

土壌水の酸素・水素安定同位体比鉛直プロファイルの 形成過程について

Formation Process of Vertical Profile of Stable Isotopes in Soil Water at TERC

藪崎 志穂*・田瀬 則雄**

Shiho YABUSAKI* and Norio TASE**

Abstract

Use of the stable isotopes of oxygen and hydrogen has been considered as one of effective methods to estimate soil water movement. The soil water were extracted from a loamy soil layer at University of Tsukuba, Japan, eleven times from April to November in 2001, and groundwater and event precipitation were also collected. The vertical profiles of isotopes in soil water showed large variations near the soil surface, because soil water is affected by the evaporation and precipitation. The variation, however, decreases gradually with increasing depth and become almost constant near the water table. Some cyclic variations were observed in the vertical profiles of isotopes of soil water. The temporal variations of isotopes in soil water and precipitation suggest that the isotopically enriched soil water was formed in summer period, and it moved downward during fall season when intensive rainfall occurred. The time-depth cross section of isotopic composition indicates that groundwater recharge occurs under the condition that rainfall amount exceeds 50 mm per event. The isotopes in soil water can be used for estimation of the soil water movement in these places such as depositing of loamy soil mainly in Japan.

1 はじめに

土壌中の水の挙動は、地表面付近の水蒸気や地表水、そして地下水に至るまでの降水-降下浸透-地下水涵養過程において大きな役割を担っており、資源としての地下水利用を行う際においても重要である。また、土壌水は地中の物質の動きと

も関連しているため、土壌や地下水の汚染の防止・対策を考える上でも欠かすことのできない情報となる。土壌水の挙動を明らかにする方法の一つとして、酸素・水素安定同位体比の鉛直プロファイルを用いる方法が有効であると考えられる。土壌水の酸素・水素安定同位体比を用いて土壌水の挙動を推定する方法は海外の乾燥・半

* 立正大学地球環境科学部

** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

乾燥地域（例えば，Allison and Hughes, 1983 や Barnes and Allison, 1988），湿潤地域（Gazis and Feng, 2004）などで行われており，その有効性が示唆されている．著者らは，厚い不飽和帯が存在する武蔵野台地北西部に位置する金子台において土壌コアを採取し，抽出した土壌水の酸素・水素安定同位体比およびトリチウム濃度を測定した．この結果から，安定同位体比の鉛直プロファイルにサイクリックな変動が確認され， d -excess 値や降水の同位体比と比較することにより，土壌水の涵養された時期の推定や地下水涵養量の把握を行うことが可能であることが示され，安定同位体をトレーサーとして利用する方法が適用できることが示された（藪崎，2000；嶋田・藪崎，2000）．こうした方法を他の地域にも適用するためには，地中における安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程を明らかにすることが必要である．本研究では，同一の地点で継続的に土壌採取および観測を行い，抽出した土壌水の安定同位体比鉛直プロファイルを求め，これらの形成要因について明らかにすることを目的として調査を実施した．

II 研究対象地域の概要

筑波大学の陸域環境研究センター（以下，TERC とする）構内のトレンチにおいて（Fig. 1），2001 年 4～11 月にかけて計 11 回の土壌採取を実施した．トレンチは長さ約 6 m，幅約 2 m，深さは約 2 m の方形に掘られており，壁面には土壌が露出している．トレンチ周辺には丈の短い雑草が生えている（Photo 1）．土壌採取地点の地質は，表層から 20 cm 深度までは砂質土壌（sandy loam），20～170 cm 深度はローム質土壌（関東ローム層）が堆積し，170～220 cm 深度はローム質土壌と粘土質土壌の漸移層で，220 cm 以深では粘土質土壌が堆積している．地下水位は 8～10 月に低下するが，10 月以降は台風や

前線性の降水などの影響を受けて水位の上昇が生じており，このような季節変動が毎年観測されている．過去の観測では水位が地表面付近まで上昇したこともあったが，本研究の観測期間内においては，最も水位が上昇したときで地表面から 100 cm 深度，最も低下したときで 250 cm 深度であり，8～10 月以外のほとんどの期間で 150～200 cm 深度（ローム層下部から粘土層中）に水位があらわれていた．つくばの年平均気温は 13.5℃，年降水量は 1235 mm であり（いずれも 1971 年から 2000 年までの平均値），梅雨前線の発達する初夏，および秋雨前線の発達する秋季において降水量が相対的に多くなっている．

