

資料 (Data)

相模湖上流地域における炭素繊維を用いたリン浄化に関する検討

秀平敦子, 関谷雅幸, 高坂和彦  
(調査研究部)

Examination of phosphorus purification technique using carbon fiber in Lake Sagami upstream region

Atsuko HIDEHIRA, Masayuki SEKIYA and Kazuhiko KOHSAKA  
(Research Division)

キーワード：リン, 相模湖, 炭素繊維

1 はじめに

相模湖は、山梨県を源流とする相模川をせき止めて作られた人造湖である。その水は上水道や工業用水のほか、水力発電、灌漑用水、水上レジャーなど幅広く利用されているが、富栄養化状態にあるため、夏場にはアオコが発生するなどの問題も抱えている。

相模湖の水質は、平成 22 年 9 月の類型指定替えにより、現在は湖沼の環境基準によって評価されている。合わせて全窒素及び全燐の環境基準値（全窒素 0.2mg/L, 全燐 0.01mg/L）も設定されたが、相模湖の全燐濃度は環境基準値を大幅に超過し、同時に定められた暫定目標値（0.085mg/L・平成 28 年 3 月 31 日から 0.080mg/L）付近を推移している（図 1）<sup>1)</sup>。

全燐濃度の環境基準超過要因としては、上流に位置する山梨県からの流入負荷が約 440kg-P / 日と多いことがあげられる。そのうち約 4 割が湧水に、約 2 割が山林、田畑、市街地などの土地系

に由来していると推定されている<sup>2)</sup>。そのため、相模湖内のリン削減には、相模湖及びその流入河川から、流入負荷の約 6 割を占める湧水や土地系由来のリンを直接除去する浄化対策が、発生源対策と合わせて有効と思われる。しかしながら、相模湖及びその流入河川水は浄化対象としてはリン濃度が低く、また幅広く利用されているため、対応できる技術は限られている。

当センターでは、これまでに凝集沈殿法や晶析脱リン法などの物理化学的手法を用いた湖沼及び流入河川の直接浄化の可能性について、主に相模湖水を用いた室内実験により検討を行ったが、その結果、物理化学的手法による除去は困難であることが分かった<sup>3)</sup>。ところが、この検討中に凝集沈殿法で補助資材として用いた炭素繊維によってリンが浄化される現象が見られた。

炭素繊維は、微生物や汚泥を含む水中の浮遊物を付着することで沼や池の透明度を上げるなど、水質浄化能力を持つことが知られている<sup>4,5)</sup>。実証試験なども行われているが、比較的濁度の高い池などがその対象となっている。

そこで、本研究では相模湖及びその上流地域の水を用い、炭素繊維を接触材としたリン浄化の可能性とその課題について、室内実験及び小型の浄化装置による屋外実験による検討を行った。



図 1 全燐濃度の推移 (相模湖湖央東部・上層)

2 実験方法

2.1 室内実験

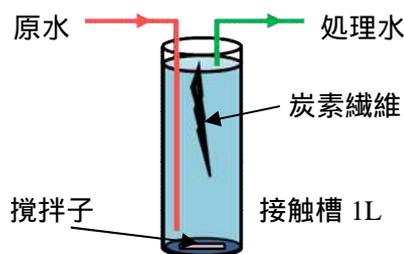


図2 室内実験装置

表1 室内実験装置の基本処理条件

項目	条件	項目	条件
装置容量	1L	炭素繊維量	1mg
滞留時間	1日	流入水量	1L/日
温度	室温	照度	室内における自然光

### 2.1.1 模擬水を用いた基礎的検討

炭素繊維を吊り下げた室内実験装置（図2）を用い、水槽の底へ数分おきに原水を少量ずつ流入させ、越流した水を処理水として1日ごとに回収した。原水には、ろ過した相模湖水にリン濃度が0.15mg/Lとなるようにリン溶液（50mg-P/L）を添加したものをを用いた。

基本的な処理条件を、表1のとおり設定し、炭素繊維量、滞留時間、水温、照度、対流の条件を一つずつ変化させながら、それぞれの影響について1条件につき1~3か月間検討を行った。その間、繁茂した微生物はそのままにし、回収は行わなかった。

