

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340045

研究課題名(和文)地衣類を利用した黄砂モニタリングのためのデータベース構築

研究課題名(英文)The database creation for monitoring the yellow sand events with lichens

研究代表者

中島 啓光 (Nakajima, Hiromitsu)

横浜国立大学・大学院工学研究院・非常勤教員

研究者番号：60399409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：金属を高濃度で蓄積する地衣類ヤマトキゴケまたはオオキゴケを国内11府県で採集、金属分析を行い、黄砂の影響を調べるための基礎データが得られた。二次代謝物を分析したところ、ヤマトキゴケはCu濃度が高いほど二次代謝物濃度が低く、Cu汚染の影響を受けていることが示唆されたが、オオキゴケにはそのような相関が見られず、二次代謝物へのCu汚染の影響に違いが見られた。また、金属を高濃度で蓄積するコケ植物イワマセンボンゴケの金属分析の結果、Ca濃度とK濃度の間に負の相関関係が見出され、過剰なCaによるK取り込みの抑制が示された。以上から、これらのコケに対する金属汚染の影響についての理解が深まった。

研究成果の概要(英文)：Metal-hyperaccumulator lichens *Stereocaulon japonicum* and *S. sorediiferum* were collected in 11 prefectures in Japan. Their metal concentrations were measured, and basic data for monitoring the yellow sand events were obtained. Secondary metabolites in them were analyzed, and the effects of Cu pollution on secondary metabolites were different between the two lichens: relative secondary metabolite concentrations in *S. japonicum* were negatively correlated with Cu concentration whereas those in *S. sorediiferum* were not correlated with Cu concentration. The metal analysis for a metal-hyperaccumulator moss *Scopelophila ligulata* was conducted, and the negative correlation between Ca and K concentrations in it was observed, indicating that an excess of Ca inhibits the uptake of K in *S. ligulata*. These findings provide a deeper understanding of the effects of metal pollution on the two lichens and the moss.

研究分野：植物生理生態

キーワード：ヤマトキゴケ オオキゴケ イワマセンボンゴケ 金属汚染 二次代謝物

1. 研究開始当初の背景

(1) 地衣類は種のバラエティーに富み、あるものは大気中の SO_2 濃度が 10 ppb オーダー以下であることの指標となり (Sugiyama et al. 1976) あるものは 0.1% オーダー以上の重金属を蓄積している (Nash 1990)。このような特性を生かして、地衣類は、都市の大気汚染、鉱山周辺の重金属汚染、原発事故による放射能汚染といった、さまざまな種類の汚染のモニタリングに利用されてきた (Richardson 1992)。一方、地衣類への汚染の影響を調べる方法として、地衣体の中で光合成を行う共生藻に対しては光合成色素の分析、共生菌に対してはその二次代謝物である地衣成分の分析などが知られている (Backor et al. 2009)。

(2) 黄砂は中国北部およびモンゴルに広がるゴビ砂漠を主な発生源とし (Hsu et al. 2013) 毎年春に日本に飛来して、視界を遮り交通を麻痺させるだけでなく、その地域住民に健康障害をもたらす (Onishi et al. 2012)。それゆえ、黄砂の影響を受ける東アジア諸国では、黄砂に関する研究が数多く行われてきた (Choi et al. 2001; Mori et al. 2003; Takahashi et al. 2011)。日本では、2002 年から環境省による大規模な黄砂実態解明調査が行われ、2012 年 3 月までの化学成分の分析結果が公開されている。しかしながら、野生生物による黄砂の取り込みとその影響について、知られていることは少ない。近年、黄砂の発生回数が増え (Kurosaki et al. 2011) その影響が懸念されており、大気分析だけでなく野生生物を対象とした分析および影響評価の必要性が高まっている。

