

分散型廃水処理のための有機性汚濁物とリンの除去  
— 土壌浸透法と生物膜法の利用 —

2016 年 3 月

濱崎 竜英

## 目次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第1章 序論.....                         | 1  |
| 1-1 本研究の目的.....                     | 1  |
| 1-2 水質保全のための廃水処理技術の着目点.....         | 1  |
| 1-2-1 財政負担が低い廃水処理技術.....            | 2  |
| 1-2-2 高度な技術力を要しない廃水処理技術.....        | 2  |
| 1-2-3 環境影響が小さく資源循環に貢献できる廃水処理技術..... | 2  |
| 1-2-4 分散型排水処理に適用できる廃水処理技術.....      | 3  |
| 1-3 本論の構成.....                      | 3  |
| 第2章 アジアと日本の水環境問題事例.....             | 5  |
| 2-1 アジアを取り巻く水環境.....                | 5  |
| 2-1-1 ベトナム.....                     | 7  |
| (1) ビール工場.....                      | 7  |
| (2) デンプン工場.....                     | 12 |
| (3) ミルク工場.....                      | 16 |
| (4) 製菓工場.....                       | 18 |
| (5) 水産加工工場.....                     | 20 |
| (6) 畜産業.....                        | 28 |
| (7) 病院.....                         | 30 |
| (8) 下水処理場.....                      | 34 |
| 2-1-2 タイ.....                       | 36 |
| (1) 工場団地.....                       | 36 |
| (2) 食品工場.....                       | 38 |
| 2-1-3 マレーシア.....                    | 39 |
| (1) パームオイル工場.....                   | 39 |
| 2-1-4 インドネシア.....                   | 40 |
| (1) 工場団地.....                       | 41 |
| 2-2 日本が直面する水環境問題.....               | 42 |
| 2-2-1 面源負荷.....                     | 43 |
| 2-2-2 難生分解性有機物質.....                | 46 |



|  |    |
|--|----|
| 関連文献.....  | 48 |
| 参考文献.....  | 48 |
| <br>   |    |
| 第3章 土壌浸透法用浄化材の開発と探索.....                                       | 49 |
| 3-1 概説.....  | 49 |
| 3-2 土壌浸透法の機構、種類及び研究動向.....                                     | 49 |
| 3-2-1 概要.....  | 49 |
| 3-2-2 機構.....  | 50 |
| (1) ろ過.....  | 50 |
| (2) 吸着.....  | 51 |
| (3) 吸収・分解.....   | 54 |
| (4) 土壌浸透法の機構の組合せ.....  | 54 |
| 3-2-3 土壌浸透法の種類.....  | 54 |
| (1) 緩速浸透法.....   | 54 |
| (2) 表面流下法.....   | 55 |
| (3) 急速浸透法.....   | 55 |
| 3-2-4 土壌浸透法の課題とその対策.....                                       | 58 |
| (1) 目詰まり対策.....  | 58 |
| (2) 使用土壌の改良、土壌以外の材料の利用.....                                    | 59 |
| 3-2-5 土壌浸透法の研究動向と課題.....                                       | 59 |
| 3-3 土壌浸透法用浄化材の開発.....  | 61 |
| 3-3-1 目的.....  | 61 |
| 3-3-2 汚泥・土壌の加熱による浄化材の開発（実験 3-1）.....                           | 62 |
| (1) 実験方法.....  | 62 |
| (2) 実験結果と考察.....   | 64 |
| (3) まとめ.....   | 68 |
| 3-3-3 加熱した浄化材中の鉄・アルミニウム濃度の違いによる<br>フルボ酸及びりん酸の吸着性能（実験 3-2）..... | 69 |
| (1) 実験方法.....  | 69 |
| (2) 実験結果と考察.....   | 70 |
| (3) まとめ.....   | 72 |
| 3-3-4 ろ過速度の違いによる実験と加熱した  |    |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 浄化材との比較実験（実験 3-3）          | 72  |
| (1) 実験方法                   | 72  |
| (ア) ろ過速度実験                 | 73  |
| (イ) 加熱比較実験                 | 74  |
| (2) 実験結果と考察                | 75  |
| (ア) ろ過速度実験                 | 75  |
| (イ) 加熱比較実験                 | 77  |
| (3) まとめ                    | 79  |
| (ア) ろ過速度実験                 | 79  |
| (イ) 加熱比較実験                 | 79  |
| 3-3-5 浄化材の検討確認実験（実験 3-4）   | 80  |
| (1) 実験方法                   | 80  |
| (2) 実験結果と考察                | 81  |
| (3) まとめ                    | 83  |
| 3-3-6 加熱による浄化材造粒（実験 3-5）   | 84  |
| (1) 実験方法                   | 84  |
| (2) 実験結果と考察                | 85  |
| (3) まとめ                    | 87  |
| 3-3-7 セメントによる浄化材造粒（実験 3-6） | 88  |
| (1) 実験方法                   | 88  |
| (2) 実験結果と考察                | 89  |
| (3) まとめ                    | 91  |
| 3-4 土壌浸透法に用いる火山灰土の探索       | 91  |
| 3-4-1 目的                   | 91  |
| 3-4-2 探索によって得られた火山灰土       | 92  |
| 3-4-3 実験方法と結果              | 99  |
| 3-4-4 回分式吸着試験及び組成分析結果の解析   | 108 |
| 3-4-5 主成分分析                | 119 |
| 3-4-6 まとめ                  | 123 |
| 3-5 結語                     | 125 |
| 3-5-1 土壌浸透法用浄化材の開発         | 125 |
| 3-5-2 新たな土壌浸透法用浄化材の探索      | 129 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 関連文献.....                          | 132 |
| 参考文献.....                          | 133 |
| 第4章 土壌浸透法を用いた路面排水及び表流水の浄化.....     | 140 |
| 4-1 概説.....                        | 140 |
| 4-2 路面排水.....                      | 140 |
| 4-2-1 土壌浸透法による路面排水中の有機物と濁度の除去..... | 140 |
| (1) 実験方法.....                      | 140 |
| (2) 実験結果と考察.....                   | 142 |
| (3) まとめ.....                       | 143 |
| 4-2-2 土壌浸透法による路面排水浄化の実証実験.....     | 144 |
| (1) 実験方法.....                      | 144 |
| (2) 実験結果と考察.....                   | 145 |
| (3) まとめ.....                       | 148 |
| 4-3 造粒浄化材による表流水の浄化.....            | 148 |
| 4-3-1 実証用浄化ろ材の製作と浄化能確認実験.....      | 148 |
| (1) 目的.....                        | 148 |
| (2) 実験方法.....                      | 149 |
| (3) 実験結果と考察.....                   | 150 |
| 4-3-2 浄化材のスクリーニングと造粒方法.....        | 151 |
| (1) 浄化材のスクリーニング.....               | 151 |
| (2) 適切な造粒方法.....                   | 152 |
| (3) まとめ.....                       | 153 |
| 4-3-3 浄化材の吸着寿命簡易予測実験.....          | 153 |
| (1) 目的.....                        | 153 |
| (2) 実験方法.....                      | 153 |
| (3) 実験結果と考察.....                   | 155 |
| 4-3-4 造粒方法を変更した浄化材の浄化性能実験.....     | 156 |
| (1) 目的.....                        | 156 |
| (2) 実験方法.....                      | 156 |
| (3) 実験結果と考察.....                   | 157 |
| 4-4 結語.....                        | 158 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4-4-1 | 土壤浸透法を用いた路面排水の浄化.....         | 158 |
| 4-4-2 | 土壤浸透法を用いた表流水の浄化.....          | 159 |
|       | 関連文献.....                     | 160 |
|       | 参考文献.....                     | 160 |
| 第5章   | 生物膜法を用いた汚水の処理.....            | 161 |
| 5-1   | 概説.....                       | 161 |
| 5-2   | 生物膜法の機構、種類及び研究動向.....         | 161 |
| 5-2-1 | 概要.....                       | 161 |
| 5-2-2 | 機構.....                       | 161 |
| 5-2-3 | 生物膜法の種類.....                  | 162 |
| (1)   | 担体添加法（流動床法）.....              | 162 |
| (2)   | 好気ろ床法（生物ろ過法）.....             | 163 |
| (3)   | 接触曝気法（接触酸化法）.....             | 163 |
| (4)   | 散水ろ床法.....                    | 164 |
| (5)   | 回転円板法.....                    | 165 |
| 5-2-4 | 生物接触酸化法（揺動床式生物接触酸化法）.....     | 165 |
| 5-2-5 | 揺動床式生物接触酸化法の研究動向と課題.....      | 166 |
| 5-2-6 | 回転円板法の研究動向と課題.....            | 167 |
| 5-3   | 揺動床式生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去..... | 168 |
| 5-3-1 | 目的.....                       | 168 |
| 5-3-2 | 実験方法.....                     | 168 |
| (1)   | 室内実験.....                     | 168 |
| (2)   | 屋外実験.....                     | 170 |
| 5-3-3 | 実験結果と考察.....                  | 173 |
| (1)   | 室内実験.....                     | 173 |
| (2)   | 屋外実験.....                     | 175 |
| 5-3-4 | まとめ.....                      | 177 |
| 5-4   | 回転円板法による廃水処理.....             | 177 |
| 5-4-1 | ミルク工場廃水の処理.....               | 177 |
| (1)   | 目的.....                       | 177 |
| (2)   | 実験方法.....                     | 179 |

|   |     |
|---|-----|
| (3) 実験結果.....                               | 182 |
| (4) 考察.....                                 | 187 |
| (5) まとめ.....                                | 187 |
| 5-4-2 病院廃水の処理.....                          | 188 |
| (1) 目的.....                                 | 188 |
| (2) 実験方法.....                               | 189 |
| (3) 実験結果.....                               | 190 |
| (4) 考察.....                                 | 197 |
| (5) まとめ.....                                | 198 |
| 5-5 結語.....                                 | 198 |
| 5-5-1 揺動床式生物接触酸化法による下水の処理.....              | 198 |
| 5-5-2 回転円板法による工場廃水と病院廃水の処理.....             | 200 |
| 関連文献.....                                   | 202 |
| 参考文献.....                                   | 202 |
| <br>  |     |
| 第6章 結論.....                                 | 206 |
| 6-1 概説.....                                 | 206 |
| 6-2 第3章「土壌浸透法用浄化材の開発と探索」について.....           | 206 |
| 6-3 第4章「土壌浸透法を用いた<br>路面排水及び表流水の浄化」について..... | 207 |
| 6-4 第5章「生物膜法を用いた汚水の処理」について.....             | 208 |
| <br>  |     |
| 謝辞.....                                     | 210 |

## 第1章 序論

### 1-1 本研究の目的

土壌浸透法は、河川の直接浄化や畜産廃水処理水の高度処理に適用事例があるが、土壌浸透法用の浄化材に用いる火山灰土のりんの吸着性に着目し、複数の火山灰土についての調査研究事例はない。また、土壌浸透法に用いる土壌の造粒についての研究開発は、最終的に本研究で採用したセメントを混練させて造粒する方法の研究開発事例や実施例はない。このような背景から、本研究では、土壌浸透法にこれまで用いられてこなかった火山灰土や新たな造粒方法の検討を行うことで、同法の適用について評価し、安価で効果的な新しい土壌浸透法を提案することである。具体的には、これまで浄化材として用いられておらず、りんの吸着を中心とした土壌浸透法用の浄化材を見いだすこと、もう一つは、吸着能を阻害せず、通水性と物理的強度を確保した浄化材の造粒方法を開発し、実施可能性を評価することである。

一方、生物膜法については、揺動床式生物接触酸化法と回転円板法の二つの生物膜法に注目し、両法の廃水処理、特に下水処理についての実験を行い、分散型廃水処理に向けた提案ができる実験を行う。

揺動床式生物接触酸化法の研究は様々な廃水における研究が進められているが、下水を対象とした研究は進んでいない。生物膜法は、中小規模の廃水処理に適した廃水処理法であり、分散型廃水処理を推進するためにも、下水処理の可能性の確認は必須であると考えられる。また、回転円板法の導入は中小規模の工場廃水処理が対象となっていることが多く、研究事例も実施例もある。しかしながら、回転円板法の欠点を補った立体格子状となった円板を用いた下水処理の事例はない。具体的には、揺動床式生物接触酸化法については、下水処理場の実廃水を用いて継続実験を実施し、種々の条件による除去能を確認すること、回転円板法については、食品工場廃水とともに病院施設から発生する下水について継続実験を行い、特に有機物除去の特性を明らかにすることを目的とする。

### 1-2 水質保全のための廃水処理技術の着目点

発展途上国や財政面で厳しい状況に置かれている国内の地方公共団体においても、環境への負荷の大小はあっても水環境問題が一様に存在している。このような地域における水環境問題への解決策としては、財政負担が低く、高度な設計・施工技術や運転維持管理技術を要しない廃水処理技術が必要であり、加

えて、環境への負荷が小さく、中小規模の発生源でも対応できる廃水処理技術が求められる。このようなことから、本研究は以下の 4 つの観点に着目し、技術開発について論述する。

#### 1-2-1 財政負担が低い廃水処理技術

研究対象とする廃水処理技術では、例えば廃棄物であったり、これまで利用されてこなかったりした材料を浄化材として利用することに着目した。具体的には廃水処理工程で発生する汚泥や、園芸や土壌改良材として用いられることが多いが廃水処理への適用例がほとんどない火山灰土を用いた土壌浸透法に着目した。一方、運転維持管理費の低減に有効とされる生物膜法に着目し、その中でも余剰汚泥発生量が少ないとされる生物接触酸化法と、余剰汚泥発生量が少なく、電力使用量も低い回転円板法に着目した。

#### 1-2-2 高度な技術力を要しない廃水処理技術

本研究で着目した土壌浸透法は、構造が簡単な槽に安価な土壌を単独で用いるか、性能向上のために活性炭や凝集剤等を混合させるか、必要に応じて土壌を造粒するだけであり、いたって簡素な構造である。そのため、設計や施工に高度な技術力は必要とせず、また、運転維持管理も水量調整と土壌の交換程度であり容易である。

一方、生物膜法は、例えば標準活性汚泥法や OD 法と比較して、設計と施工に係る技術力は大きくないと考えられるが、反応槽の管理が比較的簡便であり、また一般に余剰汚泥発生量が少ないこと、そして回転円板法については、曝気装置が必要でないことも高度な技術者を配置する必要がない。

#### 1-2-3 環境影響が小さく資源循環に貢献できる廃水処理技術

そもそも廃水処理技術は、公共用水域への環境負荷低減が主目的である。しかし、廃水処理技術の製造や設置、運転中に生じる汚泥等の廃棄物、廃水処理工程で用いる種々の薬品類、そして運転に伴うエネルギーなど、環境への影響が懸念される場合がある。とりわけ発展途上国においては、国外で製造された廃水処理装置を長い輸送距離を経て導入されることや、発生する余剰汚泥や使用される薬品の不適切な処理・処分の可能性がある。このようなことから、可能な限り、発展途上国内で製造が可能で、製造に必要な原材料も国内調達でき、

さらには余剰汚泥発生量が少なく、使用する薬品は最小限となる廃水処理技術を検討することが重要である。よってこれらの利点を有するとされる土壌浸透法、生物接触酸化法及び回転円板法に着目した。

#### 1-2-4 分散型廃水処理に適用できる廃水処理技術

人口が集中する都市部においては、各戸を下水道網に接続して、必要に応じポンプ中継地を経由して、終末下水処理場にて下水が処理されている。しかし、人口が分散したり、少数であったりした場合は、下水道網に接続することは、財政的に不利となる。また、発展途上国であれば、都市部においても下水道網が整備されておらず、人口過密地域で新たに下水道網を敷設することは現実的ではなく、また財政面への負担が大きくなるだけである。

現実的には、このような集中型で大型の下水処理施設を建設するのではなく、各戸毎、またはある限定した地区で集水し、それを処理する分散型の下水処理施設を設置することが望ましい。

また、工場、病院や学校等の公共施設においても、その工場や施設で処理することが、下水道網が未整備の地域においては、環境への負荷低減につながることになる。

一方、下水処理場や工場における廃水処理施設といった点源負荷だけに限らず、路面排水や農地・林地からの排水といった面源負荷については、むしろ集中型で処理施設を整備することは困難であり、これらが河川等の公共用水域に流入する地点毎で処理することが現実的である。併せて、汚濁物が流入した農業用水路や中小河川、排水網における直接浄化においても同様である。

このようなことから、前述の廃水処理技術は、分散型廃水処理として導入が可能な技術であることから、本研究で取り組むことになった。すなわち、小規模であれば浄化槽が、また大規模であれば活性汚泥法が有利であるが、その間に立つ中規模の廃水処理、具体的には1日、数十 $\text{m}^3$ から数百 $\text{m}^3$ 程度の排水量に適した廃水処理技術の研究開発となる。

#### 1-3 本論文の構成

本論文の構成をまとめると図1.1のとおりである。論文は本章を含め、6章から構成しており、第1章は本章の序論、第2章はアジアにおける環境事情の紹介、第3章は土壌浸透法に用いる浄化材について、土壌や廃棄物を対象にりん



や有機物の除去特性を確認するとともに、浄化材の造粒方法の検討を行っている。また、これらの実験の過程で火山灰土の有効性が見いだされたことから、浄化材として有望な火山灰土の探索と性能評価を行った。第4章はこれまで土壌浸透法で利用されてきた赤玉土を浄化材として、路面排水の除去特性を確認すること、そして開発した浄化材を用いた土壌浸透法について実河川水を用いた実験を実施した。第5章は生物膜法の内、揺動床式生物接触酸化法と回転円板法について実廃水を用いた実験を行い評価している。第6章は第3章から第5章までの実験結果や考察を結論としてとりまとめている。

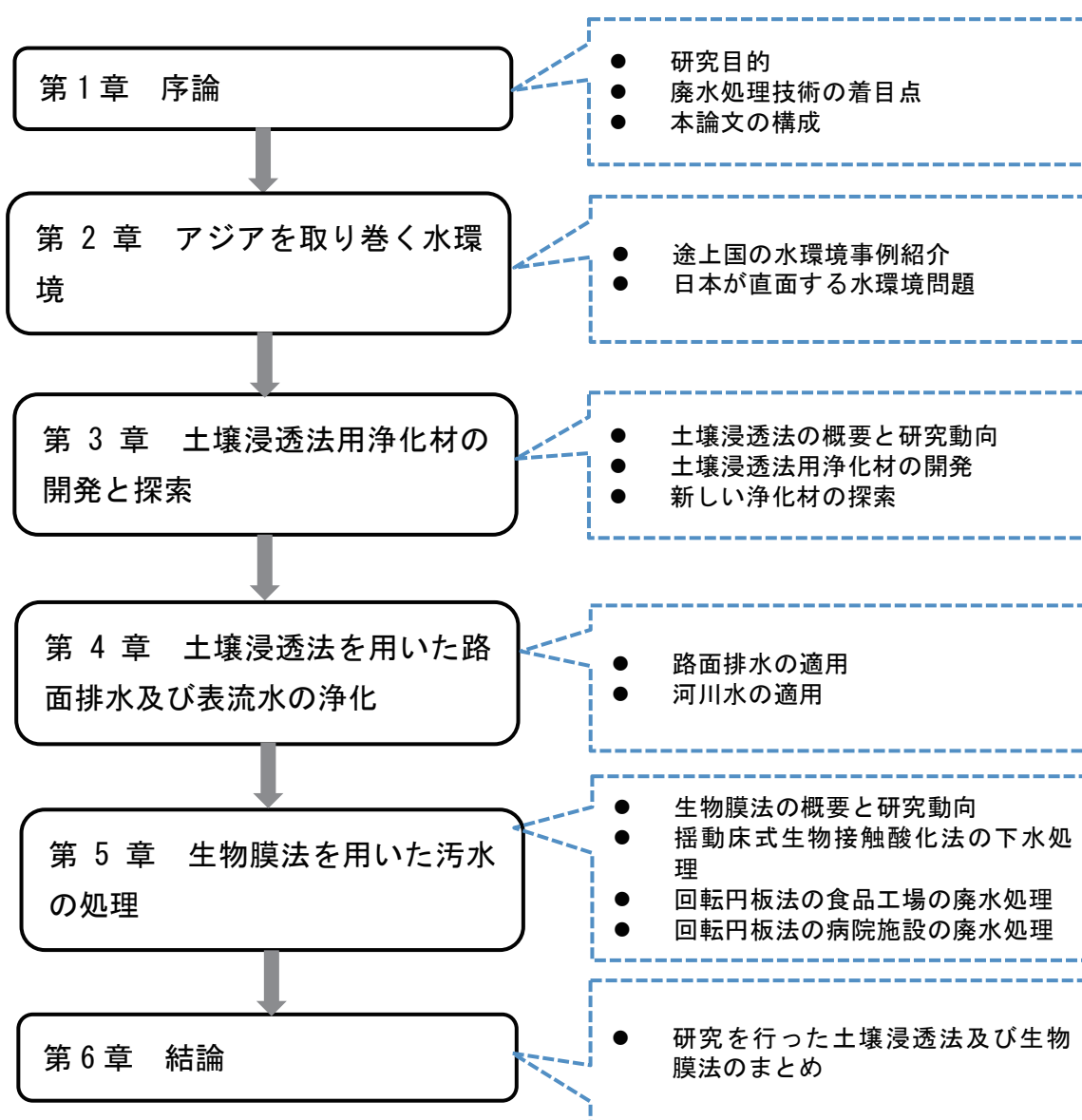


図 1.1 論文構成の概要

## 第2章 アジアと日本の水環境問題事例

### 2-1 アジアを取り巻く水環境

本研究は、財務面や技術面で課題を抱える発展途上国などにおける分散型で中小規模の廃水処理設備に必要な技術を取りあげるが、その前に発展途上国の廃水処理の現状と課題について事例を紹介する。とりわけ、日本と地理的に近い東南アジアにおいては、近年の急速な経済発展に伴い、水環境対策が急務となっている。ここでは、ベトナム、タイ、マレーシア及びインドネシアの4カ国の様々な廃水処理対策の現状と課題を示す。

図 2.1 に示す機関は、本研究で調査したベトナムを中心とした東南アジアで廃水処理施設（下水処理場を含む）を保有する企業・機関である。調査した多くの企業・機関においては、少なくとも廃水処理施設を持ち、それを運転管理している。しかしながら、その多くは適切な運転がなされておらず、処理水中に有機性汚濁物や栄養塩類を多く含み、それが系外へ排水されている。

表 2.1 にベトナム、タイ、マレーシア、インドネシア及び日本の社会・経済状況<sup>1</sup>を示しているが、社会・経済状況が違う中で単純に比較することは困難ではあるが、主に調査をしたベトナムにおける廃水処理施設の状況がベトナムの経済状況に影響を受けていることは十分に想定される。

水環境改善のためにその国が施策を策定し、援助国や援助機関による支援が推進されているので、今後の改善は期待できるが、より推進していくためには、技術や資金の支援だけでなく、環境保全に対する意識向上及び公平公正な意思決定プロセスを構築するように援助国や援助機関が促していく必要がある。

我が国では、環境保全に対する意識向上や公平公正な意思決定プロセスの構築は環境教育・啓発活動、そして不正を取り締まる法律や条例などにより、東南アジア諸国のような問題は解消されつつあるが、豊かな都市と貧しい地方という地域格差が広がりつつあり、また過疎化、少子高齢化、縮小社会といった途上国が直面していない成熟社会の新たな課題も生まれている。このような背景によって、地方都市では労働世代の減少によって十分な税収入が得られず、また環境保全に携わる人材も確保できない可能性が生まれつつある。このような意味では、途上国と日本の地方都市では資金不足と技術者不足といった同様の課題を抱えていると考えられる。加えて、環境保全対策を進めているにも関わらず、生活環境項目の環境基準達成率は頭打ちの状況にあり、次世代のためにこれら問題を打破する新しい施策や技術は必要であると考えられる。

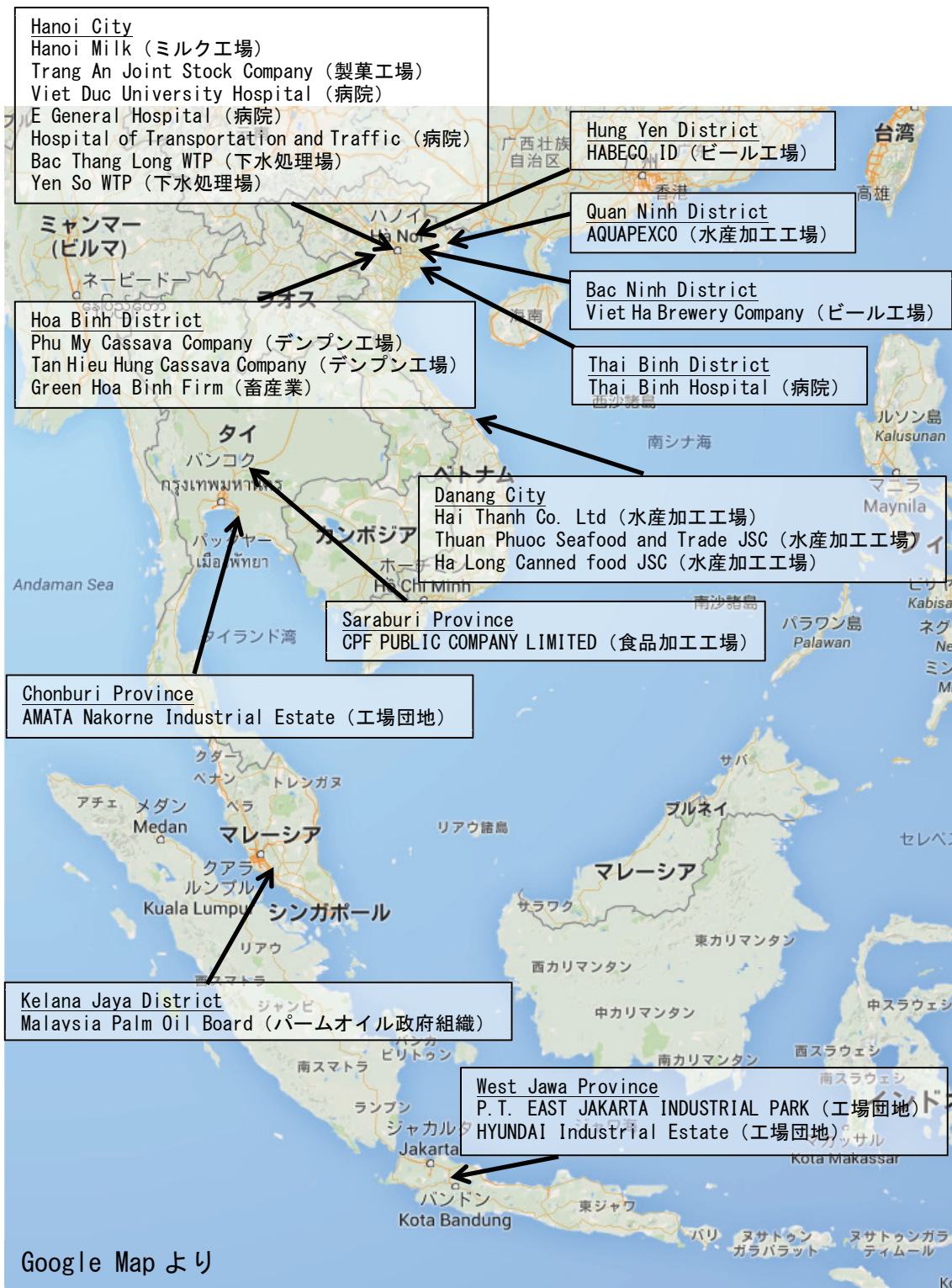


図 2.1 調査した廃水処理施設を持つ機関

表 2.1 ベトナム、タイ、マレーシア、インドネシア及び  
日本の社会・経済状況<sup>1</sup>

| 国名     | 人口<br>(百万人) | 面積<br>(千 km <sup>2</sup> ) | 国内総生産<br>(十億 US\$) | 一人当たりの<br>国内総生産<br>(US\$) |
|--------|-------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|
| ベトナム   | 89.7        | 329.3                      | 171                | 1,911                     |
| タイ     | 67.0        | 513.1                      | 387                | 5,779                     |
| マレーシア  | 29.7        | 329.7                      | 313                | 10,538                    |
| インドネシア | 249.9       | 1,904.6                    | 868                | 3,475                     |
| 日本     | 127.3       | 377.9                      | 4,920              | 38,634                    |

### 2-1-1 ベトナム

正式名「ベトナム社会主義共和国」は、インドシナ半島東部に位置する面積 329.3km<sup>2</sup>、人口 89.7 百万人の国である<sup>1</sup>。ベトナム戦争が終結して 40 年が過ぎ、1980 年代後半から始まった改革開放政策（ドイモイ）によって経済発展が加速し、現在では多くの海外資本の企業が進出し、経済発展を加速させている。ここでは、ベトナム北部を中心に、ビール工場、デンプン工場、ミルク工場、製菓工場、水産加工工場、畜産業、病院、下水処理場を取り上げる。

#### (1) ビール工場

ベトナムでは主要なアルコール飲料はビールであり、数百を超える工場が各地に存在している。ここで紹介するビール工場 2 社は、全国または広い地域で販売している大企業であるが、ベトナム語で「ビアホイ」と呼ばれる低アルコール度数の安価なビールを製造する中小企業の工場が数多く存在しており、対策が急務であることは、ベトナム政府の天然資源環境省（MONRE）も認識している。

#### ①HABECO ID

HABECO ID 社は、ベトナム首都ハノイ市南東部の Hung Yen 省の Pho Noi 工場団地に位置する。

Hung Yen 省には 17,000 社程度の企業があり、工場の多くは機械製造（製品組立を含む）と食品加工であり、水質汚濁が懸念されやすい化学工場はなく、メ

ッキ工場は 10 社程度である。重金属汚染としてはカドミウム、ヒ素、水銀、鉛などがあり、バッテリー、ペンキ、メッキ工場が主原因と考えられる。Hung Yen 省は稲作を中心とした農業が主要産業であるが、省内の河川や水路は北西側から南東側へ流れているが、工場団地が集中する地域は北西側にあるため、水質汚濁が進行すると、農業への影響も予測されており、このようなことから、Hung Yen 省天然資源環境局 (DONRE) は、有害廃棄物を排出する企業は受け入れていない。

Hung Yen 省には首都ハノイ市東部に隣接する省であり、その利便性から省内には工場団地が 3 箇所 (2012 年) あり、それぞれの工場からの廃水処理する集中処理場が設置されている。

HABECO ID 社は、集中処理場に廃水を導水しておらず、独自で処理している。同社のように独自で処理している工場の割合は 70 %程度である。また、このような場合、工場内のトイレ廃水を含む生活排水の処理は、浄化槽で対応している。

HABECO ID 社は、首都圏ハノイに展開する銘柄「BIA HANOI」を製造するビール製造会社であり、ベトナムにおける主要なビール会社の一つである。また、日本企業と提携し、日本販売用ビールの製造を HABECO ID 社が担当して、日本企業銘柄として日本国内の大手スーパーで販売するなど、海外展開にも積極的に取り組んでいる。そのため、売上高は年々上昇し、Hung Yen 省内での主要な納税企業となっている。

図 2.2 に示す HABECO ID 社のビール工場の廃水処理施設では、計画排水量は  $1,200 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、実際には  $700 \sim 800 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  程度の廃水を処理している。

ビール製造では、原料及び瓶の洗浄の廃水、醸造に伴って発生する残渣を含む廃水などが生じ、製造システム及び工場全体の洗浄などで大量の水を用い、その中には高濃度の有機物や栄養塩類を含み、また、瓶洗浄のために水酸化ナトリウムを用いているため、強アルカリ廃水であることもある。

一般に日本国内におけるビール工場廃水では、工場内用水量削減に取り組みながら、発生した廃水については分別し、高濃度有機廃水は残渣をスクリーンや沈殿槽で分離した後、UASB 法などの嫌気処理、その後に図 2.3 に示すような活性汚泥法で処理を行い、沈殿分離後、公共用水域に排出している。一部のビール工場では、後段の活性汚泥法を採用せず、そのまま公共用下水道に排出して、その費用については下水道を運営する自治体・下水道組合に支払うこ

となどもしている。



図 2.2 HABECO ID 社



図 2.3 HABECO ID 社の生物処理施設

HABECO ID 社においては、廃水を分別することなく一つの廃水処理施設で対応しているため、廃水を集水後、調整槽を設けて pH 調整を実施している。しかしながら、状況によってアルカリ性となっていると思われる廃水に硫酸を入れて調整しているが、特に pH 計を設置することもなく、その調整法は不正確である。HABECO ID 社では pH 調整槽の後に UASB 法及び活性汚泥法という生物処理に廃水を導入しており、廃水が強酸性あるいは強アルカリ性であれば、微生物による有機物分解は十分に機能しないことが十分に想定される。

表 2.2 に HABECO ID 社の廃水処理施設における  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、BOD 及び全りんの水質、加えて、同社の処理水が排水される Hun 川の水質を示す。廃水処理施設の運転に課題はあるものの、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  や BOD といった有機性汚濁物指標や栄養塩類の全りんは廃水処理基準をほぼ満たしている結果となった。ベトナムにおける産業廃水基準 (QCVN 40:2011) は、グレード A で  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  が  $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下、BOD が  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下、全りんが  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下であり、グレード B で  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  が  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下、BOD が  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下、全りんが  $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下と定められている。グレード A とは生活用水に利用される水域に排出する産業排水における基準値で、グレード B とは生活用水以外に利用される水域に排出する産業廃水における基準値であり、同社の廃水はグレード A に相当する。

図 2.4 は HABECO ID 社の処理水排水口である。この廃水が排水路を經由して図 2.5 に示す Hun 川に流入する。なお、余剰汚泥は天日乾燥させた上、汚泥処理を URENCO (都市環境公社) に委託する場合もあるが、余剰汚泥を無料で引き取る個人や企業があるため、年間汚泥処理費は明確ではない。



表 2.2 HABECO ID 社の廃水処理施設及び排出先河川（Hun 川）の水質結果

| 採水日         | COD <sub>Cr</sub> (mg・L <sup>-1</sup> ) |     |     | BOD(mg・L <sup>-1</sup> ) |     |     | T-P(mg・L <sup>-1</sup> ) |     |     |
|-------------|---|-----|-----|--------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|
|             | 原水                                      | 処理水 | 河川  | 原水                       | 処理水 | 河川  | 原水                       | 処理水 | 河川  |
| 2012年9月19日  | 1,100                                   | 320 | 250 | 850                      | 150 | 100 | -                        | -   | -   |
| 2012年10月5日  | 1,100                                   | 75  | 63  | 820                      | 30  | 21  | 6.7                      | 4.2 | 6.0 |
| 2012年10月10日 | 530                                     | 57  | -   | 320                      | 20  | -   | 6.0                      | 1.2 | -   |
| 2012年11月2日  | 570                                     | 49  | 110 | 360                      | 13  | 39  | 5.0                      | 3.4 | 4.2 |
| 2012年11月27日 | 550                                     | 44  | 450 | 360                      | 11  | 350 | 4.9                      | 1.9 | 3.3 |
| 2012年12月11日 | 610                                     | 45  | 210 | 380                      | 14  | 98  | 5.0                      | 1.7 | 4.6 |

（環境省アジア水環境改善モデル事業によりベトナム国立科学技術アカデミー（VAST）・環境技術研究所（IET）が実施）



図 2.4 HABECO ID 処理水排水口



図 2.5 Hun 川  
（右から排水、上流から下流へ）

## ②Viet Ha Brewery Company

図 2.6 に示す Viet Ha Brewery Company は、ハノイ市より北東部にある Bac Ninh 省の Tien Son 工場団地に位置するビール工場である。ハノイ市を中心に図 2.7 に示す「Viet Ha」という銘柄を製造しており、同工場では年間に 1 億 L の生産が可能である。しかしながら、生産量は季節や経済状況により変動し、実際のところ出荷可能なビールを生産しておらず、30 百万 L 程度（2011 年）である。実排水量は 400 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup> であるため、計画排水量はそれよりも大きいと推定されるが、計画排水量に見合った廃水処理施設かどうかは不明である。

工場からの廃水は、調整槽を経て図 2.8 に示す嫌気性処理をし、発生するメ

タンガスは燃焼させて大気放散させている。嫌気性処理後、図 2.9 に示す活性汚泥法により処理した後、処理水を放流しており、一般的なビール工場廃水処理工程である。



図 2.6 Viet Ha Brewery Co.



図 2.7 生産された Viet Ha ビール



図 2.8 嫌気処理槽上部



図 2.9 活性汚泥の曝気槽

この工場の廃水の水質は表 2.3 に示すとおり、2 回の分析結果では流入する  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度の変動が大きいことがわかる。また、嫌気性処理後の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度も依然高い状態であり、このまま活性汚泥法に導入し処理することは難しい。さらに全りんに関してはベトナムの産業排水基準のグレード A の基準である  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下を超えたまま水路に放流していることから、近隣の河川への影響が危惧される。



表 2.3 Viet Ha Brewery Co. の廃水処理施設の水質結果

| 採水日  | 排水量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) | COD <sub>Cr</sub> ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |               | 全りん ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |     |
|------|---|---|---------------|---|-----|
|      |   | 原水  | 嫌気処理後<br>の処理水 | 原水                                      | 処理水 |
| 1 回目 | 400   | 1,700   | 1,100         | -                                       | -   |
| 2 回目 | 440   | 4,600   | 2,600         | 9.1                                     | 5.8 |

(財団法人地球環境センター・BOCM 実現可能性調査により COD<sub>Cr</sub> については VAST-IET が実施、全りんは濱崎が実施)

## (2) デンプン工場

ベトナム北部の山間部においては、図 2.10 に示すようにキャッサバの栽培が盛んである。キャッサバの根茎（図 2.11 参照）からはデンプンを製造することができる。図 2.12 の洗浄工程において、収穫したキャッサバの根茎の皮を剥きながら洗浄し、その後、ミルで粉砕して、図 2.13 に示す抽出工程に導入する。その後、液状の抽出液を乾燥機で乾燥して粉末とし、図 2.14 のように袋詰めされる。このようにキャッサバから取れたデンプンは一般にタピオカと呼ばれている。ベトナムで生産されたタピオカの大半は、中国に輸出されており（図 2.15 参照）、重要な輸出産品の一つとなっている。しかしながら、タピオカ製造においては、根茎の洗浄、粉砕、抽出、乾燥という工程の中で、高濃度有機廃水が生まれ、視察した限りでは適切な処理が行われていないのが現状である。



図 2.10 キャッサバ畑



図 2.11 キャッサバの根茎



図 2.12 キャッサバ根茎の洗浄工程



図 2.13 タピオカ抽出工程



図 2.14 タピオカ乾燥・袋詰め工程



図 2.15 中国に輸出されるタピオカ

### ①Phu My Cassava Company

Phu My Cassava Company は、ハノイ市西部の Hoa Binh 省に位置するタピオカ製造工場である(図 2.16 参照)。年間に製造されるタピオカは約 15,000 ton(2011 年)である。稼働期間は 10 月から 2 月にかけての 5 ヶ月間あまりで、それ以外の期間は操業していない。これはキャッサバの収穫時期によるものである。

Phu My Cassava Company における計画排水量は  $2,800 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  で、実際には  $600 \sim 1,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  程度である。廃水は水深 2m 程度の嫌気性ラグーン(図 2.17、図 2.18 及び図 2.19 参照)による生物処理・自然沈殿によるものである。嫌気性ラグーンは第 1 から第 5 までの 5 池が直列に接続されており、全池における水理的滞留時間(HRT)は約 40 日である。一部処理水はキャッサバ根茎の洗浄水として再利用している。

Phu My Cassava Company における廃水処理施設の水質結果を表 2.4 に示す。同工場から時に  $10,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  という高濃度の有機性廃水が排出されているにも関わらず、ラグーンのみで処理しており、さらに排水量で半分程度にしか処理

されていないのが現状である。そのため、ラグーン周辺は悪臭が発生し、近隣住民からクレームを受けているということであった。



図 2.16 Phu My Cassava Co. 工場



図 2.17 第1嫌気性ラグーン(流入口)



図 2.18 第2嫌気性ラグーン



図 2.19 第5嫌気性ラグーン(排出口)

表 2.4 Phu My Cassava Co. の廃水処理施設の水質結果

| 採水日  | 排水量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) | COD <sub>Cr</sub> ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |       | 全りん ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |     |
|------|---|---|-------|---|-----|
|      |   | 原水  | 処理水   | 原水                                      | 処理水 |
| 1 回目 | 900   | 9,200   | 5,900 | 35                                      | 5   |
| 2 回目 | 990   | 10,000  | 5,700 | -                                       | -   |
| 3 回目 | 630   | 7,200   | 4,900 | -                                       | -   |

(財団法人地球環境センター・BOCM 実現可能性調査により COD<sub>Cr</sub> については VAST-IET が実施、全りんは濱崎が実施)



## ②Tan Hieu Hung Cassava Company

Phu My Cassava Company と同じく、Tan Hieu Hung Cassava Company は Hoa Binh 省に位置するタピオカ製造工場である (図 2.20 参照)。年間に製造するタピオカは約 4,400 ton (2011 年) で、12 月から 3 月までの 4 ヶ月間で製造している。計画排水量は  $1,300 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、実際にはその計画排水量を上回る  $1,600 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  を排出する時もあり、過負荷となっているようである。図 2.21 が同工場における排水口である。

Tan Hieu Hung Cassava Co. においては、図 2.22 に示すような 2 m 水深の嫌気性ラグーンを 3 池設置しており、過負荷への対応として、既存の 3 ラグーンの前段に密閉型嫌気性ラグーンの新規設置を計画していた (図 2.23 参照)。また、既存の 3 ラグーンの水深を 2 m から 8 m にすることで、廃水処理能力の拡張に取り組んでいる。稼働期間が 4 ヶ月であり、この期間の廃水全量をラグーンで保管し、稼働していない期間も含め、水理的滞留時間 (HRT) を長くとり、1 年間かけて放流していくということであった。



図 2.20 Tan Hieu Hung Cassava Co.



図 2.21 工場からの排水口



図 2.22 嫌気性ラグーン



図 2.23 新規嫌気性ラグーン建設現場

表 2.5 に示すように、前述の Phu My Cassava Co. と同様、高濃度の有機性廃水が十分に処理されないまま放流されていることが水質測定結果から明らかである。タピオカ製造工場で発生する廃水をラグーンのみに頼る処理法には限界があることがわかる。

表 2.5 Tan Hieu Hung Cassava Co. の廃水処理施設の水質結果

| 採水日. | 排水量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) | COD <sub>Cr</sub> ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |       |
|------|---|---|-------|
|      |   | 原水  | 処理水   |
| 1 回目 | 1,300   | 8,200   | 5,500 |
| 2 回目 | 1,600   | 12,000  | 4,900 |
| 3 回目 | 1,600   | 12,000  | 5,000 |

(財団法人地球環境センター・BOCM 実現可能性調査により VAST-IET が実施)

### (3) ミルク工場

経済発展と食生活の多様化により、ベトナムにおけるミルク（牛乳）を含む乳製品の消費は増加傾向である。そのため、ミルク工場から発生する廃水についても公共用水域の水質への影響が大きくなることが予測される。ビール、タピオカ、ミルクといった食品加工業で発生する廃水は有機性廃水が中心であることから、生物処理で対応することがほとんどである。一般に  $1,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  を超える高濃度有機性廃水の場合は、前段に UASB 法などの嫌気性生物処理、後段に活性汚泥法などの好気性生物処理で、放流基準にまで BOD や COD を下げて放流する。

ベトナムでもおおよそそのような対応をする努力をしているが、財政上の問題が大きく、満足できる廃水処理状況ではない。また、初期投資をして十分な処理装置を導入したとしても、担当する技術者の知識や経験の不足、運転維持管理費支出への無理解によって、機能していないことが多い。

ハノイ市北部のハノイ・ノイバイ国際空港よりハノイ市街に向かって 5 km 程度に位置する Hanoi Milk 社 (図 2.24 参照) は、紙パックに入った子供向けミルク製品を中心に製造する会社である。ベトナムでは、海外のミルク製品が多く輸入されているとともに、主要なミルク会社である Vina Milk 社が堅調であることから、Hanoi Milk 社の経営は苦戦を強いられている。そのため、製造工場においては、出荷状況に応じて製造しているため、その廃水処理場も毎日稼

働していない。加えて季節変動もあり、計画排水量は  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、実際にはそれよりも小さく  $100 \sim 250 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  程度である。

図 2.25 に示す同工場の廃水処理施設は、洗浄水を中心として発生した廃水を集水槽に取り込んだ後、2 槽並列に接続された沈殿槽によって浮遊物質を除去した後、活性汚泥法の曝気槽に取り込んでいる。その後、沈殿を経た処理水は、2 基並列に接続された散水ろ床法の反応槽で高度処理され、沈殿後、放流されている。なお、この散水ろ床施設は、ベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所 (VAST-IET) が設計及び指導したものである。

発生した汚泥は汚泥貯留槽で沈殿濃縮されている。汚泥処理についてはベトナムの廃棄物処理法に規定されているが、有害な物質を含まないミルク工場の余剰汚泥は肥料にされるか、埋め立て処分されている。



図 2.24 Hanoi Milk 社



図 2.25 Hanoi Milk 社の廃水処理施設

同工場の廃水処理担当スタッフは、専門学校卒程度で、電気や機械を専攻しており、環境工学などを専攻しておらず、また、他の業務と兼務していることが多い。同工場のスタッフの給与は 1 ヶ月 3,000,000~4,000,000 VND (およそ 1.5~2.0 万円) であり、高額ではないが、共稼ぎが多いベトナムにおいては、都市部で生活可能な水準である。

Hanoi Milk 社周辺は、国際空港に隣接した地域でもあり、農地が住宅地、商工業地に転換しつつある。現在のところ、Hanoi Milk 社周辺は稲作を中心とした農地となっており、同工場の廃水による周辺地域への影響が懸念されていた。図 2.26 が同社の公共用水域への排水口であり、図 2.27 が同社の廃水による影響が懸念されていた Ca Lo 川である。管轄する Hanoi 市の天然資源環境局 (DONRE) は、過去に Hanoi Milk 社に対して行政指導を実施したが、その後、Hanoi Milk

社は VAST-IET の協力により、散水ろ床法による高度処理を導入したことによって、表 2.6 に示すように、適正な基準に達することができている。ベトナムにおいては希なケースである。後に同ミルク工場にて廃水処理実験を実施した（第 5 章）。



図 2.26 Hanoi Milk 社の排水口付近



図 2.27 Ca Lo 川

表 2.6 Hanoi Milk 社の廃水処理施設及び  
排出先河川 (Ca Lo River) の水質結果

| Sampling Date | COD <sub>Cr</sub> (mg·L <sup>-1</sup> ) |        |       | BOD(mg·L <sup>-1</sup> ) |        |       | 全りん(mg·L <sup>-1</sup> ) |        |       |
|---------------|---|--------|-------|--------------------------|--------|-------|--------------------------|--------|-------|
|               | Input                                   | Output | River | Input                    | Output | River | Input                    | Output | River |
| 4-Oct-2012    | 580                                     | 60     | 36    | 300                      | N.D    | 12    | 12.0                     | 6.0    | 2.0   |
| 11-Oct-2012   | 880                                     | 50     | 43    | 430                      | N.D    | 20    | 10.0                     | 2.5    | 0.7   |
| 1-Nov-2012    | 570                                     | 44     | 36    | 320                      | N.D    | 9     | 8.9                      | 3.1    | 1.2   |
| 21-Nov-2012   | 1,100                                   | 60     | 32    | 460                      | N.D    | 8     | 9.2                      | 3.1    | 1.5   |
| 23-Nov-2012   | 500                                     | 16     | 42    | 230                      | N.D    | 13    | 4.3                      | 0.6    | 0.8   |
| 12-Dec-2012   | 530                                     | 20     | 33    | 270                      | 5      | 15    | 5                        | 0.7    | 1.1   |

(環境省アジア水環境改善モデル事業により VAST-IET が実施)

#### (4) 製菓工場

Trang An Joint Stock Company は、ハノイ市中心部から西に 10km 程度行った Quoc Oai 地区に位置する製菓工場である (図 2.28 参照)。以前は、ハノイ市中心部の Cau Giay 地区に位置していたが、数年前に現在の場所に移転した。Trang An Joint Stock Company の前身は国営企業であったが、約 10 年前に民営化している。ベトナムでは製菓業も盛んであり、Trang An Joint Stock Company は大



企業の部類に入る。現在はハノイの同工場以外にも、ハノイに 1 工場、北中部地方に 2 工場があり、4 工場で 1,000 人を超える従業員を抱えている。同工場では、キャンディーやワッフルなどを製造しており、他の工場では、クッキー、ケーキ、せんべい（米菓子）、キャンディーなどを製造している。製造は季節変動があり、旧正月を迎える 1～2 月などでは最盛期を迎える。

図 2.29 に示す同工場の廃水処理施設は、NEDO 事業による支援で導入した  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  に加え、会社独自で  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  を拡張し、合計  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  を処理できる体制を整えている。実際には  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  程度であり、最大  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  になることがあるということであった。



図 2.28 Trang An JSC



図 2.29 廃水処理施設

ところが、同工場の廃水処理施設はおおよそ正常な稼働はしていない。まず、日本の技術支援でパイロットプラントという位置づけで導入したとみられる廃水処理装置（図 2.30 参照）は、現在、稼働しておらず、拡張した処理装置も、攪拌と試薬投入などを行っているだけで、処理しているとは言いがたい状況であった（図 2.31 参照）。同工場は工場団地内に位置しており、集中廃水処理施設に接続しているため、高度な廃水処理基準ではなく、下水放流基準レベルで十分であるが、それも達成していないと考えられる。

ベトナムに多く存在する製菓工場で、しかも大企業として分類できる Trang An Joint Stock Company がこの程度の処理をしていることは大きな問題である。





図 2.30 稼働していない  
パイロットプラント



図 2.31 沈殿槽の状況

#### (5) 水産加工工場

ベトナムは東部を海に面していることから、水産物の消費が大きく、水産業は古くから盛んである。改革開放政策が始まった 1990 年代に入ってから、水産物の加工輸出が増加し、特に日本への輸出は大きく、エビやイカといった魚介類を日本企業が要求する製品に加工して輸出している。日本企業との資本提携、技術提携しているベトナムの水産加工業者も多く、日本で研修するベトナム従業員も多い。

水産加工工場における廃水は、有機性汚濁物や栄養塩類の濃度が高く、特に塩濃度が高いのが特徴である。そのため、塩対策（塩分除去や生物処理での適切な馴養）が必要となる。また、ベトナムの水産加工工場は、大規模ではなく中小規模であることも多い。ここでは、Quang Ninh 省の AQUAPEXCO 社、ダナン市の Tho Quang Seafood Industrial Park Zone にある Hai Thanh Co. Ltd、Thuan Phuoc Seafood and Trade Joint Stock Company 及び Ha Long Canned food Joint Stock Company の現状を説明する。

##### ①Quang Ninh Aquatic Products Export Company (AQUAPEXCO)

図 2.32 に示す AQUAPEXCO 社は、観光地として有名なハロン湾がある Quang Ninh 省に位置している。Quang Ninh 省は観光地として、また水産加工生産地としてベトナムの主要な外貨獲得の役割を担っているが、近年、ハロン湾での水質汚濁が問題視されはじめ、ベトナム政府、Quang Ninh 省政府そして援助国による支援などによって水質汚濁対策が推進されている。

AQUAPEXCO は、1988 年に設立された水産加工企業で、漁獲したエビやイカな

どを加工して日本などに輸出している。同社は、日本企業と協力関係があることから、水産加工品の約 8 割が日本に輸出しており、併せて同社従業員が日本に派遣され研修している。

同工場の廃水処理施設では、2011 年までは簡易な処理だけであり、適切な処理がなされていなかったが、2012 年にスペイン・バルセロナ大学の支援を受けて、処理能力が  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  の廃水処理施設を設置し、稼働している。同施設は、発生した廃水は、生物曝気槽（図 2.33 参照）、植生浄化法施設（図 2.34 参照）を経てハロン湾に放流されている（図 2.35 参照）。原水の BOD 及び  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  が  $150 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、処理水が  $40 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  である。しかしながら、同工場からの排水量は  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  を超えており、拡張するための計画を立てているが、資金難のため拡張工事は停止したままとなっている（2014 年）。



図 2.32 AQUAPEXCO



図 2.33 生物曝気槽



図 2.34 植生浄化施設



図 2.35 ハロン湾放流口

## ②Tho Quang Seafood Industrial Park Zone

図 2.36 に示す Tho Quang Seafood Industrial Park Zone が位置するダナン

市は、ベトナムにある直轄都市の 1 つで中部地方最大の人口を抱える。直轄都市とは、省から独立した大都市で、2014 年現在でダナン市の他にハノイ市、ホーチミン市、ハイフォン市の 4 市がある。ダナン市にはいくつかの工場団地が存在するが、その多くは水産加工業の企業を誘致しており、Tho Quang Seafood Industrial Park Zone もその一つでダナン市最大の規模である。同工場団地には 2014 年現在、14 社の工場があり、その内、ベトナム資本の工場 13 社、日本資本の工場 1 社の工場が稼働している。

Tho Quang Seafood Industrial Park Zone には、図 2.37 に示すダナン市政府が管理する集中廃水処理施設 (Central Wastewater Treatment Plant) があり、工場団地内の工場排水を接続して工場廃水を処理している。各工場が集中廃水処理施設に支払う費用は次のとおりである。

- 1) COD<sub>Cr</sub> 濃度 1,000–1,500 mg・L<sup>-1</sup> : 17,000 VND・m<sup>-3</sup> (約 95 円・m<sup>-3</sup>)
- 2) COD<sub>Cr</sub> 濃度 500–1,000 mg・L<sup>-1</sup> : 8,600 VND・m<sup>-3</sup> (約 48 円・m<sup>-3</sup>)
- 3) COD<sub>Cr</sub> 濃度 500 mg・L<sup>-1</sup> 以下 : 6,600 VND・m<sup>-3</sup> (約 37 円・m<sup>-3</sup>)

ダナン市政府が要求する COD<sub>Cr</sub> 濃度が最大 1,500 mg・L<sup>-1</sup> であることから、1,500 mg・L<sup>-1</sup> を超えないことが求められるようである。1,500 mg・L<sup>-1</sup> を超えた場合は追加料金を払わなくてはならない。

水産加工工場の廃水による海域の水質汚濁が懸念されるが、ベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所ダナン支局やダナン市科学技術局の話では、赤潮等は発生していないようである。しかし、風向きにより漁船停泊港付近からの悪臭が居住地に流れこみ、苦情があるということであった。



図 2.36 Tho Quang Seafood Industrial Park Zone



図 2.37 集中廃水処理施設



③Hai Thanh Co. Ltd

図 2.38 に示す Hai Thanh Co. Ltd は、Tho Quang Seafood Industrial Park Zone に位置する水産加工工場である（図 2.39 参照）。魚介類の加工を行っており、スルメなども加工生産している。水産加工品の多くは日本に輸出している。



図 2.38 Hai Thanh 社入口



図 2.39 魚介類搬入口

廃水処理設備は、ベトナム天然資源環境省 (MONRE) の技術が導入されており、計画排水量は  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  である。廃水のフローは、図 2.40 に示すスクリーンによる残渣除去の後、凝集沈殿→UASB→ $A_2O$ （図 2.41 参照）→沈殿（図 2.42 参照）→集中廃水処理施設であり、凝集の前段の原水槽（貯留槽）と調整槽があり、調整槽では水酸化カルシウムで pH 調整（図 2.43 参照）を行っている。



図 2.40 原水入口のスクリーン



図 2.41 曝気槽



図 2.42 沈殿槽（一面にスカム発生）



図 2.43 pH 調整槽

同社の廃水処理管理責任者によると、廃水の水質は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  で  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下を遵守しているが、窒素やりんなどの栄養塩類項目は測定していないということであった。沈殿槽では、スカムが一面に発生している状況が確認でき、過負荷、生物処理における生物相のトラブル、運転条件のミスなどが原因と考えられる。

スカム発生により処理水に SS が混入していることから、まずは同社廃水処理設備の仕様を確認し、過負荷であれば、施設増設が必要であろう。集中廃水処理施設へ処理水を排水していることから、産業排水基準 (QCVN40:2011) に定めている水質項目すべてを測定していないようである。排水量及び  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  だけでなく、例えば窒素、りん、SS、pH などについても日常的に測定する必要がある。その上で廃水処理設備の運転条件を見直すとともに、使用水量削減に向けたクリーナープロダクションの検討が必要である。また、悪臭が強く、対策が必要であるが、適切な運転が行われれば、悪臭は軽減されるものと考えられる。

#### ④Thuan Phuoc Seafood and Trade Joint Stock Company

図 2.44 及び図 2.45 に示す Thuan Phuoc Seafood and Trade Joint Stock Company も Tho Quang Seafood Industrial Park Zone に位置する水産加工工場である。さしみなどの魚介類の加工をしており、生産量の 50 % を日本に輸出している。

同社は、2013 年に 20 billion VND (約 1.12 億円) を負担して、廃水処理設備を導入した。工場が発生した廃水は、図 2.46 に示すスクリーン、調整槽を経て図 2.47 に示す UASB 法で処理され、 $\text{A}_2\text{O}$  法 (図 2.48 及び図 2.49 参照) による有機物の分解と脱窒素を行っている。その後、図 2.50 に示す沈殿槽を経由し、凝集沈殿による固液分離と pH 調整、そして最終沈殿、消毒を経て、処理水は集中廃水処理施設に排水されている。発生した汚泥は、図 2.51 に示すベルトプレ



スによる脱水が行われ、埋め立てまたは焼却されている。



図 2.44 Thuan Phuoc 社入口



図 2.45 Thuan Phuoc 社製品搬出口



図 2.46 原水流入口にあるスクリーン



図 2.47 嫌気槽



図 2.48 曝気槽



図 2.49 曝気槽



図 2.50 沈殿槽



図 2.51 ベルトプレス脱水機

処理計画の主な水質諸元は表 2.7 のとおりである。なお計画排水量は  $2,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  である。

表 2.7 主な処理計画水質諸元

| 水質項目                     | 単位                              | 原水          | 処理水        |
|--------------------------|---------------------------------|-------------|------------|
| pH                       |                                 | 6.5~7.6     | 5.5~9.0    |
| BOD                      | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1,500~3100  | $\leq 50$  |
| $\text{COD}_{\text{Cr}}$ | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 2,500~5,000 | $\leq 80$  |
| 浮遊物質                     | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 500         | $\leq 100$ |
| 全窒素                      | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 350         | $\leq 60$  |
| アンモニア態窒素                 | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 110         | $\leq 20$  |

実際の処理水水質は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  で  $50 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度で、時には  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度であることもあり、再利用なども検討している。UASB 法による廃水処理で発生したメタンガスは、現在、大気放散させているが、今後はエネルギー回収も検討したいということであった。設備導入に伴って汚泥発生量が増加し、現在、脱水汚泥として  $750 \sim 1,000 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$  を排出している。発生した脱水汚泥は、農家が無料で引き取り、肥料としている。

同工場は、ベトナムにおける水産加工施設の中では適切な処理を行っている工場の一つである。 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  で  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度に処理された水を  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下を求める集中廃水処理施設に排水しており、処理にかかる設置費、運転維持管理費の負担が過剰になっている。すでに適切な処理をしていることから、直接、公共用水域、すなわち海域への排水も検討する余地がある。しかしながら、集中

廃水処理施設を管理するダナン市政府側からすれば、負担金の削減となり、すぐに合意できるとは考えられない。比較的適切な管理をしていると考えられるが、改めて、クリーナープロダクションによる使用水量の削減、運転条件（曝気、薬品使用、滞留時間、汚泥返送率など）を見直し、運転維持管理費の軽減と汚泥発生量の削減に取り組むことが次の課題となる。

#### ⑤Ha Long Canned food Joint Stock Company

図 2.52 及び図 2.53 に示す Ha Long Canned food Joint Stock Company も Tho Quang Seafood Industrial Park Zone に位置する水産加工工場である。同社は魚介類、野菜及び肉類の缶詰を生産加工する会社で、同工場は同社の魚介類部門の工場である。一日に 15 ton (50,000 缶) を生産しており、主に中東（イスラエルを含む）、イラン、韓国などに輸出しているが、日本にはほとんど輸出していない。



図 2.52 Ha Long 社入口



図 2.53 魚介類搬入口

廃水処理設備の計画排水量は  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、実際には  $70 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  程度である。処理設備のフローは、スクリーン→調整槽（図 2.54 参照）→曝気槽（図 2.55 参照）→沈殿槽（図 2.56 参照）→集中廃水処理施設への排水となっている。原水の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度は  $2,000 \sim 3,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  で、処理水は  $400 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  である。処理水に SS が混入していることが課題であるということであったが、SV30 を測定しておらず、よってバルキングの指標である SVI が判断できない状況である。余剰汚泥は汚泥貯留槽（図 2.57 参照）で貯留されているが、その後の処理・処分法については不明である。

同社では前段で嫌気性処理をしておらず、標準活性汚泥法であれば過負荷で



あると考えられる。嫌気性処理や過負荷にも耐えられる生物膜法、その他の処理方法の導入が求められる。他社と同様に、排水基準に沿った水質項目の測定、適切な運転管理が必要である。



図 2.54 原水槽・調整槽



図 2.55 曝気槽



図 2.56 沈殿槽



図 2.57 汚泥貯留槽

#### (6) 畜産業

ベトナムでは、養鶏業、養豚業などの畜産業が盛んで、農村地域における主要な産業の一つとなっている。畜産業においては、畜産の過程で発生する排泄物の処理・処分が地域の環境保全にとって重要であるが、畜産業者にとっては、それが大きな負担となり、結果的に適切な処理・処分がなされないまま、系外に排出され、河川や土壌の汚染を引き起こし、二次被害を生じているのが現状である。特にベトナムなどの発展途上国においては、同問題が重大な関心事となっており、ベトナム天然資源環境省（MONRE）などの行政機関はその対策について様々な規制に取り組んでいる。ベトナムにおける畜産業では小規模が多く、資金及び技術の面からさらに対策が遅れている。

ハノイ市の西に位置する Hoa Binh 省は山間部が多く（図 2.58 参照）、平野では稲作が中心の典型的な農村地帯である（図 2.59 参照）。山間部においては、キャッサバ栽培などの農業とともに、養豚業、養鶏業をはじめ、酪農なども多く、Hoa Binh 省が大消費地であるハノイ市に隣接しているということもあって、農村畜産物の特産地となっている。そのような背景から、小規模の畜産業が多数点在し、同地域での水質汚濁と土壌汚染の進行が懸念されている。



図 2.58 Hoa Binh 省山間部



図 2.59 Hoa Binh 省平野部

一部の畜産業者では、排泄物をメタン発酵槽に取り込み、メタンガスを捕集してエネルギー回収を行っているところもあるが、消化汚泥の処分や液状廃棄物の流出などの問題もあるため、環境面で十分な処置を取っている畜産業者は少ない。家畜の種類によって排泄物の性状は違うが、成育した豚の場合、1日1頭当たり6kg程度の糞尿を排泄する。それに含まれている窒素濃度は $6,000 \sim 7,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ という高濃度であるため、糞尿を分離して、糞は希釈して嫌気性処理し、その後、脱離液と尿を活性汚泥法に処理するなどの方法を取るなどの工夫が必要である。

このような背景により、ベトナムの研究機関がその対策に取り組んでいる。Hoa Binh 省 Luong Son 地区に位置する Green Hoa Binh Farm（図 2.60 及び図 2.61 参照）では、ハノイ科学技術大学及びベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所によるパイロットプラントを用いた廃水処理実験を実施している（図 2.62 及び図 2.63 参照）。同ファームでは、豚4,000頭あまりを飼育し、 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の排水量が発生している。その原水は $\text{COD}_{\text{Cr}}$ で $6,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、BODで $4,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、SSで $4,000 \sim 6,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と非常に高い濃度を示し、十分な処理がなされないまま排出されていたが、現在は嫌気処理及び生物接触酸化処理という構



成のパイロットプラントで処理をし始めている。まだ、順調に稼働してはならず、今後の研究機関の成果が期待される。



図 2.60 Green Hoa Binh Farm



図 2.61 ファーム内の豚

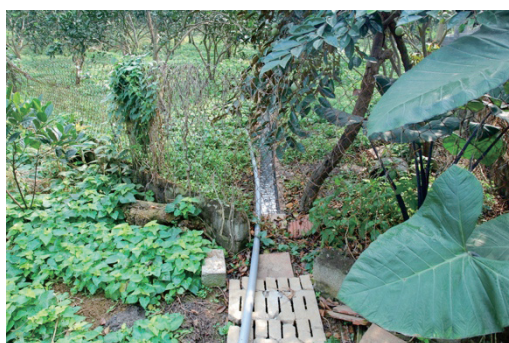


図 2.62 原水流入口



図 2.63 パイロットプラント

#### (7) 病院

病院は、人の健康を保護するための最も重要な施設であり、都市域だけに限らず、地方においても国立などの公営の総合病院が発展途上国においても存在している。ただし、医師、看護師といった人材の確保や運営に必要な費用の確保は簡単ではなく、問題を抱えていることのほうがむしろ多い。

ベトナムでは大都市だけに限らず地方都市においても総合病院が存在し、地域の医療の中心となっている。そのような病院施設からは通常の下水だけでなく、医療系廃棄物も生まれ、その処理・処分も併せて課題となっている。廃水中には患者に投与された医薬品がし尿や洗浄排水などに含まれていることも想定されるが、そもそも有機性汚濁物や栄養塩類、浮遊物質を除去する一般的な廃水対策が適切に行われていない中で、まだ医薬品汚染の問題を論ずる段階に

は至っていない。以下、ハノイ市に位置する 3 病院及び Thai Binh 省に位置する 1 病院の現状を説明する。

#### ①Viet Duc University Hospital

Viet Duc University Hospital は、ハノイ駅と観光地として有名な文廟の間にある外科を中心とした総合病院である。100 年以上前に外科病院として設立され、ロシアやフランスなどの支援を受け、40 余りの診療科、1,000 床を超える入院施設、1,700 名余りのスタッフを抱える大型病院である。外来も受け付けている。

2006 年に保健省の支援（ドイツ政府の政府開発援助）を受けて、嫌気性処理と好気処理（散水ろ床法）からなる廃水処理施設の建設を始め、2009 年に引き渡されたが、稼働後にトラブルが発生し、排水基準を満たせなかった（図 2.64 及び図 2.65 参照）。このようなトラブルに対処するため、保健省の協力を得ながら、改修等を実施し、2012 年では一部の水質項目の基準を達成することができるようになった。現在、排水量は  $900\sim 1,000\text{ m}^3\cdot\text{day}^{-1}$  で、原水 BOD はおよそ  $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  である。



