

論文の内容の要旨

論文題目 「Geochemical characterization of volcanic lakes: Implication for volcanic hazards monitoring/surveillance along the Cameroon Volcanic Line」
(カメルーン火山列における災害監視活動を目的とする火口湖の地球化学的特性解明)

学位申請者 Issa

キーワード: カメルーン, ニオス湖, マヌン湖, 自然災害, 安定同位体, モニタリング

Lakes Nyos and Monoun gas explosions killed ca 1800 people. The danger stems from the accumulation of magmatic CO₂ which is currently being removed. Except those two, the Cameroon Volcanic Line (CVL) hosts ca 37 other lakes. Excluding other triggering mechanisms, saturation may entrain gas from lakes Nyos and Monoun every about 100 and 30-40 years respectively. Still, there are no evidences of past events among the people who live near the lakes since centuries. The absence traces may mean such events might have never occurred before. This implies, the catastrophes may have resulted from relatively recent seismic and/or volcanic activities which might have entrained significant gas to seep in the lakes. Due to such processes, gas release might migrate from lake to lake as supported by social studies which indicate that, in the Oku region, some ethnic groups might have also suffered lost and destruction from lakes. Accordingly, this study provides baseline data to encourage the implementation of multiparametric monitoring and surveillance of the CVL lakes. It investigates the physico-chemistry, stable isotope, diffuse gas emission and the effect of methane; seventeen lakes, ca 40% of 39 crater lakes are considered. Finally, it advocates for the setting up of a minimum lakes surveillance network.

Major ion chemistry indicates the lakes waters are almost devoid of sulfates and chlorides and rich in bicarbonate justifying their classification as neutral-bicarbonates (NB) type-lakes. The bicarbonate dominance suggests the acidity for rock dissolution is provided by CO₂. The cations derive from water-rock interaction through rock-dominated alteration systems meaning, the mineralization processes is dominantly controlled by the hosting rocks. The fact that the water chemistry could be explained by specific geological formations supports the above assertion. Alike Nyos and Monoun, the other lakes also display thermally and physically stratified water columns the shape of which depends on seasonality and mixing with exogenous water bodies. The waters were generally neutral and their conductivities were close to fresh waters. The

^{18}O and ^2H study also shows that, the waters are meteoric and display stratified pattern with heavy isotope enriched epilimnia. It was also observed that, although the rain gets depleted northward, the lakes instead get more heavy isotopes enriched. Accordingly, the Adamaua lakes are the heaviest. Given that the mean annual temperature in the Adamaua is lower than that in the South, it was concluded that, the temperature-dependent isotopic fractionation might be reversed along the CVL. The lakes Nyos and Monoun bottom most waters were the most depleted in ^{18}O due to fractionation between water and CO_2 molecules; the process would tend to enrich the gas.

This finding could be used as a geochemical monitoring tool for gassy lakes since the induced ^{18}O depletion might imply concomitant CO_2 increase.

In addition to the physico-chemical and isotopic, the study also provides insights on diffuse gas (e.g: CO_2) manifestation in lakes and soil. During periods of quiescence, volcanogenic structures emit significant amount of volcanic gas to the atmosphere, especially CO_2 whose impacts of the global climatic evolution is now well established. This study reports on diffuse gas surveys from 9 lakes (CO_2) and soil (CO_2 , He, Ar, N_2) from Nyos valley and Mount Manenguba Caldera. Results established that, besides lakes that emit CO_2 (diffuse CO_2 -positive lakes) to the atmosphere, there also exist neutral and CO_2 sinks. All taken, the surveyed lakes emit totally ca 28 ton/day CO_2 to the atmosphere; Extrapolate to the 39 CVL lakes, the emission would amount to 75 ton/day of CO_2 , more than double of the per-land output of the Yellow stone volcanic systems. The soil emission would be ca 578 ton/day. At the global scale, the CVL hosts ca 5% of the volcanic lakes of the world and would contribute 0.0035% of the global CO_2 emission. In addition to the diffuse emission, the CO_2 concentration and its origin were also determined. Although in minor concentrations (0.56 mmoles/kg to 8.7 mmoles/kg), several lakes contain magmatic CO_2 as evidenced by the $\delta^{13}\text{C}$ values from -4.42 ‰ to -9.46 ‰ implying that magma continues to degas at depth thousands years after the last eruptive activities as confirmed by the Manenguba Caldera soil gas geochemistry. The ubiquitous presence of magma derived CO_2 in soil and in lakes implies that, future increase to seismic and/or volcanic activities might re-open vents allowing more gas to seep and dangerously accumulate in the lakes. For hazards mitigation and risks management, it is recommended that 1) a minimum network surveillance made up of suitable lakes, 2) in addition to the seismic surveillance gas based monitoring system (CO_2 , Helium, Radon...) could be established to enhance the volcanic activity predictability.

