

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：生物障害に対応した省エネルギー型水道システムの開発

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官
分担研究者 高梨 啓和 鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授
研究協力者 下ヶ橋 雅樹 国立保健医療科学院 主任研究官

研究要旨

本研究では、災害発生が浄水薬品の確保に影響を及ぼしている状況などを明らかにすること、生物障害の発生に伴って間接的に変化するエネルギー消費量などを明らかにすること、また、粒状活性炭処理プロセスの導入などの生物障害に対する恒久的対策の有効性を示すことなどを目的とした。本年度は、昨年度までに構築した、地理情報システムを用いた浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の推算方法を用いて、生物障害の発生に伴い間接的に増加する二酸化炭素排出量を推算した。また、粉末活性炭処理プロセス、粒状炭処理プロセス、膜ろ過プロセスおよびオゾン処理プロセスを組み合わせるなどの5種類のシナリオを設定して、イニシャルコストとランニングコストを推算してシナリオ分析を行い、これらのプロセスの導入による恒久的対策の有効性を検討した。

生物障害の発生に伴い増加する二酸化炭素排出量の全国値を推算した結果、全国の浄水場で消費された二酸化炭素排出量に占める割合は0.81%であった。また、シナリオ分析の結果、今後、生物障害の発生頻度の上昇や発生する臭気物質濃度の上昇により粉末活性炭の注入日数や注入率が上昇した場合には、粒状炭処理プロセスなどを導入することの有効性が明らかとなった。

A. 研究目的

本研究では、災害発生が浄水薬品の確保に影響を及ぼしている状況や災害発生に対する対策マニュアルの整備状況を明らかにすること、浄水薬品工場の所在地等を集約して災害等の発生に備えること、生物障害の発生に伴って間接的に変化する電力消費量および二酸化炭素排出量を、浄水薬品の製造工程と輸送工程を対象として明らかにすること、また、粒状活性炭処理プロセスの導入などの生物障害に対する恒久的対策の有効性を示すことを目的とした。

本年度は、昨年度に集約した浄水薬品工場等の情報を再確認し、また、事業者等が利用する際の利便性を高めた。さらに、昨年度までに構築した、浄水薬品の輸送に伴う二酸化炭素排出量の推算方法を用いて、生物障害の発生に伴い間接的に増加する二酸化炭素排出変化量を実際に推算した。また、未解析であった一部の浄水場を対象に、電

力消費変化量および二酸化炭素排出変化量を推算した。さらに、粉末活性炭処理プロセス、粒状炭処理プロセス、膜ろ過プロセスおよびオゾン処理プロセスを組み合わせるなどの5種類のシナリオを設定して、イニシャルコストとランニングコストを推算してシナリオ分析を行い、これらのプロセスの導入による恒久的対策の有効性を検討した。

B. 研究方法

一昨年度実施したアンケート調査の結果を再確認し、昨年度集約した浄水薬品の製造工場または代理店（以下、薬品工場等）の情報に誤りがないことを確認した。再確認した結果を、事業者等が利用する際の利便性を高めるために、浄水薬品毎に絞り込んで表示することができるようにMicrosoft Excel（Microsoft社）上にてプログラムを作成した。

また、生物障害の発生に伴って使用量が増加した浄水薬品を輸送する際の二酸化炭素排出量を推算した。推算は、生物障害の発生に伴って使用量が増加した浄水薬品量¹⁾を輸送する際に排出される二酸化炭素量を、改良トンキロ法²⁾を用いて式(1)により行った。浄水薬品は、軽油を使用した10トントラックで輸送し、往路は積載率100%、復路は積載率10%(空荷)と仮定した。また、改良トンキロ法燃料使用原単位として、軽油を燃料とした小型・普通貨物車の輸送トンキロ当たりの燃料使用量を、積載率10%のときに0.222 L/(t・km)、積載率100%のときに0.0342 L/(t・km)とした²⁾。軽油の単位発熱量を38.2 GJ/kL、排出係数を0.0187 t-C/GJとした²⁾。

