

落葉層の貯留効果に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON EFFECT OF LITTER LAYERS ON WATER STORAGE

川越清樹¹・風間 聡²・佐藤榮司³・沢本正樹⁴

Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, Eiji SATO, Masaki SAWAMOTO

¹ 学生会員 東北大学 大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

² 正会員 工博 東北大学 大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

³ 非会員 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

⁴ フェロー会員 工博 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

The purpose of this study is to understand effect of different litter layers on water storage. An experimental system with rainfall variation expresses the storage process through measurements of discharge and soil moisture. Also 2D Richards model with hysteresis and the experimental results show the permeability of different litters, broadleaf, acicular, and laurel. The litter layers increases the storage effect as slope angle increases. Broadleaf and laurel have larger storage capacity than acicular. Application of the model with hysteresis is approximated to survey data. In Richards equation with hysteresis, The vertical water permeability of a litter layer is expressed in the half permeable of the soil.

Key Words : litter layers, infiltration experiment, hydrograph, Richards equation hysteresis

1. 序 論

我が国の水資源の安定性は、人工ダムの存在以外に豊富な森林資源の貯留機能も関わると評価されている。経済発展による水需要の拡大化や地球温暖化に影響する気象変動の不安定化より、今後の資源確保は困難になると予測される。その一方、環境悪化を懸念し人工ダム建設は抑制傾向にあり、今後は、森林地帯の貯留機能を十分に反映する効率的な人工ダムの計画が必要となる。森林地帯の貯留性は、落葉層を含む森林土壌の効果が大きいと評価され、スポンジ機能より高い保水能を有するといわれている。しかし、機能を定量化して評価する段階まで至ってなく、今後、効果に資するためのデータ蓄積が必要である。森林土壌を対象とした貯留、浸透に関わる研究として、谷ら¹⁾は不飽和浸透過程や森林土壌の孔隙を考慮した研究をおこない、小杉²⁾は土壌水分特性や土層厚を考慮し雨水貯留量指標を導いている。恩田ら³⁾は土壌表面のクラスト形成プロセスに着目し落葉層の浸透能について研究し、落葉種別毎の効果を区別化した。Putuhenら⁴⁾は林床モデルに伴う貯水量ポテンシャルを導き、Arbelら⁵⁾は植林の成長率にあわせて落葉層の保水効果を検証している。

本研究では、森林土壌の落葉初期段階の堆積ケースに着目し、落葉種別毎の貯留効果の把握に資することを目的とする。研究内容はa), b)に示すとおりである。

a) 浸透実験より模式的な斜面および降雨条件をモデル化し、落葉層の貯留効果を検証すること

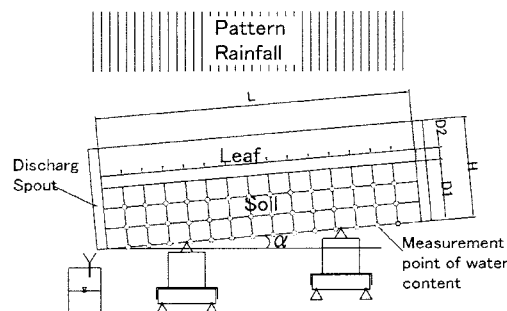


図-1 実験装置概要図

b) 実験結果を浸透解析に反映することで同定化をはかり、降水貯留効果を定量的に示すこと

Kosugiら⁶⁾も類似した研究をおこなったが、本研究では落葉層直下の土層も考慮したモデルで検討する。また、塚本⁷⁾の示した速度の小さい土壌中の貯留性という森林土壌の特性を参考に、貯留性を定量的に表現する指標として透水係数を用いる。

2. 実験概要

装置には図-1に示す長方形水槽を用いる。水槽より斜面を復元し、降水に伴う流出形態をモデル化する。

(1) 実験装置

装置規模は $L=1.5\text{m}$ 、深さ $H=0.5\text{m}$ 、幅 $B=0.2\text{m}$ である。装置支点を調整することで、傾斜変化が可能になる。水槽中には豊浦標準砂(JIS A 5201, 比重 2.64g/cm^3 , 粒径 $106\sim 300\mu\text{m}$)を試料とし、層厚 $D_L=0.3\text{m}$ で敷詰めて土層を作

