開設された作業道における表面流の発生 —現地踏査と植生調査の解析—

野口 正二^{*,1,3}・金子 智紀^{2,4}・北田 正憲¹・鈴木 秀典³

作業道における表面流発生の実態を明らかにするため、秋田県長坂試験地に開設された作業道を対象として、植生調査と表面流の発生状況の現地踏査を行った。作業道の切土のり面と山側わだちにおいて、植生の被度が低く出現種数が少なかった。これらの結果は、切土のり面では凍上融解や融雪および雨滴による侵食が要因で、山側わだちでは継続的な表面流の発生が要因と考えられた。表面流の発生源として、切土のり面から流出する遮断された地中流や河道から流入する渓流水が確認された。また、その地中流の流出によって、断片化している作業道の表面流が連続することが示唆され、降雨終了後も流域内では作業道の総延長の21.2%で表面流が発生していた。また、積雪期に表面流が発生する場所は、無積雪期に表面流が発生する場所と一致していた。以上から、作業道の開設時は、流域内の地中水の流出箇所や河道分布状況などを考慮することが重要であると考えられた。

キーワード：作業道、遮断された地中流、出現種数、被度、表面流

Shoji Noguchi,^{*,1,3} Tomonori Kaneko,^{2,4} Masanori Kitada,¹ Hidenori Suzuki³ (2014) Generation of Overland Flow on a Constructed Spur Road: Analysis of Field Observations and Vegetation Survey. J Jpn For Soc 96: 342-347 An investigation was undertaken into the generation of overland flow and vegetation recovery on a spur road constructed at the time of thinning at the Nagasaka Experiment in Akita Prefecture, Japan. The vegetation coverage and the number of species were low, both on the cut slope and in wheel tracks on the upslope side of the road. Frost heave, snowmelt, and raindrop splash on the cut slope were considered factors that affected vegetation recovery, which contributed to the continuous overland flow in the wheel tracks on the upslope side. The intercepted subsurface flow from the cut slope, in addition to the inflow to the spur road from a stream channel, was observed as a source of overland flow. This overland flow occurred over 21.2% of the entire length of the spur road within the watershed, and field observations suggested that this fragmented overland flow was caused primarily by intercepted subsurface flow. Moreover, overland flow was generated on the road during the snow season in the same locations as in the non-snow season. This study establishes that when constructing spur roads in watersheds, it is important to determine both the source of the subsurface flow and the locations of stream channels.

Key words: spur road, intercepted subsurface flow, number of species, vegetation coverage, overland flow

I. は じ め に

日本の人工林の多くは間伐等の施業が必要な生育段階に達している。林野庁は、間伐の共同実施や間伐に必要な路網整備の加速化、間伐材の公共事業への活用等により、総合的な間伐対策を推進してきた。平成20年5月には、「森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法」が公布・施行された。それによって、間伐による森林整備がさらに強力に推進され、平成19年度から平成22年度までに222万haの森林が間伐されている(林野庁 2012)。また、平成23年には「森林管理・環境保全直接支払制度」が導入され、搬出間伐等の森林施業およびこれと一体となった森林作業道の開設が支援されている(林野庁 2012)。

間伐などの森林施業や森林の維持管理には、林道や作業道といった路網は必要不可欠な施設である。林道路網の配

置は、地形、素材生産量、労働投入量などの因子を基にして算出された林道投資効果を考慮して行われてきた(Kobayashi 1984)。また、澤口・大川畑(1993)は、路網規格の合理的な配置をするために、路網整備費、路網用地費および運材費を考慮している。一方、路網の開設は林地斜面を切り盛りして開設されるため、森林流域内を攪乱することになり、浮遊土砂流出の発生源となることが指摘されている(Sidle *et al.* 2004; 佐藤 2006)。しかし、我が国では路網における浮遊土砂流出や水流出に関する研究蓄積は十分でない(佐藤 2006)。

森林の落葉・落枝および下草は、雨滴の衝撃力を緩和して表面流を減少させる機能を有する(塚本 1998)。開設直後の作業道は地表面が裸地化していることから、飽和透水係数が低下し(Ziegler *et al.* 2006)、水循環における森林の役割としての機能(例えば、降水の地中流化の機能・水

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: noguchi@ffpri.affrc.go.jp

¹ 独立行政法人森林総合研究所東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25 (Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0123, Japan)

