

底泥による静水中での溶存酸素消費に関する基礎実験

Fundamental Experiment on the Dissolved Oxygen Consumption

by Bottom Sediment in Static Water

東野 誠*・神田 徹**

BY Makoto HIGASHINO and Tohru KANDA

Laboratory experiments are carried out in order to investigate the relationship between the mechanism of dissolved oxygen (DO) consumption by the bottom sediment and time-varying process of DO consumption in static water, and the factors which influence DO consumption are examined. The experimental results have shown that DO in water decreases at the initial stage and the rate of DO consumption becomes small with time. It is also found that DO consumption increases when the chasms or holes are formed on the surface of bottom sediment and the sediment volume expands due to generation of nitrogen, hydrogen sulfide or methane gas.

Keywords : Bottom sediment, Dissolved oxygen (DO) consumption, Sediment-water interface, Laboratory experiment

1. はじめに

河川、湖沼などの水域に有機物、栄養塩などの物質を多量に含む底泥が堆積し、これらの底泥による上層水の溶存酸素 (DO) 消費ならびに底部の貧酸素化に伴う栄養塩や重金属などの溶出が水域の水質汚濁、富栄養化をもたらすことが近年、各地で報告されてきた。この問題への対処は種々行われているが、底泥の物性や水質特性に応じて適切な水質改善法を施すには未だ解明されていない水理・水質工学的課題も残されている。本研究は、底泥に起因して上層水の溶存酸素が消費される過程およびその機構について基礎的な実験により検討したものである。

底泥による DO 消費の機構として、1) 直上水から底泥へ DO が移行して水中の DO が消費される場合 (SOD: Sediment Oxygen Demand), 2) 底泥から直上水中へ DO 消費物質が拡散、溶出して上層水中の DO を消費する場合、3) 底泥粒子が巻き上がり浮遊物の形となって DO を消費する場合、が考えられる。このような DO 消費に関して多くの現地観測や室内実験が行われてきており、上述の各機構による DO 消費量についても室内実験等の結果が報告されている¹⁾。一方、底泥直上の流れが DO 消費に及ぼす影響に関して、流水中での底泥による DO 消費量の予測モデル²⁾や、境界層理論を用いた SOD に関する数理モデル^{3), 4)}が検討されている。しかしながら、実際の DO 消費現象は上述のような機構の消費が別々に行われるのではなく、それらが相互に干渉しながら、より複雑な機構で消費が進行し、また流れや上層水質の影響をも受けると考

* 学生会員 修士 (工学) 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程 (〒神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科

えられる。従来の研究では、このような複合的な DO 消費機構と DO 消費の時間的変化特性との関係については十分な検討が行われていない。

本研究では、貯水池および河川に堆積した数種類の底泥を用いて室内実験を行い、上述の 1) および 2) の DO 消費機構と底泥による静水中での DO 消費の時間的変化特性との関係について検討するとともに、底泥中の含有物質や底泥の形態変化などが DO 消費に及ぼす影響について考察した。

2. 実験装置と方法

実験水槽として図 1 に示すように縦 40cm、横 20cm、高さ 80cm の塩ビ製の水槽を用いた。この水槽底部に底泥試料を厚さ 5 ～ 10cm で敷き詰め、上部を DO を飽和させた水道水で満たした。底泥表面より 5、15、25、35、45cm 上部の採水ポイント P1 ～ 5 でサイフォン管を使って採水し、各ポイントにおける DO 濃度を DO メータで、また DO 消費物質濃度の経時変化を測定した。DO 消費物質を表す指標としては、COD_{Mn}を用いた。各実験時の水温は表 2 に示している。

