HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪中の融解水による藻類粒子の垂直移動
Author(s)	山本, 鎔子; 林, 卓志; 落合, 正広 他
Citation	低温科学, 70, 55-59
Issue Date	2012-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49013
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS70_007.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 70 （2012） 55-59

積雪中の融解水による藻類粒子の垂直移動

山本　鎔子[1)]，林　　卓志[2,8)]，落合　正広[3)]，福原　晴夫[4)]，
野原　精一[5)]，北村　　淳[6)]，尾瀬アカシボ研究グループ[7)]

2011 年 12 月 27 日受付，2012 年 1 月 18 日受理

尾瀬ヶ原湿原および尾瀬沼では毎年 5 月から 6 月の融雪期にアカシボと呼ばれる赤雪現象が生じる．赤雪の原因は，およそ 10 μm の径をもつ赤褐色の球状の緑藻 *Hemitoma* sp. 胞子に起因するもので，この胞子の被壁は酸化鉄が付着し赤褐色を呈している．この胞子は湿原表層部の融雪水の動きに従って積雪下層部から上層部に向かって動くことにより起きると考え，この可能性を検討するために，アクリル製の円筒型コアを用いて実験を行った．雪を詰めたコア（雪コア）の下層部にアカシボの粒子あるいはアカシボの粒子とほぼ同じ径をもつ *Chlamydomonas* を添加し，積雪下層部に融雪水の存在する現場と融雪水のない現場にそれぞれ埋設し，一定時間後にアカシボ粒子あるいは *Chlamydomonas* の動きを調べた．融雪水の存在する地点においてのみ下層部のアカシボ粒子および *Chlamydomonas* は雪コアの上層部に向かって動くことが観察された．この結果から，雪コア内の粒子は積雪下層部から雪面に向けて，融雪水の動きにともなって移動する可能性が高いと結論した．

Vertical movement of algal particles in melted snow

Yoko Yamamoto[1], Takashi Hayashi[2,8], Masahiro Ochiai[3], Haruo Fukuhara[4],
Seiichi Nohara[5], Jun Kitamura[6] and Oze Akashibo Research Group[7]

The red snow phenomenon called ‘Akashibo’ is usually observed from May to June during melting snow time in Ozegahara mire in Japan. The striking red coloration was mainly caused by the reddish-brown spherical particles with the diameter of about 10μm that are the spores of a green alga, *Hemitoma* sp. covered with iron oxide. These spores are enriched at the ground surface below the snow at the beginning, and their enrichment shifts to the upper layer as snow melting proceeds. It was thought that this shift is generated by movements of the spores from the lower layer to the upper layer. To test this possibility, we put acryl tubes containing snow with the spores at the bottom part on the mire at several different sites. Vertical movement of the spores toward the top part was observed only in the tubes which were put on the sites where snow melting water was present underneath the snow. These results support the idea that a flow of snow melting water toward the snow surface caused the movement of the spores from the lower layer to the upper layer.

キーワード：赤雪，尾瀬湿原，粒子の移動メカニズム
Red snow, Oze mire, Movement mechanism of algal particles

1）〒194-0042　東京都町田市東玉川学園 1-28-5；責任著者　E-mail: maya.yamamoto@nifty.com
2）元明治大学農学部　〒214-8571　神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
3）元徳島文理大学工学部　〒769-2193　香川県さぬき市志度 1314-1
4）新潟大学教育人間科学部　〒950-2181　新潟市五十嵐二の町 8050
5）㈱国立環境研究所　〒305-8506　茨城県つくば市小野川 16-2
6）㈱グリーンシグマ　〒950-2042　新潟市坂井 700-1
7）連絡先：福原晴夫
8）現在：ヤマハ発動機 KK　〒437-0061　静岡県袋井市久能 3001-10
[1] 1-28-5 Higashi-Tamagawagakuen, Machida, Tokyo 194-0042, Japan.
[2] Faculty of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan.
[3] Faculty of Engineering, Tokushima Bunri University, Sanuki, Kagawa 769-2193, Japan.
[4] Faculty of Education and Human Sciences, Niigata, University, Niigata 950-2181, Japan.
[5] National Institute, for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan.
[6] Green Sigma Cooperation, 7001 Sakai, Niigata 950-2042, Japan
[7] refer to H. FUKUHARA
[8] present address; Yamaha Motor Co., Ltd. 3001-10 Kunou, Fukuroi-shi, Shizuoka 437-0061, Japan.

