

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02914

研究課題名(和文)科学的探究を通して科学リテラシーを育成するための生命科学カリキュラムの構築

研究課題名(英文) Construction of life science curriculum to acquire scientific literacy for high school student via scientific exploration

研究代表者

加藤 淳太郎 (KATO, Juntaro)

愛知教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：80303684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在の学習指導要領の改定時より、高等学校の「生物」および「生物基礎」は内容が増加し、実験・観察やICT教材の不足状態が生じた。本研究では、特に植物に注目し、探究的に学習、実践できる生命科学カリキュラム開発を支える実験・観察教材、ICT教材の開発を植物園スタッフを含むメンバーで行った。子房内の種子発育、花粉管伸長に促進的に働く物質、異なる波長に影響されるの種子発芽後の成長の3課題については、ICT教材を作成した。胚珠発育過程については観察のための方法、植物の紫外線防御物質については実験システムの構築を行った。また、データ解釈を中心とした授業を、生態系を津波被害から学ぶ授業展開として試行した。

研究成果の概要(英文)：In the new course of study revised in 2009 by MEXT, the contents of high school biology were changed drastically. Inquires and investigations of Biology are considered to be important to understand and to memorize knowledge for students. However, experiments, observations and ICT teaching materials for new course of study were not much. In this study, we developed experimental observation materials and ICT teaching materials that support development of the life science curriculum. ICT teaching materials were prepared for three issues of seed development, substances promoting the elongation of pollen tubes, growth after seed germination effected by different wavelengths. process, we developed a method for observation for the ovule developing and an experimental system for plant UV protection substance. We also tried a lecture focusing on interpretation of data to learn ecosystem from tsunami damage.

研究分野：生物教育

キーワード：生物教育 植物園 博学連携 ICT教材 実験・観察 探求活動

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

OECD の報告 (2012) では、日本の科学的リテラシーの得点は OECD の平均得点よりも高く、加盟国の中でも 1～3 位に位置する。一方、平成 21 年改訂の高等学校学習指導要領により、高等学校生物の「生物基礎」および「生物」においては、大幅な改訂が行われ、内容の追加等にとどまらず、枠組の変換を伴うため、高等学校の教員に教科書の記載理解等の対応を苦慮させてきた。また、探究を中心とした理科カリキュラムの構築が高等学校においても求められるようになり、さらに科学を学ぶ重要性、科学の意義などの科学の本質、科学的探究などの科学を理解する概念の構築が同時に求められるようになった。

内容的増加では、遺伝子組換え技術などの新しい知見も教育内容に盛り込まれ、従来の古典的、伝統的な探究活動では対応できない新しい領域・分野の内容の探究活動も開発する必要が生じた。これらの実験観察活動は、大学などの研究機関で実施してきたものを高等学校で実施するなどの対応も取られるが限定的である。これらを踏まえ、高等学校で実施可能な生物の新しい実験観察活動やそれを補助する教材の開発が必要であるが、これらの実験観察教材、ICT (Information and Communications Technology) 教材は未だ不十分であり、座学を中心とした授業に偏る傾向に陥りやすい。以前より、「生物は暗記科目」と揶揄されてきたが、内容の増加とそれともなう実験や ICT 教材の不足状態は、学問としてのインパクトを生徒に与え難く、知的な好奇心が授業内で満たされない「知的な好奇心飢餓状態」が生じ、点数獲得のための強制的暗記の追い打ちにより「科学的暗記アレルギー」→「理科嫌い」へと移行し、科学的リテラシーの醸成に悪影響となる可能性がある。特に植物は、動きのある動物分野に対して「生育させるのに長時間を要する」、「動かないことから生徒が興味を持ちにくい」という面から「暗記」に偏重しやすいと考えられる。

博物館や動物園などの社会教育施設の存在を理科教育に利用する「博学連携」は、教科書の紙面からでなく実際に目で見、触れるなどにより、インパクトが強くなりより高い教育効果をもつ。一方、植物からのインパクトは、「動かない」、「鳴かない」、「触れるだけでは物足りない」という面から大きく無く、学校—植物園の連携もあまり活発に行われていないのが現状である。一方、研究員をもつ大型植物園では、集客効果の高い企画展を活発に開催し、研究員の研究を理解しやすい言葉で一般市民にフィードバックする試みが行われているが、その広報は地域限定になることが多い。しかし、このような地域限定で一般市民にわかりやすい企画展の中にも、生物教育に

おいて大きなインパクトをもつ教材があると予想され、その他にも多くの学校教育にインパクトを与えられうる知財が、植物園もしくは植物園研究者の中に蓄積されている。カリキュラムの開発は従来、大学の研究者、理科教育研究者、高等学校教員が中心で行って来たが、植物のカリキュラムの開発に植物園研究員が加わることで、植物園の様々な知見や知財とカリキュラムが有機的に結びつき、インパクトのあるカリキュラムの開発が行える可能性がある。