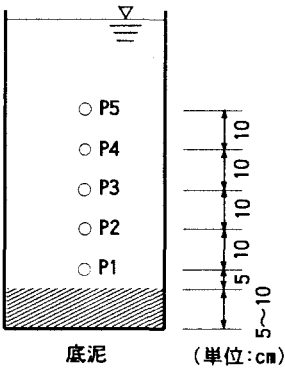


図 1 実験装置概略図

3. 底泥の物性と含有物質

ダム貯水池および河川で採取した底泥の物性および含有物質を表 1 に示す。いずれの底泥も船上や橋上からエクスマンバージ採泥器を用いて採取した。神崎川では浚渫が行われた地点と、行われていない地点の 2 点を選んで採泥した。また、寝屋川では家庭排水によって影響を受けていると考えられる地点（上流側）と、工場排水によって影響を受けていると考えられる地点（下流側）の 2 地点を選んだ。底泥中に含まれる有機物質、栄養塩類については、採取した底泥を 3,500 回転 / 分で 10 分間遠心分離して得られた間隙水について COD、T-N、T-P の濃度を下水試験方法 (1984 年版)⁵⁾ に準じて分析した。

表 1 に示す通り、粒度や有機物、栄養塩含有量は各底泥によって大きな差異が見られた。

表1 実験に用いた底泥の物性と含有物質

実験No.	底泥試料	d ₅₀ (μm)	VSS (%)	間隙水(mg/ℓ)			(mg/kg)	
				COD	T-N	T-P	Fe	Mn
1	菅生ダム底泥	14.2	9.9	86	27	2.8	36,000	850
2	菅生ダム底泥	14.2	9.9	162	32	1.0	36,000	850
3	神崎川底泥 浚渫後	16.5	10.2	113	154	11.5	33,000	390
4	神崎川底泥 浚渫前	48.0	6.7	82	38	5.2	42,000	480
5	寝屋川底泥 上流側	180.0	1.0	28	28	0.7	11,000	130
6	寝屋川底泥 下流側	15.0	19.3	149	182	13.5	42,000	480

4. 底泥による DO 消費特性

4.1 DO 消費の時空間的特性

採水ポイント P1（底泥直上 5cm）での DO 濃度の経時変化を、実験 No.1、2、3、5 を例として図 2 ～ 5 に示す。高濃度の DO 消費物質を含む底泥と上層水が接した場合、底泥表面の還元性物質の酸化のために上層水から底泥表面に DO が移行し、一方、底泥からの DO 消費物質の拡散、溶出によってまず底部の水・底泥境界面近傍が貧酸素化し、時間とともに貧酸素層が上部へと拡大してゆくものと予想される。しかし、各実験において、水深による DO 濃度の経時変化特性にあまり違い（明瞭な時間のずれ）は見られなかった。別の DO 消費に関する室内実験結果¹⁾でも、静水中での実験では水深方向に DO の濃度変化は全く認められないと報告されており、本研究でもこのような傾向が見られた。底泥を敷く際、底泥の厚さは実験 No.1 では 5cm とし、実験 No.1 以外の実験では全て 10cm とした。

