

地球温暖化の影響を考慮した 貯水池堆砂の進行予測に関する研究

STUDY ON PREDICTION OF RESERVOIR SEDIMENT PROGRESS AFFECTED BY CLIMATE CHANGE

河田暢亮¹・山元未来²・鹿野久米豊³・吉野秀樹³・藤田正治⁴

Nobuaki KAWATA, Miki YAMAMOTO, Kumetoyo SHIKANO, Hideki YOSHINO,
and Masaharu FUJITA

¹正会員 工修 前 電源開発(株)技術開発センター茅ヶ崎研究所 (〒253-0041神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²正会員 前 電源開発(株)技術開発センター茅ヶ崎研究所 (〒253-0041神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

³正会員 (株)開発設計コンサルタント土木事業本部 (〒101-0021東京都千代田区外神田2-16-2)

⁴正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235京都府京都市伏見区横大路)

This study related to prediction of reservoir sediment progress has been started for the purpose of efficient operation and maintenance as well as effective future investment of the dams and reservoirs. Reservoir sediment progress will be affected by climate change, and its detail should be clarified in order to realize the above.

This paper shows the case study of JPOWER's M dam regarding the above prediction of reservoir sediment progress using Egashira Model. Egashira Model is relatively applicable in this case and it is concluded that the M dam's reservoir sediment progress will be accelerated by 15% due to the increased rainfall. However, further analysis and modification would be necessary in order to apply Egashira Model to various conditions of the dams' basin.

Key Words : Prediction of reservoir sediment, Dams' operation and maintenance, Site survey
Climate change

1. はじめに

1950年に施行された国土総合開発法の下、全国各地で河川総合開発事業が推し進められ、大規模多目的ダムが續々と建設された。さらに、戦後の慢性的な電力不足を解消するため、黒部ダムや佐久間ダムをはじめとする大型の発電専用ダムの建設も相次いだ。現在、これらダムの多くは、運用開始から数十年が経過しており、複数のダムにおいて、堆砂問題が顕在化し始めている。

堆砂は、ダムの治水や利水機能を損なうだけでなく、堤体安定性にも悪影響を及ぼすことがある。また、ダムによる下流域への土砂供給の遮断は、下流域の河川環境や生態系を変化させ、海辺で海岸線が後退する原因の1つにもなっている。そして、近年、世界的に注目されている地球温暖化の影響により、堆砂の進み方が今まで以上に加速する可能性のあることが、2007年度末、温暖化影響総合予測プロジェクト前期報告書の中で示された¹⁾。

地球温暖化が進んで、激しい降雨の日数が増加すると、ダム流域で斜面崩壊が活発化し、堆砂の原因となる土砂の生成量が増えることが懸念される。しかし、その一方、温暖化による気温の上昇で、地盤の凍結融解現象が和らぎ、風化による土砂の生成量が抑えられることも期待できる。

現象が複雑な堆砂問題は、温暖化によって、今まで以上にその将来を予測することが難しくなり、統計的手法を駆使した従来の方法では、予測結果について高い信頼性を得ることが容易ではない。また現在、温室効果ガス削減のような緩和策だけでなく、適応策の具体化も急がれる状況にあり、堆砂について言えば、信頼性の高い貯水池堆砂の進行予測技術を確立することや、効果的な堆砂対策を実現することが喫緊の課題となっている。

堆砂問題の深刻化が予見される今後の時代、対策すべきダムの優先度や堆砂処理の開始時期、年間処理量、堆砂対策などに関して適切な意思決定を促す研究成果がダム貯水池の保守現場から期待されている。

総貯水容量約3,000万 m^3 の貯水池を形成するMダムは、2010年で供用開始から約40年が経過する。ダム流域の近傍を中央構造線から分岐した断層が横切っており、流域内には崩壊した斜面が散見され、40年間で計約900万 m^3 の土砂がMダム貯水池内に堆積している。

Mダムの流域を図-2に示す。流域面積（ただし、直接流域）は約60 km^2 であり、標高1,600～2,000mの峰々が流域の周囲を囲んでいる。流域内東側を東俣沢と西俣沢が流れ、これらはMダムの約10km上流で合流し、戸中川となってMダム貯水池に注ぎ込む。これらの河床と周囲の峰々との標高差、すなわち起伏量は1,000m以上に達し、河川兩岸の斜面は総じて30°以上の急勾配を呈している。流域を地質的に見ると、中央構造線から分岐した赤石構造線と光明断層が近傍を走る荒れた地域であり、中生代白亜紀の四万十帯に属する砂岩・頁岩互層が同流域の大部分を占めている。地層は45°以上に傾斜しているところが多く、流域は地層の上下逆転現象が見られるほどに、激しい褶曲作用を受けているのが特徴である。

