

土砂輸送レートの水系内分布特性と 水系土砂動態の解析

(課題番号: 12660126)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金(基盤研究(CX2))
研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者: 清 水 収

宮崎大学附属図書館

(宮崎大学農学部助教授)

100036386

土砂輸送レートの水系内分布特性と水系土砂動態の解析

(課題番号 12660126)

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）研究成果報告書

はじめに

平成 10 年に建設省（当時）は「流砂系の総合的な土砂管理の推進」という新たな方針を打ち出した。それまで砂防、ダム、河川、海岸といった、河川流域の土砂流送にかかわるそれぞれの国土保全事業で行われてきた個別の土砂対策から一歩前進し、水系一貫した土砂管理を目指して取り組みが始まっている。しかし、そのためのベースとなるべき河川水系スケールでの土砂動態に関する知見は未だ十分ではなく、その解明のために土砂動態モニタリング観測が各地で開始されているところである。

貴重なデータとなる土砂動態モニタリング観測の今後の長期継続とならんで、これまでの土砂移動実績の解析に基づいた水系土砂動態の解明が急がれるべきであろう。この水系土砂動態を検討するにあたって、水系内各所に設けられたダムの堆砂実績は重要な情報の一つである。ダムの堆砂量はそのダム地点を通過する輸送土砂量を示しており、これを堆砂に要した年数で除すると、その地点での土砂輸送レート（年平均輸送土砂量）が得られる。

本研究では、多数の治山・砂防ダムの堆砂量計測によって水系網内の多くの地点の土砂輸送レートを把握し、それらを流域面積や谷幅など各々の地点の河道規模を示すパラメータに関連づけて整理して、土砂輸送レートの水系内分布特性を解析する。清水（1998）が行った検討では、流域面積が増大し下流に向かうほど土砂輸送レートは低減する傾向が認められ、これは河川下流ほど河道内の土砂滞留容量（capacity）が増大し、かつ長い滞留時間を持つ土砂の構成割合が高くなることの

反映と推察される。この研究は、前記のように土砂輸送レートの水系内分布特性を解析し、さらにこれに基づいて、土砂の輸送過程で生ずる水系内各所での土砂滞留現象（一時的堆積とその後の再移動）が長期間にわたる水系を通した土砂動態を特徴づけている点を、明らかにしようとしたものである。

研究組織

研究代表者 : 清水 収 (宮崎大学農学部助教授)

交付決定額 (配分額)

(金額単位: 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 12 年度	1,600	0	1,600
平成 13 年度	900	0	900
平成 14 年度	800	0	800
総 計	3,300	0	3,300

研究発表

(1) 学会誌等

Osamu Shimizu: Sediment budgets to estimate transport rates and residence times of sediment in small mountain basins, Transactions, Japanese Geomorphological Union, Vol.22 No.4, p.C-219, 2001

(2) 口頭発表

清水 収、新谷 融: 北海道空知川における河床堆積地の変遷動態と土砂移動、平成 14 年度砂防学会研究発表会概要集、p.26-27、2002

(3) 出版物

清水 収ほか 6 名: 流域動態の認識とその方法、北海道大学図書刊行会、2001
Osamu Shimizu and Tohru Araya: Saru River; in "Source-to-Sink Sedimentary Cascades in Pacific Rim Geo-Systems" edited by T. Marutani, G. J. Brierley, N. A. Trustrum and M. Page, Matsumoto Sabo Work Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, p.62-67, 2001

1. 研究方法

1.1 調査地概要

本研究の対象地は、北海道の日高地方北部を流れる沙流川流域（流域面積 1350km²）と、上川地方南部を流れる空知川上流域（富良野市より上流の流域面積 1172km²）である（図-1）。両流域は近接しており、地質では白亜紀堆積岩が両流域ともに大きな分布を占めており、また蛇紋岩も両流域に分布する。その他の地質としては、沙流川流域には新第三紀堆積岩と深成岩類が、空知川上流域には第四紀火山岩（十勝岳火山群）がそれぞれ分布する。

この2流域内において、図-1に示すように治山ダムおよび砂防ダムの設置された支流域を調査地とした。調査地数は沙流川で42流域、空知川上流で23流域の計65流域である。これら調査地のダム地点上流の流域面積は、最大が93km²、最小が0.6km²であるが、その内訳としては小面積の調査地が多く、面積1~4km²の流域が全体の約半数にあたる31流域となっている。また、堆砂量を計測したダムの規模を有効高で示すと、最大は10mであるが、大部分は2.5~5mである。さらに堤長は20~40mのものが多いが、谷幅の広い地点のダムは60mを超えるものもあり、最大は113mである。これらの調査したダムは、いわゆる土石流対策ダムではなく、治山谷止工、床固工、および水系砂防対策のダムである。65流域のうち、4調査地は十勝岳火山群に源を発する溪流であり、源流域が火山性荒廃地となっているが、残りの調査地は全て森林に被覆された流域である。

以降の検討では、解析の際の標本数を多くするために、沙流川流域の調査地と空知川上流域の調査地を区別せず一括して扱った。

なお、沙流川本川には岩知志ダム（ダム流域面積567km²、1958年完成）、空知川本川には金山ダム（ダム流域面積470km²、1967年完成）があって、それぞれ30~40年間の貯水池堆砂資料が蓄積されている。これらの堆砂資料も、大面積流域における土砂輸送レートとして利用した。

1.2 調査方法

(1) 土砂輸送レートの計測方法

本研究では治山・砂防ダムを河川流送土砂のトラップ装置とみなし、ダム上流域からの流出土砂量であるダム堆砂量を計測することによって土砂輸送レートを得た。土砂輸送レートは、ダム地点における上流単位面積あたりの年平均流出土砂量として定義され、以下のような計算で求めた。

$$Q_s = Q / A / T$$

ここに、 Q_s は土砂輸送レート ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$)、 Q はダム堆砂量 (m^3)、 A は流域面積 (km^2)、 T は堆砂年数 (yr) である。

ダム堆砂量については、現地においてダム堆砂域とその上下流の河床縦横断測量を行うとともに、元河床の縦横断図やダム構造図などの資料をダムの設置機関より収集して、現河床と元河床の形状比較から計算した。堆砂年数については、ダム施工年を堆砂の開始年とし、未満砂ダムの場合には現地計測年までの期間とした。一方、現地計測時に既に満砂状態になっていたダムの場合には、過去の満砂に達した年までの期間とした。この過去の満砂年は、堆砂面のダム天端隣接部に生育するヤナギ類・ケヤマハンノキなどの一斉林から、最も古いとみなされる個体を数本選定し、樹幹下部の土砂埋没部分を掘削した上で伐採して、その樹齢から推定した。これに加えて、ダム満砂以降のより最近に発生した土砂移動によって、樹齢調査に用いた樹木が更新されている場合を考慮して、推定満砂年の近辺に撮影された空中写真を判読し、ダム堆砂状況の確認を行った。

一般に山地上流域における土砂流出は、数年に一度の発生頻度を持つある規模以上の降雨・出水イベント時に発生し、治山・砂防ダムの堆砂は間欠的に進行する。したがって、ここで用いる土砂輸送レートは、間欠的に進行した堆砂の累計値をそ

の期間の年数で除して 1 年あたりに表現したものであり、平年的な輸送土砂量という意味はなく、むしろ、イベントの発生頻度を内包した 1 年あたりの土砂輸送速度、とみなされるものである。

調査された 65 流域のうち、現地計測時点で未満砂であった 11 流域は堆砂年数が 24 年から 34 年の範囲であったが、残りの流域の大部分は堆砂年数が 10 年以下である。さらに、ダム完成直後に大雨が発生して 2 年以内にダムが満砂した流域が 6 例あった。これらの 6 例は、土砂量を 1 年あたりで表現すると過大な値となり適当でないため、解析の対象から除外した。したがって、以降では沙流川 38 流域、空知川上流 21 流域の計 59 流域の土砂輸送レートを解析の対象とした。

(2) 輸送レートを規定する要因の調査方法

水系内のある地点における土砂輸送レートは、概念的にはその上流域における斜面での土砂生産特性と河道での土砂流送特性の 2 つに規定されると考えられる。そして、後者の土砂流送特性には、例えば河床勾配に代表される土砂の運搬能力だけでなく、谷幅などの土砂の滞留能力も含まれる。これらを勘案して、土砂輸送レートを規定する要因として以下のような因子を取り上げた。

① 流域地質

地質は、第一には山体斜面の侵食特性を通して土砂生産の活発さに現れる。これは現在の短時間スケールにおいても認められる。これに加えて、地質の違いは長期間の流域侵食の結果としての斜面地形や水系発達にも反映されることから、地質は複合的な要素を持つ因子である。調査地ごとの地質は、5 万分の 1 地質図を用い、流域内で最大面積を占める代表地質を調べた。

② 流域面積

流域面積は前述した土砂輸送レートの定義のなかで既に使われているが、さらに土砂輸送レートの分析に際して、流域面積は水系網内で相対的に上流、あるいは下流といった縦断的位置を示す指標となる。例えば、流域面積が小さければ源流部に

