著作権等の理由により画像を掲載することができません。

A lakeful of trouble

吉か凶か、大量のガスが溶け込んだ湖

Nature Vol.460(321-323)/ 16 July 2009

アフリカのキブ湖には大量のガスが含まれている。しかし今、そのガスのためにこの湖は危険であると同時に価値あるものになっている。災害を引き起こさずにガスを抜き出して利用することは可能なのだろうか。Anjali Nayar が取材報告する。

2001 年も終わろうとするころ、コンゴ民主共和国（DRC）では、ニーラゴンゴ火山の活動が激しさを増していた。中央の火口からは噴煙が立ち上り、麓のゴマ市にいた火山学者たちは警戒を強めた。そして明けて 2002 年 1 月 17 日、とうとう山の南斜面にできた裂け目から溶岩が流れ出した。溶岩流は山の斜面をヘビのようにくねりながら下降し、家々を飲み込み、ガソリンスタンドや発電所を次々と爆発させ、ゴマ市街地を壊滅させた。夜には、溶岩流はキブ湖のそばまで進み、もうもうと立ち上った水蒸気が数日間にわたりキブ湖周辺を覆った¹。

この噴火で 100 人以上が命を落とし、およそ 30 万人が家を捨てて避難した。住む場所を失った人々が当然のこととして向かった唯一の避難場所が、キブ湖の岸辺だった。しかし、キブ湖それ自体にも危険が潜んでいた。その穏やかな湖面の下には、300 立方キロメートルの二酸化炭素と 60 立方キロメートルのメタンが含まれている。もっと大規模な噴火がさらに近くで起こるなどして湖内部が攪乱されれば、ガスの大量噴出が引き起こされ、キブ湖沿岸で暮らす約 200 万人の命が失われる恐れがあるのだ。しかし、そのリスクを数値化するのは難しい。数十年前から科学

者たちがこの湖について研究しているが、キブ湖とそこに含まれるガス類に関する基礎情報はまだかなり少なく、現状がどの程度危険なのかについては、今のところ諸説入り乱れている。

キブ湖には経済的な利益が見込まれるため、問題はさら複雑になっている。湖水に溶け込んでいるメタンは利用価値が高く、コンゴ民主共和国やキブ湖を挟んで隣接するルワンダと提携した複数のエネルギー会社どうしで、「獲物の奪い合い」が始まっているのだ。その取り引き額は数億ドルに相当する。各企業は既にメタンを湖から吸い上げ始めており、なかには湖の

リスク評価をしている科学者と連携している企業もある。これらの事業を支持する人たちは、ガス抜き事業はガス大量噴出のリスクを低減させるはずだと主張しているが、一部の研究者は、メタン抽出計画によって湖内の平衡状態が乱された場合、今よりもっと危険な状況に陥るかもしれないと危惧している。

「これは前代未聞の大規模改善プロジェクトの1つとっていいでしょう。人命を奪う自然災害の影響を軽減すると同時に、電力を心底必要とする人々に供給できるのです」と、ミシガン大学（米国、アナーバー）で生物地球化学研究に携わる George Kling はいう。「ただし、もしプロジェクトが正しく行われたなら、ですが」。

膨らみゆく問題

アフリカの大地溝帯では、地殻変動によってアフリカ大陸がゆっくりと東西に引き裂かれており、キブ湖はその中に位置する。この大地溝帯の運動によって、溶融した岩が押し上げられ、そこから放出される二酸化炭素がキブ湖の底部へ溶け出している。二酸化炭素の一部は細菌によってメタンへ変換され、また、深層水に含まれる有機物が他の細菌によって分解されることでもメタンが生成している（図を参照）。

キブ湖内部は久しく前からいくつかの層になっている。表層は淡水だが、その下には塩分が多く比重の大きい水の層がいくつか重なっている。水深約50～80メートル以下では無酸素状態となり、溶解している二酸化炭素やメタンの濃度は水深とともに増加していく²。各層の水は比重に差があるため垂直方向に混じり合うことはなく、そのため、溶解したこれらのガスは湖底に閉じ込められている。

キブ湖周辺の住民は、湖に溶解しているガスについて数十年前から知っていたが、それが危険だとは認識していなかった。そんな中1984年に、カメルーンのマヌーン湖周辺で、湖からの二酸化炭素の噴出により37人が死亡した。そして2

