

積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖と
そのアルベド効果のモデル化に関する研究

2016年8月

千葉大学大学院理学研究科

地球生命圏科学専攻 地球科学コース

大沼 友貴彦

(千葉大学審査学位論文)

積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖と
そのアルベド効果のモデル化に関する研究

2016年8月

千葉大学大学院理学研究科

地球生命圏科学専攻 地球科学コース

大沼 友貴彦

目次

図と表の一覧.....	VI
要旨.....	X
Abstract.....	XIV
研究背景.....	1
第1章 新潟県十日町市の積雪における雪氷藻類の季節変化とその繁殖要因	
1-1. はじめに.....	10
1-2. 調査地.....	11
1-3. 手法.....	13
1-3-1. 気象観測	
1-3-2. 積雪物理観測	
1-3-3. 積雪サンプルの採取	
1-3-4. クロロフィル a 濃度の分析	
1-3-5. 光学顕微鏡による藻類種の観察	
1-3-6. 光学顕微鏡による藻類の定量化	
1-4. 結果.....	17
1-4-1. 十日町試験地の気象条件	
観測された気象条件の季節変化 (2011 年)	
観測された気象条件の経年変化	
1-4-2. 十日町試験地における積雪の物理・化学条件	
観測された積雪の季節変化 (2011 年)	
観測された積雪の経年変化	
1-4-3. 積雪で観察された雪氷藻類	
積雪表面で観測された雪氷藻類	
積雪断面で観測された雪氷藻類	
1-4-4. 積雪表面における雪氷藻類の細胞濃度	
細胞濃度の季節変化 (2011 年)	
細胞濃度の経年変化	
1-4-5. 積雪表面のクロロフィル a 濃度	

クロロフィル a 濃度の季節変化 (2011 年)	
クロロフィル a 濃度の経年変化	
1-5. 考察.....	25
1-5-1. 十日町における雪氷藻類の生活史	
十日町試験地の雪氷藻類	
十日町試験地の雪氷藻類の出現過程	
1-5-2. 雪氷藻類とクロロフィル a 濃度の関係	
1-5-3. 雪氷藻類の成長曲線と最大繁殖量の年変化	
1-5-4. 雪氷藻類の成長曲線の数理モデルによる近似	
1-5-5. 雪氷藻類の初期細胞濃度と増加率	
2011 年の観測値から得た初期細胞濃度	
2011 年の観測値から得た増加率	
マルサスモデルによる 2013-2015 冬期の藻類濃度の季節変化の再現	
1-6. 結論.....	33
第 2 章 グリーンランド北西部の氷河における積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖モデル	
2-1. はじめに.....	35
2-2. 調査地.....	37
2-3. 手法.....	38
2-3-1. 気象観測	
2-3-2. 積雪観測	
2-3-3. 積雪サンプルの採取	
2-3-4. クロロフィル a 濃度の分析	
2-3-5. 光学顕微鏡観察による藻類種の同定	
2-3-6. 光学顕微鏡観察による藻類の定量	
2-3-7. 積雪中の鉍物粒子量の分析	
2-3-8. 積雪中の炭素量の分析	
2-4. 結果.....	46
2-4-1. カナック氷河の気象条件	
2-4-2. カナック氷河上の積雪条件	
積雪表面における積雪条件の季節変化	

Site-B の積雪表面下の層における積雪条件の季節変化	
積雪断面における積雪条件の季節変化	
2-4-3. カナック氷河上の鉱物粒子, BC および OC の濃度	
積雪表面における鉱物粒子, BC および OC の濃度の季節変化	
Site-B の積雪表面下の層における鉱物粒子と炭素濃度の季節変化	
2-4-4. カナック氷河の積雪中の雪氷藻類	
2-4-5. 積雪表面における雪氷藻類の細胞濃度	
<i>Chloromonas</i> sp. の細胞濃度の季節変化	
小型球形緑藻の細胞濃度の季節変化	
<i>Chr. cyanobacterium</i> の細胞濃度の季節変化	
細胞濃度の高度分布	
2-4-6. 積雪表面における雪氷藻類の群集構造	
2-4-7. 積雪表面のクロロフィル a 濃度	
クロロフィル a 濃度の季節変化	
クロロフィル a 濃度の高度分布	
2-5. 考察.....	58
2-5-1. カナック氷河の雪氷藻類	
2-5-2. カナック氷河における雪氷藻類の出現条件	
2-5-3. 雪氷藻類とクロロフィル a 濃度の関係	
2-5-4. 雪氷藻類と OC の関係	
2-5-5. 雪氷藻類の成長曲線の数理モデル	
ロジスティックモデルによる近似	
初期細胞濃度の決定要因	
増加率に影響を与える要因	
環境収容力に影響を与える要因	
2-5-6. カナック氷河と十日町試験地の観測結果の比較	
雪氷藻類の出現条件の比較	
雪氷藻類の初期細胞濃度の比較	
雪氷藻類の増加率の比較	
2-5-7. ロジスティックモデルによる雪氷藻類繁殖の再現に必要なデータ	
2-6. 結論.....	73

第3章 雪氷藻類を取り入れた積雪表面のアルベド物理モデルの開発

3-1. はじめに.....	75
3-2. 調査地.....	76
3-3. 手法.....	77
3-3-1. アルベド物理モデル PBSAM	
Physically Based Snow Albedo Model (PBSAM) の概要	
入力データ	
3-3-2. PBSAM への雪氷藻類による吸光効果の追加	
3-3-3. 積雪断面観測, 積雪サンプルの採取, サンプルの分析手法	
3-3-4. 積雪表面の反射率の観測	
3-3-5. アルベドの観測	
3-3-6. PBSAM によるアルベドの計算	
3-4. 結果.....	84
3-4-1. Pit-1 と Pit-2 における観測結果	
各ピットの積雪物理量	
各ピットの積雪中の雪氷藻類	
各ピットの積雪中の Dust 濃度	
各ピット近傍の積雪の表面反射率	
3-4-2. PBSAM による積雪表面アルベドの計算結果	
3-5. 考察.....	87
3-5-1. PBSAM から求めたアルベドの計算値と観測値の比較	
3-5-2. 雪氷藻類の吸光度の調整	
3-5-3. 雪氷藻類の繁殖による吸光効果を考慮したアルベド物理モデル	
3-5-4. 雪氷藻類の繁殖モデルと PBSAM を合わせて計算したアルベドの季節変化	
アルベドの季節変化の計算	
アルベドの季節変化の計算結果と結果の考察	
観測期間外の雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響の計算	
3-6. 結論.....	97
総括.....	99
謝辞.....	108
文献.....	112

表	125
图	162

表と図の一覧

- 表 1-1. 2011 年十日町試験地の積雪表面における観測結果
- 表 1-2. 2013 年十日町試験地の積雪表面における観測結果
- 表 1-3. 2014 年十日町試験地の積雪表面における観測結果
- 表 1-4. 2015 年十日町試験地の積雪表面における観測結果
- 表 1-5. 2011 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値
- 表 1-6. 2013 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値
- 表 1-7. 2014 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値
- 表 1-8. 2015 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値
- 図 1-1. 日本の雪質分布と調査地の位置
- 図 1-2. 新潟県十日町市の森林総合研究所十日町試験地
- 図 1-3. 十日町試験地における 1918 年から 2007 年までの気温 (a) と積雪深 (b) の年平均差
- 図 1-4. 十日町試験地に設置された気象測器
- 図 1-5. 2011 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化
- 図 1-6. 2013 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化
- 図 1-7. 2014 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化
- 図 1-8. 2015 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化
- 図 1-9. 2011 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化
- 図 1-10. 2013 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化
- 図 1-11. 2014 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化
- 図 1-12. 2015 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化
- 図 1-13. 2011 年の積雪表面の EC と pH の季節変化
- 図 1-14. 2013 年の積雪表面の EC と pH の季節変化
- 図 1-15. 2014 年の積雪表面の EC と pH の季節変化
- 図 1-16. 2015 年の積雪表面の EC と pH の季節変化
- 図 1-17. 十日町試験地の積雪で観察された雪氷藻類
- 図 1-18. 2015 年 4 月 6 日の積雪断面における雪氷藻類と物理特性の垂直変化
- 図 1-19. 十日町試験地 4 年間の積雪表面におけるクロロフィル a 濃度と細胞濃度の関係
- 図 1-20. 細胞濃度で分けた積雪表面における細胞濃度とクロロフィル濃度の関係
- 図 1-21. 2011 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値

図 1-22. 2013, 2014, 2015 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値

表 2-1. Site-A における積雪表面の物理特性

表 2-2. Site-B における積雪表面の物理特性

表 2-3. Site-A における積雪表面の EC, pH, 不純物濃度

表 2-4. Site-B における積雪表面の EC, pH, 不純物濃度

表 2-5. Site-B における表面下の積雪層の物理特性

表 2-6. Site-B における表面下の積雪層の不純物濃度

表 2-7. Site-A の積雪表面における細胞濃度とクロロフィル a 濃度

表 2-8. Site-B の積雪表面における細胞濃度とクロロフィル a 濃度

表 2-9. Site-A と Site-B における観測値とモデルの近似から得られたパラメータ

表 2-10. Site-A と Site-B におけるモデルから得られた初期細胞濃度と観測された鉍物粒子の重量

表 2-11. 先行研究によって明らかになっている藻類の増加率

表 2-12. 先行研究によって明らかになっている藻類の環境収容力

図 2-1. グリーンランド北西部カナック地区の位置

図 2-2. カナック氷河上の調査地点

図 2-3. カナック氷河の Site-A と Site-B の様子

図 2-4. Site-B に設置されている自動気象測器

図 2-5. Site-A に設置した自動気象測器

図 2-6. デジタルカメラによって撮影した積雪粒子

図 2-7. 積雪表面の生物分析用のサンプル採取の様子

図 2-8. 積雪表面の鉍物分析用のサンプル採取の様子

図 2-9. 石英ガラスフィルターに濾過した炭素分析用のサンプル

図 2-10. 鉍物分析用のサンプルの分析前処理の様子

図 2-11. カナック氷河の Site-A および Site-B で 4 月から 9 月まで観測された気象データ

図 2-12. Site-A の 6 月から 9 月までの気象データ

図 2-13. Site-B の 6 月から 9 月までの気象データ

図 2-14. Site-A の 6 月から 9 月までの積雪表面の季節変化

図 2-15. Site-B の 6 月から 9 月までの積雪表面の季節変化

図 2-16. Site-A と Site-B の積雪表面における EC の季節変化

図 2-17. Site-A と Site-B の積雪表面における pH の季節変化

- 図 2-18. Site-B の表面下の積雪層における積雪物理量の季節変化
- 図 2-19. Site-A で観察された融解水流
- 図 2-20. Site-A と Site-B の積雪表面における鉱物粒子の重量の季節変化
- 図 2-21. Site-B の積雪表面における炭素濃度の季節変化
- 図 2-22. Site-B の表面下の積雪層における不純物濃度の季節変化
- 図 2-23. カナック氷河の積雪表面で観察された雪氷藻類
- 図 2-24. Site-A 積雪表面における藻類の細胞濃度の季節変化
- 図 2-25. Site-B の積雪表面における藻類の細胞濃度の季節変化
- 図 2-26. Site-A と Site-B の積雪表面における雪氷藻類の細胞体積バイオマス
- 図 2-27. Site-A と Site-B の積雪表面におけるクロロフィル a 濃度の季節変化
- 図 2-28. Site-A と Site-B のクロロフィル a 濃度と細胞濃度の関係
- 図 2-29. 積雪表面の雪氷藻類と OC の季節変化
- 図 2-30. 藻類の細胞体積バイオマスと OC の濃度の関係
- 図 2-31. ロジスティックモデルにおけるパラメータの感度
- 図 2-32. 積雪表面の細胞濃度のモデル計算値と観測値

- 表 3-1. アルベド物理モデルで用いた不純物の波長毎の吸光係数
- 表 3-2. Pit-1 と Pit-2 の積雪 A 層（深さ 0-2 cm）における積雪物理量の観測値
- 表 3-3. Pit-1 と Pit-2 の積雪 B 層（深さ 2-10 cm）における積雪物理量の観測値
- 表 3-4. Pit-1 と Pit-2 の積雪 A 層（深さ 0-2 cm）における不純物濃度、反射率、アルベドの観測値
- 表 3-5. Pit-1 と Pit-2 の積雪 B 層（深さ 2-10 cm）における Dust, BC の観測値
- 表 3-6. アルベド物理モデルに入力した気象データと積雪全層の厚さ
- 表 3-7. アルベド物理モデルに入力した Pit-1 の積雪層ごとの物理量と不純物濃度
- 表 3-8. アルベド物理モデルに入力した Pit-2 の積雪層ごとの物理量と不純物濃度
- 表 3-9. PBSAM により求めたアルベドの計算値と観測値
- 表 3-10. OC の吸光係数を調節して求めたアルベドのモデル計算値
- 表 3-11. アルベド物理モデルに入力した気象と積雪全層の厚さのデータ
- 表 3-12. アルベド物理モデルに入力した 1 層目（深さ 0-2 cm）の積雪物理量と不純物濃度のデータ
- 表 3-13. アルベド物理モデルに入力した 2 層目（深さ 2-5 cm）の積雪物理量と不純物濃度のデータ

- 表 3-14. アルベド物理モデルに入力した 3 層目（深さ 5-10 cm）の積雪物理量と不純物濃度のデータ
- 表 3-15. アルベド物理モデルで用いた不純物の波長毎の吸光係数
- 表 3-16. アルベドのモデル計算値と観測値の季節変化
- 表 3-17. 繁殖モデルから求めた細胞濃度および OC の濃度とその値で再現したアルベド
- 図 3-1. 観測を行った Pit-1 と Pit-2 の周辺積雪
- 図 3-2. 観測を行った Pit-1 と Pit-2 の積雪表面
- 図 3-3. 本研究のアルベド物理モデル PBSAM によるアルベド計算の流れ
- 図 3-4. Pit-1 と Pit-2 の総細胞体積バイオマスに対する藻類種ごとのバイオマスの割合
- 図 3-5. Pit-1 と Pit-2 の雪面における波長毎の反射率
- 図 3-6. PBSAM によるアルベドの計算値と観測値
- 図 3-7. OC の吸光係数を調整して求めたアルベドの計算値と観測値の差
- 図 3-8. Site-B における藻類濃度とアルベドの季節変化
- 図 3-9. 観測期間外の藻類濃度とアルベドのモデル計算値

要旨

近年、北極圏では積雪の融解加速による積雪面積の減少が報告されている。積雪の融解加速の原因は、単に気温の上昇だけでなく、表面アルベドの低下が注目されている。積雪のアルベドの低下の原因の一つは、積雪中に含まれる不純物の増加である。鉱物ダストや黒色炭素といった不純物は積雪のアルベドを低下させることが知られており、その定量的な効果は、積雪中の放射伝達に基づいたアルベド物理モデルによって計算することができる。積雪中の不純物として、さらに雪氷藻類と呼ばれる微生物の存在が明らかになり、この微生物もアルベドを低下させることがわかってきた。したがって、アルベドの季節変化および積雪融解の評価のためには、雪氷藻類の積雪上の繁殖過程の理解、さらにそのアルベドへの効果を求めることが重要である。しかしながら、雪氷藻類の繁殖の季節変化の定量的な観測例はまだ少なく、またそのアルベドへの定量的効果も明らかになっていない。そこで、本研究では、日本および北極圏の積雪において融雪期に連続的な観測を行い、雪氷藻類の繁殖の季節変化を数理モデルとして再現すること、そして既存のアルベド物理モデルに雪氷藻類を不純物として新たに組み込んで、雪氷藻類の繁殖モデルと合わせることで、雪氷藻類の影響を入れた積雪表面のアルベドの季節変化を再現することを目的とした。対象とした地域は、日本の新潟県十日町市にある森林総合研究所十日町試験地と北極圏グリーンランド北西部カナック氷河である。

第1章では、新潟県十日町市に位置する森林総合研究所十日町試験地の積雪において、4年間にわたって冬期から融雪期にかけて定期的な観測を行い、雪氷藻類の繁殖の季節変化および経年変動をそれぞれ明らかにし、既存の微生物の増加モデルを用いて雪氷藻類の繁殖を再現することを試みた。

観測の結果、藻類は2月に積雪表面に出現し、その後、3、4月に積雪が消滅するまで細

胞濃度は急激に増加することが明らかになった。積雪断面観測の結果から、この雪氷藻類は大気を介して積雪表面へ供給された孢子に由来すると考えられる。気象条件と藻類の出現時期を比較したところ、雪氷藻類の繁殖開始の条件は、降雪が無く、気温が 0°C 以上の期間が連続で 24 時間以上維持されることであることが示唆された。4 年間の雪氷藻類の細胞濃度の季節変化の比較の結果、積雪表面が融解している期間が最も長い冬期では細胞濃度が最も増加していることが明らかになった。雪氷藻類の出現した時期と積雪が消滅した時期は冬期によって異なり、雪氷藻類が繁殖していた期間は冬期によって異なっていた。そして、この雪氷藻類が積雪にいた期間が長い冬期ほど雪氷藻類が繁殖を行い、藻類濃度は指数関数的に増加していたことが明らかになった。この結果は、雪氷藻類の繁殖量がその繁殖期間の長さに依存することを示唆している。

雪氷藻類の観測結果に基づいて、雪氷藻類の繁殖を微生物の増加モデルであるマルサスモデルを用いて再現することを試みた。マルサスモデルは、藻類の増加を初期細胞濃度と増加率という二つのパラメータによって表しており、このモデルでは藻類濃度は時間の指数関数として表現される。2011 年の観測結果を使った回帰から、初期細胞濃度は $0.18 \text{ cells mL}^{-1}$ と増加率は 0.22 d^{-1} となった。求めた雪氷藻類の細胞濃度のモデル計算値と観測値の決定係数は 1.00 となり、雪氷藻類の繁殖はマルサスモデルによって再現できることが示された。

第 2 章では、グリーンランド北西部のカナック氷河上の積雪において、融雪期に連続的な観測を行って標高の異なる 2 地点の雪氷藻類の繁殖の季節変化を明らかにし、1 章と同様に既存の微生物の増加モデルを用いて雪氷藻類の季節変化を再現することを試みた。

雪氷藻類は、融雪が 6 月上旬に始まった後、6 月中旬にはじめて積雪表面に出現した。その後、藻類濃度は十日町同様に指数関数的に増加していたが、標高の低い地点では 7 月下旬から藻類濃度の上昇が止まることが明らかになった。これは、雪氷藻類の繁殖量がなん

らかの環境条件の制約によって上限に達したのだと考えられた。

雪氷藻類の繁殖が上限に達していたという仮定に基づいて、1章で用いたマルサスモデルに環境収容力を加えたロジスティックモデルをもちいて、雪氷藻類の繁殖の再現を行った。環境収容力を藻類濃度の上昇が止まった8月上旬の藻類量によって定義し、このロジスティックモデルを観測結果に回帰して初期細胞濃度と増加率を決定したところ、求めたモデル式の決定係数は標高の低い地点と高い地点でそれぞれ0.64と0.96となった。2地点の比較から、初期細胞濃度はダスト量の多い下部地点の方が大きいこと、増加率は地点による大きな差がないことがわかった。以上の結果から、この地域の藻類繁殖の季節変化は、ロジスティックモデルによって再現が可能であることが示された。

第3章では、グリーンランドのカナック氷河上の積雪の観測データを利用して、既存のアルベド物理モデルPBSAMに、雪氷藻類を不純物として取り入れた新しいモデルを作ることを試みた。さらに、そのモデルを使ってカナック氷河表面積雪のアルベドの季節変化を再現し、藻類の繁殖モデルと組み合わせることによって、藻類の繁殖がアルベドの季節変化に及ぼす影響について考察した。

観測した積雪中の黒色炭素、鉱物粒子の濃度に加えて、雪氷藻類の量を従来の研究で吸光係数が示されている有機炭素として含めアルベドを計算したところ、求めたアルベドは観測値よりも0.056高い値になった。これは、雪氷藻類の吸光効果を過小評価しているためと考えられる。そこで、既存の有機炭素について、雪氷藻類の色素に対応する400–700 nmの波長域の吸光係数を数段階に分けて強くし、それぞれの場合のアルベドの再計算を行った。その結果、その吸光係数を13倍に設定し計算したアルベドが、観測値にもっとも近い値となった。この藻類の吸光係数を含めたアルベド物理モデルに、第2章で作成した雪氷藻類の繁殖モデルと合わせて、融雪期の雪氷藻類の繁殖および積雪アルベドの季節変化を再現した。その結果、8月上旬まではダストの影響が最も大きいですが、その後藻類のアルベ

ドへの影響が顕著になり，藻類濃度が上限に達すると藻類のアルベド低下効果は 0.163 であることが示された。

本研究では，積雪上の雪氷藻類の連続観測をもとに藻類濃度の季節変化を定量的に評価し，その変化が数理モデルによって再現できることを明らかにした。さらに既存のアルベド物理モデルを改良することによって，藻類の影響を含めた積雪表面アルベドの計算を可能にした。さらに検討が必要であるものの，藻類繁殖モデルのパラメータは，気象データおよびダストデータをもとに決定できる可能性を示した。このことは藻類繁殖モデルおよびアルベド物理モデルが，領域スケールまたは全球スケールの気候モデルと組み合わせた計算が可能であることを示している。今後，それぞれのモデルの汎用性を検討し，藻類繁殖およびその表面アルベドへの影響を適用する空間および時間的範囲を広げ，今後の地球温暖化の積雪融解への影響について生物活動を含めた評価を目指していきたい。

Modeling of snow algal growth and its effect on snow surface albedo based on snowfield observations

Yukihiko Onuma

Abstract

Snow covered area in the Arctic region has been recently reduced due to acceleration of snow melting. The recent acceleration of snow melting is likely caused by temperature rise and snow albedo reduction. The possible causes of the albedo reduction are impurities in the snow such as black carbon and mineral dust. Furthermore, recent studies have revealed that snow algae, which are photosynthetic microbes growing on snow and ice, can also affect albedo of snow surface. Therefore, it is important to determine factors affecting their growth and to quantify their effect of surface albedo in order to estimate present and future melting of snowpack in the Arctic region. However, there is little information on the temporal changes in snow algal growth and their effect on surface albedo. In this study, I aim to quantify the seasonal change of snow algae on snowpacks in Japan and Greenland to demonstrate the environmental factors affecting their change, and to establish a numerical model of snow algal growth, and a physical model to reproduce surface albedo including the effect of snow algae.

In Chapter 1, the temporal changes in algal abundance on surface snow were studied over four winters in a snowfield in Tohkamachi, Japan. The observations revealed that snow algae keep growing unless snowfall occurs and air temperature drops to freezing point, and that the algal abundance is likely to be correlated with the duration of algal growth. The seasonal change of observed cell concentration was fitted to a Malthusian model with the initial cell concentration of 1.8×10^1 cells mL⁻¹ and the growth rate of 0.22 d⁻¹. The coefficient of determination of the regression was 1.00, suggesting that the

algal growth curve was reproduced well with the equation.

In Chapter 2, the temporal changes in algal abundance on surface snow were studied from June to August, 2014 at two different elevations (Site-A and Site-B) on a Greenland glacier. The observations revealed that algal concentration increased exponentially until August at Site-B, while its growth rate decreased after late-July at Site-A. Based on an assumption that the algal concentration at Site-A reached the maximum abundance after late-July, the seasonal changes of snow algal abundance was reproduced with a Logistics model, which is a numerical growth model with a carrying capacity. As a result of fitting the observational data to the model, the coefficients of determination of the regression were 0.64 at Site-A and 0.96 at Site-B, respectively. Results suggest that the algal growth curve was reproduced well with the Logistics model, which can be defined with an initial cell concentration, growth rate, and carrying capacity of snow algae.

In Chapter 3, the seasonal change of surface albedo on the Greenland glacier was reproduced by a physically based albedo model (PBSAM), which was modified to include effect of snow algae. The field data of physical parameters of snow and concentrations of impurities including black carbon and mineral dust were used to calculate the albedo with the model. The light absorbance coefficients were determined for snow algae, and then snow algal abundance was introduced as an impurity to the model. The calculation with the model showed a good agreement between observed and calculated albedos on the Greenland glacier. The albedo reduction by snow algae was obtained as 0.163 in the late-August on the glacier.

This study shows that temporal changes of snow algae and surface albedo of snowpacks in Japan and Greenland can be reproduced quantitatively with a numerical model of algal growth and a physically based albedo model. In future, these models can be coupled with a snow metamorphism model and a general circulation model of the

atmosphere in order to evaluate the algal impact on the global snow melting.

研究背景

近年、急激な積雪面積の減少が北極圏で確認されている。気候変動に関する政府間パネルの第5次報告書によると、1960年から2010年までの期間で、北極圏の積雪面積は10年ごとに春季で平均1.7%、夏季で平均11.7%ずつ減少していることが報告されている (Stocker et al., 2013)。さらに北極圏に位置するグリーンランド氷床では、温暖化によって積雪や氷河の質量が減少し続けていることが多くの研究で報告されている (例えば、Rignot et al., 2008; Steffen et al., 2008; van den Broke et al., 2009)。グリーンランド氷床では、2000年以降氷河表面の融解量が急激に増加していることが報告されており、この急激な融解の原因は、気温の上昇と積雪や氷河表面のアルベドの低下であるとされている (Box et al., 2012)。

積雪表面のアルベドは、積雪の融解プロセスを理解する上で重要な役割を持っている。一般的に積雪の融解は、大気と雪面の熱収支によって起こる。雪面が受ける熱量は、太陽からの短波放射、大気からの長波放射、降雨、顕熱、潜熱によって決まる。そのため、太陽からの短波放射は、融雪期において積雪の融解量を支配する重要な要素である (Weller, 1968)。この短波放射の吸収量を決定するのが積雪表面の反射率、つまりアルベドである。一般的に、融雪期になると積雪のアルベドは0.9から0.5へと減少するため、この低下によって融雪が促進されると考えられている (Wiscombe and Warren, 1980)。このアルベドを変化させる要因には、大気の状態、積雪粒径、積雪表面の不純物濃度など、様々なものがある。

雲量と太陽天頂角は、積雪表面のアルベドを決定する条件の一つである。雲の無い晴れた空の下では、太陽から届く短波放射はほとんど散乱せずに指向性を持った直達光として積雪表面へと到達する。短波放射が積雪に入射したとき、短波放射は積雪内で散乱し、その一部は積雪表面へと戻るが、この積雪表面へと戻る短波放射の割合は、短波放射が斜め方向から積雪に入射したときの方が真上から入射したときよりも多い。そのため、雲の無

い環境では、積雪アルベドは太陽天頂角に依存し、太陽天頂角が大きくなると短波放射の全ての波長域でアルベドが上昇することが知られている (Wiscombe and Warren, 1980). 一方、空が曇天の環境下では、太陽から届く短波放射は雲によって散乱させられるため、短波放射は様々な角度から、散乱光として積雪表面へと到達する (Aoki et al., 1999). このような曇天の環境の場合、散乱光が卓越するため、地表面へと届く短波放射量は太陽天頂角に依存しない.

積雪表面のアルベドは、積雪粒子の大きさと、短波放射を吸収する性質 (吸光特性) を持つ積雪不純物の濃度にも依存する. 一般的に積雪粒子サイズの増加は近赤外域 (700–2000 nm) の短波放射、不純物濃度の増加は可視域 (300–700 nm) の短波放射の吸収を増やすことが知られている (Warren and Wiscombe, 1980; Aoki et al., 2000). 中でも可視域の吸光特性を持つ積雪不純物として、黒色炭素 (Black Carbon; 以下 BC と略) と鉱物ダスト (Mineral Dust; 以下 Dust と略) が知られている (Aoki et al., 2014). BC とは、すすと呼ばれる不純物のことで、その起源は、工場や都市部の化石燃料や固体燃料の燃焼や、バイオマスバーニング (森林や草原の火災) である (Bond et al., 2013). 融解した積雪に BC が 10 ppbw の濃度で含まれている場合、アルベドを 0.01 減少させることが報告されている (Warren and Wiscombe, 1985). Dust は、BC と比べて光の吸収効果が小さく、アルベドへの影響は BC の 1/160 倍であると言われている (Aoki et al., 2011). しかしながら、グリーンランド氷床での積雪観測では BC の数十倍の Dust が積雪表面に堆積していることが報告されており (Steffensen, 1997), Dust のアルベドへの影響も無視できないほど大きい.

以上のような積雪物理過程を考慮して積雪の融解を再現するために、積雪物理モデルおよびアルベド物理モデルが構築され、その計算によって近年の積雪融解の原因を明らかにし、将来予測を行おうとする研究が行われてきた.

積雪物理モデルは、気象データを基に積雪の変質過程を再現する物理モデルであり、一

一般的には雪崩の予測など多く用いられている。その代表的なものとして、Crocus (Brun et al., 1989, 1992; Vionnet et al., 2012) や SNOWPACK (Bartelt and Lehning, 2002; Lehning et al 2002) と呼ばれるモデルがある。これらのモデルは、複数の積雪層を考慮して積雪物理過程を計算するモデルで、広範囲の積雪において積雪の雪質、粒径、密度、層の厚さといった様々な物理量の変化を再現することができる。近年では、これらのモデルをさらに、積雪層の雪が湿っている場合の物理過程や、積雪層内の温度勾配の変化を考慮して、発展させたモデルも存在する (Niwano et al., 2012, 2015)。

アルベド物理モデルは、積雪物理過程に基づいてアルベドを計算する物理モデルであり、観測データを基にアルベドを再現することはもちろん、先述した積雪物理モデルと組み合わせることによって気象データからアルベドを再現することもできる。Wiscombe and Warren (1980) は、雪の物理過程と放射伝達過程に基づいたアルベド物理モデルを作成した。このモデルは積雪の粒子、不純物、日射の直達光と散乱光の比率などを考慮して短波長域のアルベドを計算することができる。現存する多くのモデルがこのモデルを発展させたものであり、Flanner and Zender (2005, 2006) は、複数の積雪層を考慮してアルベドと積雪内の熱伝導を計算するモデルを開発している。近年では、雪の粒径、不純物、大気の状態、複数の積雪層を考慮して、Flanner and Zender (2005, 2006) のモデルと異なり、可視域、近赤外域といった波長別にアルベドを再現するモデルも存在する (Aoki et al., 2011)。アルベド物理モデルは、他のモデルと組み合わせることによって様々なスケールで求めたい範囲のアルベドを計算することができる。Marshall and Oglesby (1994) は、Wiscombe and Warren (1980) のモデルを全球気候モデル (General Circulation Model; 以下 GCM と略) に組み込んで、初めて全球規模のアルベド物理モデルを開発し、広範囲の積雪アルベドを求めた。Jacobson (2004) は、GCM と組み合わせたアルベド物理モデルを用いて、BC による影響によって積雪のアルベドは全球規模で低下していることを報告している。

このようにアルベド物理モデルによって、全球規模でアルベドの再現が行われているが、次のような問題点もある。積雪のアルベドを低下させる不純物には、先述した Dust や BC があり、アルベド物理モデルによってその影響が計算されているが、アルベドを低下させるもう一つの不純物として有機炭素 (Organic Carbon; 以下 OC と略) が挙げられる。この OC は、大気エアロゾルとして積雪に供給される有機物粒子で、短波放射を吸収する効果がある (Aoki et al., 2014)。しかしながら、OC は積雪のアルベドを低下させることが報告されているものの、その吸光特性はほとんど明らかになっていない。さらに近年の研究では、微生物が積雪や氷河表面で繁殖しており、その雪氷微生物によって世界各地の積雪アルベドの低下が報告されるようになってきた (Hoham and Duval, 2001; Takeuchi et al., 2006; Lutz et al., 2014)。実際、グリーンランドの氷河上の積雪で観測されたアルベドは、Dust や BC を考慮したアルベド物理モデルによって計算されたアルベドとは一致せず、この原因は積雪表面で繁殖する微生物による影響であることが指摘されている (Aoki et al., 2013)。現存する多くのアルベド物理モデルでは、積雪上の不純物として Dust と BC のみを考慮してアルベドを計算している。有機エアロゾルや雪氷微生物のような OC によるアルベドへの影響はモデルでは考慮されておらず、アルベド物理モデルで改善すべき重要な問題点の一つである。

OC の中でも特にアルベドへの影響が大きいと考えられているのが、雪氷藻類である。雪氷藻類とは、世界中の雪原や氷河上で一般的に観察される光合成微生物の総称であり、寒冷環境に適応して繁殖することが可能である。積雪上の代表的な雪氷藻類である、緑藻の *Chlamydomonas nivalis* や同じ緑藻の *Chloromonas nivalis* といった藻類が世界各地で観察されている (Hoham and Duval, 2001; Nedbalová et al., 2008; Takeuchi, 2013; Lutz et al., 2015)。 *Chlamydomonas nivalis* や *Chloromonas nivalis* は、極域や高山地域の積雪上の融解水内で繁殖し、氷点を下回るような低温、平地と比べて強い日射、海や湖よりも乏しい栄養といった極端な環境に対して適応している (Remias et al., 2005; Remias et al.,

2010b). これらの藻類は、このような極端な環境に適応するために周囲の環境に応じて、繁殖活動を行う栄養細胞と高いストレス耐性を持った休眠細胞の二つの形態に変化する (例えば, Jones, 1991). 栄養細胞は鞭毛と呼ばれる器官を持ち、積雪の融解水内を遊泳することができる (例えば, Hoham, 1980). この細胞形態では、細胞は葉緑素であるクロロフィル a を細胞内の他の色素よりも多く含んでいるために緑の色をしており、光合成によって繁殖することができる。一方、休眠細胞は強い日射から細胞が傷つくことを守るためにカロチノイドと呼ばれる色素に富み、赤や橙の色を呈す (例えば, Bidigare et al., 1993). このように積雪上で繁殖している雪氷藻類は細胞内に様々な色素を持っているために、積雪を着色することが知られている。

このような雪氷藻類が積雪上で繁殖すると雪面の色が赤や緑色に変化することが知られている (例えば, Thomas and Duval, 1995; Hoham and Duval, 2001). 雪氷藻類が持つ色素は、波長依存の吸光特性を持つことが知られており (Painter et al., 2001), 400–600 nm の波長帯ではカロチノイド, 670–680 nm の波長帯ではクロロフィルによって光が吸収される (Takeuchi et al., 2006). そのため、雪氷藻類が繁殖することによって、可視域の短波放射の吸収量が増加し、積雪アルベドが低下する。Lutz ら (2014) は、グリーンランドの氷河上の積雪において藻類のほとんどいない白い雪面のアルベドが 0.75 であった一方で、藻類の繁殖していた赤い雪面や緑色の雪面はそれぞれ 0.49 と 0.44 であったことを報告している。このような雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響は、世界各地で観測されており、積雪融解を加速させる一因であると考えられている (Hoham and Duval, 2001; Takeuchi et al., 2006; Nedbalová et al., 2008; Yallop et al., 2012).

雪氷藻類の繁殖の必要条件は、積雪の融解水、日射、栄養塩である (例えば, Hoham, 1980). 積雪が融解すると、積雪内の氷粒子の周りに水の膜が形成され、その膜が雪氷藻類の生息環境となる (例えば, Fukushima, 1963). Pollock (1970) は、積雪内の融解水の凍結によって雪氷藻類の代謝が止まるため、雪氷藻類の繁殖には数日間の継続した積雪の融解が必

要であることを報告している。雪氷藻類の繁殖に関わる日射の研究では、光合成有効放射（Photosynthetically Active Radiation; 以下 PAR と略）が融雪期の積雪の深さ 1 m で、積雪表面の 1%の値として観測され、その PAR の値でも雪氷藻類が繁殖することが報告されている（Curl et al., 1972）。雪氷藻類と栄養塩に関する研究では、積雪上の栄養塩と雪氷藻類の濃度の分布には正の相関があり、栄養塩濃度の空間分布の変化によって雪氷藻類濃度の分布も変化することが示唆された（例えば、Hoham, 1980）。Takeuchi (2013) は、アラスカに位置するグルカナ氷河で高度別に雪氷藻類の濃度の季節変化を観測し、雪氷藻類の群集の季節変化は、気温の上昇や積雪深の低下と関係があることを報告した。北極圏のグリーンランド南東部の氷河では、雪氷藻類の群集が雪線の上昇に伴い雪線上で変化しているという報告がある（Lutz et al., 2014）。日本では、富山県の立山連峰で雪氷藻類の濃度が融雪に伴って増加するといった報告（Segawa et al., 2005）や、滋賀県の伊吹山の残雪において消雪の 1-2 週間前に *Chlamydomonas nivalis* が毎年繁殖するといった報告（竹内ら, 2011）がある。このように雪氷藻類の繁殖量は、積雪や気象の変化の影響を受けて、季節変化することが考えられる。しかしながら、雪氷藻類の繁殖の定量的な季節変化やその要因についてはまだ明らかになっていない。

繁殖する微生物の季節変化は、単純な数理モデルによって再現できる場合があることが知られている。微生物増加の最もシンプルなモデルは、制限した環境内における微生物の出現時の細胞濃度（初期細胞濃度）と増加する割合（増加率）によって求められる微分方程式である（例えば、Cui and Lawson, 1982）。現存する微生物の増加モデルの大半は、海洋や湖の生態系で利用することを考えられて作成されたものである。このような数理モデルは、微生物の繁殖が環境に与える影響を定量的に評価することを目的として研究されている。例えば湖では、微生物による水質汚染を評価するためにシアノバクテリアの数理モデルが研究されている（Chen et al., 2009）。積雪上の雪氷藻類の繁殖の数理モデルを作成することができれば、雪氷藻類の繁殖の影響を含めたアルベドの季節変化を計算することが

可能となる。近年では、寒冷環境においても微生物の繁殖の数理モデルに関する研究は注目されており、微生物の繁殖を再現するモデルはいくつか開発されている。例えば、北極域の海氷の底部にある高濃度の塩水で作られたブラインチャンネル内では珪藻類が主に繁殖しており、この藻類の繁殖が藻類の増加率を用いた数理モデルによって再現されている (Lavoie et al., 2005; Pogson et al., 2011)。他にも、氷河末端の下にある土壌を対象にして、その土壌内における近年の土壌藻類の繁殖と炭素収支がモデル化されている (Bradley et al., 2015)。これらの藻類の数理モデルは、そのモデルのパラメータの信頼性や他の地域へのモデルの応用性についてまだ多くの議論の余地があり、モデルを開発、発展させるためには現地観測による多くの定量的な観測が必要である。しかしながら、現地観測による積雪の雪氷藻類の季節変化に関する研究はほとんどなく、そのため積雪上の雪氷藻類の繁殖を再現したモデルは存在しない。

そこで本研究では、北極圏の積雪における雪氷藻類の繁殖を再現することと、その再現した繁殖による影響を考慮した積雪表面アルベドの再現を行うために、雪氷藻類の繁殖モデルと繁殖による影響を含めたアルベド物理モデルの開発を行うことを目的とした。本研究では、まず継続した気象および積雪データが存在する日本の新潟県の十日町試験地の積雪において、雪氷藻類の季節変化の観測を行い、藻類の定量的な季節変化およびその繁殖要因の特定を試みた。さらに、雪氷藻類の繁殖が確認されている北極域グリーンランドカナック氷河の積雪において調査を行い、雪氷藻類の季節変化、経年変化を定量的に明らかにし、その観測結果を基に雪氷藻類の繁殖を再現する数理モデルと雪氷藻類による影響を考慮したアルベド物理モデルの作成を目的とした。

本論文は以下の 4 章で構成されている。

第 1 章「新潟県十日町市の積雪における雪氷藻類の季節変化とその繁殖要因」では、新潟県十日町市にある森林総合研究所十日町試験地にて雪氷藻類の冬季から春季までの 4 ヶ月の季節変化と、4 年間の経年変化を明らかにする。詳細かつ継続的に気象および積雪観測

の行われているこの試験地において雪氷藻類の観測を行うことによって、雪氷藻類の繁殖の定量的に評価し、雪氷藻類の繁殖に影響を与える要因を明らかにすることを目的とした。そして、観測結果を基に微生物繁殖の数理モデルを適用し、雪氷藻類の繁殖がどの程度再現できているのかを検証した。複数年にわたった詳細な気象条件、積雪条件、雪氷藻類繁殖の季節変化の観測を同時期に行った例は、これまでの研究では存在しない。そのため、第 1 章は、雪氷藻類の繁殖と気象および積雪条件との関係を明らかにするうえで重要な研究例となることが期待される。

第 2 章「グリーンランド北西部の氷河における積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖モデル」では、北極域グリーンランド北西部に位置するカナック氷河上の積雪の標高の異なる 2 地点において雪氷藻類の融雪期の季節変化を明らかにし、この地域の雪氷藻類の繁殖を再現するモデルを開発、検証することを目的とした。グリーンランドの氷河では近年、氷河上の微生物が繁殖していることが多くの研究によって報告され、注目が高まってきている。この氷河における観測から近年の雪氷藻類の繁殖を数理モデルによって再現することで、グリーンランドの氷河上の積雪に雪氷藻類がどの程度存在し、どのように変化するのかを見積もることができると考えられる。

第 3 章「雪氷藻類を取り入れた積雪表面のアルベド物理モデルの開発」では、第 2 章と同様の研究地域であるカナック氷河上の積雪において、異なる 2 地点で詳細な積雪断面観測を行い、その観測結果に基づいて従来からあるアルベド物理モデルに雪氷藻類の繁殖によるアルベドの低下効果を組み込むことを目的とした。また、2 章で開発した北極圏グリーンランドの藻類繁殖モデルをつかって、アルベドの季節変化を再現することを試みた。このカナック氷河における観測から雪氷藻類の繁殖を含めたアルベドを再現することで、雪氷藻類のアルベドへの寄与を定量的に明らかにできると考えられる。雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響を定量的に明らかにすることは、近年の北極圏の積雪面積の減少に対する雪氷藻類の寄与を示す上で重要である。

最後に「総括」にて，本研究で明らかになった内容，達成したモデルについて簡潔にまとめ，現時点での問題点を整理し今後の展望を言及する．

第1章 新潟県十日町市の積雪における雪氷藻類の季節変化とその繁殖要因

1-1. はじめに

本章では、新潟県十日町市に位置する森林総合研究所の十日町試験地の積雪を対象に、積雪表面の雪氷藻類の季節変化および経年変化を定量的に明らかにし、その試験地で観測されている気象および積雪条件を基に雪氷藻類の繁殖要因を明らかにすることを目的とする。さらに得られた藻類の繁殖の季節変化を、数理モデルによって再現することを試みた。

森林総合研究所の十日町試験地（37° 08' N, 138° 46' E, 海拔 200 m）は、1917年3月に開設されて以来、現在まで毎年連続で積雪の物理量および気象条件の観測が行われてきた貴重な実験施設である（図1-1と図1-2）。試験地の敷地内には気象測器が設置されており、気象、風速、降水量、積雪深などが自動的に観測されている。試験地では、雪が積もり始めると積雪に穴を掘って積雪断面観測が行われる。この積雪断面観測は、毎年、積雪が根雪となってから消雪まで約10日間ごとに実施されており、積雪の層位、粒径、密度、硬度、含水率といった積雪の基本的な情報が全て記録されている。これらの毎年の気象と積雪の観測結果は、5冬期ごとに調査資料として公開、出版されている（例えば、竹内ら、2009, 2014）。このような連続した詳細な気象および積雪物理量の記録は、雪氷藻類の季節変化の要因を特定する上で欠かすことができないデータである。しかしながら、十日町試験地において雪氷藻類に関する調査は行われたことがなかった。

日本では全国各地の積雪で融雪期に雪氷藻類が繁殖することが報告されている。小林・福島（1952）は、尾瀬ヶ原と北アルプスの残雪で、Fukushima（1963）は、北の北海道大雪山の旭岳から南の四国にある石鎚山までの全国49か所の残雪で雪氷藻類の観察を行っている。Fukushima（1963）によると、調査を行ったほぼ全国の高山にある残雪に現れ、観察された雪氷藻類の種は10種類以上とされている。尾瀬ではアカシボと呼ばれる彩色現象が確認されており、その原因は雪氷藻類であるという報告がある（山本ら、2006）。山形県

の月山では、世界中の積雪で見られる *Chloromonas (Cr.) nivalis* が繁殖していることが藻類の形態的および遺伝子的特徴から明らかにされている（例えば、Muramoto et al., 2008; Matsuzaki et al., 2014）。十日町試験地では雪氷藻類の細胞を観察した例はないものの、融雪期の積雪のクロロフィル a 濃度が消雪まで増加していることが確認されている（大沼, 2012）。十日町試験地は、月山のような標高 1900 m にも及ぶ高山と比べると、標高が低くその消雪時期は 4 月上旬と比較的早いですが、積雪量は高山に匹敵するため、融雪期に雪氷藻類が繁殖する可能性は十分にあると考えられる。

従来の日本の雪氷藻類の研究は、細胞形態の記載や DNA による種の同定が中心で、そのバイオマスの詳細な季節変化を明らかにした例はほとんどない。Segawa et al. (2005) は、富山県の立山連峰の残雪において、2 種類の雪氷藻類が異なる時期に繁殖することを明らかにした。その季節変化の要因は、種によって異なる栄養塩、あるいは他の環境要因のためであると考察されているが、実際の要因の特定には至っていない。滋賀県の伊吹山では、竹内ら (2011) が 3 月から 5 月の融雪期間中に雪氷藻類が積雪におり、消雪直前の 1–2 週間前に繁殖することを報告している。しかし、このような雪氷藻類の繁殖がどんな条件で開始されるのかは、日本を含め世界各地の雪氷藻類に関しても調査された例はない。十日町試験地のような詳細な気象と積雪物理条件の観測を実施している環境であれば、雪氷藻類の繁殖開始条件および繁殖量の決定要因の詳細な検討が可能となると考えられる。

そこで本章では、新潟県の十日町試験地の積雪において、雪氷藻類の季節変化を 4 年間にわたって観測によって明らかにし、気象、積雪物理、化学条件と比較することによって、雪氷藻類の繁殖開始の条件と繁殖量の決定要因を特定することを目的とした。さらに得られた藻類の繁殖の季節変化を、微生物の数理モデルによって再現することを試みた。

1–2. 調査地

本研究の調査地である新潟県十日町市は、全国有数の豪雪地帯である。十日町市は、本

州中央の越後山脈に面した新潟県南部に位置する。この地域は、シベリアからの季節風の影響で冬期の降雪が非常に多く、日本の特別豪雪地帯に指定されている。十日町市の 1918 年から 2007 年の 90 年間における年間の平均気温は 11.8°C、平均降水量は 2560.7 mm となっている（竹内ら、2008）。十日町市では、ほぼ毎年 12 月から雪が積もり初め、4 月の終わりに消雪する。冬期の積雪深は、最大で 300 cm を超える年も多く、過去には 425 cm（1945 年 2 月 26 日）を記録した年もあった。

十日町試験地を管理する森林総合研究所は、森林・林産業に関わる研究と育種事業を行う機関であり、北海道から九州にわたって様々な研究センターと試験地を保有している。それら施設の一つである十日町試験地は、日本有数の豊富な気象・積雪データを定期的に観測し、記録している試験場である。十日町試験地では、地球科学研究や雪氷災害防止の基礎資料を得るために気象および積雪の観測が継続され、研究成果が報告されている（例えば、竹内ら、2009, 2014）。十日町試験地の面積は 1.35 ha にもおよび、敷地の周辺は樹林帯によって囲まれている（図 1-2）。

十日町試験地の過去 99 年間の連続気象および積雪観測は、近年の積雪環境の変化を示す貴重なデータを提供する。1981 年から 2010 年までの 30 年間では、十日町市の冬期の降雪積算値、最大積雪深、最大積雪水量の平均値はそれぞれ、1060 cm, 214 cm, 718 cm であり（竹内ら、2014）、この市は毎年非常に多くの降雪がみられる地域とであることが伺える。そのような多くの降雪がみられる十日町でも、近年の温暖化の影響により僅かではあるが平均気温が年々上昇していることが確認されている（竹内ら、2008）。図 1-3 は、十日町試験地で 1918 年から 2007 年までの 90 年間で観測された気温と積雪深の平年差を表している。図 1-3 をみると、近年で気温は上昇傾向にあり、積雪深は低下傾向にあることがわかる。

本研究では、十日町試験地の積雪断面の定期観測に合わせて、雪氷藻類の分析のための表面積雪の採取を行った。調査は、2011 年から 2015 年までの 2012 年を除いた 4 冬期で行

った。十日町試験地において行った雪氷藻類に関する調査の実施した日は、表 1-1 から 1-4 に示した。本論文では、12 月から翌年の 4 月までを 1 冬期と定義し、以降 1 つの年として記載している。例えば、2011 年は 2010 年 12 月から 2011 年 4 月の期間を指している。なお、2012 年は雪氷藻類に関する観測を行っていないため、本研究では取り扱わない。それぞれの冬期では、十日町試験地において 10 日間隔で行われている積雪断面観測と同時刻に雪試料の採取を行った。

1-3. 手法

1-3-1. 気象観測

雪氷藻類の季節変化と気象条件との関係を明らかにするために、十日町試験地で観測されている気象データを用いた。その用いた気象データは、大気的气温、降水量、日射量、相対湿度、気圧である。降水量以外の気象要素は、十日町試験地の敷地内にある気象計に地表面から 3.5 - 4.0 m の高さに設置されているセンサーによって測定されたものである (図 1-4)。降水量は、受水口の高さを地表面から 3.5 m の高さに設定して測定されている。各観測値は積雪の開始から消雪まで 1 時間ごとに測定され、自動的にデータロガーに記録される。それぞれのセンサーと気象観測についての詳細な説明は竹内ら (2014) に記載されているため、本章では説明を省略する。

4 冬期の降雪量は、山崎 (1998) および Yamasaki (2001) の手法に基づいて雨雪比を用いて降水量から求めた。この手法では雨雪比は、気温、相対湿度、気圧から得られた地上の湿球温度から計算することができる。雨雪比 $s(T_w)$ および湿球温度 T_w は、以下の式で求めた。

$$s(T_w) = 1 - 0.5 \exp\{-2.2(1.1 - T_w)^{1.3}\} \quad (T_w < 1.1) \quad \text{式 (1-1)}$$

$$s(T_w) = 0.5 \exp\{-2.2(1.1 - T_w)^{1.3}\} \quad (T_w \geq 1.1) \quad \text{式 (1-2)}$$

$$T_w = 0.584T_a + 0.875e - 5.32 \quad \text{式 (1-3)}$$

$$e_{sat} = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.5T_a}{237.3+T_a}\right)} \quad \text{式 (1-4)}$$

$$e = \frac{e_{sat}RH}{100} \quad \text{式 (1-5)}$$

ここで、 T_a は気温 (°C)、 e_{sat} は飽和水蒸気圧、 e は水蒸気圧、 RH は相対湿度を表す。雨雪比 $s(T_w)$ は、その値が高いほど降水量に対して雪の割合が大きくなることを意味している。この雨雪比を用いて観測した降水量から降雪量を求めた。

1-3-2. 積雪物理観測

雪氷藻類の季節変化と積雪物理条件との関係を明らかにするために、十日町試験地で観測されている積雪断面観測のデータを用いた。本論文で取り扱った積雪観測データは、4 冬の積雪深、雪質、密度、含水率である。積雪深は、十日町試験地の敷地内にある気象計に設置された超音波積雪深計によって積雪の開始から消雪まで 1 時間ごとに測定されたものである。雪質、密度、体積含水率は、積雪の開始から消雪までの期間において 10 日間隔で行われた積雪断面観測により得た。それぞれの物理量は、異なる雪質の層ごとに測定した。積雪深計と積雪物理観測の詳細な説明は、竹内ら (2014) に記載されているため、本章では説明を省略する。積雪の体積含水率は、Denoth (1994) の手法に従って、以下の式によって Denoth 式含水率計 (Denoth meter, Austria) によって測定した誘電率 U から計算した。

$$\varepsilon = 1 + 1.92\rho + 0.44\rho^2 + 0.187W_v + 0.0046W_v^2 \quad \text{式 (1-6)}$$

$$\varepsilon = 1 + k \log\left(\frac{U}{U_{ref}}\right) \quad \text{式 (1-7)}$$

ここで、 ε は雪の誘電定数、 ρ は雪の密度、 W_v は体積含水率、 U_{ref} は含水率のセンサーの誘電定数を表している。

1-3-3. 積雪サンプルの採取

雪氷藻類および化学成分を定量するために、表 1-1 から 1-4 で示した観測日に積雪表

面で雪サンプルを採取した。サンプルの採取にはステンレススcoopあるいは密度サンプラーを用いた。積雪表面における雪氷藻類の繁殖を定量的に評価するという目的から、本章では積雪表面でサンプルを採取した。サンプルの採取は積雪断面観測と同時刻に行い、採取時にサンプルの面積および深さを記録した。採取したサンプルの面積と深さはそれぞれ 80–400 cm² と 2–4 cm である。観測日ごとの平均値を得るため、サンプルの採取は観測時に 3–5 箇所異なる積雪表面で行った。

雪氷藻類の積雪内での垂直分布を調べるために、2015年4月6日に積雪全層にわたってサンプルの採取を行った。サンプルの採取にはステンレススcoopを用いた。サンプルの採取は積雪断面観測と同時刻に行い、採取時にサンプルの深さを記録した。採取したサンプルは、積雪の表面で 2 cm（深さ 0–2 cm）、表面下の層で 8 cm（深さ 2–10 cm）、それより深は 10 cm の間隔（深さ 10–20 cm, 20–30 cm, 以下地面に達するまで）で採取した。なお、観測時の積雪深は 121 cm であったため、最も下層のサンプルのみ 11 cm（深さ 110–121 cm）で採取している。積雪層ごとの平均値を得るために、サンプルの採取は表面のみ 5 箇所、それより下層では 2 箇所ずつ、全 29 サンプルを採取した。

全ての雪サンプルはポリエチレン製の袋（ワールパック）に採取し、十日町試験地内の冷凍庫に一旦保存し、冷凍させたまま千葉大学へと輸送した。輸送したサンプルは、研究室の室温で融解させた後、異なる分析を行うために 2 つに分注した。一つは、顕微鏡による藻類種の観察および藻類の定量化を行うためのサンプルとした。融解させたサンプルの一部を 50 mL のポリエチレン製ボトル（アイボーイ）に分注した。その後、このアイボーイを千葉大学の研究室内の冷凍庫に−20 °C で分析まで冷凍保存した。

もう一つは、電気伝導度（EC）、水素イオン指数（pH）、クロロフィル a 濃度を分析するためのサンプルとした。藻類の定量化用のサンプルをワールパックから分注した後、すぐに EC と pH を測定した。EC と pH の測定は、pH メーター（F-54, HORIBA）を用いて、ワールパック内にセンサーを入れて行った。最初に EC、次に pH を測定した。その後、サ

サンプルをフィルター (grade GF/F, 25 mm, Whatman) 上に濾過し, そのフィルターを N, N-ジメチルホルムアミド (N,N-dimethylformamide, DMF) 6 mL を入れたプラスチック製のチューブ (アシストチューブ) 内に投入した. そして, そのアシストチューブを研究室の冷蔵庫内で 5°C のまま 24 時間保存し, 藻類の色素であるクロロフィル a を抽出した. その後, アシストチューブは分析まで研究室の冷凍庫内で保存した.

1-3-4. クロロフィル a 濃度の分析

抽出した DMF 中のクロロフィル a 濃度は, Welschmeyer (1994) の方法によって測定した. まず, 蛍光光度計 (Trilogy Laboratory Fluorometer, Turner, USA) を用いて DMF 内の蛍光値を測定した. その後, 測定した蛍光値をクロロフィル a の標準試料を用いて作成した検量線を基にクロロフィル a 濃度へと変換した. 求めたクロロフィル a 濃度と濾過したサンプルの量から, 積雪の水当量あたりのクロロフィル a 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$) を求めた.

1-3-5. 光学顕微鏡による藻類種の観察

藻類種の観察は, 光学顕微鏡を用いて行った. 細胞の観察前に, 分注後アイボーイ内に保存した冷凍サンプルを融解させた後, スライドガラス上にサンプルを垂らし, その上にカバーガラスを被せてプレパラートを作成した. 観察は, 光学顕微鏡 (BX51, Olympus) とデジタルカメラを使用してプレパラートを撮影して行った. 観察時の倍率は 40 倍で, 藻類細胞の撮影は無作為に行った. 撮影した画像は画像処理ソフトウェア (Image J 1.38X, National Institutes of Health, USA) を用いて分析し, それぞれの細胞のサイズを測定した. 測定は特徴の異なる細胞ごとに 50 個体で行い, それらの平均値を用いた. 測定したサイズは, 細胞の短径, 長径である.

1-3-6. 光学顕微鏡による藻類の定量化

積雪中の雪氷藻類を定量するために、本論文ではサンプルの細胞数を透過型光学顕微鏡によってカウントした。分注しアイボーイ内で冷凍保存したサンプルを室温で融解させ、フィルター (Omnipore Membrane filters, 0.45 μ m JHWP01300, Millipore) を取り付けたフィルターホルダー (Swunnex, Non-Sterile, Millipore) 内にサンプルを注入した。適切な細胞数のカウントを行うために、サンプルごとに注入する量の調節を行い、1回の分析で20–1000 μ lの範囲のサンプルを注入した。新雪のサンプルは雪の中に含まれる微生物を含めた不純物が少ないと考えられるため、一回で1000 μ lのサンプルを注入した。一方、ざらめ雪のサンプルは、新雪よりも比較的多くの不純物を含むと考えられるため、サンプルの汚れ具合に応じて20–200 μ lの範囲でサンプルを注入した。その後、注入したサンプルを注射器 (テルモシリンジ 20 ml, TERUMO) によって加圧して濾過することで藻類細胞をフィルター上に固定した。濾過したフィルターはスライドガラス上に設置した。

細胞数のカウントは蛍光顕微鏡 (BX51, Olympus) を用いて濾過したフィルターに対して行った。顕微鏡によるカウントは、フィルター上の全ての範囲で行った。生きている細胞のみをカウントするために、クロロフィルの自家蛍光 (使用フィルター: WIG, 励起波長: 520–550 nm, 観察波長: 590 nm以上) を放った細胞のみカウントした。顕微鏡によるフィルター上の細胞カウントは、一つのサンプルで1–3回繰り返した。そのカウントした平均値と濾過したサンプルの量から積雪の水当量あたりの細胞濃度 (cells mL⁻¹) を得た。

1–4. 結果

1–4–1. 十日町試験地の気象条件

観測された気象条件の季節変化 (2011年)

十日町試験地の冬期の気温は、12月から1月にかけて低下した後に、4月まで徐々に上昇する傾向を示した (図 1–5a)。2011年の12月から4月までの月平均気温は、それぞれ 3.8, –1.4, 0.8, 1.4, 6.7 °C であった。日平均気温は、12月で–1.1°C から 10.4°C, 1月で

-3.7°C から 1.4°C, 2 月で -1.2°C から 7.6°C, 3 月で -2.8°C から 6.4°C, そして 4 月で 2.7°C から 12.1°C の範囲をとった. このことは, 12 月から 2 月までは, 時折氷点を上回ることもあるが概ね氷点下で, 3 月から 4 月は氷点を超える気温となり融雪が進むことを示唆している.

冬期の日射量も気温と同様に, 12 月から 1 月にかけて一旦減少し, その後徐々に増加した (図 1-5a). 2011 年の 12 月から 4 月までの日射量の月平均値は, それぞれ 61.1 W m⁻², 52.3 W m⁻², 117.7 W m⁻², 150.0 W m⁻², 194.6 W m⁻² となった. 日射量の日平均値は, 12 月で 9.6 W m⁻² から 120.9 W m⁻², 1 月で 17.0 W m⁻² から 117.6 W m⁻², 2 月で 15.0 W m⁻² から 203.5 W m⁻², 3 月で 32.8 W m⁻² から 283.3 W m⁻², そして 4 月で 33.4 W m⁻² から 308.9 W m⁻² の範囲をとった. 日射量の日平均値の変動幅が大きいことは, 冬期は曇天と晴天が繰り返される条件であることを示している.

冬期の期間中は, 降雨と降雪が両方とも観測され, 1 月に最も降雪量が多く, 4 月に降雨量が最も多かった (図 1-5b). 冬期中の各月の降水量の積算値は, 12 月で 394 mm, 1 月で 696 mm, 2 月で 151 mm, 3 月で 276 mm, 4 月で 126 mm となった. 降水量は 1 月に最大となり, 4 月に最小となった. 各月の降雪量の積算値は, 12 月で 193 mm, 1 月で 674 mm, 2 月で 112 mm, 3 月で 237 mm, 4 月で 3 mm となり, 1 月に最も降雪が多かった. 降雨の積算値は, 12 月で 201 mm, 1 月で 21 mm, 2 月で 39 mm, 3 月で 39 mm, 4 月で 123 mm となり, 12 月に最も降雨が多かった.

