積雪融解機構に関する研究

著者	木村 忠志, 清水 増治郎
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	33
ページ	125-135
発行年	1974-02-28
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002698/

624.144.5:632.116:632.93

積雪融解機構に関する研究

木村忠志・清水増治郎

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Studies on the Melting Mechanism of Snow Cover

By

Tadashi Kimura and Masujiro Shimizu

Institute of Snow and Ice Studies (Nagaoka), National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

Recently the ash of fine coal dust produced in the process of generation of electric power by coal burning, of which the trade name is "Green Ash," abbreviated to GA in the following, is utilized as snow melting powder on snow surface. In the present paper the results of the studies on the mechanism of snow melting by using GA are described.

In March 1971, at Dake, Iwaki-machi, Aomori-ken, a snow surface dispersed with GA was observed by very slow speed photographing, and the melting mechanism was investigated. Results obtained are as follows:–

1. Immediately after the dispersion of GA particles on the snow cover, more than several particles are congregated and become larger particles. The mode diameter of larger particles is 0.2mm, and the diameters surpassing 0.5mm are remarkably seldom observed.
2. When the solar radiation is stronger, the more is the quantity of subsidence of GA particles below the snow surface, and the limit of the subsidence is several centimeters.
3. In case of weaker solar radiation, the melting of snow surface due to the temperature rise by GA particles is prevalent, and in case of stronger solar radiation, the snow surface melting by the atmospheric temperature also conspicuously takes place in parallel.

要　　旨

最近，石炭火力発電の過程で発生する微粉炭灰（商品名グリーン・アッシュ，以下GA と略記する）が，融雪粉材として利用されている．本論文には，GA による雪面の融解機構についての研究結果が示される．

１９７１年３月，青森県岩木町嶽において，GA を散布した雪面を，微速度撮影によって観察し，融解機構を調べた．この結果，次の事柄が判明した．

１）GA の粒子は，雪面に散布した直後に，その数個以上が集合して，より大きな粒子となる．その最頻直径は 0.2 mm で，0.5 mm 以上のものは著しく少ない．

２）GA の粒子は，日射が強いほど雪面下に沈降するが，その深さの限界は数ｃｍである．

３）日射の弱いときは，GA粒子の昇温による雪面融解が卓越し，日射の強い場合には，気温による雪面融解も，併行して顕著に進行する．

1. 序　論

積雪は主として日射により，表面から融解する（小口，１９５４；小島，１９５４）．しかし，自然雪面は日射の６０～８０％を反射する（木下，１９４４；工藤，１９４４；大浦，１９５１）．それで，日射を吸収して昇温する適当な粉材を，融雪期の雪面に散布することにより，日射による積雪の融解を著しく促進することができる．

融雪促進の粉材として，土が使用されたことがあり，その場合の融解機構についての研究も，すでになされている（孫野・熊井，１９５４）．この研究によると，散布した土粒子は，直径１～12mmの範囲のものについて，融雪速度がほぼ等しく，また，散布濃度に多少のバラツキがあっても，融雪速度にあまり差がないという．実用上有利な結論が得られている．しかし，散土消雪は，土の重量が大きいため，大面積の融雪促進では，火薬散布（遠藤ほか，1954），又は特殊な専用散布装置（試作品のみ．菅谷，1954）等による必要があり，人力では小規模の実行のみが可能である．



写真１　観測区域の準備（ＧＡの散布）
Photo 1. Preparation of the observation area.

最近，黒に近く着色した．粉末状の化学肥料が，融雪粉材として利用されるようになった．これは，たとえばライムソアーなどの農業用粉剤散布器，ヘリコプターなどによって散布できるので，大面積の融雪促進が可能である（大沼ほか，１９７３）．各種の紛材のなかで，商品名をグリーン・アッシュ（以下ＧＡと略記する）と称する微量要素肥料が，実用上有利な特性を数多くそなえている（大沼ほか，１９７３）．ＧＡは石炭火力発電の過程で発生する微粉炭灰の一種で，直径0.２５～0.０５ｍｍのガラス質の球状粒子であり，重量比でおよそ９％が水に溶ける（資料Ｉ，１９６８）．そして，水に溶けない部分が，雪面付近に残って，日射を吸収し，融雪を促進する．

雪面上のＧＡは，直径0.２ｍｍ程度の小塊にまとまって分布するので，その積雪融解機構は，散土消雪の場合に，大粒の土粒子の周囲ににじみ出す土汁（孫野・熊井，１９５４）の融解機構に相当するが，この土汁の融解機構は，明らかにされていない．

1970年３月および1971年３月に，青森県中津軽郡岩木町岳農場において，ＧＡによる融雪促進実験が，科学技術庁特別研究促進調整費により実施され，この研究の一環として，ＧＡ散布雪面の微速度撮影観測を実施し，その融解機構を研究した．

2. 観測方法

写真１に観測区域の準備状況を示す．ＧＡの散



写真2.　雪面の撮影
Photo 2. Photographing of snow surface.

