



特別講演

ニオス湖ガス災害—原因の解明と防災対策—

日下部 実¹⁾

(平成 28 年 12 月 23 日受付, 平成 28 年 12 月 26 日受理)

Lake Nyos Gas Disaster ; Its Cause and Preventive Measures for Recurrence

Minoru KUSAKABE¹⁾

要 旨

1980 年代半ばにカメルーン (中央アフリカ) にある火口湖のニオス湖およびマヌーン湖で発生したガス災害について, 1986 年以来継続的に行われてきた現地調査の結果に基づいて, 原因は湖に過度に蓄積したマグマ性 CO₂ の噴出 (湖水爆発) であることが明らかになった. 原因が解明されたことを受けて, 防災対策としてガス抜きが行われ, その結果, 現在は両湖ともガス濃度が低下し, 湖水爆発が近未来に再発する恐れはないと判断される. しかし, マグマ性 CO₂ ガスが現在も湖に供給され続けていることが分かっており, 湖水爆発再発の可能性があり得ることが指摘された. このような状況がある以上, 今後とも, 両湖のモニタリングを欠くことはできない.

I. はじめに

中部アフリカ西岸には大西洋のギニア湾から内陸に向かって, カメルーン—ナイジェリア国境沿いに南西—北東方向にのびるカメルーン火山列がある (図 1). この火山列は地質学的に非常に若いアルカリ玄武岩を主体とする火山群からなる. この火山列の走るカメルーン西北部には 39 の火口湖が点在する. 1986 年 8 月にカメルーンで発生したガス災害は, それまでに知られていない全く新しいタイプの自然災害であった. ニオス湖という火口湖から突如として大量のガスが噴き出し, 周辺の住民 1,746 人と多数の家畜の命を奪ったのである. 想像を超えたこの災害はマスコミに大きく取り上げられるとともに, 世界中の地球科学研究者の関心を呼んだ. 発生直後は原因がはっきりしないまま, 様々な説が流布した. この事件のちょうど 2 年前の 1984 年 8 月にも, ニオス湖の南東 100 km にあるマヌーン湖 (やはり火口湖) で, 小規模ながらニオス湖事件と状況の酷似したガス事故 (死者 37 人) が発生していた. 本稿ではニオス湖とマヌーン湖で起こったガス災害の化学的知

¹⁾ 富山大学理学部 〒930-8555 富山県富山市五福 3190. ¹⁾ Faculty of Science, University of Toyama, 3190, Gohoku, Toyama-city, Toyama, 930-8555

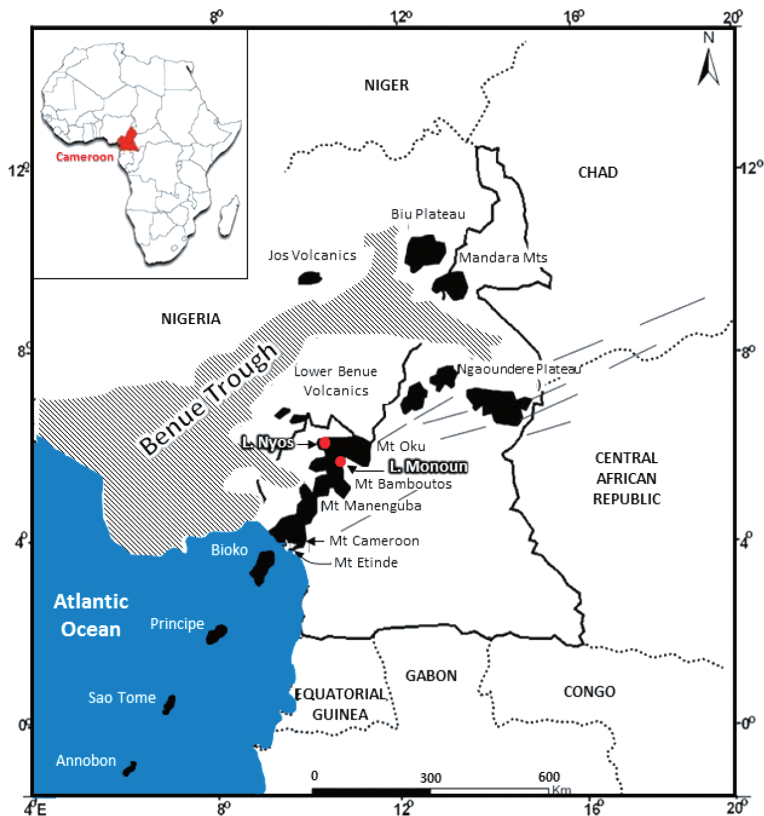


図 1 カメルーン、カメルーン火山列（黒い塗りつぶし）およびニオス湖・マヌーン湖（赤印）の地理的位置。この図は Kamtchueng *et al.* (2015) の図 1 を借用した。また Kusakabe (2017) にも使用されている。

見をまとめて述べることにする。その後の研究の過程で、湖からガスが噴出する現象に対して「湖水爆発」(英語では“limnic eruption”)という言葉が用いられるようになった。ここでもこの言葉を用いる。湖水爆発直後の現地における状況は日下部 (2010) および Kusakabe (2017) にまとめられている。

