屋上緑化利用水の水質調査および細菌リスク評価

WATER QUALITY SURVEY AND BACTERIA RISK ASSESSMENT OF THE ROOF REPLANTING UTILIZATION WATER

中村伸也*, 野知啓子**, 大塚雅之***

山海敏弘****, 武田 仁*****, 中島 古史郎*****

Shinya NAKAMURA, Keiko NOCHI, Masayuki OTSUKA,
Toshihiro SANKAI, Hitoshi TAKEDA and Koshirou NAKAJIMA

In this study, the roof replanting system was made to circulate water supply, and the water analysis was carried out in recycling retention type roof replanting system, and the tendency in the water quality by cyclic use was confirmed. And, water quality evaluation with the reuse water in carrying out water analysis on circulation bathtub water for ordinary homes and ordinary homes bathtub water and purifying chamber treated water, scene water with the room examined as a reuse application water in future, and ranking as water for miscellaneous use was carried out in addition to the rain water which the examination had already advanced in making the reuse water to use application such as the roof replanting system. In addition, these water qualities in order to grasp whether it has the risk in which degree is bacteriological, the bacteria which can proliferate in various application water were measured, and the hygienic safety from bacterial growth ability of the water was evaluated.

Keywords : Roof replanting, rain water and reuse water, resources recycling system, water quality survey, bacterial contamination, bacterial infection risk.

屋上緑化、雨水・再利用水、資源循環システム、水質調査、細菌汚染、細菌感染症リスク

1. はじめに

都市空間全体を冷却し、ヒートアイランド現象を緩和する技術として屋上緑化システムが注目されている。本システムは、ヒートアイランド対策以外にも冷暖房負荷の軽減化および大気汚染防止など、多方面においてその効果が期待されている。今後、本システムが普及していくには、軽量で保水性の高い土壌材の改良、薄層地盤に適し、乾燥にも強い植栽の育種、灌水システム方法、そしてガーデニングとしてのアメニティ要素等、さらなる技術開発が要求されている。とくに緑化植物の維持に必要である水利用方法については、節水や水の有効利用を促進させるために、上水以外の雑用水を二次利用することも考案されている。

住宅における水資源循環構想の概略を図1に示す¹⁾。同図に示すとおり、本住宅は生活系排水を処理し、雑用水として二次利用し、住宅内において水を循環し再利用することを試みている。

一方、これら再利用水を屋上緑化利用水とするには、細菌感染症へのリスクを考慮した衛生的に安全性の高い利用方法が必須条件である。特に貯留槽を設置し、循環系で行う水使用形態はレジオネラ感染症(第四型呼吸器感染症)のリスクが高い施設になってくる²⁾。

これら、レジオネラ症に対する行政的指導としては、2003年7月25日に厚生労働省告示第264号「レジオネラ症を予防するために必要な措置に関する技術上の指針」が制定され、「感染症の予防の総合的な推進を図るための基本的な指針」(2001年4月1日)を補足するものとして具体的な指導が行われている³⁾。これは感染症が多発している入浴施設を対象としたものであるが、海外で多く発症している冷却塔等およびエアロゾルを発生させるその他の設備も対象となっている。すなわち、建物内における人工水の衛生管理は管理責任を持つ施設側にあるため、緑化利用水の安全性管理も含め設備システムの適正管理の重要性はさらに高まっている。

以上の背景から本研究では、屋上緑化システムにおける利用水の循環利用を念頭におき、まず屋上緑化利用水の水質実態調査を行い、細菌汚染状況を把握し、衛生的な視点から使用実態を明らかにした。さらに各種用途水の屋上緑化利用水としての可能性を探るために、細菌リスク評価を含めた水質評価を行い、今後におけるこれら施設の衛生管理手法を確立するための基礎資料を得ることを目的とした。

* 関東学院大学大学院博士前期課程工学研究科
大学院生
** 関東学院大学工学部社会環境システム学科 技師・工博
*** 関東学院大学工学部建築学科 教授・工博
**** 独立行政法人建築研究所 上席研究員
***** 東京理科大学 教授・工博
***** 積水化学工業環境・ライフカンパニー開発部

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kanto-Gakuin Univ.

Eng., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kanto-Gakuin Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture Kanto-Gakuin Univ., Dr. Eng.
Building Research Institute
Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Chief Engineer, Sekisui Chemical Co., Ltd.

