

博士論文

マイクロ・ナノバブルを用いた
集水井横ボーリング等閉塞物除去システムの研究

2025 年 3 月

科 野 健 三

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目 次

図一覧	iii
表一覧	v
写真一覧	vi
第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景, 目的, 内容	1
1.2 既往の関連課題に対する研究	2
1.2.1 集水管の閉塞物形成要因の仮説	2
1.2.2 集水管の流量減少要因の予測	9
1.2.3 マイクロ・ナノバブルによる閉塞物除去の可能性予測	19
参考文献	24
第 2 章 集水井の流量減少要因の検証と健全度評価方法	30
2.1 集水井の流量減少要因の検証	30
2.2 集水井の健全度評価方法	32
参考文献	35
第 3 章 室内実験	36
3.1 むれ性試験	36
3.2 スケール重量測定	39
参考文献	43
第 4 章 洗浄システムと洗浄方法	44
4.1 洗浄システム	44
4.2 洗浄装置および洗浄方法	45
4.2.1 洗浄装置	45
4.2.2 洗浄方法	47
(1) 設置工	47
(2) 洗浄工	49
(3) 観測工	51
参考文献	52
第 5 章 基礎実験	53
5.1 実験方法	53
5.2 結果と考察	55
第 6 章 適用実験	60
6.1 実験方法	60
6.2 ケーススタディー1(集水井健全度(レベル):2)	63
6.2.1 注水前の集水井Kの状況	63
6.2.2 仮説の検証と考察	64
6.3 ケーススタディー2(集水井健全度(レベル):2~3)	67
6.3.1 注水前の集水井Tの状況	67

6.3.2 仮説の検証と考察	68
6.4 ケーススタディー3(集水井健全度(レベル):4)	72
6.4.1 注水前の集水井 O の状況	72
6.4.2 仮説の検証と考察	73
6.5 まとめ	77
参考文献	79
第 7 章 ライフサイクルコスト	80
7.1 マイクロ・ナノバブルのライフサイクルコスト削減効果	80
7.2 マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕コスト	82
参考文献	87
第 8 章 仮説の検証結果に基づく発展技術	88
8.1 目的	88
8.2 水井戸への適用	88
8.2.1 水井戸等の修繕方法と実績	88
8.2.2 常設装置による水中ポンプと揚水管の維持管理方法	92
参考文献	96
第 9 章 結論	98
参考文献	101
謝辞	102
引用図表	103
1. 砂防関係施設点検要領(案) 令和 4 年 3 月 国土交通省砂防部保 全課 p.31	103
2. 同上 p.42	104
3. Rolf O Halberg and Rudolf Martinell : Vyredox -In Situ Purification of Ground Water p.91	105
4. 遠藤勇, 保志篤: 液化・気化炭酸ガス注入による井戸洗浄工法(アク アフリード工法) 図-2	105
用語説明	106
事項索引	110

図一覧

図番号	ページ
1-1 集水井模式鳥瞰図.....	2
1-2 横ボーリング孔(φ 66~86)の模式横断面図	2
1-3 集水管縦断方向外壁側スライム形成イメージ	3
1-4 バイオフィルムの形成過程と脱離作用..	4
1-5 菌体増殖とクォーラムセンシング活性の相関	6
1-6 タンパク質の小胞体輸送.....	6
1-7 微生物のエネルギー変換.....	7
1-8 ATP(RLU)とバイオフィルムの状態	8
1-9 バイオサーファクタントの状態変化イメージ.....	10
1-10 EPS 内の電子の海とマイクロゲル形成イメージ	11
1-11 ミクロゲルの分散・凝集時のイメージとポテンシャル曲線.	12
1-12 ポリマーの仮想的半透膜による凝集促進.....	13
1-13 高分子ゾルーゲル転移時の浸透圧と剛性率の変化.....	13
1-14 水抜き穴付近の状態変化模式図.....	14
1-15 バイオフィルム内の微生物と鉄循環	16
1-16 ライナープレート壁面縦断方向の腐食環境	17
1-17 ライナープレートの腐食要因	18
1-18 ナノ多孔質フィルム断面模式図.....	20
1-19 発生気泡径分布図.....	20
1-20 MNB 水による EPS の剥離イメージ.....	21
1-21 ジェットティングの繰り返しによる PVC 表面変化イメージ図	21
1-22 マイクロ・ナノバブルの可溶化イメージ図	22
1-23 拡散を利用したスケール除去イメージ図	22
2-1 集水井別最大流量経年変化一覧図	31
2-2 通年流量最小値と最大値の関係図.....	31
2-3 集水井健全度(レベル)設定フロー図.....	32
2-4 健全度(レベル)とバイオフィルム形成過程関係図.....	33
2-5 短期管理指標と中期管理指標の関係	34
3-1 ぬれ性室内試験結果図	36
3-2 水道水と MNB 水の仕事.....	38
3-3 水道水温と表面張力の関係.....	38
3-4 スケール重量測定試験方法概念図	39
3-5 当初重量, 減少重量関係図.....	41
3-6 総風量, 重量減少率関係図.....	41
4-1 洗浄システム模式断面図.....	44
4-2 連結・口元治具周辺状況(管理孔なし)	45
4-3 連結・口元治具周辺状況(管理孔あり)	45
4-4 手動開閉操作バルブ拡大図	46

4-5	ヘッダー拡大図	46
4-6	先端照射部からの MNB 水縦断方向浸透イメージ図	47
5-1	集水管基礎実験平面展開図	53
5-2	集水管注入前後流量経時変化図	55
5-3	集水管別注水前後水頭・ATP 経時変化図	55
5-4	注水・養生時同一時系列水頭経時変化図	56
5-5	注水前後pH経時変化図	56
5-6	注水前後溶存酸素経時変化図	57
5-7	注水前後電気伝導率経時変化図	57
5-8	注水前後濁度経時変化図	57
5-9	注水前後水温経時変化図	57
6-1	集水井 K 展開平面図	62
6-2	流量経時変化図(集水井 K)	64
6-3	ATP【水】(RLU)経時変化図(集水井 K)	65
6-4	濁度(NTU)経時変化図(集水井 K)	65
6-5	注水時 ATP(RLU)の変化(集水井 K)	65
6-6	集水井 K 上段注水時水頭経時変化図	66
6-7	集水井 K 下段注水時水頭経時変化図	66
6-8	集水井 T 展開平面図	67
6-9	集水井 T 洗浄時水頭経時変化図	69
6-10	流量経時変化図(集水井 T)	69
6-11	ATP【水】(RLU)経時変化図(集水井 T)	70
6-12	注水時 ATP(RLU)の変化(集水井 T)	70
6-13	①, ②注水時(B-4)孔内水位モニタリング結果	71
6-14	集水井 O 展開平面図	72
6-15	MNB 水拡散想定範囲イメージ	73
6-16	流量経時変化図(集水井 O)	74
6-17	ATP(RLU)・流量経時変化図(集水井 O)	75
6-18	流末でのpH, 水温変化図	76
6-19	流末での濁度, 電気伝導率変化図	77
6-20	健全度(レベル), 気体体積率関係図	78
7-1	集水井等の工法別劣化曲線とコストのイメージ	80
7-2	中長期コスト比較図(集水井K)	84
7-3	中長期コスト比較図(集水井T)	84
7-4	中長期コスト比較図(集水井 O)	84
7-5	中長期コスト比較図(K:①ヘッダー全損時, ②損料時)	86
7-6	中長期コスト比較図(T:①ヘッダー全損時, ②損料時)	86
7-7	中長期コスト比較図(O:①ヘッダー全損時, ②損料時)	87
8-1	水井戸の洗浄方法概念図	90
8-2	簡易揚水試験他結果図	91

8-3	マイクロ・ナノバブルの循環・滞留時の洗浄イメージ図.....	93
8-4	地点別pH経時変化図.....	94
8-5	地点別溶存酸素経時変化図.....	94
8-6	地点別電気伝導率経時変化図.....	94
8-7	地点別濁度経時変化図.....	94
8-8	地点別水温経時変化図.....	94
8-9	地点別 ATP(RLU)経時変化図.....	94

表一覧

表番号		ページ
1-1	ATP 測定器仕様一覧表.....	8
1-2	マイクロバブル発生器の原理別分類表.....	19
1-3	発生装置仕様一覧表.....	20
2-1	集水井別年間最大流量, 降水量一覧表.....	30
2-2	集水井別健全度(レベル)設定チェックリスト例.....	34
3-1	ぬれ性室内実験条件表.....	36
3-2	経過時間別接触角(粗なガラス板: 平均値) 一覧表.....	37
3-3	密なガラス板上での水道水と MNB 水の接触角測定結果表 ...	37
3-4	MNB 水(ガス: 空気)・水道水表面張力試算結果表.....	37
3-5	スケール重量測定実験条件表.....	39
3-6	条件別洗浄前後試料重量減少率一覧表.....	40
3-7	総風量別重量減少率一覧表.....	41
3-8	室内実験時みかけの気体体積率一覧表.....	43
4-1	常設装置仕様等一覧表.....	45
4-2	仮設装置仕様等一覧表.....	46
5-1	基礎実験仕様一覧表.....	53
5-2	④の注入時間別みかけの気体体積率一覧表.....	59
6-1	集水井別主要諸元一覧表.....	60
6-2	集水井別流量・水質測定結果一覧表.....	61
6-3	集水井別洗浄諸元一覧表.....	62
6-4	集水管別検尺長と外挿管立上げ長.....	72
6-5	注水時観察事象整理結果一覧表.....	75
6-6	管理指標と集水井別洗浄効果判定結果一覧表.....	78
6-7	洗浄結果から推定されるレベル別スライムの性状.....	78
7-1	集水井別維持, 修繕ライフサイクル比較一覧表.....	81
7-2	集水井別維持, 更新, 修繕概算単価一覧表.....	82
7-3	集水井別概算ライフサイクルコスト比較一覧表.....	83
8-1	マイクロ・ナノバブルを用いた水井戸等洗浄実績表.....	89
8-2	気体体積率試算表.....	91
8-3	旋回流型発生装置仕様一覧表.....	92

8-4 水中ポンプ等洗浄常設装置取付実績一覧表.....	93
------------------------------	----

写真一覧

写真番号	ページ
1-1 集水井 T の集水管吐口で視認されたスライム.....	3
1-2 ライナープレート水抜き穴近傍の水酸化鉄スケール.....	3
1-3 ATP 測定器	8
1-4 コラムによるマイクロ・ナノバブル発生状況(横置きと縦置き)	20
2-1 排水量計計量部のスライム(設置1か月後)	30
3-1 横断写真撮影結果例	36
3-2 井戸水中ポンプ揚水管外壁スケール.....	37
3-3 スケール重量測定室内試験装置	37
3-4 条件別洗浄前後スケール試料.....	38
4-1 「洗浄工」地上部装置配置例	44
4-2 膨張止水材巻付け状況.....	48
4-3 VP40による止水材押込み状況	48
4-4 止水シール充填後の漏水低下状況.....	48
4-5 ホース等ワイヤー牽引状況.....	48
4-6 連結治具等取付状況	49
4-7 タンク内コラム, ポンプ据付け状況.....	50
4-8 ヘッダー(2 基)	50
4-9 先端照射部.....	50
4-10 排水管吐口での検水状況.....	51
5-1 集水管取付治具(左から①～⑥)	54
5-2 給水車による⑥への水道水供給状況.....	54
5-3 ④への MNB 水供給状況	54
5-4 タンク, CO ₂ ポンベ, 先端照射部等.....	54
5-5 流量計:10～17(L/min.)	54
5-6 CO ₂ ポンベ:圧力 0.1～0.2 (MPa)	54
5-7 CO ₂ 風量計:1～3(L/min.)	55
5-8 MNB 水注入時の隣接集水管漏水状況(左から③～⑤)	55
5-9 ⑥注水 3 時間時採水試料.....	58
5-10 ④注水 3 時間時採水試料.....	58
6-1 上段(左), 下段(右)のヘッダー取付状況	63
6-2 乾燥環境下での集水管口元止水状況.....	63
6-3 周辺地下水を用いて生成したマイクロ・ナノバブル	64
6-4 上段(左), 下段(右)のヘッダー据付状況	68
6-5 乾燥状態の EPS(上1)	68
6-6 水酸化鉄のミクロスケール(上1), (下1)	68
6-7 貯留水位上昇の痕跡(台風 19 号).....	70

6-8 集水管口元状況(左から①～⑥,①・④:閉塞管)とやや白濁した貯留水	72
6-9 外装ホース上端(集水管②,③,⑤,⑥)	73
6-10 貯留水位上昇の痕跡(台風 19 号)	74
6-11 高濃度ゾルのオーバーフロー	76
6-12 脱離した EPS の排出状況	76
6-13 EPS 排出後のミリバブル吐出状況	76
8-1 井戸蓋と先端照射部.....	91
8-2 発生装置と連成計	92

第 1 章 序論

1.1 研究の背景, 目的, 内容

水インフラの劣化問題は日々深刻さを増してきている。とりわけ、地すべりの地下水排除施設としての集水井に設置されている多数の横ボーリング集水管は、これまでは、主にジェットリングを定期的に繰り返す管内清掃によって排水機能が確保されてきた^{1), 2)}。しかし、目詰まりによって年月の経過と共に流量の低下する集水井が増加する傾向にあるという報告がなされている^{3)~5)}。また、集水井に地下水を供給する集水管の目詰まりの検討はこれまでも多くの研究が行われてきている^{6)~13)}。このような現状に対して、野呂や岸は集水管吐口に集積することの多い水酸化鉄が鉄バクテリア由来であることや、これまでのジェットリングによる方法では、根本的な解決策にならないこと等を示している^{6), 8), 10)}。また、その対策として、野呂⁶⁾、丸山⁷⁾は口元等にパッシブタイプの集水管閉塞防止器具の設置や新素材の樹脂管により閉塞し難い集水管の開発を行っている。しかし、閉塞物を積極的に除去できるジェットリングに代わるアグレッシブな方法は、見出されないまま現在に至っていると考えられる。

これは、目詰まりの原因を室内実験やシミュレーションでは明確にできなかったため、対策方法の立案が困難であったことに主な原因がある。そのため、集水管からの排水量をジェットリングにより確保する維持作業を繰り返す以外、良い方法が無かった。

この様な背景のもとで、本研究ではまず横ボーリングの閉塞物の形成要因は、供給されてくる地下水中の微生物が、外壁側等の界面に付着し栄養になる基質等を使って高粘度で接着性のポリマー⁺を増産し、スケールを成長させるバイオフィーム^{14)~27)}にあるとの仮説を立てた。しかし、これまで、集水管の難洗浄箇所におけるバイオフィームの特性等は不明であったため、まず文献によるケーススタディーを行った^{28)~34)}。一方、芹沢等³⁵⁾は窒素を使ったマイクロバブルでバイオフィームの低減化と成長を抑制できることを示しており、薬品不使用で環境にも優しいマイクロ・ナノバブル(ファインバブル)^{35)~42)}を横ボーリングにおける難洗浄箇所に形成されたバイオフィームの洗浄に有効性を発揮できると考えた。その効果を検証するため、室内実験でマイクロ・ナノバブル水の濡れ性を把握した。また、原位置における基礎実験でマイクロ・ナノバブル水は地下水に拡散してバイオフィームを剥離・分解する作用を持つと判断されたため、適用実験により効果を確認する事とした。

一方、これまでのジェットリングによる維持管理手法では、清掃時期を設定する根拠となる客観的なデータは必ずしも十分とは云えなかった。そこで、本研究ではマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄により、客観的な自主管理指標^{29)~30)}を持って横ボーリングの長寿命化を図ることのできる維持管理システムを構築するため、集水井の閉塞の程度を流量等に基づく健全度(レベル)で評価する方法を考案した。そして、開発した洗浄システムを用い健全度(レベル)の異なる3つの集水井で適用実験を行い、仮説の検証を行うと共に実際に現地

でシステムの有効性を探求し、集水井の洗浄効果を健全度（レベル）によって客観的に評価することによりライフサイクルコスト⁺削減の可能性について探求した。

また、仮説の検証結果に基づき、難洗浄箇所を持つ水井戸等の水インフラへの発展性についても探求した。

1.2 既往の関連課題に対する研究

1.2.1 集水管の閉塞物形成要因の仮説

集水井の模式的な構造を図 1-1 に示す。集水井の内径は 3.5～4m 程度であり、施設の諸元は地下水解析結果に基づき維持管理方法等を考慮して設定される。集水井の井筒材料には鋼（亜鉛引きライナープレート、コルゲート）、鉄筋コンクリート等が一般的で、地すべり地域では軽量で施工性の容易なものが用いられる。また、集水井からは一般に複数の延長 20～50m 程度の横ボーリング（概ね仰角 5 度以上、地中先端離隔 5～10m 程度）が扇状に地すべり面等に向けて配設されている。また、地下水の分布が多層構造に分かれる場合には、集水のため深さ方向に 2 段以上の横ボーリングが配設されることもある。

横ボーリング孔の横断面は図 1-2 の様な形状になっており、内空側に集水管が挿入されている。集水管は一般にはストレーナ加工を施した硬質塩化ビニール（PVC）管等の有孔管（内径 40 mm 以上）であり集水管に周辺地下水を自然流下させ、集水井に集めた後、底盤から排水管を用い自然排水する基本構造になっている。

しかし、降雨等の影響によって性状の異なる地下水が供給されることにより、集水管外壁側に微生物、有機物等の基質がスライム⁺となって集積し管内側に流亡する。これまでの横ボーリングの洗浄は 2～3 年に 1 回程度の頻度でジェッティ

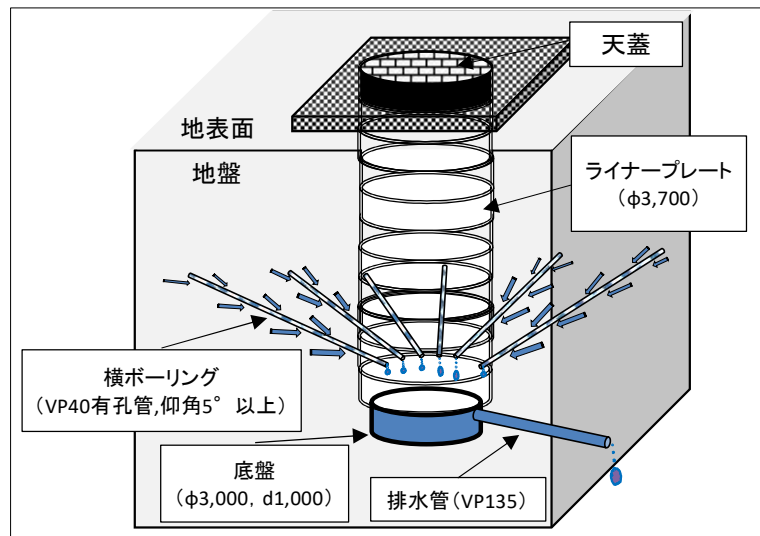


図 1-1 集水井模式鳥瞰図

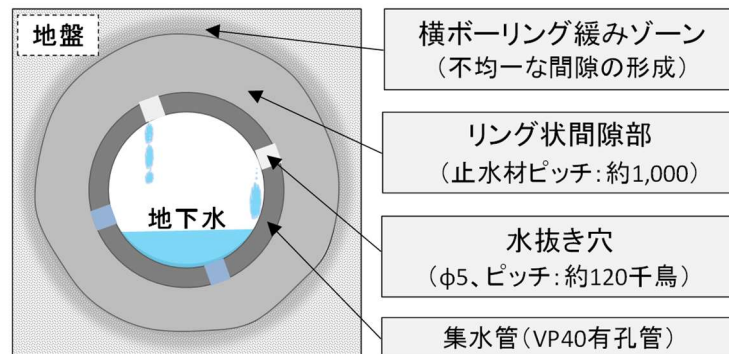


図 1-2 横ボーリング (φ66～86) 模式断面図

ングにより集水管内壁の清掃による方法であった。しかし、この方法では、管外側のスライムを除去することはできないため、長期間にわたり横ボーリング孔内で管外側にスライムが残存したままの集水管が多くなっていると考えられる。

写真 1-1 に約 2 年前にジェットイングを実施し、管内側の閉塞物はほぼ除去されていた集水管の吐口で長期間の干天時に視認できたスライムの例を示す。これは、集水管外壁側のスライムが流亡し干天時にゆっくりと吐口まで流亡したものと考えられる。その流亡物は、粘性を持つ高濃度のポリマーであった。

したがって、横ボーリングの縦断方向の集水管壁面には微生物由来と考えられるスライムが**図 1-3** に示す様なイメージで形成されることが考えられる⁶⁾。

これまで、集水機能の低下要因は管外側の付着物にありそうなのが経験的に予想されてはいた。また、集水管の水抜き穴を含む管内外壁面のスライムは高濃度ゾル状態のスケールとしてだけではなく、高橋、田崎等^{10)~11)}が示した所謂バイオマット状態のゲルになって流動しなくなるため、集水管からの吐出量を大幅に減少させることになるとも考えられた。したがって、**写真 1-1** の集水管吐口で視認されたスライムは、集水管外壁側でゲル化した EPS が離脱し水位の変動に伴う水温やイオンの変化で相転移によりゾル化して流亡した可能性もある^{57)~58)}。この技術的な論拠は、必ずしも明確に示されている訳ではなく、スライムの性状等についても不明であったが、これまでこれを除去するためには管内側からジェットイングの頻度を増加させる以外、方法は無かった。



写真 1-1 集水井 T の集水管吐口で視認されたスライム



写真 1-2 ライナープレート水抜き穴近傍の水酸化鉄スケール

一方、集水井では水酸化鉄が**写真 1-2** に示す様にライナープレート水抜き穴近傍や継ぎ目等、様々な部位の壁面に時間、場所、規模、形状を変え沈殿物としてだけではなく付着物として液だれした状態で視認される。また、水酸化鉄は集水管吐口からもスライムとして視認されることが多く、水田の取水口付近や擁壁等コンクリート構造物の漏水箇所にもみられる。

バイオフィルムについてのこれまでの研究は実験室の寒天培地での培養から推定される短期間の現象に基づくものが殆どであり、集水井の様に年

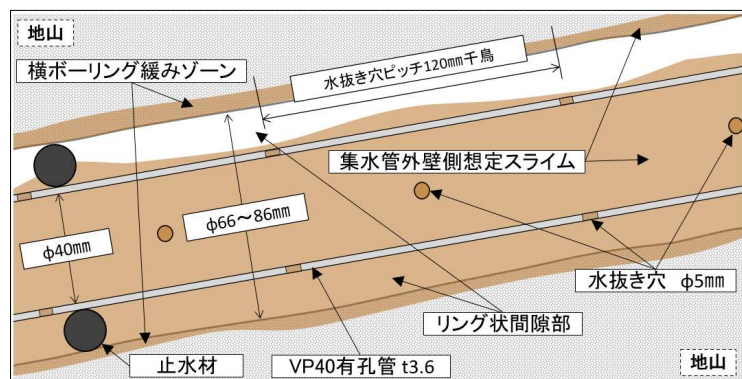


図 1-3 集水管縦断方向外壁側スライム形成イメージ

単位の長期間で常に変容し多様性に富む外的条件下での性状とは必ずしも一致しない場合が多い^{17),18),31)}と考えられる。原位置においては、図 1-2 に示した断面形状を持つ横ボーリングの内壁と集水管の外壁側に形成されるスライムが図 1-3 に示した様なイメージで縦断方向にも形成されていると考えられるが、この中の水酸化鉄等、固結したスケールを含んだスライムの性状を視認することは困難であり検査で性状を把握することも難しい。

そこで、原位置の集水管に閉塞物として形成されるこの様な固結スケールの特徴は、写真 1-2 に示した水酸化鉄スケールと類似しているものと考え、横ボーリングの閉塞物の形成要因は、供給されてくる地下水中の微生物が、外壁側等の界面に付着し栄養になる基質等を使って高粘度で接着性のポリマーを増産し、スケールを固結するまで成長させるバイオフィーム^{14)~27)}にあるとの仮説を立てた。

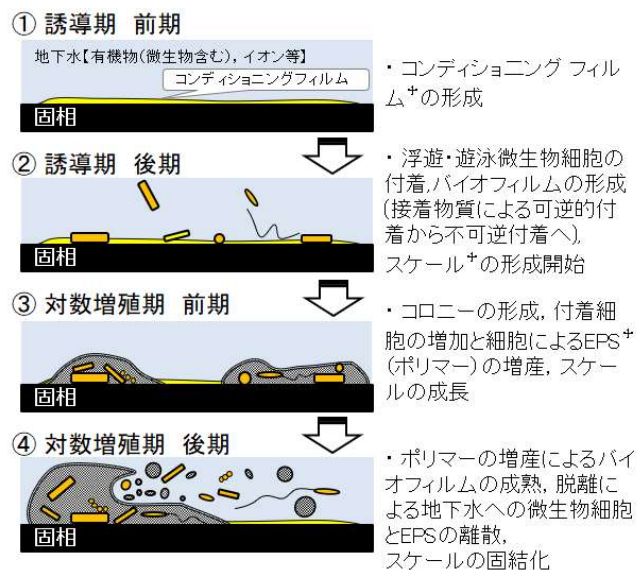
以下、文献から集水管におけるバイオフィームの特性について論述する。

大気中の浮遊微生物や塵埃は、降雨等によって汚染源となり地下水中にコロイド⁺粒子として分散する。地下水には地下に生息する殆どあらゆる微生物が存在すると考えてもよく¹⁶⁾、地下水中の浮遊微生物は水の流れにしたがって自由に動いている。しかし、森川等^{17),19),27)}が述べている様に、各々の微生物が単独の浮遊細胞として集水管周辺の地下水中に存在することは稀であり、その殆どは集水管壁面等の固相表面に形成されるバイオフィーム中に存在するものと考えられる。そして、水位変動の繰り返し等で基質が変化しバイオフィーム内の微生物は形態や性質を変えていく¹⁸⁾、といわれている。ここで、バイオフィームは、1970 年代に J.W. Costerton が提唱した比較的新しい概念であり^{21)~26)}、換言すると『材料表面に形成される微生物由来のフィルム状物質』のことであり、いわゆる「ぬめり」である。

バイオフィームは、湖や川底の石や葦の茎表面に付着して汚染物質を分解することから環境浄化に役立っており、排水処理やバイオレメディエーション⁺分野では積極利用され恩恵を被っている。しかし、産業分野では金属腐食、配管目詰まり、水質汚濁、熱交換器やセンサー設置部等難洗浄箇所の汚損等^{18),31)}多くの負の側面を有している。

本項では、まず、現地での諸現象や既往文献をもとに管外側集水管壁面のバイオフィーム形成過程について探求する。

文献等をもとに集水管壁等固相表



(文献 18), 20), 27) をもとに作成)

※EPS: Extracellular Polymeric Substances (細胞外ポリマー)

図 1-4 集水管近傍固相でのバイオフィーム形成過程と脱離作用

面でのバイオフィルムの形成過程を整理すると、図 1-1 に示した扇形に広がった複数の横ボーリング内の集水管周辺全域では図 1-4 の①～④の連鎖を繰り返しながら、集水機能を低下させ水質も汚濁していく様になる。

初期段階の微生物誘導期前期では、まず地下水によって運ばれる様々な有機物や鉱物イオン等が集水管の壁面に吸着してコンディショニングフィルム⁺が形成され（図 1-4 ① 参照）、この形成状況は供給される地下水のイオン強度によって変化するものと考えられる。

次に、誘導期後期になるとコンディショニングフィルム表面に負に帯電した微生物細胞が特定の化学物質の濃度勾配に対して方向性を持って行動する走化性により弱く付着した後、自らが生産する天然ポリマー（EPS : Extracellular Polymeric Substances ; 微生物が分泌する細胞外ポリマー：多糖類，タンパク質，核酸および両親媒性高分子化合物を含む¹⁷⁾）で保護されながらその接着性タンパク質によって瞬時に集水管壁面に不可逆付着するようになる。そして細胞同士がクォーラムセンシング^{33), 43) ~ 48)} + （定足数感知）によってタンパク質などの合成制御のコミュニケーションをとりながらバイオフィルムの形成が始まる（図 1-4 ② 参照）。この時、鞭毛をもつ細菌は集水管壁面に付着後、線毛を発現し強固に付着し線毛を持たない細菌にも大量の粘液層で付着して、壁面と強く結合する。また、最近になって微生物は多種類の接着ナノファイバーを環境条件に併せて発現しバイオフィルム等を形成しているということも解ってきており³²⁾、細胞表面の接着性については今後更に研究が進むものと考えられる。

一方、降雨等に伴い地下水位の変動する環境下においては、集水管周辺の温度、pH等は変化するが、好気性微生物と嫌気性微生物が準安定的に微生物共同体を形成することでクォーラムセンシングによって発現制御される遺伝子の中に病原因子、毒素、バクテリオシン（微生物が生産する抗菌性ペプチド⁺の総称^{19), 45)}）など他生物への攻撃機能を記号化するものも多く含まれるようになる⁴⁸⁾。したがって、図 1-4 ②の様に菌密度の低い状態では同種菌同士で制御バランスを取りながら増殖し、タンパク質や長鎖ポリマーを分解する酵素（プロテアーゼ）が高濃度になることで浄化機能を発揮することになり、バイオフィルムもまた微生物を守る盾の役割⁴⁶⁾を果たしている。

つまり、バイオレメデーション分野では微生物がクォーラムセンシング制御下で水質浄化等に寄与していることから、集水井についても微生物が集水管近傍でこの状態を長期間維持することにより、集水機能の低下を抑制できると考えられる。

しかし、養分等の基質が増え、バイオフィルム内で異種菌を含む複数種の微生物細胞が隣の細胞表面に付着し⁴⁷⁾菌密度の高いマイクロコロニーを形成し出すと、微生物の対数増殖期前期の段階に入る。この段階になると、コロニー全体がゆっくりと増産された¹⁴⁾EPSに覆われていくといわれている（図 1-4 ③ 参照）。この段階は、微生物の不活化で EPS 生産は抑制されるが、クォーラムセンシングの制御限界にあり、タンパク質や長鎖ポリマーが増えて絡まることで、ランダムコイルを形成する様になるため、酵素も分解しにくくなると考えられる。池田⁵¹⁾はクォーラムセンシング制御のみで微生物の付着を全て防ぐことは難し

いことを示している。

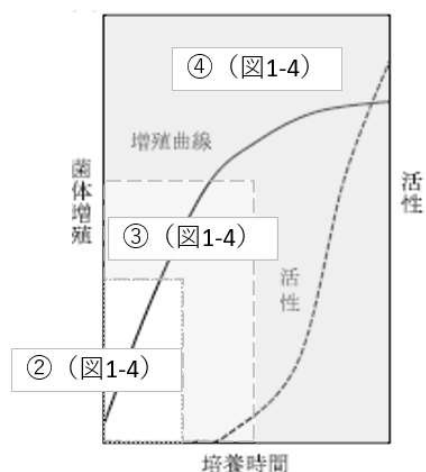
そして、地下水位の変動等外的環境の変化が加わると栄養環境が変化し、微生物細胞内に大きな分子の有機物が取り込まれるようになるため、細胞分裂が継続的に進行し細胞数の対数増殖期後期に入る。この段階になると、クォーラムセンシング制御下で微生物が活性化し EPS の大量生産によりバイオフィルムの厚さも限界値に達して、細胞の自己分解や EPS の部分的崩壊によりバイオフィルムが部分的に脱離する^{14),17)}ものと考えられる (図 1-4 ④参照)。この微生物活性は、培養実験でも菌体の対数増殖期後期から立ち上がる⁴⁹⁾ことが、確かめられておりこれに図 1-4 の③と④を併記した概念図を図 1-5 に示す。

成熟したバイオフィルムは、この後成熟場で崩壊過程をたどることになる。しかし、バイオフィルムの成熟と崩壊は必ずしも微生物の個体数のみに依存しているのではなく、過酷な環境変化にも耐えられるように EPS を増産しながら個々の微生物が自ら分裂と分化を繰り返しているものと考えられる。

したがって、集水井の集水管外壁側では時間の経過に伴いバイオフィルムが成熟し、脱離によって EPS と共に放出された微生物の離散と付着の連鎖を繰り返し、集水機能を低下させながら水質も汚濁していくようになる。

なお、地下水の供給がなくなると気液界面には、ペリクル^{19),20),31)}と呼ばれるフィルム状の微生物コロニーを形成し、完全に乾燥すると固気界面に有機物が残存することになるが、ここではこれら界面上に形成されるフィルム状の微生物コロニーも含めて広義のバイオフィルムと呼ぶこととする。

地下水中の多種多様な糖やタンパク質、バクテリア等の基質やイオンは EPS の場で微生物細胞膜に結合すると図 1-6 に示す様に生命発現の場である細胞膜の



(文献 49) の引用図に図 1-4 の②～④の概念を追記)
図 1-5 菌体増殖とクォーラムセンシング活性の相関⁴⁹⁾

- ※ 1. 細胞膜の一部が陥入する (endocytosis)
- 2. 細胞の内側に区画 (小胞体) を形成し、分泌されるタンパク質 (●) は細胞内で合成されたのち、小胞体の膜を通過し小胞体内部に入る
- 3. 4. 小胞体は細胞内部を移動する
- 5. 小胞体が細胞膜と融合し、外側に放出される (exocytosis)

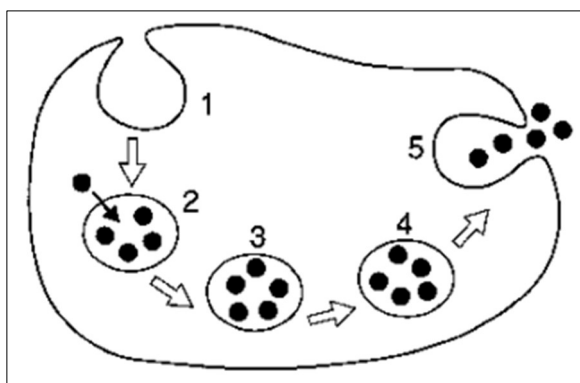


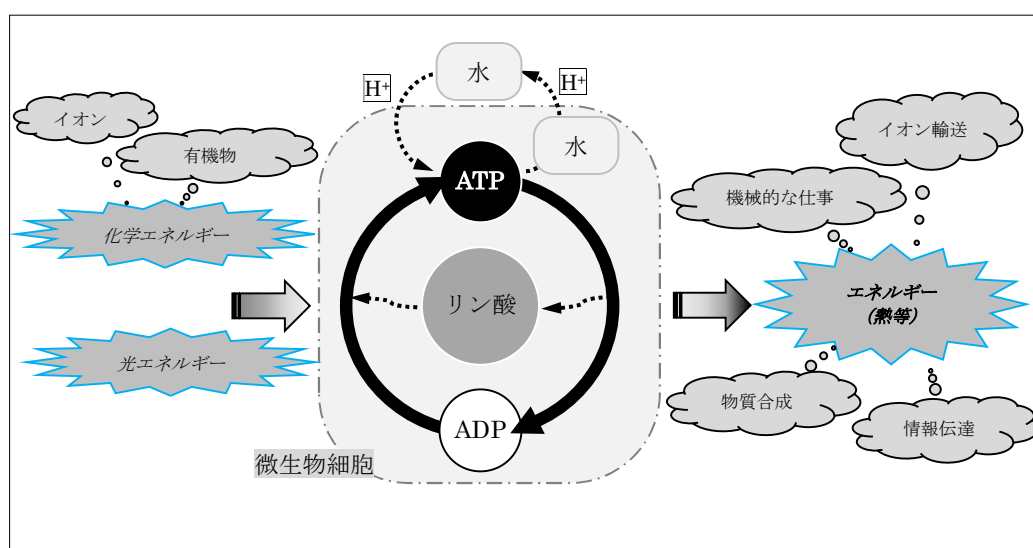
図 1-6 タンパク質の小胞体輸送⁵⁰⁾

陥入によって取り込まれる^{17),50)~52)}と考えられる。そして、水質の変化に応じて細胞膜に様々な物質を輸送できるシトクロム c^+ 等のタンパク質 (トランスポーター⁺) を増やし、細胞膜の近傍が徐々に多糖類、タンパク質等からなる細胞外重合物質としての EPS により覆われていくことになると考えられる。

一方、細胞は光エネルギーを利用できない環境下でも水素イオンと電子の豊富な EPS 環境下で細胞内外の水素イオン濃度差のエネルギーを使い EPS の各種イオンを細胞内に取り込み、酵素によりタンパク質等を含む化合物に変換し図 1-7 に示すプロセスで ATP⁺ (アデノシン三リン酸:Adenosine Tri-Phosphate) を合成する。そして、細胞はこの ATP をエネルギー源として水から糖を細胞内に取り込み、共有結合することで保持されているエネルギーを代謝により解糖する時のエネルギーを小分けにしながらバイオフィーム内で様々な活動を行うことができるといわれている^{51),52)}。

この時 ATP は、ADP になりリン酸基をくっつけ再び ATP を産出する (リン酸化)。また、バイオフィーム内で微生物コロニーの発達等により酸素が消費され貧酸素状態になっても、効率は悪いが糖の分解過程 (解糖系) で ATP を作り続けることができる⁵¹⁾と考えられる。そして、集水管界面に形成されたバイオフィーム内の微生物は、供給されてくる地下水との水素イオンの濃度差を使ったエネルギー生産の際、EPS⁺内の電子の授受による酸化還元を普遍的に行っている⁵¹⁾と考えられる。一方、微生物と微生物由来の EPS 等の生産物により構成されるバイオフィームの存在程度は ATP の量で評価できることになる^{29),30),53)}。

本研究では、集水井のマイクロ・ナノバブルによる洗浄の効果を原位置で迅速かつ簡便に評価できるようにする事が重要なため、写真 1-3 に示す ATP 測定器を用いて、原位置で迅速に RLU (Relative Lighting Unit) を測定し ATP 量 (以下、ATP(RLU) と呼ぶ) でバイオフィームの残存状況を評価し洗浄効果の概略を把握する事にする。



(文献 51) をもとに加筆・作成)
図 1-7 微生物のエネルギー変換

第 1 章 序論

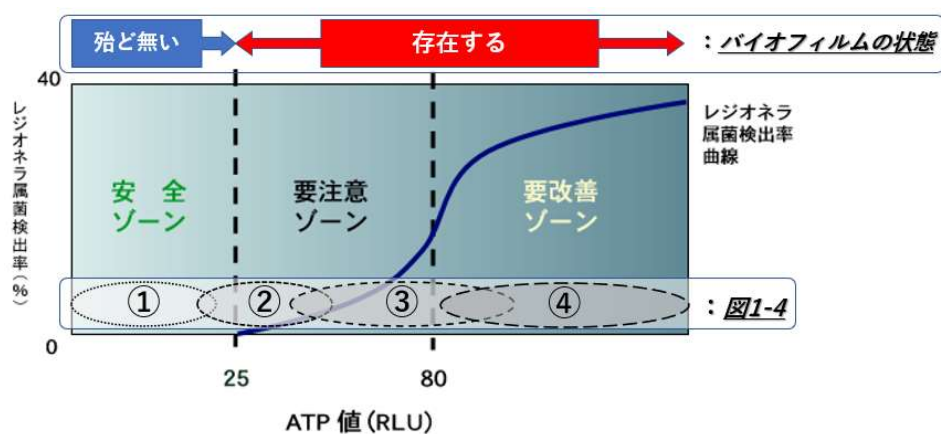
測定器の仕様は表 1-1 に示す通りであり、RLU を用いた ATP 測定法の原理は、発光物質ルシフェリンと酸素の存在下で、ルシフェラーゼ（酵素）を反応させることにより放出される光エネルギー（発光量）を測定するものである。そして、ATP(RLU)と発光量が相関関係にあることを利用してバイオフィームの残存状況を評価するもので、菌数そのものを示す指標ではない。ATP 量の測定には、これまで培養法(CFU/mL)が用いられてきており、時間と手間がかかるため建設分野での適用は難しかった。しかし、温浴施設の衛生管理には、プール水や薬湯の温泉を含む約 2,000 検体の水中用 ATP 測定（検水）データをもとに、浴槽水の ATP(RLU)が 25 以上を「バイオフィームが存在する状態」、25 未満を「バイオフィームの発生が殆どない状態」とした自主管理指標が示され^{29),30)} 検証事例も報告されている⁵⁴⁾。地下水についてもこの指標と大差ないものと考えられ、マイクロ・ナノバブルによる洗浄の効果もバイオフィームの残存状態である程度評価することができる。バイオフィームの形成状況は、基本的には壁面等の様々な部位の「拭き取り検査」により評価されるべきものであるが、集水井の場合、循環式温浴施設以上に広範囲で多くの難洗浄箇所を抱えている（図 1-1～図 1-3 参照）。したがって、集水井のバイオフィームの程度は、図 1-1 に示した通り、複数の横ボーリングに供給されてくる地下水が集水管（図 1-2 参照）を介して底盤貯留槽でブレンドされた後、排水管の吐口で「検水」によって得られる ATP(RLU)を使っ

表 1-1 ATP 測定器仕様一覧表



名称	仕様
型式	Lumitester Smart
サイズ,重量	W65×L176×H40, 0.24kg
データ出力	RLU
測定範囲	0～999999(RLU)
測定時間	10秒
試薬	ルシバック A3 Water
電源	単3アルカリ乾電池, 2本

写真 1-3 ATP 測定器



（青囲み線：参考文献 29）に加筆）

図 1-8 ATP (RLU) とバイオフィームの状態²⁹⁾

て、図 1-8 からバイオフィルムの形成状態をある程度把握できると考えられる。

図 1-8 において、「検水」による ATP(RLU)が 25 未満の「バイオフィルムが殆ど無い状態」は図 1-4 ②に対応するものと思われ、短期的な洗浄効果の目標はこれが基準になる。また、ATP(RLU)は 80 付近で「バイオフィルムが存在する状態」が微生物の活性が変化し（図 1-5 参照）、EPS の増産や離散程度に違いが生じ②～③と③～④に区分されると考えられる。同図には文献²⁹⁾に記されているバイオフィルムの状態と図 1-4 に示した①～④を加筆している。

これらのことから、バイオフィルムの存在形態は集水井の集水機能を左右することになるが、集水管等の目詰まりは、菌体の活性に伴い生産される EPS の特性に左右されることになると考えられることから、この特性について探求しておく必要がある。

1.2.2 集水管の流量減少要因の予測

地下水やバイオフィルムは EPS も含め、分散媒としての水に 1 nm～1 μ m程度の大きさに規定されたコロイド⁺粒子を含んだ状態と考える事ができる。コロイド粒子には大気から地下水に運ばれる物質や、サイズ幅の広い径や厚みを持つバクテリア、天然高分子ポリマー等の細線、地すべり土塊に多い層状粘土鉱物（ナノシート：厚さ約 1nm）の薄膜等も含まれる^{14),55),56)}。また、後述するマイクロ・ナノバブルも、内圧を受けて最終的に収縮し溶解するまでの途中の段階ではガスからなるコロイド粒子と考えることができる。

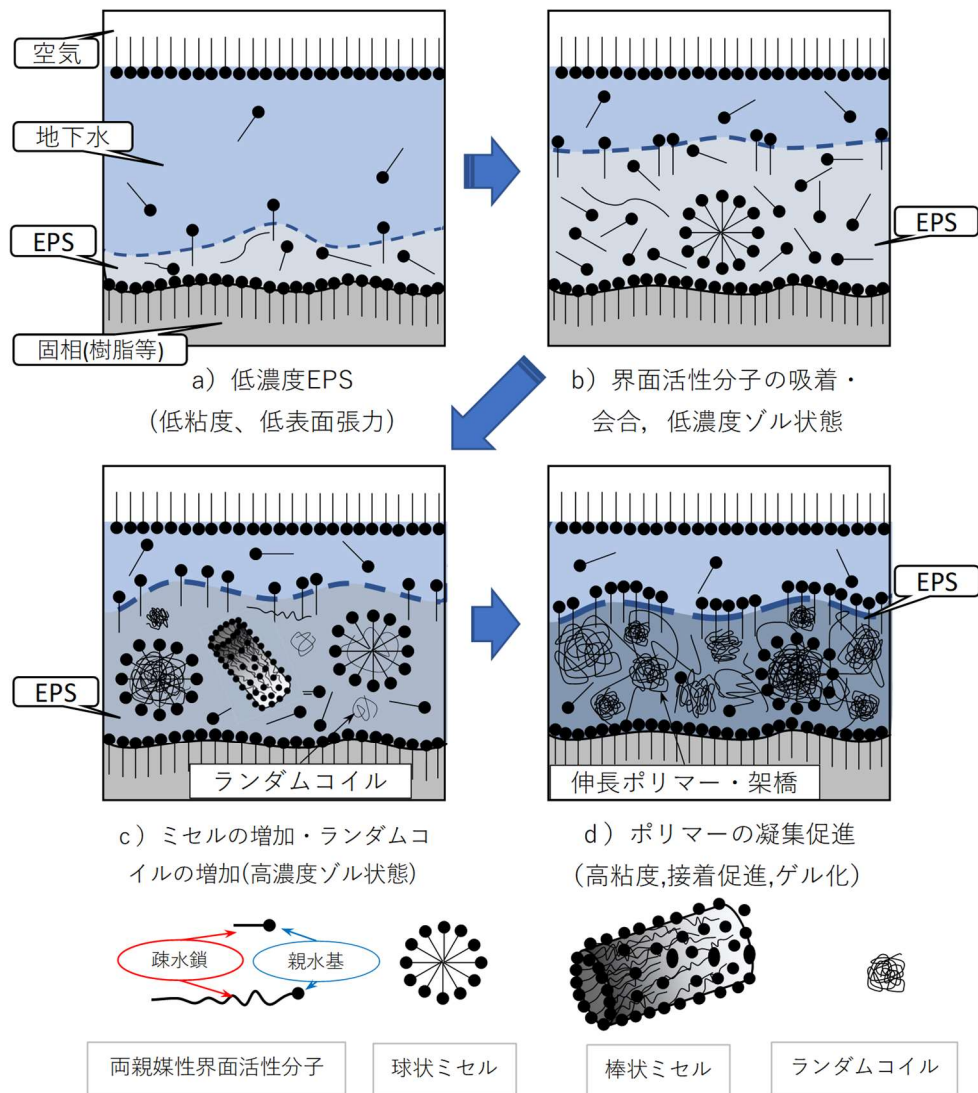
したがって、同じ液体でも大きな物質の塊（バルク）としてのコロイド⁺の特性は、大きく異なることになる。

また、EPS を構成するゾル⁺状態の多糖類、タンパク質、リン脂質、核酸は、田中等^{57),58)}が水温やイオン濃度等の変化により普遍的で不連続な流動性の無いゲル⁺に体積相転移することを明らかにしている。一方、森崎等¹⁷⁾は EPS 構成分子が水分子から絶えず衝突され、動的平衡⁵⁰⁾を保ちながら様々な物質と混在し合成を繰り返すことで、バイオフィルムの性質を決定していることを示している。このうち、多糖類はその分子同士が絡まりあい、くっつくことで液体をネバネバにする増粘機能や液体中に固形分を浮いたままにする安定化機能で細胞の構造を支えている¹⁸⁾。また、その機能を支えるタンパク質には物質の輸送、貯蔵等の運動に関わる役割を持つものや細胞同士をくっつける細胞接着分子、細胞内外の物質の出し入れを行うポンプ、シグナル受容体等としての膜タンパク質、微生物を含む有機物を材料表面に強固に付着させる接着タンパク質等多種多様な役割を持つものがある^{17),27)}。更に、リン脂質はタンパク質と共に細胞膜等の生体膜を構成し、核酸は DNA からタンパク質が作られるまでの遺伝子発現の各段階で重要な役割を担っている^{18),27)}。したがって、EPS は粘性の高いマトリクスで微生物を覆って支持しており、固液界面に強固に接着することができる特性によって、コロニーが形成されることによって増産される。また、親水性であるが保水性も備えていることで乾燥に対する耐性機能を持ち微生物の水分活性を一定期間

保持できる¹⁸⁾。そして、浮遊菌には効果のある抗菌剤や消毒薬も、付着菌は増産された EPS によって保護されているため薬剤も到達し難くする耐性も備え^{17)~19),44)}、多種多様な微生物コロニーが共存可能な場を形成していくようになると考えられる。

