

閉鎖型ダム内流動数値解析

Computer Simulation of Flow in Stratified Reservoirs



技術開発本部 研究開発部
小 西 嘉 雄
Yoshio Konishi
高 田 一 貴
Kazutaka Takata

成層型貯水池では、夏期において温度躍層を形成し、上下水の対流・混合が妨げられる。そのため、底層では無酸素（還元）状態になり、鉄・マンガン・アンモニア窒素とともに栄養塩が溶出する。その結果、貯水池内が富栄養状態となり水質の悪化が進行する。

富栄養化対策として、間欠空気揚水筒（以下揚水筒と呼称する）を用いることが考えられている。揚水筒を用いると、貯水池内に循環流を発生させることができ、この方法により、底層の無酸素状態が解消され、そして温度躍層の形成が防止される。そのため、水質の悪化を防ぐことができると考えられている。

本報の研究対象であるダムAでは、今後富栄養化が予想されるため、揚水筒の設置が必要である。本報では、ダムA内に揚水筒を設置した気液2相流3次元流動数値解析を行い、揚水筒の基数・設置位置を検討した。

Stratified reservoirs such as dam form thermocline in summer, so thermocline prevent the water in the reservoir from convecting and mixing. Therefore there are no oxygen in hypolimnion, so to lique out iron, manganese, nitride, and nutritious salts in lower layer. Stratified reservoirs become more eutrophic. The quality of water become worse. As the suppression and the dissolution way of eutrophication, thermocline, and no oxygen in law layer, it is considered to be occurred circular current in reservoirs by air-bubble plume.

It is sermorised that the Dam-A reservoir which is the object of this study will become a eutrophic dam. Therefore, this Dam needs some air-bubble plumes. In this study, computational fluid dynamics was applied to simulate suppression of eutrophication in the Dam-A reseirvor. The simulation was conducted the flow patterns in order to be determined the various air-bubble plume conditions.

Key Words :

成 層 型 貯 水 池
揚 水 筒
模 擬 実 験
数 値 計 算
富 栄 養 化

Stratified reservoir
Air bubble plume
Simulation
Computational fluid dynamics
Eutrophication

まえがき

夏期において、ダムのような成層型貯水池では、太陽エネルギーによる表層の水温上昇により上層部が高温、下層部が低温という温度躍層を形成する。そのため上下水の対流・混合が妨げられ、二層に分かれて停滞する。表層では植物プランクトンの繁殖が活発になり大量増殖し、底層で

は沈降してくる植物プランクトンが分解のために酸素を消費することから還元（無酸素）状態になり、鉄、マンガン、アンモニア窒素とともに栄養塩が溶出してくる。これが表層水温も低下し自然対流が起こる時期（秋期から冬期）になると水域全体に拡散する。これらの現象の繰り返しにより、貯水池内の富栄養化が急速に進み、水質の悪化が進行する。

本報で研究対象とした某ダム（以下ダムAと呼ぶ）では、極度の富栄養化には至っていないが、成層型貯水池であり、原水中のマンガン含有量が多いことから、今後富栄養化が進行すると予想されている。そこで、その対策として、ダムAに間欠空気揚水筒を設置して貯水池内に循環流を発生させることにより、底層の無酸素状態を解消させ、そして春期から夏期にかけての水温躍層の形成を防止し、水質の悪化を防ぐことが出来ると考えられている。

揚水筒の基数、設置位置を物理実験によって検討するには、多大な設備と時間を要するため非常に困難である。そこで、物理実験の代替えとして、揚水筒の基数、設置位置を変えたダム内の気液2相流3次元流動数値解析を行い、揚水筒設置位置、基数の検討を行った。

1. 計算モデル

実際に設置する揚水筒は間欠空気揚水筒であるため、空気と水の気液二相系の解析を行った。本来は、富栄養化対策であるため、酸素濃度・鉄・窒素濃度等を考慮したモデルを組み込む必要があるが、本解析では温度躍層形成を阻止すれば、富栄養化進行が妨げられると仮定した。そのため、ダム内の流速・温度分布だけをシミュレートし、どの揚水筒設置条件が最も効率良く循環流を発生させ、温度躍層形成の防止となるかの検討をした。

計算に用いた基礎方程式は、質量の保存式である連続の式(式(1))、流れを支配する方程式(式(2))直交座標系で記述されるBousinesq近似を採用した時間平均NS方程式(式(3))、時間平均エネルギーの輸送方程式(式(4))、そして乱流エネルギーと粘性消散率の輸送方程式(式(5)、(6))である。これら方程式を熱流体解析用のコードを用いて連立させて解き、ダム内の流速・温度分布を求めた。

[連続の式]

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

[Navier-Stokesの式]