水面下の脅威

キブ湖の深層にたまっている溶存ガスが水面に噴出すれば、数百万人の命が危険にさらされるだろう。

年後、同じくカメルーンのニオス湖から0.3～1立方キロメートルの二酸化炭素ガスが噴出し、1700人以上が窒息死した。

Kling は、ガス噴出災害の数週間後にニオス湖を訪れた調査チームに加わっていた。「動物はすべて死んでおり、辺りには数千頭の牛の死骸が横たわっていました」と話す。Kling はその前年にニオス湖を訪れていたが、湖水表層の試料しか採集していなかった。「我々は、この湖の底にガス爆弾が潜んでいることをまるで知らなかったのです」と彼はいう。

調査によって、ニオス湖の深層水に溶け込んだ二酸化炭素が飽和状態に近かったことや、キブ湖と同様に上層水塊の水圧でガス類が溶解したまま保たれていたことが判明した。Kling は、地滑りによってニオス湖内の水の層がかき乱され、ガスを豊富に含む水塊が上昇したのだと考えている³。それをきっかけに一種の連鎖反応が始まった。水塊が上昇して水圧が低くなると、ちょうどシャンパンのコルク栓を抜

いたときのように、二酸化炭素が溶解できなくなって気泡が生じる。上昇する気泡は周囲の水も一緒に引きずり上げ、そうした水からもガスが気泡となって出ることになり、爆発的なガス噴出が起こるのである。この現象は湖水爆発（limnic eruption）とよばれる。

二酸化炭素は空気よりも比重が大きいので、噴出後は地面をはうように広がり、ニオス湖から26キロメートルもの範囲を覆ってすべての動物を窒息死させた。その被害のあまりの大きさに、科学者たちは、ガスの大量溶解で知られるもう1つの湖として、キブ湖のリスク評価をせざるをえなくなったのである。

湖に潜む脅威

今までのところ、キブ湖で過去に湖水爆発があったという歴史的記録はない。しかし、湖底のプランクトン化石層の間には化石のない層が複数あることから、過去5000年の間にそうしたガス噴出が数回あった

ことがうかがわれる⁴。キブ湖はニオス湖の3000倍以上あり、ニオス湖の放出量の350倍を超えるガスを含んでいる。キブ湖の岸辺もニオス湖と同じく人口が密集している。「キブ湖はニオス湖の極悪な兄貴分といったところです」とKlingはいう。しかし、現段階でこの種の大災害が起こるリスクについての科学的な統一見解は、まだ得られていない。

スイス連邦水域研究所(Eawag; カスタニエンバウム)のMartin Schmidは、1974年に測定されたガス濃度と、2004年に行われた限定的な調査⁵から、過去30年間でキブ湖のメタン濃度は15~20%増加し、二酸化炭素濃度は10%増加したことがわかっている、と話す。もしこの傾向が続けば、キブ湖は21世紀中にガス飽和状態になり、ニオス湖と同様に、ちょっと攪乱されただけでも大噴出が起こる可能性がある。

現在、キブ湖内でガス密度が最も高いのは水深330メートル付近で、この辺りでは、ガスは飽和状態の約55%(二酸化炭素が10%、メタンが45%)程度水に溶け込んでいる。メタンはガス圧の大半を占めており、また二酸化炭素より水に溶けにくいので、噴出リスクには大きくかわる。しかし、Schmidによれば、大噴出が起こる見込みは低いという。モデル解析によれば、確かに、ガスが多く溶け込んでいる水深部分で非常に激しい噴出が1回起これば、湖全体が攪乱されてしまう可能性はありうる。ただ2002年の火山噴火では、溶岩がガスの多い水深まで達しなかったこともあり、湖の安定性はほとんど影響を受けず、平穏状態のまま保たれた。「今すぐに、爆発的なガスの噴出が起こるような大異常事態が起こる可能性は低いです。少なくとも私はキブ湖で泳ぐのが怖いとは思いませんね」とSchmid。

しかし、ナポリ第二大学(イタリア、カゼルタ)の火山学者で、国連向けにコンゴ民主共和国ニラゴンゴ山噴火の危機

管理計画を作成しているDario Tedescoは、キブ湖の湖底で噴火が起こる可能性がある」と語る。Tedescoはキブ湖の水深測量研究を行っており、火山性の起源と思われる円錐状構造を見つけた。

この証拠は、ほかのいくつかの兆候と符合する。2002年のニラゴンゴ山噴火の際に、キブ湖からわずか数キロメートルの位置の南斜面に複数の新しい裂け目があった。これらの裂け目から流れ出た溶岩は、組成的にもニラゴンゴ山火口の溶岩湖のものとは異なっていた¹ことから、この区域にはマグマだまりがいくつかあり、そのうちいくつかは湖の下に伸びている可能性が考えられる。「ニラゴンゴ山はまた噴火するでしょう。問題なのは噴火の場所です」とTedescoはいう。

