

## 河川の自浄作用

村上 健\*

河川に流入した汚濁物質はその汚濁物質自体が有害であるという場合も多いが、たとえば、通常の有機性汚濁物質を対象とした場合には、有機物そのものよりもむしろ河川水中で有機物が種々の変化を受けて行く過程でいわゆる汚濁という状態が起こると解すべきであろう。したがって、河川の自浄作用を、単に汚濁物質が河川を流下して行く間に自然に減少して行く現象ととらえてはならず、その結果として起こる現象、あるいは因果関係までを含む総合的な現象としてとらえなければならない。

さて、一般に河川の自浄作用という場合、汚濁物質がシアンや重金属などの無機性の物質のときには、多くの場合、希釈や拡散による濃度の均一化しか期待できなく、量の本質的な減少は起こらないので（物質によっては沈殿、吸着、化学的な分解などが起こるものもあるが）、自浄作用という概念を用いることは少ない。したがって、自浄作用という場合には、BOD で汚濁の程度を表わせるような有機性汚濁物質による汚濁を対象とするのが普通であり、ここでも、有機性汚濁物質に関する自浄作用について述べることにする。

有機性汚濁物質の量を BOD で表わした場合、BOD が減少するという事は溶存酸素が消費されるということとほぼ同義であるから、自浄作用という場合には、BOD の減少に伴って消費された溶存酸素がどのように回復されるかということを含めて考えなければならない。この意味から、河川の自浄作用についての理論的な裏付けは Streeter と Phelps によって始められたといえる。彼らは河川水中の BOD は流下時間に応じて 1 次反応で減少して行くとして、次のような形で表わした。

$$dL/dt = -K_1 L \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $L$  は時間  $t$  における BOD、 $K_1$  は脱酸素係数である。

また、このような形で減少して行く BOD はそれに対応するだけの溶存酸素を消費するが、この消費速度と空気中からの酸素の供給速度との平衡によって河川水中の溶存酸素濃度が規定されるとして次のように表わした。

$$dD/dt = K_1 L - K_2 D \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $D$  は時間  $t$  における溶存酸素不足量（飽和溶存酸素濃度－溶存酸素濃度）、 $K_2$  は再曝気係数である。

Streeter と Phelps の式には、脱酸素係数の意味づけの問題やこれらの式で考慮されていない因子の影響の問題などがあり、そのままの形で適用できるケースは少ないとされているが、自浄作用の研究はその大部分が Streeter と Phelps の式を議論の出発点として発展してきたといえる。河川水中での BOD の減少の機構については Streeter と Phelps の研究以来多くの研究が行なわれてきており、現在では、通常大別して次の 3 つの形態での BOD の減少があるとされている。① 水中の好気性細菌の活動によるもの、② 河床に付着している微生物、細菌による吸着、分解、③ 有機性浮遊物質として存在する BOD の沈殿、などである。

このうち、水中の好気性細菌の活動による BOD の減少については、細菌が有機物を直接酸化してエネルギー源として利用する形で起こるものと、有機物がいったん細菌の増殖に用いられ、その後、増殖した細菌の自己酸化あるいは細菌を補食する原生動物の代謝という形で起こるものがあるとされているが、BOD の減少速度には有機物の分解しやすさの程度および利用しうる有機物量と細菌数との比が大きく関係しているといえよう。また、最近では微生物学的な研究により、細菌の活動による BOD の減少を式（1）のような 1 次反応式で表わして良いかという根本的な疑問も提出され始めている。

河床に付着している微生物、細菌による河川水中の BOD の除去は、散水層床における BOD 除去と同じ機構であり、表面に微生物膜が付着した岩床または砂礫床の河川で、特に水深が浅く乱れが強い場合、その影響が大きいとされている。微生物膜に吸着された河川水中の有機物（BOD）の大部分は、水中から微生物膜中に供給される酸素によって好氣的に分解され、また一部分は微生物膜の底部で嫌氣的に分解されるといわれている。このような形での BOD の除去については、除去速度が境界層を通じての物質輸送速度に関係しているとして、水理学的なアプローチも試みられている。また、沈殿による BOD の減少については、河川に流入する廃水の種類によっては非常に沈降しやすい物質が含まれていることもあり、実際にはかなりの影響を持っているケースが多い。しかしながら、浮遊有機物の沈殿の機構はまだまだ十分には明らかにされておらず、さらに、沈殿堆積した有

