

独立駆動オーガによる省エネルギー型ロータリ除雪車

Energy Saving Effect of the Independent Auger Drive in Rotary Snow Ploughs

宮 廻 成 志 新潟トランス株式会社 特機事業部技術部 グループマネージャー

ロータリ除雪車は 50 年以上の歴史のなかで、日本の国情や雪質に合わせ世界に類を見ない高性能な除雪機械として発展してきた。省エネルギー・環境対策技術が注目されるなか、除雪設計のなかでは昔から知られているシカードの式にロータリ除雪車の省エネルギーのヒントが隠されていた。現在、開発を進めているオーガ独立駆動によって得られる省エネルギー技術について紹介する。

The history of rotary snow ploughs in Japan is more than fifty years long, and during it high performance snow removing equipment peculiar to the country that suits the conditions there and the characteristics of Japan's snow have been developed. Sicard-type rotary snow ploughs have been well-known in snow removal equipment design for many years, but within them lies a valuable hint for energy-saving and environmentally friendly technologies, which have been receiving much attention. The paper introduces the energy-saving technologies that can be derived from the independent auger drive, which is currently under development.

1. 緒 言

新潟トランス株式会社 (NTS) は、鉄道車両の製造メーカーのイメージがあると思われるが、旅客車両以外にも種々のサービスを提供している。特機事業部では鉄道用保守用車両と鉄道用道路用ロータリ除雪車の開発を行っている。ロータリ除雪車は雪国における冬季交通の維持や安全確保に活躍している。

本稿で紹介する道路用ロータリ除雪車は、1960 年代に国産車が誕生して以来改良を重ね、日本のあらゆる雪質に対応することのできるツーステージ型ロータリ除雪車となっている。現在でも、除雪装置の改良や、ディーゼルエンジンの高出力化によって除雪量は大きくなり、さらには除雪工法の発展によって作業性や作業効率は年々向上している。しかし、環境への影響が重要視される昨今、ロータリ除雪車はエネルギー効率の側面からみると、決して高い効率を発揮しているとはいえない。そこで、NTS は同じエンジン出力で除雪量を向上させ、作業時間の短縮・効率化することでロータリ除雪車の省エネルギー化を目指した。第 1 図にニイガタ NR282 ロータリ除雪車を示す。

以下、ロータリ除雪車の構造と省エネルギー技術の詳細を紹介する。

2. ロータリ除雪車の構造

ロータリ除雪車は車両前面にロータリ除雪装置を装備し

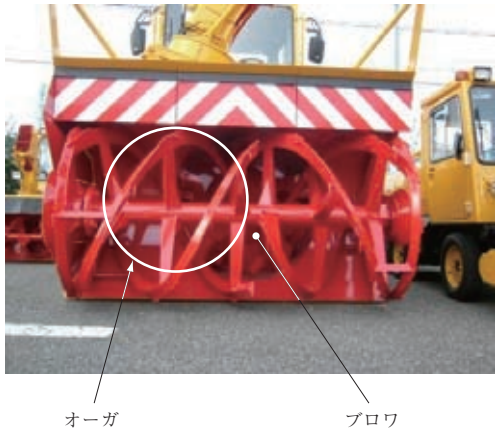


第 1 図 ニイガタ NR282 ロータリ除雪車
Fig. 1 Niigata rotary snow plough type NR282

ていて、オーガ（雪を切り崩してブロワに雪を送る羽根）とブロワ（オーガから送られた雪を遠くへ飛ばす羽根）の二つの回転羽根をもつものをツーステージ型と呼ぶ。第 2 図にオーガとブロワの関係を示す。

オーガは、積雪をかき崩しブロワに搬送する役割をもつ。2 条または 3 条のリボン状のスクリュウが雪を切り崩し、中央に運び込むように配置されている。北陸地方の湿り気を帯びた重い雪や東北地方の固いしまり雪、1 月は凍って硬い雪、3 月は融けて重い雪というように日々刻々と変化するあらゆる地域の雪質に対応し、ブロワに入る前の雪を流動的にし、均質にする。

