

阿蘇火山火口湖からの湖面蒸発量推定高精度化の試み ーラマン・ライダーおよび水温観測ブイによる観測ー

京都大学大学院理学研究科

寺田 暁彦*・鍵山 恒臣

京都大学生存圏研究所

中村 卓司**・太田 修史

北海道大学理学研究院

橋本 武志

*現所属 東京工業大学火山流体研究センター

**現所属 国立極地研究所宙空圏研究グループ

1. はじめに

阿蘇火山には、東京ドームの 1.5 倍の面積を有する火口湖が存在する(図 1(a))。湖は水温 70 °C、湖水の pH は 0 前後、全周にわたり比高 150 m の断崖に囲まれるなど(図 1(b))、湖は極端に厳しい自然環境にある¹⁾。

この火口湖からは、旧型原発 1 基分に相当する膨大な熱が放出されていると考えられている²⁾。このような火口湖から蒸発する水量を精度よく測定することで、火山地下浅部の流体輸送機構を定量的に理解し、火山噴火を予測するための重要な情報が得られる³⁾。これまで、湖面蒸発量は、赤外カメラで測定した水温に基づき、Ryan の式⁴⁾などを用いて推定されてきた。しかし、Ryan の式の信頼性、水温観測値の信頼性の問題から、蒸発量を正しく評価することが困難であった。

そこで、生存圏研究所が開発した可搬型ラマン・ライダー⁵⁾を阿蘇火山に持ち込んで、湖面から蒸発する水蒸気量を測定することを試みた。また、湖面に特別なブイ設置して湖水温度を直接測定し、Ryan の式から計算される湖面蒸発量とライダーで測定した湖面蒸発量とを比較した。

2. ライダー観測

観測は、2008 年 10 月 15 日に火口南西縁(図 1(b)の白丸)から、同 16 日には火口南縁(図 1(b)の黒丸)から行った。以下では、16 日の観測結果について述べる。観測時の気象条件は、

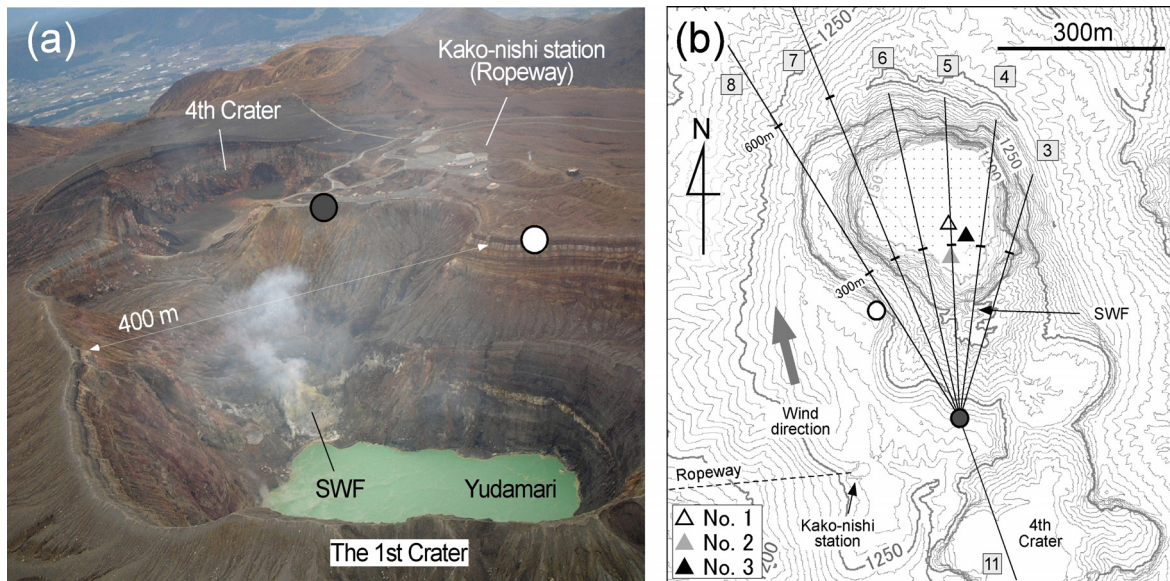


図 1. (a)阿蘇火山の火口湖(湯だまり)の空中写真(吉川 慎氏撮影)。SWF は、南壁噴気孔群の位置を表す。2008 年 10 月 15 日および 16 日のライダー設置点は、それぞれ○と●で示した。(b)火口湖周辺の地形図。三角は、3 台の水溫観測ブイ(寺田・吉川, 2009)の設置位置である。●から伸びる 7 本の直線は、それぞれ側線 data3-8 および 11 に対応する。

