

24. ブラウ式除雪機械におけるブラウ形状と雪氷の運動

長岡技術科学大学 伊藤 広・長谷川 光彦

*福士 卓郎

1. 緒言

筆者らが勤務する長岡技術科学大学の所在地、新潟県長岡市はわが国でも屈指の豪雪地帯である。冬季は道路上の積雪除去が生活の上で不可欠であり、最も重要な作業となっている。この作業に使用される除雪機械は作業性や安全性の向上が要求される一方、運転管理にあたって経済的であらねばならない。しかし、除雪機械に関する研究は少なく、断片的な



図1 ブラウ式除雪機械

実験研究がわずかに行われているにすぎない^{(1)~(3)}。そこで、筆者らは、ブラウ式除雪機械について、雪氷と機械運動体によって構成される力学系を考えて動的解析を行い、雪氷と機械運動体の動的相互作用を世界で初めて理論的に解明し、従来経験的慣習によって行われている除雪機械の性能改良を科学的に行うための基礎理論を確立した⁽⁴⁾。本研究では、除雪時の雪氷の運動について理論的に解明し、作業性や性能の良いブラウ形状を見い出すための基礎理論を確立しようとするものである。

2. 理論解析

解析を行うブラウ式除雪機械に装備された代表的ワンウェイブラウの外観図の例を図1に示す。

2.1 仮定：雪氷の運動の解析にあたりつぎの仮定を設ける。①雪氷を質点とする。②雪氷の運動は三次元の立体座標の中で考える。③雪氷の密度は厚さ方向に一定とする。④運動する雪氷間の相互作用は考慮しない。⑤ブラウの進行方向は一定とする。⑥実際にはブラウが前進して除雪を行うが、理論解析にあたっては、ブラウは静止していて、雪氷がブラウに進入するとして取扱う。

2.2 雪氷運動の分類：図2に示すように、雪氷は圧縮変形された後ブラウに流入し、ブラウにより蹴あげられ、平面および円筒面を移動し、最後に空中へ投雪される。投雪される方向は、ブラウに流入する位置により異なり、①円筒面からブラウ前方向、②円筒面から側方向、③平面から側方向の3種類がある。①により投雪された雪氷の一部は再びブラウに流入し、②あるいは③の方向に投雪される。しかし、解析が複雑となるので、この再除雪は考慮しない。^{(5)~(9)}

流入前の圧縮変形および流入直後の蹴あげの分類には吾田の理論を用いる。すなわち、圧縮変形距離 δ および蹴あげの種類により表1のように分類する。表中の式および記号を以下に示す。

$$\delta = (1 - \delta_1)(2 - \varepsilon_M) \varepsilon_M \quad \text{--- (1)} \quad \theta = \tan^{-1} \{ 1 / \cos \alpha \cdot \tan (\pi/2 - \eta) \} \quad \text{--- (7)}$$

$$\varepsilon_M = \delta_1 / (\delta_1 + 2 \cot^2 \alpha) \quad \text{--- (2)} \quad \eta = \tan^{-1} \{ -\tan \alpha \sqrt{1 - \delta / (1 - \delta_1)} \} \quad \text{--- (8)}$$

$$r = (V/S)^2 - (3) \quad \delta_1 = \delta \sin^2 \alpha \quad \text{--- (4)} \quad v_E = 2 \cos \alpha \cdot V / (2 \cos^2 \alpha + \delta \sin^2 \alpha) \quad \text{--- (9)}$$

$$\delta_0 = A + \sqrt{A^2 + 1} \quad \text{--- (5)} \quad v_D = \sqrt{(1 - \varepsilon_c^2 / \delta) \cdot V^2} \quad \text{--- (10)}$$

$$A = 1 + (\sin^2 \alpha) / 2 \quad \text{--- (6)} \quad v_E = \{ \{ \delta \cos \alpha + (r - D) \sqrt{(r - D)^2 - \delta \sin^2 \alpha} \} / \{ \delta \cos \alpha + (r - D) \} \} \cdot V \quad \text{--- (11)}$$