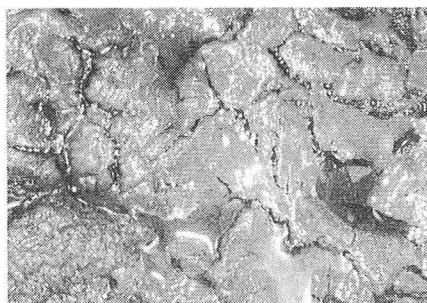


写真1 菅生ダム底泥表面のひび割れ

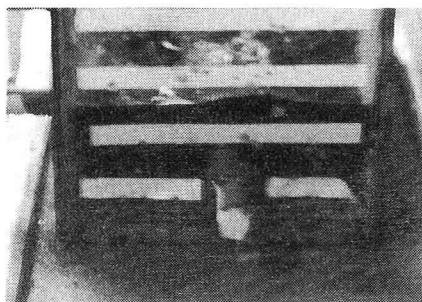


写真2 神崎川底泥(浚渫後)の膨張

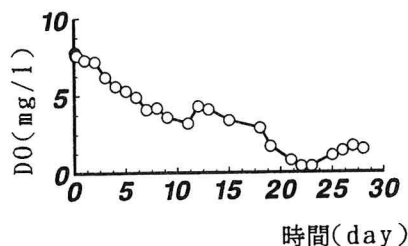


図2 実験 No.1 における DO 濃度の経時変化

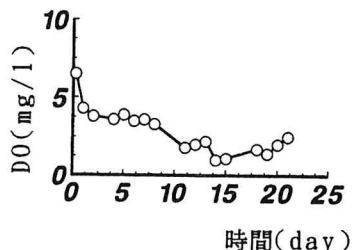


図3 実験 No.2 における DO 濃度の経時変化

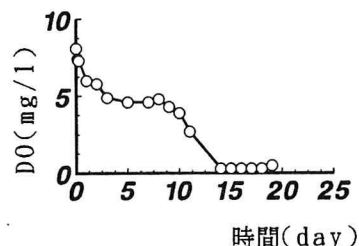


図4 実験 No.3 における DO 濃度の経時変化

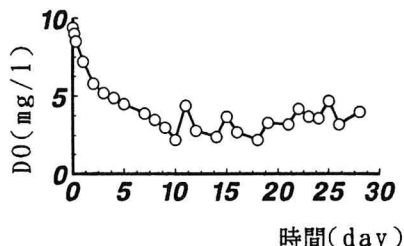


図5 実験 No.5 における DO 濃度の経時変化

図3より、実験 No.2では実験開始後 DO 濃度は時間とともに緩やかに低下してゆくのがわかる。底泥表面は実験開始直後は黒色であったものが、11日目頃より徐々に茶褐色に変色した。また、8日目から11日目および13日目頃に DO 濃度が急減している。これに対応して、この時期に底泥表面に大きなひび割れ(写真1)が次々と生じており、これが DO 消費の促進に関係していると考えられる。写真1に見られるように、実験終了時の底泥は、静水中の実験であるにもかかわらず元の底泥表面の様子が全く分からないほど全面にわたってひび割れが生じている。実験 No.1でもこの傾向は同じであり、底泥表面が茶褐色に変色しひび割れが生じた。ひび割れに対応して図2に示すように実験開始後20日目頃に急激に DO 濃度が低下した。実験 No.1,2ともに実験中、底泥から上層水中への気体の放出が観察された。また、底泥の厚さと DO 消費特性の関係については明確ではなく、DO 消費特性にはこれよりもむしろ表面のひび割れによる影響の方が大きいと考えられる。

実験 No.3でも、図4に示すように10日目以降に DO 濃度が急減した。この頃、底泥自身が20～30%膨張しており(写真2)、このような底泥の変化は DO 消費特性に影響を及ぼしていると考えられる。また、実験 No.3では底泥表面は終始黒色であり、実験 No.1, 2のように茶褐色に変色することはなかった。底泥粒子のほとんどが砂であった図5の実験 No.5では、底泥表面が茶褐色に変色し始めた7日目頃より直径および深さがそれぞれ数 mm 程度の穴が現れ、実験終了時には数十箇所確認された。また、この底泥の間隙水 COD 濃度は表1に示す通り他に比べて極端に低いにもかかわらず、底泥間隙水 COD 濃度が高か

った実験 No.2, 6 と同程度の DO が消費されたのは、このような底泥表面形態の変化に加えて底泥粒子のほとんどが砂であり、また粒径が他に比べて大きいことも影響している可能性がある。

4.2 DO 消費の時間的特性と DO 消費機構

実験結果より、いずれの底泥を用いた実験でも、図 6 に示すように実験開始後数時間から数日で DO 濃度が急減し、その後緩やかに減少し、最後には DO 濃度がほとんど変化しない状態へと推移することがわかった。DO 消費がこのような経時変化を示すことについて、底泥による DO 消費機構の相違に着目して以下に考察する。