気温 13.1 - 14.0 °C, 湿度 64 - 74 % 前後, 気圧 893 hPa, 南の風 2 m/s 前後であった。

観測された水蒸気混合比分布の例として、図 2(a)に側線 7(湖面上の側線, On fumarole)と側線 11(湖面と反対方向の側線, Off fumarole)を示す。ここで、ライダーの視線は水平であり、図 2 の横軸は図 1(b)の水平距離に対応できる。距離 450 m よりも近傍の水蒸気混合比は、ばらつきながらも 8 g/kg 前後であった。一方、距離 450 - 800 m では、側線 11 よりも有意に大きな混合比を取る。同時に撮影された高感度ビデオカメラ映像によれば、南南西の風により、噴煙は火口の北側へ流れていた(図 2(c))。すなわち、距離 450 - 800 m に見られる水蒸気混合比の増加は、湖面蒸発した水蒸気を捉えたものと考えられる。

図 2(a)によれば、火口壁の外側に相当する距離 700 - 800 m 付近にも、水蒸気混合比の増加が見られる。これは、南風により、噴煙が観測視線方向へ流下していたためであろう。エアロゾルを示す後方散乱比についても(図 2(b)), 水蒸気混合比に対応するように増加している。ただし、水蒸気混合比が増加していない距離 300 - 450 m 付近でも、後方散乱比は顕著に増加している。この増加は、火口周辺で観察される硫酸ミスト(噴気孔 SWF(図 1)から噴出した二酸化硫黄が、エアロゾル状になって浮遊しているもの)に対応するのかもしれない。

図 1 に示したように、阿蘇の火口湖は直径 200 m 以上に達し、湖面から蒸発した水蒸気は面的に分布していると思われる。そこで、ライダーの視線方向を水平に 10° ずつ移動させなが

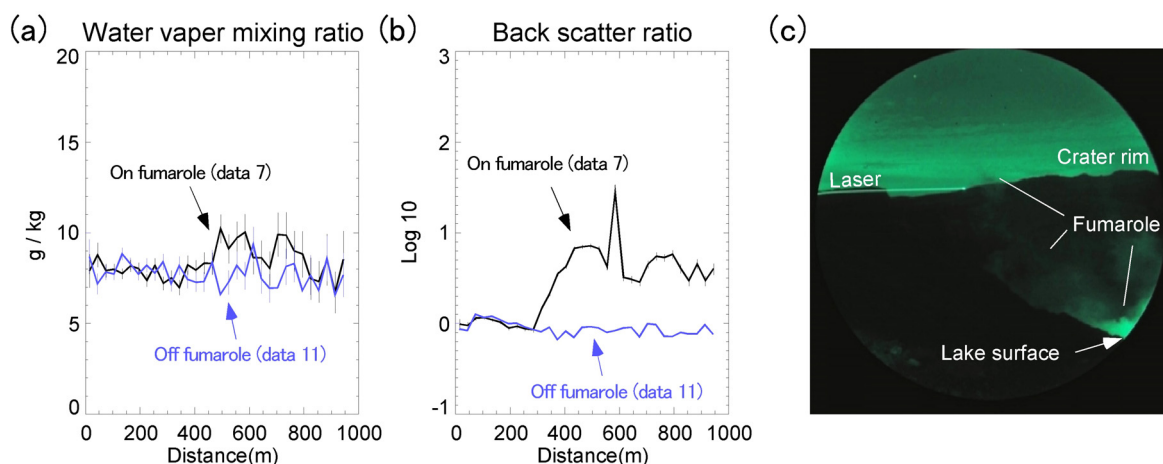


図 2. 2008 年 10 月 16 日観測された、阿蘇火山火口湖における(a)水蒸気混合比と(b)後方散乱比。ここで data 7 は火口湖上の側線を示す。data 11 は背景水蒸気量を求めるために設けた、火口湖の存在しない方向の側線である(図 1(b)参照)。(c) 同時刻の高感度ビデオ映像。