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j \rho U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \rho u_i u_j \right) \right] - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

[時間平均エネルギーの輸送方程式]

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial U_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K \frac{\partial T}{\partial x_j} - u_j t \right] \quad (3)$$

[乱流エネルギーと粘性消散率の輸送方程式($k-\epsilon$ モデル)]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_s + G_T + \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1k} \frac{\epsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_{3R_f}) - C_{2\epsilon} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

(レイノルズストレス項)

$$u_i u_j = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

$$\mu_t = C_t \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

ただし、

$$u_i t = -\frac{K_t}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad K_t = \frac{\mu_t C_p}{P_n}$$

$$G_s = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$R_f = -\frac{G_T}{G_s + G_T}$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \\ C_3 = 0.00, \quad C_t = 0.09$$

(式中の大文字は時間平均項を意味する。)である。物性値には以下の値を用いた。

$$\rho = 9.9623 \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad \mu = 1.000 \times 10^{-3} \text{ [kg/m}\cdot\text{s]},$$

$$C_p = 4.18 \times 10^3 \text{ [J/kg}\cdot\text{°C]}, \quad K = 6.12 \times 10^{-1} \text{ [J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{°C]},$$

$$\beta = 2.9 \times 10^{-4} \text{ [1/°C]}$$

ここで、 C_p ; 定圧比熱 [J/(kg·°C)], g_i ; 重力加速度 [m/s²], K ; 熱伝導率 [J/(m·s·°C)], K_t ; 乱流熱拡散係数 [J/(m·s·°C)], k ; 乱流エネルギー [m²/s²], P ; 圧力 [Pa], T ; 流体温度 [°C], T_0 ; 基準流体温度 [°C], U_i ; 時間平均流速 [m/s], u_i ; 瞬間流速 [m/s], x_i ; 位置座標 [m]

β ; 体積膨脹率, ρ ; 流体の密度 [kg/m³], σ_{ij} ; 応力テンソル, ϵ ; 粘性消散率 [m²/s²], μ ; 粘性係数 [Pa·s], μ_t ; 粘性係数 [Pa·s]

である。

計算では、ダムAの水深も含むダム形状を第1図に示すような、ほぼ実際のダム形状を忠実に近似したモデルを使用した。

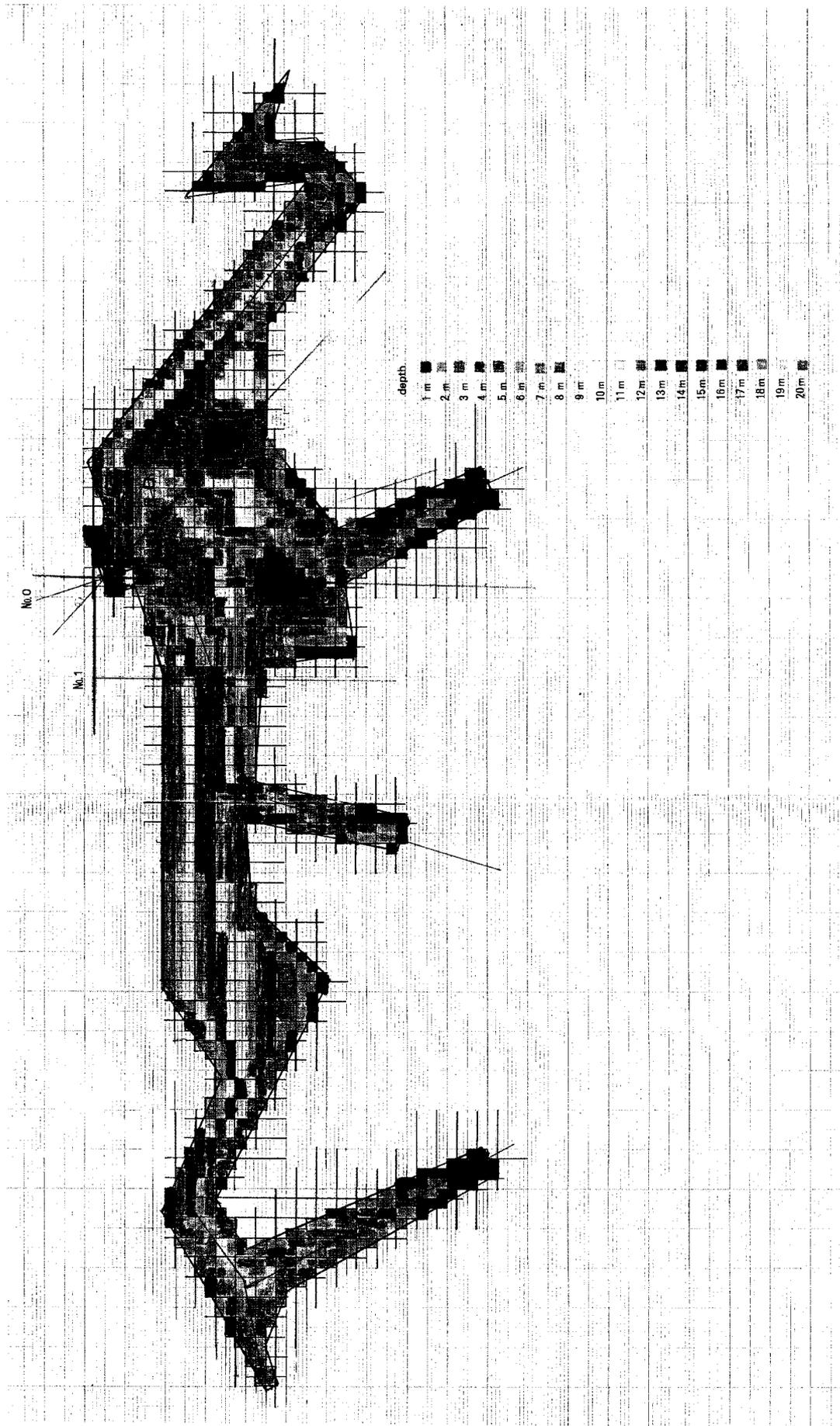
実際に計算に用いたメッシュ図を第2、3図に示す。メッシュの構成は、縦52×横144×深さ20の合計約15万のメッシュ分割とした。

