低温科学 80 （2022）145-154
doi: 10.14943/lowtemsci. 80. 145

尾瀬の赤褐色雪をつくるアカシボ粒子の顕微鏡観察

藤原　英史[1)]，福原　晴夫[2)]，大高　明史[3)]，
小島　久弥[4)]，福井　学[4)]，野原　精一[5)]

2021 年 12 月 29 日受付，2022 年 2 月 14 日受理

融雪期の尾瀬において積雪が赤褐色に呈することが観察され，これはアカシボと呼ばれている．アカシボの実体を捉えるため，尾瀬ヶ原で採集後，現地ですみやかにアカシボ粒子の内容物を光学顕微鏡で観察し，アカシボの形成過程を調べた．また過去に尾瀬沼，および青森県の多雪地域で採集された赤褐色雪についても，尾瀬ヶ原との比較観察を行った．その結果，多雪地帯の融雪時に現れる，酸化鉄の赤褐色雪の原因として，アカシボ粒子の中心に含まれる細菌が深く関与していることが示唆された．この結果は，アカシボ粒子は細菌群集であるとの先行研究結果を支持する．

Optical microscopic observations of the Akashibo particle of reddish-brown snow in Oze region

Eiji Fujiwara[1], Haruo Fukuhara[2], Akifumi Ohtaka[3],
Hisaya Kojima[4], Manabu Fukui[4], Seiichi Nohara[5]

This article outlines optical structural characteristics of microbial communities associated with red snow and Akashibo with a focus on bacteria. Observations by optical microscope of the Akashibo particle of snow in Oze region has been suggested that bacterial community in red snow tends to be dominated in organisms.

キーワード：アカシボ，赤雪，光学顕微鏡，細菌
Akashibo, bacteria, optical microscope, red snow

責任著者
藤原英史
連絡先
株式会社ドキュメンタリーチャンネル
〒 350-2204　埼玉県鶴ヶ島市鶴ヶ丘 851-1
Tel：049-299-4081
e-mail：fuji@documentary-ch.com
1）株式会社ドキュメンタリーチャンネル
2）河北潟湖沼研究所
3）弘前大学教育学部
4）北海道大学低温科学研究所
5）国立環境研究所

1 Documentary Channel Co., Ltd., 851-1 Tsurugaoka, Tsurugashima, Saitama 350-2204, Japan
2 Kahokugata Lake Research Institute, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0342, Japan
3 Faculty of Education, Hirosaki University, Bunkyo-cho 1, Hirosaki 036-8560, Japan
4 The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan
5 National Institute for Environmental Studies, Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

1. はじめに

尾瀬では，融雪期に湿原や湖沼で大規模に現れる彩雪現象をとくに「アカシボ」と呼んでいる（図１）．山本（2012）によると，尾瀬の彩雪現象については，「早田文蔵（1903），武田久吉（1920），渡辺千吉郎（1884）の紀行文のなかに記載され」，またアカシボの呼び名は，「初代長蔵小屋の主人平野長蔵（1943）は和歌の中で雪の赤くなる現象をアカシボとよび約 80 年前に記している」とされている．小林・福島（1952）の学術的調査がなされるまでは登山者あるいは植物学者たちの紀行文に記されているに過ぎなかった（山本，2012）．

アカシボの匂いを嗅ぎ，舌で味わってみれば，そこにさびた鉄，すなわち酸化鉄が含まれていることは，その場で感じることができ，その色合いの正体が酸化鉄であることは，容易に推測できる．しかし，なぜ，融雪の一時期に雪中や表面に大量の酸化鉄が現れるのか，長年の謎であった．

これまでに，尾瀬のアカシボ現象を生み出す要因として，藻類，細菌などの微生物や，鉱物の結晶化による作用など，様々な仮説が立てられ，その実体を探る研究が行われてきた（山本ほか，2004；福原ほか，2006；Kojima et al.，2009；山本ほか，2012）．その過程で，赤褐色雪には多種多様な生物，藻類（山本，2012）や鉄酸化細菌（横山ほか，2012），好気的メタン酸化細菌や嫌気的鉄還元菌（Kojima et al., 2009；小島，2012）などの微生物から貧毛類や水生昆虫を中心とした無脊椎動物（Fukuhara et al., 2002，2010；福原ほか，2006；福原ほか，2012，大高，2012；鳥居，2012，中村，2012））が生息することが示されてきた．このようにアカシボ雪では低温ながらも生命活動が行われ，一つの複雑な生態系が存在していると考えられ，アカシボの形成には，こうした生物の生命活動が関与していると推察されてきた（山本ほか，2004；福原ほか，2006；Kojima et al., 2009；小島，2012；横山ほか，2012；山本ほか，2012）．

赤褐色に着色した雪全体は，アカシボ物質（落合ほか，2012）と呼ばれる（図２）．Fukuhara et al.（2002）によって，尾瀬ヶ原の研究見本園で採取したアカシボ物質の中に，特異的に数多く含まれる赤褐色の粒子（長径 14.8 ± 3.0 μm，短径 9 ± 1.4 μm）が見いだされ，のちに「アカシボ粒子」と名付けられた．この粒子は当時同定を依頼した藻類分類学者によって緑藻綱 Chlorophyceae のクラミドモナス目 Phacotaceae の一種 *Hemitoma* sp. の休眠胞子とされ（Fukuhara et al., 2002），その後山本ほか（2004），Yamamoto et al.（2006），山本ほか（2006），福原ほか（2006），山本ほか（2012）などで用いられてきた．世界の寒冷地域で見られる赤雪の主な成因として藻類が関与していることが報告されている（山本，2012）．しかし，アカシボ雪中は当初から鉄濃度が高いことが知られ（Fukuhara et al, 2002），また，「*Hemitoma* sp.」の密度と鉄の相関が認められたこと（山本ほか，2004），通常雪中藻類に含まれるカロチノイドが検出されないこと（山本ほか，2004）から，赤色の原因は粒子の表面を構成する酸化鉄とされた．しかし，鉄代謝と *Hemitoma* sp. との関係は不明であり，さらに，尾瀬の赤雪に含まれるクロロフィル *a* 量がわずかで量子収率も低いこと（野原ほか，2012）などから，世界の他地域の赤雪のように，藻類が関与しているのかどうかを疑う見方もあった．

