

愛知工業大学教育・研究特別助成
AIT Special Grant for Education and Research
令和2年度実績報告書

種 目	研究 分野横断型 研究期間：平成30年度～令和2年度
課 題 名	災害時の安全な給水システムの確保に関する分野横断型研究
研究代表者	手嶋 紀雄（工学部 応用化学科 教授）
研究分担者	鈴木 森晶（工学部 土木工学科 教授） 北川 一敬（工学部 機械学科 教授） 道木 加絵（工学部 電気学科 教授） 村上 博哉（工学部 応用化学科 准教授）
助 成 額	15,000,000 円（3年総額）

費目別決算

（単位：円）

区 分	合 計	設備備品費	消耗品費	旅 費	その他
経費内訳	15,000,000	8,820,951	4,909,887	238,240	1,030,922

専門分野：分析化学、環境化学

キーワード：震災、減災、救命、給水、安全

1. 研究開始当初の背景

阪神・淡路大震災や東日本大震災ではライフラインが完全に崩壊し、ガス・水道の応急復興完了までには3か月も有した。また近年、南海トラフ巨大地震発生の確率が高まっている。このような教訓や将来の懸念から、地区毎の防災倉庫の設置の他、雨水蓄積槽や水道水貯留タンクの設置と耐震化は継続的かつ緊急の社会的課題である。また震災時には、河川や井戸水中のフッ化物、ヒ素、マンガンなどの濃度上昇が報告されており、水質の悪化が懸念される。無電源で使用可能な簡易浄水器も市販されているが、水溶性の高い無機化合物に対する除去効率は高くない。

2. 研究の目的

そこで、貯水タンク等の水供給施設に対し、土木・機械工学の知見により頑健性を確保する。また貯水タンクの破損や設置状況等を安全に把握するため、遠隔操縦ロボットを活用する。一方、タンク内の水あるいは遊休井戸、河川水や地下水等が地震により有害化学物質で汚染された場合、本提案により開発する携行型浄水カートリッジによって汚染物を吸着

除去し、安全性を検査した上で、飲食に利用することを目指す。すなわち本研究により震災直後の数日間における生存のための水、さらには復旧が進む段階での生活水の確保が可能となる。このような救命に資する安全な給水システムの構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、①「携行型浄水カートリッジの作製と水質評価（応化：手嶋、村上；電気：道木）」、②「耐震性貯水タンクの作製と評価（土木：鈴木；機械：北川）」、③「遠隔操縦ロボットによる貯水タンクとその周囲環境の計測（電気：道木；応化：手嶋）」の各分担研究テーマを設定した。各分担研究の方法は「5. 研究成果」において成果と共に記す。また「4. 主要な設備備品」と「5. 研究成果」欄に記載する①、②、③の番号は、上述の各分担研究の番号に相当する。

4. 主要な設備備品

- (1) 自動比表面積細孔分布測定装置（応化）
¥3,888,000・・・・・・・・・・・・・・ ①
- (2) 解析ソフトウェア（SIMULIA Academic

- Research Suite) ライセンス料 (土木)
 ¥ 632,500 ②
 (3) スコープコーダ (機械)
 ¥ 579,700 ②
 (4) 3次元計測機 (電気)
 ¥ 385,000 ③
 (5) Lenovo Thinkpad (電気)
 ¥ 286,000 ③

5. 研究成果

①-a) 携行型浄水カートリッジの作製と水質評価 (村上・手嶋)

まず、様々な中性分子や金属イオンなどを吸着することが可能な吸着剤粒子の新規合成を行った ([雑誌論文] 欄 1)、4)。これら吸着剤粒子は多機能である反面、粒子状であることからハンドリングは困難である。そこで吸着剤粒子を固めて成形することでハンドリングが容易な形状とする成形技術の確立について検討を行った。