観測された気象条件の経年変化

観測した 4 年間の冬期の気温と降雪量は, 概ね似た季節変化を示したものの, その平均値または積算値は年によって異なった. (図 1-5 から 1-8). 気温の季節変化は, 2011 年と他の 3 冬期 (2013, 2014, 2015 年) は概ね同じ変化を示し, 12 月から 1 月にかけて低下した後に徐々に上昇していた. 1 月から 4 月までの期間の平均気温は, 2015 年が 3.4°C

と4冬期で最も高く、2011年は1.9°Cと4冬期で最も低い冬期であり、年によって差があった。降雪量も気温と同様に2011年と他の3冬期で似た変化を示し、どの冬期も1月に降雪量が最も多かった。1月から4月までの積算降雪量は、2011年が1026 mmと4冬期で最も降雪が多く、2014年は627 mmと4冬期で最も少ない降雪量であり、冬期間で降雪量に差がみられた。一方、日射量の平均値は、4年間で大きな差は無かった。日射量の季節変化もどの年でも概ね似た変化を示し、1月以降徐々に増加した。4冬期の1月から4月の日射量の平均は、118 W m⁻²から130 W m⁻² (平均: 124 W m⁻²) の範囲をとり、4冬期間で差はほとんど無かった。以上をまとめると、気温、降雪、日射ともに冬期間で似た時間変化を示したが、平均気温と降雪量は冬期で異なり、2011年は最も寒冷な冬期で、2015年は最も温暖な冬期であった。

1-4-2. 十日町試験地における積雪の物理・化学条件

観測された積雪の季節変化 (2011年)

十日町試験地では、雪は12月に積もり初め、2月に冬期中で最大の積雪深となり、3月と4月に融解し、最終的に4月下旬にすべての雪が融けて消えた(図1-5b)。2011年では、12月7日に根雪が始まり、1月31日に積雪深は冬期中で最大の302 cmとなり、その後徐々に減少を続け、4月29日に消雪した。積雪表面の雪質は、1月までは全ての観測日で新雪であったが、2月4日に初めてざらめ雪となり、以降は観測直前に降雪がみられた2月14日と3月16日を除いて消雪するまでざらめ雪であった(表1-1)。積雪表面の体積含水率は、1月中は1月5日の1.4%が最も高く、他の1月の観測日は全て0%であった。含水率は2月中では0.0%から3.8%、3月中では0.4%から4.2%、4月になると3.3%から7.9%の範囲をとった(図1-9)。2月中の0.0%と3月中の0.4%はともに積雪表面の雪質が新雪であった。2011年では、12月から1月にかけての降雪によって積雪深が増加し、2月以降徐々に融雪が始まり、3月以降急激に積雪が融解した。

積雪表面の EC と pH は、どちらも雪質によって有意な違いがみられた (表 1-1, 図 1-13). EC は、新雪で $7.6-29.0 \mu\text{S cm}^{-1}$ (平均: $18.5 \mu\text{S cm}^{-1}$), ざらめ雪で $3.9-13.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ (平均: $6.7 \mu\text{S cm}^{-1}$) の範囲をとり、新雪とざらめ雪の EC の平均値には有意な差があった (student t-test, $t = 6.03$, $P = 7.92 \times 10^{-7} < 0.01$). pH は、新雪で $5.0-6.0$ (平均: 5.6), ざらめ雪で $5.5-6.3$ (平均: 6.1) の範囲をとり、新雪とざらめ雪の pH には統計的に有意な差があった (student t-test, $t = -3.37$, $P = 0.002 < 0.01$). 以上の結果は、積雪表面の EC と pH は雪質によって異なり、EC は新雪でより高く、pH はより低いことを示していた。

融雪期間中の EC と pH は、ほとんど変化しなかった (表 1-1, 図 1-13). 2011 年の表面積雪の EC のとった範囲は、1 月で $7.6-29.0 \mu\text{S cm}^{-1}$, 2 月で $4.6-14.8 \mu\text{S cm}^{-1}$, 3 月で $4.4-23.7 \mu\text{S cm}^{-1}$, 4 月で $3.9-5.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ であり、明瞭な季節変化はみられなかった。積雪表面がざらめ雪が続いた 3 月 25 日から消雪までの期間では、EC に有意な差はみられなかった (one-way ANOVA, $F = 6.59$, $P = 0.397 > 0.01$). 2011 年の pH の各月の範囲は、1 月で $5.0-6.0$, 2 月で $5.5-6.7$, 3 月で $5.6-6.1$, 4 月で $5.8-6.3$ となり、大きな季節変化はみられなかった。3 月 25 日以降の pH には統計的に有意な差は無かった (one-way ANOVA, $F = 6.59$, $P = 0.221 > 0.01$). 積雪表面の EC と pH は、融雪期間中ではほとんど変化しなかった。

観測された積雪の経年変化

根雪から消雪までの積雪期間の長さは、4 冬期の中で 2015 年が最も長かった。4 冬期の積雪期間は 2011 年で 127 日、2013 年で 133 日、2014 年で 121 日、2015 年で 143 日となり、2014 年で最も短く、2015 年で最も長く積雪が存続していた。積雪表面の雪質は、どの年も 3 月以降は概ねざらめ雪であった (表 1-1 から表 1-4 まで)。観測日が降雪の直後だった場合、たとえば 2011 年 3 月 16 日と 2015 年 3 月 5 日については、新雪であった。2013 年については、他の 3 冬期と比較して 3 月になっても降雪の回数が多く、下旬まで降

雪がみられた。そのため3月5日と3月26日の積雪表面で雪質が新雪であった。

積雪表面の含水率の結果は、1年を除いて3月から積雪の継続した融解がはじまり、どの年も融雪期の後半でより融解していることを示した（表1-1から表1-4まで、図1-9から図1-12まで）。2011年、2014年、2015年では、1月から2月にかけて0.0-4.8%（平均：0.9%）、3月で0.4-7.9%（平均：4.5%）の範囲をとり、この3冬期では3月以降全ての観測日で含水率が0%より高かった。この3冬期の4月中の含水率は、3.3-7.9%（平均：5.5%）の範囲をとり、3月よりも高い含水率を示した。2013年では、含水率は1月から2月にかけて0.0-1.5%（平均：0.7%）、3月で0.0-8.4%（平均：2.6%）の範囲をとった。2013年は他の3冬期と比べて、唯一3月中に含水率が0%の観測日があったものの、その後4月になると、含水率は3.5-8.4%（平均：5.9%）の範囲をとり、他の冬期と同様に積雪表面が融解していた。4冬期の含水率の最大値は、2015年を除いて消雪直前の観測最終日に観測された。2015年では、観測最終日の4月24日ではなく、4月15日に含水率が最大（6.9%）となったが、4月24日の含水率もその年で2番目に高かった（5.7%）。積雪表面の含水率の結果は、積雪の継続した融解がはじまる時期は2013年とそれ以外の年で異なることと、どの年も融雪期の後半でより融解していることを示した。

積雪表面のECとpHは、ともに冬期間では明確な差はみられなかった（表1-1から表1-4まで、図1-13から図1-16まで）。4月中のECは、4冬期で0.6-11.8 $\mu\text{S cm}^{-1}$ の範囲をとり、ほとんど値に差がなかった。4月中のpHは、4冬期で5.6-6.7の範囲をとり、明瞭な違いはなかった。

1-4-3. 積雪で観察された雪氷藻類

積雪表面で観測された雪氷藻類

顕微鏡による観察の結果、形態の異なる2種類（タイプA、B）の藻類細胞が4冬期全ての積雪表面でみられた（図1-17）。タイプAの細胞（図1-17A）は、紡錘形で細胞外皮

に襞がみられる細胞である。その細胞の大きさは、長さが $36.5 \pm 6.4 \mu\text{m}$ （平均 \pm 標準偏差）で幅が $21.2 \pm 2.8 \mu\text{m}$ であった。タイプ B の細胞（図 1-17B）は、タイプ A と同様に紡錘形であるが、細胞外皮に襞はみられなかい細胞である。その大きさはタイプ A よりも小さく、細胞の長さが $20.4 \pm 2.2 \mu\text{m}$ で幅が $14.6 \pm 1.8 \mu\text{m}$ であった。両タイプとも葉緑体が細胞内の中央にみられ、タイプ A のみ橙色の細胞質が葉緑体の周りにみられた。

積雪断面で観測された雪氷藻類

2015 年 4 月 6 日に積雪断面でサンプリングを行った雪氷藻類の細胞濃度は、表面で最も多く、深さに伴って減少し、表面から深さ 50 cm 以深でみられなくなった（図 1-18）。藻類の総細胞濃度は、積雪表面 0-2 cm で $1.3 \times 10^0 - 2.8 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲をとった。一方で、積雪表面から 50 cm より深い積雪層では、細胞濃度は全てのサンプルで 0 cells mL^{-1} であった。タイプ A は積雪表面から 50 cm の積雪層すべてで確認され、タイプ B は表面から 40 cm の積雪層でみられた。積雪表面 0 cm から深さ 40 cm までの積雪層における、総細胞濃度に対するタイプ A の割合は 25-60% であった。

クロロフィル a 濃度の垂直変化は、藻類の総細胞濃度同様、積雪表面で最も高く、その濃度は深さとともに減少した。クロロフィル a 濃度は、積雪表面（0-2 cm）で $13.3 \mu\text{g L}^{-1}$ であったが、積雪表面から 10 cm 以深ではどのサンプルのクロロフィル a 濃度も $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ を下回っていた。この積雪層の全ての深さで、雪質はざらめ雪、雪温は 0°C 、氷板はみられなかった。積雪層の密度と体積含水率は、全ての深さでそれぞれ $465 - 557 \text{ kg m}^{-3}$ と 4.0-5.8% の範囲をとり、深さによる変化の傾向はとくになかった（図 1-18c と d）。

1-4-4. 積雪表面における雪氷藻類の細胞濃度

細胞濃度の季節変化（2011 年）

積雪表面における雪氷藻類の総細胞濃度の分析の結果、雪氷藻類は 2 月に積雪表面には

じめて現れ、その後4月まで徐々に濃度が増加することが明らかになった(図1-5)。2011年では、1月に採取したサンプル中には藻類細胞はみられなかった。2月4日のサンプルに初めて藻類が現れ、その細胞濃度は 6.8×10^{-1} cells mL⁻¹であった。藻類の細胞濃度は3月3日や4月5日に一旦減少することがあったものの、4月15日に 2.6×10^2 cells mL⁻¹になり、消雪日(4月29日)直前の4月26日に最大細胞濃度(2.1×10^3 cells mL⁻¹)となった。統計検定の結果、2月から4月の各観測日の藻類の細胞濃度の差は有意であることが示された(one-way ANOVA, $F = 2.22$, $P = 0.002 < 0.01$)。

細胞濃度の経年変化

4冬期の雪氷藻類の細胞濃度の分析の結果、全ての年で藻類は2月に積雪表面に初めて出現した一方、その出現時期は年によって異なった(表1-1から表1-4まで)。藻類が積雪表面に出現した時期は、2011年が2月4日、2013年が2月15日、2014年と2015年が2月25日であり、2011年が最も早く、2014年と2015年が最も遅かった。

雪氷藻類の細胞濃度の季節変化は、どの年でも細胞濃度が徐々に増加する変化を示した(図1-5から図1-8まで)。細胞濃度は、4冬期どの年でも藻類が出現した2月から徐々に増加し4月に最大値に達した。統計検定の結果、各観測日の細胞濃度は、2013年については有意な差があった(one-way ANOVA, $F = 2.71$, $P = 0.008 < 0.01$)が、2014年と2015年では、有意な差がなかった(2014: $F = 2.32$, $P = 0.77 > 0.05$; 2015: $F = 5.99$, $P = 0.46 > 0.05$)。このことは、2014年と2015年では、細胞濃度の増加傾向がみられるものの、場所による濃度のばらつきが大きく、増加傾向を示すにはサンプル数が不十分であったことを示している。

細胞濃度の最大値は、年によって異なり、2011年が4年間で最も大きい値を示した(表1-1から表1-4まで)。2011年の細胞濃度の最大値は、 2.1×10^3 cells mL⁻¹であった。他の3冬期では、細胞濃度の最大値は2013年が 8.1×10^0 、2014年が 4.6×10^2 、2015年が

$8.5 \times 10^1 \text{ cells mL}^{-1}$ で、最大の2011年と最小の2013年では256倍の差があった。

雪氷藻類が積雪表面に現れてから細胞濃度が最大に達するまでの日数も、年によって異なっていた(図1-5から図1-8まで)。その日数は、2011年の80日間が最も長く、2013年、2014年、2015年の期間はそれぞれ60、38、40日間であった。

1-4-5. 積雪表面のクロロフィル a 濃度

クロロフィル a 濃度の季節変化 (2011年)

積雪表面のクロロフィル a 濃度は、藻類の細胞濃度と概ね同様の季節変化を示した(図1-5)。2011年では、クロロフィル a 濃度は3月16日までは $0-3.0 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲で増減を繰り返していたが、3月25日に $6.0 \mu\text{g L}^{-1}$ となり、その後消雪まで増加を続けて4月26日に冬期最大の $19.6 \mu\text{g L}^{-1}$ となった。統計検定は、観測日毎のクロロフィル a 濃度の平均値に有意な差があることを示した (one-way ANOVA, $F = 2.22$, $P = 2.1 \times 10^{-6} < 0.01$)。

クロロフィル a 濃度の経年変化

4冬期のクロロフィル a 濃度も同様の季節変化を示し、その最大値も冬期間で大きな差がなかった(図1-2から図1-5まで)。クロロフィル a 濃度は、どの冬期も3月までは増減を繰り返し、その後3月あるいは4月から消雪まで増加し続けていた。2011年と同様に他の3冬期もクロロフィル a 濃度の時間変化に有意な差があった (one-way ANOVA, 2013: $F = 2.55$, $P = 1.9 \times 10^{-5}$; 2014: $F = 2.30$, $P = 1.0 \times 10^{-6}$; 2015: $F = 2.22$, $P = 5.1 \times 10^{-5}$)。4冬期のクロロフィル a 濃度の最大値は、2011年で $19.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 、2013年で $11.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 、2014年で $13.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 、2015年で $13.3 \mu\text{g L}^{-1}$ となった。統計検定の結果、4冬期間のクロロフィル a 濃度の最大値には有意な差はなかった (one-way ANOVA, $F = 3.49$, $P = 0.55 > 0.05$)。

1-5. 考察

1-5-1. 十日町における雪氷藻類の生活史

十日町試験地の雪氷藻類

タイプ A の形状, サイズ, 橙色の色素, 細胞外皮の襞は, 先行研究である Remias et al (2010b) で報告された *Cr. nivalis* の休眠細胞の特徴と一致した. *Cr. nivalis* は, 森林の林床のような日陰や直射日光が当たる場所のどちらでも繁殖でき, 周囲の環境に対して幅広い適応性を持った種である (Komárek and Nedbalová, 2007; Nedbalová et al., 2008). この種は日本の山岳域でも融雪期になると現れることが報告されている (Muramoto et al., 2008; 竹内ら, 2011). この種の休眠細胞は非運動性の嚢胞で, この細胞は細胞内で 2 次カロチノイドを生産し, 細胞質内を橙色の色素で満たしている (Remias et al., 2010b). この休眠細胞は, 大気による長距離輸送に耐える得る細胞形態であると考えられている (Marshall and Chalmers, 1997). 一方, タイプ B の形状, 色素, 細胞外皮の特徴は, 先行研究の Nedbalová (2008) によって報告された *Cr. nivalis* の栄養細胞とほぼ一致する. この種の栄養細胞は, 休眠形態からの変化とその後の細胞分裂が早いために, 野外では非常に短い期間でしか確認することができないと言われている (Remias et al., 2010b). タイプ A と B 以外に他の細胞はみられなかった点も踏まえると, 両タイプの細胞は *Cr. nivalis* の休眠細胞と栄養細胞である可能性が高く, 融雪期を通して細胞分裂と休眠形態への変化が起きていたと考えられる. したがって, 十日町試験地の積雪の藻類細胞は, *Cr. nivalis* のみで占められていると考えた.

十日町試験地の雪氷藻類の出現過程

藻類の出現時期とそのときの積雪深の結果は, 十日町試験地の雪氷藻類の起源は, 積雪下の地表面ではなく, 大気であることを示唆している. 先行研究では, 雪氷藻類の細胞が積雪表面に出現する過程には, 受動的な過程と能動的な過程があると考えられている. 受

動的な過程とは、雪氷藻類の胞子が、風や動物によって 1 km から数 100 km の遠方の起源から大気を介して積雪表面に運ばれてくるというものである。能動的な過程とは、前年に繁殖し消雪後に土壌で胞子となって休眠していた雪氷藻類が、春になって融雪がはじまった時に運動性の栄養細胞となり、雪粒表面の液体の水の層を積雪下の地表面から雪面まで泳いで上がってくるというものである (Müller et al, 2001)。このとき、休眠胞子が運動性の栄養細胞になるには、融解水のほかに日射も必要だと考えられている (Hoham, 1980)。Curl et al (1972) の研究によると、融雪期の積雪の深さ 1 m では光合成有効放射 (PAR) の 1 %のみが到達し、その量の PAR で雪氷藻類が光合成によって繁殖したことが報告されている。しかしながら、十日町試験地で雪氷藻類が積雪表面に初めて現れたとき、積雪深はどの冬期も 1 m よりも深く (2011 年で 244 m, 2013 年で 203 m, 2014 年で 143 m, 2015 年で 270 m), 積雪下の地表面まで日射はほとんど届いていなかったと考えられる。加えて、2015 年 4 月 6 日に行われた積雪断面観測では、積雪表面から深さ 50 cm 以深の積雪層には藻類が全くみられなかった (図 1-18, 14 サンプル, 積雪深 121 cm)。このことは、少なくとも 4 月の時点では表面下の積雪中を移動する藻類は、存在しないことを示している。Marshall and Chalmers (1997) は、南極の地表面から 1 m の高さで採取した大気サンプルから、一般的な雪氷藻類である *Chlamydomonas nivalis* が観察されたことを報告しており、雪氷藻類が大気を介して飛来していることを述べている。以上の観測結果は、十日町試験地の積雪表面の雪氷藻類は、積雪下の地表面から遊泳して現れた栄養細胞に由来するのではなく、大気を介して積雪表面に供給された藻類胞子に由来することを示唆している。

気象観測結果と雪氷藻類の出現時期を比較した結果、雪氷藻類が出現する条件は、降雪がない期間および 0°C より高い気温の継続期間で説明できることが示唆された。雪面の雪質がざらめ雪であることは、雪氷藻類が安定して積雪表面に出現する上で重要な要素であると考えられる。日降雪量の観測結果は、雪氷藻類が出現した直前には、0.1 mm 以上の降雪がなかった期間が 29 時間以上続いていたことを示している。雪氷藻類が出現するまでに

0.1 mm 以上の降雪がなかった継続期間は、2011 年で 56 時間、2013 年で 29 時間、2014 年で 53 時間、2015 年で 115 時間であった。雪氷藻類が出現した際の積雪表面の雪質は、4 冬期全て融解時の積雪にみられるざらめ雪であった。気温の観測結果は、4 冬期すべての年において、雪氷藻類が出現した日の直前は、降雪がないことに加えて、さらに気温が 0°C 以上の条件が 24 時間以上継続していたことを示している。藻類が発生する直前に、0°C 以上の気温が継続した時間は、2011 年で 25 時間、2013 年で 28 時間、2014 年で 24 時間、2015 年で 104 時間であった。さらにその期間よりも前において、0°C 以上の気温の継続時間が 24 時間を超える期間は、存在しなかった。このことは 0°C 以上の気温の継続時間が 24 時間を超えてはじめて雪氷藻類の繁殖が開始することを示唆している。先行研究によって、雪氷藻類の繁殖には積雪の融解が必要であることが指摘されている（例えば、Fukushima, 1963）。したがって、十日町の積雪において、積雪表面に雪氷藻類が出現する条件は、降雪がなくかつ 0°C 以上の気温が、合計 24 時間続くことであると考えられる。

1-5-2. 雪氷藻類とクロロフィル a 濃度の関係

積雪表面のクロロフィル a 濃度は、4 年間でともに似た時間変化を示し、藻類濃度とのプロット図は両者に有意な相関があることを示したが ($r = 0.53, P < 0.05$)、その関係は藻類濃度によっては必ずしも線形にはなっていなかった (図 1-19)。この藻類濃度とクロロフィル a 濃度の関係は、分析した積雪中のクロロフィル a 濃度が、雪氷藻類の細胞濃度だけを反映しているわけではないことを示唆している。Remias et al. (2010b) は、環境条件によって *Cr. nivalis* の細胞の形態が変化すると、それに伴いカロチノイド量も変化した、クロロフィル a 濃度にはあまり変化がみられなかったことを述べている。研究サイトの十日町試験地は、図 1-2 や図 1-4 で見られるように森林に囲まれている。そのため、積雪中には周囲の森林から飛来した植物片が混入し、その植物片に含まれているクロロフィル a も抽出された可能性がある。その影響によって、細胞濃度とクロロフィル a 濃度の関係が、

必ずしも線形にならなかったのかもしれない。そこで、4 冬期で比較的多くの藻類細胞がみられた積雪と藻類細胞がほとんどみられなかった積雪にわけて、細胞濃度とクロロフィル a 濃度の関係を調べた。図 1-20 は、細胞濃度が比較的高い (10 cells mL^{-1} 以上) サンプルと比較的低い (10 cells mL^{-1} 未満) サンプルの細胞濃度とクロロフィル a 濃度の関係を示した図である。細胞濃度が比較的高いサンプルの細胞濃度とクロロフィル a 濃度の相関係数は、 0.61 ($P < 0.05$) となり、4 冬期をまとめた積雪サンプルの細胞濃度とクロロフィル a 濃度の相関係数 ($r = 0.53$) よりも高い値を示した。一方、細胞濃度が比較的低いサンプルでは、相関係数は 0.31 ($P > 0.05$) となり、細胞濃度とクロロフィル a 濃度には有意な相関はなかった。この結果は、とくに藻類の細胞濃度が少ない積雪では、植物片の混入による影響が強いことを示唆している。実際に採取した積雪サンプルには、顕微鏡で確認できるような植物片は確認されなかったが、微細な植物片によってクロロフィル a 濃度に影響が出たのかもしれない。

1-5-3. 雪氷藻類の成長曲線と最大繁殖量の年変化

雪氷藻類の成長曲線が年によって異なったのは、それぞれの年の藻類の繁殖期間が原因と考えられる。2011 年の藻類の成長曲線は、藻類の細胞濃度が時間に対し指数関数的に増加したことを示していた。さらに、その細胞濃度の最大値は 4 冬期で最も高かった。対照的に、他の 3 冬期の成長曲線は、2011 年と比較して 3 月から 4 月の期間の増加量が小さかった。また、藻類が積雪表面に出現した時期は、2011 年が 4 冬期で最も早かった。さらに、藻類が出現する前の 1 月中の降雪量は、2011 年が 4 冬期で最も多かった (674.3 mm)。積雪深が深いと融雪する期間もそれだけ長くなることから、2011 年は 4 冬期の中で雪氷藻類の繁殖期間が最も長かったと考えられる。実際の観測結果によると、各年の藻類が出現してから消雪までの期間は、それぞれ 84 (2011 年)、62 (2013 年)、45 (2014 年)、60 日間 (2015 年) であり、2011 年が最も長かった。その期間中に、気温が 0°C 以上になった時

間の合計は、2011年が1415時間、2013年が1065時間、2014年が888時間、2015年が1291時間であった。この結果もまた、2011年は雪氷藻類の繁殖期間が4冬期の中で最も長かったことを示している。さらに2011年以外の3冬期では、藻類の出現後に、気温が氷点を下回ることが頻繁におこっていた。たとえば、2013年では藻類の出現した2月15日から観測最終日の4月16日までの60日間のうち13日間で、日平均気温は氷点を下回っていた。このことは、この3冬期では、積雪表面が再凍結することによって藻類の繁殖が頻繁に妨げられていたことを示唆している。

藻類の繁殖に影響を与えると考えられている、雪温、日射、EC、pH、含水率といった環境条件は、観測年による違いはほとんどなかった。雪温は、藻類が出現した以降、年によらず0°Cであった。日射量は、1-4-1で述べたように年によってほとんど違いがなかった。ECとpHも、年による有意な差はなかった。含水率は、2013年3月15日を除いて、3月以降0%となった日は無く、年による違いはほとんどなかった。以上のことから、これらの条件は、十日町の積雪においては藻類の繁殖に直接的な影響は与えていないと考えられる。従って、雪氷藻類は、積雪が融解している間に繁殖し、その細胞濃度は積雪の表面が融解している限り時間とともに指数関数的に増加すると考えられる。

1-5-4. 雪氷藻類の成長曲線の数理モデルによる近似

一般に、微生物の細胞数の時間変化は、その変化率が細胞数に比例するという単純な微分方程式を解くことによって得られるマルサスモデルと呼ばれる数式で再現することが可能である。このモデルには、微生物の初期細胞濃度と増加率という二つのパラメータが必要である。このマルサスモデルは、閉じた環境における一定速度の細胞分裂による細胞数の増加を仮定したモデルであり、外部から細胞の追加または外部への細胞の移動は、考慮しない。さらに、日射や栄養塩といった繁殖に必要な資源や、微生物が存在するために物理的な空間が十分にあることも前提としている。このような環境を仮定できる時、微生物

細胞の時間変化（成長曲線）は、以下の式で表すことができる（例えば、Cui and Lawson, 1982）.

$$\frac{dx}{dt} = \mu X \quad \text{式 (1-8)}$$

式 (1-8) を X について解くと、

$$X(t) = X(0)e^{\mu(t-t_0)}, \quad t = d - d_f \quad \text{式 (1-9)}$$

式 (1-9) において、 $X(t)$ と $X(0)$ は、それぞれ時間 t と t_0 における微生物の細胞数、 μ は増加率である。 t_0 は藻類が出現時の時間で、 $X(0)$ は初期細胞濃度を意味する。雪氷藻類は積雪が融解している条件でのみ繁殖を行うので (Fukushima, 1963)、積雪の融解を考慮して式 (1-9) の右式から t を求めた。式 (1-9) の d は日数、 d_f は凍結日数を表している。先行研究によると、北海道の積雪では日最高気温が 2°C を超えると 1 mm d^{-1} 以上の積雪の融解が起こることが報告されている (小島ら, 1983)。そこで、気温が 2°C を超えると積雪表面が融解すると仮定して、凍結日数を気温が 2°C 未満の日数とした。十日町試験地では 1 時間ごとに気象データを観測しているので、例えば気温が 1 日の内 12 時間 2°C 未満の場合は、凍結日数を 0.5 日としている。 d_f を日数とした理由は、多くの研究で藻類の増加率の単位を 1 日当たりとしており、これらの先行研究と増加率の比較を行い易くするためである (例えば、Dauta et al., 1990; Radia et al., 2002; Leya et al., 2009)。十日町試験地では、雪氷藻類が積雪表面に出現した後も降雪があり、積雪表面が新雪に覆われることによって藻類の繁殖に影響が出る可能性がある。気温が 2°C 以上のときに 0.1 mm 以上の降雪は 12 月 1 日から 4 月 30 日までの期間で 13 時間しかなかった。そのため、十日町試験地では気温 2°C 以上のときはほとんど降雪が無いと考えられる。以上の理由から、本研究ではマルサスモデルを用いる際に、気温が 2°C 以上のときのみ藻類濃度が増加すると仮定した。

ここで十日町の積雪上の藻類濃度の季節変化を、この式を使って再現することを試みる。本研究では、4 年間の観測の中で最も長い期間、藻類繁殖のデータが得られた 2011 年の雪氷藻類の細胞濃度 (タイプ A と B の合計) $X(t)$ に対して、最小二乗法を用いた近似を行っ

た. 近似を行う際に用いたデータの範囲は, 雪氷藻類の細胞が出現した日 ($t_0 = 35$, 2月4日) から細胞濃度が最大値に達した日 ($t_{max} = 116$, 4月26日) までとした. タイプ A と B の細胞は, 実際には異なる生活史段階であると考えられるが, これら両タイプを含むすべての細胞が同条件で細胞分裂していると仮定した. 近似によって得られた各係数は, 初期細胞濃度 $X(0)$ が 1.8×10^{-1} cells mL⁻¹, 増加率 μ が 0.22 d⁻¹ となった. 図 1-21 と表 1-5 は, これらの得られた初期細胞濃度と増加率を使用してマルサスモデルで計算した雪氷藻類の細胞濃度と観測した細胞濃度を表している. 計算は, 藻類が積雪表面に出現した日から積雪が消雪した日までの期間で行った. 細胞濃度の計算値と観測値の決定係数は, 1.00 となった. 観測期間中に雪氷藻類の細胞濃度が最大となった 4月26日では, 細胞濃度の観測値とモデル計算値はそれぞれ, 2059 cells mL⁻¹ と 1093 cells mL⁻¹ となった. 細胞濃度の観測値と計算値には 966 cells mL⁻¹ の差がみられたものの, モデルが計算した細胞濃度は 3 日後の 4月29日に 2058 cells mL⁻¹ となり, 3日遅れて観測値とほぼ一致した. 他の日の細胞濃度の観測値と計算値も互いに近い値を示した (表 1-5). これらの結果は, 改善の余地はあるものの, 藻類の成長曲線は, このマルサスモデルによって概ね再現することが可能であることを示している.

1-5-5. 雪氷藻類の初期細胞濃度と増加率

2011年の観測値から得た初期細胞濃度

2011年の藻類濃度の観測値の回帰によって得られた初期細胞濃度 $X(0)$ は, 1.8×10^{-1} cells mL⁻¹ であった. この得られた初期細胞濃度は, 前述した藻類の供給過程より, 藻類が繁殖を始める前に大気から積雪表面へと供給された細胞の数を表していると考えられる. つまり積雪の水当量 1L あたり, 藻類の胞子は約 180 個含まれていたことを意味する. この値が実際の藻類胞子の供給量を表しているかどうかを確かめるためには, さらに調査が必要ではあるが, 本研究で得られた初期細胞濃度は十日町試験地において藻類の出現時の一般的

な細胞数であるのかもしれない。この初期細胞濃度が、他の地域でも適用できるかを確かめるためには、十日町試験地と同様に藻類孢子が気由来の雪氷藻類が繁殖する地域において調査を行い、比較することが重要であるだろう。

2011 年の観測値から得た増加率

2011 年の回帰によって得られた増加率 μ は、 0.22 d^{-1} であった。この増加率は、野外観測に基づくものとしては初めて明らかになった値である。これまで報告されてきた培養条件による雪氷藻類の増加率と比較すると、この値は小さい。先行研究によると、本研究で観察された種と同じ *Cr. nivalis* の培養環境下の増加率は、 0.60 d^{-1} と報告されている (Leya et al., 2009)。本研究の増加率が先行研究で報告された値よりも小さい理由は、おそらく野外の積雪環境が培養環境と比べて不安定で変化しやすい環境であるためと考えられる。先行研究では、藻類の増加率は、環境中の温度の影響を受けて変化することが報告されている (Eppley, 1972)。先述した *Cr. nivalis* の培養環境下の水温は 18°C であった。一方、2011 年の十日町の積雪表面の雪温は、藻類が出現して以降の全ての観測日で 0°C であった。培養環境よりも積雪環境で *Cr. nivalis* の増加率が低くなった原因は、両者の環境で温度条件が異なっていたことも関係しているのかもしれない。十日町の積雪の雪氷藻類の増加率に影響を与える要因については、現時点ではまだわからないが、その要因を明らかにすることは、藻類の繁殖を数理モデルで再現するために重要である。

マルサスモデルによる 2013–2015 冬期の藻類濃度の季節変化の再現

2011 年の観測値から得られた初期細胞濃度と増加率を用いて、他の 3 冬期 (2013, 2014, 2015 年) においても藻類繁殖の季節変化の再現を行った。再現を行った期間は、雪氷藻類が積雪表面に出現した日から積雪の消雪日までとした。図 1-22 と表 1-6 から表 1-8 までは、3 冬期の細胞濃度のモデル計算値と観測値である。計算値と観測値の決定係数は、2013

年で 0.96, 2014 年で 0.99, 2015 年で 0.14 となった。細胞濃度が最大値に達した日の細胞濃度の観測値は, 2013 年は 8 cells mL⁻¹, 2014 年は 459 cells mL⁻¹, 2015 年は 85 cells mL⁻¹ であった。一方, 同じ日の細胞濃度のモデル計算値は, 2013 年は 190 cells mL⁻¹, 2014 年は 18 cells mL⁻¹, 2015 年は 35 cells mL⁻¹ となった。2015 年の最大細胞濃度の観測値は, モデル計算値と近い値を示したが, 2013 年と 2014 年では観測値と計算値には 100 cells mL⁻¹ 以上の差がみられた。この原因は, 各年の初期細胞濃度または増加率が 2011 年とは必ずしも一致しないためであると考えられる。また, 2015 年では 4 月 6 日に細胞濃度の観測値は最大となったが, その後, 細胞濃度は減少しており, 4 月 6 日以降では細胞濃度の観測値とモデルの計算値が大きく異なった。このことが, 2015 年の決定係数が 0.14 と最も低くなった原因と考えられる。実際, 2015 年の藻類の出現日から 4 月 6 日までの期間では両者の決定係数は 1.00 となった。2015 年の 4 月 6 日以降の藻類濃度の減少は, 藻類繁殖に影響を与える環境の変化による可能性もある。その場合, 制限なく藻類が増加するマルサスモデルでは, このような藻類の変化を再現することはできない。ただし, 2011 年以外の 3 冬期間の季節変化については, 積雪表面の藻類濃度のばらつきが大きく, 各観測日に統計的有意差が必ずしも出ていない。したがって, 実際に求めた初期細胞濃度と増加率が他の年にも適用できるかを確かめるには, 観測間隔を短くすることや多数のサンプルを用いて藻類濃度の季節変動を求めてから比較する必要があるだろう。今回求めたモデルのパラメータの汎用性を確かめるためには, 他の地域において複数年にわたって調査を行い, 場所や年による初期細胞濃度と増加率を比較し, その決定要因を明らかにする必要があるだろう。

1-6. 結論

本章では, 日本の十日町市の積雪の 4 冬期にわたる観測によって, 雪氷藻類の季節変化および年変化を明らかにし, 雪氷藻類の繁殖の要因を特定し, その季節変化を数理モデル

で再現する可能性について検討した。研究地域の雪氷藻類には、2つの異なる形態をもつ細胞があることが確認された。先行研究との比較から、それら2つの細胞タイプはともに、世界および日本の積雪で一般的に観察される *Cr. nivalis* である可能性が高いことがわかった。この藻類は、4冬期のどの年も2月にはじめて積雪表面に出現したが、その出現時期は2月4日から2月25日の範囲で年によって異なった。気象観測の結果との比較から、この藻類が出現する時期は、降雪がなくかつ0°C以上の気温の継続期間によって決定されていることが示唆された。4冬期の結果から、その条件の継続時間は少なくとも24時間であることが示された。細胞濃度は、どの年も藻類の出現以降概ね増加し、4月に急激に増加して消雪の直前で最大となった。その藻類の成長曲線および最大細胞濃度も年によって異なった。4冬期の中で2011年は、雪氷藻類の繁殖期間、つまり藻類が現れてから消雪までの期間が最も長く(80日間)、最大細胞濃度も最も大きな値となった。さらに2011年は、繁殖期間中に気温が0°C以上になっていた時間も4冬期で最も長かった(1415時間)。以上の結果から、雪氷藻類は積雪の表面が融解する条件で繁殖し、その細胞濃度は繁殖によって指数関数的に増加し続けると考えられる。年によって異なる成長曲線は、各年の繁殖期間の違いによって説明できる。最大細胞濃度が2011年に最も大きかったのは、繁殖期間が最も長かったためであり、それは藻類の出現前の降雪量が多かったためと考えられる。2011年の雪氷藻類の成長曲線を、微生物の単純な指数増加式であるマルサスモデルで近似した結果、観測結果をよく再現することができた。この式の回帰から得られた初期細胞濃度 $X(0)$ と増加率 μ の値はそれぞれ、 $1.8 \times 10^{-1} \text{ cells mL}^{-1}$ と 0.22 d^{-1} であった。この雪氷藻類の初期細胞濃度と増加率の汎用性にはまだ検討が必要であるが、以上の結果は、融解期の雪氷藻類の季節変化は、繁殖開始日、初期細胞濃度および増加率さえ決定できれば、単純な微生物モデルによって再現が可能であることを示している。

第 2 章 グリーンランド北西部の氷河における積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖モデル

2-1. はじめに

本章では、近年急激な積雪の融解および雪氷藻類の繁殖が確認されている地域の一つであるグリーンランド北西部のカナック氷河を研究対象とし、雪氷藻類の季節変化からその繁殖要因を明らかにし、雪氷藻類の繁殖の数理モデルを作成することを目的とする。

第 1 章では、日本の新潟県十日町試験地の積雪において 4 年にわたる観測から、雪氷藻類の季節変化およびその繁殖の特徴を明らかにした。十日町試験地の結果は、雪氷藻類が積雪表面に現れる時期が気温と降雪によって決まることと、藻類は時間とともに指数関数的に増加することを示していた。さらに、藻類の細胞濃度の季節変化は、一般的な微生物繁殖モデルを使って再現が可能であることが示唆された。本章では、雪氷藻類がより広範囲に繁殖し、アルベドへの影響も大きいと考えられている北極域の氷河上の積雪を対象に、十日町と同様の繁殖モデルが適用できるのかを確かめるため、グリーンランド北西部において雪氷藻類の季節変化を観測し、雪氷藻類の繁殖モデルの作成を試みた。

グリーンランドは北緯 60 度から 80 度、西経 11 度から 74 度の範囲に位置する、北極域最大の島である。グリーンランド氷床は、この島の表面積の 80% を氷で占めている氷体であり、北半球で最大の氷床である (Mernild et al., 2010)。その氷体は、総面積が 1,700,000 km²、体積が 2,930,000 km³、氷床の厚さが平均で 2135 m と推定されている (Huybrechts et al., 1991; Thomas et al., 2001; Bamber et al., 2001)。グリーンランド氷床は、近年、地球温暖化に伴い急激な質量の減少が報告され、その融解過程の理解に関心が集まっている (例えば、Box et al., 2012)。

グリーンランド氷床上の積雪にも、緑藻が融雪期に繁殖し、赤雪現象を引き起こすことが明らかになっている (Kol, 1969)。グリーンランド南東部に位置する Mittivakkat 氷河上

の積雪では *Chlamydomonas nivalis* が赤雪現象を引き起こし、この藻類の繁殖域が同氷河上の雪線の上昇に伴って氷河の上流へと移っていることが報告されている (Lutz et al., 2014).

グリーンランド北西部に位置するカナック氷河では、雪氷藻類の群集構造や氷河上の高度分布が報告されている。Uetake et al. (2010) は、氷河上の裸氷域において雪氷藻類の群集構造を調べ、他のグリーンランドの氷河でも見られる一般的な緑藻類である、*Mesotaenium berggrenii* や *Ancylonema nordenskioldii* が繁殖していたことを報告している。また、カナック氷河の裸氷域と積雪域の表面は、微生物と鉱物粒子で主に構成された不純物で構成されており、このような不純物は大気あるいは氷河の氷体から供給されている可能性があることが報告されている (Takeuchi et al., 2014)。以上のように、グリーンランド氷床に繁殖する雪氷藻類の種や群集構造、分布などは明らかになってきたが、雪氷藻類が出現する時期や条件、繁殖する定量的な季節変化について観測された例はまだなく、詳しいことはわかっていない。積雪物理モデルを使って藻類の表面のアルベドへの影響の季節変化を求めるためには、融雪の始まる前から、融雪期にかけて雪氷藻類の繁殖過程を定量的に明らかにする必要がある。

そこで本研究では、雪氷藻類の季節変化を明らかにし、その観測結果に基づいて雪氷藻類の繁殖モデルを作成するため、グリーンランド北西部のカナック氷河で調査を行った。また、カナック氷河は、後述する日本の雪氷研究者を中心とした研究プロジェクトの観測対象氷河となっており、ここ数年間で夏季に集中観測が実施されている。このような集中観測から得られる詳細な情報は、モデル研究を行う上で欠かせないものである。上記の点からもカナック氷河で調査を行うことが望ましいと考えた。

本章では、グリーンランド北西部のカナック氷河において、夏季の 2 か月間にわたって異なる高度の積雪域において定期的な観測を行うことによって、雪氷藻類の季節変化を明らかにし、その観測結果に基づいて雪氷藻類の繁殖モデルを作成することを目的とした。

2-2. 調査地

本章で対象とするカナック氷河は、グリーンランド北西部に位置するグリーンランド氷床に接したカナック氷帽から流れ出る氷河（北緯 77 度 29 分，西経 69 度 12 分）である（図 2-1 および図 2-2）。

カナック氷帽は、グリーンランド北西部にある半島上を覆う氷体で、その面積は 286 km² であり、氷帽の頂上部の標高は約 1100 m，末端部の標高は約 30 m である（Takeuchi et al, 2014; Sugiyama et al, 2014）。カナック氷帽は、四方に流れ出す複数の溢流氷河を持っている。カナック氷河は、南西方向に流れ出すその溢流氷河の一つである。カナック氷河の南沿岸部には人口 600 人ほどの集落であるカナック村がある（Sugiyama et al., 2014）。カナック氷河へは、この村から低山を経由して歩いて 2 時間ほどで氷河の標高 600 m の中流部にアクセスすることができる。

カナック氷河は、寒冷な気候環境の氷河である。グリーンランドは非常に広域な島であるため、その気候は北部と南部，または内陸部と沿岸部といった地域によって大きく異なる。一般には、標高が高くかつ内陸部であるほど低気温であり、氷床表面付近の年平均気温は -10 から -30°C の範囲といわれている（Ohmura, 1987）。カナック氷河末端から約 2.8 km 離れた位置にはカナック空港があり、気温が定期的に観測されている。2011 年から 2013 年に空港で観測された気温のデータによると、空港周辺の年平均気温は -8.18°C である（田中，2016）。グリーンランドは、大部分が北極圏に位置するため夏季に白夜が存在し、白夜のときの日照時間は 24 時間となる。この環境は第 1 章で扱った十日町と明確に異なる。

カナック氷河では、日本の雪氷研究者を中心に構成された Snow Impurity and Glacier Microbe effects on abrupt warming in the Arctic (SIGMA) および Green Network of Excellence (GRENE) という研究プロジェクトによって、2011 年から 2015 年まで集中的な氷河、気象観測が行われた（例えば、Aoki et al., 2014）。SIGMA プロジェクトによってカ

ナック氷帽およびグリーンランド氷床上には合計 3 箇所に自動気象観測測器が設置され、詳細な気象データが観測されている。

これまでのカナック氷河における研究 (Sugiyama et al., 2014) によると、標高 243 m の氷河末端部から標高 1079 m の氷河上流部にかけて 6 月から 9 月の期間で気温は 0°C を上回ることが確認されている。そのため、本研究では雪氷藻類が繁殖を行うと考えられるこの融解期間に調査を行った。

雪氷藻類の季節変化の観測は、2014 年の 6 月から 8 月にかけて、カナック氷河上の高度の異なる 2 地点の積雪域で行った (図 2-3)。その観測地点は、カナック氷河の標高 551 m の中流部 (以下、Site-A と表記) と標高 944 m の上流部 (以下、Site-B と表記) である。Site-A は、カナック氷河の左岸側の端に位置する吹き溜まりの積雪上である。この積雪は、カナック氷河本流の裸氷域に接しているが、夏季を通して融けてなくなることはない越年性の積雪となっているため、雪氷藻類の季節変化の観測を行う上で適切な地点であると考えた。Site-B は、SIGMA プロジェクトによる気象測器が設置されている近傍の積雪面である。雪氷藻類の繁殖過程を明らかにすることができれば、この測器で観測されている詳細な気象データと議論できると考えた。また、Site-A と同様に夏季を通して積雪が存続しているため、適切な研究地点であると考えた。季節変化の観測は、6 月 11 日から 8 月 3 日までの期間でそれぞれの対象地点で概ね 1 週間ごとに行った。観測を行った詳細な日時は、表 2-1 から表 2-8 までで示した。

2-3. 手法

2-3-1. 気象観測

雪氷藻類の季節変化と気象環境との関係を明らかにするために、SIGMA プロジェクトによってカナック氷河で観測されている気象データを使用した。SIGMA プロジェクトによって Site-B に設置された自動気象測器を用いて、気温、上下方向の短波放射、上下方向の長

波放射, 気圧, 風速, 風向, 湿度, 積雪深が観測されている (図 2-4). この気象測器は, 2012 年 7 月 19 日に設置され, それぞれのセンサーは雪面から 2.5–3.0 m の高さに設置された. 各データは, 1 時間ごとに測定され, ロガーによって保存, さらに衛星回線によってリアルタイムに日本にも転送されている. Site-B の自動気象測器に関する詳細な説明は Aoki et al. (2014) に記載されているため, 本章では説明を省略する. 本章では気象測器による観測期間の内, 2014 年 4 月 1 日から 2014 年 9 月 1 日までの期間の気温, 下向き短波放射 (日射量), 上下方向の長波放射を使用した. Site-B の自動気象測器が観測した気象データはグリニッジ標準時 (GMT) で記録されているが, 本研究では得られた気象データをグリーンランドのサマータイムの現地時刻 ($LT = GMT - 2h$) に変換して扱った. 気象データを LT とした理由は, カナック氷河上において行った現地観測と比較を行うためである.

Site-A では, 千葉大学が設置した自動気象測器によって下向き短波放射 (日射量) を観測した (図 2-5). Site-A の気温は, Site-B の気温を基に気温減率から Site-B と A の高度差から求めた. 気温減率は, カナック氷河上の 2 地点の温度差から求めた値 $-0.780 \times 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$ (Sugiyama et al., 2014) を用いた. Site-A の気象測器は 2014 年 6 月 21 日から 2014 年 8 月 2 日までの期間で設置し, 日射のセンサー (ML-020VM, Eiko Seiki, Japan) を雪面から 1.0 m の高さに設置した. この日射計の測定波長域は 400–1100 nm である. 日射量は 1 時間ごとに測定し, ロガー (LR5041, Hioki, Japan) に記録した.

2-3-2. 積雪観測

雪氷藻類の繁殖に対する積雪条件の影響を明らかにするために, カナック氷河の各観測地点で積雪断面観測を行い, 積雪物理データを測定した. 積雪断面観測の調査項目は, 雪質, 粒径, 雪温, 密度, 含水率, 積雪表面レベルの低下量, 積雪全層の厚さである. 積雪断面観測は, Site-A と B の 2 地点で, 2014 年 6 月 11 日から 2014 年 8 月 3 日までの期間で概ね 1 週間ごとに行った (表 2-1 から 2-2 まで). 積雪粒径は, デジタルカメラのミク

口撮影機能を用いて写真（図 2-6）のように積雪の粒子を撮影した。撮影毎にカメラと粒子の距離が変化しないように、穴をあけたプラスチック製の筒をカメラに取り付けて 5 cm の距離を保ちながら撮影を行った。1 つの積雪層の異なる雪粒子に対して複数回の撮影を行った。同時に撮影した粒度ゲージのスケールを参考にして、粒子の短径を粒径として 1 つの積雪層で 10 個の粒子を測定し、粒子の半径の平均値と標準偏差を求めた。雪温はサーミスタ温度計（CT-430WP, CUSTOM, Japan）を用いて測定した。密度は、密度サンプラーを用いてサンプラーの体積と雪サンプルの重量から求めた。含水率は、雪質がざらめ雪の場合にのみ求め、第 1 章の 1-3-2 と同様の手法で、Denoth 式含水率計を用いて積雪層の誘電率を測定して求めた。雪質、粒径、雪温、密度、含水率の測定は、積雪表面で 2 cm（積雪深 0-2 cm）、表面下の層で 8 cm（積雪深 2-10 cm）、それ以深の層で 10 cm（積雪深 10 cm 以深）ごとに行った。積雪表面レベルの低下量は、Site-A と Site-B の両地点に複数のステークを設置し、その長さを観測日毎に測定して得た。Site-A では観測開始日の 6 月 11 日、Site-B では観測開始日の 6 月 17 日を 0 cm として、ステーク測定から得られた積雪の低下量を積雪表面レベルの低下量とした。積雪全層の厚さは、積雪表面から氷河の氷面までの積雪の厚さと定義し、断面観測時に測定を実施した。

積雪表面の融解の有無を観測日以外でも判定するために、先述した気象観測結果を基に積雪表面の雪温を求めた。Site-B の表面雪温は、Niwano et al. (2015) の手法にしたがって、上向きおよび下向き長波放射と積雪の放射率から求めた。積雪の放射率は、先行研究 (Armstrong and Brun, 2008; van As, 2011) より、0.98 と仮定した。上記の手法によって 1 時間ごとの雪温を求めた。Site-A の表面雪温は、長波放射の観測を行っていないため、観測値をもとに求めた大気的气温減率 (Sugiyama et al., 2014) と Site-B との標高差 (393 m) を使って、Site-B の雪温を基に気温減率から Site-B と A の高度差から得た。この得られた温度を Site-A の雪温と仮定した。なお、気温減率を用いて Site-B の雪温から Site-A の雪温を計算した際に、雪温が 0°C を超える場合は、融解している積雪の温度が 0°C を超

えることはないことに基づいて (Koivusalo et al., 2001), 0°C とした.

2-3-3. 積雪サンプルの採取

カナック氷河の積雪上に繁殖する雪氷藻類およびそのほかの不純物を定量的に評価するために, Site-A と B で表 2-3 から表 2-4 までに示した観測日に表面積雪サンプル (深さ 0-2 cm) の採取を行った. また, Site-B では積雪表面のサンプル採取に加えて, 表面下の層 (深さ 2-10 cm) でもサンプルの採取を行った. この表面下の層のサンプルは, 第 3 章で議論するアルベドの季節変化をアルベド物理モデルで計算する目的で, 表面積雪サンプルと同じ日に採取した (表 2-6). 積雪中の雪氷藻類の細胞濃度と不純物濃度 (Dust, BC, OC) をそれぞれ定量化するために, 雪サンプルはそれぞれ別々に採取した. 雪氷藻類分析用の積雪サンプルは積雪表面でのみ, 不純物分析用のサンプルは, 積雪表面と表面下の層の両方で採取した. サンプル採取は, 2-3-2 の積雪断面観測と同時に実施した.

雪氷藻類分析用の積雪サンプルは, ステンレススコップを用いてポリエチレン製の袋 (ワールパック) に採取した (図 2-7). サンプルは異なる積雪表面において複数箇所で採取した. 雪質が新雪の場合はサンプルを 1-2 箇所, ざらめ雪の場合は 3-5 箇所 で採取した. サンプルの面積は, 積雪断面観測時に測定した密度 (kg m^{-3}) と採取したサンプルの深さから計算, あるいは実測することによって求めた. 採取したサンプルの面積は 100-900 cm^2 であった. この雪氷藻類分析用の積雪サンプルとは別に, 藻類の形態を観察するためのサンプルを別途 Site-A と B でそれぞれ採取した.

不純物分析用の積雪サンプルは, 雪ヘラを用いてノンダストのポリ袋に採取した (図 2-8). サンプルは異なる積雪表面と表面下の層において複数箇所 で採取した. 表面 (深さ 0-2 cm) では, 雪質が新雪の場合はサンプルを 1-2 箇所, ざらめ雪の場合は 2-5 箇所 で採取した. サンプルの面積は測定した密度 (kg m^{-3}) と採取したサンプルの深さから計算, あるいは実測することによって求めた. 採取したサンプルの面積は 225-6050 cm^2 であつ

た。表面下の層（深さ 2–10 cm）では、雪質が新雪の場合はサンプルを 1 箇所、ざらめ雪の場合は 1–2 箇所採取した。

全ての積雪サンプルは採取後、すぐにカナック村へと輸送し、分析の前処理を行った。雪氷藻類分析用のサンプルは室温で融解させた後、サンプルを 2 つに分注した。分注した 1 つは、顕微鏡による藻類の定量化を行うために、分注時に 30 mL のポリエチレン製ボトル（ナルゲンボトル）に入れ、サンプル量の 3% のホルムアルデヒド溶液を加えて保存した。ホルムアルデヒド溶液を加えることによって、鞭毛などの細胞器官や細胞内の色素が失われ、藻類細胞の形状に変化が起こり得るが、顕微鏡観察による雪氷藻類の定量化を行う上では支障はない。残りのサンプルは電気伝導度（EC）と水素イオン指数（pH）を測定した後、クロロフィル a 濃度の分析のため前処理を行なった。前処理の手順は 1–3–3 と同様で、グラスファイバーフィルター上にサンプルをろ過した後、アシストチューブ内の 6 mL の DMF で抽出し、そのままカナック村の冷凍庫（–20°C）に保管した。

不純物分析用のサンプルは、室温で融解させた後、一つは BC と OC の濃度の分析用として、もう一つは鉱物粒子の重量の分析用として、サンプルを二つに分注した。まず、サンプルの一部を分注し、BC と OC の濃度の分析用の前処理を行った。攪拌させたサンプルを、ビーカーに 500–1000 mL の量だけ移し、ビーカー内に粉状のリン酸二水素アンモニウム（ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ）を投入した。リン酸二水素アンモニウムには、BC を凝集させる役割があり、BC の検出をより正確にできると考えられている (Torres et al., 2014; Kuchiki et al., 2015)。その後、サンプルを攪拌させ、リン酸二水素アンモニウムが全て溶けたことを目視で確認し、石英ガラスフィルター（2500QAT-UP, Pall Corp, USA）にポンプを使用せずに濾過した。ポンプを用いなかった理由は、フィルターに吸着させた BC 粒子がポンプの圧力によってフィルターから流れ落ちる可能性があるためである。濾過はフィルターの色が写真（図 2–9）のような灰色になるまで行った。以上の、フィルターへとサンプルを濾過するまでの一連の作業は、クリーンベンチ内で行い、埃等の不純物がサンプル内に入らないよう配慮

した。濾過したフィルターは、1枚ずつ透明な保存容器（ペトリスライド）に入れた後、その容器ごとシリカゲルを入れたタッパー内に入れて保管した。フィルターを乾燥させるために、保管後約1日間はペトリスライドの蓋をわずかに開け、乾燥したことを確認した後、蓋を閉じた。乾燥させたフィルターは帰国までカナック村で保管した。なお、この上記のサンプルの濾過処理は、1サンプルあたり平均6時間ほどの時間がかかる。そのため、Site-Bで採取したサンプルのみこの処理を行い、Site-Aで採取したサンプルは後述する鉱物粒子の重量を分析するための前処理のみ行った。

BCとOCの濃度の分析用に分注した後に残ったサンプルで、鉱物粒子の重量を分析するための前処理を行った。写真のように（図2-10）サンプルの入った容器を吊るして、容器に不純物を沈殿させ、サンプルの上澄みを捨て、沈殿物を30 mLのナルゲンボトルに移した。このナルゲンボトルにも3%のホルムアルデヒド溶液を加え、帰国までカナック村で保管した。

これらの2種類のナルゲンボトル、1種類のアシストチューブ、1種類のペトリスライドは、分析のため千葉大学へと常温のまま持ち帰った。アシストチューブは千葉大学へ持ち帰った後、すぐに研究室内の冷凍庫に保存した。また、藻類の形態の観察用のサンプルはバッテリーを内蔵した携帯型フリーザー内に保存し、ホルムアルデヒド溶液を加えずに冷凍状態のまま大学へと持ち帰った。

2-3-4. クロロフィル a 濃度の分析

サンプルのクロロフィル a 濃度は、1-3-4の記述と同様に蛍光法によってアシストチューブ内のDMFから定量した。その後、サンプルの濾過量を用いて積雪水当量あたりのクロロフィル a 濃度を求めた。

2-3-5. 光学顕微鏡観察による藻類種の同定

積雪中の藻類細胞の観察および写真撮影は、1-3-5 で記述したものと同様の手法で行った。藻類の種は、形態をもとにカナック氷河の先行研究 (Uetake et al., 2010; 田中, 2016) を参考に同定した。同定した種の細胞の長径と短径は、田中 (2016) によって明らかにされている値を用いた。

2-3-6. 光学顕微鏡観察による藻類の定量

前章の十日町の積雪の分析と同様に、顕微鏡による直接カウント法によって各サンプルの藻類の細胞濃度を求めた。分析の手法は、後述する点を除いて 1-3-6 で記述したものと同様である。本章では、得られた単位積雪水当量あたりの細胞濃度 (cells mL^{-1}) だけでなく、サンプルの重量と面積を用いて、単位面積あたりの細胞濃度 (cells m^{-2}) も求めた。この理由は、アルベドに影響を与える雪氷藻類の季節変化を議論するためには細胞濃度を面積あたりで表記した方が適切と考えたためである。さらに、得られた細胞濃度と細胞の体積から、面積あたりの細胞体積バイオマス (mL m^{-2}) を求めた。

2-3-7. 積雪中の鉱物粒子量の分析

積雪表面の面積あたりの鉱物粒子の重量 (g m^{-2}) は、積雪中の沈殿物から有機物を燃焼して除去し、燃え残った鉱物粒子の重量とサンプルを採取した面積から求めた。鉱物粒子の重量の分析では、まず事前に重量を測定したるつぼに、ナルゲンボトルに保存した積雪中の沈殿物を全て入れた。そのるつぼを 60°C の乾燥機に 24 時間入れ、サンプルを乾燥させて沈殿物の乾燥重量を測定した。乾燥前後の重量差とサンプルを採取した面積から、積雪表面の全不溶物質の乾燥重量 (g m^{-2}) を得る。その後、 500°C の電気炉で 3 時間かけてサンプル中の有機物を燃焼させ、再び重量を測定し、燃焼前後の重量差とサンプルを採取した面積から有機物重量 (g m^{-2}) を求めた。乾燥重量と有機物重量の差から得られた重量

を、積雪表面の鉱物粒子の重量 (g m^{-2}) として求めた。

2-3-8. 積雪中の炭素量の分析

積雪の炭素量の分析は、現地で各サンプルを濾過した石英ガラスフィルター上の炭素量を Chow et al. (1993) および Kuchiki et al. (2015) の手法に倣って熱光学法 (IMPROVE) によって定量することによって求めた。この分析では有機炭素 (Organic Carbon; 以下 OC と略) と、黒色炭素と仮定した元素炭素 (Elemental Carbon; 以下 EC と略) を、フィルター上の捕獲物質の光学的反射率を測定しつつ、燃焼温度を上昇させて各温度の燃焼炭素量をガスクロマトグラフィーで連続的に定量するものである。燃焼分析後、光学的反射率によって燃焼温度の閾値を決め、OC と EC それぞれの質量を求める。分析には、気象研究所の OC-EC Aerosol Analyzer (Sunset Laboratory Inc., USA) を使用した。現地で各サンプルを濾した石英ガラスフィルターを 1 cm^2 の正方形に切り、分析機械内へ入れた。炭素量測定では、分析機械内のガスの量を外部から調節し、ヘリウム 100% の状態で 120, 250, 450, 550°C の順に、そのフィルターを燃焼させた。この燃焼によってフィルター上の EC の質量が得られる。その後、ガスの量を酸素 10%, ヘリウム 90% に変え、550, 700, 800°C の順に燃焼させた。温度上昇に伴い燃焼したフィルターの表面の色が徐々に変化する。燃焼前のフィルターの反射率よりも燃焼後のフィルターの反射率が高くなるとフィルター上の EC は全て燃焼したと考えられる。そして、EC が燃焼した後に検出される炭素を OC と仮定し、OC の濃度が測定される。先行研究では、すす粒子のサンプルにおいて熱光学法によって検出された EC の濃度と他の手法によって検出された BC の濃度の差は 2% 以内であった (Miyazaki et al., 2007)。そこで、本研究では分析された EC の濃度を BC の濃度と仮定した。以降の EC の濃度に関する結果はすべて BC として扱う。

2-4. 結果

2-4-1. カナック氷河の気象条件

Site-B での観測によるカナック氷河の気温は、4月と5月は氷点下で、その後徐々に上昇し、6月に初めて0°Cを超え、7月から8月のほとんどの期間で0°C以上であった(図2-11から図2-13まで)。Site-Bでは、1時間ごとに測定された気温は4月1日12:00 LTに-9.9°Cで、6月2日15:00 LTに0.1°Cとなり初めて0°Cを超えた。その後、6月24日21:00 LTから観測終了日の8月3日12:00 LTまでの気温は、952時間の内764時間は0°C以上であった。Site-Bの4月から8月までの月平均気温は、それぞれ-19.5, -11.6, -2.6, 0.9, -1.2°Cとなった。Site-Bの日平均気温は、6月で-7.2から3.2°C, 7月で-1.4から3.4°C, 8月で-6.7から4.4°Cの範囲をとった。気温減率から得られたSite-Aの気温は、6月2日4:00 LTに初めて0°Cを超え、その後、6月24日14:00 LTから観測終了日の8月2日12:00までの期間で0°Cを下回った時間はなかった。

日射量は、4月から7月中旬まで徐々に増加し、その後減少した(図2-11から図2-13まで)。Site-Bでは、4月18日にはじめて日照時間が24時間となり、カナック氷河では4月18日から8月29日の期間で白夜であった。Site-Bの4月から8月までの月平均日射量は、それぞれ165, 276, 296, 244, 126 W m²となった。Site-Bの日平均日射量は、6月で116-377 W m², 7月で90-383 W m², 8月で59-237 W m²の範囲をとった。6月21日から8月2日までの期間で測定したSite-Aの日平均の日射量は、7月で73.5-374.8 W m²の範囲をとった。Site-AとBの7月中の1時間ごとに測定された日射量は、それぞれ9.6-845 W m²(平均: 218 W m²)と12-683 W m²(平均: 244 W m²)の範囲をとった。7月中の両地点の日射量は、観測された最大の日射量が異なったものの、平均値には地点による明瞭な差はみられなかった。

2-4-2. カナック氷河上の積雪条件

積雪表面における積雪条件の季節変化

カナック氷河の積雪は、いずれの地点でも6月下旬から融解が始まり、8月上旬まで1 m以上積雪表面の高さが低下していた(表2-1と表2-2, 図2-14と図2-15)。Site-Aでは、積雪表面の雪質は6月20日まで新雪であり、その後6月28日にざらめ雪となり、以降観測終了の8月2日まで続いた。密度は時間とともに増加しており、6月11日から6月20日までは $188-198 \text{ kg m}^{-3}$ の範囲をとっていたが、6月28日に急増し 418 kg m^{-3} となり、以降ゆるやかに増加し続け8月2日では 544 kg m^{-3} となった。また、観測期間中の積雪表面の密度は雪質によって異なり、新雪のときは $188-198 \text{ kg m}^{-3}$ の範囲をとったのに対して、ざらめ雪のときは $418-544 \text{ kg m}^{-3}$ の範囲をとり、ざらめ雪でより高かった。粒径は、6月11日に0.5 mm, 6月20日に0.1 mmとなり、その後6月28日に1.1 mmと急激に増加し、以降の7月5日から8月2日までは0.7-1.0 mmの範囲となりほとんど変化しなかった。粒径は雪質によって異なり、新雪のときは0.1-0.5 mm, ざらめ雪のときは0.7-1.1 mmとなった。積雪表面の雪温は、6月20日まで -0.1°C で、6月28日以降では 0°C であった。観測期間中の積雪表面の含水率は、はじめて測定した6月28日に6.0%となり、以降8月2日まで4.7-5.4%の範囲をとった。積雪表面レベルの低下量は、観測開始の6月11日から観測最終日の8月2日までの期間で183 cmとなり、観測期間の52日間で2 m近く積雪表面の高さは低下していた。Site-Bでは、積雪表面の雪質は、観測開始の6月17日では新雪であり、その後6月25日から観測終了の8月3日までざらめ雪であった。観測期間中における積雪表面の密度は、6月17日に 386 kg m^{-3} , 6月25日に 484 kg m^{-3} , 6月30日に 351 kg m^{-3} となり、増減を繰り返していた。密度は、7月9日から8月3日までの期間でも同様に増減を繰り返し、 $348-522 \text{ kg m}^{-3}$ の範囲をとった。積雪表面の雪温は、6月17日に -0.2°C , 以降は -0.1°C を記録した7月16日を除いて 0°C であった。含水率は、はじめて測定した6月30日に6.3%となり、以降増減を繰り返して3.8-4.9%の範囲をとった。

粒径は、観測開始時の6月17日に0.3 mmとなり、徐々に増加して6月30日に0.9 mmになった。その後7月9日から8月3日までは粒径にほとんど変化は無く、その大きさは0.7–0.9 mmまでの範囲をとった。積雪表面レベルの低下量は、観測開始の6月17日から観測最終日の8月3日までの期間で123 cmとなり、観測期間の47日間で1 m以上積雪表面の高さは低下していた。調査を行った2地点では、密度の季節変化と積雪表面レベルの低下量は異なったものの、どちらの地点も6月下旬から雪質がざらめ雪へと変化し、6月下旬以降は積雪表面が融解していた。

長波放射から求めた表面の雪温は、どちらの調査地点でも6月下旬から8月上旬まで積雪表面がほぼ常に融解していることを示した(図2-14と図2-15)。Site-Bの雪温は、観測開始日の6月17日12:00 LTから観測終了日の8月3日12:00 LTまでの1129時間の内885時間で0°Cであった。Site-Aの雪温は、観測開始日の6月11日12:00 LTから観測終了日の8月2日12:00 LTまでの1249時間の内1191時間で0°Cであった。またSite-Aでは、6月24日10:00 LTから8月2日12:00 LTまで雪温は常に0°Cであった。

カナック氷河の積雪表面のECとpHはいずれの地点でも、6月から8月にかけてほとんど変化していなかった(表2-3と表2-4, 図2-16と図2-17)。Site-Aでは、積雪表面のECは観測期間中の6月から8月を通して1.5–4.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (平均: 2.7 $\mu\text{S cm}^{-1}$)の範囲で、大きな変化はなかった。積雪表面のpHは、5.5–6.2 (平均: 5.9)の範囲で、ECと同様にほとんど変化がみられなかった。Site-Bでは、観測期間中のECとpHは、それぞれ0.4–3.2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (平均: 2.4 $\mu\text{S cm}^{-1}$)、5.3–6.1 (平均: 5.8)の範囲をとり、Site-A同様に観測期間を通して目立った変化はなかった。統計検定は、両地点の8月上旬のECとpHには有意な差が無いことを示した(student t-test, EC: $t = 0$, $P = 1 > 0.05$; pH: $t = 1.96$, $P = 0.14 > 0.05$)。他の時期でも同様に両地点のECとpHには有意な差はなかった。ECとpHは、観測期間を通して有意な差はなく、どちらも季節変化を示さなかった。また、ECとpHには地点間の違いもみられなかった。

Site-B の積雪表面下の層における積雪条件の季節変化

Site-B の積雪の表面下の層（深さ 2–10 cm）でも表面と同様に、積雪層が 6 月から 8 月にかけて融解していた（表 2–5，図 2–18）。雪質は、表面と異なり観測開始日の 6 月 17 日にざらめ雪であり、以降観測終了日の 8 月 3 日まで全ての観測日でざらめ雪であった。粒径は、6 月 17 日に 0.5 mm となり、徐々に増加して 7 月 16 日に 1.0 mm になった。その後 7 月 22 日から 8 月 3 日までは粒径は 0.8–1.1 mm までの範囲でほとんど変化がしていなかった。雪温は、6 月 17 日、6 月 25 日、7 月 16 日では -0.1°C で他の観測日は全て 0°C であった。密度は、6 月 17 日に 379 kg m^{-3} を記録し、徐々に増加し続けて 7 月 16 日に観測期間中最大の 519 kg m^{-3} となった。以降の 7 月 22 日から 8 月 3 日の期間では、密度は $459\text{--}490\text{ kg m}^{-3}$ の範囲で増減を繰り返した。含水率は、6 月 30 日に観測期間で最大の 6.9% となり、以降は 7 月 9 日から 8 月 3 日まで 3.8–6.8% の範囲で増減を繰り返していた。積雪表面下の層は、表面と同様、観測期間中に融解していたことを示した。

積雪断面における積雪条件の季節変化

Site-A および Site-B の両地点の積雪断面は、観測開始時には新雪、しまり雪、ざらめ雪層からなる断面であったが、6 月下旬に全層でざらめ雪になり、以降観測終了まで積雪全層がざらめ雪であった。Site-A では、6 月 11 日および 6 月 20 日の積雪断面観測時に積雪層内で新雪、しまり雪、ざらめ雪が確認された。6 月 28 日に積雪層内の雪質は全てざらめ雪となり、積雪底部は氷河上流部から流れる融解水によって積雪表面から 20 cm 以深はすべて浸水していた。実際、Site-A のあるカナック氷河中流部の左岸端では、図 2–19 のような上流部から続いている巨大な水路が確認された。6 月 25 日以降この融解水流による浸水は、観測日によって水深は異なるものの観測終了まで概ね観察された。Site-B では、6 月 17 日の積雪断面観測時に積雪層内で新雪、しまり雪、ざらめ雪が確認された。6 月 25 日で積雪層内の雪質は全てざらめ雪となり、積雪底部では再凍結氷が確認された。以降観測終

了までの期間では、積雪層内の雪質はすべてざらめ雪で、積雪底部では再凍結氷が確認された。Site-B では Site-A とは異なり、融解水流による積雪層の浸水は確認されなかった。

2-4-3. カナック氷河上の鉍物粒子, BC および OC の濃度

積雪表面における鉍物粒子, BC および OC の濃度の季節変化

表面積雪に含まれる鉍物粒子の重量は、6月から8月にかけて両地点ともに徐々に増加し、さらに標高の低い地点では鉍物粒子の重量はより高くなった(表2-3と表2-4, 図2-20)。Site-A では、積雪表面の鉍物粒子の重量は6月28日に 1.4 g m^{-2} (1サンプル) を記録し、その後、徐々に増加し続けて8月2日には $6.6 \pm 1.9 \text{ g m}^{-2}$ となった。統計検定は、各観測期間中の鉍物粒子の重量の平均値に有意な差があることを示した (one-way ANOVA, $F = 2.74$, $P = 0.004 < 0.01$)。Site-B では、積雪表面の鉍物粒子の重量は6月25日では 0.003 g m^{-2} (1サンプル) であったのに対し、その後7月28日に一度減少したものの、徐々に増加し続けて8月3日に $0.76 \pm 0.03 \text{ g m}^{-2}$ となった。観測期間中の Site-B における鉍物粒子の重量の変化も有意な差があることを示した (one-way ANOVA, $F = 4.95$, $P = 0.02 < 0.05$)。各観測日はいずれも Site-A と Site-B の鉍物粒子の重量には有意な差がみられた。Site-A の鉍物粒子の重量は、6月28日に 1.4 g m^{-2} 、8月2日に 6.6 g m^{-2} であった。一方、Site-B の鉍物粒子の重量は、6月30日に 0.007 g m^{-2} 、8月3日に 0.76 g m^{-2} であり、6月から8月にかけて Site-A よりも鉍物粒子の重量が少なかった。統計検定は、Site-A の8月2日と Site-B の8月3日に得られた鉍物粒子の重量には有意な差があることを示した (student t-test, $t = 4.10$, $P = 0.009 < 0.01$)。以上の結果から、Site-A (標高 551 m) では、標高の高い Site-B (標高 944 m) より多くの鉍物粒子が積雪表面に堆積していること、どちらの地点も、積雪表面の鉍物粒子は時間とともに徐々に増加していることが明らかになった。

Site-B の表面積雪に含まれる BC の濃度は、6月から8月までの期間でほとんど変化していないことを示した (表2-3と表2-4, 図2-21)。Site-B の BC の濃度は、6月17日に

$5.2 \times 10^{-3} \text{ mL m}^{-2}$ であった。その後、観測期間中の BC の濃度は、一度大きく減少した 7 月 28 日を除いて、 $0.8 - 18 \times 10^{-2} \text{ mL m}^{-2}$ の範囲をとり、6 月から 8 月までの期間で明瞭な変化はみられなかった。統計観測をした結果も、観測期間中の BC の濃度の変化に有意な差を示さなかった (one-way ANOVA, $F = 3.50$, $P = 0.3 > 0.05$)。

Site-B の表面積雪に含まれる OC の濃度は、観測期間中に徐々に増加し続け、特に 7 月下旬から 8 月上旬の期間では最も増加していた (表 2-3 と表 2-4, 図 2-21)。Site-B の OC の濃度は、6 月 17 日に $8.1 \times 10^{-2} \text{ mL m}^{-2}$ 、その後徐々に増加し続けて 8 月 3 日に 3.0 mL m^{-2} となり、6 月 17 日から 8 月 3 日にかけて 37 倍増加していた。6 月から 8 月の OC の濃度の変化には、有意な差があった (one-way ANOVA, $F = 3.50$, $P = 1.2 \times 10^{-5} < 0.01$)。OC の濃度は、7 月 28 日から 8 月 3 日の短期間で最も増加しており、その期間で 2.4 mL m^{-2} 増加していた。

Site-B の積雪表面下の層における鉍物粒子と炭素濃度の季節変化

積雪表面下の層の不純物濃度は、観測期間をとおして徐々に増加していたことを示した (表 2-6, 図 2-22)。鉍物粒子の重量は、6 月 17 日に 1.3 mg L^{-1} となり、その後 6 月 25 日から 7 月 9 日の期間はわずかに減少したが、7 月 16 日に 7.2 mg L^{-1} に増加した後、徐々に増加し続けて 7 月 28 日に観測期間で最大の $2.7 \times 10^1 \text{ mg L}^{-1}$ となった。その後、鉍物粒子の重量はわずかに減少し 8 月 3 日に $1.4 \times 10^1 \text{ mg L}^{-1}$ となった。BC の濃度は、6 月 17 日に $2.3 \times 10^{-5} \text{ mL L}^{-1}$ 、8 月 3 日に $1.8 \times 10^{-2} \text{ mL L}^{-1}$ となり、観測期間をとおして僅かに増加していた。OC の濃度は 6 月 17 日に $4.9 \times 10^{-2} \text{ mL L}^{-1}$ を記録し、8 月 3 日には $2.0 \times 10^{-1} \text{ mL L}^{-1}$ となり、6 月 17 日から 8 月 3 日までの期間で $1.5 \times 10^{-1} \text{ mL L}^{-1}$ 増加していた。

2-4-4. カナック氷河の積雪中の雪氷藻類

顕微鏡による積雪中の藻類の観察の結果、大きさの異なる 3 種類の球形細胞が Site-A お

よび Site-B の積雪表面でみられた (図 2-23). この 3 種類の細胞のうち, 2 種類は異なる大きさの緑藻で, 1 種類はシアノバクテリアであった. 比較的大きい緑藻の 1 つは, 直径 $21.3 \pm 2.3 \mu\text{m}$ の球形の細胞で, 葉緑体にピレノイドが確認されなかった. この藻類は, 赤色の色素を豊富に持つ細胞と, 赤色の色素を持たない緑色の細胞があった (図 2-23a, b). 先行研究 (Uetake et al., 2010; 田中, 2016) によると, カナック氷河の裸氷域と積雪域では, 種名は同定できていないものの *Chloromonas* 属の藻類が確認されている. この *Chloromonas* 属は, 直径 $20 \mu\text{m}$ 程度の球形細胞であり, 葉緑体にピレノイドがみられないという特徴を持ち, 赤色の休眠細胞と緑色の栄養細胞の二つの細胞形態が確認されている. この特徴は, 本研究が観察した緑藻 (図 2-23a, b) の特徴と一致した. そこで以下, この藻類細胞を *Chloromonas sp.* と表記する. もう一つの比較的小さい緑藻は, 直径 $9.0 \pm 2.2 \mu\text{m}$ の球形細胞で, 細胞の色は緑色で葉緑体にピレノイドが確認されなかった (図 2-23c). 先行研究 (Uetake et al., 2010; 田中, 2016) でも, ピレノイドの確認されない直径 $10 \mu\text{m}$ 程度の緑色の球形緑藻が記載されているが, 種の特定はできていない. 本研究が観察したこの比較的小さい緑藻 (図 2-23c) の大きさ, 細胞の色, ピレノイドの特徴が先行研究の球形緑藻と一致したため, ここではこの緑藻を先行研究同様に小型球形緑藻と表記する. 観察された 1 種類のシアノバクテリアは, 直径 $4.6 \pm 1.2 \mu\text{m}$ の球形の細胞で, ほぼ無色に見えるが, 蛍光顕微鏡ではクロロフィルの赤色蛍光が観察された (図 2-23d). 先行研究 (Uetake et al., 2010; 田中, 2016) の報告にある細胞の大きさと細胞の色が同様であることから, このシアノバクテリア (図 2-23d) を以下 *Chroococaceae (Chr.) cyanobacterium* とした.

