

ダム排砂に伴うDO変化に関する数値モデル

A NUMERICAL MODEL OF DO VARIATION WITH SEDIMENT FLUSHING

片岡幸毅¹・加藤雅広²・南修平³・森涼子⁴・劉炳義⁵

Koki KATAOKA, Masahiro KATO, Syuhei MINAMI, Ryoko MORI and Bingyi LI

^{1,2}正会員 工修 関西電力株式会社 土木建築室(〒530-8270 大阪市北区中之島三丁目3-22)

³正会員 工修 株式会社ニュージェック 河川・海岸部(〒542-0082 大阪市中央区島之内一丁目20-19)

⁴正会員 株式会社ニュージェック 河川・海岸部(〒542-0082 大阪市中央区島之内一丁目20-19)

⁵正会員 工博 株式会社ハイドロソフト技術研究所(〒542-0082 大阪市中央区島之内一丁目17-16)

A prediction model was constructed to estimate the variations of DO in the reservoir and the downstream of the dam associated with the sediment flushing. Based on the investigation of the sediment flushing in case of Dashidaira dam located in Kurobegawa-river, it is assumed that DO decrease is caused by Fe(II) oxidation, which have been reduced in the bottom sediment.

To estimate quantitatively the influence of accumulating duration on DO decrease, the model describing the transport and transform process of DO, Fe(II) and Fe(III) was incorporated into the one-dimensional sediment movement model. The validity of the present model is verified by the comparison of predicted results with the measured ones of the sediment flushing operations carried out at the dam on 1994 and 1999.

Key Words : *sediment flushing, DO variation, Fe(II) oxidation, Fe(III) reduction, reservoir sedimentation, prediction model*

1. はじめに

ダム堆砂対策の一つとして、排砂ゲートによる堆積土砂の排除という方式が実施されている。この場合、堆積土砂の変質割合によっては、放流水のDO(溶存酸素)濃度の低下による、魚類等水生生物の忌避行動など、下流への影響が懸念される。したがって、長期間堆積した土砂を排出する場合は、事前に排砂に伴うDOの変化を予測することが、河川環境を保全するという視点から、きわめて重要である。そこで、本研究は、黒部川の中流部に位置する出し平ダム(集水面積461.18km²、建設時総貯水容量9.01×10⁶m³)における排砂実施の際の一連の検討結果を踏まえて、適切な排砂頻度の決定や排砂に伴う下流への影響を事前に評価することを目的として、堆積状況や堆積期間等多くの要素を考慮できる排砂に伴うDOの変化予測モデルを構築する。本稿は、そのモデルの概要および妥当性について記述するものである。

2. 基本的な考え方

出し平ダムにおいては、平成6年2月に環境影響評価のための基礎データ取得を目的とする試験排砂を実施した。この際得られたデータを基に、排砂時における微細土砂流出に伴うDO低下の原因を調査した結果、主に堆積土砂に含まれる還元性物質(Fe²⁺、Mn²⁺、S²⁻等)の酸化反応によること、中でもFe(II)が支配的であることが判明している。土砂は連続的に堆積するため、排砂時のDO低下を適切に求めるには、その堆積速度や、DO消費物質の経時変化を推定する必要がある。そこで、1次元土砂動態モデルにDO、Fe(II)等の水質関係パラメータを導入することで、堆積状況および堆積期間をも考慮したモデルを構築して、貯水池内および下流河道の排砂時のDO変化を求めるものとする。

評価対象領域は、図-1に示すように大きくダム貯水池内と下流河道とに分ける。ダム貯水池内においては、DOの変化要因として、再曝気とFe(II)の酸化による消費についてモデル化する。下流河道では、再曝気と酸化

