

モンスーンアジアでの個別排水処理 (On-Site Sanitation) による  
微生物除去性能の評価 ～季節性や土壌特性との関連～

Evaluation of Microbial Removal by On-Site Sanitation in Monsoon Asia

-Relationship with Seasonality and Soil Characteristics-

大学院人間文化創成科学研究科  
生活工学共同専攻 M2 井上 眞菜

## 1. 要約

(和文)

し尿排水処理方法として、途上国や中進国では個別排水処理 (On-Site Sanitation systems ; 以下 OSS) が普及しており、この中でも底のない筒にし尿を流し込み土壌浸透させる型を Pit latrine という。Pit latrine は本来非水洗のトイレに接続されることを想定しているが、現在はトイレの水洗化が進みトイレ排水量の増加に適応できず病原微生物リスクの抑制が不十分である可能性がある。特に、OSS が多く導入されているモンスーンアジアでは、多量の降雨により OSS の周辺土壌への糞便汚染が拡大する懸念があり、これら気候および地理的要因、土壌浸透を含めて実態を探ることが必要である。本研究では OSS 周辺土壌を採取し、ヒト糞便由来のウイルス指標として Pepper mild mottle virus (PMMoV) および大腸菌ファージ、その他大腸菌等の細菌指標を測定することにより、OSS 周辺土壌による微生物除去性能を評価することを目的とした。調査方法として、OSS の普及するスリランカ国にて家庭用 Pit latrine および似た型である Soakage pit の計 6 カ所を対象とし、その近傍および遠方の箇所にて土壌を採取、各微生物指標の測定を行った。PMMoV に関しては、農業分野で土壌からの検出手法として用いられている ELISA (Enzyme-Linked Immuno-Sorbent Assay) を、OSS 周辺土壌を対象として新たに試みた。その結果、OSS より十分に離れた地点から、OSS 近傍と同レベルの PMMoV が検出されたことから、スリランカ国における ELISA による PMMoV の評価は困難である可能性が高いと示唆された。また、大腸菌ファージの結果により OSS のウイルス除去性能を評価したところ、沿岸部 1 地点における Pit latrine より最大で 3.9 Log のウイルス除去が確認され、特に降雨の少ない時期に周辺土壌によって有意に除去される傾向にあることがわかった。また、大腸菌ファージと大腸菌には相関が見られず、ウイルスと細菌の土壌中の挙動は異なることが示唆された。

(英文)

In many parts of the developing countries, On-Site Sanitation (OSS) is prevalent for treating human waste water. Among them, pit latrines are one of the common types and designed for use with non-flushing toilets. However, with the increase of flush toilets, they are likely incapable of handling the

increased wastewater volumes, potentially leading to insufficient control of pathogen risks. The effectiveness of OSS in reducing pathogen risks through soil infiltration remains unclear, necessitating further investigation. Particularly in monsoon Asia, there is concern that heavy rainfall may expand fecal contamination of soils surrounding OSS. It is, therefore, necessary to investigate the actual conditions, taking climatic and geographic factors into account, including soil infiltration. This study aimed to evaluate the microbial removal performance of OSS by collecting soil samples around them and measuring viral indicators from human feces, including the Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV) and coliphages, along with bacterial indicators like *Escherichia coli*. The research was conducted in Sri Lanka, focusing on six sites, including household pit latrines and soakage pits. Soil samples were collected from both nearby and distant locations for microbial analysis. Enzyme-Linked Immuno-Sorbent Assay (ELISA) was implemented to detect PMMoV in soil samples. Results indicated that PMMoV levels in samples collected from areas sufficiently distant from OSSs were similar to those found near OSS, suggesting challenges in accurately assessing PMMoV in Sri Lanka using ELISA. Additionally, coliphage results revealed a maximum virus removal of 3.9 Log from a coastal pit latrine, particularly during drier periods, indicating a significant role of surrounding soil in virus removal. Notably, no correlation was found between coliphages and *E. coli*, suggesting differing behaviors of viruses and bacteria in soil environments.

2. 現地調査期間：2025年10月7日～10月23日

### 3. 調査背景

WHO とユニセフの報告書<sup>1</sup>によると、世界では約7億300万人が安全な水にアクセスできず、36億人が適切な衛生設備（他世帯と共有せずに使用され、かつ排泄物が適切に処理される設備）を欠いている。2000年以降多くの水・衛生環境が改善されたものの、未だ適切なサービスを得ることのできない人々のいる現状に対し、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals ; SDGs）では2030年までに「すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」<sup>2</sup>ことを目標に掲げており、水・衛生環境に関して改善が求められている。公衆衛生上、扱いが非常に重要となるヒトの排泄物（し尿）について適切な衛生設備とは、先進国を始めとして日本の都市部で導入されている水洗化トイレおよび下水道による生活空間からの排除と下水処理による適切な処理といえる。一方、途上国や中進国では都市部では上記システムの導入が進みつつあるが、多くの地域が個別排水処理（On-Site Sanitation ; 以下 OSS）に依存している状況である。OSSとは、家庭などから排出されたし尿排水を処理槽内に貯蔵し嫌気環境下で消化処理を行う仕組みであり、家庭で使用される OSS には主に図1の種類が挙げられる。2000年以降、下水道接続人口は増加し続けているものの OSSs の増加率はより高く、2020年には OSS 使用人口が下水道接続を

