

ベンチュリ管式吸込管による湖沼塩淡水境界層水深の低下に関する基礎的研究

Fundamental study on decrease of interface between fresh water and salty water layers of lake using absorption pipe with venturi tube

北見工業大学大学院 ○学生員 吉川泰弘(Yasuhiro Yoshikawa)
 北見工業大学工学部 フェロー 佐渡公明(Kimiteru Sado)
 北見工業大学工学部 正員 中尾隆志(Takashi Nakao)

1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖は、水深約6mの塩淡水境界層を境に上部淡水層と下部塩水層に分かれ、安定な密度成層を形成し上下混合が全くない。下部塩水層では、長年の市街地・農畜産地からの排水及び自然汚濁負荷が流入貯留され、また近年の地球温暖化のためと思われる海面上昇により、満潮時には網走湖へ海水が逆流し貯留されている。その結果、窒素・燐を多く含む塩水層からの内部負荷と、人工・自然汚濁の流入による外部負荷により網走湖は富栄養化となっている。湖への流入河川水によるはく離・連行が少ない事もあり、湖底にはヘドロが溜り、下部塩水層は無酸素状態を呈している。この様な状況のもと、植物プランクトンの異常発生である「アオコ」や、塩淡水境界層が強風によって水面に出現する「青潮」の水質事故が近年多発している。わかさぎ、シジミを大量に死滅させ数億という損害を与えており、漁業や環境への影響が大きく、地域社会からは水質改善のための抜本的対策が求められている。

本研究では、網走湖の水質改善対策の一つとして「ベンチュリ管式吸込管による塩淡水境界層水深の制御」を提案することを目的として、その基本的な理論の構築を行う。

2. 網走湖の安定な二層構造

網走湖における湖心の水温、塩分、密度の鉛直分布の典型的な一例を図-1に示す。上層の水温が21℃、下層で7℃、水深6~9mで水温が急激に低下する水温躍層が明瞭である。塩分濃度は上層で1‰、下層で21‰、水深6~10mで塩分濃度の急激な増加が見られる。密度については、この水温と塩分濃度の影響をうけ上層で21℃の真水より弱若干重い999kg/m³、下層で7℃の真水より重い1016kg/m³となり、やはり水深6~10mの範囲に密度が急上昇する密度躍層が見られる。この密度躍層の平均密度(図-1では1008kg/m³)の水深を塩淡水境界層水深(図-1では6.5m)と呼び、これより上層、下層をそれぞれ淡水層、塩水層と呼んでいる。参考文献1)によると、塩淡水境界層水深が浅いほど「青潮」が発生しやすく、深いほど発生しにくいことがわかる。また網走湖水質保全対策検討委員会では、①女満別湾・呼人浦の浚渫②下水道100%整備+農業・工業負荷30%削減③塩淡水境界層水深7.10mに低下④総合対策にわけてアオコ発生抑制の検討を試みている。これによると、塩淡水境界層制御を行ったとき、もっとも大きな水質改善効果が期待できることが指摘されている。しかし、網走湖に生息する生物は塩水層からの栄養で生存しているので、ある一定の塩淡水境界層水深に保つ必要がある。

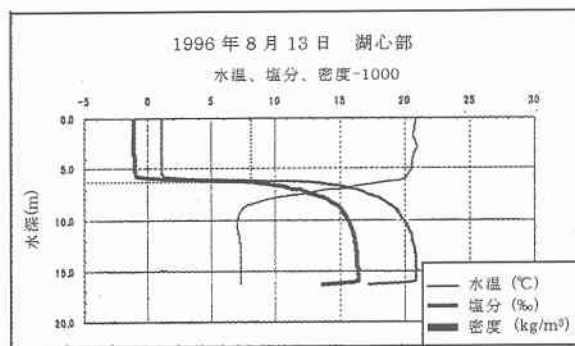


図-1 水温・塩分・密度-1000の鉛直分布の一例

3. ベンチュリ管式吸込管

水質改善が期待される塩淡水境界層水深制御の一つの方法として、ベンチュリ管の断面縮小部の小さな圧力によって塩水層にある支管から塩水をエネルギーを使わないで吸込み、塩淡水境界層水深を低下させることを提案する。

