



Title	尾瀬地域におけるアカシボの発達過程
Author(s)	福原, 晴夫; 木村, 直哉; 北村, 淳 他
Citation	低温科学, 70, 37-47
Issue Date	2012-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49011
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS70_005.pdf



尾瀬地域におけるアカシボの発達過程

福原 晴夫¹⁾, 木村 直哉²⁾, 北村 淳²⁾, 落合 正宏³⁾,
山本 鎔子⁴⁾, 林 卓志⁵⁾, 大高 明史⁶⁾, 小島 久弥⁷⁾,
福井 学⁷⁾, 菊地 義昭⁸⁾, 野原 精一⁹⁾

2011 年 12 月 28 日受付, 2012 年 1 月 18 日受理

尾瀬地域では尾瀬ヶ原と尾瀬沼に大規模なアカシボが発生する。尾瀬ヶ原では融雪の後期に雪原表面が赤褐色に彩色し、次第に濃さを増していく。この発達段階を雪コアの肉眼的観察から(1)アカシボ初期 (Stage 1; 雪原表面は白, アカシボ雪が積雪の半分以下), (2)アカシボ中期 (Stage 2; 雪原表面は白またはわずかに赤色, アカシボ雪は積雪の半分以上), (3)アカシボ最盛期 (Stage 3; 積雪全体がアカシボ雪, プール形成), (4)アカシボ終期 (Stage 4; 浮遊状態や植物体, 土壌表面 (底泥) に付着する), (5)アカシボ残存期 (Stage 5; アカシボ残存物が土壌表面に存在する) に分けて整理した。尾瀬沼においては融雪水と湖水位の上昇により, アカシボを含んだ氷雪が湖面に浮上するため, stage は明確ではないが, 同様に発達をすると考えられる。

Developmental stages of spring red snow phenomenon “Akashibo” at the Ozegahara district, Central Japan

Haruo Fukuhara¹, Naoya Kimura², Jun Kitamura², Masahiro Ochiai³,
Yoko Yamamoto⁴, Takashi Hayashi⁵, Akifumi Ohtaka⁶, Hisaya Kojima⁷,
Manabu Fukui⁷, Yoshiaki Kikuchi⁸, Seiichi Nohara⁹

A large scale of red snow phenomena “Akashibo” appeared at Ozegahara Mire and Lake Ozenuma in Oze District during snow melting period. Five developmental stages of Akashibo are classified. (1) The first stage (Stage 1; white snow surface, the lower half of the snow depth colored reddish), (2) the middle stage (Stage 2; white snow surface or faintly colored, strongly red in the lower section (above about half of the snow accumulation), (3) the peak stage (Stage 3; entire snow patches are dark-red), (4) the end stage (Stage 4; accumulation of fresh Akashibo substances on soils or dead plants) and (5) the residual stage (Stage 5; Akashibo substances remaining on soils to fall). Development of Akashibo at Lake Ozenuma seemed to be essentially same as Ozegahara Mire, but showed unclear stages, because of rising lake water level.

キーワード：アカシボ, 尾瀬ヶ原, 尾瀬沼, アカユキ, 土壌-雪界面

Akashibo, Ozegahara Mire, Lake Ozenuma, red snow, soil-snow interface

1) 新潟大学教育学部, 責任著者

2) ㈱グリーンシグマ 新潟

3) 元徳島文理大学工学部

4) 元明治大学農学部

5) ヤマハ発動機株式会社

6) 弘前大学教育学部

7) 北海道大学低温科学研究所

8) 元茨城大学広域水圏科学教育研究センター

9) 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター

¹ Faculty of Education, Niigata University, Ikarashi, Niigata 950-2181, Japan.

E-mail: fukuhara@ed.niigata-u.ac.jp

² Green Sigma Co. Ltd., 700-1 Sakai, Niigata 950-2042, Japan

³ 69-1-1401 Hamano-cho, Takamatsu, Kagawa 760-0011,

Japan

⁴ 1-28-5 Higashi-Tamagawagakuen, Machida, Tokyo194-0042, Japan

⁵ Yamaha Motor Co. Ltd., Handashi, Shizuoka 438-8501, Japan

⁶ Faculty of Education, Hirosaki University, Hirosaki 036-8560, Japan.

⁷ The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan

⁸ 3317-209 Nagaoka, Ibaragi-cho, Higashiibaragi-Gun, Ibaragi 311-3116, Japan.

⁹ Center for Environmental Biology and Ecosystem Studies, National Institute for Environmental Studies, Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan

1. はじめに

尾瀬地域において大規模なアカシボ現象は尾瀬ヶ原と尾瀬沼の特定の場所に出現する(野原ほか, 2012). 雪の表面が次第に赤褐色に変色していく過程は, 融雪期の極めて短い期間に起こる現象であるが, 雪中では土壌界面から, または湖底との界面から徐々に赤褐色化が進行している.

尾瀬沼におけるアカシボの発達過程は尾瀬ヶ原における発達と基本的に同じであると考えられるが, 尾瀬沼では融雪と湖水の貯留により水位の上昇が同時に起こるため, その過程は必ずしも尾瀬ヶ原ほどには明確ではない.

尾瀬ヶ原におけるアカシボ発達のいくつかの局面については, Fukuhara et al. (2002, 2010), Yamamoto et al. (2006), 福原ほか (2006), 山本ほか (2006) に述べられているが, 年間を通じた過程についての整理はなされていない. 尾瀬沼については Kojima et al. (2009) によって一時期のみの記載がなされている. 本稿では, これまでの調査結果から, 尾瀬ヶ原, 尾瀬沼におけるアカシボの発達過程を整理して示す. また, 尾瀬地域で観察された様々なアカシボの様相についても記録として記載する.

2. 尾瀬ヶ原におけるアカシボの発達

2.1 観察による雪原表面の変化

尾瀬ヶ原(北緯 36 度 56 分, 東経 139 度 15 分)における調査は, 山の鼻植物研究見本園(以下見本園)を中心に行った(図 1). 見本園は, 尾瀬ヶ原の西南端の山の鼻田代に位置し, 約 0.13 km² で 13 の池澮を有する. 気象条件の詳細は野原 (2012) に述べられている. 概要

を記すと, 最高積雪は本調査地の山の鼻で平均 344 (± 59) cm (1991 と 1996 を除く 1983~1997) となり, 夏季(6~10 月)の気温平年値は 13.5°C であり(西村・吉弘, 2008), 最寒月 1 月下旬の平均気温 (1988-1997) は -8.5°C である(菊池, 1999). 尾瀬では 11 月上旬から 5 月下旬までが根雪期間となる. アカシボは融雪期に発生するため, 最盛期となる時期は積雪量により異なり, 4 月下旬から 6 月上旬まで幅がある. 見本園の中央部の木道の北側を中心に毎年大規模なアカシボが同じ場所に発達する(図 1C). アカシボは見本園内のヨシ (*Phragmites australis*) と ミズバショウ (*Lysichiton camtschatense*) が優占する場所で特に発生する傾向がある. 見本園の標高は約 1400 m であるが, アカシボ発生域では 2 m 程度の標高差がみられる(図 1C).