日本において，アカシボが出現する現象は，尾瀬だけでなく，積雪の多い青森県や長野県などでも起こることが知られている（山本ほか，2012；大高ほか，2008）．山本ほか（2004）が，東北地方の水田や休耕田では，アカシボ粒子として，直径約 10 μm と約 5 μm の異なる大きさの粒子を写真で示しているほか，大高・菊池（2012）

図 1：2021 年 5 月 1 日にドローンから撮影した至仏山の麓にある尾瀬ヶ原研究見本園（中央部の雪面の上に現れた赤褐色の部分がアカシボ），3 枚の横長写真を縦に連結した合成画像．

図 2：2014 年 4 月 26 日に尾瀬ヶ原の研究見本園で採集した積雪コア．矢印の位置が地面と雪面の境界（矢印の左側は泥炭，右側はアカシボ層）．

は青森県の水田で長径 6.3 ± 1.6 μm，短径 6.0 ± 1.5 μm の粒子を報告している．また尾瀬ヶ原と同様にアカシボ雪の中に無脊椎動物の存在も報告している（大高ほか，2008; 大高，2012a）．

3 月の尾瀬ヶ原では，3 m の積雪は全層で真白であることが野原らによる雪掘調査によって確認されている（NHK，2012）．融雪が近づく春頃になると，アカシボ粒子は雪中深くに出現する赤褐色雪の底層に現れ（図 2），雪解けとともに表層付近で多くなり，毎年，ゴールデンウィークの頃にはその色彩がピークになる（福原ほか，2012）．尾瀬ヶ原と尾瀬沼におけるアカシボの分布については，航空写真による解析も行われてきた（野原ほか，2012; 野原ほか，2021）．近年では，第 4 次尾瀬総合学術調査において，著者らによって小型のドローンを用いた低空からの画像記録も進められている（図 1）．

アカシボ物質及びアカシボ粒子の化学的な研究はあまり多くない．落合ほか（2012）は尾瀬ヶ原のアカシボ物質の金属組成として Fe が 95％以上を占め，他に Al，Mn，Ca，Mg，Si が 5％ほど含まれているとした．この Fe の存在状態としては，Fe^{3+}（酸化鉄（Ⅲ））とともに Fe^{2+}（酸化鉄（Ⅱ））が共存していることを示している．Yamamoto et al（2006）もアカシボ粒子の組成として原子吸光分析法や X 線蛍光分析の測定により Fe，Al，Si，Ca を検出している．

これまでの研究では，アカシボ雪を採集後，現地から研究室へ持ち帰り，光学顕微鏡や電子顕微鏡で形態を観察する手法が用いられてきた（山本ほか，2012；福原ほか，2012）．しかし，アカシボ粒子が深い積雪の下で，どのように形成されるのかについては，決定的な形態的証拠が見つかっていなかった．

そこで本研究では，尾瀬ヶ原で採集した積雪コアのアカシボ粒子について，採集後に現地で直ちに光学顕微鏡観察を行い，アカシボ粒子の中に含まれる内容物を観察し，アカシボ粒子の形成過程を探ることを目的とした．また，過去に尾瀬ヶ原，尾瀬沼，および青森県の多雪地域で採集され，保存されていたアカシボ粒子について，同様の顕微鏡観察を行い，尾瀬ヶ原のアカシボ粒子との比較を行った．

2. 方法

2. 1　現地における顕微鏡観察

2012 年 4 月末の融雪期に，尾瀬ヶ原の研究見本園でアカシボ粒子を含む積雪コアを採集した．山の鼻ビジターセンターの展示室において，大型の正立顕微鏡（Nikon 製 Eclipse E600，対物レンズ Plan Fluor x10，x20，x40，x100）とハイビジョンカメラ（Canon 製 XLH1）およびハイビジョンテレビ（20 インチ）を設置し，サンプルを採集後，すみやかに微分干渉（DIC）法による顕微鏡観察とビデオ撮影を行った．アカシボの観察は，少量の融解した赤褐色雪の溶液を厚さ 1.5 mm のスライドグラスに滴下し，厚さ 0.17 μm のカバーグラスをかけてマウントし，試料が薄く広がった状態で行った．ハイビジョンテレビに，顕微鏡で観察しているアカシボ粒子を映し出した状態で，録画をしながら，スライドグラスとカバーグラスの間に，シュウ酸溶液（Lovley et al.（1988）の 1/2 濃度；1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）を滴下して，アカシボ粒子の変化を観察した．また，アカシボ粒子を含む赤褐色雪のサンプルを研究室へ持ち帰り，室温にて，シュウ酸溶液で同様に処理を行い，アカシボ粒子の内容物の撮影を行った．また，シュウ酸溶液で処理したアカシボ粒子サンプルについて，DAPI 染色を行い，蛍光顕微鏡（Nikon 製 TE2000U，水銀灯光源，蛍光フィルターキューブ UV-1A）による撮影を行った．また，2012 年 5 月，2014 年 4 月末にも，サンプル採集直後に，現地で積雪コアの層別にアカシボ粒子の観察と撮影を行った．2014 年 4 月末の撮影は，至仏山荘の宿泊室で顕微鏡による観察，及びハイビジョンカメラ（SONY 製 PDW-EX3）による撮影を行った．

2. 2　保存試料の顕微鏡観察

尾瀬沼（2013 年 5 月 9 日）で採集され，冷凍庫で保管されていたアカシボ粒子について，2.1 と同様の顕微鏡観察とハイビジョンカメラ（SONY 製 PDW-EX3）によるビデオ撮影を行った．また，青森県の弘前市坂本だんぶり池，2012 年 9 月 30 日；大高ほか（2008）の弘前市坂本休耕田と同一，八甲田山猿倉川上流湿原，2012 年 5 月 26 日；山本ほか（2004）の Hakkoda, upper River Sarukura と同一，弘前市稔町水田，2011 年 11 月 14 日；大高・菊池（2012）の調査地と同一で採集され，ホルマリン固定されたアカシボ粒子について，同様の顕微鏡観察と撮影を行った．

