

長期的広域的な土砂動態予測法について

いであ株式会社 ○永谷直昌
いであ株式会社 加藤陽平

論文要旨

ダムのある流域では、ダム上流の堆砂とダム下流の河床低下が問題となりやすく、このような問題の要因分析や対策検討には、数値解析が重要なツールとなっている。本論文では長期的広域的な土砂動態を分析するため、降雨流出解析と河床変動解析ができる土砂動態解析モデルを構築及び、モデル構築に必要なモニタリングを実施し、ダム上流の堆砂とダム下流の河床低下の現状把握・将来予測を実施した。

キーワード：ダム上流の堆砂，長期的広域的な土砂動態，モニタリング，土砂動態解析モデル

まえがき

図-1 は本業務で対象とした B ダム流域のイメージ図である。B ダムは昭和 30 年代に建設され、堆砂の進行が懸念されている。また、上流に C ダムの建設計画があり、B ダムの堆砂スピードへの効果・影響を検証する必要がある。さらに、C ダムの下流では、河床低下が予想され、その影響の定量分析が必要である。本論文では、上記の課題に対する数値シミュレーションによる B ダムの堆砂や、C ダム下流への影響把握手法について述べる。また、シミュレーションの精度向上のために実施したモニタリングについても併せて述べる。

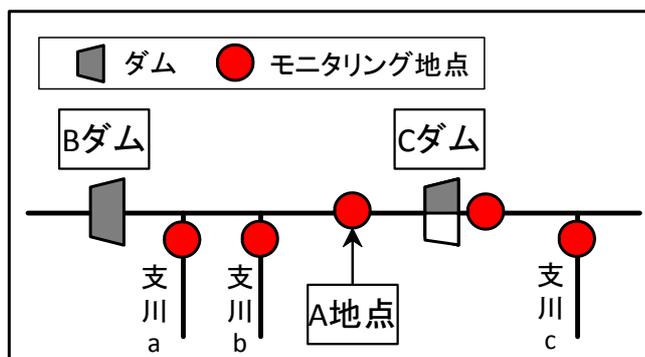


図-1 対象流域のイメージ図

1. 土砂動態モニタリング

(1) 調査目的

現状把握・将来予測ができる土砂動態把握モデルの精度のため、土砂動態モニタリングを実施した。

(2) 調査項目

調査項目としては、各地点における流砂量観測（浮遊砂観測）を実施した。

(3) 調査方法

各地点において濁度計を用いて、濁度の連続観測実施した。また、捕砂器により浮遊砂を捕捉し、捕捉した土砂の粒度分析を実施した。捕砂器の設置イメージを図-2 に示す。また、捕砂器を用いて出水中の浮遊砂を捕捉し、土砂の粒度分布解析を実施した。

(4) 調査結果

濁度計では濁度が計測でき、計測した濁度から浮遊砂量（ Q_s ）を算出できる。濁度から浮遊砂量（ Q_s ）の算出フロー図を示す（図-3）。濁度計によって観測される濁度と、実際の浮遊砂濃度（ss）との関係は、観測に用いた機種や浮遊砂の質によって異なっており、変換するための公式はない。そのため、室内実験により、濁度と浮遊砂濃度の関係式（検量線）を作成する。代表地点の A 地点の検量線を図-4 に