式(1)における浄水薬品の輸送距離は、地理情報システム(Geographic Information System : GIS)を用いて推算した。すなわち、東京大学空間情報科学研究センターの CSV アドレスマッチングサービス³⁾を使用して、アンケート調査によって集約された各種住所の緯度経度情報を取得し、Arc GIS (ESRI ジャパン、東京)によりシェープファイルに変換した。また、国土数値情報の道路データ (SHP・GML)を用いて、Arc GISによりネットワークデータセットを作成した。これらの GIS データを用いて、浄水薬品の輸送距離を推算した。

解析対象となった浄水場と浄水薬品工場等の組み合わせは、643件であった。対象浄水場が複数の薬品工場等から浄水薬品を調達していた場合は、すべての薬品工場等の解析を行い、結果を平均した。

輸送にかかる二酸化炭素排出変化量 [t-CO₂] = 輸送トンキロ[t・km] × 改良トンキロ法燃料使用

$$\text{原単位 [L/t・km]} \times 1/1,000 \times \text{単位発熱量[GJ/kL]} \times \text{排出係数 [t-C/GJ]} \times 44/12 \quad \dots (1)$$

アンケート調査において、関東地域および中部地域の事業者より、国外の工場からの粉末活性炭の輸入が報告された。このため、当該事業者が所轄する浄水場の中で生物障害の発生が報告されている浄水場を対象に、粉末活性炭の海上輸送に伴う二酸化炭素排出量を推算した。

当該事業者の一部では、粉末活性炭を国内外の複数の薬品工場から確保していた。このため、式(2)により、生物障害発生に伴う、海上輸送による粉末活性炭の輸入量を求めた。

$$\text{海上輸送による粉末活性炭の輸入量 [g]} = (\text{障害時の粉末活性炭注入率} - \text{平常時の粉末活性炭注入率}) [\text{g/m}^3] \times \text{平均送水量} [\text{m}^3/\text{日}] \times \text{障害発生日数} [\text{日}] \times \text{国外の工場数} \div \text{国内外の工場数} \quad \dots (2)$$

算出した輸入量より、式(3)を用いて、海上輸送による二酸化炭素排出量を算出した。その際、積出港は上海、積込港は東京、生物障害の発生による粉末活性炭の増加分を一度に輸送すると仮定した。上海 - 東京の港湾間距離は、檜垣ら⁴⁾の港湾間距離を参考にした。参考にした港湾間距離を表1に示す。船舶の二酸化炭素排出原単位は、39 g-CO₂/t・kmとした。

$$\text{海上輸送による二酸化炭素排出変化量} [\text{g-CO}_2] = \text{海上輸送による粉末活性炭の輸入量} [\text{g}] \times 10^{-6} \times \text{港湾間距離} [\text{シー・マイル}] \times 1.852 [\text{km}] \times 39 [\text{g-CO}_2/\text{t} \cdot \text{km}] \quad \dots (3)$$

表1 浄水薬品の海上輸送距離の解析に用いた港湾間距離⁴⁾

(単位：シー・マイル)

代表港湾	東京	名古屋	神戸	博多	上海	釜山	高雄	シンガポール	ロッテルダム	ロサンゼルス
東京	0	224	371	625	1054	681	1361	2918	11292	4862
名古屋	224	0	238	489	921	548	1228	2791	11165	4992
神戸	371	238	0	303	771	362	1131	2694	11068	5139
博多	625	489	303	0	490	115	901	2481	10855	5256
上海	1054	921	771	490	0	478	603	2183	10557	5704
釜山	681	548	362	115	478	0	913	2492	10761	5253
高雄	1361	1228	1131	901	603	913	0	1611	9985	6115
シンガポール	2918	2791	2694	2481	2183	2492	1611	0	8373	10180
ロッテルダム	11292	11165	11068	10855	10557	10761	9985	8373	0	7806
ロサンゼルス	4862	4992	5139	5256	5704	5253	6115	10180	7806	0

(注)釜山-ロッテルダム、シンガポール-ニューヨークについては航路距離データが得られなかったため、それぞれ釜山-リバプール、シンガポール-ニューヨークで代用した。

