熱帯モンスーン地域における地下水の水質および安定同位体の変化に関する研究

宮下雄次*・田瀬則雄**・Vythiringam NANDAKUMAR***

A Study of Water Quality and Stable Isotopes Change on the Groundwater in Tropical Monsoon, Sri Lanka

Yuji MIYASHITA*, Norio TASE** and Vythiringam NANDAKUMAR***

Abstract

The tropical monsoon area has the intense seasonal and areal variations of rainfall amount according to the change of seasonal wind direction. The seasonal variations of moist condition on the surface affect the groundwater and its water quality.

The hydrochemical evolution of groundwater was investigated from the variations of groundwater quality and stable isotopes in the central western area of Sri Lanka. In order to compare the isotopic values of precipitation and groundwater, the rainfall amount and $\delta^{18}\text{O}$ at observation well point were calculated from observed and measured values at five meteorological stations.

The results of comparisons between the average values of isotopic composition of precipitation and groundwater, the groundwater showed relatively low $\delta^{18}\text{O}$ values. The concentrations of dissolved ions in groundwater and its isotopic composition varied inversely as the groundwater level.

The relative low $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater indicated that the precipitation of relatively high $\delta^{18}\text{O}$ values in the dry season did not recharge on the groundwater. The weighted mean of the precipitation over 100 mm / month showed the close values to the groundwater.

On the assumption that the isotopic compositions and concentration of dissolved ions of groundwater in the dry season varied by graduation, the rate of its concentration was calculated from the change of the $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- . As a consequence of the above calculation, the change of $\delta^{18}\text{O}$ values indicated the rate of evaporation as 1 to 5 %, on the other hand, the change of concentration of Cl^- showed the rate as 3 to 37 %. Those difference of the rate of evaporation indicated that the groundwater in the dry season were recharged by the soil water graduated intensely.

Key words : groundwater, seasonal change, seasonal recharge, graduation

キーワード : 地下水, 季節変化, 季節涵養, 蒸発濃縮

I. はじめに

モンスーン地域では卓越風の方向が季節によって

大きく異なり, それに従って降水量も大きな季節変化を示す。このため熱帯モンスーン地域では, 降水量の多い季節では湿潤となる地域においても,

* 神奈川県温泉地学研究所 (Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

** 筑波大学地球科学系 (Institute of Geoscience, University of Tsukuba)

*** ペラデニヤ大学地理学科 (Department of Geography, University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka)

降水量の少ない季節では、乾燥による草本類の枯死や地下水位の低下、それらに伴う井戸水の水質悪化などがみられる。このような地域において飲料水の大部分を地下水に依存している人々にとって、地下水の量的および質的な季節変化は重要な問題である。

陸水および地下水の水質に関する研究は古くから数多くの研究者によって行われてきており、地球化学的側面からはDrever(1988)などや日本化学会(1992)などによってまとめられている。また原(1985)は、水質はそれ自身水質形成の初期条件の一つであるため、ある場所の水質形成を論じる場合、その場所の環境条件のみをとりあげたのでは全くの不十分であり、水循環システム全体と関連づけて水質形成の機構を論じる必要があると述べている。

熱帯地域における地下水の水質に関する研究としては、半乾燥地域タンザニアにおける地下水への涵養機構を明らかにした小野寺(1996)の研究や、スリランカの複数の小流域において季節ごとの地下水の水質の対比をおこなったSong and Kayane(1996)の研究などがある。しかし本研究で対象とするような熱帯地域においては、継続的な現地調査や水質分析などが困難であるため、地下水の水質と涵養形式の季節変化についてはあまり議論がなされてこなかった。

そこで本研究では、降水量の時空間分布に大きな差異があり、地表面の水文環境が極端に変化する熱帯モンスーン気候のスリランカを研究対象地域として、地下水の水質形成のメカニズムを解明することを研究の目的として、降水および地下水の水質および酸素同位体比の比較を行った。

II. 研究地域の概要

インドモンスーン支配下にあるスリランカは、北緯約 $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、東経約 $80^{\circ} \sim 82^{\circ}$ 、南北432km、東西224km、面積65,525km²、人口1,699万人(1990年)の、インド亜大陸の南東に位置する、北海道の約8割ほどの大きさの島国である(Fig.1)。国土上を

Fig.1 Study area and the locations of observation wells and climatological observations