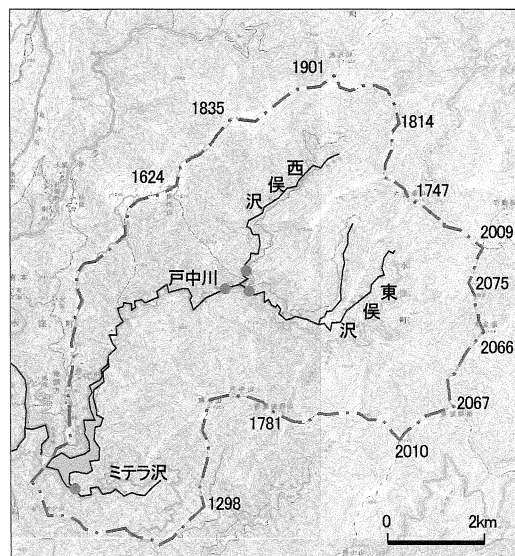


図-2 Mダム流域

(2) 堆砂進行予測のフローと現地調査の結果

Mダムの堆砂進行予測を図-3のフローに従って行った。全体を3段階に分け、最初に、現地調査でMダム流域の特徴を整理・分析しながら、数値解析の入力値を得るための試験を実施した。次に、雨量と堆砂量の実測結果を用いながら、数値解析によって、過去の堆砂量経年変化の再現を試みた。そして最後に、気象庁の降雨予測結果を解析モデルに入力し、将来の堆砂進行予測の計算を行った。まず、現地調査の結果を以下に述べる。

Mダム流域内に分布する砂岩・頁岩の多くは、頁岩内部や、頁岩と砂岩の境界部に、褶曲運動に伴う多数のすべり面を持っており、これらに沿って割れ目が形成されている。それらは非常に剥がれやすく、45°以上に傾斜していることとあいまって、崩壊した斜面が流域内のあちこちに見られる（写真-1）。頁岩は、粘土・シルトを起源とする堆積岩であり、崩壊したその岩塊はmmオーダーに細粒化しやすいため、流れに乗って容易に河道を流下する。

Mダム流域は、全体がこのような地形・地質であり、降雨による斜面崩壊と凍結融解による斜面浸食が繰り返され、河道への土砂供給が絶え間なく続く状況が現地調査から推察できた。

流域内の主な河道を眺めると、ミテラ沢、及び、東俣沢と西俣沢が合流した戸中川がMダム貯水池に注ぎ込んでいる。東俣沢は、上流から合流点の2～3km手前までは1/10前後の急勾配を成すものの、合流点付近で1/30程度の緩やかな勾配に落ち着く。また西俣沢は、上流から合流点の約1km手前までは1/10前後の急勾配を呈しているが、合流点付近で1/20程度の勾配にまで緩やかになる。

