

ポラスプレート・テンションライシメータ法による 土壌水の年移動量の測定

釣田竜也*・吉永秀一郎*・阿部俊夫*

Annual Soil Water Flux through Forest Soil Measured
by Porous Plate Tension Lysimeter Method

Tatsuya TSURITA*, Shuichiro YOSHINAGA* and Toshio ABE*

* Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305-8687, Japan

Abstract

A Porous Plate Tension Lysimeter (PPTL) method was used to measure the vertical water flux through a forest soil where the use of electric power is restricted. The PPTL was installed at the depth of 0.9 m in the upper, middle, and lower slopes of Katsura Headwater Catchment, and soil water flux was measured throughout the year. The vacuum pressure of PPTL was adjusted manually once a week to a target value determined by the matric potential of the adjacent natural soil profile measured by tensiometer. Annual soil water flux was 275, 608, and 601 mm for the upper, middle, and lower slopes, respectively, showing similar fluxes to annual runoff rate in the middle and lower slopes. This result shows that the PPTL method is applicable to measure annual soil water flux.

Key words : forest soil, soil water flux, porous plate, lysimeter, Katsura Headwater Catchment

1. はじめに

森林土壌や畑地土壌における水分や養分の保持・流出機構を理解するためには、土壌水とともに溶存物質の土壌中における移動量を把握する必要がある。そのため、土壌水を直接採水して移動量を測定する手法が試みられてきた。このような手法として従来、テンションフリーライシメータ法(有光, 1982), キャピラリーライシメータ法(Holder *et al.*, 1991; Maeda *et al.*, 1999), マイクロライシメータ法(徳地ら, 1991), テンションライシメータ法(加藤ら, 1995)などが用いられてきた。しかし、これらの手法は、不飽和で移動する土壌水の量を測定する手法としては、それぞれ一長一短がある(小杉, 2000)。

そこで、ライシメータの吸引圧を同一深度の自然土壌のマトリックポテンシャルに基づいて制御して土壌水を採取する手法が開発された(Duke and Haise, 1973; van Grinsven *et al.*, 1988; Brye *et al.*, 1999; 小杉,

2000; 尾崎ら, 2003; Lentz and Kinkaid, 2003)。これらは、ライシメータの直上の土壌のマトリックポテンシャルと、同一深度の自然土壌のマトリックポテンシャルが等しくなるようにライシメータの吸引圧を制御することによって、自然土壌中での水の移動量に相当する水量を採取する手法である。この中で、小杉(2000)は直径27 cmのポラスプレート直上の土壌のマトリックポテンシャルと、同一深度の自然土壌のマトリックポテンシャルが同じになるように、ポラスプレートの吸引圧を交流電源下で自動制御するシステムを持つ手法を開発した。Kosugi and Katsuyama(2004)は、この手法をControlled-suction period Lysimeter method(CSPL法)とし、平地林の深さ30 cmにおける400日間の土壌水の日単位の移動量を明らかにした。

これらの手法により、従来の手法よりも土壌水の移動量の実態を明らかにすることが可能となった。しかし、一般に人家より遠く離れた林地においては、吸引圧の自動制御のための交流電源を確保することが困難である。

* 森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

キーワード: 森林土壌, 土壌水の移動量, ポラスプレート, ライシメータ, 桂試験地

そこで本研究では、ポーラスプレートを用いて、週単位で吸引圧を手動調整することによって下向きの土壤水の移動量を測定する手法について検討した。この手法はCSPL法を簡便化したものであり、本稿ではポーラスプレート・テンションライシメータ (PPTL) 法と呼ぶことにする。本稿では、PPTL法を用いて森林土壤中の年間を通じた下向きの土壤水の移動量を測定し、その結果の有効性を検証する。

2. 調査地と方法

2.1 調査地

PPTL法による土壤水の移動量の測定は、茨城県東茨城郡城里町の桂試験地でおこなった (図1)。桂試験地は一次谷の源流部に設定されており、流域面積は2.3 haである。地質は中生層堆積岩で、火山灰層で厚く覆われている。土壌型は褐色森林土である。植生は尾根部から斜面中腹がアカマツの混在する落葉広葉樹二次林、斜面中腹から下部が39年生スギ人工林である。

2.2 方法

2.2.1 PPTLの設置

桂試験地内の斜面の上部、中部、下部から地表面のかく乱のないところを各1地点選定し、PPTLを設置した (図1)。小杉 (2000) に従い、直径27 cmのポーラスプレート (soilmoisture社製、1950B.5) を土壤断面のB層下部に相当する深さ90 cmに埋設した (図2)。A層の厚さは上部、中部、下部でそれぞれ12, 8, 37 cmであり、また、3地点とも根系の大部分は深さ30 cmまでに分布し、90 cm以深にはほとんど存在しなかった。なお、3地点とも樹冠および草本類に覆われているため、降水の一部は遮断される。

