

氏名 チャッカム カムチュンク ブライス
Tchakam Kamtchueng Brice

学位の種類 博士（理学）

学位記番号 富理工博甲第 87 号

学位授与年月日 平成 27 年 3 月 24 日

専攻名 地球生命環境科学専攻

学位授与の要件 富山大学学位規則第 3 条第 3 項該当

学位論文題目 Water resources around Lakes Nyos and Monoun along the Cameroon Volcanic Line, Central Africa; Hydrological and hydrogeological framework
(カメリーン火山帯沿いのニオス湖及びマヌーン湖周辺の水資源；地下水の水理・水質に関する研究)

論文審査委員
(主査) 張 劲
上田 晃
加賀谷 重浩
日下部 実
大場 武

Water resources around Lakes Nyos and Monoun along the Cameroon Volcanic Line, Central Africa; Hydrological and hydrogeological framework.

カメルーン火山帯沿いのニオス湖及びマヌーン湖周辺の水資源；地下水の水理・水質に関する研究)

Tchakam Kamtchueng Brice

ABSTRACT

Integrated approach has been used to investigate the hydrological and hydrogeological framework of complex fractured volcanic aquifers. The field of interest comprise the aquifers in the vicinity of Lakes Nyos and Monoun (*Killer Lakes*) located within the Oku volcanoes, near the northern boundary of the Cameroon Volcanic Line in the northwest and west part of Cameroon. Particularly, groundwater is the main source of water supply for multipurpose uses in Nyos and Monoun areas. Despite the great importance of this key resource for people living in this part of the country and since the Lakes' Nyos and Monoun limnic eruptions (in 1984 and 1986, respectively), which led to numerous fatalities, injuries and refugees, the hydrological system "*on the catchment scale*" of Nyos and Monoun areas is poorly understood or totally absent. Additionally, groundwater is being increasingly used in these areas with little or no consideration to its quality, recharge process, residence time and anthropogenic degradation. The lack of the basic and comprehensive data on the water resource in these areas does not only hampers the current understanding of the rule of the hydrological system in the CO₂ flux related issues in both lakes, but also constrains the resettlement process of refugees caused by the disaster and consequently precludes the achievement of the Millennium Development Goal which is intricately linked to the availability and sustainability of water resource.

In this thesis, conventional hydrological field investigations followed by hydro-geochemistry studies, multivariate statistical analysis and environmental tracers

modelling techniques have been used to characterize the water resources in the vicinity of Lakes Nyos and Monoun, in order to provide hydrogeological informations that are needed for development of water resources planning management schemes.

Generally, the water sources in the vicinity of both Lakes Nyos and Monoun are fresh, slightly acidic to neutral and heterogeneous distributed along the hydraulic gradient. They are characterized by the dominance of alkaline earth metals (Ca^{2+} and Mg^{2+}) over alkalis (Na^+ and K^+) with bicarbonate (HCO_3^-) as the most represented anion, given the mixed $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$ as the main water type in the studied catchments. Standard graphical plots of the hydrochemical composition of the water groups combined with multivariate statistical analysis reveal that the dominant processes responsible for the hydrochemical evolution of groundwater in the vicinity of both Lakes Nyos and Monoun are (i) silicate weathering reactions (water-rock-interaction), (ii) dissolution of carbonate minerals disseminated in the granitic bedrock, (iii) ion exchange reactions and (iv) anthropogenic activities.

In Nyos site, the stable isotope data of rainfall provided evidence for rapid recharge process during a very specific period (late June and earlier August, July not included), and negligible evaporation prior to groundwater recharge while the rainfall in Monoun site seems to be subjected to isotopic enrichment through evaporation prior recharge. The seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD for surface and shallow groundwater in Lake Nyos catchment are barely detectable (well-mixed aquifer) but differs from that of soda springs and that of the bottom waters of the lake. Consequently, the hypothesis of hydraulic connectivity between groundwater, soda springs and deep water of Lake Nyos as suggested in previous studies can be excluded. Instead, recharge is likely to take place in southern part of the Lake Nyos catchment between 1100 and 1600 m above sea level as suggested by the annual isotopic altitudinal gradient (-0.24 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ /100 m) and the immature stage (low total dissolved solids) of the groundwater at that location. The effective annual recharge rate of 941 mm/yr (30 % of annual precipitation) has been estimated based on the chloride mass balance method. The chlorofluorocarbons dating revealed young apparent ages of groundwater in the vicinity of Lake Nyos from 21 to 32 (mean of 24) years. The SF_6 based age of groundwater is biased young compared to CFCs

ages, suggesting an additional geogenic origin of SF₆; hence, the use of SF₆ ages is constrained in the region.

