火砕流災害回避のためのシェルタ - の活用に関する研究

Heat Transfer into Shelter Buried by Pyroclastic Flow and Insulation Methods

山田 孝 Takashi YAMADA

北海道大学大学院農学研究院 准教授 (現 三重大学大学院生物資源学研究科 准教授)

要 旨

Temperature conditions were evaluated inside the Kaliadem village shelter, which was buried by the main body of pyroclastic flow from the Mount Merapi eruption on June 14, 2006. Numerical analysis of one-dimensional steady state, two-dimensional steady-state, and non-steady-state heat transfer into the shelter was performed to determine the effectiveness of insulation materials lining shelter doors, the changes in doors' thermal conductivity, and the effects of door thickness on temperature reduction. Results show that average temperatures inside the shelter greatly exceed human body temperature in every scenario except when doors are lined with cellulose insulation. When the shelter is buried by a pyroclastic flow with a maximum temperature of 800 °C, the average temperature inside the shelter can be reduced below human body temperature if double doors are lined with at least 85 cm of cellulose, or triple doors are lined with at least 55 cm of cellulose.

Key Words : *«shelter, pyroclastic flow, heat transfer analysis, thermal insulation »*

1.はじめに

火砕流災害を回避する手法として、ハザードマップによる土地利用規制,警戒避難とともに、シェ ルターの活用が考えられる. 雲仙普賢岳の噴火時(1991-1995年)には、熱風部の危険から砂防工事関 係者の安全を確保するため、シェルターが施工された. その耐熱設計にあたっては、ハイスラー線図と 温度変化率線図を用いた非定常熱伝導計算がなされ、熱風部の温度が450℃、流下継続時間が3分と1 時間の条件において、十分安全であるように検討された¹⁾. 一方、本体部に対してシェルターを設計し た事例はない. シェルター埋没後、シェルター内の避難者を救出するには、噴火時の危険下において、 高熱の堆積土砂を掘削しなければならないので、相応の時間を要する.また、救出までは、シェルター内 は、高温の堆積土砂による伝熱の影響を受けるなどの問題がある. したがって、シェルターは原則と して本体部の流下・堆積範囲には施工せず、熱風部対応として用いるのが妥当と考えられるが、本体 部に埋没してしまうなどの事態に対して、どの程度安全が確保できるのかについても検討しておく必 要がある. そのような環境下におけるシェルターの耐熱限界性、減熱改良の可能性と手法などは、こ れまで明らかにされていない.

そこで、2006年6月14日午後3時頃にメラピ火山南斜面のゲンドール川上流で発生した火砕流に よる熱風部用シェルターの災害事例(2名死亡)²⁾を事例として、以下の調査を実施した.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と耐熱限界性、断熱材などを用いた減熱 方法の効果について考察した.

2.シェルターの被災実態

(1) シェルターの構造

インドネシア国公共事業省メラピ火山砂防事務所から、シェルターの構造図、施工写真を収集した. 当該シェルターは、被災後は封鎖されているので、その詳細な内部構造については、ほぼ同じ仕様で計 画・施工された他の地区(メラピ火山南斜面カリウラン地区)のシェルターを参考として調べた.

当該シェルターの仕様を図-1に示す.シェルターは地下3m,広さは約60m³(約50人収容可能), 厚さが0.5mのコンクリートで覆われ,天井上部は土(厚さ1.5m),コンクリート(厚さ0.3m),鉄

(厚さ 5mm)の三層で保護されている.シェルターには、外側と内側の二つのドア(仕様は同じ)があり,各ドアは、厚さ 5mmの鉄板で作られている.それぞれのドアは押し扉であり、内側から横棒でロックする構造である.したがって、ロックをしない状態でドア外側から所定の力が作用すれば開口する.ドアは、高さ 2m、横幅 1m、厚さ 0.1m である.ドア内部は、厚さ 0.1m の空洞(空気層)とな



図 1 シェルターの諸元と本体部の堆積状況

Fig-1 Shelter structure and main body of pyroclastic flow deposition situation

っているが、ドアノブとドアの側面が熱橋部となる構造になっている(**写真-1)**.また、ドア面の上部にガラス窓(14cm×14cm)が設けられている.