アカシボ発達時におけるほぼ同地点で撮影した雪表面の着色の変化を図 2 に示す. 2000 年 5 月 20 日の表面の着色が開始された時点の積雪は約 140 cm であった(図 2A). 1 週間後の 5 月 27 日には積雪は約 40 cm 程度となりこの間の融雪速度は約 14 cm 日⁻¹ であった. 雪表面は急速に色付き, アカシボの発生域は茶褐色に着色していた(図 2B) プール状に湛水する状態も多くみられた. このように, 着色が始まると見本園では融雪するまで茶褐色の状態が継続する. 融雪の速度から単純計算では, この地帯では着色状態は 6 月の始め頃まで継続していたと考えられるが, 着色したアカユキなどではアルベドが低下し, 融雪速度が上昇する(Takeuchi et al., 2001) ため, 雪解けはさらに早まっていた可能性がある. このように尾瀬ヶ原ではアカシボによる雪の着色は約 1-2 週間の短期間に起こると言える. 雪解け後のアカシボ地帯にはミズバショウとヨシが分布し, 泥炭上に発生していることが多い(図 2C).

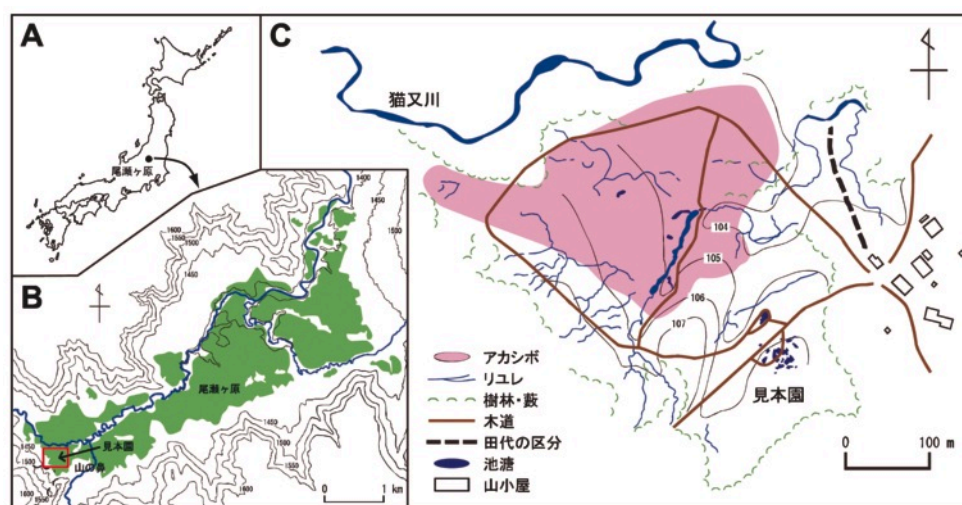


図 1: 山の鼻植物研究見本園の位置, 福原ほか (2006) を改変. A: 尾瀬ヶ原の位置. B: 尾瀬ヶ原湿原 (着色部分), 1600 m 以上は省略されている. C: 山の鼻植物研究見本園, 図は金井 (1999) を改図. 等高線は中田代十字路を 100 とした時の相対値 (m). 樹林・藪の外側はマークされていない.

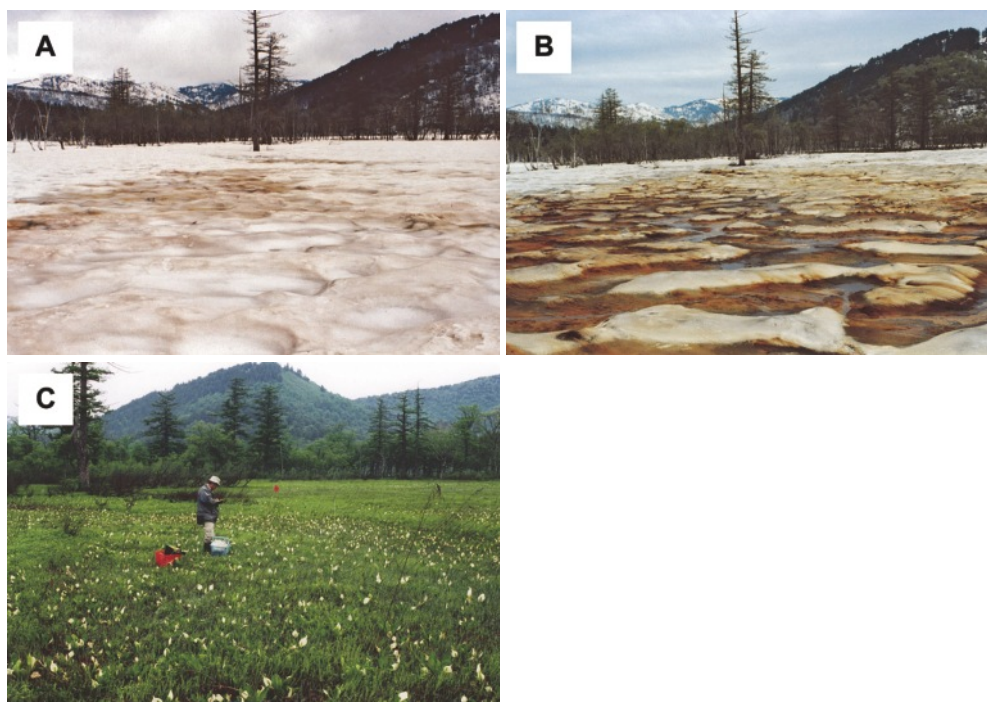


図2：ほぼ同地点から撮影したアカシボ発生地帯雪原の時間変化．A：2000年5月20日，積雪約140 cm．B：2000年5月27日，積雪約40 cm，山本ほか（2004）．C：2000年6月21日

2.2 アカシボ発達の Stage

赤褐色に着色したアカシボの雪（以下アカシボ雪）の原因は粒子状の物質である（以下アカシボ粒子）（Fukuhara et al., 2002; Yamamoto et al., 2006；山本ほか，2006；図3）．粒子の表面には瘤状の模様があり，形態は球形から楕円形で長径 $15.0 (\pm 2.7) \mu\text{m}$ ，短径 $9.5 \pm (1.2) \mu\text{m}$ で，酸化鉄を主成分とする（山本ほか，2006）．

肉眼的にはアカシボ粒子濃度が 10^3 個 ml^{-1} （融雪水）以上から着色して見える（山本ほか，2006）．したがって，肉眼的に雪が白色であっても，アカシボ粒子が存在している場合もある．アカシボを含む積雪内のアカシボ粒子密度については，Yamamoto et al. (2002)，山本ほか（2012）で詳細に述べられているので本稿では述べない．ここでは，便宜的に，肉眼観察からアカシボの発達過程を5段階に分けて示す．表1には尾瀬ヶ原におけるこれまでの雪コアの分析結果からまとめた Stage の特徴を記す．

積雪内には通常数枚の氷板が観察される（附図1 I）．

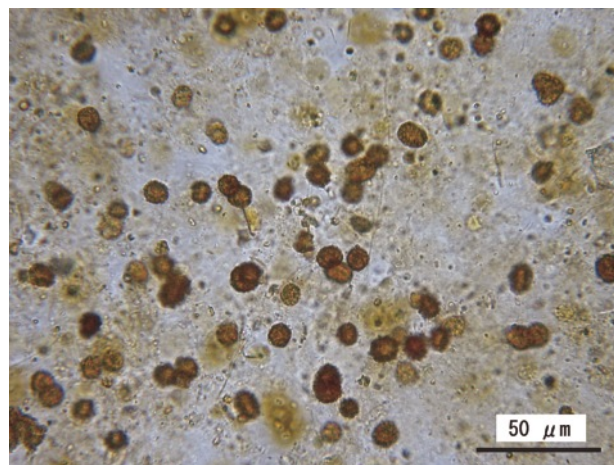


図3：アカシボ粒子．2011年5月1日採集（見本園）．

雪断面の調査では明らかに氷板の位置とアカシボの形成には深い関係があると予想されるが，多くの調査は雪コアを採取して行ったので，雪コアに基づく結果を述べる．

表1：尾瀬ヶ原におけるアカシボの発達 Stage

Stage	名 称	雪表面，土壌表面の状態	アカシボ雪の位置
Stage 1	アカシボ初期	雪原表面は赤褐色に着色していない	アカシボ雪は積雪の半分以下
Stage 2	アカシボ中期	雪原表面は通常赤褐色に着色していないか，薄く着色していることがある	アカシボ雪は積雪の半分以上である，表面が薄く着色することがある
Stage 3	アカシボ最盛期	雪原表面は大部分が赤褐色に着色し，プール状態となる	積雪全体がアカシボ雪となる
Stage 4	アカシボ終期	融雪が進み土壌表面を覆うようになる	アカシボは浮遊状態となるものや，植物体，土壌面（底泥）に付着する
Stage 5	アカシボ残存期	アカシボは土壌表面に赤褐色となって残存する	残存状態（アカシボ残存物）で土壌表面に存在する

