

1. はじめに

2006年6月14日に、インドネシア国のメラピ火山南斜面で、溶岩ドームの崩落に伴う火砕流が発生し、火砕流シェルターが本体部により埋没した。シェルター内に避難していた住民2名が、閉じ込められ、41時間後に救出されたが、死亡が確認された。シェルターが本体部に埋没した場合の耐熱限界性、減熱改良の可能性を検討するために、シェルターの被災実態を現地調査、関係機関からの聞き取り、映像資料解析などにより調べ、熱伝導・熱伝達計算により、本体部埋没後のシェルター内部への伝熱プロセスを考察した。

2. シェルターの被災実態

2.1. シェルターの構造とシェルターの埋没深

当該シェルターの外壁は、50cm厚のコンクリートで作られており、天井上部は上から、盛土(厚さ1.5m)、コンクリート(厚さ0.3m)、鉄(厚さ5mm)の三層構造となっている。シェルターには、外側と内側の二つのゲート(仕様は同じで押し扉式)がある。ゲートは、高さ2m、横幅1m、厚さ0.1mであり、厚さ5mmの鉄板で作られている。ゲート内部は幅0.1mの空洞部であるが、ドアの鉄製の側面などが室内側の扉面に溶接されているので、伝熱時には、熱橋部となる。シェルター入り口の小空間(外側と内側のゲートの間)は、高さ2.5m、幅2.3m、長さ2m、シェルター室内は、高さ4m、幅6.1m、長さ12mである。レベル測量によれば、シェルター天井部区間での縦断方向の本体部堆積深は、数10cm~1.5m、シェルター外側のゲート前面を埋塞した本体部の堆積深は3m程度である。

2.2. 火砕流本体部埋没時のシェルターの外側ゲートの表面温度、シェルター室内の温度の最大値の推測

救出時の状況を撮影した映像によれば、シェルター外側のゲートが半開きの状態で、シェルター入り口の小空間の一部に、土砂が流入していた状態であった。メラピ火山観測所(以下、MVO)により、本体部が堆積してから16時間後に、シェルター付近の堆積土砂の温度が測定され、堆積地表面から約60cm下の本体部中の温度は、平均350°Cであった。また、筆者の調査によれば、外側ゲート取り付け部のコンクリート壁面に敷設された電圧ボックスの蓋と電気コード(材質:ポリ塩化ビニル)の一部が熱変形、焦げを生じている。本体部と外側ゲートの境界面での接触熱抵抗は、未知であるが、本調査では、以上の情報から、本体部と外側ゲート接触面の最低温度を、350°Cと仮定した。遭難者救出状況を撮影した映像を判読した結果、シェルター室内から搬出された遭難者の衣服、布製のかばん、無線機、カメラ、ビデオテープのケースなどには、燃焼・焦げは認められない。衣服や布製のかばんなどの素材である綿、ポリエチレンなどの着火温度、着衣の燃焼性に関する既往研究成果から、シェルター室内の遭難者救出箇所での温度は、約300°Cよりは低かったと推測される。

3. 伝熱計算の考え方、計算ケースと計算条件、計算結果

3.1. シェルター天井部に堆積した火砕流本体部による伝熱プロセス

伝熱は、本体部堆積物⇒土層⇒コンクリート層⇒鉄層⇒シェルター室内というプロセスを経ると考えられる。高温領域が、天井に沿って形成されるため、ヌセルト数は極めて小さくなり、自然対流は発生しない。そこで、この場合の伝熱形態は、全て熱伝導とした。土層内の温度と熱伝導率、密度、比熱などは一定とした。鉄層は5mmと薄く、熱伝導率は高いので、計算上はこの層を無視し、土層とコンクリート層の二層構造とした。本体部、土層、コンクリート層、シェルター室内の空気層の温度伝導率は、各々、 $2.E-07 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、 $3.E-07 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、 $6.E-04 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、 $3.E-05 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、本体部の温度は、350°C、大気、土層、コンクリート層、シェルター室内、地盤の土の初期温度は、各々、30°C、20°C、15°C、20°C、15°Cとし、刻み時間は0.1secとした。熱伝導式を陽に差分化し、本体部の堆積時から10時間~500時間後までの温度変化を一次元非常常熱伝導計算により求めた。シェルター室内の温度は、500時間経過しても、天井付近のみが約40°Cになるだけで、ほとんど上昇しない。このようなことから、少なくとも救出時までは、天上部から室内への伝熱は無視でき、外側のゲートから室内への伝熱が支配的であったと考えられる。

