

雨水タンクの水質特性の把握と改善策の検討

STUDY ON WATER QUALITY IN RAINWATER TANKS AND MEASURES TO IMPROVE WATER QUALITY

有川 遼¹・二瓶泰雄²
Ryo ARIKAWA and Yasuo NIHEI

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(同上)

Rainwater tank is useful for not only sprinkling and toilet water, but also drinking water in an emergency like natural disaster. This study aims to show the characteristics of temporal and spatial changes of water quality in rainwater tanks and countermeasure to improve the water quality. For this, we conducted long-term field tests in which general- and improved-type tanks were used. We measured the general and coliform bacteria in the rainwater tanks which is the most important factor for the drinking water. The result indicated that the general bacteria number in the general-type tank was larger than that in the improved-type tanks, showing the fundamental validity of the improved tanks. The same tendency was found for coliform bacteria. It is noted that the temporal and spatial variations of the general bacteria are influenced mostly by water temperature and sediments in the tanks.

Key Words : rainwater tank, water use, infiltration inlet, water quality, general bacteria

1. 序論

我が国では、都市部の発達によりコンクリートやアスファルト等の不透透面が増加している。そのため、都市流域の水循環が大きく変質し、結果として受水域である河川や湖沼、内湾の水質悪化を長年引き起こす要因の一つとなっている。これを背景に「水循環基本法」¹⁾や「雨水の利用促進に関する法律」²⁾が2015年に施行され、流域水循環健全化のために雨水の貯留・浸透に関わる技術開発とその普及が社会的に要請されている。その対策の一つとして、雨水タンク(もしくは天水桶、貯留タンクとも呼ばれる)が挙げられる。雨水タンクは、一般には溜めた雨水を散水用やトイレの流し水として利用し³⁾、さらに、緊急時の水確保や飲料水を含めた多目的利用が期待される。また、インフラ整備が遅れている途上国では、雨水の飲料水としての利用が必要な地域も多く、そのための取り組みが既になされつつある⁴⁾。

このような雨水タンク内の水を散水やトイレ、飲み水と多目的利用するには、様々な環境条件下における雨水タンク内の水質を把握する必要がある。雨水タンク内水質の調査事例として、Boateng and Gadogbe⁵⁾はGhanaに

て、降水、屋根雨水(屋根からの流出水)、タンク内水の3種類で水質調査を行った。その結果、多くの項目で屋根雨水や雨水タンク水は降水よりも水質濃度(硝酸態窒素等)が高く、雨水が屋根に降り、流出することで水質汚濁が進行することが示された。Coombes *et al.*⁶⁾は、雨水タンクと上水道を使うDual水供給システムをAustraliaにて構築し、雨水タンク水質を調べた。その結果、雨水タンク内の水を煮沸すると、オーストラリアの飲料水基準を満たすことが示された。他にも、世界各地にて雨水タンク内の水質調査が実施されている^{7)~10)}。このように調査事例は存在するが、調査サンプル数は限定され、タンク内水質の時間変化、特に降雨に対する応答や季節変化などに関しては不明である。また、タンク内水質の場所的な依存性に関しても不明である。さらに、雨水タンク内には、雨水そのものの汚れ(特に、降雨開始直後の初期雨水)や屋根の汚れを取り込むため¹¹⁾、タンク内水質を改善するための工夫が必要となる¹²⁾。

本研究では、雨水の多目的・有効利用を念頭に、雨水タンク内水質の時間的・場所的変動特性を明らかにすると共に、その水質改善策を合わせて提示し、その有効性を検証する。このタンク内雨水の水質項目としては、「水道法」に基づく「水質基準に関する省令」¹³⁾を基

