

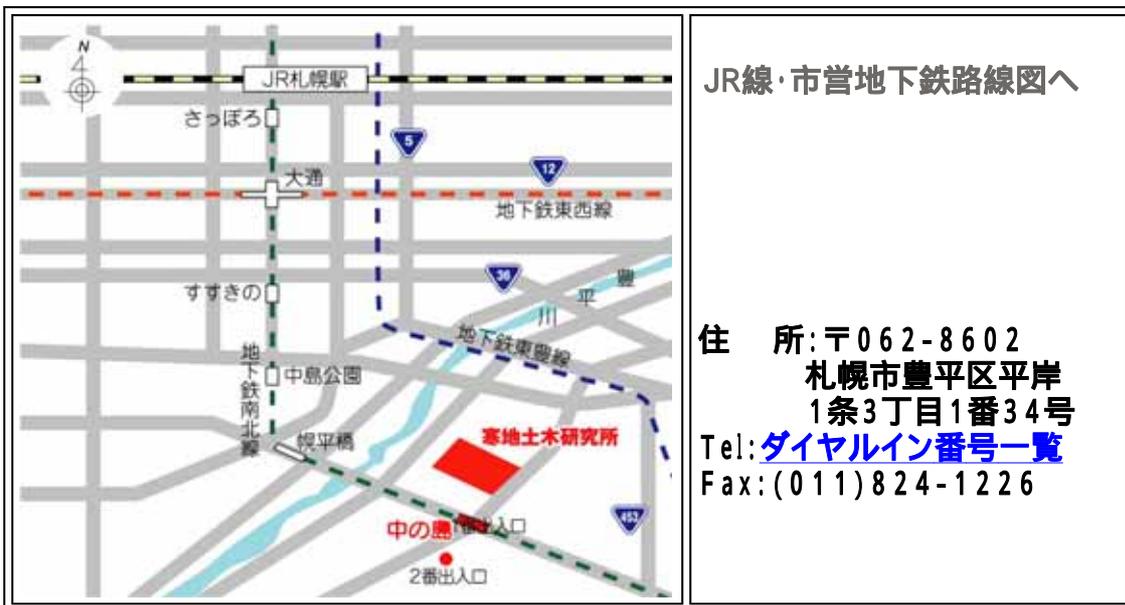
環境水理部会 研究集会

平成19年5月31日～6月1日

場所：札幌市
寒地土木研究所



寒地土木研究所の所在地



JR線・市営地下鉄路線図へ

住所: 〒062-8602
 札幌市豊平区平岸
 1条3丁目1番34号
 Tel: [ダイヤルイン番号一覧](#)
 Fax: (011) 824-1226

交通機関

新千歳空港から札幌市へ

鉄道(JR)	千歳線・室蘭本線 上り(札幌方面行き)	
	新千歳空港駅 - 札幌駅	36分
バス	北海道中央バス (JAL到着ロビー内)	札幌市内 70分
	北都交通 (ANA到着ロビー内)	札幌市内 70分

札幌から中の島へ

地下鉄(市営)	南北線 (真駒内行き・札幌駅から5つめの駅)	
さっぽろ駅	- 中の島駅	8分

中の島駅から寒地土木研究所へ

徒歩	(中の島駅1番出口・北へ200m)	
中の島駅	- 寒地土木研究所	5分

HOME

環境水理部会 研究集会 於 寒地土木研究所
スケジュール

5月31日

14:00	14:05 開会挨拶	天野 邦彦
14:05	14:50 (招待講演) 河川水質負荷量に関する研究(仮題)	橋 治國
14:50	(ダム濁水セッション)	
14:50	15:10 VOF法を用いた貯水池内濁水挙動解析の紹介	田中 伸和
15:10	15:30 北海道電力におけるダム堆砂に対する取り組み	村田 浩一
15:30	15:50 貯水位低下時の微細粒土砂の再浮上を伴う濁水挙動解析	角 哲也
15:50	16:00 休憩	
16:00	16:20 高濃度濁水が流入するダム貯水池の出水時流動特性	鶴田 泰士
16:20	16:40 ダム貯水池における濁水濁水現象のモデル化と対策	守谷 将史
16:40	17:00 貯水池流動鉛直2次元モデルにおけるモデルレベルによる計算結果の比較	櫻井 寿之
17:00	17:20 超電導磁気分離を活用した懸濁物除去技術 時間次第で総合討議	井芹 寧
18:30	20:30 懇親会	

6月1日

9:30	10:15 (招待講演) 寒地土木研究所における環境水理研究(仮題)	渡邊 康玄
10:15	(研究発表)	
10:15	10:35 塩水遡上防止の構造物による効果について	吉川 泰弘
10:35	10:55 貯水池堆積物にみる硫黄同位体比の変化	今村 正裕
10:55	11:15 亜熱帯意沿岸域におけるリン・窒素の短期的収支	井上 徹教
11:15	11:25 休憩	
11:25	11:45 凍結融解作用による土砂生産量	藤田 正治
11:45	12:05 津波と温暖化 - 2007年ソロモン諸島地震津波を例に -	松富 英夫
12:05	12:25 有明海の懸濁物質の沈降速度に関する基礎的研究	山本 浩一
12:25	12:30 次期部会長挨拶	藤田 正治
12:30	13:30 昼休み	
13:30	15:30 施設見学	
15:30	解散	

VOF法を用いた貯水池内濁水挙動解析の紹介

(財) 電力中央研究所 田中伸和

(1) はじめに

VOF法を用いた貯水池内濁水挙動解析コード (Reserv-3D) は、電中研で開発されたVOF法¹による自由液面を追跡できる3次元直交格子差分法の乱流数値計算コードで、貯水池内の流動の他、水温分布や濁質挙動などを解析する機能を付加してソフトウェア登録を行った流動解析コードの総称である。すなわち、貯水池内の水温、濁度を流動場とともに3次元非定常計算で追跡することができるシミュレーションコードである。なお、乱流は、標準 $k-\epsilon$ 2方程式モデルを用いているが、密度成層の影響は密度勾配に反比例する形で以下のように与えている。とくに、水面の取り扱いには流体充填率 F 値を導入したVOF法を用いている。計算セル内の流体充填率 F は、もともと移流方程式で表されるが、本解析では保存則を満足させるために連続方程式を使って保存形にした式を使っている。そのため、連続方程式が厳密には成り立たなくても(微量の誤差が有っても)、流入、流出量の差に対応したように、計算領域内に存在する液体の体積は保存される。すなわち、高さ関数法やMAC法などの他の方法では、体積保存が満たされない場合が多いが、VOF法は体積が保存されるのが、最大の特徴である。

(2) 離散化と自由表面の処理

上に述べた基礎方程式を3次元直交差分格子で離散化して濁質流動の予測に用いている。空間の離散化は、セル内部の中心点で流体の密度、エネルギー、温度、濁質濃度のスカラー量を定義し、流速、外力などのベクトル量の3成分をセル間の境界面中央で定義して離散化している²。移流項の離散化には、水面や壁の近傍では、1次と3次とを組み合わせた1.5次風上差分を、それ以外では、3次風上差分を用いている。また、拡散項には、同様に2次と4次の中央差分を用いている。時間の離散化については、安定な計算が進められるように係数の正值化を施した陰的解法による後退差分を採用しているとともに、質量保存則(連続方程式)を満足する(微量以下になる)ように、SIMPLEスキーム³で圧力(正確に

¹ VOF (Volume of Fluid) 法はHirtら(1981)により開発された自由液面の追跡手法である。流体の計算格子(セル)を空気、流体、固体(壁)のそれぞれに分類し、さらに空気と流体の共存セルの概念を導入し、セル内の液体充填率 F 値で液面を認識する方法である。Hirt, C. and Nichols, B.D (1981): Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journ. of Computational Physics 39, 201-225

² このような格子への変数配置をスタガード格子配列とよぶ。

³ SIMPLE ; (Semi Implicit Pressure-Linked Equation) 圧力自身でなくその補正量を決める圧力補正式をスタガード格子で解く方法である。Patankar, S.V. (1979): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Numerical Heat Transfer, Vol. 2, McGraw-Hill, New York.

は圧力補正量)と流速の修正を施して時間積分計算を進めている。このとき、圧力補正量を反復計算で数値的に解いており、これが全体の計算時間の大きな部分を占めている。なお、この連立方程式の解法には、双共役勾配法、あるいは加速SOR法を用いている。

また、VOF法の自由液面追跡の計算は以下の手順で実行している。

① 各計算格子を液体充填率 F (0から1の間の値をとる)、及び周囲のセルの状況により、気体セル(何も無い空間、気体を解いているわけではない)、共存(水面)セル、液体(内部)セル、境界(物体)セルに分類し、定義する。

② 共存セル内の液体位置(水面)を液体と気体の境界面が、 x 、 y 、 z いずれかの座標軸に垂直になるように決定する。ただし、本コードでは、上方(鉛直軸に垂直、 $x-y$ 平面に平行)にのみ、水面を定義している。

③ 各計算セルの F 値を流速場に従って、保存形式で移流させる。

④ 時間を進めて計算を繰り返す。

(3) 広範囲の領域の拡散現象を精度良く計算するための工夫

Reserv-3Dで貯水池の本川上流で発生した洪水による濁水現象をダム堤体まで広範囲に長時間計算する目的に利用するには、再現したい現象の空間解像度が異なるために、工夫が必要である。たとえば、洪水による濁水挙動の再現シミュレーションでは広範囲、長時間の計算を実用的な計算時間で計算する必要があるため、空間格子サイズを大きくせざるを得ない。しかしながら、空間格子を一定以上に大きくすると、数値拡散が大きくなり、濁度塊フロントが薄められることになる。そこで、濁度塊フロントの移動が精度良く追跡できるように、ここでも濁水塊と清水との境界にも、VOF法を適用したダブルVOF法を導入することもできるようにしている。また、空間格子サイズの拡大に伴って粘性係数の表現が不適切にならないように、平均流モデルで用いられるような、平均流速と水深で定義した場の粘性係数を導入している。

(4) 初期条件、境界条件

前述したように、VOF法の最大の特徴は、液体容量が保存されることである。そのため、予想される水位を想定して、それを初期条件として与えるものとしている。しかしながら、計算が進むと水面が変化するので、比較したい地点の水位とは、一致するとは限らないため、流出、流入量を調整するか、水位を調整するかして、液体容量の増減をはかり、調整する必要がある。

(6) 適応例の紹介(洪水時の濁質挙動解析、冬季対流解析)

ここでは、上昇流、下降流が発生する本川上流からの洪水流入による貯水池内の濁質挙動に及ぼす防止幕の効果の検討例と冬季の貯水池内の成層場が壊れる過程の検討例を示す。

以上

北海道電力におけるダム堆砂に対する取り組み

北海道電力株式会社水力部土木グループ 村田浩一

1. 北海道電力における堆砂の現状

北海道電力が有する水力発電所は、平成 19 年 4 月現在で 53 箇所、総出力は 123 万 kW となっており、当社総出力 650 万 kW の約 19%を担っている。これらの発電所に対応するダムのうち、当社が管理する高さ 15m 以上のハイダムは 22 ダムあるが、その堆砂率は平均で約 32%、最大では 90%を超えており、堆砂対策が緊急の課題となっている（平成 17 年度深淺測量調査実績）。

水力発電におけるダムの役割は、①発電に必要な位置エネルギーを得ること、②河川水を一時貯留し効率的な発電を行うこと、の 2 点であり、特に後者の機能維持について貯水池・調整池容量の確保、即ち堆砂対策が重要となる。また、堆砂が取水口前面で進行している場合は、取水量減少による発電出力低下や土砂流入による設備損傷といった問題が発生する。

当社管理のダムにおいても、表-1 に示すとおりこれらの問題が顕在化しつつあり、安全かつ効率的なダム管理・運用に向けた堆砂対策検討を進めているところである。

表-1 堆砂問題が顕在化しているダム（ハイダムのみ）

堆砂による弊害	該当ダム数*		該当割合
有効貯水容量の減少	有効貯水容量内の堆砂率が 30%を超えるダム	5 箇所	22.7%
取水障害の発生	取水障害が顕在化しているダム	4 箇所	18.2%

※ 平成 17 年度深淺測量調査実績

2. ダム堆砂に対する取り組み

現在、当社で進めているダム堆砂に対する取り組みは、①流入土砂の軽減・通過・排除を効率的に行うための工法検討、②浚渫土砂の有効利用促進の 2 つに大別される。以下に、それぞれの取り組みについて代表的な事例を示す。

2.1 流入土砂の軽減・通過・排除を効率的に行うための工法検討

恒常的に発生する浚渫費用低減を目的として、ダム地点特性に応じた効率的な流入土砂の軽減・通過・排除方法について検討を進めており、以下にその代表的事例を示す。

(1) 貯砂ポケット¹⁾

アクセスが容易で、かつ陸上掘削による浚渫工事が可能な地点に予め貯砂ポケットを造成し、流入土砂の移動を制御することにより浚渫効率を向上させるもので、上記分類では流入土砂の排除に該当する。

検討は、モデルダムを選定し、貯砂ポケット造成位置を概略選定した後、深淺測量データ・水文データおよび河床材料調査結果に基づき、水理模型実験（写真-1 参照）ならびに数値解析を行い、詳細な貯砂ポケット造成位置、掘削形状などを選定している状況であり、今後は実ダムにおける実証を経て、他ダムへの展開を図る計画である。

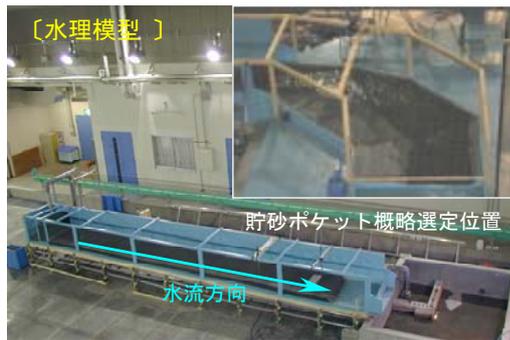


写真-1 貯砂ポケットに関する検討

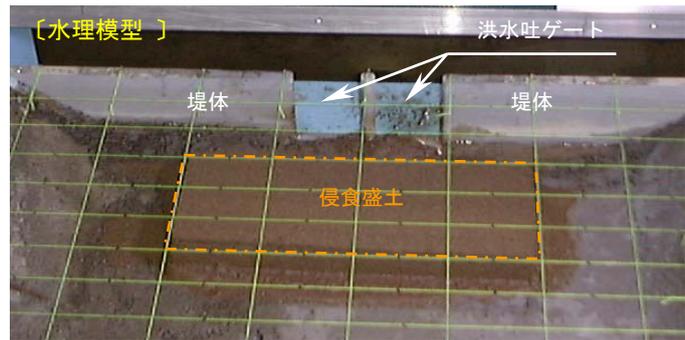


写真-2 侵食盛土に関する検討

(2) 侵食盛土

放流時の堆砂排出（スルーシング）がより効率的に行われるように、予め洪水吐ゲート前面に侵食効率の良い盛土を形成するもので、上記分類では流入土砂の通過に該当する。

検討は、モデルダムを選定し、深淺測量データ・水文データおよび河床材料調査結果に基づき、水理模型実験（写真-2 参照）ならびに数値解析を行い、侵食効率の良い盛土形状や対象流入量などを選定している状況である。今後は、下流域への影響、実ダムにおける盛土形成方法・時期等を考慮した実現可能性・費用対効果など総合的に検討を進める計画である。

2.2 浚渫土砂の有効利用促進

浚渫実施にあたっては、浚渫費用低減もさることながら、土置場の確保が大きな課題となっており、置土量低減のため浚渫土砂の有効利用促進に取り組んでいる。以下にその代表的事例を示す。

(1) 有効利用量拡大

道路材料など一般的な有効利用用途の利用量拡大に向けて、予め浚渫土砂を採取し材料試験や化学分析などを実施し、浚渫時期や浚渫量などの情報と併せて、関係者への周知に取り組んでいる。

(2) 有効利用用途拡大（磯焼け回復材）

北海道日本海沿岸域では、海藻類が生育できずに海底が白色を呈する磯焼け現象が進み問題となっているが、対策の一つとして、海藻の生育に必要な栄養塩である腐植酸鉄を安定的に形成・供給する方法が開発され、磯焼け再生に効果を挙げている²⁾。

一方、一部のダムの湖底には、山間部から流入した落ち葉や倒木等が腐植したヘドロ状物質と無機鉍物層に存在する二価鉄が結合し、大量の腐植酸鉄として存在している。現在、この腐植酸鉄含有堆積物の利用に関する技術開発（河川整備基金助成事業）が進められており、当社は堆積物の供給元という立場で、開発に協力している。

〔参考文献〕

- 1) 神藤謙一，西村哲治，上田知広：地点特性に応じた効率的なダム堆砂対策に関する研究，電力土木，no.323，pp68-71，2006.5.
- 2) 木曾英滋，長谷部廣行，渋谷正信，堀家茂一，定方正毅：転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成に関する実海域検証実験について，豊かな沿岸を造る生態系コンクリートー磯焼けを防ぎ藻場を造るーコンクリート技術シリーズ 72，pp.182-187，土木学会，2006.11.

貯水位低下時の微細粒土砂の再浮上を伴う濁水挙動解析

角 哲也¹・井口真生子²
Tetsuya SUMI and Makiko IGUCHI

¹博士（工）京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4）

²博士（工）株式会社ハイドロソフト技術研究所（〒550-0015 大阪市西区南堀江1-7-4）

1. はじめに

貯水池の水質問題の一つである濁水長期化現象は、洪水時に流入した微細粒土砂が滞留し長期間にわたって濁水が放流される現象である。濁水長期化現象の原因は、主に洪水時に流入した濁水が貯水池に貯留されることによる。それ以外にも、図-1に示されるように、貯水位が高い時期に貯水池末端に堆積した微細粒土砂が、貯水位低下に伴って再浮上する現象（濁水濁水現象としても知られる）が原因となる場合がある。

このような濁水現象は、異常濁水時のみならず、①水位変化の大きな制限水位方式である、②貯水位が高い時期に濁水が流入し、貯水池上流部に微細粒土砂が堆積する、③流域に崩壊地をもつなど生産土砂量が多い、ダムにおいても多く確認される。

本研究では、このような貯水池末端での濁質再浮上を伴う濁水長期化現象を検討するために、精度のよい、かつ実用的なモデルとして、一次元河床変動モデルと鉛直二次元濁水解析モデルを結合したモデルを構築し、過去に濁水現象が確認されている貯水池を対象に再現性を検証した。また、本検討では微細粒土砂の侵食機構が重要であり、再浮上条件についても検討した。さらに、再現計算結果より、対象貯水池の微細粒土砂の挙動の特徴について考察を加えた。

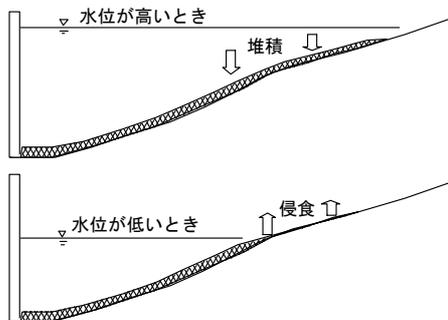


図-1 貯水池上流部での土砂の再浮上のイメージ図

2. 数値モデルの概要

一次元河床変動モデルと鉛直二次元濁水挙動解析モデルをリンクさせた「河床変動・濁水解析結合モデル」¹⁾を構築し用いた。本モデルは、図-2、図-3に示されるように、全解析領域において一次元河床変動計算を行い、さらに貯水池区間は鉛直二次元濁水計算を行い、相互の情報を受け渡すものである。河床変動解析でWashloadとして扱われる粒径階が、濁水解析でのSSに対応している。

図-4は計算フローを示している。掃流砂・浮遊砂は全対象領域で計算するが、Washloadは河道区間でのみ一次元拡散方程式を解き、河道区間最下流端でのWashload移流量を鉛直二次元濁水計算の上流端SS境界条件として与える。その後、鉛直二次元濁水計算を行い、堆積量を一次元に受け渡し、河床変動量、河床の各粒径の含有率を計算する。

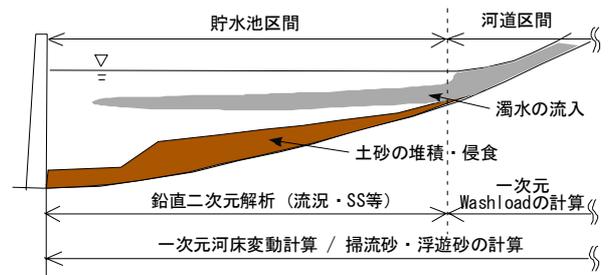


図-2 河床変動・濁水解析結合モデルのイメージ図

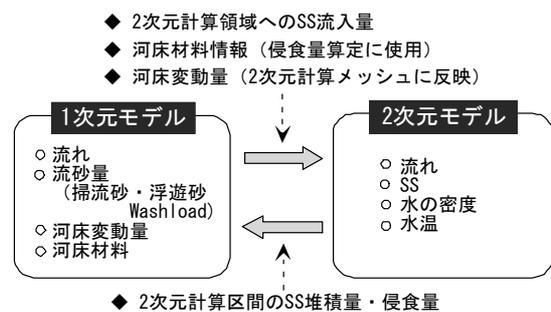


図-3 各モデルの計算項目および受け渡しする情報

一次元河床変動モデルは、堆積侵食履歴を實現象に近くする表現するため、流砂の計算は混合砂モデル、河床は多層モデル²⁾を採用する。微細粒土砂の侵食速度 E_{nk} を次式に示す。

$$E_{nk} = P_{bk} \alpha_{mc} u_*^3, \quad u_* \geq u_{*nk}$$

$$E_{nk} = 0, \quad u_* < u_{*nk} \quad (1)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 P_{bk} : 粒径 d_k の交換層における含有率、 α_{mc} : 粘着性土巻き上げに関する係数、添え字の k : 粒径階である。なお、河床モデルは図-5に示すように表層から交換層、遷移層、そして堆積層に区分されている。

鉛直二次元濁水挙動解析モデルは、既往の研究報告³⁾を参考に、さらに数十年を計算対象期間とすることを想定して、再現性を確保しつつ計算負荷の少ないモデルを採用した。圧力の取り扱いは静水圧モデルとし、渦動粘性係数の設定はRichardson数の関数⁴⁾とした。

3. 検証計算

(1) 対象領域の概要

本研究で対象としたX貯水池は、総貯水容量約110百万 m^3 、貯水池の最大水深約80m、貯水池の長さ約8kmである。堆砂の進行は緩やかであるが、濁水長期化現象が発生することがある。流入する濁質に粒径の非常に細かい成分が多く含まれることが濁水長期化の一因となっている。

