

飯田松川流域における流出土砂量

信州大学農学部 ○小林 由佳
こばやし ゆか
きたはら ひかる
北原 曜

要旨

飯田松川は崩壊率が 6.1%と土砂生産量の非常に多い流域で、民有林直轄治山事業が行われています。この流域における流出土砂量を米国の侵食土砂量推定式である USLE を用いて算出し、松川ダムの堆砂量と比較した結果、流域の総侵食土砂量の推定に USLE は使用可能であると判断されました。そこで、松川における治山工事が終了した場合の侵食土砂量を USLE により算出すると、現在の侵食土砂量よりはるかに小さい土砂量となると推定されました。

はじめに

わが国での表面侵食による大きな問題として、ダムの堆砂問題があげられます。ダムに大量の土砂が堆積することでダムの貯水能力が低下し、下流に水不足や水質汚濁が発生します。対策としては、たまった土砂を重機で掻きだし、別の場所へ移送する方法が一般的ですが、排土に高額のコストがかかる、土砂を積載したダンプカーが下流住民の生活環境に影響を及ぼす、など多くの問題を抱えています。長野県では、飯田松川に建設された松川ダムが、完成後約 10 年で予想以上の堆砂量のために頻繁な排土を余儀なくされ、土砂を発生源から食い止めることが必要とされています。

このようなダム堆砂問題を念頭におき、荒廃山地流域において土砂流出抑止のために効果的な治山施工を行うためには、崩壊地からの侵食土砂量を把握し、流域全体からの流出土砂量を正確に推定することが重要です。しかし、崩壊地において侵食土砂量を実際に測定した例は少なく、流域からの流出土砂量の見積の精度も悪いのが現状です。治山技術基準が崩壊地からの侵食土砂量を「多 60mm/y、中 40mm/y、少 20mm/y」と算定していること、また「裸地に対して崩壊地からの侵食土砂量は 10 倍となる」といわれていることなどは明確な資料が少なく、また年変動などは全く推定できません。今後さらに効果的な治山計画を樹立しダム堆砂問題を解決するためには、崩壊地からの侵食土砂量を実測し、流域総侵食土砂量の正確な推定を行うことが最優先です。崩壊地により形状や土壌、降雨の状況は異なり、侵食の大きさも変化するため、精度の良い土砂量の推定には、崩壊地の斜面長、傾斜、植物の侵入状況や流域の降雨、地質などを考慮しなければなりません。

さて、これらの諸問題にうまく解決策を与えるのが、米国の侵食土砂量推定式 USLE です。USLE は降雨、土壌、斜面長と傾斜など全部で 6 つの因子を含んだ推定式であるため、農地では非常に精度もよく、世界的にも用いられています。日本の農地でもよく適用されていますが、近年山地森林を対象とした野外試験の資料を用い、補足試験を行うことで、山地森林に対しても適用されつつあります (北原 2002)。

1 研究目的と研究フロー

本研究では米国の侵食土砂量推定式である USLE を用いて長野県飯田松川流域の総侵食土砂

量を推定すること、実際に崩壊地からの侵食土砂量を測定し農地用に開発された USLE が崩壊地でも適用性をもつかどうかの二点について検討することを目的とします。

まず、1993 年度に開始された民有林直轄治山事業に対して林業土木コンサルタンツより提出された「平成 5 年度 飯田市松川入 治山流域別調査報告書」に記載されている治山工事区分 5 地区に発生していた全崩壊地についてのデータを用い、USLE により侵食土砂量を算出、流域全体の侵食土砂量とします。しかしこれを算出するには、松川流域における USLE の係数である降雨係数 R と土壌係数 K が別に必要です。そこで R は下流の松川ダムで観測されている 1975 年から 2000 年までの 26 年分の降水量を用い算出することにします。

次に、流域内の崩壊地に試験地を設け、侵食土砂を捕捉しその量を測定します。 K はこの試験の結果よりもとめ、松川流域を代表する値とします。

さて、松川ダムでは 1974 年より音波探査によりダム湖内の砂礫層の堆砂量が調査されているため、この期間堆砂量と USLE により算出した流域の推定総侵食土砂量を比較することで、USLE の崩壊地での適用性を検討します。ダムの期間堆砂量も 1974 年より 2000 年までデータがそろっているため、推定土砂量との年推移なども比較できるため USLE の適用性の検討は可能と考えます。

