

ロータリ除雪装置から排雪される雪の重量を計測する方法について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○山崎 貴志
木村 崇
村田 晴彦

除雪の担い手不足が深刻化する中、運搬排雪におけるダンプトラックの効率的な運用が必要であり、このための一策として、ロータリ除雪車からダンプトラックへ積み込む雪の重量をリアルタイムに把握して適正重量を積み込むことが重要と考えられる。これに向けて、ロータリ除雪装置から排雪される雪の重量を計測する方法を考案し、排雪重量計測装置を開発して計測試験を行ったので、その概要について報告する。

キーワード：排雪重量、ロータリ除雪装置、運搬排雪

1. はじめに

近年、除雪の担い手不足が深刻化してきており、同様に運搬排雪に使用するダンプトラックの不足も深刻化してきている。また、運搬排雪においてダンプトラックの運用に掛かる費用は非常に大きい。このため、運搬排雪におけるダンプトラックの効率的な運用の必要性が高まっている。

ダンプトラックの積載量は一般的に積載重量で制限されることが多い。しかしながら、運搬排雪においてロータリ除雪車からダンプトラックへ積み込む雪の量は、北海道の国道においては体積基準で管理されている。雪の密度は一定ではなく、その状態によってばらつきがあるため、体積基準の積載量管理ではダンプトラックの許容積載重量を有効に利用することが難しいと考えられる。

そこで、積載量管理を重量基準で行うことがダンプトラックの効率的な運用に有効であると考え、ロータリ除雪車からダンプトラックへ積み込む雪の重量をリアルタイムに把握して適正重量を積み込む方法を検討した。この検討により、ロータリ除雪装置から排雪される雪の重量を計測する方法を考案し、排雪重量計測装置を開発して、ハンドガイド除雪機を使用した排雪重量計測試験を行った。

2. 排雪重量計測方法

ロータリ除雪車のロータリ除雪装置を写真-1に示す。ロータリ除雪装置では、オーガにより雪を砕いてプロ



写真-1 ロータリ除雪装置（ロータリ除雪車）

アに送り込み、回転羽根形状のフロアで雪に勢いをつけてシュートに送り込む。そして、シュートの向きとシュートキャップの角度を変化させることにより排雪方向を制御している。ここで、シュートを流れる雪はシュートキャップに衝突して流れの方向が変化することに着目し、シュートキャップに生じる力 (F) とシュートキャップ衝突前後の流速 (v_{in} , v_{out}) を計測することにより、力積と運動量の変化 (図-1) を表す運動方程式(1)に基づいて雪流の重量 (m) を計測する方法を考案した。

雪流は連続して流れるため、微小時間ごとに時間当たりの重量を算出し、算出値を積算することにより排雪重量を算出した。

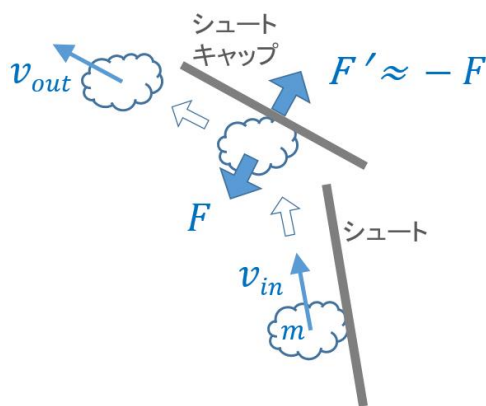


図-1 雪流の運動量変化

$$\vec{F} \Delta t = m (\vec{v}_{out} - \vec{v}_{in}) \quad (1)$$

3. 排雪重量計測装置

計測装置のシステム構成を図-2に示す。シュートキャップにかかる力を計測する機器として、ロボットの関節などにも利用されており、xyz 3軸方向の力 (F_x, F_y, F_z) と力のモーメント (M_x, M_y, M_z) を計測することができる6軸力覚センサ (写真-2、株式会社レプトリノ、PFS030YA151A6、定格容量 $F_x, F_y, F_z : \pm 150\text{N}$) を使用した。なお、xyzの方向は図-2に示す方向としている。

雪流の流速を計測する流速計としては、水車状の羽根車を雪流に接触させて回転させ、その回転回数をロータリエンコーダのパルス信号 (羽根車1回転当たり 10 pulse (10 pulse/rev) と 60 pulse (60 pulse/rev)) で取得する装置を製作した (写真-3)。なお、 v_{in} 計測用には 10 pulse/rev のロータリエンコーダを、 v_{out} 計測用には 60 pulse/rev のロータリエンコーダを使用しているが、これには特段の理由はなく保有機器の都合によるものである。ここで得られる時間当たりのパルス数と羽根車の外径から後計算で流速を算出する。