2. 解析条件と境界条件

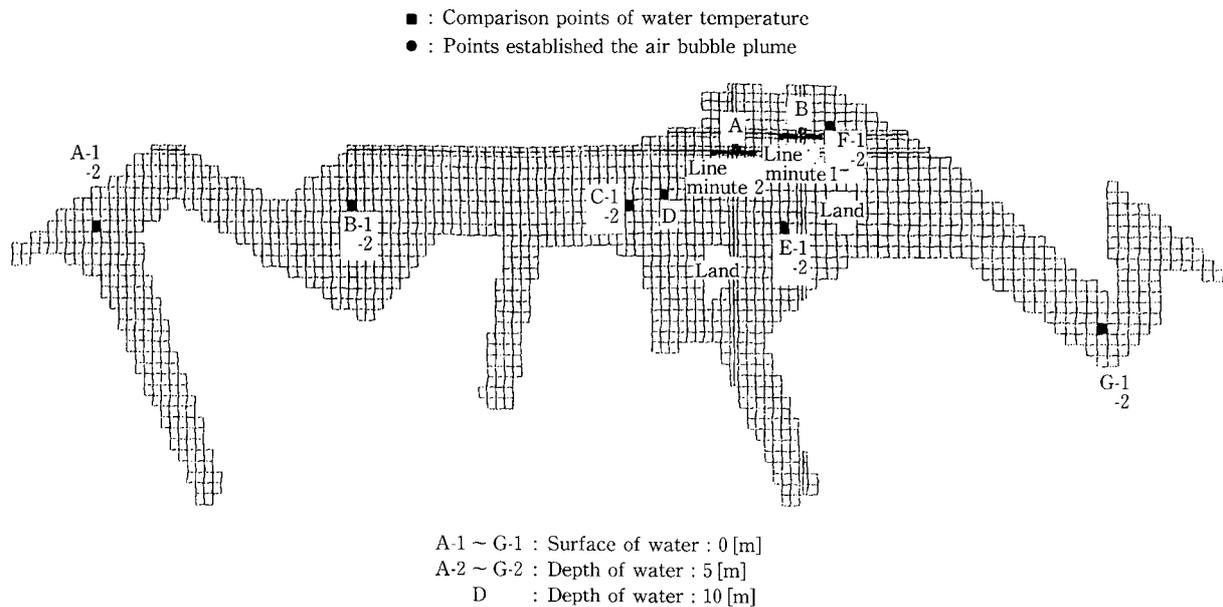
1995年9月14日の温度データ第1表を基に、温度の初期境界条件は第2表のように設定した。

揚水筒の設置基数は2基と3基とし(今後、設置基数2基を条件1、3基を条件2と呼称する。)、設置位置は第2、3図に示す位置に設置(詳しくは第4、5図参照)し、揚水筒上部に、所定の流速、乱流エネルギーと粘性消散率を与えた。

