

裸地斜面における流路網形成とそれに伴う土砂生産

Formation of Channel Network on Hillslope and Sediment Yield

関根正人*・金尾昌広**

By Masato SEKINE and Masahiro KANAO

The process of channel network formation is investigated experimentally. Experiments were conducted on the model slope with the artificial rainfall. Video analyses of these experiments enable us to clarify the mechanism of the network formation. The following are the key points; (1) this network formation is influenced by "rainfall intensity", "infiltration intensity" and "slope gradient", (2) erosion due to an overland sheet flow and the deposition of sediment mainly supplied by gully erosion are the fundamental process. The time variation of sediment yield from the downstream end of the slope was also investigated, and is seen to be correlated strongly with the progress of gullies.

Keywords : channel network, gully, sheet flow, rainfall, infiltration.

1. はじめに

裸地斜面上に降雨が継続すると、斜面は浸食を受け、やがて流路網が形成されることが知られている。本論文では、この個々の流路を「水みち」と呼ぶ。この流路網の形成は、降雨として供給された水が、斜面上を sheet flow として流れ下る際の浸食と、水みちの上流端で生じる「ガリ浸食」によって供給された過剰土砂の、下流側への堆積とを原因として、ゆっくりとしたスピードで進行する。ここで、sheet flow は、斜面表層下の透水層が飽和するか、あるいは、浸透能を上回る強度の降雨があった場合に生じる。もし、ある地点で透水層が飽和すれば、その点から地表への水の湧き出しが生じることになり、これが復帰流と呼ばれるものである。復帰流は、その地点から下流側の斜面の急激な浸食を起こすが、これが発達すると組織だった崩落を生じることになる。これをここではガリ浸食と呼ぶ。ガリ浸食は大量の土砂を下流に供給するため、これまで浸食に伴い生じた水みちを塞ぐこともあり、結果として水みちの首振りや分岐が生じることになる。このように、sheet flow による浸食と輸送される土砂の堆積の結果として、複雑な流路網が形成される。これに関連して、斜面の下流端から流出する土砂量を生産土砂量と見れば、この量は、ガリ浸食の発生・進行と密接な関係があり、時間的に顕著な変動を見せる。本研究は、このような水みちの形成機構と、それに伴う土砂生産量の時間変動特性を明らかにすることを目的とする。

流路網の形成に関しては、Horton¹⁾の研究をはじめ、主に地形学の分野で研究が始まった。1970年代になると、

* 正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科
(169 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 学生員 早稲田大学大学院 理工学研究科

澤井²⁾らによる土砂水理学的見地からの研究が発表され、実験を通じて現象の理解が飛躍的に深まった。その後、澤井らを含めて確率論的シミュレーションが試みられたが、未知の部分が多いために、水みちが形成される機構を定量的に、かつ、力学的に十分説明するには至らなかった。こうした中、近年の Willgoose³⁾ の研究を契機に、水みち形成の研究が新たな展開を見せている。泉・Parker^{4), 5)} は、それまでのノーマルフローの考え方を廃し、浅水流方程式に基づき、斜面に微小擾乱が与えられたときの流れおよび土砂移動を摂動法を駆使して解くことにより、斜面に形成される水路の間隔を合理的に求めることに成功し、現象のより深い解明への突破口を示した。一方、関根・小西⁶⁾ は、泉らとは別に、斜面の微小擾乱を乱数を用いてモデル化し、同様の支配方程式を数値解法することで、水みちの形成過程を数値的に再現することを試みた。しかし、地表流による浸食のみを考慮した解析であったため、明確な流路網の形成を説明するには至らず、結果的に、斜面表層下の浸透層の取り扱い、とりわけ上記の復帰流とガリ浸食の影響が重要であることが認識された。そこで、本研究では、制御可能な小規模のモデル斜面を対象にした模型実験を行い、水みち形成の素過程を十分理解することを目指す。さらに、合理的な数値解析を行うための第一歩として、降雨・浸透流・地表流ならびに斜面浸食をリンクさせた解析を試みた。

なお、近年問題となっている地球規模の温暖化に伴い、降雨の生起特性が変化することが指摘されているが、本研究を進展させることにより、これが斜面から供給される生産土砂量にどのような影響を及ぼすかについて理解するための基礎的な知見が得られるものと考えられる。