6軸力覚センサからのアナログ信号を受信してデジタル化すること、ロータリエンコーダからのパルス信号を受信することをマイコンボード (Arduino uno R4) により行い、マイコンボードとUSB接続したタブレットPCで計測データの保存を行っている。

計測データのサンプリング周波数について、6軸力覚センサのサンプリング周波数は 1200Hz まで高くすることが可能であるが、ロータリエンコーダのパルス出力が 10 pulse/rev および 60 pulse/rev であり 1200Hz ではサンプリングごとに 1 pulse にも満たないことがあること、また、データの取り扱いやすさを考慮して、サンプリング周波数を 100Hz とした。

計測装置の製作にあたり、排雪重量計測の対象とするロータリ除雪装置は、手軽に試験を行えることを重視し、

写真-4に示すハンドガイド除雪機とした。写真-4に示すように、ハンドガイド除雪機のシュートおよびシュートキャップを改造し、シュートキャップとして仮定する受圧板にかかる力を計測する6軸力覚センサと、受圧板衝突前後の雪流の流速を計測する流速計を取り付けている。

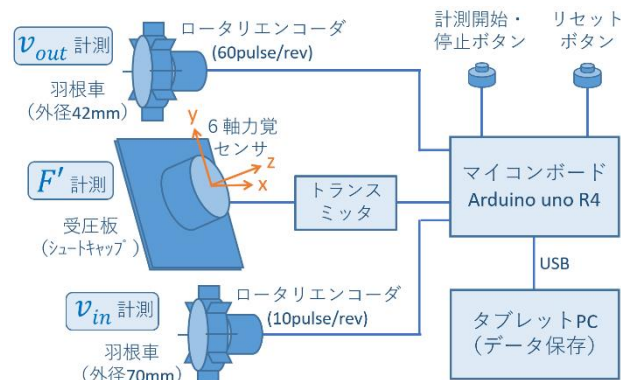


図-2 計測装置システム構成

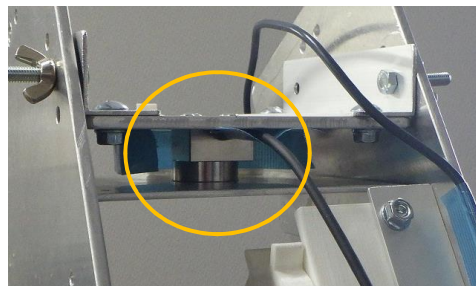


写真-2 6軸力覚センサ

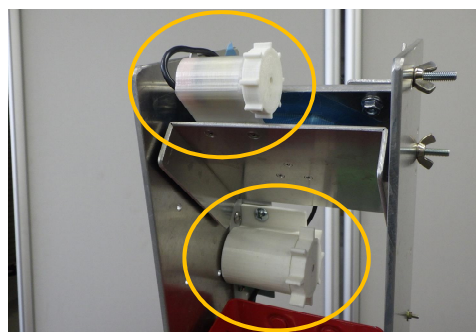


写真-3 流速計



写真-4 ハンドガイド除雪機 (計測装置取付状態)

4. 排雪重量計測試験

製作した排雪重量計測装置を使用して、2024年3月21日に寒地土木研究所構内において排雪重量計測試験を行った（写真-5）。

試験により排雪される雪の実際の重量（以降、「参照重量」という。）の計測には、重量計測機能付き運搬台車（株式会社エー・アンド・デイ、カートスケールSD200、ひょう量200kg）を使用した。運搬台車への排雪を行いやすいように、運搬台車上に枠板を設置している（写真-5）。



写真-5 排雪重量計測試験状況

試験は、ハンドガイド除雪機での除雪前進に合わせて運搬台車を並走させ、こぼれおちない程度まで運搬台車への排雪を行い、計測データの保存と運搬台車での重量計測値を取得することを10回繰り返し実施した。

試験1回目の計測結果（ F_x 、 F_y 、 F_z ）を図-3に示す。計測値はばらつきが大きいことから、ノイズ成分を抑制し信号の平滑性を向上させるためにローパスフィルタを適用した。ローパスフィルタは、処理が軽くリアルタイム処理に適している1次のローパスフィルタとした。パラメータの一つである時定数の設定によりローパスフィルタの効果が変わることから、時定数0.1sから0.5sまで0.1s毎と1.0sのローパスフィルタを適用したデータを用いて排雪重量を計算した結果、時定数0.1s：排雪重量216.0kg、0.2s：216.0kg、0.3s：216.1kg、0.4s：216.4kg、0.5s：216.7kg、