2.2.2 吸引圧の調整

CSPL法ではAC電源を用いて、吸引圧を3秒間隔で制御している。これに対して、PPTL法では手動式のポンプで吸引するため、調査頻度を考慮して概ね週一回の頻度で吸引圧を調整することにした。実際には、地上部にある採水容器を兼ねた約6 Lの減圧容器内を、以下の式で求まる吸引圧 P_c (kPa) に調整した。

$$P_c = -1 \times \phi_{90} + H \quad (1)$$

ϕ_{90} は自然土壤における深さ90 cmのマトリックポテンシャル (kPa) である。本研究では、調整直前の自然土壤の深さ80 cmと100 cmのマトリックポテンシャルの平均値を ϕ_{90} とした (図2)。 H (kPa) はポーラスプレートと減圧容器の間の位置ポテンシャルの差に相当する吸引圧であり、その高低差 h (cm) に0.098を乗じて求めた。土壤水のマトリックポテンシャルは電圧出力式のテンシ

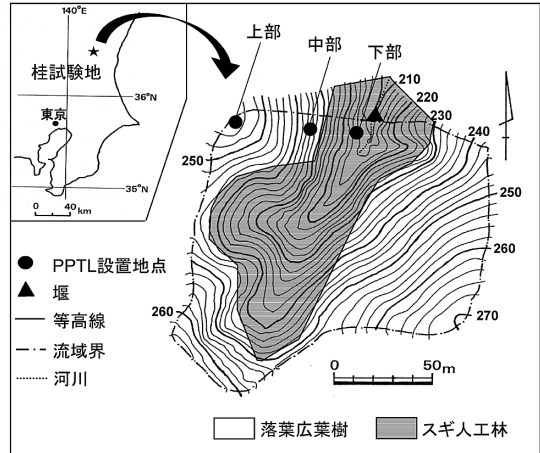


図-1 調査地の概況

Fig. 1 Topographic map of study site.

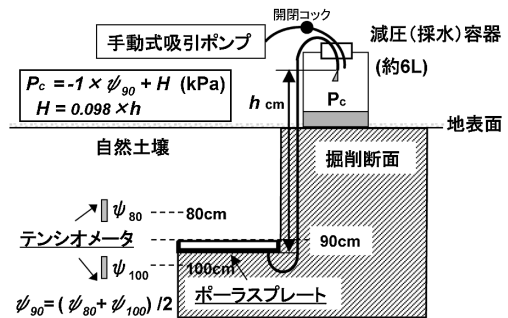


図-2 ポーラスプレート・テンションライシメータ法の概略図

Fig. 2 Schematic diagram of porous plate tension lysimeter method.

オメータ (圧力センサーはコパル電子社製 PS7) で測定した。なお、採水に伴い吸引圧は低下する。このため、予備観測期間における一週間後の吸引圧の低下量を考慮し、実際には P_c より 3 kPa 程度大きい吸引圧に調整した。

2.2.3 降水量、流出水量、土壤水の移動量の測定

降水量は調査地から約400 m下流にある露場で転倒マス型雨量計を用いて測定した。流出水量は試験地下端に設置された量水堰において測定し、水深単位で示した。土壤水の移動量も採水量をポーラスプレートの面積で除して水深単位で示した。降水量、流出水量、土壤水の移動量の観測期間は2003年4月8日から2004年4月6日までの約1年間であり、全観測期間の総量を以下そ