シェルター入り口の小空間は,高さ2.5m,幅 2.3m,長さ2mであり,シェルター室内は,高 さ4m,幅6.1m,長さ12mである.空間の形状 を示すアスペクト比(H/L)は,ドア内部,シ ェルター入り口の小空間,シェルター室内でそ れぞれ,20,1.25,0.33となっている.

(2)本体部の氾濫・堆積範囲,シェルター周 辺の本体部堆積深

カリアデム集落での火砕流の流下・堆積範囲 は,現地測量によると,扇頂部(ゲンドール川河 Photo-1 She 道右岸からの越流箇所)から約 520m,最大幅約 240m である.



写真 1 ドアとその側面の熱橋部

左:外側ドア(遭難者救出後に閉鎖)、右:カリアデム地区の シェルターと同じ仕様で施工されたカリウラン地区のシェル ターの外側ドア側面

Photo-1 Shelter door and it's part of heat bridge

シェルターは、本体部堆積先端から約 50m 上流に位置する.本体部の堆積深は、露頭や人工物の埋 積状況の観察によると、扇頂部付近の旧段丘上で約 5m、シェルター周辺の被災家屋付近で、約 50cm ~1.5m、堆積末端付近で数 10cm~1m 程度である.本体部の堆積表面には 10cm~1.5m 程度のデイサ イト質の礫が多数散在し、マトリックスは砂成分が主である²⁾.

シェルター天井部区間での縦断方向の火砕流本体部の堆積深は数10cm~1.5mであり,平均堆積深は約1mである(図-1).また,シェルター外側のドア前面を埋塞した火砕流本体部の深さは,遭難者救出直前(本体部掘削前)に撮影された映像と掘削後の残存堆積土砂面から,3m程度と想定される.

(3)本体部堆積物、シェルター室内の温度の情報

遭難者救出時の状況を撮影した映像から、シェルター外側ドアと内側ドアはともにすこし開いており、シェルター入り口の小空間、シェルター室内の入り口付近に土砂が流入していた状態であった.

インドネシア国メラピ火山観測所(以下, MVO)により, 2006年6月15日7:00am(火砕流本体部 が堆積してから16時間後)にかけて、シェルター周辺の堆積土砂の温度が測定された.堆積土砂の温 度(堆積地表面から約60cm下の地点を10箇所以上測定)は平均350℃、堆積土砂の中の岩の温度は 530℃であった.また、シェルターの外側ドアから内側ドア付近まで流入して堆積した本体部(堆積深 約1m)の温度(堆積地表面から約60cm下)は約350℃であった.なお、遭難者救出直後に、シェル ター内の温度は47℃と報道されたが¹⁾(じゃかるた新聞、2006年6月17日), MVOによればシェ ルター内はかなり熱く、消防服を着用しなければ室内に入れる状況ではなかったとのことである.遭 難者救助時の映像からも、消防服を着た救出隊員のみが室内を出入りする状況や放水により室内温度 を低下させようとしているのを確認できる.よって、本研究では室内温度47℃という情報は用いない こととした.

一方,筆者の調査によれば,外側ドア取り付け部のコンクリート壁面に敷設された室内への電気回線を制御する電圧ボックス(材質:プラスティック)の蓋と電気コード(材質:ポリ塩化ビニル)の 一部が熱変形し,焦げを生じている.ポリ塩化ビニル(硬質)の熱分解温度の範囲は,200℃~300℃, 着火温度は,454℃である³⁾.本体部と外側ドアの境界面での接触熱抵抗については,ドアと堆積物の 実際の接触面積,熱伝導率の高い岩の含有割合とその接触面積およびドアへの圧力によって変化する と考えられる⁴⁾.本研究では,接触熱抵抗は考慮せず,MVOによる温度測定結果や電気コードなどの 高分子材料の熱損傷状況から,本体部の温度を350℃とした.外側ドアの前面には本体部が厚さ3m程 度の深さで堆積しため、その熱容量は大きく、後述の計算時間内では、温度は変化しないとした. 映像によれば、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は燃焼 していない(熱変形の有無、程度は、映像から判読不可能).衣服やかばんなどの素材であると考え られるポリエチレンの着火温度は 349℃である³⁾.また、遭難者の1人(内側ドア奥で被災)は火傷 により全身が焼け爛れた状態であったことが報告されている.頭髪の炭化は約 250℃から生じること も考慮すると、シェルター室内の遭難者救出箇所での温度は、約 250℃以上 350℃未満と推測される.