2 USLE について

USLE (Universal Soil Loss Equation) はアメリカ合衆国農務省 (USDA) 土地保全局が開発した侵食土砂量推定式です。合衆国では現在、以下の式を用いて年平均侵食土砂量を求め、それを土地利用計画の指針としています。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A : 年平均侵食土砂量 R : 降雨係数

K : 土壌係数 L : 斜面長係数

S : 傾斜係数 C : 作物係数 P : 保全係数

(L 、 S をひとつにして傾斜斜面長係数 LS とすることもある)

1950 年代の後半に、合衆国全国 3000 ヶ所の農地の侵食土砂観測プロットから有用なデータを統計処理し、降雨の侵食性の $E I$ 指数を用いた Wischmeier の USLE が提案されました (Wischmeier et al., 1959 など)。USLE はその後いくつかの改良が加えられ、現在の形になりましたが、USLE のように 6 つもの因子を含むものはなく、今日世界各国で広く利用されています。

(1) 各因子について

USLE の各因子について説明します。ここでは単位はメートル単位とします。なお標準斜面は斜面長 22.1m、幅 4m、傾斜度 9% (5 度 10 分) です。

ア 降雨係数 R

その地方で予期される降雨により休閑地 (裸地) からの侵食の可能性を示す値です。一連続降雨ごとの降雨エネルギー E と、その降雨の最大 30 分間降雨強度 (1 時間あたりに換算) $I_{30\max}$ の積 $E \cdot I_{30\max}$ の年間合計値であります。 $E \cdot I_{30\max}$ を 1 年間にわたり合計したものがその降雨観測地点での R となります。1 mm あたりの降雨エネルギーは次のように表します。ここで一連続降雨とは、その合計雨量が 12.7mm 以上で、その間の無降雨期間は 6 時

間以内のものと定義されています。ただし、降雨強度が 15 分間に 6.4mm 以上ならば一連続降雨と考えます。

$$E_{1mm} = 12.1 + 8.9 \log_{10} I_{60}$$

E_{1mm} : 1 mm の降雨の運動エネルギー [m · ton f₂ /ha/mm] · · · · · (1)

I_{60} : 降雨強度 [mm/hour]

$$R = E I_{60max} \text{の年間合計値}$$

I_{60max} : 最大 60 分間降雨強度

ところで我が国では、気象台における過去の長期間の降雨データは、30 分間の雨量においてさえも不備であります。そこで代わりに 60 分間降雨強度を用いた R の簡便計算法がとられてきました (細山田 1984)。土壌侵食を促す降雨は降雨と流出の関係とは異なり、1 mm 以下の降雨あるいは無降雨が 1 時間以上続く場合、一連続降雨とみなさないとし、一連続降雨 13mm 以上の降雨を 1 時間づつの時間雨量の測定結果からもとめます。そして単位降雨あたりのエネルギー E_{1mm} を (1) より算出します。次に単位観測時間 (この場合 60 分間) の降雨量と E_{1mm} との積を一連続降雨について積算し、この一連続降雨エネルギーと最大 60 分間降雨強度 I_{60max} との積 $E I_{60max}$ を 1 年間にわたり合計することにより R がもとめられます。

イ 土壌係数 K

土壌の受食性を示す係数で、年間侵食量 A を t/ha として、裸地では $K = A/R/L/S$ でもとめることができます。日本における代表的な土壌の K 値を求めるため、谷山 (1998) は土壌環境基礎調査の定点調査のデータを用いてノモグラフ法により、各種土壌の土壌係数をもとめています。

ウ 斜面長係数 L

L は、傾斜係数 S とともに斜面の地形が侵食に及ぼす影響を表しています。標準斜面の斜面長が 22.1 m であることから、次式で表されます。

$$L = (1 / 22.1)^m$$

l : 斜面長 (m)

m : 傾斜により決まる定数

傾斜が 5% (2.9 度) 以上のとき 0.5 3.5~4.5% (2.0~2.6 度) のとき 0.4

1~3% (0.6~1.7 度) のとき 0.3 1% (0.6 度) 以下のとき 0.2

エ 傾斜係数 S

傾斜係数 S は次式によって表されます。

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065$$

大倉ら (1998) によれば、勾配 30 度程度までは適用可能であるとされています。

オ 作物係数 C

畑が作付けされる場合に減少する侵食土砂量の割合を表すのが作物係数 C です。

カ 保全係数 P

等高線栽培、横ウネ栽培、帯状作付けなどによって侵食が減少する割合を示します。 C および P は標準状態に対する侵食土砂量の変化割合を示す無次元量ですが、種々の栽培条件の中での作物の品種や、種々の地形条件によって耕作の方法が左右されるなど、関連する事柄は非常に複雑です。