2. 本研究の概要

2.1 実験の概要

実験は、斜面全域にわたって同一の材料からなり、降雨強度は時間的・場所的に変化しない、という条件下で、図-1 に示すようなモデル斜面を対象として行った。斜面下流端には金網が設置されており、斜面表層下の土砂は透過させないものの、移動土砂・表面流および浸透流は透過可能としてある。本実験では、水みち形成を支配する要因として、(1) 降雨強度、(2) 斜面構成材料の透水強度、(3) 斜面勾配、の3点が考えられるとして、これらを変化させて数通りの実験を行った。

斜面を構成する土砂としては、平均粒径 5.0 mm の硅砂 (透水係数 $6.0 \times 10^{-2}\text{ cm/sec.}$) と平均粒径 $140\text{ }\mu\text{m}$ の豊浦標準砂 (透水係数 $1.0 \times 10^{-2}\text{ cm/sec.}$) の二種類の土砂を用いた。これは、水みち形成に及ぼす浸透強度の影響を明らかにするためである。斜面の初期形状は、図-1 (b) に示すように、上流側に急な斜面を伴う丘 (以下、この部分をマウンドと呼ぶ) を設けた。これは、この急な斜面部から浸透流の湧き出し (復帰流) を生じさせ、以下に説明するような顕著なガリ浸食が生じさせるためである。なお、対照実験として、このマウンドを廃し、透水層厚および斜面勾配が一樣な斜面に対する実験も行っており、マウンドを設けたことによる影響についても検討した。また、人工降雨は、散水用ノズルを調整し、雨滴の径および量が斜面全域にわたって一様に保たれることを確認した後に、所定の強度で発生させることにした。

主な実験の条件を表-1 に示す。実験では、時空間的な降雨強度の測定、下流端から流出する土砂量の測定とあわせて、斜面形状の変化を写真およびビデオテープに記録し、後に画像解析を行った。

2.2 数値解析の概要

本研究では、関根・小西⁶⁾ の数値解析結果に鑑み、浸透流 (とりわけ復帰流) とガリ浸食の効果を考慮に入れた解析モデルの開発を行った。ただし、ここでは、できるだけ簡略化されたモデルの構築を目指し、次のような単純化を行った。(1) 拡散波近似に基づき、(2) 地表流については Manning の式を、(3) 浸透流については飽和状態の流れを記述する Darcy の法則を、それぞれ適用する。流れ方向に x 軸をとり、時間を t とすると、支配方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} q_G &= h_G \times k \quad ; \quad q_S = h_S \times \frac{1}{n} h_S^{2/3} i^{1/2} \\ \lambda \frac{\partial h_G}{\partial t} + \frac{\partial q_G}{\partial x} &= I \quad ; \quad \frac{\partial h_S}{\partial t} + \frac{\partial q_S}{\partial x} = r - I \\ (1-\lambda) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (1 \text{ a, b, c, d, e})$$

本研究の一部は既に発表済み⁷⁾ であるが、本論文は更なる検討を行い、その結果を新たにまとめ直したものである。

表 - 1 実験条件

RUN	水路勾配 [deg]	降雨強度 [mm/hr.]	浸透層形状	斜面 構成材料
A1	13	52.0	マウンドあり	*1
A2	18	45.0	マウンドあり	*1
A3	13	23.0	マウンドあり	*1
A4	13	28.0	マウンドあり	*1
A5	13	30.0	マウンドあり	*1
A6	13	36.0	マウンドあり	*1
A7	13	68.0	マウンドあり	*1
A8	5	39.0	マウンドあり	*1
A9	18	29.5	マウンドあり	*1
AN	13	58.3	マウンドなし	*1
B1	10	10.0	マウンドあり	*2
B2	10	22.0	マウンドあり	*2
B3	10	32.0	マウンドあり	*2
B4	13	10.0	マウンドあり	*2
B5	5	8.0	マウンドあり	*2
B6	8	14.0	マウンドあり	*2
B7	13	15.0	マウンドあり	*2
B8	6.5	30.0	マウンドあり	*2
B9	18	11.5	マウンドあり	*2
BN	10	7.0	マウンドなし	*2