式(1)～(3)に供したデータは、アンケート調査結果から得られた水道事業者のデータなので、全国のすべての浄水場を対象とした場合の値(以下、全国値)を推算する必要がある。全国値の推算は、アンケート調査により求めた結果の合計値を、調査したすべての浄水場の1日平均送水量の合計値と、全国に立地するすべての浄水場の1日平均給水量の合計値の比で除す(割り戻し計算を行う)ことによって行った。本研究でアンケート調査を実施して回答を得た浄水場の一日平均送水量(平成22年10月～24年9月)に対する全国の一日平均給水量(平成22年度)の占める割合は46.4%であった。

未解析であった一部の浄水場を対象に、生物障害の発生に伴い変化する電力消費量を推算した。推算は、昨年度と同様に行った¹⁾。

さらに、生物障害の発生に対する対策として、現在最も広く実施されている粉末活性炭の注入による処理を今後も継続する場合(シナリオ1)、粉末活性炭の注入に代わり粒状活性炭処理プロセスを導入する場合(シナリオ2)、オゾン処理プロセスと粒状活性炭処理プロセスを導入する場合(シナリオ3)、粒状活性炭処理プロセスと膜ろ過プロセスを導入する場合(シナリオ4)、オゾン処理プロセス、粒状活性炭処理プロセス、膜ろ過プロセスを導入する場合(シナリオ5)について、既存の情報をもとにイニシャルコストとランニングコストの合計値(以下、浄水処理コスト)を算出した。

各シナリオの浄水処理コストの算出は、財団法人水道技術研究センターが発行している浄水技術ガイドライン2010⁵⁾に基づいて行った。同ガイドラインでは、様々な浄水処理プロセスのイニシャルコスト及びランニングコストの相対比率が記載されている。このため、式(4)、(5)により、各シナリオのイニシャルコスト及びランニングコストを算出した。

各シナリオのイニシャルコスト[円] = (粒状活性炭処理プロセス + 膜ろ過処理プロセス)のイニシャルコスト[円] × 各シナリオのイニシャルコストの相対比率 ÷ (粒状活性炭処理 + 膜ろ過処理プロセス)の相対比率 ……(4)

各シナリオのランニングコスト[円/年] = (粒状活

性炭処理プロセス + 膜ろ過処理プロセス)のランニングコスト[円/年] × 各シナリオの相対比率 ÷ (粒状活性炭処理プロセス + 膜ろ過処理プロセス)の相対比率 ……(5)

式(4)および(5)における(粒状活性炭処理プロセス + 膜ろ過処理プロセス)のイニシャルコスト及びランニングコストは、文献^{6, 7)}に基づき算出した。式(4)、(5)より算出したイニシャルコスト及びランニングコストを合計し、浄水処理コストとして算出した。

粉末活性炭処理プロセスのランニングコストは、生物障害が発生したときの粉末活性炭の平均注入率と生物障害の発生日数に依存する。そこで、アンケート調査の結果からこれらの数字を求めたところ、生物障害が発生したときの粉末活性炭の平均注入率は6.07 mg/L、粉末活性炭の平均注入日数は45日/年であった。また、粉末活性炭の購入価格は、文献⁶⁾より500円/kgと仮定し、式(6)に基づき年間ランニングコストを推算した。

粉末活性炭処理プロセスの年間ランニングコスト[円] = 粉末活性炭の購入価格[円/kg]の粉末活性炭注入率[Dry mg/L] × 10⁻³ × 平均送水量[m³/日] × 粉末活性炭の平均注入日数[日] ……(6)

イニシャルコストとランニングコストを算出する際の浄水場の平均送水量は、小規模の浄水場から、大規模の浄水場まで偏りなくシナリオ分析を行うため、5,000～500,000 m³/日とした。

浄水場の運転期間を30年と仮定して、設備機器の耐用年数から同ガイドラインに基づいて16年目に更新を行うこととした。機器の更新費用は、粉末活性炭処理プロセスを含むシナリオ1では、溶解槽などの機器が占める割合が高いため、同ガイドラインに基づいて粉末活性炭のイニシャルコストの80%とした。また、粒状活性炭処理プロセスを含むシナリオ2～5では、吸着池などの構造物がイニシャルコストに占める割合が高いため、同ガイドラインに基づいて粒状活性炭処理のイニシャルコストの60%とした。

