

火砕流熱風部の流下に伴う熱伝達の実態と 温度低下のメカニズムの解明

○北海道大学農学院 佐藤澄佳
北海道大学農学研究院 山田孝

1. はじめに

前報(佐藤ら 2024)では、火砕流熱風部(以下、熱風部)が火砕流本体部から分離し、被害をもたらした事例である、1991年6月3日に雲仙普賢岳で発生した火砕流の熱風部の運動の実態を報告した。熱風部の到達区域の先端付近に相当する、「樹木変色区域」における熱風部の推定最低温度は200℃～220℃であり、それより上流の人が多く亡くなった高温のエリアである「樹皮焼け焦げ・倒木区域」における推定最低温度と比較すると100℃から200℃ほど低いことを報告した(佐藤ら,2024)。さらに、土砂の粒径が、熱風部の流下に伴い、礫と砂⇒砂と粘土・シルト⇒粘土・シルトに変化すること、熱風部に含まれる土砂が熱源であることを踏まえ、熱風部の流下に伴う温度低下は、熱風部内に含まれる高温土砂の粒径や土砂量の変化に関連がある可能性を示唆した(佐藤ら,2024)。

本研究では、「樹木変色区域」よりもさらに下流域での「樹木無変色区域」での熱風部の最高温度を推定し、熱風部の火砕流本体部からの分離⇒流下⇒停止(樹木無変色区域付近)の全プロセスでの現地推定温度データを活用した計算を行い、熱風部の流下に伴う温度低下を、エネルギー保存則と乱流境界層内の強制対流熱伝達の計算によって物理的に説明することを目的とする。

2. 方法

まず、熱風部停止区域に相当する「樹木無変色区域」での熱風部の最高温度を、高炉を用いた葉の加熱実験によって推定した。災害発生当時の航空写真から、熱風部の熱の影響を受けた範囲の中で樹木の葉が変色しなかった箇所を特定し、樹木の葉を採取した採取した葉を高炉で加熱し、葉が熱で変色しない温度を求めた。加熱時間は、熱風部の温度の継続時間が3～4分である(佐藤ら,2024)ことから、1分～4分に設定した。

次に、樹木無変色区域内の熱風部堆積物の堆積状況(層構造、堆積深、粒径、空隙率)を調査した。その結果と、佐藤ら(2024)、山田(2007)の結果から、堆積深と各流下区

間での堆積物の表面積から土砂量を計算し、流下区間ごとに堆積土砂量、通過土砂量、粒径階を明らかにした。

次に、葉の加熱実験から推定した流下区間ごとの温度と、熱風部堆積物調査から求めた通過土砂量と代表粒径をもとに、熱風部の流下に伴う温度低下量を算出し、推定した熱風部の温度の再現を試みた。計算は、二つの方法で行った。

一つ目は、エネルギー保存則のみを用いて熱風部の温度変化を求める方法である。熱風部内の土砂の堆積による熱風部に含まれる土砂量の減少に応じて、空気を取り込まれ温度が減少すると考えた。土砂の温度は常に一定である、土砂と空気は完全に混合しすぐに均一な温度になる、熱交換は土砂と空気の間でのみ発生する、という仮定のもと、熱風部の火砕流本体部からの分離⇒流下⇒停止のプロセスにおいて、各流下区間で堆積した土砂と同体積の周囲の空気(25℃)が取り込まれるとし、その入れ替わりが行われる部分の空気のエネルギーバランスを、式(1)を用いて計算した。

$$m_{初} C_p T_{初} + m_{新} C_p T_{新} = (m_{初} + m_{新}) C_p T_{後} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $m_{初}$ は混合前に熱風部内に含まれる土砂と同体積の空気の質量、 $m_{新}$ は周囲から新しく取り込まれる空気の質量(堆積により減少した熱風部内の土砂と同体積の空気の質量)、 C_p は空気の定圧比熱(≈1.005 kJ/kg・K)、 $T_{初}$ 、 $T_{後}$ はそれぞれ混合前後の温度、 $T_{新}$ は新しく取り込まれる空気の温度である。

二つ目は、熱風部内では含まれる高温土砂から空気へ強制対流により熱が伝達されると考え、強制対流熱伝達を考慮して熱風部の温度変化を求める方法である。熱伝達係数を求めることで熱風部の温度低下を評価した。熱伝達係数は、ヌセルト数(流体と伝熱面との間の熱伝達の強さを示す)、空気の熱伝導率、流れの代表長さから求めた。求めた熱伝達係数 h (W/m²K)、空気の質量 m_{air} (kg)、空気の定圧比熱 C_p (≈1.005 kJ/kg・K)、調査データから計算した熱風部に含まれる土砂の総表面積 A (m²)、土砂の温度 $T_{sediment}$ (K)から、式(2)を用いて空気の温度 T_{air} (K)

