

論文の内容の要旨

論文題目 「Hydrochemical and Environmental Tracer Characterization of Water Resources in the Ndop Plain and Bamenda Highlands, North West Cameroon, Central Africa」
(カメルーン北西部ヌドップ平原およびバメンダ高原における水環境化学的トレーサーを利用した水資源特性解明)

学位申請者 Wirmvem Mengnjo Jude

キーワード : カメルーン, ヌドップ平原, バメンダ高原, 地下水, 雨水, 安定同位体比
トレーサー

Groundwater is a major source of supply in most African countries including Cameroon. While Cameroon is gifted with numerous water resources, which are heavily dependent upon by the increasing population (especially for domestic and agricultural purposes), they have been poorly characterized in terms of drinking and irrigational quality, geological and anthropogenic controls, recharge (renewability) and response to seasonal climatic variations. Accordingly, this study utilizes hydrochemical (major ions), stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) and environmental tracer (CFCs, SF_6 and ^3H) data to address the aforementioned concerns for the first time in water resources (rainwater, surface water and groundwater) of the Ndop plain and Bamenda Highlands (North West Cameroon). The study involved sampling of 101 surface water and groundwater sources during the dry season (January 2012) and 29 groundwater samples during the rainy season (September 2012) in the Ndop plain. Eighteen normal springs and 6 soda springs were sampled from the Bamenda Highlands. Forty-four monthly rain samples were collected from 4 installed weather stations in the four localities from January to December 2012. The collected samples were analyzed for physical parameters, major ions, stable isotopes and environmental tracer gases.

The major ion concentrations of surface water and groundwater in the Ndop plain were within the WHO guidelines for drinking water. The groundwater, which was mainly Na-HCO_3 and Ca-HCO_3 , is evolved rainwater ($\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-Cl}$) in the area. The groundwater is of low salinity and sodium hazard class; hence, suitable for irrigation. Major controls on water chemistry were silicate weathering and cation-exchange of Na^+ in rocks for Ca^{2+} in solution; there was no significant effect from anthropogenic processes.

For the first time, a baseline stable isotopic and Cl^- data of precipitation for future hydrological and climatological studies has been made available in the Ndop plain (North West Cameroon). The average $\delta^{18}\text{O}$ and δD relationship for all the 11 monthly rain samples gives the following regression line that represents the Ndop Meteoric Water Line: $\delta\text{D} = 7.93 \delta^{18}\text{O} + 13.26$ ($R^2 = 0.99$) with a similar slope to the Global Meteoric Water Line (GMWL). The average $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation, which show an amount effect, vary widely from +3.86 and +38.62 ‰ in January (peak of the dry season) to -7.98 and -53.18‰ in September (peak of the rainy season), respectively. The Atlantic Ocean and inland recycled vapor contribute 75 % and 25% moisture, respectively, to rainfall in the Ndop plain.

Groundwater in the Ndop plain, which was of meteoric origin, is rapidly recharged after rainfall by direct heterogeneous mechanism through minor openings in unconsolidated sediments. Approximately 20% of the annual precipitation of 1540 mm (mainly by May-June rainfall) recharges the groundwater, indicating high annual recharge (312 mm/yr). This high amount of recharge is suitable for development of the groundwater resource for agriculture. The qualitative recharge period is estimated between 1980 and 1990 with a mean residence time of 27 years.

Groundwater in the Ndop plain shows a negligible seasonal effect on groundwater chemistry and order of major ions abundance. The major controls on groundwater chemistry in both seasons are silicate mineral dissolution and cation-exchange. Similarities in $\delta^{18}\text{O}$ and δD of same groundwater from both seasons indicate consistent recharge and quality throughout the year. The groundwater is resilient to modern short-term seasonal climatic variations. Nonetheless, with increasing population, controlled groundwater abstraction is recommended.

For the first time, an annual baseline dataset on the physico-chemical composition of rainwater at the Bamenda Highlands has been provided and used to determine the origin of chemical elements, their monthly contributions and suitability of the rain for drinking-water. Rainwater chemistry in the Bamenda Highlands, which is a Ca-Mg- SO_4 -Cl type, is mainly controlled by terrigenous dust from Saharan and Sahelian arid dusts and biomass burning. The contribution from all sources is significant in the light showers of pre-monsoon and post-monsoon than in the heavy monsoon rains. The rainwater is considered potable based on the WHO guidelines.

Stable isotopes indicate that normal and soda springs are of meteoric origin with rapid heterogeneous recharge after precipitation at different altitudes. Spring water

dating at the Bamenda Highlands revealed young (post-1957) and old (pre-1957) apparent ages of normal and soda springs, respectively. The low total dissolved solid (TDS) and short residence time of normal springs indicate short circulation in the shallow aquifer, low water-rock interactions and a renewable resource. Terrigenous origin of SF₆ makes it an unsuitable tracer of groundwater in the region.

