水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 14, No. 1 (2001) pp. 27-33

電気探査を用いた撥水性土壌での降雨浸透過程推定に関する実験的研究

Experimental Study on the Estimation of the Infiltration Process in water repellent soil, using the Electrical Exploration

長濱則夫*

Norio NAGAHAMA

(北海道大学大学院地球環境研究科)

Graduate school of Environmental Earth Science, Hokkaido University

小野寺真一**

Shinichi ONODERA

(広島大学総合科学部)

Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University.

小林政広***

Masahiro KOBAYASHI

(農林水産省森林総合研究所)

Forestry and Forest Product Research Institute

安道幸仁****・M.D. バーマノ****

Yukihito ANDO・Moch. Djoko. Birmano

(広島大学大学院生物圏科学研究科)

Graduate school of Biosphere Science, Hiroshima University.

濱田洋平*****

Youhei HAMADA

(筑波大学地球科学系)

Institute of Geosciences, University of Tsukuba

井岡聖一郎*****

Seiichirou IOKA

(筑波大学大学院地球科学研究科)

Graduate school of Geoscience, University of Tsukuba.

We carried out a sprinkling experiment on the ridge of the burned granitic mountain covered by the water repellent soils. After the applied rainfall, we dug a trench and confirmed the location of the dye tracer. In addition, we measured the soil resistivities during the experiment and examined the infiltration processes. The results are summarized as follows, 1) The infiltration process was influenced by the water repellency at the ground surface. The widths of preferential flow paths were about 1cm. 2) The change in resistivities approximately corresponded to the changes in pressure head and the dye tracer. This result indicates utility of electrical exploration to estimation of infiltration process.

Key words : Electrical exploration, Rain infiltration process, Preferential flow, Water repellent soil

撥水性土壌の分布が確認された山火事跡の花崗岩山地尾根部において散水実験を行い、散水後トレンチを掘り、染料の追跡を行った。同時に、散水中に土壌比抵抗値を測定し、浸透過程の推定を行った。その結果、以下のことが確認できた。1) 地表面の撥水性の影響を受けた、幅1cmほどのポイント的な浸透を確認した。2) 比抵抗値の変化から推定される浸透は、圧力水頭の変化

*北海道大学大学院地球環境科学研究科 〒060-0810 札幌市北区北10条西5丁目

Graduate school of Environmental Earth Science, Hokkaido University, West 5, North 10, Kitaku, Sapporo, 060-0810, Japan

**広島大学総合科学部自然環境科学講座 〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1

Department of Natural Environmental Sciences, Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Kagamiyama 1-7-1, Higashi-hiroshima, 739-8521, Japan

***農林水産省森林総合研究所九州支所 〒860-0862 熊本市黒髪4-11-6

Kyushu Research Center, Forestry and Forest Product Research Institute, Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries, Kurokami 4-11-6, Kumamoto 860-0862, Japan

****広島大学大学院生物圏科学研究科環境計画科学専攻 〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1

Graduate school of Biosphere Science, Hiroshima University, Kagamiyama 1-7-1, Higashi-hiroshima, 739-8521, Japan

*****筑波大学地球科学系 〒305-8571 つくば市天王台1-1-1

Institute of Geosciences, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8571, Japan

*****筑波大学大学院地球科学研究科 〒305-8571 つくば市天王台1-1-1

Graduate school of Geoscience, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8571, Japan