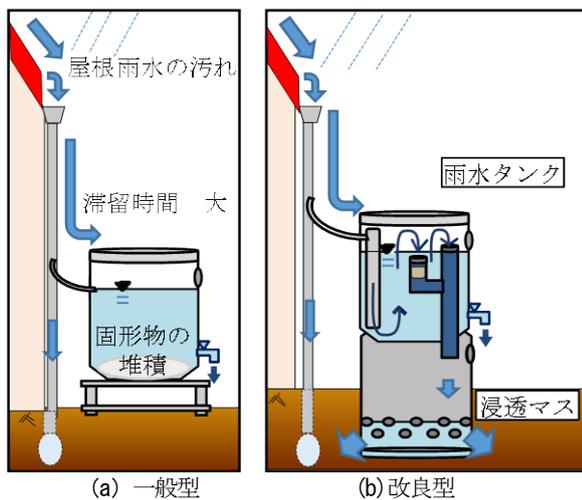


図-1 一般型・改良型雨水タンクの概略図

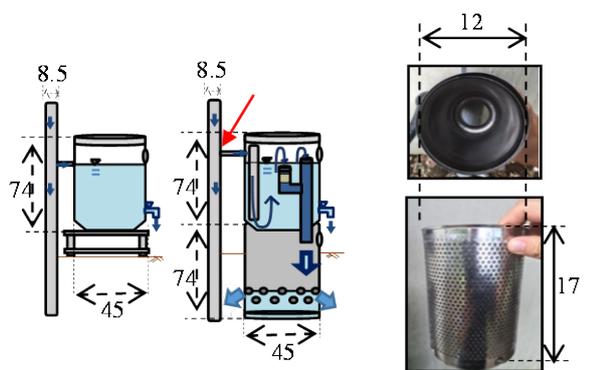


図-2 用いた雨水タンクの構造 (単位: cm)

に、飲み水として重要なファクターとなる一般細菌数と大腸菌群に着目して水質分析を行う。具体的な作業内容としては、①本学内に設置した雨水タンクと改良型タンク（詳細は後述する）におけるタンク内水質の長期連続観測を行い、一般型及び改良型タンク内水質の時間変化特性やその要因を調べると共に、改良型タンクの効果を検証する。次に、①が一箇所ではか行わないため、②多点における雨水タンク内水質の広域同時観測を行い、①の結果の代表性やタンク内水質の場所的変化を調べる。③①、②により得られた一般細菌数と環境変数（水温等）等との関係式（モデル関数）を算出し、タンク構造毎における一般細菌環境の定量評価を試みる。

2. 研究方法

(1) 一般型・改良型雨水タンクの概要

雨水タンクは、一般に、建物の屋根に降った雨水が雨どいを流れ、その一部を取り込み貯める（図-1(a)）。タンク容量は、一般に100[L]~1000[L]のものが多い。タンクはプラスチックやステンレス製のものばかりでなく、木製酒樽の再利用もなされている¹²⁾。雨水タンク内の水質上の課題としては、以下の3つが挙げられる。