ニオス湖はプレカンブリア紀の基盤花崗岩を貫いて噴出した玄武岩火山活動によって生じた火口湖(マール)である。最後の活動は地質学的には~8000年前ときわめて若い(Aka and Yokoyama, 2013)。同湖は次のような特徴を持つ。表面積は1.58 km²、体積は0.15 km³の小さな湖であるが、深さは209 mのバケツ状構造を持つ。最近の化学的・物理的状況はKusakabe *et al.* (2008) および Kusakabe (2017) にまとめられている。図2に1986年から2000年初頭までのマヌーン・ニオス両湖の電気伝導度プロファイルを示した。(1)湖水は化学成層しており、上下混合のある表層部(Layer I)、溶存物質が漸増する中層部(Layer II)、比較的变化の少ない深層部(Layer III)、および電気伝導度が急増する底層部(Layer IV)に分けられる。表層部以外は嫌氣的(無酸素)である。(2)溶存物質の中では溶存CO₂およびHCO₃⁻イオンが圧倒的に多く、陽イオンはFe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺が卓越する。水温、溶存イオンおよび溶存CO₂濃度は電気伝導度(図2)と同様な深度分布を示す。(3)後述するように、炭素同位体比(¹³C/¹²C比)およびヘリウム・アルゴン同位体比(³He/⁴He比、⁴⁰Ar/³⁶Ar比)測定から、溶存CO₂ガスはマントル起源であり、玄武岩マグマから供給されていることが分かっ

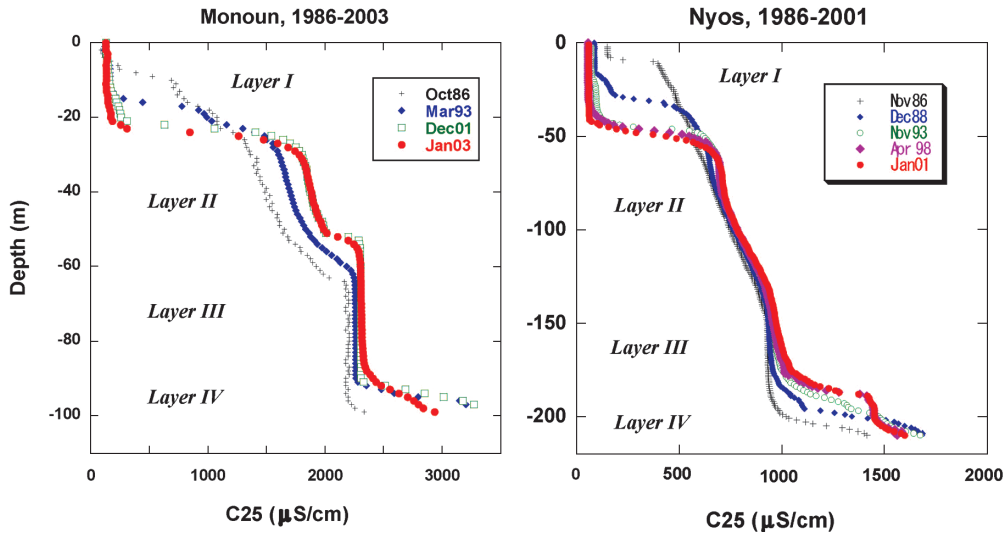


図 2 マヌーン湖（左側）とニオス湖（右側）の典型的電気伝導度プロファイル。データはそれぞれ 2003 年および 2001 年に得られた (Kusakabe *et al.*, 2008)。電気伝導度は 25°C での値に規格化してある。この図は Kusakabe (2017) に使用されている。

ている (Kling *et al.*, 1987, Sano *et al.*, 1987, Kusakabe *et al.*, 1989)。(4) 1986 年以来、底層の水温、溶存イオン濃度および溶存 CO_2 濃度が、いずれも、有意にかつ着実に増加し続けてきた (図 2 および Kusakabe *et al.*, 2008, Kusakabe, 2017)。マヌーン湖はニオス湖より規模が小さいものの、基本的にはニオス湖と同じ化学的・物理的特徴を有する。これらの湖では湖底から二酸化炭素を多量に含む塩濃度の高い温水がいわば温泉水として湧出していると思われる。(5) 湖水爆発の原因として、長期間にわたって湖底から炭酸泉の形で供給された二酸化炭素が高濃度で底層水に過度に蓄積し、ある深さで飽和濃度を越えたために気相として遊離し、一挙に噴出したと考えられる。この一連のプロセスおよびメカニズムは Kozono *et al.* (2016) Kusakabe (2015) および Kusakabe (2017) により考察が加えられている。(6) 両湖とも、溶存 CO_2 量が 1986 年以降も増加し続けていることから湖水爆発の再発が危惧され、防災対策として 2001 年頃から人為的なガス抜き工事が開始された。

本稿では、上記の項目について現在までに得られた知見をまとめた。この研究は、災害原因の究明、それに基づく防災対策の提言、防災事業の実施、国際共同研究へと発展し、「問題解決型地球化学」として特筆される。

II. CO_2 ガスの起源

すでに述べたようにニオス湖とマヌーン湖の深層水の CO_2 濃度は非常に高い。この CO_2 の起源を知るために炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比または $\delta^{13}\text{C}$) とヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) とアルゴン同位体比 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比) を測定した。その結果を図 3 に示した (Data from Nagao *et al.*, (2010))。深層水から分離・回収した CO_2 ガスの $\delta^{13}\text{C}$ 値はニオス湖で -3.4% 、マヌーン湖で -6.8% であり、マグマ起源を示唆した。深層水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比および最大の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比は、ニオス湖でそれぞれ $\sim 5.7\text{ Ra}$ および 610、マヌーン湖で $\sim 3.7\text{ Ra}$ および 480 であった (Ra は大気ヘリウムの同位体比 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$ に対する相対比を表す)。大気値に比べると両比とも十分に高い。上部マントル起源の MORB ガス中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は $\sim 8 \pm 1\text{ Ra}$ (Graham, 2002), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比は > 1650 (Barfod *et al.*, 1999)