C. 研究結果及びD. 考察

1) エネルギー消費変化量の推算

1-1) 輸送距離の解析

昨年度に構築した方法で、浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量を推算した。その結果、浄水場と薬品工場等の組み合わせによっては、浄水薬品の輸送経路の解析ができない事例が生じた。

解析が不可能だったのは、1) 浄水薬品の輸送に海上輸送を含む場合、2) 薬品工場等の所在地を特定できなかった場合、3) 薬品工場等から浄水場までの道路データが分断されており、経路の探索が行えなかった場合、4) 薬品工場等の所在地が国外であった場合であった。これらのうち、1) 浄水薬品の輸送に海上輸送を含む場合については、薬品工場等の最寄りの港および浄水場の最寄りの港の間の距離を解析し、陸上輸送のみを解析した。2) 薬品工場等の所在地を特定できなかった場合は、解析ができなかった。3) 薬品工場等から浄水場までの道路データが分断されており、経路の探索が行えなかった場合は、技術的にはデータの修正が可能であったが、修正しなければならないデータ量および範囲が膨大であったため、すべての道路データを修正するのは困難であった。このため、本研究では解析しなかった。4) 薬品工場等の所在地が国外であった場合については、海上輸送と国内輸送の両方について解析を行い、海上輸送がどの程度寄与するのかを検討した。

その結果、距離の解析対象となった浄水場と浄水薬品工場等の組み合わせ 643 件中、40 件 (6.2%) が薬品工場等から浄水場までの道路データが分断されており経路の探索が行えず、8 件 (1.2%) が薬品工場等の所在地を特定できず、12 件 (1.9%) が薬品工場等の所在地が国外であったために解析が行えず、残りの 583 件 (90.7%) の組み合わせについて浄水薬品の国内輸送距離を解析することができた。

本研究におけるアンケート調査結果において、国外から粉末活性炭を輸入していたのは関東地方と中部地方の事業体のみであった。このうち中部地方の事業体については、輸入元の国名・地域名が不明であったため、解析が不可能であった。解析が可能であった事業体において、生物障害の発生に伴って使用量が増加した粉末活性炭の量は 452.5 t/年であった。同事業体は、国内の 4 企業からと国外の 2 企業から粉末活性炭を購入してい

た。このため、式(2)および(3)に基づき海上輸送による二酸化炭素排出変化量を算出した結果、34.5 t-CO₂/年の増加となった。この増加量を全国値に割り戻すと、74.4 t-CO₂/年の増加となった。本研究における海上輸送による二酸化炭素排出量が小さな値になったのは、アンケート調査において回答された企業(工場)の所在地が国内であった場合には海上輸送を考慮しなかったことが一因と考えられる。すなわち、アンケート調査において回答された企業(工場)の所在地が国内であっても、生産場所が国外である場合が含まれている可能性があり、そのような場合の海上輸送による二酸化炭素排出量は算出されておらず、数値の解釈のうえでの考慮が必要である。

1-2) 輸送に伴う二酸化炭素排出変化量の推算

輸送による二酸化炭素排出変化量を地域ごとに取りまとめ、表 2 に示す。表 2 に示したように、輸送による二酸化炭素排出変化量は地域によって異なり、0.3~281.1 t-CO₂/年と 935 倍異なった。中部地域の二酸化炭素変化排出量が小さいのは、生物障害の発生が報告された浄水場が 3 件と少ないことが理由と考えられる。また、関西地方のように薬品の輸送距離が短いため二酸化炭素排出量が小さくなるケースも見られた。

また、未解析であった 6 カ所の浄水場のアンケート調査結果を解析した。6 カ所のうち、生物障害が発生していたのは 3 カ所であった。障害の内訳は、すべて異臭味障害であり、発生回数は 11 回であった。未解析のデータを解析することによって増加した間接的な電力消費量は、中国・四国地方で 24 MWh/年であった。昨年度推算した 8,026 MWh/年に加算すると、図 1 に示す結果となり、全国で 8,158 MWh/年が増加したと推算された。この値は、平成 22 年度に全国の浄水場で消費された電力量⁸⁾の 0.11%であった。

