

令和元年5月28日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14310

研究課題名(和文) レーダーと電場数値モデルからなる火山雷ハイブリッドモデルの開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of Volcanic Lightning Hybrid-model with radar data and numerical simulation of electric field

研究代表者

大石 哲 (Oishi, Satoru)

神戸大学・都市安全研究センター・教授

研究者番号：30252521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2015年12月より鹿児島県の桜島にフィールド・ミルと呼ばれる電場計を設置して定点観測を続けており、その結果として噴火に伴う電場変動を多数記録した。また、2018年2月19日にインドネシアのスマトラ島におけるSinabung山が今世紀最大規模の爆発を起こし、その火山灰の上昇と下降を気象レーダーによる集中観測で鮮明に捉えることができた。本論文ではSinabung山のレーダー観測値を解析することで火山噴煙内部の電場を3次元的に可視化し、時間・空間的に流動的に変化する値を気象雷の放電閾値と桜島の定点観測地上電場と比較することによって雷現象の発生機構を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで観測と数値シミュレーションを比較することが困難であった雷現象について、火山雷を取り扱うことで、観測結果と数値シミュレーション結果を比較できる道を開いた。数値シミュレーションについては、レーダーデータと電場数値モデルを組み合わせた火山雷ハイブリッドモデルによって火山現象内部の電場を計算することができるようになった。

研究成果の概要(英文)：There is a lightning phenomenon "Volcanic lightning" that occurs with the volcanic eruption. Volcanic lightning is frequently seen when eruption takes place, but its charging mechanism has not been elucidated yet. This study aims to find the plume structure causing the charging mechanism by visualizing the internal electric field of volcanic plume. On February 19, 2018 Mt. Sinabung in Indonesia caused an explosion. We collected Sector Range Height Indicator data within 10km from the vent for the first time in the world. In this research, by visualizing the data of Mt. Sinabung three-dimensionally, we investigated the variation of electric field with eruption. We applied riming electrification as a charge generation mechanism and analyzed the electric field under the hypothesis that the charge separation mechanism of weather lightning is applicable in volcanic lightning by considering graupel as large particle of volcanic lapilli and ice crystal as small particle of volcanic ash.

研究分野：水工学，気象レーダー，減災

キーワード：火山雷 電場 気象レーダー 数値シミュレーション 現地観測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初より以前には、レーダーでは3次元データの時間探知に5分程度の時間がかかることが原因となって、レーダーなどで探知される積乱雲内の降水粒子分布と、LFやVHFなどの電磁波を使って発生位置を探知する雷位置などのデータを時間的に重畳することが困難であったが、本研究の代表者が科学技術振興機構 研究成果展開事業 A-STEP フィージビリティスタディ「超時空間分解能を有するリアルタイム降雨予測技術の研究開発」（企業プロジェクト代表者 武地美明・古野電気、大学研究代表者 大石哲、研究期間：平成25年度～平成26年度）で共同開発したレーダーは1分間で3次元探知を行うことができ、雷のメカニズム解明や落雷予測に希望が出てきた。また、雷のメカニズムを表現した数値モデルは、Takahashi(1978)などが仮想的な大気状態を使って研究を進めてきたが、数値モデルでは現実の1つ1つの積乱雲を完全に再現することは、まだできておらず、電場計と直接比較するような精度にはなっていなかった。上記A-STEPで開発したレーダーはXバンド偏波ドップラーレーダーであるので、偏波パラメータを使って雲内部の粒径分布も算出できることから、数値モデルに代わってレーダーを使って電荷を計算することは可能になった。

