

簡易水質分析

佐藤 久, 中屋 佑紀

1 緒言

持続可能な開発目標 (SDGs) の第6のゴールは「安全な水とトイレを世界中に」である。現在、世界全体では約20億人が安全な飲料水を利用できていない。飲料水中の病原体は水系感染症の原因となり、重金属などの有害成分は急性および慢性の様々な疾患を引き起こす。問題の解決には飲料水水質を分析し水を処理することが不可欠である。しかしながら、水質汚染の問題は経済や教育の水準が低い開発途上国において顕著であり、既存の水質分析法は高度な分析スキルが必要である、分析装置が高額であるなど、開発途上国に適用するには課題がある。筆者らは開発途上国にも受け入れられる簡易かつ低コストの分析技術の開発を目指している。いまだ道半ばではあるが本稿では上述の目的を達成できる可能性を秘めている分析技術とこれらを用いた実サンプルの分析例について紹介する。

2 背景

2.1 世界の水事情¹⁾

世界保健機関 (WHO) の報告によれば、2020年において世界138か国の人々の約4分の3が安全に管理された飲料水供給 (敷地内にあり、必要なときに利用でき、汚染のないものと定義) の恩恵に預かっている。しかしながらこのことは、約4分の1、すなわち約20億人がまだ安全に管理された飲料水供給施設を利用できていないことを意味している。このうち約12億人は安全ではない基本的な施設のみを、2億8200万人が限定的な供給を、3億6700万人が未改良の水源を、1億2200万人が地表水を利用している。

トイレなどの衛生設備に関しては、安全に管理された設備 (排泄物を施設内または外で安全に管理できる設備) を利用できるのは世界人口の54%にすぎず、36億人が不十分な設備を利用している。これらの人々が2030年までに安全に管理された水供給施設や基本的衛生施設を利用できるようになるためには、これら施設の普及の進捗率を現在の4倍にする必要があると推定されている。後発開発途上国や脆弱な状況に置かれている地域では状況はさらに厳しく、現在の進捗率をそれぞれ10倍および23倍まで高める必要がある。2020年において家庭からの排水の約44%が安全に処理されないま

ま環境中に排出されている。不十分な衛生設備や排水処理は病原体の環境中への排出源となる。

WHOは2016年に安全でない飲料水供給施設や衛生設備の不足が原因で世界で87万人の関連死が発生したと推定している。アフリカ地域での関連死は人口10万人あたり45.9人で、この値は世界平均 (10万人あたり11.7人) の4倍である。最も影響の少ないのは欧州地域で (10万人あたり0.3人)、アフリカ地域の死亡率はこれの約150倍であり、地域間の不均衡が著しい。

WASHとはWater, Sanitation and Hygieneの略語で、UNICEF (国連児童基金) とWHOの水と衛生に関する事業である。安全なWASHは、健康、子どもの発育、社会経済の発展に不可欠である。手指の衛生は、感染症の蔓延に対する最初の防御線のひとつであるが、2020年には世界人口の29%に相当する23億人が、自宅の水と石鹸を使った基本的な手洗い設備を利用できていない。安全に管理された水供給と衛生設備を共に享受することができるのは都市部であり、農村部への普及は遅れている。安全な水が利用できればWASHを促進できる。

2.2 水系感染症を引き起こす病原体とその検出法

飲料水に関する健康リスクの中で最も一般的なものは病原微生物による水系感染症である²⁾。WHOは飲料水水質ガイドラインを策定し、その中で以下の微生物を病原微生物と定めている (表1)。

表1 WHO「飲料水水質ガイドライン」に病原体として掲載されている微生物の一例

細菌	アシネトバクター属	尿管感染、肺炎、菌血症、二次性髄膜炎および創傷感染を引き起こす日和見病原細菌
	エロモナス属	敗血症、特に免疫不全患者において創傷感染と呼吸器感染
	カンピロバクター属	低濃度でも比較的高い感染力を持つ。腹痛、下痢、嘔吐、悪寒、発熱
	病原性大腸菌	尿路感染、菌血症、髄膜炎、出血性大腸炎
原虫	レジオネラ属	レジオネラ症 (レジオネラ肺炎とポンティアック熱)
	クリプトスポリジウム	下痢、悪心、吐気、発熱
	ジアルジア・インテスチナリス	下痢、吸収不良