1．はじめに

雪の彩色現象は世界各地で報告されており（Kol, 1964; Fjerodingstad et al., 1974; Müller et al., 1998; Hoham and Duval, 2001），本邦においても高山地帯（Fukushima 1963; Yamamoto et al., 2004）また東北地方（山本ら，2006，井上・吉田，1978）において融雪期に赤，黄，緑色などに雪が彩色されることが知られている．一般に赤雪は *Chlamydomonas* の胞子が原因であり，尾瀬においてもこの藻よるものであることが古くから報告されている（Fukushima, 1963）．尾瀬ヶ原や尾瀬沼ではこの赤雪をアカシボとして古くは二三の紀行文（武田，平野）のなかで毎年 5 月から 6 月の融雪期に雪面が赤褐色化することが記載されている．前報で述べたように，現在のところ，この現象は緑藻，Phacotaceae 科 *Hemitoma* sp.の胞子表面に付着した多量の酸化鉄によるものであると考えられている（Fukuhara et al., 2002；山本ら，2006）．彩雪が著しい場合には，融解水 1 mL あたり約 10^6〜10^7 個の胞子が計測されている．しかしこの藻類の栄養細胞から胞子形成に至るまでの過程や雪の表面が着色していく過程について十分に解明されていない．雪の中における胞子の分布状況（山本ら 2006）からは，少なくともこの胞子は降雪前に湿原の表層で増殖したのち，温度の低下に伴い，胞子を形成し，積雪後は湿原表層にとどまり，融雪期に湿原表層を流れる融雪水に浮遊して雪の中を上層部に向けて動き雪の表面に顕れ出て雪を赤褐色化させ，いっそう融雪を加速させたものであろうと推測している（山本ら，2006）．

本研究では，雪面の赤褐色化は，湿原表層に生息した藻の胞子が積雪の下層から雪表面に向けて移動した結果であろうと考え，雪の中を胞子が移動する可能性を実験的に追跡した．

2．実験方法

アカシボ粒子が積雪中を移動する可能性を調べるために，内径 5 cm，長さ 1 m のアクリル製円筒コア（山本ら，2006）を用意した．円筒コアを尾瀬沼の積雪表面から底に向かって鉛直に貫入させ雪の詰まったコア（雪コア）を採取した．雪コアの採取地点は積雪 1 m 以上の深さがあり，全層とくに積雪下層部の融解水中にアカシボおよびその他の藻類が顕微鏡下で観察されない，かつ埋設地点に近い場所（約 2 m 離れる）を選んだ．このようにして得た雪コアを，下部から 5〜10 cm の A 部（図 1）に相当する部分に現場で採取したアカシボ粒子と KCl 1 g を含む懸濁液 2 mL を，また室内培養で得た *Chlamydomonas*（Chl *a* として約 0.5 mg mL^{-1}）を 1〜2 mL と KCl 1 g を含む混合液を注射器で注入したアカシボ-雪コアと *Chlamydomonas*-雪コアを用意しそれぞれの地点に設置した．なお設置場所はあらかじめ雪コアと同じ径のコアで掘削し，積雪下層部の融雪水の存在有無を確かめ，融雪速度がもっとも大きくなるとされている正午過ぎ（13 時〜14 時；小島・本山，1984）に各雪コアを埋設した．設置場所は N 36°55′35″，E 139°18′50″ の尾瀬沼（標高 1665 m）沿岸の樹林帯に近い湿原で積雪下層部には優占種としてミズバショウ，リュウキンカがひろがるミズゴケ地帯であった．一定時間後に取り出した雪コアは 5〜10 cm の間隔で切断し，アカシボ粒子および *Chlamydomonas* と K の動きを調べた．融雪水が十分存在する地点に埋設した雪コアは 2 時間後に，融雪水のない地点の雪コアは 1 日経過後に夫々回収した．なお回収時間の設定は，尾瀬ヶ原での予備調査（2001 年 4 月 29 日）から判断した．切断した雪コア中のアカシボ粒子および *Chlamydomonas* と K は雪融解水中の濃度として表した．アカシボ粒子は全鉄濃度（SHIMAZU AA-625-11；山崎 1988）を計測することにより，*Chlamydomonas* はクロロフィル *a* 濃度（有賀 1979）により，K は原子吸光法（SHIMAZU AA-625-11；波多野 1988）あるいはイオンクロマトグラフィー（東亜 DKK IC-100）によりそれぞれ分析した（山本ら，2006）．