(2) 計算条件

検証期間は2002年1月から2005年12月までの4年間とした。計算メッシュは、縦断方向は一次元、二次元ともに $\Delta x=200m$ 、二次元メッシュの鉛直方向は $\Delta z=1m$ とした。

粒径区分および初期河床材料を表-1に、初期河床高を図-6に示す。表-1中のA粒子、B粒子は梅田ら⁴⁾の提案する確率沈降モデルを仮定した粒子である。初期河床高および鉛直二次元計算用メッシュ幅は、2002年度の堆砂測量データをもとに与えた。SSおよび水温は、1月上旬の平均的な値である $5mg/l$ および $10^\circ C$ を与えた。

境界条件は次のように設定した。流入量・放流量・貯水位は図-6に示すダム運用管理記録を用いた。流入水温は2002年～2005年の定期水質調査の流入水温と日平均気温から作成した相関式により与えた。流入SS濃度は定期水質調査および出水時観測の流入SS濃度と流量から作成した相関式により与えた。なお、水温・SSとも融雪出水のある1月～5月とその他の6月～12月に分けて相関式を作成した。流入水温と気温の相関式を式(2a) (2b)に、流入SS濃度と流入量の相関式を式(3a) (3b)に示す。

$$T_w = 0.57 \cdot T_a + 4.63 \quad (1月 \sim 5月) \quad (2a)$$

$$T_w = 0.16 \cdot T_a + 4.14 \quad (6月 \sim 12月) \quad (2b)$$

$$C_{in} = 0.35 \cdot Q_{in}^{1.49} \quad (1月 \sim 5月) \quad (3a)$$

$$C_{in} = 0.16 \cdot Q_{in}^{1.24} \quad (6月 \sim 12月) \quad (3b)$$

ここに、 T_w : 流入水温($^\circ C$)、 T_a : 日平均気温($^\circ C$)、 C_{in} : 流入SS濃度(mg/L)、 Q_{in} : 流入量(m^3/s)である。

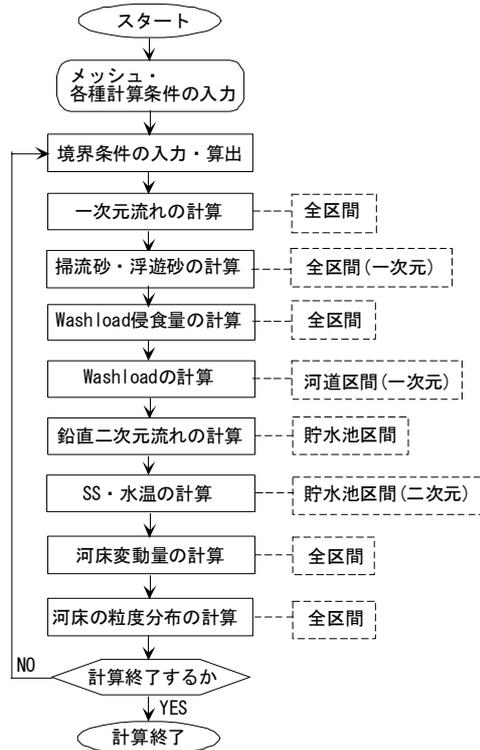


図-4 計算フローチャート

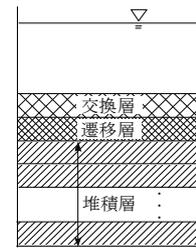


図-5 河床モデル

表-1 粒径区分および初期河床材料

	k	対象粒径	代表粒径	沈降速度	初期河床材料	流入SS	
掃流砂 浮遊砂	1	16mm-40mm	25.3mm	0.52m/s	18.8%	26.2%	
	2	6mm-16mm	9.8mm	0.32m/s	34.0%		
	3	2mm-6mm	3.5mm	0.19m/s	28.7%		
	4	0.5mm-2mm	1.0mm	0.10m/s	12.5%		
	5	0.1mm-0.5mm	0.22mm	0.03m/s	4.9%		
ウォッシュ ロード (SS)	6	30 μm -100 μm	54.8 μm	$2.0 \times 10^{-3}m/s$	1.1%		
	7	17 μm -30 μm	22.6 μm	$3.5 \times 10^{-4}m/s$	0%		
	8	10 μm -17 μm	13.0 μm	$1.1 \times 10^{-4}m/s$	0%		
	9	10 μm まで	A粒子	0m/s	0%		15.1%
	10		B粒子	$2.0 \times 10^{-3}m/s$	0%		41.0%

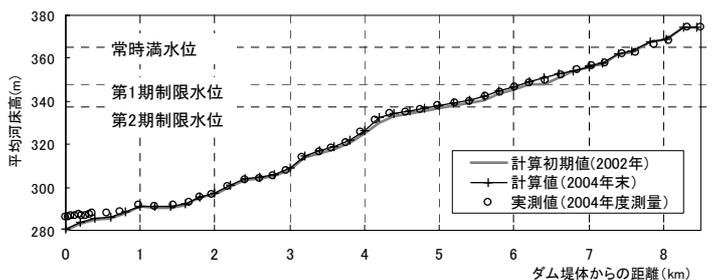


図-6 初期河床高および2004年末の計算および実測河床高

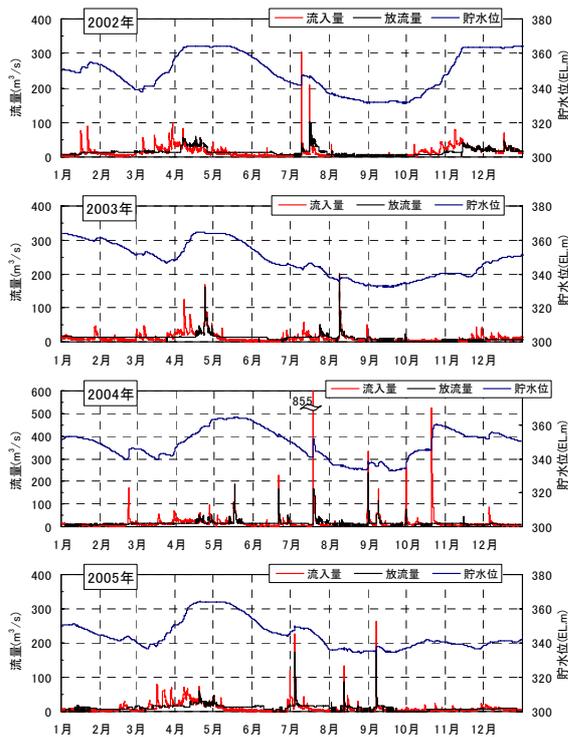


図-7 流入放流量および貯水位

表-2 微細粒土砂の侵食に関する検討ケース

	u_{*bk} (m/s)	α_{mc}	Q_{mc} (m³/s)	P_{bk}	河床変動
Case-A1	0.03	0.5	0	混合	有
Case-A2			10		
Case-B1	0.01	0.5	0		
Case-B2	0.06				
Case-C1	0.03	0.1	0		
Case-C2		1.0			
Case-D	0.03	0.5	10	分離	有
Case-E				分離	無

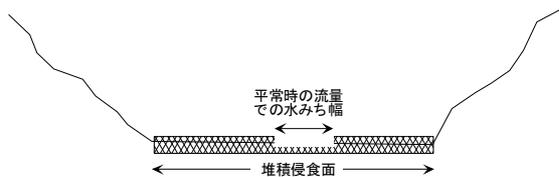


図-8 平常時の侵食イメージ図 (横断面)

流入SSの粒度分布は2005年9月出水の流入濁質の粒度分析結果の平均値から設定した(表-1)。一次元河床変動計算の掃流砂・浮遊砂流入量は、有効流量を100m³/s以上として、それぞれ上流端での平衡流砂量を与えた。

微細粒土砂の侵食量とタイミングは、式(1)より、微細粒土砂の侵食特性である u_{*bk} および α_{mc} 、その場の水理量の u_* 、河床材料に関する P_{bk} によって決まる。 u_{*bk} は過去の侵食速度実験結果より0.03m/s、情報のない α_{mc} については櫻井ら⁵⁾の論文を参考に0.5を基準値とし、それぞれについて表-2に示す感度分析を行った。また、表-3の Q_{mc}

は微細粒土砂の侵食に関する有効流量である。一次元河床変動モデルでは横断方向の土砂堆積分布を表現できないため、平常時の水みちがほぼ固定されているとすると、図-8に示すように河床幅の一部のみ侵食されるので、侵食量が過大評価になる。平常時の侵食量を簡易的に制限する方法として、 Q_{mc} を設定した。 P_{bk} に関しては、一次元モデルでは河床モデル(図-5)の1つの層内では河床材料は均一であることを前提としているが、再浮上が見られる貯水池上流部での堆積土砂の粒度は河道部では粗く側岸では細かい傾向がある。極端な例であるが、掃流砂・浮遊砂と微細粒土砂が混合しないと考えると P_{bk} を扱ったケースをCase-Dとする。 u_* は同じ流量でも、河床形状により変化する。そこで、河床変動に伴う u_* の変化が侵食量に与える影響を確認するためにCase-Eを行った。

(3) 計算結果

解析結果と実測値の比較から、河床形状、河床材料、水温および濁度の鉛直分布が再現できたことが確認されている¹⁾。ここでは、微細粒土砂の再浮上を伴う濁度上昇について記述する。

図-9は2005年のダム堤体付近で自動観測されている濁度と計算結果を、横軸に時間、縦軸に標高をとって表示し、比較した図である。観測値が欠損している時は空白になっている。なお、自動観測の濁度とSSの換算は、濁度=3.25×SS (R²値は0.89)で行った。計算値は「河床変動・濁水挙動結合モデル」と「濁水挙動単独モデル」の結果を示しているが、結合モデルでは、3月の濁度の上昇が現れ、8月中旬の濁度も単独モデルと比較して大きい。これらは、流入した土砂が一度堆積し、それが再浮上した結果である。このような現象がみられるのは、対象ダムは洪水調節のための洪水期制限水位が設けられており、年間を通して約30m近くの水位変動(図-6, 図-7参照)があるので、図-1に示すような貯水池上流部での土砂の再浮上が生じているからと考えられる。

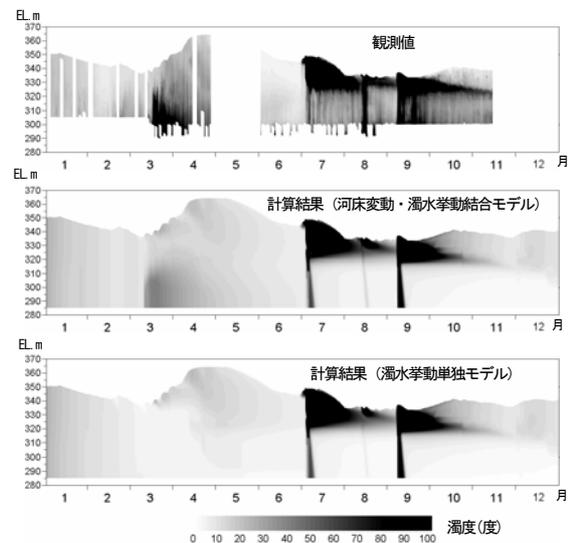


図-9 ダム堤体付近の濁度鉛直分布時系列の観測値と計算値の比較

表-2に示す侵食に関する検討結果のうち2005年3月～4月の濁度上昇に注目したものを図-10に示す。有効流量を設定したCase-A2はCase-A1より濁度上昇のタイミングが少し遅く、実測値に近くなっている。図-8に記したような水みち幅が河床幅より小さい時の対処が必要であると考えられる。限界摩擦速度 u_{smk} を変更したCase-B1とCase-B2は、Case-A1より濁度が低くなった。Case-B1は u_{smk} が小さく頻繁に侵食されるため貯水池上流部の微細粒土砂の堆積量自体が少ないこと、Case-B2は u_{smk} が大きいため侵食される区間が短くなったことによる。これより、 u_{smk} の設定は適切に行う必要があると言える。侵食速度に関する係数 α_{mc} を検討したCase-C1およびCase-C2は変化が小さかった。これは、侵食される微細粒土砂量が有限であるため、堆積量により制限がかかったためである。つまり、侵食される土砂量が有限である場合は、あまり感度は大きくないと言える。上の層に粗い土砂が存在すれば、それらが移動するまで微細粒土砂の侵食量は制限される。Case-Dは上層の粗い土砂による遮蔽効果が全くない場合であるがCase-A2より濁度のピーク値が高くなっている。仮に、微細粒土砂の多く堆積する場所と掃流砂・浮遊砂の堆積する場所が河道の横断方向に異なるとすれば、本モデルでは表現できておらず、3月の濁度上昇が小さかった一因とも考えられる。Case-Eは堆砂進行による河床高の変化が微細粒土砂の侵食に与える影響を見るために、河床高を固定したままでCase-Dと同様の計算を行った結果である。Case-Dの濁度の方が高いのは、図-6(4km～6kmあたり)に示されるように河床形状が変化し、侵食される区間が移動したことによる。したがって、微細粒土砂の侵食には、河床変動の考慮も重要であると言える。

2005年3月の濁度が上昇する現象が表現できたものの、

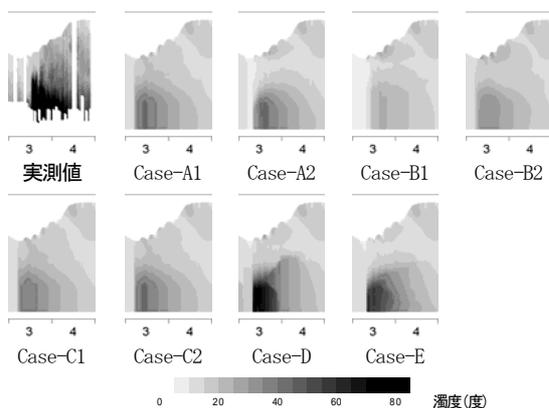


図-10 侵食に関する検討 (2005年3月～4月の濁度分布)



図-11 微細粒土砂の流入量、侵食量および貯水位

その絶対値は小さかった原因として、上記の侵食に関する検討内容の他に、微細粒土砂の沈降・圧密過程のモデル化にも課題があると考えられる。モデル改良にはさらに現地観測や現地・室内実験が必要である。

図-11は微細粒土砂の上流端流入量、および河道区間内侵食量を、月単位でまとめたものを示している。また、日平均貯水位を併示している。図-11より、水位が高い時期に出水があった場合は、後続する水位が低い時期に微細粒土砂が侵食されるというサイクルが見られる。また、侵食は春先(3月頃)と夏(8月頃)の水位が下がった時期に見られるが、2004年の春のように、水位低下が小さく、前年の秋に大きな出水がない場合は、微細粒土砂の再浮上はほとんどないことが分かる。春先と夏を比べると、春先の方が流入量に対して侵食量の割合が大きいう特徴が見られる。濁水解析単独モデルでは、上流端でのSSが境界条件として与えられるが、貯水池内でのSS侵食量が卓越する場合は、濁水解析に貯水池内から生産されるSS負荷量を考慮する必要があり、河床変動モデルとの結合モデルが有効となる。

4. おわりに

河床変動・濁水解析結合モデルにより貯水池上流部に微細粒土砂が堆積し、水位低下時に侵食され濁水発生源となる現象を再現した。また、微細粒土砂の侵食に関して検討し、課題をまとめた。今後、微細粒土砂の侵食および沈降・圧密過程に関して観測や実験を行い、精度の高いモデルに発展させることが課題である。

参考文献

- 1) 角哲也, 井口真生子: 貯水池内に堆積した微細粒土砂の侵食に関する実験的研究と数値解析への適用, 第3回粘着性土の侵食に関するシンポジウム予稿集, 土木学会水工学委員会基礎水理部会, pp. 13-20, 2006.
- 2) Liu, J., et al: Prediction of Concerted Sediment Flushing, *J. Hydr. Eng.*, pp. 1089-1096, 2004.
- 3) 櫻井寿之, 柏井条介: 貯水池流動鉛直2次元モデルにおけるモデルレベルによる計算結果の比較, *ダム工学*, 15, pp. 106-119, 2005.
- 4) 梅田信, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時濁水シミュレーションの開発, 平成14年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp. 3-17, 2002.
- 5) 櫻井寿之, 鎌田昌行, 柏井条介, 鈴木伴征: 混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現, *ダム工学* 16(1), pp. 30-40, 2006.

高濃度濁水が流入するダム貯水池の出水時流動特性

(株) 建設技術研究所 鶴田 泰士
陳 飛勇
堀田 哲夫

1. はじめに

濁水対策検討にあたっては、実績データに基づく濁水現象の解明が重要であるが、出水時の濁水挙動に関する観測データは必ずしも十分に得られていないのが現状である。本研究では、高濃度の濁水が流入するダム貯水池における現地観測を実施し、水温成層の逆転現象を伴う、高濃度濁水の挙動を捉えることができた。また、この出水について、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデルを用いて再現を試み、濁水挙動特性を考察したので報告する。

2. 現地観測

(1) 観測方法

本研究で対象としたのは、北海道内に位置する流域面積約400km²、総貯水容量約9,000万m³のダム貯水池である。当該ダムでは、主要な流入河川と貯水池湖心部で水温・濁度の自動観測が実施されており(図-1)、平成17年8月22日の出水時に、貯水池内湖心において水温・濁度の鉛直分布の変化を時間的に追う観測を実施した。

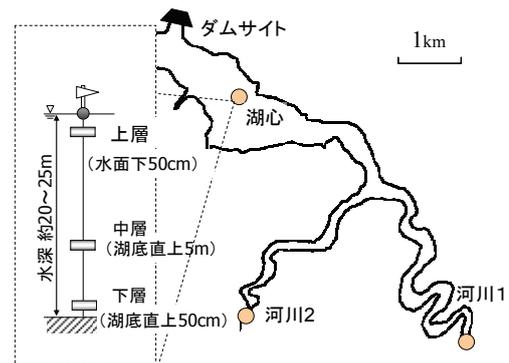


図-1 自動観測計の配置

(2) 観測結果

図-2 に流入河川の水温・濁度の変化と貯水池の運用

(流入量、放流量、貯水位)を示す。ダム流入量は8月22日午前8時付近でピーク(約800m³/s)を迎え、流入濁度は3000度近くに達した。また水温は流量増加とともに低下し、出水後期には、12℃程度になっている。図-3(記号)は、貯水池湖心で観測した水温・濁度の鉛直分布である。貯水池内では1000度を越える高濁度の濁水塊が密度差により貯水池下層に潜り込む下層密度流が生じている。それとともに、貯水池内の水温分布は急激な変化を示している。出水初期(8:20)では出水前の水温分布が、概ね残存しているが、すでに下層では洪水濁水が流入し、水温が上昇している様子が見える。下層で濁水塊の浸入段階(9:50)になると、EL.245m以深の分布が15℃程度で一様化している。その後、さらに濁水の浸入が進む(12:10)と、EL.245~250m付近において10℃近くまで水温が低下し、水温成層が上下逆転する様子が見られた。上記のような濁水浸入による貯水池内での水温・濁度の変化は、主に水深5m以深で顕著である一方、表層付近は、水温及び濁度がそれぞれ約20℃及び約100程度のまま著しい変化は見られなかった。

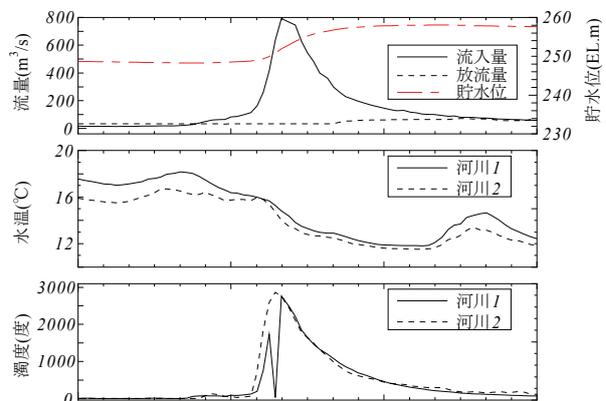


図-2 貯水池運用と流入河川の水温・濁度変化

3. 数値シミュレーション

(1) モデルの概要

使用する数値モデルは、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデルとした。本モデルは、梅田ら¹⁾が開発した洪水時の濁水流動を主要な目的としたモデルである。基礎方程式として、水平方向、鉛直方向の運動方程式、連続式及び水温とSSの輸送方程式、 $k-\epsilon$ 乱流モデル式を連立して解いている。

(2) 計算条件

流入河川の水温およびSSは、図-2に示した自動観測結果に基づいて与えた。ここでSSは濁度から換算しており、その換算方法は、筆者の1人が当該ダム流域のSS・濁度データを用いて検討した、濁質の粒度分布を考慮した換算式を使用した²⁾。流入濁質の粒度分布は、既往の出水時調査結果に基づき、流量の関数として

与えた。計算では、SSを10粒径群に分類し、別途行った沈降法による粒度分析により、各群に代表沈降速度を設定した。気象条件には、気温、湿度、日射量、風速、雲量を与えるが、雲量以外はダムサイトでの観測記録から1時間間隔で与えた。また、雲量はダムサイトでの観測記録がないため、近傍の気象観測所での日平均値を与えた。以上の条件で、出水（8月22日）を含む平成17年8月11日～29日の計算を行った。初期条件は静止状態とし、水温・濁度分布は、8月11日の湖心における観測結果に基づいて与えた。計算時間ステップは60秒とした。

(3) 計算結果

図-3 に貯水池湖心での水温・濁度の鉛直分布の再現結果を示す。高濃度の濁水による密度流については、高濃度濁水の潜り込みが概ね良好に再現されている。また、表層への濁度の拡散が抑えられ、実績に近い濁度分布となった。また、水温分布の著しい変化も比較的良好に追えている。多少時間のずれが生じてはいるが、EL.245～250m付近で10℃程度まで低下する傾向も再現されている。

そこで、シミュレーション結果に基づき、本現象のメカニズムを考察した。出水時の貯水池内水温・SSの縦断分布の変化(図-4)を見てみると、高濃度濁水が底層密度流として貯水池下層へ浸入することにより、それまで下層にあった冷水が上方へ押し上げられており、この冷水塊が底層密度流に対する補償流に乗って上流へ移動し、EL.245～250m付近に10℃程度の層が出現したものと推察された。

4. おわりに

本研究では、高濃度の濁水流入が見られるダム貯水池において、出水時の貯水池内観測を行い、水温成層の逆転現象を伴う、高濃度濁水の挙動を捉えることができた。この出水について、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデルを用いて、再現を試みた。その結果、濁水の貯水池下層への潜り込み、表層付近の成層構造の温存傾向等、観測で捉えられた濁水挙動の特徴を再現できた。