人間の熱環境下での耐容限界に関するこれまでの知見⁵⁾として、無風状態で湿度が低い場合、50℃なら数時間、70℃なら1時間、130℃なら15分、200~250℃だと5分程度、飽和水蒸気では50℃でも数分程度しか耐えられないことが明らかにされている.このようなことから、本研究では、シェルター室内の温度が体温よりも低ければ安全とみなすこととする.

3. 伝熱計算の考え方と計算条件および計算結果

本体部堆積状況から,シェルター内への伝熱ルートは、「シェルター天井部からの伝熱ルート」、「外 側ドアから室内への伝熱ルート」が想定される(図-1内の点線の矢印).

(1) シェルター天井部からの伝熱ルート

この場合の伝熱は、本体部⇒土層⇒コンクリート層⇒鉄層⇒シェルター室内からなるルートで生じ ると考えられる.鉄層から、シェルター室内への伝熱は、温度の高い領域が天井に沿って形成される ため、ヌセルト数(流動している流体で熱伝達により移動する熱量と流体が静止しているときに熱伝 導により移動する熱量の比)は極めて小さくなり,自然熱対流は発生しない⁴⁾.したがって,本伝熱 ルートでは、熱伝導のみが生じるとした.シェルター天井部を被覆している土層内の温度は一定で 20℃, 土層内の物性値(熱伝導率, 密度, 比熱など) は一定, 内部発熱が無い状態とする. そのよう な状態のときに、突然、その上部に本体部が堆積した場合のシェルター室内での温度を推定するため、 一次元非定常熱伝導計算を行った.鉄層の厚さは 5mm と薄く,またその熱伝導率は 80.3W/(m・K)⁶ と他の部材のそれよりもはるかに高いので、計算上はこの層が無いものとし、土層とコンクリート層 の二層構造とみなした.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 m²/sec(乾燥土の値)、3.E-07 m²/sec (乾燥土と湿潤土の中間値)、6.E-04 m²/sec, 3.E-05 m²/sec とし本体部の温度は MVO の温度測定結果を参考に 350℃とした.計算の刻み時間は 0.1sec と した.大気、土層、コンクリート層、シェルター室内、シェルター基礎部と接触した地盤の土の初期 温度は、各々、30℃、20℃、15℃、20℃、10℃とした.これらのうち、大気、土層の温度は、当該シ ェルター付近での測定値を参考とした(2007年7月測定).また、シェルター内の温度は、被災した シェルターの標高がそれほど変わらないメラピ火山南斜面カリウラン地区のシェルターの室内温度を 参考とした(2007年7月測定).

計算には,以下の一次元熱伝導式を用いた.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{1}$$

ここに、T:温度、D:温度伝導率、t:時間である.(1)式を陽に差分化し、本体部の堆積時から10時間~500時間後までを計算した結果を図-2に示す.一地点、一時刻のデータであるが、本体部堆積後40時間経過後に、堆積地表面下約20cmの箇所で救出隊が測定した温度値は219.8℃である.40時間後の計算結果は、地表面下20cmで220℃であり、実測値に近い.シェルター室内の温度は、40時間後では、ほとんど上昇しない.500時間経過して、天井付近のみが約20℃上昇する程度となった.よって、救出時までの間は天上部から室内への熱移動は無視でき、シェルター奥のコンクリート壁の

- 4 -

外側の温度も本体部の熱移動の影響を受けないものとした.

(2) 外側ドアからシェルター室内への伝熱 ルート

この場合の伝熱は、本体部堆積物⇒外側ド ア表面⇒外側ドア壁面内部⇒シェルター入り ロの小空間⇒内側ドア壁面内部⇒シェルター 室内内部⇒シェルター奥のコンクリート壁面 内部⇒コンクリート壁面と接している土(旧 地盤)からなるルートで生じる(今回の災害 のように、シェルターの外側ドア、内側ドア 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⇒シェルター室内⇒ シェルター奥のコンクリート壁面内部⇒コン クリート壁面と接している土(旧地盤)から なるルートで生じると考えられる). 外側と 内側のドア壁面内部、シェルター奥のコンク リート壁面内部での伝熱形態は熱伝導である とし、シェルター入り口の小空間およびシェ ルター室内内部では、自然対流による熱伝達 とみなした. また, ドアの熱橋部のため, ド



Fig-2 Changes in shelter room temperature by hear conduction from ceiling with time

ア内部の空洞部の空気層が伝熱に与える影響を無視し、厚さ 0.005m の鉄板一層からなるドアとみな した.また、300℃程度までの温度域での伝熱は、熱伝導と熱伝達(対流伝熱)が主となるので、本研 究では放射熱は考慮しない⁷⁾.