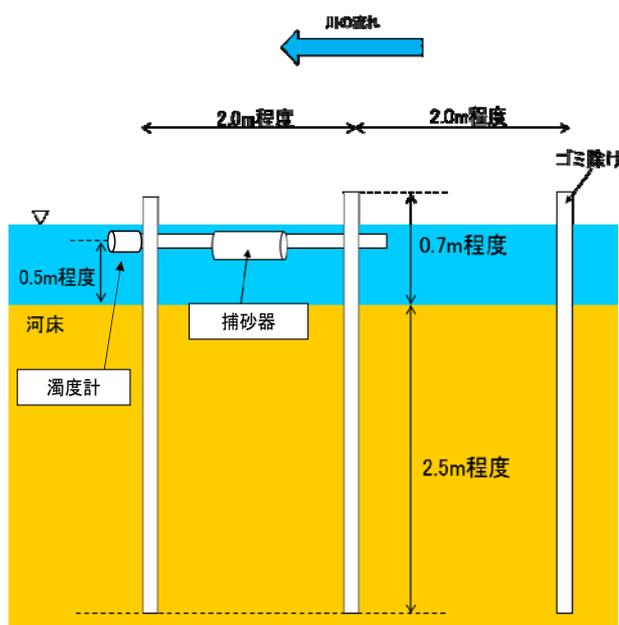


図-2 捕砂器と濁度計の設置イメージ

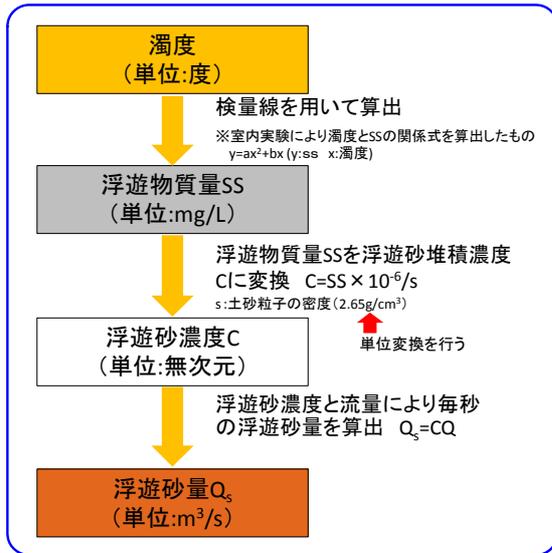


図-3 浮遊物質質量の算出フロー

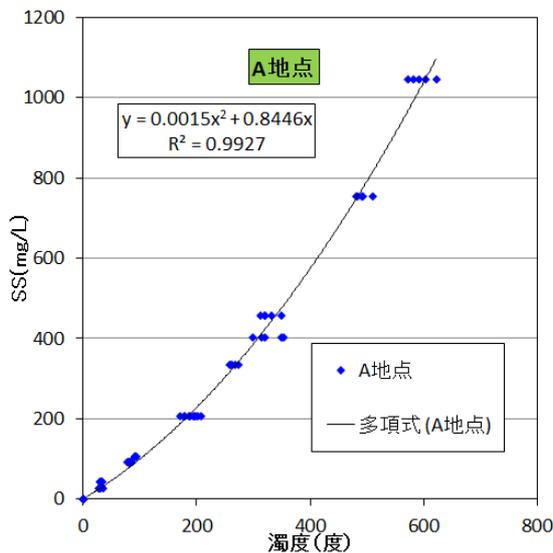


図-4 濁度と浮遊砂濃度の検量線

示す。図-4 に示すとおり濁度と浮遊砂の検量線は近似二次曲線を描く。この近似曲線を用いて、濁度を浮遊物質質量 (SS) に変換した。次に、浮遊砂物質質量 (SS) から浮遊砂濃度 (C) への変換は以下のような式を用いた。

$$C = SS \cdot 10^{-6} / \sigma \quad (1)$$

σ : 土砂粒子の密度 (2.65m³/s)

次に、浮遊砂濃度を浮遊砂量への変換は以下のような式を用いた。

$$Q_s = CQ \quad (2)$$

C地点の濁度、浮遊物質質量、流量、浮遊砂量を図-5に示す。濁度、浮遊物質質量、流量、浮遊砂量は相関関係があることが確認できる。次に、流量と浮遊砂量の関係を図にプロットした(図-6)。一般的に流量と浮遊砂量の関係について、