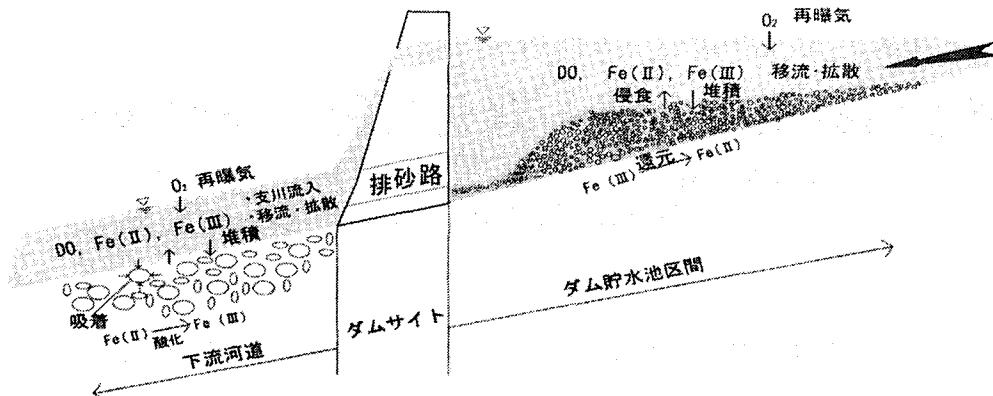
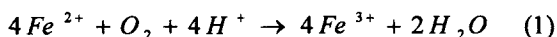


図-1 モデル概要図

反応による消費に加え、河床の砂礫層中の間隙水と砂礫上を流れる流水との交換を考慮する。

DOは下記の反応式に従って消費される。



この反応はFe(II)濃度が高いときに促進されるので、DOの消費量を評価するためには、Fe(II)の濃度の経時変化を求める必要がある。また、Fe(II)は堆積土砂に含まれるFe(III)が還元されることにより生成するので、Fe(III)も同様にその時系列変化を求める必要がある。

また、対象領域における全鉄はFe(II)とFe(III)の状態でのみ存在するものとし、酸化反応あるいは還元反応におけるFe(II)とFe(III)の変化量が等しいとする。

3. DO変化に関連する支配方程式

酸化反応に伴うDOおよびFe(II)の反応量は、微小時間の変化量がその時刻の濃度に比例するものと仮定して定式化する。すなわち、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K_{SF} \cdot C \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_{F2}}{\partial t} = -K_F \cdot C_{F2} \quad (3)$$

ここに、 K_{SF} ：DOの消費速度定数(1/s)、 C ：DO濃度(mg/l)、 K_F ：Fe(II)の酸化反応速度定数(1/s)、 C_{F2} ：Fe(II)濃度(mg/l)である。式(1)により、次の関係式が導かれる。

$$K_F = 4 \frac{W_{Fe} C}{W_{O_2} C_{F2}} K_{SF} \quad (4)$$

ここに、 W_{Fe} ：鉄の原子量(55.8)、 W_{O_2} ：酸素の分子量(32)である。DOの消費速度定数 K_{SF} とFe(II)の濃度 C_{F2} との相関の具体的な定式化については後述する。

以下に、DO変化に関連する基礎式について示す。

(1) 貯水池内の水中におけるDOおよびFe(II)、Fe(III)濃度に関する方程式

貯水池内におけるDOの変化は、次の一次元分散方程式により求められる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (C \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot C \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + K_r \cdot A (C_s - C) \\ & - K_{SF} \cdot A \cdot C + q \cdot C_{in} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 A ：流水断面積(m^2)、 u ：断面平均流速(m/s)、 D_x ：分散係数(m^2/s)、 C_s ：飽和DO濃度(mg/l)、 K_r ：再曝気係数(1/s)、 q ：単位幅支川流入量(m^3/s)、 C_{in} ：支川からの流入DO濃度(mg/l)である。