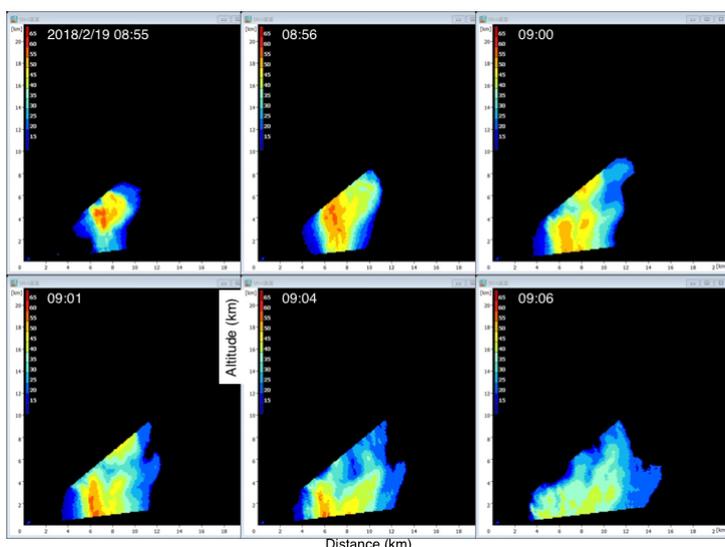
一方で、気象現象としての雷は特定の場所の発生回数が多くないため、電場計で十分な頻度の観測を行うことが難しい。そこで、発生頻度が高く発生場所も限定されている火山雷で、新たな雷ハイブリッドモデルの開発と検証を行うことを考案した。

2. 研究の目的

本研究ではレーダー観測と電場を数値計算する、火山雷ハイブリッドモデルの開発を行った。そのために、桜島火山において、Xバンド偏波ドップラーレーダーと独自製作した現位置火山礫粒径観測装置による観測を行って、大気中の火山礫の粒径分布の3次元空間分布を推定するアルゴリズムを構築した。推定された火山噴出物の3次元空間分布を雷ハイブリッドモデルに入力値として与えて、火山礫同士の衝突によって生起する時々刻々の電荷量の変化を計算し、電荷によって生まれる電場をポアソン方程式によって求めて、閾値を超える電場強度の絶対値によって放電が生起するとして、実際の雷発生と閾値の関係を算出した。同時に地上電場を計測する。

3. 研究の方法

本研究では、2018年2月19日午前8時30分にインドネシア・スマトラ島のSinabung火山で発生した噴煙高度5000mの爆発的噴火を対象とした。この噴火はSinabung山の有史以来最大の噴火で、今世紀最大級の噴火と言われた。本研究では、2017年9月にインドネシア東ジャワ州マランのSelorejoダムからSinabung火山観測所に移設されたFURUNO小型Xバンド帯域偏波レーダーによりこの噴火による噴煙と火砕流をレーダーにて捉えることに成功した。火山噴煙を噴火直後から集中的に捉えたこの観測データは世界的に見ても極めて貴重なサンプルである。また、インドネシア防災火山局は噴煙高度を5000mと発表した。レーダーエコーを確認すると仰角範囲の制約により噴煙上端が途切れているものの、[図 2.2](#) 上段に示したように現地時間午前8時55分時点で噴煙は高度8kmに達していたことがわかった。さらに9時以降は時間経過とともに観測所に近づく方向にレーダー反射強度の強い領域が拡大したことがわかる([図 2.2](#) 下段)。火砕流の痕跡から、火砕流の流下方向は山頂から東側および南南東側である。



本研究では、噴火に伴う大気電場の変動を常時測定するために、九州地方鹿児島県の鹿児島湾（錦江湾）にある桜島に赴き、島の東部に位置する黒神観測室の屋上に電場計の設置を行い、

2016年12月から定点観測を行っている。事例は異なるデータとなるが Sinabung 山は桜島と岩石成分や山の構成が類似していることから、火山雷の電場を実測するサンプルとして本論文ではこれを比較対象とする。黒神観測室は桜島の昭和火口から約3.5km離れた地点にあり、立入禁止区域以外の観測地点としては最も火口に近い場所のひとつといえる。電場計は、米 Boltek 社製の「EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor7」を使用した。図 3.12 に設置した電場計を示す。ノイズにより測定電場に影響が生じるため、設置条件として電場計より半径 10m 以内、仰角 30° 以内に電場を阻害するような障害物がない地点として黒神観測室の屋上を選定した。測定されるデータは常時パソコンに送信され、観測者が桜島にいなくても、インターネットを通じて閲覧、遠隔操作が可能となるように設定されている。一方で、桜島は日本の火山の中で最も観測体制が整っており、噴火の前兆現象を捉えることができるため、噴火の前兆および噴火時の大気電場の挙動から、噴煙の拡散状況や火山雷の発生有無を検証することができる。