3. 結果

2012 年 4 月末に尾瀬ヶ原見本園において積雪コアを採集し，深さ 1.5 m の赤褐色に呈した試料には，これまでに報告されていなかった，黄褐色の酸化鉄でうすく覆われた球状の塊「アカシボ内部粒（AKP4，8，16）」（仮

称，以下，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）と呼ぶ）が多数見られ，その中に，4 個，8 個，16 個などの透明な厚い層をまとった細菌様球体（以下，細菌様粒子）を観察した（図 3）．アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む黄褐色の球状の塊の外長径は，26.6 ± 6.7 μm（n=52）であった（表 1）．対照的に，これまで観察されてきた球形あるいは楕円体形をした粒状のアカシボ粒子の数は，わずかであった．この粒子の大きさは長径 11.2 ± 1.4 μm（n=6）であった（表 1）．

2012 年 5 月，2014 年 4 月末にも，積雪コアのサンプル採集直後に，アカシボ粒子およびアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む黄褐色の球状の塊の観察と撮影

表 1：現地で観察したアカシボ内部粒とアカシボ粒子との特徴

採集時期と 採集場所	雪面からの深さ （採集位置）	アカシボ内部粒（AKP4，8，16） を含む球状の塊 （長径平均 ± SD，n は計測数）	アカシボ粒子 （長径平均 ± SD，n は計測数）
2012.4 末 尾瀬ヶ原	深さ 1.5 m （アカシボ層の中心）	多い （26.6 ± 6.7 μm，n=52）	ほとんどない （11.2 ± 1.4 μm，n=6）
2012.5 尾瀬ヶ原	深さ 0.5 m （地面との境界）	比較的少ない （25.4 ± 8.3 μm，n=39）	比較的多い （9.5 ± 2.6 μm，n=56）
2012.5 尾瀬ヶ原	深さ 0.4 m （アカシボ層の中心）	ない	多い （10.0 ± 2.1 μm，n=51）
2014.4 末 尾瀬ヶ原	深さ 1.5 m （アカシボ層の中心）	多い （22.0 ± 7.6 μm，n=19）	ほとんどない （7.3 ± 1.0 μm，n=11）

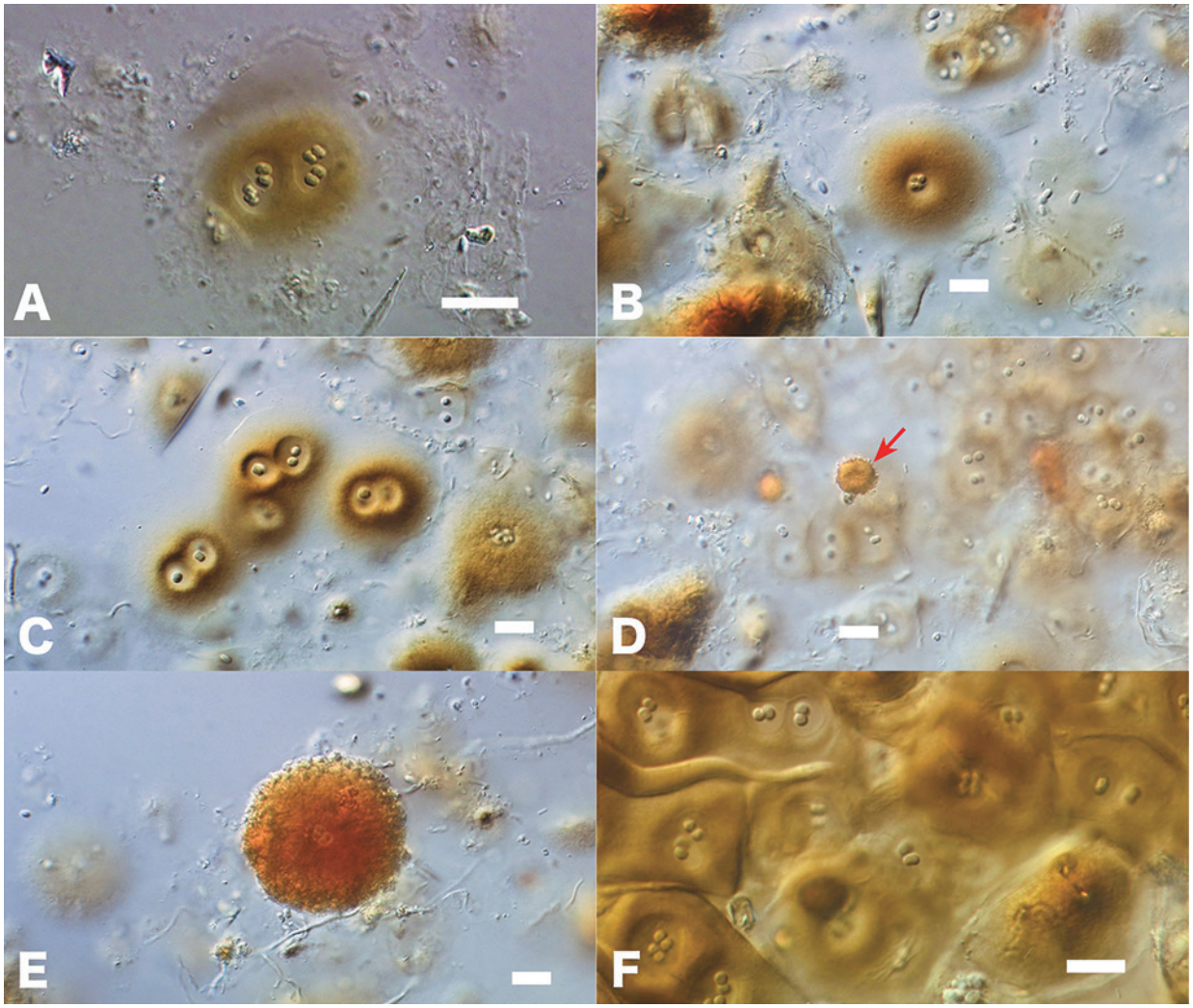

図 3：2012 年 4 月 28 ～ 29 日に尾瀬ヶ原（研究見本園）で採集した積雪コアの赤褐色雪層（表面から 1.5 m 深）を，現地で速やかに撮影した顕微鏡写真．A は細菌様粒子（アカシボ内部粒に透明な厚い層をまとった塊）が 16 個ある；B は細菌様粒子が 4 個ある；C は細菌様粒子が 4 個もしくは 8 個ある；D はアカシボ内部粒（AKP4，8，16）とアカシボ粒子（赤矢印）の比較；E は酸化鉄の層が厚いアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊；F はアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊が密につまった状態．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