図 2.64 Viet Duc 大学病院の  
廃水処理施設



図 2.65 Viet Duc 大学病院の  
散水ろ床施設

#### ②Thai Binh Hospital

Thai Binh 省はハノイ市から南東に 100 km 程度の場所に位置する農村地域である。この Thai Binh 省の総合病院が Thai Binh Hospital である。外来患者は 1 日に 500~700 名、入院患者は 220~280 名で、地方総合病院として重要な役割を果たしている。

排水量はおよそ  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  で、そのうち有害とされる廃水は  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  である。ただし、この「有害」という意味は不明である。2010年にベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所の技術によって散水ろ床法の廃水処理設備が導入され、医療施設の排水基準におけるカテゴリーA（農業等で利用する公共用水域への放流）を達成している（図 2.66 及び図 2.67 参照）。2010年以前は沈殿処理及び塩素消毒のみであったことを考えると、大幅な改善である。



図 2.66 散水ろ床法施設



図 2.67 調整槽及び処理槽

### ③E General Hospital

図 2.68 に示す E General Hospital は、1967年に設立されたハノイ市 Cau Giay 地区にあるベトナム国立病院の一つで、保健省直轄の病院である。ベッド数は 800 床で、従業員は 800 名である。

排水量は  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  で、トイレ及び 6 箇所のラボの廃水と生活系の廃水の 2 系統あり、それら进行处理している。原水の BOD は  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度である。廃水処理施設は、2008 年頃に設置されており、調整槽、嫌気槽、沈殿槽を経て、散水ろ床法施設（図 2.69 参照）で処理し、処理水を塩素殺菌し放流している。放流先は隣接する水路で、その水路はハノイ市内の To Lich 川に流入している。

残念ながら、同廃水処理施設は、ポンプの故障などの原因により、稼働していない期間が長く、その間の廃水は未処理のまま放流されているのが現状である。国の機関ということもあり、厳しい行政検査がないことも問題である。同病院にて廃水処理実験を実施している（第 5 章）。





図 2.68 E General Hospital



図 2.69 廃水処理施設

#### ④Hospital of Transportation and Traffic

図 2.70 に示す Hospital of Transportation and Traffic は 1956 年に設立されたハノイ市 Dong Da 地区に位置する運輸交通省直轄の国立病院である。2015 年に民営に移行する予定である。職員数は 450 名で病床数は 470 床ある大型病院の一つである。入院患者の増加に伴って床数が不足しており、拡張工事を実施している。外来患者数は 1 日に 600 人程度で、特に出国するための健康診断を実施する病院として位置づけられているため、1 日に 400 名の検診患者が同病院を訪れている。

廃水処理施設の計画排水量は  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、病院拡張によりさらに排水量は増大することが予想されている。2013 年に導入された現在の廃水処理施設における廃水のフローは、始めにスクリーン及び原水槽を経て、生物接触酸化槽、散水ろ床施設、沈殿槽の順で、最終的に処理水は、塩素殺菌して放流槽に貯留されて放流されている（図 2.71 参照）。原水及び処理水の水質は不明であるが、原水については他の病院廃水と大差ないと考えられる。処理水質については医療排水基準のカテゴリーA を遵守しているということであった。



図 2.70 Hospital of Transportation and Traffic



図 2.71 廃水処理施設

#### (8) 下水処理場

ハノイ市においては、2014年現在で4箇所の下水処理場が稼働している。3,345 km<sup>2</sup>の面積に650万人（2012年）を超える市民が居住しており、およそ680,000 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>の下水が発生していると言われている。しかしながら、4箇所の下水処理場で処理できる排水量は、244,000 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>であり、発生下水の多くは未処理のまま公共用水域に排水されている。

ハノイ北部のタンロン橋北側付近にあるBac Thang Long下水処理場（計画処理量：38,000 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>）の処理水は国際河川であるホン河（図2.72参照）へ、ハノイ市最大の湖であるタイ湖（図2.73参照）に隣接するチュックバック湖（図2.74参照）の湖岸にあるTruc Bach下水処理場（計画処理量：2,300 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>）の処理水はチュックバック湖へ、ハノイ南部にあるKim Lien下水処理場（計画処理量：3,700 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>）はLu川へ、そしてハノイ南部にあるハノイ市最大のYen So下水処理場（計画処理量：200,000 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>）はホン河に排水している。図2.75はハノイ西部を流れるTu Lich川であるが、ここにも未処理の生活排水が流入しており、水質汚濁が懸念されている。



図 2.72 ホン河 (Red River)



図 2.73 タイ湖 (West Lake)



図 2.74 チュックバック湖  
(Truc Bac Lake)



図 2.75 Tu Lich 川

図 2.76 及び図 2.77 に示す Truc Bach 下水処理場は、日本が技術協力によって下水道のマスタープランを策定後、日本の有償資金協力で建設したパイロット施設である。

ハノイ市最大の Yen So 下水処理場は国際機関の援助を受けて 2012 年に完成している。下水道網が未発達なため ( $30\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$ )、図 2.78 に示す Yen So 下水処理場の下水取水は隣接する Kim Nguu 川からで、同河川から取水した水を原水とし、処理を行って同河川に排水している。主たる処理は SBR 法による生物処理であり、処理後は UV による殺菌消毒 (図 2.79 参照) を実施した後、排水している。汚泥処理は再利用についても対応可能な施設が整備されている。





図 2.76 Truc Bach 下水処理場



図 2.77 Truc Bach 下水処理場



図 2.78 Yen So 下水処理場



図 2.79 Yen So 下水処理場の UV 装置

## 2-1-2 タイ

正式名「タイ王国」は、インドシナ半島の中央部から南部に位置する面積 513.1km<sup>2</sup>、人口 67.0 百万人の国である<sup>1</sup>。インドシナ半島に位置する他国と比較すると、これまで政治的に安定していたこともあり、インドシナの優等生として経済発展が進展していった。このような状況によって、早くから日本企業がバンコク及びバンコク周辺地域に進出しており、日本企業の東南アジア進出拠点となっている。ここでは、バンコク近郊の工場団地と食品工場を取り上げる。

### (1) 工場団地

タイへの外資系企業の進出の歴史は長く、日系企業も古くから進出し、数多くの工場団地が整備されている。AMATA Nakorne Industrial Estate は、バンコクから南東方向にある Chonburi 県に位置する工場団地である。バンコクからおよそ 60 km であること、港湾施設に近いこと、また国際空港から離れていないことから、同工場団地には、日系企業が多く立地している。

AMATA Nakorne Industrial Estate には 4 箇所の集中廃水処理施設（図 2.80 参照）が整備されており、全排水量は  $40,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  にも及ぶ。同施設では、各工場で発生した廃水を処理しているだけでなく、火力発電所の冷却水も併せて処理している。同施設の管理は、専門の管理会社が請け負って対応している。一般的な下水処理施設と同じく、最初沈殿槽、曝気槽（図 2.81 参照）、最終沈殿槽（図 2.82 参照）からなる活性汚泥法で処理しており、余剰汚泥も濃縮脱水を経て系外に搬出されている。タイ政府は河川や海域への排出について制限を設けた法律を整備していることから、同施設での処理水は河川に放流することができないため、処理水は工場団地内の緑化地帯への散水などに用いられている（図 2.83 参照）。



図 2.80 AMATA Nakorne Industrial Estate 内の集中廃水処理施設



図 2.81 活性汚泥曝気槽



図 2.82 沈殿槽



図 2.83 処理水搬出口



## (2) 食品工場

CPF (THAILAND) PUBLIC COMPANY LIMITED は、バンコクから北に 120 km ほど離れた Saraburi 県に位置する食品加工工場で、CP ブランドでタイやベトナムなどに広く展開する食肉生産加工販売会社である。Saraburi 県にある CPF 社では鶏肉加工だけを行っている工場であり、一日に 250,000 羽を加工する大工場である。廃水中に含まれる有機物濃度が高いため、前段でチェンマイ大学の指導によって設置した図 2.84 及び図 2.85 に示す嫌気性処理施設で処理した後、後段で図 2.86 に示す活性汚泥法による生物処理を行っている。廃水中に含まれる有機物や油分などの処理・処分に課題を持っている。同施設で生じる処理水は、隣接する Phasak 川 (図 2.87 参照) に放流されている。放流地点より上流には貯水量 800 万 m<sup>3</sup> の農業に用いられる灌漑用の Phasak ダムがあり、下流はバンコク市内を流れる Chao Praya 川であることから、処理水水質には細心の注意を払っている。



図 2.84 CPF 社の廃水処理施設



図 2.85 嫌気性処理施設



図 2.86 活性汚泥法の曝気槽



図 2.87 Phasak 川

### 2-1-3 マレーシア

マレーシアは、主にマレー半島南部及びボルネオ島北西部に位置する面積 329.7km<sup>2</sup>、人口 29.7 百万人の国である<sup>1</sup>。1981 年に就任したマハティール首相が日本の経済成長を参考にして始めた「ルック・イースト政策」により、急速に経済発展してきた。ここでは、クアラルンプール市南部のパームオイル工場を取り上げる。

#### (1) パームオイル工場

Malaysia Palm Oil Board (MPOB) は、マレーシア政府機関の一つで、パームオイルの管理や研究などを行っている機関である。パームオイルは洗剤やお菓子など様々な生活用品や食品に用いられている。マレーシアはパームオイル生産で世界第二位（一位はインドネシア）であり、広大なパームオイルツリー（アブラヤシ）（図 2.88 及び図 2.89 参照）のプランテーションが存在している。



図 2.88 パームオイルツリー  
（アブラヤシ）



図 2.89 パームオイルツリーの果実

MPOB はパームオイル企業の管理を行っているが、MPOB 直轄でパームオイル製造にも関わっている。クアラルンプール国際空港に近い Labu 地区のパームオイルツリー農園（Sime Darby 社）には MPOB が運営する製造工場がある（図 2.90 及び図 2.91 参照）。



図 2.90 パームオイルツリーの果実



図 2.91 パームオイル製造工場

図 2.92 に示すようにパームオイル製造工場の廃水中には油分や有機物が多く含まれ、特に生産工程の加熱・加圧工程で発生する廃水に油分や有機物が高濃度で含まれている。廃水処理は図 2.93 に示すラグーンによって処理されているが、適切な処理はなされておらず、そのまま近隣の河川に放流されている。また、製造工程で発生する廃棄物については再利用の研究が進められている。



図 2.92 製造工程からの廃水



図 2.93 廃水処理施設（ラグーン）

#### 2-1-4 インドネシア

正式名「インドネシア共和国」は、東南アジア南部に位置する面積 1,904.6km<sup>2</sup>、人口 249.9 百万人の国で<sup>1</sup>、東南アジアで面積・人口とも最大の国である。日本の経済成長を参考にして、日本からの経済援助を積極的に活用し、経済発展してきた国である。多くの日本企業が進出している国の一つでもある。ここでは、ジャカルタ市東部の工場団地を取り上げる。



### (1) 工場団地

インドネシアは東南アジア諸国の中で最も国土が大きく（日本の約5倍）、最も人口が多い（日本の約2倍）国であり、東南アジア諸国で唯一、G20メンバー国となっている。インドネシア国内には61もの工場団地（2014年現在）があり、インドネシアの経済と雇用を支えている。

P. T. EAST JAKARTA INDUSTRIAL PARK (EJIP) は、ジャカルタ市から東部に45 kmほど離れた工場団地である。同団地は、日本の住友商事が1990年に開発し、現在も管理運営しており、80余りの企業が入居している中で、その70%が日系企業である。

同団地内にある集中廃水処理施設も EJIP が管理している。計画排水量は  $10,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  であるが、実排水量は  $7,000 \sim 8,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  である。廃水処理施設の構成は、スクリーン、最初沈殿池、活性汚泥法（生物処理）（図 2.94 参照）、最終沈殿池（図 2.95 参照）、塩素殺菌、放流という一般的な有機性廃水処理が行われ、流入原水の BOD が  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  が  $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  に対し、処理水の BOD が  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  が  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  と適切な処理が行われている。なお EJIP は廃水処理管理運営に関してインドネシア政府から表彰されている。



図 2.94 EJIP の生物処理施設



図 2.95 沈殿池

一方、EJIP に隣接する HYUNDAI Industrial Estate では、韓国の現代グループが運営する工場団地であるが、同団地の廃水処理施設は様々な問題を含んでいた。

この工場団地は現代グループが1996年頃に設立している。図 2.96 に示す同団地の廃水処理施設は適切な処理がされておらず、杜撰な管理体制であった。同団地にあるプリント基板工場からの廃水が中心であり、廃水中には有機溶媒

らしき液体が浮上分離し、その液体は紺青色である。しかしながら、その設備は一般に生物分解を目的とした有機性廃水処理施設であり、それらを分離分解することはできない。結果的にそのまま最終の処理水であっても、その有機溶媒らしき物質は除去されず、そのまま放流されている（図 2.97 参照）。その液体はプリント基板を洗浄する溶媒であると思われ、比重が 1.0 未満であると推定される。インドネシア政府はこれまで、罰金等を課してきたが改善されず、2009 年の廃水処理に関する法律改正に基づき、罰金とともに管理者の禁固刑も検討している。現在（2014 年 10 月）、罰金 1.2 million US\$を現代グループに請求しているが、支払われていない状況である。廃水処理施設の見直しの前に、まずは工場内の製造工程、洗浄方法、使用薬資材の見直しが必要である。



図 2.96 HYUNDAI Industrial Estate  
の生物処理施設



図 2.97 沈殿池  
(手元が処理水、分離する上澄みあり)

## 2-2 日本が直面する水環境問題

高度経済成長期において、我が国の公共用水域における水質は急速に悪化した。1960 年代後半から始まった公害防止対策に係る法律や組織の整備、それに伴う地方公共団体の管理や査察、汚染源である企業の法律遵守、公害防止対策技術の発展、そして国民の環境啓発の広がりによって、水環境が修復され、改善されていった。一方、環境ホルモンやダイオキシン類といった微量有害物質が新たに注目されるようになった。このような人の健康の保護に係る物質の対策は必要不可欠ではあるが、依然、生活環境への影響を及ぼすような有機性汚濁物や栄養塩類といった従来からの課題も残っている。ここでは、その解決の必要性について、面源負荷及び難分解性有機物質について説明する。

### 2-2-1 面源負荷

図 2.98 に示されるように、近年、下水道の普及や工場廃水対策により、我が国の生活環境項目における環境基準達成率は向上し、特に河川においてはその成果は顕著である<sup>2</sup>。一方、農地や道路などから発生する排水は面源負荷と呼ばれ、対策が行いにくい分野である。このようなことも一因となり、環境基準達成率の改善は頭打ちになり、特に閉鎖性水域として汚濁の影響を受けやすい湖沼では、COD 達成率がやや向上は見られるものの、50 %程度で推移し続けており、40 年前の 40 %程度と比較しても大幅な改善が見られないのが現状である。また、湖沼や海域においては、栄養塩類の窒素及びりんについて環境基準が定められているが、図 2.99 に示される湖沼の環境基準達成率は、全窒素では 10 %程度、全りんでは 50 %程度の達成率であり、依然として厳しい状況にある<sup>3</sup>。

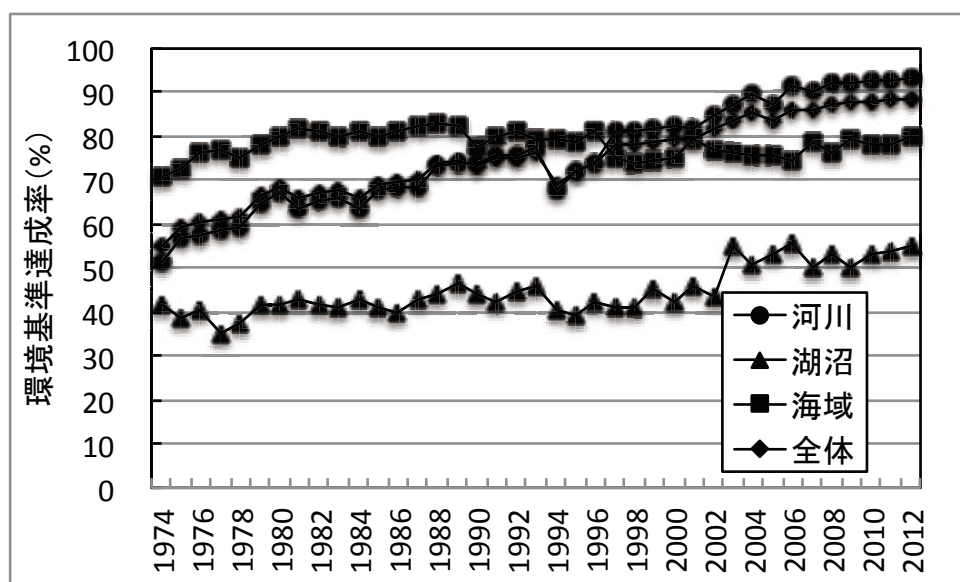


図 2.98 公共用水域の環境基準達成率の推移 (BOD 及び COD)  
(平成 26 年度環境省白書・循環型白書・生物多様性白書より)



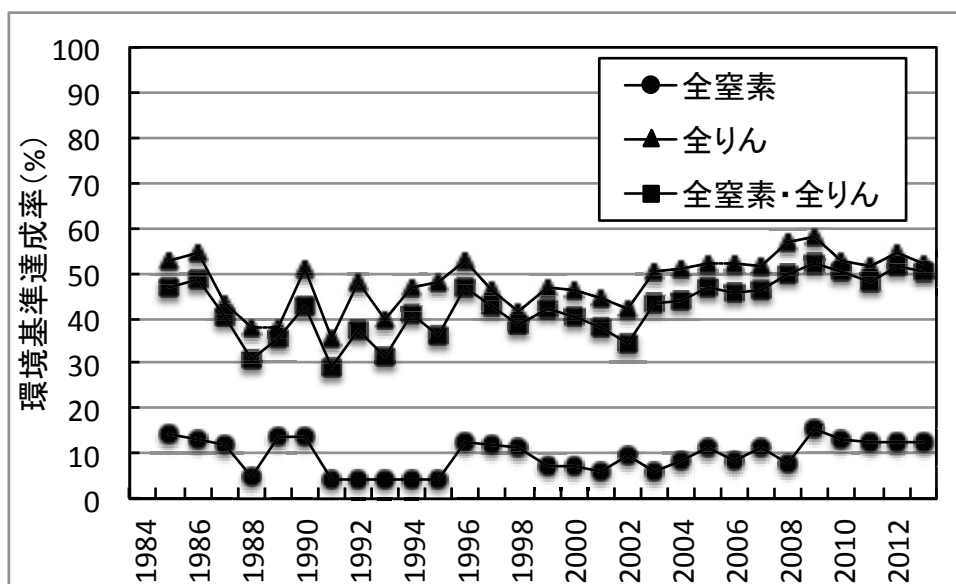


図 2.99 湖沼における全窒素及び全りん環境基準達成率の推移  
(環境省平成 25 年度公共用水域水質測定結果より)

農地周辺には水源確保のため、農業用ため池（貯水池）が設置されている場合が多く、特に水源が確保しにくい地域にはその傾向が強い。このような貯水池は農業用水としての機能とともに、水源の緩衝として、農業排水も貯留される構造となっており、農地への施肥による影響がこのような水源に影響する状況となっている。そのため、閉鎖性水域で最も指摘される富栄養化現象が発生しやすく、利水としてもまた景観などにも悪影響となっている。

兵庫県南あわじ市の農地周辺（図 2.100 参照）に点在する貯水池（図 2.101 参照）の水質測定結果を表 2.8 に示す。採水は 5 月であるが、気温の上昇と日射量の増大により、水深の浅いこのような貯水池においては、植物プランクトンの活動が活発となり、緑色化している。



図 2.100 南あわじ市の農地



図 2.101 南あわじ市の農地にある貯水池

表 2.8 兵庫県南あわじ市内貯水池の水質測定結果

| 調査名     | 水温<br>(°C) | pH   | DO<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | BOD<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | COD <sub>Cr</sub><br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | 全窒素<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | 全りん<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) |
|---------|------------|------|-----------------------------|------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| 皿池      | 23.9       | 7.33 | 8.61                        | 4.2                          | 6.5  | 22.1                         | 0.25                         |
| 皿池流入湧水  | 18.7       | 6.47 | 3.16                        | 5.5                          | 2.0  | 21.6                         | 0.09                         |
| 皿池流入表流水 | 22.0       | 6.27 | 6.61                        | 1.5                          | 6.0  | 24.2                         | 0.13                         |
| 新池      | 25.3       | 7.01 | 3.77                        | 3.1                          | 11.8                                       | 8.2                          | 1.63                         |
| 調水池     | 24.2       | 9.71 | 12.91                       | 3.6                          | 11.0                                       | 20.6                         | 0.22                         |
| 分析法     |            | 電極法  | 隔膜<br>電極法                   | JIS<br>K0102                 | HACH<br>簡易法                                | JIS<br>K0102                 | JIS<br>K0102                 |

我が国の道路は総務省統計局発表の「世界の統計 2012」<sup>4</sup>によると、およそ 80 % の道路が舗装されており、さらに道路密度も  $3.2\text{km}\cdot\text{km}^{-2}$  と他の主要国と比較しても非常に大きく、すなわち、舗装された面積の割合が高い。これに加え、居住地や工業地も大きく、よって雨水の多くは土壤に浸透する割合が小さく、多くの雨水は排水路を経由して公共用水域に流入することになる。道路上には車両から排出される油分や浮遊粒子状物質、工場等からの排出物の降下・堆積物が多く蓄積し、雨水と混合して、それら汚濁物質が公共用水域に流入することになる。しかしながら、発生源が面であり、対策は容易ではない。

表 2.9 は、大阪府東大阪市を通る近畿道 (NEXCO 西日本) の降雨時における排水の水質測定結果で、表 2.10 は、大阪府大東市を通る国道 170 号線 (外環状道

路)の降雨時における排水の水質測定結果である。COD や濁度が高いことがわかる。

表 2.9 近畿道（阪神高速道路 13 号線との交差点近傍）の水質測定結果

| 採水日              | pH   | 水温   | COD <sub>Mn</sub>  |
|------------------|------|------|--------------------|
|                  |      | °C   | mg・L <sup>-1</sup> |
| 2009 年 9 月 30 日  | 6.22 | 23.3 | 70                 |
| 2009 年 10 月 6 日  | 4.68 | 19.3 | 63                 |
| 2009 年 10 月 26 日 | 4.61 | 18.5 | 32                 |

表 2.10 国道 170 号線（野崎駅近傍の高架）の水質測定結果

| 採水日              | pH  | COD <sub>Cr</sub>  | EC                  | 濁度  | TOC                |
|------------------|-----|--------------------|---------------------|-----|--------------------|
|                  |     | mg・L <sup>-1</sup> | μS・cm <sup>-1</sup> | NTU | mg・L <sup>-1</sup> |
| 2010 年 9 月 28 日  | 6.4 | 164                | 176                 | 102 | 30.5               |
| 2010 年 10 月 8 日  | 7.2 | 61                 | 194                 | 135 | 25.9               |
| 2010 年 10 月 22 日 | 5.2 | 57                 | 200                 | 48  | 25.6               |
| 2010 年 10 月 22 日 | 5.2 | 57                 | 200                 | 48  | 25.6               |
| 2010 年 10 月 25 日 | 8.3 | 157                | 195                 | 83  | —                  |
| 2010 年 10 月 26 日 | 7.3 | 150                | 200                 | 89  | 23.8               |

降雨開始直後の排水（First Flash）においては、SS や COD の濃度が高くなる傾向があり、これらが河川や湖沼に流入することで汚濁が進行することになる。交通量が多いこともこれらを増大させる原因となる。舗装率が低い場合であれば、多くの降雨は土壌中に浸透するため、降雨時における急激な汚濁物質の上昇は避けられることは想像できる。

#### 2-2-2 難生分解性有機物質

図 2.102 は滋賀県琵琶湖の有機物指標である BOD 及び COD の年平均値の推移である<sup>5</sup>。排水基準の遵守、下水道の普及などの要因によって、この 40 年余りで BOD 値は人口密度が高い南湖であっても減少傾向にある。しかしながら、BOD と同じ有機物指標であり、湖沼の環境基準項目となっている COD 値は、1985 年頃から徐々にではあるが上昇に転じている。この傾向は南湖でも北湖でも値の違

いあるにしても同様である。図 2.103 及び図 2.104 は琵琶湖の南湖及び北湖の写真である。

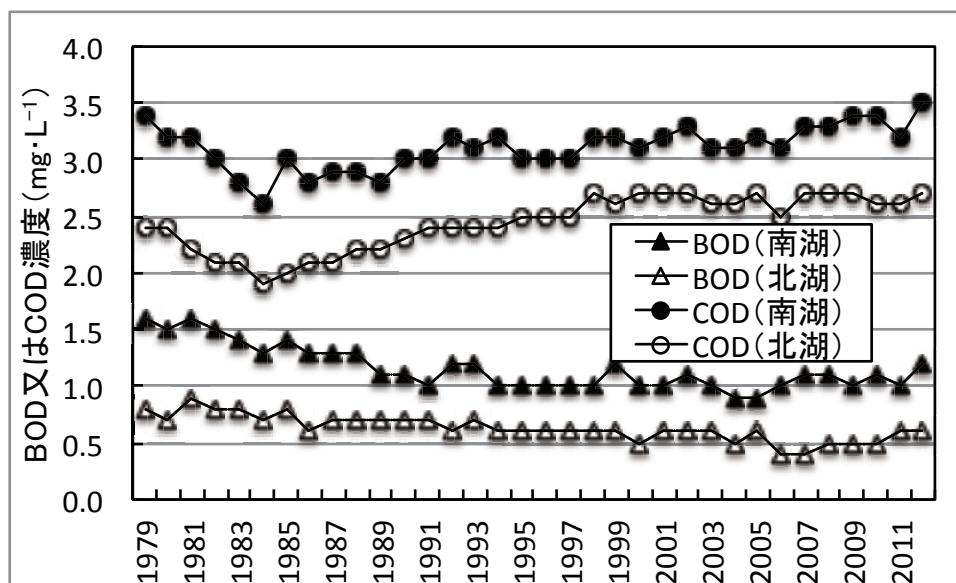


図 2.102 琵琶湖における有機物指標（BOD 及び COD の年平均値）の推移  
滋賀県環境白書より



図 2.103 琵琶湖 南湖



図 2.104 琵琶湖 北湖

この現象の原因としては、国土交通省「平成 22 年度琵琶湖の総合的な保全のための計画調査報告書」<sup>6</sup>でも指摘しているように、微生物では分解されにくい難生分解性有機物質の濃度が上昇しているためと考えられる。これは、市民生活の中で排出される汚濁物質が多様になったことに加え、活性汚泥法を中心とする生物処理法を用いた終末下水処理場の普及により、易生分解性有機物質は除去できても難生分解性有機物質が残存し排出されていることや、富栄養化に

よる内部生産によることが考えられる。難生分解性有機物質が公共用水域に残存することによる用水、特に上水での塩素消毒副生成物の影響が懸念され、対策を講ずる必要がある。しかしながら、多様化した社会の見直しや下水道処理システムの再構築は、現実的な計画とはなりにくいのが現状である。

#### 関連文献

- 1) 平成 24 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2013
- 2) 平成 24 年度二国間オフセット・クレジット制度の実現可能性調査、「食品加工工場有機廃水からのバイオガスを利用したコージェネレーション」(ベトナム) 報告書、日本テピア株式会社、2013
- 3) 平成 25 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2014
- 4) 平成 26 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2015

#### 参考文献

- 
- <sup>1</sup> 世界銀行ホームページ、WDI Data and Statics 2015
  - <sup>2</sup> 平成 26 年度環境省白書・循環型白書・生物多様性白書
  - <sup>3</sup> 環境省ホームページ、平成 25 年度公共用水域水質測定結果
  - <sup>4</sup> 世界の統計 2012、総務省統計局
  - <sup>5</sup> 滋賀県環境白書（複数年度）
  - <sup>6</sup> 国土交通省「平成 22 年度琵琶湖の総合的な保全のための計画調査報告書」



## 第3章 土壤浸透法用浄化材の開発と探索

### 3-1 概説

本章は、土壤浸透法の機構、種類及び研究動向（第3章第2項）、土壤浸透法に用いる浄化材の開発（第3章第3項）と新たな土壤探索（第3章第4項）、そして第3項と第4項の結語（第3章第5項）で構成している。浄化材の開発では、通水性と耐水性の確保を目的に、強度を確保した造粒方法の検討を行った。造粒方法は、加熱と固化剤を用いる方法で検討し、最終的に固化剤としてセメントを採用している。一方、新たな土壤探索では、それまで土壤浸透法で採用されることが多かった赤玉土を代表する栃木県産の火山灰土であったが、本研究では、これまでに採用されてこなかった九州産の火山灰土に着目した。九州4県（大分県、熊本県、宮崎県及び鹿児島県）の火山灰土を探索し、それらのりん吸着能や組成等を分析し、得られた結果を用いて解析を行った。浄化材の開発では、有機性汚濁物の吸着性を評価するために難生分解性有機物質であるフルボ酸と、栄養塩類であるりんを除去対象物質としたが、新たな土壤探索ではりに焦点を絞っている。

### 3-2 土壤浸透法の機構、種類及び研究動向

#### 3-2-1 概要

土壤浸透法は、土壤処理法、土壤浸透式廃水浄化法などと呼ばれている自然の浄化能力を利用した廃水処理技術の一つである。一般的な処理工程は、土壤表面に汚水を散布することによって汚水が土壤中に浸透し、浸透する過程で汚水中の汚濁物質が、土壤を構成する土粒子などの物理的なろ過、化学的な吸着及び生物化学的な分解という分離・分解機能によって除去されるというものである。図3.1に土壤浸透法の概略を示す。

浄化が可能な汚濁物質は、浮遊物質、有機物、りんなどが挙げられるが、無機性の浮遊物質は目詰まりの原因となり浄化対象となりにくい。土壤浸透法で処理対象としての汚水は様々であり、生活雑排水、し尿や畜産廃水の処理水、河川や湖沼の環境水、雨水などがあげられる。浮遊物質の除去も可能であるが、特に土壤浸透法に期待する効果はりんの除去であり、次いで溶解性有機物である。

土壤浸透法に浄化材として利用する材料は主として土壤である。土壤浸透法として一般的に日本で用いられる土壤は、マサ土、黒ボク土、赤玉土などで、

これに活性炭、木炭や凝集剤を添加して有機物やりんの分離除去能を大きくする場合がある。

水量負荷（ろ過速度）は、 $1.0\sim 2.0\text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$ 程度であり、砂ろ過法などの清澄ろ過法と比較すると緩速ろ過法程度に相当する。そのため、他の処理法と比較すると大きな敷地面積を必要とする。

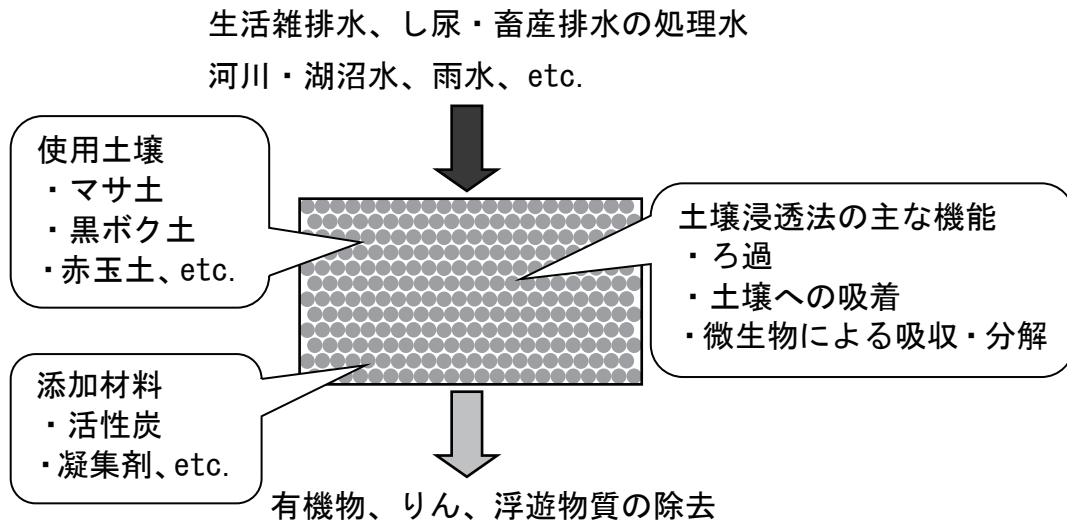


図 3.1 土壌浸透法の概略

### 3-2-2 機構

前述のとおり、土壌浸透法による汚濁物質の除去は、土壌を構成する土粒子などによる物理的なろ過、化学的な吸着及び生物化学的な吸収・分解という分離・分解機能によって行われる。それぞれの機構は次のとおりである。

#### (1) ろ過

土壌は、様々な粒径の土粒子によって構成されており、その土粒子には空隙が存在する。汚水が土壌に浸透する際、汚水中に含まれる浮遊物質などが土粒子に捕捉されることにより、浮遊物質の除去が行われる。汚濁物質のろ過は、空隙の大きさよりも大きい汚濁物質を取り除く機械的なろ過に加え、汚濁物質間、または土粒子と汚濁物質との間で発生する凝集によるろ過が行われ、空隙よりも小さな汚濁物質も捕捉されることがある。土壌浸透法におけるろ過は、土粒子が砂ろ過などに代表される清澄ろ過と比較すると粒径分布が大きく、かつ微細な粒径も存在することから、特に加工が施されていない土壌であれば、

微細な浮遊物質の除去も可能である。このような浮遊物質の除去は、概ね土壌表面（汚水流入側）で行われている。図 3.2 に土壌浸透法によるろ過のメカニズムを示す。

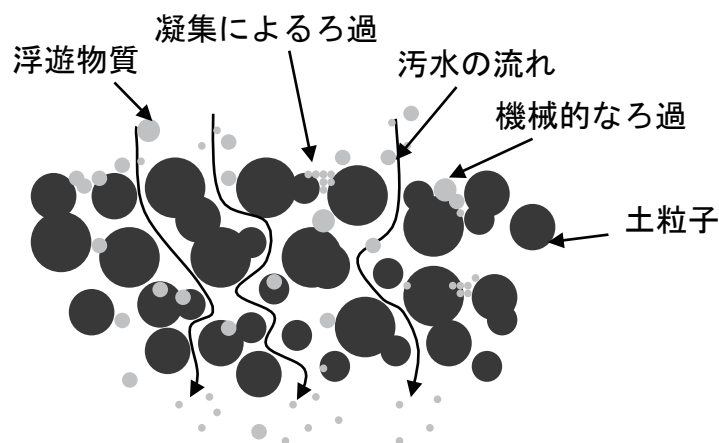


図 3.2 土壌処理によるろ過のメカニズム

しかしながら、砂やアンストラサイトをを用いた清澄ろ過では逆洗が可能であり、捕捉された浮遊物質を比較的容易に除去することができるのに対し、土壌浸透法の場合は構造上逆洗が困難であることから、浮遊物質による閉塞が起きると、計画処理水量を確保することができなくなる。そのため、土壌浸透法を運用するためには、ろ過という機能を可能な限り利用しない方法を検討せざるを得ない。

閉塞した場合には表面土壌のかき取り除去が可能であるが、一般には浮遊物質を多く含む汚水を対象とする場合は、土壌浸透法の前段で浮遊物質の除去を行うことが適切である。浮遊物質のうち、特に無機性の浮遊物質は閉塞の主たる原因物質である。有機性の浮遊物質の場合は、例えば、流入を中断するなどして、後述する生物化学的な分解を待てば閉塞が解決することもある。いずれにしても浮遊物質濃度が高い場合や、無機性浮遊物質の割合が大きい汚水を土壌浸透法へ直接流入させることは困難である。

## (2) 吸着

吸着による汚濁物質の除去は、水量負荷が大きい土壌浸透法では中心的な除去機能である。ろ過では、浮遊物質などのような粒径が大きな汚濁物質が除去

対象であるのに対し、吸着は溶解性物質が対象となる。土粒子中に含まれる吸着材料に、溶解性物質のうち吸着されやすい物質が吸着し、処理対象水から分離される。吸着材料となりえる物質としては、鉄やアルミニウムなど一般的に凝集剤として使用されている物質や活性炭のような多孔質で比表面積が大きな物質が考えられる。土壌には鉄やアルミニウムが含まれていることから、リンの吸着が可能である。

ろ過と同様に吸着にも限界があり、吸着効果もやがて寿命となり、吸着していた汚濁物質が流出する、いわゆる破過点に達する。破過に達するメカニズムを図 3.3 に示す。

このように土粒子中に含まれている吸着材料によって汚濁物質が可逆的に吸脱着を繰り返し、破過するまでの時間が水や吸着されにくい物質よりも遅れることで、吸着されやすい汚濁物質の分離が行われる。吸着のされやすさは、分子構造や大きさ、界面張力、溶解度、イオン極性、pH、濃度などによって変化する。

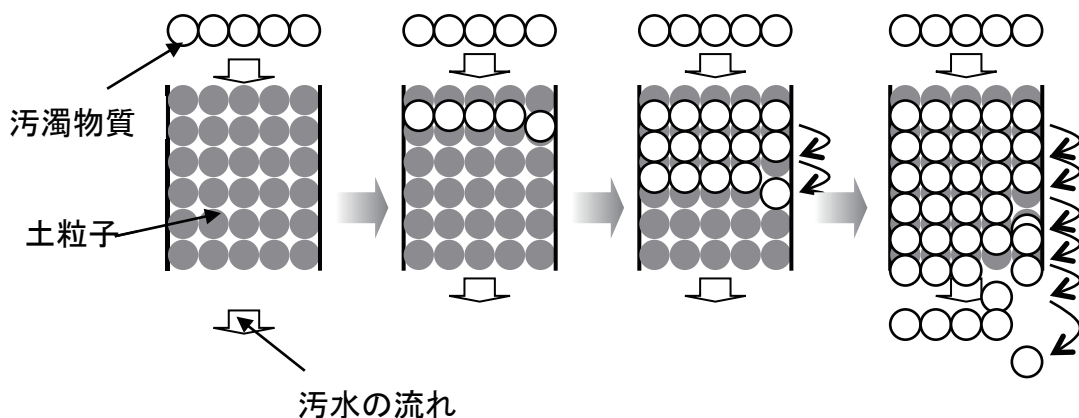


図 3.3 破過に達するメカニズム

吸着能を判断する場合には、吸着等温線を作成することが適切である。吸着等温線とは、一定温度（一般的に 25 °C）において、吸着材（土壌浸透法の場合は土壌）と汚水と接触させて平衡状態に達したときの溶質濃度（汚濁物質濃度）と、そのとき吸着材に吸着された溶質量（汚濁物質量）との関係をプロットしたものである。この吸着平衡を表す式は様々あるが、次の Freundlich の式（式 3.1）が有名であり、最も用いられている<sup>1,2,3,4,5</sup>。

$$V = aC^{\frac{1}{n}} \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.1)}$$

ここに、 $V$ : 吸着剤の単位質量当たりの吸着量  
 $C$ : 平衡濃度  $a, n$ : 定数

両辺の対数をとると、式 3.2 となる。

$$\log V = \log a + \frac{1}{n} \log C \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.2)}$$

Freundlich 形の吸着平衡が成立するときは、 $\log V$  と  $\log C$  の関係をプロットすると直線が得られる。図 3.4 に吸着等温線の例を示す。

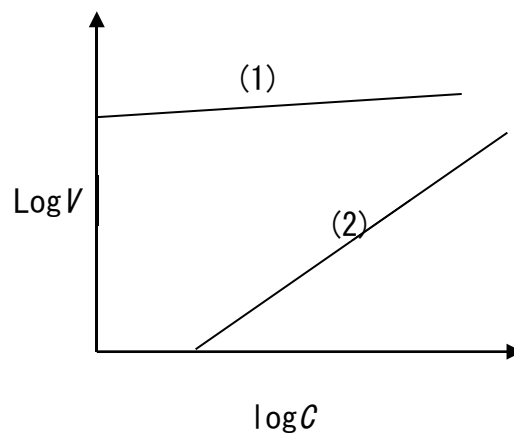


図 3.4 吸着等温線の例

図 3.4 に示す(1)及び(2)の勾配は、式の中の $\frac{1}{n}$ となる。また、 $\log a$  は、 $\log C = 0$  ( $C=1$ ) のときにおける  $\log V$  の値となる。(1)の吸着等温線の場合、 $\frac{1}{n}$ が小さく、 $a$  が大きい。(2)の吸着等温線の場合は、(1)と比較すると $\frac{1}{n}$ が大きく、 $a$  が小さいことがわかる。(1)は低濃度から高濃度までよく吸着するのに対し、(2)は高濃度で吸着はするが、低濃度で吸着能が低下する。このようなことから吸着剤を選定する場合、 $a$  が大きく $\frac{1}{n}$ が小さい吸着剤が良好である。



### (3) 吸収・分解

古くから土壌浸透法では、土壌中に生息する微生物によって有機物の吸収と分解が行われ、そのメカニズムが主たる除去であるとされてきた。日本における年間降水量程度 ( $1600\sim 1800\text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ ) の水量負荷であれば、微生物による有機物の吸収や分解は期待できるが、 $1\text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  程度の水量負荷を与える土壌浸透法では、微生物作用は大きくは期待できない。実際に易生分解性有機物と難分解性有機物の除去率を比較しても大きな差は生まれていない。仮に微生物による吸収と分解が起きれば、易生分解性有機物の除去率は大きくなることが予想される。ただし、多種多様な微生物が土壌中に存在することから、土壌微生物の研究が進展すれば、水量負荷が大きい場合であっても微生物による有機物の吸収と分解の可能性があると考えられる。また、土粒子に捕捉や吸着によって有機物が土壌中に留まることが可能であれば、微生物による吸収・分解は促される。

### (4) 土壌浸透法の機構の組み合わせ

以上のことから土壌浸透法では、物理的なろ過、化学的な吸着及び生物化学的な吸収・分解という分離・分解機能によって汚濁物質の除去が可能であるが、水量負荷が大きい場合の主たる機構は化学的な吸着、小さい場合は化学的な吸着に加え、生物化学的な吸収・分解とし、物理的なろ過は閉塞を招くため、可能な限り土壌処理の前段で浮遊物質の除去を行う前処理を行う必要がある。

## 3-2-3 土壌浸透法の種類

土壌浸透法にはいくつかの種類があるので紹介する<sup>6</sup>。

### (1) 緩速浸透法

都市排水や工場廃水などに用いられる方法で、農業灌漑法に類似のもので、水量負荷は、 $0.5\sim 6.0\text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$  と土壌処理法では最も小さい。一般的に土壌表面にスプリンクラー等で散水し、一部は土壌中に浸透するものの蒸発散によって汚水は処分される。図 3.5 に緩速浸透法の概略を示す。

欧州では 16 世紀ごろから採用されており、米国では現在、800 以上の緩速浸透法が稼働している。狭大な日本などでは採用が困難な方法である。

## (2) 表面流下法

表面流下法は、草が生えた緩い傾斜のある地表面に沿って、汚水を流下させて処理する方法である。水量負荷は  $3\sim 20 \text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$  程度である。図 3.6 に表面流下法の概略を示す。また、実際の写真を図 3.7 に示す。緩速浸透法の場合、汚水の全量を土壌への浸透もしくは蒸発散としているのに対し、表面流下法は、土壌への浸透と蒸発散に加え、下流部に設置された水路に流入させている。汚水を地表面に流下させていることから、緩速浸透法より浮遊物質の影響は小さい。

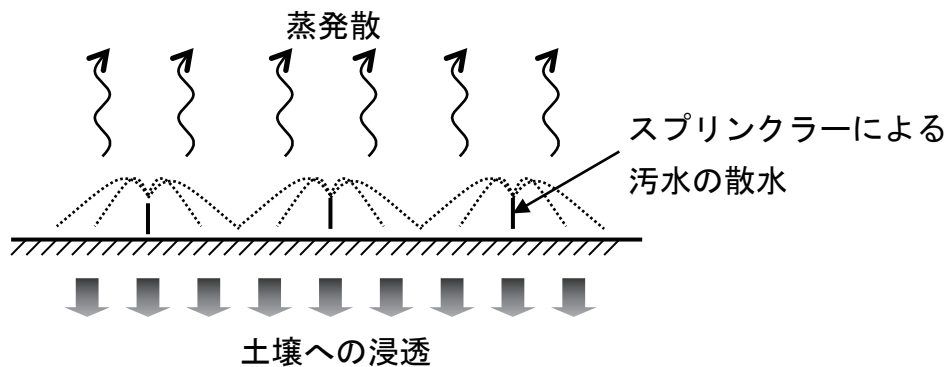


図 3.5 緩速浸透法の概略図

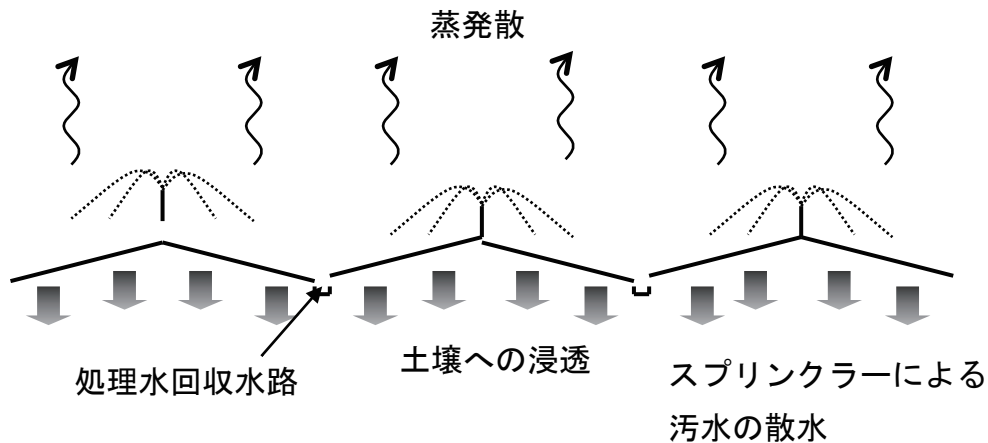


図 3.6 表面流下法の概略図

## (3) 急速浸透法

急速浸透法（図 3.8 参照）は、汚水を透水性の土壌に浸透させて処理する土壌浸透法で、日本で最も採用されている土壌浸透法である。水量負荷は他の方

法に比べて大きく、 $6\sim 125\text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$ 程度であり、 $1\text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$ を超える水量負荷の場合もある。水量負荷が大きいことなどから、土壌浸透法の前段で浮遊物質の除去や BOD の削減を行う前処理を設けることが多い。急速浸透法のいくつかを紹介する。



図 3.7 表面流下法（日本）  
稼働停止



図 3.8 急速ろ過法（日本）  
農村集落排水の高度処理

### ①トレンチ法

トレンチ法は、多孔とした散水管を土壌中に埋設し、汚水を土壌中に散水、浸透させる方法である<sup>1</sup>。図 3.9 に概略を示す。図 3.9 では、排水管を示しているが、下部土壌層から地下へ浸透させる方法もある。図 3.10 は中国で実証実験に用いられたトレンチ法である。

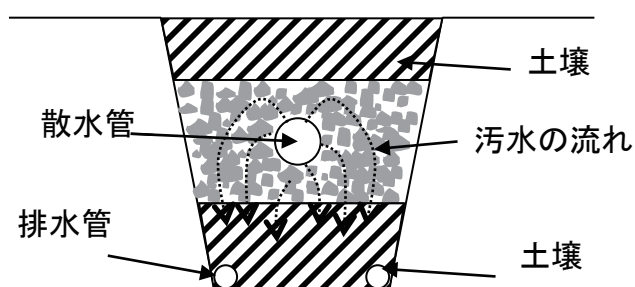


図 3.9 トレンチ法の概略図



図 3.10 急速ろ過法（中国）  
トレンチ法

### ②多段層法

多段層法<sup>7,8</sup>は、土壤浸透法の欠点である水量負荷を上げるため、土壤部分に土壤層と通水層を設け、透水性の向上と土壤層による有機物及び栄養塩類の除去を目的としたものである。土壤層には、マサ土、木炭、腐葉土などの混合物が用いられ、通水層には、軽石やゼオライトが用いられる。水量負荷は、数  $\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$  に設定している。また、好気性微生物の活性等を確保するため散気管を設けて、土壤層内を好氣的な状態を確保する場合がある。施工が複雑になること、汚水の大半が通水層を通過するなどの欠点がある。図 3.11 に多段層法の概略を示す。

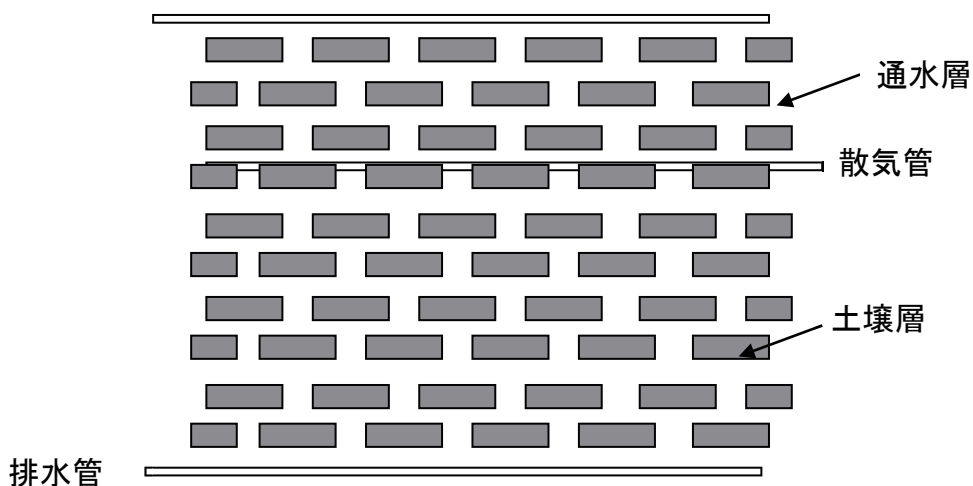


図 3.11 多段層法の概略図

### ③造粒法

造粒法も多段層法と同じく、通水性を確保することを目的とした構造となっ



ている。造粒法は、自然状態もしくはふるいわけによって粒状になっている赤玉土や鹿沼土を用いたり、造粒加工によって浄化能力の高い材料を粒状にしたものを用いたりする方法である。また、土壤粒の耐水性を確保するために、造粒加工時にバインダーを利用することがある。この方法では、今まで浄化能があったにも関わらず通水性がないことから利用されてこなかった土壤や廃棄物として処分される汚泥等についても用いることができる。図 3.12 に造粒法の概略を示す。

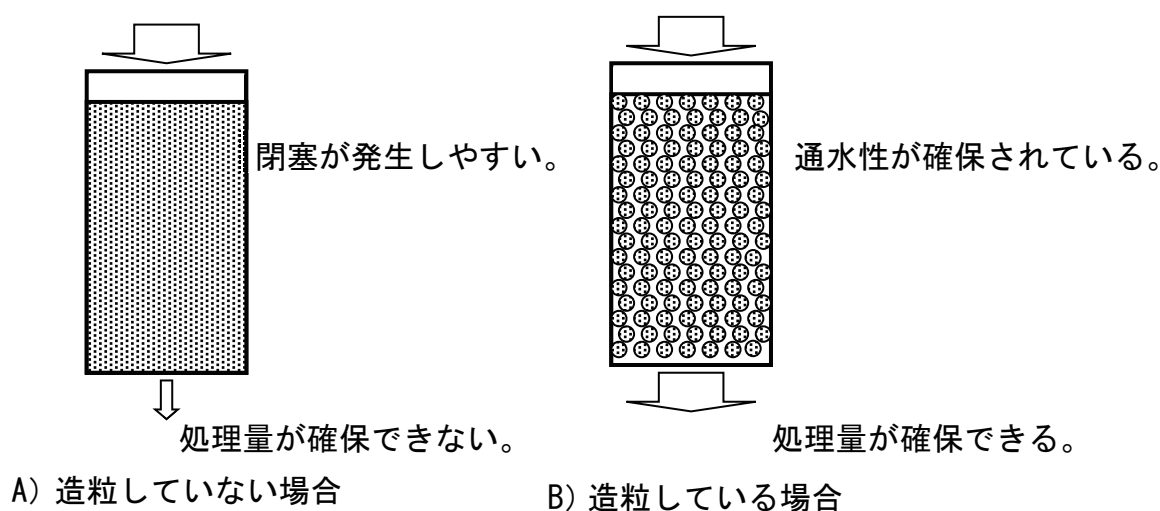


図 3.12 造粒法の概略図

### 3-2-4 土壤浸透法の課題とその対策

#### (1) 目詰まり対策

河川水や湖沼水などの水を浄化することを目的とした土壤浸透法では、除去困難な浮遊物質が含まれている。特にシルト等の無機性浮遊物質は、土壤層に直接流入すると目詰まりの原因となり、本来の機能を低減させることになる。多くは、前段に沈殿槽やろ過槽を設け、浮遊物質を十分に除去してから、対象水を土壤層に導入させている。

処理すべき水量を確保して寿命の伸ばすためには、無機性浮遊物質に限らず、有機性浮遊物質についてもあらかじめ除去することが望まれる。方法としては、沈殿槽を設けて物理的に分離する方法、ろ過槽を設けてろ材で分離する方法などが考えられる。凝集沈殿や浮上分離といった方法は、構造が複雑になり、環境水浄化法としては採用困難であるが、コストが低減でき、かつ運転維持管理

が容易となれば、検討の余地がある。また、敷地面積を確保できるのであれば、酸化池に代表される安定池など、構造上目詰まりといった問題がない方法も検討されるべき方法の一つである。

## (2) 使用土壌の改良、土壌以外の材料の利用

土壌浸透法の中の急速浸透法に用いる土壌には、通水性が求められる。そのため、今まではマサ土など通水性を持ち合わせた土壌が用いられてきた。しかしながらマサ土は、有機物やりんの吸着性は大きくなく、高い性能を発揮することができなかった。一方、黒ボク土などは有機物やりんを吸着する能力を持っているにも関わらず、通水性がなく、湿潤状態になると閉塞状態になり、本来持っている能力を発揮しないという問題点があった。今後、土壌浸透法の急速浸透法の性能を向上させるためには、土壌の改良が必要となってくる。例えば、前章であげた造粒法があげられる。また、通水性とともに強度を確保するため、焼結といった加熱加工などについても研究の余地がある。土壌以外の材料についても検討すべきである。特に廃棄物となっている地下水を原水とする浄水場から発生する汚泥には、鉄やアルミニウムなど、吸着剤として十分な能力を持った物質が多く含まれている。このような廃棄物を使用することによって循環型社会への一助となると考えられる。

### 3-2-5 土壌浸透法の研究動向と課題

土壌浸透法の緩速浸透法は、1531年のドイツの Bunzlau、1650年のスコットランドの Edinburgh の例まで遡り<sup>6</sup>、およそ500年の歴史を有する。1850年代から1870年代のイングランドで、また1880年代には米国の多数の都市において、廃水が灌漑に使用されてきた。またオーストラリアで大規模な同法が1897年に設置されている。米国においては稼働中の同法は800以上存在する<sup>6</sup>。

表面流下法は、これもイングランド、オーストラリア、米国などで採用されており、イングランドやオーストラリアでは草地ろ過という名称で知られている。また、米国では約50の都市排水用表面流下法が稼働し、工場廃水処理としても採用実績がある<sup>6</sup>。

このように米国では歴史的に土壌浸透法が採用されており、土壌浸透法の経済性についても1979年に Crites ら<sup>9</sup>が検討している。また1980年代には食品加工工場廃水<sup>10</sup>、灌漑施設への適用<sup>11</sup>などについて検討がなされ、さらに石炭ガス

化行程からの廃水<sup>12</sup>についても研究が進められている。これらの多くは緩速ろ過法であるが、急速ろ過法についても含まれている。

一方、日本においては1970年代から土壤浸透法の研究がなされるようになった。処理対象は下水<sup>13</sup>、生活雑排水<sup>14,15</sup>、農薬除去<sup>16</sup>、畜産廃水<sup>17</sup>、工場廃水<sup>18</sup>など様々であり、土壤浸透法の種類も様々であった。また、土壤浸透法による除去機構解明や効率的な利用についても研究が行われた<sup>19,20,21,22,23,24</sup>。

その中でも土木研究所の長谷川ら<sup>25</sup>が、下水処理水や畜産廃水処理水に含まれる窒素やりんといった栄養塩類除去を目的とした土壤浸透法の高度処理への適用について研究を進めた。また、神奈川県工業試験所の大森正男ら<sup>26</sup>が染色工場廃水の処理水に含まれる窒素やりんの除去に土壤浸透法の適用について研究を行っている。

しかしながら、土壤浸透法の採用が盛んな米国やオーストラリアと違い、日本は狭大な土地という条件もあり、次第に急速ろ過法が主流となっていった。1980年代後半に入り、若月利之ら<sup>27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42</sup>が種々の土壤や材料を層状またはブロック状に配置した急速ろ過法の一つである多段土壤層法を開発し、下水の高度処理による窒素やりんの除去、有機物や農薬成分までの除去に取り組んだ。また対象水は下水処理水だけでなく河川水までに及んだ。

1990年に入り、菅原正孝ら<sup>43,44</sup>が河川水や下水処理水、畜産廃水処理水などを対象とした急速ろ過法の研究と機構解明に取り組み、2003年頃から、ろ過材にこれまで使用してきたマサ土だけでなく、火山灰土の黒ボク土や赤玉土、浄水汚泥などを用いることも検討し、また、通水性を高めて高速処理を可能とするため、土壤の造粒方法についても研究し、一定の成果を得た<sup>45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89</sup>。主に処理対象としたのは、難分解性有機物やりんである。後に路面廃水にも対象の範囲を広げている。濱崎は同研究の共同研究者として関わってきた。

2000年頃からは、和田桂子ら<sup>90,91,92,93,94,95</sup>が河川水のりんを除去する目的で火山灰土を用いた急速ろ過法の開発と検証を行った。やがて、同研究から路面排水への適用につなげている。

2004年頃には、生地正人ら<sup>96,97</sup>が傾斜土壤システムを開発し、生活雑排水への適用について考察している。同システムは、土壤を浸透させるのではなく、土壤層を傾斜させ、その表面を流下させる方法であり、表面流下法の一つであ

る。

このように河川の直接浄化や畜産廃水処理水の処理に適用事例があるが、次の点において本研究の独自性がある。これまで、土壌浸透法に用いる土壌については、種々用いられているが、火山灰土のりんの吸着性に着目し、複数の火山灰土については研究されていない。また、土壌浸透法に用いる土壌の造粒については、前述の菅原らの研究で検討は行われているが、最終的に本研究で採用したセメントを混練させて造粒する方法については検討していない。このように本研究では、この土壌浸透法にこれまで用いられてこなかった火山灰土や新たな造粒方法の検討をしている点において独自性がある。

### 3-3 土壌浸透法用浄化材の開発

#### 3-3-1 目的

土壌浸透法に求められる浄化材は、りんや有機物の吸着性に優れ、かつ通水性と耐水性を兼ね備えていることである。このようなことから、火山灰土や浄水汚泥を対象に、透水性と耐水性を確保するために加熱加工や造粘材の添加の実験を行った<sup>54, 55, 67</sup>。その結果、栃木県産の火山灰土である赤玉土や鹿沼土の難生分解性有機物質の一つであるフルボ酸の吸着係数は、加熱温度が 200℃及び 400℃で低下したが、600℃では上昇し、加熱しなかった時の吸着係数と同等程度になった。このことから浄化材として使用可能な加熱領域があることがわかった。なお、ここでフルボ酸を用いたのは、生分解による除去を排除し、有機物の吸着能を見極めることが容易であることから採用した。また、一部の浄化材については、加熱をしてもりんや有機物の吸着性が損なわれず、耐水性を得ることが確認できた。しかしながら、未だ素材ごとの最適な加熱温度や加熱による吸着性の変化の原因など不明なことが多いことから、本研究では、加熱温度による吸着性の変化とともに、それぞれの素材の組成を詳細に分析し、吸着性と素材組成の関係について検討を行った（実験 3-1）。

また、上述の実験でフルボ酸の吸着には、火山灰土の赤玉土や鹿沼土、浄水場で発生する脱水汚泥が有効であることがわかったが、土壌浸透法の浄化材には通水性と耐水性が求められるが、造粒に必要な加熱や造粘材添加によってこれらの問題が解決する可能性もわかった。とりわけ加熱加工では、600℃から 800℃付近でも加熱をしない場合と大差のない吸着性能を得たこと、アルミニウムを多く含む鹿沼土が、鉄が多く含む赤玉土よりも加熱加工による吸着性能の

変動が小さいことなどがわかった。このようなことから鉄とアルミニウムの存在比が加熱加工による吸着性能に大きく関わっていると判断し、鹿沼土にアルミニウムと鉄を人工的に加え、吸着性能の変化を確かめることを目的とする実験を行った（実験 3-2）。

上述の実験（実験 3-1 及び 3-2）は回分式実験であるが、実際の土壤浸透法は通水しており、より実証に近いカラムを用いた通水実験を行った（実験 3-3）。なお、同実験では、ろ過速度の違いによる除去の影響を確認する実験（実験 3-3-1）と上述の実験で得られた加熱による影響を確認する実験（実験 3-3-2）を行った。また、これまで検討してこなかった火山灰土やその他土壤についても引き続き実験を行った（実験 3-4）。

このような実験の結果を踏まえ、土壤等を造粒する一般的な方法は、加熱・焼成することであるが、土壤を加熱することによって、吸着能が変化、特に低減する可能性があることがこれまでの実験で明らかになった。他方で土壤を浄化材とする場合は、通水性を確保しながら、物理的な強度も求められることから、まずは加熱する方法を改めて試みることにした（実験 3-5）。

これらの実験で、加熱による吸着能の低下が見られることから、安価な造粒方法を検討し、セメントを用いることを検討することにした（実験 3-6）

### 3-3-2 汚泥・土壤の加熱による浄化材の開発（実験 3-1）

#### （1）実験方法

本研究に用いた試料は浄水汚泥 1 種と土壤 2 種の 3 種とした。浄水汚泥は地下水を水源とした大阪府交野市の浄水場で発生した汚泥で、無薬注のフィルタープレスによって脱水された脱水汚泥を使用した。土壤はホームセンターで市販していた栃木県産の赤玉土と鹿沼土を使用した。これら試料を選択したのは、これまでの研究<sup>54, 55, 67</sup>で、土壤浸透法の浄化材として実用可能性が大きいと判断された試料であり、さらに加熱加工による耐水性と造粒加工による通水性が確保できる素材であることも確認しているからである。以下、浄水汚泥、赤玉土及び鹿沼土と呼ぶ。

これら 3 種の試料を強熱減量などの分析に用いるマッフル炉によって、200 °C、400 °C、600 °C、800 °C 及び 1000 °C で 30 分間の加熱を行い、自然冷却させたものを用いた。対照として加熱なしの試料も含め 6 条件とした。

吸着試験は、図 3.13 に示すとおり、三角フラスコに一定量の模擬河川水に、



粒径を 2 mm 以下とした一定量の試料を入れ、十分に攪拌して 1 週間の馴致を行い、後に一定量のフルボ酸を添加、1 週間後の液相中のフルボ酸濃度を TOC 計 (SIEVERS Instruments, Inc. 製 TOC810 型) を用いて DOC で測定した。この値に加えて添加時とブランクの DOC から、ヘンリーの式が成立するという仮定から以下のようにして吸着係数を算出した。なお、模擬河川水は、炭酸水素ナトリウム  $71.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硫酸ナトリウム  $21.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硫酸ナトリウム  $10.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硫酸マグネシウム  $48.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、塩化マグネシウム  $31.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、塩化カルシウム  $48.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  の濃度になるよう超純水にそれぞれ溶解させ、希硫酸で pH を 7.65 に調整したものである。

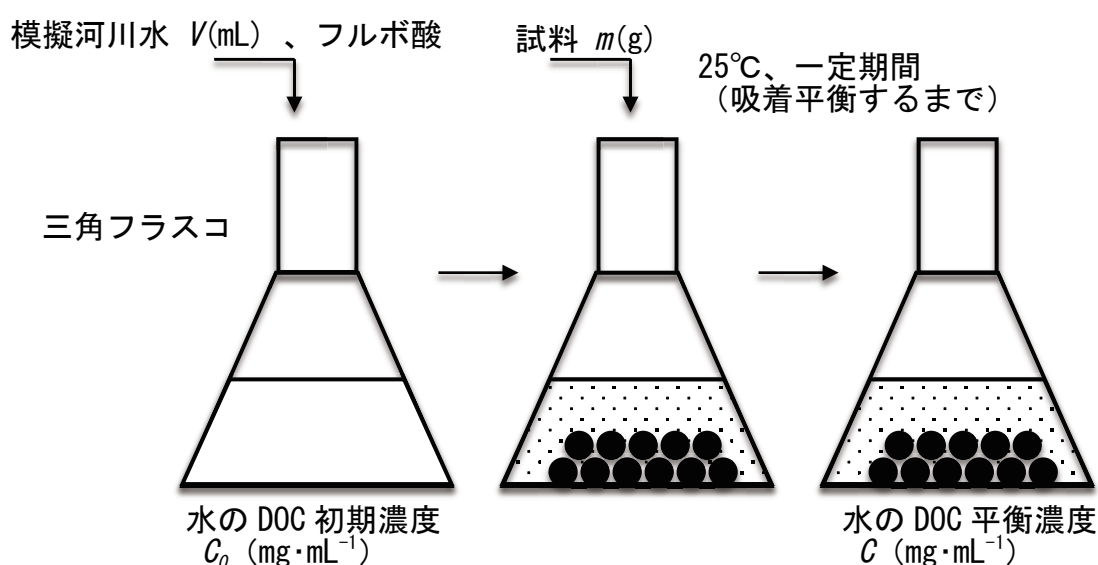


図 3.13 吸着係数  $K_d$  を求めるための回分式試験方法

三角フラスコ内の DOC 量  $M_0$  (mg) は次式で求めることができる。

$$M_0 = C_0 \times V \quad (\text{式 3.3})$$

吸着平衡後の三角フラスコ内の水の DOC 量  $M$  (mg) は次式で求めることができる。

$$M = C \times V \quad (\text{式 3.4})$$

試料に吸着した DOC 量  $M_c$  (mg) は次式で求めることができる。

$$M_c = M_0 - M \quad (\text{式 3.5})$$

試料  $m$  (g) 中に吸着された試料当たりの吸着量  $q_c$  ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) は次式で求めることができる。

$$q_c = \frac{M_c}{m} = \frac{V}{m} (C_0 - C) \quad (\text{式 3.6})$$

吸着係数  $K_d$  ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ) は次式で求めることができる。

$$K_d = \frac{q_c}{c} = \frac{V}{m} \left( \frac{C_0 - C}{c} \right) = \frac{V}{m} \left( \frac{C_0}{c} - 1 \right) \quad (\text{式 3.7})$$