表 2 輸送に伴う二酸化炭素排出量 (t-CO₂/年)

地 域	排出量
北海道・東北	104.3
関 東	281.1
中 部	0.3
関 西	44.1
中国・四国	127.6
九州・沖縄	15.2
全 国	572.5

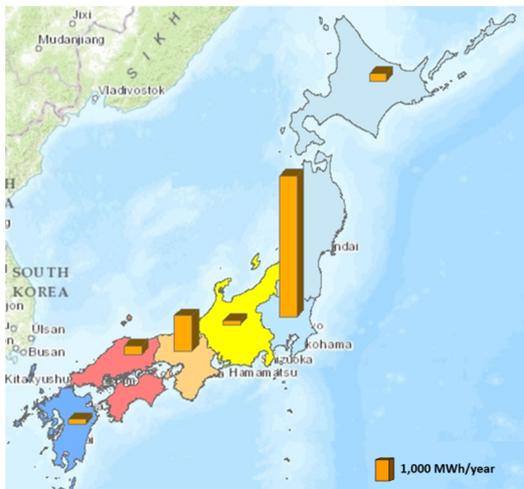


図1 生物障害発生による間接的な電力消費量

未解析のデータを解析することによって増加した間接的な二酸化炭素排出量は、196 t-CO₂/年であった。昨年度推算した 34,026 t-CO₂/年に加算すると、全国で 34,614 t-CO₂/年が増加したと推算された。この値は、平成 22 年度に全国の浄水場で排出された二酸化炭素排出量⁹⁾の 0.80%であった。

1 - 3) 間接的な二酸化炭素排出変化量に対する浄水薬品の輸送の影響

浄水薬品の製造および輸送に伴う二酸化炭素排出変化量をそれぞれ推算することができたので、両者が占める割合を求めて図2に示す。図2に示したように、ほとんどの地域において、間接的な二酸化炭素排出変化量に占める輸送の割合は5%以下であった。北海道・東北地方は、他の

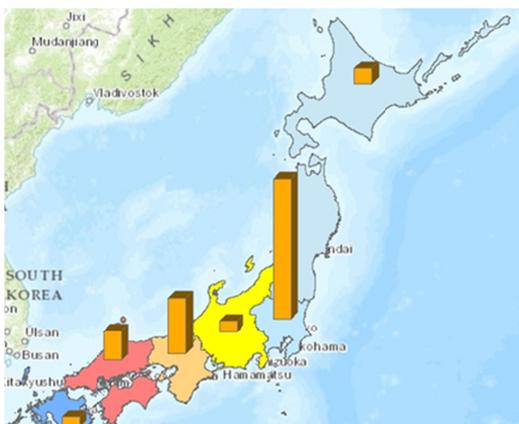


図3 生物障害発生に伴う間接的な二酸化炭素排出量

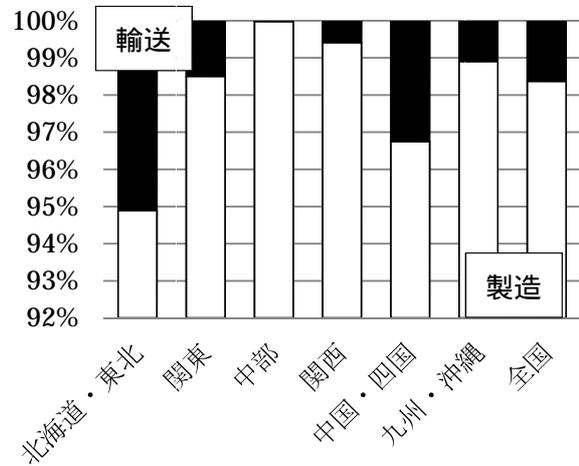


図2 間接的な二酸化炭素排出量に占める製造と輸送の割合

地域と比較して輸送の割合が高く推算された。これは、他の地域と比較して浄水薬品の輸送距離が長いことが原因と考えられる。

生物障害の発生に伴う間接的な二酸化炭素排出変化量は、図3に示す結果となり、地域によって 1,385 ~ 18,826 t-CO₂/年と 14 倍異なった。また、全国で 35,186 t-CO₂/年が増加することが明らかとなった。この値は、浄水処理による二酸化炭素排出量の年間値⁹⁾の 0.81%である。以上により、間接的な二酸化炭素排出量を推算できた。今後、生物障害の発生頻度や発生期間、臭気物質濃度が上昇した場合には、対策が望まれる。

