

# 地下水流動調査に関する諸問題—何がわかるのか？—

辻村 真貴 (筑波大学地球科学系)

## 1. はじめに

本稿では、地下水調査に関わるいくつかの話題を提供し、「どのような調査を行う」ことによって、「何があきらかになる」のか、そして「どのような問題点が残っているのか」を、できるだけわかりやすく記述する。水文学や同位体科学に関する基礎知識をまったく持たない方々を読者対象とし、平易な記述を心がけたため、専門家諸氏には科学的厳密さに欠ける記述が散見されることを危惧している。ご指摘いただければ、幸いである。

## 2. 地下水のあり方

### 1) 地下水と人間活動の密接な関係

図1は、東京大学構内の深井戸における長期地下水位変動記録を示したものであり、おそらく我が国において最も長期にわたる水位データであろう。第二次大戦直後の経済停滞に伴う水位上昇、高度経済成長に伴う水位低下と、その後の地下水揚水規制に伴う水位回復が顕著である。地下水と人間活動の関係が、きわめて密接であるかを示す好例である。

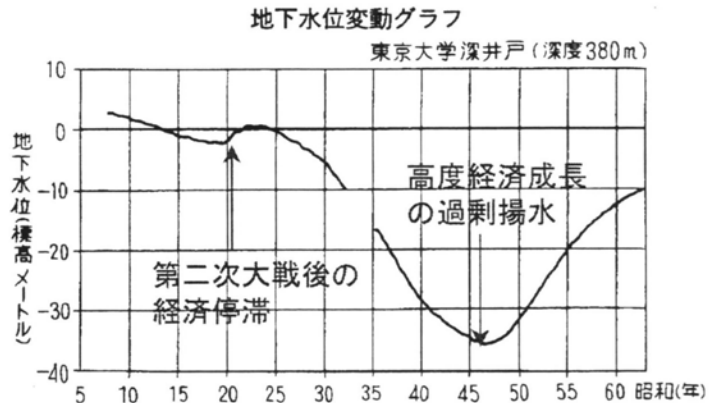


図1. 東大構内の深井戸における長期水位変動記録(榎根, 1992).

### 2) 地球上の地下水量

図2は、地球上における種々の水体の貯留量と、水の輸送量(流動量)を相対的に示した模式図である。この図から、地下水の貯留量が、淡水の中で2番目に大きいという特徴を、よみとることができる。地球の水の総量中、97.5%を海水が占め、淡水が残り2.5%を占める。淡水のうち、氷河などの雪氷が70%、地下水が29%、そして残りが河川水、土壌水、水蒸気等である。このように地下水は、量的に地球の水循環において重要な位置を占めているが、一方で我々が知らないことも多い。一因として、地下水に関わる現象が、目で見ることが困難な地表面の下で生じている、ということを挙げることができる。

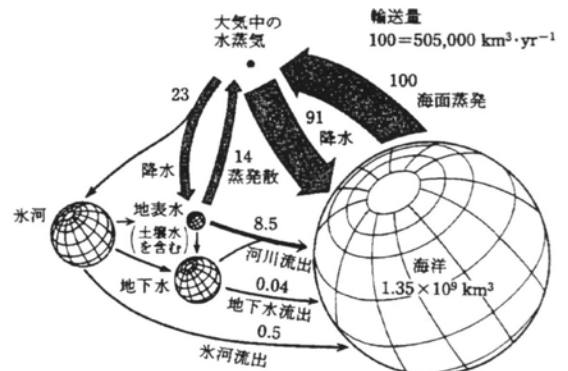


図2. 地球上における各種水体の貯留量と輸送量. 球の体積は水の貯留量を, 矢印の太さは輸送量を示す(榎根, 1980).