(3) これまで、地衣類を利用した黄砂モニタリングに関する研究はなされていない。しかし、私が行った、銅汚染環境に生育する地衣類への銅ストレスの影響に関する研究 (Nakajima et al. 2013) を継続中に、東アジアに広く分布する普通種であるヤマトキゴケ (*Stereocaulon japonicum*) が黄砂モニター候補種であることが見出され、これをもとに本研究が着想された。私は上記研究を続けて行くなかで、秋田から愛媛までの $1 \times 10^3 \text{ km}$ の範囲にわたる 9 サイトで採集したヤマトキゴケに対して金属分析を行ったところ、銅汚染の有無や採集場所に関係なく、Fe と Al の濃度比 (以下、Fe/Al 比) が一定であることがわかった (図 1)。ここで図 1 の回帰直線の傾きが Fe/Al 比である。この結果と、Al は地衣類にとって必須元素ではないという事実 (Ahmadjian 1993) を合わせると、この比は日本全域に降下しヤマトキゴケに取り込まれた共通の微粒子の Fe/Al 比であることが示唆される。このような微粒子として黄砂が考えられる。というのは、Al と Fe は黄砂を構成する主要元素であり、その比の一定であることが報告されているからである (環

境省 2009)。私が求めた図 1 のヤマトキゴケの Fe/Al 比 0.53 ± 0.23 は、環境省の分析結果から得られる黄砂の Fe/Al 比 0.63 ± 0.15 と一致したうえ、さらに黄砂の発生源であるゴビ砂漠の標準試料 (NIES CRM No. 30 ゴビ黄砂) の Fe/Al 比 0.51 ± 0.08 とも一致した。以上から、ヤマトキゴケが黄砂モニター候補種であることが明らかとなった。

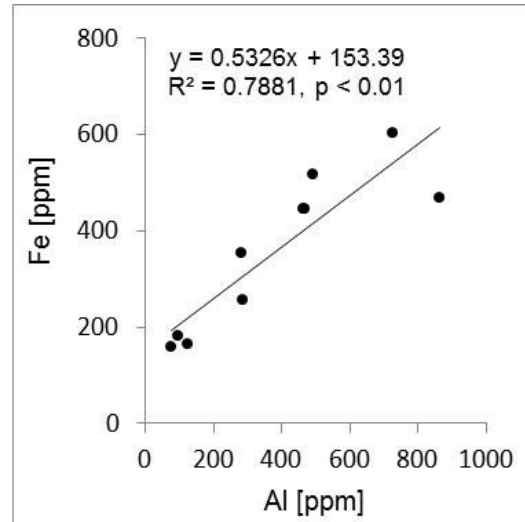


図 1 .ヤマトキゴケ中の Al と Fe の関係 .

2. 研究の目的

(1) 環境モニターとして実績のある地衣類を黄砂モニターとして利用するため、日本各地の地衣類を調査してモニター候補種とモニタリングサイトを決定し、そのサイトで黄砂の前後に地衣類サンプルを採集して分析を行い、結果を黄砂成分と比較する。この比較により、黄砂の地衣類への影響を明らかにし、候補種の黄砂モニターとしての特性を検証する。以上から、地衣類を黄砂モニターとして利用するための基盤となるデータベースを構築することが本研究の目的である。

(2) 本研究は、地衣類を黄砂モニタリングに利用しようという初めての試みである。本研究によって、地衣類の黄砂モニターとしての利用方法が確立され、地衣類の新たな利用価値が創出される。陽の目を見ることのない地道な調査と分析によって、古くから知られている普通種に新たな価値が見出されるのである。近年の黄砂の増加によって高まるであろう、野生生物を対象とした分析と評価へのニーズに、本研究は応えるものでもある。さらに、本研究の成果は東アジア諸国への展開が可能であり、日本での成果を起点に東アジア全体での国際共同研究へと発展することが期待される。また、地表の 8% が地衣類の支配的な植生によって覆われているながら (Purvis 2000) ほとんどの人にとって未知の生物である地衣類に対する認知度を高め、その意義を広く知らしめることに、本研究は貢献する。

