

## 7. 河床付着生物膜による自浄能力促進工法 の検討

1. 都市域河川空間における親水機能と自浄作用
2. 実験装置と実験方法
3. 理論展開および結果と考察
4. 河床設計に対する提言

東京大学工学部助教授 大垣 真一郎  
東京大学工学部講師 味埜 俊  
東京大学工学部助手 長岡 裕



## 1. 都市域河川空間における親水機能と自浄作用

近年、都市河川における親水機能が注目を浴びている。河川には、治水、利水の面からの利用に加え、この親水機能を有していたが、特に大都市圏における水質悪化、流量の低下、三面張り等の河川改修による河川形状の変貌によってこの親水機能の喪失が起こり、かえってその反動として親水空間の意義が強調されるようになった。その結果、特に都市圏においては様々な河川の親水機能の回復、創造のプロジェクトが促進、または計画されている。中小河川、用水路の水質改善、河岸改修、または流量確保による清流復活事業（東京都、野火止用水の例）や公園等におけるせせらぎ空間の建設等もその一例である。

しかし都市圏における水不足が慢性化していることもある、景観用水として水道水あるいは他の河川水を使うことは困難な状況にある。そこでその豊富な流量、供給の安定性等から下水処理水が注目されており、多くの事例が報告されている。

中小河川、用水路における例としては東京都の野火止用水および玉川上水、鹿沼市の木島掘用水路、大阪城の濠および城南地区の溪流、大阪市の今川、駒川等がある。団地内公園等のせせらぎ空間においても団地からの雑排水の処理水を使用している例もあり、千葉県住宅都市整備公団、飯山満団地の流れ、船橋市住宅都市整備公団、芝山団地等で行われている。

これらの処理水は高度処理のものが多く、一般に水質は良好であるが、親水空間の創造のために必ずしも十分ではなく（玉川上水においても臭気等の苦情が寄せられているという）、さらに水質を浄化させることも必要である。また現にある河川水を浄化するにもコスト的な面から高度な処理技術の駆使は不可能である。

以上の親水空間を取り巻く現況を見ると、河川が本来持っている水質浄化機能（自浄作用）に注目し、これを大いに利用して河川水の浄化を進め、親水空間の復活、建設を進めることが有望であると考えられる。自浄作用はおもに河床付着微生物によって担われているが、河床付着生物膜は絶えず増殖、死滅、剥離を繰り返しており、その利用および管理のためには増殖特性や基質利用速度に関する知見が不可欠である。

河川の自浄作用に関する研究はStreeter & Phelps(1925)に始まるが、その多くは河川水中に浮遊する微生物のみを対象にしたものであったり、河川をマクロに捉え、溶存酸素やBODの収支を記述したりするものであった。近年微生物が実際に浄化を行う場についての考慮を加え、付着生物膜による浄化や河床底泥の影響等を考えた研究も見られるようになったがそれらは依然未完成であり、さらに実際の河床形態（砂、礫等で構成されている）や河床付近における流れとの関連について注意を向けたものは極めて少ない。特に流水系下に存在することを考慮すると、流れの条件との関連でその特性を把握することは重要である。本研究は流れの条件が付着生物膜の活性に与える影響について定量的な議論を行い、自浄効率を高めるような河道設計法の開発への応用を目的とするものである。

## 2. 実験装置と実験方法

### 2.1 実験装置の概要

実験装置としては直径40cm、高さ60cmの透明塩化ビニール製円筒を反応槽として用いた。中心には十字形攪拌板が取り付けられ、この大きさと回転速度の変化によって多様な流水条件を得た。十字形攪拌板は長さ8cmのものと4cmの2種類を用いた。各攪拌板は10枚が2cmおきに中心の回転シャフトに設置されている。また最小流速条件として攪拌板を設置せずにシャフトのみを回転させた条件を加えた。

壁面の上部8cmと下部8cm、および攪拌板は定期的に掃除を行い、壁面中心部のみを付着面とした。これは微生物膜の付着面における水理学的条件を均一にするためである。基質は塩化アンモニウムと栄養塩類およびアルカリ度を加えたものを用いた。基質原液は水道水と同時に攪拌槽に流入するようになっており、この量流量の比を変化させることによって流入基質濃度の制御を行った。流入基質の滞留時間は1.9~2.0hとし、水温は流入水道水の温度制御により20~22°Cに保った。