このように水系感染症を引き起こす病原微生物は多岐にわたる。これら微生物を培養に基づく方法により検出するとすると、病原微生物ごとに選択性培地が必要となり現実的ではない。核酸を検出する分子生物学的手法でも、各病原微生物の核酸に特異的な遺伝子プローブや PCR プライマーを使用しなければならず、飲料水が有する生物学的リスクを頻繁に解析することは極めて難しい。

水系感染症を引き起こす病原微生物は主に温血動物の腸管に存在するので、飲料水に病原微生物が混入する主な原因はヒトおよび動物の排泄物による飲料水水源の汚染である。この点に着目し、病原微生物そのものを検出するのではなく糞便汚染の可能性を検査し、糞便汚染の可能性が無いならば病原微生物による汚染もないであろうとする考え方がある。この考え方に基づいて、糞便汚染の可能性は腸管内に高い割合で普遍的に存在する細菌群を検出することで間接的に検査されている。飲料水や公共用水域には大腸菌が用いられ、これらは糞便汚染の指標細菌と呼ばれる。指標細菌の存在はその水が糞便で汚染されていることを意味する。

この背景から、日本の水道水質基準には糞便汚染の指標として大腸菌が含まれている。大腸菌は特定酵素蛍光基質を用いて検出されている。特定酵素蛍光基質とは、ある酵素の基質に蛍光分子を修飾したものであり、サンプルと混合された時にサンプル中に酵素があれば分解されて蛍光分子が遊離し蛍光を発する、酵素がない場合は蛍光を発しない物質である。大腸菌の 95% が β -グルクロニダーゼ (GUS) を産生し³⁾、大腸菌以外の細菌で GUS を産生するものは現時点では少ないので、GUS の基質を利用した大腸菌用の特定酵素蛍光基質が開発されている⁴⁾。

3 SDGs に貢献する分析技術

3.1 簡易でハイスループットの大腸菌分析技術

上述のように大腸菌分析の公定法は操作が煩雑であり、クリーンな環境で作業することが不可欠であるために高額な設備を必要とする。このような背景から筆者らは簡易かつ迅速に大腸菌を分析する技術を開発することを試みた。大腸菌は指数関数的に増殖する。かつ、その濃度は上述のように特定酵素蛍光基質を用いて蛍光強度を測定することで検出できる。新型コロナウイルス感染症でよく知られることとなった定量 PCR 法は、指数関数的に DNA を増幅し蛍光色素を用いて濃度を定量する技術である。そこで定量 PCR 法と同様のメカニズムで大腸菌を定量できるのではないかと考えた。

定量 PCR 法ではリアルタイム PCR を用いて DNA を増幅する。DNA は温度の上昇と低下の 1 サイクルで 2 倍に増える。n 回のサイクルの後には DNA 量は理論的には初期濃度の 2 の n 乗倍に増える。相対的な DNA 濃

度は二本鎖 DNA と結合すると蛍光を発する色素の蛍光強度からリアルタイムに求められる。増幅前のサンプルの蛍光強度 (ベースライン) と比較して明らかに高い蛍光強度を閾値に設定すると、初期 DNA 濃度が高いサンプルほど早く蛍光強度が閾値に達するので、閾値に達するまでのサイクル数 (Ct 値と呼ばれる) と初期 DNA 濃度の対数値には負の相関が見られる。初期 DNA 濃度既知のサンプルを用いてあらかじめ検量線を作成しておき、初期 DNA 濃度未知のサンプルを同様の条件で増幅し蛍光強度の変化から Ct 値を求めると、検量線から初期 DNA 濃度を算出できる。