成形手法には 2 つあり、市販の接着剤を利用する手法 ([雑誌論文] 欄 3) および高分子化合物による化学反応を利用する手法 ([雑誌論文] 欄 2) である。前者の手法によって成形された吸着媒体の例を Fig. 1 に示す。Fig. 1

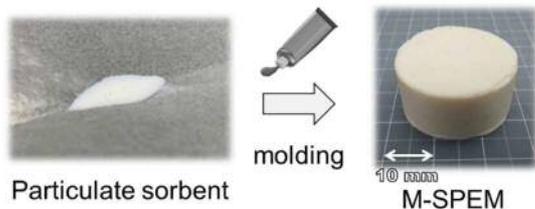


Fig. 1 A molding-type solid-phase extraction medium (M-SPEM) molded by an adhesive.

では円柱状の吸着媒体を示したが、厚さ数 mm 程度のシート、直径 5 mm 程度の円柱など任意の形状に成形可能である。しかし、吸着媒体の捕捉能は、吸着剤粒子そのものの捕捉能よりも低下してしまうことが確認されていた。

そこで接着剤を用いずに高分子化学反応を用いる後者の成形手法では、用いる吸着剤粒子の粒子径の変更や成形に利用する各種高分子の種類および配合比などについても精査を行った。その結果、特に中性分子の捕捉特性において、吸着剤粒子そのものを利用する場合と同等の吸着特性を有する吸着媒体の合成が可能であった。

①-b) 携行型浄水カートリッジの作製と水質評価 (手嶋・村上・道木)

①-a)で合成した新奇な吸着剤粒子あるいは吸着媒体による有害化学物質の除去能を評価するために、福井県立大学の片野肇教授との共同研究により、現場簡易分析を可能とするポータブル吸光光度計を開発した ([学会発

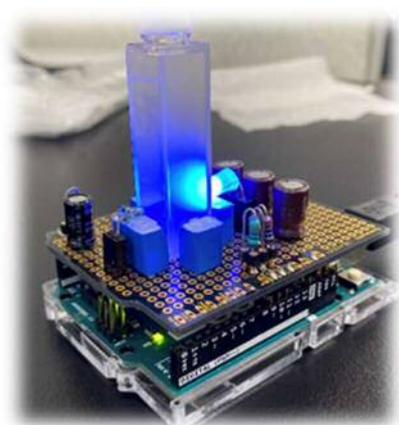


Fig. 2 Portable LED photometer [H. Katano, Bunseki Kagaku 68 (2019) 381].

表] 欄 1)。Fig. 2 はフルカラーLED の青色発光を用いる場合の写真である。この青色発光を銅(I)-ネオクプロイン錯体 (黄色) が吸収する現象を利用して、重金属イオンである銅(II)の吸着能を評価できるかについて基礎検討を行った。まず銅捕捉容量が既知 (0.25 mmol/g) である市販のキレート樹脂を用いて検討を行ったところ、ほぼ同等の銅捕捉容量値を得ることができた。よって本ポータブル吸光光度計の有用性が確認された。今後は、独自に合成された金属吸着剤の重金属捕捉容量を計測し、現場分析に応用する予定である。

②-a) 耐震性貯水タンクの作製と評価 (北川・鈴木)

初年度は、従来よりタンク損傷の原因と指摘されていた、スロッシングおよびバルジング振動の抑制かつ地震外力の伝達を低減させることを目指し、タンクと基礎の間に減衰性の高いゴムシートを挟み、その低減効果について模索した。また、ゴムは外気温によりその強度に影響を受け易いため、冬季に夏季の条件下での実験をするためストーブなどを用いて温度環境をコントロールした。

2 年目はタンクの接合部のディテールに着目すると共に、地震時における内水圧の変化との因果関係を明確にし、同時にゴムシートの効果について検証し、最大で 1/2 程度まで水圧を低減できることを確認した。