を行った結果を表1にまとめた．2014年4月末には，2012年4月末と同じように，多数のアカシボ内部粒（AKP4，8，16）と，少数の粒状のアカシボ粒子を確認することができた．また，2012年5月には，少数のアカシボ内部粒（AKP4，8，16）と，多数の粒状のアカシボ粒子を観察した．アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊と，アカシボ粒子の大きさの変動係数（平均に対する標準偏差の百分率）は表1より，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊の平均30.8（25.2－34.5）%，アカシボ粒平均18.6（12.5－27.4）%で，内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊の方が，変異が大きかった．

スライドグラスとカバーグラスの間にマウントされたアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含んだ溶液に，滴下したシュウ酸溶液が浸透し，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）に到達すると，周囲の酸化鉄が溶解されて徐々に透明になり，内容物が現れる様子を撮影することができた（図4）．シュウ酸溶液を添加してから変化が終了するまでの時間は、30秒～3分程度であった．

尾瀬ヶ原で採集し，氷温保存しながら持ち帰った赤褐色雪の中には，アカシボ粒子が含まれていた．シュウ酸溶液で酸化鉄を溶かした多くのアカシボ粒子の中心付近には，対になって並んだ楕円体形の細菌様の物体が残った（図5）．これらの長径は1.8 ± 0.5 μm（n=19）で，その形や大きさは様々だった．

シュウ酸溶液処理をして，最後に残った細菌様の形態のアカシボ内部粒（AKP4，8，16）をDAPI染色して，蛍光顕微鏡で観察すると，内部の対になった球体は，青色の蛍光を発したが（図6），クロロフィル *a* などの光合成色素由来の自家蛍光は観察できなかった．

尾瀬と青森の各地で採集し，保存した赤褐色雪のサンプル（図7）について，中に含まれるアカシボ粒子をシュウ酸溶液で処理すると，粒子の中心付近には，対になって並んだ楕円体の細菌様の物体が残った（図8，9，10，11）．尾瀬沼サンプルの長径は1.8 ± 0.4 μm（n=16），青森のサンプルの長径は，それぞれ，弘前市坂本だんぶり池では，長径は1.3 ± 0.2 μm（n=11），弘前市休耕田では，長径は1.0 ± 0.1 μm（n=6），八甲田山では，長径は1.9 ± 0.4 μm（n=11）であった．

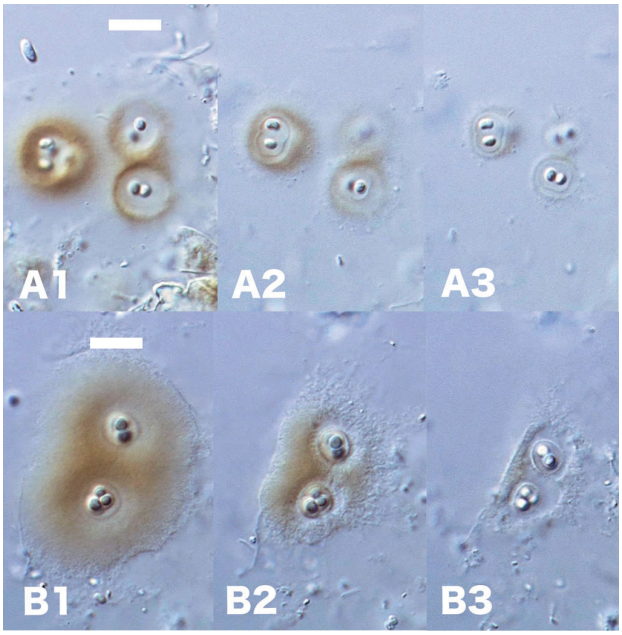

図4：マウントしたアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊を含んだ溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真（2012年4月28～29日に尾瀬ヶ原で採集，同日撮影）．A1～A3，B1～B3は，それぞれ左から右へ，シュウ酸溶液添加後の変化を示す．白色のバーは10 μmの長さを示す．