現在雷の研究分野では霰と氷晶の衝突における電荷分離が放電を引き起こしているとされる「着氷電荷分離機構」が有力な説である。本研究において火山噴煙内部の電場を求める方法論もまた着氷電荷分離機構に基づいている。この発生機構では霰と氷晶の衝突を仮定していることから、霰、氷晶に関するパラメータも多く登場するが、原則として密度や誘電率など火山について既知な部分は火山の値を、未知な部分は火山灰の大粒子を霰、小粒子を氷晶とみなして値をそのまま適用する。火山灰の電荷量推定式は Takahashi をもとに金子 11) から以下のように定式化する。

$$\frac{\partial Q_{g-i}}{\partial t} = \frac{5\pi \bar{D}_i^2 N_i n_{g0} q E_{sep} \alpha_{ug}^2}{4V_0 D^2} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{2\gamma_{ug}} \Gamma(3 + 2\beta_{ug}) \bar{D}_g^{-3+2\beta_{ug}}$$

ここで、Q はモデル格子内の霰の電荷密度[C/m³]、t は時間[s]、g は霰、i は氷晶、qcharge は霰一つの電荷密度[C/m³]、ng0 は霰の数密度の切片(=N₀)、Λ は粒径分布の傾斜パラメータ、D は粒子直径、D⁻ は平均粒子直径、N は粒子数濃度、q は帯電係数(分離電荷量)(=0.015pC=1.5×10¹⁴C)、E_{sep} は衝突分離係数(=1)、V₀ は基準落下速度(=8m/s)、D₀ は基準粒子直径(=100 μm)、α_u(=124)、β_u(=0.64)、γ_u(=0.5)は落下速度の形状パラメータ、(D_g)⁻は霰の粒径分布の中心値を示す。ここで、基本場の地表面の空気密度 ρ₀ を水蒸気と水物質を考慮した湿潤大気密度 ρ で割った値は 1 と仮定する。また、氷晶は雲内に無数に存在しているため、レーダーから正確な数を測定することは困難である。そのため、本論文では高橋より、(D_i)⁻の氷晶の平均粒子直径(=200 μm)、N_iの氷晶の空間数濃度(=5×10⁴/m³)と仮定する。氷晶の平均粒子直径は航空機観測の結果であり、氷晶の空間数濃度は放電電場形成に必要な値を与えている。また、U_g(D_g)、U_i(D_i)はそれぞれ霰、氷晶の粒径分布の中央値であり、前述した式(5.21)により求める。D_g は Λ で表せることから、N₀ と Λ より電荷密度を求めることが可能である。

電場・電位の推定については極座標(r,θ,φ)で表された以下のポアソン方程式を解く

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} \cot \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = -\frac{Q}{\epsilon_0}$$

ここで、電荷密度 Q[C/m³]、電位 V[V]、ε₀ は真空の誘電率(=8.85×10⁻¹²[F/m])である。

4. 研究成果

図 6.26~6.29 に電場ベクトルおよび電場の可視化結果を示す。電場を多層等値面、電場ベクトルをアローグリフで表現している。まずオーダーであるが、ワークマンとレイノルズが示した「レーダーエコーが現れてから 10 分以内に 3.4×10⁵V/m」の閾値 3) を超す 3.4×10⁶V/m の強電場域が最初にエコーが捉えられていたことが分かった。図において空洞化している箇所はレジエンドの最大値 2.0×10⁶V/m を超える値を示している。この強電場域は球状を成して点入しており、粒子の上下運動に連動して合体と分裂を繰り返しているように見られた。電場ベクトルは鉛直成分が非常に強く、基本的に上下に伸びた発散形をしているが、レーダー方向に流れる際には水平成分が強くなる場面や、落下方向に向くといった現象が見られた。強電場は高高度など電荷が小さかった箇所でも発生しており、大きな電位勾配が存在していたことが伺える。また、傾向として高高度よりも低高度において値の大きい電場が見られることがわかった。