ここに、 ε_m は前縁最大歪、 α は切削角、 μ は開き角、 V は除雪速度、 v_f 、 v_b 、 v_s はそれぞれ蹴あげ後の雪氷速度、 S は塑性歪速度、 γ は実用速度変数、 γ_0 は理論速度変数、 ε_c は粉砕歪、 θ は雪氷流入角、 κ はアウラまえ圧縮の流線の方程式の接線とアウラ前縁とがなす角である。

2.3 運動方程式：蹴あげ後の雪氷の運動方程式をマトリックス表示する。

$$\diamond \text{アウラ平面} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{13} \\ A_{23} \end{bmatrix} \quad \text{---(12) ただし、} \left. \begin{aligned} A_{13} &= -\mu \cdot g \cos \alpha \sqrt{\dot{x}_f^2 / (\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2)} \\ A_{23} &= -\mu \cdot g \cos \alpha \sqrt{\dot{y}_f^2 / (\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2)} \end{aligned} \right\} \quad \text{---(13)}$$

$$\diamond \text{アウラ円筒面} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{13} \\ A_{23} \end{bmatrix} \quad \text{---(14) ただし、} \left. \begin{aligned} A_{13} &= g(\sin \theta \cos \lambda \sin \alpha - \cos \theta \cos \alpha) / 2\rho - \mu(\rho \dot{\theta}^2 + g \cos(\alpha + \theta) \cos \lambda) \dot{\theta} / 2\rho \sqrt{\rho^2 \dot{\theta}^2 + \dot{x}_c^2} \\ A_{23} &= -g \sin \lambda \sin \alpha / 2 - \mu(\rho \dot{\theta}^2 + g \cos(\alpha + \theta) \cos \lambda) \dot{x}_c / \sqrt{\rho^2 \dot{\theta}^2 + \dot{x}_c^2} \\ \rho &= (a_0 b \gamma_c / 3.545 \cos \lambda + a_2 b) / (1 - \cos \theta \tan \lambda) \end{aligned} \right\}$$

$$\diamond \text{アウラ面外} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{14} \\ A_{24} \\ A_{34} \end{bmatrix} \quad \text{---(15) ただし、} \left. \begin{aligned} A_{14} &= -D \dot{x}_f, A_{24} = -D \dot{y}_f - g \sin \alpha, A_{34} = -D \dot{z}_f - g \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad \text{---(17)}$$

ここに、 μ は雪氷とアウラ間の摩擦係数、 D は空気抵抗である。

2.4 除雪抵抗：除雪抵抗は前報と同様に①アウラ前の圧縮抵抗、②蹴あげ抵抗、③投雪抵抗の3種類を考慮する。ただし、蹴あげ抵抗は不明な点が多いので、前報と同様に切削抵抗とする。

◇ 圧縮抵抗 $R_s = A \cdot \delta_s$ --- (18)

◇ 切削抵抗 $R_{cx} = A \cdot T \cdot \sin \alpha, R_{cz} = A \cdot T \cdot \cos \alpha$ --- (19)

◇ 投雪抵抗

$$\text{アウラ平面} \quad \left\{ \begin{aligned} R_Y &= F_{fx} \sin \kappa + F_{fy} \cos \alpha \cos \kappa \\ F_{fx} &= \mu m_s g \cos \alpha \sqrt{\dot{x}_f^2 / (\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2)} \\ F_{fy} &= m_s g \sin \alpha - \mu \cos \alpha \sqrt{\dot{y}_f^2 / (\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2)} \end{aligned} \right\} \quad \text{---(20)}$$

$$\text{アウラ円筒面} \quad \left\{ \begin{aligned} R_Y &= -(F_{fb} \sin \lambda - F_{fc} \cos \lambda) - (F_{fx} \sin \lambda + F_{fb} \cos \lambda) \sin \kappa \cos(\theta + \alpha) + m_s \rho \dot{\theta}^2 \sin \kappa \sin(\theta + \alpha) \\ F_{fb} &= \mu m_s (\rho \dot{\theta}^2 + g \cos(\alpha + \theta) \cos \lambda) \dot{\theta} \dot{\theta} / \sqrt{\rho^2 \dot{\theta}^2 + \dot{x}_c^2}, F_{fc} = \mu m_s (\rho \dot{\theta}^2 + g \cos(\alpha + \theta) \cos \lambda) \dot{x}_c / \sqrt{\rho^2 \dot{\theta}^2 + \dot{x}_c^2} \end{aligned} \right\} \quad \text{---(21)}$$