3.2. 外側のゲートから室内への伝熱プロセス

今回の災害のように、シェルターの外側のゲートが開いたままの状態では、本体部堆積物⇒シェルター入り口の小空間⇒内側のゲート⇒シェルター室内⇒シェルター奥のコンクリート壁面内部からなるプロセスで生じると考えられる。伝熱形態は、シェルター入り口の小空間、シェルター室内では、自然対流による熱伝達、内側ゲート、コンクリート壁面では、熱伝導とした。シェルター入り口の小空間、ゲート内側表面での平均ヌセルト数を MacGregor の式(1969)²⁾を用いて求め、レイリー数から、密閉空間を対象とした MacGregor の式(1969)²⁾により、平均熱伝達率を算出した ($2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$)。

計算ケースを表-1に示す。熱通過率を、各々の熱伝導率、熱伝達率、壁厚から求め、一次元定常伝熱計算により、温度変化を求めた。ゲートでは、熱橋部のため、ゲート内部の空気層が伝熱に与える影響を無視し、熱伝導形態とした。その熱伝導率は高いため、外側ゲートの表面温度が瞬時に、本体部の温度と等しくなると仮定した。境界条件は、本体部とゲートとの接触部の温度が時間によらず一定であるとした壁温一定の条件(第1種境界条件)を用いた。

伝熱プロセスにおける温度変化を図-1に示す。シェルター室内の温度は、内側ゲートとシェルター奥のコンクリート壁面温度の平均値である。人体の耐熱限界についての研究成果をもとに、シェルターの室内温度が、人間の体温よりも低ければ、安全とみなすと、現行のシェルター構造では、温度350℃の火砕流本体部に埋没した場合は、全ての計算ケースにおいて、安全を確保できない結果となった。ついで、シェルター室内の温度分布を検討するために、一次元計算の結果をもとに、二次元定常自然対流伝熱計算を行った。内側ゲート側を高温壁、シェルター奥のコンクリート壁を低温壁、上下壁が断熱された密閉空間を想定し、120×40の格子分割を行った(格子幅 $\Delta x = \Delta y = 0.1$)。そこでの自然対流の流れ場と温度場を計算するために、流れ関数と渦度を導入し、連続式、運動方程式(浮力項を加えたもの)、エネルギー式からなる基礎式を無次元化した流れ関数と渦度の関係式、渦度輸送方程式、エネルギー式を用いた。これらの無次元化した基礎式には、風上差分を適用した。壁面での温度勾配は、二次式近似、壁面での渦度は、流れ関数の3次式近似により評価した。計算の結果、シェルター室内では、対流による渦が1~2つ生じ、それによって、室内の空気が大きく混合されるため、室内の隅以外の場所では、温度分布は大きな偏りが生じないことが推測された。

3.3. 現行シェルターの構造改善による伝熱変化

外側、内側のゲートの熱橋部の断熱化、ゲートの増設、ゲート素材の交換と厚みの増加、断熱材の使用といった改良を施した場合の温度変化の事例を図-2に示す。ゲートの熱橋部の断熱化を行い、断熱効果の優れたセルロースファイバー(熱伝導率:0.03W/mK)の厚さを40cm以上として、ゲート内部の空洞部に充填した場合は、350℃の本体部に埋没しても、シェルター室内の温度を体温以下とすることができ、今回の計算条件、方法の限りでは、安全を確保できる結果となった。