除去率  $R$  (%) は次式で求めることができる。

$$R = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (\text{式 3.8})$$

試料の組成は、炭素、水素及び窒素については元素分析装置 (Parkin Elmer 製 2400 II 型)、並びにチタン、アルミニウム、けい素、カリウム、カルシウム、マンガン及び鉄については標準土壌試料に基づき、蛍光 X 線分析装置 (島津製作所製 EDX-900 型) で分析した。

## (2) 実験結果と考察

吸着試験の結果を図 2.2 に示す。浄水汚泥、赤玉土及び鹿沼土のいずれの試料についても加熱なしの場合の吸着係数が高く、加熱することによって低下し、600～800 °C の範囲で上昇、800～1000 °C で再び低下するという傾向となった。この内、鹿沼土については他の素材と同様の傾向は見られるものの、加熱による急激な吸着係数の低下はなかった。これは、これまでの実験<sup>54, 55, 67</sup>でも同様の結果であった。浄水汚泥及び赤玉土は、加熱なしの場合には鹿沼土よりも高い吸着係数であったが、加熱の影響が大きかったことがわかった。ただし、800 °C 付近で良好な吸着係数を得られたことから、加熱加工に適した温度であると判断できる。

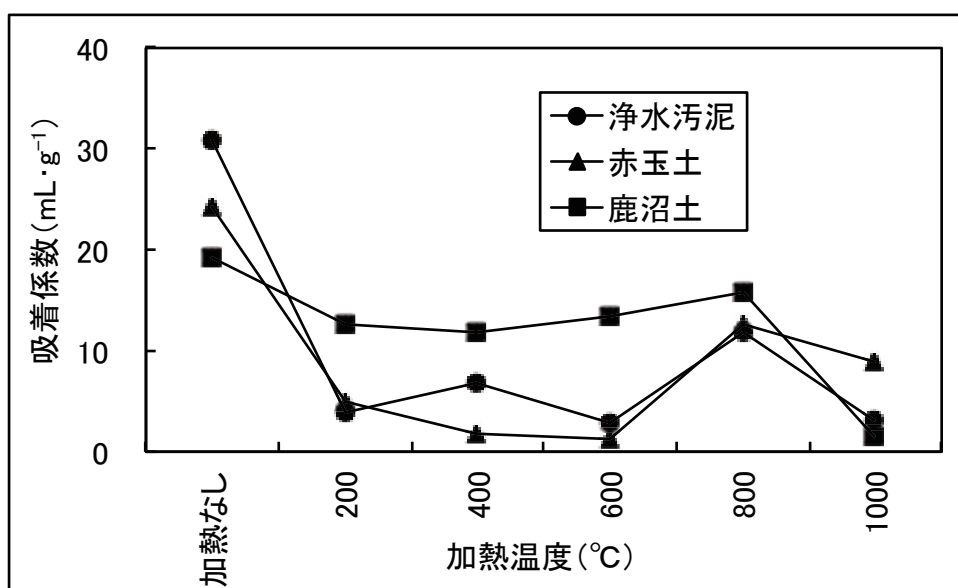


図 3.14 加熱温度の違いによるフルボ酸の吸着係数の変化

試料の組成を表 3.1、図 3.15～図 3.17、表 3.2 及び図 3.18 に示す。表 3.1 をグラフにしたのが図 3.15～図 3.17 である。表 3.1 及び図 3.15～図 3.17 が示すように、いずれの試料についても加熱によって、炭素、水素及び窒素の低下が見られた。炭素や水素については、加熱によって二酸化炭素や水蒸気となって試料から分離したと考えられ、また、酸化が進んで酸素の割合が大きくなったものと考えられる。加熱による炭素、水素及び窒素の組成割合の変化とフルボ酸の吸着係数が 600～800 °C で上昇したことの関係は不明であるが、加熱による燃焼により、多孔質となって比表面積が上昇したことで吸着能が上昇し、一方、1000 °C 付近では吸着能に影響すると思われる鉄やアルミニウムの構造に変化があるなどして逆に吸着能が低下したと考えられる。

表 3.1 加熱温度の違いによる炭素、水素及び窒素の組成の変化

単位：%

| 加熱条件   | 浄水汚泥 |      |      | 赤玉土  |      |      | 鹿沼土  |      |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | 炭素   | 水素   | 窒素   | 炭素   | 水素   | 窒素   | 炭素   | 水素   | 窒素   |
| 200 °C | 0.96 | 3.10 | 0.13 | 2.41 | 2.57 | 0.28 | 0.34 | 2.80 | 0.10 |
| 400 °C | 0.85 | 2.33 | 0.09 | 1.64 | 2.29 | 0.20 | 0.28 | 2.55 | 0.06 |
| 600 °C | 0.38 | 1.50 | 0.06 | 0.83 | 1.53 | 0.17 | 0.20 | 1.96 | 0.06 |
| 800 °C | 0.21 | 0.82 | 0.05 | 0.84 | 0.95 | 0.12 | 0.09 | 1.17 | 0.04 |

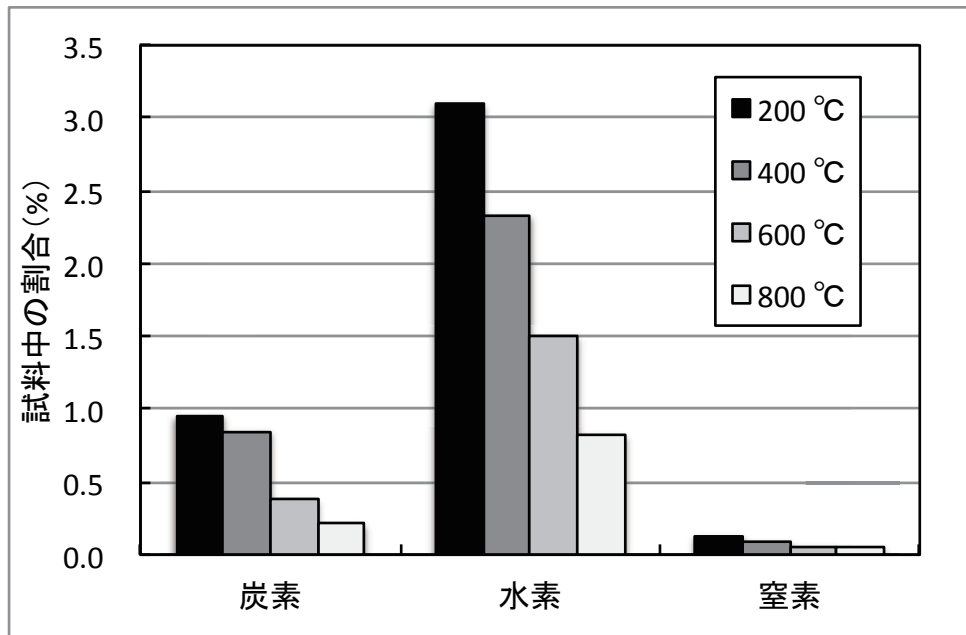


図 3.15 加熱温度の違いによる炭素、水素及び窒素の組成の変化（浄水汚泥）

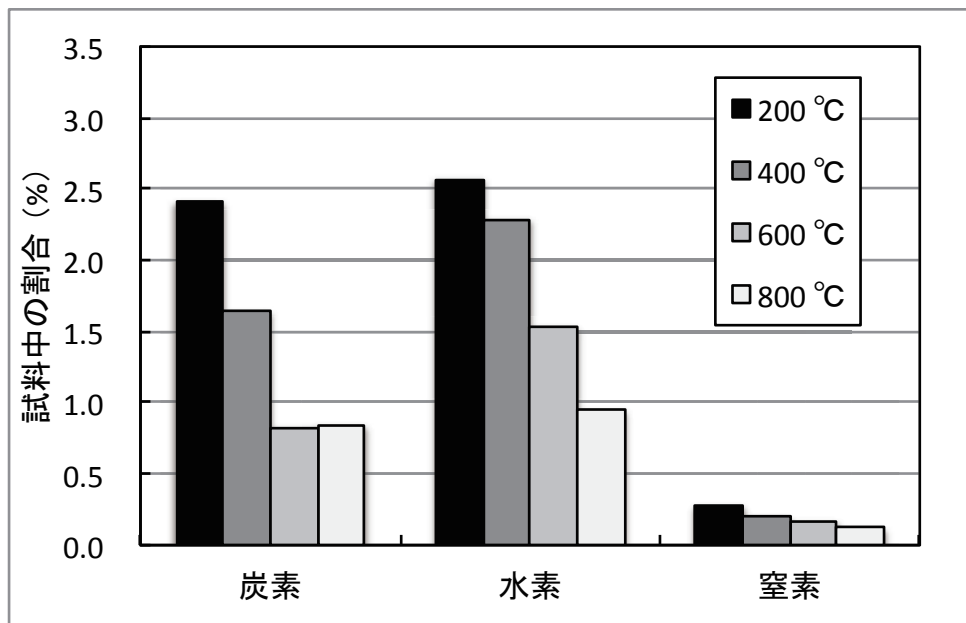


図 3.16 加熱温度の違いによる炭素、水素及び窒素の組成の変化（赤玉土）

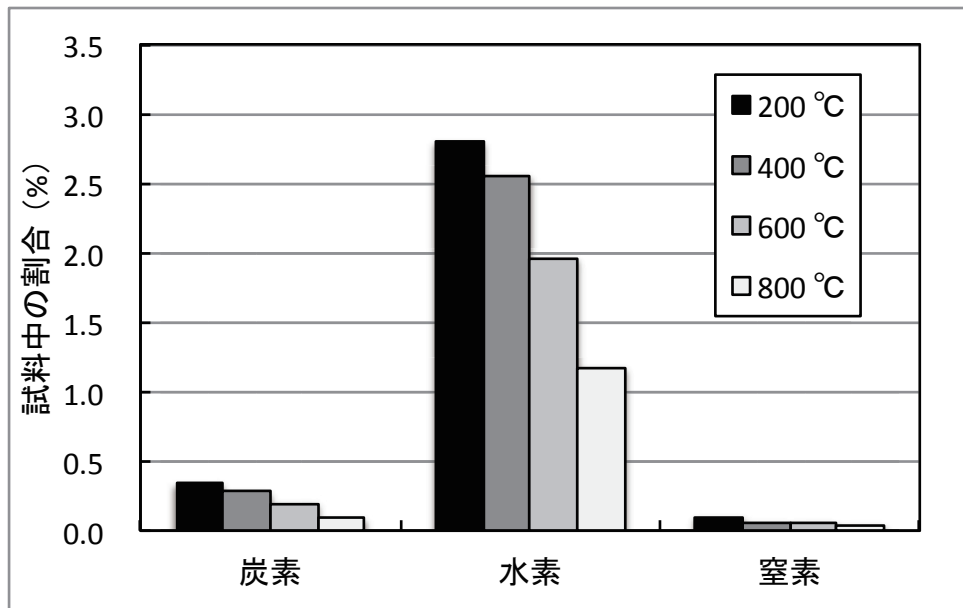


図 3.17 加熱温度の違いによる炭素、水素及び窒素の組成の変化（鹿沼土）

表 3.2 及び図 3.18 に試料中に含まれる 7 種の元素の割合を示す。表 3.2 は組成割合の範囲を、図 3.18 は平均値を示している。浄水汚泥中には他と比較して鉄とマンガンの濃度が高く、アルミニウム、けい素の濃度が低い。赤玉土と鹿沼土を比較すると、鹿沼土のほうが、アルミニウム、けい素の濃度が高く、鉄の割合が低いという結果となった。しかし、加熱による変化は、炭素、水素及び窒素の割合の減少に伴う変化であり、大差はない。いずれにしても鉄とアルミニウムが多く含むことから、フルボ酸の吸着に影響する因子であると考えられる。



表 3.2 実験に用いた素材のチタン、アルミニウム、けい素、カリウム、カルシウム、マンガン及び鉄の組成

(加熱なし、200 °C、400 °C、600 °C及び800 °Cの範囲)

単位：%

| 元素 | 浄水汚泥      | 赤玉土       | 鹿沼土       |
|----|-----------|-----------|-----------|
| Ti | N.D       | 0.6-0.7   | 0.2-0.3   |
| Al | 5.1-6.3   | 8.1-12.9  | 13.4-16.8 |
| Si | 6.1-7.3   | 10.9-15.9 | 13.7-16.6 |
| K  | 0.1-0.2   | 0.6-0.8   | 0.3-0.4   |
| Ca | 0.5-0.6   | 0.3-0.5   | 0.5-1.0   |
| Mn | 1.5-1.7   | 0.1-0.2   | 0.1       |
| Fe | 22.2-24.2 | 6.4-7.8   | 2.1-2.3   |

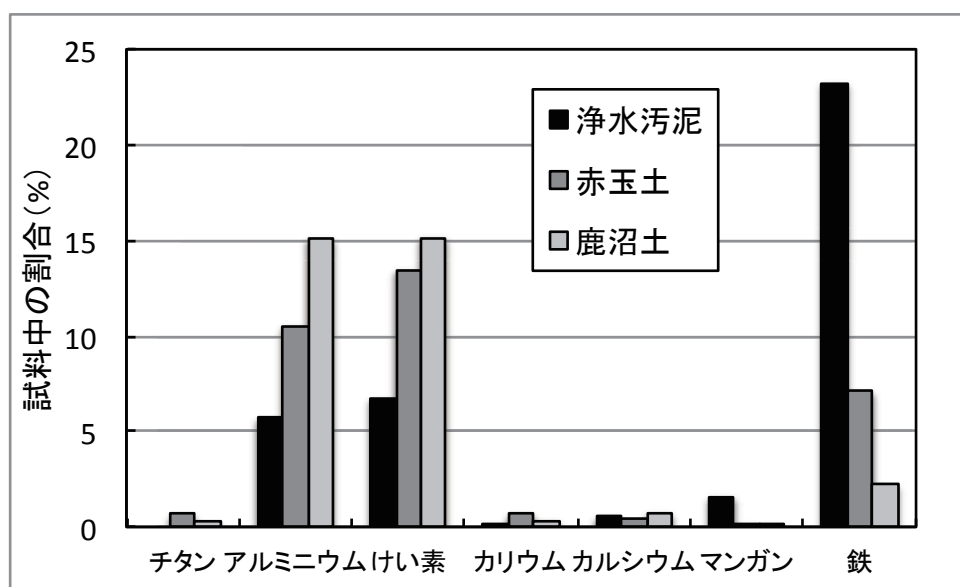


図 3.18 実験に用いた素材のチタン、アルミニウム、けい素、カリウム、カルシウム、マンガン及び鉄の組成 (加熱なし、200 °C、400 °C、600 °C及び800 °Cの平均値)

### (3) まとめ

鉄やアルミニウムは、フルボ酸の吸着性に影響を与える物質と考えられるが、アルミニウムの濃度が高かった鹿沼土は、加熱温度によって大きな影響はないが、鉄の濃度が高かった浄水汚泥や赤玉土は、加熱しない場合におけるフルボ酸の吸着が最も大きく、200 °Cから 600 °Cの範囲で一旦吸着係数が減少するも

の、600 °Cから 800 °Cの範囲で再び上昇し、800 °Cから 1000 °Cで減少するという結果となった。このように加熱温度による影響が鹿沼土よりも大きいことがわかった。ただし、加熱なしの場合は、鉄の濃度が高いと高い吸着係数を得られることもわかった。

### 3-3-3 加熱した浄化材中の鉄・アルミニウム濃度の違いによるフルボ酸及びりん酸の吸着性能（実験 3-2）

#### （1）実験方法

フルボ酸については、ホームセンターなどで園芸用として市販されている鹿沼土に、酸化アルミニウムもしくは酸化鉄を重量比で 10 %、20 %加えたものと加えないものを対象に、200 °C、400 °C、600 °C、800 °C、1000 °Cに加熱したものと加熱しないものについて回分式の吸着性能試験を行った。ここでは、酸化アルミニウムを添加した実験を Run-1、酸化鉄を添加した実験を Run-2 としている。次にりん酸については、同じ鹿沼土と酸化アルミニウムもしくは酸化鉄を重量比で 10 %加えたものと加えないものを対象に Run-1 及び Run-2 と同じ加熱条件で回分式の吸着性能試験を行った。これを Run-3 としている。吸着性能試験方法は、過去の実験と同様である。また、実験 3-1 と同じ蛍光 X 線分析装置で、アルミニウム及び鉄の濃度を測定しており、表 3.3 及び表 3.4 のとおりとなった。

表 3.3 土壤中の Run-1 のアルミニウム濃度と Run-2 の鉄濃度

| Run-1    |            | Run-2    |       |
|----------|------------|----------|-------|
| 添加割合     | アルミニウム (%) | 添加割合     | 鉄 (%) |
| 0 w/w %  | 13.4       | 0 w/w %  | 2.4   |
| 10 w/w % | 20.2       | 10 w/w % | 13.2  |
| 20 w/w % | 24.3       | 20 w/w % | 21.9  |

表 3.4 Run-3 における土壤中のアルミニウム及び鉄の濃度

| 試料名                     | アルミニウム (%) | 鉄 (%) |
|-------------------------|------------|-------|
| 鹿沼土                     | 15.8       | 2.5   |
| 鹿沼土+酸化鉄 (10 w/w %)      | 12.9       | 13.2  |
| 鹿沼土+酸化アルミニウム (10 w/w %) | 20.2       | 1.9   |

## (2) 実験結果と考察

Run-1 及び Run-2 の結果を図 3.19 及び図 3.20 に示す。酸化アルミニウムを添加した Run-1 では、いずれのアルミニウム濃度であっても加熱なしと 800 °C で高い吸着を示し、400 °C 付近と 1000 °C で低下した。しかし、酸化鉄を添加した Run-2 では、加熱をした場合、いずれの濃度であっても大差がなく、600 °C 付近以降は低下している。酸化鉄を添加すると加熱をしない場合では、吸着係数が低下するという結果となった。酸化アルミニウムを添加していない Run-1 の浄化材と鉄を添加していない Run-2 の浄化材の結果が違うのは、調達した鹿沼土が違うためである。

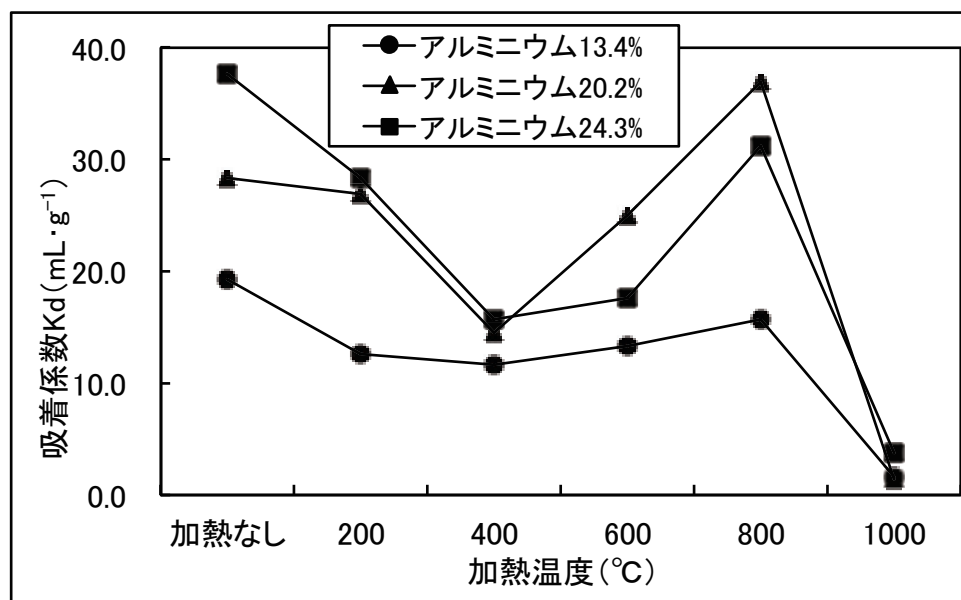


図 3.19 Run-1 (酸化アルミニウム添加) の結果

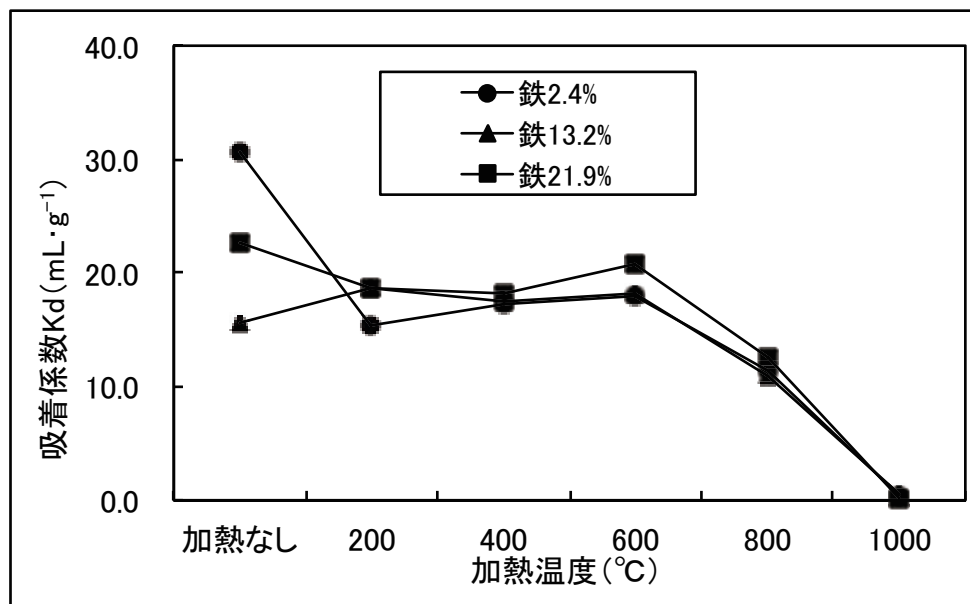


図 3.20 Run-2 (酸化鉄添加) の結果

浄化材に含まれる酸化アルミニウムは、濃度が上昇すると吸着性能が加熱なしの場合と 800 °C 付近で上昇することがわかった。この結果により、フルボ酸の吸着には、酸化アルミニウムが大きく関与していることがわかった。一方、酸化鉄は、加熱をしない場合、添加割合が増加することによって吸着係数が低下し、加熱をした場合は、吸着係数は酸化鉄の濃度に影響がないことがわかった。このようなことから、加熱加工する場合は、酸化アルミニウム濃度が高い浄化材を探索する必要があることがわかった。また、Run-1 及び Run-2 のいずれの場合も、加熱することにより水中の pH が上昇した。pH の上昇は吸着係数の低下を引き起こす一因となるが、Run-1 の 800 °C 付近の吸着係数の向上は、注目すべき点である。

次に Run-3 の結果を図 3.21 に示す。鹿沼土の場合、加熱温度 400°C 付近で高いりん酸の吸着係数を示し、酸化アルミニウムを添加した鹿沼土は、200°C から 400°C で高い吸着係数を示した。一方、酸化鉄を添加した鹿沼土は、加熱なしで高い吸着係数を示すものの、加熱すると低い吸着係数となった。600°C 以上の加熱の場合は、いずれの土壌についても低い吸着係数となった。

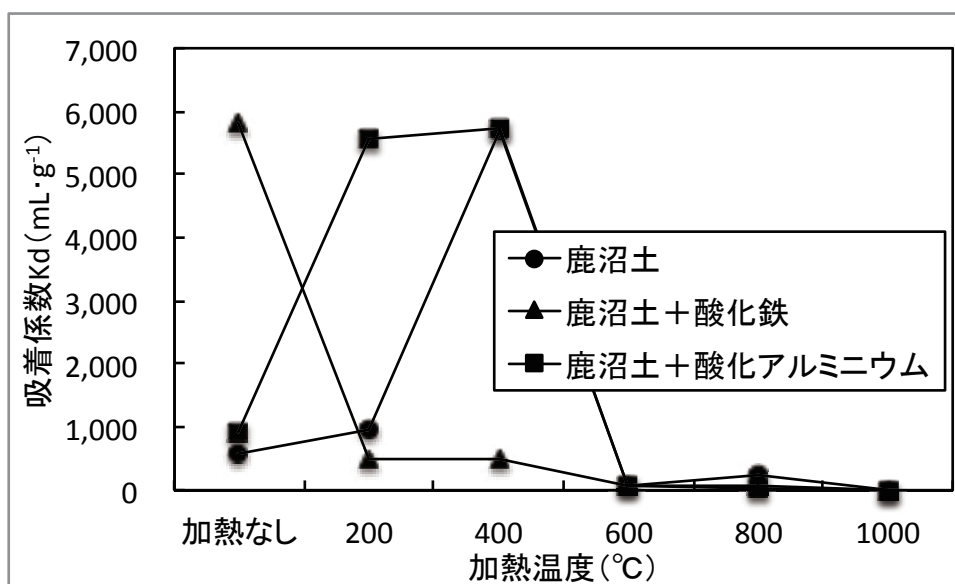


図 3.21 Run-3 (りん酸吸着係数) の結果

### (3) まとめ

難分解性有機物を除去することを目的とした土壌浸透法では、浄化材を選択する条件としてアルミニウム濃度が高く、加熱加工を必要とする場合は、800 °C 程度の加熱が最適であることがわかった。りんの除去を目的とした場合は、加熱加工をしないか、または鉄を多く含む土壌を選択することが望ましいことがわかった。

### 3-3-4 ろ過速度の違いによる実験と加熱した浄化材との比較実験 (実験 3-3)

#### (1) 実験方法

浄化材実験については、ろ過速度の違いによる実験と加熱した浄化材との比較実験の 2 種を行った。それぞれの実験を「ろ過速度実験」及び「加熱比較実験」とする。どちらの実験も図 3.22 及び図 3.23 に示す実験装置で行った。カラム内径は 25 mm、カラム高さは 200 mm で、この中に浄化材を 100 mm の高さで投入した。よって浄化材の体積は 49 cm<sup>3</sup> である。浄化材はいずれも 1-2 mm にふるい分けしたものを使用している。原水は、大阪産業大学南側に位置する鍋田川の水を採水して用いた。鍋田川は寝屋川水系に位置する環境基準 D 類型の一級河川で、近年、環境基準を達成している河川である<sup>98</sup>。

原水容器に投入された原水は、定量ポンプによって一定速度で浄化材の入ったカラムに流される。カラムは、入口出口以外は密閉されており、あらかじめ



浄化材と同じ高さまで原水が入れられており、定量ポンプによって投入された原水と同量の処理水が出口から排出される仕組みとなっている。排出された処理水は、処理水容器に貯留され、一定期間の混合採水として分析を行った。なお、「ろ過速度実験」及び「加熱比較実験」とも2日以上通水して馴養した後、採水を行っている。ただし、この期間で有機物やりんの吸着について破過しておらず、破過する前段の吸着能について実験している。

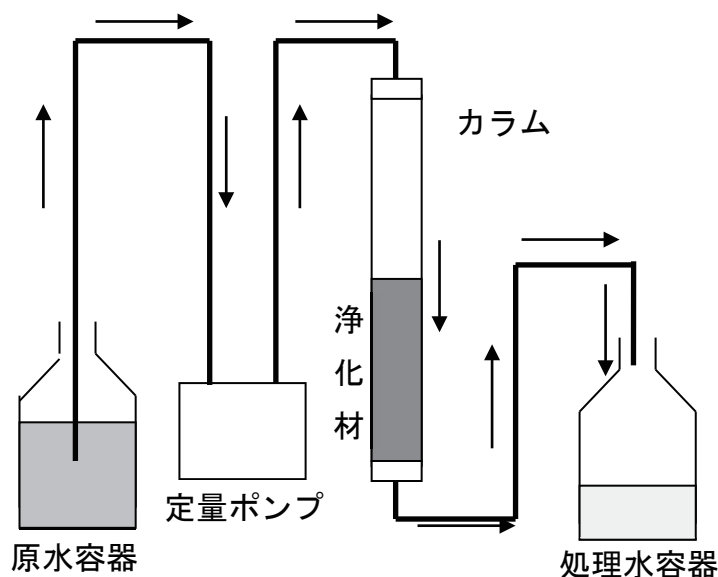


図 3.22 浄化材実験装置概略図



図 3.23 浄化材実験装置写真

(ア) ろ過速度実験

ろ過速度実験では、ボラ土、炭、瓦及び赤玉土の4種の浄化材を対象に、通

水速度を  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  (Run-1) 及び  $4.90 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  (Run-2) で行った。なお、投入質量は、ボラ土が 35.3 g、炭が 7.5 g、瓦が 45.2 g、赤玉土が 32.2 g である。ここで瓦を用いたのは、実用化に向けて、廃棄物となっている製作過程で発生する廃瓦を土壌浸透法への適用の可能性を探るために実験対象とした。

測定項目は、pH、EC、ORP、TOC 及び全りんである。これは、TOC は有機炭素量で、河川水の有機物濃度が低いことから、BOD や COD では精度が期待できないため、TOC とした。また、りんの除去は期待できるが窒素の除去は期待できないため、全りんのみの測定とした。

実験に供した河川水の水質を表 3.5 に示す。

表 3.5 ろ過速度実験に供した河川水の水質

| 実験 No. | 原水の濃度 |                                       |          |                                       |                                       |
|--------|-------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|        | pH    | EC ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | ORP (mV) | 全りん ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |
| Run-1  | 7.22  | 0.37                                  | 163      | 2.944                                 | 4.01                                  |
| Run-2  | 7.71  | 0.35                                  | 226      | 0.197                                 | 3.96                                  |

#### (イ) 加熱比較実験

火山灰土を  $600\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  程度に加熱しても吸着能が低下しない場合があることが実験 3-1 で判明したことから、一部の材料について改めて加熱して吸着能の比較を行った。加熱することにより、物理的強度が向上し、寿命などが向上するという利点があるためである。

本研究では、表 3.6 に示す浄化材について検討した。なお、炭及び瓦はすでに加熱した材料であることから非加熱のみとし、青土、浅黄土及び黒土は、非加熱では閉塞することから加熱のみで比較した。青土及び浅黄土は瓦の原料となる堆積土壌である。赤玉土、鹿沼土、黒土及びボラ土は火山灰土である。炭は椰子柄を原料としたマレーシア産の炭であり、国内産の炭と比較して安価であったため実験に供した。加熱はマッフル炉で  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 、30 分行い、自然冷却とした。測定項目は、pH、EC、TOC 及び全りんとした。

実験に供した河川水を表 3.7 に示す。浄化材の種類が多かったため、実験を 2 分割しており、ボラ土、赤玉土、鹿沼土の実験を Run-3、炭、瓦、青土、浅黄土、黒土の実験を Run-4 とした。

吸着能を評価する上で、汚濁物の吸着面となる吸着材の比表面積が影響する

ことから BET 法によって比表面積を測定した。比表面積は、火山灰土と炭が高く、特に鹿沼土と炭は高い値となった。また加熱をすることで鹿沼土の場合は70%程度増加した。これは加熱による有機物の燃焼で孔が増加したと思われる。同様にボラ土も上昇しているが、赤玉土は減少している。

表 3.6 加熱比較実験で検討した浄化材の種類、投入質量と比表面積

| 浄化材       | 投入質量 (g) | 比表面積 ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|-----------|----------|---|
| ボラ土 (非加熱) | 40.7     | 5.07                                      |
| ボラ土 (加熱)  | 26.0     | 25.12                                     |
| 赤玉土 (非加熱) | 31.0     | 34.01                                     |
| 赤玉土 (加熱)  | 29.3     | 25.61                                     |
| 鹿沼土 (非加熱) | 18.8     | 111.83                                    |
| 鹿沼土 (加熱)  | 19.6     | 191.83                                    |
| 炭 (非加熱)   | 14.6     | 170.55                                    |
| 瓦 (非加熱)   | 43.6     | 0.31                                      |
| 青土 (加熱)   | 43.7     | 4.43                                      |
| 浅黄土 (加熱)  | 43.0     | 14.35                                     |
| 黒土 (加熱)   | 33.1     | 4.38                                      |

表 3.7 加熱比較実験に供した河川水の水質

| 実験 No. | 濃度  |  |  |  |
|--------|-----|--|--|--|
|        | pH  | EC<br>( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
| Run-3  | 8.1 | 0.25                                       | 0.173                                      | 3.31                                       |
| Run-4  | 8.1 | 0.30                                       | 0.191                                      | 2.88                                       |

## (2) 実験結果と考察

### (ア) ろ過速度実験

ろ過速度実験の結果を表 3.8、表 3.9、図 3.24 及び図 3.25 に示す。表 3.8 及び表 3.9 はろ過速度  $2.45 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  (Run-1) と  $4.90 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  (Run-2) における測定結果をとりまとめた表で、図 3.24 及び図 3.25 は、ろ過速度  $2.45 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  (Run-1) と  $4.90 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  (Run-2) における全りん及び TOC の除去率を比較したグラフで

ある。

全りんの除去率は赤玉土が他の試料と比較して圧倒的に高い結果となったが、ろ過速度の違いに大差はなかった。一方、ボラ土と瓦はろ過速度が速いと除去率が低下した。炭は大差がないが低い除去率であった。TOCは赤玉土が最も高い除去率を示したが、3~4割程度であった。

表 3.8 ろ過速度実験の結果 (Run-1 : ろ過速度 2.45 m·day<sup>-1</sup>の場合)

| 浄化材<br>種類 | ろ液の濃度 |                           |          |                           |                           | 除去率     |         |
|-----------|-------|---------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
|           | pH    | EC (mS·cm <sup>-1</sup> ) | ORP (mV) | 全りん (mg·L <sup>-1</sup> ) | TOC (mg·L <sup>-1</sup> ) | 全りん (%) | TOC (%) |
| ボラ土       | 7.24  | 0.35                      | 162      | 2.272                     | 3.20                      | 22.8    | 20.2    |
| 炭         | 7.02  | 0.33                      | 164      | 2.712                     | 3.20                      | 7.9     | 20.2    |
| 瓦         | 7.11  | 0.3                       | 166      | 2.770                     | 3.31                      | 5.9     | 17.5    |
| 赤玉土       | 7.18  | 0.35                      | 168      | 0.476                     | 2.46                      | 83.8    | 38.6    |

表 3.9 ろ過速度実験の結果 (Run-2 : ろ過速度 4.90 m·day<sup>-1</sup>の場合)

| 浄化材<br>種類 | ろ液の濃度 |                           |          |                           |                           | 除去率     |         |
|-----------|-------|---------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
|           | pH    | EC (mS·cm <sup>-1</sup> ) | ORP (mV) | 全りん (mg·L <sup>-1</sup> ) | TOC (mg·L <sup>-1</sup> ) | 全りん (%) | TOC (%) |
| ボラ土       | 7.61  | 0.44                      | 232      | 0.174                     | 3.31                      | 11.5    | 16.4    |
| 炭         | 7.71  | 0.41                      | 227      | 0.180                     | 3.39                      | 8.7     | 14.4    |
| 瓦         | 7.85  | 0.39                      | 225      | 0.201                     | 3.38                      | -2.5    | 14.6    |
| 赤玉土       | 7.78  | 0.35                      | 224      | 0.032                     | 2.78                      | 83.7    | 29.8    |

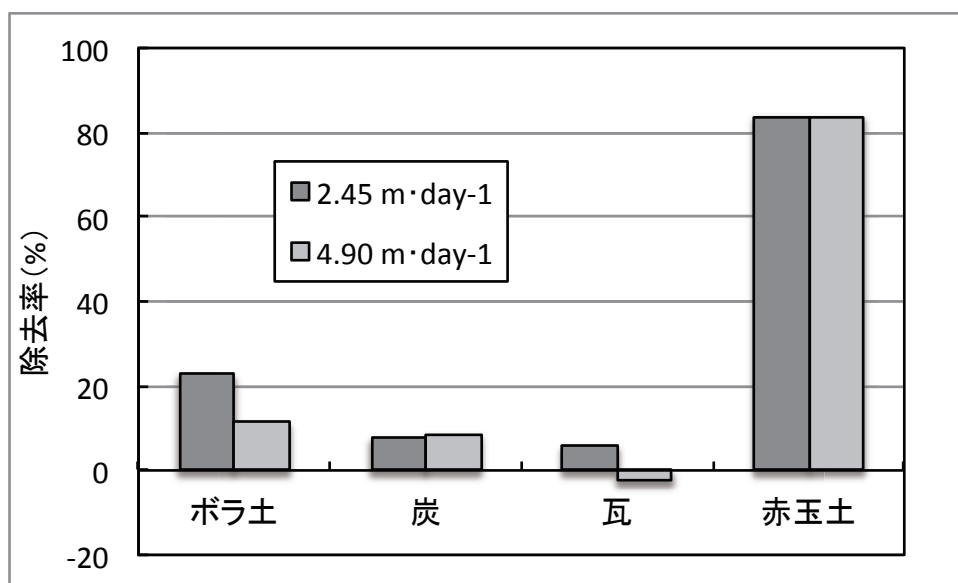


図 3.24 ろ過速度実験における全りんの除去率

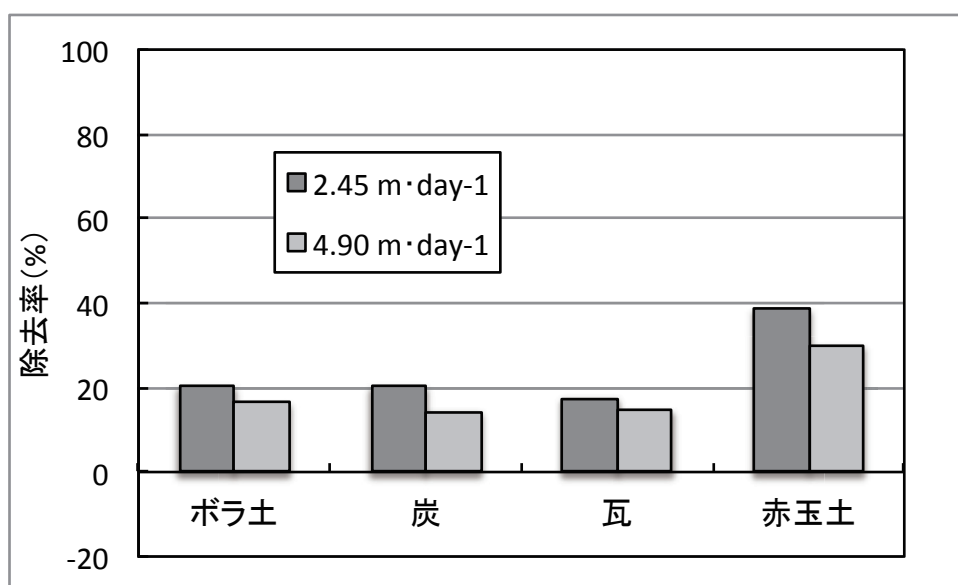


図 3.25 ろ過速度実験における TOC の除去率

#### (イ) 加熱比較実験

加熱比較実験の結果を表 3.10、図 3.26 及び図 3.27 に示す。なお、ろ過速度は  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  とした。表 3.10 は加熱比較実験で供した試料すべての結果を表にとりまとめたもので、図 3.26、図 3.27 は同一の試料で非加熱と加熱の結果があるボラ土、赤玉土及び鹿沼土の全りん及び TOC の結果を図にしたものである。

全りんについては、ボラ土は加熱すると急激に除去率が低下したが、赤玉土



と鹿沼土は大きな変化はなかった。一方、TOC については、ボラ土、赤玉土及び鹿沼土いずれも加熱すると除去率が低下した。

表 3.10 加熱比較実験の結果

| 実験 No. | 浄化材種類     | ろ液の濃度 |                           |                           |                           | 除去率     |         |
|--------|-----------|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
|        |           | pH    | EC (mS・cm <sup>-1</sup> ) | 全りん (mg・L <sup>-1</sup> ) | TOC (mg・L <sup>-1</sup> ) | 全りん (%) | TOC (%) |
| Run-3  | ボラ土 (非加熱) | 8.2   | 0.25                      | 0.026                     | 2.46                      | 84.9    | 25.6    |
|        | ボラ土 (加熱)  | 8.4   | 0.25                      | 0.149                     | 2.74                      | 14.0    | 17.3    |
|        | 赤玉土 (非加熱) | 7.3   | 0.21                      | 0.012                     | 1.38                      | 93.3    | 58.3    |
|        | 赤玉土 (加熱)  | 7.9   | 0.22                      | 0.012                     | 2.03                      | 93.3    | 38.8    |
|        | 鹿沼土 (非加熱) | 8.0   | 0.20                      | 0.012                     | 1.75                      | 93.3    | 47.3    |
|        | 鹿沼土 (加熱)  | 7.6   | 0.20                      | 0.007                     | 2.47                      | 95.7    | 25.4    |
| Run-4  | 炭 (非加熱)   | 8.2   | 0.29                      | 0.061                     | 2.46                      | 67.8    | 14.4    |
|        | 瓦 (非加熱)   | 8.2   | 0.30                      | 0.134                     | 3.00                      | 29.8    | -4.2    |
|        | 青土 (加熱)   | 8.0   | 0.28                      | 0.274                     | 2.91                      | -43.5   | -1.2    |
|        | 浅黄土 (加熱)  | 8.1   | 0.29                      | 0.243                     | 2.89                      | -27.2   | -0.6    |
|        | 黒土 (加熱)   | 8.1   | 0.29                      | 0.134                     | 1.79                      | 29.8    | 37.9    |

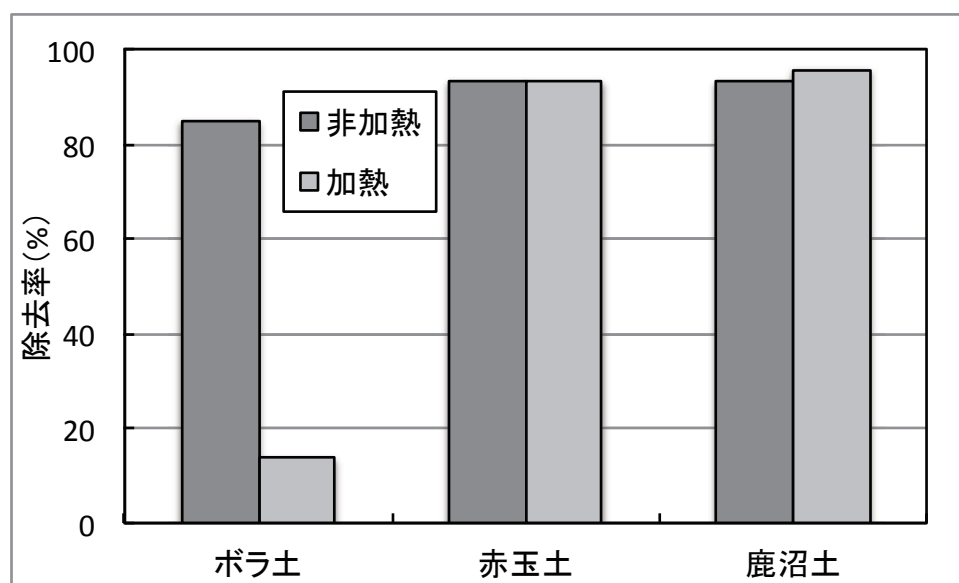


図 3.26 加熱比較実験におけるボラ土、赤玉土及び鹿沼土の結果 (全りん)

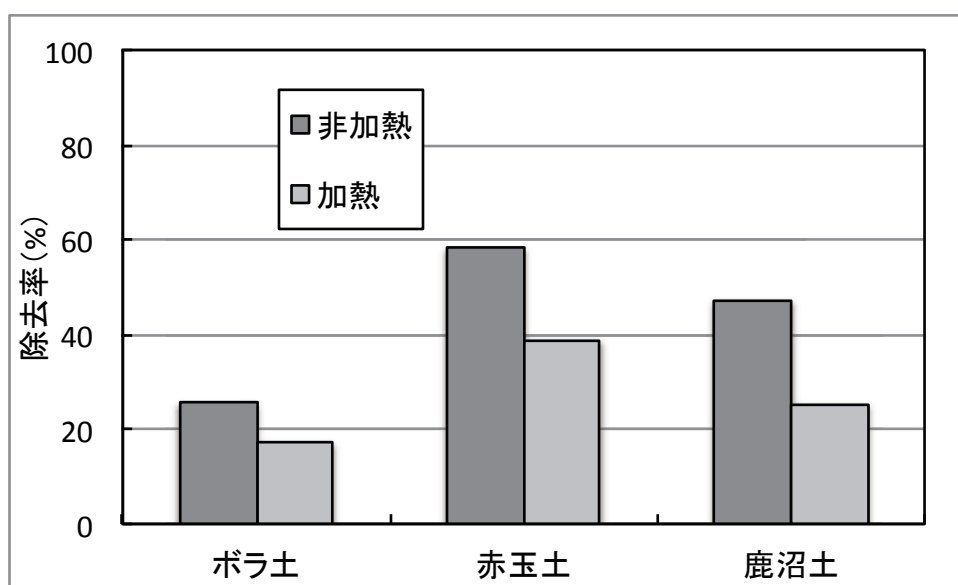


図 3.27 加熱比較実験におけるボラ土、赤玉土及び鹿沼土の結果 (TOC)

### (3) まとめ

#### (ア) ろ過速度実験

ろ過速度  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  の場合、pH、EC 及び ORP については原水とろ過水の間では大きな変化はなかった。りんについては、特に赤玉土は高い除去率を得ることができた。TOC においても赤玉土が約 40% の除去率で、4 種の試料の内、最も高い値であった。その他 3 種については、およそ 20% 程度の除去となった。以上のことから、ろ過速度  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  では、赤玉土が最も優れた浄化材という評価ができる。

ろ過速度  $4.90 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  の場合、ろ過速度  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  の場合と大差はなかった。りん及び TOC のいずれも赤玉土が最も優れた除去率となった。以上のことから、同条件であれば赤玉土が適していることがわかった。いずれの試料もろ過速度が速くなると除去率が下がる傾向にある。このような結果から、ろ過速度は低いことが除去率の上昇につながるということがわかった。

#### (イ) 加熱比較実験

りんの除去率は、加熱非加熱を問わず、赤玉土及び鹿沼土が高かった。前述のろ過速度実験の結果で特に良好でなかったボラ土であったが、今回の実験では、非加熱の場合、80% を超える除去率を得た。しかしながら、加熱すると除去率は急激に下がった。加熱によって、ボラ土に含まれている鉄の結晶構造が

変化し、吸着能が低下したものと考えられる。一方、赤玉土や鹿沼土は、鉄だけでなくアルミニウムによる吸着が良好で、加熱によって大きな変化が生じなかったのではないかと考えられる。火山灰土である黒土は予想していたよりも低い除去率であった。黒土は赤玉土や鹿沼土と比較して物理的強度が弱く、通水による崩壊も一因ではないかと考えられる。一方、瓦の原材料である青土や浅黄土は溶出が卓越してりんを除去することはできなかった。黒土と同様、物理的強度が弱いところも浄化材として利用を困難にしている。

### 3-3-5 浄化材の検討確認実験（実験 3-4）

#### （1）実験方法

実験装置の概要は、前述の図 3.22 のとおりであり、実験条件の詳細は表 3.11 に示す。ろ過速度は  $2.3 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  である。

表 3.11 浄化材の検討確認実験の条件

| 項目    |           | 数値                                  |
|-------|-----------|-------------------------------------|
| カラム内径 |           | 25 mm                               |
| カラム高さ |           | 200 mm                              |
| 浄化材高さ |           | 100 mm                              |
| 浄化材容量 |           | 49 cm <sup>3</sup>                  |
| 浄化材粒径 |           | 1-2mm                               |
| 投入重量  | リモナイト     | 31.9 g                              |
|       | 赤玉土       | 35.2 g                              |
|       | 瓦         | 51.5 g                              |
|       | 鹿児島赤ホヤ    | 25.6 g                              |
|       | 鹿児島シラス KA | 48.9 g                              |
|       | 鹿児島シラス T1 | 9.7 g                               |
|       | ゼオライト     | 39.6 g                              |
|       | 鹿児島ボラ土    | 40.3 g                              |
|       | 宮崎赤土      | 28.4 g                              |
|       | 宮崎ボラ土     | 35.0 g                              |
| 水温    |           | 24.9 °C                             |
| ろ過速度  |           | $2.3 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$ |

原水は、前述の実験 3-3 と同様に大阪産業大学南側を流れる 1 級河川の鍋田川から採取した河川水を用いており、カラムに充填した浄化材に 1 日程度通水して馴養させた後、3 時間ろ過した試料を処理水として測定に用いた。

実験に供した河川水の水質を表 3.12 に示す。

表 3.12 浄化材の検討確認実験に供した河川水の水質

| 原水の水質 |  |  |  |             |
|-------|--|--|--|-------------|
| pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) |
| 8.4   | 0.33                                       | 0.22                                     | 4.28                                     | 1.980       |

本実験に用いた浄化材のうち、火山灰土は、赤玉土、赤ホヤ、シラス、ボラ土、赤土で、火山由来の浄化材は熊本県産のリモナイトである。また、浄化材として用いられる人工ゼオライトも検討することにした。

## (2) 実験結果と考察

浄化材の確認検討実験の結果を表 3.13 及び図 3.28～図 3.30 に示す。表 3.13 は測定結果をすべて示した表で、図 3.28～図 3.30 は、実験に供した試料の全りん、TOC 及び濁度の除去率を降順に表した図である。

pH は、火山灰土や火山由来の浄化材では、原水の 8.4 から全体的に 6.9～8.3 に低下する傾向にあった。全りんの除去率が最も高かった浄化材は赤玉土の 82 % 程度であり、これまでの結果を裏付けるものである。また、リモナイト、赤ホヤ、ボラ土 (鹿児島産)、赤土といった浄化材も 77 % と高い除去率であった。瓦、シラス、ゼオライトによる除去は全くみられなかった。TOC の除去率が最も高かった浄化材は、赤ホヤで 70 % であった。続いてリモナイトが 59 % で、赤玉土、赤土、ボラ土 (宮崎産) も 27～32 % と比較的除去できた。全りんと同様、シラスやゼオライトはほとんど除去は期待できなかった。濁度は、全体的に高い除去率であったが、その中でも赤ホヤが 88 % と最も高かった。

表 3.13 浄化材の確認検討実験の結果

| 種類        | ろ液の濃度 |  |  |  |             | 除去率        |            |           |
|-----------|-------|--|--|--|-------------|------------|------------|-----------|
|           | pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) | 全りん<br>(%) | TOC<br>(%) | 濁度<br>(%) |
| リモナイト     | 6.9   | 0.30                                       | 0.05                                     | 1.74                                     | 0.658       | 77.3       | 59.3       | 66.8      |
| 赤玉土       | 7.1   | 0.28                                       | 0.04                                     | 2.91                                     | 0.535       | 81.8       | 32.0       | 73.0      |
| 瓦         | 8.1   | 0.33                                       | 0.22                                     | 4.40                                     | 0.830       | 0.0        | -2.8       | 58.1      |
| 鹿児島赤ホヤ    | 7.4   | 0.28                                       | 0.05                                     | 1.27                                     | 0.243       | 77.3       | 70.3       | 87.7      |
| 鹿児島シラス KA | 8.2   | 0.33                                       | 0.22                                     | 4.01                                     | 0.804       | 0.0        | 6.3        | 59.4      |
| 鹿児島シラス T1 | 8.3   | 0.32                                       | 0.22                                     | 4.22                                     | 0.937       | 0.0        | 1.4        | 52.7      |
| ゼオライト     | 8.0   | 0.32                                       | 0.26                                     | 3.89                                     | 0.852       | -18.2      | 9.1        | 57.0      |
| 鹿児島ボラ土    | 7.7   | 0.30                                       | 0.05                                     | 3.59                                     | 0.652       | 77.3       | 16.1       | 67.1      |
| 宮崎赤土      | 7.5   | 0.29                                       | 0.05                                     | 2.86                                     | 0.503       | 77.3       | 33.2       | 74.6      |
| 宮崎ボラ土     | 7.8   | 0.32                                       | 0.15                                     | 3.12                                     | 0.822       | 31.8       | 27.1       | 58.5      |

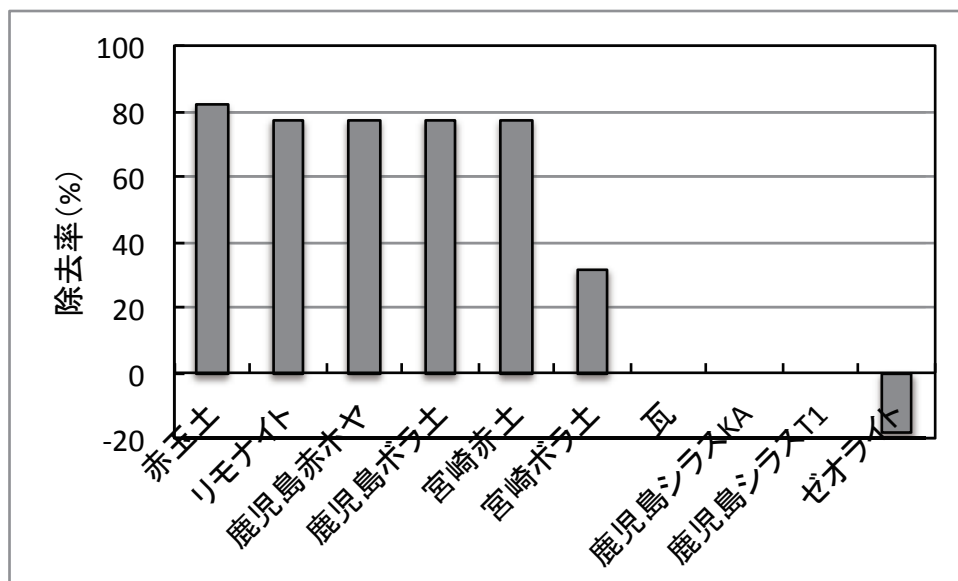


図 3.28 浄化材の検討確認実験結果（全りんの除去率）



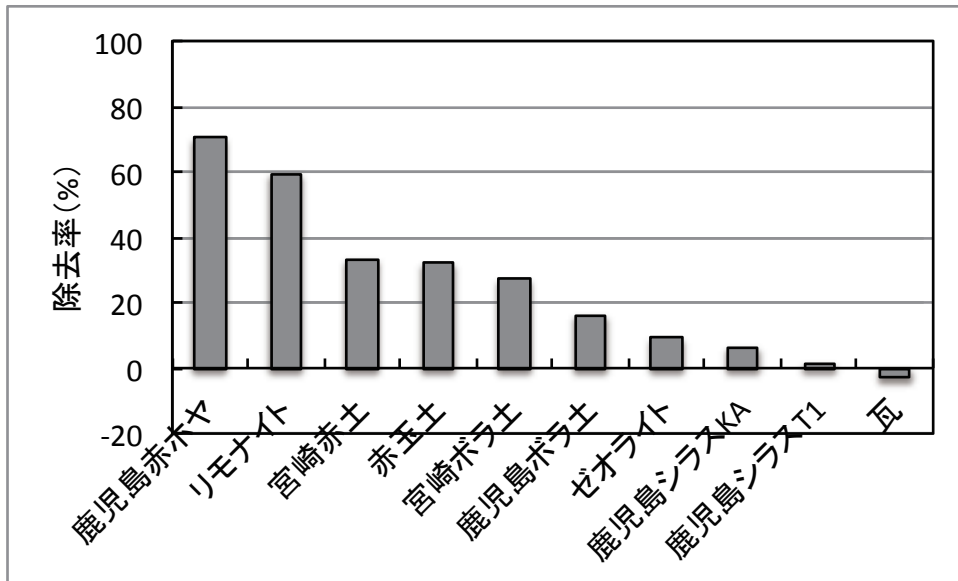


図 3.29 浄化材の検討確認実験結果 (TOC の除去率)

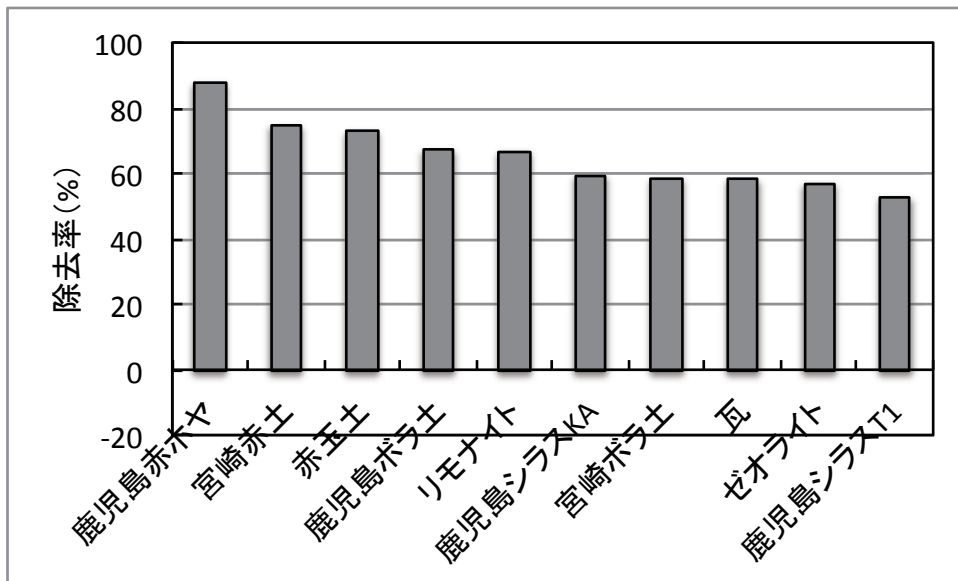


図 3.30 浄化材の検討確認実験結果 (濁度の除去率)

### (3) まとめ

以上の結果から、赤玉土だけでなく、赤ホヤ、ボラ土、赤土といった火山灰土で赤色のものは浄化材として用うる可能性があることがわかった。これは火山灰土中に含まれる鉄が有効に働いているものと考えられる。しかしながら、これまで利用してきた赤玉土と違い、赤ホヤ、ボラ土、赤土は粒状でないため、そのまま浄化材として利用できないことから、造粒方法を検討する必要がある。

造粒方法では加熱による方法をこれまで検討し、加熱温度を 600～800 °C であれば利用可能であることは実験 3-1 で明らかになったため、まずは加熱による造粒方法を廃瓦と混合することも含め、検討することにした。

### 3-3-6 加熱による浄化材造粒 (実験 3-5)

#### (1) 実験方法

本実験で検討することにした浄化材は、これまで有効な結果を得られた赤玉土と鹿沼土に加え、今回の研究で浄化能が確認できた鹿児島県産の赤ホヤと宮崎県産の赤土の 4 種を検討することにし、これら 4 種に瓦を混合させ、加熱したものの浄化能を確認することにした。加熱する方法は次のとおりである。

- 1) 赤玉土、鹿沼土、赤ホヤ、赤土及び瓦を乳鉢またはミル機で粉砕し、ふるいで分けて 1mm 以下のものを用いる。
- 2) 容量比で赤玉土、鹿沼土、赤ホヤ及び赤土をそれぞれ 70 %、瓦を 30 % で混ぜる。
- 3) 十分に混ぜた試料に蒸留水を適量入れて、粘土状にする。
- 4) 粘土状になった試料をマッフル炉で 800 °C、30 分間加熱する (800 °C となっているマッフル炉内に常温の試料を 30 分間投入する)。
- 5) 加熱後に自然冷却させ、粉砕し、ふるいで 1 mm 以上 2 mm 以下のものをふるい分けし浄化材として採用する。

浄化能の実験においては、実験装置の概要については、前述の図 3.22 のとおりであり、実験条件の詳細は表 3.14 に示す。ろ過速度は  $7.0 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  である。

原水は、1 級河川の鍋田川から採取した河川水を用いており、カラムに充填した浄化材に 1 日程度通水して馴養させた後、3 時間ろ過した試料を処理水として測定に用いた。実験に供した河川水の水質を表 3.15 に示す。本実験では、十分な浄化材量を確保することができなかつたため、これまでの実験で使用したカラムより小型のカラムを用いて実験した。そのため、カラム内径が小さくなったため、ろ過速度をこれまでと同程度に小さくすることができず、 $7.0 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  で実施した。

表 3.14 加熱した浄化材の確認実験の条件

| 項目    |          | 数値                      |
|-------|----------|-------------------------|
| カラム内径 |          | 10 mm                   |
| カラム高さ |          | 100 mm                  |
| 浄化材高さ |          | 50 mm                   |
| 浄化材容量 |          | 3.9 cm <sup>3</sup>     |
| 浄化材粒径 |          | 1-2 mm                  |
| 投入重量  | 赤玉土+瓦    | 3.48 g                  |
|       | 鹿沼土+瓦    | 2.95 g                  |
|       | 鹿児島赤ホヤ+瓦 | 4.08 g                  |
|       | 宮崎赤土+瓦   | 2.80 g                  |
| 水温    |          | 24.9 °C                 |
| ろ過速度  |          | 7.0 m·day <sup>-1</sup> |

表 3.15 加熱した浄化材の確認実験に供した河川水の水質

| 原水の水質 |  |  |  |             |
|-------|--|--|--|-------------|
| pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) |
| 7.0   | 0.30                                       | 0.15                                     | 2.91                                     | 2.04        |

## (2) 実験結果と考察

加熱した浄化材の確認実験の結果を表 3.16 及び図 3.31～図 3.33 に示す。表 3.16 は測定結果をすべて示した表であり、図 3.31～図 3.33 は、実験に供した試料の全りん、TOC 及び濁度の除去率を降順に表した図である。

pH は、加熱した浄化材は非加熱と比較すると、赤ホヤ以外は、原水の pH 7.0 に比べて 7.4～7.8 と高くなった。全りんは、これまで検討を繰り返してきた赤玉土や鹿沼土は、50 %程度の除去率を確認できたが、新規浄化材として検討している赤ホヤや赤土は 20 %程度の除去率しか確認できなかった。TOC は際だった除去はいずれも得られなかった。濁度は 50 %程度以上の除去率は確認できた。

表 3.16 加熱した浄化材の確認実験の結果

| 種類       | ろ液の濃度 |  |  |  |             | 除去率        |            |           |
|----------|-------|--|--|--|-------------|------------|------------|-----------|
|          | pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) | 全りん<br>(%) | TOC<br>(%) | 濁度<br>(%) |
| 赤玉土+瓦    | 7.4   | 0.29                                       | 0.08                                     | 2.91                                     | 0.72        | 46.7       | 0.0        | 65.0      |
| 鹿沼土+瓦    | 7.8   | 0.29                                       | 0.06                                     | 2.49                                     | 0.60        | 60.0       | 14.4       | 70.8      |
| 鹿児島赤ホヤ+瓦 | 6.8   | 0.31                                       | 0.11                                     | 2.46                                     | 0.43        | 26.7       | 15.5       | 78.9      |
| 宮崎赤土+瓦   | 7.8   | 0.29                                       | 0.13                                     | 3.28                                     | 1.14        | 13.3       | -12.7      | 44.1      |

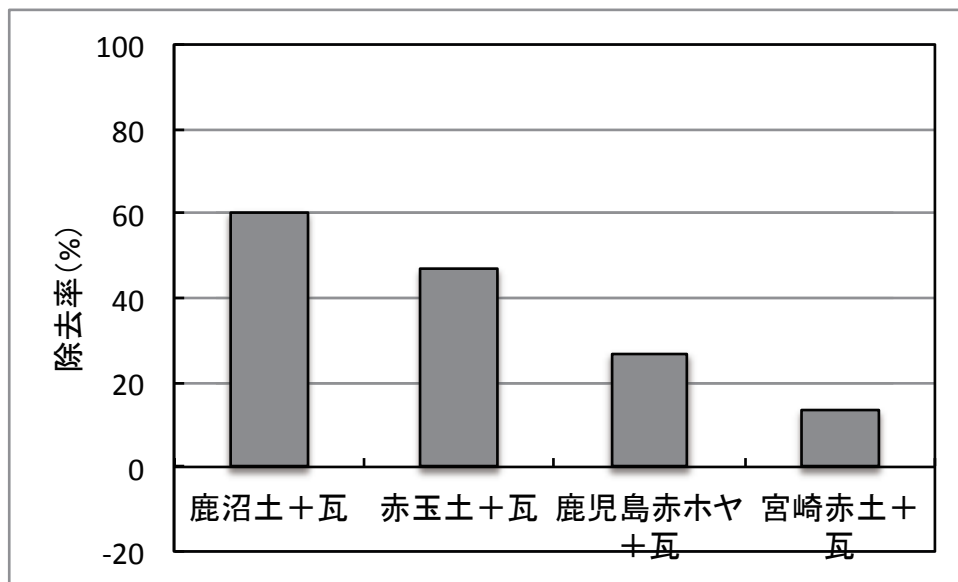


図 3.31 加熱による浄化材造粒の実験結果（全りん）

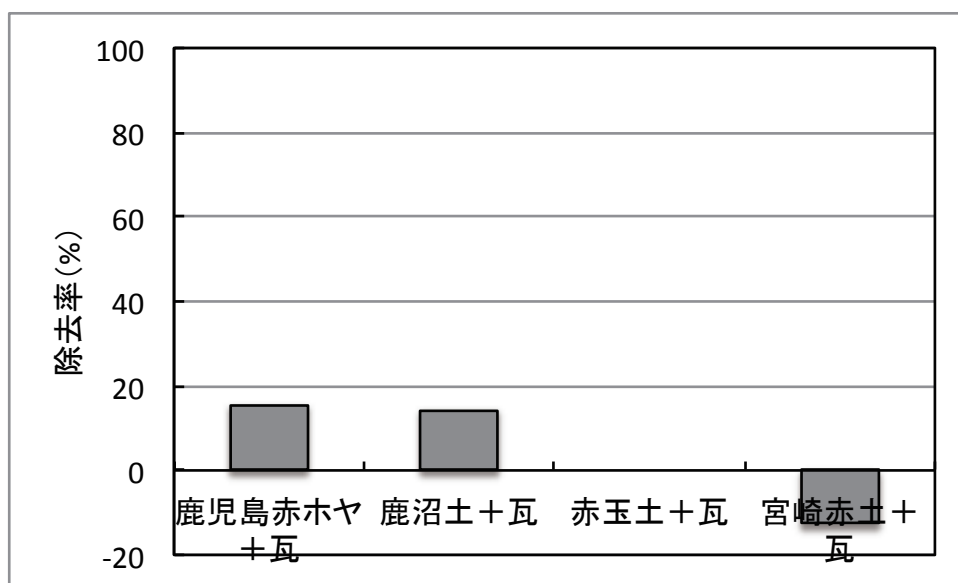


図 3.32 加熱による浄化材造粒の実験結果 (TOC)