水面はすべりあり条件を与え、壁面にはすべりなし(対数則)条件を与え断熱壁とした。計算は、EWS(エンジニアリングワークステーション)を使用し60時間後のダ

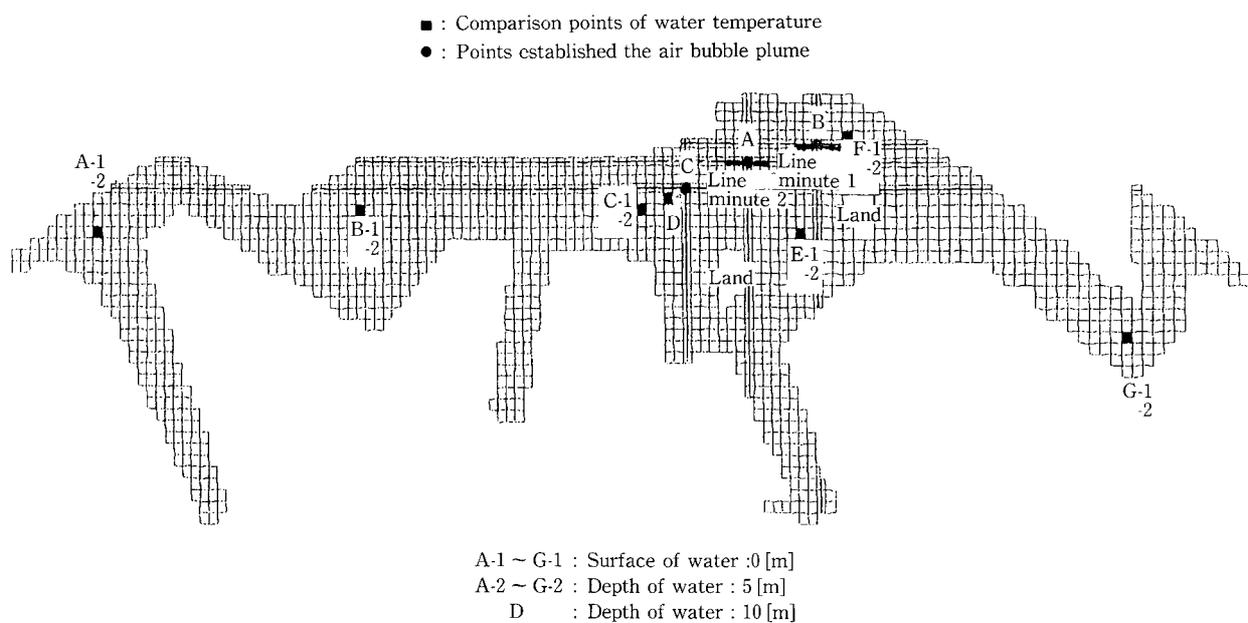


第 1 図 計算モデル
Fig. 1 Calculation mode 1



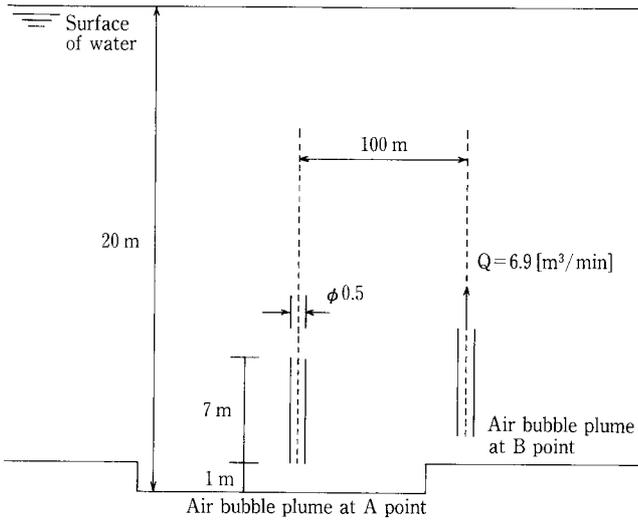
第 2 図 揚水筒 2 基設置条件解析のメッシュ図

Fig. 2 Mesh figures of 2 air bubble plumes establishment condition analysis

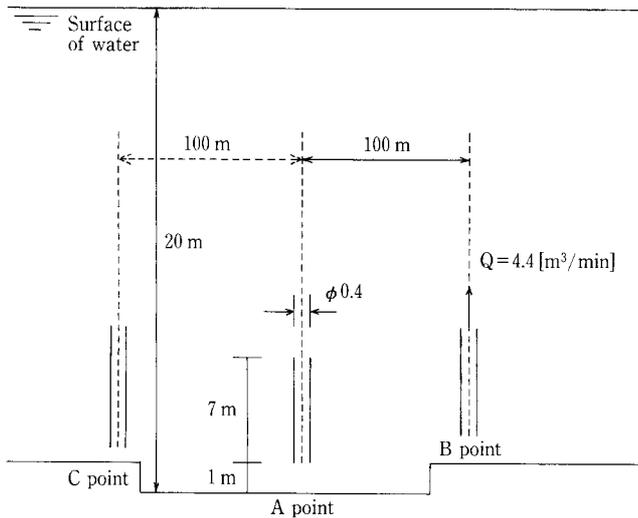


第 3 図 揚水筒 3 基設置条件解析のメッシュ図

Fig. 3 Mesh figures of 3 air bubble plumes establishment condition analysis



第 4 図 揚水筒設置位置概略図 (2 基の場合)
Fig. 4 Rough sketch of air bubble plume establishment (2 air bubble plumes condition)