表-1 落葉試料の詳細事項

タイプ	樹 種	概 要
落葉広葉樹 (広葉樹) Broad leaf	ケヤキ (ニレ科ケヤキ属) Zelkova serrata	湿帯に自生する落葉高木。樹高 20~25m, 葉形 2~7cm の卵形 で先端尖る。
常緑針葉樹 (針葉樹) Acicular	アカマツ (マツ科マツ属) Pinusu densiflora	二次林として分布。痩せ地に生 育する。樹高 30~35m, 葉形 7 ~12cm の棒状。
常緑広葉樹 (照葉樹) Laurel	シラカシ (ブナ科コナラ属) Quercus mysinaefolia	山地に生える常緑高木。樹高 15 ~20m, 葉形 4~13cm の卵形。 葉は皮質で硬い。

成する。装置左端は流出面となり、フィルター一面の構造をなす。

(2) 実験方法

落葉層に着目するため、土層表面に落葉層を層厚 $D_2=0.05\text{m}$ で敷詰め、落葉被覆モデルを作成する。落葉層は、日本の植生分布状況を考慮し、落葉広葉樹、常緑針葉樹、常緑広葉樹の3種類を用いる。各種の詳細は表-1に示すとおりである。地表被覆は裸地状態とあわせ計4ケースを設定する。傾斜については 0° 、 5° 、 10° の3ケースを設定する。以上より、総計12ケースの条件差異を与えた実験をおこなう。実験手順はa)からc)に示すとおりである。

- 数値解析への反映を考慮し、初期土壌含水率およびその分布を簡易化させるため土層を飽和状態にし、2時間排水させる。2時間で流出量がなくなったため、この時点で定常とする
- 定常状態直後の10分間に地表面へ一様に $1\text{mm}/\text{min}$ を降水させ ($10\text{mm}/\text{h}$)、1分毎に流出量を計測する
- b)以降の50分間は降水なしで、1分毎に流出量を計測し、合計1時間の流出量変化をグラフ化する

実験の補足条件として落葉層状態の同一化をはかるため、落葉を一時乾燥状態にし、 $10\text{mm}/\text{day}$ の降水を2度経験させて実験に用いた。また、土層における含水率の状態を把握するため、TDR土壌水分計(中村理科工業株式会社 TDR-251A)を用い、 10cm ピッチの体積含水率を浸透実験と並行して測定する。測定は、降水終了の10分後におこなった。

3. 実験結果

(1) 流出量

各傾斜における流出結果は図-2,図-3,図-4に示すとおりである。不飽和を対象とするため角度の傾斜に伴い流出量は減少する。裸地状態の流出量の変動は、各傾斜度ともに降水累積するに従って流出増加し、降水終了の10分にピークが生じる。以降20分から25分まで急速な流出低下を示し、その後は緩慢な低下傾向を示す。この変動を基準にすれば、常緑針葉樹は、流出増加域の波形角度がやや緩く、流出ピークに1分から2分遅れる特徴を有する。落葉広葉樹および常緑広葉樹は、ピークの流出量が約3割減少し、ピークカットした緩やかな流出波形が認められる。全体的に植生被覆に伴う

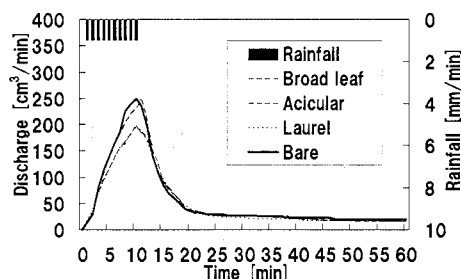


図-2 実験結果ハイドログラフ(Angle 0°)

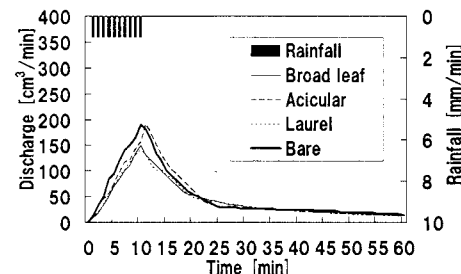


図-3 実験結果ハイドログラフ(Angle 5°)

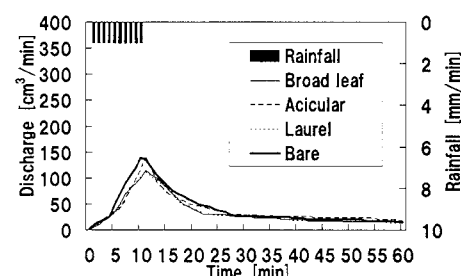


図-4 実験結果ハイドログラフ(Angle 10°)