2. 実験方法

2.1 屋上緑化利用水の水質調査

屋上緑化利用水の調査は、すでに設置されている屋上緑化施設を対象とした。各施設の概要を表1に示す。A 大学構内にある屋上緑化実験施設(n=6)、B 研究所内にある屋上緑化実験施設(n=2)、C 研究所屋上緑化実験施設(n=1)、D 住宅展示場屋上に設置された屋上緑化実験施設(n=1)、E 役所および F 役所屋上に設置された屋上緑化施設(n=1)の計 6 施設の貯留水槽内の水質について実態調査を行った。同表に示すとおり 6 箇所の屋上緑化システムのうち、B 屋上緑化実験施設は平面パネル式緑化パレットシステム、その他の施設については底面灌水式緑化システムとなっている。一例として写真1に F 屋上緑化施設を示す。

平面パネル式緑化パレットシステムは、傾斜屋根に緑化パレットを設置し、棟部の染み出しホースより灌水し、軒先まで浸透した余剰水は雨樋より回収する方式を仕様としている。

一方、底面灌水方式緑化システムは植栽パレットの下面から散水し、貯留タンクよりポンプで植栽パレット下部に所定時間給水・一時滞留し、土壌の毛細管現象で灌水後、再び貯留タンクへ戻る。雨水は植栽パレット面で回収し、不足時には上水(中水)を補給するシステムとなっている。

緑化システムの概況は、散水頻度が1日1回、散水量は30~45 m³程度、システムの土壌厚は20~70mm、貯留槽に市販の遮光精度80%のシートを被覆させ遮光措置を行っていた。システムの経過年数は7ヶ月のものから、2年経過しているものもあった。上水の補給については、ボールタップによる自動給水方式をとっているものが多く、植栽に対する肥料については、システム設置時に腐葉土を施肥している。

屋上緑化利用水の水質測定項目は外観、透視度、pH、電気伝導率、臭気、TOC、COD、懸濁物質、一般細菌、従属栄養細菌、レジオネラ属菌および大腸菌群について行い、試験方法は上水試験方法⁴⁾に基づいた。

2.2 各種用途水の水質調査

本実験では、雨水、一般家庭浴槽水、合併式浄化槽処理水、修景用水および循環浴槽水を対象とした。表2に各種用途水の調査概要を示す⁵⁾。

本実験で対象とした家庭用合併式浄化槽は、ディスポーザ対応型浄化槽であり、第一嫌気ろ床槽、第二嫌気ろ床槽からなり、処理水は第一嫌気ろ床槽への循環により、窒素除去が行われる。生物ろ過槽は上段が反応部、下段がろ過槽に区切られ、1mm角の担体が充填されている。上段底部には散気管が取り付けられ、常時ばっ気が行われ、担体に付着した微生物により排水は酸化分解される。対象とした処理水は、この生物ろ過槽後段で採取した。

一般浴槽水の入浴条件は入浴者が8人であり、入浴後、浴槽(FRP製)容量約220L中から3Lの浴槽水を採取した。試料の採取時間は入浴後12時間以内に行った。

雨水は2003年6月25日~11月25日の間に計6回採取した。雨水の採取は、6月22日~6月25日(RUN1)、6月26日~7月1日(RUN2)、7月7日~7月10日(RUN3)に行った。なお、11月21日(RUN4)と11月25日(RUN5)は、関東学院大学実験棟の

図1 水資源循環型住宅の構想図¹⁾

表1 調査対象とした屋上緑化システムの概要(n=1~9)

屋上緑化施設	所在地	給水系統	貯留水槽 容量	植栽パレット		採水日
				植栽種類	面積(m ²)	
A実験施設	千葉県	雨水・上水 循環利用	500L	高麗芝	3.24	2003.7.28 ~9.29
B実験施設	茨城県	上水	—	セダムゴケ	4.86	2003.9.18 ~12.4
C実験施設	京都府	雨水・上水 循環利用	300L	高麗芝	3.24	2003.9.10
D緑化施設	神奈川県	雨水・上水 循環利用	600L	高麗芝	15.12	2003.9.30
E緑化施設	埼玉県	雨水・上水 循環利用	300L	高麗芝	3.6	2003.12.2
F緑化施設	東京都	雨水・上水 循環利用	300L	高麗芝	3.6	2003.12.2

