

除雪グレーダのガイダンス装置検討について ～作業装置の自動制御に向けて～

今野 孝親*¹ 高橋 直陽*¹

1. はじめに

除雪グレーダはブレードを用いて新設除雪及び路面整正作業を行う除雪機械であり、幹線道路における除雪作業の主力機械となるもので、安全で安定した冬期道路交通確保の重要な役割を担っている。

除雪グレーダによる除雪作業は、路面状況、道路構造及び沿道条件等に合わせた操作が必要であり、その操作は複雑で難易度が高く、オペレータの熟練した技術が必要である。近年、建設業の担い手不足が懸念されているなか、除雪機械の熟練オペレータにおいても高齢化及び減少が進んでおり、将来的に熟練オペレータの確保が困難な状況になることが予想される。

本稿は、担い手確保及び除雪レベル（品質）確保の取り組みの一環として、経験の浅いオペレータでも現状の除雪レベルが維持可能となる除雪グレーダの運転操作支援方法について検討した結果の報告を行うものである。

2. 作業装置操作系の整理および検討優先度

各作業装置の操作支援（自動制御）を検討するにあたり、まず各操作支援の優先度を整理して検討対象を決定した。各作業装置及び操作項目の内容を以下に示す（図-1）。

- ①：ブレード昇降（押付力）
ブレードの上下、線圧を調整する操作
- ②：ブレードスライド（横送り）
ブレードの横位置を調整する操作
- ③：サークル回転（推進角）
除雪負荷により推進角を調整する操作
- ④：ブレードチップ（切削角）
圧雪状況により切削角を調整する操作
- ⑤：シャッターブレード
交差点等への寄雪を抑制する操作
- ⑥：前車輪リーニング
除雪負荷による車体の横振れを抑制する操作

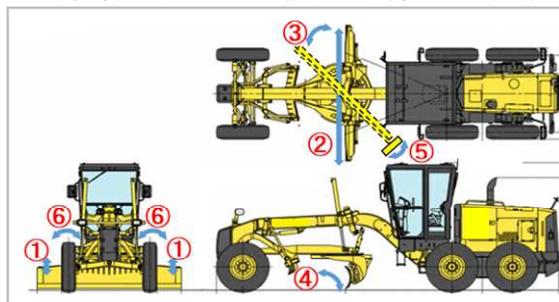


図-1 除雪グレーダの作業装置

作業装置の制御方法の一つとして、GNSSを活用した位置情報に基づく制御があるが、こちらについては、現在他機関において検討を進めているため、本検討の対象外としている。従って、位置情報のみに基づいて制御が行われる⑥のシャッターブレード制御は除外した。

また、除雪路面の仕上がりに影響する①のブレード押付力制御については、すでにオートブレードとしてメーカーで開発済みであり、こちらも検討の対象外とした。

次に作業装置の操作頻度を把握するため、工区特徴として2車線と4車線の割合に偏りがなく、沿道条件として市街地、平野部、山間地を有し、シャッターブレードが装備された新型ワンマングレーダが配備されている岩手河川国道事務所管内盛岡西国道工区（橋場ST担当）を選定し操作回数を分析した。図-2に示すとおりサークル回転（推進角）、ブレードスライドの操作回数が多く、作業員からのヒアリングにおいても、特にブレード端部の位置関係に注意を払いながら操作しているとの意見が多かったことから、サークル回転（推進角）とブレードスライド操作の優先度が高いと判断した。さらに、ブレードスライド操作は、位置情報に基づく制御以外は、サークル回転（推進角）制御に従属的な操作となるため、最終的に検討対象をサークル回転（推進角）制御に定めた。

