

昭和基地での夏期作業に向けた効率的な除雪時期について

石沢賢二^{1*}

Timing of efficient snow clearance for summer operation at Syowa Station

Kenji Ishizawa^{1*}

(2017 年 12 月 7 日受付；2018 年 2 月 6 日受理)

Abstract: Some construction and outworks are conducted at Syowa Station during the period between the middle of December and middle of February every season. Before the outworks, main roads for cargo transportation and new outwork sites need to be cleared of snow by the wintering members. The clearance work of snow is carried out depending on the respective plans by each wintering parties because there are not any manuals referring to the timing of the operation and the method. Therefore, some clearance works were not efficient because they started the work too early without plenty of solar radiation or they suffered from blizzards after completing the snow removal.

To work out the best moment of the operation, meteorological data such as air temperature, snow depth, solar radiation and blizzard over previous years at Syowa Station were analyzed. As a result, it was found that the snow-removal operation including treatment of snow melting agent should start from the middle of November.

要旨: 南極の盛夏である 12 月中旬から翌年 2 月にかけて、昭和基地では、各種施設の建設などの屋外作業が行われる。それに先立ち、基地に滞在する越冬隊員が物資輸送用の幹線道路や建設作業現場の除雪作業を行う。

しかし、除雪の開始時期やその方法に関するマニュアル類はなく、これまで各隊が独自に計画し行ってきた。そのため、十分な日射が得られない時期に始めたり、除雪後に大きなブリザードに見舞われ作業が振り出しに戻ったりするなど、効率的でないことが多かった。

そこで、昭和基地の過去の気象データ（気温、積雪深、日射放射量、ブリザード）を解析し、最適な除雪時期を検討した。その結果、融雪材の散布を含めた除雪作業を、11 月中旬から開始するのが効率的であることがわかった。

キーワード: 除雪、昭和基地、日射放射、積雪深、ブリザード、融雪材

1. はじめに

南極観測船「しらせ」は、例年 12 月中旬にリュツォ・ホルム湾の定着氷縁に到達し、船

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* E-mail: ishizawa@nipr.ac.jp

上から大型ヘリコプターで隊員および夏作業に必要な物資の輸送を始める。いっぽう昭和基地では、それらを受け入れるため、ヘリポート、幹線道路、物資集積場および建設予定地などの除雪を事前に行う（石沢，2014）。除雪の開始時期や方法についてのマニュアル類は存在しないので、その年の気象条件などを基に、越冬隊が独自に計画し実施している。気の早い隊では、10月中旬から主要幹線道路の除雪を始めた例もある。しかし、除雪後にブリザードが襲来し、大量の積雪やスノウドリフトにより、隊員の努力が無駄になることは珍しくない（国立極地研究所，2009）。

昭和基地では、11月から12月にかけて日射量が急速に増加するとともに、気温も上昇する。除雪作業を効率よく行うには、日射量とそれに伴う気温を有効利用するのが得策である。また、ブリザードの襲来時期の考慮も重要である。そこで、過去の気象データ（気温、積雪深、日射放射量、ブリザード）を解析し、除雪を開始するのに適した時期を検討した。

2. 融雪熱源

ある厚さをもった積雪層に出入りする熱量は一般的に次式で表される（小島，1979）。

$$QR + QA + QE + QC = QM. \quad (1)$$

ここで、QR：放射収支量、QA：大気と雪面の温度差に基づく顕熱輸送量、QE：雪の蒸発または大気中の水蒸気の雪面への凝結による潜熱輸送量、QC：積雪中の伝導熱流量、QM：融雪熱量である。式（1）中の左辺の各項は、雪の単位表面積当たり単位時間に出入りする熱量で、表面に向かう場合あるいは表面に与えられる場合を正とする。右辺のQMは、氷と水の相変化熱（潜熱）で、正の場合は融雪熱量、負なら融雪水の凍結潜熱放出量を表す。

式（1）のQRは、波長約 $4\mu\text{m}$ を境に、可視光領域を含む短波長放射と長波長放射（赤外放射）にはっきり分離される。雪氷面あるいは地表面からの短波長放射の反射率（アルベド）を a とすると、放射収支量（正味放射）QRは以下の式で表される。

$$QR = S(1 - a) + L\downarrow - L\uparrow. \quad (2)$$

ここでSは全天日射量、 $L\downarrow$ は下向きの長波長放射、 $L\uparrow$ は雪面あるいは地表面からの上向きの長波長放射である。これらの関係を模式的に表したのが、図1である。Ohmuraによれば、氷河や氷床における雪面融解に寄与するエネルギーのうち、①下向きの長波長放射（ $L\downarrow$ ）、②短波長放射（ $S(1 - a)$ ）、③顕熱輸送量（QA）の順に重要な値であるという（Ohmura, 2001）。また、氷河の平衡線高度付近では、①は③の10倍も大きく、①+③で全体の3/4を占め、①も③も気温に影響される。このことが融解と気温が密接な関係にある最大の理由であるという。また、大沼によると、融雪促進に関与する熱量は、放射収支量（QR）と顕熱輸送量（QA）を考えるだけで充分という（大沼ほか，1973）。以上のことから、式（1）は、