写真1 F屋上緑化施設

表2 各種用途水の調査概要

対象試料	試料数 (n)	採水日	採取場所
雨水	6	2003.6月 ~11月	関東学院大学 設備工学研究所屋上
一般家庭浴槽水	6	2003.6月 ~12月	A宅浴槽, B宅浴槽
家庭用循環浴槽水	6	2003.4月 ~7月	C宅浴槽
合併式浄化槽処理水	9	2002.6月 ~2003.5月	D研究所
修景用水	6	2003.11/28	E動物園内遊水池

東側に設置してある屋外喫煙所の片流れ屋根から、雨樋を流れる雨水を容器に採取した。RUN1～RUN5 は降雨直後の採取とした。さらに、RUN6 (11月21日) の試料は無蓋のポリバケツ容器に約半年間、屋上環境下において静置の状態で長期滞留した雨水を採取した。雨水採取時の気象状況を表3に示す。気象データは、気象庁横浜観測所(緯度: 35度26.3分、経度: 139度39.1分、標高: 39m) 閲覧電子データをまとめたものである。主な気象状況としては、RUN1の採取時は平均気温23.0℃、平均相対湿度80.7%、平均風速2.6m/sおよび積算降水量37.0mmとなっている。RUN2は平均気温22.6℃、平均相対湿度77.0%、平均風速2.6m/sおよび積算降水量12.5mmであった。同様にRUN3は21.3℃、83.0%、3.1m/sおよび12.0mm、RUN4およびRUN6は17.1℃、76%、3.0m/sおよび9mmであり、RUN5は11.4℃、83.0%、5.7m/sおよび45mmであった。

家庭用循環浴槽システムは、容量2.6Lの濾過槽が2系列設置され、この中を浴槽水が循環することで生物浄化が進行する。また、紫外線照射灯が付設しており、1日8時間の照射となっている。試料は230Lの浴槽内から入浴8時間後(入浴者: 4人)に採取した。

修景用水は2003年11月28日に、G動物園の敷地内にある遊水池(以下修景用水とする)の計6箇所から採取した。

2.3 各種用途水の細菌リスク予測評価

2.3.1 一般細菌の増殖試験

本実験では、各種用途水における細菌のリスクを評価するために一般細菌の増殖試験を行った。まず、合成基質試料(グルコース、グルタミン酸)のTOC(有機物)濃度を0～95.9mg/Lの濃度段階をとり、この中で増殖する一般細菌の増殖挙動を測定した。さらに、各種用途水のTOC濃度を実測し対比させることで、細菌増殖の主要素である各種用途水の有機汚濁物質濃度による一般細菌の増殖リスクを予測した。

実験方法は滅菌水にグルコース、グルタミン酸混合液をTOC値として1.6～95.9mg/Lになるように添加する。これに継代培養した一般細菌1白金耳を滅菌水で10mLとした調製液の中から100μL植菌し、全量を300mLとする。これを90rpm、25℃の条件下で24～120時間の振とう培養試験を行った。

さらに各種用途水における本細菌のリスク予測は各種用途水の示すTOC値に本菌がどの程度増殖するのかで評価した。

2.3.2 レジオネラ属菌の増殖試験

本実験では、各水質中におけるレジオネラ属菌の増殖特性からリスク評価を行った。まず、振とう培養法による実験では、雨水、修景用水、循環浴槽水、浄化槽処理水、精製水を孔径0.22μmでろ過滅菌し、試料中に増殖している細菌類を除去し、300mLを共栓付き三角フラスコに分取する。この試料水中にWYOαレジオネラ選択培地で培養したレジオネラ属菌を10²CFU/mLになるように植菌し、25℃、90rpmで振とう培養実験を行った。測定は培養前後におけるTOCおよびレジオネラ属菌数とした。

次に恒温槽内における静置実験としては次のとおりに行った。

入浴後の一般浴槽水、家庭用循環浴槽水および修景用水、対照試料として給湯水を用い、25℃、静置条件下におけるレジオネラ属菌等の増殖特性について検討した。なお、本条件下ではろ過滅菌は行

表3 雨水採取時における気象観測値(2003年気象庁横浜観測所)