シェルター入り口の小空間,シェルター室内での自然対流による熱伝達に大きな影響を与える平均 熱伝達率 (a_m)を以下のようにして設定した. MacGregor ら (1969)は、アスペクト比 (H/L)が1~ 40 の範囲に応じ、レイリー数 (R_a)と平均ヌセルト数 (N_{um})との関係を示す下記の実験式を提案し た⁸. レイリー数は、後述のプラントル数 (Pr)とグラスホフ数 (G_{rd})の積であり、平均ヌセルト数 は、熱伝達により移動する熱量と熱伝導により移動する熱量との比を示す無次元量である.

$$N_{um} = 0.046 \cdot R_a^{-\frac{1}{3}} \tag{2}$$

本シェルターのドア入り口の小空間,シェルター室内,ドア内部の空洞部のアスペクト比も,この 実験式の対象とする範囲に含まれる.鈴置(1971)らも, R_a が高い領域(10⁶ < R_a)の平均ヌセル ト数は,アスペクト比に関係なく,MacGregorら(1969)とほぼ同様の式を提示した⁹⁾.レイリー数 は,以下の式によって算出される.

$$R_a = \Pr \cdot G_{rd} \tag{3}$$

ここに、Pr:プラントル数(動粘性係数と温度伝導率との比で,運動量が速度境界層内を分子拡散 による伝えられる伝わり易さと,熱エネルギーが熱伝導により伝えられる伝わり易さとの比を示す), *G_{rd}*:グラスホフ数(流体の膨張に伴う浮力とその粘性によるせん断力との比を表す無次元量で自然対 流の強さを表す)である.密閉空間内では、レイリー数が約1000よりも大きければ、自然対流が発生 する⁴⁾.本研究では、レイリー数は、2.E+05~2.E+12程度の値を示し、十分、自然対流が発生する領 域となる.

$$G_{rd} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T - T_{room}) \cdot L^3}{\nu^2}$$
(4)

ここに、 $g: 重力加速度 (m/sec²), \beta: 膜温度 (=(T+T_{room})/2+273(K)) での体膨張係数 (1/K),$ $T-T_{room}: 室内との温度差 (°C), L: 密閉空間の長さ (m), v: 膜温度における動粘性係数 (m²/s) で$ $ある. (2), (3), (4)式から平均ヌセルト数 (<math>N_{um}$)を求め、下記の式により平均熱伝達率 (a_m)を算出 した.

$$a_m = \frac{N_{um} \cdot \lambda}{L} \tag{5}$$

ここに、λ: 膜温度(シェルター室内に面したドアの表面温度とシェルター室内温度(定常状態)との平均温度)における熱伝導率(W/(m・K))である.シェルター入り口の小空間とシェルター室内の 温度(定常状態)は、2.(3)での推定結果を参考に、250℃~300℃までの値を試行的に与えた.ドアの 素材が高い熱伝導率を示す鉄であることから、外側ドアの表面温度が瞬時に本体部の温度と等しくな り、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)を境界条件と して用いた.シェルターの奥の壁は最大厚さ2mのコンクリート壁で、その外壁は旧地盤内の土に直 接接した構造となっている(図-1).本体部堆積前後のコンクリート壁(土と接触した外部壁)の表 面温度は10℃とした.

計算された平均伝達率は、1.1~1.5 W/(m²・K)であり、 膜温度が増加するほど減少する. 今回は、 これらの値の平均値に近い値として、シェルター入り口の小空間およびシェルター室内での平均熱伝達率を 1.3 W/(m²・K)に設定した.

