

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15630

研究課題名(和文) 光質制御資材としての積雪の特性と利用

研究課題名(英文) Specification of snowpack as a spectral conversion material and its application for agriculture

研究代表者

村上 貴一 (Murakami, Keach)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・北海道農業研究センター・研究員

研究者番号：50813903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：積雪は地表面で越冬する植物に到達する太陽光スペクトルを変質させることで生理諸反応に影響を及ぼす可能性がある。本研究では積雪の光質制御資材としての特性を調査し、その影響評価と利用可能性を検証することを目的とした。積雪の透過率は可視光で高く遠赤色光で低く、葉とは正反対の特性を示す。15 cm程度の積雪の下で上昇した赤色光/遠赤色光比は光受容体を介した応答を十分に誘導しうる。コムギを対象とした雪上からの電照処理では、光質が生存率および融雪後生育に及ぼす影響は品種間差よりも小さかった。したがって、積雪は光質制御資材としての特性を有するが、その作物生産性への影響は小さいと推察される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物の資源獲得競争という観点から重要な融雪期の積雪下の地表面における光環境の特性を整理し、電照実験によりその光環境が越冬性植物に及ぼす影響を評価した。これらの結果は、気候変動の影響を顕著に受ける積雪地帯での植物の振る舞いに関する基礎的な知見である。また、おもに極域で得られた既存の積雪透過特性が地理状況によっては再現しない可能性を示唆し、生産圏における積雪の光学的特性評価の重要性を示した。

研究成果の概要(英文)：Snowpack has the potential to affect physiological reactions in plants that overwinter on the soil surface by altering the spectrum of penetrating sunlight. This study aimed to investigate the characteristics of snow as a light quality control material and to assess its impact and potential for agricultural utilization. The transmittance of snow is high in the visible waveband and low in the far-red waveband, exhibiting characteristics opposite to those of leaves. Under up to approximately 15 cm of snow, the increased red/far-red ratio could sufficiently induce physiological responses via photoreceptors. Lighting treatment above the snow surface on wheat plants showed that the effects of light quality under snow on survival rate and post-melting growth were smaller than the varietal differences. Therefore, snow possesses characteristics as a light quality control material, but its impact on crop productivity is presumed to be minimal.

研究分野：生物環境工学

キーワード：越冬性 低温耐性 phytochrome コムギ

1. 研究開始当初の背景

寒冷地の植物の一部は積雪下で越冬し、春の融雪とともに生育を再開する。これらの越冬性植物にとって融雪後の速やかな生育再開は周囲の植物との資源獲得競争という観点で重要な意味を持つ。また、コムギに代表される越冬性栽培作物にとっても、生育再開後の初期生育は生産性を決定づける因子のひとつである。

植物は光質（光の波長組成、相対分光分布）を感知することで周囲あるいは上層の個体との競合程度を認識し、自身の置かれた環境に適するよう生育を調節する。とくに葉に吸収されやすい可視域のうち 600–700 nm 程度の赤色光 (R) と吸収されにくい 700–750 nm 程度の遠赤色光 (FR) の比 (R/FR 比) は、光受容体 phytochrome によって感知される代表的な光質情報である。例えば R/FR 比が低い環境は多数の競合個体の存在を示唆し、このような環境で生育した植物は薄く展開された葉や徒長した茎に代表される避陰反応を示す (Smith & Whitelam, 2008)。一方で、積雪は透過した光の R/FR 比を入射光のそれよりも高くするような分光透過特性を示す (Richardson & Salisbury, 1977; Robson & Aphalo, 2019) ことから、積雪透過光は植物にあたかも自身が環境を独占しているかのように誤認させうる。すなわち、積雪は越冬性植物の振る舞いに影響を及ぼす光質制御資材として機能している可能性がある。