² 秋田県森林技術センター 〒019-2611 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台 47-2 (Akita Prefecture Forest Technology Center, 47-2 Idoshiridai, Kawabe-Toshima, Akita, Akita 019-2611, Japan)

³ 現在：独立行政法人森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan)

⁴ 現在：秋田県林業研究研修センター 〒019-2611 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台 47-2 (Akita Forestry Research and Training Center, 47-2 Idoshiridai, Kawabe-Toshima, Akita, Akita 019-2611, Japan)

(2012年12月25日受付, 2014年8月6日受理)

質形成の機能：塚本 1998) が低下している状態であり、表面流が発生しやすいと考えられる。植生が回復した斜面では裸地斜面と比べて、表面流の発生量が1/3程度だという報告もあり(西田ら 1998), 本研究では作業道の植生回復が表面流の発生の影響を受けていると考えて、作業道開設後の植生の被度と出現種を調査した。そして、現地踏査によって作業道における表面流の発生源と発生状況を明らかにするとともに、作業道の植生回復について考察した。

II. 方 法

1. 試験地の概要

本研究は、秋田県大館市に位置する長坂試験地(40°16' N, 140°24' E)の上の沢流域(6.55 ha)を対象に行った(図-1A)。年平均降水量は1,906 mmで、その内訳として無積雪期(5~10月)は834 mm, 積雪期(1~4月, 11~12月)は1,072 mmである。日平均気温は-7.2~29.4℃(平均値±SD: 10.3±9.0℃)を示す。最大積雪深は2007年で57 cm, 2008年で70 cm, 2009年で97 cmを示した(野口ら 2011)。試験地近傍のアメダス(鷹巣)での最大積雪深の平年値(1981~2010)は73 cmで、2007年から2009年の最大積雪深は55 cm, 56 cm および 85 cmを示し、本試験地より浅い傾向がある。地質は東北地方の日本海側に広く分布する凝灰岩で、表層土壌は黒ボク土壌と褐色土壌で覆われている。植生は流域の大部分がスギ(*Cryptomeria japonica*)の人工林であり、スギの生育が劣る稜線

部では自然由来のコナラ(*Quercus serrata*)やミズナラ(*Quercus crispula* Blume), アカマツ(*Pinus densiflora*)などが優占する。流域のスギは1963年に植栽され、1987年から1995年の間に除伐や間伐が実施された(金子ら 2010)。その後、2007年に本数で約50%の間伐によって、スギの立木密度は1,820本ha⁻¹から960本ha⁻¹へ減少した(岩谷ら 2013)。

本研究で対象とした作業道は、間伐に先駆けてバックホウ(コベルコ, 0.25 m³)で2007年2月に開設された。作業道の地表面の土壌硬度について、わだちの部分(平均値±SD: 274±85 kPa)は中央部(146±88 kPa)や盛土部(136±60 kPa)より高い値を示した。流域における作業道の総延長は655.6 mで、密度は100.1 m ha⁻¹, 作業道の面積は流域面積の2.6%であった(図-1B)。また、平均幅員は2.6 mで、切土と盛土のみによって作設され、転圧や敷砂利、のり面の整形などは行われていない。

2. 調査方法と解析

間伐材搬出終了直後の作業道は、裸地の状態である。本研究では、作業道における植生の回復を作業道開設後の裸地に植生が侵入し、その被覆面積が増大することと定義し、開設7ヵ月後(2007年10月)および18ヵ月後(2008年9月)の植生の状態(被度と出現種の判別)について調査を行った。被度は固定枠内(1.0 m×1.0 mまたは1.0 m×0.5 m)を目視で判定した(星野 2002)。調査プロットの作業道の特徴を表-1に示す。作業道の植生調査の場

図-1. 試験地の位置と調査区

(A) 試験地の位置, (B) 試験地の地形と調査区の位置, (C) 調査区の模式図。

所は、作業道の開設後に表面流の発生が認められる領域から四つの調査区を選定した(図-1B)。さらに、各調査区について長さ1mで4~5カ所を選定して、その場所を切土のり面、山側わだち、中央部、谷側わだち、路肩に区分した(図-1C)。