近く、流域面積が大きければ下流域に位置することを表す。この河川縦断における位置は、上流の流路長、河床勾配、谷幅、また河床材料の粒径などを複合的に表す因子である。調査地ごとの流域面積は、5 万分の 1 地形図上でダム地点上流域の面積をプランメータによって計測した。

③ 起伏比

起伏比は流域の概略的な傾斜を表す指標で、土砂生産特性に関係する因子と考えられる。起伏比は、流域内の最高標高点とダム地点との標高差 (km) を流域面積 (km^2) で除し、単位面積あたりの標高差 (km/km^2) として表した。

④ 水系密度

水系密度は流域における水系の発達程度を表す指標で、水系発達のよい流域は流域内の総流路長が長いことから、河道の土砂滞留空間量が多いと予想される。水系密度は、流域内の総流路長 (km) を 5 万分の 1 地形図上でプランメータによって計測し、これを流域面積 (km^2) で除して、単位面積あたりの流路長 (km/km^2) として表した。

⑤ 河床勾配

河床勾配は河道の土砂運搬能力を表す指標であり、本論ではダム地点より上流側の本流全区間の平均勾配を用いた。すなわち、延長が最も長い流路を本流とし、この本流の上流端開始点からダム地点までの流路長 (km) を本流の標高差 (km) で除し、パーセントで表した。なお、流路長と標高差は 5 万分の 1 地形図上で計測した。

⑥ 谷幅

谷幅は河道の横断方向の広がりであり、河道の土砂滞留空間量を表す指標である。山地上流域における谷幅は、地形図での計測が不可能であり、現地計測によらなければならない。そこで、ダム地点における谷幅 (m) を現地で計測した。ここで、谷幅とは現在の土砂移動や滞留が及んでいる河道部分の幅によって表す必要があることから、具体的にはダムの両岸端までの範囲の幅であり、堤長とほぼ同じ長さとなる。なお、調査地ごとの谷幅はダム地点での値で代表させたが、ダム地点がそ

の上下流より極端に幅の狭い狭窄部に設置されている事例はないことを、現地にて確認している。

2. 結果と考察

2.1 土砂輸送レートの計測結果

59 流域の土砂輸送レートは、最小 $27 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、最大 $3381 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ で、全体の平均は $551 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ であった。また、これらの内訳は $1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 以上が 8 流域、 $100 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 未満が 7 流域であり、残りの 44 流域は $100 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ の範囲にある。したがって、沙流川と空知川上流における土砂輸送レートは、全体としてみると $10^2 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ オーダーが多いことが判明した。

2.2 土砂輸送レートと地質要因との関係

59 流域を地質で分類した結果、白亜紀堆積岩が 43 流域、新第三紀堆積岩が 4 流域、蛇紋岩が 5 流域、深成岩類が 3 流域、そして第四紀火山岩が 4 流域であった。これら地質ごとの流域数の多少は、対象地である沙流川流域と空知川上流域における各地質の分布面積の割合をおおよそ反映しており、とくに白亜紀堆積岩の地質が最も広範囲に分布していることと関係している。

地質分類ごとに土砂輸送レートを集計して平均値を求めた（図-2）。新第三紀堆積岩は平均 $2120 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、第四紀火山岩は平均 $1948 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ であり、両者は類似していておおよそ $2000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 程度である。次いで、白亜紀堆積岩は平均 $341 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、蛇紋岩は平均 $248 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、そして深成岩類は平均 $109 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ となっている。

この結果から、流域の地質によって土砂輸送レートが著しく異なっていることが明らかである。白亜紀堆積岩は沙流川流域および空知川上流域に最も広く分布する地質であることから、その土砂輸送レートは本調査地域における代表的な値とみなすことができる。これと比較して、新第三紀堆積岩と第四紀火山岩の流域における土砂輸送レートの多さは顕著であり、白亜紀堆積岩の 5 倍以上の値を示す。

この理由として、両地質における土砂生産の活発さが推察される。まず、第四紀火山岩の 4 流域はいずれも活火山の十勝岳に源を発しており、その源流部は火山性荒廃地となっている。すなわち、植生被覆が粗で、山腹斜面はルーズで脆弱な火山噴出物から構成され、さらに溪床には多量の不安定土砂が蓄積されている。このような状況から、斜面の侵食と河床洗掘による下流への土砂生産が非常に多い。また、新第三紀堆積岩の流域については表層崩壊による土砂生産が活発である。この新第三紀堆積岩の 4 流域はいずれも沙流川流域に属するが、その沙流川流域において新第三紀堆積岩 3 流域と白亜紀堆積岩 1 流域における過去 30 年間の斜面崩壊状況を調査した結果、白亜紀堆積岩では崩壊発生頻度が低かったのに対し、新第三紀堆積岩では 3 流域ともに崩壊発生頻度が明らかに高かった（清水、1998）。この

ような崩壊発生頻度の違いは、地質年代に応じた基岩強度の相違によるものと推測される。そして、強度の低い新第三紀堆積岩での表層崩壊の頻発が、下流への活発な土砂生産を引き起こしている。

蛇紋岩流域は本調査地域において地すべりを頻発しているため、他の地質と異なった土砂生産様式を有すると考えられる。しかし、その土砂輸送レートは白亜紀堆積岩よりも若干少ない程度であり、差異は明瞭ではない。一方、深成岩類については少数のサンプルであるが、白亜紀堆積岩よりも輸送レートが明らかに少ないようであり、白亜紀堆積岩の約 $1/3$ となっている。これらの深成岩類はいずれもハンレイ岩であり、堆積岩よりも緻密で硬いため、侵食されにくいと推測される。

2.3 土砂輸送レートと地形要因との関係

地形要因として流域面積、起伏比、水系密度、河床勾配、谷幅の 6 因子を取り上げ、土砂輸送レートとの関係を図-3 から図-7 までの散布図に示した。起伏比との関係（図-4）では右上がりの傾向、水系密度との関係（図-5）では右下がりの傾向、河床勾配との関係（図-6）では右上がりの傾向がそれぞれ予想されたが、実際にはそのような傾向は見出されなかった。また、谷幅との関係（図-7）では、土砂滞留効果によって流出土砂量が調節されて一定値に収束することが事前に予想された。実際の散布状況では谷幅の広い流域で土砂輸送レートが一様に少ないことは伺えるが、これについては後で検討する。

ここでは、図-3 に示した流域面積との関係を議論する。散布図によると流域面積が増大するにつれて、土砂輸送レートが減少するとともに、輸送レートのばらつきが小さくなる傾向が認められる。このことをより明確に表すために、流域面積の階級別に土砂輸送レートの平均値と標準偏差を求め、図-8 に示した。なお、面積の階級は、流域数が均等化するように 2 の累乗で区分している。図から明らかのように、流域面積の増大につれて土砂輸送レートの平均値と標準偏差がともに減少している。

まず、土砂輸送レートそのものが減少する理由は、図-9 に模式的に示される。流域面積の増大とは、一つの水系の中で上流から下流に向かって土砂輸送レートの位置的变化を見ていることを意味する。一般に、上流域ほど侵食（土砂供給）量が多く、河川下流に向かうにしたがって、谷幅の拡大や河床勾配の減少を通じて土砂滞留量が増加する。このため、土砂生産量と滞留量の差分である下流への流出量、すなわち土砂輸送レートが下流へ向かうにしたがい減少することになる。

次に、流域面積の増大につれて土砂輸送レートのばらつきが減少する理由は、図-10 に模式的に示される。個々の単位流域はそれぞれ個別の土砂生産・流出特性を持っており、例えばある大雨イベントがあった場合に、隣接する 2 つの小流域間で土砂移動の発生、非発生の差異があることは日常的に経験する。これらは流域

個々が持つ、水文特性や移動可能土砂蓄積量などのミクロな条件によって、土砂移動の応答性が異なるためである。したがって、流域面積が小さいほどその特性が土砂輸送レートに現れやすく、流域間で輸送レートがばらつくが、これらが集まった大面積流域ではそれらが平均化されて、土砂輸送レートがある幅に収斂していく。これは、一種の確率論的過程とみなされる。

2.4 同一地質条件下における土砂輸送レートと地形要因との関係

前節に取り上げた地形要因では、流域面積だけが土砂輸送レートと系統的な関係が認められ、その他の地形要因との関係は見出されなかった。一方、2.2 で述べたように土砂輸送レートは地質によって大きく異なっていた。そこで、59 流域中 43 流域を占める白亜紀堆積岩のみを対象として、地質条件を同一にした上で、さらに地形要因との関係を分析した。その結果、谷幅と河床勾配に関して以下のような関係が見出された。

(1) 土砂輸送レートと谷幅との関係

白亜紀堆積岩流域のみを対象とした谷幅と土砂輸送レートとの散布図を、図-11 に示す。これによると谷幅 40m 付近を境にして、それ未満の流域では土砂輸送レートがばらつき、非常に大きな輸送レートの流域も存在するが、谷幅が 40m を超える流域では、谷幅の増大につれて土砂輸送レートがある値の幅に収斂していく傾向が認められる。