	平均 気圧 (hPa)	平均 気温 (℃)	最高 気温 (℃)	最低 気温 (℃)	平均相対 湿度(%)	平均 風速 (m/s)	積算 降水量 (mm)
RUN 1	1012	23	30.2	20.2	80.7	2.6	37
RUN 2	999.8	22.6	28.3	18.8	77	2.6	12.5
RUN 3	1007.4	21.3	24.9	18.4	83	3.1	12
RUN 4	997.1	17.1	23.1	10.9	76	3	9
RUN 5	1017	11.4	15.1	9	83	5.7	45
RUN 6	997.1	17.1	23.1	10.9	76	3	9

表4 屋上緑化利用水の水質特性

	対象施設					
	A施設	B施設	C施設	D施設	E施設	F施設
外観	微緑 黄色	無色 透明	弱黄色	弱黄色	弱黄色	微黄色
透視度 (cm)	45.8	50以上	50以上	36.5	50以上	50以上
pH (-)	7.3	7.84	7.2	6.7	7.1	7.1
臭気	弱藻臭	微弱 藻臭	土臭	土臭	青草臭	土臭
電気伝導率 (μS/cm)	150	-	154	78	70	134
DOC (mg/L)	7.64	-	11.4	4.75	7.14	3.22
COD (mg/L)	9.54	3.65	12.0	10.5	9.04	3.11
T-N (mg/L)	0.86	0.16	0.63	2.92	0.46	1.21
T-P (mg/L)	-	0.06	-	-	0.15	0.06
SS (mg/L)	7.26	-	0.89	8.22	3.90	1.80
一般細菌 (CFU/mL)	1.8 ×10 ⁵	2.2 ×10 ⁵	6.8 ×10 ²	4.4 ×10 ³	2.0 ×10 ⁴	2.8 ×10 ³
従属栄養細菌 (CFU/mL)	3.2 ×10 ⁴	2.1 ×10 ⁵	8.3 ×10 ³	6.7 ×10 ⁴	2.5 ×10 ⁵	1.5 ×10 ⁵
大腸菌群 (CFU/mL)	62	15	8	3	1390	25
レジオネラ属菌 (CFU/100mL)	355	58	440	130	220	100

図2 屋上緑化利用水におけるDOC, COD

わずに、レジオネラ属菌は無添加とし、すでに試料中に存在しているレジオネラ属菌の増殖特性について検討した。

3. 結果および考察

3.1 屋上緑化利用水の水質特性

屋上緑化利用水の6施設における水質特性を表4に示す。全体的に各屋上緑化利用水は藻類の増殖が顕著であった。これは水質項目の外観、透視度、臭気から評価された。各屋上緑化利用水の有機系汚濁状況を知るためにCODおよびDOC(溶存有機炭素)を測定し、図2に示す。

同図より、屋上緑化利用水の有機系汚濁が最も進行している施設はC施設であり、CODおよびDOCは11.4 mg/L、12.0mg/Lの高い値を示した。調査対象とした6施設のうち、67%の4施設(A,C,D,E)において、CODが9.04~12.0mg/Lとなった。そのうち3施設(A,C,E)はDOCも7.14~11.4mg/Lを示した。

一方、COD(10.5mg/L)に対し、極端にDOCが4.75mg/Lと低いD施設の試料中には、ろ過することで除かれる藻類の存在があり、CODは藻類も含み100℃で煮沸し測定する方法であるため、高い値になったと考えられる。また、B施設においては、水道からの直接給水であり循環系の水質ではないことから、有機系汚濁が進行していないことが考えられた。

図3には屋上緑化利用水中から検出された一般細菌、従属栄養細菌、大腸菌群およびレジオネラ属菌の検出数を示した。

従属栄養細菌は 10^4 CFU/mL~ 10^5 CFU/mLオーダーで検出され、一般細菌数も比較的高く 10^2 CFU/mL~ 10^4 CFU/mLと細菌汚染は顕著であった。また、大腸菌群はE施設において最大値で1390CFU/mLが検出された。一方、病原性細菌としてエアロゾルの飛散等による感染症に注意が必要とされる、レジオネラ属菌は全施設で検出された。検出されたレジオネラ属菌数は58~440CFU/100mLを示し、浴場施設における指針値10CFU/100mL未満(検出されないこと)より高い結果となった。