この分析メカニズムを参考にして、水サンプルに大腸菌用の特定酵素蛍光基質を添加し、蛍光強度をリアルタイムで測定し、蛍光強度が閾値に達した時間とサンプル水中大腸菌数から検量線を作成することで、水サンプル中の未知の大腸菌数を分析できるのではないかと考え研究を進めた。これまでにこの方法で下水や河川水中の大腸菌濃度を測定することに成功した^{5)~7)}。研究結果の一例を示す。この研究では下水処理場の処理水放流口の直上および直下の河川において 2017 年 5 月から 2018 年 1 月の期間に河川水を採取し、市販の測定キット (Colilert および Quanti-Tray/2000, IDEXX Laboratories) で大腸菌濃度を測定し、本法で求めた GUS 活性との関係を解析した (図 1)。放流口の直上では大腸菌濃度は約 10 MPN mL⁻¹ 以下であった。これに対し放流口の直下では大腸菌濃度は 5 MPN mL⁻¹ から 1000 MPN mL⁻¹ であった。このように下水処理水は大腸菌の環境負荷になっていることがわかった。大腸菌濃度とサンプル水の GUS 活性には正の相関があった。この研究から、本法により、多様な夾雑物を含む環境中の水サンプル中の大腸菌濃度を、マイクロプレートに用意した培地にサンプル水を添加するだけで、3 時間以内に、一度に最大 96

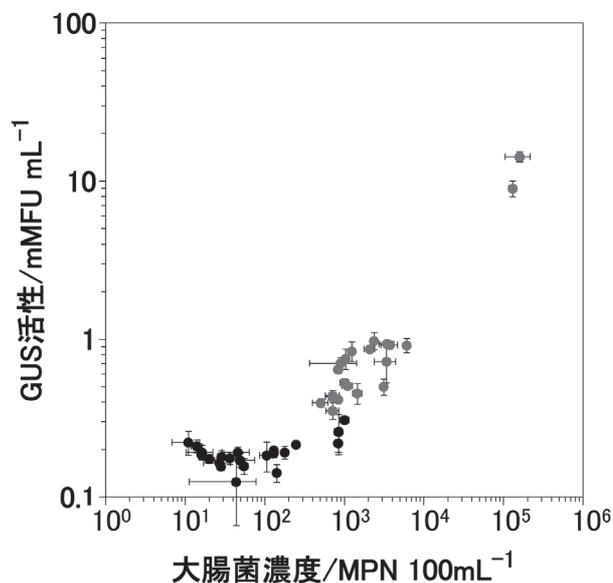


図 1 大腸菌濃度とサンプル水の GUS 活性の関係

サンプル測定できることがわかった。

Burnet らは取水口が糞便汚染源の下流にある浄水場で1年半に渡り GUS 活性をオンラインでリアルタイムでモニタリングした⁸⁾。Poulouxi らはフェノールフタレイン β -D-グルクロニドを基質とし、大腸菌により分解されて遊離したフェノールフタレイン濃度をグラファイトスクリーン印刷電極と3電極電気化学セルを用いて測定した⁹⁾。その結果、分析時間4時間で検出限界値 100 cfu mL^{-1} で大腸菌を測定した。

現在筆者らはインドネシアとスリランカの共同研究者に本技術を提供した。これらの国々では依然として水道水中に大腸菌や病原性細菌が含まれている¹⁰⁾¹¹⁾。本技術の導入により大腸菌分析への技術的、経済的および心理的ハードルが低くなれば、分析頻度が上がることで水道水の汚染の原因解明が進み、問題解決につながるのではないかと考えている。