処理水は孔径0.45μmのシリンジフィルターでろ過し、リン浄化率は、処理前後の溶解性磷酸態リン濃度（以下「リン濃度」という。）から次の式によって算出した。

$$\text{リン浄化率(\%)} = \frac{\text{処理前後のリン濃度差}}{\text{原水中のリン濃度}} \times 100$$

なお、分析はJIS K 0102-2013「工場排水試験方法」により実施し、試薬は全て特級グレードまたは同等品を使用した。

### 2.1.2 相模湖上流域の水を用いた検討

相模湖には、山梨県にある山中湖を水源とする桂川の水が流入している。桂川のリン負荷量は中流部が高く、途中で一度減少したのち下流部で一気に増加する傾向にある<sup>6)</sup>。桂川の中流域では、途中で農業用や発電用に取水されているが、発電用水は下流部で桂川に放流されてい



図3 小型浄化装置

表2 小型浄化装置の運転条件

条件設定日	8/19	9/16	10/6	11/5	12/1
滞留時間(h)	1		2	2.1	2
流入量(L/分)	15		7.5	7	7.5
炭素繊維量(g)	20		70		

る。その間暗渠などを通過するため、自然浄化の影響を受けにくいことがこの原因と考えられた。そこで、発電用導水路の取水口、貯水池入口及び貯水池出口の水質調査を実施し、全磷及び磷酸態リン濃度の測定を行った。

また、貯水池出口の水について、50mL槽を用い、炭素繊維1mg、滞留時間3時間の条件で1か月間連続室内実験を実施した。

### 2.2 屋外試験

平成27年8月中旬~12月にかけて、小型浄化装置を相模ダム脇に設置し（図3）、リン浄化効果の検証を行った。

小型浄化装置は、炭素繊維を吊り下げた1000Lの接触槽（上部直径119cm、高さ120cm、実容量900L）に、水深9m付近から揚水した湖水を導入し、湖水を直接浄化する装置である。炭素繊維量、滞留時間などの運転条件を表2に示した。なお、試験当初は水面下に吊り下げた70cmの紐から10束の炭素繊維が左右水平方向に延びている形状のものを使用した。また、9月16日からは幅60cm、長さ100cmのノレン状に炭素繊維が固定されている形状のものを使用した。

週1~2回、原水槽及び放流槽の水を採取し、全磷、リン濃度等を測定した。

## 3 結果と考察

### 3.1 室内実験

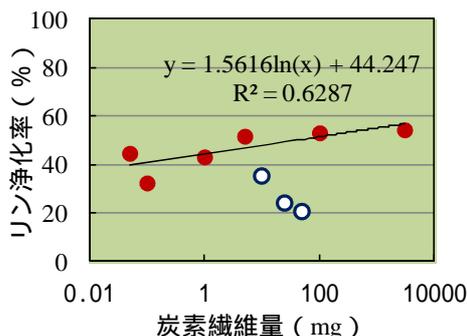


図4 炭素繊維量の影響(横軸：対数)

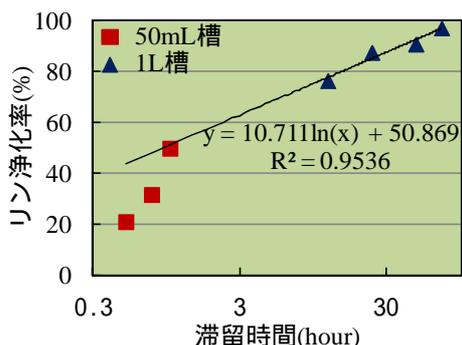


図5 滞留時間の影響(横軸：対数)

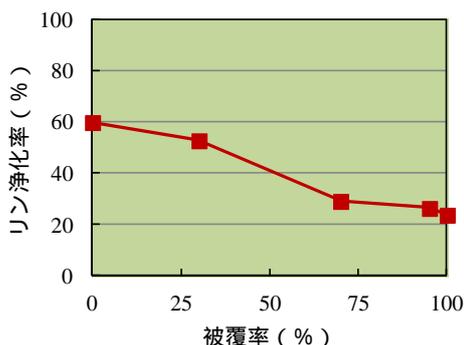


図6 光照射の影響

### 3.1.1 模擬水を用いた基礎的検討

最初に炭素繊維量の検討を行った。炭素繊維量を 0.05 ~ 3000mg の範囲で処理したところ、浄化率は炭素繊維量にほとんど影響されなかった(図4)。しかし、図に示したの点(繊維量 10 ~ 50mg)で一時的に浄化率が落ちており、再実験でも同様の結果であった。この領域で浄化率が低下した理由は不明だが、炭素繊維への浄化微生物の広がり具合(付着状況)が影響している可能性が考えられた。そのため、炭素繊維 10mg を槽内 5 か所に分散して設置したところ、浄化率は 1 か所の場合の 35% から 67% (7 週間平均) に向上した。このことから、この領域では、炭素繊維を分散して設置することで浄化微生物との接触面積が増加し、浄化率が向上するものと思われた。