## 2.2 流速測定

各条件の水理学的諸特性はホットフィルム流速計を用い、微生物膜を装置内で培養する前の状態において測定した。これは流水中に微生物が浮遊している状態においてホットフィルムプローブを水中に入れるとプローブが損傷を受けてしまうためである。プローブ（日本カノマックス社製コニカル型プローブ1231W）を壁面から4mmの場所において流れの主流方向と平行（円筒の壁面に平行）に設置した。ホットフィルム流速計からの出力電圧（0~5V）はAD変換器（ネオローグ電子社製PCN1211）を通して12bitデジタルデータに変換された後にパーソナルコンピューター（日本電気社製PC8801）のメモリーに収納される。AD変換器PCN1211はマシン語プログラムによる制御によって最高約10Khz間隔までのサンプリングが可能である。簡単な計算（時間平均流速等）は同コンピューター内で行われるが、大量の演算時間が要求される解析（パワースペクトル、自己相関係数等の計算）については一度2バイトの（上位4ビット、下位8ビット）マシン語プログラムとしてディスクケット（2D）にセーブし、その後日本電気社製PC9801、ユーティリティープログラム“DDconv.n88”を用いて2HDディスクケットに移した後に同コンピューター内にて計算を行った。

流速データは高速フーリエ変換によってスペクトル解析を行い、乱流エネルギーの波数スペクトルを計算した。

## 2.3 微生物膜活性に及ぼす流れの短期的な影響

硝化菌を植種して最大流速条件（基底条件）にて運転を続け、生物膜が定常に達した後に流水条件を次々に変化させてそれに伴う基質除去フラックスの可逆的変化（流水条件の短期的な影響）を測定した。

硝化菌は室内で培養している活性汚泥をアンモニア性窒素を中心とする基質中にて馴致することによって得たものを用いた。植種後は最大流速条件（8cm攪拌板で400rpmの回転速度）で半バッチ条件にて培養を続け、硝化細菌の生物膜が装置壁面に確認された後に連続基質投与の条件に

移行した。

硝化微生物膜が十分に増殖し、定常状態に達したと考えられた後に装置の水理学的条件および流入基質濃度の条件を次々と変化させてこれらの条件の変化による生物膜の基質除去フラックスの可逆的变化を測定した。ここで言う可逆的变化とは微生物膜の厚さ、密度、微生物相、微生物の活性そのもの等の状態が変化せず、基質の輸送条件のみが変化し、それに伴う基質フラックスの変化を言う。基質除去フラックスは流入と流出NH<sub>4</sub>-N 濃度の差を生物膜表面積で除することにより計算した。完全混合槽における物質混合条件より、条件を変化させた後は装置の水理学的滞留条件の3倍以上の時間（6時間）経過の後に基質除去フラックスを測定した。

## 2.4 微生物膜活性に及ぼす流れの長期的な影響

装置内の水理学的变化をさせた後に数日間培養を続け、微生物膜の厚さ等形態的变化諸条件の变化を含む基質除去フラックスの負荷逆的变化を測定した。装置の攪拌は壁面上下部および攪拌板の掃除の間、および生物膜の状態の写真影響の間にのみ停止させた。

## 3. 理論展開および結果と考察

### 3.1 流れが付着生物膜反応に及ぼす影響に関する理論的展開

#### 3.1.1 拡散層モデル

生物膜反応が流れによって影響を受けることは従来より知られているが、その理論的説明としては拡散層モデルが広く用いられてきている。

壁面上に生物膜が一様に付着していると考えると生物膜近傍に拡散層が形成され、この層における基質輸送過程が生物膜反応にとって律速となると考えられる。生物膜上の流れは一般に乱流であるので生物膜上には粘性底層（viscos sublayer）が形成される。粘性底層内は流れは層流であると考えられるので物質輸送は分子拡散によって担われる。その外側（乱流境界層）においては乱流拡散によって物質が輸送されるであろう。一般に乱流拡散は分子拡散に比べはるかに大きいと考えられるので、前述の拡散層としては粘性底層を考えることが可能である。すなわち拡散層より外側では大きな乱流拡散によって基質濃度が一定となり、拡散層内では小さな分子拡散によって濃度勾配が形成されてしまうため、流水中の基質濃度C<sub>s</sub>より低い生物膜表面濃度C<sub>b</sub>によって反応が規定されてしまうというものである。