2-4-5. 積雪表面における雪氷藻類の細胞濃度

Chloromonas sp. の細胞濃度の季節変化

積雪表面における細胞濃度の分析結果は, *Chloromonas sp.* は Site-A と Site-B の両地点

ともに 6 月下旬にはじめて現れ、その後指数関数的に濃度が増加したことを示した（表 2-7 と表 2-8, 図 2-24 から図 2-25 まで）。Site-A では、6 月 28 日にはじめて積雪表面に *Chloromonas* sp. が現れた。積雪表面の細胞濃度は、6 月 28 日に 3.1×10^3 cells m⁻², 7 月 10 日に 7.8×10^4 cells m⁻², 7 月 20 日に 2.2×10^7 cells m⁻² となり、指数関数的に増加した。Site-B でも、Site-A とほぼ同時期である 6 月 30 日にはじめて積雪表面に *Chloromonas* sp. が現れた。その細胞濃度は 6 月 30 日に 7.4 cells m⁻² であったが、7 月 9 日と 7 月 16 日には *Chloromonas* sp. は一度観察されなくなった。その後の 7 月 22 日に再び現れて、 9.6×10^4 cells m⁻², 8 月 3 日に 5.0×10^5 cells m⁻² となり、指数関数的に細胞濃度が増加していた。積雪表面の細胞濃度が観測日によって有意な差があるかどうかを調べるために、2 地点でそれぞれ統計検定 (ANOVA) を行った。その結果、Site-A と Site-B とともに各観測日の *Chloromonas* sp. の細胞濃度には、有意な差があることがわかった (one-way ANOVA, Site-A: $F = 2.45$, $P = 0.006 < 0.01$; Site-B: $F = 2.91$, $P = 5.9 \times 10^{-5} < 0.01$)。

Site-B では 7 月下旬から 8 月上旬まで *Chloromonas* sp. の細胞濃度は増加を続けていたが、Site-A では 7 月下旬から 8 月上旬まで細胞濃度に有意な差がみられず、2 地点で *Chloromonas* sp. の細胞濃度の増加傾向は異なった（表 2-7 と表 2-8, 図 2-24 から図 2-25 まで）。Site-B では、積雪表面における *Chloromonas* sp. の細胞濃度は 7 月 22 日に 9.6×10^4 cells m⁻², 7 月 28 日に 9.8×10^4 cells m⁻², 8 月 3 日に 5.0×10^5 cells m⁻² となり、観測終了まで細胞濃度は増加していた。この観測日ごとの細胞濃度の平均値には有意な差があった (one-way ANOVA, $F = 4.26$, $P = 0.04 < 0.05$)。一方、Site-A では、*Chloromonas* sp. の細胞濃度は 7 月 20 日に 2.2×10^7 cells m⁻², 7 月 27 日に 1.0×10^7 cells m⁻², 8 月 2 日に 3.5×10^7 cells m⁻² となり、一度減少した後に再び増加した。7 月 20 日から 8 月 2 日までのそれぞれの *Chloromonas* sp. の細胞濃度の平均値には有意な差がなかった (one-way ANOVA, $F = 4.46$, $P = 0.26 > 0.05$)。Site-B では 8 月上旬まで *Chloromonas* sp. の濃度は増加を続けていたが、Site-A では 7 月 20 日まで濃度が増加した後、8 月上旬まで濃度はほ

とんど増加していなかった。

小型球形緑藻の細胞濃度の季節変化

積雪表面における細胞濃度の分析結果は、小型球形緑藻は Site-A と Site-B の両地点ともに 6 月にはじめて現れ、その後指数関数的に増加したことを示した（表 2-7 と表 2-8、図 2-24 から図 2-25 まで）。Site-A では、観測初日の 6 月 11 日に積雪表面で小型球形緑藻が確認された。積雪表面の細胞濃度は、6 月 11 日に $2.0 \times 10^3 \text{ cells m}^{-2}$ 、6 月 28 日に $7.3 \times 10^3 \text{ cells m}^{-2}$ 、7 月 10 日に $4.0 \times 10^5 \text{ cells m}^{-2}$ 、7 月 20 日に $1.6 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ となり、指数関数的に増加した。Site-B では、Site-A よりも 2 週間遅い 6 月 25 日にはじめて積雪表面に小型球形緑藻が現れた。その細胞濃度は 6 月 25 日に $4.8 \times 10^3 \text{ cells m}^{-2}$ 、7 月 16 日に $4.4 \times 10^4 \text{ cells m}^{-2}$ 、8 月 3 日に $1.6 \times 10^6 \text{ cells m}^{-2}$ となり、指数関数的に増加していた。統計検定（ANOVA）の結果、Site-A と Site-B とともに各観測日の小型球形緑藻の細胞濃度には、有意な差があることがわかった（one-way ANOVA, Site-A: $F = 2.45$, $P = 9.1 \times 10^{-4} < 0.01$; Site-B: $F = 2.91$, $P = 3.0 \times 10^{-5} < 0.01$ ）。

Site-B では 7 月下旬から 8 月上旬まで小型球形緑藻の細胞濃度は増加をしていたが、Site-A では 7 月下旬から 8 月上旬まで細胞濃度に有意な差がみられず、2 地点で小型球形緑藻の細胞濃度の増加傾向は異なった（表 2-7 と表 2-8、図 2-24 から図 2-25 まで）。Site-B では、積雪表面における小型球形緑藻の細胞濃度は 7 月 22 日に $2.7 \times 10^5 \text{ cells m}^{-2}$ 、7 月 28 日に $5.7 \times 10^4 \text{ cells m}^{-2}$ 、8 月 3 日に $1.6 \times 10^6 \text{ cells m}^{-2}$ となり、7 月 22 日から 7 月 28 日にかけて 1 度減少したものの、その後 8 月 3 日まで大きく増加した。この観測日ごとの細胞濃度の平均値には有意な差があった（one-way ANOVA, $F = 5.14$, $P = 0.002 < 0.01$ ）。一方、Site-A では、小型球形緑藻の細胞濃度は 7 月 20 日に $1.6 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ 、7 月 27 日に $9.3 \times 10^6 \text{ cells m}^{-2}$ 、8 月 2 日に $2.6 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ となり、一度減少した後に再び増加した。7 月 20 日から 8 月 2 日までのそれぞれの小型球形緑藻の細胞濃度の平均値には有意な

差がなかった (one-way ANOVA, $F = 4.46$, $P = 0.22 > 0.05$). Site-B では 8 月上旬まで小型球形緑藻の細胞濃度は増加を続けていたが, Site-A では 7 月 20 日まで濃度が増加した後, 8 月上旬まで濃度はほとんど増加していなかった.

Chr. cyanobacterium の細胞濃度の季節変化

積雪表面における細胞濃度の分析結果は, *Chr. cyanobacterium* は Site-A と Site-B の両地点ともに 6 月にはじめて現れ, その後指数関数的に増加したことを示した (表 2-7 と表 2-8, 図 2-24 から図 2-25 まで). Site-A では, 観測初日の 6 月 11 日に積雪表面で *Chr. cyanobacterium* の藻類細胞が確認された. 積雪表面の細胞濃度は, 6 月 11 日に 9.9×10^2 cells m^{-2} , 6 月 28 日に 1.7×10^4 cells m^{-2} , 7 月 10 日に 4.8×10^5 cells m^{-2} , 7 月 20 日に 1.7×10^7 cells m^{-2} となり, 指数関数的に増加した. Site-B では, Site-A より 2 週間遅い 6 月 25 日にはじめて積雪表面に *Chr. cyanobacterium* が現れた. その細胞濃度は 6 月 25 日に 7.3×10^3 cells m^{-2} , 7 月 16 日に 1.8×10^5 cells m^{-2} , 8 月 3 日に 9.7×10^5 cells m^{-2} となり, 指数関数的に増加していた. 統計検定 (ANOVA) の結果, Site-A および Site-B ともに各観測日の細胞濃度には, 有意な差があることがわかった (one-way ANOVA, Site-A: $F = 2.45$, $P = 0.02 < 0.05$; Site-B: $F = 2.91$, $P = 3.8 \times 10^{-5} < 0.01$).

Site-B では 7 月下旬から 8 月上旬まで *Chr. cyanobacterium* の細胞濃度は増加していたが, Site-A では 7 月下旬から 8 月上旬まで細胞濃度に有意な差がみられず, 2 地点で *Chr. cyanobacterium* の細胞濃度の増加傾向は異なった (表 2-7 と表 2-8, 図 2-24 から図 2-25 まで). Site-B では, 積雪表面における *Chr. cyanobacterium* の細胞濃度は 7 月 22 日に 6.4×10^4 cells m^{-2} , 7 月 28 日に 1.4×10^5 cells m^{-2} , 8 月 3 日に 9.7×10^5 cells m^{-2} となり, 7 月 22 日から 7 月 28 日にかけて一旦減少したものの, その後 8 月 3 日まで再び細胞濃度は増加した. この観測日ごとの細胞濃度の平均値には有意な差があった (one-way ANOVA, $F = 5.14$, $P = 0.007 < 0.01$). 一方, Site-A では, *Chr. cyanobacterium* の細胞濃

度は7月20日に 1.7×10^7 cells m^{-2} , 7月27日に 2.6×10^7 cells m^{-2} , 8月2日に 2.5×10^7 cells m^{-2} となり, 7月27日から8月2日にかけて濃度がほとんど増加していなかった. 7月20日から8月2日までのそれぞれの *Chr. cyanobacterium* の細胞濃度の平均値には有意な差がなかった (one-way ANOVA, $F = 4.45$, $P = 0.79 > 0.05$). Site-B では8月上旬まで *Chr. cyanobacterium* の濃度は増加していたが, Site-A では7月20日まで濃度が増加した後, 8月上旬まで濃度の増加はほとんど起きていなかった.

細胞濃度の高度分布

Site-A と Site-B 両地点の細胞濃度の最大値には差があり, 全ての藻類種で Site-A の方がより高い細胞濃度を示した (表 2-7 と表 2-8, 図 2-24 から図 2-25 まで). Site-A では, 8月2日に *Chloromonas* sp. の細胞濃度は最大値を示し, 3.5×10^7 cells m^{-2} となった. Site-B では8月3日に *Chloromonas* sp. の細胞濃度は最大の 5.0×10^5 cells m^{-2} となった. 統計検定 (t 検定) を行ったところ, 8月2日の Site-A と8月3日の Site-B の最大細胞濃度には, 有意な差があった (student t-test, $t = 3.10$, $P = 0.09 < 0.1$). 両地点では, 積雪表面で *Chloromonas* sp. がはじめて出現した日から観測終了日の8月2日あるいは8月3日までの期間は, Site-A で35日間, Site-B で34日間とほとんど変わらなかった. しかしながら, 両地点の観測終了日の *Chloromonas* sp. の細胞濃度は, Site-A で 3.5×10^7 cells m^{-2} , Site-B で 5.0×10^5 cells m^{-2} であり, 両地点の *Chloromonas* sp. の細胞濃度には有意な差があった. 他の全ての観測日でも Site-A の方が同時期の Site-B よりも高い細胞濃度を示した. 小型球形緑藻と *Chr. cyanobacterium* の細胞濃度も同様に Site-A でより高く, 2地点の濃度には有意な差があった. 8月2日の Site-A と8月3日の Site-B における両藻類の細胞濃度は, 小型球形緑藻でそれぞれ 2.6×10^7 cells m^{-2} と 1.6×10^6 cells m^{-2} となり, *Chr. cyanobacterium* でそれぞれ 2.6×10^7 cells m^{-2} と 1.6×10^6 cells m^{-2} となった. この8月の両藻類の細胞濃度には2地点で有意な差があった (小型球形緑藻: student t-test, $t = 3.00$, P

= 0.095 < 0.1; *Chr. cyanobacterium*: student t-test, t = 3.06, P = 0.092 < 0.1). 以上より, 全ての藻類種が Site-B よりも高度の低い Site-A でより高い細胞濃度を示した.

2-4-6. 積雪表面における雪氷藻類の群集構造

カナック氷河上の Site-A と B の積雪表面には先述した 3 種類の藻類が観察されたが, その中で *Chloromonas* sp. が藻類の総体積の大半を占めていた (図 2-26). Site-A では, 8 月 2 日の積雪表面における総細胞体積バイオマスに対する各藻類のバイオマス比は, *Chloromonas* sp. が 95%, 小型球形緑藻が 5%, *Chr. cyanobacterium* が 0% であった. *Chr. cyanobacterium* は細胞を確認できていたものの, 細胞の体積が緑藻と比べて非常に小さいためにバイオマス比では 0% に近い値となった. Site-B では, 8 月 3 日の各藻類のバイオマス比は, *Chloromonas* sp. が 81%, 小型球形緑藻が 19%, *Chr. cyanobacterium* が 0% であった. 両地点の 8 月の積雪表面では, 全藻類の 80% 以上を *Chloromonas* sp. が占めており, *Chloromonas* sp. がみられた他の観測日でも同様にこの種が積雪でみられる藻類の総体積の大半を占めていた.

2-4-7. 積雪表面のクロロフィル a 濃度

クロロフィル a 濃度の季節変化

積雪表面のクロロフィル a 濃度は, Site-A と B どちらも 7 月中に増加していたことを示した. (表 2-7 と表 2-8, 図 2-27). Site-A の積雪表面のクロロフィル a 濃度は, 観測開始から 6 月 28 日までは $0 \mu\text{g m}^{-2}$ であり, 7 月 5 日に $0.7 \pm 1.2 \mu\text{g m}^{-2}$ となった. その後徐々に増加し, 7 月 27 日に観測期間で最大の $71 \pm 18 \mu\text{g m}^{-2}$ となったが, 観測最終日の 8 月 2 日には $6.6 \pm 1.7 \mu\text{g m}^{-2}$ へと減少した. Site-B の積雪表面のクロロフィル a 濃度は, 観測開始から 7 月 16 日までは $0 \mu\text{g m}^{-2}$ で, その後 7 月 22 日に $3.7 \pm 0.7 \mu\text{g m}^{-2}$ となり, 8 月 3 日には観測期間で最大の $11 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-2}$ となった. 統計検定の結果, 両地点ともに各

観測日のクロロフィル a 濃度の平均値には有意な差があった (one-way ANOVA, Site-A: $F = 2.45$, $P = 4.38 \times 10^{-7} < 0.01$; Site-B: $F = 2.91$, $P = 1.13 \times 10^{-11} < 0.01$). Site-A のクロロフィル a 濃度は 7 月上旬から徐々に増加し続け、7 月 27 日に最大となった後、8 月 2 日に大きく減少した。Site-B のクロロフィル a 濃度は、7 月下旬から 8 月上旬にかけて僅かに増加していた。

クロロフィル a 濃度の高度分布

Site-A と Site-B の両地点間のクロロフィル a 濃度にも季節を通じて有意な差がみられた (表 2-7 と表 2-8, 図 2-27)。Site-A のクロロフィル a 濃度の最大値は 7 月 27 日の $71 \pm 18 \mu\text{g m}^{-2}$ であった。一方、Site-B のクロロフィル a 濃度の最大値は、Site-A よりも遅い 8 月 3 日に達し、Site-A の最大値よりも低い $11 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-2}$ であった。両地点で最大となった観測日の平均クロロフィル a 濃度には有意な差がみられた (student t-test, $t = 6.38$, $P = 0.007 < 0.01$)。

2-5. 考察

2-5-1. カナック氷河の雪氷藻類

カナック氷河で観察された雪氷藻類は、2-4-6 で示したとおり、Site-A と Site-B の両地点で *Chloromonas* sp. が積雪表面でみられる藻類の総体積の大半を占めていた。この結果を踏まえ、本章ではより簡便に雪氷藻類の繁殖モデルを作成するため、また、雪氷藻類の繁殖を考慮したアルベド物理モデルを作成するために、観察された藻類の内、最も積雪で多くみられた *Chloromonas* sp. に対象を絞って議論を行う。

2-5-2. カナック氷河における雪氷藻類の出現条件

積雪断面観測の結果から、カナック氷河における積雪表面に現れた雪氷藻類

(*Chloromonas* sp.) は、十日町同様に、大気を介して供給された胞子に由来すると考えられた。1章の1-5-1で述べたように、雪氷藻類は、大気や動物によって休眠胞子が積雪表面に受動的に飛来して繁殖するか、積雪底部で越冬した前年の休眠胞子が遊泳細胞となり能動的に積雪表面へ移動することによって繁殖することが知られている (Müller et al., 2001; Remias, 2012)。しかし、積雪下の胞子が遊泳細胞となるには融解水の供給と十分な光が必要である (例えば, Hoham, 1980)。Site-A と Site-B の両地点ではじめて積雪表面に藻類が現れたとき、積雪表面から氷河の氷面までの積雪全層の厚さは、それぞれ 229 cm (6月28日) と 110 cm (6月30日) であり、十分な光が届く積雪深である 1 m よりも深かった。なお、Site-A の 6月28日では、積雪表面から深さ 20 cm 以下は上流部から流れしてきたと考えられる融解水によってすべて浸水していた。そこで 6月28日の積雪全層の厚さは、7月14日の層厚を基準に積雪表面レベルの低下量から推定して求めている。6月28日の積雪全層の厚さは実際に観測した値ではないが、7月14日の積雪全層の厚さが 140 cm であったことから、6月28日の積雪全層の厚さはほぼ間違いなく 140 cm 以上はあると考えられる。第1章でも述べたように、先行研究で、融雪期の積雪では PAR の 1% が深さ 1 m 地点まで届いており、その量の PAR では雪氷藻類が光合成によって繁殖したことが報告されている (Curl et al., 1972)。他にも、日射量の測定は行われていないものの、融雪期の深さ 40 cm 以下の積雪でのみ雪氷藻類が積雪下の地表面から積雪表面へと遊泳したという報告がある (Müller et al., 2001)。以上より、藻類が積雪表面に出現した日では、積雪層が厚すぎるために積雪底部からの藻類の遊泳は行われていないと考えられる。

Site-B では、積雪層内に厚さ 1 cm 以上の氷板が複数確認された。また、積雪の最深部には再凍結氷が形成されていた。再凍結氷は、春の表面積雪の融解水が積雪層内に浸透し、雪温の低い下部で再凍結することによって形成され、北極の氷河でみられる現象であることが知られている (Wright et al., 2007)。実際、2013年の夏季にも、Site-B で積雪下部に再凍結氷が 18 cm 形成されたことが報告されている (Aoki et al., 2014)。このような再凍

結氷の形成は、前年に藻類が繁殖した層を覆ってしまうため、前年の層から表面への藻類の遊泳は不可能になると考えられる。Site-A では、藻類が表面に現れたときの積雪層は、表面から 20 cm 以深が上流部から流れてきたと考えられる融解水によってすべて浸水しており、それよりも上の層では氷板はなかった。積雪の最深部に再凍結氷が形成されたかは確認できなかったが、前年の積雪層にいた雪氷藻類が下流方向へと流れる融解水に逆らって積雪表面へと到達したとは考えにくい。また、Site-A で藻類の出現した 6 月 28 日の直前の観測日である 6 月 20 日では、融解水による浸水は確認されなかったが、積雪表面から 30 cm 以深で厚さ 0.5 cm 以上の氷板が 12 枚みられた。6 月 20 日から 6 月 28 日までにこれらの氷板が全て融解し、積雪表面まで藻類が遊泳してきた可能性は低いだろう。先述したように、両地点で積雪表面に藻類が出現したときの積雪層は藻類が遊泳をするためには厚すぎると考えられ、その積雪底部は再凍結氷によって覆われていたと推測される。従って、カナック氷河の積雪では、雪氷藻類の供給過程の一つである、前年の雪氷藻類が積雪底部から積雪表面へと遊泳してくる可能性は低いと考えられる。Marshall and Chalmers (1997) は、南極の地表面から 1 m の高さで採取した大気サンプルから、一般的な雪氷藻類である *Chlamydomonas nivalis* が観察されたことを報告しており、雪氷藻類が大気を介して飛来していることを述べている。以上より、これらの観測結果は雪氷藻類が積雪底部からではなく、もう一つの供給過程である大気を介してカナック氷河の積雪表面へと飛来してきていることを示唆している。

雪氷藻類が出現した時期と気象と積雪条件の観測結果を比較したところ、雪氷藻類 (*Chloromonas* sp.) は降雪がない期間中に少なくとも気温が 94 時間連続で 0°C を超えた後にはじめて観測され、1 章と同様、0°C 以上の気温の継続時間から雪氷藻類の出現時期を特定できると考えられた。雪氷藻類がはじめて積雪表面で観測されたのは、Site-A は 6 月 28 日 12:00 LT、Site-B は 6 月 30 日 12:00 LT であり、両地点でほぼ同じ時期にはじめて藻類がみられた。なお、藻類が確認された時刻は観測を実施した時刻に基づいて 12:00 LT

とした。藻類がはじめてみられたときの積雪表面の雪質は、Site-A と Site-B とともにざらめ雪であった。積雪表面レベルの低下量は、Site-A の 6 月 20 日 12:00 LT から 6 月 28 日 12:00 LT の期間で 30 cm であり、Site-B の 6 月 25 日 12:00 LT から 6 月 30 日 12:00 LT の期間で 25 cm であった。観測期間中の降雪の有無は確認していないが、積雪表面の雪質と積雪表面レベルの低下量の結果より、6 月下旬の両地点では、降雪がほとんどなく積雪表面が融解していたと考えられる。雪氷藻類がはじめて観測されるまでに気温が 0°C 以上であった時間は、Site-A が 6 月 24 日 15:00 LT から 6 月 28 日 12:00 LT までの 94 時間、Site-B が 6 月 24 日 21:00 LT から 6 月 30 日 12:00 LT までの 136 時間であった。Site-A では、このような気温が連続して数日間 0°C を超えていた期間は、藻類が出現する以前にも 1 度だけ存在していた。その期間は、6 月 13 日 15:00 LT から 6 月 15 日 23:00 LT までの 56 時間であり、その後の観測日の 6 月 20 日では藻類がみられなかった。6 月 20 日の積雪表面の雪質は新雪であった。6 月 11 日から 6 月 20 日の期間では、積雪表面レベルの低下量は 10 cm であり、0°C 以上の気温が続いていたにもかかわらず、ほとんど積雪表面の高さが低下していなかった。これらの結果は、6 月 11 日から 6 月 20 日の期間に降雪があったことを示唆している。そのため、6 月 20 日では降雪によって藻類が覆われてしまい、観測されなかったのかもしれない。1-5-1 で述べたように、雪氷藻類の繁殖に一定期間の積雪の融解が必要であることは先行研究（例えば、Fukushima, 1963）によって知られている。以上の結果は、カナック氷河においても第 1 章の十日町試験地と同様に、雪氷藻類の出現には一定期間の融雪が必要であることを示唆している。

2-5-3. 雪氷藻類とクロロフィル a 濃度の関係

積雪表面のクロロフィル a 濃度は、藻類の細胞濃度と同様の季節変化を示し、両者の相関は有意であるが、プロット図は綺麗な線形にはならなかった ($r = 0.13$, $P < 0.01$) (図 2-28)。この結果は、十日町の場合と同様にクロロフィル a 濃度は雪氷藻類の細胞濃度とは

必ずしも線形の関係ではないことを示唆している。積雪表面で藻類の総体積の大半を占めていた *Chloromonas* sp.には、赤色と緑色の2種類の細胞形態が確認された(図 2-23a, b)。Remias et al. (2005) は、積雪表面で一般的にみられ、赤色と緑色の細胞形態を持つ球形緑藻の *Chlamydomonas nivalis* が成長段階によって細胞内の色素であるクロロフィル a に対するアスタキサンチン割合が異なっていたことを報告している。そのため、*Chloromonas* sp.の持つクロロフィル a の割合は、細胞ごとに異なっている可能性があり、細胞濃度と関係がみられなかったのかもしれない。

2-5-4. 雪氷藻類と OC の関係

藻類の濃度と OC の濃度は、互いに似た季節変化を示し、両者の値には強い正の相関 ($r = 0.98$) がみられた(図 2-29 から図 2-30 まで)。2-4-2 と 2-4-4 で述べたように、Site-B の *Chloromonas* sp.の細胞濃度と OC の濃度は、6 月から 8 月を通してともに増加する傾向を示しており、図 2-29 にみられるように互いの季節変化は似ていた。そこで、それぞれの観測日ごとに得られた *Chloromonas* sp.の細胞体積バイオマスと OC の濃度の平均値から、図 2-29 を作成し、互いの相関係数を求めた。細胞濃度を細胞体積バイオマスで表した理由は、雪氷藻類の持つ炭素量は、藻類の細胞体積の合計によって比例すると考えたためである。細胞体積バイオマスと OC の濃度の相関係数は 0.98 ($P < 0.05$) となり、両者には強い正の相関があった。また、両者の関係から以下の近似式が得られた。

$$y = 1038x + 0.3422 \quad \text{式 (2-1)}$$

ここで、 x と y はそれぞれ積雪表面の細胞体積バイオマス (mL m^{-2}) と OC の濃度 (mg m^{-2}) を表している。式 2-2 に示すように細胞体積バイオマスと OC 濃度の近似式では、切片が 0.3422 となっている。この切片は、雪氷藻類由来ではない OC を表していると考えられる。実際、全ての雪氷藻類が積雪表面に出現していなかった 6 月 17 日の OC 濃度の観測値は、 0.08 mg m^{-2} となり、雪氷藻類由来ではない OC が検出された。雪氷藻類由来では

ない OC が積雪中には存在しているものの、図 2-29 に示すように OC 濃度の季節変化は、雪氷藻類の細胞濃度の季節変化とほぼ一致したため、積雪中に藻類由来以外の有機炭素はほとんどないと考えられる。そのため、本研究では、この式 (2-1) によって求められる OC 濃度は、雪氷藻類由来の OC 濃度と仮定した。この式 (2-1) を用いて切片を含めずに、*Chloromonas sp.* の 1 細胞の OC 濃度を求めると、その値は $5.3 \times 10^{-6} \text{ mg cells}^{-1}$ となった。この式は、第 3 章で議論する藻類の繁殖量をアルベド物理モデルに組み込むときに使用する。

2-5-5. 雪氷藻類の成長曲線の数理モデル

ロジスティックモデルによる近似

十日町の雪氷藻類の成長曲線の近似では、1-5-4 で述べたようにマルサスモデルを用いた。このモデルは微生物の細胞増加を再現するモデルであるが、細胞の増加の上限を設定していないために、条件が許す限り細胞が無限に増加し続けるという問題がある。Site-A では、細胞濃度が 7 月下旬まで増加した後に、降雪もなく気温も氷点を上回っているにもかかわらず、ほとんど増加しなくなるという現象が全ての藻類種でみられた。これらの結果は、カナック氷河における雪氷藻類の繁殖には、ある細胞濃度の上限が存在する可能性を示している。そこで、カナック氷河の雪氷藻類の繁殖を再現するには、上限のないマルサスモデルよりも、上限の設定が可能なロジスティックモデルがより適していると考えられる。ロジスティックモデルにおける細胞濃度の季節変化の計算には、マルサスモデルで用いた初期細胞濃度と増加率という二つのパラメータに加えて、細胞の増加の上限である環境収容力を定義する。ロジスティックモデルもマルサスモデル同様に、閉じた環境での細胞の増加を仮定したモデルであり、外部から細胞が繁殖環境に流入しないことと、繁殖環境から細胞が流出しないことが使用の前提としてある。ロジスティックモデルではマルサスモデルとは異なり、細胞が増加し続け、栄養塩の枯渇あるいは物理的な繁殖空間の減

少によって起こり得る細胞の増加率の減少を環境収容力というパラメータを用いることで考慮している。以上の点に基づいて、ロジスティックモデルでは藻類細胞の繁殖曲線を以下の式で表すことができる（例えば、Cui and Lawson, 1982）。

$$X(t) = \frac{K}{1 + \frac{K-X(0)}{X(0)} e^{\mu(t_0-t)}}, \quad t = d - d_f \quad \text{式 (2-2)}$$

ここで、式 (2-2) の $X(t)$ と $X(0)$ は、それぞれ時間 t と t_0 における藻類の細胞濃度、 μ は増加率、 K は環境収容力を表している。本研究では、 t_0 は雪氷藻類の細胞が初めて積雪表面に現れた日とし、 X_0 はその時の細胞濃度（初期細胞濃度）、 t は t_0 を基準とした経過時間とする。雪氷藻類は積雪が融解している条件でのみ繁殖を行うので（Fukushima, 1963）、積雪表面の雪温を用いて式 (2-2) の右式から t を求めた。式 (2-2) の d は日数、 d_f は凍結日数を表している。凍結日数は積雪表面の雪温が 0°C 未満の日数とした。なお、Site-A および Site-B の雪温は 1 時間ごとに求めているので、例えば雪温が 1 日の内 12 時間 0°C 未満の場合は、凍結日数を 0.5 日としている。 d_f を日数とした理由は、第 1 章の 1-5-4 と同様である。

ロジスティックモデルによって再現した細胞の成長曲線が、初期細胞濃度、増加率、環境収容力によってどのように影響を受けるのかは、図 2-31 に示した。図 2-31a は、初期細胞濃度の値のみ変化させた際の成長曲線の変化を表しており、初期細胞濃度の値を高くするほど細胞はより早く増加し、環境収容力に至るまでの時間が短くなる。図 2-31b は、増加率の値を変化させた際の成長曲線の変化を表しており、増加率の値を高くするほど細胞はより早く増加し、環境収容力により早く到達する。図 2-31c は、環境収容力の値を変化させた際の成長曲線の変化を表しており、環境収容力の値を高くするほど期間中に増加できる細胞の上限が高くなる。また、図 2-31c からみられるように、環境収容力の値を変化させた際に、細胞の時間あたりの増加量も多くなっている。ロジスティックモデルでは、時間とともに細胞は増加するが、細胞数が環境収容力に近づくと増加率は減少していく。

環境収容力がより高い場合では、栄養塩がより多いあるいは繁殖空間がより広い環境であることを意味するため、時間が経過したときに増加率はより減少しなくなる。

この式を用いて Site-A および Site-B で観測された雪氷藻類の細胞濃度に対して最小二乗法による近似を行った。両地点では 2-4-3 で述べたように 3 種類の雪氷藻類がみられたが、近似はそのうちの *Chloromonas* sp.のみを対象に行った。この理由は、*Chloromonas* sp. が最も積雪表面でみられ、総細胞体積バイオマスに対する割合から積雪表面のアルベドに与える影響はこの藻類の繁殖によってほぼ決まると考えたためである。もう一つの緑藻である小型球形緑藻が *Chloromonas* sp. の栄養細胞である可能性もあるが、図 2-23 (a, b) で示すように赤色と緑色の *Chloromonas* sp. が先行研究 (田中, 2016) と同様に確認されたため、本研究では小型球形緑藻は *Chloromonas* sp.とは別の種であるとした。また、本研究では細胞濃度分析用のサンプルをホルムアルデヒド溶液によって保存したために、色素が消失した藻類細胞から細胞濃度を求めている。そのため、*Chloromonas* sp.の休眠細胞と栄養細胞の割合まではわからない。そこで、1 章と同様に *Chloromonas* sp.の休眠細胞と栄養細胞の濃度がともに増加し続けると仮定して、分析した *Chloromonas* sp.の細胞濃度を近似した。

近似を行う際に用いたデータの範囲は、雪氷藻類の細胞が出現した日 (Site-A: 6 月 28 日, $t_0 = 179$; Site-B: 6 月 30 日, $t_0 = 181$) から観測終了日 (Site-A: 8 月 2 日, $t = 214$; Site-B: 8 月 3 日, $t = 215$) までとした。また、最小二乗法による回帰を行うために、環境収容力の値を観測結果より仮定した。仮定した値は、Site-A の 8 月 2 日より、 3.5×10^7 cells m^{-2} とした。Site-A の 8 月 2 日に観測された細胞濃度は、Site-B を含めた両地点で最も細胞濃度が高く、 3.5×10^7 cells m^{-2} であった。Site-A の観測は 8 月 2 日を最後に終了したため、以降の積雪表面における細胞濃度はわからない。そのため、観測終了後も雪氷藻類の細胞濃度が増加を続けていた可能性はある。Site-A の 7 月 20 日以降では気温が氷点を常に上回っており、降雪も無かった。それにもかかわらず、7 月 20 日以降はどの藻類もほとんど増加し

ていない, 特に *Chr. cyanobacterium* に至っては 7 月 27 日から 8 月 2 日にかけて細胞濃度が減少していた. この結果は, 藻類濃度の増加によって積雪が藻類の繁殖する環境に適さない環境へと変化したことを示唆している. したがって, Site-A では観測終了後に雪氷藻類の細胞濃度が急増することは考えにくく, 増加したとしてもその濃度は 8 月 2 日の値と大きく変わらないと考えた. 以上の理由から, Site-A の 8 月 2 日における *Chloromonas* sp. の細胞濃度 3.5×10^7 cells m^{-2} を上限とし, この値を環境収容力として仮定した.

表 2-9 は, Site-A と Site-B における観測結果より仮定した環境収容力および近似によって得られた *Chloromonas* sp. の初期細胞濃度と増加率を表している. 図 2-32 は, 2 地点の回帰によって得られたパラメータを用いたモデルの細胞濃度の計算値と観測値を示している. モデルによる細胞濃度の計算は, 雪氷藻類の細胞が出現した日 (Site-A: 6 月 28 日, $t_0 = 179$; Site-B: 6 月 30 日, $t_0 = 181$) から 8 月 31 日 ($t = 242$) までの期間で行った. カナック氷河での観測は, Site-A では 8 月 2 日, Site-B では 8 月 3 日に終了しているため, 観測最終日以降の細胞濃度はモデルの予測値となっている. モデル計算値と観測値の決定係数 (R^2) は, Site-A と Site-B それぞれ 0.64 と 0.96 となった. 両者の値は, Site-B では期間を通して一致していたが, Site-A では特に 7 月 27 日で大きく異なった. Site-A では, 7 月 20 日から 7 月 27 日にかけて細胞濃度の観測値は 2.2×10^7 から 1.0×10^7 cells m^{-2} へと減少したが, 同期間のモデル計算値は 6.4×10^6 から 2.8×10^7 cells m^{-2} と増加した. この細胞濃度の季節変化の不一致によって決定係数が小さくなったと考えられる. しかしながら, その後の 8 月 2 日では, 細胞濃度の観測値とモデル計算値は, それぞれ 3.5×10^7 cells m^{-2} , 3.4×10^7 cells m^{-2} と両者の値が良く一致している (図 2-32). この結果は, モデルは細胞濃度が環境収容力に到達する時期をよく再現できていることを示唆している. 藻類の増加が上限に達する時期が最も積雪アルベドに影響を与えられられるため, 本研究の目的である雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響をモデル化する上で, 藻類が環境収容力に達する時期を正確に再現することが雪氷藻類の繁殖モデルの中で重要な点であると考えら

れる。したがって、以上の結果は、藻類の成長曲線はロジスティックモデルによって概ね再現でき、特に藻類濃度が最も高くなった時期をモデルによって正確に推定できることを示唆している。

初期細胞濃度の決定要因

観測値の *Chloromonas* sp. の初期細胞濃度が Site-A と Site-B で異なったのは、大気から飛来する藻類胞子の量に両サイトで違いがあるためと考えられる (表 2-10)。回帰から得られた初期細胞濃度は Site-A と Site-B でそれぞれ、 6.9×10^2 cells m^{-2} と 6.3 cells m^{-2} で、Site-A の方が有意に濃度は高かった。2-5-1 より、カナック氷河では雪氷藻類は大気を介して積雪表面へと運ばれてくると考えられる。先行研究によると、カナック氷河の裸氷面では、標高による鉱物組成の違いはほとんどなく、鉱物粒子は周辺の土壌あるいはモレーンから大気を介して飛来してきているということが報告されている (Nagatsuka et al., 2014)。そこで、雪氷藻類の胞子も鉱物粒子と同様に周辺の土壌あるいはモレーンから飛来してくると仮定すれば、観測した鉱物粒子の重量と初期細胞濃度の関係から近似式を求めることで、鉱物粒子の重量によって初期細胞濃度を推定できると考えられる。藻類出現時の積雪表面に含まれる鉱物粒子の重量の観測値は、Site-A と Site-B でそれぞれ、 1.4 g m^{-2} と 0.01 g m^{-2} であり、初期細胞濃度と同様に Site-A は、Site-B よりも高い値を示した (表 2-10)。この結果は、より標高の低い Site-A でより多くの雪氷藻類と鉱物が飛来していることを示唆している。Site-A と Site-B の初期細胞濃度は、鉱物粒子の重量 1 g m^{-2} あたりに換算するとそれぞれ 493 cells m^{-2} と 630 cells m^{-2} となり、2 地点の初期細胞濃度は有意な差がなかった。本来はもっと多くの地点のデータに基づくべきであるが、この割合を使って鉱物粒子の重量から初期細胞濃度を推定することが可能である。この割合から、1 平方メートルあたりで 1 g の鉱物粒子が積雪表面に供給されると、同時に 1 平方メートルあたり $493-630$ 個の細胞が積雪表面に供給されると考えられる。ロジスティックモデルによる計

算を行う上で初期細胞濃度の値をどのように設定するのかが重要である。カナック氷河の場合はこの割合の範囲で推定することが可能であるが、この割合は地域や高度によって変わる可能性もある。藻類繁殖モデルをより広範囲に適用するためには、同地域の異なる高度での調査や同じ藻類種がみられる異なる地域での調査を行い、鉱物粒子の重量と初期細胞濃度の関係を明らかにする必要があるだろう。

増加率に影響を与える要因

回帰によって得られた *Chloromonas* sp. の増加率は、Site-A で 0.42 d^{-1} 、Site-B で 0.39 d^{-1} となり、両地点の増加率は互いに近い値を示し、増加率は標高によらず一定であることが示唆された（表 2-9）。本研究では、積雪表面の融解を考慮して増加率を求めており、得られた増加率は両地点で互いに近い値となった。この結果は、積雪表面の融解を除いた、標高の違いによる異なる環境条件（例えば、日射量）は増加率に影響を与えていないことを示している。表 2-11 は、先行研究で明らかになっている藻類の培養環境下の増加率である。カナック氷河の *Chloromonas* sp. の増加率は、表で示された大半の増加率よりも低い値を示した。先行研究では、藻類の増加率に影響を与える要因として、環境中の温度（Eppley, 1972）が挙げられている。Leya et al. (2009) は、培養環境下における雪氷藻類の *Chloromonas nivalis* の増加率が最も高くなったのは水温が 18°C のときであることを報告している。野外では積雪が融解している場合、気温に関係なく積雪の温度は 0°C となるため（Koivusalo et al., 2001）、雪氷藻類が生息している融解水の温度は、常に 0°C である。したがって、カナック氷河で得られた *Chloromonas* sp. の増加率が先行研究で報告された他の雪氷藻類の増加率よりも小さくなった原因は、おそらく野外の積雪内の温度が培養環境の水温と比べて低いためと考えられる。

環境収容力に影響を与える要因

観測結果を基に仮定した *Chloromonas* sp. の環境収容力は, Site-A と Site-B とともに 3.5×10^7 cells m^{-2} である (表 2-9). 先行研究では雪氷藻類の環境収容力に関する研究成果はまだないが, 多くの細胞濃度の観測結果が報告されている. 表 2-12 は, 先行研究によって観測された細胞濃度の最大値を環境収容力と仮定してまとめたものである. 表 2-12 は, 同じ藻類種でも地域によって環境収容力に差があることを意味し, 環境収容力が環境に応じて異なっていることを示唆している.

積雪表面の含水率と鉱物粒子の重量の観測結果は, Site-A と Site-B の環境収容力を決定している主な条件は, 積雪中の栄養塩であることを示唆している. 環境収容力を決定する条件として次の二つが挙げられる. (1) 藻類の物理的な繁殖空間の減少 (McKindsey et al., 2006). (2) 藻類の繁殖に必要な栄養塩の枯渇 (Cui and Lawson, 1982). 藻類が生息している融解水内の物理的空間を調べるために, 積雪表面 (深さ 2 cm) の融解水の体積に対する雪氷藻類の細胞体積バイオマスの比較を行った. 藻類が最も繁殖していた Site-A の 8 月 2 日の積雪表面の含水率は約 5 % で, 融解水の体積は約 500 mL m^{-2} であった. 一方で, 同積雪で繁殖していた藻類の体積は 0.19 mL m^{-2} となった. 加えて, 藻類が出現してからの積雪表面の含水率は Site-A と Site-B の両地点で少なくとも 3.8% はあった. これらの結果は, 藻類の生息場所の物理的な空間となる融解水量は, 藻類の繁殖を制限しておらず, 環境収容力を決定する条件ではないということを示している. 緑藻類の繁殖には, 窒素やリンなどの栄養塩が必要不可欠であり, 積雪表面には窒素とリンともに大気からのエアロゾルの沈着として供給されると考えられている. 中でもリンは窒素と比べて藻類の繁殖を制限する栄養塩であるとされている (Chen et al., 2009). そのため, 積雪中でもリンが藻類繁殖の環境収容力を制限している可能性がある. 積雪上のリンの主な供給源は, 大気から供給された鉱物粒子に含まれるリン酸塩鉱物と考えられている (Stibal et al., 2008). カナック氷河では, 積雪表面の詳細な化学成分の分析は行っていないため, 現時点では環境収容力

の決定条件を断定することはできないが、表 2-12 のように地域によって異なる環境収容力を示したのは、このような積雪中の栄養塩の濃度が地域によって異なっていたためかもしれない。2-4-4 に示した通り、Site-A では 7 月 20 日から 8 月 2 日までの期間で *Chloromonas* sp. がほとんど増加していなかったが、この現象は同時期の他の藻類種でもみられた。もしかすると、環境収容力は、積雪の栄養塩濃度によって藻類種に関係なく一定の値をとるのかもしれない。今後、異なる地域において積雪の栄養塩濃度と様々な種の藻類濃度を比較することによって、雪氷藻類の環境収容力の決定条件を明らかにし、栄養塩濃度から環境収容力を決定できる可能性がある。本研究では、環境収容力を観測結果から仮定したが、環境収容力の決定条件が明らかになれば、より実際の積雪環境を反映した環境収容力を設定できるだろう。

2-5-6. カナック氷河と十日町試験地の観測結果の比較

雪氷藻類の出現条件の比較

雪氷藻類の出現条件は、カナック氷河と十日町試験地の両方とも、気温が 0°C を超えている期間で説明がつくことが明らかになったが、その期間は両者で異なっていた。十日町試験地では 0°C 以上の気温が 24 時間続くと藻類が出現し、カナック氷河では 94 時間以上続いたときに藻類が出現したことが明らかになった。十日町試験地とカナック氷河みられた藻類は、それぞれ紡錘形と球形の藻類であることから、異なる種と推定されるので、藻類の出現に必要な気温の条件が異なるのは、藻類種の違いが原因となっているのかもしれない。本研究の結果は、あくまでも観測日のみを基準とした 0°C 以上の気温の継続時間を求めており、実際には観測されていない日に藻類が現れている可能性もある。例えば、ある観測日の 3 日後に藻類が出現する場合、3 日後に観測を行ったときと 7 日後に観測を行ったときで藻類の出現に必要な気温の継続時間が異なる。そのため、観測間隔を短くすることによって、より正確な気温の継続時間が求められるかもしれない。いずれにしても藻類

の出現条件を明らかにするには、同じ藻類種のみられる異なる地域での調査やサンプル採取の間隔を短くして観測を行うといったより詳細な調査が必要ではあるが、少なくとも雪氷藻類が出現するためには積雪表面が融解している期間が重要であると考えられる。

雪氷藻類の初期細胞濃度の比較

回帰によって得られたカナック氷河の初期細胞濃度は Site-A と Site-B でそれぞれ、 $6.9 \times 10^2 \text{ cells m}^{-2}$ と 6.3 cells m^{-2} で、十日町試験地の初期細胞濃度は $2.2 \times 10^3 \text{ cells m}^{-2}$ ($1.8 \times 10^{-1} \text{ cells mL}^{-1}$) となり、十日町試験地の方が高い初期細胞濃度を示した。十日町試験地の標高は 200 m であり、カナック氷河の Site-A (標高 551 m) よりも高度は低い。カナック氷河では、高度の低い Site-A でより多くの鉱物粒子と藻類細胞が飛来していた。そのため、より高度の低い十日町試験地では、カナック氷河よりも多くの鉱物粒子と藻類細胞が飛来したために、初期細胞濃度は比較的高い値となったのかもしれない。今後、異なる地域や異なる高度において調査を行い、比較することで初期細胞濃度の決定要因が明らかになるだろう。もし、初期細胞濃度が高度によって決定できるのであれば、様々な地域の雪氷藻類の繁殖を容易にモデル化できるはずである。

雪氷藻類の増加率の比較

回帰によって得られたカナック氷河の増加率は、Site-A で 0.42 d^{-1} 、Site-B で 0.39 d^{-1} となり、十日町試験地の増加率は 0.22 d^{-1} となり、両地域で増加率は大きく異なった。十日町試験地の増加率は、ロジスティックモデルを用いてカナック氷河で得られた値よりも低かった。マルサスモデルにはロジスティックモデルと異なり環境収容力が含まれていないが、十日町では細胞濃度が増加し続けていたため、環境収容力による増加率への影響はほとんどなく、使用したモデルの違いで増加率が異なったわけではないと考えられる。夏季のカナック氷河は白夜のため、日照時間は 24 時間であるが、日本の十日町はそれよりも短い。

カナック氷河で得られた増加率は、日照時間が長かったために、十日町試験地で得られた値よりも高い値となったのかもしれない。また、カナック氷河と十日町試験地では、みられた藻類が異なる種であると考えられるため、両者の増加率は異なったのかもしれない。実際に、先行研究では、培養環境下で多くの藻類の増加率が明らかになっており、その値は種によって大きく異なっている（表 2-11）。カナック氷河の Site-A と Site-B で得られた増加率は、互いに近い値を示していたが、異なる地域の十日町と比べると増加率は大きく異なっていた。この結果は、雪氷藻類の増加率は、同じ地域の同じ種ではほとんど変わらないものの、異なる地域や種によって大きく異なることを示唆している。今後異なる地域の同じ種の増加率を比較することで、雪氷藻類の増加率が地域で異なる環境の影響を受けるのか、それとも種による違いのみなのかが明らかになると考えられる。

2-5-7. ロジスティックモデルによる雪氷藻類繁殖の再現に必要なデータ

ロジスティックモデルによる雪氷藻類の繁殖の再現には、初期細胞濃度、増加率、環境収容力の三つのパラメータに加えて、雪氷藻類の繁殖期間が必要である。初期細胞濃度は、観測結果より、鉍物粒子の重量 1 g m^{-2} あたり $493-630 \text{ cells m}^{-2}$ であることが示唆された。また、藻類が出現する時期は、気温によって推定できる可能性が明らかになった。藻類の増加率は、カナック氷河では $0.39-0.42 \text{ d}^{-1}$ であった。環境収容力は、カナック氷河の場合では、観測結果から $3.5 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ であると考えられる。最後に雪氷藻類の繁殖期間は、雪温によって求められる。したがって、この藻類繁殖モデルは、気温と積雪表面の鉍物粒子の重量（初期細胞濃度）、増加率、環境収容力、積雪表面の雪温（繁殖期間）のデータさえあれば、藻類繁殖を再現することが可能である。

今後も研究を続けていく必要はあるが、ロジスティックモデルを用いれば、カナック氷河はもちろん他の地域における積雪の雪氷藻類の繁殖もモデルによって再現できるかもしれない。本研究で得られたロジスティックモデルのパラメータは、カナック氷河の 2 地点

の観測結果を基に得られた値であるため、カナック氷河で扱う分にはこれらのパラメータは信頼できると考えられる。しかしながら、カナック氷河と十日町で得られた増加率が異なったように、得られたパラメータを他の地域に適用するには問題も多く、その応用性には疑問が残る。初期細胞濃度をより信頼できるパラメータとするためには、同地域はもちろん異なる地域の積雪表面においても藻類の細胞濃度と鉱物粒子の重量の観測を行い、本当に鉱物粒子の重量と初期細胞濃度に関係がみられるのかを明らかにする必要がある。また、藻類の出現時期と気象条件との関係についても同様に他の地域で観測を行い、明らかにする必要がある。そうすることで初期細胞濃度を他の地域でも適用できるようになるだろう。2-5-3で述べたように、増加率は異なる地域や種によって大きく異なると考えられるが、その原因が地域の環境が異なるためなのか、種による違いなのかを本研究では明らかにできなかった。今後は、異なる地域で同じ藻類種の増加率を調べることで、本研究で明らかになった地域ごとの増加率の違いが環境要因によるものなのか、種の違いによるものなのか明らかになると考えられる。もし、増加率が種による違いのみで、地域による違いが無いのであれば、それぞれの種の増加率を用いることで、観測を行えないような他の地域でもモデルによる藻類の繁殖の再現を行えるだろう。環境収容力は、2-5-4で述べたように、リンによって制限されている可能性がある。そのため、様々な地域における積雪表面のリンの濃度と藻類の濃度を比較することで、リンの濃度から環境収容力を決定できるかもしれない。特に南極半島の沿岸部のような生物コロニーが近くにある積雪では、栄養塩が豊富にあると考えられるため、カナック氷河で得られた環境収容力と大きく異なる可能性がある。今後は、モデルに必要なそれぞれのパラメータの信頼性を高め、応用性を得るために、他の地域でも観測を行い、情報を拡充させていく必要があるだろう。

2-6. 結論

本章では、北極圏グリーンランドカナック氷河上の夏季の積雪における観測によって、

異なる標高の 2 地点において雪氷藻類の季節変化を明らかにし、雪氷藻類の繁殖モデルを作成した。研究地域では、3 種類の異なる藻類が確認され、その中でも緑藻の *Chloromonas* sp. が観測期間を通して積雪表面に優占していた。この藻類は、積雪断面観測の結果から、大気から積雪表面へ供給された胞子に由来すると考えられる。この藻類は観測を行った 2 地点でそれぞれ 6 月 28 日と 6 月 30 日にはじめて積雪表面に出現した。気象条件との比較から、この出現時期は、降雪が起こらず、気温が 0°C を超えていた継続時間によって決定できると考えられる。雪氷藻類の濃度は、2 地点とも藻類細胞が積雪表面に出現してから指数関数的に増加していた。その増加の傾向は地点によって異なり、標高の高い地点では観測終了まで藻類濃度は増加し続けたが、標高の低い地点では 7 月下旬以降、ある濃度に達した後、藻類濃度はほとんど増加しなかった。この観測結果を基に、カナック氷河の雪氷藻類の繁殖を再現するモデルとしてロジスティックモデルを採用した。観測した雪氷藻類の結果に対してこのロジスティックモデルを積雪表面の融解を考慮した上で近似し、モデルの計算に必要な初期細胞濃度と増加率を得た。また、モデルの計算に必要なもう一つのパラメータである環境収容力は観測結果を基にした。得られたパラメータを用いたモデルの計算値と観測値の決定係数は、2 地点でそれぞれ 0.64 と 0.96 となり、ロジスティックモデルによって雪氷藻類の繁殖を概ね再現でき、特に藻類が繁殖の上限に達する時期を正確に推定できることが明らかになった。それぞれのパラメータを決定する要因を調べたところ、初期細胞濃度は鉱物粒子の重量によって推定でき、増加率は同地域であれば地点によらず一定、環境収容力は積雪の栄養塩濃度によって推定できると考えられた。先述したとおり、気温によって藻類の出現時期（初期細胞濃度を定義する時間）を決定できる可能性がある。本研究のロジスティックモデルでは、積雪表面の雪温が 0°C のときに雪氷藻類が繁殖するとしている。以上の結果から、気温と鉱物粒子の重量、増加率、環境収容力、積雪表面の雪温のデータがあれば、カナック氷河の雪氷藻類の繁殖の再現がロジスティックモデルによって可能であることが示された。

第3章 雪氷藻類を取り入れた積雪表面のアルベド物理モデルの開発

3-1. はじめに

本章では、積雪表面の雪氷藻類の繁殖が、アルベドへ及ぼす効果を定量的に評価するため、従来からあるアルベド物理モデルに雪氷藻類の繁殖含めて改良することを目的とし、2章で提案した北極圏グリーンランドの藻類繁殖モデルをつかって、アルベドの季節変化を再現することを試みた。

近年、アルベドの低下が原因の一つと考えられる急激な積雪面積の減少が、北極圏で確認されている。北極圏のグリーンランド氷床では、2000年以降顕著なアルベドの低下が報告されており、このアルベドの低下が積雪の融解速度を促進させていると考えられている (Box et al., 2012)。そのため積雪の表面アルベドを物理モデルによって再現し、近年の積雪融解の原因を解明し、その将来予測を行おうとする研究が行われてきた。一般的に、太陽からの短波放射は、積雪粒径の増加や不純物濃度の増加によってより吸収されるため、これらの物理量の増加はアルベドの低下を引き起こす。Wiscombe and Warren (1980) は、この積雪粒径や積雪不純物による影響を考慮し、放射伝達過程に基づいたアルベド物理モデルを作成した。このモデルは積雪の粒子、不純物、日射の直達光と散乱光の比率などを考慮して短波長域のアルベドを計算することができる。現存する多くのアルベド物理モデルがこのモデルを発展させたものであり、Marshall and Oglesby (1994) は、Wiscombe and Warren (1980) のモデルを全球気候モデルに組み込んで、初めて全球規模のアルベド物理モデルを開発した。Flanner and Zender (2005, 2006) は、Wiscombe and Warren (1980) のモデルを発展させて、複数の積雪層を考慮してアルベドと積雪内の熱伝導を計算するモデルを開発している。近年では、より詳細かつ正確にアルベドを計算できるモデルが開発されており、雪の粒径、不純物、大気の状態、複数の積雪層を考慮して、Flanner and Zender (2005, 2006) のモデルと異なり、可視域、近赤外域といった波長別にアルベドを再現す

るモデルも存在する (Aoki et al., 2011). これらのアルベド物理モデルでは, BC と Dust がアルベドに影響を与える不純物として, その吸光効果が考慮されている. しかしながら, 融雪期には積雪表面では雪氷藻類などの微生物が繁殖し, そのアルベド低下の効果も無視することはできない. 実際に, グリーンランドのカナック氷河上の積雪では, Dust よりも雪氷藻類の持つ吸光特性によってアルベドの低下が引き起こされていることが報告されている (Aoki et al., 2013). しかしながら, 雪氷藻類によるアルベドを低下させる効果はまだ定量的に明らかにされておらず, アルベド物理モデルに雪氷藻類の繁殖によるアルベドの低下効果を組み込むことはできていない.