熱帯内収束帯が年1回往復するため、1年は主として南西および北東の季節風の卓越する2回の乾季(南西モンスーン季(5月~9月)および北東モンスーン季(12月~2月))と、熱帯内収束帯の通過による2回の雨季(第一モンスーン間季(3月~4月)および第二モンスーン間季(10月~11月))に分けることができる。また島の南側中央部に標高2,000mを超す中央高地が存在し、南西モンスーン季において、中央高地の風上側斜面に地形性の降雨が発生する。このためColomboなど島の南西部の地域においては、12月から2月の北東モンスーン季以外の時期では月に100mmを超す降水が見られる。このような年降水量の空間的な違いや、それらに伴う植生の違いなどから、スリランカではDry Zone, Wet Zone およびそれら両者の遷移帯としてIntermediate Zone の三つの地域に分けられている。また北部のJaffna半島周辺を除く国土の約9割が、非常に堅固な結晶変岩を基

盤岩としているため、資源としての地下水の存在量は全般的に貧弱であるといえる。しかし一方で、上水道施設は都市部で約50%、農村部では5%ほどの普及率にしか過ぎず (Survey Department, Sri Lanka, 1988)、多くの人々が飲料水を家庭用もしくは共用の井戸に依存しているのが現状である。このためDry Zoneなどでは、乾季における浅井戸の枯渇に備えたTube Wellとよばれる岩盤中の裂か水を採ることを目的とする、共同の深井戸が数多く設けられており、乾季における貴重な水源となっている。

スリランカにおける水収支に関する研究として、Kayane and Nakagawa (1983) による、水収支式とペンマン法を用いた蒸発散量に関する研究がある。またMiyashita (1997) は、スリランカ全地域135流域において水収支計算を行い、流域実蒸発散量の分布を明らかにするとともに、過去40年における環境変化と水収支変化との関係を示唆している。

また蒸発散による乾燥過程に関連して、Dry Zoneにおける地下水の水質およびその変化についてKayane *et al.* (1983) の研究があり、地下水位と電気伝導度との関係から、地下水涵養時における表層に集積された塩分の影響について示唆している。Song (1996) は、スリランカのWet ZoneからDry Zoneにかけての6小流域において、浅層および深層地下水、河川水および灌漑用ため池の水などの水質および水素、酸素安定同位体比の比較を行い、地下水における気候、地形、地下水流動および地表水などの影響を明らかにした。スリランカのDry Zoneの小流域を対象とした研究として、板倉 (1994) による連珠溜池灌漑システムについての研究がある。ここでは溜池の貯水量などの水文観測をもとに水収支モデルを構築し、溜池の統廃合や堰堤のかさ上げなどによる影響のシミュレーションを行った。またスリランカ政府機関の調査として、The Natural Resources Energy and Science Authority (1985) による、The Hydrogeochemical Atlas of Sri Lanka の作製がある。ここでは島内約500地点において

地下水の水質調査が行われ、溶存成分の地域的な分布が明らかにされている。

スリランカにおける同位体を用いた研究としては先に挙げたSong (1996) のほかに、島内7地点において降水の水素および酸素安定同位体比の測定を行ったDharmasiri and Atuluwage (1991) の研究がある。ここで彼らは降水の同位体分布や頻度などを明らかにし、スリランカにおける降水が、傾き+8, d-パラメーター+10で示される天水線 (Meteoritic Water Line) とほぼ同じ、傾き+7.9, d-パラメーター+11.0の直線上に分布することを明らかにした。また田瀬・宮下 (1997) は降水の水素・酸素の同位体比の空間分布に海岸から内陸方向に大きな変化が認められないことなどから、全島スケールでの再循環がおきている可能性を示唆している。また、Dharmasiri *et al.* (1982) はトリチウムを人工トレーサーとして土壤に注入することによって涵養量などの測定を行った。この野外実験によってスリランカ北部の最も降水量の少ない地域などでも、降水量の約30%が地下水に涵養されていることを明らかにした。

スリランカのDry Zone における地下水の開発に関する研究としては、農業用水用浅井戸の研究がDavies and Herbert (1988), Barker and Herbert (1989), Ball and Herbert (1992) などによって行われている。ここではDry Zoneにおける農業用水の開発を目的に、大口径井戸による浅層地下水の揚水試験などが行われた。

本研究では、乾燥および湿润地域における乾燥過程における地下水の水位、溶存成分濃度および水素・酸素同位体比の変化を明らかにするため、Dry ZoneからWet Zone にまたがる北緯6°50' ~8°05', 東経79°50' ~80°45' までのスリランカ中西部を研究対象地域とし、5地点において降水の採取、対角線に沿った10地点において地下水位の観測および採水を、1993年の1月から7月まで月一回の割合で行った (Fig. 1)。