一方、森崎等¹⁷⁾は EPS を構成する分子に、糖やアミノ酸類等を親水基に持ち中鎖および長鎖の脂肪酸等を疎水基に持つ両親媒性の高分子物質(界面活性物質^{33),59)~63)}も含むことを示している。したがって、EPS は界面活性物質を含む高分子ポリマー⁺のコロイド濃度によって図 1-9 の a)~d) の様なイメージで変化していると考えられる。

つまり、養分等の基質の濃度が低い時は、分子間距離が離れて分子の熱運動が会合(ミセル⁺形成)を妨げるため界面活性物質は短鎖ポリマーとして溶解している(図 1-9 a) 参照)。そして、微生物の不活化によりクォーラムセンシング制御下で EPS の合成と分解の好循環



(文献 18), 55), 64) をもとに作成)

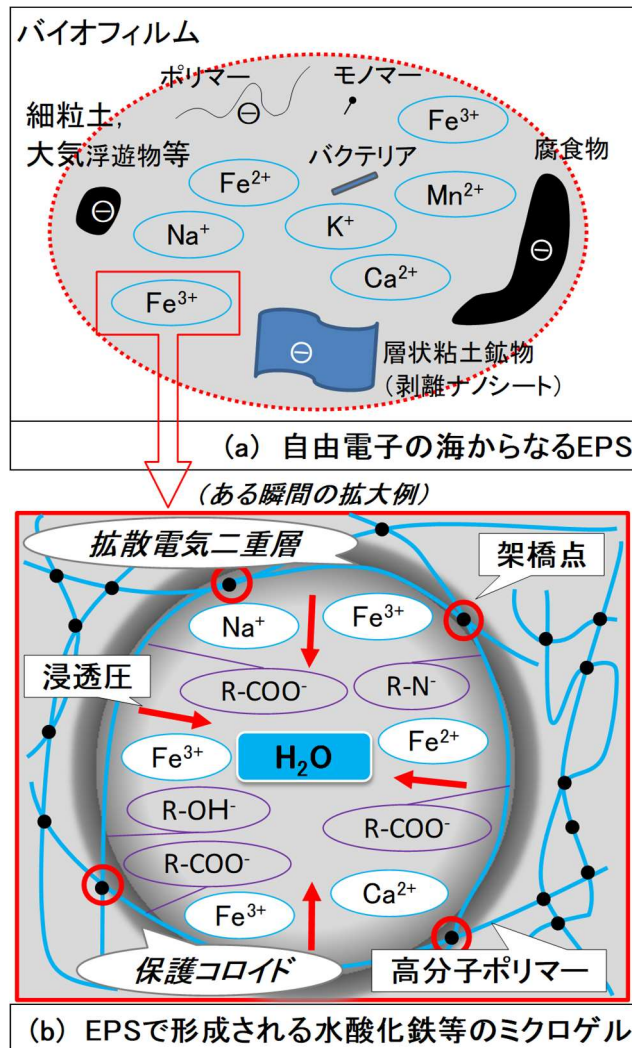
図 1-9 界面活性分子等による EPS の状態変化イメージ

が続くと (図 1-4 ②, ③ 参照), ポリマーがある程度の濃度 (臨界ミセル濃度: cmc^+ ; critical micelle concentration) で, 疎水性分子を核として光の波長より短い直径数 10nm 程度の会合コロイド, 即ち低濃度ゾルとして球状ミセル⁺を分散させる (図 1-9 b) 参照)。その後, 微生物の活性化により EPS が増産され, 吸着が進んでランダムコイル⁺が増えても界面活性分子のサイズより遥かに大きく形の異なるミセルが増え^{61)~64)}, 会合が進んで疎水基は可溶化され, 水質は浄化される (図 1-9 c) 参照)。しかし, 更に活性が進むと EPS のポリマーが高濃度になり疎水基は行き場を失い, 中～長鎖のポリマーが増える。そして, 伸長して絡み合いながらランダムコイルを架橋する様になる (図 1-9 d) 参照)。この状態になると, 高濃度ゾルとして EPS は高粘度になって集水管の水抜き穴を閉塞する上, EPS の増産と離散の悪循環が続き水質悪化の原因にもなる。

界面活性物質等のポリマーをコロイド粒子に持つゾルがゲルを形成するまでのプロセスについては以下のように考えられる。

EPS を構成する高分子ポリマーは, 図 1-10 (a) の様に自由電子の海の中で水位変動等の外部環境の影響を受け, バイオフィーム内で共有結合により伸長して 3 次元的に繋がって糸まり状になり, 図 1-10 (b) に示すように架橋点を増やして網目構造を形成し, ミクロゲルを形成する様になると考えられる。

この時, 負に帯電したポリマー⁺ (COO^- 基等) の網目近傍には静電気相互作用によるイオンの雲が拡散電気二重層として形成される^{55), 64)}。そして, 網目の外側表面には, 対イオン (+イオン) の数が増えて仮想的な半透膜が形成され, 二重層の外側と内側とのイオンの濃度を均一にするため膜内側に浸透圧が働く^{65), 66)}。また, 高分子ポリマー液の水の分子とイオンは, 透過して溶媒 (水和水) として膜内に取り込まれる。しかし, ややサイズの大きいコロイド粒子は, この膜を透過できずポリマ



(文献 17), 55), 64) をもとに作成)

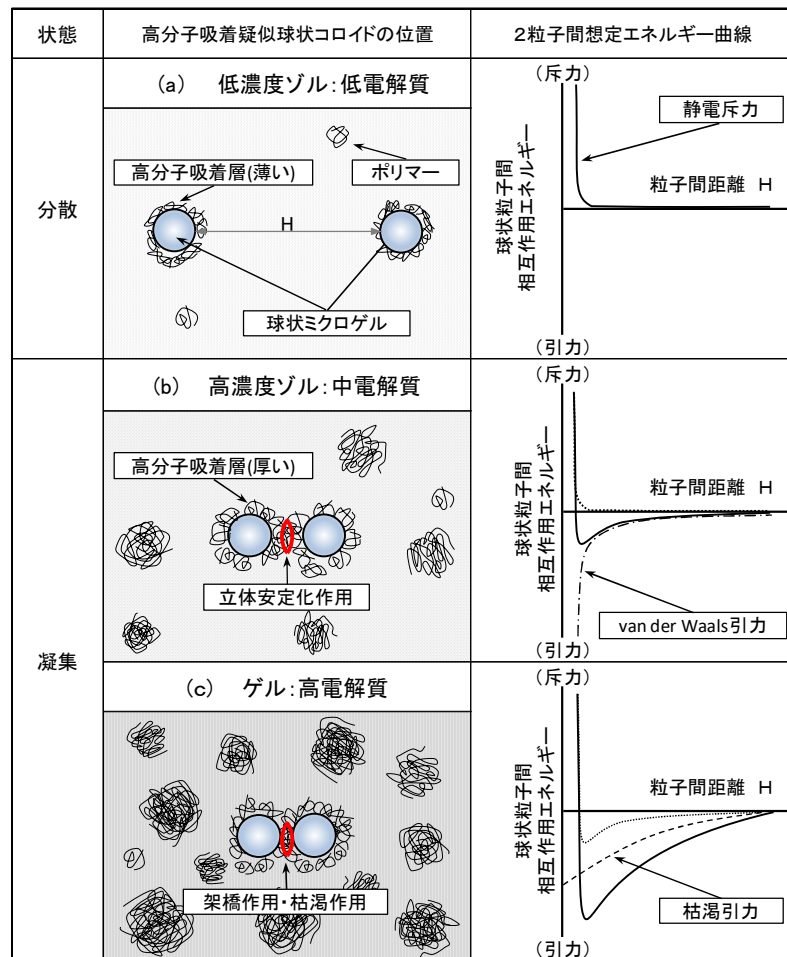
図 1-10 EPS 内の電子の海とミクロゲル形成イメージ

一等が膜の周縁部に保護コロイドとして集積することになると考えられる。

特に鉄は、原子核を構成する陽子や中性子が数ある金属原子の中で最も軽く他の化学元素と融和する親和力も高い^{67),68)}ことから、 Fe^{2+} や Fe^{3+} が拡散電気二重層内に集積する様になると考えられる。また、1963年にR. G. Pearsonが発表したHSAB (Hard and Soft Acids and Bases) の法則⁶⁹⁾から、水分子の OH^- や O^{2-} との親和性は Fe^{3+} の方が Fe^{2+} より大きい。水分子の水素結合を振り切り、直接イオン結合することで生成される多くの水酸化鉄分子（構造式： $\text{O}=\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}=\text{O}$ ）が、互いに分子間引力を及ぼし膜周縁部に不純物の多い水酸化鉄微粒子の結晶が形成される。

この結晶は、高分子吸着層で修飾された保護コロイドを構成することになり、膜内の水と水が網目押し上げ、増粘性で不可逆のミクロゲル⁷⁰⁾を形成する。ミクロゲルは鉄以外の金属イオン（マンガン、アルミニウム等）や鉱物イオン（カルシウム、マグネシウム等）による多くの結晶からも形成^{65),66)}され、流れを無くしながらマクロゲルに成長していくと考えられる。

この様に、高分子修飾された複数のミクロゲルがマクロゲル化する際のポテンシャル曲線は、図 1-11 の様になると考えられ、低濃度ゾルの状態（図 1-9 b）参照）での 2つの球状ミクロゲルを考えると、離れて静電反発力により付着することはないが（図 1-11 (a) 参照）、濃度が上がり始めると van der Waals 引力の和が静電的反発力を上回って付着し始め凝集するようになる（図 1-9 c）、図 1-11 (b) 参照）。そして、更に高濃度になると、ポリマーは伸長して架橋し、各所でサイズの大きいランダムコイルを形成するようになる。これらは、



(文献 64), 66), 72) をもとに作成)

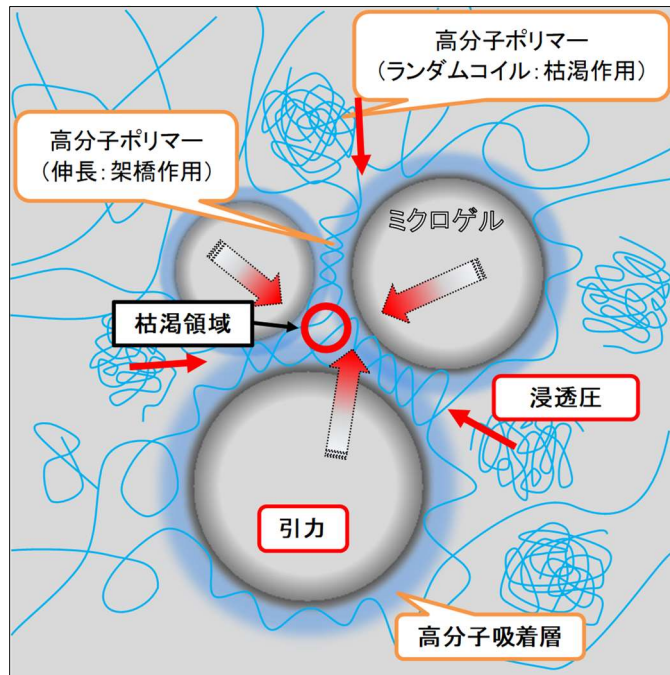
図 1-11 ミクロゲルの分散・凝集のイメージとポテンシャル曲線（架橋作用を考慮しない）

隣接し接近したマイクロゲルの間隙に入り込めないため、複数のマイクロゲルの間隙にポリマーの枯渇領域が形成される。3つのマイクロゲルが凝集した場合に形成される枯渇領域と浸透圧の関係を図 1-12 に示す。同図に示した通り、枯渇領域と外部領域との間にはポリマーの濃度差による

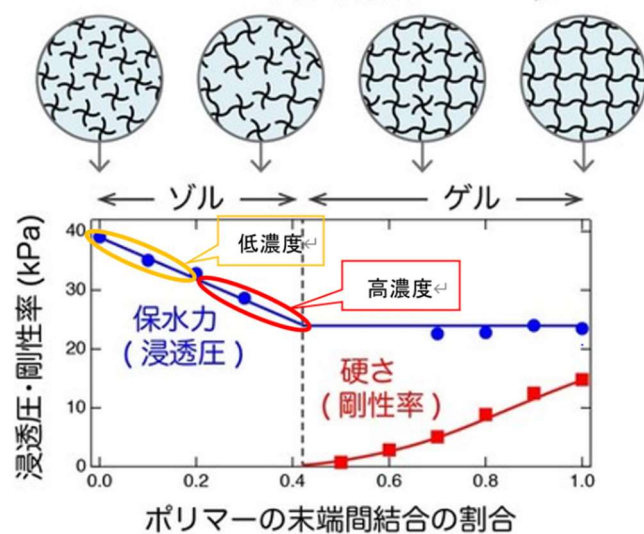
浸透圧が発生する枯渇作用で引力ポテンシャルが働く^{55),64),71)~73)}と考えられる。このポテンシャルと van der Waals 引力の和は斥力ポテンシャルを上回り、マイクロゲルの凝集が促進されて、ゲル化が進む様になると考えられる(図 1-9d), 図 1-11(c) 参照)。山中, 奥玉等⁷³⁾は図 1-11 の右列に示したポテンシャル曲線を示すと共に、室内実験で 200~500(nm)のポリマーと金属氧化物(シリカ)の荷電粒子を用い、1(cm)程度の結晶ができることを示している。

また、作道等⁷⁶⁾はゾルがゲル化に伴い生じる浸透圧は、ポリマーが架橋して網目を作り、末端同士の共有結合が進むにしたがい低下し、ゲル化と同時に剛性率が増加して膨れ方に限界が生じることを示している(図 1-13 参照)。同図から、既往文献^{6)~9),11)}にも取り上げられている集水管吐口で視認されることの多い高粘度で流動性を持った水酸化鉄等の殆どは、マイクロゲル同士が凝集した高濃度ゾル(図 1-9 c) 参照)で、マイクロゲルを架橋している高分子ポリマーが引きちぎられた状態を考えることができる。したがって、これら水酸化鉄等の大半は、乾燥すると結合力が弱いため硬いが指圧で潰れる程度に脆く、凝集の進んでいない場合は鉄粉の様になると考えられる。

図 1-13 より、ゲル化は流動性のあるゾルのポリマー末端間結合の割合



(文献 55), 73) をもとに作成)
図 1-12 ポリマーの仮想的半透膜による凝集促進
ゲル化過程



(作道直之等による⁷³⁾ 資料に追記)
図 1-13 高分子ゾル-ゲル転移時の浸透圧と剛性率の変化図

が 40%以上で始まると考えると、図 1-11 に示した低濃度ゾルと高濃度ゾルの境界はポリマー末端間結合の割合（40%未満）にも左右されていると考えられる。既述の通り、EPS にはこれを構成する多糖類、タンパク質、核酸全てにみられる普遍性のある相転移現象^{57),58)}があるが、これはポリマー末端の結合割合が水温やイオン濃度により変化しゾルとゲルを可逆的に変化させているためとも考えられる^{55),57),58),64)}。

この様な相転移現象は、特に水抜き穴周辺で顕著に現れると考えられる。水抜き穴周辺では、降雨と干天の繰り返しによる地下水位の変動に起因した物理・化学的条件（水温、基質の組成、pH、イオン濃度等）の変化が起き易いためである。

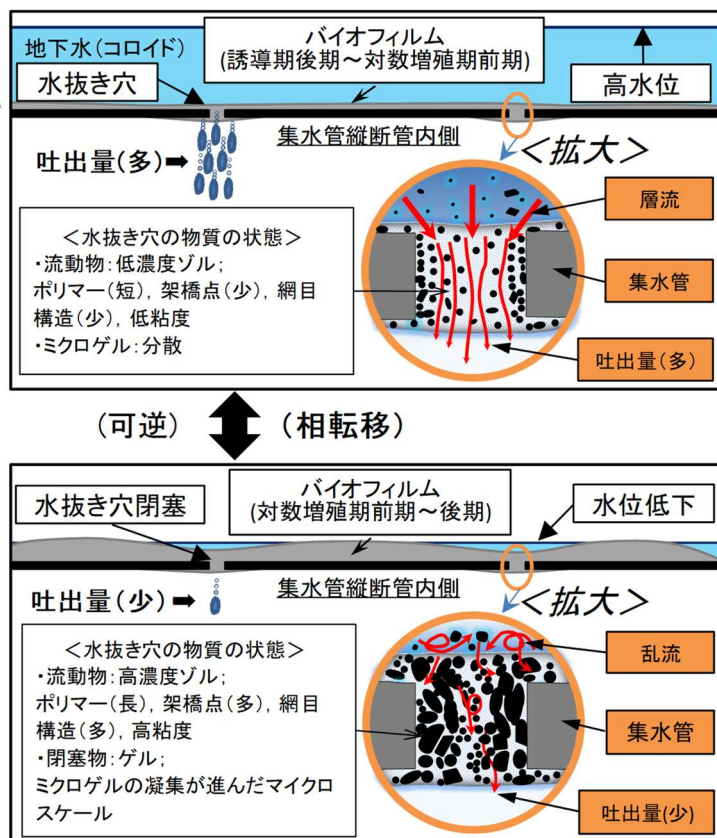
この概念図は図 1-14 に示す通りとなり、同図の上段と下段を可逆的に移行し、短期的に流動を繰り返す（チキソトロピー⁺）準（擬）塑性流動の挙動^{75)~84)}を呈する様になると考えられる。そして、水位が高くなっても降伏値を超えられなくなり、集水管に多数設けられた水抜き穴近傍のスライムのゲル化が進むため、ずり応力（降伏値： σ_0 ）を上昇させながら、不可逆^{82)~84)}になっていき集水井全体の集水機能は大きく低下することになる。

この様な状態が続くと、集水管内の清掃による排水機能の確保はできても、集水機能の回復は望めず集水井全体のライフサイクルコスト⁺の高騰に繋がる。

また、集水井においては、排水管の清掃を行った直後であるにも関わらず底盤貯留水が排水されず、湛水されてしまう

場合がある。これは、底盤貯留槽に低濃度ゾル状態で供給された EPS が、水温やイオン濃度等の外的環境の急変により貯留槽内で高濃度ゾルに転移し、高粘度のため呑口から排水されなくなるチキソトロピー⁺現象によるものと考えられる。しかし、これが底盤貯留槽内の環境が緩慢に変化して戻ると、再び水温やイオン濃度の変化で低濃度ゾルになって流動化し、排水される⁸⁴⁾。

以上のことから、集水管周辺のバイオフィルムを構成する EPS の特性は主に界面活



（文献 58），75）をもとに加筆・作成）
図 1-14 水抜き穴付近の状態変化模式図

性物質を含むポリマーの性状に左右される^{60)~63)}と考えられ、仮説が正しいとすると長期間経過した集水井の場合は、微生物が生産する高粘度で接着性の高濃度ゾル状態とゲル化した EPS が流量を減少させる要因になっていると予測される。

予測の検証については、流量とバイオフィルムの形成過程の関係等から次章 2 章で論述する。

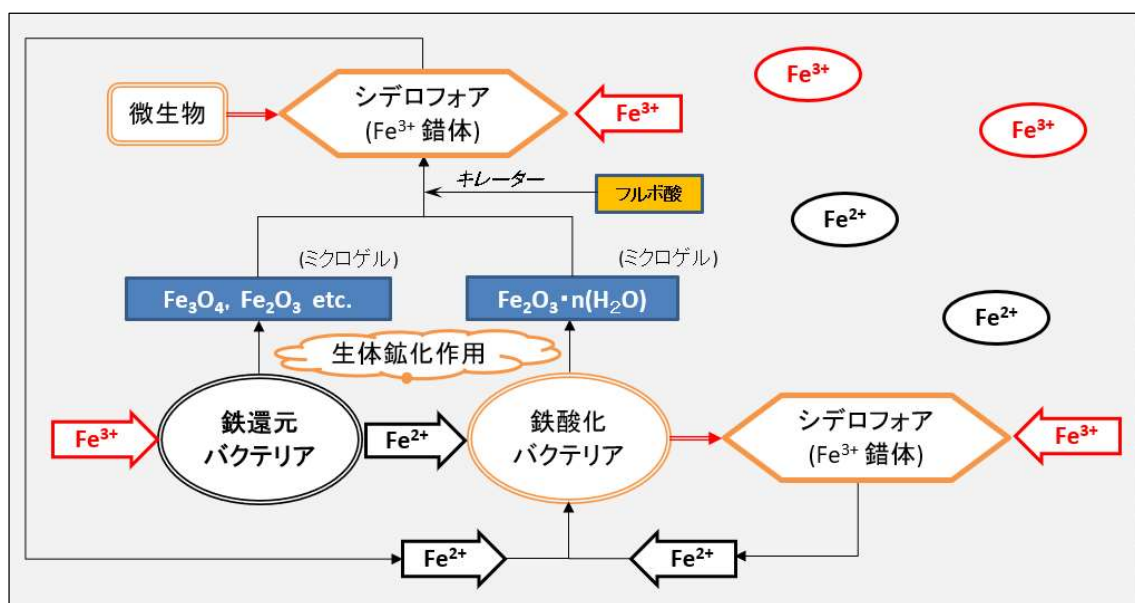
一方、長期間経過した集水井の場合、水酸化鉄や水酸化カルシウムの固結スケールが集水管の吐口をゾルやゲルの形態で閉塞することが多くなり、EPS 内で網目構造を持つ接着性の高分子修飾されたマイクロゲル⁺が、架橋されて凝集し、高粘度となって流動性を失いながら、水抜き穴を徐々に閉塞するため流量を減少させていくと予測される (図 1-10~図 1-14 参照)。

この閉塞に至るメカニズムは、バイオフィルムの中に生息するあらゆる微生物によって生産される EPS の物理・化学作用によるものであるが、集水井の場合は地すべり粘土を構成する層状粘土鉱物 (ナノシート) が豊富なため、マイクロゲルが特に増産され易い環境に置かれていると思われる (図 1-10 参照)。

また、微生物は可溶化された Fe^{2+} を直接取り込み、難溶性の水酸化鉄 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 等) を効果的に可溶化するといわれている。しかし、微生物が地下水に浮遊した状態ではこのような状況にはなく、微生物はバイオフィルム内でイオン濃度の低くなった場合等に備え、自らが分泌するキレート⁺で Fe^{3+} 錯体として取り込むことのできるシデロフォア⁺と呼ばれるシステム (鉄イオン運搬体)^{17),18),86)~88)}を使って可能になる。この取り込み機構は、他の必須金属の場合にはなく、バイオフィルム内では鉄の生産、保管、貯蔵を長期・安定的に微生物自ら行うことができる。これは、移動距離の少ないバイオフィルム内では鉄が欠乏し易い環境に置かれるため、自らの生命維持活動として地下水から供給されるイオン性の界面活性剤であるフルボ酸やフミン酸を取り込み保管すると共に、貯蔵している難溶性の水酸化鉄 (固結スケール) のマイクロゲルを分散させて破壊し可溶化していると考えられる。

国の天然記念物に指定されている高師 (たかし) 小僧 (こぞう) は、葦等の植物根の回りに長期間かけて形成された同心円構造の水酸化鉄である可能性が高いといわれている。吉田等⁸⁵⁾ は、この走査電子顕微鏡により微生物の痕跡を認め特性 X 線分析 (EPMA) により後述する ATP 反応に必要なリンを確認したことを示している。また、三野は⁸⁶⁾ イネ科植物の根においても微生物による鉄の取り込み機構を解明して、バイオフィルム内に水酸化鉄等のスケール⁺が不可逆のゲルとなって視認される場合が多くなることを示している。

森崎等¹⁷⁾ は、バイオフィルム内では好気性と嫌気性の異なる代謝系を持つ微生物が μm オーダーの微視的環境化で棲み分けられていることを示している。この考え方に、西尾⁸⁷⁾ により示されているシデロフォア⁺が分泌される環境や田崎⁸⁹⁾ により示されている生体鉱化作用を併せて考えると、鉄はバイオフィルム内において図 1-15 に示す様なイメージで循環していると考えられる。したがって、供給される地下水の溶存酸素が降雨等の影響により大きく変動しても、バイオフィルム内で微生物はそれぞれの代謝系で酸素分圧の違いを利用



(文献 17), 87), 89) をもとに作成)
図 1-15 バイオフィルム内の微生物と鉄循環

し、異なったコロニーを形成できると考えられる。また、図 1-15 に示す様に好気性環境下に鉄酸化バクテリア^{6)~14)}が棲み付くと、バクテリアが分泌するシデロフォアの中で Fe^{3+} の錯体がシデロフォアと反応することで還元され、時間の経過と共に一連の生体鉱化作用^{10), 89)}により結晶構造のがっちりとした $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (赤鉄鉱)や Fe_3O_4 等(磁鉄鉱)等のミクロスケールをバイオフィルム内に形成していくと考えられる。一方、嫌気性環境下で棲み付く鉄還元バクテリア^{6)~11)}は、シデロフォアを利用する必要が殆どないため、バイオフィルム内で長期的に保持され易くなっている EPS の基質やイオンを利用し(図 1-10(a) 参照)、効率的に還元を行い生体鉱化作用により Fe_2O_3 (マグネタイト)^{10), 89)}等のミクロゲルが形成されていくと考えられる。この段階になると、EPS^{90), 91)}は接着性で保水効果の高い高粘度物質となり全体として小さな力で大きく変形するが、しなやかに振る舞い変形が力に比例しない固体と液体の中間的なソフトマター⁺の性状⁹²⁾を呈する様になると考えられる。

ミクロゲルは、この中で高分子修飾された水酸化鉄がコロイド粒子として浮遊した後、凝集してマトリクスに支持されながら、固結スケールになっていくと予測される。

一方、図 1-15 に示したバイオフィルム中の Fe^{3+} は集水井の函体を構成するライナープレートとの腐食に伴い、集水管近傍の金属イオンが増加するため、微生物がバイオフィルムの中でこれらを利用しスケールを増産し易くすると考えられる。

ライナープレートと交接する集水管吐口付近では図 1-16 に示す様に、ライナープレート内空側表面と地山側裏面に電解質で低濃度ゾル状態の地下水(ポリマー液)が至る所で付着し、ライナープレートは吐出水の飛沫による湿潤環境の中で常に腐食し易い状況におかれているといえる。また、図 1-16 に示した集水管吐口付近は横ボーリング孔の口元保護のた

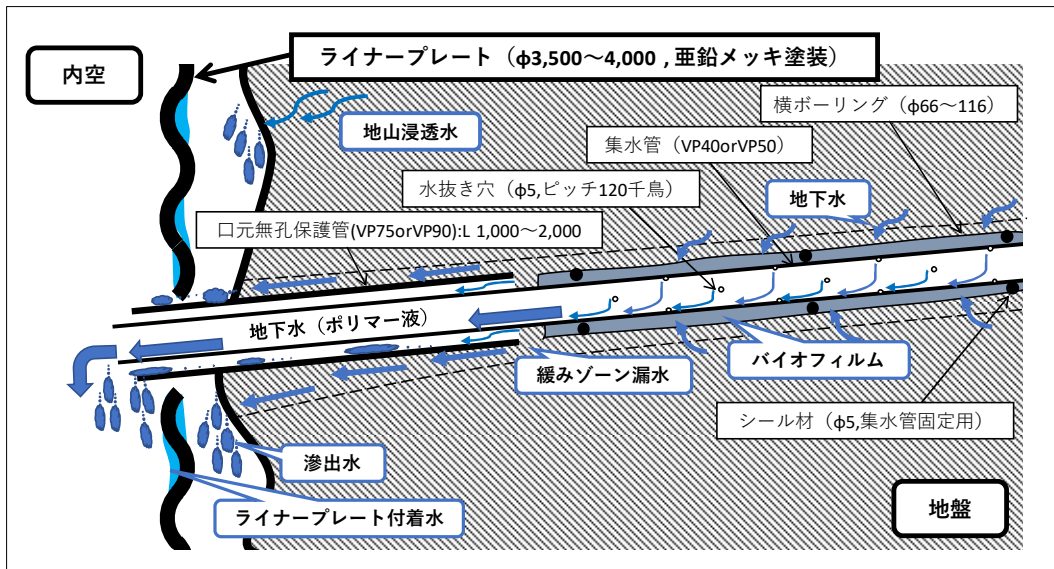


図 1-16 ライナープレート壁面縦断方向の腐食環境

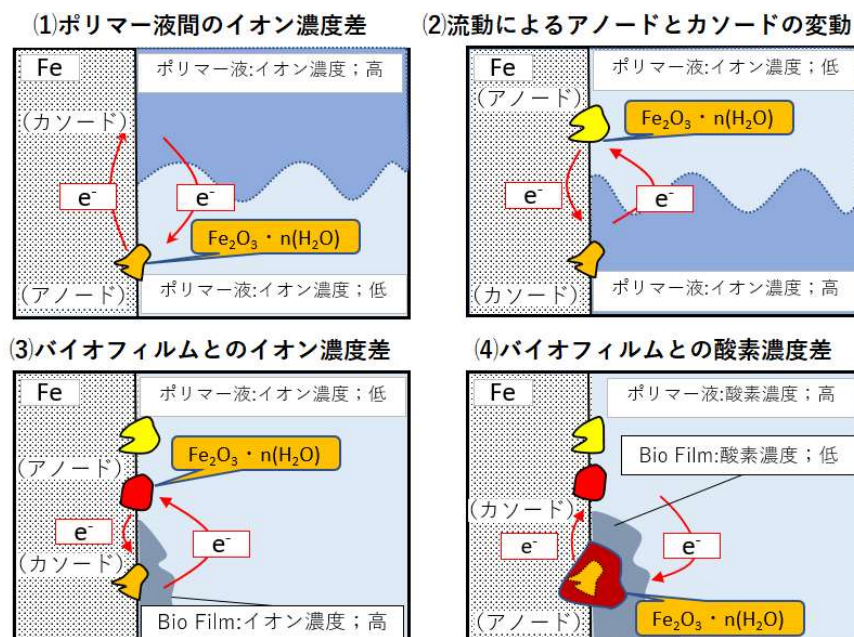
め、樹脂製の無孔保護管（内径 φ125 程度）が長さ 1～2m 程度で挿入されている。

しかし、建設後長期間経過した集水井の場合、横ボーリング孔壁近傍の細粒土が流亡し、緩みゾーンが形成されていく。そのため、集水管に供給される地下水の一部は無孔保護管外壁側の緩みゾーンを介してライナープレート地山側に漏水する。また、無孔保護管先端部から内壁側に滲出水となりライナープレート内空側にも漏水する。したがって、ライナープレートは地山側と内空側の両面に飛沫が付着することになり、特に 2 段以上の集水管が設けられている集水井では、下段側の集水管ほど飛沫の付着面積は広範囲に及ぶことになる。

ライナープレートには一般的に施工性とコストの面で優れた表面改質技術手法である亜鉛メッキが施されており、鉄よりもイオン化傾向の大きい亜鉛による塗装を内空側表面で実施しているのが現状である。しかし、地山側表面の再塗装は不可能である上、上記の理由により腐食の進行が速くなるため函体の強度や延性を損ない破損に至ることが懸念される。破損に至ると、内巻き補強等による更新が必要となり維持管理は困難を伴うことから、ライナープレートのライフサイクルは集水管の目詰まり状態に左右されているといえる。

ライナープレート等の腐食は、既述の鉄バクテリアのコロニーがこれらに付着しバイオフィーム内で腐食に関わる場合もあると考えられる^{10),14),18)}。しかし、鉄バクテリアが不在であっても、多種多様な微生物が集水管外壁側で鉄の循環が絶えず行われているバイオフィームの EPS を含む飛沫がライナープレート表面に付着する場合、空気だけに晒されている場合よりも腐食の進行速度は速くなると考えられる^{17),18)}。ここでの腐食は典型的な微生物誘起腐食(MIC⁺ : Microbiologically Influenced Corrosion;)と云え、一般的な確率現象としての金属腐食の電気化学反応のメカニズムと基本的には同じと考えられる^{91),93)～95)}。

この場合、腐食は主にライナープレート表面に電解質のポリマー⁺液が接触、付着することで数多くの電極が形成され腐食面積を拡げる場合（図 1-17(1)～(2) 参照）とライナープ



(文献 18), 93) をもとに作成)
図 1-17 ライナープレートの腐食要因

レート表面に微生物が付着してバイオフィルムを形成し周辺に腐食面積を拡げる場合 (図 1-17(3)~(4) 参照) の 2 つに大別される。

前者は、ライナープレート表面に接触しているゾル状態のポリマー液の濃度は乱流により常に変動していることから、表面にイオンの濃度差に伴い形成される境界が移動することでマイクロ腐食電池 (濃淡電池) を発生させる形態である。この場合、ライナープレート表面は腐食する酸化側の陽極表面 (アノード⁺) と還元側の陰極表面 (カソード⁺)^{18), 95)} の位置が時間と共に移動するため発生する局部腐食が面的に拡大し最終的に全面腐食に至るものと考えられる。

後者の一つは、ライナープレート表面にバイオフィルムが形成され高電解質で接着性の EPS の固定化により周縁部でイオン濃度差が大きくなるためマイクロ腐食電池 (濃淡電池) を発生させる形態 (図 1-17(3) 参照) である。あと一つはバイオフィルム内の微生物が、生命維持活動に必要な ATP 生産により酸素消費量が大きくなり、低酸素状態になるため腐食部中央と外周の酸素濃度差が大きくなりマイクロ腐食電池 (濃淡電池) を発生させる形態 (図 1-17(4) 参照) である。

特に、この(4)については EPS 中央と外周の酸素濃度差が大きくなり、アノードが EPS 内部に固定され EPS とポリマー液界面をカソードとする濃淡電池を発生させる形態となる。この現象はライナープレート部材の合せ部の間隙において、間隙入口と奥の濃度差によって発生するすき間腐食^{18), 94)} の形態と類似するものである。

写真 1-2 に示したライナープレート水抜き穴から液だれした状態で視認される水酸化鉄も滲出したポリマー液の地下水、微生物コロニーと EPS を包含するバイオフィルム等が複

雑に関与した微生物腐食と考えられる。また、微生物腐食の特徴として金属材料が腐食環境を受けにくい中性、常温、常圧のマイルドな環境下でも、微生物の生育条件が満たされると水素イオンの拡散速度が速くなり腐食も異常な速度で進行し、材料に大規模な腐食環境をもたらす場合もある^{18),93),94)}といわれている。微生物誘起腐食のメカニズムは諸説あり今も議論が続いている^{18),95)}。

以上のことから、ライナープレートにおける微生物誘起腐食は集水井に致命的なダメージを与える可能性があり、この腐食をメッキによる表面改質技術のみで防止することは困難な環境にある。したがって、腐食の進行を遅らせるためには、既述の通り横ボーリングの目詰まりを抑制し、集水管外壁側に形成されていると考えられるバイオフィーム内の微生物をクォーラムセンシング制御下におき EPS を抑制することによって、低電解質濃度で低濃度ゾルの短鎖ポリマー液を長期間維持し流動状態にしておく必要があると予測される。

1.2.3 マイクロ・ナノバブルによる閉塞物除去の可能性予測

2011 年、芹沢等は窒素を使ったマイクロバブルでバイオフィームの低減化と成長を抑制できることを示している³⁵⁾。また、マイクロ・ナノバブルは高速道路サービスエリアのトイレ床表面の洗浄に広く利用されており、ぬめり（バイオフィーム）が付きにくくなり、滑り止めに有効で清掃作業時間負荷が軽減されている。また、便器の洗浄水としても利用され尿石（リン酸カルシウム等スケール）を除去できることで洗浄効率を向上させている¹⁰²⁾。

しかし、集水井に関する過去の維持管理マニュアル等^{1),2)}では、マイクロ・ナノバブルによる集水井への洗浄適用事例は示されていない。

本研究で用いた具体的な洗浄装置と方法については第 4 章で論述する。

マイクロ・ナノバブルは数 10(nm)～100(μm)程度の気泡を指し、この製造技術には表 1-2 に示した様に様々な原理を用いた多くの種類の発生器が特許も含め提案され商品化されている^{36),37),96)}。集水井でこれを適用しようとする場合、集水井は大型重機の近付き難い山間僻地に設けられている場合が

多く、集水井毎に目詰まりの状況が不明な場合が殆どであることから小型・軽量の発生装置であることが望ましい。

この様な条件を克服するため、ここでは表 1-3 に示す仕様のコラム（微細孔式）を採用している（写真 1-4、図 1-18 参照）。この装置による気泡のサイズ幅は、図 1-19 に示す通

表 1-2 マイクロバブル発生器の原理別分類表⁹⁶⁾

使用原理	マイクロバブル発生器の種類
液流せん断による気相分散	旋回液流式
	スタティックミキサー式
	機械的せん断式
	微細孔式
キャビテーション	エゼクター式
	ベンチュリー式
液中ガス溶解度変化	加圧溶解式
	加温析出式
分散相の相変化	混合蒸気凝縮式
液相の化学変化	電気分解式

第 1 章 序論

り他の発生装置に比べ比較的広いことが特徴で^{103), 104)}，これを生成する供給水の溶存ガスの溶解度が飽和値以下であれば，飽和途中の自己加圧効果で収縮しながら溶解する^{15), 16)}といわれている。このため，気泡間力によってあたかも剛体球的挙動を呈し，ブラウン運動⁺しながら拡散する性質を持つ^{35)~42), 96)~101)}と考えられる。因みに水分子の大きさは0.3(nm)，EPS等を構成するATP分子は1.1~1.3(nm)である。

以下，集水管のスケールを除去するマイクロ・ナノバブルの作用を論述する。マイクロ・ナノバブルは，風量を増加させることにより気体体積率(ボイド率⁺)を上げ^{55), 64)}，移動集合体を作ることにより高粘度で壁面に接着した凝集ポリマーで構成されているEPSを剥離できる⁴⁰⁾と考えられる。これは，例えば図1-20に示すように，ナノサイズバブル群がEPSとの界面各所に界面活性物質の濃度の濃淡が引き起こす空間的な表面張力の違い(マランゴニ効果⁺36)~40), 96)~101))により発生すると予測される。しかし，これらの結果は本研究で

表 1-3 発生装置仕様一覧表

型式	サイズ	1本当り風量 (0.1MPa時)	接続	重量 (kg)	使用ガス
FP40-670	φ 57×L 672	1~3 (L/min.)	Rc1/4 (6mmO.D.)	約 1 kg	エア, CO ₂



写真 1-4 コラムによる
マイクロ・ナノバブル発生状況
(横置きと縦置き)

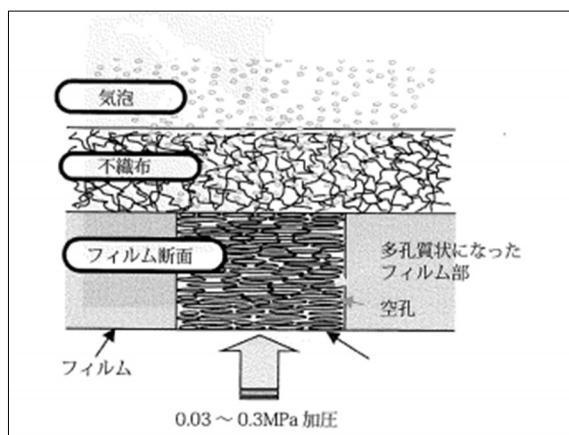
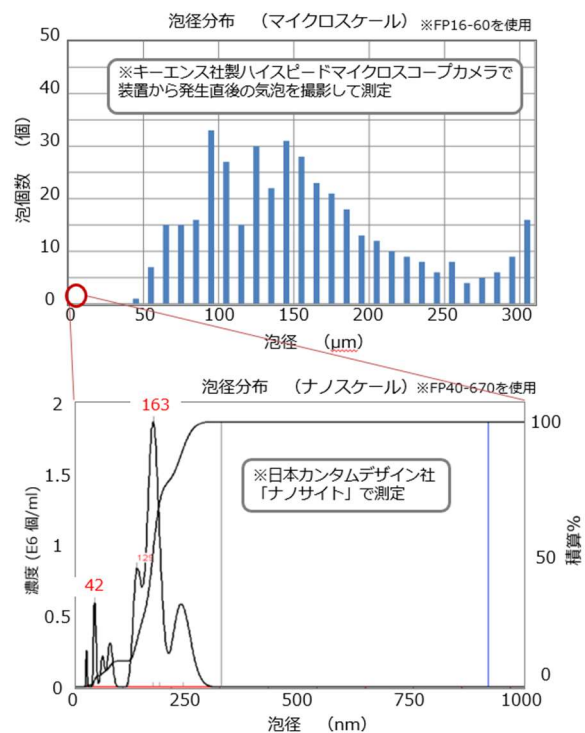
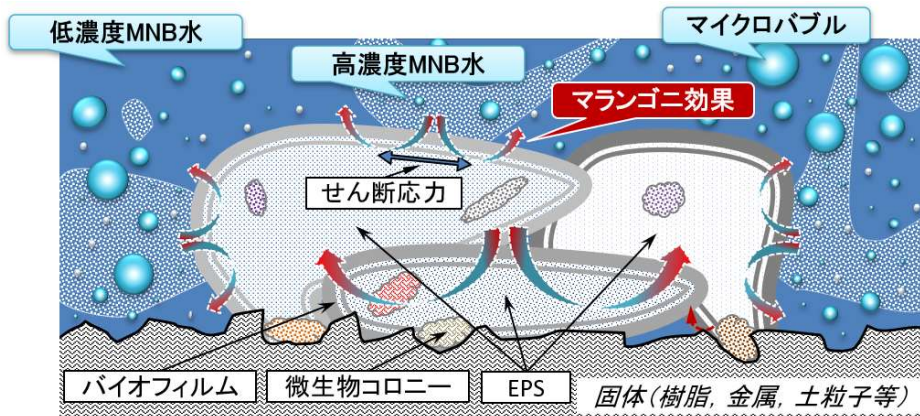


図 1-18 ナノ多孔質フィルム断面模式図¹⁰³⁾



(株ナック提供資料 2015/12/19)

図 1-19 発生気泡径分布図
(20nm~300 μm)



(文献 17), 39) をもとに作成)
図 1-20 MNB 水による EPS の剥離イメージ

ジェッティング回数	(少)	→→→ →→→ →→→	(多)
巨視的		・PVC表面研磨により滑らかさ増大 ・見かけ上、表面の殆どのバイオフィilm除去	
微視的		・表面研磨により凹凸差増大 ・PVC表面粗度の上昇による全体表面積の増加 ・凹部が菌体の温床となりバイオフィilm常時形成	

(文献 105) ~107) をもとに作成)
図 1-21 ジェッティングの繰り返しによる PVC 表面変化イメージ

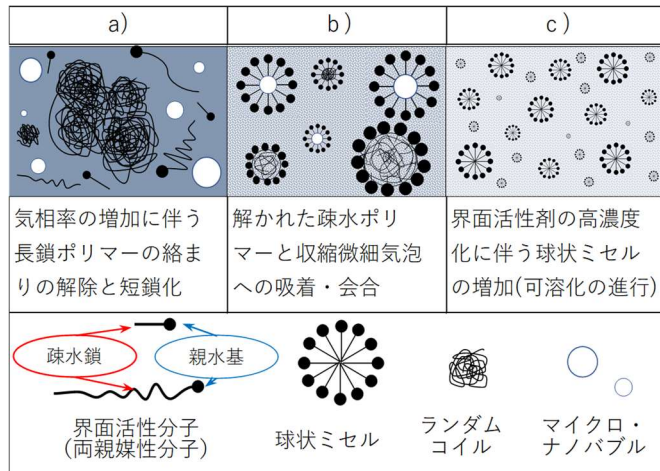
使用する発生装置（表 1-3 参照）と発生原理が異なるため、ここでは本研究で用いる発生装置による表面張力について、室内実験を行い検証することにした。方法と結果については第 3 章で論述する。

また、洗浄には巨視的なバイオフィルムの除去以外に、微視的スケールでの窪みに固着している EPS を分解除去し、クォーラムセンシングの活性を遅らせることも重要になる。森崎等はバイオフィルムが集水管を構成する硬質ポリ塩化ビニール (PVC) 表面の微視的な窪みに多く形成されることを示している^{105)~107)}。これによれば、横ボーリングの集水管壁面はバイオフィルムが増殖しやすい環境にあり、特に外壁側の微視的な窪みには EPS が多く付着していると考えられる。これまで、集水管内壁面はジェッティングの繰り返しにより、内壁面は研磨され見かけ上、内壁面の殆どのバイオフィルムは除去されている、と考えられてきた（図 1-21 上段参照）。しかし、微視的には凸部の山が削られ凹部は更に削られ深い谷となるため、表面粗度が上昇し表面積が増加していくことになる（図 1-21 下段参照）。ジェッティングの繰り返しに伴い拡張することになる微視的な窪みは、微生物にとって格好

の生息環境となり、ジェッティング後には集水管外壁側で脱離したバイオフィームが、瞬時に集水管内壁側の窪みに付着し、再び成熟・脱離するため集水管の排水機能の低下速度を速めることになっていた可能性がある。

これに対し、MNB 水の場合、巨視的には剥離した内外壁面の EPS を構成するランダムコイル等の伸長ポリマーの絡まりをマイクロ・ナノバブルの気泡外側の後部で後方から界面方向に向かう逆の流れ（マランゴニ対流）で形成される剥離渦³⁹⁾によって解くことができる。また、微視的にはマイクロ・ナノバブルの溶解プロセスにおけるナノサイズのパブルは非常に小さいため、図 1-20 や図 1-21 下段に示した様な微細な固液界面や高分子修飾された固結スケール等のマイクロクラックにも容易に浸透し、固着した EPS を剥離すると同時に、高比表面積であることから吸着を速め化学反応を促進する。したがって、EPS に豊富に存在する酵素（プロテアーゼ）によってタンパク質や長鎖ポリマーは無差別に切断される¹⁰⁸⁾と共に、短鎖ポリマーを増やすことで吸着特性を促進し可溶化（分解）も速まると考えられる。

ここで論述した剥離した EPS を構成する凝集コロイドの可溶化イメージを図 1-22 に示す。マイクロ・ナノバブルを供給し続けることにより絡まっていた長鎖ポリマーは解け、疎水鎖が短くなって低濃度化していく（図 1-22 a）参照）。そして、疎水鎖の短くなったモノマーにより会合コ



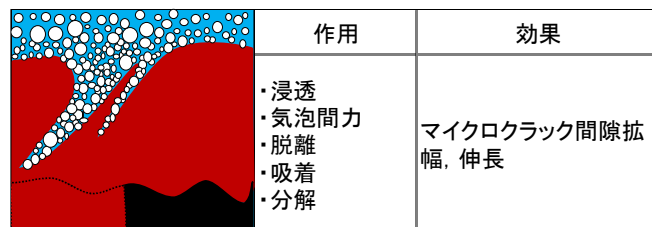
（文献 38），92）をもとに作成）

図 1-22 マイクロ・ナノバブルの可溶化イメージ図

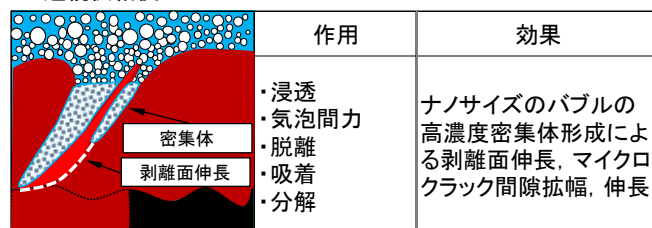
I. マイクロ・ナノバブル供給開始



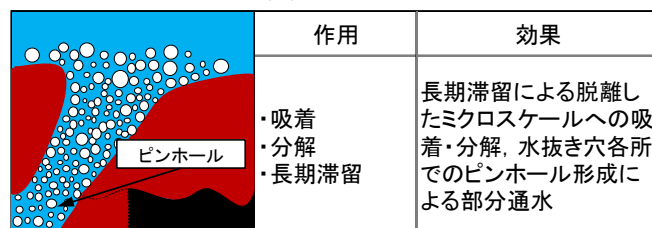
II. 供給直後



III. 連続供給後



IV. マイクロ・ナノバブル供給停止後



（文献 96），101）をもとに作成）

図 1-23 拡散を利用したスケール除去イメージ図

ロイドは増え、気泡とランダムコイル等の疎水ポリマーに吸着し始める。この後、安定した分散剤としての作用を持つ様になる MNB 水の中で、水分子は気泡やフルボ酸・フミン酸の界面活性分子の疎水基を排除する様になる (図 1-22 b) 参照)。排除された気泡と疎水基は自ら会合し水との接触を避けて安定化を図り、cmc 以上で会合体としてミセル内部に取り込まれ気泡は溶解し、疎水基を構成する炭化水素集合体も可溶化される様になる^{40), 55), 64)} (図 1-22 c) 参照)。藤本等はマイクロ・ナノバブルの消失時間が添加する界面活性剤の種類に関わらず、水道水に比べて長くなる事を実験により示している¹⁰⁹⁾。コロイドとしての地下水に含まれる界面活性物質 (フルボ酸, フミン酸等)¹¹⁰⁾ についても同様と考えられ、マイクロ・ナノバブルによる分散剤としての効果は水道水よりも地下水で大きくなると考えられる。