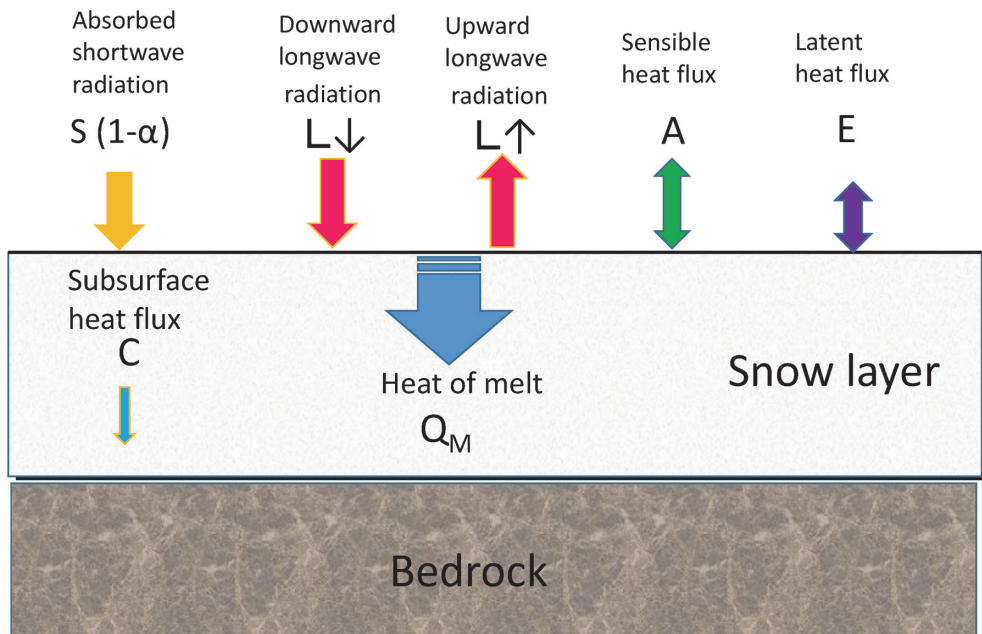


図 1 融雪に関わる熱源

Fig. 1. Heat sources for snow melt.

以下のように簡略化できる。

$$Q_R + Q_A \doteq Q_M. \quad (3)$$

融雪の概念は次のようにまとめることができる。放射収支量と顕熱輸送量による熱量が雪氷面から吸収される。それにより積雪温度が 0°C まで上昇し、さらに氷から水への潜熱分の熱量が加わると融雪が始まる。

3. 昭和基地の日射放射量と積雪深

3.1. 昭和基地における日射放射観測と融雪の観測

昭和基地の全天日射観測は1966年から始まった。1991年からは全天日射、直達日射、散乱日射、下向き長波長放射の観測が開始され、1998年から反射日射、上向き長波長放射、放射収支の観測が追加された（気象庁、2008）。また、これに先立ち、研究観測の一環として、全天日射、反射日射、上向き長波長放射、下向き長波長放射の観測が1987年2月から1988年1月末まで実施された（Yamanouchi, 1989）。

いっぽう、昭和基地の融雪に関しては、林が、昭和基地がある東オングル島東部の雪溪で融水流の測定を行い、気温が 0°C 以上になる時期（1月上・中旬）は、雪溪の消耗量は気温に左右され、 0°C を越えることの少ない1月下旬以降は、日射量の変化が流出量を左右して

いると報告している（林, 1977）.

筆者がこの論文で使用する昭和基地のデータは、気象庁が発表しているものである（気象庁, 南極気象資料（データ））. なお, 全天日射量 S として, 以下の理由により, 合成全天日射量 (S^*) を使用する. 全天日射量は, 太陽光の入射角度が水平方向になるほど測定誤差が大きくなる（間宮ほか, 2012）. また, 気象庁が発表している昭和基地での正味放射量の計算には合成全天日射量が用いられている. S^* は, 以下で定義される.

$$S^* = DR \times \sin(h) + DF. \quad (4)$$

ここで, DR は直達日射量, h は太陽高度角, DF は散乱日射量を表す.

3.2. 下向き放射量

図 2 は, 2009 年 10 月 1 日から 12 月 31 日までの短波長放射収支量（日射吸収量） $S(1-\alpha)$ と下向き長波長放射量 $L\downarrow$ の変化を示したものである. Ohmura が指摘しているように, 長波長放射量が短波長放射収支量に比べて, 数倍大きな値である（Ohmura, 2001）. 短波長放射収支量のデータがところどころ途切れているのは, データの欠測や不備による.