*1) 珪砂(0.5mm) *2) 豊浦標準砂(140 μ m)

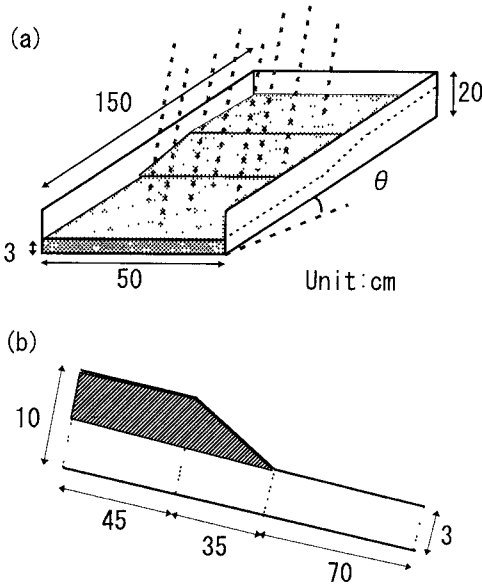


図 - 1 モデル斜面

ここに、 h_G および h_S は浸透流および地表流の水深であり、 q_G および q_S はそれぞれに対応する単位幅流量である。また、 i は水面勾配、 r は降雨強度、 l は浸透強度、 λ は空隙率であり、 k は透水係数、 n は Manning の粗度係数である。斜面高さ η の時間変化を求める際に必要となる掃流砂量 q_B については、斜面の勾配の影響が問題となることがあるものの、ここでは簡易的に Meyer-Peter and Muller 式を用いる。本計算では、これらの方程式を有限差分法の考え方に基づいて解き、諸量の時間変化を求める。なお、時間の経過とともに上流部で局所的な浸食が進み、やがて斜面の勾配が安息角を越えるほど大きくなることもある。このとき、滑り崩落が生じることになり、これを解析モデルに取り入れることが必要である。本研究では、関根⁸⁾と同様の手法を用いてこれを処理することにした。

3. 流路網形成

3.1 流路網の形成過程

斜面上に流路網が形成される典型的なケースの写真を図-2 に示す。これは、標準砂を用い、マウンドを設けた RUN B1 に対応する実験の結果であり、時間の経過とともに水みちが形成されていく過程がよくわかる。そこで、この写真を参照しながら、流路網が形成されていく過程について説明する。すなわち、(1) 降雨強度が斜面の浸透強度を下回るため、降った雨は全て斜面に浸透し、降雨開始後 8 分程度までは地表流は生じない、(2) 表層下の透水層が飽和状態に達すると、斜面上流部より浸透水の湧き出し (復帰流) が生じるようになり、その位置より下流側で地表流が起こる。この地表流は、降雨による補給を受けながら流れ下るため、下流へいくにつれて水深および流速が大きくなる。そこで、一般に下流側ほど流砂量は大きくなり、斜面表層の浸食が起こる (図-2 (a) 参照)、(3) さらに時間が経過すると、選択的に深い水みちが生じるようになる一方で、復帰流が生じる点付近に大規模な崩壊が生じ、その下流側に多量の土砂が供給されるようになる。ただし、この復帰流あるいはガリ浸食は、多少の時間遅れはあるもののほぼ同時に数カ所で発生する (図-2 (b) 参照)、(4) ガリ浸食は、初めは連続的に、時間の経過とともに間欠的に、ゆっくりと発生し、その先端部は斜面上流部へ向かって遡上する。これに伴い供給された土砂は、下流側へ輸送され、あるいはそこに堆積し、時にこれまで発達してきた水みちをせき止める。その結果、上流から流れてきた水は堆積物を避けるように迂回したり、分岐したりするようになる。その結果、それまでに形成されてきた水みち同士の合流も生じるようになり、複雑な流路網が形成されていく (図-2 (c) ~ (e) 参照)。

以上が流路網の形成過程の概略であり、RUN B1 以外の実験条件の場合にも、ほぼ同様であることが確認された。また、個々の水みちの発達に関して、次のような点に注目すると興味深い。すなわち、(1) Horton らにより提案された水系網の階級区分における高次の流路 (骨格となる水みち) は上流側から発達しはじめ、その上流端は復帰流の発生位置と一致する、(2) 水系網の階級区分における低次の流路 (枝に相当する水みち) は、高次の流路から斜