であることが知られている。ニオス湖とマヌーン湖の値はこれらのマントル起源ガスの値より低い
が、ニオス湖下部の上部マントルは $^{206-208}\text{Pb}$, ^{143}Nd , ^{87}Sr , $^{235-238}\text{U}$ など放射性起源の同位体に富んでおり、
そのため、そこで発生するニオス湖火山および周辺火山を形成したマグマの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は
MORBの値より低い (Aka *et al.*, 2004)。また、両湖に供給されている“温泉水”の起源はガス成分を
除いて地下水であるから (Kusakabe *et al.*, 1989, Kamtchueng *et al.*, 2015)、地下水に溶け込んでいた
大気起源の He や Ar の寄与のためにマントル起源ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比や $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比がさらに低めら
れる結果になったものと考えられる。

III. CO₂ の蓄積とガス抜き

ニオス湖とマヌーン湖では 1986 年以來、ほぼ継続的に溶存 CO₂ 濃度のプロファイルが計測されてきた。図 4 に 1986 年からガス抜き開始 (2000 年代初頭) までの両湖の溶存 CO₂ 濃度プロファイルを示した。この図から、深層水の CO₂ 濃度が時間とともに高くなっていること、かつ、深層水の厚みが増してきたことが分かる。これらの増加は湖底から供給されている炭酸泉が底層部分に付け加えられつつあることを示している。マヌーン湖では 2001 年に深度約 55 m での CO₂ 濃度とその深さにおける CO₂ 飽

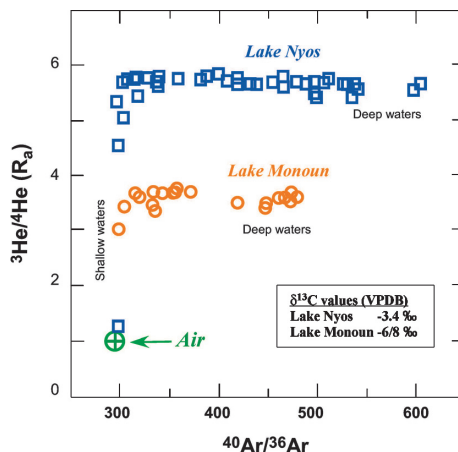


図 3 ニオス湖およびマヌーン湖に溶存するガス中のヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) とアルゴン同位体比 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) の関係。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は大気ヘリウムの同位体比 ($=1.4 \times 10^{-6}$) に対する相対値 (R_a) で表示してある。測定点は深層水が示唆するマグマ性ガスと大気との混合曲線上にのる。炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, VPDB を基準) も図中に示した。希ガスのデータは Nagao *et al.* (2010) による。

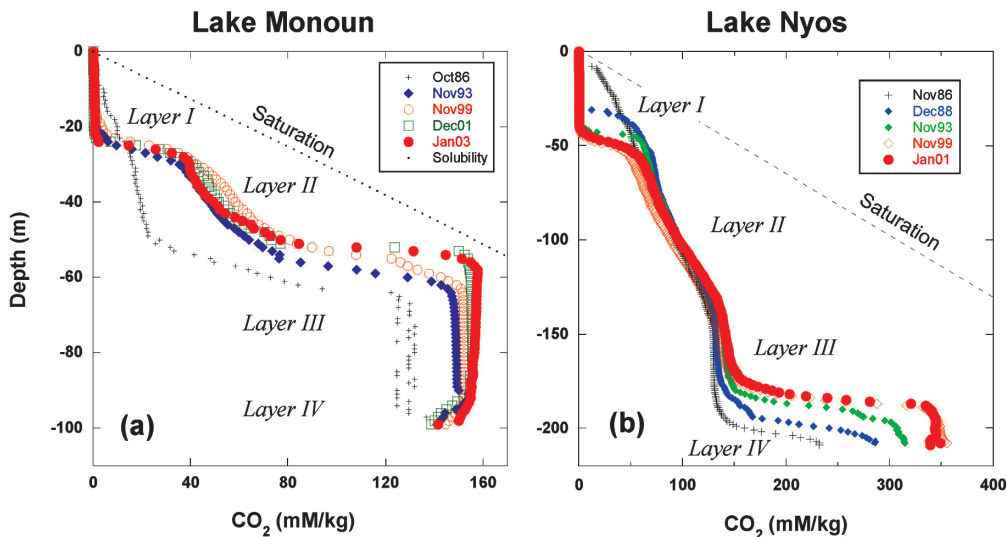


図 4 マヌーン湖 (左, 1986-2003) とニオス湖 (右, 1986-2001) における溶存 CO₂ 濃度プロファイルの時間的変遷。25°C での CO₂ 飽和曲線が点線で示してある。Kusakabe *et al.* (2008) の図 4 および 9 を色別に描き直した。マヌーン湖では 2001 年ころに深さ約 55 m 付近の CO₂ 濃度が飽和に近いことに注意してほしい。この図は Kusakabe (2017) にも使用されている。

和濃度にきわめて近づいていることが分かった (図 4a)。2001 年までの深層水の厚みの増加速度を考えると、その後、数年以内に CO₂ 濃度が飽和曲線を超過して発泡 (ガスバブルの発生) が始まることが予想された。発泡はおそらく湖水爆発を誘発するであろうから、これを避けるためにマヌーン湖のガス濃度を低下させる必要があった。2000 年からガス抜き対策プロジェクトが開始され、2001 年にはニオス湖に、2003 年にはマヌーン湖にガス抜きパイプが設置された (Halbwachs *et al.*, 1993, 2004)。湖底ぎりぎりの深さまで直径 15 cm のプラスチックパイプを挿入し、パイプ内部の水

