

懸濁物質負荷の確率流出特性に関する研究

PROBABILITY OF THE CUMULATIVE LOAD OF THE SUSPENDED SEDIMENT

山本浩一¹・横山勝英²
Koichi YAMAMOTO and Katsuhide YOKOYAMA

¹正会員 博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1)

²正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市環境学部(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

Suspended sediment concentration was monitored continuously for 3 years in the Shira River, Japan. We analyzed the suspended sediment load data to apply probability analysis. The Shira River discharged 48 thousand tons to 170 thousand tons per year. The frequency of the suspended sediment discharge per event distributes as log-normal distributions. The discharged suspended sediment was also fitted in Gumbel distribution. The return period of the cumulative suspended load sediment per event was calculated. The severe flood disaster in 1953 in the Shira River basin, it was estimated that about 6.07 million tons of suspended sediment was discharged with the flood, whose probability was 1/150.

Key Words : Suspended sediment, probability, Gumbel distribution, log-normal distribution

1. はじめに

湖沼や海域の水質汚濁負荷削減については点源(いわゆるポイントソース)での対策が行われてきたが、降雨により流出する特性をもつ非特定汚染源(いわゆるノンポイントソース)の重要性が次第に認識されてきた。2004年には湖沼法が改正されて非特定汚染源対策を推進することが盛り込まれた。

非特定汚染源負荷(ノンポイント汚染源負荷)とは、「汚濁物質の発生がある特定の地点からではなく、面的に分布し、処理施設によって処理されることなく、面的な外部エネルギーによって流出するもの」と定義されている¹⁾が、ここで河川流域を考えると、流域への降雨は土壌の浸食と汚濁物質の溶解、汚濁物質の掃流をもたらすので「外部エネルギー」に相当する。雨が流域から河川水となって流出するとともにこれらの汚濁物質は河川水に含まれた状態で下流域に流下する。自然流域や都市流域を問わず、河川水による汚濁物質の流送は降雨、特に有効降雨に支配されている²⁾。また、流量による流出負荷量の経験的表現も良く用いられる方法であり、流量 Q と流出負荷 L の関係式をべき乗の関数形に近似させてそのパラメータを経験的に求める方法が一般には良く用いられており³⁾、たとえば

$$L = CQ^n \quad \text{ただし } C, n: \text{定数} \quad (1)$$

がよく用いられる。既往の研究で定数 C 、 n を各水質成分について流量規模・時期別に求めることが行われている⁴⁾。

汚濁物質の流出負荷量を高精度に求めるためには高頻度の観測を数年にわたって継続する方法をとるほかないが、これには多大な労力が要求されるし、年間の汚濁物質負荷量をいくら高精度に計測しても、前述のように降水量が大きなファクタとして存在するため、年間の流出負荷量が年間の総降雨量によって大きく変動するという問題が生じる⁵⁾。

懸濁物質の場合は(1)式中の定数のうち n は2程度となることが多く⁶⁾、出水の規模を上回る規模で汚濁物質が流出するので、数十年に一回の規模の大規模出水によってその年の流出負荷量の大半が流送されることもある⁷⁾。

このように、非特定汚染源からの汚濁物質の流出については出水の規模が汚濁物質の流出量を支配するので年間平均値あるいは汚濁物質の流出負荷原単位を求める際の障害になっている。

そこで、水文統計学を応用することにより年間に生じる汚濁物質負荷量の期待値や数年あるいは数十年に一度発生する負荷量を予測できるのではないかと考えた。そこで本研究では汚濁物質のモデルケースとして自動連続観測が可能な懸濁物質(濁度)をとりあげ、この確率水文量に相当する流出負荷量についてその確率特性を明らかにし、災害時の汚濁物質負荷量や年間の汚濁物質負荷量の期待値を推定する方法を確立することを目的とした。

2. 研究方法

(1) 水文量の統計整理

a) 確率密度関数, 分布関数

ある水文量 X の確率密度関数(pdf)が $f(x)$ で与えられるとき, 分布関数(cdf) $F(x)$ は(2)式で与えられる⁸⁾.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2)$$

b) グンベル分布

グンベル分布は年最大洪水量の分布関数によく用いられており, 水文統計解析で多用されている. グンベル分布のpdfは(3)式, cdfは(4)式で表される⁸⁾.