図-2 流路網の形成過程 (RUN A1) :

左から順に、(a) 10 分, (b) 20 分, (c) 30 分, (d) 60 分 (e) 90 分後

面を遡上する形で上流側へと発達してしていく、(3) 下流では数本の水みちが合流して一本となる。なお、マウンドを設置しない場合には、図-2 のような顕著なガリ浸食が生じないために、明確な水みちの形成は認められなかった。

3.2 流路網の形成条件

本研究では、斜面構成材料の浸透能、降雨強度および斜面勾配の3点に着目し、これらが水みちの形成に及ぼす影響について検討した。硅砂あるいは標準砂を用いた実験の結果をまとめたのが図-3である。図-3では、モデル斜面上で生じる現象を、実験時の観察に基づいて以下の5タイプに分類した結果を示している。

第一に、傾斜角が一定という条件の下で考える。もし、降雨強度が少ないと、透水層が飽和することではなく、結果として斜面表層には何も変化が起らない (Type 1)。降雨強度をわずかに増加させると、復帰流が生じるようになり、地表に水が浮いた状態になるが、sheet flow による掃流力が土砂の限界掃流力を下回る程度では、斜面の変形には至らない (Type 2)。さらに降雨強度を増大させると、小規模の水みちからやがてリル状の水みちが形成されるとともに、上流側でガリ浸食が進行するようになる (Type 3)。しかし、降雨強度がある限界を越えると、斜面全域にわたる崩落と、それに伴う比較的流量の大きな sheet flow が生じ、土砂移動も活発となるために、水路内には明確な流路網が形成されなくなる (Type 4)。このように、流路網が形成されるためには、降雨強度と土砂の浸透強度との関係に応じた、有効な降雨強度の範囲が存在することがわかる。

次に、降雨強度が一定である条件下で、斜面の勾配を変化させることを考える。傾斜角が小さい場合 (この場合には 5° 程度) には、sheet flow は生じるものの、勾配が緩いために十分な流速まで発達できず、限界掃流力以下に留まるため、先ほどの Type 2 に分類されるように斜面には何の変化も起らない。一方、勾配がある限界を超えて急 (この場合には 18° 程度) になると、斜面全幅にわたる大規模なすべり破壊が生じるようになる (Type 5)。この点に関しては上記の Type 4 と同様であるが、Type 4 ではその下流側における土砂移動が掃流砂であるのに対して、Type 5 では泥流に近い流動状態にある点に両者の明瞭な差異がある。

次に、斜面構成材料の浸透能の影響について考える。図-3 (a), (b) を比較すると、両者の間に定性的な違いは見られないが、透水係数の小さな標準砂の場合の結果は、硅砂の場合に比べて全体として左下方向へ移動していることがわかる。また、本研究の範囲内における硅砂を用いた実験では Type 4 の状態が存在しなかった。これは、透水係数が小さいほど降雨の地表面下への浸透が抑制されるためと考えられ、水みちの形成条件が浸透能の影響を顕著に受けることが確認された。

このように、流路網の形成条件が、斜面構成材料の浸透能、降雨強度および斜面勾配の影響を顕著に受けることが明らかになった。ただし、厳密な限界条件を特定するには、さらに多くの検討が必要となるため、これについては今後の課題とする。

3.3 数値解析による検討

図-4には、前述した一次元の数値解析の結果の一例を示した。この図は、降雨・浸透流・地表流ならびに斜面高が、相互に関連し合いながら時間的にどのように変化するかを示している。計算に当たっての初期条件としては透水層が dry の状態を、境界条件としては上流端で流れがないという状態を、それぞれ想定しており、図-4では、実験時に用いた硅砂を対象とした結果を示した。この図より、時間の経過とともに透水層が飽和し、復帰流が生じ

