

農耕地における融雪促進法に関する研究 - ヘリコプターによる融雪促進 -

著者	大沼 匡之, 中村 千里, 小林 一雄, 高橋 久三郎
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	3
ページ	51-73
発行年	1965-03-31
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002503/

農耕地における融雪促進法に関する研究

——ヘリコプターによる融雪促進——

大沼匡之*・中村千里・小林一雄・高橋久三郎

農林省北陸農業試験場

The Studies on the Methods of Promoting the Melting of Snow in a Farm

——The Promotion by Helicopter of the Melting of Snow——

By T. Onuma*, C. Nakamura, K. Kobayashi and K. Takahashi

Hokuriku Agricultural Experiment Station, Ministry of Agriculture and Forestry, Takada

Abstract

The methods of promoting the melting of snow by covering snow surface with black powder scattered from a helicopter were investigated, in order to make clear the problems involved in such procedures.

The results of experiment pointed out two main factors, *i.e.*, the effectiveness of the black powder in the promotion of melting of snow, and the degree of the scattering ability of the duster of a helicopter. And the degrees of the promotion of melting of snow were found to be determined by the actual amount of the powder settled on a snow surface.

The quantity of snow melted by the covering with the black powder (M_p) was as follows:

$$M_p = m(R_s)^n, \quad m = Ae^{-Bx}, \quad \text{and } n = cx^D, \quad \text{where } 3 < x < 20 \text{ g/cm}^2,$$

R_s : solar radiation, m, n : coefficients depending on x (the amount of settled powder) and A, B, C, D (constants characteristic of the powder).

On the other hand the scattering ability of the duster was known to be conditioned by the liquidity of the powder, *i.e.*, bulk density and coefficient of friction, *etc.*

"Method of albedo" is conceived to be superior to the others in estimating the amount of the settled black powder, and consequently, the "albedo-meter" which shows the direct amount of the settled black powder was devised and used for the estimation of the amount of the scattered black powder.

目 次

まえがき	52	2. ヘリコプターによる大規模融雪実験	54
1. 融雪促進	52	2.1 粉材の融雪促進効果	54
1.1 融雪促進の過去と将来	52	2.2 ヘリコプターによる粉材の散布	59
1.2 融雪に関する雪面熱収支	53	2.2.1 吐出試験	59
1.3 雪面黒化法による融雪促進	53	2.2.2 散布試験	61

* 執筆者 (The writer assigned for the report)

2.3 航空散布材としての融雪促進粉材……………63
 2.4 アルベド法による落下量の判定……………63
 3. 大規模消雪の現地実験……………65
 3.1 目的および計画……………65

3.2 散布実施と融雪経過……………65
 3.3 融雪促進結果と雪下作物への影響……………68
 4. 大規模消雪に関する今後の問題……………70

まえがき

北陸地方を中心とする裏日本一帯を襲った昭和38年1月の豪雪は、いわゆる里雪型の降雪形態をとり、平年は比較的寡雪地とみられていた平野部にとくに多く積もり、急性的には交通運輸を麻痺させ、農業面では、果樹、桑樹の枝折れ、施設の破損等で大被害をもたらした。慢性的には雪どけを遅らせ、積雪期間を長びかせて越冬作物に破滅的被害を与え、融雪遅延により夏作への悪影響も憂慮され、作業時期のずれにより労力配分に支障をきたした。

農業上の雪害を軽減、または防除するのに農作物の耐雪性を強化するなど、作物の面からする方法と積雪条件を人為的に変える方法と考えられるが、降雪を制御することは、現在は困難であるので、積雪を処理することになる。すなわち、積雪の性質を人工的に変質することや、融雪を促進させることになる。この処理方法で、大規模化の可能性の最も高いものは融雪促進であろう。

1. 融雪促進

1.1 融雪促進の過去と将来

雪を早く消して種まきをするために、田畑の雪面に灰や土をまく方法は昔から行なわれてきた。その他、水を引いて雪を早く消す方法や、雪を掘り起こして雪面に畦を作ることも考えられていたが、労力の割にはあまり効果があがらなかった。また、灰や土をまく場合に、効果をより大きくしようとして厚くまき過ぎ、かえって雪消しを遅くしてしまった例などもみることができる。このように、昔は灰や土をまく量なども単に個人の経験だけに頼っていて、合理的な融雪促進技術としての形態はとられていなかった。

農業や林業の分野で、融雪促進を一つの技術とするために試験研究を進めた例は少なくない。雪消しには種々の方法が採用され、また雪面に散布する材料も手近なものから特殊なものまで試験され、その散布方法なども考案された。そのような散布技術と併行して、融雪現象自体の研究も、物理的に熱学的に徐々に進展してきた。その結果、融雪促進の効果も増し、自然放置の場合よりも半月近く早く雪を消し、条件のよいときは3週間の促進がなされた例もみられるようになった。

試験された融雪促進法について概略を整理すれば表一1のようになる。

以上の融雪促進法の中で、普遍性があり労力的にも有利なものとして、黒色粉末の雪面散布が多く試験され、材料、散布量、散布法などについて考察されたが、二、三の例を除き事例的な試験の繰り返しに過ぎなかった。すなわち、散布材料は何がよかったか、散布量はどの位がいちばんとけたか、とかの試験が多く、散布材料の物理性と気象環境、それに融雪機構の関連などについての検討が少なかつたので、融雪効果の判定についての理論的基礎がはなはだ弱体であつたらうみがある。したがって、融雪効果の予測、すなわちある材料をどれほど散布すれば、促進量はどうかに対して明確な返答がえられなかつたと考えられる。

前記のように融雪促進は、おもに農業面より発達してきたが、最近では他産業でもその必要性がうまれ、たとえば道路管理、道路建設工事場、荷上港や、また融雪水の調節を目的としたダム集水地などと融雪促進技術の応用面が開かれている。農業面では構造改善にともない、耕地の大規模集約化が進む方向として示されている。したがってこの場合必要とする雪消しの技術は、従来の小面積を対象とする手法では間に合わず、大面積を目標とする融雪促進技術が要請される。大規模化するには労働生産性、経済性、地域の普遍性より見て雪面に黒色材料を散布する方法（雪面黒化法）が採用されるものと考えられる。

雪面黒化法が大規模に実施するには、目的に応じたすぐれた散布材料が用意され、また規模に応じた最適の散

表一1 従来の融雪促進法のあらし
 Summary of the methods of promoting the melting of snow formerly in use.

融雪方法	熱源とその受熱型式	作業方法、形式、材料	応用地物
水のかげ流し（敷水法）	水溜からの熱伝導	かんがい水の利用 温水（井戸水）のパイプ敷水	水田、道路、屋根など
雪掘り跳立て（雪面凹凸法）	気温、水蒸気からの熱伝達	人力による手掘り、馬力による雪面翻起、機械力による雪面裏作り	水田、畑地、広場など
黒色粉末の雪面散布（雪面黒化法）	主として、日射による放射熱	手まき、ダスターによる散布、ダイナマイト散布、泥水散布、材料：土、灰、焼もみがら、パイニン、石灰粉、フライッシュ、液状色素、カーボンブラック	水田、畑地、道路、広場、工事場、ダム、集水山地

以上のほかに、吸水発熱物、氷点降下剤の散布もある。

布機械および方法などが研究され、その技術を確保しなければならぬ。

1.2 融雪に関する雪面熱収支

雪面黒化法では融雪熱の獲得は雪面で行なわれるので、まず自然雪面での融雪に関する熱収支についてあたって見る。

融雪期における積雪層の熱収支は雪面に出入りする熱量だけを考えればよく、次に示す熱収支式が成立する。

$$M = R_s(1-a) + R_e + L + IE$$

ここで M は融雪に費やされる熱量、 R_s は雪面に到達する短波放射量、 a は雪面のアルベド、 R_e は有効放射量、 L は気温（顕熱）伝達量、 IE は水蒸気（潜熱）伝達熱量である。各項のそれぞれの大きさを、時期的にあるいは地帯別に知っておくことは、融雪促進の計画をたてる上できわめて重要なことである。1962年の高田における積雪期間について算出した熱配分結果を表—2に示す*。この年は2月の上、中旬の境に強い暖気の侵入があって、高田における平均的な熱配分の時期的変化を知るのにあまり適当な例とはいえないが、2月は降雪期で、2月下旬頃から徐々に融雪期に入り、3月上旬から本格的な融雪期に入ることがわかる。

融雪期の自然雪面において、 M に対する吸収短波放射量 $R_s(1-a)$ の割合はきわめて大きく、0.8~2倍を示し、また、一般に負を示す有効放射量 R_e を加えた純放射量 S との割合も M の半分またはそれ以上に達している。気温からの伝達熱量 L も、 M に対して約半分ほどの大きさであるが、水蒸気からの伝達熱量 IE は融雪の末期を除いて負、すなわち、蒸発過程を示し、結局空気から伝達される熱量 $L+IE$ は、 M の半分またはそれ以下となる。以上のように、 M に対する $R_s(1-a)$ の

割合は授熱項の中で最大で、融雪に対して最も支配的な熱量である。

低緯度積雪地帯（高田はその代表といえる）では、融雪期の高温を利用するために、空気融雪促進法としての畦立法が有利であるとされた研究例をみることもできるが、このような地帯でさえ、やはり短波放射量（日射量）からの融雪促進が有利であることがわかる。

1.3 雪面黒化法による融雪促進

さて、雪面を黒化して自然雪面のアルベド（あらゆるゆき：80~90%、ざらゆき：50~60%）を20~30%にした場合に、一体どれほどの融雪熱量が増加するか、そしてどれほど融雪が促進されるかを試算して表—3に示した。表—2と同様、1962年の高田の資料を用いたがまず融雪期に入る直前の2月中旬に雪面を黒化して、アルベドが30%になったと仮定した場合、および2月中~3月上旬に雪面を黒化して、アルベドを25%と仮定した場合には1日当たり同じく100 ly/day程度、20日間に1,910 lyの熱量の増加をみる事ができる。

融雪熱量 M と積雪密度 ρ 、積雪層の含水率 w 、融雪による減雪深 ΔH_s との間には、 $M/80 = \Delta H_s \cdot \rho(1-w)$ の関係があるが、上式によって融雪促進日数の概算を求めれば表—3下段となる。2月中旬から雪面を黒化した場合、その時の平均積雪密度を0.35 g/cm、平均含水率を10%と仮定して、上式から減雪深を逆算してみると期間増加熱量2,660 lyに対して106 cmが得られ、その期間の自然減雪深の日量5.6 cmで除すと、融雪促進日数は19日となった。また、3月上旬から雪面を黒化した場合にも同様な計算を行なって、融雪促進日数10日を得た。

このように黒色材料を散布して雪面を黒化する場合、

表—2 自然雪面の融雪熱量の配分 (ly/day) (1962年, 高田)
Heat balance on the natural snow surface at Takada, 1962.

熱収支項	月	I				II			期間合計
	旬	下	上	中	下	上	中	下	
放射	吸収短波放射量 $R_s(1-a)$	20	115	65	65	155	125	150	6,950
	有効放射量 R_e	-40	-60	-60	-40	-75	-80	-55	-4,100
	計(純放射量) s	-20	55	5	25	80	45	95	2,850
空気伝達	気温伝達熱量 L	15	30	40	25	70	70	90	3,400
	水蒸気伝達熱量 IE	-10	-10	-25	-15	-15	0	10	-650
	計(空気伝達熱量) $L+IE$	5	20	15	10	55	70	100	2,750
融雪熱量 M		-15	75	20	35	135	115	195	5,600

* 各項の決定方法については、中村、大沼：融雪の際の雪面熱収支について、農業気象、1962(4)、中村千里：融雪時の雪面熱収支に関する研究、北陸農業試験場報告、No. 7を参照。

表—3 雪面黒化による吸収短波放射量 (ly/day) 変化と融雪促進日数の計算例 (1962年高田における資料から)

Effects of the blackening of snow surface on the absorptivity of short-wave radiation and the melting of snow at Takada, 1962.

