

# 日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係

## Correlation between Suspended Sediment Transport and River Discharge in Japan

武川一樹<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>

Kazuki TAKEKAWA and Yasuo NIHEI

To examine correlations between SS transport  $L$  and river discharge  $Q$  in Japan, we develop a database for SS and river discharge in Japan under low- and high-flow conditions by collecting previous field data. In addition, we present a new approach to evaluate a sediment rating curve ( $L=aQ^b$ ) using the database and statistical analysis. The results indicate that the coefficient  $b$  was mostly 1.6 to 2.0 which was slightly lower than previous results ( $b=2$ ). The SS fluxes in mountain rivers were on the whole larger than those in other rivers, showing appreciable dependence of the  $L$ - $Q$  relations on land use of watershed. We confirmed the fundamental validity of the present approach through the comparison with observed data.

### 1. はじめに

流域土砂管理を行う上では、流域から河川、沿岸にわたる流域圏全体の土砂動態を把握することは重要である(藤田, 2000)。様々な流砂形態のうち、相対的に粒径が細かい浮遊土砂(SS)は沈降せずに長距離輸送され、河口で沈降・堆積することから、水質浄化機能を有する干潟の形成プロセスと密接に関連する。またSSは土粒子の比表面積が大きく栄養塩類や有機物、重金属、放射性物質等のキャリアとなるため、陸域から内湾・湖沼への浮遊土砂供給量を把握することが必要であり、内湾環境管理指標としてCODやT-N,T-Pに加えてSSと密接に関係する透明度の導入も検討されている(中央環境審議会, 2010)。このことから、河川における浮遊土砂輸送量 $L$ (=SS×流量)を精緻に把握することは必須である。

河川の浮遊土砂輸送量 $L$ の算出には、SSの実測値が無い場合には、簡易的な統計手法である浮遊土砂輸送量 $L$ と流量 $Q$ の相関式( $L$ - $Q$ 式,  $L=aQ^b$ ,  $a, b$ :係数)が用いられる(武田, 2001)。これは、時々刻々の流量観測値 $Q$ と対象地点固有の $L$ - $Q$ 式さえあれば、時々刻々の浮遊土砂輸送量 $L$ を簡便に算出できる。 $L$ - $Q$ 式の作成には平常時から出水時にわたる $L$ と $Q$ のデータセットが必要となるが、観測自体の労力やコストを要する出水時の観測データは平常時に行われる公共用水域データと比べると非常に少ない。出水時観測は後述するように実施例があるものの、それらのデータが散在しておりデータベースとして整備されていない。また、観測値の無い河川では何らかの形で $L$ - $Q$ 式を与える必要があるが、河川毎に大きく変化する $L$ - $Q$ 式の推定法は未確立のままである。

本研究では、著者らや他の機関が行ったSSモニタリングデータを収集し、日本全国の河川を対象とした浮遊土砂輸送量 $L$ と流量 $Q$ に関するデータベースを作成し、それに基づいて $L$ - $Q$ 関係の基本特性やそれと流域情報との関連性を明らかにすることを試みる。また、本データベースを教師データとしたニューラルネットワークに基づく $L$ - $Q$ 式推定方法を提案し、その有効性を検証する。

### 2. 研究方法

#### (1) 出水時SSデータベースの構築

著者らによるSSモニタリングデータと他機関が実施した観測結果を収集し、図-1に示す全国80河川、94地点における浮遊土砂輸送量のデータベースを構築した(データ総数274,108個)。データベースの対象となる河川名、データ数、流域面積、流域の土地利用分類、出典を取りま