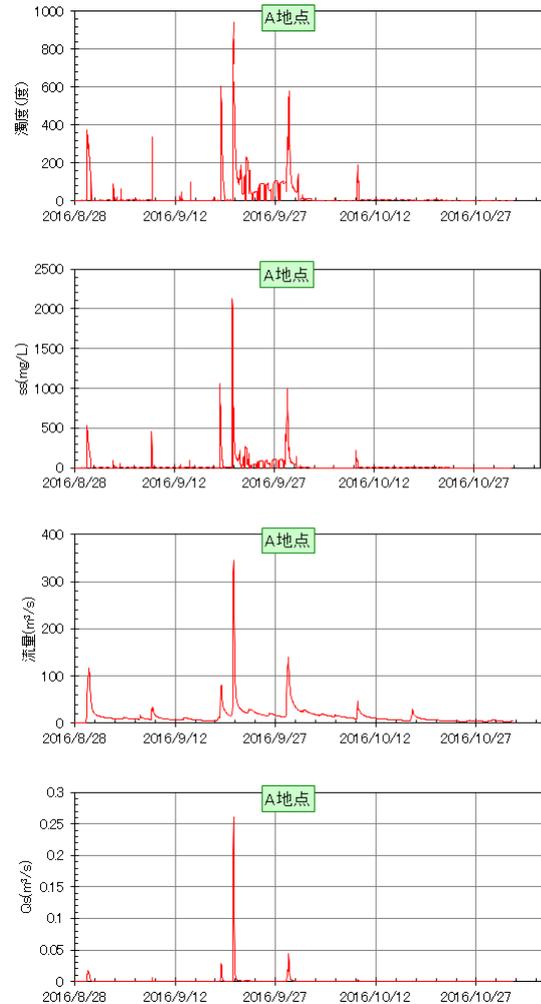


図-5 濁度、浮遊物質質量、流量、浮遊砂量ハイドログラフ

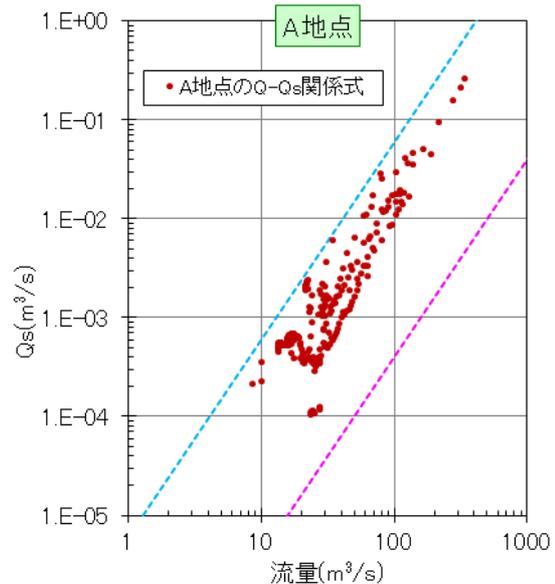


図-6 A地点のQ-Qs関係式

Q-Qs 関係図として整理されており、水理公式集等¹⁾に全国の事例がまとめられている。その中で、上限値・下限値が目安とされている。今回プロットしたA地点のQ-Qs

関係式は目安とされている上限値・下限値に収まるため、この Q-Qs 関係式を一つの指標として、モデルの構築した。次に捕砂器を用いて、A 地点で捕捉した土砂の粒度分布解析結果を図-7 に示す。A 地点の粒度分布解析結果は砂成分が多い結果となっておりこの河川では砂まで粒径の土砂が浮遊することが確認できる。

2. 土砂動態解析モデルの構築

(1) 土砂動態解析モデルの概要

山地から検討区間の下流端までの土砂移動・河床変動減少一連で解析するモデルを土砂動態モデル²⁾と呼んでいる。土砂動態モデルは分布型降雨流出解析部分と土砂流出・河床変動部分に分かれており、2つを接続することで、山地から下流端までの流量・土砂流出量を分析できる。