なお、本研究では供給水に地下水を用いることの有為性については原位置の適用実験で水道水と比較した結果を第 6 章で論述する。

以上の事から、目詰まりの原因となっているバイオフィルムを除去するためには、マイクロ・ナノバブルを cmc 以上の濃度に達するまで連続供給することにより EPS を剥離し可溶化 (分解) できると予測される。しかし、目詰まりの程度は集水井毎に異なっているため、本格運用に際してはこれを客観的な自主管理指標である健全度 (レベル) を使って識別することにする。この詳細は第 5 章で論述する。また、健全度 (レベル) に応じ適正な風量を設定するため、3 つの集水井でライフサイクル縮減のための修繕コストの試算を行い検討した結果について第 7 章で論述する。

一方、集水管の水抜き穴近傍で固結スケールが生産されているような場合は、ゲルの凝集が進んでいるためマイクロクラックは EPS で高分子修飾されている。上述の通りマイクロ・ナノバブルはマイクロクラックに接着した EPS に浸透した後 (図 1-23 I.), 気泡間力によりマイクロクラックを徐々に拡張して、伸長させる (図 1-23 II.).)。次に、ナノサイズのバブルが連続供給されて押し込まれることでマイクロクラック先端部に高密度な密集体が形成され剥離面が形成される (図 1-23 III.).)。マイクロ・ナノバブルはマイクロクラックに押し込まれ続けることにより、開放するまで閉鎖系の中で長期滞留して気泡間力でマイクロクラックを拡張し、脱離したマイクロゲルは EPS 内のイオン性の界面活性物質 (フルボ酸・フミン酸等) に吸着し、マイクロゲルを分散させて結晶構造を破壊し分解することで、マイクロサイズのピンホールを多数形成する様になり (図 1-23 IV.), 徐々に通水機能を回復すると考えられる。

以上のことから、固結スケールの発達した集水管を洗浄する場合は、落葉する広葉樹の分布する山の土壌にでき易いフルボ酸やフミン酸を多く含む地下水を分散媒とした MNB 水で洗浄する方が有利で、マイクロ・ナノバブルの連続供給時間も長い方が溶解までの化学反応を促進するため有利と予測される。

なお、マイクロ・ナノバブルによるミクロスケールの剥離と分解の検証については、室内で簡易実験を行った結果を第 3 章で論述する。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案), pp. 31-60, 令和 4 年 3 月
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案), pp. 23-29, 平成 31 年 3 月
- 3) 奥山武彦, 黒田清一郎：地すべり対策集水ボーリング末端における閉塞の要因と対策, 農耕研技法 209, 1~6, 2009.
- 4) 独立行政法人 土木研究所 土砂管理研究グループ 雪崩・地すべり研究センター：地すべり防止施設の維持管理に関する実態と施設点検方法の検討-地表水・地下水排除施設-, 土木研究所資料第 4201 号, 2011.
- 5) 佐藤俊典, 浅野将人, 桑本巧, 備前信之：「地すべり防止施設の機能保全の手引き」について, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2017.
- 6) 野呂智之, 丸山清輝：地すべり地における地下水排除施設の適正な維持管理に関する研究, 雪崩・地すべり研究センター, 2008-2010.
- 7) 丸山清輝, 安藤達弥, 飯田正己：地下水排除施設集水管の目詰まりに関する検討, J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol. 39, No. 4 409, 2003.
- 8) 岸智, 河野剛士, 浅野将人, 森田健太郎：北陸地方の地すべりにおける水抜きボーリング工の目詰まりの実態と要因, J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol. 43, No. 4 185, 2006.
- 9) 佐藤悦司, 長谷川陽一, 百瀬直孝：長野県長久保地すべり地における地下水排除工の劣化状況の特徴について, J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol. 51, No. 6 243, 2014.
- 10) 高橋直人, 榎本真嗣, 名倉利樹, 稗田佳彦, 田崎和江, 片桐憲一：鉄細菌が関与する井戸障害と水質変化, 日本地下水学会誌 第 43 巻第 2 号 71-88, 2001.
- 11) 高橋直人, 瀬川宏美, 田崎和江：地すべり地の水抜きボーリング孔におけるバイオマットの形成, 日本地下水学会誌 第 49 巻第 2 号 115-137, 2007.
- 12) James J. Houle, Robert M. Roseen, Thomas P Ballester, Timothy A Puls, James Sherrard Jr. : Comparison of Maintenance Cost, Labor Demands, and System Performance for LID and Conventional Stormwater Management, Journal of Environmental Engineering/Volume 139 Issue 7, 2013.
- 13) H Pazwash, Urban storm water management, CRC Press, 2011
- 14) 森崎久雄, 服部黎子：界面と微生物, 学会出版センター, 1986.
- 15) 江島洋介：これだけは知っておきたい 図解 細胞生物学, オーム社, 2011.
- 16) 木村真人, 土壌中の微生物とその働き(その 1) —土壌の微生物, 微生物の特徴—, 農業土木学会誌第 59 巻第 4 号, pp. 415-420, 1991.
- 17) 日本微生物生態学会 バイオフィーム研究部会(会長：森崎久雄)：バイオフィーム入門—環境の世紀の新しい微生物像—, 日科技連, pp. 55, 113-115, 171, 2005.
- 18) 兼松秀行, 生貝初, 黒田大介, 平井信充：バイオフィームとその工業利用, 米田出版, pp. 107-

- 120, 2015.
- 19) 森川正章：バイオフィルム 微生物だってひとりじゃ生きてゆけない？, 化学と生物, Vol. 41. No. 1, pp. 32-37, 2003.
 - 20) 森川正章： 生物工学基礎講座 バイオよもやま話 バイオフィルムをしらべてみよう, 生物工学会誌, 90 巻 5 号, pp. 246-250, 2012.
 - 21) <http://www.colinmayfield.com/bio1447/Biofilms/biofilmsoverview.htm>, 2019.
 - 22) Costerton, J. W., K. -J. Cheng, G. G. Geesey, T. I. Ladd, J. C. Nickel, M. and T. J. Marrie, :Bacterial Biofilm on Nature and Ann. Rev. Microbiol. 41, pp. 435-464, 1987.
 - 23) Geesey, G. G., R. Mutch, J. W. Costerton, and R. B. Green, .Sessile bacteria: An important component of the microbial population in small mountain streams. Limnol. Oceanogr., 23, 1214-1223, 1978.
 - 24) Flemming, H. C., & Wingender, J.:The biofilm matrix, Nature Reviews Microbiology 8, 623-633, 2010.
 - 25) Najat Amin: Impact of Different Cleaning Methods on Biofilm Removal in Membrane Distillation, King Abdullah University of Science and Technology, 2021.
 - 26) Stephen M. Hunt, Erin M. Werner, Baochuan Huang, Martin A. Hamilton, Philip S. Stewart: Hypothesis for the Role of Nutrient Starvation in Biofilm Detachment , ASM Journals Applied and Environmental Microbiology Vol. 70, No. 12, 2004.
 - 27) 稲葉知大, 清川達則, 尾花望, 豊福雅典, 八幡穂, 野村暢彦：集団微生物学のすすめ バイオフィルムとその解析技術, 化学と生物 Vol. 52. No. 9. pp. 594-601, 2014.
 - 28) 立川真理子：バイオフィルムと酸化性殺菌剤；バイオフィルムモデルを用いた殺菌・除去効果評価, YAKUGAKU ZASSHI 137 (6) pp. 707-717, 2017.
 - 29) (財)日本公衆衛生協会 分担事業者 大黒 寛（東京都多摩立川保健所長）：平成 22・23 年度地域保健総合推進事業「保健所のレジオネラ対策における簡易迅速な検査方法の実用化と自主管理の推進に関する研究」報告書, pp. 1-5, 2012.
 - 30) 東京都多摩立川保健所：ATP 測定法を用いた公衆浴場等における管理マニュアル, 2011.
 - 31) 古川壮一, 荻原博和, 森永康：食品とバイオフィルム, 食品と容器 VOL. 50 NO. 9 シリーズ解説:食品加工における微生物・酵素の利用(第 32 回) , pp. 508-515, 2009.
 - 32) 堀克敏, 石川聖人：細菌ナノファイバーによる微生物の表面付着, Journal of Environmental Biotechnology (環境バイオテクノロジー学会誌), 総説 (特集) Vol. 10, No1, pp. 3-7, 2010.
 - 33) 山崎義隆：バイオフィルム, 信州医誌, Vol. 53No. 2, pp. 91-92, 2005.
 - 34) 中谷肇：細菌の付着とバイオフィルム形成に関わる表層分子たち, 生物工学会誌, 93 巻 11 号, pp. 693, 2015.
 - 35) 芹澤昭示：マイクロ／ナノバブルの基礎, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 46 巻 第 6 号, pp. 56-61, 2011

- 36) 大成博文：マイクロバブルのすべて，日本実業出版社，2006.
- 37) 日本機械学会：マイクロバブル最前線，共立出版，pp. 3-21，2009.
- 38) 上山智嗣，宮本誠：マイクロバブルの世界，工業調査会，2009.
- 39) 高木周：界面活性剤が気泡挙動に与える影響，ながれ 23，日本流体力学会，pp. 17-26，2004.
- 40) Yohko F. Yano, Hiroki Tada, Etsuo Arakawa, Wolfgang Voegeli, Toshiaki Ina, Tomoya Uruga, and Tadashi Matsushita: Periodic Elastic Motion in a Self-Assembled Monolayer under Spontaneous Oscillations of Surface Tension-Molecules in a Scrum Push Back a Marangoni Flow-, J. Phys. Chem. Lett., 11, 15, 6330-6336, 2020.
- 41) 高橋正好：マイクロ・ナノバブルの基礎と洗浄への応用 Micro/nano Bubble ; Fundamental Properties and Application in Surface Cleaning オレオサイエンス第 17 巻第 9 号，pp. 413-419，2017.
- 42) 一般社団法人ファインバブル産業界 HP (2. ファインバブルの作り方)：参照先 <http://www.fbja.or.jp/>，2022.
- 43) Ian W. Sutherland :Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework, Microbiology 147, 3-9, 2001.
- 44) 吉田明弘：口腔細菌のクオラムセンシングとバイオフィーム形成，Journal of Environmental Biotechnology (環境バイオテクノロジー学会誌)，Vol. 10, No. 1, pp. 9-14, 2010.
- 45) 中山二郎：クオラムセンシングに見る乳酸菌の生き残り戦略，Japanese Journal of Lactic Acid Bacteria Copyright © 2006, Japan Society for Lactic Acid Bacteria, pp. 12-14, 2006.
- 46) 半谷朗：汚染源にも環境浄化にも～バイオフィーム～，愛産研食品工業センターニュース，愛知県産業技術研究所食品工業技術センター，2010. 11.
- 47) 岡部聡：バイオフィームの理解・制御から共存へ，Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan, 特集「海水とバイオフィーム」，pp. 191-197, 2012.
- 48) 山田加一郎，八十川大輔：非加熱食品の安全性向上におけるバクテリオシン生産菌の活用，北海道立総合研究機構 食品加工研究センター研究報告，NO. 11，pp. 11-19, 2015.
- 49) 池田宰：生物工学基礎講座 バイオよもやま話 Quorum Sensing と菌体増殖，生物工学会誌，90 巻 9 号，pp. 582-585, 2012
- 50) 福岡伸一：生物と無生物のあいだ，講談社，2007.
- 51) 二井将光：生命を支える ATP エネルギー メカニズムから医療の応用まで，講談社，2017.
- 52) レイチェル・カーソン，(訳) 青樹繁一：沈黙の春，新潮社，2014.
- 53) IASR：ATP 測定による入浴施設の衛生管理・レジオネラ汚染リスク，Vol. 34，p. 167-168，2013.

- 54) 科野健三：温浴施設常設装置による除菌効果の検証—ATP 指標を用いて—；第 8 回日本マイクロ・ナノバブル学会学術総会講演集，pp. 29，2019.
- 55) 尾関寿美男，岩橋槇夫：コロイド・界面化学 —基礎と応用—，2018.
- 56) 金井豊：自然界でのコロイドの概要とその特性について，地質ニュース 631 号，産総研地質調査総合センター，pp. 7-9，2007.
- 57) 市川朝子：調理と水和ゲル，日本調理科学会誌 Vol. 30， No. 3， pp. 278-284，1977.
- 58) 田中豊一：ゲルの相転移現象，日本ゴム協会誌，第 64 巻第 4 号，pp. 219-231，1991.
- 59) 北本大：生物が作り出す自己組織化材料：バイオサーファクタントの多彩な機能とその応用，YAKUGAKU ZASSHI 128(5) pp. 695-706，2008.
- 60) 真鍋敬，奥山典生：天然に存在する界面活性物質，油化学 第 26 巻第 10 号，pp. 578-587，1977.
- 61) 松浦良平：界面活性と界面活性剤，油化学 第 34 巻第 1 号，pp. 67-71，1985.
- 62) Foundation for Water Research：LEGIONELLA in the Environment (the cause of Legionnaires' disease)，A review of Current Knowledge，FR/R0004，2001.
- 63) 荒牧賢治：分子集合体，J. Jpn. Soc. Colour Mater.，89，〔3〕界面活性剤講座（第 2 講），pp. 98-101，2016.
- 64) 辻井薫：生活と産業の中のコロイド・界面化学，米田出版，2011.
- 65) 山中淳平，豊玉彰子：荷電コロイドの結晶化，日本結晶成長学会誌，Vol. 36，No. 2，pp. 76-83，2009.
- 66) 山中淳平，奥蘭透，豊玉彰子：自己集合によるコロイド系の構造形成，Acc. Mater. Surf. Res.， Vol. 5 No. 3，pp. 90-97，2020.
- 67) 山崎一正：鉄の起源 宇宙の創造から生物の進化まで，モノづくりの原点—科学の世界，VOL. 15 NIPPONN STEEL MONTHLY，pp. 9-14，2004.
- 68) 伊藤叡：金属の中の鉄(2)，モノづくりの原点—科学の世界，VOL. 31 NIPPONN STEEL MONTHLY，pp. 13-16，2006.
- 69) 荒牧國次：硬いおよび軟らかい酸塩基の法則に基づいた陰イオンの腐食および抑制現象現象のさらなる考察，材料と環境 63，pp. 417-426，2014.
- 70) 石倉慎一，石井敬三：ミクロゲルの開発と工業化，「超硬化性樹脂」Vol. 12 No. 4 総説，pp. 235-247，1991.
- 71) 古澤邦夫：微粒子分散系の基礎理論，日本印刷学会誌，第 30 巻第 2 号，pp. 76-83，1993.
- 72) 大島広行：分散理論の基礎，色材協会誌 77(7)分散基礎講座(第Ⅱ講)，色材協会，pp. 328-332，2004.
- 73) 豊玉彰子，松野宏美，小森和紀，奥蘭透，山中淳平：枯渇引力による荷電コロイドの共晶形成，日本結晶成長学会誌，Vol. 43，No. 2，pp. 71-77，2016.
- 74) 作道直幸，安田傑，酒井崇匡：液体が固まる「ゲル化過程」の普遍法則を解明
～ゼリー・ヨーグルト・豆腐・医用材料：やわらかくウェットな物質開発の指導原理～

- ，東京大学工学部プレスリリース，2020 年 12 月
- 75) 峰島三千男：ダイアライザの過去・現在・未来，日腎会誌 55(4)，pp. 515-522，2013.
- 76) 幸塚広光：ゾルーゲルコーティング技術の基礎，機関誌 NEW GLASS 一般社団法人
ニューガラスフォーラム Vol. 25 No. 3，pp. 40-45, 2010.
- 77) 岡部巍：食品の力学的性質（I）力学的性質の表現法，食物学会誌，第 3 号，pp. 5-12，
1958.
- 78) 小野木重治：高分子系の流動特性，高分子 Vol. 20，No. 229，pp. 254-266, 1971.
- 79) 佐藤達雄：サスペンションの物理化学的性質（II）サスペンションのレオロジー，
色材，60【3】，pp. 167-175，1987.
- 80) 横尾俊信，神谷寛一，作花済夫：ゾル - ゲル法による機能性材料の合成，日本金属学会
会報 第 27 巻 第 10 号，pp. 775-783，1988.
- 81) 西村太良：高分子粘性流体の流れ，繊維工学，繊維機械学会誌 Vol. 42，No. 10. pp. 523
-527，1989.
- 82) 甘利武司：分散系のレオロジー，日本印刷学会誌，第 30 巻第 2 号，pp. 84-91，1993.
- 83) 木下圭吾，坪田実：第 4 章 塗料の流動性と塗膜形成（1）流れるという現象，色材，
67【8】，pp. 513-519，1994.
- 84) 朝田仁：化工澱粉のレオロジー特性に関する研究，広島大学博士論文，pp. 93-96，2007.
- 85) 吉田英一，松岡敬二：愛知県豊橋市高師原台地から産する「高師小僧」，名古屋大学博
物館報告 Bull. Nagoya Univ. Museum, No. 20, pp. 25-34, 2004.
- 86) 三野芳紀：鉄の生物無機化学，YAKUGAKU ZASSI 138 巻, 3 号，pp. 373-387，2018.
- 87) 西尾孝之：シデロフォアと微生物，生活衛生 30-4，pp. 220-222, 1986.
- 88) Marcus Miethke and Mohamed A. Marahiel：Siderophore-Based Iron Acquisition
and Pathogen Control, Microbiology and molecular biology reviews 71 (3) pp. 413-
451. 2007.
- 89) 田崎和江：微生物がつくる鉱物，地質ニュース 489 号，産総研地質調査総合センター，
pp. 17-24, 1995
- 90) Absolom, D. R. , F. V. Lamberti, Z. Policova, W. Zingg, C. J. van Oss, and A. W. Neumann.
，Surface Thermodynamics of Bacterial Adhesion, Appl. Environ. Microbiol. 46：
90, 1983.
- 91) 山中健生：環境にかかわる微生物学入門，講談社，2003.
- 92) 瀬戸秀紀：ソフトマター，米田出版，2012.
- 93) 宮野泰征，菊地靖志：微生物による溶接部と金属材料の腐食劣化，溶接学会誌第 77 巻
第 7 号，特集 溶接における腐食と防食 22-29，2008.
- 94) 佐藤嘉洋：バイオフィルムと微生物腐食，関西蔵前工業会午餐会講演資料，2013.
- 95) 小川亜希子：微生物が関わる金属腐食，生物工程，第 95 巻，第 10 号，pp. 608-611，
2017.

- 96) ファインバブル学会連合：ファインバブル入門，日刊工業新聞社，263p.，2020.
- 97) Guihong Han a b, Shuo Chen a, Shengpeng Su a, Yanfang Huang a b, Bingbing Liu a b, Hu Sun a b: A review and perspective on micro and nanobubbles: What They Are and Why They Matter, Minerals Engineering Volume189,2022.
- 98) Marwa Sakr a b, Mohamed M. Mohamed a b, Munjed A. Maraqa a b, Mohamed A. Hamouda a b, Ashraf Aly Hassan a b, Jafar Ali a b, Jinho Jung c: A critical review of the recent developments in micro-nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment, Alexandria Engineering Journal Vol. 61, Issue 8, 6591–6612, 2022.
- 99) B. Cuenot, J. Magnaudet, B. Spennato: The effects of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble, Journal of Fluid Mechanics , 339, 25, 1997.
- 100) P. Bagchi and S. Balachandar: Effect of free rotation on the motion of a solid sphere in linear shear flow at moderate Re; Physics of Fluids 14, 2719 ,2002.
- 101) 秦隆志，西内悠祐，坂本正興：ファインバブルを用いた洗浄・水処理技術，表面技術，Vol. 68. No. 6, pp. 317–320, 2017.
- 102) 株式会社 Ligaric：UFB 技術を活用した高速道路等での洗浄事例，ファインバブル東北セミナー資料，2019
- 103) 篠田昌孝：マイクロ・ナノバブルを生み出す「モノトランフィルム」の技術とその特徴，コンバーテック，2010. 8.
- 104) 篠田昌孝：マイクロナノバブルの工業用途への最新応用事例，MATERIALSTAGE Vol. 14, No. 7, 43–47, 2014.
- 105) 日本微生物生態学会 バイオフィルム研究部会（会長：森崎久雄）：バイオフィルム入門—環境の世紀の新しい微生物像—，日科技連，2005.
- 106) 磯部賢治：微生物の生存戦略—固体表面への付着—，表面科学 Vol. 22, No. 10, pp. 652–662, 2001.
- 107) 佐野勝彦：抗バイオフィアウリングコンポジットコーティング膜の構造と機能性に関する研究，大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士学位論文，2017, 151p.
- 108) 中西茂子：洗剤と洗浄の化学，新型コロナシリーズ，194p.，2007
- 109) 藤本明弘，服部香名子，大矢勝：マイクロバブル洗浄への界面活性剤の添加効果，繊維消誌 Vol. 57 No. 11, pp. 838–843, 2016.
- 110) 畠山重篤：鉄が地球温暖化を防ぐ，文藝春秋，175p.，2010

第 2 章 集水井の流量減少要因の検証と健全度評価方法

2.1 集水井の流量減少要因の検証

集水管の維持管理は、管内側から 20MPa 程度の高圧水を移動させながら管内壁に噴射し、主に管内側壁面に付着した硬質スケールを掃引除去する方法が主流である。そのため、図 1-2、図 1-3 に示した φ5 mm の水抜き穴近傍の硬質スケールを引きちぎることはできても¹⁾、管外側に掃引力を伝えることはできないため、流量を回復させることは難しい。また、ジェッティングの頻度は、ライフサイクルコスト⁴⁾の縮減のため、2～3 年に 1 回としている集水井が多いが、効果の「みえる化」と管理基準に明確なものは無く、設定根拠に乏しかった。

したがって、この方法は集水井を設置してから短期間のうちは管外側のスライムが少なく、バイオフィームも低濃度ゾルの状態で流動することからジェッティングも効果を発揮し、集水機能の回復に寄与しライフサイクルコストの縮減に効果を発揮する。しかし、長期間経過した集水井の場合は、管外壁側でバイオフィームが成熟し EPS が高濃度ゾルの状態やゲルになると、上記の通り水抜き穴からの掃引力はもはやこれらの高粘度物質や固形物には伝わらず、この方法が続けても集水機能を回復させることはできなくなると考えられる。

そこで、まず 1.2.2 節の仮説の検証を行うため、施工後 10 年以上経過した 12 か所の集水井において 7 年間にわたり年 6 回程度の頻度で流量観測を行ってきたデータをまとめ、バイオフィームとの関係について探求することとした。

集水井別の年別最大流量を近傍の雨量データ（気象庁）、地質状況^{2),3)}、ジェッティング実施時のデータと併せて表 2-1 に示す。鈴木等は集水井の機能性評価を行う上で流量観測が有望であることを提唱しており⁴⁾、ここでも計量枡とストップウォッチを用いた手ばかりの観測データを採用している。なお、流量観測に利用されることの多い排水量計による換算流量は、難洗浄箇所写真 2-1 に示すようなスライム⁴⁾（前章に記述した微生物由来の閉塞

表 2-1 集水井別年間最大流量、降水量一覧表



写真 2-1 排水量計量部のスライム（設置 1 カ月後）

盛土、切土、 地質記号	集水井NO.	年別最大流量 (L/min.)									
盛土	1	6.0 ^{※4}	48.0 ^{※3}	6.0 ^{※4}	9.0 ^{※4}	18.0	48.0	27.0			
	2	1.0	12.0	18.0	10.7	8.4	23.4	2.0			
切土:ty	3	0.9	7.2	3.3	9.1	6.5	18.0	12.0			
切土:ty	4	46.2	40.8	37.2	69.6	66.0	66.0	78.0			
切土:to	5	—	5.5	15.0	21.3	9.0	24.0	30.0			
切土:to	6	5.3	4.1	3.4	6.1	8.2	16.4	17.0			
切土:p	7	61.2	96.0	210.0	210.0	160.0	120.0	114.0			
切土:Va	8	1.4	4.0	0.1	3.4	3.0	10.2	6.3			
切土:Va	9	1.2	0.9	1.4	1.7	0.8	3.0	3.2			
切土:vd	10	1.0	1.5	2.1	1.0	1.8	2.1	1.8			
切土:f	11	0.8	0.1	0.2	6.4	10.4	18.6	12.0			
切土:f	12	0.0	0.1	0.0	0.0	1.0	0.6	0.3			
日数(日降水量50mm以上) ^{※2}		2	0	1	1	0	0	1			
日数(日降水量30mm以上)		4	3	6	6	2	6	6			
日数(日降水量10mm以上)		33	29	27	31	31	35	23			
年降水量(mm)		930.5	836.0	934.5	911.5	835.5	971.0	799.0			
西暦年		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017			

※1 ty:新期段丘堆積物,to:古期段丘堆積物,p:貫入岩類,Va:デイサイト火砕物,vd:火山岩屑,f:扇状地堆積物。 ※2 気象庁データ(佐久)。 ※3 斜体太字:最大値。
※4 斜体下線:最小値。 ※5 塗りつぶし:流量はジェッティング実施時のデータ

物：高濃度ゾルとゲルの混合物）が付着し、観測不能となるため採用していない。

表 2-1 をもとに、12 か所の集水井の年間最大流量の経年変化を日降水量 10 mm 以上の年間日数と併せ図 2-1 に示す。地すべり土塊は一般的にはれき、砂、粘土等で構成されており、集水井毎のこれらの構成比率は不明であるが、図 2-1 によれば集水井は年間最大流量が多く、変動幅の小さいグループ（寒色系実線）と、流量が少なく変動幅の大きいグループ（暖色系点線）に別れる傾向を伺うことができる。これは、前者のグループは、地下水が常時供給され、環境変化は比較的少なく相轉移し難いためと考えられる（図 1-14 上段 参照）。したがって、ジェッティングを実施していない NO. 6 の様に、変動幅の小さいグループの流量は、概ね日降水量と連動するか、供給水量が豊富なため降水量に左右されずほぼ一定になっている様に思われる。

それに対して、後者の場合は、地下水の供給量が少ないため、気象条件の変化に伴う環境変化が大きくなり外壁側で EPS の頻繁な相轉移^{5),6)}（図 1-14 下段 参照）に加え、ジェッティング（図 2-1 黒枠線）による洗浄の効果が加わるため、年度毎の流量の変動幅自体が大きく変化する様になると考えられる。また、集水管に多数設けられた水抜き穴でゲル化が進むと、ずり応力（降伏値： σ_0 ）を生じさせながら、水位が高くなっても降伏値を超えられなくなり、水抜き穴を徐々に閉塞し集水機能が低下していくと考えられる。

一方、表 2-1 のデータをもとに 7 年間の年間最大流量の最小値と最大値の関係に変動幅の上限と下限の曲線を併せ図 2-2 に示す。これによると、年間最大流量(L/min.)が 1 と 5 を境に流量の変動幅は大きく変化する傾向を示す。これは、7 年間での年間最大流量が 5(L/min.) 以上の集水井の場合、内壁側はジェッティングによる掃引効果で排水機能は確保されるが、外壁側からは常時豊富な地下水が供給されるため、集水管の外壁側のバイオフィームは低濃度ゾルの

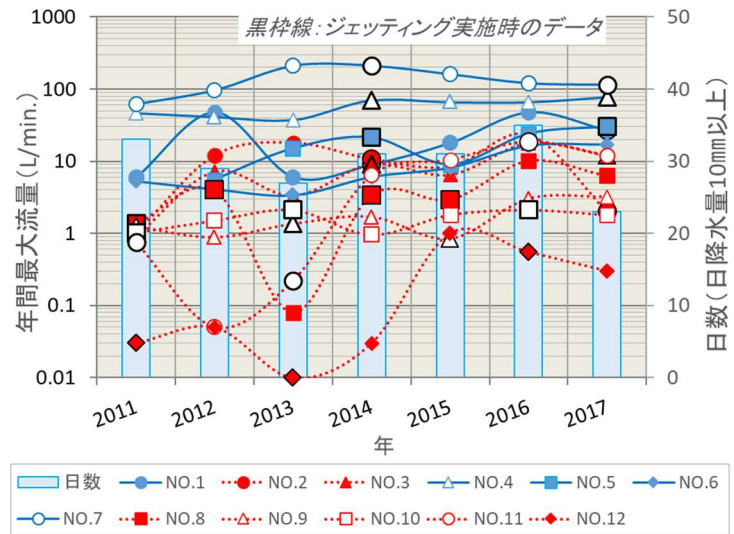


図 2-1 集水井別最大流量経年変化一覧図

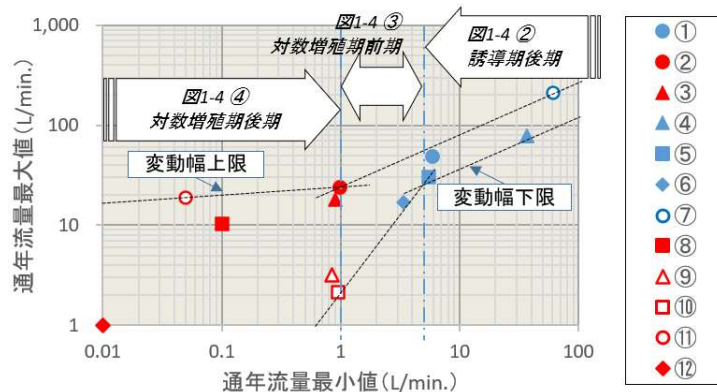


図 2-2 通年流量最小値と最大値の関係図

状態にあり誘導期後期(図 1-4 ② 参照)に相当する状態を維持していると考えられる。しかし、年間最大流量(L/min.)が 1～5 の集水井では、降雨等の影響により EPS が粘度の異なる低濃度ゾルと高濃度ゾルの相転移を起こし易くなる。そのため、外壁でのバイオフィームは誘導期後期～対数増殖期前期(図 1-4 ②～③ 参照)に相当する状態になって、EPS は粘弾性体としての挙動を呈する様になる。ところが、最小流量が更に少ない 1(L/min)未満の集水井になると、バイオフィームは対数増殖期前期～対数増殖期後期(図 1-4 ③～④ 参照)の状態になり、EPS は構成するポリマーの架橋点を更に増やし、固結スケールを生産する様になって、水抜き穴付近の体積相転移が起こるため流量の変動幅は非常に大きくなると考えられる。即ち、ゲルになり目詰まりを引き起こすと、流量が増加し大きな地下水圧がかかるとチキソトロピー⁺的性質によってゾルになって流動化するまで長期間を要するようになる(図 1-14 下段 参照)。この様な地下水位の変動が複数の集水管で不規則に繰り返されると準(擬)塑性流動となり、降伏値を徐々に上昇させ不可逆になるため、集水全体の排水流量の変動幅も大きくなると考えられる。

以上のことから、写真 2-1 と図 2-2 は 1.2.2 項で論述した予測の検証データの一つと云える。

2.2 集水井の健全度評価方法

集水井横ボーリングは地下水を排除するための地すべり防止抑制工としての機能を有する重要な社会資本であり、果たしている役割を持続的に発揮させなければならない。

また、現下の厳しい財政状況下で多発している局地豪雨による土砂災害の現況¹⁸⁾を踏まえ、予防保全型の長寿命化計画の策定が提唱されており^{1),7)}、長寿命化計画の前提として施設の点検を通じ、機能及び性能の状況を的確に把握し、砂防関係施設の台帳を整備すると共に、経年的な点検の結果をもとにした評価を行い、集水井のライフサイクルコスト⁺削減のため集水ボーリングの維持、修繕、改築、更新を実施して

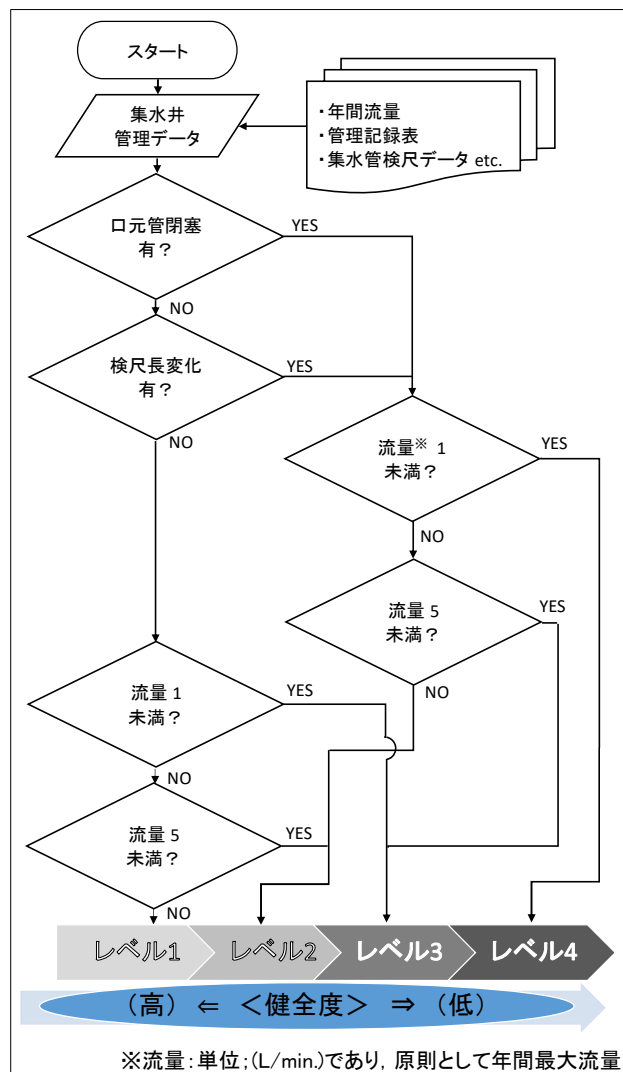


図 2-3 集水井健全度（レベル）設定フロー図

いく必要がある¹⁾。

集水ボーリングの集水機能は、中期的な流量観測によって評価でき（図 2-2 参照）、その排水流量は相転移の影響によって変動する（図 1-14 参照）ことも解ったことから、集水井毎の健全度を集水管の変状程度と年間最大流量を併せ図 2-3 に示す中期指標レベルとして評価できると考えられる。ただし、ここで用いる指標は集水井の年間最大流量(L/min.)であり最大水量 (L) ではない。

図 2-3 により集水井毎の健全度をレベルで設定する際は、流量に加え清掃管理記録表等の記載事項（集水管の変状、口元閉塞状況、検尺長等）からその情報を得ることができる。

そして、この集水井の健全度（レベル）に図 1-4 のバイオフィルムの形成状況を併せてまとめると図 2-4 の様になると考えられる。平井等は、バイオフィルムは室内の浸漬実験により 6 時間で形成が進行する⁹⁾ことを示している。このことから、図 1-4 の①誘導期（前期）に相当するコンディショニングフィルムのみが付着した状態の集水井は少ないと考えられる。したがって、図 2-4 ではこれを除いた②誘導期（後期）～④対数増殖期（後期）の状態と健全度（レベル）の関係を併せて整理している。

同図より、中期指標としての健全度（レベル）が小さい集水井ほど微生物の不活化により、健全な状態を維持できることから、洗浄によってバイオフィルムを除去し図 1-4 の②の状態（図 2-4 の中期指標レベル：1～2）を長期間維持できる様にする事が望ましい。

集水井中期指標（レベル）		1	2	3	4
バイオフィルム形成過程	図1-4 ② 誘導期 後期 固相	←→			
	図1-4 ③ 対数増殖期 前期 固相		←→		
	図1-4 ④ 対数増殖期 後期 固相			←→	
	図1-4 ④ 対数増殖期 後期 固相			←→	

図 2-4 健全度（レベル）とバイオフィルム形成過程関係図

これまでの分析の結果、集水井の健全度はスライムと流量の変動パターンをトレースすることにより評価できることが解ったことから、集水井毎に豊水期と渇水期を含む年 2 回以上の計量枘による流量測定結果をもとに、客観的な判断材料を使って毎年の健全度のレベルを設定できることになる。毎年の健全度（レベル）を設定することによって、下記の項目を客観的に評価することが可能になる。

- ① 注水前後 1 年間のレベル比較によるランクアップの有無の判定
- ② 中期的なレベルのモニターによる次回注水時期の判定
- ③ 複数の集水井のレベル比較による洗浄優先順位の判定

①の管理方法は、中期的な健全度評価になることから、注水後 1 年間の健全度が「バイオフィルムが殆ど無い状態」になっているかどうかを検証する必要がある。これは前章 1.2.1 項で述べた検水による ATP(RLU)を自主管理指標とすることで評価できる。

また、②は健全度を毎年更新することで、レベルがランクダウン（ランクの上昇）する時

第 2 章 集水井の流量減少要因の検証と健全度評価方法

期をみえる化し、次回の洗浄時期を客観的に判断できる。③は複数ある集水井の全体最適を考量したライフサイクルコストの最小化の視点から多くの井戸の管理者にとって重要になる。

なお、上記①～③の判定を行う際、管理している全集水井について、例えば表 2-2 の様な形式のチェックリストを作成し毎年更新することにより、レベル設定の見直しを行うことが可能になる。

マイクロ・ナノバブルの洗浄システムにおける中期的な視点での洗浄効果は、洗浄後のレベルの「ランクアップ」で確認でき、洗浄前後の流量測定が必要になる。また、短期的な視点ではMNB水注入後のATP (RLU)測定によって、注入後に「バイオフィルムが殆ど無い状態」(ATP(RLU)が25未満)になっていることが必要である。

そして、MNB 水注入後に集水管には基質の豊富な地下水が供給されても、集水管壁面の

表2-2 集水井別健全度(レベル)設定チェックリスト (20〇〇年)

[illegible]

※1 洗浄を行わない年は無記載とし、左列を毎年更新する。

※2 「バイオフィルムの殆ど無い状態」: ATP(RLU) < 25をOK、これ以外をNGとする。

※3 洗浄後のレベルが洗浄前のレベルより小さく、ランクアップしている場合をOK、これ以外をNGとする。

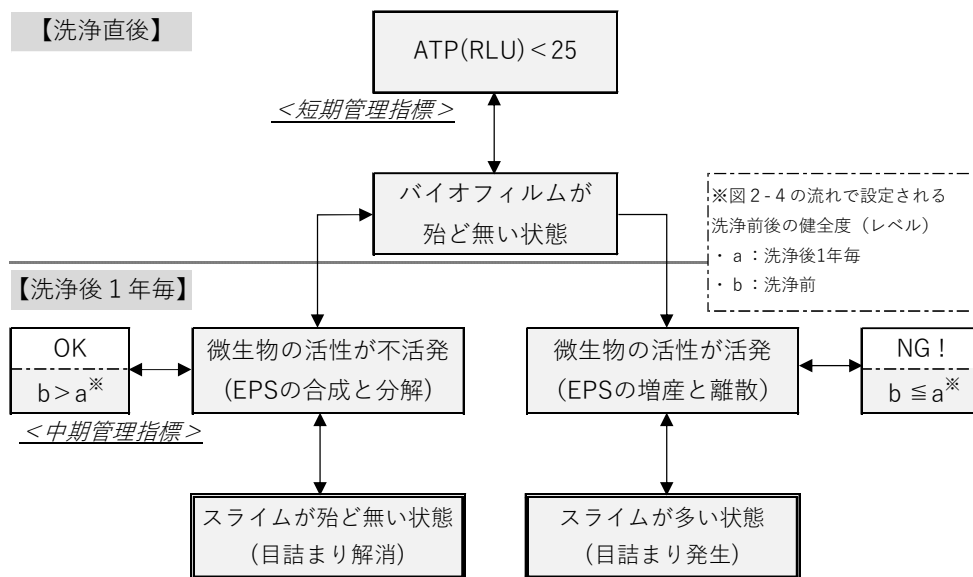


図 2-5 短期管理指標と中期管理指標の関係

微生物ができるだけ長期間クォーラムセンシング制御下に置かれていることが望ましい(図 1-5 参照)。当該年度のバイオフィルムが図 1-4 ② に示した状態を維持できているかどうかはまず、年間 2~4 回程度の流量データをもとに図 2-3 と図 2-4 を用いて得られる健全度(レベル)を用いて判定できる。この結果をもとに洗浄により微生物の不活化が向上した場合、当該年度の健全度(レベル)は前年度のレベルより 1 ランク以上アップする。また、不活化のレベルが維持できている場合のレベルは同じになり、活性化が進んだ場合のレベルはランクダウンすることになる。したがって、洗浄効果の判定は、図 2-5 に示す通り、短期管理指標と中期管理指標の両指標を満足していることが必要になる。

ここで論述した集水井の健全度は、これまで課題であった効果をみえるかできるツールであり、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄効果の判定指標として不可欠である。また、この指標は複数の集水井の横ボーリングの注水時期や注水優先順位を客観的に判定できるアセットマネジメント+ツールとしても有用と考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案), pp. 31-60, 令和 4 年 3 月
- 2) 地質調査所：20 万分の 1 地質図幅 長野, 1998.
- 3) 地質調査所：5 万分の 1 地質図幅 坂城, 1980.
- 4) 鈴木将之, 石井靖雄, 藤澤和範：地すべり動態観測による地下水排除工の計画手法に関する調査, 土木技術資料, 48-5, pp. 24-29, 2006.
- 5) 田中豊一：ゲルの相転移現象, 日本ゴム協会誌, 第 64 巻第 4 号, pp. 219-231, 1991.
- 6) 市川朝子：調理と水和ゲル, 日本調理科学会誌 Vol. 30, No. 3, pp. 278-284, 1977.
- 7) 水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案), pp. Ⅲ-1-Ⅲ-6, 2022.
- 8) 気象庁：気候変動監視レポート, 35p. 2021,
- 9) 平井信充, 兼松秀行, 生貝初：バイオフィルム生成超初期における金属材料表面への細菌の付着性の評価, 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 課題番号 25420795, 2016. 5, 4p.

