多点濁度観測による筑後川水系の SS 流出・輸送 特性に関する研究

SEDIMENT YIELD AND SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE CHIKUGOGAWA RIVER BASIN

横山勝英¹·藤塚慎太郎²·中沢哲弘³·高島創太郎⁴

Katsuhide YOKOYAMA, Shintaro FUJIZUKA, Tetsuhiro NAKAZAWA and Soutaro TAKASHIMA

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
 ²学生会員 首都大学東京大学院 都市基盤環境工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
 ³非会員 修(工) 神奈川県庁 (〒231-8588 神奈川県横浜市中区日本大通1)
 ⁴非会員 いであ株式会社九州支店(〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜1-5-12)

Turbidity was measured continuously and suspended sediment samples were collected at the 17 gage stations in the Chikugogawa River basin, the suspended sediment budget and the characteristics of sediment rating curve were studied. The relationship between turbidity and suspended sediment concentration were analyzed for each stream, the nephelometric backscatter became much weaker with steep and small stream. The suspended sediment load was integrated for flood period of 2006, the sediment budget in the whole basin, the reservoir sedimentation by fine solids and the additional sediment supply to the flood water by river bed erosion in the estuarine channel were explained. The sediment rating curve for each stream were developed, it is shown that the coefficients of power function were affected by the watershed conditions such as topography, land use, rainfall and area.

Key Words: turbidity, suspended sediment concentration, sediment budget, sediment rating curve, erosion rate

1.はじめに

山地流域における土砂生産や河道における流砂の問題 は防災や環境の面から重要であるが,土砂のうちでも ウォッシュロードは生産源や生産過程が明確でないこと から力学的なモデルが確立されていない.ウォッシュ ロードの生産過程は実験による抽象化が難しいため,現 地観測に基づいた研究が主に行われており,ダム堆砂量 と植生,地質,起伏量などの流域土地条件の関係を相関 分析する方法か,SS 観測や濁度モニタリングから生産特 性を解析する方法がとられている.

ダム堆砂量を利用した研究は石外ら¹⁾の研究をはじめ として古くから取り組まれてきた手法であるが,堆砂の 粒度構成が不明であることから,上流河川における河床 材料の移動とウォッシュロードの生産・輸送が分離され ていない.特にウォッシュロードは貯水池の滞留時間に よって堆積するものと浮遊・通過するものがあるため, 堆砂量から生産量を単純には推定できない.

ウォッシュロードの直接観測による研究として,村上 ら²⁾は平水時の水質自動観測データを用いてウォッシュ ロード流出と流域特性との関係を調べているが,生産量 が激増する洪水時については沙流川のみの検討にとど まっている.南波ら³³は吾妻川上流の74の小流域を含む 4つの大流域を対象として617の採水データを分析し,森 林率が高い流域ではSS流出が抑制されるという結論を 導いている.しかし,このような多数の流域を比較した 研究は少なく,土地条件とウォッシュロード生産・輸送 の関係には依然として不明な点が多い.

そこで本研究では,山地流域におけるウォッシュロードの流出・輸送過程を解明するために,その基礎的段階として流域土地条件の異なる多数の地点でウォッシュロードの現地観測を行い,データの蓄積をはかると共にその特徴について考察した.

研究対象地は筑後川水系である.筑後川の感潮河道で はシルト・粘土の堆積による漁港の閉塞や底質環境の変 化が問題となっており,さらに有明海では干潟における 漁業生産性の低下,透明度の上昇による赤潮の増加など が問題になっているため,筑後川流域から有明海北東部 海域へのシルト・粘土の供給状況を解明することが求め られている.そのため,源流域でのウォッシュロード生



図 - 1 筑後川流域図

産状況だけではなく,河口域を含めた水系全体の輸送状況についても検討することとした.

なお本論文では用語の統一を図り, 粒径が概ね0.1 mm 以下の懸濁土砂を SS と称することとする.

2.研究方法

(1)研究対象地の概要

図 - 1 に筑後川の流域図を,表 - 1 に観測地点の名称 や流域面積,土地利用の一覧を示す.筑後川は流域面積 が2,860 km²,幹川流路延長が143 kmの河川である.流域 区分は筑紫平野が約800 km²であり,阿蘇外輪山を源流と する本川上流域が580 km²,久住連山(火山)を源流とす る玖珠川流域が540 km²,その他の低山地流域が940 km²で ある.流域に設置されたダムは11 基あるが,このうち土 砂動態に影響を及ぼすダムは本川上流の治水用ダムが2 基,北部の低山地流域の利水・治水ダムが2 基である.