① タンク内の水の交換が制限され、雨水の滞留時間が

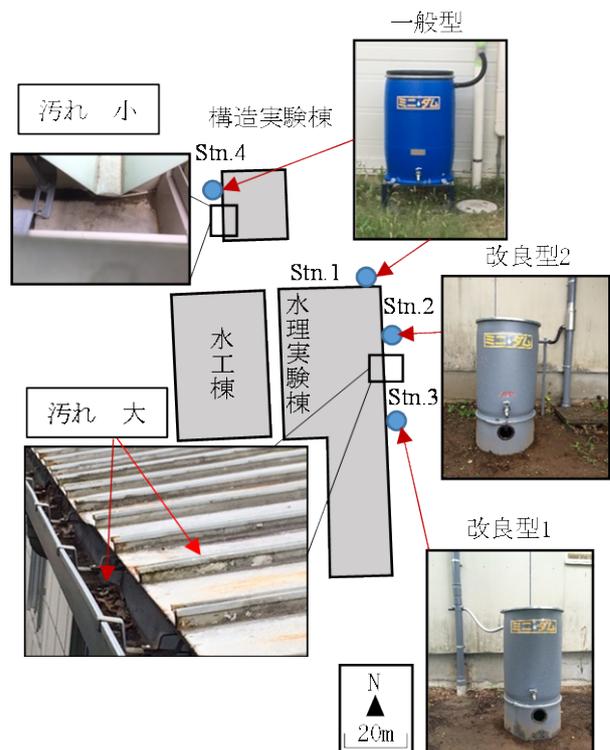


図-3 長期連続観測における雨水タンクの設置状況（東京理科大学野田キャンパス）

長くなりやすい。

- ② 流入する屋根雨水が汚濁している（特に初期雨水）。
- ③ 葉などの大きめの固形物が流入する。

このことを鑑み、本研究では2種類の改良型タンクを準備した（改良型1, 2）。改良型1は、図-1(b)に示すように、上部の雨水タンクと下部の浸透マスを結合し、雨水を上部タンクに貯留し、一定量を越えると下部の浸透マスを經由して地中に雨水を浸透させる構造である。ここでは雨水流入管を上部タンクの底面付近まで伸ばすことでタンク内の循環を促進する。これによりタンク内水の滞留時間を減らし、水質改善に寄与する。改良型2は、改良型1の雨水流入部に初期雨水カット用フィルターを設置し、流入する汚濁物質をできる限りカットする。

本論文の中で長期連続観測用に用いた一般型・改良型雨水タンクを図-2に示す。一般型には容積100[L]の雨水タンク（ミニダム）を、改良型1には浸透マス付雨水タンク（天水うるる、共にサンエービルドシステム(株)製）をそれぞれ用いた。また、改良型2のフィルターには Garden Filter Collector（WISY社製）を用い、流入部（図-2(b)赤矢印）に設置した。フィルターは目合い0.28mmであり、濡れていない状態では水を通さない性質を有するため、粗いごみのみならず初期雨水のカットできる。

(2) 長期連続観測の概要

雨水タンク内水質の時間変動特性を見るために、図-3に示すように、東京理科大学野田キャンパス水理・構造実験棟にて一般型・改良型タンクを2015年7月に設置し

表-1 長期連続観測の測定期間・項目・場所

No.	期間	測定項目		測定場所
		DO, pH, 水温	一般細菌等	
1	2015/7/13~10/23	○	△※1	Stns.1-3
2	2016/1/18~2/11	○	○	
3	2016/8/22~31	○	○	
4	2016/9/13~10/7※2	○	○	Stns.1-4
5	2016/11/7~12/16※3	○	○	

※1一般細菌等は10/16-23のみ計測, ※22016/9/24~30はNo data, ※32016/11/21~25はNo data.

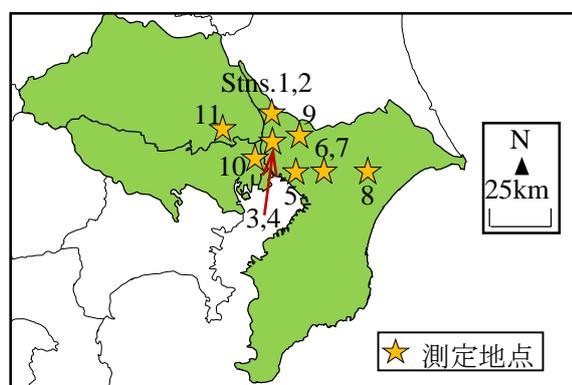


図-4 広域同時観測の測定地点

た。観測期間と測定場所をまとめたものを表-1に示す。このうち前半の3期間では、水理実験棟に設置された3基（一般型、改良型1、2）について、週末を除いてほぼ毎日一回採水を行った。また、屋根の違いが雨水タンク内水質に及ぼす影響を調べるために、後半の2期間にて構造実験棟に一般型雨水タンクを設置し、観測を行った。水理実験棟（1978年竣工）は構造実験棟（2013年竣工）よりも古く、周囲が木々に覆われているため、屋根面の樋には葉っぱや泥が堆積していたが、構造実験棟では見られなかった。水質測定には、雨水タンクに取り付けられた蛇口をライター等で火炎滅菌し、採水した。用いた採水瓶はオートクレーブで滅菌した。測定項目はpH、DO、水温、一般細菌数、大腸菌群である。飲料水に関しては、我が国では51項目あり、それを全て分析することが難しいため、最も重要な一般細菌数と大腸菌群のみを対象とした（測定方法は2.(4)で説明）。pHについてはHI1290Piccolo（HANNA社製）、DO・水温にはHI9147 Dissolved Oxygen Meter（共にHANNA社製）を用いて測定した。