3. 研究の方法

(1) サンプル採集：国内の金属汚染および非汚染地域で地衣類を調査して、ヤマトキゴケおよび同じキゴケ属のオオキゴケ (*S. sorediiferum*) のサンプルを採集した。地衣類調査は、鹿児島、大分、福岡、山口、兵庫、大阪、京都、静岡、神奈川、長野、栃木の11府県で行った。また、比較対象として、ヤマトキゴケと同様に金属を高濃度で蓄積するコケ植物の調査をして、大阪、京都、東京の3都府で鉄を高濃度で蓄積するコケ植物イワマセンボンゴケ (*Scopelophila ligulata*) のサンプルを採集した。

(2) サンプル分析

金属：サンプルを酸に溶解し、その溶液中の金属濃度を誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) によって定量分析した。

二次代謝物：本研究で購入したフォトダイオードアレイ検出器を含む高速液体クロマトグラフ (HPLC) 分析システムを用いて、地衣類に含まれる二次代謝物を特定し、その相対濃度を決定した。

蛍光：採集したオオキゴケの蛍光スペクトルを蛍光分光装置を使って測定した。

4. 研究成果

(1) ヤマトキゴケの金属分析：

表1. ヤマトキゴケ中の金属濃度 [ppm].

No.	場所	Cu	Al	Fe
1	鹿児島	12.7	290.5	86.4
2	鹿児島	54.5	451.9	151.7
3	静岡	10.0	748.0	235.9
4	大分	6.5	105.6	126.7
5	神奈川	2000.1	1228.8	987.5
6	静岡	82.8	400.8	677.6
7	静岡	786.5	385.6	631.8
8	静岡	4.4	329.3	301.2
9	兵庫	5.2	318.5	275.5
10	兵庫	99.2	396.9	624.5
11	兵庫	29.0	196.2	335.9
12	兵庫	124.3	35.7	351.3
13	大阪	5.6	323.2	427.6
14	山口	5.1	227.7	354.2
15	山口	13.5	324.5	244.6
16	山口	30.3	302.7	1075.4
17	福岡	472.5	296.7	396.6
18	福岡	10.8	188.4	166.9
19	長野	6.0	552.8	326.7

採集したヤマトキゴケの金属分析の結果を表1にまとめた。銅濃度は銅葺き屋根の下で採集したサンプルが高く(最大2000.1 ppm)。

次いで銅鉱山で採集したものが高かった(最大99.2 ppm)。これらの銅濃度は非汚染サイトで採集したもの(約5 ppm)の20~400倍であったことから、ヤマトキゴケが銅ハイパーアキュムレーターであることが再確認された。この金属分析によって、データベースの主要データを入手することができた。

(2) ヤマトキゴケは銅汚染環境に生育し、高濃度の銅を蓄積することから、銅耐性を持つことは間違いないが、この地衣類への銅汚染の影響は明らかになっていない。そこで、ヤマトキゴケの共生菌が合成し、地衣体に蓄積している二次代謝物への銅汚染の影響を調べるべく、主要な二次代謝物であるアトラノリンとスチクチン酸の相対濃度を測定したところ、これらの相対濃度は銅濃度の自然対数と負の相関関係にあることが見出された(図2、3)。これにより、ヤマトキゴケは銅汚染の影響で二次代謝物を減らしている可能性、さらには、二次代謝物を減らした分の炭化水素を銅汚染対策に利用している可能性が示された。

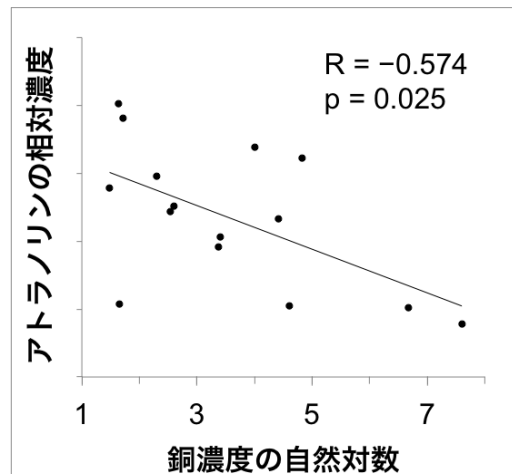


図2. 銅濃度とアトラノリンの相対濃度.