また,河口から23 kmの区間が感潮域であり,広い範 囲で河床材料がシルト・粘土となっている.感潮河道で は洪水時に河床底泥が浸食されることが報告されている ため⁴⁾,筑後川の土砂輸送が有明海に及ぼす影響を考え る上では河川上流域だけではなく河口域での細粒土砂の 動態にも着目する必要がある.

(2)現地観測の方法

現地観測の内容はSS 流出の連続データを得るための 濁度モニタリング,濁度をSS に換算するための採水分 析,流量観測所がない地点での水文計測である.

濁度計はアレック電子製Compact-CLWを使用し,10分 間隔でモニタリングした.設置地点は図-1及び表-1 に示す17箇所であり,国土交通省が管理する河川中の量 水標(H鋼)に測器を取り付けた.このうち,玖珠川上 流には流量観測所が無いが,玖珠川の源流は活火山地帯 であり,かつ牧草地が多いため,土砂流出の研究を進め る上では重要な箇所である.そこで,直線的な河道区間 を選び,濁水がまんべんなく混合する箇所に濁度計を取

表 - 1 観測地点の名称と土地利用情報

番号	河川名	地点名	面積	主な土地利用の面積率(%)					
			(km ²)	森林	草地	田畑	市街地	崩壊地	
1	津江川	栃野	61.5	88.8	8.1	1.5	0.0	0.3	
2	川原川	川原	38.0	91.4	5.0	1.2	0.0	0.8	
3	川原川	上野田	36.5	90.7	4.0	2.6	0.0	0.2	
4	筑後川	杖立	281.0	66.4	21.2	8.7	0.3	0.1	
5	筑後川	松原ダム下流	524.2						
6	玖珠川	引治	120.2	55.9	29.9	10.1	0.0	0.5	
7	玖珠川	小ヶ瀬	540.5						
8	花月川	花月	126.9	74.4	9.2	11.5	1.4	0.2	
9	小石原川	江川ダム上流	18.8	86.3	3.6	7.0	0.0	0.0	
10	小石原川	江川ダム下流	18.8						
11	宝満川	端間	167.0	43.7	5.0	30.0	9.4	0.0	
12	巨瀬川	中央橋	50.0	53.8	2.4	32.3	3.9	0.2	
13	城原川	日出来橋	50.8	76.9	2.8	15.3	1.4	0.0	
14	筑後川	荒瀬	1443.0						
15	筑後川	瀬ノ下	2295.0						
16	筑後川	感潮河道14km							
17	筑後川	感潮河道10km							
注1)	主1)森林は針葉樹林,広葉樹林の合計				注2)草地は草地,伐採地の合計				
注3)	主3)田畑は水田,果樹園等の合計				注4)崩壊地は露岩,崩壊地の合計				

り付けた. 濁度計のメーカー検定はカオリン粘土により 5,000 ppm レンジで行われている.

洪水時には濁水を自動採水器(ISCO-6712)もしくはバ ケツ採水により取得した.一般に,自動採水機の採水口 (ストレーナー)は河岸に固定されるが,ストレーナー自 身がゴミや土砂をトラップして異常に濃い濁水を吸入し たり,逆に河岸境界層付近の低濃度水を吸入するといっ た問題がある.そこで,採水チューブの先端50 cm を針 金で補強して流心に突き出すように設置し,先端が振動 して代表性の高い濁水を取得できるように工夫した.設 置地点は本川上流の栃野と玖珠川上流の引治である.

バケツ採水では観測所近傍の橋梁から流心部の表面水 を採取した. 濁度データを補正することが目的なので, 時間間隔や地点間の同時性にはこだわらず,1 グループ が数箇所の観測所を巡回しながら濁水を採取した.

得られた濁水は実験室に持ち帰り,SSと粒度分布の分析を行った.粒度分布はレーザー回折式粒度分析装置 (島津製作所SALD-3100)により計測した.