使用する人数を初めて上回った<sup>1</sup>。この要因としては、国連の主導により世界的に屋外排泄をなくす取り組みが行われている中、OSS が下水道と比較して費用が安く済み、かつ共同体でまとめて処理を行うことも可能であるため、特に農村部にて積極的に導入されていることが挙げられる。



図1 OSSの主な種類

このうち、低・中所得国を中心とした約17億人は非水洗式トイレ用のOSSであるPit latrineを使用しており<sup>3</sup>、これは底がない筒に流入したし尿排水は比較的短い期間のうちに土壌に浸透する仕組みをとっている。また、Septic tankにて処理を行った後Pit latrineにて土壌浸透を行うSoakage pit型も存在する。特にPit latrineは本来非水洗のトイレに接続されることを想定しているが、昨今はトイレの水洗化が進みトイレ排水量の増加に適応できず病原微生物リスクの抑制が不十分である可能性がある。しかし、個々のOSSによって設計や運用状況が異なるため、実際のOSS処理による病原リスク低減効果がどの程度なのかは明らかでない。また、OSS処理に加え土壌浸透による病原リスクの低減効果について不明な点が多く、特に飲み水として井戸水が使用されている地域では地下水の汚染からの水系感染症の要因となる可能性があると考えられる。加えてOSSが比較的多く導入されているモンスーンアジアでは、季節によって卓越風向が反対になることにより雨季や乾季に分かれているのが特徴であるが、特に雨季には多量の降水が発生し、OSSの周辺土壌の状況が変わることで糞便汚染が拡大する報告がある。

以上の背景からもOSSの周辺への汚染に関する評価を土壌浸透も含めて検討する重要であり、かつ、モンスーンアジア地域では土壌浸透によるウイルスの伝搬を、気候を含めた地理的な要因も含めて実態を探ることが必要である。

#### 4. 調査目的

本研究では、モンスーンアジアにおいて運用中のPit latrineおよびSeptic tankが前段に接続されたSoakage pitからの糞便由来病原微生物の流出状況を調査した。実際に稼働するOSS処理槽からのサンプリングが難しいことから、OSS近傍および周辺土壌中の糞便汚染指標を測定することで、OSS周辺土壌による微生物除去性能の評価を目的とした。

除去性能の評価を行うための糞便性微生物指標として、細菌及びウイルスを対象とした。

ヒト糞便汚染の指標微生物としては大腸菌が一般的に使われるが、細菌指標である大腸菌はサイズ・構造が大きく異なる病原ウイルスの挙動を示しているかは疑わしい。そこで、人糞便汚染のウイルス指標として Pepper mild mottle Virus (PMMoV)、および大腸菌を宿主とする大腸菌ファージを測定することで病原ウイルスの挙動を推定することとした。なお先行研究<sup>4</sup>では PMMoV 濃度を定量 PCR にて測定したが、PCR 法に対する共存物質の影響、また定量下限値が高いことから、多くのサンプルで不検出となっていた。そこで、本研究では農業分野で土壌からの PMMoV の検出法として用いられた実績のある ELISA (Enzyme-Linked Immuno-Sorbent Assay) を用いることを検討し、海外調査での実施が可能かどうかについても検討を行った。2024 年度の途上国研究・国際協力分野海外調査支援により 2024 年 10 月に施行した調査では、ELISA を現地 (スリランカ国) で実施することを試みた結果、実際に使用されている家庭用 OSS 近傍土壌から PMMoV を検出・測定することに成功したことから、本調査において調査地点・サンプル数を増やし他指標を含めた微生物除去性能の評価を行うこととした。

## 5. 調査方法

調査期間内にスリランカ国 Galle 市近郊にて OSS 周辺の土壌を採取し、微生物指標として PMMoV、大腸菌ファージ、大腸菌、大腸菌群を測定した。ただし、期間中に体調不良によりサンプルの測定を終えることができなかったため、研究室からの費用により別途 12 月に再調査を行なった。その間、Ruhuna 大学において 4℃ にて冷蔵保存を行い、また、ウイルス指標の測定に大きな影響がないことを確認した。

調査は共同研究を行っている Ruhuna 大学 (スリランカ国、Galle 市) と協力して進め、サンプリングは Ruhuna 大学の学生の協力のもと行った。また、微生物指標の測定は Ruhuna 大学の実験室にて行った。加えて本調査とは別に、本年の 3 月、6 月、8 月にサンプリングを行っており、その際の結果もまとめて本文に掲載する。