3.3. 上向き放射量

2009 年 10 月 1 日から 12 月 31 日までの短波長の反射日射量 $S\alpha$ と上向き長波長放射量 $L\uparrow$

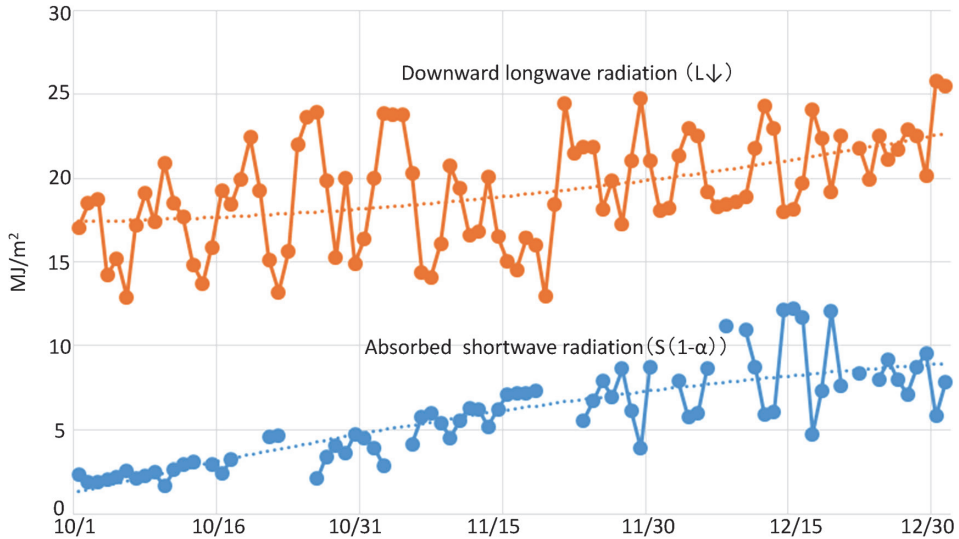


図 2 2009 年 10-12 月の下向き長波放射量と日射吸収量の日積算値（破線は 2 次近似曲線）

Fig. 2. Daily total downward longwave radiation and absorbed shortwave radiation between Oct. and Dec. in 2009. Dashed lines are quadratic approximated curves.

の変化を示したのが図3である。短波長の反射日射量が12月初旬から減少しているのは、ブリザードなどによる新雪の供給が少なくなるとともに、雪解けが進み、周囲の土砂が風に飛ばされ徐々に雪面が汚れアルベドが減少したためと考えられる。

3.4. 正味放射量

式(2)から計算した2009年の正味放射量を図4に示す。プラスに転ずるのは、11月中旬である。また、図5には、2009年から2014年まで6年間のデータを示した。11月中旬までは、値は正負に大きく変動しているが、赤の破線で示したように、11月15日頃から直線的に増加している。

3.5. アルベドと積雪深

図6に2009年10月から12月までのアルベドの値を示す。短波長入射量としては、合成全天日射量(S^*)を使用した。また、昭和基地の海氷上に設置してある積雪深のデータもあわせて示した。この期間のアルベドの最大値は0.85で、最小値は0.66である。12月末の盛夏に向かって徐々に減少していくが、これは、3.3節で述べたように、雪面の汚れが増すためと考えられる。また、積雪深が急激に上昇しているのは、ブリザードや降雪によりもたらされた新雪によるもので、その結果アルベドも上昇する。

積雪深変化は、積雪の圧密、融雪、昇華などによる総合的な結果であるが、11月に入ると減少し始め、その後、減少率は増加する。

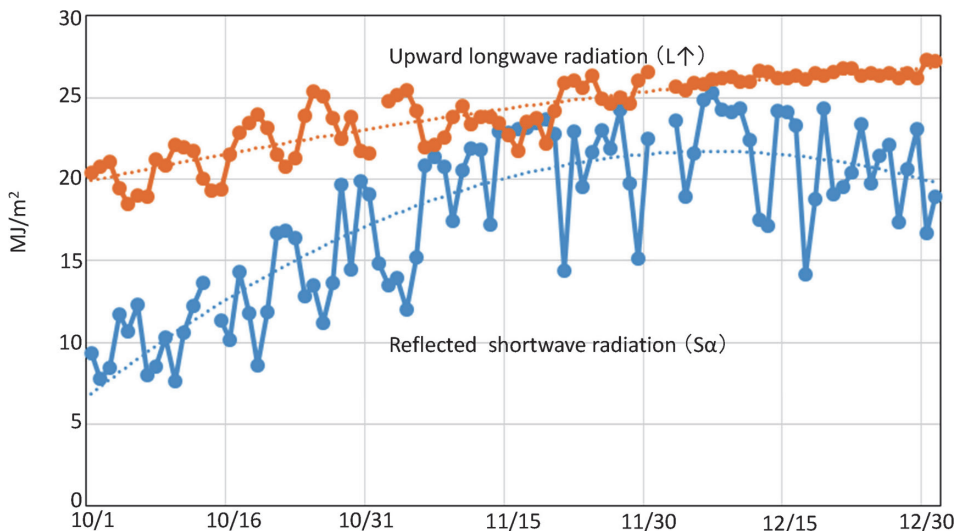


図3 2009年10-12月の上向き長波放射量と反射日射量の日積算値(破線は2次近似曲線)

Fig. 3. Daily total upward longwave radiation and reflected shortwave radiation between Oct. and Dec. in 2009. Dashed lines are quadratic approximated curves.