ら、湖面上の 6 方向について計測し、コンターマップを描画したのが図 3(a)である。ここに示したのは、観測された側線 3-8 の水蒸気混合比から、背景の水蒸気混合比(data 11, 平均 7.94 g/kg)を差し引いた値、すなわち湖面から蒸発したと思われる水蒸気に相当する。図 3(a)に示された水蒸気の分布は北側に偏っており、当時の映像に映し出された噴煙の流向と整合的である。

同様に、data 5 の視線方向について、仰角をずらしながら 5 回測定し、水蒸気増加量についてコンターマップで表現したのが、図 3(b)である。水平距離 100 - 300 m と 400 m 付近に、比較的多くの水蒸気が分布していることがわかる。これらは、それぞれ南壁噴気(SWF)と、湖面蒸発に由来する水蒸気に対応すると思われる。なお、湖面付近に水蒸気増加が見られない(data 13, 14)。これは、南風によって湖面蒸発した水蒸気が火口北側に吹き寄せられ、その補償流として降下してきた上空の空気が存在するためと思われる。

3. 水温観測

絶壁に囲まれた阿蘇火山の火口湖は、水温が高く、しかも強酸性である。今回、新たに水温観測ブイを開発し(図 4)、これを設置・運用する技術を確立させた。その詳細は寺田・吉川⁶⁾で述べ、ここでは結果のみ記述する。

水温観測ブイ 1 号機は 2008 年 4 月 25 日に、2 号機は 7 月 7 日に設置された。しかし、同 8 月上旬かけて、おそらく落雷を原因として両機とも故障した。そこで、2009 年 2 月 12 日には 3 号機

(a) Horizontal distribution of water vapor
[g/kg]

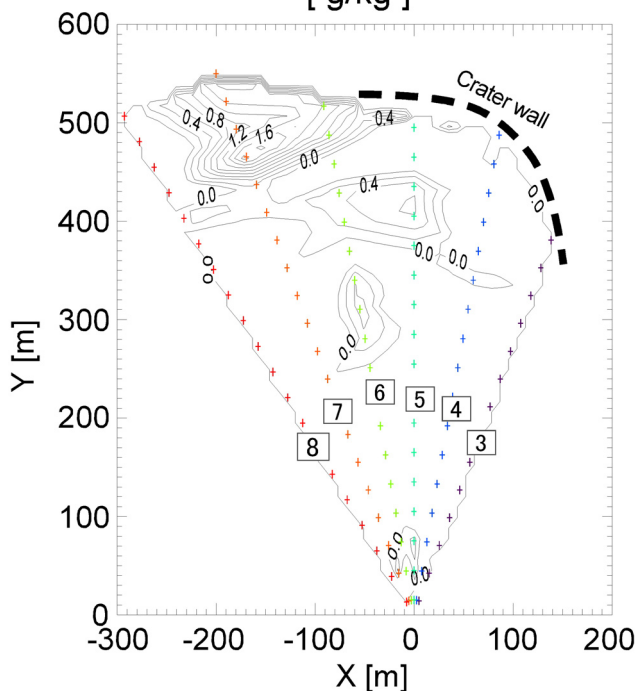


図 3 (a) 2008年10月16日観測された、火口湖上空の水蒸気混合比分布。ここに示したコンターは、側線 3-8 の混合比から、背景の混合比 (data 11) を差し引いた値である。四角で囲んだ数字は、それぞれ側線の番号 (図 1(b)) である。

(b) Vertical distribution of water vapor [g/kg]