作業道の縦断地形は光学測器(LASERACE 300, MDL, イスラエル)を用いて2007年3月に測定した。また、路網で生じる表面流は大別すると、切土のり面から発生する成分(遮断された地中流の流出)と路面で発生する成分に区分されているが(Ziegler *et al.* 2004), 作業道の表面流の発生状況と発生源の位置および表面流が作業道から林地斜面へ排水される箇所(ノード, discharge node, Sidle *et al.* 2004)は、開設後から複数回(2007年3月, 2009年8月, 2011年9月および2012年7月)にわたって踏査して特定した。また、作業道の積雪状況について、2010年2月と2011年2月に調査した。

統計解析はKaleidaGraph (version 4.03, HULINKS Inc.)を使用した。グループの組み合わせの平均値の差の比較は、TukeyのHSD検定を利用して、有意水準 α を0.05として有意差を判断した。

III. 結 果

1. 植生の回復

図-2に植生の被度の測定結果を示す。1回目(2007年)において、被度の平均値は切土のり面<山側わだち<谷側わだち<路肩<中央部の順番で高かった。また、中央部と切土のり面($p=0.0027$), 山側わだち($p=0.0016$)および山側わだちと路肩($p=0.0498$)の間に統計的に有意な

表-1. 植生調査区の作業道の特性

調査区	幅員(m)	平均勾配(°)	長さ(m)	切土高(cm)	DSFとISF*		斜面方位**
1	3.50±0.30	8.60	15	0.84±0.11	0.088,	0.093	南
2	3.71±0.21	11.2	18	0.46±0.06	0.164,	0.135	南
3	2.51±0.31	1.07	30	0.05±0.02	0.085,	0.102	北西
4	3.55±0.26	7.73	30	0.92±0.31	0.121,	0.131	北東

*魚眼レンズ(FC-E8)を装着したデジタルカメラ(Nikon Cool Pix 4500)を用いて、作業道の中央部で全天空写真を撮影し、その写真を解析ソフト(Hemiview; Delta-T Devices Ltd, UK)を用いて求めた。DSFとISFはそれぞれdirect site factorとindirect site factorの略。**金子ら(2010)の解析結果から算出した。

図-2. 作業道における植生の被度

棒グラフとエラーバーは全測定値の平均値と標準偏差を示し、異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを示す(TukeyのHSD検定)。

差があった。2回目(2008年)において、被度の平均値は切土のり面<山側わだち<路肩<谷側わだち<中央部の順番で高かった。また、切土のり面と中央部($p=0.0015$), 谷側わだち($p=0.0031$), 路肩($p=0.0193$)および山側わだちと中央部($p=0.0110$), 谷側わだち($p=0.0218$)の間に統計的に有意な差があった。また、作業道の全ての位置において、1回目より2回目の方が被度は増加し、路肩でその増加率が高く(34.4%), 切土のり面で低かった(9.0%)。

1回目の調査では木本が20種、草本が48種出現し、2回目の調査では木本が28種、草本が68種出現した。木本について高木・亜高木はアカマツ、スギ、コシアブラ(*Eleutherococcus sciadophylloides*)やリョウブ(*Clethra barbinervis*)など、低木はキブシ(*Stachyurus praecox*), タニウツギ(*Weigela hortensis*)やヒメアオキ(*Aucuba japonica* var. *borealis*)などが出現し、草本ではシダ植物(シシガシラ(*Blechnum nipponicum*), ワラビ(*Pteridium aquilinum*), ヤマドリゼンマイ(*Osmunda cinnamomea*)など), イネ科(ススキ(*Miscanthus sinensis*), アキメヒシバ(*Digitaria violascens* Link)など), キク科(アキタブキ(*Petasites japonicus* subsp. *giganteus*), イナカギク(*Aster semiamplexicaulis*)など), その他, アリノトウグサ(*Haloragis micrantha*), オトギリソウ(*Hypericum erectum*)やノブドウ(*Ampelopsis glandulosa* var. *heterophylla*)などが出現した。図-3に植生の出現種数の結果を示す。1回目(2007年)において、出現種数の平均値は山側わだち<切土のり面<谷側わだち<路肩<中央部の順番で多かった。また、山側わだちと中央部($p=0.0044$), 谷側わだち($p=0.0061$), 路肩($p=0.0118$)の間で統計的に有意な差があった。2回目(2008年)においても、出現種数の平均値は同様な順番で多かった。また、山側わだちと中央部($p<0.0001$), 谷側わだち($p=0.0020$), 路肩($p<0.0001$)および切土のり面と中央部($p=0.0032$)の間で統計的に有意な差があった。作業道の全ての位置において、1回目より2回目の方が植生の出現種数は増加した。その数は中央部で多く(平均値: 6.7), 山側わだちで少なかった(平均値: 2.6)。

