

地球規模課題対応国際科学技術協力

(防災研究分野「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」領域)

カメルーン火山湖ガス災害防止の総合対策と人材育成

(カメルーン)

平成 24 年度実施報告書

代表者：大場 武

東海大学 理学部・教授

<平成 22 年度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

1980年代の半ばにカメルーンのエオス・マヌ湖でCO₂ガスが爆発的に放出し、約1800名の周辺住民が犠牲になった。この現象は「湖水爆発」と呼ばれ、湖水爆発の根本的な原因は、湖水に蓄積したマグマ起源のCO₂であることが明らかとなったが、湖水爆発の引き金やメカニズムの詳細については、未だ説明されていない。本プロジェクトでは、カメルーンの研究者とエオス・マヌ湖について湖水爆発に関連した共同研究を実施し、ガス災害の再発防止を目指す。その取り組みを通じてカメルーンにおける自立的、持続的な研究体制の確立をめざす。

カメルーンの研究人材の育成として、平成24年6月に最後の1名の留学生候補を選出し、平成24年10月から富山大学の博士課程に入学した。これで5名の留学生がそろって日本で研究する体制が整った。なお本プロジェクトにはカメルーンからの文部科学省国費留学生が1名参加しており、それを含めるとプロジェクトは6名のカメルーン人を支援している。

エオス・マヌ湖の定期観測は毎年3月に実施しており、エオス湖では深層でCO₂濃度の急激な低下が観測された。これは脱ガスパイプが3本に増加した効果の表れである。パイプから立ち上がる噴水の高度は7m程度まで低下した。マヌ湖では脱ガスパイプが機能停止しており、CO₂濃度はやや増加傾向にあり、強制的な深層水のくみ上げが必要であることを示唆している。マヌ湖は東西に伸びた形をしており、西と中央に小さな湖盆があり東に大きな湖盆がある。これまでCO₂は東の湖盆だけにあると考えられていたが、平成24年3月の調査で、西と中央の湖盆にもCO₂がある程度存在することが観測された。エオス・マヌ湖とその周辺地域の水理地質特性を調べるために複数回、湧水、地表水の採取を行った。エオス湖では、北側の天然ダム下部から湧出する水が安定同位体比の測定から比較的浅い湖水の漏水であることが明らかとなった。エオス湖水にはFeが高濃度で溶存しており炭酸イオンと結合しFeCO₃を形成している可能性がある。これを実証するために、FeCO₃の結晶を実際の湖水に長期間暴露して結晶の成長を確かめる実験を行い、実際に深層ではFeCO₃が生成していることが確認された。また結晶成長速度も定量的に推定された。エオス・マヌ湖のリアルタイムモニタリングを目指し、自動観測ブイを設計し、池田湖で設置実験を行った。平成26年1～3月に設置を予定する。エオス・マヌ湖では気象観測のための湖上ステーションが完成し、観測を開始した。データは20分毎に取得されメモリーに保存され、定期的に研究者が回収する。平成24年8月に山梨県の本栖湖でマルチビームソナーの集中的な運用訓練を実施した。平成25年にも同様な集中訓練を実施し、平成26年度にカメルーン現地での観測を目指す。

2. 研究グループ別の実施内容

2.1. 研究題目:カメルーン火口湖ガス災害防止の総合対策と人材育成

研究機関・研究代表者:東海大学理学部化学科・大場武

①研究のねらい

エオス・マヌ湖水を定期的に採取・分析し、湖水に溶存するCO₂量の正確な推定を行う。さらに自動観測装置による湖水の状態をリアルタイムにモニタリングし、湖周辺の安全確保に寄与する。マヌ湖の深層水に溶存しているCO₂ガスを汲みあげて脱ガスさせる試行実験を行う。カメルーンとの共同研究、研究機材の供与、留学

生の受け入れを通じてカメルーンにおける研究人材を育成する。

②研究実施方法

ニオス・マヌ湖において毎年1回、湖水を深度別に採取し、陰イオン組成、陽イオン組成、安定同位体比などを測定し、湖水に残存する CO₂ 量を正確に見積もる。このデータは、湖水爆発シミュレーションの初期条件として利用され、湖水爆発の発生可能性の判断に利用される。ニオス・マヌ湖に、湖水の水温、電気伝導度、気象要素などを自動的に観測し、データを人工衛星およびインターネットを経由し、ほぼリアルタイムで取得するシステムを構築し安全宣言の必要条件を整える。日本国内で採取可能な炭酸泉水をニオス・マヌ湖で湧出する温泉水の代替物とみなし、採取・分析法の開発に利用する。湖水の陽イオン組成は地殻を構成する岩石由来と考えられる。湖水の陽イオン組成の1起源を解明するためにニオス・マヌ湖地域に分布する岩石の化学分析を行う。マヌ湖ではすでに脱ガスパイプによりCO₂の大半が除去されているが、依然として湖底に近い深層水には CO₂ ガスが高濃度で溶存している。この深層水を動力ポンプで汲みあげて脱ガスさせる試行実験を行う。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

【人材育成】

平成 23 年6月と12月に日本で博士号取得を目標とする留学希望者と面接を実施した。面接官は日本人研究者3名と IRGM 研究者3名で構成された。留学希望者はこれまで行ってきた研究内容と今後日本に留学した場合の研究計画について発表を行い、面接官が採点・順位付けし、6月の面接で2名、12月の面接で2名を候補者として決定した。その内の1名は東海大学大学院の入試を経て10月から研究を開始した。残りの3名も全て入試を突破し平成 24 年 4 月から、東海大学、富山大学、東京工業大学の大学院博士課程に入学した。平成 24 年 6 月に5名の留学希望者と面接し、最高点を得た一名の女子学生を候補者として選出した。彼女は富山大学の大学院入学試験に合格し、平成 24 年 10 月から研究活動を開始した。これで5名の留学生在日本で研究する体制が整った。なお本プロジェクトにはカメルーン人の文部科学省国費留学生在が1名参加しており、それを含めるとプロジェクトは6名のカメルーン人を支援していることになる。以下の表に受け入れ状況をまとめた。

学生	受入機関	受入期間	指導教官	研究テーマ
A	東海大学	平成 23 年 10 月～平成 26 年 9 月	大場武	CVL に分布する火口湖の地球化学
B*	東海大学	平成 23 年 10 月～平成 26 年 9 月	大場武	Ndop 平原の地球化学的水文学
C	東海大学	平成 24 年 4 月～平成 27 年 3 月	大場武	Barombimbo 山の火山地質学
D	富山大学	平成 24 年 4 月～平成 27 年 3 月	上田晃	ニオス・マヌ湖および周辺域を含む水文学
E	富山大学	平成 24 年 10 月～平成 27 年 9 月	上田晃	生物学的指標を取り込んだ水文学
F	東京工業大学	平成 24 年 4 月～平成 27 年 3 月	横山哲也	Oku 火山地域に産する火山岩の地球化学

* 文部科学省国費留学生

博士号取得を目的とする留学生とは別に、カメルーン人のポスドク(PD)を1名選出した。選出されたのは、W.Fantong 博士でありカウンターパートである IRGM の職員である。Fantong 氏は平成 25 年 7 月から半年間、富山大学で上田晃氏と共同して研究に従事する。

平成 25 年 7 月に鹿児島で開催される IAVCEI(国際火山学地球内部化学連盟)総会および、国際火口湖ワークショップに IRGM の研究者を 3 名招聘する。研究者は研究発表を通じて研究能力の向上を図る。さらに次回の国際火口湖ワークショップをカメルーンに誘致する活動も支援する。

供与機材に含まれるマルチビームソナーは複雑かつ高度な計測機器であり、使用に際し相当な訓練を要する。平成 25 年度は夏期に集中的に訓練を国内で実施する。この際に、カウンターパートから1名の研究者を本邦に招聘する。

【研究】

2011 年 12 月、2012 年 3 月、2013 年 3 月に相手国研究者と共同し、ニオス・マヌ湖の現地調査を実施した。その結果、ニオス湖水に溶存する CO₂ 濃度は 2009 年の値に比べて着実に低下していることが確認された (Fig. 1)。これはニオス湖においては現在のガス抜きパイプから放出される CO₂ 流量が湖底に供給される CO₂ 流量を上回っていることを意味している。

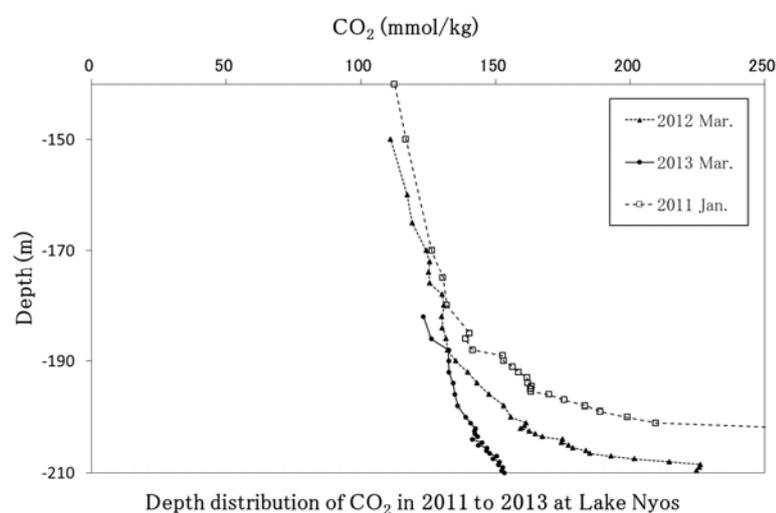


Fig. 1 ニオス湖における CO₂ 濃度の時間変化

マヌ湖は東西に延びた形をしており、西と中央部に浅い湖盆がある。東には深い湖盆があり、主要な CO₂ の蓄積場所になっている。2013 年 3 月の調査では、これまで詳しく調べられていなかった西と中央部に浅い湖盆でも CTD 観測と採水を行った。Fig.2 には CTD で得た電気伝導度の深度プロファイルを示す。東の深い湖盆では 2012 年 3 月に比較して、電気伝導度の低下が観測された。西と中央の浅い湖盆の深度プロファイルはほぼ同一で、図では曲線が重なっている。西と中央部の異常は 2012 年 3 月に佐伯らによる水中音速度の調査で初めて指摘されており、今回の調査はそれを確認したことになる。今後の水質の分析により、何の成分が電気伝導度を高めているのか解明が期待される。