次に滞留時間の検討を行った。滞留時間 12 ~

表3 室内実験における最適浄化条件

項目	条件
滞留時間	> 1 時間
水温	> 15
対流	必要
光の照射	必要

表4 発電用導水路の水質

(H26.9 ~ 11; n=3)

項目	全燐	磷酸態燐
取水口	0.158	0.157
貯水池入口	0.109	0.105
貯水池出口	0.127	0.114
桂川橋	0.10	0.080
境川橋	0.093	0.069
相模湖大橋	0.077	0.041

平成 26 年 9 月 ~ 11 月の測定結果の平均値<sup>7)</sup>

72 時間の範囲で処理したところ、浄化率はほぼ 80% 以上となった(図5)。相関式から 1 時間で浄化率 50% となると想定されたことから、滞留時間を 0.5 ~ 1 時間とするため、槽容量を 50mL にして同様の検討を行った結果、滞留時間 1 時間で浄化率 50% が得られた。

水温については、20 前後では浄化率への影響は見られなかったが、15 以下になると浄化率は低下した。このことから、冬季の浄化は困難と思われた。

また、光照射の影響については、装置の側面を覆い、光が当たる割合を変えて実施した。被覆率 100% は暗幕で装置全体を覆い、完全に遮光した。被覆率に応じてリン浄化率は変化し、被覆率 0% で最大となった(図6)。このことから、リン除去には光照射が必要であることが明らかとなった。

最後に、装置内での対流の影響について検討を行った。少しずつ流入する原水が十分混合するよう、マグネチックスターラーを用いて静止しない程度に攪拌して対流を作り出したところ、対流がない場合に比べてリン浄化率が 20% 程度向上した。これは、原水と炭素繊維表面に繁茂した浄化微生物との接触効率が向上したためと考えられた。

以上の結果から得られた室内実験における最適浄化条件は、表3のとおりであった。

### 3.1.2 相模湖上流域の水を用いた検討

発電用導水路の水質は、表4のとおりであっ

た。取水口は比較的全燐濃度の高い地点にあり、その濃度は燐酸態燐濃度とほぼ等しく、途中の貯水池までに減少がみられた。

導水路の取水許可量は最大  $27\text{m}^3/\text{s}$  であり、放流先である桂川合流地点の下流に位置する桂川橋の平成 26 年度の年平均流量は  $37\text{m}^3/\text{s}$  である<sup>8)</sup>。このことから、桂川橋の水は、導水路経由で流下してきたものが多いと思われ、2.1.2で述べた下流部で一気にリン負荷量が増加する理由のひとつは、この発電用導水路であると思われた。

なお、貯水池出口の水を用いた室内実験では、リン浄化率が 50%以上となり、相模湖水とほぼ同様の結果が得られ、炭素繊維による浄化の可能性が示唆された。

### 3.2 屋外試験

室内実験で得られた結果から初期条件を設定し、検証試験を開始した。試験開始時に吊り下げた炭素繊維は、槽の中央で直径 20~30cm 程度に広がり、9 月初旬には炭素繊維表面に浄化微生物が十分繁茂していた(図7)ことから、9 月 8 日から処理前後の水質測定を開始した。なお、試験期間中、水面に浮上した汚泥は回収したが、沈殿物等の回収は行わなかった。

試験期間中のリン濃度とリン浄化率の推移を図8に、温度計を設置した 9 月 16 日からの平均気温、水温(11 月 11~17 日までは、温度計の電池交換のため欠測)と試験期間中の降水量の推移を図9に示した。