月降水の採取を行った5地点における月降水量および月平均気温の平年値と観測期間中の月降水量を示したものがFig. 2 である。ただし、

Fig. 2 Monthly rainfall and air temperature at five stations

Diganpathaha においては、1985年以降欠測が生じていたことなどから、25年間（1961年～1985年）の平均値を用いた。観測を行った1993年は雨季においては年より多雨傾向を、そして乾季においては少雨傾向を示し、1993年の降水量は平年値の75%から129%であり、時空間的なばらつきは見られたがほぼ平年の降水量であった。年平均気温は、中央高地の中腹部に当たるPeradeniyaと、降水量のみの観測を行っているDiganpathahaを除いた3地点において27.3～27.8℃であり、標高によるものの以外の空間的な変化は少なかった。

Ⅲ. 研究方法

降水は、Fig. 1中の■印で示された地点にある、気象観測所(Colombo, Puttalam)、農業気象観測所(Batalagoda, Diganpathaha)、およびPeradeniya大学の気象観測圃場内に設置した同位体用降雨採水装置によって各月毎の降水を採取した。降雨採水装置はSimada *et al.* (1992)に準じ、捕集した降水の蒸発を防止することを目的とした、ピンポン玉による蒸発防止用栓をとりつけたものを用い、地上約1.5mの高さに設置した。対象地域内の降水量は、14地点の月降水量観測所(Rainfall reporting stations) および、降水の採取をおこなった5地点の気象観測所における観測値を用いた。

地下水位の測定および地下水の採水は対象地域の対角線に沿った10地点において、1993年1月より同年7月まで月1回行った。観測には一般家庭用および農業用として日常的に使用されている浅井戸を用い、採水時に地下水位、水温および電気伝導度の測定を併せて行った。対象地域は中央高地に分類されるNo.7の地点を除き、ほとんどの地域が標高300m以下のおおむね平坦な地形をしており、複雑な地下水流動系が形成されているものと考えられた。このため10ヶ所の地下水採水地点の地下水流動系を把握するために、現地観察と1/63360地形図により、各地点が局地流動系の涵養域に位置するのか流出域に位置するのかの判読

Table 1 Classification of the observation wells

	Agro ecological region		
	Wet Zone	Intermediate Zone	Dry Zone
Recharge area	No.1 No.7	No.9	No.5 No.10
Discharge area	No.2	No.3 No.4 No.8	No.6

を行った。その結果Table 1 に示したように、涵養域5地点、流出域5地点に分類された。

観測および採水を行った10地点の井戸は、それぞれの測線の方向に互いに20km～30km離れており、全体では対角線方向にして150km程度の空間的スケールを持っており、単一地点における降水の観測値で、地域全体を代表させるのは困難であると考えられる。そのため、本研究では地下水観測地点への降水を量的および質的に明らかにするために、得られた降水量データと安定同位体比を地点間距離により内挿し、各地下水観測地点への降水の値として用いた。

試料中に溶存する陰イオン成分のうち Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- は、イオンクロマトグラフによって、また陽イオン成分のうち Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および SiO_2 は、プラズマ発光分光分析装置により定量した。水の安定同位体比の分析は、酸素の同位体比は炭酸ガス平衡法により、また水素の安定同位体比は亜鉛バッチ法によりそれぞれ前処理を行い、質量分析計 (Finnigam Mat 社製、軽元素質量分析計 Delta S)により測定を行った。水素および酸素安定同位体は、平均標準海水 (SMOW) からの千分率偏差 (‰)として式 (3.1) で表した。

$$\delta^{18}\text{O} \text{ or } \delta\text{D} = \frac{R_{(\text{Sample})} - R_{(\text{Standard})}}{R_{(\text{Standard})}} \times 1000 (\text{‰}) \quad (3.1)$$

ここで R は $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ あるいは D/H である。酸素安定同位体比分析のための前処理方法として用いた炭酸ガス平衡法では、水試料中に高濃度に溶存物質が存在する場合、炭酸ガスと水との間の同位体平衡値が変化することが明らかにされてい

る。しかし、Gat and Gonfiantini (1981) により、本研究における水試料の溶存物質濃度においては、分析精度 0.1 ‰以上の変化を生じさせるものでないとされていることから、濃度補正は行わなかった。