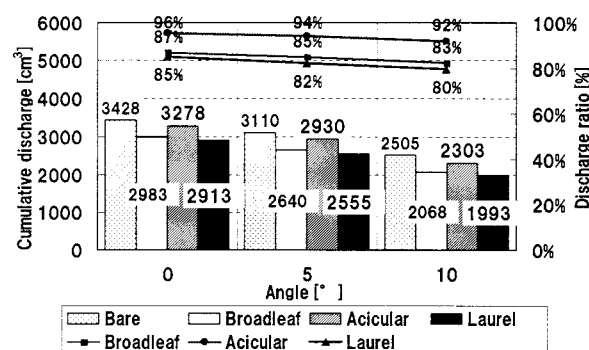


図-5 総流出量比較検討グラフ

降水遮断の流出低減が明瞭である。

流出における全体流出の関係は図-5に示すとおりである。流出比率は裸地状態を100%とした流出割合で、流出比率が低いほど貯留性が高いことを示す。常緑針葉樹と落葉広葉樹および常緑広葉樹では流出比率は大きく異なり、常緑針葉樹のほうが約10%流出比率が高い。また、傾斜角度をあげる程に流出比率が低下する傾向が認められる。この原因は、傾斜度増加に並行して葉間等の水分吸収面積が増加するためと推測する。

(2) 土壌水分

土壌水分測定結果は、概ね各ポイントともに40%以下の体積含水率を示す。図-6から図-8は裸地状態と落葉層被覆状態の体積含水率の差分を示す。グラフは水

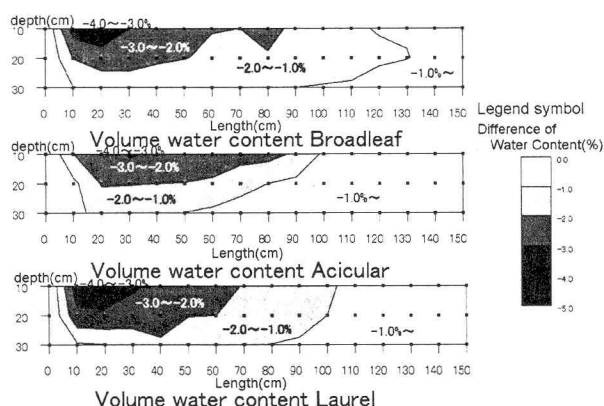


図-6 0°における裸地との含水率差分グラフ

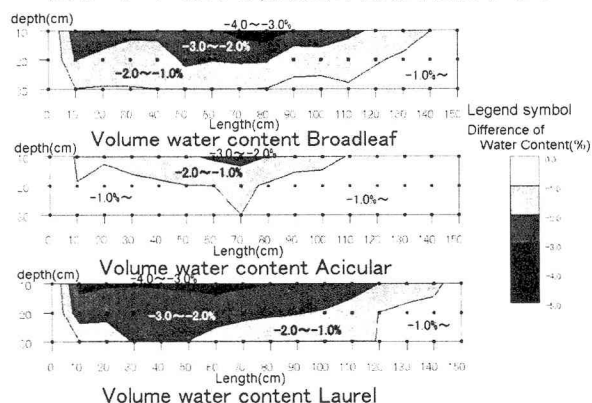


図-7 5°における裸地との含水率差分グラフ

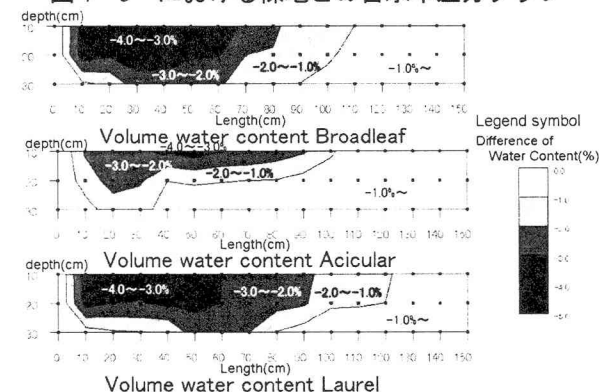


図-8 10°における裸地との含水率差分グラフ

槽を二次元化したもので、左を流出口、上を地表面とする。被覆状態における体積含水率は最大4%低下する。この現象は落葉被覆に伴う降水遮断効果を示唆する。また、傾斜角度の変化に並行し、全落葉種ともに類似した時間的な含水率の変化が認められる。詳細はa)からc)に示すとおりである。

