ブナ林における林床合計被覆率の変化が地表流流出率に与える影響

海 虎^{*1}・石川 芳治²・白木 克繁²・若原 妙子²・畢力 格図¹・内山 佳美³

神奈川県東丹沢堂平地区のブナ林では、シカの採食圧により林床植生が衰退し、土壌侵食が広範囲にわたり進行しており、森林および溪流の環境に大きな影響を与えている。既往の研究により堂平地区においては土壌侵食の中で布状侵食の占める割合は雨滴侵食よりも大きく、流出土砂は主として地表流により生産されていることが報告されている。本研究では 2004–2009 年の間、堂平地区のブナ林斜面において幅 2 m、長さ 5 m の林床植生被覆率の異なる試験プロット 4 個を設置し、樹冠通過雨量、地表流流出量、林床合計被覆率（林床植生被覆率＋リター被覆率）、土壌侵食量等を測定し、ブナ林斜面における林床合計被覆率が地表流流出率に与える影響について検討した。その結果、林床合計被覆率（ C_m ）と地表流流出率（ R_{em} ）には $R_{em} = -18.9 \ln(C_m) + 86.4$ で表される高い負の相関があることがわかった。このため、地表流流出率は季節により大きく変化し、リター堆積量が少ない夏季（7–9 月）はリター堆積量が多い春季（4–6 月）や秋季（10–11 月）に比べて地表流流出率が増加することが明らかになった。

キーワード：ブナ林、シカ採食圧、地表流流出率、林床合計被覆率、降雨量

Hai Hu,^{*1} Yoshiharu Ishikawa,² Katsushige Shiraki,² Taeko Wakahara,² Biligetu,¹ Yoshimi Uchiyama³ (2012) Influence of Change of Forest Floor Cover Percentage on Overland Flow Rate on Beech Forest Slopes. J Jpn For Soc 94: 167–174 Soil erosion has been progressing over a large area on the beech (*Fagus crenata*) forest floor with an understory impoverished by the feeding of deer (*Cervus nippon*) in Doudaira (located in East Tanzawa of Kanagawa Prefecture), and has a significant impact on the environment of the forest and streams. In previous studies at Doudaira, it is reported that the amount of washed soil is larger than the splashed soil, and washed soil is strongly affected by the overland flow. In this study, four erosion plots (2 m wide × 5 m long) with different understory cover percentage were installed on the beech forest slope in Doudaira. Throughfall, overland flow, forest floor cover percentage (the total values of understory cover percentage and litter cover percentage), soil erosion rate and other factors, were monitored during 2004–2009, and the effect of forest floor cover percentage on the overland flow rate was examined. As a result, a significant negative correlation expressed by $R_{em} = -18.9 \ln(C_m) + 86.4$ between the forest floor cover percentage (C_m) and the overland flow rate (R_{em}) was found. From the equation, when the forest floor cover percentage decreases, the overland flow rate increases. The overland flow rate changes seasonally; for example, such as in summer (Jul.–Sep.) with less litter, the overland flow rate decreases compared to spring (Apr.–Jun.) and autumn (Oct.–Nov.) with a great deal of litter.

Key words: beech forest, browsing impact by deer, overland flow rate, forest floor cover percentage, rainfall

I. は じ め に

東丹沢の堂平地区（神奈川県清川村）では、ニホンジカ（*Cervus nippon*）（以下、シカと呼ぶ）の増加に伴う採食圧の増加により林床植生が衰退している。一方、堂平では上層木としてブナ（*Fagus crenata*）林が存在しているため、毎年秋に樹冠から多量のリターが供給される。しかし斜面上に堆積したリター量は地表流（表面流）や風などによる移動、小動物や微生物による分解、一部シカの採食などによって時間とともに変化し、土壌侵食速度に大きな影響を与えている（初ら 2010）。表層土壌の侵食は樹木の根を露出させ、倒木の要因となっているだけでなく（石川ら 2007）、林床に生息する生物相に影響を与え、さらに土壌が流下する溪流の生態系にも悪影響を与えている（有馬ら 2007）。流出した土壌は濁水となって水源を汚濁し、また