Stage 1 (アカシボ初期) : 雪原表面は着色していないが, 雪コアでは積雪^{*1}の半分以下が着色している. 積雪内水位^{*2}は着色の上部を超えている (図 4 Aa, Ab).

Stage 2 (アカシボ中期) : 雪原表面は着色していないか, または薄く着色しているが, 雪コアのアカシボ雪部分は積雪の半分以上に達している. 積雪内水位は着色の上部を超えている (図 4 Ba, Bb) プール状の凹み (図 5 A) が始まる.

Stage 3 (アカシボ最盛期) : 雪原表面は赤褐色に着色し, 雪コア全体がアカシボ雪となっている. 積雪内水位は着色部分まで達している (図 4 Ca, 図 4 Cb). プール状に湛水しているものや (図 5 C), 赤褐色の物質 (以下アカシボ物質) が雪表面に吹きだしているもの (図 6 A) など種々の様相がある.

Stage 4 (アカシボ終期) : 融雪が進み, 積雪 0 の状態で, 土壌表面が露出する場所もあり, アカシボ物

質が土壌表面を覆う場合や, 植物枯死体に付着している場合がある (図 4 D). 大きなプールや流れのある場所では, 気泡を含み浮遊状態になるものもある (附图 1 C).

Stage 5 (アカシボ残存期) : 融雪後もアカシボ物質は赤褐色の状態で土壌表面に根雪の時期まで残存している (以下残存アカシボ) (図 4 E).

*** 1 積雪 :** アカシボが発生する時期の「雪」の状態には, しまり雪, ざらめ雪, しもざらめ雪, 氷板, クラストなどを含み, 氷雪の状態の場合が多い. ここではこれらを区別せず, 積雪深として積雪量を表す.

*** 2 積雪内水位 :** 積雪内に湛水した水の表面 (和泉 (1986) の飽和含水状態の最上面) は, 平面ではなくある曲率を持つが (吉田, 1965), 本研究では肉眼的に判断した水位面を指す. 正確には飽和含水状態の最上面のさらに上部には水しみ雪の層があるが (藤岡ほか, 1963), 肉眼的に判定できる範囲で積雪内水位を決めた.

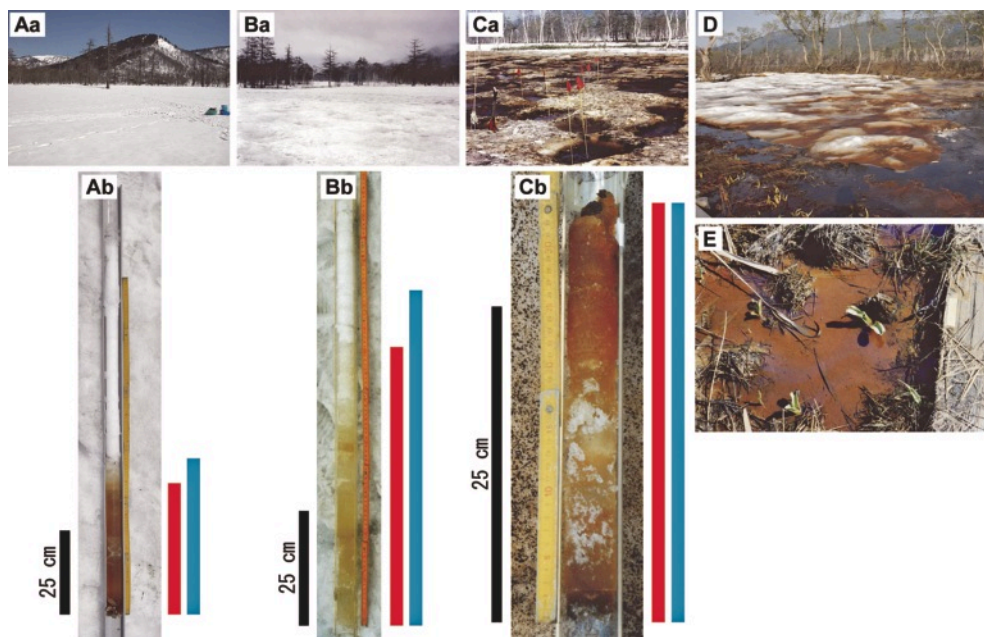


図 4 : 尾瀬ヶ原におけるアカシボの発達過程. Stage 1 (アカシボ初期) の雪原の状態 (積雪 140 cm) (Aa) と雪コア (Ab) (2007 年 4 月 29 日), Stage 2 (アカシボ中期) の雪原の状態 (積雪 140 cm) (Ba) と雪コア (Bb) (2000 年 5 月 21 日), Stage 3 (アカシボ最盛期) の雪原の状態 (積雪 40 cm) (Ca) と雪コア (Cb) (2000 年 5 月 27 日), Stage 4 (アカシボ終期) の状態 (D) (2006 年 6 月 3 日), Stage 5 (アカシボ残存期) の状態 (E) (1999 年 5 月 8 日). 図中の赤カラムはアカシボ雪の高さ, 水色カラムは積雪内水位を示す.

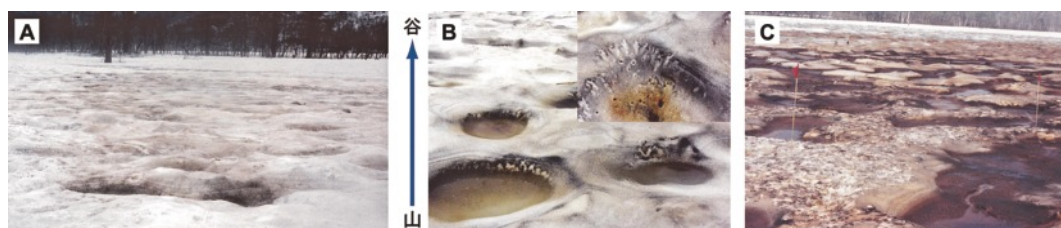


図 5 : 尾瀬ヶ原見本園におけるアカシボプールの変化. A : 2000 年 5 月 20 日の状態, 積雪 140 cm, B : プール側壁の一定方向に小穴を持つプールとその拡大 (2000 年 5 月 27 日) C : 2000 年 5 月 27 日の積雪の少ない場所の状態, 積雪 40 cm, プールの変化を追うために旗によりマークした.