放射量	月 旬	I			II			III		
		下	上	中	下	上	中	下		
到達短波放射量 R_s		129	245	243	232	341	288	364		
A	吸収短波放射量 $R_s(1-a)$	20	115	65	65	155	125	150	期間増加熱量	
B	2月中旬散布 $a=0.30$ としての増加熱量 $R_s(1-0.30)-R_s(1-a)$			105	97	84			期間28日として 2,660 ly	
C	3月上旬散布 $a=0.25$ としての増加熱量 $R_s(1-0.25)-R_s(1-a)$					101	91		期間20日として 1,910 ly	

計算結果	期間増加熱量	積雪密度	含水率	換算減雪深	自然減雪日量	融雪促進日数
上表の B	2,660 ly	0.35 g/cm ³	0.10	106 cm	5.6 cm	19日
C	1,910	0.40	0.10	66	6.5	10

散布時期をより早くすれば効果が大きいですが、しかし早過ぎても散布面に新積雪がつもり、黒化の作用が一時停止するので効果は減少する。したがって、散布に際しては事後の降雪の程度を考慮しながら計画を進める必要がある。

2. ヘリコプターによる大規模融雪実験

従来の小規模消雪では、ただより早く雪を消せばよいという期待だけでなされ、労力はあまり問題にされず、融雪材料、散布方法などもそれほど吟味を要しなかったが、大規模に実施する場合には、実施結果につながる計画的な期待がもたれるので上記の項の一つもゆるがせにはできない。その選択を誤れば、影響するところがはなはだ大きいものがある。

今回の実験はヘリコプターを使用しての大規模消雪の際に遭遇する問題点を明らかにし、それ解明して融雪促進の技術を確立するのが目的であって、ねらいとするところは、どんな粉をどのようにして散布すればもっともよいかということになる。どんな粉とは融雪促進効果が優れていて散布の容易な粉で、しかも入手し易く安価で農作物、人畜に無害なるものである。どのようにしてとは、飛行高度、速度などはどの程度がよいか、風に対してどうか、散布区の形をどう探るか、散粉機(マスター)の性能は、粉材の雪面落下量の判定をどうするかなどの課題が含まれている。

2.1 粉材の融雪促進効果

このたびの実験に使用した粉材は付表のようなもの

で、カーボンブラック系のものである。各粉材の融雪促進効果の判定のため次の実験を行なった。

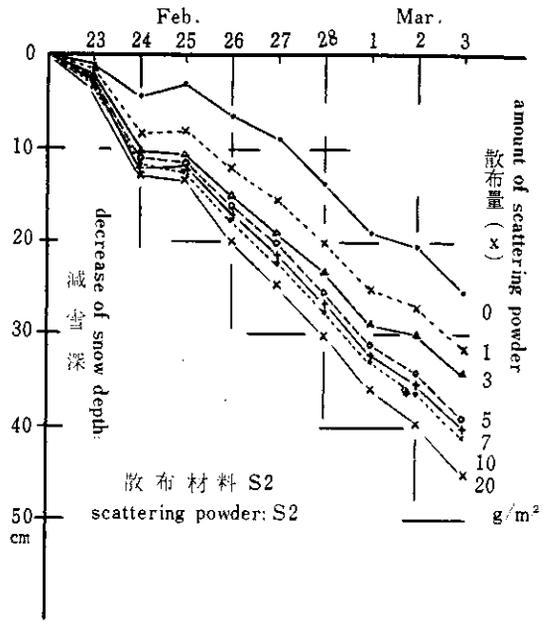
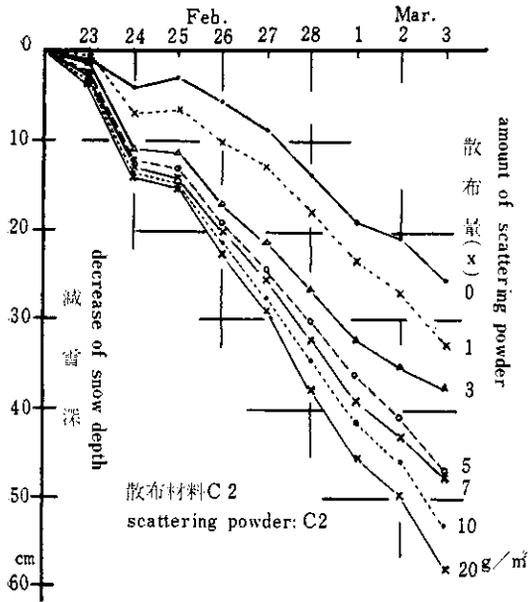
37年度

1) 実験方法：平坦な雪面に1m四方の区画を作り、その中に約9種類の材料を手まきで散布した。散布量は各材料について、1, 3, 5, 7, 10, 20 g/m² とし、融雪促進による雪面の低下を観測した。実験期間は1963年2月22日～3月3日である。

2) 気象、雪質：実験期間は比較的好天に恵まれ、日射量は2月24日、3月1日が150～200 ly/day で少なかったが他は350～400 ly/day 前後であった。気温は日平均で22日から25日まで日を追ってのぼり1°C から3°C に達し、3月2日まで3°C を前後し、3日にふたたび1°C となった。日平均風速は実験期間中大きく3～5 m/s 前後で、気温伝達熱量を大きくしたが、水蒸気圧は日平均4.8 mb 前後で経過したから、水蒸気伝達量は負を示した。

実験期間の自然積雪深は100 cm から76 cm に低下し、雪質は全層にわたって「ざらめ」であり、積雪密度は全層平均で初日より終日まで0.42～0.45 g/cm³ を示し、安定していた。

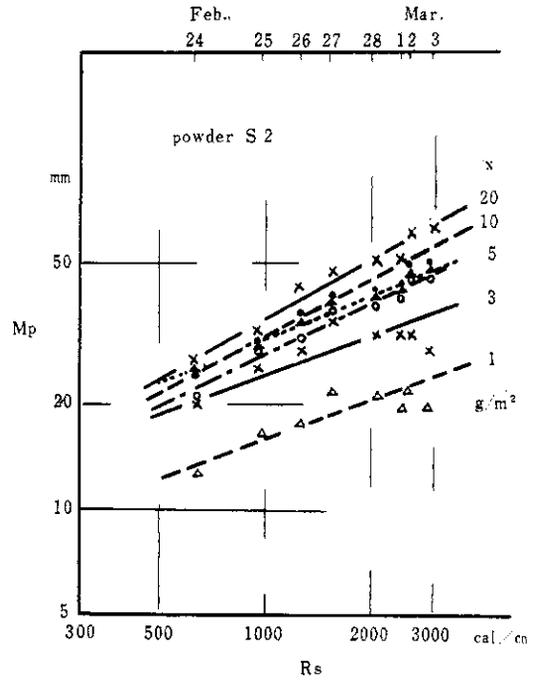
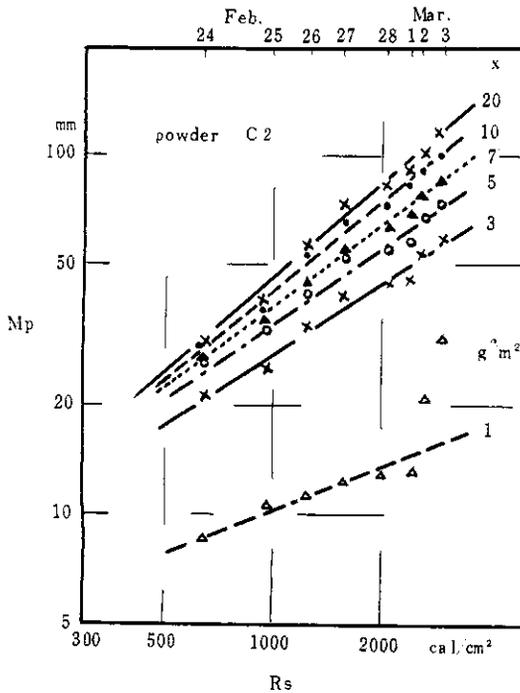
3) 実験結果：各区の散布量(x)と融雪経過の1例を図—1に示す。これはカーボンブラックの1例である。当然のことながら散布量が多いほど融雪効果がある。終日において10 g/m² 散布で約30 cm、20 g/m² では約40 cm の差が自然減雪区(x=0)との間に生じて



(a)

(b)

図-1 融雪促進経過
Progress of promotion of the melting of snow.



(a)

(b)

図-2 融雪促進量 (M_p) と日射量 (R_s) の関係。x: 散布量 (パラメーター)

The relationship between the promoted snow-melt (M_p) and solar radiation (R_s). x: amount of scattering powder (parameter).

いる。

次に融雪促進効果の判定についての考察を行なうため、上記の散布量と融雪経過の資料および日射量を用いて、以下のような整理を行なった。すなわち、各区の日減雪深と自然積雪区(対照区)の日減雪深との差を融雪促進日減雪深 H_{sp} とし、その H_{sp} に積雪表面密度 ρ を乗じたものを $H_{sp} \cdot \rho$ を融雪促進量 $M_p(mm)$ とした。そして M_p と日射量 R_s のそれぞれの積算値の関係を求めてみた。その1例を図-2に示すが各散布量ごとに明確な相関がみとめられる。そして

$$M_p = m(R_s)^n$$

の関係式が成立することが明らかである。上式で m は

材料固有の初期融雪促進を示す数値であり、 n は日射量 R_s の増加(いかえれば日数の経過)による融雪促進量の変化を示す数値で融雪促進効率の持続性を示し、粉材料の粒度、カーボン含有比、親水性などに関係深いものとされた。

各区の M_p と R_s の関係から、各材料別、散布量 x 別の m, n を求めたものが付表-2であり、そのうちの3例を示したものが、図-3である。C1, C2 は共にカーボンブラック、S2 はスノーメルトと称する黒色粉末の一つである。図によって、 m, n の変化傾向をみると一般に散布量 x の増加に応じて、 m は減少し、 n は増加する傾向を示している。