下流の貯水ダムに流入して堆砂を進行させ、ダムの耐用年数の低下を引き起こす可能性がある（若原ら 2008）。

一般に表層土壌の侵食量は降雨量や降雨係数と密接に関係しているが、地表流流出量（表面流）も、表層土壌の侵食（Fukuyama *et al.* 2008; Miyata *et al.* 2009）および侵食土砂の流出（Ide *et al.* 2009）と密接に関係していることがわかっている。丹沢山地堂平地区の林床植生が衰退した斜面においては雨滴侵食よりも布状侵食が卓越しており、地表流流出量が布状侵食量に大きな影響を与えている（Ghahramani *et al.* 2011）ことが報告されている。また、地表流流出量は、流域の水源涵養機能や河川水質を評価するうえで重要な要素といえる（宮田ら 2009b）。森林土壌は高い浸透能を有し（村井・岩崎 1975；阿部・佐藤 2008）、また表層土壌サンプルを用いて測定される浸透能は一般的に数百 mmh^{-1} であるため（小杉 1999）、森林斜

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: 50010953007@st.tuat.ac.jp

¹ 東京農工大学大学院連合農学研究科 〒183-8509 府中市幸町 3-5-8 (United School of Agricultural and Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan)

² 東京農工大学大学院農学研究科 〒183-8509 府中市幸町 3-5-8 (Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan)

³ 神奈川県自然環境保全センター 〒243-0121 厚木市七沢 657 (Kanagawa Prefectural Natural Environment Conservation Center, 657 Nanasa, Atsugi 243-0121, Japan)

(2011 年 12 月 28 日受付；2012 年 6 月 8 日受理)

面においてホートン型地表流は発生し難いと考えられてきた(塚本 1992)。ただし、実際に地表流の観測を行った例はわずかであり(塚本 1961; Dunne and Black 1970)、林地での詳細な地表流測定例は宮田ら(2009b)の地質や降雨特性の異なる3カ所の試験など数例がある。一方、近年の研究によりヒノキ林、特に管理施業が不十分で林床植生が失われたヒノキ林斜面において地表流出が顕著に発生することが報告されている(古池 1985; 服部ら 1992; 西山 2003; 辻村ら 2006; Miyata *et al.* 2007, 2009, 2010; Sidle *et al.* 2007; Gomi *et al.* 2008a; 平野ら 2008, 2009)。ヒノキ林における地表流の発生メカニズムとして、ヒノキ林表層土壌の撥水性(Miyata *et al.* 2007; Gomi *et al.* 2008b; 宮田ら 2009a)や林床被覆が乏しい場合には地表面に雨滴衝撃が直接与えられることで団粒が破壊されて起こる土壌孔隙の「目詰まり」(湯川・恩田 1995; 恩田・湯川 1995)が示唆されている。Miyata *et al.* (2009)はヒノキ人工林において地表流を観測し、林床が林床植生で覆われたプロットでは表層土壌の撥水によって地表流が発生するが、林床植生の乏しいプロットでは林床植生で被覆されたプロットに比べて約2.7倍の地表流が発生することを示した。このようにヒノキ林においては、特に近年、ホートン型地表流発生についての研究が精力的に行われ、発生要因や降雨-流出過程に対する林床被覆の影響が明らかにされつつある(恩田 2008)。

以上のようにスギ、ヒノキ林などの人工林である針葉樹林における地表流流出量の観測例は増加し、現象の解明が進んできているが、落葉の季節変化が明瞭な広葉樹林に関しては土壌侵食量に大きな影響を与える地表流に関する研究および地表流流出量に大きな影響を与える林床被覆との関係に関する研究は少ない。

広葉樹林における地表流および土壌侵食に関する研究として、若原ら(2008)は丹沢堂平地区の林床植生被覆率が少ない斜面に設置した長さ5m、幅2mの土壌侵食試験プロットにおける調査から、林床植生被覆率が少ないプロットではリター堆積量の季節変化に伴って地表流の流出率が変化することを指摘している。一方、Ghahramani *et al.* (2011)は同じ丹沢堂平地区の斜面に設置した林床合計被覆率(林床植生被覆率+リター被覆率)が異なる長さ5m、幅2mの土壌侵食試験プロットにおける土壌侵食に関する研究において、①4月初旬~11月末の期間全体(年間)では、林床合計被覆率の大小によらず布状侵食量の方が雨滴侵食量よりも大きい、②林床合計被覆率が小さい試験プロットでは樹冠通過雨量と地表流流出量には強い正の相関が認められる、③林床合計被覆率が小さい試験プロットでは林床合計被覆率が大きい試験プロットに比べて地表流流出量が多い、④林床合計被覆率が小さい試験プロットでは布状侵食量は地表流流出量と相関が高く、雨滴侵食量は樹冠通過雨量と相関が高い、ことを報告している。これらの結果から、地表流流出量は斜面における土壌侵食量を推定する上で重要であるとともに、地表流流出量は林床