3.2 簡易薬剤耐性大腸菌分析技術

筆者らは本法を応用し薬剤耐性大腸菌の分析技術も開発した¹²⁾。本法は薬剤感受性試験の微量液体希釈法を参考にした¹³⁾。まず、サンプル水中の大腸菌数を上述の方法で求める。これに並行して、サンプル水を生理食塩水 (0.9% NaCl 溶液) で3倍および9倍に希釈したものも用意する。上述の方法で対数増殖開始時間を求め検量線を作成する。この分析と並行して培地に抗菌薬を添加したウェルを用意し、このウェルでもサンプルについて同様の分析を行い、対数増殖開始時間を求める。抗菌薬添加系では希釈なしサンプル中の大腸菌数よりも不活化された大腸菌数の分だけ対数増殖開始時間が遅れる。抗菌薬添加系ではすべての大腸菌が完全に不活化されるか全く抗菌薬の影響は受けないものと仮定する。検

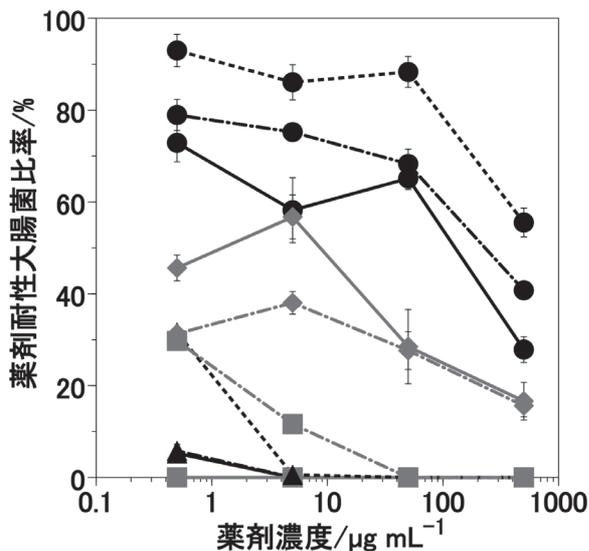


図2 異なる薬剤濃度における薬剤耐性大腸菌比率

●:メチシリン, ◆:アンピシリン, ◆:シプロフロキサシン, ▲:ゲンタマイシン

量線を用いて抗菌薬添加系の対数増殖開始時間から抗菌薬添加系の大腸菌数を算出する。この大腸菌は抗菌薬添加系でも増殖した大腸菌、すなわち薬剤耐性大腸菌ということになる。サンプル水の薬剤耐性大腸菌数を大腸菌数で除した値を薬剤耐性大腸菌比率とした。

3 下水処理場の最終沈殿池から下水を採取し、4種の抗菌薬について薬剤耐性大腸菌比率を求めた(図2)。薬剤濃度は0.5から $500 \mu\text{g mL}^{-1}$ とした。薬剤耐性大腸菌比率は処理場間で差は小さく、抗菌薬の種類に大きく依存した。メチシリン、アンピシリン、シプロフロキサシン、ゲンタマイシンの順に比率は高かった。

薬剤耐性菌の存在は病原体による感染症に罹患した患者の治療に抗菌薬を使えないことを意味する。2019年には薬剤耐性菌により世界で120万人が死亡したと推定され、今後何も対策を取らなければ2050年には薬剤耐性菌により現在のがんによる死亡者を超える1000万人が死亡すると推定されている¹⁴⁾。ワンヘルスとは、ヒトと動物、それを取り巻く環境(生態系)は、相互につながっていると包括的に捉え、ヒトと動物の健康と環境の保全を担う関係者が緊密な協力関係を構築し薬剤耐性の問題に対処していこうという考え方である。下水中の薬剤耐性菌は環境中に拡散し、いずれは人間社会に戻ってくると考えられる。今後も環境中の薬剤耐性菌の動態を詳細に明らかにしてゆく。

3.3 PCRを用いない微生物の核酸の分析

現在のところ13の菌種(菌群)に特異的な特定酵素基質が報告されている¹⁵⁾。しかしながら本技術は特定の酵素を産生する微生物が存在し、かつその酵素を他の細菌は産生しないという条件が成立する場合にのみ適用できるため、新たな特定酵素基質の開発は非常に難しいと考えられる。そこで培養に依存しない微生物の分析法を開発することとした。