ここに、 A は除雪断面積、 m_s は雪氷の質量、 g は重力の加速度、 δ_s は木下硬度計により実測される垂直方向応力、 T は抗せん力である。

表1 雪氷の圧縮および蹴あげの種類

分類	条件	適用式
A	圧縮歪形距離有り	$\delta > 0$ 式(7)、(8)
B	圧縮歪形距離無し	$\delta \leq 0$ $\theta = \tan^{-1}(\cos \alpha \tan \kappa)$
C	飛散形低速蹴あげ	$\beta < 1, \delta < \beta$ 式(9)
D	飛散形高速蹴あげ	$\beta > 1, \delta < \beta$ 式(10)
E	飛散形低速蹴あげ	$\beta > 1, \delta > \beta$ 式(11)

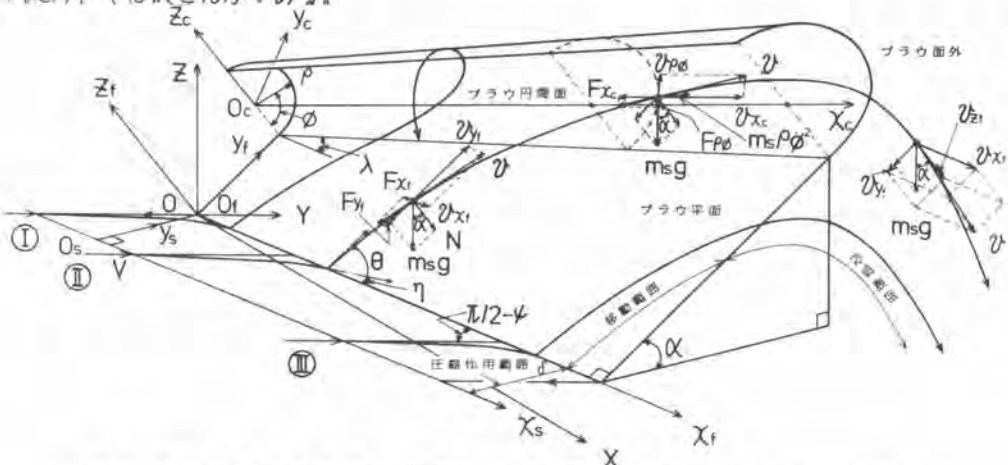


図2 雪氷の運動の種類、速度、作用力およびブラウの座標などについての説明図

3. 理論解析結果

および実験結果
式(12), (14), (16)を解
くにあたっては、はき
出し法とルンゲ・クッ
タ・ギル法を用いる。

理論の妥当性を確認

するためにフロン被ダンプトラックにワンウェイプラウを装
着した実験を行なった。プラウの諸元を表2に示す。

3. 1 最大投雪距離と最高投雪高さ：図3に比較結果を示
す。理論値は塑性波速度が7.0%のときである。4つの実験
点に対する雪米物性値を表3に示す。理論値は実験値にほぼ
一致している。

3. 2 除雪抵抗：表3に比較結果を示す。No.1の新雪の場
合は理論値は実験値にほぼ一致している。No.4のざらめ雪の
場合は理論値が大きい。No.2, No.3のざらめ雪の上に新雪が
積った場合は理論値が小さめである。これらの理論値と実験
値の差は式(18)圧縮抵抗および式(20)切削抵抗の解析が不十
分のためと思われる。

3. 3 塑性波速度の影響：図4に塑性波速度を4種類取っ
て計算した結果を示す。除雪速度が35km/h以下の中速域にお
いて、塑性波速度が大きくなるに従って最大投雪距離は大き
くなる。35km/h以上の高速域では差は少なくなる。