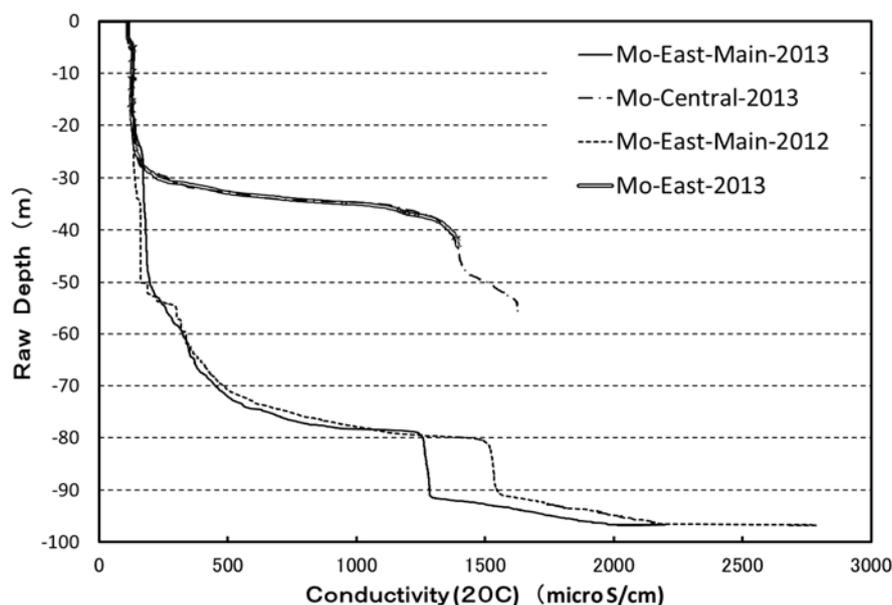


Fig.2 マヌン湖の電気伝導度の深度プロファイル

ニオス・マヌン湖では湖上における気象観測がスタートした。Fig.3 にニオス湖の湖上における気温変化を示す。データは 20 分毎に取得されメモリーに記録される。データはカメルーンの研究者が定期的に回収する。気象ステーションでは気温の他には、表面湖水温度、雨量、相対湿度、風速、風向、日照などのデータも同時に取得している。

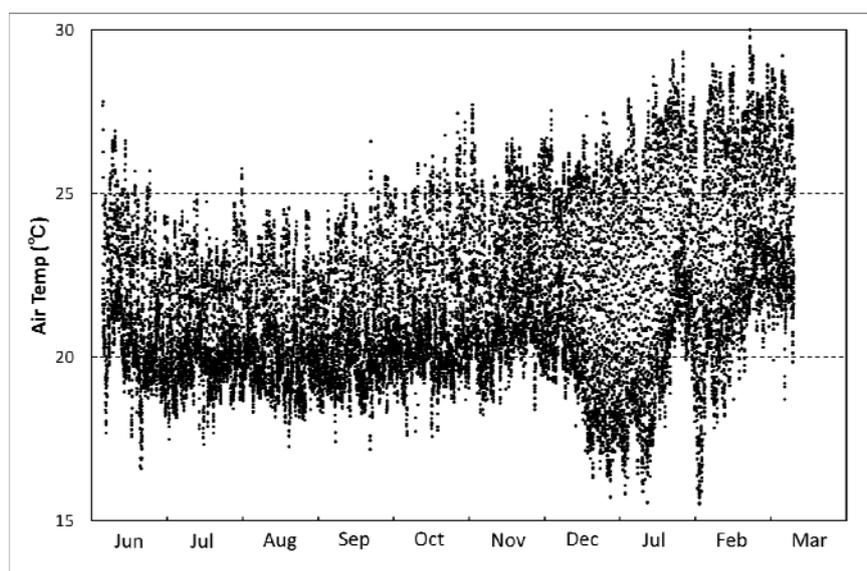
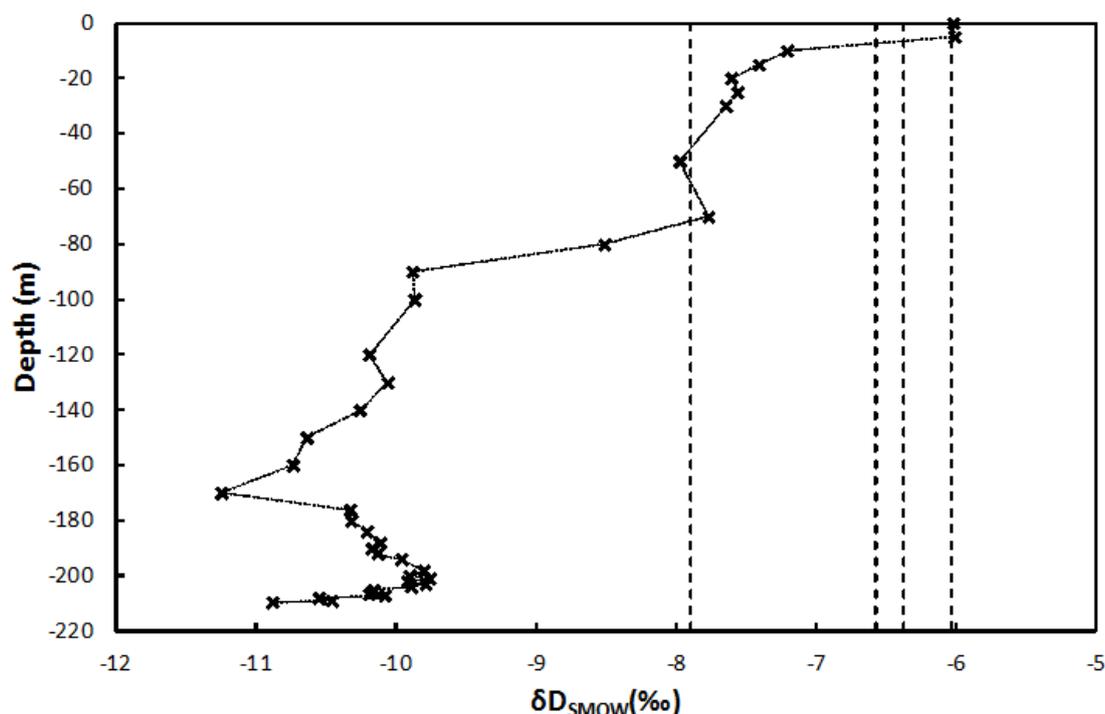


Fig. 3 ニオス湖上における気温の変動(20分毎のデータを処理せずに表示。期間は2012年6月5日～2013年3月11日)

ニオス湖水の D/H は浅層で高く、90m から急激に低くなる特徴がある(Fig. 4)。この特徴を利用することにより、北側の天然ダムの下部から湧出する湧水と湖水の関係を推定することが可能である。Fig.4 には湧水の D/H 比を破線で示した。これによると、仮に湧水が漏出する湖水であり、湖水から湧出地点まで D/H 比が変化しないと

仮定すると、湧水は-80mの深度までの浅層湖水が漏出して形成されたと考えることができる。天然ダムはおよそ40mの火砕堆積物からなり、それよりも下は基盤岩から成るとされている。上述のD/H比の関係から湖水は基盤岩の亀裂も利用して漏水している可能性が示唆される。



④カウンターパートへの技術移転の状況

湖水の観測に関しては常にカウンターパートと共同して実施しており、カウンターパートだけで観測が可能になりつつある。気象データの回収は、当初からカウンターパートの仕事として実行している。研究者間では概ね技術移転は順調に進行している。

カメルーン国内の研究所で分析器の使用、維持管理に取り組む技術者については、能力の向上が必要と考えられ、平成 25 年の 4 月に 3 週間程日本に 4 名を招聘し研修を受けさせる。研修では、日本の各研究機関での分析器の管理状況を実際に見てもらい、対話をすることにより、現地での分析器の維持管理に貢献することが期待される。

供与機材に含まれるマルチビームソナーは複雑かつ高度な計測機器であり、使用に際し相当な訓練を要する。当初、1 年程度で日本人研究者が技術を習得できると考えていたが、実際には訓練を行う場所と期間が限られており、技術の習得に手間取っている。平成 25 年度も夏期に集中的に訓練を国内で実施し、技術の習得に努める。この際に、カウンターパートから 1 名研究者を本邦に招聘することを予定する。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

ニオス湖においては、EU の資金提供で、北部天然ダムの地盤補強工事が 2012 年 10 月ころから開始された。実際の工事はベルギーの建設会社が行っており、建設会社はニオス湖に工事に携わる人の為の宿泊施設やインフラを整備した。IRGM が当初から保有していた宿舎も同時に改善された。この恩恵により、ニオス湖では水道、電気、インターネットが利用できるようになり、研究環境は飛躍的に改善された。地盤補強工事は 2013 年内には終了する予定で、その後建設会社は撤退するが、宿泊施設などは残され、観測業務に利用されることが期待されている。

2. 2. 研究題目:CO₂-岩石反応を含む物質移動現象の解析

研究機関名・研究代表者:富山大学理学部生物圏環境科学科・上田晃

①研究のねらい

ニオス湖、マヌン湖を中心とした CO₂ ガスが問題となる可能性が高い湖及びその周辺地域の地下で起こっている物質移動現象(物質フラックス、水質変化など)を解析することを主目的としている。このため、水や岩石試料の化学分析や同位体分析結果から総合的に判断し、岩石-CO₂ 反応を評価すると共に、実験室内での単純化された岩石-CO₂ 反応試験の結果と比較して、天然での複雑な系の岩石-CO₂ 反応を評価する。