### 3) 地球上の水の滞留時間

地下水はどのくらいの速さで、循環しているのだろうか。表1に、地下水をはじめ種々の水体における滞留時間(入れ替え,あるいは更新時間)を示した。滞留時間は、水体の貯留量(地下水が存在している地層の厚さ)を輸送量(地下水への正味入力量)で除すことによって求められる。地下水の滞留時間は、地域によって数年から数万年の範囲で異なるが、地下水の滞留時間は、水蒸気や河川水におけるそれと比較し、きわめて長いことは特徴として指摘し得る。

表1. 各種水体における滞留時間(榎根, 1980).

|     | 貯留量(km <sup>3</sup> ) | 輸送量(km <sup>3</sup> /年) | 平均滞留時間 |
|-----|-----------------------|-------------------------|--------|
| 海洋  | 1.3 × 10 <sup>9</sup> | 4.2 × 10 <sup>5</sup>   | 3200年  |
| 氷雪  | 2.4 × 10 <sup>7</sup> | 2.5 × 10 <sup>3</sup>   | 9600年  |
| 地下水 | 1.0 × 10 <sup>7</sup> | 1.2 × 10 <sup>4</sup>   | 830年   |
| 土壌水 | 2.5 × 10 <sup>4</sup> | 7.6 × 10 <sup>4</sup>   | 0.3年   |
| 湖沼水 | 2.1 × 10 <sup>5</sup> |                         | 数年~数百年 |
| 河川水 | 1.2 × 10 <sup>3</sup> | 3.5 × 10 <sup>4</sup>   | 13日    |
| 水蒸気 | 1.3 × 10 <sup>4</sup> | 4.8 × 10 <sup>5</sup>   | 10日    |

(平均滞留時間=貯留量÷輸送量)

#### 4) 地下水の存在する隙間

地中の砂の層を顕微鏡で拡大してみると、粟おこしのような構造をしている(図 3)。粟粒にあたるものが砂の粒子で、粟粒をくっつけている水飴にあたるものが水である。水が“すきま”(隙間)を完全に満たしているとき(飽和しているとき)、その水を地下水という。図 3 に示すように、地下水は、地中の様々な隙間に存在する。地表面に穴を掘っていくと、ある深度から水がゆっくりとしみ出し、しばらくすると穴の中に水面が生じる。これが地下水面である(図 4)。地下水は、大まかに言えば地下水面の高いところから低いところに向かって流動するが、地形条件や地質条件によっては、複雑な流動経路を示す。

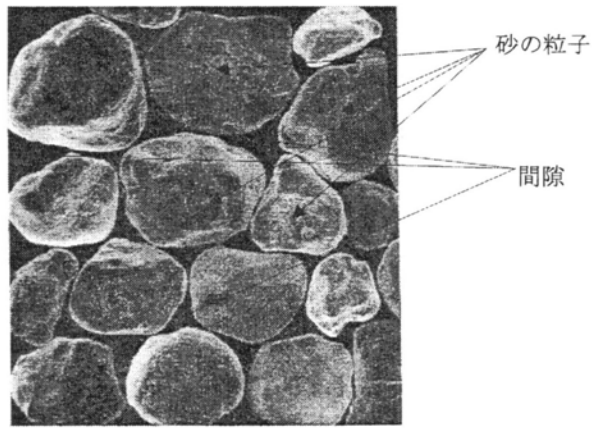
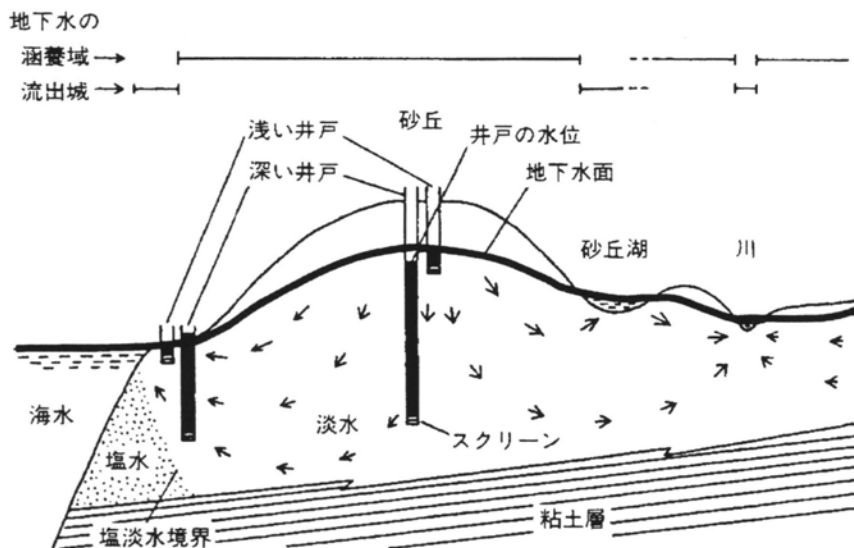


図 3. 砂粒子の顕微鏡写真(山本, 1992).