第 3 章 室内実験

3.1 めれ性試験

1.2.3 項で論述の通り、マイクロ・ナノバブルの移動集合体(MNB 水)は、高粘度で壁面に接着した凝集ポリマーで構成されている EPS を剥離できると考えられる。ここでは、EPS の剥離効果の発揮に要する時間と表面張力について検討するため原位置で使用する発生装置（表 1-3 参照）を使い、水道水を分散媒とした MNB 水の表面張力を求めるめれ性実験を行った。

方法は、樹脂製水槽内（450×450×900）でコラムを横置きにし、使用ガスに空気と CO₂ を使い、加圧時の風量(L/min.) 1，流量(L/min.)15 として 30 分間に循環させた時の水槽内の MNB 水を表 3-1 に示す 5 回の照射時間毎にスポイドにより採水する。そして、空気と CO₂ の場合について同一粗度のガラス板に 5 μ l 程度の水滴を 5 滴滴下する。ここでは、滴下後の水滴の断面を真横から撮影した画像から角度 θ を求め、それを 2 倍して接触角とした（写真 3-1 参照）。

測定結果を図 3-1 と表 3-2 に示す。図 3-1 より、使用ガスに(a)空気と(b)CO₂を用いたいずれの場合についても、MNB 水の接触角は照射時間が長くなる程、低下する傾向にあることが解る。しかし、両者の接触角の低下傾向に違いがみられ、(a)空気の場合は 30 分かけて緩やかに下降するのに対し、(b)CO₂の場合は 3 分程度の短時間で低下した後、ほぼ一定に

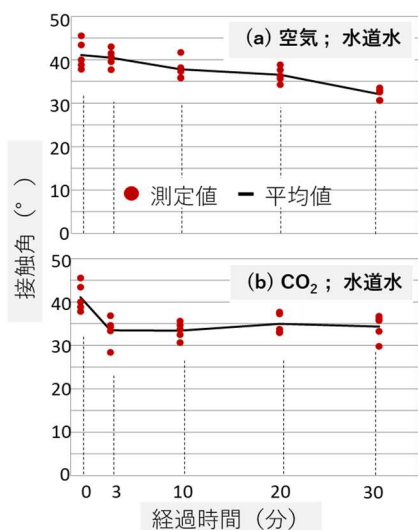


図 3-1 めれ性室内試験結果図

表3-1 めれ性室内実験条件表

使用ガス	(a) 空気, (b) CO ₂
(a), (b) 測定回数	各 5回
(a), (b) 照射時間(分)	各 0, 3, 10, 20, 30分

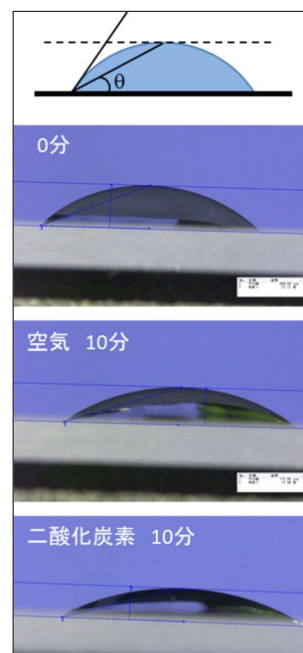


写真 3-1 横断写真撮影結果例

なっている。

このことから、CO₂のマイクロ・ナノバブルの接触角低下速度は空気の場合よりも速く、原位置での作業時間の短縮のためには CO₂の方が空気よりも有利と考えられる。しかし、原位置で CO₂のマイクロ・ナノバブルを生成する場合、大量の CO₂ガスボンベが必要になり運搬作業に困難を伴う場合は不利となる。このような場合は、作業性の観点から使用ガスにエアポンプ等による空気を用いた方が有利といえる。

一方、MNB 水の表面張力を試算するため、空気の MNB 水を粗度の異なる密なガラス板 (solid①) に、表 3-1 の条件で実施した粗なガラス板(solid②)と同様、5 μ l 程度の水滴を滴下し濡れ性を比較した。密なガラス板 (solid①) での接触角測定結果は表 3-3 に示す通りであり、表 3-2 の結果と併せ水道水と MNB 水の表面張力を以下の方法で試算した結果を表 3-4 に示す。

即ち、濡れの仕事(湿潤張力) $W_i(\text{mJ}/\text{m}^2)$ は Young の式、次式(1)の移項式(2)で表すことが

表3-2 経過時間別接触角(粗なガラス板: 平均値)一覧表

時間(分)		0	3	10	20	30
接触角平均値	(a) 空気	41.1	40.5	37.8	36.6	32.1
	(b) CO ₂	41.1	33.5	33.4	34.9	34.3

表3-3 密なガラス板での水道水とMNB水の接触角測定結果一覧表

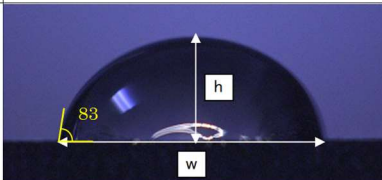
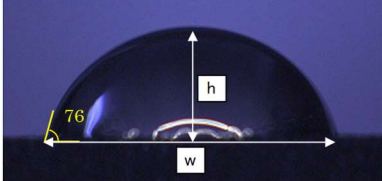
対象	マイクロ・ナノバブル	高さ h(cm)	幅 w (cm)	比	接触角 (°)	横断写真撮影結果(密なガラス板)
水道水	なし	2.3	6.3	0.37	83	
MNB水	あり (空気)	2.34	7	0.34	76	

表3-4 MNB水(ガス:空気)・水道水表面張力試算結果表

ガラス表面	諸元	水道水	MNB水
密なガラス	①の接触角: $\theta(^{\circ})$	83	76
	液体の表面張力: $\gamma_L(\text{mN}/\text{m})$	72.75	<u>36.65</u>
	濡れの仕事: $W_i(\text{mJ}/\text{m}^2)$	8.87	
	液体の表面張力: $\gamma_L(\text{mN}/\text{m})$	72.75	<u>65.72</u>
	付着の仕事: $W_a(\text{mJ}/\text{m}^2)$	81.62	
粗なガラス	①の接触角: $\theta(^{\circ})$	41	32
	液体の表面張力: $\gamma_L(\text{mN}/\text{m})$	72.75	<u>64.74</u>
	濡れの仕事: $W_i(\text{mJ}/\text{m}^2)$	54.91	
	液体の表面張力: $\gamma_L(\text{mN}/\text{m})$	72.75	<u>69.08</u>
	付着の仕事: $W_a(\text{mJ}/\text{m}^2)$	127.66	

できる¹⁾ことから、付着の仕事 $W_a(\text{mJ}/\text{m}^2)$ は Young-Duprè の式(3)で表すことができる

2)。

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \theta \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 γ_s : 固体の表面張力 (mN/m),

γ_l : 液体の表面張力 (mN/m),

γ_{sl} : 固/液界面張力 (mN/m),

θ : 接触角 (°)。

$$W_i = \gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_l \cos \theta \quad \dots \dots (2)$$

$$W_a = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} = \gamma_l (1 + \cos \theta) \quad \dots \dots (3)$$

これらの結果を一覧図にしてまとめた結果を図 3-2 に示す。表 3-4 より、MNB 水の表面張力 $\gamma_l(\text{mN}/\text{m})$ は、水道水に含まれている微量な界面活性物質の濃度の違いにより $\gamma_l(\text{mN}/\text{m})=36\sim69$ の低表面張力の範囲で変動していると考えられる³⁾。この変動幅は水道水の界面活性物質の影響を受けた結果と考えられる。

一方、微生物の表面張力 $\gamma_b(\text{mN}/\text{m})$ は実験条件等によって異なるため注意を要するが、Absolom et al.によれば $\gamma_b(\text{mN}/\text{m})\approx 66\sim70$ が得られている^{4),5)}。これによれば、EPS のぬれ性は周辺の水よりも大きいので、バイオフィームは固液界面で吸着できていると考えられる。しかし、MNB 水のぬれ性はこれよりも更に大きくなることが解ったことから、MNB 水はバイオフィームとの液液界面でなじむことができ図 1-20 に示したマランゴニ効果を発揮し易いと考えられる^{6),7)}。

因みに、上記の結果を水道水の水温と表面張力の関係⁸⁾に併せてイメージ化すると図 3-3 に示す通りとなる。同図には、バイオフィーム (BF) と MNB 水が水温 15°C 程度での表面張力をして示しているが、これによるとバイオフィームは 40~60°C 程度の湯温の表面張力に相当し、MNB 水の場合は 50°C 以上の湯温に相当していることが解る。

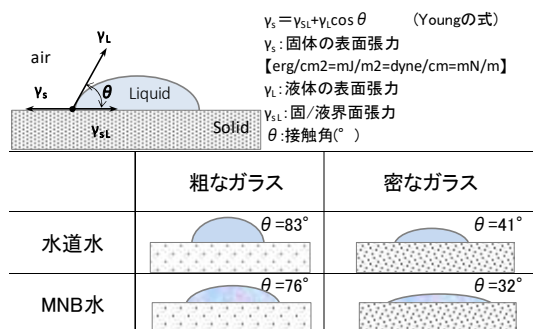
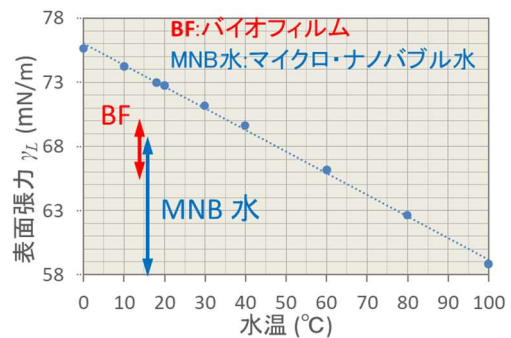


図 3-2 水道水と MNB 水の仕事



(文献 5) と表 3-4 の結果を併記 : 水温 15°C 付近)
図 3-3 水道水温と表面張力の関係⁸⁾

3.2 スケール重量測定

マイクロ・ナノバブルによる固結スケールの除去効果を把握するため、水井戸で形成された水酸化鉄スケールを使い、分散媒を水道水と MNB 水として洗浄前後の固結スケール重量測定を行った。

実験に用いる薄片試料は、集水管外壁側に形成される固結スケールと類似の強度と考え、成形のし易いスケールを確保するため、水井戸のメンテナンス時に揚水管と共に引き揚げられた水中ポンプに付着したマンガン含有水酸化鉄スケール(写真 3-2 参照)を採取し、1 カ月程度室内でこれを自然乾燥させた。

実験に際してはまず、この固結スケールの試料をシリコンによりガラス板に接着した後、透明アクリルパイプ(φ 160, h 1,000)内壁面に固定する(図 3-4, 写真 3-3 参照)。次に、パイプの中に 12L 程度の水道水を入れて満水状態とし、30 分程度浸水養生した後、小型水中ポンプ(流量: 25(L/min.))によりパイプ内で水道水と MNB 水(使用ガス: 空気)を循環させ、洗浄前後の自然乾燥重量の減少程度を比較した。MNB 水生成時は、図 3-4 に示した通りコラムを縦置きにし、ベビーコンプレッサーにより空気のマイクロ・ナノバブルを循環させている。また、実験は表 3-5 に示す 4 通りについて行い、洗浄前後の固結



写真 3-2 井戸水中ポンプ
揚水管外壁スケール



写真 3-3 スケール重量
測定室内試験装置

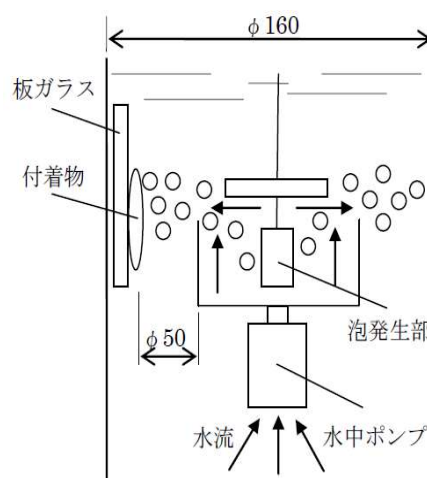


図 3-4 スケール重量測定
試験方法概念図

表3-5 スケール重量測定実験条件表

条件	使用水	圧力 (MPa)	風量 (cc/min.)	洗浄時間 (min.)	総風量 (cc)	試料数 (試料)	目的
(1)	水道水	—	—	120	—	3※	同一洗浄時間での水道水とMNB水による重量減少率の違いの把握
(2)	MNB水	0.1	80	120	9,600	3※	
(3)	MNB水	0.1	80	60	4,800	5	同一 5 試料で(3)⇒(4)に移行し、総風量と重量減少率量の関係を把握
(4)	MNB水	0.2	200	160	32,000	5	

※ シリコン接着部で5試料中2試料スケール剥落

第 3 章 室内実験

スケールの重量はガラス板とシリコンの重量を差し引き、洗浄後は3日間の自然乾燥後の重量を用いた。表 3-5 にも示した通り、洗浄前に乾燥した固結スケールの試料をガラス板に接着する際、試料は脆いため、シリコンに接着させる際はスケール内のミクロスケールが極力破損しない様に慎重に取り扱い、ガラス板に垂らしたシリコンが固まる前にこれを極力押し付けずに載せるだけにした。このため、シリコンとの密着度合いが悪かった試料については実験時に接着力不足につき一部剥落した（表 3-5 (1), (2) 参照）。これらの試料データについては重量分析に供していない。表 3-5 に示した4通りの実験を通して、(1)と(2)の結果から同一の洗浄時間（2 時間）で水道水と MNB 水による重量減少率の違いを

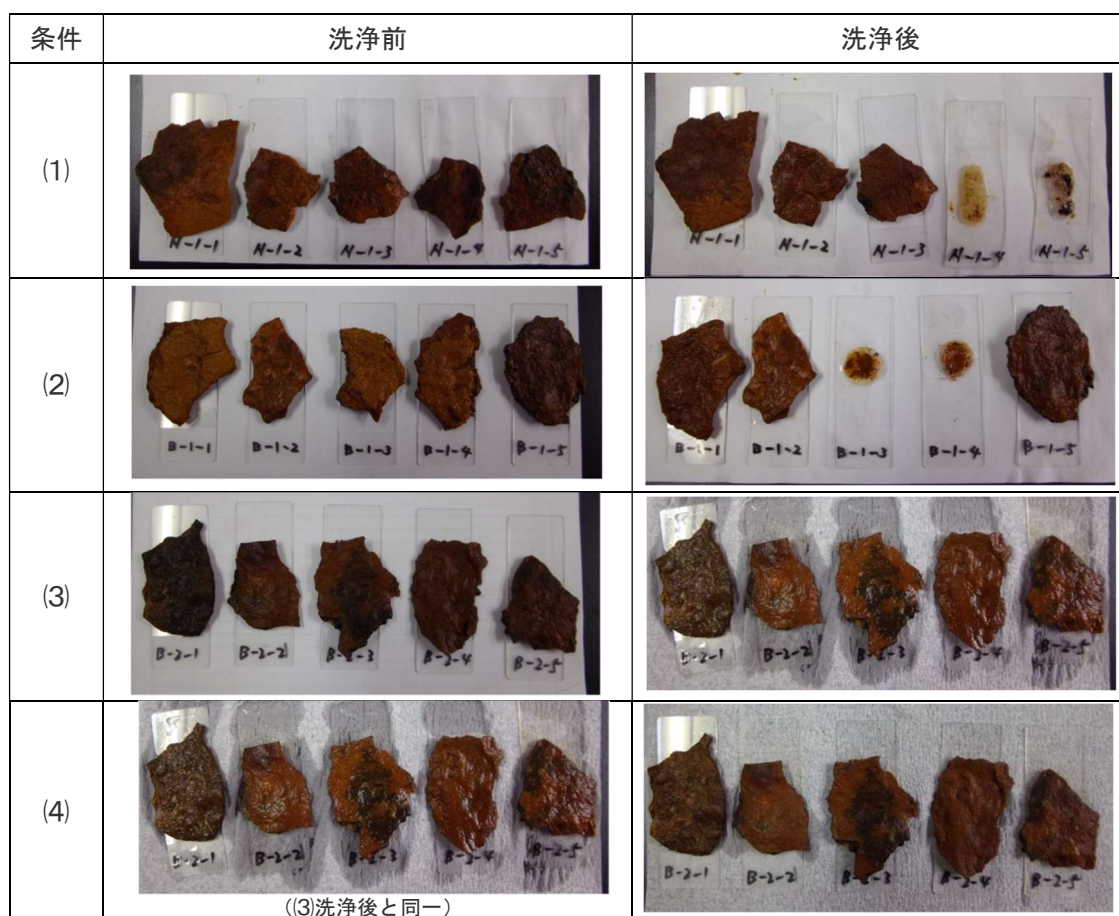


写真 3-4 条件別洗浄前後スケール試料

表3-6 条件別洗浄前後試料重量減少率一覧表（ガラス重量, シリコン重量除く）

試料 NO.	(1) 水道水 【洗浄時間: 120分】				(2) MNB水 【洗浄時間: 120分, 風量(cc/min.): 80】				(3) MNB水 【洗浄時間: 60分, 風量(cc/min.): 80】				(4) MNB水 【洗浄時間: 160分, 風量(cc/min.): 200】			
	重量 w(g)		重量差 Δw(g)	重量 減少率 p(%)	重量 w(g)		重量差 Δw(g)	重量 減少率 p(%)	重量 w(g)		重量差 Δw(g)	重量 減少率 p(%)	重量 w(g)		重量差 Δw(g)	重量 減少率 p(%)
	洗浄前	洗浄後			洗浄前	洗浄後			洗浄前	洗浄後			洗浄前	洗浄後		
1	10.413	10.285	0.129	1.237	7.410	7.109	0.301	4.057	4.327	4.297	0.030	0.698	4.327	4.253	0.074	1.711
2	4.672	4.632	0.041	0.869	2.601	2.585	0.016	0.619	3.723	3.662	0.061	1.644	3.723	3.614	0.109	2.927
3	3.597	3.412	0.185	5.135	5.189	—	—	—	7.834	7.791	0.043	0.548	7.834	7.776	0.058	0.743
4	2.203	—	—	—	6.879	—	—	—	5.699	5.567	0.132	2.314	5.699	5.448	0.251	4.403
5	5.018	—	—	—	7.757	7.389	0.368	4.748	5.163	5.036	0.127	2.468	5.163	4.981	0.183	3.541
(平均)	5.181	—	—	2.414	5.967	—	—	3.141	5.349	—	—	1.534	5.349	—	—	2.665

求め、(3)と(4)の結果から MNB 水の風量を変えた場合の総風量と重量減少率の関係を比較した。ガラス板にシリコンで接着した固結スケールの洗浄前後 5 試料の写真撮影結果を写真 3-4 に示す。また、ガラス板とシリコンの重量を除いた固結スケールの重量測定結果をまとめ表 3-6 に示す。同表をもとに、洗浄の効果をみるため固結スケールの当初重量(洗浄前) w と洗浄後の重量差 Δw の関係をまとめ図 3-5 に示す。同図において、横軸の洗浄前重量 w は EPS のポリマー等によるミクロスケールの付着力の影響で稠密度が高く重量も大きくなるとも考えられる。図 1-22 と図 1-23 に示したメカニズムでマイクロ・ナノバブル水酸化鉄の固結スケールを剥離・

分解できれば、洗浄前後の重量差 Δw は大きくなると考えられる。この様に考えると、条件(1) (△) と(3) (■) では洗浄前の重量 w に関わらず、洗浄前後の重量差 Δw (g) は 0~0.2 でほぼ一定となり、(1)のアクリルパイプ内で水道水を循環させただけの場合と、(3)のマイクロ・ナノバブルが低濃度の MNB 水(総風量(cc): 4,800)を循環させた場合はミクロスケールの剥離・分解は殆ど起こっていないことになる。しかし、条件(3) (■) で用いた試料の総風量を大きくした(4) (●) の場合は、MNB 水が高濃度になり(総風量(cc): 32,000)、スケールの剥離・分解が起こるようになるため w と Δw の関係は大きくばらつきながらも全体に正の相関を示す。ばらつきは、ミクロスケールの付着力の違いによるものと考えられる。また、条件(3), (4)の場合と異なる試料(2) (▲) で MNB 水を(3)よりも高濃度にした場合(総風量(cc): 9,600)の場合についても、試料数は少ないが正の相関を示しており、高濃度の MNB 水による洗浄を行うことで固結スケールの除去が可能であると考えられる。

ここで、マイクロ・ナノバブルの濃度によるミクロスケールの剥離・分解の程度の違いを更に詳細に検討するため、同一試料で総風量を変えて重量変化率の測定を行った(3)

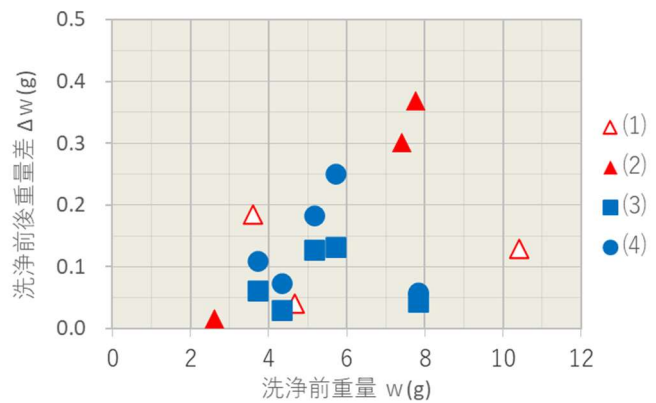


図 3-5 当初重量、減少重量関係図

表3-7 総風量別重量減少率一覧表

	試料 NO.	総風量 T(cc)	
		(3)	(4)
試料別 重量減少率 p(%)	1	0.70	1.71
	2	1.64	2.93
	3	0.55	0.74
	4	2.31	4.40
	5	2.47	3.54
(平均)		1.5	2.7

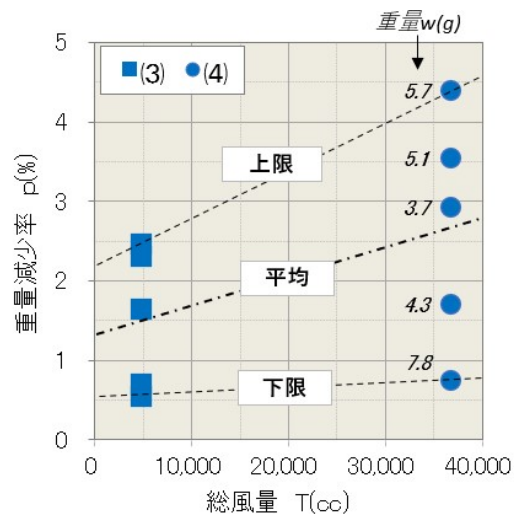


図 3-6 総風量、重量減少率関係図

(■) と(4) (●) の総風量と重量減少率の関係を表 3-7 と図 3-6 に示す。

図 3-6 には洗浄前の試料の重量 w (g) と上限, 下限, 平均線を併せて示す。これによると, 高濃度で総風量が多い(4)の場合 (●) の重量減少率 p (%) のばらつき幅は, 低濃度で総風量の小さい(3)の場合 (■) に比べて大きくなっている。これは, (3), (4)は同一の 5 試料を用い, 風量を変化させた場合の分解途中の実験結果であることから, マイクロ・ナノバブルが高濃度になる程, 図 1-22 と図 1-23 に示したメカニズムでミクロスケールの脱離と分解の程度の差が大きくなるためと考えられる。

以上のことから, MNB 水は総風量を増加することでミリバブルに比べ比表面積の大きいマイクロ・ナノバブルが高濃度になり, 気液界面での化学反応が系全体として促進されミクロスケールは図 1-22 と図 1-23 に示したメカニズムで脱離と分解を促進することになると考えられる。

したがって, マイクロ・ナノバブルを連続供給することで, 樹脂等の固液界面で微視的な窪みに強固に接着しているバイオフィルムを剥離・分解した後, この中の EPS に支持された水酸化鉄等の固結スケールはこれを構成している多数のミクロスケールを脱離・分解しながら除去できると考えられる。

しかし, 固結スケールが優位な集水管では, EPS の剥離と分解以上の気体体積率を確保する必要があると思われる。これは固結スケールがミクロスケールの EPS によって固着された集合体であると考えられることから, マイクロ・ナノバブルの濃度を cmc 以上にし, EPS を除去する以上のエネルギーが必要になるためである。

また, 原位置における環境は, ここでの室内実験の環境の様に常時一定の閉鎖系の環境下にある訳ではなく, 常に流量や基質等がダイナミックに変化する中で平衡状態にあるため, 安全側を考慮し健全度 (レベル) の低い条件を想定し, 高濃度のマイクロ・ナノバブルにして洗浄する必要がある。しかし, 固結スケールの場合は EPS 内に豊富に蓄積されている酵素(プロテアーゼ)と界面活性物質(フルボ酸・フミン酸)がマイクロ・ナノバブルの作用によって分散し, キレート作用により固結スケールの結晶構造を破壊する。その程度は不明なため, 後の原位置での基礎実験 (第 5 章 参照) や適用実験 (第 6 章 参照) で論述する。また, マイクロ・ナノバブルの持つ作用を最大限発揮するために開発したシステムについては次章第 4 章で論述する。

ここで, 気体体積率 (ボイド率^{*}) は気液二相流内の全体の体積に対するガス (気相) 成分の体積率で定義されるが, コラムの場合図 3-6 の結果より, マイクロ・ナノバブルの数は総風量を上げることによって増加すると云え, ミクロスケールを除去 (剥離・分解) できる気体体積率については地下水中の酵素や界面活性物質の濃度も含め, 今後探求していく必要がある。

また, 気体体積率を厳密な測定により把握することは難しいため, ここでは原位置でシステムを適用する際に設置した風量計による風量と洗浄時間から得られる総風量 $V_1(L)$ と, 洗浄対象にした容器容積 $V_2(L)$ から得られるみかけの気体体積率を気体体積率と呼び

洗浄効果を検討した。

結果は表 3-8 に示す通りであり，室内実験であることを考慮するとスケールを除去できるみかけの気体体積率 $P(\%)$ は安全側を考慮すると 80 以上と予測される。これが原位置における集水管の集水機能を回復させる閾値になりうるかどうかは，後述の基礎実験（第 5 章 参照）と適用実験（第 6 章 参照）で検証する。横ボーリングの洗浄に有効な風量の設定は点検診断と整備補修の継続を通して明らかになり，集水井の延命化にも繋がると考えられる（後述の第 7 章 参照）。

表3-8 室内実験時みかけの気体体積率一覧表

室内実験		総風量 V_1 (L)	容器容積 V_2 (L)	みかけの気体体積率 $P(\%)$ ※	備考
スケール重量測定	条件 (2)	$0.08 \times 120 \div 10$	12	50	cmc 以上
	条件 (3)	$0.08 \times 60 \div 5$	12	30	cmc 不達
	条件 (4)	$5 + 0.2 \times 160 \div 37$	12	80	cmc 以上

※ $P = 100 \times V_1 / (V_1 + V_2)$

参考文献

- 1) 北原文雄：固・液界面の基礎知識，色材，pp. 622-628，1970.
- 2) 三刀基郷：接着の基礎，溶接学会誌，第 81 巻第 6 号，pp. 503-507，2012.
- 3) 氷室昭三：日本混相流学会におけるマイクロナノバブル技術の進展，混相流 31 巻 4 号，pp. 375-381，2017
- 4) 森崎久雄，服部黎子：界面と微生物，学会出版センター，1986.
- 5) Absolom, D. R. , F. V. Lamberti, Z. Policova, W. Zingg, C. J. van Oss, and A. W. Neumann. , Surface Thermodynamics of Bacterial Adhesion, Appl. Environ. Microbiol. 46:90, 1983.
- 6) 高木周：界面活性剤が気泡挙動に与える影響，ながれ 23，日本流体力学会，pp. 17-26，2004.
- 7) B. Cuenot, J. Magnaudet, B. Spennato: The effects of slightly soluble surfactantson the flow around a spherical bubble, Journal of Fluid Mechanics , 339, 25, 1997.
- 8) 東京都鍍金工業組合：めっき関連データ集（温度による水の表面張力の変化）；東京都鍍金工業組合データベース，2019.

第 4 章 洗浄システムと洗浄方法

4.1 洗浄システム

これまでの横ボーリングの維持管理は、ジェットリングによる集水管内の排水機能の確保を目的としてきたが、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは基本的に予防保全¹⁾に主眼を置いた修繕工法になる。また、ジェットリングにおける効果の確認は、直前・直後の排水量の測定により主観的な経験則に頼ってきており、設定根拠は物理面からみて乏しい。また、集水管外壁側でバイオフィームは成熟と脱離を繰り返し集水管内に高粘度のゾルとなって流亡した排水は相転移の影響により流量をばらつかせながらゲル化に至るため、排水の性状だけでジェットリングの時期を判断する方法を続ける限り、コストが嵩んでいくことになる。しかし、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムでは、集水井毎の流量測定データの最大値を整理し（表 2-2 参照）、自主管理基準により集水井毎の健全度（レベル）を客観的に評価し、これを毎年逐次更新（図 2-6 参照）していく所謂情報化施工になる。

横ボーリングに原位置でマイクロ・ナノバブルを生成して集水管外壁側のスケールを除去できるシステムの断面図は図 4-1 に示す通りであり、MNB 水注入時に設置する洗浄装置の配設例を写真 4-1 に示す。



写真 4-1 「洗浄工」地上部装置配置例

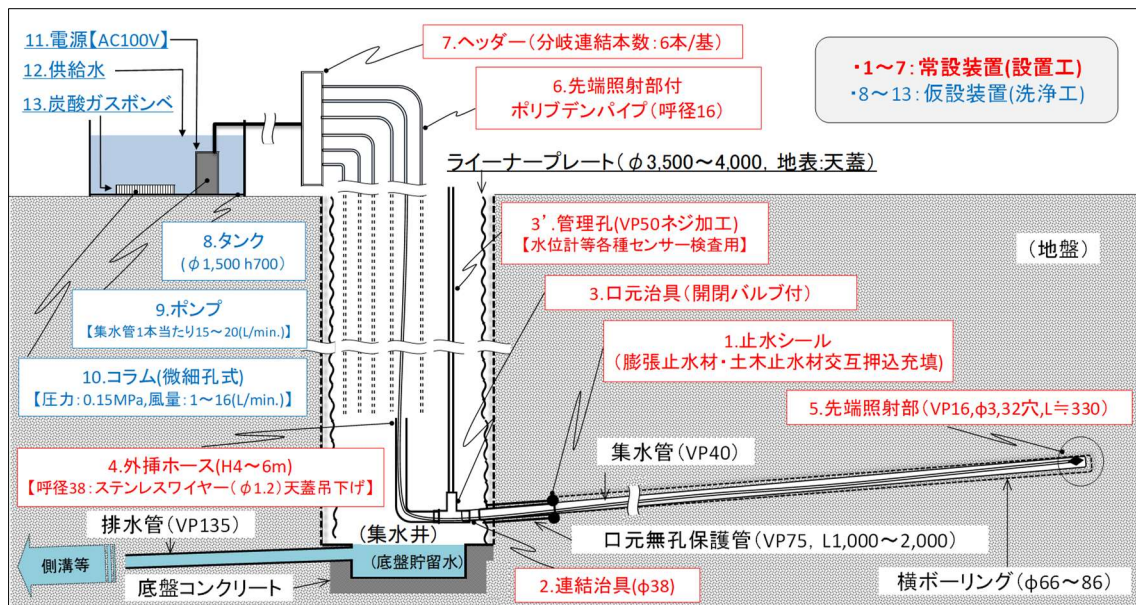


図 4-1 洗浄システム模式断面図

図 4-1 に示した洗浄システムは、主に常設装置を設置する「設置工」、MNB 水を注入する「洗浄工」および流量観測等の「観測工」の 3 工種で構成されており、これらをサイクルで回す維持管理作業になる。ただし、「設置工」に際してはポリブデンパイプの挿入が可能になるよう、集水管内はジェットティングにより清掃されていることが望ましい。

また、システムの運用に際しては、これまで実施されてきたジェットティング作業時の『ジェットティング群別記録表』等既往資料の収集・整理と、準備工としての現地視察(検尺結果含む)で得られる横ボーリング本数、段数、横ボーリング長、仰角、集水井深度、集水井の排水方式、数量等の諸元を展開平面図としてまとめ、数量等を算出する。

4.2 洗浄装置および洗浄方法

4.2.1 洗浄装置

図 4-1 のシステムを構成する装置の構成は 1. ～13. となり、このうち 1. ～7. は注水後も常設可能な「設置工」で設置する常設装置であり、8. ～13. は「洗浄工」の注水作業等で必要になる仮設装置となる。

「設置工」時と「洗浄工」時に使用する常設装置と仮設装置の仕様と上述の展開平面図より得られる数量設定時の考え方等を表 4-1 と表 4-2 に示す。また、集水管吐口付近の連結治具、口元治具、管理孔、外挿ホース取り付け部の拡大図を図 4-2、図 4-3 に示し、地上からの開閉操作バルブの拡大図を図 4-4 に示す。

注水時は地上に設けた仮設タンクにマイ

表4-1 常設装置仕様等一覧表

工種	装置・製品名	仕様	数量設定時の考え方
設置工	1. 止水シール	膨張止水材(板状、ひも状)、土木遮水材(合成ゴム発泡体)、巻き付け固着加工	口元無孔保護管と集水管の間詰め用にVP40ソケットで膨張止水材と土木遮水材を奥から口元まで交互に押し込む作業により数量設定(図1-16 参照)
	2. 連結治具	樹脂ホースVS-C (φ38)	集水管の本数で数量設定(口元閉塞孔含む、図4-2 参照)
	3. 口元治具	TSチーズ (75*40、L200) 異形ソケット (50*30、L136) 異形ソケット (75*40、L153) 手動開閉操作ボールバルブ (開閉用吊ワイヤー加工)	集水管の本数で数量設定(口元閉塞孔含む)。手動開閉操作ボールバルブの最大ワイヤー長は集水井深さに相当(図4-2、図4-3、図4-4 参照)
	3'. 管理孔	VP50(ネジ加工)、水位計設置用等	集水井を代表する平均的な吐出量の集水管に設置、立上高さは集水井の深さにより設定(図4-3 参照)
	4. 外挿ホース	樹脂ホースVS-C (φ38)	最大立上高さを横ボーリング仰角と検尺長より試算し、立ち上げ高さを設定(図4-2 参照)
	5. 先端照射部	VP16(L300、φ2、32穴)、先端コーン、後端ねじ加工	挿入可能集水管本数(図4-6 参照)
	6. 先端照射部付ポリブデンパイプ	口径16(先端照射部後端とねじ加工により取付)	挿入可能集水管本数を設定、1本当りの長さ:【検尺長】+【集水井深度】+【余長(3m)】(図4-6 参照)
	7. ヘッダー(半透明樹脂管)	φ320、L500、t15、重量:約50kg、ボールバルブ(6個)、エア抜き(1個)、水抜き(1個)、架台付(in:φ40(1穴)、out:φ16(6穴))	集水管6本につき1基(図4-5(2基の例) 参照)

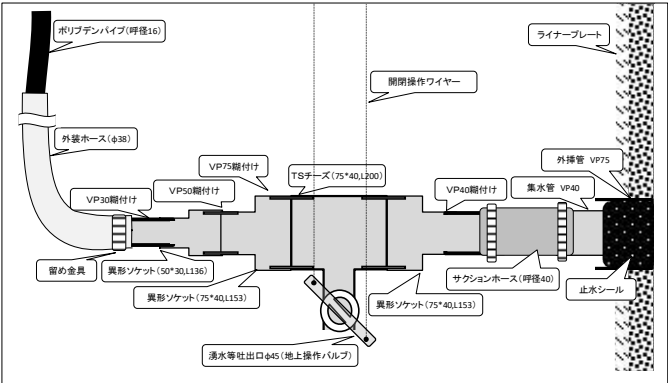


図 4-2 連結・口元治具周辺状況模式断面図(管理孔なし)

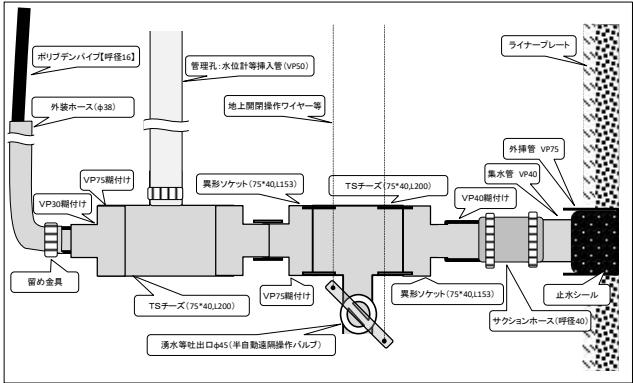


図 4-3 連結・口元治具周辺状況模式断面図(管理孔あり)

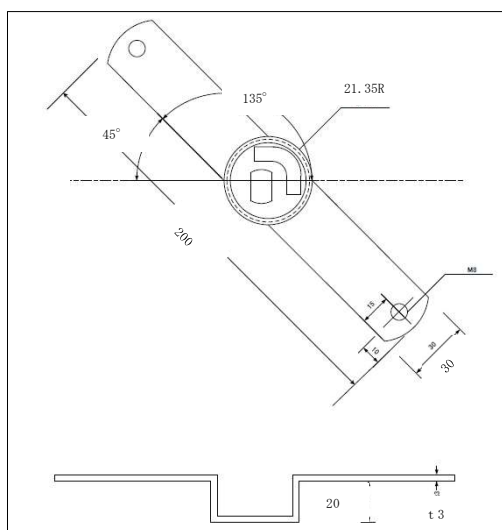


図 4-4 手動開閉操作バルブ拡大図

クロ・ナノバブル生成装置(コラム)
を据え付け、ここで生成された MNB

水を図 4-5 に示した構造のヘッダーを介し，集水管最奥部に挿入された先端照射部から図 4-6 のイメージで照射する。

図 4-4 のバルブは坑内作業時間の短縮化を図るため、地上からボールバルブの開閉操作を行うことができるように工夫しており、バルブの「洗浄工」での MNB 水注入直前から注水翌朝程度までの間、閉鎖しておくことにより集水管口元から立ち上げた外挿ホースにより MNB 水を貯留させ拡散作用を促進させる。これは、注水後の管理孔を用いた水位測定や外挿ホース上端か

らのオーバーフローの状況で確認できる。また、図 4-5 は集水管が上下 2 段でそれぞれ 6 本ずつ配列されている集水井に適用する場合のヘッダーの構造図であり、仮設タンクからヘッダー(in 側)に送られヘッダー内で一旦満水状態にされた MNB 水は、out 側から全ての集水管に分岐されたポリブデンパイプに一斉に送水され集水井全体に拡散(浸透)される。

表 4-2 仮設装置仕様等一覧表

工種	装置・製品名	仕様	数量設定方法、考え方
洗 浄 工	8. タンク	組立式丸型シート水槽： φ1,500*700h	1基
	9. 水中ポンプ	流量40～120(L/min.)、 揚程約20m	集水管1本当り流量：10～ 20(L/分)として集水管本数 (本)を乗じて試算
	流量計	流量計：φ40、L150.25～ 125(L/min.)	1基(ヘッダー 1 基当り)
	10. マイクロナノバ ブル生成装置	表1ー3 に示した通り	見かけの気体体積率よりコ ラム1本当りの風量を 1(L/min.)として試算
	CO ₂ 風量計	φ6、L150、0.2MPa用、 4～40(L/min.)	1基(コラム 8 本使用時)
	11. 供給水	水道水等	必要水量：【10～20(L/min.) /(本)】*【ポリブデンパイ プ挿入集水管本数(本)】* 【洗浄時間(120分)】により 試算
	12. 炭酸ガスポンペ	7kgポンペ	2本【30kgポンペ使用時：1 本】
13. 電源	AC100V(発電機等)	1基	

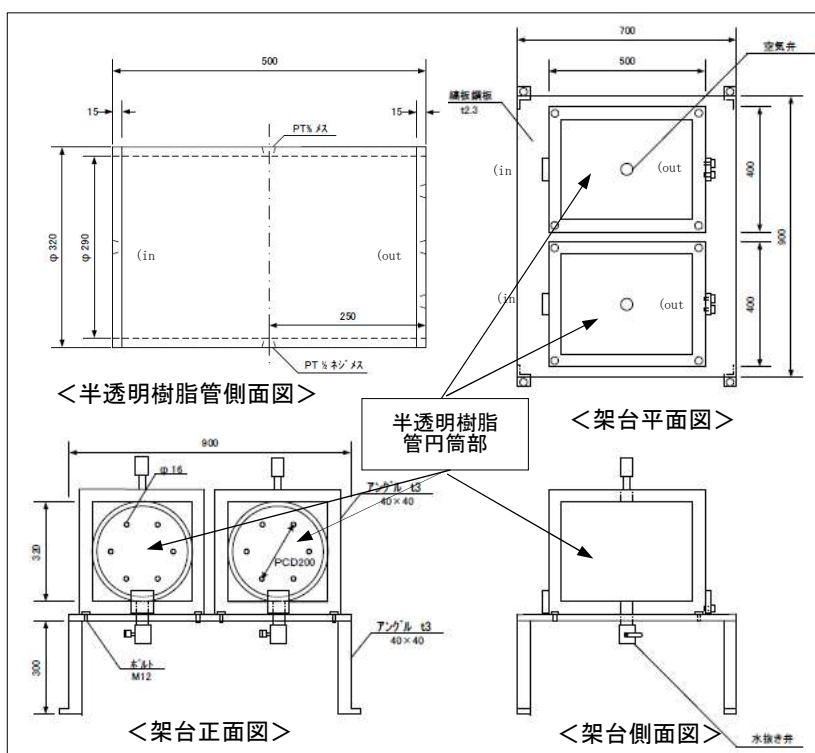


図 4-5 ヘッダー拡大図

このシステムで用いる装置の主な特徴は、下記の通りである。

- 1) MNB 水の送水には、可撓性に優れ、分子量が大きくマイクロ・ナノバブルが壁面集積し辛いため輸送能力に優れたポリブデンパイプを使用している。
- 2) ポリブデンパイプの外挿管を集水管吐口から立ち上げ二重管にすることで、上流側から供給されてきた MNB 水を集水管近傍に長時間停滞させ、拡散を促進できる。
- 3) 「設置工」において、口元無孔保護管先端部と集水管接合部での緩みゾーンからの漏水を抑制するため(図 1-16 参照)、「洗浄工」に先立ち集水管外壁間隙部の止水シールによる充填作業を行っておくことで、マイクロ・ナノバブルの拡散を促進できる。
- 4) 集水管が複数段に設置されている場合は、原則として上段側から注水を行うことによりマイクロ・ナノバブルの拡散域を拡大させる。
- 5) スケール等による口元閉塞管については、ジェットティング作業は不可能であったが、このシステムを使えば閉塞管の口元にパイプ等を立ち上げておくことで、隣接する洗浄可能な集水管からの MNB 水が流下途中に、閉塞管の奥側から閉塞管内に流入した後、スケール等固相の間隙に浸透してスライムを除去できる。
- 6) 初回の「設置工」時では坑内での装置の取付け作業時間が必要になるが、2 回目以後は不要になり「洗浄工」の坑内作業時間もジェットティングに比べ短縮でき、安全作業を可能にする。

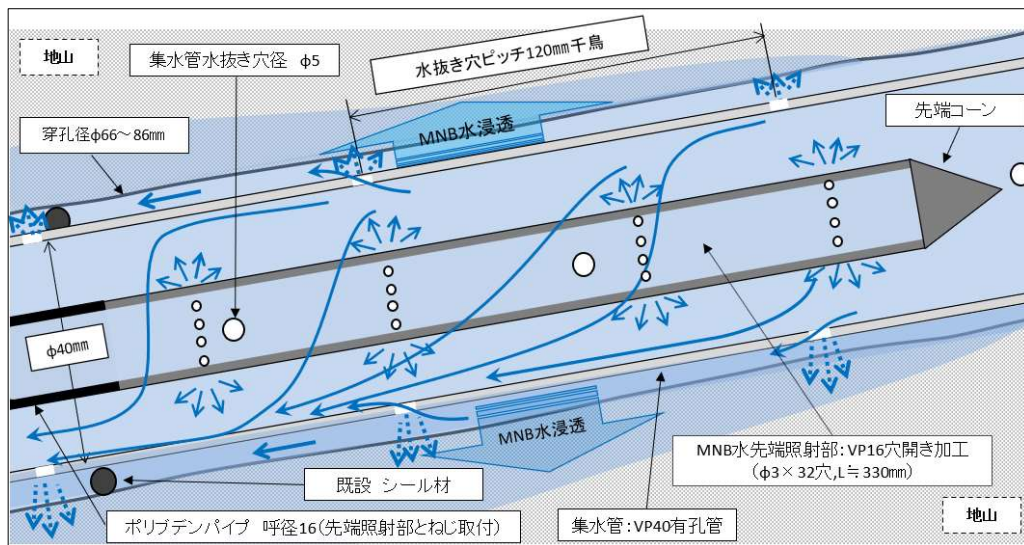


図 4-6 先端照射部からの MNB 水縦断方向浸透イメージ図

4.2.2 洗浄方法

洗浄システムを構成する「設置工」、「洗浄工」、「観測工」の詳細を以下に論述する。

(1) 設置工

「設置工」に先立ち、洗浄システムを適用する際に必要となる装置と数量をまとめるために行う「準備工」において、集水管毎の検尺によって管内閉塞物の確認後、必要に応じてジェッティングを実施しておく。

また、カスケード方式で排水ボーリングにより複数の集水井が流下方向に連結されている場合は、下流側の集水井ほど上流側の排水の影響を受けるため、上流側から洗浄を行うことを原則とする。

「設置工」の作業手順を以下に記述する。

- 1) 「洗浄工」に先立ち、「設置工」で図 1-16 に示した口元無孔保護管先端部の止水のため、膨張止水材と土木遮水材を VP40 ソケットにより押し込みながら口元に達するまで間詰め充填を繰り返す(写真 4-2, 4-3 参照)。止水材の養生には 1 カ月以上の期間が必要になるため、この作業を他の常設装置の設置と併せた「設置工」として「洗浄工」の数カ月程度前に実施しておく。止水措置約 3 カ月後の集水管吐口の状況例は写真 4-4 に示す通りであり、止水材の効果で地下水の集水管外からの漏水を抑制できる。
- 2) 止水作業完了後、坑内にてソケット、バルブ、チーズ等の接続による口元治具を組み立てる(図 4-1 参照)。
- 3) 集水井昇降口から外挿ホースをロープにて吊り下げ、ホース上端を集水井上蓋付近で緊縛・固定する。
- 4) 坑外から先端照射部付ポリブデンパイプを外挿ホース、口元治具、口元治具・集水管連結ホースに通管後、集水管最奥部まで押し込む。通管時は、作業性の向上のため、坑外から坑内の挿入作業を誘導、補助する。
- 5) 坑内にて先端照射部が所定の長さ達したことを確認後、坑外より外挿ホース上端の緊縛・固定を解き、ロープを介してホースを口元治具に到達するまで降下させる。



写真 4-2 膨張止水材巻付け状況



写真 4-3 VP40 による止水材押し込み状況

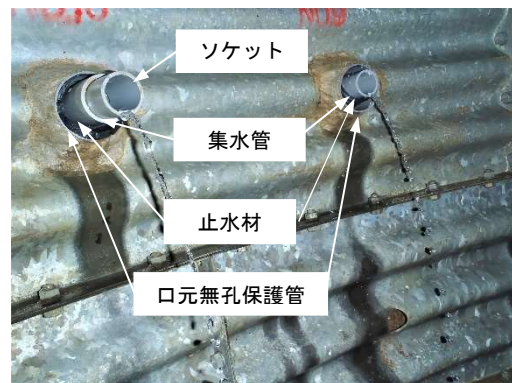


写真 4-4 止水シール充填後の漏水低下状況



写真 4-5 ホース等ワイヤー牽引状況

横ボーリング集水管吐口と②の作業で組み立てた口元治具に集水管（口元治具・集水管連結ホース）、外挿ホースを金具等により接続し、ホース上端を集水井上蓋からステンレスワイヤーで吊り下げる(写真 4-5 参照)。

- 6) 3. 口元治具のバルブの開閉操作に際しては、現地状況を鑑み必要に応じて 2 本のワイヤー操作により開閉可能となるよう装置の工夫を施す(写真 4-6 参照)。
- 7) 管理孔については、塩ビパイプ(VP40)上端を天蓋下面付近まで立ち上げ、水位測定等が可能となるように工夫する(図 4-1 参照)。
- 8) 集水管口元にスケールや土砂の流出した閉塞した閉塞孔については、ポリブデンパイプの挿入が不可能となる。しかし、近傍の集水管からの MNB 水が閉塞管の奥側から拡散しながら流下するため、口元治具にバルブを取り付けたパイプを立ち上げることでこれを貯留させ、閉塞管の洗浄を可能にする。
- 9) 集水井昇降口に集まる先端照射部付ポリブデンパイプを天蓋に緊結し、昇降口扉の開閉、昇降作業に支障が無いようにする。
- 10) ヘッダーについても同様の考え方で集水井天蓋上または集水井近傍地上部に据え付け、作業に支障を来さない様にする。
- 11) 昇降口から取り出された先端照射部付ポリブデンパイプについては折れ曲がりや余り代が生じないように、適切な離隔と曲率で末端処理を施しヘッダーに連結する。

なお、「設置工」時は集水井内での坑内作業になるため、労働安全衛生規則等に準拠し、酸欠防止送風機等を用いて換気を十分に行うと共に、酸素濃度測定器を常備して作業を行う。

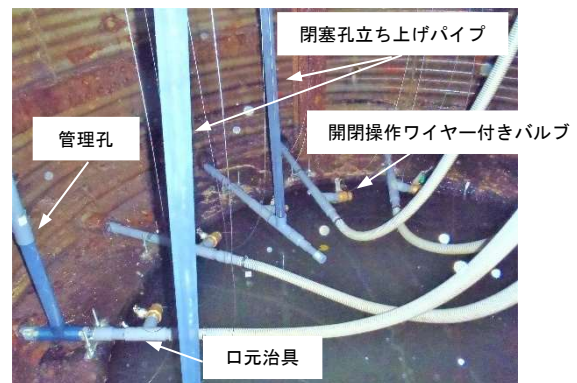


写真 4-6 連結治具等取付状況

(2) 洗浄工

「洗浄工」実施時期は、「設置工」で使用する膨張止水材が乾燥条件下にあっても、降雨等により膨張し止水機能を発揮できる様、「設置工」の 1 カ月以上経過後を原則とする。

また、「洗浄工」に際しては集水井の横ボーリング配設段数が 1 段、複数段に関わらず段別の全集水管に一斉に MNB 水を注入することとし、各段の注水順序は MNB 水の浸透効果促進のため上段側から下段側に向けて行う。この時の必要供給水の流量(L/min.)は、注水作業を 1 日で完了することを条件に、横ボーリング 1 孔当り 10~20(L/min.)、洗浄時間 2 時間程度で計画し、洗浄本数を乗じて算出する。原位置への水道水の供給方法は、原則としてタンクローリー車(2t)等による。また、タンク内で生成するマイクロ・ナノバブルの濃度は CO₂ 風量計により、風量を調整することにより所定の気体体積率に設定する。例えば、気体体積率を例えば 50(%)に設定する場合、洗浄対象容積を集水管外壁側のリング状間隙部を含む横ボーリングの全容積(図 1-2, 図 1-3 参照)とし、総風量が約 2 時間でこの容積と同

程度になる様に風量を設定する様になる。風量の設定については、集水井毎の健全度（レベル）により異なるため、後述の第 5 章の基礎実験と第 6 章の適用実験で結果を論述する。

以下、「洗浄工」の具体的な作業手順について述べる。

- 1) タンク（組立式丸型シート水槽）を集水井近傍にセットし、給水車等から給水補給する。供給水に地下水を使用する場合は、集水井底盤に水中ポンプを据え付け、直接 8. タンクに供給しても良い（図 4-1 参照）。
- 2) タンク内にポンプ、コラムを据え置いた後、近傍に立て掛けた炭酸ガスボンベ（7 kg または 30 kg）に、風量計を介してコラムを接続する。なお、マイクロ・ナノバブル発生量については短時間で高濃度の MNB 水にするため、コラムを 1 つのタンク内に最大 8 本まで据え置くことができる様に工夫している。
- 3) 炭酸ガスボンベを 0.1~0.2 (MPa) で加圧後、水道水等の供給水をタンクに満水となるまで供給する（写真 4-7 参照）。
- 4) タンクを満水にした後、室内実験の結果をもとにコラムにボンベからの炭酸ガスを 30 分以上加圧し、タンク内の MNB 水が高濃度になってから、流量計を介しポンプとヘッダー（写真 4-8 参照）を連結する。
- 5) ポンプに電源を繋ぎ、集水管にヘッダーに MNB 水を一齐供給し、ここで十分なエア抜きを行ってから (out) 側バルブを開放し、全集水管最奥部に挿入した先端照射部（写真 4-9 参照）から MNB 水を一齐に注水する。なお、MNB 水によるポンプのエア噛みはない。
- 6) 注水開始後 15 分間程度は、口元治具の 3. 口元バルブを開放状態にしておき、集水管近傍の比較的大きなサイズのスライムを排泄する。その後、全集水管の 3. 口元バルブを閉鎖し、MNB 水の約 2 時間の連続注水を行い、周辺地盤に浸透させる。

ただし、注水中に立ち上げた外挿ホースからのオーバーフロー水が約 1 時間経過しても減少しない場合は、固結したマクロスケールが凝集し、排出できていない場合もあること

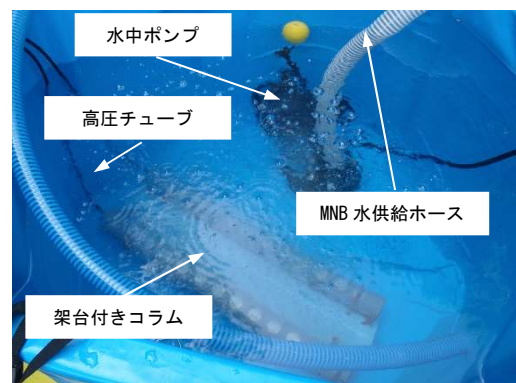


写真 4-7 タンク内コラム、ポンプ据付け状況

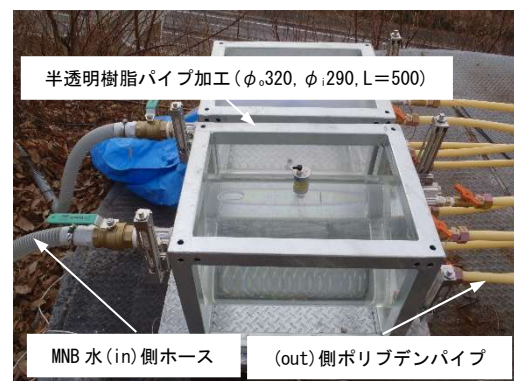


写真 4-8 ヘッダー（2 基）

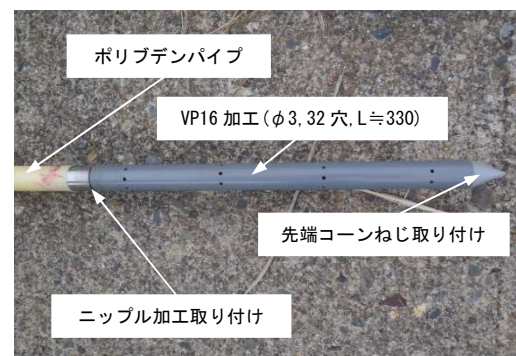


写真 4-9 先端照射部

から口元バルブを一旦開放し、スケールを排泄した後、バルブを再度閉鎖後 1 時間程度の注水作業を再開する。

- 7) この様にして計 2 時間の注水を行った後、口元治具に取り付けたバルブを閉鎖したまま管理孔内の MNB 水の水位が低下し集水井近傍に拡散したことを確認後、検水による後述の ATP(RLU)測定を実施する。注水後、ポンプに繋がるホース (φ38) とヘッダーの連結を解除する。
- 8) 連結解除後は、ヘッダー内に溜まった洗浄水を十分に水抜きした後、口元治具に取り付けたバルブを開放し、集水管からスライムを伴う地下水の排泄が可能となる措置を施しておく。
- 9) 「洗浄工」で用いた仮設装置 (8.~13.) を撤去後、1.~7.の常設装置を養生し、次の「洗浄工」に備え安全措置を施しておく。

なお、「洗浄工」においても排水状況確認のための坑内作業を伴うため「設置工」時と同様、労働安全衛生規則等に準拠した安全措置を施す。排水状況確認方法としては、現地状況に応じて坑外からの排水音、双眼鏡による観察作業等も併用する。

(3) 観測工

2.2 節に記述した通り、集水井の健全度 (レベル) は豊水期と渇水期を含む年 2 回以上の流量測定「観測工」により設定される。そして、マイクロ・ナノバブルの洗浄システムにおける集水井の「洗浄工」実施時期は、この「観測工」によって決まる。1 回当たりの流量測定は、原則として排水管吐口における計量ますによる流量測定を 3~5 回に分けて行う。ただし、複数の集水井がカスケード方式による排水ボーリングで連結され、洗浄対象集水井が上流側に位置する場合、排水管吐口は下流側集水井の高位置のライナープレートに配設されている場合が多いことから、排水管吐口での流量測定が困難になる。この様な場合は、個々の集水管からの吐出水の流量の総和を集水井の流量とする。しかし、図 1-16 に示した通り、緩みゾーンからの滲出水の流量は不明となるため、真の流量よりも小さくなることを考慮しておく必要がある。

また、MNB 水の注入により「バイオフィルムが殆ど無い状態」まで洗浄できたか否かを判定するための検水による ATP(RLU)測定も (図 1-8 参照)「観測工」の一つになる。

この測定は、「洗浄工」による MNB 水の注入終了後、MNB 水が集水井の周辺に十分拡散したことを管理孔での水頭等により確認後、排水管吐口での排水 (写真 4-10 参照)、底盤貯留水または集水管の吐出水の検水により行う。洗浄直後に水頭の低下がみられない場合



写真 4-10 排水管吐口での検水状況

は、翌朝の測定とする。

そして、短期管理指標 ATP(RLU)が 25 未満を満足しない場合(1.2.3 項 図 1-8 参照)、再度注水時間を延長することにより総風量を上げて、短期管理指標を満足するまで注水作業を繰り返す。なお、横ボーリングが複数段に配設されている集水井においては、上段で行った MNB 水は下段にも浸透していることから、再洗浄の必要性の有無は、下段注水後の ATP(RLU)により判断する。

なお、マイクロ・ナノバブルの生成ガスに発現効果の速い CO₂ を使用した場合、pH は一時的に低下することになるため、注水時の排水は環境省の定める pH 5.8 を下回る事の無い様に pH を管理しながら注水作業を行うことになる。ここで採用しているコラム（微細孔式）はスケラビリティ⁺に優れた発生装置であることから、pH の濃度については原位置で pH をモニターしながらマイクロ・ナノバブルの風量を調整することでコントロールできる。また、注水による「洗浄工」終了後の MNB 水は長期滞留作用で供給される地下水とブレンドされるため、pH 5.8 を下回することは考え難いが、関係諸機関の要請等によってこのモニタリングを行う必要が生じた場合には、注水後の排水管吐口における流量測定時に pH 計による管理測定を行う。

ただし、生活用水として利用している地域においては水道法の水質基準、工業用水や農業用水等に利用している地域においては用途ごとの水質ガイドラインにしたがい水質測定等を行い管理していく必要がある。

参考文献

- 1) 水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン（案）p. III-1－III-6, 2022.
- 2) 環境省 HP（水・土壌・地盤・海洋環境の保全）参照先：
<https://www.env.go.jp/water/impure/haisui.html>, 2023.