そこで本研究では, グリーンランドカナック氷河の気象と積雪環境に基づいて, 従来の積雪アルベド物理モデルに, 不純物として積雪中の BC および Dust だけでなく雪氷藻類も含めたモデルを新たに開発し, 微生物の繁殖モデルと組み合わせてアルベドの季節変化を再現することを目的とした. そのために, 観測した雪氷藻類の細胞濃度を使って, アルベド物理モデルから積雪表面アルベドを計算した. 計算したアルベドと観測したアルベドを比較しながら, 適切な藻類の吸光係数を決定した. そして, 2 章で開発した雪氷藻類の繁殖モデルとアルベド物理モデルを組み合わせて, カナック氷河のアルベドの季節変化を再現した.

3-2. 調査地

本章で研究の対象とした地域は, 北極圏グリーンランドのカナック氷河である. 1 章で研究対象とした森林総合研究所十日町試験地においても, 詳細な気象と積雪, 微生物の観測は行っていたが, アルベドの観測を行っていなかったため, 本章ではカナック氷河のみを研究対象とした. 本章で取り扱うデータも, 第 2 章と同じ 2014 年 6 月から 8 月のものである. アルベド物理モデルに雪氷藻類の効果を精度よく取り入れるため, 2 章で調査を行った Site-B の調査表面に加えて, その地点に近い別地点でも新たに積雪断面観測と積雪のサン

プリングを行った。以降、2章で扱った調査表面の積雪断面を Pit-1、その3章で新たに扱う積雪断面を Pit-2 とする (図 3-1)。Pit-2 は、Pit-1 から 50 m ほど離れた地点を指す。Pit-2 では Pit-1 に比べ積雪表面に肉眼で確認できるほどはっきりとした藻類繁殖による赤雪現象が確認された (図 3-2)。したがって、この積雪の条件を用いれば、アルベド物理モデルに藻類の効果を適切に組み込むことができると考えた。本章では、この Pit-1 と Pit-2 の観測から得られた雪氷藻類および積雪不純物 (Dust, BC, OC) の濃度、積雪物理量 (粒径, 水当量, 雪温, 層厚) の観測結果と、この観測結果を用いて計算したアルベドの結果について述べる。カナック氷河と研究対象地点の Site-B についての説明は、2-2 で述べているためここでは省略する。

3-3. 手法

3-3-1. アルベド物理モデル PBSAM

Physically Based Snow Albedo Model (PBSAM) の概要

Physically Based Snow Albedo Model (PBSAM) は、積雪の物理条件、積雪の不純物濃度、気象の条件に基づいて、アルベドを計算するアルベド物理モデルである (Aoki et al., 2011)。この PBSAM は、雪氷藻類は考慮していないが、BC と Dust を吸光効果を持つ積雪不純物とし、それらの吸光効果を考慮してアルベドを計算することができる。また、不純物による吸光効果を定量的に求めるために、モデルの計算で吸光効果を考慮する不純物を設定して不純物の条件別に計算することもできる。例えば、積雪と気象の条件は同じのまま、不純物の吸光効果がないと仮定したときのアルベドと、Dust のみ吸光効果があると仮定したときのアルベドと、Dust と BC の両方に吸光効果があると仮定したときのアルベドをそれぞれ求めることができる。この PBSAM は、積雪の物理量の季節変化を再現する積雪変質モデルの SMAP (Niwano et al., 2012) と組み合わせて、気象データからアルベドの季節変化を計算することも可能となっている。

入力データ

PBSAMによるアルベドの計算に必要なデータは、太陽天頂角、太陽方位角、下向き短波放射量、光の直達散乱比、積雪層の厚さ、積雪の水当量、雪温、積雪粒径、不純物（Dust, BC）の濃度である。図3-3は、本研究におけるアルベド物理モデルPBSAMの計算の流れを示した図である。太陽天頂角、太陽方位角、光の直達散乱比、積雪の水当量、不純物の吸光効果の計算方法を以下に記す。

太陽天頂角は、Goudriaan（1977）の手法に基づき以下の式から求められる。

$$\cos\theta_v = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos t \quad \text{式(3-1)}$$

ここで、 θ_v は太陽天頂角、 δ は赤緯、 φ は緯度、 t は時角を表している。赤緯は海上保安庁のホームページ（<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/jhd.html>）にある、海上保安庁が計算した天体の位置情報から取得できる。時角は経度から求められる。

太陽方位角は、Goudriaan（1977）の手法に基づき以下の式から得られた X を場合分けすることによって求められる。

$$\sin X = \cos\delta \frac{\sin t}{\sin\theta_v} \quad \text{式(3-2)}$$

$$\cos X = \frac{-\cos\varphi\sin\delta + \sin\varphi\cos\delta\cos t}{\sin\theta_v} \quad \text{式(3-3)}$$

$$X = \sin^{-1}(\sin X) \quad \text{式(3-4)}$$

得られた X を以下の条件で変換する。

1. $\cos X < 0$ ならば、

$$X_1 = \pi - X$$

2. $\cos X > 0$ かつ $\sin X < 0$ ならば、

$$X_1 = 2\pi + X$$

3. それ以外ならば、

$$X_1 = X$$

X_1 を得た後、

$$X_2 = X_1 + 2\pi$$

$X_2 > 2\pi$ であるならば,

$$X_3 = X_2 - 2\pi$$

以上より, 得られた X_2 あるいは X_3 を太陽方位角とした.

光の直達散乱比は, van den Broeke et al. (2004; 2006) および Niwano et al. (2012) の手法に基づいて, 以下の式から得られた雲量の割合から求められる.

$$clf = 1 - \left(\frac{LW_{netmax} - LW_{net}}{LW_{netmax} - LW_{netmin}} \right) \quad \text{式 (3-5)}$$

$$LW_{net} = LW_d + LW_u \quad \text{式 (3-6)}$$

$$LW_{netmin} = -5.4T_a + 1383.21 \quad \text{式 (3-7)}$$

$$LW_{netmax} = 0 \quad \text{式 (3-8)}$$

ここで, clf は雲量を指す. LW は長波放射を意味し, 小文字の net , d , u はそれぞれ正味の放射, 下向き放射, 上向き放射であることを指す. T_a は気温 (K) である. 大気から地表面へと届く光には, 指向性を持つ直達光と指向性を持たない散乱光の 2 種類があり, 両者の割合は雲量に依存する (Aoki et al., 2011). 空が曇天 (雲量 = 1) の場合は, 光は雲の影響によって散乱光のみとなる. 一方, 空が晴天 (雲量 = 0) の場合では全て直達光となる. この光の性質に基づいて, 雲量から直達光と散乱光の割合を求めた.

積雪の水当量 (kg m^{-2}) は, 積雪層の密度 (kg m^{-3}) に積雪層の深さ (m) を掛けて求めることができる.

不純物の吸光効果は, Snow Impurity Factor (SIF) という指標として以下の式で表すことができる.

$$SIF^i = k^{i,BC} C_{BC} + k^{i,dust} C_{dust} \quad \text{式 (3-9)}$$

ここで, $k^{i,BC}$ と $k^{i,dust}$ は BC と Dust の比表面積ごとの吸光係数 ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) を表す. 吸光係数は不純物ごとの光の吸収率を表し, それぞれの値は Aoki et al. (2011) で定められている. C_{BC} と C_{dust} は, BC と Dust の濃度 (mg L^{-1}) を表している. 従って, SIF , つまり

不純物の吸光効果は、不純物の濃度と吸光係数によって計算することができる。

3-3-2. PBSAM への雪氷藻類による吸光効果の追加

PBSAM では、将来的に OC による吸光効果もモデルに取り入れて計算することが考えられており、式 (3-9) に OC を加えた場合、以下の式で SIF を表すことができる。

$$SIF^i = k^{i,BC} c_{BC} + k^{i,dust} c_{dust} + k^{i,OC} c_{OC} \quad (3-10)$$

ここで、 $k^{i,OC}$ と C_{OC} はそれぞれ OC の吸光係数と濃度 (mg L^{-1}) を表す。本研究では、この式 (3-10) の OC の項を雪氷藻類として、雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響の再現を試みた。

3-3-3. 積雪断面観測、積雪サンプルの採取、サンプルの分析手法

Pit-2 において、PBSAM を用いてアルベドを計算するために、積雪物理量の測定およびサンプルの採取を行った。Pit-1 の積雪断面観測およびサンプルの採取の手法は、2 章の 2-3-2 および 2-3-3 に記載したものと同様である。積雪断面観測の測定および採取したサンプルの積雪層は、表面から 2 cm (深さ 0-2 cm) の層と、その表面層の下から 8 cm (深さ 2-10 cm) の層の 2 層である。以降、深さ 0-2 cm の積雪層を A 層、深さ 2-10 cm の層を B 層とする。

Pit-2 では、積雪物理測定を行った。測定項目は、積雪全層の厚さと、A 層と B 層の粒径、密度、雪温である。他の積雪物理量の測定の手法は、2-3-2 と同様である。以上の観測から、Pit-2 の粒径、密度、雪温、そして積雪全層の厚さを得た。

Pit-2 では、雪氷藻類分析用と鉱物粒子分析用の 2 種類のサンプルを採取した。サンプルの採取方法は、Pit-2 の A 層と B 層で新たにサンプルを採取した点を除いて、2-3-3 と同様である。雪氷藻類分析用のサンプルは A 層のみ、不純物分析用のサンプルは A 層と B 層で、それぞれ 1-3 サンプルずつ採取した。なお Pit-2 では、Pit-1 と異なり、BC と OC の

濃度を分析するサンプルを採取しなかった。

それぞれのピットで得られた各サンプルの分析の手法は、2-3-5 から 2-3-8 までと同様である。上記の分析により、両地点で A 層の細胞体積バイオマス (mL L^{-1}) と A 層と B 層の鉱物粒子 (Dust) の重量 (mL L^{-1}) を得た。さらに、Pit-1 では、A 層と B 層の BC の濃度 (mL L^{-1}) を得た。

3-3-4. 積雪表面の反射率の観測

2 地点のアルベドの観測値を求めるために、Pit-1 と Pit-2 の両地点の積雪表面で反射率を測定した。積雪表面の反射率は、携帯型分光放射計 (MS-720, Eiko Seiki, Japan) を用いた。放射計を用いた測定は、Takeuchi and Li (2008) の手法に従って行った。測定を行ったセンサーから積雪表面までの距離は約 10 cm である。測定は、対象の雪面と反射率を 100% と仮定した白板で行った。白板で 1 回、同じ雪面で 3 回、白板で 1 回の順に放射量の測定を行い、白板と雪面の放射量の平均値をそれぞれ得た。得られた雪面の放射量から白板の放射量を割ることで、雪面における 350–1050 nm の波長域の 1 nm 毎の反射率を求めた。Pit-1 と Pit-2 では、この放射測定をそれぞれのピットの異なる雪面で 3 箇所ずつ行い、地点ごとの平均反射率を得た。なお本研究では、測定した波長帯 350–1050 nm の内、350–700 nm までの波長帯で得られた放射量のみを取り扱う。この理由は、雪氷藻類の吸光効果があると言われている可視域 (350–700 nm) の反射率を計算するためである。

3-3-5. アルベドの観測

積雪のアルベドの観測値は、Site-B の気象測器が観測した短波放射量から求めた。積雪アルベドは、Site-B の自動気象測器に上下二方向で設置した短波放射センサー (CNR-4, Kipp & Zonen, Netherlands) から得られた波長 0–2000 nm の放射データを基に計算した。それぞれのセンサーは、2012 年 7 月 19 日に裸表面から 2.5 m の高さに設置されたもので

(Aoki et al., 2014), 上向きと下向きの各短波放射量が計測されている。下向き短波放射量は大気から入射した短波放射（日射）の量を表し、上向き短波放射量は積雪表面から反射した短波放射の量を表している。積雪のアルベドは、観測した上向き短波放射量を下向き短波放射量で割って求めた。2014年8月3日12:00 LTの放射データから得られた値をアルベドの観測値とした。

本研究ではアルベドの観測値と、それぞれの地点の近傍の雪面で測定した反射率の結果をもとに、Pit-2のアルベドの観測値を設定した。Pit-1とPit-2の近傍の雪面で測定した反射率より、Pit-2のアルベドの観測値は0.498とした。測定した反射率(350–700 nm)は、Pit-1の近傍の雪面で0.846、Pit-2の近傍の雪面で0.700となった。そこで、Pit-2の近傍の雪面における反射率は、Pit-1の近傍の雪面における反射率よりも割合にして17%低かったため、気象測器から得られた8月3日のアルベドの観測値0.602を0.83倍して、求めた値0.498をPit-2周辺のアルベドの観測値と仮定した。

3-3-6. PBSAMによるアルベドの計算

雪氷藻類によるアルベドへの影響を定量的に評価するために、Pit-1とPit-2から得られた観測結果を用いて、雪氷藻類の吸光効果を考慮したPBSAMでアルベドの計算を行った。

アルベドの計算は、2014年8月3日のカナック氷河のPit-1とPit-2を対象に行った。計算に用いたデータは、3-3-1で述べた、太陽天頂角、太陽方位角、下向き短波放射量、光の直達散乱比、積雪層の厚さ、積雪の水当量、雪温、積雪粒径、DustとBCの濃度、これらに加えて3-3-2で述べたOCの濃度である。また、アルベドの計算の際にそれぞれの不純物の吸光係数も設定し、不純物の吸光効果の計算も行った。

計算に使用した気象データは、Pit-1とPit-2ともにSite-Bの気象測器によって8月3日12:00 LTに観測されたデータを用いた。12:00 LTの気象データを用いた理由は、それぞれのピットで行った積雪断面観測の時刻と同時刻にするためである。

PBSAM に入力する OC の濃度は、2 章 2-5-4 で OC 濃度と藻類濃度の観測値の比較から得られた近似式 (2-1) を使って、積雪表面 (深さ 0-2 cm) で観測した細胞体積バイオマスから求めた値を用いた。近似式に用いた細胞体積バイオマスは、2 章と同様に、*Chloromonas sp.* のものとした。この細胞体積バイオマスを変換して、両地点の A 層の OC 濃度を得た。B 層では、細胞体積バイオマスのデータがないため、Pit-1 の B 層で得られた OC 濃度の観測値を両地点の B 層の OC 濃度として用いた。

PBSAM による計算では、積雪層ごとに不純物濃度 (BC, Dust, OC) および積雪物理データをを入力する。PBSAM では、アルベドの計算を行うために考慮する積雪の層を、積雪表面から深さ 0-2 cm の 1 層目、2-5 cm の 2 層目、5-10 cm の 3 層目の 3 つの層に仮定している。アルベドは、その 3 層それぞれの積雪物理量と不純物濃度のデータを用いて計算される。本研究でも、これら 3 層に観測から得られた積雪物理量および不純物濃度 (BC, Dust, OC) のデータを入力した。実際に観測したデータは、深さ 0-2 cm の A 層と深さ 2-10 cm の B 層であり、B 層は PBSAM で仮定した積雪層の 2 層目と 3 層目を合わせた厚さの層である。そこで、B 層で得られた積雪の水当量と不純物濃度を積雪層の厚さ 8 cm でそれぞれ割り、その値にそれぞれ 3 cm 掛けて 2-5 cm、5 cm 掛けて 5-10 cm の層データへと変換し、2 層目と 3 層目の入力データとして使用した。なお、雪温と粒径のデータは、B 層で測定した値をそのまま 2 層目と 3 層目の入力データとして用いた。

入力データに用いた積雪物理量と Dust の濃度は、PBSAM で仮定した 3 つの積雪層で、後述するそれぞれの地点ごとの観測平均値を用いている。入力データの BC 濃度は、Pit-1 と Pit-2 の 2 地点で同じ観測値を用いた。BC の濃度は、3-3-3 で述べた通り、Pit-1 でのみ得られている。2-4-3 より、積雪表面の BC 濃度は、季節によってほとんど変化がみられなかった。そのため、BC の濃度は、同観測日の異なる地点である Pit-1 と Pit-2 でもほとんど違いはないと仮定し、両ピットで同じ値を用いた。

SIF を求めるために必要な各不純物の吸光係数は、Aoki et al. (2011) が定義した値を用

いた (表 3-1). 表 3-1 は, PBSAM による計算の際に用いた Dust, BC, OC の波長別の吸光係数である. OC の吸光係数は, Hess et al. (1998) の研究に基づいて得られた土壌起源の水溶性エアロゾルの吸光特性に基づいた値を使用した. 使用する OC の吸光係数は, 雪氷藻類の吸光特性に基づいて決定された値ではないが, 雪氷藻類の吸光特性はまだ明らかになっていないことが多く, 参考にするべき値が無いため, 本研究では表 3-1 に記載してある OC の吸光係数を雪氷藻類の吸光係数と仮定して使用した.

3-4. 結果

3-4-1. Pit-1 と Pit-2 における観測結果

Pit-1 と Pit-2 における積雪物理量, 藻類濃度, 不純物濃度 (Dust, BC), 反射率, アルベドの観測値を, 表 3-2 から表 3-5 までに示した. なお, BC 濃度は Pit-1 でのみ測定しているため, 3-3-6 で述べた理由から Pit-1 と Pit-2 の BC 濃度の観測値は同じ値としている. また, Pit-2 のアルベドの観測値は, 3-3-5 で述べたように反射率の観測値を基に Pit-1 のアルベドの観測値から仮定した値としている.

各ピットの積雪物理量

Pit-1 と Pit-2 で観測した積雪物理量は, 積雪全層の厚さを除いて, 両ピットにほとんど差がなかった (表 3-2 と表 3-3). A 層 (深さ 0-2 cm) における積雪層の水当量は, Pit-1 では 10.2 kg m^{-2} , Pit-2 では 9.1 kg m^{-2} となり, 両者の値にほとんど違いはなかった. B 層 (2-10 cm) では, 密度は Pit-1 で 40.8 kg m^{-2} , Pit-2 で 36.6 kg m^{-2} となり, 明瞭な差はみられなかった. A 層における粒径は, Pit-1 では 0.9 mm, Pit-2 では 1.0 mm となり, 両者の値にほとんど違いはなかった. B 層では, 粒径は Pit-1 では 1.1 mm, Pit-2 では 1.4 mm となり, A 層と同様に差はほとんどなかった. 雪温は両地点の A 層と B 層ともに 0°C で違いは全くなかった. 積雪層の厚さは, Pit-1 で 19 cm であったが, Pit-2 では 50 cm となり,

Pit-2の方が積雪表面から氷河の氷面までの積雪層が厚かった。

各ピットの積雪中の雪氷藻類

両ピットの積雪表面では、2章の結果と同様に2種類の緑藻と1種類のシアノバクテリアが観察され、その内の緑藻の *Chloromonas* sp.が両ピットで観察される雪氷藻類の中で大半を占めていた(図3-4)。Pit-1では、2-4-6で述べたとおり、積雪表面でみられる藻類の総体積の大半は *Chloromonas* sp.が占めていた。Pit-2では、積雪表面における総細胞体積バイオマスに対する各藻類のバイオマス比は、*Chloromonas* sp.が96%、小型球形緑藻が4%、*Chr. cyanobacterium*が0%であった。*Chr. cyanobacterium*の細胞は確認されていたものの、その細胞体積が他の藻類種と比べて非常に小さいために、0%という結果となった。以上より、Pit-1とPit-2の積雪表面には *Chloromonas* sp.が大半を占めていた。

積雪表面の細胞体積バイオマスの分析の結果、Pit-1とPit-2における *Chloromonas* sp.の濃度は大きく異なり、Pit-2ではPit-1よりも17倍大きいバイオマスを示した(表3-4)。Pit-1のバイオマスは、 $2.5 \pm 0.9 \times 10^{-3} \text{ mL m}^{-2}$ であった。一方、Pit-2のバイオマスは、 $4.3 \pm 1.9 \times 10^{-2} \text{ mL m}^{-2}$ であった。

各ピットの積雪中の Dust 濃度

各ピットの積雪中の鉱物粒子の重量を分析した結果、積雪表面ではPit-2の方がPit-1よりも2倍高かった(表3-4と表3-5)。A層(深さ0-2 cm)における鉱物粒子の重量は、Pit-1では $7.5 \pm 3.0 \times 10^1 \text{ mg L}^{-1}$ であったが、Pit-2ではその2倍の $1.5 \pm 0.1 \times 10^2 \text{ mg L}^{-1}$ となった。一方、B層(深さ2-10 cm)では、鉱物粒子の重量はPit-1でより多く $1.4 \times 10^1 \text{ mg L}^{-1}$ を記録し、Pit-2ではその半分の 7.5 mg L^{-1} であった。

各ピット近傍の積雪の表面反射率

各ピット周辺の積雪表面の反射率の測定の結果、Pit-2 周辺の反射率は、Pit-1 周辺よりも 0.146 低い値を示した（表 3-4, 図 3-5）。Pit-1 の雪面における 1 nm ごとの反射率は、350-700 nm の波長帯で 0.812-0.863 の範囲をとった（平均: 0.846）。Pit-1 で最も反射率が高い波長は 586 nm で、最も低い波長は 700 nm であった。Pit-2 の反射率は、350-700 nm の波長帯で 0.663-0.751 の範囲をとり、平均値は 0.700 であった。この波長帯で最も反射率が高かったのは 628 nm で、最も低かったのは 359 nm であった。Pit-2 の 350-700 nm の波長帯の平均反射率は、Pit-1 の平均反射率よりも 0.146 低い値を示した。

3-4-2. PBSAM による積雪表面アルベドの計算結果

表 3-6 から表 3-8 までは、Pit-1 と Pit-2 の観測結果を基に設定した両地点のアルベドのモデル計算に用いた入力データである。

表 3-9 と図 3-6 に、両ピットの観測データを基にした PBSAM による積雪表面アルベドの計算値と、アルベドの観測値を示した。PBSAM は、積雪不純物の吸光効果の有無を仮定して、4 つの異なる吸光効果の条件別にアルベドの計算を行っている。表 3-9 と図 3-6 の結果には、不純物の吸光効果がないと仮定したアルベド、Dust のみの吸光効果を仮定したアルベド、Dust と BC の吸光効果を仮定したアルベド、Dust, BC, OC（雪氷藻類）の吸光効果を仮定したアルベドの 4 つの計算結果を示している。これらの異なる不純物の吸光効果を仮定したアルベドの計算で使用した入力データは、全て同じで表 3-6 から表 3-8 までに記載したデータを使用している。この 4 つの条件別の計算では、式 (3-10) における *SIF* の計算過程を調整することによって、それぞれのアルベドを求めている。例えば、不純物の吸光効果がないと仮定したアルベドの計算では、*SIF* の計算を行わず、不純物の吸光効果を求めない。一方、Dust, BC, OC の吸光効果を仮定したときのアルベドの計算では、これら全ての不純物のデータを使って *SIF* を求めている。この不純物の吸光効果の条件別

に計算を行うことによって、各不純物の吸光効果をそれぞれ定量的に求めることができる。

Pit-1 と Pit-2 におけるアルベドのモデル計算値は、不純物の吸光効果によって大きく異なり、不純物の吸光効果がないと仮定した場合と Dust, BC, OC の吸光効果を仮定した場合のアルベドでは、最大で 0.154 の差があった（表 3-9）。積雪中のすべての不純物の吸光効果がないと仮定して計算したアルベドは、Pit-1 で 0.731 と Pit-2 で 0.708 となった。積雪中の Dust の吸光効果のみを考慮して計算した場合のアルベドは、Pit-1 で 0.621, Pit-2 で 0.566 となった。Dust および BC の吸光効果を考慮して計算したアルベドは、Pit-1 で 0.619, Pit-2 で 0.564 となった。さらに、モデル計算で全ての不純物（Dust, BC, OC）の吸光効果を入れて計算したアルベドは、Pit-1 で 0.618, Pit-2 で 0.554 となった。以上のアルベド物理モデルの計算結果から、Pit-1 および Pit-2 の観測で求めた積雪不純物（Dust, BC, OC）の濃度は、アルベドを 0.15 程度低下させる効果を持つことがわかった。

さらにアルベド計算の結果は、観測によって求めた各ピットの積雪中の OC 濃度は、Pit-1 ではアルベドにほとんど影響しないが、Pit-2 ではアルベドを 0.01 低下する効果を持っていることを示していた（表 3-9）。Pit-1 では、Dust と BC の吸光効果を入れて計算したアルベドは 0.619, Dust, BC, OC の吸光効果をすべて入れて計算したアルベドは 0.618 となり、OC の吸光効果によるアルベドの低下は 0.001 であった。一方、Pit-2 では、Dust と BC の吸光効果を入れて計算したアルベドは 0.564 で、Dust, BC, OC の吸光効果をすべて入れて計算したアルベドは、0.554 となり、積雪中の OC の存在を加えることによって、アルベドが 0.01 低下した。この Pit-2 でのアルベドの低下効果は、Pit-1 の 10 倍であった。

3-5. 考察

3-5-1. PBSAM から求めたアルベドの計算値と観測値の比較

積雪物理条件および不純物濃度の観測結果を用いて PBSAM によって求めたアルベドの計算値は、実際のアルベドの観測値よりも高い値を示した。これは、モデル計算において

不純物のアルベドを低下させる効果が過小評価されていることを示唆している（表 3-9, 図 3-6）. すべての不純物の吸光効果がないと仮定したときの Pit-1 のアルベドの計算値は, 0.731 で, 実際のアルベドの観測値は 0.602 であった. 同様に Pit-2 の計算値は, 0.708 で, 観測値は 0.498 であった. 計算値と観測値の差はどちらの地点でも大きく, このことは両地点とも不純物のアルベド低下効果が大きいことを示している. 観測によって求めた積雪中の不純物, Dust, BC, OC のすべての吸光効果を入れてアルベドを計算した結果は, Pit-1 で 0.618, Pit-2 で 0.554 となり, 両地点のアルベドの観測値により近い値となった. しかしながら, まだアルベドの観測値に比べると計算値は高い値であり, Pit-1 と Pit-2 におけるそれぞれの両者の差は, 0.016, 0.056 であった. またこの差は, Pit-1 にくらべて Pit-2 の方が大きい. Pit-2 は, Pit-1 よりも積雪表面の藻類の細胞体積バイオマスが 17 倍高い値を示していたことから, これらの結果は, 積雪中の藻類濃度が高い場合に, モデル計算によるアルベドの再現が悪いことを示している.

アルベドのモデル計算値が観測値よりも高い原因は, PBSAM で設定した OC の吸光係数が雪氷藻類の実際の吸光係数と異なるためと考えられる. 式 (3-10) より, 雪氷藻類の濃度が増加すると, *SIF* の値は高くなり, 不純物による吸光効果はより強くなる. しかしながら, 吸光係数の値が本来の雪氷藻類の値よりも低いとすると, 藻類の濃度が増加するほど, 計算される *SIF* と実際の *SIF* の値に差が開き, 不純物による吸光効果も実際とより異なることになる. 藻類の濃度が高い Pit-2 で, アルベドの計算値と観測値の差がより大きいのは, このためであると考えられる. 今回 PBSAM の計算で使用した OC の濃度は, 雪氷藻類の細胞体積バイオマスの観測値から求めているため, 雪氷藻類の濃度を正しく反映していると考えられる. しかしながら, 計算で使用した OC の吸光係数は, 先行研究 (Hess et al., 1998; Aoki et al., 2011) によって定義されたエアロゾル OC の値であり, 藻類の吸光特性と同じとは言い難い. 以上より, アルベド物理モデルが藻類濃度のより高い地点でアルベドを正確に再現できていなかったのは, 計算に用いた OC の吸光係数が実際の雪氷藻類の

吸光係数と異なるためと考えられる。

3-5-2. 雪氷藻類の吸光度の調整

PBSAM の計算で用いる雪氷藻類の吸光係数を求めるために、従来使われてきたエアロゾル OC の吸光係数を複数段階で変更してそれぞれアルベドを求め、その中でアルベドの観測値に最も近い値を再現する係数を選ぶ方法を試みた (表 3-1 と表 3-10, 図 3-7)。雪氷藻類が持つ色素は、波長依存の吸光特性を持つことが知られており (Painter et al., 2001), 400-600 nm の波長帯ではカロチノイド, 670-680 nm の波長帯ではクロロフィルによって光が吸収される (Takeuchi et al., 2006)。したがって、本研究では PBSAM におけるこの波長域の OC の吸光係数を調整することによって、雪氷藻類の吸光係数を求めることを考えた。吸光係数の調整は、表 3-1 で示した OC の 400-700 nm の吸光係数の値を変化させることで行った。その波長帯のそれぞれの吸光係数の値を 2 倍, 3 倍, ... と倍数で変化させ、2 倍から 15 倍までの倍率で変化させた 14 通りの吸光係数を新たに得た。他のデータを一切変更せずに、OC の吸光係数のみを変更して、Pit-1 と Pit-2 のアルベドを再計算した。表 3-10 と図 3-7 は、調整した吸光係数を用いて計算した Pit-1 と Pit-2 のアルベドを示している。調整した吸光係数を用いて得られたアルベドの計算値と観測値を比較した結果、Pit-2 では、OC の吸光係数を 13 倍にして計算したアルベドが最も観測値と近い値を示した。また、Pit-1 では、OC の吸光係数を 13 倍にして計算したアルベドは、観測されたアルベドより依然高い値を示したがその差は 0.01 であった。吸光係数を 14 倍以上にすると、Pit-2 のアルベドの計算値は、観測値よりも低い値となるため、吸光係数を調整するとしても 13 倍が調整の上限であるといえるだろう。以上より、雪氷藻類の吸光係数としてエアロゾル OC の吸光係数を 400-700 nm の波長帯で 13 倍にしたものを用いることによって、アルベドのモデル計算値と観測値が最も合うことがわかった。

3-5-3. 雪氷藻類の繁殖による吸光効果を考慮したアルベド物理モデル

以上の結果より、雪氷藻類の繁殖を考慮したアルベド物理モデルは、既存のモデルである PBSAM に雪氷藻類のバイオマスを変換して得られた OC の濃度を入力データとして加え、藻類の吸光特性を考慮して調整した OC の吸光係数をパラメータとして設定することによって、観測値をよく再現するアルベドを計算できることがわかった。雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの吸光効果を計算するためには、まず PBSAM 内の不純物による吸光効果を表す指標である *SIF* を求める式として、既存の式 (3-9) ではなく OC の影響を加えた式 (3-10) を使用する。この OC によるアルベドへの吸光効果を求めるためには、OC の濃度と吸光係数が必要である。OC の濃度は、雪氷藻類の細胞体積バイオマスを式 (2-1) で変換することによって得ることができる。OC の吸光係数は、既存の OC の吸光係数を 400-700 nm の波長帯のみ 13 倍に増加させた値を用いる。このアルベド物理モデル PBSAM の改良によって、雪氷藻類の繁殖による吸光効果を再現できることがわかった。

今回決定した藻類の吸光係数は、雪面のアルベドの実測値から逆算的に求めた係数である。本来は、雪氷藻類細胞の光学特性を実験室等で分析して質量あたりの吸光係数を求めるべきである。今後、そのような測定ができる機会が得られれば、藻類の実際の吸光係数を測定し、本研究で求めた係数と比較してその有効性を評価したい。また、今回の吸光係数は、カナック氷河で優占種であった *Chloromonas* sp. を対象にした結果である。そのため、藻類種によって吸光係数が異なる場合、他の種が優占としている地域では、本研究が調整した吸光係数は適用できない可能性もある。今後は、得られた吸光係数が他の地域でも適用できるのか、他の種が優占していた場合、その吸光係数はどのような値をとり得るのか、という点に着目して研究を継続して行うことで、雪氷藻類の吸光特性を定量化できるだろう。しかしながら、本研究の結果は、現時点ではその応用性にはまだ改善の余地があるものの、新しく作成したアルベド物理モデルを用いることによって、雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響を考慮することができ、従来よりも正確にアルベドが再現できることを

明らかにした。

3-5-4. 雪氷藻類の繁殖モデルと PBSAM を合わせて計算したアルベドの季節変化

アルベドの季節変化の計算

本章で開発した雪氷藻類の吸光効果を考慮したアルベド物理モデルと 2 章で開発した雪氷藻類の繁殖モデルを合わせて、カナック氷河の Site-B (Pit-1) の積雪におけるアルベドの季節変化を再現した。雪氷藻類の濃度とアルベドのモデル計算は、カナック氷河の Site-B (Pit-1) を対象に、2014 年 6 月 17 日から 2014 年 8 月 3 日までの期間の積雪断面観測を実施した計 8 日間で行った。入力データとした気象データおよび入力データを計算するために使用した気象データは、現地で行った積雪断面観測の時刻と同じになるようにすべて 12:00 LT のデータを用いた。入力データとした積雪の物理量および不純物濃度 (Dust と BC) は、2-4-3 で示した Site-B の観測値を用いた。アルベドの計算では、入力データの OC の濃度は雪氷藻類の繁殖モデル (式 2-2) で計算した値を用い、OC の吸光係数は 3-5-2 で得られた 400-700 nm の波長帯における値を 13 倍したものを使用した。それ以外の手法は 3-3-6 と同様である。

雪氷藻類の濃度は、式(2-2)を用いて、初期細胞濃度を 6.3 cells m^{-2} 、増加率を 0.39 day^{-1} 、環境収容力を $3.5 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ と設定し、計算を行い、積雪表面 (深さ 0-2 cm) の細胞濃度 (cells m^{-2}) を得た。得られた細胞濃度は、*Chloromonas* sp. の体積を用いて細胞体積バイオマス (mL m^{-2}) にし、式 (2-1) によって面積あたりの OC 濃度 (mg m^{-2}) へと変換した。面積あたりの OC 濃度を積雪の水当量 (kg m^{-2}) から水当量あたりの OC 濃度 (mg L^{-1}) へと変換し、PBSAM の入力データ (積雪層 0-2 cm) として用いた。なお、PBSAM によるアルベドの計算では、積雪表面から深さ 2-5 cm と 5-10 cm の積雪層の入力データも必要である。2 章で開発した雪氷藻類の繁殖モデルは、積雪表面 (深さ 0-2 cm) における観測結果を基にモデルで用いる初期細胞濃度、増加率、環境収容力を決定しているの

で、深さ 2–10 cm までの雪氷藻類の濃度をこれらのパラメータから再現することはできない。そこで、深さ 2–5 cm, 5–10 cm の積雪層における OC の濃度は、2–4–2 で示した OC の濃度の観測値（深さ 2–10 cm）を用いた。観測値を深さ 2–5 cm と 5–10 cm の層のデータへと変換する手法は、3–3–6 と同様である。

以上のアルベドの季節変化を計算する際に使用した入力データおよび吸光係数は、表 3–11 から表 3–15 までに示した。アルベドは、すべての不純物の吸光効果がないと仮定した場合、Dust の吸光効果のみ仮定した場合、Dust と BC の吸光効果を仮定した場合、Dust, BC, OC の吸光効果を仮定した場合の 4 つの条件別にそれぞれ計算を行った。また、アルベドの観測値をモデル計算値との比較に用いた。アルベドの観測値は、Site-B で 12:00 LT に得られた短波放射量から 3–3–5 と同様の手法で計算した値を用いた。

アルベドの季節変化の計算結果と結果の考察

モデルによって再現した Site-B (Pit-1) の積雪アルベドの季節変化を、表 3–16 と図 3–8 に示した。不純物の効果を 4 通りに分け、それぞれのパターンで計算したアルベドと観測値の決定係数 (R^2) は、観測した全ての期間を通して、不純物の吸光効果を仮定しない場合で 0.36, Dust のみ仮定した場合で 0.98, Dust と BC を仮定した場合で 0.99, Dust と BC と OC を仮定した場合で 0.98 であった。決定係数は、Dust と BC の吸光効果を仮定したときで最も高かった。これは、Dust と BC の吸光効果のみをモデルで考慮すれば、今回のカナック氷河の積雪アルベドの観測値を再現できることを示している。しかしながら、再現した Site-B (Pit-1) では、このアルベドを計算した期間では雪氷藻類がほとんど繁殖していなかった。そのために、雪氷藻類の吸光効果を考慮しなくてもアルベドを再現できたのだと考えられる。これに対して、Pit-2 のような雪氷藻類が繁殖し、積雪表面の色が着色されるような積雪の場合は、本研究が結果に示した通り、Dust と BC の吸光効果だけではアルベドを正確に評価できていなかった。そのため、雪氷藻類がさらに繁殖した場合で

は、本研究が開発したアルベド物理モデルの有効性がはっきりと現れると考えられる。実際、アルベドを計算した期間の中で雪氷藻類の濃度が最も高かった 8 月 3 日では、アルベドの観測値は 0.602 であったことに対して、Dust と BC の吸光効果を考慮したアルベドの計算値は 0.619 であったが、Dust, BC, OC の吸光効果を考慮した場合には 0.609 となり、観測値により近い値を示した (表 3-16, 図 3-8)。以上の結果より、本研究が開発したアルベド物理モデルは、雪氷藻類が繁殖する時期においては、従来のアルベド物理モデルよりも正確にアルベドを再現できることがわかった。

計算で求めたアルベドの季節変化の中で、特に Site-B (Pit-1) の 6 月 17 日から 6 月 30 日の低下は、積雪の粒径の変化が寄与していると考えられる (表 3-16, 図 3-8)。アルベドのモデル計算値は、6 月 17 日から 6 月 30 日の期間では、不純物の吸光効果が無いと仮定した場合だと、0.749 から 0.713 へと 0.036 低下していた。しかしながら、同期間におけるアルベドの計算値は、不純物の吸光効果をすべて考慮した場合でも同様に 0.039 低下するにとどまった。この結果は、6 月中のアルベドの低下には、積雪の不純物がほとんど寄与していないことを示している。6 月 17 日から 6 月 30 日までの期間では、積雪表面 (深さ 0-2 cm) の雪質が新雪からざらめ雪へと変質し、粒径が増加した。一方、不純物の濃度はどれもほとんど変化していなかった。表面下の層 (深さ 2-10 cm) でも同様の積雪と不純物の変化の傾向がみられた。観測結果は、6 月 17 日から 6 月 30 日にかけて積雪の粒径のみが増加していたことを示している。積雪の粒径が増加すると近赤外域の放射がより吸収され、アルベドは低下することが知られている (Wiscombe and Warren, 1980)。そのため、6 月下旬では、積雪粒径の増加による影響で観測したアルベドが低下したと考えられる。

計算で求めたアルベドの季節変化の中で、Site-B (Pit-1) の 6 月下旬から 7 月上旬のアルベドの変化は、積雪表面の鉱物粒子の増加が原因であると考えられる (表 3-16, 図 3-8)。アルベドの計算値は、6 月 30 日から 7 月 9 日にかけて、不純物の吸光効果がないと仮定した場合だと、0.001 しか低下していなかった。一方、Dust, BC, OC の吸光効果を仮定

したときのアルベドの計算値は、6月30日から7月9日にかけて0.020低下していた。これらの結果は、6月30日から7月9日のアルベドの低下が、積雪表面の不純物の増加によって引き起こされていたことを示している。この期間では、観測された積雪表面（深さ0-2 cm）の粒径は0.9 mmから0.7 mmへと減少しており、鉱物粒子の重量は6月30日から7月9日にかけて15倍増加していた。観測したBCの濃度やOCの濃度はほとんど変化していなかった。表面下の層（深さ2-10 cm）では、期間中に粒径の増加がみられたが、不純物の濃度はどれもほとんど変化していなかった。以上の観測結果は、6月30日から7月9日の期間で、積雪表面の鉱物粒子が大きく増加していたことを示している。鉱物粒子の増加は、可視域において放射の吸収をより強くし、アルベドを低下させることが知られている（Warren and Wiscombe, 1980）。したがって、アルベドは、6月下旬から7月上旬では、積雪表面の鉱物粒子が大きく増加したことにより低下したと考えられる。この期間では、積雪表面レベルが30 cm低下していたため、積雪の融解によって、積雪層に含まれていた鉱物粒子の濃縮が起こり、鉱物粒子が急激に増加したのかもしれない。

計算で求めたアルベドの季節変化では、Site-B (Pit-1) の7月中はほとんど変化しておらず、これは積雪の粒径と不純物濃度がほとんど変化していなかったためと考えられた（表3-16, 図3-8）。Dust, BC, OCの吸光効果を仮定したときのアルベドの計算値は、7月9日から7月28日の期間で0.673-0.699となり、ほとんど変化がなかった。7月中では、積雪の表面（深さ0-2 cm）と表面下の層（深さ2-10 cm）でともに、粒径と不純物の濃度に特徴的な変化はみられなかった。したがって、積雪の状態がほとんど変わらなかったために、アルベドも大きく変化しなかったと考えられる。

アルベドの計算値は、Site-B (Pit-1) の7月下旬から8月上旬の期間で0.1程度低下し、これは雪氷藻類を含めた不純物の影響であると考えられた（表3-16, 図3-8）。モデルで計算したアルベドは、不純物の吸光効果がないと仮定した場合、7月28日から8月3日の期間で0.009上昇した。DustとBCの吸光効果を仮定したときのアルベドの計算値は、7

月 28 日に 0.699, 8 月 3 日に 0.619 となり, アルベドは 0.08 低下した. Dust, BC, OC の吸光効果を仮定したときのアルベドの計算値は, 7 月 28 日に 0.695 であったが, 8 月 3 日には 0.609 となり, アルベドは 0.09 低下した. 8 月 3 日の Dust と BC の吸光効果を仮定して計算したアルベドと, Dust, BC, OC の吸光効果を仮定して計算したアルベドを比較すると, 後者の方がアルベドは 0.01 低かった. これは雪氷藻類の吸光効果によってアルベドが 0.01 低下していたことを意味している. 積雪表面の鉱物粒子の重量と繁殖モデルで再現した OC の濃度は, それぞれ 7 月 28 日に 7.1 mg L^{-1} と $1.1 \times 10^{-1} \text{ mg L}^{-1}$, 8 月 3 日に 84 mg L^{-1} と $4.6 \times 10^{-1} \text{ mg L}^{-1}$ と急激に増加していた. 一方, 積雪の粒径と BC の濃度はほとんど変化していなかった. 以上の結果は, アルベドは, 7 月 28 日から 8 月 3 日の期間では, 鉱物粒子と雪氷藻類の濃度の増加によって大きく低下したことを示唆している. 表 3-16 で示したアルベドの計算結果を基に不純物ごとのアルベド低下への寄与を, 異なる不純物の吸光効果を仮定したアルベドの計算結果から求めた. 例えば, 不純物の吸光効果がないと仮定したときのアルベドの計算値から, Dust のみの吸光効果を仮定したときのアルベドの計算値を引くことによって, Dust のアルベド低下への寄与として求めた. この期間では, Dust, BC, OC のアルベド低下への寄与は, それぞれ 0.11, 0.002, 0.01 であることがモデル計算によりわかった.

観測期間外の雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響の計算

カナック氷河の Site-B (Pit-1) における最終観測日の 8 月 3 日以降の雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの影響を求めるために, 繁殖モデルで再現した藻類の細胞濃度を使用して, アルベドの計算を行った. 繁殖モデルで再現した 8 月 3 日の雪氷藻類の細胞濃度 ($8.2 \times 10^5 \text{ cells m}^{-2}$) は, 2 章で得られた藻類の環境収容力 ($3.5 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$) に対してわずか 2% の濃度であった. そのため, 雪氷藻類の繁殖によるアルベド低下の寄与は 0.01 しかなかった. しかし融雪期間は, そのあともしばらく続くため, Site-B の雪氷藻類の細胞濃度は,

増加を続けていると考えられる。そこで、2014年のカナック氷河の Site-B において、雪氷藻類によるアルベドへの影響が最大でどのくらいあるのかを雪氷藻類の繁殖モデルとアルベド物理モデルによって計算した。アルベドの計算を行った日は、Site-B において繁殖モデルで最も細胞濃度が高かった 8月21日 (1.5×10^7 cells m^{-2}) で行った。また、雪氷藻類の濃度が環境収容力まで到達した場合のアルベドへの影響もアルベド物理モデルによって計算した。Site-B では、8月21日以降に気温が常に氷点以下となったため、繁殖モデルでは8月21日で細胞濃度の増加は停止した。そのため、雪氷藻類の細胞濃度 (1.5×10^7 cells m^{-2}) は環境収容力 (3.5×10^7 cells m^{-2}) に対して 43%の濃度に留まったが、標高の低い Site-A では同時期には細胞濃度が環境収容力に到達していたため、今後、気温の上昇により藻類の繁殖できる期間が長くなるといった要因によって、Site-B でも藻類濃度が環境収容力に到達する可能性がある。そこで、本研究では Site-B で 8月21日まで藻類が繁殖した場合と、環境収容力まで到達したと仮定したときの 2つの条件で新たにアルベドを計算した。アルベドの計算の手法は、3-3-6と同様である。入力データは、観測最終日であった 8月3日のアルベドの計算値との比較を行うために、OCの濃度(深さ 0-2 cm)以外は全て 8月3日の観測値を使用し、OCの濃度(深さ 0-2 cm)のみ繁殖モデルが計算した 8月21日の細胞濃度あるいは環境収容力の細胞濃度から求めた値を用いた。計算したアルベドの結果は、表 3-17 と図 3-9 に示した。

モデルによるアルベドの計算結果は、雪氷藻類の繁殖によってアルベドが最大で 0.163 低下することを示唆した(表 3-17, 図 3-9)。8月3日の Dust と BC の吸光効果を考慮したときのアルベドの計算値は、0.619であった。Dust, BC, OC の吸光効果を考慮したアルベドの計算値は、8月3日に 0.609, 8月21日に 0.518, 環境収容力に到達した場合に 0.456 となった。Dust と BC の吸光効果のみ含めたアルベドの計算値(0.619)と OC の吸光効果も含めたときの計算値との差は、8月3日では 0.01, 8月21日では 0.101, 環境収容力に藻類が到達したときでは 0.163 となった。この結果は、2014年のカナック氷河の

Site-B では、8月3日以降、雪氷藻類の繁殖によってアルベドが最大で 0.101 低下していたことを示唆している。今回の繁殖モデルによる計算では、積雪表面の層（深さ 0–2 cm）のみで藻類の繁殖を再現しており、表面下の層（深さ 2–10 cm）の雪氷藻類の繁殖を考慮していない。そのため、アルベド物理モデルによる計算では、8月3日以降の表面下の層における雪氷藻類の濃度は8月3日と同じ値を用いている。表面下の層でも8月3日以降に藻類が繁殖していたとすれば、実際のアルベドはより低下している可能性があり、雪氷藻類によるアルベド低下への影響はさらに大きいのかもしれない。本研究の結果より、雪氷藻類の繁殖によってアルベドが 0.1 以上低下することが示唆された。同地点では、2014 年に雪氷藻類の細胞濃度は環境収容力に到達しなかったが、今後の温暖化による気温の上昇などで雪氷藻類の繁殖可能な期間が長くなるといった要因によって、細胞濃度が環境収容力に到達した場合には、アルベドはさらに低下すると考えられる。その場合、アルベドは、雪氷藻類の繁殖による吸光効果のみでも 0.163 低下する可能性がある(表 3–17, 図 3–9)。雪氷藻類の繁殖により積雪のアルベドが低下すると、氷河が裸氷になるまでの時期が早まり、氷河の消耗域が拡大すると考えられる。

3–6. 結論

本章では、グリーンランドカナック氷河上の積雪観測の結果をもとにして、既存のアルベド物理モデル PBSAM に雪氷藻類の繁殖の影響を含めるモデルの改良を行った。この改良は、不純物の効果として、雪氷藻類の有機炭素 (OC) の濃度とその吸光特性を示す吸光係数を加えることである。OC の濃度は、2章で得られた雪氷藻類と OC の濃度の関係から、藻類の細胞体積バイオマスを用いて求めた。吸光係数に既存のエアロゾル OC の値を用いてモデル計算を行った結果、アルベドの計算値は観測値よりも高い値となった。このモデル計算値と観測値の差は、モデルで設定した OC の吸光係数が、実際の雪氷藻類の吸光特性を反映していないことが原因と考えられた。そこで、藻類の吸収の大きい 400–700 nm

の波長帯について OC の吸光係数を数段階に分けて大きい値に設定し、それぞれの係数についてアルベドを再計算した。その結果、エアロゾル OC の吸光係数の 400–700 nm の波長帯を 13 倍した係数が、もっとも観測値に一致した。以上より、従来のアルベド物理モデル PBSAM に、藻類のバイオマスから求めた OC の濃度と雪氷藻類に合わせた OC の吸光係数を加えることによって、雪氷藻類の繁殖による影響を含めたアルベドを再現できることが明らかになった。この求めたアルベド物理モデルと 2 章で開発した雪氷藻類の繁殖モデルを組み合わせてカナック氷河のアルベドの季節変化を計算した。アルベドのモデル計算値と観測値を比較した結果、両者の決定係数は 0.98 となり、観測期間で雪氷藻類が最も繁殖していた 8 月 3 日では、アルベドの観測値 0.602 に対して、計算値は 0.609 となった。雪氷藻類の細胞濃度が環境収容力に達し最大となった場合、雪氷藻類は積雪表面アルベドを 0.163 低下させる吸光効果を持つことが計算によって明らかになった。2 章で開発した雪氷藻類の繁殖モデルと本章で開発したアルベド物理モデルには、まだその汎用性に解決すべき問題点が残るものの、両モデルを組み合わせることによって、将来的には気象条件に合わせて広域に雪氷藻類の繁殖およびその影響を含めたアルベドの季節変化をモデル計算できるようになるだろう。

総括—まとめと今後の課題

本研究は、日本の新潟県十日町市とグリーンランド北西部の積雪上の雪氷藻類の季節変化を連続観測から初めて定量的に明らかにし、その変化は一般的な微生物モデルで時間の関数として再現が可能であることを示した。さらに、従来のアルベド物理モデルに雪氷藻類の影響を新たに取り込み、雪氷藻類の繁殖モデルと組み合わせることによって融解期のアルベドの季節変化をより正確に再現できることを示した。第 1 章では、十日町市の積雪の 4 冬期にわたる観測によって、雪氷藻類の季節変化および年変化を明らかにし、雪氷藻類の繁殖の要因を特定し、その季節変化を微生物の単純な指数増加式であるマルサスモデルで再現できることを明らかにした。第 2 章では、北極圏グリーンランドカナック氷河上の夏季の積雪における観測によって、異なる標高の 2 地点において雪氷藻類繁殖の季節変化を明らかにし、その季節変化を微生物の単純な指数増加式であるロジスティックモデルで再現できることを明らかにした。第 3 章では、グリーンランドカナック氷河上の積雪観測の結果をもとにして、既存のアルベド物理モデルに雪氷藻類の繁殖の影響を含めるモデルの改良を行い、雪氷藻類による積雪アルベドの低下効果をモデル計算によって明らかにした。

観測の結果、十日町およびグリーンランドの積雪に繁殖した雪氷藻類の供給源は、どちらも大気であることが示唆された。先行研究では、雪氷藻類は、大気や動物によって休眠胞子が積雪表面に受動的に飛来して繁殖するか、積雪底部で越冬した前年の休眠胞子が遊泳細胞となり能動的に積雪表面へ移動することによって繁殖することが知られている (Müller et al., 2001; Remias, 2012)。先行研究によると雪氷藻類の細胞は、地表面から高さ 1 m の大気サンプルから確認されている (Marshall and Chalmers, 1997)。本研究で観測を行った両地域では、どちらも雪氷藻類が大気を介して積雪表面へと飛来しており、積雪底部から積雪表面へと移動している可能性はないと考えられる。本研究は、この雪氷藻類の供給が大気を介して行われている地域で雪氷藻類の繁殖を議論しているため、積雪底

部から積雪表面へと藻類細胞が移動してくる地域では、本研究が明らかにした雪氷藻類の繁殖の条件や開発した数理モデルによる藻類繁殖の再現は当てはまらない可能性がある。そのため、本研究で開発した雪氷藻類の繁殖モデルが他の地域でも適用できるかは、検討の余地が大いにある。実際に、Müller et al. (2001) は、積雪深が 40 cm 以下の積雪では雪氷藻類が地表面から積雪表面へと遊泳している可能性を述べている。今後は雪氷藻類の供給源が積雪底部である地域でも観測を行い、その繁殖過程についても明らかにし、藻類の繁殖モデルを発展させる必要があるだろう。

雪氷藻類が積雪上に現れる条件は、十日町とグリーンランドのどちらでも、降雪がなく気温が 0°C を超えた期間が一定以上必要であることが明らかになった。十日町の積雪では、その期間が 24 時間を超えたとき、グリーンランドの積雪では、連続で 94 時間続いた後に雪氷藻類は出現した。0°C 以上の気温が一定期間続く必要があるのは、雪氷藻類の繁殖には積雪中に融解水が必要（例えば、Fukushima, 1963）であることと関係していると考えられる。両地域でこの出現までの期間が異なるのは、雪氷藻類の種の違いによるのかもしれない。十日町でみられた *Chloromonas nivalis* は、高山よりも標高の低い樹林帯でよくみられることが報告されている（Komárek and Nedbalová, 2007; Nedbalová et al., 2008）。カナック氷河でみられた *Chloromonas* sp. は、赤い色素を持つ藻類であり（Uetake et al., 2010）、このような赤い色素を持った緑藻は、高山の残雪でよくみられる（Remias et al., 2010a）。雪氷藻類の種によって好ましい環境は異なるため、藻類種ごとに繁殖を始める条件も異なるのだろう。雪氷藻類の繁殖開始の条件を正確に明らかにするためには、ある地域の継続した観測や、多数の地域の積雪での比較研究が必要であると考えられる。他の地域で新たに観測を行う場合、詳細な気象観測および積雪観測をすでに継続して行っている、あるいはこれから行うことができるような地域が好ましい。

雪氷藻類の濃度の増加量は、藻類が積雪表面に出現後、積雪の融解時間が長いほど大きいことが明らかになった。十日町とグリーンランドどちらの地域の積雪でも、雪氷藻類は

時間とともに指数関数的に増加を続けていることが確認された。十日町の積雪で 4 冬期にわたる観測を行った結果、雪氷藻類の最大細胞濃度は年ごとに異なった。最大細胞濃度が最も高かった年は、雪氷藻類の出現時期が最も早く、かつ積雪の消滅が最も遅かった年、つまり積雪の融解期間が最も長かった年に一致した。グリーンランドの積雪でも同様に、積雪表面が融解している時間が長い標高の低い地点の方が、雪氷藻類の細胞濃度は大きかった。積雪粒子間の融解水が継続的に存在することが、雪氷藻類の繁殖のために必要であるため、その継続期間が藻類濃度の増加量に重要なのだと考えられる。一方、藻類の繁殖に影響を与える日射や積雪の化学成分といった要因について、どちらの地域でもはっきりとした関係はみられなかった。ただし本研究では、積雪の化学条件は EC と pH のみでしか分析を行っていないため、雪氷藻類の繁殖に必要な栄養塩である窒素やリンがこれらの地域の積雪でどのように変化していたかははっきりとわかっていない。実際に、湖の藻類のモデル研究では、藻類の栄養塩として挙げられるものの中でリンが最も藻類にとって不足しやすく、リンの濃度によって藻類の増加率が変化するといわれている (Chen et al., 2009)。今後の研究では、栄養塩の季節変化についても詳細に評価し、雪氷藻類の繁殖の要因を明らかにしていく必要がある。

観測された雪氷藻類の季節変化は、十日町とグリーンランドのどちらの地域でも、一般的な微生物繁殖モデルによって再現できることが明らかになった。十日町では、藻類濃度が消雪まで増加を続けていたため、際限なく微生物が増加を続けるマルサスモデルを適用した。グリーンランドでは、融雪期の後半に藻類濃度がほとんど増加しなくなる期間があったため、マルサスモデルに微生物の増加の上限（環境収容力）を加えたロジスティックモデルを適用した。十日町では、藻類濃度の増加は消雪まで続いていた。この原因は、グリーンランドと比較して消雪時期が 4 月と早いためか、環境収容力が高かったためなのかは本研究ではわからなかった。しかしながら、十日町とグリーンランドの藻類濃度の季節変化の結果は、地域によって藻類の繁殖が上限に達しない地域と達する地域があることを

示している。したがって、雪氷藻類の繁殖をモデルによって再現する際には、地域によってロジスティックモデルの環境収容力を設定せずに、マルサスモデルとして適用する必要もあるだろう。また、十日町では2011年の観測結果からマルサスモデルによって得られた、雪氷藻類の初期細胞濃度と増加率を他の年にも適用し、異なる年において藻類繁殖の季節変化の再現を試みた。モデル計算の結果、2011年以外の3年間の藻類繁殖は完全には再現できていなかった。これは2011年の初期細胞濃度と増加率が他の年では適用できないことを示しており、初期細胞濃度と増加率は年によって異なる可能性がある。初期細胞濃度と増加率が異なる原因として、十日町の年ごとに異なる気象および積雪条件が考えられる。十日町では、雪氷藻類が出現した後も降雪は続いており、その降雪期間及び降雪量は年によって異なっていた。十日町の消雪日は、年によって最大で3週間ほど異なっていた。これらの年ごとに異なる気象条件と積雪条件が初期細胞濃度と増加率に影響を与えている可能性もある。そのため、年による繁殖モデルの普遍性を明らかにし、改善していくためにも複数年に渡った雪氷藻類繁殖の季節変化の観測を今後も続けるべきであろう。

回帰式における藻類の初期細胞濃度は、十日町とグリーンランドの両地域で異なることが明らかになった。十日町（標高 200 m）の初期細胞濃度は $2.2 \times 10^3 \text{ cells m}^{-2}$ 、グリーンランドの初期細胞濃度は Site-A（標高 551 m）と Site-B（標高 944 m）でそれぞれ、 $6.9 \times 10^2 \text{ cells m}^{-2}$ と 6.3 cells m^{-2} となった。グリーンランドでの観測結果は、高度のより低い地点でより多くの鉱物粒子と藻類細胞が飛来しており、鉱物粒子の重量から初期細胞濃度を推定できる可能性を示した。高度の最も低い十日町の初期細胞濃度は、グリーンランドの2地点の初期細胞濃度よりも大きな値であったことから、グリーンランドと同様に高度が低いために多くの鉱物粒子と藻類細胞が大気を介して積雪表面へと飛来していたのかもしれない。そのため、グリーンランド以外の地域でも鉱物粒子の重量あるいは高度から初期細胞濃度を決定できる可能性がある。積雪において初期細胞濃度を定義する時間とその濃度に関する研究は、既存の研究では存在していない。今後、異なる地域や異なる高度の積雪

でさらに調査を行い、雪氷藻類がはじめて積雪表面に出現する時期とそのときの藻類濃度を明らかにし、その情報を拡充させていくことで、雪氷藻類の繁殖モデルの汎用性を改善していくことができるだろう。

回帰式における藻類の増加率は、観測地点による違いはほとんどみられなかったが、地域によって大きく異なることが明らかになった。十日町とグリーンランドの観測から微生物モデルの回帰によって得られた増加率は、十日町では 0.22 d^{-1} であったのに対して、グリーンランドでは $0.39-0.42 \text{ d}^{-1}$ と、グリーンランドで観察された藻類の増加率の方が高かった。夏季のグリーンランドは、白夜によって日本よりも日照時間が長いために、藻類が繁殖できる 1 日の時間が長くなり、増加率がより高くなったと考えられる。また、十日町では、観測期間中に頻繁に降雪が確認され、藻類が積雪表面に出現後も表面では新雪がたびたびみられた。一方、グリーンランドでは、藻類が出現後に新雪は確認されず、観測期間中に降雪はほとんどなかったと考えられた。多量の降雪の場合、積雪表面で繁殖している雪氷藻類が覆われてしまうため、こういった降雪の有無もまた雪氷藻類の増加率に影響を及ぼしている可能性もあるだろう。あるいは、両地域で見られた藻類種は異なったことから、増加率は地域の環境に関わらず藻類種ごとに決まった一定の値をとるということも考えられる。実際に多くの先行研究（例えば、Weger et al., 2002; Tittel et al., 2005; Leya et al., 2009）では、培養環境下で得られた藻類の増加率は、種によって大きく異なっていた。

環境収容力の値は、十日町とグリーンランドの観測との比較から、地域によって異なる可能性があることを示した。十日町では、観測された最大の細胞濃度は、 $2.2 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ で、観測期間中に藻類の繁殖が停止することは無かった。一方、グリーンランドでは、細胞濃度が $2.2 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ となって以降、藻類濃度はほとんど増加しなかった。この結果は、地域によって藻類の環境収容力が異なることを示している。Takeuchi (2013) と Lutz et al. (2014) は、異なる氷河の積雪における同じ藻類種の調査結果であるが、両研究の最大細胞濃度は約 10 倍異なった。また、内陸部と沿岸部の積雪における雪氷藻類の先行研究

を比較したところ、みられた藻類が同じ種であるにもかかわらず沿岸部の積雪の方が内陸部の積雪よりも最大細胞濃度は5倍ほど高かった (Sutton, 1972; Lutz et al., 2014). 環境収容力が地域や場所によって大きく異なるのは、栄養塩の濃度などの環境条件が異なっていたことが関係しているのだろう. 十日町で雪氷藻類の濃度が増加を続けていた原因は、積雪中の栄養塩濃度がグリーンランドの積雪の栄養塩濃度よりも高かった可能性もある.

以上のように、初期細胞濃度、増加率、環境収容力の値は、地域や藻類種によって大きく異なると考えられるため、これらのパラメータの汎用性についてはまだ検討が必要である. 十日町では *Chloromonas nivalis*, グリーンランドでは *Chloromonas* sp. と考えられる藻類が観察され、本研究はこれらの藻類の繁殖モデルのパラメータについて議論した. 先行研究によると、世界中の積雪では *Chlamydomonas nivalis* と呼ばれる緑藻が繁殖しており、この藻類の繁殖によって積雪が赤く染まっていることが多くの研究で報告されている (例えば, Hoham and Duval, 2001; Takeuchi et al., 2006; Lutz et al., 2014). そのため、本研究で開発した繁殖モデルが *Chlamydomonas nivalis* にも適用できるかについても今後の調査で明らかにしていく必要があるだろう. これらのモデルパラメータを検討するためには、様々な地域の積雪において雪氷藻類の季節変化の観測を行い、検証していく必要がある.