2. 表面流の発生状況

降雨直後に作業道の表面流発生箇所の位置や距離を測定

図-3. 作業道における植生の出現種数

棒グラフとエラーバーは全測定値の平均値と標準偏差を示し、異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを示す(TukeyのHSD検定)。

した結果、表面流が発生していた場所は流域内の作業道の総延長の21.2% (139 m) を占め、作業道が北西と北東斜面に位置する部分で顕著だった (図-4)。開設後の作業道は地表面が裸地化しており、切土のり面において土柱の形成が観察された (図-5A)。表面流の発生源として切土のり面によって遮断された地中流があり、恒常的に流出する場所 (図-5B) と一時的に流出する場所 (図-5C) があった。恒常的に流出する場所の一部では、斜面上方にサワギキョウ (*Lobelia sessilifolia*) などの湿性植物が小規模に群生する場所 (湿原) が存在していた (図-5D; 図-4)。作業道が河道を横断する場所では、渓流水の一部が作業道へ流入して表面流の発生源となっており (図-5E), 表面流は降雨終了後も継続していた (図-5E~H)。作業道の表面流が連続して集中する場所で、ノード (discharge node) が生じていた (図-5F, G)。一部のノードで排水された表面流が、林地斜面に全て浸透せずに河道まで達していた。

積雪期に作業道を踏査した際、局所的に積雪深が低下している箇所や明らかに地表面が露出して表面流が生じている場所が観察された。これらの場所は、無積雪期の表面流が発生している場所と一致していた (図-4)。

IV. 考 察

1. 植生の回復

各調査区の作業道において、切土のり面と山側わだちの

部分で、植生の被度が低く、出現種数が少なかった (図-2, 3)。そこで、ここでは4カ所の調査区間の議論は行わず、植生の回復が異なった切土のり面と山側わだちの箇所に焦点を当てて議論することとした。

図-4. 上の沢流域の作業道における表面流の発生状況

図-5. 開設された作業道の様子

(A) 切土のり面での雨滴侵食による土柱, (B) 切土のり面 (○印) からの恒常的な地中流の流出, (C) 切土のり面からの地中流の流出, (D) 小規模な湿原における湿性植物のサワギキョウの群生, (E) 渓流水の一部が作業道へ流れ込んでいる地点, (F) 作業道の表面流が林地斜面へ排水されている地点, (G) 表面流が林地斜面へ排水される箇所 (ノード, discharge node), (H) 作業道の表面流。※赤矢印は水流の方向を示す。

植生の出現種数は切土のり面で山側わだちよりやや多いが、被度は最も低かった(図-3)。北原ら(1986)は、北海道の林道切取裸地のり面において木本侵入の初期過程を観測した結果、落下種子の44%は凍上融解、降雨、融雪および乾燥風食によって流失し、年内に発芽した稚苗は凍上融解によってすべて枯死したことを報告している。本調査地は積雪寒冷地域に位置し、厳冬期(1月と2月)の日最低気温は $-11.5\sim-0.6^{\circ}\text{C}$ (平均値 $\pm\text{SD}$: $-5.6\pm 2.7^{\circ}\text{C}$)、日最高気温は $-6.2\sim-11.7^{\circ}\text{C}$ ($-1.3\pm 2.7^{\circ}\text{C}$)であった(野口ら 2011)。よって、本試験地の切土のり面でも同様に凍上融解や融雪が生じていると考えられる。また、酒井(2004)は切土のり面での雨滴侵食によって、土砂崩落が生じることを報告している。本試験地は土砂崩落には至っていないが、切土のり面で土柱の形成が多く観察された(図-5A)。スギ林において、立木の林縁でより多くの樹冠通過降水量が生じることが報告されており(例えば、野口ら 2007)、本試験地でも同様な結果が観測された(岩谷ら 2013)。作業道の切土のり面はスギの立木の林縁に位置することも多く、雨滴侵食が切土のり面の被度に影響を及ぼしていると考えられた。