現在水環境工学分野で細菌の検出に広く使われている技術に蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション(FISH)法がある。核酸は四つの塩基からなり、特定の塩基同士が結合(ハイブリダイズ)する性質がある。検出したい細菌(ターゲットと称する)のみが持つRNAの塩基配列(約20塩基)と相補鎖的な塩基配列を持つDNAを人工的に合成する。この末端に蛍光分子を修飾する。このDNAはプローブと呼ばれる。プローブとサンプルを混合するとプローブがターゲット内のRNAにのみ結合するので、蛍光顕微鏡下でターゲットのみが蛍光を発する。従ってターゲットの数や他の細菌との位置関係を分析できる。

FISH法は、蛍光顕微鏡が必要、プローブの洗浄が必要、分析できるサンプル量が少ない等の問題がある。そこで筆者らは蛍光分子を金ナノ粒子に置き換え、細菌から核酸を抽出することで上記の課題を解決することを試

みた。本法の測定メカニズムは以下のように考えている。サンプルにプローブを添加し、NaClを添加し、95℃で加熱する。サンプルにターゲットが高濃度に存在し抽出液中のターゲット核酸濃度が高い場合、プローブはこれとハイブリダイズし、ターゲット核酸がプローブの金ナノ粒子を覆うことでNaイオンによる金ナノ粒子の凝集が阻害されるため、サンプルは金ナノ粒子本来の赤色を維持する。この場合、波長550 nm付近に吸光度のピークが見られる。抽出液中のターゲット濃度が低下するにつれて金ナノ粒子はNaイオンにより凝集しやすくなり、凝集するほど波長650 nm付近の吸光度が増大する。従って波長650 nmの吸光度を波長550 nmの吸光度で除した吸光度比は凝集具合を表し、これとターゲット核酸濃度に負の相関が見られる。

これまでに全細菌^{16),17)}、アンモニア酸化細菌、腸管出血性大腸菌 O157:H7、コロナウイルス、アデノウイルスの検出に成功している。本稿では O157:H7 の分析例について述べる。検出する核酸は O157:H7 が持つ O 抗原合成遺伝子 *rfbE* とした。プローブの塩基配列は *rfbE* の PCR プライマーと同じものとした¹⁸⁾。実験室にて腸管出血性大腸菌 O157:H7 の純菌を培養し DNA を抽出した。抽出液を Nuclease-Free water で段階的に希釈することで DNA の濃度が異なるサンプルを用意した。本法でサンプルの吸光スペクトルを測定し、プローブの吸光度のピークが見られた波長 550 nm の吸光度とターゲット核酸とハイブリダイズしたプローブの吸光度のピークが見られた波長 650 nm の吸光度の比率をセンサーシグナルとした。*rfbE* 遺伝子濃度は定量 PCR で測定した。図 3 に *rfbE* 遺伝子濃度と吸光度比の関係を示す。吸光度比は *rfbE* 遺伝子濃度に依存して低下した。現在環境中の微生物はサンプル中の微生物から核酸を抽出した後、PCR 法にて核酸を増幅することで分析されているが、本法は PCR 法の代替技術となり得るこ