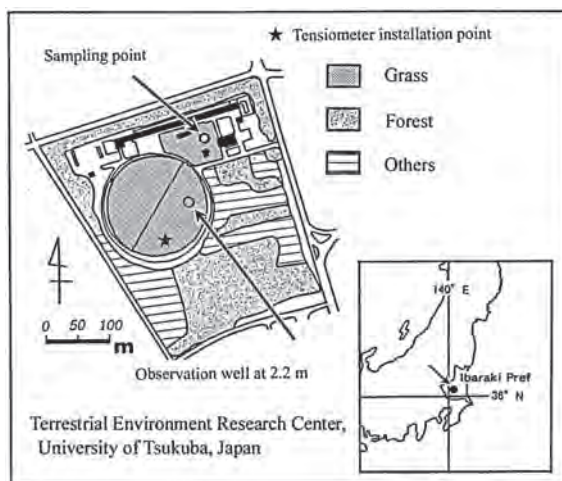


Fig. 1 Study area



Photo 1 Condition at the trench

III 研究方法

1. 土壌採取および地下水、降水の採取方法

土壌水抽出用の土壌（攪乱土壌）は 2001 年 4 月から 11 月の間に計 11 回採取し、土壌の物理測定のための土壌コア（不攪乱土壌）は 3 回採取した（Table 1）。攪乱土壌は、トレンチ壁面の土壌を表面から 30 cm ほど取り除いた後、5 cm 深度間隔で採取した。採取した土壌はビニール袋に保存し、蒸発が生じないように冷暗所で保存して、できるだけ時間をあけずに土壌水を抽出した。不攪乱土壌はハンドオーガーを利用して、10 cm 深度間隔でトレンチの壁面から採取し、100 cc の土壌サンプル缶に保存した。また、採取した攪乱土壌についても 100 cc の土壌サンプル缶に詰め、重量を測定した後、遠心分離法により pF3.0 と pF4.2 の土壌水を抽出した。土壌採取と併せて地下水の採取も実施した。地下水は、TERC 観測圃場内に設置された 2.2 m の地下水観測井と、土壌採取を行ったトレンチ近傍の 2 箇所で定期的に採取した。降水サンプルは筑波大学構内の研究棟の屋上に蒸発防止構造を有した装置を用いて、1998 年 8 月から月単位の降水を、2000 年 1 月からは併せてイベント単位の降水の採取を継続して行っ

Table 1 Schedule of soil sampling

| No. | Date of soil sampling for isotope analysis (Disturbed soil samples) ^{*1} | Date of soil core sampling for soil physical analysis (Undisturbed soil samples) ^{*2} |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 28 April 2001 | 5 May 2001 |
| 2 | 5 May 2001 | 14 October 2001 |
| 3 | 22 June 2001 | 15 November 2001 |
| 4 | 26 July 2001 | |
| 5 | 25 August 2001 | |
| 6 | 2 September 2001 | |
| 7 | 8 September 2001 | |
| 8 | 14 September 2001 | |
| 9 | 24 September 2001 | |
| 10 | 14 October 2001 | |
| 11 | 15 November 2001 | |

^{*1} Soil samples were collected every 5-cm depth.

^{*2} Soil samples were collected every 10-cm depth.

ている。

2. 分析方法

不攪乱土壌（土壌コア）を用いて、三相測定、透水試験および pF 試験を実施し、土壌の物理性について分析した。また、抽出した土壌水、採取した地下水および降水について、酸素・水素安定同位体比を測定した。安定同位体は自動平衡法を用いて前処理を行った後、安定同位体質量分析計（Finnigan MAT 252）にて測定を実施した。同位体比はスタンダード（V-SMOW：標準平均海水）からの千分率偏差（ δ 値）として表示した。測定精度は、酸素安定同位体比で $\pm 0.1\%$ 、水素安定同位体比で $\pm 1\%$ である。また、一部のサンプルについては、トリチウム分析を実施した。