3. 4 全除雪抵抗の内訳
：図5はNo.1の実験条件に
おいて、理論値の除雪抵抗
の内訳である。除雪速度が
20km/h以上になると、除雪
抵抗の大半は投雪抵抗とな
る。また、40km/h以上の高
速になると、投雪抵抗が除
雪速度とともに急激に増加
する。

3. 5 プラウ形状の影響
：図6に切削角 α を変えた
ときの最大投雪距離の理論

表2 プラウ諸元

全幅	2.9	m
底面除雪幅	2.85	m
プラウ斜線幅	3.26	m
先端高さ	0.72	m
後端高さ	1.43	m
切削角	58.4	deg
進行角	54.4	deg
投雪角	-45.8	deg
最大田厚	0.32	m
最小田厚	0.26	m
質量	1800	kg

表3 除雪抵抗の比較

実験番号	雪米物性値			除雪高 h m	除雪抵抗	
	硬度 δ_s kg/m ²	抗せん力 kg/m ²	密度 δ_s kg/m ³		実験値 kgf	理論値 kgf
NO.1	120	280	200	0.205	444	424
NO.2	215	196	87	0.315	793	468
NO.3	120	127	140	0.295	649	508
NO.4	1525	360	430	0.109	498	913

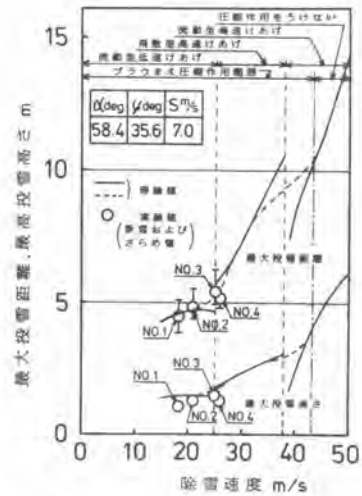


図3 除雪速度と最大投雪距離および最高投雪高さの関係についての理論値と実験値の比較

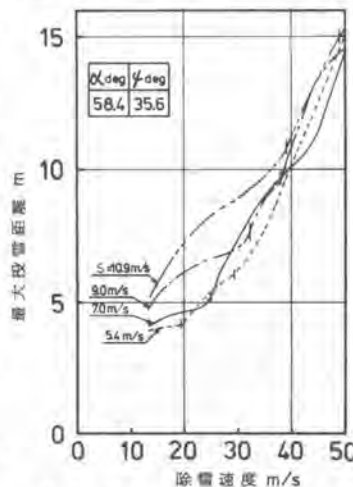


図4 塑性波速度の違いによる除雪速度と最大投雪距離の関係

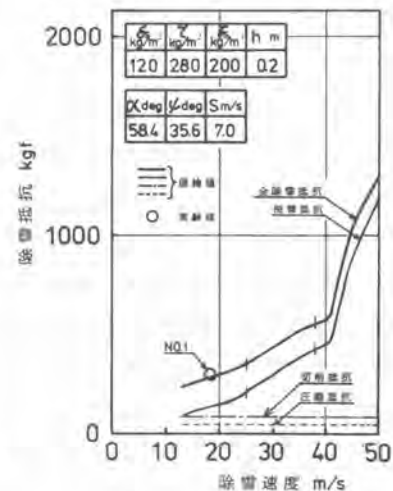


図5 全除雪抵抗とその内訳

値を示す。図7に開き角 ψ を変えたときの最大投雪距離の理論値を示す。切削角および開き角が小さくなるに従い最大投雪距離が大きくなる。しかし、実際に用いたアウラの $\alpha=58.4$ 度、 $\psi=35.6$ 度よりさらに小さい値としても、それ程大きくはならない。図8に切削角 α を変えたときの投雪抵抗の理論値を示す。図9に開き角 ψ を変えたときの投雪抵抗の理論値を示す。 α および ψ が小さくなるに従い、投雪抵抗が大きくなる。 $\alpha=58.4$ 度、 $\psi=35.6$ 度より角度が小さくなくても、投雪抵抗はかなり増加する。

4. 結言

- (1) アウラ除雪における雪米の運動の理論式を導いた。
- (2) 理論解析結果と実験結果はほぼ一致し、本理論の妥当性を確認した。
- (3) アウラの除雪性能には雪米の物性値のうち、塑性波速度が大きく影響する。