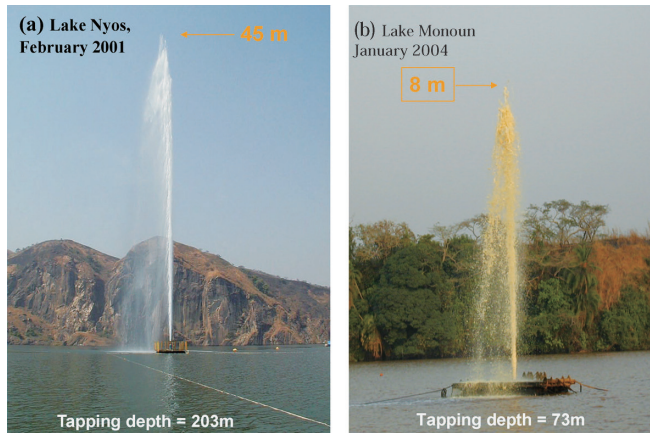


図 5 ガス抜きパイプから吹き上がる深層水の写真。ニオス湖の噴水の高さは 2001 年に 45 m に達した。マヌーン湖では 2004 年 1 月に 8 m であった。パイプの取水深度は、それぞれ、203 m と 73 m。

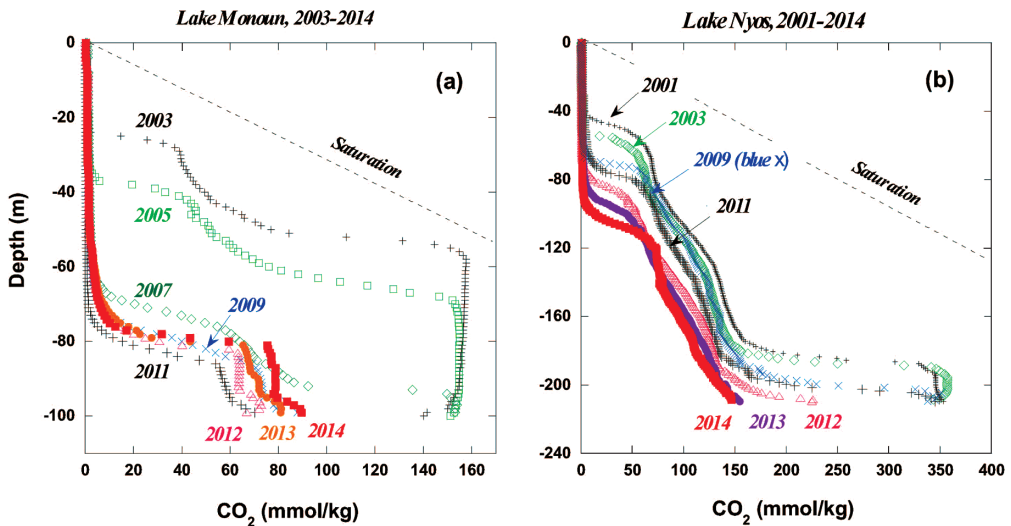


図 6 ガス抜き進行中のマヌーン湖 (左, 2003-2014) とニオス湖 (右, 2001-2014) における溶存 CO₂ 濃度プロファイルの時間的変遷。25°C での CO₂ 飽和曲線が点線で示してある。Kusakabe *et al.* (2008) の図 5 と 11 に 2011 年以降のデータ (大場, 私信) を追加し年ごとに色分けで示した。マヌーン湖では 2012 年以降、深層水の CO₂ 濃度が上昇に転じ、ガスの蓄積が再開したことを示している。ニオス湖では最深部の CO₂ 濃度が、今、150 mmol/kg にまで減少した。この図は Kusakabe (2017) にも使用されている。

を吸い上げると CO₂ 濃度の高い底層水がパイプ内部を上昇する。一定の深さまで底層水が上昇するとパイプ内部で飽和が達成し、発泡が始まる。発泡により密度が劇的に低下する結果、ガスと水からなる 2 相流がパイプ出口から勢いよく噴出する。図 5 はガス抜き開始当時の見事な噴水の様子を示す。温泉の掘削でよく使われる“ガスリフト”の応用であるが、カメルーンの湖の場合、底層水に含まれる CO₂ そのものが水をリフトさせるポテンシャルなので、外部からエネルギーを持ち込む必要がなく、底層水の CO₂ 濃度が高い限りガス抜きは継続する。この作戦はうまく行き、両湖の CO₂ 量を減らすことに成功した。ガス抜き開始以降 2014 年までの両湖の溶存 CO₂ 濃度プロファイルを図 6 に示した。この図から、CO₂ プロファイルは順調に低下（達磨落としのように下方にシフト）し、かつ最深部での CO₂ 濃度も大きく低下したことが分かる。その結果、噴水の高さも著しく低下した。2011 年のマヌーン湖では最高 CO₂ 濃度は約 70 mM/kg にまで低下し、ガス抜きパイプはそのガスリフト機能を停止した。その結果、2012 年、2013 年、2014 年には最深部における CO₂ 濃度は増加に転じ、高 CO₂ 濃度層の厚みもわずかに増加している。このことから、今も湖底からのマグマ性 CO₂ の供給が続いていることが確認された。将来における湖水爆発再発の可能性を示唆する観測結果である。しかし、湖水爆発が起こったとしても災害に至るような危険性は溶存しているガスの全量に依存する。現在の状況から判断すると、マヌーン湖における湖水爆発再発の可能性は今では低いと判断される。