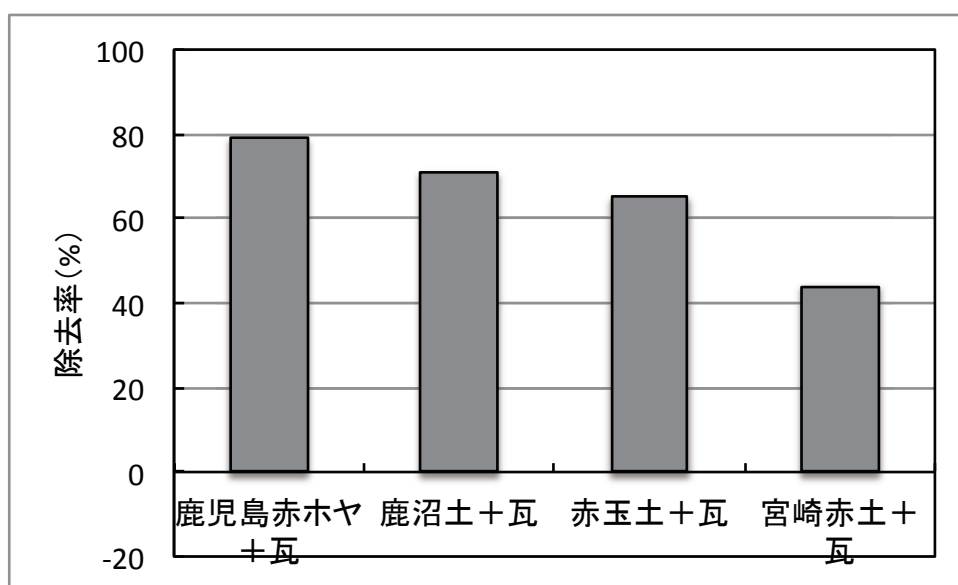


図 3.33 加熱による浄化材造粒の実験結果 (濁度)

### (3) まとめ

ろ過速度が前回の実験よりも速いとはいえ、全りんも TOC も良好な除去を得られなかった。加熱することにより、特に、新規の浄化材として可能性のある赤ホヤや赤土の除去能の低下が著しいことから、加熱による造粒は困難であること判断した。



### 3-3-7 セメントによる浄化材造粒（実験 3-6）

#### （1）実験方法

加熱で検討した浄化材 4 種についてセメントによる造粒方法について検討した。セメントによる固形化及び造粒方法は以下のとおりである。

- 1) 赤玉土、鹿沼土、赤ホヤ、赤土及び瓦を乳鉢またはミル機で粉砕し、ふるい分けし、1 mm 以下のものを用いる。
- 2) 容量比で赤玉土、鹿沼土、赤ホヤ及び赤土をそれぞれ 70 %、瓦を 20 %、セメント 10 %で混ぜる。
- 3) 十分に混ぜた試料に適量の蒸留水を入れて、粘土状にし、高さ 10 mm 程度に広げ、養生する。
- 4) 3 日後、粉砕し、1~2 mm 程度のものを浄化材として採用する。

浄化能の実験においては、実験装置の概要については、前述の図 3.22 のとおりであり、実験条件の詳細は表 3.17 に示す。ろ過速度は  $2.5 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  で行った。

表 3.17 セメントを用いた浄化材の確認実験の条件

| 項目    |               | 数値                      |
|-------|---------------|-------------------------|
| カラム内径 |               | 25 mm                   |
| カラム高さ |               | 200 mm                  |
| 浄化材高さ |               | 100 mm                  |
| 浄化材容量 |               | 49 cm <sup>3</sup>      |
| 浄化材粒径 |               | 1-2 mm                  |
| 投入重量  | 赤玉土+瓦+セメント    | 30.6 g                  |
|       | 鹿沼土+瓦+セメント    | 25.5 g                  |
|       | 鹿児島赤ホヤ+瓦+セメント | 22.7 g                  |
|       | 宮崎赤土+瓦+セメント   | 27.9 g                  |
| ろ過速度  |               | 2.5 m·day <sup>-1</sup> |

原水は、大阪産業大学南側を流れる 1 級河川の鍋田川から採取した河川水を用いており、カラムに充填した浄化材に 1 日程度通水して馴養させた後、3 時間ろ過した試料を処理水として測定に用いた。実験に供した河川水の水質を表 3.18 に示す。

表 3.18 セメントを用いた浄化材の確認実験に供した河川水の水質

| 原水の水質 |  |  |  |             |
|-------|--|--|--|-------------|
| pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) |
| 9.1   | 0.35                                       | 0.20                                     | 3.01                                     | 1.800       |

(2) 実験結果と考察

セメントを用いた浄化材の確認実験の結果を表 3.19 及び図 3.34～図 3.36 に示す。表 3.19 は測定結果をすべて示した表で、図 3.34～図 3.36 は、実験に供した試料の全りん、TOC 及び濁度の除去率を降順に表したグラフである。

pH は原水の 9.1 に対して、赤玉土以外は 9.9～10.1 に上昇した。赤玉土は 7.3 と低下している。全りんは、いずれも 85 %以上という高い除去率であり、特に赤玉土は 99 %以上と高かった。また、TOC はいずれも除去を確認できなかった。濁度は、いずれも 62～72 %の除去を確認できた。

表 3.19 セメントを用いた浄化材の確認実験の結果

| 浄化材の種類        | ろ液の濃度 |  |  |  |             | 除去率        |            |           |
|---------------|-------|--|--|--|-------------|------------|------------|-----------|
|               | pH    | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) | 全りん<br>(%) | TOC<br>(%) | 濁度<br>(%) |
| 赤玉土+瓦+セメント    | 7.3   | 0.25                                       | 検出限界以下                                   | 3.05                                     | 0.435       | 99.9       | -1.3       | 75.8      |
| 鹿沼土+瓦+セメント    | 9.9   | 0.32                                       | 0.02                                     | 3.11                                     | 0.680       | 90.0       | -3.3       | 62.2      |
| 鹿児島赤ホヤ+瓦+セメント | 10.0  | 0.30                                       | 0.03                                     | 2.68                                     | 0.455       | 85.0       | 11.0       | 74.7      |
| 宮崎赤土+瓦+セメント   | 10.1  | 0.25                                       | 0.03                                     | 2.97                                     | 0.683       | 85.0       | 1.3        | 62.1      |

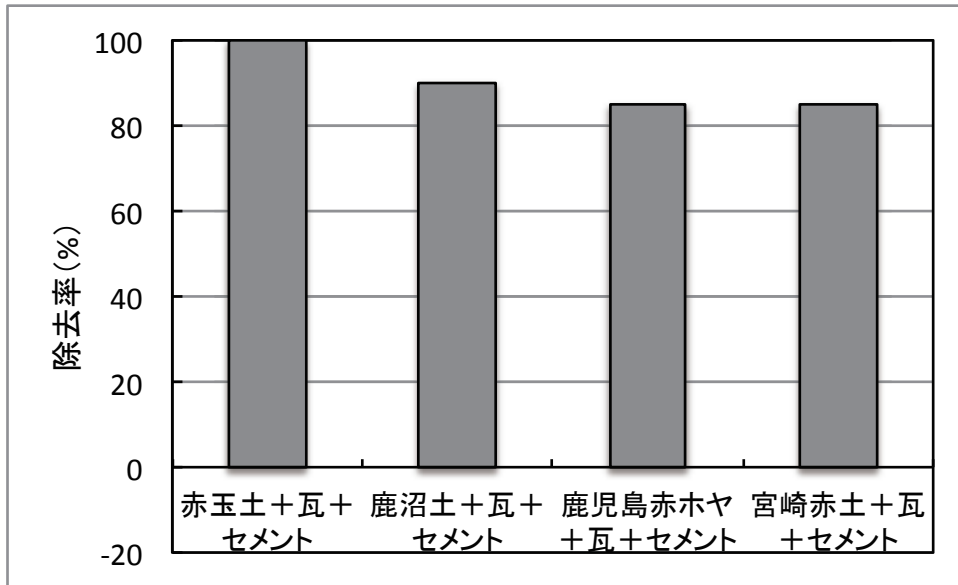


図 3.34 セメントを用いた浄化材造粒の実験結果（全りん）

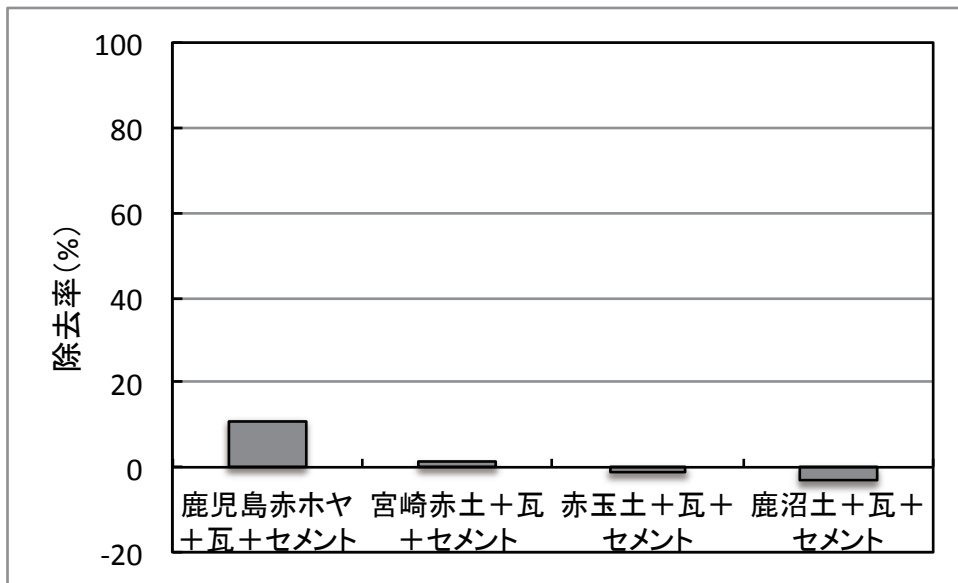


図 3.35 セメントを用いた浄化材造粒の実験結果（TOC）

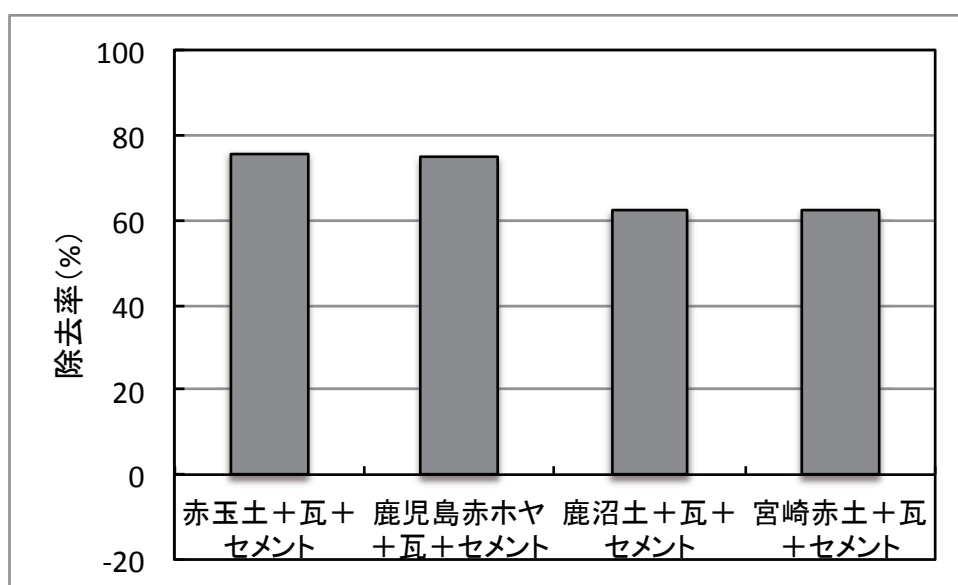


図 3.36 セメントを用いた浄化材造粒の実験結果（濁度）

### (3) まとめ

セメントを用いて造粒しても、りん除去を目的とする浄化材として十分に利用できることがわかった。しかしながら、TOC はほとんど除去できないこともわかった。以上のことから、りんだけを選択的に除去することを目的とした浄化材として有効であることがわかったことから、りんに着目することで、赤ホヤや赤土といったこれまで水質浄化材として用いられなかった火山灰土も使える可能性がある。第 4 章では、実証用浄化材としては、赤土を採用して検討することにした。

## 3-4 土壌浸透法に用いる火山灰土の探索

### 3-4-1 目的

火山国である日本には大量で多種の火山灰土が存在する。しかしながらそれら土壌の大半は、浄化材として用いられていない。そこで、第 3 章第 3 項でも浄化材として取り扱った九州の火山灰土について、直接採取、または火山灰土採掘・製造販売をする企業からの提供による複数の火山灰土の全りん吸着性能を確認するとともにりんの吸着能がどのような成分に依存するのかを見極めるため、組成分析など物理的・化学的分析を行い、多変量解析を行った。

### 3-4-2 探索によって得られた火山灰土

熊本県、宮崎県及び鹿児島県の3県の九州南部地域及び大分県の4県で土壌掘削、販売などを行っている企業を訪問し、それぞれの地域における火山灰土を採取した。火山灰土採取は掘削現場だけでなく、製品化されたものも含めて入手した。土壌入手先を図3.37に示す。

これらの場所で入手した土壌の一覧とそれら土壌の利用状況を表3.20に示す。なお、表3.20左端のNo.は後に示す主成分分析における図内のNo.である。

採取地点における土壌採取場所を図3.38～図3.48に示す。



図 3.37 調査した火山灰土を掘削・加工・販売する企業  
Google Map より

表 3.20 採取した土壌と利用状況

| No. | 採取場所           | 土壌名     | 利用状況                     |
|-----|----------------|---------|--------------------------|
| 1   | 熊本県益城町         | 黒土(上層)  | 農業、土壌改良、<br>観賞魚用(通称:ソイル) |
| 2   |                | 黒土(中層)  |                          |
| 3   |                | 黒土(下層)  |                          |
| 4   |                | 赤土      | 農業、土壌改良                  |
| 5   | 宮崎県都城市<br>高崎町  | 黒土      | 利用していない                  |
| 6   |                | 赤土(上層)  | 利用していない                  |
| 7   |                | ボラ土     | 園芸、農業、土壌改良               |
| 8   |                | 赤土(下層)  | 利用していない                  |
| 9   | 宮崎県都城市<br>山田町1 | 黒土      | 利用していない                  |
| 10  |                | ボラ土(上層) | 園芸、農業、土壌改良               |
| 11  |                | ボラ土(下層) | 園芸、農業、土壌改良               |
| 12  | 宮崎県都城市<br>山田町2 | 黒土      | 利用していない                  |
| 13  |                | ボラ土(上層) | 園芸、農業、土壌改良               |
| 14  |                | ボラ土(下層) | 園芸、農業、土壌改良               |
| 15  | 鹿児島県大崎町        | 黒土      | 農業、土壌改良、グラウンド整備          |
| 16  |                | 赤土      | 利用していない                  |
| 17  |                | ボラ土(赤)  | 利用していない                  |
| 18  |                | ボラ土(黄)  | 利用していない                  |
| 19  |                | 製品黒土    | 農業、土壌改良、グラウンド整備          |
| 20  | 鹿児島県垂水市        | 黒土      | 農業、土壌改良                  |
| 21  |                | 鹿沼土     | 園芸、農業                    |
| 22  |                | さつま土    | 園芸、農業                    |
| 23  | 鹿児島県鹿屋市        | 黒土      | 農業、土壌改良                  |
| 24  |                | 赤土      | 園芸、農業                    |
| 25  |                | 鹿沼土     | 園芸、農業                    |
| 26  |                | さつま土    | 園芸、農業                    |
| 27  |                | 粘土      | 利用していない                  |
| 28  | 大分県豊後大野市千歳町新殿  | 黒土      | 園芸、農業                    |
| 29  | 大分県豊後大野市千歳町柴山  | 赤土(表層)  | 利用していない                  |
| 30  |                | 赤土(中層)  | 利用していない                  |
| 31  |                | 赤土(下層)  | 利用していない                  |
| 32  | 大分県豊後大野市三重町百枝  | 黒土      | 園芸、農業                    |
| 33  | 熊本県天草市五和町御領    | 表土      | 利用していない                  |
| 34  |                | 赤土      | 園芸、農業、土壌改良               |



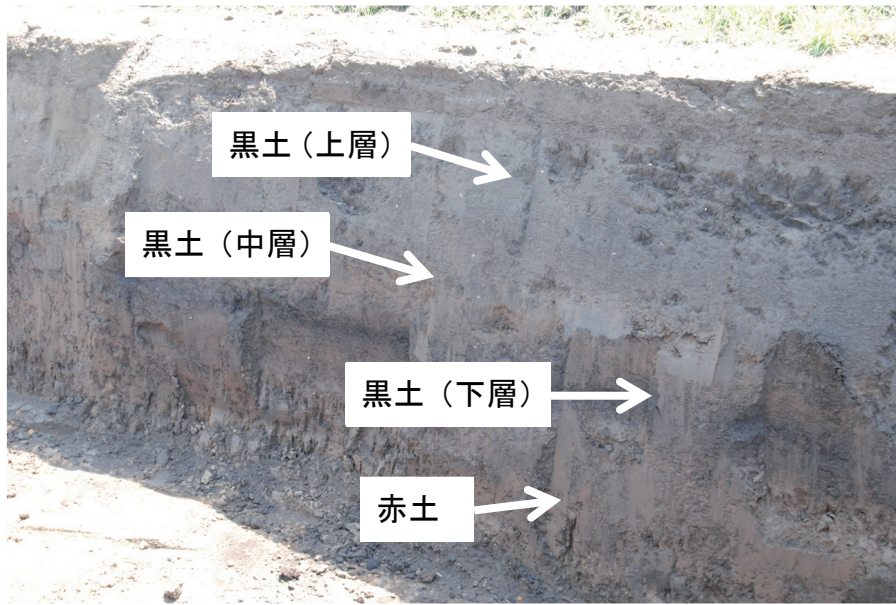


图 3.38 熊本県益城町

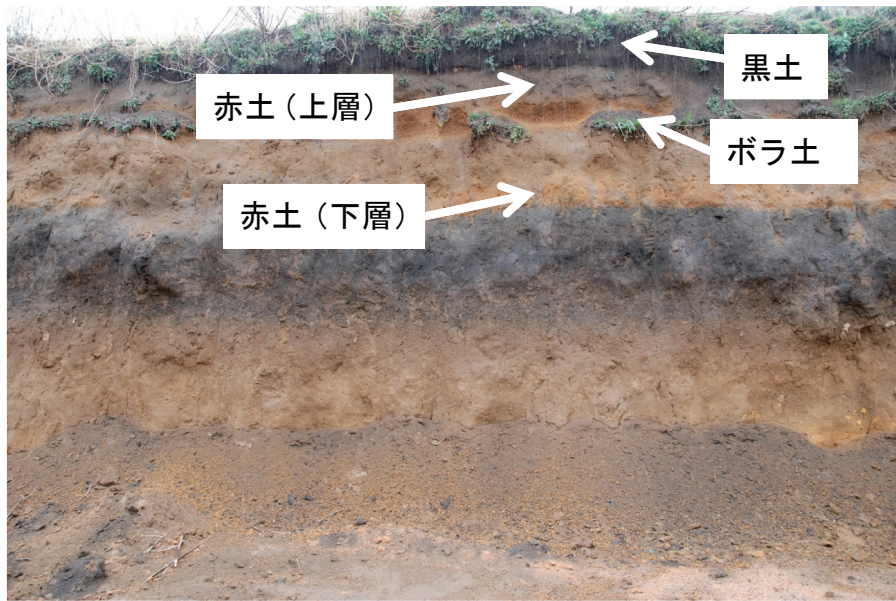


图 3.39 宮崎県都城市高崎町

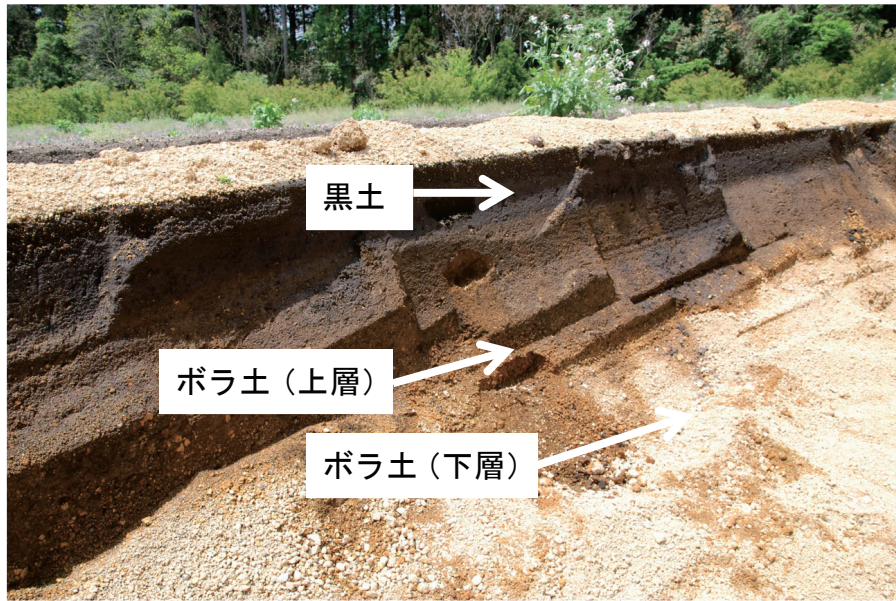


図 3.40 宮崎県都城市山田町 (採取箇所 1)



図 3.41 宮崎県都城市山田町 (採取箇所 2)



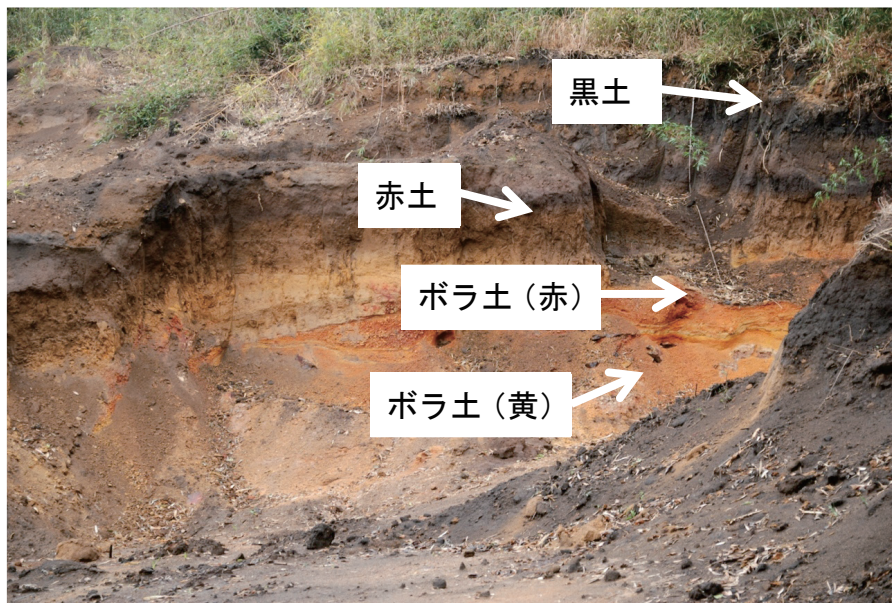


図 3. 42 鹿児島県大崎町横内



図 3. 43 鹿児島県垂水市新城



図 3.44 鹿児島県鹿屋市



図 3.45 大分県豊後大野市三重町百枝



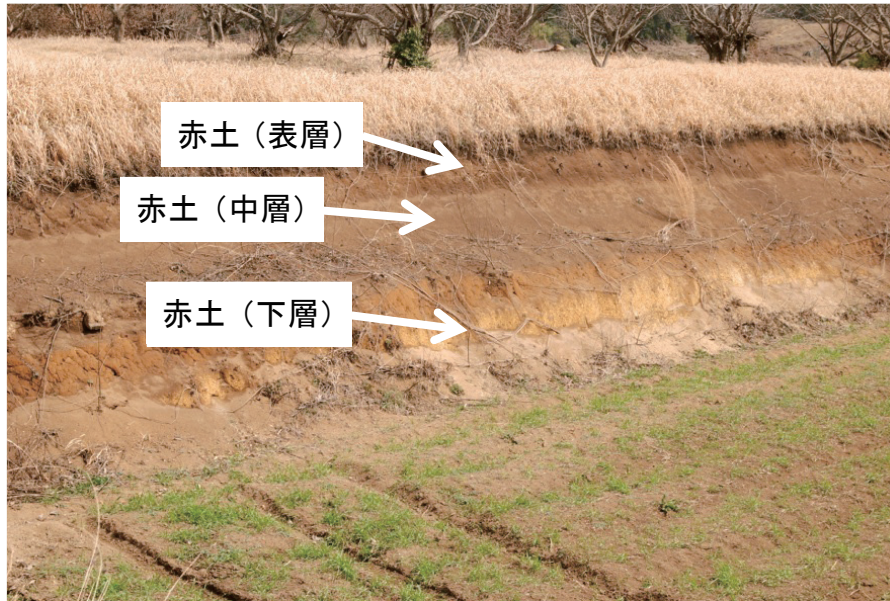


図 3.46 大分県豊後大野市千歳町柴山



図 3.47 大分県豊後大野市千歳町新殿

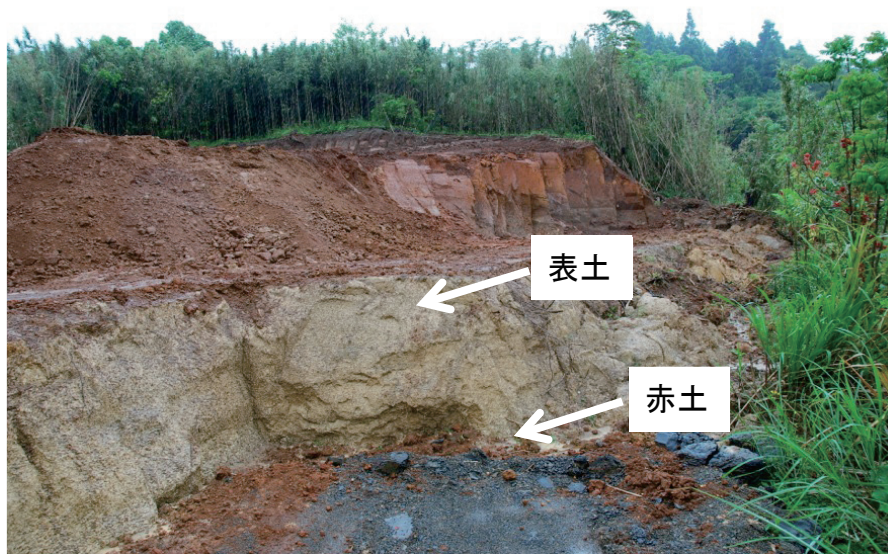


図 3.48 熊本県天草市御領

### 3-4-3 実験方法と結果

採取した火山灰土のりん吸着性能を確認するために、回分式吸着試験を行った。回分式吸着試験では、100 mL の三角フラスコに全りん濃度を  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  程度に調整した水を 100 mL 入れ、それらに  $40^\circ\text{C}$  で十分に乾燥させた火山灰土を 10 g 投入した。その三角フラスコを密閉し、 $25^\circ\text{C}$  の暗所に統一して 5 日間保存した後、上澄水の全りん濃度を測定した (図 3.49 参照)。なお、全りんは、JIS の K0102 に準拠したモリブデン酸青吸光光度法で測定している。

採取した火山灰土については、蛍光 X 線分析法 (EDX 法) にて組成分析を行った。なお、火山灰土は、錠剤生成器で錠剤化し、雰囲気へリウム置換して分析した。マイラーは  $6 \mu\text{m}$  厚のものを使用した。

この回分式吸着試験の後、りん吸着能があり、特徴的な火山灰土を抽出して、フロイントリッヒの吸着等温式を求めるための試験を考察としておこなった。試験手順は回分式吸着試験と同様であるが、全りん濃度を  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及び  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  の 6 段階に調節し、これら 100 mL とともに選択した火山灰土を 10 g とともに三角フラスコに入れて密閉し、試験をおこなった。吸着係数  $K_d$  は式 2-5 で求めた。





図 3.49 回分式吸着試験

EDX 分析によって得られたけい素、アルミニウム、鉄、カルシウム、チタン及びマンガンの組成、比表面積、回分式吸着試験によって得られた pH とアルカリ度を表 3.21 及び表 3.22 に示す。また、回分式吸着試験によって得られたりん除去率及び吸着係数を表 3.23 に示す。

表 3.24～表 3.26 は、鉄及びアルミニウムの組成割合が大きいトップ 5 と比表面積が大きいトップ 5 を示している。また、表 3.27 は、吸着係数が大きいトップ 5 を示している。

鉄の組成割合が高いのは、熊本県益城町産の黒土が高く 7.7～8.2%であった。次いで大分県豊後大野市千歳町柴山の赤土で 7.6%であった。アルミニウムの組成割合が高かったのは、熊本県天草市の表土で 16.8%であった。全体に熊本県天草市と大分県豊後大野市千歳町柴山の土壌が高かった。一方、比表面積が高かったのは、宮崎県都城市高崎町のボラ土で  $215 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  で、次いで鹿児島県鹿屋市の鹿沼土で  $197 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  であった。

このような物理的性状である中で、吸着係数が最も高かったのが、熊本県天草市の赤土で、 $1580 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  であった。次いで大分県豊後大野市千歳町柴山の赤土が 990、鹿児島県鹿屋市の鹿沼土で  $571 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  であった。

表 3.21 火山灰土壌の物理化学的性状分析 (1)

| 採取場所            | 土壌名      | 組成 (%) |      |      |      |      |      | 比表面積<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) | pH   | アルカリ度 |
|-----------------|----------|--------|------|------|------|------|------|--|------|-------|
|                 |          | Si     | Al   | Fe   | Ca   | Ti   | Mn   |  |      |       |
| 熊本県益城町          | 黒土 (上層)  | 8.46   | 4.84 | 7.87 | 1.67 | 0.84 | 0.25 | 90.5   | 5.21 |       |
|                 | 黒土 (中層)  | 8.47   | 4.29 | 7.71 | 0.72 | 0.84 | 0.17 | 48.0   | 5.05 | 0.30  |
|                 | 黒土 (下層)  | 8.69   | 4.56 | 8.20 | 0.51 | 0.82 | 0.16 | 98.5   | 5.08 | 0.45  |
|                 | 赤土       | 7.76   | 4.44 | 7.44 | 0.24 | 0.79 | 0.17 | 120.2  | 5.52 | 0.25  |
| 宮崎県都城市<br>高崎町   | 黒土       | 10.12  | 4.16 | 5.80 | 2.60 | 0.42 | 0.11 | 72.5   | 5.77 | 0.80  |
|                 | 赤土 (上層)  | 10.79  | 5.54 | 5.36 | 1.34 | 0.58 | 0.12 | 114.0  | 6.26 | 0.70  |
|                 | ボラ土      | 13.38  | 4.56 | 5.71 | 2.80 | 0.68 | 0.19 | 215.2  | 6.24 | 0.95  |
|                 | 赤土 (下層)  | 14.28  | 4.93 | 2.21 | 1.49 | 0.21 | 0.06 | 20.5   | 6.20 | 0.70  |
| 宮崎県都城市<br>山田町 1 | 黒土       | 10.89  | 3.73 | 5.56 | 4.22 | 0.38 | 0.11 | 13.9   | 6.08 | 0.60  |
|                 | ボラ土 (上層) | 10.66  | 4.07 | 5.15 | 2.77 | 0.42 | 0.13 | 13.4   | 5.97 | 0.55  |
|                 | ボラ土 (下層) | 16.67  | 3.12 | 2.50 | 1.93 | 0.22 | 0.07 | 15.7   | 6.28 | 0.70  |
| 宮崎県都城市<br>山田町 2 | 黒土       | 10.67  | 5.11 | 5.71 | 1.49 | 0.48 | 0.15 | 6.5  | 6.24 | 0.60  |
|                 | ボラ土 (上層) | 10.66  | 3.52 | 5.75 | 3.38 | 0.42 | 0.13 | 53.7   | 6.26 | 0.65  |
|                 | ボラ土 (下層) | 12.62  | 4.78 | 4.85 | 2.28 | 0.46 | 0.18 | 58.5   | 6.00 | 0.70  |

表 3.22 火山灰土壌の物理化学的性状分析 (2)

| 採取場所          | 土壌名     | 組成 (%) |       |      |      |      |      | 比表面積<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) | pH   | アルカリ度 |
|---------------|---------|--------|-------|------|------|------|------|--|------|-------|
|               |         | Si     | Al    | Fe   | Ca   | Ti   | Mn   |  |      |       |
| 鹿児島県大崎町       | 黒土      | 10.19  | 4.01  | 4.83 | 1.85 | 0.44 | 0.12 | 94.0   |      |       |
|               | 赤土      | 11.81  | 5.02  | 3.33 | 1.18 | 0.25 | 0.06 | 115.9  |      |       |
|               | ボラ土 (赤) | 11.82  | 5.23  | 3.44 | 2.58 | 0.21 | 0.08 | 157.4  | 6.34 | 0.65  |
|               | ボラ土 (黄) | 13.18  | 5.69  | 2.52 | 0.88 | 0.17 | 0.05 | 148.8  | 6.22 | 0.85  |
|               | 製品黒土    | 10.23  | 3.98  | 4.74 | 1.88 | 0.44 | 0.12 | 4.4  |      |       |
| 鹿児島県垂水市       | 黒土      | 11.51  | 3.95  | 4.37 | 2.30 | 0.38 | 0.11 | 6.4  | 6.11 | 0.75  |
|               | 鹿沼土     | 13.39  | 5.14  | 2.16 | 0.94 | 0.17 | 0.05 | 18.7   |      |       |
|               | さつま土    | 14.38  | 4.90  | 1.96 | 1.36 | 0.17 | 0.04 | 71.0   | 5.30 | 0.50  |
| 鹿児島県鹿屋市       | 黒土      | 7.83   | 4.35  | 7.38 | 0.27 | 0.79 | 0.18 | 77.0   | 5.84 | 0.70  |
|               | 赤土      | 7.98   | 6.00  | 7.53 | 0.45 | 0.66 | 0.14 | 186.5  | 5.89 | 0.60  |
|               | 鹿沼土     | 11.86  | 6.09  | 2.78 | 2.06 | 0.22 | 0.07 | 197.2  | 6.03 | 0.25  |
|               | さつま土    | 16.19  | 4.10  | 2.06 | 2.93 | 0.17 | 0.07 | 80.3   | 6.21 | 0.50  |
|               | 粘土      | 14.62  | 4.65  | 4.21 | 0.96 | 0.43 | 0.23 | 53.8   | 6.23 | 1.00  |
| 大分県豊後大野市千歳町新殿 | 黒土      | 15.77  | 9.67  | 5.79 | 1.50 | 0.67 | 0.17 | 17.5   | 5.28 | 0.63  |
| 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (表層) | 15.47  | 13.10 | 7.48 | 0.57 | 0.78 | 0.18 | 105.6  | 5.57 | 0.68  |
|               | 赤土 (中層) | 15.47  | 11.79 | 7.64 | 0.62 | 0.76 | 0.18 | 108.8  | 5.64 | 0.75  |
|               | 赤土 (下層) | 15.29  | 15.15 | 4.74 | 2.89 | 0.48 | 0.11 | 149.3  | 5.75 | 0.73  |
| 大分県豊後大野市三重町百枝 | 黒土      | 17.27  | 9.98  | 5.75 | 1.39 | 0.68 | 0.17 | 19.4   | 5.72 | 0.70  |
| 熊本県天草市五和町御領   | 表土      | 17.54  | 16.81 | 3.94 | 0.80 | 0.74 | 0.13 | 89.3   | 6.32 | 0.75  |
|               | 赤土      | 14.37  | 12.09 | 6.17 | 0.51 | 0.73 | 0.10 | 40.3   | 6.20 | 0.85  |

表 3.23 りん除去率と吸着係数

| 場所                  | 土壌名            | りん除去率 (%) | 吸着係数 (mL・g <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|----------------|-----------|----------------------------|
| 熊本県<br>益城町          | 黒土 (上層) No. 1  | 94.7      | 178.8                      |
|                     | 黒土 (中層) No. 2  | 91.2      | 103.9                      |
|                     | 黒土 (下層) No. 3  | 91.3      | 105.2                      |
|                     | 赤土 No. 4       | 91.1      | 102.7                      |
| 宮崎県<br>都城市<br>高崎町   | 黒土             | 76.4      | 32.4                       |
|                     | 赤土 (上層)        | 91.2      | 103.2                      |
|                     | ボラ土            | 92.1      | 117.3                      |
|                     | 赤土 (下層)        | 89.0      | 80.9                       |
| 宮崎県<br>都城市<br>山田町 1 | 黒土 No. 1       | 91.7      | 110.6                      |
|                     | ボラ土 (上層) No. 2 | 87.7      | 71.6                       |
|                     | ボラ土 (下層) No. 3 | 52.1      | 10.9                       |
| 宮崎県<br>都城市<br>山田町 2 | 黒土 No. 1       | 60.5      | 15.3                       |
|                     | ボラ土 (上層) No. 2 | 90.8      | 99.1                       |
|                     | ボラ土 (下層) No. 3 | 89.8      | 87.8                       |
| 鹿児島県<br>大崎町         | 黒土             | 77.8      | 35.1                       |
|                     | 赤土             | 93.1      | 135.6                      |
|                     | ボラ土 (赤)        | 91.7      | 111.3                      |
|                     | ボラ土 (黄)        | 81.3      | 43.6                       |
|                     | 製品黒土           | 92.7      | 127.7                      |
| 鹿児島県<br>垂水市         | 黒土             | 90.8      | 98.4                       |
|                     | 鹿沼土            | 86.1      | 114.2                      |
|                     | さつま土           | 88.2      | 59.8                       |
| 鹿児島県<br>鹿屋市         | 黒土 No. 1       | 86.5      | 64.0                       |
|                     | 赤土 No. 2       | 90.5      | 94.7                       |
|                     | 鹿沼土 No. 3      | 98.3      | 570.6                      |
|                     | さつま土 No. 4     | 89.2      | 82.5                       |
|                     | 粘土 No. 5       | 80.9      | 42.3                       |
| 大分県豊後大野<br>市千歳町新殿   | 黒土             | 96.4      | 268.1                      |
| 大分県豊後大野<br>市千歳町柴山   | 赤土 (表層)        | 99        | 989.5                      |
|                     | 赤土 (中層)        | 76.6      | 32.7                       |
|                     | 赤土 (下層)        | 98.3      | 564                        |
| 大分県豊後大野<br>市三重町百枝   | 黒土             | 97.5      | 392.6                      |
| 熊本県天草市五<br>和町御領     | 表土             | 86.9      | 66.6                       |
|                     | 赤土             | 99.4      | 1578.1                     |

表 3.24 探索した土壌の鉄の組成割合が大きいトップ5

| 順位 | 採取場所          | 土壌名     | 鉄の割合 (%) |
|----|---------------|---------|----------|
| 1  | 熊本県益城町        | 黒土 (下層) | 8.20     |
| 2  | 熊本県益城町        | 黒土 (上層) | 7.87     |
| 3  | 熊本県益城町        | 黒土 (中層) | 7.71     |
| 4  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (中層) | 7.64     |
| 5  | 鹿児島県鹿屋市       | 赤土      | 7.53     |

表 3.25 探索した土壌のアルミニウムの組成割合が大きいトップ5

| 順位 | 採取場所          | 土壌名     | アルミニウムの割合 (%) |
|----|---------------|---------|---------------|
| 1  | 熊本県天草市五和町御領   | 表土      | 16.81         |
| 2  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (下層) | 15.15         |
| 3  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (表層) | 13.10         |
| 4  | 熊本県天草市五和町御領   | 赤土      | 12.09         |
| 5  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (中層) | 11.79         |

表 3.26 探索した土壌の比表面積が大きいトップ5

| 順位 | 採取場所          | 土壌名     | 比表面積 ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|----|---------------|---------|---|
| 1  | 宮崎県都城市高崎町     | ボラ土     | 215.2                                     |
| 2  | 鹿児島県鹿屋市       | 鹿沼土     | 197.2                                     |
| 3  | 鹿児島県鹿屋市       | 赤土      | 186.5                                     |
| 4  | 鹿児島県大崎町       | ボラ土 (赤) | 157.4                                     |
| 5  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (下層) | 149.3                                     |

表 3.27 探索した土壌の全りんの吸着係数が大きいトップ5

| 順位 | 採取場所          | 土壌名     | 吸着係数 ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|----|---------------|---------|--|
| 1  | 熊本県天草市五和町御領   | 赤土      | 1578                                     |
| 2  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (表層) | 990                                      |
| 3  | 鹿児島県鹿屋市       | 鹿沼土     | 571                                      |
| 4  | 大分県豊後大野市千歳町柴山 | 赤土 (下層) | 564                                      |
| 5  | 大分県豊後大野市三重町百枝 | 黒土      | 393                                      |



次に比較的に吸着性能が高く、特徴的な5種の火山灰土壌について、Freundlichの吸着等温式を図3.50～図3.54に示す。なお、過去に用いてきた栃木県鹿沼市産の赤玉土についても吸着等温式を求めている。

Freundlichの吸着等温式は次式のように示される。

$$V = aC^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Freundlichの吸着等温式}) \quad (\text{式3.9})$$

$V$ : 吸着量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )

$C$ : 平衡濃度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

吸着係数  $a$  の値が大きいほど吸着されやすく、吸着指数  $\frac{1}{n}$  の値が小さいほど吸着されやすい。表3.28に図3.50～図3.54に示した吸着等温式の吸着係数、吸着指数及び相関係数をまとめている。Freundlichの吸着等温式にあてはめると、吸着係数が最も大きいのは鹿児島県大崎町の赤土で、吸着指数が最も小さいのは鹿児島県鹿屋市の鹿沼土であった。

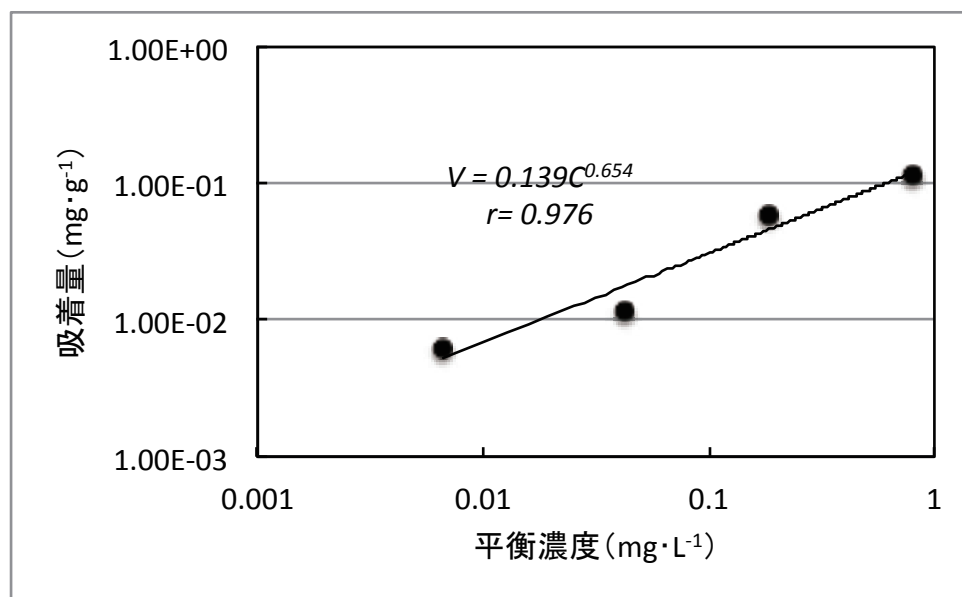


図 3.50 宮崎県都城市高崎町のボラ土

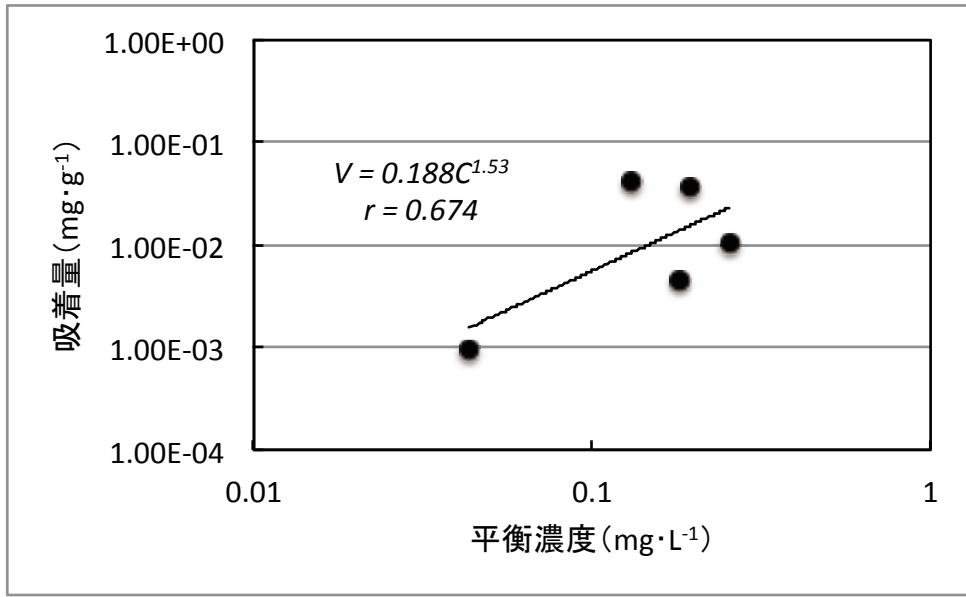


図 3.51 鹿児島県大崎町の赤土

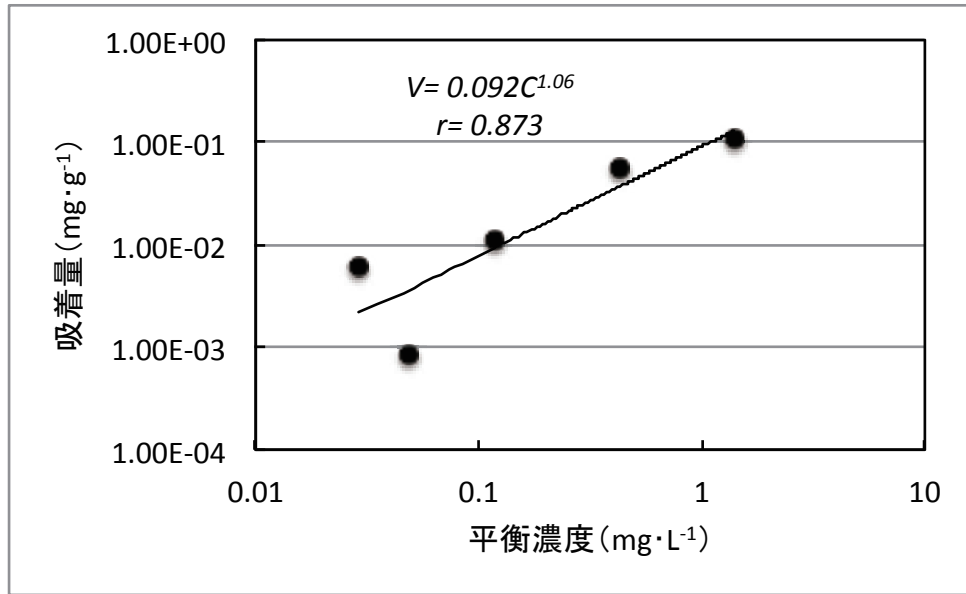


図 3.52 熊本県益城町の黒土上層

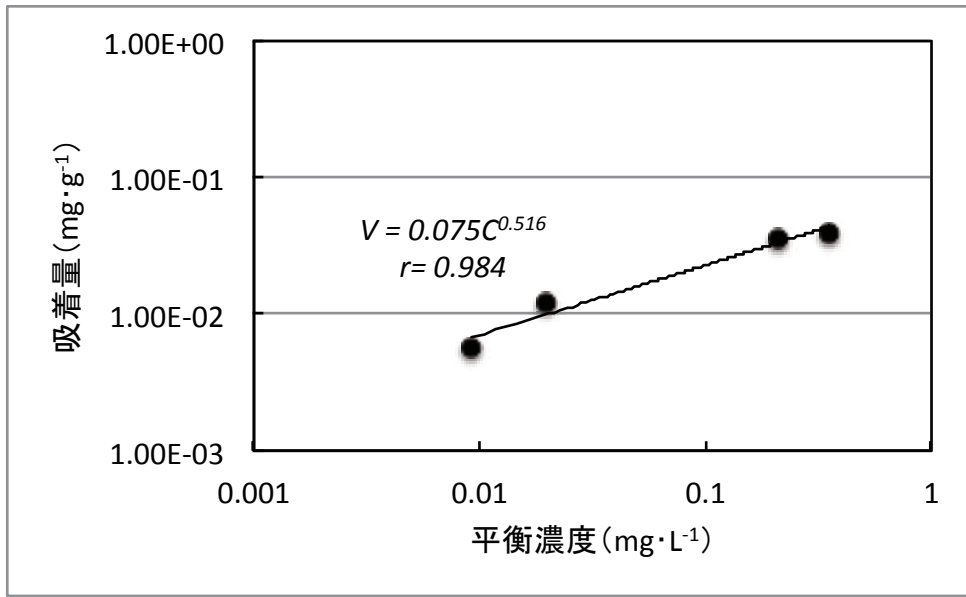


図 3.53 鹿児島県鹿屋市の鹿沼土

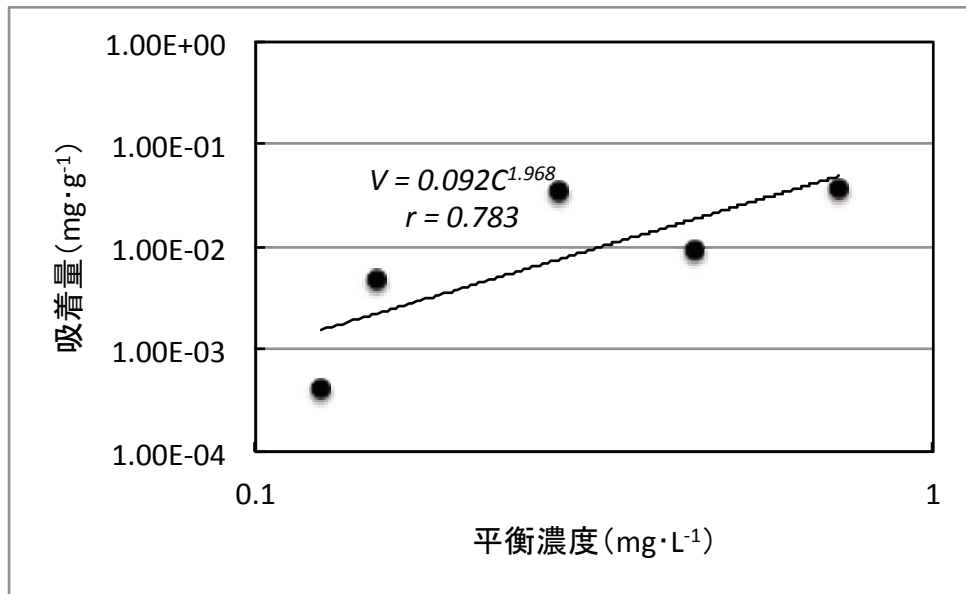


図 3.54 栃木県鹿沼市の赤玉土

表 3.28 図 3.50～3.54 の火山灰土の吸着係数と吸着指数

| 火山灰土名         | 吸着係数 $a$ | 吸着指数 $1/n$ | 相関係数 $r$ |
|---------------|----------|------------|----------|
| 宮崎県都城市高崎町のボラ土 | 0.139    | 0.654      | 0.976    |
| 鹿児島県大崎町の赤土    | 0.188    | 1.526      | 0.674    |
| 熊本県益城町の黒土上層   | 0.092    | 1.062      | 0.973    |
| 鹿児島県鹿屋市の鹿沼土   | 0.075    | 0.516      | 0.984    |
| 栃木県鹿沼市の赤玉土    | 0.092    | 1.968      | 0.783    |

#### 3-4-4 回分式吸着試験及び組成分析結果の解析

表 3.21、3.22 及び 3.23 で示している採取した火山灰土における回分式吸着試験による全りんの吸着係数、pH 及びアルカリ度、EDX 分析で得られた組成について相関の有無を検証した。

##### ①解析に用いるデータ

火山灰土の探索で得られた九州地方の火山灰土及びそれらの周辺土壌で、一部製品となった土壌も含め 34 種である。これらの土壌については、土壌の組成 (Si、Al、Fe、Ca、Ti、Mn) に加え、比表面積、pH、アルカリ度を測定し、それぞれについて全りんの吸着係数を求める吸着試験を行っている。よってこれら 10 項目を変数としている。ただし、一部の土壌については、pH 及びアルカリ度については 34 種中 5 種に欠損がある。

##### ②全変数 (10 変数) に対する相関関数行列

はじめに、変数の単位が統一していないため、平均値 ( $\bar{x}$ ) 及び標準偏差 ( $s$ ) を用いて変動係数 (C.V.) を求め、Pearson の相関係数 ( $r$ ) を求めた (式 3.10)<sup>101</sup>。相関係数を行列にしたものが表 3.29 である。ただし、34 種中 5 種については、pH 及びアルカリ度に欠損があるため、29 種について求めている。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{式 3.10})$$

表 3.29 全変数に対する相関関数行列

| 変数    | Si            | Al           | Fe            | Ca            | Ti            | Mn           | 比表面積   | pH            | アルカリ度        | 吸着係数         |
|-------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------|---------------|--------------|--------------|
| Si    | 1             | <b>0.572</b> | <b>-0.494</b> | 0.085         | -0.216        | -0.155       | -0.145 | 0.218         | <b>0.424</b> | 0.260        |
| Al    | <b>0.572</b>  | 1            | 0.146         | -0.288        | <b>0.407</b>  | 0.132        | 0.146  | -0.092        | 0.232        | <b>0.548</b> |
| Fe    | <b>-0.494</b> | 0.146        | 1             | <b>-0.386</b> | <b>0.888</b>  | <b>0.730</b> | 0.047  | <b>-0.512</b> | -0.120       | 0.162        |
| Ca    | 0.085         | -0.288       | <b>-0.386</b> | 1             | <b>-0.557</b> | -0.304       | -0.113 | <b>0.380</b>  | 0.072        | -0.182       |
| Ti    | -0.216        | <b>0.407</b> | <b>0.888</b>  | <b>-0.557</b> | 1             | <b>0.755</b> | 0.060  | <b>-0.483</b> | -0.039       | 0.252        |
| Mn    | -0.155        | 0.132        | <b>0.730</b>  | -0.304        | <b>0.755</b>  | 1            | -0.032 | -0.289        | 0.163        | -0.029       |
| 比表面積  | -0.145        | 0.146        | 0.047         | -0.113        | 0.060         | -0.032       | 1      | 0.041         | -0.047       | 0.057        |
| pH    | 0.218         | -0.092       | <b>-0.512</b> | <b>0.380</b>  | <b>-0.483</b> | -0.289       | 0.041  | 1             | <b>0.498</b> | -0.039       |
| アルカリ度 | <b>0.424</b>  | 0.232        | -0.120        | 0.072         | -0.039        | 0.163        | -0.047 | <b>0.498</b>  | 1            | 0.082        |
| 吸着係数  | 0.260         | <b>0.548</b> | 0.162         | -0.182        | 0.252         | -0.029       | 0.057  | -0.039        | 0.082        | 1            |

表 2.30 は相関係数の解釈を示している。相関係数  $r$  の絶対値  $|r|$  が 1 に近いほど相関性があり、0 に近いほど相関性がないことを示す。

表 3.30 相関係数の解釈<sup>99</sup>

| 相関係数の絶対値 $ r $ | 解釈          |
|----------------|-------------|
| 0.0-0.2        | ほとんど相関関係がない |
| 0.2-0.4        | やや相関関係がある   |
| 0.4-0.7        | かなり相関関係がある  |
| 0.7-1.0        | 強い相関関係がある   |

表 3.29 の中で強い相関関係があるのは、Fe と Ti ( $r=0.888$ )、Fe と Mn ( $r=0.730$ )、Mn と Ti ( $r=0.755$ ) が上げられる。吸着係数と最も強い相関関係を示したのが、Al ( $r=0.548$ )、次いで Si ( $r=0.260$ ) 及び Ti ( $r=0.252$ ) であった。

一般に吸着は pH に依存する<sup>100</sup>が、今回の土壌では、pH やアルカリ度に大差なく、また欠損が 5 種あったことから、pH 及びアルカリ度を排除し、34 種の土壌について改めて相関関数行列を求めた (後述)。

### ③データの整理

34 種の火山灰土における EDX 分析で求めた Si、Al、Fe、Ca、Ti 及び Mn の組



成割合、BET 法で求めた比表面積、そして回分吸着試験で求めた全りんの吸着係数の 8 変数について相関を求めた。

8 変数のヒストグラムを図 3.55～3.62 に示す。相関を求める火山灰土の種類が 34 種 ( $n$ ) であり、ヒストグラムの階級の数 ( $N$ ) は式 3.11 により 6.8 となり、四捨五入して 7 と決定した。よって最小値から最大値までを 7 等分にした。ヒストグラムに示す階級値は階級毎の中央値である。

$$N = \sqrt{n} + 1 \quad (\text{式 3.11})$$

A1 は階級値が 4.10 %が相対的に多く、吸着係数は階級値が  $123 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  に集中していることがわかった。その他の変数に顕著な傾向は見られなかった。

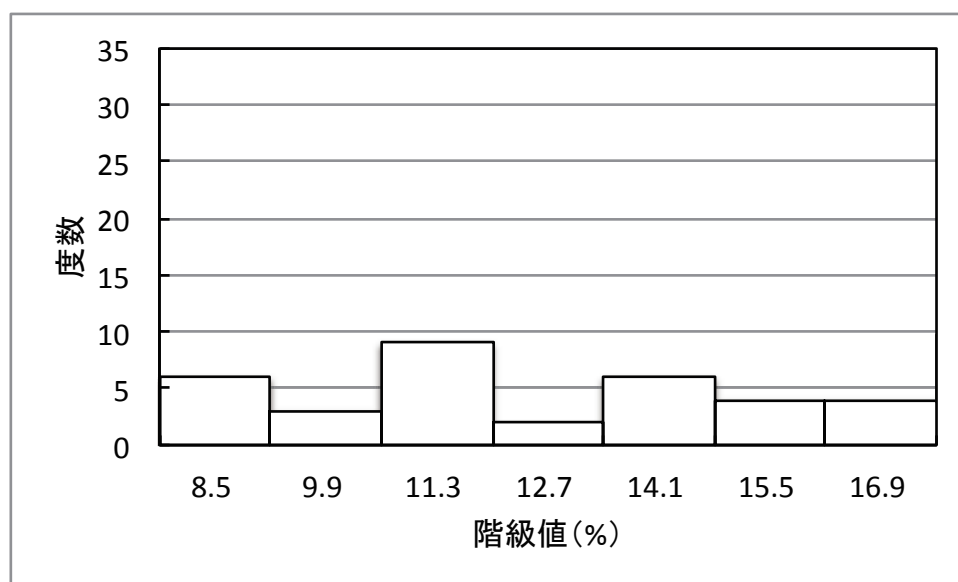


図 3.55 Si のヒストグラム

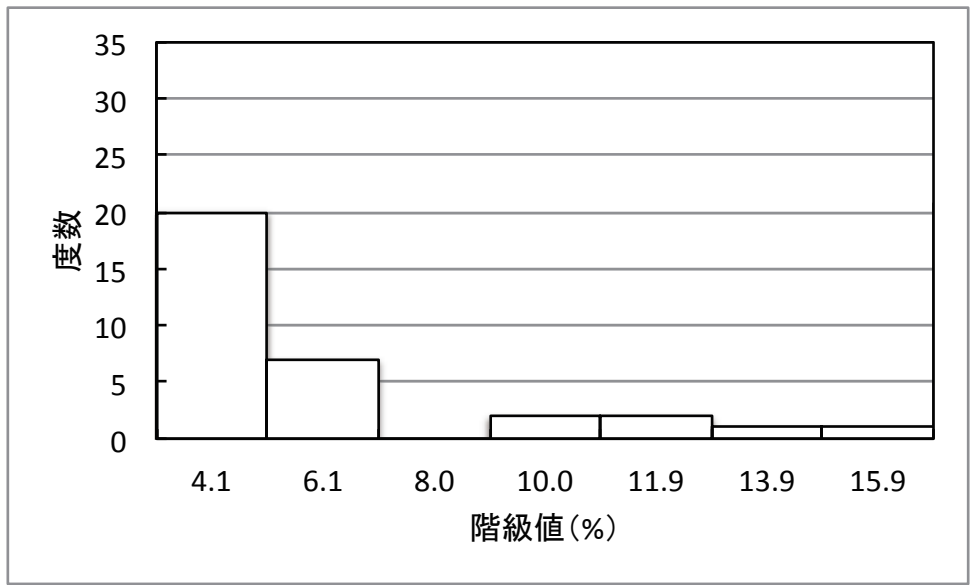


図 3.56 Al のヒストグラム

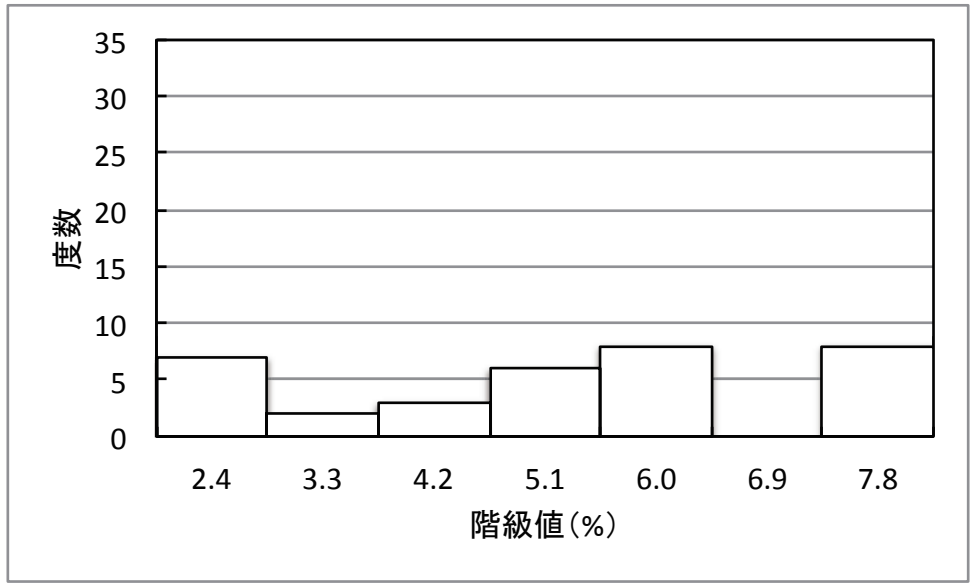


図 3.57 Fe のヒストグラム

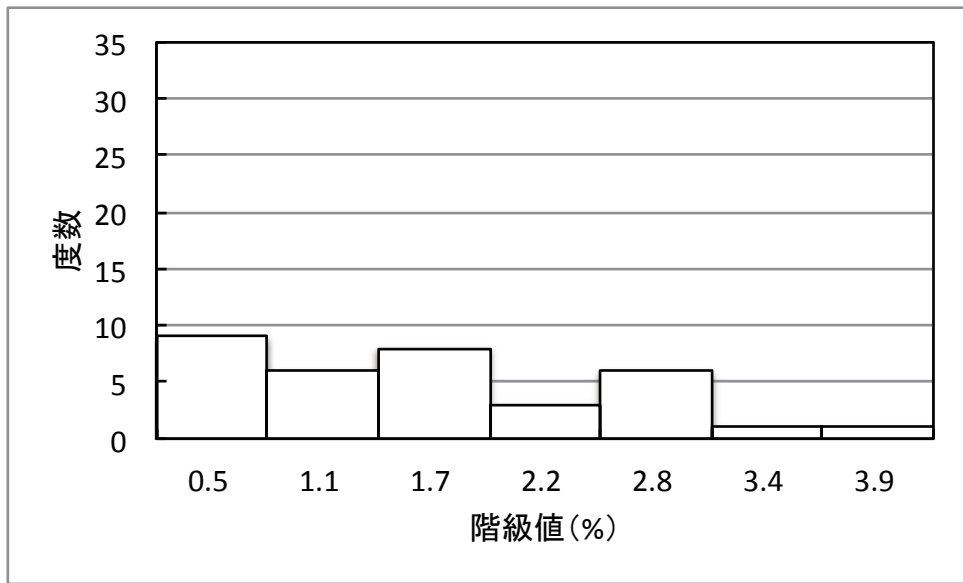


図 3.58 Ca のヒストグラム

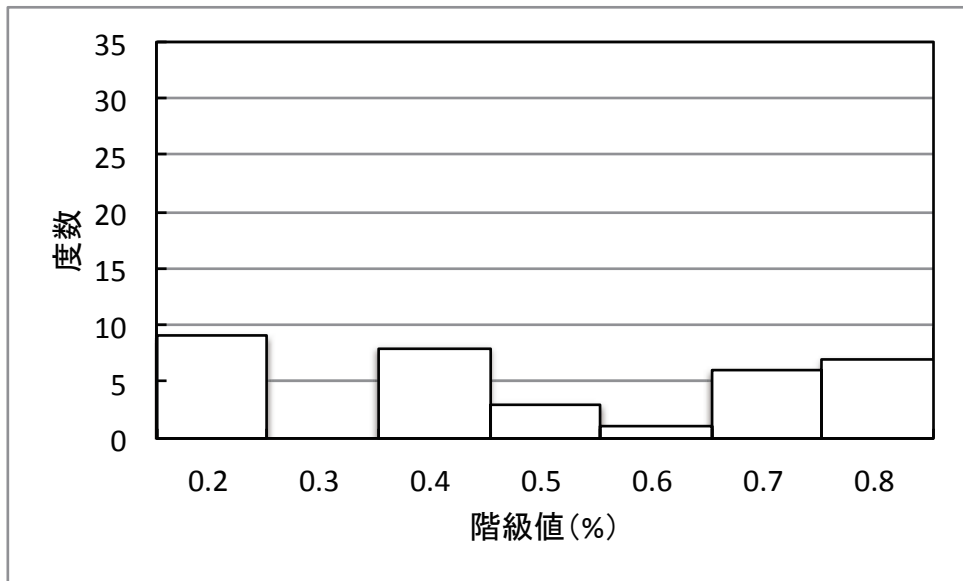


図 3.59 Ti のヒストグラム

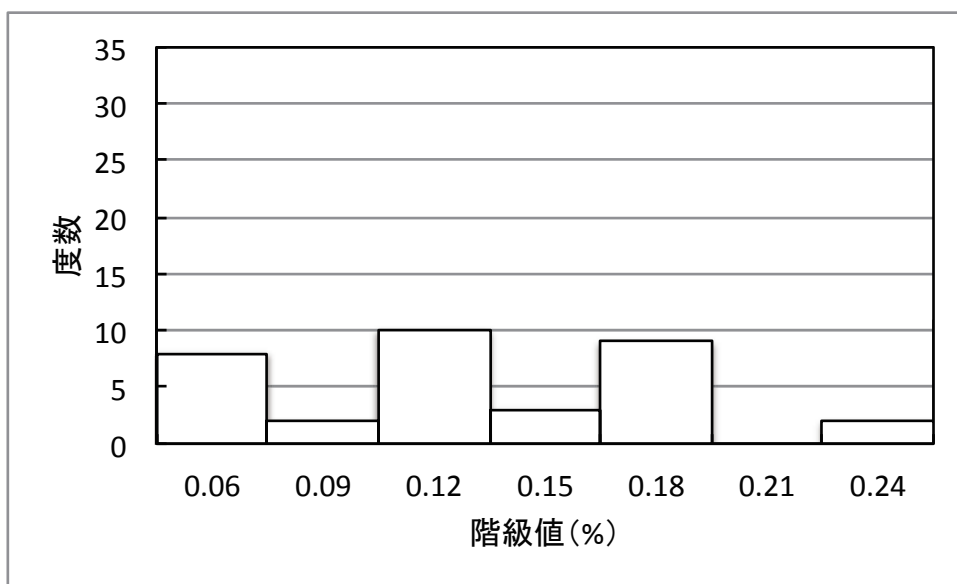


図 3.60 Mn のヒストグラム

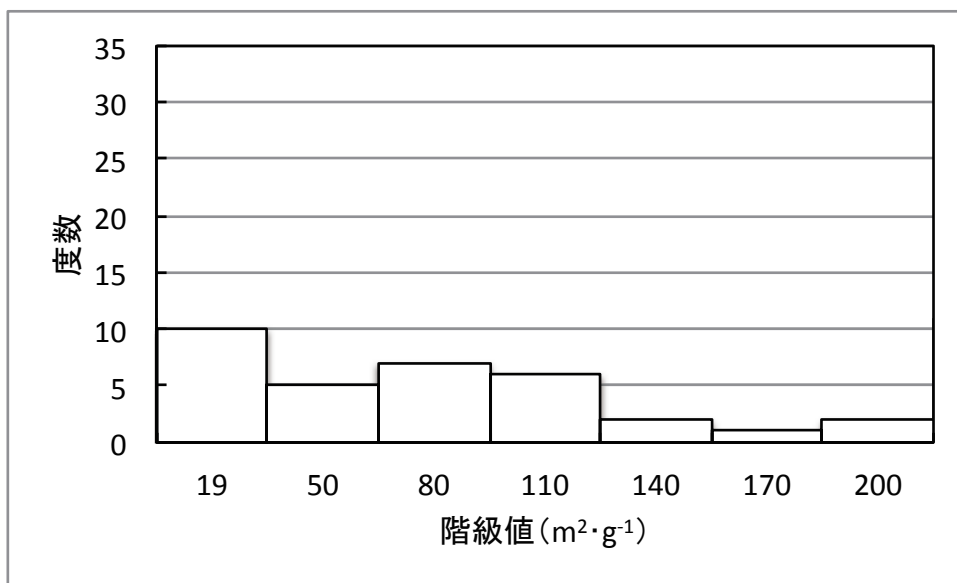


図 3.61 比表面積のヒストグラム

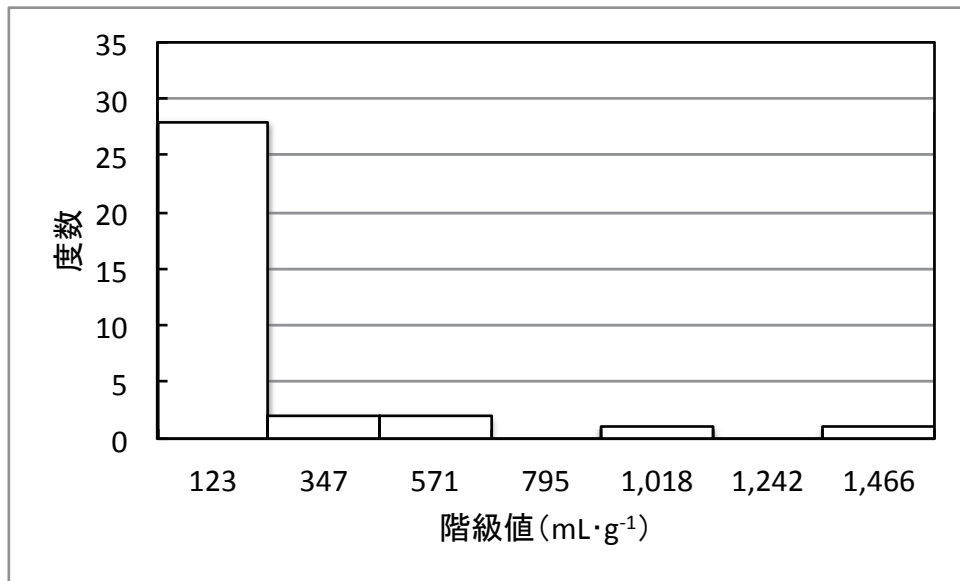


図 3.62 全りんの吸着係数のヒストグラム

#### ④変動係数及び相関係数

続いて、図 3.55～図 3.62 に示した 8 変数について、平均 ( $\bar{x}$ )、分散 ( $s^2$ )、標準偏差 ( $s$ )、変動係数 ( $C.V.$ ) 及び相関係数 ( $r$ ) を式 3.12、式 3.13、式 3.14、式 3.15、前述の式 3.10 を用いて求めた<sup>101</sup>。その結果を表 3.30 及び表 3.31 に示す。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{式 3.12})$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{式 3.13})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{式 3.14})$$

$$C.V. = \frac{s}{\bar{x}} \quad (\text{式 3.15})$$

図 3.62 のヒストグラムでも示したように、表 3.31 に示す変動係数からみても吸着係数のバラツキが大きいことがわかる。

表 3.31 8 変数の平均、分散、標準偏差及び変動係数

|      | Si    | Al    | Fe   | Ca   | Ti   | Mn   | 比表面積     | 吸着係数      |
|------|-------|-------|------|------|------|------|----------|-----------|
| 平均   | 12.36 | 6.28  | 5.08 | 1.63 | 0.50 | 0.13 | 78.90    | 196.80    |
| 分散   | 8.15  | 12.16 | 3.55 | 0.94 | 0.05 | 0.00 | 3,354.73 | 95,815.25 |
| 標準偏差 | 2.86  | 3.49  | 1.88 | 0.97 | 0.23 | 0.05 | 57.92    | 309.54    |
| 変動係数 | 0.23  | 0.56  | 0.37 | 0.60 | 0.46 | 0.41 | 0.73     | 1.57      |