IV 結果・考察

1. 降水および地下水の酸素・水素安定同位体比の特徴

2000 年～2006 年までのイベント降水の降水量、気温、酸素・水素安定同位体比（以下、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD とする）、d-excess 値（ $=\delta\text{D}-8\times\delta^{18}\text{O}$ ）を Fig.2 に示した。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD には周期的な変動はほとんど認められないが、d-excess 値は夏季に低く、冬季に高いという季節変化が明瞭にあらわれている。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD が相対的に低い（軽い）値を示しているイベントがあるが（例えば、2000 年 6 月、2003 年 8 月など）、これらは梅雨および秋雨前線性の降水や台風によってもたらされた降水量が相対的に多いイベントに相当している。また、2001 年 1 月や 2002 年 12 月、2005 年 1 月～3 月、2006 年 1 月も同位体比は相対的に低い値を示しているが、この時期は多量の降雪があり、この降雪の影響を受けて同位体比が相対的に低くなっていると考えられる。2000～2006 年における降水の同位体比の年加重平均値は、 $\delta^{18}\text{O}$ が -8.2‰ 、 δD が -52‰ であ

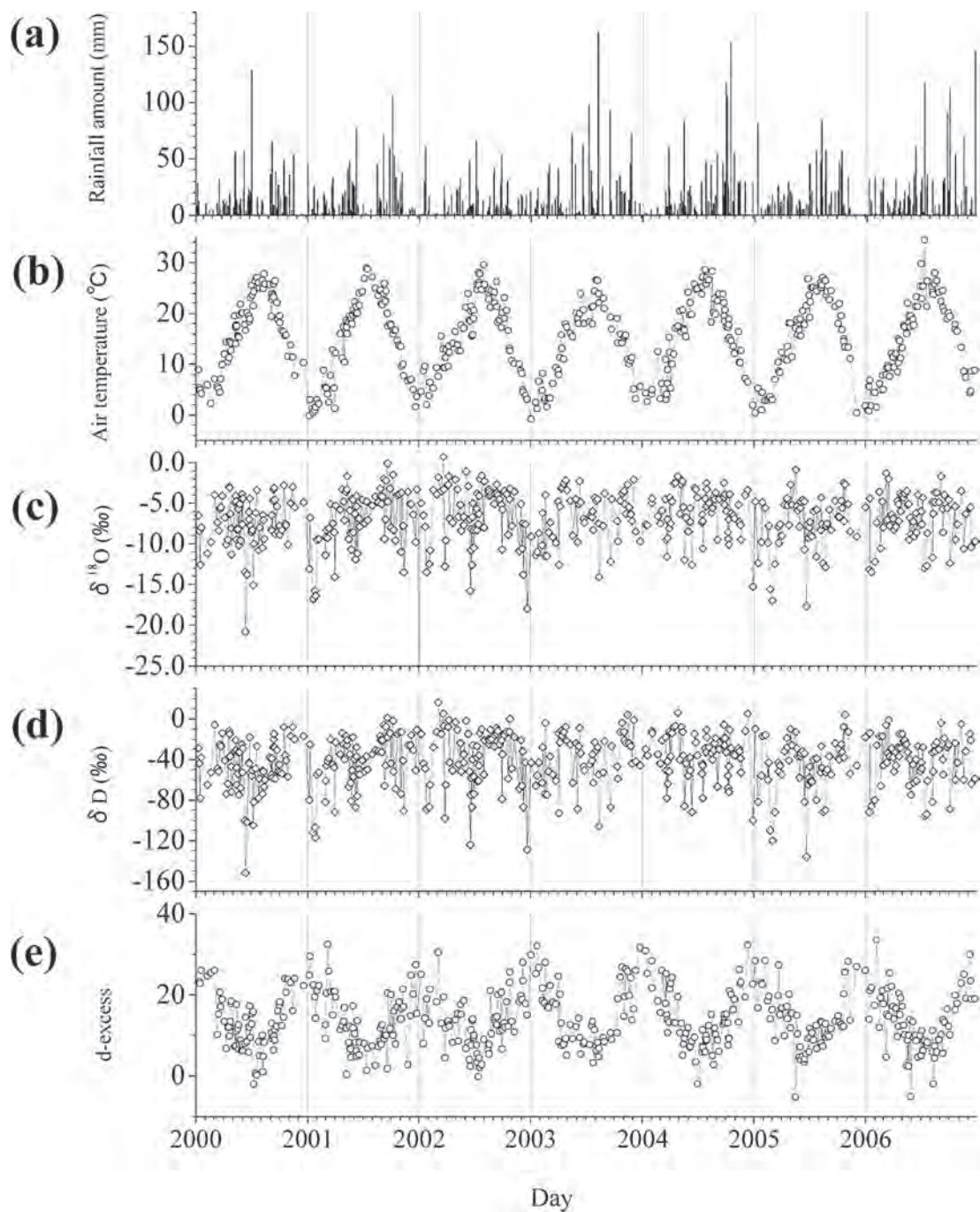


Fig. 2 Temporal variation of (a) rainfall amount, (b) air temperature, (c) $\delta^{18}\text{O}$, (d) δD and (e) d-excess in Tsukuba for event precipitation from 2000 to 2006

る。イベント降水の同位体比を用いて計算を行った結果、つくばの降水の天水線（LMWL）は、 $\delta D = 7.7\delta^{18}O + 11.2$ ($R^2 = 0.919$) であり、Craig の天水線 ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$) に近い値を示している。