#### 3.1.2 乱流拡散モデル

前述の拡散層モデルは生物膜が均一に付着しているという場合、あるいは表面の凹凸があった場合でもその凹凸が粘性底層内に収まっている場合にのみ成立するが、生物膜の凹凸が完全に粘性底層の外部に突出している場合は拡散層モデルはとうてい成立しない。Picologlouら（1980）は管路内の生物膜と抵抗との関係について考察を加え、管内の抵抗係数とレイノルズ数との関係は生物膜厚さを粗度k<sub>s</sub>で置き換えたものに類似していること、粘性底層厚さより生物膜厚さが小さな場合は水理学的に滑らかな面として扱うことが可能であるとしている。つまりこれは凹凸のある平面上の流速分布を滑面上の流れとして扱えるか、あるいは粗面上の流

れとして別の流速分布式を考えなければならないかの議論と同等である。

生物膜の柔軟性を考えれば、生物膜の突出部分が乱流領域に完全に飛び出している場合には当然に生物膜は流水中でゆらぐはずである。そのゆらぎの強さが流水中の流速（あるいは乱れ）の増加にともなって高まることによって、生物膜深部への基質輸送が増加すると考えられる。

生物“膜”といっても実際は糸状になっていることが多い。流れが遅く、生物膜が完全に粘性底層内に埋まっている場合は膜間の基質輸送は分子拡散によるであろう。ところが乱流中で生物が揺らぐ様になると膜間の基質輸送を流水中の乱れ強度に応じた乱流拡散が担うことになるであろう。

以上の考察より、生物膜内における乱流拡散を考慮した生物膜モデル（乱流拡散モデル）を考える。生物膜中における基質濃度の分布の定常状態を考える。

いま、付着生物膜が十分に発達し定常状態に達している場合を考える。せん断応力による剥離が極端に大きくなれば定常状態とは有効生物量が最大の状態のことであり、その場合、生物膜内における基質濃度分布を考えると生物膜奥において基質が不足している状況が予想される。乱流中で揺らいでいる糸状の生物膜内の拡散係数として、生物膜近傍における乱流強度と生物膜の長さスケールの積の形を考え、式を変形すると次の結果を得る。「生物膜が低濃度条件下において十分に発達して定常状態に達した場合、生物膜活性は生物膜近傍の乱れエネルギーの $1/4$ 乗（乱れ強度の $1/2$ 乗）に比例して増加する。」

また糸状生物膜内における物質輸送に関して相対拡散の考え方を導入すると以下のようなことが想像される。

- ① 余りに低周波で大きいスケールの乱れは糸状生物膜を全体として同時に揺動させ、その内部に混合を引き起こすことはできないであろう。
- ② 逆に余りに高周波の乱れでそのスケールが糸状生物膜のスケールに比べ極端に小さい場合は大きな物質輸送は期待できないであろう。
- ③ 糸状生物膜と同程度のスケールを持った乱れは糸状生物膜を互いに自由に揺動させることができ、おおきな物質輸送能力を期待できるであろう。

### 3.2 装置内の水理学的条件の特性

測定した乱流強度の値は概ね時間平均流速の20%弱であった。流速データより求めた乱流エネルギーの波数スペクトルによると軸のみを回転させた条件で高波数領域が大きく落ち込んでいる他は各条件のスペクトルは概ね同様の形をしていた。このことより、これらの実験条件においては特別にある波数領域において乱流エネルギーが卓越しているということではなく、従ってトータルの乱流エネルギーまたは乱流強度の違いとして各水理条件の違いを議論できることが示された。

### 3.3 微生物膜活性に及ぼす流れの短期的な影響

流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と流水条件（壁面近傍の乱流強度）を変化させて得た基質除去フラックスの変化（流水条件の短期的影響）の変化によると、各条件毎に基質除去速度が1次反応で表されるこ

とが示された。また壁面近傍乱流強度と基質除去フラックスとの関係をみると乱流強度の減少とともにになってフラックスも減少していることがわかった。

### 3.4 微生物膜活性に及ぼす流れの長期的な影響

流水条件の長期的（およそ20日間以上）な変化に伴うNH<sub>4</sub>-N フラックスの変化を調べた。NH<sub>4</sub>-N フラックスとは槽内NH<sub>4</sub>-N 濃度で除し、比フラックスとして表現した。各条件毎にフラックスがほぼ安定したと思われた後に各条件での平均フラックスを計算し、次の条件に移行させるようにした。乱流強度の増減に伴ってフラックスも増減する傾向が得られた。