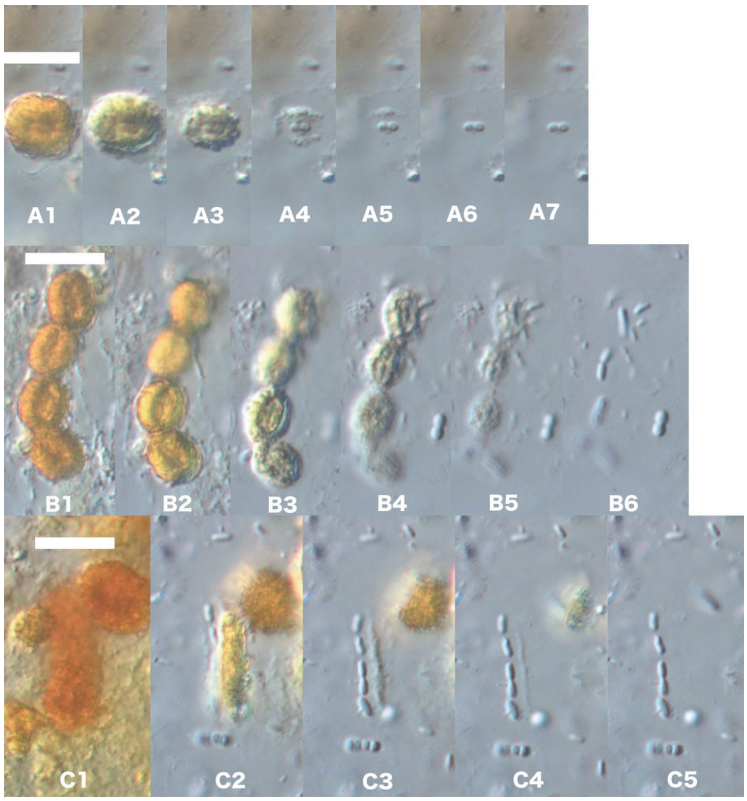

図5：マウントしたアカシボ粒子を含んだ溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真（2012年4月28～29日に尾瀬ヶ原（研究見本園）で採集し，氷温保存した試料，2012年6月20日撮影）．A1～A7，B1～B6，C1～C5は，それぞれ左から右へ，シュウ酸溶液添加後の変化を示す．白色のバーは10 μmの長さを示す．

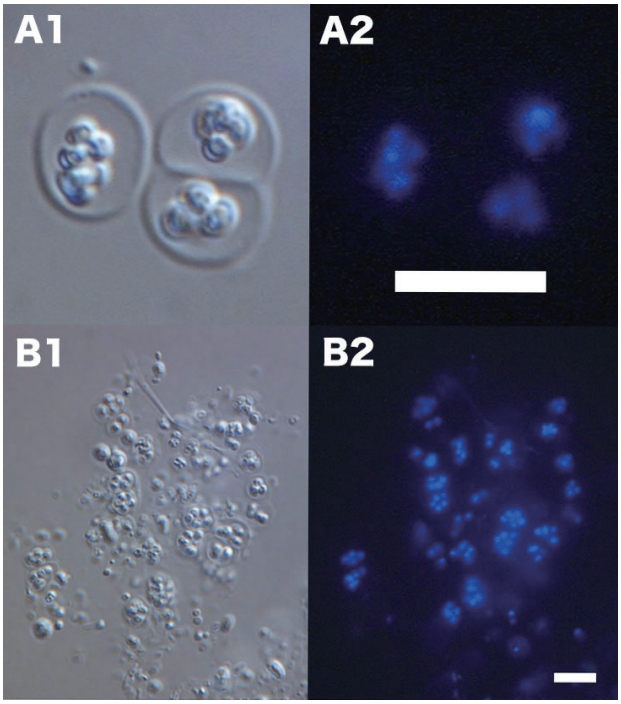

図 6：シュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）処理した後に DAPI 染色したアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊の落斜蛍光顕微鏡像．A1，B1 は微分干渉像；A2，B2 はフィルターキューブ UV-1A による蛍光像．2012 年 5 月 10 日に尾瀬ヶ原（研究見本園）で採集し，氷温保存した試料を 2012 年 6 月 10 日に撮影．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

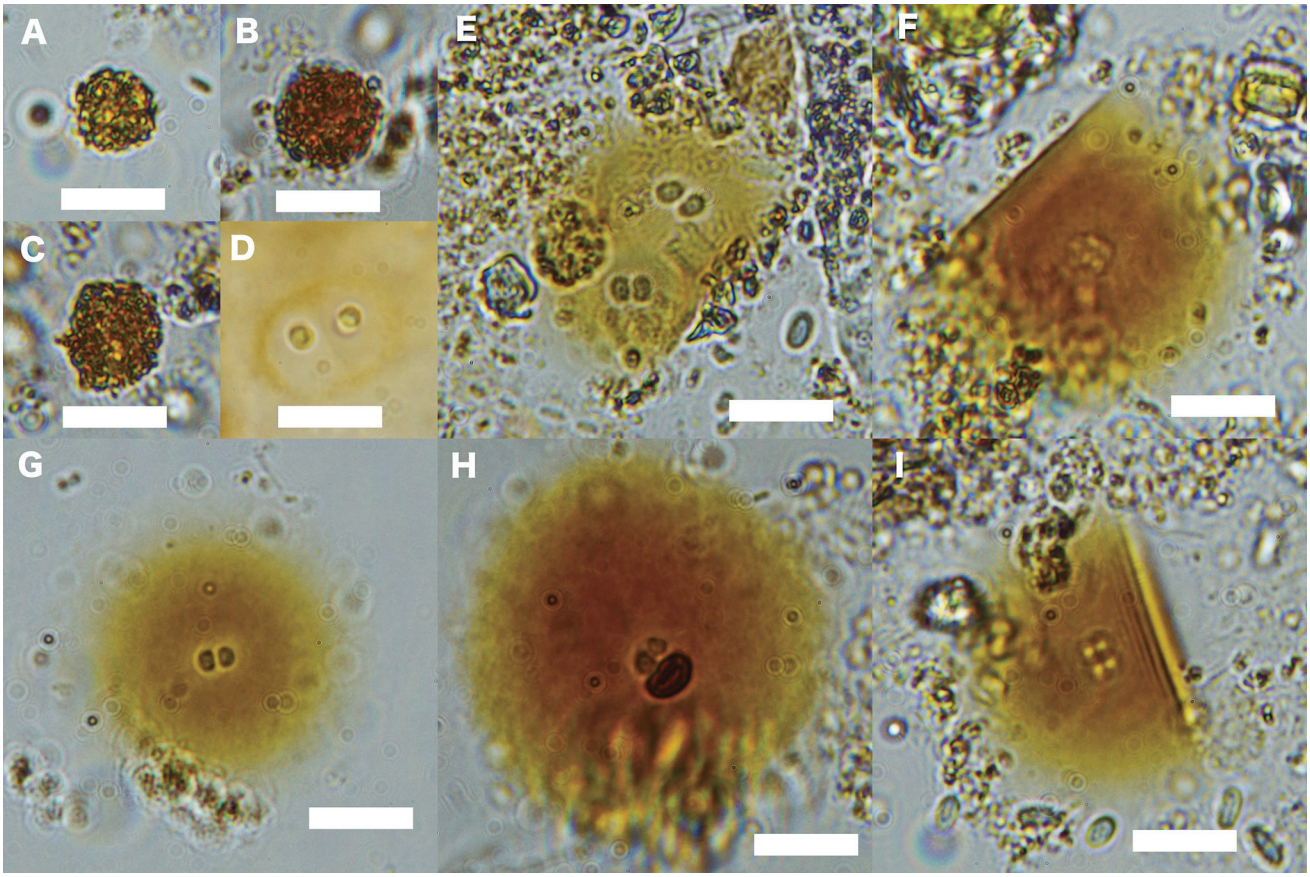

図 7：2014 年 5 月 8 ～ 9 日に尾瀬沼（長蔵小屋付近）で採集した積雪コアの赤褐色雪層（表面から約 1 m 深）に含まれるアカシボ粒子およびアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を速やかに現地で撮影した顕微鏡写真．A，B，C はアカシボ粒子；D ～ E はアカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む球状の塊．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