Consistent with the isotopic results reported in Lake Nyos catchment, the isotopic and hydrochemical investigations of groundwater around Lake Monoun showed no evidence of hydraulic connectivity between deep waters of Lake Monoun and surrounding groundwater. Moreover, the evidence obtained from the hierarchical cluster analysis (HCA) strengthens the ideas concluded from the groundwater and bottom waters of Lakes relationships. The results of the HCA indicated that CO₂-rich bottom waters of Lakes Nyos and Monoun belongs to an isolated hydrological system within the studied catchments. Therefore, it can be said that the discharge of CO₂ gas which seems to be limited beneath both Lakes has no influence on the chemistry of surrounding groundwater.

With respect to the groundwater quality, a comparison of major concentrations with standards set by two organizations (World Health Organization and Nigerian standards) indicated that groundwater in the vicinity of Lake Nyos is of good quality for human consumption and domestic uses, while in the vicinity of Lake Monoun groundwater partially failed the quality standards with respect to pH, hardness and nitrates. Human related activities such as poor sewer system, spreading of animal manure and use of agricultural fertilizers has been identified as the main factor responsible for the high level of NO₃ in groundwater (especially in shallow wells which are the most used in the area). Quality risk assessment with respect to agricultural uses showed that water sources in the studied areas is of low to moderate salinity and low alkalinity hazard, thus good to excellent quality and can be used safely for irrigation purposes in almost all types of soils.

博士学位論文審査結果の要旨

本研究は、JICA-JST の「地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) : カメルーン火口湖ガス災害防止の総合対策と人材育成」(プロジェクトリーダー：東海大学大場武教授)の一環として、カメルーンからの留学生として富山大学で行ったものである。博士学位論文は、8 章から構成されている。全体の内容は、多量の CO₂ガスを排出して火山災害を引き起こしたカメルーンのニオス湖及びマヌーン湖を中心とし、湖水、周辺の地下水や河川水を 2 度の現地調査を行って採取し、それらの水素・酸素同位体組成や化学組成（主要成分、微量成分）の分析を行った。それらの結果から、2 つの湖の周辺地下水の流動様式や水質変化の原因、CO₂ 流体の寄与について検討を行った。第 1 章は、研究背景で、CO₂ 災害をもたらした湖のカメルーン国内での分布状況や地質環境、対象とするニオス湖とマヌーン湖に関する地質学的研究をまとめた。第 2 章は、特に水理・水質の視点から、深度 200m 程度のニオス湖の帶水層の特徴や経年変化についてまとめている。第 3 章は、調査地域の地下水の湧出地点や地質との関係、気象データや植生との関係について検討を行った。第 4 章は、現地調査での分析方法や分析結果を詳細に検討している。その際、得られた分析データをもとに主成分解析 (PCA) を行い、各成分の関係や地下水の湧出箇所との関連性について議論した。その結果、ニオス湖周辺では、標高が高い地域からの降水に由来しており、周辺岩石との化学反応によって、主要成分が変化していることを見出した。この際、化学成分分析結果から、様々な鉱物の飽和指数を検討し、どの鉱物が反応に寄与しているかを検討し、炭酸塩や斜長石などの鉱物が大きく寄与していることをつきとめている。第 5 章は、マルチトレーサとしての様々な化学成分や同位体成分を用いた地下水の年代の推定とその意義をまとめている。特に、今までデータがなかった降水の δ¹⁸O と δD 値について、毎月の試料採取と分析を行い、乾季と雨季での同位体組成の変化を把握し、調査地域へ供給されている降水の平均値を求めており。また、地下水中の CFCs や SF₆などの近年の人工成分の環境への寄与を利用して、平衡論をもとに、地下水の年代を推定し、調査地域の地下水の滞留期間が、21~32 年であることを推定した。第 6 章は、主としてニオス湖周辺の地下水理解析結果及び飲用水としての地下水の安全性評価を行った。その結果、調査地域に供給される降水の約 30% (941mm) 分が地下水として涵養されていることを推測した。また、第 7 章と 8 章は、これらの結果を総括的に議論して、火山湖としてのニオス湖やマヌーン湖周辺の地下水の特徴と今後への対策の提案を行った。特に、ニオス湖周辺の地下水は、標高 1100~1600m の降水に由来しており、高度効果は δ¹⁸O で、-0.24‰/100m であった。また、ニオス湖やマヌーン湖中の深部の CO₂に富む流体は、深部から供給されており、周辺地下水との関連はないことが結論づけられた。このうち、ニオス湖近傍に湧出している CO₂ガスに富む地下水は、地下の断裂系に沿って、深部の地下水が湧出している可能性が高いことを見出した。

以上の研究内容は、国際科学雑誌へ 5 編公表されており、現在も 2 編の論文を作成中であり、博士学位としてふさわしいと判断される。これらの多大な成果は、SATREPS プロジェクトの 1 つの目的である人材育成の成果でもある。なお、博士学位論文審査には、東海大学の大場教授も参加されている。