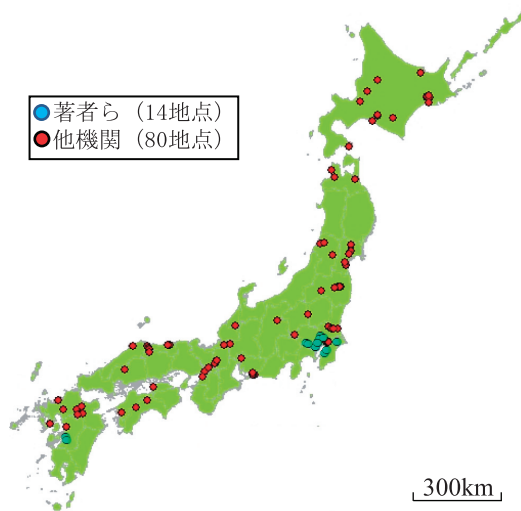


図-1 本データベースの対象地点

1 正会員 修(工) 東京都  
2 正会員 博(工) 東京理科大学理工学部土木工学科准教授

表-1 本データベースの概要

No	河川名	データ数【個】	流域面積【km <sup>2</sup> 】	土地分類	出典	No	河川名	データ数【個】	流域面積【km <sup>2</sup> 】	土地分類	出典	
1	石狩川	31	2089.2	山林	桑村ら,2002	48	堀川	42	1.8	市街地	筒井ら,2010	
2	石狩川	49	7518.1	山林		49	手取川	29	428.4	山林	櫻井ら,2002	
3	石狩川	55	11023.7	山林		50	揖斐川	16	471.0	山林		
4	原木川	56	13.0	山林	柳井ら,1995	51	高時川	27	103.0	山林	木戸ら,2005	
5	沙流川	114	796.2	山林		52	野洲川	33	286.6	山林	阿部ら,2006	
6	沙流川	24	1394.7	山林	村上ら,2004	53	法竜川	93	7.3	田	大久保,1996	
7	沙流川	77	365.8	山林		54	伊佐々川	19	3.9	混合	市木ら,1999	
8	札内川	7	117.7	山林	55	十禅寺川	53	0.7	混合			
9	釧路川	5	1396.5	山林	清水ら,2003	56	木津川	7	1596.0	山林	西田ら,2010	
10	久著呂川	55	98.6	山林		57	淀川	39	8330.7	山林	中谷ら,2010	
11	ツルハシナイ川	4	17.6	山林		58	大和川	17	1070.0	混合		
12	幌呂川	4	148.6	山林		59	千代川	100	1080.3	山林	今井ら,2007	
13	雪裡川	4	175.4	山林		60	長柄川	29	11.5	山林	細井ら,1993	
14	網走川	165	1444.2	山林		61	枝川	43	1.3	山林		
15	岩木川	26	1424.1	山林		望月ら,2008	62	日野川	21	467.1	山林	山本ら,2004
16	岩木川	27	2540.0	山林			63	日野川	32	661.2	山林	
17	七戸川	34	347.1	山林		64	日野川	23	661.2	山林		
18	荒川	6	36.9	混合		65	日野川	33	711.5	山林		
19	鳴瀬川	10	728.0	山林	馬場ら,2002	66	斐伊川	96	2070.0	山林	阿部ら,2006	
20	吉田川	10	302.5	山林		67	江の川	66	307.5	山林	櫻井ら,2002	
21	阿武隈川	33	5400.0	山林	小林ら,1999	68	高瀬川	21	67.0	混合	冠野・土取,2009	
22	阿武隈川	78	1599.9	山林	長林ら,2003	69	吉野川	95	472.0	山林	櫻井ら,2002	
23	大滝根川	9	469.8	山林	渡邊ら,2000	70	仁淀川	161	688.9	山林		
24	大滝根川	8	87.7	山林		71	肱川	103	168.0	山林		
25	大滝根川	8	62.8	山林		72	瑞海寺川	19	36.9	山林	佐野・久場,2006	
26	大滝根川	8	290.8	山林		73	山国川	8	89.0	山林	櫻井ら,2002	
27	桧山川	8	26.0	山林		74	筑後川	27	491.0	山林		
28	牧野川	9	59.3	山林		75	筑後川	163	120.2	山林	横山ら,2008	
29	最上川	761	6316.2	山林	76	筑後川	307	126.9	山林			
30	最上川	31	6316.2	山林	77	筑後川	504	2295.0	山林			
31	赤川	6	857.0	山林	前川ら,1998	78	本明川	19	249.0	山林	野口,2010	
32	本川	23	254.0	山林	櫻井ら,2002	79	白川	74	480.0	山林	横山,2005	
33	川又川	15	2.9	混合	村山ら,2001	80	轟川	101	12.4	畑地	仲宗根ら,2001	
34	恋瀬川	95	212.6	混合	海老瀬,1981	A01	江戸川	39720	2391.0	山林	重田ら,2008	
35	山王川	96	8.6	市街地		A02	中川	30117	987.0	混合		
36	園部川	91	79.3	混合		A03	荒川	12443	2300.0	山林		
37	谷田川	28	49.1	畑地		寺川ら,2005	A04	隅田川	20979	535.0		混合
38	神崎川	98	57.0	混合		千葉県	A05	神田川	10032	105.0		市街地
39	桑納川	150	25.0	市街地		千葉県	A06	多摩川	38000	1240.0	山林	
40	手繰川	127	31.0	市街地		千葉県	A07	浅川	856	154.6	山林	武川ら,2012
41	師戸川	81	14.0	混合		千葉県	A08	秋川	2298	169.6	山林	
42	荒川	27	350.0	山林		櫻井ら,2002	A09	小櫃川	18540	267.0	山林	重田ら,2008
43	千曲川	32	2042.3	山林		渡辺ら,1997	A10	養老川	1870	142.0	山林	重田ら,2008
44	豊川	18	835.5	山林	青木・井上,2011	A11	栗山川	18872	166.1	混合	梶ら,2012	
45	精進川	68	2.9	畑地	坂西ら,2008	A12	大堀川	35924	31.0	市街地	二瓶ら,2007	
46	浜田川	23	0.4	畑地	山田,2002	A13	球磨川	24337	1725.2	山林	大槻ら,2013	
47	梅田川	20	56.2	混合	山田・井上,2004	A14	球磨川	27407	1867.0	山林		

