

FC に充填した雪塊の融雪に伴う形状変化の数値シミュレーション

田中光太¹・西川詩音¹・上村靖司²・杉原幸信²・佐々木賢知³

(1:長岡技術科学大学大学院 工学専攻 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 工学研究科 機械系

3:三機工業株式会社 R&D センター建築設備開発部先端環境開発課)

1. はじめに

近年, 雪冷熱エネルギーの活用促進により, 雪利用への関心が高まっている. 本研究では必要に応じて移動可能な可搬型雪冷房装置を開発している. この装置では FC (flexible Container, 通称フレコンと呼ばれる大型の袋) に充填した雪の表面で熱交換を行うことで冷風を得ているため, 雪の融解に伴う形状の変化は熱交換性能を決める重要な因子であり, 所定の熱交換性能を維持するには設計段階で最適な熱交換システムを確立することが必要である. しかし, 実際の装置で夏場の屋外環境下で様々な条件で実験を行い, 最適な熱交換システムを追求することは現実的でない. そこで, CFD 解析を用いて雪の融解形状の変化を検討することで, 実験を行うことなく最適な熱交換システムを確立できると考え, 本研究では市販の CFD ソフトを用いて非定常熱交換シミュレーションにより, 雪塊の融解形状と熱交換性能を再現することとした.

2. 数値解析の概要

本研究では数値解析を 2 段階に分けて行った. まず, 時間経過ごとの雪の融解形状を再現することを目的とした非定常融解解析を行う. この時, 実際に解析領域内のメッシュが変形して融解するのではなく, メッシュの固相率が変化することで, 融解を疑似的に再現している. 計算の後, 雪の融解形状データを 3 次元モデルとして取り出し, 定常熱流体シミュレーションを行う. 定常, 非定常に分けて解析を行う理由は, 様々な条件を変更した複数のモデルを段階的に解析できることが, 計算コストの削減になるためである.

本研究で使用したシミュレーションソフトは市販の熱流体解析ソフト Cradle CFD V2023.1 (Student Edition) の STREAM (MSC Software)である. これは使いやすさと高速演算が特徴の解析ソフトである. また, ソフト内の凝固・融解ツールを使用することで, 相変化時の潜熱を与えて計算することができる.

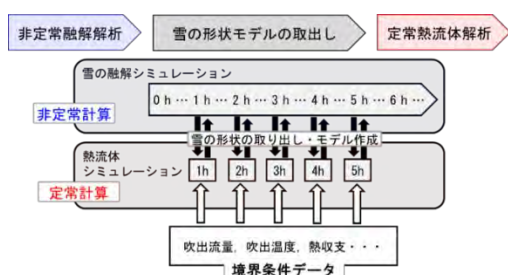


図1 数値解析の概要

3. 雪-空気非定常融解シミュレーション

3.1 非定常融解解析モデル

雪冷房装置では FC に充填された雪を使用する. 融解形状解析モデルは FC 内部を再現するため, 雪の高さを 1000 mm, 直径を $\phi 1000$ mm の円柱とした. また, 熱交換ユニットの隔膜設置部や台車の高さを考慮し, 雪上面から 100 mm, 雪下面から 250 mm の位置に解析領域を設定した.

初期状態として, 円柱の雪塊モデルに $\phi 150$ mm の吹出口ダクトが 20 mm 雪に埋没している状態を設定した.

また, 使用ソフトが Student Edition で, 最大メッシュ分割数が 1,000,000 以下という制約があるため, メッシュ数を抑えるために解析領域は円筒座標系 1/4 の円柱形とした.

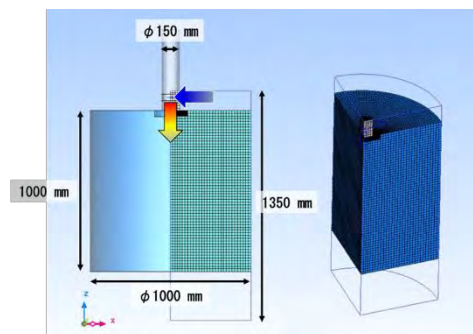


図2 非定常融解解析モデルの概要

3.2 非定常融解解析の解析条件

表1に非定常融雪融解解析の解析条件を示す.

