粒子法を用いた雪の特性モデリングと挙動シミュレーション*

Characteristic Modeling and Dynamic Simulation of Snow Using Particle Method

山本 洋 佑**
YAMAMOTO Yosuke

石 本 淳***
ISHIMOTO Jun

落 合 直 哉***
OCHIAI Naoya

Abstract Snow characteristics are changed by climate or region. For the efficient development of a snow blower, stable and quantitative performance evaluation method is required. We try to reproduce the snow removal work using Discrete Element Method (DEM) in this study. In addition to conventional DEM, we developed potential model for reproducing the compaction of snow and air drag model to consider the characteristics of actual snow. And we found that simulation result is qualitatively consistent with the experimental result.

Keywords: Snow, Snow blower, Simulation, DEM, Lenard-Jones potential model

1. 緒 言

日本の国土の約半分に相当する 19 万 km²は『豪雪地帯対策特別措置法』によって豪雪地帯に指定されており、人口比約 16%の居住地域となっている。そのような雪国に暮らす人々にとって除雪機は欠かせない存在であり、除雪作業の負荷軽減のためには短時間で作業を行うことができる高効率な除雪機が求められている。

一方、除雪機の開発において除雪性能の計測は現状、冬期の豪雪地帯を利用した実用作業が基本となっており、試験条件を一定に保つことは困難である。そのため同一日時、同一場所における試験データの相対評価に頼らざるを得ない状況である。そこで高効率な除雪機を開発するためには、季節や試験場所に左右されない、安定かつ定量的な除雪性能の評価手法が求められる。

除雪作業は雪の相変化を考慮しなければ基本的に気相と固相を含む攪拌現象であると考えられる。また、除雪機から遠く離れた場所に雪を飛ばすため、除雪機に対して広範囲の解析領域を必要とする。格子法で多相流解析を行う際によく用

いられる VOF 法などでは雪を攪拌し飛散する挙動を追跡するために広範囲にわたって細かいメッシュを必要とし、計算時間が膨大となる。一方、粒子法のようなラグランジュ法では比較的容易に界面挙動の追跡が可能であり、気相の計算を行う必要がないため現実的な計算時間で広範囲にわたる雪の飛散挙動を再現することができる。

[1,2]

本研究では粒子法の 1 種である個別要素法 (Discrete Element Method、DEM)を用いて除雪作業のシミュレーションを試みた。従来の DEM を用いる場合、粒子同士の接触力のみが考慮され粒子が離れるときには相互作用を及ぼさない。しかしながら、実際の雪は圧密によって雪同士の付着が生じることによっていくつかのまとまった塊を形成する。[3] 塊の大きさによって空気抵抗の影響度合が異なるため、実際の除雪機では雪のまとまり方の違いによって投雪距離に差異が生じる。そこでこのような雪の特性を再現するためのモデルを開発し、雪の挙動シミュレーションを行った。

* 2013.11.5 受付

** (株)本田技術研究所 汎用 R&D センター 〒351-0024 埼玉県朝霞市泉水 3-15-1
TEL: (048)462-6171 FAX: (048)462-5835 E-mail: yosuke.yamamoto@h.rd.honda.co.jp

*** 東北大学流体科学研究所

2. 除雪機について

2.1 概要

除雪機の外観を Fig.1 に示す。図の除雪機は 2 ステージ型と呼ばれるタイプのもので、2 種類の異なる機能の回転体を有する。まず、オーガ (auger) と呼ばれるらせん状の回転体で雪の切削と中央への輸送を行う。オーガで中央に集められた雪はブロワ (blower) と呼ばれる羽根車によってシュータ (chute) を通って十分な速度で外部へ放出される。シュータの向きの変更により、投雪方向や高さを調整することができる。実際の除雪作業の様子を Fig.2 に示す。

2.2 求められる性能

除雪機に求められる除雪性能として除雪能率と投雪距離がある。除雪能率は単位時間当たりの除雪量であり、作業時間を短縮する上でこれを向上することは重要である。投雪距離は雪を飛ばす距離である。除雪作業を円滑に行うためには、作業者のいる機体後方以外のあらゆる方向に十分遠くまで雪の投雪距離を得られることが要求される。また、除雪作業を行っているとき除雪機内部に雪が付着することがあるため (Fig.3)、この影響による除雪性能の低下も配慮しなければならない。