ブロワは、4 枚から 6 枚の羽根で構成され、遠心力によってダクトから投雪する機能をもつ。大きさや使用条件



第2図 オーガとブロウの位置関係
Fig. 2 Positional relationship of auger drive and blower

にもよるが、ブロウから投げだされる雪は最大で 45 m 遠方に飛ばすことができる。逆に遠くに飛ばす必要がない場合は除雪量は多くでき、脇に寄せた 10 t ダンプカーに 15 秒程度で雪を満載することができる。

このオーガとブロウは歯車、チェーンによって機械的に連結され、最大除雪量を確保できる回転比となっている。

3. 温故知新 — 省エネのヒントは原点にあった —

これからのロータリ除雪車はどうあるべきかを検討を重ねるなかで、さまざまなアイデアが出ては、見送られた。省エネルギーの観点から、鉄道や自動車ですでに実用化され、多くの分野で盛んに研究されているエネルギー回生については、ロータリ除雪車の場合、大半が投雪エネルギーとして消費されるため、回生可能エネルギーは僅かであることから、検討を見送った。

また、負荷が小さいときにエネルギーを蓄えておき、必要に応じて蓄えからアシストする方法も連続運転が基本のロータリ除雪車の特性に適していない。さらに、電動化やハイブリッドシステムのアイデアを検討するたびにロータリ除雪車には適さないことが明確になった。

あるとき、検討会議で、現在のロータリ除雪車の生い立ちなどが話題になった。初期のロータリ除雪車はオーガとブロウ間に変速機があったが、操作が煩雑だったためにオーガとブロウの回転比が固定されていった経緯が大ベテランから紹介された。つまり、現在のロータリ除雪車は操作性を優先したために、ブロウを高速回転するとオーガも高速回転して、無駄に雪を集めるデメリットを内包していることになる。ブロウ回転とは別にオーガの回転を低くできれば省エネルギーになるというヒントを発見できた。

4. シカードの式

古くから知られているシカードの式⁽¹⁾を次に示す。

$$P_0 = (D_1 - t_n) \{ h(S_b \times t_n \times \cos \beta) + (S_c \times W_a \times \sin \beta) (\mu + 1) \} N_e / (2 \times 716) + Q \times \delta \times L / (3.6 \times 75) \dots \dots \dots (1)$$

- P_0 : オーガ所要動力 (PS)
- D_1 : オーガ径 (m)
- t_n : 切削深さ = $Q/60 \times N_e \times O_b \times W_0$ (m)
- Q : 除雪量 = 除雪重量 / 雪密度 (m^3/h)
- N_e : オーガ回転数 (min^{-1})
- O_b : オーガ条数
- h : 平均除雪高さ = W_0/W_r (m)
- S_b : 雪の圧縮抵抗 (kg/m^2)
- β : オーガリード角 = $\tan^{-1}(p/\pi D_1)$
= $\tan^{-1}(p/\pi \times 1300)$ (度)
- p : オーガピッチ (mm)
- S_c : 雪のせん断抵抗 (kg/m^2)
- W_0 : 除雪断面 (m^2)
- W_r : 除雪低面幅 (m)
- μ : 雪と鉄との摩擦係数 = 0.1
- δ : 雪密度 (g/cm^3)
- L : ブロウ中心までの距離 (m)
- W_a : オーガ幅 (m)

式を簡単に説明する。右辺第1項はオーガが雪を切削するときに生じる雪のせん断力、雪を圧縮する力、オーガと雪の摩擦力の三つの力にオーガ径（厳密にはオーガが雪に食い込んだ距離を引いた半径）と回転数を掛けてオーガ切削馬力（PS表示）に換算している。右辺第2項は雪をブロウまで搬送するのに必要な距離と単位時間当たりの雪の質量を掛け合わせた搬送馬力を求めている。そしてオーガ切削馬力と搬送馬力の合計がオーガ駆動の所要馬力を表している。この式ではオーガ切削馬力は回転数に比例し、オーガによる雪の搬送量はオーガ所要馬力から切削馬力を引いた出力に比例している。