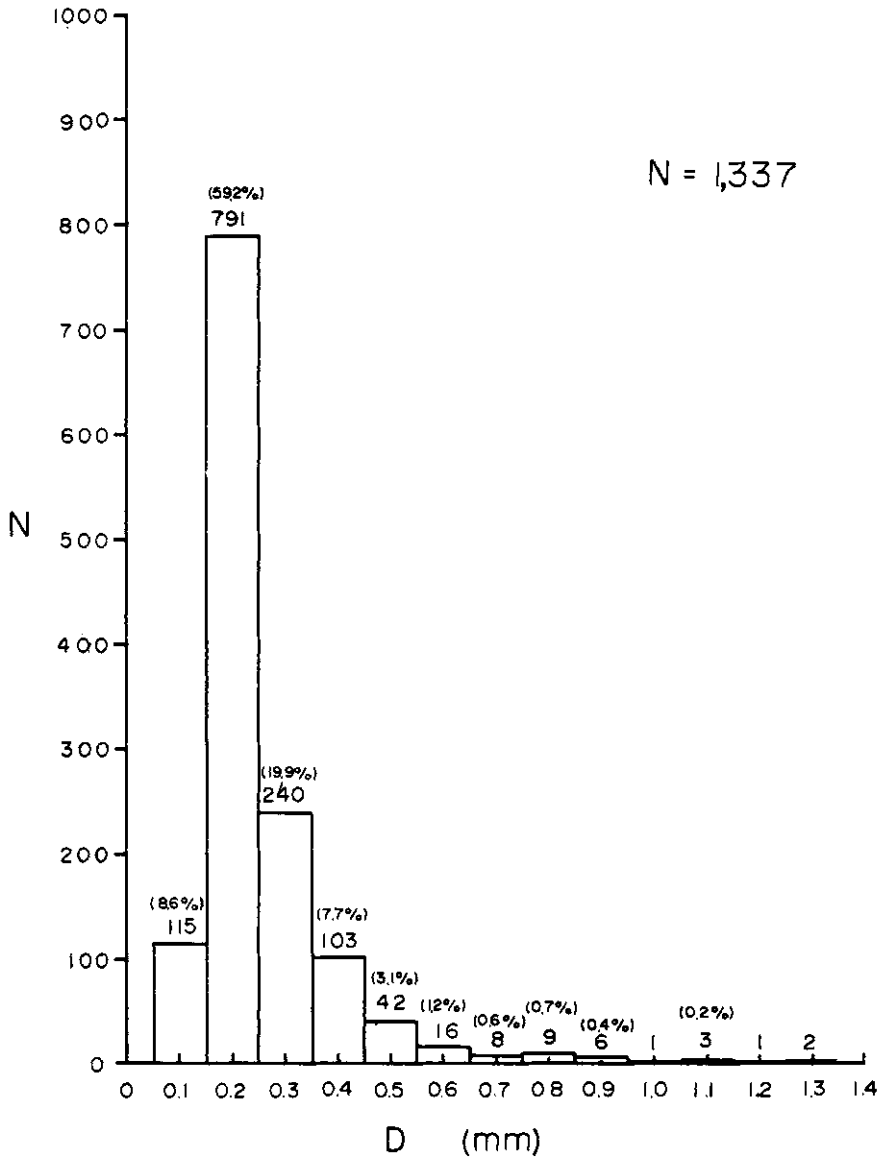


図1 雪面上のGA粒子の粒度分布

Fig. 1. Size distribution of green ash particles on the snow surface.

布区域(大沼ほか, 1973)の東南端に, 20m×20mの観測区域を設け, ここにGAを散布した. 一様な散布濃度を得るために, 散布は手まき法で行なった。散布濃度は平均100g/m^{2}である. 写真の手前側は, 雪上車が引いたライムソアーによる散布状況で, 手まきのように一様ではない.

上記のように準備した観測区域内で, GAの散布濃度が一様で, 平たんな雪面を選び, その雪面の一部について, 8ミリ・シネカメラによるコマどり撮影を行なった. 撮影状況を写真2に示す.

この撮影は毎日10h00m～17h00mにわたって継続し，毎日場所を変えて行なった．シネ・カメラはミノルタ8D－6型に，専用のコマどり装置（インターバロメータ）をつけたもので，フイルムはサクラカラーを使用した．撮影間隔は15秒にとり，7時間連続して1本のフイルムが終了するようにした．また，撮影部分の雪面が，融解によって低下するので，2時間おきに，ピント調節を手動で行なった．8ミリを採用したのは，付属機構も含めて小型にまとまっていて，野外での扱いが容易なことと，露光の自動調節機構が完備していることが主な理由である．解像力の点では，静止映写の場合は不充分であるが，18コマ／秒で映写した場合には，雪面上のGA粒子の動きを，充分に観察できた．



写真3　GAの過剰散布

Photo 3. Surplus dispersing of green ash (GA).

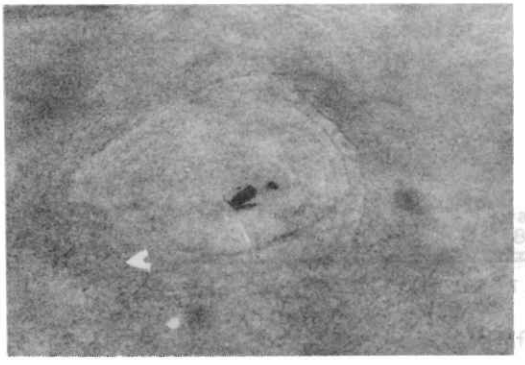


写真4　大粒子による融解

Photo 4. Snow melting by large-particle dispersion.