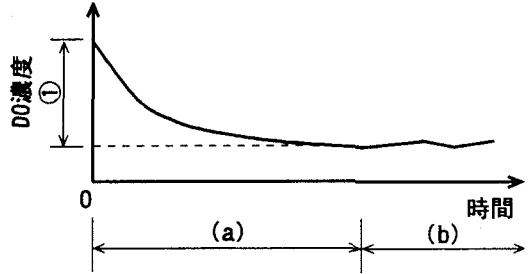


図 6 DO の時間変化の模式図

静水中では、1) 直上水から底泥への DO の移行によって上層水中の DO が消費される場合、2) 底泥から直上水中へ DO 消費物質が拡散、溶出して上層水中の DO を消費する場合、の二通りが考えられる。図 6 の (a) の期間は 1) および 2) の機構による DO 消費が行われ、(b) の期間では 1) の機構による DO 消費のみが行われると考えられる。従来、底泥表層のごく薄い層のみが好気性に保たれることが指摘されているが⁶⁾、このような層が安定して存在するためには、上層水中からの単位時間当たりの DO 供給量がこの層内での DO 消費量と釣り合っていなければならない。このように底泥表層に酸化層が安定して存在する場合には、1) の機構による DO 消費のみが行われ、底泥内部の DO 消費物質は上層水中へと移行する間に酸化層で分解されてしまい、上層水中には拡散、溶出しなくなると考えられる。したがって、図 6(a) の期間の初期には底泥間隙水と上層水との濃度勾配により底泥表層の DO 消費物質は上層水中へと拡散、溶出して水中の DO を消費するが、時間とともにその DO 消費物質量が減少することに加えて、上層水から供給された DO により表層部が酸化されて好気性の層が形成されるため、ある程度時間が経過すると DO 消費物質は上層水中に拡散、溶出しなくなると考えられる。

4.3 DO 消費速度定数

4.1 で述べたように水深による DO 濃度の差異は見られなかったので、各採水ポイントでの DO 濃度の平均値をとり、これを各時刻における上層水の DO 濃度とする。上層水中での DO 消費速度は DO 濃度に比例すると考え、次式で表される DO 消費速度定数を底泥による DO 消費特性を表す指標として定義する。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

ここに、 C ; DO 濃度である。DO 消費速度定数 k (1/day) は、底泥中に含まれる DO 消費物質や粒度などの DO 消費への影響を表すパラメーターと考えられる。式 (1) より次式を得る。

$$C = C_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

ここに、 C_0 ; 実験開始時の上層水の DO 濃度である。各実験によって得られた上層水の DO 濃度の経時変化を式 (2) にカーブフィッティングさせて、DO 消費速度定数 k を求めた。底泥のひび割れや膨張によって DO 消費の促進が認められた実験 No.1, 2, 3 では、このような変化が生じる以前のデータを用いた。また、実験 No.1 ~ 6 では実験中の水温が異なるので DO 消費特性も水温の影響を受けていると考えられる。そこで、実測値より求めた DO 消費速度定数 k を、次の Wuhrman の式⁷⁾によって 20 °C の値に換算した。

$$\frac{\ln k_1 - \ln k_2}{T_1 - T_2} = 0.0315 \quad (3)$$

ここに、 T_1 ; 実験中の平均水温 (°C), k_1 ; 実測値より求めた DO 消費速度定数 (1/day), k_2 ; 20 °C におけ

表2 各実験におけるDO消費速度定数

実験No.	実験中の平均水温 (°C)	DO消費速度定数 k_1 (1/day)	20°CでのDO消費速 度定数 k_2 (1/day)
1	25.8(22.0~28.5)	0.060($r=0.98$)	0.050
2	27.9(26.0~29.0)	0.14($r=0.89$)	0.11
3	22.5(21.0~26.0)	0.068($r=0.92$)	0.063
4	20.3(17.5~23.5)	0.049($r=0.91$)	0.049
5	14.2(12.0~17.0)	0.051($r=0.52$)	0.061
6	13.5(11.0~17.0)	0.046($r=0.97$)	0.056