IV. 結 果

1. 地下水の水位、酸素安定同位体比

および溶存成分濃度の季節変化

各観測井における地下水の水位、酸素安定同位体比および溶存成分濃度の経月変化をFig.3-1 から Fig. 3-10 に示した。

地下水の酸素安定同位体比は、降水に比べ季節的に大きな変化はなく、7ヶ月の観測期間中0.1 ‰から1.2‰の変化しか示さなかった。一方溶存成分濃度は、成分ごとにも違いはみられるが、酸素安定同位体比に比べると大きな変化を示した。

全地点における地下水の水素および酸素安定同位体比の関係を、 δ -ダイアグラム上にプロットしたのがFig. 4 である。図中の実線は天水線を示している。乾季に枯渇してしまい極度の蒸発濃縮を受けたと思われるNo. 9を除いて、ほぼ天水線に沿った変化をしていることが明らかになった。

溶存成分濃度や地下水位の変化などから、地下水の水質の季節変化の要因として以下に示す二点が考えられる。

一点目は、Wet Zone に位置するNo.1, No.2, No.7 の3地点で顕著に認められる、一時的な降水の涵養による地下水の希釈によって起こると思われる溶存成分濃度の低下である。これらの地点では、本格的な雨季となる4月から5月頃の南西モンスーン季における地下水位の上昇とともに地下水の溶存成分濃度の低下が認められる。また酸素同位体比についても、4月から5月頃の100mmを越える低い同位体比をもつ降水の影響により、地下水の同位体比が低く変化しているのが認められた。

二点目は、Dry Zone および Intermediate Zone に位置するNo.9, No.10の地点で顕著に認

Fig.3 Seasonal variations in element value of observation wells No.1 - No.10

Fig.4 δ -Diagram of groundwater

められる、1月～2月の乾季における溶存物質濃度の上昇である。これらの地点などでは、乾季において地下水位の低下と溶存成分濃度の上昇が同時に起きており、地下水位の低下に伴う蒸発の影響によるものと考えられる。また地下水の酸素同位体比はこの期間ほとんどの地点で、高い値に変化しており、地下水体の蒸発による濃縮や、高い同位体比をもつ乾季のわずかな降水や土壌水の涵養

の影響などが考えられる。

2. 地下水採水地点への降水量および酸素安定同位体比の推定

各地点における地下水への降水の影響を明らかにするために、降水試料の採取地点における欠測期間中の降水量と、10地点ある地下水採水地点への降水量および降水の酸素安定同位体比の推定を行った。

降水量データの推定には、降水の採取をおこなった5地点の月降水量データと、14地点のRainfall reporting stationにおける月降水量データを用いた。推定には、Colombo-Diganpathaha および Puttalam-Peradeniya における二測線上的における地点間距離をもとに、推定する地点の両側に観測値のある場合は距離比に応じた内挿を行い、どちらか片側の観測値だけしかない場合は、最も近い地点の観測値をそのまま用いることにより、個々の地下水採水地点における降水量の推定を行った。この結果得られた各地点における月降水量をFig.3-1-a からFig.3-10-aに示した。

降水の酸素安定同位体比の推定は、降水量同様に各地点間距離によって内挿を行い、Fig.3-1-b から Fig.3-10-b における□印で示した。

Fig. 5 Change of the $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation and groundwater in the cross section from Colombo to Diganpathaha (a), from Puttalam to Peradeniya (b)

3. 降水および地下水の酸素安定同位体比の比較

No.1 からNo.10 の各地下水観測地点において実測された酸素安定同位体比の算術平均値と、5地点において実測された降水の酸素安定同位体比、および計算によって求められた各地点への降水の同位体比の降水量加重平均値の各測線方向に沿った変化を示したものがFig.5である。Fig.5-aはColombo - Diganpathaha 測線方向、Fig.5-b

はPuttalam - Peradeniya 測線方向にそれぞれ沿岸部に位置するColombo, Puttalam からの距離を横軸にとったものである。図中の実線は降水および地下水の最小二乗法による一次回帰を示している。

従来、ある地点における浅層地下水の安定同位体の値は、周囲から値の異なる地下水の流入および混合がない限り、その地点の降水の年加重平均値とほぼ等しくなるといわれている(水谷, 1986)。しかしFig. 5において示された、降水の酸素安定同位体比の加重平均値と期間中の地下水の算術平均値との間には、最大2.2‰平均1.0‰の差がみられた。また涵養形式で比較してみると、流出域に位置する地下水の同位体比は、降水の加重平均値と比較して平均0.8‰の差しかないのに対し、涵養域の地下水は乾季に枯渇してしまったNo. 9の地点を除くと、平均1.6‰の差が認められた。