オーガ所要出力 P_0 を SI 単位系に書き直し、各出力の関係式を (2) ~ (5) 式⁽¹⁾に示す。

$$P = P_0 + P_B + P_r + P_s \dots \dots \dots (2)$$

$$P_0 = (D_1 - t_0) \cdot h \cdot \{ (S_b \cdot t_0 \cdot \cos \beta) + (S_c \cdot W_a \cdot \sin \beta) (\mu + 1) \} N_0 \cdot \pi \zeta + Q \cdot g \cdot L \dots \dots \dots (3)$$

$$P_B = \frac{Q \cdot U_B^2}{2 \cdot \eta} \quad U_B = 2\pi R B \cdot N_B \dots \dots \dots (4)$$

$$P_r = \frac{V \cdot F}{\varepsilon}, \quad V = \frac{Q}{\rho \cdot W_0} \dots\dots\dots (5)$$

- P : ロータリ除雪車の全所要出力
- P_0 : オーガ所要出力 (シカードの式)
- P_B : ブロワ所要出力
- P_r : 走行所要出力
- P_s : そのほかの出力 (一定)
- Q : 除雪量
- N_0 : オーガ回転数
- N_B : ブロワ回転数
- U_B : 投雪速度
- RB : ブロワの回転半径
- F : 走行抵抗 (転がり抵抗 + 勾配抵抗 + 空気抵抗 + 除雪抵抗)
- ε : F の効率
- V : 走行速度
- η : 雪の飲み込み効率
- t_0 : 切削深さ
- ζ : オーガ切削の効率
- g : 重力加速度
- ρ : 雪の密度

5. ブロワ所要出力, 走行出力について

ブロワの回転と除雪量は、低回転のときは回転数と除雪量は比例関係にあるが、実用回転域ではロータリ除雪車に搭載された原動機の最高出力によって決まり、ほぼ反比例の関係にあることが分かっている。すなわち、ブロワの回転数が大きくなると除雪量は下がる。(4)式に示すブロワ所要出力は、除雪量(単位時間当たりの雪質量) Q を投雪速度 U_B にするための仕事率を表している。 U_B は回転する羽根の周速であり、ブロワの回転半径 RB と回転数 N_B によって求めることができる。ブロワの羽根形状によって雪の飲み込み効率が異なることを η によって表している。ブロワ回転数 N_B が大きくなるとブロワ所要出力は N_B の2乗に比例して大きくなる。しかし原動機の最高出力以上にはなり得ない所に制約があり、その分除雪量(単位時間当たりの雪質量) Q が小さくなる。

(5)式に示す走行所要出力について説明する。走行抵抗 F は転がり抵抗、勾配抵抗、空気抵抗、除雪抵抗の合算となる。除雪中の走行速度は人の歩行速度程度なので、空気抵抗は無視できる。転がり抵抗は除雪抵抗と比較して十分に小さい。そのため、走行抵抗はそのほとんどが除雪抵抗

であると考えられ、転がり抵抗、勾配抵抗、空気抵抗の因子を効率 ε としてまとめた。また、走行速度 V と除雪量 Q の関係は経験則から比例関係となっている。全体出力のなかに占める走行所要出力の割合は1割程度である。

シカードの式とそのほかの式から得られた知見をまとめる。オーガとブロワの動力伝達は、歯車やチェーンによって機械的に連結されている。そのため、ブロワの回転数を大きくすると、オーガの回転数も比例して大きくなる。このときの除雪量に着目してみると、回転数が大きいほど、オーガ所要馬力は大きくなり、雪の搬送量も大きくなる。しかし、前述のように搭載原動機の馬力制限によってブロワによる除雪量は小さくなり、オーガ所要馬力の増加分は無駄になる。これに走行馬力が加わり複雑な馬力配分の結果、除雪量が決定していることが予想できる。