先にも述べたように谷幅は河道の土砂滞留容量を表現しており、谷幅が広ければ土砂滞留の効果によって流出土砂量が調節され、土砂輸送レートがある値に近づいていくものと考えられる。一方、谷幅が狭い場合には土砂滞留効果はなく流過区間であり、上流からの流出土砂量の多寡がそのまま輸送レートのばらつきとなって現れることになる。

ただし、一般に谷幅は河川下流に向かって大きくなるため、上述の関係が先に述べた流域面積と土砂輸送レートとの関係を繰り返している可能性を吟味しなければならない。そこで、図-12 に流域面積と谷幅の散布図を示したが、ここで扱った 43 流域においては流域面積と谷幅が無関係であることが確認された。したがって、上述の谷幅に関する説明は妥当と考えられる。

(2) 土砂輸送レートと河床勾配との関係

前項で検討した谷幅の分析結果を踏まえて、谷幅の 40m を境にそれより広い流域と狭い流域とに区分した上で、それぞれ河床勾配と土砂輸送レートとの関係を分析した（図-13）。その結果、谷幅が広い流域においては河床勾配が大きいほど土砂輸送レートが増大する、有意な正の相関関係が認められた。一方、谷幅が狭い流域では河床勾配と土砂輸送レートとの間に関係が認められなかった。

この理由は次のように解釈される。谷幅の広い流域では、土砂滞留容量が大きいために滞留土砂が豊富にあり、この移動可能土砂が豊富な条件下では河床勾配が表す土砂輸送能力に応じて、土砂輸送レートが決定される。一方、谷幅の狭い流域では、土砂滞留がなく流過区間であるため、土砂輸送レートはもっぱら源流部での土砂生産状況に依存し、たとえ河床勾配が急で土砂輸送能力が高くても移動可能土砂がなければ輸送レートは少なく、源流部での土砂生産の多寡に応じて土砂輸送レートがばらつくことになる。

3. 要約

北海道の沙流川流域と空知川上流域における計 59 流域の土砂輸送レートについて、その規定要因を流域地質および河川水系スケールの地形的観点から解析した。土砂輸送レートは、ダム地点における上流単位面積あたりの年平均流出土砂量として定義された。得られた結果は以下のとおりである。

1. 流域面積が大きいほど、土砂輸送レートは小さく、また流域間でのレートのばらつきも少なくなる。これは河川水系スケールで見た場合に、上流域ほど侵食がより活発であることと、下流域ほど土砂滞留空間が増加することの両方の反映である。輸送レートのばらつきに関しては、上流の小流域ほど個々の流域が持つ土砂生産特性（活発さ）が輸送レートに直接反映されてばらつきが大きい、大面積の下流地点になるとそれらが平均化されて輸送レートのばらつきが小さくなる、と説明される。

2. 同程度の流域面積（1～10km² の範囲）で比較すると、輸送レートは流域地質によって明瞭に異なり、第四紀火山岩ならびに新第三紀堆積岩流域で平均 2000m³/km²/yr 程度、白亜紀堆積岩流域で平均 350m³/km²/yr 程度、蛇紋岩流域で平均 250 m³/km²/yr 程度、深成岩流域で平均 100 m³/km²/yr 程度である。この結果は、一般的に認められる地質ごとの侵食特性と調和する。

3. 最も広く分布する白亜紀堆積岩の流域のみを抽出し、同一地質条件下でさらに地形要因を検討した。その結果、谷幅の広い流域で輸送レートがある幅に収斂し、谷幅の狭い流域でレートがばらついた。谷幅と流域面積が無相関であることを確認したので、この結果より谷幅が土砂滞留の容量を表している。さらに谷幅が広い流域の中では、河床勾配が急なほど輸送レートが大きく、土砂豊富な条件下では勾配が輸送レートを規定する。

文献

清水 収 (1998) : 土砂収支解析による流域土砂輸送の時空間特性に関する研究、
北海道大学農学部演習林研究報告、55-1、p.123-215.