### 3.5 微生物膜活性に及ぼす流れの影響のまとめ

流水条件の短、長期的影響を壁面近傍の乱流強度と比フラックスの関係としてまとめると、生物膜の形態変化を伴わない基質輸送のみの影響（短期的影響）に関しては乱流強度の0.76乗に比例してフラックスが支配された。本研究の理論展開の所では、低基質濃度下においては生物膜の基質除去フラックスは生物膜近傍における乱流強度の0.5乗に比例することが示されているが本実験においては指数の値が0.5よりもやや大きくなっているがおおむね理論どおりの傾向となっている。一方長期的影響に関しては乱流強度の影響がより顕著に現れた。乱流強度が5 cm/s 以下におけるフラックスは乱流強度 6.6 cm/s の場合の約2割程であった。付着生物量は乱流強度 6.6 cm s<sup>-1</sup>、3.7 cm s<sup>-1</sup>においてそれぞれ 0.0079 mg cm<sup>-2</sup>、0.0188 mg cm<sup>-2</sup>でありフラックスとは逆の傾向であった。しかし生物膜の形態をみると、6.6 cm s<sup>-1</sup>の条件では糸状（長さ 0.1～1 mm）になり流れの中で揺らいでいたが、3.7 cm s<sup>-1</sup>の場合ではコロニー状になり揺らぎの現象はみられず、有効な微生物量という点で大きな差が存在していたと考えられる。

## 4. 河床設計に対する提言

### 4.1 河川の自浄作用の促進工法と礫層の効用

河川の自浄作用は主に河床に付着した微生物によって担われておりそれ自体全くコストがかからないが、そのままでは余り大きな浄化速度は期待できない。そこで自浄作用を高めるいくつかの方法が試みられている。その例として、

- ① 薄層流法、
- ② 伏流水浄化法、
- ③ 磯間接触酸化法、
- ④ 流路内浄化法

などが挙げられる。

建設コスト、維持コスト、さらには流路周辺の用地確保等を考慮すると④の流路内浄化法が最適であると考えられる。さらに実際の流路に設置することを考えると

- ・河川の疎通能力を損ねない
- ・耐久性がある

- ・工事が容易である
- ・景観を損ねない

等の条件が必要であり、特に、元々親水機能の回復、創造の手段であることを考えると景観の問題は重要である。これらの要素を考慮すると礫を敷き詰める工法が最も有力なもののが一つである。

礫を水路床に敷き詰めることの効用としては先に述べた付着面積の増加の他にいろいろなものが考えられる。以下にそれらの効用を列記する。

#### 1) 自浄に係わる微生物の付着面積の増加

#### 2) 景観の向上

流れそのものを景観として捉えた場合、流速、水深、流路幅、水面形等の要素が重要である。これらのうち水面形について考えると、河床が礫で構成されて粗度が増すと、水が躍って実際よりも水量が多く見え、また水面における光の乱反射によって水の透明度の悪さをカバーして清流に見せてしまう効果がある。

#### 3) 底質の保護

流速の底がむき出しの土になっている場合、大きな流量が流されると河床を浸食し、さらにはそれが下流における濁度の上昇、景観の悪化を招くことがあり、野火止用水（底はローム層がむき出し）でもこのような事例が報告されている（川原（1987））。これらの防止のために路床に礫を積むことは有効であり、玉川上水においても路床の一部に実施されている。

#### 4) SSの除去

水質の悪化を示す指標としてSS（浮遊物質）は重要であり、特に景観を問題にする場合はその影響は大きい。礫層の空隙を利用してSSの沈降、除去を促進させることが可能である。但しこの効果は礫層の目詰まりの問題と裏腹である。

#### 5) 脱窒等の嫌気的反応による浄化

礫の表面において好気的な生物反応（有機物酸化、硝化等）が起こると、礫層深部は嫌気的になる。そこでは通常の好気的な生物学的自浄作用では得られない効果、例えば脱窒や沈降した生物体の嫌気的分解等を期待することができる。