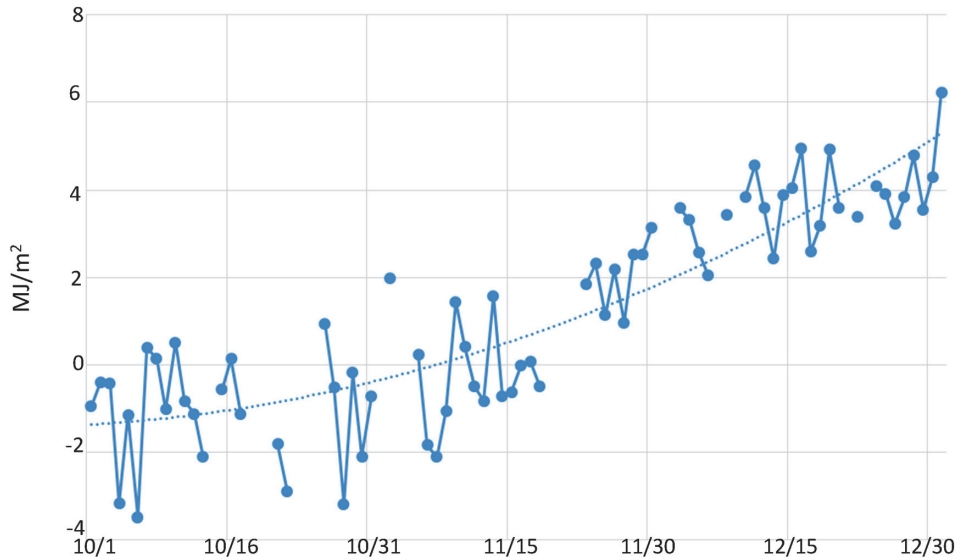


図 4 2009 年 10-12 月の正味放射量日積算値（破線は 2 次近似曲線）

Fig. 4. Daily total net radiation between Oct. and Dec. in 2009. The dashed line is a quadratic approximated curve.

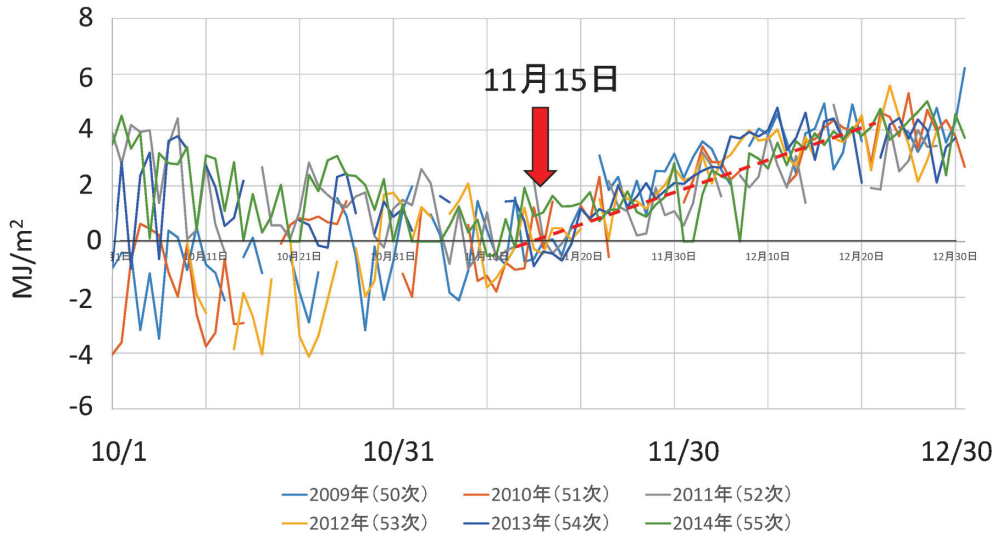


図 5 2009-2014 年 10-12 月の正味放射量日積算値（赤破線は、筆者が近似的に記載）

Fig. 5. Daily total net radiation between Oct. and Dec. from 2009 to 2014. Red dashed line is drawn by the author approximately.

4. 気 温

図 7 は、2009 年から 2014 年まで 6 年間の 10 月から 12 月までの日平均気温である。プラスになるのは 12 月中旬以降である。石井によれば、日本で融雪が始まるのは、日平均気温