とめたものを表-1に示す。No.1~80は他機関のデータ、No.A1-A14は著者らのデータである。流域の土地利用として、市街地、山林、水田、畑地、その他に分類し、その中で50%以上を占めたものを表中に記述しており、それ

を満たさないものを「混合」としている。本データベースには、各地点のLとQのデータや表中の流域情報と共に、流域の平均傾斜角度、表層地質割合、ダムの有無などを加えている。

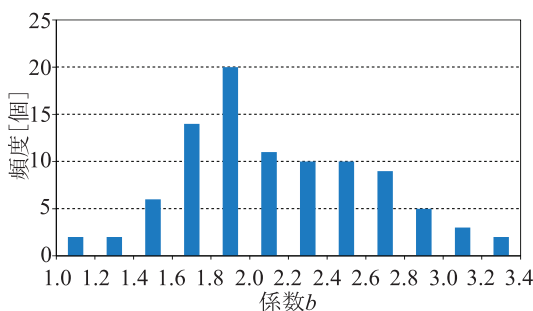


図-2 係数bの頻度分布

他機関のデータの収集には、基本的に、公表されている文献中に示されている情報（グラフ等）を読み取る作業を行う必要がある。そのグラフの読み取りをオートマテックに数値化するために、北海道大学原子核反応データ研究開発センター（2012）が開発・公開しているグラフ数値読取システム（GSYS, SyGRD）を利用する。

(2) データ解析方法

ここで得られたLとQのデータセットから、地点毎のL-Q式やL'-Q'式 ( $L' = a'Q'^b$ , L':比浮遊土砂輸送量 (=L/A), Q':比流量 (=Q/A), a', b':係数, A:流域面積) を求める。式中の係数間の関係は以下の通りである。

$$a' = aA^{b-1}, b = b \dots\dots\dots (1)$$

データのばらつきを除くため、ある流量範囲にわたり移動平均を行ったLとQに対してL-Q式やL'-Q'式を算定する（田中・二瓶, 2011）。なお、SS輸送に関するL-Q式の係数bは、流量の大きさにより変化することが報告されているが（武川ら, 2012）、ここでは簡便のためその影響を考慮せず、各地点で一つのL-Q式を算出している。

