

1. 問題の背景

当該水域は総貯水量  $11.6 \times 10^6 \text{m}^3$ 、最大水深 31m、年交換率 2~10 程度で南北方向に 5.6km の湛水延長を有する成層貯水池である。成層期には表層にアオコが発生し、深水層が貧酸素化するなど、水質管理上の課題が多い。1988 年より深層曝気が開始され酸素は順調に回復したが、1990 年代半ばより中層に深層曝気が行き届かず嫌気状態に至った。そのため 2010 年 8 月からは深層に加えて中層でも曝気が開始された。中層の貧酸素状態は局部的に解消されたが、同年 9 月の強い北風が作用した際に水道原水でカビ臭が発生した。

2. カビ臭発生当時の状況

カビ臭発生直前 (9 月 21 日) の水温成層、溶存酸素 (DO) の状況を図-2 に示す。中層曝気によって EL.161~166m の範囲の水質が一様化し、その上下に明瞭な水温躍層が発達していた。この時の中層曝気装置の吸入口標高は EL.162.3m、吐出口標高は EL.164.2m である。中層の DO は回復しているが、その直上と深水層は貧酸素状態にある (深層曝気装置が不調)。原水は上下に設置された複数の取水口から選択的に取水される。9 月 21 日当時の取水標高は EL.166.3m であった。流入河川水温から推定される河川水の流入位置を同図に併記する。表層にはアオコが発生していた。図-2 は当該期間における南北方向風速と三つの取水口位置で定点計測された水温変化を示す。9 月 21 日頃から原水にカビ臭原因物質 (ジェオスミン) が混じり始め、9 月 22 日 12:30 に取水位置を EL.166.3m から (EL.166.3m+EL.163.8m) へと低下させ、さらに 9 月 24 日には EL.163.8m のみからの取水へと切り替えられた。その後 9 月 24-25 日に強い北風が発生し、これと連動して EL.166.3m 取水口での水温が瞬間的に増加した。大阪湾尼崎沖でも同時期に青潮が確認された。北風時に発生する水温成層のセットアップを図-3 のように考えると、風速と取水口位置での水温挙動の連動が説明できる。9 月 24-25 日の EL.166.3m 取水口における水温変動幅は、 $18.5 \sim 21.0^\circ\text{C}$  (中央値  $19.8^\circ\text{C}$ ) であり、9 月 25 日の水温分布と対応させれば、図-4 のように EL.165.4~166.4m の範囲での約 1m の内部変位に相当する。この間、取水口周辺のジェオスミンがさらに増加したため、9 月 25 日 15:08 には取水位置が EL.163.826m から EL.163.826m+161.351m へとさらに下方へ切り替えられた。

3. カビ臭発生要因の分析

表層に集積するジェオスミンを中層に位置する取水口にまで輸送する水理機構として、以下の要因を検討した。

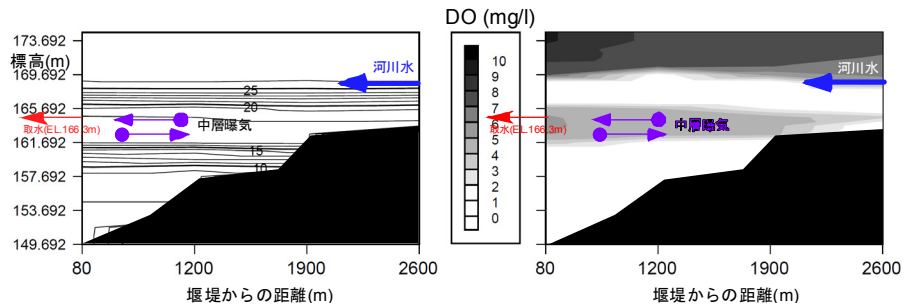


図-1 カビ臭発生直前の貯水池の状況 (2010 年 9 月 21 日)