論文の内容の要旨

論文題目 「Hydrochemical and Environmental Tracer Characterization of Water Resources in the Ndop Plain and Bamenda Highlands, North West Cameroon, Central Africa」
(カメルーン北西部ヌドップ平原およびバメンダ高原における水環境化学的トレーサーを利用した水資源特性解明)

学位申請者 Wirmvem Mengnjo Jude

キーワード：カメルーン，ヌドップ平原，バメンダ高原，地下水，雨水，安定同位体比トレーサー

カメルーンを含むほとんどのアフリカ諸国において、地下水は生活水の主要な源である。カメルーンは様々な水源に恵まれているものの、増大する人口を賄うために、特に生活水と農業用水は、水源として地下水に強く依存している。しかし、飲料水や灌漑用水としての利用、治水、涵養（再生可能性）、気候変動への対応の点について、カメルーンの水資源はほとんど特性が知られていない。そこで、本研究では、カメルーン北西部のヌドップ平原とバメンダ高原において、主要成分、安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD ）、環境トレーサー（CFCs, SF_6 , ^3H ）のデータを取得し、水源（雨水、地表水、地下水）の特性を初めて解明する。本研究では、ヌドップ平原の乾季（2012年1月）に、101の地表水と地下水を採取し、雨季（2012年9月）に29の地下水を採取した。バメンダ高原では、18の湧水、6つの炭酸泉水を採取した。2012年1月から12月にかけて4地点において、44の雨水の採取を行った。これらの採取した試料は主要成分、安定同位体比、環境トレーサーガスに関して分析を行った。

ヌドップ平原における地表水と地下水の主要成分は WHO による飲料水のガイドラインに示された濃度以下であった。地下水は Na-HCO_3 、 Ca-HCO_3 型の組成であり、雨水（ $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型）が化学的に進化したと解釈された。地下水の塩濃度は低く、灌漑に適している。主要成分はケイ酸塩の風化と岩石に含まれる Na^+ と溶存 Ca^{2+} のイオン交換に支配されている。人間活動による顕著な影響は見られなかった。

ヌドップ平原における最初の試みとして、降水の安定同位体比と Cl^- 濃度の測定を行った。11の月別雨水試料について測定データを $\delta^{18}\text{O}$ - δD 平面にプロットし回帰直線を求めたところ、 $\delta\text{D} = 7.93 \delta^{18}\text{O} + 13.26$ ($R^2 = 0.99$) という関係式が得られた。傾きの値は全地球的な天水直線（GMWL）に近い。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の平均値は大きな季節変動を示し、乾季の1月では、それぞれ、+3.86、+38.62‰であったが、雨季の9月には、-7.98、-53.18‰に低下した。ヌドップ平原では大西洋の水蒸気が75%、内陸の循環した水蒸気が25%の寄与をしていることが明らかとなった。

ヌドップ平原の地下水は、雨水が降水後に堆積層を通じて速やかに涵養されたものである。年間降水量（1540mm）のおよそ20%が地下水を涵養しており、年間の涵養量は312mm/年と見積もられた。このよ

うな大きな涵養率は、この地域の地下水が農業用水の水源として適することを示している。涵養の年代は、1980年から1990年頃と推定され、平均滞留時間は27年であった。

ヌドップ平原の地下水の化学組成はほとんど季節変動を示さなかった。雨季でも乾季でも、主要化学成分を支配する要因はケイ酸塩の溶解と陽イオンの交換であった。安定同位体比は雨季でも乾季でも類似しており、年間を通じて一貫した涵養が起きていることを示した。地下水は現世の短期的な季節変動には左右されない。それにもかかわらず、増大する人口に対応し、地下水の計画的な汲み上げが望まれる。

バメンダ高原では、月毎の雨水量、雨水の化学組成を調べ、化学成分の起源の推定を試みるとともに、雨水が飲料に適しているかを判断した。バメンダ高原の雨水は、Ca-Mg-SO₄-Cl型であり、その成分はサハラ、サヘルの乾燥地域における陸起源の塵や植物の燃焼により影響されていた。雨水中のこれらの成分はモンスーン期の大雨よりも、モンスーン前後の弱い雨で高い濃度を示した。この地域における雨水はWHOガイドラインに基づくと、飲料に適していると判断された。

安定同位体比から、バメンダ高原の湧水と炭酸泉水は異なった高度において凝結した水が降水後に速やかに涵養したものであることが推定された。湧水の涵養年代は、1957年以降であり、炭酸泉水の涵養年代は1957年以前であることが判明した。多くの湧水は溶存成分濃度が低く滞留時間が短い。浅い帯水層では早く循環し、岩石との相互作用は乏しい。このような湧水は再生可能な資源とみなされる。バメンダ高原では陸物質起源のSF₆が存在しており、そのためにSF₆は地下水のトレーサーとしては不適當であると判断された。