Fe(II)およびFe(III)については、以下のFe(II)およびFe(III)に関する一次元分散方程式を解くことにより、各時刻、各地点におけるFe(II)およびFe(III)濃度を求める。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (C_{F2} \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot C_{F2} \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C_{F2}}{\partial x} \right) - K_F \cdot A \cdot C_{F2} \\ & + (\beta R_{F2} + (1 - \beta) \cdot 10^{-6} \cdot R_{W2}) \cdot \sigma_s \cdot B_b \cdot DE \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (C_{F3} \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot C_{F3} \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C_{F3}}{\partial x} \right) + K_F \cdot A \cdot C_{F2} \\ & + (\beta R_{F3} + (1 - \beta) \cdot 10^{-6} \cdot R_{W3}) \cdot \sigma_s \cdot B_b \cdot DE \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 R_{F2} 、 R_{F3} ：それぞれ河床表層におけるFe(II)およびFe(III)の含有率(mg/kg)、 R_{W2} 、 R_{W3} ：それぞれ水中のFe(II)とFe(III)濃度(mg/l)とSS濃度(mg/l)との比、 β ：定数(堆積するとき0、浸食するとき1)、 σ_s ：土砂の比重(=2.65 g/cm³)、 B_b ：河床幅(m)、 DE ：粒径0.2mm以下の土砂の侵食または堆積速度(m/s)(侵食が+とする)である。

(2) 堆積土砂におけるFe(II)およびFe(III)含有率に関する基礎方程式

堆積土砂におけるFe(II)およびFe(III)につい

ては、土砂量に対する含有率で表現することにより計算するものとする。水と堆積土砂の界面におけるFe(II)およびFe(III)の交換は、土砂の堆積・侵食に伴う移行によるものとし、沈殿・溶出等は無視できるものとする。Fe(II)およびFe(III)含有率の変化は、式(8)、(9)のように、還元反応による変化項と河床変動に伴う移行項とで表される。

$$\frac{\partial R_{F2}}{\partial t} = K_{red} \cdot R_{F3} + \Delta R_{ZF2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial R_{F3}}{\partial t} = -K_{red} \cdot R_{F3} + \Delta R_{ZF3} \quad (9)$$

ここに、 K_{red} ：還元によるFe(II)生成速度定数(1/s)、 ΔR_{ZF2} 、 ΔR_{ZF3} ：それぞれ河床変動に伴うFe(II)およびFe(III)の単位時間の移行量(mg/kg・s)である。

(3) 下流河道の流水中におけるDOおよびFe(II)、Fe(III)濃度に関する方程式

DOについては、2. に示す考え方により、次式のよう

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot C \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + K_r \cdot A(C_s - C) \\ & - K_{SF} \cdot A \cdot C + q \cdot C_{in} + \lambda_b \cdot B_b \cdot V_e (C_b - C) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 λ_b ：河床間隙率、 V_e ：交換速度(m/s)、 C_b ：間隙水中のDO濃度(mg/l)である。

Fe(II)およびFe(III)については、移流・分散および酸化反応によるFe(II)の減少およびFe(III)の生成、ならびにDOと同様に河床砂礫層中の間隙水との交換を考慮し、下式のように表すものとする。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C_{F2} \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot C_{F2} \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C_{F2}}{\partial x} \right) - K_F \cdot A \cdot C_{F2} \\ & + \lambda_b \cdot B_b \cdot V_e (C_{F2b} - C_{F2}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C_{F3} \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot C_{F3} \cdot A)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C_{F3}}{\partial x} \right) + K_F \cdot A \cdot C_{F2} \\ & + \lambda_b \cdot B_b \cdot V_e (C_{F3b} - C_{F3}) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 ad ：間隙水層の厚さ(m)、 α ：係数、 d ：砂礫粒径(m)、 C_{F2b} 、 C_{F3b} ：それぞれ間隙水中のFe(II)およびFe(III)濃度(mg/l)である。