#### 6) 再ばっ気係数の増大

水路内浄化法における溶存酸素（DO）濃度の重要性についてはいうまでもないことである。路床における大きな粗度要素の存在によって表面流において大きな乱流強度が生み出され、それが再ばっ気係数の増大を促すと考えられる（寺島ら（1983））。

#### 7) 矶層境界面における乱流がもたらす生物膜活性の増大

礫層の境界面においては大きな乱れが発生し、それが礫層表面に付着した生物膜への基質供給を促進し、活性を大きくさせる効果が考えられる。

以上のように礫層を有する河床には実用上多くの効用が考えられるがそれで起こる現象は極めて複雑であり、その機構に関する定量的な知見が必要である。例えば1) 付着面積の増加、4) SSの除去、5) 嫌気的反応に関しては礫層内における有機物、浮遊物質、溶存酸素、硝酸性窒素等の分布を決定づける礫層内部の物質輸送機構に関する知見が必要である。7) 乱流と生物膜

に関しては本研究の実験において既に知見を得ている。

以上を受けて、ここでは礫層を有する水路床における生物学的自浄作用を表す一般的なモデルを導いた。さらにそのモデルを用いて、水路の設計の基礎となる諸元（水深、勾配等）や生物反応の大きさによってその機構がどの様な影響を受けるかについてシミュレーションによる検討を行った。

#### 4.2 矶層内生物学的自浄作用のモデル

礫層内の基質濃度分布を表すモデルとして、礫層内全体を3領域に分けたものを用いる。これは物質輸送をフィック型の拡散モデルで表し、さらに礫層内の流速条件を決定するモデルを加えたものである。さらに生物膜活性と周辺流速の関係に関しても本実験の結果を用いた。

#### 4.3 矶層における生物学的自浄作用のシミュレーション

##### 4.3.1 矶の粒径の影響

礫層の厚さはそのままにして礫の粒径を0.1cmから16.7cmまで段階的に変化させたときのシミュレーションを行った。その結果によると粒径が大きくなると礫層内深部において高い基質濃度および大きな流速が得られるようになり、生物膜当りの活性は大きくなる。しかし空隙体積に対する膜面積の比が小さくなるため、礫層全体としての活性はある礫径の値より大きい領域では逆に減少の傾向を見せるようになり、特に深い領域では減少が著しかった。また礫径が大きくなると表面流に対する抵抗が大きくなるため表面流平均流速の減少がみられた。

ここでは定量的な議論はできないが、礫径が小さすぎると生物膜が礫層の表面を覆うように付着してしまい、深い礫層が全く働かないという状況が生ずる可能性があることを付け加えておく。

##### 4.3.2 カルマン定数の影響

粒径の影響の解析では全ての場合について $\kappa=0.2$ としたが、水深に比べ粒径が小さくなると通常の粗面上の流れになってカルマン定数が通常の値0.4程度を取ると考えられる。本モデルでは水深粒径比がカルマン定数に与える影響については考慮されていないので、ここでカルマン定数のみを変化させてその影響を調べた。その結果、カルマン定数が大きくなるとスリップ速度の減少を招き、礫層全体の活性もそれによって減少した。

##### 4.3.3 空隙率の影響

空隙率の値を0.1から0.8まで段階的に変化させてシミュレーションを行った。空隙率0.1および0.2という値は同一粒径の礫を積み重ねた場合は得られないが、礫の表面に厚い生物膜が付着して空隙体積が減少した場合などでは達成されよう。また本モデルでは礫層1層分の厚さと粒径を等しいとしたので、空隙率0.6および0.8という場合は礫層各層がそれぞれ格子の上に乗っている様な場を考えれば良いであろう。これらによると空隙率が大きくなると礫層深部において高い基質濃度と大きな流速が達成され、特に第Ⅲ領域の活性が飛躍的に大きくなつて空隙体積の増加による効率の低下を考えても礫層全体の活性が向上している。つまり礫はあ

る程度間隔を開けて並べた方がよいということになる。

#### 4.3.4 碓層の厚さの影響

碓層は多くの碓を積めば積むほどその分だけ付着面積が増えて活性が大きくなると考えがちである。碓層厚さを3層から60層まで変化させてシミュレートした結果、碓層が深くなってしま基質供給が律速になって、ある程度以上になっても碓層の深い部分の活性の増加はあまり期待できなかった。つまりある程度以上に碓層を深くすることはあまり効果が無いことが示された。