このほか，35ミリ・スチールカメラで雪面を接写し，GA粒子の雪面上における粒度分布をしらべた．また，GA粒子の積雪層内への沈下状況を観察するために，雪面付近の断面観測を行なった．



写真5　雪面の変質

Photo 5. Degeneration of snow surface.

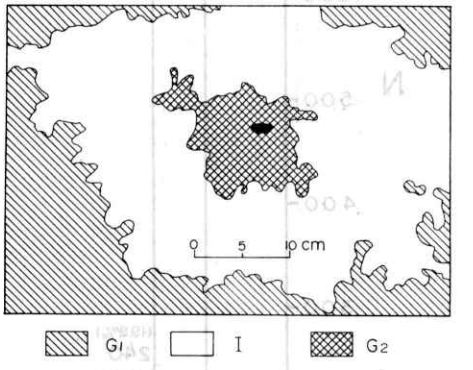


図2　雪面の変質

Fig. 2. Degeneration of snow surface.

次に，雪面撮影と併行して，気温，湿度，風向，風速，日射等の雪面気象要素を自記測定した．これらの測定は，電源事情によって，撮影現場から西に1.5kmはなれた地点で実施した．この地点は撮影現場の風上にあたる．実験地は平たんであり，観測期間中はほとんど西風であったので，気温と日射については，上記の測定でも，大きな支障はないであろう．

3. 雪面上のGAの粒度分布

図1に，雪面上のGAの粒度分布を示す．縦軸は度数，横軸は粒子の直径である．直径の幅を0.1mmにとって，棒グラフで表示した．図中に記入した数字は，それぞれの粒径の範囲内に含まれた粒子の個数で，括弧内の数字は，その全体に対する割合いである．図1の資料は，GAを散布した

雪面を，35mmカメラで等倍に接写し，印画紙上で，最もピントが良く，一様に粒子が分布している部分の50cm²について，メスルーペによって測定した。写真の解像度の制限から0.05mm以下の粒径は測定できなかった．測定した粒子の総数は，1,337個である．

雪面に散布したGAは，日射を吸収して昇温し，周囲の雪粒子をとかす．そして，発生した融解水によって，数個以上の粒子が相互に付着して，図1に示すような粒度分布で，雪面上に分布し，融雪をつづける．ここで特徴的なのは，0.5mm以上の大きな粒子が少ないことで，散土消雪の場合の土粒子より，1けた小さい粒子が雪面融解を進行させている．図1では0.2mmの粒径のものが59.2%を占めているが，これは0.05mm以下の粒子が，測定できなかったためで，実際には0.5mm以下の粒径のすべての粒子が融雪に効いているものと考えられる．

4. GA散布後の雪面状況

4.1 過剰散布： 写真3は，散布後20日の雪面状況を示す．写真の右側は，散布していない部分で，散布雪面がほぼ一様に低下している様子がうかがわれる．散布面には，ほぼ一様にGAが付着していて，融雪が進行中であるが，写真の中央部のように，著しく多量にGAが散布されたところは，融雪が抑制される．この写真の例は，散布作業のとき，たまたま捨てられたGAの30kg入りビニール袋のひとつに，まだ若干のGAが残っていたため，風に飛ばされることもなく，雪面に残ったものであって，大量のGAが日射と，熱伝導をさえぎり，周囲よりも融雪を抑制した結果，このような「残丘」が，融雪面上に形成されたものである．大量に散布すると，このような逆効果がもたらされるが，GA粒子は，散布前は非常に流動性が良く，かたまりにくいので，このようなことは，通常の散布作業では，ほとんど起こらない．

残丘の側面に認められる水平のシマは，積雪層の層界であって，ここにGA粒子が集まる．実験地の雪面付近の層界は，うすい氷板状になる傾向が強く，その上にGAが集まるので，このようにハッキリと認められることが多い．

4.2 大粒子による融解： 写真4も，散布後20日のものであるが，融解が進行中のGA散布面には，ところどころに，このようなへこみが発生し，そのへこみの底には，直径10mm以上にまとまった．GAの塊が認められることがある．これはその一例である．穴の直径は約60cmで，深さは20cmあった．GA塊の大きさは，直径20mm，長さ50mmで，この融解機構は，たぶん，土粒の場合に近いものと思われる．周囲をとかしながら，GAの小さい粒子を放出しつつ，このようなスリバチ形の融解孔が形成されたものと考えられる．融解孔の上部に認められる円形のシマは，雪面付近の層界である．

4.3 雪面の変質： 写真5は，GA散布後4日の状況で，スリバチ形の融解孔が発生しかけているところを，上方からながめたものである．雪面の最上層がとけて，その下部の氷板状の層界に融解が進行し，層界の一部に穴があいて，更に下の層に，GAが移動し，融解を進行させている．これをトレースしたものが図2である．G_1の部分は，雪面の雪層で，ほとんどザラメ化している．Iの部分は露出して融解しつつある層界で，氷板からしだいにザラメ化しつつある．G_2は，氷板の下の雪層で，これも露出部分はザラメ化している．GAによって，融解面がザラメ化する傾向がうかがえる．ザラメ化した雪粒子の間を，表面張力で支持された融解水が移動し，それに従ってGA粒子も移動しつつ，雪粒子を次第にとかしていく機構が，この例から想像される．