(3) 計算ケースと結果(Case-1~4)

表-1に計算ケースを示す. Case-1 では、外側ドアのみが開いており、本体部がシェルター入り口の 小空間まで流入した場合(内側ドアまでは到達しない)を想定した. Case-2 では、今回の災害のよう に、外側、内側のドアが開いており、本体部が内側ドアまで到達した場合を想定した. Case-3 では、 外側ドアのみが開いており、かつ本体部がシェルター入り口の小空間に流入し、内側のドアに接して 堆積した場合を想定した. Case-4 では、外側ドアおよび内側ドアが完全に閉められ、本体部が外側ド アに接して堆積した場合を想定した. 計算は定常状態を仮定して実施した. これは、室内での対流に よる熱伝達は、短時間でなされること、シェルター埋没後、救出までに 41 時間経過したことから、救 出時点では既に定常状態であったと想定されることによる.

本体部から、シェルター奥のコンクリート壁面の区間での熱通過率(K)の基礎式を(6)式に示す.

$$K = \frac{1}{\left(m \times \frac{b_i}{\lambda_i} + n \times \frac{1}{h} + \frac{b_c}{\lambda_c}\right)}$$
(6)

ここに、 b_i :ドアの鉄板厚 (0.005m)、 λ_i :ドアの鉄板の熱伝導率 (80.3W/(m・K))、h:シェルタ ー入り口の小空間およびシェルター室内の平均熱伝達率、 b_c :シェルター奥のコンクリート壁面厚 (2m)、 λ_c :コンクリート壁面の熱伝導率 (1.2 W/(m・K))、係数 m、n は、Case-1 では、m=1、n=2、 Case-2、Case-4 では、m=0、n=1、Case-3 では、m=1、n=1 である.

$$q = K \times \left(T_{pf} - T_s\right) \tag{7}$$

ここに、q:熱流束 (W/m²)、 T_{pf} :本体部の温度(350°C)、 T_s :シェルター奥のコンクリート壁と 土との接触温度(10°C)である.シェルター室内奥の室内側のコンクリート壁面温度(T_w)は、(8)式 により算出される.

- 6 -

$$T_w = T_{id} - q \times \frac{1}{h} \tag{8}$$

ここに, *T_{id}*:シェルター内側ドアの室内側表面温度(℃)である.シェルター室内の平均温度は, 内側ドアのシェルター室内側壁面温度とシェルター奥のコンクリート壁面温度(*T_w*)の平均値とした. 伝熱プロセスにおける温度変化を**表-2**に示す.

シェルター室内の平均温度は, Case-1 および Case-4 では 227.6℃, Case-2 および Case-3 では 296.3℃ を示す. Case-2 の計算値は, 2.(3)で推定したシェルター室内の温度の範囲内である. 現行のシェル ター構造では, 350℃の本体部に埋没した場合は全ての計算ケースで体温を大きく超過し, 安全を確保 できない.

シェルター室内の温度分布を検討するために、Case-4を対象として、その一次元計算結果をもとに、 二次元定常自然対流伝熱計算を行った.内側ドアを高温壁とし、シェルター奥のコンクリート壁を低 温壁として、上下壁が断熱された密閉空間を想定した.X軸は内側ドアから水平方向にコンクリート 壁までの区間(12m),Y軸はシェルター室内床部から室内天井部までの高さ(4m)とし、120×40 の格子分割を行った(格子幅 △x=△y=0.1m).高温壁、低温壁の温度は、各々、268.4℃、186.2℃で ある.そこでの自然対流の流れ場と温度場を計算するために、連続式(9)、運動方程式(10)、(11)、エネ ルギー式(12)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(保存形)(14)、渦度輸送方程式 (16)、エネルギー式(保存形)(17)を用いた¹⁰.