(2) 支配方程式

1) 斜面の連続式・運動方程式

単位斜面は表層・A層・B層・C層があるものとし、基底流を表現することとした。支配方程式は以下のとおりである。

$$a \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = (r - f_A) \cos \theta \quad (3)$$

$$\lambda_e \frac{\partial h_B}{\partial t} + \frac{\partial q_b}{\partial x} = (f_A - f_B) \cos \theta \quad (4)$$

$$\lambda_e \frac{\partial h_C}{\partial t} + \frac{\partial q_c}{\partial x} = (f_B - f_C) \cos \theta \quad (5)$$

$$q_s = k_A D_A \sin \theta + \frac{1}{N} \sqrt{\sin \theta} (h_s - D_A)^{5/3} \quad (h_s \geq D_A) \quad (6)$$

$$q_s = k_A h_s \sin \theta \quad (h_s < D_A) \quad (7)$$

$$q_B = k_B h_B \sin \theta \quad (8)$$

$$q_C = k_C h_C \sin \theta \quad (9)$$

ここに、 h : 水深、 q : 単位幅流量、 R : 雨量強度、 f : 浸透能、 λ : 空隙率、 D : 層厚、 N : 等価粗度、 K : 透水係数、 θ : 斜面勾配である。添字 $S \cdot A \cdot B \cdot C$ はそれぞれ表層・A層・B層・C層のパラメータであることを示す。

2) 河道の連続式・運動方程式

図-8 は単位河道の内部構造模式図である、連続式・運動方程式に用いる変数を記載している。

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial t} + (Q_{in} - Q_{ij}) = q_L + q_R \quad (10)$$

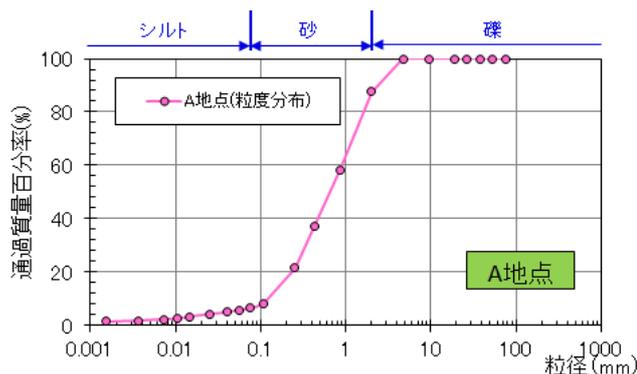


図-7 A 地点の粒度分布(浮遊砂)

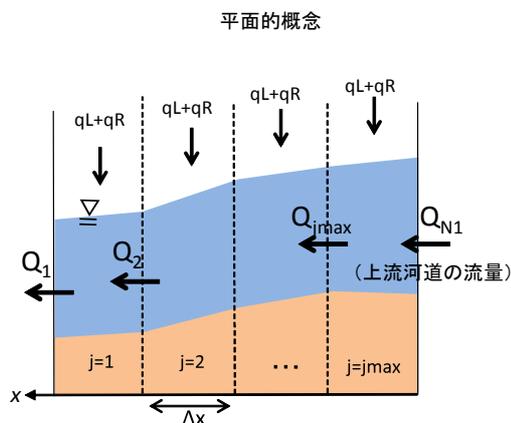
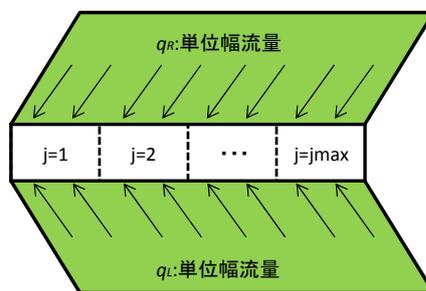