地下水流動系における位置の違いにより、同位体比に差が認められたことの原因として、流出域では上流域からの地下水流動によって、同位体比の均一化が行われていることや、涵養時の影響が表れるのにある程度のタイムラグがあることなどに対し、涵養域では降水の季節変化などの影響を直接的に受けることなどが考えられる。しかし、地下水の同位体比は一般的に安定な値を示し、実際の地下水の安定同位体比に数‰に及ぶような大きな季節変化が認められないことなどから、平均1.0‰の差は観測期間のばらつきや涵養形式の違いだけではなく、降水の季節涵養や蒸発など、他の要因によるものと推察された。

V. 考 察

スリランカ中西部地域の地下水および降水中における、安定同位体比および溶存成分濃度の季節的および空間的な比較から、以下の3点が明らかにされた。

- 1) 降水と地下水の酸素安定同位体比の比較から、地下水が降水より最大2.2‰平均1.0‰低い。
- 2) 地下水位上昇時に溶存成分濃度および同位体

比が低下。

- 3) 地下水位低下時に溶存成分濃度および同位体比が上昇。

これらの原因として、この章では1)の降水と地下水の同位体比の差について降水の季節涵養の視点から、また地下水の水位および水質の季節変化のうち、3)の乾季における水質の変化について地下水および土壌水の蒸発濃縮の視点から考察をおこなう。

1. 降水の季節涵養による影響

降水が土壌中を降下浸透する時に強い蒸発散を受けた場合、降水量の少ない乾季においては、降水のほとんどが蒸発散によって失われてしまうと考えられる。降水中の酸素安定同位体比の降水量加重平均値に比べ、地下水の同位体比が低いことから、地下水として涵養される水は同位体比の低い値、すなわち降水量効果の関係から雨季などにおける降水量の多い時の降水のみが涵養され、小雨時の同位体比の高い降水は、地表面および土壌中で蒸発してしまい、ほとんど涵養されていないものと考えられる。その結果、地下水への涵養は雨季においてのみ選択的におこなわれる、いわゆる季節涵養がなされているものと考えられる。

スリランカにおける蒸発散量は流域水収支法から、Wet Zone : 1450-1550mm/year, 中央高地 : 900-1200mm/year, Dry Zone : 1000-1400mm/year (Kayane and Nakagawa, 1983), 全島平均 : 1150mm/year (Miyashita, 1997) という値が得られている。またペンマン法から、4.1mm/day (Peradeniya : Wet Zone), 同4.8mm/day (Maha Illuppallama : Dry Zone) (Kayane and Nakagawa, 1983) という可能蒸発散量が得られており、平均すると約75~145mm/month となる。

月降水量がこれらの値よりも少ない、同位体比の高い降水のときは、降水が地下水に涵養される前にそのほとんどが蒸発散してしまうものと考えられることから、各地点における地下水の酸素安定同位体比の算術平均値と、全期間(□印)および

Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ of groundwater and precipitation

月降水量100mm以上の月のみ(■印)の降水を加重平均した値とを比較したのがFig. 6である。図中の実線は1:1の値を示しており、この線上では降水と地下水の同位体比が同じであることを表している。測定した期間が7ヶ月と一年に満たないことや、降水の値は内挿による推定値であることなどから厳密な比較はできないが、100mm以上の降水のあった月のみを平均したプロットの多くの地点において、全期間の平均より1:1の線の近くに分布することが明らかとなった。また全地点の地下水の平均値が-4.9‰であったのに対し、全期間および100mm以上の降水の平均値は、それぞれの-3.9‰、-4.4‰であった。

これらの考察より、熱帯モンスーン地域であるスリランカでは、地下水は季節的に涵養されており、乾季の少量の重い同位体比を持つ降水は、ほとんど地下水の涵養に寄与していないことが明らかとなった。