合計被覆率により影響を受けていることが推定される。地表流は洪水の直接流出を構成する主要な流出成分である(永井ら 2000)ことから、地表流の流出率を明らかにすることは洪水の予測にも寄与するものと考えられる。ここで地表流流出率=地表流流出量/降雨量(樹冠通過雨量)とすれば地表流流出率がわかれば降雨量の測定結果から地表流流出量を推定することができる。全国的にみれば地表流流出量が測定されている事例は降雨量に比べて極めてわずかであり、降雨量と地表流流出率から地表流流出量を予測することが実用上は求められる。このため降雨量のデータを用いて地表流流出量を予測するためには地表流流出率が重要であると考えられる。

本研究はブナ林(広葉樹林)の斜面に試験プロットを設置して地表流流出量、樹冠通過雨量および林床合計被覆率(林床植生被覆率+リター被覆率)を長期間観測し、林床合計被覆率の変化が地表流流出率(地表流流出量/樹冠通過雨量)に与える影響について明らかにすることを目的とする。なお、地表流流出量は降雨量によっても影響を受けることがこれまでの多くの研究で示されている(例えば、村井・岩崎 1976)。このことから、地表流流出率と降雨量の関係についても併せて検討することとした。

II. 調査地および調査方法

1. 調査地概要

調査地は神奈川県愛甲郡清川村、東丹沢の堂平地区(図-1)である。堂平地区は相模川流域の宮ヶ瀬ダム上流の支流流域である塩水川流域に位置する。地質は海成火砕岩類を主体とする新第三紀層の丹沢層群である。表層は厚さ2~3mの関東ローム(火山灰)で覆われ、透水性は比較的良好である。標高は約1,190mで、斜面勾配は5~33°程度

図-1. 調査地位置図

図-2. 試験プロット配置図

である（石川ら 2007）。林床植生は約 30 年前まではスズタケが卓越していたが、現在ではシカの食害により衰退してほとんどみられず、モミジイチゴ、バライチゴなどのシカの嗜好性植生が一部でみられる（石川ら 2007）。図-2 に示すように、本調査地は南向きの斜面であり、十分な日射が林床に到達する。林内の林床植生はシカの採食圧により衰退しているが、調査地の一部では、シカによる採食を防ぐために植生保護柵が設置されているので、植生保護柵内では林床植生はある程度回復している。調査箇所には立木密度は 366 本/ha、平均直径は 26.9 cm の落葉広葉樹であるブナ林が存在しているため年間約 400 g m^{-2} のリターが供給されている（若原 2008）。

2. 調査方法

1) 試験プロットの設置と降雨量および地表流出量の測定

林床合計被覆率の空間的、時間的変化と土壌侵食量、地表流出率の関係を検討するために、図-2 に示す 4 か所（No. 1～4）に図-3 に示す試験プロット（幅 2 m × 長さ 5 m = 10 m^2 ）を設置して観測を行った。調査プロットの斜面勾配はすべて 33° である。各調査試験プロットの林床植生被覆率、観測期間、植生保護柵の内外については表-1 に示す。毎年 4 月～11 月末にかけて、各試験プロットの下部の捕捉箱内に堆積した侵食土砂および流出リターを 1 週間から 2 週間に 1 回の頻度で回収している。

降雨量は試験プロットに設置した 4 個の雨量計（転倒マス型、1 転倒 0.5 mm）（図-3）を用いて樹冠通過降雨量を測定した。この 4 個の雨量計で測定した樹冠通過降雨量の平均値を以下では降雨量と呼ぶこととする。

地表流出量の測定は試験プロットの下部に設置した量水計（転倒マス型、1 転倒 500 mL）（図-3）により 4～11 月の間測定した。地表流出量の単位は降雨量と同じくするために水高換算を行い、mm 表示とした。なお、積雪などにより調査が困難となる冬季（12 月～3 月）は観測を行わなかった。観測期間は表-1 に示すように No. 1 と No. 2 は 2004 年 7 月～2008 年 8 月、No. 3 は 2004 年 7 月～2009

図-3. 試験プロット模式図

表-1. 試験プロット一覧

試験プロット 番号	林床植生被覆率 (8 月平均)	林床合計被覆率 (全観測期間平均)	観測期間	柵内 柵外
No. 1	31～75%	81.05%	2004.7～2008.8	内
No. 2	79～95%	96.98%	2004.7～2008.8	内
No. 3	0.24～3.4%	47.67%	2004.7～2009.11	外
No. 4	28～30%	62.94%	2008.8～2009.11	外