注) 井戸にはスクリーンから地下水が入る。涵養域では深い井戸ほど井戸の水位は低く、流出域では高くなる。

図 4. 砂丘の地下水流動を示す模式図(榎根, 1992).

#### 3. 同位体から何がわかるか?

水すなわち  $H_2O$  に含まれる、 $^1H$  および  $^{16}O$  の同位体である重水素 ( $^2H$  or  $D$ )、および酸素 18 ( $^{18}O$ ) は、 $^1H$  および  $^{16}O$  に比べ質量数が大きいため“重い”とすることができる。すなわち、 $D$  および  $^{18}O$  を多く含む水は、見た目にはまったく同じであっても、質的にみると相対的に重い水と判断することができる。これらの同位体は、水分子を構成しているため文字通り水と同じ挙動をし、一方その存在率は化学反応では変化しないが、水循環プロセスによって変化する。例えば、降水プロセスでは、重い水から順に降雨となるので、降水、水蒸気中の同位体の存在率(同位体比)に変化が生じる。すなわち、水循環の各プロセスに存在する水の同位体比は過去の履歴を表していると考えられ、水循環の各プロセスにおける同位体比を求めることで、水の履歴を求めることができる。

#### 4. 国内を対象とした地下水と人間活動の関係に関する調査事例

##### 1) 富山県黒部川扇状地における地下水流動の実態と人間活動(榎根, 1991)

黒部川扇状地は、富山県宇奈月町を扇頂とする半径約 14 km、扇頂角  $60^\circ$  の臨海扇状地である。扇状地でありながら、扇端部が海岸線を形成するという珍しい例であるが、流域の背後に立山など降水量の多い地域を擁するため、従来から水の豊富な地域として知られる。この地域を対象フィールドに、地下水調査を行い、数 10 年程度のタイムスケールで、地下水がどのように変遷したかを検討した事例を紹介する。

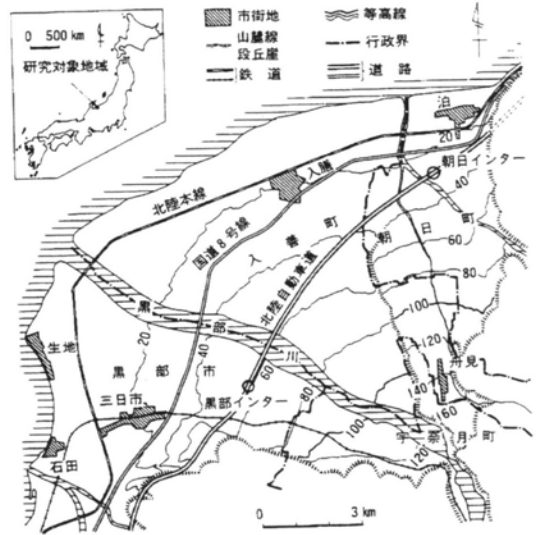
2) 地下水面形態から何を読みとることができるのか？  
(1940年代と90年代の比較)

● 地下水と河川水の交流関係の変化

1941年、90年とも地下水の尾根が、黒部川近傍に現れているが、尾根の凸部は90年の方がより顕著である。このことは、黒部川から地下水への水の供給量が、90年においてより大きくなったことを示している。

● 土地利用と地下水面の関係（流水客土が地下水涵養量に及ぼす影響）

もともと黒部川扇状地は、水田の灌漑水が地下水の供給源として重要な役割を果たしていた。しかし1970年代になり、水田における灌漑水の浸透量を低く押さえる試みがなされ(流水客土)、水田から地下水への水供給量が減少した。その結果、黒部川から地下水への水供給量が、従来に比べ多くなった。



第1図 研究対象地域  
(国土地理院発行5万分の1地形図、三日市<1988年>、  
泊<1988年>より作成)

図5. 黒部川扇状地の位置と地形(田林, 1991).