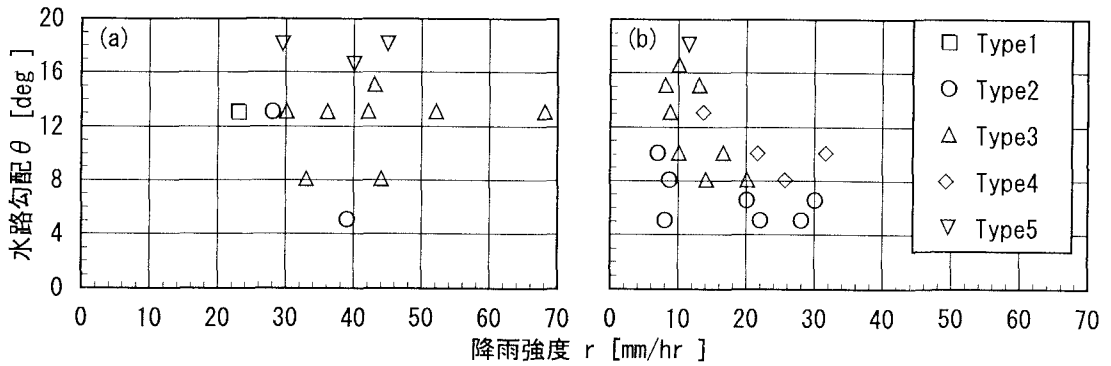


図-3 流路網の形成条件：(a) 珪砂，(b) 標準砂

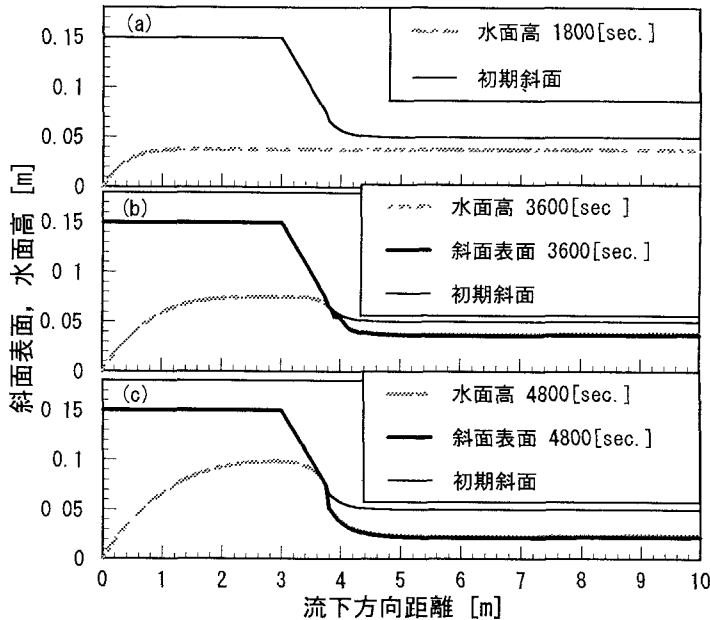


図-4 数値解析結果 (計算条件： $k=0.06$ (cm/sec.)， $r=30.0$ (mm/hr)， $\theta=13.0^\circ$)

るようになり、それを期に地表流が生じて、斜面の浸食が進行すること (図-4 (b))、その後、復帰流が生じる点付近でガリ浸食が生じるようになること (図-4 (c))、などの実験時に観測された素過程が、本研究で行った簡易的な数値解析によっても概ね再現されていることがわかる。ただし、本計算では斜面全長にわたって浸食を受ける結果となったが、これは、実験で得られた一本の水みちに沿って、その時間発達の様子を解析したことに相当すると考えれば理解し易い。

4. 土砂生産

モデル斜面の下流端から流出する土砂量の時間変化について考える。山間部を流れる河川上流部では、一般にここで想定するような斜面に囲まれており、斜面からの土砂の流入量が、流域単位で土砂収支を考える上では重要な意味をもつ。ただし、流入土砂量に占める割合からすれば、土砂崩れ等に起因するものが圧倒的に大きいことが予想されるが、ここでは、斜面表層の浸食によるもののみに限定して議論する。

珪砂を用いた実験のうち、マウンドを設けた RUN A1 およびマウンドを設けない RUN AN の流砂量の時間変化を示したのが図-5 (a)，(b) である。一般的な傾向として、(1) 降雨開始後、透水層が飽和するまでは流出土砂量は 0 であるが、(2) 地表流が発達するに伴い、流出土砂量は増加し続け、やがてピーク値をとった後、(3) 定常状態に達して一定値となる。参考までに、RUN A1 および AN の場合の復帰流が生じ始めた時間は、各々 5.3 分、3.5 分であった。しかし、図よりわかる通り、マウンドを設けた RUN A1 では、ガリ浸食が極めて顕著な形で生じる