5. GA粒子の垂直移動

散布後のGA粒子を観察すると，雪面と相対的に上下する移動が，水平方向の移動より大きい．そこで散布後の雪面付近の断面観測によって，GA粒子の垂直方向の移動を調べてみた．

写真6は，散布後4日の雪面付近の縦断面である．雪面より50mm下に，ひとつの層界があり，これから上方の層は，水で飽和しており，雪面で生じた融解水の大部分がここにたまっている．散布したGAは，ほとんど雪面付近に存在し，融解水とともに雪層内にしみ込んだ部分は，ごくわずかであり，それも雪面下30mm以下には達していない．

写真7は，散布後20日のもので，積雪層の厚さは，すでに63cmに減少している．全層がほぼ完全にザラメ化していて，融解水で飽和し，地表面近くはスノー・ジャム状になっている．この場合

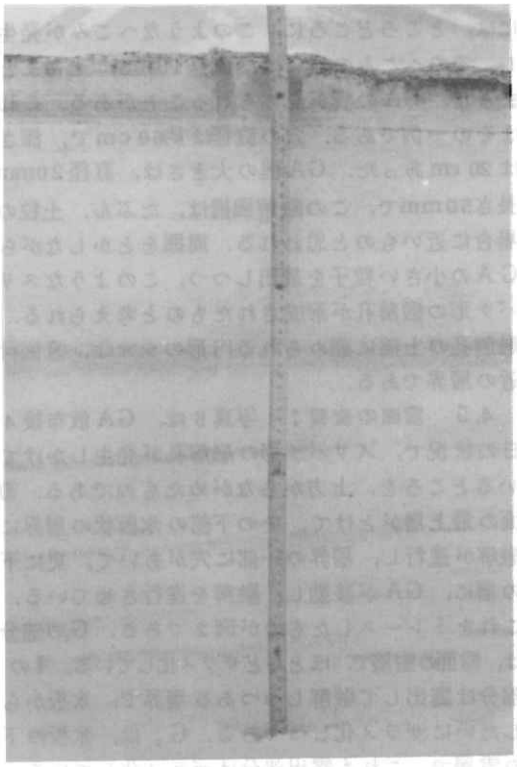


写真6　散布後4日の積雪断面

Photo 6. Cross-sectional view of snow cover four days after green ash dispersion.
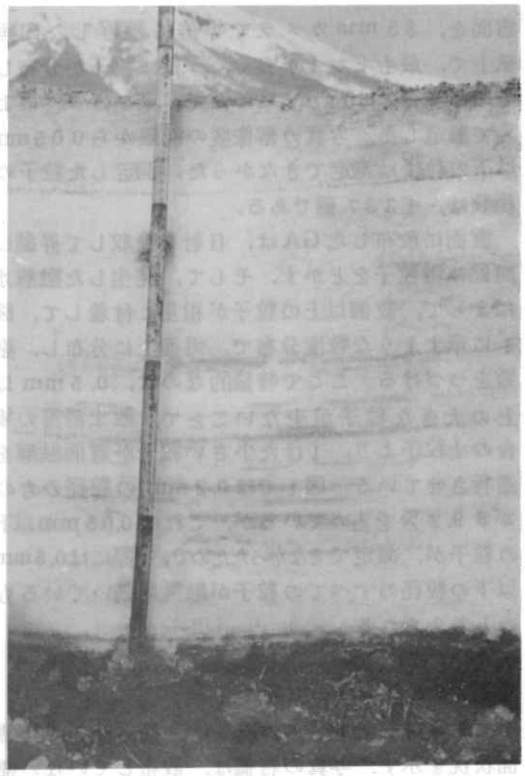


写真7　散布後20日の積雪断面

Photo 7. Cross-sectional view of snow cover twenty days after green ash dispersion.

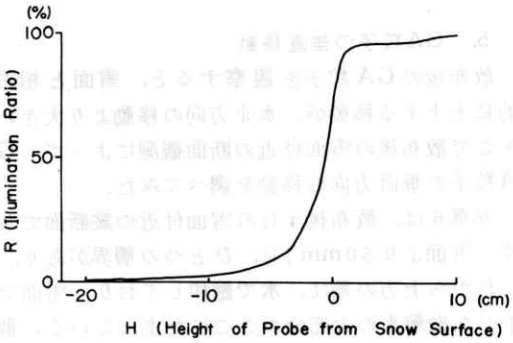


図3　雪面付近の散乱光照度の鉛直分布

Fig. 3. Vertical distribution of illumination ratios of scattering light near the snow surface.

にも，GA粒子は表面付近に存在し，積雪層内にあまり深く侵入していない．

写真6および7に示したように，雪面に一様に散布したGAは，融雪の進行中，常に雪面付近に滞留し，積雪層内に深く沈下することはない．これは融雪促進効果が，GA散布後の全融雪期間中，持続されることを意味し，実用上きわめて都合のよい特性であるが，これは，積雪層が，太陽光線をあまり通さないことによると考えられる．

図3に，雪面付近の積雪層内外での，散乱光照度の垂直分布の一例を示す．これは，外径4mm，長さ50cmの金属パイプの先端に，外径2mm，受光角30°のフォト・トランジスタをとりつけた測光プローブを，雪面上から雪面下に鉛直に下降させて測定したものである．横軸は雪面を基準とした測定点の高さで，雪面上10cmから雪面下20cmまで測定した．縦軸は照度の相対値で，雪面上10cmの照度を100%にとった．この資料は1972年3月25日，青森県岩木町嶽温泉で，快晴の13時ごろ測定したものである．雪面下2 cmで照度は10%になり，3 cmでは5%に低下している．このこと