(2) 森林への適用

大倉ほか(1996、1998)はかき起こしにより裸地化した斜面において、表面侵食流出土砂量の経年観測とUSLEによる解析を行っていますが、USLEの森林への適用性はこれまでほとんど検討されてきませんでした。USLEを山地森林に適用した数少ない例として農林水産技術会議(1997)がありますが、侵食量の測定方法に大きな問題点があり、算出された係数などをそのまま使用することはできません。というのも、USLEの山地森林への適用には、その基準(斜面長22.1m、幅4m)にしたがった多数の野外侵食試験が必要で、その結果からUSLEが使用できるのかどうか、使用できるとするならばどのように改善するのかが検討しなければならないからです。一方、わが国には山地森林を対象にした精密な野外侵食試験資料が多数あります。北原ほか(1998)はこれらに若干の補足試験を行うことでUSLEに対してより有効に活用できると考え、USLEの山地森林への適用性を検討しました。それによるとUSLEの斜面長係数 L 、傾斜係数 S の算出方法は、斜面長は少なくとも50mまで、傾斜角は30度程度までほぼ妥当なものであると判断されました。また、これまでの侵食試験のデータを用いて C と P の係数値の提示が行われ、表面侵食に対する植生の防止機能が具体的に数値で示されています。

3 対象地

(1) 位置

対象地は長野県南部の中心都市、飯田市の北西部に位置する山地、松川流域としました。松川は木曾山脈の奥念丈岳(2,303m)に源流を發し、西縁を画する安平路山(2,363m)・摺古木山(2,168m)・風穴山(1,988m)及び東縁を画する念丈岳(2,290m)・大島山(1,869m)・本高森山(1,890m)・鷹巣山(1,443m)・風越山(権現岳1,535m)から發する各支流を集めて南下し、山ろく付近で東方へ大きく曲流して飯田市を貫流、天竜川に直行する流路延長約26kmの荒廃河川です。(図-1)

(2) 流域の概要

松川流域は流域面積60km²、平均標高1,433m、花崗岩類を基盤とします。林況は第9期属地森林簿(1993)によれば、天然林50%、人工林41%、その他(未立木地、崩壊地など)9%となっています。自然植生はシラビソ-オオシラビソ上群集、コメツガ群落、クマシデーサワシバ群落、サイゴクミツバツツジーツガ群集ほかである。下層植生はヤマアジサイ・イタドリ・ヨモギ・カヤ・アザミ・シダ類などで、沢筋にはサワシバ・

ヤナギ・ヤマハンノキ・サワグルミなどが多いです。

人工林は樹種別ではヒノキ 37%、カラマツ 35%と多く、その他の針葉樹 11%、その他広葉樹 8%、スギ・アカマツがそれぞれ 5%などと続いています。

気象は松川ダムの記録によれば、ダム完成以来 2000 年までの 26 年間の年平均降雨量は 2,079mm で年平均降雨日数は 137 日、夏季多雨の特性をもちます。積雪については松川ダムでの観測値がないことから飯田測候所（標高 482m）での観測値を示しますが、1976 年から 1992 年の間で年最大積雪深 35cm、年最小積雪深 5 cm、年平均積雪深は 16cm となっています。松川流域は平均標高が飯田観測所より 1,000m ほど高いことから、積雪はこれより多いと予想できます。

松川流域はほとんどを松川入財産区が所有・管理していますが、一部財産区・飯田市・個人などの所有地や、森林開発公団や地元自治体などの分収林が設定されています。また、治山工事は事業対象区域が広範囲なため、地形区分によって桐の木沢、押の沢、砂古谷、箒沢、牧小谷の 5 地区に分割されています。