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp \left[-\frac{x-c}{a} - \exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (3)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (4)$$

ただし a, c : 定数

c) 確率水文量精度の評価

確率水文量精度の評価を行う際にはパーセントイル-パーセントイルプロットおよび標準最小二乗基準(SLSC)を用いて評価した. プロットングポジション公式にはヘーゼンプロット法を用いた. 以下のプロットングポジション公式において $\alpha = 1/2$ としたときに相当する.

$$F[x_{(i)}] = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (5)$$

ここで, N : 標本数, i : 標本を大きさの順にならべたときの小さい方からの順位, $x_{(i)}$: i 番目の順位標本値, $F[x_{(i)}]$: $x_{(i)}$ のプロットングポジション.

SLSCは(6)式で表される. 通常, $SLSC \approx 0.02$ 程度であれば適合度が良好であるといわれている⁹⁾.

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|} \quad (6)$$

ただし

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2$$

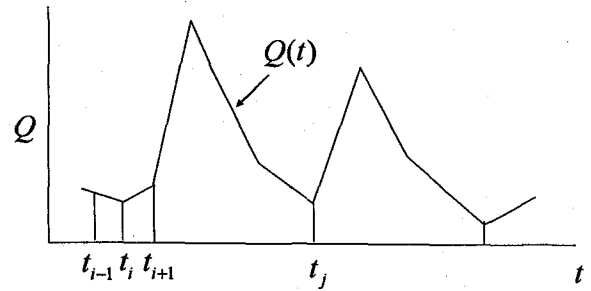


図-1 イベントの切り分け方法

ここで s_i : 順序統計量データを推定母数で変換した標準変量 r_i : プロットング・ポジション, $s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率0.99と0.01に対する当該確率分布の標準変量.

(2) 出水イベントの切り分け

河川流量を以下に示す要領で各イベントに切り分けた. 各イベントはハイドログラフが下に凸となる. すなわち流量が減少から増加に転じるところが各出水イベントの境界であるとして各出水イベントを切り分けた. すなわち, 時刻 t_i の流量を $Q(t_i)$ とし,

$$Q(t_{i+1}) - Q(t_i) > 0 \text{ かつ } Q(t_{i-1}) - Q(t_i) > 0 \quad (7)$$

のとき, $t = t_i$ で流量増加が起こったと判断する. その後

$$Q(t_{j+1}) - Q(t_j) > 0 \text{ かつ } Q(t_{j-1}) - Q(t_j) > 0 \quad (8)$$

が成立するような $t = t_j$ までを1出水とした. 単一イベントで二峰性ピークとなったところのみ切り分けずに単一イベントにまとめた.

また, 区間 $t = t_i$ から $t = t_j$ まで流量を累加したものを流出量 $V(i, j)$ とした. ただし Δt : 時間刻み.

$$V(i, j) = \Delta t \sum_{t=t_i}^{t_j} Q(t) \quad (9)$$

(3) 調査対象水域

研究対象の白川は, 熊本県の阿蘇カルデラに源を発する流域面積480 km², 流路延長74 kmの一級河川である(図-2). 流域の8割を阿蘇カルデラが占める. 年間の降水量はカルデラ北部盆地の阿蘇乙姫地点で2833 mm(1979年~2002年平均), 阿蘇山で3252 mm(1961年~2002年平均)である. 降水の大部分は梅雨によってもたらされ, 5月~7月の3ヶ月間の降水量は年間降水量の約40%~50%である(2001年~2003年). 上流域は山地が70%を越えるが, そのうち60%は崩壊地および牧草地である.