2.3 雪の分類

除雪機で取り扱う雪は天候や地域によってさまざまな性質に変化する。雪の大分類を Table 1 に示す。これによると新雪 (new snow)、しまり雪 (compact snow)、霜ざらめ雪 (hoar)、ざらめ雪 (granular snow) の 4 種類に分類される。しまり雪と霜ざらめ雪はさらに細分化することができ、水の有無でこれらの名称の前に乾きまたは濡れを付加して計 12 種類に分類することもある。

取り扱う雪の性質によって除雪機の除雪能率や投雪距離は変化するが、密度が 10 倍以上の幅を持つ様々な雪質に対しても効率的に除雪作業を行えることが望まれる。

Fig.1 Snow blower.

Fig.2 Snow removal operation.

Fig.3 Snow blower after snow removal.

Table 1 Snow classification.

Name	Symbol	Density [kg/m ³]
New Snow	N +++ +++	30 - 150
Compact Snow	S ○○○ ○○○	150 - 500
Hoar	H ^^^ ^^^	200 - 400
Granular Snow	G ●●● ●●●	300 - 500

3. 計算手法

3.1 DEMについて

本研究で採用した DEM は粉体解析などで広く用いられる手法である。同様に粒子を用いる計算手法として SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics method)や MPS(Moving Particle Simulation)などがある。これらは流体や弾性体などの連続体を取り扱うための手法であり、連続体内部の勾配をモデル化するため、DEM よりも多くの計算量を必要とする。[4,5]

この手法は空間中を自由に移動できる粒子を計算点とし、それらの間の接触力を定義して粒子群の挙動を算出する。粒子間の接触力のモデルにはフォークトモデルが用いられる。Fig.4 に 2 粒子間接触面の法線方向の接触力モデルの模式図を示す。接触時には弾性バネと粘性ダッシュポットを組み合わせた力が働くが、ジョイントが存在するため粒子同士が離れる場合には相互作用を及ぼさない。接触面接線方向(せん断方向)には、これに摩擦スライダーを追加したモデルを適用する。

1 つの粒子は並進自由度と回転自由度を持つため、運動方程式は式(1)、(2)で表される。 m は粒子 1 つあたりの質量、 I は慣性モーメント、 t は時刻、 u は 2 粒子間の変位量、 ψ は回転角度、 K はばね定数、 η は粘性係数、 D は粒子直径を意味する。あるステップで接触している粒子同士の間で接触力を計算し、時間増分により次のステップの粒子の位置と速度を算出する。

Fig.4 Discrete Element Method.

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + \eta \frac{du}{dt} + Ku = 0 \quad (1)$$

$$I \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \eta \frac{d\psi}{dt} + K \left(\frac{D}{2}\right)^2 \psi = 0 \quad (2)$$

3.2 ポテンシャルモデルによる雪の圧密モデル

雪は非連続体であり、微視的には氷、水、空気といった複数の要素で構成される。各相の構成比率、氷粒子のサイズや幾何学的な位置関係などによって雪の性質が変化する。このような微視的構造を忠実にモデル化するには各相で性質や形の異なる粒子を想定し、それらの間に働くさまざまな相互作用を考慮することになり、煩雑な計算条件や膨大な計算時間が必要となる。

そこで本研究では、雪の微視的構造の結果として発生する付着力を 1 つのモデルで表現して雪の特性の再現を試みた。付着力のモデルには式(3)に示す Lenard-Jones ポテンシャルモデルを採用した。[6] U はポテンシャルエネルギー、 r は 2 粒子間の距離、 ϵ はポテンシャルエネルギーの深さ、 σ は $U=0$ となる粒子間距離を意味する。粒子間に働く力は式(3)を距離で微分することで得られる。ポテンシャルと力のグラフの一例を Fig.5 に示す。粒子間の力は斥力を正、引力を負で表しており、粒子間距離が小さい場合($r < 1.1 \sigma$)には大きな斥力が働くが、それ以上の領域では引力が働く。本研究では雪が圧密で塊を形成する現象を模擬するため、斥力が働く領域ではポテンシャルの影響を無視し引力のみを考慮している。

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (3)$$

Fig.5 Lenard-Jones potential model.