\*正会員 建設省土木研究所 下水道研究室

機物による2次汚濁の問題、あるいは洗掘・再浮遊の問題なども残っており、今後の研究課題になっている。

このように、河川水中でのBODの減少は非常に複雑な形で起こっているものであるが、実用上の問題としてはBODの減少をoverallな形で式(1)のような1次反応式で表わした場合、その速度係数はいかなる意味を持つのか、また、実際河川ではいかなる値をとるものか、実験室のBOD試験などによって定めうるものかなどが大きな問題になる。まず、速度係数の意味づけについては、河川水中でのBODの減少には沈殿による除去や河床に付着している微生物膜による除去の一部のように溶存酸素を消費しないで減少するものもあるので、一括して脱酸素係数と呼ぶのは不適當であり、現在ではBOD減少係数 $K_r$ と呼ぶことが多い。さらにこのうち溶存酸素を消費して減少するものを $K_1$ で表わして脱酸素係数と呼び、溶存酸素を消費しないで減少するものを $K_2$ としてStreeterとPhelpsの式で速度係数を定義しなおして適用するのが通例である。河川でのBOD減少係数 $K_r$ の実測は、先に述べたBODの除去機構の研究に関連して数多くの河川で行なわれており、個々のケースについては理論的な説明のついた場合も多く、また、そのような形で自浄作用の研究が進歩してきたわけであるが、現在までの研究では個々の河川について一般的にBOD減少係数を与えることができる段階にはなっていない。したがって、個々の河川についてBOD減少係数を定めるためには、現状では実測するのが最も安全な方法といえるが、BOD減少係数は汚濁負荷の流入条件や河川の水利条件などによって変わるので、実際問題としては実測によっては解決がつかない場合が多い。よって、何らかの実験的な手法によって河川水中でのBOD減少係数の値を推定することができれば最も望ましいわけであるが、従来の実験室のBOD試験によって求めた脱酸素係数では、多くの場合代用することができない。しかしながら、先に述べた河川水中でのBODの減少についての研究に関連して、実際の河川になるべく近い状態でBOD減少係数を測定できるような実験方法、実験装置の開発が行なわれており、今後の発展が望まれている。

以上はBODの減少という観点からみた場合であるが、自浄作用のもう一つの側面は、溶存酸素の回復という問題である。河川水の溶存酸素濃度を規定する因子には、StreeterとPhelpsの式で考慮されているBODによる脱酸素と空気中からの酸素の供給のほかに、藻類による影響や河床堆積物による脱酸素などもあり、これらの各因子についてそれぞれ広範囲な研究が行なわれている。まず、空気中からの酸素供給、いわゆる再曝気につ

いては、この現象が単に物理的な条件のみで定まることも相まって多くの研究者の興味の対象になっており、再曝気係数 $K_2$ を河川の水利量の関数で表わすことが試みられてきた。その結果、温度の影響を考えなければ、再曝気係数は平均流速 $V$ および平均水深 $H$ の関数として $\text{const} \times V^m/H^n$ のような形で表わされることはほぼ確認されているが、定数や冪数の値は研究者によってかなり異なった値が報告されている。この理由としては、一つには再曝気現象の物理的モデルがまだまだ十分には明らかになっていないという点もあるが、もう一つの大きな理由として、検証に用いるべき河川での実測値が、他の因子の影響で十分正確には求められないという点もあろう。しかし、代表的な計算公式を用いて計算すれば、実用的には支障がない程度の精度は得られるとみなしてよいと思われる。

もう一つの大きな影響を持つ因子として、藻類の光合成および呼吸がある。藻類には固着性藻類と水中に浮遊しているプランクトン性藻類とがあるが、通常はプランクトン性藻類の影響の方がはるかに大きい。藻類は湖などに限らず、極度に汚濁した河川を除けばほとんどの河川に棲息しており、水温が高く日照量の大きい夏季には藻類の影響が支配的になって河川水の溶存酸素濃度が定まってくることが多い。藻類は光合成によって酸素を生産するが、その量は日照量によって大きく変わり、また、呼吸作用によって酸素を消費するし、さらに死滅すればBOD源となるため安定した酸素の供給源として考えることは難しいが、現実には多くの河川で酸素供給源になっている。藻類の影響については湖などの富栄養化の観点から広く研究されており、藻類の単位量当りの酸素生産速度や呼吸速度などについてはおおよそ明らかになってきており、また藻類の量も窒素やリンなどの栄養塩類の量とある程度関係があることがわかっている。しかし、藻類の影響を定量的に取り扱うには、どのような条件のもとでは藻類がどれだけ発生するか、また、死滅した藻類とBODとの関係はどのようになるかなどの点を明らかにして行く必要があり、今後の研究課題であろう。

その他、場所によっては大きな影響を持っている因子として河床堆積物が河川水質におよぼす影響がある。これは、有機性の浮遊物質が流速の小さい所で河床に沈殿して河床堆積物が悪化した結果起こるものであり、河川水中のBODが減少した結果として起こる2次汚染の例とみなせることができよう。

現在までの研究の蓄積によって多くの現象が明らかになってきているが、いまだ、定性的あるいはケーススタディの段階で止まっている分野も少なくなく、今後の研究に待つ所は大きいといわねばならない。