玖珠川上流には測水所が存在しないので,流量を算出 するために横断測量と水位計測,浮子観測を実施した. 河道地形はRTK-GPS(TOPCON,GP1000)を用いて50m離 れた2断面を測量した.観測地点は河床が100~300mご とに階段状になっており,平水時は水面勾配が1/167であ るのに対して,洪水時は最大で1/60になっていたため,水 面勾配は水位の関数とした.水位モニタリングは自動採 水機に付属している水位計により行った.浮子観測は洪 水時に1回実施した.以上のデータを用いてマニング式 から流量を推定した.得られた流量と流域雨量から洪水 流出率を計算し,下流観測所(7番,小ヶ瀬)の洪水流出 率と同程度になることを確認した.

観測期間は2002年から2006年までの5年間であるが, 全期間で観測を行ったのは4地点,残りの地点は1~3年 である.さらに国土交通省が流域内で自動観測している 雨量,流量データを提供していただいた.



3. 観測結果

(1)降雨分布の特徴

SS は降雨時に発生するため,基本情報として流域全体の降雨分布状況を図-2に示す.流域に44箇所,流域界 近傍に3箇所設置された雨量観測所の5年平均値(1995年~1999年)を等値線表示している.流域によって降雨の 多寡があり,例えば河川1~3は年平均雨量が3,600mmを 超える多雨地帯であり,河川6は源流標高が筑後川で最 も高いが雨量は河川1~3よりも少ない.河川8や11は 雨量が1,800~2,000mmの土地が支配的であり,流域1~ 3の半分程度となっている.5年間の内訳としては,梅雨 期が約40%,台風期が約25%,それ以外が約35%であ り,梅雨期に降雨が集中するのが特徴である.

(2) 濁度とSS の相関

採水分析から得られたSS と濁度の関係を全てプロットすると図-3のようになった.両者の関係はかなりばらついており,例えば濁度が1,400~1,500 ppm でのSS濃度は最大で7,800 mg/1,最小で1,800 mg/1と4倍以上の開きがある.これは山地源流と100 km以上離れた河口付近ではSS 粒子の性質が異なることを示している.

そこで, 濁度 - SS の関係性が類似している地点をグ ループ化し, 図 - 3 に示す相関式を作成した.第一グルー プは主に久住・阿蘇外輪山を源流とする急峻流域, 第二 グループはその他の低山地流域や大きな支流域の出口 部, 第三グループはダム放流水や本川下流部であり, 概 ね地形的な特徴に応じてベキ乗指数が整理された.

指数の違いはSS 粒子に対する光学的な反応性の違い を表していると考えられ,同じSS 濃度であっても急峻流 域では反応が悪く,ダム放流水や本川下流部では反応が 敏感であると言える.横山⁵⁾は濁度計の粒径依存特性を 実験により調べ,単位水量中の土粒子質量が等しくても 粒子が細かいサンプルほど光の散乱強度(濁度)が高く なることを示している.すなわち図-3からは,急峻流 域のSS は粒径が大きく,ダム放流水や下流域では粒子が 細かいと推測される.この点について粒度分布データを 整理したが,同じSS 濃度レベルの粒度分布データは数が 少なく有意な差が認められなかった.そのため,今後は さらなるデータの蓄積を進めて粒径以外の要因も含めて 検討することが必要である.

(3) SS データの作成

図 - 3の相関式を各地点の濁度データに適用し,SS濃 度時系列を作成した.SS流出データの一例として,流域 面積がほぼ等しい河川6と8を図-4に示す.図示した 期間では降雨の強度や継続時間は同程度であり,河川8 に対して河川6の流量は0.5~1.5倍となっている.しか し,SS濃度は10~30倍となっており,明らかに河川6の 方がSSの生産・流出が著しいことが分かる.このように, 流域ごとにSS流出状況の異なるデータが得られた.

(4) SS 動態マップ

図 - 5 にデータが最も揃っている期間のSS 動態マップ を示す.表示期間は2006年6月20日~7月10日である. この間,洪水は3回発生しており,下流基準点における ピーク流量は1,784 m³/s 2,026 m³/s ,3,310 m³/s である.筑後 川の平均年最大流量は約2,700 m³/s であり,梅雨期に断続 的に洪水が発生することが多いため,図 - 5 は平均的な SS 流出状況を示していると考えられる.なお,2006年は 7月20日に3,353 m³/s の洪水が発生しているが,多くの地 点で濁度計を撤去していたため検討から除外した.