8 月下旬から 9 月下旬までは雨天・曇天が続くなど天候不順等の影響もあり、初期条件では水質に変化が見られなかった。炭素繊維の広がりも槽の直径に対して半分程度であったため、試験水と浄化微生物との接触効率が室内実験より低くなっていると考え、9 月 16 日に接触槽を流入側と流出側に区切る形で炭素繊維量を増やし、また滞留時間を 2 倍にするなど条件を変更して調査を継続した。10 月中旬までに得られた最大のリン浄化率は、13.3% (10 月 14 日・リン濃度差  $0.004\text{mg/L}$ ) であった。

10 月下旬の採水時に、配管の目詰まりが原因と思われる流量の低下があり、翌週には  $2\text{L}/\text{分}$  (滞留時間 7.5 時間) となった。このときのリン浄化率は 24.3% (同  $0.009\text{mg/L}$ ) と期間を通して最大のリン浄化率となったが、配管を清掃して流入水量の回復を図ったため、その後のリン浄化率

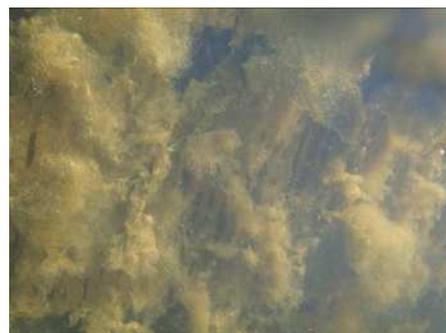


図7 炭素繊維に付着した浄化微生物

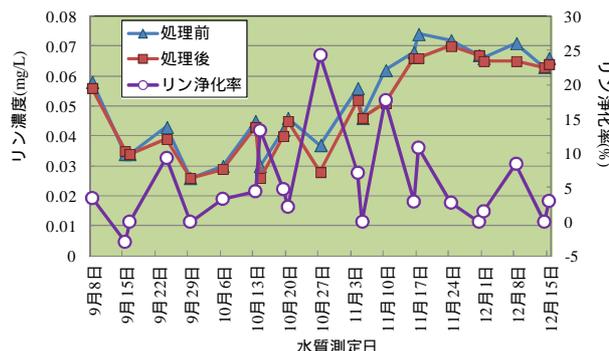


図8 リン濃度とリン浄化率の推移

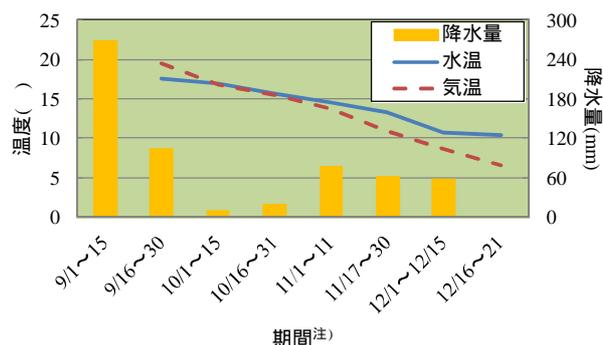


図9 平均温度と降水量<sup>9)</sup>の推移

注)11月の降水量については、15日間毎のもの

は最大で 17.7% (11 月 16 日・同  $0.011\text{mg/L}$ ) であった。

11 月下旬ごろに、室内実験では見られなかった貝類(種は不明)が炭素繊維や壁面上に発生し始め、徐々に浄化微生物が消失していった。貝類による摂食が考えられたことから採水時に大きな貝類は取り除いたが、12 月中旬には、ほぼすべての浄化微生物が消失した。貝類の発生に加え、11 月上旬には平均水温が 15 以下になったことから、消失の原因はこれらにあると考えられたが、詳細は不明である。

### 3.3 室内実験と屋外試験の違い

3.1.1と3.2の違いについて、表5にまとめた。これらの違いから、屋外試験で浄化

表5 室内実験と屋外試験の違い

項目	室内実験	屋外試験
試験水	ろ過した湖水又は河川水	湖水そのまま
接触槽容量 (L)	0.1~1	900L
接触槽材質	透明ガラス	不透明プラスチック
接触槽の直径と水深の比	1:5	1:1
炭素繊維重量 (g)	0.0001~1	20~70
上方から見た炭素繊維の広がり具合	全体的に広がる (目視7割)	局所に集中 (目視2割)
接触槽表面での浄化微生物による膜の形成	あり	あり
日中の天候	比較的安定	不安定
水温	15~25	天候回復時には15前後
貝類の発生	なし	あり
リン浄化率	50%以上	-2.9~24.3%