第 5 章 基礎実験

5.1 実験方法

室内実験よりマイクロ・ナノバブルによる洗浄効果を原位置で確認するため、前章第 4 章で論述したシステムを用い、MNB 水と水道水を実際の横ボーリングの単孔に注入した時の拡散程度とバイオフィルムの除去程度の違いを比較・検討する基礎実験を行った。

基礎実験を実施する平面展開図を図 5-1 に示す。この集水井は盛土内に設置されている。実験にはタンク（図 4-1 参照）から MNB 水と水道水をポンプにより集水管④と⑥の最奥部に注入する日を変えて、注水時と養生時（注水後）の水頭測定を行い拡散の違いを検討した。

実験に先立ち実施した集水管①～⑦の約半年間の各集水管吐口での手ばかりによる流量モニタリング結果によれば、流量（L/min.）は 0.01～10 の範囲で大きくばらつきながら変動していた。本集水井では実験の約 2 カ月前にジェッティングを実施しており 2.3 節で述べた集水井毎のバイオフィルムの形成状況や相転移の状況の違いは、全ての集水管で時期の違いこそあるが同様に現れていると考え、ここでは作業性を考慮し④を MNB 水の注入孔、⑥を水道水の注入孔とした。

ただし、実験手順についてはまず、写真 5-1 の様に口元治具（図 4-1 参照）から管理孔を立ち上げた。注水時には④の口元付近での MNB 水の拡散による影響が⑥の水道水の流量に影響を及ぼすことも考えら

れたことから、⑥を④に先行させ概ね 4.2.2 項で論述した「洗浄工」の要領で水道水と MNB 水の注水作業を行った。（写真 5-2、写真 5-3 参照）。風量や水頭変化状況等については不明な点が多かったため、図 5-1 および表

5-1 に記載した仕様で④と⑥それぞれの集水管における作業時間（注水時間、養生時間）、注水時間、流量及び養生時間を一致させ比較・検討可能なデータを取得した。同表に示した通り、気体体積率を^{1),2)}コラム 1 本の風量で約 80%に設定している。これは室内実験の表 3-8 に示した

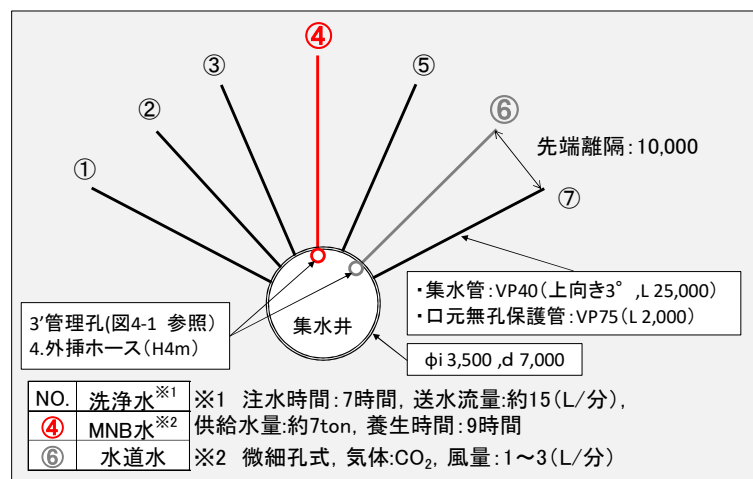


図 5-1 集水管基礎実験展開平面図

表5-1 基礎実験仕様一覧表

NO.	洗浄水	注水時間 (時間)	養生時間 (時間)	供給水流量 (L/min.)	供給水量 (t)	使用ガス	風量 (L/min.)	総風量 V ₁ (m ³)	対象容積 V ₂ (m ³)	みかけの気体体積率 P (%) [※]
④	MNB水	7	9	約15	約7	CO ₂	2	0.8	0.2	80
⑥	水道水	7	9	約15	約7	—	—	—	0.2	—

※ $P = 100 \times V_1 / (V_1 + V_2)$

(4)のケースに相当する。水頭測定に際しては、管理孔④と⑥の孔底に水位計（S & DL mini, 水位測定用圧力センサー： $\pm 0.1\%$ F.S., 寸法： $\phi 22 \times L150$ mm, 重量：135g, 測定範囲：4m, 分解能：3 cm）を据え置き、サンプリング間隔 1 分で洗浄前後の水圧データを電気信号として収録後、水頭に換算した。

ここでの供給水は、給水車から運搬された水道水を用いており、MNB 水を生成するタンクを写真 5-4 に示す。タンクから送水される MNB 水の流量管理のための流量計を写真 5-5 に示す。また、CO₂ ボンベの送気圧を管理するための圧力ゲージを写真 5-6, 風量管理のための風量計を写真 5-7, MNB 水注入時の隣接する集水管（③, ⑤）への拡散状況を写真 5-8 に示す。

なお、集水管④と⑥の注水に際してはバイオフィルムの有無を把握するため、写真 1-3 に示した測定器を用い注水前後の検水を行った。



写真 5-1 集水管取付治具(左から①～⑥)



写真 5-2 給水車による⑥への水道水供給状況



写真 5-3 ④への MNB 水供給状況



写真 5-4 タンク, CO₂ ボンベ, 先端照射部等



写真 5-5 流量計 : 10~17(L/min.)



写真 5-6 CO₂ ボンベ : 圧力 0.1~0.2 (MPa)



写真 5-7 CO₂ 風量計 : 1~3 (L/min.)



写真 5-8 MNB 水注入時の隣接集水管漏水状況
(左から③~⑤)

5.2 結果と考察

④と⑥の注水前後 10 か月間の流量を月降水量と併せて図 5-2 に示す。流量測定に先立ち、写真 5-1 に示した口元無孔保護管先端部からの漏水が無いよう止水措置を施している。同図によれば、MNB 水を注入した後の④の流量は水道水を注入した⑥の場合に比べ、降雨に敏感に反応するようになる傾向を伺うことができる。また、注水時においては、外挿ホース上端から水道水と MNB 水のオーバーフローはみられず、⑥と④の保護管周辺からの漏水(図 1-16 参照)が視認された。

実験工程にしたがい得られた⑥と④の水頭経時変化状況を図 5-3 に示す。同図には、口元バルブの開閉操作時期、注水・養生時期を併記すると共に、「バイオフィルムの有無」の状態を確認するため、検水による ATP(RLU)^{3), 4)} を併せて示す。

一方、図 5-4 には⑥と④の注水開始時刻と養生終了時刻を一致させ、注水時と養生時の水頭経時変化形状を片対数の同一時系列で整理した結果を示す。

図 5-3 と図 5-4 に示した水頭は各集水管の保護管周辺からの漏

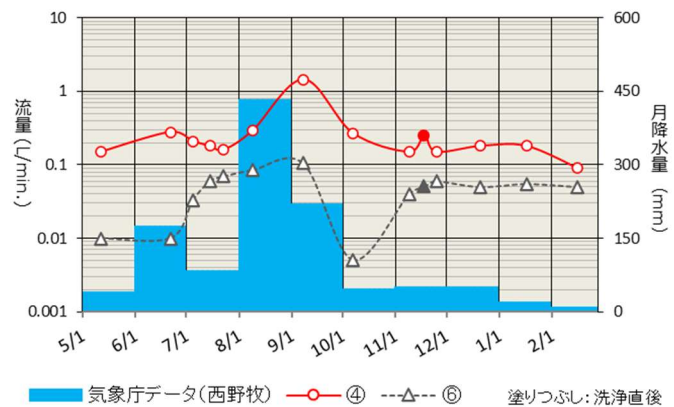


図 5-2 集水管別注水前後流量経時変化図

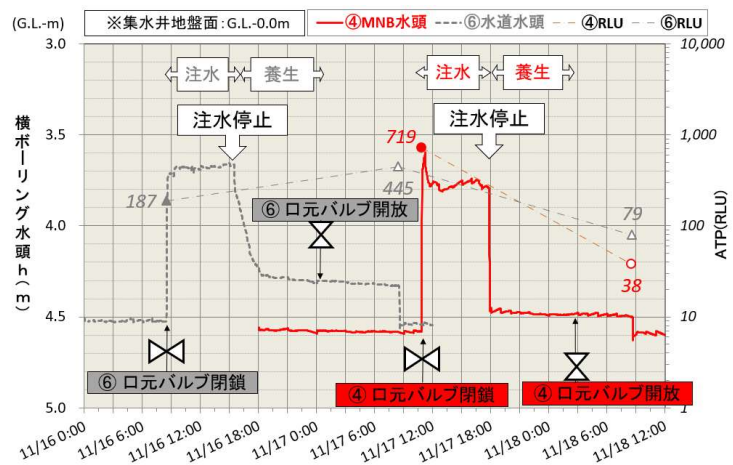


図 5-3 集水管別注水前後水頭・ATP 経時変化図

水による影響を受けてはいるものの、④、⑥共に送水流量 15 (L/min.) 程度で注水しており、注水時間と養生時間も一致させた場合の実験結果である。

以上の各図を通観して明らかとなる事項を以下に論述する。

- 1) 図 5-3 と図 5-4 より④の MNB 水注入直後の水頭上昇速度は⑥の水道水の場合に比べて速く、④の MNB 水注水停止直後

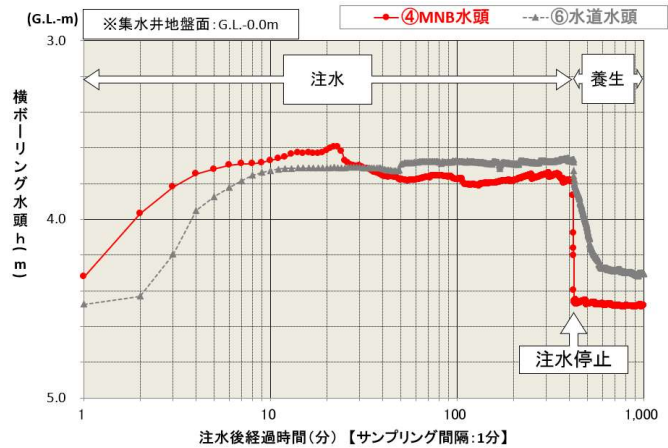


図 5-4 注水・養生時同一時系列水頭経時変化図

- の water head 降下速度も同様に⑥の水道水の場合に比べて速い。また、養生期間中の④の MNB 水の水頭は不規則に変動しながらやや低下する傾向を示しているが、⑥の水道水では殆ど変化していないことから、MNB 水の拡散効果は水道水よりも高いと云える。
- 2) 図 5-4 の④の MNB 水注入後の水頭は注水後 20～30 分でピーク (G.L.-3.6m) を有した後、不規則で微小な上下変動を繰り返しながら約 2 時間後には G.L.-3.8m 付近まで水頭を低下させる。これは、連続注水することで EPS が一旦膨張した後、高濃度になった MNB 水が 20～30 分で EPS を剥離・分解後、集水管外壁側への拡散も進み低濃度ゾルになって隣接する③と⑤の集水管にも拡散したためと考えられる (写真 5-8 参照)。しかし、⑥の水道水の場合はこのような変化はみられない。
- 3) ATP(RLU)は、微生物由来のバイオフィルムの量を捉えていることから変動幅の大きい指標である。しかし、これは流量の変動幅と同程度 (表 2-1, 図 2-1 参照) であり、ATP(RLU)を洗浄効果の指標にすることに問題はないと考えられる。
- 4) 図 1-8 より、ATP(RLU)が 25 以上を「バイオフィルムが存在する状態」、25 未満を「バイオフィルムの発生が殆どない状態」と考えると、⑥の水道水では注入前後とも「バイオフィルムが存在する状態」のままであり、④の MNB 水注入後も ATP(RLU)は 38 で、同様に「バイオフィルムが存在する状態」であった (図 5-3 参照)。
- 5) 図 5-3 の結果は 1 孔の注水結果に基づく推定となる。しかし、MNB 水注入翌日の集水管④と⑥の ATP(RLU)は、共に注水前に比べて 1 オーダー低下している。集水井全体でデータ数を増やした適用実験の結果については次章 6 章で論述するが、注水後の集水井全体の ATP(RLU)が 25 未満になることは、注水によって集水管全体をクォーラムセンシング制御下に

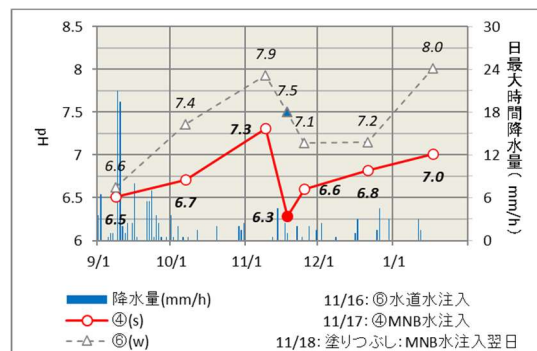


図 5-5 注水前後pH経時変化図

置くことができた状態を考える事ができる。

- 6) 藤本ら⁵⁾はマイクロ・ナノバブルの消失時間が、添加する界面活性剤の種類に関わらず水道水に比べて長くなることを実験により示している。このことから、MNB 水生成に際しての供給水としては水道水より界面活性効果を発揮できる地下水の方が適していると考えられる。

一方、④に MNB 水を注水前後の⑥と④における水質と水温の性状を把握するため、水質チェッカー（ポータブル多項目水質計 WQC-24、ケーブル長：10m）による pH、電気伝導率（mS/m）、濁度（NTU）、水温（℃）の測定結果を日最大時間降水量と併せて図 5-5～図 5-9 に示す。これらの各図を通観して明らかになる事項を以下に論述する。

- 1) 図 5-5 によると CO₂ の MNB 水を注入した④の注水翌日の pH は、酸性側に移行するがその後は供給される地下水とブレンドされ低濃度のゾルになって徐々にアルカリ側に移行する。
- 2) ⑥の pH も④からの MNB 水の拡散の影響を受け、④の MNB 水注水翌日には酸性側に移行するが、その後は地下水の影響を大きく受け高濃度のゾルになってアルカリ側に移行する。
- 3) 図 5-6 をみると、⑥の吐出水の流量は④に比べて少なく（図 5-2 参照）、空気との接触時間が長いため⑥の溶存酸素は全体として④に比べて大きくなっている。また、④の CO₂ の MNB 水注水翌日の溶存酸素（赤丸塗りつぶし）はやや低下するが、1 カ月後には低濃度ゾルとしての吐出水の溶存酸素を反映するようになると考えられる。
- 4) ④における MNB 水によるスライムの分解効果は図 5-7 と図 5-8 の MNB 水注水翌日の電気伝導率と濁度が低下している

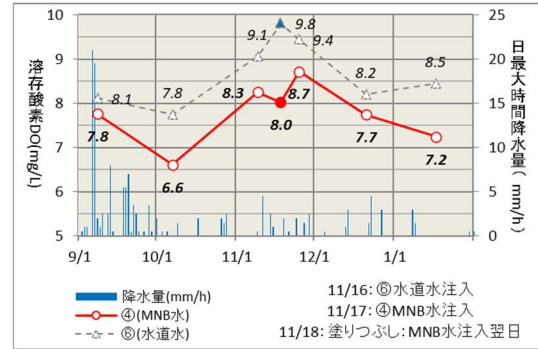


図 5-6 注水前後溶存酸素経時変化図

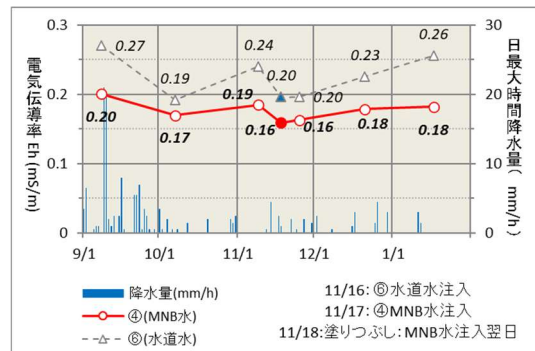


図 5-7 注水前後電気伝導率経時変化図

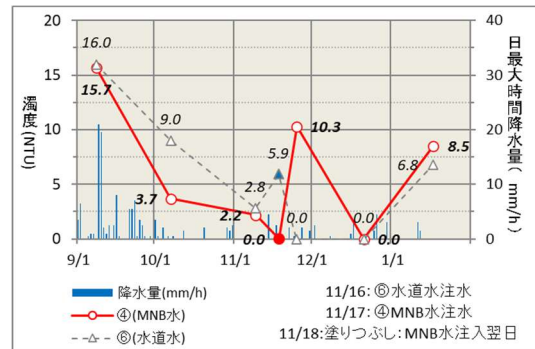


図 5-8 注水前後濁度経時変化図

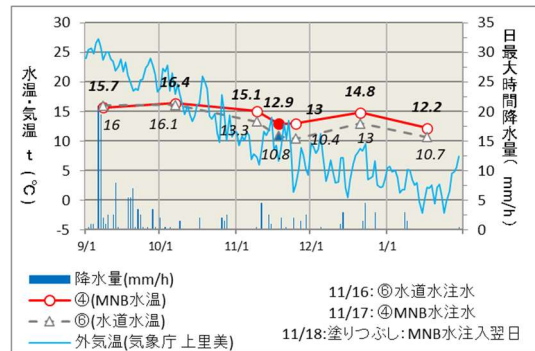


図 5-9 注水前後水温経時変化図

ことでも確認できる。これは、マイクロ・ナノバブルがコロイド粒子を構成するミクロスケールやポリマー等を分解しているためと考えられる。その後は、地下水の基質によって、ばらつきながら増加する場合もあるが、注水を開始して 3 時間後の清澄度は⑥と④の注水中に口元バルブを一時的に開放して採水した試料の清澄度の違いをみても明らかである(写真 5-9, 写真 5-10 参照)。なお、写真 5-10 では、採水容器の底に水酸化鉄のスラッジが視認される。これは MNB 水と共に集水管④の管外側に形成されていた水酸化鉄スケールの一部が脱離し、分解途中に断片化したミクロスケール(図 1-22 参照)の集合体と推察される。

- 5) 図 5-9 をみると、吐出量の多い④(図 5-2 参照)の地下水温は吐出量の少ない⑥に比べ、併記した外気温が低下してもその影響を受け難い結果になっている。これは、図 5-6 の溶存酸素の経時変化とも調和している。

集水管④の洗浄前の ATP(RLU)は 719 であったことから(図 5-3 参照)、④と同程度の複数の集水管が配設された集水井の場合、その健全度(レベル)は 3~4 になると考えられる(図 1-8 参照)。このような健全度の低い集水井になると、気体体積率を 80(%)で洗浄しても、洗浄後の ATP(RLU)は 38 であり、「バイオフィルムの発生が殆どない状態」を達成できなかったことになる。

したがって、このような健全度の低い集水管で洗浄後の中期指標としての健全度(レベル)をランクアップさせるためには、気体体積率 80(%)を目安にして、ATP(RLU)が 25 未満の「バイオフィルムの発生が殆ど無い状態」を達成できない場合は、注水時間を延長して ATP(RLU)が 25 未満を達成するまで注水が続けることが必要条件になる(図 2-6 参照)。

健全度(レベル) 3~4 の集水井を想定し、気体体積率と洗浄程度の違いを探究するため、④の集水管のマイクロ・ナノバブルの注水時間別の気体体積率を試算した結果を表 5-2 に示す。

同表によれば、バイオフィルムの剥離・分解効果は図 5-4 の水頭経時変化形状より注水開始後 20~30 分で出現すると考えられる。そして、バイオフィルムが剥離されるまでの間の原位置における環境は室内実験の閉鎖系の環境に類似した状態になっていると考えられる



写真 5-9 ⑥注水 3 時間時採水試料



写真 5-10 ④注水 3 時間時採水試料

が、その後マイクロ・ナノバブルはバイオフィルムを剥離後、相転移により一旦膨張させて分解しながら拡散し、閉塞物を除去しながら開放系に転じるものと考えられる。

一方、図 5-3 から判断される MNB 水注入後の水頭のピークは約 1m となっており、図 5-1 から試算される集水管口元と先端部との高さが約 1.3m であることを考えると、集水管の先端側約 5m の部分の洗浄は不十分になっていた可能性がある。したがって、今後の注水作業で「バイオフィルムの発生が殆ど無い状態」まで洗浄するためには、無孔保護管と集水管との間の止水措置を 4.2.2 項の方法で確実に実施する(写真 4-3 参照)と共に、健全度(レベル)毎に設定される最適な気体体積率で注水することにより、マイクロ・ナノバブルが横ボーリング全体に拡

散させ、ATP(RLU)が 25 未満の「バイオフィルムの発生が殆ど無い状態」まで注水する必要がある。

この検討結果については次章第 6 章で論述する。

表5-2 ④の注入時間別気体体積率一覧表

流量	平均風量	注入時間	総風量	横ボーリング容積	気体体積率
(L/min.)	(L/min.)	(時間)	V ₁ (L)	V ₂ (L)	P(%)※
15	2	1	120	200	40
		2	240		50
		3	360		60
		7	840		80

※ $P=100 \times V_1 / (V_1 + V_2)$

参考文献

- 1) 日本機械学会：マイクロバブル最前線，共立出版，pp. 3-21，2009.
- 2) 上山智嗣，宮本誠：マイクロバブルの世界，工業調査会，2009.
- 3) (財)日本公衆衛生協会 分担事業者 大黒 寛（東京都多摩立川保健所長）：平成 22・23 年度 地域保健総合推進事業 「保健所のレジオネラ対策における簡易迅速な検査方法の実用化と自主管理の推進に関する研究」報告書，pp. 1-5，2012.
- 4) 東京都多摩立川保健所：ATP 測定法を用いた公衆浴場等における管理マニュアル，2011.
- 5) 藤本明弘，服部香名子，大矢勝：マイクロバブル洗浄への界面活性剤の添加効果，織消誌，Vol. 57，No. 11，pp. 838-843，2016.

第 6 章 適用実験

6.1 実験方法

基礎実験の結果をもとに、第 4 章で既述した洗浄システムを実際に適用し、洗浄効果と仮説の検証を行うと共に洗浄の効果、健全度（レベル）と気体体積率の関係等を把握するため、図 2-3 と図 2-4 で設定されるレベルの異なる 3 つの集水井において適用実験を行った。

3 つの集水井 K,T,O の集水井管理記録表等の既往資料、集水井坑内観察結果、検尺結果とジェットイング前後の流量から図 2-4 に基づき設定される洗浄前の健全度（レベル）評価をその他の諸元と併せて表 6-1 に示す。

ここでは、3 つの集水井の洗浄による中期的な効果を把握するため、4.2.2 項で論述した洗浄方法を使い、洗浄後の健全度（レベル）のランクアップの有無を検証する。この際、前章の 5 章でも論述した通り、注水作業後に「バイオフィルムの発生が殆ど無い状態」になったかどうかを現地で迅速に判断することは極めて重要である。そのため、図 2-5 にしたがって洗浄後に短期的な自主管理指標としての ATP(RLU)測定を行い、中期的な健全度（レベル）との関係

について検討を行う

こととした。また、

流量測定と ATP

(RLU) 測定に加え、

集水井毎の地下水特

性を把握する上での

補間資料を得るた

め、原位置において

基礎実験と同様の装

置で水質・水温測定

も実施した。本洗浄

システム適用前後の

集水井別の流量と水

質データを一覧表に

してまとめ表 6-2 に

示す。

集水井別の施工計

画に際しては現地の

下見、検測等の事前

表6-1 集水井別主要諸元一覧表

主要項目			集水井名		
			K	T	O
建設年度			2001	1999	1999
深さ(m)			14	10	22
段数(段)			2	2	1
洗浄本数(本)			上:5	上:4	4 (設計本数:6)
			下:6	下:4	
			計:11	計:8	
洗浄延長(m)			上:193.3	上:52.2	141.82
			下:204.4	下:52.2	
			計:397.7	計:104.4	
口元管閉塞の有無			無	無	有(2本)
検尺長変化の有無			無	無	有(4本)
ライナープレートの変形			無	無	有
底盤貯留水の濁り			清澄	やや白濁	やや白濁
連結集水井の数			0	0	3(上流)
流量 (L/min.)	ジェッティング	前	—	0.08～2.5 (7か月)	—
		後	1.62～2.6 (10か月)	0.14～2.75 (6か月)	(0～0.03) ^{※2} (6カ月)
健全度(レベル) ^{※1}			2	2～3	4

※1 図2-4による

※2 口元閉塞管吐口の排水流量を含む集水管別総流量

第 6 章 適用実験

表 6-2 集水井別流量・水質測定結果一覧表

年月日	集水井名	ATP (検水)	pH	電気伝導率 (mS/m)	濁度 (NTU)	水温 (℃)	計量槽流量 (L/min.)	備考
17/2/15	K	5	7.35	34.8	1.6	9.7	1.62	
	T		8.2	54.4	4.6	8.1	0.3	
17/3/23	K	5	8.11	35	26.1	14.6	1.8	
	T	144	8.15	15.9	15.9	14.3	0.095	
17/4/21	K	16	8.12	34.1	3.5	13.7	2.1	
	T	15	7.86	16.6	3.7	19.4	0.61	
17/5/17	K	6	7.8	33.4	0	14.3	2.2	
	T	17	7.76	38.7	0	15.7	0.15	
17/6/19	K	15	7.46	25.2	0	15.5	2	
	T	19	7.78	35.1	0	23.5	0.12	
17/7/20	K	841	7.56	31.5	1.1	16.7	2	
	T	15	7.74	42.2	1.9	25.1	0.1	
17/8/28	K	4	7.69	34.5	10.3	20.5	2	
	T	20	7.63	43.8	2.2	23.5	0.24	
17/9/27	K	653	6.7	56.4	8.7	16.9	2.2	
	T	15	7.31	51.1	1.4	23.1	0.08	
17/10/20	K	—	7.62	59	7.1	12	—	T:集水井底盤貯留水で検水、採水
	T	—	7.71	50.1	7	16.7	2.5	
17/10/30	T							T:ジェットイング
17/11/14	K	3	7.55	41	1.5	12.8	2.6	
	T	1,118	7.91	35.2	11.1	15.4	1.12	
17/12/18	K	6	8.31	34.4	7.2	12.3	1.5	
17/12/19	K							K:マイクロ・ナノバブルによる洗浄
17/12/20	K	2	7.94	34.1	3.9	4.3	0.3	
	T	1,360	8.3	28.3	4.3	10.9	0.33	
18/1/23	K	10	8.14	33.9	1.3	9.3	3	
	T	14	8.3	23.9	0	6.2	0.2	
18/2/19	K	2	8.08	35.9	7.6	10.6	4.3	
	T	3	8.24	38.8	5.5	5.9	0.14	
18/3/14	K	3	7.97	35.6	7.7	16.5	5.449	
	T	33	8.02	40.5	7.9	13.4	0.38	
18/4/23	K	2	7.95	43.7	4.2	12.8	9.237	
	T	26	7.95	33	6.1	16.4	1.142	
18/5/15	K	0	7.67	37	3.7	16.2	7.32	
	T	54	7.42	34.1	2.8	19.5	2.752	
18/5/16	T							T:①マイクロ・ナノバブルによる洗浄(1回目)
18/5/17	T	61	7.19	46.6	2.7	17.5	1.86	
18/6/19	K	56	7.31	40.3	0.1	17.2	5.085	
	T	700	7.21	38.5	18.6	16.9	2.654	
18/7/17	K	3	6.92	50.7	3.1	18.6	4.48	
	T	59	6.46	92	13.2	24.2	0.68	
18/8/21	K	133	7.32	34.3	0.9	20.4	4.903	
	T	36	7.25	33	4	22.5	0.691	
18/9/11	K	10	7.25	32.5	8.1	18.4	4.92	
	T	16	7.33	49.1	4.2	20.3	0.31	
18/10/23	K	41	7.49	44.8	0	17.7	4.274	
	T	69	7.96	35.1	4.1	18.0	0.388	
19/2/21	K	26	7.8	48.6	1.8	12.6	6.71	
	T	37	6.81	37.7	2.2	10.6	0.07	
19/3/19	O	59	7.93	169	24.9	10.9	0.01	集水管①:0.01(L/min.)
19/6/11	O						0.01	集水管①:0.01(L/min.)
19/6/12	K	73	7.37	43.2	0	15.4	6.73	
	T	38	7.41	49.6	0	16.9	1.62	
19/7/22	O						0.03	集水管①:0.03(L/min.)
19/8/27	T	17	7.31	46.5	5.1	22.4	0.41	
19/8/28	K	15	7.24	47.6	2.2	16.7	3.9	
	T							T:②マイクロ・ナノバブルによる再洗浄(2回目)
19/8/29	T	18	6.72	40.1	20.2	19.9	12.3	
	O						0	
19/8/30	O	15					測定不可	O:マイクロ・ナノバブルによる洗浄
19/10/2	O	11	7.35	108.6	3.3	14.7	0.15	集水管①:0.1(L/min.), ④:0.05(L/min)
19/10/3	T	7	7.65	21.3	7.7	22.6	0.13	
19/10/31	K	5	7.43	35.7	0	15.7	4.58	
	T	16	8.05	27.1	1.3	17.7	6.97	10/12:時間雨量;約250mm(台風19号)
	O	19	8.74	36	1.5	16.3	0.42	集水管①:0.28, ②:0.01, ④:0.13(L/min)
19/11/27	K	8	7.81	35.6	0.8	15.6	2.4	
	T	64	7.97	28.1	1.8	15.9	1.11	
	O						0.13	集水管①:0.13(L/min.)
19/12/25	K	4	7.78	42.9	1.1	12.6	6.97	
	T	172	8.01	37	9.1	12.3	0.39	
	O						0.09	集水管①:0.09(L/min.)
20/10/8	K	59	7.81	39.2	5.2	16.9	9.28	
	T	86	7.7	26.4	7.0	16.8	3.38	

第 6 章 適用実験

調査結果に基づき展開平面図を作成し、「設置工」に必要な装置の数量等の諸元を設定する。集水井の諸元を健全度（レベル）、注水時の気体体積率と併せて表 6-3 に示す。

複数の集水管に適用した場合の気体体積率については不明なため、ここでは室内実験と基礎実験より得られた結果をもとに（表 3-8, 表 5-2 参照）、健全度（レベル）に応じて気体体積率を 50～90%に変化させた注水実験を行った。そして、短期管理指標と中期管理指標に基づく効果判定の流れ（図 2-5 参照）をもとに、健全度（レベル）別の適切な気体体積率について考察した。また、同表に示した供給水については、集水井毎の現地制約の関係から分散媒として地下水か水道水を選定した結果である。なお、集水管が上下 2 段で放射状に配設されている集水井（K,T）の気体体積率試算時の横ボーリング容積 $V_2(\text{m}^3)$ には、上段と下段の容積を加算した結果を採用している。

表6-3 集水井別洗浄諸元一覧表

集水井名		K		T①(1回目)		T②(2回目)		O
上下段		上段	下段	上段	下段	上段	下段	(1段) ^{※1}
集水管長 (m)	1	45.5		16.1	20.2	16.1	20.2	35.0
	2	45.7		16.1	12	16.1	12	35.5
	3	40.7		10	10	10	10	35.4
	4	35.7		10	10	10	10	30.0
	5	25.7						35.5
	6		40.8					35.4
	7		40.7					
	8		35.8					
	9		35.7					
	10		25.7					
	11		25.7					
総延長(m)		193.3	204.4	52.2	52.2	52.2	52.2	206.8 ^{※1}
横ボーリング容積 $V_2(\text{m}^3)$ ^{※2}		1.0	1.1	0.3	0.3	0.3	0.3	1.2
供給水		地下水		水道水		地下水		水道水
1集水管当り流量 (L/min.)		10～15		15～20		15～20		20
コラム本数 (本)		4		2		8		8
注水時間 (時間)		1	1	1	1	2	1	5
時間当たり風量 (L/min)		15	15	8	8	16	16	28
風量 $V_1(\text{m}^3)$		0.9	0.9	0.5	0.5	1.9	1.0	8.4
健全度 (レベル)		2		2～3		2～3		4
気体体積率 P(%) ^{※3}		約50		約60		約80		約90

※1 集水管1,4（下線）は口元閉塞孔であるが、それぞれの設計長を加算

※2 集水井K, Tの容積は、上段と下段の容積を加算

※3 みかけの気体体積率： $P = 100 * V_1 / (V_1 + V_2)$

6.2 ケーススタディー1（集水井健全度（レベル）：2）

6.2.1 注水前の集水井Kの状況

集水井 K は砂、れき等からなる扇状地に配設されており、横ボーリングは図 6-1 の平面展開図に示す通り上下 2 段からなる。集水管は、上下 2 段（比高差 4.2m）で配設されており、「設置工」では天蓋上に上段用と下段用の 2 基のヘッダーを設置した（写真 6-1）。また、事前調査時においては、上段の集水管から吐出水は視認されず乾燥状態にあった。この上段に配設された集水管は集中豪雨時の表層滑り抑制のための横ボーリングと考えられ、4.2.2 項で述べた方法により膨張止水材と土木止水材を交互に押し込み（写真 4-2、4-3 参照）、口元無孔保護管先端部の止水措置を施した（写真 6-2 参照）。なお、図 6-1 で網掛けした番号の集水管には、集水管毎の洗浄効果の違いを検討するため基礎実験時と同様の方法で集水管の口元治具から立ち上げた管理孔内に水位計を据え置き、注水時と洗浄後の水頭データを収録した。

ここでは、本システムを用いた洗浄の約 1 年前にジェッティングを実施しており、それ以前の流量については不明であったが、ジェッティングを実施してから本システムを適用するまでの間の流量（L/min.）は 1.6～2.6 であった（表 6-1、表 6-2 参照）。

この流量は、上述の通り、上段の 5 本の集水管からの吐出水を視認できなかったことか

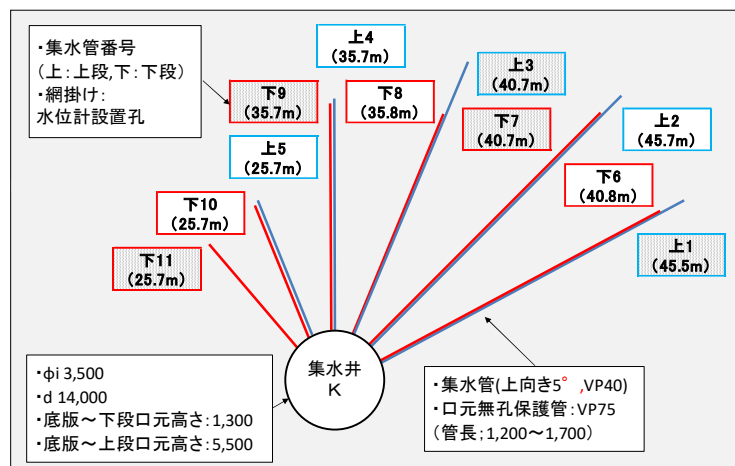


図 6-1 集水井 K 展開平面図



写真 6-1 上段（左）、下段（右）のヘッダー据付状況

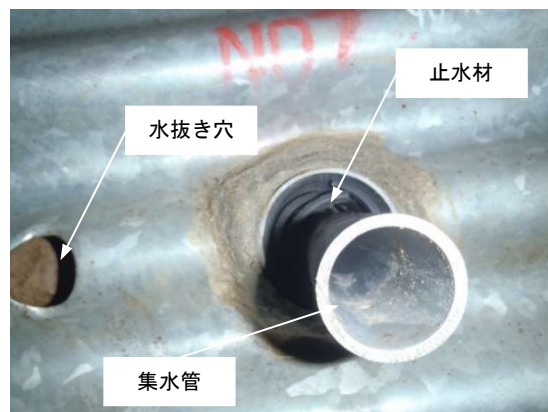


写真 6-2 上段乾燥環境下での集水管口元止水状況

ら、主に下段 6 本の集水管（下 6～下 11）からの吐出水の合計と考えられる。

一方、「洗浄工」前の約 10 カ月間に実施した坑内観察結果および検尺の結果によると、ライナープレートや集水管に異常はみられず設計通りであったことが確認され、流量の結果（表 6-1 K 参照）と併せて考えると注水前の集水井 K の健全度は「レベル 2」に相当すると判断された（表 6-3 K 参照）。これは、図 2-4 よりバイオフィルムの形成過程としては「②誘導期後期」～「③対数増殖期前期」に相当し、集水井 K に供給される地下水の養分等の基質は比較的少なく、バイオフィルムも微生物の不活化により、クォーラムセンシング制御下で長期間維持されていると考えられる。しかし、時間の経過と共に、流量が短期間で減少する様になり、ジェットイングの頻度が徐々に増加し、集水管外壁側では EPS のゲル化が進み流量を減少させる傾向にあった。したがって、固結スケールの発達は少ないと考え気体体積率を 50%程度で注水作業を行うこととした。

「洗浄工」に際しては、当該地周辺の地下水は豊富であることと、当該地までのアクセス道路が狭隘で、水道水を供給するローリータンク車の運航は困難であったため、供給水には周辺の側溝を流下する地下水を分散媒とした（写真 6-3 参照）。供給水に地下水を利用する場合は、MNB 水の中の酵素や界面活性物質が、水道水を利用する場合に比べて豊富になるため気体体積率の増加に伴い EPS のミセル形成と可溶化が進み、固結スケールのキレート作用による結晶構造の破壊も促進されることが考えられる。



写真 6-3 周辺地下水を用いて生成したマイクロ・ナノバブル

6.2.2 仮説の検証と考察

注水作業は上段を下段より先行させ、それぞれ午前と午後各 1 時間、計 2 時間かけて行った。洗浄の要領は表 6-3 の集水井 K に示した通りであるが、注水時には上段、下段とも外挿ホース先端からのオーバーフロー水は視認されなかったことから、MNB 水は全て拡散（浸透）したといえる。

表 6-2 より、集水井 K の流量経時変化を近傍の月降水量データ（気象庁、佐久）と併せて図 6-2 に示す。同図によれば、注水を終了した翌日に一旦流量を低下する。これは剥離したゲル状の EPS が相転移により高濃度ゾルになり、高粘度のため水抜き穴が一旦閉塞されたためと考えられる。その後、平均流量は増加し続け約 5 カ月後の平均流量が洗浄前の 3 倍程度になるまで急

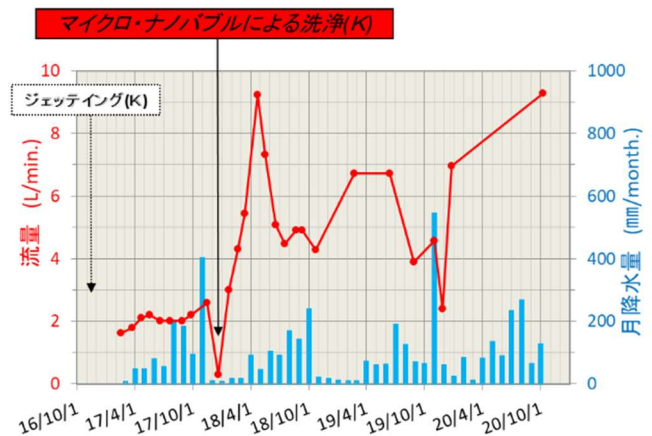


図 6-2 流量経時変化図(集水井 K)

増する。この間、膨大な数のマイクロ・ナノバブルは VP50 表面の微視的な窪みに拡散し長期滞留効果によって界面に固着している EPS が無くなるまでこれを剥離・分解したと考えられる。そして、半年後には目詰まりの無い状態になり、地下水の流量(L/min.)を変動させながら概ね 5 程度で流入する様になると考えられる。したがって、健全度(レベル)はその後レベル (1~2) を維持し、流量は降水量に対して鋭敏な挙動を呈するようになる。図 6-3 によると、ATP (RLU)も洗浄後の半年間程度は 25 未満であり、「バイオフィームが殆ど無い状態」になっており、図 6-2 の流量変化程度と調和しているが、その後は流入する地下水の基質の変動によって 25 以上の「バイオフィームが存在する状態」になる場合もある。一方、図 6-2 のジェッティング後 1 年間の流量の経時変化状況についてみると、流量自体少ないことに加え、その間の変動幅も小さく、集水管外壁側等のスケールがジェッティングでは除去されなかったといえる。しかし、集水管外壁側のスケールは其後のマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄によって除去され、集水機能を回復させることができおり、仮説の検証の一つになると考えられる。なお、図 6-2 で注水後の流量がピークを示す時期は、図 6-3 に示す注水後の ATP (RLU)が減少して 0 になる時期とほぼ一致しており、注水後 5 カ月間のマイクロ・ナノバブルは VP50 表面の微視的な窪みに拡散し長期滞留効果によって界面に固着している EPS を除去していたと考えられる。この後は、バイオフィーム内での菌体増殖は進むが「バイオフィームが存在する」状態のクォーラムセンシング制御下で微生物は不活化され、EPS の生産と分解が長期間にわたり好循環に作用する様になると考えられる (図 1-5 参照)。図 6-3 には排水口における採水試料による室内試験のうち「鉄及びその化合物(mg/L)」の結果を併せて示しており、注水後 6 カ月間でマイクロ・ナノバブルによる EPS の剥離と分解が進むが、水酸化鉄等のミクロスケールの脱離と分

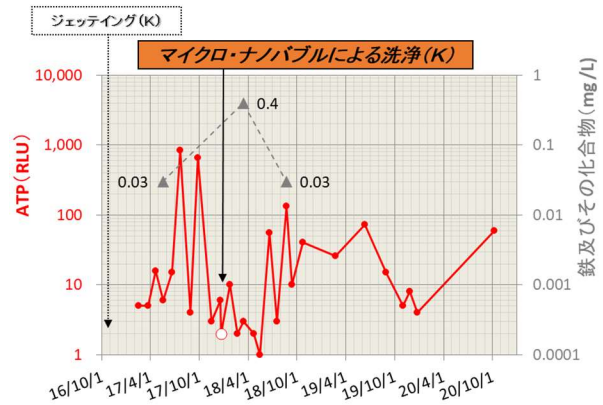


図 6-3 ATP【水】(RLU) 経時変化図(集水井 K)



図 6-4 濁度 (NTU) 経時変化図(集水井 K)