In addition to the study of volcanic gases, the work attempted to assess CH₄ role on the stability of lakes Nyos and Monoun water columns. The results show that, CH₄ concentration is slightly increasing. Given its lower solubility compared to CO₂, current CH₄ increase rate may create instability in the lakes as recently argued for in the case of Lake Kivu which might release gas within the current century. In order to assess its effect, the study proposes a simple, rapid, accurate and cheap method to monitor CH₄.

Finally, in view to set up a minimum volcanic lakes surveillance network, the study attempted to identify the lakes having natural characteristics similar to lakes Nyos and Monoun. In addition to the data generated, depth and area, ca 24 parameters were used to group the lakes and subsequently identify the parameters that most account for the variance. The results highlighted the peculiarity of the gassy lakes. However, Lake Benakuma, the third deepest lake (after Nyos and Manenguba female) was identified as the one that most resembles the gassy lakes. Bicarbonate was the parameter that most accounted for the similarity/difference among the lakes.

論文の内容の要旨

論文題目「Geochemical characterization of volcanic lakes: Implication for volcanic hazards monitoring/surveillance along the Cameroon Volcanic Line」
(カメルーン火山列における災害監視活動を目的とする火口湖の地球化学的特性解明)

学位申請者 Issa

キーワード：カメルーン，ニオス湖，マヌン湖，自然災害，安定同位体，モニタリング

ニオス・マヌン湖のガス放出は1800人の犠牲をもたらした。災害の原因は湖に供給されるマグマ起源の二酸化炭素 (CO_2) の蓄積であり、現在は除去されつつある。ニオス・マヌン湖以外に、カメルーン火山列 (CVL) には37の火口湖が分布している。ガス放出の引き金がなければ、ニオス湖とマヌン湖ではそれぞれ100年、30~40年で CO_2 が溶解度の限界に達してしまうと考えられている。湖の周辺には何百年も前から人々が住んでいるが、過去には同様の災害が起きた証拠はない。したがって、ガスの放出による災害は、比較的最近の地震の影響あるいは火山活動の結果、大量のガスが湖に供給されたことが原因なのかも知れない。このように考えると、ガスの放出が起きた湖は時代により移動したのかも知れない。民族学的な調査で明らかになったように、オク火山地帯では、実際にいくつかの民族の集落が湖によって失われたらしい。そこで、本研究では、CVLに分布する湖の、多項目監視活動の基礎となるデータを取得することを目的とする。本研究では、37の湖の40%に相当する17の湖を研究対象とし、湖水の物理化学、安定同位体比、拡散的ガス放出、メタンの影響について考察する。最後に最低限必要な湖監視活動の取り組みについて提案を行う。