3.3 空気抵抗について

本研究では雪を表す固相のみを粒子で再現し、周囲の流れ場の計算は行っていない。そのため1つ1つの雪粒子に対してその速度の関数として空気抵抗を与えている。3.2で導入したポテンシャルモデルによって計算が進行していく中で単独の雪粒子と複数の雪粒子の塊が混在することになる。慣性は質量に比例し、空気抵抗は表面積に比例するため、雪塊の体積に対する表面積の割合(比表面積)の違いを考慮する必要がある。雪粒子の塊については周囲の粒子の位置関係を用いて表面粒子であるかどうかを判定し、塊の表面に存在する粒子である場合にのみ空気抵抗を与えるている。[2]

Fig.6に2次元における表面粒子判定の模式図を示す。ある粒子について破線で示す一定範囲内に存在する周辺粒子のX、Y方向それぞれの正の領域と負の領域にある粒子数の差を算出する。これとは別に粒子直径の間隔で格子状に整列している状態において一定半径内(破線内)に存在する粒子数を算出し、正規化することで粒子塊表面の

方向と大きさが求まるのでこれを法線ベクトルとする。正規化に用いた粒子数は塊内部に相当し、表面上では粒子数はその50%となる。したがって、この法線ベクトルの大きさが0.5以下である粒子は表面に存在すると判定し、法線ベクトルの逆方向の方向に速度の2乗に比例する空気抵抗を与える。

Fig.6 Surface detection for a lump of particles.

4. 計算結果

4.1 雪の特性モデルの効果確認

まず前述の雪の圧密モデルと空気抵抗モデルの効果確認のため、一定方向に矩形な流入口から雪粒子を放出し壁面に衝突させたときの挙動のシミュレーションを雪の圧密および空気抵抗モデルがない場合とある場合で行った。雪の密度は 50 kg/m^3 、粒子径は 5 mm とし、 80 mm 四方の矩形領域より 10 m/s で流出させた。雪の圧密モデルのパラメータについて、 $\varepsilon=0.0008 \text{ J}$ 、 $\sigma=0.006 \text{ m}$ としている。Fig.7にシミュレーション結果を示す。モデルがない場合では従来のDEMと同様に粒子同士が離れる場合には相互作用が働かないため、それぞれの粒子が粉体のように振る舞う。一方、圧密と空気抵抗モデルがある場合では衝突により雪の付着により塊が生じ、壁面上で粒子の粗密が確認できる。これらの挙動の違いから、今回提案した圧密モデルおよび空気抵抗モデルが有効に働いていることが確認できる。

Fig.7 Effect of characteristic models for snow.

4.2 台上試験との比較

実際の除雪作業を模擬した実験装置を製作して台上試験を実施し、シミュレーションとの比較を行った。Fig.8 に実験装置の外観を示す。装置は実際の除雪機で投雪を行うブロワと雪の方向を調整するシュータを模擬している。実験は気温 -25℃ に保たれた低温室で行った。人工降雪機によって雪を生成し、新雪に相当する条件で実験を行った。(密度 50~100 kg/m³)

実験およびシミュレーションともにブロワを 1200 rpm で回転させ正面から雪を投入し、そのときシュータ内部を通過する雪の挙動を観察した。また、シュータ内部の様子をハイスピードカメラで撮影し、時刻と雪の位置からシュータ内部の雪の速度を測定した。

実験における雪の放出の様子を Fig.9 に示す。実験ではシュータ出口から雪はブロワの周期に合わせて固まった状態でシュータを通過し、塊の分布を保った状態で曲げられて放出される。シュータ内部の雪の速度はブロワ先端の周速 9.5 m/s に対し、シュータ入口で約 8 m/s、シュータ出口で約 4 m/s となっている。

Fig.10 と Fig.11 にシミュレーション結果を示す。粒子間距離は 5 mm とし約 1,800 個の粒子で解析を実施した。雪の密度は実験で用いた雪の密度に合わせて 50 kg/m³ とし、雪の圧密モデルのパ