表1 解析条件(非定常融解解析)

Cradle CFD V2023.1 (STREAM)			
解析領域	R : 500mm	θ : 90°	Z : 1700mm
雪モデル	r : 500mm		z : 1000mm
メッシュ分割	29 × 46 × 95		126730
乱流モデル	線形低レイノルズ数モデル		
流れ境界条件	吸込口側面 表面圧力0Pa (30°C) 吹出口ダクト 150 m³/h流出 (30°C)		
壁境界条件	Tmax面, Tmin面 (対称面) 熱伝達係数 : 4.94 W/(m²・K)		
熱境界条件	Rmax面, Zmax面 (熱伝達条件) Rmax面, Zmin, Zmax面 (ノースリップ面)		
初期条件	雪(0°C), 解析領域(30°C)		
融解物性判別条件	固相率 : 0.9		

3.3 非定常融解解析結果

図3に計算で得られた1時間ごとの雪の融解形状の変化を示す. 白く表示されている部分が固相率0.9の等値面で色

分けした雪を表している。結果から、1時間ごとに鉛直下向きに縦穴が徐々に形成される様子が再現でき、およそ5時間後には縦穴がFC底部に到達している。また、図4に1時間ごとの温度分布と流速ベクトルを示す。非定常解析では、冷氣吸込口付近の温度は3時間以降ではほとんど5度以下の冷風であり、温度分布からも実測値と異なる結果となった。

さらに、解析初期から中期では、比較的高温、高流速の空気が吹き付けているにも関わらず、雪中央部で融け残りが確認できる。これは円筒座標系の回転軸中心近傍であるほど、メッシュが複雑になりやすい性質が原因だと考えられる。また、吹出口直下には高流速の流体が流れているため、雪上面によみ点が形成され、部分的に流速が 0 m s^{-1} と判断されたのではないかと考察した。

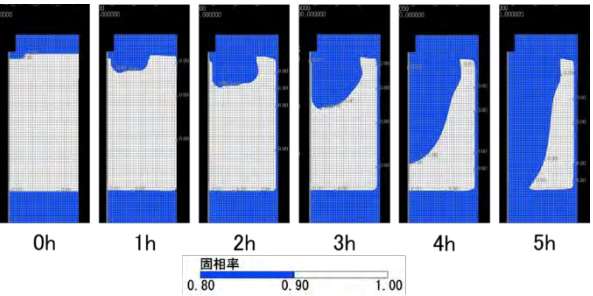


図3 1時間ごとの雪の融解形状(固相率0.9)

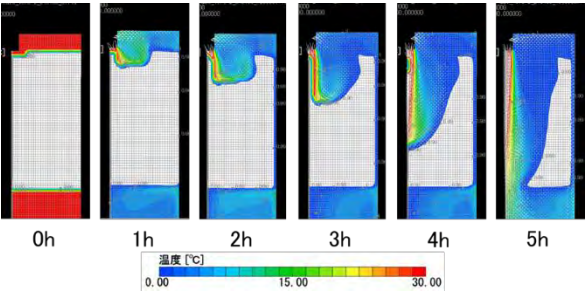


図4 1時間ごとの温度分布と流速ベクトル

3. 4 残雪率の計算

シミュレーションの再現性及び妥当性を評価するために、雪の融解形状から求めた時間経過ごとの残雪率の傾向を実測値と比較することとした。残雪率 R を雪の初期体積 V と一定時間経過後の雪の体積 V_x を用いて以下の式1に示す。

$$R = \frac{V_x \text{ [m}^3\text{]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \tag{1}$$

シミュレーションの雪の体積は CAD ツールを用いて出力した。実験における雪の体積は、雪塊高さと直径、そして縦穴の深さと直径を計測し体積を算出する。また、実験に使用する前後に雪の重量を計測している場合は、残っている重量の割合から残雪率を算出した。

図5に時間経過に伴う数値解析と実測値から求めた残雪率をプロットしたグラフを示す。グラフの下には1時間ごとの雪塊の融雪の様子と縦穴の直径、深さを示している。

グラフから、数値解析と6月21日の実測値と残雪率を比較すると傾向はおおむね一致しているが、時間が経過するにつれ解析のほうがやや融解が促進されていることが確認できる。しかし、8月の実験での5時間後の残雪率と比較すると、実測値の融解のほうが促進されていることから、外気温による影響が大きいと考えられる。