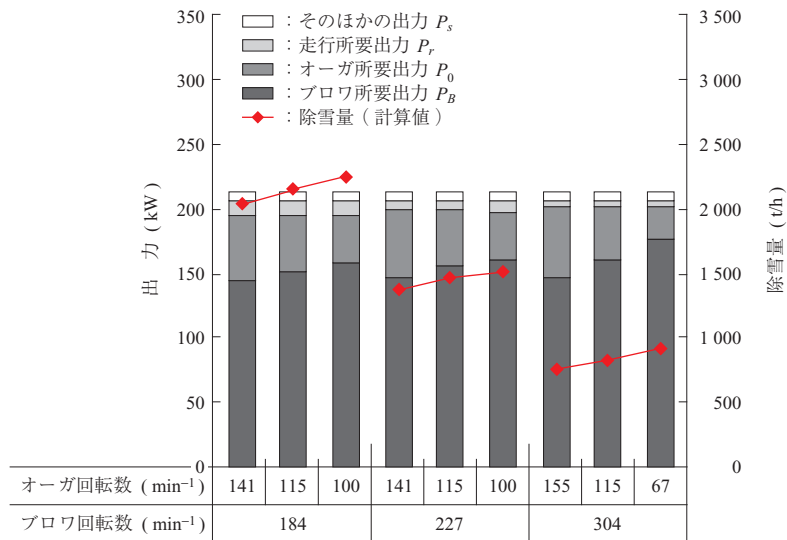
6. 数値シミュレーション

(2)~(5)式によって数値シミュレーションを行った。冷却ファンロスやオルタネータ(発電装置)による発電などの所要出力をまとめ、一定の値としそのほかの出力 P_s とした。消費シミュレーションの手順を以下に示す。

- (1) シカードの式によるオーガ所要出力の式とブロワ所要出力の式、走行所要出力の式から三つの所要出力を算出する。
- (2) 三つの所要出力の合計はロータリ除雪車に搭載しているエンジンの出力を超えることはない。
- (3) 除雪量 Q は、すべての式のなかで共通した値をとる。
- (4) オーガ形状やブロワの効率、雪の物性値などを決定して、原動機の最大出力値における、ある一定のオーガ回転数とブロワ回転数のときの除雪量 Q を求める。

第3図にロータリ除雪車の出力と一定条件におけるシミュレーション結果を示す。ブロワ回転数は現状の変速段で使用されている184, 227, 304 min^{-1} の3パターンとした。同一ブロワ回転数ごとにオーガ回転数を変化させ計算し比較した。現状のオーガ回転数は115, 141, 190 min^{-1} となるが、ブロワ回転数304 min^{-1} については後述の試験結果と比較するために155 min^{-1} を採用している。棒グラフは算出された所要出力を示し、折れ線プロットは右軸の除雪量の計算値を示している。

この結果、ブロワの回転数に対してオーガの回転数を独立制御し、オーガ回転数を小さくすると、除雪量が増大することが分かった。また、ブロワ所要出力が70%以上を占めており、オーガ所要出力は20%程度で、オーガ回転



第3図 ロータリ除雪車の出力の関係と一定条件でのシミュレーション結果
 Fig. 3 Results of simulation of using a relational expression and fixed conditions for rotary snow plough power output

数が増えるとブロワとオーガの出力配分が変化することが分かった。走行出力は全体に占める割合が少ないためにオーガ回転数の変化による影響は小さい。

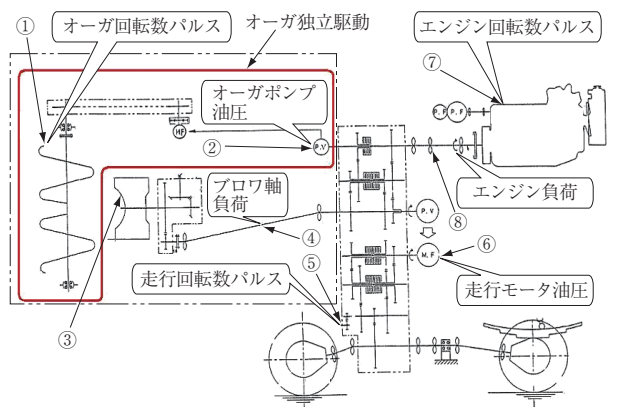
7. 要素試験

NR282 ロータリ除雪車 (NTS 製) を改造し、オーガを油圧独立駆動方式とし、2009年3月に山形県小国町で除雪性能試験を実施した。第4図に試験概要を示す。試験方法はブロワの回転数を一定に保ち、オーガの回転数を変化させ、数パターンの組合せで除雪能力試験を行い、除