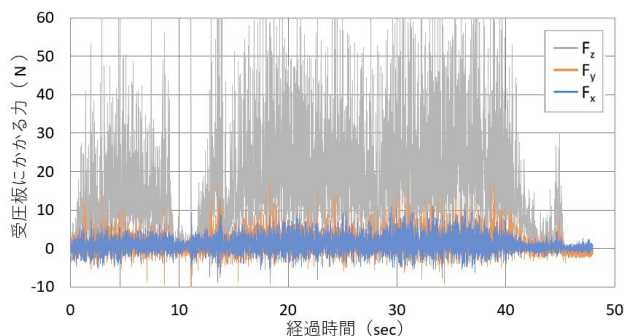


図-3 計測結果（試験1回目）

1.0s：218.2kgとなり、時定数が大きくなるほどデータの平滑性は向上する反面、重量計算値の変化が大きくなることが確認できたため、時定数0.2sを適用することとした。時定数0.2sのローパスフィルタ適応後の計測結果（ F_x 、 F_y 、 F_z ）を図-4に示す。

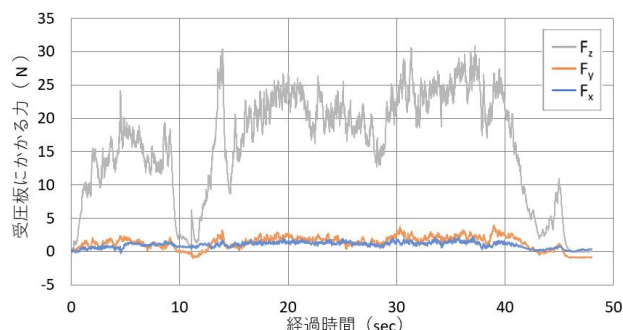


図-4 計測結果（ローパスフィルタ（時定数0.2s）適用後）

5. 排雪重量計測結果

今回の計測では、現象を単純化するため、流れを2次元平面流れ（yz平面）として仮定した。これにより、排雪重量の算出には F_y 、 F_z 、受圧板衝突前流速 v_{in} 、受圧板衝突後流速 v_{out} が必要となる。

試験3回目について、 F_y 、 F_z を図-5に、流速計のパルス信号から後計算で算出した v_{in} 、 v_{out} を図-6に、計測値から算出した排雪重量（以降、「算出重量」という。）を図-7に示す。

図-5より、排雪時間は約35秒間で、受圧板にかかる力は最大でy方向約5N、z方向約35Nであったことがわかる。受圧板にかかる力が一定ではなく大きく波を打っている理由は、除雪機のオーガで取り込む雪の量が常に一定ではなく随時変動することによる。

図-6より、流速が受圧板衝突前（ v_{in} ）ではおよそ5.2～6.8m/s、受圧板衝突後（ v_{out} ）ではおよそ3.7～4.3m/sであったことがわかる。排雪量の変動により受圧板にかかる力は大きく変動するが、排雪量の変動による流速の変動は確認できない。なお、受圧板衝突前の流速計測点と衝突後の流速計測点は鉛直方向で約150mmの差があり、例えば速度6m/sでの鉛直方向への物体投げ上げでは、150mm上方では重力により約0.25m/sの減速が生じるが、本件における雪流は重力のみが働くような流れではなく、雪流は常にブロウにより押し出されているような流れであるため、重力による減速を無視することとしている。

図-7より、図-5において受圧板にかかる力が大きい時間帯に算出重量の増え方が大きくなっていることがわかり、排雪終了時に算出重量は221.5kgとなっている。

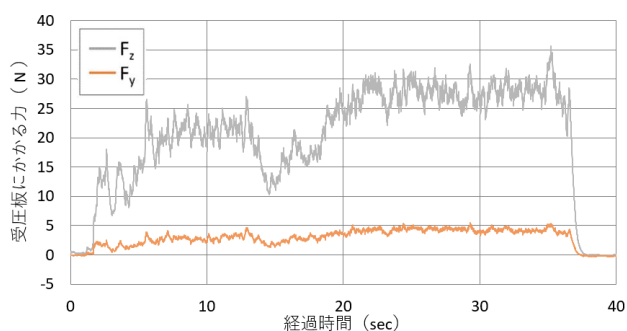


図-5 計測結果 (F_y , F_z) (試験3回目)