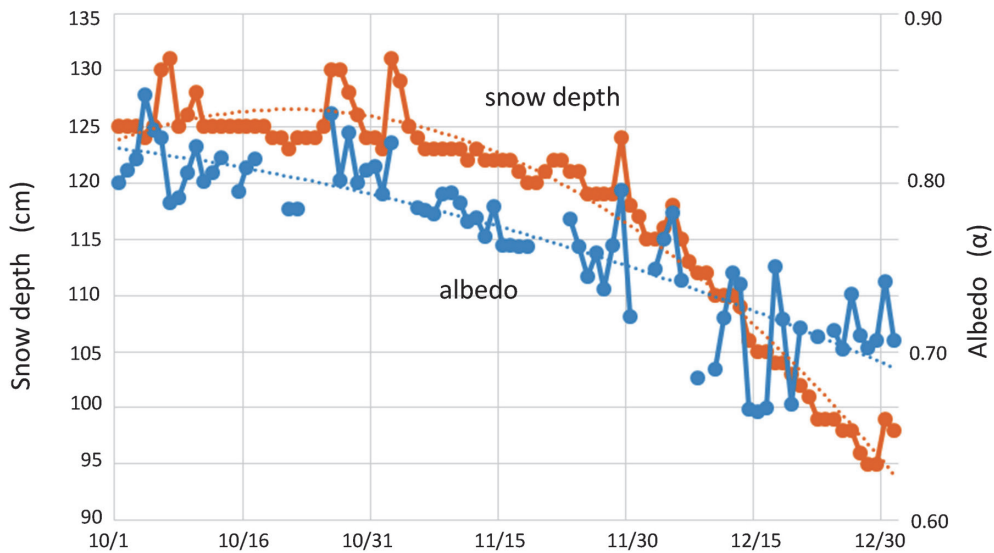


図 6 2009 年 10-12 月の積雪深とアルベド（破線は 2 次近似曲線）

Fig. 6. Snow depth and albedo between Oct. and Dec. in 2009. Dashed lines are quadratic approximated curves.

がマイナス 3℃ 以上のときであるという（石井，1959）。昭和基地でこの条件になるのは，図より 11 月中旬以降である。これは，3.4 節で論じた正味放射量がプラスに転じる時期とほぼ一致する。

5. ブリザード

1981 年から 2010 年までの昭和基地におけるブリザード日数の平年値は，24.6 回である。気象庁によるブリザードの定義は，視程 1km 未満，平均風速 10m/s 以上の状態が 6 時間以上継続したときである。また，ブリザードは，視程，風速，継続時間により A 級，B 級，C 級の 3 種類に分類される（表 1）。

表 1 の分類に従い 1989 年から 2014 年までの日本南極地域観測隊報告（国立極地研究所）での 26 年間のデータをまとめたものが，図 8 である。縦軸が 10 月 1 日から 12 月 31 日までで，ブリザードが襲来していた月日を，階級に応じて色分けした。一般的に 10 月は頻繁に襲来するが，12 月に入ると極端に回数が減る。この表より，10 月中旬から除雪を始めても，その後にブリザードが発生することが多く，再度除雪しなければならない可能性が大きい。第 49 次隊を例にとると，2008 年 10 月 13 日から除雪を開始し，11 月初旬までに主要な建物や幹線道路の除雪は，おおむね完了していた。しかし，11 月 8-9 日にかけて A 級ブリザードが襲来し，除雪開始前の状態に戻ってしまった。その後，直ちに除雪を再開したが，12 月 10 日にも C 級ブリザードに見舞われた。そのため，12 月 11 日から 20 日まで昼夜 2 交代

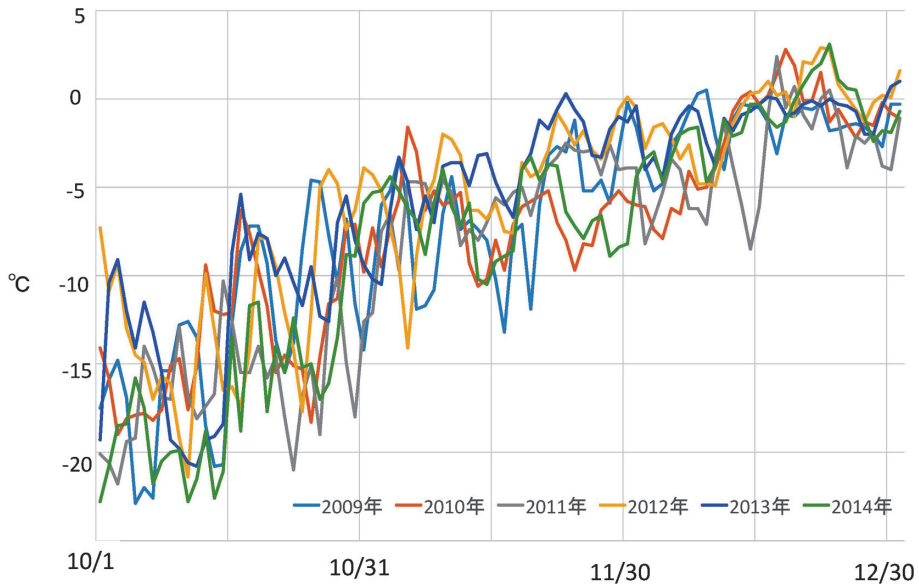


図 7 2009–2014 年 10–12 月の日平均気温

Fig. 7. Daily average air temperatures between Oct. and Dec. From 2009 to 2014.

表 1 昭和基地でのブリザードの分類

Table 1. Classification of the blizzard at Syowa Station.