3 年目は、タンクのパネル接合部のひずみ分布および破壊直前に至るまでのせん断変形性能について実験を行った。同時にタンク製作時は考慮していないが、実際の地震荷重下においては、内水圧とせん断変形が同時に生ずることから、FEM 解析によりひずみ分布を検証した。その結果、Fig. 3 に示すように通常設計で考慮している場所とは異なる部分に、より大きなひずみの発生が確認され、今後の検討課題となった。

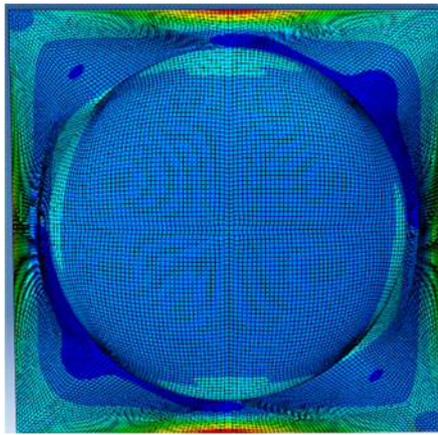


Fig. 3 Strain distribution diagram.

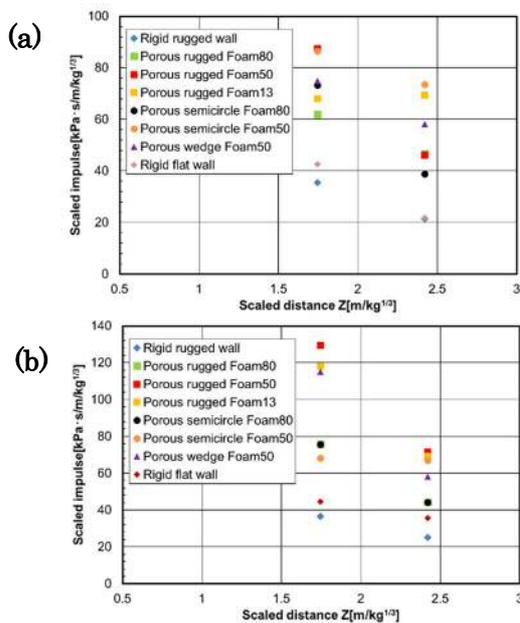


Fig. 4 Scaled impulse versus scaled distance. (a), First shock wave; (b), secondary shock wave.

②-b) 耐震性貯水タンクの作製と評価 (北川・鈴木)

水中爆発で発生する衝撃波を地震波と見立て、爆発環境下での各種表面形状の構造体に掛かる衝撃力昇圧の様相を調べた。

Fig. 4 に換算運動量と換算距離の関係を示す。(a)は入射衝撃波、(b)は二次衝撃波の換算インパルスである。可変形空隙媒体背面のインパルスの値はすべて凹凸形状剛体壁のインパルス値よりも増加する現象が確認された。実際の構造物の破壊にはインパルスと同様に衝撃荷重の変動が重要となる。

入射衝撃波 $\Delta P[\text{MPa}]/\Delta t[\text{ms}]$ は、凹凸剛体壁 $>$ 半円 Foam80 $>$ 凹凸 Foam80 $>$ 凹凸 Foam13 $>$ 半円 Foam50 $>$ 楔 Foam50 $>$ 凹凸 Foam50 の順で減少した。この結果、凹凸 Foam50 は凹凸剛体壁の衝撃荷重を約 1/236 まで減衰させることが明らかとなった。

②-b) 遠隔操縦ロボットによる貯水タンクとその周辺環境の計測 (道木・手嶋)