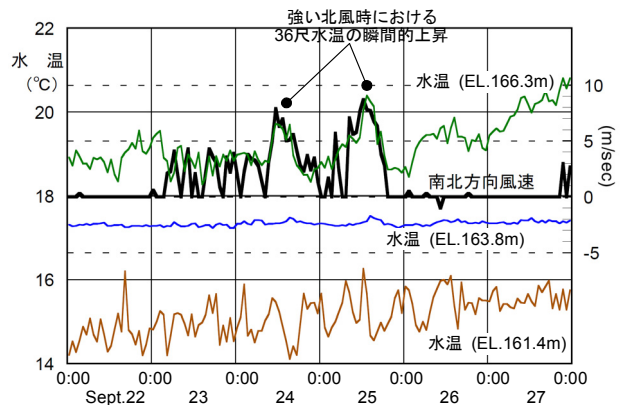


図-2 南北方向風速と各取水口における水温。

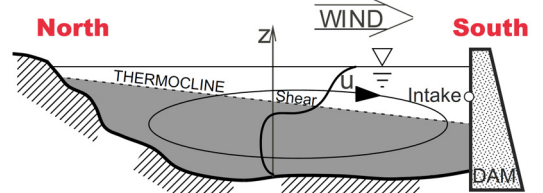


図-3 北風による水温成層のセットアップ

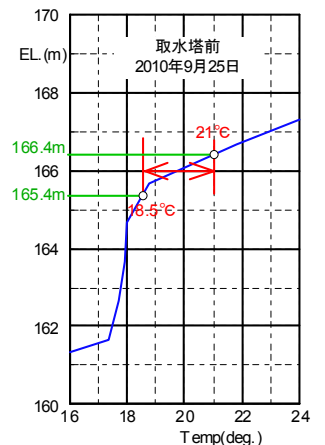


図-4 取水口前の水温分布 (9 月 25 日)

(1) 風による水温成層のセットアップ：吹送密度流によるダムサイトでの躍層低下量を概算するために（図-3），図-5 のように水温成層を二層系あるいは三層系にモデル化する．二層系に近似した場合には，風下端での躍層低下量が $\Delta_2=u_*^2L/(2\varepsilon gh_1)=0.43\text{m}$  と概算される<sup>2)</sup>．ここで， $u_*$ は9月25日の最大風速 8.0m/sec に対する水面での摩擦速度であり，貯水池の二層系区間長を  $L=2,600\text{m}$ ，二層系の上層厚さを  $h_1=12\text{m}$ ，上下層の相対密度差を  $\varepsilon=0.03$  としている． $g$  は重力加速度である．一方，中層曝気が実施されているため，水温成層は二層系というよりも三層系の方に近い．この場合，セットアップ・モードは Wedderburn number  $W$  と Lake number  $L_N$  の組み合わせによって図-6 のように分類される<sup>3)</sup>．現地の諸元に基づけば， $W=3.24, L_N=3.93$  であり，図-6 (a)の Mode2 が生起すると判定される．

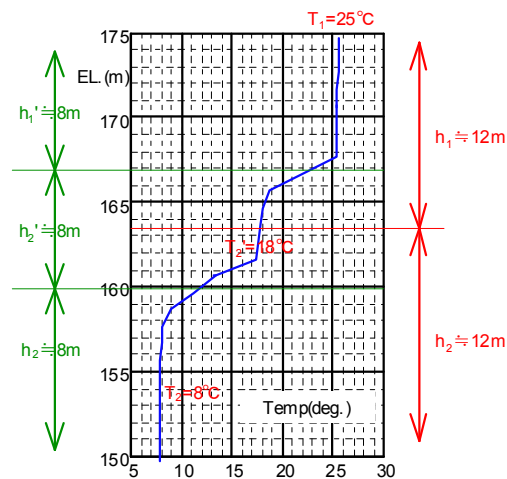


図-5 水温成層の二層系（右軸）と三層系（左軸）へのモデル化

したがって，下層が不動で上中層界面の低下量を前述と同様に概算すると

$\Delta_2=u_*^2L/(2\varepsilon_{12}gh_1)=1.23\text{m}$  を得る（ $\varepsilon_{12}$ は上中層界面の相対密度差， $h_1'=8.0\text{m}$ は三層系の上層厚さ）．これは図-4 の結果と整合する．また，内部セイシュ周期から算定される Mode2 のセットアップ完了時間は 1.25hr であり，9月24,25日の北風がそれよりも長時間に継続している（図-2）ことから，前述の 1.23m の躍層低下は十分に達成されていたと考えられる．