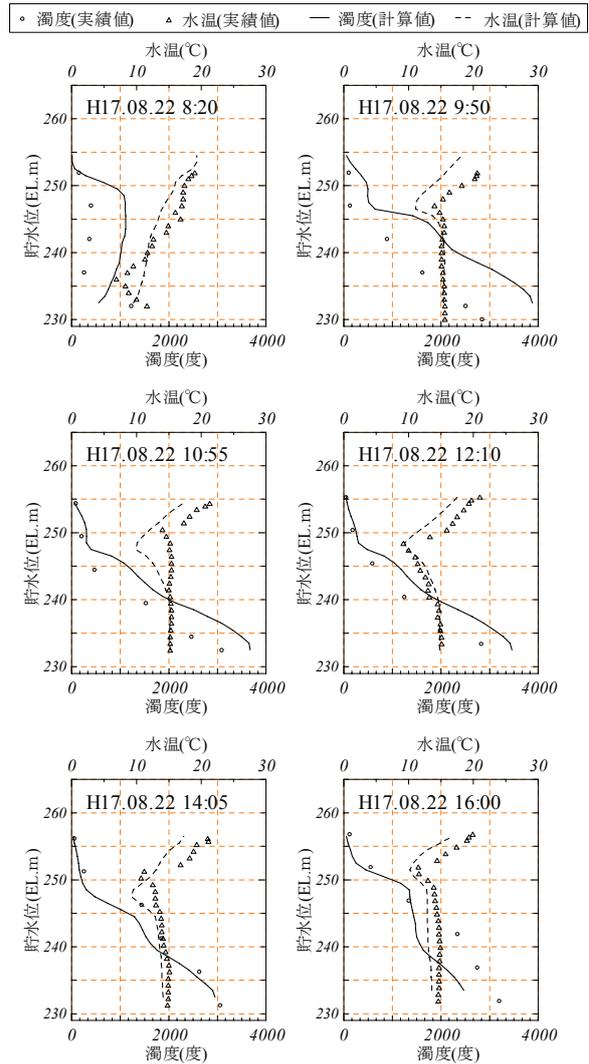


図-3 貯水池湖心における水温・濁度鉛直分布

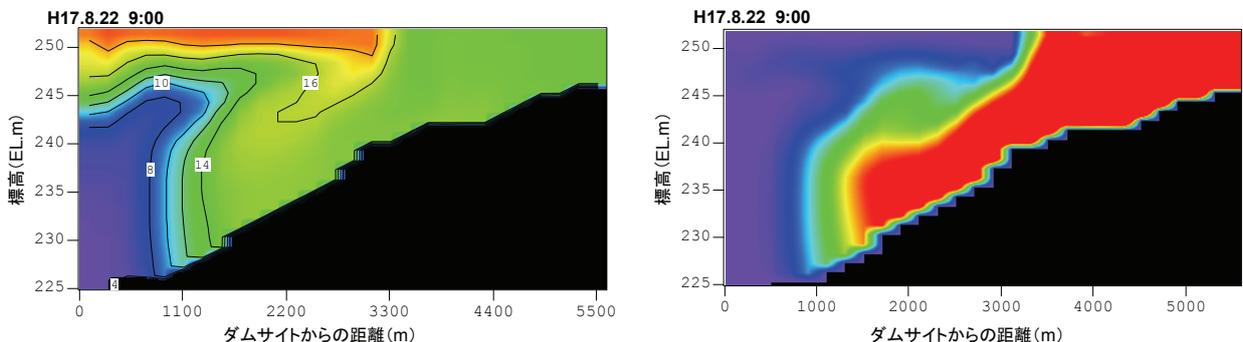


図-4 貯水池の水温(左)・SS(右)の縦断分布(平成17年8月22日 9:00)

参考文献

- 1) 梅田 信, 池上 迅, 石川忠晴, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, Vol. 48, pp. 1363-1368, 2004.
- 2) 鶴田泰士, 尾島亮太, 陳飛勇, 堀田哲夫: 現地調査データを用いた粒径分布を考慮した濁度-SS関係の検討, 第61回土木学会年次講演会講演概要集, 2005.

ダム貯水池における濁水濁水現象のモデル化と対策

(株)建設技術研究所 守谷 将史
鶴田 泰士
陳 飛勇
堀田 哲夫

1. はじめに

ダム貯水池では、貯水位低下に伴い露出した貯水池末端部の微細堆積濁質が再懸濁する現象（以降、濁水濁水と呼称）がみられる場合がある。本研究では、継続して濁水濁水による濁水化が見られる目屋ダムを対象に、堀田ら¹⁾が構築した濁水濁水の発生モデルを改良し、貯水池1次元多層モデルと組み合わせて貯水池の濁水現象再現モデルを構築した。また、目屋ダムの再開発ダムとして建設される津軽ダムを対象に、濁水濁水を対象として水質保全ダムを設置した場合の低減効果について検討した。

2. 濁水濁水の発生機構

濁水化が激しいダム貯水池では、流入した微細濁質の沈降・堆積範囲が貯水池流入端にまで及ぶ。これらの微細堆積濁質が、貯水位低下時に露出し、流入河川の水流によって再懸濁すると、大きな出水が生じていないにもかかわらず貯水池が濁水化する。再懸濁の要因としては以下に示す3つの機構が考えられている。

① 流入水による浸食・崩壊

貯水位の低下により露出段丘部が長くなり、小出水等により長い区間にわたって段丘側岸が浸食・崩壊し、流入水の濁水化が生じる。

② 段丘部からの濁質流出

段丘上部からの雨水流出に伴うガリ浸食等が加わり濁水化する。

③ のり面の崩壊

貯水位の急激な低下によりのにり面の自然滑落が生じ濁水化する。

3. 貯水池濁水現象再現モデル

(1) 貯水池1次元多層モデル

貯水池内の濁水挙動については、図2に示す貯水池の縦断・鉛直方向の変化を表現する1次元多層モデルを用いて計算した。貯水池への流入濁質については、図3に示すように流域からの流出と、堆積濁質の再懸濁に分けてモデル化した。流域からの濁質流入量はL-Q式により、貯水池流入端における微細土砂の再懸濁量については濁水濁水発生モデルにより推定し、流入条件とした。

(2) 濁水濁水発生モデル

堀田ら¹⁾は、前に述べた微細堆積土砂の再懸濁要因のうち、実現象として影響の大きい①、②を対象として濁水濁水をモデル化している。すなわち、側岸浸食や巻き上げの原動力となる掃流力を代表的な外力として捉え、微細堆積土砂の再懸濁量を小暮ら²⁾、海田ら³⁾と同様に次式に示す巻き上げの式を用いて表現している。

$$q_s = q_c \left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^2$$

ここに、 q_s は単位面積・時間あたりの巻き上がり量(kg/m²/s)、 q_c は q_s と同じ次元をもつ定数(7.0×10⁻⁵kg/m²/s)、 m は無次元定数(2)、 τ_y は限界掃流力(8.0N/m²)である。 τ は掃流力であり次元不等流計算より求めた。 q_c 、 τ_y の各パラメータは実験結果⁴⁾を参考に、試行計算により値を設定した。 m は一般的な値⁵⁾として2を用いた。

本研究では、さらに以下の点を改良した。

- ・ 図4に示すように貯水池流入端を階段状にモデル化し、断面全体ではなく貯水位に応じて各々の堆積部からの巻き上げを表現した。計算では図5のように、巻き上げ量、堆積量が変化することとなる。

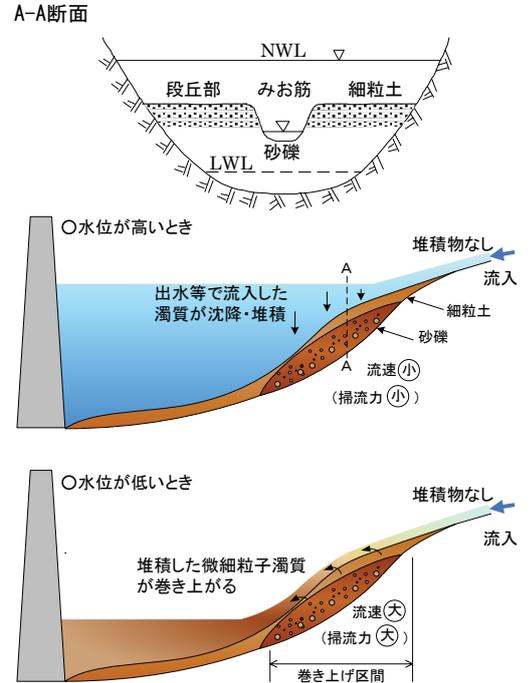


図1 貯水池流入端の濁質堆積状況

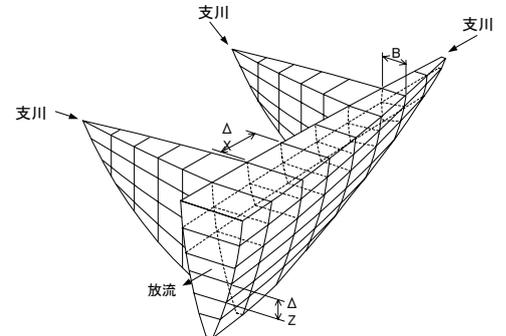


図2 1次元多層モデル概念図

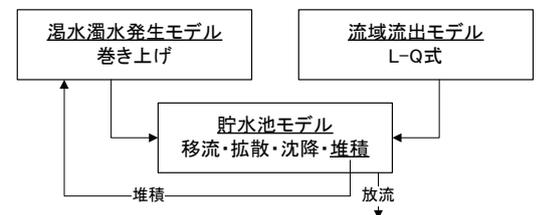


図3 モデルの相互関係

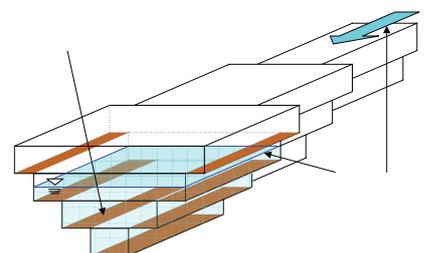


図4 濁水濁水発生モデル概念図

- ・ 巻き上がる濁質の粒度は、モデルで計算される堆積土砂の粒度によることとした。
- ・ 洪水由来と濁水濁水由来の濁質を個別に取り扱うこととした。

(3) 再現計算

洪水濁水が支配的であった平成2年9月、洪水濁水、濁水濁水両方の影響を受けている平成6年8月および濁水濁水が支配的であった平成11年9月におけるダムサイトSS鉛直分布の再現計算結果を図6に示す。平成2年9月についてみると、9月18日、20日に発生した洪水により濁質が流入し、沈降する様子を概ね再現することができている。平成6年8月、平成11年9月についてみると、最低水位付近まで低下した状態で小出水を迎えており、計算値は洪水濁水のみを考慮した場合と比較して、実測値を良好に再現している。このように、構築したモデルにより様々な貯水池の状態や流況に応じて変化する濁水化の状況を概ね再現することができた。

4. 水質保全ダムによる濁水濁水低減効果

濁水濁水軽減対策として、本研究では水質保全ダムを検討した。これは、図7に示すように貯水池上流にダムを設置し、貯水位低下時にも上流域の水位を維持することで、流入端の河床露出を防ぐものである。これにより、濁水濁水の発生そのものを抑制することができるため、放流SSの低減のみならず貯水池内のSSも低減し、景観の面からも対策効果が期待できる。

津軽ダムを対象に、濁水年である昭和63年の流況を用いて水質保全ダムの効果を試算した結果を図8に示す。水質保全ダムの設置標高は地形を考慮してE.L. 185m、ダム高は15mとし、水位が維持される区域では濁水濁水は発生しないものとして計算を行った。その結果、放流SSの基準値を10mg/Lとしその年間超過日数を比較すると、濁水濁水により超過日数が106日であったものが、水質保全ダムにより45日に低減することができる結果となり、濁水濁水の低減に水質保全ダムが有効であることが示された。

5. おわりに

本論文では、濁水濁水発生モデルを改良し、1次元多層モデルと組み合わせることで貯水池内の濁水現象の再現を試みた。その結果、濁水濁水による貯水池の濁水化を再現することができた。また、水質保全ダムを設置した場合の予測計算を行い、濁水濁水の低減に効果的であることを示した。水質保全ダム湛水域における堆砂、出水時の巻き上げ等による貯水池への濁水の流入の有無等の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 堀田哲夫, 金内剛, 山下芳浩, 東海林光: ダム貯水池での濁水濁水現象と貯砂ダムによる対策効果について, 河川技術論文集, 第7巻, pp. 209-214, 2001.
- 2) 小暮和史, 首藤伸夫: 貯水池における濁度物質の堆積と洗掘, 第24回水理講演会論文集, pp. 265-270, 1980.
- 3) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 栗谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp. 33-42, 1988.
- 4) 楠田哲也, 山西博幸, 吉見博之, 二渡了: 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 314-323, 1989.
- 5) 佐藤敦久: 水環境工学, 技報堂出版, 1987.

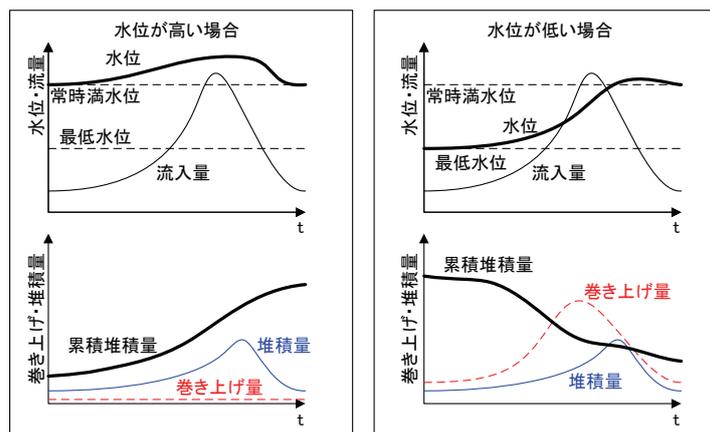
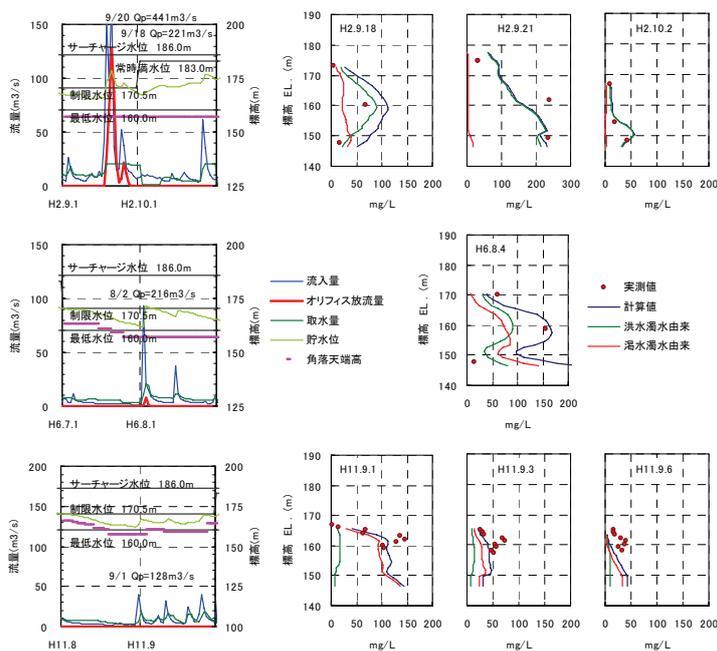


図5 堆積・巻き上げのイメージ



(上段:平成2年、中段:平成6年、下段:平成11年)
図6 出水時SS鉛直分布再現計算結果(目屋ダムダムサイト)

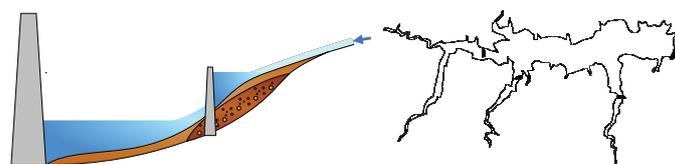


図7 水質保全ダム設置位置(津軽ダム)

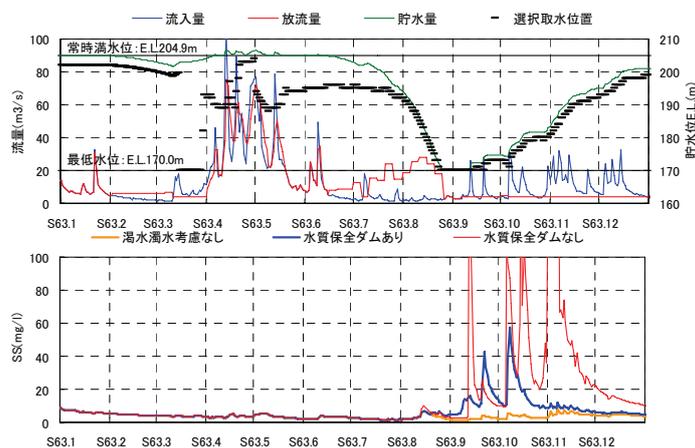


図8 津軽ダム放流SS予測結果(昭和63年)

論文

貯水池流動鉛直 2 次元モデルにおけるモデルレベルによる
計算結果の比較櫻井 寿之¹ 柏井 条介²Comparison of Calculation Results by Model Level on Vertical Two-dimensional
Simulation Model for Reservoir Flow

Toshiyuki SAKURAI Josuke KASHIWAI

貯水池流動の鉛直 2 次元モデルによるシミュレーションは貯水池の水温・水質を予測するために用いられる。鉛直 2 次元モデルは基礎式、渦動粘性係数の取扱い、数値計算法等の違いによってさまざまなモデルがあるが、モデルの相違による貯水池流動における計算結果への影響は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、流動のほかに水温と濁質を取り扱う鉛直 2 次元モデルを作成し、渦動粘性係数の取扱いと圧力の取扱いの違いに着目して、モデルのレベルを変えて貯水池の典型的な流動現象を計算し、モデルレベルによる計算結果への影響を比較した。その結果、渦動粘性係数の取扱いによる影響は比較的顕著であり、圧力の取扱いによる大きな差異は認められなかった。

キーワード：貯水池流動、鉛直 2 次元モデル、水温、濁質濃度、渦動粘性係数

1. はじめに

貯水池計画時の環境影響評価や運用中の貯水池に濁水長期化等の問題が発生した場合の対策検討において、貯水池内および放流水の水温・水質を予測することが求められる。

一般に貯水池の水温・水質予測には数値シミュレーションモデルが用いられる。数値シミュレーションモデルは計算機の進歩とともに発展してきておりさまざまな手法やモデルが提案されている。研究レベルでは、梅田ら¹⁾による $k-\varepsilon$ モデルと SIMPLE 法を用いた 3 次元の非静水圧モデルによる七ヶ宿貯水池の解析や、米山・井上²⁾の VOF 法による水面挙動の解析を取り入れた 3 次元非静水圧モデルによる揚水発電所貯水池の解析など、貯水池を対象とした高度なモデルによる解析がなされている。一方、貯水池全体を解析の対象とする貯水池計画や放流水質に関する問題の対策検討等の実務においては、長期的な予測には鉛直 1 次

元モデルが用いられることが多く、水質の縦断変化の検討が必要な場合に鉛直 2 次元モデルが用いられ、計算労力の大きい 3 次元モデルが用いられることは稀である。

濁水長期化問題等の対策検討では出水時の流動を再現することが重要であり、出水時には貯水池の流動は時間的な変化が大きく水平方向に一様ではないため、少なくとも縦断的な変化を再現する必要がある。今回は計算労力とのバランスも考慮し、貯水池全体の縦断的な流動と水質の再現が可能な鉛直 2 次元モデルを検討対象とする。

鉛直 2 次元モデルによる解析に関してはこれまで多くの研究が行われている。現地スケールの現象を解析した研究としては、モデル貯水池を対象とした Farrell・Stefan³⁾、森北・天野⁴⁾、Bournet ら⁵⁾、長良川河口堰を対象とした松尾・鶴田⁶⁾、二風谷ダムを対象とした斎藤ら⁷⁾、利根川河口域を対象とした鈴木・石

¹ 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ河川・ダム水理チーム 主任研究員

² 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ河川・ダム水理チーム 上席研究員

川⁸⁾および川治ダムを対象とした鈴木ら⁹⁾の研究が挙げられる。実験スケールの現象を解析した研究としては、下層密度流を対象とした福嶋・高島¹⁰⁾、交換密度流を対象とした細田ら¹¹⁾、赤堀ら¹²⁾、河口密度流を対象とした伊福・楠¹³⁾、横流式沈殿池を対象とした藤崎ら¹⁴⁾、水平床での重力プリュームを対象としたJhaら¹⁵⁾、風応力による三成層水域の応答を対象とした新谷・梅山¹⁶⁾、保存性傾斜サーマルを対象とした衛藤・福嶋¹⁷⁾および保存性・非保存性サーマルを対象とした秋山ら¹⁸⁾が挙げられる。また、無次元化したモデル貯水池を対象とした道奥ら¹⁹⁾、河口密度流について実験および実河川スケールを対象とした細山田ら²⁰⁾の研究がある。

前述の研究について計算手法に関してまとめると、渦動粘性係数に関しては森北・天野、斎藤らは一定値、松尾・鶴田はリチャードソン数の関数、伊福・楠、細山田ら、JhaらはSmagorinskyのsubgrid-scaleモデル、細田ら、赤堀ら、秋山らは実験スケールを対象としているため分子粘性係数を用いており、その他は $k-\varepsilon$ モデルが用いられている。なお、藤崎らは完全流体のモデルと $k-\varepsilon$ モデルの比較を行っている。圧力の取扱いに関しては、森北・天野、松尾・鶴田、斎藤ら、伊福・楠、鈴木らが静水圧の仮定を用いており、その他は非静水圧のモデルを用いている。一方、実務レベルでの貯水池の解析では一定値またはリチャードソン数の関数による渦動粘性係数および静水圧の仮定が用いられることが多いようである。

モデルレベルの選定においては、必要とされる計算精度と計算労力・コストを考慮して決定されるが、これらの客観的な判断基準は確立しておらず、個々の技術者の判断にゆだねられている。一方、計算結果の解釈においては、モデルレベルによる現象再現特性を把握しておくことが重要である。既往の研究において、個々の実験結果や観測結果に対して個別のモデルの精度評価がなされているが、同一の計算条件で貯水池の流動を対象として渦動粘性係数や圧力のモデルレベルを変化させて比較検討した事例は筆者の知る範囲では見当たらず、モデルレベルが計算結果へ与える影響は十分に明らかになっていない。