貯水タンクへの安全なアクセスルートやタンクの破損等を確認するための自律移動ロボットの実現第一歩として、初年度はロボットに搭載したタンク周辺環境の動画転送機能とロボットの遠隔操縦機能を実現した。構築システムに360°カメラとHMDを用いることで、遠隔操縦者は自身の操縦に適した臨場感ある視覚情報を元にロボットの遠隔操縦を行うことが可能となった (Fig. 5 (A))。2年目は前年度にロボットに搭載したカメラに環境地図作成用センサとして3D LiDARを搭載した。更に、遠隔操縦において無視できない通信遅延が作業効率に与える悪影響を抑制するために搭載した3D LiDAR情報に基づくAR映像提示システムを構築し (Fig. 5(B))、障害物回避問題において有効性を検証した。被験者実験より、通信遅延が発生する状況下では映像のみよりもAR映像を提示したときの方が、障害物を確実に回避できる結果が得られた。最終年度は、インフラ点検を容易にするため、Fig. 5(C)に示すようにロボットにパンチルトカメラ (PTカメラ) を搭載し、HMDと連動することで貯水タンク確認操作が容易かつ高解像度の映像を取得可能なシステムを構築した。

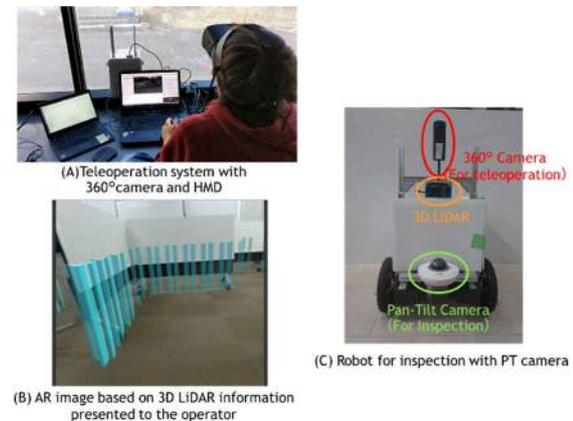


Fig. 5 Tank inspection system by a teleoperated mobile robot with 360° and PT cameras and HMD.

6. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 8 件)

- 1) H. Murakami, Yoshinori Inoue, Norio Teshima, (他員数 4), “Effects of hydrophilic monomers on sorptive properties of divinylbenzene-based reversed phase sorbents”, *Talanta*, **185**, 427–432 (2018), 査読有。
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.03.093>
- 2) 手嶋紀雄, 村上博哉, 井上嘉則, 三木雄太, 特願 2019-153939, “多孔性吸着媒体、多孔性吸着媒体を備えた固相抽出用カートリッジ及び多孔性吸着媒体の製造方法” (特許出願中)。