とトレンチで確認した浸透によく一致したことから、野外における不均一な浸透過程の推定に、比抵抗値を利用することが有用であることを確認した。

キーワード：電気探査、降雨浸透過程、不均一流、撥水性土壌

I. はじめに

地表面下の降雨浸透現象に関しては、均一流を仮定したDarcy-Richards式を前提として、実験や数値計算により一般化がなされてきた(Hillel, 1970; Jury *et al.*, 1990など)。一方で、野外における観測から、不均一な浸透過程が多数報告されてきた。例えば、McDonnell(1990)はテンシオメーターを用いた圧力水頭の測定から、Jardine *et al.*(1990)はBr⁻トレーサーの追跡から、Onodera and Kobayashi(1995)は圧力水頭の測定とBr⁻トレーサーの追跡の両方から、降下浸透過程におけるマクロポアの寄与を確認した。ここでは、水の移動経路そのものの不均一性(マクロポア)による選択的な浸透の確認が主であり、その手法も一次元での観測にもとづいたものであった。さらに、二次元的な観測により、Onodera(1993)は乾燥地域の砂質土層中で、Dekker and Ritsema(1994)は撥水性砂質土壌で、Miyazaki(1993)は傾斜した層構造の二次元土壌カラム中で、均一なマトリックス中における不均一な降雨浸透を確認した。さらに、この他の不均一な浸透として、微地形や樹幹流の影響も報告されている(Crabtree and Trudgill, 1985; Dekker and Ritsema, 1996)。ここで、Onodera(1993)やDekker and Ritsema(1994)は、時間ごとに断面を少しずつずらしながら、ぬれ前線や含水率の変化を追跡した。このように複数の不均一要素を含む野外で、土壌中の水の挙動をより明確にするためには、テンシオメーターによるポイント的な測定やトレンチでの確認、トレーサーの追跡による推定に加え、非破壊でかつ空間的に連続した測定が望まれる。

一方、土壌水分量を二次元または三次元的、かつ経時的にとらえる方法として、土壌比抵抗値を利用するものがある(嶋田・佐藤, 1995; Qi You *et al.*, 1999)。これは、土壌が水を多く含むと比抵抗値が小さくなるという特徴を利用したもので、値の時間変化をもとに水分量の変化を把握することができる。嶋田・佐藤(1995)が均質な平坦部で行った散水実験では、その有用性が示されている。

そこで本研究では、表層土壌に不均一な撥水性土

壌の分布が確認された山火事跡地において散水実験を行い、実際の浸透過程を確認すると同時に、野外における比抵抗値の変化を利用した浸透過程の推定の有用性を検討することを目的とした。

II. 研究方法

1. 実験地

散水実験は、広島県大野町の花崗岩山地尾根部で、水平に近い場所を選んで行った。実験地の標高は約140mである。本地域は1999年5月3日～5日に山火事がおこり、およそ100haが焼失した。このため、地上部には山火事前から生えていたアカマツなどの幹が黒く焦げて残っているほかは、ほぼ完全に焼失している。表層土壌は、植物の根から構成されるA₀層(ルートマット)が3cmほどあり、その下は厚さ3～6cmのA層となっている。A層の下層は、深度30cmまでまざ土からなるB層となっており、それ以降は風化花崗岩からなるC層が分布する。

一般に、山火事後の土壌には強い撥水性が生じることが報告されている(Meeuwig, 1971; Dyrness, 1979)。実験地の電気探査の測線における撥水性の特徴を図-1(a)に示す。結果は散水実験後の2000年2月22日のものである。ここでは、A層の水滴侵入時間(The water drop penetration time以後WDPT)を示す。WDPTは、Richardson and Hole(1987)などが行った測定法で、土壌面に水滴を落としその水滴が完全に浸透するまでの時間で表す。WDPTが5secを上回ると土壌が撥水性をもつとみなせる(Krammws and DeBano, 1965)。測定結果より、実験地の地表面では撥水性が不均一な分布を示すことが確認できる。

2. 実験方法

本実験は、1999年11月25日に行った。この時期は比較的乾燥していたが、前日に2mm、二日前に17mmの降雨があった。図-2に、散水実験の概念図を示す。実験地には、散水中に比抵抗値の測定を行うために3mの電気探査の測線(～25cm地点～275cm地点)を設け、10cm間隔で電極を打ち込んだ。電極には長さ11.5cm、直径0.5cmの鉄の釘を使用した。各電極

図一 1 (a) 電気探査測線における水滴侵入時間の分布(2000年2月22日測定)
(b) 比抵抗値測定点と測定順番

Fig. 1 (a) Distribution of water repellency in the measured line
(b) Measured points of resistivity and measurement order