イベント降水をある一定の降水量で区分してそれぞれ同位体比の加重平均値を求め、このデータを利用して δ ダイアグラムを作成した (Fig. 3)。降水量と同位体比の関係をみると、降水量が増加するに従い、 $\delta^{18}O$ 、 δD 共に低い値となることが明らかであり、つくばの降水の同位体比には雨量効果が存在すると考えられる。

2. 降水および地下水の酸素・水素安定同位体比の特徴

トレンチ近傍で採取した地下水の 2001 年～2002 年における $\delta^{18}O$ 、 δD 、d-excess、地下水位を Fig. 4 に示した。地下水位は地表面から約 130～240 cm 深度とかなりの変動が生じているが、 $\delta^{18}O$ 、 δD 値はほぼ一定した値を示している。このことから、TERC では多量の降水が発生した場合においても preferential flow（卓越流）の影響はあまり及んでいないと考えられる。地下水の

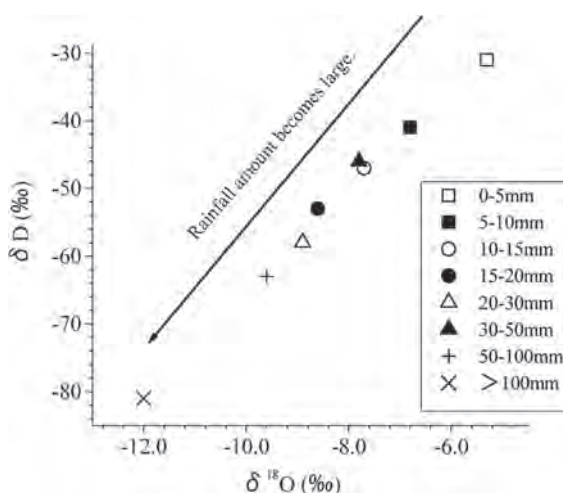


Fig. 3 δ -diagram using the data of amount-weighted mean event-based δ -values for each level of rainfall amount in Tsukuba

同位体比の平均値は、 $\delta^{18}O$ は -6.7‰ 、 δD は -45‰ であり、つくばのイベント降水の同位体比の年加重平均値（それぞれ、 -8.2‰ 、 -52‰ ）と比較すると、地下水の方が相対的に高い値を示していることが明らかとなった。これは地表面付近で蒸発の影響を受け同位体比が高くなった土壌水が下方へと浸透し、地下水を涵養しているためであると考えられる。

降水と地下水の同位体比の関係は世界各地で異なった結果が報告されている（例えば、Central Australia のように降水の同位体比の方が地下水の同位体比よりも高くなっている地域 (Harrington *et al.*, 2002)、England のようにほぼ同じ値を示している地域 (Darling and Bath, 1988)、金子台（藪崎, 2000；藪崎ほか, 2006）や八ヶ岳 (Tsumimura and Tanaka, 1998) のように降水の同位体比の方が低い値を示している地域