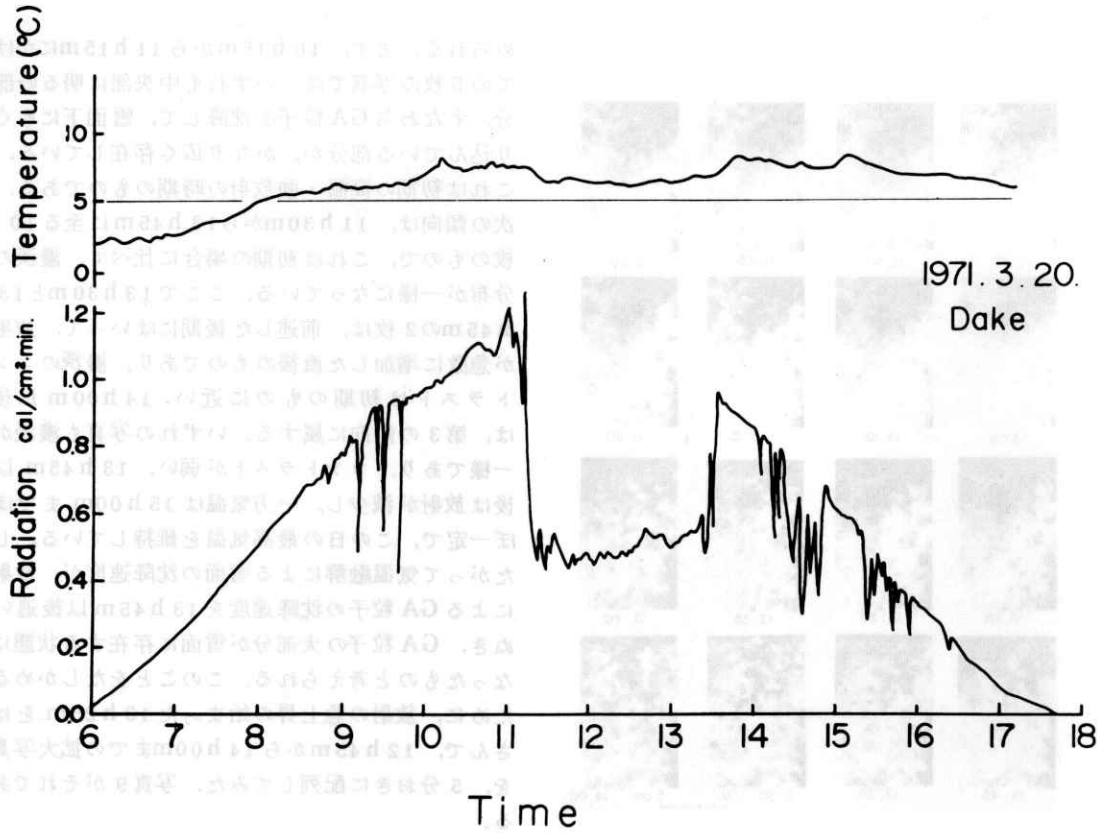


図 4　気温と日射の時間変化

Fig. 4. Time variations of air temperature and solar radiation.

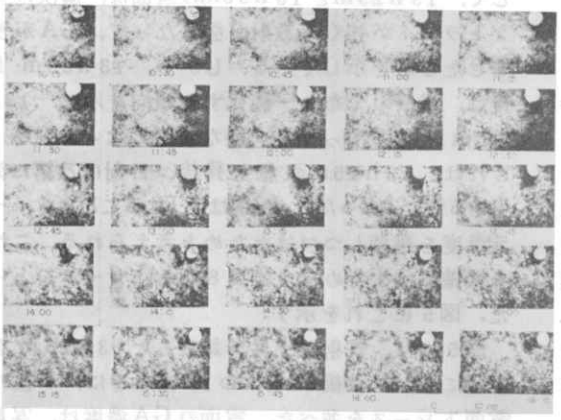


写真8　GA散布雪面の変化

Photo 8. Variations of the snow surface after green ash dispersion.

から，雪面下に数 cm 沈下したグリーン・アッシュの沈降速度が著しく減少し，一方，雪面の高さは気温融解によって低下するので，グリーン・アッシュが雪面付近に常に存在するものと考えられる．

6. GA 散布雪面の変化

GAを散布した雪面で，融解がどのように進行するかを，8 ミリ・シネ・カメラで雪面を微速度撮影して観測した．観測方法は第2章で述べたとおりである．本報告では，1971年3月20日の資料について論ずることにする．その理由は，観測開始の10h00 mから，終了の17h00mまで，気温に複雑な変動がなく，風速も2m／s程度でほぼ一定しており，日射以外に大きな気象要素の変動がなく，気温融解がほぼ一定のレベルで進行していたと考えられるからである．このような条件は比較的少なかった．

図4に観測期間中の気温と太陽放射の変化を示す．横軸は時刻，縦軸は上段が気温，下段が放射である．放射について，11h15mから13h30mまで，雲による低下があり，気温もこの期間は約1.5℃低下している．また，14hと15hの間，