これらのデータセットを用い観測データの無い河川用のL-Q式推定方法を提案する。ここでは、本データベースを教師データとしたニューラルネットワークに基づき適切な流域情報からL-Q式を推定する。以下では、観測値との比較を通して、本手法の有効性を検証する。

3. 結果と考察

(1) 全国平均L-Q式

全地点のL-Q関係データベースから得られた係数bの頻度分布を図-2に示す。これより、係数bは1.0から3.4まで幅広い範囲に分布しているものの、1.6~2.0に比較的集中している。この係数bの中央値は1.88であり、一般的な係数b=2よりも若干小さい（吉川, 1985）。

これらの全データに対するL'-Q'関係をプロットしたものを図-3に示す。図中には、生データとともに、移動平均値やそれに対する近似曲線も合わせて表示している。これより、生データの振れ幅は非常に大きく、同一の比

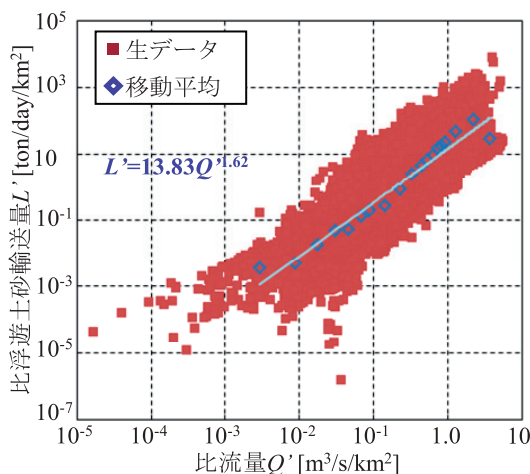


図-3 全データに対するL'とQ'の相関関係

	a'	b
山林	36.14	1.86
その他	12.62	1.63

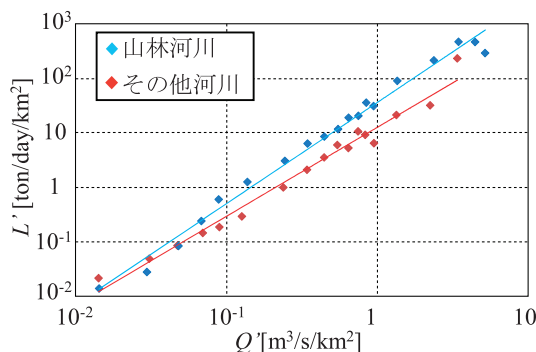


図-4 山地河川とその他河川におけるL'-Q'関係の比較

流量では、3, 4オーダー異なっている。これは、同一地点における出水イベント内における変化に加えて、地点間の差に起因している。移動平均値に対する近似式としては、係数a', bはそれぞれ13.83, 1.62となる（単位はL': [ton/day/km²], Q': [m³/s/km²]）。一種の全国平均データと見なせる上記のL'-Q'式においても、係数bは一般的な2よりも小さい。

(2) L-Q関係と流域情報の関連性

L'-Q'関係と流域情報の関連性を検討するために、山林河川（土地利用割合のうち山林率が50%以上）とその他河川（山林率50%未満）におけるL'-Q'の相関関係を図-4に示す。ここでは、二つに分類された河川に対する移動平均値を表示している。これより、山林河川のL'はその他河川のL'よりも全般的に大きくなっており、両河川では、L'-Q'関係が大きく異なっている。また、両者それぞれに対して流域情報との関連性を重回帰分析によ