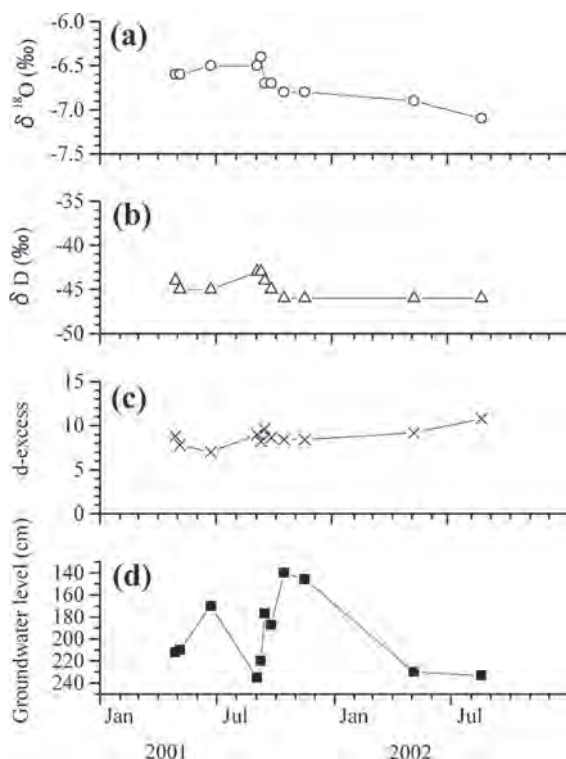


Fig. 4 Values of (a) $\delta^{18}O$, (b) δD , (c) d-excess and (d) groundwater level from the soil surface

など)。こうした現象は、乾燥・半乾燥地域および湿潤地域における降水量や気温の違い、土壌中の水分量の違いなどが土壌水の浸透過程に影響を与え、その結果生じていると考えられる。このように降水と地下水の同位体比の比較・解析を行なって得られた結果を、地下水涵養のプロセスを解明するための指標の一つとして活用することの有効性が示唆される。

3. 土壌水の酸素・水素安定同位体比の鉛直プロフィールと形成過程について

不攪乱の土壌コアを用いて測定した三相分布図の結果から、固相は 20 ~ 30%，体積含水率は平均すると約 70% であり、地下水面近傍まで気相が存在していることが示された (Fig. 5)。

トレンチで採取した土壌から遠心分離法で抽出した土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ 鉛直プロフィールの 11 回分のデータを Fig. 6 に示した。地表面近くの $\delta^{18}\text{O}$ 値は相対的に高い値を示しており、蒸発の影響を受けていると考えられる。特に、7/26 ~ 9/8 の夏季に相当するデータではこの傾向が顕著にあらわれている。鉛直プロフィールには幾つかのサイクリック (Cyclic) な変動が確認され、それらはあ

る時期にピークを保ちながら下方へと浸透している (ピークの下方への移動を \leftarrow で示した)。また、深度が増すにつれ $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動幅は減少し、地下水面近傍ではほぼ一定した値となることが示されている。 $\delta^{18}\text{O}$ 値と d-excess の鉛直プロフィールを比較すると、 $\delta^{18}\text{O}$ 値が高くなっている深度の d-excess 値は低くなっていることから、この深度に存在している土壌水は、夏季に蒸発の影響を強く受けた水が浸透したものであるということが考えられる。このように、同位体比や d-excess を利用することによって、水が土壌中へ浸透した時期の推定を行うことが可能となる。

$\delta^{18}\text{O}$ 値の時間-深度断面図を Fig. 7 に示した。降水量と降水の $\delta^{18}\text{O}$ 値についても同図に併せて示した。7 ~ 9 月にかけて、地表面近傍の土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は非常に高い値となっている。また、多量の降水が発生したイベント降水時の後 (図中に矢印で示した時期) で、 $\delta^{18}\text{O}$ 鉛直プロフィールが下方へと移動していることが明らかとなった。このときのイベント降水量はいずれも 50 mm 以上となっており、本研究地域では 50 mm 以上のイベント降水が発生した時 (特に秋雨前線性の降水や台風による降水が生じた時) に土壌水の下方