### (1) 調査対象国・地域について

スリランカ国は、人口 2204 万人、国民 1 人当たり GDP が 3474 米ドル<sup>5</sup>であり、中所得国<sup>6</sup>に分類される。熱帯地域に属しているが、面積が約 6 万 5000 m<sup>3</sup> と比較的小さいにも関わらず各地域の地理的条件に応じて気候が大きく異なっている。今回調査対象とした Galle 市はスリランカの南部に位置し、年平均気温は 28℃、年平均降水量は 2485.6 mm であり、湿度が約 80% と高温多湿の気候となっている<sup>7</sup>。明確な区切りはないものの乾季と雨季が存在し、1 月から 3 月にかけては特に降水量が少なく、10 月から 12 月には降水量が多い。

衛生施設に関しては、下水道接続は人口のおよそ 2.4% にとどまっており、その整備は主に西部州を中心に整備されている<sup>8</sup>。人口のほとんどは OSS を使用しており、図 2 に示した WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) によると<sup>9</sup>、図 1 に示すように 2024 年時

点でおよそ 80 % の家庭が Pit latrine もしくは Septic tank に接続された Soakage pit にてし尿を処理していた。これに関し、非水洗トイレの接続が想定されている Pit latrine への水洗トイレの接続は不十分な処理を引き起こす可能性があり、さらにスリランカでは飲用水における地下水のカバー率が約 40 %<sup>10</sup> となっていることから、スリランカにおいて OSS 由来の成分による地下水の汚染や、飲用水への影響が考えられる。

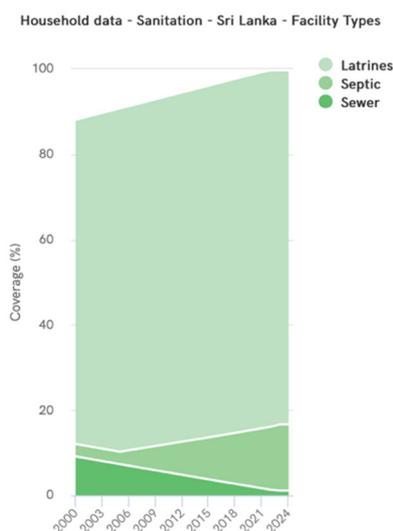


図 2 スリランカ国における衛生施設型別の家庭割合の推移

出典：WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) : Data household Sanitation Trend Chart.<sup>11</sup>

(2) 調査対象の OSS について

Galle 市において、内陸部である Hapugala 地区および沿岸部である Ahangama 地区の許可を得た一般家庭にて、実際に運転中の 5 ヲ所の OSS を対象とした。各 OSS の呼称は、Pit latrine を”P”、Septic tank+ Soakage pit の型を”SP”とし、後ろに番号を振ることで区別を行った。調査対象の OSS の位置を図 3、4 に示す。また、調査対象とした各 OSS に関する情報を表 1 に示す。ただし、各 OSS の設置から経過した年月は 2025 年 8 月を起点とする。これら OSS は設置以来一度も汚泥の引き抜きが行われたことはなかった。また、各家庭の事情に伴い、OSS によっては採取のできなかった月があった。



図 3 内陸部における対象 OSS の位置関係(Hapugala) 図 4 内陸部での対象 OSS の位置関係(Ahangama)

表 1 各 OSS の情報

地点	OSSの型	土壌採取を行った月	設置からの経過	OSSの形状
内陸SP1	Septic tank+Soakage pit	3・6・8・10	10年	一辺2 m、深さ3 m の正四角柱
内陸SP2	Septic tank+Soakage pit	3・6・8・10	3年	一辺1.5 m、深さ3 m の正四角柱
内陸P1	Pit latrine	8・10	6ヶ月	直径1 m、深さ3 m の円柱
沿岸SP1	Septic tank+Soakage pit	8・10	3ヶ月	直径1 m、深さ2 m の円柱
沿岸P1	Pit latrine	古:3・6 新:8・10	古:60年 新:3ヶ月	直径1.5m、深さ2.5 m の円柱

土壌採取の様子の一例を、図 5、6 に示す。また、サンプリング日時別の降水量を図 7 に示す。



図 5 沿岸 SP1 にて土壌採取の様子 (10 月)



図 6 沿岸 P2 にて土壌採取の様子 (10 月)

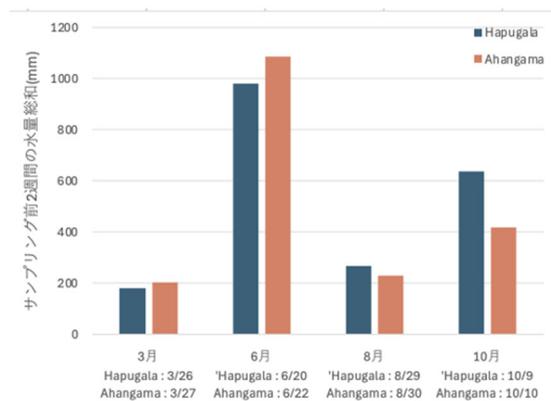


図 7 内陸部 Hapugala および沿岸部 Ahangama における各月のサンプリング前 2 週間の降水量和<sup>12</sup>

### (3) 土壌の採取方法

各 OSS より 0.2 m 離れた近傍および 2 m 離れた遠方のポイントを 3 方向ずつ選択し、それぞれにおいてハンドオーガー DIK-100A (大起理化工業) を用いて垂直に掘削し土壌を採取した。OSS 近傍を S1~S3、これを OSS から 2m 先に伸ばした遠方のポイントを L1~L3 とする。また、各箇所にて土壌を深さ 0.5 m、1.0 m 地点の 2 種類ずつ採取した。同時に、十分に OSS から離れた地点でも土壌を採取し、これを対照サンプル (以下 Bg とする) とした。採取した土壌は 4°C で保管し、微生物指標の測定とは別途に含水率、pH および電気伝導率を測定した。図 8 にサンプリング例を示す。図中の黄点が沿岸 P1 におけるサンプリン