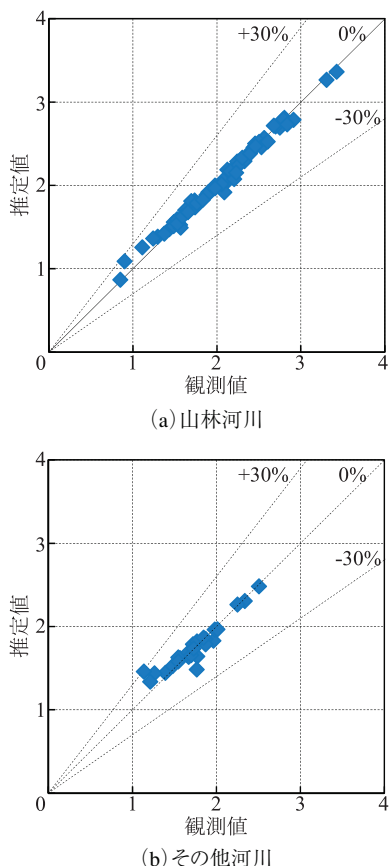


図-5 係数bに関する観測値及び本手法による推定値の比較

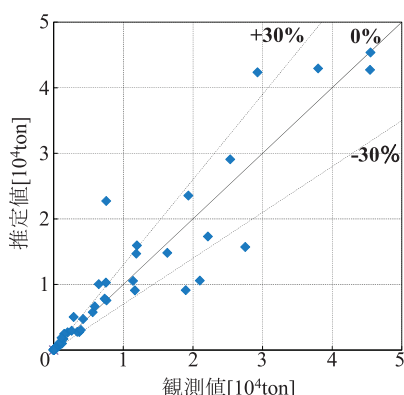


図-6 各地点の総SS輸送量Lに関する推定L-Q式の精度比較

り調べたところ、山林河川では表層地質とダムの有無、その他河川では土地利用割合や平均傾斜角度とそれぞれ相関性が高いことが確認された (図面省略)。

(3) 本手法によるSS輸送量の推定精度

L-Q関係と関連性が見られた流域情報パラメータに基づくニューラルネットワークによるL-Q式の係数を推定した結果の一例として、L-Q式の係数bに関する観測値と推定値の相関図を図-5に表示する。ここでは、図-4と同じく、対象地点を山林河川とその他河川に分け、流域パラメータとしては、山林河川では山林率と表層地質、ダムの有無、流域面積、その他河川では、土地利用割合 (市街地・畑地・田) と平均傾斜角度をそれぞれ用いる。これより、係数bに関する観測値と推定値の誤差のRMS値は山林河川では0.07、その他河川は0.11となり、本手法により係数bを高精度に推定できることが示された

二瓶ら (2010) に倣い、本手法により得られる係数bと入手が容易な平常時観測データを用いて係数aを求め、各地点における総SS輸送量Lを推定した結果を図-6に示す。その結果 (推定L-Q式) と、対象地点毎のL-Q式 (観測L-Q式) からLを求めたところ、観測L-Q式では相対誤差±30%

以内に収まった地点が85%であるのに対して (図面省略)、本手法による推定L-Q式では71%と同程度となっている (図-6)。これより、本手法によるL-Q式推定精度が概ね良好であることが示された。

4. まとめ

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 全国80河川, 94地点における出水時の流量Q, SSフラックスL, 流域情報に関するSSデータベースを構築した。
- 2) 各地点におけるL-Q式の係数bの頻度は1.6~2.0に集中しており, 一般的なb=2よりも若干小さい。
- 3) 本データベースを教師データとしたニューラルネットワークに基づくL-Q式推定方法を提案し, 観測結果との比較を通して, 本手法の有効性が確認された。

今後、ここで得られたL-Q式推定方法と別途算定される時々刻々の河川流量データを用いて、全国の河川から海域へのSS輸送量を算出する予定である。

謝辞：データ取りまとめの一部を東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室梶純也氏に実施して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

青木伸一・井上隆信 (2011) :サステナブルな社会における未来ビークルシティー, 豊橋技科大H22年度研究成果報告書, pp.193-199.

阿部 徹・斐 義光・後藤 崇 (2006) :湖沼の流入負荷に関する研究, 河川環境総合研究所報告書, Vol.12, pp.30-43.

市木敦之・山田 淳・佐藤昌弘・和田有朗・嶋田智行・大久保卓也 (1999) :降雨時都市流出水の水質変化と粒度特性, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, Vol.41, VII-1-1-1-2.