- 3) Y. Miki, H. Murakami, K. Iida, T. Umemura, Y. Esaka, Y. Inoue, N. Teshima, "Molding-type Solid-phase Extraction Media Glued with Commercially Available Adhesives", *Anal. Sci.*, **36**, 1153–1155 (2020), 査読有.
<https://doi.org/10.2116/analsci.20C012>
- 4) H. Murakami, T. Sugiyama, Y. Miki, T. Umemura, Y. Esaka, Y. Inoue, N. Teshima, "Development and evaluation of HILIC-Type sorbents modified with hydrophilic copolymers for solid-phase extraction", *Anal. Sci.*, **36**, 1185–1190 (2020), 査読有.
<https://doi.org/10.2116/analsci.20P084>
- 5) H. Murakami, Y. Inoue, N. Teshima, (他員数 4), "Evaluation of the adsorption properties of nucleobase-modified sorbents for a solid-phase extraction of water-soluble Compounds", *Talanta*, **217**, 121052 (2020), 査読有.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121052>
- 6) 手嶋紀雄, 村上博哉, 酒井忠雄, "流れ分析法による水質試験方法の開発", *分析化学*, **69**, 257–269 (2020), 査読有.
<https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.69.257>
- 7) 井上嘉則, 村上博哉, 手嶋紀雄, (他員数 2), "チタニアおよびアルミナにおける無機陰イオンおよび有機酸に対する固相抽出特性", *分析化学*, **70**, 53–58 (2021), 査読有.
2021.03.15 提出日時時点で doi 付与手続き中
- 8) K. Kitagawa, A. Abe, "The behavior of micro explosive charge underwater explosion near a rigid wall", *Progress in Scale Modeling, an International Journal*, Vol. 1, Article 5, pp. 1–6 (2020), 査読有.
<https://doi.org/10.13023/psmij.2020.05>
- 5) 佐久間真輝, 鈴木森晶, 青木大祐, 坂東芳行, 行田聡, "パネル接合部の損傷に着目したステンレス鋼製パネルタンク強度の検討", 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会, 愛知工業大学, 2019 年 3 月 1 日発表.
- 6) D. Aoki, Y. Bando, N. Watanabe, M. Suzuki, "Development of Seismic Device for Stainless Steel Rectangular Water Tank at Short Period Earthquake", The 14th Nordic Steel Construction Conference, Copenhagen, Denmark, 2019 年 9 月 19 日発表.
- 7) 佐久間真輝, 鈴木森晶, 青木大祐, 行田聡, 坂東芳行, "ステンレス鋼製パネルタンク内部の動水圧分布に着目した破損メカニズムの検討", 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, 香川大学, 2019 年 9 月 5 日発表.
- 8) 青木大祐, 行田聡, 鈴木森晶, "流体と構造の連成解析によるステンレス鋼製矩形水槽内の動水圧の検証", 令和 2 年度土木学会中部支部研究発表会, 名城大学, 2021 年 3 月 1~5 日発表 (オンライン).
- 9) K. Kitagawa, K. Ohtani, "Visualization of flow field around the underwater explosion", The 18th International Symposium on Flow Visualization, ETH Zurich, Switzerland, 2018 年 6 月 27 日発表.
- 10) K. Kitagawa, K. Ohtani, "Experimental study on washing effect for textile using the underwater explosion", 32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32), Singapore, 2019 年 7 月 18 日発表.
- 11) K. Suzuki, K. Doki, A. Torii, S. Mototani, "Remote control robot operator support system using augmented reality based on sensor information", IWGESD (International Workshop on Green Energy System and Devices), Aichi Institute of Technology, Japan, 2019 年 12 月 9 日発表.
- 12) 道木加絵, 山本貴大, 鈴木建哉, 鈴木森晶, 手嶋紀雄, "HMD と全天球映像を用いたインフラ点検用遠隔ロボットの開発", 令和 2 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 名古屋工業大学, 2020 年 9 月 4 日発表 (オンライン).
- 13) 道木加絵, 山本貴大, 鈴木建哉, 鈴木森晶, 手嶋紀雄, "HMD と PT カメラを用いたインフラ点検用遠隔ロボットの開発", 令和 3 年電気学会全国大会, 大阪大学, 2021 年 3 月 9 日発表 (オンライン).

〔学会発表〕 (計 13 件)

- 1) 上田奈穂, 片野肇, 村上博哉, 手嶋紀雄, "マイコンを利用した遠隔操作・簡易自動分析装置の検討", 第 38 回分析化学中部夏期セミナー, インテック大山研修センター, 2019 年 9 月 3 日発表.
- 2) 杉山倫明, 村上博哉, 杉山拓也, 三木雄太, 井上嘉則, 手嶋紀雄, "両性イオン型親水性高分子を被覆した HILIC 樹脂の開発", 「分析中部・ゆめ 21」若手交流会 第 20 回高山フォーラム, 三重大学, 2020 年 11 月 13 日発表 (オンライン).
- 3) 村上博哉, 手嶋紀雄, (他員数 5), "環境中全窒素の小型バッチ酸化分解/FIA", 日本分析化学会第 69 年会, 名古屋工業大学, 2020 年 9 月 16 日発表, (オンライン).
- 4) 青木大祐, 行田聡, 坂東芳行, 佐久間真輝, 鈴木森晶, "短周期振動を受ける矩形大型水槽の水圧低減装置に関する実験的検討", 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会, 愛知工業大学, 2019 年 3 月 1 日発表.

〔その他〕

<http://www.aitech.ac.jp/~analabo/>