2. 乾季における蒸発の影響

2.1. 地下水体の蒸発による濃縮

乾季の地下水位低下時に見られる溶存成分濃度および同位体比の上昇の原因として、少量の重い

Table 2 Groundwater changes in the period of dry season

Well No.	Month	Depth to W.T. (m)	Cl ⁻ (mg/l)	$a_w/a_{(m+1)}$ (%)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\Delta\delta^{18}O$ (‰)	f(28.4°C)	processes
No.1	Jan.	4.10	11.4	0.727	-4.7	0.5	0.946	equilibrium
	Feb.	4.50	15.6		-4.2			
No.3	Jan.	3.70	29.2	0.969	-5.1	0.2	0.978	equilibrium
	Feb.	4.00	30.1		-4.9			
No.6	Jan.	4.15	30.9	0.849	-5.4	0.2	0.978	equilibrium
	Feb.	4.23	36.5	0.900	-5.2	0.1	0.989	equilibrium
	Mar.	4.47	40.6		-5.1			
No.7	Jan.	0.95	3.30	0.730	-5.3	0.1	0.989	equilibrium
	Feb.	1.30	4.52		-5.2			
No.8	Jan.	3.03	420	—	-5.0	0.4	0.957	equilibrium
	Feb.	4.30	398		-4.6			
No.9	Jan.	3.10	310	0.636	-4.5	1.0	—	non-equilibrium
	Feb.	3.83	486		-3.5			
No.10	Jan.	7.95	570	0.631	-5.4	0.1	0.989	equilibrium
	Feb.	8.50	904	0.763	-5.3			
	Mar.	8.75	1180		-5.2	0.1	0.989	equilibrium

同位体比を持つ降水や土壌水の涵養,あるいは地下水体の蒸発による濃縮などが考えられる。そこで地下水の酸素同位体比および溶存成分濃度の変化から,蒸発率の算定を行った。蒸発率の計算は,以下の条件を満たす地点および期間について行った。選別の条件として,

- 条件 1 月降水量が100mm程度以下
- 条件 2 地下水位の低下
- 条件 3 塩化物イオン濃度の上昇
- 条件 4 酸素安定同位体比の上昇
- 条件 5 δ -ダイヤグラム上において平衡あるいは非平衡な蒸発を示すこと

の5つを用いた。このうち条件1に用いた値は,V. 1章による考察から月降水量に換算して100mm程度が,降水が地下水に涵養される場合の下限であると推定されたことから用いた。

条件1から5まで全てを満たす変化のあった地点と期間をTable 2に示した。なおNo.6の3月は降水量が僅かに100mmを上回っているが,水質および同位体比の条件を満たしていることから計

算を行った。またNo.8の地点では,条件3の水質の項目が適合しなかったが,その他の条件は全て満たしているので,参考として計算を行った。

条件を満たしている期間は,すべて1993年1月から3月までの北東モンスーン季であった。またこれらの地点は乾燥および湿潤両地域で認められた。このことから,乾季においてはWet Zoneにおいても蒸発の影響が地下水に及んでいる可能性が示された。また蒸発の影響が認められた地点は,涵養域および流出域のどちらにもあらわれた。これは降水による地下水への,直接的な影響のほとんど無い期間のみを抽出したことにより,涵養形式などに影響されなかったためと思われる。

平衡過程における蒸発によって生じる同位体濃縮の割合は,一般に式(5.1)から求めることができる(田中ら,1992)。

$$(\delta^* - \delta_m) = 103 \times (1/\alpha - 1) \cdot \ln f \quad (5.1)$$

ここで δ^* は蒸発作用を受けた後の水の同位体比,

δ_{in} は蒸発作用を受ける前の水の同位体比, f は水の残存率, α は同位体の分別係数である。

また同位体の分別温度は, Colombo, Puttalam, Kurunegala における年平均気温の30年平年値の平均である28.4℃を用い, Majoube (1971) による実験式 (5.2式) から求めた。

$$\ln \alpha = \frac{1.137}{T^2} \times 103 - \frac{0.4156}{T} - 2.0667 \times 10^{-3} \quad (5.2)$$

ここで T は絶対温度 (K) である。以上の式から 28.4℃における残存率を計算したものを Table 2 の f (28.4℃) として示した。

その結果, 蒸発による水の損失は1~5%程度であることが明らかになった。

同じ期間における塩化物イオン濃度は, 濃度が低下しているNo. 8を除き, 約1~300mg/l の変化が認められた。変化前の月の濃度および水体の量を $a_{(n)}$ (mg/l) および $L_{(n)}$, 変化後の濃度および水体の量を $a_{(n+1)}$ (mg/l) および $L_{(n+1)}$ とし, 地下水中の塩化物イオン濃度に質量保存則が適応できるとしたとき次式が成り立つ。

$$a_{(n)} \times L_{(n)} = a_{(n+1)} \times L_{(n+1)} \quad (5.3)$$

水の濃縮率を同様に f_d とし, 式 (5.4)

$$f_d = L_{(n+1)} / L_{(n)} \quad (5.4)$$

で表した場合, 溶存物質の濃度変化から求められる水の残存率は, 二式を連立して

$$f_d = a_{(n)} / a_{(n+1)} \quad (5.5)$$

(5.5)式から変化後の濃度で変化前の濃度を除したものがそのまま濃縮率となり, 1 から濃縮率を引いたものを蒸発率として表すことが出来る。計算の結果, 塩化物イオン濃度より得られた蒸発率は3%から37%となり, 同位体比変化より求めた蒸発よりもはるかに大きな値が得られた。