図-8 単位河道の内部構造模式図

$$A_{ij} = B_{ij} h \quad (11)$$

$$Q_{in} = Q_{ij+1} \quad (j < j_{max}) \quad (12)$$

$$Q_{in} = \sum_{k=1}^K Q_{k1} \quad (j = j_{max}) \quad (13)$$

ここに A : 河積、 Q : 河道流量、 B : 河幅、 h : 河道水深、 q_L 、 q_R : 左右岸斜面から流出する単位幅流量 ($= q_s + q_A + q_B + q_C$)、 n : 粗度係数、 I_b : 河床勾配、 K : 流入する単位河道の数である。添字 i は単位河道番号、

j は単位河道内のブロック番号である。

3) 流砂・河床変動の方程式

河床・浮遊砂の連続式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial z_{bij}(1-\lambda)}{\partial t} = \frac{1}{B} \sum_{m=1}^M (Q_{bIN} - Q_{bijm}) \frac{1}{\Delta x} + \sum_{m=1}^M (D_{ijm} - E_{ijm}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial (C_{ijm} A_{ij})}{\partial t} = (Q_{sIN} - C_{ijm} Q_{ij}) \frac{1}{\Delta x} + B_{ij} (E_{ijm} - D_{ijm}) \quad (15)$$

$$D_{ijm} = C_{bijm} w_{fm} \quad (16)$$

ここに、 λ : 空隙率, Q_b : 全幅掃流砂量, D : 浮遊砂沈降量, E : 浮遊砂浮上量, C : 断面平均浮遊砂濃度, C_b : 基準面浮遊砂濃度, w_f : 沈降速度である。添字 m は粒径を表す番号である。 Q_{bIN} および Q_{sIN} はそれぞれ上流ブロックからの掃流砂および浮遊砂の流入量の合計であり、以下のように扱われる。

$$\begin{pmatrix} Q_{bIN} \\ Q_{sIN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{bij+1m} \\ C_{ij+1m} Q_{ij+1} \end{pmatrix} \quad (j < j_{\max}) \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} Q_{bIN} \\ Q_{sIN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^K Q_{bk1m} \\ \sum_{k=1}^K C_{k1m} Q_{k1} \end{pmatrix} \quad (j = j_{\max}) \quad (18)$$

表-1 計算条件

項目		設定条件
計算期間		昭和57年～平成28年の36年間
計算領域		Bダム流域
河道	流れの計算式	常流区間: 下流からの不等流計算 射流区間: 等流計算
	流砂量式	掃流砂: 芦田・道上式 浮遊砂: 板倉・岸式
	粒度分布式	芦田・江頭・劉の式
	流量配分	溪流・河道ごとに降雨流出解析結果を与える
	河床横断地形	山地部: 基盤地図情報(10mDEM)を用いて作成 河道部: 横断測量結果を用いて作成 Bダム: 横断測量結果を用いて作成
	初期河床材料	既往の河床材料調査結果
初期水位	Bダム	Bダム貯水位を与える
上流端供給土砂量	掃流砂	平衡給砂条件に年別の倍率を設定する
	浮遊砂	なし(上流端で掃流砂として発生した土砂が河道内で自動的に浮遊する)
	ウオッシュロード	過去の観測結果をもとに、流量Qと流域面積Aの関係式で設定 $Q_w = \alpha Q^2, \alpha = 2.19 \times 10^{-4} A^{-0.75}$