②研究実施方法

現地での試料採取は、ニオス湖、マヌン湖を中心とし、CVL 沿いに分布する火山湖のうち、CO₂ ガスが問題となりうる地域も対象として、湖水・地下水・河川水を採取し、同位体分析(H,O,C,S,He^{●●})や化学分析(主要成分、微量成分)を行うことによって、その地域特有の地下水理や、水質変化の原因、CO₂ 供給量の経年変化の有無及びその原因の解明を行う。また、岩石-CO₂ 水反応室内試験では、現地の岩石と CO₂ を含む水(炭酸水)をいろいろな条件で反応させて、水試料の化学組成変化を観察する。この際、岩石-CO₂ 水反応過程での鉱物の沈殿や溶解現象について、位相シフト干渉計を用いた測定法を導入する。現地では、結晶成長試験装置を湖底付近に設置して、原位置で起こっている化学反応を評価解析する。これらの結果をもとに、岩石反応地化学シミュレーションを行って、反応を規制している因子を把握し、長期的な水質変動・CO₂ フラックスなどの予測を

行う。特に、岩石あるいは鉱物の溶解・沈殿現象は、湖底堆積物の変化や水質変化に寄与することから、物質バランスを考慮しながら検討を行ってゆく。これらの結果をもとに、ニオス湖、マヌン湖の長期的な水質変動を予測し、防災への資料とする。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 24 年度の計画と進捗状況は、次の通りである。

(1)ニオス湖を中心とした地域を対象として、水試料・ガス試料・岩石試料の採取と、それらの試料の化学分析・同位体分析

ニオス湖周辺の地下水・河川水の採水を、平成 23 年 11 月に引き続き、平成 25 年 1 月に行った(Fig.1)。この調査により、ニオス湖を中心とした集水域内の水試料をほとんど採取できた。現在、試料の化学成分や同位体成分(水素・酸素)を分析中である。また、地下水の水循環を検討するためには、雨水試料も必要となるため、簡易式雨水採水装置を製作し数カ所に設置し、定期的に回収することを現地住民に依頼した。対象としているニオス湖の集水域では、大きな河川が流れており、その河川水の水位・水温・電気伝導度(EC)を連続的に測定できる水質センサーを設置した。これらの水試料やセンサーの測定データは、平成 25 年度に予定している現地調査時に回収予定である。

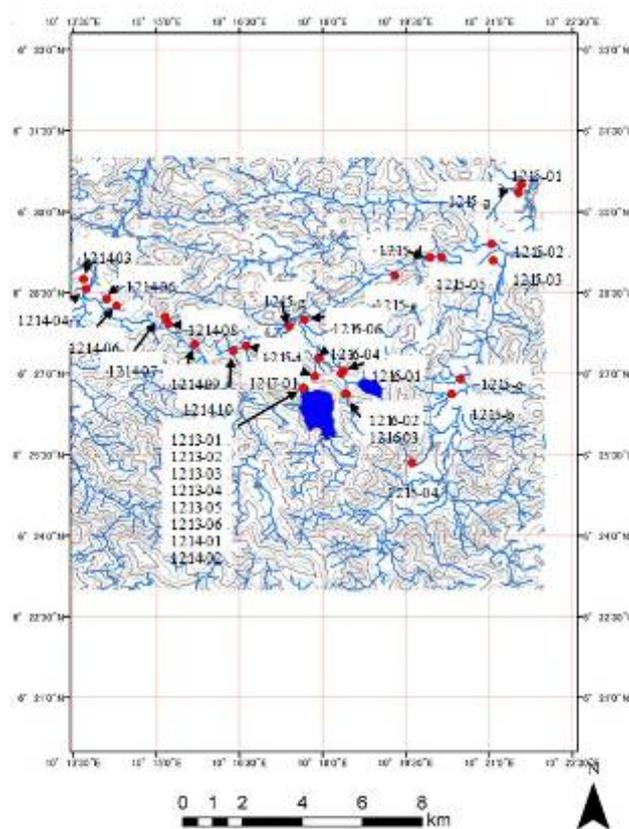


Fig.1 ニオス湖周辺地下水・河川水の採取地点

地下水調査では、現地で pH, EC(電気伝導度), ORP(酸化還元電位)を測定した。EC は、ニオス湖水は、15mS/m であるが、周辺地下水や河川水の値は、10mS/m 以下であり、2mS/m と低い値を示すものも存在した

(Fig.2)。このことから、一部の地域を除いて、地下水には CO_2 に富むニオス湖水の影響が少ないことが判明した。

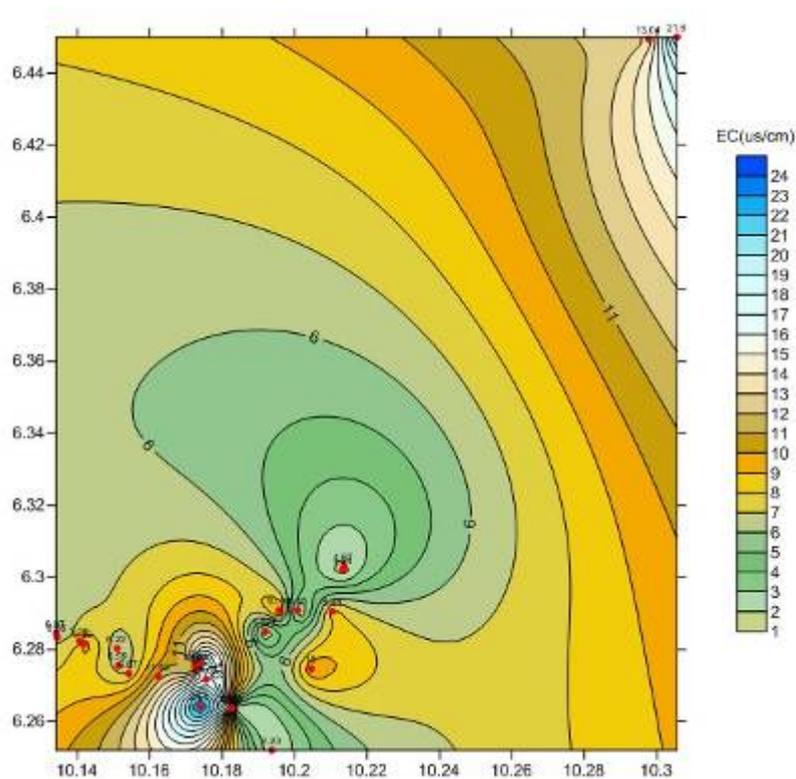


Fig.2 ニオス湖周辺地下水・河川水の電気伝導度(EC)

2011年12月に脱 CO_2 用の孔井から吹き上げる湖水の高さを測定したところ、Fountain 2001 (Fig.3の中央)では、28m、Fountain 2011 C-1 (Fig.3の左)では、22.4m、Fountain 2011 C-2 (Fig.3の右)では、26.4mであった。3本の噴水の高さは2013年3月にはいずれも7m程度まで低下した。これは、深層水における CO_2 濃度の低下を反映している。



Fig.3 3つの脱 CO_2 孔井 (2011年12月7日撮影)

(2) 岩石-CO₂ 反応試験による評価試験

実験室内での岩石-CO₂ 反応試験は、バッチ式あるいは流通式反応容器を用いた試験を行う計画であり、その試験試料となる岩石や水試料の採取を現地調査期間中に行った。採取した岩石を試験用として粉砕・整粒する必要があり、現在その準備中である。他に、ニオス湖水のいくつかの深度に、2種類(A セメントと G セメント)のセメントコア試料(15mm φ × 30mmL)を設置し、湖水と反応させる試験を行い、新規建設が予定されているニオスダムにセメント材の耐 CO₂ 性を評価する試験を行った。コア試料は、約3か月間反応を行い、平成 24 年3月に回収した。現在、試料の分析中である。さらに、ニオス湖周辺に分布する花崗岩から作成した岩石薄片を、現在湖水の3深度に設置しており、1年毎に薄片を回収して、その鉱物組成変化を検討することにより、ニオス湖で起こっている現象を解明する。



Fig. 4 ニオス湖水（深度 200m）と 3 か月間反応したセメントコア
（左：A セメント、右：G セメント）

(3) シデライト結晶成長試験

ニオス湖水の底部にはシデライト(FeCO₃)が存在することが知られており、岩石と CO₂ 水との反応によるものと推定される。本年度は、シデライトの沈殿速度を、ナノ技術を用いて測定した。その方法は、シデライトあるいは方解石(CaCO₃)の結晶表面の一部を被覆し、これを湖水と反応させて、反応前後の高さ変化を、位相シフト干渉計装置(VSI)を用いて測定した。その結果、深度が増加するにつれて、シデライトの沈殿速度も増加したが、最深部(210m)の高 CO₂ 濃度域より 10m 上部で高い沈殿速度(0.29 μm/年)が測定され、それより以深ではむしろ減少することが判明した(Fig.5)。また、深度 50m では、シデライトは不飽和状態にあり、溶解することが判明した。今回の試験では、シデライト結晶と湖水との反応は、わずか2日間であったため、沈殿量が少なく VSI による測定が困難を極めた。このため、平成 24 年度以降の調査では、長期間(半年)の試験を計画している。

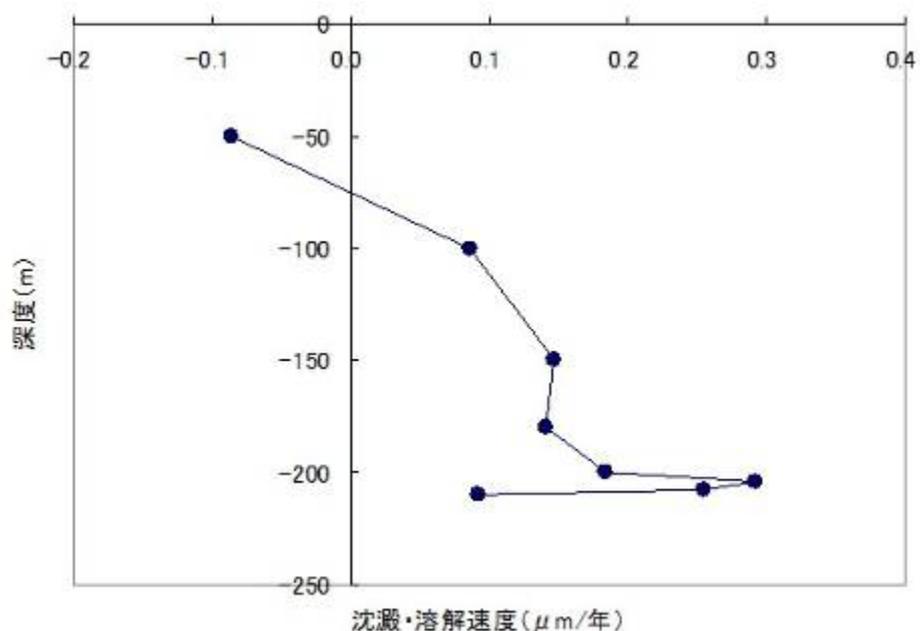


Fig. 5 ニオス湖水からのシデライト沈澱/溶解の速度測定結果

2011年12月にニオス湖において、深部湖水の採取をおこなった(Fig.6)。深部湖水の採取は、耐圧容器の内部圧力を正確に制御し、外圧より若干低下させることによりフィルターを介して深部湖水を採取した。この採取方法は溶存CO₂ガスをまったく失わずに採取する点において画期的な方法である。