階級	視程 (m)	風速 (m/s)	継続時間 (h)
A	100 未満	25 以上	6 以上
B	1000 未満	15 以上	12 以上
C	1000 未満	10 以上	6 以上

制で作業を行い、12月29日に完了した（国立極地研究所，2009）。このシーズンは、南極観測船「しらせ」の運航がなく、チャーターした外国船が定着氷縁に到着し、ヘリコプターで隊員と物資が基地に入ったのは、2009年1月13日だった。そのため、十分な日程の余裕があったので、物資輸送や夏作業に支障はなかった。

6. 融雪材の利用

昭和基地では、以前から「砂まき」と称して、現地の土砂を雪面に散布し融雪を早める作業を行ってきた（図9）。これは、黒色系の資材を散布し、雪面のアルベド（ a ）を低下させ日射吸収量を増やすことで融雪を促す雪面黒化法というものであり、散布なしに比べて約3倍の速度で融雪が進むことが報告されている（広田ほか，2008；大沼ほか，1973）。昭和基地では、その有効性は経験的に知られていたが、定量的に測定されたことはない。図10は、

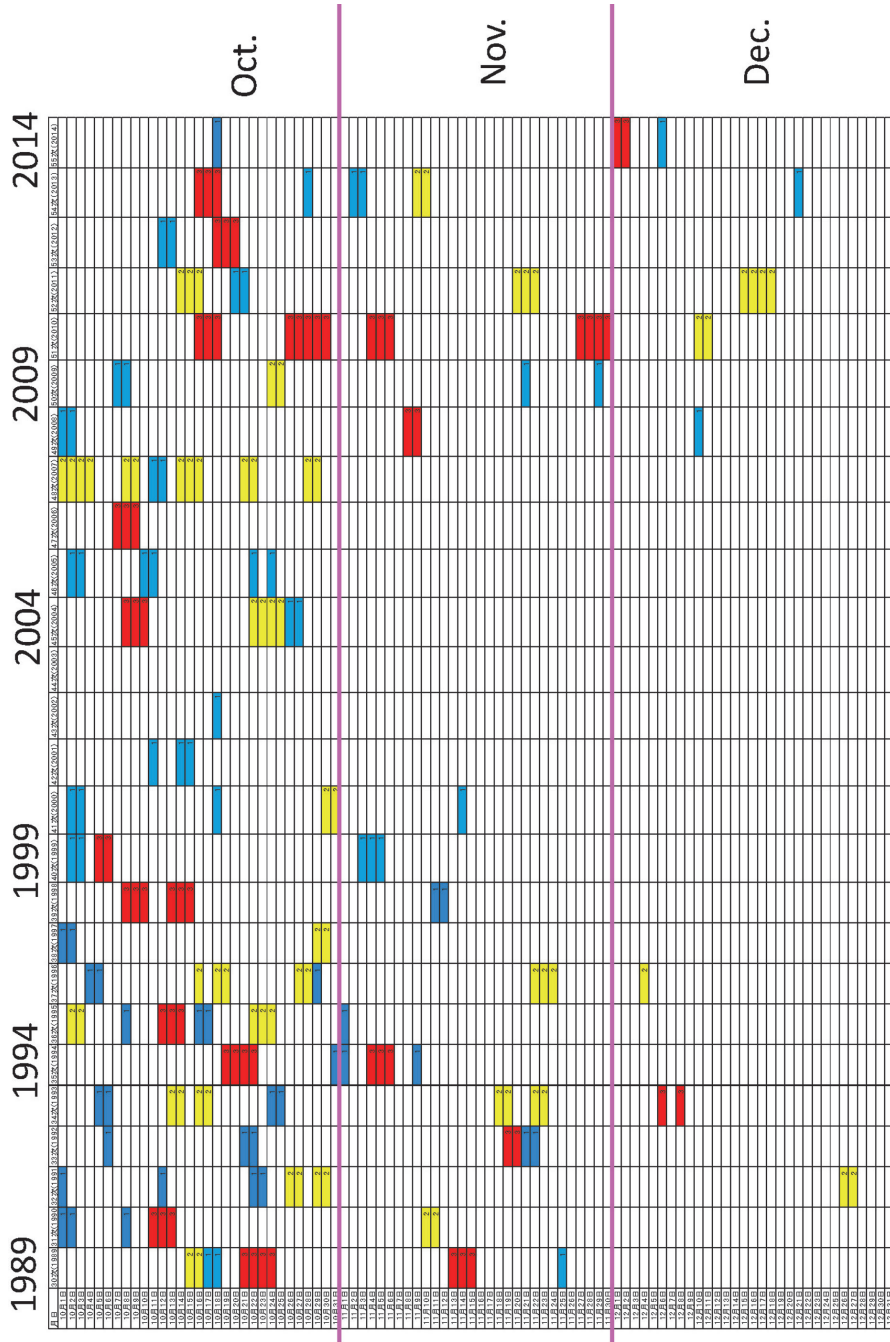


図 8 1989-2014 年 10-12 月のブリザード (国立極地研究所『日本南極地域観測隊報告』第 30-55 次隊の各版より作成)。縦軸は 10 月 1 日から 12 月 31 日まで、赤色は A 級、黄色は B 級、青色は C 級。

Fig. 8. Blizzards hitting Syowa Station between Oct. and Dec. from 1989 to 2014. Vertical axis starts Oct. 1 and ends Dec. 31. Red, Yellow, and Blue indicate A, B and C classes, respectively.