2) 高度浄水処理プロセスの有効性

アンケート調査の結果、急速ろ過を導入している浄水場は 239 件中 172 件であり、同プロセスが日本で広く普及しているプロセスであった。また、多くの浄水場より、生物障害に対応するために粉末活性炭を投入したと回答が寄せられた。シナリオ 2~5 と一致するシナリオ 1 の粉末活性炭の注入率を、浄水場の平均送水量毎に求めた。算出結果を図4に示す。図4に示したとおり、平均送水量 500,000 m³/日の規模の浄水場において、粉末活性炭の平均注入率が、27 mg/L 以上になると、シナリオ 2 の対策を施した方がコスト面で有利になることが明らかとなった。一方で、アンケート調査の結果から求めた現状の粉末活性炭の平均注入率は 6.07 mg/L であった。

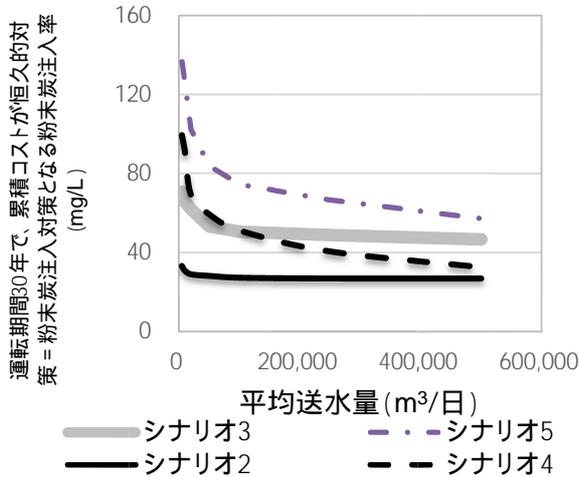


図4 恒久的対策の有効性

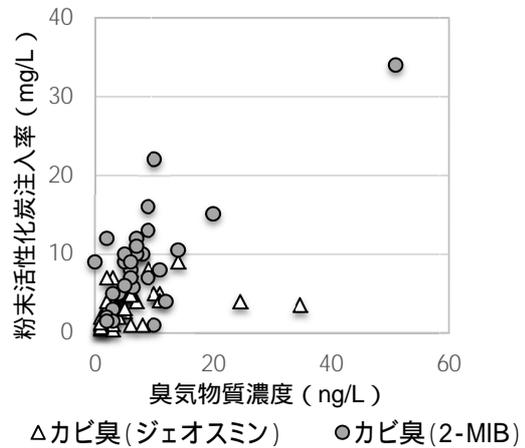


図5 粉末活性炭注入率の調査結果

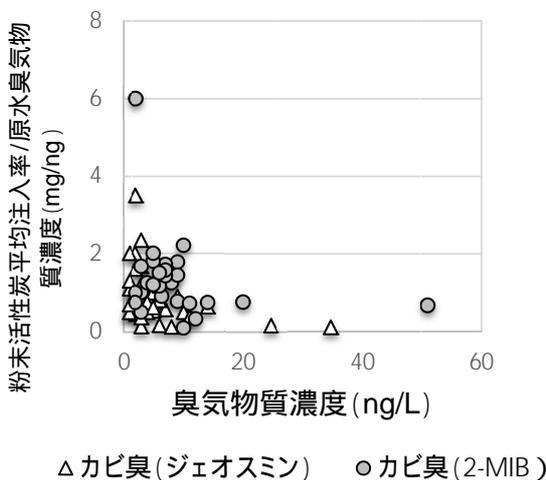


図6 臭気物質濃度あたりの粉末活性炭注入率

また、原水中のジオスミンと2-メチルイソボルネオール（以下、2-MIB）の臭気物質濃度と粉末活性炭の注入率の関係を求めた。その結果を図5に示す。アンケート調査の結果、報告された2-MIBとジオスミンの濃度は、それぞれ2～350 ng/L、1～120 ng/Lの範囲であった。この際の粉末活性炭注入率は、報告されている範囲で1～34 mg/L、0.4～9.0 mg/Lであった。一部の浄水場においては、臭気物質濃度は報告されているが、粉末活性炭注入率が報告されていない場合があった。臭気物質濃度あたりの粉末活性炭の注入率を算出した。その結果を図6に示す。2-MIBでは0.10～6.0 mg/ng、ジオスミンでは0.10～3.5 mg/ngであった。臭気物質濃度あたりの粉末活性炭注入率がジオスミンで35.0倍、2-MIBで60.0倍異なる原因として、浄水場によって使用する粉末活性炭の吸着能の違いや吸着時間の違いが考えられ、改善の余地

がうかがえる。また、活性炭への臭気物質の吸着等温線の研究結果を見ると、活性炭に対する吸着性は、一般的に2-MIBの方が低い¹⁰⁾。しかし、アンケート調査の結果から求めた臭気物質濃度当たりの粉末活性炭注入率に大きな差は認められなかった。

E. 結論