- 0° 傾斜時では、体積含水率低下が最大となるポイントがモデル斜面中腹部表面に分布する。このポイントを中心に含水率は徐々に低下する
- 5° 傾斜時では、体積含水率低下が最大になるポイントが流出口側に遷移する。-3.0%から-4.0%低下の面積比率は0°と比較して小さくなるが、1.0%以上の面積比率は大きくなる
- 10° 傾斜時では、体積含水率低下が最大になるポイントの位置は変化しないが、面積比率は大きくなる

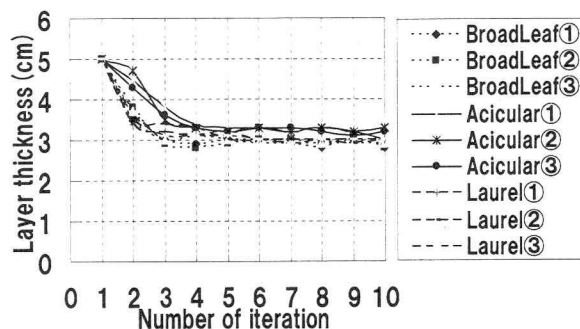


図-9 落葉層厚変化グラフ

以上の結果は、落葉被覆による影響が、低い傾斜角度ほど水槽全域で万遍なく与えられること、高い傾斜角度が高いほど流出口側に偏ることを示唆する。

(3) 落葉層における特記事項

落葉層は、全樹種共通して、当初の乾燥状態で $D_2=0.05\text{m}$ に敷き詰めていたが、最終的な初期実験時には $D_2=0.03\text{m}$ 程度の層厚に収縮した。そこで、落葉層における追跡実験を行い、複数回の浸透実験同様の降水を与え、収縮性検証をおこなった。結果は図-9に示すとおりである。実験条件のケースでは概ね $D_2=0.03\text{m}$ で安定する結果が得られる。この収縮性は、水分吸収より空隙を伴う落葉層が収縮するスポンジ機能の存在を示唆する。

4. 浸透解析概要

落葉層被覆条件における浸透実験の検証として浸透解析をおこなう。実験は、地表付近を対象としているため、不飽和領域の浸透理論を反映したモデル式の適用が必要である。以上より、浸透解析にはRichards方程式を基にする二次元不飽和斜面浸透解析モデルと高橋ら⁸⁾が提案する土壌ヒステリシス効果を考慮したRichards方程式を基にする二次元不飽和斜面浸透解析モデルを用いる。落葉層を対象に土壌ヒステリシス効果を考慮した解析の例はなく、その検証もかねて2手法の比較もおこなう。

(1) Richards式の二次元不飽和斜面浸透解析モデル

Richardsの基礎方程式は式(1)から式(6)に示すとおりである。式(1)は飽和不飽和浸透理論に基づいた連続式で、式(2)はダルシー則の運動方程式である。式(3)に示す全水頭圧力 ϕ は圧力水頭と位置水頭の和より求める。式(2)に式(1)を代入し $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ を導入して式(4)に示すRichardsの方程式となる。圧力水頭 ψ と体積含水率 θ の関係には式(5)に示す谷式⁹⁾を、体積含水率 θ と不飽和透水係数 K の関係には式(6)に示す一般化Kozeny式¹⁰⁾を用いる。蒸発散も考慮できるが、植物からの蒸発散より放出される水分の供給源は、主に土壌水分で植物の根や茎を通じて土状中から吸い上げられている。本研究では落葉層に着目していることから、蒸発散をゼロとした。式(4)については、単独でとくことができないため、式(5)と式(6)を用い完全陰形差分式とする。

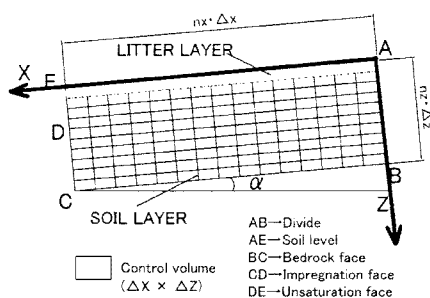


図-10 浸透解析モデル斜面概要図

次の計算時間ステップの圧力水頭を求める場合には、この差分式と繰り返し計算手法のSOR法(Successive Over Relaxation法)を用いて計算する。解析モデル斜面は図-10に示すとおりである。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$V_x = -K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

$$V_z = -K_z \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\phi = \psi - x \sin \alpha - z \cos \alpha \quad (3)$$