を計算した。その際、土砂の温度は熱風部内の空気の温度と等値になり、平衡状態に達すると仮定した。

$$m_{air} C_p T_{air} = hA(T_{sediment} - T_{air}) \cdots \cdots (2)$$

これらの結果をもとに、熱風部の火砕流本体部からの分離⇒流下⇒停止の全プロセスでの温度低下を物理的に考察した。

3. 結果と考察

3.1 樹木無変色区域の温度推定

樹木無変色区域内で採取した葉(シラカシ)を加熱した結果と、樹木変色区域内で採取した葉を加熱した結果(佐藤ら,2024)を図1に示す。樹木無変色区域内で採取した葉について、熱風部の温度の継続時間である3～4分加熱した場合、変色しない温度は100℃以下であった。120℃,140℃で3～4分加熱した場合は、葉の一部が変色したことから、樹木無変色区域での熱風部の推定最高温度は、100～140℃以下であったと考えられる。

変色区域 加熱時間	80℃	100℃	120℃	140℃	160℃	180℃	200℃	220℃	240℃	260℃	280℃
1分	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△
2分	x	x	x	x	x	△	△	△	△	△	●
3分	x	x	x	x	△	△	△	○	●	●	●
4分	x	x	x	△	△	△	○	○	●	●	●
5分	x	x	x	△	△	△	●	●	●	●	●

△ : 変色確認できず △ : 一部(葉先)のみ変色 ○ : 褐変 ● : 焦げ

図1 葉の加熱実験結果(樹木変色区域・樹木無変色区域)

3.2 エネルギー保存則のみを用いた温度変化の計算

樹皮焼け焦げ・倒木区域での熱風部の推定最低温度が300℃～400℃である(石川ら, 1993)ことから、分離直後の温度を、400℃～800℃の間で50℃刻みで設定し、それぞれの場合で熱風部の温度変化を計算した。その結果を図2に示す。

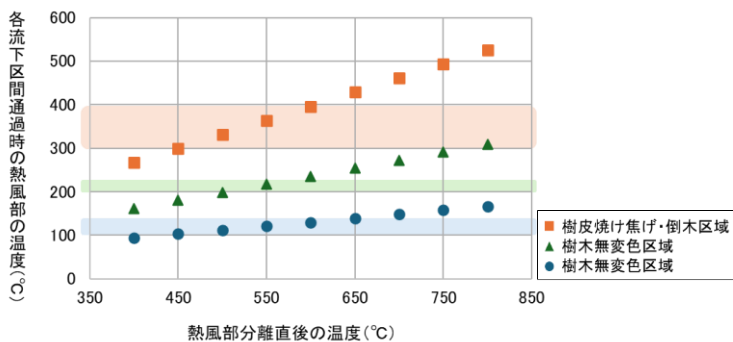


図2 熱風部分離直後の温度を変化させたときの各流下区間の温度

樹木の葉の加熱実験から推定した樹木変色区域と樹木無変色区域の温度と比較すると、分離直後の温度を550℃と設定した場合が、実態に最も近いと考えられる。分離直後の温度を550℃としたとき、各流下区間での熱風部の温度は、樹皮焼け焦げ・倒木区域では364℃、樹木変色区域では217℃、樹木変色区域では121℃であると推定された。

3.4 強制対流熱伝達を考慮した温度変化の計算

各流下区間での熱風部の温度を計算した結果、以下のようになった。

	熱風部の温度 T_{air} (℃)
樹皮焼け焦げ・倒木区域	374
樹木変色区域	265
樹木無変色区	49

この強制対流熱伝達の計算では、流下に伴って周囲の空気を取り込むことを考慮していないため、実際は得られた結果よりも温度は低いと考えられる。ただし、この結果から、周囲の空気を取り込みを考慮しない場合でも、熱風部の温度は熱風部内部の土砂量の減少によって低下すると考えられる。よって、熱風部の流下に伴う温度低下は、熱源である内部の土砂が堆積し、熱風部に含まれる土砂量が減少することが要因の一つであると言える。

4. 結論

本研究により、以下のことが明らかにされた。

- 1) 樹木無変色区域での熱風部の推定最高温度は、100℃～140℃である。
- 2) エネルギー保存則のみを用いて各流下区間での熱風部の温度を推定した結果、分離直後の温度を550℃としたときが最も実態に近いと考えられ、その場合の推定温度は、樹皮焼け焦げ・倒木区域では364℃、樹木変色区域では217℃、樹木変色区域では121℃である。
- 3) 強制対流熱伝達を考慮した温度変化の計算の結果、周囲の空気を取り込みを考慮しない場合、実態よりも高い温度が算出されるものの、熱風部の流下に伴って内部の土砂が堆積し、熱風部に含まれる土砂量が減少することで熱風部の温度は低下すると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 石川ら (1993) 雲仙普賢岳で発生した火砕流熱風部による災害。新砂防, 46: 3-9.
- 2) 佐藤澄佳, 山田孝 (2024) 樹木の変色区域における火砕流熱風部の運動の実態と特性. 令和6年度砂防学会研究発表会概要集, 377-378.
- 3) 山田孝 (2007) 火砕流本体部から分離した熱風部のその後の運動・堆積特性. 砂防学会誌, 60(1) 29-36.