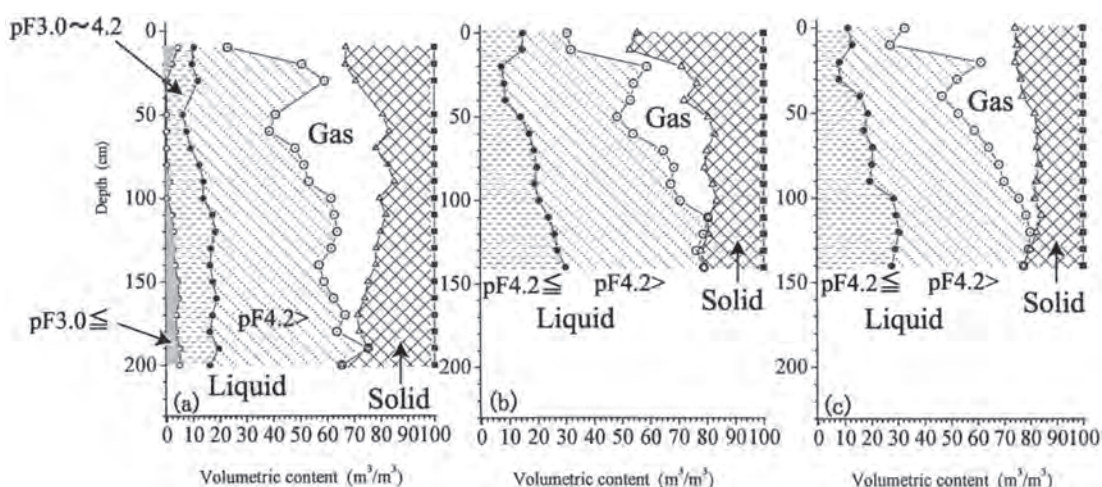


Fig. 5 Three-phase distribution of undisturbed soil samples at trench (a) on 5 May, (b) on 14 October and (c) on 15 November, 2001