切土のり面に次いで山側わだちの被度が低く、植生の出現種数はもっとも少なかった。山側わだちでは無降雨時においても表面流が継続して生じていた(図-5E~H)。縦断勾配が6%を超えると雨水による侵食でわだちの侵食が生じることが指摘されており(酒井 2004)、3カ所の調査区で平均勾配が6%を超えていた(表-1)。特に山側わだちは、盛土、中央部や谷側わだちより継続的に表面流が発生しているため、植生の回復が遅いと考えられた。

2. 作業道の表面流の発生状況と開設時の留意点

作業道で発生していた表面流は流域内で一様でなく(図-4)、渓流水の一部が作業道へ流入する場所と小規模な湿原が存在する場所で恒常的に発生していた。また、降雨直後の踏査から一時的に切土のり面から地中流が流出している部分が確認され、表面流は作業道の総延長の21.2%を占めていた(図-4)。出水時においてこの切土のり面からの地中流の流出が、林道表面で発生する表面流より直接流出量に影響を及ぼし(Negishi *et al.* 2008)、作業道を流下する領域が連続化することが報告されている(吉幸ら 2001)。同様に本試験地においても、切土のり面によって遮断された地中流が流出することによって、作業道の断片化している表面流が連続しやすくなると考えられた。

積雪期においても作業道で表面流が生じており、これらの場所は無積雪期の表面流が発生している場所と一致していた(図-4)。その発生源は温度の測定から地中流が要因と考えられた(野口ら 2010)。よって、表面流の発生源と流出状況を把握するために、積雪期に作業道の積雪状況を踏査することも有効と考えられた。また近年、多田ら(2007)は地下水流の発する地下流水音によって、地中水みちの位置を特定している。今後、切土のり面から地中流が流出する場所を特定するためには、周辺の湧水地点や小

規模な湿原などの湿潤な場所の位置を踏査することに加え、切土のり面において地下水流音の調査をすることが有効であろう。

作業道の表面流が林地斜面へ排水され河道に到達している箇所において(図-5G)、作業道から河道までの距離は15mであった。森林土壌には濾過機能があり(Okura *et al.* 1997)、林地斜面で一時的に発生した表面流は森林土壌に浸透する(Gomi *et al.* 2008)。しかし、路網が河川に近い位置に配置され林地の斜面長が十分でない場合、作業道で発生した表面流を河畔域の森林土壌では吸収できない場合がある(Gomi *et al.* 2006; Ohnuki *et al.* 2010)。河畔域を攪乱すると河川へ及ぼす影響が甚大なため、例えばインドネシアでは、森林伐採のときに河道の幅に応じて河畔域の森林を保全している(Sist *et al.* 1998)。一方、日本では、作業道のルートはなるべく谷から遠ざけて選定することが推奨されているが(森林総合研究所ほか 2013)、作業道から河道までの保全すべき距離や領域など具体的な指標はない。今後、路網の開設時に保全が必要な河畔域の幅などの指標について、検討する必要がある。

V. お わ り に

間伐時に開設された作業道を対象として、植生の回復状況の調査と表面流の発生状況の現地踏査を行った。山側わだちでは植生の被度が低く、出現種数が少ないことが明らかになり、継続的な表面流の発生が要因と考えられた。その発生源として、切土のり面から流出する遮断された地中流や河道から流入する渓流水が確認された。特に表面流が集中するノードでは、発生した表面流が河道まで達していた。作業道の表面流の発生源やその状況は流域内で一様でなく、流域内の地中水の流出箇所や河道分布状況などを考慮することが重要であると考えられた。また、積雪期に表面流が発生する場所は、無積雪期に表面流が発生する場所と一致し、表面流の発生源は地中流と考えられた。森林流域からの融雪流出は春先の水資源の安定確保に影響を与えることから、今後、無積雪期ばかりでなく融雪時においても、作業道における表面流の流出特性について明らかにすることが課題である。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」と森林総合研究所運営費交付金によって行われたものである。また、匿名の2名の査読者からは有益なご意見をいただいた。ここに、記して感謝します。

引用文献

- Gomi T, Sidle RC, Miyata S, Kosugi K, Onda Y (2008) Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslope: Scale effects and runoff transfer. *Water Resour Res* 44: W08411 doi:10.1029/2007WR005894
- Gomi T, Sidle RC, Noguchi S, Negishi JN, Abdul Rahim N, Sasaki S (2006) Sediment and wood accumulations in humid tropical headwater streams: Effects of logging and riparian buffers. *For Ecol Manage* 224: 166-175