雪氷藻類の繁殖によるアルベドへの効果は、既存のアルベド物理モデルに雪氷藻類の濃度のデータと吸光のパラメータを新たに組み込むことによって、再現できることが明らかになり、本研究のグリーンランドの観測条件では、雪氷藻類は積雪アルベドを最大で0.163低下させる効果を持つことがわかった. 本研究によって、雪氷藻類の繁殖を考慮したアルベド物理モデルが作成され、そのアルベドへの効果が計算できたが、課題もある. 本研究で提案した雪氷藻類の吸光係数は、OCのエアロゾル粒子の吸光係数を基に雪面のアルベドの実測値から逆算的に求めた値であるため、実際の雪氷藻類の吸光係数とは言い難い. 雪氷藻類の吸光特性は、これまで明らかにしようとする試みがなかったため、まだ定量的に

明らかになっていない。そのため、先行研究を基に吸光係数を新しく設定することはできないが、今後、雪氷藻類細胞の光学特性を実験室等で分析することができれば、雪氷藻類細胞の質量あたりの吸光係数が得られるだろう。本研究におけるグリーンランドの調査では、積雪表面で主に赤い色の細胞が観察され、融雪期の後半では積雪表面が赤く着色していた。この赤雪は、世界各地の積雪で報告されている現象であるため（例えば、Hoham and Duval, 2001; Takeuchi et al., 2006; Lutz et al., 2014）、本研究が明らかにした雪氷藻類による積雪アルベドの低下（最大 0.163）と同程度のアルベドの低下が他の地域でも起きている可能性は十分にある。一方で先行研究では、雪氷藻類の細胞の色によって積雪が赤色だけでなく、緑、黄、橙などの色に染まることも世界各地で報告されている（例えば、Nedbalová et al., 2008; Spiljerman et al., 2012; Lutz et al., 2015）。実際、本研究の十日町で観察された *Chloromonas nivalis* の細胞の色は主に橙色であり、グリーンランドで観察された *Chloromonas sp.* の細胞の色は主に赤色であった。こうした積雪表面で繁殖する主な藻類種の違いによって、積雪が異なる色に染まる可能性があり、雪氷藻類によるアルベドの低下効果も本研究のグリーンランドの観測結果で明らかになった値（0.163）と異なるかもしれない。したがって、世界各地で繁殖する雪氷藻類によるアルベドへの効果を定量的に明らかにするためには、藻類種ごとの吸光係数を明らかにする必要があるだろう。今後、実験室等での光学分析によって、雪氷藻類の種ごとの吸光係数が明らかになれば、雪氷藻類によるアルベド低下効果のモデル化に関する研究は飛躍的に進展するはずである。

アルベド低下効果のモデル化は、本研究ではグリーンランドでのみ行ったが、同様に観測した十日町の積雪アルベドも観測条件が揃えば同じように再現できると考えられる。十日町ではアルベドの観測を行っていなかったため、今回はアルベド物理モデルを適用することはできなかった。十日町で観測した藻類の積雪表面の最大細胞濃度は、 2.2×10^7 cells m^{-2} であり、グリーンランドの観測から得た環境収容力の 3.5×10^7 cells m^{-2} に近い値を示していた。グリーンランドでは、細胞濃度が環境収容力に到達したとき積雪アルベドを

0.163 低下させる効果があることが計算されている。そのため、十日町の積雪でも藻類が繁殖する年では、雪氷藻類によって積雪アルベドが 0.1 以上低下している可能性が十分にある。グリーンランドと比べて日本の積雪域の面積は小さく、その融解による地球環境への影響は小さいかもしれないが、日本の積雪は、平地では交通や農地などの人間社会活動に密接に関わり、山岳域では春から夏にかけての貯水される水資源としての役割がある。他にも融雪で引き起こされる雪崩もある。そのため、日本の融雪を正確に評価、再現することは、人間社会活動に貢献する上で重要である。上記の点や雪氷藻類の影響を含めたアルベド物理モデルの異なる地域での汎用性を高めるためにも、今後も日本で雪氷藻類の観測を行っていくことは重要であるだろう。

解決すべき課題がまだ多くあるものの、本研究で示した積雪表面における雪氷藻類繁殖の季節変化およびそのアルベドへの影響の数理モデル化による再現は、微生物活動を含めた全球規模の積雪融解予測への発展につながる。本研究が作成した雪氷藻類の繁殖モデルとその影響を考慮したアルベド物理モデルは、既存の研究には存在せず、はじめての試みである。本研究で作成したモデルを使うことによって、今後、積雪融解のより正確な将来予測が可能になると考えられる。また、雪氷藻類は酸素と二酸化炭素を光合成や呼吸によって吸収あるいは放出するため、積雪域の炭素循環に影響を与えることが知られている（例えば、Singer et al., 2012; Takeuchi, 2013）。将来的には、本研究のモデルを発展させることにより積雪域の炭素循環も定量化できるようになるだろう。本研究の繁殖モデルによる計算は、観測結果から得られたパラメータである初期細胞濃度、増加率、環境収容力と、気温などの容易に入手できる気象データから行っている。今後、繁殖モデルのパラメータの値を決定できるのであれば、様々な地域の雪氷藻類の繁殖を再現することができるはずである。そして、将来的には本研究が開発した繁殖モデルおよびアルベド物理モデルを領域気候モデル、あるいは全球気候モデルと結合することによって、雪氷藻類の繁殖とそのアルベド効果を大陸規模から全球規模の範囲で再現することが可能となると考えられ

る. このような新しいモデルを作成し提案できたことは, 本研究による大きな成果である.
今後も継続して観測と研究を行い, これらの繁殖モデルとアルベド物理モデルを発展させていくことで地球環境の将来予測に大いに貢献できることが期待される.

謝辞

本研究を博士論文として作成するにあたっては、様々な方にお世話になりました。全ての方のお名前をあげることができず申し訳ないのですが、博士論文を作成する上でお世話になった方々へ、下記にてお礼を申し上げさせていただきます。

千葉大学の宮内崇裕教授、戸丸仁准教授、近藤昭彦教授には本研究の博士論文としての質をより良いものとするために、学位審査時に多くの的確なご指導を頂きました。宮内先生には、ご多忙にもかかわらず、論文を細部まで見て頂いた上に数多くのご添削をして頂いたこと、誠に感謝しております。戸丸先生には、博士論文の制作時だけでなく、研究室のゼミ時にも的確なご指摘をして頂き、大変お世話になりました。近藤先生には、学位本審査時に私の研究に関して多くのご指摘および指導をして頂き、誠にありがとうございます。

森林総合研究所十日町試験地の竹内由香里研究員には、同試験地の複数年の冬期観測で大変お世話になりました。竹内さんに採取して頂いたサンプルを分析した結果は、雪氷藻類の繁殖過程を明らかにするうえで非常に重要な情報となりました。この結果のおかげで博士論文が制作できたこと、感謝してもしきれません。同試験地の村上茂樹研究員、遠藤八十一氏、庭野昭二氏にも観測の際にお世話になりました。千葉から来た若輩者に対して快く接して頂いたこと、積雪断面観測についてご指導頂いたこと、大変感謝しております。今後は学会誌に論文として十日町試験地での調査から得られた結果を投稿することで御恩をお返しできればと思います。

岡山大学の青木輝夫教授には、私が SIGMA プロジェクトの一員としてグリーンランドの調査を行う機会を与えて頂きました。加えて、アルベドの測定の仕方やアルベド物理モデル PBSAM の扱い方を教えて頂きました。青木さんのおかげで念願のグリーンランドでの調査を行うことができたこと、こうして博士論文を制作することができたこと、誠に感謝しております。気象研究所の谷川朋範研究官には、2013年と2014年の観測でお世話にな

り、2015年の富山で行われた国際学会で貴重なご意見を与えて下さりました。頂いたご意見がきっかけとなり、ロジスティックモデルの存在に気が付くことができました。ありがとうございます。気象研究所の庭野匡思研究官には、2013年と2014年の観測でお世話になり、また気象データや積雪物理モデル SAMP の扱い方について多くのことを教えて頂きました。お忙しい立場にもかかわらず、いつも快く私の質問に答えて頂いた上に「また質問があればいつでも聞いてください」と毎回仰ってくれたこと、いつも感謝しております。そのお言葉に甘えて、外部の研究者の方では庭野さんに最も質問したと思います。気象研究所の朽木勝幸研究官には、2013年と2014年のグリーンランドの観測と、積雪の BC の分析に関してお世話になりました。当時、気象研究所で BC の分析を行っていたとき、私の手際が悪くいつも遅くまで残ることになったのにもかかわらず、笑顔で快く付き合ってくださいましたこと、今でも覚えております。朽木さんのご協力がなければ、本研究の第3章は書けませんでした。誠にありがとうございます。今後は、私のグリーンランドの観測に協力して頂いた皆様に学会誌に論文を投稿することで頂いた御恩をお返ししたいと思っております。

国立極地研究所の植竹淳研究員には2013年、同研究所の永塚尚子研究員には2013年と2014年にグリーンランドの微生物観測でお世話になりました。2013年のグリーンランドの観測は、私にとって最も反省すべき観測で、そして多くのことを学んだ観測でした。海外、特にグリーンランドのカナック地域のような僻地では、調査にかかる費用も多く、観測に足りないものがあっても日本に戻ってやり直すことはできません。初めての本格的な海外調査であった2013年のグリーンランドの観測で、私は上記の意識が非常に不足しておりました。そのような中、お二方には調査に対する準備の大切さ、1つ1つを早く正確に行動することの重要さ、周りとの協力して調査を進めることの大切さを言葉とその行動で教えて頂いたことは、一生忘れないと思います。おそらく、2013年のグリーンランドの経験が無ければ、2014年のグリーンランドの観測は満足に行うことができず、博士論文も執筆で

きなかったと思います。また、私の観測に最後まで辛抱強く付き合っていて、誠にありがとうございました。グリーンランドの観測結果もなんとか論文にして、御恩をお返しできればと思います。

国立極地研究所の本山秀明教授、名古屋大学の藤田耕史准教授、北海道大学の的場澄人助教授、北極探検家の山崎哲秀さん、北海道大学の箕輪昌紘君、山形大学の小室悠紀君には、2014年のグリーンランドのカナック氷帽でのアイスコア掘削の際にお世話になりました。本山さん、藤田さん、的場さん、山崎さんには、アイスコアの掘削中に多くのことを教えて頂きました。掘削キャンプ中に私の不慣れな料理やアイスコアの処理などについても褒めて下さり、ありがとうございました。おかげさまで観測に対して少なからず自信を持つことができました。その後のカナック氷河での観測が満足に行うことができたことも、掘削での経験が大きいと思います。箕輪くんと小室くんは、私にとって初めて一緒に観測した博士後期課程の学生でしたので、お互いの存在が良い刺激となって上手く観測ができたと思います。ありがとうございました。的場さんと山崎さんには、2013年のグリーンランド観測でもお世話になりました。的場さんには2013年のグリーンランド観測でご多忙にもかかわらず、私の調査に協力して頂き、誠にありがとうございました。山崎さんには2013年の観測でよく励ましてもらったこと、大変感謝しております。山崎さんがいたからこそ、2014年にもう一度グリーンランドでの観測に挑戦できました。今後、掘削でお世話になった皆様には何らかの形で頂いた御恩をお返しできるよう精進いたします。

竹内研究室および戸丸研究室の学生の皆様には、日々の研生活や多くの調査で大変お世話になりました。竹内研究室の島田さんには、私の学部生時の西尾研究室からの先輩として、西尾文彦教授が退官なされた後も竹内研究室の先輩としてもお世話になりました。島田さんとはおそらく6年間研究室が一緒に、私にとってもっとも付き合いが長い先輩でした。私は博士後期課程になるまで数理モデルを扱ったことがなかったのですが、多忙にもかかわらずプログラミングに関して優しく丁寧に教えて下さったこと、誠に感謝してお

ります。竹内研究室の同期の田中聡太君には、野外調査や日々の研究生生活においてとてもお世話になりました。特に2014年のグリーンランドの調査は、田中君の協力のおかげで私にとって最も楽しく、最も充実した観測となりました。約2ヶ月にわたって2014年のグリーンランドのカナック氷河を田中君とほぼ二人で調査したことは、私にとって大きな自信となりました。おそらく、今後どの地域へ長期間行ってもなんとかなるような気がします。日々の研究生生活でも快く協力してくれたことも含めて、田中君本当にありがとうございます。人数が多いため、この謝辞で残りの研究室のメンバーそれぞれにお礼を述べることができず申し訳ありません。ただ、この1年間は研究室の皆様には私の博士論文の制作にあたって、なにかと気を使ってくださったようで、本当に感謝しております。おかげさまで落ち着いて論文を執筆することができました。

家族には、博士後期課程への進学を許して頂いたこと、長期間の海外の調査に快く送りだして頂いたこと、また日々の研究生生活を支えて頂いたこと誠に感謝しております。これからは親孝行として今までの御恩をお返しできるように努めてまいります。

最後になりますが、指導教官である竹内望教授には、学部生時代から今日まで日々の研究において非常にお世話になりました。竹内先生には、ご多忙の中、何度も私の博士論文に対して的確なご意見およびご指導をして頂いたおかげで、皆様にお見せできるまでの論文にできたと思います。まだまだ未熟ですが、研究や調査に対する心構え、自分の研究を他の方に理解してもらうことの重要性などについても少なからず身についたと感じております。また、研究や調査に関して、学生の自主性を重んじた指導方針をとって頂いたことに誠に感謝しております。おかげさまで私は念願であったグリーンランドの調査を行うことができ、その結果をこうして博士論文として残すことができたと思っております。また、博士2年生時に私が南極半島の調査を行うことを許可して頂き、ありがとうございます。南極半島に行かなければ、きっと今頃後悔しているはずです。これまでに受けた御恩は、これから論文として残すことでお返しできればと思います。

文献

- Aoki, Te., Aoki, Ta., Fukabori, M. and Uchiyama, A., 1999, Numerical simulation of the atmospheric effects on snow albedo with a multiple scattering radiative transfer model for the atmosphere–snow system. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 77, 595–614, doi:10.2151/jmsj.77.595.
- Aoki, Te., Aoki, Ta., Fukabori, M., Hachikubo, A., Tachibana, Y. and Nishio, F., 2000, Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bidirectional reflectance of snow surface. *J. Geophys. Res.*, 105, 10,219–10,236, doi:10.1029/1999JD901122.
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Kodama, Y., Hosaka, M. and Tanaka, T., 2011, Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 116, D11114, doi: 10.1029/2010JD015507.
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Uetake, J., Masuda K. and Ishimoto, H., 2013, Numerical Simulation of Spectral Albedos of Glacier Surfaces Covered with Glacial Microbes in Northwestern Greenland. *RADIATION PROCESSES IN THE ATMOSPHERE AND OCEAN (IRS2012)*, Robert Cahalan and Jürgen Fischer (Eds), ALP Conf. Proc., 1531, 176, doi: 10.1063/1.4804735.
- Aoki, T., Matoba, S., Uetake, J., Takeuchi, N., and Motoyama, H., 2014, Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 3–20, doi:10.5331/bgr.32.3.
- Armstrong, R. L. and Brun, E. (Eds.), 2008, *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Bamber J. L., Layberry, R. L., Gogineni, S. P., 2001, A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet: 1. Measurement, data reduction, and errors. *J. Geophys. Res.*, 106, 33773–33780.

- Bartelt, P. and Lehning, M., 2002, A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part I: numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35, 123–145, doi: 10.1016/S0165232X(02)00074–5.
- Bidigare, R. R., Ondrusek, M. E., Kennicutt II, M. C., Iturriaga, R., Harvey, H. R., Hoham, R. W. and Macko, S. A., 1993, Evidence a photoprotective for secondary carotenoids of snow algae. *J. Phycol.*, 29 (4), 427–434.
- Bond, T. C. and Coauthors, 2013, Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res.*, 118, 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171.
- Box, J. E., Fettweis, X., Stroeve, J. C., Tedesco, M., Hall, D. K., and Steffen, K., 2012, Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, 6(4), 821–839, doi: 10.5194/tc-6-821-2012.
- Bradley, J. A., Anesio, A. M., Singarayer, J. S., Heath, M. R. and Arndt, S., 2015, SHIMMER (1.0): a novel mathematical model for microbial and biogeochemical dynamics in glacier forefield ecosystems. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3441–3470, doi.org/10.5194/gmd-8-3441-2015.
- Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C. and Coleou, C., 1989, An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 35, 333–342.
- Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brunot, G., 1992, A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 38, 13–22.
- Chen, S., Chen, X., Peng, Y. and Peng, K., 2009, A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population. *Appl. Math. Model.*, 33, 1097–1106.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Pritchett, L. C., Pierson, W. R., Frazier, C. A. and Purcell, R. G., 1993, The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: Description,

- evaluation and applications in U. S. air quality studies. *Atmos. Environ.*, 27, 1185–1201.
- Cui, Q. and Lawson, G. J., 1982, Study on models of single populations: an expansion of the logistic and exponential equations. *J. Theor. Biol.*, 98, 645–659, doi: 10.1016/0022-5193(82)90143-6.
- Curl, H. Jr., Hardy, J.T. and Ellermeier, R., 1972, Spectral absorption of solar radiation in alpine snow fields. *Ecology*, 53, 1189–1194, doi: 10.2307/1935433.
- Danta, A., Devaux, J., Piquemal, E. and Boumnick, L., 1990, Growth rate of four freshwater algae in relation to light and temperature. *Hydrobiologia*, 207, 221-226.
- Denoth, A., 1994, An electronic device for long-term snow wetness recording. *Ann. Glaciol.*, 19, 104-106.
- Eppley, R. W., 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, 70, 1063–1085.
- Flanner, M. G. and Zender, C. S., 2005, Snowpack radiative heating: Influence on Tibetan Plateau climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06501, doi:10.1029/2004GL022076.
- Flanner, M. G. and Zender, C. S., 2006, Linking snowpack microphysics and albedo evolution. *J. Geophys. Res.*, 111, D12208, doi:10.1029/2005JD006834.
- Fukushima, H., 1963, Studies on cryophytes in Japan. *J. Yokohama Munic. Univ. Ser. C, Nat. Sci.*, 43, 1–146.
- Goudriaan, J., 1977, *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*. Pudoc, Wageningen, the Netherlands.
- Hess, M., Koepke, P. and Schult, I., 1998, Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 831–844, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0. CO;2.
- Hoham, R. W., 1980, Unicellular chlorophytes-snow algae. *Phytoflagellates* (Cox ER, ed),

- 61–84, Elsevier, New York.
- Hoham, R. W. and Duval, B., 2001, Microbial ecology of snow and freshwater ice. in: Jones, H. G., Pomeloy, J. W., Walker, D. A. and Hoham, R. W. (Eds.), *Snow Ecology*, Cambridge University Press, 168–228.
- Hoham, R. W., Roemer, S. C. and Mullet, J. E., 1979, The life history and ecology of the snow alga *Chloromonas brevispina* comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales). *Phycologia*, 18, 55–70.
- Hoham, R. W., Yatsko, C. P., Germain, L. and Jones, H. G., 1989, Recent discoveries of snow algae in upstate New York and Québec Province and preliminary reports on related snow chemistry. *Proc. 46th Ann. Eastern Snow Conf.*, 196–200.
- Huybrechts, P., Letreguilly, A. and Reeh, N., 1991, The Greenland Ice Sheet and greenhouse warming. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology (Global and Planetary Change Section)*, 89, 399–412.
- 石坂雅昭, 2008, 「しもざらめ雪地域」の気候条件の再検討による日本の積雪地域の質的特徴を表す新しい気候図, *雪氷*, 70, 3–13.
- Jacobson, M. Z., 2004, Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. *J. Geophys. Res.*, 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945.
- Jones, H. G., 1991, Snow chemistry and biological activity: a particular perspective on nutrient cycling. In *NATO ASI Series G: Ecol. Sci.*, Vol. 28, *Seasonal Snowpacks, Processes of Compositional Change*, T. D. Davies, M. Tranter, and H.G. Jones (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, 173–228.
- 小林義雄, 福島博, 1952, 日本に於ける赤雪と緑雪に就て I. *植物学雑誌*, 65(765–766), 77–85.
- Koivusalo, H., Heikinheimo, M. and Karvonen, T., 2001, Test of a simple two-layer parameterisation to simulate energy balance and temperature of a snowpack. *Theor.*

- Appl. Climatol., 70, 65–79.
- 小島賢治, 本山秀明, 山田芳則, 1983, 気温等単純な気象要素による融雪予測について. 低温科学物理篇, 42, 101–110.
- Kol, E., 1969, The red snow of Greenland. II. Acta Bot. Acad. Sci. Hung, 15, 281–289.
- Komárek, J. and Nedbalová, L., 2007, Green cryosestic algae. Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology: Algae and cyanobacteria in extreme environments, part 4: phototrophs in cold environments (Seckbach J, ed), 11, 321–342, doi: 10.1007/978-1-4020-6112-7_17.
- Kuchiki, K., Aoki, T., Niwano, M., Matoba, S., Kodama, Y. and Adachi, K., 2015, Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical and gravimetric methods: Variations during the 2007–2013 winters at Sapporo, Japan. J.Geophys. Res., 120, 868–882.
- Lavoie, D., Denman, K. and Michel, C., 2005, Modeling ice algal growth and decline in a seasonally ice - covered region of the Arctic (Resolute Passage, Canadian Archipelago). J. Geophys. Res., 110, C11009, doi:10.1029/2005JC002922.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C. and Satyawali, P., 2002, A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part II: Snow microstructure. Cold Reg. Sci. Technol., 35, 147–167, doi:10.1016/S0165-232X(02)00073-3.
- Leya, T., Rahn, A., Lütz, C. and Remias, D., 2009, Response of arctic snow and permafrost algae to high light and nitrogen stress by changes in pigment composition and applied aspects for biotechnology. FEMS Microbiol. Ecol., 67, 432–443, doi: 10.1111/j.1574-6941.2008.00641.x.
- Ling, H. U. and Seppelt, R. D., 1990, Snow algae of the Windmill Island, continental Antarctica. *Mesotaenium berggrenii* (Zygnematales, Chlorophyta), the alga of grey snow. Antarct. Sci., 2, 143–148.
- Ling, H. U. and Seppelt, R. D., 1993, Snow algae of the Windmill Island, continental

- Antarctica. 2. *Chloromonas rubroleosa* sp. nov. (Volvocales, Chlorophyta), an alga of red snow. *Eur. J. Phycol.*, 28, 77–84.
- Lutz, S., Anesio, A. M., Jorge Villar, S. E. and Benning, L. G., 2014, Variations of algal communities cause darkening of a Greenland glacier. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 89, 402–414, doi: 10.1111/1574-6941.12351.
- Lutz, S., Anesio, A. M., Field, K. and Benning, L. G., 2015, Integrated 'Omics', Targeted Metabolite and Single-cell Analyses of Arctic Snow Algae Functionality and Adaptability. *Front. Microbiol.*, 6, 1323, doi: 10.3389/fmicb.2015.01323.
- Marshall, S. and Oglesby, R. J., 1994, An improved snow hydrology for GCMs. Part1: Snow cover fraction, albedo, grain size, and age. *Clim. Dyn.*, 10, 21–37.
- Marshall, W. A. and Chalmers, M. O., 1997, Airborne dispersal of Antarctic terrestrial algae and cyanobacteria. *Ecography*, 20, 585–594, doi: 10.1111/j.1600-0587.1997.tb00427.x.
- Martins, I., Oliveira, J. M., Flindt, M. R. and Marques, J. C., 1999, The effect of salinity on the growth rate of the macroalgae *Enteromorpha intestinalis* (Chlorophyta) in the Mondego Estuary (West Portugal). *Acta. Oecol.*, 20, 259–266.
- Matsuzaki, R., Hara, Y. and Nozaki, H., 2014, A taxonomic study of snow *Chloromonas* species (Volvocales, Chlorophyceae) based on light and electron microscopy and molecular analysis of cultured material. *Phycologia*, 53, 293–304, doi: 10.2216/14-3.1.
- McKindsey, C. W., Thetmeyer, H., Landry, T. and Silvert, W., 2006, Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management, *Aquaculture*. 261, 451–462.
- Mernild, S.H., Liston, G.E., Hiemstra, C.A. and Christensen, J.H., 2010, Greenland ice sheet surface mass-balance modeling in a 131-yr perspective, 1950-2080. *J. Hydrometeorol*, 11, 3–25.

- Miyazaki, Y., Kondo, Y., Han, S., Koike, M., Kodama, D., Komazaki, Y., Tanimoto, H. and Matsueda, H., 2007, Chemical characteristics of water-soluble organic carbon in the Asian outflow. *J. Geophys. Res.*, 112, D22S30, doi:10.1029/2007JD009116.
- Müller, T., Leya, T. and Fuhr, G., 2001, Persistent Snow Algal Fields in Spitsbergen: Field Observations and a Hypothesis about the Annual Cell Circulation. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 33, 42–51, doi: 10.2307/1552276.
- Muramoto, K., Kato, S., Shitara, T., Hara, Y. and Nozaki, H., 2008, Morphological and genetic variation in the cosmopolitan snow alga *Chloromonas nivalis* (Volvocales, Chlorophyta) from Japanese Mountainous Area. *Cytologia*, 73, 91–96, doi: 10.1508/cytologia.73.91.
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J. and Shimada, R., 2014, Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 107–114, doi:10.5331/bgr.32.107.
- Nedbalová, L., Kociánová, M. and Lukavský, J., 2008, Ecology of snow algae in the Giant Mts. *Opera Corcontica*, 45, 59–68.
- Niwano, M., Aoki, T., Kuchiki, K., Hosaka, M. and Kodama, Y., 2012, Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for Climate studies: Model validation using meteorological and snow Impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, 117, F03008, doi: 10.1029/2011JF002239.
- Niwano, M., Aoki, T., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Kuchiki, K. and Motoyama, H., 2015, Numerical simulation of extreme snowmelt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012. *Cryosphere*, 9, 971–988.
- Ohmura, A., 1987, New temperature distribution maps for Greenland. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 23, 1–45.
- 大沼友貴彦, 2013, 日本の融雪期における雪氷藻類の繁殖に関わる積雪の物理・化学的要因. 修士論文, 千葉大学.

- Painter, T. H., Duval, B., Thomas, W. H., Mendez, M., Heintzelman, S. and Dozier, J., 2001, Detection and quantification of snow algae with an airborne imaging spectrometer. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67(11), 5267–5272.
- Pogson, L., Tremblay, B., Lavoie, D., Michel, C. and Vancoppenolle, M., 2011, Development and validation of a one-dimensional snow–ice algae model against observations in resolute passage, Canadian Arctic Archipelago. *J. Geophys. Res.*, 116, C04010, doi: 10.1029/2010JC006119.
- Pollock, R., 1970, What colors the mountain snow? *Sierra Club Bull.*, 55, 18–20.
- Remias, D., Lütz-Meindl, U., Lütz, C., 2005, Photosynthesis, pigments and ultrastructure of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis*. *Eur. J. Phycol.*, 40 (3), 259–268.
- Remias, D., Albert, A. and Lütz, C., 2010a, Effects of realistically simulated, elevated UV irradiation on photosynthesis and pigment composition of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis* and the arctic soil alga *Tetracystis* sp. (Chlorophyceae). *Photosynthetica*, 48, 302–312.
- Remias, D., Karsten, U., Lütz, C. and Leya, T., 2010b, Physiological and morphological processes in the Alpine snow alga *Chloromonas nivalis* (Chlorophyceae) during cyst formation. *Protoplasma*, 243, 73–86, doi: 10.1007/s00709-010-0123-y.
- Remias, D., 2012, Cell structure and physiology of alpine snow and ice algae, *In* Lütz, C. (Editor) *Plants in alpine regions, Cell physiology of adaption and survival strategies*. Springer Wien, 202, 175-186, doi: 10.1007/978-3-7091-0136-0_13.
- Reynolds, J.H., Middlebrooks, E. J., Porcella, D. B. and Grenney, W. J., 1975, Effects of temperature on growth constants of *Selenastrum capricornutum*. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 47, 2420–36.
- Rignot, E., Box, J. E., Burgess, E. and Hanna, E., 2008, Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20502, doi:

10.1029/2008gl035417.

- Segawa, T., Miyamoto, K., Ushida, K., Agata, K., Okada, N. and Koshima, S., 2005, Seasonal Change in Bacterial Flora and Biomass in Mountain Snow from the Tateyama Mountains, Japan, Analyzed by 16S rRNA Gene Sequencing and Real-Time PCR. *App. Environ. Microbiol.*, 71 (1), 123–130. doi:10.1128/AEM.71.1.123–130.
- Spijkerman, E., Wacker, A., Weithoff, G. and Leya, T., 2012, Elemental and fatty acid composition of snow algae in Arctic habitats. *Front. Microbiol*, 3, 380, doi: 10.3389/fmicb.2012.00380.
- Singer, G. A., Fasching, C., Wilhelm, L., Niggemann, J., Steier, P., Dittmar, T. and Battin, T. J., 2012, Biogeochemically diverse organic matter in Alpine glaciers and its downstream fate. *Nature Geosci.*, 5, 710–4.
- Steffen, K., Clark, P. U., Cogley, J. G., Holland, D., Marshall, S., Rignot, E. and Thomas R., 2008, Rapid changes in glaciers and ice sheets and their impacts on sea level, in *Abrupt Climate Change: A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. U.S. Geol. Surv., Boulder, Colo., 60–142,
- Steffensen, J. P., 1997, The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climate periods. *J. Geophys. Res.*, 102, 26755–26763, doi: 10.1029/97JC01490.
- Stibal, M., Tranter, M., Telling, J. and Benning, L. G., 2008, Speciation, phase association and potential bioavailability of phosphorus on a Svalbard glacier. *Biogeochemistry*, 90, 1–13, doi:10.1007/s10533-008-9226-3.
- Stocker, T. F. and Coauthors, 2013, IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University

Press.

- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno S., Yamaguchi, S., Matoba, S. and Aoki T., 2014, Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland. *Ann. Glaciol.*, 55, 25–33, doi: 10.3189/2014AoG66A102.
- Sutton, F.A., 1972, The physiology and life histories of selected cryophytes of the Pacific NorthWest. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, 98.
- Takeuchi, N., 2013, Seasonal and altitudinal variations in snow algal communities on an Alaskan glacier (Gulkana glacier in the Alaska range). *Environ. Res. Lett.*, 8, 035002, doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035002.
- Takeuchi, N. and Li, Z., 2008, Characteristics of Surface Dust on Urumqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 40, 744–750. doi: 10.1657/1523-0430(07-094)[TAKEUCHI]2.0.CO;2.
- Takeuchi, N., Dial, R., Kohshima, S., Segawa, T. and Uetake, J., 2006, Spatial distribution and abundance of red snow algae on the Harding Icefield, Alaska derived from a satellite image. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21502, doi: 10.1029/2006GL027819.
- 竹内望, 角川咲江, 武藤恭子, 2011, 伊吹山山頂の残雪表面の雪氷藻類. *雪氷*, 73, 271–279.
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J. and Shimada, R., 2014, Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 85–94, doi:10.5331/bgr.32.85.
- 竹内由香里, 庭野昭二, 村上茂樹, 山野井克己, 遠藤八十一, 小南裕志, 2008, 新潟県十日町市の気象 90 年報 (1918–2007 年). 森林総合研究所報告, 7, 187–244.
- 竹内由香里, 遠藤八十一, 庭野昭二, 村上茂樹, 2009, 十日町における冬期の気象および雪質の調査資料 (7) (2004/05 年–2008/09 年 5 冬期). 森林総合研究所研究報告, 8, 227–277.

- 竹内由香里, 遠藤八十一, 庭野昭二, 村上茂樹, 2014, 十日町における冬期の気象および雪質の調査資料(8) (2009/10年–2013/14年5冬期). 森林総合研究所研究報告, 13, 271–334.
- 田中聡太, 2016, アジアおよび北極域の氷河における雪氷藻類群集の季節変化と経年変動. 博士論文, 千葉大学.
- Thomas, W.H., 1994, Tioga Pass revisited: Interrelationships between snow algae and bacteria. *Proceedings, 62nd Ann. W. Snow Conf., Santa Fe, NM*, 56-62.
- Thomas, W. H. and Duval, B., 1995, Sierra Nevada, California, USA, snow algae: snow albedo changes, algal-bacterial interrelationships, and ultraviolet radiation effects. *Arct. Alp. Res.*, 27, 389–99.
- Thomas, R., Csatho, B., Davis, C., Kim, C., Krabill, W., Manizade, S., McConnell, J., Sonntag, J., 2001, Mass balance of higher-elevation parts of the Greenland ice sheet. *J. Geophys. Res.*, 106, 33707–33716.
- Tittel, J., Bissinger, V., Gaedke, U. and Kamjunke, N., 2005, Inorganic carbon limitation and mixotrophic growth in *Chlamydomonas* from an acidic mining lake. *Protist*, 156, 63–75.
- Torres, A., Bond, T. C., Lehmann, C. M. B., Subramanian, R. and Hadley, O. L., 2014, Measuring organic carbon and black carbon in rainwater: Evaluation of methods. *Aerosol Sci. Technol.*, 48, 238–249, doi:10.1080/02786826.2013.868596.
- Uetake, J., Naganuma, T., Hebsgaard, M. B. and Kanda, H., 2010, Communities of algae and cyanobacteria on glaciers in west Greenland. *Polar Sci.*, 4(1), 71–80, doi:10.1016/j.polar.2010.03.002.
- van As, D., 2011, Warming, glacier melt and surface energy budget from weather station observations in the Melville Bay region of northwest Greenland. *J. Glaciol.*, 57, 208–220, doi:10.3189/002214311796405898.

- van den Broeke, M., Reijmer, C., and van de Wal, R., 2004, Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations. *J. Geophys. Res.*, 109, D09103, doi:10.1029/2003JD004394.
- van den Broeke, M., Reijmer, C., van As, D., and Boot, W., 2006, Daily cycle of the surface energy balance in Antarctica and the influence of clouds. *Int. J. Climatol.*, 26, 1587–1605, doi:10.1002/joc.1323.
- van den Broeke, M. and Coauthors, 2009, Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, 326, 984–986, doi: 10.1126/science.1178176.
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., Le Moigne, P., Martin, E. and Willemet, J. M., 2012, The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geosci. Model Dev.*, 5, 773–791, doi:10.5194/gmd-5-773-2012.
- Warren, S. G., 1982, Optical-properties of snow. *Rev. Geophys.*, 20(1), 67–89.
- Warren, S. G., and Wiscombe, W. J., 1980, A model for the spectral albedo of snow, II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734–2745, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2.
- Warren, S. G. and Wiscombe, W. J., 1985, Dirty snow after nuclear war. *Nature*, 313, 467–470, doi:10.1038/313467a0.
- Weger, H. G., Middlemiss, J. K. and Petterson, C. D., 2002, Ferric chelate reductase activity as affected by the iron-limited growth rate in four species of unicellular green algae (Chlorophyta). *J. Phycol.*, 38, 513–519.
- Weller, G., 1968, Heat-energy transfer through a four-layer system: Air, snow, sea ice, sea water. *J. Geophys. Res.*, 73, 1209–1220.
- Welschmeyer, N. A., 1994, Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and phaeopigments. *Limnol. Oceanogr.*, 39, 1985–1992, doi: 10.4319/lo.1994.39.8.1985.
- Wiscombe, W. J., and Warren, S. G., 1980, A model for the spectral albedo of snow: I.

Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2712–2733, doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<2712:AMFTSA>2.0.CO;2.

Wright, A. P., Wadham, J. L., Siegert, M. J., Luckman, A., Kohler, J. and Nuttall, A. M., 2007, Modeling the refreezing of meltwater as superimposed ice on a high Arctic glacier: A comparison of approaches. *J. Geophys. Res.*, 112, F04016, doi:10.1029/2007JF000818.

Yallop, M.L., Anesio, A.M., Perkins, R.G., Cook, J., Telling, J., Fagan, D., MacFarlane, J., Stibal, M., Barker, G. and Bellas, C., 2012, Photophysiology and albedo-changing potential of the ice algal community on the surface of the Greenland ice sheet. *ISME J.*, 6, 2302–2313, doi: 10.1038/ismej.2012.107.

山本鎔子, 林卓志, 落合正, 福原晴夫, 大高明史, 野原精一, 福井学, 菊地義昭, 尾瀬アカシボ研究グループ, 2006, 尾瀬ヶ原のアカシボ現象に関する研究—赤雪の垂直分布と藻類との関わり—. *陸水学雑誌*, 67 (3), 209-217.

Yamaguchi, S., Motoyoshi, H., Tanikawa, T., Aoki, T., Niwano, M., Takeuchi, Y. and Endo, Y., 2014, Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on near-infrared reflectance around 900-nm wavelength to set snow zones in Japan. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 55-64, doi: 10.5331/bgr.32.55.

山崎剛, 1998, 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル. *雪氷*, 60, 131–141, doi: 10.5331/seppyo.60.131.

Yamazaki, T., 2001, A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in eastern Siberia. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 79, 1107–1118, doi: 10.2151/jmsj.79.1107.

表 1-1. 2011 年十日町試験地の積雪表面における観測結果.

雪質, 密度, 含水率, EC, pH, 雪氷藻類の細胞濃度, クロロフィル a 濃度の結果を示している. 日付欄の*は雪氷藻類がはじめて積雪表面に確認された日を示している.

日付	雪質	密度 (kg m^{-3})	含水率 (%)	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	細胞濃度 (cells mL^{-1})	クロロフィル a 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$)
1/5	新雪	172	1.4	17.5 ± 4.4	6.0 ± 0.7	0.0 ± 0.0	1.5 ± 0.3
1/14	新雪	32	0.0	7.6 ± 0.1	5.8 ± 0.3	0.0 ± 0.0	2.7 ± 0.8
1/25	新雪	63	0.0	29.0 ± 0.9	5.0 ± 0.3	0.0 ± 0.0	2.2 ± 0.1
*2/4	ざらめ	276	1.0	13.2 ± 1.9	5.5 ± 0.2	0.7 ± 0.6	0.6 ± 0.1
2/14	新雪	127	0.0	14.8 ± 0.5	5.4 ± 0.1	0.0 ± 0.0	1.1 ± 0.0
2/25	ざらめ	403	3.8	4.6 ± 0.2	6.7 ± 0.2	1.0 ± 0.0	1.2 ± 0.3
3/7	ざらめ	307	4.2	10.6 ± 0.9	5.9 ± 0.2	0.4 ± 0.6	0.9 ± 0.1
3/16	新雪	140	0.4	23.7 ± 4.3	5.6 ± 0.1	2.9 ± 2.7	2.7 ± 0.7
3/25	ざらめ	388	3.2	4.4 ± 0.2	6.1 ± 0.2	6.6 ± 6.3	6.0 ± 1.3
4/5	ざらめ	414	3.9	3.9 ± 0.1	5.8 ± 0.4	3.4 ± 1.4	6.1 ± 1.1
4/15	ざらめ	479	3.3	4.7 ± 0.8	6.3 ± 0.3	263 ± 270	7.2 ± 2.3
4/26	ざらめ	490	7.9	5.1 ± 1.5	6.1 ± 0.2	2059 ± 1739	19.6 ± 9.8

表 1-2. 2013 年十日町試験地の積雪表面における観測結果.

雪質, 密度, 含水率, EC, pH, 雪氷藻類の細胞濃度, クロロフィル a 濃度の結果を示している. 日付欄の*は雪氷藻類がはじめて積雪表面に確認された日を示している.

日付	雪質	密度 (kg m^{-3})	含水率 (%)	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	細胞濃度 (cells mL^{-1})	クロロフィル a 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$)
1/25	ざらめ	354	1.5	17.9 ± 6.9	5.7 ± 0.6	0.0 ± 0.0	0.9 ± 0.4
2/4	新雪	171	1.5	72.1 ± 29.5	4.7 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.1
*2/15	ざらめ	329	1.2	6.5 ± 0.3	6.6 ± 0.3	0.3 ± 0.6	0.8 ± 0.3
2/25	新雪	59	0.0	64.1 ± 12.6	5.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.1
3/5	新雪	73	0.2	60.5 ± 1.5	4.5 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.5 ± 0.1
3/15	ざらめ	407	0.0	7.5 ± 0.5	6.5 ± 0.2	0.0 ± 0.0	7.9 ± 1.8
3/26	新雪	70	0.8	56.0 ± 5.9	4.8 ± 0.3	0.0 ± 0.0	1.4 ± 1.1
4/5	ざらめ	470	3.5	11.8 ± 14.0	6.2 ± 0.1	2.8 ± 1.0	11.6 ± 6.2
4/16	ざらめ	468	8.4	2.5 ± 0.5	6.7 ± 0.2	8.1 ± 6.4	11.1 ± 3.2

表 1-3. 2014 年十日町試験地の積雪表面における観測結果.

雪質, 密度, 含水率, EC, pH, 雪氷藻類の細胞濃度, クロロフィル a 濃度の結果を示している. 日付欄の*は雪氷藻類がはじめて積雪表面に確認された日を示している.

日付	雪質	密度 (kg m ⁻³)	含水率 (%)	EC (μS cm ⁻¹)	pH	細胞濃度 (cells mL ⁻¹)	クロロフィル a 濃度 (μg L ⁻¹)
1/6	新雪	84	0.0	no data	no data	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.1
1/15	新雪	62	0.0	no data	no data	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
1/24	ざらめ	145	0.0	15.8 ± 4.0	5.2 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
2/5	新雪	58	0.0	no data	no data	0.0 ± 0.0	0.4 ± 0.7
2/14	新雪	291	0.0	2.5 ± 0.7	6.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.2
*2/25	ざらめ	348	0.8	1.9 ± 0.5	6.1 ± 0.1	4.5 ± 4.4	0.5 ± 0.1
3/5	ざらめ	365	4.9	0.6 ± 0.3	6.7 ± 0.2	4.8 ± 3.3	1.7 ± 0.4
3/17	ざらめ	389	1.4	1.1 ± 0.4	6.6 ± 0.8	8.6 ± 7.9	10.6 ± 1.7
3/25	ざらめ	393	3.9	1.3 ± 0.8	6.9 ± 0.1	4.8 ± 3.4	5.9 ± 1.0
4/4	ざらめ	513	5.4	0.6 ± 0.1	6.5 ± 0.1	459 ± 960	13.8 ± 7.5

表 1-4. 2015 年十日町試験地の積雪表面における観測結果.

雪質, 密度, 含水率, EC, pH, 雪氷藻類の細胞濃度, クロロフィル a 濃度の結果を示している. 日付欄の*は雪氷藻類がはじめて積雪表面に確認された日を示している.

日付	雪質	密度 (kg m^{-3})	含水率 (%)	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	細胞濃度 (cells mL^{-1})	クロロフィル a 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$)
1/5	ざらめ	304	4.8	16.9 ± 6.8	5.3 ± 0.4	0.0 ± 0.0	1.2 ± 0.2
1/15	ざらめ	232	0.0	19.3 ± 6.6	5.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
1/26	ざらめ	361	1.1	14.3 ± 8.1	5.8 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.5 ± 0.2
2/5	ざらめ	225	0.0	38.5 ± 2.0	5.0 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
2/16	新雪	304	0.5	103.6 ± 60.6	5.3 ± 0.2	0.0 ± 0.0	6.3 ± 1.7
*2/25	ざらめ	358	4.0	3.6 ± 0.5	6.3 ± 0.3	1.3 ± 1.5	3.7 ± 0.9
3/5	新雪	91	0.5	no data	no data	0.3 ± 0.6	0.0 ± 0.0
3/16	ざらめ	366	5.2	5.3 ± 0.4	6.2 ± 0.4	0.7 ± 0.6	0.9 ± 0.3
3/25	ざらめ	296	4.2	8.8 ± 1.4	6.0 ± 0.1	8.3 ± 7.6	0.6 ± 1.0
4/6	ざらめ	516	5.6	4.6 ± 0.7	5.6 ± 0.1	85 ± 123	13.3 ± 5.4
4/15	ざらめ	544	6.9	3.9 ± 1.3	6.0 ± 0.0	31 ± 11	9.2 ± 10.4
4/24	ざらめ	444	5.7	2.7 ± 0.4	6.0 ± 0.1	50 ± 44	12.8 ± 3.4

表 1-5. 2011 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.
 期間は雪氷藻類が積雪表面に出現してから細胞濃度の観測値が最大となった日までである.

日付	細胞濃度の 観測値 (cells mL ⁻¹)	細胞濃度の モデル計算値 (cells mL ⁻¹)
2/4	0.7	0.2
2/14	0	0.3
2/25	1.0	0.7
3/7	0.4	1.3
3/16	2.9	2.9
3/25	6.6	6.7
4/5	3.4	20
4/15	263	106
4/26	2059	1093

表 1-6. 2013 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.
 期間は雪氷藻類が積雪表面に出現してから細胞濃度の観測値が最大となった日までである.

日付	細胞濃度の 観測値 (cells mL ⁻¹)	細胞濃度の モデル計算値 (cells mL ⁻¹)
2/15	0.3	0.2
2/25	0	0.2
3/5	0	0.3
3/15	0	1.0
3/26	0	5.0
4/5	2.8	26
4/16	8.1	190

表 1-7. 2014 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.
 期間は雪氷藻類が積雪表面に出現してから細胞濃度の観測値が最大となった日までである.

日付	細胞濃度の 観測値 (cells mL ⁻¹)	細胞濃度の モデル計算値 (cells mL ⁻¹)
2/25	4.5	0.2
3/5	4.8	0.4
3/17	8.6	0.8
3/25	4.8	2.4
4/4	459	18

表 1-8. 2015 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.
 期間は雪氷藻類が積雪表面に出現してから細胞濃度の観測値が最大となった日までである.

日付	細胞濃度の 観測値 (cells mL ⁻¹)	細胞濃度の モデル計算値 (cells mL ⁻¹)
2/25	1.3	0.2
3/5	0.3	0.4
3/16	0.7	1.1
3/25	8.3	4.1
4/6	85	35
4/15	31	185
4/24	50	1209

表 2-1. Site-A における積雪表面の物理特性.

観測日	雪質	粒径 (mm)	密度 (kg m ⁻³)	雪温 (°C)	含水率 (%)	表面レベルの 低下量 (cm)
6/11	新雪	0.5 ± 0.1	198 ± 1	-0.1	no data	0
6/20	新雪	0.1 ± 0.1	188 ± 11	-0.1	no data	10
6/28	ざらめ	1.1 ± 0.5	418 ± 25	0	6.0 ± 1.2	40
7/5	ざらめ	0.7 ± 0.2	494 ± 31	0	5.0 ± 1.0	75
7/10	ざらめ	no data	no data	0	no data	99
7/14	ざらめ	1.0 ± 0.6	498 ± 24	0	5.4 ± 0.9	115
7/20	ざらめ	no data	no data	0	no data	145
7/27	ざらめ	0.9 ± 0.3	524 ± 10	0	4.7 ± 0.8	168
8/2	ざらめ	0.9 ± 0.5	544 ± 12	0	4.7 ± 0.7	183

表 2-2. Site-B における積雪表面の物理特性.

観測日	雪質	粒径 (mm)	密度 (kg m ⁻³)	雪温 (°C)	含水率 (%)	表面レベルの 低下量 (cm)
6/17	新雪	0.3 ± 0.1	386 ± 17	-0.2	no data	0
6/25	ざらめ	0.6 ± 0.4	484 ± 39	-0.1	no data	7
6/30	ざらめ	0.9 ± 0.3	351 ± 9	0	6.3 ± 0.5	32
7/9	ざらめ	0.7 ± 0.2	471 ± 35	0	4.8 ± 0.7	62
7/16	ざらめ	0.7 ± 0.2	348 ± 62	-0.1	4.9 ± 0.3	81
7/22	ざらめ	0.7 ± 0.3	522 ± 40	0	4.8 ± 0.7	98
7/28	ざらめ	0.6 ± 0.4	369 ± 12	0	3.8 ± 1.2	108
8/3	ざらめ	0.9 ± 0.2	489 ± 39	0	4.8 ± 1.1	123

表 2-3. Site-A における積雪表面の EC, pH, 不純物濃度.

観測日	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	鉍物粒子 (mg m^{-2})	BC (mg m^{-2})	OC (mg m^{-2})
6/11	2.6 ± 0.1	5.7 ± 0.6	no data	no data	no data
6/20	4.0 ± 0.2	6.2 ± 0.0	no data	no data	no data
6/28	3.0 ± 0.3	6.2 ± 0.1	1.4×10^3	no data	no data
7/5	2.4 ± 0.3	6.2 ± 0.3	$2.1 \pm 0.9 \times 10^3$	no data	no data
7/10	2.3 ± 0.2	6.1 ± 0.1	$2.1 \pm 1.9 \times 10^3$	no data	no data
7/14	2.9 ± 0.3	5.9 ± 0.2	$2.2 \pm 1.6 \times 10^3$	no data	no data
7/20	1.5 ± 1.1	6.0 ± 0.2	$3.9 \pm 2.4 \times 10^3$	no data	no data
7/27	2.9 ± 0.4	5.5 ± 0.1	$6.5 \pm 1.3 \times 10^3$	no data	no data
8/2	2.5 ± 0.1	5.5 ± 0.1	$6.6 \pm 1.9 \times 10^3$	no data	no data

表 2-4. Site-B における積雪表面の EC, pH, 不純物濃度.

観測日	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	鉱物粒子 (mg m^{-2})	BC (mg m^{-2})	OC (mg m^{-2})
6/17	0.4	5.8	3.2	5.2×10^{-3}	8.1×10^{-2}
6/25	2.6 ± 0.2	5.8 ± 0.6	2.6	2.8×10^{-2}	3.5×10^{-1}
6/30	2.6 ± 0.0	5.8 ± 0.2	7.1	$3.7 \pm 1.3 \times 10^{-2}$	$3.1 \pm 0.7 \times 10^{-1}$
7/9	2.1 ± 0.1	6.1 ± 0.1	$1.4 \pm 0.2 \times 10^2$	$1.0 \pm 4.1 \times 10^{-2}$	$5.1 \pm 0.5 \times 10^{-1}$
7/16	3.2 ± 0.4	6.1 ± 0.4	$1.5 \pm 0.3 \times 10^2$	$1.8 \pm 1.9 \times 10^{-1}$	$6.9 \pm 1.4 \times 10^{-1}$
7/22	2.6 ± 0.4	5.8 ± 0.0	$3.9 \pm 0.2 \times 10^2$	$8.0 \pm 7.3 \times 10^{-3}$	$8.2 \pm 1.4 \times 10^{-1}$
7/28	3.0 ± 0.8	5.9 ± 0.1	$6.6 \pm 1.6 \times 10^1$	$2.4 \pm 0.2 \times 10^{-4}$	$6.0 \pm 7.0 \times 10^{-1}$
8/3	2.5 ± 0.0	5.3 ± 0.1	$7.6 \pm 3.0 \times 10^2$	$3.4 \pm 5.8 \times 10^{-2}$	3.0 ± 0.4

表 2-5. Site-B における表面下の積雪層の物理特性

観測日	雪質	粒径 (mm)	密度 (kg m ⁻³)	雪温 (°C)	含水率 (%)
6/17	ざらめ	0.5 ± 0.1	379 ± 10	-0.1	no data
6/25	ざらめ	0.8 ± 0.3	420 ± 36	-0.1	no data
6/30	ざらめ	0.4 ± 0.1	452 ± 22	0	6.9 ± 0.5
7/9	ざらめ	0.7 ± 0.3	507 ± 54	0	6.8 ± 0.9
7/16	ざらめ	1.0 ± 0.4	519 ± 31	-0.1	5.1 ± 0.7
7/22	ざらめ	0.8 ± 0.2	486 ± 27	0	3.8 ± 0.4
7/28	ざらめ	1.1 ± 0.5	459 ± 45	0	5.0 ± 1.9
8/3	ざらめ	1.1 ± 0.4	510 ± 32	0	4.6 ± 1.9

表 2-6. Site-B における表面下の積雪層の不純物濃度.

観測日	鉍物粒子 (mg m ⁻²)	BC (mg m ⁻²)	OC (mg m ⁻²)
6/17	4.5×10 ⁻¹	2.1×10 ⁻³	3.2×10 ⁻²
6/25	2.7×10 ⁻¹	4.4×10 ⁻³	5.5×10 ⁻²
6/30	1.0	7.8 ± 2.9×10 ⁻³	6.5 ± 1.6×10 ⁻²
7/9	1.5 ± 0.2×10 ¹	2.5 ± 1.1×10 ⁻²	1.3 ± 0.1×10 ⁻¹
7/16	2.1 ± 0.5×10 ¹	3.1 ± 3.3×10 ⁻²	1.1 ± 0.3×10 ⁻²
7/22	3.7 ± 0.2×10 ¹	1.7 ± 1.6×10 ⁻³	1.8 ± 0.2×10 ⁻¹
7/28	7.1 ± 4.8	5.4 ± 1.2×10 ⁻⁵	1.3 ± 0.1×10 ⁻¹
8/3	7.5 ± 2.9×10 ¹	3.7 ± 6.3×10 ⁻³	3.4 ± 0.3×10 ⁻¹

表 2-7. Site-A の積雪表面における細胞濃度とクロロフィル a 濃度.

観測日の*印は *Chloromonas sp.* が初めて確認された日を示す.

観測日	<i>Chloromonas sp.</i> の細胞濃度 (cells m ⁻²)	小型球形緑藻 の細胞濃度 (cells m ⁻²)	<i>Chr.</i> <i>cyanobacterium</i> の細胞濃度 (cells m ⁻²)	クロロフィル a 濃度 (μg m ⁻²)
6/11	0	$2.0 \times 10^3 \pm 3.2 \times 10^{-13}$	$9.9 \pm 14.0 \times 10^2$	0
6/20	0	$9.4 \pm 13.3 \times 10^2$	$9.4 \pm 13.3 \times 10^2$	0
*6/28	$3.1 \pm 5.4 \times 10^3$	$7.3 \pm 6.5 \times 10^3$	$1.7 \pm 0.9 \times 10^4$	0
7/5	$1.3 \pm 1.3 \times 10^4$	$2.6 \pm 3.4 \times 10^4$	$1.2 \pm 1.1 \times 10^5$	0.7 ± 1.2
7/10	$7.8 \pm 4.6 \times 10^4$	$4.0 \pm 1.7 \times 10^5$	$4.8 \pm 1.9 \times 10^5$	1.7 ± 1.0
7/14	$3.4 \pm 4.2 \times 10^4$	$3.0 \pm 3.1 \times 10^5$	$4.8 \pm 4.6 \times 10^5$	1.3 ± 0.9
7/20	$2.2 \pm 2.4 \times 10^7$	$1.6 \pm 1.4 \times 10^7$	$1.7 \pm 2.3 \times 10^7$	27 ± 24
7/27	$1.0 \pm 0.7 \times 10^7$	$9.3 \pm 3.8 \times 10^6$	$2.6 \pm 1.8 \times 10^7$	71 ± 18
8/2	$3.5 \pm 2.0 \times 10^7$	$2.6 \pm 1.4 \times 10^7$	$2.5 \pm 1.0 \times 10^7$	6.6 ± 1.7

表 2-8. Site-B の積雪表面における細胞濃度とクロロフィル a 濃度.

観測日の*印は *Chloromonas* sp. が初めて確認された日を示す.

観測日	<i>Chloromonas</i> sp. の細胞濃度 (cells m ⁻²)	小型球形緑藻 の細胞濃度 (cells m ⁻²)	<i>Chr.</i> <i>cyanobacterium</i> の細胞濃度 (cells m ⁻²)	クロロフィル a 濃度 (μg m ⁻²)
6/17	0	0	0	0
6/25	0	4.8 ± 6.8×10 ³	7.3 ± 10.3×10 ³	0
*6/30	7.4 ± 1.1	5.3 ± 7.4×10 ³	2.6 ± 3.6	0
7/9	0	9.6 ± 14.2×10 ³	4.8 ± 4.4×10 ⁴	0
7/16	0	4.4 ± 1.6×10 ⁴	1.8 ± 0.9×10 ³	0
7/22	9.6 ± 2.2×10 ⁴	2.7 ± 1.3×10 ⁵	6.4 ± 2.1×10 ³	3.7 ± 0.7
7/28	9.8 ± 8.3×10 ⁴	5.7 ± 6.5×10 ⁴	1.4 ± 0.7×10 ³	0.3 ± 0.5
8/3	5.0 ± 1.7×10 ⁵	1.6 ± 0.5×10 ⁵	9.7 ± 2.8×10 ³	10.7 ± 0.6

表 2-9. Site-A と Site-B における観測値とモデルの近似から得られたパラメータ.
環境収容力は観測値から仮定し, 増加率と環境収容力は回帰によって得られた.

観測地点	初期細胞濃度 (cells m ⁻²)	増加率 (day ⁻¹)	環境収容力 (cells m ⁻²)
Site-A	6.9×10^2	0.42	3.5×10^7
Site-B	6.3	0.39	3.5×10^7

表 2-10. Site-A と Site-B におけるモデルから得られた初期細胞濃度と
観測された鉍物粒子の重量.

観測地点	日付	初期細胞濃度 (cells m ⁻²)	鉍物粒子の重量 (g m ⁻²)	鉍物粒子 1 g m ⁻² あたりの 初期細胞濃度 (cells m ⁻²)
Site-A (544 m)	6/28	6.9 × 10 ²	1.4	493
Site-B (941 m)	6/30	6.3	0.01	630

表 2-11. 先行研究によって明らかになっている藻類の増加率.

表中の値は, すべて細胞の培養時に求められた結果である.

増加率に幅がある結果は, いくつか異なる条件で藻類を培養した結果を反映している.

種	水温 (°C)	増加率 (day ⁻¹)	参考文献
<i>Ankistrodesmus braunii</i>	25	1.6	Reynolds et al., 1975
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	25	2.2	Reynolds et al., 1975
<i>Chlorella vulgaros</i>	25	2.0	Reynolds et al., 1975
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	28	0.01–0.19	Martins et al., 1999
<i>Chlorococcum macrostigmatum</i>	20	0.1–1.6	Weger et al., 2002
<i>Stichococcus bacillaris</i>	20	0.1–1.2	Weger et al., 2002
<i>Chlamydomonas acidophila</i>	20	0.04–1.63	Tittel et al., 2005
<i>Chloromonas nivalis</i>	18	0.6	Leya et al., 2009
<i>Chlorococcum</i> sp.	18	0.2	Leya et al., 2009
<i>Chlorococcum</i> sp.	18	0.4	Leya et al., 2009
<i>Chlamydocapsa</i> sp.	18	0.5	Leya et al., 2009

表 2-12. 先行研究によって明らかになっている藻類の環境収容力.
 表中の値は, すべて観測結果より得られた観測期間中の細胞濃度の最大値を藻類の
 環境収容力と仮定したものである.

観測地点	種	環境収容力 (cells m ⁻²)	参考文献
Oregon	<i>Chlamydomonas nivalis</i>	2.3×10^9	Sutton, 1972
Washington	<i>Chloromonas brevispina</i>	5.0×10^9	Hoham et al., 1979
Antarctica	<i>Mesotaenium berggrenii</i>	1.0×10^9	Ling and Seppelt, 1990
Antarctica	<i>Chloromonas rubroleosa</i>	2.0×10^9	Ling and Seppelt, 1993
California	<i>Trochiscia americana</i>	6.3×10^8	Thomas, 1994
Svalbard	<i>Chloromonas alpine</i>	7.5×10^9	Spijkerman et al., 2012
Alaska	<i>Chlyamidomonas nivalis</i>	5.1×10^7	Takeuchi, 2013
SE-Greenland	<i>Chlyamidomonas nivalis</i>	5.0×10^8	Lutz et al., 2014

表 3-1. アルベド物理モデルで用いた不純物の波長毎の吸光係数.
 表中の値は, Aoki et al. (2011) で定められた値である.

波長 (nm)	Dust ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	BC ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	OC ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
200-400	0.15	15.06	0.23
400-475	0.09	13.29	0.18
475-550	0.06	11.78	0.16
550-625	0.04	10.39	0.15
625-700	0.04	9.20	0.15
700-950	0.03	7.36	0.16
950-1125	0.02	5.42	0.20
1125-1400	0.02	4.28	0.19
1400-1950	0.02	3.01	0.15
1950-3000	0.03	2.11	0.25

表 3-2. Pit-1 と Pit-2 の積雪 A 層（深さ 0-2 cm）における積雪物理量の観測値.
 積雪全層の厚さは、積雪表面から氷河の氷面までの厚さを意味している.

ピット	水当量 (Kg m ⁻²)	粒径 (mm)	雪温 (°C)	積雪全層の厚さ (cm)
Pit-1	10.2 ± 0.7	0.9 ± 0.2	0	19
Pit-2	9.1 ± 0.1	1.0 ± 0.4	0	50

表 3-3. Pit-1 と Pit-2 の積雪 B 層（深さ 2-10 cm）における積雪物理量の観測値.

ピット	水当量 (Kg m ⁻²)	粒径 (mm)	雪温 (°C)
Pit-1	40.8 ± 2.6	1.1 ± 0.4	0
Pit-2	36.6 ± 2.2	1.4 ± 0.6	0

表 3-4. Pit-1 と Pit-2 の積雪 A 層 (深さ 0-2 cm) における
不純物濃度, 反射率, アルベドの観測値.

ピット	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	細胞体積 バイオマス (mL L ⁻¹)	反射率	アルベド
Pit-1	$7.6 \pm 3.0 \times 10^2$	$3.4 \pm 5.8 \times 10^{-2}$	$2.5 \pm 0.8 \times 10^{-3}$	0.846	0.602
Pit-2	$1.5 \pm 0.1 \times 10^3$	no data	$4.3 \pm 1.9 \times 10^{-2}$	0.700	0.498

表 3-5. Pit-1 と Pit-2 の積雪 B 層（深さ 2-10 cm）における Dust, BC の観測値.

ピット	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)
Pit-1	1.4×10 ¹	1.8 ± 0.9×10 ⁻²
Pit-2	7.5	no data

表 3-6. アルベド物理モデルに入力した気象データと積雪全層の厚さ。
 太陽天頂角, 太陽方位角, 直達散乱比は, 気象測器が観測した気象データから求めた計算
 値である。下向き短波放射量と積雪全層の厚さは観測値である。
 全て 8 月 3 日 12:00 LT の観測値あるいは同時刻の観測値を基に計算した値である。

サンプル	太陽天頂角 (degree)	太陽方位角 (degree)	直達散乱比	下向き 短波放射量 (W m ⁻²)	積雪全層の 厚さ (cm)
Pit-1	63	137	1.00	47	19
Pit-2	63	137	1.00	47	50

表 3-7. アルベド物理モデルに入力した Pit-1 の積雪層ごとの物理量と不純物濃度.

表の積雪層は, 積雪表面からの深さを示している.

表のデータは, 全て Pit-1 の観測値である.

OC 濃度 (0-2 cm) は, 細胞体積バイオマスの観測値を変換して求めた値である.

OC 濃度 (2-5, 5-10 cm) は, OC 濃度の観測値である.

積雪層	水当量 (kg m ⁻²)	粒径 (mm)	雪温 (°C)	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	OC (mg L ⁻¹)
0-2 cm	10.2	0.9	0	8.4×10 ¹	3.7×10 ⁻³	3.3×10 ⁻¹
2-5 cm	15.3	1.1	0	1.3×10 ¹	6.6×10 ⁻³	7.6×10 ⁻²
5-10 cm	25.5	1.1	0	1.3×10 ¹	1.1×10 ⁻²	1.3×10 ⁻¹

表 3-8. アルベド物理モデルに入力した Pit-2 の積雪層ごとの物理量と不純物濃度.

表の積雪層は, 積雪表面からの深さを示している.

表中の*は, Pit-1 の観測値であることを示している.

表中の*以外は, Pit-2 の観測値である.

OC 濃度 (0-2 cm) は, Pit-2 の細胞体積バイオマスの観測値を変換して求めた値である.

積雪層	水当量 (kg m ⁻²)	粒径 (mm)	雪温 (°C)	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	OC (mg L ⁻¹)
0-2 cm	9.1	1.0	0	1.5×10 ²	*3.7×10 ⁻³	4.4
2-5 cm	13.7	1.4	0	5.8	*6.6×10 ⁻³	*7.6×10 ⁻²
5-10 cm	22.9	1.4	0	5.8	*1.1×10 ⁻²	*1.3×10 ⁻¹

表 3-9. PBSAM により求めたアルベドの計算値と観測値.

表中のアルベドは、観測値と吸光効果を考慮した不純物のパターンごとの計算値を表している.

サンプル	観測値	不純物無し	Dust	Dust, BC	Dust, BC, OC
Pit-1	0.602	0.731	0.621	0.619	0.618
Pit-2	0.498	0.708	0.566	0.564	0.554

表 3-10. OC の吸光係数を調節して求めたアルベドのモデル計算値.

吸光係数は 400-700 nm の波長帯の値を倍率調節した.

求めたアルベドは, Dust, BC, OC の吸光効果を考慮して計算した値である.

表中の*は, アルベドの観測値と計算値が最も近い値となったときの吸光係数の倍率を示している.

吸光係数	Pit-1	Pit-2
観測値	0.602	0.498
1 倍	0.618	0.554
2 倍	0.618	0.548
3 倍	0.617	0.543
4 倍	0.617	0.538
5 倍	0.616	0.533
6 倍	0.616	0.528
7 倍	0.615	0.523
8 倍	0.615	0.518
9 倍	0.614	0.514
10 倍	0.614	0.509
11 倍	0.613	0.505
12 倍	0.613	0.502
*13 倍	0.612	0.498
14 倍	0.612	0.495
15 倍	0.611	0.492

表 3-11. アルベド物理モデルに入力した気象と積雪全層の厚さのデータ。
 太陽天頂角, 太陽方位角, 直達散乱比は, Site-B の気象観測値から求めた計算値である。
 下向き短波放射量と積雪全層の厚さは, Site-B の観測値である。
 全て Site-B (Pit-1) の 12:00 LT の観測値あるいは同時刻の観測値から計算された値である。

計算日	太陽天頂角 (degree)	太陽方位角 (degree)	直達散乱比	下向き 短波放射量 (W m ⁻²)	積雪全層 の厚さ (cm)
6/17	57	137	0.23	356	142
6/25	57	137	0.85	239	135
6/30	57	137	0.41	335	110
7/9	58	136	0.44	336	80
7/16	59	136	0.61	344	61
7/22	60	136	1.00	88	44
7/28	62	137	0.89	110	34
8/3	63	137	1.00	47	19

表 3-12. アルベド物理モデルに入力した 1 層目（深さ 0-2 cm）の積雪物理量と
不純物濃度のデータ.