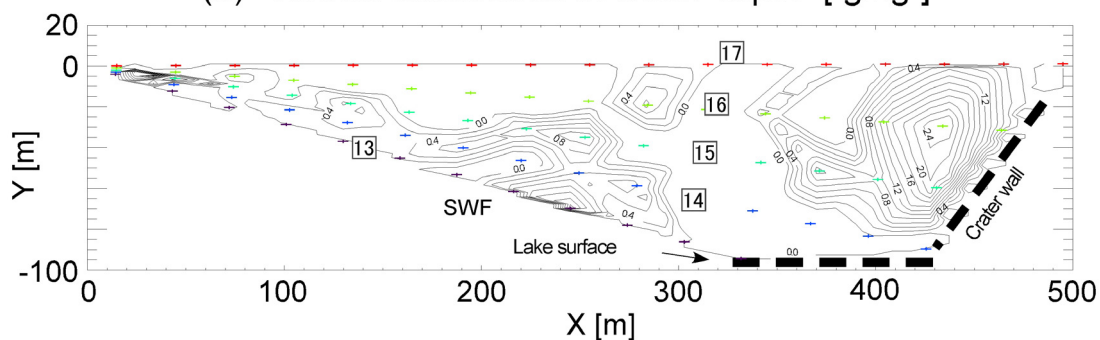


図 3 (b) 側線 5 (data 5) の方位について、視線方向を鉛直にずらして計測し、(a)と同様に示した水蒸気増量分布。

を設置した (図 1(b) の三角)。

今回の観測により、周期的な水温変動の存在が明らかになった (図 5 の太線)。このような水温変動は、気象要因を考慮した数値モデル ¹⁾ により、適切なパラメータを選ぶことで再現できる (図 5 の細線)。

また、火口縁から実施した赤外放射温度計との同時観測を、合計 22 回行なった。その結果、火口縁で得られる水温 T_{IR} は、ブイで得られる水温 T_B よりも平均 8.3 °C 低く計測されてい

ることがわかった。また T_B と T_{IR} の経験的關係として、

$$T_B = 1.09T_{IR} + 3.05 \quad (1)$$

を得た。本式に、さらに風の効果 τ を考慮することで、ブイの未稼働期間についても、 T_{IR} を用いて確からしい湖面温度が得られる。すなわち、(1)式を用いることで、 T_{IR} を用いた蒸発量計算の信頼性を著しく向上させることができる。