図 7 は 1986 年以降 2014 年までの両湖における全溶存 CO₂ 量の経年変化を示している。ガス抜きが開始されるまでは両湖とも全溶存 CO₂ 量が着実に増加しており、その増加速度から、湖底に供給される CO₂ 量はマヌーン湖で 8.4 Mmol/yr、ニオス湖で 0.12 Gmol/yr と推定された (Kling *et al.*, 2005, Kusakabe *et al.*, 2008)。上に述べたように、2010 年以降、ガスリフト機能が停止したマヌーン湖では底層での溶存 CO₂ 量が有意に増加しており、増加速度はガス抜き前のそれを下回っていると思われるが、CO₂ の供給が続く限り湖水爆発の再発が懸念される。この懸念を完全に払拭するためにはマヌーン湖の底層水を除去すべきで、ガスリフト機能によらない底層水除去システムが提案され、実行された (Yoshida *et al.*, 2010, 2016)。このシステムはガスリフト機能の停止したパイ

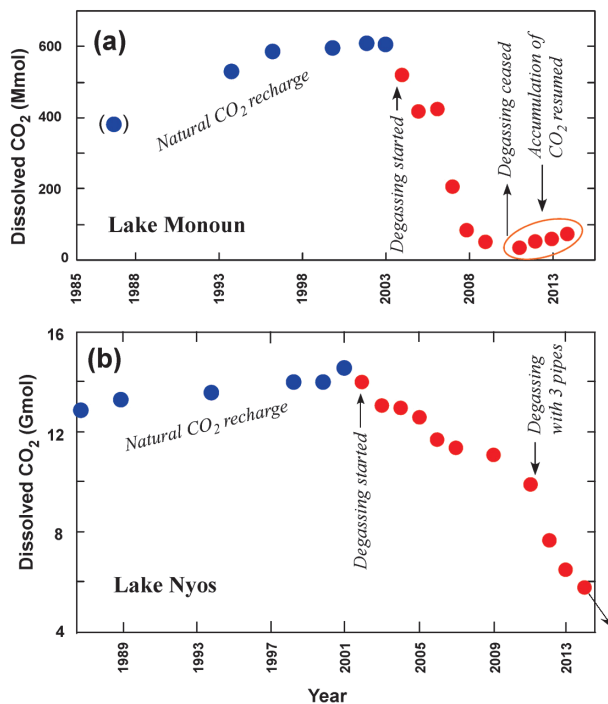


図 7 マヌーン湖 (a) およびニオス湖 (b) における全溶存 CO₂ 量の時間的変遷。Kusakabe *et al.* (2008) の図 6 と 12 に 2011 年以降のデータを追加した。青のマークはガス抜き前のものを、赤のマークはガス抜き進行中のものを示す。マヌーン湖では 2011 年以降、全溶存 CO₂ 量が明らかに増加している。増加速度は ~4.8 Mmol/yr と見積もられる。これはガス抜き前の CO₂ recharge (8.4 Mmol/yr) より少ないが、より正確な見積もりには更なる観測を要する。ニオス湖では 2001 年に 2 本のガス抜きパイプが追加されてガス抜き速度が増加し、今後、数年以内に全溶存 CO₂ 量が極小化すると思われるが、その後はマヌーン湖で見たようなガス量の増加が予想される。この図は Kusakabe (2017) にも使用されている。

ブを利用し、その中に太陽発電を電源とするロータリーポンプを組み込み、常に（昼間だけ）底層水を汲み出す仕掛けである。カメルーンの遠隔地のような電源の得にくい場所に適した防災設備とすることができる。図7から分かるように、ニオス湖における全溶存CO₂量も着実に減少しており遠からず（～2020年？）溶存ガス量は極小になると予想されるが、ここでもマヌーン湖で観測されたようにガス抜き機能の停止とマグマ性CO₂の継続的供給に伴い、溶存CO₂量の増加が予測される。したがって、ガスリフト機能の停止後のニオス湖にも太陽発電を利用した底層水除去システムの設置が強く望まれる。

IV. 湖水爆発のメカニズム

湖水爆発のメカニズムについては災害直後から様々なアイデアが提出されてきた。例えば、急斜面の湖岸でのがけ崩れが湖水爆発を引き起こした (Sigurdsson *et al.*, 1987, Kling *et al.*, 1987), 非常に浅い部分でのCO₂ガスの過飽和が発生した (Tietze, 1987), 全層がCO₂ガスに飽和した (Kanari, 1989), CO₂に関して過飽和状態になった表面の密度躍層部分 (約23m深) から発泡が開始し、徐々に深い部分の水を巻き込んで大規模な湖水爆発に至った (Evans *et al.*, 1994), 災害発生直前に大量に降った低温の (したがって密度が高い) 降水が沈み込んで、CO₂ガス濃度の高い中層水を追い出した (Giggenbach, 1990), などがある。筆者は“自発的湖水爆発説”の立場をとっている (Kusakabe, 2015, 2017)。その根拠は図4にある。湖水爆発が起きるためにはどこかの深さで飽和溶解度に達している必要がある。CO₂に富んだ溶液が湖底から供給され続けられれば、ある深さでのCO₂濃度プロファイルが“自然に”かつ“いつのまにか”飽和溶解度曲線に達する。これに近い状況がマヌーン湖で実際に観測されている (図4)。しかし、CO₂濃度が飽和溶解度を越えたからといって、直ちに湖水爆発が発生するとは限らない。過飽和の、いわば“臨界”状況を作り出す“何らかの過程”が必要である。何らかの過程は飽和しているCO₂層を上方に持ち上げるようなプロセスならば何であってもよい。例えば、がけ崩れに伴う深層水の押し上げ、低温表面水の潜り込み、表面からの外力 (例えば、強風) によって生じる内部波の振動、などが考えられる。Kozono *et al.* (2016) は、飽和した層からCO₂の泡が発生した場合、泡がブルームとなって高い流速を維持したまま表面に達することができることをコンピューターによる数値計算により再現した。つまり、“自発的”湖水爆発のモデリングである。ニオス湖とマヌーン湖の場合、恐らくは一定CO₂濃度 (ニオス湖では～350 mmol/kg, マヌーン湖では～155 mmol/kg) の溶液が湖底から継続的に供給され、その濃度を持った層が厚みを増しつつ上方に向かって成長したと考えられる。この様子を図8に模式的に示した。1986年11月 (湖水爆発直後) のCO₂プ