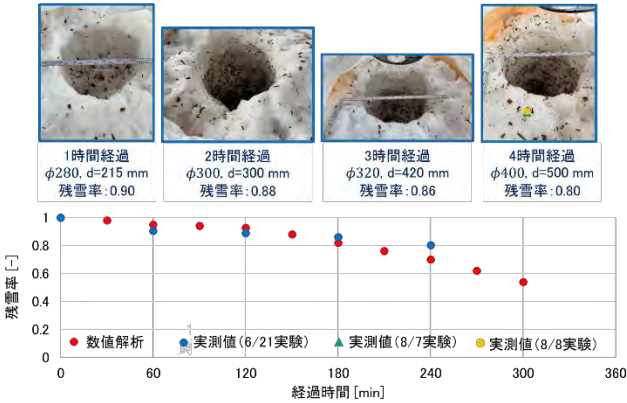


図5 数値解析と実測値による残雪率の比較

表2 実測値の残雪率

実験日	平均外気温	稼働時間	平均冷房能力	実験前	実験後	残雪率
6月21日	30.2℃	4時間	2.5 kW	225.0 kg	180.5 kg	80.2%
8月7日	34.2℃	5時間	2.6 kW	261.5 kg	120.0 kg	45.9%
8月8日	34.3℃	5時間	2.2 kW	241.0 kg	111.0 kg	46.1%

4. 雪-空気定常熱流体シミュレーション

4. 1 定常熱流体解析モデル

非定常計算で得られた雪の融解形状をもとに、形状変化を伴わない雪-空気間の熱交換性能を再現する定常熱流体シミュレーションを行った。雪の形状データを3次元モデル化して解析に使用した。

4. 2 定常熱流体解析の解析条件

定常熱流体解析の解析条件を表3に示す。

表3 解析条件(定常)

Cradle CFD V2023.1 (STREAM)		
解析領域	R : 500mm θ : 90° Z : 1700mm	
雪モデル	r : 500mm z : 1000mm	
メッシュ分割	約263000 ~ 約886000	
乱流モデル	線形低レイノルズ数モデル	
流れ境界条件	吸込口側面 表面圧力0Pa (30℃) 吹出口ダクト 150 m³/h流出 (30℃)	
壁境界条件	Tmax面, Tmin面 (対称面) 熱伝達係数 : 4.94 W/(m²・K)	
熱境界条件	Rmax面, Zmax面 (熱伝達条件) Rmax面, Zmin, Zmax面 (ノースリップ面)	
初期条件	雪(0℃), 解析領域(30℃)	
計算結果出力時間	1, 2, 3, 4, 5 (時間)	

4. 3 定常熱流体解析結果

図6に外気吹出口・吸込口降下ありの1時間ごとの温度分布と流速ベクトルを、図7に外気吹出口・吸込口降下なしのものを示す。なお、風量は送風ファンの出力 $350 \cdot 600 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ のそれぞれ 1/4 とした。外気吹出口・冷氣吸込口は融解した雪モデル縦穴の最下面から 50 mm 上を維持し、時間経過とともに降下するものとした。

風量が多い場合には高温の領域が大きく、外気吹出口付近にある吸込口からは熱交換される前の空気をそのまま吸気していると見て取れる。対して、風量が少ない場合には温度分布が緩やかに形成されている。また、比較的高温な温度分布が外気吹出口直下に鉛直下向きに伸びていることから、流速が冷氣吸込口温度に与える影響の大きさがわかる。

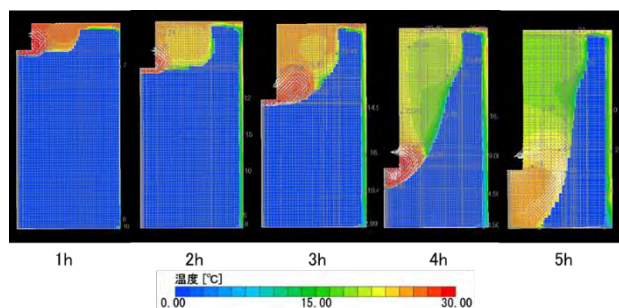


図6-1 外気吹出口・冷氣吸込口降下あり(風量 $87.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

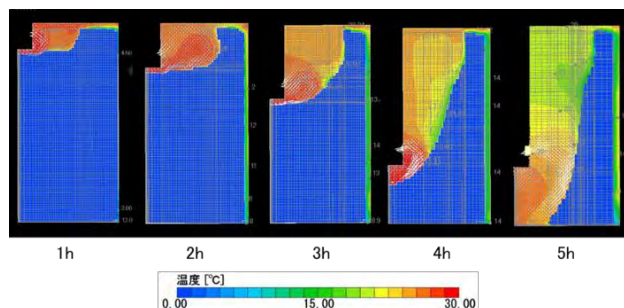


図6-2 外気吹出口・冷氣吸込口降下あり(風量 $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

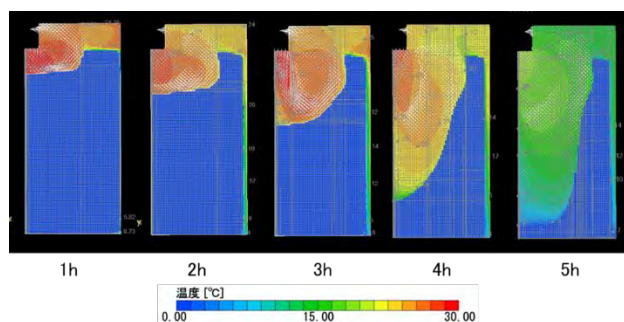


図7-1 外気吹出口・冷氣吸込口降下あり(風量 $87.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

