

雪崩の物理シミュレーション

日大生産工 (学部) ○平岩 智之 日大生産工 吉田典正

1. はじめに

近年、映画やゲームアプリケーションなどで物理計算により求めた値を用いて様々な自然現象を表現する事例が多く見られているが、雪崩の物理シミュレーションはあまり行われていない。本研究では、物体の運動方程式と雪崩の物理計算式を考慮し、雪崩のビジュアルシミュレーションを試みる事を目的とする。

2. 雪崩の運動モデル

本節では文献 1)を参考に雪崩を質点の集合として考える。その場合、雪崩の加速度は

$$m\left(\frac{du}{dt}\right) = F - R$$

によって表される。 m は雪崩の質量、 F は駆動力、 R は抵抗力である。この式から駆動力が抵抗力を上回っている間は雪崩は加速を続けることになる。駆動力は

$$F = mg \sin(\theta)$$

で表される。 g は重力、 θ は斜面の勾配である。抵抗力は

$$R = \mu N + BU + CU^2$$

で表される。 μ は動的摩擦係数、 N は垂直抗力、 B は粘性摩擦係数である。 C は乱流摩擦係数、 U は雪崩の速度である。しかし雪崩の速度が大きくなると B が与える影響は次第に小さくなる。よって多くの場合抵抗力には

$$R = \mu N + CU^2$$

が用いられる。この抵抗力を用いた代表的なモデルが Voellmy モデルである。このモデルでは雪崩を密度 γ 、深度 h 、勾配 θ の開水路流れと考え、これに運動量保存則を適応することにより次式となる。

$$\left(\frac{du}{dt}\right) = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \left(\frac{g}{h\omega}\right)U^2$$

ここで ω は乱流減衰抵抗 (m/s)、 h は流下深である。勾配 θ は地面の傾斜であるので、二つのパラメーター

の μ と ω を設定し、 h が分かれば運動計算を行うことができる。 μ の範囲としては 0.1~0.5 程度で特に 0.14~0.33 の範囲が多い。集落雪崩防止工事マニュアル(素案)1)では、 μ に Schaerer の提唱した経験式を用いている。また ω の範囲として集落雪崩防止工事マニュアル(素案)では表層雪崩の場合 1,000~3,000、全層雪崩の場合 400~600 をおおむねの目安としている。本研究の雪崩の加速度計算ではこの Voellmy モデルを用いる。

3. 地面の傾斜による雪崩の動き

地面は二等辺三角形(以下、フィールド分割面)を4つ合わせた面を格子状に並べることで作成する。乱数で面ごとの y 座標を得ることにより起伏のある地面を生成する。そしてオブジェクトの位置から真下に向かってレイを飛ばすことで、真下にあるフィールド分割面との交点計算を行い、オブジェクトの現在位置の高さを取得する。またフィールド分割面ごとに方向ベクトルを求める。下の図を例に挙げると、頂点 A, B, C の平均となっている中心点を始点とし、頂点の中で最も y 座標が低い頂点 C を終点としたベクトルを方向ベクトルとする。各成分ごとの方向ベクトルを正規化し、速度と乗算することで雪崩の進行方向を求める。

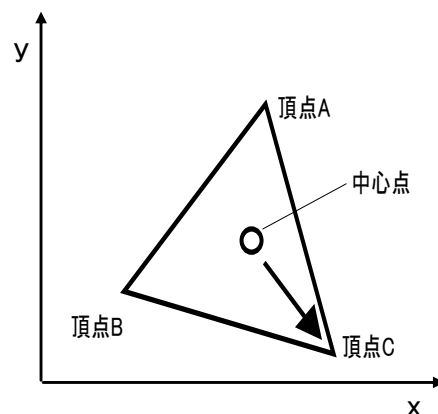


図1 方向ベクトル

4. 雪崩の発生

斜面に積もった雪は重力により斜面方向に滑り落ちようとするが、積雪層の破壊強度よりも積雪底面と地表面等による支持力が大きければ斜面の積雪は安定している。ゆえに雪崩が発生する条件は次式である。