3-1. 水理計算

図-2にベンチュリ管式吸込管の略図を示す。それぞれの記号は、次のように定義される。

- z_1, z_2, z_3 : 断面1,2,3の位置水頭(m)
- h_1, h_2, h_3 : 断面1,2,3の水深(m)
- Q_1, Q_2, Q_3 : 断面1,2,3の流量(m³/s)
- V_1, V_2, V_3 : 断面1,2,3の流速(m/s)
- d_1, d_2, d_3 : 管路1,2,3の管径(m)
- L_1, L_2, L_3 : 管路1,2,3の管路長(m)
- f_1, f_2, f_3 : 管路1,2,3の摩擦損失係数
- V_v : 断面縮小管の流速(m/s)
- D : 断面縮小管の管径(m)
- θ : 管路1と断面縮小管の交角(rad)
- r : 管路1と断面縮小管の接続部面取り半径(m)

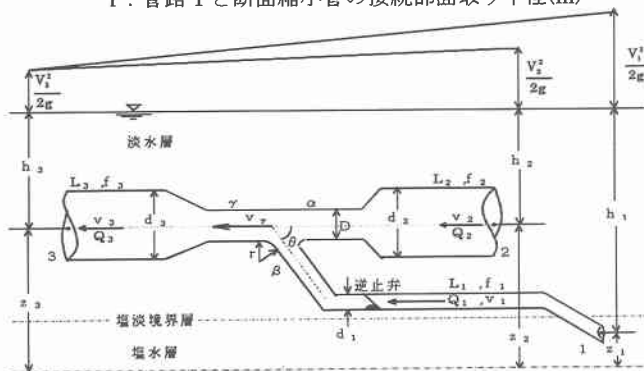


図-2 ベンチュリ管式吸込管

断面1と断面3の間にベルヌーイの定理を適用して、

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} - (z_3 + h_3 + \frac{\alpha v_3^2}{2g}) = f_1 \frac{L_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} + f_{c,\beta} \frac{v_1^2}{2g} + f_3 \frac{L_3}{d_3} \frac{v_3^2}{2g} \dots \dots \dots (1)$$

同様に、断面2と断面3の間にベルヌーイの定理を適用して、

$$z_2 + h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} - (z_3 + h_3 + \frac{\alpha v_3^2}{2g}) = f_2 \frac{L_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} + f_{c,\alpha} \frac{v_2^2}{2g} + f_3 \frac{L_3}{d_3} \frac{v_3^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$$

連続の式より、

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \dots \dots \dots (3)$$

$f_{c,\alpha}$ 、 $f_{c,\beta}$ は、合流損失係数である。Gardel²⁾の実験式によれば、 $f_{c,\alpha}$ 、 $f_{c,\beta}$ は、 $(-Q_1/Q_3) \equiv q_\beta$ の二次方程式で表され、 $f_{c,\beta} = a q_\beta^2 + b q_\beta + c$ とおくと、式(1)は式(4)となる。

$$(z_1 + h_1) - (z_3 + h_3) = (k_1 - j_1) Q_1^2 + (k_3 + j_3 + a \frac{Q_1}{Q_3})^2 + b \frac{Q_1}{Q_3} + c Q_3^2 \dots \dots \dots (4)$$

$$j_i = \frac{8\alpha}{g\pi^2 d_i^4}, \quad k_i = \frac{8f_i L_i}{g\pi^2 d_i^5} \quad (i = 1, 2, 3) \quad \text{とする。}$$

$Q_3 = C_3$ ($Q_1=0$ のときの Q_3 の値)と仮定すると、式(4)は、

$$(k_1 - j_1 + a) Q_1^2 + b C_3 Q_1 + (k_3 + j_3 + c) C_3^2 - (z_1 + h_1) + (z_3 + h_3) = 0 \dots \dots \dots (5)$$

式(5)は、 Q_1 の二次方程式となり、 Q_1 の正の実根が得られるまで Q_3 を仮定し直し、式(2)より

$$Q_2 = + \sqrt{\frac{1}{(k_2 - j_2)} \left\{ (z_2 + h_2) - (z_3 + h_3) - \left(k_3 + j_3 + f_{c,\alpha} \left(\frac{d_3}{D} \right)^4 \frac{j_3}{\alpha} \right) C_3^2 \right\}} \dots \dots \dots (6)$$

式(6)から、 Q_2 の正の実根が得られるまで Q_3 を仮定し直す、これで Q_1, Q_2, Q_3 の正根が得られる。EPS= $Q_1 + Q_2 - Q_3$ が必要な精度を満足するまで、以上の繰り返し計算を行い、 Q_1, Q_2, Q_3 を求める。