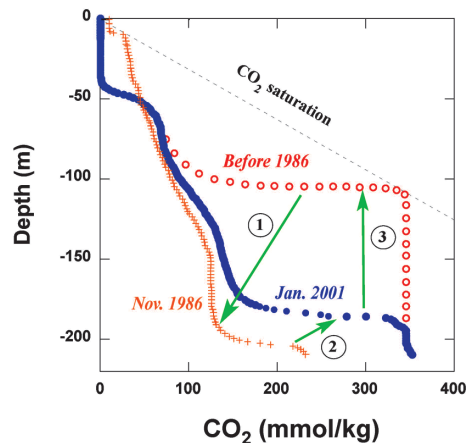


図8 “自発的湖水爆発説”のモデル図。湖水爆発が発生する前のCO₂プロファイル“Before 1986”として示した。1986年の湖水爆発 (process 1) の後は“Nov. 1986”のプロファイルになった。その後、実際に観測されたように、湖水のCO₂濃度は高まり続け (process 2) 2001年1月のプロファイルになった。もし、CO₂の供給速度が0.12 Gmol/yrのまま不変であれば (process 3), おおよそ120年後に“Before 1986”のプロファイルが再現し、約100mの深さで飽和になり“湖水爆発”が再発するかもしれない。この図はKusakabe (2017)の図30を採録した。

ロファイルを出発点とすると、15年後の2001年にはプロファイルに示されるように深層水のCO₂濃度が高くなり、かつ深層水の厚みが増したことを示している(プロセス2)。CO₂濃度が~350mmol/kgの溶液が供給され続けたとすると、この濃度のLayer IIIの厚みが増し続け、ついには、その上端が約100mの深さで飽和溶解度曲線に接する状況が生じるであろう(プロセス3)。この後は上に述べたように湖水爆発の発生(プロセス1)に至る。上に述べた解釈では、供給源である炭酸泉のCO₂濃度が時間とともに変化しないということを仮定している。しかし、自然界はそれほど単純ではないかもしれない。この仮定の確からしさを知るにはさらに長期にわたる観測が必要であるが、それは容易ではない。マグマの寿命、つまりCO₂ガスを供給し続ける期間はわれわれに許されている時間よりもはるかに長い。しかし、現に湖水爆発があったし、今後も発生する確率が高い。言い換えると、湖水爆発には“反復性”があるということである。反復性があれば、その発生間隔はどの程度なのであるか?ニオス湖の場合、湖水爆発でガス量を減らした湖に湖底からのCO₂供給速度0.12ギガモル/年が120年間続けば、図8に描かれたプロセス3により“1986年以前”のCO₂プロファイルに到達するであろう。つまり、発生間隔は約120年になる。

およそ120年という反復期間が正しければ、地元には過去の湖水爆発に関する記録が残されているのではないと思われるが、この地域では過去の出来事に関する文字記録がなく、過去の湖水爆発の有無を資料で確認することはできない。しかしながら、この地域に古くから伝えられてきた“伝承”によれば、1986年に起きたガス災害のような突発的な事件によって多くの人々が犠牲になったことが窺われる。カメルーンの北西部はいわゆるサバンナで、森林でもなく砂漠でもない。このような地域に何千年も前から30以上の部族が住んでいた。これらの部族は固有の言語や風習を持つ。彼らは歴史的に移動を繰り返してきたが、移動のきっかけになったのは、それまで住んでいた場所にある湖が何か異常な状況に立ち至ったからであるとする伝承が多い。ニオス湖ガス災害の後、そのような伝承を積極的に調査した研究者がいた。彼女の論文(Shanklin, 1992, 2007)に書かれている伝承の一つの概要を以下に示す。

コム族にまつわる話

コム(Kom)族の人々が、バミシ(Bamessi)という地域の支配者(フォンという)の許しを得て、バミシに移り住んできた。そのうちコム族の勢力が強くなって、もともと住んでいたバミシ族と対立し始めた。そこで、バミシの族長が一計をめぐらし、コム族の族長に、“最近、若者がわれわれの言うことを聞かなくなってきたので、若者たちを家に閉じ込め、家ごと燃やしてしまおう”と提案した。しかし、バミシの族長は狡猾で、彼が建てた家には裏口が作られており、火事の時にバミシの若者たちは逃げ出すことができた。一方、コム族長の建てた家は、入り口が一つで、かんぬきがかけていたので、コム族の若者は皆殺しになってしまった。コム族の族長はこの奸計に気づき、復讐を誓った。彼は妹を呼んで曰く、“わしは首を吊って死ぬ。われわれコム族の連中はわしの死体を下ろしてもいけないし、そばに近付いてもいけない。何が起るかひたすら見守るべし。そのうち大蛇の通った跡が現れる。その跡をたどって行けばコム族の新しい土地に行くことができるであろう”。コム族の人たちは遺言を守った。遺体から滴り落ちた液体は、やがて湖になった。遺体にたかった蛆虫は湖に落ちて魚になった。バミシ族の人たちは湖の誕生を喜び、族長に知らせた。族長は日を決めて人々に湖に行って魚を獲るように言い、人々は、初めは族長のために、その後は自分たちのために魚獲りに励んだ。この時、コム族の人たちは湖畔でバミシ族の人たちを眺めていた。その時、湖が“爆発”し、バミシ族の人たちは一瞬に消え失せてしまった。かくしてコム族長の呪いは実現し、バミシ族はほとんど壊滅した。生き残った2人のバミシ族が丘の上から見つめていると、大蛇の通り道が現れ、コム族はその道を西に向かって移動し、今彼らが住んでいる土地に落ち着い