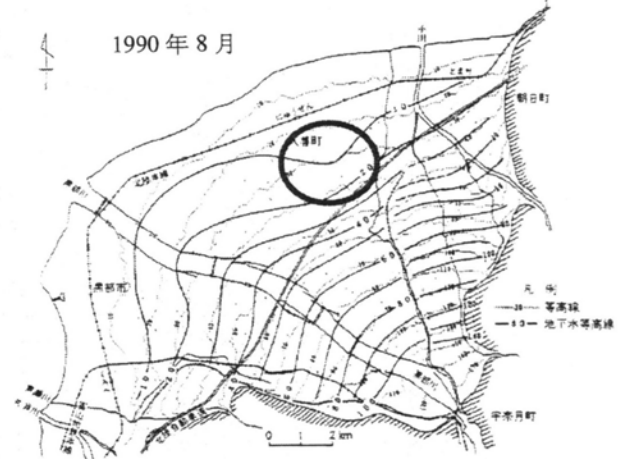
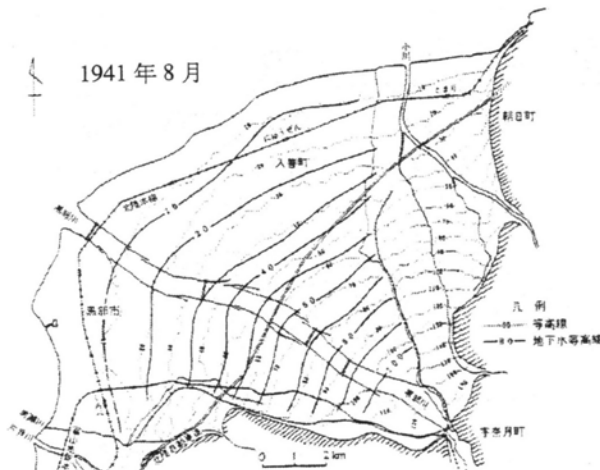


図6. 黒部川扇状地における1940年代と90年代の地下水面図。地下水面等高線は10m間隔(島野・辻村, 1991).



図7. 工場による地下水揚水量の分布  
(辻村・榎根, 1991).

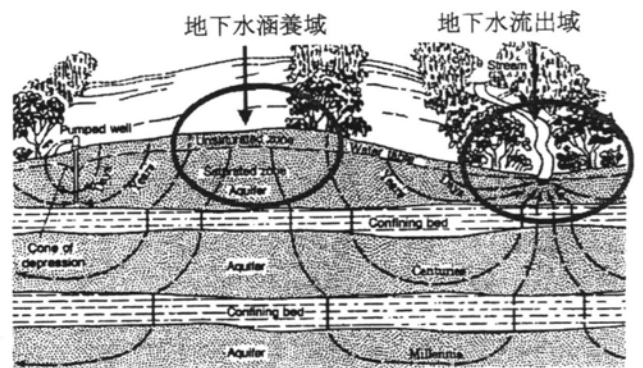


図8. 流域における地下水循環の様子を示す模式図  
(Engelen and Kloosterman, 1996).

- 人間活動が地下水面形態に及ぼす影響

図6をみると、1990年の地下水面図において入善町市街部（丸で囲んだ区域）で、顕著な地下水面の谷（地下水位低下域）が認められる。これは、人間活動の影響が地下水に現れた例であるが、その具体的なメカニズムは次のように推察される。図7は、扇状地における工場による地下水揚水量の空間分布を示したものである。これをみると、最大揚水地域は黒部川河口左岸部（図中点線で囲んだ区域）であり、地下水位低下域（実線で囲んだ区域）では、揚水量はそれほど多くない。このことは、地下水の供給源である黒部川近傍において多量に地下水を揚水しても、その地下水に対する影響はほとんどみられないのに対し、地下水供給源から遠いところにおける人間活動の影響は、たとえ量的に少なくとも、地下水に対する負荷が大きいことを示している。

3) 理想的な地下水と人間との関係とは？

図8は流域の地下水循環の様子を、模式的に示したものである。図に示されるように、流域には地下水の水供給域である涵養域と、地下水の排水域である流出域とが必ず存在する。こうした地下水循環の実態を把握した上で、対象地域の地下水利用を検討する必要がある。例えば、大量の地下水を揚水するような施設は、どちらかと言えば涵養域ではなく流出域近傍に設置すべきである。なぜなら、涵養域に設置した場合、地下水大量揚水の影響が流域全域に及ぶ可能性があるからである。実際には他のいろいろな要素が関与するため、これほど問題は単純ではないが、地下水循環プロセスを知ることが第一段階として重要であることは確かである。