雪量を測定した。同時に、エンジン回転数、エンジン負荷、ブロワ回転数、ブロワ負荷、オーガ回転数、オーガ負荷、走行速度、走行負荷を測定し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。

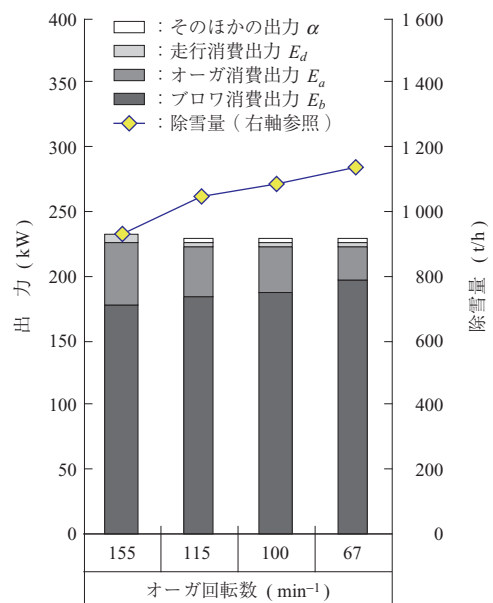
第5図にオーガ回転数ごとの除雪量と出力配分を示す。ブロワ回転数 304 min⁻¹ のとき、オーガ回転数を変化させて測定した除雪量と各消費出力を示す。この図からはオーガ回転数を小さくすると除雪量が増大することが分かる。

第6図に除雪量 Q の計算結果と試験結果の比較を示す。除雪量には差が見られたが、除雪量増減の傾向は一致

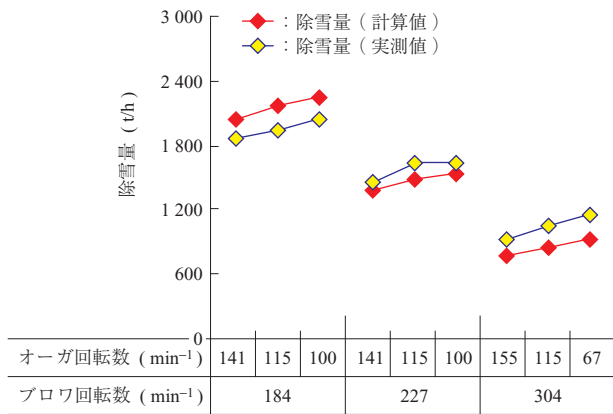


(注) ①～⑧は測定箇所を示す。
 ①: オーガ回転数 ①×②: オーガ消費出力
 ②: オーガ負荷 ③×④: ブロワ消費出力
 ③: ブロワ回転数 ④: ブロワ負荷
 ⑤: 走行回転数 ⑤×⑥: 走行消費出力
 ⑥: 走行負荷 ⑦: エンジン回転数 ⑦×⑧: エンジン出力
 ⑧: エンジン負荷

第4図 試験概要
 Fig. 4 Outline of experiment



第5図 オーガ回転数ごとの除雪量と出力配分グラフ
 Fig. 5 Amount of snow removed and output distribution by auger drive rotational frequency



第 6 図 除雪量 Q の計算結果と試験結果の比較

Fig. 6 Comparison of amount of snow removed Q according to results of calculation and of experiment