(3) 広域同時観測の概要

一般型タンク内水質の場所的変化特性を把握するために、広域同時観測を行った。測定地点は千葉県、東京都

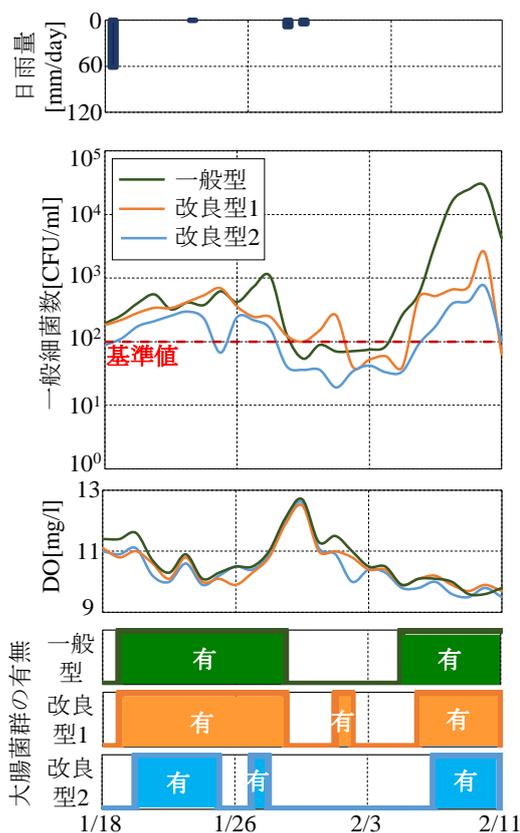


図-5 長期連続観測に基づく一般細菌数・DO・大腸菌群有無の時間変化（2016/1/18~2/11）

埼玉県にわたる計11地点である（図-4）。このうち、Stns.1と2は長期連続観測を行った本学の水理・構造実験棟である。観測日は2016/12/15と2017/1/18であり、いずれも晴天日であった。各地点に設置されている雨水タンクよりサンプル水を採取し、クーラーボックスに保管して大学に持ち帰り分析を行った。分析項目は長期連続観測と同項目に加えて、濁度、SS（Suspended Solid）、VSS（Volatile Suspended Solid）を測定した。濁度計測には多項目水質計（東亜DKK(株)製）により、SSとVSSの分析方法は上水試験方法¹⁴⁾に準じて実施した。

(4) 一般細菌数・大腸菌群の分析方法

一般細菌数の分析では、上水試験方法¹⁴⁾に基づいて行った。まず、採水したサンプル水を直ちにクリーンベンチ内に移動させた。クリーンベンチ内では、サンプル水を1、10、10²、10³、10⁴倍に希釈し、希釈試料1mlを滅菌シャーレに入れた。その後、寒天平板混濁法を用いて標準寒天培地を希釈倍率に3枚作成し、インキュベーターで36±1℃、24±1時間培養した。培養後は、コロニー数が30~300個の範囲にある希釈倍率の平板にてコロニーをカウントし、3枚の平均値を一般細菌数とした。

大腸菌群は有無判定の定性試験を行った。一般細菌数と同じ方法で採水した試料50mlを乳糖ブイヨン（LB）発酵管に入れ、インキュベーターで36±1℃、24±1時間培養し、発酵管内のガスの有無及び黄変を調べ、この反

応が見られたものについては大腸菌群陽性と判断した。

3. 観測結果と考察

(1) 一般細菌数の時間変動特性

一般型・改良型タンクにおける水質環境の時間変動特性を比べるために、長期連続観測により得られた一般細菌数とDO、大腸菌群判定結果の経日変化の一例を図-5に示す。ここでは、冬季の期間2 (2016/1/18~2/11) に関する一般型と改良型1, 2の結果を表示している。また、日雨量 (千葉県我孫子アメダス観測所) も合わせて示す。なお、大腸菌群判定結果として、陽性を有、陰性を無とし、図中には「有」のみ色塗りして図示する。これより、一般細菌数は、一部を除いて、 $10^2 \sim 10^3$ [CFU/ml] となり、基準値を下回る日も見られる。3タンク間の一般細菌数を比べると、改良型2<改良型1<一般型の大小関係が明確に現れている。同様な傾向は大腸菌群の陰性の日数にも見られ、特に、改良型2では同期間中の60%が陰性となった。降雨時における一般細菌数の変化に着目すると、例えば1/29, 30の降雨時 (総雨量13.5mm) の直後では、減少してしばらく横ばいであったが、2/5ごろから急増した。このように、降雨の影響を受けて、雨水タンク内の一般細菌数が明確に増減しており、DOと概ね逆相関関係となっている。