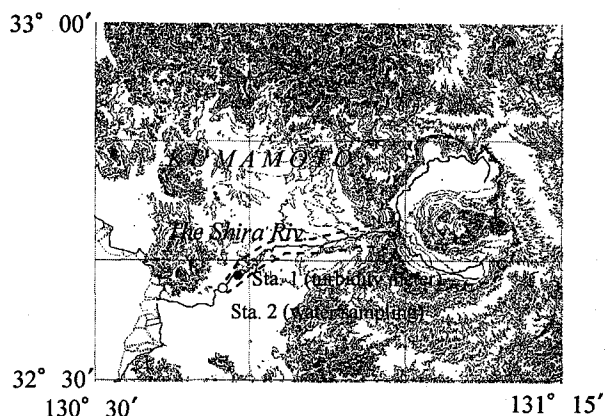


図-2 調査対象流域(白川) 点線:流域界

(4) 調査方法

濁度の連続計測のため、白川のSta.1(16KP地点)にアレック電子ATU 5-8Mを設置した。濁度は20分間隔で計測した。設置期間は2001年5月9日から2004年11月30日である。濁度はカオリン濁度である。濁度をSSに換算するため、Sta.2(代継橋, 12.3 KP)において連続採水を行った。現場では河川水の表層水をバケツで採取し、濁度検定用の艶消し黒塗装の容器に入れて直接濁度を測定した。なお、サンプルはポリエチレン瓶に入れて冷蔵し、後日分析に供した。洪水時の連続採水は2001年6月28日～29日、2002年6月24日～25日、2003年6月28日～29日、7月12日の計4回行った。また、河川流量はSta. 2で河川管理者が測定したデータを用いた。

(5) 水質分析

懸濁物質(SS), 全窒素(TN), 全リン(TP), 溶存態窒素(DN), 溶存態リン(DP), 懸濁態窒素(PN), 懸濁態リン(PP), 全有機炭素(TOC), 溶存態全有機炭素(DOC)を分析した。SSについては0.45 μ mメンブレンフィルターを用いた重量法, TN, DN, TP, DPについてはペルオキシ2硫酸カリウム分解後BRAN+LUEBBE社TRAACSによる分析を行った。TOC, DOCについては島津TOC-5000Aにより測定した。懸濁物質(SS), 次項に示す各態有機炭素, 栄養塩を分析した。ただし有機炭素, 栄養塩の分画は次式に従った。

$$\text{有機炭素:} \quad \text{TOC} = \text{POC} + \text{DOC} \quad (10)$$

$$\text{窒素:} \quad \text{TN} = \text{PN} + \text{DN} \quad (11)$$

$$\text{リン:} \quad \text{TP} = \text{PP} + \text{DP} \quad (12)$$

3. 研究結果

(1) 現地調査結果

出水時の濁水採取によって得られた濁度とSS濃度の関係について図-3に示す。SS, POC, PN, PP濃度については(13)式に回帰した。定数を表-1に示す。おおむね高

表-1 各懸濁成分における α , β (白川Sta.1)

	α	β	R^2
SS	0.0880	1.54	0.955
POC	0.0167	1.18	0.886
PN	0.00367	1.09	0.954
PP	0.00280	0.991	0.968

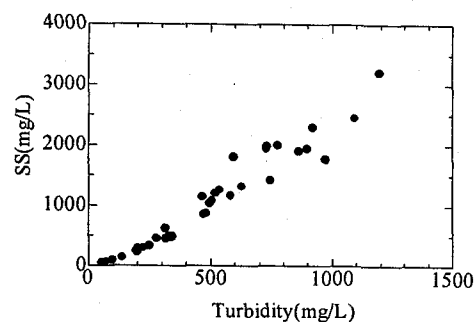


図-3 カオリン検定濁度とSS濃度の関係(白川Sta. 2)

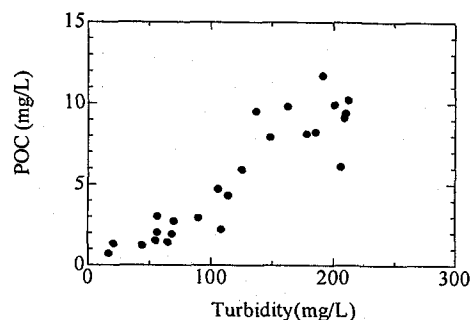


図-4 POC 濃度と濁度の関係(白川Sta. 2)