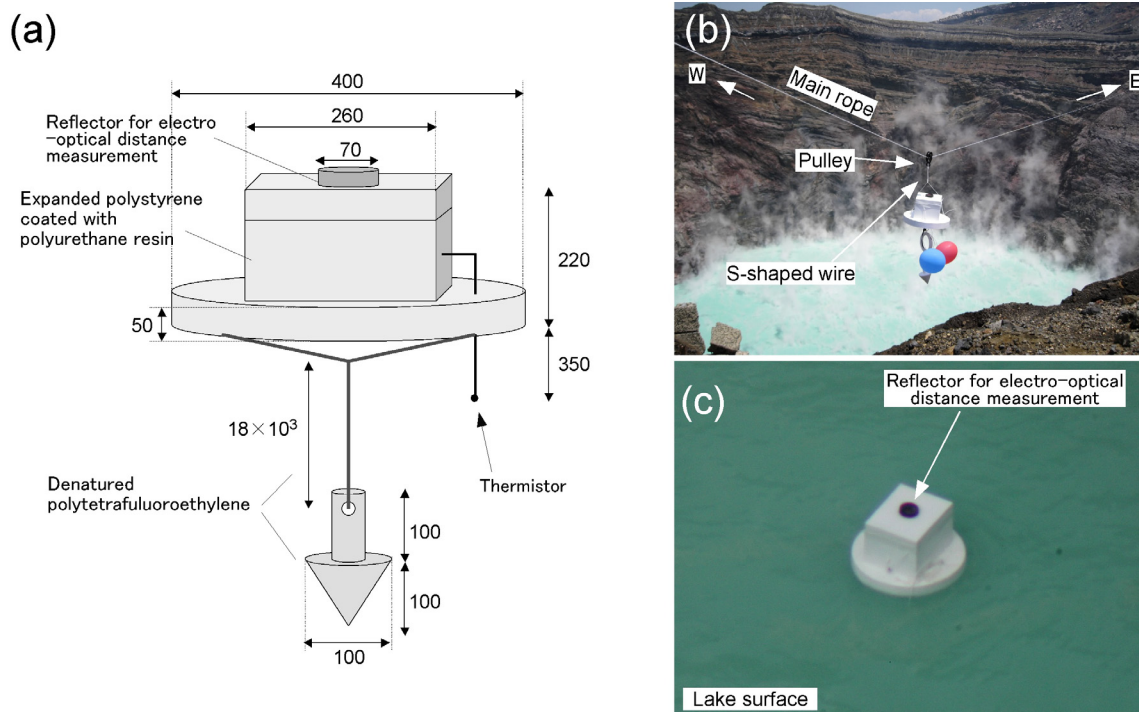


図 4. 新たに開発した水温観測ブイ。(a)材質および形状。水温計の(b)設置作業、および(c)設置後の状態。

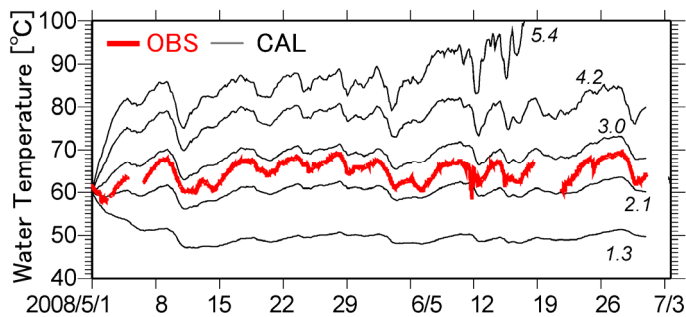


図 5. ブイによる水温観測値(太線)と、数値モデルに基づく水温計算値(細線)。数字は、計算で仮定した湖底噴出流体の enthalpy (MJ) である。

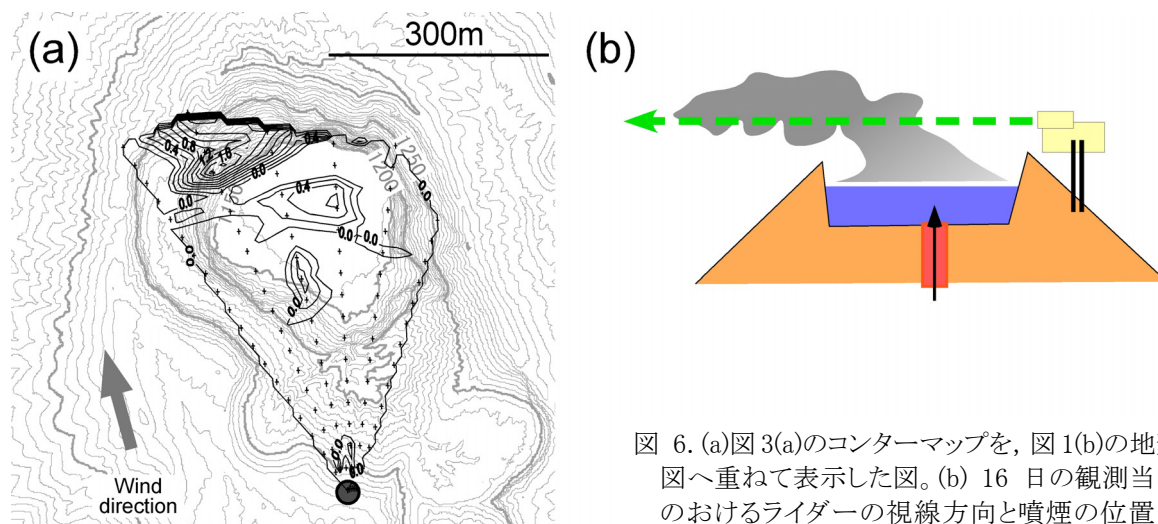


図 6. (a)図 3(a)のコンターマップを, 図 1(b)の地形図へ重ねて表示した図。(b) 16 日の観測当時におけるライダーの視線方向と噴煙の位置関係。

4. 議論

ライダーによる臨時観測の結果, 火口湖上空の水蒸気の空間分布が明らかになった。これは, 活動的の火口に存在する火口湖としては, 世界初である。また, 湖水温度をモニタリングする基礎的な技術を確立し, 阿蘇火山として初めて水温連続観測に成功した。

まず, 水温観測ブイの結果に基づいて, 蒸発量を計算する。式(1), 気象庁の赤外放射温度計による測定結果, および湖面積のモニタリング結果(Terada et al., 2008), Ryan の式から, 2008 年 10 月の湖面蒸発量は, 風速の不確定を考慮して 73 - 98 kg/s と見積もられる。

次に, ライダーで得た図 3(a)から, 水蒸気 flux を概算する。ここでは, 混合比から水蒸気密度を計算してコンターについて積分し, 噴煙の平均的移動速度を掛け合わせることを考える。ただし, 図 2(c)に示したように, 当日の気象条件では噴煙を目視できず, 噴煙上昇速度を求めることが出来ない。15 日に見積もった噴煙の平均的上昇速度 3 m/s に, 水平風速 2 m/s を考慮して, 噴煙の移動速度を 3.6 m/s と仮定すれば, 水蒸気 flux は 105 kg/s と計算される。