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} - K_x \sin \alpha \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_z \cos \alpha \right) \quad (4)$$

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi'}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi'}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (5)$$

$$K_x = K_{sx} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta, K_z = K_{sz} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (6)$$

ここで、 θ :体積含水率、 t :時間、 V :流速、 K :不飽和透水係数、 ϕ :全水頭、 θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :残留体積含水率、 C :比水分容量、 ψ_0 : C が最大となる圧力水頭 ψ 、 ψ' : $\psi < 0$ のとき ψ かつ $\psi \geq 0$ のとき0、 β :土壌固有の定数、 K_s :飽和透水係数である。なお、添え字は x 、 z 方向を示す。

(2) 土壌ヒステリシスの導入

土壌ヒステリシスは、負の圧力水頭(吸引力) ψ と水分量(含水率) θ の関係を表す土壌水分特性曲線が、乾燥および湿潤過程で異なることである。同一圧力水頭のもとでは湿潤過程よりも乾燥過程の水分量が多くなる。ヒステリシスが大きい土壌では、不飽和流の運動や地下水上昇および下降に伴う地下水流出に与える影響が大きい。通常の浸透解析では、便宜的に乾湿の過程を同一の水分特性曲線としている。高橋ら⁹⁾の研究では、簡便で実態を良く表すKoolら¹¹⁾の解析的手法を改良した栗生田ら¹²⁾の式を2次元モデルに適用している。本研究では、 $\theta - \psi$ 関係が初期段階では乾燥主曲

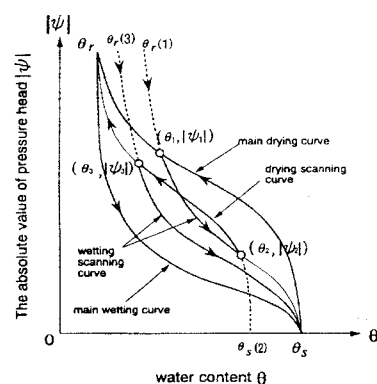


図-11 ヒステリシスを考慮した水分特性曲線

表-2 浸透解析土壌パラメータ

項 目	数 値
X 方向メッシュ数 Nx	30
Z 方向メッシュ数 Nz	裸地 20 落葉層被覆 22
X 方向メッシュサイズ ΔX(m)	0.050
Z 方向メッシュサイズ ΔZ(m)	0.015
X 方向透水係数 Ksx(cm/sec)	2.56×10^{-2}
Z 方向透水係数 Ksz(cm/sec)	2.56×10^{-2}
圧力水頭設定値 ψ_0 (m)	-0.25
飽和含水率 θ_s	0.41
飽和含水率 θ_r	0.00
透水係数低下パラメータ特性値	3.0

線関係にあるものと仮定し、基本概念は図-11に示すとおりである。 $\theta - \psi$ 関係は折り返し点となる乾燥主曲線上の点 $(\theta_1, |\psi_1|)$ から土壌水分が減少する時は乾燥主曲線上を θ_r へ変動し、増加する時は点 $(\theta_1, |\psi_1|)$ を出発点に湿潤主曲線上を θ_r へ変動する。この湿潤走査曲線を規定する $\theta_r(1)$ は式(5)を用いて式(7)より求めることができる。

$$\theta_r(1) = \frac{\theta_1 - \theta_s \left(\frac{\psi_1'}{\psi_0^w} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi_1'}{\psi_0^w} \right)}{1 - \left(\frac{\psi_1'}{\psi_0^w} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi_1'}{\psi_0^w} \right)} \quad (7)$$

ここで、 ψ_0^w :吸水過程で C が最大となる ψ である

$\theta - \psi$ 関係が湿潤走査曲線上にあり、湿潤走査曲線上の点 $(\theta_2, |\psi_2|)$ から土壌水分が増加する時は湿潤走査曲線上を θ_s へ変動し、減少する時は点 $(\theta_2, |\psi_2|)$ を出発点に乾燥走査曲線上を θ_r へ変動する。から湿潤主曲線上を θ_r へ変動する。この湿潤走査曲線を規定する $\theta_r(2)$ は式(5)を用いて式(8)より求めることができる。

$$\theta_s(2) = \frac{\theta_2 - \theta_r}{\left(\frac{\psi_2'}{\psi_0^d} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi_2'}{\psi_0^d} \right)} + \theta_r \quad (8)$$