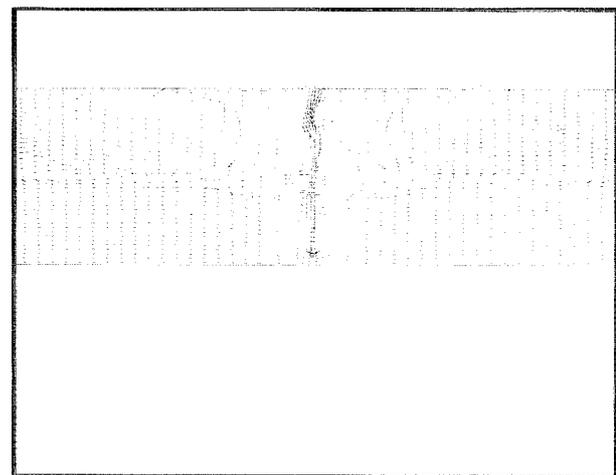
第 5 図 揚水筒設置位置概略図 (3 基の場合)
Fig. 5 Rough sketch of air bubble plume establishment (3 air bubble plumes condition)

第 1 表 水温測定結果
Table 1 The results of the water temperature measurement

Depth [m]	water temperature [°C]
0	28
2	27
4	19
6	17
8	17
10	13
12	13
14	13
20	13

第 2 表 数値解析境界条件
初期水温
Table 2 Numerical boundary condition Initial water temperature

Depth [m]	water temperature [°C]
0~1	28
1~2	27.5
2~3	27
3~4	23
4~5	19
5~6	18
6~8	17
8~9	15
10~20	13



第 6 図 流速ベクトル図 (条件 1)
Fig. 6 Velocity vectors (Condition 1)

ム内流動状態を再現させるのに約 720 時間/2 ケース要した。

3. 結 果

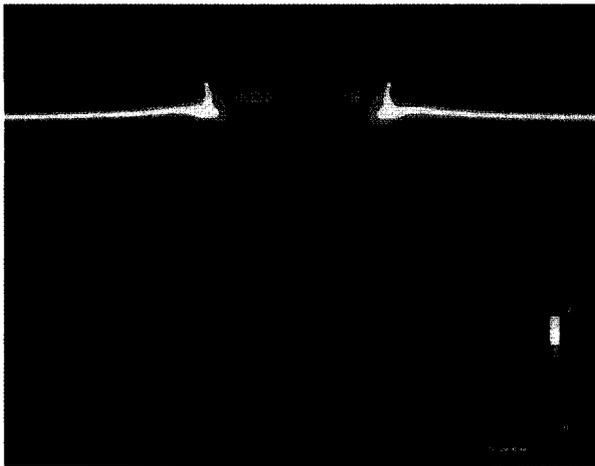
3.1 揚水筒付近の流速ベクトル図及び温度コンター図

揚水筒付近の流速分布代表例として、条件 1 のポイント B 一帯 (揚水筒を中心) の断面 (第 1 図参照) の流速ベクトル図を第 6 図に示す。条件 2 のポイント B 一帯の断面 (揚水筒を中心) (第 2 図参照), そして揚水筒設置ポイント A, C の流速ベクトル図は、ポイント B と同様の流動を示していたため、流速ベクトル図は省略した。

第 6 図より、揚水筒付近の流れは、揚水筒下部から低水温の原水が流入し、その原水が筒内を通り上部から流出する。筒内中心部付近から流出する水の流動は上向き流れで

あるが、揚水筒外周部付近から流出する水は、すぐに下向きの流れに変わっている。この理由として、中心部付近の流出水は気泡の上昇に伴って上昇するが、外周部付近の流出水は気泡の上昇流にのれず、しかも流出水の密度が流出口付近の原水よりも大きい (流出口付近水温 17 °C, 流出水温度 13 °C), この密度差のため、すぐに下向き流れに変わってしまうと考えられる。

次に、揚水筒付近の温度分布図代表例として、条件 1 のポイント B 一帯 (揚水筒を中心) の断面 (第 1 図参照) の温度コンター図を第 7 図に示す。条件 2 のポイント B 一帯の断面 (揚水筒を中心) (第 2 図参照), そして揚水筒設置ポイント A, C の温度コンター図も、ポイント B と同様の温度分布を示していたため、温度コンター図は省略した。