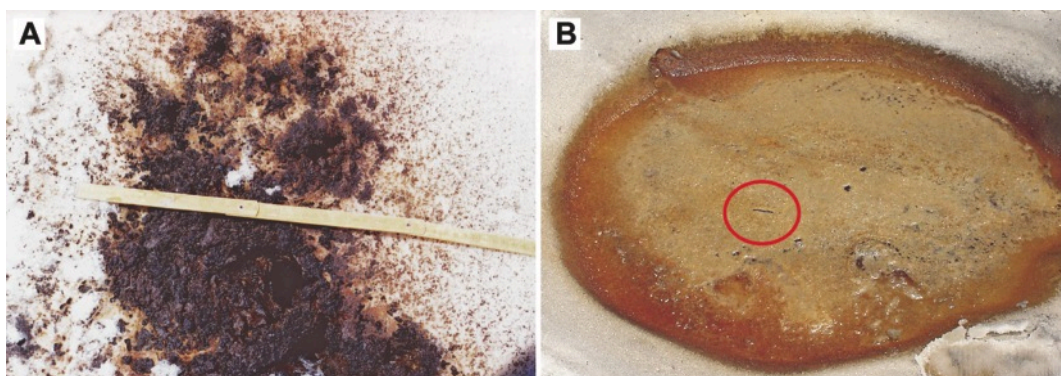


図6：アカシボ最盛期およびその後に特にみられる表面に噴き出した赤褐色物質（1999年4月30日，見本園）(A)とアカシボプールに見られる無脊椎動物(B)．赤マル内にガガンボ科幼虫，ユスリカ科幼虫，貧毛類が多く観察される．2006年6月3日，横井友秋氏撮影，見本園．

アカシボの発達は局地的には時系列的に進行するが，ある時期に同じ Stage が観察される訳ではない．場所による積雪量の違いや融雪速度の違いにより，Stage は混在している．特に Stage 2 以降は，Stage 3～Stage 5 が同所的に存在している場合が多い．

2.3 アカシボの発達と融雪水

尾瀬ヶ原のアカシボは春の雪解け時期に観察されること，Stage 1 の極く初期には融雪水の深さ（積雪内水位）は極めて低く，アカシボ雪の厚さも薄いこと，青森県のアカシボの発生する休耕田の観察では，雪と土壤の界面が湛水状態になってからはじめてアカシボが発達を開始すること（大高ほか，2008）から，アカシボの発生と発達には融雪水が密接に関係していると推定される．積雪中の水位は常にアカシボと同じかまたはさらに上部になる（図4 A-C）ことから，この点は支持される．

尾瀬ヶ原の他地域，尾瀬沼の湿地部分，八甲田山の湿原（山本ほか，2004）において，プール状のアカシボ（以下プールアカシボ）や赤褐色の物質が雪表面に噴出している状態などが共通して観察される．このプールの形成や噴き出しの過程に融雪水が関係している可能性があると考えられることから，尾瀬ヶ原において観察を試

みた．

アカシボ中期から最盛期にかけて，見本園では雪表面にほぼ球形の多くの凹みが観察される（図5）．2000年5月20日には長径約1m前後の凹みが数多く形成されており，凹みの底部は薄く着色していた（図5 A）．これらの凹みのほとんどが湛水してなく，凹みの周囲にも肉眼的に明らかな小穴は観察されていない（表2）．1週間後の大きな変化は，プールは湛水しており，多くの場合，凹みの谷側部分に図5 B にみられるような小穴が形成されていたことである，凹みはさらに拡大したものや不定形に融合したものも多くあった．小穴からは明らかに下部から噴き出したとみられるアカシボ物質の痕跡がみられた（図5 B）．さらに進行した凹みは融合し，湛水状態やリュレとなって流れているものも見られた（図5 C）．また，水のないプールには明らかに下部から噴き出したとおもわれるアカシボ物質の堆積が観察される（図6 A）．さらに特徴的な点は，プールの底部には多数のガガンボ科幼虫，ユスリカ科幼虫，貧毛類が観察されることである（表2．図6 B）．プールアカシボには土壤動物起源と思われる高密度の無脊椎動物が観察されている（Fukuhara et al., 2002）．これらの点を総合す

表2：尾瀬ヶ原見本園におけるアカシボプールの変化．10個のプールの長径，小穴数，小穴の方向，湛水状態，肉眼的に観察されるプール内動物の有無の1週間後の変化．

2000年5月21日					2000年5月27日				
プール No	長径(cm)	小穴数，穴の方向	湛水状態	動物	プール No	長径(cm)	小穴数，穴の方向	湛水状態	動物
K 1	80	0	N	N	K 1+K 2	150	>20，谷	O	O
K 2	80	0	N	O	—	—	—	—	—
K 3	90	0	N	N	K 3	90	>10，谷	O	O
K 4	75	0	N	N	K 4	150	2，谷	O	O
K 5	100	0	N	O	K 5	拡大	2，谷	O	O
K 6	90	0	N	N	K 6	100	10 全周	O	O
K 7	80	0	N	N	K 7	80	>10，中，谷	O	O
K 8	170	1，谷	O	O	K 8	拡大	>10，谷	O	O
K 9	110	0	N	O	K 9	拡大	>8，全周	O	O
K 10	80	0	N	N	K 10	拡大	>10，谷	O	O

N：無し O：あり

拡大：不定形に拡大

谷：谷側，全周：周囲全体，中：中央部

—：K 2はK 1と融合

ると、融雪水は量を増すにつれて雪中を浸し、一部はプール内に小穴を通じて土壌表面から雪表面まで通水し、アカシボ物質や土壌動物を同時に運搬しているものと思われる。なぜ多くの小穴が谷側に形成されるのかについては不明であるが、アカシボ発生地帯は約2 mの標高差がある斜面積雪であり（図1C）、融雪水の谷側方向への流れと関係が深いと思われる。若浜（1968）によれば、融雪水（とけ水）は基本的に積雪の表面から水みちを作って急速に流下したり、雪粒の表面を薄膜状に包みながら、積雪内をゆっくり流下するが、雪層の異なる部分があれば止水層となり停滞するという。しかし、斜面積雪では、止水面につき当たった水は、その面内の最大傾斜方向にそって移動する。この止水面上のある点で止水面をつき破ったとけ水は、再び鉛直に流下し、次の止水面でとめられるという流れを示すという。プールの谷側面に小穴から噴き出す流れは、過剰なとけ水の量と止水面の位置関係で決定されているのかも知れない。

形成当初のプールアカシボの水は、主に午後に観察され、早朝には湛水していない。この点も融雪水が関係することを示す。そこで積雪中の水位（積雪内水位）変化の測定を試みた。測定期間中の気温と、リュレへの出口から約100 m離れた地点での水位変化を図7に示す。気温のピークは正午であるが、雪中の水位のピークは午後8時付近である。水位の低下は午前10時–12時頃がピークとなっていた。この時点では約15 cmの水位変化が生じていたことになる。このようにプールアカシボの湛水状態や赤褐色物質の噴出には、気温による融雪水の量が影響していると考えられる。

アカシボ中期に目立つ円形の凹みの原因は明らかではないが、形態的には「融雪面の窪み模様—Ablation-hollows on snow」の一種（高橋，1979）か「雪エクボ」の発達した段階のものである可能性が高い。凹みの状態は、山岳地帯の雪渓上に融雪期に現れる「窪み」とほぼ円形であるという点を除くと類似しているが、これ

らの形成の主たる原因が風であるという点（高橋，1979）では一致しない。雪えくぼは雪面のとけ水とその下の水みちを特徴とするが（納口，1984）、水みちの存在は確かめていない。しかし、凹みがほぼランダムに形成されているとみられる点や、底部にアカシボ物質が堆積し、アルベードが低下して融雪が凹みの中央を中心に周囲よりも活発になる点を考慮すると、雪エクボの発達した段階の可能性が高いとみられる。