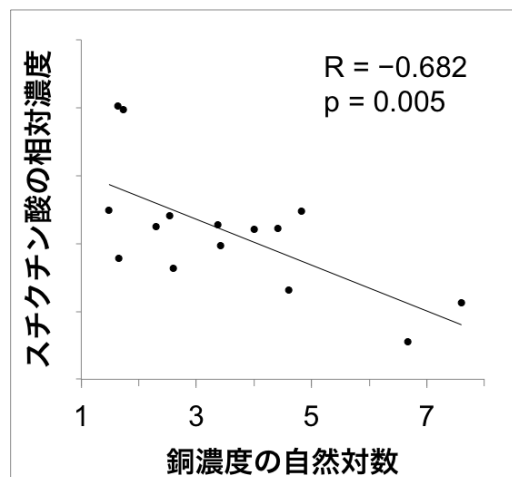


図3. 銅濃度とスチクチン酸の相対濃度.

(3) ヤマトキゴケと同属のオオキゴケについて、銅汚染環境および非汚染環境で採集し

たサンプルの金属分析を行ったところ、最大で451.7 ppmもの銅を蓄積しており、ヤマトキゴケと同様に銅ハイパーアキュムレーターであることがわかった。オオキゴケに含まれる二次代謝物の1つであるロバール酸はUV照射下で蛍光を発することが知られており、もしヤマトキゴケの二次代謝物が銅汚染の影響を受けていたのと同様にロバール酸も銅汚染の影響を受けているならば、蛍光測定によってその影響を調べることができるとの考えから、採集したオオキゴケの蛍光スペクトルを測定したところ、銅濃度と蛍光強度とが負の相関関係にあることが見出された(図4)。これにより、蛍光を利用した銅汚染評価の可能性が示された。

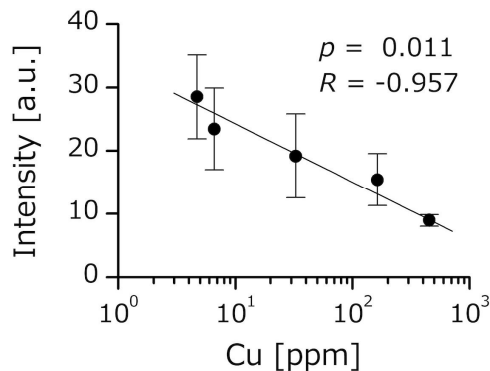


図4．銅濃度と蛍光強度．

(4)鉄を高濃度で蓄積することが知られているイワマセンボンゴケについて、採集したサンプルの金属分析を行ったところ、最大で2.87 wt%もの鉄を蓄積しており、鉄ハイパーアキュムレーターであることが確認されるとともに、カルシウム濃度とカリウム濃度とが負の相関関係にあることが見出された(図5)。これにより、カルシウムがカリウムの取り込みを抑制していることが示唆された。

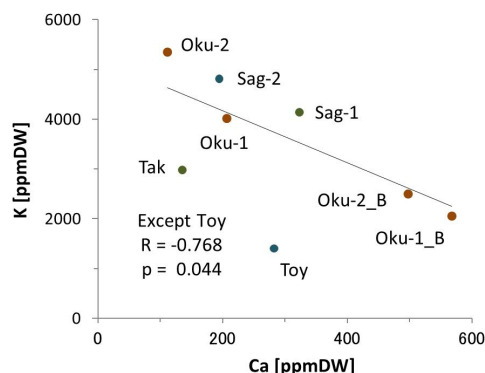


図5．カルシウム濃度とカリウム濃度

< 引用文献 >

Hiromitsu Nakajima, Yoshikazu Yamamoto, Azusa Yoshitani, Kiminori Itoh, Effect of metal stress on photosynthetic pigments in the Cu-hyperaccumulating lichens *Cladonia humilis* and