ここで、 ψ_0^d :排水過程で C が最大となる ψ である。

(3) 解析条件

浸透解析は、飽和から2時間排水後の状態を基本条件とする。土試料のパラメータは、表-2に示すとおり

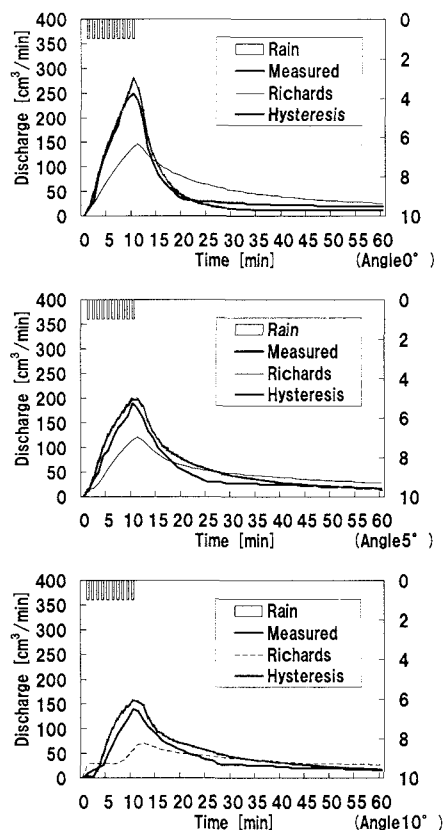


図-12 裸地の実測と解析値のハイドログラフ

で、竹下ら¹³⁾の測定結果に基づく。ヒステリシス考慮の場合は、高橋ら⁸⁾の解析結果より、 $\psi_0=0.25$ を基準に排水過程で -0.05m 、吸水過程で $+0.05\text{m}$ のヒステリシス幅を与える。落葉層は、表層土壌の透水係数に異方性をもたせることで擬似的に示す。落葉収縮性結果を基に表層 0.03m 分について x 、 z 方向それぞれの飽和透水係数を $1/5$ から 5 倍し変化させる。実測値と異方性を与えた浸透解析結果について、流出と流出波形を比較検討し、落葉層の透水性を評価する。流出は実測値を基準とした流出比率、流出波形は実測値との相関係数 r^2 で示す。比較検討には標準化の得点式を用い、飽和透水係数毎に評価する。標準化の式は式(9)に示すとおりである。

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (9)$$

ここで、 Z :標準化得点、 x :基準値、 μ :母集団平均、 σ :標準偏差である。

傾斜度毎の結果は飽和透水係数の分類に包括する。落葉層として最適異方性は、基準値に近似してばらつきの少ない値である。標準化した得点 Z は正規分布表で対応して、誤差の割合を示せるため、最適値を導くことができる。なお、標準化の式の基準値は、相関係数では相関の最大値である 1.00 、流出比率で誤差がないと評価できる 1.00 に設定する。

5. 浸透解析結果

(1) 裸地状態

裸地状態における実測結果と解析結果のハイドログラフは図-12に示すとおりである。ヒステリシスを考慮

した浸透解析モデルは、流出量低減段階に若干の差異が生じるものの概ね実測値と近似した流出波形を示す。この結果は、土壌ヒステリシスを考慮した浸透解析モデルによる改善を示唆する。

(2) 落葉層被覆状態

実測値と解析結果の大局的な関連性を把握するため、流出比率の差異が基準値 1 に ± 0.2 の誤差範囲に存在し、相関係数 r^2 が 0.1 の誤差範囲に存在するケースを抽出し、表-3に示す。全体的な共通点として透水係数 K_{sz} の異方性は $1/2$ である。落葉層は、土層の半分の透水性が適当である結果を示す。なお、ヒステリシスを考慮した浸透解析モデルの相関係数 r^2 は 0.9 以上で認められている。この傾向は、裸地状態と同様に、流出量の変動形態は実測値と近似することを示し、ヒステリシス導入の優位性を示す。標準化得点より最適値は、落葉広葉樹で $K_{sz}-L=K_{sz} \times 1/2$ 、 $K_{sx}-L=K_{sx} \times 1/2$ 、常緑針葉樹で $K_{sz}-L=K_{sz} \times 1/2$ 、 $K_{sx}-L=K_{sx} \times 1$ 、常緑広葉樹で $K_{sz}-L=K_{sz} \times 1/2$ 、 $K_{sx}-L=K_{sx} \times 1/4$ の異方性を示す(異方性を与えた透水係数は $K_{sx}-L$ 、 $K_{sz}-L$ と記す)。落葉被覆実測値とヒステリシスを考慮した解析値の比較は図-13に示すとおりである。