積雪下における光質に着目して、積雪透過光が植物の生育に及ぼす影響を調べた研究はいくつか存在する。Richardson & Salisbury (1977) はユタ州北東部の山林に埋没設置されたトンネルの中でレタスの発芽試験を実施し、198 cm の積雪透過光のもとでもレタスの発芽が促進されることを報告し、光質影響を示唆した。Robson & Aphalo (2019) は、積雪による紫外線のスクリーニングに着目してヘルシンキ郊外で積雪の分光透過スペクトルを測定し、積雪下で越冬した融雪期のコケモモは、非被覆状態で越冬した個体と比較して光合成の活性が高く維持されていることを報告した。しかし、これらの研究は直接積雪下における光質が生育に及ぼす影響を調査したのではなく、他の要因との交絡の可能性を排除できない。また、積雪の分光透過特性を調査した報告 (Richardson & Salisbury, 1977; Warren et al., 2006; Perovich, 2007; Robson & Aphalo, 2019 など) の間でも、透過率のピークはおおよそ 350–600 nm と幅広く、植物の生育に影響を及ぼしうる波長範囲での分光透過率についてより詳細な解析が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は (1) 経時的に密度や雪質が変化する積雪の分光透過特性を評価し、積雪が光質制御資材として作用するに足る特性を有するのかを調査すること、そして (2) 積雪下の光質が越冬性植物の生存率および融雪後初期生育に及ぼす影響を実験的に調査することである。実験では、モデルとして典型的な越冬性の栽培作物であるコムギを対象とした。

なお、新型コロナウイルスへの対応にかかるイレギュラーにより当初計画していた実験の実施が困難になった。そのため、当初予定していた研究の一部を中止し、慣行の秋まきコムギ栽培体系に相当する対照区を対象として、非定常環境下における動的な光合成に関するシミュレーション (Murakami & Jishi, 2022) と収量性の品種間差へのガス交換特性の寄与の解析 (Murakami & Ikawa, 2023) を実施した。

3. 研究の方法

(1) 積雪の分光透過率測定

冬季の北海道農業研究センター（札幌市; 43.0°N, 141.4°E）内の畑作圃場近傍の草地上の積雪を対象とした。表層 14 cm の積雪を上下面が空いた筒状の亚克力容器（内寸: 134 × 134 × 140 mm）で採取し、暗室内に運び込み速やかに分光透過率を測定した。光計測には、小型分光器（Maya 2000 Pro, Ocean Insight）に接続された光ファイバ（QP1000-2-UV/VIS, Ocean Insight）を用いた（図 1A）。ハロゲンランプ光（MegaLight 100, SCHOTT）を測定光とし、光源と光ファイバコサインコレクタ（CC-3-UV-S, Ocean Insight）との間に、採取されたサンプルをセットする場合とセットしない場合の光子カウントの比から透過率を計算した。分光透過特性の評価とあわせて、同じく表層 14 cm を対象に積雪の密度を測定し、表層における雪質を評価した。1月から3月までの期間に測定を反復することで、密度および雪質の変化が分光透過率に及ぼす影響を解析した。