源流域から下流に向かって徐々にSS量が増えており, 河川5,7,8の合計は合流後の14よりも11.6%過小,河 川10,11,12,14の合計は合流後の15よりも3.8%過小 となっており,計測していない支川があることを考慮す るとSS収支はほぼ整合している.

最上流域に着目すると,河川1のSS量は河川4に対して80%であるが流域面積は22%であり,また河川6に対してはSS量が88%,流域面積が51%である.その他





の河川と比較しても河川1 は単位面積あたりの SS 生産量 が最も多い場所であることが分かった.

急峻流域である河川1,2,3,4,6におけるSS量の合 計は98×10⁶kgであり,下流基準点の15番では156×10⁶kgである.急峻流域の面積は下流基準点の23%に相当 するが,ここで63%のSSが生産されている.

上流2基のダムには河川1,2,3,4から71×10^{kg}の SSが流入するが放流量は39×10^{kg}であり,SS放流率は 55%であった.これらのダムは梅雨期の洪水調節容量が 有効貯水容量の98%と大きく(ほぼ空になっている),ま た洪水調節開始流量に達するまでは流入=放流の運用を しているため,洪水時の短期回転率が高い.そのためSS 放流率も比較的高くなっていると推測される.

急峻流域で生産される SS のうち,河川1,2,3,4の SS はダムで 45% が貯留されることから,筑後川下流への SS 供給源としては久住連山を源とする河川6 および計 測していない隣接河川が重要であると言える.

有明海への土砂供給という観点で着目すべきは河口域 である.下流基準点(15)でのSS量は156×10⁶kgである が,感潮河道の10km地点の通過量は602×10⁶kgと4倍 に増えている.筑後川の感潮河道では河床底泥が洪水に よって1~1.5m浸食され,その後,数ヶ月のうちに高濁 度水塊によりSSが逆流輸送されて,底泥堆積層が復元す ることが示されている⁴⁾.そこで,平均浸食深を1m,浸 食幅を150m,浸食区間を河口堰までの13km,含水比を 200%と単純に仮定すると,浸食底泥は820×10⁶kgとな り,濁度モニタリングから求まるSS増加量(446×10⁶kg) とオーダー的に一致する.

そのため,筑後川の感潮河道では洪水時に河床の底泥 が浸食されることで,河川水中にSSが供給されることが 分かった.計測していない10 kmよりも下流での浸食も 考慮すると,有明海へのSS流出量はさらに増大する可能 性があり,筑後川が有明海に及ぼす短期的影響としては 流域のSS生産だけではなく,感潮河道における底泥の浸 食も重要な現象であることが明らかになった.

4.上流域のSS流出特性

(1) 流量とSS 輸送量の相関

一般にウォッシュロードの流出式(Q-Qs式)は流量の 2~3 乗で表されるが,大河川と小河川を比較したとき にSS輸送量の大小が流量(流域面積)に依存しているの か斜面浸食特性に依存しているのか判別できない.そこ で,単位面積あたりの流量・SS輸送量に変換した.

$$Q_{\rm s} = \alpha Q^{\beta} \tag{1}$$

ここで,Qsは比SS輸送量(kg/s/km²),Qは比流量(m³/s/km²),,は係数である.は比流量が1.0(m³/s/km²)のときの比SS輸送量であり,単位流量に対する基本的なSS発生量を表す.は対数グラフ上での傾きを表すが,比流量は単位換算すれば降雨強度(mm/h)に相当し,比SS輸送量は浸食速度(mm/s)に相当するので,指数 は降雨時の浸食の進みやすさを表す.

図 - 6 に河川6 と 8 の Q-Qs 相関を,表 - 2 に全地点の 相関式を示す.SS 流出のループ特性が表れているが,こ こでは最適相関式の特性について考察する.河川6 の指 数 は3.5 と最も大きく,河川8 は1.86 であり最も小さい. 残りの河川はこの間に収まっている.したがって,河川 6 は筑後川流域の中で洪水時に最も急激に地表浸食が進 む場所であり,河川8 は浸食が進みにくい場所と言える. 一方で低水時の比SS 輸送量を見ると,例えば比流量が 0.05 m³/s/km² のとき,河川6 の比SS 輸送量(kg/s/km²)は2.7 × 10⁵ であるのに対して河川8 では7.2 × 10⁴ と 27 倍大き く,平常時には河川8 の方が濁っている.