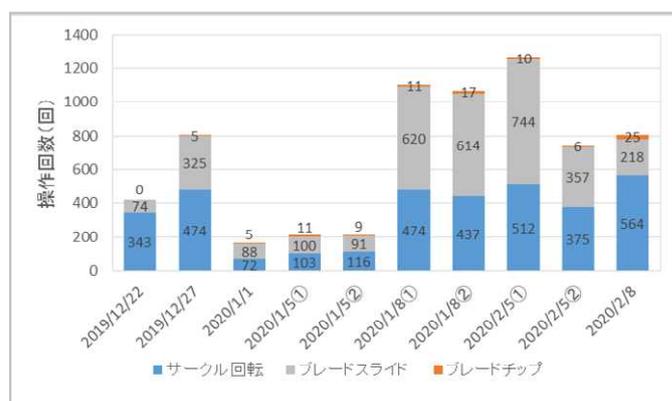


図-2 各装置の操作回数

3. 推進角制御の検討

3.1 推進角操作の目的

推進角の制御方法を検討するためには、その制御目的から考える必要があるが、推進角の制御の大きな目的の一つとして作業負荷調整による作業速度の維持が挙げられる。

なお、このほかの制御目的として除雪幅調整や寄雪量調整もあるが、これらは位置情報に基づく制御に該当するため検討対象外としている。作業負荷調整が推進角制御により行われる理由の一つは、他の制御項目と比較してその影響が大きいためである。除雪グレーダのけん引力（作業能力）は、下記の式により算出され、押付力、切削角、推進角はオペレータの操作により変化する要素である。

$$\begin{aligned}
 \text{けん引力} : F &= F_s + F_m \\
 F_s &= \mu_f \times W_B + \frac{\tau \times S \times \sin \theta_c \times \sin \theta \times 10^{-3}}{\cos^2(\theta_c/2)} \\
 &\quad + \frac{10^2 \times S \times \gamma \times V^2 \times 10^{-3}}{(3.6)^2} \times (1 + 0.73 \sin^2 \theta - 0.33 \cos^2 \theta) \\
 F_m &= \mu_a \times 10^{-3} \times A \times V^2 + \mu_r (W \times 9.8 \times 10^{-3} - W_B) \\
 W_B &= \frac{K \times \tau \times S \times \cos^2 \theta_c \times 10^{-3}}{\cos^2(\theta_c/2)}
 \end{aligned}$$

理論式の各記号に対応する項目を表-1に示す。

表-1 理論式記号表

記号	名称	単位	デフォルト値
F	けん引力	kN	-
F _s	最大除雪抵抗	kN	-
F _m	最大走行抵抗	kN	-
W _B	ブレード押付力	kN	-
K	刃先係数	-	3
τ	雪のせん断応力	N/cm ²	0.235H+9.22
H	圧雪高度	kg/cm ²	100
θ _c	切削角	度	75(60~90)
μ _f	カッチングエッジと路面の摩擦係数	-	0.1
S	除雪断面積	cm ²	d×h
d	除雪幅	cm	ブレード幅×sinθ
h	除雪高	cm	2
θ	推進角	度	60(45~90)
γ	雪密度	kg/cm ²	0.6×10 ⁻³
V	除雪速度	km/h	15
μ _a	空気抵抗係数	-	0.0274
A	前面投影面積	m ²	9
μ _r	タイヤのころがり係数	-	0.0189+601×10 ⁻⁶
W	車両総重量	kg	18.505

前述の式を用い、押付力、切削角、推進角を変数としてけん引力の相関を示すと図-3~5となる。この中で一番相関が強いのは推進角であり、推進角の操作が最もブレードにかかる負荷を低減し、除雪速度を保持する効果大きいことがわかる。