長野県は 1975 年 2 月、下流住民の治水・利水を目的とした多目的ダムである松川ダムを松川流域の標高 689.30m 地点に建設しました。松川流域は全国でも有数の荒廃流域であり、荒廃率は 6.1%です。これは治山流域別調査説明書（林業土木コンサルタンツ 1993）によると、全国国有林の平均荒廃率 1.03%の 4.9 倍という値です。ダムの計画堆砂年は当初 100 年でしたが、流域からの大量の流入土砂のため、完成後わずか 12 年で計画堆砂量を超えてしまいました。このため 1993 年度より民有林直轄治山事業が開始されています。

4 方法

(1) 崩壊地での侵食土砂量の測定

ア 崩壊地試験地の概要

試験地には流域のほぼ中央、標高 1,060m に位置する小入道沢沿い 10 年生のヒノキ人工林に自然発生した表層崩壊地を選びました。崩壊地は面積 247.55 m²、斜面長 42.49m（水平長 32.19m）、幅 11.4m、傾斜 40.74 度、ほぼ西向きの斜面です。ヒノキ林のヒノキの平均樹高は 9.02m、林床植生はササ（桿高 70 cm）、スゲ、ムラサキシキブ、ヤマブキ、クロモジでした。基盤である花崗岩が表層で風化したマサ土となっています。

イ 侵食土砂量の測定

崩壊地の崖錘上部に、幅 45cm、深さ 1m、長さ 11m の溝を南北方向に掘り、ビニールシートをかぶせ、土砂受け箱としました。高低差を設けた土砂受け箱の最下部のビニールシートには、穴を開けて金網を張り、排水口をつくりました。侵食土砂の採取は月に一度行い、得られた土砂は落葉など有機物を取り除いてから絶乾させ、この絶乾質量を崩壊地からの侵食土砂量としました。付近には降水を観測している地点がないため、試験地に隣接して雨量計を設置し、10 分間隔で降水を観測しました。

(2) 流域総侵食土砂量推定方法

1975 年から 2000 年に松川ダムで観測された雨量データと、地形図よりもとめた松川流域の平均標高を用い、まず流域の年降雨量を算出します。これを用いて、流域全体の降雨係数 R を算出します。次に、平成 5 年度の治山流域別調査報告書（林業土木コンサルタンツ）よ

り治山工事区分5地区の崩壊地全てについて、斜面長、傾斜を抽出し、斜面長係数 L と傾斜係数 S を算出します。土壌係数 K は崩壊地試験地より得られた実測データから算出します。これら R 、 L 、 S 、 K を用い、各崩壊地から侵食土砂量を算出し、流域全体の侵食土砂量として地区ごと、年ごとに積算します。

5 結果および考察

(1) 崩壊地試験地での侵食土砂量測定結果

崩壊地試験地で行った侵食土砂量の測定結果を表-1に示します。観測日数147日で、採取した土砂は1009.58kg(40.78t/ha)でした。ただし、11月21日からの28日分の土砂は、土砂受け箱に約20cm積雪していたため採取できませんでした。降水量は過去の松川ダムでの降水量と比較すると、平年より少ない傾向がみられ、特にこの流域では一年のうち最も多い9月が目立って少なかったため、侵食土砂量への影響も大きいものと考えられます。

(2) USLE各係数の算出

ア 流域降雨係数 R の算出

降雨係数の算出にあたっての問題点は、使用する30分もしくは60分降水量のデータが入手しにくいこと、きわめて計算が煩雑なことです。また流域単位で広範囲にわたる降雨係数を算出しなければならない場合、ある一つの地点で観測された降水量をその流域全体のものとすることは適当ではありません。ここでは比較的手に入りやすい年降水量を用い、流域の標高差について考慮した、以下の簡易算出法を用いることにしました。 P_b は観測地点である松川ダムの1975年から2000年の年降水量、 h は松川ダムの標高689.30mと松川流域の平均標高1,433mとの差を表します。流域平均標高は、縮尺50000分の1の地形図より流域界から流域の最高等高線まで200mごとに面積をもとめたものにそれぞれの平均標高をかけ、積算し、流域面積で割って算出しました。なお、松川流域は冬期に根雪で覆われるため、年降水量から1、2、3月および12月のデータを差し引きました。

$$\begin{aligned} P &= P_b \left(1 + h / 1000 \right) \\ &= P_b \times 1.7437 \end{aligned}$$