そこで本研究では、モデル選定および計算結果の解

釈における判断材料を提示することを目的として、モデルレベルを変化させた数値シミュレーションモデルを作成し、原型貯水池を想定したモデル貯水池の流動を解析することによってモデルレベルが計算結果に与える影響について検討を行った。比較の対象とする項目は貯水池の流動に大きな影響を与えると考えられる水温と濁質濃度であり、モデルレベルとして圧力の取扱いと渦動粘性係数の設定（乱流拡散の取扱い）に着目した。モデルレベルとしては、これらのほかに、基礎式の離散化手法、計算格子（数値計算法とも密接に関係する）、自由水面の取扱い等が挙げられ、これらについては今後の課題としたい。

2. 計算方法

2.1 概要

モデルレベルとして、圧力の取扱いについて静水圧モデルと非静水圧モデルの2通り、渦動粘性係数の設定について、(1) 定数、(2) 摩擦速度による設定、(3) Richardson数を用いた設定、(4) 標準型 $k-\varepsilon$ モデルの4通りを設定した。渦動粘性係数のモデル化にあたっては、何らかの仮定を用いる必要があるが、(1)~(4)の順に実現象により近い仮定を用いていると考えられる。以下に各手法の詳細を示す。

2.2 基礎方程式

始めに静水圧モデルの基礎方程式を示す。

(連続式)

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial VB}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(x 方向運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial BU}{\partial t} + \frac{\partial BU^2}{\partial x} + \frac{\partial BUV}{\partial y} \\ = -\frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(\nu + D_h) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(\nu + D_v) \frac{\partial U}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wx}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2)$$

(静水圧の式)

$$0 = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

(熱の輸送方程式)

$$\frac{\partial BT}{\partial t} + \frac{\partial BUT}{\partial x} + \frac{\partial BVT}{\partial y}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_T (\nu + D_h) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_T (\nu + D_v) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{BH}{\rho_0 C_w} \quad (4)$$

(粒径別 SS 濃度の輸送方程式)

$$\frac{\partial BC_i}{\partial t} + \frac{\partial BUC_i}{\partial x} + \frac{\partial B(V + V_{0i})C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_c (\nu + D_h) \frac{\partial C_i}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_c (\nu + D_v) \frac{\partial C_i}{\partial y} \right\} \quad (5)$$

ここに, (x, y) : 空間座標 (x : 流下方向, y : 鉛直上向き方向), t : 時間, B : 貯水池幅, (U, V) : 幅平均流速ベクトル, p : 圧力, ν : 動粘性係数, D_h : 水平方向の渦動粘性係数, D_v : 鉛直方向の渦動粘性係数, ρ_0 : 流体の基準密度, ρ : 流体の密度, g : 重力加速度, τ_{wx} : 側岸面に単位面積当りに流体に作用する力の x 方向成分, T : 水温, H : 単位体積当りの発生熱量, C_w : 流体の比熱, C_i : i 番目代表粒径の SS 濃度, V_{0i} : i 番目代表粒径の濁質粒子の沈降速度, α_T, α_c : それぞれ動粘性係数と渦動粘性係数の和と熱の拡散係数および濁質の拡散係数の比 (本研究ではともに 1 を与えた) を表す。

非静水圧モデルでは上述の静水圧モデル基礎式において, 静水圧の式の代わりに下記の y 方向 (鉛直方向) の運動方程式を用いる。

(y 方向運動方程式)

$$\frac{\partial BV}{\partial t} + \frac{\partial BUV}{\partial x} + \frac{\partial BV^2}{\partial y} = -\frac{\rho}{\rho_0} gB - \frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(\nu + D_h) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(\nu + D_v) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wy}}{\rho_0} \quad (6)$$

ここに, τ_{wy} : 側岸面に単位面積当りに流体に作用する力の y 方向成分を表す。密度は水温と SS 濃度の関数とした。

2.3 渦動粘性係数の取扱い

1) 定数

渦動粘性係数を一定値と仮定する。水平方向と鉛直方向で異なる値が与えられる場合もある。検証計算によって最適化されることが多いが, 水平方向の渦動粘性係数については, 慣性小領域におけるリチャードソ

ンの 4/3 乗則と海洋等での観測結果から次の提案²¹⁾がある。

$$D_h = C_h L^{4/3} \quad (7)$$

ここで, D_h : 水平方向の渦動粘性係数, C_h : 定数 (0.01~0.09 cm^{2/3}/s), L : 拡散現象の長さスケール (貯水池の計算では L として水平方向計算格子間隔が用いられることが多い)。

2) 摩擦速度による設定

鉛直方向の渦動粘性係数について断面内の平均的な流速のスケールを考慮するために, せん断応力の直線分布の仮定および流速分布の対数則分布の仮定より導かれる次式によって設定する。ここで求められるのは, 流水中に密度勾配のない理想的な開水路 2 次元流れにおける渦動粘性係数である。摩擦速度の評価には Manning 式を用いた。

$$D_{v0}(y) = \kappa |u_*| y_w \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (8)$$

$$u_* = \frac{n U_{ave} \sqrt{g}}{h^{1/6}} \quad (9)$$

ここで, D_{v0} : 中立状態 (密度勾配のない状態) の鉛直方向の渦動粘性係数, κ : カルマン定数 (0.4), y_w : 底面を基準とした鉛直上向き座標, h : 水深, u_* : 摩擦速度, n : マニングの粗度係数, U_{ave} : 断面平均流速を表す。

3) Richardson 数による設定

貯水池内に密度勾配が存在する場合には, 鉛直方向の拡散が抑制される。この効果を取り入れるために, 密度成層の安定度のパラメーターである Richardson 数を用いて鉛直方向の渦動粘性係数を求める。その関数形は複数提案されており, モデル定数を検証計算により同定する場合もあるが, 本研究では次式²²⁾を用いた。

$$D_v = D_{v0} (1 + 10 R_i)^{-0.5} \quad R_i \geq -0.1 \quad (10)$$

$$D_v = D_{v0} \exp(-1.5 R_i) \quad R_i < -0.1 \quad (11)$$

$$R_i = -\frac{g \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)}{\rho_0 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2} \quad (12)$$

ここで, D_v : 密度成層がある場合の鉛直方向の渦動粘性係数, R_i : 局所リチャードソン数, ρ : 密度,

ρ_0 : 基準密度, U : 流下方向流速を表す。なお, 本研究では D_v は2) 項で示した方法により求めた。

4) 標準型 k - ε モデル

k - ε モデルとは, 渦動粘性係数が乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ε の2つの量により表されると仮定し, k と ε の輸送方程式を解くことにより渦動粘性係数を求める方法である。それぞれの輸送方程式は下記のとおりである。

(k 方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial Bk}{\partial t} + \frac{\partial BUk}{\partial x} + \frac{\partial BVk}{\partial y} = BP_r - gB \frac{D}{\sigma_t} \frac{\partial \delta}{\partial y} - B\varepsilon \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

(ε 方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial B\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial BU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial BV\varepsilon}{\partial y} \\ = C_{\varepsilon 1} B \frac{\varepsilon}{k} \left(P_r - C_{\varepsilon 3} g \frac{D}{\sigma_t} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - C_{\varepsilon 2} B \frac{\varepsilon^2}{k} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$P_r = D \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

$$D = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \quad (17)$$

ここで, k : 乱れエネルギー, ε : 乱れエネルギー散逸率, D : 渦動粘性係数 (k - ε モデルを用いる場合は, 水平方向と鉛直方向は同じ値を用いており, 他の基礎式でも同様とした), P_r : 乱れエネルギー生成率, σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ : モデル定数 (順に 1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 0.09 の標準値) を表す。密度勾配による寄与を表す (13) 式の右辺第2項と (14) 式の右辺第1項の括弧内第2項に含まれる σ_t , $C_{\varepsilon 3}$ もモデル定数であり, ここでは, それぞれ 1.0, 0 を与えた。

2.4 数値計算法

上記基礎式の変数を直角座標系のスタッガード格子に配置し, 非定常項に関してはオイラー陽解法を用いて離散化し, 空間に関しては基礎式を有限体積法によ

りコントロールボリュームで積分することにより離散化した。その際, 水表面に接するコントロールボリュームでは下記の自由水面の運動学的条件を用いて積分し, 水面形の計算も行っている。

$$V_s = \frac{\partial H_s}{\partial t} + U_s \frac{\partial H_s}{\partial x} \quad (18)$$

ここに, (U_s, V_s) : 表面の流速ベクトル, H_s : 水位を表す。基礎式の移流項の離散化には1次精度風上差分を用いた。

非静水圧モデルでは, 以下の手順で動圧を求める。表層のコントロールボリュームを除く内部のコントロールボリュームにて連続式の誤差を計算し, Hirt・Cook²³⁾ による次式を用いて圧力を補正する。

$$\frac{\Delta p}{\rho} = - \frac{\omega \cdot E}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad (19)$$

ここに, Δp : 圧力の補正值, ω : 収束パラメーター, E : 連続式の誤差, Δt : 計算時間間隔, $(\Delta x, \Delta y)$: x および y 方向の格子幅を表す。運動方程式の圧力項のみを補正值で修正して流速を再計算し, 連続式の誤差を計算する。すべてのコントロールボリュームで誤差が許容値以下になるまで上記手順を繰り返し, 次の計算時間ステップに進む。ここで誤差の許容値は計算精度と計算時間に影響するため, 対象とする現象に応じて適切な値を設定した。

粒子の沈降速度の算定には Rubey の式を用いた。

なお, Richardson 数を用いて渦動粘性係数を設定する場合には, 非常に小さな値による割り算を回避するため, $\partial U / \partial y$ の絶対値に適当な下限値 (ここでは 0.00001 s^{-1} とした) を設定し, (12) 式における Richardson 数の減少による鉛直方向渦動粘性係数の著しい増加による計算の不安定を回避するために, 中立状態の鉛直方向渦動粘性係数値を上限値とした。また, k - ε モデルにおける境界条件としては, 水表面では, k と ε の鉛直方向の勾配を 0 とするノイマン条件とし, 底面の計算格子において k と ε を壁関数により与える方法を用いた。

3. 計算条件

実際の貯水池は, 個別に様々な形状や規模を有しており, 流入量, 流入水温・土砂濃度等の条件も様々で

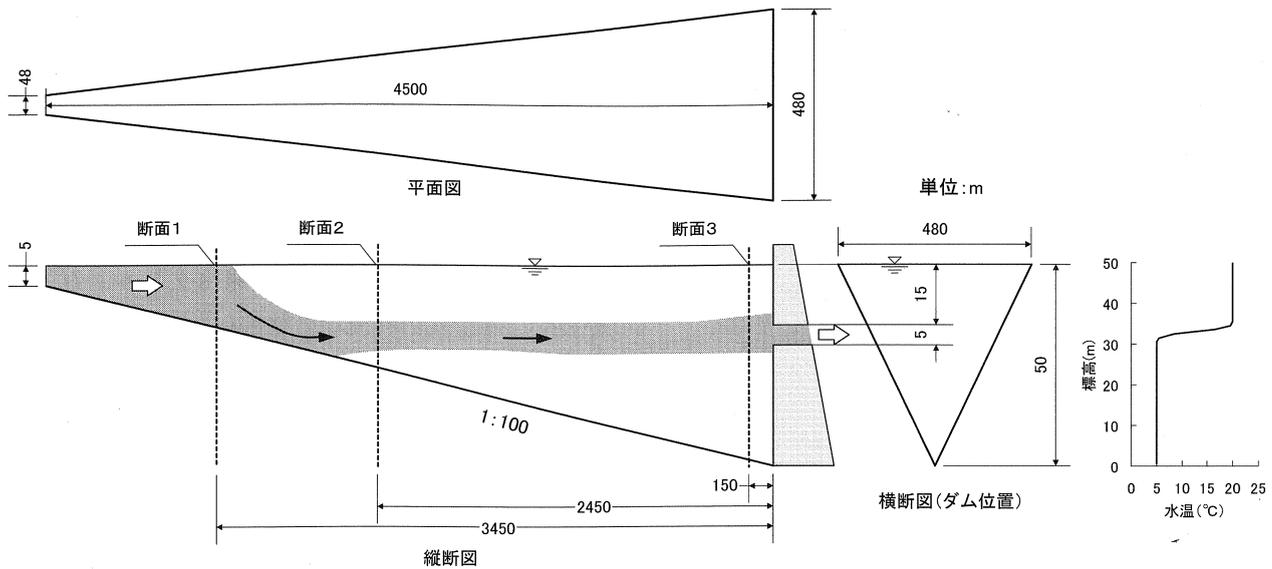


図-1 モデル貯水池概要図

あるが、本研究では、実貯水池規模の現象におけるモデルレベルによる計算結果への影響を検討するために、日本の貯水池を代表する規模を有する単純な形状と流動現象の条件を設定して計算を行った。

貯水池形状は図-1 に示すように、V字谷を堰き止めたときに形成される三角錐形状を基本として、上流

表-1 粒度分布の条件

代表粒径 No.	粒径 (μm)	割合 (%)
1	1	5
2	5	25
3	13	40
4	30	25
5	100	5

表-2 計算条件

項目	設定値
計算時間間隔 (s)	2
現象を再現する時間 (h)	100
流下方向格子間隔 (m)	100
流下方向格子数 (個)	46
鉛直方向格子間隔 (m)	1
鉛直方向格子数 (個)	52
マンニングの粗度係数 (m ^{-1/3} s)	0.03
初期流速 (m/s)	0
連続式の許容誤差 (s ⁻¹) (非静水圧モデル)	
流入量 10 m ³ /s	10 ⁻⁶
流入量 300 m ³ /s	10 ⁻⁴

端水深 5 m, ダム堤体直上流水深 50 m, 堤体直上流水面幅 480 m, 貯水池延長 4,500 m, 貯水量約 2,000 万 m³ とした。この貯水池規模は国土交通省所管ダムにおける中程度の規模に相当している。放流設備は、呑口高さ 5 m, 底面標高を水深 20 m の位置とし、操作方法はモデルレベルの影響を把握しやすくするために「流入=放流」の単純な条件を設定した。実際の貯水池でも、中小規模の出水において、治水を目的に含むダムで流入量が洪水調節開始流量に達しない場合や、発電ダムなどで「流入=放流」に近い操作が行われている。流入量は水温躍層に及ぼす影響が小さい通常時と影響が大きい出水時の流況を想定して 10 m³/s と 300 m³/s に設定し、基本的な特性を把握するために複雑なハイドログラフではなく、2 時間で上記の流量まで線形に増加させた後、100 時間の間一定とした。100 時間後の貯水池回転率は 10 m³/s で 0.18, 300 m³/s で 5.35 である。貯水池内の初期水温については、水温躍層のある場合を想定し、貯水池内を 5~20°C, 流入水温を 12.5°C とした。水温躍層の初期水温鉛直分布は次式で与えた (図-1 参照)。

$$T(y) = T_b + \frac{\Delta T}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(6 \frac{y - y_{Tc}}{\Delta y_T} \right) \right\} \quad (20)$$

ここで、 y : 鉛直方向標高 (ダム直上流河床底面基準), $T(y)$: 標高 y の水温, T_b : 下層水温 (5°C), ΔT : 上層と下層の水温差 (15°C), y_{Tc} : 躍層の中心

表-3 計算ケース

ケース名	流量 (m ³ /s)	圧力の取扱い	水平方向渦動粘性係数	鉛直方向渦動粘性係数
A-1	10	静水圧	計算格子より算定*	摩擦速度による設定
A-2	10	静水圧	計算格子より算定*	Richardson数による設定
A-3	10	静水圧	<i>k-ε</i> モデル	<i>k-ε</i> モデル
A-4	10	非静水圧	<i>k-ε</i> モデル	<i>k-ε</i> モデル
A-5	10	静水圧	一定値 0.0001 m ² /s	一定値 0.0001 m ² /s
A-6	10	静水圧	一定値 0.01 m ² /s	一定値 0.01 m ² /s
B-1	300	静水圧	計算格子より算定*	摩擦速度による設定
B-2	300	静水圧	計算格子より算定*	Richardson数による設定
B-3	300	静水圧	<i>k-ε</i> モデル	<i>k-ε</i> モデル
B-4	300	非静水圧	<i>k-ε</i> モデル	<i>k-ε</i> モデル
B-5	300	静水圧	一定値 0.0001 m ² /s	一定値 0.0001 m ² /s
B-6	300	静水圧	一定値 0.01 m ² /s	一定値 0.01 m ² /s

* 2.3項1) で示した 4/3 乗則による設定

標高 (放流設備の中心標高と同じ水深 17.5 m の位置とする), Δy_T : 躍層の厚さ (5 m とする) を表す。濁質の条件としては, 代表粒径を 5 粒径とし, 各粒径の値は直轄ダム貯水池の流入土砂観測結果²⁴⁾ を参考に表-1 のように設定した。

SS 濃度の初期値は貯水池全域で 0 とし, 流入 SS 濃度は流量の関数として, 次式で与えた。

$$C_{SS} = 2.0 \times 10^{-7} Q \rho_s \quad (21)$$

ここで, C_{SS} : 土砂質量濃度 (SS 濃度) (g/m³ または mg/l), Q : 流量 (m³/s), ρ_s : 土粒子密度 (g/m³) を表す。

標準型 *k-ε* モデルを用いる場合には, 乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ϵ の初期値はともに 0 とした。今回は比較的短時間の現象であるので, 大気との熱交換は考慮していない。その他の計算条件および計算ケースは, 表-2, 3 に示すとおりである。図-1 には, 基本的な流れのパターンを併せて示してある

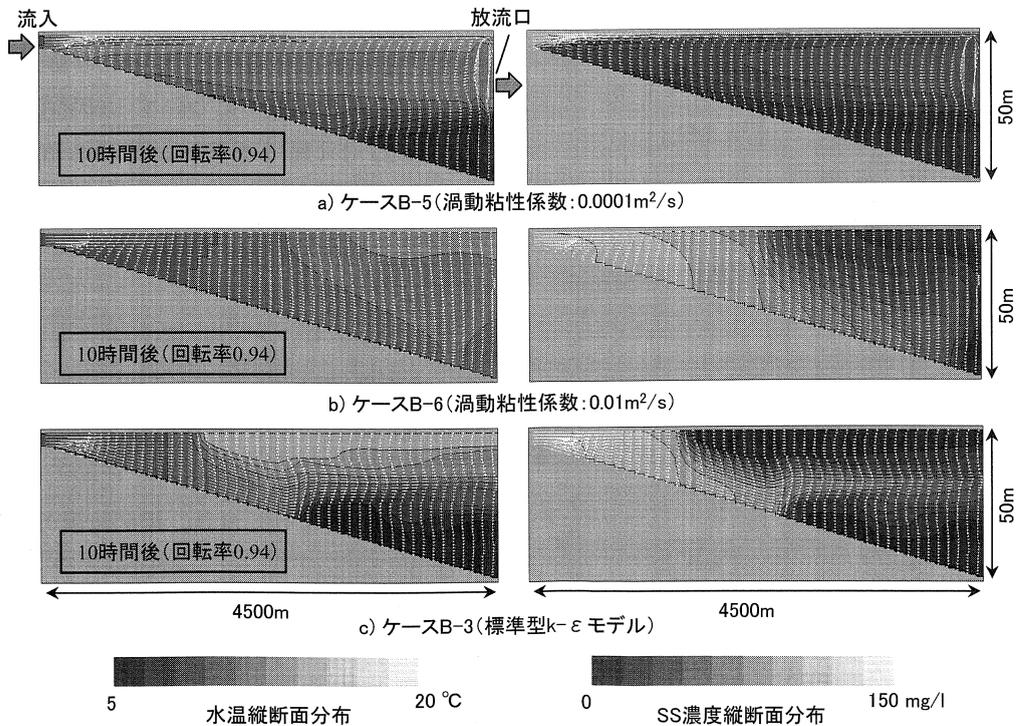


図-2 計算結果の横断面分布

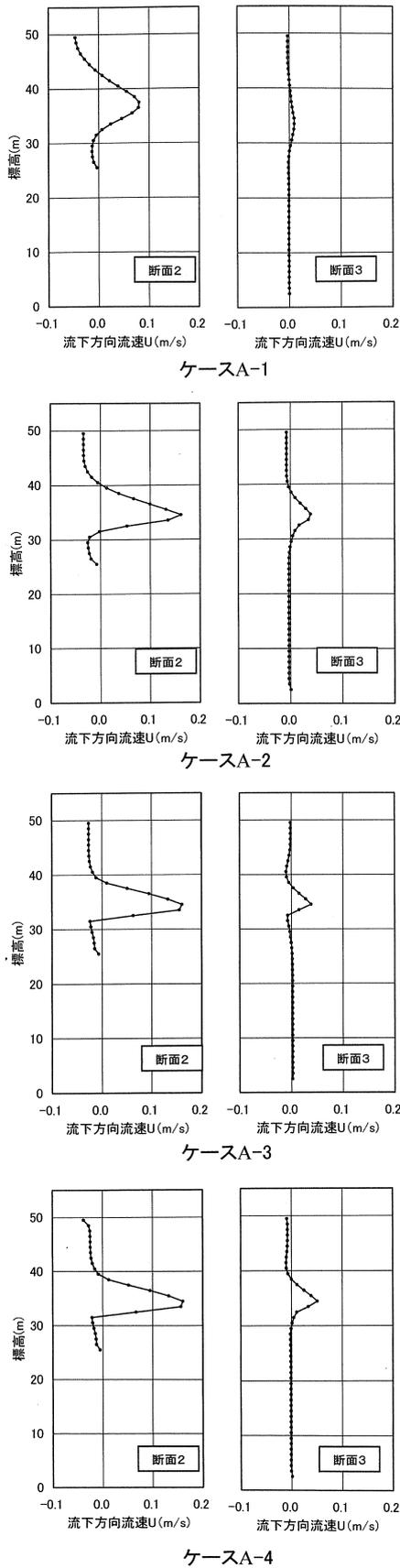


図-3 流下方向流速鉛直分布計算結果 (10 m³/s, 13 時間後)

が、流入水はある地点から潜り込み、周辺水を取り込みながら躍層に沿って取水口に向かって流下する流れとなる。時間とともに潜り点位置が下流に移動し、また躍層沿いの層厚が厚くなるが、潜り込みの状況や層厚のモデルによる違いがここでの主たる比較内容になる。