Fig. 6 深層湖水の採取実験

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

現地調査を行う際には、地下水のアルカリ度や鉄濃度を現場測定しており、その分析方法や試薬などについての技術移管を行っている。また、岩石(セメント)-CO₂水反応試験では、試料の取り扱いや試験方法についての情報を提供した。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)特になし

2. 3. 研究題目:湖水爆発の数値シミュレーション

研究機関名・研究代表者:防災科学技術研究所 地震・火山防災研究ユニット 小園誠史

①研究のねらい

本研究グループでは、カメルーンのニオス湖およびマヌン湖において大きな災害をもたらした湖水爆発現象について数値シミュレーションを実施し、その現象のメカニズムを明らかにすることを目的としている。本年度は、昨年度までの湖水爆発に関する一次元物理モデルを拡張し、水中における CO_2 流体の二次元の流れに関する数値モデルの構築と解析に取り組む。これによって、湖水爆発に至るまでの湖内における CO_2 流体の多様な挙動を再現することを目的とする。

②研究実施方法

本研究では、有限要素法数値解析ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて水中への CO_2 流入シミュレーションを行った。ニオス湖を再現した容器内の水に、 CO_2 気泡が容器の底から流入し、水へ溶解・拡散していく過程をモデル化した。まず、ニオス湖と同じアスペクト比で小スケールの矩形容器内におけるパラメータ解析に取り組み、さらにニオス湖の詳細な形状や大きさを再現したうえでのシミュレーションにも着手した。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

本グループの全体計画においては、様々な種類・レベルの数値モデルに対する解析に基づいて湖水爆発発生メカニズムや条件を明らかにしていくことを目標としているが、昨年度における CO_2 気泡プルームの一次元物理モデルに関する詳細なパラメータ解析、本年度における水中への CO_2 流入過程の二次元シミュレーションによって、モデルの段階的な高度化に成功し、当初の計画通りに研究が進展している。本年度の具体的な進捗状況は以下のとおりである。

本研究ではまず、単純な矩形容器内の水に CO_2 気泡が容器の底から流入し、水へ溶解・拡散していくシミュレーションを行った。容器の大きさは $1.5\text{m} \times 7\text{m}$ と設定し、ニオス湖とほぼ同じアスペクト比であるが、スケールは約 $1/130$ である。計算負荷が比較的軽いこの小スケールの計算条件でパラメータ解析に取り組んだ。

Fig. 1 に CO_2 流入後の容器内における CO_2 濃度分布の時間変化の計算例を示している。 CO_2 気泡は浮力によって上昇するが、溶解した CO_2 は水より重いいため容器下部へ広がっていく様子が見られる。この計算では容器内の計算要素数を 88528 に設定して十分に要素の大きさを小さくしており、 CO_2 プルームの細かい複雑な挙動を再現できている。しかし要素数が少ない場合は CO_2 の溶解パターンが単純化され、プルームの正確な挙動を再現できていない(Fig. 2a)。適切な要素数を評価するために、容器水表面からの CO_2 濃度放出量の積算値の時間変化を調べたところ、要素数約 20000 以上でプルームの運動をほぼ定量的に捉えられることがわかった(Fig. 2b)。以上の解析で明らかになった要素数約 20000 の設定条件のもとで、容器底からの CO_2 流入質量を変化させるパラメータ解析を行ったところ、 $10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$ 以下の低流入量において、容器下部への CO_2 の拡大がより支配的になり、水表面からの CO_2 放出量が非常に小さくなることがわかった(Fig. 3)。

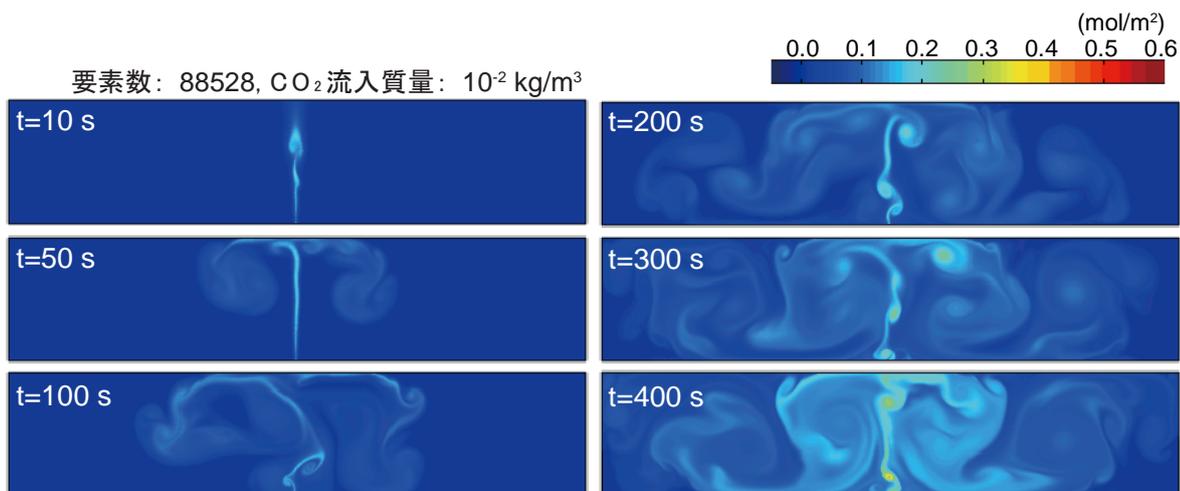


Fig.1 底部からの CO₂ 流入後の容器 (1.5m×7m) 内における CO₂ 濃度分布の時間変化

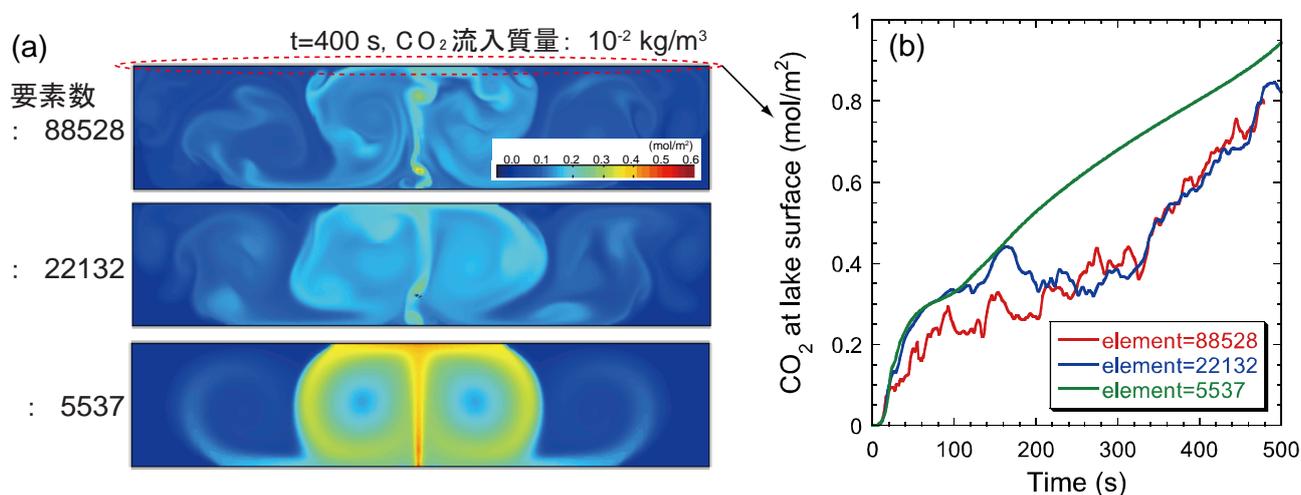


Fig.2 計算要素数を変化させた場合の容器内 CO₂ 濃度分布(a)と、容器水表面からの CO₂ 濃度放出量の積算値の時間変化(b)

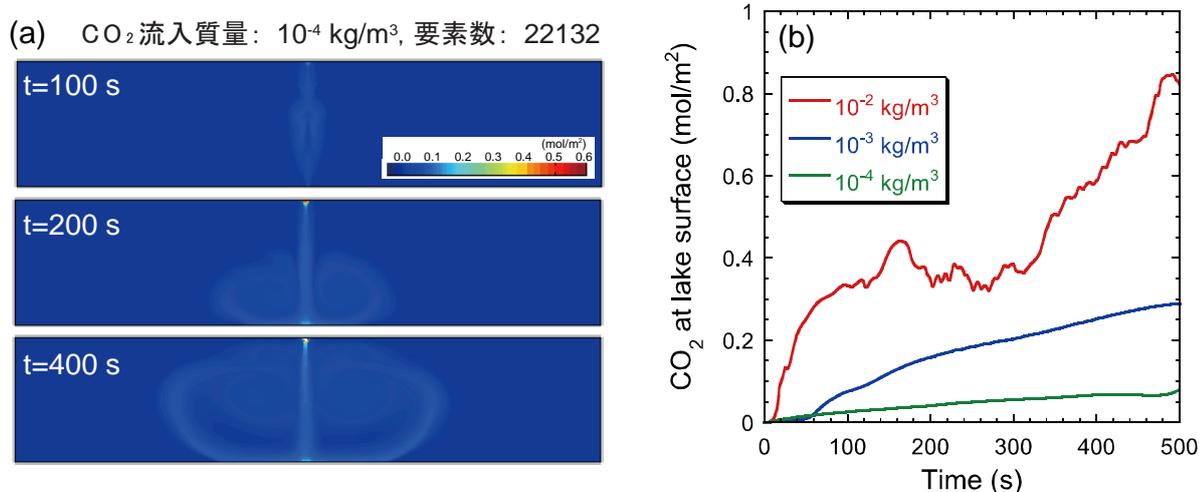


Fig.3 (a)低 CO₂ 流入質量における容器内 CO₂ 濃度分布の変化. (b)容器水表面からの CO₂ 濃度放出量の積算値の時間変化の CO₂ 流入質量依存性.