このことは乾季における地下水の水質変化が, 地下水体の単純な蒸発濃縮のみによるものではないことを示しており, 地下水の水質を上昇させる, 蒸発濃縮以外の機構が存在していることが示唆された。

2.2. 土壌水の蒸発による濃縮

地下水中の溶存成分濃度を上昇させ, かつ地下水の同位体比にあまり上昇が起きないような変化を示す涵養機構として, 従来より言われている土壌表層中に集積された塩類の溶出によるものの他に, 土壌中での蒸発による高度に濃縮された土壌水の涵養による水質形成プロセスが考えられる。

塩化ナトリウムの溶解度は, 20℃, 100gの水に対し35.83gである(理科年表)。すなわち飽和時の塩化物イオン濃度は約160g/lであり, 本研究で得られた地下水の塩化物イオン濃度の最大値の更に100倍以上の値である。このことから土壌中で極度に蒸発を受け, 飽和状態にまで達するような水の溶存物質濃度は, 地下水の濃度に比べ数百-数万倍の濃度にまで達すると考えられる。

一方安定同位体の場合, 閉鎖系における蒸発においては, 蒸発が進行しても同位体比が無限に大きくなることはなく, ある一定の定常値近くなることが実験によって明らかにされている (Craig *et al.*, 1963)。また塩水など高濃度の溶液の蒸発の場合, 水素および酸素安定同位体比の変化は δ -ダイアグラム上を右回りあるいは左回りの変化を示し, ある極大値をもつことが Sofer and Gat (1975) によって明らかにされている。

この結果, 極度に蒸発濃縮された土壌水は, 溶存物質濃度では地下水に対し数百倍以上の値を持つものに対し, 酸素安定同位体比では十数%程度の差しかない値を持つことが推測される。この様に極端に蒸発濃縮した土壌水が地下水に涵養されることによって, 乾季における溶存成分濃度のみが大きく変化し, 同位体比はほとんど変化しない地下水の変化を説明することができる。

Ⅳ. おわりに

本研究は熱帯モンスーン気候であるスリランカにおいて、広範囲な地域における降水と、地下水の水質および安定同位体比を比較することにより、地下水の水質形成の支配要因を明らかにし、その影響について環境同位体などから定量的な考察を試みた。

降水と地下水の安定同位体比の比較から、地下水が降水の値より同位体比で平均すると1.0‰低い値を持つことが明らかになった。また1月から7月までにおける地下水の水位及び溶存物質濃度の変化から、地下水位上昇時に溶存成分濃度および同位体比が低下し、地下水位低下時に溶存成分濃度および同位体比が上昇する傾向が認められた。

乾季における溶存成分濃度と安定同位体比の上昇を蒸発濃縮によるものと仮定し、安定同位体比の変化から平衡過程における蒸発による同位体比変化に当てはめた場合、1~5%の蒸発率が求められた。一方塩化物イオン濃度の変化から3~40%程度の蒸発率が示され、水位低下時における地下水の水質変化は、水体の蒸発による濃縮だけでは説明できないことが示された。

また、降水と地下水の安定同位体比の比較から、地下水が降水の値より平均すると1.0‰低い値を持つことから、月100mm程度以上の降水のみが地下水に涵養され、乾季におけるわずかな雨は地表面および土壤中で蒸発してしまう季節涵養が起きていることが明らかになった。

その結果、水位低下時の地下水の溶存物質濃度を上昇させる原因として、従来より言われている、土壌表層付近に集積された塩類が降下浸透中に溶出されることによって生じる高濃度の土壌水によるものの他に、乾季における降水等が土壤中で蒸発による極度な濃縮を受け、溶存成分濃度のみが高濃度になった土壌水による涵養システムの存在が示唆された。

謝 辞

本研究は、平成4年度から6年度までの文部省国際学術研究「湿潤熱帯植生系における水循環」(研究代表者 榎根勇)の一部として行われた。榎根先生をはじめとするメンバーの先生方には、調査期間中多くの御指導を賜った。ここに記して感謝いたします。