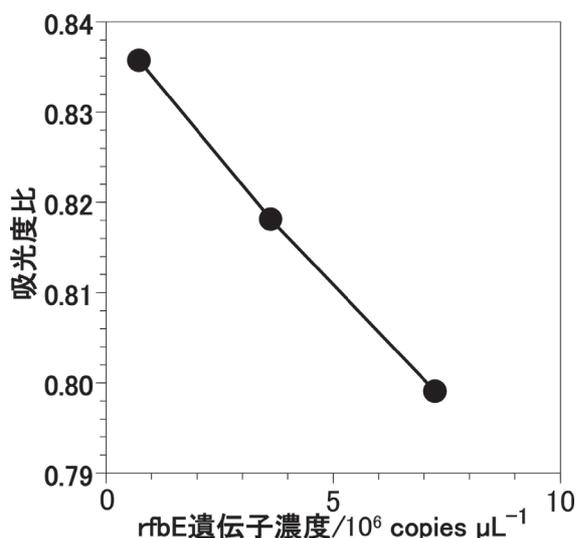


図 3 *rfbE* 遺伝子濃度と吸光度比の関係

とが示唆された。

3・4 水質の定量的な理解に向けて

人の健康に直接影響を及ぼす水質汚染物質として、病原体の他に重金属や環境ホルモンなどの化学物質が考えられる。筆者らは環境中の水サンプルに含まれる重金属イオンを簡易に検出する手法の開発にも取り組み、これまでに亜鉛(II)イオン^{19),20)}、ヒ素(III)イオン²¹⁾、ヒ素(V)イオン²²⁾の実サンプルでの簡易定量に成功している。

また、人の健康に直接的な影響はないが、健全な水環境の維持に影響を及ぼしうる汚染として、栄養塩類や有機物による汚染が考えられる。元素としてリンや窒素を含む栄養塩類が過剰に水域に供給されれば、富栄養化により植物プランクトンが大量発生し水域の酸素が欠乏し、生態系や水産物の生産に大きな悪影響を及ぼすことがある。一方で、水域に栄養塩類が不足すると貧栄養化状態となり、これも生態系の豊かさや水産物の生産性を低下させる。水域に流出した有機物も、腐敗により水域の酸素欠乏や悪臭を引き起こす可能性がある。このような有機物の量は、それらを微生物による生物学的な、もしくは化学的な酸化により分解するときに消費される酸素の量を指標として測定される。実際に環境から採取した試料水を密封し 20℃ で一定期間置いておいたときに微生物により消費される酸素量は生物化学的酸素要求量 (biochemical oxygen demand, BOD) と呼ばれる。試料水を過マンガン酸カリウムや二クロム酸カリウムなどの強力な酸化剤と反応させたときの酸素消費量は化学的酸素要求量 (chemical oxygen demand, COD) と呼ばれる。河川に対しては BOD が、湖沼や海域など長期間滞留する水域に対しては全リン量、全窒素量、COD がそれぞれ環境基準として水域の類型ごとに定められ、公定法による定期的な監視が行われている²³⁾。

一方で、微生物が利用しにくい難分解性の有機物も水質に影響を及ぼす可能性がある。生物遺体や代謝物が分解・重合を繰り返して出来た不定形で難分解性の有機高分子は、総称して腐植物質と呼ばれる。腐植物質は主に褐色であり、光吸収により水の光透過性を悪化させて水中での光合成を阻害する。また、腐植物質のもつ多様な官能基が、重金属や農薬などに由来する汚染物質と相互作用し、汚染物質の水域での移動性を高める運び屋として働く可能性がある。そのため、腐植物質の起源や構造を調べる化学的分析や、他の物質との反応性を調べる研究が多く行われてきた²⁴⁾。

筆者らは、腐植物質と汚染物質との相互作用を検討する大前提として、腐植物質と呼ばれるものの生成と分解の時間スケール、すなわちその相互作用の原因である腐植物質がどのくらいの期間で環境に留まるのか、という反応速度論の視点から研究を行ってきた。

腐植物質の生成仮説として、微生物作用や酵素反応、重合などの化学反応が考えられている。アミノ酸やタンパク質のアミノ基と糖類のカルボニル基が結合して逐次的に重合反応が進んでいくメイラード（褐変）反応は食品中でよく見られる反応であるが、これも腐植物質の生成過程のひとつと考えられている。筆者らは、グリシンとリボースからなる単純な系においてメイラード反応による褐色重合物の生成を模擬した。紫外可視分光光度計を用いて 254 nm の吸光度を褐変の指標として追跡し、反応速度式でフィッティングした。見かけの反応速度定数の温度依存性（アーレニウスの式）から水環境の温度（15℃）での反応の時間スケールを概算したところ、100 年以上の時間スケールで腐植様の褐色重合物が生成することが示唆された²⁵⁾。同様に、実環境から得た腐植物質を水熱分解し褐色が消えていく分解反応を追跡したところ、15℃では数百年から 2000 年の時間スケールで褐色を呈する構造が失われていくことが分かった²⁶⁾。