年 11 月、No. 4 は 2008 年 8 月～2009 年 11 月である。

2) 林床合計被覆率の測定

各試験プロットについて、各プロット内の林床合計被覆率を調査するために、ほぼ毎週 1 回の頻度で侵食土砂と流出リターを回収するときに、各試験プロット内の地表面の上に $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ のコドラートを置いて真上から写真撮影を行い、撮影した写真を用いて初ら（2010）が行った方法により画像解析ソフト Photoshop を用いて林床合計被覆率を測定した。詳しい方法については初ら（2010）の論文を参照されたい。

III. 結果と考察

1. 試験プロット別の各年の降雨量と各年の地表流出量および各年の地表流出率の経年変化

各年の降雨量、地表流出量の観測期間は 2004 年 7 月 5 日～2004 年 12 月 5 日、2005 年 4 月 2 日～2005 年 12 月 4 日、2006 年 4 月 9 日～2006 年 12 月 3 日、2007 年 4 月 8 日～2007 年 12 月 2 日、2008 年 4 月 20 日～2008 年 11 月 30 日、2009 年 4 月 19 日～2009 年 12 月 6 日である。2004 年 7 月 5 日～2009 年 11 月 30 日までの全観測期間の各年の降雨量と各年の地表流出量との関係を図-4 に示す。各年とも 12 月初旬から翌年 3 月下旬までは、冬期で凍結するため観測（現地調査）は行わなかった。各年の観測期間積算降雨量は約 2,132～2,502 mm であり、年ごとの変動は比較的小さい。一方、各年の地表流出量は各試験プロットで大きく異なり、No. 2 の試験プロットでは地表流出量の年ごとの変化は小さいが、No. 1 の試験プロットでは経年により地表流出量が大きく減少している。

各試験プロットの各年の地表流出率と各年の平均林床合計被覆率を図-5 に示す No. 2 の試験プロットの林床合計被覆率は全観測期間を通じて 93% 以上で、地表流出率は約 10% 以下であった。No. 1 の試験プロットでは観測初期（2004 年）の林床合計被覆率は約 60% であり、地表

図-4. 試験プロット別各年の降雨量と各年の地表流出量

図-5. 試験プロット別各年の林床合計被覆率と各年の地表流出率

図-6. 試験プロット別月平均降雨量，月平均地表流出率および月平均林床合計被覆率

流出率は約 20%であった。しかし植生回復とともに林床合計被覆率は年々増加し、観測期の終年（2008 年）では林床合計被覆率および地表流出率ともに No. 2 と同じ程度となった。No. 3 の試験プロットでは林床植生被覆率は年間で大きくても 4% 未満であって、林床合計被覆率はリター被覆率の変化により左右され 28~60% で変化した。図-4, 5 より各年の平均地表流出率の年ごとの変動の原因としては各年の平均林床合計被覆率による影響が大きく、各年の降雨量の影響は比較的小さいと考えられる。

2. 降雨量と地表流出率および林床合計被覆率の月別、季節別の変化

土壤侵食量のうち「布状侵食量」は「地表流出量」により強く影響される（Ghahramani *et al.* 2011）。このため土壤侵食量を予測する場合には「地表流出量」の予測を行うことが重要である。「地表流出量」は「降雨量」により大きく影響される（宮田ら 2009b）。

丹沢山地堂平地区の林床植生が衰退した斜面においては雨滴侵食よりも布状侵食が卓越しており、地表流出量が布状侵食量に大きな影響を与えている（Ghahramani *et al.* 2011）。したがって土壤侵食量を予測するためには地表流

図-7. 試験プロット別季節別期間内降雨量と期間内地表流出率

流出量を知ることが重要である。しかしながら地表流出量の測定例は少なく土壌侵食量の予測には直接使用できる場合に限定されている。このようなことから観測例の多い降雨量から地表流出量を予測するためには地表流出率を知ることが重要となる。

降雨量、地表流出率と林床合計被覆率について月ごとおよび季節ごとの変化を検討した。No. 1~4の試験プロットにおける月平均地表流出率を図-6に示す。図-6より林床合計被覆率が小さいNo. 3の試験プロットでは月平均降雨量と月平均地表流出率および月平均林床合計被覆率は月ごとに大きく変化しており、月平均林床合計被覆率が増加すると月平均地表流出率が減少し、月降雨量が多いと地表流出率が高くなる傾向が認められる。一方、林床合計被覆率がほぼ100%のNo. 2の試験プロットでは月平均林床合計被覆率は月ごとにほとんど変化せず、地表流出率もほとんど変化していない。次に降雨量と地表流出率の季節変化を詳細に検討するために、林床合計被覆率の変化を考慮して4~6月を春季、7~9月を夏季、10~11月を秋季として検討することとした。1~2週間の観測期間(侵食土壌の回収期間)ごとの降雨量と地表流出率を春季、夏季、秋季に分けてプロットした結果を図-7に示す。図-7より、試験プロットNo. 1, 3, 4では地表流出率と降雨量には正の相関があり、近似直線式の傾きは季節ごとに異なっている。図-7より同量の降雨量があった場合でも地表流出率は夏季>秋季>春季の順となることがわかった。夏季はリターが流出するとともにリターが分解し