(3) モデルの精度検証

モデル精度を確保するため、再現計算を実施した。計算区間は下流にあるBダムから山地までとした。計算条件を表-1に示す。再現期間は昭和57年から平成28年の36年



図-9 Bダムの実績堆砂量

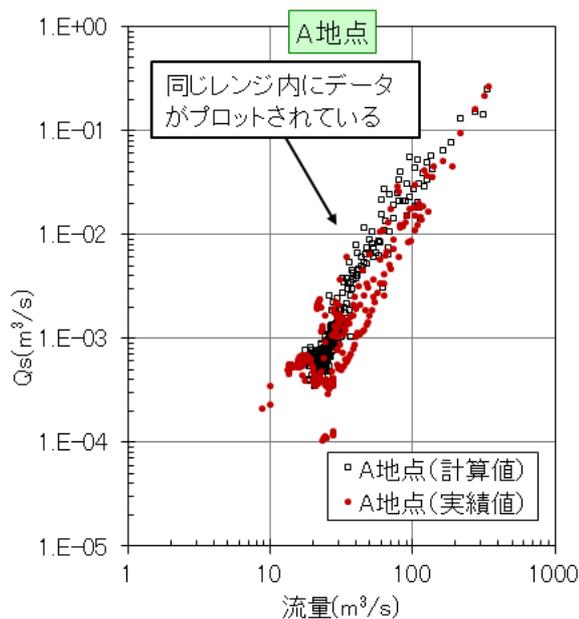


図-10 Q-Qs関係式によるモデルの精度検証

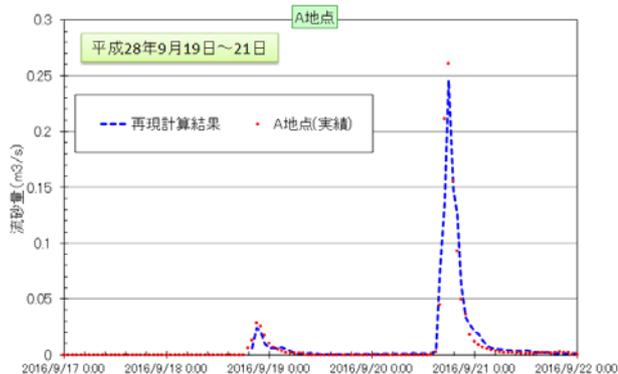


図-11 流砂量ハイドロによるモデルの精度検証

間とした。

図-9はBダムの堆砂量の再現である。概ねBダムの堆砂土砂量を再現できている。

次に図-10, 図-11はそれぞれC地点のQ-Q_s関係式, 流砂量のハイドログラフの再現となっており, Q-Q_s関係式は概ね同じレンジ内にデータがプロットされている。流砂量のハイドログラフについても再現が出来ている。流砂の計算について精度があることを検証ができた。構築したモデルを用いて将来予測を実施した。

3. 土砂動態解析モデルによる将来予測

将来予測においては現状の場合(case1)とBダムと上流域の間にCダム設置に加え各領域の対策を実施した場合を仮定(case2)し計算を実施した。基本的な計算条件はモデルの精度検証計算に準じている。将来予測の計算期間は100年間(平成6年~平成25年の20年×5回)とした。計算期間の平成6年~平成25年まで理由としては,平成5年より以前はBダム上流域で砂防施設の設置数が少ないため,土砂量が多いと考えられるため計算期間から外すこととした。また,平成24年,平成25年を含んだ理由としては,流域内で土砂生産(土砂災害)が発生しており,これらを繰り返し発生させる厳しい計画シナリオを設定することとした。また,初期河床高,初期河床材料等については最新データを用いた。Bダム堆積予測を実施した(図-13)。case2の堆砂量はcase1より堆砂のペースが下がることが確認できた。また,100年後ではBダムに堆積土砂量が1,300千m³減少した。次に,100年後のCダム下流の河床変動高を比較した(図-14)。case1で堆積傾向部分がcase2では洗掘傾向となる。洗掘傾向になるものの,河床は安定状態である。ダム上流の堆砂とダム下流の河床低下の現状把握・将来予測ができた。