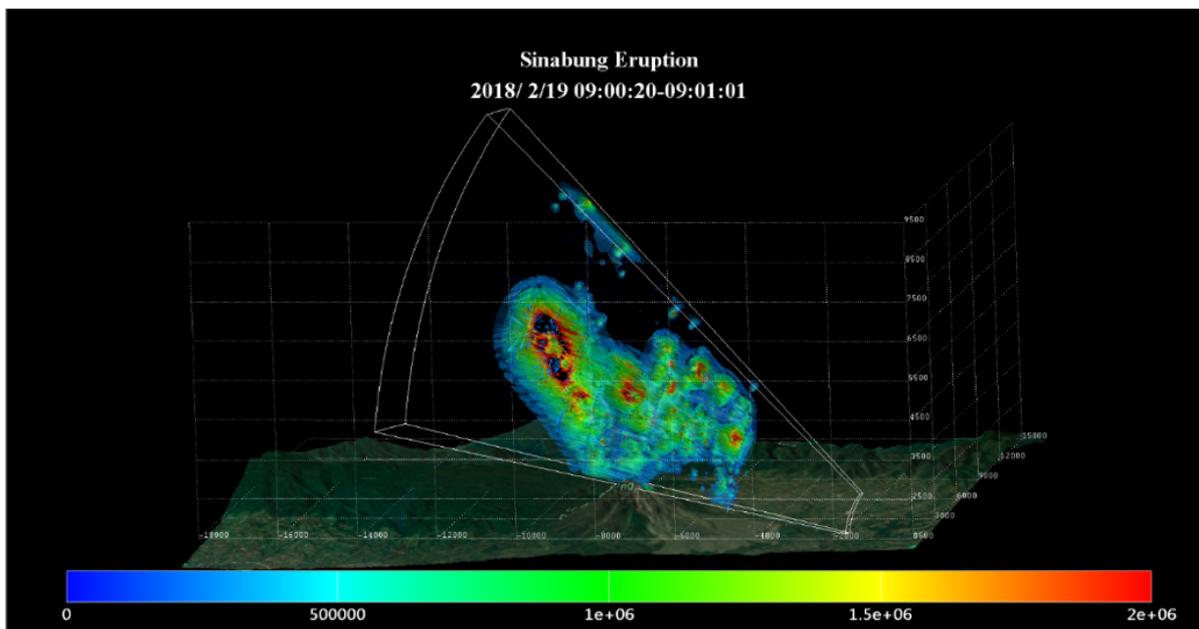


図 9時0分20秒～9時1分1秒における電場分布[V/m]