3.2 各種用途水の水質評価

各種用途水の水質特性について、中央値でまとめたものを表5に示す。降雨直後における雨水のpHは4.9の酸性を示した。電気伝導率は、 $26.6\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、降雨直後の雨水中含有成分は低いことがわかる。同様に一般細菌数も50CFU/mLと低い値となったが、従属栄養細菌は 10^5 CFU/mL程度の高い値を示し、雨水中に従属栄養細菌は増殖していることが示された。一方、RUN6の長期滞留した雨水について、降雨直後の雨水と比較すると、有機汚濁物質(TOC,DOC)に明らかな増加がみられ、それに伴い一般細菌数および従属栄養細菌数についても、降雨直後の雨水に比べ $10\sim 10^2$ 倍程度高い検出数が確認された。また、レジオネラ属菌については 2.96×10^4 CFU/100mL、大腸菌群についても同様に240CFU/mLが確認された。この結果より雨水を長期放置・滞留しておくことで水質は劣化し、それに伴って細菌は増殖していくことが示された。

一般浴槽水の水質特性をみると、TOCは3.64 mg/Lを示し、一般細菌は1200CFU/mLおよび従属栄養細菌は 10^5 CFU/mLの検出が確認され、細菌汚染は顕著であった。一方、循環浴槽水のTOCは1.8 mg/Lと低く、生物濾過槽により処理された水質は安定していた。浄

図3 屋上緑化利用水中における細菌検出数

表5 各種用途水の水質特性 (中央値 n=6~9)

	雨水 (RUN6)	一般浴槽 水	循環 浴槽水	浄化槽 処理水	修景用 水
外観	無色透明 (無色透明)	無色 透明	無色 透明	微黄色	微黄色
透視度 (cm)	50以上 (50以上)	50以上	50以上	46	50以上
臭気	土臭 (土臭)	-	-	カビ臭	沼沢臭
pH (-)	4.9 (7.0)	7.2	7.2	7.5	8.1
電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	26.6 (88.9)	155	156	363	907
TOC (mg/L)	1.37 (3.88)	3.64	1.78	9.95	13.8
COD (mg/L)	0.57 (17.7)	1.18	0.64	6.85	2.28
SS (mg/L)	0.79 (2.95)	1.12	-	2	3.97
一般細菌数 (CFU/mL)	50 (704)	1200	151	420	8050
従属栄養細菌 (CFU/mL)	3.5×10^5 (1.5×10^7)	1.7×10^5	700	8.9×10^3	5.3×10^4
レジオネラ属菌 (CFU/100mL)	ND (3.0×10^4)	15	ND	68	62.5
大腸菌群 (CFU/mL)	ND (240)	ND	ND	ND	88

注) (RUN6): 長期滞留雨水

表6 各種用途水における高順 (中央値 n=6~9)

項目	高順
pH (-)	修景>浄化>一般浴槽・循環>雨水 (8.1) (7.5) (7.2) (4.9)
電気伝導率($\mu\text{S}/\text{cm}$)	修景>浄化>循環>一般浴槽>雨水 (907) (363) (156) (155) (26.6)
TOC (mg/L)	修景>浄化>一般浴槽>循環>雨水 (13.8) (9.95) (3.64) (1.78) (1.37)
一般細菌数 (CFU/mL)	修景>一般浴槽>浄化>循環>雨水 (8050) (1200) (420) (151) (50)
レジオネラ属菌 (CFU/100mL)	浄化>修景>一般浴槽>循環・雨水 (68) (62.5) (15) (ND)

化槽処理水は、中央値からみて pH は 7.5 の中性を示し、電気伝導率は $363 \mu\text{S}/\text{cm}$ であった。有機汚濁物質を TOC および COD から評価すると、TOC は 9.95 mg/L 、COD は 6.85 mg/L が示された。

次に一般細菌数は 420 CFU/mL を示し、従属栄養細菌は $8.9 \times 10^3 \text{ CFU/mL}$ が検出された。修景用水の TOC は 13.8 mg/L と最も高く、一般細菌数も $8.05 \times 10^3 \text{ CFU/mL}$ が検出された。

得られた水質試験結果について雑用水としての水質評価を行った。まず表 6 に示すとおり、対象試料水の TOC の中央値について高順に並べると、修景用水 (13.8 mg/L) > 浄化槽処理水 (9.95 mg/L) > 一般浴槽水 (3.64 mg/L) > 循環浴槽水 (1.78 mg/L) > 雨水 (1.37 mg/L) の順となり、有機汚濁の進行程度がわかる。