単位：平均及び標準偏差 (Si~Mn：%、比表面積： $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、吸着係数： $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )

分散 (Si~Mn： $\%^2$ 、比表面積： $\text{m}^4 \cdot \text{g}^{-2}$ 、吸着係数： $\text{mL}^2 \cdot \text{g}^{-2}$ )

変動係数 (-)

表 3.32 に示す相関関数の結果から、表 3.30 に示した相関係数の解釈によれば、強い相関関係があるのが Fe と Ti ( $r=0.91$ )、Ti と Mn ( $r=0.80$ )、Fe と Mn ( $r=0.78$ ) で、かなり相関関係があるのが、Si と Al ( $r=0.58$ )、Al と吸着係数 ( $r=0.56$ )、Si と Fe ( $r=-0.49$ )、Ca と Ti ( $r=-0.46$ ) となった。

表 3.32 8 変数に対する相関関数行列

| 変数   | Si    | Al    | Fe    | Ca    | Ti    | Mn    | 比表面積  | 吸着係数  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si   | 1     | 0.58  | -0.49 | 0.06  | -0.24 | -0.22 | -0.13 | 0.27  |
| Al   | 0.58  | 1     | 0.15  | -0.27 | 0.38  | 0.12  | 0.16  | 0.56  |
| Fe   | -0.49 | 0.15  | 1     | -0.30 | 0.91  | 0.78  | 0.09  | 0.17  |
| Ca   | 0.06  | -0.27 | -0.30 | 1     | -0.46 | -0.20 | -0.10 | -0.17 |
| Ti   | -0.24 | 0.38  | 0.91  | -0.46 | 1     | 0.80  | 0.09  | 0.25  |
| Mn   | -0.22 | 0.12  | 0.78  | -0.20 | 0.80  | 1     | 0.02  | 0.00  |
| 比表面積 | -0.13 | 0.16  | 0.09  | -0.10 | 0.09  | 0.02  | 1     | 0.06  |
| 吸着係数 | 0.27  | 0.56  | 0.17  | -0.17 | 0.25  | 0.00  | 0.06  | 1     |

#### ⑤相関図

相関係数の絶対値  $|r|$  の大きい順に相関図にしたものが図 3.63~3.69 である。Fe と Ti には最も強い相関があることがわかった。全りんの吸着係数については、Al との相関があり、Al の組成割合が大きくなることによって、全りんの吸着係数が大きくなることがわかったことが注目すべき点である。一方、Fe と全りんの吸着係数は 0.17 であり、ほとんど相関関係がないことがわかった。Si と Fe



の組成の間には負の相関関係があり、Si と Al には正の相関関係があることなどから、相関係数及び相関図だけによる評価が難しいこともわかった。

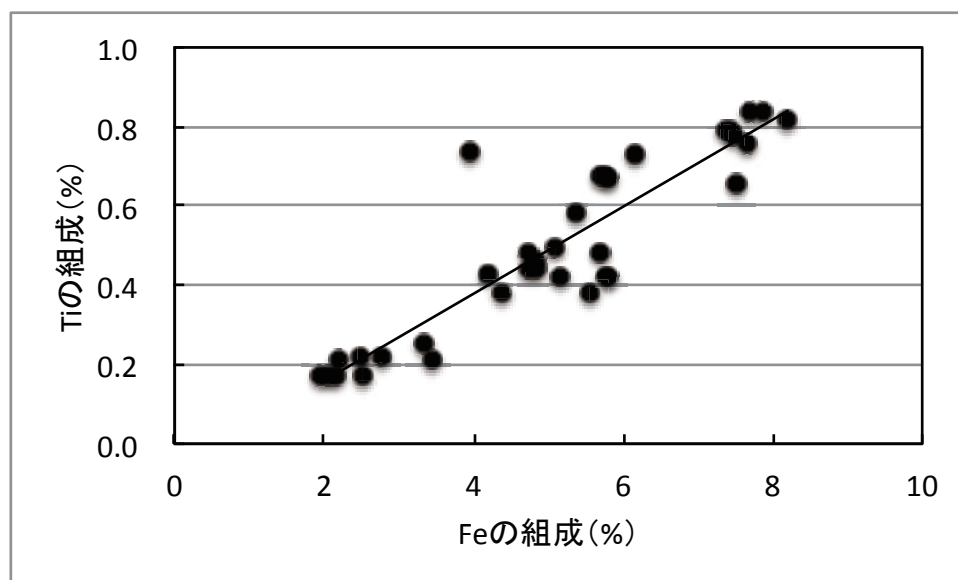


図 3.63 Fe の組成と Ti の組成の相関図 ( $|r|=0.91$ )

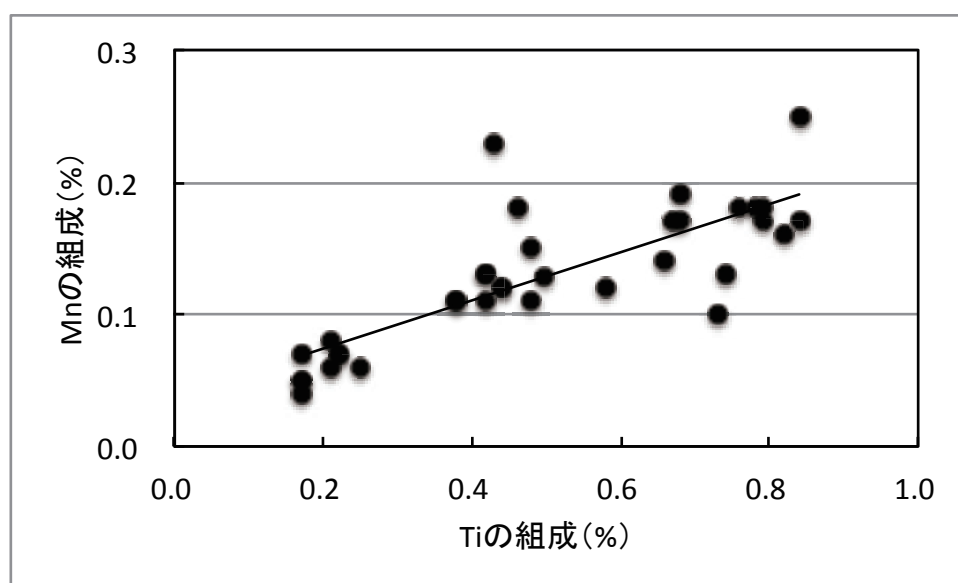


図 3.64 Ti の組成と Mn の組成の相関図 ( $|r|=0.80$ )

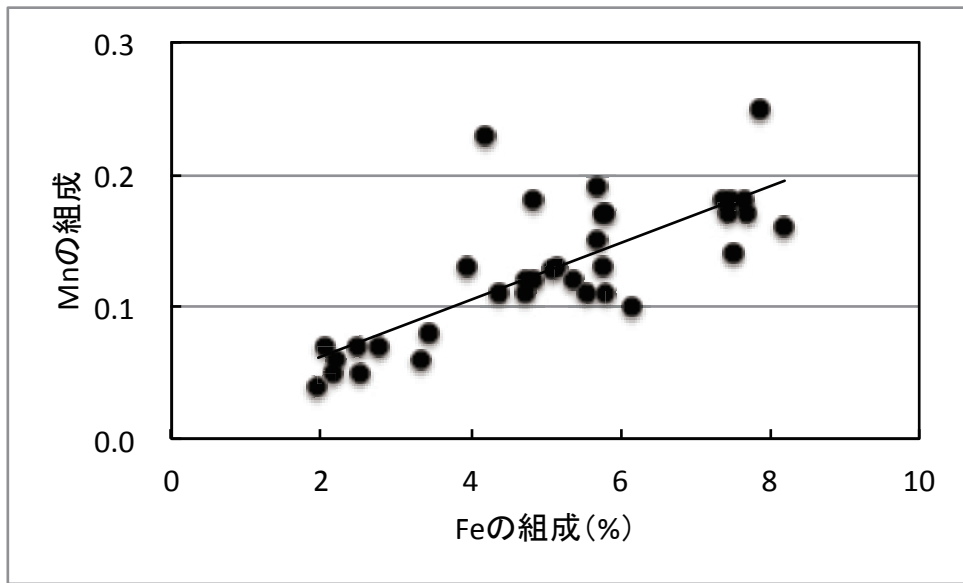


図 3.65 Fe の組成と Mn の組成の相関図 ( $|r|=0.78$ )

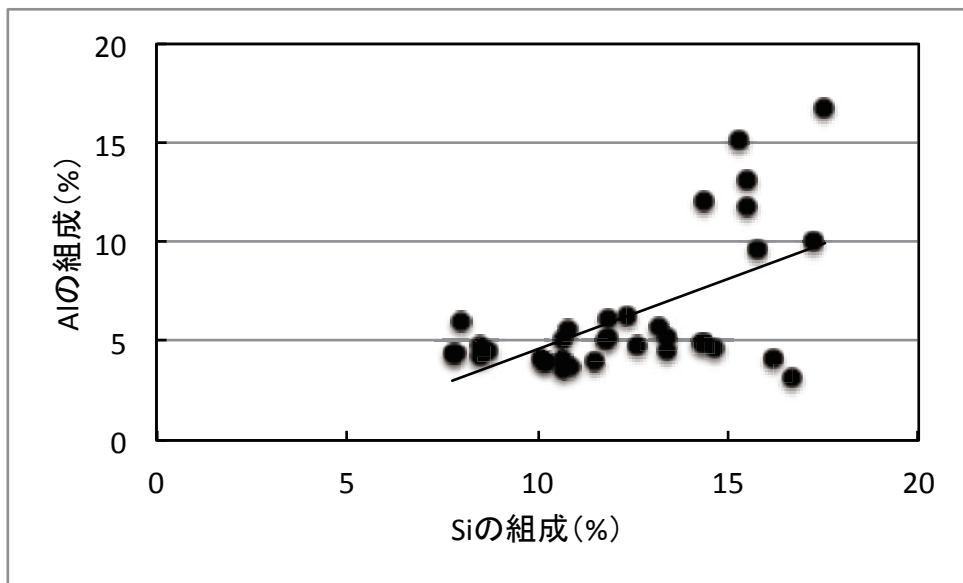


図 3.66 Si の組成と Al の組成の相関図 ( $|r|=0.58$ )

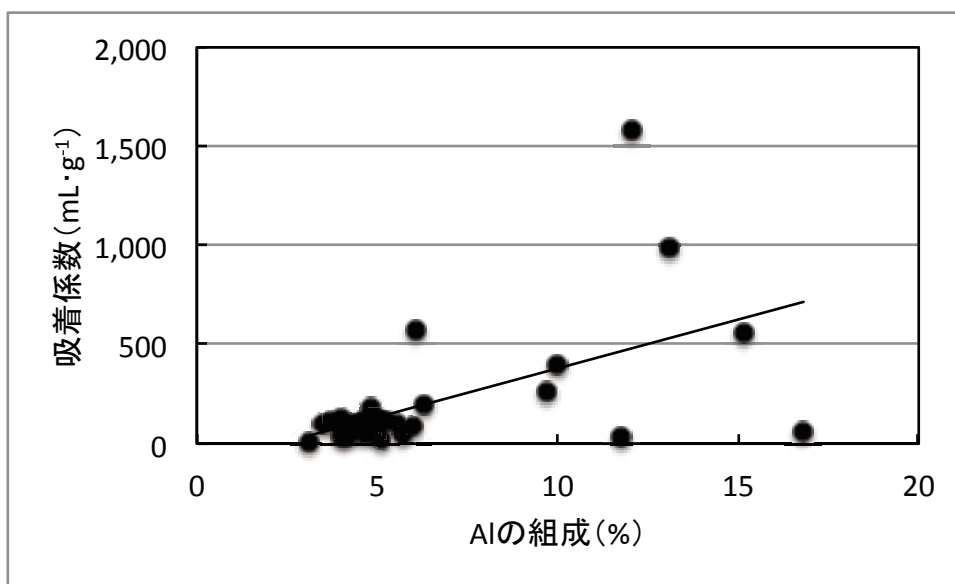


図 3. 67 Al の組成と全りんの吸着係数の相関図 ( $|r|=0.56$ )

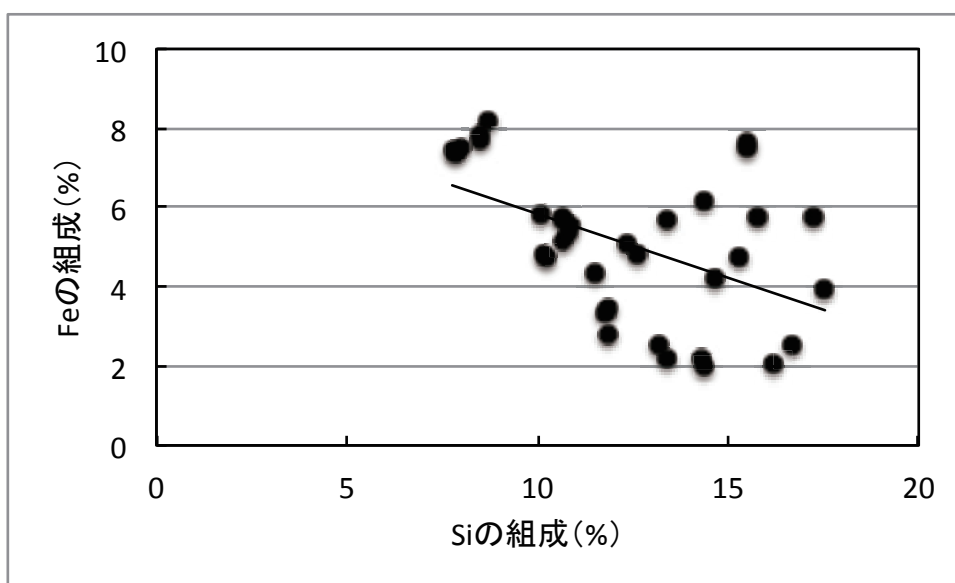


図 3. 68 Si の組成と Fe の組成の相関図 ( $|r|=0.49$ )

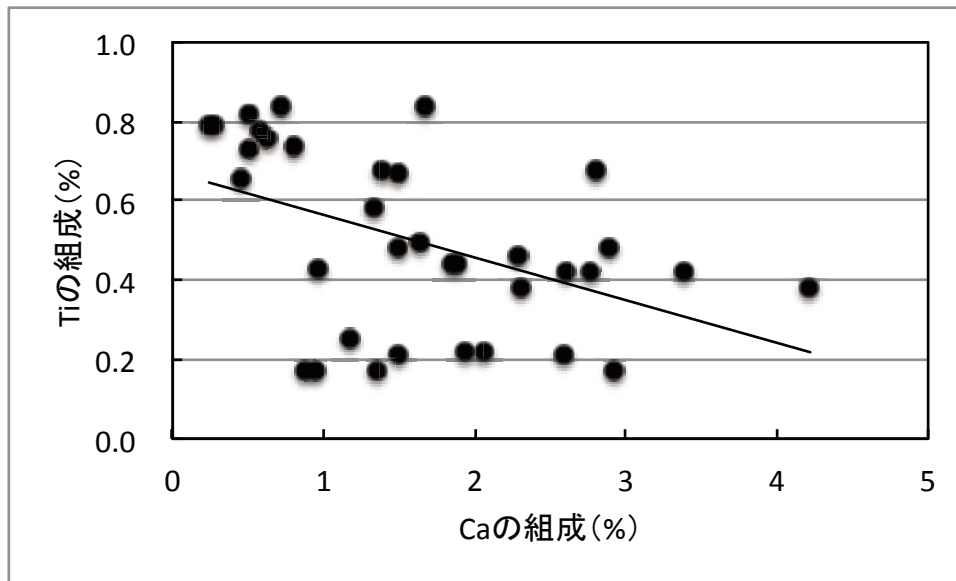


図 3. 69 Ca の組成と Ti の組成の相関図 ( $|r|=0.46$ )

### 3-4-5 主成分分析

相関係数と相関図の評価に加えて、主成分分析についても試みた。主成分分析は多変量解析の一つであり、複数の変数の関係性を解析するために用いられる方法で、複数の変数を合成して別の変数とし、データ群の特性を表す手法である<sup>102</sup>。主成分分析に用いたのは Addinsoft 社製の XLSTAT で、Microsoft Excel にアドインして用いるデータ解析・統計解析のアプリケーションである。

#### ①主成分分析に用いるデータ

組成分析で得られた、Si、Al、Fe、Ca、Ti 及び Mn の組成を主成分分析に用いるデータとし、34 種の土壌について行った。表 3. 33 は、主成分分析に用いる組成の相関関係行列である。

表 3. 33 6 変数に対する相関関数行列

| 変数 | Si     | Al     | Fe     | Ca     | Ti     | Mn     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Si | 1      | 0.581  | -0.489 | 0.064  | -0.241 | -0.218 |
| Al | 0.581  | 1      | 0.146  | -0.275 | 0.383  | 0.118  |
| Fe | -0.489 | 0.146  | 1      | -0.303 | 0.906  | 0.775  |
| Ca | 0.064  | -0.275 | -0.303 | 1      | -0.458 | -0.205 |
| Ti | -0.241 | 0.383  | 0.906  | -0.458 | 1      | 0.797  |
| Mn | -0.218 | 0.118  | 0.775  | -0.205 | 0.797  | 1      |

6変数の相関関係を見ると、FeとTi ( $r=0.906$ )、FeとMn ( $r=0.775$ )、MnとTi ( $r=0.797$ )が強い相関関係があることがわかる。またSiとAl ( $r=0.581$ )とやや強い相関関係があり、SiとFeにはやや強い負の相関関係 ( $r=-0.489$ )があることがわかる。

#### ④6変数による固有値、変動及び累積

6変数に対する相関関数行列から、固有値、変動及び累積を算出した。その結果を図3.70に示す。

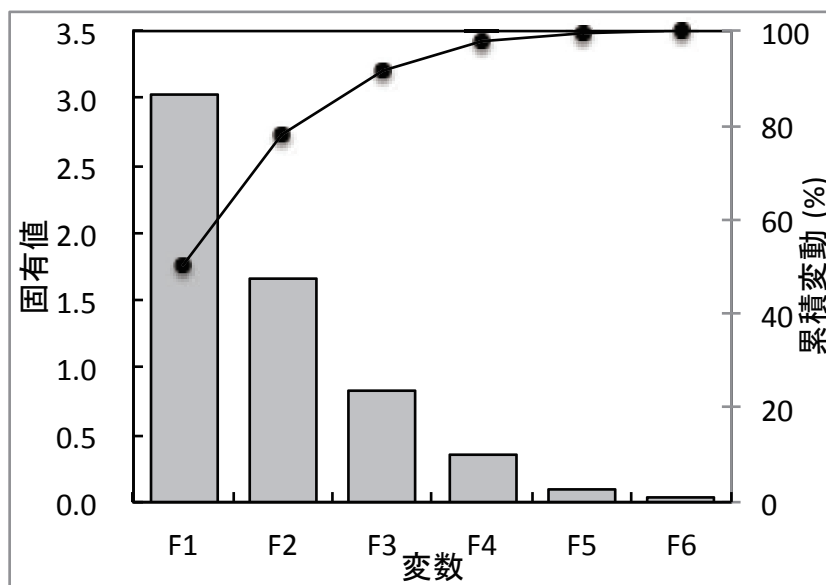


図 3.70 6変数に対する固有値、変動及び累積

第1主成分 (F1) の固有値の変動が50%、第2主成分 (F2) の固有値の変動が28%であり、第1主成分と第2主成分の累積は78%になった。累積が80%に近いので、この6種の変数で主成分分析を続けることとした。

#### ⑤変数と因子の相関

算出した第1主成分及び第2主成分の因子負荷量に対する変数についての相関を表したのが図3.71である。

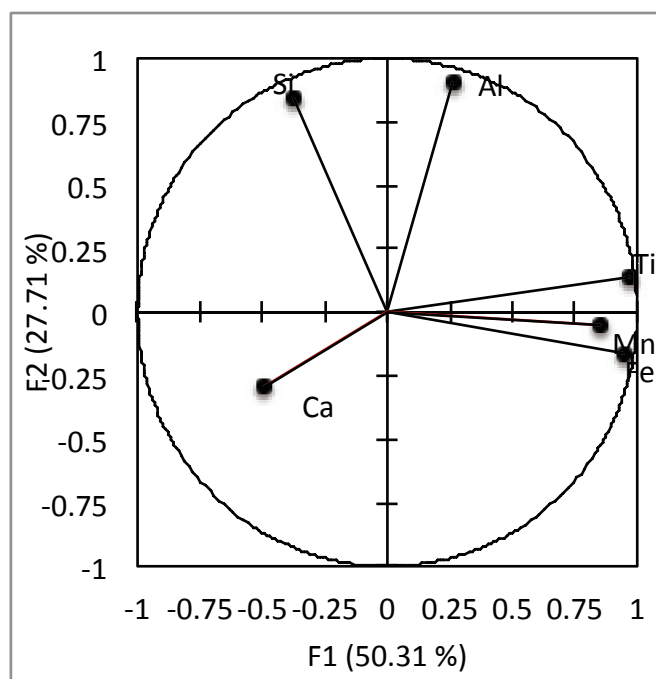


図 3.71 変数と因子の相関

算出した第1主成分及び第2主成分の因子負荷量に対する変数についての相関をみたところ、第1主成分については、Fe、Ti及びMnは正の相関があり、Caは負の相関があった。第2主成分については、Si及びAlは正の相関があることがわかる。

⑥因子得点 (オブザベーション)

次に、第1主成分及び第2主成分から土壌すべての得点を計算した結果を図3.72に示す。



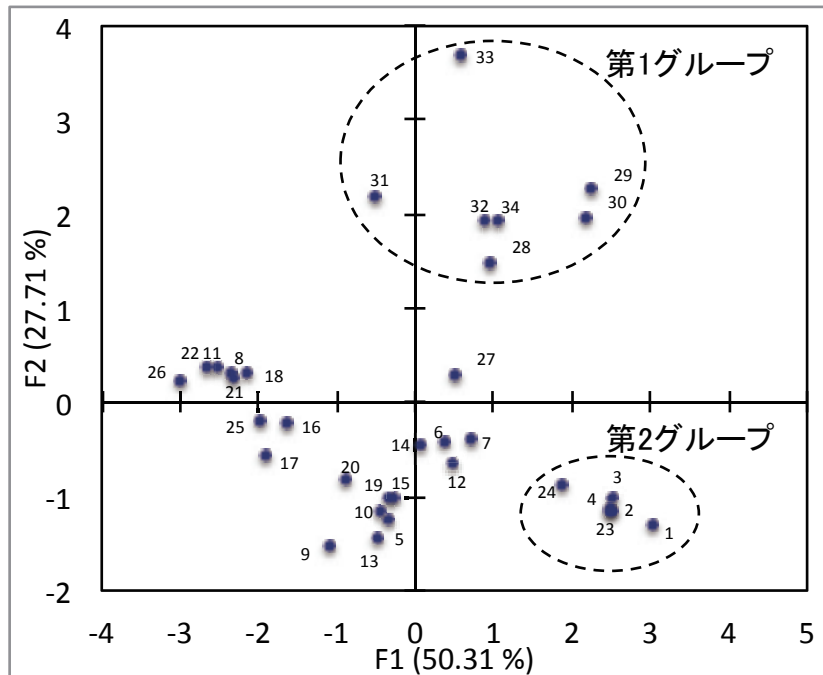


図 3.72 因子得点

また、図 3.72 中にある番号が示す土壤名は、表 3.34 のとおりである。

図 3.72 から、第 1 主成分または第 2 主成分の正側で、おおよそ 2 つのグループに分けることができる。第 2 主成分の正側にある第 1 グループは、大分県豊後大野市及び熊本県天草市で産出された土壤で、第 2 主成分が正側で、第 1 主成分もおおよそ正側に存在する。もう一つの第 2 グループは、熊本県益城町で産出された土壤及び熊本県鹿屋市の黒土、赤土で、第 1 主成分で正側にあり、第 2 主成分で負側にあるものである。いずれの土壤も「黒土」または「赤土」と呼ばれる土壤であり、第 1 グループの吸着係数の平均は  $556 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  であり、第 2 グループの吸着係数の平均は  $108 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  と高い値を示しており、このような土壤を用いることが適切であることがわかった。なお、これらの土壤はいずれも造粒する必要がある土壤であるため、造粒方法を検討しなければならない。

表 3.34 土壌名

| No. | 採取場所           | 土壌名     |
|-----|----------------|---------|
| 1   | 熊本県益城町         | 黒土(上層)  |
| 2   |                | 黒土(中層)  |
| 3   |                | 黒土(下層)  |
| 4   |                | 赤土      |
| 5   | 宮崎県都城市<br>高崎町  | 黒土      |
| 6   |                | 赤土(上層)  |
| 7   |                | ボラ土     |
| 8   |                | 赤土(下層)  |
| 9   | 宮崎県都城市<br>山田町1 | 黒土      |
| 10  |                | ボラ土(上層) |
| 11  |                | ボラ土(下層) |
| 12  | 宮崎県都城市<br>山田町2 | 黒土      |
| 13  |                | ボラ土(上層) |
| 14  |                | ボラ土(下層) |
| 15  | 鹿児島県大崎町        | 黒土      |
| 16  |                | 赤土      |
| 17  |                | ボラ土(赤)  |
| 18  |                | ボラ土(黄)  |
| 19  |                | 製品黒土    |
| 20  | 鹿児島県垂水市        | 黒土      |
| 21  |                | 鹿沼土     |
| 22  |                | さつま土    |
| 23  | 鹿児島県鹿屋市        | 黒土      |
| 24  |                | 赤土      |
| 25  |                | 鹿沼土     |
| 26  |                | さつま土    |
| 27  |                | 粘土      |
| 28  | 大分県豊後大野市千歳町新殿  | 黒土      |
| 29  | 大分県豊後大野市千歳町柴山  | 赤土(表層)  |
| 30  |                | 赤土(中層)  |
| 31  |                | 赤土(下層)  |
| 32  | 大分県豊後大野市三重町百枝  | 黒土      |
| 33  | 熊本県天草市五和町御領    | 表土      |
| 34  |                | 赤土      |

#### 3-4-6 まとめ

九州地域の土壌 34 点を採取し、種々の物理化学特性について分析してりんの吸着係数に影響因子について評価を行った。土壌中に酸化鉄や酸化アルミニウムを添加すると、吸着係数が向上したことから、土壌中に含まれる鉄やアルミニウムがりんの吸着係数に大きく影響するとの仮定としていた。しかしながら、

Al と吸着係数には相関関係はみられたものの、Fe と吸着係数に相関関係はほとんどなかった。次に比表面積が大きければ吸着係数は高くなると仮定していたが、これも大きな相関をみることはできなかった。そこで、主成分分析を試みたところ、第 1 主成分については、Si 及び Al で正の相関が強く、第 2 主成分については、Ti、Mn 及び Fe で正の相関が強いことがわかった。第 2 主成分の正側にある第 1 グループは、大分県豊後大野市及び熊本県天草市で産出された土壤で、第 2 主成分が正側で、第 1 主成分もおおよそ正側に存在する。もう一つの第 2 グループは、熊本県益城町で産出された土壤及び熊本県鹿屋市の黒土、赤土で、第 1 主成分で正側にあり、第 2 主成分で負側にあるものである。いずれの土壤も「黒土」または「赤土」と呼ばれる土壤である。

### 3-5 結語

#### 3-5-1 土壌浸透法用浄化材の開発

本研究の結果に基づき、土壌浸透法に用いる浄化材の開発について手順を取りまとめると図 3.73～3.75 になる。図 3.73 は探索段階、図 3.74 は造粒検討段階、図 3.75 は加熱加工・造粒検討段階を示している。

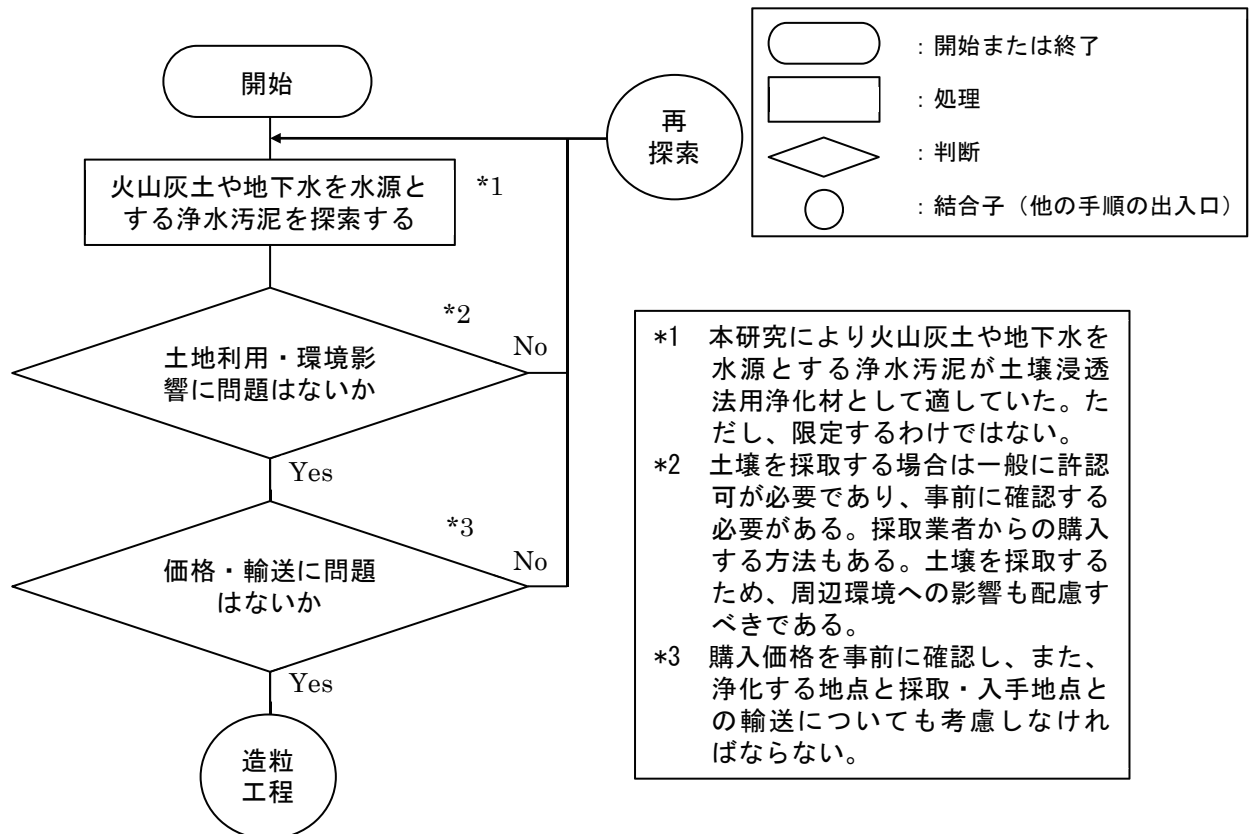


図 3.73 土壌浸透法用浄化材の開発手順（探索段階）

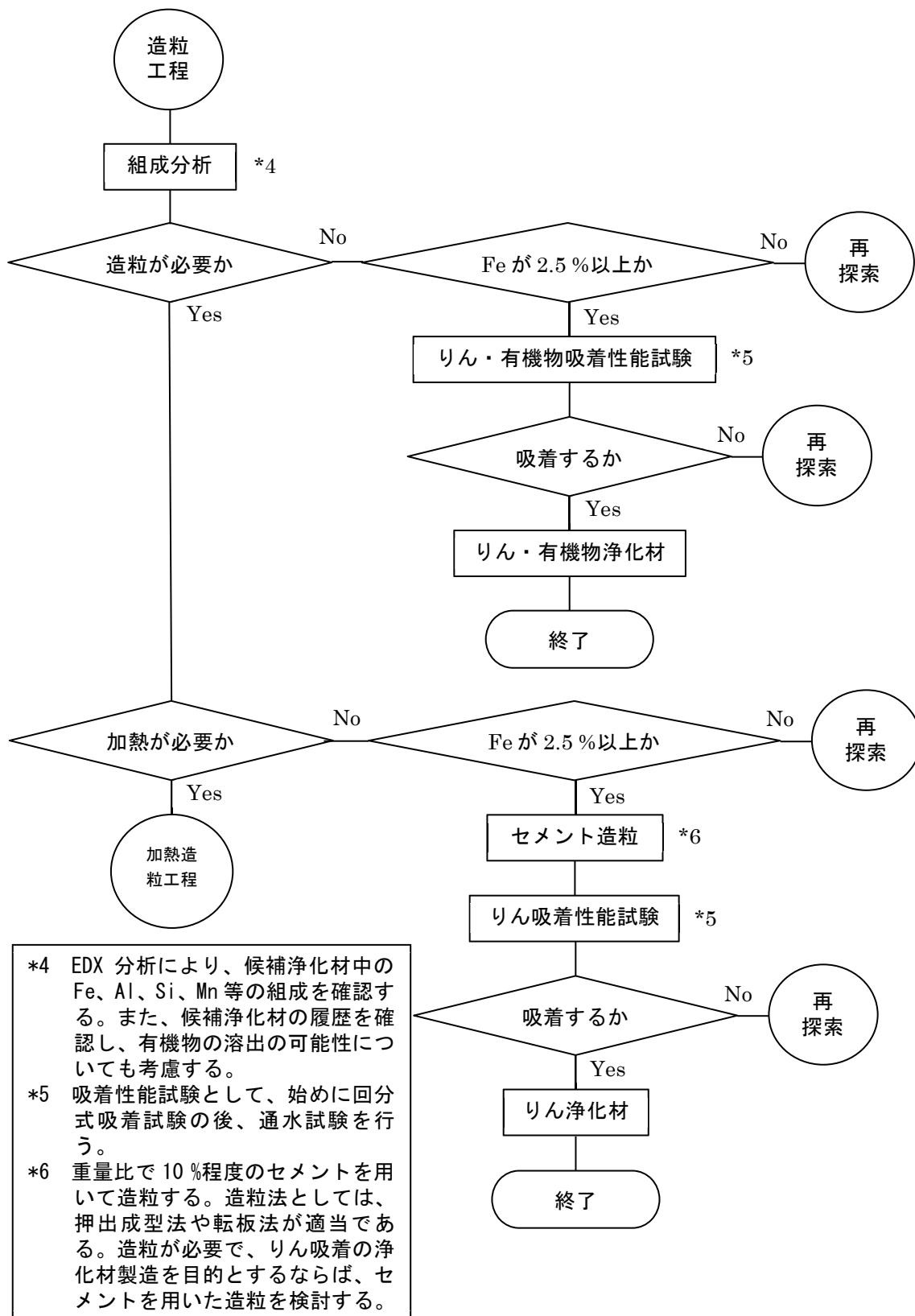


図 3.74 土壌浸透法用浄化材の開発手順（造粒検討段階）

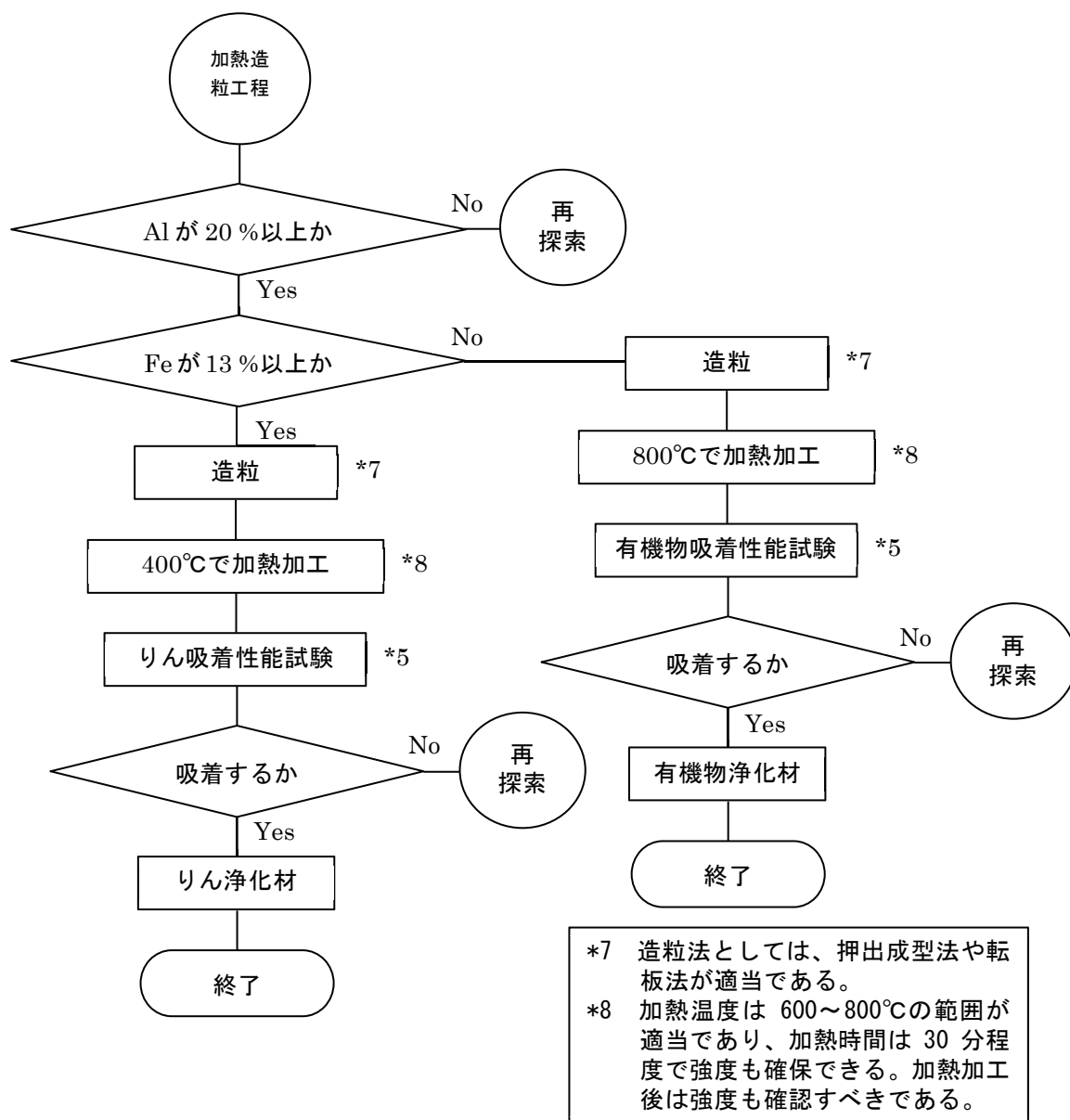


図 3.75 土壌浸透法用浄化材の開発手順（加熱加工・造粒検討段階）

セメントを用いた浄化材の確認実験の結果を図 3.76（第 3 章の図 3.34）に示す。図 3.76 は、実験に供した試料の全りんの除去率を降順に表したグラフである。いずれも 85 %以上という高い除去率であった。表 3.35 に図 3.76 に示した火山灰土の鉄とアルミニウムを示す。いずれも鉄が 2.5 %程度以上含まれており、図 3.73~3.75 に示す手順にも合致する。なお、第 4 章では、宮崎県産の赤土を用いて実験を行った。

栃木県産の赤玉土や鹿沼土は造粒の必要がないので、りんだけでなく有機物



の除去も可能である。造粒が必要でかつ加熱して強度を付加しなければならない場合は、アルミニウムが20%程度以上あることが前提であり、さらに鉄が13%程度以上含まれていれば、りん浄化材として用いることができる。ただし、鉄が13%程度以下であっても、有機物の浄化材としては用いることができる。加熱する場合は、りん浄化材として用いる場合は、400℃程度、有機物浄化材として用いる場合は、800℃程度の加熱温度が適切である。

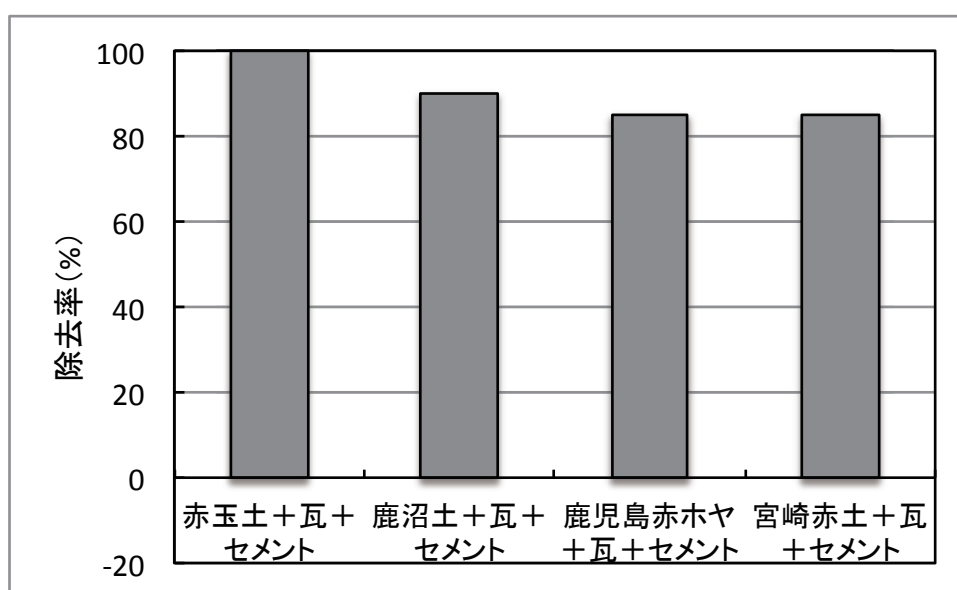


図 3.76 セメントを用いた浄化材造粒の実験結果 (全りん)

表 3.35 図 3.76 に示す火山灰土の鉄とアルミニウムの組成

| 火山灰土名             | 鉄濃度 (%) | アルミニウム濃度 (%) |
|-------------------|---------|--------------|
| 栃木県産・赤玉土*1        | 6.4-7.8 | 8.1-12.9     |
| 栃木県産・鹿沼土*1        | 2.1-2.3 | 13.4-16.8    |
| 鹿児島県産・赤ホヤ (赤土) *2 | 3.3     | 5.0          |
| 宮崎県産・赤土*3         | 5.4     | 5.5          |

\*1 第3章 表 3.2 より参照

\*2 第3章 表 3.22 より参照

\*3 第3章 表 3.21 より参照

### 3-5-2 新たな土壌浸透法用浄化材の探索

九州地域の火山灰土に着目し、探索を実施してりん吸着の評価を行った。図 3.77 は採取した土壌のりん吸着係数を高い値が順に並べたグラフで、図 3.78 は、栃木県鹿沼市産の赤玉土と本研究で取り上げた火山灰土のりん吸着係数上位 5 種の写真である。図 3.79 は、探索を行った地域と採取した土壌のりん吸着係数を示している。図 3.77 のグラフでは「赤土」と称される土壌、「黒土」と称される土壌、そして「その他」として分類している。採取した土壌 34 種については、いずれもりん除去のための浄化材として用いることは可能であるが、特に赤土と呼ばれる土壌が適していることがわかる。赤土も黒土も自然で粒状となっておらず、造粒しなければりん除去のための浄化材として使用は困難である。図 3.77 中で第 3 位であった土壌は、鹿児島県鹿屋市産の鹿沼土であり、図 3.78 でもわかるように、同土壌は造粒の必要がなく、そのまま浄化材として使用することも可能であり、このような、「鹿沼土」、「さつま土」、「ボラ土」と称される土壌については、低コスト化を検討する上で優位な土壌である。

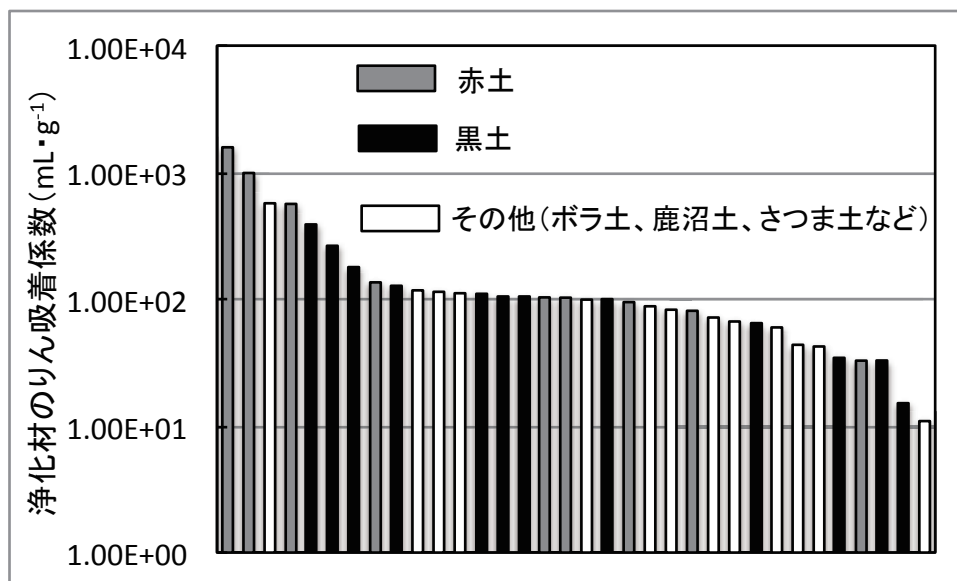


図 3.77 九州地域で探索した 34 種の土壌のりん吸着係数



図 3.78 栃木県鹿沼市産の赤玉土とりん吸着係数上位 5 種の土壤

採取した 34 種の土壤については主成分分析を行った。主成分分析の結果、鉄やアルミニウムの割合が大きいことだけでなく、土壤中の他成分も関わっていることがわかった。ただし、主成分分析で第 1 グループに存在する土壤の内、7 種中 2 種の土壤は、りんの吸着係数の順位で 34 種中 25 位と 31 位であったり、第 2 グループに存在する土壤の内、6 種中 1 種の土壤は、りんの吸着係数の順位で 34 種中 26 位であったりしており、最終的には組成分析だけではなく、りんの吸着試験は必須であることがわかった。

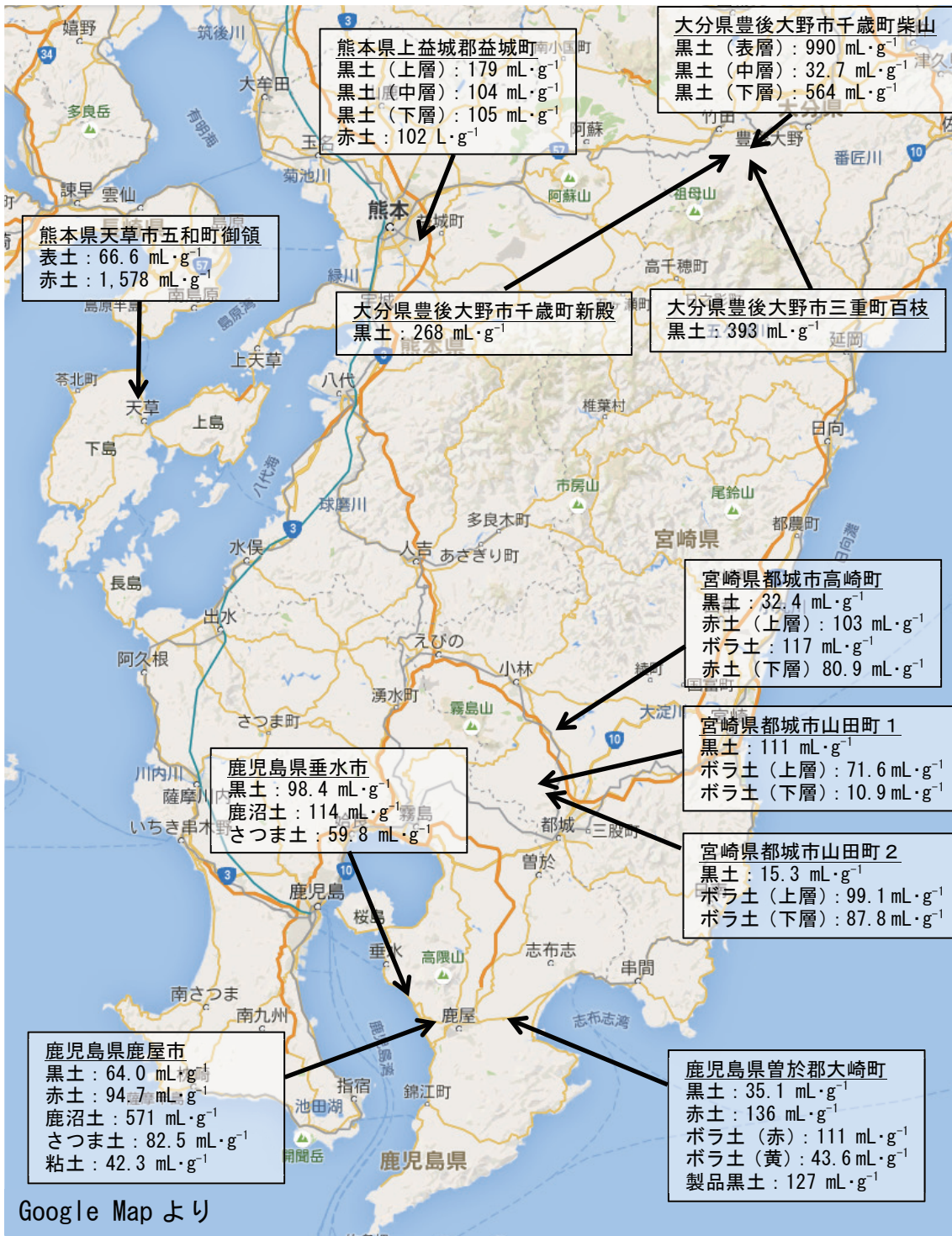


図 3.79 探索した火山灰土のりん吸着係数



## 関連文献

- 1) 濱崎竜英、他、土壌浸透法による河川水浄化の検討 1. バッチ吸着試験による浄化素材探索、Vol. 37、p. 260、日本水環境学会年会講演集、2003
- 2) Hamasaki, T., etc., Re-evaluation and Re-construction of Water Purification System Using Soil II. Removal of Pollutants from Infiltrating Water, 90/1-90/4, ECOHAZARD 2003, International Water Association, 2003
- 3) 濱崎竜英、他、土壌浸透水浄化システムの再評価・再構築 2. 浸透水からの汚濁物質除去メカニズム、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 58、p. 617-618、2003
- 4) 濱崎竜英、他、土壌浸透法に用いる土壌等浄化材加工技術の検討、Vol. 38、p. 505、日本水環境学会年会講演集、2004
- 5) 濱崎竜英、他、土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討 3. 浄化材の加熱加工処理によるフルボ酸及びリン酸の吸着能の変動、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 59、p. 75-76、2004
- 6) 濱崎竜英、他、高速土壌浸透システムの実用化の検討 - 汚泥・土壌の加熱による浸透ろ過材の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-076、2005
- 7) 濱崎竜英、他、高速土壌浸透法による廃水処理 1 加熱浸透ろ材中の鉄・アルミニウム濃度の違いによるフルボ酸の吸着性能、日本水環境学会年会講演集、p. 66、Vol. 40、2006
- 8) 濱崎竜英、他、高速土壌浸透法用ろ過材の探索条件と適切な加工、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 61、No. 7-053、2006
- 9) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 21 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2010
- 10) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 22 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2011
- 11) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 23 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2012

- 12) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 24 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2013
- 13) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 25 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2014
- 14) 濱崎竜英、他、土壌浸透法用りん吸着材に適した九州地方の火山灰土の探索と評価（投稿中）、環境技術、2016

## 参考文献

- <sup>1</sup> 新・公害防止の技術と法規 水質編、(一社) 産業環境管理協会、丸善、2008
- <sup>2</sup> 竹内雍、吸着分離 入門から操作設計まで、培風館、2000
- <sup>3</sup> 近藤精一、他、吸着の科学 第 2 版、丸善、2001
- <sup>4</sup> 土壌の吸着現象 -基礎と応用-、日本土壌肥料学会編、博友社、2001
- <sup>5</sup> 小野嘉夫、他、吸着の科学と応用、講談社サイエンティフィック、2003
- <sup>6</sup> S. C. Reed, R. W. Crites, E. J. Middlebrooks 著、石崎勝義、楠田哲也監訳、自然システムを利用した水質浄化、技報堂出版、2001
- <sup>7</sup> 増永二之、佐藤邦明、若月利之、多段土壌層法による河川や下水処理水の高速高度処理、p. 73、第 37 回日本水環境学会年会講演集、2003
- <sup>8</sup> 佐藤邦明、増永二之、若月利之、多段土壌層法による水質浄化—装置内部における処理プロセスの研究—、p. 74、第 37 回日本水環境学会年会講演集、2003
- <sup>9</sup> Crites R. W., etc., Land treatment vs. awt - how do costs compare?, Water Wastes Eng., Vol. 16, No. 8, p. 16-19, 1979
- <sup>10</sup> Ketchum L. H. Jr, etc., A physical model for overland flow treatment, Proc. Ind. Waste Conf., Vol 34, p. 406-412, 1980
- <sup>11</sup> Troxler R. W., etc., An overview of land treatment in Georgia, 1981 Nat' l Conf. Env. Eng., p. 265-272, 1981
- <sup>12</sup> Overcash, M. R., etc., Coal gasification waste detoxification via land treatment, 1981 Nat' l Conf. Env. Eng., p. 468-478, 1981
- <sup>13</sup> 佐々木光人、他、回転円板および土壌処理システムによる中水道設備計画について、公害と対策、Vol. 17, No. 8, p. 739-743, 1981
- <sup>14</sup> 永井武、他、土壌処理法による家庭雑排水の処理について、静岡県衛生環境センター報告、No. 25, p. 83-88, 1983
- <sup>15</sup> 吉野文雄、他、生活雑排水の土壌処理に関する調査報告書（建設省土木研究所）、土木研究所資料、No. 2591, p. 216, 1988
- <sup>16</sup> 郡司孝志、他、コンニャク根腐病に対するエクロメゾール剤の土壌処理法、関東東山病害虫研究会会報、No. 22, p. 31, 1975
- <sup>17</sup> 原田靖生、家畜尿汚水中の窒素・リンの除去対策、用水と廃水、Vol. 28, No. 10、



---

p. 1035-1039、1986

<sup>18</sup> 岡本信二、他、土壌浄化法による工場排水の高度処理Ⅲ、愛媛県公害技術センター所報、No.10、p.9-15、1989

<sup>19</sup> 松田弘、他、土壌処理法による下水中の窒素除去の最適化、土木学会年次学術講演会講演概要臭第2部、Vol.46、p.360-361、1991

<sup>20</sup> Jiang Y., etc., Change in Microstructure of Clogged Soil in Soil Wastewater Treatment under Prolonged Submergence, Soil Sci. Plant Nutr., Vol. 41, No. 2, p. 207-231, 1995

<sup>21</sup> 石崎勝義、他、小規模排水処理のための粒化土壌の利用に関する研究、地盤工学研究発表会発表講演集、Vol. 34、p. 2219-2220、1999

<sup>22</sup> 川西琢也、他、土壌処理法における窒素の挙動、水質汚濁学会講演集、Vol. 22、p. 147-148、1988

<sup>23</sup> 稲森悠平、他、土壌浸透浄化法による汚水の浄化 水と物質の循環からみた土壌浸透浄化法の意義と展望、Vol. 31、p. 942-949、環境技術、2002

<sup>24</sup> 木持謙、他、土壌浸透浄化法による汚水の浄化 二段式嫌気ろ床・土壌トレンチシステムによる汚水の浄化と海外への技術展開、p. 950-954、Vol. 31、環境技術、2002

<sup>25</sup> 長谷川清、他、土壌処理法の豚舎排水への適用 100頭当たり排水を用いた実験的検討、土木研究所資料、No. 3332、p. 75、1995

<sup>26</sup> 大森正男、他、染色工場排水の土壌処理、神奈川県工業試験所研究報告、No. 56、p. 120-121、1985

<sup>27</sup> 吉田勲、他、多段土壌層法による汚水の三次処理、農業土木学会誌、Vol. 56、No. 7、p. 647-652、1988

<sup>28</sup> 若月利之、他、多段土壌層法による生活排水の浄化システムの開発Ⅰ 多段土壌層法による生活排水中の窒素、リンおよびBOD成分の除去とその浄化能の評価、日本土壌肥料学雑誌、Vol. 60、No. 4、p. 335-344、1989

<sup>29</sup> 若月利之、他、多段土壌層法による生活排水の浄化システムの開発Ⅱ 気温、流出浄化水の流出速度、pH、鉄およびマンガン濃度の経時変化と浄化能力の関係、日本土壌肥料学雑誌、Vol. 60、No. 4、p. 345-351、1989

<sup>30</sup> 若月利之、他、多段土壌層法による生活排水の浄化システムの開発 第3報 浄化装置充填土壌資材の浄化機能と耐用年数、日本土壌肥料学雑誌、Vol. 61、No. 1、p. 74-84、1990

<sup>31</sup> 江角比出郎、他、多段土壌層法を適用した合併浄化槽のBOD、チッソ、リンの除去性能、水質汚濁学会講演集、Vol. 25、p. 394-395、1991

<sup>32</sup> 若月利之、他、多段土壌層法を適用したゴルフ場排水処理装置の農薬成分、チッソ及びリンの除去性能、水質汚濁学会講演集、Vol. 25、p. 48-49、1991

<sup>33</sup> 原田剛臣、他、多段土壌層法による畜産排水の高度処理の試み、日本水環境学会年会講演集、Vol. 31、p. 140、1997

<sup>34</sup> 佐藤邦明、他、多段土壌層法による汚濁河川水高速処理システムの開発 北九州熊添川の浄化施設計画の予備実験結果報告、日本土壌肥料学会講演要旨集、Vol. 47、p. 204、2001