図-8. 試験プロットNo. 1~4を合わせた林床合計被覆率別の一雨の降雨量と一雨の地表流出率

て減少し、林床合計被覆率が低くなり(図-6)、この結果地表流出率が増加すると考えられる。試験プロットNo. 2では地表流出率の変化は認められなかった。

3. 一雨降雨量と一雨地表流出率および林床合計被覆率

No. 1~4の試験プロットで観測されたデータを合わせて林床合計被覆率(0~25, 25~50, 50~75, 75~100%の4段階に区分)別の一雨降雨量と一雨地表流出率の関係を図-8に示す。一雨の定義は、無降雨の時間が24時間以上継続した場合に別々の雨と判定した。また、林床合計被覆率が0~25%の区分のデータ数は少なかったため図-8には示さなかった。図-8より、一雨降雨量と一雨地表流出率の関係は、林床合計被覆率の各段階とも決定係数 R^2 は

0.84 以上であり、林床合計被覆率 25~50% のときの平均地表流出率は 23.9%，林床合計被覆率 50~75% のときの平均地表流出率は 16.9%，林床合計被覆率 75~100% のときの平均地表流出率は 6.5% であった。一方で、林床合計被覆率に関わらず約 5~12 mm の降雨量(しきい値)まで地表流が発生しないことがわかった。さらに、林床合計被覆率が小さいときほど降雨量と地表流出率との間の決定係数 R^2 が大きくなる傾向が認められた。

4. 試験プロット別と季節別および雨量別の月平均地表流出率と林床合計被覆率の関係

No. 1~4 の試験プロットについてプロット別と季節別および雨量別 (0~150, 150~300, 300~450, 450~600 mm の 4 階級別) の月平均地表流出率とその時の林床合計被覆率の関係を図-9 に示す。図-9 により林床合計被覆率は地表流出率と高い負の相関があり、試験プロット No. 1, 3, 4 ではリター供給量が多い秋季には林床合計被覆率が高くなり、春季から夏季にかけて徐々に林床合計被覆率が減少するため、林床合計被覆率の変化と共に地表流出率も大きく変化する。図-9 に示すように No. 1~4 の試験プロット全体についてみれば月平均地表流出率と月平均林床合計被覆率の決定係数 R^2 は 0.776 ($p < 0.01$) であり、月降雨量に関わらず林床合計被覆率が減少すると月平均地表流出率は増加する傾向が認められ、その関係は(1)式で表される。

$$R_{em} = -18.9 \ln(C_m) + 86.4 \quad (1)$$

ここで、 R_{em} は月平均地表流出率、 C_m は月平均林床合計被覆率である。(1)式から月別の降雨量がわかれば月別の地表流出率が推定でき、さらに月別の地表流出量を算定できる。表-2 に林床被覆(率)と地表流出(率)との関係に関する既往の研究成果と本研究の相違点を示している。若原ら(2008)は本研究と同じ丹沢堂平地区の試験プロットにおけるリター・植生量 (g/m^2) と地表流出率の観測期間(1~2 週間)ごとの変化を示して林床植

生量がわずかなプロットではリター堆積量が減少する夏季に地表流出も減少することを示唆しているが定性的な記述であり定量的な分析は行っていない。Ghahramani ら(2011)は本研究と同じ丹沢堂平地区の試験プロットにおいて観測期間(1~2 週間)ごとの降雨量(樹冠通過雨量)と地表流出量の関係を示して林床植生量がわずかなプロットでは林床被覆率(植生+リター)の減少に伴い地表流出率が増加することを示唆しているが定性的な記述であり定量的な分析は行っていない。

宮田ら(2009b)は高知サイト、三重サイト、東京サイトにおいて針葉樹(スギ、ヒノキ)で 10 個、広葉樹(コナラ、ミズナラなど)で 3 個のプロットを設定して降雨量と地表流出率を観測している。平均流出率は各サイトの