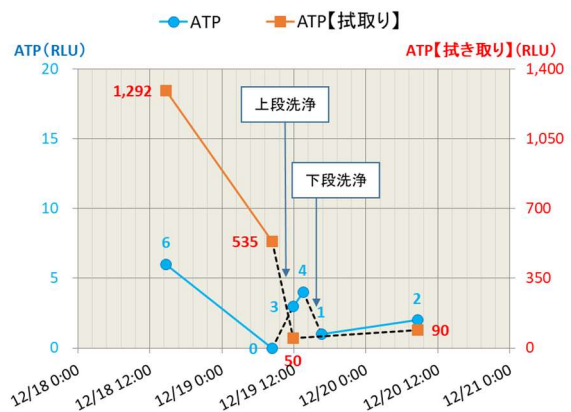


図 6-5 注水時 ATP (RLU) の変化(集水井 K)

解は遅れるため、一旦急増した後 8 カ月後には地下水から供給される界面活性物質(フルボ酸等)のキレート作用により結晶構造が破壊され、注水前と同程度に減少すると考えられる。

一方、地下水の濁度 (NTU) は図 6-4 に示す通り注水後 5 カ月で ATP(RLU)が 0 になった後急激に低下し、変動幅をやや小さくしながら洗浄前と大差の無い状態になっていることから、この間 EPS が徐々に分解され濁度も低下したと考えられる。同図に併記した「有機物【TOC】(mg/L)」は「鉄及びその化合物(mg/L)」と同様、固結スケールは高分子修飾されていることから、有機物は一旦急増するが 8 カ月後には地下水の有機物が反映され注水前と同程度に減少すると考えられる。

なお、集水管外側を含め注水時の短期的なバイオフィームの状態を類推するため、注水直前、注水中、直後に排水管吐口で検水による ATP(RLU)と排水管吐口内壁面の ATP【拭き取り】(RLU)検査を実施した。結果は図 6-5 に示す通りであり、注入した MNB 水の ATP(RLU)が 0~2 であったことを考えると、洗浄前日に 6 であった排水の ATP(RLU)は翌日には 2 に低下しており、上段と下段の注水によって集水管外壁側のバイオフィームも含めその大半を除去できたと考えられる。また、ATP【拭き取り】(RLU)も注水前は $10^2 \sim 10^3$ オーダーであったが、注水後は 10^1 オーダーに低下しており、集水管内壁面のバイオフィームは MNB 水によって除去されていると考えられる。

次に、注水前の集水管外壁側の目詰まりの状況と注水後の集水管外壁側のスライムの状況を水頭の経時変化により類推するため、上段の集水管 (上 1), (上 3) と下段の集水管 (下 7), (下 9) および (下 11) の口元の管理孔内に設置した水位計による約 1 年間の集水管別の水頭経時変化を図 6-6 と図 6-7 に示す。

まず、注水時の目詰まりの状況を両図の注水時の水頭で推察すると、上段注水時の水頭は注水前より最大で約 10 cm 高い G.L.-8.4m 付近まで上昇している (図 6-6 参照) のに対し、下段注水時には最大で約 60 cm 高い G.L.-12.1m 付近まで上昇しており (図 6-7 参照)、下段のスケールは上段よりも多いことが解る。また、上段注水時には外挿ホース内への吐出水を視認されていなかったことから、注水時に現

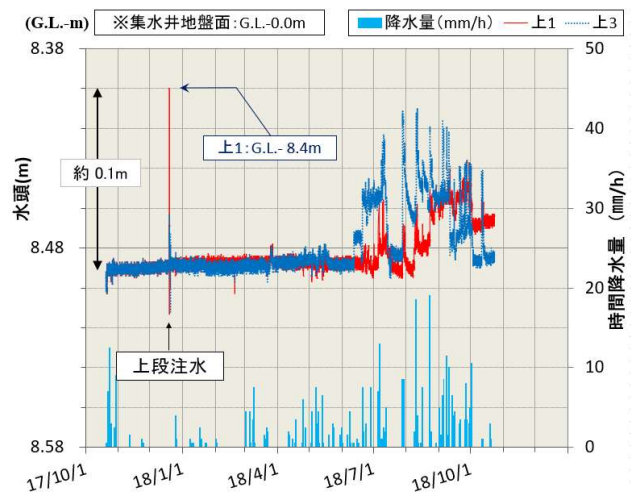


図 6-6 集水井K上段注水時水頭経時変化図

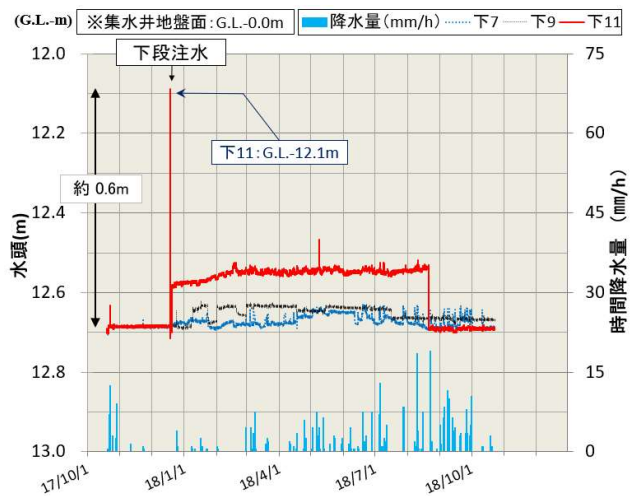


図 6-7 集水井K下段注水時水頭経時変化図

れた水頭は目詰まり物質としてのペリクルを剥離するに要した水圧と考えられる。

一方、図 6-6 と図 6-7 の注水後 10 カ月間の目詰まりの状況を水頭の経時変化で比較すると、上段では注水後 6 カ月後の頻繁な集中豪雨により表層地すべり土塊の比較的大きなサイズの基質が集水管外壁に流入することにより、水頭が比較的短期間で小刻みに変動した可能性が高い（図 6-6 参照）。これに対して、下段では注水直後からそれぞれの集水管が異なる変動傾向を示すが、注水後 6～8 カ月後には収束する傾向を伺うことができ、図 6-2 や図 6-3 と調和的である。

集水井 K では、この後も 5 年間にわたり健全度（レベル）1～2 を維持できるようになり、これまでのここでのジェッティングの維持間隔（1～3 年）を大きく上回る結果になった。

これは、MNB 水が拡散しバイオフィルムを剥離・分解することにより、地下水からバイオフィルム内に取り込まれる酵素や界面活性物質と微生物の生産する EPS のバランスが良くなり、微生物を長期間にわたりクォーラムセンシング制御下に置くことができたためと推察される。

以上のことから、集水井 K の様に健全度（レベル）2 の EPS 優勢で固結スケールの比較的小さい集水井の場合は、気体体積率が 50% で十分洗浄効果を発揮すると考えられる。

6.3 ケーススタディー2（集水井健全度（レベル）：2～3）

6.3.1 注水前の集水井 T の状況

集水井 T は砂、れき等からなる段丘上流部に配設されており、図 6-8 の展開平面図に示す通り上下 2 段（比高差 0.4m）からなる。ここでは同図にも示した通り、下流側 5m 付近に地下水観測孔（B-4）が設けられており、水位計が据え付けられている。また、「設置工」では天蓋上に上段用と下段用のヘッダーを設置した（写真 6-4 参照）。

集水井 T では、MNB 水注入作業の約 2 年前にジェッティングを実施しており、管内側の閉塞物はほぼ除去されているが、作業前には写真 1-1 に示した通り干天時に上段の集水管（上 1、上 2）の吐口で流亡した EPS の離脱した高濃度ポリマーが視認されている（写真 1-1、写真 6-5 参照）。（上 1）と（上 2）の横ボーリング先端は上流側に位置する砂防堰堤付近まで配設されており、沢筋沿いの水位の変動が激しいことからく降雨の

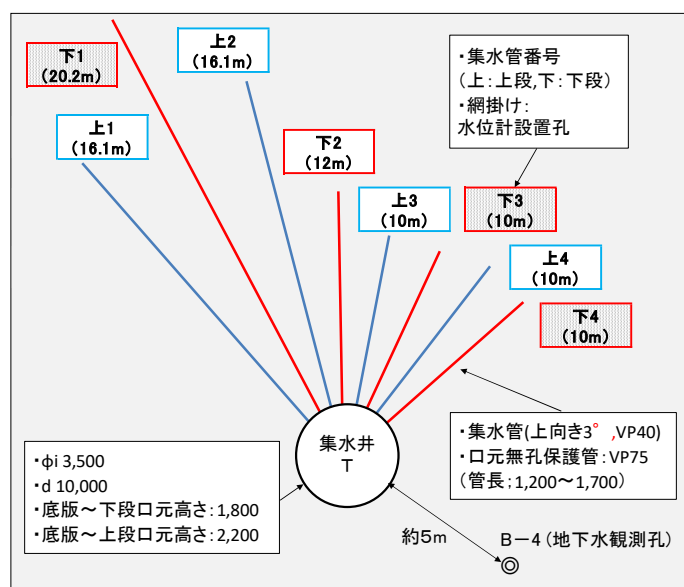


図 6-8 集水井 T 展開平面図

都度沢部から高濃度の養分等の基質が繰り返し供給されたため、EPS が大量生産され、目詰まりの原因になっていると考えられる。

これらの事象も図 2-2 と併せて閉塞物形成要因の仮説の検証材料になる考えられる。

集水井 T では、ジェットイング前後 6～7 カ月間で月 1 回程度の流量測定を実施している。結果は表 6-1 に示した通り、ジェットイング前の流量(L/min.)は 0.08～2.5, ジェットイング後の流量 (L/min.) は 0.14～2.75 であった。また、注水前 1 年半の集水井坑内観察結果と検尺の結果、ライナープレートや集水管に異常はみられず、設計通りであったことから健全度は図 2-3 より「レベル 2～3」に相当すると判断される。なお、ジェットイングによる洗浄効果は殆どなく、バイオフィームは「③対数増殖期前期」～「④対数増殖期後期」の状態にあり、降雨と干天の繰り返し頻度が多い外的条件下で短期間のうちに低濃度と高濃度ポリマーの相転移が加わり、ゾルーゲル転移を繰り返しながら降伏値を漸増させていると考えられる。



写真 6-4 上段(左), 下段(右)のヘッダー据付状況



写真 6-5 乾燥状態の EPS (上 1)

6.3.2 仮説の検証と考察

集水井 T における健全度(レベル)は 2～3 で固結スケールの発達した状況にあると考えられたことから、洗浄作業は注水時の風量を表 6-3 に示した通り①と②の 2 種類について行い、供給水については①では水道水, ②では地下水を使用した。そして, 1 回目(①)の風量は健全度(レベル)2 が優勢と考え、注水時間を上段と下段で各 1 時間の計約 2 時間, みかけの気体体積率 60%とし, 2 回目の風量(②)は健全度(レベル)3 が優勢と考え、注水時間を上段 2 時間, 下段 1 時間の計約 3 時間, みかけの気体体積率を 80%として洗浄効果の違いを比較・検討した。



写真 6-6 水酸化鉄のミクロスケール (上 1), (下 1)

①, ②共, 上段注水時には外挿ホース上端からのオーバーフロー水は視認されなかったが, ライナープレート水抜き穴等から逸水が視認された。また, ①の下段注水時に(下 1)の水位計を設置している管理孔上端からオーバーフロー水が視認された。そして, ①の下段注水 30 分後, 写真 6-6 に示す様に(上 1)と(下 1)の茶褐色に変色した口元外挿ホース管底には水酸化鉄スケールの断片がミクロスケール集合体のスラッジとして視認された。しか

し、②の下段注水後にはミクロスケールは分解され視認されずホースの変色も無くなっていた。このことから、先端が砂防堰堤付近まで到達している(上1)と(下1)では、降雨による沢筋の水位の変動幅が大きいと、大気中や山腹斜面からの微生物や基質が豊富となりEPSのゲル化と固結スケールの発達形成が進んだと考えている。このため集水井Tの目詰まりは激しく、1回目に実施した①の水道水による気体体積率(60%)の注水では、スケールを十分除去できなかったと考えられる(写真6-6 参照)。しかし、①の1年3か月後に実施した2回目②の地下水による気体体積率(80%)の注水は、ゲル化したEPSや固結スケールをある程度除去でき、目詰まりを解消できたと考えられる。この様に判断した理由を以下に論述する。

①と②の洗浄効果の違いは図6-9に示す(下1)、(下3)および(下4)の注水時における水頭経時変化をみても明らかである。即ち、「観測工」の結果より①と②の注水前の健全度(レベル)は2~3と同じになるが(表6-3 参照)、①の注水時の水頭はG.L.-3.3mで管理孔の約5mの高さまで上昇しオーバーフローしているのに対し、1年3か月後に実施した②の注水時の水頭はG.L.-6.0mで管理孔の約2mの高さになり、①よりも低下しオーバーフローもなくなっている。これは1回目の洗浄によってEPSやスケールがある程度除去されたが、脱離したスケールが(下1)や(下3)の水抜き穴を閉塞するため、水頭は不規則で不連続な挙動を呈するようになると考えられる。したがって、この集水井の様にゲル化したEPSやスケールが発達しており健全度(レベル)2~3の集水井の場合は、分散媒に地下水を用い気体体積率を80%以上にして洗浄することが望ましいが、洗浄を繰り返すことで養生期間中にフルボ酸が固結スケールに直接関与できる様になるため結晶構造を破壊し、次第に流量を回復していくと考えられる。

このことは、図6-10の①と②の注水前後半年間の流量経時変化状況をみても明らかである。同図には、近傍の月降水量データ(気象庁 藤岡)を併せて示してお

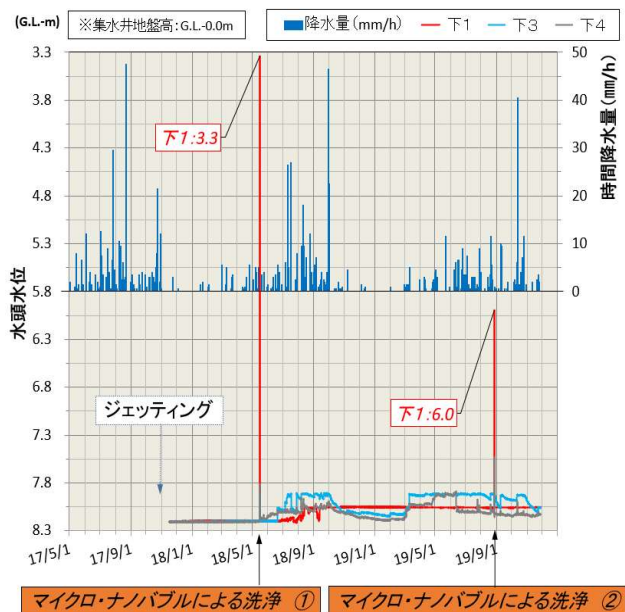


図 6-9 集水井 T 洗浄時水頭経時変化図

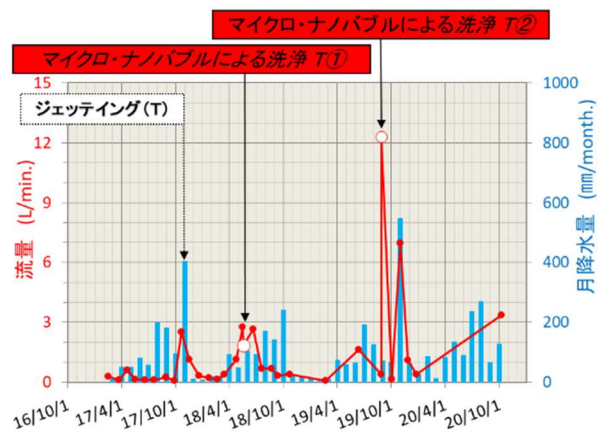


図 6-10 流量経時変化図(集水井 T)

り、ジェットイング時や①の注水後の流量と降水量は連動しているとはいいい難いが、②の注水翌日（2019/8/29）の流量は 12.3(L/min.)と大きく、その後の流量も月降水量と明瞭に連動するようになる。特に、②の注水約 2 カ月後の 2019/10/31 の「観測工」では、底盤に仮置きしておいた作業用足場板が茶褐色に変色し浮上した痕跡と、清澄になった底盤貯留水を視認できた(写真 6-7 参照)。これは、表 6-2 にも示した同年 10/12 の台風 19 号の豪雨（月降水量 540.5 mm）による影響で集水管から大量の排水があったためと思われる。

したがって、②の洗浄後の 14 カ月間の流量測定から得られた健全度(レベル)は 1～3 となり、洗浄前 30 カ月間の流量測定から判定されたレベル 2～3 に比べてランクアップしていることが確認された。

一方、ジェットイングと 2 回の注水（①, ②）前後の中期的な検水による ATP(RLU)の結果をまとめ図 6-11 に示す。①注水後の ATP(RLU)の最小値は注水 4 カ月後に 16 になるが、②の場合は繰り返しの効果により更に短期間の注水 1 カ月後で 7 となり、共に「バイオフィルムの殆ど無い状態」まで低下していた。しかし、ジェットイング 4 カ月後と①注水後の ATP (RLU)は、3 と 16 まで低下しているにも拘らず、流量は回復しておらず(図 6-10 参照)、微生物の不活化には至っていないと考えられる(図 2-6 参照)。

また、図 6-11 に併記した室内試験による「鉄及びその化合物」は、①注水前に比べて注水後に増加しており、写真 6-6 を支持する結果となっている。

一方、注水時におけるマイクロ・ナノバブルの風量の違いによる ATP(RLU)を比較すると図 6-12 に示す様になり、注水後は検水と拭き取り検査共に①注水時（●, ●）に比べ②注水時の方（▲, ▲）が低くなる傾向を示す。また、注水翌朝の検水による ATP (RLU)は①注水時に 61, ②注水時に 18 となっており、①注水では「バイオフィルムが存在する状態」であったが、②注水では「バイオ

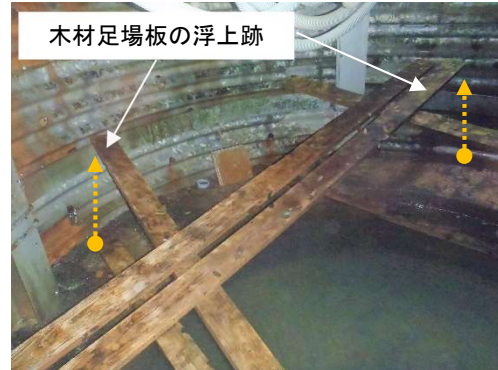


写真 6-7 貯留水位上昇の痕跡(台風 19 号)



図 6-11 ATP【水】(RLU)経時変化図(集水井 T)

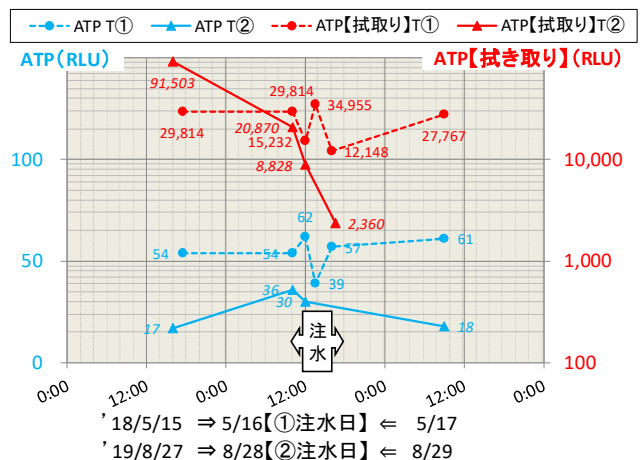


図 6-12 注水時 ATP (RLU) の変化 (集水井 T)

フィルムが発生が殆ど無い状態」であったと考えられる。このことは、ATP【拭き取り】(RLU)が①の注水では注水の直前と直後で 10^4 オーダーのままで殆ど変化していないが、②の注水では、洗浄直前と直後で 10^4 オーダーから 10^3 オーダーにワンオーダー低下していることと調和している。なお、ジェッティングの場合も①注水時の状態と類似していたものと思われ、ATP(RLU)が 25 未満であっても、常に健全度（レベル）がランクアップする訳ではない。

また、集水井 T の下流側 5m 付近には図 6-8 に示した通り、地下水観測孔(B-4)が設けられている。①と②の異なる注水日における注水時の孔内水位波形を同一時刻歴で整理し、作業内容と併せて図 6-13 に示す。これによると、①と②の注水作業前の孔内水位に違いはあるものの、共に上段注水後に上昇する傾向を示しており MNB 水は拡散し、高粘度の EPS を剥離したと考えられる。また、①注水時は水位上昇までの初動時間が②注水時に比べて遅く、上昇勾配も小さい。このことから、①の注水による洗浄の効果は②の注水に比べて低かったといえる。

この結果と図 6-9～図 6-12 の結果を併せて考えると、集水井 T の様にゲル化の進行した EPS や固結スケールが微視的な窪みにも固着して発達した横ボーリングを有する集水井の場合、風量を増やすことでマイクロ・ナノバブルの拡散作用が進み集水管外壁側のスケールを剥離・分解できる。また、バイオフィルム内の微生物を不活化により長期間にわたりクォーラムセンシング制御下に置くことができることが解った。これは 1.2.2 項で論述した予測の検証結果の一つと判断される。

ただし、①と②注水時に用いた洗浄液はそれぞれ水道水と地下水を分散媒とした MNB 水であるため、酵素と界面活性物質を多く含んだ地下水を分散媒としている②の洗浄液としての性能は①よりも優れているといえる。また、①注水後と②注水までの約 1 年 3 カ月の養生期間中に、①注水によって固結スケールが地下水と直接接触する様になり界面活性物質としてのフミン酸がこれを溶かし、キレート作用により結晶構造を破壊するプロセスが有効に機能していた可能性がある。②注水による洗浄効果は①注水と養生期間中界面活性物質の効果が加わった結果であることを考量しておく必要がある。②注水後 4 年間のレベルは 1～3 で、洗浄前に比べて流量の回復した状態を維持できており、これまでのジェッティングによる 1～3 年の維持期間を上回る結果になっている。

以上のことから、スケールが優勢な集水井では、供給水に地下水を用い、気体体積率を 80%以上にして洗浄を繰り返すことでより洗浄効果を発揮すると考えられる。

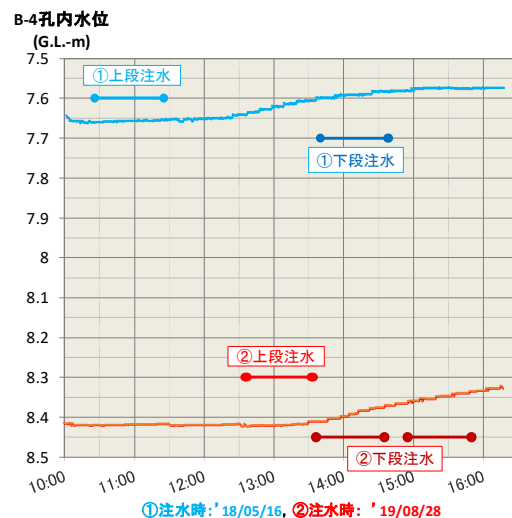


図 6-13 ①, ②注水時(B-4) 孔内水位モニタリング結果

6.4 ケーススタディー3（集水井健全度（レベル）：4）

6.4.1 注水前の集水井 O の状況

集水井 O は粘土、れきからなる土石流堆積物層に位置しており、展開平面図を図 6-14 に示す。同図には表 6-1 に示した 6 カ月間の坑内観察結果と検尺による変状の内容も併せて示す。この集水井は、大規模地すべりに配設された 3 基の集水井の最上流側に位置しており、すべり面深部周辺の地下水は常に染み出し程度でしか排水されていない状態にあった。また、同図に示した通り、集水管①と④は口元が閉塞しており、ジェットティングを実施できる集水管が減少した集水井であり、排水機能を十分に発揮できなくなりつつあると考えられる。更に、「洗浄工」の約 2 カ月前に実施した「設置工」時における「観測工」では底盤貯留水がやや白濁し(写真 6-8 参照)、集水管②、③、⑤、⑥の検尺長は表 6-4 に示す通り、全て設計長よりも長くなっていた。この理由の一つに、集水井建設後の豪雨等によって土塊に供給された地下水が、これら水抜き穴周辺の閉塞物によって排水されなくなり、水圧によって滑動力が抵抗力を上回って発生したせん断力が函体を変形させた可能性を考慮することができる。

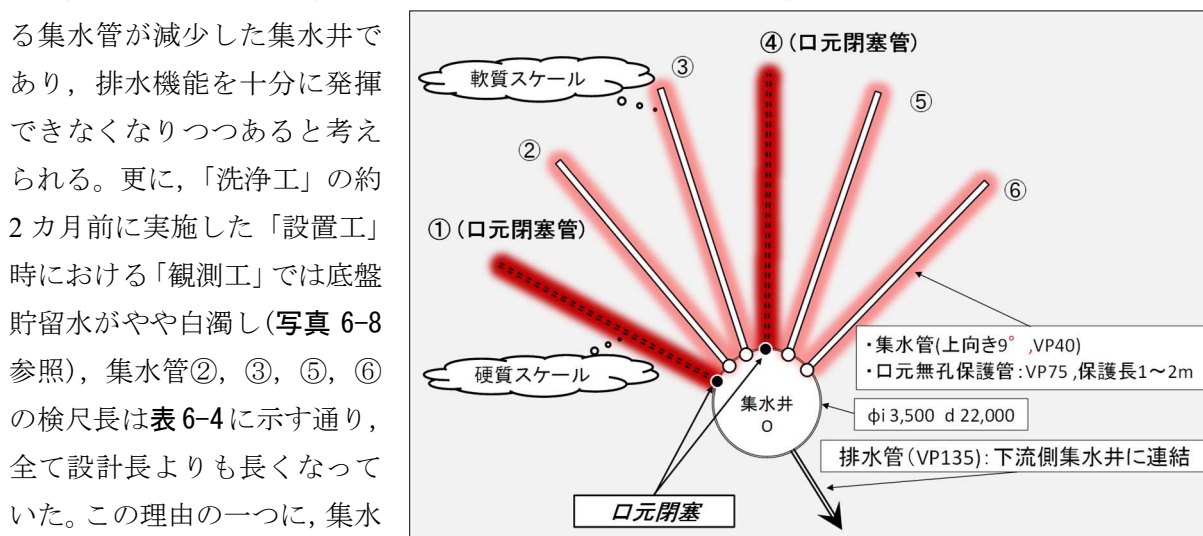


図 6-14 集水井 O 平面展開図

塊に供給された地下水が、これら水抜き穴周辺の閉塞物によって排水されなくなり、水圧によって滑動力が抵抗力を上回って発生したせん断力が函体を変形させた可能性を考慮することができる。

また、ここでの流量測定方法は、排水がカスケード方式で下流側に連結された排水管を流下し 2 基の集水井とブレンドされ流末まで 174m 流下する。しかし、下流側の集水井の排水管吐口が高位置にあり測定不可能であったため、本集水井の各集水管の吐出流量を合計する方法に依ることとした（表 6-2 備考欄 参照）。

集水井 O では 1 年前にジェットティングが実施されているが、注水前の状



写真 6-8 集水管口元状況（左から①～⑥、①・④：閉塞管）とやや白濁した貯留水

表 6-4 集水管別検尺長と外挿管立上げ長

集水管番号	①	②	③	④	⑤	⑥
検尺長(m)	0	35.5	35.44	0	35.5	35.38
設計長(m)	35	35.0	35.0	35	30.0	30.0
外挿管立上長(m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

況から判断する限り，集水管外壁側にはゲル化の進行した EPS と固結スケールが広範囲に分布していると考えられ，注水前の健全度は図 2-4 より「レベル 4」に相当すると判断された（表 6-1 O 参照）。これをバイオフィルムの形成過程でみると図 2-2 と図 2-5 より「④ 対数増殖期後期」に当たり，集水管外壁側での EPS の離散とスケールの固結化は進行していると考えられる。

6.4.2 仮説の検証と考察

健全度(レベル)が 4 の集水井 O の集水管①と④の口元は硬質なスケール等で閉塞されているため，ジェッティングが不可能な上，本システムで MNB 水を照射するためのポリブデンパイプの挿入も不可能となる。このような状態になると，集水井全体の集排水機能は大きく低下することになるため，リボーリング¹⁾等により集水量を回復する方法しかないが，集水井毎に技術的，経済的な制約を受け実施に際しては困難を伴う場合も多い。

しかし，マイクロ・ナノバブルによる洗浄の場合は少なくともこの様なリスクを軽減した方法で課題を克服することができる。即ち，MNB 水を注入するポリブデンパイプは，写真 6-9 に示す様に集水管（②，

③，⑤，⑥）の口元から高さ約 4m まで立ち上げた外挿ホースの中を通り，先端照射部はそれぞれの集水管の最奥部に達している。そして，①と④の集水管の口元から写真 6-8 に示した様にパイプ（高さ約 4m）を立ち上げておくだけで，②，③，⑤，⑥の最奥部から流下してきた MNB 水の拡散域は図 6-15 の

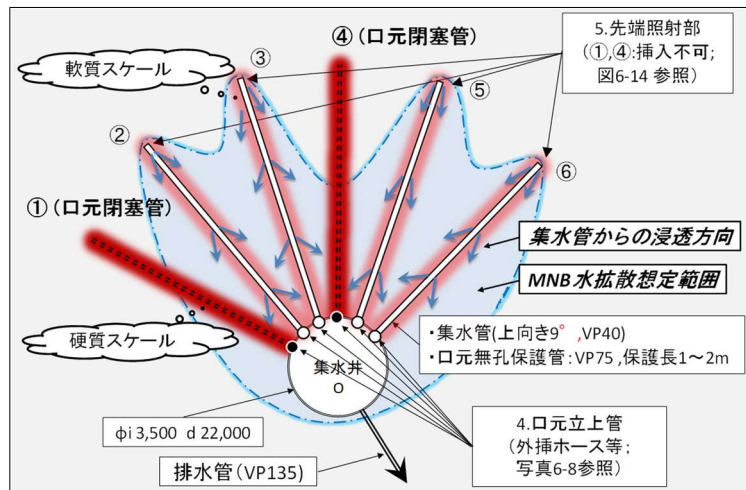


図 6-15 MNB 水拡散想定範囲イメージ

様なイメージで拡がると考えられる。つまり，②，③，⑤，⑥の最奥部から供給された MNB 水は，拡散しながら隣接する口元閉塞管（①，④）奥の地盤と集水管外壁の間に形成されたスライムを除去しながら，水抜き穴を介して閉塞管内に流入後，土粒子や硬質スケール等固相の間隙に形成されたゲル化した EPS を剥離・分解し，ミクロスケールを分解しながら高濃度～低濃度ゾルになってパイプ頭部からオーバーフロー排水される。



写真 6-9 外挿ホース上端(集水管②, ③, ⑤, ⑥)

ここでの洗浄の要領は、表 6-3 の集水井 O の列に示した通り供給水に地下水を用いることができなかったため、閉塞管を有する健全度(レベル)4 の集水井の洗浄になった。そのため、気体体積率についてはコラムを集水井 T②と同じ 8 本とし、注水時間を (I.10:00～12:00), (II.12:20～13:30), (III.14:00～16:00) の計約 5 時間の繰り返し洗浄とすることで 90% とした。

以下、まず集水井 O における本洗浄システムの中期的な効果について論述する。

表 6-2 より集水井 O の流量経時変化を近傍の月降水量データ(気象庁, 聖高原)と併せて図 6-16 に示す。ただし、ここでの流量は、既述の通り排水ボーリング吐口における測定が困難であったため、計量弁による 6 本の集水管口元での吐出量(表 6-2 備考欄 内訳 参照)の合計になっている。

図 6-16 によると、10/31 の流量は洗浄 2 カ月後の豪雨(10/12 の台風 19 号, 時間雨量約 250 mm)により増加している。ここで、流量を測定できた集水管は閉塞管の①と④であり、集水管②, ③, ⑤, ⑥吐口からの吐出水を確認することはできなかった(表 6-2 参照)。その後の流量も①からの吐出水のみの測定になる。

写真 6-10 には 10/31 の測定時に撮影した集水管口元の接続部の状況と貯留水の状況を示すが、貯留水は清澄になっており集水管⑤の口元開放バルブ直下の底盤底面には、高さ 10 cm 程度の円錐形の水酸化鉄のスラッジが視認された。これは洗浄注水後にマイクロ・ナノバブルの長期滞留作用により⑤の集水管外壁側に形成されていた EPS が剥離後、ミクロスケールが支持されなくなり豪雨時に流亡したものと考えられる。また、集水管に接続したホース表面をみても底盤コンクリート天端から 1m 程度の高さまで褐色化しており、集水井 T の写真 6-7 でみられた現象と同様 10/12 の集中豪雨によって水酸化鉄を含む地下水が底盤に供給・貯留されたと考えられる。

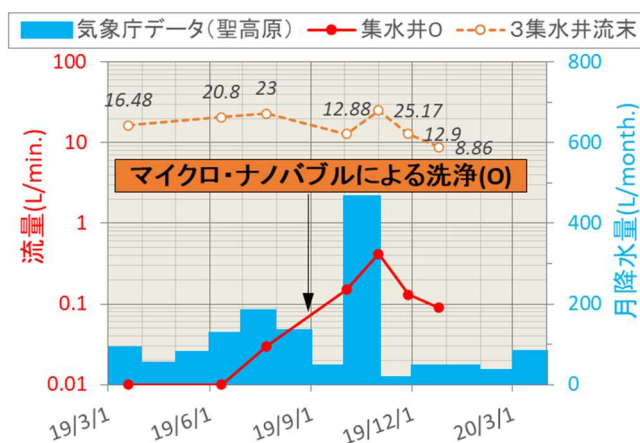


図 6-16 流量経時変化図(集水井 O)

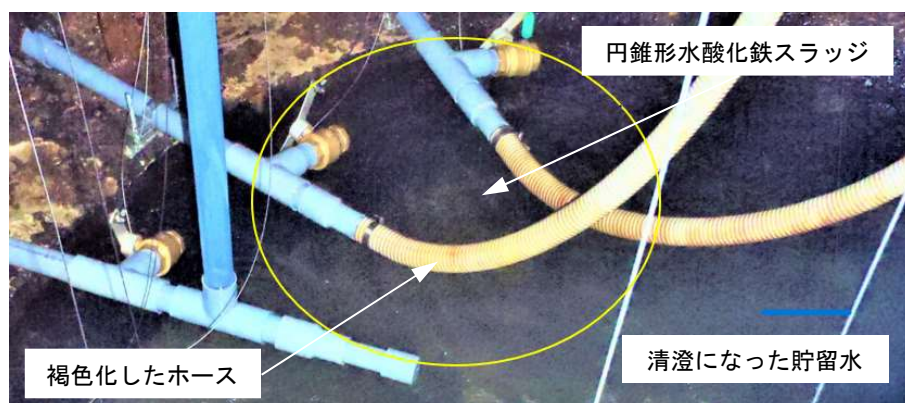


写真 6-10 貯留水位上昇の痕跡(台風 19 号)

更に、図 6-17 に示す洗浄前後の集水井 O 貯留水(赤 実線)と流末排水(赤 破線)の検水による ATP (RLU)の経時変化をみると、10/31 も含め注水後 2 カ月間の ATP (RLU)は 25 未満で「バイオフィルムの発生が殆ど無い状態」を維持できており、図 2-6 の短期指標を満足している。しかし、流量(L/min.)は改善されたものの、1 以上を確認できなかったため、図 2-4 より得られる健全度(レベル)のランクアップを達成できなかった。集水井 O における集水管は、地すべり頭部直下の地下深部に位置する地すべり面付近に配設されているため、地下水位が降雨等の影響により下流側の 2 つの集水井よりも大きく変動すると考えられる。水位の大きな変動は、地下水中に地すべり面付近の豊富なイオンや層状粘土鉱物(ナノシート)等の基質を多くするため、

EPS の中でスケールの要因となるマイクロゲルを形成し易くなる(図 1-10 参照)。また、水位の変動に伴い水温やイオン濃度の変化による影響を受けやすいため、集水管外壁側の EPS の相転移が頻繁になり、ゲル化と水酸化鉄等の固結スケールが発達したと考えられる(図 1-14 参照)。

したがって、今回の注水後の「観測工」では、実施期間が 4 カ月と短かったこともあるが、流量の増加を確認できなかったため、ランクアップを達成していないと判断した。

しかし、注水後の流量の増加(図 6-16, 17 参照)は、②, ③, ⑤, ⑥の 4 本の集水管の最奥部から注入された MNB 水は、隣接する 2 本の口元閉塞管(①, ④)の管外側のバイオフィルムを除去後、管内に浸透して充填していたスライムを脱離・分解したことによる効果と

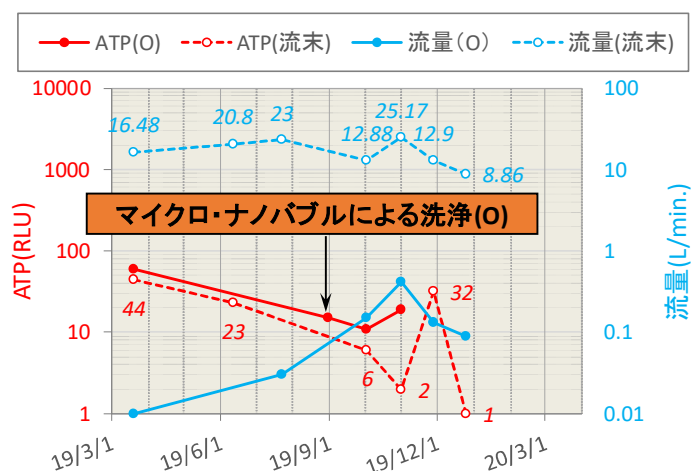


図 6-17 ATP (RLU) ・ 流量経時変化図(集水井 O)

表 6-5 注水時観察事象整理結果一覧表

注水時刻	坑内観察事象	坑外観察事象
I. 10:00~12:00	・集水管①~⑥の口元立上管上端から、脱離した高濃度ゾルがオーバーフロー	・流末での排水 pH の低下と水温上昇(図 6-18)、濁度と電気伝導率の低下(図 6-19)
II. 12:20~13:30	・貯留水の水頭が底盤天端上約 30cm の高さに上昇 ・集水管②, ⑤の口元バルブ開放: 排水は温水となり白濁(写真 6-12) ・数分後、排水はミリバブルとセンチバブルを含む清澄な冷水に急変(写真 6-13)	・2 回目の注水(II)開始 20 分後、下流側の集水井への排水停止 ・その後、流末での排水も停止し、水質測定不能
III. 14:00~16:00	・貯留水の水頭が底盤天端上約 1.8m の高さまで上昇 ・濃霧の発生により視界不良 ・②と④の立上管上端からのオーバーフロー停止(浸透)	・注水作業停止後、底盤貯留水は高粘度となり完全に排水停止 ・翌朝、分解されて高濃度ゾルになり排水復帰

考えられ、この結果と写真 6-10、写真 6-12 の洗浄後、洗浄中の観察事象と併せて考えると、マイクロ・ナノバブルは拡散して界面張力の違いにより固結した水酸化鉄スケールを支持していた EPS を剥離した後(写真 6-12 参照)、球状ミセルを作り炭化水素集合体を分解した後、分解途上にあり EPS に支持されなくなった水酸化鉄が地下水位の急激に変化によって脱離した(写真 6-10 参照)と判断され、1.2.4 項の予測を示唆する資料の一つと判断される。

次に、注水中と注水直後の状況について論述する。

ここでは、集水井 K や T で用いた水位計による水頭測定は行わなかったが、既述の 3 回の MNB 水注入時に坑内と坑外の観察に加え、流末において pH、水温、濁度、電気伝導率の測定を行った。洗浄時刻別に坑内と坑外で観察された事象を整理し表 6-5 に示す。

以下、同表をもとに注水時の状況を時系列で記述する。

- 1) I. で注水直後の MNB 水は、バイオフィルムを剥離しながら全ての集水管の吐口から立ち上げた外挿ホース(②, ③, ⑤, ⑥)と、閉塞管(①, ④)の上端から高濃度ゾルとしてオーバーフローする(写真 6-11 参照)。
- 2) ここでのオーバーフロー水は、拡散したマイクロ・ナノバブルによって、集水管の外壁側に広範囲に形成されていた EPS が一斉に剥離し、ポリマーの絡み合った高濃度ゾルとなって高粘度擬塑性流体に特徴的な流動形態^{2), 3)}を呈する様になると考えられる(写真 6-11 参照)。
- 3) 一方、流末(坑外)での pH は CO_2 の溶解が進み徐々に低下するようになり、同時に脱離した EPS の流亡により流末での水温は上昇傾向を示す(図 6-18 参照)。また、II. の注水停止後、貯留水の水位は底盤コンクリート天端から 30 cm 程度の高さまで上昇する。この時、集水管②と⑤の口元バルブを解放したところ、バルブ開放直後

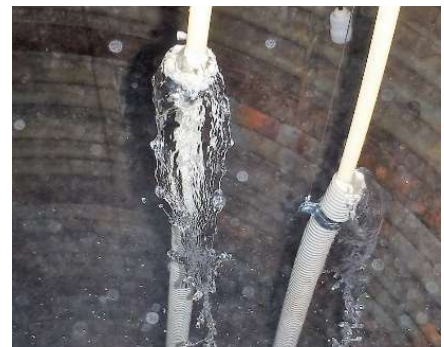


写真 6-11 高濃度ゾルのオーバーフロー

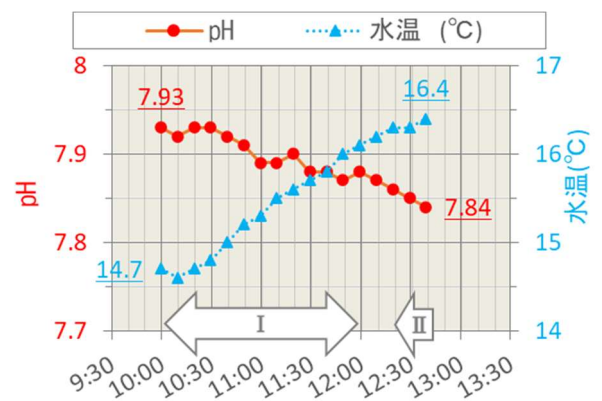


図 6-18 流末での pH、水温変化図



写真 6-12 脱離した EPS の排出状況

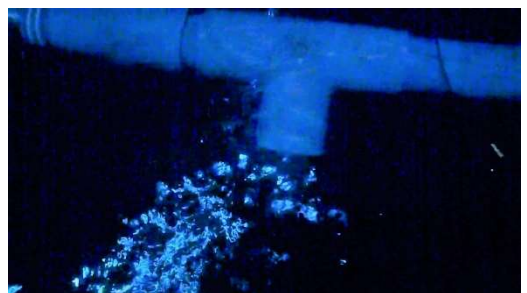


写真 6-13 EPS 排出後のミリバブル吐出状況

の排水は白濁し、触診により水温 17～18℃の温水になっていた(写真 6-12 参照)。
 上述の流末での水温上昇はこの現象と調和している(図 6-18 参照)。

- 4) この白濁物質は MNB 水の剥離作用によって、EPS の脱離したコロイド粒子と考えられ、発生する熱はバイオフィーム内の微生物が図 1-7 に示した細胞内の ATP の加水分解により ADP になる時に放出されるエネルギーの一つであり⁴⁾、自らの生命活動を維持するため EPS のタンパク質成分の保温効果で維持され则认为られる。
- 5) そして、数分後にこの白濁水はミリバブルとセンチバブルを含む清澄で低温の MNB 水に急変する(写真 6-13 参照)。これらの大きなサイズのバブルは、マイクロ・ナノバブルが合体して形成されたものと考えられる。
- 6) また、流末での濁度と電気伝導率は図 6-19 に示す様に、注水開始 20～30 分間で EPS が大量に脱離するためピークに達した後、下流側の清澄で流量の豊富な 2 つの集水井の排水とブレンドされ吸水・膨張しながら高粘度になるため流量は低下し、2 回目の注水(Ⅱ.)を再開後 20 分程度で、(高濃度ゾル)～(ゲル)の状態となり流末への排水の供給が停止する。
- 7) その後、3 回目の注水(Ⅲ.)を再開後は、集水管②と閉塞管④の立上管上端からのオーバーフローはなくなり、注水を繰り返すことにより高濃度になった MNB 水は拡散域を拡げ、閉塞管①と④に浸透していくと认为られる。

上記 6) と同様、3 回の注水(Ⅲ.)が終了した時点で、剥離した高粘度で大量の EPS が底盤に貯留される。そして、排水管呑口からの排水がなされなくなり、坑内に上記が発生し水頭は底盤コンクリート天端から最大 1.8m 程度の高さまで上昇する。

しかし、その後はマイクロ・ナノバブルの分解作用により低粘度化して徐々に流動して排水されるようになり、翌朝には水位低下して流末の流量も徐々に回復する。

以上のことから、集水井 O の様に固結したスケールが発達した集水井については、ここで用いた供給水が水道水であったことを考えると、これらを 1 回の注水で一挙に除去するためには、集水井 T の結果からこれを地下水に変え、気体体積率を 90%以上にすることが望ましい。

なお、洗浄の繰り返し効果については、今後更に詳細な実験を積み重ねていく必要があるが、現在のところ集水井 T での結果をもとに半年から 1 年程度と认为られる(図 6-10 参照)。



図 6-19 流末での濁度、電気伝導率変化図

6.5 まとめ

表 6-1 に示した健全度の異なる 3 つの集水井において表 6-3 の要領で 4 回の異なる総風量で実施した洗浄効果の検証結果をまとめ表 6-6 に示す。

同表には、図 1-8 に基づく注水直後の短期管理指標の判定結果と図 2-3、図 2-4 に基づく中期管理指標の判定結果を併せて示す。

表 6-6 中の短期判定結果と中期判定結果を比較すると、両者は集水井 O を除き一致している。このことから、短期判定結果で ATP(RLU)が 25 未満であることを確認しておくことは中期判定結果で目詰まりが解消された「スライムが殆ど無い状態」を得るための必要条件であり、中期判定結果で洗浄後の健全度（レベル）が洗浄前よりランクアップしておくことは必要十分条件となる（図 2-5 参照）。

同表から、集水井 T、O は、集水井 K に比べて微生物の活性が進んでおり、EPS の増産と離散を起こしやすい環境にあると考えられる

（図 2-5 参照）。本研究

では集水井 O での繰り返し効果の検証を行うことはできなかったが、集水井 T の結果から、この繰り返し周期はマイクロ・ナノバブルの持つ長期滞留作用を利用することで半年から 1 年程度が妥当と考えられるが、今後更に実験を重ねていく必要がある。

一方、洗浄結果から推定される健全度（レベル）のスライム性状の関係と

レベル別の気体体積率の関係を表 6-7 と図 6-20 に示す。

表 6-7 より、健全度の高い集水井（レベル 2）のスライムはゾル状態の EPS が主体となるが、健全度の低い集水井（レベル 3,4）程、高濃度ゾルやゲル化した EPS、高分子修飾された固結スケールが主体になっていくと考えられる。また、図 6-20 よりレベル 2 と 3 の気体体積率の差は 30%程度と大きいのに対

表6-6 管理指標と集水井別洗浄効果判定結果一覧表

短期管理指標：注水後の検水：ATP(RLU) 《図1-8による》		短期自主管理基準：25未満 (バイオフィルムの発生が殆ど無い状態)			
洗浄前	洗浄前後の健全度(レベル) 《図2-4、図2-5 による》	健全度(レベル)：b(2～4)とする			
洗浄後		健全度(レベル)：a(1～4)とする			
中期管理指標：洗浄前後の健全度(レベル)比較		中期自主管理基準：b<a(洗浄後のランクアップ)			
洗浄 ・ 注水別	項目	集水井名			
		K	T		O
			①	②	
注水時	気体体積率 P(%)	29	44	83	80
注水後	ATP【水】(RLU)	2	61	18	15
注水後	短期判定結果	OK	NG !	OK	OK
洗浄前	流量(L/min.)	1.62～2.6 【10ヵ月】	0.14～2.75 【6ヵ月】	0.07～2.65 【15ヵ月】	(0～0.03)※ 【6ヵ月】
洗浄後		3～9.2 【12ヵ月】	0.31～2.65 【5ヵ月】	0.13～6.97 【14ヵ月】	(0.09～0.42)※ 【4ヵ月】
洗浄前	健全度(レベル)	2	2～3	2～3	4
洗浄後		1～2	2～3	1～3	4
洗浄後	中期(洗浄)判定結果	OK	NG !	OK	NG !