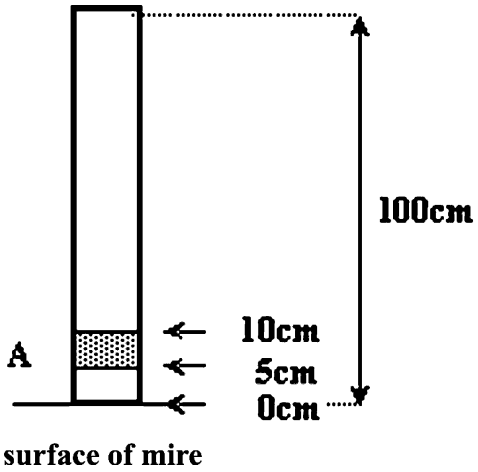

図 1：積雪中の粒子の動きを調べるために用いたコア

アカシボ胞子とほぼ同じ大きさの雪氷藻として尾瀬ヶ原や尾瀬沼でも観察される *Chlamydomonas nivalis*（IAM C236：東京大学からの譲渡株）を対照株として使用した．同藻は，20°C，光照射下で 10 日間培養し遠心により濃縮後，使用するまで冷暗所に保存した．保存後，多くは鞭毛を失っていた．

また実験を行った 2001 年 5 月 18 日〜19 日の天候は，晴れ，気温は，2.8°C〜5.0°C であった．使用した雪コアの雪質は日本雪氷学会の推奨する方法（1998）に従って計測した（表 1）．空隙率（N%）は，切断したコアの実容積 VmL（V）の雪を溶解したときの重量（Wg）

を測り次式に従い求めた．

$N = 100(V - W)/V$

3．結果

雪コアに用いた融雪期の雪は，ざらめ雪で薄い氷板が幾層か存在しており（表1），この雪の融解液中のK濃度は，0～0.7 mg L^{-1}，Clは0.6～2.4 mg L^{-1}，空隙率は44～50%であった．積雪下層部に融雪水が存在する地点に埋設したアカシボ-雪コアあるいは*Chlamydomonas*-雪コアを2時間後に回収し雪コア中の各粒子の垂直分布を測定した結果を図2a,-2bに示す．アカシボ-雪コア（100 cm）のアカシボ粒子は，雪コア15～20 cmの部分に最も多く検出され（Fe 35 μg mL^{-1}），20～25 cmで27 μg mL^{-1}，25～30 cmで8.1 μg mL^{-1}，35 cm～ではごく微量であった．KはA部では218 μg mL^{-1}，さらにその下層の0～5 cmでは雪コア中において，コアの各画分でもっとも多量の243 μg mL^{-1}が計測された．15～20 cmでは38 μg mL^{-1}，20～25 cmで10 μg mL^{-1}，25～30 cmで4.7 μg mL^{-1}が測定され，添加したKの雪コア中での回収率は41%であった（図2b）．

Chlamydomonas-雪コア（93 cm）のA部（5～10 cm；図1）中の*Chlamydomonas*は，クロロフィル*a*量として雪融解水中に7.3 μg mL^{-1}，A部の上層部10～15 cmでは9.0 μg mL^{-1}，50～55 cmでは0.1 μg mL^{-1}，55～93 cmでは0.1 μg mL^{-1}の値を夫々示した．KはA部（5～10 cm）で176 μg mL^{-1}，A部の下層（0～5 cm）では104 μg mL^{-1}，45～93 cmでは2.1 μg mL^{-1}の値で（図2a），Kの回収率は66%であった．