今後、生物障害の発生頻度の上昇や発生する臭気物質濃度が上昇した場合には、生物障害の発生に伴うエネルギー消費量、および二酸化炭素排出量の増加が問題になる可能性がある。本年度は、集約された浄水薬品調達に関する情報を整理しつつ、事業者等の利用を想定して、そのデータ参照の利便性を高めた。また、生物障害対策としての浄水薬品輸送に伴う二酸化炭素排出変化量を行った。さらに、生物障害の対策として、現在最も広く実施されている粉末活性炭の注入に代えて、粒状活性炭処理プロセスなどの導入が運用コスト面で有効になるケースを、シナリオ解析を通じて明らかとした。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1) 論文発表

該当なし

2) 学会発表

(1) 下ヶ橋雅樹, 高梨啓和, 秋葉道宏. 浄水処理

プロセスにおける生物障害のエネルギー環境
負荷．化学工学会第 80 年会；2015 年 3 月 21
日．同講演要旨集、I314.

技術センター，pp.29-31.

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定も含む。）

1) 特許取得

該当なし

2) 実用新案登録

該当なし

3) その他

該当なし

I. 参考文献

- 1) 秋葉道宏，高梨啓和，下ヶ橋雅樹（2014）厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究分担研究報告書.
- 2 経済産業省・国土交通省（2007）物流分野の二酸化炭素排出量に関する算定方法ガイドライン（<http://www.greenpartnership.jp/pdf/co2/co2brochure.pdf>）(2015 年 2 月時点).
- 3) 東京大学空間情報科学研究センター CSV アドレスマッチングサービス（<http://newspat.csis.u-tokyo.ac.jp/geocode/>）(2015 年 2 月時点)
- 4) 檜垣史彦，水谷 誠，土谷和之，小池淳司，上田孝行（2008）準動学的 SCGE モデルによる国際物流需要予測および港湾整備の便益評価，運輸政策研究，Vol.10(4)，pp.21-32.
- 5) 水道技術研究センター（2010）浄水技術ガイドライン 2010 .水道技術研究センター，東京，340 pp.
- 6) 日本水道協会（1988）高度浄水施設導入ガイドライン．日本水道協会，東京，67pp.
- 7) 水道技術研究センター（2010）環境影響低減化浄水技術開発研究（e-Water）ガイドライン集．水道技術研究センター，東京，402pp.
- 8) 日本水道協会（2010）平成 22 年度水道統計施設・業務編．日本水道協会，東京.
- 9) 日本水道協会（2010）水道統計要覧（平成 22 年度）．日本水道協会，東京.
- 10) 滋賀県東北部工業技術センター（2006）研究報告書 平成 18 年度．滋賀県東北部工業