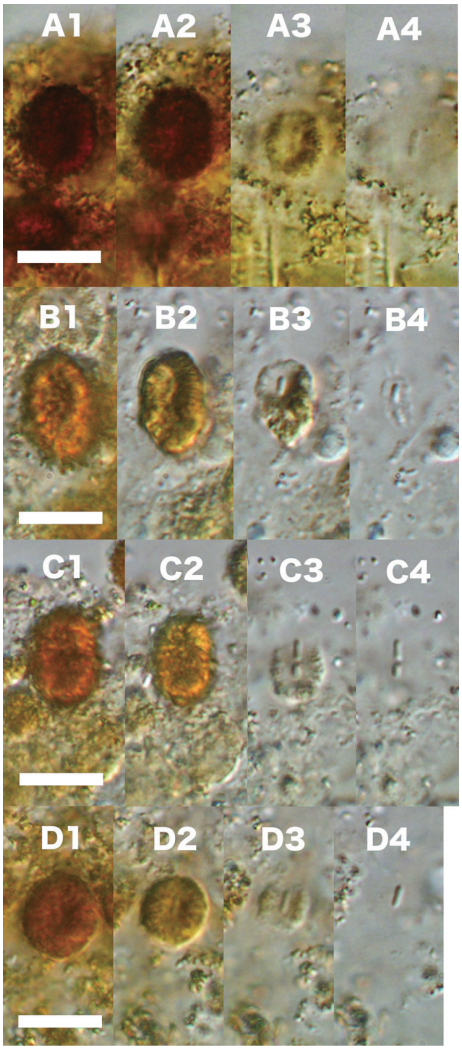

図 8：2013 年 5 月 9 日に尾瀬沼で採集し，冷凍保存した試料．マウントしたアカシボ粒子を含む溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真．A1 ～ A4，B1 ～ B4，C1 ～ C4，D1 ～ D4 は，それぞれ左から右へ，シュウ酸溶液添加後の変化を示す．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

4. 考察

これまで，尾瀬の赤褐色雪の主因となるアカシボ粒子は，藻類であるとの説が論じられてきた（e.g. Fukuhara et al., 2002；山本ほか，2006）．本研究において，尾瀬ヶ原の研究見本園で，アカシボ初期に雪の下 1.5 m 付近からアカシボ物質を採集して，すみやかに現地で顕微鏡観察を行った時に多く出現した細菌様粒子を含む黄褐色の球状の塊は，これまでに報告されていなかった形状であった（図 3，4）．シュウ酸溶液処理で周囲の酸化鉄を溶かし，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を DAPI 染色した観察では，透明な膜におおわれた中心付近の粒状の複数の物体全体が青い蛍光を放っており，細菌様粒子全体に DNA が存在することが示された（図 6）．この時，クロロフィル *a* などが持つ自家蛍光は観察できなかった．これまでに，光合成に関与するルビスコ遺伝子はアカシボ粒子から見つかっておらず（Kojima et al., 2009），雪中藻類に含まれるカロチノイドは検出されていない（山本ほか，2006）．これらの点から，アカシボ粒子は，藻類ではないことが示唆された．

本研究において，アカシボ粒子をシュウ酸溶液で処理すると，内部には，対になって並んだ楕円体の粒子が含まれていた（図 5）．その大きさや形態，および DAPI 染色による顕微鏡観察から，この内部の粒子は，細菌であると考えられた．これまでに，横山ほか（2012）によって，アカシボ雪の中に代表的な鉄酸化細菌である *Gallionera* sp. や *Leptothrix* sp. が観察されおり，0 ℃という低温環境下においても，鉄の酸化と細菌の増殖が可能であることが報告されている．Kol and Flint（1968）は雪のなかの微生物 466 種を検索し，カビ 77，細菌 35，残りは藻類に寄生していることを示している（山本，2012）．積雪中の細菌群集の分類群構成は，他の淡水低温環境と類似した特性を有している（小島，2012）．これに対し赤雪では，紫外線に対する防御機構を有する細菌の存在比が特に高くなることが示唆されている（小島，2012）．一方アカシボでは，好気的なメタン酸化細菌と嫌気的な鉄還元菌がともに多く含まれるという独自の微生物群集が成立している（小島，2012）．アカシボの微生物群集については，尾瀬沼における研究が報告されている（Kojima et al., 2009）．積雪表面に見出されたアカシボ粒子の凝集体，およびコア試料の解析からアカシボの細菌群集が他に類を見ない特徴を有していることが明らかとなっている（小島，2012）．

2012 年，2014 年ともに，4 月末に雪の下の深い層（1.5 m）から採集したアカシボ物質では，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む黄褐色の球状の塊が多く観察された一方で，赤褐色で粒径がそろったアカシボ粒子が少なかった（表 1）．融雪がさらに進んだ 5 月に入り，雪の下の浅い層（1 m 以下）から採集したアカシボ物質では，アカシボ粒子の割合が増えた（表 1）．これに対して，雪の下の 0.4 m にあったアカシボ層の中心付近では，アカシボ内部粒（AKP4，8，16）を含む黄褐色の球状の塊は観察できなくなり，アカシボ粒子の割合が大部分を占めた（表 1）．これは，雪解けが進むにつれて，アカシボ層のアカシボ内部粒（AKP4，8，16）と粒状のアカシボ粒子の構成割合が変化する，つまり，アカシボが発達する段階を示すものと考えられた．毎年春にアカシボが発達する雪原では，雪解けの季節になると，周辺部の雪解けによって，積雪内部の間隙水・地下水が上昇してくると考えられている（野原ほか，2012）．こう