TOC、一般細菌数および大腸菌群の中央値と使用用途別水質ランク (表 7) ^{8), 9)} に基づき、表 8 に示す項目について対象試料水の水質ランク付けを行った (表 8)。すなわち、AA は飲用として利用可能となり、A は洗浄水 (厨房洗浄用)、B は風呂・洗濯およびプール用水、C は親水用水、D は洗車用水、そして E は水洗便所の洗浄水としての使用用途と定義した。

各種用途水の水質ランクづけ評価結果を表 9 に示す。これより、浄化槽処理水および一般家庭浴槽水は E にランクされ、循環浴槽水は B となった。

なお、雨水は酸性を示したことことから pH の調整は必要であるが、AA の水質となることがわかる。これより、各種用途水の再利用可能とされる使用用途は、一般家庭浴槽水、合併式浄化槽処理水および修景用水は水洗便所の洗浄水、循環浴槽水は風呂・洗濯およびプール用水、雨水は飲用可能な水質と同程度と評価することができる。また、屋上緑化利用水も 3.1 の結果より、E 判定となり水洗便所の洗浄水としての利用が可能であると評価された。しかし各試料とも従属栄養細菌等が検出されていることから、何らかの消毒方法により、細菌感染症リスクを考慮した使用方法が重要であると考えられた。

3.3 各種用途水における細菌リスク予測評価

本項では各種用途水中における増殖可能な細菌リスク予測評価を行った。

3.3.1 一般細菌の増殖特性

図 4 にグルコースを基質とした条件下における一般細菌数の増殖特性を示す。同図に示すとおり、TOC 濃度が 10 倍量高くなると一般細菌数は 10^5 倍まで増殖することがわかる。なお、各濃度における TOC は 50% が減少した。

水中 TOC 濃度と増殖可能な一般細菌数の関係を図 5 に示す。さらに同図中に対象とした用途水中の実測 TOC を挿入し、対象用途水中に増殖可能な一般細菌数を予測することを試みた。

同図に示すとおり、TOC 濃度が $1.4 \sim 14 \text{ mg/L}$ の範囲において、一般細菌数は TOC 濃度の増加に伴い、対数的に増殖することが示された。詳細にみると、TOC 濃度が 14 mg/L と各用途水中で最も有機系汚濁の進行している修景用水は、 10^7 CFU/mL 程度まで一般細菌数の増殖が予測された。

そして、最も有機系汚濁の低い雨水においても、一般細菌数は 10^3 CFU/mL 程度増殖する可能性が示された。

一方、一般細菌は増殖に伴い水中に白濁現象が認められる。そこ

表 7 各種用途水別水質ランク ^{8), 9)}

水質ランク	AA	A	B	C	D	E
使用用途	飲用	厨房	風呂等	親水	散水	便所
TOC (mg/L)	<2	<3	<5	<10	<20	<30
一般細菌数 (CFU/mL)	<100	<100	<200	—	—	—
大腸菌群 (CFU/mL)	ND	ND	ND	ND	ND	<10

表 8 各種用途水の 3 項目における水質

	TOC (mg/L)	一般細菌数 (CFU/mL)	大腸菌群 (CFU/mL)
修景用水	13.8	8.1×10^3	88
浄化槽処理水	9.6	4.2×10^2	ND
一般浴槽水	3.6	1.2×10^2	ND
循環浴槽水	1.8	1.5×10^2	ND
雨水	1.3	50	ND

表 9 各種用途水の水質ランクづけ評価

	評価	可能な使用用途
雨水	AA	飲用
循環浴槽水	B	風呂、洗濯等
一般浴槽水	E	便所
浄化槽処理水	E	便所
修景用水	E	便所

図 4 一般細菌の増殖と TOC 減少率の一例

図 5 各種用途水における一般細菌の増殖特性の予測

で、増殖に伴う濁度を吸光度 ($\lambda = 560\text{nm}$) より評価⁹⁾ し、TOC 濃度との関係を求め、図 6 に示す。

これより、一般細菌の増殖に伴う吸光度の上昇は、TOC 濃度の高順にあり、24 時間が最大ピーク値となり、120 時間までほぼ平衡にあった。

図 7 では各 TOC 濃度条件下で示された吸光度値と一般細菌数の関係を求めた。関係式は $G=7E+11A^{5.08}$ (G : 一般細菌数 (CFU/mL), A : 吸光度 (-), $R^2=0.85$) が得られた。関係式より、たとえば、浄化槽処理水中に増殖する一般細菌数を求めると 10^7CFU/mL となった。