このようにしてもとめた年降水量 P を用い、以下の式で降雨係数 R を算出しました。

$$R = 0.32 \left(P / 100 \right)^{2.5}$$

イ 斜面長係数 L 、傾斜係数 S の算出

松川流域の国有林を除いた治山工事区分の5地区に発生した崩壊地全てについて、斜面長、傾斜を平成5年度の治山流域別調査報告書から抽出し L 、 S を計算しました。

ウ 土壌係数 K の算出

崩壊地試験地での土砂採取試験より得られたデータを用い、土壌係数 K を算出し、流域全体の土壌係数としました。

$$\begin{aligned} K &= A / R / L / S / C / P \\ &= 40.78/53.72/1.39/30.90/1/1 \\ &= 0.0177 \end{aligned}$$

例年にくらべて降雨が少なかったため、 K の精度はよいものとはいえません。今後ひきつづいて観測し、 K 値を松川流域で代表的なものとする必要があります。

(3) 流域総侵食土砂量の推定

以上の R 、 L 、 S 、 K を用い、松川流域の総侵食土砂量を推定しました。対象は崩壊地であるため、植被係数 C 、保全係数 P ともに、 $C = P = 1$ となります。各年の侵食量を合計した年総侵食量と、松川ダムの期間堆砂量、降雨係数、年降水量をまとめ、治山施工区分5地区について各地区の侵食量を USLE で推定したものと治山流域別調査報告書によるものとで比較しました(表-2)。

ア 松川ダム期間堆砂量との比較

1974年より記録されている松川ダムの年間堆砂量と、USLEにより推定した流域年総侵食土砂量を比較しました。1975年から2000年まで26年間の平均は、流域総侵食土砂量が1年あたり265、690 m^3 、松川ダム堆砂量が125、460 m^3 でした。各年の推定侵食量とダム堆砂量の関係を示したものが図-2です。この図からは一部USLEに反映されない事象がダム堆砂量に影響していると考えられる年を除外してあります。前年の降水量が非常に多く当年のダム堆砂量に前年の降水が影響していると考えられる1984年と1999年、ダム堆砂量に当年9月の台風が影響を及ぼしていると考えられる1983年、ダム堆砂量がマイナスとなっている1997年です。これに回帰式を導くと、 $y = 0.401x - 10.757$ となり、 $R^2 = 0.5183$ が得られました。危険率5%で相関係数の検定を行うと、 $n = 22$ のとき $R = 0.7199$ (> 0.4277)となり x と y の間に有意な相関がありました。したがって、USLEによる侵食土砂量の推定は、この流域において信頼できるといえます。

次に、推定侵食土砂量とダム堆砂量の年推移を比較してみると(図-3)、双方ともほぼ同じ動きをとりますが、花崗岩類を基盤とする流域であるため、豪雨が発生すると当年から2年間後までも土砂流出があり、ダム堆砂量に影響しているようです。

イ 地区別侵食量との比較

平成5年度(1993年)の治山流域別調査報告書に記載されているデータから、桐の木沢、押の沢、砂古谷、箒沢、牧小谷の各流域で侵食土砂量を算出し、USLEを用いて推定した侵食土砂量と比較しました(表-2)。1993年の松川ダムの降水量は2025mm(ただし積雪期間の1、2、3、12月は除く)です。USLEにより松川流域の総侵食土砂量として推定した土砂量は419、575 m^3 、報告書で治山技術基準を参考にし、年間侵食土深40mmで計算された土砂量は、5地区の合計で86、348 m^3 でした。USLEによる推定土砂量と報告書による土砂量の差は約5倍となりましたが、これは、報告書による侵食量は降水の影響を含まず、全て年間侵食土深で統一し計算しているためと考えられます。標高が高くなると降水量は増加するため、特に奥地となる牧小谷地区や砂小谷地区からは多く土砂が発生しているといえます。USLEによる方法でも、降雨係数は流域平均標高を用いて算出しているため、地区別にさらに精密に侵食土砂量を推定する場合は、地区を代表する地点に降雨計を設置する必要があると考えられます。