次に、ニオス湖の形状を正確に再現した場合のシミュレーションに取り組んだ。まず、Kusakabe et al. (2008, *Geochem. J.*, 42, 93-118) に基づき、ニオス湖の東西南北断面形状を実スケールの 1/200 で再現した二次元の容器を設定し、CO₂ 流入シミュレーションを行った。その結果、沿岸部の水深が浅くなっている部分で CO₂ プリュームの挙動がより複雑になることが確認された (Fig. 4)。さらに、水深約 210m の実スケールにおけるシミュレーションにも着手した。その結果、CO₂ の拡散過程は湖の下部のみに限定され、湖水面への活発な CO₂ 放出は見られなかった。一方で、CO₂ が活発に湖底へ拡大した後、湖水内に CO₂ の濃度成層構造が形成されていく過程が再現された (Fig. 5)。昨年度実施した CO₂ プリュームの一次元物理モデルの解析によると、この湖水内の CO₂ 成層構造が湖水爆発の有無を支配する重要な条件となることがわかっている。従って、Fig. 5 で示された CO₂ 成層構造形成のシミュレーションは、湖水爆発への準備過程を理解するうえで有用になると考えられる。

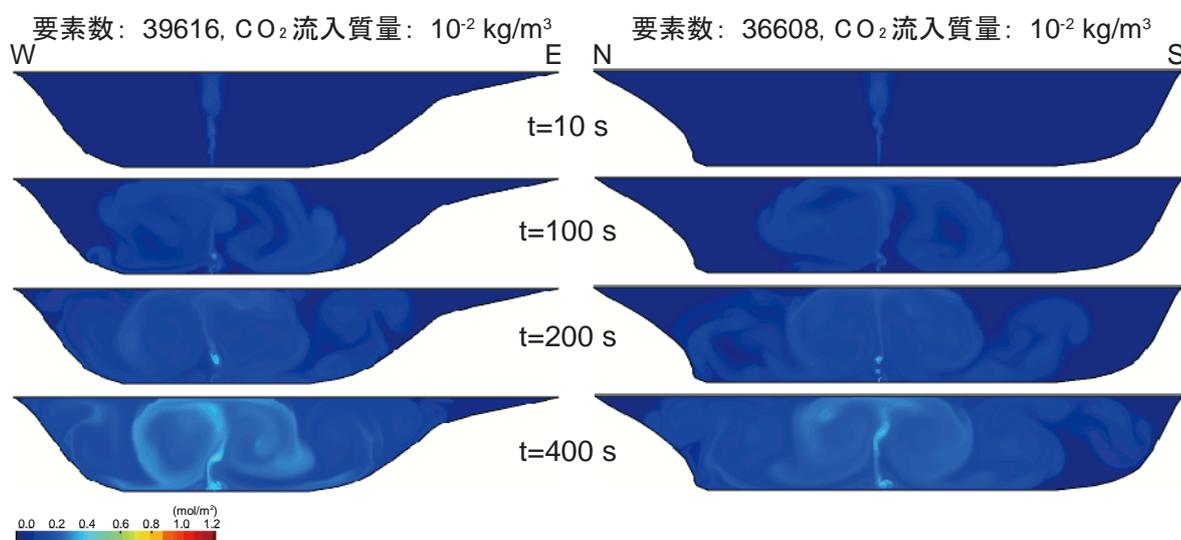


Fig.4 ニオス湖の WE, NS 断面形状(スケール 1/200)を再現した容器内における CO₂ 流入後の CO₂ 濃度分布の時間変化

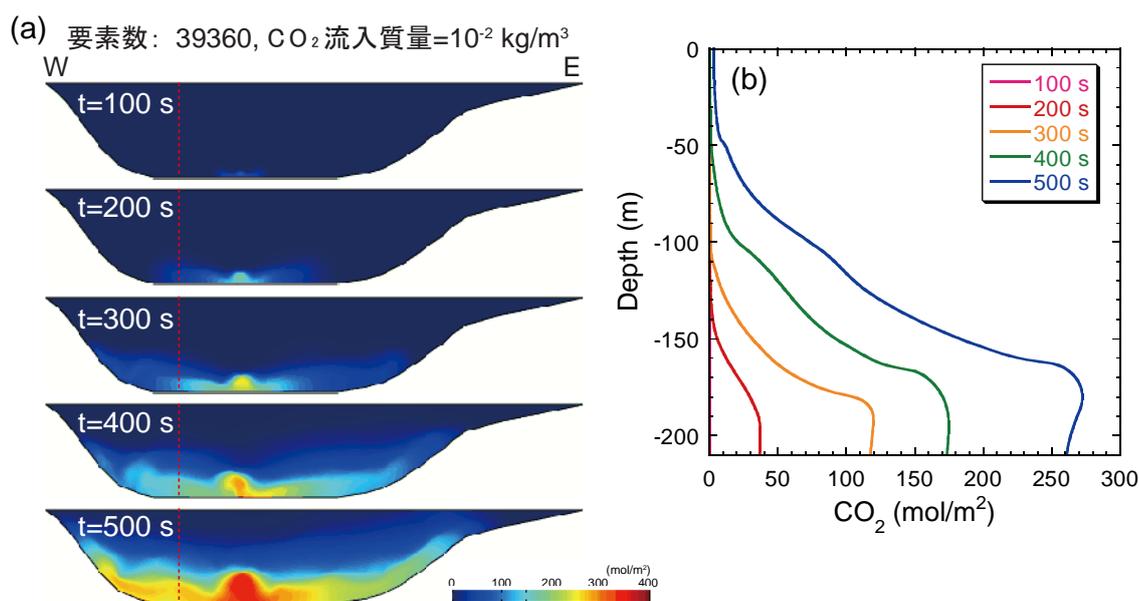


Fig.5 (a)ニオス湖の WE, NS 断面形状と実スケール(約 210m×1200m)を再現した容器内における CO₂ 流入後の CO₂ 濃度分布の時間変化. (b) 図 a 点線上における CO₂ 濃度の時間変化.

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

本グループに関しては、数値計算という研究手法の性質上、カメルーンにおける現地調査等のカウンターパートとの連携は現在のところ行われていないが、本年度実施した二次元数値シミュレーションの結果はデータベース化しており、将来の技術移転後の再解析にも有効利用できる環境を整えている。

2. 4. 研究題目「ニオス・マヌン湖の CO₂ 供給システムの解明」グループの実施内容

研究機関名・研究代表者:大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻・佐伯和人

1) 研究のねらい

本グループの全期間を通しての目的は、ニオス・マヌン湖の CO₂ 供給源とその拡散経路を解明すること、および、湖水爆発の前兆をモニター可能な自動化を取り入れた観測態勢を整えることである。

2) 研究の実施方法

具体的には、マルチビームソナーによる湖盆地形測量、ハイドロフォン、温度計、溶存二酸化炭素計による湖水内の三次元的観測を元に CO₂ 供給源を特定し、湖水周辺の濃度測定により CO₂ 拡散経路を把握する。そして、それらの知見をもとに、前兆現象を継続的に調査できる自律航法観測ボートなど現地の環境に適したモニターシステムを開発提供することを計画している。

3) 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

23 年度は、観測ボートおよび、湖底地形を測量するためのソナーを購入し、カメルーンでの使用の前に日本の火山湖(池田湖、鹿児島県)にて科学データを採取する訓練を行った。ボートへのソナーの取り付け方法や、運用方法に関して、現地で使用するボートや、現地の船着き場、湖の浅瀬やロープなどの障害物といった現地状況にあわせた事前調整が当初の想定以上に必要であることがわかった。従って、24 年度も国内(本栖湖、山梨県)にて運用訓練を行い、運用に習熟するとともに、現地に合わせたマルチビームソナー取り付け方法の設計に必要な情報を得た。

当初は溶存二酸化炭素測定装置を無人観測ボートから上げ下ろしするモニター方法を考えていたが、水中音速度の変化をモニターするという方式であれば、修理がままならない現地でも維持しやすいセンサーができるはずである。23年度はこの測定方法の実用性を検証するためのデータを取得した。ソナーの校正用データを取るための水中音速度測定装置に温度センサーを付加し、圧力、温度、音速度が測定できるものに改良した。二酸化炭素が溶け込むと水中の音速度が早くなるので、温度や溶存イオンの影響を取り除けば、二酸化炭素モニターになるというアイデアである。琵琶湖にて音速度センサーの運用訓練を行った後、カメルーンのニオス湖、マヌン湖で水中音速度垂直プロファイルを測定した。図 1 にニオス湖の測定点、図 2 にマヌン湖の測定点を示す。