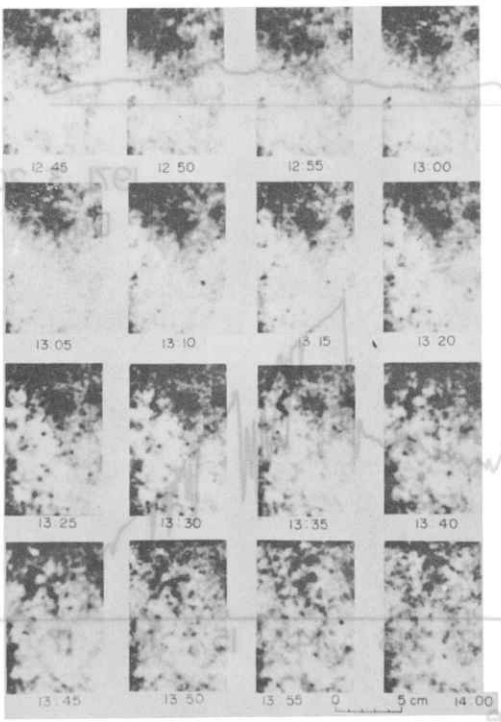


写真９　ＧＡ散布雪面の変化
Photo 9. Variations of the snow surface after green ash dispersion.

15ｈ25ｍから16ｈ00ｍ の間にも雲による一時的な低下が認められる．気温の方は，10ｈ15ｍから11ｈ15ｍまで，ほぼ＋7.5℃，11ｈ30ｍから13ｈ30ｍまで，ほぼ＋6.0℃，14ｈ00ｍから15ｈ30ｍまで，ほぼ＋8.0℃と，三つの等温期間が認められる．これらの期間中，気温融解の程度は，それぞれ一定であったとしてよいであろう．放射の方は，最初の期間中増加，中期に一定，後期は減少している．そして11ｈ15ｍ には急激な低下，13ｈ30ｍには急激な上昇がある．

写真８は，気温が最初の等温期にはいった10ｈ15ｍから，雪面の写真を１５分おきに１６ｈ１５ｍまで配列したものである．８ミリフィルムからのプリントであるため，解像度が低く，ひとつひとつの粒子は識別しがたい．しかし，雪面上のＧＡ粒子の分布状況は，濃淡によって識別できるので，これに着目する．

写真８からＧＡ粒子の分布に三つの傾向が認められる．まず，10ｈ15ｍから11ｈ15ｍにかけての５枚の写真では，いずれも中央部に明るい部分，すなわちＧＡ粒子が沈降して，雪面下にもぐり込んでいる部分が，かなり広く存在している．これは初期の高温・強放射の時期のものである．次の傾向は，11ｈ30ｍから13ｈ45ｍに至る10枚のもので，これは初期の場合に比べて，濃淡の分布が一様になっている．ここで13ｈ30ｍと13ｈ45ｍの２枚は，前述した後期にはいって，放射が急激に増加した直後のものであり，濃淡のコントラストは初期のものに近い．14ｈ00ｍ以後は，第３の傾向に属する．いずれの写真も濃淡が一様であり，コントラストが弱い．13ｈ45ｍ以後は放射が減少し，一方気温は15ｈ00ｍまでほぼ一定で，この日の最高気温を維持している．したがって気温融解による雪面の沈降速度が，放射によるＧＡ粒子の沈降速度を13ｈ45ｍ以後追いぬき，ＧＡ粒子の大部分が雪面に存在する状態になったものと考えられる．このことをたしかめるために，放射の急上昇の始まった13ｈ25ｍをはさんで，12ｈ45ｍから14ｈ00ｍまでの拡大写真を，５分おきに配列してみた．写真９がそれである．

写真９において，13ｈ20ｍ以前の場合と比較して，13ｈ25ｍと13ｈ30ｍの雪面は，濃淡のコントラストが強く，放射が強くなって，ＧＡが沈降したことを示している．しかし，13ｈ35ｍ 以後は，濃淡の分布は一様化する傾向を示し，13ｈ50ｍ以後はすっかり一様な濃度になっている．これは，13ｈ25ｍの急上昇後，日射は次第に減少する傾向になったが，気温は低下することなく，一定温度を維持しつづけたためと考えられる．これを明確に示すために，写真８からトレースをとった．図５にこれを示す．

図５には，日射の上昇が始まった13ｈ25ｍを中心にして，前後30分ずつ10分おきに，７枚の雪面トレースを並べた．雪面のＧＡ濃度は，写真のうえで３段階にわけて表示した．撮影機の自動露光機構によって，写真の調子が一様化されるため，写真上の濃度は相対的なものであり，真値は不明である．白の領域ではＧＡ粒子が雪面下に沈みこんで，ほとんど雪面に存在しない．それぞれの写真で最も黒い領域は，雪面に現われているＧＡ粒子が多量に存在する部分であり，格子ジマで示した．また，中間的な領域は打点で区別した．