以上より若干問題点はあるものの、USLEが崩壊地において適用性があり、流域の総侵食土砂量の推定にも用いることができるということが出来ます。

(4) 治山工事の効果

治山工事の効果について検討します。裸地：森林の侵食土砂量を100：1とします。崩壊率が6.1%の流域では全く侵食量は以下の式より7.039となります。

$$(0.061 \times 100 + 0.939 \times 1) \cdot \alpha = E = 7.039$$

ここで、この流域の崩壊地の三分の二に治山工事が行われたとすると、

$$(0.0203 \times 100 + 0.9797 \times 1) \cdot \alpha = E = 3.0097$$

となり施工前と施工後と比較すると、

$$3.0097 / 7.039 \times 100 = 42.75$$

で現状に対し、約43%侵食土砂量が減ることになります。これにより、松川ダムの寿命は延長されるため、治山工事の効果は大きいものといえます。

おわりに

本研究では、USLEの崩壊地における適用性の検討と、松川流域の総侵食土砂量のUSLEによる推定を行いました。年降水量を用いた降雨係数 R の算出、崩壊地の侵食土砂量の実測結果より算出した土壌係数 K 、これらを用い松川流域の侵食土砂量を推定し、過去26年の松川ダムの期間堆砂量と比較することで検討しました。結果として、USLEは崩壊地において適用可能であり、流域の総侵食土砂量の推定にも用いることができるとわかりました。また、治山工事の効果を検討しましたが、ダムの寿命延長にかなりの効果があるという結果になりました。今後、継続して研究を行うことで、流域の代表値としては信頼性にかける土壌係数 K の精度を高めること、森林からの侵食量についての考慮、ダムにたまらず浮遊砂として流れる土砂についてなど検討を進めていきたいと考えています。