している。この差の要因は時々刻々と変化する雪のせん断抵抗や圧縮抵抗といったパラメタに平均的な値を用いたことによるものと考えられる。

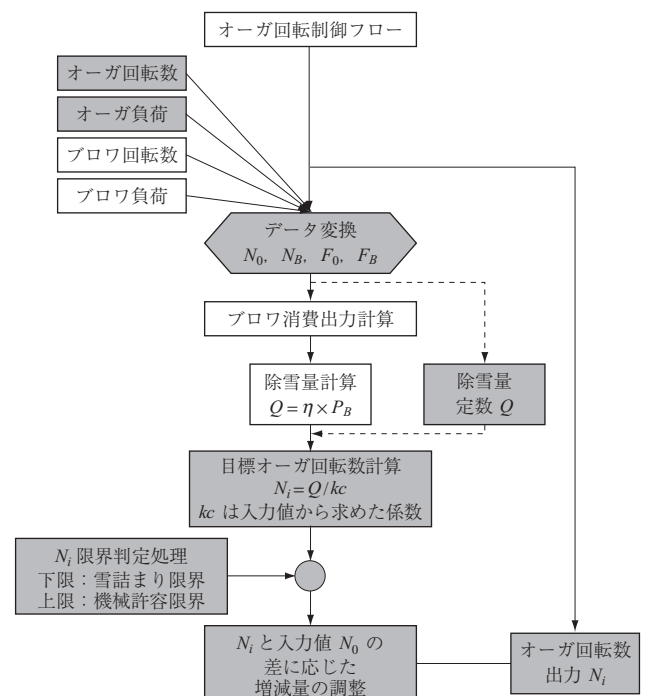
以上の試験結果から、オーガの回転数を小さくしていくと除雪量が増えることが分かった。また、数値シミュレーションに用いた式の妥当性について一定の確認ができた。

第 7 図にオーガ回転数の制御フローを示す。オーガ回転数を独立制御できれば、オーガによる搬送量をブロワ除雪量に必要な量まで抑え、余剰搬送量分の無駄を省ける。これによって、オーガの搬送量における無駄を省き、省エネルギー化を図ることができる。この省エネルギー分はブロワ所要出力や走行所要出力へ分配できるので、同じエンジン出力で除雪量を増加させることが可能である。特に、除雪した雪を遠くへ飛ばす高速回転での作業では 22% 以上の除雪量増大が見込める。

8. 今後の課題

以上の試験結果から、製品化に向けた今後の課題を述べる。オーガ・ブロワの負荷を測定し、測定データを基に、ブロワの処理できる除雪量に必要な分をオーガに搬送させるように理想的なオーガ回転数にする制御システムの開発が急がれる。基礎試験で採用した油圧ポンプモータであれば、その特性によって負荷によらず一定回転数が得られ、負荷は油圧の圧力として比較的簡単に測定ができる。また、負荷の情報を油圧ポンプモータにフィードバックして自動制御すれば、オペレータは従来と同じようにブロワの操作のみで、煩雑さは発生しない。

また、副産物として、オーガ回転数をフィードバック制御する過程で、ブロワによる除雪量が概算できる。これまで、除雪量は、あらかじめ計測した雪を除雪するのに要す



第 7 図 オーガ回転数の制御フロー

Fig. 7 Control process for auger drive revs

る時間を測定して、後から算出するしかできなかった。しかし、ブロワ負荷と回転数によって除雪量の逐次表示が可能になり、作業性や効率を数値管理することが可能になる。

9. 結 言

これまでの成果は、個人や 1 グループの業務で得られたものではない。事業部全体として、さらには社内外各方面から貴重な助言や協力があって、ここまで到達したことを書き添える。

ロータリ除雪車の効率化によって、除雪量が 22% 以上向上することが分かった。今回の研究は、除雪能力の向上にとどまらず、除雪作業中の雪詰まりの防止や、シャープン（安全装置）に代わる過負荷防止装置への応用、さらには除雪量の数値化・視覚化によって、運転者の作業効率意識を向上させ、除雪工法のなかで低燃費・低炭素化に向けた取組みへと発展させることも可能である。

この技術の一つ一つの要素は、既存の技術ではあるが、早期製品化に向けて研究を継続し、より高効率で作業性の高いロータリ除雪車を雪国に暮らす人々に提供したい。

参 考 文 献

- (1) 社団法人日本建設機械化協会：除雪機械技術ハンドブック 2007 年 12 月 pp. 4-13 - 4-16