4. おわりに

ゲートの熱橋部の断熱化とゲート内部への断熱材の充填により、シェルターが本体部に埋没した場合でも、安全を確保できる可能性が考えられた。今回の検討以外にも、横方向に伸びた部屋構造から深度方向にもぐるような部屋構造とすることによって、主要な伝熱形態を熱伝導に変化させ、伝熱低減効果を高めるなどのことも考えられる。今後は、熱伝導、熱対流からなる伝熱プロセスを、二次元、三次元の非定常計算で検討する必要がある。

表-1 計算ケース

	ゲートの状況		ゲートの断熱状況		土砂の流入状況	備考
	外側ゲート	内側のゲート	外側ゲート	内側ゲート		
case-1	open	close	無	無	入り口小空間に流入	今回の災害に近いケース
case-2	open	open	無	無	入り口小空間に流入	
case-3	open	close	無	無	入り口小空間に流入し、内側ゲートに接触	外側ゲートに接触
case-4	close	close	無	無	外側ゲートに接触	
case-5	ゲートの熱橋部を断熱化した場合					
case-6	ゲートの熱橋部を断熱化し、それを一基増設					
case-7	ゲートの熱橋部を断熱化し、ゲートの素材、厚さを変化					
case-8	ゲートの熱橋部を断熱化し、ゲート内部の空洞部に断熱材を充填した場合					

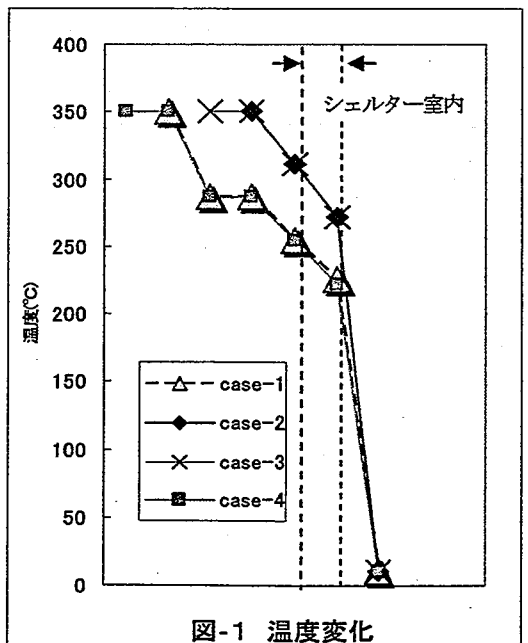


図-1 温度変化

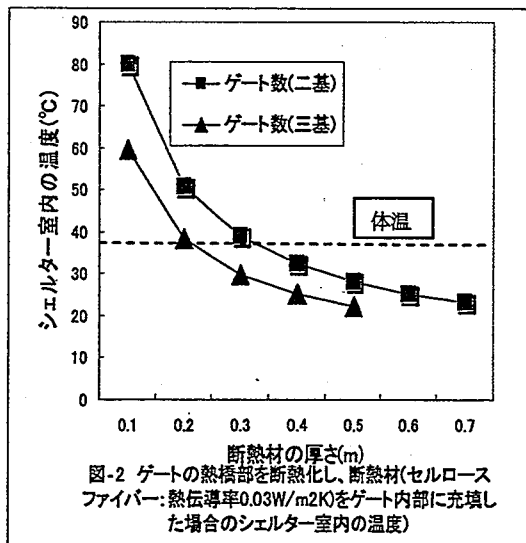


図-2 ゲートの熱橋部を断熱化し、断熱材(セルロースファイバー:熱伝導率0.03W/m2K)をゲート内部に充填した場合のシェルター室内の温度

参考文献

- 1)伝熱工学資料、望月貞成、村田章:理工学基礎シリーズ 伝熱工学の基礎、日新出版、p.125、1994。2)MacGregor,R.K.and Emery,A.P.:Free Convection through vertical plane layers,Moderate and High Prandtl Number Fluid,J. Heat Transfer, Vol.91,p.391、1969。3)例えば、東京消防庁:消防科学研究所報31号、pp.131-136、東京消防庁、1994。