(4) 間隙水におけるDOおよびFe(II)、Fe(III)濃度に関する方程式

間隙水においてDOは、間隙水と河床材料表面の両方のFe(II)によって消費される。

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = -\frac{V_e}{\alpha d} (C_b - C) - K_{SF} \cdot C_b \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{F2b}}{\partial t} &= -\frac{V_e}{\alpha d} (C_{F2b} - C_F) - K_{Fb} C_{F2b} \\ & - K_F \cdot C_{F2b} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{F3b}}{\partial t} &= -\frac{V_e}{\alpha d} (C_{F3b} - C_{F3}) - K_{Fb} C_{F3b} \\ & + K_F \cdot C_{F2b} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial C_{F2d}}{\partial t} = K_{Fb} C_{F2b} - K_F \cdot C_{F2d} \quad (16)$$

$$\frac{\partial C_{F3d}}{\partial t} = K_{Fb} C_{F3b} + K_F \cdot C_{F2d} \quad (17)$$

ここに、 K_{Fb} ：河床の土砂粒子への吸着率(1/s)、 C_{F2d} 、 C_{F3d} ：それぞれ河床材料表面のFe(II)およびFe(III)濃度(mg/l)である。ただし、

$$K_F = 4 \frac{W_{Fe} C_b}{W_{O_2} (C_{F2b} + C_{F2d})} K_{SF} \quad (18)$$

4. 主要パラメータの定式化

本計算で用いる諸パラメータのうち、主なものを以下に示す。

(1) 再曝気係数

再曝気係数(K_r)については、影響を与える因子として酸素の水中での拡散係数や表面近傍の乱れを律する諸因子などを考慮する必要があり¹⁾、種々の予測式が提案されている。代表的なものとしては、Dobbinsの式²⁾と村上の式³⁾とがある。

(2) DOの消費速度定数

DOの消費速度定数 K_{SF} は、ダム上流60～80m地点表層泥(平成8年10月採取)を用いたDO消費実験結果より、経過時間とDOの時間変化量との関係から K_{SF} を求め、各試料の K_{SF} とFe(II)濃度 C_{F2} との相関を求めた結果(図-2を参照)、次式が得られた。

$$K_{SF} = 6.0 \times 10^{-6} \times C_{F2}^{1.5} \quad (19)$$

(3) Fe(II)の生成速度定数

一般に、底質中の還元反応は段階的に進行するものであり、また空間的にも深さに応じて特徴的な鉛直分布を示す。そのため、堆積した底質中では、これらの段階的に化学的性質の異なる各層において、Fe(II)の生成状況が異なるものである。しかしながら、そのような性質に影響を与える多数の要因について、1つ1つ量的変化を追跡するためには、モデルがきわめて煩雑になるのは避けられない。さらに、平成9年に出し平ダムにおいて実施された底泥調査結果からはORPなどの深さ方向の明確な傾向は認められていない。したがって、底質における嫌氣的性質の深さ方向の変化は考慮しないものとし、

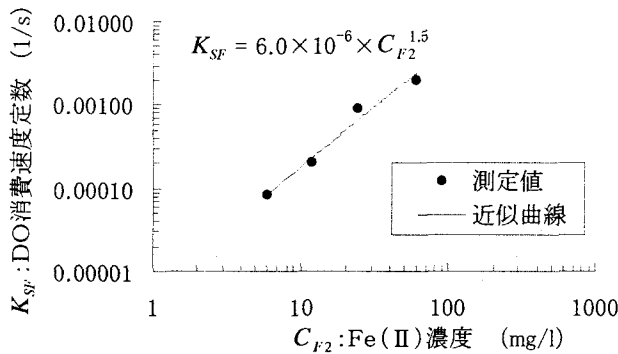


図-2 DO消費速度定数 K_{SF} とFe(II)濃度 C_{F2} との関係

Fe(II)生成速度定数は、下記のArrheniusの式で表される関係から、泥温により決定されるものとする。

$$K_{red} = Ae^{-E_a/RT} \quad (20)$$

ここに、 A ：定数、 E_a ：活性化エネルギー (J/mol)、 R ：気体定数 (8.31451 J/mol/K)、 T ：絶対温度 (K) である。ダム上流60～80m地点表層泥(平成9年採取)を用いた底質の嫌気化実験により、 $E_a = 1.16 \times 10^5$ (J/mol)、 $A = 1.42 \times 10^{17}$ が得られている。