第7図 温度コンター図(条件1)
Fig. 7 Temperature Contours (Condition 1)

第7図より揚水筒を中心に低温度部が伝搬されていく様子がわかる。また、気泡の上昇効果に伴った流出水の影響で温度躍層が破壊されていく様子もわかる。

3.2 温度分布

60時間後の温度分布結果を第8, 9図に示す。

まず水面での温度分布図の条件1(揚水筒2基)を第8図に、条件2(揚水筒3基)を第9図に示す。第8, 9図を比較すると顕著な温度差は見られないが、第9図(揚水筒3基)の方が、低温度域が存在する。そのためこちらの方が、若干温度伝搬が速いと言える。

しかし、これらの温度分布図では、計算再現時間が60時間と少ないため(揚水筒の能力は、[ダム貯水量/揚水筒排水量合計=約1ヶ月]となるものを計画基準としている)揚水筒排水口付近でしか顕著に温度伝搬の様子が把握できず、揚水筒から離れた部分では温度変化が微小であるため比較が難しい。そのため、次項で水温比較ポイントでの水温変化を示した。

3.3 水温比較ポイントにおける水温変化図

第2, 3図に水温比較ポイントを示す。

水温比較ポイントの代表的な水温変化としてA-1, A-2, C-1, C-2, D, F-1, そしてF-2, での水温変化図を第10~16図に示す。

なお、ダム内の平均水温を計算すると20.87℃であった。

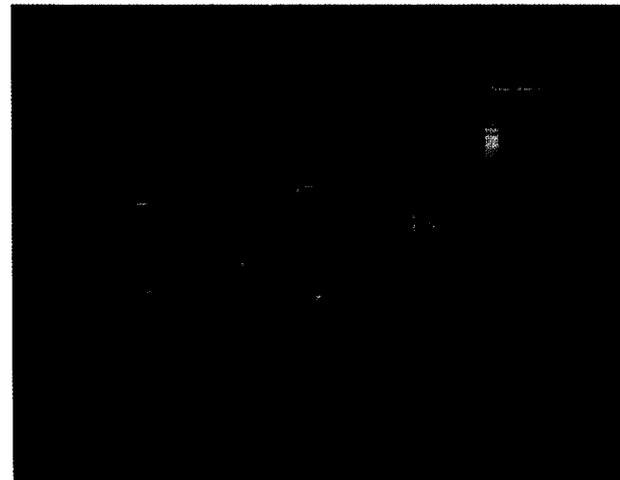
水面での温度比較(A-1, C-1, F-1)では初期水温が高水温層(平均水温より約7℃高い)に属するため、水温は時間とともに低下する。A-1の60時間後は、揚水筒3基設置の方の水温が低下しており、条件2の揚水筒設定の方が、温度伝搬が速く効果的な流動を発生させていると言える。C-1, F-1では、60時間後は揚水筒3基設置の方が厳密に言えば、低温度であるが、その水温差はないに等しく、しかもこれら2条件の温度曲線は、度重なり交わり合っている。これらのポイントでは、どちらの揚水筒条件でも効果はほぼ同じである。

ポイントDでは、初期水温が低水温層に属するため、水



duw1 60hrs

第8図 温度分布図(条件1 水面)
Fig. 8 Water temperature contours in the surface (Condition 1)



duw2 6hrs

第9図 温度分布図(条件1 水面)
Fig. 9 Water temperature contours in the surface (Condition 2)

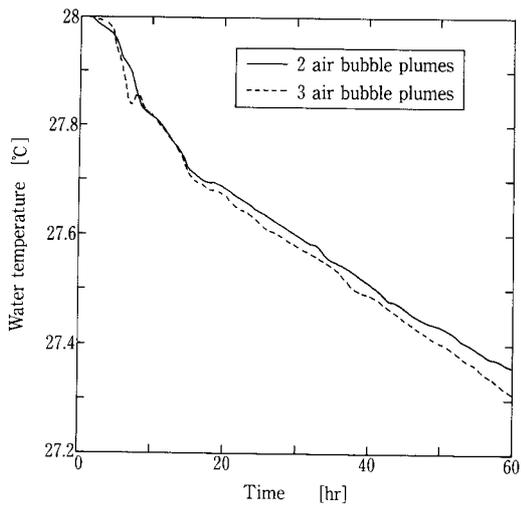
温は時間とともに上昇する。このポイントでは、揚水筒2基の方が、60時間後の水温は高いが、このポイントでも効果の差はない。

次にポイントA-2, C-2, そしてF-2を比較すると、水温差は微小ではあるが、A-2, C-2に見られるように、時間経過と共に揚水筒3基と2基とで温度差が大きくなる。従って揚水筒3基の方が良いと考えられる。