全5期間における長期間連続観測結果を取りまとめて、一般細菌数を月ごとに平均化して季節変化としてまとめたものを図-6に示す。ここでも、雨水タンクとして、一般型・改良型1, 2を対象としている。観測期間に含まれない3~6月はNo dataとした。なお、水温の月平均値も表示している。これより、一般細菌数の月平均値は、冬季では $10^2 \sim 10^3$ [CFU/ml] のオーダーとなり、相対的に低い。一方、夏季 (7, 8月) は 10^5 [CFU/ml] のオーダー、秋季 (9, 10月) でも 10^4 [CFU/ml] のオーダーとなり非常に高い。このように、雨水タンクでは明確な季節変化が現れ、これらは水温に大きく依存している。また、これらの季節変化は、3つのタンクとも見られるが、大小関係としては改良型2<改良型1<一般型となっている。

(2) 一般型・改良型タンク間の一般細菌数の比較

長期連続観測に基づいて、一般型及び改良型1, 2における一般細菌数の大小関係を定量的に比較する。そこで、一般型・改良型1, 2における一般細菌数の平均値と最大値、最小値を図-7に示す。ここでは、全測定日において得られた全データ ($n=90$) の平均値を記載している。ここから、一般細菌数の平均値は改良型2<改良型1<一般型の順になっており、最大値、最小値に関しても同様のことが言える。

この差が有意であるかを調べるために、t検定を行った。その結果、一般型と改良型1に関してp値は $2.01 \times$

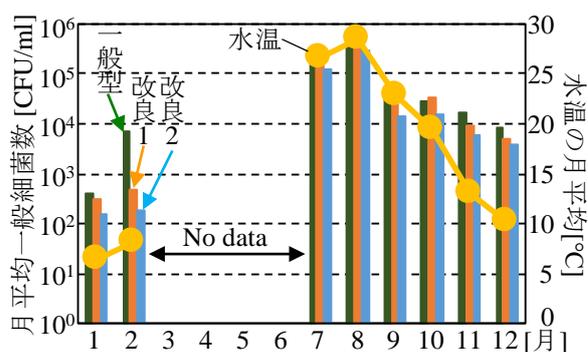


図-6 一般細菌数の経月変化と月平均気温

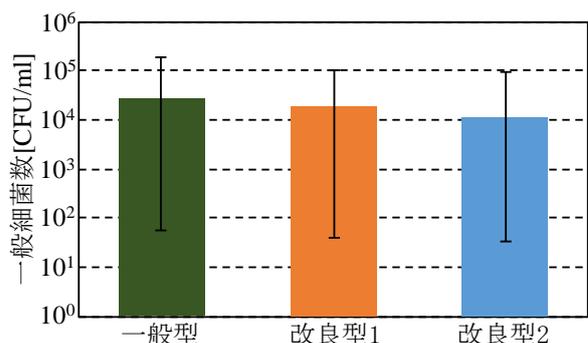


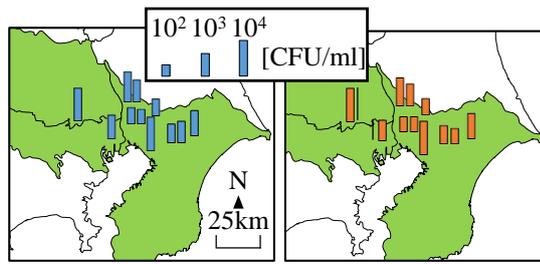
図-7 一般型・改良型1, 2における一般細菌数の全期間平均値と最大・最小値

$10^{-4} <$ 有意水準 α ($=0.05$) , 一般型と改良型2のp値は $5.24 \times 10^{-4} < 0.05$, 改良型1と改良型2ではp値は $1.11 \times 10^{-4} < 0.05$ となった。これより、全ての雨水タンク間の一般細菌数には、改良型2<改良型1<一般型の大小関係が見られ、それらの間には有意差があることが示された。