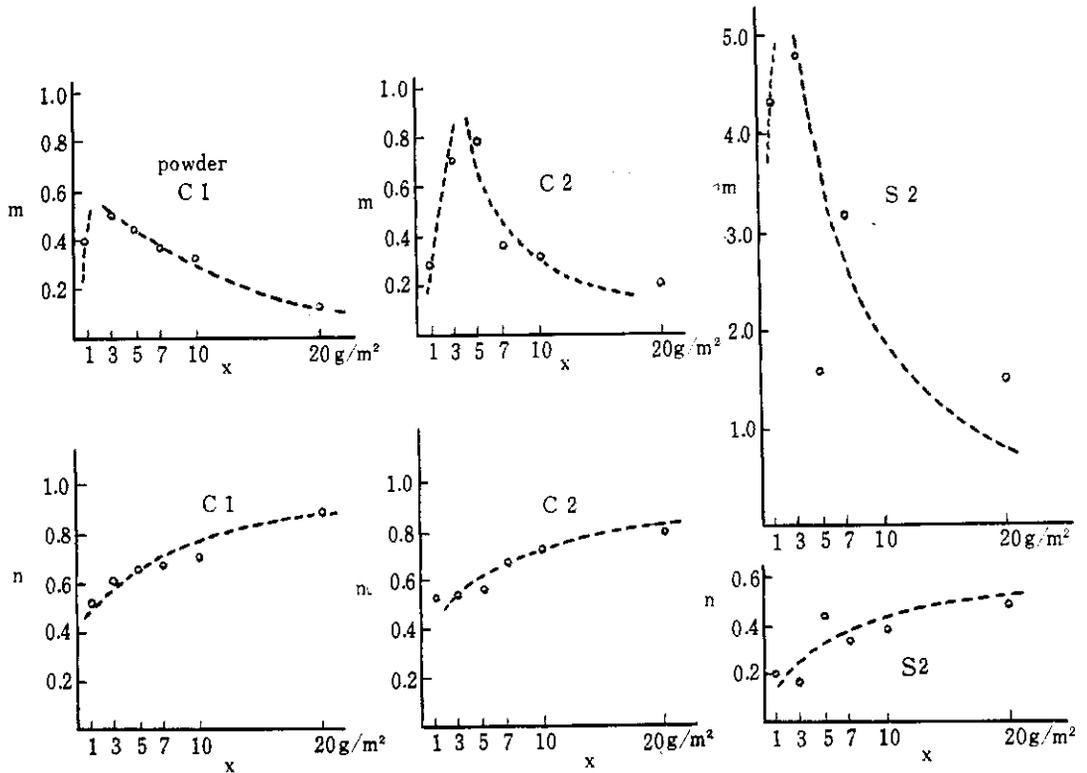


図-3 散布量 (x) による m と n の変化
 m and n as a function of amount of scattering powder (x).

m, n がこのように同じ材料でも散布量に応じて変わることは次のように考察される。まず、 m が散布量の少ない時に大となり、散布量が多くなれば小さくなることは、材料粒子の融雪促進の作用圏の重複が影響してい

ることが考えられる。雪面にまかれた材料粒子は日射を吸収して温度が上り、これと接触している雪粒子をとかすとともに、周囲の雪粒子群に長波放射として熱を与えて、融雪をうながすことが考えられる。この時は放射の

およぶ作用圏が形成される。粒子が疎に散布されている場合は、作用圏は各々独立的に散在するが、粒子が濃密に散布される場合は、作用圏が重複して、材料粒子からの熱を積雪が無駄なく得られ難くなり、折角暖まった材料粒子の熱は冷気温や天空への放射で逃げてしまう。この関係は散布された材料粒子の分布密度が高くなるほど激しくなり、すなわち散布量が多い程この損失が多く、 m が小さくなるものと考察される。S1, S2, C4などは粒子が細かく、 x が増大するにしたがって m の減少が急激である。なお、 x に対する m の傾向として、 x が極端に小さくなると、逆に m が小さくなるが、材料粒子の融雪作用圏の考えよりすれば、 x が0に近づけば、粒子数が少なくなるので積雪に対する融雪能力が低下することは当然である。一方、 n が散布量とともに増大する傾向は、材料粒子の融雪経過に伴う粒子の凝集、材料の親水性による雪層への流下などにより散布量の多い方が団粒形成の数が多くなり、雪面を材料でおおう面積が広がる。また、粒子数が多い程、材料の微粒子が積雪層に流失する分が少なく、雪面に残留定着されることによるものと考えられる。さらに、このことについて言及すれば、雪面にまかれた粉材粒子が融雪の経過に伴って雪面で凝集して、雪面覆度が少なくなり、融雪効率は散布直後から次第に低下することがまず考えられる。この場合、散布量が多い程、凝集による団粒が多く形成され、融雪効率の低下が遅く、したがって、 n が大きくなる傾向がある。材料粒子は雪粒（ざらめゆき 1~3 mm）に比較して小さい（0.2~0.01 mm）（付表）ので融雪の激しい時は融雪水とともに積雪層中へ流去して雪面より消え失せてしまい次第に融雪効果を減ずる。この挙動を見ると雪面への散布粒子数が少ない時は、材料粒子の行動は自由であるが、粒子数が多くなると粒子相互にけん制して行動が阻害され、雪面に残留して定着する分が多くなる。このような現象も散布量が多くなるにしたがって、 n を大きくしている原因と考えられる。

このたび、使用した材料の組成がカーボンだけのものとカーボンに担体として他の鉱石粉砕粒子を混合したものがある。また材料粒子に親水性のものと疎水性のものがある。これらの相異が融雪効果の持続性に影響し、材料間の n の大小に関係しているものと考えられる。疎水性が強く、粒径（団粒径）の大きいCD, C1などの n は全般的に大きい値を示し、親水性で微粒子であるもの（たとえばS1, S2, C4）程 n が小さい。S1, S2, C4などの混合材料は、混合物の微粒子にさらに粒子の細かい（9~300 μ m）カーボンが展着された粒子と残余のカーボ

ン小団粒子よりなっているものと推察される。このような材料が雪面に落下すればカーボンでまぶされた親水性の微粒子は融雪水とともに、積雪層中に流去し、雪面に残留する分が減じて融雪効果の低下をうながすものと見られる。S1, S2 などカーボン量の少ない材料は散布後2~3日頃より雪面の黒化度が減じ、色が薄れてくるのが肉眼でも観察された。

前に戻って融雪促進量と m, n について、解析的に考察してみよう。 m, n は材料によって変わることはもちろんであるが、また材料の散布量（ x ）に対しても変化し、 x を変数とする函数関係がうかがわれる。 m, n と x との関係を示す図—3を見れば、 m は n の x についての一次導函数のような曲線変化の傾向があるが、これについての理論的根拠は考えられないし、また取扱いを簡単にするため、 m, n を各々単独の函数

$$m = Ae^{-Bx} \quad \text{および} \quad n = Cx^D$$

と仮定して、この近似式に含まれる定数の値を求めれば付表—3となる。上式で定数 A, C, D が大きき、 B が小さければ、 m, n が大きくなり、 M_p が大きくなり、融雪効果が大となるわけである。しかし、この定数を見ただけでは、 m, n の大小の判定が困難であり、単に傾向がわかるだけである。それで実際に散布される具体的な散布量（ x ）を5, 10, 20 g/m^2 （ $\text{g}/\text{m}^2 = \text{kg}/10a$ ）として m, n を算出すれば付表—4となる。 m は材料とその散布量による固有の融雪効果の性質を表わす数であり、一般に散布量を増せば、 m は減少する動きを示している。材料間の差異は、散布量によって少し変わるが、 m の大きさの順位としては、S2, S1, C4が1, 2, 3位を占め、次にC2, C1, CS, C3, Tの順で続き、CDは最も小さい。粒径分布より見れば、 m が大きい第1群S2, S1, C4は微粒の多い材料にあたり、第2群のうち、C3, C2, C1は120~250 meshに山のある中微粒に相当し、他は50~120 meshに山のある大微粒に該当する。C, Dの m がとくに小さいのは仮比重がとくに小さく、疎水性が大きいためではないかと考えられる。CSの m は x に無関係のように見える。材料間の差異の極端な例として $x=5$ の場合のS2の m は、C, Dの m の27倍となっている。しかし、散布量を10gに増せば約24倍、20gでは約11倍と差が縮まっている。融雪促進量 $M_p = mR_s^n$ を考える場合に、 R_s の増加により R_s^n が増すので m だけでは M_p の大小、すなわち、融雪促進効果の比較にならないのは当然である。 m の比較とともに、 R_s の増加による R_s^n の比較、すなわち、効果の持続性の比較をしなければ、最終的效果判定の目的は達せられない。

融雪促進効果の持続性を比較する方法として単位日射量を受けた時の融雪促進量，すなわち， M_p/R_s を融雪促進率とし，これが半減する期間（日射量の積算値 R_s で置き替えて考える）についてあたってみる。半減するまでの積算日射量を R_s^* ，それまでの融雪促進量を M_p^* とすれば

$$\frac{M_p}{R_s} = m \cdot R_s^{n-1}$$

$$\frac{M_p^*}{R_s^*} = m \cdot (R_s^*)^{n-1}$$

また

$$\frac{M_p^*}{R_s^*} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_p}{R_s}$$

の関係より，半減するまでの日射量は

$$R_s^* = R_s \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

となる。散布後の R_s の値により R_s^* が異なり， R_s が小さい時は，半減が速やかに行なわれ，大きくなるにしたがって緩慢となる。散布直後より R_s が積算され，時間的にいって数分または数時間で急激に減衰するが効率半減の基準として，実際の融雪促進技術として，1日単位を採るのが妥当であろう。散布後1日間の日射量を基準として，これを R_{s0} とし，上式の R_s を R_{s0} におきかえて，散布量，粉材別の R_s^* を算出すれば付表—5 となり， n が x に応じて増加するので R_s^* も x が大きくなれば増加する。すなわち，散布量を多くすれば融雪促進効率の減衰のしかたが小さくなる。

さらに，効率減衰のしかたを具体的に表現するために半減期を日数 (d) で示してみる。

散布時期を2月中旬と3月上旬の場合を考え，各粉材の散布量を5, 10, 20 g/m² とした時の効率半減日数を計算する。この計算には日射量の時期的な変化を知る必要がある。それで積雪地方の代表として札幌，秋田，富山の R_s の半月平均値の10か年平均をとり，1~4月の期間についてあたって見たところ，ほぼ直線変化をしているので日射量の1日当りの増加量は 2.5 cal/cm² と求められた。散布日の日射量を R_{s0} とすれば，散布後 d 日目の日射量の積算値は

$$R_{s0} \cdot d + \frac{2.5}{2} d(d-1)$$

となる。この値が R_s^* と等しくなる時の d が効率半減期間（日）として求められる。前出の3地区の日射量の時期的変化より2月中旬の日射量は 232.5 cal/cm²，3月

上旬のものは 277.5 cal/cm² と求められるので，これを R_{s0} として d を求めれば付表—6 の値となる。たとえば散布粉材を C1 とし2月中旬に 20 g/m² で散布した場合の融雪促進の効率は日を追うて減衰し，42日後には効率は散布当日の半分になってしまう。また，3月上旬に 10 g/cm² 散布すれば14日で半減するということである。CD を $x=10$ 以上散布した場合，減衰が遅く，消雪期までには半減に達しないものと見られる。

以上，各散布材料の融雪促進効果と m , n について考察を加えてきたが，これらを総合すれば散布の初期に効果があってもその効果の持続性のないものと，散布の初期にはさほど効果があがらないが持久性のある材料とがあることが判然とした。前者のように，急性的な効果のある材料としては，S2, S1, C4 など，後者の慢性的なものとしては，CD, C1, C2 などで，他は中間的な性質を示している。

38年度

38年度は前年度より効果的と考えられる粉材 TB_R, TB_B, CA, CCM を採用し，参考品とし前年融雪効果の最もよい C1 と散布の容易な S2 を加え，さらに乾燥土（クロボク）(K)，肥料の石灰窒素 (N) も含めて前年同様の実験を行なった。現場実験を3回と室内実験1回を加えて計4回にわたって各粉材の融雪実験を行なった。

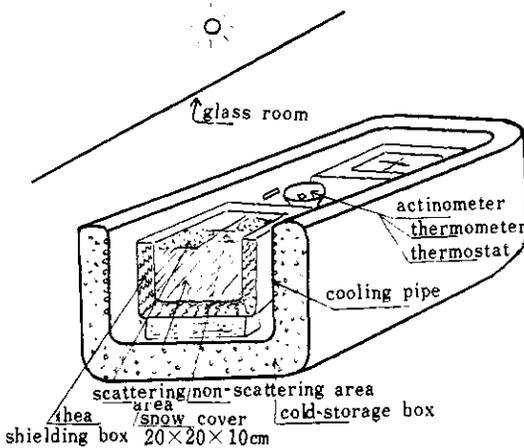
(a) 現場実験第1回として高田にて39年3月4~7日に実施したが，積雪が少なく，3日目より地面が現われた。結果として散布直後の効果がわかった程度で，TB_R と CA とはほぼ同じで，CA にやや持続性が認められ，CCM は前者の50~70%の効果となった。

(b) 第2回目は，関山地区大洞原（後記）での実験である。3月9日に散布したが，その直後より降雪のため散布面が新雪でおおわれ十分な比較はできなかった。ただ，効果の大きい粉材の散布区はわずかの新雪の場合は新雪をとおして融雪促進が行なわれ，散布面の露出程度に差が現われた。この露出度の比較により融雪効果を見れば，C1, TB_R, S2, CA, CCM, K の順であった。

(c) 第3回目は高標地（830 m）の関温泉付近の残雪地に実験場をうつして前回同様の実験を4月6日より17日にかけて行なった。天候的には恵まれたが残雪地に微地形的なむらがあり，融雪経過をはなはだしく乱し，数量的な結果は得られず，融雪性能より見れば，C1, TB_R, CA, S2, CCM, K の順であることを知るとどまった。

(d) 上のように現場実験は悪条件のため十分な目的

を果せなかったので、積雪を高田の試験場低温室に貯蔵し、6月より10月にかけて、図—4の装置で室内実験を行なった。このような装置では長期の融雪経過を調べることは無理なので、80 cal/cm²の日射に対する融雪促進量を実測して付表—7の結果を得た。



図—4 室内実験装置
Apparatus of the indoor experiment.