グ箇所である。ただし、沿岸 SP1 における対照サンプルの採取場所は OSS よりも 10 m 以上離れた場所であったため省略する。OSS から 3 方向に採取箇所を選択する際、3 方向の間隔がおよそ 120° ずつであることが望ましいが、沿岸 P1 のように家屋等が OSS 付近にある場合は可能な限り方向の間隔を空けるようにして対応した。

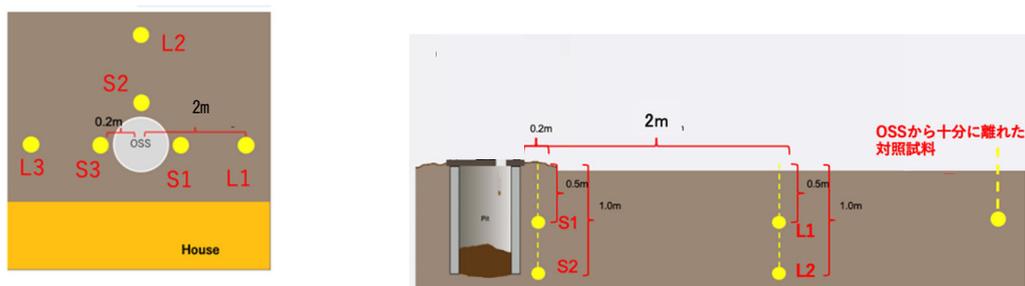


図 8 内陸 SP1 におけるサンプリグ箇所 (赤枠は Soakage pit の設置範囲を示す)

#### (4) 土壌試料からの微生物抽出方法

Claudia Rocco<sup>12</sup>らの手法をもとに、土壌の採取部位によるばらつきを軽減させるため、採取した土壌から均一に土壌をとり混合させることでコンポジットサンプルを作成した。また、ウイルス指標に関しては、1つのコンポジットサンプルにつき3回の抽出を行い、それぞれのサンプルごとに測定を行うことで、十分な測定結果を得た。以下に測定方法を示す。

- ① 各土壌試料を平坦に押し伸ばした後、おおよそ5等分した。各等分より土壌2gずつはかりにて計測し、計10gの土壌を採取した。
- ② 脱イオン水2mLを滴下し、よく混合した。これをコンポジットサンプルとした。
- ③ 作成したコンポジットサンプルと脱イオン水を19:6の比率で遠沈管に入れた。
- ④ 手振りによる攪拌を3分間行った。
- ⑤ これを微生物抽出液とし、4°Cにて保管した。

#### (5) 微生物抽出液の PMMoV 測定方法

以下に PMMoV の測定方法を示す。手順は DAS-ELISA キット (日本植物防疫協会製) に従って行った。また、農研機構遺伝資源ジーンバンクより供与いただいた PMMoV 株をポジティブ・コントロールとして使用した。この際、PMMoV のポジティブ・コントロール濃度は事前に行った定量 PCR により RNA 濃度を既知のものとし、これを段階希釈したものを ELISA に供することで作成した検量線を用い、濃度未知試料の定量を行った。

- ① (4) にて作成した微生物抽出液を遠心機にて 2000 g で 10 分間遠心にかけた。
- ② ELISA 用 96well プレート (以下プレート) の各 well に希釈済みコーティング液 (ウサギ  $\gamma$ -グロブリン、0.05%  $\text{NaN}_3$ ) 200 $\mu\text{L}$  を入れ、密閉したのち 37°C で 3 時間静置した。

- ③ PBS-T (pH7.4 リン酸緩衝生理食塩水液、0.05 % Tween20) を用いてプレートを 3~4 回洗淨した。
- ④ 遠心済み抽出液の上澄みを 10 倍希釈し、プレートの各 well に 200  $\mu$ L ずつ入れ、密閉したのち 37  $^{\circ}$ C で 2 時間静置した。
- ⑤ PBS-T を用いてプレートを 3~4 回洗淨した。
- ⑥ プレートの各 well に希釈済みコンジュゲート液 (アルカリフォスファターゼ標識ウサギ  $\gamma$ -グロブリン、1%牛血清アルブミン、0.05%  $\text{NaN}_3$ ) 200 $\mu$ L を入れ、密閉したのち 37  $^{\circ}$ C で 3~4 時間静置した。
- ⑦ PBS-T を用いてプレートを 3~4 回洗淨した。
- ⑧ 10 % ジエタノールアミン溶液に p-ニトロフェニルリン酸二ナトリウム (1 mg/mL) を溶かしたものを基質溶液とし、プレートの各 well に入れ密閉したのち、アルミホイルに包み 30 分間静置した。
- ⑨ 波長 405nm で吸光度測定を行った。