- <sup>35</sup> 増永二之、他、土壤浸透浄化法による汚水の浄化 多段土壤層法による汚水の浄化特性、Vol. 31、p. 955-962、環境技術、2002
- <sup>36</sup> 増永二之、他、多段土壤層法によるシマジン、フェニトロチオン、ナプロパミド、テトラクロロエチレンの除去に関する研究、水環境学会誌、Vol. 25、No. 6、p. 361-366、2002
- <sup>37</sup> 増永二之、他、多段土壤層法による河川や下水処理水の高速高度処理、日本水環境学会年会講演集、Vol. 37、p. 73、2003
- <sup>38</sup> 佐藤邦明、他、多段土壤層法による水質浄化—装置内部における処理プロセスの研究—、日本水環境学会年会講演集、Vol. 37、p. 74、2003
- <sup>39</sup> 増永二之、他、22. 環境保全 多段土壤層法による汚濁河川浄化、日本土壤肥料学会講演要旨集、Vol. 49、p. 168、2003
- <sup>40</sup> 安池友時、他、多段土壤層法による汚水処理機構の解明 13年間家庭排水処理を行った装置内の理化学性の変化、日本土壤肥料学会講演要旨集、Vol. 50、p. 185、2004
- <sup>41</sup> 佐藤邦明、他、金属鉄とおがくずを利用した窒素・リン高度水質浄化技術の開発、用水と廃水、Vol. 51、No. 12、p. 1007-1017、2009
- <sup>42</sup> 佐藤邦明、他、土壤式水質浄化法における土壤構造と浄化能との関係 水移動から見た定量的評価、日本土壤肥料学会講演要旨集、Vol. 58、p. 154、2012
- <sup>43</sup> 菅原正孝、土壤浸透法による総合的水環境管理 (2)、土木学会関西支部年次学術講演会講演概要、Vol. 1990、p. G1.1-G1.2、1990
- <sup>44</sup> 菅原正孝、他、流域水管理における土壤機能の活用に関する研究 (鉄鋼業環境保全技術開発基金 S)、流域水管理における土壤機能の活用に関する研究 平成5年、p. 9、1993
- <sup>45</sup> 濱崎竜英、他、土壤浸透法による河川水浄化の検討 1. バッチ吸着試験による浄化素材探索、Vol. 37、p. 260、日本水環境学会年会講演集、2003
- <sup>46</sup> 藤川陽子、他、土壤浸透法による河川水浄化の検討 2. カラム通水試験下での素材の性能、Vol. 37、p. 263、日本水環境学会年会講演集、2003
- <sup>47</sup> 藤川陽子、他、土壤浸透水浄化システムの再評価・再構築、環境衛生工学研究、No. 17、p. 35-40、2003
- <sup>48</sup> 濱崎竜英、他、土壤浸透法による河川水の浄化、第38回日本工業用水研究発表会、講演要旨、p. 79-82、2003
- <sup>49</sup> 藤川陽子、他、土壤浸透法による環境水中腐植物質難分解性有機物の除去の基礎的検討、第9回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、p. 372-375、2003
- <sup>50</sup> Fujikawa, Y., etc., Re-evaluation and Re-construction of Water Purification System Using Soil I. Assessment of Soil as a Sorbent of Humic Substances and Phosphorous Acid, 89/1-89/4, ECOHAZARD 2003, International Water Association, 2003
- <sup>51</sup> Hamasaki, T., etc., Re-evaluation and Re-construction of Water Purification System Using Soil II. Removal of Pollutants from Infiltrating Water, 90/1-90/4, ECOHAZARD 2003, International Water Association, 2003

- 
- <sup>52</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透水浄化システムの再評価・再構築 1. 腐植物質及びリンに対する土壌の吸着能評価、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 58、p. 615-616、2003
- <sup>53</sup> 濱崎竜英、他、土壌浸透水浄化システムの再評価・再構築 2. 浸透水からの汚濁物質除去メカニズム、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 58、p. 617-618、2003
- <sup>54</sup> 濱崎竜英、他、土壌浸透法に用いる土壌等浄化材加工技術の検討、Vol. 38、p. 505、日本水環境学会年会講演集、2004
- <sup>55</sup> 今田綾介、他、土壌浸透法によるリン・有機物の除去機構、Vol. 38、日本水環境学会年会講演集、p. 515、2004
- <sup>56</sup> 藤川陽子、他、既存の土壌浸透水処理施設の浄化性能の研究 1、浄化施設流出水の逐次分析方法、Vol. 38、p. 506、日本水環境学会年会講演集、2004
- <sup>57</sup> ギャネンドラ・プロサイ、他、既存の土壌浸透水処理施設の浄化性能の研究 2、実施の観測結果、Vol. 38、p. 507、日本水環境学会年会講演集、2004
- <sup>58</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討-通水条件下と静的条件下での新しい浄化素材の難分解性有機物・リン酸吸着能の比較、環境衛生工学研究、No. 18、p. 214-218、2004
- <sup>59</sup> ギャネンドラ・プロサイ、他、生分解性と潜在的変異原性に基づく溶解性有機物質の診断-新規な有機物分画法の開発と適用、環境衛生工学研究、No. 18、p. 192-197、2004
- <sup>60</sup> Sugahara, M., etc., Basic Experimental Research for the reconstruction of water purification system using soil - Sorption isotherm of fulvic acid and phosphate ion for selected materials under different pH, Proceedings of International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum 2004, Monaco, IAEA-CN-118/137P, 2004
- <sup>61</sup> Fujikawa, Y., etc., Basic experimental research for the reconstruction of water purification system using soil - Sorption of Refractory DOM and Phosphate Ion to Soil Beads Under Static and Dynamic Water Flow Conditions, Proceedings of International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum 2004, Monaco, IAEA-CN-118/124P, 2004
- <sup>62</sup> Hamasaki, T., etc., Basic experimental research for the reconstruction of water purification system using soil - Changes of sorption of fulvic acid and phosphoric acid by heating processing Ion to Soil Beads Under Static and Dynamic Water Flow Conditions, Proceedings of International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum 2004, Monaco, IAEA-CN-118/143P, 2004
- <sup>63</sup> Sugahara, M., etc., Soil Percolation System for Wastewater and River Water Treatment in Japan 1. History of Technical Developments, Proceedings of the 4th International Conference on Watershed Management and Urban Water Supply, Shenzhen, China, p. 666-671, 2004
- <sup>64</sup> Fujikawa, Y., etc., Soil Percolation System for Wastewater and River

---

Water Treatment in Japan 2. Development of a Rapid Infiltration System Using Granulated Soil, Proceedings of the 4th International Conference on Watershed Management and Urban Water Supply, Shenzhen, China, p637-654, 2004

<sup>65</sup> 今田綾介、他、土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討1．フルボ酸およびリン酸の土壌等への吸着等温式の検討、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 59、p. 71-72、2004

<sup>66</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討2．通水条件下と静的条件下での土壌の難分解性有機物・リン酸吸着能の比較、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 59、p. 73-74、2004

<sup>67</sup> 濱崎竜英、他、土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討3．浄化材の加熱加工処理によるフルボ酸及びリン酸の吸着能の変動、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 59、p. 75-76、2004

<sup>68</sup> 濱崎竜英、他、高速土壌浸透システムの実用化の検討－汚泥・土壌の加熱による浸透ろ過材の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-076、2005

<sup>69</sup> 藤川陽子、他、高速土壌浸透水浄化システム実用化の検討－造粒土の性能と寿命、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-075、2005

<sup>70</sup> 山崎力、他、高速土壌浸透システムの実用の検討－リン・難分解性有機物・色度除去のための浄化素材、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-078、2005

<sup>71</sup> 阿部悠子、他、高速土壌浸透システムの実用の検討－逐次分画法によるパイロットスケール試験施設の有機物除去性能観測、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-077、2005

<sup>72</sup> 櫻井伸治、他、高速土壌浸透システムの実用の検討－使用済み浸透ろ材における植物育成、土木学会年次学術講演会講演概要集、No. 60、No. 7-225、2005

<sup>73</sup> 藤川陽子、他、高速土壌浸透水浄化システム実用化の検討、環境衛生工学研究、No. 19、p. 175-178、2005

<sup>74</sup> 櫻井伸治、他、使用済み浸透ろ材における植物育成、環境衛生工学研究、No. 19、p. 183-186、2005

<sup>75</sup> 濱崎竜英、他、高速土壌浸透法による廃水処理1 加熱浸透ろ材中の鉄・アルミニウム濃度の違いによるフルボ酸の吸着性能、日本水環境学会年会講演集、Vol. 40、p. 66、2006

<sup>76</sup> 原侑子、他、高速土壌浸透法による廃水処理2、有機物の逐次分画とサイズ排除クロマトグラフィ、CHNS測定による有機物特性の同定、日本水環境学会年会講演集、Vol. 40、p. 67、2006

<sup>77</sup> 阿部悠子、他、高速土壌浸透法による廃水処理3、畜産廃水中のエストロン、エストラジオール、エストリオールの処理効率、日本水環境学会年会講演集、Vol. 40、p. 62、2006

<sup>78</sup> 濱崎竜英、他、高速土壌浸透法用ろ過材の探索条件と適切な加工、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 61、No. 7-053、2006

- 
- <sup>79</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透法に使用後のろ材における植物育成試験、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 61、No. 7-140、2006
- <sup>80</sup> 藤川陽子、他、造粒土を用いた高速土壌浸透法による畜産廃水処理-エストロゲン・難分解性有機物・リンの除去効率、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、Vol. 12、p. s3-s4、2006
- <sup>81</sup> 梶山陽介、他、造粒赤玉土及びろ材混合黒ボク土を用いた畜産排水からのリン除去、日本水環境学会年会講演集、Vol. 41、p. 420、2007
- <sup>82</sup> 川田拓真、他、高速土壌浸透法に適したろ材の探索-フルボ酸とリン酸の吸着を中心に-、日本水環境学会年会講演集、Vol. 41、p. 298、2007
- <sup>83</sup> 川田拓真、他、土壌浸透ろ材の性能変化の原因に関する考察、日本水環境学会年会講演集、Vol. 42、p. 455、2008
- <sup>84</sup> 藤川陽子、他、火山灰土のリン・フルボ酸吸着性能が保管条件により変化する理由の検討、環境技術学会研究発表大会及び特別講演会予稿集、Vol. 9、p. 49-50、2009
- <sup>85</sup> 菅原正孝、他、土壌浸透法の技術的発展、大阪産業大学人間環境論集、No. 9、p. 243-260、2010
- <sup>86</sup> 濱崎竜英、他、土壌浸透法による路面排水中の有機物と濁度の除去、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 65、No. 7-018、2010
- <sup>87</sup> 濱崎竜英、他、土壌浸透法による路面排水浄化の実証実験、環境技術学会研究発表大会及び特別講演会予稿集、Vol. 10、p. 62-63、2010
- <sup>88</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透浄化法 第3回造粒化土壌処理法と実施例、環境技術、Vol. 41、p. 115-119、2012
- <sup>89</sup> 藤川陽子、他、土壌浸透浄化法 第5回(最終回)土壌浸透浄化法の課題と展望、環境技術、Vol. 41、p. 509-512、2012
- <sup>90</sup> 堀野善司、他、土壌浄化実験 I、水、Vol. 42、No. 12、p. 26-33、2000
- <sup>91</sup> 和田桂子、他、土壌浸透による水質浄化法-施設上部構造と通水方法の検討-、日本水環境学会年会講演集、Vol. 38、p. 504、2004
- <sup>92</sup> 和田桂子、他、土壌浸透による水質浄化法-赤玉土を用いた通水速度の検討-、日本水環境学会年会講演集、Vol. 40、p. 199、2006
- <sup>93</sup> 木田豊、他、琵琶湖の生態系と水質の改善 琵琶湖集水域における路面排水対策とその効果、環境技術、Vol. 35、p. 564-569、2006
- <sup>94</sup> 佐久間維美、他、琵琶湖の生態系と水質の改善 草津川放水路浄化事業における土壌浄化の取り組み、環境技術、Vol. 35、p. 570-574、2006
- <sup>95</sup> 和田桂子、他、土壌浸透処理による赤玉土のリン除去性能および吸着特性の長期カラム実証評価、水環境学会誌、Vol. 37、p. 404、No. 2、p. 55-62、2014
- <sup>96</sup> 生地正人、他、薄層型傾斜土壌生物膜による高度化技術、日本水環境学会シンポジウム講演集、Vol. 7、p. 131-132、2004
- <sup>97</sup> 板山朋聡、他、傾斜土壌処理システムによる生活雑排水処理の実証試験の解析・評価、日本水処理生物学会誌 別巻、No. 25、p. 50、2005
- <sup>98</sup> 平成26年度版だいたいの環境(環境白書・平成25年度年次報告書)、大東市、2014

- 
- <sup>99</sup> Weblio 辞書ホームページ ([www.weblio.jp](http://www.weblio.jp)) -ピアソンの積率相関係数
- <sup>100</sup> 土壌の吸着現象-基礎と応用-, 日本土壌肥料学会編、博友社、2001
- <sup>101</sup> 栗原伸一、入門統計学-検定から多変量解析・実験計画法まで-, オーム社、2014
- <sup>102</sup> 藤本壱、Excel でできるらくらく統計解析 新版、自由国民社、2010



## 第4章 土壌浸透法を用いた路面排水及び表流水の浄化

### 4-1 概説

環境白書<sup>1</sup>の水環境の現状に示されているように、河川や湖沼の有機物濃度は、改善傾向にあるものの、その改善は鈍化しており、特に湖沼においては、CODの環境基準を超える測定点が半数程度となったままである。このような状況を招いている一因として面源負荷が考えられる。面源負荷の内、道路面からの排水については、舗装率の向上とともに道路延伸の傾向にある中で、点源負荷のような対策が進められていない。広範な道路面の排水を処理するためには、膨大な費用が必要となるため、現段階では簡単に進めることはできない。

そこで、施工及び維持管理の費用が小さく、かつ構造が簡単で維持管理しやすい土壌浸透法に着目し、路面排水対策への検討を始めた。土壌浸透法は、研究者らが以前から様々な排水の処理について検討してきており、これまでの知見を活かし、路面排水の適用について、実験室での基礎実験と高架道路でのフィールド実証実験を実施した（第4章第2項）。

また、第3章で造粒方法の検討を行ったが、セメントを用いる方法であれば、有機物は除去できないものの、りんの吸着は可能であることがわかった。そこで、セメントを用いた方法によって造粒した土壌を用いた実証的な実験を表流水を対象として行った（第4章第3項）。

### 4-2 路面排水

#### 4-2-1 土壌浸透法による路面排水中の有機物と濁度の除去

##### (1) 実験方法

本研究では、雨天時に貯留して得られた路面排水を対象に大阪産業大学内実験室にてカラムを用いた通水実験を行い、通水速度や浄化材の違いによる汚濁物質の除去能を把握することを目的とした。

関西圏内にある高架道路の雨水集水管（樋）から得られた雨水排水を 1.0 m<sup>3</sup> の貯留槽に、ストレーナーに通過した後に貯留させて自然沈殿した上澄水を原水とし、大阪産業大学内実験室において、通水速度及び浄化材の種類の違いによる有機物と濁度の除去を実験的に検討した。実験装置の概略を図 4.1、実験条件を表 4.1 に示す。

原水容器に路面排水を投入し、定量ポンプにて流量調整を行って浄化材を充填したカラムに通水した。カラムは密閉されており、流入した路面排水と同量

の処理水が流出する仕組みとなっている。一般に土壌浸透法の通水速度は、1-2 m・day<sup>-1</sup>程度が適当であるとされていることから、通水速度 2.45 m・day<sup>-1</sup>を最小とし、さらに2倍及び4倍として3種類の速度で検討した。

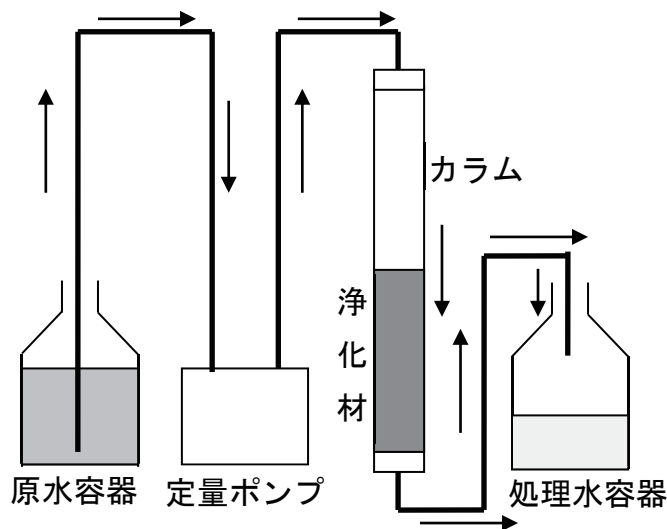


図 4.1 実験装置概略図

表 4.1 実験条件

|            |  |        |  |
|------------|--|--------|--|
| カラム内径      | 25 mm  |        |  |
| カラム高さ      | 200 mm   |        |  |
| 浄化材高さ      | 100 mm   |        |  |
| 通水速度       | 2.45 m・day <sup>-1</sup> 、4.90 m・day <sup>-1</sup> 、9.80 m・day <sup>-1</sup> |        |  |
| 実験温度       | 25 °C  |        |  |
| 実験に供した 浄化材 | 浄化材の種類<br>(加熱・非加熱)   | 質量 (g) | 比表面積<br>(m <sup>2</sup> ・g <sup>-1</sup> ) |
|            | 赤玉土 (加熱)   | 29.3   | 26   |
|            | 赤玉土 (非加熱)  | 31.0   | 34   |
|            | 鹿沼土 (加熱)   | 19.6   | 191  |
|            | 鹿沼土 (非加熱)  | 18.8   | 112  |
| 加熱条件       | マッフル炉 800 °C、30 min  |        |  |

あらかじめ浄化材は水道水で洗浄して 40 °Cで乾燥させたものをカラムに投入し、実験開始前に浄化材高さと同じ高さまで路面排水を入れて浸漬させて通水し、1~2 日程度の馴養期間において処理実験を開始した。実験に供した浄化材は、本研究で、有機物やリンの除去能が高く、浄化材として有望であると判断した火山灰土の赤玉土と鹿沼土を用いた。いずれもホームセンターや園芸店

で一般に市販されているものである。また、マッフル炉によって 800 °C で 30 分加熱した赤玉土及び鹿沼土も用いた。加熱条件についても前章の研究により、800 °C 付近で非加熱と同等の除去効果があることが確認されていたためである。加熱した理由は、通水性を確保するために浄化材を造粒するとともに、物理的強度を増加させることが求められる場合があるためである。また、赤玉土及び鹿沼土に含まれている鉄やアルミニウムが除去能に大きく影響していることも前章のより明らかになっている。

第 3 章の EDX による組成分析で、赤玉土には鉄が 6.4~7.8 %、アルミニウムが 8.1~12.9 %、鹿沼土には鉄が 2.1~2.3 %、アルミニウムが 13.4~16.8 % 含まれ、赤玉土は鹿沼土より鉄濃度が高く、鹿沼土は赤玉土よりアルミニウム濃度が高いことがわかっている。また、今回の実験に供した浄化材のフルボ酸の吸着係数は、第 3 章の研究結果では、赤玉土（非加熱） $24.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、赤玉土（加熱） $12.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、鹿沼土（非加熱） $19.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、鹿沼土（加熱） $15.7 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  であった。以上の 4 種類の土壌を浄化材として実験を行った。評価に用いた水質項目は、有機物の指標として TOC とし、懸濁物質の指標として濁度を用いた。TOC は SIEVERS Instruments Inc. 製 TOC810 型で DOC として測定し、濁度は HACH Company 製 2100 型で測定した。なお、りんについては、第 2 章に示した測定結果から路面排水中のりん濃度が高くなかったため、本研究では評価対象としなかった。

## （2）実験結果と考察

実験の結果を図 4.2 及び 4.3 に示す。原水濃度は、pH が 7.1~7.2、EC が  $143 \sim 164 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、TOC が  $8.6 \sim 10.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、濁度が 21~23 NTU であった。TOC の除去率は赤玉土（非加熱）で最も高く、およそ 5 割程度除去することができた。通水速度を上げると除去率は低下した。濁度の除去率は、鹿沼土（加熱）が最も高く、およそ 8 割程度除去することができた。鹿沼土（加熱）は、比表面積が最も大きいことが濁度の除去率を上昇させたのではないかと考えられる。通水速度を上げると有機物の除去とほぼ同様に除去率は 60%程度低下した。

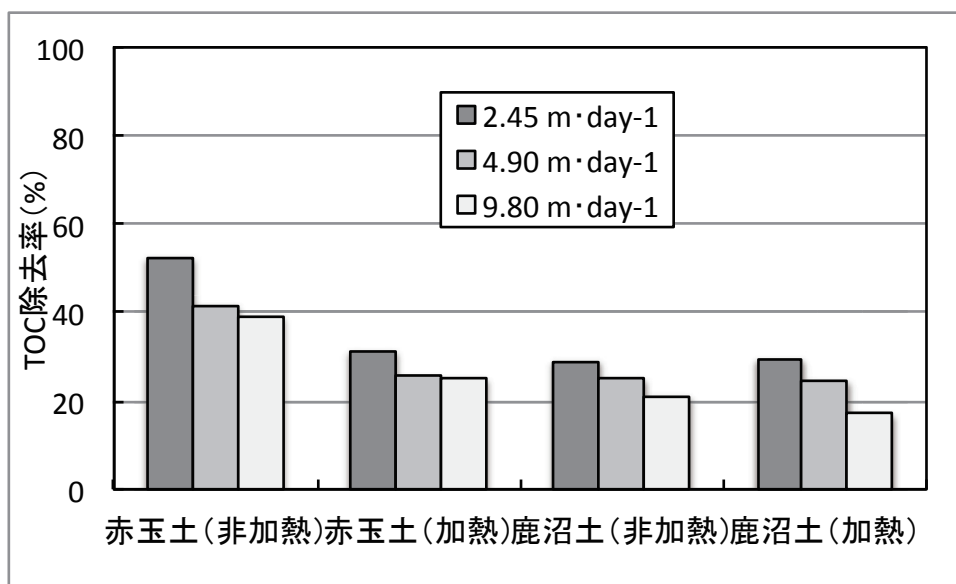


図 4.2 TOC の除去率

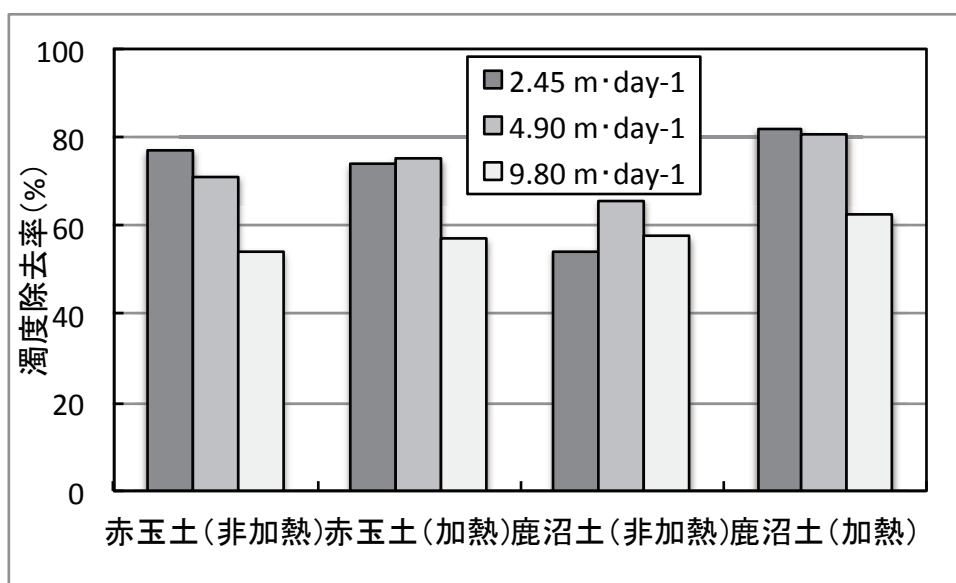


図 4.3 濁度の除去率

### (3) まとめ

通水速度が2倍、4倍と上昇するにしたがって、TOCも濁度も除去率は緩やかに低下した。通水速度が今回の研究よりも遅い  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  以下であれば、除去率は上昇すると予測できるが、その場合、処理施設の敷地面積が大きくなり現実的ではない。一般的に土壌浸透法の場合、 $1\sim 2 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$ 程度が理想であるが、路面排水を対象とした場合であっても、同程度の通水速度が適当であることが

わかった。

#### 4-2-2 土壌浸透法による路面排水浄化の実証実験

##### (1) 実験方法

実験 3-5(第 3 章)では、浄化材の違いや通水速度の違いについて検討したが、有機物の除去については加熱していない赤玉土、濁度の除去については 800 °C、30 分で加熱した鹿沼土が良好な結果が得られ、通水速度は  $2.45 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  程度でも十分に除去できることがわかった。このような結果から、フィールド実証実験では加熱していない赤玉土を採用し、通水速度は  $2.0 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$  を超えないように調整した。

フィールド実証実験は、関係機関の協力のもと、関西圏内にある高架道路直下で実施した。図 4.4 に示すように、高架道路の雨水集水管(樋)を加工し、フィールド実証実験装置を接続した。フィールド実証実験装置は、沈殿槽、浄化槽及び貯水槽の 3 つの槽(それぞれ  $1.0 \text{ m}^3$ )で構成している。沈殿槽には、ごみや砂などを除去するスクリーンが樋からの流入口直下に取り付けられ、ごみや砂の浄化槽への流入を抑制し、かつ沈殿槽内でごみや砂が沈殿し、沈殿槽内の上澄水が浄化槽に流入する構造となっている。浄化槽には、これまでに得られた知見で有機物やりの除去に有効で、かつ基礎実験でも有効性が確認された赤玉土を  $0.5 \text{ m}^3$  投入し、またその上部には、油分除去と赤玉土の長寿命化を目的として、海域での油流出事故時に使用する油分除去シートを取り付けた。貯水槽は、浄化槽で処理された処理水を貯留できる構造となっている。それぞれの槽は沈殿槽、浄化槽そして貯水槽の順でホースまたはパイプが取り付けられ、沈殿槽には流入過多の場合、排水するオーバーフロー管、貯水槽には排水管が取り付けられている。また、浄化槽にはフロート弁が取り付けられており、浄化槽が閉塞した場合には沈殿槽からの水が流入しないようになっている。

フィールド実証実験は、4 月から 12 月まで実施し、その結果、濁度や浮遊物質、有機物の除去に有効な結果が得られた。測定項目は、TOC、濁度や油分とともに金属類も測定した。TOC は SIEVERS Instruments Inc. 製 TOC810 型で DOC として測定し、濁度は HACH Company 製 2100 型、油分は堀場製作所製の油分計を用いた簡易法で測定した。

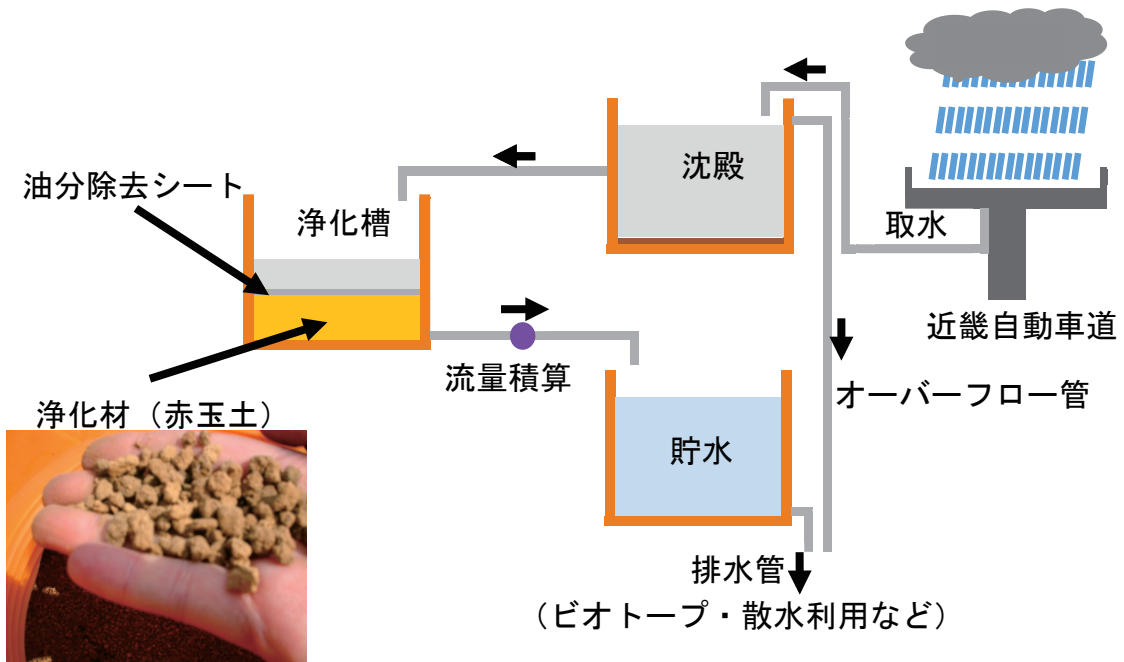


図 4.4 フィールド実証実験装置

## (2) 実験結果と考察

7月9日、8月7日及び10月29日の測定結果を表4.2～表4.4に示す。BODの除去率が50～84%、CODの除去率が75%という結果になった。窒素やりんも3割から4割の除去が確認できた。

次に12月10日9:30に採水したものについて検討する。測定箇所は、沈殿槽に流入する前の水(「原水」とする)、沈殿槽から浄化槽に流入する水(「中間水」とする)、浄化槽から貯水槽に流入する水(「処理水」とする)の3箇所とした。



表 4.2 7月9日の測定結果

| 測定項目                      | 原水（貯留槽） | 処理水（処理槽） | 除去率（%） |
|---------------------------|---------|----------|--------|
| pH                        | 6.87    | 6.42     | —      |
| BOD (mg・L <sup>-1</sup> ) | 3.2     | 0.5      | 84     |
| COD (mg・L <sup>-1</sup> ) | 7.9     | 未測定      | —      |
| SS (mg・L <sup>-1</sup> )  | 7.8     | 未測定      | —      |
| 全窒素 (mg・L <sup>-1</sup> ) | 4.0     | 2.1      | 48     |
| 全りん (mg・L <sup>-1</sup> ) | 0.052   | 0.032    | 38     |
| 油分 (mg・L <sup>-1</sup> )  | 2.5     | 検出限界以下   | —      |

\* 午後3時採水 前日及び当日降雨

表 4.3 8月7日の測定結果

| 測定項目                      | 原水（貯留槽） | 処理水（処理槽） | 除去率（%） |
|---------------------------|---------|----------|--------|
| pH                        | 6.98    | 7.37     | —      |
| BOD (mg・L <sup>-1</sup> ) | 1.6     | 0.8      | 50     |
| SS (mg・L <sup>-1</sup> )  | 2.4     | 1.2      | 50     |
| 全窒素 (mg・L <sup>-1</sup> ) | 4.1     | 2.2      | 46     |
| 全りん (mg・L <sup>-1</sup> ) | 0.059   | 0.037    | 37     |
| 油分 (mg・L <sup>-1</sup> )  | 0.8     | 検出限界以下   | —      |

\* 午後3時採水 前日降雨

表 4.4 10月29日の測定結果

| 測定項目                      | 原水（貯留槽） | 処理水（処理槽） | 除去率（%） |
|---------------------------|---------|----------|--------|
| COD (mg・L <sup>-1</sup> ) | 20      | 5        | 75     |

採水時前後の降水量と気温を図 4.5 に示す。なお、データは気象庁が公開している大阪市のデータである<sup>2</sup>。採水は、12月11日9:30に行っている。なお、12月5日10:00から12月10日21:00までは降水は観測されていない。

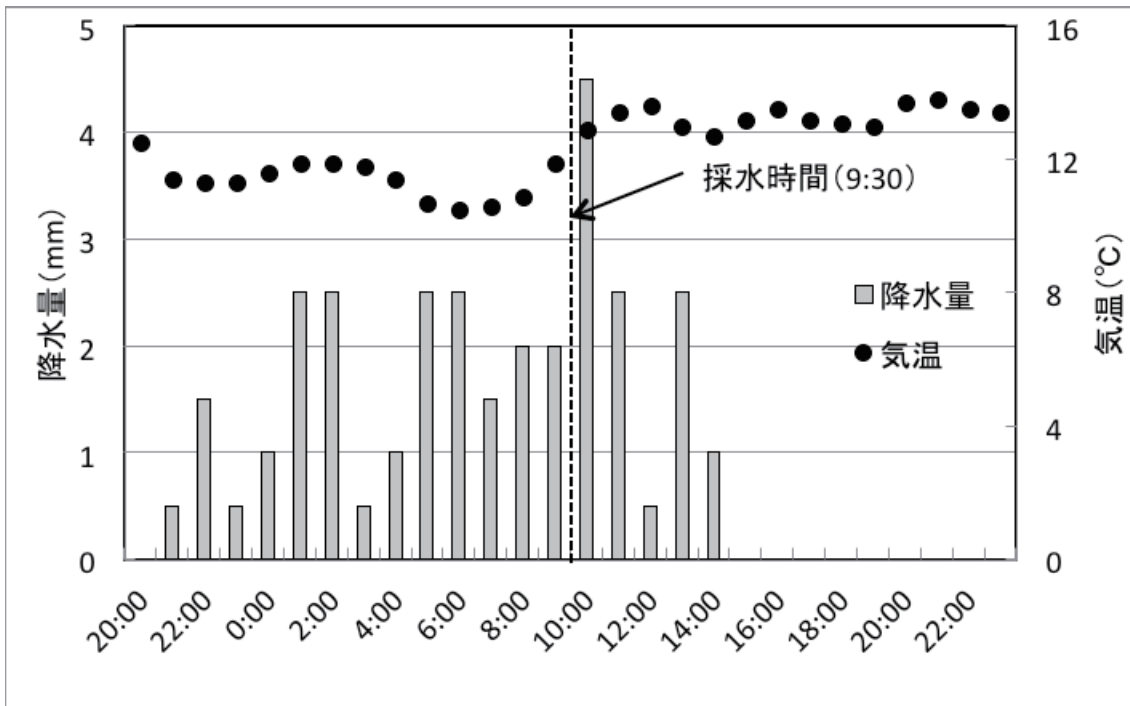


図 4.5 12月10日20:00から11日23:00までの時間毎の気温と降水量の変化  
(大阪市)

実験結果のうち、一般的な水質項目を表 3.5 に示す。濁度はおよそ半減し、浮遊物質 (SS) は 86 %の除去であったことから、濁質成分の除去は良好であったと考えられる。しかしながら TOC の除去率は 20%であり、これまでの有機物除去の状況と比較すると低い除去率であった。これは原水の TOC 濃度が  $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  と低いことが一因であったと考えられる。また、油分の除去はほとんど確認できなかった。これも TOC の除去率が低かった原因と同様に、原水濃度が低かったのではないかと考えられる。

表 4.5 フィールド実証実験の実験結果

| 水質項目 | 単位                 | 測定値  |      |      | 除去率 (%) |     |
|------|--------------------|------|------|------|---------|-----|
|      |                    | 原水   | 中間水  | 処理水  | 中間水     | 処理水 |
| pH   |                    | 7.2  | 7.3  | 6.8  | -       | -   |
| 水温   | °C                 | 11.3 | 11.2 | 11.0 | -       | -   |
| 濁度   | NTU                | 59.7 | 58.0 | 32.4 | 3       | 46  |
| SS   | mg・L <sup>-1</sup> | 22.0 | 19.8 | 3.1  | 10      | 86  |
| 油分   | mg・L <sup>-1</sup> | 1.4  | 1.8  | 1.3  | -29     | 7   |
| TOC  | mg・L <sup>-1</sup> | 3.3  | 3.0  | 2.7  | 8       | 20  |

### (3) まとめ

今回の TOC 除去率は 20% と高くなかったが、7 月 9 日、8 月 7 日及び 10 月 29 日の結果では、BOD の除去率が 50～84%、COD の除去率が 75% であったことから、有機物の除去については原水濃度によるものの一定の除去が可能であることがわかった。ただし、濃度変動が大きく、特に降雨直後が高くなることが予想されていたが、比較的降雨が連続した後の有機物濃度も高い場合もあることから、濃度変動には注意が必要である。

土壌浸透法は以前より濁度や浮遊物質の除去については効果があることがわかっていたが、目詰まりすることが問題となっていた。今回、油分除去とともに目詰まり対策として、油分除去シートを浄化材料上部に取り付けたが、およそ 2 年間のフィールド実証実験で 1 度の交換を行ったのみであった。油分除去シートには油分や浮遊物質が付着していたが、直下の赤玉土は汚れておらず、目詰まりすることはなかった。このようなことから、油分除去シートが除去能の維持及び赤玉土の長寿命化にある程度効果があることがわかった。ただし、油分除去シートであっても油分の除去は確認できなかった。

## 4-3 造粒浄化材による表流水の浄化

### 4-3-1 実証用浄化材の製作と浄化能確認実験

#### (1) 目的

浄化材として適した土壌であっても、粒状になっていない場合は、通水しにくくなる場合があり、一定のろ過速度を保てなくなる。土壌を採取した場合に自然の状態では粒状化している赤玉土や鹿沼土などはそのまま利用できるが、粒

状でない土壌であっても吸着能が高い土壌もある。そこで、粒状でない土壌を造粒することが望まれるが、浄化材は水中に浸漬した上、流水下であり、また土壌を積み重ねることから、物理的強度も併せて求められる。

このようなことから、造粒を試みることにしてきたが、第 3 章で示したとおり、いくつかの方法が適用可能であるが、それぞれ利点と欠点がある。今回は、製作の簡便さなどを鑑み、セメントで造粒することとし、それを実験に用いることにした。なお、浄化材には、宮崎県産の赤土に、廃棄物となる碎瓦を混合したものを実験に供した。

## (2) 実験方法

浄化材は、容量比で赤土 70 %、碎瓦 20 %、セメント 10 %を適量の水を入れて混合し、土練機にて試料を押し出し成形し、その後、養生した (図 4.6～図 4.9 参照)。

以上のように押出成形され、養生された浄化材をこれまでと同様、図 4.1 に概要が示されている実験装置を用いて行い、実験条件の詳細は表 4.6 に示す。なお、投入した浄化材の重量は乾燥重量ではなく、含水率が 31.0 %の重量である。原水は、大阪産業大学南側を流れる 1 級河川の鍋田川から採取した河川水を用いており、カラムに充填した浄化材に 1 日程度通水して馴養させた後、3 時間ろ過した試料を処理水として測定に用いた。また、浄化材の粒径が実証用のため、これまでよりも大きいことから、径の大きいカラムを用いた (図 4.10 参照)。



図 4.6 土壌等の混合



図 4.7 土練機 (押出成形式造粒装置)



図 4.8 押出成形中の浄化材



図 4.9 養生中の浄化材

表 4.6 実証実験用浄化材の確認実験の条件

| 項目    | 数値                      |
|-------|-------------------------|
| カラム内径 | 50 mm                   |
| カラム高さ | 200 mm                  |
| 浄化材高さ | 175 mm                  |
| 浄化材容量 | 343 cm <sup>3</sup>     |
| 浄化材粒径 | 2-3 cm                  |
| 投入重量  | 218.2 g                 |
| ろ過速度  | 2.2 m·day <sup>-1</sup> |

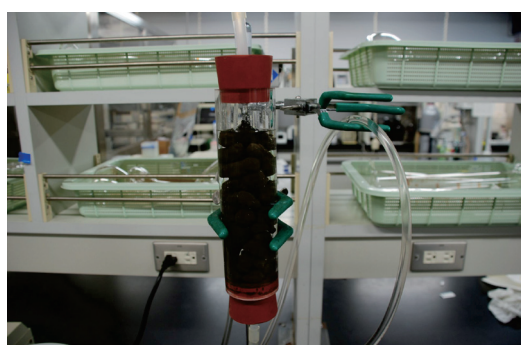


図 4.10 実証用浄化材の確認実験

### (3) 実験結果と考察

実証用浄化材の確認実験の結果を表 4.7 に示す。セメントを入れたことで pH が高くなった。全りんは 70 %程度除去できた。濁度は 20 %弱の除去であった。これは原水の濁度が低いこと、カラム径に対して浄化材が大きく、空隙が大き

かったことが原因であると考えられる。TOCは除去を確認できなかった。濁度と同様に原水濃度が低いことが一因であると考えられる。通水時間がさらに長くなる、または濃度が高くなれば除去が期待される。なお、3ヶ月程度、水中に浄化材を放置したが、崩壊することなく安定していたことから、物理的強度も高いと予想される。

表 4.7 実証用浄化材の確認実験の結果

| 種類  | 測定結果 |  |  |  |             | 除去率        |            |           |
|-----|------|--|--|--|-------------|------------|------------|-----------|
|     | pH   | EC<br>( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TOC<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 濁度<br>(NTU) | 全りん<br>(%) | TOC<br>(%) | 濁度<br>(%) |
| 原水  | 7.9  | 0.29                                       | 0.18                                     | 2.71                                     | 1.22        | —          | —          | —         |
| 処理水 | 10.6 | 0.27                                       | 0.05                                     | 3.30                                     | 1.02        | 72.2       | -21.8      | 16.4      |

以上の結果、これまでの赤玉土や鹿沼土とともに、セメントをバインダーとする造粒方法で、赤土もりん専用の浄化材となり得ることがわかった。

#### 4-3-2 浄化材のスクリーニングと造粒方法

##### (1) 浄化材のスクリーニング

りんの除去に着目すると、第3章の結果を整理したものを図4.11に示す。

図4.11に示されるように、全りんの除去能が高い浄化材は、赤玉土など火山灰土や火山系資材であることがわかる。また、共通点として、いずれも鉄の含有率が高い赤色系の土壌であることがわかる。以上のことから、今後、りん除去材として検討する場合は、このような赤色系の土壌を選択することが近道であると考えられる。



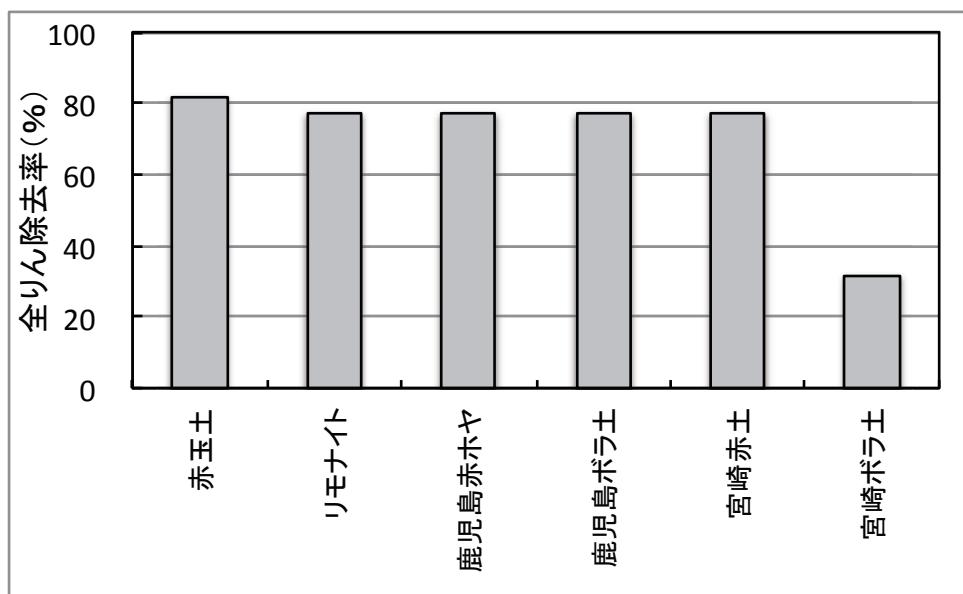


図 4.11 全りんの除去率

(2) 適切な造粒方法

実験 3-6 (第 3 章) で、これまで検討してこなかったセメントが、りん除去だけを着目すると十分に有効であることがわかった。実験 3-6 の結果の内、全りんの除去だけを抜粋すると図 4.12 のようになる。

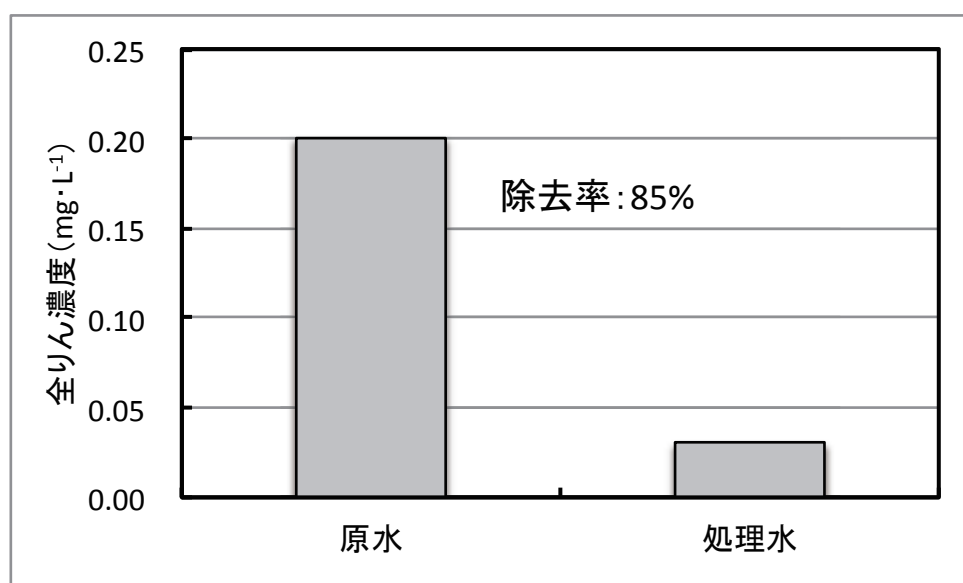


図 4.12 セメントで造粒した浄化材の全りん除去率

### (3) まとめ

全りんを除去する技術として一般的な方法は、凝集剤を用いた凝集沈殿法や微生物を用いた生物学的りん除去法である<sup>3</sup>。凝集剤は鉄やアルミニウムを原料とした無機凝集剤がりん除去などに用いられ、生物学的りん除去法は微生物にりんを取り込ませ、その微生物を排除するという方法である。凝集剤といった薬品を使用することや下水処理施設で用いる高度で複雑な技術を採用することなど、施設コストが大きくなる。元来、りんを吸着することができる鉄やアルミニウムや地球上に大量に存在しており<sup>4</sup>、特に地球表層に含まれる鉄やアルミニウム濃度は元素順位で上位を占めている。第3章の実験で用いた火山灰土には、これら鉄やアルミニウムは多く含まれており、これらを有効に利用することでりんを除去することは容易であると考えられる。

窒素やりんといった栄養塩類が湖沼などの閉鎖性水域に流入すると、植物プランクトンが増殖し、やがてアオコや赤潮といった水環境問題に発展することがある。このようないわゆる富栄養化に対処するために、発生源でりんの排出を抑制することは効果的な方法であると考えられ、同法を対策技術の一つとして適用も可能であると考えられる。

#### 4-3-3 浄化材の吸着寿命簡易予測実験

##### (1) 目的

火山灰土をりん除去の目的のための浄化材として利用すれば、やがて土壌へのりん吸着の破過を迎える。すなわち、吸着材の寿命である。これを把握する必要があり、その実験を行った。他の夾雑物の影響も鑑み、実験には実際の河川水を用いた。

##### (2) 実験方法

直径 21 cm で 10 L のプラスチック製円筒型タンクを図 4.13 のように配置し、上部タンクに実河川水を入れ、およそ 4 時間で全量が排出するように排水口を調整した。よってろ過速度はおよそ  $1.7 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$  である。下部タンクには実験 3-6 (第 3 章) で制作した浄化材を  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  の電気炉で十分に乾燥させた上で 3.5 kg 入れ、その後、18 時間程度水道水で洗浄した。以上のように設置した上で、通水開始約 4 時間後の処理水を採水し、全りんの除去性能を確認した。また、2 日間、浄化材が入ったタンクに放置した河川水についても処理水として除去性能

を同様に確認した。

実験に使用した河川水は次の3箇所、いずれも大阪府内で採水した。

農業用水路（図 4.14 参照）は水質汚濁が進行している農業用水路で、全りんが  $0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水温  $29.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH が 8.02、D0 が  $4.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  である。農業用水路ではあるが、現在は農業には利用されていない。ここでは当該原水を「農業用水路 A」とする。



図 4.13 吸着寿命簡易予測実験



図 4.14 農業用水路 A

農業用水路 B（図 4.15 参照）は農業用水路 A と同様に水質汚濁が進行している農業用水路で、全りんが  $0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水温が  $31.4^{\circ}\text{C}$ 、pH が 9.08、D0 が  $10.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  である。気温が高い時期であったことから、富栄養化に起因するアオコが発生しているのがわかる。現在も農業用水路として利用されている。ここでは当該原水を「農業用水路 B」とする。

一級河川（図 4.16 参照）は市街地に位置する一級河川であり、全りんが  $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水温が  $29.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH が 8.27、D0 が  $2.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  である。前述の農業用水路と同様に水質汚濁が進行していることがわかる。ここでは当該原水を「一級河川」とする。



図 4.15 農業用水路B



図 4.16 一級河川

### (3) 実験結果と考察

実験結果を表 4.8 に示す。農業用水路 A の 4 時間後処理水を除き、いずれも全りんが 70 %程度除去することができた。実験 3-6 (第 3 章) の実験では、全りん濃度が  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  の実河川水であった場合、85 %程度除去が確認できている。また、別に全りんの吸着量を回分式吸着試験で確認したところ、最大で  $0.44 \text{ kg}\cdot\text{ton}^{-1}$  であった。これらの数値から浄化材の寿命を簡易的に予測した。

表 4.8 実験結果

| 試料名     | 原水<br>全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 4 時間後<br>処理水<br>全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 4 時間後<br>全りん<br>除去率<br>(%) | 2 日間後<br>処理水<br>全りん<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 2 日間後<br>全りん<br>除去率<br>(%) |
|---------|--|--|----------------------------|--|----------------------------|
| 農業用水路 A | 0.36   | 0.29   | 23                         | 0.13   | 62                         |
| 農業用水路 B | 0.32   | 0.09   | 72                         | 0.10   | 69                         |
| 一級河川    | 0.29   | 0.11   | 64                         | 0.08   | 74                         |

処理を対象とする水の全りん濃度が  $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (今回の実験と同程度の汚濁状況) とし、浄化材による全りん除去率が 70% できたとして過程した場合、浄化材 1 ton による最大の処理水量は約  $2,100 \text{ m}^3$  である。処理を対象とする水の全りん濃度が  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (比較的汚濁が進んでいない場合) とし、浄化材による全りん除去率が 85 % できたとして過程した場合、浄化材 1 ton による最大の処理水量は約  $26,000 \text{ m}^3$  である。計算方法を表 4.9 に示す。

表 4.9 浄化材寿命の計算方法

| 項目  | 計算        | 全りん<br>0.30 mg・L <sup>-1</sup><br>の場合 | 全りん<br>0.02 mg・L <sup>-1</sup><br>の場合 |
|---|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 原水の全りん濃度 (mg・L <sup>-1</sup> )              | ①         | 0.30                                  | 0.02                                  |
| 全りん除去率                                      | ②         | 0.70                                  | 0.85                                  |
| 除去分の全りん濃度 (mg・L <sup>-1</sup> )             | ③=①×②     | 0.21                                  | 0.017                                 |
| 除去分の全りん濃度 (kg・m <sup>-3</sup> )             | ④=③÷1,000 | 0.00021                               | 0.000017                              |
| 全りん吸着量 (kg・ton <sup>-1</sup> )              | ⑤         | 0.44                                  | 0.44                                  |
| 除去可能水量 (m <sup>3</sup> ・ton <sup>-1</sup> ) | ⑥=⑤÷④     | 2,100                                 | 26,000                                |

#### 4-3-4 造粒方法を変更した浄化材の浄化性能実験

##### (1) 目的

前述の実験で用いた浄化材は、火山灰土である赤土、廃瓦及びセメントを混練させ、水を加えて土練機で造粒浄化材を作成したが、他にも種々の造粒方法があることから、他の方法によって作成した 2 種と加えて、全りんの回分式吸着試験を実施し、その差を検討することにした。

##### (2) 実験方法

図 4.17 に示すとおり、4-3-1 で実施した造粒方法以外の方法で 2 種作成した。これまでの浄化材の構成（火山灰土、廃瓦及びセメント）は変更していない。造粒した浄化材の大きさから、ここでは「中玉品」及び「小玉品」としている。これまでの浄化材を「従来品」とする。

これら 3 種の浄化材について、これまでと同様の回分式吸着試験を実施した（図 4.18 参照）。回分式吸着試験では、100 mL の三角フラスコに全りん濃度を段階的に調整した水を 100 mL 入れ、それらに浄化材を 10 g 投入した。その三角フラスコを密閉し、25 °C の暗所に 24 時間保存した後、上澄水の全りん濃度を測定した。

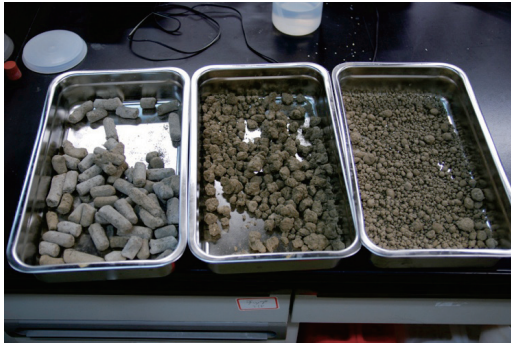


図 4.17 浄化材

(左から「従来品」「中玉品」「小玉品」)



図 4.18 回分式吸着試験

### (3) 実験結果と考察

図 4.19 は、回分式吸着試験によって得られた結果に基づき、吸着等温線図にしたものである。低濃度の付近で多少のばらつきはあるが、3 種について大差はないことがわかった。なお、平衡濃度が小さい箇所で負の吸着量となっているのは、浄化材からりんが溶出したためと考えられる。

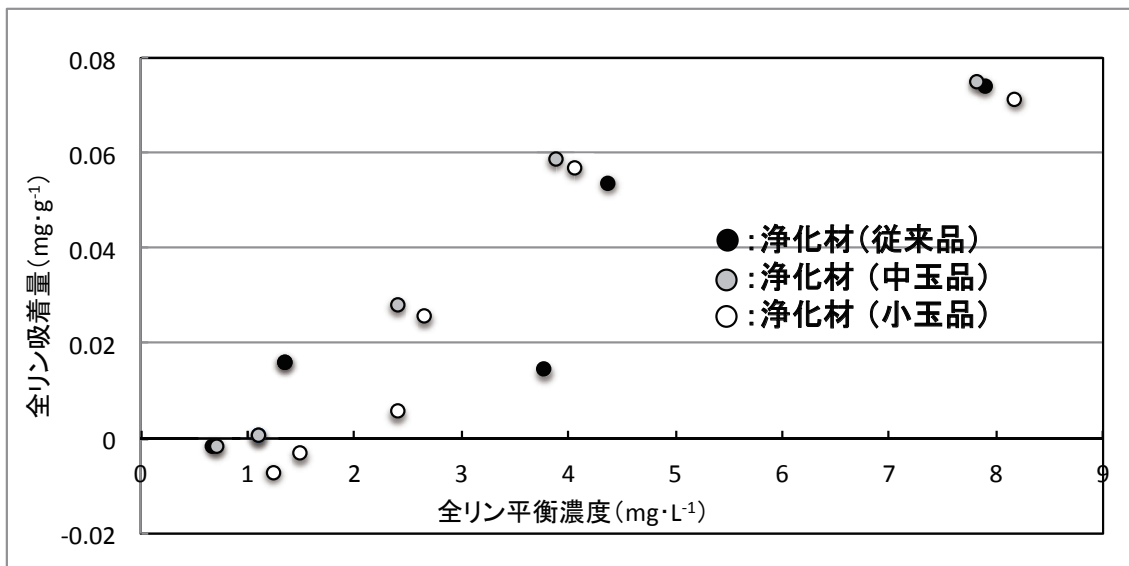


図 4.19 実験結果 (吸着等温線)

浄化材の製作する過程で最大の課題は造粒方法である。造粒方法には様々な方法が存在するが、エネルギー使用量、製作に要する時間や手間、製造機のコストや操作性、そして全体的な運転管理費などを考慮すると、河川や湖沼の浄



化に使用する浄化材製作に大きなコストをかけることはできない。一般的に、1 ton あたり 30,000 円以下でなければならないとされている。また、浄化性能を維持したまま通水などによって崩壊しない程度の強度が求められるが、2年以上水中に静置しても崩壊せず、十分な強度があることがわかった。今後は、製品化された製品を長期的に通水し、強度と予測したりん吸着の寿命が確保できるか検証する必要がある。

#### 4-4 結語

##### 4-4-1 土壌浸透法を用いた路面排水の浄化

図 4.20 に栃木県鹿沼市の赤玉土を用いた路面排水の浄化の結果の内、有機性汚濁物の指標である BOD 及び COD の結果を示す。BOD の除去率が 50%及び 84%、COD の除去率が 75%であったことから、有機性汚濁物の除去については一定の除去が可能であることがわかった。ただし、濃度変動が大きく、特に降雨直後が高くなることが予想されていたが、比較的降雨が連続した後の有機物濃度も高い場合もあることから、濃度変動には注意が必要である。

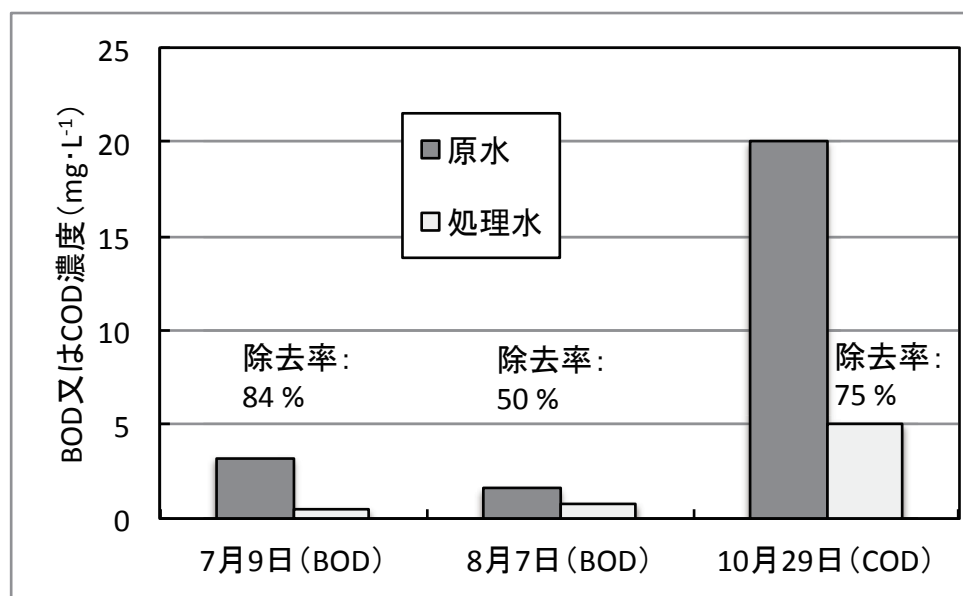


図 4.20 土壌浸透法による路面排水の BOD 及び COD 除去結果

図 4.21 は同実験の全りんの結果を示す。赤玉土のりんの吸着能は第 3 章で示したとおり、非常に高いが、本実験では原水の全りん濃度が低いこともあり、37～38 %という除去率であった。

このように路面排水の浄化のために土壌浸透法を適用することは可能であるかもしれないが、路面排水のような面源負荷の場合は、汚濁源が広範囲におよぶことから、土壌浸透法を適用するにあたっては、施工方法については十分に検討しなければならない。

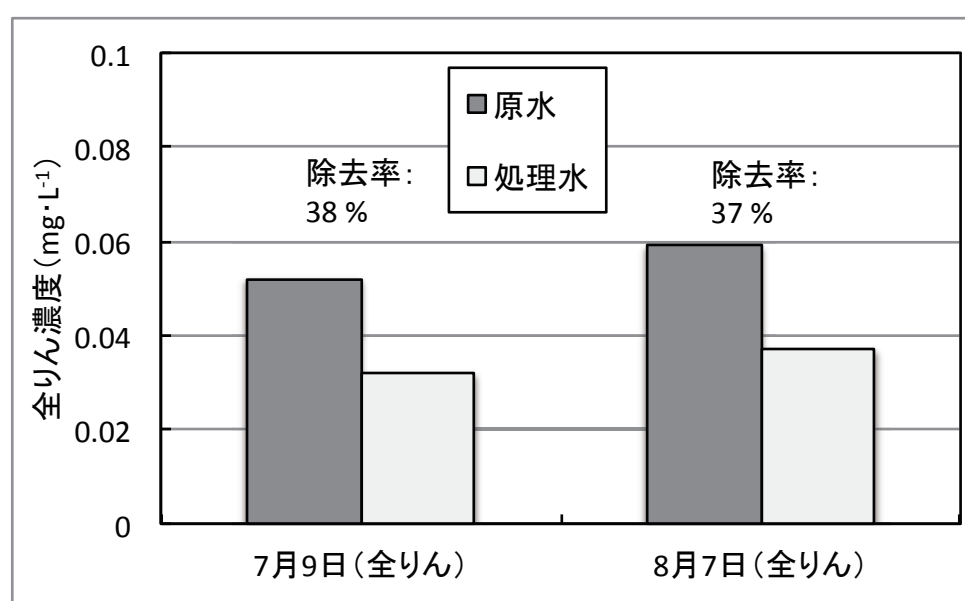


図 4.21 土壌浸透法による路面排水の全りん除去結果

#### 4-4-2 土壌浸透法を用いた表流水の浄化

図 4.22 は、第 3 章で開発したセメントを用いた造粒によって得られた浄化材による全りんの除去率の結果を示している。原水は、大阪府内の農業用水路と河川から採水したものをを用いており、およそ  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  前後の全りん濃度である。実験の結果、いずれの原水でもおよそ  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  程度まで除去でき、除去率は 70 %程度であった。セメントを造粒に用いた場合、有機物の除去は期待できないが、りんの吸着では十分に期待でき、物理的強度も増すことから、浄化材として有望であることがわかった。また、種々の造粒方法においてもりんの吸着能を損なわないこともわかった。このようなことから、同浄化材は河川や湖沼などの直接浄化や工場廃水の高度処理などに対応が可能であると判断した。

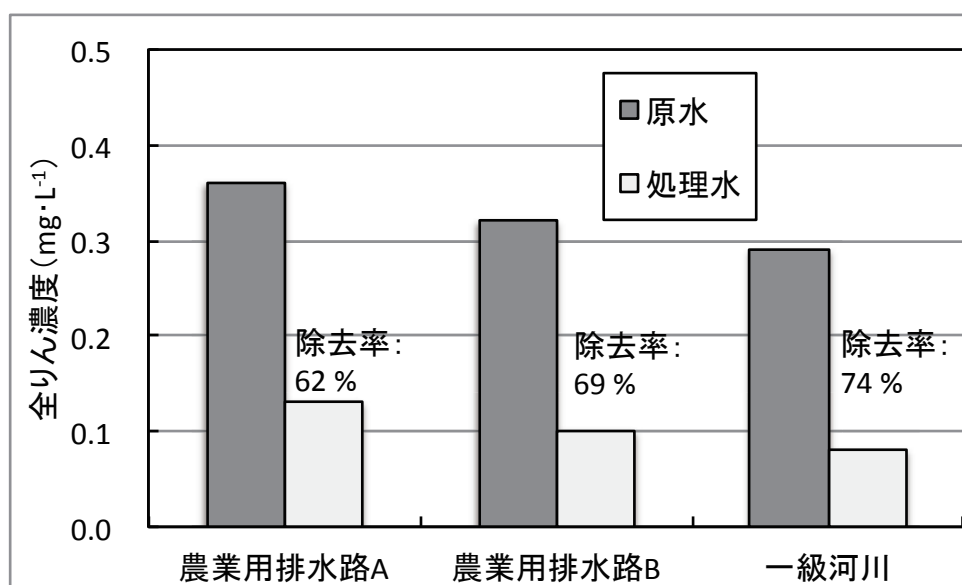


図 4.22 土壌浸透法による表流水の全りん除去結果

#### 関連文献

- 1) 濱崎竜英、他、土壌浸透法による路面排水中の有機物と濁度の除去、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.65、No.7-018、2010
- 2) 濱崎竜英、他、土壌浸透法による路面排水浄化の実証実験、環境技術学会研究発表大会及び特別講演会予稿集、Vol.10、p.62-63、2010
- 3) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 22 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2011
- 4) 濱崎竜英、淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発実施報告書、菊川建材株式会社受託研究、平成 23 年度経済産業省近畿経済産業局「地域資源活用新事業展開支援事業」、2012

#### 参考文献

- 1 平成 26 年度環境省白書・循環型白書・生物多様性白書
- 2 気象庁ホームページ
- 3 新・公害防止の技術と法規 水質編、(社) 産業環境管理協会、丸善、2008
- 4 理科年表、文部科学省国立天文台、2004

## 第5章 生物膜法を用いた汚水の処理

### 5-1 概説

日本において、最も一般的な下水処理法は活性汚泥法である。同法は、設計指針、維持管理方法などが十分に確立しているため、経験豊かな技術者の確保が困難な発展途上国でも普及しつつある。しかしながら、活性汚泥法は「活性汚泥」と呼ばれる好気性微生物群を数千  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  という高濃度で維持しながら有機物分解を行う方法であるため、最終的には下水中の有機物が活性汚泥に変換された汚泥（余剰汚泥）は系外に排出・処分しなければならない。余剰汚泥は、一般に嫌気性処理を経て濃縮・脱水し、焼却、埋立されている場合が多い。この汚泥処理・処分費は、下水処理施設に必要な運転・維持管理費の中で大きな割合であることから、地方公共団体等の運営組織にとって大きな財政負担となっている。

そこで、汚泥発生量が少ないとされる生物接触酸化法に着目し、中小規模の処理施設を対象とした下水処理法について基礎的な検討を行うにした。生物接触酸化法は、処理効率の点で一般に活性汚泥法よりも劣る技術とされているが、余剰汚泥の発生量が少なく、運転管理も容易な有機物除去法である。ここでは、揺動床式生物接触酸化法（第5章第3項）と回転円板法（第5章第4項）について検討した。

### 5-2 生物膜法の機構、種類及び研究動向

#### 5-2-1 概要

生物膜法も活性汚泥法と同様に生物処理法の一つであるが、活性汚泥法は微生物が水槽内を浮遊しているのに対し、生物膜法は、微生物が生物担体に担持している点が異なる。用いられる担体は、礫、石といったものから、プラスチック、化学繊維や炭素繊維など多種多様であり、それらの多くは比表面積を大きく取るような形状となっており、微生物が担持する面を広く取っている。

生物膜法には微生物の担持方法、担体の形状や反応槽内の設置方法、または酸素の供給方法の違いなどにより数多くの種類が存在する。いずれにしても、主たる好気性微生物によって、有機物を分解してBOD成分を除去している。

#### 5-2-2 機構

生物担体はいずれの形状・材質であっても、その表面に微生物が担持されて

生物膜を形成している。生物膜の対象水側には曝気や直接空気を触れさせることにより、酸素供給を行い、対象水に存在する有機物を生物膜が取り込み、代謝や増殖によって有機物を分解することにより、除去される仕組みとなっている。また、水中に含まれている窒素やりんは一部生物膜に取り込まれる。生物膜の生物担体近傍側では、生物膜の表面（対象水側）よりも酸素濃度が低く、嫌気的な状況となり、嫌気性微生物群が存在すると言われている。そのため、表面の好気性微生物と生物担体近傍側の嫌気性微生物の存在により、窒素の硝化及び脱窒素が期待できると言われている。