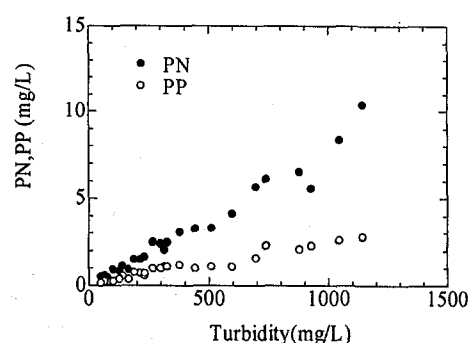
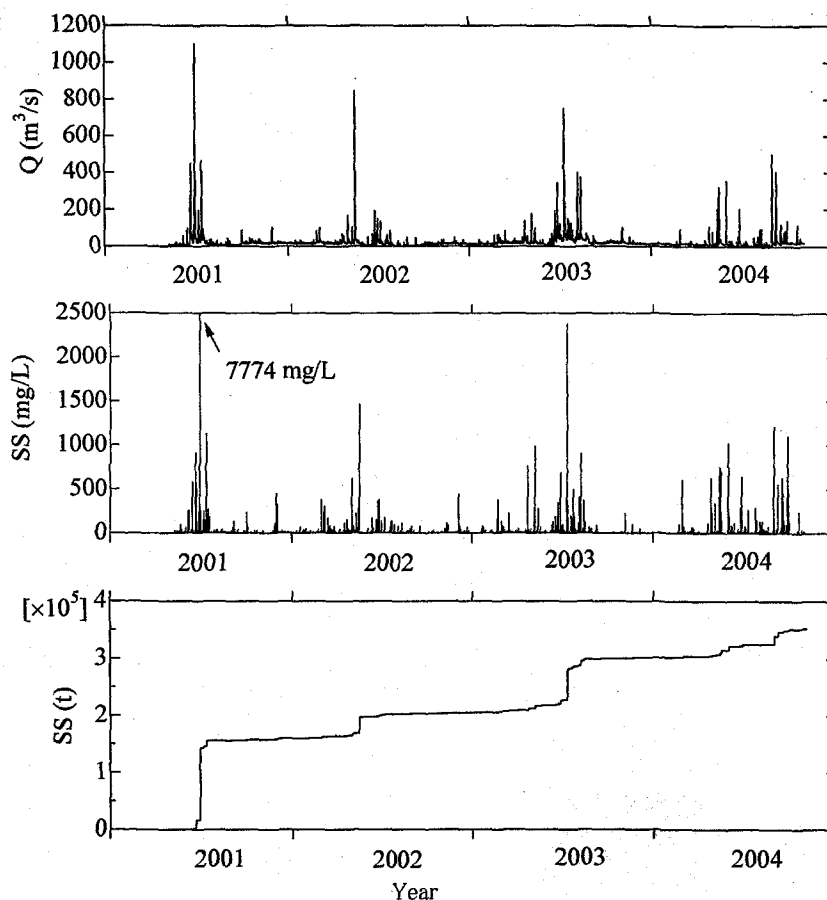


図-5 PNおよびPP濃度と濁度の関係(白川Sta. 2)

い相関係数が得られた。これにより濁度をSS, POC, PN, PP濃度に変換した。季節変動は考慮されていないが、出水が頻繁に発生し、負荷が流出するのが毎年5月から8月の梅雨の時期であることを考えると、大きな問題はないと考えられる。

$$C = \alpha \text{Turb}^\beta \quad (13)$$

ここでC:物質濃度, Turb:濁度, α , β :定数



図－6 白川Sta.2における流量Q(上)とSS濃度(中), 累積SS負荷量(下)

表－2 白川代継橋地点における流域平均年降水量 R total, 最大月間降水量Rm,max, 流出高 q, 損失高L, 各懸濁成分負荷量の年間流出負荷量(SS, POC, PN, PP)

		Period		
		2001*	2002**	2003***
R total	mm	2705	2560	3037
R m,max	mm	895 (Jun.)	455 (May)	517 (Jul.)
q	mm	1501	1168	1706
L	mm	1204	1392	1331
SS	10 ⁴ t	17	4.8	9.1
POC	10 ³ t	4.1	1.9	3.4
PN	10 ² t	3.8	1.9	3.3
PP	10 ² t	1.7	0.91	1.5