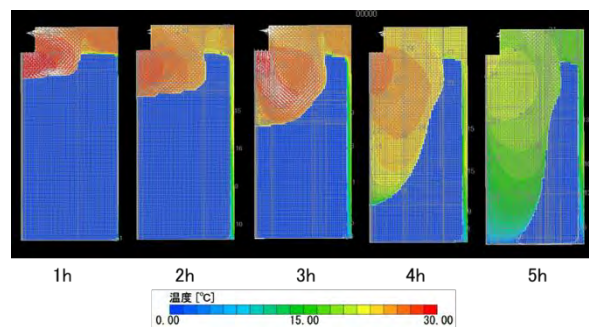


図7-2 外気吹出口・冷氣吸込口降下あり(風量 $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

降下あり・なしを比較すると、時間が経過するにつれ降下なしの場合のほうが吹出口温度が低くなる傾向になっている。また、風速の変化による影響を見てみると、風速が小さい条件の時に吹出口温度が低いといえる。これは鉛直下向きに対する風速の影響が大きく、降下なしの場合では伝熱面積がより大きく確保できるためと考えられる。

解析結果から求めた熱移動量を図8に示す。熱移動量は以下の式2から算出した。

$$\Delta t = t_{in} - t_{out}$$

$$P' = \Delta t \rho Q C_p \quad (2)$$

ここで、 t_{in} は流入温度(解析では $t_{in} = 30^\circ\text{C}$)、 t_{out} は吹出口温度である。また、 ρ は空気密度 $[\text{kg m}^{-3}]$ 、 Q は風量 $[\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$ 、 C_p は空気の比熱 $[\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$ である。

実測値と比較すると、解析では低い値を示していることがわかる。これは解析内で設定する雪表面の熱伝達率の与え方による影響が考えられる。また、雪モデルを 0°C 、密度 600 kg m^{-3} の氷として扱うため、実測値とのずれが生じたと考えられる。

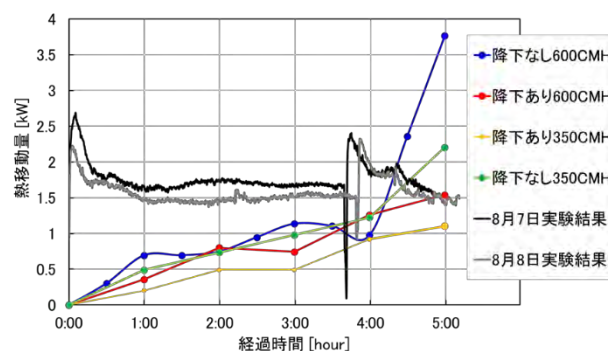


図8 時間経過に対する熱移動量

5. まとめ

FC内部環境での空気の流れ及び、雪-空気の熱交換性能の最適条件を検討するため、市販のCFDソフトを用いて数値解析を行った。まずは雪の非定常融解シミュレーションを行い、時間経過による雪の融解形状変化は概ね一致することが確認できた。定常熱流体シミュレーションでは概ね実測

の熱交換性能を再現することができた。数値解析と実測値では冷房性能の時間変化において逆の傾向がみられた。この原因として、風速分布、雪表面の熱伝達率の与え方に改善の必要があるものと考察した。

文献

田中光太ら(2023):可搬型雪冷房装置におけるFC内の雪の熱流体シミュレーション. 雪氷研究大会(2023・郡山)公園要旨集, 18p.

田中光太ら(2023):可搬型雪冷房装置の実用機試験と雪の非定常解析. 寒地技術論文・報告集 39, 121-126p.

国土交通省国土政策局地方振興課 豪雪地帯担当(2023):豪雪地帯対策特別措置法. 国土交通省 豪雪地帯対策特別措置法, p1,5. <https://www.mlit.go.jp/common/001475891.pdf>(2024.4.10 閲覧).

佐々木ら(2022):鉛直孔を有する雪塊と空気との熱交換に対する研究. 寒地技術論文・報告集 38, 228-231p.