以上の融雪実験を総括して優位なものより順位と大略的な比率をつければ、付表—8となり、前年度最優秀のC1に対してTB系とCAは80%、S2、CCMは60%台の効果が認められた。

以上、2冬の実験より見て、等量の散布であれば純カーボンブラックの融雪効果が優れ、副産物的カーボン含有粉材がこれに続き、土（最も効果的なクロボク）はカーボンの約半分程度（野外実験では30~40%）の効果しかないことを知った。しかし、ヘリコプターよりの散布より見れば後記のように純カーボンは最適粉材とはいえない。

2.2 ヘリコプターによる粉材の散布

ヘリコプターを利用して大面積に粉体を散布することは、農業面では農薬散布において事業化されているのでこの方面の技術を参考にすればよい。しかし、農薬散布とは散布の際の環境、散布材料、散布量、散布目的が異なるので、これらについてあたって見る必要がある。

高田における散布予備実験（農林航空協会よりの委託研究）と37年、38年の大規模現地実験（長岡、富山実験）（関山大洞原実験）において得られた資料をもって記述する。

使用機種はいずれもベル47—G 2型ヘリコプター、散

布装置は農薬散布用の全日空K.K.、朝日航空K.K.、農林ヘリK.K.ダスターキット（いずれも同型）および融雪粉材用として改造した農林ヘリK.K.のダスターキットを使用した。

実施した試験は、ダスターよりの各粉材の吐出の良否、粉材の空中における分散、落下の状況、散布量と雪面への落下定着の量および落下率、散布区の形と散布飛行所要時間の関係などについてである。

2.2.1 吐出試験

散布する粉材の仮比重は農薬よりも種類による幅が大きく、0.2より1.0以上であり、散布量は農薬の1.5~3.0 kg/10a に対して、5~20 kg/10a で数倍必要である。散布量が多いので吐出がよくないと単位面積あたりの散布に長時間かかり不利である。ヘリ散布の場合、粉材の融雪促進効果に匹敵する重要さがこの吐出性の良否にある。

吐出量の測定はダスターのホッパー下部にあるシャッター開度を一定（全開）にして散布飛行をし、吐出開始より終了までの時間を測り、これと粉材の積載量より算出したものである。予備実験と現地大規模散布実験によって得られた結果は付表—9に示してある。同じ粉材でも吐出性に幅があるがこの原因として積載量の相異、ダスターの個性、粉材の乾湿や不均一性などが考えられるが、大きな偏差となる原因は散布終了時の決め方によるものと考えられる。3実験の結果を総括して各粉材の吐出量平均値を示せば次の値となる。

表—4 各粒材の吐出量
Discharge rate of powder.

年度	37							38			
粉材	S1	S2	C1	C2	C3	T	CS	CCM	TB _R	TB _R	CA
吐出量 (平均値)	94	85	24	32	25	78	52	65	35	62	60
	kg/min										

吐出量と仮比重

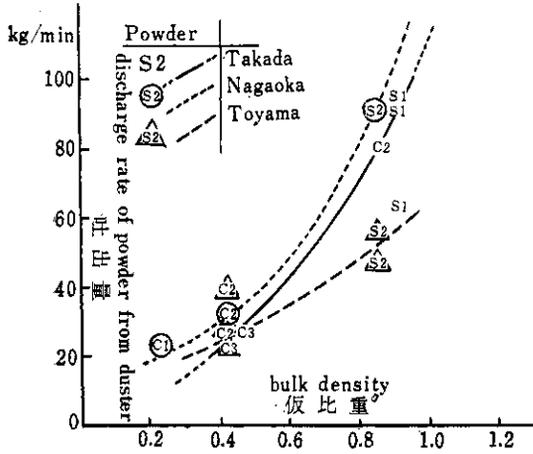
吐出量と仮比重の関係図は図—5となり、一般に仮比重の小さいものは吐出が悪い傾向を示している。

吐出量と安息角

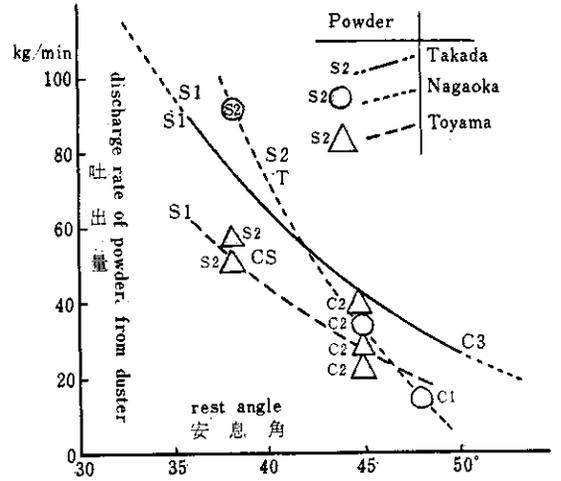
吐出量と安息角（摩擦係数）との関係図は図—6となり、一般に安息角の大きいもの程吐出が悪い傾向を示している。

ダスターの改造

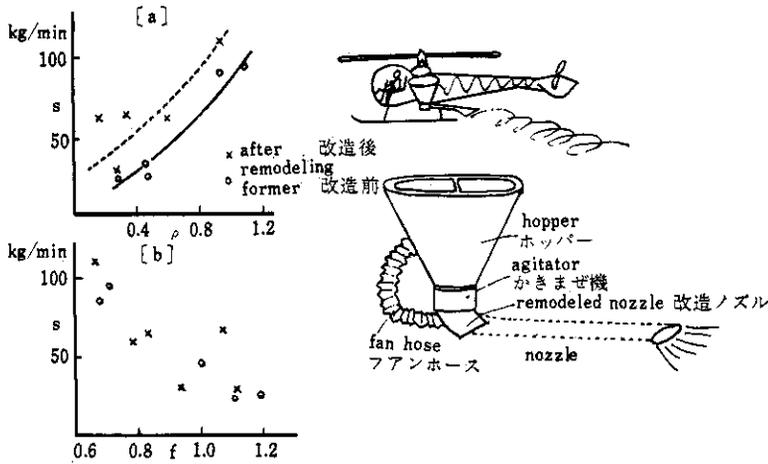
37年度の実験により融雪効果の大きい純カーボンは吐出が悪い結果となったので、38年度はダスターの改造を



図—5 吐出量と仮比重との関係
The relationship between bulk density and discharge rate of powder from duster.



図—6 吐出量と安息角との関係
The relationship between rest angle and discharge rate of powder from duster.



図—7 改造後の性能の変化
吐出量 (s) と仮比重 (ρ) [a], 摩擦係数 (f) [b] との関係
Duster performance formerly and after remodeling.
Relationships of discharge rate of powder (s) to bulk density (ρ) [a] and coefficient of friction (f) [b].

試み、ヘリコプター会社に改造を依頼したが、経費の都合で大改造はできず、ノズルの改造と粉材を噴出させるファンの強化を計った。改造機の吐出実験の結果は図—

7となり、吐出量と仮比重との関係図より見れば、吐出はやや良くなったようであるが、吐出量と摩擦係数との関係図では改良の傾向は認めがたい。昨冬と同じ粉材

S2, C1 の吐出量を比較すれば、吐出性のよい S2 では改良型が優れ、吐出性の悪い C1 では逆の関係になっている。吐出性のよい粉はシャッターの開度を大きくした場合、かきまぜ機より噴出管に落下堆積した粉がホッパーよりの粉の流下を妨げていたのが、ノズル管の短縮とファンの強力化によりよく粉を排出して、ホッパーより自由に粉を流下させる結果として吐出がよくなったのではないかと考えられる。吐出性の悪い粉はホッパーの中の粉の流動がにぶいのでホッパーの流下量が少なく、ノズルやファンが変わっても吐出量の増加には影響を与えなかったのではないかと推測する。

ホッパーよりの粉体の流下については二、三の実験式が求められているがその一例として Deming & Mehning の式を簡単な形に書き替えて引用すれば、

$$Q = \frac{\rho}{\mu \cdot f_1(d, D, \mu)} \times \frac{D^5}{f_2(\theta)} \times 10^6 \text{ kg/min}$$

となる。Q は流下量、 ρ , μ , d は粉の仮比重、摩擦係数、平均粒径であり、 D , θ はホッパーのオリフィスの直径と円錐頂角の半分である。上式において $f_1(d, D, \mu)$ はこの場合用いられる粉とホッパーから見て、0.05前後の数となるので粉材が同じであれば、ホッパーのオリフィスを大きくするか、円錐の角度を小さくしなければ流下量は大きくならないことになる。この点より見ればこのたびの改良型はホッパーの改造が行なわれていないので吐出の悪い粉に対しては吐出性能をあげるには効果がなかったものと考えられる。

2.2.2 散布試験

散布飛行諸元

融雪粉材散布のヘリコプター飛行基準としては高田における予備実験の結果

(a) 飛行高度——雪上飛行の安全性より 10 m を規準とした。雪面凹凸判別が容易でないため、農業散布の場合のように 3~7 m では危険度が大きく、また農業のようにヘリコプターのローターによるダウンウォッシュの必要がないので低く飛ばなくともよいためである。

(b) 飛行速度——散布量が農業の場合よりも多いため速度は遅い方がよいが安全低速度として 48~56 km/hr (30~35 mi/hr) とした。

(c) 風速限界——粉材の落下より見て、風速 (雪面上 1.5 m) 4 m/sec 以上では区内に粉を落下させることが困難である。風速は 3 m/sec 以下が望ましい。

粉材の分散

粒度が小さく、団粒化の少ない粉材の分散は良好であ

るが、粗粒と細粒の混合したものは風の息などにより空中での粉の分散が乱れ、雪面には縞模様となって落下する傾向があり、カーボンに他の粉材を混じたものでは、混合物の粒度の大きいものは空中で分離して風のある時は混合物だけが区内に落下し、カーボンの細粒は区外に漂流するのが認められた。