※集水管の流量の合計

表6-7 洗浄結果から推定されるレベル別スライムの性状

健全度(レベル)	2	3	4
注水時オーバーフロー	なし	あり	
スライム	EPS	(低濃度ゾル) ~ (高濃度ゾル) ~ (ゲル)	
	スケール	(軟 質) ~ (硬質)・(固 結)	

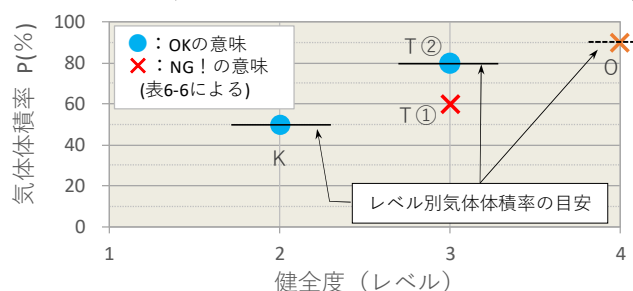


図6-20 健全度(レベル), 気体体積率関係図

して、レベル 3 と 4 の差は 10%程度と小さくなっていることから、気体体積率は固結スケールの有無に大きく左右されると考えられる。ただし、これらは供給水に酵素や界面活性剤の豊富な地下水を使用した場合の目安となるため、これらコロイド粒子の濃度の違いによっては異なる結果になる可能性はある。

健全度（レベル）とバイオフィルムの形成状況には図 2-4 に示した通り、ある幅を持った関係にあると考えられるため、実際の注水時には健全度（レベル）別の総風量を図 6-20 に示した気体体積率を目安に洗浄計画を策定することになる。また、固結スケールが主体の集水井等でランクアップがみられなかった場合には半年から 1 年の養生期間後に再度 MNB 水の注入を行うことで、ランクアップするまでこれを繰り返すことになる。

一方、化学反応が進んだ固結スケールを持つ集水井には、マイクロ・ナノバブルの適用は難しく集水機能の向上は見込めないとする考え方もある。これは、例えば集水管の口元まで管内に固結したスケールで閉塞されている様なケースになるが、本洗浄システムは図 4-1 に示した通り、マイクロ・ナノバブルを照射するためのポリブデンパイプを集水管の最奥部まで挿入する必要があるため、この様な集水管に本洗浄システムを適用するためには、予めジェッティング等により通管のための管内清掃が必要になる。ただし、頻繁な管内清掃作業は集水管の損傷にも繋がるため、この様な状態になる前にマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄による予防措置が有効となる。

究極すれば、健全度の高いレベルが 2 程度の集水井については、集水管外のスライムが比較的少なく、これまで通りのジェッティングによる管内側の清掃で排水機能を確保できるが、予防保全の観点からマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄を行う事がリーズナブルと考えられる。しかし、健全度の低いレベル 3～4 の集水井については、ジェッティングによる管内清掃で排水機能を確保することは難しいため、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄により、集水機能の回復のため気体体積率や洗浄の繰り返し間隔・回数等についての検証を行う事により可能となる。この洗浄作業は、ライフサイクルコスト削減のための修繕⁵⁾に位置付けられ、この作業によるライフサイクルコストの検証については次章 7 章で論述する。

参考文献

- 1) 林野庁計画課施工企画調整室：地すべり防止施設の長寿命化について，日本地すべり学会関西支部シンポジウム「施設長寿命化の方法と限界」講演 PPT，2018
- 2) 小野木重治：高分子系の流動特性，高分子 Vol. 20，No. 229，pp. 254-266，1971.
- 3) 西村太良：高分子粘性流体の流れ，繊維工学，繊維機械学会誌 Vol. 42，No. 10. pp. 523-527，1989.
- 4) 二井將光：生命を支える ATP エネルギー メカニズムから医療の応用まで，講談社，pp. 35, 45, 2017.
- 5) 奥田修一：L C C（ライフサイクルコスト）とインフラ長寿命化，pp. 52-57，2019.

第 7 章 ライフサイクルコスト

7.1 マイクロ・ナノバブルのライフサイクルコスト縮減効果

これまで実施してきたジェットリングは健全度の高いレベルが 2 程度の集水井の集水管の排水機能確保のための日常的な「維持作業」として有効である^{1)~4)}。しかし、健全度の低いレベル 3~4 の集水井になると、集水管外壁側のバイオフィームが成熟しゲル化した EPS と高分子修飾された固結スケールが増産されるため、これらの除去が困難になるため集水機能を回復させるための補修方法として有効とはいえなくなる。特に、閉塞管を有する集水井の場合、ジェットリングの作業自体不可能になるため、この課題を克服できないままリボーリング等の更新を行わざるを得なくなりコスト高となる。

これに対し、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは、横ボーリングの集水機能の回復に主眼を置いた新技術の「修繕作業」に位置付けられる。これまで、集水井横ボーリングの集水機能を回復させる修繕手法は無かったが、本洗浄システムでは目詰まりを解消し劣化前の状況まで回復させることができる。また、この修繕時期については、流量による健全度（レベル）を設定して客観的に診断でき、アセットマネジメントの考え方で管理している複数の集水井の修繕順位の設定も可能になる（2.5.1 項 参照）。ここでの健全度（レベル）は横ボーリングの健全度（レベル）であるが、集水井全体をライフサイクルコストの視点から評価する「対策不要」、「経過観察」、「要対策」

1),2)の 3 段階の健全度（巻末の引用図表 1 参照）は、「レベル 1~2」、「レベル 2~3」、「レベル 3~4」に対応するものと考えられる（図 2-3、図 2-4 参照）。

一方、横ボーリング等にジェットリングとマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムを適用した場合の劣化曲線とコストの経年変化のイメージを比較し図 7-1 の上段と下段に示す。

ジェットリングの維持サイクルは、これまで集水機能を回復させることのできる修繕技術自体が不在であったことから、排水量の減少に伴い短くなる傾向にあったの

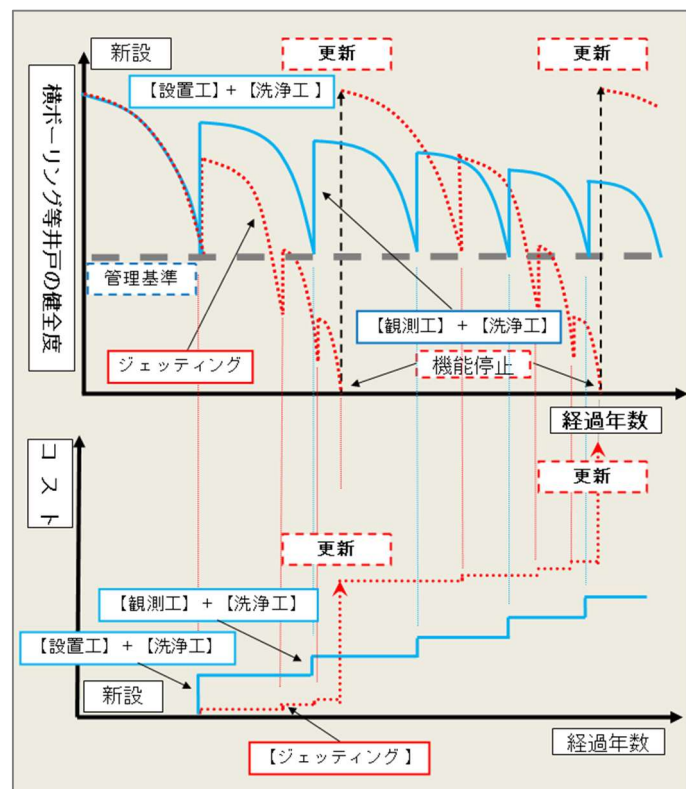


図 7-1 集水井等の工法別劣化曲線³⁾とコストのイメージ

が現状である。ジェッティングは図 7-1 の赤点線で示した集水管の流量確保のための維持作業に相当する。適用実験を行った集水井 O の様に「レベル 4」の横ボーリングを有する「要対策」の集水井の場合は、ジェッティングを繰り返し行っても流量が回復することはない、その時点で更新コストが必要になり、コストが嵩むばかりとなる。また、このような健全度(レベル)の低い集水井では、閉塞管が増える傾向にあると考えられることから、ジェッティングを実施できる集水管の本数自体が減少していく。このような状況になると、短期的な維持コストはみかけ上は安くなっていくが、中期的には更新時期が早まることになりライフサイクルコストの高騰に繋がる³⁾。

6.4 節と 6.5 節で論述したとおり、健全度の低い「レベル 4」の集水井横ボーリングのランクアップを実現するためには、供給水に地下水を用いマイクロ・ナノバブルの気体体積率を 90%以上にして注水を繰り返すことで可能になると考えられる。注水の繰り返し回数や養生期間については、今後追加検証が必要と考えられるが、集水井 O では 1 回の洗浄で健全度(レベル)のランクアップこそ無かったものの、スライムの剥離と分解による流量の回復を確認できたことから、半年から 1 年後に再洗浄を行う事によりランクアップできると考えられる。

また、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムによる修繕作業は、健全度の低い横ボーリングほど 1 回の注水で機能回復し易いことから、横ボーリングの健全度のランクアップを図りながら、ライフサイクルコストの縮減が可能になると考えられる。これは、マイクロ・ナノバブルはその小ささ故の物理・化学的な浸透・剥離・分解作用が閉塞物の除去に寄与することで可能になる。短期的なコストは「設置工」によるイニシャルコストの影響でやや大きくなるが、奥田が指導している通り⁵⁾、ライフサイクルコストで最も重要な修繕コストは、劣化の度合いが軽微な「レベル 2～3」の段階で「洗浄工」による修繕を実施する方が、ライフサイクルコストの縮減に効果を発揮すると考えられる。

これを検証するため、適用実験を実施した 3 つの集水井のライフサイクルコストを試算する際の基礎資料となるジェッティング時の維持サイクルと、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄実施後の修繕サイクルを一覧表にして表 7-1 に示す。

表7-1 集水井別維持，修繕ライフサイクル比較一覧表（2023年12月現在）

主要項目		集水井名		
		K	T	O
建設年度		2001	1999	1999
健全度(レベル) ^{※1}	洗浄前	2	2～3	4
	洗浄後	1～2	1～3	4
維持サイクル ^{※2}	洗浄前	2～3年	1～3年	1～3年
修繕サイクル ^{※3}	洗浄後	5年	4年以上	4年

※1 図2-4による集水井横ボーリングの健全度(レベル)

※2 ジェッティングの維持周期

※3 MNB水の注入による修繕周期

既述の通り、これまでの集水井の横ボーリングの長寿命化策としては、ジェッティングにより集水機能を確保する維持手法しか無かったため、集水井 O のように外的環境の劣悪な集水井の場合は、流量を回復するための修繕を行わない限り、建設後 10～20 年の短期間で機能を停止することになり、ライフサイクルコストの高騰に繋がると考えられる。

図 7-1 下段のイメージ図をみても、初期段階でのマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムの修繕コスト（青実線）は、ジェッティングによる維持コスト（赤点線）に比べて割高にならざるを得ない。しかし、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは「観測工」での流量測定を行いながら、横ボーリングの修繕サイクルを維持サイクルの 2～4 倍に伸ばし（表 7-1 参照）、図 7-1 上段のイメージ図の様に、更新サイクルを延ばすことで、これまで不可能であった集水井の中長期的なライフサイクルコストの縮減を可能にすると考えられる。

また、集水井のライナープレートの耐用年数は 20～50 年程度といわれているが^{4)～6)}、これまでの方法を一律に継続する限り、横ボーリングの更新サイクルがライナープレートの耐用年数を下回ることになることも十分考えられる。1.2.2 項でも述べた通り、横ボーリングのスライムの増加は微生物腐食の進行に伴うライナープレートの更新時期自体も速めることに繋がるため、集水井全体のライフサイクルコストを高騰させることになる。

地すべりは、気候変動に伴う局地豪雨等多くの不確定要因により、これまで以上に多発することが懸念され、昨今の厳しい財政状況と人口減少と相俟って維持管理業務自体の運営が厳しくなりつつある。マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは、この様な課題を克服可能で、集水井全体のライフサイクルコストを中長期的に削減しながら地すべりの予防保全を可能にする新技術と考えている。

7.2 マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕コスト

ライフサイクルコストの縮減効果について更に詳細な検討を加えるため、適用実験を行った 3 つの集水井における横ボーリングの維持・更新・修繕の概算コストを試算し一覧表にして表 7-2 に示す。維持コストはジェッティング作業によるコストであり、更新コストは横ボーリングのリボーリング⁷⁾と集水管設置作業を伴うコスト、修繕コストはマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムの「設置工」、「洗浄工」、「観測工」の各作業に要するコストであり、コスト算出時の単価は土木工事積算基準や地質調査業務積算基準等をもとに試算している。ただし、安全費、準備工費、宿泊・交通費等については考慮していない。同表をもとに、3 つの集水井の将来 20 年間の維持管理コストを表 7-1 のライフサイクルをもとに予測した試算結果を表 7-3 に示す。

表 7-3 をもとに 3 つの集水井における中長期の修繕コスト、維持コスト、更新コストを比較・整理した結果をまとめ図 7-2～図 7-4 に示す。

以下に、以上の各図を通観して明らかとなる事項を箇条書きにして論述する。

- 1) 図 7-2 によると、集水井 K における更新コストは、3 つの集水井のうちリボーリン

第 7 章 ライフサイクルコスト

表7-2 集水井別維持，更新，修繕概算単価一覧表

主要項目		集水井名					
		K			T		
健全度	横ボーリング(レベル)	2			3		
	集水井	経過観察			経過観察		
深さ (m)		14			10		
段数 (段)		2			2		
集水管本数 (本)		上	下	計	上	下	計
		5	6	11	4	4	8
集水管延長 (m)		上	下	計	上	下	計
		193.3	204.4	397.7	52.2	52.2	104.4
1 回当り概算維持コスト ^{※1} (円)		600,000			400,000		
1回当り概算更新コスト ^{※2} (円)		7,900,000			2,000,000		
1回当り 概算修繕コスト ^{※3} (円)	設置工	4,600,000			3,500,000		
	洗浄工	1,000,000			1,000,000		
	観測工	100,000			100,000		
	計	5,700,000			4,600,000		

※1 ジェットニングによる1回当りの維持作業によるコスト(足場仮設費含む)

※2 リボーリング(φ90)と集水管設置の打ち増しによる集水ボーリングの更新作業によるコスト(足場仮設費含む)

※3 マイクロ・ナノバブルの洗浄システムによる工種別単価で，設置工のコストは初回洗浄時のみ必要

表7-3 集水井別概算ライフサイクルコスト比較一覧表

主要項目		集水井名									
		K			T			O			
健全度	横ボーリング(レベル)	2			3			4			
	集水井	経過観察			経過観察			要対策			
深さ (m)		14			10			22			
段数 (段)		2			2			1			
集水管本数 (本)		11			8			6 (うち閉塞孔2)			
集水管延長 (m)		397.7			104.4			211.82 (うち閉塞孔70)			
経過年	年	5	10	20	5	10	20	5	10	20	
維持※1作業	維持	単価(円)	600,000			400,000			400,000		
		回数(回)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		コスト(円)	600,000	1,200,000	1,800,000	400,000	800,000	1,200,000	400,000	800,000	1,200,000
修繕※3作業	設置工	単価(円)	4,600,000			3,500,000			2,600,000		
		回数(回)	1	0	0	1	0	0	1	0	0
		コスト(円)	4,600,000	0	0	3,500,000	0	0	2,600,000	0	0
	洗浄工	単価(円)	1,000,000			1,000,000			1,000,000		
		回数(回)	1	1	2	1	2	2	1	2	2
		コスト(円)	1,000,000	1,000,000	2,000,000	1,000,000	2,000,000	2,000,000	1,000,000	2,000,000	2,000,000
	観測工(円)	単価(円)	100,000			100,000			100,000		
		回数(回)	5	5	10	5	5	10	5	5	10
		コスト(円)	500,000	500,000	1,000,000	500,000	500,000	1,000,000	500,000	500,000	1,000,000
	修繕コスト(円)		6,100,000	1,500,000	3,000,000	5,000,000	2,500,000	3,000,000	4,100,000	2,500,000	3,000,000
更新作業※2	更新コスト(円)	7,900,000			2,000,000			4,200,000			

※1 ジェットニングによる1回当りの維持作業によるコスト(足場仮設費含む)

※2 リボーリング(φ90)と集水管設置の打ち増しによる集水ボーリングの更新作業によるコスト(足場仮設費含む)

※3 マイクロ・ナノバブルの洗浄システムによる工種別単価で，設置工のコストは初回洗浄時のみ必要

グの掘進長が最大になるため、割高になる。また、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕作業のイニシャルコストも高額となるが、更新コストより割安である上、修繕サイクルが 5 年と長いため維持・修繕コストの削減を図ることができる。

- 2) 図 7-3 と図 7-4 によると集水井 T と O におけるリボーリングによる更新コストは横ボーリングの掘進長が比較的短いことから、割安になる。このため、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕コストより割安になっている。
- 3) しかし、リボーリングの場合、既設の横ボーリングの間を打ち増しできるだけの離隔を有していること等原位置の制約条件をクリアする必要がある。マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕作業ではこのような制約を受けることはない。

- 4) また、集水井 O は函体に変形しており要対策の集水井であるが（表 7-2 参照）、変形が停止している状況では、図 7-4 よりリボーリングによる更新作業よりも安全性が高く、集水機能を確実に改善することのできるマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕作業の方が優れていると思われる。
- 5) 図 7-4 より、集水井 O の様にレベルが 4 で健全度の極めて低い「要対策」の集水井

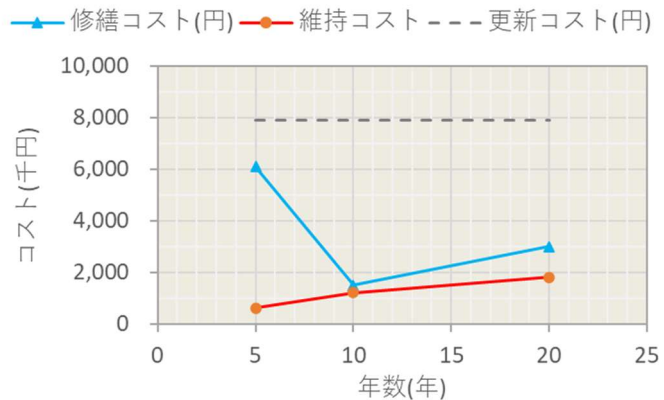


図7-2 中長期コスト比較図(集水井K)

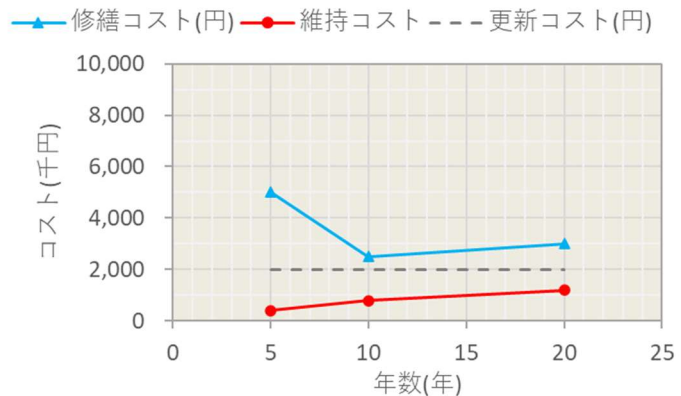


図7-3 中長期コスト比較図(集水井T)

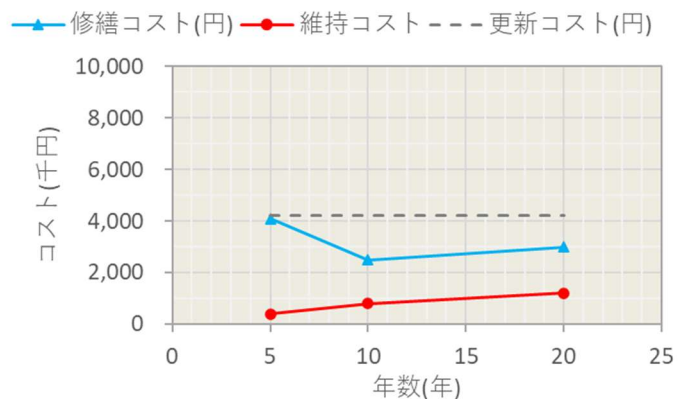


図7-4 中長期コスト比較図(集水井O)

の場合、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕コストはリボーリングによる更新コストと大差無くなる場合も多いと思われる。この様な集水井については、新しい技術による修繕作業は更新作業に比べて安全面で優れており、集水機能が改善される面でも優れていると考えられる。

- 6) マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄修繕サイクルは4～5年であることが解ったことから(表 7-1 参照)、「観測工」による流量測定結果に基づき次回の洗浄修繕作業の前に集水管の排水機能を確保するためのジェットニング維持作業を引用図表 2¹⁾ 等も参考にしながら実施しておくことが望ましい。
- 7) 図 7-2 より集水井のレベルが 2 程度の健全度の高い集水井にマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムによる修繕作業を適用することは割高となるが、集水井 K の様に予防保全により中期的な効果を発揮することから引用図表 2¹⁾ 等を参考に「観測工」によりスケールの状況を確認しながら判断することが望ましい。
- 8) 複数の集水井をアセットマネジメントの考え方で維持管理を行おうとする場合、集水井健全度(レベル)設定チェックリスト(表 2-2 参照)を用いて、修繕(維持・洗浄)順位のみえる化が可能になり、管理している集水井全体のライフサイクルコストの最小化を図ることができると考えられる。
- 9) 図 7-3 によれば、集水井 T のマイクロ・ナノバブルによる洗浄修繕コストは、集水管長が他の 2 集水井に比べて短いにも関わらず割高になっている(表 7-2 参照)。これは、集水井 T の集水管が上下 2 段の配置で、各段 4 本、計 8 本配設されているため、ヘッダー(約 30 万円/台)が 2 台必要になり割高になる(表 4-1, 写真 6-4 参照)。
- 10) システムの「設置工」のコストは、ヘッダー 1 台当りのポリブデンパイプの接続本数を 6 本の統一規格にしているため(図 4-5, 写真 4-8 参照)このシステムを普及させていくためには、「設置工」のコストを縮減する工夫が必要になる。
- 11) 「設置工」のコスト縮減策としての方法の一つとしてヘッダーを仮設装置とし、損料扱いとする方法がある。図 7-5～図 7-7 に仮設装置を全損扱いとした場合(①)と損料扱いとした場合(②)の 2 種類について集水井別中長期コストを比較すると、ヘッダーを損料扱いとすることで「設置工」のコストは割安となるため、修繕コストと更新コストの差は縮まり、コスト縮減効果が顕著になる。
- 12) ここでの検討は標準的な場合であるが、ヘッダーの重量は表 4-1 にも示した通り 1 台当り約 50 kg の重量物となるため、現地の搬入出条件によっては、この運搬に要する「洗浄工」での人件費コストが割高になる場合もあると考えられる。今後も多様な現地状況に応じたリーズナブルな方法でサイト毎に修繕コストを削減する工夫を行っていく必要がある。

13) この新しい修繕方法が定着する様になれば、横ボーリングの健全度（レベル）と ATP(RLU)を用いた自主管理指標による診断は、今後ますます重要になっていくと考えられる。

14) 集水井の長寿命化は、横ボーリングの長寿命化に左右されているといって良く、地道な診断結果に基づく維持・修繕を確実に実践することにより、コストを下げながら可能になると考えられる。そして、将来は従来の考え方にはなかった50～100年先を見据えた長寿命化に挑戦していくことも可能と考えられる。

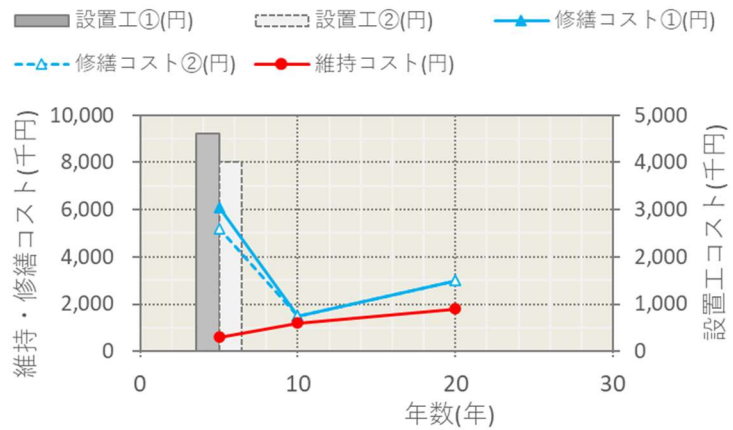


図7-5 中長期コスト比較図(K:①ヘッダ*全損時,②損料時)

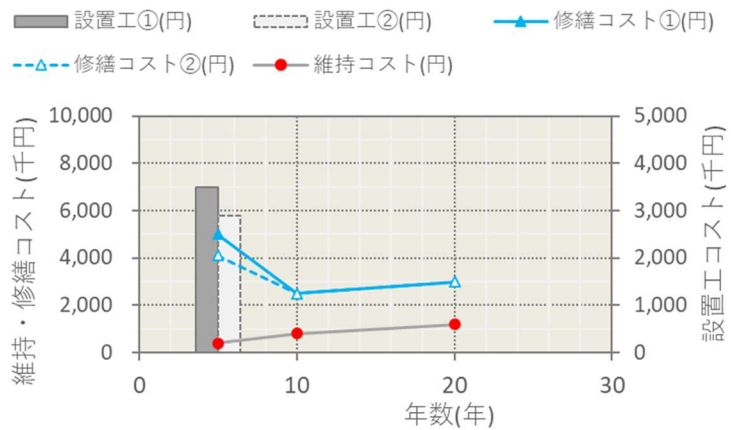


図7-6 中長期コスト比較図(T:①ヘッダ*全損時,②損料時)

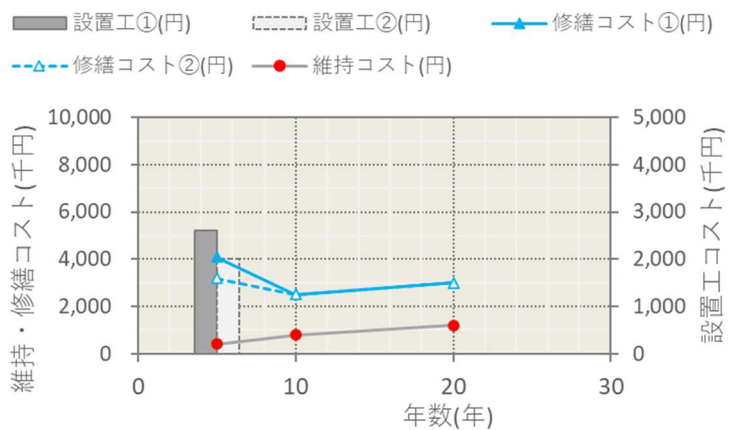


図7-7 中長期コスト比較図(O:①ヘッダ*全損時,②損料時)

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案), pp. 31-60, 令和 4 年 3 月
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案), pp. 23-29, 平成 31 年 3 月
- 3) 三好正晃, 奥山悠木, 藤澤芳信：地すべり対策施設の長寿命化計画～劣化予測式の検討とライフサイクルコストの算定～, 四国地方整備局管内技術・業務研究発表会論文集(四国地方整備局管内技術研究会論文集), II. 57-II. 60, 2019
- 4) 農林水産省：地すべり防止施設の長寿命化計画(個別施設計画)策定の手順書(案), 農村振興局農村環境課 農村振興局防災課, pp. 12-23, 2016
- 5) 奥田修一：L C C (ライフサイクルコスト)とインフラ長寿命化, pp. 52-57, 2019
- 6) 武士俊也, 千田容嗣, 阿部大志：地すべり対策のライフサイクルコストの評価及びアセットマネジメントの研究, 土木研究所地すべりチーム, 2008～2011
- 7) 林野庁計画課施工企画調整室：地すべり防止施設の長寿命化について, 日本地すべり学会関西支部シンポジウム「施設長寿命化の方法と限界」講演 PPT, 2018

第 8 章 仮説の検証結果に基づく発展技術

8.1 目的

1.2.1 項で論述した、集水井の横ボーリングの目詰まりの原因は集水管外壁側の難洗浄箇所形成されるバイオフィームにある、とした仮説に基づき、1.2.3 項で論述した、EPS が流量を減少させるとする予測は、2.1 節で論述した流量観測データ等の整理と 6 章のマイクロ・ナノバブルの洗浄によって出現した諸現象からほぼ検証できたと考えている。

この方法は、現在のところ横ボーリングの流量を回復させることのできる唯一の修繕方法であり、今後は検証結果に基づく発展技術を取水方式の異なる難洗浄箇所を持つ様々な水インフラにも適用できると考えられる。次節に水井戸に適用した例について論述する。

8.2 水井戸への適用

8.2.1 水井戸等の修繕方法と実績

横ボーリングと類似の構造を持つ水井戸（垂直ボーリング）の目詰まり抑制策の研究は、国外では微生物の働きを利用した Vyredox 法（引用図表 3 参照）等により、主に原位置で水酸化鉄等の吸着を利用したスケール除去とその抑制技術を中心に行われてきた^{1)~6)}。

また、国内における水井戸の洗浄は横ボーリングと同様、流量の確保を目的に洗浄可能な箇所についてのみやはりスケールの除去を目的としたジェッティングが主流であった。一方、難洗浄箇所のスケールを除去し流量を回復させることのできるユニークな工法としては液化炭酸ガスを用いた井戸回収システムがある（引用図表 4 参照）。この工法は 1997 年に米国から導入されて以来、抜管や二重ケーシングの挿入等、施設の更新に近い工法ではなく液化炭酸ガスをスクリーン外壁側に高圧で圧入することにより、圧力調整してシャベット状になったドライアイスがスケールをスクリーン内壁側に掻き出す優れた修繕工で、施設の更新サイクル直前の段階で適用される場合が多い⁷⁾。

この工法は横ボーリングへのマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄の考え方と同様、スライムはスクリーンの外側に形成されていることを経験的な既知の事実として捉え、実績を挙げている。しかし、大型の高圧ガス注入車を必要とし、液化炭酸ガスの注入のために必要になる井戸口元に硬質ゴムパッカーの据え付けも不可欠になる。したがって、この工法を適用する際のサイトには装置を取り付けるための広い敷地が必要になる。また、集水井の横ボーリングも含め、構造が華奢で劣化の進んだ部材で構成された井戸の場合は口元付近に圧入するガスを遮蔽するためのパッカーの据え付けが困難になり、適用できない。

これまで、閉塞物の原因は主にスケールにあるとの考え方で、対策はジェッティング等の衝撃力によりこれを離脱させる方法が主流にならざるを得なかった。しかし、この方法では難洗浄箇所において発達したスケールの除去は難しく、固結が進む程この衝撃力が及ば

第 8 章 仮説の検証結果に基づく発展技術

なくなるため、修繕工や再掘削による更新を行わざるを得なかった。

一方で、水井戸の用途は多岐にわたっており、設備も千差万別であるため、集水井の横ボーリングのように診断パラメーターを一律に流量で点検・診断することは難しい。

点検は基本的に水中ポンプの電流値のぶれや井戸水位、水質や濁り等から総合的に判断

表8-1 マイクロ・ナノバブルを用いた水井戸等洗浄実績表

番号	用途	課題	指標	仕様			MNB発生源			洗浄結果	評価
				径 φ(mm)	深度 d(m)	スクリーン 長等L(m)	発生量 (L/min.)	発生時間 (分)	気体 (方式)		
①	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	300	50	16.5	0.3	360	エア (ワンウェイ)	揚水量:0⇒30(L/min.)	○
②	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	300	54	22	1	339	CO ₂ (サイクル)	揚水量:2倍 比湧出量:2～4倍	○
③	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	250	150	47.5	1	800	CO ₂ (サイクル)	揚水量:1.1倍 比湧出量:1.1倍	△
④	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	300	54	22	1	339	エア (サイクル)	比湧出量:3.8倍	△
⑤	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	250	150	47.5	1	504	エア (サイクル)	揚水量:1.2倍 比湧出量:1.2倍	△
⑥	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	300	50	16.5	1	252	エア (サイクル)	比湧出量:1.2倍	△
⑦	揚水井戸	敷地狭隘	揚水量	250	150	120	1	600	CO ₂ (ワンウェイ)	比湧出量:1.2倍	△
⑧	揚水井戸	敷地狭隘 ・ 口元保護管腐食	揚水量	400	80	40	4	2,280	CO ₂ (サイクル)	揚水量:100⇒ 200(L/min.)以上	○
⑨	揚水井戸	大口径	井戸水位 回復時間	1,000	20	8.5	72	455	CO ₂ (ワンウェイ)	水位回復時間: (1/5)に短縮	○
⑩	揚水井戸	大口径	井戸水位 回復時間	1,000	27	5.4	72	405	CO ₂ (サイクル)	水位回復時間: (1/5)に短縮	○
⑪	浸透枳	コンクリート製 円形枳	水位 上昇速度	700	4.5	(底面浸透)	0.3	900	エア (ワンウェイ)	水位上昇速度: 0⇒4(cm/min.)	○
⑫	地下水 浄化井戸	工場建屋内	揚水量	125	30	22	20	400	CO ₂ (ワンウェイ)	揚水量:30⇒50(L/min.); 比湧出量:14倍	○
⑬	地下水 浄化井戸	敷地狭隘	揚水量	150	35	26.5	20	1,160 500	CO ₂ (サイクル)	揚水量:75⇒ 110(L/min.) ;比湧出量:1.3倍	△
⑭	揚水井戸	大口径	比湧出量	1,000	23.9	8.5	60	840	CO ₂ (サイクル)	30分時比湧出量倍率: 1.02倍	○
⑮	揚水井戸	大口径	比湧出量	1,000	30.7	7.5	60	900	CO ₂ (サイクル)	30分時比湧出量倍率: 1.03倍	○
⑯	地下水観測孔	VP50	水位 変動状況	60 (VP50)	16.6	16.6	1	200	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
⑰	地下水観測孔	VP50	水位 変動状況	60 (VP50)	10	10	1	90	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
⑱	地下水観測孔	VP50	水位 変動状況	60 (VP50)	10	10	1	150	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
⑲	地下水観測孔	VP40	水位 変動状況	48 (VP40)	23	1	1	110	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
⑳	地下水観測孔	VP40	水位 変動状況	48 (VP40)	29	1	1	110	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
㉑	地下水観測孔	VP50	水位 変動状況	60 (VP50)	3	3	10	120	CO ₂ (ワンウェイ)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○
㉒	地下水観測孔	VP50	水位 変動状況	60 (VP50)	3	3	10	120	CO ₂ (サイクル)	降雨による水位変動: 緩慢⇒敏捷	○

し診断することになるが、管理者不足等によりこれらの点検診断を行っている井戸は少ないのが現状である。

しかしながら、これまでも論述してきた通り、水井戸の目詰まりの原因も横ボーリングと同様、取水部であるスクリーン外壁側の充填砂利の間隙等の難洗浄箇所形成されるバイオフィームにあり、スケールもまたこの中で形成されることが考えられる。

したがって、集水井の設置間もないうちは、ジェットリングによる維持作業を定期的に繰り返し管内のスライムを除去することで取水機能を維持できているが、長期間経過するうちに管外側でバイオフィームが形成され、スライムが発達するようになるためこれを除去できないようになっていく。地下水観測孔や浸透桝も同様に構造が華奢で、ジェットリングや液化炭酸ガスを用いた井戸回収システムを適用することは物理的に不可能であるため、難洗浄箇所形成されているバイオフィームを除去できないまま対応に苦慮した末、施設の更新を余儀なくされる場合が多かった（図 7-1 参照）。

マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは、このような井戸の構造様式に関わらず拡散効果を利用し水インフラの難洗浄箇所に形成された閉塞物の除去を可能にする。

マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムを適用した検証結果を洗浄時の諸元等と併せ、表 8-1 に示す。同表において、管理基準の設定値が高い井戸については、1 回の洗浄で基準を達成することが難しかった井戸であり（△印）、構造が華奢な井戸であっても井戸の用途に応じ、点検診断方法を構築し整備補修を繰り返すことで、流量等の機能を回復させながらコストを削減することができる。

なお、大口径の集水井や復水井、満州井戸等についても、これまではアセットマネジメントの考え方で予防保全を行うことが難しかったが、マイクロ・ナノバブルの拡散と分解効

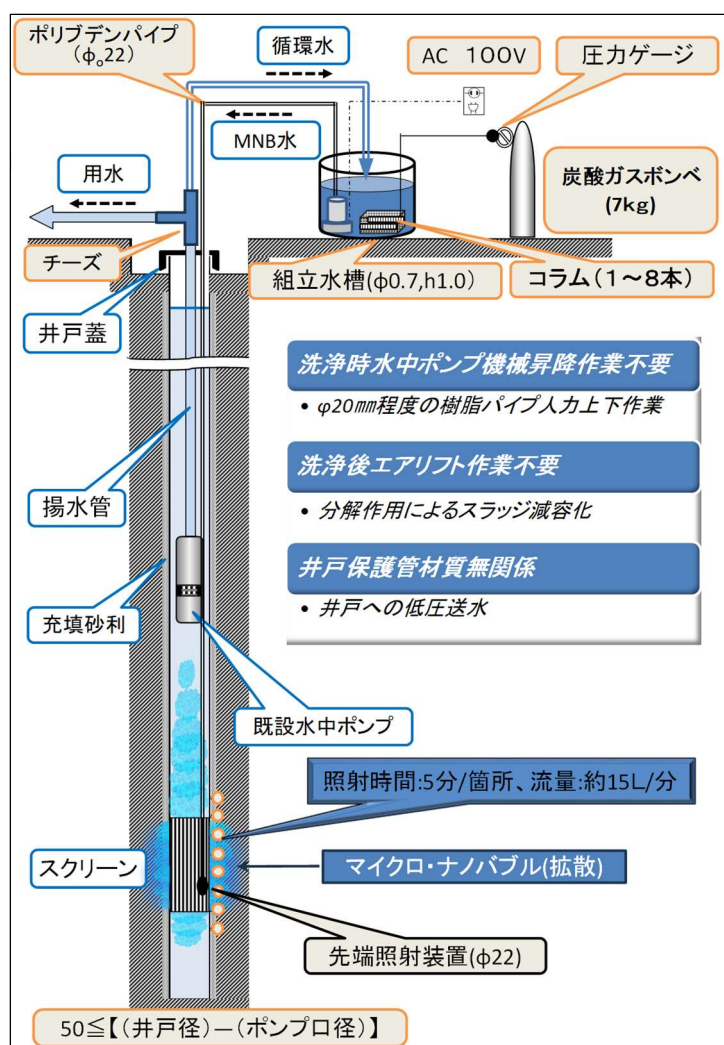


図 8-1 水井戸の洗浄方法概念図

果により可能になると考えられる。

また、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムは、これら多様な構造形態を持つ水インフラについても施設毎の用途と診断方法を勘案しながら、ライフサイクルコストを最小化できる修繕方法を構築できると考えられる。

水井戸の場合の洗浄方法概念図を図 8-1 に示す。

このシステムの最大の利点は、洗浄前の既設の水中ポンプの引揚げ作業や洗浄後の引降ろし作業、スラッジのエアリフト作業等の付帯工事が不要になる点にある。ただし、このシステムでは井戸蓋にポリブデンパイプの出し入れ可能な φ50 mm 程度の開口部を設けておくことが必要で(写真 8-1 参照)、既設水中ポンプと井戸保護管内径とのクリアランスも 50mm 以上必要になる。しかし、水中ポンプと揚水管の揚降作業やスケール除去のためのエアリフト作業は無くなり、



写真 8-1 井戸蓋と先端照射部

工程、安全、コストは有利になる。また、スライムの進行した水井戸の場合、注水時は剥離したスケールの分解作用に時間を要するため、濁度が一時的に上昇し、脱離したスケールが水中ポンプをロックする可能性もあるため、注水時には既設ポンプを停止しておくことが望ましい。また、地下水のサイクル方式による洗浄ではワンウェイ方式の場合

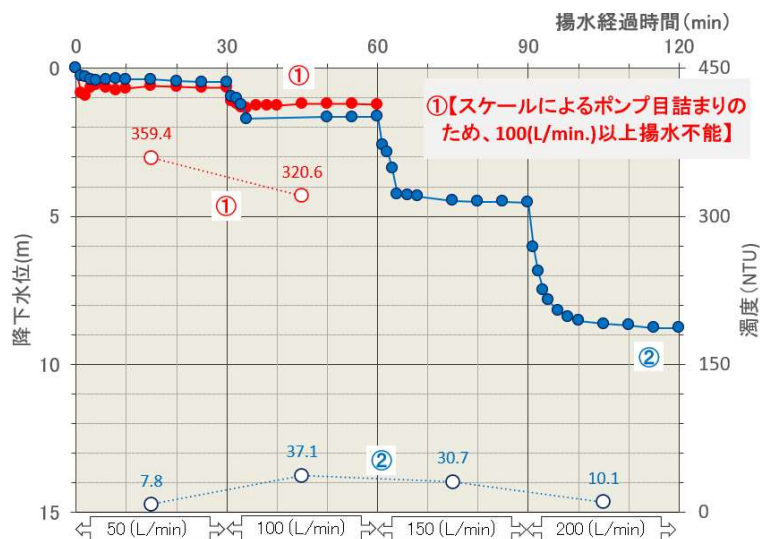


図 8-2 簡易揚水試験他結果図

に比べ時間の経過と共に高濃度の MNB 水が循環することになるため、マイクロ・ナノバブルにより短時間で界面活性物質の濃度が増して cmc 以上になり可溶化が進むと考えられる(1.2.7 項 参照)。今後は、水井戸でのサイクル方式による洗浄事例を増やし、洗浄効果を発揮する設計採用値を把握していく必要がある。

水井戸の洗浄結果の例として、表 8-1⑧の敷地が狭隘で老朽化の激しい食品工場の水井戸（昭和 40 年代施工）で実施した簡易揚

表8-2 気体体積率試算表

掘削長(m)	80
掘削径 (mm)	400
ケーシング径 (mm)	250
スクリーン長 (m)	40
スクリーン部全体容積 V_3 (L)	5,000
スクリーン部ケーシング内容積 V_4 (L)	2,000
洗浄対象容積 V_2 (L) $\div V_3 - V_4$	3,000
使用ガス	CO ₂
風量 (L/min.)	4
注水時間 (分)	2,300
総風量 V_1 (L)	9,200
気体体積率 P(%) ※	約75

※ $P = V_1 / (V_1 + V_2)$

水試験結果（50(L/min.)ピッチ，30 分，4 段階）を揚水段階毎の濁度の変化と併せて図 8-2 に示す。

ここでは，先端照射部(写真 4-9 参照)を原則として 1m ピッチに風量(L/min.)4 で 5 分間照射しながら上方に移動した。

ただし，図 8-2 の①は 1 回目の洗浄で先端照射部が，G.L.-65m 付近で管内側に成長し，固結化したと思われるスケールによりポリブデンパイプ先端照射部の挿入が不可能になったため，これより浅部で洗浄を行った後の簡易揚水試験結果である。揚水試験時，第 2 段階の 100(L/min.)では水中ポンプがスケールによりロック状態になり，150(L/min.)での揚水は不可能になった。そこで，①の 1 回目の揚水試験後，先端照射部を直噴用に切り換え，スケールによる挿入不能深度まで降下させた後，夜間の 16 時間連続照射を行った。その結果，翌日にはスケールが分解され，先端照射部は井戸底（G.L.-80m）まで挿入可能になったため，引き続き G.L.-80m～G.L.-65m を上記と同様の方法で洗浄を行った。その後 2 回目の簡易揚水試験②を行ったところ，200(L/min.)まで揚水可能となったが，100 (L/min.)までの井戸水位変化曲線は①と殆ど違いがみられなかったことから，洗浄前の揚水量の低下は主にスケールが原因であったと考えられる。これは，図 8-2 の右縦軸に示した濁度（○）が，2 回目の洗浄（○）により大きく低下していることから推察される。また，2 回の洗浄による気体体積率（表 8-2 参照）で，ゲル化した EPS やスケールは分解され目詰まりも解消されたと考えられる。ただし，ここでの気体体積率試算時に用いた洗浄対象容積は，横ボーリングの場合は掘削径が小口径なことから全断面としたが，水井戸の場合が大口径になるため，ケーシング内空断面を除く地山との間隙部としている。

ここでの洗浄に要した延べ日数は準備・撤去も含めて 4 日間となったが，今後は同様の諸元と閉塞物の特性を持つ水井戸については風量(L/min.)をこの時の 2 倍の 8 とすることで，2～3 日に工程を短縮することが可能と考えられる。また，この様な用途の水井戸の場合は検水による ATP(RLU)のモニタリングが望ましい。

8.2.2 常設装置による水中ポンプと揚水管の維持管理方法

水井戸における難洗浄箇所には，スクリーン外壁側の充填砂利の部位以外に，揚水設備の水中ポンプインペラ（羽根）部や吸水フィルター口，揚水管等があり，これらの固液界面に形成されるバイオフィーム内で目詰まりの原因となる EPS やスケールが生産されると考えられる。

水中ポンプには物理的な固形物である砂等の異物による目詰まりを起こしにくいように工夫されている場合が多いが，バイオフ



写真 8-2 発生装置と連成計

イルムはあらゆる設備の固液界面に形成されるため、その中で EPS のゲル化やスケールの固結化が進み徐々に流量を低下させていく。そして、スケールが発達すると前項で論述した様な水中ポンプのロックに伴う機能不全を引き起こすこともある。

また、EPS のゲル化が発達する場合は流量が徐々に低下するため、予め停止時期を見極め易いが、スケールの場合は予測不能なため、管理者は付帯作業も含む設備の停止と予期せぬランニングコストの高騰に悩まれ、被害も甚大になる。

そこで、この様なリスクを回避するため、井戸口元揚水管にバイパスでチーズ接続されている連成計付近にマイクロ・ナノバブル発生装置を取り付け(写真 8-2 参照),これに VP16 を接続することで図 8-3 に示す様に界面活性剤を含む MNB 水が常時循環されることになり(サイクル方式)、主にポンプと揚水管のスケールを抑制できる様になると考えられる。

表8-3 旋回流型発生装置仕様一覧表

型式	推奨水圧	標準流量	吸気量	中心気泡径	重量	配管口径	材質
TH-03	0.2MPa	8(L/min.)	約1(L/min.)	16~20(μm)	0.25kg	Rc1/4	SUS304

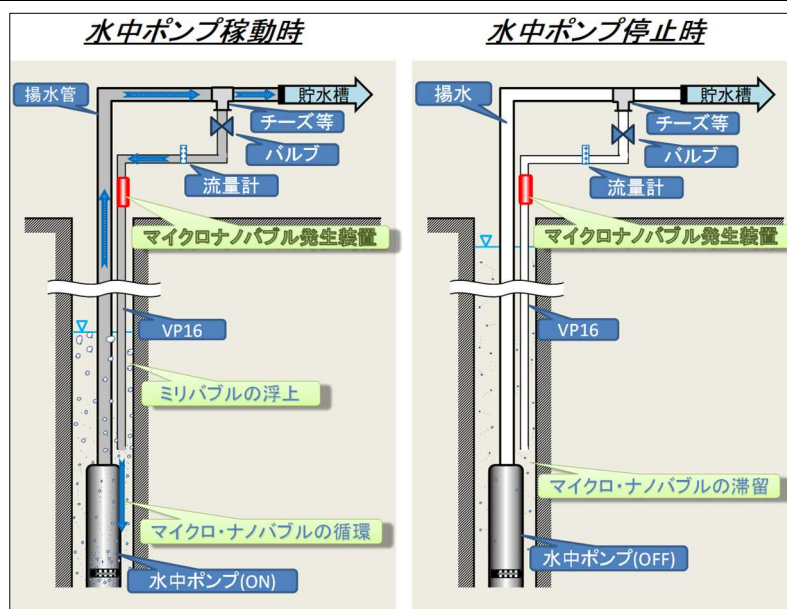


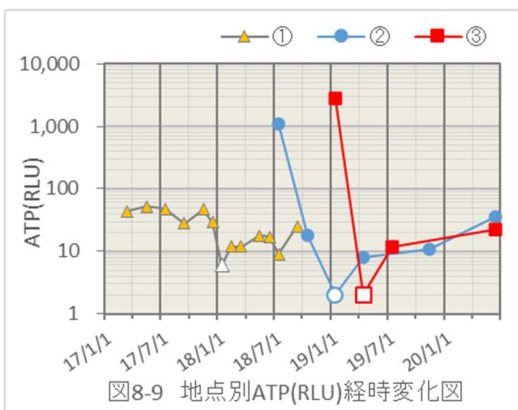
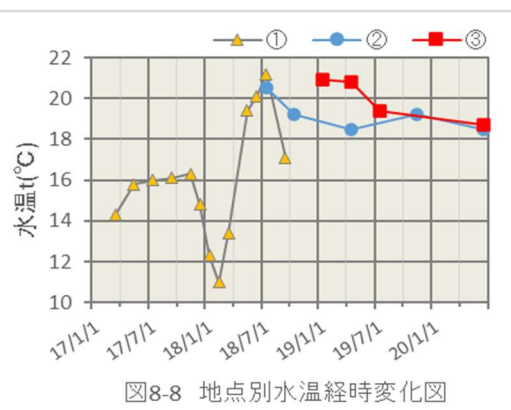
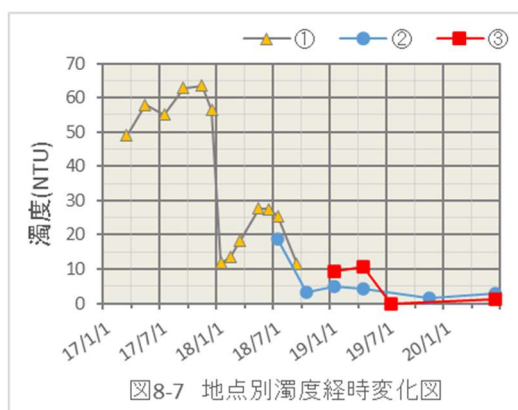
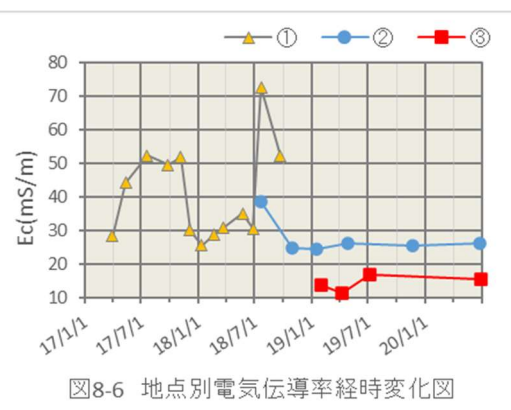
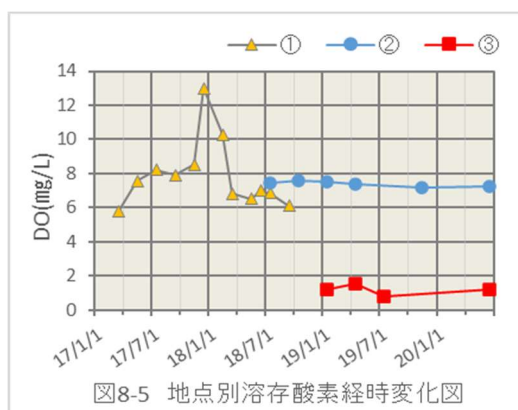
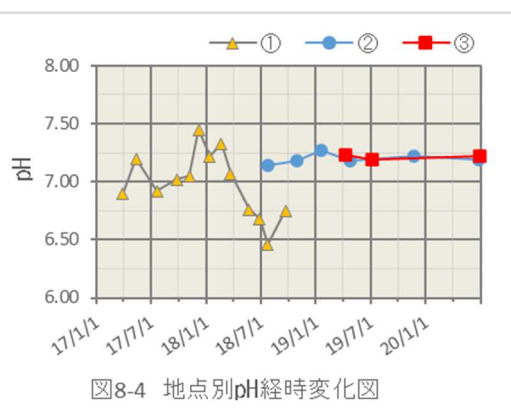
図 8-3 マイクロ・ナノバブルの循環・滞留時の洗浄イメージ図

表8-4 水中ポンプ等洗浄常設装置取付実績一覧表

番号	施設 (対象)	利用形態	井戸仕様							モニタ リング データの 有無	設置後 効果発 現期間	推定 気体 体積率 (%)
			供用年	管径, 掘削径(mm), 【管材質】	深度 d(m)	ストレーナー 長(m), 【タイプ】	揚水管径 (mm), 長さ(m)	地質	ポンプ出力(kw), 揚水量(L/min.), 【運転方法】			
①	揚水井戸 (スケール)	セメント工場 (冷却用水)	2012	150, 375 【SGP】	150	16.5 【スリット】	50, 58.5	砂岩, 凝灰岩	3.7, 150 【断続】	有	約9か月	95
②	揚水井戸 (スケール)	簡易水道水源 (飲料用水)	1994	250, 400 【SGP】	80.7	27.5 【スリット】	80, 49.5	砂れき, 砂岩	11, 250 【断続】	有	約6か月	95
③	揚水井戸 (スケール)	簡易水道水源 (飲料用水)	1984	200~300, 450 【SGP(二重)】	220	49.5 【巻線スクリーン】	80, 66.1	砂岩, 凝灰岩	11, 320 【断続】	有	約6か月	90
④	揚水井戸 (スケール)	地下水浄化 (工業用水)	2012	700, 1,200 【SGP】	23.9	8.5 【巻線スクリーン】	50, 22.9	花崗岩	3.7, 150 【断続】	無	?	?