なお本研究は筆頭著者の修士論文(筑波大学大学院修士課程環境科学研究科)の内容と、第8回日本水文科学会学術大会において発表した内容に加筆および修正したものである。

参考文献

- 板倉 純(1994): スリランカ・連珠溜池灌漑システムの水収支モデル, 農土誌, 62, 1-6.
- 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, ハイドロロジー, 26, 87-98.
- 田瀬則雄・宮下雄次(1997): 熱帯生態系における水循環 —(1) スリランカの地域水循環プロセス—, 大学等における地球圏—生物圏国際共同研究計画 成果報告書, 427p, 315-329.
- 田中 正・嶋田 純・板寺 一洋・中井 伸之(1992): インドネシア・バリ島における土壌水の水素・酸素安定同位体比について. 日本水文科学会学術大会講演予行集, 6, 28-32.
- 日本化学会(編)(1992): 陸水の化学, 季刊化学総説, 14, 184p.
- 原 明宏(1985): 水循環と水質形成, ハイドロロジー, 15, 1.
- 水谷義彦(1986): 水文学に望まれる諸問題—安定同位体水文学—, ハイドロロジー, 16, 74-82.
- Ball, D.F. and R.Herbert (1992): The Use and Performance of Collector Wells Within the regolith Aquifer of Sri Lanka. *Ground Water*, 30, 683-689.
- Barker, J.A. and R.Herbert (1989): Nomograms for the analysis of recovery tests on

- large-diameter wells. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22, 151-158.
- Craig, H., Gordon, L.I. and Y. Horibe (1963) : Isotopic exchange effects in the evaporation of water. 1. Low-temperature experimental results. *Journal of Geophysical Research*, 68, 5079-5087.
- Davies, J. and R. Herbert (1988) : The hydrogeology of the Miocene sedimentary belt of Sri Lanka. *Journal of the Geological Society of Sri Lanka*, 1, 45-63.
- Dharmasiri, J.K., Dharmawardena, K.G., Wijesinghe, M.W.P., Thiranagama, P., De Mel, I.D.T., Wickremarachi, D.A. and Geol, P.S. (1982) : Infiltration rates of rainwaters in Sri Lanka measured by using tritium tracer. *Nordic Hydrology*, 13, 13-26.
- Dharmasiri, J.K. and Atulwage, C.J. (1991) : Variation of stable isotopes in the monsoonal rains of SRI LANKA. *Isotope techniques in water resources development*. Proceedings of a symposium, Vienna, Organized by IAEA, 707-711.
- Drever, J.I. (ed). (1988) : *The Geochemistry of Natural Waters, second edition*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 437p.
- Gat, J.R. and Gonfiantini, R. (eds). (1981) : *Stable Isotope hydrology*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 339p.
- Kayane, I. and Nakagawa, S. (1983) : Evapotranspiration and water balance in Sri Lanka. *Climatological Notes, Inst. Geosci. Univ. of Tsukuba*, 33, 127-138.
- Kayane, I., Yamashita, S., Nakagawa, S. and Nomoto, S. (1983) : Salinization of groundwater in the Dry Zone of Sri Lanka. *Climatological Notes, Inst. Geosci. Univ. of Tsukuba*, 33, 147-154.
- Majoube, M. (1971) : Fractionnement en oxygène 18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. *J. Chim. Phys.*, 68, 1423-1436.
- Miyashita Y. (1997) : Effects of Environmental Change on the Water Balance in Sri Lanka. Doctor degree's thesis, Doctoral program in Geoscience, the University of Tsukuba, 137p.
- Shimada, J., Itadera, K., Nakai, N., Suprpta, D. N. and Gara, W. (1992) : Stable isotope ratio in precipitation as an input of hydrological cycle. *Water cycle and water use in Bali Island*. Kayane, I. (ed), 105-115.
- Sofer, Z. and Gat, J.R. (1975) : The isotope composition of evaporating brines: effect of the isotopic activity ratio in saline solutions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 179-186.
- Song, X. (1996) : A study on the relation between water cycle and groundwater quality in Sri Lanka. Doctor degree's thesis, Doctoral program in Geoscience, the University of Tsukuba, 151p.
- Song, X. and Kayane, I. (1996) : Zonal Characteristics of Groundwater Quality Controlled by Climate in Sri Lanka. *ハイドロロジー*, 26, 151-165.
- Survey Department, Sri Lanka (1988) : *The National atlas of Sri Lanka*, 142p.
- The Natural Resources Energy and Science Authority, Sri Lanka (1985) : *The hydrogeochemical atlas of SRI LANKA*. Dissanayake, C.B. and Weerasooriya, S.V.R. (eds), 106p.

(受付 1997年9月8日)

(受理 1998年1月14日)

この論文に対する「討論」を1998年8月31日まで受付けます。