*2001.5.10～2002.5.9, **2002.5.10～2003.5.9, ***2003.5.10～2004.5.9

(2) 懸濁成分負荷の年間流出量

連続した3年間半の流量, SS濃度, 累積SS負荷量の観測

結果について図－6に示す。

2001年には流域内で80mm/hrを超える雨量を記録し、

月間降水量が800mmを超えた。2001年6月29日の出水ではピーク流量は1074 m³/sを記録し、SS濃度は7000mg/Lを超えた。次いで2003年7月12日に発生した出水(ピーク流量 = 677m³/s)のSS濃度が高く、3000mg/Lに達した。年間の流出高は1168 mm～1706 mmあり、流出率は45.6%～56.2%であった。2001年5月からの3年間における懸濁成分の濃度・負荷量について表－2にまとめた。

2001年6月29日の大規模な出水によって3年間のSS流出負荷量のおよそ1/3に相当する負荷が流出した。

(3) 単一流量増加イベントによる累加流量の頻度分布特性

懸濁物質負荷量の確率的検討を行う準備として、単一流量増加イベントにおける累加流量(単一イベント累加流量)の頻度分布特性を整理した。なおこの切り分けには降雨による出水ではないものも含まれている(たとえば灌漑による流量変動)。2001年5月10日～2004年5月9日の3年間に切り分けられた単一イベント累加流量は合計2531回で平均値は0.33 Mm³であった。図－7にその頻度分布を示す。

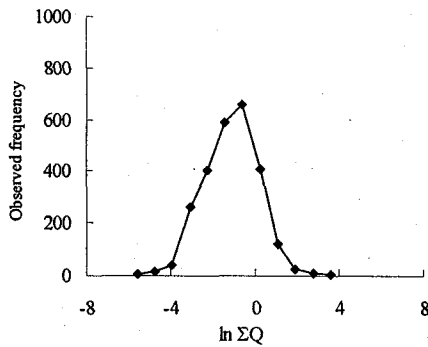


図-7 白川Sta.2における単一イベント累加流量 ΣQ の自然対数値の度数分布, 横軸は範囲の中間値. 正規化していない.

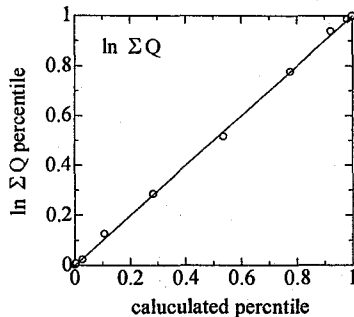


図-8 白川Sta.2における単一流量増加イベントにおける累加流量の自然対数の正規確率プロット(P-Pプロット)

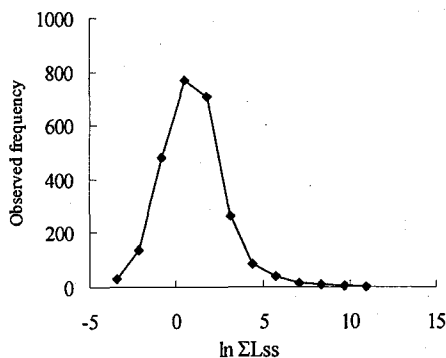


図-9 白川Sta.2における単一イベント累加SS負荷量 ΣL_{ss} の自然対数値の度数分布, 横軸は範囲の中間値. 正規化はしていない

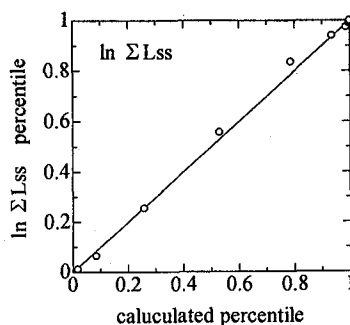


図-10 白川Sta.2における単一流量増加イベントにおける累加SS負荷量の対数の頻度に関する正規確率プロット(P-Pプロット)

対数正規分布の適用性を調べるため図-8に単一イベント累加流量 ΣQ の自然対数のパーセントイル-パーセントイルプロットを示す. これは横軸に正規分布から得られた累積頻度を, 縦軸にプロットポジション公式で得られた累積頻度をプロットした. 自由度11の χ^2 検定の結果, P値は 6.9×10^{-9} となり, 有意水準1%で正規分布することがわかった. したがって, 単一イベントの累加流量は対数正規分布するといえる. しかしながら, 年最大流量などの極値分布はグンベル分布に従う⁸⁾.