そして、合流点から下流の戸中川は、Mダム貯水池の背水端まで1/50程度の緩やかな勾配が続く。



写真-1 流域内の斜面崩壊

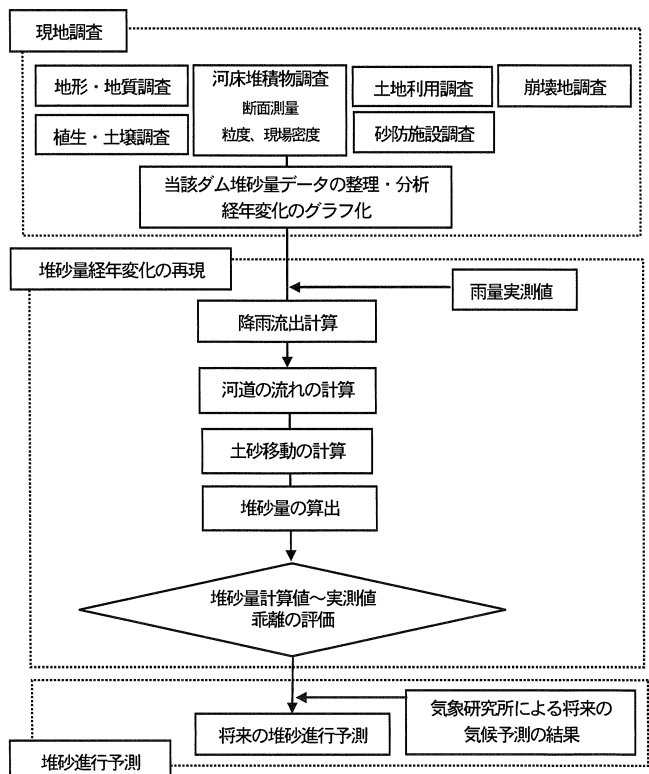


図-3 堆砂進行予測のフロー

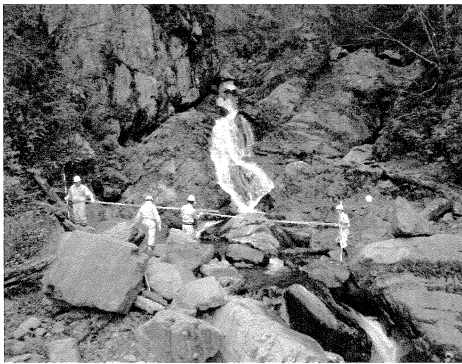


写真-2 東俣沢につながる溪流の1つ



写真-3 東俣沢と西俣沢の合流点下流

現地調査では、河床に堆積している不安定土砂について簡易測量を行い、下記の点を確認した。

- ・ 東俣沢、西俣沢、戸中川につながる小さな沢は、多くが1/10を超える急勾配を呈しており、河床にはほとんど土砂が残っていない(写真-2参照)。
- ・ 崩壊斜面等から供給された土砂の大部分は、勾配が緩やかになる東俣沢・西俣沢の合流点やや上流から戸中川にかけて堆積している(写真-3参照)。
- ・ Mダム貯水池の年平均堆砂量が20万 m^3 であることに對し、砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説⁴⁾を参考に流域内不安定土砂量を概算した結果、堆積量は300万 m^3 を超えていた(表-1参照)。

また、ミテラ沢、東俣沢、西俣沢、戸中川の各々を代表する物性値を得るため、図-2に示した位置で河床堆積物の粒度試験と現場密度試験を行った。それぞれの結果を図-4と表-2に示す。これらは、以降に示す堆砂量の経年変化の再現と将来予測の計算において、河床堆積物の粒度分布、及び間隙率 λ の入力値に用いている。

(3) Mダムの堆砂量経年変化の再現と将来予測の結果

ここでは、河床勾配が 10° 程度の区間よりも下流側を対象に、江頭(Egashira 1998)^{5) 6)}、及び江頭・松木(2000)⁷⁾の方法にならって、単位河道と単位斜面の組合せに細かく分割した(図-5)。今回用いた江頭モデルは、流砂量と流砂の粒度分布が流量の連続関数として評価されるものを対象としている。現地調査により、Mダム流域では、土砂の生成活動が非常に活発で、緩勾配区間の河床に不安定土砂が豊富に堆積していることが判明し、堆砂量とダム流入量の相関係数(約0.5)も図-1のダムの中では比較的高かったことから、江頭モデルの適用性に期待がもてた。