3. 尾瀬沼におけるアカシボの発達

尾瀬沼ではアカシボは湖内と湖岸の湿地帯に出現する（野原ほか，2012）。湿地帯におけるアカシボの発達過程は尾瀬ヶ原と同様に進行すると考えられる。しかし、尾瀬沼では湖水の侵入があり、また連続観測がなされていないため、発達の全過程は明らかではない。尾瀬ヶ原での発達過程を適用するなら、Stage 1とStage 4、Stage 5の状態が観察できることは確認できた。以下尾瀬沼湖内におけるアカシボの発達過程について述べる。

3.1 アカシボ発生地域の環境

尾瀬沼は標高1665 m、面積18.3 km²、最大水深9 mの堰止め湖である。沼尻川と東電取水口より流出するが約90%は東電取水口より流出する（内山，1982）。最寒月は2月上旬で平均-9.1°C（1988–1997）、平均302（±56）cmの最大積雪があり（1993–1997年の平均—福原計算）、平年の積雪期間は11月上旬～5月下旬である（菊池，1999）。1949年より東京電力株式会社による取水（図8A）がなされており、冬季減水期では11月下旬から3月下旬まで湖面は3 m程度低下し、4月上旬から5月中旬にかけて一気に3 m回復する（野原，2012）。2004年、2005年の4月下旬の実測ではそれぞれ6.0、11.8 cm/日上昇した。アカシボの発達期はこの春の増水期にあたり、調査は最大水位のほぼ直前の時期に行われている。

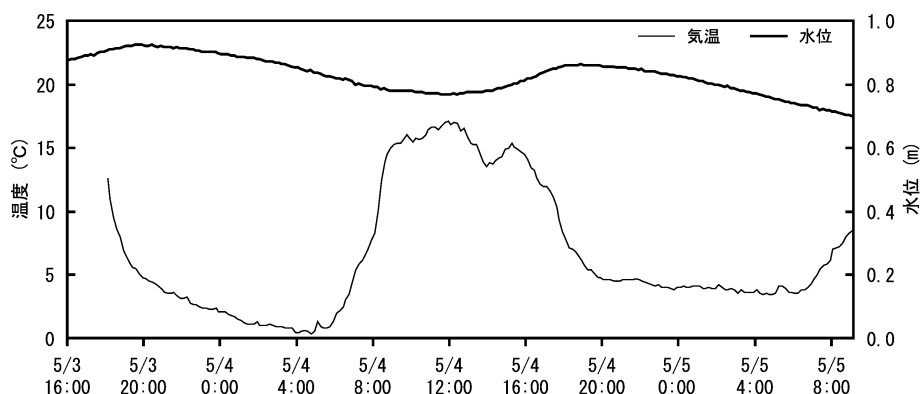


図7：尾瀬ヶ原山の鼻における気温(A)と見本園アカシボ地帯の積雪中における水位変化(B)。気温はアカシボ発生地帯から約200 m離れた山の鼻炊事小屋に設置した温度ロガー（ホボ U 20）で測定した。水位は直径4 cmのコア掘削跡に水位ロガー（ホボ U 20）を設置した。2008年5月3日16:00より5月5日8:20まで10分間隔で測定。積雪は115 cm、Stage 2 アカシボ中期の状態。

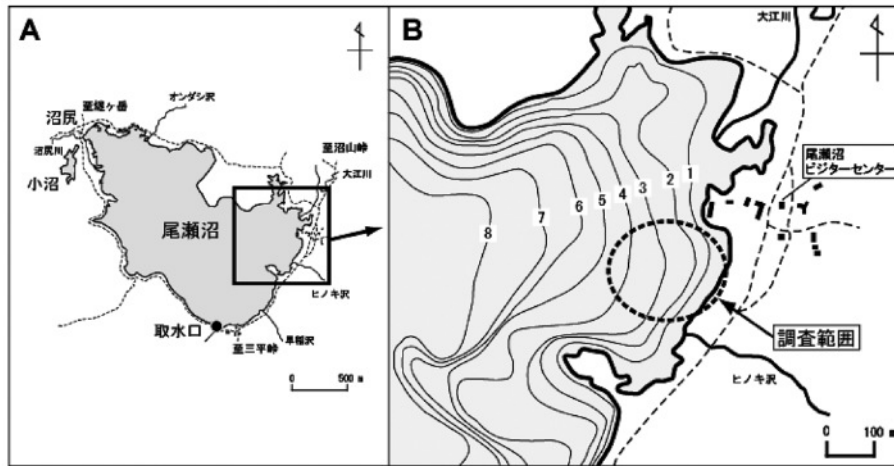


図8：尾瀬沼におけるアカシボ調査地域。尾瀬沼(A)，長蔵小屋前の調査地域(B)。 (A)はOhtaka et al. (1988) を改変した。(B)は栗田ほか (1988) の長蔵小屋沖を改変した。

尾瀬沼周辺では、浅湖湿原、小沼、沼尻、長蔵小屋沖など多くの場所でアカシボが発生する(野原ほか, 2012)。アカシボの調査は図8Bに示した長蔵小屋沖で行った。アカシボは沿岸の湿地部分にも発生するが、大部分は湿地から沖合に向けて水深約4m沖付近まで発生する(2001年5月18日の調査では水深3.75mまで確認出来た)。

例年(2001～2006, 2008～2010)4月下旬から5月上旬(27日～3日)に調査を行っているが、調査時の湖上の積雪深* (スノージャムを含む湖底からの氷雪部分)は2009年の約105cmから2006年の約250cmと年により大きな違いがあった。しかし積雪下部に水の層がない場合でも、この時期には湖底から約150cmまでは積雪内に水が浸み込んでいる。この水は融雪による供給と4月上旬からの貯水による湖水の浸入によるものである。

*尾瀬沼湖内の水面下に堆積している雪はスノージャムと言われる(藤岡ほか, 1963)。スノージャムは「水中に懸垂

する雪」と定義され、水面上の多量の積雪の防熱効果のため水面で水が発達せずに雪のままに没していくことで出来るとされている。藤岡ほか(1962)は冬季減水期の1月下旬のまだ湖水が積雪底部に残っている状態で密度などの詳細な観察を行っているが、放水により湖底まで水位の低下する3m以浅では一旦できたスノージャムが水位低下とその後の浸水でどのように形態を変化させるのかは明らかではない。アカシボ発生時期にはこのような変化を経て、見かけ上はスノージャムの状態になっている。ここではスノージャムとして扱い、これらと氷板の部分も含めて積雪深としてあつかった。

3.2 尾瀬沼湖上におけるアカシボの発達

調査年内で最も積雪の多かった2006年4月下旬では湖上に着色や水しみ雪状態は観察されなかった(図9A)。湖内では約250cm、沿岸の湿地で約300cmの積雪があった。この時期の雪コアーの状態は図10Aに示すように赤褐色に着色した部分は無かったが、積雪内水位は140cmであった。アカシボが発達する前の状態で