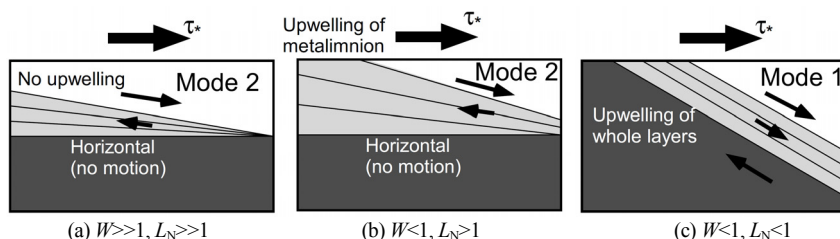


図-6 三層系のセットアップ・モード

(2) 中層曝気による表層水の連行：図-7 のように曝気流動によって中層が乱れ，表層・深層水が中層へと連行される．ノズルから吐出される曝気流を水平噴流としてモデル化し，表層水の連行流量を 1.45m<sup>3</sup>/day と概算した．仮に1ヶ月程度連行が継続しても，表層水の総連行量は中層容量に比べ格段に小さく影響は少ない．

(3) 取水流動による水温躍層の drawdown：取水流量  $Q=0.58\text{m}^3/\text{sec}$  と水温成層諸元を用いて二層取水系における表層水混入量を概算した<sup>4)</sup>．9月22日まで稼働していた EL.166.3m 取水口へは  $Q=4,600\text{m}^3/\text{day}$  の表層水が混入し，中層には相当量のジェオスミンが輸送されていたと思われる．一方，9月22-25日に稼働した EL.163.8m 取水口へは表層水は混入しないと判定された．しかし，前述のように 8.0m/sec 程度の北風作用下では水温躍層が 1m 以上低下する．躍層低下を 1m 以下とすると表層水は EL.163.8m 取水口に混入しないが，躍層低下を 2m とすると  $Q=610\text{m}^3/\text{day}$  が混入する．

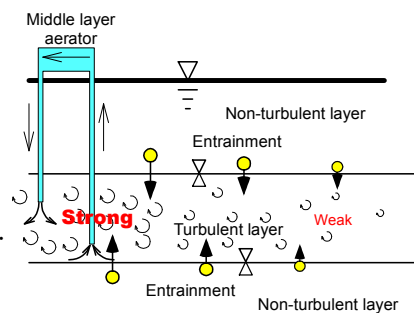


図-7 中層曝気による連行

(4) 自然対流による鉛直混合：放熱期の自然対流による躍層低下速度を連行則に基づいて推算すると 0.123m/day となり，水温観測値とも一致する．これより，カビ臭が顕在化した9月22~25日の間の自然対流による躍層低下量はわずかに  $0.123 \times 3 = 0.369\text{m}$  であるため，自然対流が表層水を混入させた可能性は低い．

(5) 河川流入の影響：河川流入による成層せん断流の連行速度は 0.000364m/day ときわめて微小であった．

#### 4. まとめ

以上より，強い北風にとまなう水温成層のセットアップが水温躍層を低下させ，同時に取水流動によってジェオスミンを高濃度に含む表層水が取水口へ混入して水道原水にカビ臭を発生させたと考えられる．

#### 参考文献

- 1) 道典・小谷・小林：水工学論文集，第51巻，pp.1355-1360，2007年，2) Spigel, R. H., and Imberger, J. J. Phys. Oceanog., Vol.19, pp.1104-1121, 1980., 3) Monismith, S. G.: J. Fluid Mech. Vol. 171, pp.407-439, 1986., 4) Jirca, J.H. and D.S.Katavola: J. Hydraulic Research, Vol.17, No.1, pp.53-62, 1979.