4. 参考文献

- 1)水理公式集【平成11年版】:土木学会 pp.170~171
- 2)加藤陽平:透過型砂防堰堤を有する流域の土砂流出予測に関する研究,鳥取大学学位論文

あとがき

土砂動態解析モデルを用いて,長期的広域的な土砂動態

の予測ができた。長期的広域的な土砂動態を用いて,ダム上流の堆積量やダム下流の河床低下が確認できた。

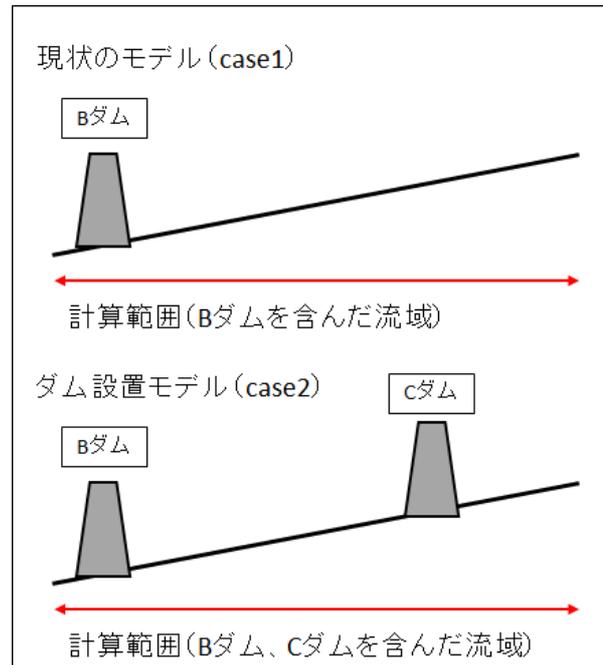


図-12 計算範囲の概略図

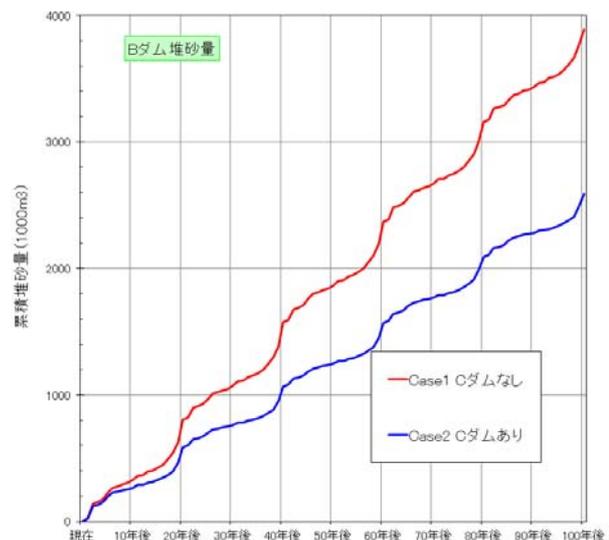


図-13 Bダムの堆砂量(将来予測)

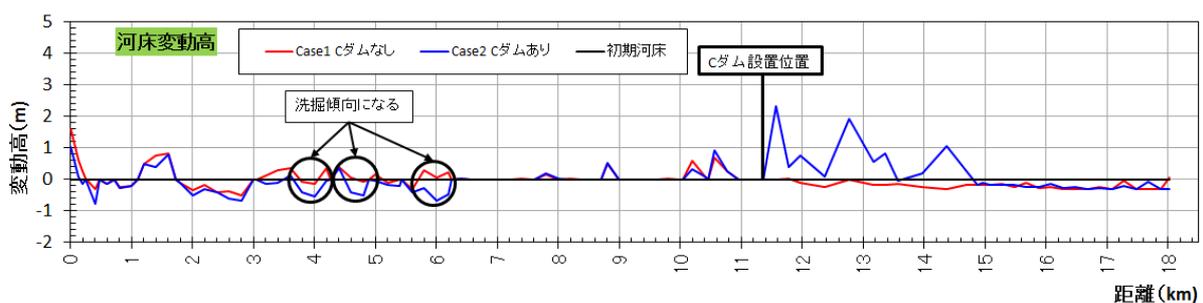


図-14 Cダムありなし河床変動高の比較(Cダム直下流)