(2) 積雪下のコムギの光質応答の解析

雪上から R あるいは FR の LED 電球を用いて電照することで、積雪下における光質がコムギの生存率および融雪後初期生育に及ぼす影響を調査した。実験は (a) 圃場に播種され発芽した個体に対して電照を行う圃場系および (b) 人工気象器（LH-80WLED-DT, 株式会社日本医化器械製作所）内で育苗された幼苗を 5 °C で低温順化したのちに屋外で電照処理に供試する育苗系からなる。いずれの系でも、ストリングライトを雪上に張り R または FR の電球型 LED（BT-9C-R30 および BT-9C-FR15, アスター株式会社）を設置して電照する試験区（R 区または FR 区）および無照射の対照区（ctrl 区）を設けた（図 1B）。圃場系では9月下旬に播種する北海道で主流の秋まきコムギ栽培と長期積雪の直前に発芽するよう 11 月に播種を行う初冬まきコムギ栽培をモデルとし、積雪期に雪面から 20–30 cm の位置から光を照射した。融雪後に生存率を評価し、一部の実験ではサンプリングと葉面積測定を行い地上部のみを対象とした生長解析を実施することで生育再開初期における乾物生産特性を評価した。育苗系では、低温順化後の苗に対して屋外で電照処理を開始し、一定期間後に人工気象室内に移動して生長を再開した個体を生存したとみなした。積雪深および電照距離はなりゆきの降雪に応じて変化した。また、屋外移動時に降雪が見込まれず苗が直ちに枯死する低温の場合には苗を一定の深さまで埋没させて電照処理を開始した。実験には、秋まき向け品種の‘きたほなみ’、‘ゆめちから’、春まき向け品種の‘春よ恋’、‘はるきらり’、‘ハルユタカ’を供試した。

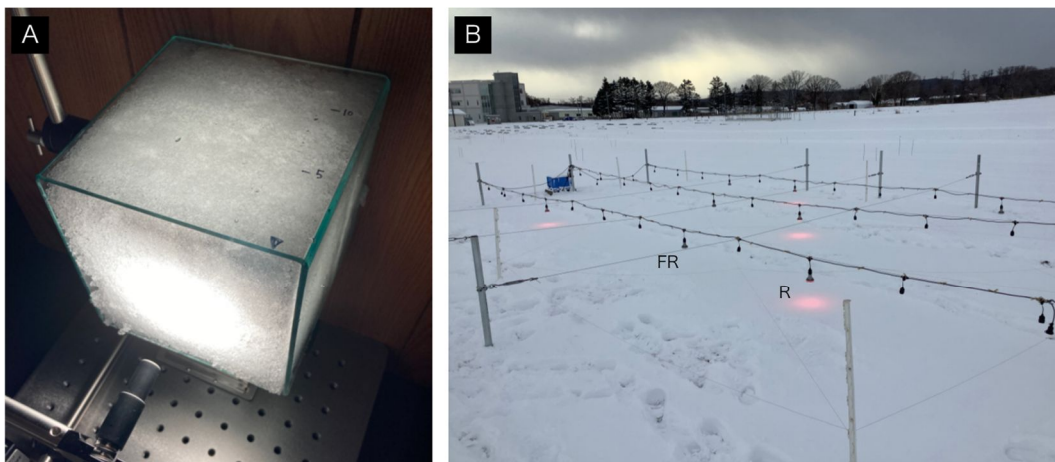


図1: (A) 採取された積雪の分光透過率測定および (B) 圃場での初冬まきコムギに対する雪上電照処理の様子。

4. 研究成果

(1) 積雪の分光透過率

積雪の透過率には、雪質・密度・波長の3要因がいずれも影響した。400–800 nm の波長範囲では透過率は雪質・密度によらず 600 nm 付近にピークを持つ概ね単峰性のスペクトルを示し、R/FR は常に1よりも小さくなった (図 2A)。phytochrome を介した反応の指標となる phytochrome 光平衡値 (Sager et al., 1988) は、快晴時の雪面における太陽光では 0.72 程度であるのに対し、積雪透過光では 0.74–0.78 となった。積雪 1 cm あたりの透過率は高くとも 80 % 程度であり、密度が 0.1 g cm^{-3} 程度の新雪は透過率が小さく、密度が 0.3 g cm^{-3} 前後の湿った雪で透過率が最大となった (図 2B)。融雪と変態にしたがって新雪からこしまり雪、しまり雪と粒径が大きくなり、氷に近づくことで、透過率が上昇したものと考えられる。14 cm の積雪のもとでは、太陽光は 10^2 オーダーで減衰したが、この量は弱光に应答する光受容体を介した諸反応を誘導するには十分である。とくに融雪期の春が近づいた地表面は比較的明るくかつ高 R/FR 条件にある。