ここで採用したマイクロ・ナノバブル発生装置⁸⁾は、巡回液流式に類似しておりその仕様を表 8-3 に示す。この発生装置は、電力不要でほぼメンテナンスフリーであるため、水井戸を管理していく上でのリスクの回避に繋がると共に、井戸全体のライフサイクルコストの縮減にも寄与すると考えられる。また、このシステムの利点には図 8-3 にも示した通り、水中ポンプ停止時にもマイクロ・ナノバブルの持つ長期滞留作用により、ほぼ連続して難洗浄箇所の洗浄を行っているところにある。

水中ポンプと揚水管に頻繁にスケールが付着し、洗浄のための揚降作業・分解作業に伴う設備停止が課題になっていた 4 つの水井戸にこの装置を取り付けた結果を井戸の仕様、効



果発現に至る気体体積率と併せて表 8-4 に示す。同表によれば気体体積率は概ね 90%以上で cmc に達していると考えられ、スケール優勢の横ボーリングや水井戸で得られた気体体積率（図 6-20, 表 8-2 参照）を上回る高濃度なマイクロ・ナノバブルが長期間かけて供給されていると考えられる。

この効果発現時期は、図 8-4～図 8-9 に示す①～③における発生装置取り付け後の水質の変化状況から推定され、井戸管理者のヒアリング結果とほぼ一致している。

図 8-4～図 8-9 を通観して明らかになった事項を箇条書きにして以下に列挙する。

- 1) システム設置後の効果発現時期は、ポンプの稼働状況、気象変動、地下水の基質等により異なると考えられる。濁度の高かった①では、システム設置後 1 年以内に井戸水が清澄になり、濁度の急減する時期が ATP (RLU)の低下時期（△とほぼ一致している（図 8-7, 図 8-9 三角 参照）。
- 2) また、①の場合、図 8-6 より地下水の鉱物イオンも豊富と考えられ、ゲル化の進行に伴いスケールが形成され目詰まりし易くなると考えられる（図 1-10 参照）。これは、①では水素イオン濃度や溶存酸素、電気伝導率のばらつきが②、③に比べて大きいことから推察される。
- 3) ①～③の結果から判断すると、マイクロ・ナノバブルは発生装置を取り付けて 1 年以内に cmc に達しており、②、③の様に電解物質の少ない場合は、短期間で cmc に達するため設置後すぐに、電気伝導率は低下する傾向を示す。
- 4) しかし、①の様に地下水が電解質の場合は、cmc に達するまでに時間がかかり、マイクロ・ナノバブルの高濃度化に伴い電気伝導率は増加後頭打ちになった後、減少して変動すると考えられる（図 8-6 参照）。
- 5) また、この cmc による効果発現時期は図 8-9 の ATP(RLU)経時変化状況とも調和している。即ち、①～③のいずれの地点においても ATP (RLU)は cmc に達した後、「バイオフィームが殆ど無い状態」まで低下している（図 8-9 中抜き三角、丸、四角 参照）。
- 6) 鉱物イオンの豊富な①の様な井戸ではスケールが発達し易いため、②と③の様にシステム設置後 1 年以内に ATP(RLU)が 2 オーダー以上低下することはないが（図 8-9 中抜き丸、四角 参照）、少なくとも 1 オーダーは低下しており、既述のスケールにより水中ポンプがロック状態に陥るようなリスクを回避できると考えられる。

以上のことから、このシステムにより井戸の閉塞物として視認されることの多い固結した水酸化鉄スケール(写真 3-2 参照)は、井戸底にスラッジとして沈殿する前に、壁面に形成された接着性の強いバイオフィーム内の増粘性の EPS の中でミクロゲルが凝集することにより形成されていると考えられる（図 1-12 参照）。これはまた、写真 1-2 に示した集水井のライナープレート水抜き穴近傍の壁面に液だれして接着している水酸化鉄のスライムと類似の形成状況にあると考えられる。

また、このマイクロ・ナノバブル発生装置を常設したシステムでは、水中ポンプ停止中にも高濃度のマイクロ・ナノバブルが水井戸のスクリーン外壁側にも拡散することになる(図 8-3 右列 参照)。したがって、スクリーン周辺の水質も改善しながら目詰まりし難い水循環の場を形成することにより、取水設備全体の長寿命化を可能にすると考えられる。

横ボーリングにおける集水方式は自然流下方式であるのに対し、前節で論述した水井戸の場合は水中ポンプによる強制集水方式であり、付帯設備が多様で複雑になり、水中ポンプ内の狭隘部やスクリーン周辺の固液界面にもバイオフィームが形成されることになるため、集水方法に違いはあるもののスクリーン外壁側の難洗浄箇所が目詰まりの原因になっていると考えられる。また、洗浄時においては、横ボーリングでは外的環境により地下水の供給がないものもあるが、水井戸の場合はスクリーンの配設された取水区間は、常時水浸状態にある。しかし、水井戸においても長期間かけて形成されたスライムは、水井戸でもマイクロ・ナノバブルを高濃度にできる洗浄システム(図 8-1 参照)を用いて、EPS 内で固結したスケールも含めて除去できることを示唆している(図 8-2 参照)。固結したスケールは、EPS 内でミクロスケールが長期間かけて凝集し形成されることから(図 1-4 ③, ④ 参照), 図 1-22 に示したマイクロ・ナノバブルの拡散によりスケールを除去するためには、これを長時間照射することで気体体積率を上げ(図 8-2 の場合は約 38 時間)、マイクロ・ナノバブルを高濃度にするすることで、ミクロスケールを離脱しながら吸着・分解できると考えられる。

スケールの発達した水井戸の集水機能を回復させることのできる注水時の気体体積率は、表 8-4 の結果に横ボーリングの実績である図 6-20 を併せて考えると、90%以上になると考えられる。しかし、スケールの性状は井戸により異なるため、8.2.1 項で論述した様な 75%程度で除去できる水井戸もあると考えられる。これは健全度(レベル)3 の横ボーリングに相当すると考えられるが、水井戸の場合この様な健全度の把握自体が困難であり、EPS のゲル化とスケールの発達程度は不明となる。

したがって、水井戸についてはマイクロ・ナノバブルの気体体積率をこれまでの研究成果をもとに 90%程度に設定した注水による洗浄を行い、注水後の簡易揚水試験や ATP (RLU) のデータを蓄積しながら論理的な修正を加え、リーズナブルな工法に完成させていくことが今後の課題となる。

なお、水井戸の洗浄システムの他に、仮説の検証結果に基づく発展技術を適用可能な分野としては、半地下建設構造物の地下水流動保全工法における集・排水井の機能維持のための洗浄やダム基礎排水孔における揚圧力測定機能を改善するための洗浄等があり、今後もこれら以外に適用できる分野が増え続けると推察される。

参考文献

- 1) Rolf O Halberg and Rudolf Martinell : Vyredox -In Situ Purification of Ground

- Water, Vol. 14, NO. 2, GROUND WATER , 1976
- 2) Cullimore, D. Roy : Microbiology of well biofouling, The sustainable well series, Lewis, 435 p., 2000
 - 3) Mettler, Suzanne : In situ removal of iron from ground water Fe(II) oxygenation, and precipitation products in a calcareous aquifer, ETH Library , Diss ETH Nr. 14724, pp. 14–75, 2002
 - 4) Gregory P , Miller : The Water Research Foundation : Subsurface Treatment for Arsenic Removal・・ Phase I Investigation, Daniel・B・Stevens・and・Associates company. 2007
 - 5) The Water Research Foundation : Subsurface Treatment for Arsenic Removal : Phase II Investigation, 2009, 80p.
 - 6) D. van Halem, S. G. J. Heijman, G. L. Amy, J. C. van Dijk : Subsurface arsenic removal for small-scale application in developing countries, Desalination 251 pp. 241–248, ELSEVIER, 2010
 - 7) 遠藤勇, 保志篤 : 液化・気化炭酸ガス注入による井戸洗浄工法 (アクアフリード工法), 全地連「技術 e フォーラム 2005」 仙台, 全地連フォーラム, 2005
 - 8) 青木克己, 加藤克紀, 奥津俊哉, 沖 真 : 旋回流型マイクロバブルジェットの特性と衝突圧力の可視化, 一般社団法人日本機械学会, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2015

第9章 結論

集水井横ボーリングの新しい洗浄工法として、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄システムについて主に工学的な観点から論述した。

今でこそマイクロ・ナノバブル(ファインバブル)やバイオフィームという用語を眼にすることが多くなり、既に医学・工学・農学・食品等の分野でその重要性和革新性に気付かされる様になってきたものの、本研究を開始した15年程前には全く受け入れられていなかった。両者は共に最近になって提唱、発見された技術分野であり、現在進行形の技術分野でもある。

一方、これまで集水井横ボーリングや水井戸等、水インフラの劣化に繋がる難洗浄箇所が目詰まりの問題については、既存技術を駆使し七転八倒しながらも最適な解決策を得られず現在に至っている。しかも、本邦のメンテナンスビジネスは技術力を極力発揮したものであっても安価でなければ歓迎されないのが現状である。

したがって、本洗浄システムの開発に際しては文献をもとに原位置での知見を活かし、調査や検査の省力化を図りながら徹底したコストカットにより最適なソリューションを得るための葛藤の連続となった。その結果、課題として生命体としてのバイオフィームと、対策として高比表面積を持つマイクロ・ナノバブルは必然の主役になった。

また、本研究では集水管外壁側の目詰まりの問題を培養では確認できないと思われるマクロサイズでのバイオフィームのゾル・ゲル転移⁺の挙動についても論述した。そして、マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄によって得られた原位置データや事象により、これまで目詰まりの主な原因とされてきた水酸化鉄や水酸化カルシウムの固結スケールもバイオフィームの中で生産され固結化していく可能性が高いことを示した。

一方、「砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案)」¹⁾によれば、孔内洗浄(ジェットティング)は、集水管内の閉塞物を除去することにより集水井の機能性確保のための維持作業に該当すると考えられる。しかし、これまで、横ボーリングや水井戸については、その集水量を低下させている閉塞物(集水管外側の閉塞物)を除去し、既存孔の機能を積極的に回復させることのできる抜本的な修繕技術が不在であった。

現況において、本研究成果は環境科学に根差した地下水インフラの修繕に関する新技術であり、メンテナンス時期等をみえる化しながら、難洗浄箇所を持つ集水井等の地下水インフラ施設の健全度(レベル)を向上させ長寿命化を図ることができると考えられる。

以下に、まず本研究の成果を列挙する。

- 1) 横ボーリングの目詰まりの原因は集水管外壁側の難洗浄箇所におけるバイオフィームにあるとする仮説は、長期間での最大流量(L/min.)の変動幅がその形成過程と対応していることで説明できる。また、仮説によれば微生物が生産する高粘度で接着性のEPSが流量を減少させる要因になっていると予測され、この形成過程は集水井の持つ客観的な評価指標である健全度(レベル)にほぼ対応していると判断される(図2-2 参照)。

- 2) 界面活性作用を持ち高比表面積のマイクロ・ナノバブルは、拡散作用によって口元閉塞管を有する集水井についても全体の集水機能を回復させることができ、集水井のライフサイクルコストを削減できると考えられる（図 6-16 参照）。
- 3) マイクロ・ナノバブルは、その風量を大きくすることで EPS の中で豊富に存在する酵素や界面活性剤の両親媒性ポリマーを離脱させる。また、ミクロスケールに拡散したマイクロ・ナノバブルは、流れがあっても流亡することなくこの中で長期滞留して固着し、ゲル化した EPS や固結スケールを剥離・分解し、集水機能を回復できると考えられる（図 1-21, 1-22 参照）。
- 4) 健全度(レベル)2, 3, 4 の集水井に対する気体体積率の目安は、それぞれ 50, 80, 90% となり（図 6-20 参照）、健全度の低いレベル 4 の集水井については数カ月以上の養生期間を設けることによって、繰り返し洗浄を行う事が必要になる。
- 5) マイクロ・ナノバブルを用いた洗浄で健全度のレベルをランクアップするためには、供給水として地下水を用い風量を上げて cmc 以上とし、注水作業を繰り返すことで、数カ月以上の養生期間中に地下水から供給される界面活性剤（フルボ酸等）が固結スケールの結晶を破壊し、閉塞物を除去できることが解った。
- 6) 洗浄効果の判定指標のうち、短期指標は MNB 水注入後の検水による ATP(RLU)が 25 未満²⁾を満足していることが必要になる（図 1-8 参照）。
- 7) これは、MNB 水の注入後に集水管外壁側をバイオフィルムの殆ど無い状態まで除去できたかどうかの検証になり、微生物を長期にわたりクォーラムセンシング制御下に置いて集水機能を回復していくための必要条件になると考えられる。
- 8) 集水機能維持の監視は、洗浄前後 1 年間に 2 回以上の集水井の流量測定を行い、設定される洗浄後の健全度(レベル)が洗浄前よりランクアップしたかどうかを中期指標にしてチェックリスト（図 2-3, 表 2-2 参照）を使いモニターしていく。これは洗浄により集水機能が回復するための必要十分条件であり、次回の修繕計画時期もこの方法を使って客観的に判断できる。
- 9) 本洗浄システム（図 4-1 参照）では、コンプレッサーや汚泥吸引車等の大型重機は不要となる。また、集水井全体の長寿命化のため、メンテナンス業務の省人化による安全性と業務効率の向上を可能にすると考えられる。ただし、集水管内が目詰まりにより排水機能が著しく低下している集水管を有する集水井等については予めジェッティングで管内清掃を行っておく必要がある。

次に、今後の課題を列挙する。

- 1) 発展技術の一つである水井戸における洗浄の場合、横ボーリングの様な健全度の把握自体が困難なため、EPS のゲル化と固結スケールの発達程度も不明となる。したがって、水井戸についてはマイクロ・ナノバブルの気体体積率を 90%以上に設定した注水による洗浄を行い、注水後の簡易揚水試験や ATP(RLU) のデータを蓄積しながら論

理的な修正を加え、リーズナブルな工法を完成させていく必要がある。

- 2) 目詰まりの生成要因と実態の技術は、未だ緒に就いたばかりであるが、これを集水井の機能を回復させることのできる予防保全のための修繕技術として確立していくためには、洗浄事例を増やし中・長期的な効果検証を行う必要のあることが課題と考えている。
- 3) また、目詰まりの原因について室内実験やシミュレーションで探求しようとしても不明確な点が残される可能性が高いことから、5～30年の中・長期間に集水管外壁側に形成されるバイオフィルムを再現できる実験施設を作り、マイクロ・ナノバブルによるスケールの除去効果を検証できる長期の原位置実験を行っていくことも必要になると考えられる。
- 4) 注水時の供給水には地下水を用いることが望ましく、気体体積率については固結化したスケールが発達したレベル4の集水井の場合には90%以上、軟質なスケールがけいせいされたレベル3の集水井の場合には80%以上で注水を行う事が望ましいことが解り、水井戸での結果ともほぼ一致していた。しかし、固結スケールの発達した集水井の場合等では、1回の注水で健全度のランクアップを達成できない場合もあり、繰り返し洗浄が必要になってコスト増になることが課題である。
- 5) コスト縮減のため、今後は繰り返し洗浄時に、添加する界面活性剤の適切な種類（フルボ酸等）や量を把握するための実験を行う必要がある。
- 6) 現地の制約で水道水を使用せざるを得ない場合についても同様で、MNB水にEPSの除去に適した界面活性剤を添加し³⁾、気泡の安定化を図ることが有効と考えられる。この添加剤としては、市販のフルボ酸等が有効と考えられるが、バランスが取れないと鉄イオンがフルボ酸と結合しにくくなる可能性もあるため、最適な量や種類については実験により地下水のpHや電気伝導率を定期的にモニターしながら選定していく必要がある。
- 7) 図4-1の洗浄システムを適用するに際しては、ポリブデンパイプの先端を最奥部まで挿入する必要があるため、集水管内に固結したスケールが形成されている場合には、事前にこれを除去するためのジェッティングを行い、集水管の排水機能を確保しておく必要がある。修繕コストの縮減のためには、固結したスケールが形成される前にマイクロ・ナノバブルを用いた洗浄を行った方がリーズナブルである。しかし、集水井の健全度を把握するための流量観測が行われていないことが課題である。
- 8) 奥田が指導している通り⁴⁾、施設のライフサイクルコストの中で修繕コストは最も重要となる。この新技術を活用した場合、横ボーリングの修繕コストはかかるが健全度の低下速度が緩やかになり集水井全体の延命化を図ることができる（図7-1 参照）ことから、今後は中長期的な視点でライフサイクルコスト^{5),6)}の縮減のため、最適な修繕サイクル構築を目標にしたデータの蓄積・分析が必要になる。

地すべり集水井の劣化と整備は、近年の異常気象による局地豪雨の増加に伴い、これまで以上に地下水位の急激で大幅な上下変動を頻繁に引き起こす様になっていく。本研究で取り上げた集水管に供給される地下水によって形成される EPS の相転移の問題は、このような異常気象によって引き起こされ易くなるため、地すべり土塊の安定性の観点から今のうちに検討しておくべき重要課題といえる。一方、インフラメンテナンスは深刻な担い手不足もあいまって今後ますます社会問題化していくものと考えられる。集水井は公共性の極めて高い土木施設であるにもかかわらず、横ボーリングの集水機能を回復できる技術の不在が積年の課題であった。本研究成果を本格運用していくことにより、上記の課題を克服しながら最適な LCC (ライフサイクルコスト*) で省人化による維持が可能になっていくと思われる。

また、建設産業はこれまで以上のスピードでメンテナンスの時代に突入していくと思われる。今後は、従来型の建設分野でのビジネスモデルと異なり、メンテナンスビジネスが建設分野での主流となり、技術力そのものに相応の対価が支払われるべき時代になっていくものと考えている。

本研究が、これまで曖昧にされてきた多くの事象の科学的な解明の一助になると同時に、AI により各種計測の予測値を融合させジェットングからマイクロ・ナノバブルに切り換えるべき洗浄時期の設定の開発等を進めることや、マイクロ・ナノバブルの最適な風量を制御可能なロボット技術の開発等を進めることで、次世代の省人化と安全性に寄与できる水インフラメンテナンス手法の礎になることを願ってやまない。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案), pp. 23-29, 平成 31 年 3 月
- 2) 東京都多摩立川保健所：ATP 測定法を用いた公衆浴場等における管理マニュアル, 2011.
- 3) 藤本明弘, 服部香名子, 大矢勝：マイクロバブル洗浄への界面活性剤の添加効果, 繊維消誌 Vol. 57 No. 11, pp. 838-843, 2016.
- 4) 奥田修一：LCC (ライフサイクルコスト) とインフラ長寿命化, pp. 52-57, 2019.
- 5) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案), pp. 31-60, 令和 4 年 3 月
- 6) 水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案), pp. III-1-III-6, 2022.

謝辞

本論文を審査いただきました，主査 岡山大学大学院環境生命科学研究科 木本和志准教授，副査西山哲教授，同吉田圭介准教授には，研究をとりまとめるにあたり，論文の内容に関する適切なご意見とご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

西垣誠岡山大学名誉教授には，本研究に取り組む機会を賜ると共に，論文の構成段階から最終のとりまとめに至るまで，適切なご指導とご助言を頂きました。深謝すると共に厚くお礼申し上げます。また，西山哲教授と木本准教授には，本研究を進めるに際しても有益なご指導，ご教示を賜りました。心より厚く感謝申し上げます。

なお，本研究論文をまとめるに際し，応用地質㈱社長の成田賢氏（当時）には本研究の進歩性を高く評価して頂くと共に，研究を進めるに際し多方面からご支援いただきました。サイトの選定や現地作業の調整については，本研究内容を十分にご理解いただきながらネクスコメンテナンズ関東㈱の越山安敏様（当時）はじめ職員の皆様にご尽力いただきました。また，現地作業については，安全性と利便性を常に考慮しながら東北ボーリング㈱の保志篤様はじめ職員の皆様にご助力いただきました。

更に，微生物，バイオフィルム，EPS の特性等については関西大学化学生命工学部松村吉信教授に，また，水の構造に関するシミュレーション研究等については，岡山大学理学部化学科松本正和准教授に，そしてマイクロ・ナノバブルの水インフラ等工学的観点での適用性については，東北大学未来科学技術共同研究センター白井泰雪教授，高橋正好特任教授に現地指導も含めご教示いただきました。なお，ヘッダーや発生装置等の設計，製作に際してはシグマ工業㈱の曾我工場長（当時）はじめ職員の皆様から貴重なご意見を頂戴しながらシステムを構築できました。

最後に，長きにわたり寝食を共にしてきた科野優子には病気がちにもかかわらず研究中也昼夜を問わず健康を気遣ってくれ，励ましてくれました。ありがとう。

この事実をここに記して厚く感謝の意を表します。

引用図表

1. 砂防関係施設点検要領（案） 令和4年3月 国土交通省砂防部保全課 p. 31

部位あるいは部位グループの変状レベル評価と表記

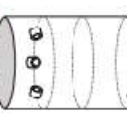
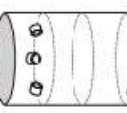
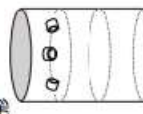
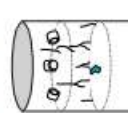
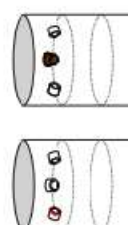
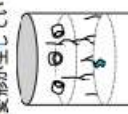
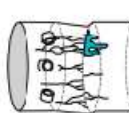
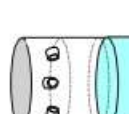
変状レベル	損傷等の程度	備考
a	当該部位に損傷等は発生していないもしくは軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該部位の性能の低下が認められず、対策の必要がない状態	
b	当該部位に損傷等が発生しているが、問題となる性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、今後の損傷等の進行を確認するため、定期巡視点検や臨時点検等により、経過を観察する必要がある状態	
c	当該部位に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該部位の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態	

砂防関係施設の健全度評価と表記

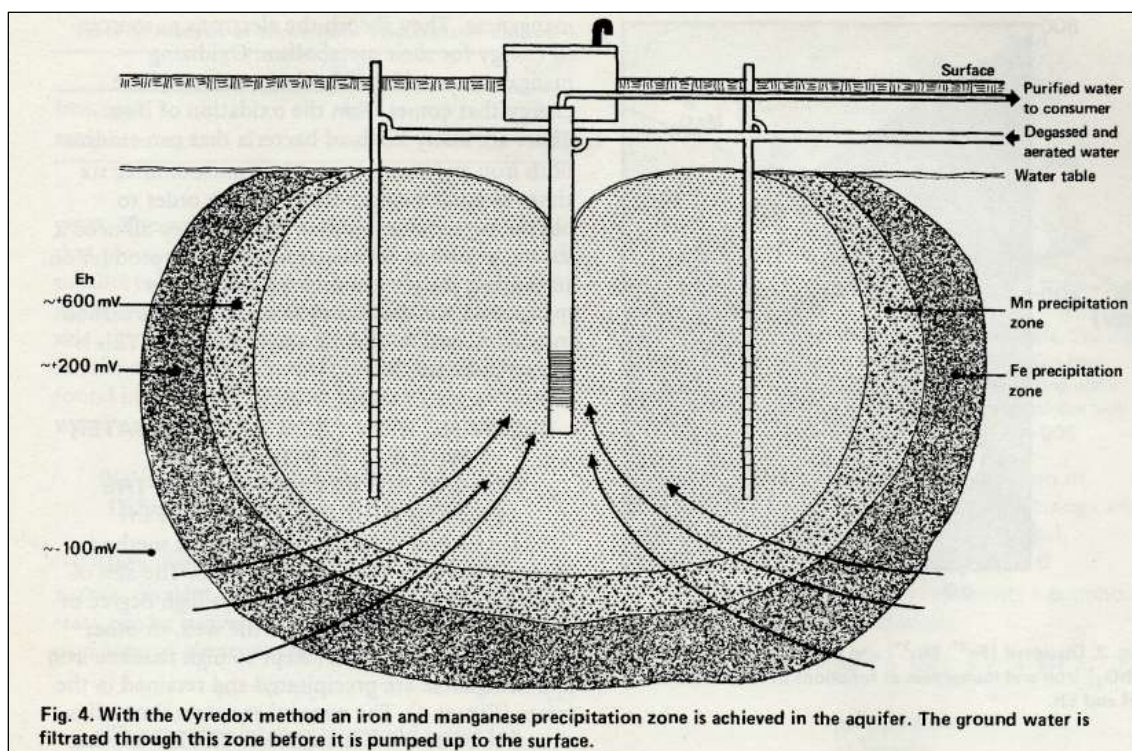
健全度	損傷等の程度	表記
対策不要	当該施設に損傷等は発生していないか、軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該施設の機能及び性能の低下が認められず、対策の必要がない状態	A
経過観察	当該施設に損傷等が発生しているが、問題となる機能及び性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、将来対策を必要とするおそれがあるので、定期点検や臨時点検等により、経過を観察する、または、予防保全の観点より対策が必要である状態	B
要対策	当該施設に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該施設の機能低下が生じている、あるいは当該施設の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態	C

2. 砂防関係施設点検要領（案） 令和4年3月 国土交通省砂防部保全課 p. 42

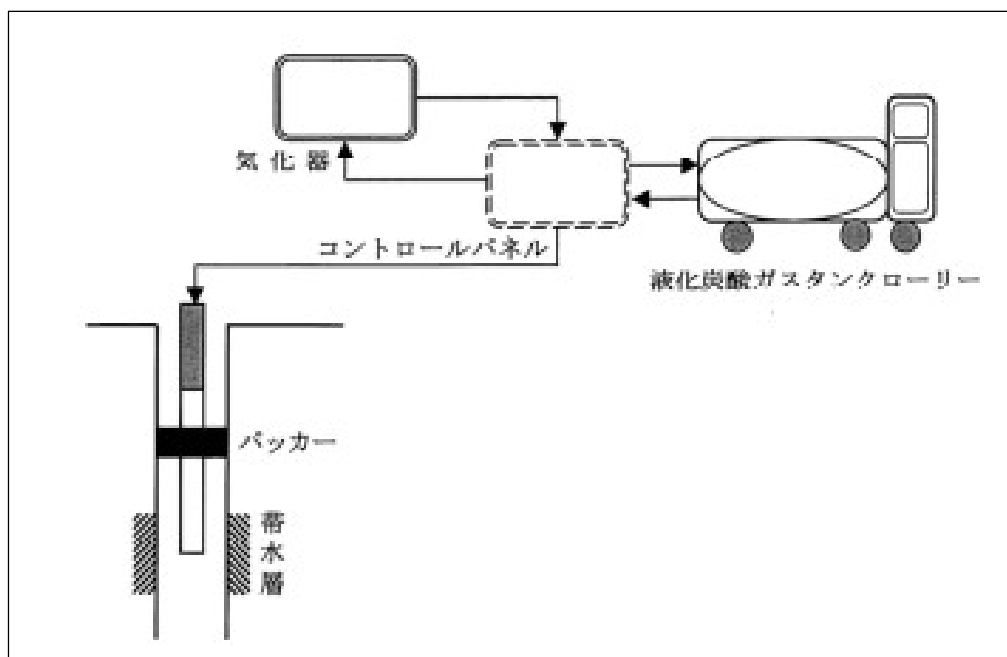
主な部位の変状レベルの評価基準（集水井工）/2/

変状レベル	集水井工			
	本体の腐食・劣化、損傷・変形	集水管の腐食・劣化、損傷・変形	集水管の閉塞物の付着	排水管の腐食・劣化、損傷・変形
a 軽微な損傷	○変状なし。 ○軽微な腐食・劣化、損傷・変形 	○変状なし。 ○軽微な腐食・劣化、損傷・変形 	○閉塞物の付着なし。 ○孔口に閉塞物が少量付着 ○集水された地下水等の排出が確認されている 	○変状なし。 ○軽微な腐食・劣化、損傷・変形 ○排水が確認されている 
b 損傷があるが、機能・性能低下に至っていない	○せん断等の損傷・変形が生じている ○本体の一部が腐食・劣化によって損傷している 	○一部の集水管が破損、閉塞している 	○大半の集水管に閉塞物が付着（概ね孔口の25%以下）している ○集水された地下水等の排出が確認されている 	○損傷・変形によって排水管の断面が減少している ○腐食・劣化によって排水管に変形が生じている ○排水が確認されている 
c 機能・性能低下あり	○本体の大半が腐食・劣化、損傷・変形によって損傷している ○せん断等の損傷・変形によって、本体が破断している ○本体が傾動している 	○大半の集水管が破損、閉塞している 	○大半の集水管に閉塞物が多量に付着（概ね孔口の25%以上）している ○閉塞し、地下水等の排出が止まっていると考えられる。 	○腐食・劣化、損傷・変形によって排水管が破損し、集水した水の漏れが生じている ○腐食・劣化、損傷・変形によって排水管が閉塞し、漏水が生じている 
評価の観点	・集水不能や集水した水の漏出は、地下水位の上昇を要因となり、地すべりの安定性の低下につながる。 ・地下水観測や地下水排除工の排水量観測のデータは、地下水排除工の健全度評価において有益な情報となる。 ・地すべり活動や浅い地すべり等による本体の損傷・変形が進行すると、終局的には破断する。 ・本体の腐食・劣化、損傷・変形が進行し、本体が破損すると、集水管が閉塞し、集水不能や集水した水の漏出が生じる恐れがある。			
点検留意事項	・効果が大きく、重要な集水井については、内部に入って損傷や変形の位置、規模、変形の状態を記録して目視点検する。 ・内部に入らない場合は、本体の損傷・破断・傾動の有無、排水の有無、集水管孔口の状況を確認して目視点検する。 ・集水管からの排水状況（量）を記録することが望ましい。 ・本体の損傷・変形の状態について、位置、規模、変形方向等を記録する。特に、クラックの位置、変形方向等は、力の加わり方を推測する重要な情報となるので適切に記録する。 ・経年変化による本体の腐食（鋼製部材）や劣化（コンクリート部材）の状況について、位置、規模を記録する。			

3. Rolf O Halberg and Rudolf Martinell : Vyredox -In Situ Purification of Ground Water p. 91



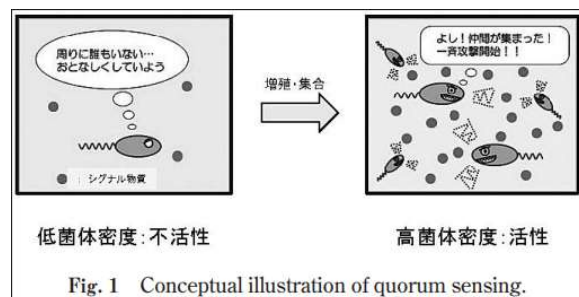
4. 遠藤勇, 保志篤 : 液化・気化炭酸ガス注入による井戸洗浄工法 (アクアフリード工法) 図-2



用語説明

- ・ **アセットマネジメント**：集水井等インフラの将来的な損傷・劣化等を予測・把握し、施設が機能不全に陥る前に、定期的に診断・補修して最も費用対効果の高い方法でライフサイクルコストを最小にする維持管理の考え方。
- ・ **アノード**：ギリシャ語の上り坂の意味で、電子（アニオン）を受け入れる側であり電池の場合の陽極に相当する。
- ・ **ATP (RLU)**：ATP はアデノシン三リン酸(Adenosine Tri-Phosphate)のことで、ヒトから藻、微生物を含むすべての生物の細胞には一定量の ATP が存在し、バクテリアを含めた微生物由来の汚れの元になるバイオフィルムの量と ATP 量の間には相関関係がある。この測定には、これまで時間と手間のかかる培養法(CFU/mL)が用いられてきたが、バクテリア等の持つATP量を測定する技術が開発され(ATP測定法)、培養しなくても現場で迅速に「バイオフィルムの存在状況」を測定することが可能となった。測定原理は、発光物質ルシフェリンと酸素の存在下で、ルシフェラーゼ(酵素)を反応させることにより放出される発光量を測定し、ATP量と発光量が相関関係にあることを利用し、RLU(Relative Lighting Unit)として測定するもので、菌数そのものを示す指標ではない。
- ・ **EPS**：微生物により作り出される多糖類、タンパク質、核酸等からなる細胞外ポリマー(Extracellular Polymeric Substances)。バイオフィルムが形成されると、これらの物質がバイオフィルムを固相表面に固着させるため、目詰まりや相転移(ゾルーゲル転移)の原因になる。
- ・ **MIC**：材料とバイオフィルムの界面で直接あるいは間接的に化学反応が発生し、材料が金属の場合は金属腐食、コンクリートの場合はコンクリート腐食となる。この現象は微生物誘起腐食(Microbiologically Influenced Corrosion)と呼ばれており、特に金属腐食は単にライナープレートの電気化学としての取扱いだけではなく、集水井の維持管理を行う上で微生物がどの様にこの腐食に関与しているかの解明が重要になる。
- ・ **カソード**：ギリシャ語の下り坂の意味で、電子（カチオン）を流出する側であり、電池の場合の陰極に相当する。
- ・ **キレーター**：金属イオンは水和しているため、単純に水に溶かすだけでは分離できないが、金属イオンに強い親和性を持ち、水溶性の高い錯体を形成する化合物のこと。
- ・ **クォーラムセンシング**：右図；「池田宰 “Quorum Sensing 制御を利用した MBR におけるバイオフィルム形成抑制技術の開発”，膜(MEMBRANE)，40(6)，318-332，pp. 319，2015.」より抜粋

バクテリアが自分と同種の細胞が周辺にどれくらいの菌数、密度で存在してい



るかの情報を感知し、特定の化学物質の産生をコントロールする機構。少数の菌だけが生息している環境では、この物質は細胞外に拡散して細胞内の濃度は低くなる。しかし多数の菌が生息する環境になると、物質の濃度が上がり細胞内の濃度も上昇する。クォーラムとはもともと法律用語で、定足数という意味であり仲間数をシグナル物質を使ってセンシングし応答する機構であることから名付けられている。

- ・**ゲル**：ゾル中の高分子やコロイド粒子が三次元網目構造を形成することで流動性を失い、網目の中に流体が閉じ込められた構造になる。網目構造は線状高分子物質が繋がって架橋点をもって網目となり、ここでは微生物由来の天然高分子でできる天然ゲルである。
- ・**コロイド**：分散粒子の種類により分子コロイド（高分子溶液）、会合コロイド（ミセル溶液）、分散コロイドに分類される。ここでは、清澄な地下水を分散コロイドとして捉え液相としてのバイオフィルムや EPS を分子コロイドや会合コロイドとして考察している。物質化学では体積（バルク）が主役であるが、界面化学では面積が重要な要素になる。
- ・**コンディショニングフィルム**：環境中の固液界面は清浄ではなく、有機物や無機物が吸着して形成する厚さ 10 nm 程度の膜。タンパク質、糖タンパク、腐植酸等からなるといわれ、微生物の栄養源になるだけでなく、固液界面での表面荷電等の物理化学的性質にも様々な影響を与えるといわれている。
- ・**cmc**：界面活性剤の濃度の上昇に伴い表面張力が低下してミセルが形成し始める臨界ミセル濃度(critical micelle concentration)のこと。cmc 以上で表面張力はほぼ一定。
- ・**シデロフォア**：微生物が分泌する低分子キレート剤の総称で、 Fe^{3+} に対して親和性が高い。微生物は地下水中の酸化鉄や水酸化鉄を直接利用できないため、これらから Fe^{3+} 錯体を取り出し栄養素として吸収すると共に、 Fe^{2+} に還元して鉄を放出できるシステム。
- ・**シトクロム c**：細胞の内膜に弱く結合しているタンパク質の一種で、電子伝達系の構成要素をなす。
- ・**スケール**：酸化鉄、炭素、カルシウム、マグネシウム等集水管内外壁面等の固相界面付着物。
- ・**スケラビリティ**：現地状況の変化に柔軟に対応できる装置の能力や度合い。
- ・**スライム**：微生物による設備の目詰まり、閉塞を促進するもの。
- ・**スラッジ**：沈殿（沈降）物。
- ・**走化性（ケモタキシス）**：細胞を含むバクテリアが栄養成分等基質の濃度が高い方に移動したり、危険物質の濃度の低い方に移動したりする性質のことで、界面に炭水化物やアミノ酸のコンディショニングフィルムがあればバクテリアは鞭毛を使ってそこを目指して吸着する。
- ・**ソフトマター**：高分子、液晶、両親媒性分子、コロイドが相互に関係し、ひと塊の大きさの物質（バルク）の中に様々な大きさの構造を持つ物質がそれぞれ違う動き方をすることで粘弾性の固体でも液体でもないやわらかな性質を持つ物質。
- ・**ゾル**：流動性を持つ分子コロイド（高分子溶液）、会合コロイド（ミセル溶液）、分散コロ

イドの総称。流動性のあるゾルは流動性のないゲルと双方向で変化し、この現象は相転移（ゾル→ゲル転移）と呼ばれる。

・チキソトロピー：水圧等の変化により、ゲルのような塑性固体とゾルのような非ニュートン液体の変換が可逆的に起こる現象。集水管の場合、水位低下すると水抜き穴周辺の EPS の粘度が次第に上昇し最終的に固体状の閉塞物（ゲル）になり、降雨によりせん断速度が急上昇しても、粘度が一定値に低下し流動化（ゾル）するまで時間がかかるため集水機能を発揮できなくなる。

・トランスポーター：物質輸送するタンパク質。

・バイオレメデーション：微生物の持つ分解・代謝作用によって、土壌や地下水中の有機物質を除去する技術で、浄化には時間がかかり全ての汚染物質に有効とは云えないが、環境負荷が低く低コストである。

・バクテリオシン：細菌が産生する抗菌ペプチド・タンパク質の総称で、標的細胞の膜に孔を形成して抗菌する。

・ブラウン運動：水面に浮かぶ花粉由来の微粒子や空気中の霧がとる不規則な運動。連続供給されたマイクロ・ナノバブルも、小さくなる程安定性が向上し水分子の衝突により濃度の高い方から低い方に濃度勾配を形成しながら移動（拡散）し、熱力学的に平衡なエントロピー最大の状態になって消滅するまでの間に本稿で論述したような様々な洗浄機能を発揮すると考えられる。

・ペプチド：ペプチド結合（アミノ基とカルボキシル基の間の化学結合：-CO-NH-）で短い鎖状に繋がったアミノ酸群。

・ボイド率：気液二相流の全体体積に占める気相成分の占める割合で定義されるが、横ボーリングや水井戸にマイクロ・ナノバブルを適用する場合は実用性に欠けるため、ここでは全体体積を洗浄対象容積（小口径の横ボーリングの場合は掘削容積、大口径の水井戸の場合は掘削容積からケーシング管内容積を取り除いた外側容積）とし、気相流成分の容積をマイクロ・ナノバブルを生成する際の風量と注水時間から得られる容積としたみかけの体積率で試算し検討している。

・ポリマー：構成単位となるモノマーが重合してできた高分子物質のこと。EPS を構成する多糖類、タンパク質、核酸やプラスチックなど。

・マクロファウリング (macrofouling)：主に海洋環境中で浸漬された固液界面にフジツボ、ムラサキガイ等の大型海生生物が付着する現象でバイオフィームとの関係性は大きいと考えられる。

・マランゴニ効果：界面活性剤が濃度の高い領域（低表面張力域）から濃度の低い領域（高表面張力域）に移動する作用のこと。マイクロ・ナノバブルでは気泡の頂局と底極間で界面活性分子の濃度分布差により引き起こされ、上昇速度を減少させ、合体を妨げる効果があり、剛体球の様に振る舞うと云われている。

・ミクロゲル：ゲルは一般的には系全体が一つの三次元網目であるマクロゲルを指すが、100

μm以下の微粒子状のゲルをマイクロゲルと呼び、区別している。

・**ミセル**：多くの低分子の界面活性剤が親水基を外側、疎水基を内側に向けて集まった会合体で球状、棒状、板状のものがある。

・**ライフサイクルコスト**：集水井のライフサイクルを新設(または更新)から更新までの1サイクルとすると、この間の洗浄サイクルは集水井固有の集水機能によって異なる。新設後の集水井のライフサイクルコストを維持管理費と更新費の合計とすれば、マイクロ・ナノバブルを利用した新しい洗浄システムの導入等により、洗浄サイクルとライフサイクルを延ばすことができる上、洗浄（修繕）時期の設定や集水井の洗浄優先順位の設定も可能になり、結果としてライフサイクルコストの最小化に繋がる。

・**ランダムコイル**：EPS等の分子量の大きい鎖状ポリマーがとるクシャクシャに折れ曲がった（エントロピー最大の）糸まり状の球形。マイクロ・ナノバブルはマランゴニ効果等によって長い疎水鎖を解くことで、低分子の界面活性剤を増やしミセルを形成し易くすると考えられる。

事項索引

【ア行】

アセットマネジメント 35, 80, 88, 90
アノード 18, 19
EPS 4~14, 16, 18, 20~22, 29~31, 34,
36, 38, 42, 67~71, 75~78, 92, 93,
99, 100
ATP 7, 8, 20, 34, 55, 56, 58, 59, 65,
70, 75, 75, 87, 92, 95, 99, 100
MIC 17, 18

【カ行】

カソード 18, 19
キレーター 15
クォーラムセンシング 5, 10, 19, 31,
65, 67, 70, 99
ゲル 9, 11, 13~16, 29~31, 44, 71,
74, 76, 78, 92, 93, 95, 96, 98, 100
コロイド 9~11, 14, 21, 57, 76
コンディショニングフィルム 4

【サ行】

c m c 10, 21, 22, 42, 43, 91, 95, 99
シデロフォア 15~16
シトクロムc 6
スケール 2, 4, 15, 16, 19, 29, 36, 38
~43, 47, 51, 57, 64, 67, 69, 71,
72, 75, 77~80, 88, 91~93, 95, 96,
100
スケーラビリティ 52
スライム 2, 3, 16, 20, 34, 35, 47, 51,
57, 66, 67, 71, 73, 75, 78, 81, 91,
95
スラッジ 58, 68, 74, 91, 95
走化性 4

ソフトマター 16

ゾル 9, 11~14, 16, 29~31, 57, 73,
96, 98, 100

【タ行】

チキソトロピー 14, 31
トランスポーター 6

【ハ行】

バイオレメデーション 4, 5
バクテリオシン 5
ブラウン運動 20
ペプチド 5
ボイド率 21, 42
ポリマー 4, 10, 11, 14, 18, 19, 21,
76, 99

【マ行】

マランゴニ効果 21, 38
ミクロゲル 12, 13
ミセル 10, 21

【ラ行】

ライフサイクルコスト 14, 22, 29, 35,
80~83, 85, 86, 91, 94, 100, 101
ランダムコイル 10, 21