ただし, 図 3 から水蒸気 flux を議論する際には注意が必要である。コンターマップを実際の地形図に重ねてみると(図 6), 噴煙が風に流されているために, 水蒸気の分布中心が湖面から外れていることがわかる。今回のように, 噴煙の流向とライダーの視線方向が一致している場合, flux を求める際のコンターの積分範囲に任意性が残る。このような気象要因に起因する観測の難しさは, 噴煙移動速度の計測とともに, 今後の観測の課題である。

5. まとめ

ライダーとブイに基づく水蒸気 flux の推定値は、ほぼ同じ値を与えた。一方、2006 年に実施した試験的観測⁸⁾では、ライダー観測の方が小さな値を与えている。正確な湖面蒸発量を知ること、火口湖を通じた熱活動を評価する上で大きな課題であり、ライダーは、阿蘇において蒸発量を実測する唯一の手段である。ライダーによる水蒸気 flux 計測の確からしさは、風向きと湿度に左右される。今後も研究を継続することで、蒸発量推定の精度向上が期待できる。

謝 辞

ライダー観測には、生存圏研究所の江尻 省氏、首都大学東京の阿保 真氏のご協力を頂きました。水温計設置作業には、京都大学火山研究センターの吉川 慎氏、宇津木 充氏、井上 寛之氏、森林総合研究所九州支所の宮縁育夫氏、阿蘇火山博物館の須藤靖明氏、吉川美由紀氏にご参加を頂きました。阿蘇山火山防災連絡事務所の後小路義弘氏、山下隆丞氏には、水温計設置作業の労に加えて、火口縁からの赤外カメラ観測データをご提供頂きました。国際航業株式会社には、数値標高データをご提供頂きました。本観測を実施するにあたり、阿蘇市役所の白川 晃氏に多大な便宜を図って頂きました。ここに記して深く感謝します。本研究は京大大学生存圏研究所平成 20 年度萌芽ミッションプロジェクトに基づいて進められ、研究の一部に同プロジェクト研究費を使用しました。本文は、同報告書の一部⁸⁾を改変し、図を追加したものです。

参 考 文 献

- 1) 寺田暁彦・橋本武志(2008): 阿蘇の火口湖「湯だまり」が 1,500 年間も維持されている理由, 地球, 号外, 60, 121-132.
- 2) Terada, A., Hashimoto, T., Kagiya, T. and Sasaki, H. (2008): Precise remote-monitoring technique of water volume and temperature of a crater lake in Aso volcano, Japan: Implication for a sensitive window of volcanic hydrothermal system, Earth Planets Space, 60, 705-710.
- 3) 鍵山恒臣(2008): 噴火卓越型火山活動と地熱活動卓越型火山活動—新しい視点で見る火山活動—, 日本地熱学会誌, 30, 193-204.
- 4) Ryan P. J., Harleman, D. R. and Stolzenb, K. D. (1974): Surface heat loss from cooling ponds, Water Resour. Res., 10, 930-938.
- 5) Nakamura T., Hashimoto T., Terada, A., Katsube, Y., Maruyama, J. and Tsuda, T. (2008):

Field observation of water vapor distribution in volcanic plumes with a Raman Lidar, Reviewed and revised papers presented at the 24th International Laser Radar Conference, 23-27 June 2008, Boulder, CO, USA., 1029 - 1032.

- 6) 寺田暁彦・吉川 慎(2009): 接近困難な強酸性火口湖における観測技術ー水温モニタリング・湖水および湖底泥の採取ー, 日本地熱学会誌, 印刷中.
- 7) Oppenheimer, C. (1997): Ramifications of the skin effect for crater lake heat budget analysis, J. Volcanol. Geotherm. Res., 75, 159-165.
- 8) 寺田暁彦・鍵山恒臣(2009): 活動的火口湖からの湖面蒸発量測定の新手法開発ーライダー技術の「安全・安心」への応用ー, 平成20年度生存圏萌芽・融合ミッションシンポジウム講演要旨集, 83-89.