散布区の形と散布飛行時間

ヘリコプターで矩形の区域に所要の散布量を散布するのに反復飛行回数がどうなるかについて、このたび最も多く散布した CCM を例としてあためみる。

まず、反復飛行回数 (n) は矩形の短辺 (b) が長くなれば当然多くなるわけであるが実際の結果は図-8に示すような結果となった。同じ散布量の場合は n と b は一次比例関係で、

$$n_{100} = (b - 19.2) / 7.7 \dots \dots \text{散布量 } 100 \text{ kg/ha}$$

$$n_{200} = (b - 0.4) / 5.6 \dots \dots \text{ " } 200 \text{ kg/ha}$$

となったが、散布濃度と n は必ずしも比例しないで、濃度を増せば n の増加は少なくなる傾向を示している。この理由はつまびらかでない。

次に、長辺の長さ (l) と単位面積あたりの飛行時間 (t/A) の関係は図-9であるが、 l が図で見られるように特定の所にかたよっていたので、広範囲の実験値が得

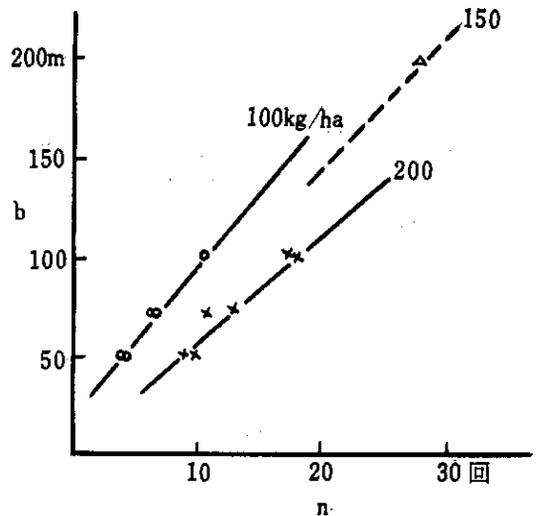


図-8 反復飛行回数 (n) と散布区の短辺 (b) の関係

The relationship between repetition frequency of flight (n) and length of short side of scattering area (b).

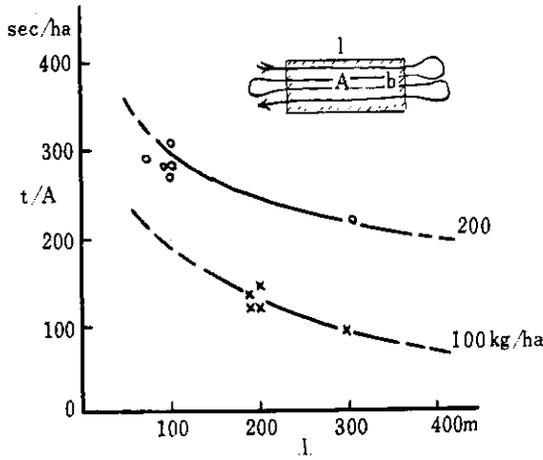


図-9 散布飛行時間 (t/A) と散布区の長辺 (l) との関係
The relationship between flight time for scattering per ha (t/A) and length of long side of scattering area (l).

られず推定線で図示してある。これより知られることは、 l が長ければ同じ面積の散布には飛行時間は短縮され、この傾向は l が小さい範囲でいちじるしい。また散布濃度の大きい程この傾向は強調される。この理由は l が長ければヘリコプターの旋回回数が少なくなるのでこの結果になったものと考えられる。この点よりすれば散布区は l を長くすべきである。

粉材の吐出性と散布飛行時間

粉材の吐出性が悪ければ定量の散布に長い飛行時間を要することは当然であるが、実験資料よりこの関係を示したのが図-10である。図で見られるように消雪効果のほとんど等しい(後記) TBR と TBB において、 TBB 100 kg/ha 散布所要時間は 1 ha につき約 300 sec であるのに対し TBR では約 170 sec でほぼ半分で済むということになる。これを見てもヘリ散布のように行動の速い機械力散布では粉材の吐出いかんがその経済性を強く動かすことが察せられる。

散布量と落下量

ヘリ散布のように空中からある区画の散布区に粉材をまく場合は散布量が必ずしも落下量として雪面に定着するとは限らない。とくに粉材が軽く、風の強い時は散布区という標的に粉材の全部は落下せずに区域外に流れ去

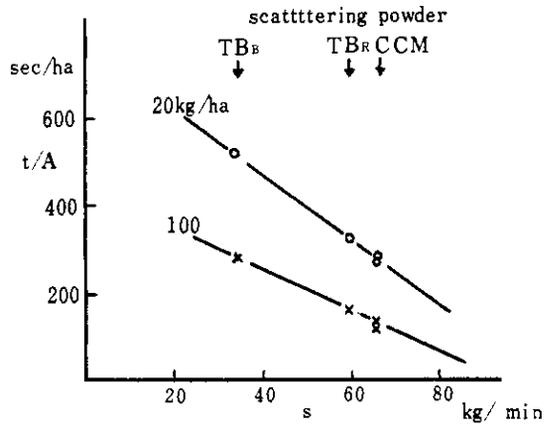


図-10 散布飛行時間 (t/A) と吐出量との関係
The relationship between flight time for scattering per ha (t/A) and discharge rate of powder (s), $l=100$ to 190 m.

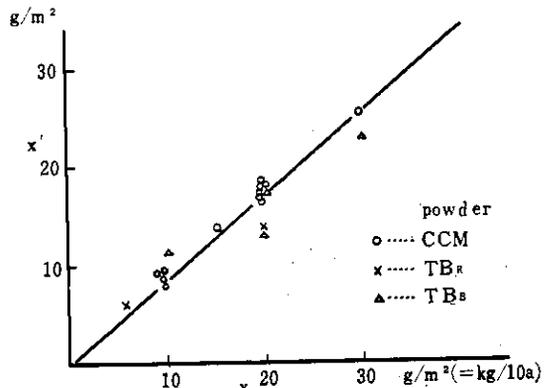
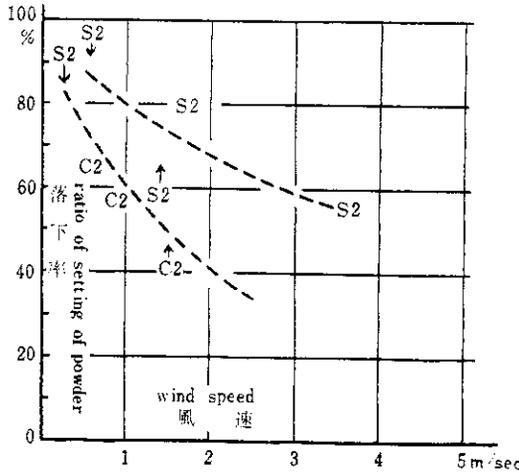


図-11 散布量 (x) と落下量 (x') の関係
The relationship between amount of scattering powder (x) and one settled on the snow surface (x').

る分と上空の乱流に乗って漂流し、霧散する分が多くなる。

38年度の実験より散布量と落下量の関係を図示したのが図-11である。落下量は写真比較判定によって求めたものである。同図を見ると散布量の大小にかかわらず落下量は84%で直線関係となり、また仮比重の異なる材料

間にもその差はめりょうには認められなかった。わずかに軽い粉材であるTB系の落下量が低下している傾向があるだけであった。この実験の際は無風に近い状態(0~0.5 m/sec)であったのでこのような結果になったものと推察される。37年度の例は図—12となり、落下率



図—12 粉材の落下率と風速の関係
Relation between wind speed and ratio of settling of powder.

は風によって低下することが知られる。この落下率は散布区の面積にも関係し、散布区が小さいほど散布技術は困難となり、落下率は低下し、大規模面積では大きくなるはずである。上の例は、0.5~2 haの面積を対象としたものである。

2.3 航空散布材としての融雪促進粉材

ヘリコプターや他の航空機で粉材を散布するのに最適条件としては散布が容易であり、融雪促進効果の大きいものとなる。37年度に使用した粉材では、表—5の前半

で見られるように吐出が良好なるものは融雪効果が劣り、融雪効果の優れた粉材は吐出時間が長くなり飛行に長い時間を要した。38年度は上の点を考慮して粉材を選択し、表—5の後半で見るとよいものを発見した。中でもTB_B、CAは両性質が目的に沿うものと見られた。

2.4 アルベド法による落下量の判定

ある粉を雪面に散布した場合、融雪促進に直接関係するのは散布量ではなく落下量である。たとえば20 kg/10aの散布を行っても風などで所定の区域には15 kg/10aしか落下していないとなれば融雪促進は15 kg/10aでしか行なわれないのは当然である。計画的な融雪促進を実施しようとする場合、所定量の粉が雪面に落下しているかどうかを見極めるためには落下量を正確に、また迅速に測定する必要がある。

農薬ヘリ散布の例では落下量の測定には散布区内にシャーレ、カルトンまたは粘着紙(粒のとき)などを置いて粉の量を秤量する方法や、判定用の粉材濃淡写真と黒紙上の落下粉材とを照合する方法などが用いられている。融雪促進の場合は前者の方法は実施が困難であり、また迅速性を欠き適当な方法とは言えない。後者は測点を多数選ぶ必要があり、また個人差をまぬがれない。

白い雪面へ黒い粉材を散布する場合は、散布雪面のアルベドが大幅に変化する。この点を利用して落下量を判定する方法が考えられる。この方法を迅速に行なうにはあらかじめ落下量とアルベドの関係を求めて置き、散布用のヘリコプターにアルベドを直示するような計器を乗せて空中より直接測定するのが良策と考えられる。散布後直ちに落下量が判明するので補正散布も同時に可能となる。

落下量とアルベドの関係

落下量に対してアルベドがどのように変わるかをまずあたって見た。地上(雪上)で、1, 3, 5, 10, 20, 40 g/m²の正確な落下量(この場合散布量と同じ)の散布区を設けて、雪上20 cmでアルベドを測定した。その結

表—5 各粉材の吐出量と融雪率
Discharge rate of powder and melting rate of snow.

粉 材	37 年 度 使 用							38 年 度 使 用			
	S1	S2	C1	C2	C3	T	CS	CCM	TB _B	TB _R	CA
吐 出 量 (平均)	94*	85*	24	32	25	78*	52	65*	35	62*	kg/min 60*
融 雪 率 (C1を100として)	38	34	100†	92†	69	36	46	61	85†	84†	89†

* 吐出量 60 kg/10 a 以上のもの、† 融雪率 80%以上のもの。

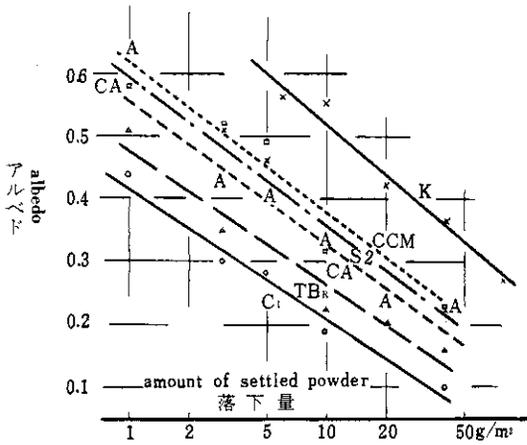


図-13 落下量 (散布量) とアルベドの関係
Relation between amount of settled powder and albedo.