このように、限られた条件ではあるが腐植物質の生成分解の模擬実験を反応速度論的に解析することで、実環境での腐植物質の寿命を予測できるのではないかと考えている。一方で、実際の海水底の堆積物のコアを深さ方向に分けて抽出した腐植物質の褐色度を測定したところ、水底の有機物は堆積速度から概算して数年のスケールで褐変（腐植化？）していることが示唆された²⁶⁾。これは、実際の環境では微生物による代謝や共存鉱物による有機無機相互作用があり、模擬実験とはそう簡単に一致しないという現実を筆者らに突きつけた。筆者らはさらに研究を行い、共存鉱物の影響による腐植物質模擬生成・分解過程の加速を速度論的に解析している^{27), 28)}。

また、これらの数年～数千年スケールという地球科学的スケールの腐植物質の消長だけでなく、実際の河川において下水処理場や天然から放出された有機物の数日スケールでの消長を時空間的に把握する研究も行っている。

豊かで安全な水環境を維持していくために、病原体や重金属イオンなどの汚染物質、易分解～難分解な有機物に対し定量的な理解を基にした根拠のある水質の安全保障と挙動予測は重要である。簡易分析法の開発と実環境試料への適用、そして水質の時空間的な分析を通して、SDGs 第 6 の目標の達成にアプローチできる分析化学・環境工学研究に今後も取り組んでいきたい。

文 献

- 1) WHO: “World health statistics 2022: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals (19 May 2022)”, (<https://www.who.int/publications/i/item/9789240051157>), (accessed 2022. 8. 1).
- 2) WHO: “飲料水水質ガイドライン第 4 版 (23 April 2013)”, (https://www.niph.go.jp/soshiki/suido/WHO_GDWQ_4th_