図一 2 散水実験の概念図

Fig. 2 Schematic of the sprinkling experiment

からは散水範囲の外まで電線を伸ばし、Wenner四極法の電極配置で土壌比抵抗値の測定を行った(島ほか, 1995)。図一1に、実際に比抵抗値を測定した地点と測定順序を示す。比抵抗値は、20, 40, 60

cmの三深度で測定を行った。全地点の測定には約15分かかるため、各深度の測定終了後、その深度で最初に測定した地点を再度測定し、時間差による影響がないことを確認しながら測定を行った。電源には12Vのバッテリーを使用し、出力は600mVで測定した。比抵抗値は、以下に示す式から計算した。

$$\rho = 6.28 \times a \times R \quad (1)$$

ここで、 a は測定点の深度(m)、 R は電気探査で読み取った抵抗値である。

散水には灌漑用ホースを用いた(図一2)。灌漑用ホースは、微細な散水用の穴が上向きになるように地表面に固定し、タンク内の水位を一定に保ちながらホースへ給水した。ホースは、観測線に並行にそれぞれ35cmずつ離して2本を設置した。なお、実験前にあらかじめ本装置を用いて降雨強度と水頭差の関係を作り、実験ではその水頭差になるように装置を設置し、全給水量からも平均降雨強度を確認した。

降雨強度は、約15mm/hで行った。また、予備実験では、散水域内の5ヶ所にランダムにシャーレを設置し数回雨量を測定した結果、降雨強度の差はほぼ10%以下で実験中も均一なものと仮定した。散水時間は二時間で、散水範囲は電気探査の測線を中心とする3×1.5mの区画である。なお、浸透過程を主に検討したのはこのうち50% (150cm) の区間 (50cm地点～200cm地点) である。水は青色の染料(ブリリアントブルー： $C_{34}H_{26}N_6O_{15}S_4Na_4$) を混ぜた海水を使用した。海水を使用した理由は、電気探査で読み取れる抵抗値(R)が最大で300であり、深度20cmでは比抵抗値が $376.8\Omega \cdot m$ より高い場合測定できず、仮に通常の水で飽和状態になっても測定ができなかったためである。このため、 $0.3\Omega \cdot m$ と伝導性の良い海水(佐々ら, 1993)を散水することにした。染料は浸透の様子を確認するために使用し、散水後にトレンチを掘り確認した。濃度はほぼ $0.03g/l$ で使用した。

散水中の浸透を確認するために、二地点に深さ15cmと50cmのテンシオメーターを設置し、圧力水頭の測定を行った。設置した地点は、実験の三日前に測線に沿ってWDPTを測定し、撥水性が強い地点として70cmの地点(T70)、弱い地点として120cmの地点(T120)を選んだ。比抵抗値と圧力水頭は30分ごとに測定した。

Ⅲ. 結 果

1. 土壌比抵抗値分布の時間変化

図-3に、散水開始から30, 60, 90, 120分後の比抵抗値の分布を示す。なお、測定時間は全体の計測時間の平均値であり、30分の場合は約22分から38分までに測定した値という意味である。深度20, 40, 60cmでの測定誤差は、それぞれ ± 1.38 , ± 2.58 , $\pm 3.8\Omega \cdot m$ であった。各深度における散水前の比抵抗値は、検出限界より高いため測定できなかったが、散水開始から10分ほどで比抵抗値が低下し測定可能になった。図-3より、時間の経過とともに、地表面付近から比抵抗値の低い領域が拡大していく様子がうかがえる。また、120cm, 190cm, 230cmの地点では、周囲の同じ深度に比べ比抵抗値が低いとわかる。ただし、230cm地点では散水域の中では外側に位置するためその影響も考慮する必要がある。

2. 圧力水頭の時間変化

図-4に、圧力水頭の変化を示す。70, 120cmの地点にあるテンシオメーター(それぞれT70, T120)

図-3 比抵抗値の分布

(a) 30分後, (b) 60分後,
(c) 90分後, (d) 120分後

Fig. 3 Distribution of the resistivities

(a) 30minutes, (b) 60minutes,
(c) 90minutes, (d) 120minutes

のうち、深度15cmに設置したものは30分後に圧力水頭が $-62.5cmH_2O$ から約 $-10cmH_2O$ まで上昇し、その後はほぼ一定となっている。T120の深度50cmの圧力水頭は、30分後に $-57cmH_2O$ から $1.75cmH_2O$ へと大きな変化があり、その後は緩やかに上昇して、120分後には $16.8cmH_2O$ になっている。T70の深度50cmの圧力水頭は、散水開始から30分後に $-65cmH_2O$ から $-55cmH_2O$ になり、他の三地点と比較して変化は小さかったが、その後も緩やかに上昇を続け、90分後に $-12.5cmH_2O$ に達している。

