

回転ドラム装置を用いた雪の摩擦特性把握に関する研究

日本大学 正会員 ○小田 憲一

新潟大学 非会員 河島 克久

日本大学 正会員 小林 義和

日本原燃株式会社 非会員 中村 勝哉

1. はじめに

土砂や雪崩の運動を予測する手法の多くは、三軸圧縮試験や一面せん断試験などの力学試験から求めた材料の摩擦特性を一定値として設定している。しかし実際に斜面上を流動している物体の摩擦特性は、流動している物体の速度や密度の変化に影響を受け、必ずしも一定であるとは限らない。一方で、流動している物体の摩擦特性を把握するためには、人工的に流動した状態を再現することが可能な実験を行う必要がある。このような実験を可能とする装置として、回転するドラム（以下、回転ドラム）を用いた実験が挙げられる¹⁾。回転ドラムを用いた実験は、主に粉体工学や機械工学などの分野で用いられており、材料の混合や分離について報告している研究がある²⁾。そこで本研究では、回転ドラム内で流動させた雪試料を観測することで、雪の摩擦特性を把握する方法について検討を行った。

2. 回転ドラム実験

2.1 実験条件

本研究では、内径 118mm、長さ 130mm のアクリル製パイプ管(回転ドラム)内に実験試料を入れて回転させた。図-1 に本研究で用いた回転ドラム装置を示す。回転ドラム内の試料は、ドラムの回転に伴い、外周に沿って上る流れと、粒子が流れ方向を変えて下る流れの二つの運動となり、上りの流れと下りの流れの境界面が円弧を描くことが過去の研究から分かっている¹⁾。本研究ではこの境界面を境に上部で流動する円弧形状に着目し、摩擦係数の算出を試みた。本実験に用いる雪は 2017 年 2 月に新潟県魚沼市で降雪した雪を -20℃ に設定した低温室内で保存した物とした。また、あらかじめ機材類は実験開始前日から低温室で冷却させてから実験に使用した。実験に使用する雪試料の調整は、保管していた雪を氷になっている部分を除いてブロック状に切り出し、6mm 径の網目を通した粉砕機にかけて行った。そ

の後、粉砕した雪は 500 μ m 未満、500 μ m、1mm、2mm、4mm になるようふるい分けを行った。本研究で利用した材料は、1mm 以上 2mm 未満、2mm 以上 4mm 未満、4mm 以上の 3 試料とし、回転ドラムの回転速度は、10rpm、15rpm、20rpm の 3 ケースで設定した。実験はそれぞれ 3 回行った。回転ドラム内の流動観測には、高速度カメラ (K-III) を用いた。撮影解像度は 1280×1024(pixel)撮影フレームレート 1000(fps)で設定し、1.6 秒間(計 1636 フレーム)の観測を行った。

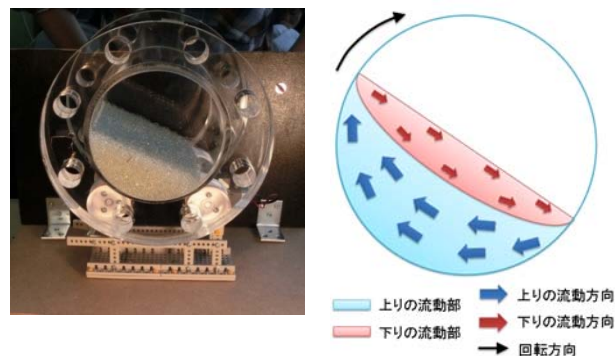


図-1 回転ドラム

2.2 流速分布の抽出

本研究では、粒子イメージ流速計測法(Particle Image Velocimetry, 以下 PIV)を用いて、観測で得られた画像から粒子の動きを把握し、円弧形状部分の抽出を行った。PIV による画像解析では、前処理として元画像の 3×3pixel で平滑化し、輝度補正とコントラストの調整を行った。また、粒子の検査領域を 32×32 pixel、探査領域を 52×52 pixel とし、計算格子幅は各実験で使用した最大粒径に合わせて設定した。

3. 摩擦係数の算出方法

本研究では、土砂や雪崩の流動を Bingham 流体と仮定し、運動物体のせん断応力を Mohr-Coulomb の破壊規準を用いて定義した流体解析モデル³⁾を用いて、画像解析で得られた流速分布の時系列データから摩擦係数の算出を試みた。流体解析モデルで使用している運動量保存則は以下の式で表される。

キーワード 回転ドラム、摩擦係数、雪、密度、流速

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

日本大学理工学部 TEL 03-3259-0668

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + 2 \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\eta' V_{ij}) + g_i \quad (1)$$