Tedescoがキブ湖で行った調査から、問題の複雑さがよくわかる。キブ湖には湖盆が少なくとも5つあり、それぞれの特徴も対流の起こる確率も異なっている²。キブ湖の北西側の角にあるカブノ湖盆は、湖面からわずか12メートル下でもガスの濃度が高い。カブノで噴出が起これば、ニオス湖の少なくとも3倍以上のガスが放出されると考えられる。

研究者たちは自然災害を回避するためにキブ湖のガス圧を軽減することが重要だと考えており、また、国の景気刺激策でもそうした事業を前向きに進めようとしている。60立方キロメートルのメタンガスは、コンゴ民主共和国とルワンダ両国を合わせた年間の商業エネルギー需要にほぼ匹敵するのだ。エネルギー不足に悩むルワンダにとって事業は特に魅力的であり、キブ湖は同国の発電量増大計画において非常に重要な存在となっている。

キブ湖からのメタン抽出はアイデアとして新しいものではない。ルワンダのビール会社は、電力利用に切り替えるまで40年にわたって、この湖のメタンでボイラーをたいていた。しかし、メタンを使った発電に対する商業的な関心は近年になって急速に芽生えたもので、それにはルワンダ

が政治的に安定してきたことも一部起因している。2005年以降、約60社(そのほとんどが海外企業)が、キブ湖の利用を目的にルワンダ政府にアプローチしてきたと、ルワンダのエネルギー・水資源・公衆衛生大臣であるAlbert Butareは話す。

ルワンダは既に、合計して数百メガワット分のメタン採取権を5つの合併企業に振り分けており、その中には、ニューヨークに本社を置くエネルギー企業、ContourGlobal社との間で結ばれた、100メガワットで3億2500万ドル(約309億円; 1ドル=95円換算)という契約も含まれている。さらに今年6月には、ルワンダとコンゴ民主共和国は、キブ湖からさらに200メガワット分を採取する新たな合同開発計画を発表した。

メタン採取の具体的方法は、基本的には、浮き桟橋を使って、ガスの豊富な水の層へ垂直にパイプを降ろすというものだ。まず小型ポンプで、湖底の水の一部を、ガスが飽和状態になって気泡を形成し始めるくらい水圧の低い層まで吸い上げる。そのあとは、ポンプを使わなくても気泡形成によって水がパイプ内を押し上げられる。この抽出機構は、制御された湖水爆発だといえる。

メタンは二酸化炭素に比べて水に溶けにくく、先に気泡となる。気泡となったメタンガスはパイプ内を通して陸上まで上昇し、発電のために燃焼される。問題は、二酸化炭素がたくさん溶け込んだまま残された水をどう処理するかである。

安全性の観点からすれば、二酸化炭素も抽出して、ガス抜きした水をまた湖の深層へ戻せば、湖水の平衡を乱すこともなく理想的だろうとKlingはいう。しかし、二酸化炭素を除去した水は軽くなって深層にとどまりにくくなる。「水塊の下降や上昇は湖水の混合を引き起こすので、やりたくありませんね」と彼はいう。湖の最深層の水だけは、ガス抜き後に最深層へ戻しても大丈夫な比重だと考えられるが、それには莫大な費用がかかる。そのため

Kling は、二酸化炭素を湖水中に保持させる妥協策を提案している。

利害の対立?

地球物理学者で、ドイツのツェレに本社を置くコンサルタント会社、Physik-Design-Technology 社の取締役である Klaus Tietze によれば、キブ湖の二酸化炭素濃度は 10 年当たり 3% 以上の率で増加しており、「二酸化炭素をこのままにしておくのは、解決策として非常にお粗末です」という。彼は、メタンと二酸化炭素の両方をできるだけ早く抽出し、ガス抜きした水を湖の主要なガス蓄積層の上に戻せば、メタン資源を薄めることもないとして、この方法を強く推奨している。

しかし、Schmid はこの案を疑問に思っている。ガス抜きした深層水に含まれる栄養素が湖の上層に余計な負担をかけると考えられるからだ。

科学者の間でも意見の相違がかなりあり、特にガス抽出技術には疑問点が多い。このため、開発企業が今後とるべき最良の道ははっきりしていない。これまでのところ、4 メガワットの浮き桟橋 (KP とよばれる) 1 つのみが散発的に発電して、ルワンダの送電線網に電力を供給している。ルワンダ投資グループ (Rwandan Investment Group) という、もう 1 つのグループが投資する 3.6 メガワットのプロジェクトでは、昨年、発電開始予定の 1 週間前に浮き桟橋が沈んでしまった。この事故は、妨害工作だとか、手抜き工事だとかいった憶測をよんでいる。