分割された単位斜面にMダム流域の雨量実測値を与え、貯留関数法により、河道に入る水量を次式で算出した。

$$S = KQ^P$$

$$R - Q = \frac{dS}{dt}$$

表-1 Mダム流域不安定土砂の簡易測量結果

主要河道	東俣沢	西俣沢	戸中川	ミテラ沢
堆積量(万 m^3)	100	100	100	40

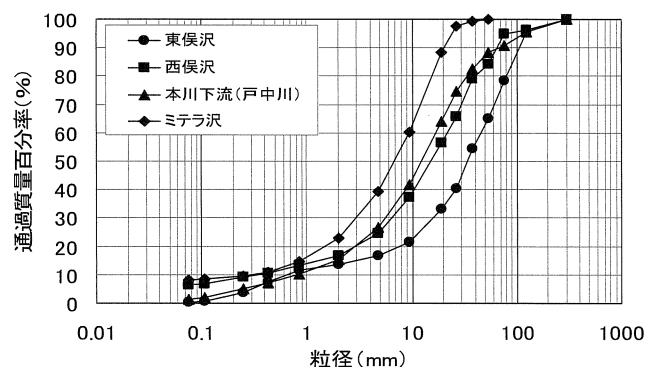


図-4 Mダム流域 河床堆積物の粒度分布

表-2 河床堆積物の間隙率

採取場所	東俣沢	西俣沢	戸中川	ミテラ沢
間隙率(%)	20.5	20.9	24.6	31.7

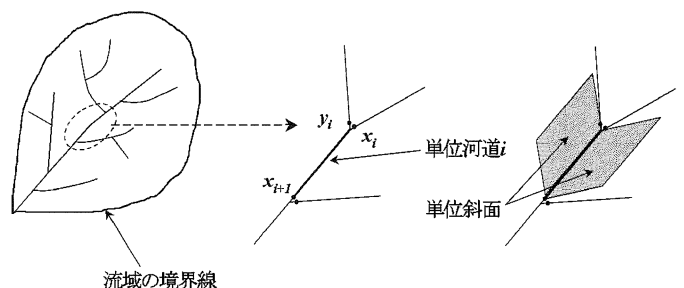


図-5 流域・河道のモデル化と単位河道および単位斜面

ここに、 S は単位貯留高(mm)、 Q は単位流出高(mm/h)、 R は有効雨量(mm/h)、 t は時間(hour)、 K と P は当該流域の特徴から決まる定数である。

また、河道の流れについては以下の式で計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{BL} \{Q(x_i) + Q(y_i) - Q(x_{i+1})\} + \frac{1}{B} q + r \cos \theta$$

$$Q(x_{i+1}) = \frac{1}{n} I^{1/2} B h^{5/3}$$

ただし、 h 、 L 、 B は単位河道 i の水深、河道長、河幅であり、 $Q(x_i)$ と $Q(y_i)$ は、上流側 x_i 、 y_i 地点からの流入

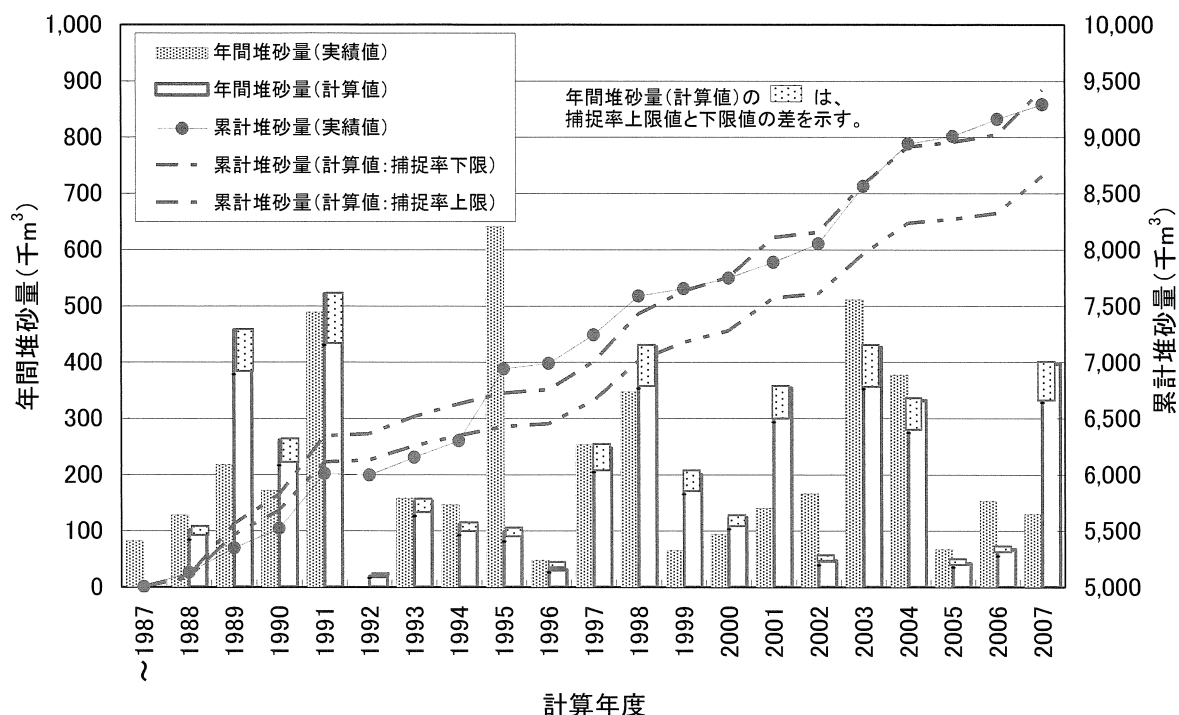


図-6 Mダム地点 堆砂量経年変化の実測値と計算値

量、 $Q(x_{i+1})$ は下流側 x_{i+1} 地点への流出量を示す。また、 q は単位河道 i に接続する山腹斜面からの単位長さ当たりの横流入量、 r は雨量、 θ は河床勾配、 n はマンニングの粗度係数である。