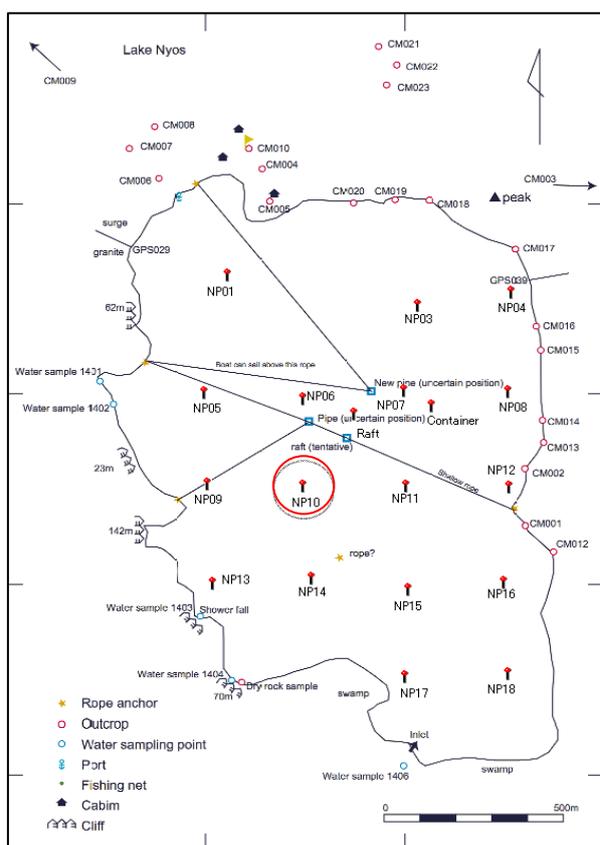
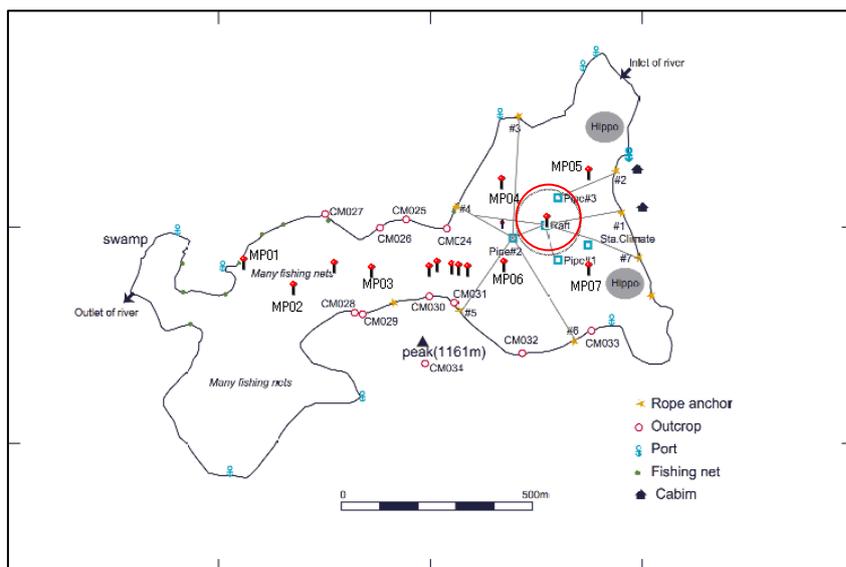


図 1(左) ニオス湖音速度垂直プロファイル測定点 (赤ピン)

図 2(上) ママヌーン湖音速度垂直プロファイル測定点 (赤ピン)

22 年度に作成した湖外周図にプロット。赤丸の測定点の化学定量データを元に音速法に必要な係数を得た。

測定の結果、ニオス湖は、場所による音速度プロファイルの違いはなく、また、日変化もないことがわかった。すなわち、ニオス湖の湖水は大変安定した成層構造をなしていることが示唆された。一方で、マヌン湖は、音速プロファイルが東側の湖と西側の湖で異なることがわかった。このことから、東側の湖はガス抜きパイプによって溶存二酸化炭素濃度が下がっているが、西側の湖では依然として大量の二酸化炭素が溶け込んだままである可能性が高いことが示唆された。一方で、湖面直上の空中二酸化炭素濃度を測定する装置も現地使用を開始し、測定実験を行った。結果、ニオス湖の各所で高濃度の二酸化炭素を観測したが、それらは全て、ガス抜きパイ

プから発生した二酸化炭素が風下に流れて来ているものであることがわかった。23 年度の測定では、バックグラウンドレベルの二酸化炭素濃度を確認することができた。24 年度は、音速度から溶存二酸化炭素濃度を定量的に推定するための基礎研究を行うため 10 気圧までの実験が可能な圧力水槽を設計製作し、室内実験システムを完成させた。音速度と溶存二酸化炭素濃度の間の関係として、 $\Delta v = k_1[\text{CO}_2(\text{aq})] + k_2[\text{HCO}_3^-]$ という式を仮定した。 Δv は音速度の純水からの変化分、 k_1 は溶存 CO_2 が音速に与える影響、 k_2 は水中の CO_2 から生成した HCO_3^- イオンが音速に与える影響を現している。 k_1 を圧力容器を用いた室内実験により求めた。また、 k_2 は現地で取得した音速、温度、圧力、電気伝導度データ、およびシリンジ法で求められた全 CO_2 含有量データより求めた。その結果、陽イオン組成比が大きく変化しない限り、音速度と電気伝導度、温度から、 $\pm 10 \text{ mmol/kg}$ 以内の精度で溶存 CO_2 濃度が推定できることがわかった。ハードウェア面では、来年度の現地観測の準備として、湖底の画像を撮影する水中カメラを特注して準備した。また、マルチビームソナーを安全に運用するための事前測深や水中障害物の画像化をする音波探査装置も準備した。これらの装置と音速法による水中二酸化炭素濃度の3次元測定装置などを搭載して総合運用ができるボートを製作した。

4) カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

日本国内におけるソナーの運用訓練は、23 年度は池田湖において IRGM スタッフの 2 名も一緒に行った。また、23 年度 3 月の現地調査では、ニオス湖とマヌ湖にて、音速測定装置をボートから上げ下ろして水中音速の 3 次元分布を測定する実験、および湖水面直上の空中二酸化炭素濃度を測定する実験を IRGM スタッフと一緒に、測定方法やその意義についての情報を伝えた。24 年度の日本国内におけるソナーの運用訓練(山梨県池田湖)では、東海大学に留学しているカメルーン人留学生 2 名も一緒に行い、後年のカメルーンでの運用のための人材を育成した。