- 星野義延 (2002) 植生調査法. (森林立地調査法. 森林立地調査法編集委員会編, 博友社). 43-46
- 岩谷綾子・金子智紀・和田 覚・野口正二 (2013) スギ人工林における間伐が樹冠通過雨量に及ぼす影響—秋田県長坂試験地における無積雪期間の事例—. 東北森林科学会 18: 38-42
- 金子智紀・武田響一・野口正二・大原偉樹・藤枝基久 (2010) 積雪地帯の近接したスギ人工林3小流域における流出特性の比較. 日林誌 92: 208-216
- 北原 曜・真島征夫・清水 晃 (1986) 林道切取のり面における木本侵入の初期過程(I)裸地のり面におけるカンパ類侵入阻害要因. 日林誌 68: 171-179
- Kobayashi H (1984) Planning system for road-route Locations in mountainous forests. J Jpn For Soc 66: 313-319
- Negishi JN, Sidle RC, Ziegler AD, Noguchi S, Abdul Rahim N (2008) Contribution of intercepted subsurface flow to road runoff and sediment transport in a logging-disturbed tropical catchment. Earth Surf Process Landforms 33: 1174-1191
- 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998) 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化. 日緑工誌 23: 249-255
- 野口正二・安田幸生・村上 亘 (2007) 森林総合研究所東北支所実験林内のスギ林とブナ林における樹冠通過雨量の比較. 森林総合研究所研究報告 6: 157-162
- 野口正二・金子智紀・和田 覚・石川具視 (2010) スギ林における間伐区と無間伐区の積雪深の比較. 水文・水資源学会誌 23: 339-346
- 野口正二・金子智紀・大原偉樹・田村浩喜・平井敬三 (2011) 秋田県長坂試験地における気象特性. 森林総合研究所研究報告 9: 173-198
- Ohnuki Y, Abdul Rahim N, Noguchi S, Sasaki S (2010) Sediment discharge through buffer zones in a tropical rainforest of Peninsular Malaysia. JARQ 44: 187-196
- Okura Y, Kitahara H, Sammori T (1997) Forest soil and litter as filtering media for suspended sediment. J For Res 2: 9-14
- 林野庁 (2012) 平成 23 年度森林及び林業の動向 森林・林業白書 (平成 24 年度版). 林野庁
- 酒井秀夫 (2004) 作業道 理論と環境保全機能. 全国林業改良普及協会
- 佐藤弘和 (2006) 浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法. 日林誌 88: 50-59
- 澤口勇雄・大川畑修 (1993) 路網規格の合理的配置(I) HACK の法則の類似式適用による幹線路網規格の決定. 日林誌 93: 16-23
- 森林総合研究所・石川県農林総合研究センター 林業試験場・岐阜県森林研究所 (2013) 森林作業道開設の手引き—土砂を流出させない道づくり—. 森林総合研究所第3期中期計画成果2
- Sidle RC, Sasaki S, Otsuki M, Noguchi S, Abdul Rahim N (2004) Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. Hydrol Process 18: 703-720
- Sist P, Dykstra DP, Fimbel R (1998) Reduced impact logging guidelines for lowland and hill dipterocarp forests in Indonesia. CIFOR Occasional Paper, 15
- 多田泰之・藤田正治・堤 大三・小山 敢・河合隆行・奥村武信・本田尚正 (2007) 地中水みちと崩壊発生位置の関連性. 砂防学会誌 60: 25-33
- 塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全. 朝倉書店
- 吉幸 朗・長澤 喬・森田紘一・中尾博美 (2001) 高密度道路網を基盤とする機械化間伐作業林分における土砂流出について. 森林利用学会誌 16: 191-202
- Ziegler AD, Negishi JN, Sidle RC, Noguchi S, Abdul Rahim N (2006) Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. Catena 67: 89-104
- Ziegler AD, Giambelluca TW, Sutherland RA, Nullet MA, Yarnasarn S, Pinthong J, Preechapanya P, Jaiaree S (2004) Toward understanding the cumulative impacts of roads in upland agricultural watersheds of northern Thailand. Agric Ecosyst Environ 104: 145-158