#### 4.3.5 水路の勾配の影響

水路の勾配を0.1%から10%まで変化させた。勾配の増大にともなってスリップ速度および碓層内浸透流速が増大し、碓層各領域で活性が大きくなった。しかし表面流平均流速も同時に大きくなってしまい、ある一定の長さの流速を通過した後の浄化率（除去率）を考えると必ずしも効率が良いとはいえない。

#### 4.3.6 表面流水深の影響

表面流の水深を1cmから100cmまで（水深碓径比0.2～20）変化させた。その結果、水深の増加にともなってスリップ速度の値が大きくなり、碓層表面付近の活性増加によって碓層全体の活性も大きくなった。しかし碓層深部における活性の増加はほとんどみられていない。この場合も勾配の影響の場合と同様に表面流平均流速も大きくなってしまい、一定流路当りの浄化率または除去率を考えると必ずしも効率が良いわけではない。

#### 4.3.7 微生物の基質摂取速度の影響

微生物自体の基質摂取速度はもちろん微生物によってそれぞれ異なっているし、また温度、pH、阻害物質の有無等、様々な外的要因によって左右される。それらの要因による影響を調べるために、みかけ比フラックス係数Kfuの値を変化させてシミュレートを行った。反応速度の低下によって基質が碓層深部にまで供給されるようになり、それにともなって碓層深部の寄与率も上昇した。これによると基質摂取速度の小さい微生物による反応を考える場合、および水温の低下、阻害物質の流入等微生物にとって過酷な条件を想定する場合は深い碓層が有効に働くことになる。

### 4.4 水路における自浄作用を高める路床設計方法に関する検討

ある水路の単位幅当り流量、勾配が与えられた場合に路床の設計をどの様にしたら最大の自浄活性が得られるかについての知見を得ることを目的にシミュレーションを行った。路床設計における変数としては路床に敷き詰める碓の径、碓層の空隙率、碓層の数の3つを考えた。

#### 4.4.1 碓径の影響

碓径を0.1cm～15cmまで変化させた計算結果によると碓径が大きい方が単位面積当りの浄化能力が大きいことが示された。河川の自浄係数を計算した結果、これも粒径と共に大きくなってしまい、水路の水辺環境の改善という面からも大きい粒径が有効であることが示された。つまり粒径はなるべく大きい方が水路の浄化促進に有効に働くことが示された。

#### 4.4.2 空隙率の影響

空隙率を 0.4から 0.8まで変化させてシミュレーションを行った。この範囲内での空隙率の増大に伴う比フラックスおよび自浄係数両方の増加が示され、空隙をある程度開けて礫を積んだ方が浄化力の改善に有効であることが示された。

#### 4.4.3 磯層数の影響

磯層数を 3～60層まで変化させたシミュレーションを行った。20層までは磯層を多く積み重ねた効果が少し現れるが、それ以上積み重ねても全く浄化力の改善はみられなかった。つまり磯層を無闇に多くすることは必ずしも有効ではなく、本シミュレーションの条件では 5層程度でも十分な浄化力を期待できることが示された。

### 4.5 磯層における生物学的自浄作用の総合的評価

磯を有する水路床における生物学的自浄作用に関するモデルを作成し、シミュレーションによる感度解析の結果、以下の結論を得た。

- 1) 磯層全体の比フラックス（路床単位表面積当たりの浄化力に関する指標）が最大になる最適磯径が存在する。
- 2) 磯層の空隙率は大きい方が比フラックスが大きくなる。
- 3) 磯層数はある程度までは大きい方が比フラックスも大きくなるがある程度以上多くなると比フラックスの増加はほとんど見られなくなる。
- 4) 水路の勾配、および水深は大きい方が磯層の活性自体は大きくなるが、それは表面流の流速の増大の結果であり、一定流路長さを表流水が通過した後の浄化率を考えると必ずしも効率的とはいえない。
- 5) 基質消費速度の小さい微生物を考える場合や低い水温、阻害物質の流入等が考えられる場合は深い磯層が有効に働く。

また水路表面流の流量一定の条件下におけるシミュレーションの結果、水路の浄化促進工法に関して以下の知見を得た。

- ① 水路床に積み重ねる磯の径は大きいほどよい。
- ② 磯はなるべく空隙を開けて積み重ねたほうがよい。
- ③ 磯層の厚さはむやみに大きくしても効果は期待できない。一般には 5層もあれば十分であろう。