そして、流砂量については以下の式で計算した。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} \{Q_t(x_i) + Q_t(y_i) - Q_t(x_{i+1}) - Q_w\}$$

ここに、 z 、 L 、 B は単位河道 i における河床位、河道長、河幅である。また、 λ は河道堆積物の間隙率であり、表-2のとおりである。

また、 $Q_t(x_i)$ と $Q_t(y_i)$ は、それぞれ x_i 、 y_i 地点からのウォッシュロードを除く流入土砂量、そして、 $Q_t(x_{i+1})$ は x_{i+1} 地点からのウォッシュロードを除く流出土砂量であり、芦田・道上の式⁸⁾⁹⁾で掃流砂量と浮遊砂量を、また江頭の式でウォッシュロード量 Q_w を計算した。

流域の上流から下流に向かって、河道の流れと流砂量を上述の式で計算し、Mダム貯水池へ流入する土砂量の計算結果に、Bruneの曲線¹⁰⁾と貯水池回転率から得られる捕捉率を乗じて堆砂量を求め、それを整理したのが図-6である。

図-6では、堆砂量の各年の値と累計値について、計算結果と実測結果を比較して示しており、各年値の方は計算結果と実測結果の間で乖離が見られる年もあるが、累計値については良い一致が見られた。

再現計算では、ミテラ沢や東俣沢、西俣沢の源頭域に近い最上流区間においても、常に不安定土砂が豊富に堆積していると仮定し、それら区間にも図-4の粒度を与

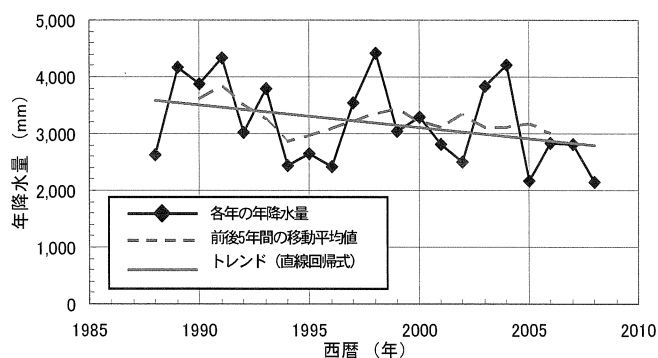


図-7 Mダム地点 年降水量の経年変化

えて計算したが、これは必ずしも正しいものではない。にもかかわらず、堆砂量の累計値で良い一致が見られたのは、東俣沢と西俣沢合流点付近から下流側に不安定土砂が豊富に堆積しているMダム流域の特徴によるものであり、これらの土砂が痩せ細ることなく、流れによって貯水池に流入するため、江頭モデルの適用性が良かったものと筆者らは推察している。

今後、Mダム地点とは異なる特徴の地点にも江頭モデルの適用を広げようとすると、土砂の生成と土砂が河道に入るまでのプロセスをモデルに付加することが必要であると筆者らは考えており、今後の研究課題として取り組んでいくつもりである。

さて、最後の堆砂量予測計算に入る前に、Mダム地点において、地球温暖化の影響が既に顕在化しているのか否かを確認する目的で、1988年から2008年までの年降水量の経年変化を整理してみたのが図-7である。