以上の結果より、対象とする各種用途水の TOC 濃度から、増殖可能な一般細菌数を求めると、TOC 濃度で 1.3mg/L 以上が示されれば、一般細菌の増殖を伴う水質であることが予測された。

すなわち、比較的有機物濃度の低い各種用途水中において、細菌が増殖することが明瞭であり、衛生学的な措置を施す重要性が示唆された。

3.3.2 レジオネラ属菌の振とう培養法による増殖試験

本実験では、TOC 濃度の異なる各種用途水中でレジオネラ属菌の増殖がどのように推移するかを中心に検討した。なお、本実験では植菌したレジオネラ属菌以外の細菌はろ過滅菌した。各種用途水中の TOC とレジオネラ属菌の経日変化を図 8 に示す。

TOC 初濃度 (1mg/L 前後) が低い精製水および雨水中におけるレジオネラ属菌の増殖特性は、日数が経過するにつれ増殖する傾向にあり、初濃度 10^2CFU/mL の本菌は 10^5CFU/mL まで増殖した。

図 6 TOC 濃度による吸光度の経時変化

図 7 24 時間時における一般細菌数と吸光度の相関図

図 8 各種用途水におけるレジオネラ属菌と TOC の経時変化

また、TOC 初濃度が 15mg/L 前後を示す浄化槽処理水中におけるレジオネラ属菌も 10^6 CFU/mL まで増殖した。

一方、レジオネラ属菌の増殖がみられなかった試料は、修景用水および循環浴槽水であり、初濃度 10^2 CFU/mL は $10 \sim 10^2$ CFU/mL になった。

以上の結果より、レジオネラ属菌は精製水および雨水のように有機基質の低い環境下でも増殖可能であることがわかった。

3.3.3 レジオネラ属菌の静置培養法による増殖試験

3.3.2 の実験では、各種用途水中にレジオネラ属菌を植菌し、振とう培養法による増殖特性について検討した。

本実験では、試料中にレジオネラ属菌を植菌せずに、静置培養下におけるレジオネラ属菌の増殖挙動について観察した。

図 9 に修景用水、一般浴槽水、循環浴槽水および給湯水の時間に伴う TOC 変化を示す。TOC 初濃度は一般浴槽水が 12mg/L と最も高い値になった。これは、入浴者が浴槽内で体を洗い、浴槽水の TOC 濃度を高めるために意図的に行った結果である。給湯水および循環浴槽水は 3mg/L 前後の低い値を示した。TOC の時間的な推移をみると各試料とも 1 週間前後はほぼ平衡を示し、TOC 初濃度が 12mg/L と高い一般浴槽水は 9 日値で約 40% 前後の TOC 減少がみられた。

同条件下における従属栄養細菌の増殖特性を図 10 に示す。同図より、実験開始時の細菌数をみると給湯水は不検出となり、その他の試料は 10^4 CFU/mL オーダーで検出された。

給湯水も 3 日間、25℃ 下に静置すると 10^4 CFU/mL まで従属栄養細菌は増殖することがわかる。その他の試料は測定期間中において 10^4 CFU/mL と平衡を示した。

レジオネラ属菌の増殖特性を図 11 に示す。レジオネラ属菌の増殖が最も顕著であった試料は一般浴槽水であり、入浴直後の試料中からは 20CFU/100ml が検出された。この試料を 3 日間静置すると、レジオネラ属菌は 10^4 CFU/100ml まで増殖した。一方、初期値は不検出の給湯水も 9 日間滞留させると 100CFU/100ml の増殖が示された。また、家庭用循環浴槽水は生物ろ過槽により処理されているため、静置培養下においてレジオネラ属菌数が 10^2 CFU/mL と増殖の変動が小さい理由になったと考えられた。

表 10 に各培養条件下におけるレジオネラ属菌の生残率（最終培養値）をまとめた。

同表に示すとおり、TOC 値の低い水質特性を示す雨水、給湯水および精製水中で本菌は $10^2 \sim 10^3$ 倍で増殖し 10 日前後は生残することが示された。