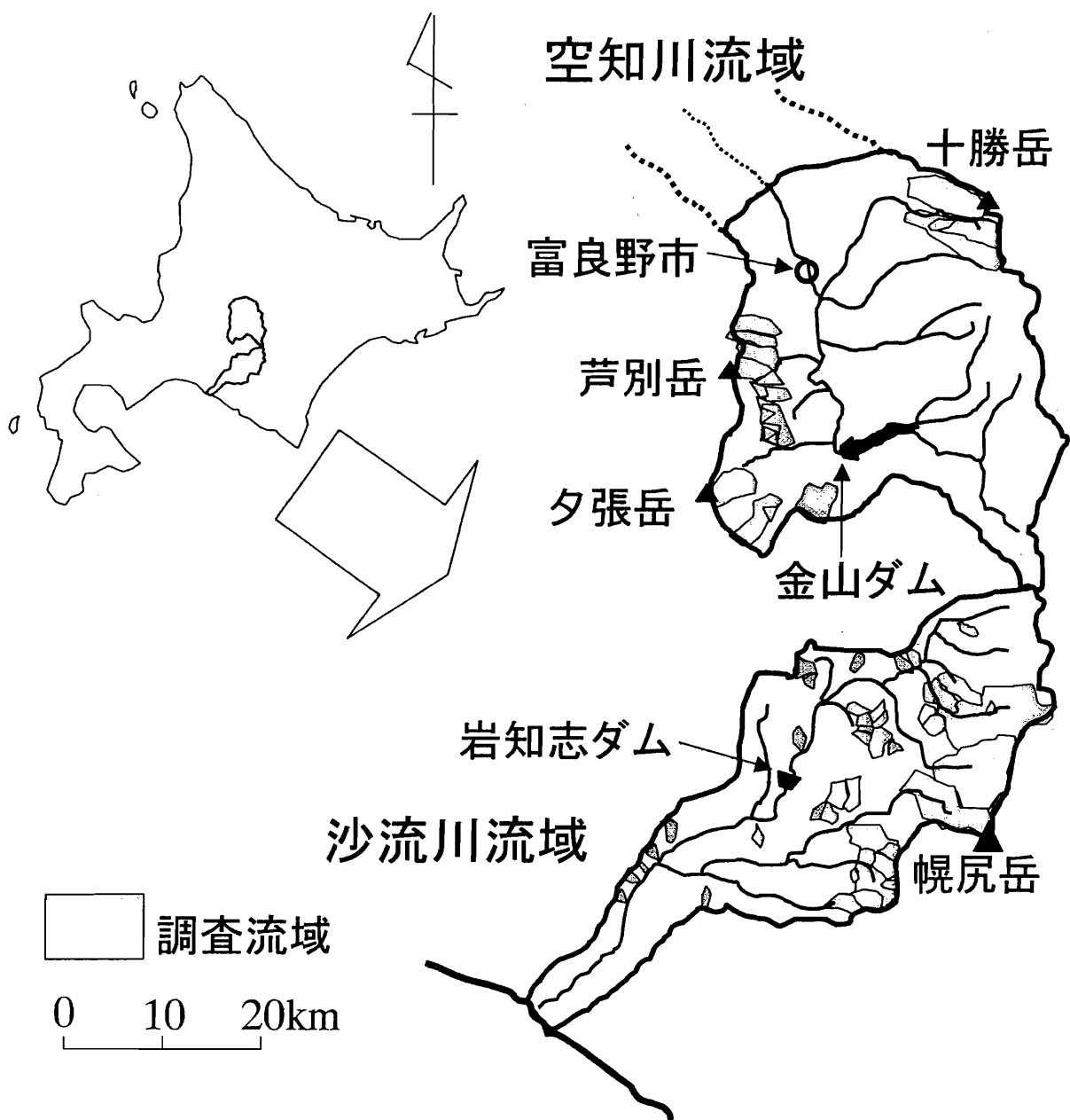


図-1 調査地位置図

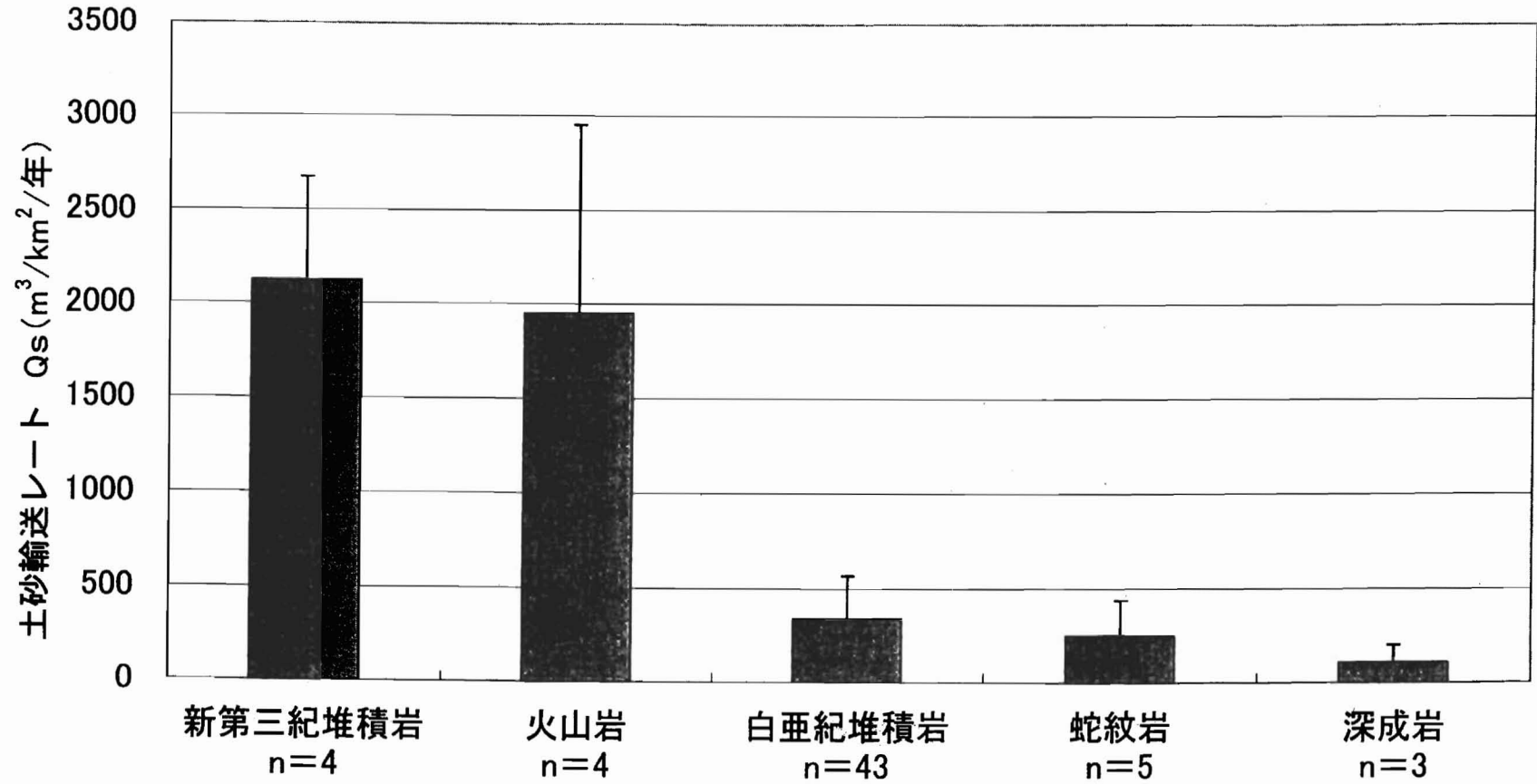


図-2 地質別の土砂輸送レートの違い

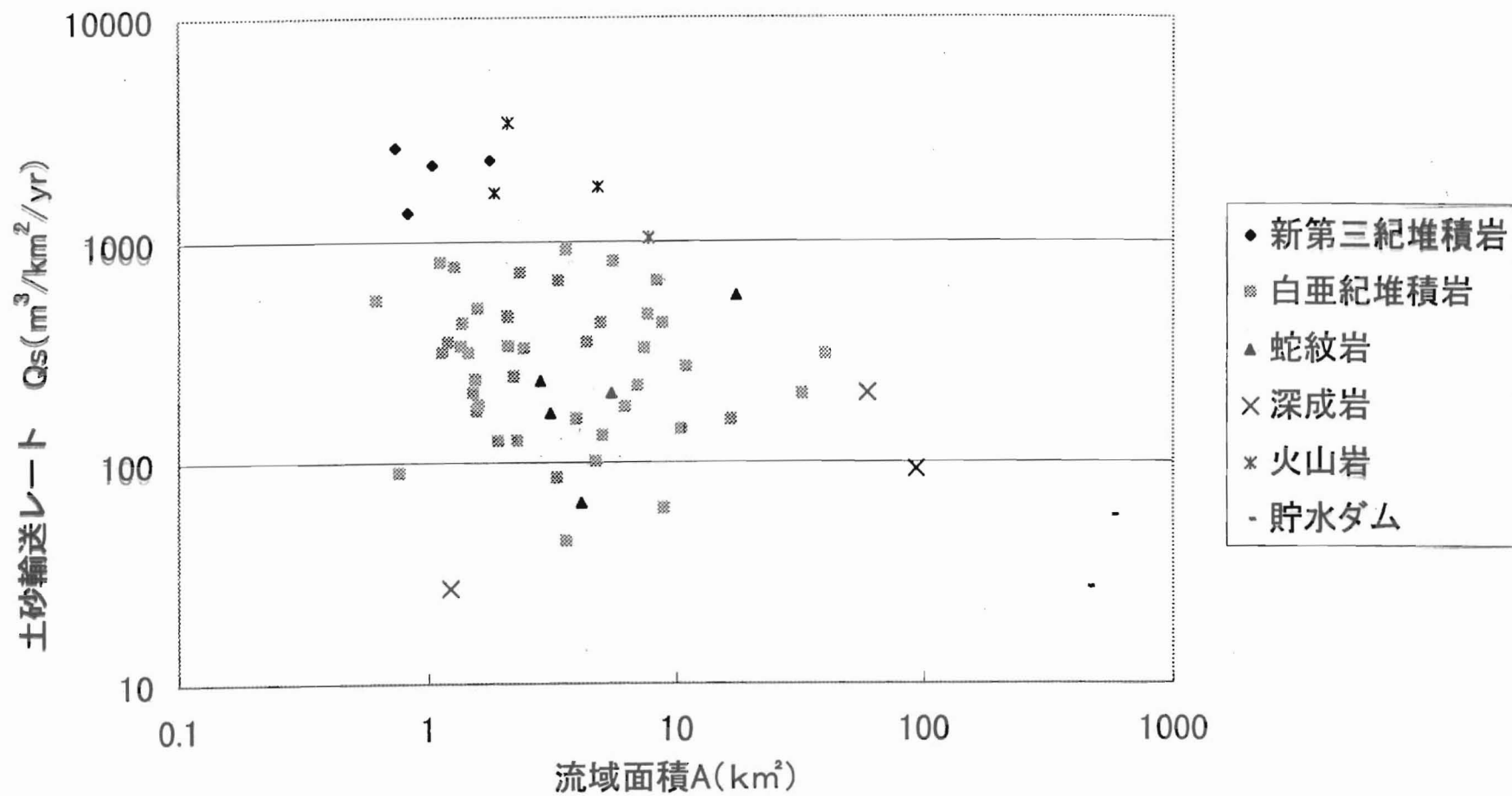


図-3 流域面積と土砂輸送レートとの関係