表1：使用した1 mコアの雪質

Depth of snow (cm)	snow type		Grain degree (mm)	Hardness*
0-2	granular snow	wet	0.5-1.5	P
2-3	ice layer			K
3-6	granular snow	wet	0.5-1	1F
6-9	granular snow	wet	0.5-1	1F
9-12	ice layer			K
12-13	granular snow	wet		1F
13-15	ice layer			K
15-17	granular snow	wet		1F
17-18	ice layer			K
18-20	granular snow		0.5-1.5	4F
20-32	granular snow	wet	0.5-1.5	4F
32-39	granular snow	very wet	0.5-1.5	1F
39-47	granular snow			K
47-59	ice layer	many		K
59-68	granular snow	compact	＜0.5	P
68-71	ice layer			K
71-84	granular snow		＜0.5	P
84-88	ice layer			K
88-95	granular snow	wet	0.5-2	P
95-	granular snow	wet		P

*; Hardness of deposited snow: P; Pencil, K; knife blade, 1F; finger, 4F; 4fingers.
手による雪質測定；P；ペンシル状；K；ナイフ刃状；1F；1指状；4F；4指状．

積雪下層部に融雪水のない地点に設置した雪コアでは，1日経過後においても*Chlamydomonas*粒子はA部（5～10 cm；8.5 μg mL^{-1}，図3）に留まり，10～15 cm；1.3 μg mL^{-1}で上層部への移動は少ない（図3）．

4．考察

山岳地方や極地で発生する赤雪や緑雪は，雪の表面に

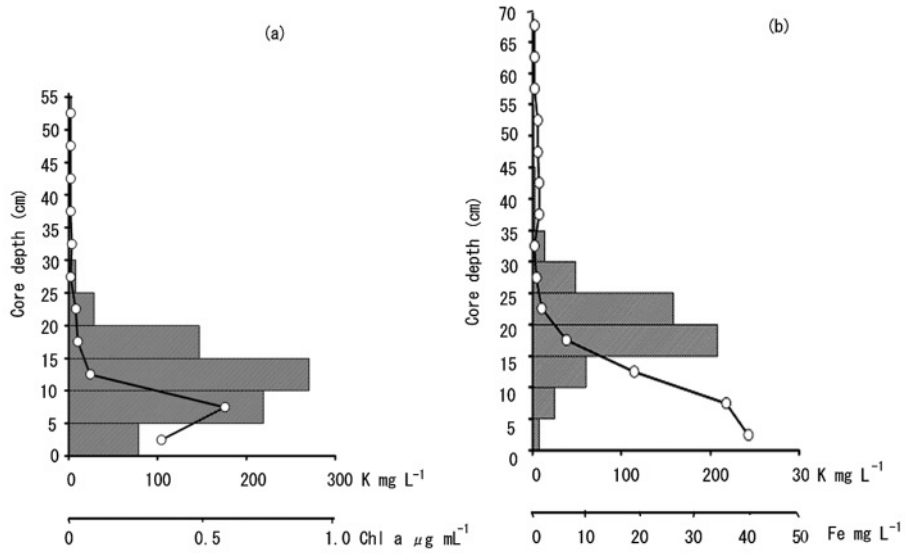

図2：積雪下層部に融雪水のある場所にコアを置いた時のコア中の粒子の動き
クラミドモナス細胞(a)およびアカシボ粒子(b)の動きはクラミドモナス細胞についてはクロロフィルa濃度で，アカシボ粒子は鉄濃度で測定した．マーカーとして塩化カリを用いた．