図-9. 月平均林床合計被覆率と月平均地表流出率

(a) プロット別および季節別, (b) 降雨量段階別。

表-2. 既往の研究における比較

研究内容	若原ら 2008	Ghahramani <i>et al.</i> 2011	宮田ら 2009b	本研究
観測期間	28 カ月	20 カ月	30 カ月	62 カ月
樹種	ブナ林	ブナ林	広葉樹, スギ, ヒノキ林	ブナ林
主題	リター, 植生量と 土壌侵食量	林床被覆と雨滴侵食, 布状侵食の関係	地表流出に影響を 与える要因	地表流出率と 林床合計被覆率
地表流出率(量) と関係要因	地表流出率と リター, 植生量	地表流出量と 林床(植生, リター)被覆率	地表流出量と 林床(植生, リター)被覆率	地表流出率と 林床合計被覆率
林床被覆	大, 中, 小	大, 中, 小	被覆度指標別	4 段階
プロットの大きさ 幅×長さ(m)	2×5	2×5	0.5×2	2×5
プロット数	3	3	広葉樹 3, 針葉樹 10	4
季節変化について検討	あり	無し	無し	あり
結果	定性的な関係 (夏季にリター, 植生量 が変化することにより 地表流出率が増加)	定性的な関係 (林床植生, リター)被覆率 は地表流出量に影響を 与える)	定性的な関係 (林床被覆(植生, リター) が地表流出を抑制する 効果がある)	定量的な関係 (地表流出率と林床合計 被覆率の関係を表わす式を 得ることができた)

表-3. 重回帰分析による偏回帰係数と決定係数一覧

月平均林床合計 被覆率	月別 降雨量	月平均林床植生 被覆率	月平均リター 被覆率	決定係数
X_1	X_2	X_3	X_4	R^2
-0.392	0.008			0.817
-0.413				0.806
	0.011		-0.365	0.737
			-0.392	0.718
	0.033	-0.352		0.231
	0.034			0.21
		-0.502		0.043

土壌条件や降雨量により異なるが、高知サイトのヒノキ林で0.20~0.57、広葉樹林で0.13、三重サイトではヒノキ林で0.20~0.32、広葉樹林では0.11、東京サイトではヒノキ林で0.04~0.09、広葉樹林では0.05であった。また、林床被覆率と各プロットにおける50 mm h⁻¹の降雨強度に対する地表流出量の関係をプロットした結果から林床被覆率が高いほど地表流出量は小さくなることが示しているが、土壌条件や上層木の種類が異なるプロットを混ざって検討しているため明確な関係は見出せておらず定性的な記述に留まっている。

以上述べたように既往の研究では林床被覆率（植生+リター）が減少すると地表流出量（率）が増加する傾向があることを定性的に述べているものの、両者の関係について定量的に関係式を求めている例はない。さらに地表流出率の季節変化については若原ら（2008）が示唆しているものの、林床植生被覆率が約1%とほとんど林床植生がないプロットにおける傾向について述べているだけで林床植生被覆率が比較的大きいプロットについては言及していない。しかしながら丹沢ではシカの食害により林床植生被覆率およびリター被覆率は場所により、また季節により異なるため林床植生被覆率およびリター被覆率が異なる斜面において林床合計被覆率と地表流出率の関係を精度良く求めることが重要であり、本研究により得られた関係(1)式が林床合計被覆率から地表流出率を推定するには非常に有効である。

5. 重回帰分析による地表流出率に影響する因子の検討

これまでの検討から各試験プロットにおける地表流出率に影響を与える主な要因としては林床合計被覆率、降雨量、林床植生被覆率およびリター被覆率が考えられる。これらの要因の地表流出率に対する影響度を検討するために、(2)式に示すように月平均地表流出率（Y）を目的変数とし、月平均林床合計被覆率（ X_1 ）、月降雨量（ X_2 ）、月平均林床植生被覆率（ X_3 ）および月平均リター被覆率（ X_4 ）を説明変数として重回帰分析を行った。

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 \quad (2)$$

ここで、月平均林床合計被覆率は月平均林床植生被覆率と月平均リター被覆率の合計値である。なお月平均林床植生被覆率と月平均リター被覆率には高い相関関係（ $R^2 = 0.815$, $p < 0.01$ ）があったため、同時に使用できない。 X_1 ,