6. 結論

実験より、落葉層被覆の降水遮断効果、つまり、貯留効果が認められた。その他、a)からd)の結果を得た。

- a) 落葉および常緑広葉樹の貯留効果は、常緑針葉樹よりも大きい
- b) 斜面傾斜度をあげると流出流出比率が低下する
- c) 落葉被覆による影響が、低い傾斜角度ほど水槽全域で万遍なく与えられ、高い傾斜角度が高いほど流出口側に偏る
- d) 落葉層には層厚の収縮性が存在し、ある程度の降水履歴に伴い層厚は安定化する

恩田ら³⁾の研究結果を参考にすれば、常緑針葉樹に属するマツリターで被覆した場合、クラスト形成過程の差異から裸地よりも浸透能が低下する結果を得ている。評価対象項目は違うが、大局的に異なる結果を示している。この原因は、モデル降水量が浸透能より小さい、試料が均一化されている豊浦標準砂である、落葉分布密度に差異がある、落葉の風化進行度に差異があるためと推測する。この推測の検証のため、降水量、土層、落葉の分布密度および風化程度に差異を与えた実験をおこなうことは今後の課題である。斜面傾斜度に伴う流出流出比率の低下現象においては、傾斜度増加に並行して葉間等の水分吸収面積が増加するためと推測する。傾斜角度と流出量の変化の検証も今後必要である。浸透解析より、ヒステリシスの導入が効果的であること、落葉層の鉛直方向の透水性が土層と比較して半分になる結果を得た。その他、e)、f)の結果を得た。

- e) 流出量低減域の流出波形は実測値の方が小さい
- f) 傾斜度が大きくなるほど実測値との差異が広がる
土壌均一性に多少の差異が生じるためe)、f)の結果が

表-3 落葉の透水係数異方性判定結果表

解析法	落葉樹種	透水係数の倍数		相関係数の検討				収支比率の検討			
		Z 方向	X 方向	相関係数の平均 μ	相関係数の標準偏差 σ	標準化得点 Z	誤差割合	収支比率の平均 μ	収支比率の標準偏差 σ	標準化得点 Z	誤差割合
ヒステリシスを考慮	Broad Leaf	0.50	0.20	0.96	0.03	1.11	13.4%	1.07	0.12	0.52	30.2%
		0.50	0.25	0.97	0.03	1.13	12.9%	1.06	0.13	0.50	30.9%
		0.50	0.33	0.97	0.03	1.13	12.9%	1.06	0.13	0.51	30.5%
		0.50	0.50	0.97	0.03	1.13	12.9%	1.07	0.13	0.53	29.8%
	Acicular	0.50	1.00	0.95	0.03	1.47	7.1%	0.97	0.11	0.29	38.6%
		0.50	2.00	0.95	0.03	1.39	8.2%	0.99	0.12	0.11	45.6%
		0.50	3.00	0.96	0.04	1.09	13.8%	1.00	0.12	0.02	49.2%
		0.50	4.00	0.95	0.03	1.34	9.0%	1.02	0.13	0.14	44.4%
		0.50	5.00	0.96	0.03	1.32	9.3%	1.04	0.14	0.25	40.1%
	Laurel	0.50	0.20	0.97	0.03	0.98	16.4%	1.10	0.13	0.74	29.9%
		0.50	0.25	0.97	0.03	1.00	15.9%	1.10	0.14	0.71	29.4%