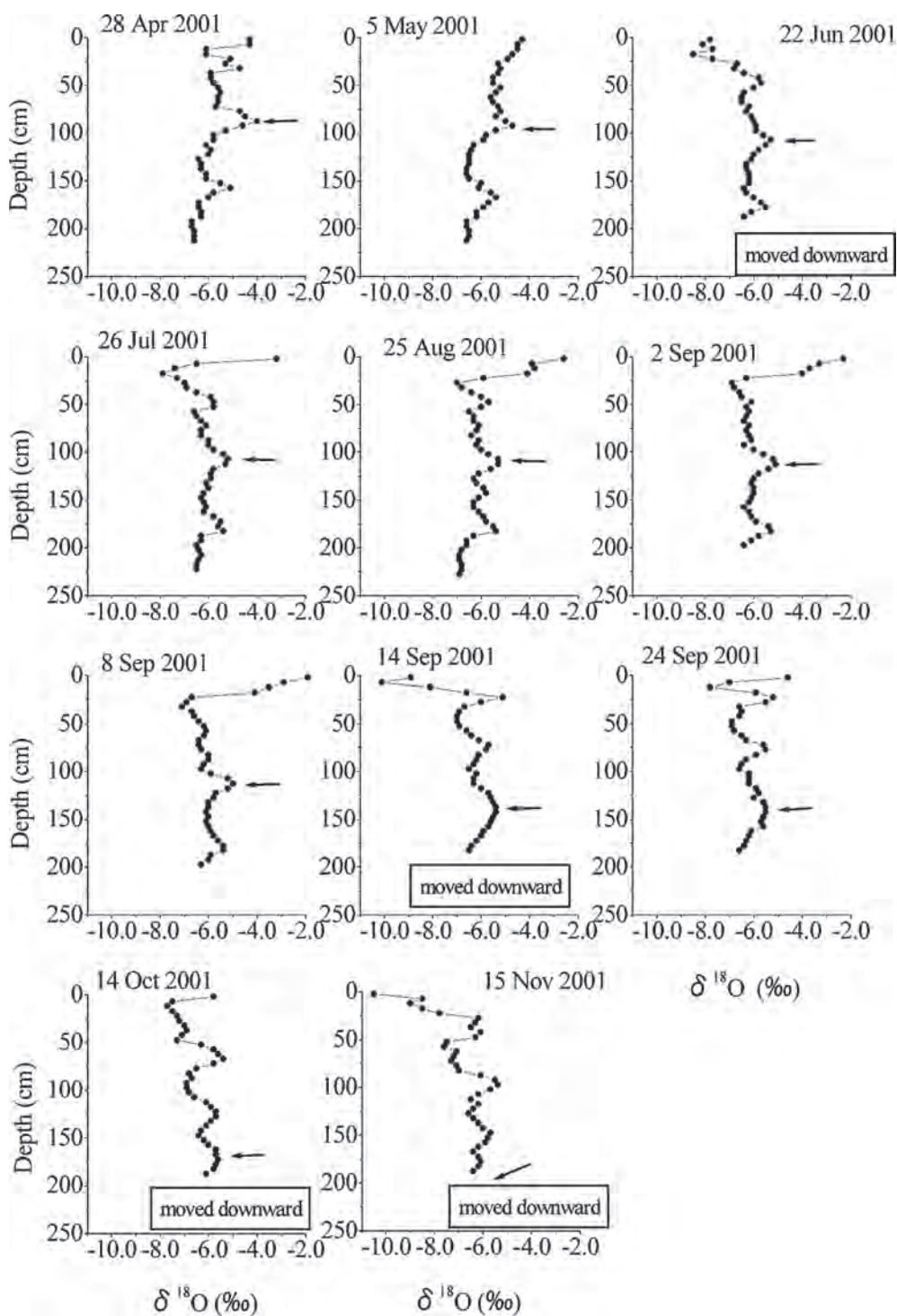


Fig. 6 Vertical profiles of $\delta^{18}\text{O}$ of soil water in the trench

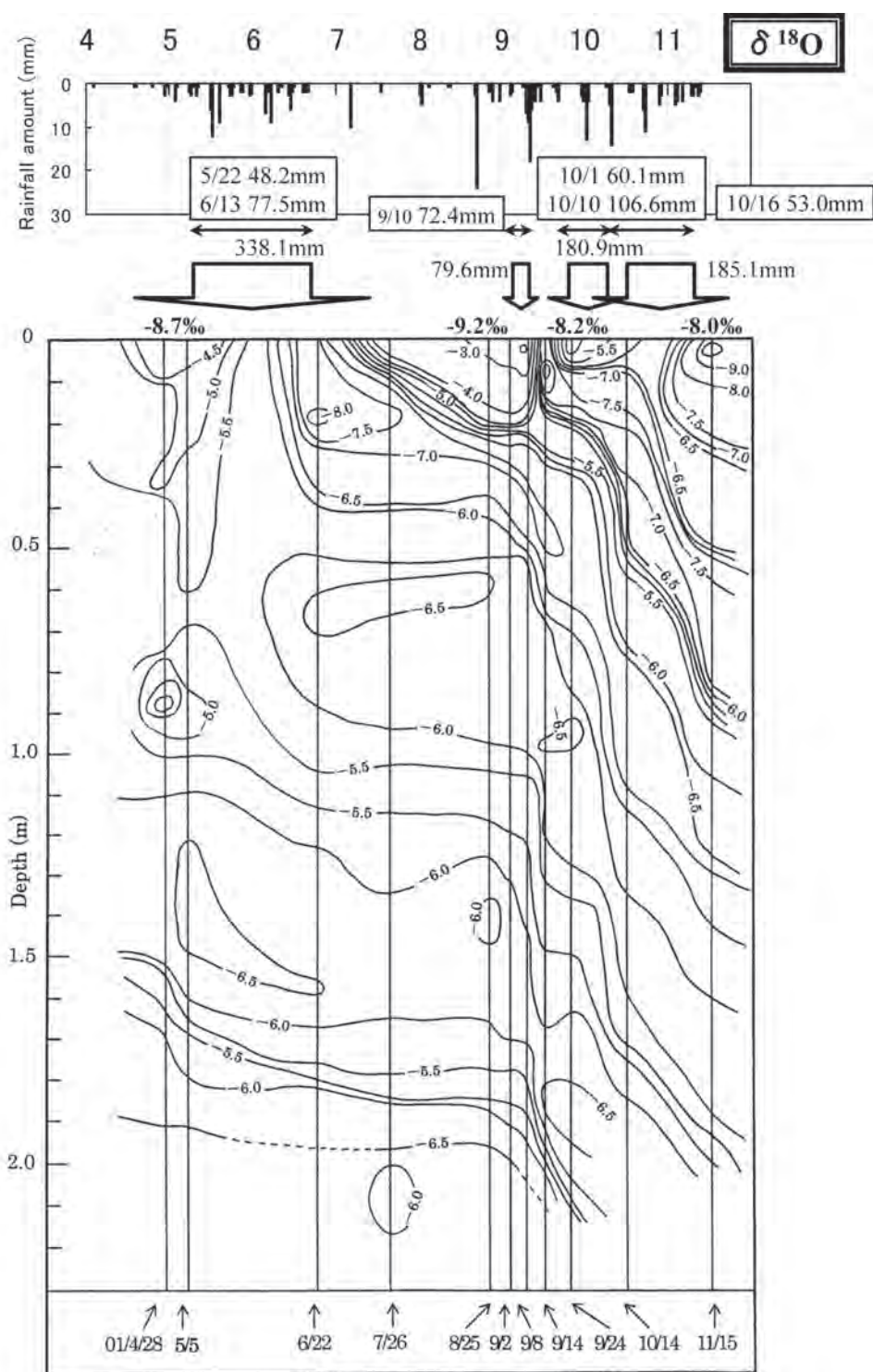


Fig. 7 Time-depth cross section of $\delta^{18}\text{O}$ of soil water

浸透が生じていると考えられる。この結果、夏季に蒸発の影響を受けて同位体比の高くなった土壤水が、秋季の同位体比が相対的に低い値を示す量の降水が発生した時に下方へと押し出されるように浸透することによって、土壤水の同位体比のサイクリックな変動が形成されていると考えられる。また、土壤中を浸透するに従い、移流・分散の働きを受けて土壤水の同位体比は均質化してゆくと考えられる。安定同位体比の鉛直プロファイルの下方移動と土壤中の水分量を考慮して計算した結果、地下水涵養量は 658 mm/year となった。これは降水量から Penman 法により求めた蒸発量を差し引いた値とほぼ同様の値となっており、同位体比を利用した方法の妥当性が示唆された。

V まとめ

土壤水や降水の同位体比の変動を比較検討することにより、土壤水の安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程を明らかにすることができた。また、研究の結果、土壤水の挙動や地下水涵養過程を解明する際に、土壤水の安定同位体比の利用が有効であることが示唆された。今後は他の地域においてもこうした方法が有効であるか、さらにデータを蓄積して考察を行う予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境科学研究科の辻村真貴准教授および筑波大学陸域環境研究センターの山中 勤講師には多くのご助言をいただきました。併せて、筑波大学水文学教室の先生方にも貴重なコメントをいただきました。また、査読者のかたにも細かなご指摘をいただきました。記して、御礼申し上げます。

文献

- 嶋田 純・藪崎志穂 (2000): 環境同位体による土壤水の滞留時間・浸透機構の解明。土壤層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明 平成 9 年度～平成 11 年度科学研究費補助金 研究成果報告書 (課題番号: 09480113), 58-64.