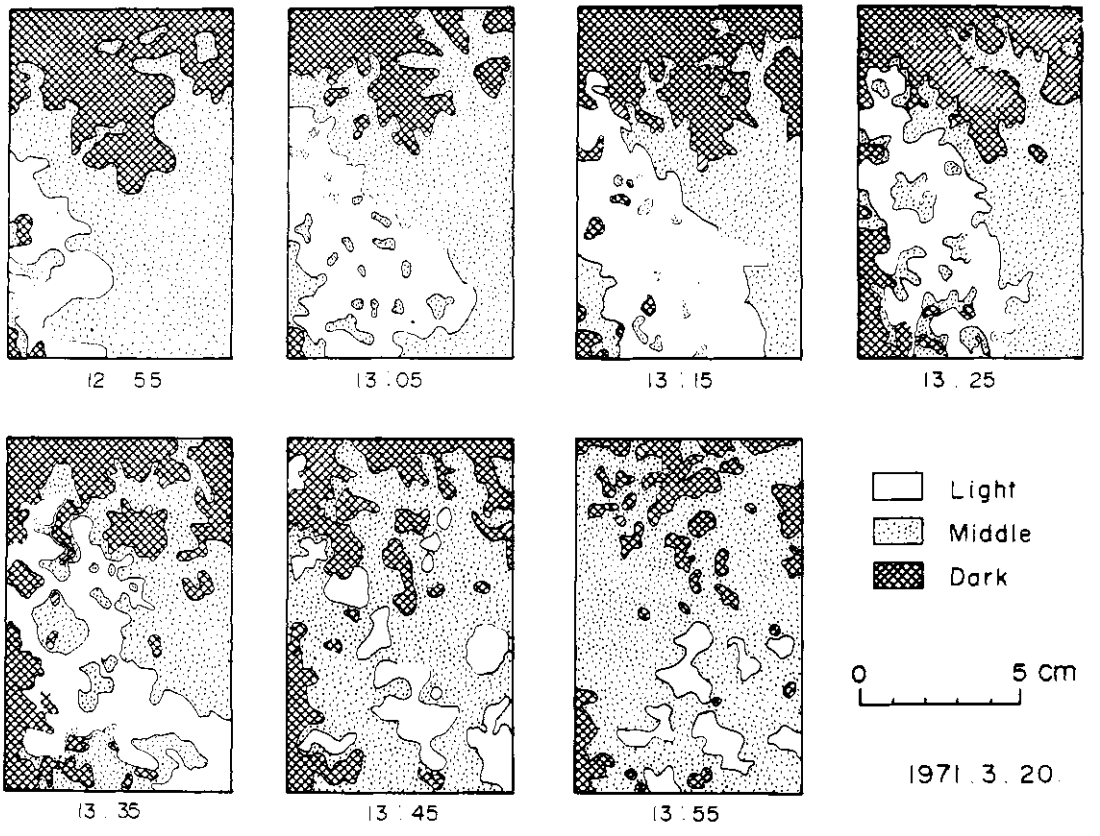


図5　GA散布雪面の変化
Fig. 5. Variation of the snow surface after green ash dispersion.

12h55mから13h25mにかけての4枚では，格子ジマ領域が大きくまとまっていて，その広がりの形にあまり大きな変化がない．しかし，13h35m以後は格子ジマ領域は分散して減少し，13h55mにはほとんど打点領域で占められている．同じ傾向は，白の領域についても認められるが，13h35mに一時，範囲が増加し，その後は細分化し減少している．これは，13h45m以後，気温が上昇して，日射が減少し，気温融解が卓越した結果と考えられる．すなわち13h35mの場合は放射融解が強く効いて，白の領域の増加と，格子領域の細分化を生じたが，13h45m以後は，粒子が雪面に相対的に上昇して，GAの濃度の一様化がもたらされた．13h45m以後の格子ジマ領域の減少は，撮影機の自動露光機構の動作特性によるものであろう．

7. 考　察

GAを散布した雪面について，雪面付近の断面観測および雪面の微速度近接撮影を実施した結果，GA散布雪面の融解機構の定性的なモデルが得られた．これを図6に示す．

図6には融解機構を5ステップに分けて示した．番号順に説明する．ステップ1は，日射の強いときに，雪面にGAを散布した直後の状態で，図中の白ヌキの矢印は，雪面の低下速度を示す．これが長いほど低下速度が大きい．GAは散布後数秒以内に，発生した融解水によって数個以上結合して，直径0.2mm程度の粒子になり，日射によってあたためられ，急速に雪層のなかに沈下しはじめる．この状態がステップ2で，雪面はあまり低下していない．GA粒子の沈下速度は黒い矢印で記入した．これはステップ2において最大になる．ステップ3は，GA粒子の沈降速度が，粒子の沈下につれて，粒子が吸収する放射量の低下にともなって減少し，一方，粒子が沈下して粗面化した雪