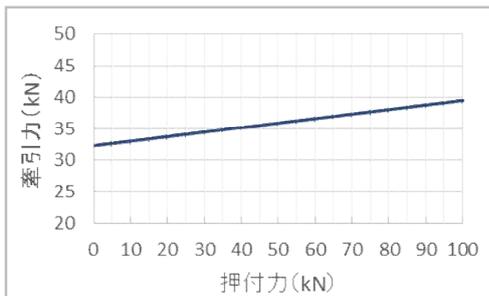


図-3 けん引力と押付力の相関

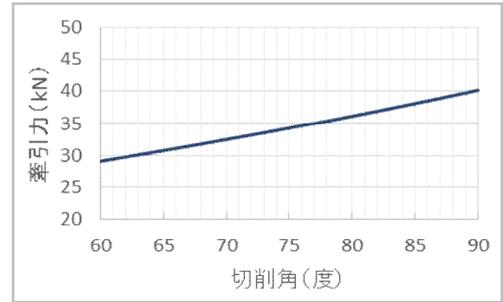


図-4 けん引力と切削角の相関

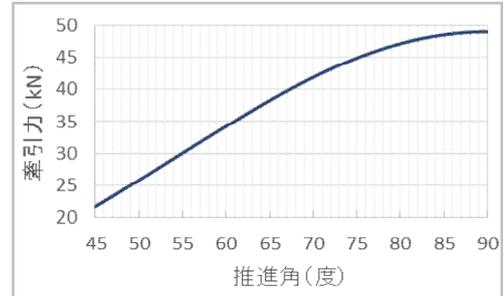


図-5 けん引力と推進角の相関

3. 2 制御要素

推進角を制御するにあたり、制御要素を確認するため実機による運転データの分析を行った。運転データから推進角、ブレード負荷、エンジン回転数、作業速度データを抽出し図-6の関係性を得た。

- ・同シフト内では定格負荷以上でエンジン回転数、速度が低下
- ・変化点①~②の推進角減少中はブレード負荷が上昇
- ・変化点②~③の推進角減少後もブレード負荷が若干上昇し、負荷減少までに時間差が生じる
- ・変化点②以降、エンジン回転数、速度が復帰

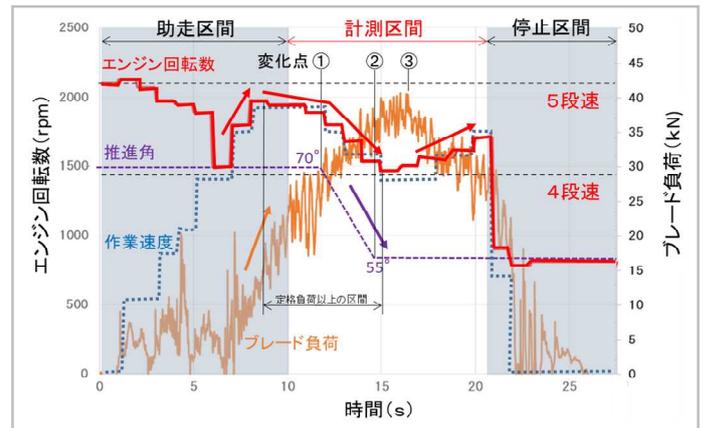


図-6 各抽出データの関係

各データの関係性から、エンジン回転数を監視することで推進角を制御することが可能と判断した。

4. 運転支援検討

4. 1 ガイダンス装置の製作

推進角の運転支援を実施するにあたり、第一段階としてガイダンス装置を製作して、ガイダンス装置の出力とオペレータの実操作の整合を確認することで、エンジン回転数制御の的確性及び有効性を検証することとした。ガイダンス装置の表示内容を以下に示す(図-7)。

- ①除雪幅：推進角による現除雪幅員
- ②限界角：自車に接触する限界値
- ③現在角：現在の推進角
- ④推奨角：エンジン回転数監視による目標推奨値
- ⑤～⑦車幅とブレード端部の位置関係：
 - ⑤ブレードはみ出し量の生データ
 - ⑥ブレードはみ出し量の目盛表示(1目盛=5cm)
 - ⑦信号表示の点滅による表現
(青：-10cm以下 黄色：-10~0cm 赤0cm以上)
- ⑧推奨角に対する操作レバー入力方向：