Stereocaulon japonicum growing in Cu-polluted sites in Japan, Ecotoxicology and Environmental Safety, Vol. 97, 2013, pp. 154-159.

Hiromitsu Nakajima, Kojiro Hara, Yoshikazu Yamamoto, Kiminori Itoh, Effects of Cu on the content of chlorophylls and secondary metabolites in the Cu-hyperaccumulator lichen *Stereocaulon japonicum*, Ecotoxicology and Environmental Safety, Vol. 113, 2015, pp. 477-482.

Hiromitsu Nakajima, Kiminori Itoh, Relationship between metal and pigment concentrations in the Fe-hyperaccumulator moss *Scopelophila ligulata* Journal of Plant Research, Vol. 130, 2017, pp. 135-141.

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Hiromitsu Nakajima, Kiminori Itoh, Relationship between metal and pigment concentrations in the Fe-hyperaccumulator moss *Scopelophila ligulata*, Journal of Plant Research, Vol. 130, 2017, pp. 135-141. (査読有)

Hiromitsu Nakajima, Kojiro Hara, Yoshikazu Yamamoto, Kiminori Itoh, Effects of Cu on the content of chlorophylls and secondary metabolites in the Cu-hyperaccumulator lichen *Stereocaulon japonicum*, Ecotoxicology and Environmental Safety, Vol. 113, 2015, pp. 477-482. (査読有)

[学会発表](計6件)

Hiromitsu Nakajima, Effect of Cu on the fluorescence of the Cu-hyperaccumulator lichen *Stereocaulon sorediiferum*, The 8th IAL Symposium, 2016年8月3日, Helsinki (Finland).

中島啓光, 伊藤公紀, 高橋佑輔, 飯田悠介, 久富木志郎, 鉄ハイパーアキュムレーターコケ植物 *Scopelophila ligulata* に蓄積している鉄の化学状態と他の金属イオンによるストレス, 第17回メスバウアー分光研究会シンポジウム, 2016年3月17日, 首都大学東京(東京都・八王子市)。

Hiromitsu Nakajima, Naoki Fujimoto,

Takashi Amemiya, Kiminori Itoh, Effect of Cu stress on the allocation of carbohydrates in the Cu-hyperaccumulator lichen *Stereocaulon japonicum*, Colloquium Spectroscopicum Internationale XXXIX, 2015年9月1日, Figueira da Foz (Portugal).

Hiromitsu Nakajima, Yusuke Takahashi, Yusuke Iida, Shiro Kubuki, Kiminori Itoh, Relationship between the chemical state of Fe and the concentrations of Fe and chlorophyll in the Fe-hyperaccumulator moss *Scopelophila cataractae*, 13th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, 2015年7月15日, Fukuoka international congress center (福岡県・福岡市).

中島啓光, 藤本尚希, 山本好和, 伊藤公紀, ヤマトキゴケの地衣成分と色素に対する銅汚染の影響, 日本地衣学会第14回大会, 2015年7月5日, 久留米高専(福岡県・久留米市).

藤本尚希, 中島啓光, 雨宮隆, 伊藤公紀, 山本好和, キゴケ属の地衣成分に対する銅汚染の影響, 日本地衣学会第14回大会, 2015年7月5日, 久留米高専(福岡県・久留米市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 啓光 (NAKAJIMA, Hiromitsu)
横浜国立大学・大学院工学研究院・非常勤
教員
研究者番号: 60399409