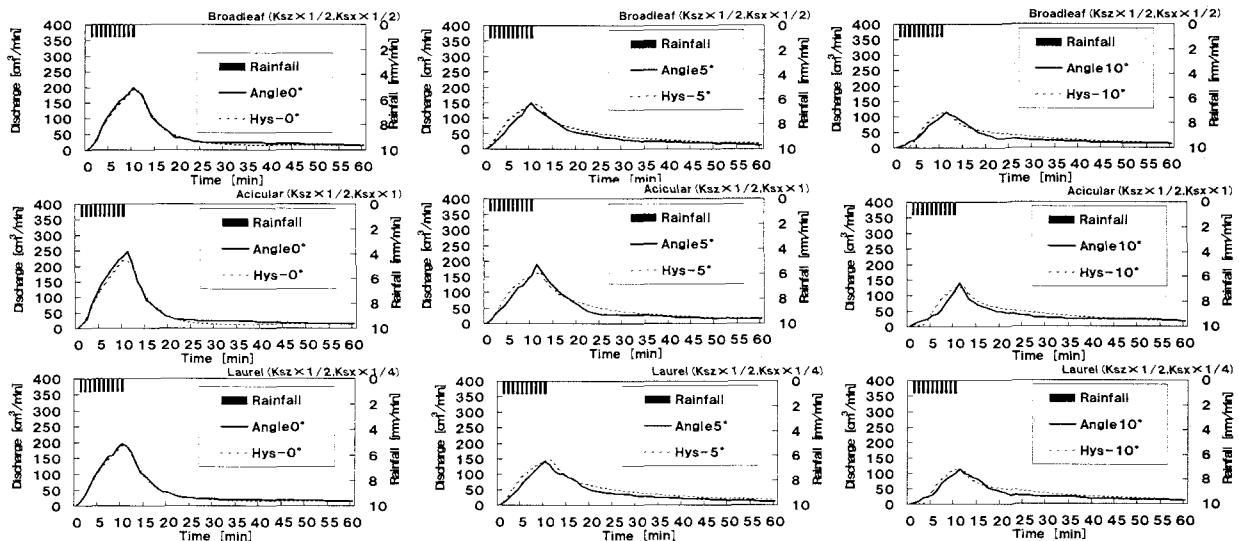


図-13 落葉被覆の実測値とヒステリシス考慮の浸透解析結果の比較ハイドログラフ

認められる。ヒステリシスにより大幅に実測値への再現性が向上したが、更に導入における改良の余地がある。角度変化による差異の広がり、土粒子間の収縮性も寄与している可能性があるため、角度にあわせたパラメータ条件も検討する必要がある。

今後は、自然落葉層の風化および分布状態等に差異を与えデータを蓄積すること、浸透解析モデルの異方性ではなく葉種に合わせた透水係数値や飽和および残留体積含水率も解明することに着目し、落葉層の貯留機能を議論していく。

参考文献

- 1) 谷誠, 小杉賢一朗, 坪山良夫, 窪田順平: 森林土壌が多様な不均質性をもつ流域の流出特性に及ぼす影響の解明に向けて, 日本林学会誌, 80(1), pp.44-57, 1998.
- 2) 小杉賢一朗: 森林土壌の雨水浸透能を評価するための新たな指標の検討, 日本林学会誌, 81(3), pp.226-235, 1999.
- 3) 恩田裕一, 山本高也: リターに被覆された土壌表面におけるクラスト形成プロセスの解明, 日本林学会誌, 80(4), pp.302-310, 1998.
- 4) Putuhen, W.M and Cordery, I.: Estimation of interception capacity of the forest floor, Journal of Hydrology, 180, pp.283-299, 1996.
- 5) Arbel, Y., Yair, A. and Oz, S.: Effect of topography and water repellent layer on the non-uniform development of planted trees in a sandy arid area, Journal of Arid Environments, Journal of Arid

Environments, 60(1), pp.67-81, 2005.(掲載予定)

- 6) Kosugi, K. Mori, K and Yasuda, H.: An inverse modeling approach for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor, Journal of Hydrology, 246, pp.96-108, 2001.
- 7) 塚本良則: 森林・水・土の保全・湿潤変動帯の水文地形学, 朝倉書店, 1998.
- 8) 高橋雅之, 風間聡, 佐藤榮治, 沢本正樹: 不飽和浸透解析によるヒステリシス効果の検証-二次元浸透流への適用-, 水工学論文集, 47, pp.265-270, 2003.
- 9) 谷誠: 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性, 日本林学会誌, 64 (11), pp.409-418, 1982.
- 10) Brutsaert, W.F.: The permeability of a porous medium determined from certain probability laws for pore size distribution, Water Resources Research, Vol.4, No.2, pp.425-434, 1968.
- 11) Kool, J. B. and Parker, J. C.: Computer simulation model of evaluation of soil hydraulic properties from one-dimensional unsaturated flow by non-linear least-squares parameter estimation, Soil and Environmental Science, Ver.2.2, 1990.
- 12) 栗生田忠雄, 吉田昭治: ヒステリシスを考慮した土壌-植物-大気連続系の土壌水分動態モデル, 水文・水資源学会誌, 8(3), pp.322-334, 1995.
- 13) 竹下祐二, 河野伊一郎: 不飽和浸透特性の推定方法とその適用について, 地盤と建設, Vol.11, No.1, 1993.

(2004. 9. 30 受付)