表 1	計	算	ケ	ース	
-----	---	---	---	----	--

Table-1 Calculation case

	ドアの閉	閐 閉 状 況	ドアの断熱状況など		土砂の流入状況	計算方法	摘要
	外 側ドア	内 側ドア	外 側ドア	内 側ドア			_
case-1	open	close	無	無	入り口小空間に流入		_
case-2	open	open	無	無	入り口小空間に流入	一次元定常	今回の災害に 近いケース
case-3	open	close	無	無	入り口小空間に流入 し、内側ゲートに接触		
case-4	close	close	無	無	外 側 ゲートに 接 触	一次元定常	
						二次元定常	シェルター室 内での温度分 布
case-5	close	close	ドアの熱橋部 た場合	阝を断熱化し			
case-6	close	close	ドアの熱橋部 し、それを一	阝を断熱化 基増設			
case-7	close	close	ドアの熱橋部 し、ドアの素舗 化	ßを断熱化 材、厚さを変		一次元定常	減 熱 改 艮 ケー ス
case-8	close	close	ドアの熱橋部 し、ドア内部 断熱材を充5	『を断熱化 の空洞部に 真した場合			

表 2 伝熱ルートにおける温度の変化(計算結果) Table-1 Changes in temperature (calculated)

	case-1	case-2	case-3	case-4	case-5	case-6
火砕流本体部	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0
外 側ドア(外)				350.0	350.0	350.0
外側ドア(内)				350.0	294.9	308.1
改良案 増設ドア(外)						266.7
改良案 増設ドア(内)						224.8
内側ドア(外)	268.4		350.0	268.4	239.7	183.3
_内側ドア(内)	268.4		350.0	268.4	184.6	141.4
シェルター室内(平均温度)	227.6	296.3	296.3	227.6	157.0	120.7
コンクリート壁(内)	186.8	242.6	242.6	186.8	129.5	100.0
_コンクリート壁(外)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{9}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$
(10)

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + g\beta(T - T_0)$$
(11)

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)$$
(12)

$$T_0 = 0.5(T_h + T_w) \tag{13}$$

ここに,u,v:速度,p: 圧力,T: 温度, T_0 : 膜温度,v: 動粘性係数,g: 重力加速度, β : 体膨張 係数,a: 温度伝導率, T_h : 内側ドアの温度, T_w : コンクリート壁の室内側の温度である.

$$Z = -\left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y}\right)\right]$$
(14)

ここで, 流れ関数 (Ψ) と渦度 (Z) は,

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad Z = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y}$$
(15)

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(Z \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(Z \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right) + G_r \frac{\partial \theta}{\partial X}$$
(16)

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\theta \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(\theta \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) = \frac{1}{\Pr} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \right] + \frac{1}{\Pr} \left[\frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right]$$
(17)

無次元量と無次元数は、以下のようである.



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 は二次式近似し,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 算の結果を図-3に示す.2.(3)でのシ ェルター室温の推定値より低めの領域 が多いが,シェルター室内では,対流



による渦が生じ、室内の空気が混合されるため、内側ドア近傍以外では、温度分布はあまり偏りが生じないことが推測された.

(4) 現行シェルターの問題点と構造改善の方法

本体部に現行シェルターが埋没したときの、構造の問題点として、①ドアが熱伝導率の高い鉄製で あり、ドア側面が鉄板で接合されているため、この部分が熱橋部となること、②ドア両面の上部にガラ スの採光部があり、強度的にその部分が弱く破壊されやすいこと、③現行シェルターは、地下にステ ップを降りていく構造であり、本体部がステップ最下段の床まで堆積した場合は、本体部の熱容量増 加から、堆積物の冷却に長時間を要すると考えられることがあげられる.

現行シェルターの構造の改善案として、問題①に対しては、外側と内側のドアの熱橋部の断熱化、 ドアの増設、ドア素材の変更とドア厚の増大、断熱材の使用などが考えられる.また、問題②につい ては、窓は設けないものとした.また、問題③について今回は検討しないものとした.

(5) 計算ケース(表-1)と計算結果(Case-5~8)

以下の全てのケースでは、外側ドアと内側ドアが完全に閉められていることを前提とする.

Case-5 では、外側と内側のドアの熱橋部を断熱化(鉄板 - 空気層 - 鉄板の三層構造とする)した場合を想定した.空洞部の厚みが約3 mm以下程度ならば自然対流は発生せず、空洞部内の空気層を一層と考えた多層熱伝導として扱われる⁷⁾.よって、ドア内部の空洞部(現行厚:0.1m)では、自然対流による熱伝達が生じるとした.その場合の平均熱伝達率は、前述のシェルター入り口の小空間およびシェルター室内での計算方法と同様の方法により、1.3 W/(m²・K)に設定した.