る DO 消費速度定数 (1/day) である。これらを表 2 に示す。

この DO 消費速度定数 k に関係する因子としては、底泥中の DO 消費物質の濃度および粒度が考えられる。そこで、DO 消費速度定数 k_2 と間隙水 COD 濃度の関係をしらべると図 7 に示すようである。この図より、実験 No.6 および底泥粒子の中央粒径の大きかった実験 No.5 を除くと、間隙水 COD 濃度の高い底泥ほど k_2 は大きい。すなわち、DO 消費物質が底泥から水中へ拡散、溶出して DO を消費する場合、底泥中に高濃度の DO 消費物質を含む底泥ほど多くの DO を消費するといえる。

4.4 底泥の形態変化が DO 消費に及ぼす影響

前述のように、上述の 1)、2) の DO 消費機構の他にも、底泥表面にひび割れが生じたり、底泥が膨張することによって DO 消費が促進されることが認められた。ここでは、DO 消費物質の指標としている COD の経時変化より、このことについて考察する。図 8～10 に実験 No.1～3 の採水ポイント P1 での COD の経時変化を示す。COD についても採水ポイント P1～5 で濃度を測定しているが、DO と同様に水深による COD の経時変化特性にあまり違いは見られなかった。

図 8 より、実験 No.1 では実験開始後 20 日目頃までは 1.9～4.1mg/l 程度の値であるが、23 日目には 5.9mg/l と急激に COD 濃度が上昇している。図 2 より、20 日目頃に底泥表面にひび割れが生じた後、DO 濃度は急減しているが、これと COD が高濃度を呈する時期とが良く対応しているのが確認できる。実験 No.2 でもこの傾向は同じであり、図 9 より 15 日目頃に COD 濃度が上昇しているのが確認できるが、これは図 3 の DO 濃度の減少している時期ともよく対応している。このことから、DO の急減と COD の急上昇は底泥表面にひび割れが生じることによって引き起こされていると考えられる。すなわち、底泥と上層水との間の物質の輸送は界面を通して行われるが、底泥表面にひび割れが生じることによって底泥内部の DO 消費物質が多量に上層水中へと移行するため、COD を上昇させ DO 消費を促進すると考えられる。

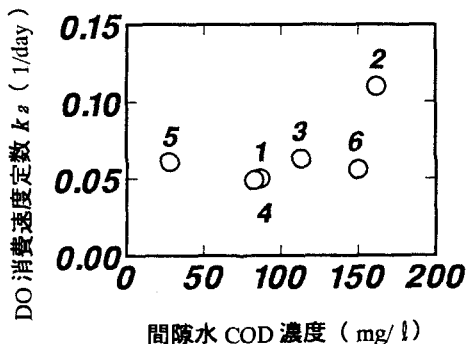


図 7 DO 消費速度定数と間隙水 COD 濃度の関係 (図中の数字は実験 No.)