矢印の点滅と音によりレバー操作を促す

なお、④推奨角(必要操作量)はエンジン回転数のデータ変化量から近似式により算定しており、また、橋梁ジョイント等の注意箇所、対向車や後続車両を避けるためのアクセルワークに伴うエンジン回転数の変化を排除するため、アクセル開度95%(エンジン回転数1,900rpm)以上を出力条件としている。



図-7 ガイダンス画面

4. 2 現場実証試験

現場実証試験は、国道112号(山形河川国道事務所管内寒河江国道西工区(月山沢ST担当))にて実施した。本工区の特徴は、片側1車線区間の山間多雪地区あり、除雪回数も多いことが挙げられ、また、今後導入が進むオートブレード装置を装備した新型ワンマングレーダが配備されていることが選定理由となった。なお、試験車両には、前述のガイダンス装置のほか、センサ、カメラ等を設置して各種作業データの取得を行った。除雪グレーダの各種機器設置状況を図-8に、試験状況を図-9にそれぞれ示す。

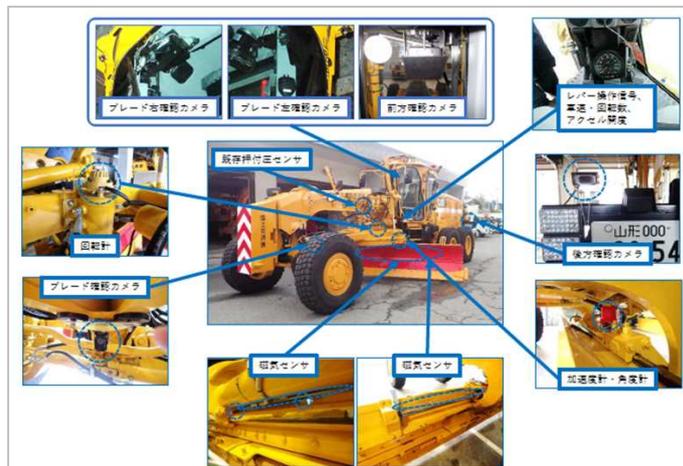


図-8 機器設置状況

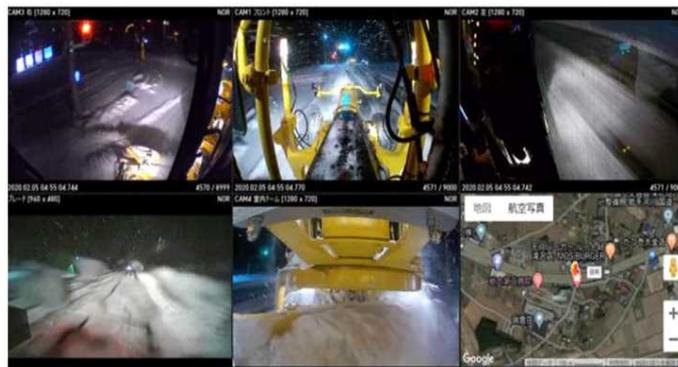


図-9 実証試験状況

実証試験では、ガイダンス出力とオペレータによる実操作との整合に関して、操作の有無、操作タイミング、操作角の差分等を確認し、結果は以下のとおりであった。

(1) 操作の有無

ガイダンス出力に対する実操作の有無について確認したところ、オペレータが実際に操作を行った割合は約38%であり、整合性が高いとは言えない結果となった。要因としては、オペレータが多少の速度低下を許容し、あえて推進角操作を行わなかったこと、もしくは、新型ワンマングレーダの操作に不慣れなため、ブレード操作を高い頻度で行わなかったことが推察されるが、今後も引き続き要因分析を進めていく予定である。

(2) 操作タイミング

ガイダンス出力とオペレータ操作の時間差をみると平均8.5秒程度遅い操作となっていた。これは、ガイダンスはエンジン回転数の低下条件に達した段階で瞬時に目標推進角を出力しているのに対し、オペレータは、ガイダンスやタコメータ、速度計を常時監視しているわけではなく、エンジン回転数の低下や速度低下がある程度継続した段階で感覚的に認識してから操作しているものと推察される。

