

風の流れと堆積過程を考慮した積雪変形解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 小川 徹
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

これまでに当研究室では、降雪の移動と堆積および積雪の圧密変形とを同時に扱う降積雪過程解析手法を構築した¹⁾。しかし、従来の手法は積雪の圧密変形過程に重点を置いており、降雪過程は簡易な移流拡散モデルを用いていた。これは計算時間を短縮できるというメリットを持っていたが、同時に構造物や積雪が介在する場合に発生する風の乱れを再現することができないというデメリットを併せ持っており、解析条件に限りがあった。

本研究では風の乱れや吹き溜まりといった気象現象を従来法に反映させることを主な目的とする。具体的には空気を非圧縮粘性流体と見なし、流れの解析を行うことで算出された風速を降雪の運動速度に反映させる。なおその際に、速度および圧力に関する安定化手法である SUPG 法と PSPG 法を併用した安定化有限要素法を用いて流体解析を行っている²⁾。

2. 従来法における簡易移流拡散モデル

従来法では、降雪過程のうち落下を移流、揺らぎを拡散とした2つの過程に分けて以下に示すような簡易モデルで表現する。まず次式のように各要素に対する降雪供給質量を決定する降雪濃度 c を算出することで、降雪過程を表している。

$$\rho = c\bar{\rho} \quad (1)$$

ここで、 ρ はある要素における降雪の質量密度、 $\bar{\rho}$ は障害物の無い無限空間における降雪の質量密度である。なお、全く障害物の無い領域において $c_{i,j}$ は 1、逆に全く降雪の無い領域（構造物や積雪で完全に占められている要素も含む）では 0、構造物や積雪の下方の様に降雪強度が小さくなるような領域では $0 < c_{i,j} < 1$ となる。

一様な風の下、図 1(a) に示すように $\tan\theta=a$ の方向に雪が降っていると仮定する。さらに拡散過程として図 1(b) に示すような、拡散パラメータ b により同一段の要素間において降雪濃度の分配を行う。

降雪は拡散しながら下方へ落下するため、これらの2過程を組み合わせることで、図 2 のように各要素からそれぞ

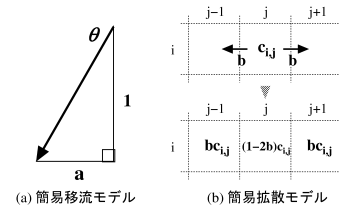


図 1 従来法における簡易移流モデルおよび拡散モデル

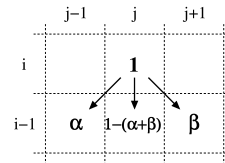


図 2 従来法における移流拡散モデル

れ下方の3要素に対して降雪濃度 c を分配するような移流拡散モデルとする。なお、 $\alpha = a + b - 3ab, \beta = b(1 - a)$ である。以上の操作を順次下段要素に対して行うことで、領域全体の降雪濃度分布を作成する。なお、積雪の成長および圧密変形に伴い積雪領域は変化するため、各要素の降雪濃度も変化する。積雪の成長速度、時間増分などに応じて適宜数ステップ毎に降雪濃度分布を更新する。

しかし、この手法では降雪の移動方向が a により一方向に限られ、構造物や積雪の有無によらず不変となる。そこで、風による影響の適切な評価を行うため、流体解析を並行する。

3. 積雪の力学変形モデル

積雪は一般に粘弾性体的性質を有するが、長時間に亘る変形過程においては粘性変形が支配的となる。そのため、本研究では積雪を粘性体として扱う。積雪の粘性係数は雪温 θ と密度 ρ に依存し、次式のように与えられる。

$$\eta_i = \tilde{\eta}_{0i} e^{\kappa|\theta|} \cdot e^{\zeta\rho} \quad (2)$$

ここで、下添え字の i は t (引張), c (圧縮), s (せん断)のいずれかを表し、 η_i は各変形下での粘性係数、 $\tilde{\eta}_{0i}, \kappa, \zeta$ は各積雪に固有の定数である。

また、積雪の一軸粘性変形下におけるポアソン比 ν は、引張時に 0.5(等体積変形)、圧縮時に 0 となることが知られている。以上の性質を反映させた一般の応力状態下における積雪の力学モデルは、等方性および温度一定の仮定の

keywords : 有限要素法, 降積雪過程

連絡先 : 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地

TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

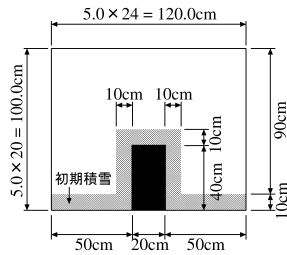


図3 解析条件

下、次式により記述される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 2\eta_G \mathbf{D} + p\mathbf{I} \\ \text{tr} \mathbf{D} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (p > 0), \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 2\eta_G \mathbf{D} \quad (p \leq 0), \\ \eta_G &= \eta_0 e^{\zeta \rho} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 σ は応力、 $p = \text{tr} \sigma / 3$ は圧力 (引張を正)、 $\mathbf{I}$ は恒等テンソル、 η_G はせん断粘性係数、 η_0 は定数である。また、 $\mathbf{D}$ はひずみ速度であり次式で与えられる。