率が低くなった原因として次のことがあげられる。

- 1)炭素繊維が、接触槽中心部に集中していた。
- 2)接触槽の形状や材質が異なるため、水が循環しにくく、炭素繊維に付着した浄化微生物と原水との接触効率が悪くなったほか、上部からの日射しかなかったため槽内部での照度が不十分であった可能性がある。
- 3)11月頃から平均水温が15以下になり、浄化微生物の活動が抑制された可能性がある。

### 3.4 相模湖上流域における直接浄化の可能性

屋外試験では、炭素繊維に付着した浄化微生物と試験水の接触効率がリン浄化に影響するという可能性が示唆された。

リン浄化率を上げるには、接触効率が上がるよう設置場所の状況に合わせた炭素繊維の設置方法を検討する必要があるが、相模湖は様々な用途で使用されていることから、浄化機材を設置できる場所はほとんどないと思われる。また河川では、流速にもよるが設置範囲が狭いとほとんど接触しないまま流下してしまう可能性が高い。導水路途中にある貯水池については、現地を確認したところ、流出入の水量が多く流れが速いほか水位変動も激しいため、機材の設置を考えると炭素繊維による直接浄化には向いていなかった。

他にも、水温や浄化微生物以外の生物もリン浄化率に影響を及ぼすことが考えられた。室内試験の結果から、直接浄化には水温が高いほうがよいと思われたが、相模湖上層部の平均水温は約15 (平成26年度平均)であることやリン濃度は比較的水温の低い時期に高くなる傾向がみられ

る<sup>1)</sup>ことから、この時期のリン浄化は難しいと思われる。また、今回の屋外試験では貝類が発生しており、浄化微生物が摂食された可能性がある。浄化微生物の減少は、その度合いが大きいとリン浄化率が低下するおそれがあるが、この流域でどのような生物が発生し影響を及ぼすかについては、今回の試験だけではわからない。

以上のように、今回の屋外試験では、相模湖上流域における炭素繊維を用いたリンの直接浄化は難しいという結果が得られた。

### 4 まとめ

相模湖上流域における炭素繊維を用いたリン浄化について、相模湖水を模擬水に用いた室内実験及び屋外試験による検討を行った。

室内実験では、浄化微生物が炭素繊維表面に繁殖することで、相模湖やその上流地域の水のようにリン濃度が低い水であっても、光照射が十分であれば浄化できることを確認した。

屋外試験では、炭素繊維に付着した浄化微生物と試験水の接触効率や水温、貝類のような生物の発生などがリン浄化率に影響を及ぼすことが分かった。流域の状態を考慮すると、相模湖上流域において炭素繊維を用いたリンの直接浄化は難しいと考えられた。

### 5 謝辞

屋外実験の実施にあたり、装置設置場所の提供及び設置についてご協力いただいた、企業庁相模川水系ダム管理事務所の方々並びに発電用導水路の採水にご協力いただいた方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 神奈川県：神奈川県公共用水域及び地下水の水質測定結果（HP）  
<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f41010/>  
(参照;2016.11)
- 2) 神奈川県：平成 21 年度桂川・相模川流域における水質汚濁負荷量調査業務報告書 - 平成 22 年 3 月(2010)
- 3) 秀平敦子，池田佳世，井上充：相模湖水中の低濃度リンの直接浄化に関する検討，神奈川県環境科学センター研究報告，(37)，18-23(2014)
- 4) 小島昭：水質浄化の発見と池水浄化への展開，化学経済，55(3)，72-77(2009)
- 5) 明田川康，福永和久，高木敏彦：炭素繊維を用いた水質浄化技術，環境浄化技術，10(6)，73-77(2011)
- 6) 田所正晴：相模湖・津久井湖の水質汚濁の実態解明，第 17 回環境科学センター業績発表会要旨集，19-22(2008)
- 7) 神奈川県：平成 26 年度神奈川県水質調査年表 - 平成 28 年 2 月 (2016)
- 8) 山梨県：山梨県公共用水域及び地下水の水質測定（常時監視）（HP）  
<https://www.pref.yamanashi.jp/taiki-sui/sokutei.html>  
(参照;2016.11)
- 9) 気象庁：過去の気象データ検索（HP）  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>  
(参照;2016.11)