この結果からも、エンジン回転数の低下を機械的に捉えて瞬時に推進角制御を行うことは、除雪作業の効率化及び一般交通への影響低減の効果が高いといえる。

(3) 操作角の差分

目標推進角とオペレータ操作角の差は操作毎のバラツキはあるものの、平均 0.5° 以下となり、概ね良好な結果が得られ、実機を用いた運転データ解析から導出された計算式の有効性が確認できた。

(4) ガイダンスの有効性

ガイダンスの内容についてオペレータにヒアリングを行った結果、ブレード左端の車体接触警報については、熟練オペレータでもタイヤガードに接触し損傷させることがあるため必要性が高いという意見を頂いたものの、除雪作業中オペレータは車両及び作業装置の操作に集中しており、ガイダンス画面を見る余裕はほぼ無いことが明らかとなった。

今回の実証試験から、除雪グレーダの作業負荷に応じたブレード操作支援については、他の土工用機械やロータリ除雪車とは違い、ガイダンスではなく自動制御という形での支援でなければ効果は得られないということがわかった。

4. 3 自動化に向けた検討

現場実証試験にて得られたデータにより、プログラムの改良は必要ではあるが、制御ロジックの有効性はある程度確認できた。引き続き作業データを収集・分析することより、ブレード操作の精度向上を目的としたプログラムの検討を行っていきたい。特に、自動化を実現するためには、安全性の確保が最も重要なポイントとなることから、インターロック、手動操作介入、制御情報（方向、変位量等）のオペレータ認知方法に関する検討が必要となる。

なお、作業装置の操作項目の中で、検討優先度が低いと判断されたブレードチップ（切削角）及び前車輪リーニングについては、刻々と変化する除雪作業の流れ（状況）に合わせて高頻度で制御するものではなく、必要が生じた場合にのみ操作するものであることから、オペレータが必要な角度設定を選択した場合に、その設定された角度に自動調整される半自動制御であっても問題無いと考えている。

ブレード操作の完全自動化については、GNSSを活用した自車位置推定技術のほか障害物等を検知する周辺環境認識技術も必要であるが、本検討で目指す当面の自動化のシステム概要を図-10に示す。

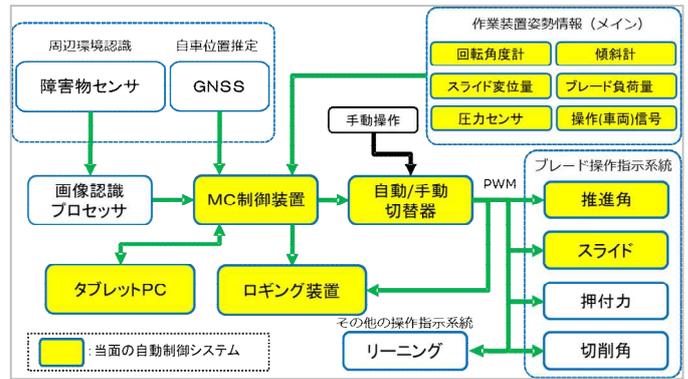


図-10 自動制御システム概要

5. おわりに

ブレードの自動化に向けた検討については、今年度試作機を製作して試験場内での動作検証を実施する予定である。今回紹介した制御方法は、エンジン回転数（作業負荷）に応じた制御であるが、これに現在他機関において検討を進めている位置情報に基づいた制御を組み合わせることで作業装置の自動化が概成する。これにより、オペレータは煩雑な除雪装置の操作から解放され、車両の運転に専念することが出来ることから、新人オペレータであっても早期に必要な除雪レベルに達することが可能となる。

ただし、上記制御のほかにも沿道の障害物や一般車両の挙動から緊急回避的な操作の必要性も残されていることから、完全自動化に向けてはさらなる検討が必要である。引き続き、苦渋作業の解消、担い手確保の一助となるよう、更なる自動化の進展を目指し検討を進めていきたい。