ラメータは実験の挙動に近くなるように調整し、 $\varepsilon=0.0008$ J、 $\sigma=0.006$ m としている。ブロワ前方に 80 mm 四方の流入口を設定し、1.5 m/s の速度でブロワに雪を投入し、約 1 秒後にシュータから放出される様子を観察した。Case 1 は雪の特性モデルを用いない条件での計算結果、Case 2 は雪の圧密および空気抵抗モデルを用いた条件の計算結果である。Case 1 ではシュータ出口で雪が上下に大きく広がって放出されている。一方、Case 2 ではシュータ出口で雪が広がらず、実験結果と同様に固まって放出される様子が観察される。(図中の黒線) また、Fig.12 に実験とシミュレーションでシュータ入口と出口の雪の速度を比較したグラフを示す。実験ではハイスピードカメラの様子を基に移動量の最も大きい雪塊について速度を算出しているため、シミュレーションにおいてもシュータ入口およびシュータ出口を通過する雪粒子の最大速度を評価した。シミュレーションについて、雪の特性を考慮しない Case 1 ではシュータ入口速度 9.5 m/s、シュータ出口速度 7.5 m/s に対し、今回構築した雪の特性モデルを用いた Case 2 ではシュータ入口 8.5 m/s、シュータ出口 4.5 m/s となっている。Case2 では空気抵抗モデルの影響があることから Case1 よりシュータ入口およびシュータ出口の速度が低く、実験値に近い値となっている。

Fig.8 Experimental Apparatus.

Fig.9 Experimental result.

Fig.10 Simulation result (Case 1).

Fig.11 Simulation result (Case 2).

Fig.12 Snow velocity.

5. 結 言

除雪作業の再現のため、DEM を用いて雪の挙動シミュレーションを行った。雪の特性を再現するため、雪の圧密と雪塊が生じたときの空気抵抗についてモデル化を行った。雪の圧密には Lenard-Jones ポテンシャルモデルを採用し、粒子が離れる場合にも相互作用を付与することで雪粒子の付着を模擬した。雪粒子の塊に対しては表面粒子を検出して空気抵抗を与えることで、雪塊の比表面積の違いの再現を試みた。人工降雪機で生成した雪を用いて低温室で台上試験を実施しシミュレーションと比較したところ、雪の挙動について実験とシミュレーションで定性的に良好な一致を得た。

今後、さらなる改良として力やトルクなどの定量的な相関の確認および雪質違いを再現するための計算モデルの検討を行い、実際の除雪機の形状を用いて除雪作業を想定したシミュレーションに展開していく。

Nomenclature

D : particle diameter	[m]
I : moment of inertia	[kg · m ²]
K : elastic coefficient	[N/m]
m : particle mass	[kg]
r : distance between particles	[m]
U : potential energy	[J]
u : displacement	[m]
Greek letters	
ϵ : depth of potential well	[J]
η : viscosity coefficient	[Pa · s]
σ : distance at which potential is zero	[m]
ψ : angle of rotation	[rad]

参考文献

- [1] The Society of Powder Technology, JAPAN ed., Introduction of powder simulation (in Japanese), 29-82, Sangyo-tosho (1998).
 - [2] Koshizuka, S., Particle method (in Japanese), 1-20, Maruzen Company, Limited (2005).
 - [3] Maeno, N., Kuroda, T., Structure and properties of snow and ice (in Japanese), 131-155, Kokon-shoin (1986).
 - [4] Abe, M., Ariga, N., Furukawa, S., Dynamic Simulation Analysis on Snow Removing by Plow : Some Analysis Results on Snow Removing Specific Resistance of New Snow and Granular Snow, 67-68, Journal of Snow Engineering 20(5), 2004-11-01 (2004).
 - [5] Abe, M., Saito, F., Nishijima, K., Three Dimensional Dynamic Simulation Analysis of Rotary Removal, 55-56, Journal of Snow Engineering 23(4), 2007-07-01 (2007).
 - [6] Kotake, S., Molecular dynamics for thermal fluids (in Japanese), 133-134, Maruzen Company, Limited (1998).
-