

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	瀧下 恒星
論文題目	粒径・落下速度分布観測と移流拡散モデル計算から得られた桜島ブルカノ式噴火のテフラ分離プロファイル		
( 論文内容の要旨 )			
<p>火山噴火で放出される砕屑物 ( テフラ ) の移流拡散を追跡するモデル ( テフラ移流拡散モデル ) を用いることで、地上に降下するテフラ重量分布を計算することが可能である。テフラ移流拡散モデルでは、火山噴煙からテフラが分離して移流する際の高度と、その高度におけるテフラ質量の関係を表すテフラ分離プロファイルが用いられる。テフラ分離プロファイルは、火山噴煙の大まかな形状を表現している。本論文で対象とするブルカノ式噴火のようなテフラを短時間で噴出する爆発性が高い小規模な噴火では、噴煙は火山近傍の気象場の影響を強く受ける。そのため、地上に降下したテフラ質量分布から、テフラ移流拡散モデルを用いてテフラ分離プロファイルを推定することは容易ではない。また、ブルカノ式噴火の降下テフラ質量測定には、テフラ残存量の少なさに起因する試料採取時の課題がある。</p> <p>そこで本論文では、ブルカノ式噴火において降下テフラ質量の分布に強い影響をおよぼすテフラ分離プロファイルを、即時性の高い機器観測から推定する手法を確立することを目的とした。対象火山は、ブルカノ式噴火の発生頻度が高く、多様な地球物理観測が行われている桜島である。観測には、降雨観測で広く用いられている時間分解能が高い粒径・落下速度分布計を使用した。そして、機器観測によって得られたテフラの粒径と落下速度を、実際に採取したテフラ試料の質量・粒径と比較することで、降下テフラ質量への換算式を経験的に構築した。テフラ粒径が粒径・落下速度分布計の検知下限粒径を満たす場合と満たさない場合の2通りの換算式を構築することで、粒径による実効密度の差異を考慮できるような工夫を施した。</p> <p>先行研究で使用されているテフラ移流拡散モデルは大規模噴火を対象としたものであり、テフラ分離プロファイルは分離高度と粒径で離散化されている。そして、テフラ粒子群が噴煙から分離して大気中を移流し落下するときの粒子群重心の移動経路 ( 流跡線 ) と、重心からの水平方向の拡散を考慮することで、降下テフラ質量が計算される。また、流跡線計算では時間変化のない水平方向に均質な2次元風速場が用いられる。これらは、火山近傍の鉛直方向風速場の影響を強く受けるブルカノ式噴火のような小規模噴火への適用が困難な原因であった。そこで、本論文では時間依存空間3次元風速場を考慮した新しいテフラ移流拡散モデル ( Tephra4D ) を開発した。また、粒径・落下速度分布観測結果への適用を念頭に、Tephra4Dではテフラ分離プロファイルを粒子落下速度で離散化した。これにより、既往のテフラ移流拡散モデルに比べて、Tephra4Dは粒子・落下速度分布観測結果をよりよく説明できるようになった。</p> <p>開発した観測手法とモデルを用いて、桜島における噴火頻発期にあたる2018年と2019年に発生した39の噴火を対象として、テフラ分離プロファイルの時間変化を推定した。手順は以下の通りである。まず、対象噴火について地震動と地盤変動から高時間分解能で噴煙頂高度を算出する。次に、テフラ分離プロファイルの近似形状を特徴づけるパラメータkを仮定して、本論文で開発したTephra4Dにて降下テフラ質量の時間変化を求めた。そして、粒径・落下速度分布観測結果との比較から、パラメータの最適値を複数候補から決定した。この結果、算出した噴煙頂高度にかかわらず、噴煙頂高度近傍からテフラが大量に分離することを意味す</p>			