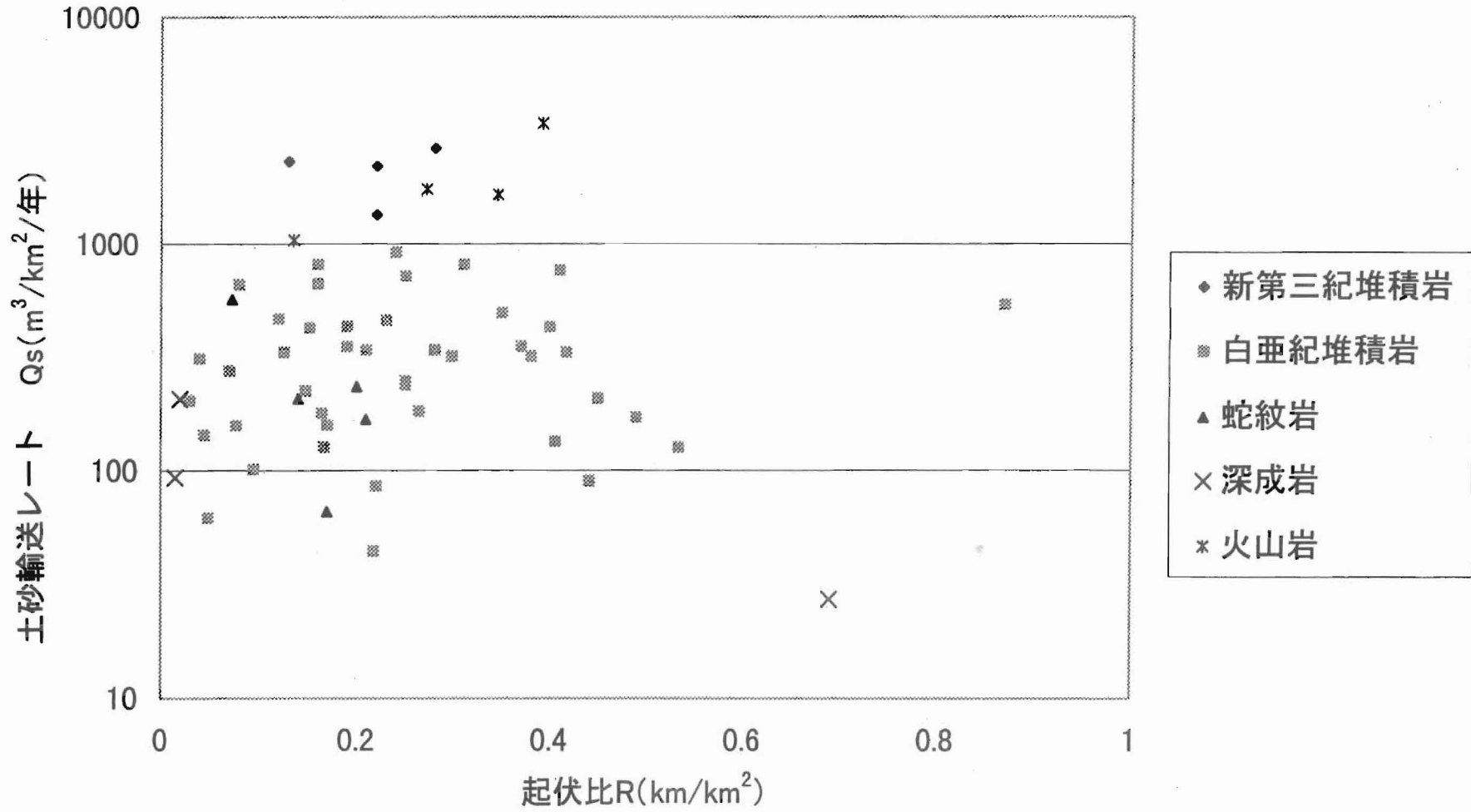


図-4 起伏比と土砂輸送レートとの関係

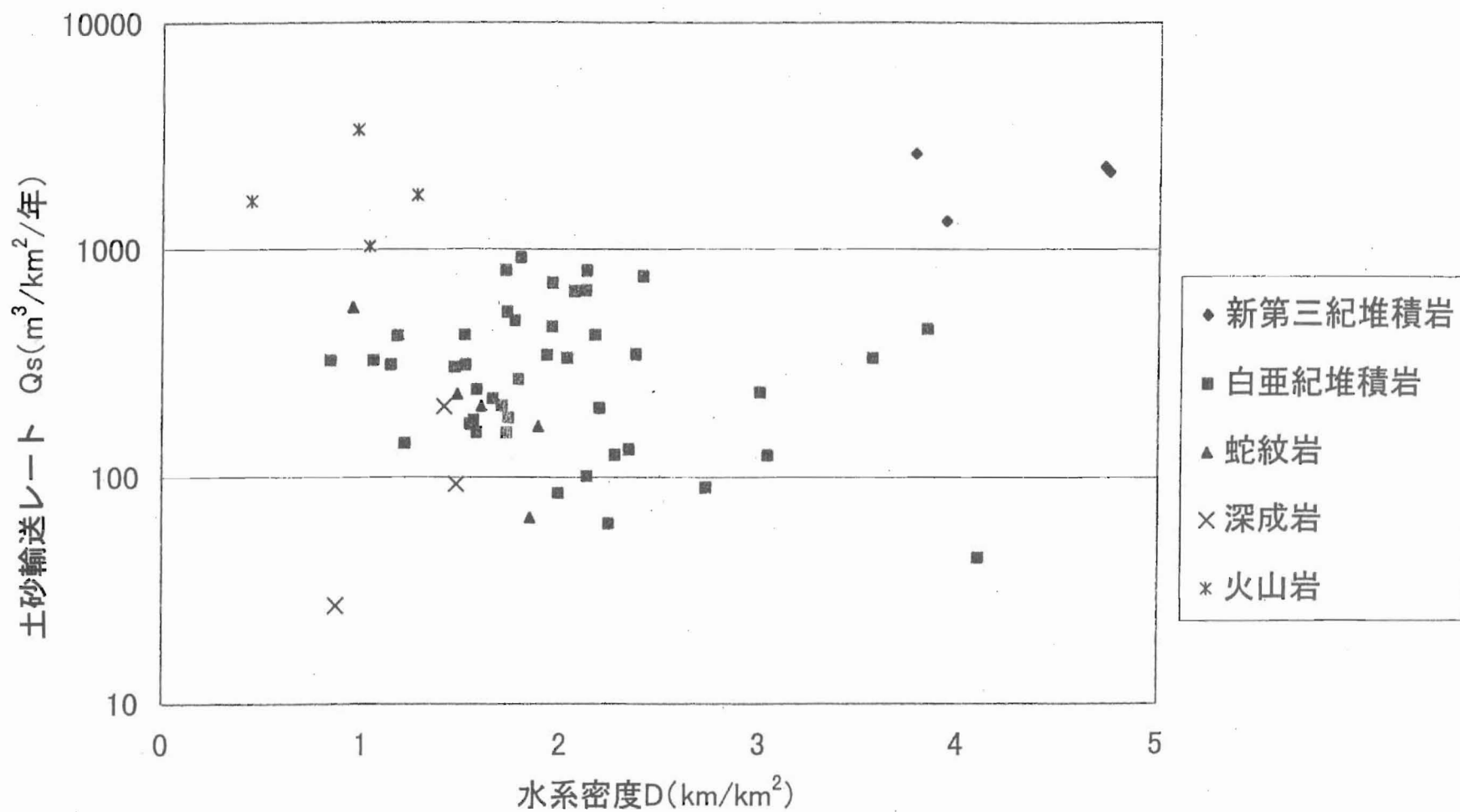


図-5 水系密度と土砂輸送レートとの関係

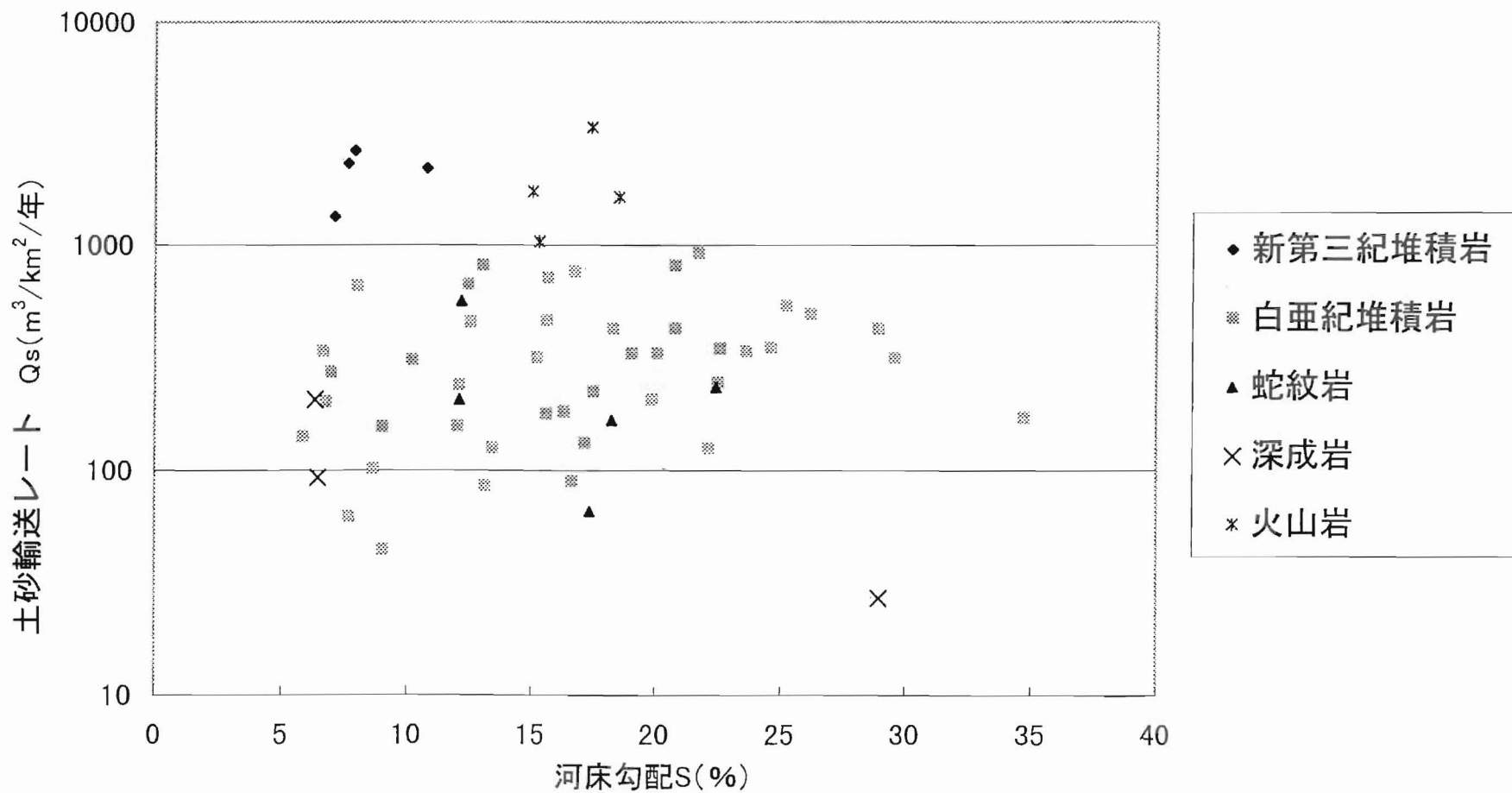