5. 乾燥・半乾燥地域における地下水調査事例

1) 何が重要か？

- 地下水がどのように供給（涵養）されるのか？（地下水の起源は？）
- 土壌水と地下水の流動プロセス
- 降水のうちどれだけが地下水を涵養するのか？蒸発散量は？

2) いくつかの事例

- HEIFE における陸水の安定同位体比からみた地下水涵養機構の推定(Taniguchi et al., 1995)

中国 Heife 川流域を対象とし、地下水位、地下水の電気伝導度、水素・酸素安定同位体比などの調査を行った事例。乾燥地域の地下水調査の貴重な例。データが限られており、その中での discussion に限界はあるが、今後のオアシスプロジェクトで参考にすべきいくつかの知見が得られている。

➤ 地下水位の浅い領域と、地下水中の溶存成分濃度の総量（電気伝導度）が高い領域とが一致している（図9）。

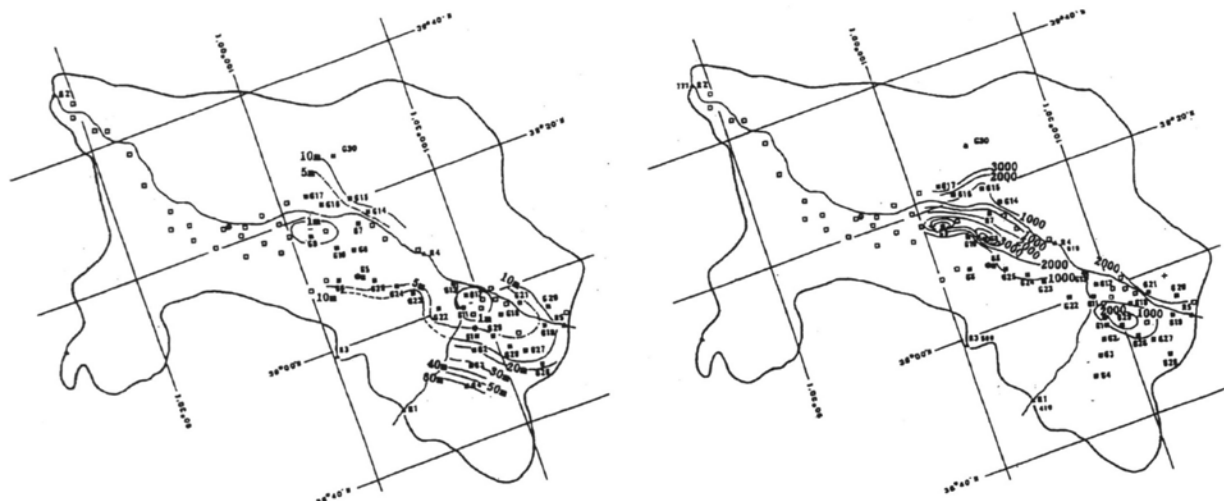


図9. Heife 流域における、地下水位（地表面から地下水面までの深さ；左側）と地下水中の電気伝導度（右側）の分布(Taniguchi et al., 1995).

- ▶ 地下水位の浅い領域は河川本流近傍に分布する (図 9) .
- ▶ 図 10 において, „D の変化に関わらず, 電気伝導度が変化しない(地下水の重い・軽いに関わらず, 溶存成分濃度に違いがない) 地下水(A)と, „D が高いほど電気伝導度が高い(重いほど溶存成分が多い) 地下水(B)とに分けられる.
- ▶ このことは, 次のことを示唆している. グループ A の地下水は, 地下水の重い・軽い (地下水が涵養された標高) に関わらず, 溶存成分は一定. すなわち, 山岳地域起源の地下水と推定される. グループ B は, 重い地下水ほど溶存成分も多い, すなわち蒸発の影響を強く受けており, 比較的標高の低い地域で涵養された可能性がある.