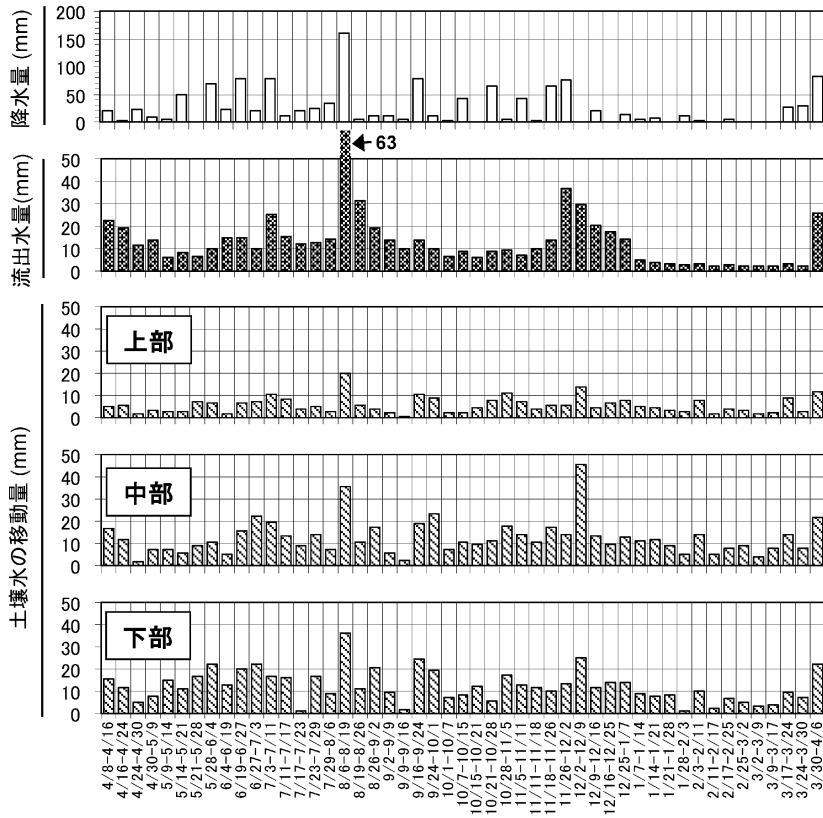


図-3 週単位の降水量，流出水量および土壌水の移動量

Fig. 3 Weekly precipitation, weekly runoff rate, and weekly soil water flux.

それぞれ，年降水量，年流出水量，土壌水の年移動量とする。

3. 結 果

3.1 土壌水のマトリックポテンシャル，吸引圧の変化

全観測期間中の深さ 90 cm のマトリックポテンシャル (ϕ_{90}) は上部，中部，下部でそれぞれ $-16.1 \sim -3.6$ ， $-5.8 \sim -1.8$ ， $-12.7 \sim -1.6$ kPa の範囲で変動し，平均値は上部，中部，下部でそれぞれ -7.0 ， -3.4 ， -4.1 kPa であった。上部の ϕ_{90} の下限値 (-16.1 kPa) は，9 月 5 日から 11 日間継続した無降雨期間の末期の 9 月 16 日に得られた。この時の中部，下部の ϕ_{90} はそれぞれ -5.5 ， -4.1 kPa であり，上部の ϕ_{90} は中部，下部に比べて無降雨期に小さい傾向を示した。なお， ϕ_{90} 算出に用いた深さ 80 cm と 100 cm のマトリックポテンシャルの差は，3 地点とも全観測期間を通じて $1 \sim 2$ kPa 程度であった。

一週間後の吸引圧は 3 地点の全観測期間の平均値で， P_c より 4.0 kPa 小さく，地点別では，上部の吸引圧の低

下量が最も小さかった（全観測期間の平均値で 1.7 kPa）。

3.2 週単位の土壌水の移動量

3 地点において，年間を通じた継続的な土壌水の移動が観測された（図 3）。その量は個々の期間あたり $1 \sim 46$ mm であり，同期間の降水量とは必ずしも量的な関係が認められない。しかし全観測期間を通じては降水量の変化と類似した移動量の変化が観測された。

6 月から 11 月は降雨が多く，同期間には土壌水の移動量が大きい傾向を示した。また，全観測期間中で最大の降雨（総雨量 160 mm）があった 8 月 6～19 日の期間には，上部，中部，下部で，13 日間でそれぞれ 20 ， 35 ， 36 mm の土壌水の移動量が観測された。この量は同期間の降水量の $1/8 \sim 1/4$ ，流出水量（ 63 mm）の $1/3 \sim 3/5$ であった。しかし土壌水の移動量は次の期間（総雨量 5 mm）も継続して大きく，上部，中部，下部で，7 日間でそれぞれ 5 ， 11 ， 11 mm であった。このように，降水が観測された期間に，その降水量に見合った土壌水の移動

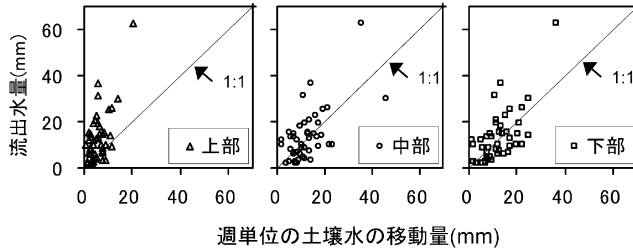


図-4 週単位の土壌水の移動量と流出水量との関係

Fig. 4 Relationship between weekly soil water flux and weekly runoff rate.