4. 計算結果

4.1 渦動粘性係数一定の場合

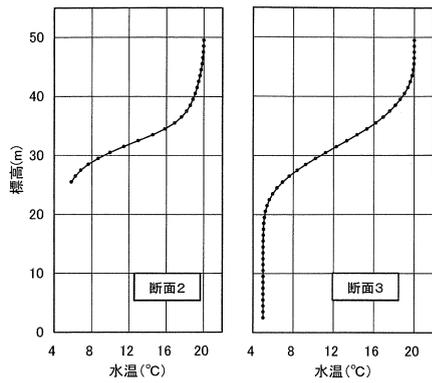
紙数の関係からここで詳細は示さないが、渦動粘性係数一定の場合、流水断面積の小さい上流部においては、水塊の慣性力が大きく、渦動粘性係数を小さくすると流入水の運動量が拡散されずに、流入水の密度が大きいにもかかわらず、水面付近を流下するような不合理な流況となる場合が生じた (図-2 a)。一方、渦動粘性係数を大きくすると、下流部において、流水断面積が大きくなり流速が小さくなるため、流動層厚が小さくなり、水温躍層が保たれ、濁質濃度が流動層内で大きくなるべきところで、水温や濁質濃度が急速に鉛直方向に一樣化する傾向となる (図-2 b)。よって、流量が大きく変化する出水時に貯水池全域で一定の渦動粘性係数を与えて流動を精度良く再現することは困難と考えられる。

4.2 常時 (流入量 10 m³/s) の計算結果

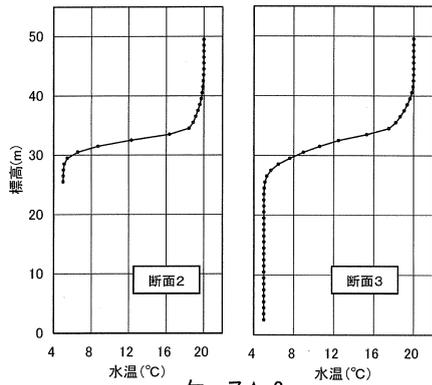
モデル貯水池を対象に流入量 10 m³/s の計算を行ったケース A-1~A-4 について 13 時間後 (回転率 0.02) の断面 2, 3 (図-1 参照) における流下方向流速の鉛直分布を図-3 に、水温の鉛直分布を図-4 に、断面 1, 2, 3 における鉛直方向渦動粘性係数 D_v の鉛直分布を図-5 に示す。

図-3, 4 より、どの計算ケースも流入水が潜り込み、水温躍層付近へ貫入している様子がみられる。ケース A-2~A-4 の流速分布および水温分布の差は小さいが、A-1 は、他ケースと比較して貫入水が厚く流速が小さくなっており、躍層位置の水温勾配が小さくなっている。

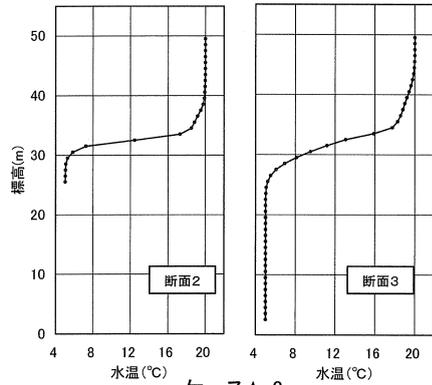
図-5 をみると、上流域の断面 1 では $k-\epsilon$ モデルを用いている A-3 と A-4 が底面付近の大きな速度勾配より発生した乱れで大きな D_v の値を示しているが、A-1, A-2 では小さい D_v の値となっている。実際の



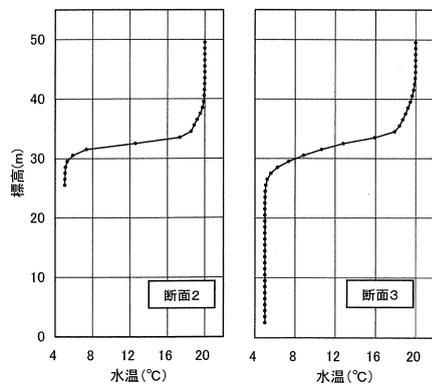
ケースA-1



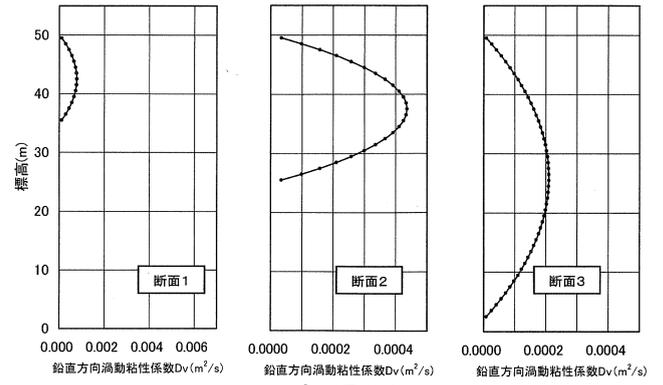
ケースA-2



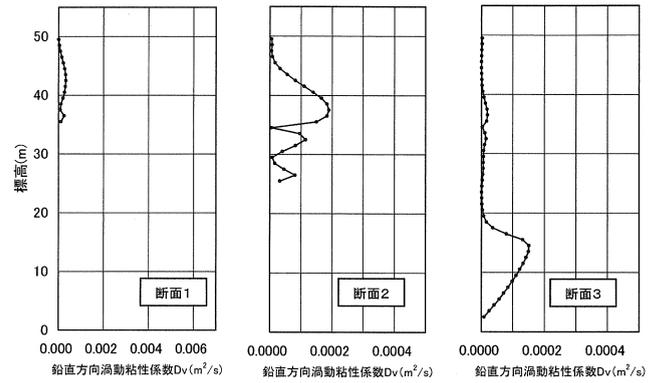
ケースA-3



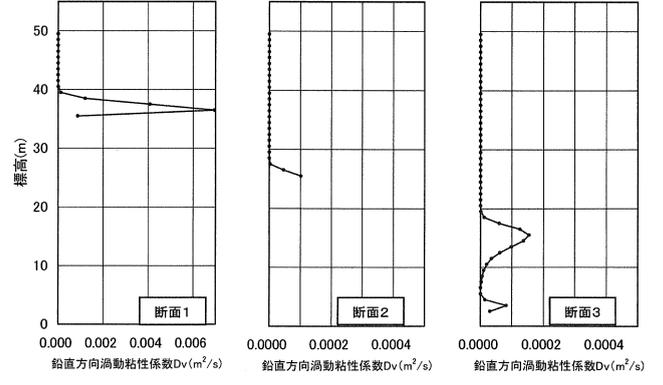
ケースA-4



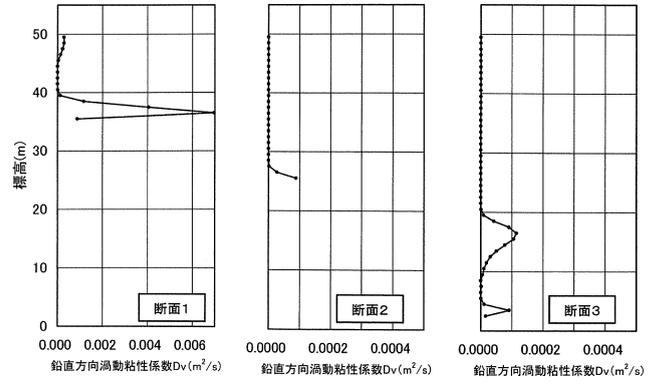
ケースA-1



ケースA-2



ケースA-3



ケースA-4

図-4 水温鉛直分布計算結果 (10 m³/s, 13 時間後)

図-5 鉛直方向渦動粘性係数鉛直分布計算結果 (10 m³/s, 13 時間後)

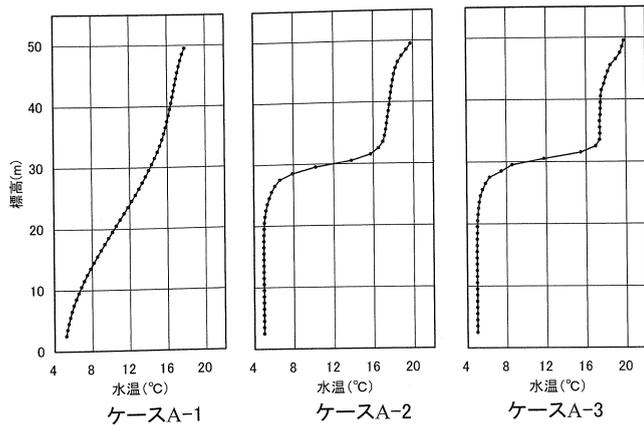


図-6 水温鉛直分布計算結果 (10 m³/s, 100 時間後, 断面 3)

貯水池における D_v の値は不明であるが、貫入水内部では、その流動により周辺水と比較して大きな D_v となっていると考えられ、A-3, A-4 はそのような傾向を再現していると思われる。また、断面 2, 3 では、ケース A-3, A-4 では水温躍層上方での値が小さく、ケース A-2 でも同様の傾向となっているが、ケース A-1 では全体に大きな D_v となっている。

図-6 には、ケース A-1~A-3 の 100 時間後 (回転率 0.18) の断面 3 の水温鉛直分布を示す。ケース A-4 は A-3 とほぼ同様の結果であるため省略した。ケース A-1 では水温急変部は消滅し、一様な水温勾配になりつつあるのに対し、ケース A-2 と A-3 はよく似た分布を示し、水温躍層位置が低下し、躍層上方水温が低くなっているが、水温の急変部を残している。

以上示されるように、モデル貯水池における小流量の計算では、渦動粘性係数を摩擦速度により設定した場合には全体に D_v が大きくなり、混合が過大になる。また、Richardson 数と $k-\epsilon$ モデルの設定では、上流域の D_v の分布が異なるものの水温への影響は小さかった。これは $k-\epsilon$ モデルで渦動粘性係数が大きくなっている底面付近の領域では、流入水の貫入によって水温が一様になっており、拡散の影響が現れなかったためと考えられる。なお、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果はほぼ同じであった。

4.3 出水時 (流入量 300 m³/s) の計算結果

モデル貯水池を対象に流入量 300 m³/s の計算を行ったケース B-1~B-4 について 10 時間後 (回転率

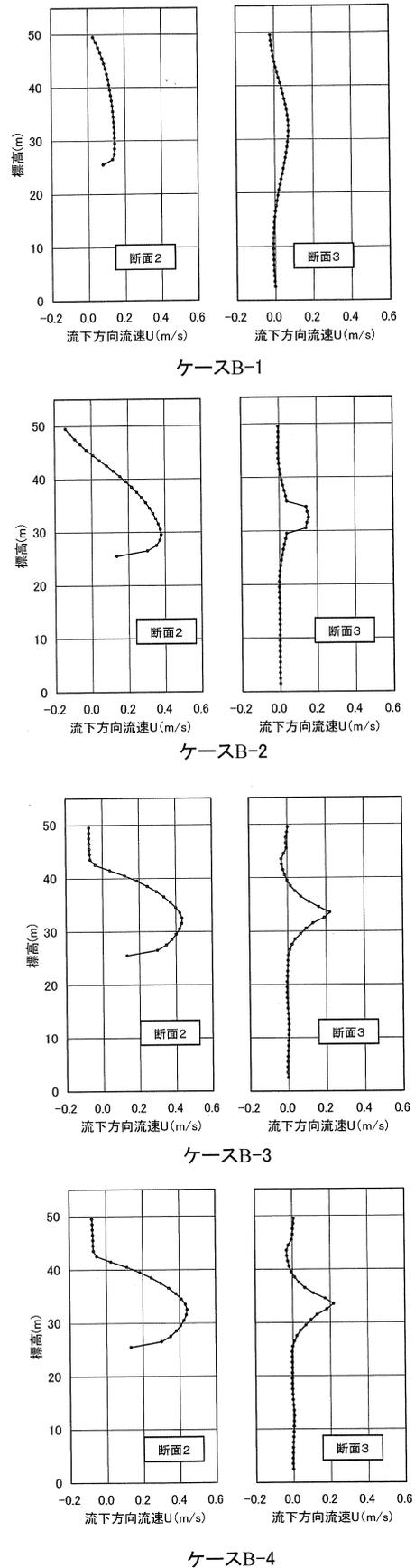


図-7 流下方向流速鉛直分布計算結果 (300 m³/s, 10 時間後)

0.49) の断面2, 3 (図-1 参照) における流下方向流速の鉛直分布を図-7 に, 水温の鉛直分布を図-8 に, SS 濃度の鉛直分布を図-9 に, 断面1, 2, 3 における鉛直方向渦動粘性係数 D_v の鉛直分布を図-10 に示す。図-7, 8 より, 潜り点下流に位置する断面2, 3 をみると, B-1 では水温分布が一様化する傾向になり, 断面2 ではほぼ一様, 断面3 では勾配がほぼ一様な水温分布になっている。流速分布は B-2, B-3 (または4) の順に偏る傾向があり, B-2 では断面3 で水面付近と底面付近に初期の水温が残るものの, B-3, B-4 と比較して水温が緩やかに変化する分布形状になっている。また図-9 の SS 濃度分布をみると, 流速分布と同様の傾向となっており, B-3, B-4 では断面3 の底部で清水が残っているが, B-1 では, 断面3 の底部の SS 濃度は小さいが, 上部については断面2, 3 とともに濁水が拡がる結果となった。

図-10 の D_v の分布をみると潜り込み位置上流の断面1 では, B-1, B-2 は同様の分布となっており, 乱流モデルである B-3, B-4 とかなり異なる分布となっている。ただし, この断面位置の流速が水温分布に与える影響は小さい。一方, 潜り位置下流の断面2 では, 小流量時の断面1 と同様の分布形状となっており, B-3, B-4 での分布が底面付近で D_v が急激に大きくなる形状を示している。また, 断面3 では D_v の変化, 絶対値とも小さいが, B-1 での値がやや大きくなっている。

ここで, 潜り込み位置上下流の D_v 分布にケースごとの差があることから潜り込み位置の時間変化を調査した。結果を小流量時の場合と併せて図-11 に示す。なお, 潜り込み位置の算出においては, 表層の流速の方向が下流から上流に変化する位置 (流速 0 m/s) とし, 堤体位置を基準として貯水池長で無次元化を行った。

図-11 より, 流入量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合には $0.97 \sim 0.94$ 程度に潜り込み位置があり, ケースによる差があまりないが, 流入量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合にはケースによる違いが大きいことがわかる。 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ では, 全体として時間とともに潜り込み位置が下流へ移動しており, B-1, B-2, B-3, B-4 の順に下流への移動が速い。 B-3 と B-4 の差は圧力の取扱いによる影響であるが,

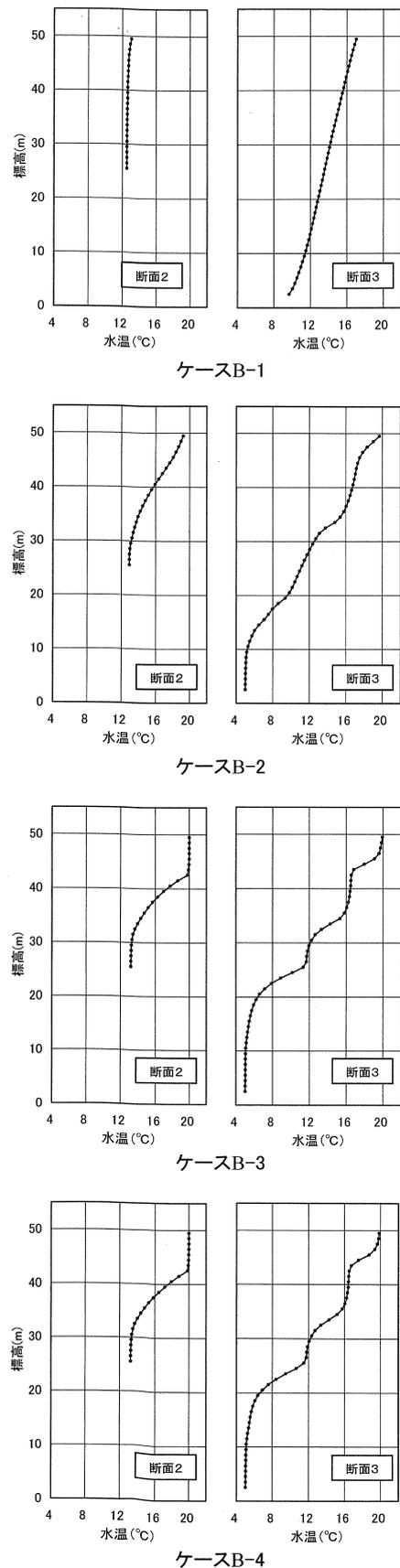
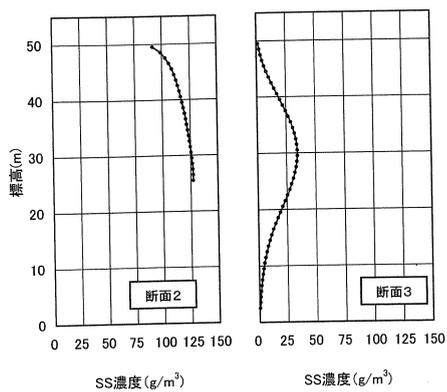
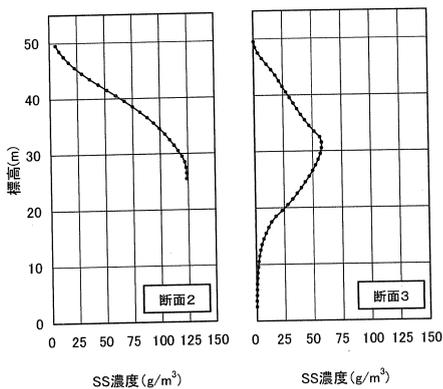


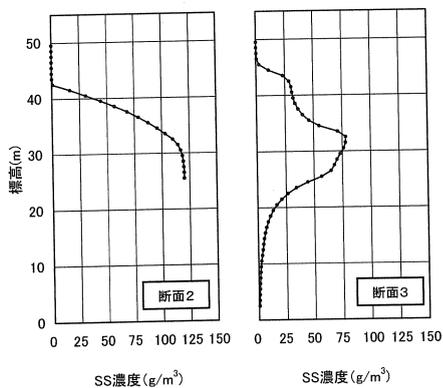
図-8 水温鉛直分布計算結果 ($300 \text{ m}^3/\text{s}$, 10 時間後)



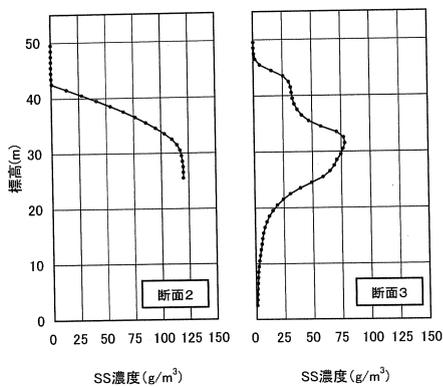
ケースB-1



ケースB-2

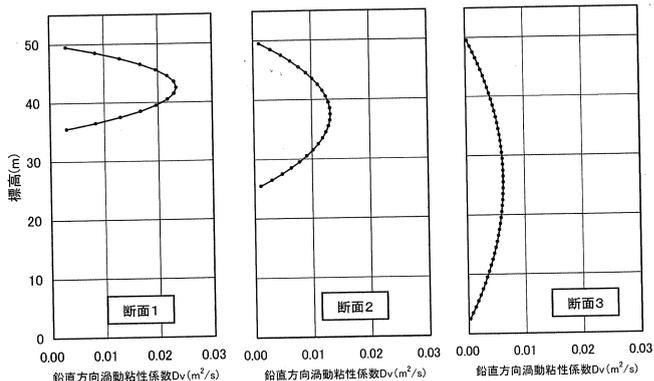


ケースB-3

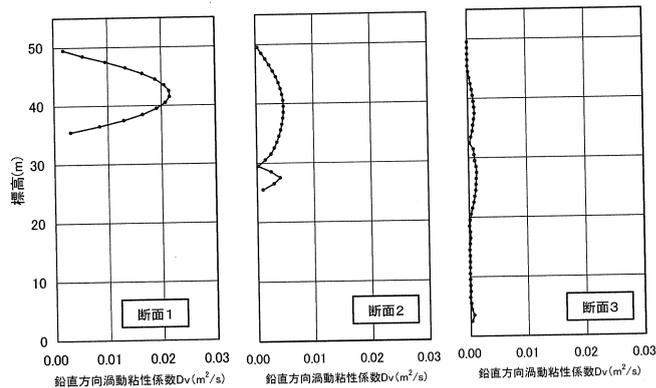


ケースB-4

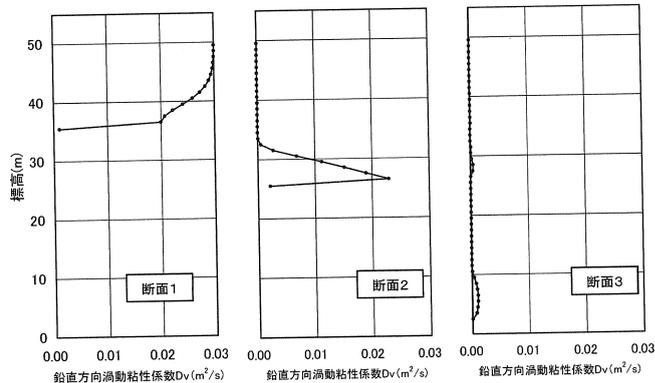
図-9 SS濃度鉛直分布計算結果 (300 m³/s, 10 時間後)