果は図-13である。図に示されるように、各粉材ごとに落下量の増加と共にアルベドは指数関数としてめいりよ

うに低下することが実証された。そして融雪効果の大きいもの程一般にアルベドが小さいことがうかがわれた。

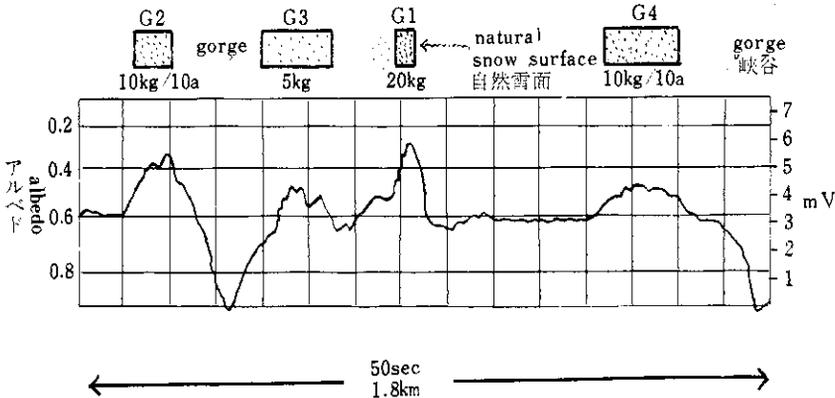
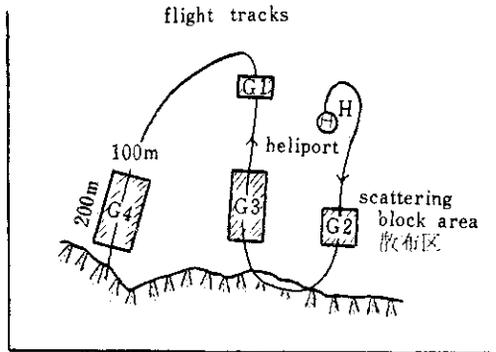
アルベド計の試作

アルベドを測定する場合、通例は日射計で日射量を測り、次に日射計を下向きにして雪面に向けて反射量を測り、両者の比率を算出する方法でアルベドを定めている。雲のある時は両者の測定中に日射量の変動があり、測定が困難であり不正確となる。2個の測器を上下に向けて同時に記録させればこの点は解決する。しかも両者の値の比率を記録するように設計すればアルベドは直示可能になる。

上記の目的のため日射計として、特性の同じ CdS を使用し、上下2個を1組として、これをブリッジに組み、上下の放射量によって生ずる不平衡電圧を電池駆動のミリボルト記録計に記録させるアルベド計を試作した。この計器をヘリコプターに乗せ、散布実験地の上空を飛びながら空中より雪面のアルベドを記録させる実験をした結果は図-14に示してある。同図の右上の図は散布区の平面図と航跡である。ヘリポートを飛び立ち時速120 km

図-14 ヘリコプターによる散布区のアルベドの空中よりの測定
関山大洞原, 1964.3.26
飛行高度 10 m
飛行速度 120 km/hr

Aerial measurement by helicopter of albedo on the scattering area in Sekiyama Daidohara, 26 March 1964.
Flight height: 10 m;
flying speed: 120 km/hr.



高度 10 m で G2 区の上を直線飛行し、旋回して G3, G1 上を通過、再び旋回して G4 を通り谷上(深さ 100 m の箱状の谷)に出た。その間の時間は 50 sec、飛行距離は 1.8 km である。その時のアルベドの記録は同図の下方のグラフであるが図の上にグラフに対応して各散布区を相対的に入れてある。図の左測より G2 に入る前の無散布自然雪面のアルベドは、0.59~0.62 を示し、G2 通過中は 0.33~0.37、次にアルベドは 0.9 に近い値を記録しているが、谷上空における旋回時の値である。この時はヘリコプターが傾斜し上向き CdS への入射光が水平飛行時より少なくなり下向きの CdS への入射光が増加した結果としてこのような値を指示したものと考えられる。次に G3 の通過では約 0.48~0.52 で凹凸曲線となっているがこれは明らかにまきムラと対応している。G1 は 0.29 の値を示すピークとなっている。これは散布幅が 50 m しかないので散布面上の飛行が短く、高度が高いためである。その後再び旋回したので記録に凹部が描かれている。次に自然雪面上の水平飛行にうつったがアルベドは 0.62 を記録し、G4 では 0.47 前後を示している。この値と地上で測定した値とを比較すれば表—6 となる。

表—6 空中および地上よりのアルベド測定値
Aerial and ground measurements of albedo.

散布区	G2	G3	G1	G4	
粉 材	CA	CA	CA	CCM	
落 下 量	10	5	20	10 g/m ²	
アルベド	地 上	0.33	0.41	0.26	0.38
	空 中	0.33~37	0.48~52	0.29	0.46~48

空中よりの測定値が一般に地上のものより大きい値を示している。この原因は散布量を落下量と見なしたこと、第 2 に計器の位置が高いので散布区域外の放射量が横から入り込みアルベドが実際より大きな値を示すものと考えられる。このことは散布面積が有限である限りこのたびの装置ではさげられない欠点である。この差は飛行高度 (h) が高ければ高い程大きくなり次のような関係になるはずである。

$$h(\tan w/2 - \tan \theta/2)(\alpha_0 - \alpha_B)$$

上式で θ は散布雪面に張る h よりの立体角、 w は計器の開口角(入射角の限界角)、 α_0 と α_B は無散布雪面と散布雪面の真のアルベドである。この差を小さくするには $w = \theta$ にすればよい。散布面の最小測定面積の直径を D とすれば $\tan w/2 = D/2h$ となり、実際的には $D = 10$ m, $h = 10$ m 程度が適当であるので $w = 60^\circ$ 程度に

とるのがよいものと考えられる。このたびの計器の w は約 160° あったのでこの点改良の必要がある。このように反射光の測定に指向性を持つようにすれば実用に耐える見とおしがあった。

3. 大規模消費の現地実験

3.1 目的および計画

ヘリコプター利用による融雪促進について一応の予備的実験を行なったが実際に大規模地区に適用する際に、種々の技術的な問題が介在することが予想される。これらの問題を明らかにし、解決するため下記のように大規模消費現地実験を計画した。

37年度は初めての実験のため各地区からの要望もあり、雪下作物の選択のこともあり、下記のように分離して実施した。

表—7 現地実験
Outline of field experiment.

実験地区	面積	散布材料	雪下作物	協力機関
長岡市新潟県農試	2.5ha	C1, C2, S2	レンゲ(水田)	県, 農試
〃 日越農協	6~9	S2	雪下カンラン	県, 農協
新津市外横越農協	6~9	C2, S2	果樹, ソ菜	県, 農試, 農協
富山市富山農試	4~5	C2, S2	レンゲ(水田)	県, 農試

散布材料を C2, S2 にしほり、それに C1 を加えた。C2 は吐出では C 系統中最も優れ、C1 に次ぐ融雪効果があること。S2 よりは S1 の方が融雪効果、吐出しづれも少し優れたが製品の都合で S2 とした。C1 は吐出は悪いが融雪効果が高いので加えてみた。

3.2 散布の実施と融雪経過

大面積に迅速に散布するために各作業を統制下に行なう必要があるので、あらかじめ散布区の境界に赤旗をたて、散布粉材をヘリポートに用意し、散布実施には下記のような作業人員を配置した。

総括指揮 1名 指揮、吐出その他の記録、積込指示、パイロット、整備員との連絡
フラッグマン 2名 ヘリコプターの誘導
調査 2名 散布前の雪面の調査、散布後の落下量の調査

気象観測 1~2名 気象観測

積込 人夫 4名 散布材料の積込み

警備および整理人夫 2名 ヘリポート付近の警備と見学者の整理

各実験の担当者および協力者は表—8のとおりである。各地区の散布経過と融雪経過は次記のとおりである。
長岡市県農試実験(37年度)

表—8 各地区の実験担当者と協力者
 Researchers and collaborators in
 various test fields.

実験場所	担当者および協力者
長岡市 新潟県農試	大沼匡之, 小林一雄, 岡部 俊 (北陸農試), 堀田良, 藤岡澄行, 今井梯三 (県農試), 岸野賢一 (農林航空協会), 石井, 山田, 片田江 (全日空)
長岡市 日越農協農場	岡部 俊 (北陸農試), 岸野賢一 (農林航空協会), 池崎, 石橋 (日越農協), 石井, 山田 (全日空)
新津市 横越農協農場	小林一雄, 大沼匡之 (北陸農試), 佐々木正三郎, 近藤 亨 (県農試), 横越農協関係者, 石井, 山田 (全日空)
富山市 富山県農試 機械化実験農場	中村千里, 高橋久三郎, 金田忠吉, 大沼匡之 (北陸農試), 伊東達夫, 山下律也, 猪原明成 (県農試), 竜崎, 波辺 (朝日ヘリ)
妙高村 関山 大洞原開拓農協農場	大沼匡之, 中村千里, 小林一雄, 高橋久三郎 (北陸農試), 岸野賢一 (農林航空協会), 早川春兼, 野月善七, 曾根栄澄 (農林ヘリ), 大洞原農協

実験区は試験場の水田で、建物より約 150~300 m 離れ、200~300 m 外域に高圧線があるだけで他に障害物はない。実験区は本来の試験区に支障をきたすおそれがあるため予定より狭められ、図—15のように50×100 m の区を 10 m 間隔で 3区設け、図に示す粉材を図示のように散布した。散布は3月14日に行ない、天候は晴、風速は 1.5 m/sec で好条件であった。風下の③区より S2 を散布したが、細粉の一部は漂流して行くのが認められた。次に②区に仮比重の小さい C2 を散布したが一部は③区に流れて落下するのが認められ、①区の C1 はさらに軽いため区域外に流れ、②、③区にも落下する分が多かった。落下量を写真判定で比較した結果は①区で

は40%、②区でも40%でそれに①区の10%が加わり50%の落下率も見られた。③区の S2 の落下は70%に達し、これに②区と①区よりの漂流落下分が加わり、80%の黒化が検出された。

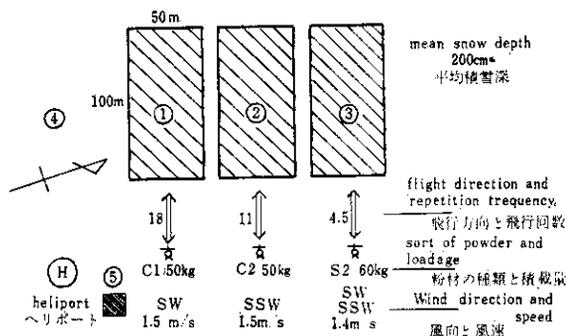
融雪経過を見ると散布後の降雪はわずかに 1~2 cm で順調に融雪した。

長岡市日越農協実験 (37年度)

長岡市の旧市外で斜角 5~7° の西斜面の畠地に図—16の要領で同日午後12時に S2 を散布した。100×300 m の2区とこれを横断する区を計画して散布濃度の大小区を設けた。一部散布を遅えて幅 120 m になった区もあった。散布時の天候は午前と同様に好天であり、風速は落ち 0.3 m/sec 前後で無風に近かった。ヘリコプターが斜面に平行に飛んだ時のダウンオッシュを見ると、傾斜の下の方の粉の流れが長く、上の方が短くなるのが認められた。粉材が重く、風速が弱かったので落下率は90~95%に達した。傾斜地で排水がよく、融雪は割合に早く行なわれた。

新津市外横越農協実験 (37年度)

阿賀野川のメアンダー地で実験区はモモを主とする果樹園と畑地である。散布は前2区と同日で15時45分より約1時間半にわたって行なわれた。図—17に示す要領で散布した。散布時の風速は平均1~2 m/sec であったが、時々風の息により粉材の落下分散に差があり、「まきむら」を生じた。樹高が雪上 2~3 m あったので、飛行高度は10~15 m と高くとったので漂流分も多かった。落下率の判定は夕刻のため不可能であったが、かなり低いものと察せられた。



図—15 現地実験の散布区分 (長岡, 1963. 3. 14)
 Scattering block of field experiment in Nagaoka, 14 March 1963.