現地の土砂を散布したところと何も手を加えない雪面の比較である。図で手前側の灰色の雪面は、土砂を散布した区域であり、奥の自然雪面と比べて融雪材の効果が絶大であることがわかる。問題なのは、散布の時期である。先の例で第49次隊は、機械による除雪が終了する時期に散布している。しかし、これでは効果が少ない。本来は、雪面へ吸収される放射量、



図 9 昭和基地における融雪材の散布

Fig. 9. Dispersal of snow melting agent at Syowa Station.



図 10 融雪材散布の効果。手前の灰色の雪面は融雪材（土砂）を撒いたエリア。

Fig. 10. Effect of snow melting by dispersal of snow melting agent. Earth and sand were scattered in the nearest area with gray snow surface.

すなわち正味放射量がプラスに転じた頃に散布し、ある期間経過して融雪が進んだ時点で除雪作業をするのが理想的である。

7. 結 論

昭和基地での物資輸送および夏作業の開始時期は、例年 12 月 18 日頃である。そのため、この頃までに必要な場所の除雪を終了させておく必要がある。融雪は、日射放射量と空気伝達熱（顕熱）に大きく依存する。また、ブリザードの襲来は、11 月中旬以降は少なくなる。以上から、除雪開始の時期は遅いほど効率が良い。しかし、12 月中旬までに主要地域の除雪を完了させることを目標にするなら、正味放射量がプラスに転ずる 11 月 15 日頃に融雪材を散布し、ある程度融雪が進み積雪深（図 11）が急激に減少する 11 月 25 日頃から除雪を始めれば効果的である。除雪開始から次隊の到着する 12 月 18 日頃までは約 23 日間あり、当初必要とされる主要幹線道路と物資集積場および建設敷地の除雪（石沢，2014）には充分である。その他の区域の除雪は、その後必要に応じて行えばよい。図 7 で示したように気温がそれ以降も上昇するので、作業はさらに捗るはずである。

8. 今後の課題

昭和基地では、2012 年から大型大気レーダー（パンジー）の観測が始まった。これは小さな八木アンテナを狭い地域に多数配置して行う観測であるが、アンテナがあたかも防風林の役目を果たし、周囲に大きな雪の吹き溜まり（スノウドリフト）を作るようになった。図

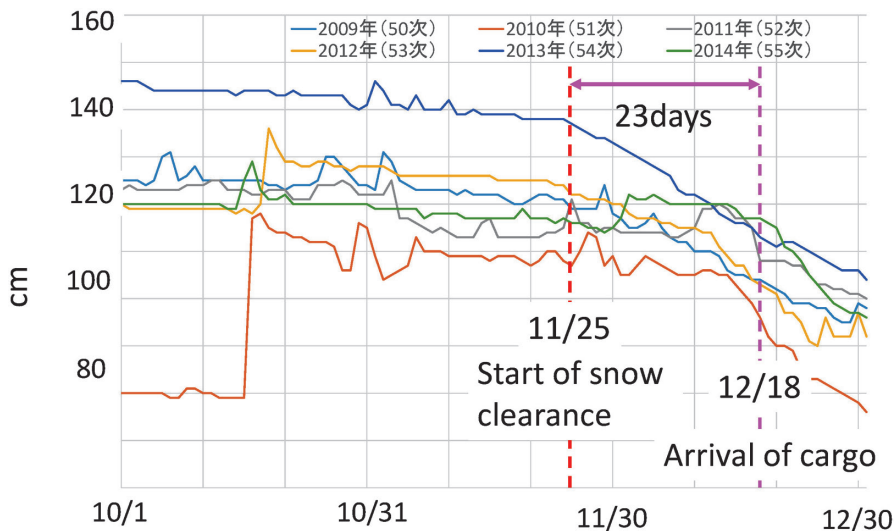


図 11 2009-2014 年 10-12 月の積雪深の変化

Fig. 11. The change of snow depth between Oct. and Dec. from 2009 to 2014.