伊藤真彦・長谷川信夫・平賀義尚 (1998) :伊豆沼への降雨時の汚濁負荷に関する調査研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, Vol.35, pp.834-835.

今井康友・檜谷 治・梶川勇樹・奥野裕明 (2007) :千代川下流域における土砂収支, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, Vol.59, pp.87-88.

- 海老瀬潜一(1981):霞ヶ関流入河川の流出負荷量変化とその評価, 国立公害研究所研究報告, Vol.21.
- 大久保卓也(1996):雨天時流入汚濁負荷量調査—赤野井湾流入河川を対象として—, 琵琶湖研究所所報, Vol.15, pp.10-19.
- 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼倉徳雄(2013):出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.1063-1068.
- 梶 純也・二瓶泰雄・中田遙香(2012):九十九里浜流域における浮遊土砂供給量の経年変化, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, Vol.67, pp.491-492.
- 冠野禎男・土取みゆき(2009):高瀬川における水質特性調査, 香川県環境保健研究センター所報, Vol.8, pp.102-108.
- 木戸研太郎・松川知三・吉栖雅人・西本直史・江頭進治(2005):高研川流砂系における丹生ダムの影響, 河川技術論文集, Vol.11, pp.279-284.
- 桑村貴志・財津知享・市川嘉輝・齊藤大作・若林英樹・原田輝雄(2002):石狩川における流砂の計測—流砂系モニタリングのために—, 砂防学会誌, Vol.54, No.5, pp.86-91.
- 小林紀幸・長林久夫・真野 明(1999):阿武隈川における出水時のT-N, T-P輸送機構の検討, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.54, pp.464-465.
- 櫻井寿之・柏井条介・大黒真希(2002):日本の多目的ダム貯水池における微細粒子土砂の捕捉と堆積, 大ダム, No.181, pp.30-40.
- 佐野弘典・久場隆広(2006):瑞梅寺川流域における水量解析と汚濁負荷量の推定, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.61, pp.183-184.
- 重田京助, 二瓶泰雄, 坂井文子, 大塚 慧(2008):東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.52, pp.913-918.
- 清水康行・新庄 興・住友慶三・渋谷直生(2003):釧路湿原の浮遊砂収支と湿原流入部における土砂堆積実態について, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.60, pp.318-321.
- 武川一樹, 二瓶泰雄, 田中健太郎(2012):濁度連続観測及び底質分析に基づく多摩川流域のウォッシュロード供給源の推定, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.1913-1918.
- 武田育郎(2001):水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp.158-164.
- 田中健太郎, 二瓶泰雄(2011):SSモニタリングネットワークに基づく東京湾への浮遊土砂供給特性の把握, 水工学論文集, Vol.55, pp.S\_1327-S\_1332.
- 中央環境審議会(2010):第7次水質総量削減の在り方について(答申), pp.1-70, 2010.
- 筒井建伍・中西祐貴・富永晃宏(2010):雨水吐越流が都市河川・堀川の水質に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.65, pp.579-580.
- 寺川 陽・高須修二・深見和彦・木内 豪・松浦 直・猪股広典・飯泉佳子・賈 仰文・天野邦彦・時岡利和・対馬孝治(2005):流域における総合的な水循環モデルに関する研究, <http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D5809.pdf>(閲覧:2012年10月1日).
- 仲宗根一哉・比嘉榮三郎・大見謝辰男・安村茂樹・灘岡和夫(2001):石垣島轟川のSSと栄養塩濃度, 沖縄県衛生環境研究所所報, Vol.35, pp.93-101.
- 長林久夫・真野 明・湯田純一(2003):出水時におけるSS及び汚濁負荷特性の検討, 環境水理部会研究要旨集.
- 中谷祐介・西田修三(2010):淀川・大和川における出水時負荷特性と陸域流入負荷の評価, 水工学論文集, Vol.54, pp.1615-1620.