Case-6 では,現行の外側ドアと内側ドアの熱橋部を断熱化するとともに,シェルター入り口の小空間に,それらと同じ仕様のドアを一基増設した場合を想定した.

Case-7 では、現行の外側ドアと内側ドアの熱橋部を断熱化するとともに、ドアの素材として、熱伝 導率が現行の鉄よりも小さい素材(ねずみ鋳鉄(熱伝導率:42.8W/(m・K))、ステンレス鋼(熱伝導 率:16W/(m・K))、石灰岩コンクリート(熱伝導率:1.2W/(m・K)))の3種を別々に使用した場合 を想定した(Case-7-1). ついで、シェルター入り口の小空間に、前述の各素材のドアを一基増設し た場合を想定した(Case-7-2).さらに、Case-7-1で用いた素材の外側ドアと内側ドアの壁厚を、0.01m、 0.03m、0.1m、0.3m、0.5m と厚くした場合を想定した(Case-7-3).

Case-8 では,現行の外側ドア,内側ドアの熱橋部を断熱化するとともに,ドア内部の空洞部に断熱 材を充填させた場合(伝熱形態は熱伝導)を想定した.断熱材は,耐熱性に優れた高気密住宅用断熱 材である「セルロースファイバー」(熱伝導率:0.03 W/(m・K))を用いるものとする.ドアの数は現 行の二基とし,ドア内部の空洞部の厚さ(断熱材の厚さに相当)を 0.1m(現行)~0.7m と厚くした 場合を想定した.

Case-5~Case-8 でのシェルター室内の温度は, Case-1~Case-4 と同様の方法 (式(1)~(3)) で求めた. (1)式中の係数 m, n については, Case-5 と Case-7-1 と Case-7-3 では *m*=4, *n*=4, Case-6 と Case-7-2 で は *m*=6, *n*=6, Case-8 では *m*=4, *n*=2 としている (断熱材として, (6)式の分母に, 2×b'/λ'を加える (b': 断熱材の充填幅, λ': 断熱材の熱伝導率)).

Case-5, Case-6の結果を表-2に示す.

Case-5 では、シェルター室内の平均温度は、157℃となり、Case-4 と比較して 70.6℃、低下させる ことができる.

Case-6 では、シェルター室内の平均温度は、120.7℃と計算され、現行のシェルター構造と比較して、約 106.9℃室内の温度を低下させられる.

Case-7-1 では、ドアの素材によらず、室内の温度は約 157℃となる.ドアの壁厚(空洞部を除く) は、片側のみで 0.005m と薄く、この場合は、壁の素材を熱伝導率の低いものに変えるだけでは温度

を低下させられない. Case-7-2 では, 室内の温度は約 121℃となり, ドア一基の増設で 36℃低下する. Case-7-3 では, 室内の温度は約 157℃となる. ドア厚(空洞部を除く)のみを大きくしても, 室内の 温度を低下させられない. ちなみに, シェルター入り口の小空間に同じ仕様のドアを一基増設した場 合(ドア厚は 0.005~0.5m), シェルター室内の平均温度は約 121℃となる. また, 今回のケースでは, 最も熱伝導率が低い「石灰岩コンクリート」を用いて厚さ 0.5m のドアを三基設置した場合は, シェル ター室内の平均温度は 89.5℃となり, Case-4 と比較して 138.1℃温度を低下させられる.

Case-8 でのシェルター室内の平均温度の変化を図-4 に示す. 断熱材の充填厚を大きくすることで, シェルター室内の温度を大きく低下させられる. ドアの数が現行の二基の場合は, セルロースファイ バーの厚さを約 0.4m より厚くすると, シェルター室内の平均温度は体温よりも低くなる. さらに, セルロースファイバーを充填した同じ仕様のドアを一基増設した場合, 充填厚を約 0.2m より大きく すると, シェルター室内温度は体温よりも低くなる.

図-5 に、本体部の温度を変化させた場合の、シェルター室内の定常温度を体温以下とするためのセルロースファイバー充填最低厚さ(ドアー基あたり)を示す.過去の本体部の堆積温度に関する測定結果¹¹⁾を参考に、本体部の温度が250℃~800℃の範囲で計算した.