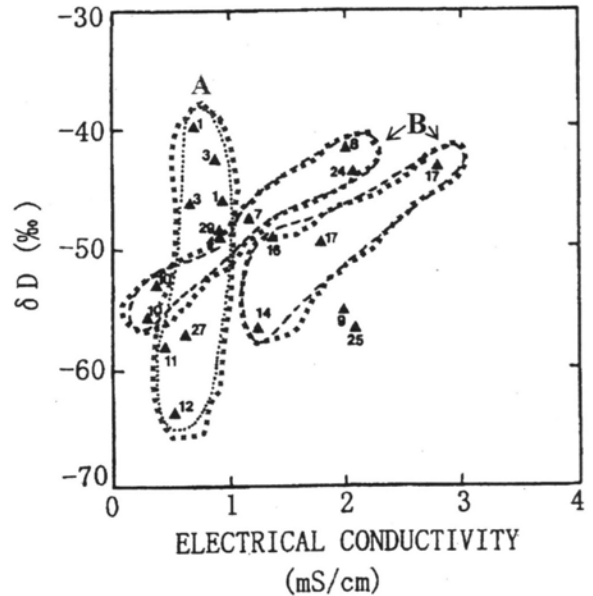


図 10. 地下水の水素安定同位体比(„D)と電気伝導度の関係(Taniguchi et al., 1995).

- タンザニアにおける水文観測および安定同位対比からみた地下水涵養機構の推定(小野寺, 1996)
  - 地表面から地下水面に至る土壌中における, 水の挙動を明らかにした事例.
    - ▶ 降雨の地中への浸透は, 一様ではなく, 空間的にきわめて不均一に生じる. とくに降雨量がおおいときに, この特徴は顕著になる (図 11) .
    - ▶ 雨量 15 mm 以下の降雨では, すべての雨水は蒸発し地中への浸透は生じない. 雨量 15 mm を超えて始めて, 地中への浸透が生ずる (図 12) .
    - ▶ 降水中の水素・酸素安定同位体比の平均値に比べて, 地下水の同位体比は顕著に軽い (図 13) . すなわち, すべての降水が平均的に地下水を涵養しているのではなく, 特定の降水が地下水を涵養していることが示唆される.
    - ▶ 雨量が多い降水ほど, 同位体比が低く(軽く)なる傾向がある (図 14) . すなわち, 比較的雨量が多く軽い雨が, 地下水を涵養していることが推測される.

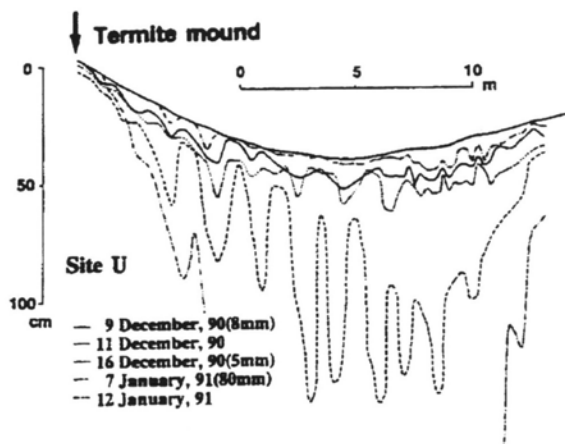


図 11. 降雨時の水の浸透の様子. 降雨後実際に土壌を掘削し, 浸透具合を確認した結果(小野寺, 1996).

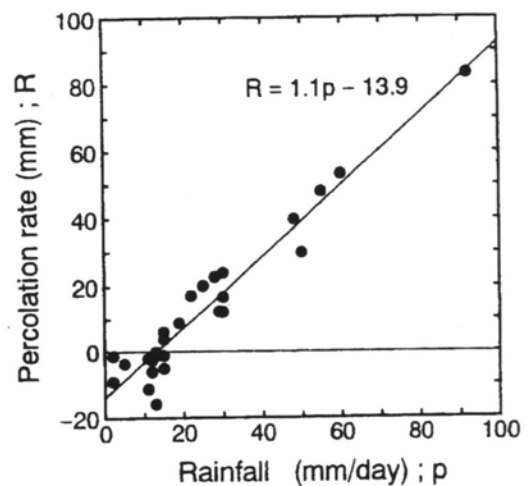


図 12. 雨量と土壌への浸透量の関係. 15 mm 以下の雨量では, 浸透量は 0 mm 以下を示しており, 蒸発している(小野寺, 1996).