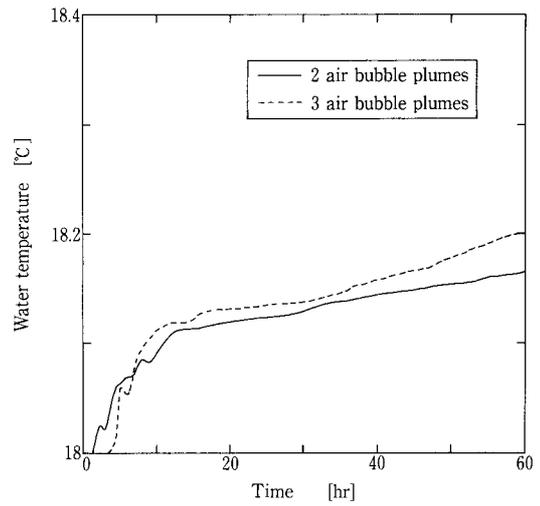
4. 考察

数値解析により再現した60時間後のダム内流動状態での相対比較を次のように行った。

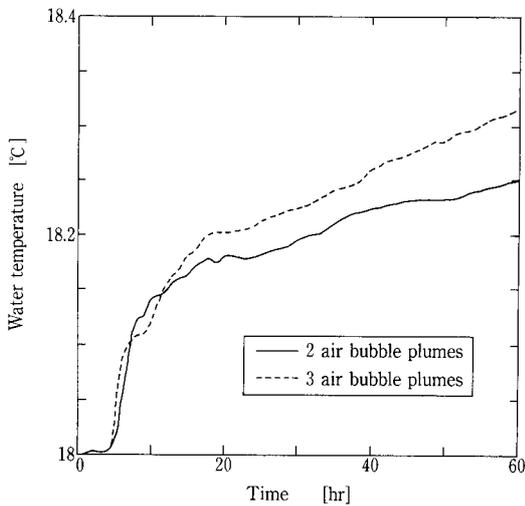
揚水筒2基と3基のどちらの条件が、ダムAに適しているかを水温比較ポイント(水面及び低水温層)A-1, B-1, C-1, D, E-1, F-1, そしてG-1の7



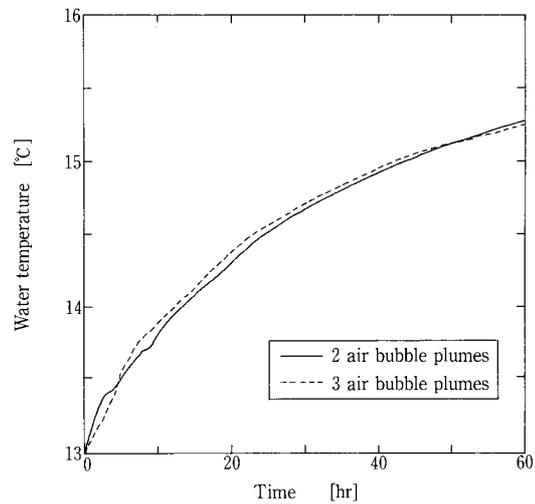
第10図 A-1地点における水温変化図
Fig. 10 Elapsed time and water temperature at A-1 point



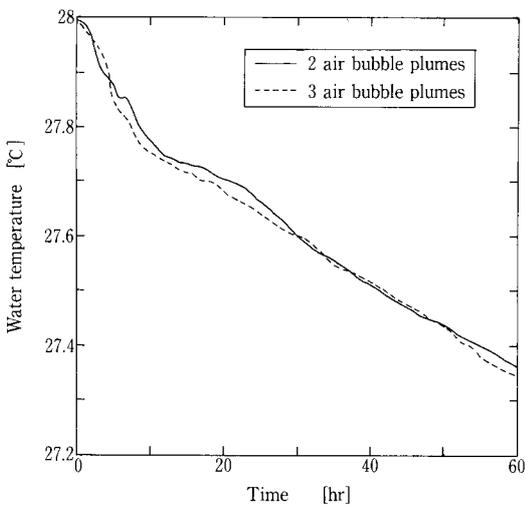
第13図 C-2地点における水温変化図
Fig. 13 Elapsed time and water temperature at C-2 point