河川6は急峻な山岳地帯を源とする渓流であることから,普段は清浄であるものの洪水時に地表面浸食が進みやすく,河川8は観測点付近が密集市街地であるために日常的に濁っているが,表面浸食は山岳地帯ほどには進まないと推測される.河川1,2,3,6,9の相関式は山地流域の特徴を有し,河川8,10,11,12は低平地流域の特徴を有し,河川4 は中間的な性質であった.



河川名 地点名 番号 0-Ost 津江川 栃野 Qs=1.00E-01 × Q 1 川原川 川原 2 Os=1.00E-02 × O 80 3 川原川 上野田 Os=6.00E-02 × O 4 筑後川 杖立 $O_{s=5.00E-01 \times C}$ 5 筑後川 松原ダム下流 6 **玖珠川** 引治 =9.50E-01 × C 7 **玖珠川** 小ヶ瀬 Os=4.00E-01 × O 1.86 花月川 花月 8 Os=1.91E-01 × O 9 小石原川 江川ダム上流 $Os=1.15E-01 \times C$ 江川ダム下流 小石原川 10 11 宝満川 端間 Qs=3.99E-01 × C 巨瀬川 中央橋 12 Qs=1.57E-01 × Q 日出来橋 Qs=4.42E-01 × Q 13 城原川 .45 筑後川 14 荒瀬 Os=3.00E-01 × O 2.20 筑後川 瀬ノト 15 Os=3.50E-01 × O 16 筑後川 感潮河道14km 17 筑後川 感潮河道10km

ここで, Q-Qs 式の性質を他の河川の事例も含めて考察 する.図-7は筑後川各地点のQ-Qs 図及び文献から調べ た各地の実測例である.指数が2乗を下回る河川や3乗 を上回る河川もいくつか見られるが,概ね2乗から3乗 の間に収まっており,平均は2.6である.

指数 と流域面積の関係を調べたところ(図-8),面 積が増大するほど指数が低下する傾向がわずかに見られ た. を決定する主な要因は地質や勾配,土地利用であ ると考えられるが,大流域では土砂生産の乏しい低平地 を含む割合が高くなり河道内堆積量も増えるために,流 域面積も指数に影響を及ぼすと推測される.このことは ダム堆砂量に基づく土砂生産の研究で既に指摘されてい るが,ウォッシュロード観測からも裏付けられた.

また図 - 7 から, Q-Qs 式の傾き が等しくても の効 果により比SS 輸送量は10~1000倍異なっている.これ は単位流量のときの基本SS 発生量が異なることを表し ているが, の値自体に流出過程から見た意味はない. 傾きと任意の一点を決めればQ-Qs 式は表せるので,例え ば低水時の比流量に対する定常的なSS 輸送量の発生要 因を解析すれば, Q-Qs 式をモデル化できるであろう.

(2)流域浸食深の検討

流域各地点の平均浸食深を次の方法で計算した.計算



図 - 8 流域面積とベキ乗指数 の相関

期間は2002年から2006年の5年間であり, 濁度観測デー タもしくは表 - 2のQ-Qs式を用いて各年の単位面積あた リSS輸送量(kg/km^2)を求め,土粒子密度と土壌空隙率を 用いて地表浸食深に換算した.空隙率として有光¹¹⁾は褐 色森林土の平均値を0.63,竹下¹²⁾は標準的な森林土壌の A1層(0~5 cm)の空隙率を0.54としているため,本研 究では代表値として0.6を採用した.計算の結果,年平均 浸食深(SS成分のみ)は0.084~0.466 nmとなった.

横山ら¹³⁾は筑後川流域の6つのダムにおける堆砂デー タを用いて,流域の土砂生産量分布Qs[']を起伏量Hと日 雨量rから予測している(降雨・起伏量モデルと呼ぶ).

$$Q_s' = \sum_{i=1}^n cH^j r^k \tag{2}$$

ここで, *c*・*j*・*k* は係数であり, *n* は30 年間の日数である (2)式から求まる年平均土砂生産量を平均浸食深 (mm)





図 - 10 Q-Qs式による侵食深と降雨・起伏量 モデルによる浸食深の比較

に換算し,本研究で得られた浸食深と比較すると,分布 図として図-9が,地点別の相関図として図-10が得ら れた.土壌によって空隙率が違うことや,降雨・起伏量 モデルではシルト・粘土と砂礫の合計量を求めており, 平均期間も異なるため厳密には同じ比較にならないが, 2つの方法で求めた浸食深はいずれも河川1,2,3におい て大きく,河川8,12では小さいなど,浸食の傾向が概 ね整合している.