たという。

“コム族にまつわる話”に似た話は1930年代にすでにあったという。サバンナに住む人々にとって川や湖は恐怖の対象であった。湖には精霊が棲み、水はあるときは神秘的であり、あるときは気まぐれで懲罰的な性質を持つと信じられていた。上に述べた伝承は科学的証拠として採用するにはほど遠いけれども、湖が劇的な、かつ恐ろしい変化を遂げ、湖が住民に対して害をなすという点で湖水爆発が過去にもあったことを示唆するものであり、これらの伝承は興味深い（日下部, 2010, Kusakabe, 2017）。

V. SATREPS

“SATREPS”とはThe Science and Technology Research Partnership for Sustainable Developmentの略語で、地球規模課題の解決と将来的な社会実装に向けて、日本と開発途上国の研究者が共同で研究を行う3~5年間の研究プログラムである。科学技術振興機構（JST）と国際協力機構（JICA）が共同で実施している（<https://www.jst.go.jp/global/about.html>）。ニオス湖・マヌーン湖でのガス災害はカメルーンで発生した自然災害であり、その再発防止等に向けた対策は、本来、カメルーン政府が実施すべき立場にあると筆者は考えるが、現実問題として、同国の政治・経済的事情からその実施には限りがある。そこで、我々はSATREPSに応募し、2011年に採択された。代表者は大場武東海大教授、課題名は‘Magmatic Fluid Supply into Lakes Nyos and Monoun, and Mitigation of Natural Disasters through Capacity Building in Cameroon’で、2016年3月に終了した。主たる目的は、課題名にあるように、人材育成を通じてカメルーンの防災科学の進展に寄与することにあった。具体的には、同国の若く優秀な研究者（修士卒）を日本に招聘し、ニオス湖・マヌーン湖ガス災害に関連したテーマで研究を進めて博士の学位を取得してもらうことにあった。研究に必要な化学分析機器やフィールド用機材も同時に供与し、今後の湖の観測に役立てるようにした。この意図は功を奏し、多くの学術論文が公表された。公表された学術論文の数は多く、ここにすべての文献名等を掲げることができないが、その詳細はKusakabe (2017)に記載されている。このプログラムを通じてカメルーンの防災科学の底上げを図ることができた。しかし、学位を取得して帰国した人々が、ニオス湖・マヌーン湖ガス災害の再発防止やガス噴出の根本的原因の解決に直接関連した仕事を継続できているかは疑わしい。彼らにその能力を生かすことができるような職をカメルーン政府が提供することが難しかったからである。とはいえ、上に述べてきたように、湖のモニタリングを続ければ、湖水爆発の再発の危険性を予知できるので、カメルーン研究者がモニタリングを継続することを願う。同国における自然災害は湖水爆発だけではない。SATREPSを通じて防災科学に関心を深めたであろう若手研究者の努力に期待したい。

VI. 謝 辞

本稿は2016年9月に富山県砺波市で開催された日本温泉科学会第69回大会での特別講演の内容をまとめたものである。この機会を与えてくださった杉森賢司氏に感謝する。また、CO₂分析はSATREPSのリーダーでもあった大場武氏に負うところが多い。

引用文献

Aka F.T. and Yokoyama, T. (2013) Current status of the debate about the age of Lake Nyos dam (Cameroon) and its bearing on potential flood hazards. *Nat. Hazards*. **65**, 875–885, DOI