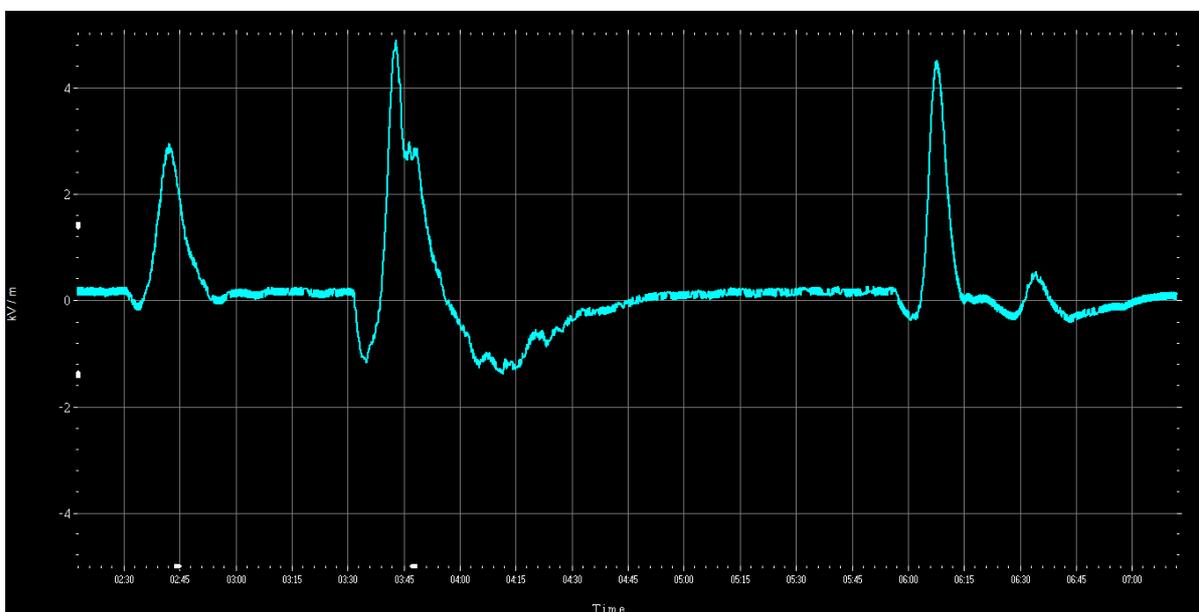


図 計測電場の変動記録 ここでは2時30分、3時31分、6時3分に噴火が発生している。

2017年6月22日～2018年9月2日にかけて鹿児島県の桜島で火山噴火に伴う電場変動を記録した。図 6.21 にその結果の1例(2018年9月20日)を示す。特徴として、噴火の直後に電場が一時的に負の値を示してから(図 6.21 では2時30分～2時33分など)、正方向に大きく伸びていく変化を見せる(図 6.21 では2時33分～2時42分など)。事例によって値の符号が逆転することもある。また、電場変動の時間スケールが噴火現象の継続時間と一致し、噴火後の大気電場は不安定になる傾向がある。取得データ一覧における電場の大きさと時間変化率を表 6.1 に示す。電場の時間変化率は、最初の微変動が現れてからピーク値に達するまでの変化量を表しているため、2次的なピークは考慮していない。桜島には火口が2つあり、それぞれ観測点までの距離が異なるので注意する(昭和火口 3.5km, 南岳山頂火口 4.0km)。これらの結果より桜島では平均して約 6V/m/s の電場変動が噴火に伴って発生することが分かった。

2018年2月19日に発生した Sinabung 山の爆発的噴火のレーダー集中観測データを3次元的に可視化することによって、火山噴火の際にレーダーエコーが現れてから189秒で雷放電電場 $3.4 \times 10^5 \text{V/m}$ を超える電場が発生していることが明らかになった。高電場域の発生位置は火口直上～高度7000mの範囲で、電場ベクトルは鉛直成分が強い発散形状を示すことが分かった。また、電場ベクトルは粒子の動きに沿った向きを示す傾向も見られた。さらに噴火発生から10分経過後に噴煙柱内部に0.3mm付近を核とする粒子の凝集部分が発生すること、噴煙の頂上において偏波間相関係数が0.9を超すような粒子で構成されると考えられる部分が存在することが分かり、噴煙内部の電荷が3極構造で構成されている可能性を見いだせた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

Magfira Syarifuddin, Satoru Oishi, Ratih Indri Hapsari, Jiro Shiokawa, Hanggar Ganara Mawandha, Masato Iguchi, Estimating the Volcanic Ash Fall Rate from the Mount Sinabung Eruption on February 19, 2018 Using Weather Radar, Journal of Disaster Research, Vol. 14 No. 1, pp. 135-150, 2019, 2019.

<https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0135>

Ratih Indri Hapsari, Masahiro Iida, Masahide Muranishi, Mariko Ogawa, Magfira Syarifuddin, Masato Iguchi, Satoru Oishi, Ground Observation of Tephra Particles: On the Use of Weather Radar for Estimating Volcanic Ash Distribution, Journal of Disaster Research, Vol. 14 No. 1, pp. 151-159, 2019.

Magfira SYARIFUDDIN, Satoru OISHI, Haruhisa NAKAMICHI, Masato IGUCHI, SPATIO TEMPORAL DISTRIBUTION OF RAINFALL IN MOUNT SAKURAJIMA BASED ON WEATHER RADAR, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 75, No. 4, 2018.

〔学会発表〕（計3件）

村西将英・大石哲, 気象レーダーを用いた火山噴出物の堆積量推定に関する研究, 日本火山学会秋季大会 2016, 2016.

佐藤卓弥・小川まり子・大石哲, 偏波レーダーを用いた氷点下層における氷粒子の粒径分布と体積量推定に関する研究, 水文・水資源学会, 2016年度総会・研究発表会(福島大会) 2016.

千原拓馬・大石哲・小池雄大・小川まり子, 偏波ドップラーレーダーと雷探知装置を用いた雷雲内電荷電場推定手法に関する研究, 日本気象学会 2016年度春季大会, 2016.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：中道 治久

ローマ字氏名：NAKAMICHI, Haruhisa

所属研究機関名：京都大学

部局名：防災研究所

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00420373

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。