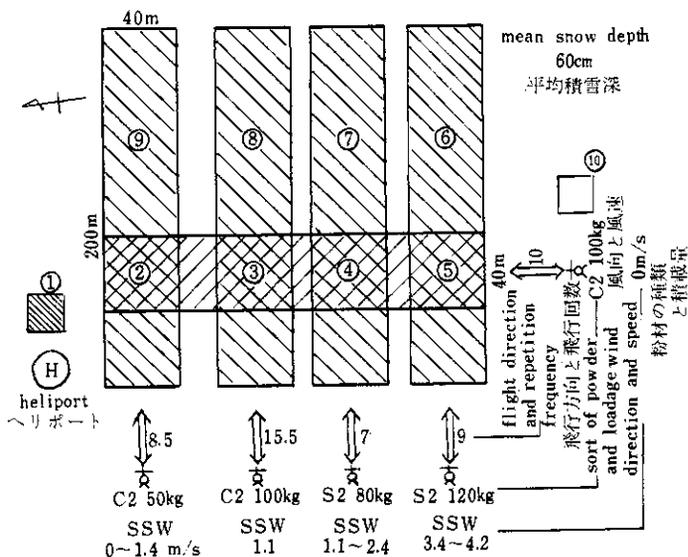


図-18 現地実験の散布区分 (富山, 1963. 3. 15)
Scattering block of field experiment in Toyama, 15 March 1963.

後半は 0~1 m の無風状態のもとで行なった。図-18に示す要領で S2, C2 の粉材を散布量を変えて散布し、さらに濃淡をつけるため横断散布を C2 で行なった。落下量の調査は 2 名で区ごとに 10 点ずつ写真比較によって行なったがその平均値は表-9 となった。

表-9 落下率と風速
Relation between settling rate of powder and wind speed.

区番号	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
散布量 kg/10 a	S2			10	15	15	10	
	C2	18.8	25	12.5	12.5		12.5	6.3
落下量 kg/10 a	8.5	11.9	10.6*	11.4*	7.9	7.7	7.3	4.0
落下率 %	43	48	47*	42	53	77	58	64
風速 m/sec	0.7	1.1	1.8	3.8	3.8	1.8	1.1	0.7

* は C2 に換算。

仮比重の大きいものは風速が大きくても落下率はよい。

妙高山麓大洞原実験 (38年度)

散布実験地は妙高山麓の標高 500 m の緩斜面で約 75 ha の地内に区数 19, 面積約 25 ha の実験区に 4 種 (TB_R, TB_B, CA, CCM) の粉材を 39 年 3 月 5 日に散布した。(図-19 参照) 散布日はほとんど無風状態の晴天に恵まれ、約 3 時間で完了した。後記のように散布翌

日より降雪が続き、散布面が露出せず融雪効果が得られなかったので 3 月 26 日に実験区の一部約 6 ha に CCM と CA を追加散布した。

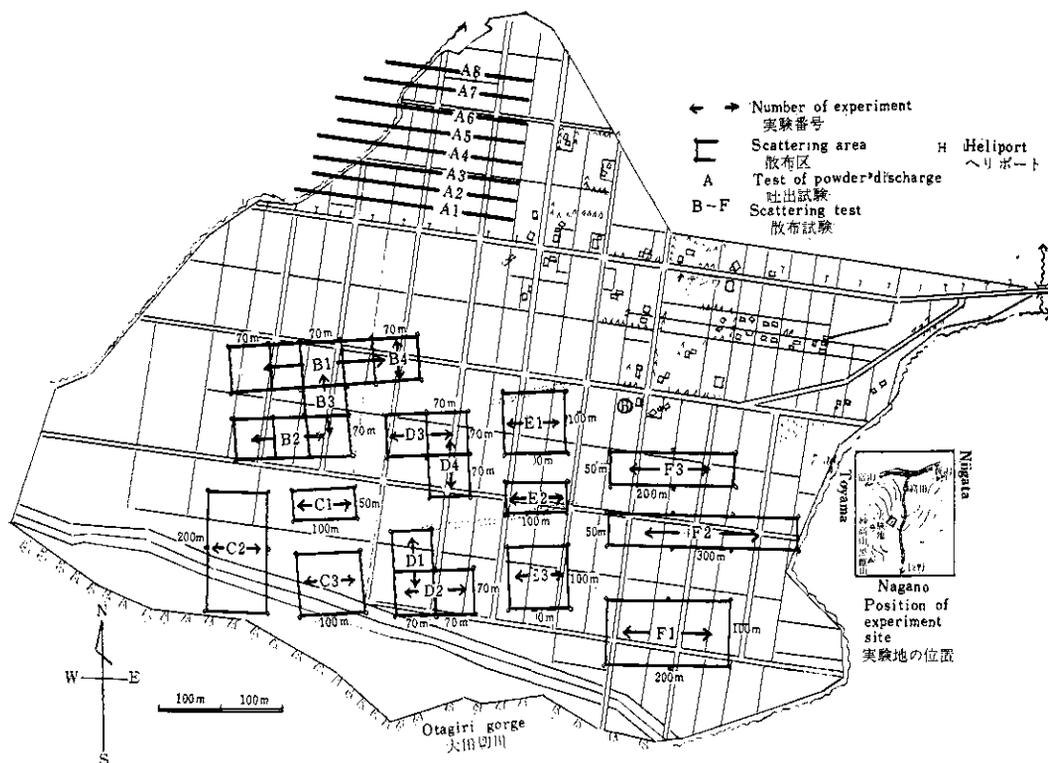
3.3 融雪促進結果と雪下作物への影響

長岡市農試実験

散布時の積雪深は 2 m で表層はざらめゆき、中下層はしまりゆき層で所々に氷板とざらめゆき層を挟んでおり、平均密度は 0.47 g/cm³、したがって積雪水量としては 940 mm を示した。散布後の天候は概して良好で雪どけまで 35 日中雨天 7 日、曇天 5.5 日で他は晴または快晴であった。散布後 2~3 日間は S2 の区が最も早く融雪促進が行なわれたが、その後、C1, S2, C2 の順で進んでいる。しかし散布量は S2, C2, C1 の順で多い。各区の融雪促進量を日数で示せば表-10 となる。各区は必ずしも積雪深が同じでないで、規準の積雪までの減雪深で評価した。

S2 20 kg/10 a の区は手まきの参考区である。

規準の積雪を下層に採った場合に促進日数が低下するのは積雪下層の滞水層(約 25 cm)の影響と考えられる。したがって消雪を早める場合は融雪水の排水をよくする必要がある。なお各区の融雪促進量 M_p と日射量 R_s の関係を示したのが図-20 であり、 $M_p = mR_s^n$ の関係をよく現わしている。この実験区ではレンジに対する消



図—19 大規模融雪促進実験地の散布区分, 1964. 3. 5~6

(新潟県中頸城郡妙高村, 関山大洞原開拓地)

Scattering block of a large-scale experiment site for promotion of the melting of snow in Sekiyama Daidohara, Niigata Prefecture, 5 to 6 March 1964.

表—10 融雪促進日数(長岡)
Promotion of the melting of snow
in Nagaoka.

材 料	C1	C2	S2	S2	
散 布 量	10	10	12	20 kg/10 a	
落 下 量	4	5	7	20	
促 進 日 数	規 準 減 雪 深				
	150 cm	7	6	7	10
	170 cm	6	4	5	9
	190 cm	4	4	4	9

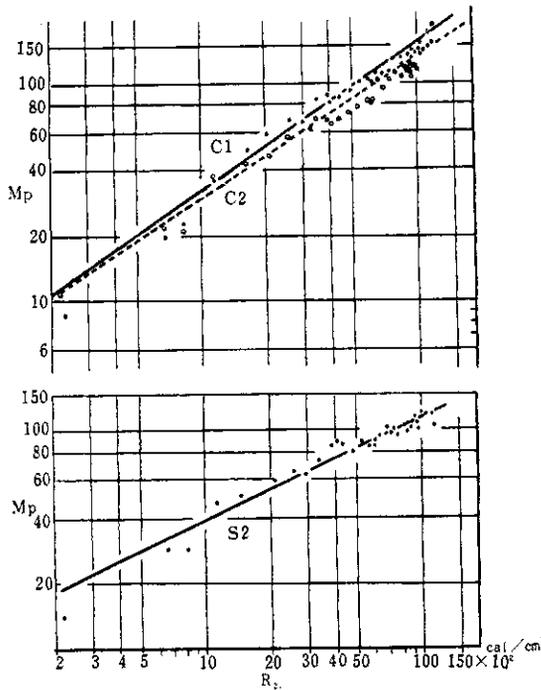
雪効果を調べる予定であったが、他の試験のため散布区にレンゲ圃場を入れることができなかったため目的は達せられなかった。しかし手まき S2 20g/10a の区(根雪日数96日)ではレンゲ生存株数は30%であったのに比し、自然放置区(根雪日数106日)は全滅した。排水を

進め、根雪日数を90日以内に保てばさらに雪害を軽減し得るものと見られた。

長岡市日越農協実験

積雪・天候経過の状況は前地区と同じであるが傾斜地であり、透水性のよい畑地であるため処理区ともに融雪の進み方は早く、散布粉材が S2 という融雪効果の低いものであったが、散布量にしたがって表—11に示す融雪促進が行なわれた。

自然区は3月16日まで残った。落下率は90~95%。この地区は雪下カンラン栽培地であり、平年は3月中下旬に雪を掘って出荷するのであるが、散布区は自然区に対して20~30cmの積雪差があり、雪掘り労力の軽減がなされた。融雪効果の高い粉材を選べば労力軽減を倍加させ得る見通しがついた。なお粉材散布による野菜の汚染を懸念したが、現地報告では何ら支障はないとしている。



図—20 融雪促進量 M_p と日射量 R_s の関係（長岡）

Relation between M_p and R_s in Nagaoka.

M_p : Promoted snow-melt (mm),
 R_s : solar radiation (cal/cm²).