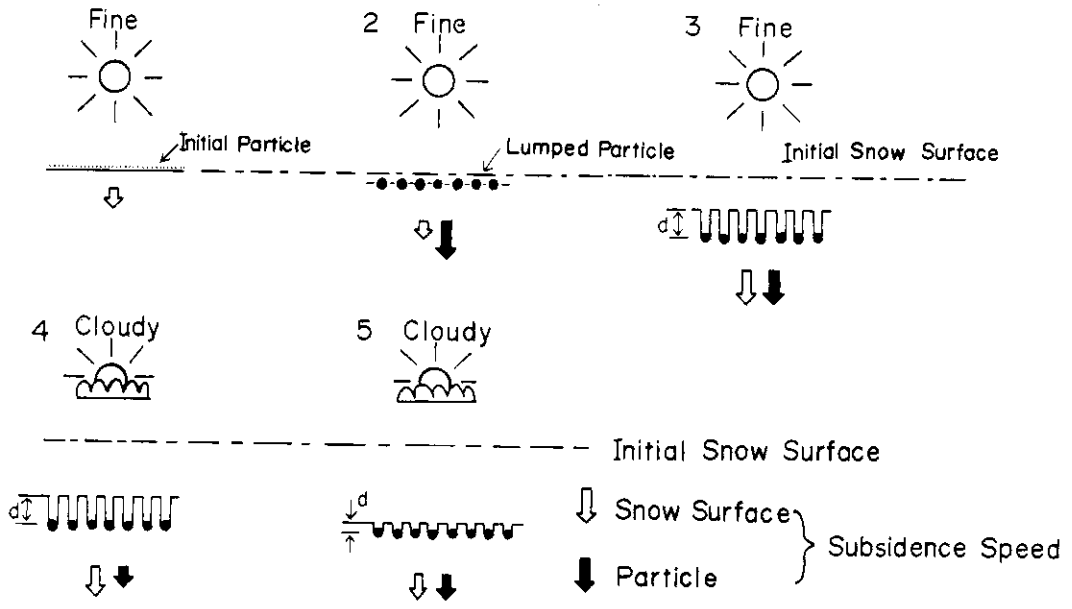


図６　ＧＡ散布雪面の融解機構
Fig. 6. Melting mechanism of the snow surface after green ash dispersion.

面に対する気温融解によって，雪面の低下速度は上昇する．そして，ＧＡ粒子が雪面からdの深さまで沈降したときに，雪面とＧＡ粒子の，双方の低下速度が一致し，平衡状態が成立する．このとき雪面のＧＡ濃度は，ステップ２の場合よりも低下し，白っぽくなる．もし気温融解の程度が一定なら，dの値は日射が強いほど大きくなり，日射が一定なら，気温融解が強いほど小さくなる．

気温融解の程度が変化せず，日射が弱くなったときがステップ４である．このときＧＡ粒子の沈降速度が減少し，dの減少が始まって，ＧＡ粒子は相対的に雪面に向かって上昇し始める．そして，上昇が進行するにつれて，ＧＡに達する日射量が大きくなるため，ＧＡの沈降速度は増加し，d'の深さで雪面の低下速度と一致する．この状態がステップ５で，d'はdより小さく，雪面のＧＡ濃度はステップ３のときよりも増加し黒っぽくなる．

以上が，ＧＡ散布雪面における融解機構の定性的な説明であるが，要するに，雪面に散布したＧＡ粒子は日射を吸収して昇温し，その熱で雪をとかすとともに，雪面を粗面化して表面積をふやし，気温融解を促進する効果をもっている．したがって，気温が０℃以下，気温融解が生じない条件のもとでは，ＧＡ粒子は，雪面下にある程度沈下して，そこに滞留するのみで，顕著な融解促進効果を示さないことになる．それで，融雪促進作業は融雪期になってから実施しなくてはならない．

8. 結　論

この研究により判明した事柄を，以下に列記する．

1）雪面に散布したＧＡは，散布直後に数個以上の粒子が結合して，より大粒の粒子となって雪面に分布する．その粒径範囲は0.15mmから1.3mm，最頻半径は0.2mmである．

2）雪面に散布したＧＡ粒子は，雪粒子の間に表面張力で保持されて流動する融解水とともに移動するが，水平方向にあまり移動せず，上下方向に移動する．

3）ＧＡ散布雪面の融解は，ＧＡ粒子の日射による昇温沈降と，それによって粗面化された雪面に対する気温融解の二つの機構によって進行する．したがって，気温が０℃以下の条件下では，効果的な融雪促進作用は起こり得ない．ＧＡ散布による融雪促進は，融雪期にはいってから実

施しなくてはならない.

4) 雪面に散布したGA粒子は，気温融解が作用するかぎり，雪面付近に存在し，積雪層内に深く沈降することはなく，融雪促進作用は，融雪期間中ほぼ一定に維持される.

参 考 文 献

木下是雄，1944： 積雪の反射能．透過能等に関する文献の紹介（Ⅰ）．雪氷，Vol.3，№3，154−157．

工藤 清，1944： 積雪中の明るさ．雪氷，Vol．3，№9，390−395．

大浦浩文，1951： 積雪による光の反射及び透過について Ⅱ．低温科学，A，6，35−40．

孫野長治・熊井 基，1954： 撒土融雪の基礎的研究（Ⅰ）．融雪促進の総合的研究，中谷宇吉郎編．農業総合研究所・雪の研究，第1号，9−19．

遠藤良男・花島政人・孫野長治・荒川 淳・熊井 基，1954： 火薬による撒土試験．同上誌，55−61．

菅谷重二，1954： 動力撒土機による撒土消雪試験．同上誌，63−79．

小口八郎，1954： 雪に及ぼす気温及び雪面の影響について．同上誌，33−41．

小島忠三郎，1954： 融雪促進の研究第一報．農林省農業総合研究所刊行物，第104号（昭和29年）．

資料Ⅰ，1968： 肥料用微粉炭灰（グリーンアッシュ）の理化学性について，アッシュ肥料協会．

大沼匡之・小林一雄・高橋久三郎・村松謙生，1973： 平地雪処理技術の改善に関する研究．防災科学技術総合研究報告，第33号，73−124．