図-6 河床勾配と土砂輸送レートとの関係

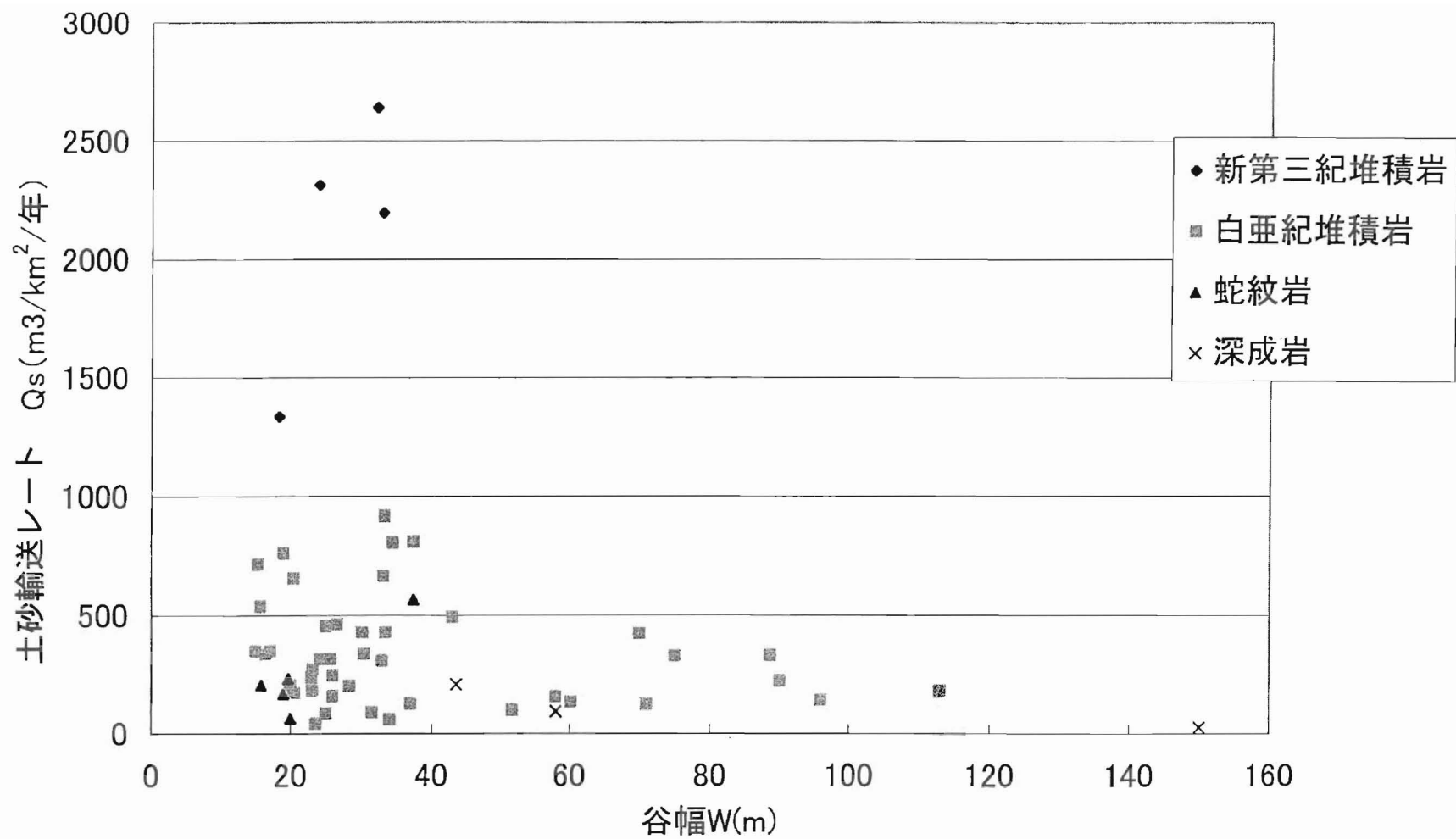


図-7 谷幅と土砂輸送レートとの関係

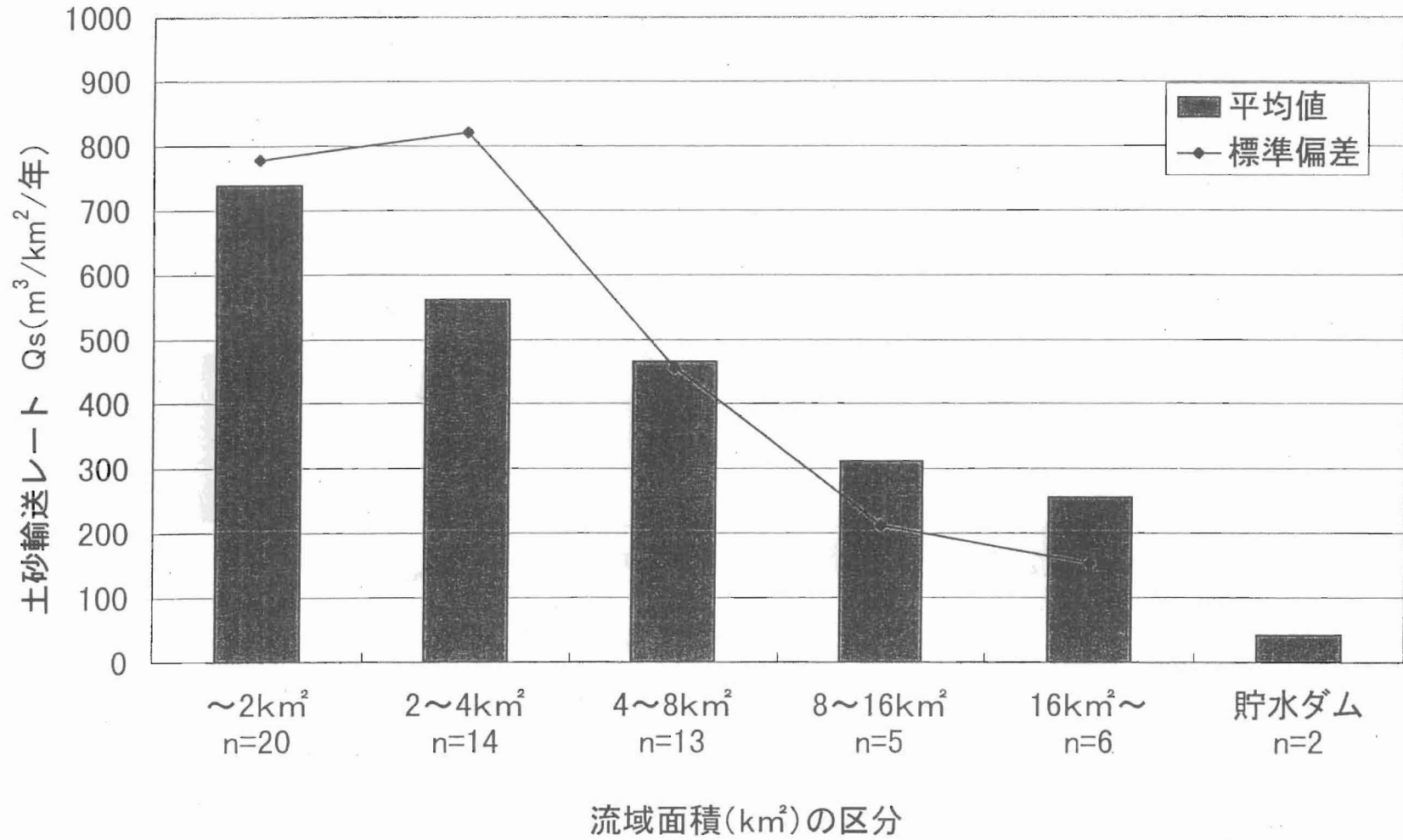


図-8 流域面積階別での土砂輸送レートの平均値と標準偏差

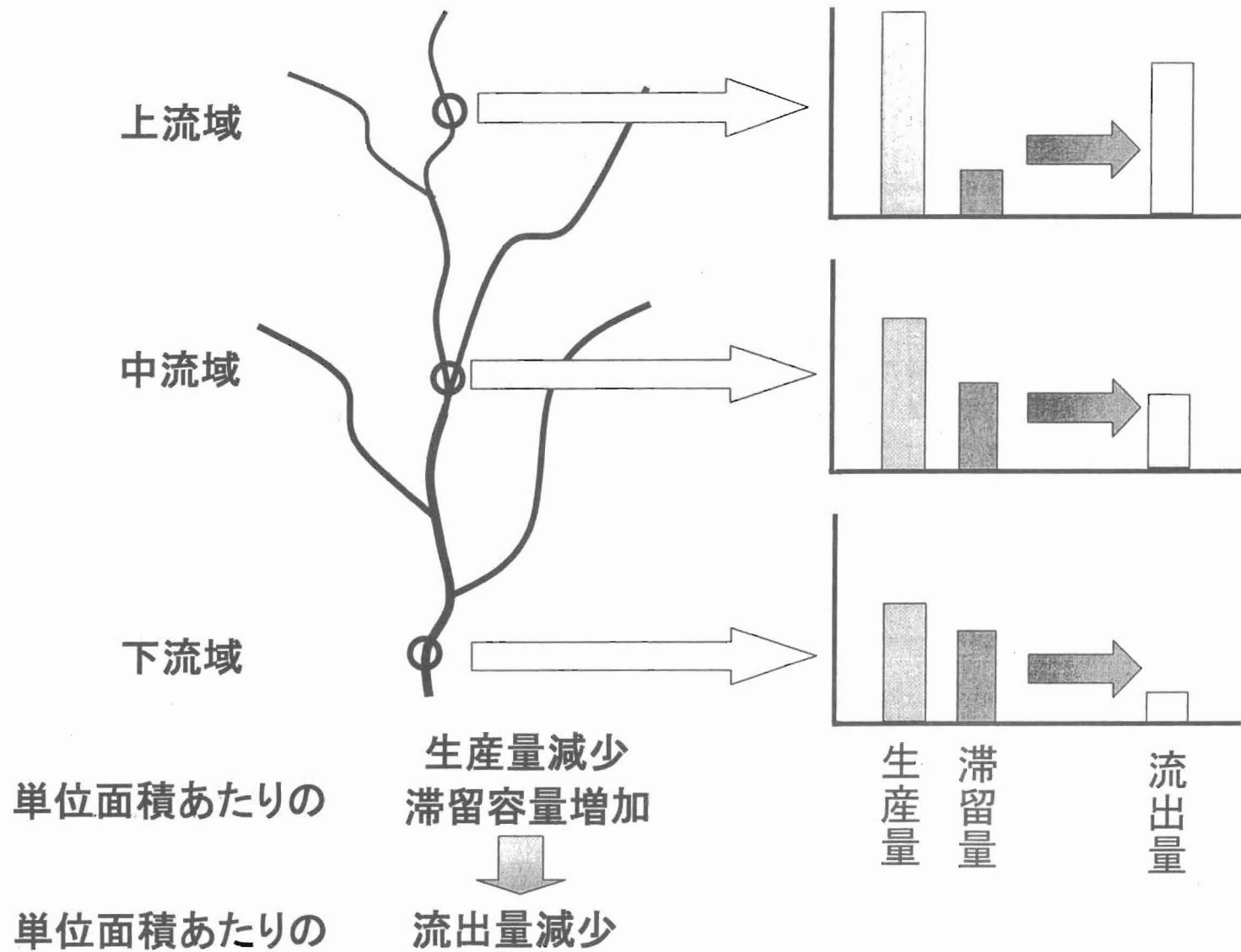