表中の OC 濃度以外の値は, Site-B (Pit-1) の観測値である.

OC 濃度は, 繁殖モデルが計算した藻類濃度を基に求めた計算値である.

粒径の値は半径で表している.

計算日	粒径 (mm)	水当量 (kg m ⁻²)	雪温 (°C)	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	OC (mg L ⁻¹)
6/17	0.3	7.7	-0.2	0.5	2.1×10 ⁻³	4.4×10 ⁻²
6/25	0.6	9.7	-0.1	0.3	4.4×10 ⁻³	3.5×10 ⁻²
6/30	0.9	7.0	0.0	1.0	7.8×10 ⁻³	4.9×10 ⁻²
7/9	0.7	9.4	0.0	15	2.5×10 ⁻²	3.6×10 ⁻¹
7/16	0.7	7.0	-0.1	21	3.1×10 ⁻²	5.0×10 ⁻²
7/22	0.7	10.4	0.0	37	1.7×10 ⁻³	3.8×10 ⁻¹
7/28	0.6	7.4	0.0	7.1	5.4×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻¹
8/3	0.9	10.2	0.0	84	3.7×10 ⁻³	4.6×10 ⁻¹

表 3-13. アルベド物理モデルに入力した 2 層目（深さ 2-5 cm）の積雪物理量と
不純物濃度のデータ.

表中の値は、全て Site-B (Pit-1) の観測値である.

粒径の値は半径で表している.

計算日	粒径 (mm)	水当量 (kg m ⁻²)	雪温 (°C)	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	OC (mg L ⁻¹)
6/17	0.5	11.4	-0.1	0.5	8.7×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻²
6/25	0.8	12.6	-0.1	0.1	3.8×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻²
6/30	0.4	13.6	0.0	0.1	3.8×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻²
7/9	0.7	15.2	0.0	0.2	4.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻²
7/16	1.0	15.6	-0.1	2.7	1.3×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻²
7/22	0.8	14.6	0.0	0.9	1.2×10 ⁻³	2.7×10 ⁻²
7/28	1.1	13.8	0.0	9.9	2.1×10 ⁻³	6.1×10 ⁻²
8/3	1.1	15.3	0.0	12.9	6.6×10 ⁻³	7.6×10 ⁻²

表 3-14. アルベド物理モデルに入力した 3 層目（深さ 5-10 cm）の積雪物理量と
不純物濃度のデータ.

表中の値は、全て Site-B (Pit-1) の観測値である.

粒径の値は半径で表している.

計算日	粒径 (mm)	水当量 (kg m ⁻²)	雪温 (°C)	Dust (mg L ⁻¹)	BC (mg L ⁻¹)	OC (mg L ⁻¹)
6/17	0.5	18.9	-0.1	0.8	1.5×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻²
6/25	0.8	21.0	-0.1	0.2	6.3×10 ⁻⁵	2.7×10 ⁻²
6/30	0.4	22.6	0.0	0.2	6.3×10 ⁻⁴	2.4×10 ⁻²
7/9	0.7	25.3	0.0	0.4	7.4×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻³
7/16	1.0	25.9	-0.1	4.5	2.2×10 ⁻⁵	4.1×10 ⁻²
7/22	0.8	24.3	0.0	1.5	2.1×10 ⁻³	4.5×10 ⁻²
7/28	1.1	22.9	0.0	16.6	3.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹
8/3	1.1	25.5	0.0	12.9	1.1×10 ⁻²	1.3×10 ⁻¹

表 3-15. アルベド物理モデルで用いた不純物の波長毎の吸光係数.
 OC の吸光係数は 400–700 nm の波長帯で 13 倍に調整した値である.

波長	Dust ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	BC ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	OC ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
200–400	0.15	15.06	0.23
400–475	0.09	13.29	2.35
475–550	0.06	11.78	2.11
550–625	0.04	10.39	2.00
625–700	0.04	9.20	1.91
700–950	0.03	7.36	0.16
950–1125	0.02	5.42	0.20
1125–1400	0.02	4.28	0.19
1400–1950	0.02	3.01	0.15
1950–3000	0.03	2.11	0.25

表 3-16. アルベドのモデル計算値と観測値の季節変化.

表中の観測値以外のアルベドは、計算時に考慮した不純物の吸光効果ごとの結果を表している.

日付	観測値	計算値 不純物無し	計算値 Dust	計算値 Dust, BC	計算値 Dust, BC, OC
6/17	0.761	0.749	0.748	0.748	0.747
6/25	0.741	0.732	0.731	0.730	0.729
6/30	0.695	0.713	0.711	0.710	0.708
7/9	0.682	0.712	0.694	0.690	0.688
7/16	0.680	0.704	0.680	0.675	0.673
7/22	0.706	0.753	0.702	0.701	0.699
7/28	0.701	0.722	0.700	0.699	0.695
8/3	0.602	0.731	0.621	0.619	0.609

表 3-17. 繁殖モデルから求めた細胞濃度および OC の濃度とその値で再現したアルベド.

表中の値は、全て計算値である.

どの計算条件でも OC 濃度以外は全て同じ入力データを用いている.

表中の取り消し線は、アルベドのモデル計算に使用していないデータを意味している.

アルベドの低下量は、8月3日の OC を考慮していないアルベドの計算値 (0.619) から各アルベドの計算値を引くことによりそれぞれの値を求めている.

計算条件	細胞濃度 (cells m ⁻²)	OC (mg L ⁻¹)	アルベド	OC による アルベド低下量
8月3日の Dust と BC のみ仮定	8.2×10⁵	0.5	0.619	0
8月3日の Dust, BC, OC を仮定	8.2×10 ⁵	0.5	0.609	0.01
8月21日の Dust, BC, OC を仮定	1.5×10 ⁷	7.1	0.518	0.101
環境収容力の細胞濃度で Dust, BC, OC を仮定	3.5×10 ⁷	15.1	0.456	0.163

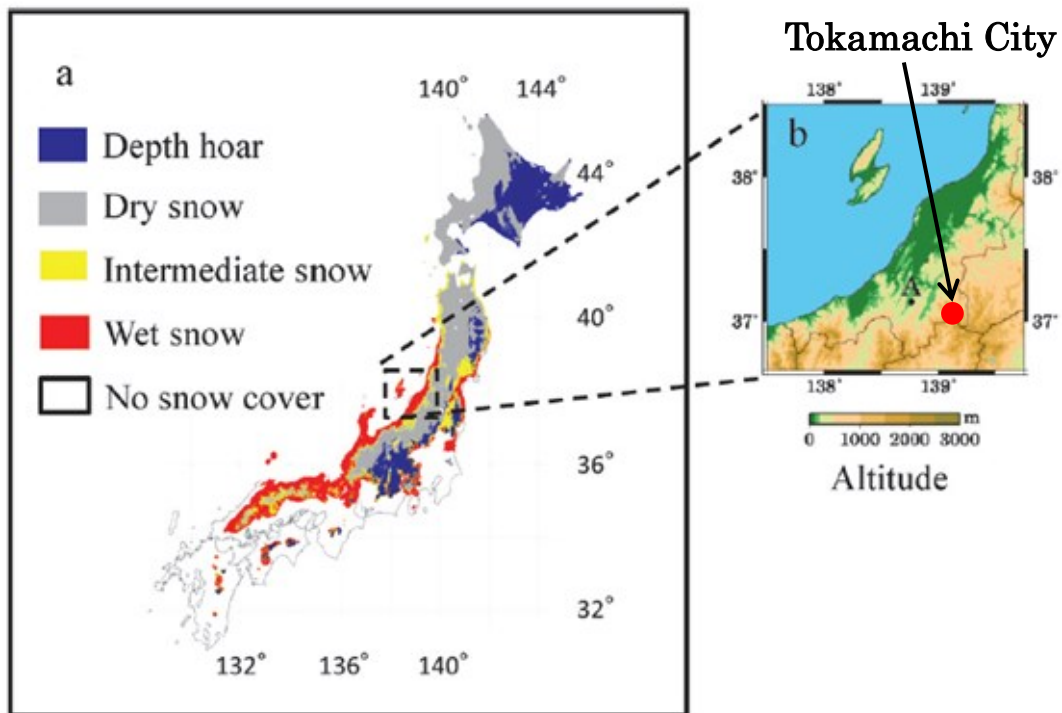


図 1-1. 日本の雪質分布と調査地の位置.

図は Yamaguchi et al., 2014 から引用し，加筆修正した.

a: 日本の雪質分布. 分布図は 1971-2000 年の 1, 2 月の気温と積雪深のデータを基に作成 (参考: 石坂, 2008). 凡例は上から, しもざらめ雪, しまり雪, しまり雪とざらめ雪の混合, ざらめ雪, 非積雪の地域をそれぞれ指している.

b: 新潟県十日町市の位置.

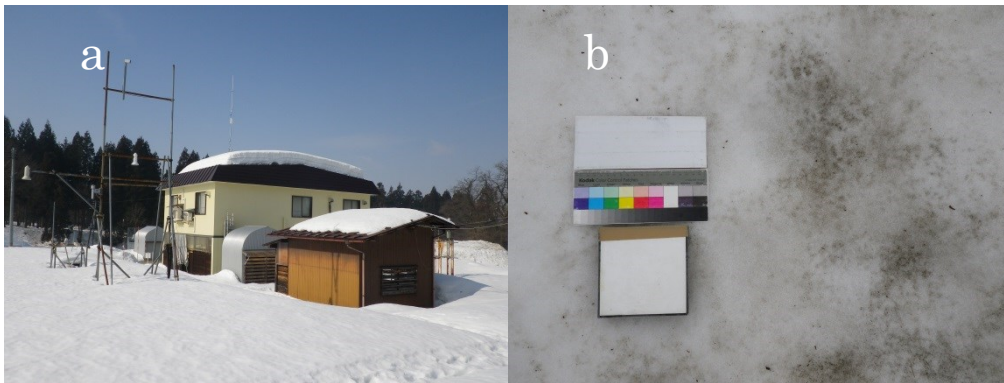


図 1-2. 新潟県十日町市の森林総合研究所十日町試験地.

a : 新潟県十日町市の森林総合研究所十日町試験地

b : 十日町試験地の積雪表面

2014 年 4 月 4 日撮影

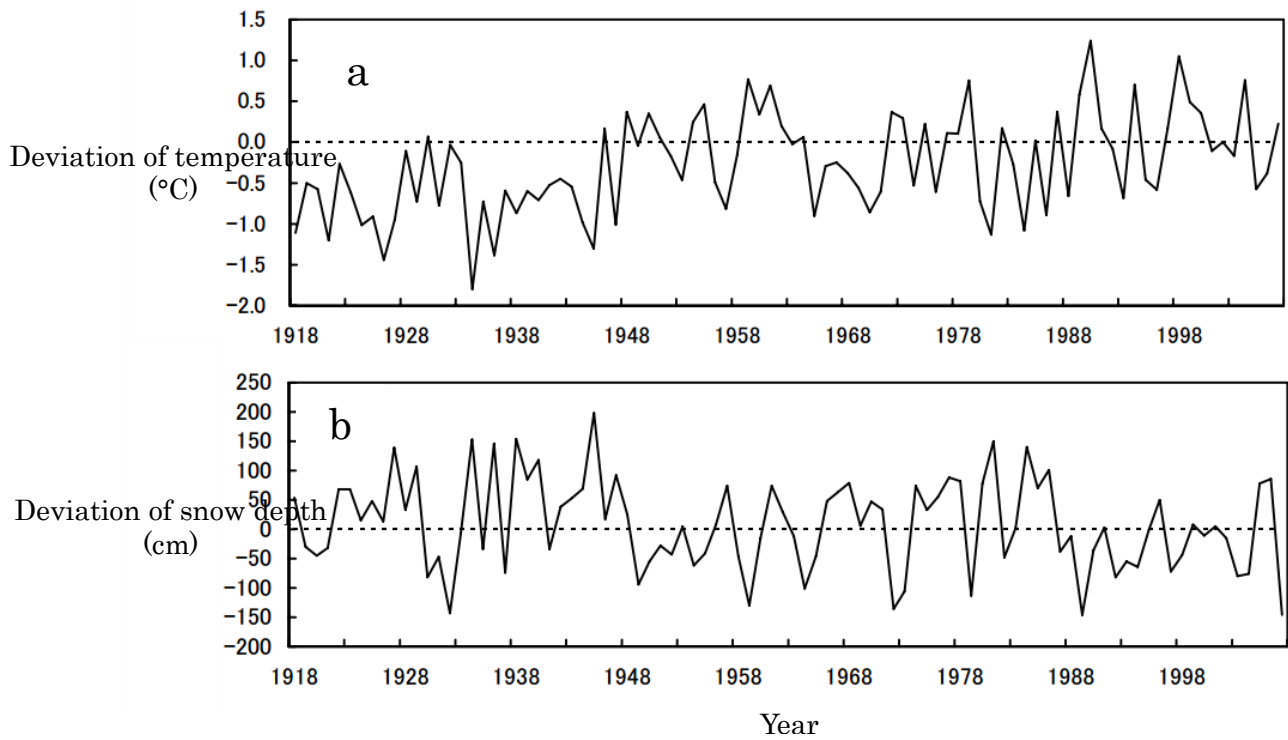


図 1-3. 十日町試験地における 1918 年から 2007 年までの気温 (a) と積雪深 (b) の
平年差.

グラフは竹内ら (2008) のものを引用し, 加筆修正した.

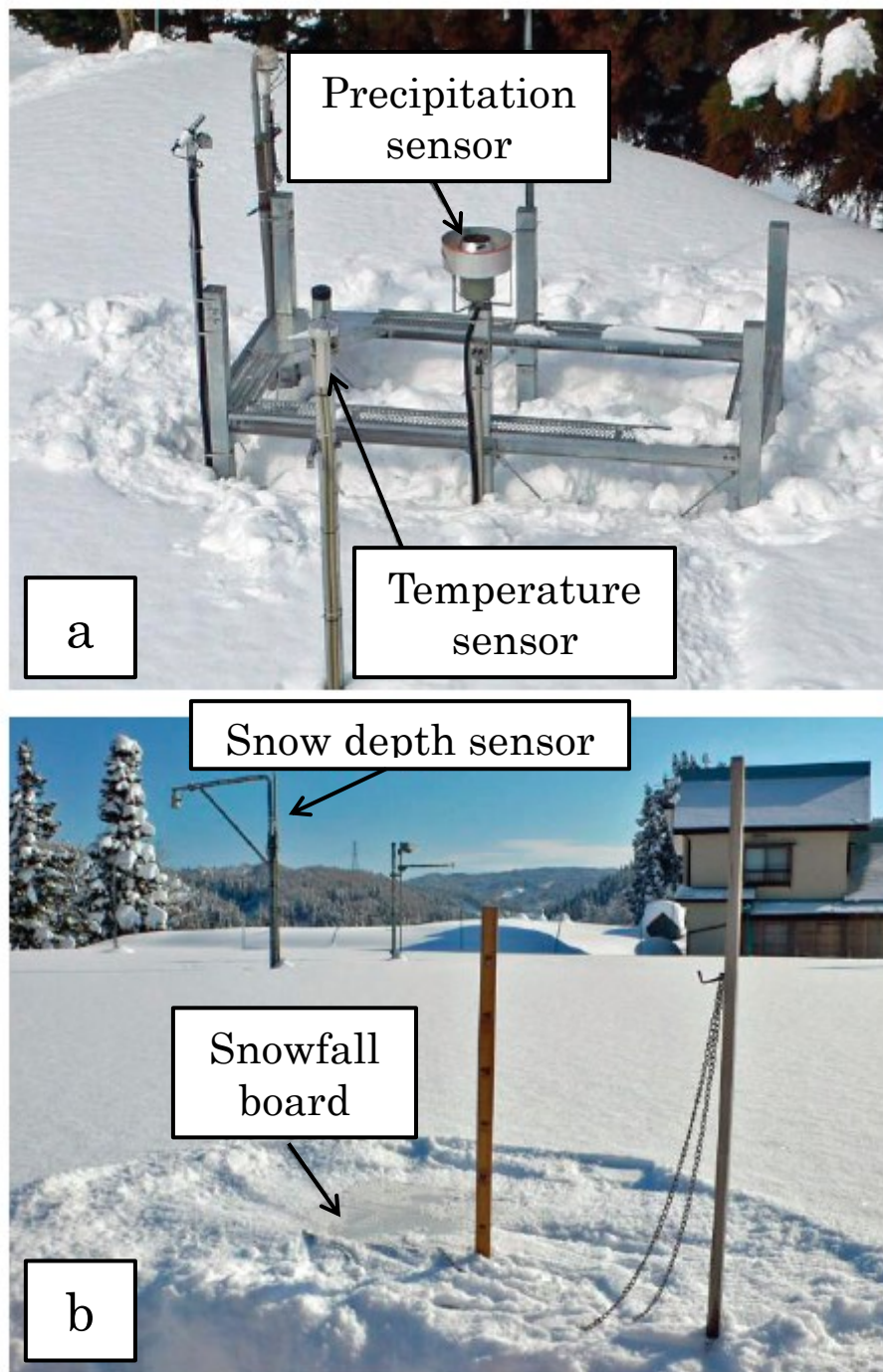


図 1-4. 十日町試験地に設置された気象測器.
写真は竹内ら (2014) から引用し, 加筆修正した.
a: 降水量計と気温計.
b: 積雪深計と降雪板.

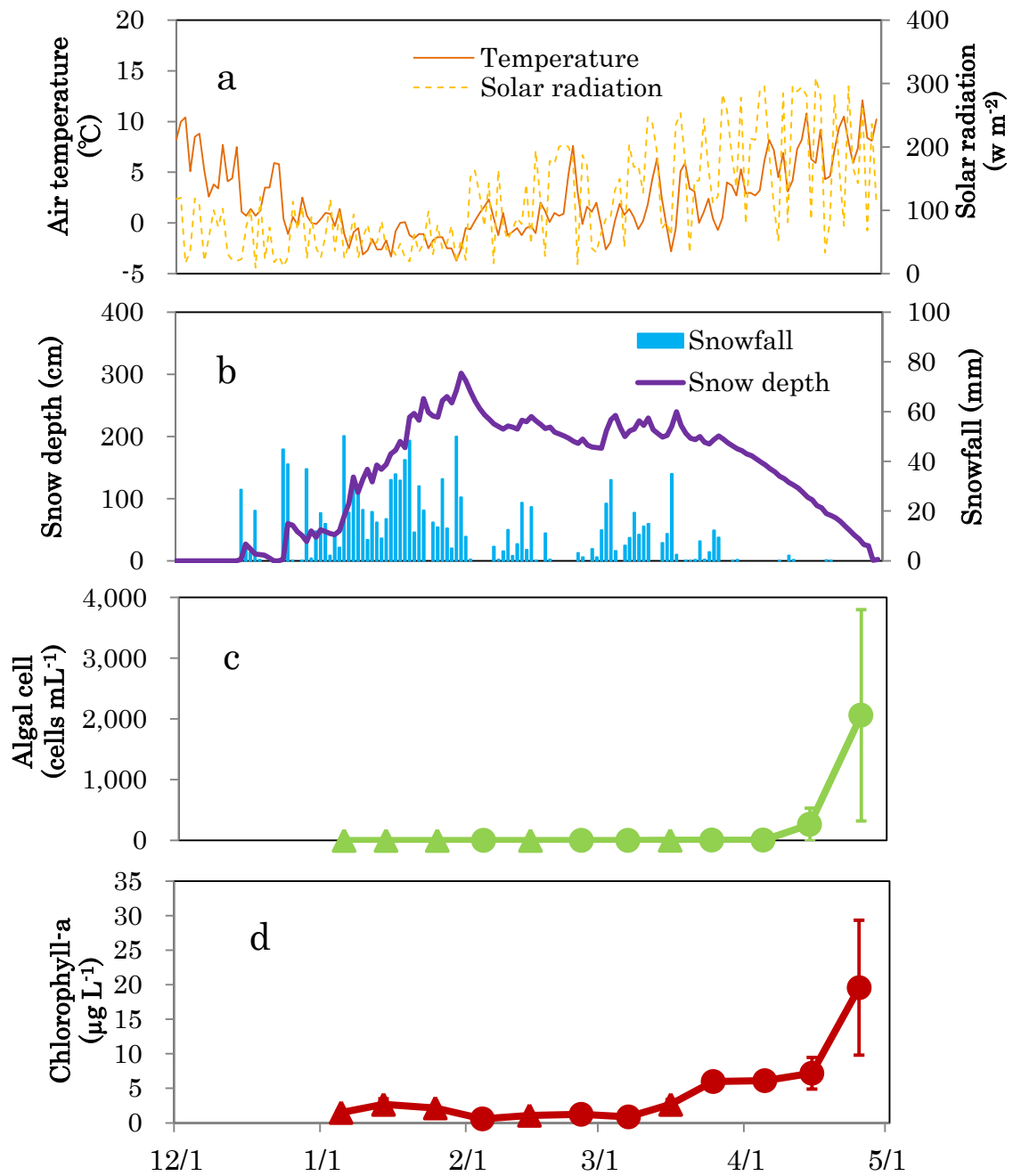


図 1-5. 2011 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化.

a: 気温と日射量の日平均値, b: 積雪深と降雪量, c: 細胞濃度, d: クロロフィル a 濃度.
 エラーバーは標準偏差を表す. 細胞濃度とクロロフィル a 濃度の三角と円のマーカはそれぞれ雪質が新雪とざらめ雪であることを示している(c と d).

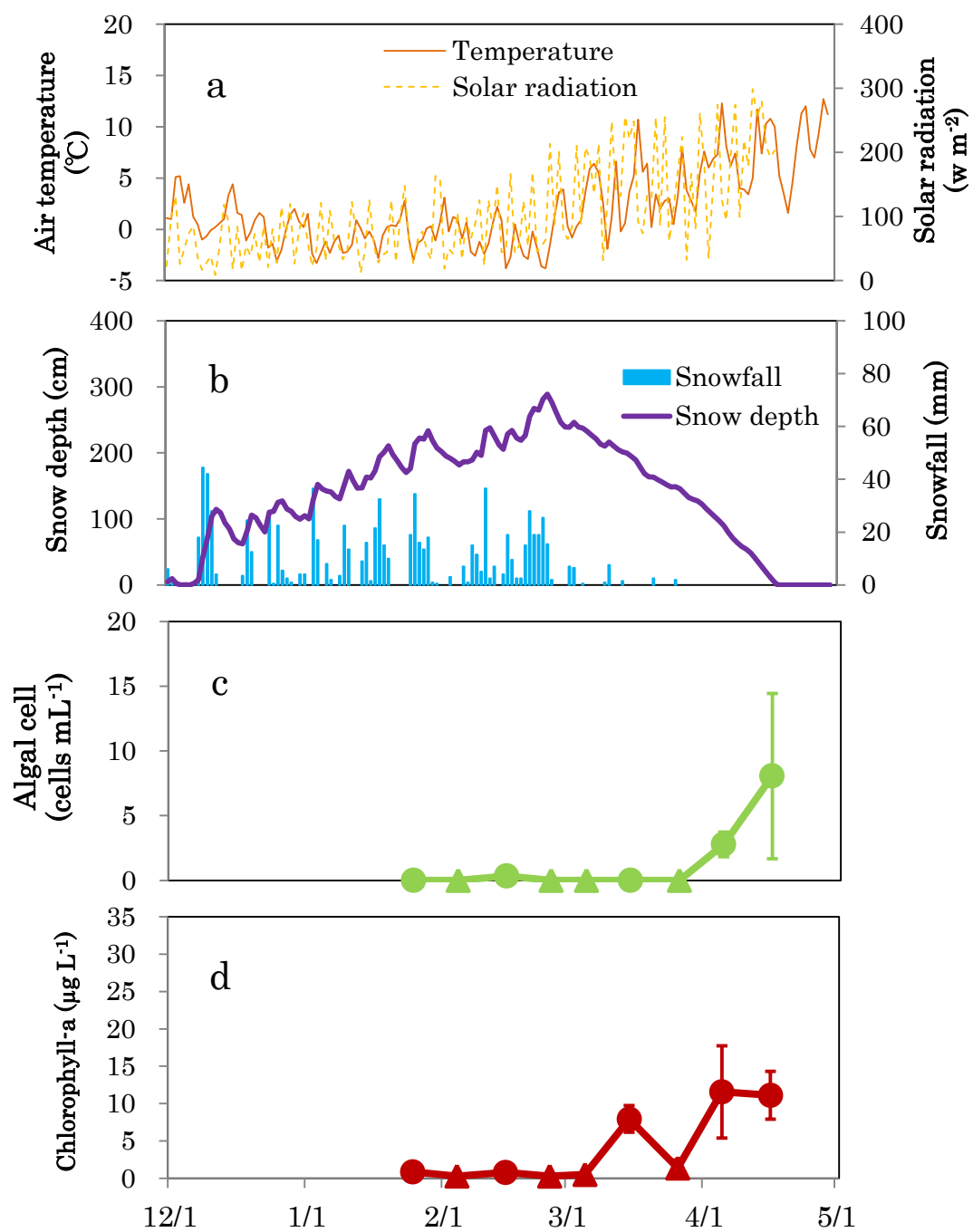


図 1-6. 2013 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化.

a: 気温と日射量の日平均値, b: 積雪深と降雪量, c: 細胞濃度, d: クロロフィル a 濃度.
 エラーバーは標準偏差を表す. 細胞濃度とクロロフィル a 濃度の三角と円のマーカーはそれぞれ雪質が新雪とざらめ雪であることを示している(c と d).

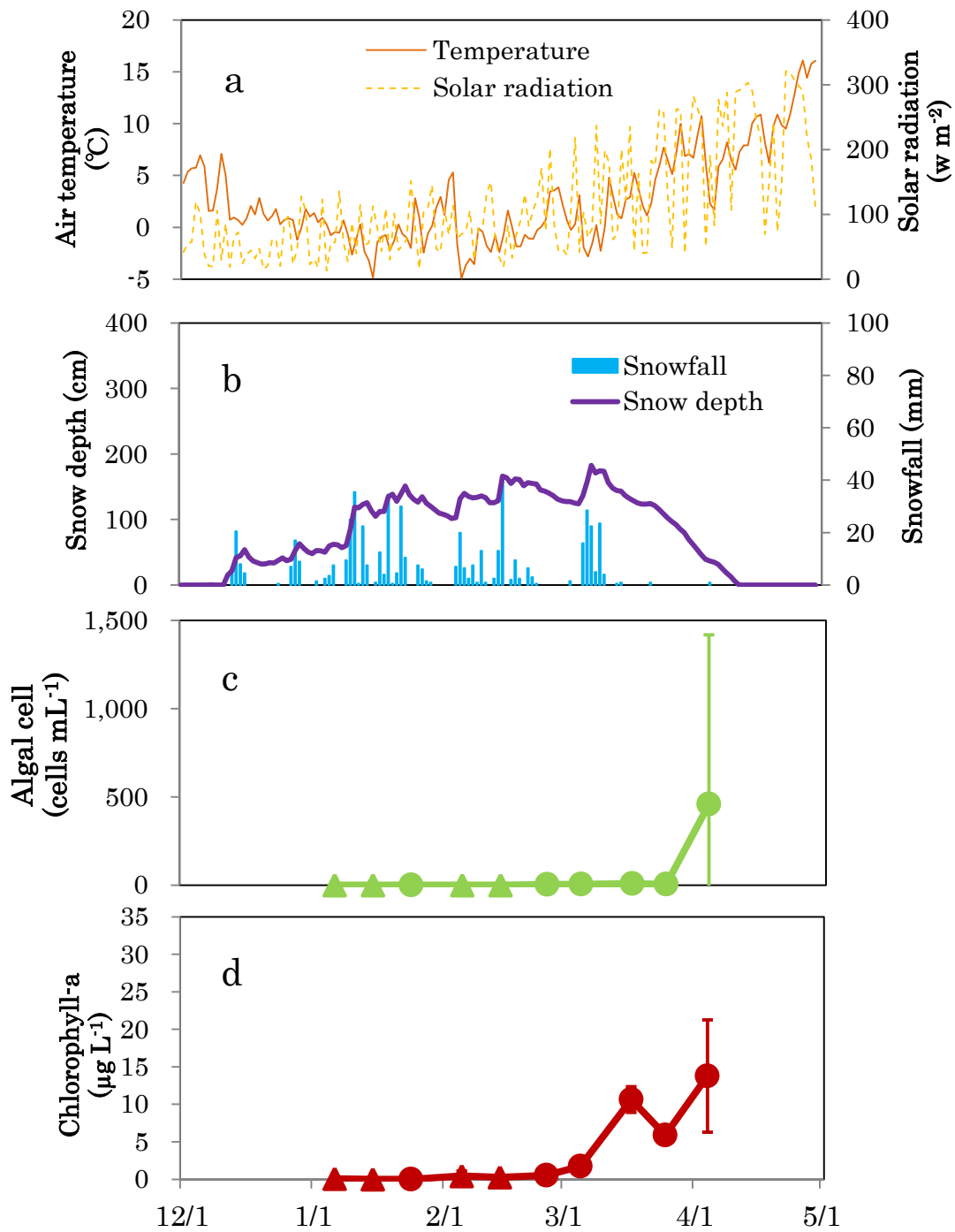


図 1-7. 2014 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化.

a: 気温と日射量の日平均値, b: 積雪深と降雪量, c: 細胞濃度, d: クロロフィル a 濃度.
 エラーバーは標準偏差を表す. 細胞濃度とクロロフィル a 濃度の三角と円のマーカーはそれぞれ雪質が新雪とざらめ雪であることを示している(c と d).

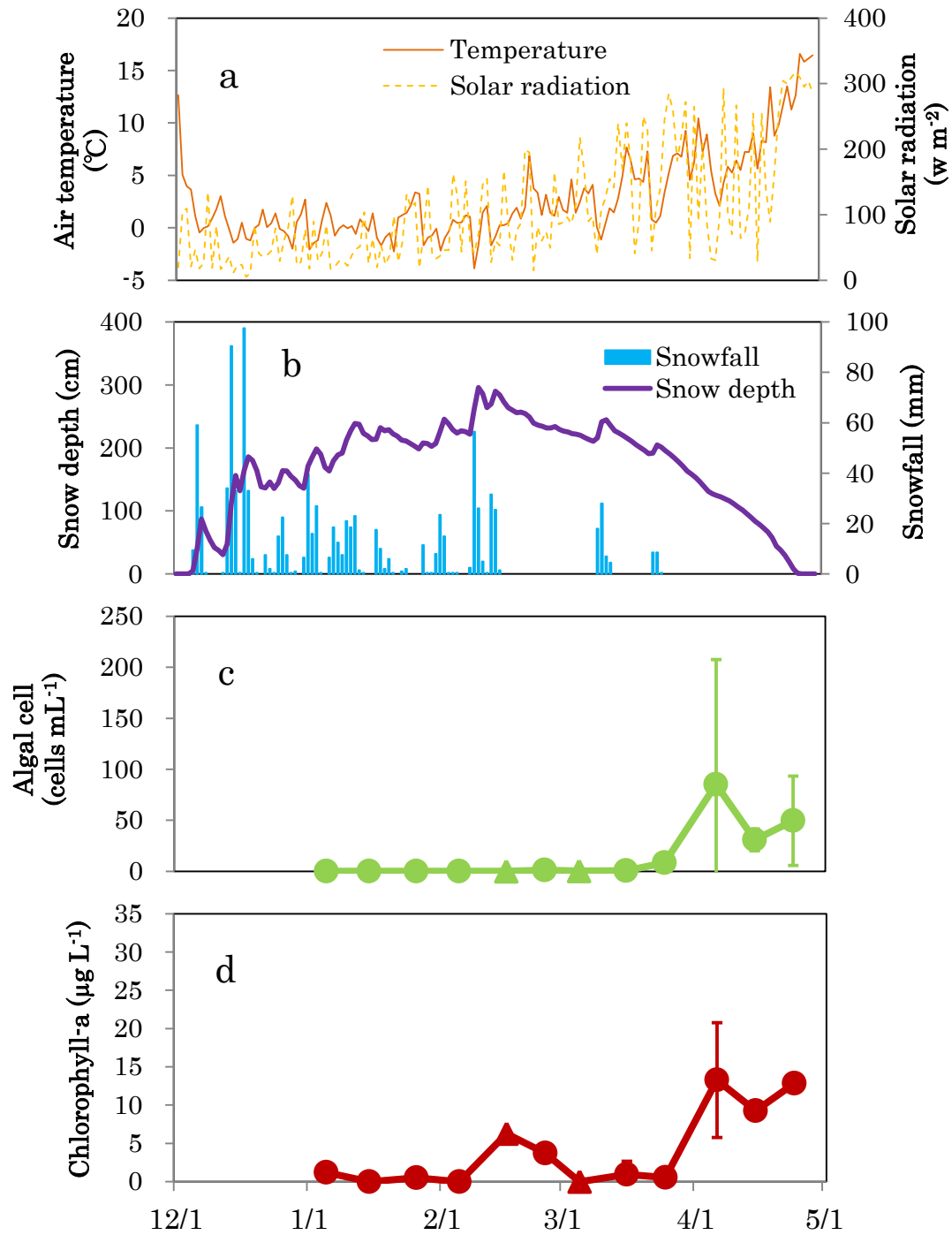


図 1-8. 2015 年の積雪表面における気象と雪氷藻類の季節変化.

a: 気温と日射量の日平均値, b: 積雪深と降雪量, c: 細胞濃度, d: クロロフィル a 濃度.
 エラーバーは標準偏差を表す. 細胞濃度とクロロフィル a 濃度の三角と円のマーカーはそれぞれ雪質が新雪とざらめ雪であることを示している(c と d).

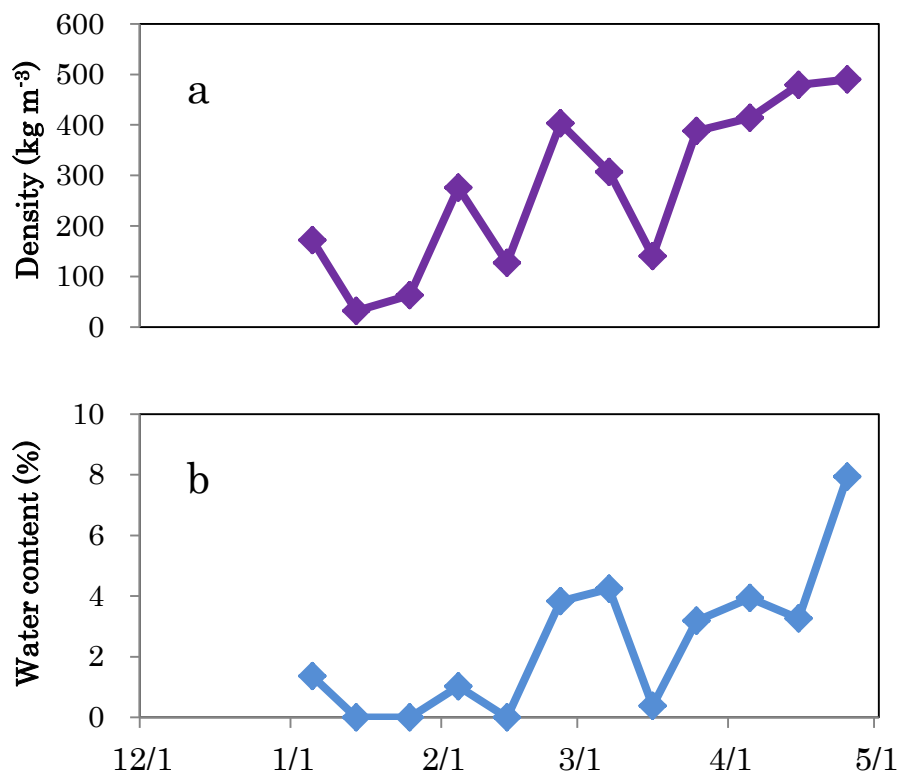


図 1-9. 2011 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化.

a: 密度.

b: 含水率.

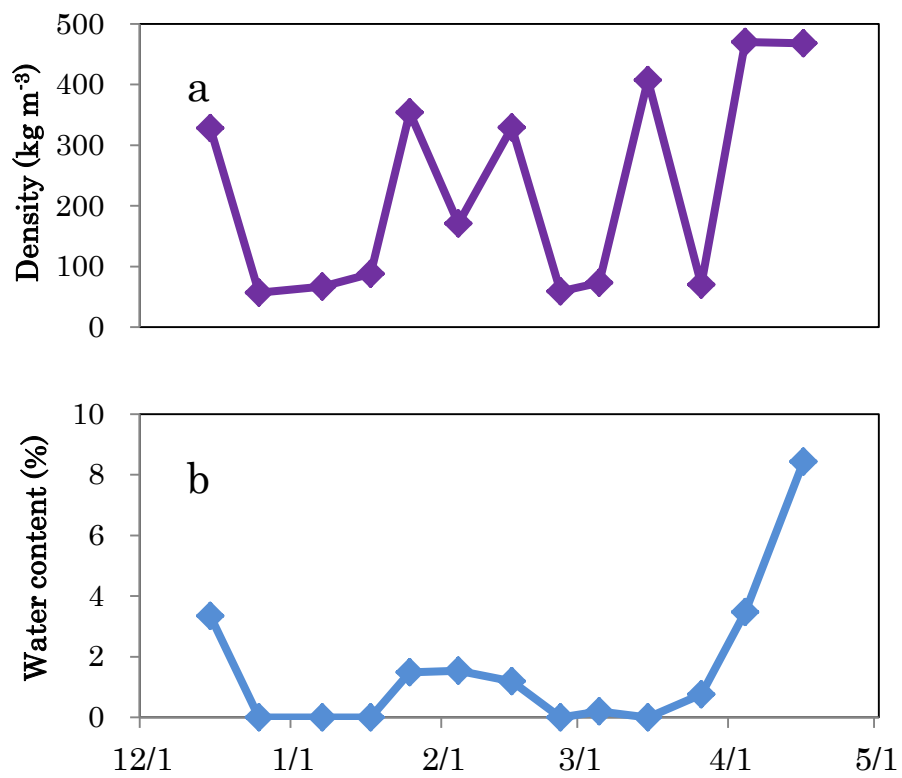


図 1-10. 2013 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化.

a: 密度.

b: 含水率.

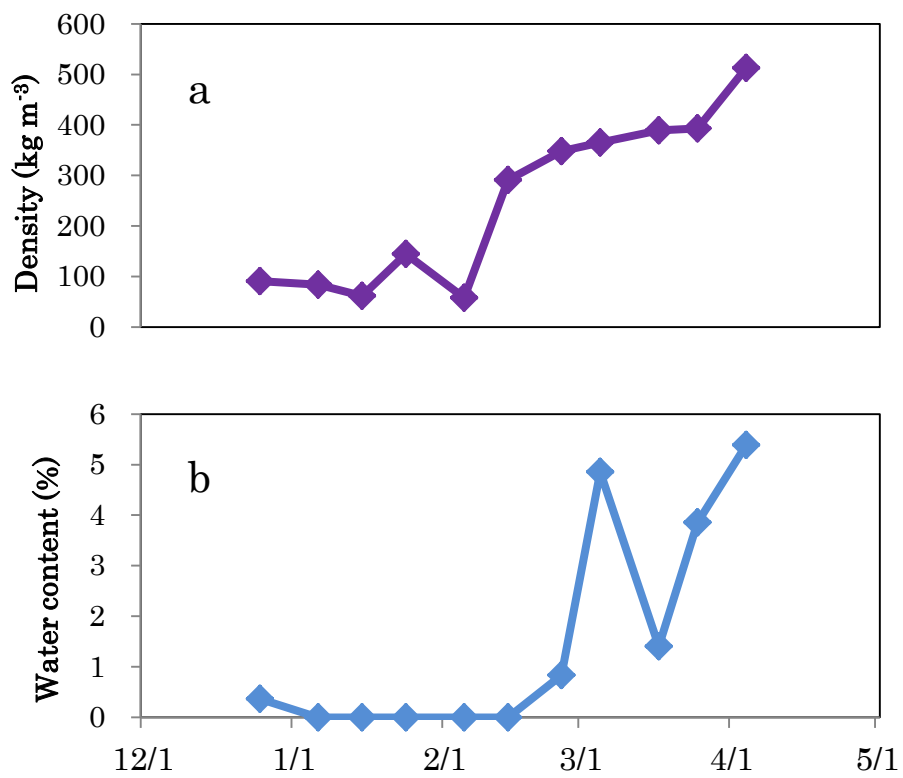


図 1-11. 2014 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化.

a: 密度.

b: 含水率.

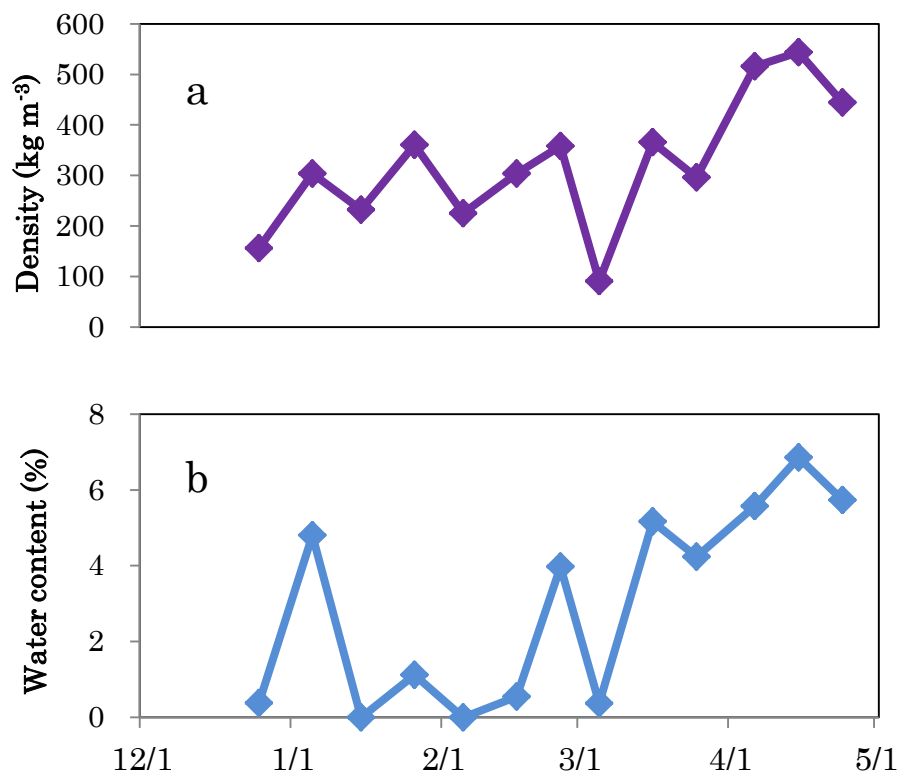


図 1-12. 2015 年の積雪表面の密度と含水率の季節変化.

a: 密度.

b: 含水率.

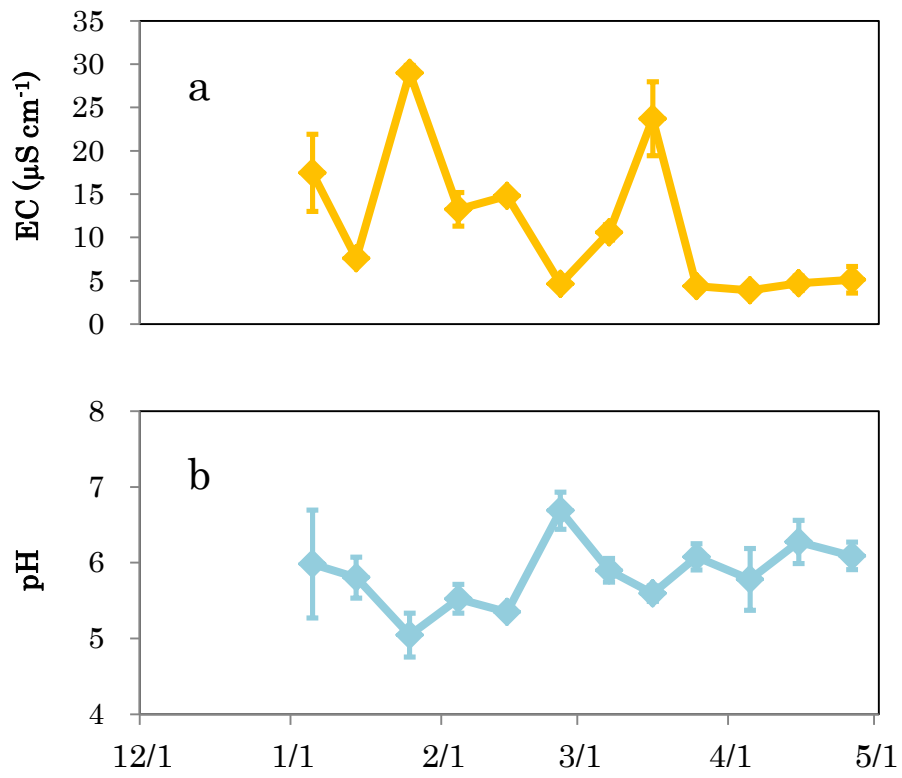


図 1-13. 2011 年の積雪表面の EC と pH の季節変化.

a: EC.

b: pH.

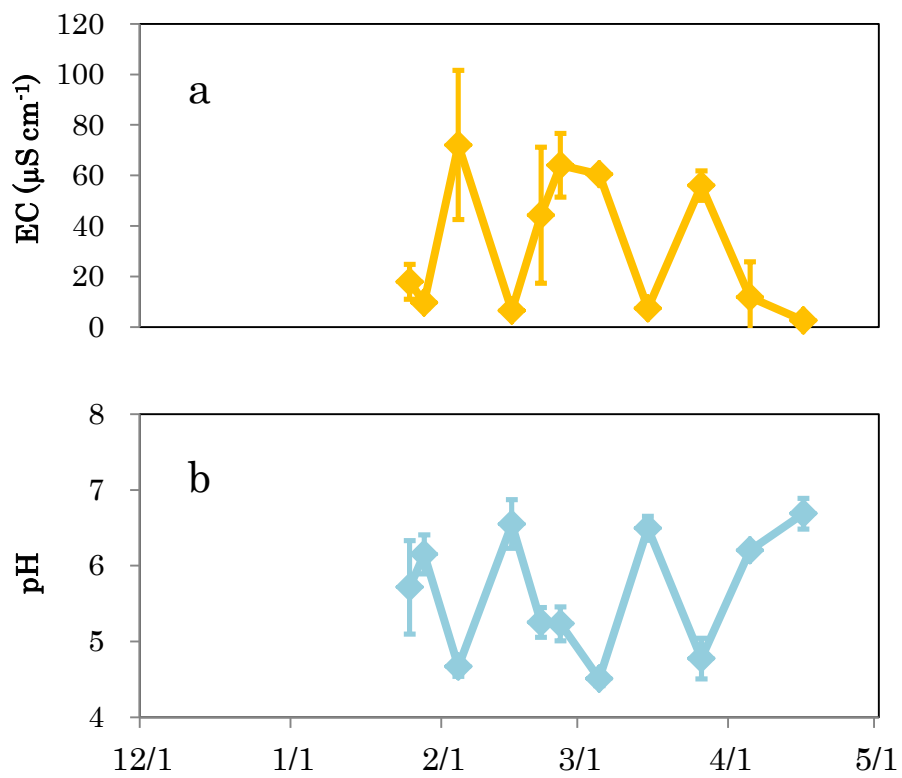


図 1-14. 2013 年の積雪表面の EC と pH の季節変化.

a: EC.

b: pH.

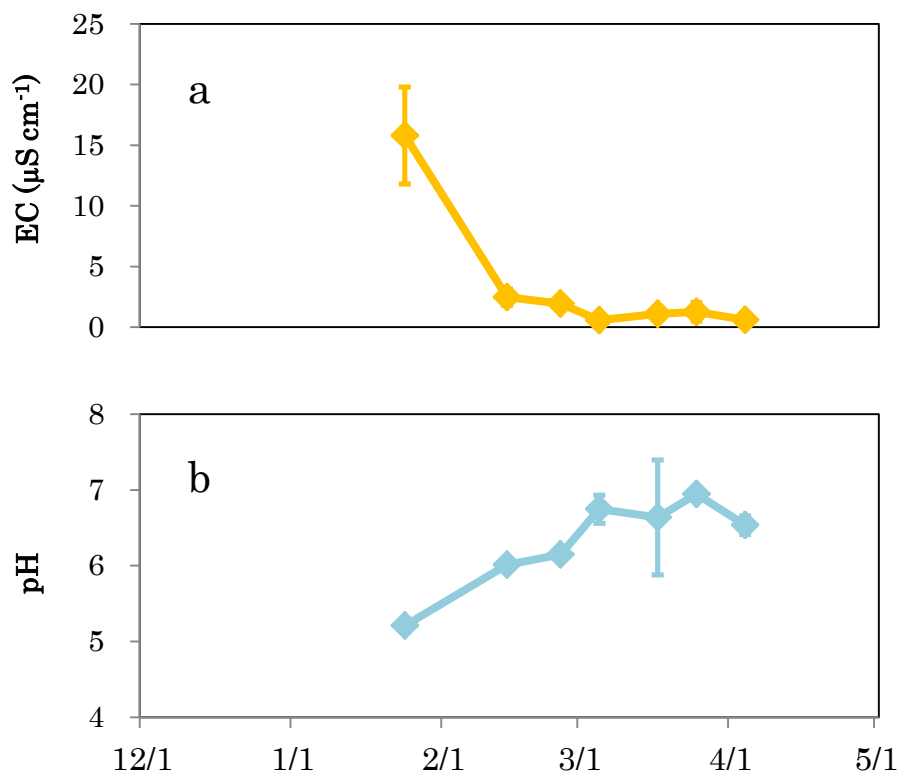


図 1-15. 2014 年の積雪表面の EC と pH の季節変化.

a: EC.

b: pH.

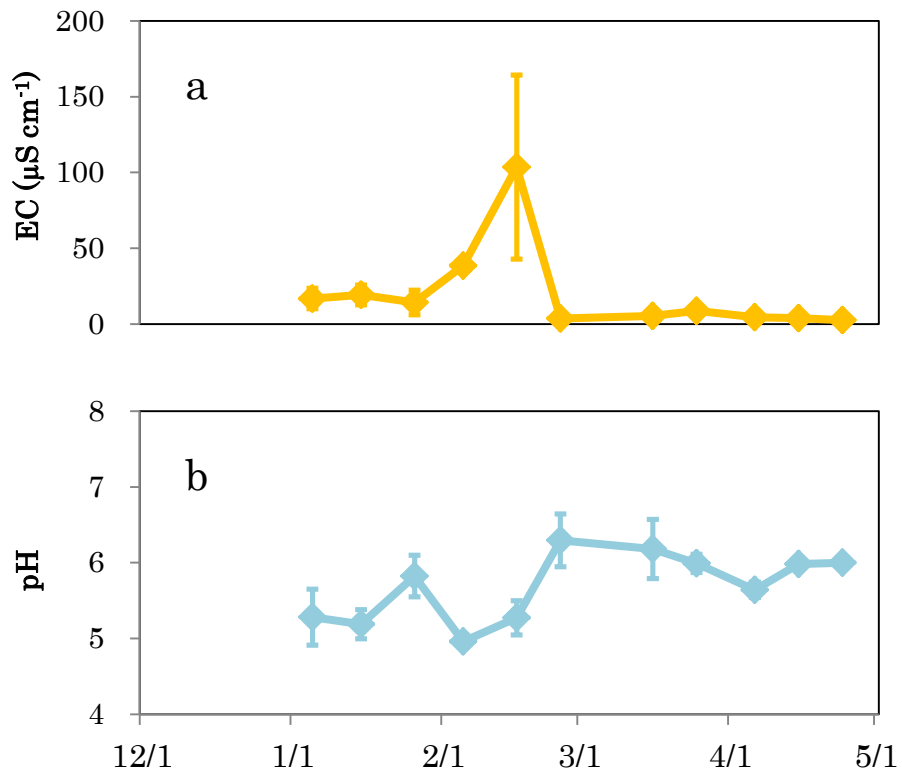


図 1-16. 2015 年の積雪表面の EC と pH の季節変化.

a: EC.

b: pH.

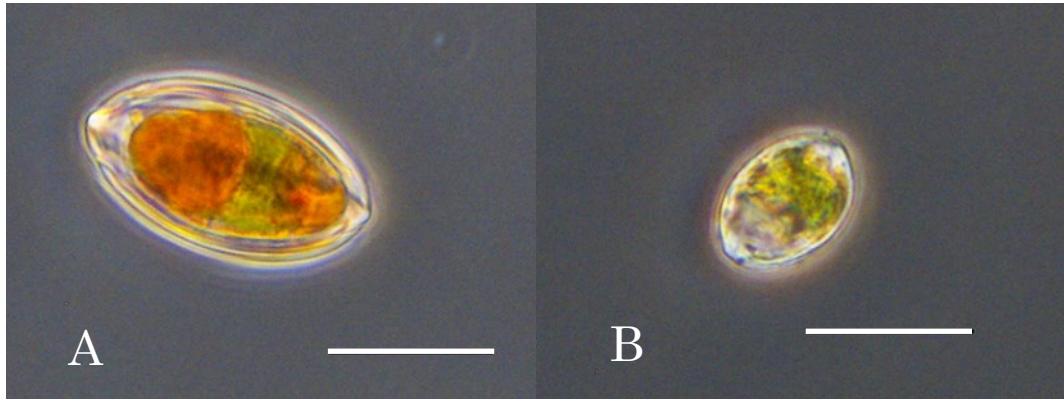


図 1-17. 十日町試験地の積雪で観察された雪氷藻類.

A: 橙色と緑色の色素を持った楕円形の細胞で，細胞は襞状の細胞壁で覆われている．

B: 緑色の色素を持った楕円形の細胞で，細胞に襞状の細胞壁はみられない．

スケールバーは 20 μm .

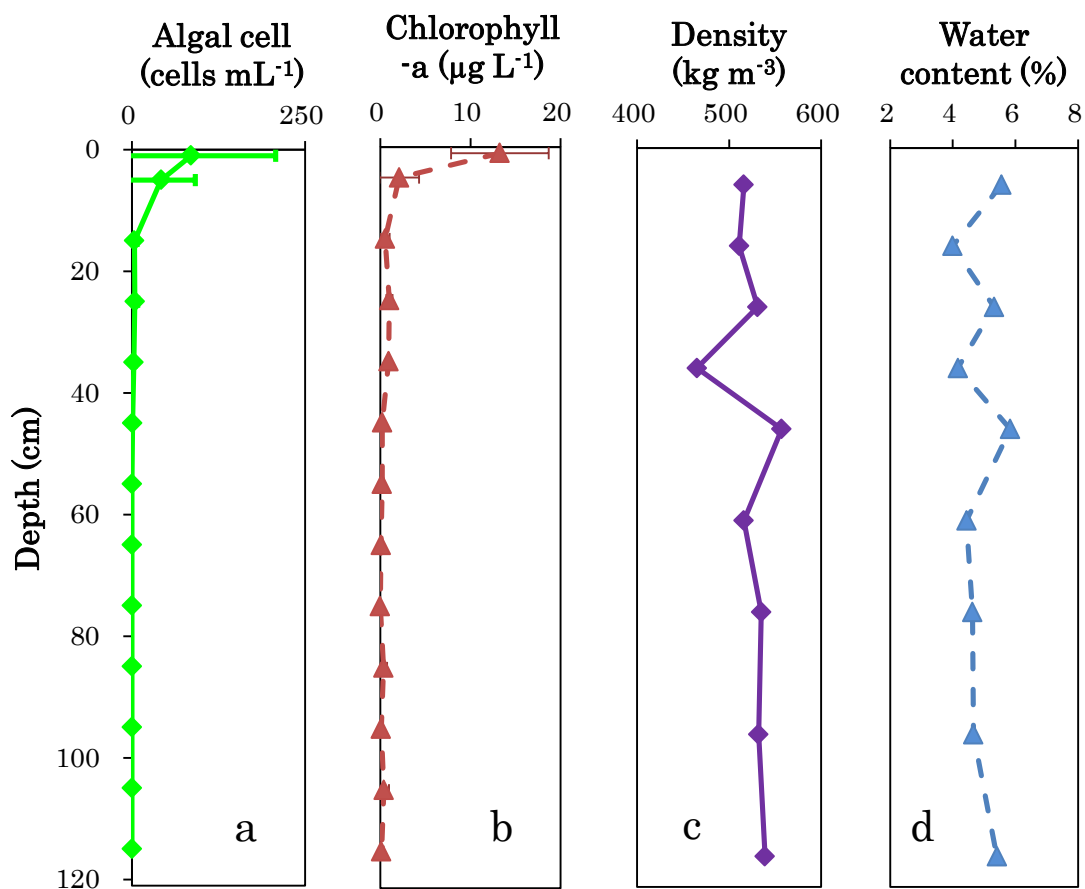


図 1-18. 2015 年 4 月 6 日の積雪断面における雪氷藻類と物理特性の垂直変化.

a: 藻類の細胞濃度, b: クロロフィル a 濃度, c: 密度, d: 含水率.

図の縦軸の深さ 0 cm は積雪表面であることを意味している.

エラーバーは標準偏差を表す.

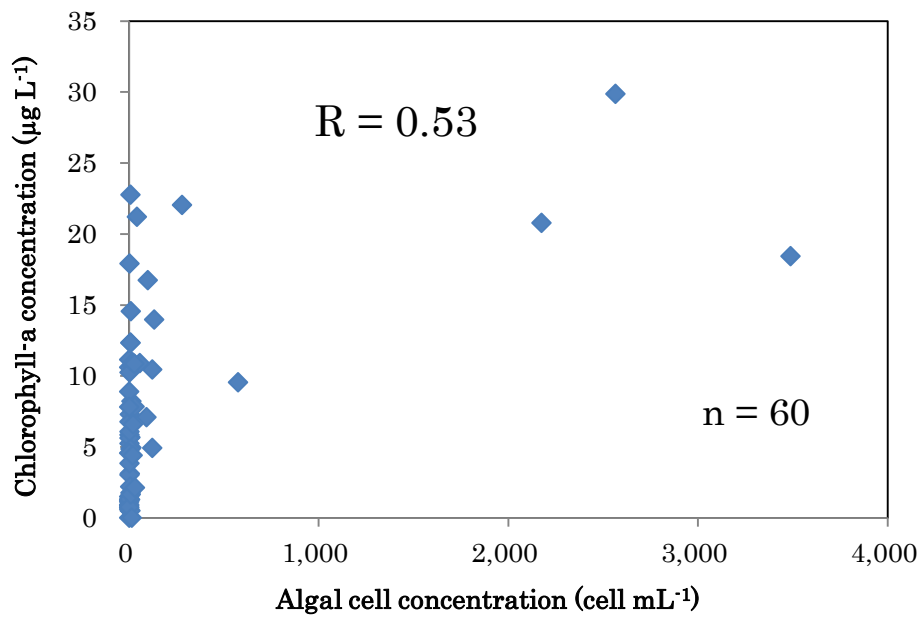


図 1-19. 十日町試験地 4 年間の積雪表面におけるクロロフィル a 濃度と細胞濃度の関係.

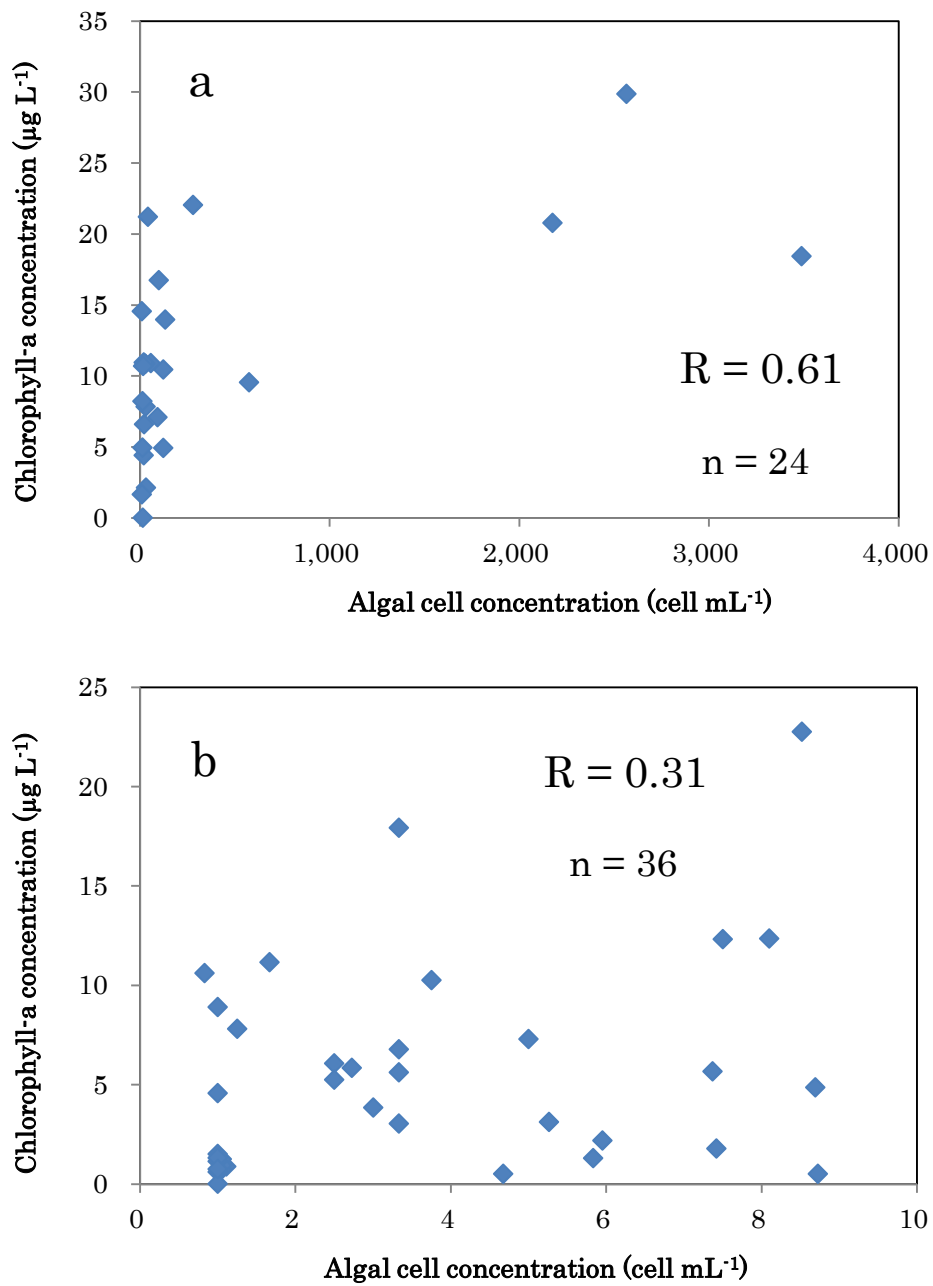


図 1-20. 細胞濃度で分けた積雪表面における細胞濃度とクロロフィル濃度の関係.

a: 細胞濃度が 10 cells mL^{-1} 以上のサンプル

b: 細胞濃度が 10 cells mL^{-1} 未満のサンプル

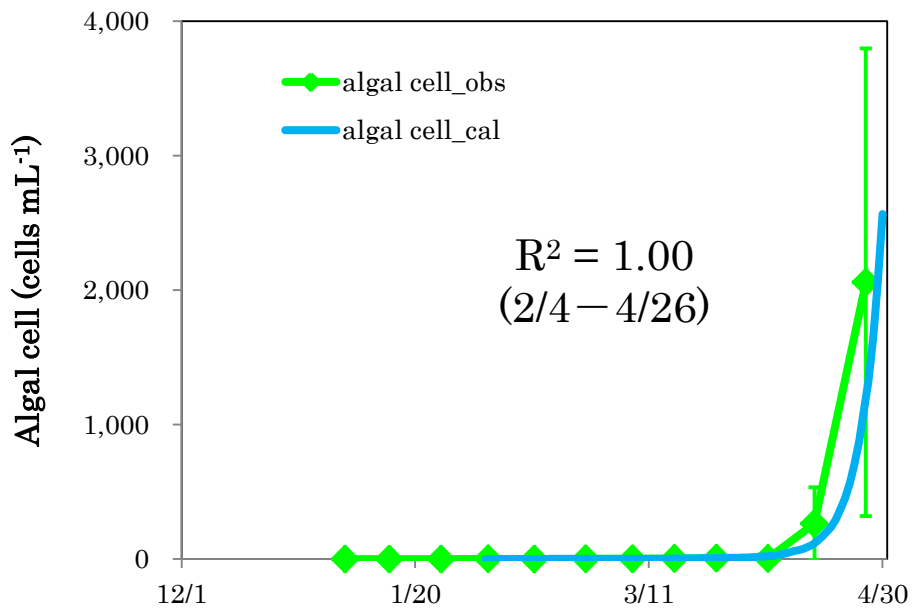


図 1-21. 2011 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.
 モデルによる計算は藻類の出現日から 4 月 30 日までの期間で行った.
 観測値のエラーバーは標準偏差を表している.