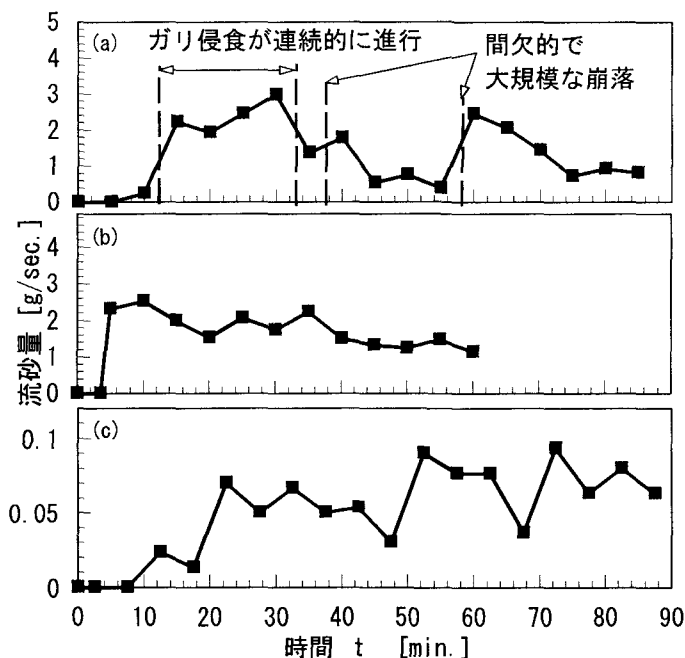


図-5 流出土砂量の時間変化: (a) RUNA1, (b) RUNAN, (c) RUNB1

ため、両者の流砂量の時間変化には明らかな差異が見られる。すなわち、ガリ浸食が生じると、大量の土砂が下流に供給され、その一部は斜面上に堆積するものの、概ねわずかな時間だけ遅れて下流端まで流送される。透水係数の小さな豊浦標準砂を用いてマウンドを設けて行ったRUNB1の場合には、降雨強度との関係からもわかる通り、sheet flowの流量ならびに流砂量そのものが小さく、しかも小規模のガリ浸食がゆっくりと継続的に進行するため、流送土砂量は少ないものの、その時間変化は砂粒以上に活発である。なお、実験の継続時間の関係で、定常状態に到達するには至っていない。このように、斜面下流端からの流出土砂量は、ガリ浸食の発生の影響を顕著に受け、ガリ浸食が生じた直後に流送土砂量が急増することは興味深い。

5. おわりに

本研究では、裸地斜面上に形成される流路網の形成過程とそれに伴う流出土砂量の時間変化について実験的に検討し、そのメカニズムの一端を明らかにすることができた。最後に、本研究の遂行に当たり、文部省科学研究費一般研究C(代表者: 関根正人)の援助を得た。また、新田 明・石井威・東海林大嗣・尾藤文人(早稲田大学学生)の4名ならびに同大学流体実験室の職員諸氏の助けを受けた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) Horton, R. E., *Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology*, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 56, 275-370, 1945.
- 2) 澤井健二: 粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究、京都大学学位論文、1977.
- 3) Willgoose, G., Bras, R. and Rodriguez-Iturbe, I., *A physically based channel Network and catchment model*, Report No. 322, Ralph M. Parsons Laboratory, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- 4) 泉 典洋・パーカー・ゲリー: チャンネルネットワークの初期形成機構、水工学論文集、第38巻、pp.203-208、1994
- 5) 泉 典洋・Gary Parker: 斜面下流端から発生する水路群について、土木学会論文集、No.521/II-32, pp.79-91, 1995.
- 6) 関根正人・小西 淳・佐々木六造: 山地斜面における河道網形成に関する研究、土木学会第49回年次学術講演会概要集、No. 49, pp. 576-577, 1994.
- 7) 関根正人、金尾昌広、新田 明、石井 威: 山地斜面における河道網形成に関する研究、土木学会第50回年次学術講演会概要集、No. 50, pp. 498-499, 1995.
- 8) 関根正人: 側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究、土木学会論文集(登載決定)。