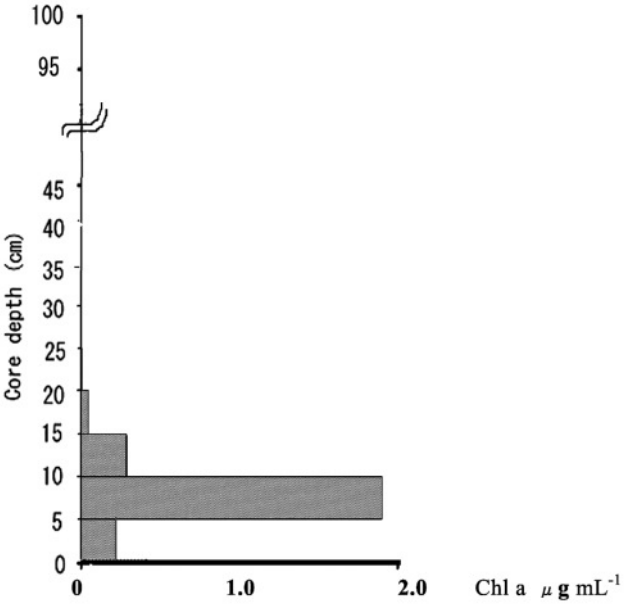

図3：積雪下層部に融雪水のない場所にコアを置いた時のコア中の粒子（クラミドモナス細胞）の動き

落下した無機物などが栄養源となり雪の表層部で藻が増殖した結果であるとの報告が多い（Hoham and Duval, 2001）．しかし尾瀬ヶ原湿原および尾瀬沼で発生するアカシボ現象は積雪下層部から上層部に向けて分布しており（山本ら，2006），この垂直分布から推測すると，積雪表層で藻細胞が増殖したというよりは降雪前に湿原の表層部で増殖していた藻細胞が積雪による低温のため胞子を形成し，融雪期に生じる融雪水により雪の中を移動し表面に顕出した可能性が高いと判断した．雪の表層でみられる赤雪は多くの場合 *Chlamydomonas* よるもので尾瀬においてもよく観察される．本実験においても細胞の大きさがアカシボ粒子とほぼ同じである *Chlamydomonas* を対照の種として用いた．

アカシボ粒子あるいは *Chlamydomonas* を添加した1mの雪コア実験では，積雪下層部に融雪水が存在すれば，雪の中をアカシボ粒子（図2b）および *Chlamydomonas* (図2a) を雪の表層に向けて移動させることができる．これらの粒子とともに添加したKは，A部（図1）の上層で検出されてはいるものの，その量は少なく，多くはA部もしくはA部の下層部に高濃度で集積されている．この結果からアカシボ粒子や *Chlamydomonas* の移動に融雪水の存在が欠かせないと判断した．

融雪水の大部分は雪面の受熱でおき，雪質により積雪層内を複雑な流れをとりながら土壌面に達することが知られている（若浜1963，1968，新井1973，藤野1979，前野・黒田1986，鈴木1993）．土壌面に達した融雪水の一部は土壌中に吸収されたり，あるいはその場が斜面であれば最大傾斜の方向に流れるという（鈴木1993）．このような融雪水の複雑な挙動のなかを湿原表層から積雪表層に向け粒子が移動するには，少なくても，この流れに逆らうことが必要であろう．また数層の氷板を通って，粒子が積雪表層へ移動するには，これを突きやぶるような流れが働いていることが必要である．

Kは，添加した部位（A）より下層に集積している．実験終了後コアを引き上げる時に，融雪水の漏出のため下層への移動がおきたと判断した．Kの回収率の低いことは，このことを裏付け，一方大きな粒子のアカシボ粒子や *Chlamydomonas*　はKに比べ下層への流下がしにくく，その場に留まる可能性が高いと考えた．とくにアカシボ粒子は *Chlamydomonas* と異なり野外で採取したため細胞壁表面には夾雑物が多く積雪中の移動に影響を与えている可能性も高い．

尾瀬ヶ原および尾瀬沼湿原のアカシボの垂直分布（山本ら，2006），水の流れに沿って拡大していくアカシボの発達過程，また融雪が著しい時に音とともに勢いよく雪面にアカシボ粒子が吐出される様子，上記の実験結果からアカシボの形成される過程を次のように推定した．

雪面表層のアカシボ形成には複雑な要因が関与しているであろうが，融雪水の働きがもっとも大きいものであると考える．湿原表層のアカシボ粒子は，積雪下層部に到達した融雪水中のなかをその流れに従って移動し，ときには凹凸のある湿原表層の凹部に溜まったり，また傾斜した地点への融雪水の流れが加速されると，雪面からの融雪水の流れに逆らって，雪面にアカシボ粒子は移動する．この移動が大きいほど，アカシボ粒子は融雪水とともに雪面に向かって急激に吐出し，パッチ状のプールが雪面に形成される．赤褐色粒子は太陽光を吸収して融雪をすすめる．この過程は10日ほど続きアカシボ現象は終焉する（山本ら，2006）と推察した．