ニオス・マヌン湖の水の主要なイオンは炭酸水素イオンであり、硫酸イオン、塩化物イオン濃度は極めて低い。炭酸水素イオンが陰イオンとして優勢であることは、湖水の酸性は CO_2 の溶解によりもたらされたことを示している。湖水の陽イオンは岩石-水作用で供給されると考えられる。水質が特定の地層により説明されることは上述の推定を支持する。ニオス・マヌン湖と同様に、他の湖でも熱的あるいは物理的な性質に関し、水の成層構造が存在し、その形は季節的に変化し、外来水の影響を受けている。概して湖水は中性であり、電気伝導率は低く、淡水の特徴を示す。水の ^{18}O と D 濃度から、湖水は天水起源であり、表層水はこれらの同位体について濃集した層構造が見られる。一般に高緯度の天水は同位体比が低いですが、CVLに沿った湖では、逆に高緯度の湖に同位体比が高い傾向がみられ、北部のアダマワ湖では最高の同位体比を示した。アダマワ湖の地域における降水量は南部よりも低く、蒸発にともなう同位体比分別の影響が大きいと考えられる。ニオス・マヌン湖の水は底部で最も ^{18}O に乏しく、水と CO_2 の間の同位体分別が影響しているのかも知れない。水- CO_2 間では CO_2 に ^{18}O が分配し易い。このことは、ガスに富む湖の地球化学的監視活動に利用できる。すなわち、水の ^{18}O の低下は、 CO_2 の増加を意味するのかも知れない。湖水の物理化学および安定同位体比に加え、本研究では、湖水と周辺土壌における拡散的放出ガスを追跡した。火山活動が静穏な時期に火山体は相当量の火山ガス、特に CO_2 を放出し、これが地球の気候に影響を与えることがよく知られている。本研究では9つの湖で湖水からの CO_2 の拡散的放出とニオス谷とマゲンヌバ

山カルデラにおける土壌ガス (CO_2 , He, Ar, N_2) を調査した. その結果, CO_2 を放出する湖に加えてまったく放出がない湖, 逆に CO_2 を吸収する湖が見いだされた. 調査した湖から大気への放出量を総合すると 28 ton/day となり, 39 の湖に外挿すると 75 ton/day となる. 土壌からの CO_2 放出は, 578 ton/day であった. CVL には世界の火口湖の約 5% が存在し, 全地球の CO_2 放出量の 0.0035% が放出されていると考えられる. 拡散放出量に加え, 溶存 CO_2 の濃度とその起源についても調べた. 濃度は, 0.56~8.7 mmol/kg と低いものの, いくつかの湖では $\delta^{13}\text{C}$ の値が, -4.42 ‰~-9.46 ‰であり, マグマに起源する CO_2 を含んでいることを示した. マゲンヌバカルデラでは最後の噴火から数千年が過ぎているにも拘わらず依然としてマグマの脱ガスが継続していることを暗示している. マグマ起源の CO_2 が土壌や湖水に幅広く分布していることは, 将来, 地震活動や火山活動によりガスの通路が再開した場合, 多量のガスが放出され, 湖水に蓄積する危険性がある. 災害防止とリスク管理のために, 以下のことが望まれる. 1) 特定の湖に対し, 最低限の監視活動ネットワークを構築する. 2) 地震観測ネットワークに加えて, ガス観測 (CO_2 , He, ラドン等) による監視活動を行う.

火山ガスの研究に加え, ニオス・マヌン湖の水に溶存するメタン (CH_4) の役割について調べた. CH_4 は CO_2 に比べて水に対する溶解度が低いため湖水分層構造の不安定化をもたらすかもしれない. アフリカ東部のキブ湖では, 今世紀内に CH_4 による影響でガス放出があり得ると懸念されている. CH_4 の効果を評価するために本研究では現場で結果が得られるシンプルで迅速なモニタリング法を開発した.

最後に, 必要最低限の火口湖モニタリングネットワークを構築するため, ニオス・マヌン湖に類似する特性を有する湖の探索を行った. 調査で得たデータに加え, 湖の深度と面積を加え, 24 のパラメータで統計学的に類似性を評価し, どのパラメータが類似性に寄与しているのか検討した. その結果, ニオス・マヌン湖のようなガス成分に富む湖は特異であることが証明され, 高深度のベナクマ湖はニオス・マヌン湖に類似性が最も高いことが示された. 類似性に最も寄与する湖水のパラメータは, 炭酸水素イオン濃度であることが示された.