X_2 , X_3 , X_4 のすべての組み合わせについて決定係数（ R^2 ）と偏回帰係数を求め、決定係数の絶対値の大きい順に並べた結果を表-3に示す。表-3より、決定係数の絶対値が0.7以上である組み合わせは4ケースあり、説明変数として月平均林床合計被覆率と月別降雨量を同時に用いた場合に決定係数は最も大きくなることがわかった。また説明変数として月平均林床合計被覆率のみおよびリター被覆率のみを用いた場合と、月平均林床合計被覆率および月別降雨量の両値を用いた場合との決定係数の絶対値の差はわずかでることがわかる。一般的に説明変数を多く用いると決定係数の絶対値が大きくなることが知られている。したがって、説明変数が1個と最も少ない月平均林床合計被覆率と月平均地表流出率との関係が最も重要であると考えられる。すなわち、月平均林床合計被覆率を用いることにより月平均地表流出率を精度よく推定することが可能であると考えられる。

IV. 結 論

丹沢山地の堂平地区におけるシカ採食圧により林床植生衰退が激しいブナ林斜面に設置した林床植生被覆率の異なる4個の試験プロットにおいて2004年7月~2009年11月の間、樹冠通過雨量、地表流出量、林床合計被覆率などを観測した。その結果、月林床合計被覆率が小さくなるほど月地表流出率は大きくなり、両者の決定係数は0.776と高いことがわかった。さらに林床合計被覆率の季節変化に伴い地表流出率も季節変化することがわかった。

調査対象地区における地表流出率に影響を与える主な要因の影響度を検討するため重回帰分析を行った結果、月平均地表流出率は月平均林床合計被覆率との間で最も決定係数が高くなり、次にリター被覆率との間で決定係数が高くなった。また降雨量による影響度は低いことがわかった。これらの結果から、ブナ林斜面における地表流の流出には林床合計被覆率が最も大きく影響しており、このことは林床合計被覆率が土壌侵食量や洪水の主要な成分である直接流出にも大きな影響を与えていることを示唆している。これまでの研究で地表流出率は降雨量や土壌の種類、林床植生被覆率、林床リター被覆率およびそれらの両方により変化することが指摘されていた（永井ら2000；若原ら2008；宮田ら2009b；初ら2010；Ghahramani *et al.* 2011）が、いずれも定性的な指摘にとどまっている。本研究により月平均地表流出率（ R_{em} ）と月平均林床合計被覆率（ C_m ）には $R_{em} = -18.9 \ln(C_m) + 86.4$ の関係があることが明らかになり、定量的な関係を示すことができた。さらに、林床合計被覆率の季節変化に伴い地表流出率も季節変化することも明確にすることができた。

V. お わ り に

丹沢山地堂平地区のブナ林斜面において現地観測を行い、林床合計被覆率を用いて地表流出率を推定することが可能であることを示した。シカの採食圧などにより林床

植生が衰退しても、上層木から供給されるリターにより林床が被覆されていれば地表流出量が抑制され土壤侵食量を抑制されることがわかった。シカの食害により林床植生が衰退した落葉広葉樹林斜面においてリター被覆率を向上させることにより土壤侵食量の軽減を図ることができ、さらに下流の河川の直接流出量の軽減にも役立つと考えられる。