表—11 融雪促進日数（長岡日越）
 Promotion of the melting of snow
 in Nagaoka-Higoshi

区 番 号	②	③	①	④
散 布 量	16.3	10.5	10.0	4.2 kg/10 a
融雪促進日数	7	5	4	3

新津市外構越農協実験

富山市農試実験

上の両区は散布時期がおそく、散布時にすでに積雪60 cm で融雪促進効果を現わすには日数が少なく、2~3日の差しか出なかった。融雪促進量で各区を比較すれば落下量の多い区の順に促進量が多くなっていた。新津地区の果樹に対しては生育に及ぼす程の差はなく、枝や芽の汚染、薬害の心配はないことを知った。富山地区のレン

ゲの被害調査の結果、いずれの区も被害面積率は30~35%であった。レンゲそのものまきむらがいちじるしく、雪腐れ病発生も場所による差がはなはだしく、滞水地の被害が顕著であった。区別の差としては有意差は認められなかった。両地区ともに散布時期を適期に選べば消雪効果の作物への影響は大きく現われたものと考えられる。

妙高山麓大洞原実験（38年度）

散布当時の積雪深は約1 mであったが翌日より降雪が続き、散布面は新雪下に埋まり、3月中旬を過ぎても散布面は表面下20~30 cm にありついに現われず、第2回目の散布を行なった。しかしこの散布のあとも降雪がつづいて3月末になった。3月30日より4月1日にかけての極端なフェーン現象のため気温融雪がはじまり、散布面が30日に現われた。しかし1日に約40~50 cm の融雪のため、散布粉材による放射融雪の効果を現わす時間的余裕もなく4月2日に全く雪が消えた。したがって散布の効果はほとんど認められずに終わった。

4. 大規模消雪に関する今後の問題

農耕地のような大面積の消雪の方法として雪面に黒色粉材を散布することは、熱経済的に見て最も普遍的に優れた方法であることは動かせないものと考えられる。この雪面黒化法を適用するには何で、何を、いつどのようにして散布するかが問題である。このたびヘリコプターを使用して、入手し得た粉材を散布したが、今後さらに効果的にするには次のことが考えられる。

(i) 空中散布 散布用機種としてヘリコプターまたは軽飛行機を使用し得る。ヘリコプターは着陸や小回りに適しているが飛行経費が高いため必ずしも最適なものとはいえない。現在使用している農薬散布のマスターでは吐出性能が悪い。この改良を必要とする。軽飛行機（ストール機）は飛行速度、積載量、飛行経費の点で有利である。これに適当なマスターをつけ、雪上着陸を考えれば将来性あるものと思われる。（今回も実験計画に入れていたがマスターの都合で中止した。）

(ii) 地上散布 中規模の消雪には空中散布よりも地上散布が経費の点で優れているものと考えられる。小型雪上車またはハンドトラクター利用の雪上車を利用し、これに大型マスターを取りつけることが考えられる。この方法の技術的問題の解明は未着手である。

(iii) 粉材 一応空中散布に適した粉材を見出したが、さらに融雪促進効果があがり、吐出性のよいしかも安価な粉材を探索する。とくに融雪効果の持続性の長いものに注目して選択する。または吐出性だけ劣る粉材の

形態を改良して散布を容易にする。

(iv) 落下量判定 計画的消雪の重要なポイントである粉材の落下量判定法を確立する。アルベド計の開発などさしあたり必要である。

(v) 散布時期 時期を失すれば早くとも遅くとも効果があがらない。この適期をつかむことはかかって降雪予想の適確化にある。この点気象の長期予報にまつとこ

ろが大きい。

(vi) 排水 消雪効果をあげるためには対象地区の融雪水の排水をよくして置くことが必要である。

以上の問題を解決しておけば不慮の豪雪にも農業上の雪害軽減の技術的対策が立てられ、雪国における計画的営農の円滑化に資するものと考ええる。

主要参考文献

1. 平田徳太郎等 (1935): 融雪に関する研究. 積雪地方農村経済調査所報告, No. 10.
2. 中谷宇吉郎編 (1949): 融雪促進の総合的研究. 農業物理研究所報告, Ser. 3.
3. 高橋喜平 (1949): 消雪に関する研究. 雪氷, 11, No. 4.
4. 吉田順五等 (1959): 融雪の実験的研究. 低温科学, Ser. 3.
5. 日本雪氷協会編(1955): 融雪, 雪氷の研究, No. 2.
6. 小島忠三郎 (1954): 融雪促進の研究. 農業総合研究所, 雪の研究, No. 235.
7. 関西電力 (1958): 人工融雪について(I~IV). 雪氷, 20, No. 1~4.

付表—1 融雪促進材料の性状

Characteristics of powders scattered for the promotion of the melting of snow.

粉 材	仮比重	安息角	乾燥減量率 110°C 24h	水に対する 性質 沈殿率	カーボン比	混 合 物	粒度分布 (メッシュ透過率)					注
							>32	32~55	55~120	120~250	250>	
C1	0.28	50°	3.0	0	100	0		1	8	46	45	
C2	0.44	45	3.0	75	50	クレー		1	14	60	25	
C3	0.45	50	4.0	30	52	ベントナイト		1	5	52	42	
C4	0.45	45	2.0	40	46	消石灰		1	12	20	67	
S1	1.09	35	2.0	30	24<	?			2	14	85	
S2	0.94	40	1.0	35	24	76			3	46	51	
T	0.66	40	6.0	80	100	0	2	27	45	13	13	角 粒
CD	0.15	40	4.0	0	100	0	1	10	50	16	23	団 粒
CS	0.43	40	4.0	95	100	0	4	13	42	18	23	微粒子
TBR	0.18	40	2.0		46	54	1	3	42	38	16	
TBR	0.18	43	2.0		46	54	4	9	41	25	16	
CCM	0.58	50	2.5		25	75	15	22	43	16	4	
CA	0.44	47			100	0	5	22	52	17	4	

付表-2 各粉材の散布量別の m, n 表
Relation between values of m and n
and amount of scattering powder.

粉材	散布量 g/m ²	散布量					
		1	3	5	7	10	20
C1	m	0.388	0.507	0.449	0.372	0.330	0.115
	n	0.521	0.611	0.648	0.685	0.709	0.880
C2	m	0.289	0.712	0.790	0.376	0.317	0.207
	n	0.528	0.546	0.565	0.681	0.725	0.794
C3	m	0.049	0.224	0.248	0.143	0.255	0.176
	n	0.814	0.668	0.690	0.780	0.724	0.789
C4	m	2.354	2.681	1.592	0.873	0.826	0.227
	n	0.320	0.348	0.450	0.549	0.563	0.771
S1	m	10.090	0.546	0.525	1.254	1.484	0.682
	n	-0.046	0.419	0.442	0.418	0.438	0.575
S2	m	4.354	4.804	1.550	3.169	0.119	1.522
	n	0.194	0.154	0.428	0.337	0.382	0.472
T	m	0.442	0.156	0.261	0.249	0.123	0.191
	n	0.475	0.630	0.631	0.632	0.746	0.722
CD	m	0.156	0.091	0.103	0.095	0.077	0.127
	n	0.713	0.837	0.822	0.854	0.892	0.845
CS	m	0.495	0.215	0.187	0.208	0.244	0.250
	n	0.502	0.640	0.686	0.700	0.709	0.730

付表-3 x (散布量) を変数とする
 m, n の近似式の定数
Constants characteristic of each powder
(A, B, C, D). m and n : coefficients
depending on the amount of
settled powder x .

粉材	定数	$m = Ae^{-Bx}$		$n = Cx^D$	
		A	B	C	D
C1		0.659	0.069	0.051	0.169
C2		0.736	0.071	0.459	0.194
C3		0.264	0.029	0.584	0.111
C4		2.299	0.111	0.270	0.344
S1		1.525	0.028	0.338	0.149
S2		3.035	0.027	0.171	0.346
T		0.213	0.014	0.502	0.136
CD		0.102	0.004	0.747	0.060
CS		0.201	0.000	0.554	0.105

注 明らかに実験のミスと見られる観測値を除外して計算した。

付表-4 m, n の計算値
Calculated values of m and n .

粉材	x m, n	5 g/m ²		10 g/m ²		20 g/m ²	
		m	n	m	n	m	n
C1		0.467	0.657	0.331	0.739	0.166	0.830
C2		0.516	0.626	0.362	0.717	0.178	0.820
C3		0.229	0.715	0.119	0.754	0.148	0.815
C4		1.320	0.470	0.758	0.597	0.250	0.755
S1		1.326	0.430	1.153	0.477	0.692	0.528
S2		2.651	0.298	2.316	0.378	1.768	0.481
T		0.199	0.625	0.185	0.687	0.161	0.754
CD		0.100	0.823	0.098	0.858	0.094	0.894
CS		0.201	0.656	0.201	0.705	0.201	0.754

付表-5 R_s^* の値
Values of R_s^* . ($\times R_{s0}$ cal/cm²)

粉材	x	5 g/m ²	10 g/m ²	20 g/m ²
		C1	7.6	14.3
C2	6.4	11.6	47.0	
C3	11.4	16.7	42.5	
C4	3.7	5.6	16.9	
S1	3.4	3.8	4.3	
S2	2.7	3.1	3.8	
T	6.4	9.2	16.7	
CD	50.2	131.8	91.7	
CS	7.5	10.5	17.5	

(注) $R_s^* = R_{s0} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$

付表-6 融雪促進効率半減期 (d). 単位: 日
Half-value period of the effectiveness of
promotion of snow melting (d).
Unit: days.

粉材	散布期 散布量	3月中旬			3月上旬		
		5 g/m ²	10 g/m ²	20 g/m ²	5 g/m ²	10 g/m ²	20 g/m ²
C1		6	12	42	8	14	50
C2		5	9	34	7	12	42
C3		9	13	31	12	17	40
C4		3	5	14	4	6	17
S1		3	3	3	4	4	4
S2		2	2	3	3	3	4
T		5	8	13	7	9	17
CD		36	(80)	(253)	45	(100)	(310)
CS		9	9	14	8	11	18

(注) 2月20日の平均日射量 $R_{s0} = 232.5$ cal/cm²
3月10日の " $R_{s0} = 277.5$ cal/cm²
とすれば

$R_s^* = R_{s0} \cdot d + \frac{2.5}{2} \cdot d(d-1)$

の関係となり、これより求めた d が上表である。

農耕地における融雪促進法に関する研究—大沼・中村・小林・高橋

付表—7 各粉材の融雪促進量 (mm) (融雪水量)
Amount of snow-melt promoted by
scattering of powder. (mm)

回	粉材	TBR	TBB	C1	K	S2	CA	CCM	N	月日
1		6.6	6.4	6.8	3.6					6.19
2		6.4		8.5		6.6	6.3	5.9		6.30
3		6.4	6.2	6.9		5.1	7.4	6.5		9.12
4		5.9		6.5			6.4			9.26
5				6.3	3.4				4.8	9.30
6			5.4	6.1		4.3		3.8		10.1
7		5.4	5.4	6.2			5.6			10.2
8		5.0	4.6	5.6		3.4	5.2	3.6		10.3
5~8 の平均		5.7	5.1	6.1	3.4	3.9	3.4	3.7	4.8	
比率		85	84	100	56	64	89	61	79	

(注) 雪質…ザラメニキ 散布量…20 g/m²

付表—8 融雪促進効果の順位
Ranks of effectiveness in promoting
the melting of snow.

順位	1	2	3	4	5	6
実験						
室内	C1	CA	TBR	TBB(N)	S2	CCM (K)
関	C1	TBR	CA		S2	CCM (K)
大洞原	C1	TBR	S2	CA		CCM (K)
高田		TBR	CA			CCM
総括的 順位	C1	TBR	CA TBB	(N)	S2	CCM (K)
比率 (%)	100	80台		60台		50台

付表—9 吐出性能試験
Performance test of powder discharge.

a. 高田予備実験 (37年度) (全日空ダスター)

供試粉材	積載量	吐出時間	吐出量
	kg	sec	kg/min
S1	60	38	95
T	80	62	78
S1	60	38.5	94
C3	40	95	25
CS	40	46	52
S2	60	45	80
S1	60	56(?)	64(?)

b. 長岡, 富山実験 (37年度)

(長岡…全日空)
(富山…朝日航空)

供試粉材	積載量	吐出時間	吐出量	備考
	kg	sec	kg/min	
S2	60	40	90	長岡
C1	50	127	24	
C2	50	95	32	
S2	120	130	55	富山 片ダスターのかきまぜ 機故障のため吐出量小
S2	80	98	49	
C2	100	231	26	
C2	50	131	23	
C2	100	161(?)	37(?)	

c. 関山大洞原実験 (38年度)

(農林へり改造型)

供試粉材	積載量	吐出時間	吐出量
	kg	sec	kg/min
CCM	440*	428	62
	140	129	65
	140	125	67
	100	90	67
	100	97	62
	400*	394	61
	200*	182	66
TBR	100	90	67
	200	171	70
TB _B	196*	339	35
	98	172	34
TB _R	150*	151	60
	48	46	63
CA	100	110	55
	100	94	64
	100	99	61

* は 2~4 回にわけて積載