3-2. 数値計算例

水面勾配を1/100として、以下の表-1の条件で数値計算を行う。今回の計算では、絞り直径比(D/d_2)が、0.8の時($D=0.12\text{m}$)と0.5の時($D=0.075\text{m}$)とを比較し、絞り直径比によって流量がどのように変化するかを検討する。プログラミング言語は“FORTRAN”を用いた。結果を表-2,3に示す。

表-1 数値計算例のための定数

z_1 (m)	0.0	L_1 (m)	$10.0 \times d_1$
z_2 (m)	0.3	L_2 (m)	$2.0 \times d_2$
z_3 (m)	0.3	L_3 (m)	$2.0 \times d_3$
h_1 (m)	0.6	D (m)	0.12, 0.075
h_2 (m)	0.3	α	1.1
h_3 (m)	0.3-0.006	θ (rad)	$\pi/2$
d_1 (m)	0.075	r (m)	$0.1 \times D$
d_2 (m)	0.15	マニングの粗度係数	0.014
d_3 (m)	0.15		

表-2 絞り直径比 0.8

D=0.12 (m)	流出流量 Q_3 に対する比
$Q_1=0.16649 \times 10^{-2}$ (m^3/s)	0.38478
$Q_2=0.26620 \times 10^{-2}$ (m^3/s)	0.61522
$Q_3=0.43269 \times 10^{-2}$ (m^3/s)	1.0000
EPS= 0.93132×10^{-8} (m^3/s)	0.21524×10^{-5}

表-3 絞り直径比 0.5

D=0.075 (m)	流出流量 Q_3 に対する比
$Q_1=0.18428 \times 10^{-2}$ (m^3/s)	0.79575
$Q_2=0.47369 \times 10^{-3}$ (m^3/s)	0.20455
$Q_3=0.23158 \times 10^{-2}$ (m^3/s)	1.0000
EPS= 0.73179×10^{-6} (m^3/s)	0.31600×10^{-3}

絞り直径比を大きくすると、断面縮小管の圧力がそれほど下がらず、塩水層につながっている管路1の吸引力は抑えられる。絞り直径比を1に近づけるほど、吸引力は弱まると想定される。また絞り直径比を小さくすると、Dの減少に伴い Q_2 は減少するが、断面縮小管の圧力は下がるので塩水層からの吸い上げ流量 Q_1 は増加することが示されている。塩淡水境界層水深を早く低下させるには、絞り直径比を小さくすることがよいが、急な吸い上げは自然環境に与える影響が大きい。吸い出した溶存酸素ゼロの塩水が河口の網走港に流れ出すことを考えれば、生態系に影響の無い範囲の Q_1 を流出させるよう適切な絞り直径比が必要である。図-2は網走湖下流の網走川が順流のときの流れである。逆流時には、従来、海水逆流量は滞筋を通して塩水層に貯留され、水質悪化の原因となっていた。しかし、ベンチュリ管式吸込管を設置すると管路1の逆止弁が働き $Q_1=0$ となり、海水逆流量 $Q_3=Q_2$ は淡水層に流入・拡散されることになる。また常に塩水層の水を河口に流すのではなく、網走湖でのシジミ・わかさぎなどの漁業に必要な窒素・燐・塩分を確保できるだけの塩水層を保持しなくてはならない。つまり、最適な塩淡水境界層水深を想定し、常時塩淡水境界層水深を監視し、その制御のために「ベンチュリ管式吸込管」の使用を考えるべきである。ベンチュリ管式吸込管の良い点は、一旦、動き始めればエネルギーを加えることなく作動すること、設備投資が抑えられることである。

4. 結論

- 1) 網走湖の水質改善対策の中で、効果的な改善が見込まれる塩淡水境界層水深の低下を目的として、ベンチュリ管の圧力差を利用して塩水層の水を吸込むことが、数値計算から可能であることがわかった。
- 2) 絞り直径比と吸い上げ流量は、反比例していることがわかった。

参考文献

- 1) 網走湖水質保全対策検討委員会：網走湖の水環境回復に関する調査報告書、pp.259-274、1996。
- 2) 土木学会水理公式集改訂委員会：水理公式集、pp.398-405、土木学会、1985。