#### (6) 大腸菌ファージの測定

(4) にて作成した微生物抽出液を遠心機にて 2000 g で 10 分間遠心にかけ、上澄みを採取した。その後、宿主菌として TSB (Tryptic soy Broth, Difco 社製) 中で培養した WG5 を用い、TSA (Tryptic soy Agar, Difco 社製) 培地にて Plaque Assay により大腸菌ファージの測定を行った。

#### (7) 大腸菌・大腸菌群の測定

(4) にて作成した微生物抽出液を必要に応じて段階希釈を行い、1 mL ずつシャーレに注いだ。その後、大腸菌・大腸菌群の測定培地として Chromocult (Millipore 社) を規定通りに調製し、各シャーレに 10mL ずつ注いだのち、37  $^{\circ}$ C で 1 晩培養した。紫色を大腸菌、赤色を大腸菌でない大腸菌群として計測した。

## 6. 結果と考察

### (1) PMMoV の測定結果

10 月に採取した土壌のうち、OSS 近傍から採取した試料 (S1~S3) および OSS から十分に離れた地点で採取した対照試料 (Bg) の PMMoV の測定結果を図 9 に示す。図 9 の結果より、PMMoV は対照サンプルから OSS 近傍のサンプルと同レベルの高い濃度で検出されたことがわかった。このことから、特にスリランカの土壌中において PMMoV を糞便汚染指標として扱うことが難しいと考えられる。その理由として、スリランカ国においてはトウガラシ属の植物および、それらにまつわる製品が多く存在・流通しており、土壌においても糞便汚染関係なく存在している可能性が挙げられる。しかし、本研究により海外調査におい

て ELISA を適切に実行することができたため、ELISA を用いて PMMoV とは異なる別の指標を測定するなど、今後の展望を見出すことができる。

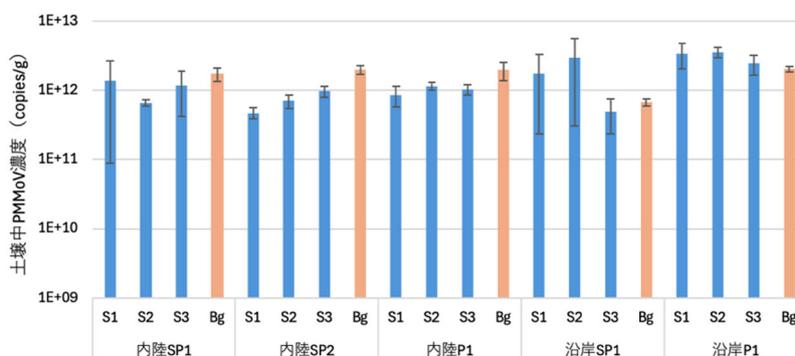


図9 OSS 近傍試料および対照試料での深さ 0.5 m の土壌における PMMoV の測定結果  
エラーバーは 3 回行った抽出での測定値からの標準偏差を示す

### (2) 大腸菌ファージの測定結果

10月に採取した深さ 0.5 m の土壌中の PMMoV 濃度を以下図 10 に示す。図 10 より、10 月においてはほとんどの地点にて大腸菌ファージが検出された。同方向ごとの近傍および遠方の試料に対し、対応のない *t* 検定を行ったところ、一部の試料間にて有意な差が見られた。

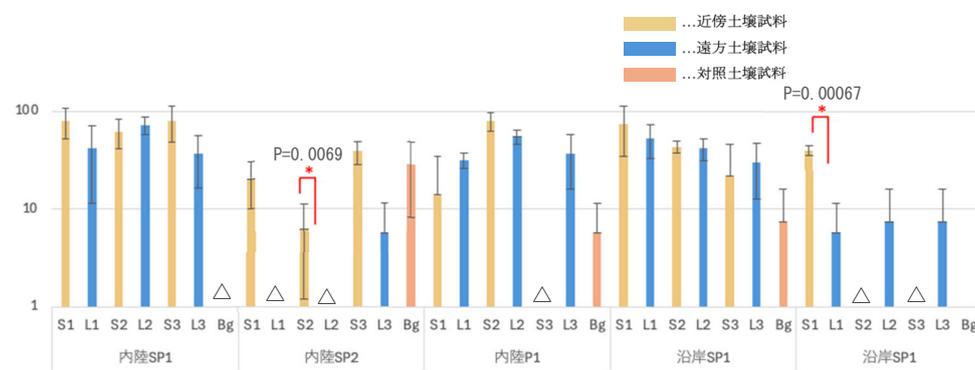


図 10 10 月に採取した深さ 0.5 m の土壌における大腸菌ファージの測定結果  
△は定量下限 (5PFU/g) 以下の試料を示す。エラーバーは 3 回行った抽出での測定値からの標準偏差を示す。有意差のあるものは\*で示した (有意水準を 1% とする)。