これからさらにUSLEの精度を向上させるとともに、今後は治山計画樹立の際にUSLEの使用などを視野にいれた研究の継続が必要であると考えます。

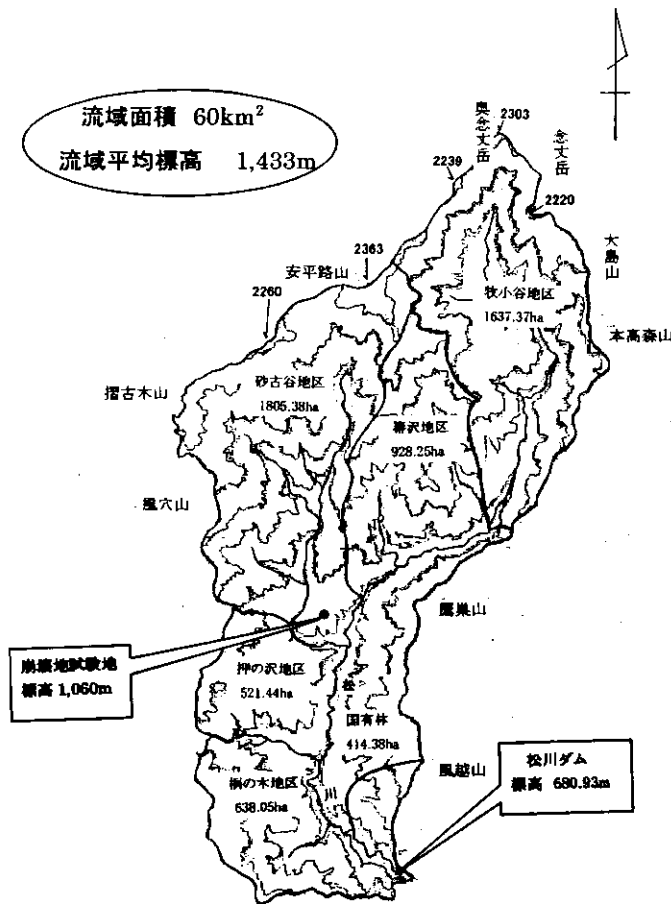


図-1 松川流域の概要

表-1 松川 表層崩壊試験地

面積	247.55 m ²
斜面長	42.49 m
(水平長)	32.19 m)
傾斜	40.74 °
容積重	1.364 g/ml

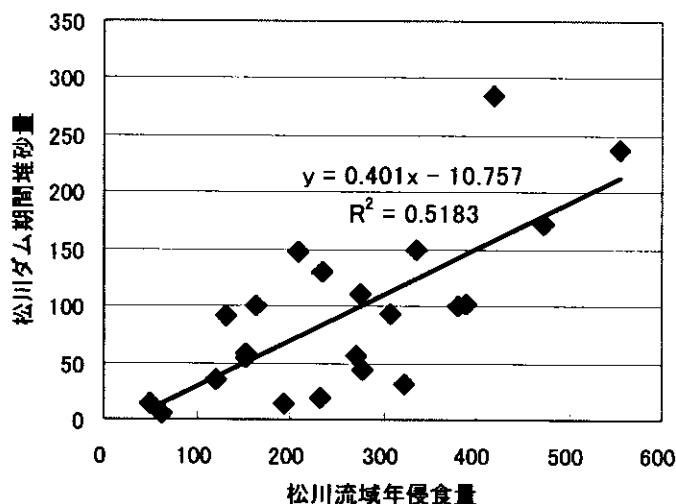
観測期間(2001年)	降水量(mm)	侵食量(kg)	侵食量(t/ha)	侵食土深(mm)	降雨係数:R
7.24-8.27(34日)	210.5	652.08	26.34	2.63	14.3
8.28-9.26(30日)	135.5	25.58	1.03	0.10	4.3
9.27-10.24(28日)	242.5	292.18	11.80	1.18	26.9
10.25-11.20(27日)	96.5	39.74	1.61	0.16	2.6
11.21-12.18(28日)	97.5	採取不能	—	—	5.7
7.24-12.18(147日)	782.5	1009.58	40.78	4.08	53.7

※11.21-12.18の侵食量は積雪のため土砂の採取不能

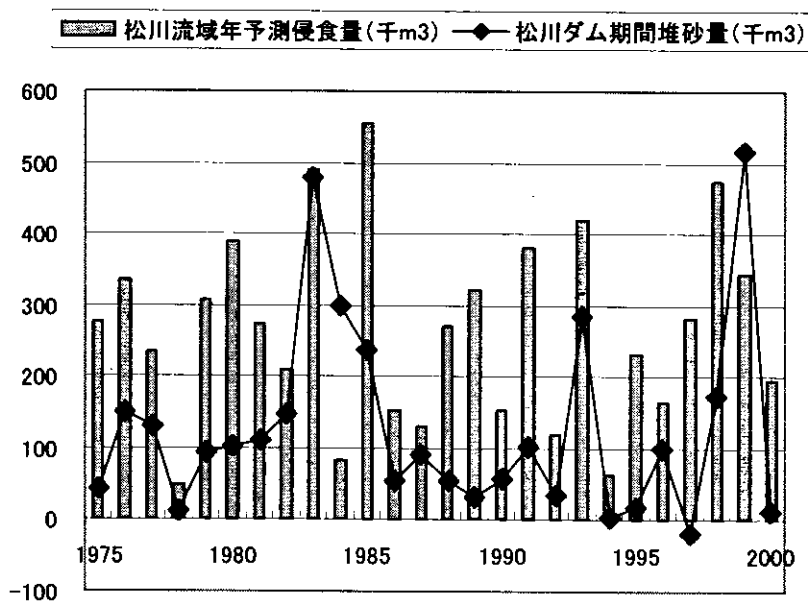
土壌係数:K	0.0177 (実測値を用い $K=A/R/L/S$ により求めた)
斜面長係数:L	1.39 $L=(l/22.1)^m$ ($m=0.5$)
傾斜係数:S	30.90 $S=65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065$
植被係数:C	1
保全係数:P	1

表一 2 治山施工地区分における1993年の侵食土砂量の比較

	流域面積 (ha)	報告書による侵食量 (m ³)	USLEによる推定量 (m ³)	松川ダム堆砂量 (m ³)
桐の木沢地区	638.05	2276	9927.2	
押の沢地区	521.44	2068	7857.9	
砂古谷地区	1805.38	28120	123530.4	
箒沢地区	928.25	13416	60621.2	
牧小谷地区	1637.37	40468	217637.9	
合計	5530.49	86348	419574.6	263435.67
流域全体	6000			285800



図一 2 USLEによる流域年総侵食土砂量とダム期間堆砂量の関係



図一 3 松川流域総侵食土砂量と松川ダム期間堆砂量の推移