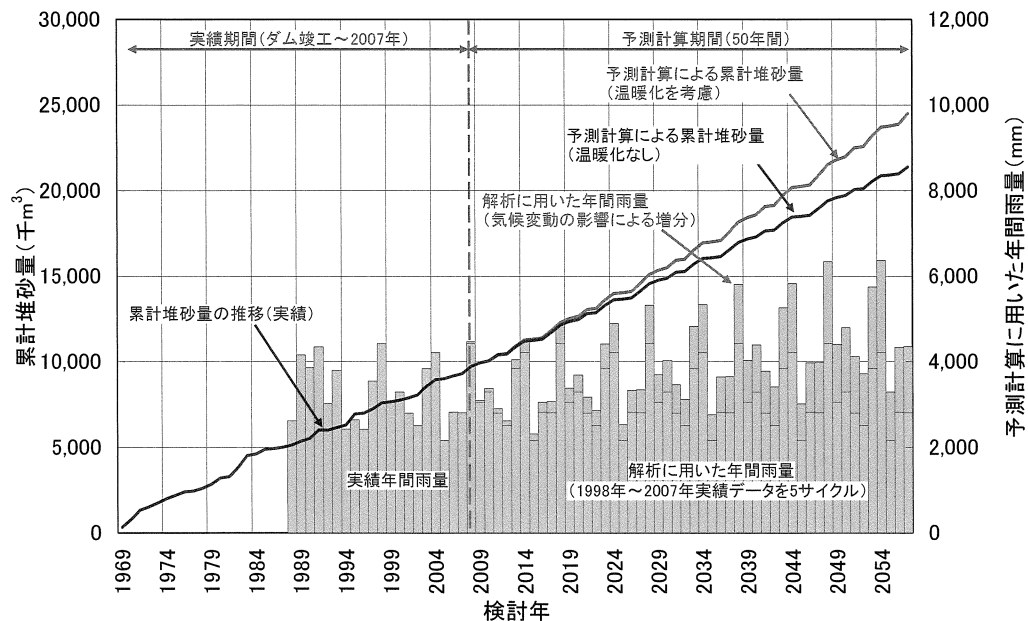


図-8 Mダム地点 地球温暖化が堆砂進行に及ぼす影響

図-7によれば、過去20年、降水量はやや減少傾向を示しており、降水量の増加が予想される温暖化の影響は、現時点ではMダム地点で顕在化していない。そして図-8が、現在から50年後までのMダム地点の堆砂進行を予測してみたものである。図-1の結果を用い、毎年一定の割合で増加しながら、50年後に年降水量が現在の1.55倍に達するものと仮定して、各年の降水量を求め、それを入力値として将来の堆砂量を計算した。降水量に合わせて流量も増え、結果、折れ線の累計堆砂量は、現時点までの増加割合から将来加速していく傾向が図-8から見てとれ、50年後には、累計値で、従来の増え方から読み取れる値より約15%上乘せされる結果となった。

4. まとめと今後の研究課題

電源開発株のMダム地点を事例とし、流域の地形や地質、河床堆積土砂の粒度や密度、堆積量などを調査・分析しながら、降雨の点から温暖化が堆砂の進行にどのような影響を及ぼすのか明らかにすることを試みた。

その結果、図-3のフロー図の細部をつくり込むことで、個々に異なる流域の特性と温暖化の影響を考慮できる堆砂進行予測モデルを構築できる見通しを得ることができた。そして、気象庁の50年後の降雨予測結果を用いた場合、Mダム地点では、15%程度、堆砂の進行が加速するとの結果を得た。

今回は降雨だけに着目したが、温暖化による気温の上昇が、凍結融解作用による土砂の生成活動を鈍らせ、堆砂の進行を抑える可能性があるなど、今後は降雨以外の影響を考えていきたい。

また、既述のとおり、河道外で土砂が生成され、それが河道に入るまでのプロセスが今回のモデルに反映されていないことも課題として認識しており、今後、これらの改善に向けて研究的取り組みを継続していきたい。

参考文献

- 1) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－，2008
- 2) 気象庁：異常気象レポート2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～（Ⅶ），2005
- 3) 気象庁：地球温暖化予測情報第6巻 IPCCのSRES A2シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測，2005
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国土技術政策総合研究所資料 No. 364，2007
- 5) Egashira, S.: Research Related to Prediction of Sediment Yield and Runoff, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project pp. 373-384, 1988
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 中川 一: 21世紀の河川学 安全で自然豊かな河川を目指して, 京都大学学術出版会, 2008
- 7) 江頭進治, 松木 敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp. 735-740, 2000
- 8) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 206, pp. 59-69, 1972
- 9) 芦田和男, 道上正規: 浮遊砂に関する研究（1）－河床付近の濃度, 京都大学防災研究所年報第13号B, 昭和45年3月
- 10) 江崎一博: 貯水池の堆砂に関する研究, 土木研究所報告, 第129号, pp. 55-83, 1967

(2010.4.8 受付)