### (3) 大腸菌ファージによる OSS 周辺土壌による微生物除去性能評価

各 OSS において、OSS 近傍 3 地点 (S1~S3) と、OSS から 2m のセットバックのある遠方 3 地点 (L1~L3) の土壌からそれぞれ作成したコンポジットサンプルより、3 回の抽出・大腸菌ファージの測定を行なった。それら測定値を利用して対応のない *t* 検定を行い、ボンフェローニ補正を行うことで多重比較を行った。以下表 2 にその結果を示す。表 2 より、内陸 SP2、沿岸 P1 の一部のサンプリング時において近傍と遠方の濃度に差のある傾向があっ

た。

内陸 SP2 では、10 月の土壌 (1.0 m) において、OSS 近傍では高濃度で検出された一方、遠方のポイントではほとんど検出されておらず、ウイルスが土壌の 2 m のセットバックにより減少した傾向にあった。この OSS はガーデニングの行われる庭に設置されており、土壌の有機分が豊富で水捌けがよく、他地点と比較して含水率が約 15% と突出して低い。ウイルスは一般に負電荷を帯びており、静電相互作用等から以上のような特性を持つ土壌におけるウイルスの吸着性が高い可能性がある。10 月ほど降水量が多くないにもかかわらず減少傾向の見られない月もあったが、それ以前までの連続した高い降水負荷が要因の一つであると考えられる。

沿岸 P1 では、切り替わる前の古い Pit latrine の際、3 月の土壌 (0.5 m) において近傍、遠方に有意差があり、深さ 1.0 m においてはその傾向が見られた。6 月の土壌 (深さ 0.5 m) においてもやや差のある傾向があった。沿岸 P1 では、他地点と比較して、最も 2m のセットバックによる除去が認められた地点である。特に降水量の少ない 3 月においては、近傍 2 箇所の深さ 0.5 m 地点より  $10^3\sim 10^4$  PFU/g ほどの非常に高濃度の糞便由来の大腸菌ファージが検出されており、これは、沿岸 P1 が設置から 60 年という長い年月を経ていることから、土壌に糞便由来のウイルスが蓄積されているためであると考えられる。ならびに、降雨による土壌水分の希釈が行われず、また、ウイルスの流出があまり起きなかったことが要因として挙げられる。深さ 1.0 m においても同様に近傍での大腸菌ファージ濃度が高かったものの、深さ 0.5 m のサンプルよりも濃度が低い理由として、Pit latrine の側面に滲出穴がついており、それが深さ 0.5 m 近くにあったことだと推測される。また、S2 においては濃度がほとんど定量下限値レベルであることから、その滲出穴は S1、S3 の近くに存在するが S2 の近くには存在しないことが考えられる。近傍に大量のウイルスが蓄積していたにも関わらず 6 月には有意な傾向がはっきりとは現れなくなっており、かつ近傍と遠方で濃度が低くも検出率が増加した理由として、6 月の降水によってウイルスの流出が起きていること、および降水により土壌中のウイルスが希釈されていることが挙げられる。

また、ウイルスの除去率 R を以下のように定義し算出した。ただし、S1~S3、L1~L3、対象サンプルの大腸菌ファージ測定値平均を、それぞれ  $V_{S1}\sim V_{S3}$ 、 $V_{L1}\sim V_{L3}$ 、 $V_{Bg}$  とした。

$$R = \text{Log}(V_{L1} + V_{L2} + V_{L3} - 3V_{Bg}) / (V_{S1} + V_{S2} + V_{S3} - 3V_{Bg}) \quad (6.1)$$

式 (6.1) により、沿岸 P1 におけるウイルスの除去率は最大で 3.9 Log (3 月採取、深さ 0.5 m) であった。

内陸 SP2、沿岸 P1 以外の地点では 2 m のセットバックにより有意に大腸菌ファージが除去される結果は得られなかった。しかし、OSS 近傍土壌の大腸菌ファージ濃度が対照サンプルと同レベルに低い場合、また、対照サンプルから他試料と比較してウイルス濃度が高く

検出されている場合には両者の差が検出されにくいと考えられる。したがって、これらの地点において有意差が認められなかったことは、土壌によるウイルス除去が生じていないことを必ずしも示すものではない。

表2 各地点における OSS 近傍と遠方箇所間での大腸菌ファージ濃度の多重比較結果  
斜線は未実施、“NaN” は比較対象の少なくとも一方が定量下限以下であることを示す