(4) 単一流量増加イベントによる累加SS負荷量の頻度分布特性

次に単一イベントによって流出するSS負荷量の頻度分布特性を検討する. 図-9に頻度分布を示す. これも有意水準1%で対数正規分布していることがわかった. p-pプロットを図-10に示す. 単一イベント累加流量の頻度分布に比べてやや非対称であり, SS累加負荷量が高い領域についてよくみると, 誤差が大きくなった. そこで, 極値の頻度解析に用いられるグンベル分布の適用を検討した. グンベル分布の適合性は標準最小二乗基準(SLSC)を用いて検討した. 累加SS負荷量の適用性評価の結果, $SLSC = 1.66 \times 10^{-6}$ となり, 適合度は極めて良好であった.

グンベル分布を適用した結果, (4)式において $a=1.3069$, $c=0.2649$ となった. 3年間の間に合計2531イベントあったから, リターンピリオド T と単一イベントによる流出SS負荷量 x の関係は(13)式~(14)式のようにになる.

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-0.2649}{1.3069} \right) \right] \quad (13)$$

$$T = \frac{3}{2531 \cdot F(x)} \quad (\text{years}) \quad (14)$$

ヘーゼンプロット法とグンベル分布を比較すると図-11のようになり, 概ね一致していると考えられる. 単一出水による懸濁物質負荷量がグンベル分布すると仮定して, $T=1$, すなわち一年に一回程度起きるSS流出負荷量は8695tと推定された.

昭和28年には既往最大洪水が発生し, その確率規模は1/150とされている. リターンピリオド150年のSS量を(14)式を用いて計算すると $x=607$ 万tとなった.

昭和28年災害に関する文献によれば, 白川の氾濫時の土砂濃度は8.3%(83,000mg/l)に達し, 100万 m^3 の泥土が熊本市内に堆積したとされている¹⁰⁾. また, 阿蘇地域崩壊土砂量調査報告書¹¹⁾によれば, 熊本市内には410万 m^3 が堆積したと見積もられている. 泥土の粒径構成に関する正確な値は現存しないが, 各種の記述を参考にすると細砂混じりシルトが主体であったと考えられる. ここで, 含水比を100~200%と仮定すると, 堆積土砂の重量は42~300万tの範囲にある.

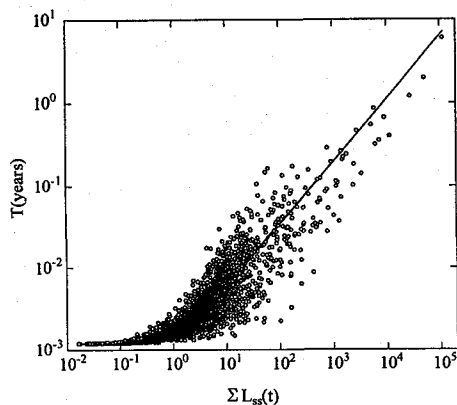


図-11 白川Sta.2における単一流量増加イベントにおけるSS流出負荷量と再現期間の関係、ヘーゼンプロットによる。実線はグンベル分布

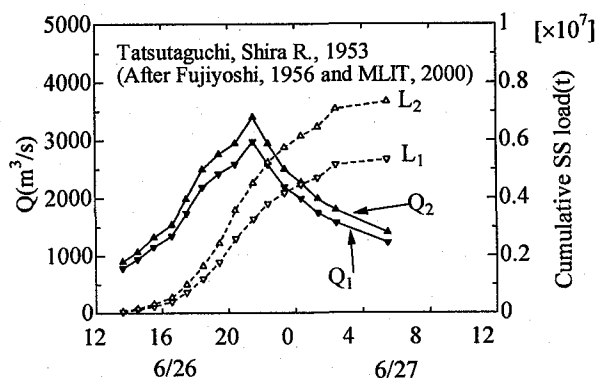


図-12 昭和28年の白川竜田口地点における流量 (Q_1 : 元データ, Q_2 : $3400\text{m}^3/\text{s}$ に補正) と累積流出SS負荷量 (L_1 : Q_1 に対応, L_2 : Q_2 に対応)。