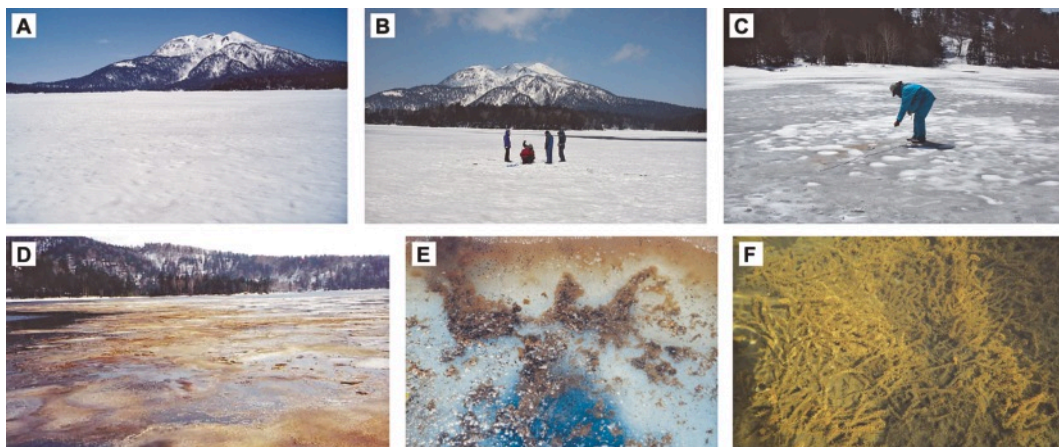


図9：長蔵小屋沖の尾瀬沼湖面の変化。A：2006年4月30日、湖底からの積雪約250cm，B：2008年4月27日、湖底からの積雪約150cm，C：2004年4月30日、湖底からの積雪約110cm，D：2001年5月18日、積雪約20-40cm，E：2000年5月18日 湖面に浮遊しているアカシボ物質，F：アカシボ残存物の付着したコカナダモ(2010年5月20日)

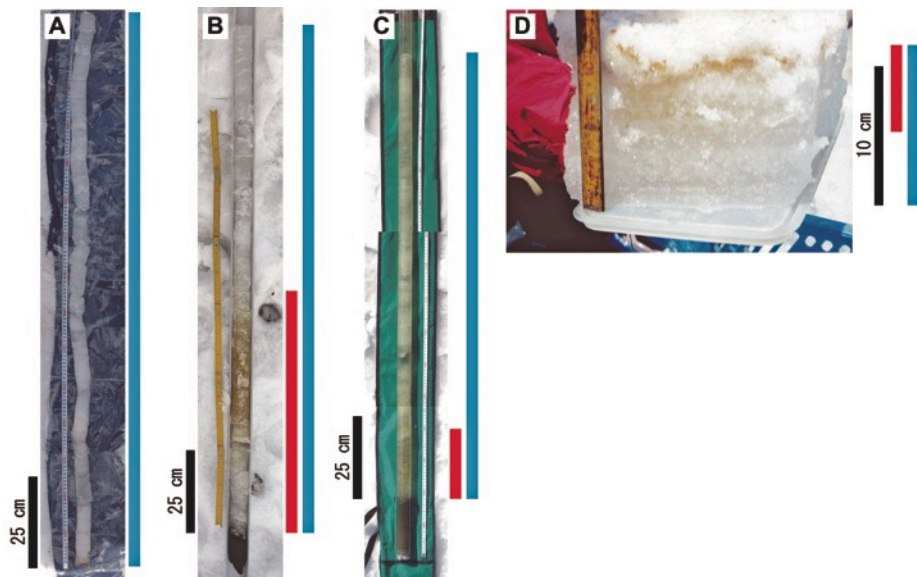


図 10：尾瀬沼長蔵小屋沖におけるアカシボの発達．A：2006 年 4 月 29 日，積雪約 240 cm，積雪内水位 140 cm，図 9 A に対応，B：2008 年 4 月 27 日，湖底からの積雪約 150 cm，図 9 B に対応，C：2004 年 4 月 29 日，湖底からの積雪約 110 cm，図 9 C に対応，D：2001 年 5 月 18 日，積雪約 20 cm．図 9 D に対応．図中の赤カラムはアカシボ雪の高さ，水色カラムは積雪内水位を示す．

あると推定された．

積雪が約 150 cm では，雪原表面の着色は観察されなかったが，積雪内水位はほぼ 130 cm で，踏み跡には湖水が湛水する状態であった（図 9 B，図 10 B）．積雪最下部には水の層は形成されていなかった．この時期のコアーは約 55 cm までアカシボが発生しており（図 10 B），尾瀬ヶ原の Stage 1 に相当する段階であった．

積雪が約 110 cm の状態では，積雪内水位は，表面まで完全に達していた（図 9 C，図 10 C）．いくつかの場所において尾瀬ヶ原で観察されるアカシボ物質が吹き出した状態が見られた（附図 1 L）．全体的に雪原表面の着色は見られなかったが，部分的に赤褐色に着色するところも観察された．アカシボは雪コアーの約 40 cm まで達していた．尾瀬ヶ原における Stage 2 のアカシボ中期に近い状態であった．この時点では湖底には約 10 cm の水の層が形成されていた．この後の発達の連続的過程は現時点では追跡できていない．

融雪がさらにすすみ尾瀬ヶ原における Stage 3（アカシボ最盛期）から Stage 4（アカシボ終期）に近い状態は，湖面中央部が開水した状態において観察される（図 9 D）．湖面に，約 30～40 cm の氷の状態で浮き，内部が赤褐色に着色し，さらに表面にアカシボ物質が付着した状態となっている（図 10 D）．表面の赤褐色物質は，すでに融雪が進行し，浮遊状態となったもの（図 9 E）が付着したと推定される．これらは気泡に富み，湖内を浮遊している．

融雪が進み，湖面が完全に開いた状態では，アカシボ物質は沈降して湖底に堆積するものと思われる（Stage 5 のアカシボ残存期）．コカナダモの分布する地帯では，

葉上に堆積し，茎葉自体が赤褐色に着色している状態が観察される（図 9 F）．コカナダモ上や湖底に堆積したアカシボ残存物が秋期まで残っているかについては確認できていない．

4. アカシボ発生地帯の土壌（湖底泥）—雪界面の溶存酸素濃度

すでに述べたようにアカシボが発達している地帯の土壌と雪の界面には尾瀬ヶ原では主に融雪水が，尾瀬沼ではスノージャム状態で湖水が湛水している．アカシボ発生初期の雪コアーを採集した跡に貯留する水について溶存酸素濃度を測定した．尾瀬ヶ原ではアカシボ発生地域では溶存酸素濃度が低下していることが観測されているが（福原ほか，2006，2012），その後の結果も含めてまとめたのが表 3 である．対照地点においてもわずかな水が湛水している場合もあり，溶存酸素濃度は平均 65% で低い値であったが，尾瀬ヶ原のアカシボ地帯ではさらに低く，平均で 21% であり，明らかに飽和以下であっ

表 3：アカシボ発生初期（Stage 1，Stage 2）における雪-土壌-界面に湛水している水の溶存酸素濃度（%）．尾瀬ヶ原は 2000，2001，2007，2011 の調査結果，尾瀬沼は 2003-2006 の調査結果をまとめている．雪コアー（直径 4 cm）の掘削跡から二口注射器により試水を採集し，ウインクラー法により測定．2011 年は蛍光式溶存酸素計により測定．対照は見本園のアカシボの発生を見ない地帯で測定．

アカシボ地帯	平均	SD	最大	最少	地点数
尾瀬ヶ原見本園	21.2	20.2	63.7	1.3	18
尾瀬沼長蔵小屋沖	78.0	22.3	98.2	0.2	17
対照（見本園）	64.7	16.7	83.1	34.3	5

た。

尾瀬沼においても湖底面の溶存酸素濃度は飽和以下であったが、尾瀬ヶ原に比較すると平均値は高い値であった。しかし、極めて低い無酸素状態の時期も観測された。これは、春期の水位の上昇にともなって、酸素のある程度豊富な湖水が積雪下部から侵入する时期的な違いが反映していると考えられる。水位の上昇する4月上旬前などの早い時期の観測が必要である。