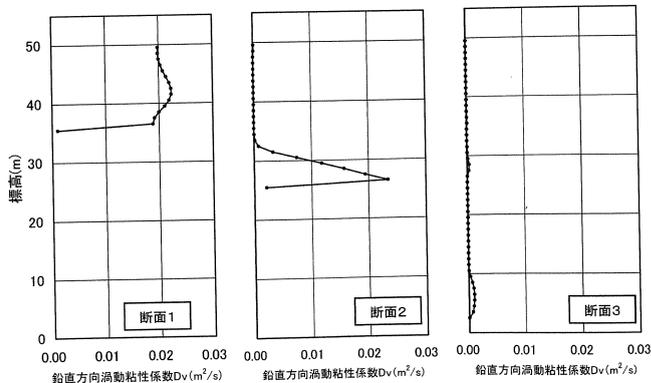
ケースB-1



ケースB-2

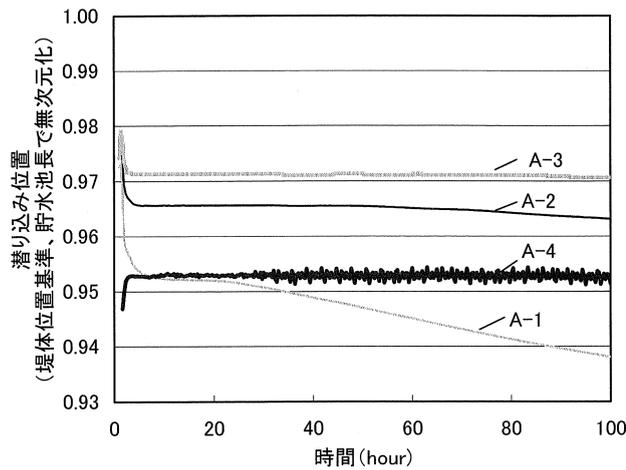


ケースB-3

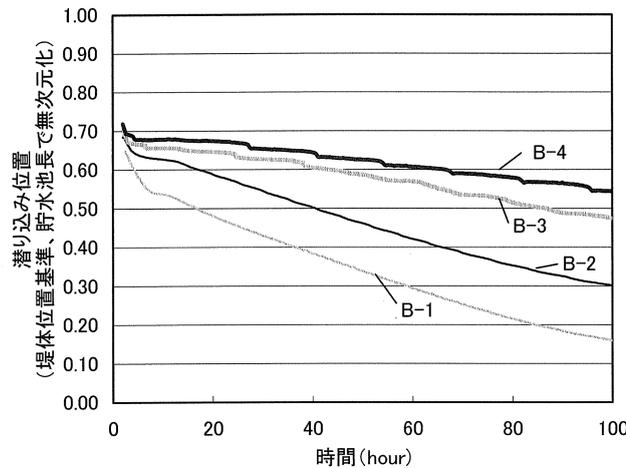


ケースB-4

図-10 鉛直方向渦動粘性係数鉛直分布計算結果 (300 m³/s, 10 時間後)



a) 流量10m³/s)



b) 流量300m³/s)

図-11 潜り込み位置の時間変化

B-1, B-2, B-3 相互の差と比べて小さくその影響は小さい。

図-12 にはケース B-1~B-3 の30時間後(回転率1.57)の断面3の水溫鉛直分布とSS濃度鉛直分布を示す。B-4はB-3とほぼ同様であった。B-1では水溫がほぼ一様になり、SS濃度は濁質の沈降により底部が濃くなっている。また、B-2, B-3では水溫躍層が認められるが、下方の躍層位置はB-2が7m程度低くなっており、水面の水溫も低くなっている。

以上のように、モデル貯水池における流量300 m³/sの計算では、渦動粘性係数の設定において、 $k-\epsilon$ モデル、Richardson数による設定、摩擦速度による設定の順に運動量・熱・濁質の拡散が大きくなり、鉛直分布に差が認められた。一方、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果については、潜り込み位置に若干

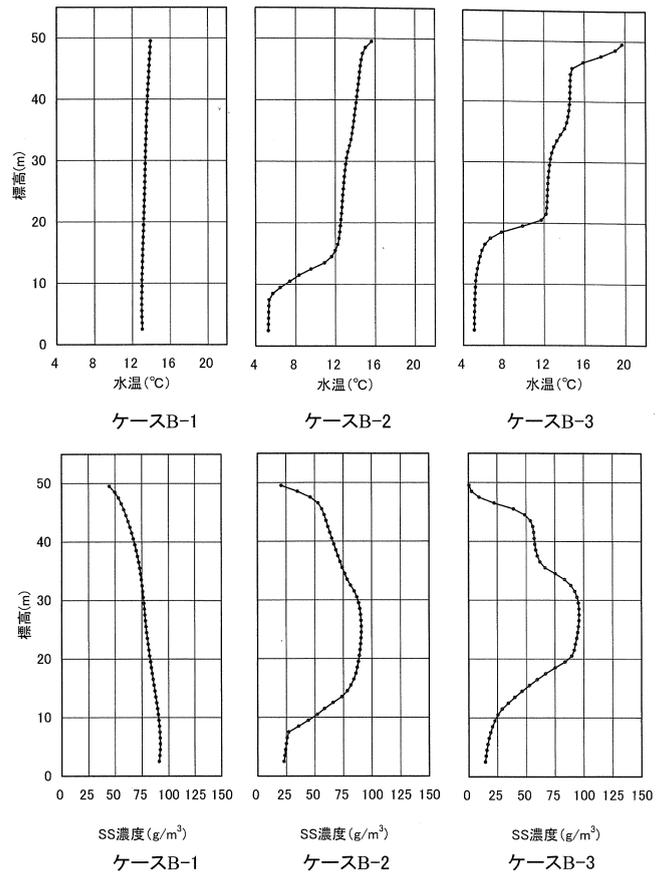


図-12 水溫・SS濃度鉛直分布計算結果(300 m³/s, 30時間後, 断面3)

の差がみられるが、貯水池全体としての水質の鉛直分布にはほとんど差がみられなかった。

4.4 水平方向の渦動粘性係数について

計算ケースに示していないが、A-3, B-3のケースについて水平方向渦動粘性係数に計算格子より算定した値を用いた計算を行っており、結果は $k-\epsilon$ モデルの値を用いた場合と差がなかった。今回対象としているような貯水池の流れでは、水平方向の拡散に対して、慣性力や密度差で生じる移流の影響が大きく、水平方向の渦動粘性係数の影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

水溫と濁質を取り扱う鉛直2次元モデルを作成し、渦動粘性係数の設定法と圧力の取扱いについてモデルのレベルを変えて貯水池の典型的な流動現象を計算し、モデルレベルによる計算結果の影響について検討を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) モデル貯水池における小流量 (10 m³/s) の計算では、渦動粘性係数を Richardson 数によって設定した場合と $k-\epsilon$ モデルを用いた場合とで差はなく、摩擦速度で設定した場合は他と比べて、運動量や水温の拡散が大きくなり計算結果に差が生じた。
- 2) モデル貯水池における出水流量 (300 m³/s) の計算では、渦動粘性係数の設定法により、運動量、水温、濁質の拡散状況に差が認められ、摩擦速度による設定、Richardson 数による設定、 $k-\epsilon$ モデルの順に拡散が大きくなった。
- 3) 今回対象としたモデル貯水池の計算において、出水流量 (300 m³/s) の場合の潜り込み位置を除いて、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果に大きな差異は認められなかった。

したがって、渦動粘性係数の設定法については、流量が大きくなるほどモデルレベルによる結果の差が顕在化するものと考えられる。水温分布や濁質濃度分布の違いは洪水時間の経過とともに大きくなる。今回の流量の 300 m³/s はそれほど大きな流量ではなく、貯水池にもよるが、実際の貯水池では中規模出水程度以上の流量の現象では手法による差が生じるものと思われる。また、静水圧モデルと非静水圧モデルについては、計算結果に大きな差は認められず、流入水の潜り込みや構造体周辺や取水口周辺などの動圧が卓越する局所的な流動は別として、貯水池の大局的な流動の計算では静水圧近似による影響は小さいと考えられる。

今回のモデル貯水池の計算においては、 $k-\epsilon$ モデルの導入による計算時間の増加は 15%程度であった。一方、非静水圧モデルの計算時間は対象とする現象や設定する収束条件により変化するが、今回の計算では静水圧モデルの 4~10 倍程度であり、 $k-\epsilon$ モデルと静水圧モデルの組合せが合理的と考えられ、計算機の能力や対象とする現象の期間によっては非静水圧モデルの採用も可能である。

本検討では、モデルの計算結果同士の比較による影響の把握にとどまっており、今後、現地観測結果を用いた検証を行っていきたい。なお、実際のダムの流動を論じるためには、流入土砂の条件の影響が無視できないことが明らかになっている⁹⁾。

参考文献

- 1) 梅田 信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭 新, 高橋迪夫: センチメータ貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656/II-52, 255-268, 2000
- 2) 米山 望, 井上素行: 三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法, 土木学会論文集, No. 684/II-56, 127-140, 2001
- 3) Farrell, G.J. and Stefan, H.G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *J. Hydr. Res.*, **26**, 525-537, 1988
- 4) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, **182-1**, 1-109, 1991
- 5) Bournet, P.E., Dartus, D., Tassin, B. and Vincon-Leite, B.: Numerical investigation of plunging density current, *J. Hydr. Eng.*, **125**, 584-594, 1999
- 6) 松尾直規, 鶴田周作: 長良川河口堰上流域の流れと水質に及ぼす風の影響に関する数値解析, 水工学論文集, **41**, 451-456, 1997
- 7) 斎藤大作, 清水康行, 坊野聡子, 伊藤 丹: 洪水時のダム湖における濁水の観測と数値シミュレーション, 水工学論文集, **42**, 709-714, 1998
- 8) 鈴木伴征, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値計算, 水工学論文集, **43**, 881-886, 1999
- 9) 鈴木伴征, 櫻井寿之, 柏井条介: 川治ダム貯水池の洪水時濁水現象, 水工学論文集, **48**, 1357-1362, 2004
- 10) 福嶋祐介, 高島哲雄: 下層密度流の形成領域の乱流モデルによる解析, 水理講演会論文集, **33**, 589-594, 1989
- 11) 細田 尚, 西澤賢太郎, 福住 晃, 大久保賢治, 村本嘉雄: 交換密度流に生じる内部波に関する数値解析的研究, 水工学論文集, **40**, 525-530, 1996
- 12) 赤堀良介, 清水康行, 中山 卓: 鉛直方向に密度境界面を持つ流体の混合に関する数値計算, 水工学論文集, **43**, 521-526, 1999
- 13) 伊福 誠, 楠 芳洋: 潮汐波の伝播を考慮した塩水侵入の数値解析, 水工学論文集, **42**, 781-786, 1998
- 14) 藤崎一裕, 島田立季, 長田直己: 横流式沈殿池における密度流の挙動, 水工学論文集, **45**, 973-978, 2001
- 15) Jha, A.K., Akiyama, J. and Ura, M.: Numerical simulation of gravity currents, *Annu. J. Hydr. Eng., JSCE*, **45**, 979-984, 2001
- 16) 新谷哲也, 梅山元彦: 風応力による三成層水域の応答に関する数値解析, 水工学論文集, **46**, 1007-1012, 2002

- 17) 衛藤俊彦, 福嶋祐介: $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる保存性傾斜サーマルの数値解析, 水工学論文集, **46**, 1043-1048, 2002
- 18) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 山崎 勉, 野仲雅之: 水平面上における保存性・非保存性サーマルの数値シミュレーション, 水工学論文集, **47**, 1147-1152, 2003
- 19) 道奥康治, 藤川佳宏, 不二秀人: 貯水池内に流入する浮力水塊の挙動解析, 水工学論文集, **40**, 561-566, 1996
- 20) 細山田得三, 早川典生, 青山了士, Atkinson, J.F., 福嶋祐介: 河口における密度流と浮遊物質の輸送に関する数値計算, 水工学論文集, **45**, 955-960, 2001
- 21) 玉井信行: 密度流の水利, 技報堂出版, pp. 44-46, 1980
- 22) 岩佐義朗 編著: 湖沼工学, 山海堂, p. 121, 1990
- 23) Hirt, C.W. and Cook, J.L.: Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, *J. Comput. Phys.*, **10**, 324-340, 1972
- 24) 柏井条介: ダム貯水池における細粒成分の捕捉率に関する一考察, *ダム技術*, No. 181, 21-28, 2001
(2004年9月1日受理)

Vertical two-dimensional numerical simulation model is used to predict water temperature and water quality of reservoirs. There are many different models proposed. Those models can be classified according to their characteristics, such as basic equations, eddy viscosity coefficient modeling, numerical scheme and so on. However, the effect of the model level on the calculation result for reservoir flow is not clear sufficiently. In this study, we made vertical two-dimensional model dealing with flow, water temperature and SS concentration, and carried out calculations of typical flows in the hypothetical reservoir under the condition of various model levels, paying attention to eddy viscosity coefficient modeling and pressure modeling. As a result, by comparing the calculation results, the eddy viscosity coefficient modeling has a relatively significant effect on the results. On the contrary, the difference by pressure modeling is not remarkable.

Key words: reservoir flow, vertical two-dimensional model, water temperature, SS concentration, eddy viscosity coefficient

超電導磁気分離を活用した懸濁物除去技術

井芹 寧・森雅佳(西日本技術開発(株) 環境部)
林秀美(九州電力(株) 総合研究所)

1. 超電導磁気分離による水質浄化システムの開発

本装置は水中の汚濁物質をマグネタイトと磁性フロック化し、膜でろ過した後、超電導磁石を用いて磁性フロックを回収する水質浄化装置(図-1)である。高磁場を利用して連続処理ができるため高濃度の汚濁水を高速で処理することが可能である。

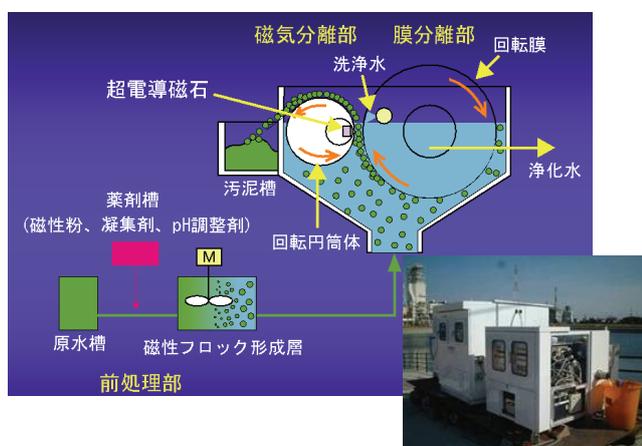


図-1 超電導磁気分離システム

また、コンパクトで移動可能な車載型なので水質浄化装置を設置できない場所であっても移動して処理を行うことが可能である(図-2)。さらに、濁水やアオコの発生など問題発生したときにタイムリーに処理することが可能である。



図-2 モービル型磁気分離システム

アオコが発生した湖水を対象に、水質浄化試験を行い、良好な結果が得られた(図-3, 表-1, 2)。



図-3 アオコの浄化(右:原水, 左:処理水)

表-1 アオコが発生した湖水の浄化試験結果

試料	SS (mg/L)	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (μg/L)
処理前	107	48.3	0.054	68.4
処理後	< 1	2.9	< 0.003	7.3

表-2 アオコが発生した湖水の浄化試験結果

採水地点名	原水	処理水1
藍藻類		
<i>Anabaena</i> sp.	4,352	
<i>Microcystis</i> sp.	1,112	
<i>Oscillatoria</i> sp.	172	51
<i>Phormidium musicola</i>	153	
珪藻類		
<i>Achnanthes</i> sp.	2	
<i>Asterionella formosa</i>	25	
<i>Aulacoseira distans</i>	11	
<i>Aulacoseira granulata</i>	254	8
<i>Aulacoseira solida</i>	7	
<i>Aulacoseira varians</i>	64	
<i>Cyclotella</i> sp.	45	4
<i>Cymbella minuta</i>	2	
<i>Navicula</i> sp.	13	
<i>Nitzschia acicularis</i>	15	2
<i>Nitzschia</i> sp.	20	
<i>Rhizosolenia</i> sp.		
<i>Stephanodiscus</i> sp.	7	
<i>Synedra acus</i>	14	
<i>Synedra ulna</i>	8	
緑藻類		
<i>Chlamydomonas</i> sp.	36	8
<i>Dictyosphaerium</i> sp.	2,685	
<i>Eudorina elegans</i>	84	31
<i>Golenkinia</i> sp.	11	
<i>Oocystis</i> sp.	28	
<i>Pediastrum duplex</i>	32	
<i>Pediastrum simplex</i>	34	
<i>Pediastrum</i> sp.	28	
<i>Scenedesmus bernardii</i>	8	
<i>Scenedesmus opifilensis</i>	12	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	11	
<i>Scenedesmus</i> sp.	88	18
<i>Sphaerocystis</i> sp.	28	20
<i>Staurastrum</i> sp.	34	4
<i>Tetradion minimum</i>	15	
渦鞭藻類		
<i>Peridinium</i> sp.	8	
緑虫藻類		
<i>Tracelomonas</i> sp.	2	

2. 土壌(底泥)浄化システムの検討

本システムは重金属等による汚染土壌に磁気分離型吸着資材を添加し、汚染物質を吸着資材で回収後、資材を超電導磁気分離システムで回収するものである(図-4)。

吸着資材には対象汚染物質を選択的に吸着可能なゼオライトを利用し、水田土壌や海底土汚染の浄化システムとして技術開発を行っている。

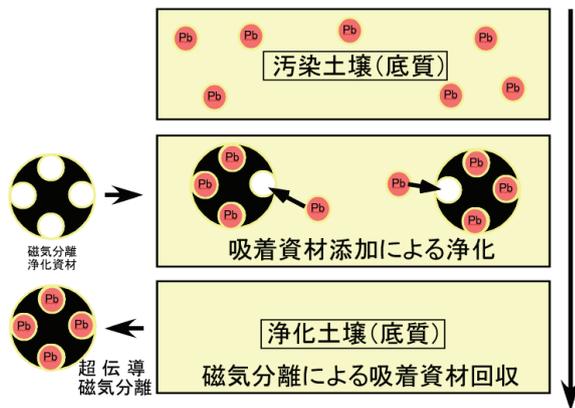


図-4 汚染土壌(底質)の浄化イメージ図

3. 凝集剤無添加浄化システムの検討(天然凝集性イオンの利用)

A 調整池の流入水は原水中に多量の2価鉄が溶存している。この溶存態の鉄を利用することで、凝集剤を添加することなく高分子ポリマーとpH調整のみで強固な凝集フロックを形成させ、SSが87mg/Lが8mg/Lに改善されるなど、水質浄化効果が確認された。処理結果を表-3に、処理条件を表-4に、汚濁成分の除去率を図-5に示す。

表-3 凝集剤無添加処理試験結果

項目	単位	原水	処理水
水温	°C	32.2	32.4
pH		3.25	8.95
EC	μ S/cm	211	214
DO	mg/L	6.99	6.37
DO	%	95.2	84.0
濁度	mg/L	64.4	2.28
SS	mg/L	87	8
T-Fe	mg/L	44	1
D-Fe	mg/L	6.6	0.40

表-4 凝集剤無添加処理試験の処理条件

薬剤名	濃度	添加量	最終濃度(ppm)
マグネタイト	(40000ppm)	17.5 mL/min	20ppm
ポリ硫酸第二鉄	(原液)	-	
高分子ポリマー	(4000ppm)	150 mL/min	17ppm
10%NaOH	(100000ppm)	75 mL/min	214ppm

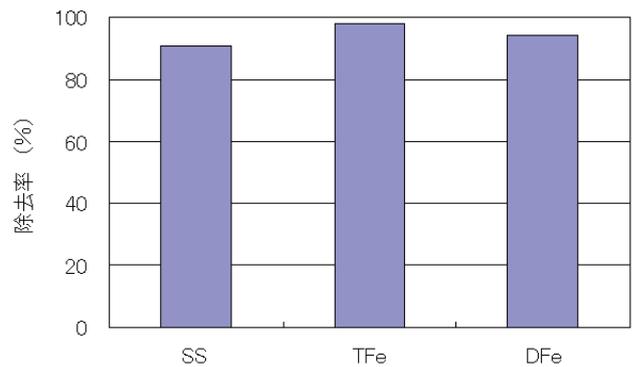


図-5 凝集剤無添加処理による除去率

B 貯水池では、冬季の成層期から循環期への移行期において、黒色化現象が発生した場合、黒色化後に速やかに滞留濁質の沈降が生じることが観察された。黒色化は、還元状態で底泥から溶出した鉄、マンガンイオンが酸素を含んだ表層水と混合することで凝集フロックを生じたためと推察された。

黒色化機構に基づいた長期濁水処理を試み、底泥間隙水採取装置で得られた間隙水やダム漏水を濁水と混合し曝気することにより、凝集剤無添加条件で濁質の凝集沈降処理が可能であることが示された。

4. まとめ

超電導水質浄化実験装置は100m³/dayの処理量があり、主な用途として濁水の処理、湖沼で異常増殖した植物プランクトン(アオコや淡水赤潮)の除去、溶存態リンの回収、工場排水の浄化、汚染土壌の浄化等があげられる。

また、条件を整えば、自然の凝集性イオンを活用し、凝集剤無添加条件による濁質除去も可能であることが確認された。

なお、現在の超電導磁石は岩手大学藤代博之氏が開発したMMPSC法により着磁された磁石を利用している。

貯水池堆積物にみる硫黄同位体比の変化

(財) 電力中央研究所 今村正裕 松梨史郎 長岡亨

1. はじめに

貯水池では、森林流域からの有機物・各種鉱物の供給と微生物の働きにより、堆積物中に嫌気的な雰囲気形成されていることが多い。このような堆積物中では嫌気化が原因と考えられる還元物質 (Mn^{2+} , Fe^{2+} や S^{2-}) が存在しており、その量の把握と要因 (寄与率等) の解明は、下流方向における環境影響を考える上で必要かつ重要な課題である。近年では酸性雨、出水時における堆積物中への流木や葉などの長期堆積、温泉水等の影響によって、硫黄循環に関与する嫌気的な雰囲気が変化している可能性もある。そこで、本研究では貯水池内の水・堆積物、流入する降雨・樹木・懸濁物 (鉱物) 中の硫黄同位体比の分析結果から、淡水域における硫黄循環の解明を目的とし、まず堆積物を中心に硫黄同位体比の挙動について検討した。

2. 堆積物中の硫黄同位体比の変化

ある貯水池内で未攪乱の堆積物鉛直を採取し、堆積物の硫黄同位体比分析を試みた。目視観察から堆積物中には表層から 5~8cm 層に腐植した葉・枝が確認できた。そこで、この腐植した葉および湖水面に浮遊している葉を採取しその硫黄同位体比についても分析を試みた。なお、分析に用いた試料 (堆積物・枝葉) は十分に乾燥後メノウ鉢にて均一にすり潰したものをを用いた。

分析の結果を図-1 に示す。硫黄同位体比の値は表層から 20cm までで数‰ではあるが変化していた。また、同じ水系の

貯水池であっても堆積物の硫黄同位体比は約 5 (‰ $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$) の違いが見られた。同地点の堆積物硫黄含有量は低い (0.03~0.07%D.W.) もの、堆積物への懸濁物質の供給や生成速度、供給源の違いに応じた値の変化が見られ、そのような環境評価の指標になりうると考えられる。

一方、5~8cm 層に存在した腐植した黒色葉の値は 1.31 (‰ $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$)、湖水面上の緑色葉では 5.36 (‰ $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$) であった。分析試料は同一種の葉ではないものの、葉・枝沈降後の堆積物中における変遷過程で値が小さくなった結果であり、葉・小枝のアミノ酸およびフミン物質の分解過程も要因の一部と推察されるが、詳細については今後検討したい。