最後に、関係者各位から賜った多大なご指導、ご支援、ご協力に対し心より感謝する。

引用文献

- 阿部友幸・佐藤弘和 (2008) 北海道東部における林相、斜面地形、下層植生が森林土壌の浸透能に及ぼす影響. 日林誌 90: 84-90
- 有馬 眞・金子慶之・中村栄子 (2007) 丹沢山系における地質・土壌の地球化学的特性と流域圏の物質動態評価. (文部科学省 21 世紀 COE プログラム「生物・生態環境リスクマネジメント」成果報告書. 横浜国立大学大学院環境情報研究院). 35-46
- 初 磊・石川芳治・白木克繁・若原妙子・内山佳美 (2010) 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における林床合計被覆率と土壤侵食量の関係. 日林誌 92: 261-268
- Dunne T, Black, R (1970) An experimental investigation of runoff production in perm soils. Water Resour Res 6: 478-490
- Fukuyama T, Onda Y, Takenaka C, Walling DE (2008) Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210ex measurements. J Geophys Res 113: F02007
- Ghahramani A, Ishikawa H, Gomi T, Shiraki K, Miyata S (2011) Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope. A plot-scale study. Catena 85: 34-47
- Gomi T, Sidle R, Miyata S, Kosugi K, Onda Y (2008a) Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer. Water Resour Res 44: W08411
- Gomi T, Sidle RC, Ueno M, Miyata S, Kosugi K (2008b) Characteristics of overland flow generation on steep forested hill slopes of central Japan. J Hydrol 361: 275-256
- 服部重昭・阿部敏夫・小林忠一・玉井幸治 (1992) 林床被覆がヒノキ人工林の侵食防止に及ぼす影響. 森林総研研報 362: 1-34
- 平野智章・寺嶋智巳・中村智博・青木文聡・境 優 (2008) 管理放棄されたヒノキ人工林および天然生落葉広葉樹林における土壌表層部の水流発生機構. 地形 29: 255-280
- 平野智章・寺嶋智巳・中村智博・境 優・青木文聡・名波明菜 (2009) 針葉樹林流域と広葉樹林流域の短期流出特性の違い—降雨イベントの規模が森林流域の水流発生機構に及ぼす影響—. 水文・水資源学会誌 22: 24-39
- Ide J, Kume T, Wakiyama Y, Higashi N, Chiwa M, Otsuki K (2009) Estimation of annual suspended sediment yield from a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation considering antecedent rainfalls. For Ecol Manage 257: 1955-1965
- 石川芳治・白木克繁・戸田浩人・若原妙子・宮 貴大・片岡史子・中田 亘・鈴木雅一・内山佳美 (2007) 堂平地区における林床植生衰退地での土壌侵食と浸透の実態. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 平岡環境科学研究所). 445-458
- 古池末之 (1985) 保育作業が立地要因の変動に及ぼす影響 (I) ヒノキ人工林の枝打ち, 間伐による土壌, 植生の変化と表層土壌の流出及び地表去水の動態. 兵庫林試報 30: 41-52
- 小杉賢一朗 (1999) 森林土壌の雨水貯留能を評価するための新たな指標の検討. 日林誌 81: 226-235
- Miyata S, Kosugi K, Gomi T, Onda Y, Mizuyama T (2007) Surface runoff as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. Hydrol Process 21: 2365-2376
- 宮田秀介・小杉賢一朗・五味高志 (2009a) ヒノキ林小流域の水文過程における土壌撥水性の役割. 土壌の物理性 111: 9-16
- 宮田秀介・恩田裕一・五味高志・水垣 滋・浅井宏紀・平野智章・福山泰治郎・小杉賢一朗・Sidle Roy C・寺嶋智巳・平松晋也 (2009b) 森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因—地質および降雨特性の異なる 3 サイトにおける観測結果の解析—. 日林誌 91: 398-407
- Miyata S, Kosugi K, Gomi T, Mizuyama T (2009) Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests. Water Resour Res 46: W06402
- Miyata S, Kosugi K, Nishi Y, Gomi T, Sidle Roy C, Mizuyama T (2010) Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment. Hydrol Process 24: 535-549
- 村井 宏・岩崎勇作 (1975) 林地の水及び土壌保全機能に関する研究 (第 1 報) 森林状態の差異が地表流下, 浸透及び侵食に及ぼす影響. 林試研報 274: 23-84
- 村井 宏・岩崎勇作 (1976) 林地の水及び土壌保全機能に関する研究 (第 2 報) 地表かく乱が地表流下・浸透および侵食に及ぼす影響と林地の保全策. 林試研報 286: 1-52
- 永井壯茂・白木克繁・熊谷朝臣・鈴木雅一・太田猛彦 (2000) 裸地斜面へのストーンマルチが表面流出形成に与える影響. 東京大学農学部演習林報告 103: 107-119
- 西山嘉寛 (2003) 岡山県におけるヒノキ人工林の表面侵食と表面流出の研究 (III) 月地表流出量と降雨因子との関係. 森林応用研究 12: 59-63
- 恩田裕一 (2008) 人工林荒廃と水・土砂流出の実態. 岩波書店
- 恩田裕一・湯川典子 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (II) 下層植生の効果に関する室内実験. 日林誌 77: 399-407
- Sidle R, Hirano T, Gomi T, Terajima T (2007) Hortonian overland flow from Japanese forest Plantations an aberration, the real thing, or something in between?. Hydrol Process 21: 3237-3247
- 辻村真貴・恩田裕一・原田大路 (2006) 荒廃したヒノキ林における降雨流出に及ぼすホートン地表流の影響. 水文・水資源学会誌 19: 17-24
- 塚本良則 (1961) 中間流についての—実験. 日林誌 43: 62-67
- 塚本良則 (1992) 森林水文学. 文永堂
- 若原妙子・石川芳治・白木克繁・戸田浩人・宮 貴大・片岡史子・鈴木雅一・内山佳美 (2008) ブナ林の林床植生衰退地におけるリター堆積量と土壌侵食量の季節変化—丹沢山地堂平地区のシカによる影響—. 日林誌 90: 378-385
- 湯川典子・恩田裕一 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験. 日林誌 77: 224-231