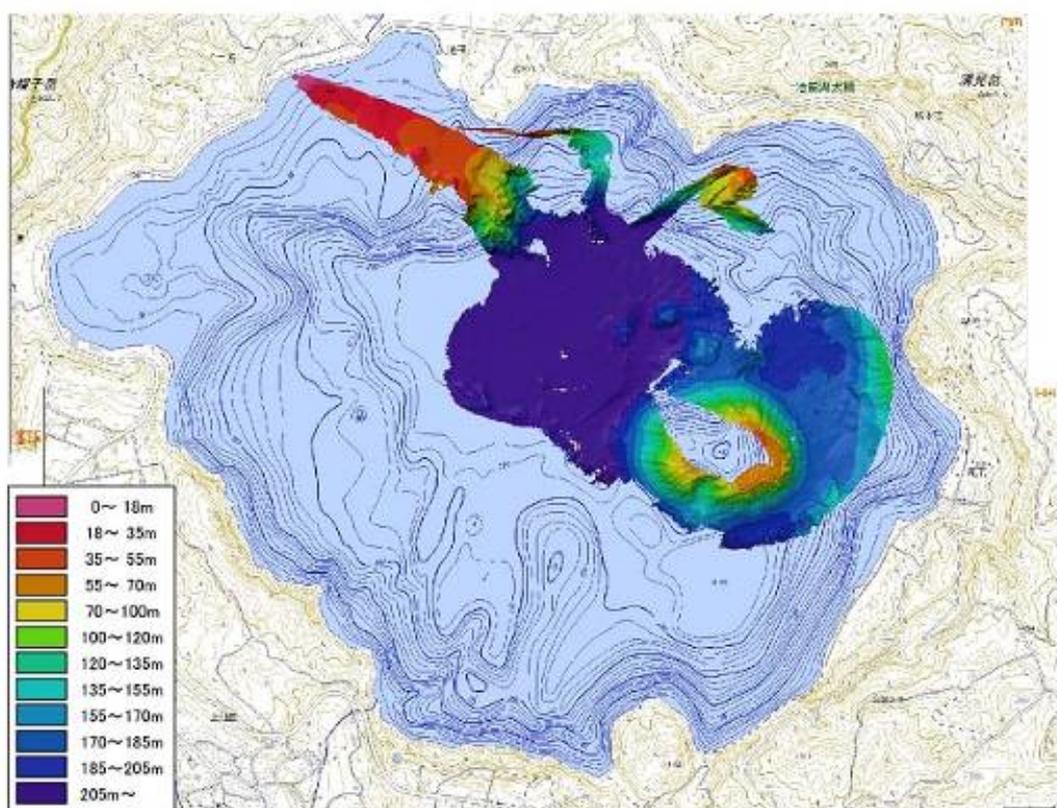


図3. マルチビームソナーにより明らかとなった池田湖の部分的な詳細湖盆地形

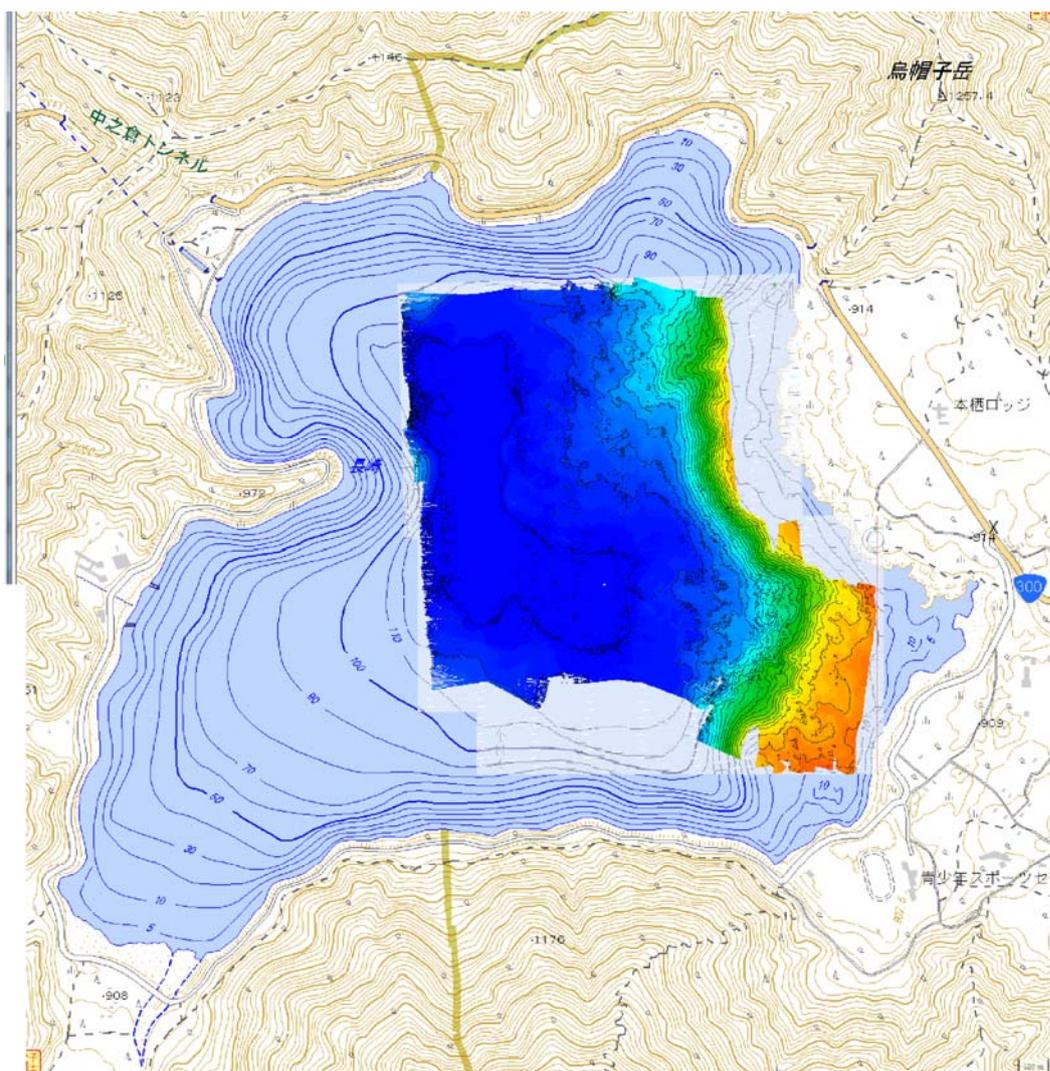


図4. マルチビームソナーにより明らかとなった本栖湖の部分的な詳細湖盆地形

5) 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

ソナーとは、音波の反射を利用して湖底の地形を測量する装置であるが、地形の再現精度をあげるためには音速の垂直分布をあらかじめ調べておく必要がある。もともとその音速分布を調べる装置がソナーシステムには組み込まれていたのであるが、水中音速そのものが溶存二酸化炭素量のモニターに使えるはずであるというアイデアの元、このセンサーに温度センサーを追加して、温度・圧力・音速度を同時に測定できるものに改良し、ニオス湖、マヌ湖で測定を行った。そして、室内実験とあわせて、この測定方法の有効性を確認することができた。音速度の変化を元に溶存二酸化炭素量を測定する方式であれば、構造が簡単で安価なセンサーを開発することができ、センサーを上げ下ろして水深方向の変化を測定するという複雑な運用をしなくても、最初から深度を変えた複数のセンサーを常設することも可能である。今後は、水中音速度を積極的に利用する方式のモニターシステムを構築していく方針である。

2. 5. 研究題目:カメルーン火口列の火口湖周辺における噴火活動履歴の解明

研究機関名・研究代表者:熊本大学教育学部理科教育・宮縁育夫

①研究のねらい

火山ガス災害が発生したニオス湖とマヌン湖など、カメルーン火山列の火山周辺域において、カメルーン側研究者と協力して地質学的調査を実施し、それらの火山の噴火活動履歴と主な噴火の特徴を解明する。

②研究実施方法

期間全体の研究目的を達成するために、まず平成 23 年度は火山ガス災害が発生したニオス湖およびマヌン湖地域に関する既往の研究成果のレビューやカメルーン側研究者が保有するデータや情報収集を行うとともに、平成 23 年度および以降の年度では、現地において地質学的調査を実施して、同地域の地形地質を明らかにする。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 23 年度

ニオス湖およびマヌン湖地域の噴火活動史解明に向けて、初年度は既往の研究成果などから同地域の地形地質の概要把握に努めたが、火山噴出物層序や噴火年代について多くの課題が残されていることがわかった。

2011 年 1 月と 12 月に主にニオス湖周辺で噴出物の露頭観察、岩石および土壌の採取を行った(Fig. 1)。火砕堆積層のなかから ^{14}C 年代測定に利用することが可能な土壌試料を採取した。試料は日本に持ち帰り、 ^{14}C 年代測定を実施した。その結果、ニオス湖を形成した噴火は 1200 年以上前に起きたと推定された。但し、この年代は土壌の炭素含有量が低いために信頼性に乏しく、今後充分な大きさの炭化木片を採取して年代を再測定する必要があるだろう。

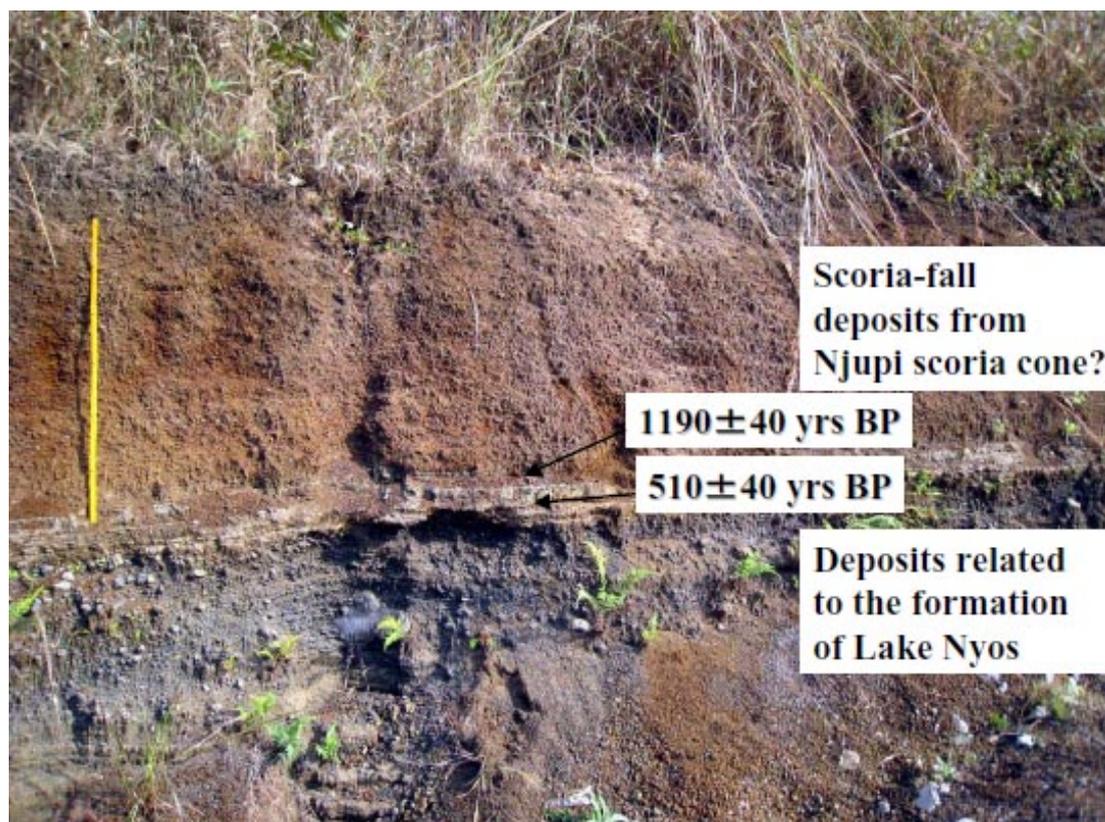


Fig. 1 ニオス湖周辺における露頭

平成 24 年度

本年度はカメルーン共和国における現地調査を実施できなかったが、前年度までの調査結果をとりまとめ、ニオス湖を形成した噴火堆積物の層序の概要を明らかにした。ニオス湖周辺域には基盤岩である約 6 億年前の花崗岩質岩石が広く分布している。その基盤岩を直接覆って、ニオス湖(マール)形成時に噴出したと考えられる火山砕屑物が堆積していた。この火山砕屑物はよく成層した火砕サージ堆積物を主体とし、湖の東岸や北岸を中心に分布しており、最大層厚は 60 m 程度に達していた。また、北東岸の火砕サージ堆積物直下には降下スコリア堆積物が存在しており、その一部は強溶結していた。さらに我々の調査によって、その降下スコリア堆積物の直下に淘汰の悪い無層理の火砕流堆積物が発見された。この火砕流堆積物はニオス湖北端の天然ダム下流側にも露出しており、基盤岩を覆っていた。



Fig. 2 ニオス湖東岸における火山噴出物層序

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

平成 23 年度の現地調査はカメルーン国立地質調査所(IRGM)研究者と協力して行い, 調査方法とその意義について情報を伝達した. 平成 24 年度は現地調査を行うことができなかったが, 電子メールや書面等により IRGM 研究者との情報交換を行った.

⑥当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

平成 24 年度は課題担当者の大学用務や健康状況等により, カメルーン共和国での現地調査を行うことができなかった. 今後は大学用務に支障がない 8 月などに現地調査を行いたいと考えている. この時期は同国の雨季にあたるが, 乾季以外にも調査を実施できる体制を整備されることを希望する.