(4) 河床変動に伴うFe(II)およびFe(III)の変化量の求め方

出し平ダム貯水池内底質調査結果によると、堆積土砂におけるFe(II)およびFe(III)の含有率と粒度構成の間には、粒径が細かいほど含有率が高くなるという関係がある。このため、堆積土砂におけるFe(II)およびFe(III)の変化量は、粒径毎に評価する必要がある。したがって、土砂動態モデル⁴⁾における粒度分布評価と同様に層毎に分けて計算する(図-3参照)。以下は河床変動に伴うFe(II)とFe(III)の移行量の計算式を示す。

侵食の場合：

$$\sum_k E_{Fe2k} = \sum_k (R_{S2k} \times \sigma_S \cdot E_{Sk}) \quad (21)$$

ここに、 E_{Fe2k} ：粒径階 k の土砂の侵食に伴うFe(II)の水中への移行率 (g/s)、 R_{S2k} ：河床表層(交換層)における粒径階 k の土砂に対するFe(II)含有率 (mg/kg)、 E_{Sk} ：粒径階 k の侵食速度 (m/s) である。

堆積の場合：

$$\sum_k D_{Fe2k} = R_{W2} \times \sigma_S \times 10^6 \times \sum_k D_{Sk} \quad (22)$$

ここに、 D_{Fe2k} ：粒径階 k の土砂の堆積に伴うFe(II)の移行率 (g/s)、 D_{Sk} ：粒径階 k の堆積速度 (m/s) である。また、Fe(III)についても同様に求めるものとする。

なお、交換層、遷移層および堆積各層におけるFe(II)とFe(III)の粒径別の含有率の変化は、河床変動に伴う変化量と還元反応による変化量を求めることにより評価される。紙面の関係でその記述を省略する。

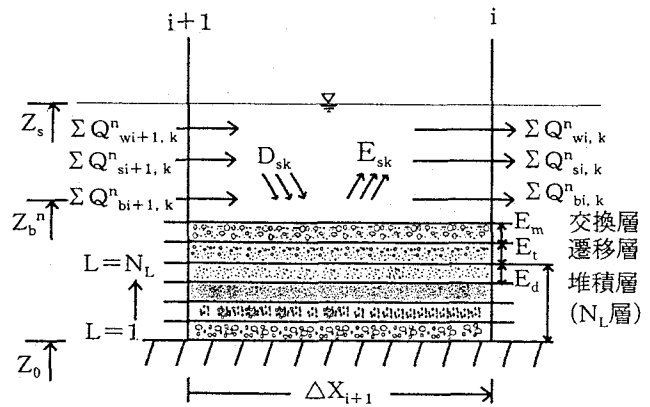


図-3 河床変動および粒度分布変化モデル⁴⁾

(5) 流水と間隙水の間での交換速度および吸着率について

芦田・江頭・金屋敷・小川⁶⁾は、河道における濁度の減衰要因を主流部と間隙水との交換、および間隙水中における濁質粒子の砂レキへの沈着によるものとした。彼らは、実験により、交換速度について次式を提案した。

$$\frac{V_{ex}}{u_*} = 4.33 \times 10^{-3} \quad (23)$$

ここに、 V_{ex} ：交換速度、 u_* ：摩擦速度である。本検討においては、交換速度については上記の考え方を参考に、摩擦速度に比例するものと仮定する。ただし、比例係数については再現計算により同定するものとする。

また、吸着率 K_{fb} については、粒径や粒子周辺の電気的な性質、流れの乱れ等が関係するものと考えられ、吸着作用を定式化するには、さらなる研究が必要である。本検討においては、便宜的に再現計算により定めるものとする。