3. トレンチでの青色染料の分布

散水終了後10分ほどしてから測線に沿ってトレンチを掘り、青色染料の分布から実際の浸透過程を確認した。図-5に、染料を確認した深さを示す。A層(ルートマット)とA層の境界である0cmまでは、ほぼ全地点において水の浸透を確認できた。一方、まさ土からなるB層では、幅1cmほどの狭い範囲でのポイント的な浸透が確認できた。特に、120, 170, 180, 230cmの4地点では、他の地点に比べ深くまで青色染料が浸透していた。それぞれの地点で確認した浸透の深さは、16, 21, 16, 23cmであった。また、170cmの地点では、A層で植物根に沿った浸透が確認でき、その下方へ浸透したものだとなった。

図-4 圧力水頭の変化
Fig. 4 Changes of pressure head

図-5 トレンチにおける青色染料の分布
Fig. 5 Distribution of blue tracer in the trench

IV. 考 察

嶋田・佐藤(1995)によれば、同一地点における比抵抗値の変化は水分量の変化によってのみおこると考えられる。ただし、測定範囲全体の水分変化が影響を及ぼす(島ほか, 1995)ため、相対的な水分量変化としてのみ利用する。

トレンチで土壌断面を観察したところ、深度30cmまではまさ土からなる均一に近い層であり、下層の風化花崗岩層も、測定範囲の深度60cmまででは比較的不均一性は小さいと考えられるため、均一な層も

しくは水平な二層構造が仮定できる。このため、比抵抗値分布の変化がそのまま水分量の変化、つまり水の浸透を示していると考えられる。そこで、比抵抗値分布の時間変化をみると、120, 190, 240cmの地点では周囲の同じ深度に比べ比抵抗値が低く、他の地点よりも深くまで水が浸透しているということが示唆された。これは、散水後にトレンチで確認した青色の染料が120, 170, 180, 240cmの地点で深くまで確認できたという結果ともよく一致する。また、テンシオメーターを設置した70cmと120cmの地点での比抵抗値に注目すると、散水前は高く測定でき

なかった比抵抗値が、30分後には深度15cmで $40\Omega \cdot m$ 程度まで低下している。深度15cmの圧力水頭の変化をみると、二地点とも30分後に同じように大きな上昇を示し、比抵抗値の変化から推定される水の浸透とよく対応する。より深い深度をみると、30分後の比抵抗値は120cmの地点で深度30cmまで $40\Omega \cdot m$ 以下となっているのに対し、70cmの地点で同じく $40\Omega \cdot m$ 以下となっているのは深度15cm程度までで、二つの地点を比べた場合、120cmの地点でより速い浸透が示唆された。このことは、T120の深度50cmの圧力水頭は30分後に大きく上昇するが、T70の深度50cmにおける圧力水頭の変化は比較的小さいことから指示される。また、WDPTの測定結果(図-1(a))から70cmの地点では土壤の撥水性が強く、120cmの地点でより浸透しやすいことが推定され、確認した不均一な浸透と一致した傾向を示した。すなわち、この浸透が土壤の撥水性に起因している可能性が示唆される。さらに、70cmの地点における各深度の比抵抗値は、90分後まで時間の経過とともに低くなっており、T70の深度50cmの圧力水頭が90分後まで緩やかに上昇し続けていることから、比抵抗値の変化は実際の浸透過程の傾向をとらえていると考えられる。

一方、染料で確認した浸透の深さは、最も深いところでも深度23cmであるにもかかわらず、比抵抗値の低下はより深い深度まで現れた。これは、本実験で散水した電気伝導度の高い海水(抵抗の小さい液体)の影響を強く受け、実際の浸透スケールに比べ比抵抗値の変化が大きくなったため、比抵抗値の変化から推定した浸透の深度の方が深くなったと考えられる。また、使用した青色の染料が低濃度のため希釈され、25cmまでしか追跡できなかったことも考えられる。