- jp.html), (accessed 2022. 8. 1).
- 3) R. G. Price, D. Wildeboer (Ed.): “*E. coli as an Indicator of Contamination and Health Risk in Environmental Waters*”, (2017), (IntechOpen Limited, London).
- 4) 日本水道協会: “上水試験方法”, 2020 年度版, (2021), (日本水道協会).
- 5) 佐藤 久, 津田 収, 菊地 凱, 平野麗子: 下水道協会誌, **684**, 110 (2019).
- 6) H. Satoh, K. Kikuchi, Y. Katayose, S. Tsuda, R. Hirano, Y. Hirakata, M. Kitajima, S. Ishii, M. Oshiki, M. Hatamoto, M. Takahashi, S. Okabe: *Sci. Total. Environ.*, **715**, 136928 (2020).
- 7) H. Satoh, Y. Katayose, R. Hirano: *Wat. Sci. Tech.*, **83**, 1399 (2021).
- 8) J. B. Burnet É. Sylvestre, J. Jalbert, S. Imbeault, P. Servais, M. Prévost, S. Dorner: *Wat. Res.*, **164**, 114869 (2019).
- 9) S. Poulouxi, M.I. Prodromidis: *J. Electroanal. Chem.*, **879**, 114752 (2020).
- 10) B. Wispriyono, L. Arsyina, I. Ardiansyah, L. D. Pratiwi, R. Arminsih, B. Hartono, N. Nurmalasari, R. Novirsa: *Open Access Maced. J. Med. Sci.*, **9** (2021). DOI:10.3889/oamjms.2021.6152.
- 11) A. F. Cruzl, R. G. S. Wijesekara, K. B. S. N. Jinadasa, B. J. Gonzales, T. Ohura, K. S. Guruge: *Front. Water*, **3**, 730124 (2021).
- 12) H. Satoh, N. Nagahashi, K. Kikuchi, R. Hirano: *ACS ES&T Water*, **2**, 1301 (2022).
- 13) 動物医薬品研究所: “薬剤感受性ディスク・薬剤感受性試験”, (https://www.maff.go.jp/nval/yakuzai/yakuzai_p9.html), (accessed 2022. 8. 1).
- 14) J. O' neill: “Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations”, (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf), (accessed 2022. 8. 1).
- 15) 金子孝昌: “微生物を色で見る一酵素基質培地—”, (https://www.kanto.co.jp/dcms_media/other/backno8_pdf41.pdf), (accessed 2022. 8. 1).
- 16) 中島芽梨, 石田晃彦, 渡慶次学, 佐藤 久: 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **69**, 715 (2020).
- 17) M. Nakajima, R. Hirano, S. Okabe, H. Satoh: *Chemosphere*, **263**, 128331 (2021).
- 18) Y. Liu, Y. Cao, T. Wang, Q. Dong, J. Li, C. Niu: *Front Microbiol.*, **10**, 222 (2019).
- 19) 羽深 昭, 吉川弘晃, 大屋光平, 山田幸司, 高橋正宏, 岡部 聡, 佐藤 久: 土木学会論文集 G (環境), **69**, III_275 (2013).
- 20) A. Hafuka, H. Yoshikawa, K. Yamada, T. Kato, M. Takahashi, S. Okabe, H. Satoh: *Wat. Res.*, **54**, 12 (2014).
- 21) K. Matsunaga, Y. Okuyama, R. Hirano, S. Okabe, M. Takahashi, H. Satoh: *Chemosphere*, **224**, 538 (2019).
- 22) K. Matsunaga, R. Hirano, H. Satoh: *Water Supply*, **22**, 5524 (2022).
- 23) 環境省: “水質汚濁に係る環境基準”, (<https://www.env.go.jp/kijun/mizu.html>), (accessed 2022. 8. 1).
- 24) 石渡良志, 米林甲陽, 宮島徹編著: “環境中の腐植物質: その特徴と研究法”, (2008), (三共出版).
- 25) Y. Nakaya, S. Nakashima, M. Moriizumi: *Appl. Spectrosc.*, **72**, 1189 (2018).
- 26) Y. Nakaya, S. Nakashima, T. Otsuka: *Geochem. J.*, **53**, 407 (2019).
- 27) Y. Nakaya, K. Okada, Y. Ikuno, S. Nakashima: *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.*, **16**, 411 (2018).
- 28) Y. Nakaya, S. Nakashima, T. Otsuka: *Appl. Spectrosc.*, **75**, 111 (2021).



佐藤 久 (Hisashi SATOH)

北海道大学大学院工学研究院環境工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)。北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻博士課程修了。博士(工学)。《現在の研究テーマ》環境水中の微生物濃度を簡易に測定可能な手法の開発。《趣味》料理, ジョギング, スキー, 川釣り。

E-mail : qsatoh@eng.hokudai.ac.jp



中屋佑紀 (Yuki NAKAYA)

北海道大学大学院工学研究院環境工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)。大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻博士課程修了。博士(理学)。《現在の研究テーマ》環境中の有機物動態の追跡と非破壊分析手法の開発。《趣味》研究, 音楽, 旅。

E-mail : ynakaya@eng.hokudai.ac.jp

『ぶんせき』再録集 vol. 1 出版のお知らせ

ぶんせき誌の過去記事の有効利用の一環として、『ぶんせき』再録集 vol. 1 が出版されました。2011年から2020年まで、10年間分の〈ミニファイル〉の記事が詰まっています。

下記10章からなり、それぞれ12から14の話題が集められています。

1. 実験器具に用いられる素材の特徴, 2. 分析がかかわる資格, 3. 顕微鏡と画像データ処理, 4. 最新のweb文献検索データベース, 5. ポータブル型分析装置, 6. 分析化学と材料物性, 7. 分析化学者のための多変量解析入門, 8. 土壌分析, 9. サンプルング, 10. 前処理に必要な器具や装置の正しい使用法。

本書はアマゾンオンデマンド出版サービスを利用して出版した書籍ですので、書店には並びません。アマゾンサイトからのネット注文のみとなりますので、ご注意ください。詳しくは「ぶんせき」誌ホームページをご確認ください。