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \otimes \mathbf{v} + \mathbf{v} \otimes \nabla) \quad (5)$$

なお、 $\mathbf{v}$ は積雪の変位速度である。

本研究では、以上の力学モデルを反映した VOF 法に基づく有限要素解析法により積雪変形の計算を実施する。

4. 流れの影響を考慮した降積雪過程解析

今回構成した流れの解析を従来法に実装する。流れの解析により各要素での流速ベクトルを算出し、降雪の鉛直落下速度ベクトルと合成する。それにより得られたベクトルを降雪の移動速度ベクトルとし、前述の簡易移流拡散モデルに適用する。その上で行った解析結果を、従来の簡易モデルにより行われた解析結果と比較する。

(1) 解析条件

解析条件を図3に示す。幅 120.0cm、高さ 100.0cm の矩形領域を 1 辺 5.0cm の正方形要素で一様分割し、幅 20.0cm、高さ 40.0cm の障害物を図のように設置する。また領域底部および障害物周辺には、図のように初期密度 $\rho_0 = 0.098\text{g/cm}^3$ の初期積雪を厚さ 10.0cm 与える。また降雪条件は密度 0.098g/cm^3 、落下速度 0.3m/s 、積雪堆積速度 3.0cm/hr とした。時間増分 $\Delta t = 60\text{s}$ とし、300min 経過までの解析を行う。流れは領域右面に対して左向きに $v = 0.05\text{m/s}$ の速度を固定して与え、30min 経過毎に流れの解析を行い、降雪の移動速度に反映させる。

(2) 解析結果

積雪面の形状を図4に示す。また図5には、構造物の存在によらず領域全体に一様風速を設定して得られた積雪面形状を示した。なお、いずれも降雪過程は前述の簡易モデ

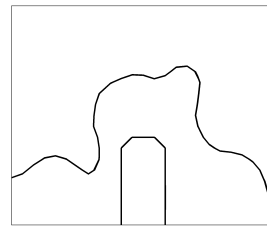


図4 流れ計算を反映させた場合の積雪形状

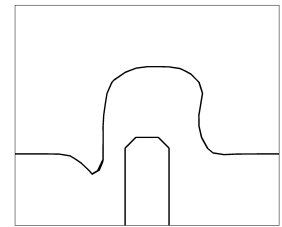


図5 一様風速を与えた場合の積雪形状

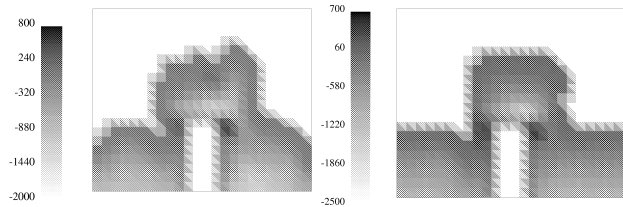


図6 流れ計算を反映させた場合の圧力分布

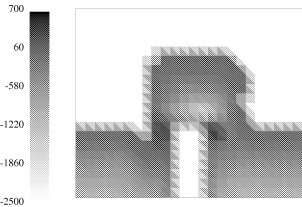


図7 一様風速を与えた場合の圧力分布

ルによっている。したがって、これらの差異は設定している風速の違いのみである。風の流れ解析に基づいた結果では、解析領域左右端における雪面高さが幾分低くなっている。これは流れ解析における左右の鉛直境界の雪面近傍に発生した風速の乱れが影響しているものと考えられる。ここには風速分布の様子を図示していないが、この左右端の乱れは風の流れと積雪域との境界と解析領域境界との交差部に発生しており、当該箇所の条件設定によるものと考えられ、この点については今後の課題である。

構造物の影響を考慮した場合の積雪面形状には、上流側上端付近に突起上の成長域が認められ、風速の設定方法の違いが現れている。また、図4と5に対応する積雪内部の圧力分布をそれぞれ図6, 7に示す。いずれのケースにおいても、構造物上端角部近傍に比較的高い引張力が発生していることが確認できるが、形状程の顕著な違いは認められていない。

5. おわりに

本研究では、これまでに構築した降積雪過程の解析手法を対象に、積雪形状にしたがって周囲の風の流れを解析し、それを反映させることを試みた。その結果、小規模な問題ではあるが、風の影響による積雪形状の差異を捉えることができた。なお、雪の降雪過程には依然簡易なモデルを用いている。この点については今後より適切なものに改善を図って行く必要がある。

参考文献

- 1) 小川徹, 阿部和久, 紅露一寛: 構造工学論文集, Vol.54A, 114-123, 2008.
- 2) T.E.Tezduyar, S.Mittal, S.E.Ray, R.shih: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **95**, (1992), 221-242.