謝辞

本研究は，「干潟等湿地生態系に関する重点国際共同研究」（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．記して感謝申し上げたい．

引用文献

新井正（1973）積雪内の自由水の水平移動．地理学評論 **45-1**，33-35．

新井正（1994）雪氷水文現象，融雪量と融雪出水．前野喜一・福田正巳編，p.69，古今書院，東京．

新井正（2004）積雪・融雪の水文学，地域分析のための熱・水収支水文学，p.69，p.166．古今書院，東京．

有賀祐勝（1979）現存量の測定，藻類研究法，西沢一俊・千原光男編，397–398．共立出版，東京．
井上克弘・吉田稔（1978）岩手県盛岡市に降った〝赤雪〟中のレスについて．土壌肥料学会雑誌，**49**，226–230．
Fjerodingstad E., K. Kemp L., Fjerodingstad E. and L. Vanggaard (1974) Chemical analysis of red 'snow' from east-Greenland with remarks on *Chlamydomonas nivalis* (Bau.) Wille. *Archiv Hydrobiologie*, **73**, 70–83.
Fukuhara, H., A. Ohtaka, N. Kimura, M. Fukui, Y. Kikuchi, S. Nohara, M. Ochiai, Y. Yamamoto and Oze Akashibo Res. Group (2002) Spring red now phenomenon "Akashibo" in the Ozegahara mire, central Japan with special reference to distribution of small animals in red snow. Ver. *Internat. Verein Limnology*. **28**, 1645–1652.
Fukushima, H. (1963) Studies on Cryophytes in Japan. Yokohama Municipal University. Series C. **43**, 1–146.
藤野和夫（1979）融雪水の積雪内部への滲透．気象研究ノート，**186**，49–62．
小島賢治・本山秀明（1984）積雪中の融雪水浸透量ピーク時間の遅れ．低温科学，A 43，181–184．
Kol, E, (1964) Cryobiological research in the Rocky Mountains. Archiv für Hydrobiologie, **60**, 278–285.
Hoham, R. W. and B. Duval (2001) Microbial ecology of snow and freshwater ice with emphasis on snow algae. In Snow Ecology. An Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems, H. G. Jones, J. W. Pomeroy, D. A. Walker and R. W. Hoham (eds), 168–228. Cambridge Univ. Press.
波多野隆介（1988）水溶性陽イオン，土壌標準分析・測定法，土壌標準分析・測定委員会編，p.135–140．博友社，東京．
前野紀一・西村浩一（1978）流動状態の雪の研究Ⅰ．低温科学北海道大学低温科学研究所，**A 36**，77–92．
前野紀一・黒田登志雄（1986）雪氷の構造と物性，基礎雪氷学講座Ⅰ．p.142，p.186，p.193–195．古今書院，東京．
Müller, T., W. Bleiss, C-D. Martin, S. Rogaschewski and G. Fuhr (1998) Snow algae from northwest Svalbard: their identification, distribution, pigment and nutrient content. *Polar Biology*, **20**, 14–32.
日本雪氷学会（1998）日本雪氷学会積雪分類．雪氷，**60**，419–436．
鈴木啓助（1993）積雪中における押し出しの流れの形成．地理学評論，**66 A–7**，416–424．
若浜五郎（1963）積雪内における融雪水の異動Ⅰ．低温科学，物理篇，**21**，45–74．
若浜五郎（1968）2）積雪内への融雪水の滲透．雪氷 **30**，175–188．
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）東北地の赤雪，陸水学雑誌，**65**，181–191．
山本鎔子・林卓志・落合正広・福原晴夫・大高明史・野原精一・落合正宏・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**，209–217．
山崎慎一（1988）鉄（全量分析），土壌標準分析・測定法，土壌標準分析・測定委員会編，188–191．博友社，東京