表-1 土壌水の年移動量および年流出水量に対する割合

Table 1 Annual soil water flux and ratio of annual soil water flux to annual runoff rate

	土壌水の 年移動量 (a) (mm)	(a) の年流出水量 (628 mm) に対する割合
上部	275	0.44
中部	608	0.97
下部	601	0.96

量が観測されず、次の期間に降水量より大きな土壌水の移動量が観測される例は多かった。

一方、12月から3月は降雨が少なく、特に2月25日～3月17日は3週間にわたる無降雨期間であった。しかし、3月9～17日の期間でも、土壌水の移動量は上部、中部、下部で、8日間でそれぞれ1.4、4.0、3.1 mmであった。これは同期間の流出水量の2.5 mmとほぼ同等であった。

土壌水の移動量と流出水量の間には、ばらつきはあるものの、土壌水の移動量が大きいと流出水量も大きい傾向が認められた(図4)。

3.3 土壌水の年移動量

土壌水の年移動量は上部、中部、下部でそれぞれ275、608、601 mm、年降水量は1,250 mm、年流出水量は628 mmであった(表1)。年降水量から年流出水量を減じた損失量は622 mmであり、これは九州を除く関東以南の森林の蒸発散量の600～900 mm(塚本編, 1992)の間であった。土壌水の年移動量は年降水量よりも小さく、また中部と下部の土壌水の年移動量は年流出水量と同等の値を示した。土壌水の年移動量の年流出水量に対する割合は、上部、中部、下部でそれぞれ0.44、0.97、0.96であった。

4. 考 察

桂試験地の水収支から算出される損失量は流域水収支からみて妥当な値であり、ほぼ蒸発散量を示していると考えられる。本研究において、PPTLを設置した深さ90 cmは根系の分布の下限に相当することから、同深度を通過する水は蒸発散による損失を免れ、流出に寄与するとみなすことができる。

一方、中部、下部の土壌水の年移動量は、年流出水量と同等であった。このことは、PPTL法により本試験地における流出に寄与した土壌水の移動量を測定できたことを示している。また、中部と下部の土壌水の移動量の積算値の変化は流出水量の積算値の変化とほぼ一致していることも(図5)、土壌下層における下向きの水移動が河川流出に寄与していることを示している。

本研究では週単位ではあるが、降水量の変化と類似した土壌水の移動量の変化が観測された。しかし、両者の量的な関係は明瞭ではなく、降水が観測された期間に、その降水量に見合った土壌水の移動量が観測されず、次の期間に降水量より大きな土壌水の移動量が観測されることも多かった。これは、不飽和浸透過程において地表への降水の供給と深さ90 cmへの土壌水の到達との間に時間差が生じたためと考えられる。

また、3地点とも、深さ80 cm、100 cmのマトリックポテンシャルは観測期間を通じて負の値を示しており、土壌中における水移動は不飽和浸透が卓越している。斜面方向の成分を有する不飽和側方流が発生した可能性は高いが、PPTL法では手法上、側方流を測定することは不可能であり、その下向き成分しか測定できない。しかし、フラックスの大きい側方流の発生する場所は、降雨時に飽和帯を形成する場所であり(太田ら, 1985)、本研究の観測場所とは条件が異なる。また、降雨時およびその直後は不飽和土壌では鉛直浸透が主体となる(太田ら, 1985; 窪田・鈴木, 1988)。したがって、本研究の観測地点においては、年単位の土壌水の移動量を測定する

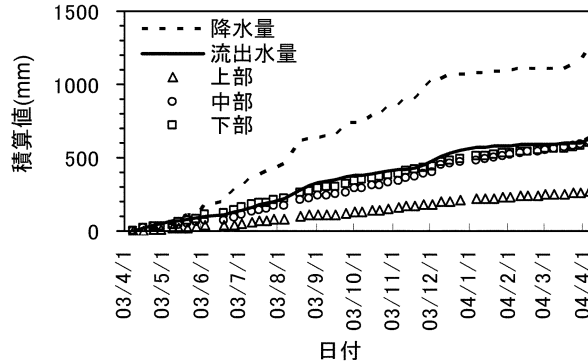


図-5 降水量，流出水量および土壌水の移動量の積算値の変化

Fig. 5 Cumulative precipitation, runoff rate, and soil water flux.