本研究で得られた積雪の透過率のピークは先行研究 (Robson & Aphalo, 2019) およびその中で文献調査結果と比較して長波長側にシフトしている。この傾向はとくにサンプル中に飛来した物質が観察される融雪期に顕著であったことから、サンプルに混入した不純物が原因であると推察される。ニューハンプシャー州の小都市で積雪の分光透過率を計測した Perovich (2007) は、本研究と同様に融雪期の湿り雪の透過率ピークが 590 nm 付近にあったことを報告し、その原因として大気中の粒子状物質と植物性の微小な物質を挙げている。積雪の分光特性を調査した先行研究はおもに極域を対象としており、周囲植生からの乾性沈着が少なく人為性の物質の影響も少ないことが予想される。正確な原因を理解するためにはさらなる分析を要するが、積雪下の光環境を議論する場合には、サイト周囲の地理的な要因を考慮する必要がある可能性が高い。

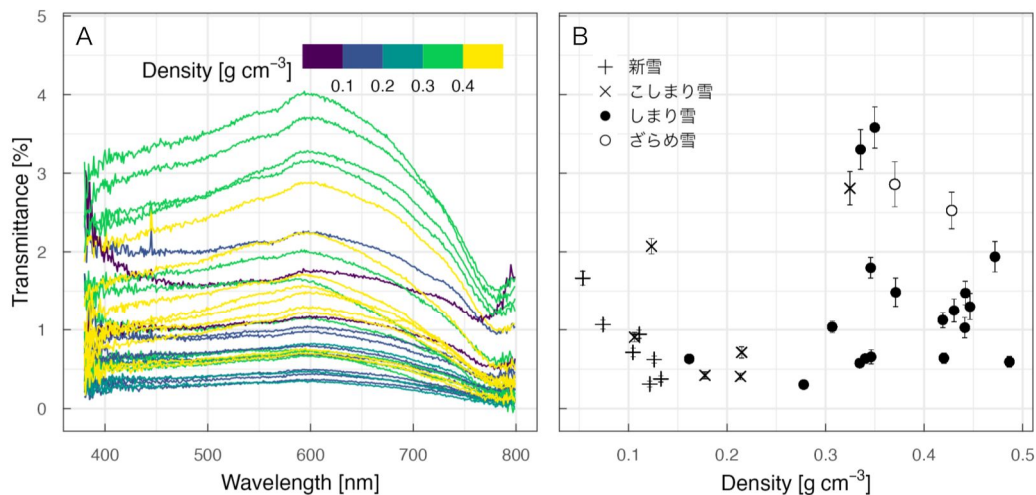


図2: 採取された14 cmの積雪の (A) 分光透過率および (B) 密度と透過率 (波長400–700 nm) の関係。エラーバーは標準偏差 ($N = 3-4$)、雪質は積雪表面の観察に基づいたもの。

(2) 積雪下のコムギの光質応答の解析

9月下旬に播種する慣行的な秋まきコムギの栽培体系を対象として実施した圃場電照実験では、越冬率・初期生育とも達観で把握できるほどの顕著な光質影響は認められなかった。phytochrome を介した開花・伸長などに関するいくつかの生育項目は、R/FR 比に対して極めて鋭敏であることが報告されているが、慣行の秋まきコムギで越冬率および初期生育が積雪下における R/FR 比に対して鋭敏に反応する可能性は低いと考えられる。そこで初冬まき栽培体系を対