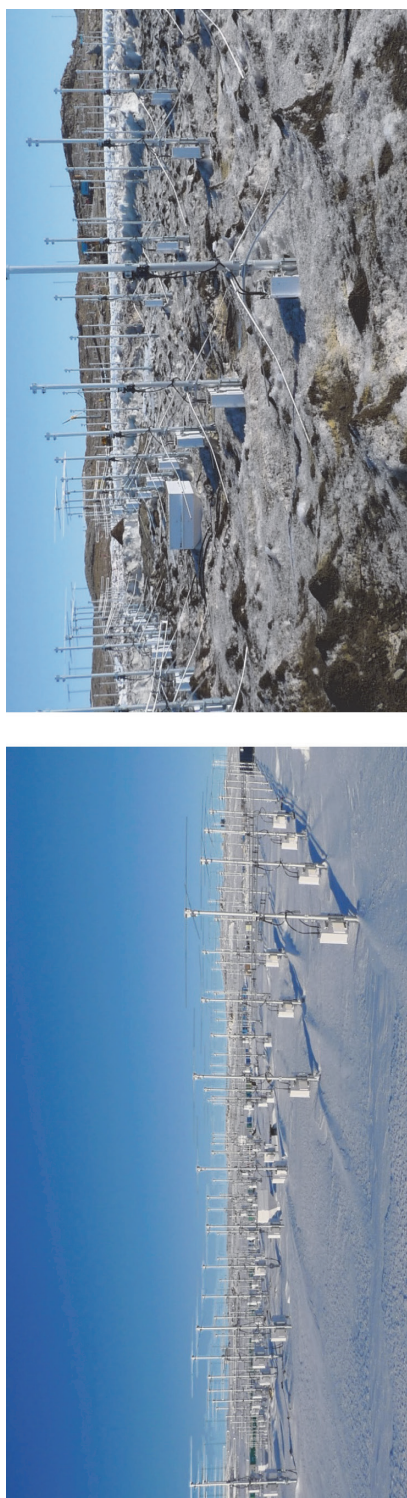


図 12 大型大気レーダー (パンジー) アンテナ群.

左：アンテナ群のスノウドリフト，右：融雪材散布後のアンテナ群と一部変形したアンテナエレメント.

Fig. 12. Pansy antenna array.

Left: Antenna array and snow drift

Right: Antenna array after dispersal of snow melting agent and deformed antennas' elements

12 左側の図は、スノウドリフトがそれほど発達しない時期の写真である。右の図は、白い箱やその上部にあるアンテナエレメントの部位まで発達した後、融雪で雪面が沈下した写真である。こうなると、アンテナエレメントや配線が、雪の沈降力によりダメージを受ける。アンテナ周辺の雪は、夏のシーズンに完全融雪させる必要がある。残雪があると次のシーズンの雪面上昇が早まる。そのため、土砂を散布して融雪を進める作業が毎年行われている。しかし、アンテナの間隔が狭いために車両が進入できず、人手による融雪材の運搬・散布に頼らざるを得ない。この重労働を避けるために、最近開発が進んでいるドローンを利用してアンテナを監視し、また融雪材を散布すれば有効であると思われる。昭和基地の土砂は、粒径が不ぞろいで、湿っているため、遠心力を利用した機械散布には不向きである。国内ではブラックカーボンなどが使用されているが、南極の環境に負荷を与えない融雪材を選定する必要がある。

謝 辞

国立極地研究所の山内恭特任教授には日射放射について基本的なことを教えていただいた。また、スイス連邦工科大学の大村纂名誉教授からは放射と融雪についての概念的なことを教えていただいた。さらに、北見工業大学の高橋修平名誉教授と亀田貴雄教授からは、融雪材散布についてご教授いただいた。特に亀田教授からは、北海道北見の農場での散布現場に案内していただいた。筆者が第53次越冬隊に参加して融雪および除雪に関しさまざまな試行錯誤を行った際、隊員の多くから寛容な理解と援助をいただいた。また、パンジーアンテナの専門家として1年間アンテナのメンテナンスを行った伊藤礼隊員からは、アンテナ周辺の融雪方法について教えていただいた。これらの方々に心から感謝する。

文 献

- 林 正久 (1977) : 東オングル島東部の雪溪の融解. 南極資料. **60**, 28-37.
- 広田知良・長谷川益男・田中弘康・鈴木伸治・但野利秋 (2008) : 農林水産系廃棄物を利用して開発した融雪材の融雪促進効果の検証. 農業気象. **64**, 271-279, doi:10.2480/agrmet.64.4.3.
- 石井幸男 (1959) : 積雪基礎調査融雪の研究. 北海道電力株式会社・札幌管区気象台, 84 p.
- 石沢賢二 (2014) : 昭和基地におけるスノウドリフト軽減のために実施した雪対策. 南極資料. **58**, 52-70, doi:10.15094/00009725.
- 気象庁 (2008) : 南極気象観測五十年史. 東京, 255 p.
- 気象庁 : 南極気象資料 (データ), 気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/antartic/data/report/index.html>, (参照 2017-11-25).
- 小島賢治 (1979) : 融雪機構と熱収支. 気象研究ノート. **136**, 1-38.
- 国立極地研究所 (2009) : 日本南極地域観測隊第49次隊報告. 東京, 410-416.
- 間宮嘉久・居島 修・石井憲介・大河原望・辰己 弘 (2012) : 新しい日射放射観測の開始について. 測候時報. **79**, 15-37.
- Ohmura, A. (2001): Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. J. Appl. Meteorol. **40**, 753-761, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2.
- 大沼匡之・小林一雄・高橋久三郎・村松謙生 (1973) : 融雪促進に関する研究. 北陸農試報. **15**, 135-198.

Yamanouchi, T. (1989): Antarctic Climate Research Data, Part 1. Radiation Data at Syowa Station, Antarctica from February 1987 to January 1988. JARE data reports. **144** (Meteorology **22**), 193 p.