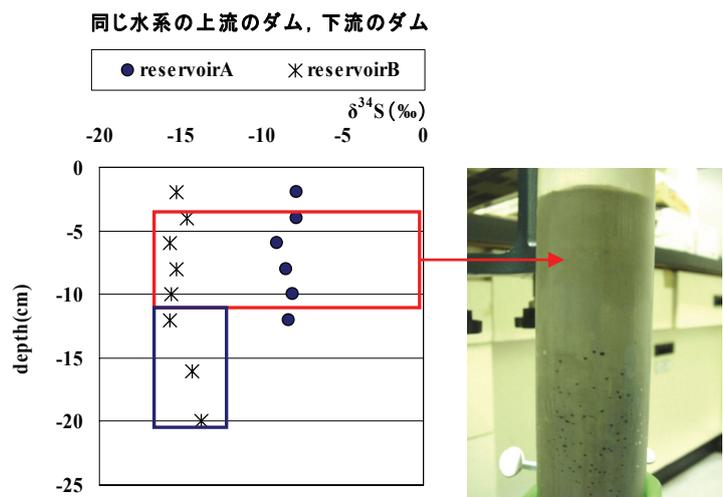


図-1 堆積物中の硫黄同位体比鉛直分

3. 嫌気化実験における硫黄同位体比の変化

著者らは、室内にて堆積物を嫌気化的な状態（表層水への酸素供給はない状態）で約1年間恒温（10℃）維持し、堆積物中の間隙水や物質の変化を検討してきた。そこで、この嫌気化実験の堆積物を試料とし、硫黄同位体比を測定した。その結果を図-2に示す。表層から8cmまでの層では硫黄同位体比の値は低くなる傾向にあるものの、8cm以深では高くなる傾向を見せた。本室内実験では、最終段階（450日後）において表層付近まで嫌気化が進行していたことが明らかになっているが、この8cm層を境にして嫌気化に関する異なる反応の存在を示すものである。今後、硫黄循環の競合反応から発生するメタンや一酸化二窒素に関する検討が必要である。

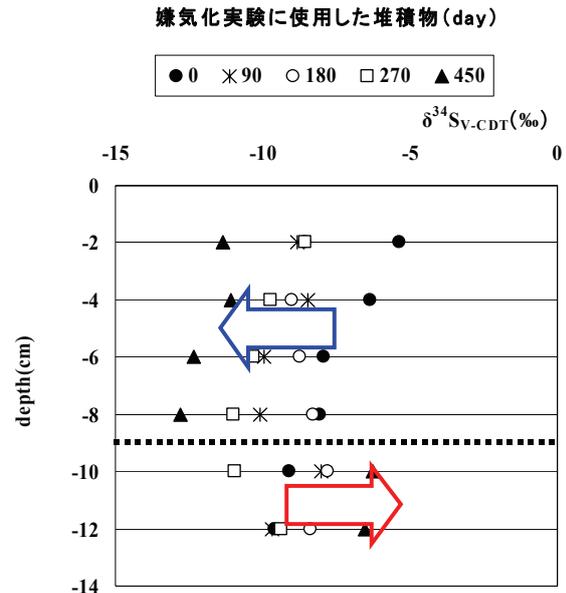


図-2 嫌気化実験の硫黄同位体比

4. 硫酸還元菌の活性

今回は硫黄循環に関連するバクテリア（硫酸還元菌）の培養を行い、堆積物鉛直方向にどの程度の活性があり、堆積物中の硫黄同位体比変遷との関係があるか検討した。

実験はクリーンベンチ内にて、堆積物試料約1g (0.95 ± 0.7 g) を秤量後、脱酸素した滅菌済イオン交換水9ml中に懸濁させ、振盪攪拌することにより、十分に堆積物を分散させた。その懸濁液を用いて、硫酸還元菌の検出実験を行った。硫酸還元菌存在の判定は、生育の結果生成した硫化水素が培地中の鉄イオンと反応し、黒色の硫化鉄沈殿の生成を経時的に確認することによって行った。

培養実験の結果を図-3に示す。培養実験の結果、硫酸還元菌はどの地点においても存在することがわかった。しかしながら、培養期間を延長することによって、黒色化する瓶が増加しその傾向も鉛直方向で異なっていること

から、硫酸還元菌の生息数は地点及び深度により異なる傾向にある可能性が認められた。ただ、今回の結果のみでは堆積物中の硫黄同位体比変化との関係はわからなかった。硫酸還元菌の関与による同位体分別も含めて今後検討を進める。

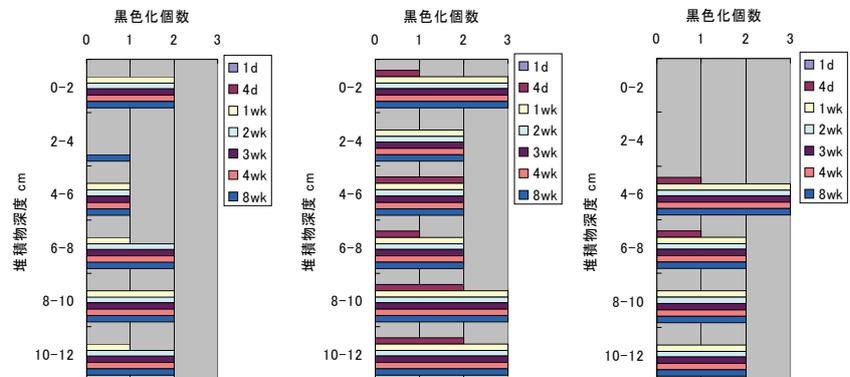


図-3 硫酸還元菌活性変化

亜熱帯意沿岸域におけるリン・窒素の短期的収支

○井上徹教・細川真也・内村真之・中村由行
(港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境領域)
キーワード： マングローブ・リン・窒素・吹通川

1. はじめに

亜熱帯沿岸域における生態系要素の一つとしてマングローブ林は重要な位置を占めているが、周辺水域との物質交換の定量化は基本的かつ重要な課題である。本稿では、マングローブ林-前面海域間での物質循環の定量化を目的とした観測結果について報告する。

2. 観測内容

観測は比較的規模の大きいマングローブ林が存在する沖縄県石垣市伊土名地先の吹通川河口部において、大潮時の2005年3月10日9時から同11日11時にかけての26時間連続的に行った。最も川幅が狭くなっている水路状の箇所において横断方向に4箇所の観測点を設け、凡そ20~30分毎に採水を行った。水サンプルの一部はディスクフィルターを用いてろ過し、ろ過水と未ろ過水に分取した。各観測点の上層及び下層には自記式電磁流速計(アレック電子社製、COMPACT-EM)を、下層にのみ水深計(三洋測器製、MDM)を設置した。並行して1時間毎に各測点10分間ずつ、1m四方の方形枠に袋状のネットを取り付けたものでリターの採取を行った。採取したサンプルは速やかに冷凍保存し、実験室に持ち帰った後、窒素及びリンの分析を行った。

3. 観測結果及び考察

観測期間中の流速(海域への流出を正としている)、リン濃度、窒素濃度の時間変化を図に示す。観測位置では、上げ潮時には前面海域からマングローブ林への海水の流入、下げ潮時には逆の流出が認められ、干潮時前後では流速 5cm s^{-1} 程度の安定した流出が確認された。各態リン共に上げ潮時には低濃度で安定して推移している。しかし溶存態については、下げ潮から干潮時付近にかけて単調な増加傾向が見ら

れる。これはマングローブ林内(スオンプ、クリーク)において主にそこに生育する生物による代謝過程により生成されたものであると考えられる。一方、粒子態については下げ潮最強時に最も高濃度となっている。これは流速が大きくなった際のクリーク内堆積物の巻き上げによるものと考えられる。また窒素については各態共に上げ潮時には低濃度で安定して推移している。溶存態については、下げ潮から干潮時付近にかけて単調な増加傾向が見られる。これはマングローブ林内(スオンプ、クリーク)において水塊へ供給されたものであると考えられる。リンの場合とは異なり、粒子態も溶存態と同様の傾向を示している。窒素については巻き上げの影響があまり大きくないものと考えられる。

上記の観測結果を元に、以下に物質収支の計算を行う。収支を計算する際の潮位による影響を排除するため、ある時刻を基点とし、その時点での水深から潮汐変動により次に元の水深に戻るまでの期間を抽出し、その間の輸送量の積分値から収支を計算した。観測期間中の平均的な流出量を表1に示す。ほとんどの項目、時間帯で流出する結果となっているが、夜間のDOP、NH₄、NO₂で流入する傾向が見られる。また、PTNはいずれの時間帯においても負の値をとっており、海側からマングローブ林側への輸送がおこるといった結果になった。

4. おわりに

今回の結果はあくまで「スナップショット」であり、観測対象となった水域の全体像を捉えていない。今後は懸濁態の輸送量や異なる季節のフラックスとの比較検討、及び安定同位体等の他の手法により得られる知見を考慮し、マングローブ-前面海域間の物質循環を定量化する予定である。

表1 物資収支の計算結果

start	finish	PO4	DOP	DTP	PTP	TP	NH4	NO2	NO3	DIN	DON	DTN	PTN	TN	note
2005/3/10 9:34	2005/3/10 21:54	4.5	7.7	12.1	16.8	28.9	50	25	155	231	346	577	-190	386	①1回目の1潮汐間
2005/3/10 21:52	2005/3/11 9:54	4.3	-1.3	3.0	26.3	29.3	-48	-4	137	85	151	236	-38	198	②2回目の1潮汐間
2005/3/10 9:00	2005/3/10 17:58	3.6	7.1	10.6	17.7	28.3	106	29	155	290	107	397	-145	252	③昼間
2005/3/11 7:16	2005/3/11 9:42														
2005/3/10 20:46	2005/3/11 8:29	6.0	-4.0	2.0	33.5	35.5	-146	-23	165	-5	328	324	-107	217	④夜間

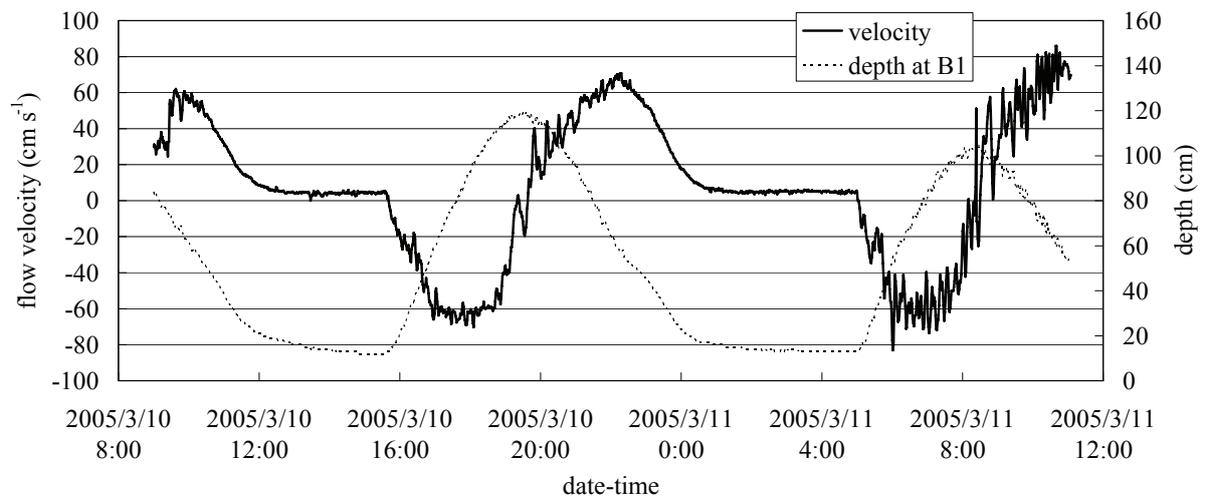


図1 流速

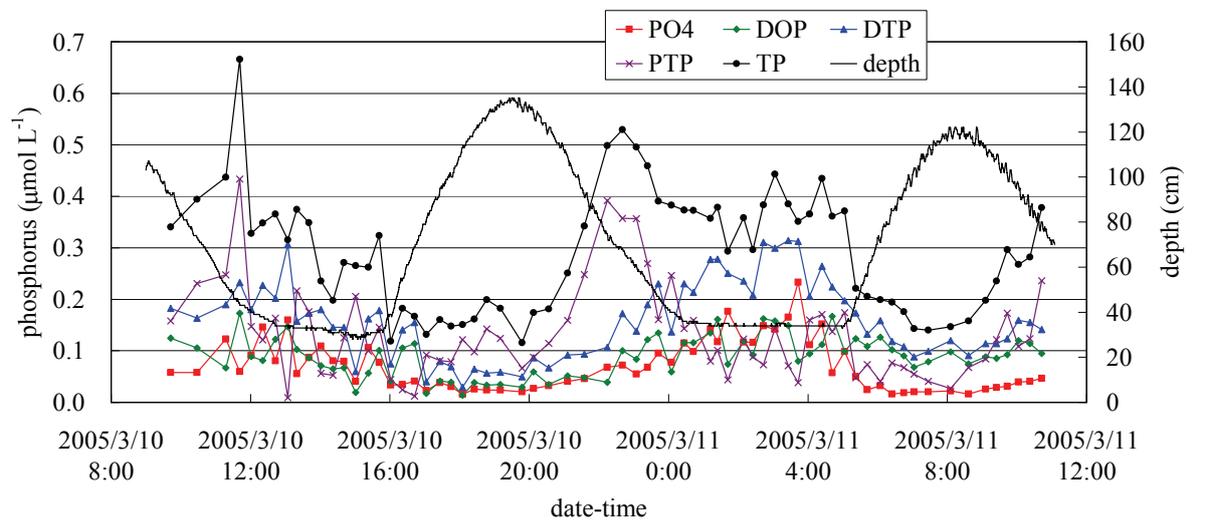


図2 リン

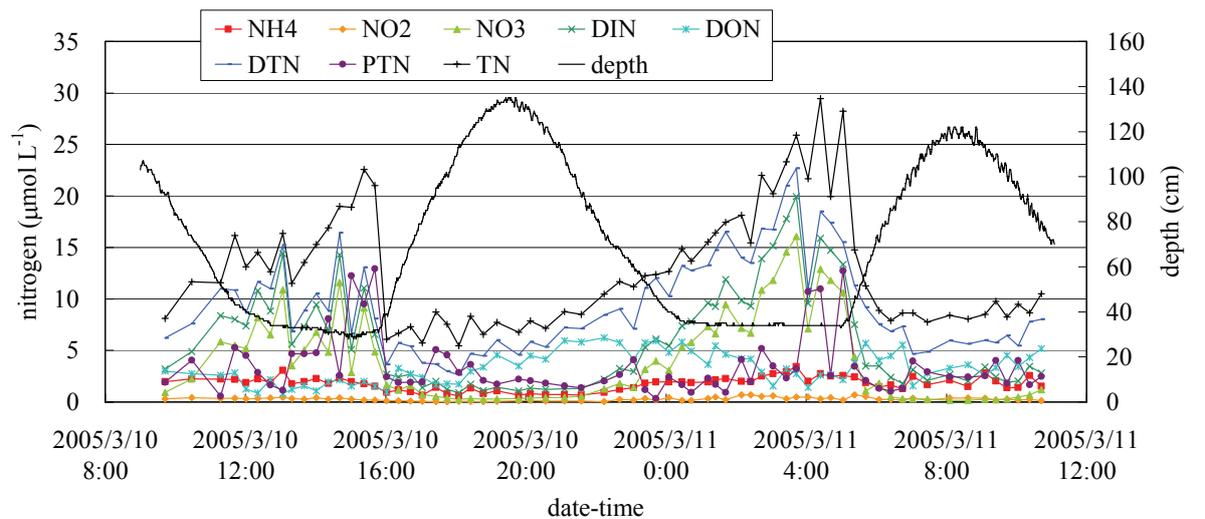


図3 窒素

凍結融解作用による土砂生産量

京都大学防災研究所

藤田正治・堤大三

京都大学大学院

手島宏之

NPO 法人山の自然文化研究センター

澤田豊明

1. はじめに

わが国では、主要な通常の土砂生産として、凍結融解による土砂生産が挙げられる。これは、晩秋から初春にかけて、裸地斜面の基岩が凍結融解を繰り返すことにより、土砂化するものである。気温条件と密接に関係していることから、今後地球温暖化の影響を受ける現象でもある。本研究では、凍結融解による土砂生産量の算定モデルの構築と高原川流域への適用を行う。

2. 土砂量の推定

(1) 推定モデルの概略

土砂量は既往のシミュレーションモデル¹⁾によって推定する。このモデルは地表面温度を境界条件とし、地中温度変化を計算した上で、凍結融解の経験回数を基に土砂量を算出する。したがって、地表面温度変化のデータが必要であるが、それを推定する方法を以下に示す。

(2) 地表面温度の推定法

図-1 に高原川流域に位置する穂高砂防観測所での各観測値を示す。積雪が観測されない12月下旬までは、地表面温度は大気温度とほぼ同じ変化を示すが、積雪が約25cmを超えると地表面温度が一定になる。そこで、図-2 に大気温度が0°Cを下回った時の地表面温度と大気温度の相関を示す。図-3の(a)~(c)は積雪深により以下のように分けられる。

(a) 積雪あり／深さ25cm以下

(b) 積雪無し

(c) 積雪あり／深さ25cm以上

(a)のように25cm以下の積雪では、大気温度と比べて地表面温度が高く、温度変化が小さくなる傾向があり、(c)のように積雪が25cmを超えると地表面温度はほぼ一定(-0.3°C)になることがわかる。また、積雪が無い場合でも、(b)のように地表面温度が大気温度より高い。しかし、これらの積雪と温度は異なる場所で測られおり、25cmという閾値にはさほど

意味があるわけではない。そこで次にシミュレーションにより、積雪深さと地表面温度の関係を検討した。

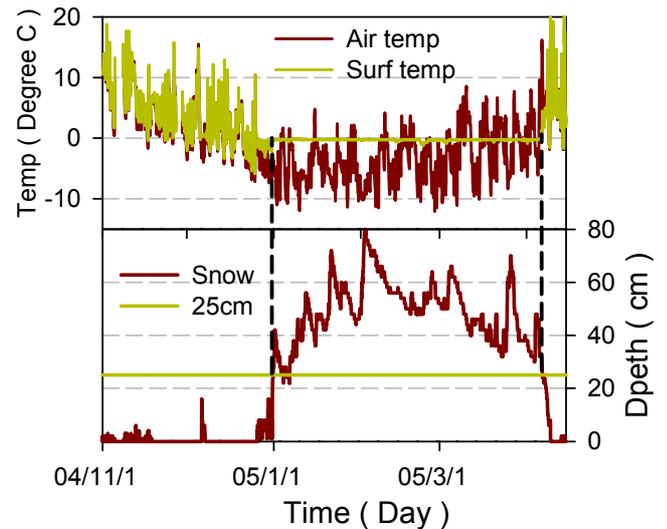


図-1 気温・地表面温度・積雪の観測値

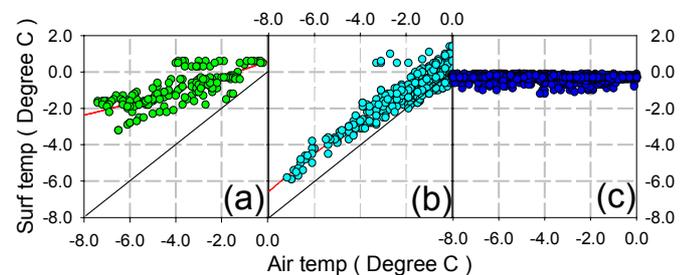


図-2 地表面温度と気温の相関

(2) シミュレーションによる積雪深の影響評価

積雪の影響を検証するため、地表面に任意の積雪深を与え、熱伝導計算により積雪の効果を検証した。計算条件として、

- 1) 積雪の相変化は無視する
 - 2) 積雪表面に大気温度を与える
 - 3) 積雪の熱拡散係数を $4.40 \times 10^{-7} [\text{m}^2/\text{s}]$ (積雪の一般的な値)の一定値として与える
- とし、積雪深として0cm(積雪なし), 1~5cm, 10cmの7パターンを与え、積雪の違いによる地表面温度変化を計算した。

計算結果を図-3, 4 に示す. 観測値と同様に, 積雪があると温度変化が小さくなっている. また, 観測値では 25cm で変化が見られなくなったが, ここでは 5cm で温度変化がほぼなくなる結果となった. ここで, 地表面温度を一定とする積雪深さを $S_d(\text{cm})$ として, 厳冬大雪である 1995-1996 年と, 暖冬細雪である 1997-1998 年の大気温度を用いて, 図-5 の手順により大気温度から地表面温度を推定した (図-6: $S_d=25\text{cm}$, 1995-96 の推定地表面温度). そして, その地表面温度を境界条件として生産土砂量を計算した.

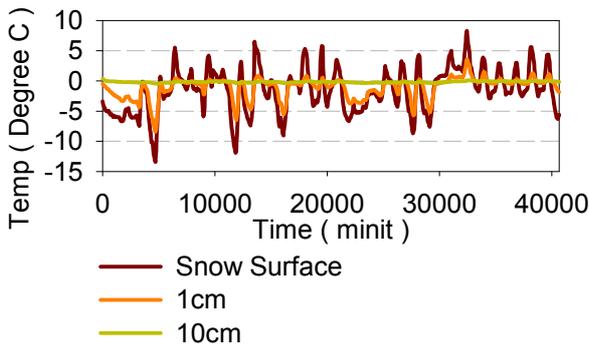


図-3 積雪を考慮した地表面温度変化

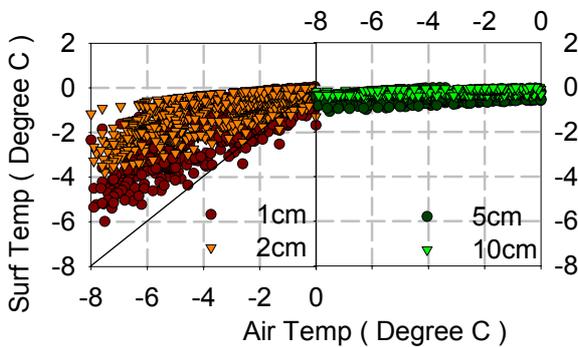


図-4 地表面温度と気温の相関

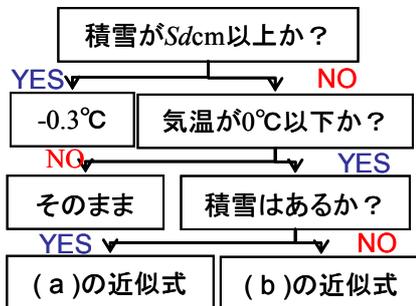


図-5 大気温度から地表面温度の推定

3. 土砂生産量の計算結果

図-7 に計算結果を示す. 凍結融解を n 回経験したものを土砂化したとし, 5 回, 10 回の場合を示した.