これらは氾濫堆積物であるから、その数倍のSSが海域に流出したと予想される。そこで、当時のハイドログラフをもとに当時のL-Q式¹²⁾を適用して流出SS負荷量を推定した(図-12)。ハイドログラフは文献¹⁰⁾のうち竜田口(Sta.1付近)における氾濫を考慮しなかったときの追跡計算から得られたハイドログラフ(最大流量= $2982\text{m}^3/\text{s}$)と、このピーク流量を現在の計画流量 $3400\text{m}^3/\text{s}$ に補正したハイドログラフの2通りを計算した。用いたL-Q式は昭和29年に測定された流量と浮遊土砂量の関係¹²⁾、比重 2.73 ¹²⁾を用いてSSの質量に換算した。流量 $3400\text{m}^3/\text{s}$ 時にSS濃度は 8.3% になるとしてデータに加えた。その結果、昭和28年6月26日13時半～翌27日7時半までに流出した土砂量はピーク流量 $2982\text{m}^3/\text{s}$ の場合で533万t、ピーク流量 $3400\text{m}^3/\text{s}$ の場合で760万tとなった。よって確率計算によって得られたSS量の607万tは妥当な推定値となっていると考えられる。

4. 結論

水文統計の手法を応用して白川における懸濁物質の確率流出特性の検討を行った。3年間の懸濁物質負荷量データを解析した結果、単一イベントによる流出水量

の頻度分布は対数正規分布していた。同様にイベント毎の懸濁物質負荷量についても対数正規分布していたが、グンベル分布を用いることでより高負荷量の領域でもほぼ適合した。これから、比較的長期の再現期間における流出土砂量について推定した結果、昭和28年6月の土砂災害のとき1/150確率のSS流出負荷量は607万tとなり、文献値の熊本市への氾濫土砂量の数倍程度のオーダーとなり、おおむね妥当な結果となった。また、年間一回程度起こる洪水による流出土砂量は8695tと求められた。

謝辞：濁度・SS・水質データについては国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室から、河川流量データは国土交通省熊本河川国道工事事務所から貸与していただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 和田安彦：非点源負荷の定量と水域環境への影響度の評価，第16回衛生工学研究討論会論文集，Vol.16，1980。
- 2) 横山勝英，石川忠晴，梅田信：濁質生産量の推定方法に関する研究，ダム工学，Vol. 10，No. 4，pp.311-322，2000。
- 3) 橘治国，那須義和：河川における汚濁物質の流出機構(増水時についての考察)，第11回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集，pp.37-42，1977。
- 4) 海老瀬潜一，宗宮功，大楽尚史：市街地河川における降雨時流出負荷量の変化特性，水質汚濁研究，2，pp. 33 - 44，1979。
- 5) 山本浩一・横山勝英・森下和志・高島創太郎・河野史郎・末次忠司：白川河口域における土砂・栄養塩収支，河川技術論文集，Vol. 11，pp.53-58，2005。
- 6) Yamamoto, K. and Suetsugi T.: Estimation of Particulate Nutrient Load Using Turbidity Meter: Water Science and Technology, Vol 53, No 2, pp. 311-320, 2006。
- 7) Tachibana, H., K. Yamamoto, K. Yoshizawa and Y. Magara: Non-point pollution of Ishikari River, Hokkaido, Japan, Water Science and Technology, Vol. 44, No. 7, pp. 1-8, 2001。
- 8) 星 清：洪水ピークの確率評価法について，開発土木研究所月報，No.539，pp.34-40，1998。
- 9) 星 清：水文統計解析，開発土木研究所月報，No.540，pp.31-63，1998。
- 10) 藤芳義男，白川調査書，第一編，白川洪水の解析(昭和28年6月出水)，1956。
- 11) 建設省熊本工事事務所，阿蘇地域崩壊土砂量調査報告書，1976
- 12) 建設省熊本工事事務所：平成11年度白川浮遊土砂調査業務報告書，2000

(2007.4.5受付)