上での側方流量の寄与は小さいと考えられる。

なお，上部においては，中部，下部に比べて少ない移動量しか観測できなかった。上部は斜面のほぼ頂上に位置しており，蒸発散量，側方流量などが他の地点と異なった可能性がある。これらの要因が土壌水の移動量に与える影響の評価については今後の課題である。

5. ま と め

PPTL 法による斜面の上部，中部，下部の深さ 90 cm における土壌水の年移動量はそれぞれ 275, 608, 601 mm であった。これらの値は特に中部と下部で流域水収支からみて妥当な値であることが明らかになった。PPTL 法は交流電源の確保が困難な調査地において，年単位の下向きの土壌水の移動量を評価する手法として有効であると考えられる。

謝 辞

関東森林管理局茨城森林管理署および森林技術センターの方々にご協力をいただいた。森林総合研究所土壌特性研究室の三浦 覚氏（現在，森林総合研究所東北支所），相澤州平氏，岡本 透氏，伊藤優子氏には，機器の設置にご協力いただいた。京都大学大学院農学研究科の小杉賢一朗氏には貴重なご助言をいただいた。ここに謝意を表します。本研究は，森林総合研究所交付金プロジェクト 200003「森林・農地・水域を通ずる自然循環機能の高度な利用技術の開発」および森林技術センター技術開発課題「森林流域における窒素等の動態と収支の解明」によって行った。

引用文献

有光一登 (1982) : 森林土壌の水分動態に関する研究 (第

2 報), 森林土壌の水分および溶存成分の動態. 林誌研報, **318** : 11-78.

Barzeger, A.R., Herbert, S.J., Hashemi, A.M. and Hu, C.S. (2004) : Passive pan sampler for vadose zone leachate collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68** : 744-749.

Brye, K.R., Norman, J.M. and Gower, S.T. (1999) : An Equilibrium tension lysimeter for measuring drainage through soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63** : 536-543.

Duke, H.R. and Haise, H.R. (1973) : Vacuum extractors to assess deep percolation losses and chemical constituents of soil water. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37** : 963-964.

Holder, M., Brown, K.W., Thomas, J.C., Zabcik, D. and Murray, H.E. (1991) : Capillary-wick unsaturated zone soil pore water sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55** : 1195-1202.

加藤正樹・小野寺真一・小林政広 (1995) : 源頭部森林小流域における土壌溶液と湧水の硝酸態窒素の動態. *日林誌*, **77** : 516-626.

小杉賢一朗 (2000) : 不飽和土壌中の鉛直浸透水の不攪乱採取手法の開発. *水文・水資源学会誌*, **13** : 462-471.

Kosugi, K. and Katsuyama, M. (2004) : Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68** : 371-382.

窪田順平・鈴木雅一 (1988) : 山腹斜面における 2 次元土壌水分ポテンシャル分布とフラックスの実態. *ハイドロロジー*, **18** : 62-73.

- Lents, R.D. and Kincaid, D.C. (2003) : An automated vacuum extraction control system for soil water percolation samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67** : 100-106.
- Maeda, M., Liyanage, B.C. and Ozaki, Y. (1999) : Water collection efficiency of wick samplers under steady state flow conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **45** : 485-492.
- 太田猛彦・塚本良則・城戸 毅 (1985) : 丘陵性自然斜面における雨水移動の実証的研究 (II) 斜面内地中流の実態. *日林誌*, **67** : 383-390.
- 尾崎保夫・前田守弘・関口浩昭 (2003) : 畑地からの窒素溶脱量モニタリングのためのテンションキャピラリーライシメーターの試作. *土肥誌*, **74** : 773-780.
- 徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎 (1991) : 森林生態系における溶存物質濃度・量の垂直的变化 (I) スギ人工林における塩素イオンとナトリウムイオンと土壌水の垂直的移動. *日林誌*, **73** : 135-144.
- 塚本良則編 (1992) : 森林水文学. p. 97, 文永堂出版, 東京.
- van Grinsven, J.J.M., Booltink, H.W.T., Dirksen, C., van Breemen, N., Bongers, N. and Waringa, N. (1988) : Automated in situ measurement of unsaturated soil water flux. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52** : 1215-1218.

要 旨

電源の確保が困難な森林斜面の上部, 中部, 下部において, PPTL法により年間を通じた下向き of 土壌水の移動量を測定した。PPTL法では, 自然土壌のマトリックポテンシャルに基づいてポーラスプレート of 吸引圧を週一回, 手動で調整する。土壌水の年移動量は上部, 中部, 下部でそれぞれ, 275, 608, 601 mm であり, 年降雨量の 1,250 mm よりも小さく, 中部と下部では年流出水量 of 625 mm と同等であった。PPTL法は年単位の下向き of 土壌水の移動量を評価する手法として有効である。

受稿年月日: 2005年 3月 1日

受理年月日: 2005年 7月 7日