ここで、 u_i は速度ベクトル、 p は圧力ベクトル、 ρ は密度、 η' は等価粘性係数、 V_{ij} はひずみ速度テンソルを表している。等価粘性係数 η' は Mohr-Coulomb の破壊規準を考慮した以下の式で定義される。

$$\eta' = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta_0 + \frac{p \tan \phi + c}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 η_0 は疑似的な初期粘性係数を表している。通常、流体解析を行う際は、式(1)を離散化し、未知数となる係数を解くことで、流体の運動を表現することが可能となる。本研究では、あらかじめ実験によって物体の流速データが得られるため、未知数は圧力 p と等価粘性係数 η' のみであるが、圧力 p は流速データが得られていることから陽的に求めることができ、等価粘性係数は式(1)から圧力 p を代入することで求めることができる。一方で、物体の摩擦特性となる内部摩擦角は式(2)から求めることができる。以上のことから、本研究では流速データをあらかじめ実験で求めておくことによって、運動中の物体内部で生じている内部摩擦角を逆解析で導く方法を提案する。なお、本研究で使用した材料は、低温室内で調整を施した雪試料であることから乾燥した状態にあると考えられ、今回は粘着力 c を 0 として評価する。

4. 結果および考察

実験で得られた流速分布データから内部摩擦角を時刻歴ごとに算出し、得られた内部摩擦角を平均値としてまとめた。図-2 に供試体の見かけの密度と内部摩擦角の関係を示す。図より、一般的に報告されている雪の内部摩擦角に比べて 40 度近く大きな値が算出されているが、密度の増加に伴い、内部摩擦角も増加する傾向が見られる。ここで表している密度は、粒径の大きさに影響していることから、内部摩擦角の値は粒径の大きさに依存することが考えられる。

図-3 に流速データから得られた平均流速と内部摩擦角の関係を示す。この結果から、1mm 粒径は流速の増加に伴い内部摩擦角も増加している傾向が顕著であるが、その他は減少している傾向が見られる。しかしながら、全体的に見ると、流速の増加に伴い内部摩擦角が増加している傾向にある。このことから、本研究で評価した内部摩擦角は流速の変化に伴い、値が変化すると考え

られる。

5. まとめ

本研究では雪を材料とした回転ドラムの観測実験を行い、雪の摩擦特性を算出する方法について検討した。その結果、一般的な内部摩擦角よりも過大に評価された値が算出されるものの、傾向として摩擦係数は流速に影響することを確認した。今度は、流速の影響をより詳細に分析する。

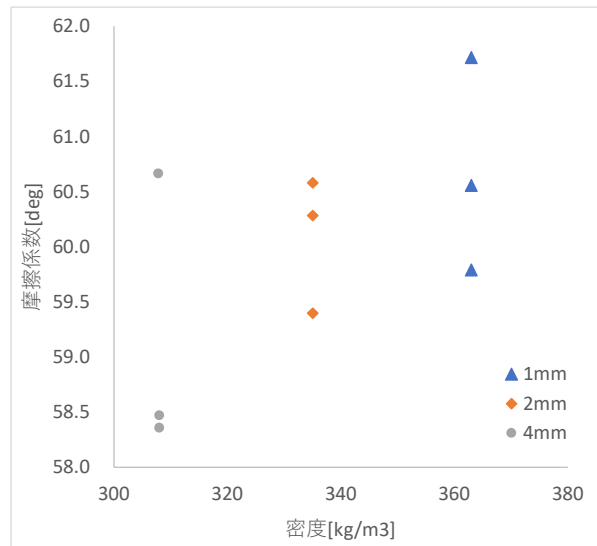


図-2 密度と内部摩擦角の関係

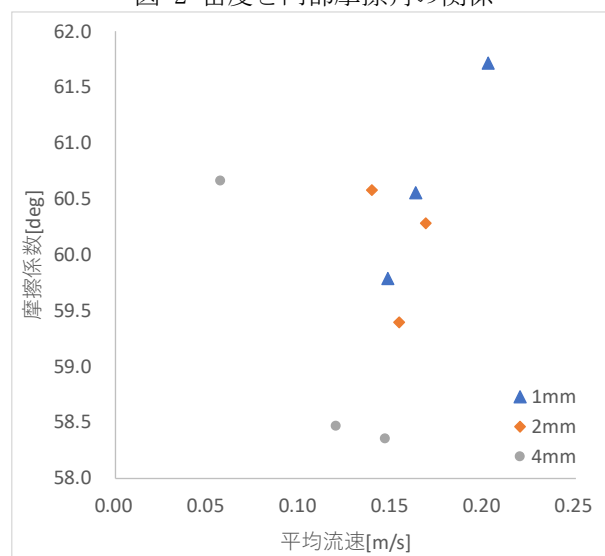


図-3 平均流速と内部摩擦角の関係

参考文献

- 1) Shiva P. Pudasaini and Kolumba Hutter: Avalanche Dynamics Dynamics of rapid flows of dense granular avalanches, springer, 2007.
- 2) K. M. Hill, A. Caprihan and J. Kakalios: Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging, Physical Review Letters, Volume 78, Number 1, pp.50-53, 1997.
- 3) K. Oda, et.al: Simulation of snow avalanche model test using computational fluid dynamics, Annals of Glaciology, pp57-64, 2011.