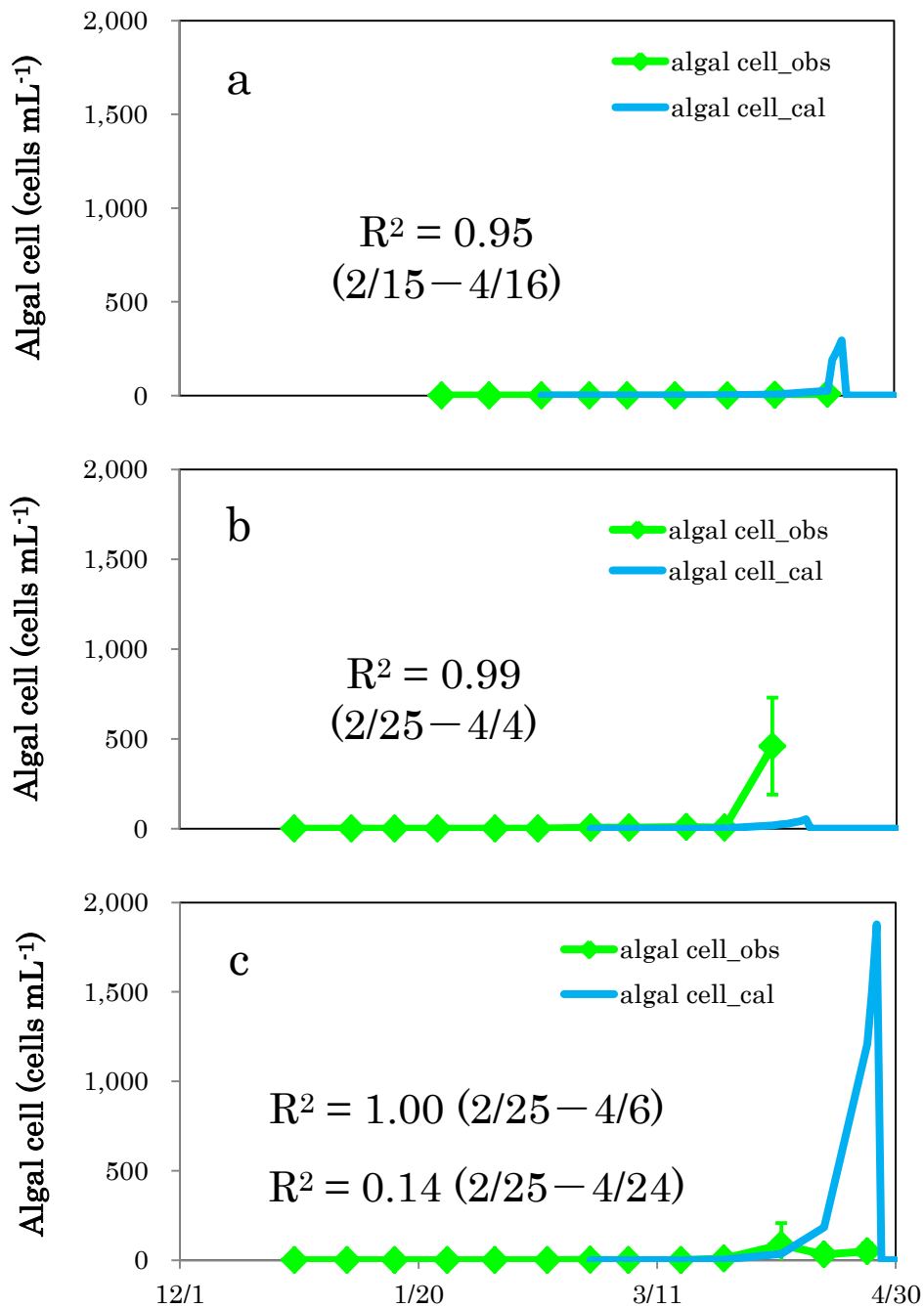


図 1-22. 2013, 2014, 2015 年の積雪表面における細胞濃度の観測値とモデル計算値.

a: 2013 年の細胞濃度, b: 2014 年の細胞濃度, c: 2015 年の細胞濃度.

モデルによる計算は藻類の出現日から 4 月 30 日までの期間で行った.

モデル計算値は, 積雪が消雪すると値が 0 cells mL⁻¹ となるようにしている.

観測値のエラーバーは標準偏差を表している.

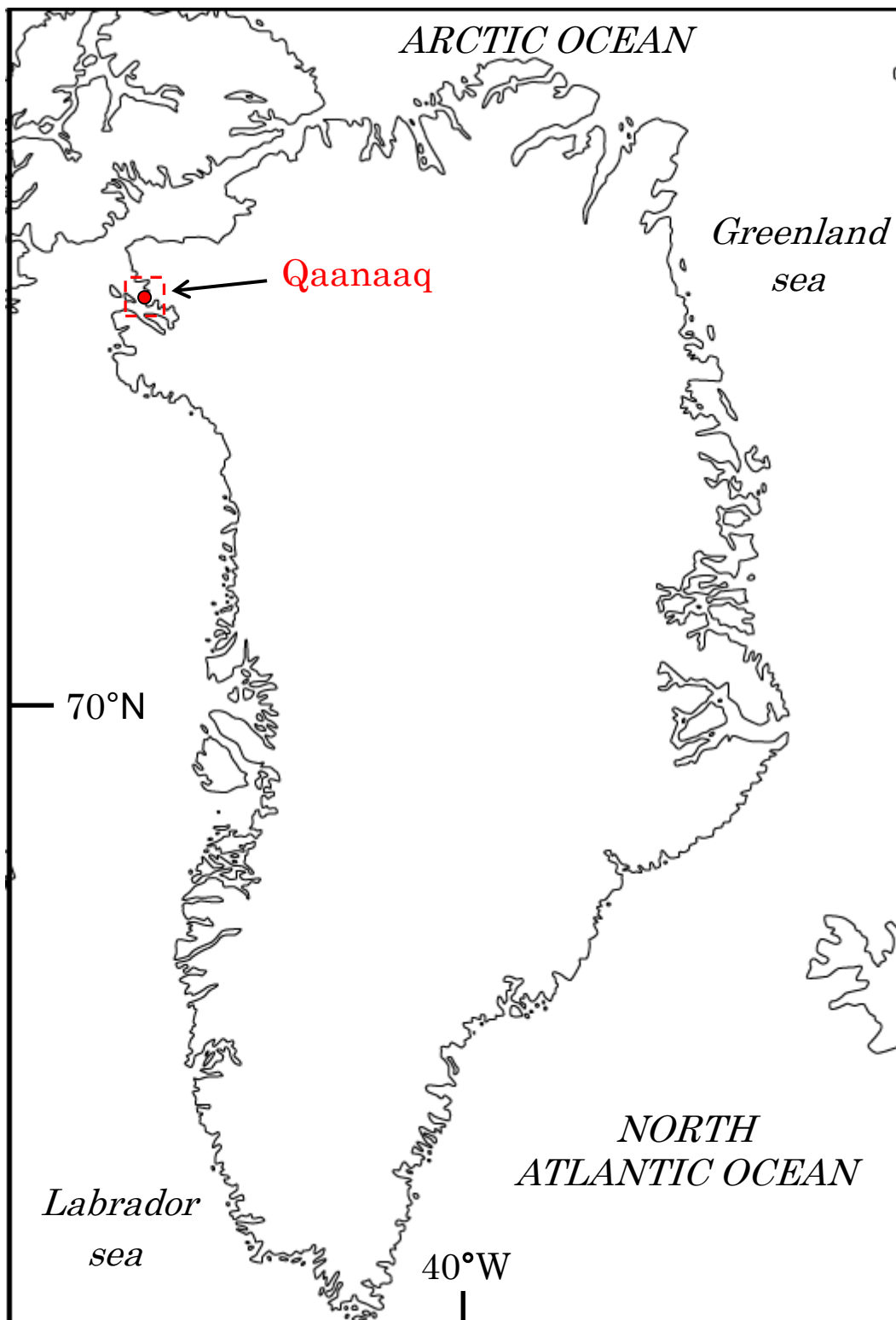


図 2-1. グリーンランド北西部カナック地区の位置.

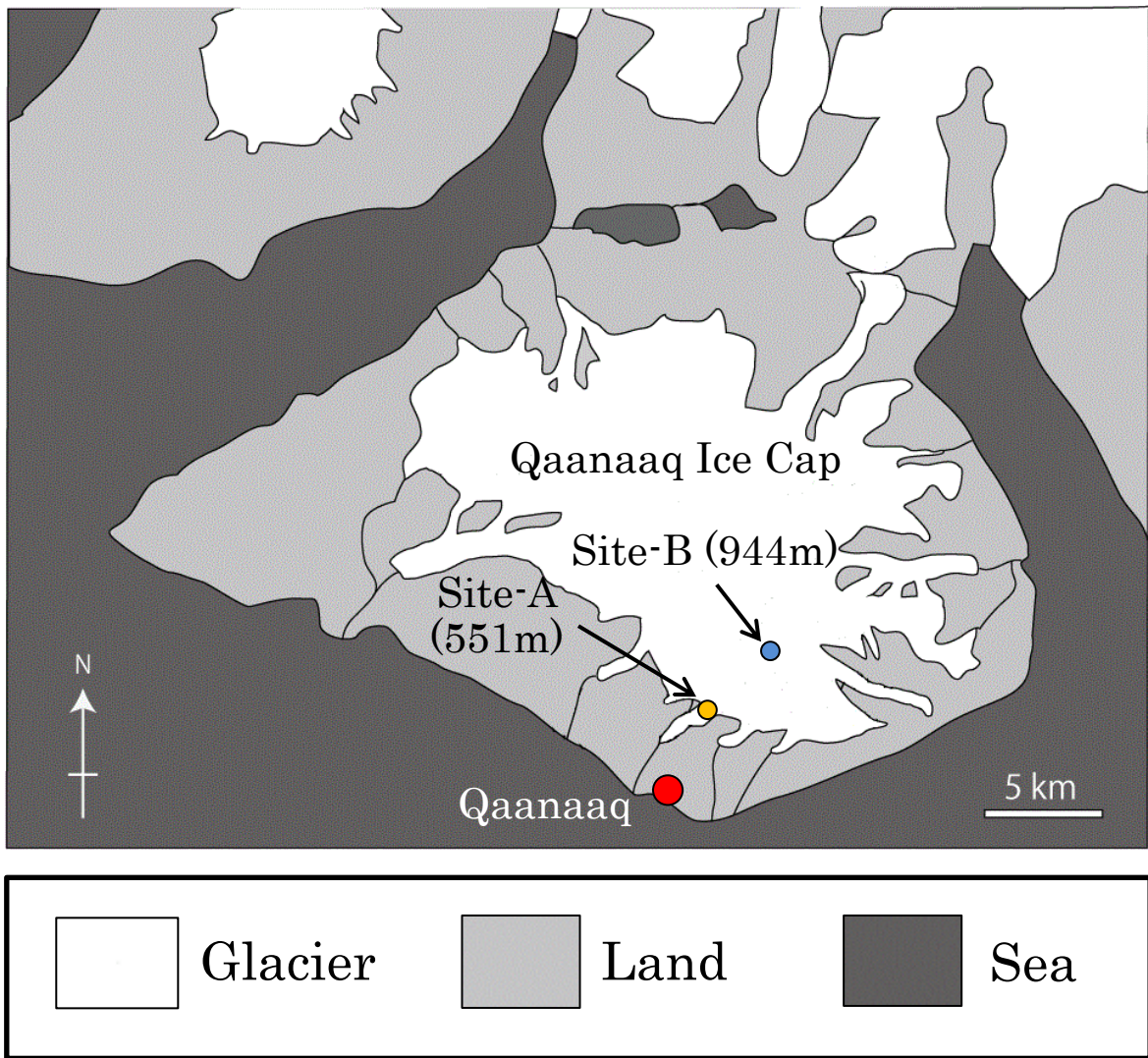


図 2-2. カナック氷河上の調査地点.



図 2-3. カナック氷河の Site-A と Site-B の様子.
a: Site-A, b: Site-B.

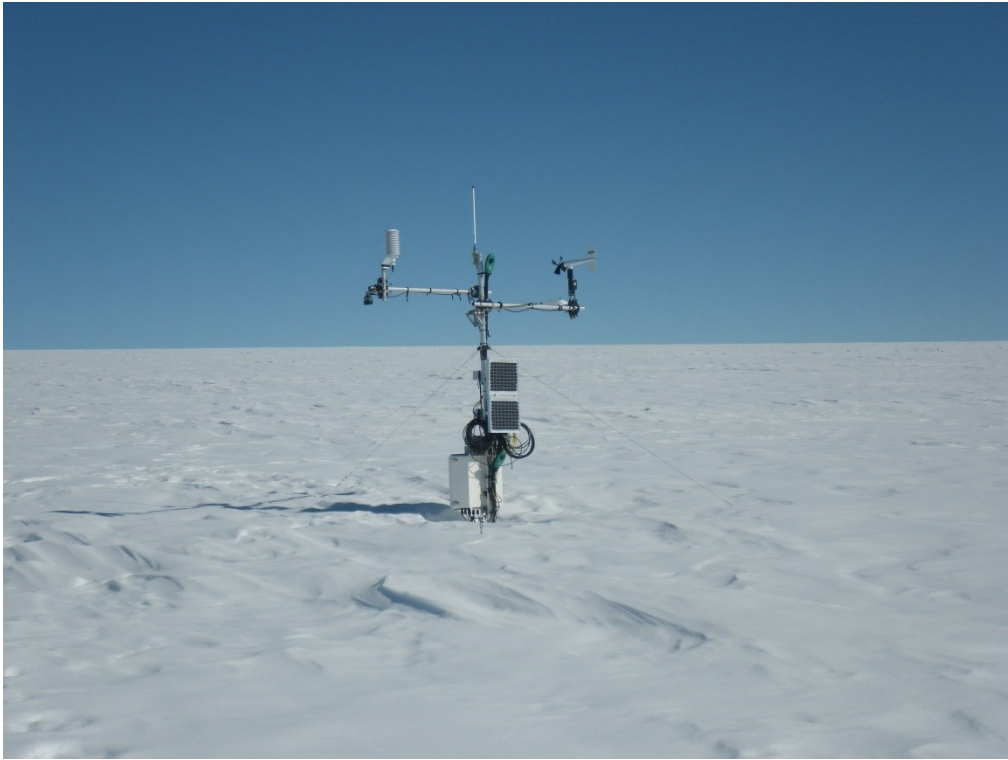


図 2-4. Site-B に設置されている自動気象測器



図 2-5. Site-A に設置した自動気象測器

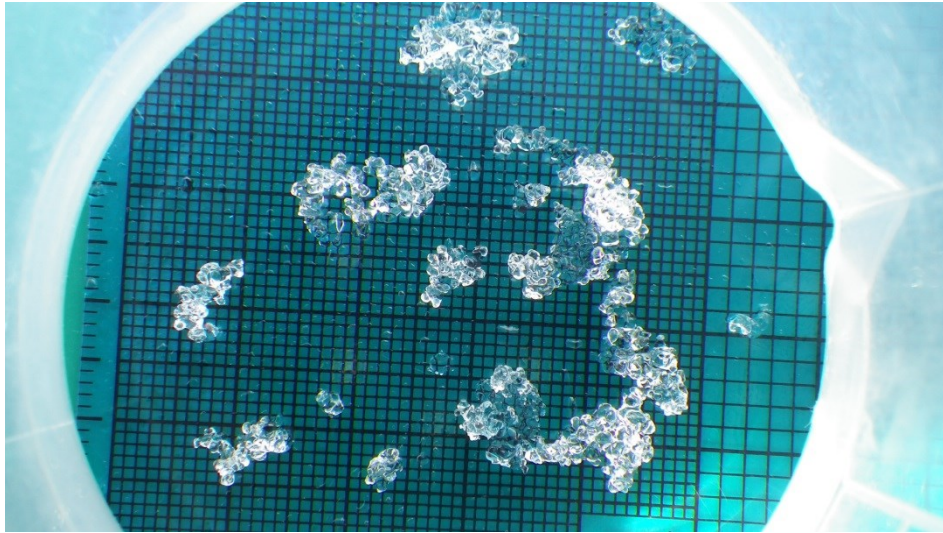


図 2-6. デジタルカメラによって撮影した積雪粒子

写真はカメラのマイクロ撮影モードを使用して、カメラのレンズから 5 cm 離して撮影した。
方眼紙のスケールは、1 目盛り 1 mm である。



図 2-7. 積雪表面の生物分析用のサンプル採取の様子



図 2-8. 積雪表面の鉍物分析用のサンプル採取の様子



図 2-9. 石英ガラスフィルターに濾過した炭素分析用のサンプル。
撮影は 2014 年 9 月 3 日に気象研究所のクリーンルーム内で行った。



図 2-10. 鉍物分析用のサンプルの分析前処理の様子.
ポリ袋の底に沈殿物が溜まっている.

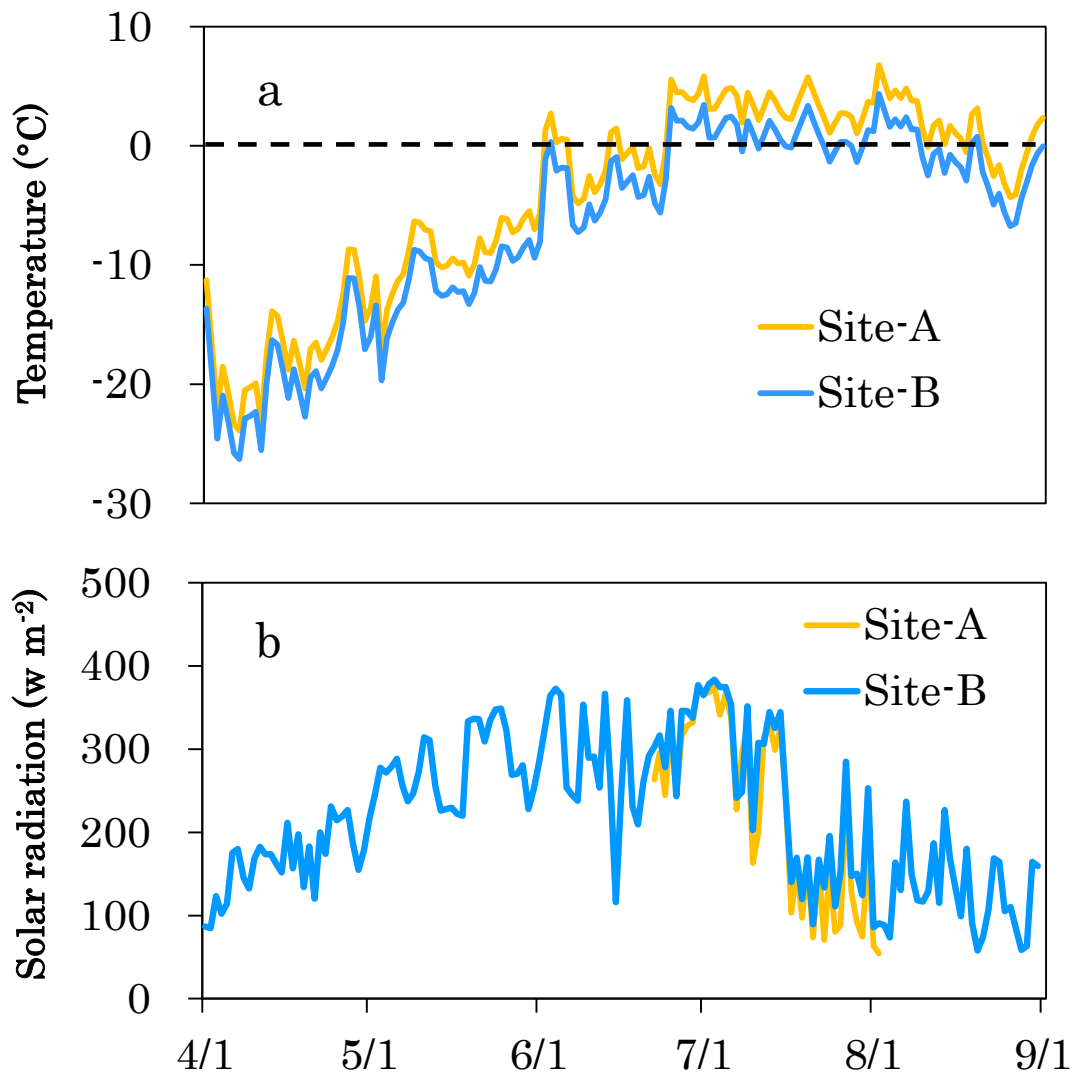


図2-11. カナック氷河のSite-AおよびSite-Bで4月から9月まで観測された気象データ.

a: 日平均気温, b: 日平均日射量.

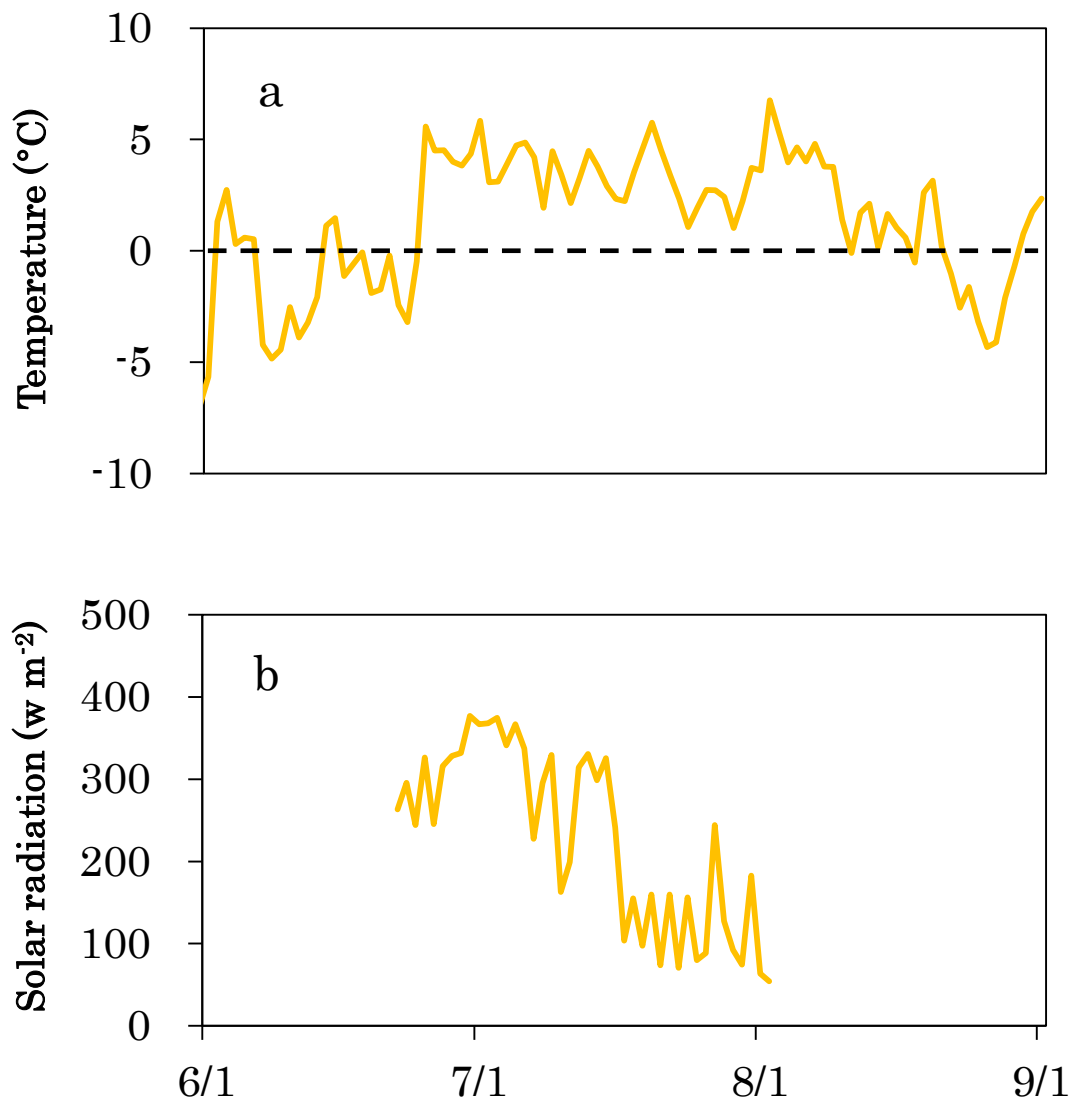


図 2-12. Site-A の 6 月から 9 月までの気象データ.

a: 日平均気温, b: 日平均日射量

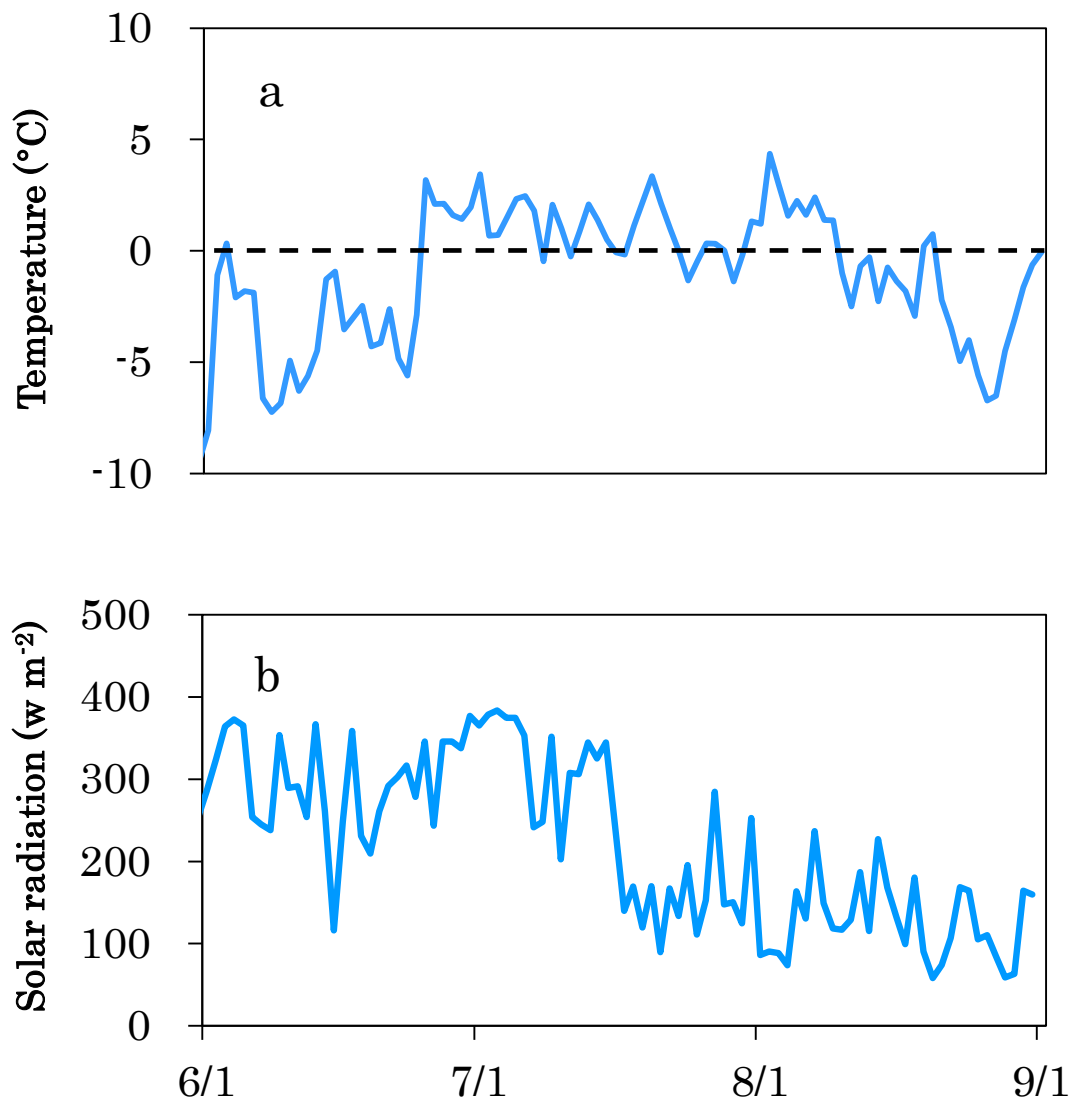


図 2-13. Site-B の 6 月から 9 月までの気象データ.

a: 日平均気温, b: 日平均日射量

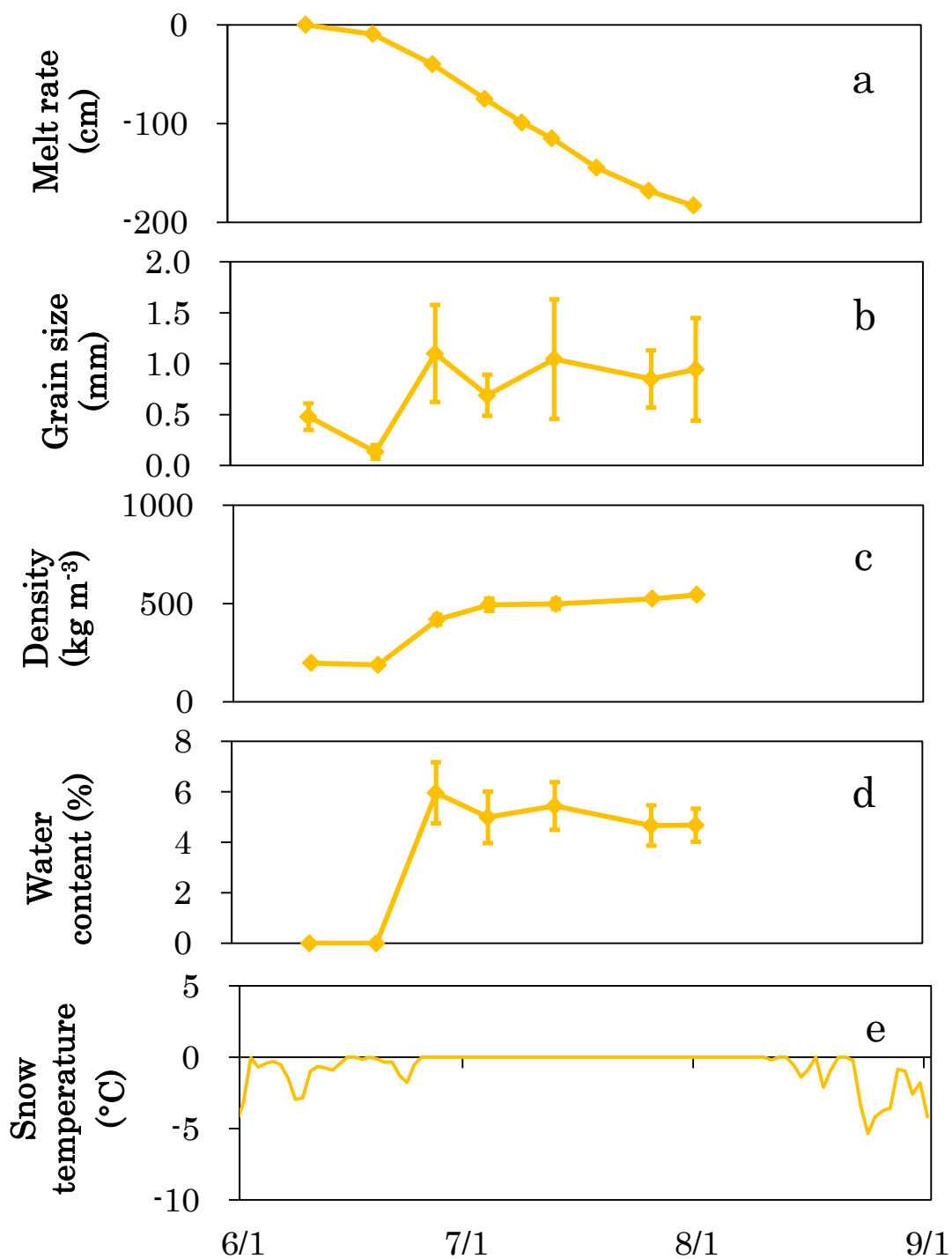


図 2-14. Site-A の 6 月から 9 月までの積雪表面の季節変化.

a: 積雪表面レベルの低下量, b: 粒径, c: 密度, d: 含水率, e: 雪温.

粒径, 密度, 含水率は積雪表面から深さ 2 cm のデータ. エラーバーは標準偏差.

雪温は長波放射から求めた 1 時間ごとの値.

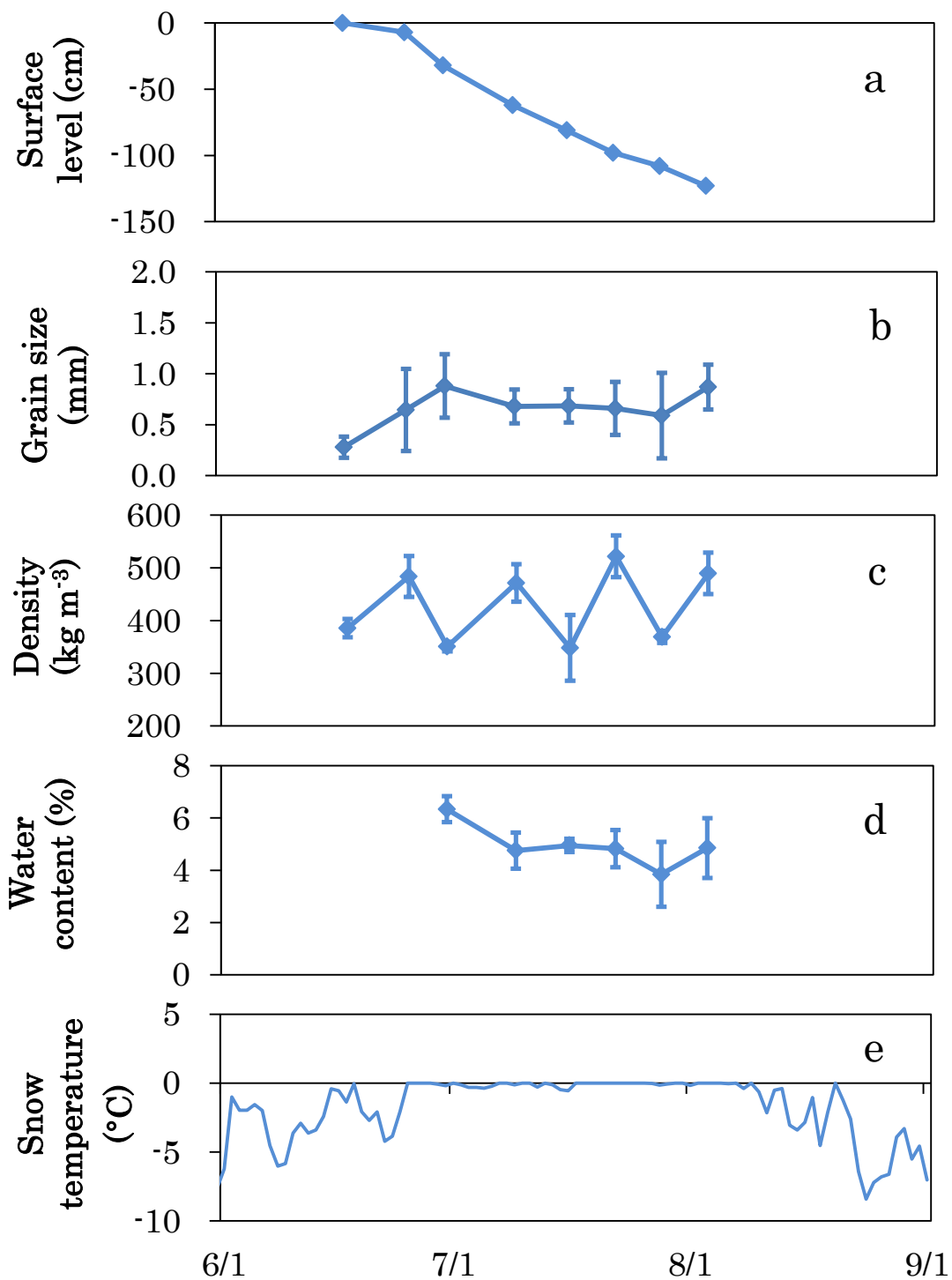


図 2-15. Site-B の 6 月から 9 月までの積雪表面の季節変化.

a: 積雪表面レベルの低下量, b: 粒径, c: 密度, d: 含水率, e: 雪温

粒径, 密度, 含水率は積雪表面から深さ 2 cm のデータ. エラーバーは標準偏差.

雪温は長波放射から求めた 1 時間ごとの値.

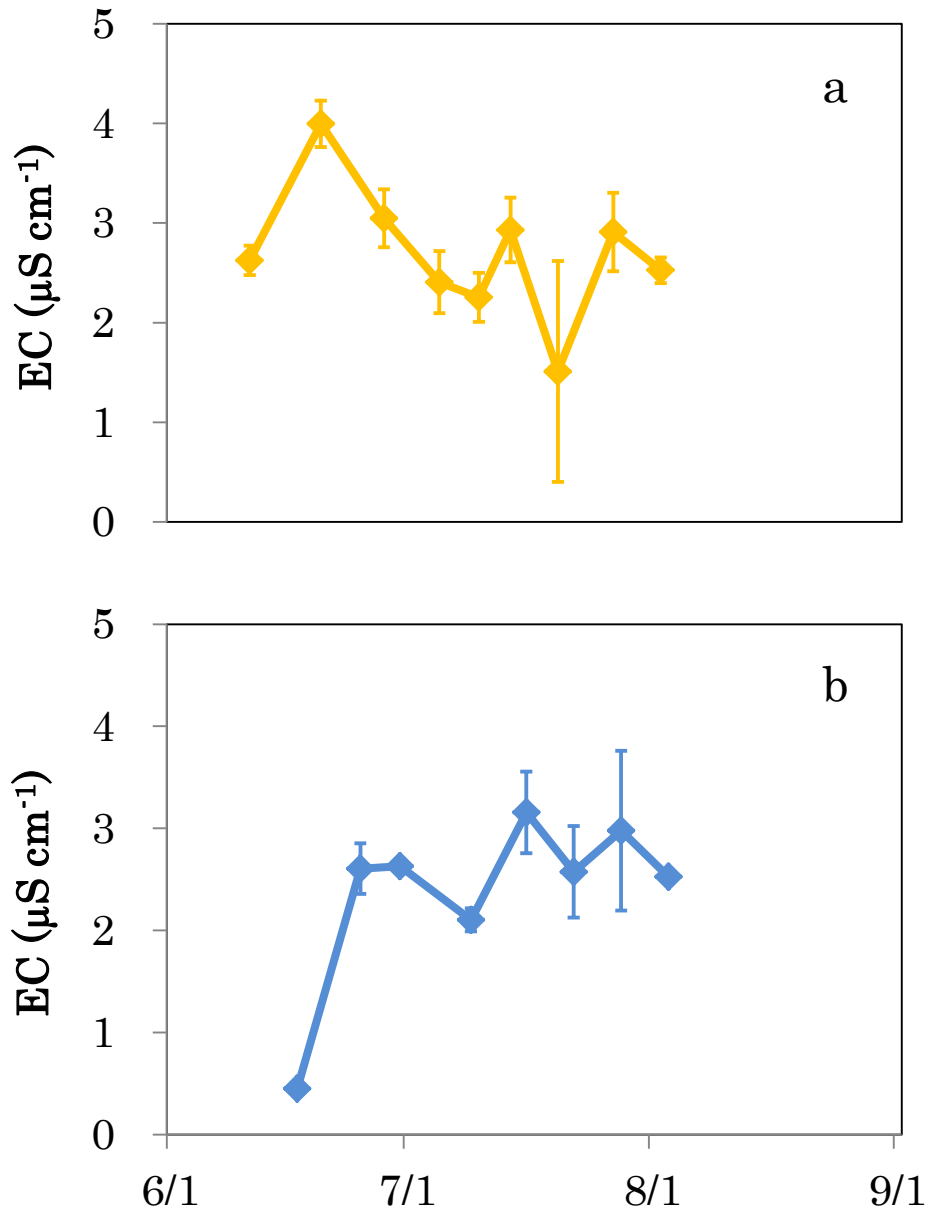


図 2-16. Site-A と Site-B の積雪表面における EC の季節変化.

a: Site-A の EC, b: Site-B の EC.

エラーバーは標準偏差.

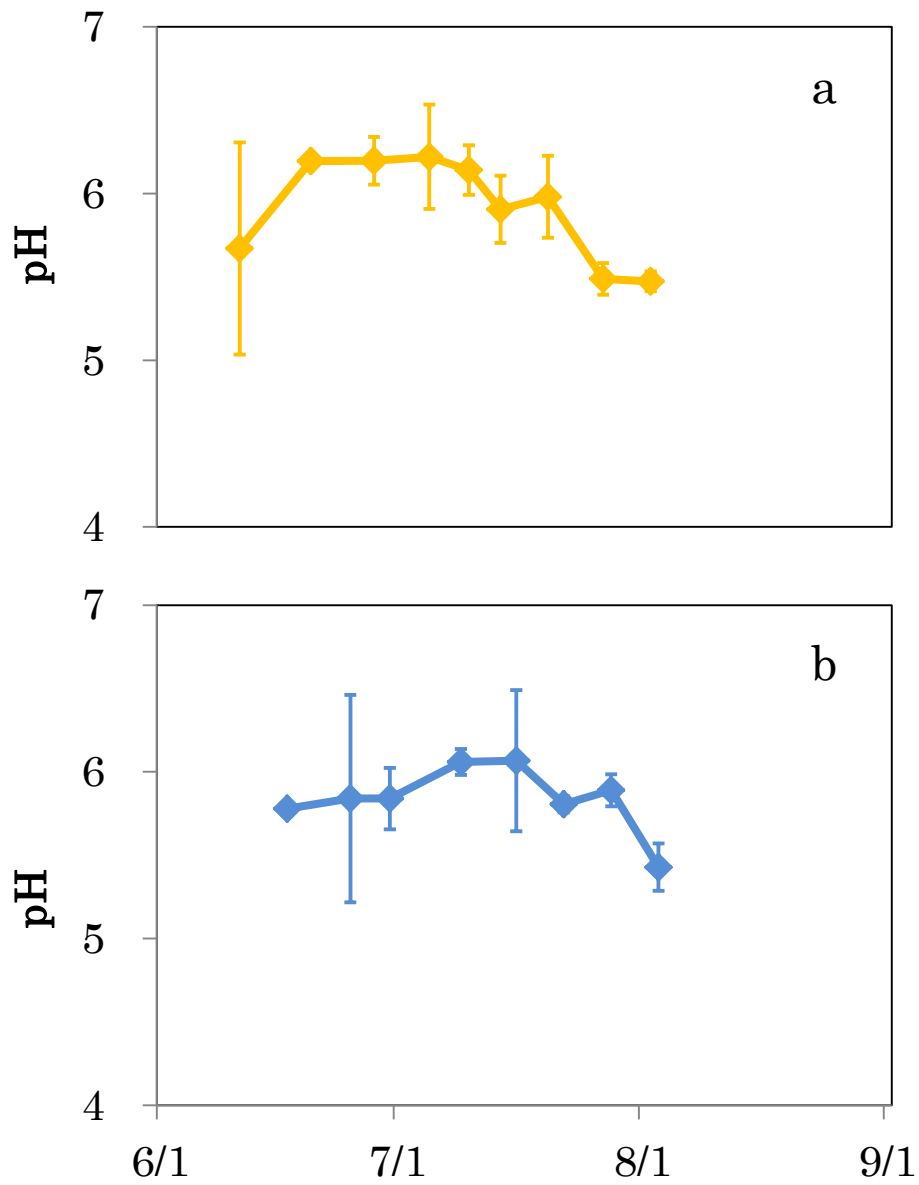


図 2-17. Site-A と Site-B の積雪表面における pH の季節変化.

a: Site-A の pH, b: Site-B の pH.

エラーバーは標準偏差.

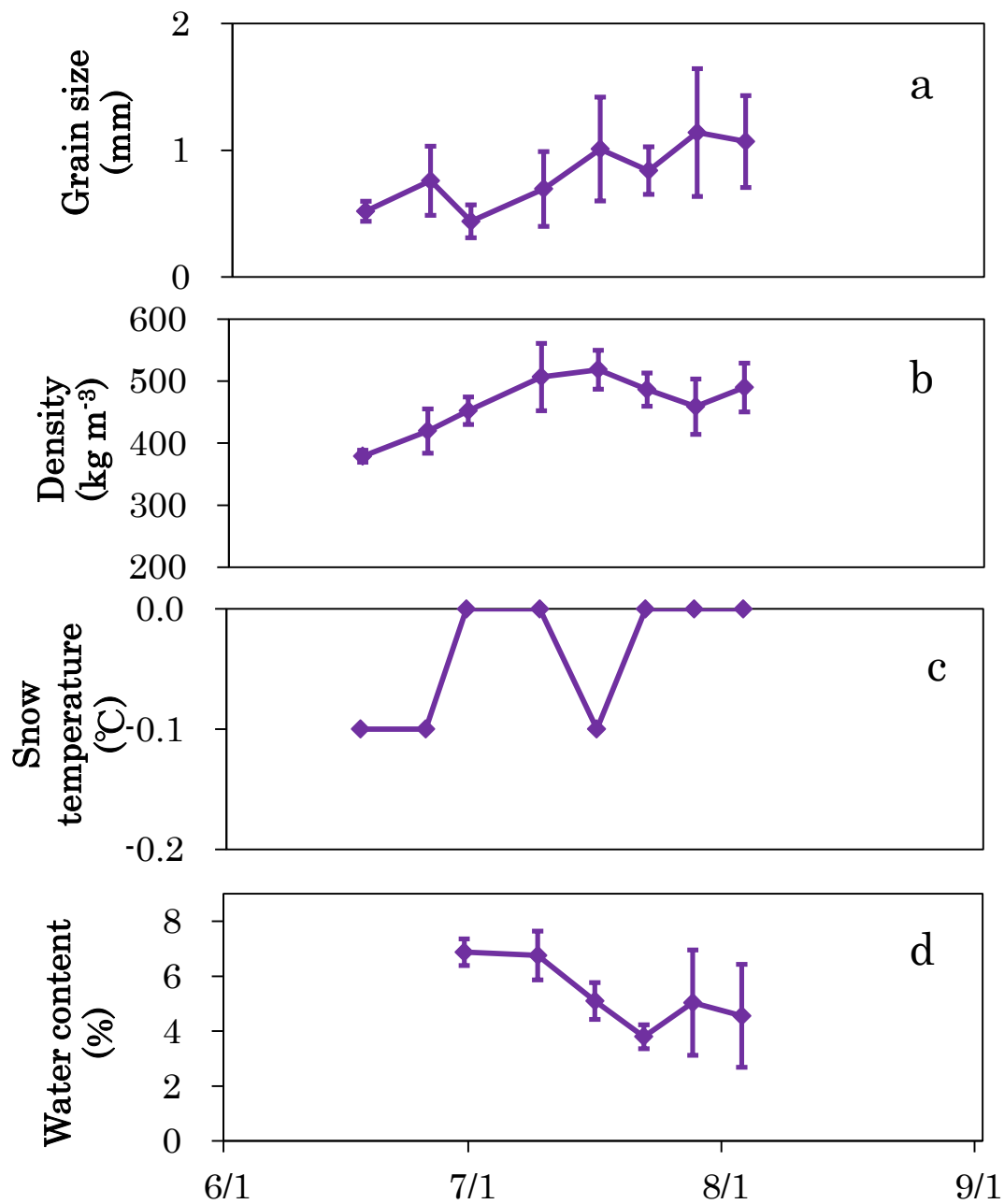


図 2-18. Site-B の表面下の積雪層における積雪物理量の季節変化.

a: 粒径, b: 密度, c: 雪温, d: 含水率.

粒径, 密度, 雪温, 含水率は積雪表面から深さ 2-10 cm の測定値. エラーバーは標準偏差.

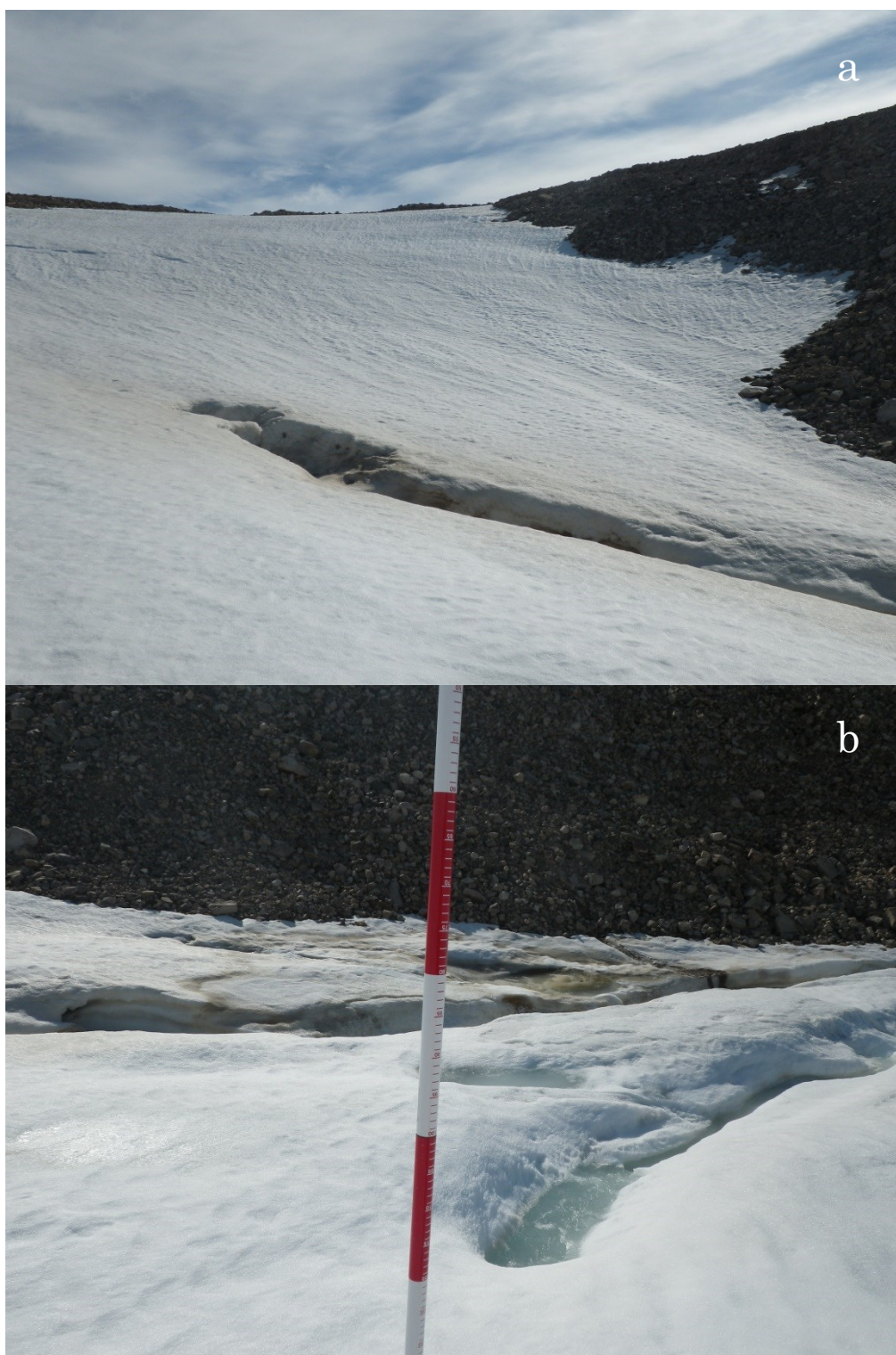


図 2-19. Site-A で観察された融解水流.

a: Site-A の中央を通る融解水流, b: Site-A 上流部から氷河の左岸へと流れる融解水.

2014 年 7 月 14 日撮影.

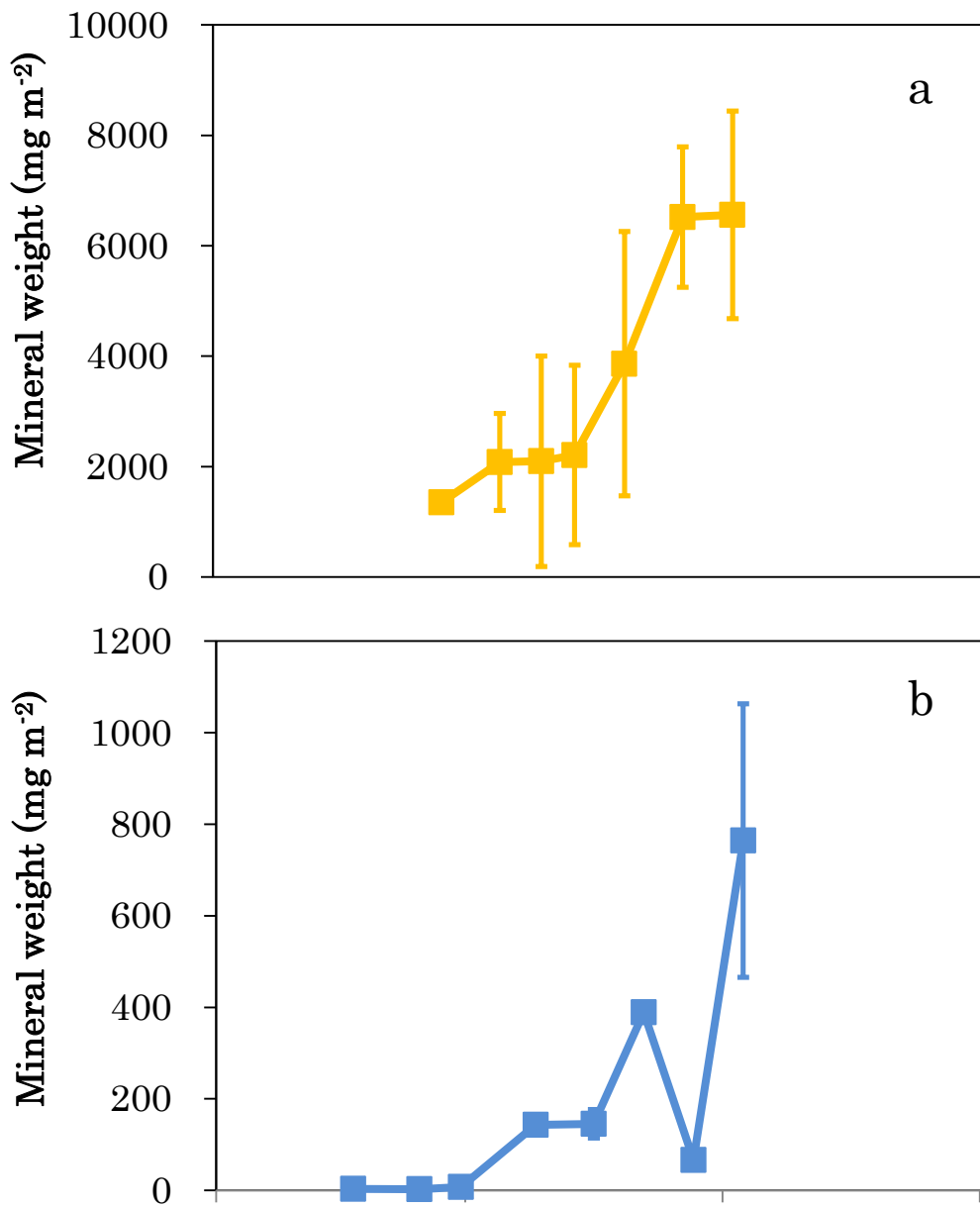


図 2-20. Site-A と Site-B の積雪表面における鉱物粒子の重量の季節変化.

a: Site-A の鉱物重量, b: Site-B の鉱物重量.

エラーバーは標準偏差.

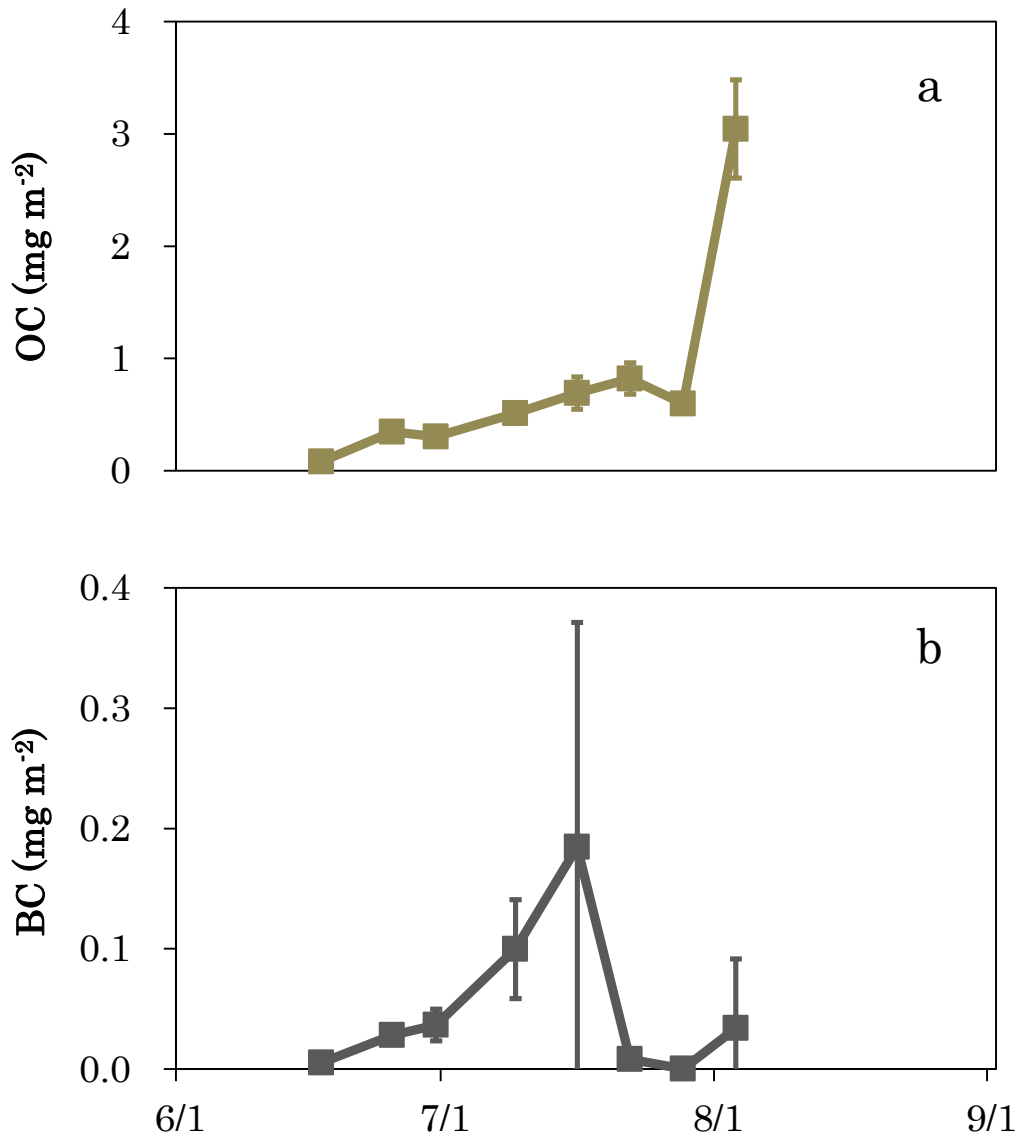


図 2-21. Site-B の積雪表面における炭素濃度の季節変化.

a: OC の濃度, b: BC の濃度.

エラーバーは標準偏差.

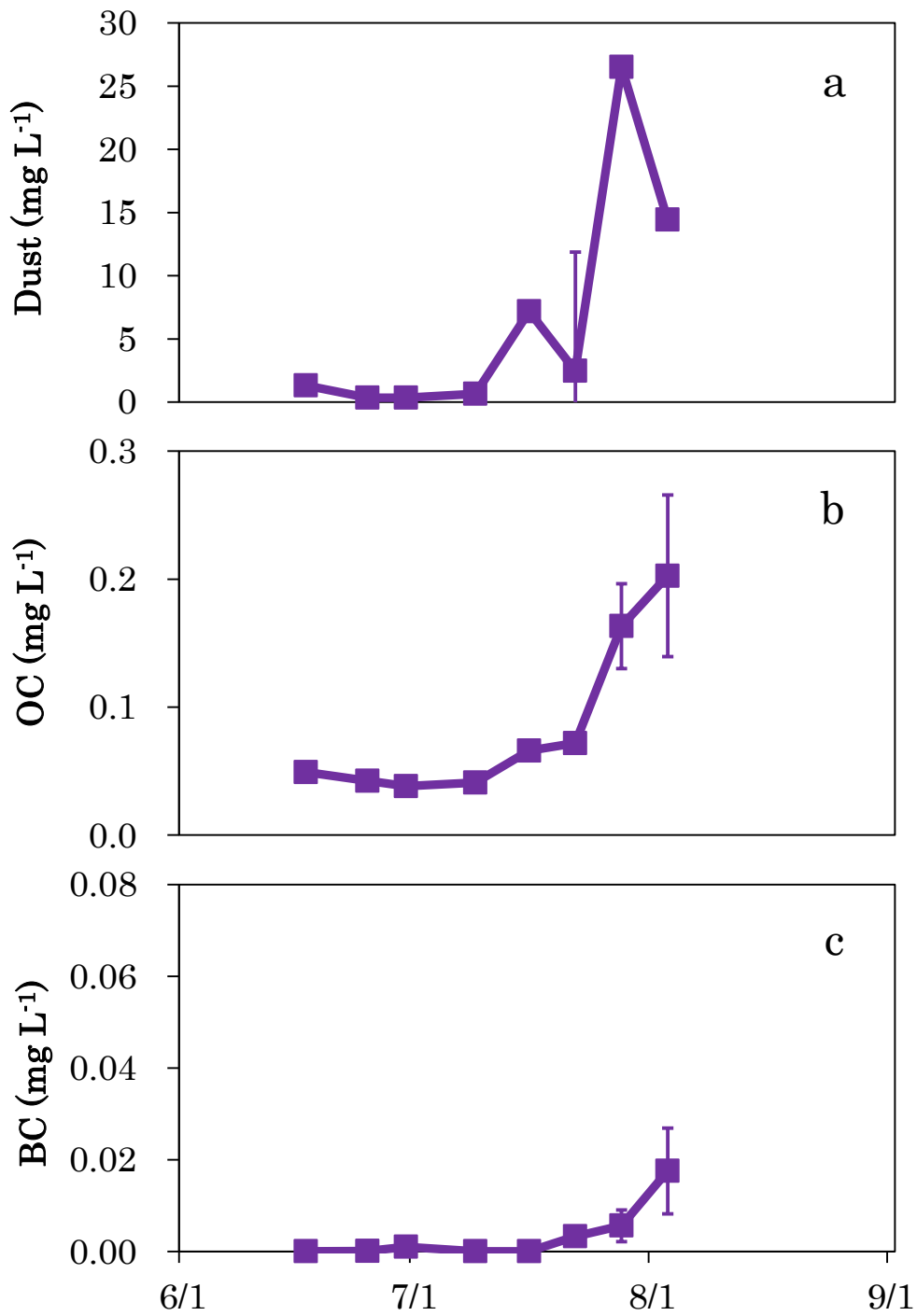


図 2-22. Site-B の表面下の積雪層における不純物濃度の季節変化.

a: 鉱物粒子の重量, b: OC の濃度, c: BC の濃度.