状況をさらに複雑にしているのが、潜在的な利害の対立である。キブ湖の研究で災害の危険性に気付いた科学者のうち何人かが、現在、メタン抽出プロジェクトにかかわっているのである。

例えば、サヴォワ大学 (フランス) を最近退職した物理学者の Michel Halbwachs は、20 年にわたってニオス湖とキブ湖の研究を行い、現在はルワンダ投資グループのプロジェクトで陣頭指揮

危機一髪：2002 年 1 月にニラゴンゴ火山から噴出した溶岩はキブ湖に流れ込んだが、湖水爆発を引き起こすほどの深さには達しなかった。しかし、次の噴火ではどうなるかわからない。

を執っている。彼は、キブ湖に関するこれまでの自分の研究は利害の対立には当たらず、むしろ研究によってガスの安全な抽出法について多くの貴重な知識を得ることができた、と話す。

Tietze は、数十年の研究歴があって「キブ湖の全体像がわかっている」少数の科学者のみに、メタン抽出プロジェクトを担当する資格があると述べている。実は彼も「ガス抽出ゲーム」に加わろうとしており、投資家を探しているところだ。

しかし、ほかの科学者たちは、ガスのリスク評価をしている研究者が商業目的のメタン抽出事業で働くことで、キブ湖の安全性が脅かされる可能性があるかと危惧する。キブ湖周辺の 200 万人住民にとって最大の利益が、途中でどこかに消えてしまうかもしれないと、Tedesco はいう。彼はメタン抽出計画を「純粋なビジネス」とよび、「これは状況の危険性とは何の関係もないのです」と付け加えた。

「今の状況は、誰かが金を道にばらまいて、みんながそれを拾い集めようと走り回っている光景に似ています」と Kling はいう。彼は、世界銀行や関係諸国とともに活動する国際チームに加わって、キブ湖のメタン抽出事業のルール作りをしている。このチームでは、現地の組織を介してすべてのプロジェクトを監視し、そうした組織から国際的な専門家集団へ報告が送られるようにしたいと考えている。「事業を運営する人間と事業をチェックする人間は別々であるべきです」と彼はいう。6 月中旬、チームは法案の第一草稿を発表した。これはルワンダおよびコンゴ民主共和国の議会に、今ごろ、支持を取り付けているだろう。

メタン抽出は理論的にはキブ湖の安全性を高めることになるはずだが、果たして災害の危険性が低減されるかどうかは依然として不透明である。ガス抜き計画が湖内部の安定性にどのような影響を及ぼすかは誰にもわからない。

大災害を回避しようとしても、科学者の制御がきかない要因や、湖を挟む両国政府の手に負えない要因もある。最近、コンゴ民主共和国の武装勢力がこの地域の 7 つの地震監視施設のうち 4 つを占拠し、火山学者がニラゴンゴ山の噴火を予測することが難しくなっている。また、過去数か月に農村部で起こった新たな戦闘で、何十万人もの難民が生じている。

ゴマ市の人口は、2002 年のニラゴンゴ山噴火のときからほぼ 3 倍の推定 120 万人に膨れ上がっている。利用できる土地という土地には掘って建て小屋がひしめき合い、その多くは最後の噴火で噴出した溶岩塊から作られている。科学者や開発企業がキブ湖のメタン資源を巡って争っている一方で、難民は、火山と武装勢力と湖水爆発の危険性のある湖に取り囲まれて、身動きがとれずにいるのだ。(船田晶子 訳)

Anjali Nayar は、*Nature* に籍を置く国際開発研究センターの特別研究員。

1. Tedesco, D. et al. *J. Geophys. Res.* **112**, B09202 (2007).
2. Tassi, F. et al. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **10**, Q02005 (2009).
3. Kling, G. W. et al. *Science* **236**, 169–175 (1987).
4. Haberyan, K. A. & Hecky, R. E. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **61**, 169–197 (1987).
5. Schmid, M., Halbwachs, M., Wehrli, B. & Wüest, A. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **6**, Q07009 (2005).
6. Schmid, M. et al. *Acta Vulcanologica* **14/15**, 115–122 (2003).
7. Lorke, A., Tietze, K., Halbwachs, M. & Wüest, A. *Limnol. Oceanogr.* **49**, 778–783 (2004).