5. モデルの妥当性検討

(1) パラメータの同定

a) 試験排砂に対する計算条件

下流河道における交換速度 V_e 等の同定を目的として、試験排砂の再現計算を行う(表-1)。ここでは、初期河床のFe(II)含有率を、図-4に示す底質調査(試料は平成8年排砂後～平成9年排砂前に採取)に基づく粒径0.2mm以下の土砂の50%粒径との相関により設定する。また、再曝気係数による計算結果への影響を調べるため、再曝気係数 K_r を表-1に示す5とおりに設定してCASE1～CASE5とする。なお、CASE1～3の代表値は急流河川の代表値⁶⁾の範囲(1.0～10.0/day)において設定する。

b) 計算結果および考察

下流河道におけるDOの縦断分布変化および2地点におけるDOの経時変化について、交換速度 V_e と吸着率

表-1 試験排砂に対する計算条件

項目	計算条件
再現期間	H6.2/27 7:00~2/28 24:00
計算ケース	CASE1: 代表値, $K_r=1.0\text{day}^{-1}$ CASE2: 代表値, $K_r=5.0\text{day}^{-1}$ CASE3: 代表値, $K_r=10.0\text{day}^{-1}$ CASE4: Dobbins式 CASE5: 村上式
使用流況	当該期間における実績流況
下流河道下流端水位	平均潮位
初期河床	河床高 H5.12実測河床 粒度分布 H5.12実測粒度分布 (H6.2までの2ヶ月考慮) Fe(II)含有率 50%粒径との相関 (図-4)

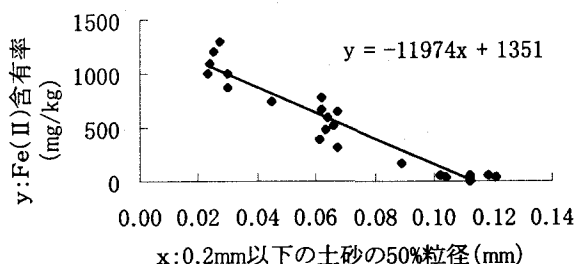


図-4 Fe(II)含有率と50%粒径との関係

K_{Fe} を式(24)のように設定したときの再現計算結果と実測値との比較を図-5および図-6に示す。排砂は、ダム水位低下後フリーフロー状態で上流の黒部ダムより40m³/sの流量を供給して行われ、フリーフローは2月28日8:00~9:00の1時間(ダム地点平均35m³/s)であった。図-5より、DOはダム内で低下し始め、ダム下流7km~10km付近で最も低く、その後次第に回復していく様子が見える。また、同排砂時のダム放流量が小さいのに対し、ダム下流2.5kmおよび5km付近には比較的大きな支川流入があるため、DO値の急激な上昇が見られる。図-6より、各地点におけるDO低下量や最小値の発生時刻等は両者がほぼ一致している傾向が見える。再曝気係数 K_r については、DOの消費・回復の傾向を変えるような顕著な差異は認められず、最小DO値からは、CASE3が適当であると判断される。

$$\frac{V_e}{u_*} = 4.33 \times 10^{-5}, K_{Fe} = 0.005 \text{ (1/s)} \quad (24)$$

また、同排砂中にA地点を含む一部の河道区間において、DOがゼロまで低下したが、これは主に土砂が長期間(前回の排砂から3年経過)堆積したことで排砂流量が小さかったことに起因すると考えられる。それ以降の排砂では、堆積期間の短縮と排砂流量の増加(洪水時排砂)を図ったことにより、上記の現象は発生しなかった。

(2) 平成11年9月排砂の再現計算

a) 計算条件

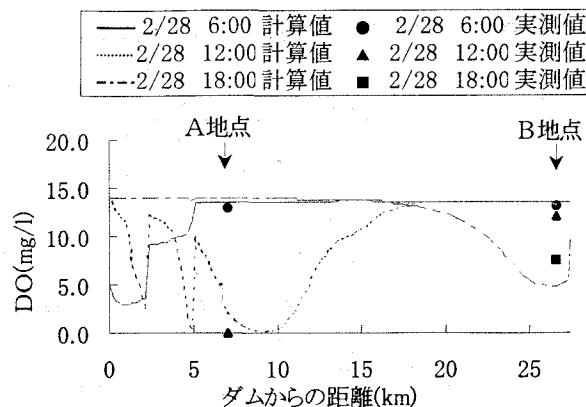


図-5 下流河道におけるDOの縦断変化 (CASE3)