図より厳冬(95-96 年)の方が多くの土砂が生産され, S_d を小さくすると土砂量の計算値も小さくなるのが分かる. これらは雪の断熱効果によるものであり, 積雪が多い年ほど地表面が覆われ凍結しにくくなり, 結果として土砂生産量が小さくなるのが原因と思われる. 観測値も 95-96 年が $2668[\text{g}/\text{m}^2/\text{year}]$, 97-98 年が $3762[\text{g}/\text{m}^2/\text{year}]$ (深谷) であり, 同様の傾向が見られた. また, 計算値は観測値よりも多く, 積雪の局地的な違いや, 基岩の物性値の違いなど, 今後検討していく必要がある.

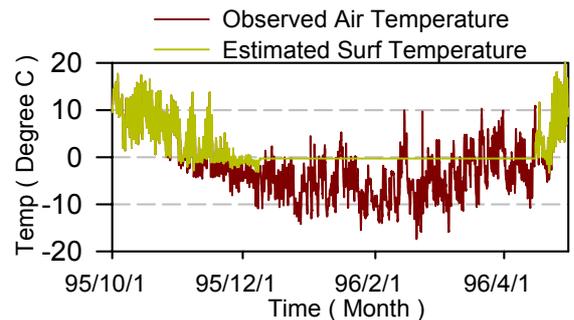


図-6 観測大気温度と推定地表面温度

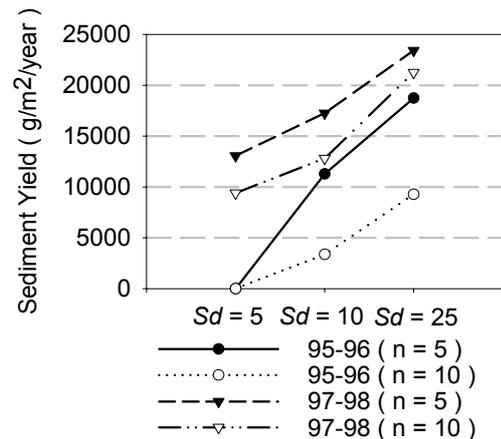


図-7 計算土砂量

4. おわりに

以下に得られた知見を示す.

- 1) 約 5cm の積雪で地表面温度は一定になると思われる.
- 2) 暖冬で積雪が少ない年は土砂量が増え, 厳冬で積雪が多い年は減る可能性がある.

今後は, 積雪の局所的な違いや, 雪や岩の物性値などを考慮し, より正確な土砂生産量を予測する必要がある.

参考文献

- 1) 堤大三ほか: 凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究, 砂防学会誌第 59 巻第 6 号

津波と温暖化

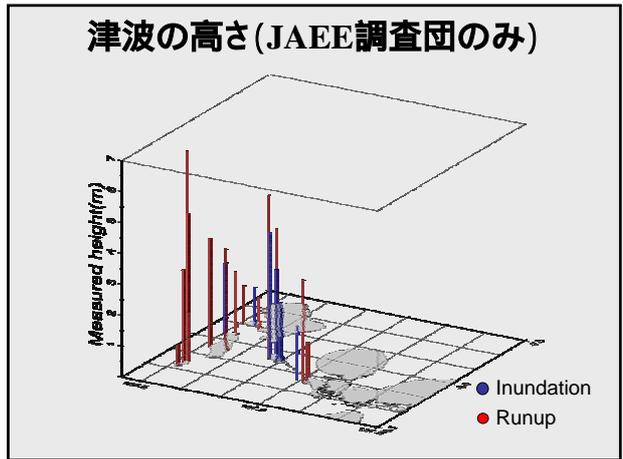
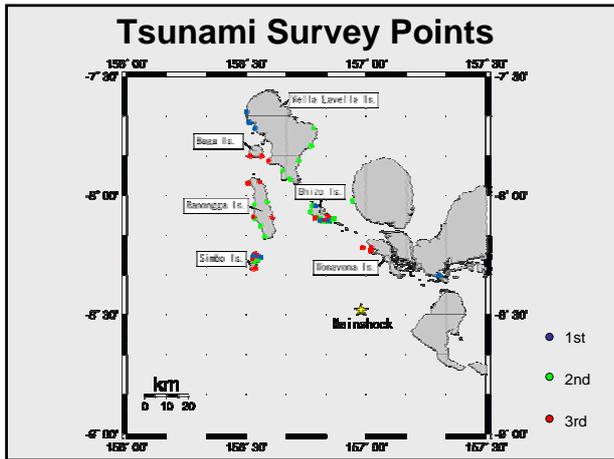
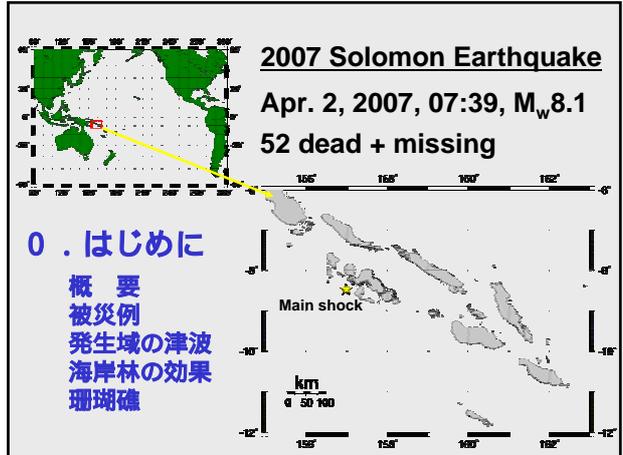
- 2007年ソロモン諸島地震津波を例に -



With Tom at Gizo Airfield

JAEЕ津波調査団

松富英夫 (秋田大学)
藤間功司 (防衛大学)
嶋原良典 (防衛大学)



1. 被災例 (Malakarava 1, 2, 3 in Gizo Is.)

Malakarava 1

Malakarava 2, 1 dead

Malakarava 3

沈下
少し引いた後
押し寄せる
→ 被害が最大

Medical Area in Gizo Is.

浸水高 > 2.05m
浸水深 > 1.1m
床上浸水深 > 0.3m

20x20cm
床高 0.8~
0.9m
しっかり
固定 (職員住宅)

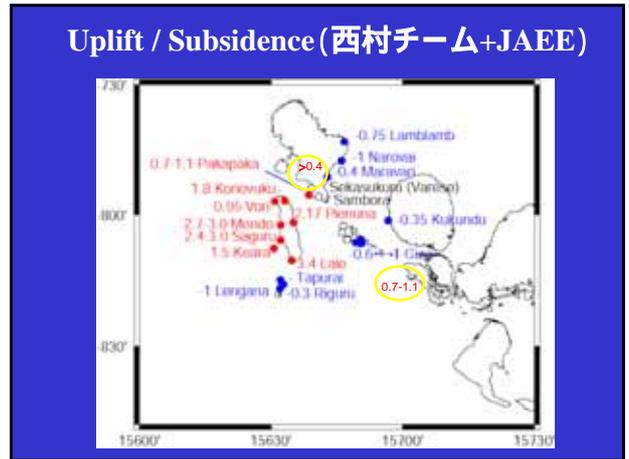
浸水高 2.57m
浸水深 1.6m



2. 現地調査から見た発生域の津波

地点	津波高 (m)	旧満潮位 (m)	旧干潮位 (m) 新満潮位 (m)	白化面位 (m)	備考
Lale	5.94 (B)	-	-	3.11 (>3.1)	4.22 15:25
Suava	3.76 (B)	-	2.97	- (>2.3)	4.22 16:28
Kundu	3.56 (B)	2.74 (0.68)	2.06注1)	2.12 (>2.0)	4.23 10:20
Vori Pt.	2.47+α (C)	1.38 (0.70)	0.68	- (>0.7)	4.23 11:30
Vori	2.52 (A)	1.86 (1.07)	0.79	- (>0.8)	4.23 11:46
Koriovuku	2.42 (B)	-	-	1.91 (>1.9)	4.23 13:15
Supato	1.89 (1.51(A))	1.12 (0.67)	0.45	- (>0.4)	4.23 16:28
Ndivulani Is.	3.28 (A)	1.79 (0.71)	1.08	0.66 (>0.7)	4.24 10:08
Rarumana	1.32 (B)	-	0.43注1) 0.43	0.46 (0.7)	4.24 10:50
Unidentified Is.	1.86+α (C)	-	0.53注2)	0.96 (1.1)	4.24 11:25

津波高>旧満潮位(発生域, 隆起を前提) → 他(海域)に高い隆起域有り
 白化面位は干潮位と一致するようである(注1) → 要確認(生物層?)
 赤字は潮位と判断される(海図: MHHW-MLLW=0.4m (Gizo), 0.3m (Simbo))
 隆起した島の島影の浜では新旧の満潮位の痕跡が残る(注2)?
 Unidentified Is. での隆起量は0.96-(0.53-0.68)≒1.1m.



4. 珊瑚礁について

風波 (日常事象)
減勢効果有り
大勢が住むようになる。

津波 (非日常事象)
低平地のため、津波に脆弱
地盤沈降 >? < 海面上昇
津波対策 温暖化対策
反射・減勢効果有り
砕波が生じ易く、伝播が遅いため、
日中では津波警報機能有り(音?)

有明海の懸濁物質の沈降速度に関する基礎的研究

佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 山本浩一・速水祐一・濱田孝治
佐賀大学理工学部 安江洋介・大串浩一郎

1. はじめに

近年有明海では透明度が上昇傾向にあり¹⁾,その要因の一つに懸濁物質(SS)の凝集が挙げられる. 一般に SS が凝集して粗大なフロックを形成すると,濁度は低下して清澄になる. また,凝集は粘土粒子同士のファンデルワールス力によっておこるが,植物プランクトンや細菌が産生する高分子化合物による架橋作用も凝集を促進する²⁾. しかしながら,現地での SS の凝集状態や沈降速度の時系列変動については知見が不足している. そこで本研究は有明海湾奥部浅海域において一潮汐間の凝集した懸濁物質の沈降速度,沈降フラックスの実態を明らかにすることを目的とした.

2. 研究方法

2006年9月5日,6時から17時30分に有明海湾奥部の佐賀県浜川タワー(北緯33°5'4",東経130°10'27")において,超音波流速計(Nortek Vector),レーザー粒度分析計(Sequoia LISST-100),水質計(YSI 600QS)を設置し,計測した. それぞれの設置位置は底面上20cm,50cm,20cmである. 超音波流速計はサンプリング周波数64Hzで20秒間の測定を5分間隔で自記記録し,レーザー粒度分析計は粒径1.36~230 μm の粒径について32分画の粒径の体積濃度を5分間隔で自記記録した. 水質計は水温・塩分・pH・DO・ORPを1分間隔で自記記録した. 同時に15分から30分間隔でクロロフィル濁度計(Alec compact CTD)を用いて水温・塩分・クロロフィル蛍光・濁度の鉛直分布を測定した.

タワー上からバンドン採水器で底面上50cmの海水を採取し,透明アクリル角筒(厚さ1cm幅3cm高さ25cm)に静かに分取して横からフロックの沈降状況をマクロレンズ付きハイビジョンビデオカメラで撮影することでフロックの粒径と沈降速度の関係を求めた. フロック沈降速度の解析には流跡線法を用いた. ハイビジョンカメラで得た動画は Adobe Premiere を用いて 30 fps/sec の連続静止画に加工し,画像解析ソフト(NIH Image-J)を用いて,30枚(1秒間)の連続静止画像を合成してフロックの流跡線を作成した. 流跡線の短径をフロックの粒径,長径をフロックの粒径 d と移動距離の和としてフロックの粒径と沈降速度の関係を求めた. 画像解析の際は著しく球形から離れた粒子については解析から除外した. 粒子レイノルズ数が1より小さい時,粒子の沈降速度はストークスの式で表される. フロックを破壊して測定した中央粒径の粒子は少なくとも単粒子であると仮定し,中央粒径での $\rho_e = 1630 \text{ kg m}^{-3}$ とし,(1)式で有効密度を算出し,回帰曲線からフロック密度関数 $\rho_e(a)$ を求めた.

$$\rho_e(a) = \frac{18\mu(T)}{ga^2} w_s(a, T) \quad (1)$$

ここで a : 粒径(m), $\rho_e(a)$: 粒径 a におけるフロックの有効密度, (kg/m^3), T : 水温 $\mu(T)$: 水温 T における粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), g : 重力加速度(m/s^2), $w_s(a, T)$: 粒子の沈降速度 (m s^{-1}).

次に Lisst-100 による体積濃度の粒径分布から重量濃度分布 $C_M(a)$ (SS 濃度に相当)を(2)式より求めた.

$$C_M(a) = \frac{\rho_e(a)\rho_s}{\rho_s - \rho_w} C_V(a) \quad (2)$$

ここで ρ_w : 水の密度(kg m^{-3}), ρ_s : 粒子単体の密度(kg m^{-3}), $C_V(a)$: 粒径 a の懸濁物質の体積濃度($\mu\text{L L}^{-1}$)

ストークス式で与えられる沈降速度と重量濃 C_M (kg m^{-3})を用いて,(3)式で沈降フラックス D ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を求めた.

$$D = \frac{\mu(T_o)}{\mu(T_f)} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} C_M(a) \cdot w_s(a, T) da \quad (3)$$

ここで a_{\min} : フロック最小粒径, a_{\max} : フロック最大粒径. 沈降フラックス D , T_o : 沈降実験時水温, T_f : 現場水温.

沈降フラックス D ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を SS 濃度で除することで重量平均沈降速度 $w_{s, \text{mean}}$ (m s^{-1})を得た.

$$w_{s, \text{mean}} = \frac{D}{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} C_M(a) da} \quad (4)$$

ここで, $w_{s, \text{mean}}$: 重量平均沈降速度 (m s^{-1}), SSC : SS 濃度(mg L^{-1}). 採水したサンプルは,超音波洗浄器で破碎し,レーザー粒度分析(島津 SALD-3100)を用いて一次粒子の粒度分布を測定し. SS をフィルターごと 600°C で処理して VSS の測定を行った. 流速は5分間隔にて64Hz,20秒間取得し,(5)式でレイノルズ応力,(6)式で音響強度を SS 濃度に換算して(7)式で超音波流速計のデータから渦相関法により5分おきの鉛直 SS フラックスを算出した.

$$\tau_{xz} = \rho_w \sqrt{\langle -v_n' w' \rangle^2 + \langle -v_e' w' \rangle^2} \quad (5)$$

$$EL = a \log_{10} C + b \quad (6)$$

$$J_z = \langle C' w' \rangle \quad (7)$$

ただし τ_{xz} : 底面剪断応力, v_n' : 北方流速乱流成分(m s^{-1}), v_e' : 東方流速乱流成分(m s^{-1}), w' : 鉛直上方流速乱流成分(m s^{-1}), EL : 反射音響強度(dB), C : SS 濃度(mg L^{-1}), C' : SS 濃度変動成分(mg L^{-1}), J_z : 乱流鉛直 SS フラックス ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a, b : 定数, $\langle \rangle$ は平均操作を示す.

3. 研究結果

図1に示すように,満潮時においては表層に低塩分,底層に高塩分の状態がみられたが,10時台に成層状態がなくなった. また,図2から下げ潮のフロントの通過時に,底面せん断応力 τ_{xz} が急激に増加しており,それに伴って SS 鉛直フラックス J_z も急激に増加していることが認められる. 14時台からも再び塩分は上昇し始めた時には,同図より,上げ潮時にも τ_{xz} の増加と J_z の増加が認められた. 密度フ

ロント通過後の 16 時以降にも τ_{xz} の高い状態が続いている。(1)式によって算出された有効密度と、粒径より求められた各時刻のフロック密度関数(図 3), および $a = 100, 200\mu\text{m}$ を代入したときの有効密度を表 1 に示す。

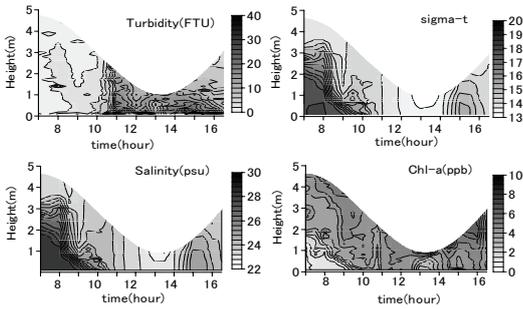


図 1 濁度, 比重 σ_t , 塩分, クロロフィル蛍光の鉛直分布, 浜川タワー, 2006 年 9 月 5 日

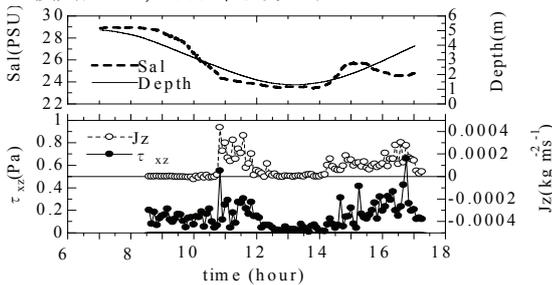


図 2 浜川タワーにおける水深・塩分(下)と底面せん断応力と SS 鉛直フラックス, 浜川タワー, 2006 年 9 月 5 日

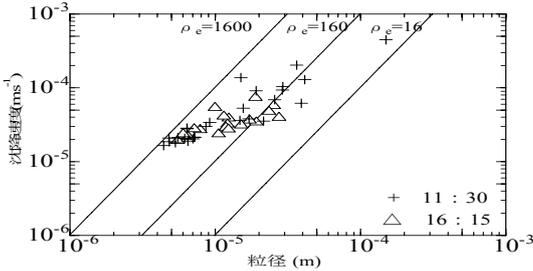


図 3 11:30 と 16:15 のフロック密度関数

表 1 各時間におけるフロックの粒径, 有効密度から算出したフロック密度関数 $\rho_c (= \alpha \cdot a^{-\beta})$; a : 粒径(m), $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ の有効密度の例, 密度区分

	α ($\times 10^{-4}$)	β	$\rho_c(1 \times 10^{-4}\text{m})$ (kg/m^3)	$\rho_c(2 \times 10^{-4}\text{m})$ (kg/m^3)	密度 区分
10:00	3.87	1.227	31.4	13.4	I
11:30	1.20	1.344	28.6	11.3	II
12:00	2.91	1.254	30.1	12.6	I
14:30	0.61	1.395	23.1	8.8	II
16:15	0.20	1.475	15.9	5.7	III

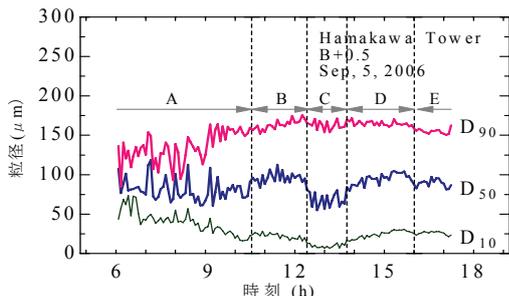


図 4 Lisst-100 による D_{10}, D_{50}, D_{90} の時系列変化

また, b について $b < 1.3$ を I, $1.3 < b < 1.4$ を II, $1.4 <$

b を III と分類した. なお, 有効密度は $I > II > III$ となる. 図 4 は現地にて観測された体積濃度分布における 10%, 50%, 90% 粒径の時系列変化である. この図の明らかに粒径の変化している時刻で, A から E に区分した. この区分と Lisst-100 の体積濃度分布データを照らし合わせると, A については密度が大きく粗大なフロックが多く, B, D, E は粗大なフロックとマイクロフロック, C は密度が大きく粘土粒子とマイクロフロックを多く含んでいることが分かる. ただし, $3.9\mu\text{m} < d$ ($8 < \phi$) を粘土粒子, $33.9\mu\text{m} < d < 31.25\mu\text{m}$ ($5 < \phi < 8$) をマイクロフロック, $31.25\mu\text{m} < d$ ($\phi < 5$) を粗大なフロック ($\phi = -\log_2 d$, d : 粒径(mm)) とする. B, D, E においては, 密度フロントの通過により粗大なフロックとマイクロフロックが巻き上がったと考えられる. C は, 底面せん断力が減少した時に再懸濁が弱まり, 沈降速度が速く, 粒径の大きいフロックが先に沈降したため, 粘土粒子とマイクロフロックの割合が増加したと考えられる.

底面せん断力が大きく, 濁度が高い 11:00 付近, 15:00 付近に沈降フラックスの極大がみられる. (図 5)

沈降速度については密度が高く粗大なフロックが観察された 10:30 において最大値を示した. しかし, 全体的に見ると, 時間帯 E を除いては沈降速度には大きな変化が見られなかった. SS 濃度の変動幅は沈降速度より大きいことから, 沈降フラックスの変化は SS 濃度変化の影響が大きい.

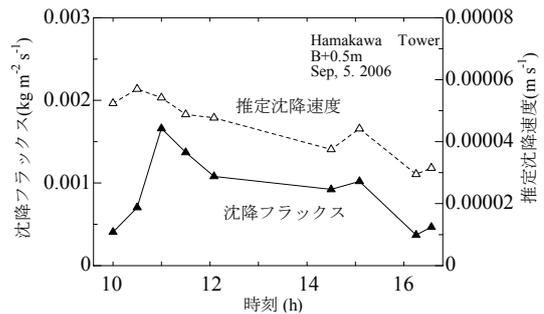


図 5 沈降フラックスと推定沈降速度の時系列変化

4. まとめ

懸濁物質の沈降速度の実態を明らかにすることを目的とし, 有明海湾奥部浅海域において一潮汐間の観測を行った. 観測結果より, 密度フロントの通過時には, 底面せん断力が大きくなったため, 小さいフロックとともに, 粒径の比較的大きいフロックも巻き上がるが, 干潮の憩流時には, 小さなフロック, および粘土粒子の割合が多かった. 沈降速度は劇的な変化は見られないものの, 潮時や密度フロントの存在によるフロックの性質の違いによって変化していることが明らかになった.

謝辞: (株)イーエムエスには Lisst-100, 首都大学東京 横山勝英准教授には超音波流速計を貸与していただいた. 佐賀県水産振興センター, 鹿島市漁業協同組合には浜川タワーでの観測を許可していただいた. ここに記して感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 中田・野中(2003)月刊海洋, 35:256-260.
- 2) W.van Leussen (1988) Aggregation of Particles, Settling Velocity of Mud Floccs A Review, Physical Processes in Estuaries, Springer-Verlag, pp.368