この差の要因として、一般型タンク内では流入雨水の循環は不明瞭である。一方、改良型1では、図-2 (b) のように、雨水タンクを越流したものが下部の浸透マスに流入し、雨水タンク内の流入口はタンク下側に設置されているため、タンク内の水が押し出されて浸透マス側に流れる仕組みとなっている。このようなタンク内の循環パターンは別途行われた実験で確認されている。また、改良型2では設置されたフィルターにより、他のタンクと比べて葉っぱ等の固形物や土砂の堆積量は少なかったことを目視で確認している。このため、改良型2では一般細菌数が三者の中で最も少なかったものと考えられる。

(3) 一般細菌数の場所的変化とその要因

次に、タンク内水質の場所的変動特性を調べるために、広域同時観測により得られた11地点における一般細菌数マップを図-8に示す。ここでは、観測が行われた2016年12月と2017年1月の結果が表示されている。これより、一般細菌数は地点毎に大小が見られ、かつ、2016年12月と2017年1月の結果には大きな差異は見られない。また、本学の水理実験棟 (Stn. 1) の結果は、すぐそばのStn. 2よりも1オーダー以上大きくなっており、一般細菌数の



(a) 2016年12月 (b) 2017年1月
 図-8 広域同時観測による一般細菌数マップ

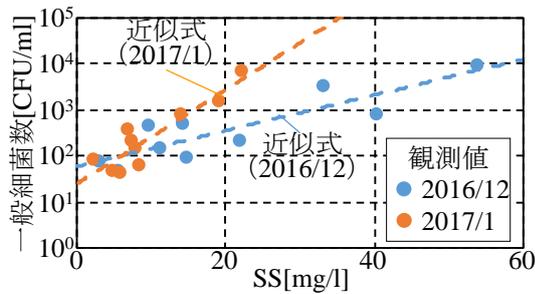


図-9 一般細菌数とSSの関係 (広域同時観測)

地点毎の差異に対して地域全体の差異は特に見られない。

そこで、これらの地点毎の一般細菌数の違いを検討するために、一般細菌数とSSの相関図を図-9に示す。ここでのSSは、タンク内の水を十分かき混ぜた後に採水したもののSSであり、タンク底部の堆積物量の大きさを表す指標である。これより、SSの増加と共に、一般細菌数も増加しており、観測日毎のデータに関しては両者には良好な正の相関が見られる。同様な傾向は有機物指標であるVSSについても確認されており(図面省略)、一般細菌の繁殖に必要となる有機物がタンク底部に多く溜まっているほど、一般細菌数も多くなるものと考えられる。これより、タンク内の一般細菌数が地点毎に異なるのは、タンク底部の堆積物量の大小と関係しており、そのソースとなり屋根面の汚れそのものに大きく影響されていることが示唆された。

4. 一般細菌数のモデル式に基づく改良型タンクの有効性評価

(1) 一般細菌数のモデル式の作成

3. で示したように、タンク内の一般細菌数は時間的・場所的に変化しており、それは水温とSSの影響を受けている。このうち、SSはタンク底部の堆積物量と関係し、これは雨水タンクの設置期間もしくはメンテナンスしてからの経過期間と密接に関係している。そのため、説明変数として水温 T とメンテナンスからの経過月数 M とした一般細菌数 G に関するモデル式を作る。ここでは、生態系の個体群モデルに用いられるロジスティックモデル¹⁵⁾に基づく以下の式を採用する。

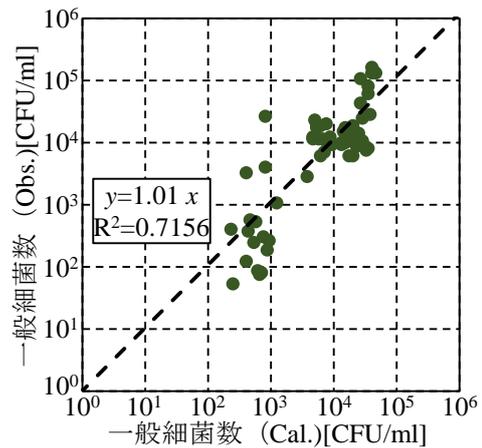


図-10 一般細菌数に関する予測値と観測値の比較 ($n=57$, 一般型)