象として早いステージの個体の応答を評価することで、積雪以前にある程度生育が進んだ個体を対象とする秋まき栽培体系よりもクリアに光質影響を検証することを検討した。また秋まき栽培体系で対象とした品種が日長感応性を失っていた可能性も考慮し、春まき向け品種を加えた4品種を解析に供試し、生存率と生長解析パラメータを被説明変数として光質処理と品種を要因とする二元配置分散分析を実施した(表1)。品種がこれらの被説明変数のうちいくつかの変数に及ぼす影響は統計的に有意であった。一方で、光質は蓄積された乾物の葉への分配を反映するパラメータである葉重量比(Leaf Weight Ratio; LWR)にのみ有意な影響を及ぼした。LWRはctrl区と比較してR区で小さく、FR区で大きい傾向が認められた。すなわち、積雪下で受光する光のR/FR比が小さいほど、コムギは越冬後の初期生育過程で葉へ乾物分配を多く分配する傾向にあった。R/FR比に応じた避陰反応では、R/FR比が小さいときにLWRは小さくなる(Shibuya et al., 2016 など)ことから、本データは積雪下で特有のメカニズムが機能した可能性を示唆する。

育苗系では、幅広い発育ステージ・環境条件のもとでの光質と生存率の関係を評価することを意図して、育苗期間と電照処理期間・時期にバリエーションを設けた実験を反復した。無電照のctrl区と比較して、電照区で生存率が高い傾向にあり、この結果は十分な低温耐性の獲得には光照射が必要であるとする既存の報告(Gray et al., 1997 など)と整合的であった。また、電照区間ではFR区でR区と比較して生存率が高い傾向にあった。FR照射あるいは低R/FR比が低温耐性を高めた例はシロイヌナズナ(Franklin & Whitlam, 2007)およびトマト(Wang et al., 2016)で報告されており、積雪を透過した比較的弱い光でもコムギに同様の影響を及ぼした可能性がある。上述の通り、積雪の分光透過特性はR/FR比を高めることから、積雪の存在は低温耐性を低下させる。積雪自体には断熱作用があるため、十分な積雪があれば地表面の植物が低温に曝される可能性は低い。ただし、気候変動による降雪・気温パターンの変化により、連続した極端な高温と低温により融雪促進と低温への暴露が生じるリスクは別途評価する必要があるだろう。

表1 初冬まき栽培に供試された4品種のコムギに対するR・FR電照実験の分散分析表(N=4)

RGR: 相対成長速度; NAR: 純同化速度; LAR: 葉面積比; LWR: 葉重比; SLA: 比葉面積

n.s.: $P > 0.05$, *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$

	生存率	RGR	NAR	LAR	LWR	SLA
Light (L)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
Cultivar (C)	***	n.s.	n.s.	***	***	***
L × C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

引用文献

Franklin & Whitlam (2007) *Nat Genet* **39**:1410–1413; Gray et al. (1997) *Plant Physiol* **114**:467–474; Murakami & Ikawa (2023) *bioRxiv* doi: 10.1101/2022.08.17.502868; Murakami & Jishi (2022) *Funct Plant Biol* **49**:452–462; Perovich (2007) *J Glaciol* **53**:201–210; Richardson & Salisbury (1977) *Ecology* **58**:1152–1158; Robson & Aphalo (2019) *Photochem Photobiol Sci* **18**:1963–1971; Sager et al. (1988) *Trans ASAE* **31**:1882–1889; Shibuya et al. (2016) *HortScience* **51**:843–846; Smith & Whitlam (2008) *Plant Cell Environ* **20**:840–844; Wang et al. (2016) *Plant Physiol* **170**:459–471; Warren et al. (2006) *Appl Opt* **45**:5321–5334.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murakami Keach, Jishi Tomohiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Appropriate time interval of PPFD measurement to estimate daily photosynthetic gain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Functional Plant Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1071/FP20323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村上 貴一, 伊川 浩樹
2. 発表標題 北海道の秋まきコムギ‘ゆめちから’と‘きたほなみ’の光合成特性
3. 学会等名 日本農業気象学会 2022 年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上 貴一
2. 発表標題 圃場実験を始めて感じた施設園芸へのwish list
3. 学会等名 園芸学会令和3年度秋季大会 小集会「第8回栽培系・環境制御系融合型施設園芸研究」（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------