V. まとめ

本研究では、表層に撥水性の土壤が不均一に分布する山火事跡地において散水実験を行い、以下に示すことが確認された。

- ①表層に分布する撥水性土壤の影響を受けた、不均一な浸透を確認した。
- ②野外における比抵抗値変化を利用した降雨浸透過程推定の有用性を確認した。

今後は、より多数の不均一要因の存在下で実験や降雨時の比抵抗値変化の測定を行い、さらに広い範囲での応用性を探ることが望まれる。

謝辞：本研究を行うにあたり、広島県大野町役場の方々には実験地に関して便宜を計っていただきました。また、広島大学総合科学部藤崎知恵子さんには、終始研究に御協力頂きました。以上記して感謝申し上げます。なお、本研究は平成11年度河川情報センター研究開発助成、平成11年度広島大学総合科学部プロジェクトの一部である。

引用文献

- Crabtree, R.W. and Trudgill, S.T. (1985) : Hillslope hydrochemistry and stream response on a wooded, permeable bedrock, the role of stem-flow. *Jour. Hydrol.*, 80, pp. 161-178.
- Dekker, L.W. and Ritsema, C.J. (1994a) : How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.*, 30(9), pp. 2507-2517.
- Dekker, L.W. and Ritsema, C.J. (1994b) : How water moves in a water repellent sandy soil. 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resour. Res.*, 30(9), pp. 2519-2531.
- Dekker, L.W. and Ritsema, C.J. (1996) : Uneven moisture patterns in water repellent soils. *Geoderma*, 70, pp. 87-99.
- Dyrness, C.T. (1976) : Effect of wildfire on soil wettability in the High Cascades of Oregon. USDA For. Serv. Res. Pap. PNW-2-2, 18pp., illus. Pacific Northwest Forest & Range Exp. Stn., Portland, Oregon.
- Jardine, P.M., Wilson, G.V. and Luxmoore, R.J. (1990) : Unsaturated Solute Transport through a Forest Soil during Rain Storm Events. *Geoderma*, 46, pp. 103-118.
- Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H. (1991) : Soil Physics. 328pp., John Wiley & Sons, INC., New York.
- Hillel, D. (1971) : *Soil and Water*. Academic Press, New York.
- Krammes, J.S. and DeBano, L.F. (1965) : Soil wettability: a neglected factor in watershed management. *Water Resour. Res.*, 1, pp. 283-286.
- McDonnell, J.J. (1990) : A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resour. Res.*, 26, pp. 2821-2832.
- Meeuwig, R.O. (1971) : Infiltration and water re-

- pellency in granitic soils. USDA For. Serv. Res. Pop. INT-111, Intermt. Forest. & Range Exp. Stn., Ogden, Utah. 20pp.
- Miyazaki, T. (1993) : *Water Flow in Soils*. 296pp., Dekker, INC., New York.
- Onodera, S. (1993) : Estimation of a rapid recharge mechanism in the semi-arid upland, Tanzania, using soil water ^{18}O and Cl^- , *IAHS Publ.*, 215, pp. 151-160.
- Onodera, S. and Kobayashi, M. (1995) : Evaluation of seasonal variation in bypass flow and matrix flow in a forest soil layer using bromide ion, *IAHS Publ.*, 299, pp. 99-107.
- Qi You, Z., Shimada, J. and Sato, A. (1999) : Three-Dimensional Soil Resistivity Inversion Using Patching Method. *Jour. Japan. Soc. Eng. Geol.*, 39 (6), pp. 524-532.
- Richardson, J.L. and Hole, F.D. (1978) : Influence of Vegetation on Water Repellency in Selected Western Wisconsin Soils. *Soil Sci. Soc. AM. J.* 42, pp. 465-467.
- 佐々宏一・芦田 譲・菅野 強(1993) : 『建設・防災技術者のための物理探査』, 森北出版株式会社, pp. 128-130.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹(1995) : 『建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法』, 古今書院, pp. 20, 27-30.
- 嶋田 純・佐藤 朗(1995) : 高密度比抵抗探査法を利用した鉛直二次元断面における土壌水分変化の追跡. 日本地理学会予稿集, 47, pp. 394-395.
(受付: 2000年2月29日, 受理: 2000年12月11日)