内陸SP1		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	NaN	0.49	1.00	1.00
	S1 vs L2	1.00	0.77	1.00	1.00
	S1 vs L3	NaN	0.49	1.00	1.00
	S2 vs L1	NaN	1.00	0.17	1.00
	S2 vs L2	1.00	1.00	0.20	1.00
	S2 vs L3	NaN	1.00	0.17	1.00
	S3 vs L1	1.00	NaN	1.00	1.00
	S3 vs L2	1.00	1.00	NaN	1.00
	S3 vs L3	1.00	NaN	1.00	1.00
深さ1.0m	S1 vs L1	NaN	1.00	0.88	1.00
	S1 vs L2	NaN	0.64	1.00	1.00
	S1 vs L3	NaN	1.00	0.93	1.00
	S2 vs L1	NaN	1.00	1.00	1.00
	S2 vs L2	NaN	0.64	1.00	1.00
	S2 vs L3	NaN	1.00	1.00	1.00
	S3 vs L1	NaN	1.00	NaN	1.00
	S3 vs L2	NaN	0.99	1.00	1.00
	S3 vs L3	NaN	1.00	1.00	1.00

内陸SP2		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	NaN	1.00	1.00	1.00
	S1 vs L2	NaN	1.00	0.76	1.00
	S1 vs L3	NaN	1.00	1.00	1.00
	S2 vs L1	NaN	1.00	1.00	NaN
	S2 vs L2	NaN	1.00	0.86	NaN
	S2 vs L3	NaN	1.00	1.00	NaN
	S3 vs L1	NaN	1.00	1.00	1.00
	S3 vs L2	NaN	1.00	0.86	1.00
	S3 vs L3	NaN	1.00	1.00	1.00
深さ1.0m	S1 vs L1	NaN	1.00	1.00	0.019
	S1 vs L2	NaN	1.00	1.00	0.019
	S1 vs L3	NaN	1.00	1.00	0.019
	S2 vs L1	NaN	1.00	1.00	0.023
	S2 vs L2	NaN	1.00	1.00	0.023
	S2 vs L3	NaN	1.00	1.00	0.023
	S3 vs L1	NaN	1.00	1.00	NaN
	S3 vs L2	NaN	1.00	1.00	NaN
	S3 vs L3	NaN	1.00	1.00	NaN

内陸P1		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	/	1.00	1.00	1.00
	S1 vs L2	/	/	1.00	0.33
	S1 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L1	/	/	1.00	0.27
	S2 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L3	/	/	1.00	0.47
	S3 vs L1	/	/	1.00	0.15
	S3 vs L2	/	/	1.00	0.091
	S3 vs L3	/	/	1.00	1.00
深さ1.0m	S1 vs L1	/	/	1.00	0.91
	S1 vs L2	/	/	1.00	0.78
	S1 vs L3	/	/	NaN	0.59
	S2 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L3	/	/	NaN	1.00
	S3 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L3	/	/	0.28	1.00

沿岸SP1		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S1 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S1 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L3	/	/	1.00	1.00
深さ1.0m	S1 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S1 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S1 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L1	/	/	NaN	1.00
	S2 vs L2	/	/	NaN	1.00
	S2 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L1	/	/	NaN	1.00
	S3 vs L2	/	/	NaN	1.00
	S3 vs L3	/	/	1.00	1.00

沿岸P1		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	0.0044	1.00	/	/
	S1 vs L2	0.0044	1.00	/	/
	S1 vs L3	0.0044	1.00	/	/
	S2 vs L1	NaN	0.064	/	/
	S2 vs L2	NaN	0.030	/	/
	S2 vs L3	NaN	0.064	/	/
	S3 vs L1	0.0038	0.31	/	/
	S3 vs L2	0.0038	0.43	/	/
	S3 vs L3	0.0038	0.22	/	/
深さ1.0m	S1 vs L1	0.019	0.62	/	/
	S1 vs L2	0.019	1.00	/	/
	S1 vs L3	0.019	1.00	/	/
	S2 vs L1	1.00	1.00	/	/
	S2 vs L2	1.00	0.53	/	/
	S2 vs L3	1.00	0.51	/	/
	S3 vs L1	0.15	0.58	/	/
	S3 vs L2	0.15	0.25	/	/
	S3 vs L3	0.15	0.26	/	/

沿岸P3		補正済P値			
比較対象		3月	6月	8月	10月
深さ0.5m	S1 vs L1	/	/	1.00	0.099
	S1 vs L2	/	/	1.00	0.028
	S1 vs L3	/	/	1.00	0.028
	S2 vs L1	/	/	0.35	1.00
	S2 vs L2	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L3	/	/	0.048	1.00
	S3 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L2	/	/	0.32	1.00
	S3 vs L3	/	/	1.00	1.00
深さ1.0m	S1 vs L1	/	/	0.16	1.00
	S1 vs L2	/	/	0.24	NaN
	S1 vs L3	/	/	0.24	1.00
	S2 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S2 vs L2	/	/	1.00	NaN
	S2 vs L3	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L1	/	/	1.00	1.00
	S3 vs L2	/	/	1.00	NaN
	S3 vs L3	/	/	1.00	1.00

#### (4) 大腸菌ファージと大腸菌の関係

以下図 11 に大腸菌ファージと大腸菌の相関図を示す。相関係数が $-0.0070$ であり、これら指標間において相関関係は見られなかった。また、地点別においても相関は見られず、OSS 周辺土壌中でのウイルスと細菌の挙動は必ずしも同様でないことが示唆された。