以上の結果より、雨水、給湯水および精製水などのように TOC 値の低い水質であっても、滞留することでレジオネラ属菌は対数的に増殖可能であることが明瞭に示されたことから、水循環利用における細菌汚染対策の重要性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、屋上緑化システムにおける利用水の水質調査および利用可能な各種用途水の水質評価を行い、本システムの有効な水利用方法について検討した。得られた知見をまとめると次のとおりである。

(1) 屋上緑化利用水の水質実態を知るために、有機汚濁物質

図 9 各種用途水における TOC の経時変化（静置）

図 10 各種用途水中における従属栄養細菌の増殖特性（静置）

図 11 レジオネラ属菌の増殖特性（静置）

表 10 レジオネラ属菌の生残率と TOC 減少率

区分 試料	培養法			
	振とう培養 (7日値)		静置培養法 (9日値)	
	生残率 (-)	TOC減少率 (-)	生残率 (-)	TOC減少率 (-)
浄化槽処理水	927	0.37	—	—
修景用水	0.12	0.56	1	0.87
一般家庭浴槽水	—	—	14.5	0.56
循環浴槽水	0.4	2.15	0.74	0.85
雨水	213	3.26	—	—
給湯水	—	—	1000	0.85
精製水	612	6.08	—	—

注) 生残率 (-) = 最終値/初期値

(TOC,COD)、細菌類等を中心に測定を行った。その結果、67%の施設 (n=6) で水中有機汚濁物質濃度は 10mg/L 付近を示した。

この理由として、貯留槽内における藻類による有機物の産生が考えられた。同時に消化器系病原菌の指標細菌である一般細菌の増殖も顕著であり、 $10^3 \sim 10^4$ CFU/mL が検出された。

(2) 本システムにおける雑用水の有効利用を目的として、各種用途水の水質調査を行った。使用可能な用途を意識しながら水質ランク付けを行った結果、雨水、循環浴槽水の水中 TOC 値は 2mg/L 以下であり、AA および B にランクされた。また、一般浴槽水、浄化槽処理水、修景用水は E ランクとなった。

(3) 雑用水を本システムに利用する際の細菌によるリスク予測評価を行った。消化器系病原菌のリスクは一般細菌により評価した。各種用途水中の水中 TOC 値から評価すると、修景用水>浄化槽処理水>一般浴槽水>循環浴槽水>雨水の順に一般細菌数は高くなることが予測された。

一方、呼吸器感染症の起因菌であるレジオネラ属菌のリスク評価を行った結果、各種用途水のもつ基質に影響されずに、本菌の増殖する可能性が示された。

(4) 以上の結果より、本システムの衛生管理は、貯留槽内における藻類の産生を防止するための措置を行い、細菌リスクを考慮した消毒方法の検討、また植栽への散水はエアロゾルの飛沫を避けた散水方法の漏水システム計画手法の確立について検討することが今後必要とされる。

謝辞

本研究の一部は国土交通省総プロジェクト「自立循環型住宅開発委員会[A9]資源循環システム」の一環として行ったものである。関係各位に深甚なる謝意を表する。その後の継続研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業に選定された「都市・建築のストック再生を目的とした環境共生技術の戦略的開発研究」の一環で行ったものであることを付記する。実験にあたり、当時の卒業研究生、椎野晃明氏 (現：(株)カンドー) にご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大塚雅之, 山海敏弘: 資源循環型住宅システムの開発 その3 要素技術と技術評価の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊 pp.519-520, 2004.8
- 2) 中村伸也, 野知啓子, 椎野晃明, 大塚雅之: 資源循環型住宅システムの開発 その6 雨水・再利用水の水質評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊 pp.525-526, 2004.8
- 3) 日本水道協会: 上水試験法・解説, 2001
- 4) 光岡俊成: レジオネラ症を予防するために必要な措置に関する技術上の指針(厚生労働大臣告示)の制度について, 空気調和・衛生工学, 第78巻, 第2号, pp.63~69
- 5) 椎野晃明, 野知啓子, 大塚雅之, 山海敏弘他: 屋上緑化システムに利用可能な雑用水の水質調査, 2003年度日本建築学会関東支部研究報告集 I pp.535-538
- 6) 山田賢次: 建物内における上質水, pp.20.25, 1995
- 7) 山本大輔: 暮らしの水, pp.25, 1994
- 8) 西村和之, 真柄泰基: 水の細菌増殖能力を用いた水質評価, 水質汚濁研究, Vol 10, pp.681~689, 1987

(2005年7月6日原稿受理, 2006年2月1日採用決定)