エラーバーは標準偏差.

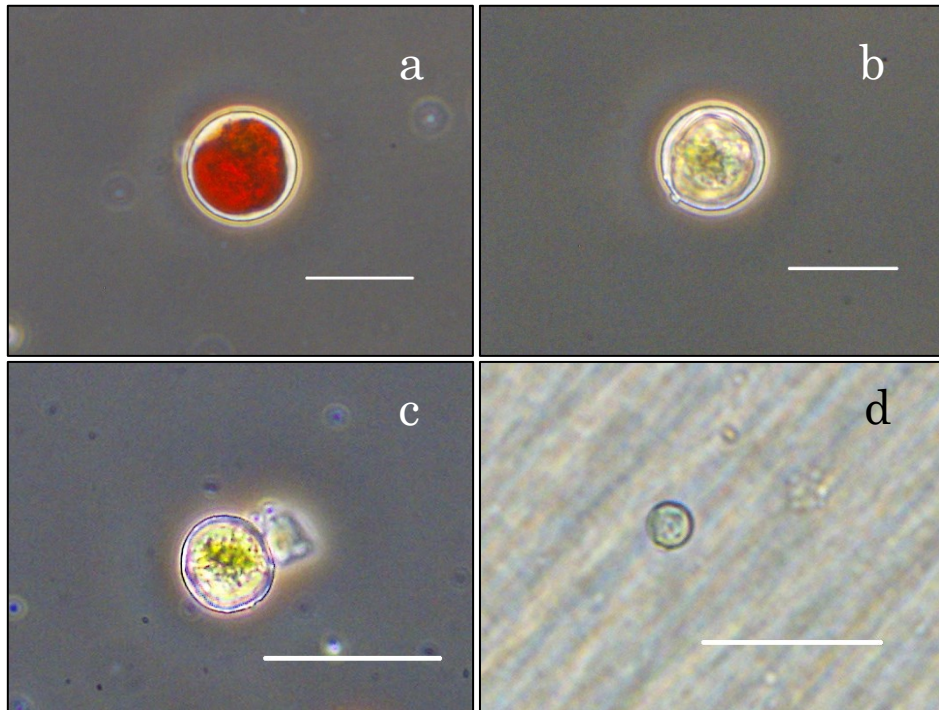


図 2-23. カナック氷河の積雪表面で観察された雪氷藻類.

a: *Chloromonas* sp.の休眠細胞, b: *Chloromonas* sp.の栄養細胞,

c: 小型球形緑藻, d: *Chroococcaceae cyanobacterium*.

写真内の白線は 20 μm のスケールを表している.

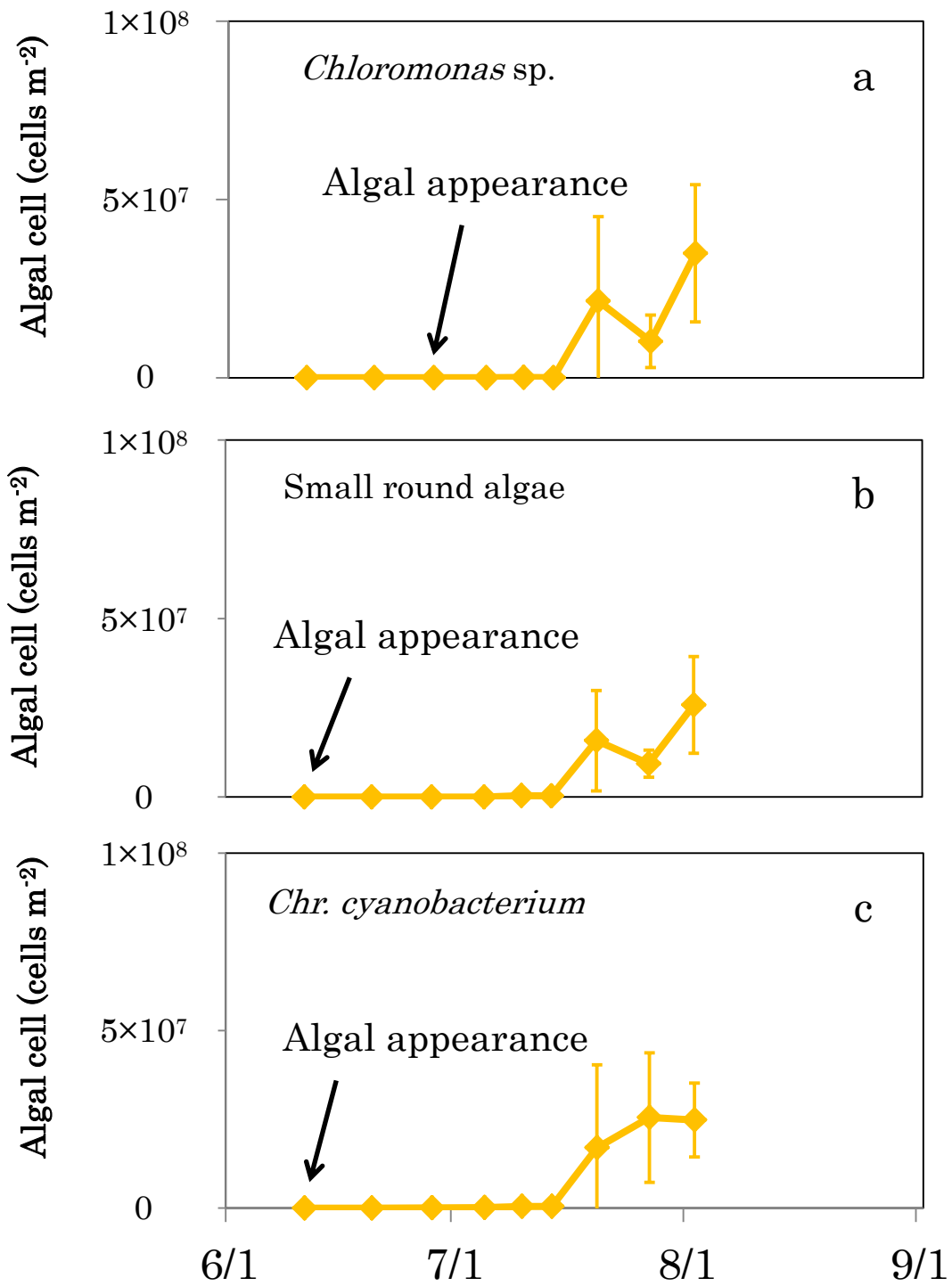


図 2-24. Site-A 積雪表面における藻類の細胞濃度の季節変化.

a: *Chloromonas sp.*, b: 小型球形緑藻 (Small round algae) , c: *Chr. cyanobacterium*.

エラーバーは標準偏差.

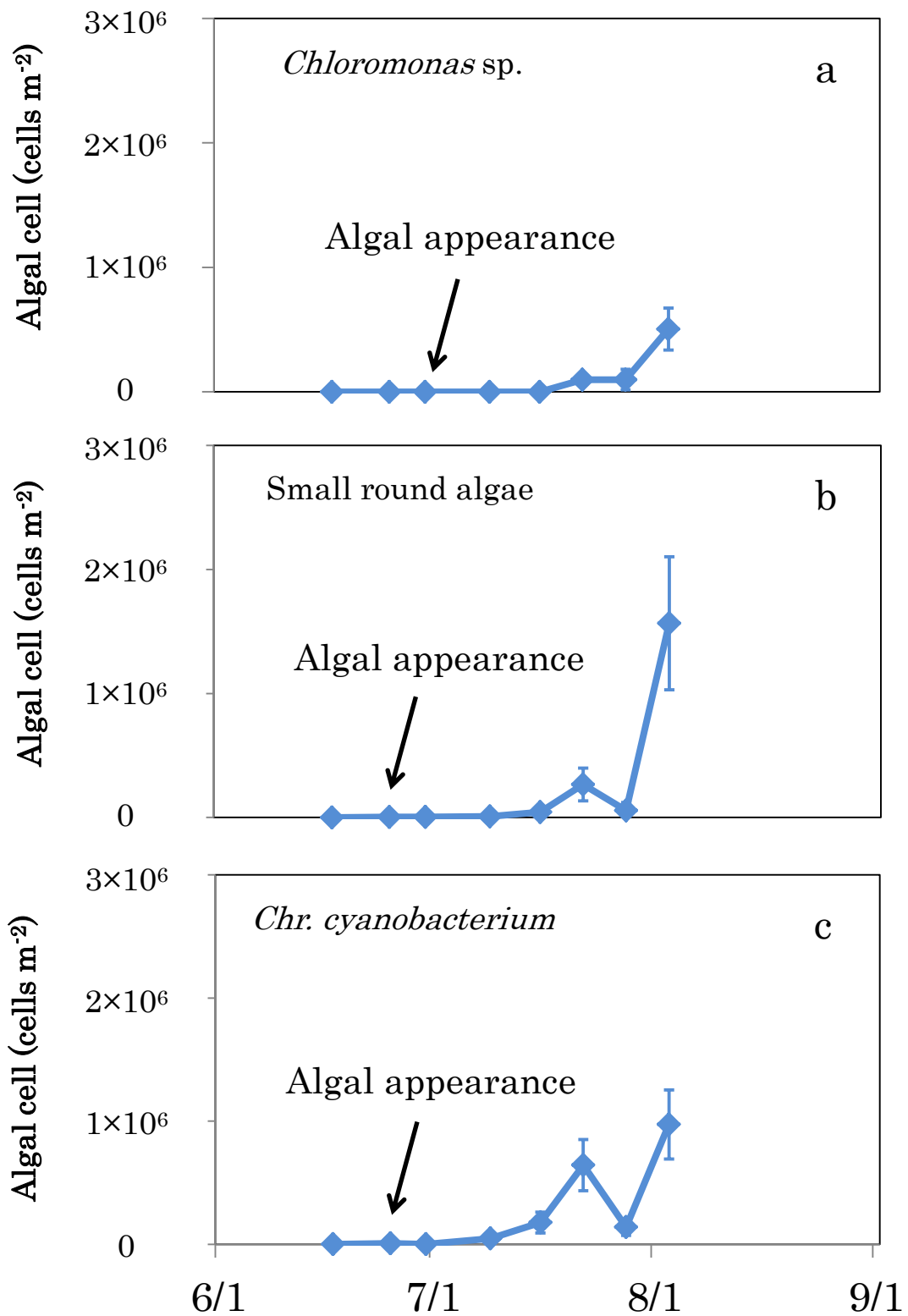


図 2-25. Site-B の積雪表面における藻類の細胞濃度の季節変化.

a: *Chloromonas sp.*, b: 小型球形緑藻 (Small round algae), c: *Chr. cyanobacterium*.

エラーバーは標準偏差.

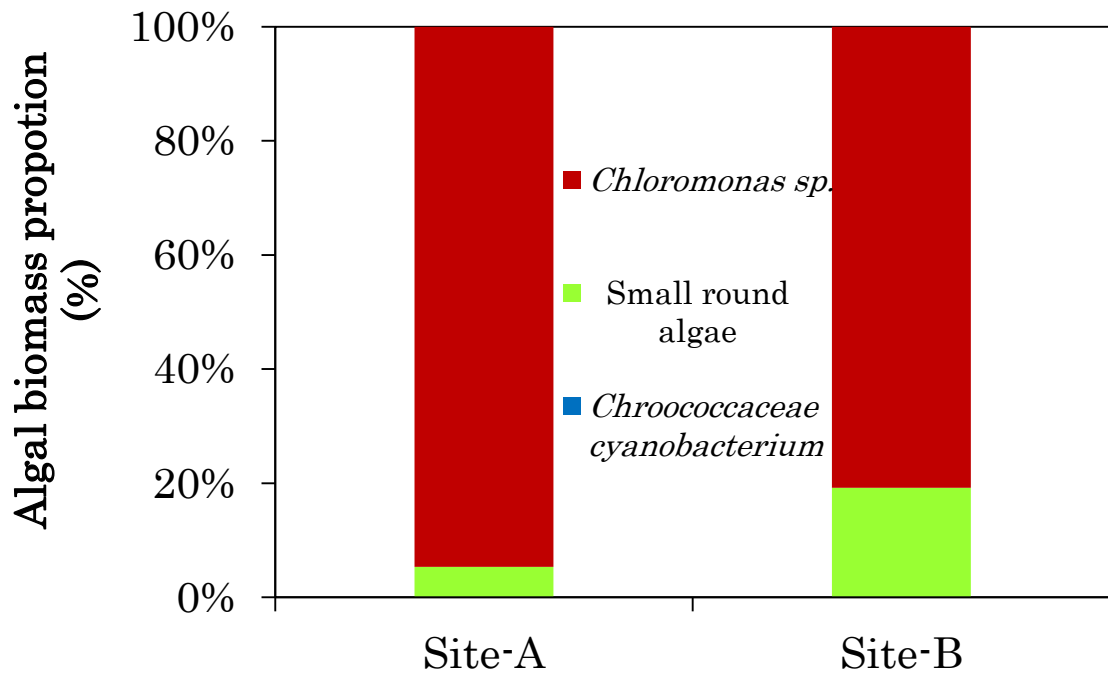


図 2-26. Site-A と Site-B の積雪表面における雪氷藻類の細胞体積バイオマス。

Site-A は 8 月 2 日， Site-B は 8 月 3 日の結果を表している。

両地点で *Chr. cyanobacterium* の細胞は確認されたが，細胞の体積が比較的小さいため，両地点で *Chr. cyanobacterium* の細胞体積バイオマスは 0% となっている。

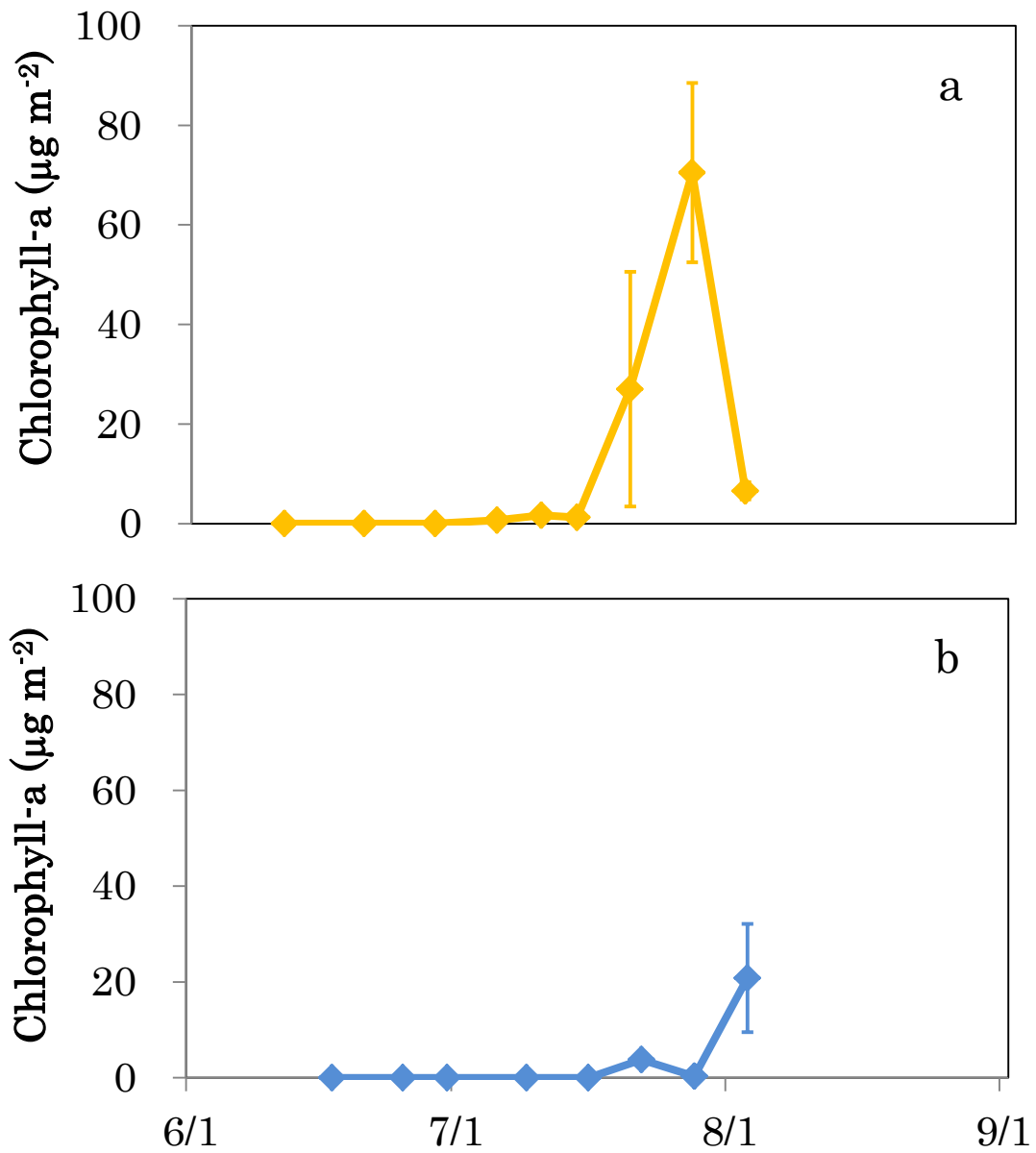


図 2-27. Site-A と Site-B の積雪表面におけるクロロフィル a 濃度の季節変化.

a: Site-A のクロロフィル a 濃度, b: Site-B のクロロフィル a 濃度.

エラーバーは標準偏差.

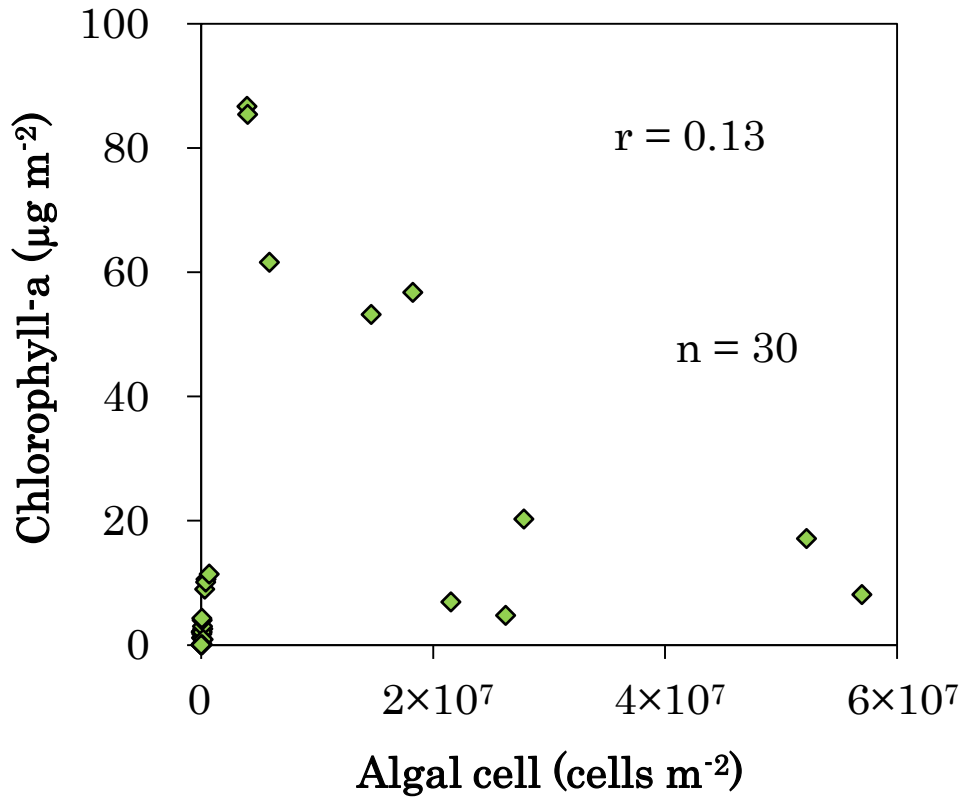


図 2-28. Site-A と Site-B のクロロフィル a 濃度と細胞濃度の関係.

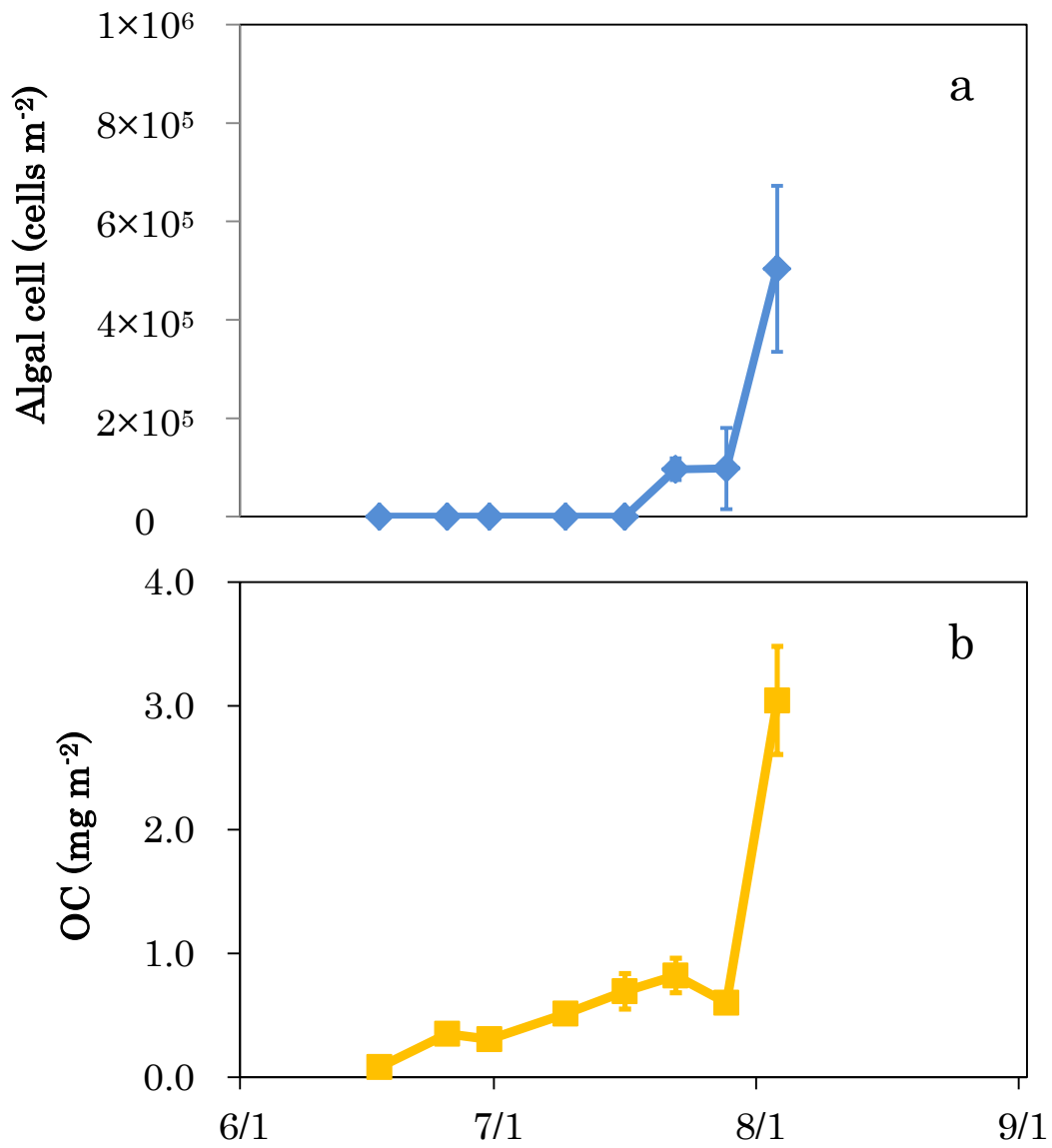


図 2-29. 積雪表面の雪氷藻類と OC の季節変化.

a: 藻類の細胞濃度, b: OC の濃度.

それぞれのエラーバーは標準偏差を表している.

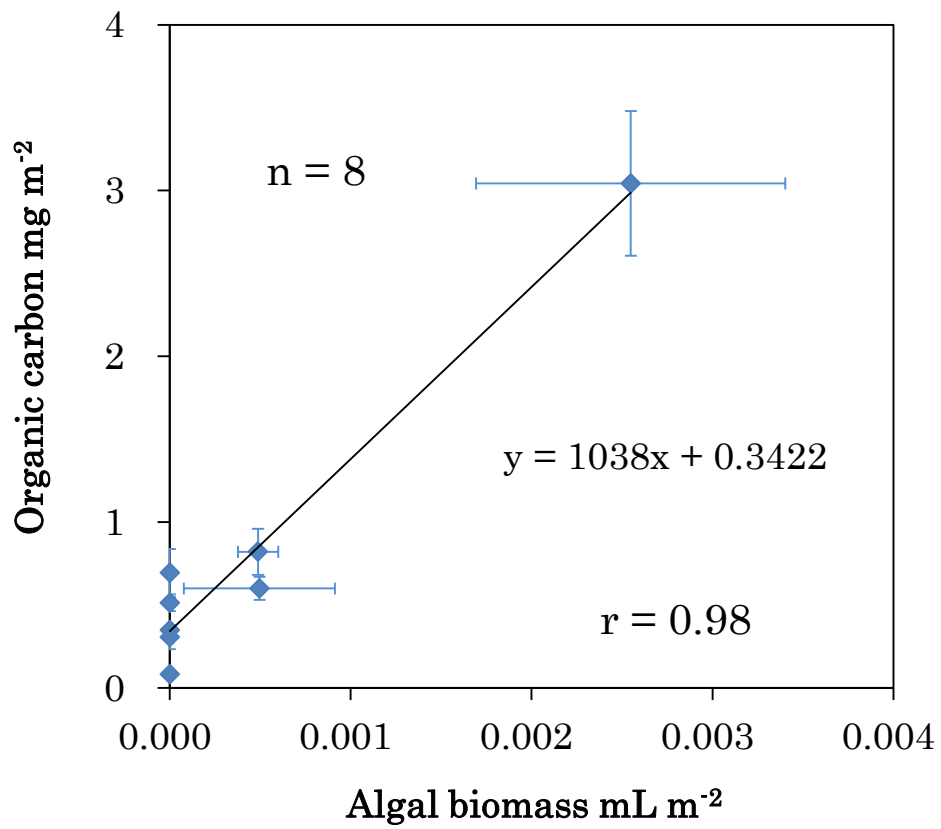


図 2-30. 藻類の細胞体積バイオマスと OC の濃度の関係.

それぞれの値は、観測日ごとに得られたバイオマスと OC の平均値である.

エラーバーはそれぞれのサンプルの標準偏差を表している.

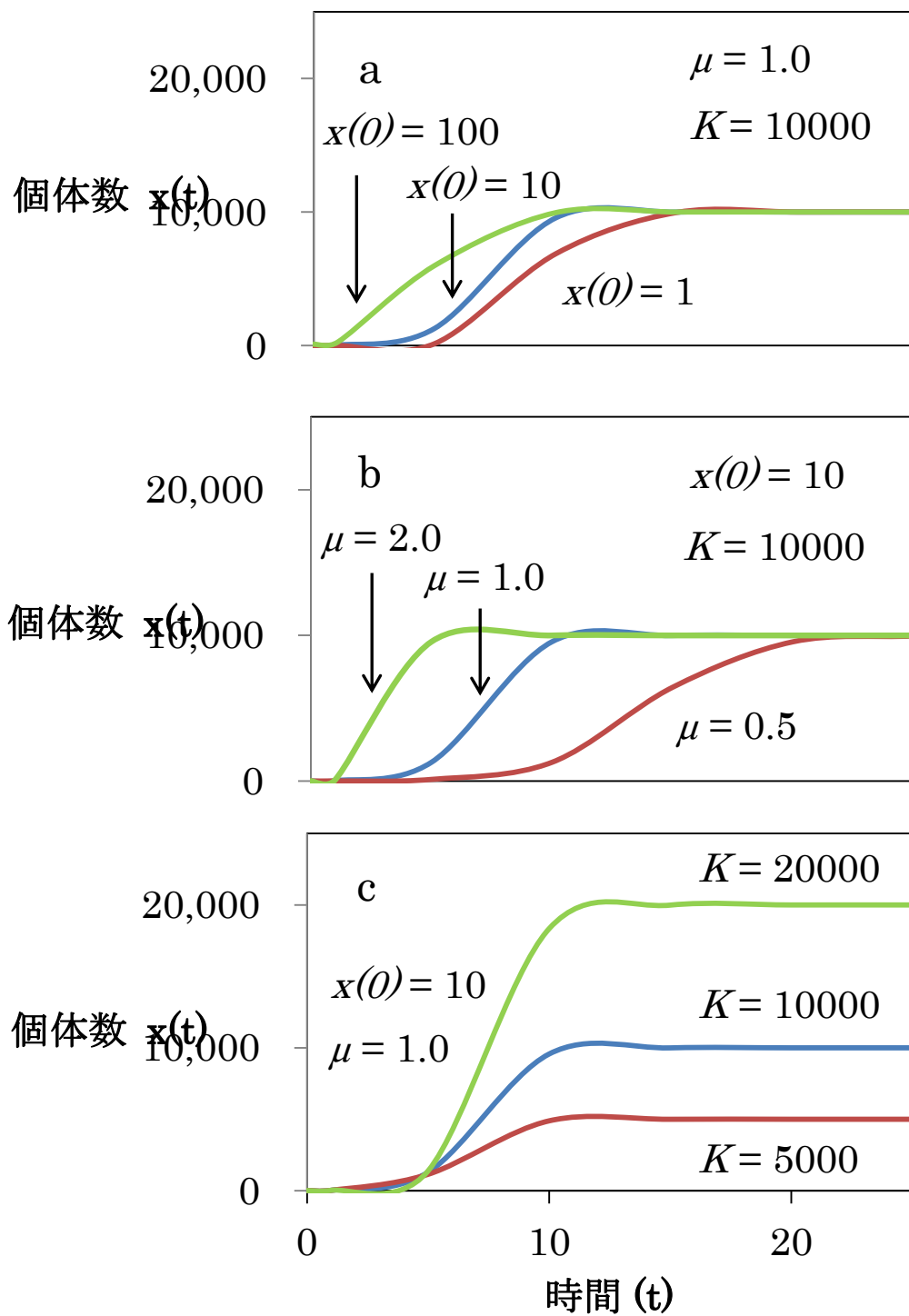


図 2-31. ロジスティックモデルにおけるパラメータの感度.

a: 初期細胞濃度 $x(0)$, b: 増加率 μ , c: 環境収容力 K .

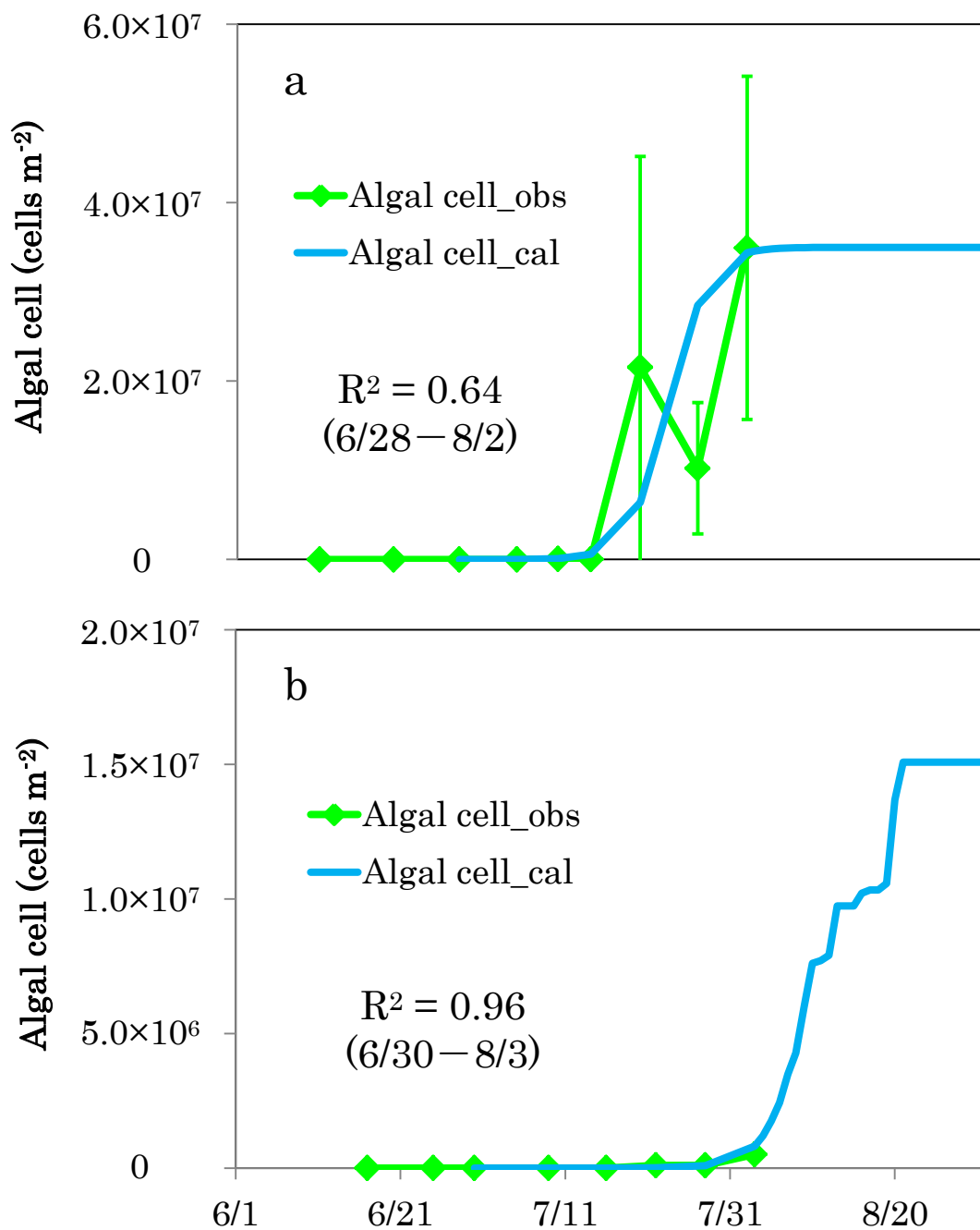


図 2-32. 積雪表面の細胞濃度のモデル計算値と観測値.

a: Site-A の細胞濃度, b: Site-B の細胞濃度.

モデルによる計算は藻類の出現日から 8 月 31 日までの期間で行った.

縦軸の値のスケールは a と b で異なる.

観測値のエラーバーは標準偏差.

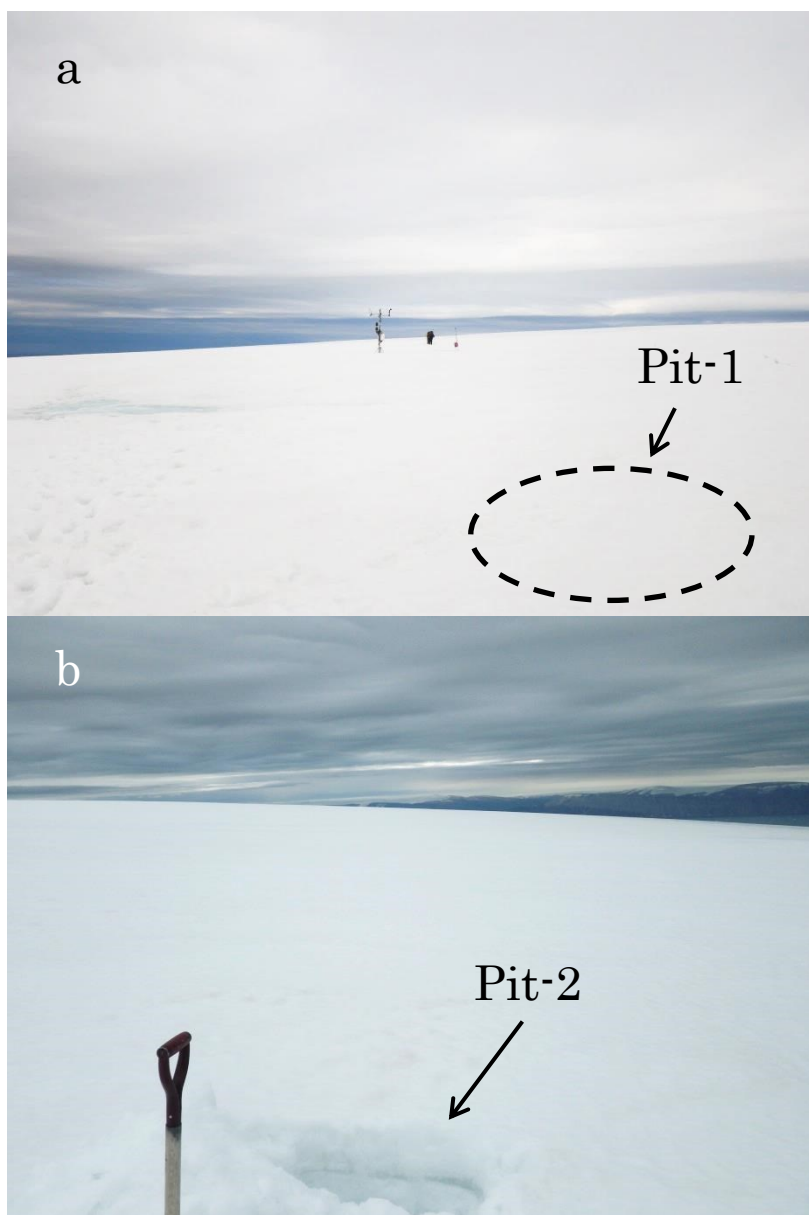


図 3-1. 観測を行った Pit-1 と Pit-2 の周辺積雪.

2014 年 8 月 3 日撮影.

a: Pit-1 周辺の積雪, b: Pit-2 周辺の積雪.

a は積雪断面作成前に撮影した写真である.

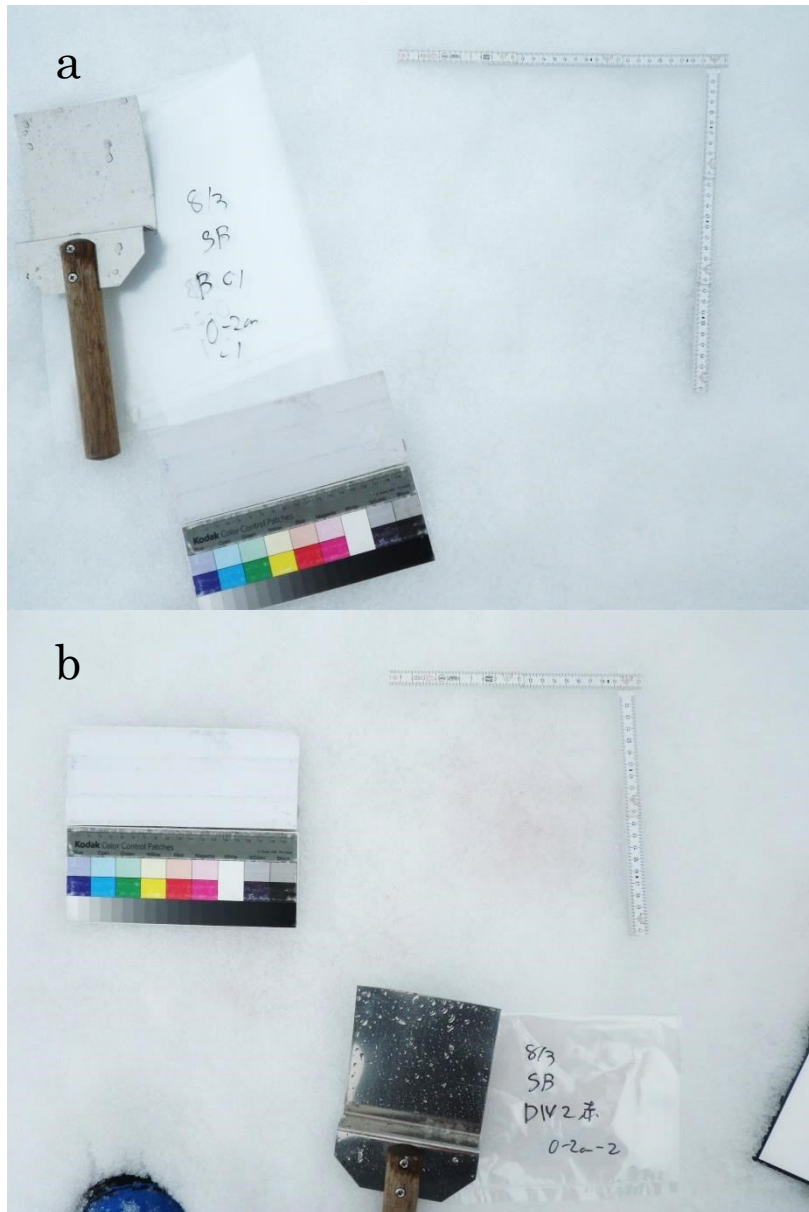


図 3-2. 観測を行った Pit-1 と Pit-2 の積雪表面.

2014 年 8 月 3 日撮影.

a: Pit-1 の積雪表面, b: Pit-2 の積雪表面.

b では積雪表面が赤く染まっている様子がみられる.

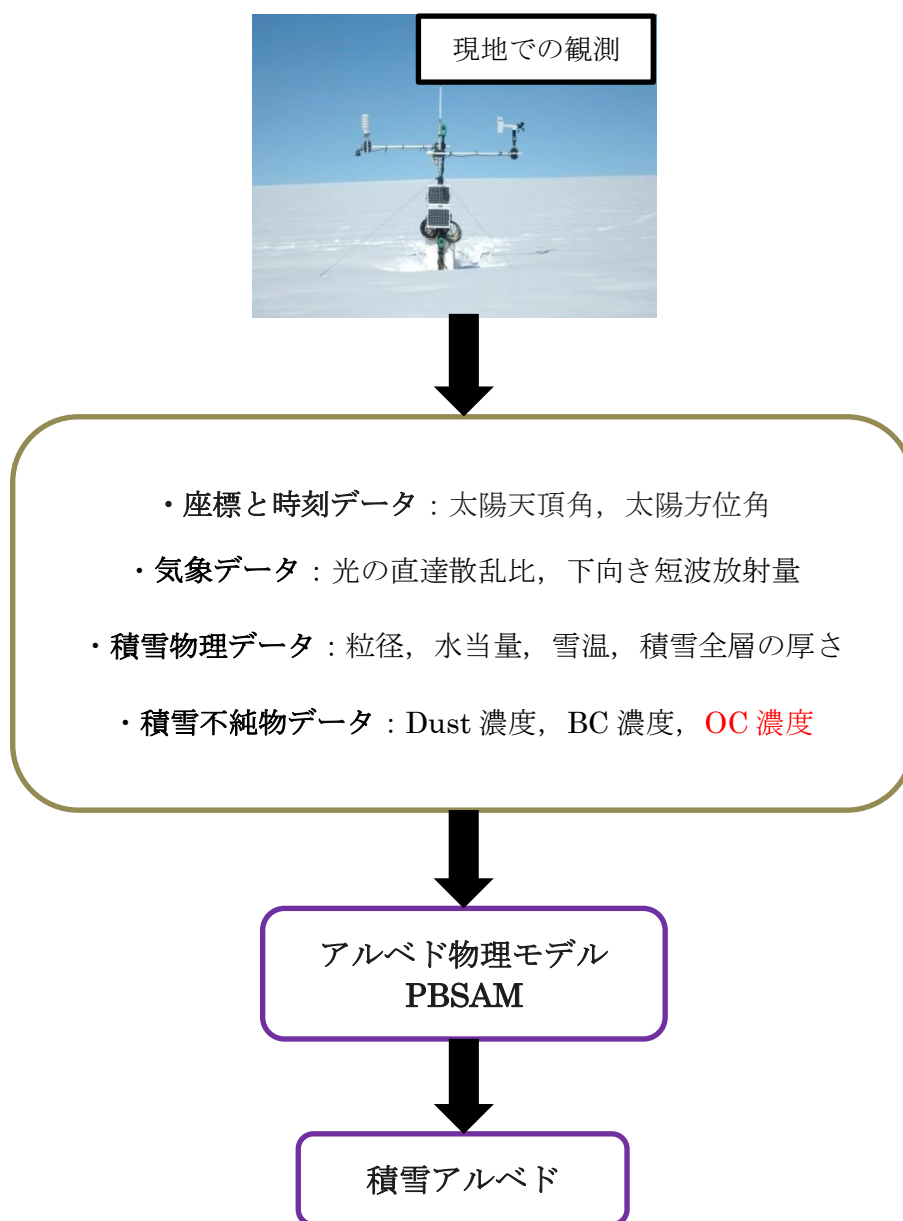


図 3-3. 本研究のアルベド物理モデル PBSAM によるアルベド計算の流れ。
 本研究の積雪アルベドのモデル計算は，現地観測データのみを基にして行っている。
 赤字で示した OC 濃度は，本研究で新しく加えた入力データである。

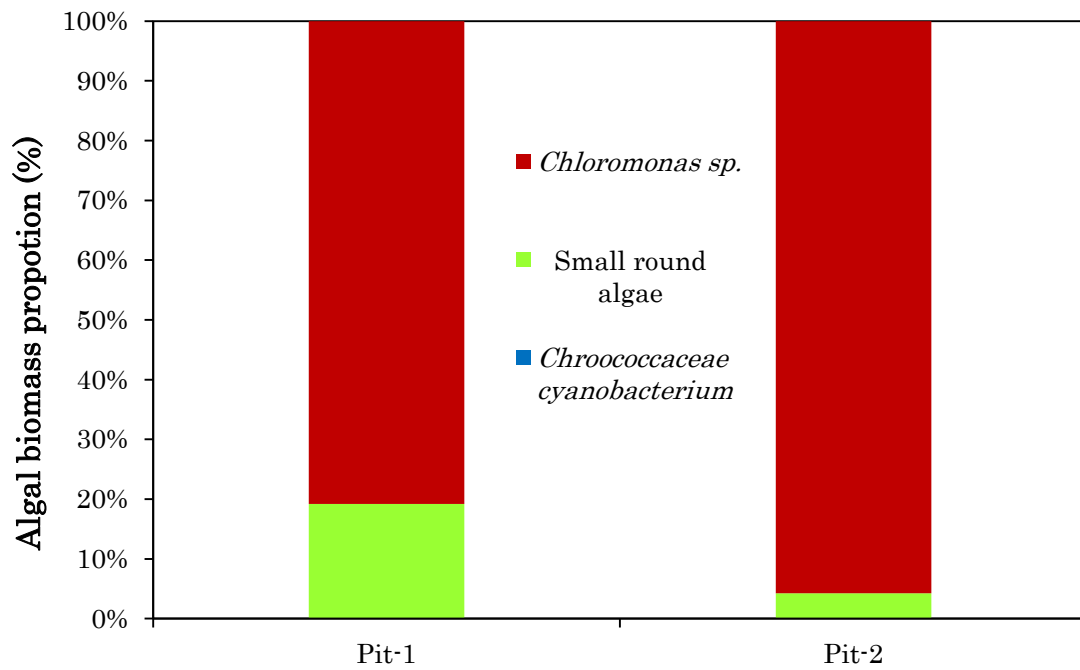


図 3-4. Pit-1 と Pit-2 の総細胞体積バイオマスに対する藻類種ごとのバイオマスの割合.

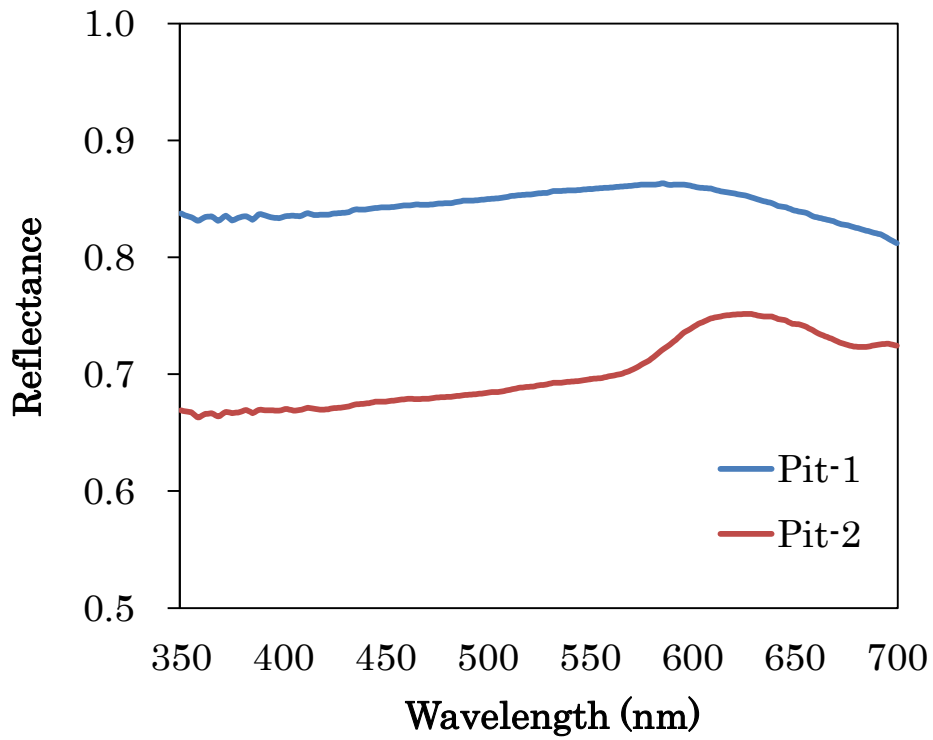


図 3-5. Pit-1 と Pit-2 の雪面における波長毎の反射率.

反射率は、それぞれのピット周辺の雪面の異なる 3 箇所で測定した値の平均である。測定波長 350-1050 nm の内、可視域の 350-700 nm までの反射率を示している。

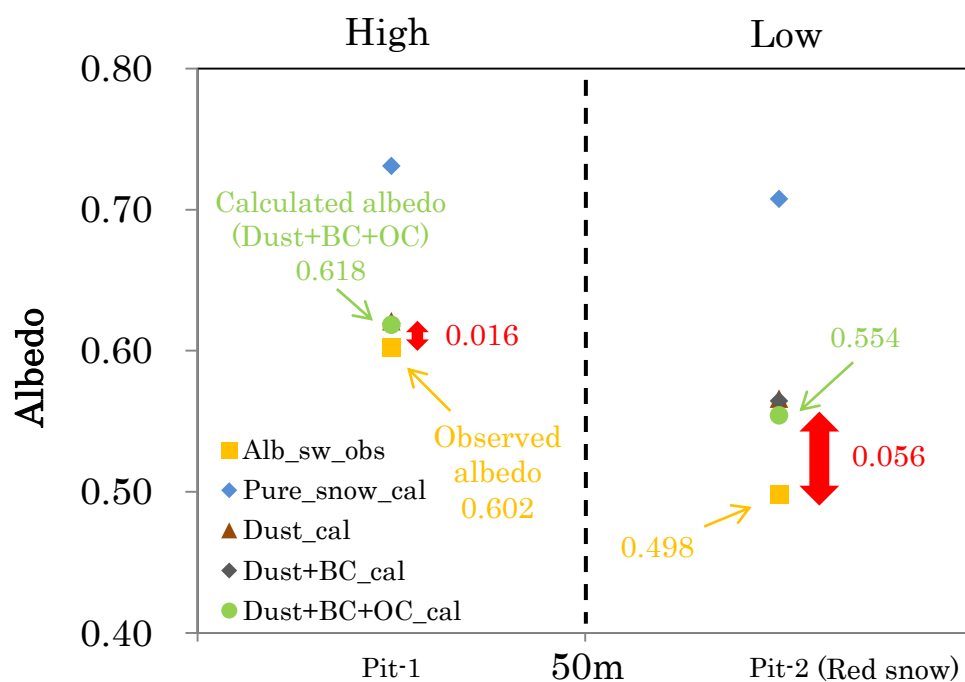


図 3-6. PBSAM によるアルベドの計算値と観測値.

アルベドの計算値は、不純物の吸光効果を考慮しない場合 (Pure snow), Dust の吸光効果のみ考慮する場合 (Dust), Dust と BC の吸光効果を考慮する場合 (Dust+BC), Dust, BC, OC の吸光効果を考慮する場合 (Dust+BC+OC) の 4 つの条件で求めている.

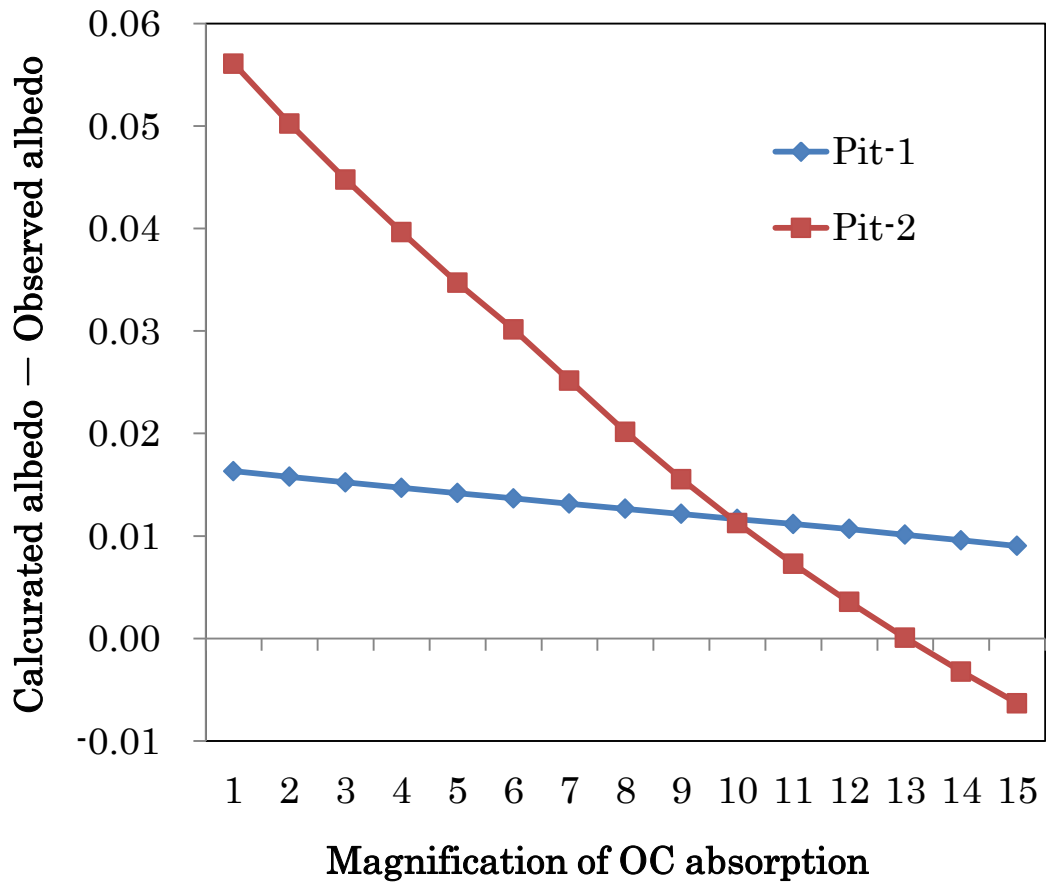


図 3-7. OC の吸光係数を調整して求めたアルベドの計算値と観測値の差.

Pit-2 で OC 濃度はより高いために、吸光係数の倍率を変えたときのアルベドの変化が大きくなっている。Pit-2 では、OC の吸光係数を 13 倍したときのアルベドの計算値が観測値と最も近い値となった。

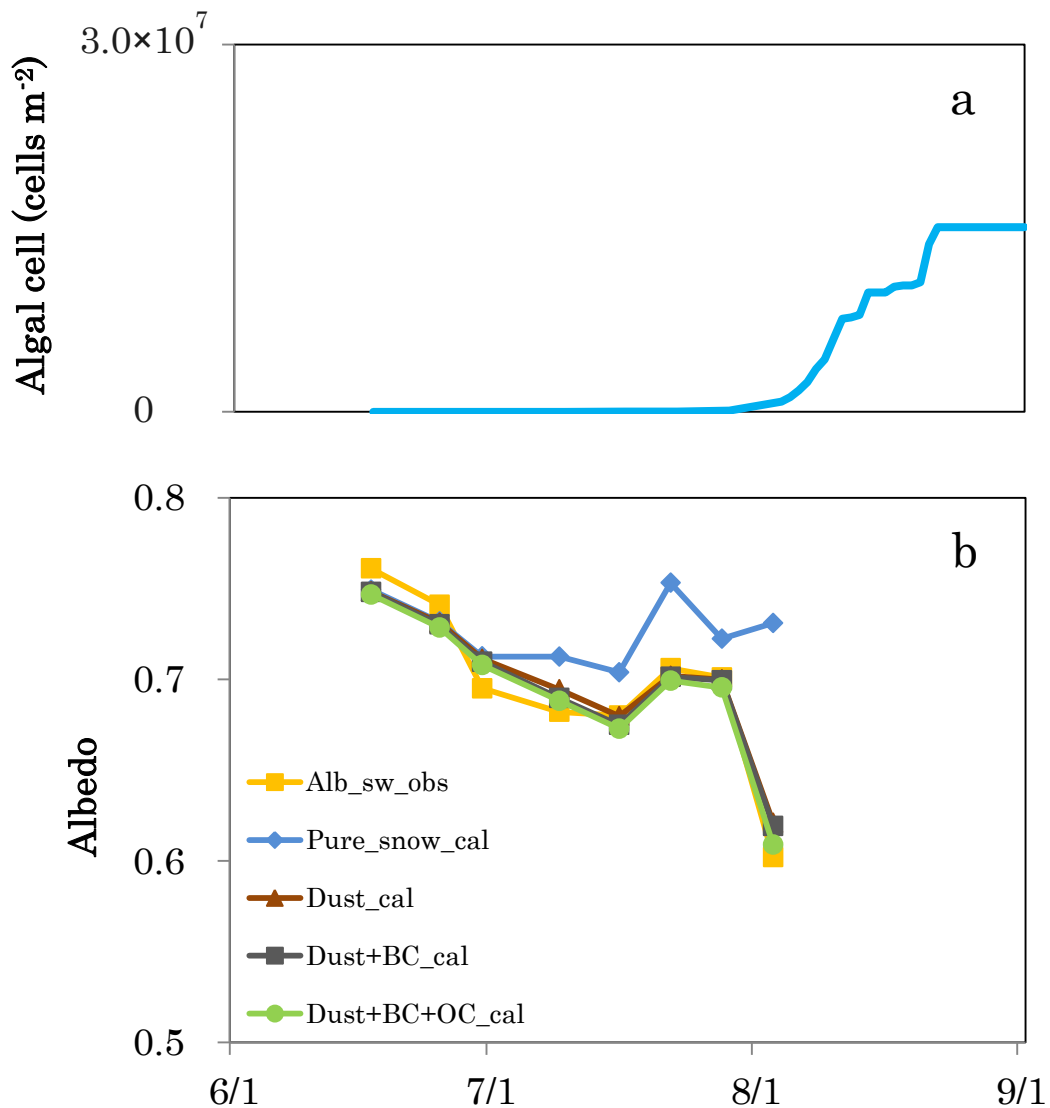


図 3-8. Site-B における藻類濃度とアルベドの季節変化.

a: 繁殖モデルが計算した藻類の細胞濃度の季節変化.

b: アルベド物理モデルが求めたアルベドの計算値と観測値の季節変化.

OC の吸光係数は 400–700 nm の波長帯の値を 13 倍にしたものを使用している.

アルベドの計算値は、不純物の吸光効果を考慮しない場合 (Pure snow), Dust の吸光効果のみ考慮する場合 (Dust), Dust と BC の吸光効果を考慮する場合 (Dust+BC), Dust, BC, OC の吸光効果を考慮する場合 (Dust+BC+OC) の 4 つの条件で求めている.

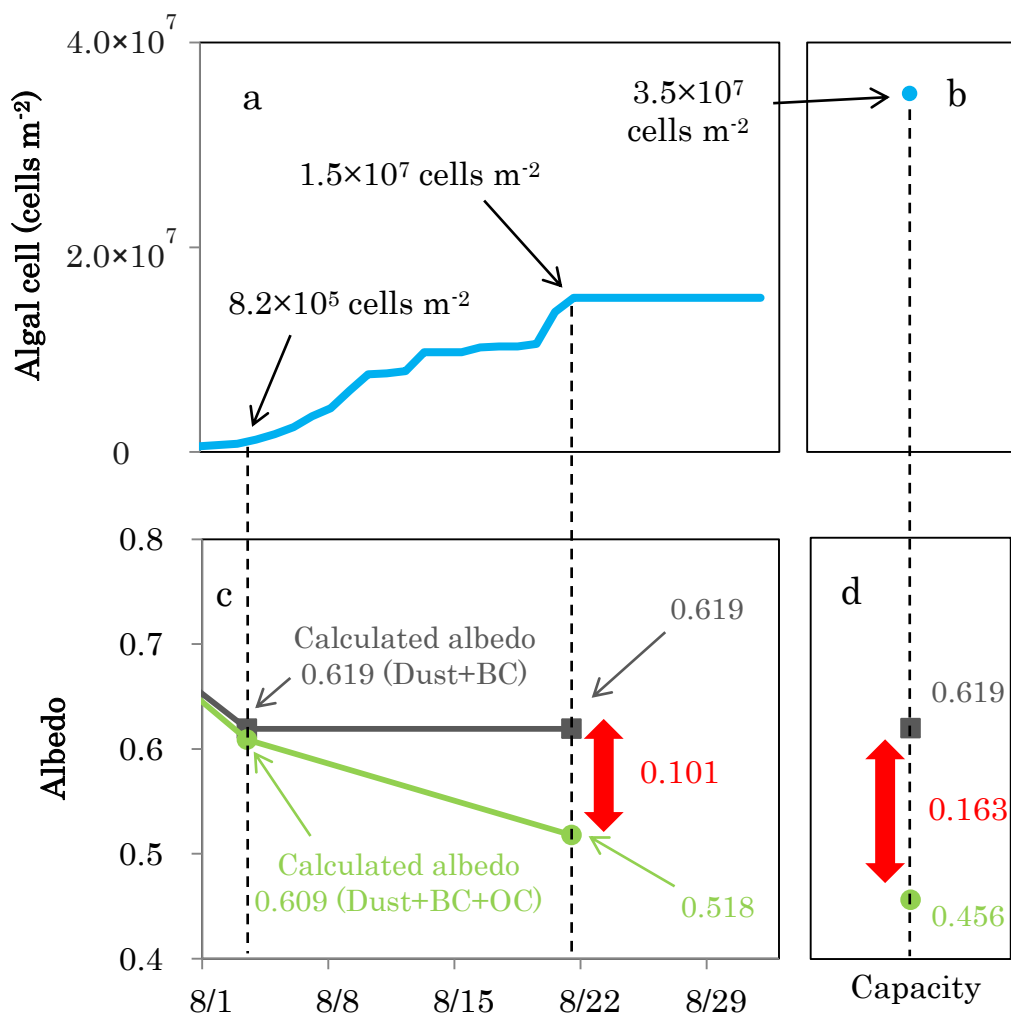


図 3-9. 観測期間外の藻類濃度とアルベドのモデル計算値.

a: 繁殖モデルが計算した細胞濃度.

b: 繁殖モデルで設定した細胞濃度の環境収容力.

c: a の細胞濃度から求めたアルベドと細胞濃度を含めないアルベド.

d: b の細胞濃度から求めたアルベドと細胞濃度を含めないアルベド.

アルベドのモデル計算では、細胞 (OC) 濃度以外の条件は全て同じである.