る $k=8$ が最適値であった。この結果からは、本論文で対象としたブルカノ式噴火のテフラ分離プロファイルは、浮力流理論から導出されるプロファイルと整合的であることを示している。また、大規模噴火に比べて短時間のプロセスであるブルカノ式噴火であっても、大規模噴火と同様の噴煙形成がなされることが明らかになった。すなわち、本論文によってブルカノ式噴火の噴煙形成論の構築に重要な条件を付与することができた。

一方、テフラ粒子の落下速度と到達時刻には、観測結果と計算結果との間に差が生じることも明らかになった。現地観測では、どの落下速度の粒子であってもほぼ同時に地表に到達していたが、テフラ移流拡散モデル計算では、落下速度が低い粒子ほど到達時刻が遅れる結果となった。本論文では、この食い違いの原因は、異なる粒径の粒子と気体の混合体が集団として降下する現象であるFingeringの効果がモデル計算に反映されていないためと結論づけ、今後のテフラ移流拡散モデルの改善すべき点として指摘した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、機器観測により得られる降下火山砕屑物（テフラ）の粒径・落下速度分布から、テフラ総質量を推定する方法を開発し、高時間分解能で降灰量推定を行えるようにした点が高く評価できる。

本論文では、降下テフラの観測に、降雨観測で使われている粒径・落下速度分布計を使用した。雨滴のように、すでに粒径・落下速度分布を説明する関係式が確立している場合であれば、高い精度で雨量推定が可能である。しかし、テフラの場合には、大気中での凝集作用によって粒径が増加し、見かけ上の密度低下がおきる。そこで、実際の観測記録から計測検知限界粒径を境界とした2通りの粒子群について実効密度を推定することで、観測された粒径・落下速度分布から降下テフラ質量を推定する経験式の構築に成功した。

また、既往のテフラ移流拡散モデルの離散化方法に落下速度を用いるように改良し、機器観測から得られる落下速度記録をモデル計算に使用する新しい数値計算モデル（Tephra4D）の開発も行った。Tephra4Dは、気象学分野で近年使われている領域気象モデル（WRF）によって高解像度化された時間依存空間3次元風速場を入力できるように改良されており、とくに火山体近傍の風速場の影響を強く受けるブルカノ式噴火の噴煙挙動をより正確に再現することが可能になった。既往モデルとの比較を行ったところ、機器観測から推定される降下テフラ質量と空間分布が、実際の火山噴火時のものにより整合するようになった。Tephra4Dと既存モデルの両方について使いやすい計算コードを、オープンソフトウェアプラットフォームで公開したため、世界中の研究者がWRFを用いることで小規模な噴火に対してもテフラ移流拡散モデル計算を行えるようになった点も評価できる。

本論文では、1) 粒径・落下速度分布観測による降下テフラ質量推定法、2) 精緻な風速場を取り込み落下速度で離散化したテフラ移流拡散モデル開発、そして3) 地震・地盤変動観測による高時間分解能のテフラ噴出率推定法、のすべてを組み合わせることで、ブルカノ式噴火のテフラ分離プロファイルの特徴づけるパラメータを、世界で初めて機器観測をもとに推定することに成功した。これにより到達高度や形状などといったブルカノ式噴火の噴煙の特徴は、テフラ質量噴出率の時間変化でおおむね説明出来ることを示した。ただし、本論文で提示した手法では、テフラ分離プロファイルの特徴パラメータの時間変化を考慮しておらず、この点についての検証作業は今後していく必要がある。

本論文は、大規模噴火よりも発生頻度が高く、短時間スケールでの噴火現象であるブルカノ式噴火を対象とした。ブルカノ式噴火のテフラ噴出から噴煙形成までのダイナミクスの研究は、大規模噴火のそれに比べて遅れていたが、本論文で観測とモデル計算とを組み合わせる方法が確立されたことにより、当該研究の大きな進展が期待される。また、より正確な気象場を導入することで、テフラ移流拡散の精緻化を測った点も特筆すべきものである。以上のことから、本論文は火山学的に非常に高い価値があるだけでなく、火山学と気象学との融合による地球惑星科学の発展の方向性を示した重要な研究と評価した。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年              月              日以降