- 西田修三・前田瑛美・今岡知武(2010):淀川水系の出水特性と物質輸送の解析, 河川技術論文集, Vol.16, pp.317-322.
- 二瓶泰雄, 大関雅丈, 福地正宗(2007):河川下流域の土砂動態に着目した富栄養化湖沼の流入負荷特性に関する検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.1111-1116.
- 二瓶泰雄・田中辰弥・滝岡健太郎(2010):出水時水質データが無い河川におけるL-Q式推定法の一提案, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.57, No.2, pp.1176-1180.
- 野口正人(2010):流域からの汚濁流出量の評価とその削減方策の検討, [http://www.k-keikaku.or.jp/xc/modules/public/index.php?content\\_id=39](http://www.k-keikaku.or.jp/xc/modules/public/index.php?content_id=39)(閲覧:2012年10月1日).
- 馬場仁志・大嶋武志・高崎みつる・飯島眞治(2002):鳴瀬川水系から沿岸海域に対する物質供給特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, pp.449-450.
- 坂西研二・糟谷真宏・神田健一(2008):LQ式に見られる農村流域河川の水質特性, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.954-955.
- 藤岡英俊・前川勝朗・梶原晶彦・大久保博(2002):最上川における出水時の水質観測, 東北地域災害科学研究, Vol.38, pp.127-129.
- 藤田光一(2000):"広域総合土砂(物質)管理"の理念と実践との隔たりをどう埋めるか, 月刊海洋, Vol.32, No.3, pp.179-184.
- 細井由彦・倉上正規・鬼木 哲(1993):湖山池への雨天時汚濁流入量の検討, 土木学会東北支部技術研究発表会, Vol.59, pp.130-131.
- 北海道大学原子核反応データ研究開発センター(2012):<http://www.jcprg.org/gsys/gsys-j.html>(閲覧:2012年10月1日).
- 前川勝朗・大久保博・瀬川 学(1998):出水時における赤川の水質観測, 東北地域災害科学研究, Vol.34, pp.117-122.
- 真野 明・杉木基泰・前川勝朗(1997):最上川流域の雪解け出水に伴う懸濁物質の輸送, 水文・水資源学会誌, Vol.10, No.5, pp.407-415.
- 村上泰啓・中津川誠・高田賢一(2004):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, Vol.48, pp.1105-1110.
- 村山重俊・駒田充生・馬場浩司・津村昭人(2001):農業集水域小河川の平常流量時の水質とその時期的変動, 日本土壤肥科学雑誌, Vol.72, No.3, pp.409-419.
- 望月貴文・藤田光一(2008):十三湖に供給されるウォッシュロードの捕捉率の出水規模による違い, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.63, pp.221-222.
- 柳井清治・寺沢和彦(1995):北海道南部沿岸山地流域における森林が河川および海域に及ぼす影響山地流域から津軽海峡に流出する浮遊土砂と有機物, 日本森林学会誌, Vol.77, No.5, pp.408-415.
- 山田俊郎(2002):農業地域からのノンポイント汚濁負荷の評価と削減対策に関する研究, <http://www.sangetsu.co.jp/hibizaidan/>(閲覧:2012年10月1日).
- 山田俊郎・井上隆信(2004):農耕地からのリンの流出, 衛生工学シンポジウム論文集, Vol.12, pp.57-60.
- 山本正司・犬山 正・岡田浩治・吉栖雅人・西本直史(2004):日野川流域における土砂動態の再現, 河川技術論文集, Vol.10, pp.173-178.
- 横山勝英(2005):河川の土砂動態が有明沿岸に及ぼす影響について—白川と筑後川の事例—, 応用生態工学, Vol.8, No.1, pp.61-72.
- 横山勝英・藤塚慎太郎・中沢哲弘・高島創太郎(2008):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, 水工学論文集, Vol.52, pp.553-558.
- 吉川秀夫(1985):流砂の水理学, 丸善出版, pp.1-541.
- 渡邊 毅・高橋迪夫・長谷川将吾(2000):洪水時における三春ダム流域の水質特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.55, pp.644-645.
- 渡辺義人・大久保嘉洋・谷川のみ・土屋伸雄・武田昌昭・中本信忠(1997):千曲川中流部における流量変化と水質の動向, 環境科学年報—信州大学—, Vol.19, pp.103-110.