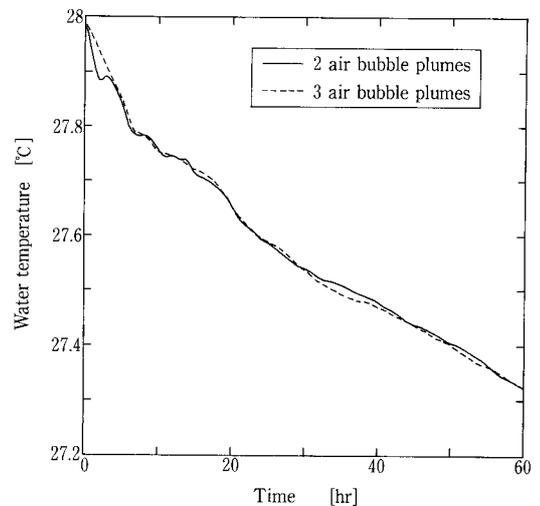
第11図 A-2地点における水温変化図
Fig. 11 Elapsed time and water temperature at A-2 point



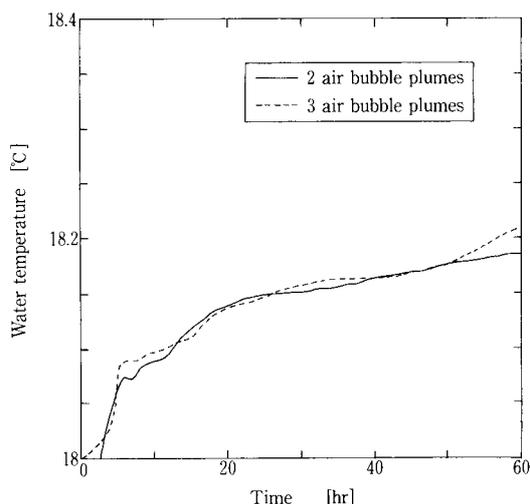
第14図 D地点における水温変化図
Fig. 14 Elapsed time and water temperature at D point



第12図 C-1地点における水温変化図
Fig. 12 Elapsed time and water temperature at C-1 point



第15図 F-1地点における水温変化図
Fig. 15 Elapsed time and water temperature at F-1 point



第16図 F-2地点における水温変化図
Fig. 16 Elapsed time and water temperature at F-2 point

点で、温度変化が激しく（流動状態が良く、温度伝搬が速い）効果的にダム内に循環流を発生可能であると考えられる方を○で表し、温度変化が緩やかで（流動状態が比較して悪く、温度伝搬が遅い）効果的に循環流を発生できないと考えられる方を×で、そして効果が同じと考えられるものを△で第3表に示し、○の数の多い方が最適条件であるとした。

また、中間温度層 A-2, B-2, C-2, E-2, F-2, そしてG-2の6点についても同様な評価を行いその結果を第4表に示した。

この結果、水面及び低水温度層では、揚水筒2基の○の数が0個、揚水筒3基の○の数が3個（△4個）である。また中間温度層では、揚水筒2基の○の数が0個、揚水筒3基の○の数が4個（△2個）で、こちらも3基設置する方が、2基設置よりも効率よくダム内を循環させることができ、より速く底層の無酸素状態を解消させ、かつ温度躍層形成の防止が可能であると考えられる。

第3表 水温比較ポイント（水面及び低水温度層）での流動状態判定

Table 3 Flow condition determination (Surface and lower layer)

	A-1	B-1	C-1	D	E-1	F-1	G-1
2 air bubble plumes	×	×	×	△	△	△	△
3 air bubble plumes	○	○	○	△	△	△	△

第4表 水温比較ポイント（中間温度層）での流動状態判定

Table 4 Flow condition determination (Intermediate temperature layer)

	A-2	B-2	C-2	E-2	F-2	G-2
2 air bubble plumes	×	×	×	×	△	△
3 air bubble plumes	○	○	○	○	△	△

むすび

気液2相流モデルの数値解析により、60時間後の仮想揚水筒を設置したダム-A内の流動状態を2条件シュミレートした。計算再現時間が60時間と少ないため（揚水筒の能力は、[ダム貯水量/揚水筒排水量合計=約1ヶ月]となるものを計画基準としている）、計算結果の流動状態は、ダム内に循環流が発生しない結果であったが、水温変化の激しいほうが、流動状態が良く、温度伝搬が速く、そして、効果的にダム内に循環流を発生できるという仮定の基に、表水層・中間層・深水層を含む数ポイントの水温変化比較を行った。そして、水温変化の激しいポイントを多く持つ条件が、最適条件であるとした。

この評価方法により小時間のシュミレーションで、どの揚水筒設置条件が、閉鎖型貯水地を効率良く循環させ、温度躍層の形成防止、並びに底層の無酸素状態の解消可能か比較できるようになった。

連絡先

小西 嘉雄 技術開発本部
研究開発部
TEL 078-992-6525
FAX 078-992-6504
E-mail y.konishi@pantec.co.jp

高田 一貴 技術開発本部
(工学博士) 研究開発部
TEL 078-992-6525
FAX 078-992-6504
E-mail k.takata@pantec.co.jp