$$F \geq R$$

F は発生力、 R は支持力である。駆動力が支持力の限界を越す過程として、次の二つのケースが考えられる。

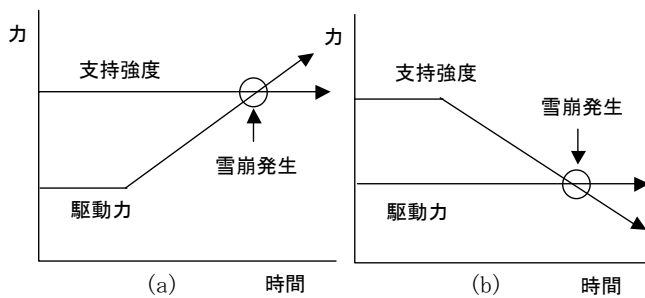


図2 雪崩の発生分岐

図 2 (a)は駆動力が増加し、支持力の限界を超えるケースである。この場合の多くは厳寒期の乾雪表層雪崩に相当する。新雪は破壊強度が極めて小さいため、強度の増加を上回る速度で新雪層が増大すると雪崩の発生率が高くなる。また積雪層内部に強度が弱い層や不連続面がある場合には、降雪や衝撃等により雪崩が高確率で発生する。図 2 (b)は支持強度が低下して駆動力を下回るケースである。一般に融雪期に発生する全層雪崩がこれにあたる。積雪の機械的強度は雪温の上昇と共に低下し、水に浸されると一段と弱くなる。このような状況は高温の継続、活発な融雪、降雨などによって起きる。その結果、斜面積雪の支持強度がそのときの駆動力を下回るようになると雪崩が発生する。

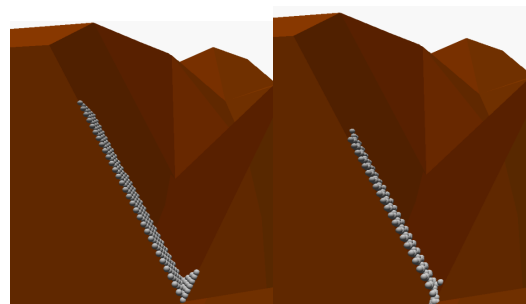
5. 結果と考察

プログラムはVisualC++6.0を用いて作成した。実行結果を図3に示す。雪粒は処理速度を考慮し球体で表現している。加速度の増加に伴い抵抗力が増加するために図3(c)を境に徐々に減速している事がタイムステップの値より分かる。このことから雪崩が地面を滑

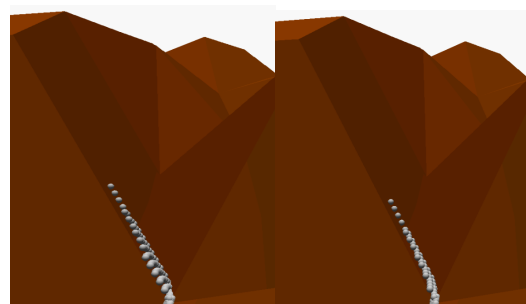
る速度を確認できた。今後より正確に雪崩を再現するために4節で述べた雪崩の発生や雪同士の衝突時の処理、空気抵抗と雪粒の粘性を考慮した雪粒の吹き上がり、外温等の周辺環境を考慮した動作変化などを考慮し、よりリアルなシミュレーションを目指していく予定である。

参考文献

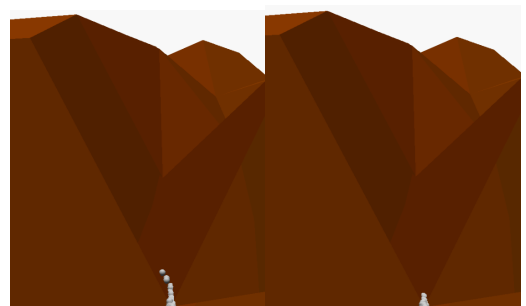
- 1) 雪崩対策研究会, 雪崩とその対策, 財団法人経済調査, (1986), pp15-67
- 2) 前野紀一, 氷の科学, 北海道大学図書刊行会, (1981), pp19-73



(a) t = 0.0 (b) t = 0.3



(c) t = 0.7 (d) t = 1.1



(e) t = 1.5 (f) t = 2.0

図3 実行画面