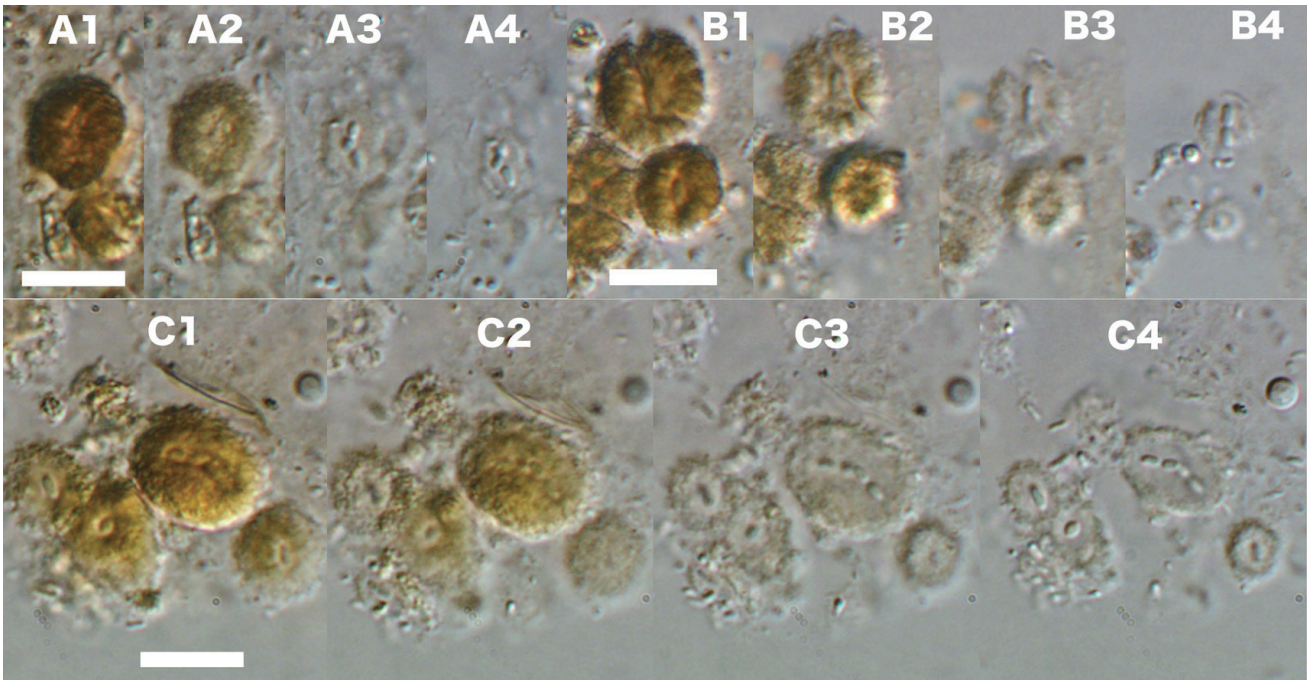

図 9：2012 年 5 月 26 日に八甲田山の湿原で採集した試料．マウントしたアカシボ粒子を含む溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真．A1 ～ A4，B1 ～ B4，C1 ～ C4 は，それぞれ左から右へ，シュウ酸溶液添加後の変化を示す．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

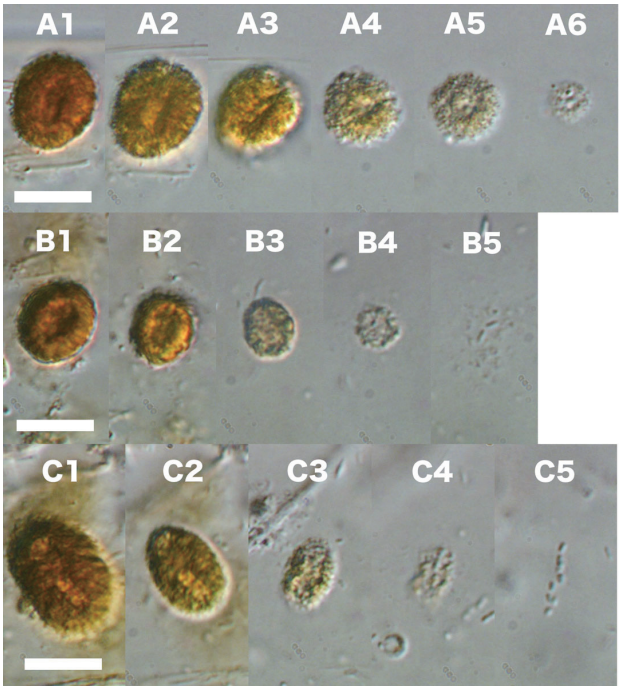

図 10：2012 年 9 月 30 日に弘前市坂本だんぶり池で採集した試料．マウントしたアカシボ粒子を含む溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真．シュウ酸溶液添加後の変化を左から右へ示す．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

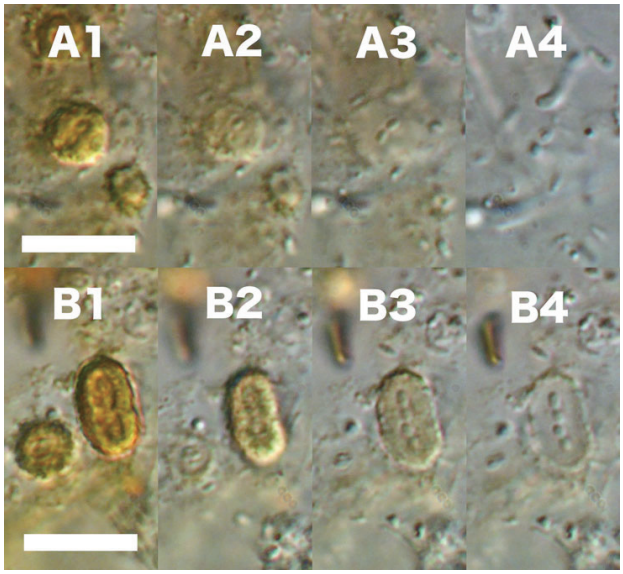

図 11：2012 年 9 月 30 日に弘前市稔町水田で採集した試料．マウントしたアカシボ粒子を含む溶液にシュウ酸溶液（1.4% シュウ酸アンモニウム +0.75% シュウ酸：pH 2.72）滴下後の連続写真．シュウ酸溶液添加後の変化を左から右へ示す．白色のバーは 10 μm の長さを示す．