- 藪崎志穂 (2000): 酸素・水素安定同位体比およびトリチウム濃度を用いた土壤水の浸透速度と涵養量の推定。筑波大学環境科学研究科修士論文, 79p.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・島野安雄・嶋田 純 (2000): 降水と地下水の安定同位体比について。土壤層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明 平成 9 年度～平成 11 年度科学研究費補助金 研究成果報告書 (課題番号: 09480113), 52-57.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴 (2006): 酸素・水素安定同位体を用いた地下水涵養過程の解明に関する研究。同位体科学, **2**, 41-44.
- Allison, G. B. and Hughes, M. W. (1983): The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *J. Hydrol.*, **60**, 157-173.
- Barnes, C. J. and Allison, G. B. (1988): Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol.*, **100**, 143-176.
- Darling, W. G. and Bath, A. H. (1988): A stable isotope study of recharge processes in the English chalk. *J. Hydrol.*, **101**, 31-46.
- Gazis, C. and Feng, X. (2004): A stable isotopic study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, **119**, 97-111.
- Harrington, G. A., Cook, P. G. and Herczeg, A. L. (2002): Spatial and temporal variability of

ground water recharge in central Australia:
A tracer approach. *GROUND WATER*, **40**,
518-527.

Tsujimura, M. and Tanaka, T. (1998): Evaluation
of evaporation rate from forested soil surface

using stable isotopic composition of soil
water in a headwater basin. *Hydrol. Process.*,
12, 2093-2103.

(2007 年 5 月 30 日受付, 2007 年 8 月 6 日受理)