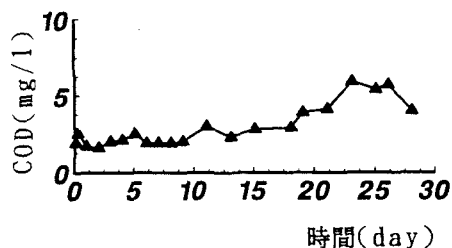


図 8 実験 No.1 における COD 濃度

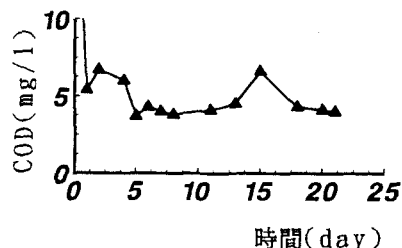


図 9 実験 No.2 における COD 濃度

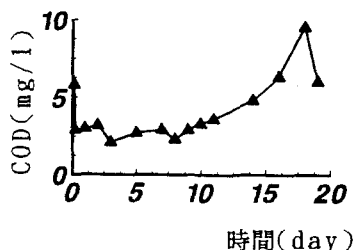


図 10 実験 No.3 における COD 濃度

底泥の膨張が観察された実験 No.3 では、図 10 に示すように底泥が膨張し始めた 10 日目以降 COD 濃度が上昇し始め、18 日目には 9.5mg/l と高濃度を呈するに至っている。これに対応して図 4 に示すように 10 日目以降 DO 濃度が急減し 14 日目以降は 0.5mg/l 以下の低い値で推移しており、10 日目から 18 日目にかけて底泥から DO 消費物質が溶出し続けたことが伺える。

以上のように、底泥表面の形態変化は DO 消費を促進したと考えられる。底泥表面の形態変化を引き起こす要因として、実験中底泥表面から気泡が上層水中へ放出されているのが確認されていることから、底泥内部で何らかの気体が発生していることが考えられる。底泥表面の DO が供給されている部分(酸化層)では好気的な物質代謝が行われるが、その層以深の還元層は脱窒層、硫酸還元層、メタン生成層の順に分かれている⁶⁾。この還元層では嫌気的な物質代謝が行われていることを考えれば、底泥内部で N_2 , H_2S , CH_4 などの気体が生成され、これが底泥を膨張させたり気泡となって底泥表面から上層水中へと放出される際に、表面にひび割れを生じさせることが考えられる。

5. 結 論

本研究では、貯水池および河川に堆積した数種類の底泥を用いて室内において基礎実験を行い、DO 消費の時間的变化特性と DO 消費機構との関係、および DO 消費に影響を及ぼす因子について検討した。得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 静水中での DO 消費機構として、上層水から底泥への DO の移行によって DO が消費される場合と底泥から DO 消費物質が拡散、溶出して水中の DO を消費する場合とがある。DO 消費物質が溶出し続ける間は後者の機構によって水中の DO 濃度は時間とともに減少してゆくが、十分に時間がたつと前者の機構による DO 消費のみとなる。前者の DO 消費速度(SOD)は静水中の場合、後者の DO 消費に比べて非常に小さい。
- (2) DO 消費物質が底泥から水中へ拡散、溶出して DO を消費する場合、高濃度の DO 消費物質を含む底泥ほど多くの DO を消費する。
- (3) 底泥表面にひび割れが生じたり、底泥が膨張することによって、水中の DO 消費が促進される。これは、底泥内部での微生物学的な反応によって引き起こされていると考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、阪神高速道路公団 上枝千夏氏(当時神戸大学学生)に御助力を得た。また、底泥資料の採取について、兵庫県土木部ならびに大阪府土木部に御協力を頂いた。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 茂庭竹生：底泥の酸素消費に関する室内実験，水質汚濁研究，第 9 巻，第 4 号，pp.231-238, 1986.
- 2) 細井由彦，村上仁士，上月康則：底泥による酸素消費に関する研究，土木学会論文集，No.456/Ⅱ-21，pp. 83-92, 1992.
- 3) 中村由行，御子神学，H.G. ステファン：閉鎖性水域における底質の酸素消費速度 - 流れの影響のモデル化 -，海岸工学論文集，第 40 巻，pp. 986-990, 1993.
- 4) 中村由行：底質の酸素消費過程における濃度境界層の役割，水環境学会誌，Vol.16, No.10, pp.732-741, 1993.
- 5) 下水試験方法，日本下水道協会，1984.
- 6) 楠田哲也編：自然の浄化機構の強化と制御，技報堂出版，1994.
- 7) Eckenfelder, W.W., Jr. & O'Connor, D.J.：廃水の生物学的処理，コロナ社，1977.