これらの結果は、明らかにアカシボ地帯の土壤（湖底）—雪界面は溶存酸素濃度の低い、還元的な環境になっていることを示している。多くの場合、アカシボ発生地域の界面の水（雪間隙水）からは濃度の高い Fe^{2+} が検出される（落合ほか，2012）ことからこの点は支持される。ある程度の積雪があれば、土壤との界面はほぼ 0°C に保たれ、 CO_2 が放出されているという知見も多く（Penny and Pruitt, 1984; von Bochov et al., 2000; Liptzin et al., 2009）、微生物の活性があることが知られている（Coxson and Parkinson, 1987; von Bochov et al., 2000; Brooks et al., 2005）。また、浅田（1957）は尾瀬ヶ原河川の冬期の渇水期における異常流出の原因を考察して、湿原の主体をなす泥粘土層は、積雪以前の降水を徐々に吸水しているが積雪期に入ってから、次第に増加する積雪荷重により圧縮を始め、それに伴い保有水の河川流出が強制されるとし、湿原は不凍結で、常に著しい保水過剰が積雪期間中続いていることが推定出来るとしている。すなわち長期間界面付近は湛水状態にあり、微生物の活性により、酸素が消費され、貧酸素状態となっていると推定される。

この還元的環境の形成がアカシボの発生や土壤動物起源と思われる無脊椎動物が雪中へ移動する原因となっていると考えられている（Fukuhara et al., 2002, 2010；福原ほか，2006，2012；大高，2012；大高ほか，2008）。

5. 尾瀬ヶ原と尾瀬沼のアカシボの比較

アカシボ発生のメカニズムについて、アカシボ粒子の形成を含めて現時点では解明されていない。しかし、尾瀬ヶ原、尾瀬沼におけるアカシボ発生時における比較からいくつかの共通点が挙げられる。(1)活発な融雪時に起こること、(2)発生時には土壤（湖底）—雪界面が尾瀬ヶ原では融雪水により、尾瀬沼ではスノージャムにより、飽和含水状態となっていること、(3)土壤（湖底）—雪界面の雪間隙水の溶存酸素濃度は低く、還元的な環境が形成されていること、(4)形態的には酸化鉄を主成分とするアカシボ粒子を含むこと、などである。雪中での酸化鉄の形成の概略は、界面や界面下部の還元的な環境下で鉄の還元が起こり、雪間隙水の中を Fe^{2+} が上昇するにつれて、上部から空気中や融雪水中の酸素によっ

て酸化されるプロセスによって説明可能であろう（落合ほか，2012）。しかし、酸化鉄粒子を形成する反応が微生物や藻類の関与する生物学的反応によるのか（山本ほか，2012）、生物の関与しない反応により、主体であるアカシボ粒子が形成されるのかについての課題が依然として残る。

6. おわりに

アカシボ雪の中には低温化で活性を持つ様々な微生物学的な反応、特に鉄の酸化や還元、メタン酸化に関与する微生物の存在が確認されている（Kojima et al., 2009）。アカシボ粒子が藻類（*Hemitoma* 属の一種）の休眠孢子であるという見解もある（Fukuhara et al., 2002; Yamamoto et al., 2006；山本ほか，2006）。しかし、その後の尾瀬沼のアカシボの遺伝子の解析では雪氷藻の遺伝子が検出されない（Kojima et al., 2010）ことから、生物起源については疑問な点も提出され、その本体は現時点では不明である。この粒子形成のメカニズムの解明が大きな課題である。また、アカシボ雪の中に、貧毛類、水生昆虫、底生カイアシ類などのさまざまな無脊椎動物が高密度で存在することも知られている（Fukuhara et al., 2002；福原ほか，2006；大高ほか，2008；大高，2012）。これらの生物の低温下における適応の課題もある。

酸化鉄の結晶構造や形成に関する多くの研究が高温条件下で行われている中で（安藤，1966；木山，1976）、田畑ほか（1999）は 5°C （ $\text{pH}=9$ ）において、酸素供給速度を低く設定すると Magnetite (Fe_3O_4) の単相が形成され、流量を多くすると Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) が形成されるとした。アカシボ粒子の結晶学的な課題も残るが、粒子の形成が生物的であれ、無生物的であれ 0°C という極めて低温下で形成される酸化鉄結晶である点についても興味深い面がある。

「アカシボ雪」に関係する生物学的、化学的知見は集積されつつあるが、アカシボ粒子形成のメカニズム、尾瀬沼湖内の界面における還元過程の発達の検証などの課題も残る。また、尾瀬地域において、さまざまな様相で出現する「アカシボ」についての記載的な調査は必ずしも十分ではない。ここに尾瀬地域に出現するアカシボのいくつかの側面を附図1として記録し、今後の参考に供したい。

謝辞

本研究は、「干潟等湿地生態系に関する国際共同研究」（独立行政法人国立環境研究所）、の一部として開始され、国立環境研究所と環境省（庁）との協議、及び許可、文化庁の許可を受けて行われた。尾瀬沼の調査に当たっ

ては福島県尾瀬保護指導委員会の調査の一部として許可の範囲内で実施した。尾瀬地域の入山にあたっては、東京電力KK、尾瀬林業KKの許可を受けた。また、現地においては山の鼻ビジターセンター（尾瀬保護財団）および尾瀬沼ビジターセンター（同）にアカシボの発生状況の情報や調査機材の保管などについて、調査上の便宜をはかっていただいた。記して感謝申し上げたい。