図-9 流域面積の増大につれて土砂輸送レートが減少することの説明

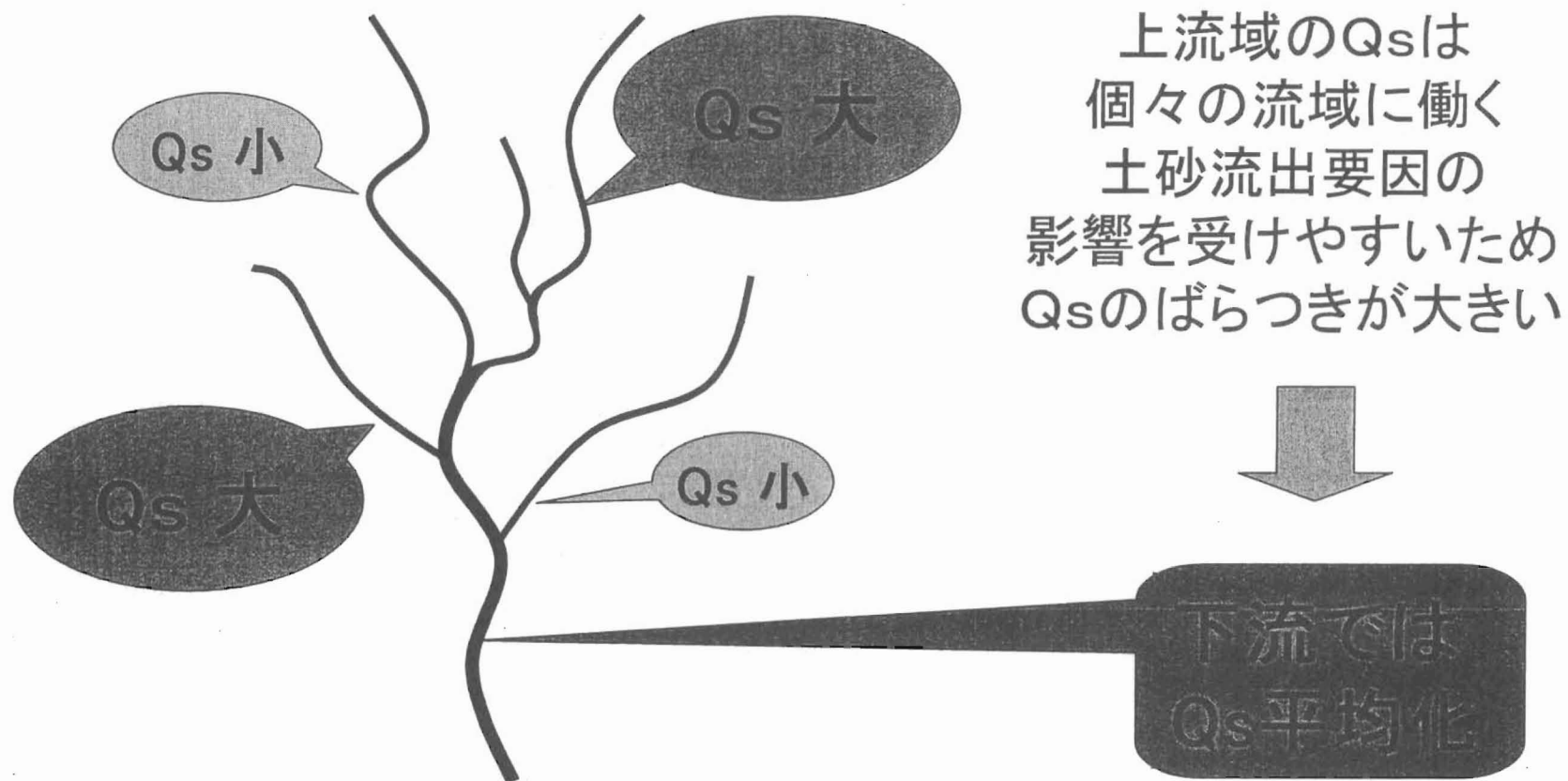


図-10 流域面積の増大につれて土砂輸送レートの流域間のばらつきが減少することの説明

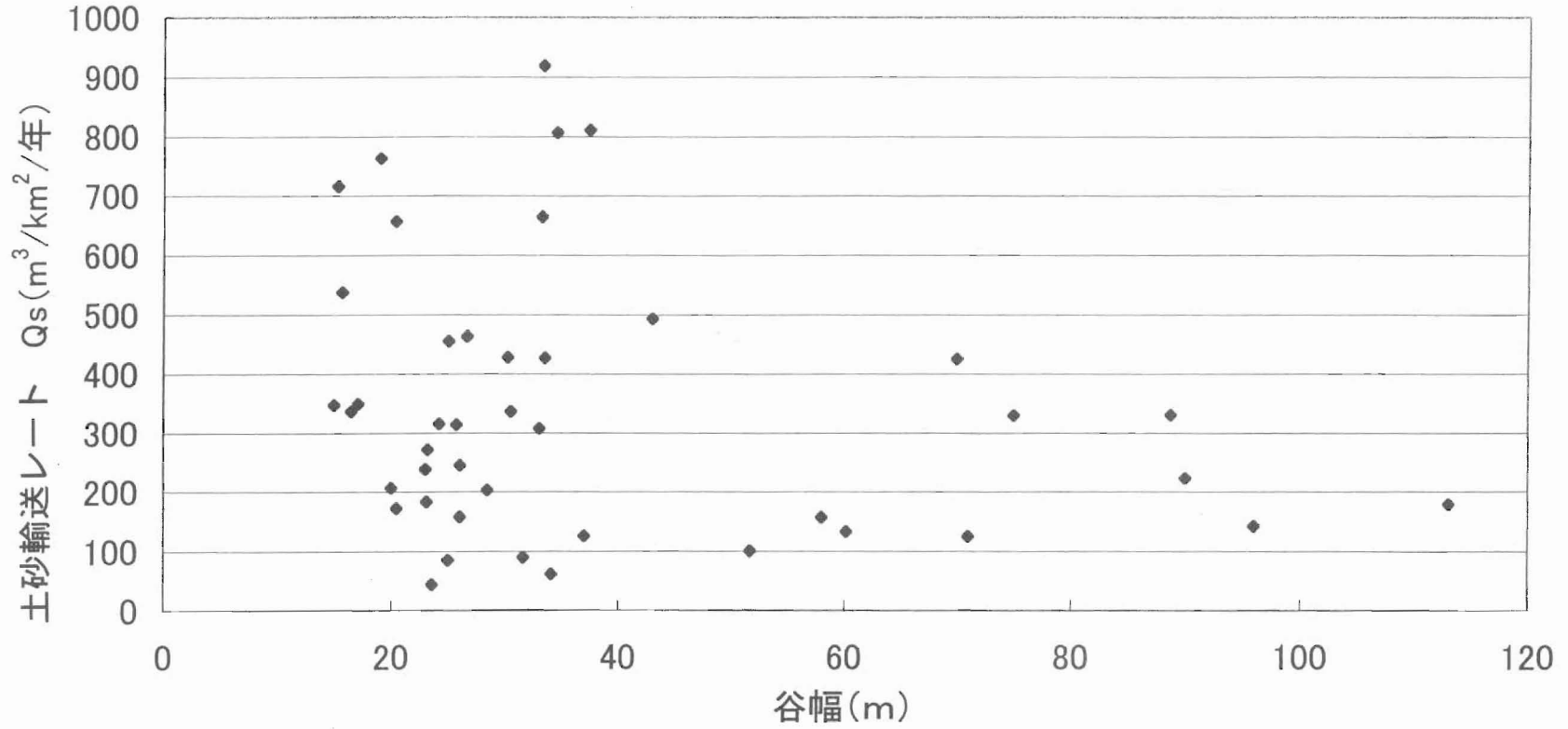