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \exp\left\{-\left(\alpha_1 + \alpha_2 T + \alpha_3 M\right)\right\}} \quad (1)$$

ここで、 G_{\max} は一般細菌数の観測最大値、 α_1 、 α_2 、 α_3 は係数である。長期連続観測結果にfittingするようにモデル係数を同定しており、一般型タンクに関しては $\alpha_1 = -0.82007$ 、 $\alpha_2 = 0.09257$ 、 $\alpha_3 = 0.05841$ となった。このモデル式から求めた一般型タンクの一般細菌数に関する予測値と観測値の相関図を図-10に示す(図面が見つからないため、改良型1, 2のデータは省略)。これより、予測値と観測値に関する近似式の傾きはほぼ1となり、また決定係数 $R^2=0.7156$ となったことから、本モデル式の一定の妥当性が得られた。同様のことは、改良型1, 2に関しても確認された。

(2) タンク構造間の一般細菌数の比較

上記のモデル式に基づいて得られた各タンクにおける一般細菌数のコンター図を図-11に示す。図中の横軸はメンテナンスからの経過時間、縦軸は水温である。なお、図中には、一般細菌数の水道水基準値(=100[CFU/ml]以下)を赤実線、長期連続観測に基づく大腸菌群不検出の一般細菌数(200[CFU/ml]以下)を赤点線でそれぞれ図示する。この結果から、いずれのタンクも水温が低く、かつ、メンテナンス経過時間が短ければ、水道水基準を満たす一般細菌数になることが分かる。その範囲は、一般型<改良型1<改良型2の順で大きくなっている。また、図中の等値線の傾きは、3ケースともほぼ同じであり、メンテナンスからの経過時間に対する依存性にタンク間の差異は少ない。以上より、雨水タンク構造による一般細菌数の差が明瞭となると共に、タンク内水の飲料水としての利用範囲を定量的に評価できたものと考えられる。なお、このモデル式に関しては、観測データの少ない一般細菌数の低濃度レベルでは再現性が十分でなく、今後の追加観測に基づきより高精度化していく必要がある。