2. 6. 研究題目:地下水流動系の解明

研究機関名・研究代表者: 東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻・穴澤活郎

①研究のねらい

ニオス湖ならびにマヌン湖の地下水流動を GIS・リモートセンシングならびに地球化学的手法を用いて解明する。

②研究実施方法

(1) 地形解析: 衛星画像や航空写真と現地踏査により地形を把握する

(2) 地球化学的手法:湧水・井戸水・表流水・湖水を採取し化学成分や同位体比を求める

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

(1) 地球探査衛星のステレオ画像から DEM データを発生させ、GIS ソフトを用いてニオス湖周辺の地形図を作成した(Fig.16)。また、1960 年代に撮影された調査地域の航空写真を入手、整理した。

ニオス湖周辺の詳細地形図によるとニオス湖周辺の基盤は北西に傾く構造があり、南東から北西に地下水の流動が暗示される。

平成 24 年度は陸域観測技術衛星 Terra ならびに Spot が提供する空間情報を用いて、地形解析により当該調査地域の地下水の流動系を推定した。平成 25 年度は目的地周辺で湧水・井戸水・表流水・湖水を採取し、化学成分や同位体比から水域をグルーピングし、地形解析の結果と合わせて地下水の流動系を解明する。

また、これに合わせて温室効果ガス観測技術衛星いぶき(GOSAT)の観測データを用いてニオス湖・マヌン湖ならびに周辺地域の二酸化炭素濃度分布を定量化し、放出量・移動量・吸収量の推定を行い、包括的な CO₂ の流動形態を把握する。

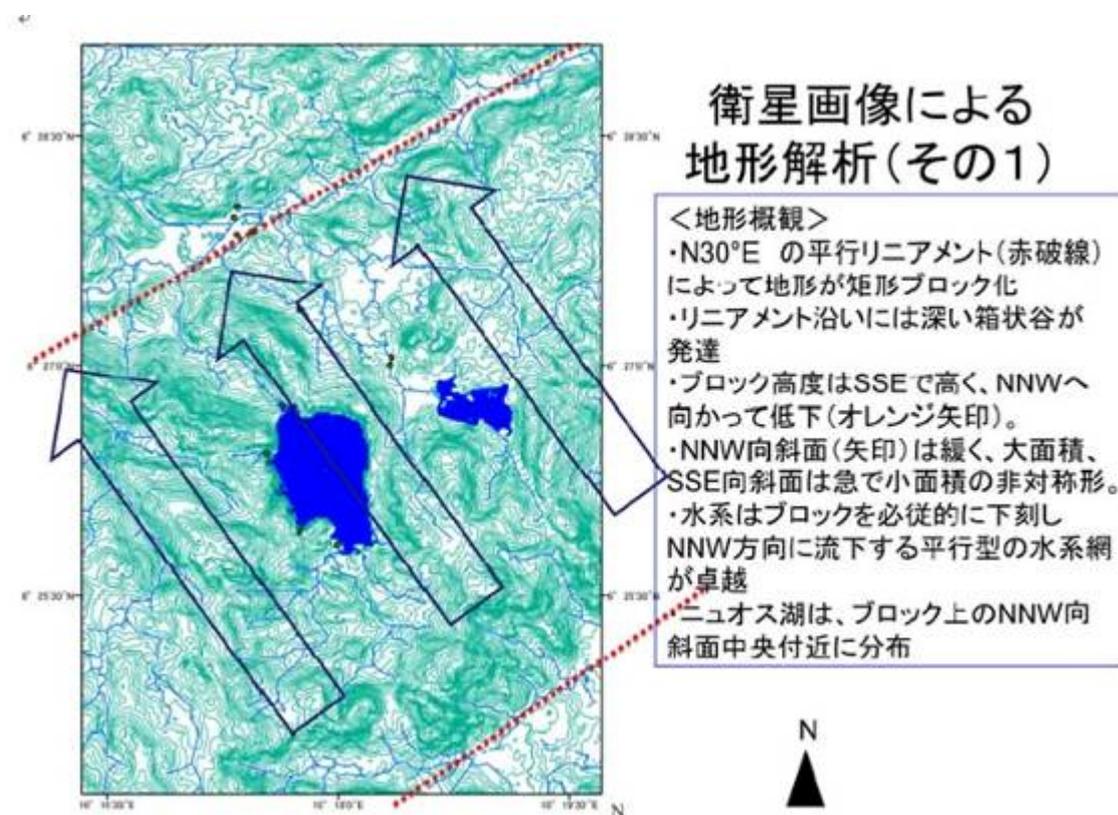


Fig. 16 ニオス湖周辺の地形構造

(2) ニオス湖ならびに湖周辺において平成 23 年中に2回の調査を実施した。現地では、湖沼・井戸・河川・湧水の約 60 地点において pH・EC・ORP や重炭酸イオンの現地測定を実施し、計 50 の水試料を採取した。また、これら水試料は日本に持ち帰り、主要成分と重金属類について定量分析を行った。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

現地調査はカウンターパートである IRGM の研究員とともに実施し、現地での水質分析法の教育訓練を実施した。また、地化学データの GIS による提示方法についての指導を行った。

2. 7. 研究題目:カメルーン火山列 Oku 火山群における火山岩の成因に関する地球化学的研究
研究機関名・研究代表者:東京工業大学地球惑星科学科・横山哲也

① 研究のねらい:

Cameroon Volcanic Line 北部、Oku Volcanic Group に産する火山岩の地球化学的研究を通じ、火山岩の成因を解明する。特にニオス湖における CO₂ ガスの供給源となったマグマの起源について明らかにすることを目的とする。

② 研究実施方法:

Oku Volcanic Group のフィールド調査を行い、火山岩を採取し、それらの岩石学的・鉱物学的記載を行う。その後、XRF(蛍光 X 線分析)を用いて主成分元素を、ICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析計)を用いて微量元素を、更に TIMS(表面電離型質量分析計)を用いて放射性起源同位体(Sr・Nd・Pb・Os など)を測定する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況:

2012 年 11-12 月に Oku Volcanic Group においてフィールド調査を行い、100 点以上の火山岩を採取した。これらの試料について、粉末試料の作成、主成分及び微量元素濃度の測定をすすめている。

④ カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

2012 年 4 月に Asobo Nkengmatia Elvis Asaah 氏が東工大地球惑星科学専攻の博士課程に入学した。横山研究室に所属し、実験室(クリーンルーム)での化学分析および分析機器(XRF・ICP-MS)の使用法を会得しつつある。

⑤ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

該当せず

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 0 件、国際 2 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 1 件、海外 3 件)
- ③ 論文詳細情報

Y. YOSHIDA, ISSA, M. KUSAKABE, H. SATAKE and T. OHBA

An efficient method for measuring CO₂ concentration in gassy lakes: Application to Lakes Nyos and Monoun,

Cameroon, *Geochemical Journal*, Vol. 44, pp. 441 to 448, 2010

大場武, カメルーン火口湖ガス災害防止の総合対策と人材育成, 日本地震学会ニューズレター, 23, 4,p23-25 (2011)

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

Issa, Takeshi Ohba, Fantong Wilson, Yutaka Yoshida, Fouepe Alain, Minoru, Kusakabe, UrumuTsunogai, Yu Oginuma, Chako Tchamabe Boris, Gregory Tanyileke, Sigha Nkamdjou, Hiroshi Satake and Hell, J., V. Contribution of methane to the total gas pressure in deep waters at lakes Nyos and Monoun (Cameroon, West Africa) *Geochemical J.* (accepted).

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

4. プロジェクト実施体制

(1)「モニタリング」グループ(研究題目:カメルーン火口湖ガス災害防止の総合対策と人材育成)

①研究者グループリーダー名: 大場武(東海大学・教授)

②研究項目

ニオス・マヌーン湖の定期的採取および自動観測ブイによりモニタリングを実施し、湖に残存するCO₂の量の時間変化を把握する。これらの情報と推定される湖水爆発の条件を総合し、カメルーン政府が湖の安全宣言を出すために必要な情報を提供する。脱ガスパイプでは排除できない深層湖水に溶存したCO₂を排除するために、湖水を動力ポンプで汲み上げ脱ガスさせる試行実験をマヌーン湖で行う。プロジェクト終了後も湖の研究がカメルーン国内で継続されるように留学生を東海大学で受け入れ研究人材を育成する。

(2)「CO₂-岩石反応」グループ(研究題目:CO₂-岩石反応を含む物質移動現象の解析)

①研究者グループリーダー名: 上田晃(富山大学・教授)

②研究項目

CO₂-岩石反応を実験的に検証し反応を規制している因子を把握し、長期的な水質変動・CO₂フラックスなどの予測を行う。特に、岩石あるいは鉱物の溶解・沈殿現象は、湖底堆積物の変化や水質変化に寄与することから、物質バランスを考慮しながら検討を行ってゆく。これらの結果をもとに、ニオス・マヌーン湖の長期的な水質変動を予測し防災に寄与する。プロジェクト終了後も湖の研究がカメルーン国内で継続されるように留学生を富山大学で受け入れ研究人材を育成する。

(3)「シミュレーション」グループ(研究題目:湖水爆発の数値シミュレーション)

①研究者グループリーダー名: 小園誠史 (防災科学研究所・研究員)

②研究項目

湖水爆発を数値シミュレーションにより再現する. シミュレーションでは本プロジェクトの観測データを活用して境界条件を設定する. シミュレーションでは湖水内におけるCO₂ 濃度分布, 湖面からのCO₂ 放出量などのパラメータと湖水爆発現象の有無の関係を定量的に調べる. これにより湖水爆発が生じる条件を解明できると期待される.

(4)「CO₂ 供給系」グループ(研究題目:ニオス・マヌーン湖のCO₂ 供給システムの解明)

①研究者グループリーダー名: 佐伯和人 (大阪大学・准教授)

②研究項目

ニオス・マヌーン湖の下部に存在するマグマは定常的にCO₂ ガスを放出している. 放出されたCO₂ は地殻内を上昇し, 一部が地下水に吸収され熱水を形成し湖底に到達すると考えられる. 地下水に吸収されないCO₂は土壌ガスとして大気に放出されていると考えられる. 本研究ではさまざまな手法を適用しマグマから湖水あるいは大気へ移動するCO₂ ガスの動きを総合的に捉える.

(5)「噴火履歴」グループ(研究題目:カメルーン火口列の火口湖周辺における噴火活動履歴の解明)

①研究者グループリーダー名: 宮縁育夫 (熊本大学・准教授)

②研究項目

ニオス湖やマヌーン湖をはじめとするカメルーン火口列火山において地質学的調査を実施し, 噴出物の層序的・岩石学的特徴を明らかにする. 火山ガス災害が発生したニオス湖とマヌーン湖においては, 周辺における火山噴出物の分布状況等に関する調査を行って, それらの火口湖を形成した噴火の特徴を明らかにする.

(6)「地下水」グループ(研究題目:地下水流動系の解明)

①研究者グループリーダー名: 穴澤活郎 (東京大学・准教授)

②研究項目

マグマから放出されたCO₂ ガスは主に地下水に吸収されニオス・マヌーン湖に供給されていると考えられる. マグマから放出されたCO₂ の行方は, 地下水の動きに依存している. 本研究ではニオス・マヌーン湖周辺領域における地下水流動をGIS・リモートセンシングならびに地球化学的手法を用いて解明し湖に蓄積するCO₂ の収支を包括的に把握する.

以上