわたり、雨水の飲用利用という挑戦的な課題に対して、継続的なご支援を賜りましたことに、心より御礼申し上げます。

共同研究者として本研究を支えてくださった、NPO 法人 雨水市民の会の笹川みちる理事、尾崎昂嗣氏、高橋朝子事務局長、柴早苗理事に深く感謝申し上げます。雨水タンクの調査、浄水装置の設置調整、市民との対話の場の設営、そして雨水を実際に飲むという文化の創造まで、皆様の実践なくして本研究は成立しませんでした。

雨水ろ過システムの設置にあたり、全水道会館の辻谷貴文氏、鎌田工業所の鎌田芳久氏、株式会社 アクアサポーターズの皆様、株式会社 26K ブルワリーの皆様にご協力をいただきました。Springer 書籍の執筆においては、公益社団法人 雨水貯留浸透技術協会の屋井裕幸氏と共著の榮に浴しました。水質調査にご協力いただいた墨田区、武蔵野市、立川市の関係各位、ならびにタンクを提供してくださった市民の皆様に御礼申し上げます。

水質分析および実験の遂行にあたっては、中央大学 水代謝システム研究室の学生諸君に多大な尽力をいただきました。水質管理アプリの原型を築いた石井崇晃氏、前田寛明氏、山本迅平氏の先駆的な仕事なくして、本年度のアプリ開発はありえませんでした。

末筆ながら、雨を「流すもの」から「使うもの」へと変える営みに、これからも力を尽くしてまいります。

以上