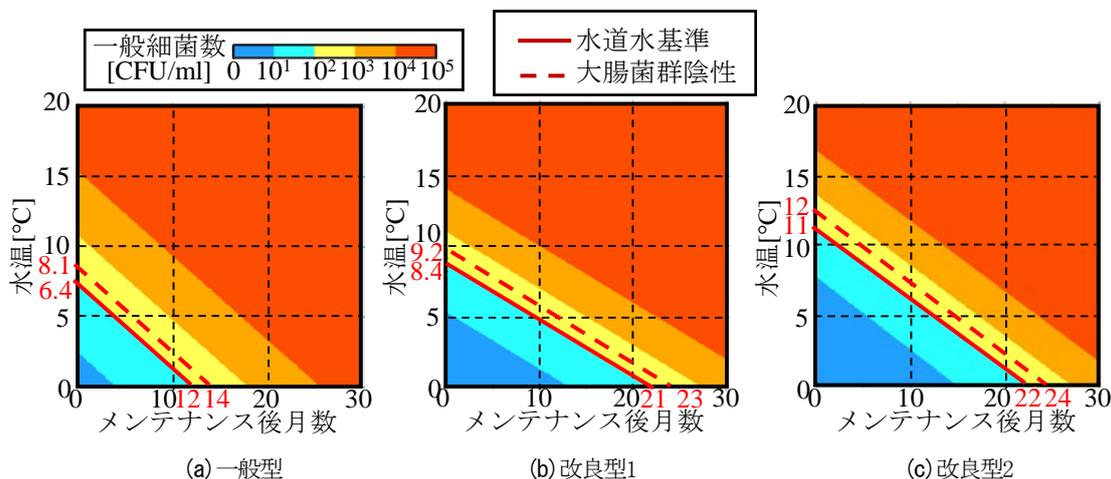


図-11 各タンクにおける一般細菌数コンター

5. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 3つの雨水タンク構造の一般細菌数を長期データに基づいて比べた結果、改良型2<改良型1<一般型の順となり、その差が有意であることが示された。そのため、改良型1の水循環促進効果と改良型2の初期雨水・粗ゴミカット用のフィルタの有用性が明らかとなった。
- 2) 長期連続観測と広域同時観測から、一般細菌数は時間的・場所的に大きく変化することが示された。その要因として、水温やタンク内堆積物量（ここではSSやVSS）が挙げられることが示された。
- 3) 長期連続観測に基づいて一般細菌数に関して水温とメンテナンス後の経過時間を説明変数としたモデル式を作成した。それに基づいて、各タンクにおける一般細菌数が水道水基準を満たすの水温・メンテナンス経過時間の範囲を定量評価することができた。

なお、一般細菌数のモデル式には広域同時観測のデータが組み込まれていない。また、広域同時観測を実施した地点数や日数も限られている。そのため、これらのデータを加味した一般細菌数のモデル式作成と評価が今後の課題となる。

謝辞：サンエービルドシステム(株)山本裕子氏、前田嘉人氏には、本実験で用いた一般型・改良型雨水タンクをご提供・設置して頂いた。雨水タンクの多地点調査の実施に際しては、NPOせっけんの街・道端園枝氏にご協力頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 国交省：水循環基本法について、<http://www.mlit.go.jp/common/001047785.pdf> (閲覧日：H28年9月22日)。

- 2) 国交省：雨水利用の推進に関する基本方針について、<http://www.mlit.go.jp/common/001082127.pdf> (閲覧日：H28年9月22日)。
- 3) 福岡県：雨水利用について、<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/amamizu.html> (閲覧日：H28年9月22日)。
- 4) 外務省：2014年版政府開発援助 (ODA) 白書、匠の技術世界へ2 雨水タンクによるソーシャルビジネスですべての人々に安全な水を届ける、46p., 2015。
- 5) Owusu-Boateng, G. and Gadogbe, M.K.: Domestic rainwater harvesting in a water-stressed community and variation in rainwater quality from source to storage, *The Journal of Sustainable Development*, Vol.14, Iss.2, pp.225-243, 2015.
- 6) Coombes, P. J., Kuczera, G. and Kalma, J. D.: Economic, water quantity and quality impacts from the use of a rainwater tank in the inner city, *Australian Journal of Water Resources*, Vol.7, No.2, pp.111-120, 2003.
- 7) Chapman, H., Gardner, T., Huston, R., Chan, A/ and Shaw, G.: Chemical water quality and health risk assessment of urban rainwater tanks, *7th Int. Conf. Urban Drainage Modelling and the 4th Int. Conf. Water Sensitive Urban Design*, pp.509-516, 2006.
- 8) Haebler, R. H. and Waller, D. H.: Water quality of rainwater collection systems in the eastern Caribbean, *Proc. 3rd Int. Conf. Rain Water Cistern Systems*, pp.F2-1-F2-16., 1985.
- 9) Dillaha III, T.A. and Zolan, W/ J.: Rainwater catchment water quality in Micronesia, *Water Research*, Vol.19, No.6, pp.741-746, 1985.
- 10) Abbott, A., Caughley, B. and Douwes, J.: The microbiological quality of roof-collected rainwater of private dwellings in New Zealand, *Rainwater and Urban Design*, pp.9-16, 2007.
- 11) 越川康夫, 村川三郎：収集雨水汚濁防止を目的とした初期雨水排除量の検討, 日本建築学会計画計論文報告集, 第350号, pp.8-18, 1985.
- 12) 大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課：誰でもできる！楽しい雨水利用！, pp.1-20, 2007.
- 13) 水質基準に関する省令 (平成15年30日厚生労働省令第101号), <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H15/H15F19001000101.html> (閲覧日：H28年9月22日)。
- 14) 日本水道協会：上水試験方法 (2011年版), 2010.
- 15) 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門, 岩波書店, 2012.

(2017. 4. 3 受付)