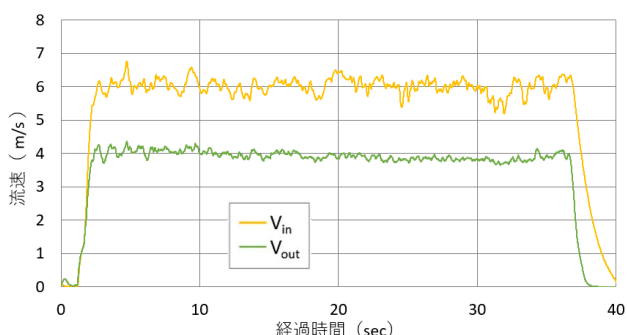


図-6 算出結果 (V_{in} , V_{out}) (試験3回目)

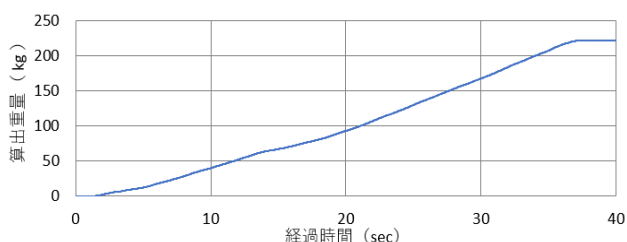


図-7 算出重量 (試験3回目)

全試験について、算出重量と参照重量の関係を図-8に示す。排雪前には算出重量と参照重量はともに0kgであることは明らかであるため、図-8には(0,0)を通る近似直線を示している。近似直線の傾きは0.835となっており、算出重量は参照重量と比較して約1.2倍となっている。

この乖離の原因としては、シュート内の流速は壁面摩擦などにより均一ではないが流速の計測はシュート壁面近くで行っていること、2次元流れに近似したこと、重力による減速、雪流の内部衝突や内部変形、摩擦損失など、多くの要因が考えられるが、これらを数式により近似表現することは困難であるため、上記近似直線の傾きを定数として定め、この定数を算出重量に乗じて排雪重量を算出することとした。

算出重量に上記定数を乗じた計算値（以降、「算出排雪重量」という。）、参照重量およびこれらの比率（算出排雪重量／参照重量）を表-1に示す。参照重量に対する算出排雪重量の誤差は-7.0%～11.3%となっており、本方法による排雪重量計測ではおおそ誤差1割程度で計測できる可能性があることがわかった。

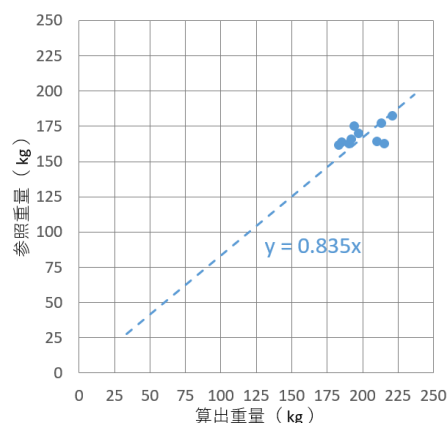


図-8 算出重量と参照重量の関係

表-1 算出排雪重量、参照重量および比率

実験番号	算出排雪重量 (kg)	参照重量 (kg)	比率 (%) 算出排雪重量／参照重量
1	180.4	162	111.3 (11.3)
2	176.1	164	107.4 (7.4)
3	185.0	182	101.6 (1.6)
4	178.6	176.5	101.2 (1.2)
5	165.2	169.5	97.5 (-2.5)
6	159.6	162	98.5 (-1.5)
7	154.9	163.5	94.8 (-5.2)
8	160.7	165.5	97.1 (-2.9)
9	162.3	174.5	93.0 (-7.0)
10	153.3	161	95.2 (-4.8)

本件では10回の試験結果から得られた近似直線の傾きにより定数を求め、計測結果に乗じる方法で排雪重量を算出したが、今後、より多くの試験を行い、雪質による差異等についても確認しながら、算出方法の検討を継続する予定である。

6. まとめ

運搬排雪作業において、ダンプトラックの積載容量を有効に利用してダンプトラックの効率的な運用を行うことを目指し、ロータリ除雪装置から排雪される雪の重量を計測する方法を考案し、排雪重量計測装置を開発した。

本装置は、シュートを流れる雪の流速及び雪流がシュートキャップに衝突することで発生する力を計測し、力積と運動量変化の関係から雪流の重量を算出するものである。

開発した計測装置を用いて排雪重量計測試験を行った結果、本装置で計測した重量は、重量計で直接計測した重量よりも10回計測の平均で約1.2倍となったため、本装置での計測結果に0.835を乗じて排雪重量を算出することとした。また、算出結果のばらつきは、重量計で直接計測した重量と比較して-7.0%～11.3%となっており、本方法による重量計測ではおおそ誤差1割程度で計測できる可能性があることがわかった。