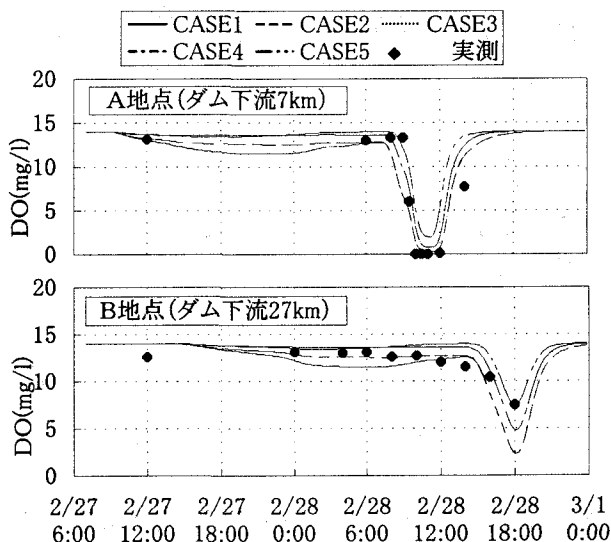


図-6 下流河道におけるDOの経時変化
(試験排砂に対する計算結果および実測)

(1)で同定したパラメータを使用した再現計算により、モデルの妥当性の検討を行う。再現するのは、平成11年9月排砂とする(表-2)。この排砂は、環境への影響を極力低減するための現在の排砂運用方法で実施されており、放流量等の条件は試験排砂とは異なっている(表-3)。ここで、初期河床の河床高および粒度分布は、当該排砂時のダム内河床形状変化と放流SSとを別途再現した計算の結果に基づいている。0.2mm以下の粒度構成については別途実施された底質調査結果を参考にして、0.2mm以下土砂の50%粒径を0.09mmおよび0.10mmの2通りに設定して、それぞれCASE aおよびCASE bとする。

なお、同計算における50%粒径と最大DO低下量との関係を図-7に示す。

b) 計算結果及び考察

下流河道におけるDOの縦断分布変化および2地点における経時変化について、再現計算結果と実測値との比較を図-8および図-9に示す。排砂は、出水末期にダム水位低下後自然流入量で行われ、フリーフローは9月15日21:00~16日21:00の24時間(ダム地点平均140m³/s)であ

表-2 平成11年9月排砂に対する計算条件

項目	計算条件
再現期間	H11.9/14 1:00~9/18 24:00
計算ケース	CASEa: 50%粒径 0.09mm CASEb: 50%粒径 0.10mm
使用流況	当該期間における実績流況
下流河道下流端水位	平均潮位
初期河床	H11.9再現河床形状 ダム内再現計算結果に基づき設定
河床	粒度分布 H11.9再現河床粒度分布
Fe(II)含有率	50%粒径との相関(図-4)

表-3 排砂方法の比較

	排砂時期	排砂流量
試験排砂	2月後半	上流の黒部ダムより40m³/s供給
現在の排砂	6月~8月	出水末期の自然流入量

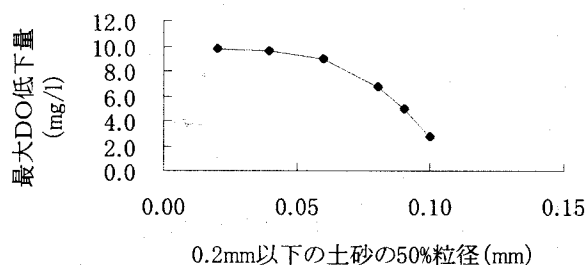


図-7 50%粒径と最大DO低下量との関係

った。最小DO値の比較によりCASE aの計算値がより実測値に近いことが分かる。

以上(1)、(2)、に示すように、排砂時の放流量や堆積土砂の性状等、条件の異なるいずれのケースについても概ね再現できている。若干のパラメータ選定・調整の余地はあるものの、排砂時の下流河道におけるDOの消費・回復現象を再現するのに、当モデルは妥当であると考えられる。