両者の間には線形に近い関係がある.また,ドアの数が三基の場合は,二基の場合よりもセルロース ファイバー充填最低厚は小さくなる.たとえば,セルロースファイバー充填厚を 0.5m にした場合, ドア数が二基のときは約 500℃,ドア数が三基のときは約 700℃までの本体部温度からの伝熱に対応で きる.800℃の本体部堆積物にシェルターが埋没した場合,シェルター室内の平均温度を体温未満とす るためには,ドア二基,ドア三基の場合のセルロースファイバー充填厚は,各々,一基あたり 0.85m 以上, 0.55m 以上は必要と考えられる.



図 4 ドア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/(m²・K)をゲート内 部に充填した場合のシェルター室内の温度 Fig-4 Shelter's room average temperature reduction by insulation material(cellulose fiber) lining shelter doors



図 5 シェルター室内温度を体温以下とする ためのセルロースファイバー充填最低厚さ



4.おわりに

本研究により,以下の事項が明らかにされた.

①シェルターの天井上部は平均1m,シェルターの外側ドア前面は約3mの厚さで本体部に埋塞された.本体部はシェルター室内まで流入した.堆積土砂の温度測定の結果,ドア付近の部材の熱変形,焦げの状況などから、本体部の温度は350℃、シェルター室内の温度は約250℃以上350℃未

満と推測された.

- ②シェルター内への伝熱ルートは、シェルター天井上部からによるものよりも、外側ドアから流入 した堆積土砂によるものが支配的であったと考えられる.
- ③現行のシェルター構造では、たとえ、外側ドアと内側ドアが完全に閉められていても、温度 350℃ の本体部に埋没した場合のシェルター室内は体温を大きく超過する結果となり、安全を確保でき ない.
- ④今回の計算条件の下では、ドア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をドア内部の空洞部に充填することが、シェルター室内の平均温度を体温より低くさせるための最も効果の高い減熱方法であった.ただし、800℃の本体部にシェルターが埋没した場合、その充填厚は、ドア二基では一基あたり0.85m以上、ドア三基では一基あたり0.55m以上は必要であると考えられる.

現実的には、このような厚い改良ドアを数基設置した場合、緊急時にそれらを迅速に開閉して避難 することは困難である場合も想定される.今回の計算結果のみからの判断ではあるが、火砕流氾濫シ ミュレーションなどにより、本体部の氾濫区域を想定したうえで、シェルターをその区域内に配置す るのを避け、必要に応じて熱風部の危険区域に配置するのが妥当と考えられる.ちなみに、今回被災 したシェルターの仕様でも、外側と内側のドアを確実に閉じておけば、熱風部(温度:400℃、流下時 間:2分、5分と仮定)のみでは、室内の安全が確保されることが筆者による集中熱容量法計算により 推察される.

謝辞:株式会社ダイヤコンサルタントの高橋透氏(元インドネシア駐在 JICA 専門家)には,沢山の有 意な情報を賜った.また,研究助成をいただきました(財)北海道河川防災研究センターに深謝の意 を表します.

参考文献

- 1) 財団法人建設工法研究所: 雲仙復興工事実施安全対策技術検討業務報告書, 1994.
- 2) 山田孝: 平成 18 年 6 月 14 日にインドネシアメラピ火山の南山麓で発生した火砕流災害, 砂防学会 誌, Vol.59, No.3, p.47-50, 2006.
- 3) ポリマー辞典編集委員会:ポリマー辞典(増補版),大成社,1993.
- 4) 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.
- 5) 東京消防庁: 消防科学研究所報 31 号, 東京消防庁, p.131-136, 1994.
- 6) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改定第3版, p.297, 1975.
- 7) 竹内正雄: 新版熱計算入門 II, (財) 省エネルギーセンター, p.59, 1989.
- 8) 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.
- 9) 鈴置昭,赤津康昭:垂直密閉流体層内の自然対流熱伝達,第8回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p.309-312,1971.
- 10) 岩井裕, 大村高弘, 小林健一, 富村寿夫, 羽田光明, 平澤茂樹, 吉田英生: 熱流体のシミュレーション, 丸善株式会社, 2005.
- Norman G. BANKS and Richard P. Hoblitt: Summary of temperature studies of 1980 deposits, The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, Geological Survey Professional Paper 1250, p.295-313, 1981.