したことから，雪解けの季節に，雪の深いところで，泥炭の中から供給された鉄と，雪解け水に含まれる酸素から，細菌の活動によって酸化鉄が作られ，雪が赤褐色に染まることが示唆された．

2014 年 4 月末の観察において，採集直後に顕微鏡観察し，アカシボ粒子をなかなか見つけることができなかったサンプルを，翌日に観察すると，アカシボ粒子を簡単に見つけることができた（藤原ほか，未発表）．これは，積雪の下層からサンプリングを行ったことによって，低酸素状態の雪の中（福原ほか，2012b）にあった何らかのアカシボ粒子前駆物質が，空気中の酸素と反応して，一晩の間に急激に酸化が進み，赤褐色の粒状のアカシボ粒子が形成された可能性がある．

おわりに，今回の光学顕微鏡での観察結果は，多雪地帯の融雪時に現れる，酸化鉄が多く含まれる赤褐色雪の原因として，アカシボ粒子の中心に含まれる細菌が深く関与していることを示していた．今後，内部の細菌様粒子だけを採取して PCR 分析を行い，その遺伝子解析から，種が特定されることが期待される．

謝辞

この研究は，「干潟等湿地生態系の管理に関する国際共同研究」（国立環境研究所）の一部として，当時の環境庁との協議や関係機関の許可を得て行われたものである．また，研究の一部は文部省科学研究費（10680531，研究代表者　野原精一）を用いて実施した．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．ドローンによる調査は，第 4 次尾瀬総合学術調査の一環として行われた．尾瀬入山に際して，便宜を図っていただいた尾瀬保護財団，東京電力 KK 及び当時の尾瀬林業 KK，顕微鏡観察の場を提供していただいた山の鼻ビジターセンターに感謝の意を表する．調査及び分析や解析など様々に協力していただいた全ての尾瀬アカシボ研究グループメンバーに感謝する．本研究の調査の一部の様子は NHK との共同研究として 2012 年の NHK スペシャル「奇跡の湿原　尾瀬」で紹介された．番組の制作に尽力いただいた吉川徳人氏，神央氏をはじめとする制作スタッフの皆さま，また現地での調査に協力いただいた佐久間文男氏，山下範晃氏，大畠祐一氏に感謝申し上げる．

引用文献

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.

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.

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―尾瀬ケ原のアカシボにみられる無脊椎動物―．陸水学雑誌，**67**，81-93.

福原晴夫，木村直哉，北村　淳，落合正宏，山本鎔子，林　卓志，大高明史，小島久弥，福井学，菊地義昭，野原精一（2012a）尾瀬地域におけるアカシボの発達過程．低温科学，**70**，37-47.

福原晴夫，大高明史，木村直哉，北村　淳，菊地義昭，野原精一（2012b）アカシボに分布する無脊椎動物－尾瀬ヶ原のアカシボを中心に－．低温科学，**70**，75-85.

小林義雄，福島　博（1952）日本に於ける赤雪と緑雪に就いて．　*Bot. Mag. Tokyo*, **65**, 77-85.

Kol, E., and E. A. Flint（1968）Kryobiologie. Biologie und Limnologie des Schnees und Eises. I. Kryovegetation. In Thienemann, A.（founder）, H.-J. Elster, and W. Ohle（eds.）, *Die Binnengewsser*. Vol.24. Stuttgart: E. Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, 216 pp.

Kojima, H., H. Fukuhara, and M. Fukui（2009）Community structure of microorganisms associated with reddishbrown iron-rich snow. *Systematic and Applied Microbiology*, **32**, 429-437.

小島久弥（2012）アカシボおよび赤雪の微生物群集の特徴．低温科学，**70**，61-65.

Lovley D. R., and J. P. Phillips（1988）Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese. *Appl Environ Microbiol*, **54**, 1472–1480.

NHK（2012）NHK スペシャル放送, 奇跡の湿原　尾瀬．NHK ビデオ（2013 出版）.

中村剛之（2012）尾瀬ヶ原のアカシボ発生地からえられたガガンボ類（昆虫綱，双翅目）．低温科学，**70**，99-102.

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.

野原精一，村田智吉，藤原英史，福原晴夫，千賀有希子（2021）尾瀬ヶ原における湿原地形と河川・池溏環境と洪水に伴う変遷．陸水学雑誌，**82**，151–169.

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（2012a）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.
大高明史（2012b）尾瀬ヶ原のアカシボ雪に出現する貧毛類（環形動物門環帯綱）の生態学的特徴．低温科学，**70**，87-92.
大高明史，菊池智子（2012）青森県弘前市の水田で積雪前に出現した赤褐色粒子の観察．低温科学，**70**，103–107.
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無脊椎動物．陸水学雑誌，**69**，107-119.
鳥居高明（2012）尾瀬ヶ原湿原のヒメミミズ科（環形動物門環帯綱）．低温科学，**70**，93-98.
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，大高明史，林　卓志，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（2012）藻類による彩雪現象．低温科学，**70**，1-8.
山本鎔子，林　卓志，大高明史（2012）東北地方にみられる赤雪．低温科学，**70**，109–112.
横山亜希子，滝　玲加，大鐘由加子，八木明彦（2012）尾瀬ヶ原に現れるアカシボと鉄・マンガン酸化細菌．低温科学，**70**，67-73.