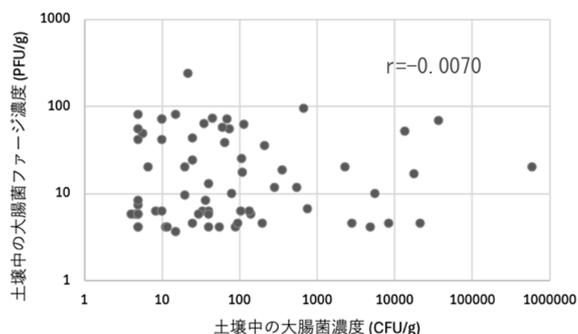


図 11 各地点での深さ 0.5 m、1.0 m の土壌における含水率の測定結果  
定量下限値 (5 PFU/g または 5 CFU/g) を下回る試料を除く

#### 7. 今後の研究への展望

今回の調査にて PMMoV のポジティブ・コントロールを用い、ELISA による PMMoV 定量を試みたものの、スリランカ国の土壌中において PMMoV の濃度の測定によりヒト由来の糞便汚染を推定することは難しいと考えられた。しかし、本研究により途上国を対象とした海外調査において ELISA を実行することができたため、ELISA を用いて PMMoV とは異なる別の指標を測定する、もしくは別の手法で当該指標の測定を行うなど、今後の展望を見出すことができる。大腸菌ファージにより OSS の微生物除去性能の評価を行ったところ、降水量の少ない 3 月の沿岸部の Pit latrine において最大で 3.9 Log のウイルス除去がなされていたことを確認した。同時に雨季には大量の降水により、土壌中のウイルスの流出が拡大している可能性が考えられた。大腸菌ファージと大腸菌の相関を調べたところ、両指標に相関は見られず、OSS 周辺土壌中でのウイルスと細菌の挙動は必ずしも同様でない可能性が示唆された。以上の結果より、細菌・ウイルスは並行して測定を行う必要があると考えられる。

本調査によって、サンプリング前の降水量等の気候が同じ様相を呈していたとしても、その時々によりウイルスの土壌中での挙動は大きく変化する可能性が判明したことから、今後細かいスパンおよび年単位での調査を行うことにより、OSS 微生物処理実態の解明に近づくと考えられる。

#### 注

1. WHO, JMP, UNICEF (2021) : PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE 2000-2020 FIVE YEARS INTO THE SDGs

- [https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2022/01/jmp-2021-wash-households\\_3.pdf](https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2022/01/jmp-2021-wash-households_3.pdf)
2. 外務省国際協力局 「持続可能な開発目標 (SDGs) と日本の取組」 (2026/1/20 アクセス)  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs\\_pamphlet.pdf](https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs_pamphlet.pdf)
  3. Graham, J. P., Polizzotto, M.L (2013) “Pit latrines and their impacts on groundwater quality: a systematic review.” *Environmental Health Perspect*, 121, 521–530.  
<https://doi.org/10.1289/ehp.1206028>.
  4. 井西一葉 (2023) 途上国における個別排水処理(オンサイトサニテーション) の周辺土壌からのウイルス抽出方法の検討 令和 5 年度お茶の水女子大学卒業論文
  5. 外務省 スリランカ民主社会主義共和国基礎データ (2026/1/20 アクセス)  
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/srilanka/data.html>
  6. JICA 主要国所得階層別分類 (国連及び世銀の分類による。) (2026/1/20 アクセス)  
[https://www.jica.go.jp/activities/schemes/finance\\_co/about/standard/class2012.html](https://www.jica.go.jp/activities/schemes/finance_co/about/standard/class2012.html)
  7. time and date 「Climate & Weather Averages in Galle, Sri Lanka」 (2026/1/20 アクセス)  
<https://www.timeanddate.com/weather/sri-lanka/galle/climate>
  8. JICA スリランカ国 下水セクター開発計画策定 プロジェクト(第 I 期) (2017)  
[https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12307880\\_03.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12307880_03.pdf) (2026/1/20 アクセス)
  9. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) Data household Sanitation Trend Chart  
<https://washdata.org/data> (2026/1/20 アクセス)
  10. Suresh Indika, Yuansong Wei, et al (2022) “Groundwater-Based Drinking Water Supply in Sri Lanka: Status and Perspectives” *Water* 2022, 14(9), 1428  
<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/9/1428>
  11. Climate Data Store ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present (2026/1/20 アクセス)  
<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>
  12. Claudia Rocco, Ida Duro, et al (2016) “Composite vs. discrete soil sampling in assessing soil pollution of agricultural sites affected by solid waste disposal” *Journal of Geochemical Exploration*, 170, 30-38

## 参考文献

- Sri Lanka Demographic and Health Survey 2016 (2025/1/3 アクセス)  
<https://www.statistics.gov.lk/Health/StaticInformation/DHS#gsc.tab=0>
- 柴尾映里奈 (2022) 「オンサイトサニテーション由来の病原指標微生物の状況調査 ～スリランカ・ベトナムの事例～」 令和 4 年度お茶の水女子大学卒業論文