降雨・起伏量モデルは限られた地点のデータを全域に 拡張しているが,それが実測値に近いQ-Qs式と整合して いるため,流域のSS生産には降雨と起伏量(勾配)が大 きく寄与していると考えられる.ただし,低平地にある 河川11は降雨・起伏量モデルによる予測値(全粒径土砂 を対象)がSS成分のみを表したQ-Qs式と同程度であり, 浸食深の予測が過小である.これは,河川11には土砂生 産の活発な田畑・密集市街地が多いために降雨・起伏量 だけでは予測がうまくゆかないことを示しており,SS生 産には土地利用なども考慮する必要があると言える.

5.まとめ

本研究では様々な土地利用が存在する筑後川の17地 点で濁度モニタリングとSS分析を実施し,ウォッシュ ロードの生産・輸送の特徴について検討した.

濁度とSS の相関を調べたところ,源流に近いほど同 じSS 濃度に対して濁度の反応が低く,粒径が光学特性 に影響していると推測された.各地点のSS 輸送量を洪水 期間で積分することで,筑後川では急峻かつ降雨量の多 い最上流部でSS 生産量が卓越していること,また治水ダ ムに流入したSS の55 % が放流されること,感潮河道で は底泥が浸食されることで多量のSS が水中に回帰し,上 流生産量の約4倍のSS が通過していることなどを明らか にした.さらに,比流量Qと比SS 輸送量Qs との関係式 を地点別に整理し,式の係数が流域の土地利用や起伏, 降雨,面積などと関係している可能性を示した. 謝辞:本研究の実施にあたり,筑後川河川事務所から水 文データを提供して頂き,現地観測でもご助力頂いた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 石外宏:貯水池の堆積土砂量について,応用地質7号7巻,pp.173-190,1966.
- 2) 村上泰啓,中津川誠,高田賢一: 流域条件と土砂・水質成分の流 出特性について,水工学論文集,第48巻,pp.143-148,2004.
- 高波陽平,堀田紀文,鈴木雅一,執印康裕: 吾妻川上流域における suspended sedimentの流出に対する森林率の影響,砂防学会誌, Vol.59, No.6, pp.14-24, 2007.
- 4)横山勝英,山本浩一,一寸木朋也,金子祐:筑後川感潮可道における底泥の堆積過程に関する調査,海岸工学論文集,第54巻, pp.451-455,2007.
- 5) 横山勝英:濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698 / -58, pp. 93-98, 2002.
- 6) 坊野聡子,清水康行,黒木幹男,藤田睦博,吉田義一:ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究,土木学会論文集 No.656
 / -52, pp.61-72, 2000.
- 7) 松村和樹,鈴木宏,上島隆雄: Wash load の生産・流出機構と長期流出土砂量,新砂防, Vol.37, No.2(133), pp.28-34, 1984
- 8) 川村力,清水康行,藤田睦博,市川嘉輝:山地河川における流砂 の観測と解析,水工学論文集,第41巻,pp.771-776,1997.
- 9) 清水康行,嵯峨浩,早川博,品川守:石狩川の土砂流出に関する 研究,水工学論文集,第42巻,pp.1039-1044,1998.
- 10) 高橋迪夫,千田宏明,松尾聡,黒沢善恒,清水竜二:ダム流域に おける出水時の濁質と水質特性の検討,水工学論文集,第43巻, pp.593-598,1999.
- 11) 有光一登 牧勉:森林士壌の保水のしくみ 創分 pp.120-149,1997.
- 12) 竹下敬司:山の森と土と水,福岡県水源の森基金,pp.43-55,2001.
- 13) 横山勝英,中村岳由,五十嵐麻美:堆積学的手法による筑後川の 土砂供給能に関する長期変遷解析,水工学論文集,第50巻, pp.1039-1044,2006.

(2007.9.30受付)