引用文献

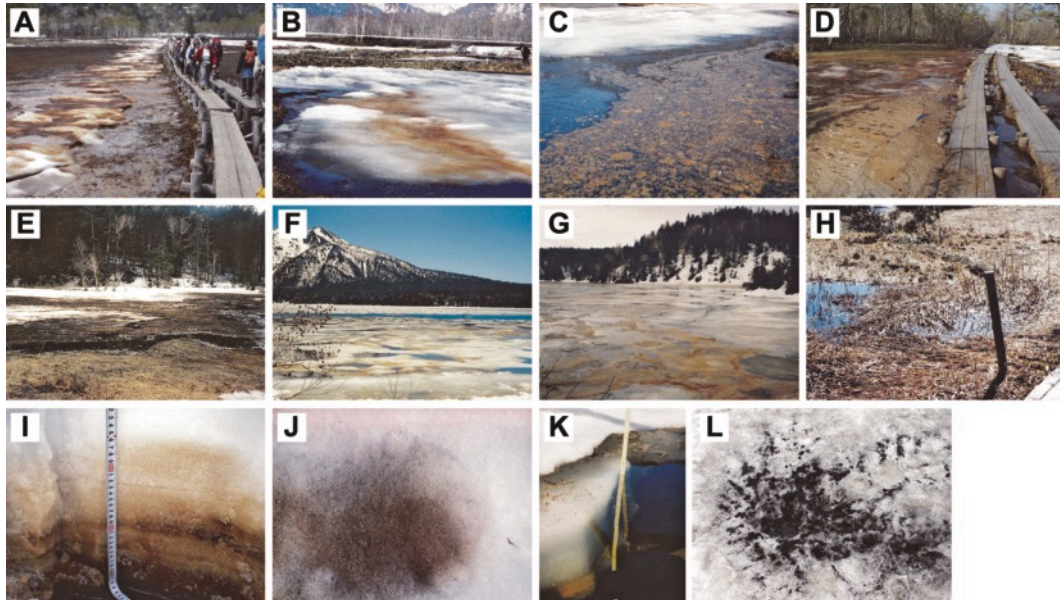
- 安藤徳夫 (1966) 各種酸化鉄の水溶液中での生成とその物性. 粉体および粉末冶金, **13**, 1-12.
- 浅田暢彦 (1957) 尾瀬原湿原の河川流出に対する影響. 雪氷, **19**(6), 169-171.
- Brooks, P. D., D. McKnight, K. Elder (2005) Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes. *Glob. Chang. Biol.*, **11**, 231-238.
- Coxson, D. S., and D. Parkinson (1987) Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor and soils. *Soil Biol Biochem.*, **19**, 49-59.
- 藤岡敏夫, 田畑忠司, 木下誠一 (1963) 尾瀬沼スノージャム調査. 低温科学 (物理篇) **21**, 95-115.
- Fukuhara, H., A. Ohtaka, N. Kimura, M. Ochiai, Y. Yamamoto, and Oze Akashibo Research Group (2010): Vertical distribution of invertebrates in red snow (Akashibo) at Ozegahara mire, Central Japan. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, **30**, 1487-1492.
- Fukuhara, H., A. Ohtaka, N. Kimura, M. Fukui, Y. Kikuchi, S. Nohara, M. Ochiai, Y. Yamamoto, and Oze Akashibo Res. Group. (2002) Spring red snow phenomenon "Akashibo" in the Ozegahara mire, Central Japan—with special reference to distribution of invertebrates in red snow. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, **28**, 1645-1652.
- 福原晴夫, 大高明史, 木村直哉, 菊地義昭, 山本鎔子, 落合正宏, 福井 学, 野原精一, 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—尾瀬ヶ原のアカシボにみられる無脊椎動物—. 陸水学雑誌, **67**, 81-93.
- 和泉 薫 (1986) むれ雪の硬度 III: 水浸または日射による硬度減少. 低温科学. 物理篇, **44**, 37-48.
- 金井弘夫 (1999) 尾瀬ヶ原の池沼地図と水生植物5種の分布消長. 尾瀬の総合研究 (福島・群馬・新潟三県合同調査) (尾瀬総合学術調査団編), 274-288. 尾瀬総合学術調査団, 東京.
- 菊地慶四郎 (1999) 尾瀬の気候解析 気温. 降水量. 積雪深について. 尾瀬の自然保護, **22**, 8-24.
- 木山雅雄 (1976) 水酸化鉄 (II) (III) の化学. 粉体および粉末冶金, **23**, 77-84.
- Kojima, H., H. Fukuhara, and M. Fukui (2009) Community structure of microorganisms associated with reddish-brown iron-rich snow. *Systematic and Applied Microbiology*, **32**, 429-437.
- 栗田秀男, 峰村 宏, 大森威宏 (1988) 尾瀬沼におけるコカナダモ侵入後の大型水生植物群落. 尾瀬の自然保護, **11**, 33-57.
- Liptzin, D., M. W. Williams, D. Helmig, B. Seok, G. Filippa, K. Chowanski, and J. Hueber (2009) Process-level controls on CO₂ fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow soil, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, **95**, 151-166.
- 西村 満, 吉弘雅士 (2008) 尾瀬山ノ鼻地区の気象30年—1977~2006年の気象観測結果による平年値と変動傾向の算出, 尾瀬の自然保護—30年間の取り組み—(群馬県尾瀬保護専門委員会編集), 187-199, 群馬県自然環境課尾瀬保全推進室, 上海印刷, 群馬県.
- 野原精一 (2012) 尾瀬の自然環境の概要. 低温科学, **70**, 9-20.
- 野原精一, 福原晴夫, 山本鎔子, 落合正宏, 大高明史, 宇多川広勝 (2012) 尾瀬の彩雪の分布と積雪環境. 低温科学, **70**, 21-35.
- 納口恭明 (1984) 雪えくぼのパターン形成 I. 国立防災科学技術センター研究報告, **33**, 237-254.
- 落合正宏, 山本鎔子, 野原精一, 福原晴夫 (2012) アカシボ物質の化学的側面. 低温科学, **70**, 49-54.
- 大高明史 (2012) 融雪期の雪中における無脊椎動物の生息状況. 低温科学, **70**, 113-117.
- Ohtaka, A., A. Ujiie, and S. F. Mawtari (1988) Composition and abundance of zoobenthos in the profundal zone of Lake Oze-numa in Central Japan. *Jpn. J. Limnol.*, **49**, 109-117.
- 大高明史, 山崎千恵子, 野原精一, 尾瀬アカシボ研究グループ (2008) 青森県のアカシボ発生地域における雪中の環境と無脊椎動物群集. 陸水学雑誌, **69**, 107-119.
- Penny, C. E., and W. O. Pruitt, J. r. (1984) Subnivean accumulation of carbon dioxide and its effects on winter distribution of small mammals. *Special Publication Carnegie Museum of Natural History*, **10**, 373-380.
- 田畑勝弘, 榮雄一郎, 北山和弘, 丁子哲治 (1999) マグネタイト低温合成における酸素供給速度と反応温度との関係. エコテクノロジー研究, **5**, 248-249.
- 高橋修平 (1979) 融雪面の窪み模様に関する研究. 低温科学 (物理篇), **37**, 13-46.
- 内山征洋 (1982) 尾瀬沼およびその周辺におけるメチレンブルー活性物質の分布. 陸水学雑誌, **43**, 39-43.
- Takeuchi, N., S. Kohshima, and K. Seko (2001) Structure, formation, darkening process of albedo reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **33**, 115-122.
- van Bochove, E., H. G. Jones, N. Bertrand, and D. Prevost (2000) Winter fluxes of green-house gases from snow-covered agricultural soil: intra- and interannual variations. *Global Biogeochem. Cycles*, **14**, 113-125.
- 若浜五郎 (1968) 積雪内への融雪水の滲透. 雪氷, **30**(6), 175-188.
- Yamamoto, Y., A. Ohtaka, T. Hayashi, H. Fukuhara, S. Nohara, and M. Ochiai (2006) Spring red snow phenomenon caused by iron accumulated around algal spores in alpine mires in Japan. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **29**, 1947-1950.
- 山本鎔子 (2012) 藻類による彩雪現象. 低温科学, **70**, 1-7.

山本鎔子, 林 卓志, 大高明史, 福原晴夫, 野原精一, 落合正宏, 尾瀬アカシボ研究グループ (2004): 東北地方の赤雪. 陸水学雑誌, **65**, 181-191.

山本鎔子, 林 卓志, 落合正宏, 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かかわり—. 陸水学雑誌, **67**, 209-217.

吉田順五 (1965) 融雪水の積雪内渗透. 低温科学 (物理篇), **23**, 1-16.



附図 1: 尾瀬地域に発達するアカシボのさまざまな様相.

A: 上田代木道沿い (2006 年 6 月 4 日), B: 牛首近くの池澁 (1999 年 5 月 9 日), C: 上ノ大堀川を流れるアカシボ物質 (1999 年 5 月 9 日), D: 研究見本園西側木道の山側 (2006 年 6 月 3 日), E: 大江湿原奥 (2001 年 5 月 19 日), F: 尾瀬沼山荘前 (2001 年 5 月 19 日), G: 小沼 (2001 年 5 月 19 日), H: 沼尻湿原 (1998 年 5 月 9 日), I: 見本園リュウレの雪断面 (2007 年 4 月 29 日) J: 最も初期のプール状アカシボ (見本園, 1999 年 5 月 8 日) K: 底部にアカシボを有する浮き氷 (尾瀬沼, 2003 年 4 月 27 日), L: 尾瀬沼長蔵小屋前 (2000 年 5 月 3 日), M: (2007 年 4 月 29 日)