(4) アウラ形状の切削角 α および開き角 ψ が小さくなるに従い、最大投雪距離が大きくなる。しかし、除雪抵抗の兼ね合いを考えると、最適な値が存在する。

(5) アウラ形状の切削角 α および開き角 ψ が小さくなるに従い、投雪抵抗は大きくなる。

参考文献 (1)北海道開発局 高速域における除雪トラックの信頼性試験 (昭50.9)

(2)北海道開発局 信頼性試験に関する調査試験報告書 (昭53.3)

(3)北海道開発局 新雪路整正同時施工に関する調査試験 (昭51.3)

(4)伊藤, 長谷川, 野崎 機構論 No.870-14 (昭56.10) (5)吉田 アウラ除雪の理論I 低温科学 物理篇32 (昭49)

19-53 (6)吉田 アウラ除雪の理論II 低温科学 物理篇32 (昭49) 55-70 (7)吉田 アウラ除雪

の理論III 低温科学 物理篇33 (昭50) 34-55 (8)吉田 アウラ除雪の理論IV 低温科学 物理

篇33 (昭50) 57-73 (9)吉田 アウラ除雪の理論V 低温科学 物理篇33 (昭50) 75-91

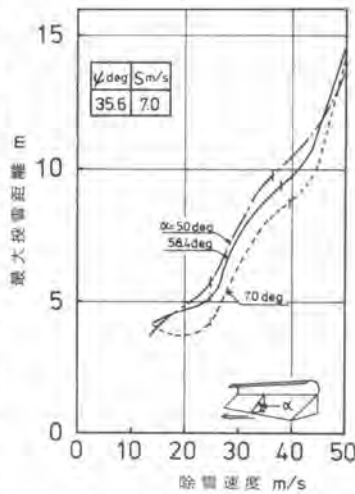


図6 切削角 α の違いによる除雪速度と最大投雪距離の関係

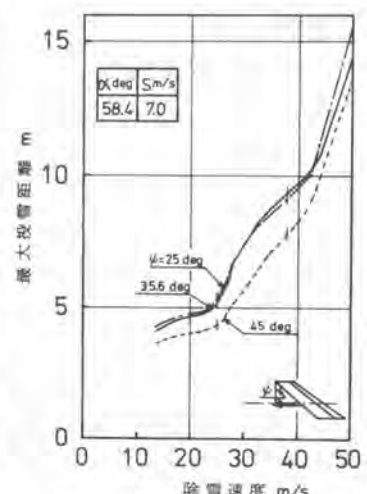


図7 開き角 ψ の違いによる除雪速度と最大投雪距離の関係

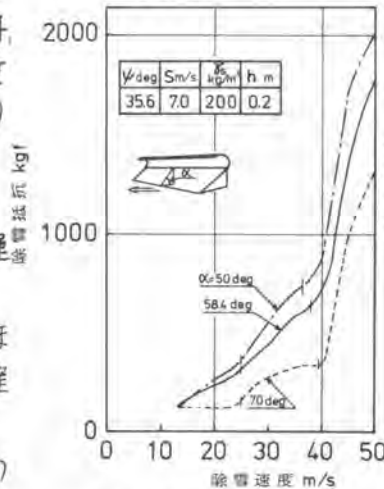


図8 切削角 α の違いによる除雪速度と投雪抵抗の関係

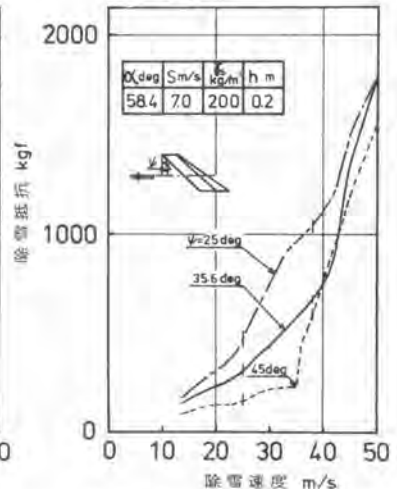


図9 開き角 ψ の違いによる除雪速度と投雪抵抗の関係