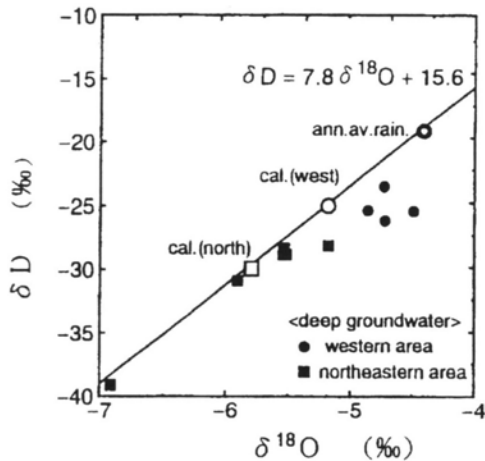


図 13. 降水と地下水の安定同位体比の比較. 降水に比べ、地下水が低い傾向が明瞭(小野寺, 1996).

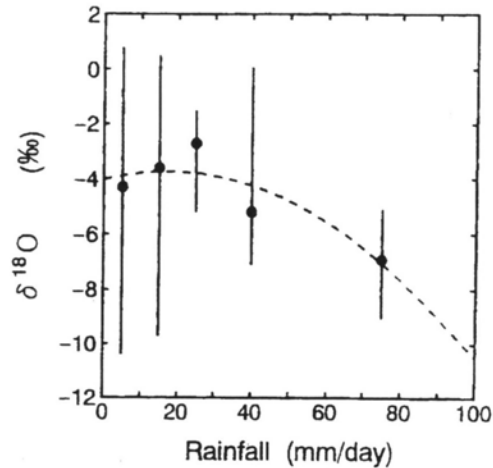


図 14. 雨量と酸素同位体比  $\delta^{18}\text{O}$  の関係. 雨量が多くなるほど、 $\delta^{18}\text{O}$  が低くなる(小野寺, 1996).

### 3) 何が問題(必要)か?

- 定量的な議論の不足.
  - 地下水の流動量(フラックス)を明らかにする必要がある. 河川流量の把握が不可欠.
- 地下水面形態の正確な把握が必要.
  - 地下水面の深さだけでなく、絶対標高のデータが不可欠.
- 土壌水分ポテンシャルの把握が必要.
- これさえ測れば絶対であるという物理量はない(状況証拠の積み重ねが必要).
  - 地道なデータの積み重ね.

### 6. まとめ

- 場の条件と地下水のあり方の関係を常に考慮する必要がある.
  - ある地域の観測例が、そのまま他の地域に適用できるわけではない.
- 量と質の関係(動きに伴う質的な変化).
  - 地下水の物理的な流動に関するデータ(地下水面形態など)と、質的なデータ(同位体、溶存成分濃度など)を併用することが重要.
- 表層(土壌層)のプロセスと深層(基盤岩)のプロセスの関係(地形的な地下水と地質的な地下水).
  - 乾燥域の地下水についてだけでなく、水文学そのものの最重要課題の一つ.
- 地表面から地下水面に至る部分の水の動き.
  - 地下水だけ見ていると、わからない.

### 7. 参考文献

- 小野寺真一(1996): 熱帯半乾燥地域における集中的な地下水涵養機構. 日本水文科学会誌, **26**, 87-98.
- 榎根 勇(1980): 「水文学」. 大明堂, pp. 272.
- 榎根 勇(1991): 「実例による新しい地下水調査法」. 山海堂, pp. 169.
- 榎根 勇(1992): 「地下水の世界」. NHK ブックス, pp. 221.
- 島野安雄・辻村真貴(1991): 地下水面の形態と変動. 榎根 勇編「実例による新しい地下水調査法」, 山海堂, 33-51.
- 田林 明(1991): 「扇状地農村の変容と地域構造」. 古今書院, pp. 286.
- 辻村真貴・榎根 勇(1991): 地下水の利用. 榎根 勇編「実例による新しい地下水調査法」, 山海堂, 77-82.
- 山本荘毅(1992): 「地下水水文学」. 共立出版, pp. 228.
- Engelen, G. B. and Kloosterman, F. H. (1996): *Hydrological Systems Analysis -Methods and Applications-*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 152.
- Taniguchi, M., Kaihotsu, I. and Kotoda, K. (1995): Isotope studies of precipitation, river water and groundwater in the HEIFE area, northeastern China. *Journal Meteorological Society of Japan*, **73**, 1293-1299.