生物膜はその成長とともに厚みを増し、やがて剥離することになる。剥離した生物膜は反応槽下部に沈殿するか、処理水内に混入してSS濃度を高めることになる。そのため、生物膜法では、それら汚泥の管理が重要となるが、活性汚泥法と比較して、相対的に余剰汚泥発生量は小さいとされており、余剰汚泥処理処分に伴う費用が軽減されると言われている。

生物膜法は、活性汚泥法と比較してスケールメリットは高くなく、一般に中小規模廃水処理に適している。

### 5-2-3 生物膜法の種類<sup>1</sup>

生物膜法には、おおよそ次の5つの種類に分けることができる。

#### (1) 担体添加法（流動床法）

生物担体を反応槽で浮遊させる方法で、生物担体には図 5.1 や図 5.2 に示すようなスポンジ状や粒状に成型されたものが多く、浮遊させているため、担体のサイズは数 mm から 10 mm 程度であるものが多い。担体は微生物を担持させる必要があるため、細孔が空く多孔質としている。活性汚泥法等の既存施設を大きく構造を変えることなく採用することができるという利点がある。ただし、生物担体を反応槽等に入れても微生物が担持しにくいいため、担持のための工夫が必要となる。また、担体の保持の工夫が必要となる。



図 5.1 担体添加法の生物担体

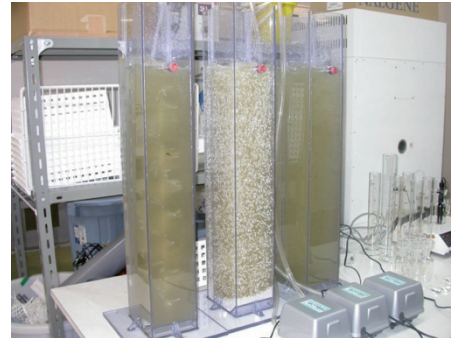


図 5.2 生物膜実験  
(中央が担体添加法)

### (2) 好気ろ床法 (生物ろ過法)

好気ろ床法の実施例を図 5.3 に示す。生物担体は反応槽に固定されるタイプであり、一般に下降流で廃水を反応槽内に通水し、一方、下部から曝気して酸素供給する仕組みである。生物担体には、礫や石を採用することが多く、流水によっても動くことはない。生物担体が固定されているため、生物膜の剥離などによって目詰まりが起きやすく、また下部に生物膜が沈殿した際の取り出し方法にも工夫が必要であり、よって高負荷運転を避けなければならない。



図 5.3 好気ろ床法 (国内)

### (3) 接触曝気法 (接触酸化法)

反応槽に投入する生物担体は、図 5.4 に示すような軽量プラスチックや図 5.5 に示すような化学繊維を使うことが多く、プラスチックも比表面積を得るため、複雑な構造になっているものが多い。また、生物担体は水中に浸漬し、曝気を通じて生物膜への酸素供給を行っている。生物膜法の中で最も採用されている



方法であり、下水や生活雑排水だけでなく、簡易トイレの廃水処理や食品加工などの工場廃水にも採用され、さらには河川、湖沼、公園の池などの直接浄化にも使われている。



図 5.4 接触曝気法用生物担体



図 5.5 揺動床式生物接触酸化法  
(反応槽の水を抜いた状態)

#### (4) 散水ろ床法

散水ろ床法の実施例を図 5.6 及び図 5.7 に示す。反応槽内に生物膜を担持させる生物担体が対象水に浸漬せずに配置され、上部より対象水を散水し、担体表面に付着増殖した生物膜上に流下させて有機物を分解させる方法である。生物膜は空気に触れやすい配置であるので、曝気のないのが特徴である。ただし、反応槽は密閉しにくく、悪臭や虫への対策が課題となっている。生物担体には、礫以外にプラスチックなどが用いられている。



図 5.6 散水ろ床法 (ベトナム)  
病院廃水処理施設



図 5.7 散水ろ床法 (ベトナム)  
食品加工廃水処理施設

#### (5) 回転円板法

回転円板法の実施例を図 5.8 及び図 5.9 に示す。生物担体を複数の円板状にして、それを自転させながら処理を行う方法である。円板の 4 割程度を対象水中に浸漬させ、回転させることによって空気に触れさせて酸素を取り込む仕組みとなっており、散水ろ床法と同様に曝気を必要となしない。悪臭や虫などの課題があることは散水ろ床法と同じで、対策としてカバーで回転する生物担体を覆うのが一般的である。生物担体には軽いプラスチック系の素材を用いることが大半で、その表面は表面積を多くするため、凹凸のある形状にしていることが多い。

この方式は、軽量でかつ表面積を多く確保することができるという特徴があり、本研究で取り上げることとした。



図 5.8 回転円板法（日本）  
食品加工廃水処理施設



図 5.9 回転円板法（日本）  
食品加工廃水処理施設

#### 5-2-4 生物接触酸化法（揺動床式生物接触酸化法）

5-2-3 の (3) で取り上げた生物膜法の一つである。揺動床式生物接触酸化法は、化学繊維を用いた揺動床式で、同法はすでに複数の企業が廃水処理等で設計・施工して稼働させている。図 5.10 のように生物担体の長さ（図 5.10 の横方向）は自由に設定でき、横方向の十字方向（上下方向）にアクリル系繊維 100 mm 長の生物担体の主体が横方向のポリエステル系繊維に縫いこんである。乾燥重量は長さ 520 mm に対し 11.2 g である。この生物担体を反応槽に上下方向に複数配置して処理を行うのが一般的である。曝気や水流により生物担体が揺れ動くので揺動床式生物接触酸化法と呼ばれている。企業によってはこの生物担体をバイオフィリンジなどと称している。

この方式では、担体が軽量であり、ひも状であることから、反応槽内にある担体を容易に交換することができ、また、表面積も十分に確保できるだけでなく、微生物の担持が容易であるという特徴もあることから、本研究で取り上げることとした。

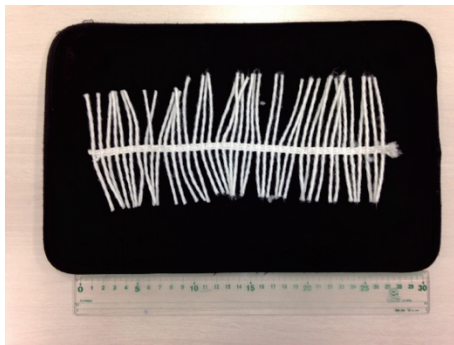


図 5.10 揺動床式生物担体  
(ひも状接触担体、バイオフィリンジ)

#### 5-2-5 揺動床式生物接触酸化法の研究動向と課題

揺動床式生物接触酸化法を研究対象として最も取り組んだのは熊本大学の古川憲治らの研究グループがあげられる。ただし、商品開発はエヌ・イー・ティ株式会社で、同社 HP の沿革には 1989 年に開発し、1993 年に販売を開始したことになっている<sup>2</sup>。エヌ・イー・ティ株式会社は開発・販売とともに 2001 年度以降から古川氏や西華産業株式会社とともに食品加工廃水などの高度処理への適用について研究している<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14</sup>。2002 年から 2006 年にかけて、副島秀則<sup>15</sup>、佐分利治<sup>16</sup>、佐竹純一郎<sup>17</sup>、村谷俊雄ら<sup>18</sup>も揺動床式生物接触酸化法の研究と実証に取り組んでいる。

古川らの研究グループは 2001 年以降の当初は、食品廃水など高濃度有機廃水処理の揺動床式生物接触酸化法の適用について研究していたが<sup>19, 20, 21, 22, 23</sup>、2008 年頃からは、処理水中の脱窒素法として有効なアナモックス法を揺動床に適用させることに着目した<sup>24, 25, 26, 27, 28, 29, 30</sup>。また、平行して 2005 年頃からは、廃水処理だけでなくアナモックス法による地下水中の脱窒素について揺動床を用いることに取り組み始めた<sup>31, 32, 33, 34, 35</sup>。

また、大阪大学の惣田訓らの研究グループは金属工場廃水中のセレン除去に同法適用について研究している<sup>36, 37, 38</sup>。

研究実績とはなっていない場合もあるが、その他にも複数の企業が同法の適用に着目しており、例えば、関西 PGS 株式会社は、バイオトイレと称して揺動床を採用し、簡易トイレの普及に努めている。

このように揺動床式生物接触酸化法の研究は様々な廃水における研究が進められているが、下水を対象とした研究は進んでいない。中小規模の廃水処理に適した生物膜法であり、分散型廃水処理を推進するためにも、下水処理の可能性の確認は必須である。

#### 5-2-6 回転円板法の研究動向と課題

1958年にドイツで回転円板法は開発された<sup>39</sup>。それ以降、ヨーロッパで普及し、その後、日本に中小規模の有機性工場廃水処理を目的として導入されていった。

1970年代における日本の回転円板法の研究は、宮崎大学の渡辺義公氏や石黒政儀氏らが挙げられる。渡辺らは、回転円板法を下水高度処理<sup>40,41</sup>、養豚廃水処理<sup>42</sup>、埋立処分場浸出水処理<sup>43</sup>、下水のメタン発酵処理<sup>44</sup>への適用に関する研究を行い、同法の研究を1990年代まで継続してきた。これらの研究が回転円板法の普及の起点になっていることは容易に想像できる。

本研究で用いた積水アクアシステム株式会社の回転円板装置は、1980年代に開発した初期のSFやSR型を経て<sup>45,46</sup>、円板表面を立体格子状にしたエスローテが開発された<sup>47</sup>。

一方、鹿児島工業高等専門学校<sup>48</sup>の西留清らの研究グループが企業とともに回転円板法の研究に取り組み<sup>48</sup>、やがて、セキスイエンバイロメント（現、積水アクアシステム）らとともに立体格子状接触体を用いた研究を開始した<sup>49,50,51,52</sup>。この研究は有機物除去だけでなく硝化・脱窒素についても検証している。

積水アクアシステム以外にも複数の企業や研究機関が回転円板法の開発、実証、検証に取り組み、導入されている<sup>53,54,55,56</sup>。

また、ヨーロッパなどでは実用化されており、長期的に運用されてきた回転円板装置の検証なども行われているようである<sup>57</sup>。

このように回転円板法は、古くから用いられているが、生物膜が形成する表面積を大きく確保するためには、生物膜が形成する円板の間隔を小さくし、円板枚数を増やす必要がある。しかし、間隔が小さいと、生物膜による閉塞が起きるなどの問題が生まれてしまう欠点がある。このような欠点が広く普及することの妨げとなっている。このような欠点を改良し、円板の表面を立体格子状

にすることで表面積を大きくとり、かつ生物膜が形成しやすいものにしたのが、積水アクアシステム株式会社が開発し、製造販売している商品名、エスローテで、同社は立体格子状接触体エスローテと呼んでいる。回転円板の大きさの違いによりタイプⅠ（直径 1.2 m）とタイプⅡ（直径 2.0 m）があり、実験に用いたのはタイプⅠである。

回転円板法の導入は中小規模の工場廃水処理が対象となっていることが多く研究事例も実施例もある。しかしながら、回転円板法の欠点を補った立体格子状となった円板を用いた下水処理の事例はない。

### 5-3 揺動床式生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去

#### 5-3-1 目的

揺動床式生物接触担体は、有機系産業廃水などの処理を目的として研究・開発が進められてきたもので、し尿処理などへの利用も進められている。本研究では、揺動床式生物接触担体を用いた生物接触酸化法について実験的検討を試みた。反応時間の違いによる汚濁物質の除去特性を検討する室内実験、および室内実験の結果を踏まえ、実際の下水処理場において、2 m<sup>3</sup> 程度の反応槽を用いた実証的な屋外実験を実施した。

#### 5-3-2 実験方法

##### (1) 室内実験

室内実験の装置図及び写真を図 5.11 に示す。実験は揺動床式生物接触担体を取り付けた実験系と取り付けていない対照系の 2 系列で行った。実験装置の反応槽は、高さ 800 mm（有効水深 700 mm）、幅 150 mm、奥行き 116 mm のアクリル製の直方体で、内部に仕切り板を設けている。仕切り板の下部に散気球が取り付けられ、吐出風量 6.0 L・min<sup>-1</sup> のエアープンプを 2 系列の反応槽に分岐して内部を曝気している。曝気は、溶存酸素増加の目的だけでなく、曝気によって生まれた水流によって、反応槽内部の下水を循環することも目的としている。

実験系には図 5.11 に示されるような生物接触担体である揺動床式生物接触担体が上部及び下部の担体接続棒に取り付けられている。揺動床式生物接触担体の長さ（揺動床式生物接触担体の幹部分）は 520 mm で、左右に 45 mm 長の枝部分の担体が縫いこんである。乾燥重量は 520 mm に対し 11.2 g で、幹部分はポリエステル系繊維、枝部分はアクリル系繊維できている。対照系には揺動



床式生物接触担体を取り付けいないが、それ以外の条件は実験系と同様にして  
いる。

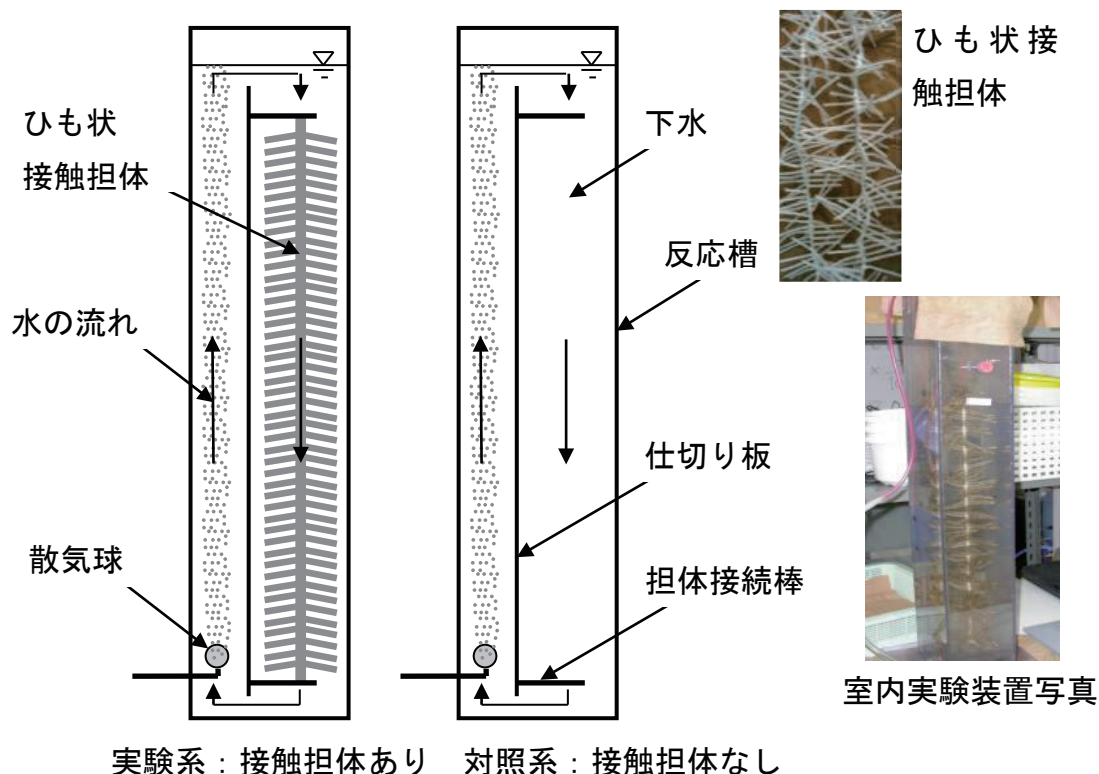


図 5.11 室内実験 実験装置図及び写真

実験手順は、上述のように実験装置を準備したうえで、大阪産業大学中央キャンパス内下水処理施設に流入する下水をそれぞれの反応槽内に 11 L 程度入れ、一定の時間（6 時間、24 時間、48 時間）曝気し、曝気前を原水、曝気後は処理水とした回分式にて複数回実施した。その内、Run-1.1~1.4 の 4 回の結果を示す。実験に供した原水の水質を表 5.1 に示すように、pH は 6.96~7.62 の範囲で、BOD は  $75\sim 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD が  $51\sim 349 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  の範囲であった。

測定項目は、pH、ORP、EC、DO、BOD、COD、SS、TS、溶存態窒素及び溶存態りんである。COD 以外の分析は JIS に準拠した方法を採用しているが、COD は重クロム酸カリウムを用いた HACH 社製の簡易分析装置を用いて分析した。



表 5.1 室内実験に供した原水の水質

| 実験 No.  | pH   | ORP<br>(mV) | EC<br>(mS・cm <sup>-1</sup> ) | DO<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | BOD<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | COD<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | TS<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | SS<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | D-P<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | D-N<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) |
|---------|------|-------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Run-1.1 | 6.96 | -465        | 0.75                         | 0.78                        | 149                          | 349                          | 316                         | —                           | 2.9                          | 29                           |
| Run-1.2 | 7.46 | -191        | 0.55                         | 1.31                        | 240                          | 207                          | 260                         | —                           | 2.5                          | 33                           |
| Run-1.3 | 7.61 | -157        | 0.56                         | 2.40                        | 75                           | 100                          | 384                         | 49                          | 2.5                          | —                            |
| Run-1.4 | 7.62 | -160        | 0.55                         | 0.27                        | 75                           | 51                           | 512                         | 175                         | 2.5                          | 26                           |

## (2) 屋外実験

室内実験の結果を踏まえ、大阪府内の下水処理場にて屋外実験を行った。実験の写真を図 5.12 及び図 5.13 に、実験装置の概略を図 5.14 に示す。

実験装置の容器は、縦 1 m、横 1 m、高さ 2.5 m の FRP 製で、容器内に 2.0 m<sup>3</sup> の下水を入れることができる。この中に室内実験と同様の長さ 870 mm の揺動床式生物接触担体が 88 本垂直に取り付けられている。構造は室内実験と類似しているが、内部には、最下部に穴が開いた仕切り板を 2 箇所設けて 3 室とし、中央室の下部に散気管を設置して、2 基のエアポンプによって曝気する仕組みとなっている。2 室の側室にそれぞれ 44 本の揺動床式生物接触担体を取り付けられており、側室上部から下部に曝気による水流が得られ、最上部で中央室から側室に越流するようになっている。また、側室下部には傾斜板が取り付けられており、循環の効率をあげている。

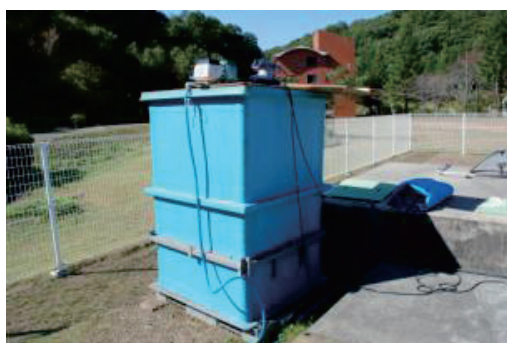


図 5.12 屋外実験 装置写真



図 5.13 屋外実験 装置内写真

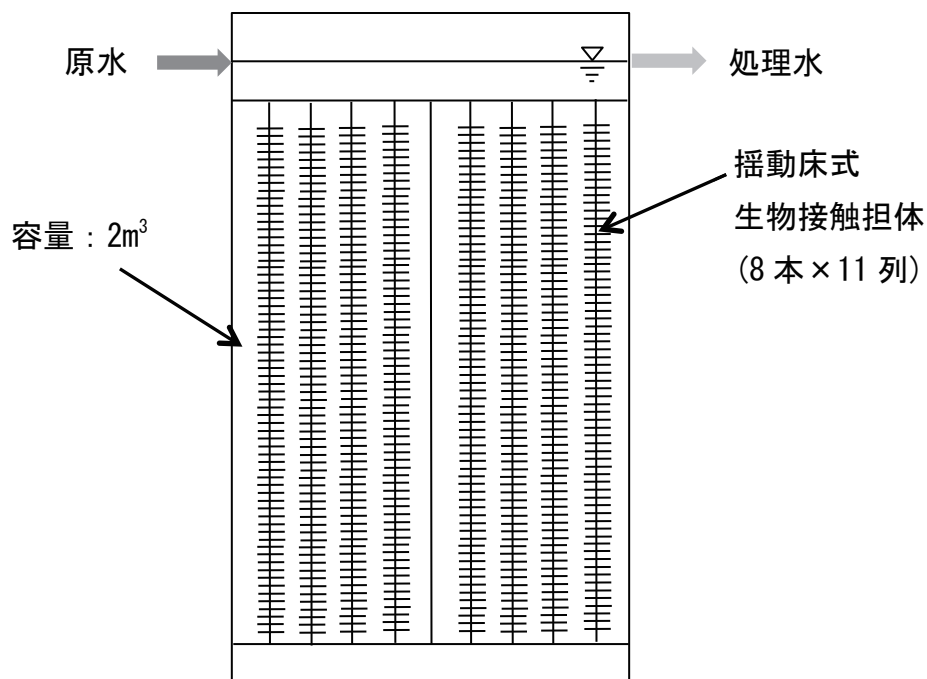


図 5.14 実験装置概略図

揺動床式生物接触担体への微生物付着状況を図 5.15 及び図 5.16 に示す。いずれの図も実験完了時に実験装置内の下水を引き抜いた状態である。揺動床式生物接触担体表面に微生物が付着しているのがわかる。



図 5.15 屋外実験  
実験装置内の下水を抜いた状態



図 5.16 揺動床式生物接触担体への  
微生物付着状況

実施場所は大阪府内の下水処理場であり、下水処理場に流入するスクリーンを通過した未処理の下水を水中ポンプによって容器に導入し、容器内を循環さ

せた後、再び下水処理場に返還するようにした連続式実験で実施した。流入量は制御盤により制御することができ、ポンプの稼働を間欠として流入量を変化させた。実験装置への流入量を表 5.2 のように変えて実験を行った。実験期間中においては、同一の実験装置で実施していることから、ポンプ流入量を変えることにより、滞留時間を変えている。滞留時間、原水 BOD から算出した BOD 容積負荷を表 5.3 に示す。

測定項目は、水温、透視度、pH、ORP、EC、DO、BOD、COD、SS、TS、溶存態窒素及び溶存態りんである。室内実験と同様、COD 以外は JIS に準拠した方法を採用しているが、COD は重クロム酸カリウムを用いた HACH 社製の簡易分析装置を用いて分析した。

表 5.2 屋外実験における実験条件 (2009 年)

| 経過<br>日数 | 月日     | 実験 No.                    | 滞留時間<br>(hour) | 流入量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) |
|----------|--------|---------------------------|----------------|---|
|          | 10月16日 | 実験開始 Run-2.1              | 18.9           | 2.5   |
| 1        | 10月17日 |                           |                |   |
| 2        | 10月18日 |                           |                |   |
| 3        | 10月19日 |                           |                |   |
| 4        | 10月20日 | Run-2.1 採水・分析／Run-2.2 に移行 | 12.0           | 4.0   |
| 5        | 10月21日 |                           |                |   |
| 6        | 10月22日 |                           |                |   |
| 7        | 10月23日 | Run-2.2 採水・分析／Run-2.3 に移行 | 7.4            | 6.5   |
| 8        | 10月24日 |                           |                |   |
| 9        | 10月25日 |                           |                |   |
| 10       | 10月26日 |                           |                |   |
| 11       | 10月27日 | Run-2.3 採水・分析／Run-2.4 に移行 | 6.0            | 8.0   |
| 12       | 10月28日 |                           |                |   |
| 13       | 10月29日 |                           |                |   |
| 14       | 10月30日 | Run-2.4 採水・分析／実験終了        |                |   |

表 5.3 屋外実験における滞留時間、原水 BOD 及び BOD 容積負荷

| 実験 No.  | 実験期間<br>(day) | 流入量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) | 滞留時間<br>(hour) | 原水 BOD<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | BOD 容積負荷<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ ) |
|---------|---------------|---|----------------|---|---|
| Run-2.1 | 4             | 2.5   | 18.9           | 152   | 0.19  |
| Run-2.2 | 3             | 4.0   | 12.0           | 148   | 0.30  |
| Run-2.3 | 4             | 6.5   | 7.4            | 146   | 0.47  |
| Run-2.4 | 3             | 8.0   | 6.0            | 183   | 0.74  |

### 5-3-3 実験結果と考察

#### (1) 室内実験

室内実験のうち、BOD、COD 及び SS の結果を図 5.18～5.20 に示す。Run-1.1～1.4 における BOD 量は、Run-1.1 が 1.64 g、Run-1.2 が 2.64 g、Run-1.3 が 0.83 g、Run-1.4 が 0.83 g であった。BOD の平均除去率は、6 時間の曝気時間では実験系が 44 %、対照系が 29 %で、実験系が対照系よりも高い除去率となり、48 時間では、実験系が 82 %、対照系が 73%の除去率を得ることができた。COD の平均除去率は、6 時間の曝気時間では実験系が 21 %、対照系が 17 %で、実験系が対照系よりも高い除去率となり、48 時間では、実験系が 62 %、対照系が 60 %の除去率を得ることができた。このようなことから、曝気によって有機物は化学的または生物学的に酸化が促進されることにより分解されるが、揺動床式生物接触担体を用いた実験系は、特に BOD において、促進されることがわかった。このことは、揺動床式生物接触担体によって、曝気を短時間に行うことができるため、エネルギー消費を抑制でき、かつ同一の下水流入量であれば、施設規模を小さくできることがわかった。SS が  $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  であった Run-1.4 における SS の除去率は、24 時間以上で両系とも 94 %以上であった。その多くは揺動床式生物接触担体や反応槽側面に付着したものが多くと考えられるが、曝気時間を長くすることによって自己酸化が促進され、SS が減少した部分もあると推察される。なお、pH、ORP、EC、DO、溶存態窒素及び溶存態りんについては、実験系と対照系では大差はなかった。

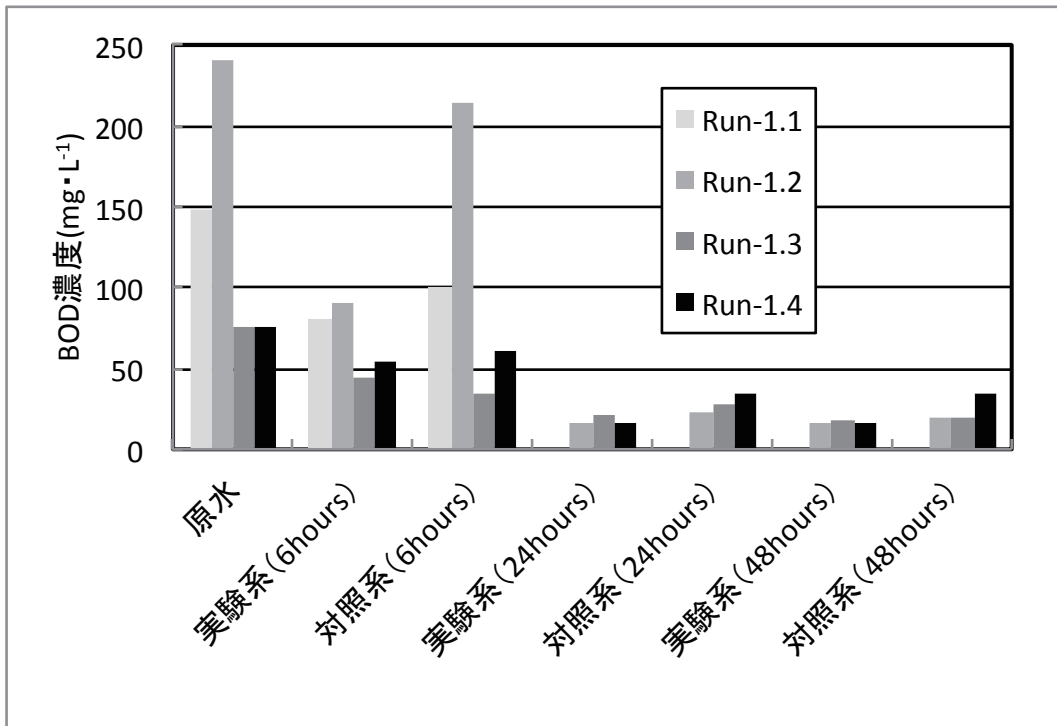


図 5.18 室内実験における BOD の変化

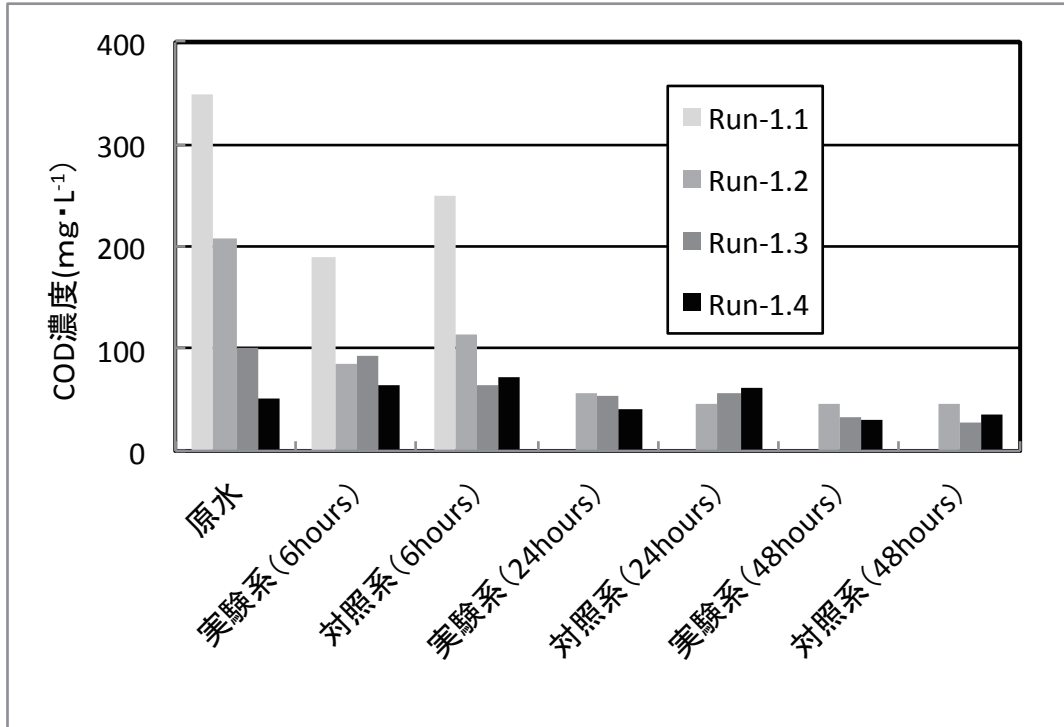


図 5.19 室内実験における COD の変化

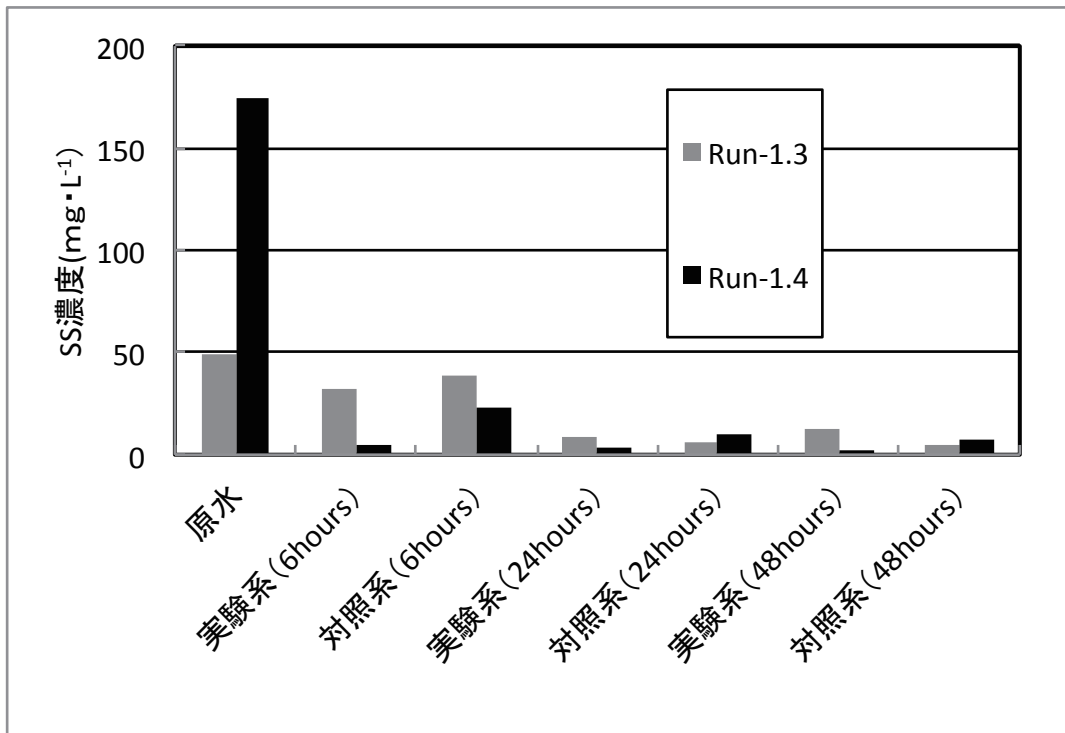


図 5.20 室内実験における SS の変化

## (2) 屋外実験

屋外実験の結果を表 5.4 に示す。原水及び処理水の採水は、それぞれの実験期間終了後に採水している。

Run-2.1 から徐々に原水流入量を増加させ、滞留時間で Run-2.1 は 18.9 時間、Run-2.4 は 6.0 時間で、BOD 容積負荷で Run-2.1 は  $0.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、Run-2.4 は  $0.74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と変化させた。Run-2.2 の BOD 除去率を除けば、BOD 及び COD は 43-76 % の除去率であった。SS は 67-89 % 除去できた。しかし溶存態窒素や溶存態りんは、原水濃度より上昇した場合があり、また高くても 30 % の除去率しか得ることができなかった。



表 5.4 屋外実験の結果

| 実験 No.  |                    | 水温<br>(°C)                   | 透視度<br>(cm)                  | pH                          | ORP<br>(mV)                 | EC<br>(mS・cm <sup>-1</sup> ) | DO<br>(mg・L <sup>-1</sup> )  |
|---------|--------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Run-2.1 | 原水                 | 23.3                         | 4.9                          | 7.30                        | -142                        | 0.44                         | 0.33                         |
|         | 処理水                | 22.7                         | 17.5                         | 7.47                        | 70                          | 0.41                         | 5.66                         |
| Run-2.2 | 原水                 | 24.6                         | 4.0                          | 7.17                        | -29                         | 0.45                         | 0.20                         |
|         | 処理水                | 24.4                         | 18.0                         | 7.62                        | 30                          | 0.40                         | 5.50                         |
| Run-2.3 | 原水                 | 21.7                         | 4.9                          | 7.35                        | -88                         | 0.47                         | 0.74                         |
|         | 処理水                | 21.9                         | 13.8                         | 7.49                        | -43                         | 0.41                         | 4.59                         |
| Run-2.4 | 原水                 | 21.2                         | 4.5                          | 6.83                        | 41                          | 0.40                         | 0.31                         |
|         | 処理水                | 21.7                         | 12.1                         | 7.53                        | 48                          | 0.31                         | 5.90                         |
| 実験 No.  |                    | BOD<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | COD<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | TS<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | SS<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | D-P<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) | D-N<br>(mg・L <sup>-1</sup> ) |
| Run-2.1 | 原水                 | 152                          | 445                          | 192                         | 166                         | 2.5                          | 25.1                         |
|         | 処理水                | 87                           | 125                          | 188                         | 46                          | 2.3                          | 26.8                         |
|         | <b>除去率<br/>(%)</b> | <b>43</b>                    | <b>72</b>                    | <b>2</b>                    | <b>72</b>                   | <b>8</b>                     | <b>-7</b>                    |
| Run-2.2 | 原水                 | 148                          | 512                          | 596                         | 244                         | 2.1                          | 24.0                         |
|         | 処理水                | 119                          | 124                          | 324                         | 26                          | 2.4                          | 27.9                         |
|         | <b>除去率<br/>(%)</b> | <b>20</b>                    | <b>76</b>                    | <b>46</b>                   | <b>89</b>                   | <b>-14</b>                   | <b>-16</b>                   |
| Run-2.3 | 原水                 | 146                          | 495                          | 680                         | 256                         | 2.3                          | 34.0                         |
|         | 処理水                | 40                           | 260                          | 572                         | 70                          | 1.9                          | 23.8                         |
|         | <b>除去率<br/>(%)</b> | <b>73</b>                    | <b>47</b>                    | <b>16</b>                   | <b>73</b>                   | <b>17</b>                    | <b>30</b>                    |
| Run-2.4 | 原水                 | 183                          | 613                          | 640                         | 234                         | 2.6                          | 34.6                         |
|         | 処理水                | 64                           | 203                          | 356                         | 78                          | 2.8                          | 24.8                         |
|         | <b>除去率<br/>(%)</b> | <b>65</b>                    | <b>67</b>                    | <b>44</b>                   | <b>67</b>                   | <b>-8</b>                    | <b>28</b>                    |

いずれの結果でも処理水の BOD は 40 mg・L<sup>-1</sup> 以上であり、このまま公共用水域に放流できる水質ではないが、Run-2.4 は Run-2.1 と比較して滞留時間がおよ

そ 1/3 でありながら、BOD 除去率が 65 %、COD 除去率が 67 %、SS 除去率が 67 % であったことから、滞留時間は 6 時間程度でも十分であることがわかった。

#### 5-3-4 まとめ

今回の実験によって、揺動床式生物接触担体を用いた方法で下水中の有機物を比較的容易に分解除去できることがわかった。

好気性従属栄養生物は外部からの有機物を栄養源とし、酸素を消費しながら増殖と死滅を繰り返す過程とともに、生存のための代謝としても有機物を分解している。活性汚泥法は、生物活動の中の増殖とその排除に重点をおいた有機物除去法である。一方、生物接触酸化法は、自己酸化を含む増殖、死滅及び代謝のバランスを取りながら有機物の分解を行う方法である。高効率ではないものの、余剰汚泥の処理費用、または環境への負荷という点で利点があると考えられる。このようなことから、より効率的に生物活動を維持する方法を見出せば、生物接触酸化法も産業廃水や河川の直接浄化だけでなく、下水処理などにも適用できると考えられる。

### 5-4 回転円板法による廃水処理

#### 5-4-1 ミルク工場廃水の処理

##### (1) 目的

ベトナムにおいては、稲作を中心とした農業、山間部で盛んな畜産業、沿海部を中心とした漁業といった第一次産業が主たる産業である。このようなことから農業、畜産業や漁業で生産される農作物、畜産物や水産物を加工する食品加工業の工場がベトナム国内に広く点在している。製造業や食品加工業の一部の大規模工場は工場団地に位置し、適切な廃水処理が行われているのかの如何に関わらず、工場団地内の集合廃水処理施設に接続しているが、大半の食品加工工場、特に中小規模の工場では未処理か十分な処理がなされないまま、系外に排出している。結果的には有機物や栄養塩類が多く含んだ廃水が公共用水域に排出され、水質汚濁を引き起こしている。

このような背景から、ベトナムの食品加工工場に着目し、その適切な廃水処理について検討するため、実証実験を実施することにした。対象とした食品加工工場は第 1 章でも示したハノイ市郊外にあるミルク工場とし、用いる廃水処

理システムは、図 5.21 及び図 5.22 に示す円板体が立体格子状になった回転円板法の実証実験用装置である。

同装置は、ポリプロピレン製の円板体の表面を立体的かつ格子状にして表面積を広く確保したもので、同表面に生物膜を形成させ、回転体を 40 %浸漬させて円板周速度  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  以下で回転させ、有機物分解を行わせるというものである。回転によって酸素供給を行うため、活性汚泥法のような曝気装置は必要としない。曝気装置にかかる電気代は処理システムの大きな比重を占めており、曝気装置がないため、エネルギー消費量の削減が期待されている処理法である。

また、生物膜法は一般に汚泥発生量が活性汚泥法と比較して少なく、汚泥処分にかかる費用も削減できるという利点が考えられている。



図 5.21 大阪府内の食品工場に  
設置してある同装置



図 5.22 円板体本体

さらに、構造が簡単であるため、運転維持管理が容易であることから、特殊かつ高度な技術を保有したスタッフが必要ないため、継続的に処理ができるという利点も考えられる。同利点は途上国においては最も重要な項目であり、同装置は途上国での中小規模廃水処理システムとしては適切な方法の一つであると考えられる。

表 5.5 は、ベトナムにおける産業排水基準である。表中にある「カテゴリーA」及び「カテゴリーB」とは、排水する公共用水域または下水道の状況により、基準が異なり、「カテゴリーA」は排水する公共用水域で生活用水等の水源となっている場合の基準で、「カテゴリーB」はそれ以外である。よって、「カテゴリーA」ではより厳しい基準となっている。具体的には BOD では、「カテゴリーA」は  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  であるのに対し、「カテゴリーB」は  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  となっている。なお、

CODは重クロム酸カリウムを用いる方法であり、日本の環境基準や排水基準とは測定方法は異なるが、COD以外の測定方法はJISやUSEPA（米国環境局）の公定法と基本的には同じである。

表 5.5 ベトナムの産業排水基準（QCVN 40:2011）

| 番号 | 項目    | 単位                  | カテゴリー A | カテゴリー B | 番号 | 項目       | 単位                            | カテゴリー A | カテゴリー B |
|----|-------|---------------------|---------|---------|----|----------|-------------------------------|---------|---------|
| 1  | 温度    | °C                  | 40      | 40      | 18 | シアン化合物   | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.07    | 0.1     |
| 2  | 色度    | Pt・Co <sup>-1</sup> | 50      | 150     | 19 | フェノール    | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.1     | 0.5     |
| 3  | pH    |                     | 6-9     | 5.5-9   | 20 | 鉱物油      | mg・L <sup>-1</sup>            | 5       | 10      |
| 4  | BOD   | mg・L <sup>-1</sup>  | 30      | 50      | 21 | 硫黄化合物    | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.2     | 0.5     |
| 5  | COD   | mg・L <sup>-1</sup>  | 75      | 150     | 22 | フッ素化合物   | mg・L <sup>-1</sup>            | 5       | 10      |
| 6  | SS    | mg・L <sup>-1</sup>  | 50      | 100     | 23 | アンモニア性窒素 | mg・L <sup>-1</sup>            | 5       | 10      |
| 7  | 砒素    | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.05    | 0.1     | 24 | 全窒素      | mg・L <sup>-1</sup>            | 20      | 40      |
| 8  | 水銀    | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.005   | 0.01    | 25 | 全りん      | mg・L <sup>-1</sup>            | 4       | 6       |
| 9  | 鉛     | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.1     | 0.5     | 26 | 塩化物      | mg・L <sup>-1</sup>            | 500     | 1000    |
| 10 | カドミウム | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.05    | 0.1     | 27 | 残留塩素     | mg・L <sup>-1</sup>            | 1       | 2       |
| 11 | 六価クロム | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.05    | 0.1     | 28 | 有機塩素系農薬  | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.05    | 0.1     |
| 12 | 三価クロム | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.2     | 1       | 29 | 有機りん系農薬  | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.3     | 1       |
| 13 | 銅     | mg・L <sup>-1</sup>  | 2       | 2       | 30 | PCB      | mg・L <sup>-1</sup>            | 0.003   | 0.01    |
| 14 | 亜鉛    | mg・L <sup>-1</sup>  | 3       | 3       | 31 | 大腸菌      | Bacterium・100mL <sup>-1</sup> | 3000    | 5000    |
| 15 | ニッケル  | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.2     | 0.5     | 32 | アルファ線強度  | Bq・L <sup>-1</sup>            | 0.1     | 0.1     |
| 16 | マンガン  | mg・L <sup>-1</sup>  | 0.5     | 1       | 33 | ベータ線強度   | Bq・L <sup>-1</sup>            | 1.0     | 1.0     |
| 17 | 鉄     | mg・L <sup>-1</sup>  | 1       | 5       |    |          |                               |         |         |

## （2）実験方法

実証実験で用いる回転円板の直径は 1.2 m で、回転軸に複数枚が取り付けられており、回転円板の表面積が 420 m<sup>2</sup> となる。装置の概略を図 5.23 に示す。実施場所は、第 2 章で示した Hanoi Milk で実証実験装置を図 5.24 に、また生物膜が付着した回転円板を図 5.25 に示す。この装置の概要を表 5.6 に示す。回転

円板装置の原水は工場廃水の集水枡で採水し、処理後、同集水枡に返送している。

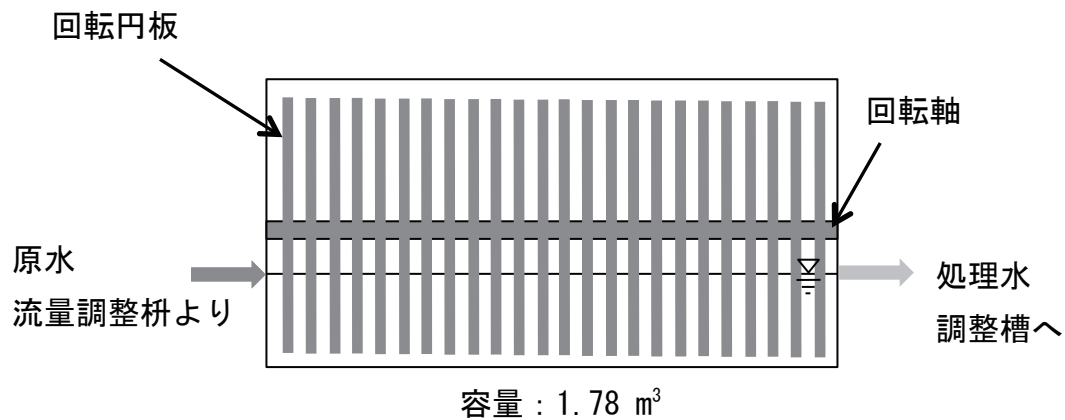


図 5.23 実証実験装置の概略図



図 5.24 Hanoi Milk に設置した  
実証実験装置



図 5.25 生物膜が付着した回転円板体

表 5.6 実証実験に用いた回転円板装置の概要

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| 製造会社     | 積水アクアシステム株式会社                        |
| 構成       | 流量調整枡→回転円板装置本体→調整槽→沈殿槽               |
| 水槽容量     | 1.78 m <sup>3</sup>                  |
| 円板直径     | 1.2 m                                |
| 回転円板体表面積 | 420 m <sup>2</sup>                   |
| 動力       | 1.5 kW                               |
| 計画排水量    | 30 m <sup>3</sup> ・day <sup>-1</sup> |

測定した水質項目は、pH、水温、SS、BOD、COD<sub>Cr</sub>、アンモニア態窒素、全窒素、全りん、*n*-ヘキサン抽出物質であり、定期的に採水し、除去性能を確認した。実験に供した原水の水質は、BOD が 40~324 mg・L<sup>-1</sup>、COD<sub>Cr</sub> が 136~637 mg・L<sup>-1</sup> である。なお、Hanoi Milk の製品製造工程の稼働が不定期であり、水質変動が大きいこともあったが、そのまま運転を行った。定期的な採水は約 6 ヶ月継続し、この実験を Run-1 とした。また、定期的な採水の内、経時変化を確認するため、朝から夕方まで 1 時間毎に 9 回採水した実験を 2 回実施し、これを Run-2 及び Run-3 とした。なお、Run-1 での排水量は平均 1.2 m<sup>3</sup>・hour<sup>-1</sup> (28.8 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>)、Run-2 では平均 1.5 m<sup>3</sup>・hour<sup>-1</sup> (36.0 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>)、Run-3 では平均 1.2 m<sup>3</sup>・hour<sup>-1</sup> (28.8 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>) である。

Hanoi Milk での廃水中の BOD に対する栄養塩類濃度比の平均は、全窒素が 13 % (1.7~34 %)、全りんが 1.5 % (0.1~5.1 %) であった。生物学的処理では適した比率であると考えられる。

ここで示す水質項目の結果は、回転円板装置本体を挟む流量調整柵を原水とし、調整槽を処理水としている (図 5.24 及び表 5.5 を参照こと)。よって、回転円板装置での水理的滞留時間 (HRT) は、1.2~1.5 時間である。

生物学的処理の場合、BOD 容積負荷  $L_v$  は次式で求めることができる。

$$L_v = \frac{L_f \times Q}{V} \quad (\text{式 4.1})$$

ここで、 $L_v$  : BOD 容積負荷 (kg-BOD・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup>)

$L_f$  : BOD (kg・m<sup>-3</sup>)

$Q$  : 排水量 (m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>)

$V$  : 曝気槽容積 (m<sup>3</sup>)

標準活性汚泥法の BOD 容積負荷は、一般に 0.5~1.0 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup> が採用されている。回転円板法は曝気槽がなく、回転円板体 (支持体) から構成している反応槽で BOD 除去が行われていることから、BOD 容積負荷に加えて BOD 面積負荷で設計・評価することになる。BOD 面積負荷  $L_{Surface}$  は次式で求めることができる。

$$L_{Surface} = \frac{L_f \times Q}{A} \quad (4.2)$$

ここで、 $L_{Surface}$  : BOD 面積負荷 (kg-BOD・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>)

$L_f$  : BOD (kg・m<sup>-3</sup>)

$Q$  : 排水量 (m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>)



A : 回転円板体面積 (m<sup>2</sup>)

### (3) 実験結果

Run-1 の実験結果を図 5.26～図 5.29 に示す。Run-1 での BOD 容積負荷の平均は 2.1 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup> で、BOD 面積負荷の平均は 0.009 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup> であった。

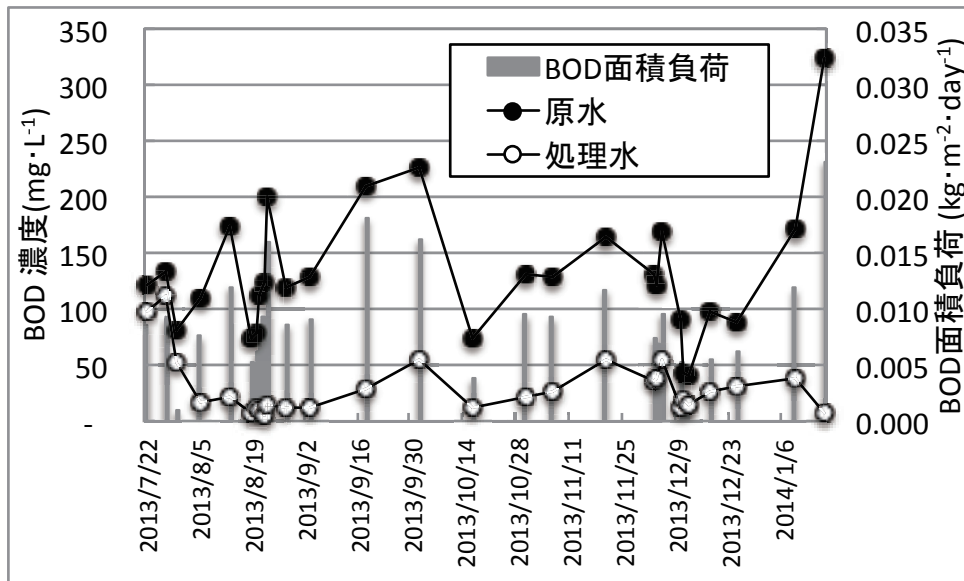


図 5.26 Run-1 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の BOD 及び BOD 表面負荷の経日変化

設置直後の BOD 除去率は低かったものの、その後、原水の BOD が大きく変動しても処理水の BOD は安定し、除去率が平均 72% で 50 mg・L<sup>-1</sup> 以下程度となった。BOD 容積負荷は 0.22～5.5 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup>、BOD 面積負荷は 0.001～0.023 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup> の範囲であったが、BOD 面積負荷は、おおよそ 0.005～0.015 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup> 程度の範囲で推移した。一般に回転円板体の BOD 面積負荷は、0.005～0.007 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>（小規模下水処理等）が採用されている<sup>58</sup>ことから、Hanoi Milk に設置している回転円板装置の BOD 面積負荷は、一般的な数値と比較するとやや高めの設定となっている。BOD 容積負荷は 0.22～5.46 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup> の範囲で推移し、平均は 2.11 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup> であった。これは標準活性汚泥法の一般的な BOD 容積負荷が 0.5～1.0 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup> である<sup>59</sup>ことから、高い設定となっており、それでも BOD 除去率が平均で 72% であり、かつベトナムの産業排水基準のカテゴリ-B 基準である 50 mg・L<sup>-1</sup> を大半の処理水が下回っており、十分な有機物除去能であ

ると判断できる。ただし、カテゴリ-A 基準である  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  を下回ったのは、30 回の測定の中で 18 回程度であった。

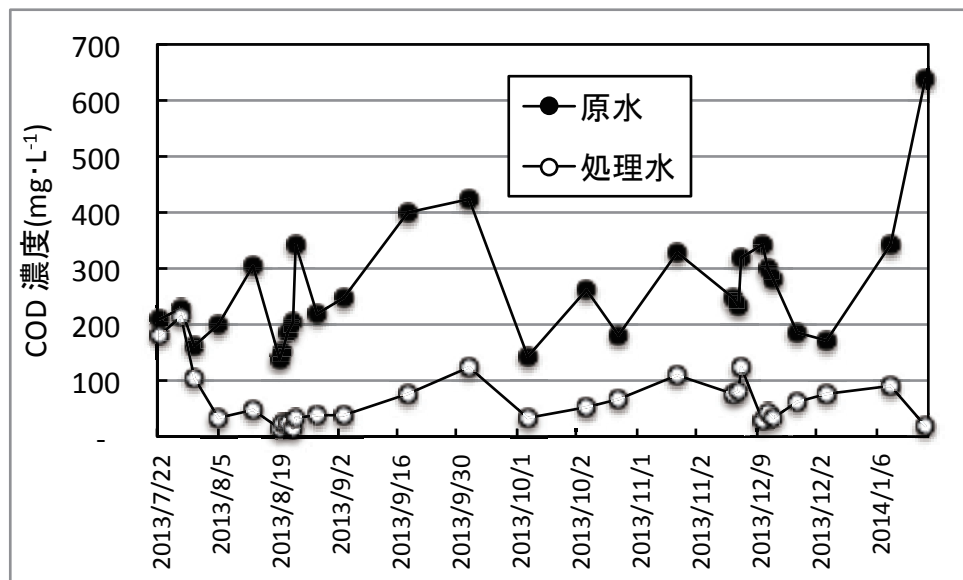


図 5.27 Run-1 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  の経日変化

CODの経日変化もBODと同様であり、設置直後は除去率が悪いものの、その後、安定して平均除去率が72%で  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  程度以下で推移した。BODと比較しても同等の除去率が得られた。

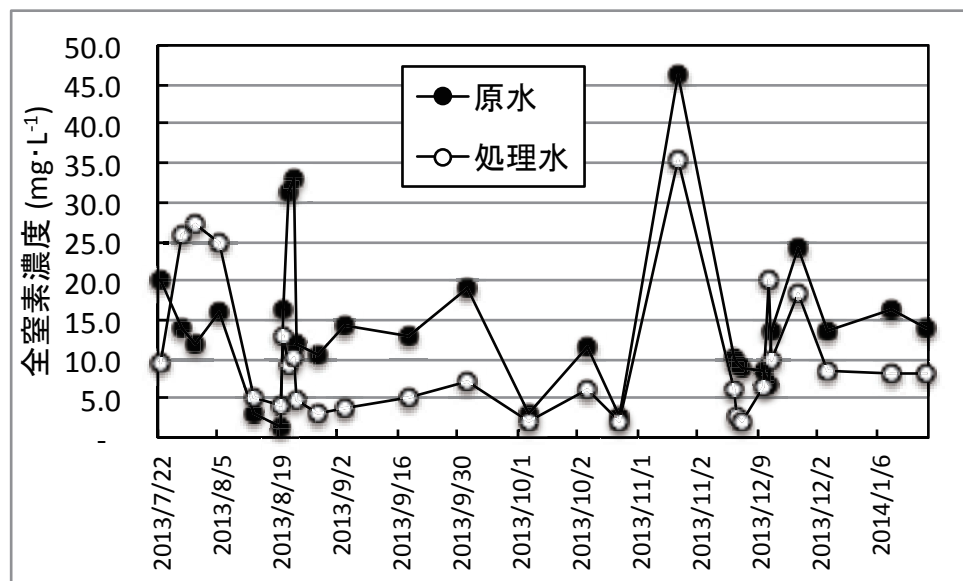


図 5.28 Run-1 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の全窒素の経日変化

次に全窒素であるが、除去率が平均 11 %であり、十分な除去が得られなかった。生物膜法の場合、担体に付着した微生物の内、より担体に近傍の微生物は好気性微生物に限らず、嫌気性微生物の存在があり、生物膜内で硝化と脱窒素が期待できると言われている<sup>58</sup>が、本研究ではそれを十分に確認できなかった。

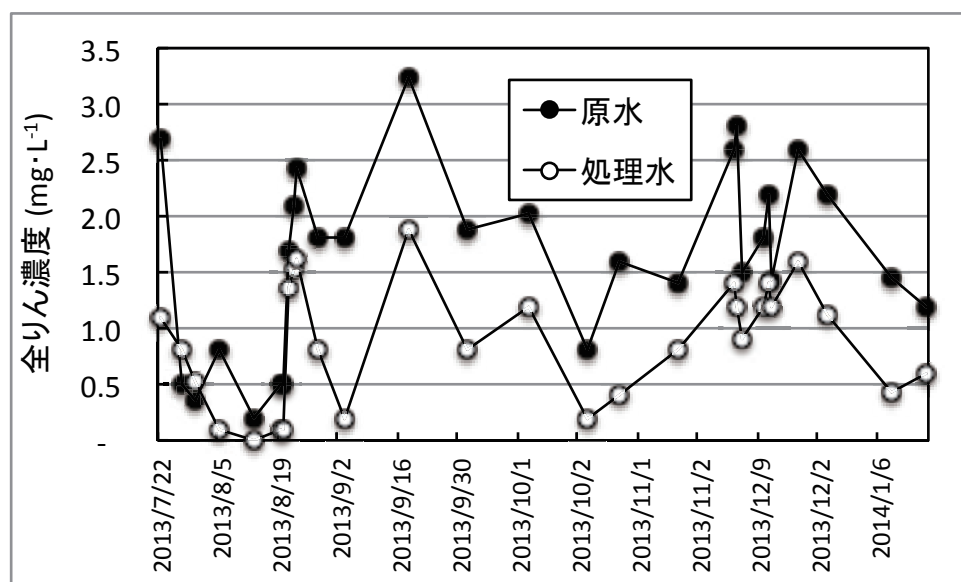


図 5.29 Run-1 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の全りん濃度の経日変化

全りんについては不安定さが残るものの、平均の除去率が 46%であり、約半数のりん成分が除去されたことになる。ただし、除去されているりんは、回転円板装置の水槽内に剥離沈殿した汚泥や回転円板担体微生物に付着しているものと考えられる。定期的な系外への排出が必要となる。

Run-2 では、2013 年 8 月 23 日、朝 8:15 から夕方 16:15 までの 8 時間について 1 時間毎に採水して経時変化を確認した。Run-2 の実験結果を図 5.30～図 5.31 に示す。Run-2 での BOD 面積負荷の平均は  $0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  であった。BOD 容積負荷は、 $1.38 \sim 2.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  で推移し、平均は  $2.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  であった。標準活性汚泥法の一般的な容積負荷のおよそ 2～4 倍であり、高い値であった。このような高い BOD 容積負荷であっても BOD 除去率の平均は 77%であり、9 回の測定で処理水の BOD がベトナムの産業環境基準のカテゴリー A である  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  を超えたのは 1 回だけで、平均は  $18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  であり、基準を達成している。

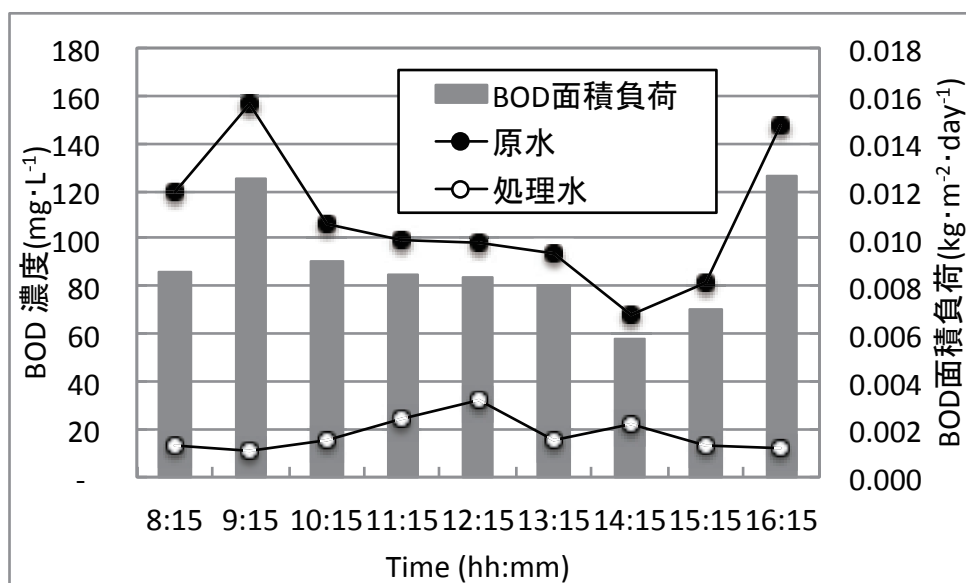


図 5.30 Run-2 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の BOD 及び BOD 表面負荷の経時変化

原水の BOD と COD は、9 時頃に最も高くなり、その後徐々に低下、午後 2 時頃に最も低くなった。いずれの濃度でも約 2 倍の差があった。14 時を過ぎると再び上昇に転じた。本装置による有機物除去により、処理水の BOD は 15～30 mg·L<sup>-1</sup> 程度、COD は 30～60 mg·L<sup>-1</sup> 程度で推移した。

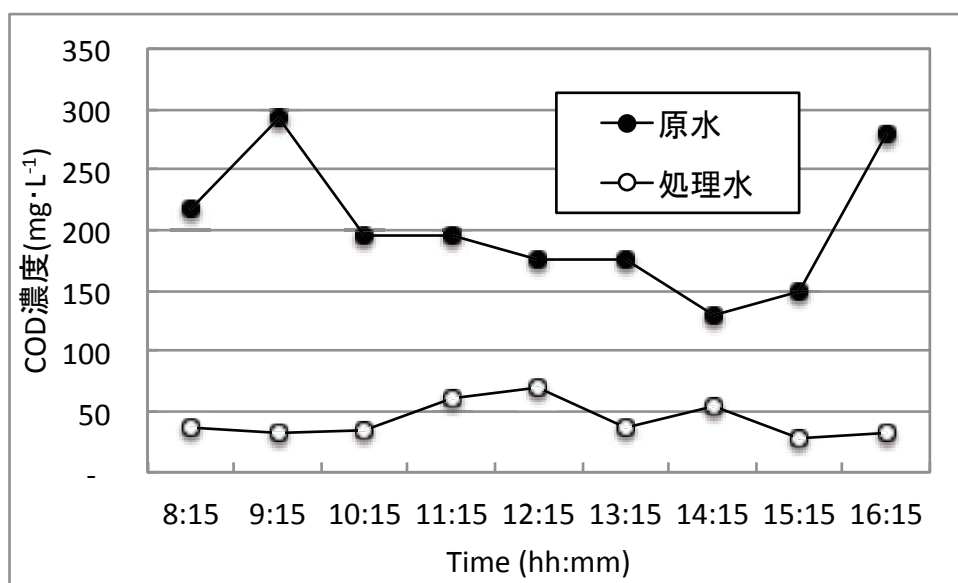


図 5.31 Run-2 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の COD<sub>Cr</sub> の経日変化

2013年12月25日に行ったRun-3の実験結果を図5.32～図5.33に示す。

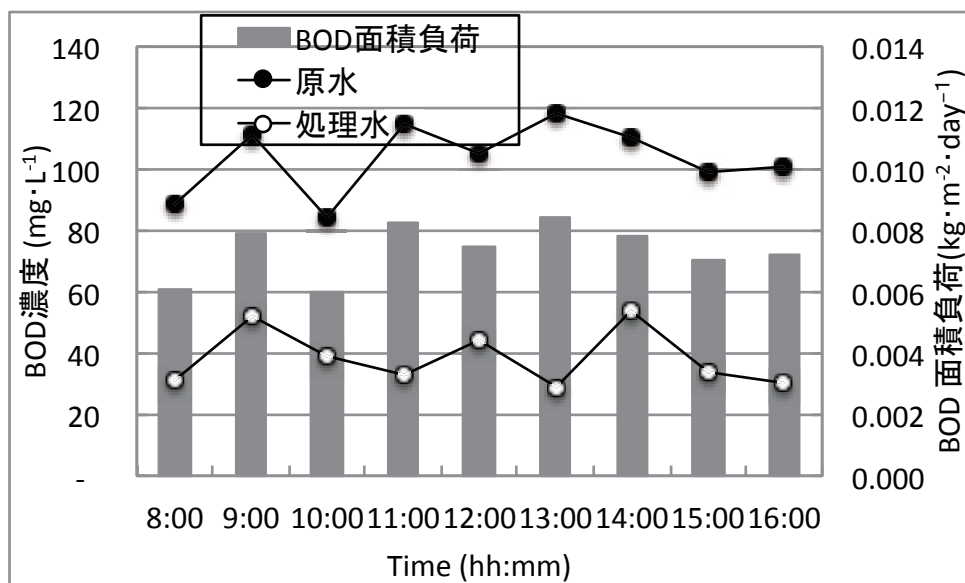


図 5.32 Run-3 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の BOD 及び BOD 表面負荷の経時変化