6. 結語

出し平ダムの排砂計画では、出水時後半に流入土砂を溜めることなく排砂することを基本としているが、他地点等で万が一、長期間堆積した土砂を排出する場合でも、当モデルを用いることにより、貯水池内の任意の堆積状況に対する、排砂時DO低下・回復予測が可能であり、ダム排砂に伴う下流への影響評価には有効であると考えられる。今後は、上記モデルの他地点ダムへの適用を図るとともに、モデルの汎用性を高めていく予定である。

参考文献

- 1) 宗宮功編：自然の流下機構，技報堂出版，p. 217-

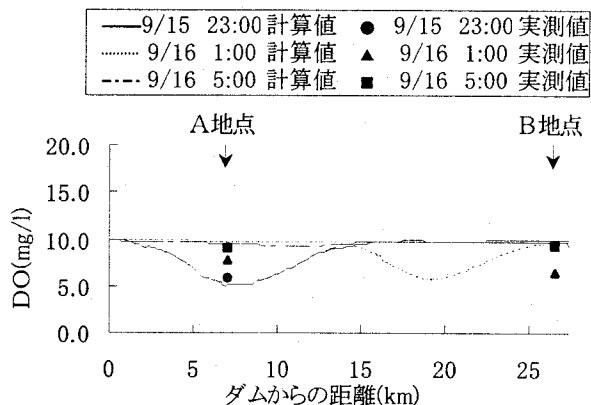


図-8 下流河道におけるDOの縦断変化 (CASEa)

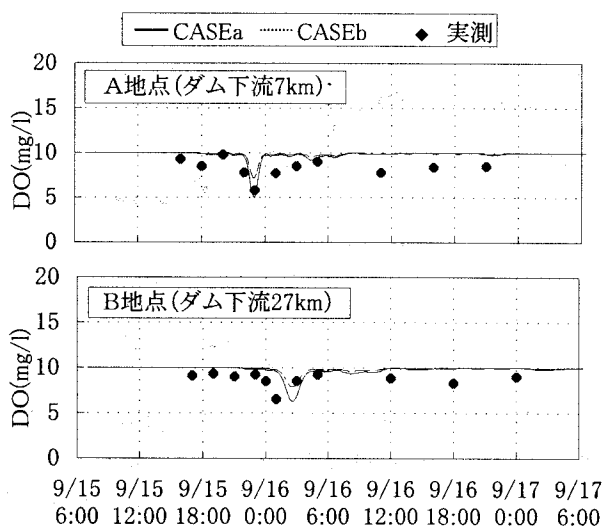


図-9 下流河道におけるDOの経時変化
(平成11年排砂に対する計算結果および実測)

222, 1990.

- 2) Dobbins, W.E. : BOD and oxygen relationships in streams, *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 90(SA3), p. 53-78, 1964.
- 3) 村上健：河川における再曝気，第6回衛生工学研究討論会講演論文集，p. 45-52, 1970.
- 4) 劉炳義：ダム堆砂・排砂シミュレーションモデル，(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部 第28回業務研究発表会論集，pp. 157-164, 1995.
- 5) 芦田和男、江頭進治、金屋敷忠儀、小川義忠：河道における微細土砂の生産・流出機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp. 413-431, 1980.
- 6) Chadderton, R. A., Miller, A. C. and McDonnell, A. J. : Uncertainly analysis of dissolved oxygen model, *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 108(EE5), p. 1003-1013, 1982.

(2000.10.2受付)