- 10.1007/s11069-012-0401-4.
- Aka F.T., Nagao K., Kusakabe M., Sumino H., Tanyileke G., Ateba B., and Hell J. (2004) Symmetrical helium isotope distribution on the Cameroon Volcanic Line, West Africa. *Chem. Geol.* **203**, 205–223.
- Barfod, D.N., Ballentine, C.J., Halliday, A.N., Fitton, J.G., (1999) Noble gases in the Cameroon Line and the He, Ne, and Ar isotopic composition of high-A (HIMU) mantle. *J. Geophys. Res.* **104**, 29509–29527.
- Evans, W.C., White, L.D., Tuttle, M.L., Kling, G.W., Tanyileke, G. and Michel, R.L. (1994) Six years of change at Lake Nyos, Cameroon, yield clues to the past and cautions for the future. *Geochem. Jour.* **28**, 139–162.
- Giggenbach, W.F. (1990) Water and gas chemistry of Lake Nyos and its bearing on the eruptive process. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **42**, 337–362.
- Graham, D. (2002) Noble gas isotope geochemistry of mid-oceanic ridge and ocean island basalts : characterization of mantle source reservoirs. *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry* (Porcelli D, Ballentine CJ, Wieler R, eds.), *Rev. Mineral. Geochem.* **47**, 247–317. Geochem. Soc. Mineral. Soc. America, Washington, D.C.
- Halbwachs, M., Grangeon, J., Sabroux, J.-C. and Villevielle, A. (1993) Purge par auto-siphon du gaz carbonique dissous dans le lac Monoun (Cameroun) : premiers resultats experimentaux. *C. R. Acad. Sci., Paris* **316**, Series II, 483–489.
- Halbwachs, M., J.-C. Sabroux, J. Grangeon, J., G. Kayser, J.-C. Tochon-Danguy, A. Felix, J.-C. Beard, A. Villevielle, G. Vitter, B. Richon, A. Wuest, and J. Hell (2004) Degassing the “Killer Lakes” Nyos and Monoun, Cameroon. *EOS* **85**, No. 30, 27 July 2004, 281–288.
- Kamtchueng, B.T., Fantong, W.Y., Tiodjio E.R., Takounjou, A.F., Wirmvem, M.J., Djomou, S.L.B., Asai, K., Kusakabe, M., Ohba, T., Tanyileke, G., Hell, J.V., and Ueda, A., (2015) A multi-tracer approach for assessing the origin, apparent age and recharge mechanism of shallow groundwater in the Lake Nyos catchment, Northwest, Cameroon. *J. Hydrol.*, **523**, 790–803. DOI 10.1016/j.jhydrol.2015.02.008.
- Kanari, S. (1989) An inference on process of gas outburst from lake Nyos, Cameroon. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **39**, 135–149.
- Kling G.W., Clark M.A., Compton H.R., Devine J.D., Evans W.C., Humphrey A.M., Koenigsberg E.J., Lockwood J.P., Tuttle M.L., and Wagner G.N. (1987) The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science* **236**, 169–175.
- Kling, G.W., Evans, W.C., Tanyileke, G., Kusakabe, M., Ohba, T., Yoshida, Y. and Hell, J.V. (2005) Degassing Lakes Nyos and Monoun : Defusing certain disaster. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **102**, 14185–14190.
- Kozono, T., Kusakabe, M., Yoshida, Y., Ntchantcho, R., Ohba, T., Tanyileke, G. and Hell, J.V. (2016) Numerical assessment of the potential for future limnic eruptions at lakes Nyos and Monoun, Cameroon, based on regular monitoring data. *Geochemistry and Geophysics of Active Volcanic Lakes* (Ohba, T., Capaccioni, B. & Caudron, C.eds). Geological Society, London, Special Publications, **437**, <http://doi.org/10.1144/SP437.8>.
- Kusakabe M, Ohsumi T, Aramaki S (1989) The Lake Nyos gas disaster : chemical and isotopic evidence in waters and dissolved gases from three Cameroonian crater lakes, Nyos, Monoun

- and Wum. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **39**, 157–185.
- Kusakabe, M., Ohba, T., Issa, Yoshida, Y., Satake, H., Ohizumi, T., Evans, W.C., Tanyileke, G. and Kling, G.W. (2008) Evolution of CO₂ in Lakes Monoun and Nyos, Cameroon, before and during controlled degassing. *Geochem. J.* **42**, 93–118.
- 日下部 実 (2010) 湖水爆発の謎を解く—カメルーン・ニオス湖に挑んだ20年. 岡山大学出版会. pp. 208.
- Kusakabe, M. (2015) Evolution of CO₂ content in Lakes Nyos and Monoun, and sub-lacustrine CO₂-recharge system at Lake Nyos as envisaged from CO₂/³He ratios and noble gas signatures. *Volcanic Lakes*. (Dmitri Rouwet, Bruce Christenson, Franco Tassi, Jean Vandemeulebrouck, eds.) pp. 427–450. DOI 10.1007/978-3-642-36833-2_19, pp. 427–450. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kusakabe, M. (2017) Lakes Nyos and Monoun gas disasters (Cameroon)—Limnic eruptions caused by excessive accumulation of magmatic CO₂ in crater lakes. *Geochemistry Monograph Series* Vol. 1, No. 1, pp. 1–50 (2017). Terrapub, Tokyo.
- Nagao, K., Kusakabe, M., Yoshida, Y. and Tanyileke, G. (2010) Noble gases in Lakes Nyos and Monoun, Cameroon. *Geochem. J.* **44**, 519–54.
- Sano, Y., Wakita, H., Ohsumi, T. and Kusakabe, M. (1987) Helium isotope evidence for magmatic gases in Lake Nyos, Cameroon. *Geophys. Res. Lett.* **14**, 1039–1041.
- Shanklin, E. Natural disasters in the oral history of West Cameroon. *Natural Hazards in West and Central Africa* (S.J. Freeth, C.O. Ofoegbu and K.M. Onuoha, eds), Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, pp. 57–62 (1992)
- Shanklin, E. (2007) Exploding lakes in myth and reality : an African case study. Geological Society, London, Special Publications **273**, 165–176.
- Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Presser, T.S., Pringle, M.K., and Evans, W.C. (1987) Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroon. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **31**, 1–16.
- Tietze, K. (1987) The Lake Nyos gas catastrophe in Cameroon : cause, sequence of events, consequences. *Proc. XXII Congress IAHR*, Topics in Lake and Reservoir Hydraulics (W.H. Graf, ed.)
- Yoshida, Y., Issa, Kusakabe, M., Satake, H. and Ohba, T. (2010) An efficient method for measuring CO₂ concentration in gassy lakes : Application to Lakes Nyos and Monoun, Cameroon. *Geochem. J.* **44**, 441–448.
- Yoshida, Y., Kusakabe, M., Issa, Ohba, T., Tanyileke, G. and Hell, J.V. (2016) Decreasing capability of the degassing systems at Lakes Nyos and Monoun (Cameroon) : A proposal for a new system aiming at prevention of recurrence of a future limnic eruption. *Geochemistry and Geophysics of Active Volcanic Lakes* (Caudron, C., Capaccino, B. and Ohba, T. eds.), Geological Society of London Special Publications **437**, <http://doi.org/10.1144/SP437.3>.