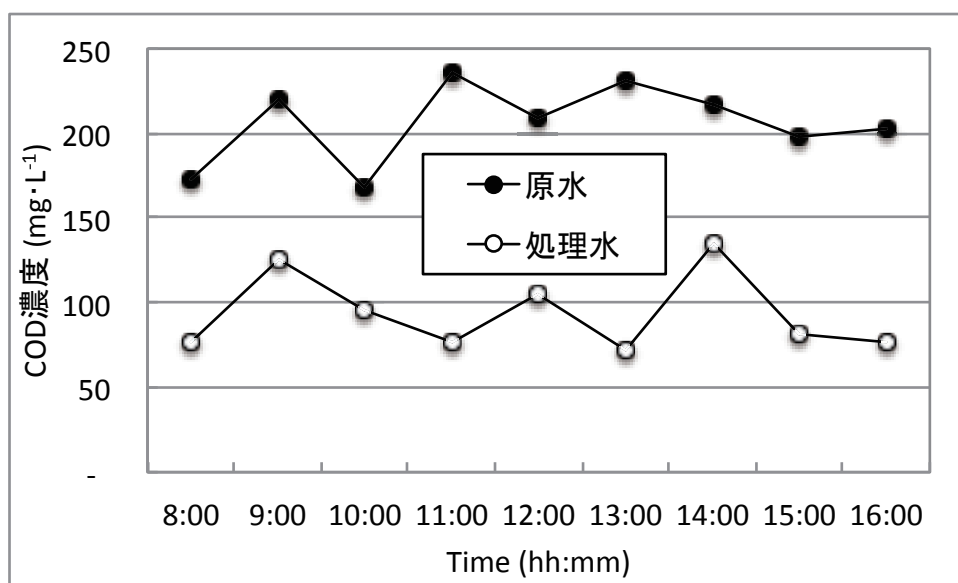


図 5.33 Run-3 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の COD<sub>Cr</sub> の経日変化

Run-3 では、Run-2 と同様の実験ではあるが、排水量が Run-2 で  $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hour}^{-1}$  であるのに対し、Run-3 は  $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{hour}^{-1}$  であるという違いがある。しかしながら、Run-3 は Run-2 と比較して、有機物除去能力が低下しており、処理水の

BOD が  $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  程度、COD は  $70\sim 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  程度で推移した。原因は不明であるが、Hanoi Milk の稼働状況が不安定であり、Run-3 の実験開始前に稼働が停止し、回転円板体に付着している生物膜に影響があったと考えられる。

#### (4) 考察

図 5.34 は、Hanoi Milk における実験での BOD 除去率と BOD 面積負荷の関係を示している。強い相関性はみられないが、BOD 面積負荷が  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.46 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と変動してもおおよそ 6 割から 9 割の BOD 除去が可能であることがわかった。

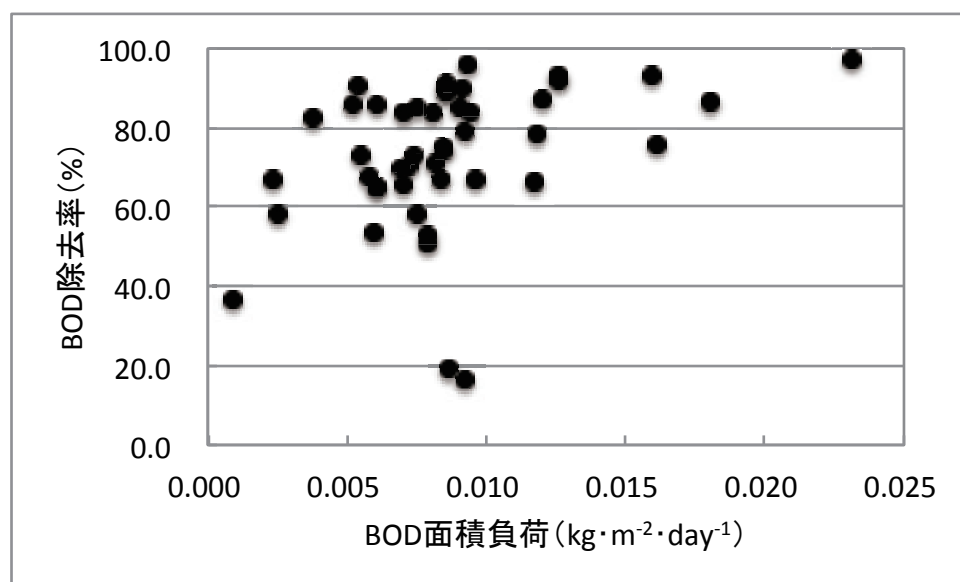


図 5.34 BOD 除去率と BOD 面積負荷との関係

#### (5) まとめ

BOD 面積負荷が  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.46 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい工場という条件でありながら、BOD 除去率がおおよそ 60~90% と安定的に除去し、ベトナムの産業排水基準のカテゴリーB 基準である  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下もおおよそ達成し、カテゴリーA 基準も処理水の多くは達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。また、電力消費量は処理量に対して、 $0.44\sim 0.49 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  であった。



ただし、原水の流入が停止した場合は、稼働を停止したこともあり、電力消費量を評価する精度は高くない。

#### 5-4-2 病院廃水の処理

##### (1) 目的

医療機関は、人の健康を維持し、生命を守るために最も重要な公共施設であるため、国や地方の経済規模の違いに関係なく存在している。しかしながら、業院の人口比や医療技術水準等の違いは多く、整備については、自国や援助国・機関によって推進されている。

総合病院のような大型の医療機関は、その多くが都市の中心的な場所に位置することが多く、本来であれば、総合病院で発生する廃水や廃棄物は二次感染や疾病の拡散となるため、適切に処理されなければならないが、途上国においてはそれが適っていないところが多い。ベトナムにおいても自国政府や援助機関による整備が実施されているが、運転維持管理が適切でないため、廃水に限れば、その廃水がそのまま公共用水域に排出されているのが現状である。原因としては、運転維持管理するためのスタッフが不足または能力が低いこと、運転維持管理費が十分ではないこと、排水基準遵守のための政府機関（ベトナムの場合は地方の天然資源環境保護局（DONRE））の査察が適切に機能していないことがあげられる。

ベトナムにおいては、このように病院廃水にも工場廃水と同様に問題を抱えていることから、病院から排出する下水を対象に実証実験を行い、実施可能性と確認することにした。また、同装置については、工場廃水での検証は行われているが、下水については検証していないことから、同装置の下水への適用についても検証することを目的としている。

表 5.7 は、ベトナムにおける医療系排水基準である。表 5.5 に示したベトナムにおける産業排水基準とは別に医療機関に対する排水基準で、基準となっている項目も基準値も多く異なる。表中にある「カテゴリーA」及び「カテゴリーB」は、産業排水基準と同様であり、「カテゴリーA」は排水する公共用水域で生活用水等の水源となっている場合の基準で、「カテゴリーB」はそれ以外である。BOD の基準は産業排水基準も医療系排水基準も同じ基準値であるが、COD は、「カテゴリーA」で  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、「カテゴリーB」で  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  と産業排水基準のそれぞれ  $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及び  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  と異なっている。COD については、医療系排水

基準の方がより厳しい基準となっている。また、産業排水基準では、窒素については、全窒素とアンモニア性窒素であるのに対し、医療排水基準では、硝酸性窒素とアンモニア性窒素という区分で基準を設けている点が違う。全りんは、両者とも基準にあるが、「カテゴリーA」も「カテゴリーB」も産業排水基準がより厳しい基準となっている。

表 5.7 ベトナムの医療系排水基準 (QCVN 28:2010/BTNMT)

| 番号 | 項目       | 単位                            | カテゴリーA   | カテゴリーB   |
|----|----------|-------------------------------|----------|----------|
| 1  | pH       |                               | 6.5~8.5  | 6.5~8.5  |
| 2  | BOD      | mg・L <sup>-1</sup>            | 30       | 50       |
| 3  | COD      | mg・L <sup>-1</sup>            | 50       | 100      |
| 4  | SS       | mg・L <sup>-1</sup>            | 50       | 100      |
| 5  | 硫化水素     | mg・L <sup>-1</sup>            | 1.0      | 4.0      |
| 6  | アンモニア性窒素 | mg・L <sup>-1</sup>            | 5        | 10       |
| 7  | 硝酸性窒素    | mg・L <sup>-1</sup>            | 30       | 50       |
| 8  | 全りん      | mg・L <sup>-1</sup>            | 6        | 10       |
| 9  | 油分       | mg・L <sup>-1</sup>            | 10       | 20       |
| 10 | アルファ線強度  | Bq・L <sup>-1</sup>            | 0.1      | 0.1      |
| 11 | ベータ線強度   | Bq・L <sup>-1</sup>            | 1.0      | 1.0      |
| 12 | 大腸菌      | Bacterium・100mL <sup>-1</sup> | 3000     | 5000     |
| 13 | サルモネラ菌   | Bacterium・100mL <sup>-1</sup> | 検出されないこと | 検出されないこと |
| 14 | 赤痢菌      | Bacterium・100mL <sup>-1</sup> | 検出されないこと | 検出されないこと |
| 15 | ビブリオ菌    | Bacterium・100mL <sup>-1</sup> | 検出されないこと | 検出されないこと |

## (2) 実験方法

Hanoi Milk で用いた回転円板法の装置を Hanoi 市内にある E General Hospital に移設し、実証実験を試みた。図 5.35 は実証実験装置を E General Hospital に設置した写真である。また、図 5.36 は回転円板に生物膜が形成されている写真である。実験は、2014 年 6 月から 2015 年 1 月までの約 8 ヶ月実施した。E General Hospital の概要は第 2 章で説明している。既存の廃水処理施設の調整槽（原水を一時的に保管する槽）を実験の原水とし、同装置で処理した後、処理水柵に排出させた。原水は病院内のリネン室からの洗濯廃水が大半である。



図 5.35 E General Hospital に  
設置した回転円板装置



図 5.36 回転体に付着した生物膜

測定した水質項目は、pH、水温、SS、BOD、COD<sub>Cr</sub>、アンモニア性窒素、全窒素、全りん、*n*-ヘキサン抽出物質であり、定期的に採水し、除去性能を確認した。測定方法はベトナムの公定法であるが、日本の JIS 規格と違いはない。pH はガラス電極法、SS はガラス繊維ろ紙法、BOD は BOD<sub>5</sub> で、DO は隔膜電極法により測定している。また、COD は重クロム酸カリウムを用いた COD<sub>Cr</sub> で、全窒素及び全りんは、吸光光度法を用いている。アンモニア性窒素は比色法である。定期的な採水を約 5 ヶ月継続し、この試験を Run-4 とした。また、定期的な採水の内、経時変化を確認するため、朝から夕方まで 1 時間毎に 9 回採水した試験を 1 回実施し、これを Run-5 とした。なお、Run-4 の排水量は平均  $1.3 \text{ m}^3 \cdot \text{hour}^{-1}$  ( $31.2 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ )、Run-5 は平均  $1.1 \text{ m}^3 \cdot \text{hour}^{-1}$  ( $26.4 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ) である。

ここで示す水質項目の結果は、前述のミルク工場廃水の試験と同様に、回転円板装置本体の前後で原水及び処理水としている。よって、回転円板装置での水理的滞留時間 (HRT) は、1.4~1.6 時間である。

E General Hospital での廃水中の BOD に対する栄養塩類濃度比の平均は、全窒素が 25 % (14-50 %)、全りんが 1.8 % (0.7-4.4 %) であり、Hanoi Milk と比較して全窒素が高かった。また、除去 BOD の汚泥への転換率を求める実験を行った。これを Run-6 とする。

### (3) 実験結果

Run-4 の実験結果を図 5.37~図 5.40 に示す。

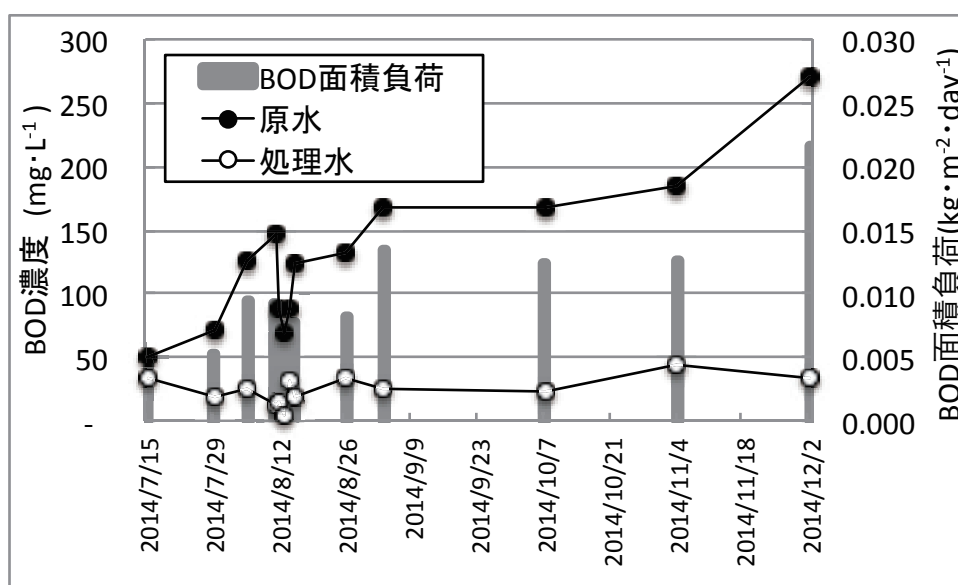


図 5.37 Run-4 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の BOD 及び BOD 表面負荷の経日変化

原水の BOD は、実験開始時から徐々に濃度が上昇し、当初は  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  であったが、実験終了時では、 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  を超える値となった。実験に供した病院廃水は、隣接するリネン室からの洗濯廃水が中心であり、夏場の洗濯量は増えると聞き取りで確認しているが、このような上昇が見られたことについての原因は不明である。このような原水の変動があっても処理水については、医療系排水基準の「カテゴリーB」基準である  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  を安定して下回っており、良好な結果となった。

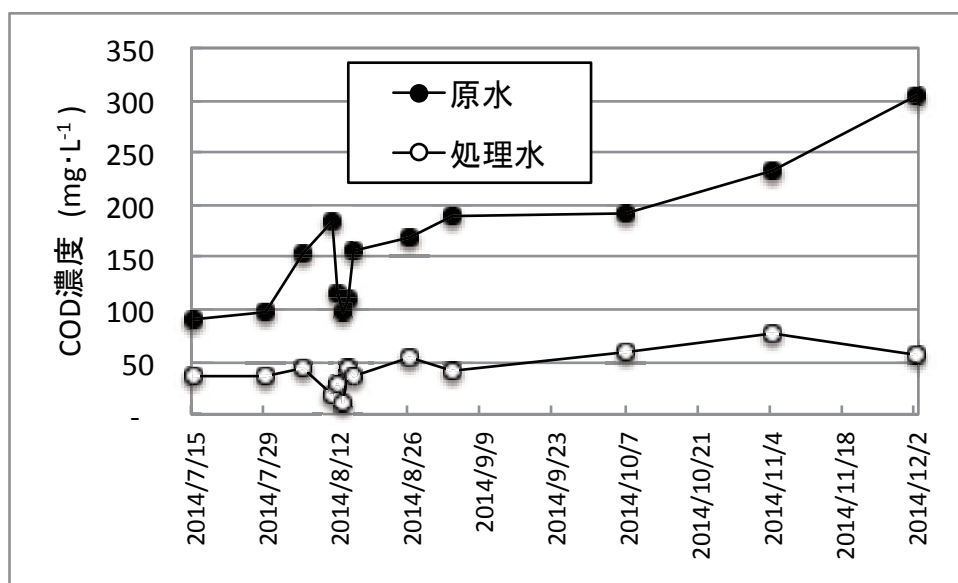


図 5.38 Run-4 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の COD<sub>Cr</sub> の経日変化

CODについてもBODと同様に実験開始時から終了時にかけて原水濃度が徐々に上昇する傾向にあった。処理水については、原水濃度が上昇するにつれて緩やかな上昇を示しているが、比較的良好に除去しており、80 mg·L<sup>-1</sup> 以下で推移していることがわかる。CODの医療系排水基準の「カテゴリーB」基準が100 mg·L<sup>-1</sup>を安定して下回っている。

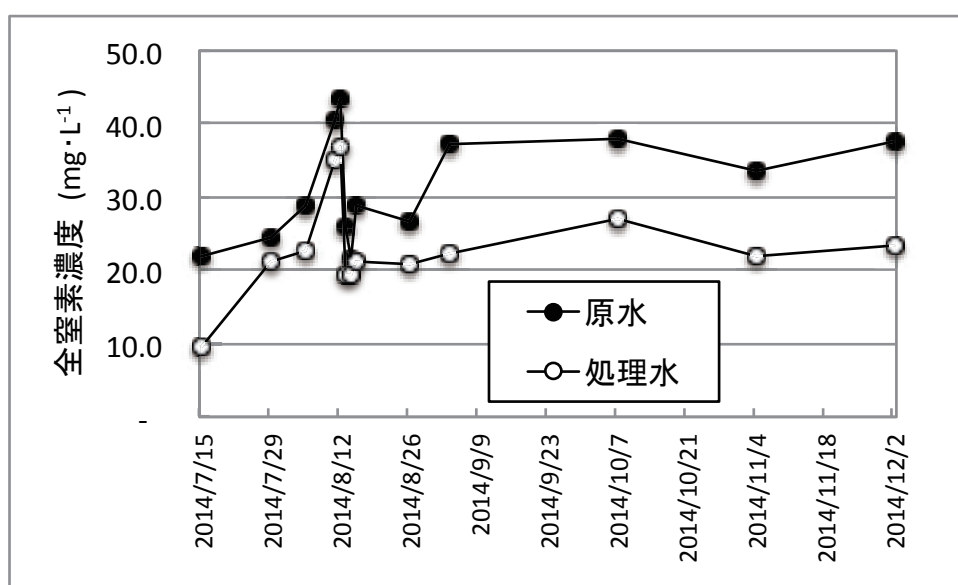


図 5.39 Run-4 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の T-N の経日変化

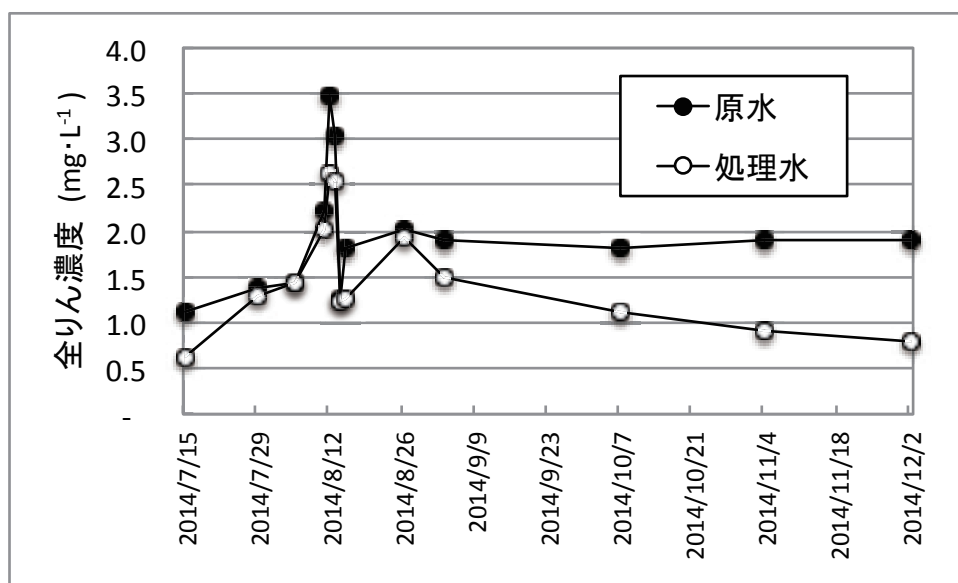


図 5.40 Run-4 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の T-P の経日変化

窒素やりんについては、同法による除去については大きな期待はしていなかったものの、実験が経過するに従って、窒素については 4 割程度、りんについては 5 割程度の除去を確認することができた。これらは、生物膜に付着して存在するか、回転円板本体下部の水槽に剥離して汚泥として残ったと考えられる。

Run-5 の実験結果を図 5.41 及び図 5.42 に示す。Run-5 は 2014 年 8 月 26 日に行った。



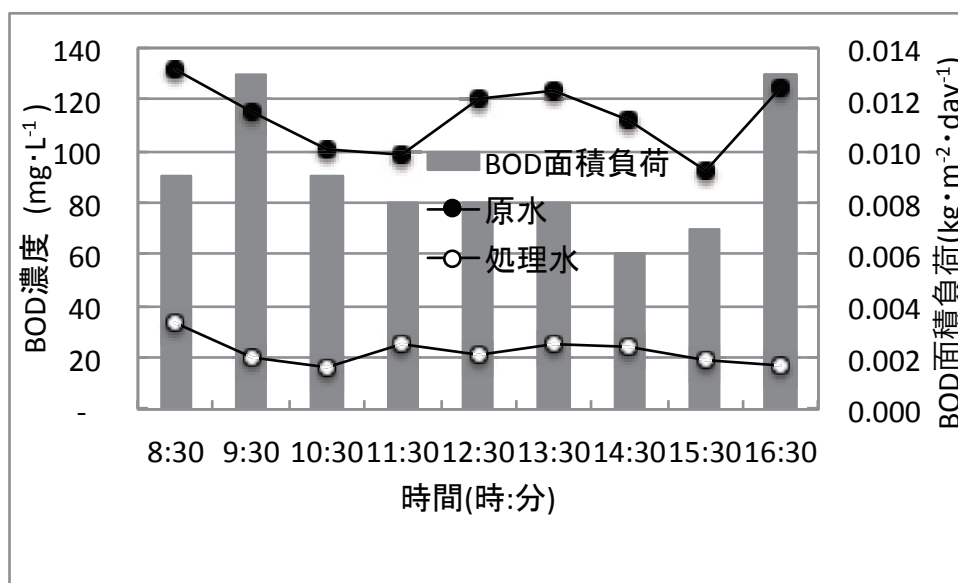


図 5.41 Run-5 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の BOD 及び BOD 表面負荷の経時変化

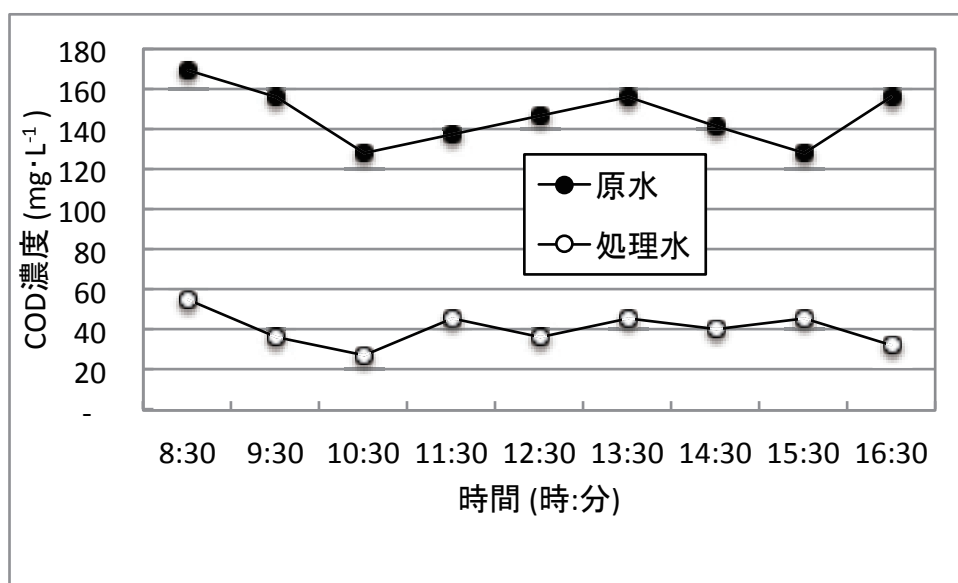


図 5.42 Run-5 原水及び処理水（回転円板体装置直後）の COD<sub>Cr</sub> の経時変化

Run-5 では、1 日における経時変化を確認する実験であったが、BOD も COD についても良好な除去を確認することができた。BOD も COD も朝から昼にかけて原水濃度が減少し、やがて昼を過ぎると転じて上昇、そして夕方にかけて低下し、夕刻に再度上昇した。これは、原水となっている廃水は前段に調整槽があるた

め、若干の時間差が生じているが、例えば、病院内での厨房廃水の影響や洗濯の時間帯によるものと考えられる。

Run-6 では、回転円板装置の除去 BOD の汚泥への転換率を求めるため、汚泥生成量を算出するにあたり、次の作業を実施した。

1. 回転円板装置の水の引き抜き（2015 年 1 月 13 日）、調整槽、沈殿槽の清掃の実施（2015 年 1 月 13 日）
2. 沈殿槽引き抜き口にサンプル採取用バルブの設置（2015 年 1 月 13 日）
3. 一定期間（3 週間）の稼働
4. 一定期間終了後、回転円板装置入口、処理水（沈殿槽後）の SS、BOD 及び COD 測定及び沈殿槽からの引き抜き汚泥の SS 測定（2015 年 2 月 3 日採水、2 月 4 日測定）

ただし、次の条件によって算出する。

1. 「汚泥引き抜き量＝沈殿した汚泥量」であるとする。すなわち、汚泥引き抜きをしても沈殿槽の汚泥界面は一定であるとする。
2. パイプ内、回転円板装置本体下部、沈殿槽や調整槽の壁面等に付着した汚泥は無視する。
3. 汚泥の自己酸化量は無視する。

測定結果を表 5.8 に示す。

表 5.8 Run-6 の測定結果

| 採水場所      | SS<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | BOD<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | T-COD<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | D-COD<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |
|-----------|---|--|--|--|
| 回転円板装置入口  | 41                                      | 92                                       | 157  | 133  |
| 処理水（沈殿槽後） | 36                                      | 28                                       | 47.4                                       | 33.2                                       |
| 除去率       | 12%                                     | 70%                                      | 70%  | 75%  |
| 引き抜き汚泥    | 2,140                                   | —  | —  | —  |

\* BOD から汚泥への転換率を求めることから、T-COD 及び D-COD は参考値とする。

次に既知の回転円板装置入口、処理水及び引き抜き汚泥の流量とそれぞれの SS から SS 量（汚泥量）を算出する。

$$\text{回転円板装置入口} : \text{SS}_{\text{in}} = 41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} = 0.041 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

回転円板装置入口流量： $Q_{in}=1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hour}^{-1}=36 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$

汚泥量： $SS_{in} \times Q_{in}=0.041 \times 36=1.48 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$

処理水（沈殿槽後）： $SS_{out}=36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}=0.036 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

処理水（沈殿槽後）量： $Q_{out}=36 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  ( $Q_{in}=Q_{out}$  とする。引き抜き汚泥排出量、蒸発量、漏水等は無視する。)

汚泥量： $SS_{out} \times Q_{out}=0.036 \times 36=1.30 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$

引き抜き汚泥： $SS_{sludge}=2,140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}=2.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

引き抜き汚泥排出量： $Q_{sludge}=0.158 \text{ m}^3 \cdot \text{once}^{-1} \times 4 \text{ times} \cdot \text{day}^{-1}=0.632 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$

\*沈殿槽からの汚泥の引き抜きは6時間に1回、すなわち1日に4回に設定しており、1回の引き抜き汚泥排出量は、実測で158 Lであった。

汚泥量： $SS_{sludge} \times Q_{sludge}=2.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0.632 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}=1.35 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$

汚泥生成量は、次のとおり算出できる。

汚泥生成量=引き抜いた汚泥量- (入口の汚泥量-出口の汚泥量)

汚泥生成量= $1.35-(1.48-1.30)=1.17 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$

次に BOD 成分が汚泥に転換する割合（汚泥転換率）を算出する。測定結果から、除去 BOD 量は次のように算出できる。

除去 BOD 量= (入口の BOD-処理水の BOD)  $\times$  流入量 (処理水量)

除去 BOD 量= $(0.092-0.028) \times 36=2.3 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$

よって除去 BOD の汚泥への転換率は、次のように算出できる。

汚泥生成量/除去 BOD 量= $1.17/2.3=0.51$

除去 BOD の汚泥への転換率について、標準活性汚泥法の汚泥生成量  $\Delta S$  ( $\text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$ ) は次式で求めることができる。

$$\Delta S = aL_r - bS_a \quad (\text{式 4.3})$$

ここに、 $L_r$  : 除去 BOD 量 ( $\text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$ )

$a$  : 除去 BOD の汚泥への転換率

$S_a$  : 曝気槽内汚泥量 (kg)

$b$  : 内生呼吸による汚泥の自己酸化率 ( $\text{day}^{-1}$ )

一般に  $a$  (除去 BOD の汚泥への転換率) は 0.5~0.8、 $b$  は 0.01~0.07 程度である<sup>59</sup>。

今回の測定で得られた E General Hospital における回転円板装置の除去 BOD の汚泥への転換率は 0.51 であったことから、標準活性汚泥法における最低値と

ほぼ同等と言える。すなわち、除去 BOD 量と比較して汚泥生成量が少ないことを示す。

E General Hospital での実験は、2014 年 6 月 25 日から 2015 年 1 月 29 日までの 218 日間で、この期間中に処理した廃水量は 6,136 m<sup>3</sup>、電力消費量は 4,495 KWh であった。よって、E General Hospital における処理水量あたりの電力消費量は、0.73 KWh・m<sup>-3</sup>となった。この期間中に運転の停止などはしていない。

#### (4) 考察

図 5.43 は、E General Hospital における実験での BOD 除去率と BOD 面積負荷の関係を示している。強い相関性はみられないが、BOD 面積負荷が 0.005 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>から 0.022 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>、BOD 容積負荷が 1.09 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup>から 5.12 kg・m<sup>-3</sup>・day<sup>-1</sup>と変動してもおおよそ 6 割から 9 割の BOD 除去が可能であることがわかった。

この結果は、前述の Hanoi Milk と大差なく、食品工場である Hanoi Milk でも公共施設の病院である E General Hospital であっても、今回用いた回転円板装置は十分に機能することがわかった。ただし、このような生物膜法は、排水量が 100~500 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>程度の施設や工場で望ましく、例えば、大規模工場や工場団地の廃水処理や数千 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>となるような下水処理場などでは不向きであると考えられる。

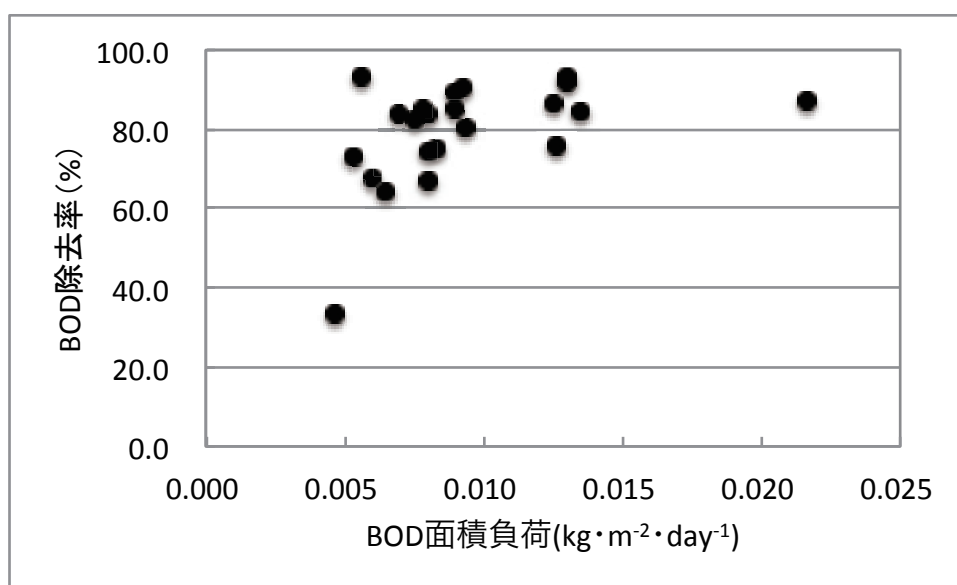


図 5.43 BOD 除去率と BOD 面積負荷との関係

#### (5) まとめ

BOD 面積負荷が  $0.005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.022 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $1.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい病院廃水であったが、BOD 除去率がおおよそ 60~90 % (平均 : 78 %) と安定的に除去し、ベトナムの産業排水基準及び医療系排水基準のカテゴリーB 基準である  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下を達成し、カテゴリーA 基準も処理水の大半は達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。また、電力消費量は処理量に対して、 $0.73 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  であった。これは Hanoi Milk より大きな消費量となっているが、Hanoi Milk は原水が発生していない場合は運転を停止したことがあり、より精度がある電力消費量は、E General Hospital で得られたものと考えられる。

### 5-5 結語

#### 5-5-1 揺動床式生物接触酸化法による下水の処理

大阪府内の下水処理場で実施した屋外実験の結果の内、BOD 及び COD の結果を図 6.9 及び図 6.10 に示す。同実験は、同一の処理槽で流入量をポンプで可変し、BOD 容積負荷の違いによる有機性汚濁物の除去を実験したものである。原水及び処理水の採水は、それぞれの条件の実験期間終了後に採水している。

実験条件は4段階とし、BOD容積負荷で $0.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ から $0.74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ と変化させた。BOD容積負荷が $0.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ の条件のものを除けば、BOD及びCODは43-76%の除去率であった。なお、SSは67-89%除去できている。今回の実験によって、揺動床式生物接触担体を用いた方法で下水中の有機物を比較的容易に分解除去できることがわかった。

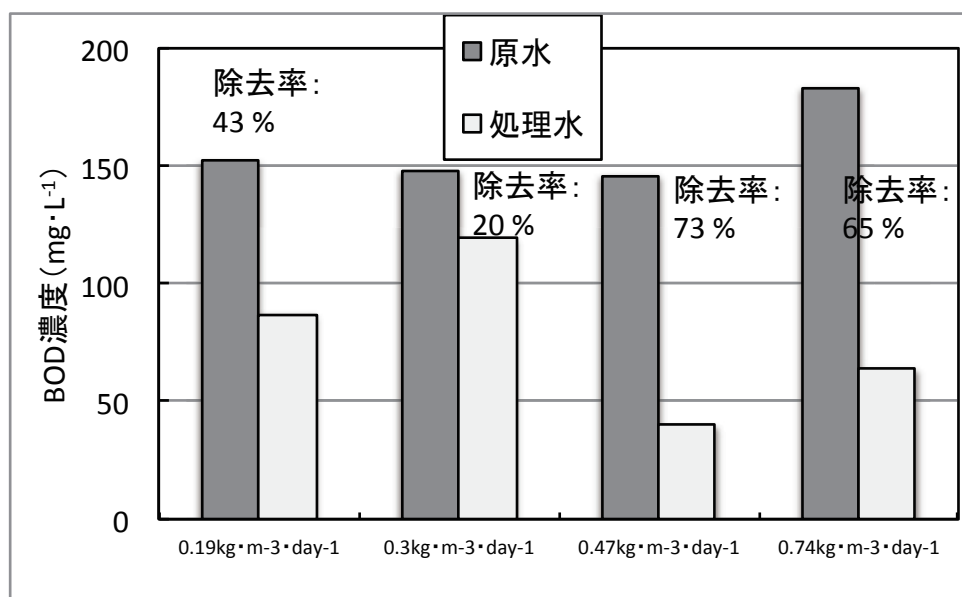


図 6.9 揺動床式生物接触酸化法による BOD 除去結果

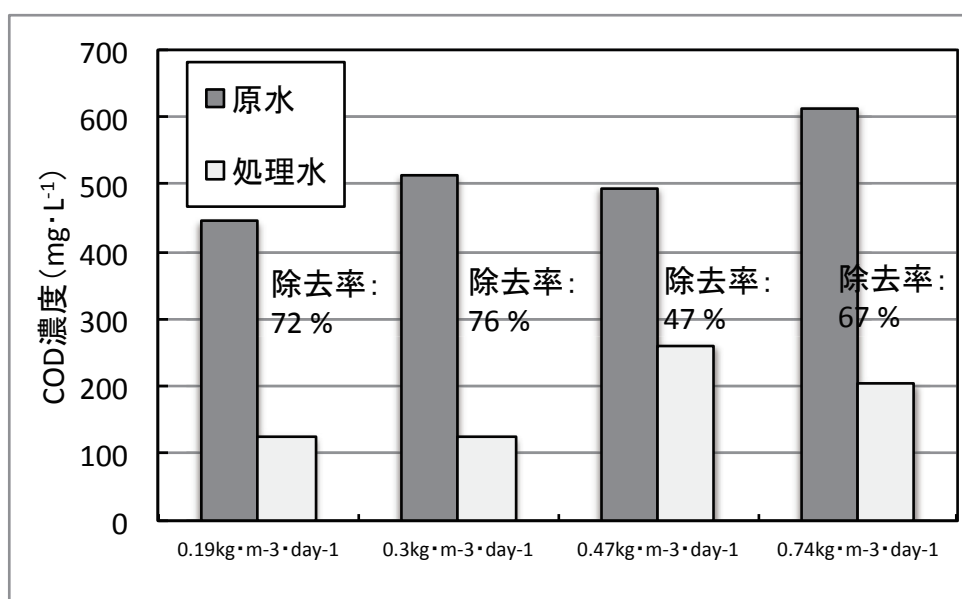


図 6.10 揺動床式生物接触酸化法による COD 除去結果

### 5-5-2 回転円板法による工場廃水と病院廃水の処理

図 6.11 は、Hanoi Milk における実験について実験期間中の BOD 及び COD の原水と処理水の平均を示している。BOD 面積負荷が  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.46 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい工場という条件でありながら、BOD 除去率がおおよそ 60~90 % と安定的に除去し、ベトナムの産業排水基準のカテゴリーB 基準である  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下もおおよそ達成し、カテゴリーA 基準も処理水の多くは達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。また、電力消費量は処理量に対して、 $0.44\sim 0.49 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  であった。ただし、原水の流入が停止した場合は、稼働を停止したこともあり、精度で問題がある。

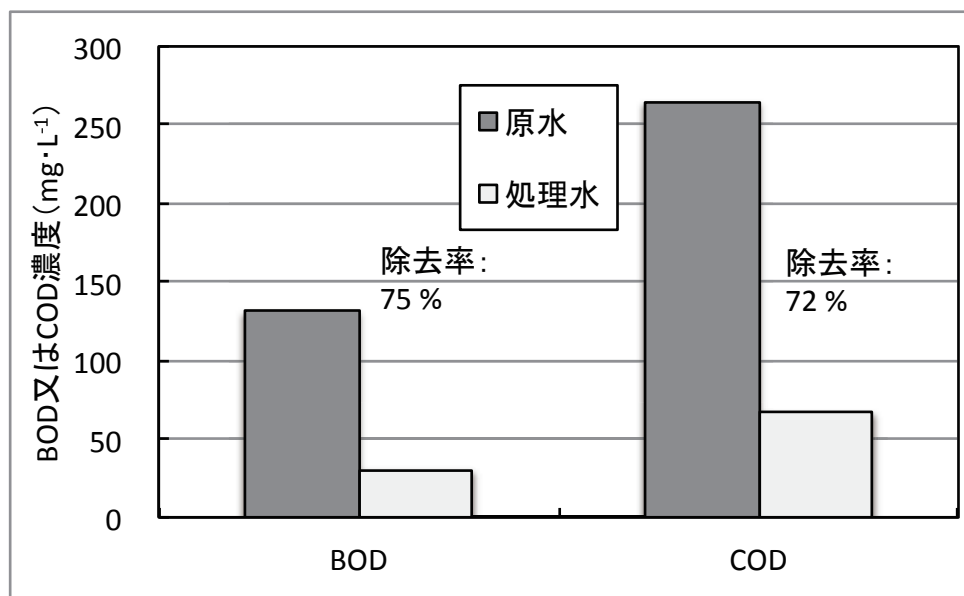


図 6.11 回転円板法による BOD 及び COD 除去結果 (Hanoi Milk)  
(経日実験の平均値、BOD 面積負荷平均 :  $0.009 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )

図 6.12 は、E General Hospital における実験について実験期間中の BOD 及び COD の原水と処理水の平均を示している。BOD 面積負荷が  $0.005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.022 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $1.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい病院廃水であったが、BOD 除去率がおおよそ 60~90 % (平均 : 78 %) と安定的に除去し、ベトナムの医療系排水基準のカテゴリーB 基準である



50 mg・L<sup>-1</sup>以下を達成し、カテゴリ-A 基準も処理水の大半は達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。また、電力消費量は処理量に対して、0.73 kWh・m<sup>-3</sup>であった。これは Hanoi Milk より大きな消費量となっているが、Hanoi Milk は原水が発生していない場合は運転を停止したことがあり、より精度がある電力消費量は、E General Hospital で得られたものと考えられる。

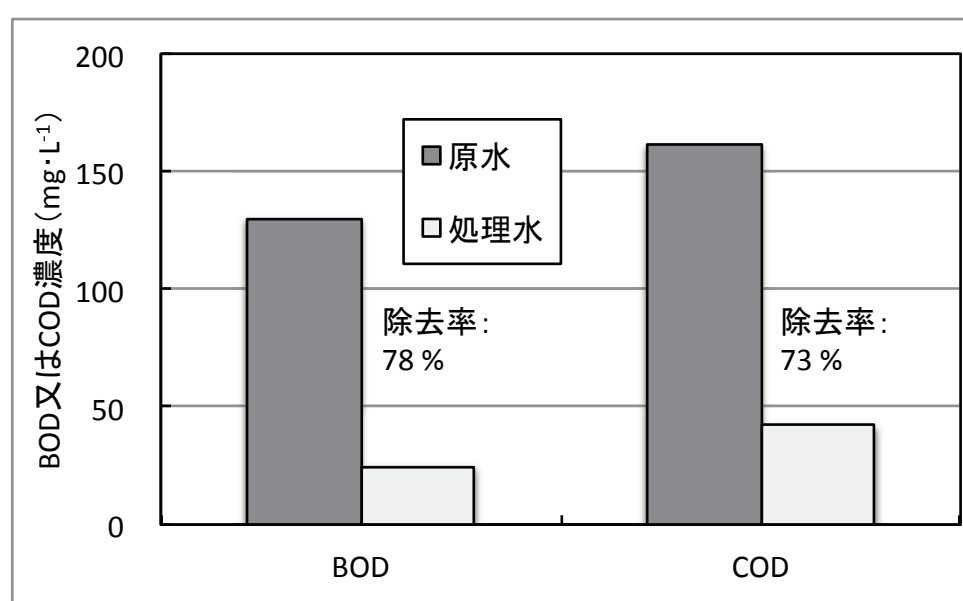


図 6.12 回転円板法による BOD 及び COD 除去結果 (E General Hospital)  
(経日実験の平均値、BOD 面積負荷平均 : 0.010 kg・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>)

生物膜法である揺動床式生物接触担体を用いた生物接触酸化法と、立体格子状になった回転円板を用いた回転円板法について研究を行ったが、BOD 容積負荷を高く設定でき、かつ安定的に BOD が除去できた回転円板法が優位であると考えられる。分散型廃水処理に求められるのは、中小規模という経済的、技術的な制限がある中で、より小型で操作が容易でありながら十分な処理が可能なシステムである。操作を評価することは困難であるが、少なくとも今回の回転円板法を長期に渡って、実験を行った中で致命的な故障や大幅な除去の低減などはなかった。

## 関連文献

- 1) 西村昌次、他、生物接触酸化法による下水処理の基礎的検討、環境技術学会研究発表大会及び特別講演会予稿集、Vol. 9、p. 45-46、2009
- 2) 濱崎竜英、他、ひも状生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去とリンの回収、大阪産業大学人間環境論集、Vol. 9、p. 53-62、2010
- 3) 濱崎竜英、他、ひも状接触担体を用いた生物接触酸化法による下水中有機物の除去、日本水環境学会年会講演集、Vol. 44、p. 86、2010
- 4) 平成 24 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2013
- 6) 平成 25 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2014
- 6) 平成 26 年度アジア水環境改善モデル事業、ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善 業務報告書、積水アクアシステム株式会社 2015
- 7) Hamasaki, T. etc., Removal of Organic matter in Wastewaters of a Milk Factory and a Hospital Using a Cubic Latticed Based Rotating Biological Contactor in Vietnam, GEOMATE Conference, 2016 (投稿中)

## 参考文献

- 
- <sup>1</sup> 中村和憲、環境と微生物 環境浄化と微生物生存のメカニズム、産業図書、1998
  - <sup>2</sup> エヌ・イー・ティ株式会社ホームページ
  - <sup>3</sup> エヌ・イー・ティ、膜分離法による高度排水処理 揺動床「バイオフィリンジ」の汚泥減容効果、月刊地球環境、Vol. 32、No. 2、p. 130-131、2001
  - <sup>4</sup> 小山登一郎、揺動床（特殊繊維製微生物担体）の現状と今後の課題、日本水処理生物学会誌 別巻、No. 22、p. 114、2002
  - <sup>5</sup> 矢裂大輔、他、揺動床による高負荷排水処理に関する研究、日本水処理生物学会誌 別巻、No. 23、p. 87、2003
  - <sup>6</sup> エヌ・イー・ティ、揺動床「バイオフィリンジ」による既設排水処理設備の増強・合理化、食品と開発、Vol. 38、No. 11、p. 68-69、2003
  - <sup>7</sup> 豊岡正志、水処理分野 揺動床バイオフィリンジ、環境浄化技術、Vol. 3、No. 7、p. 40-43、2004
  - <sup>8</sup> 豊岡正志、余剰汚泥の減容化技術 高性能接触材・揺動床「バイオフィリンジ」、月刊産業と環境、Vol. 33、No. 7、p. 87-88、2004

- 
- <sup>9</sup> 西華産業、余剰汚泥の減容化技術 揺動床バイオフィリンジ、ジャパンフードサイエンス、Vol. 43、No. 8、p. 64-65、2004
- <sup>10</sup> 豊岡正志、高度化する排水処理技術と支援機器 余剰汚泥発生量を十分の一以下に激減した揺動床「バイオフィリンジ」による排水処理改善例、月刊産業と環境、Vol. 34、No. 2、p. 61-62、2005
- <sup>11</sup> 豊岡正志、汚泥の減容技術 環境省実証試験で汚泥引き抜きゼロを達成した揺動床「バイオフィリンジ」、月刊産業と環境、Vol. 34、No. 7、p. 63-64、2005
- <sup>12</sup> 豊岡正志、他、含油排水向け生物処理技術 揺動床式生物処理法 揺動床式生物処理法の含油廃水処理への適応、環境浄化技術、Vol. 5、No. 2、p. 24-27、2006
- <sup>13</sup> 角田誠司、高度化する排水処理技術と支援機器 環境省実証試験で汚泥引き抜きゼロを達成-揺動床「バイオフィリンジ」、月刊産業と環境、Vol. 35、No. 10、p. 61-62、2006
- <sup>14</sup> 小山登一郎、揺動床バイオフィリンジ、環境浄化技術、Vol. 6、No. 1、p. 62-68、2007
- <sup>15</sup> 副島秀則、環境装置／水質汚濁防止技術 揺動床式生物膜排水処理装置、産業機械、No. 621、p. 59-60、2002
- <sup>16</sup> 佐分利治、ハイフリンジ揺動型リアクターによる排水処理、MRC News、No. 31、p. 114-120、2004
- <sup>17</sup> 佐竹純一郎、食品工場の排水処理技術 揺動床式活性汚泥法による食品工場排水処理 食物連鎖を利用した汚泥発生率の少ない高負荷処理装置、環境浄化技術、Vol. 3、No. 6、p. 32-36、2004
- <sup>18</sup> 村谷俊雄、他、揺動床縦型厨房排水処理装置の開発とその性能、日本文理大学環境科学研究所報告、No. 5、p. 14-19、2006
- <sup>19</sup> Rouse J. D.、他、高速廃水処理用の揺動床技術を用いた新規な付着成長プロセス、日本水処理生物学会誌、Vol. 40、No. 3、p. 115-124、2004
- <sup>20</sup> Cheng Yingjun、他、家庭汚水処理に関する揺動床法と活性スラッジ法との処理能力比較評価、日本水処理学会誌、Vol. 42、No. 3、p. 126-137、2006
- <sup>21</sup> Cheng Yingjun、他、揺動床廃水処理工程におけるバイオマス特性および余剰スラッジ削減、日本水処理学会誌、Vol. 43、No. 2、p. 73-82、2007
- <sup>22</sup> 渡辺祐輔、他、揺動床を用いた活性汚泥法の処理性能向上に関する研究、日本水処理学会誌 別巻、Vol. 27、p. 78、2007
- <sup>23</sup> 渡辺祐輔、他、揺動床による高濃度活性汚泥法に関する研究、日本水環境学会年会講演集、Vol. 42、p. 68、2008
- <sup>24</sup> Qiao Sen、他、嫌気性汚泥脱離液を対象とした部分亜硝酸化処理における揺動床と活性汚泥法の比較研究、日本水環境学会年会講演集、Vol. 42、p. 189、2008
- <sup>25</sup> Xu Xiaochen、他、嫌気性発酵と好気性揺動床プロセスとの結合システムにおける同時硝化脱窒と余剰スラッジ削減について、日本水処理生物学会誌、Vol. 45、No. 3、p. 123-136、2009
- <sup>26</sup> 渡辺祐輔、他、活性スラッジプロセスにおける汚泥特性促進のために揺動床技術の適用、日本水処理生物学会誌、Vol. 45、No. 4、p. 153-163、2009

- 
- <sup>27</sup> 岡本裕行、他、一槽式 anammox リアクタの運転条件に関する研究、化学工学論文集、Vol. 36、No. 4、p. 420-428、2010
- <sup>28</sup> Qio Sen, etc., High-rate partial nitrification performance of high ammonium containing wastewater under low temperatures, *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 1, p. 111-117, 2010
- <sup>29</sup> Qio Sen, etc., Partial nitrification treatment for high ammonium wastewater from magnesium ammonium phosphate process of methane fermentation digester liquor, *J. Bioscience and Bioengineering*, Vol. 109, No. 2, p. 124-129, 2010
- <sup>30</sup> Zhang Li, etc., High-rate partial nitrification treatment of reject water as a pretreatment for anaerobic ammonium oxidation (anammox), *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 4, p. 3761-3767, 2011
- <sup>31</sup> Ha Doan Thu, etc., Nitrofication of Ammonium-Contaminated Hanoi Groundwater using Swim-bed Technology, *J. Japanese Socieity of Water Treatment Biology*, Vol. 41, No. 3, p. 141-152, 2005
- <sup>32</sup> Ha Doan Thu, etc., Evaluation of the Swim-bed Attached-Growth Process for Nitrification of Hanoi Groundwater Containing High Levels of Iron, *J. Japanese Socieity of Water Treatment Biology*, Vol. 41, No. 4, p. 181-192, 2005
- <sup>33</sup> Ha Doan Thu, etc., Nitrogen Removal from Groundwater Using a Swim-Bed Biological Reactor, *J. Japanese Socieity of Water Treatment Biology*, Vol. 42, No. 2, p. 65-78, 2006
- <sup>34</sup> 神田龍一、他、硝化処理された地下水の揺動床による脱窒処理、*日本水処理生物学会誌 別巻*、No. 26、p. 18、2006
- <sup>35</sup> 古川憲治、ベトナムの環境と日本の技術協力 アンモニアで汚染されたハノイ地下水の浄化に関する日越国際共同研究、*環境技術*、Vol. 37、No. 3、p. 169-176、2008
- <sup>36</sup> 惣田訓、他、ラボスケールのバイオリクターによる金属工場廃水からのセレンの除去、*日本水環境学会年会講演集*、Vol. 45、p. 333、2011
- <sup>37</sup> Soda Satoshi, etc., Laboratory-scale bioreactors for soluble selenium removal from selenium refinery wastewater using anaerobic sludge, *Desalination*, Vol. 279, No. 1-3, p. 433-438, 2011
- <sup>38</sup> Soda Satoshi, etc., Biotreatment of Selenium Refinery Wastewater Using Pilot-Scale Granular Sludge and Swim-Bed Bioreactors Augmented with a Selenium-Reducing Bacterium *Pseudomonas stutzeri* NT-1, *J. Japanese Socieity of Water Treatment Biology*, Vol. 48, No. 2, p. 63-71, 2012
- <sup>39</sup> ジャペックス株式会社ホームページ
- <sup>40</sup> 石黒政儀、他、回転円板法による下水高度処理に関する研究 I 処理特性の検討、*下水道協会誌*、Vol. 12、No. 129、p. 46-54、1975
- <sup>41</sup> 石黒政儀、他、回転円板法による下水高度処理に関する研究 II BOD, SS, ABS の除去と硝化、*下水道協会誌*、Vol. 14、No. 152、p. 32-41、1977
- <sup>42</sup> 石黒政儀、他、回転円板法による養豚廃水処理 実装置の実績とその考察、

- 
- 水処理技術、Vol. 17、No. 10、p. 923-931、1976
- <sup>43</sup> 石黒政儀、他、回転円板法によるじんかい埋立地の浸出汚水処理、環境技術、Vol. 7、No. 6、p. 513-521、1978
- <sup>44</sup> 石黒政儀、他、回転円板法による都市下水のメタン発酵処理に関する研究、環境技術、Vol. 19、No. 5、p. 290-293、1990
- <sup>45</sup> 荒砂光徳、高度排水処理技術はいま 中小規模の排水処理に最適な回転円板法の開発、月刊地球環境、Vol. 31、No. 4、p. 146-147、2000
- <sup>46</sup> 福田文治、資源循環型高度排水処理技術 生物膜処理法の進歩 回転円板法を見直す、化学装置、Vol. 43、No. 8、p. 29-35、2001
- <sup>47</sup> 福田文治、環境省技術実施モデル事業 立体格子状接触体による排水処理システム めん類及び弁当製造業排水、環境浄化技術、Vol. 5、No. 5、p. 61-65、2006
- <sup>48</sup> 西留清、他、回転円板法を用いた排水処理、用水と廃水、Vol. 43、No. 2、p. 125-140、2001
- <sup>49</sup> 有馬浩一郎、他、反応槽下直下沈殿槽付立体格子状回転円板法による排水処理、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 57、No. 7-186、2002
- <sup>50</sup> 西留清、他、立体格子状回転円板法による排水処理とその設計法、水処理技術、Vol. 44、No. 3、p. 123-129、2003
- <sup>51</sup> 西留清、他、立体格子状回転円板法による排水処理、鹿児島工業口頭専門学校研究報告、No. 43、p. 23-32、2009
- <sup>52</sup> 西留清、他、回転円板法と担体を用いた有機物酸化・硝化・脱窒、鹿児島工業高等専門学校研究報告、No. 44、p. 19-25、2010
- <sup>53</sup> 谷川吉輝、産業廃水処理システムとリサイクル 回転円板排水処理装置 技術的特徴と使用例、配管と装置、Vol. 38、No. 8、p. 6-10、1998
- <sup>54</sup> 郡部英利也、他、硫黄酸化細菌を応用した回転円板法による硫化物含有排水の処理、硫酸と工業、Vol. 56、No. 6、p. 41-46、2003
- <sup>55</sup> 高島正信、回転円板装置を用いた高濃度排水処理、福井工業大学研究紀要、No. 43、p. 353-362、2013
- <sup>56</sup> 田中直、アジア地域に適したコミュニティ排水処理システムの開発と普及、季刊環境研究、No. 176、p. 15-22、2014
- <sup>57</sup> Winkler G., etc., Mass Flow Balances of Triclosan in Small Rural Wastewater Treatment Plants and the Impact of Biomass Parameters on the Removal, English Life Science, Vol. 7, No. 1, p. 42-51, 2007
- <sup>58</sup> Macros von Sperling, Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors, Vol. 5, Biological Wastewater Treatment Series, IWA, 2007
- <sup>59</sup> 新・公害防止の技術と法規 2015 水質編、産業環境管理協会、2015

## 第6章 結論

### 6-1 概説

第6章は、第3章「土壌浸透法用浄化材の開発と探索」、第4章「土壌浸透法を用いた路面排水及び表流水の浄化」及び第5章「生物膜法を用いた汚水の処理」について、それぞれ結論を取りまとめている。本研究は、財政面や技術面で課題を抱える発展途上国の下水処理事業体や廃水処理が必要な企業、また日本国内においても中小規模の地方公共団体や企業において、安価で構造が簡単な廃水処理技術として、土壌浸透法と生物膜法に着目し、分散型廃水処理の適用可能性について検討することを目的とした。

### 6-2 第3章「土壌浸透法用浄化材の開発と探索」について

第3章第3項の土壌浸透法に用いる浄化材の開発では次の結論に至った。

- 1) 鉄やアルミニウムを多く含む火山灰土や地下水を水源とするような比較的清澄な水の処理によって発生する浄水汚泥を探索する。
- 2) 探索した浄化材候補がそのまま粒状であり、物理的な強度（通水しても粒状が崩壊しない）があるものは、加熱加工せず、そのまま浄化材として使用することを検討する。
- 3) 加熱加工を要せずりん吸着を目的とする場合であれば、浄化材候補の鉄濃度が2.5%程度以上あることが望ましく、10%以上であればさらに有望である。
- 4) 加熱加工を要せず有機物吸着を目的とする場合であれば、浄化材候補のアルミニウム濃度が15%程度以上で鉄濃度は2.5%程度が望ましい。
- 5) 探索した浄化材候補が乾燥させた場合に粉末状で、通水しても閉塞することが危惧される場合は造粒する。
- 6) りん除去を目的とするならば、セメントによる造粒加工が有効な方法である。浄化材候補の鉄濃度が2.5%程度以上あることが望ましく、10%以上であればさらに有望である。
- 7) 加熱加工が必要でりん吸着を目的とする場合であれば、加熱温度が400℃程度、浄化材候補の鉄濃度が13%程度以上でアルミニウム濃度が20%以上であることが望ましい。
- 8) 加熱加工が必要で有機物吸着を目的とする場合であれば、加熱温度が800℃程度、浄化材候補のアルミニウム濃度が20%以上であることが望ましい。

第3章第4項では、新たな浄化材探索として、九州地域の火山灰土に着目し、探索を実施してりん吸着の評価を行った。

採取した土壌34種については、いずれもりん除去のための浄化材として用いることは可能であるが、特に「赤土」と呼ばれる土壌が適していることがわかった。次いで「黒土」と呼ばれる土壌も適していた。ところが、「赤土」も「黒土」も自然の状態では粒状となっておらず、造粒しなければりん除去のための浄化材として使用は困難である。りんの吸着係数が第3位であったのは鹿児島県鹿屋市産の「鹿沼土」であったが、同土壌は造粒の必要がなく、そのまま浄化材として使用することも可能であり、このような、「鹿沼土」、「さつま土」、「ボラ土」と称される土壌については、低コスト化を検討する上で優位な土壌である。主成分分析の結果では、鉄やアルミニウムの割合が大きいことだけでなく、土壌中の他成分も関わっていることがわかった。ただし、主成分分析で第1グループに存在する土壌の内、7種中2種の土壌は、りんの吸着係数の順位で34種中25位と31位であったり、第2グループに存在する土壌の内、6種中1種の土壌は、りんの吸着係数の順位で34種中26位であったりしており、最終的な組成分析だけではなく、りんの吸着試験は必須であることがわかった。

### 6-3 第4章「土壌浸透法を用いた路面排水及び表流水の浄化」について

栃木県鹿沼市の赤玉土を用いた路面排水の浄化の結果の内、有機性汚濁物の指標であるBOD及びCODの結果では、BODの除去率が50%及び84%、CODの除去率が75%であったことから、有機性汚濁物の除去については一定の除去が可能であることがわかった。雨天時の路面排水は、濃度変動が大きく、特に降雨直後が高くなることが予想されるため、このような初期の路面排水については、前段に調整槽を設けるなどの工夫をして、濃度変動や流量変動への対応に備える必要がある。土壌浸透法は以前より濁度や浮遊物質の除去については効果があることがわかっていたが、目詰まりすることが問題となっていた。今回、油分除去とともに目詰まり対策として、油分除去シートを浄化材料上部に取り付けたが、およそ2年間のフィールド実証実験で1度の交換を行ったのみであった。油分除去シートには油分や浮遊物質が付着していたが、直下の赤玉土は汚れておらず、目詰まりすることはなかった。このようなことから、油分除去シートが除去能の維持及び赤玉土の長寿命化にある程度効果があることがわかった。同実験の全りんの結果であるが、赤玉土のりんの吸着能は第3章で示した



とおり、非常に高いことがわかったが、本実験では原水の全りん濃度が  $0.05 \sim 0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度と低いこともあり、 $37 \sim 38 \%$  という除去率であった。このように路面排水の浄化のために土壌浸透法を適用することは可能であるかもしれないが、路面排水のような面源負荷の場合は、汚濁源が広範囲におよぶことから、土壌浸透法を適用するにあたっては、施工方法については十分に検討しなければならない。

第 3 章で開発したセメントを用いた造粒によって得られた浄化材を表流水中の全りんを除去する実験を行った。原水は大阪府内の農業用水路と河川から採水したものをを用いており、およそ  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  前後の全りん濃度である。実験の結果、いずれの原水でもおよそ  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  程度まで除去でき、除去率は  $70 \%$  程度であった。セメントを造粒に用いた場合、有機物の除去は期待できないが、りんの吸着では十分に期待でき、物理的強度も増すことから、浄化材として有望であることがわかった。また、種々の造粒方法においてもりんの吸着能を損なわないこともわかった。このようなことから、同浄化材は、河川や湖沼などの直接浄化や工場廃水の高度処理などに対応が可能であると判断した。

#### 6-4 第 5 章「生物膜法を用いた汚水の処理」について

大阪府内の下水処理場で実施した揺動床式生物接触担体を用いた屋外実験では、実験条件を 4 段階とし、BOD 容積負荷で  $0.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  から  $0.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  と変化させて行った。BOD 容積負荷が  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  の条件のものを除けば、BOD 及び COD は  $43 \sim 76 \%$  の除去率であった。なお、SS は  $67 \sim 89 \%$  除去できている。今回の実験によって、揺動床式生物接触担体を用いた方法で下水中の有機物を比較的容易に分解除去できることがわかった。

立体格子状になった回転円板を用いた回転円板法では、ミルク工場の Hanoi Milk とベトナムの国立病院である E General Hospital の 2 箇所で実験を行った。Hanoi Milk における実験では、BOD 面積負荷が  $0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  から  $0.020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  から  $5.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい工場という条件でありながら、BOD 除去率がおよそ  $60 \sim 90 \%$  と安定的に除去し、ベトナムの産業排水基準のカテゴリー B 基準である  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下もおおよそ達成し、カテゴリー A 基準も処理水の多くは達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。一方、E General Hospital の実験

では、BOD 面積負荷が  $0.005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $0.022 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、BOD 容積負荷が  $1.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  から  $5.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$  と負荷変動が大きい病院廃水であったが、BOD 除去率がおおよそ 60~90 % (平均 : 78 %) と安定的に除去し、ベトナムの医療系排水基準のカテゴリー-B 基準である  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下を達成し、カテゴリー-A 基準も処理水の大半は達成していた。BOD 容積負荷が標準活性汚泥法よりも大きくても処理可能であり、処理システムの規模を小さくすることが可能であることがわかった。また、電力消費量は処理量に対して、 $0.73 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  であった。

好気性従属栄養生物は外部からの有機物を栄養源とし、酸素を消費しながら増殖と死滅を繰り返す過程とともに、生存のための代謝としても有機物を分解している。活性汚泥法は、生物活動の中の増殖とその排除に重点をおいた有機物除去法である。一方、生物接触酸化法は、自己酸化を含む増殖、死滅及び代謝のバランスを取りながら有機物の分解を行う方法である。高効率ではないものの、余剰汚泥の処理費用、または環境への負荷という点で利点があると考えられる。このようなことから、より効率的に生物活動を維持する方法を見出せば、生物接触酸化法も産業廃水や河川の直接浄化だけでなく、下水処理などにも適用できると考えられる。

生物膜法である揺動床式生物接触担体を用いた生物接触酸化法と、立体格子状になった回転円板を用いた回転円板法について実験を行ったが、BOD 容積負荷を高く設定でき、かつ安定的に BOD が除去できた回転円板法が優位であると考えられる。分散型廃水処理に求められるのは、中小規模レベルという制限がある中で、より小型で操作が容易でありながら十分な処理が可能なシステムである。操作を評価することは困難であるが、少なくとも今回の回転円板法を長期に渡って、実験を行った中で致命的な故障や大幅な除去の低減などはなかった。

## 謝辞

本博士論文を執筆するにあたり、多くの皆様のご支援とご協力を得ることができ、無事、まとめることができました。中でも、主査をしてくださいました大阪産業大学の津野洋教授には、論文指導だけでなく、論文執筆への後押しもしていただきました。また、副査をしていただきました大阪産業大学の尾崎博明教授、倉橋幸彦教授、吉川耕司教授のご指導も併せていただきました。誠にありがとうございました。

第2章での海外調査では、環境省・アジア水環境改善モデル事業「ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による水環境改善」の調査において、ベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所のPhan Do Hung氏、積水アクアシステム株式会社の吉井良氏（当時）、荒砂光徳氏、サン・エンジニアリング株式会社の五味紀夫氏（当時）、大阪府の南哲朗氏（当時）、橋本浩一氏のご協力を得ました。また、平成26年度の海外留学実現に、大阪産業大学人間環境学部長の倉橋幸彦教授のご支援を得ました。タイでの調査では、TESCO Bangkok Co., LtdのAdisak Youngynen氏とCPF (THAILAND) PUBLIC COMPANY LIMITEDのSupong Phanchantraurai氏、マレーシアでの調査では、Malaysia Palm Oil BoardのYahaya Hawari氏とORECのZahari Mohamad氏、インドネシアでの調査では、P. T. EAST JAKARTA INDUSTRIAL PARKのGunawan氏、ベトナムのダナン市の調査では、ベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所・ダナン環境技術センターのDo Van Manh氏のご支援を得ました。

第3章及び第4章の調査と実験では、文部科学省科学技術振興調整費・産学官共同研究の効果的推進「廃棄物・新素材による土壌浸透システム開発」の研究において、大阪産業大学の菅原正孝教授（当時）、京都大学原子炉実験所の藤川陽子准教授、米田大輔氏（当時）はじめ多くの院生や学部生、経済産業省近畿経済産業局・地域資源活用新事業展開支援事業「淡路瓦の製造工程で排出される不良瓦を有効活用した水質浄化材の開発」の研究において、菊川建材株式会社の菊川健一氏、大分県の十時花園、熊本県の鉦栄物産株式会社、小浦建設、宮崎県の有限会社ラテック、太成建設株式会社、有限会社南建興業、鹿児島県の有限会社中村産業、有限会社しろやま興産のご協力を得ました。

第5章の調査と実験では、関西ピー・ジー・エス株式会社の鈴木實氏や西村昌次氏（当時）はじめ多くの院生や学生、第2章の海外調査と同じく、環境省・アジア水環境改善モデル事業「ベトナム国省エネ型有機性産業排水処理による

水環境改善」の調査において、ベトナム国立科学技術アカデミー・環境技術研究所の Phan Do Hung 氏と積水アクアシステム株式会社の吉井良氏（当時）、荒砂光徳氏、サン・エンジニアリング株式会社の五味紀夫氏（当時）、大阪府の南哲朗氏（当時）、橋本浩一氏のご協力を得ました。

ご協力とご支援をしてくださいました多くの皆様に感謝申し上げます。ありがとうございました。