図-11 白亜紀堆積岩流域における谷幅と土砂輸送レートとの関係

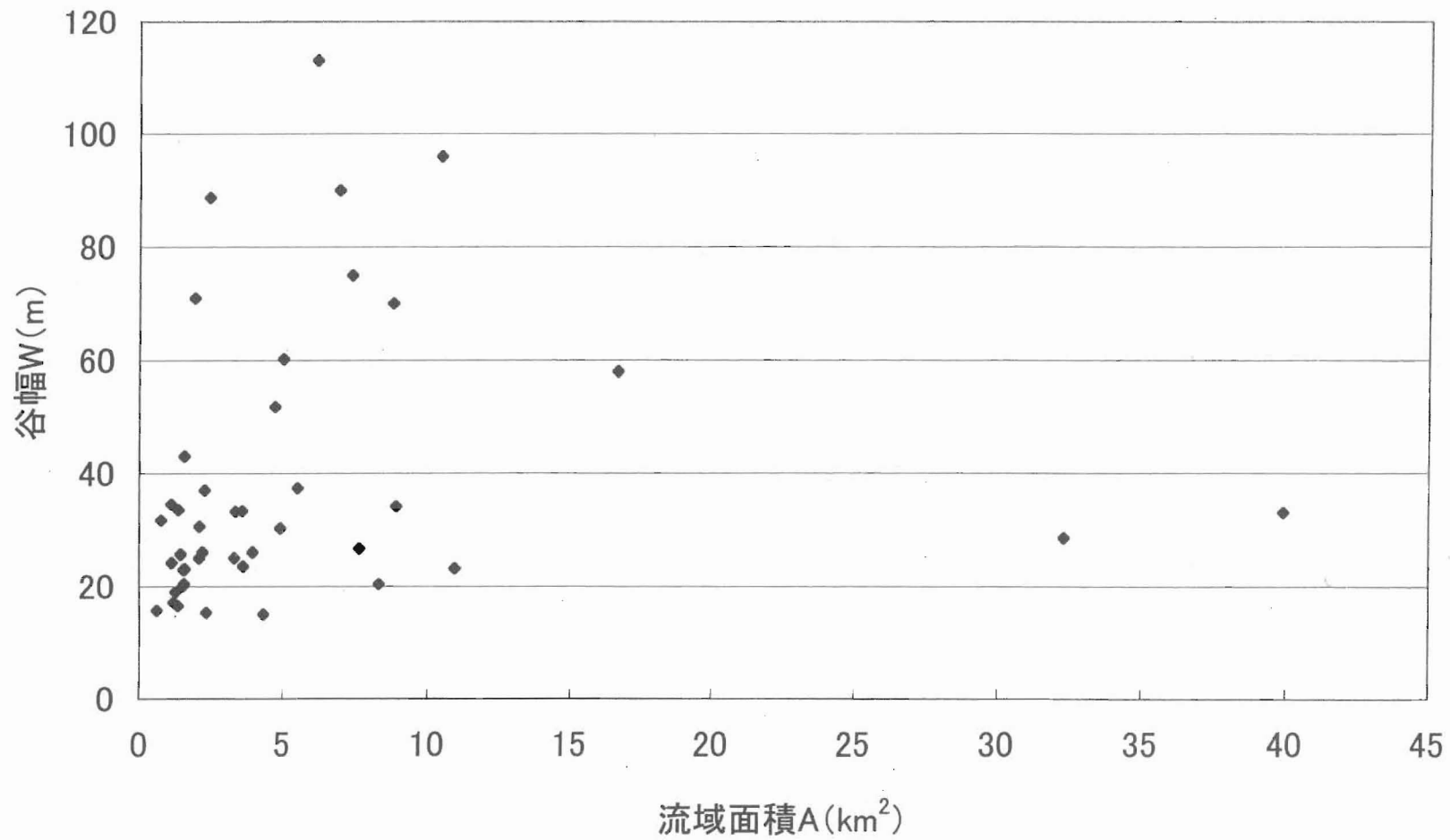


図-12 白亜紀堆積岩流域における谷幅と流域面積との関係

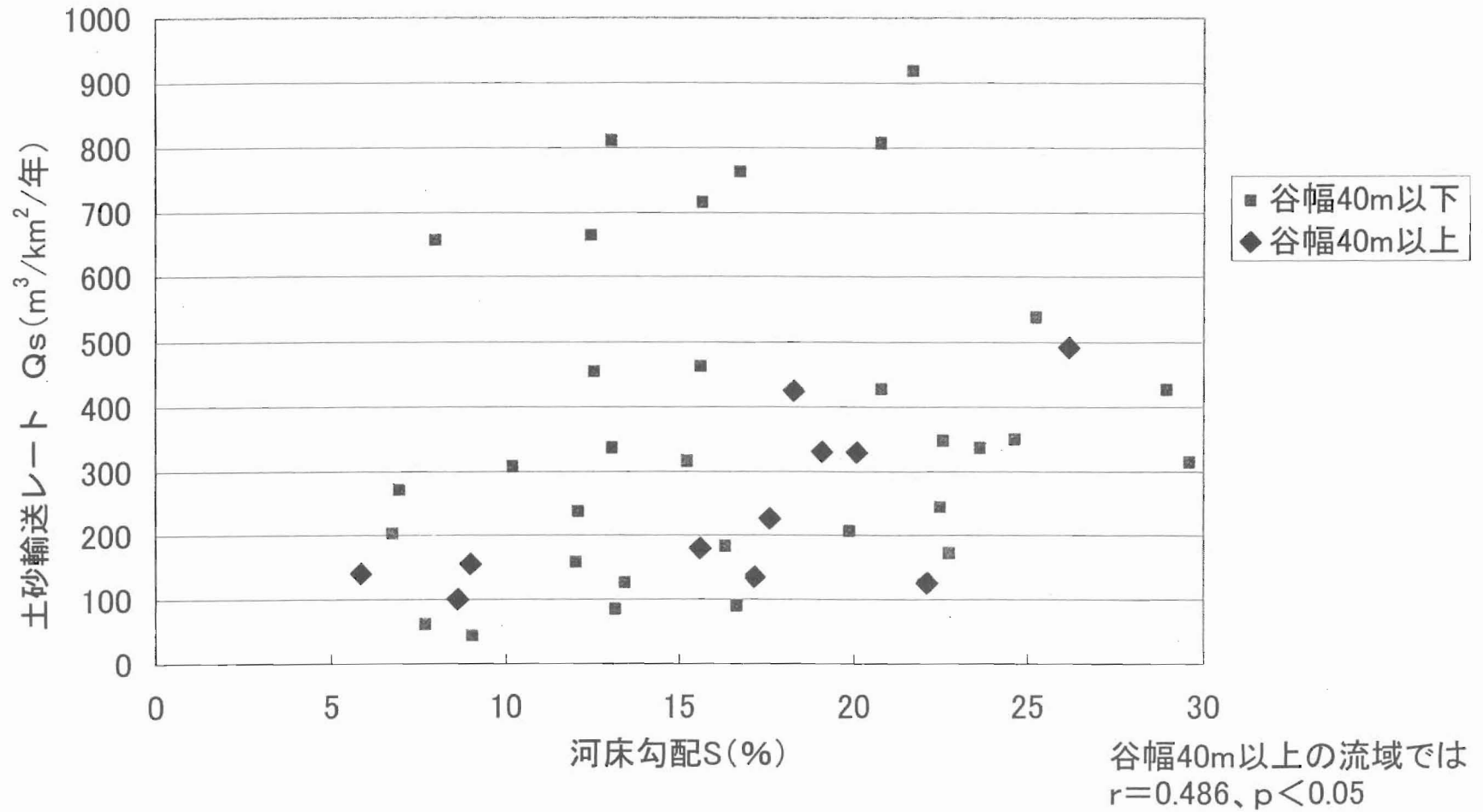


図-13 白亜紀堆積岩流域における河床勾配と土砂輸送レートとの関係