2. 研究の目的

21 世紀に対応できる生命科学の育成を目標とした現学習指導要領の改訂により、「生物」および「生物基礎」の内容は大幅に増加し、それともない実験・観察や ICT 教材の不足状態が生じた。特に、植物を題材とする内容では、具体的な実験観察を実施することが困難となり、科学的知識の伝達に終始している。本研究では、最先端の生命科学を、より具体的に理解できるような生命科学の理解を深め、さらに探究的に学習、実践できる生命科学カリキュラムの開発を支える実験観察教材、ICT 教材を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、2 大学、2 植物園のスタッフが自身の専門とする研究を深めるとともに、教育大スタッフと相談し、蓄積されている成果や新たな成果をもとに、探究的に学習、実践できる生命科学カリキュラムの開発を支える実験観察教材、ICT 教材の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 高等学校における生物教育に関する現状と課題

平成 21 年改訂学習指導要領に基づく、高等学校生物教育が指導する教員や学習を受けた生徒の現状を理解するため、指導する高校教員ならびに教育課程を受けた大学生を対象とした質問紙調査を、愛知県高等学校教員 38 名、愛知教育大学の学部生 214 名 (平成 11 年改訂教育課程 127 名、平成 21 年改訂教育課程 87 名) に対して行った。

大学生への調査結果から、小・中学校までと異なり、高等学校での生物では探究的な活動があまり行われていないことが改めて浮き彫りとなった。生命科学が日進月歩で進歩している状況にもかかわらず、生物に関する理解が進んでいないことも明らかとなった。加えて、生き物に関する体験も小学校での体験がほとんどであり、高等学校では生きた生物に触れる機会があまりなく、生物に関しての理解、実感や実態が伴っていないと考えられる。

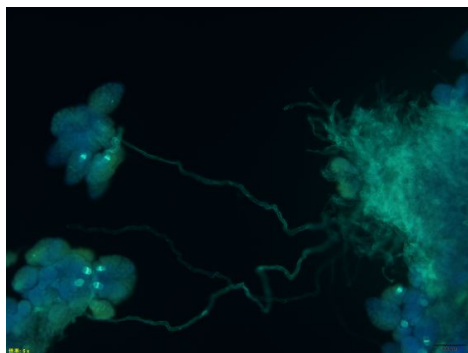
教員への調査結果からは、多くの教員は理科において科学的な探究は重要と考えて

いるが、実験観察の実施や生物や映像の提示については、年数回程度しか行えていないことが分かった。教員自身の専門性では、自然科学の知識専門性についてある程度の自信を有しているものの実験観察の知識・技能については不十分と評価していた。教員として力量形成については、専門性や実験観察の技能を求める比率が高く、授業指導や評価などについては必要とする教員はほとんど見られなかった。また今後、導入が積極的に進められるアクティブ・ラーニングについて、多くの教員が賛成しているものの、実際の指導については自信の無い教員が半数以上を占めていた。

(2) 植物の生殖に関する理科教材開発

雌性側：ランを用いた観察実験

園芸的によく利用されるラン科植物の中には、受粉から完熟種子形成まで一年近くも要するものが比較的多くあり、胚珠形成は受粉時より始まり、受精まで3ヶ月程度の期間を有するとされる。他の植物は、蕾の段階で胚珠形成がすんでしまい、また花のサイズも異なるため、胚珠形成もしくは減数分裂の時期を特定するのは困難であるのに対し、ラン科植物のこのような性質は胚珠形成もしくは減数分裂の時期の特定に有利であり、映像資料もしくは実験教材への使用が期待された。そこで、比較的花数が多くまた花のサイズが大きく多くの種子をつけるシンビジウムを用い、胚珠形成、減数分裂期、受精時期、さらには無菌的子房培養における種子形成を試みた。その結果、シンビジウムでは、受粉後4週前後より胚珠の形成が始まるが、同調的でなく比較的長い期間にかけて胚珠の形成が連続的に進み、減数分裂の痕跡も8-11週の間観察可能であり、受精のために胚珠内に侵入する花粉管も減数分裂期と同じ時期に観察することができた(図1)。また、交配7週目より子房培養し、8ヶ月程度経過した子房内からは、完熟用の種子が得られることから、最初の減数分裂は7週より以前に起きていることが推測された。1子房内の胚珠はたくさんあるため、実験・観察教材への利用は受粉後9週の子房を分割して配るこ



とで可能であることが示唆された。
図1 受粉9週後に観察された減数分裂過程にある胚珠と胚珠に向かう花粉管

雌性側：ヒガンバナを用いた探究活動

日本全国に広く分布しているヒガンバナは9月の後半に開花するが三倍体であるため種子を得ることができない。この現象は、生徒たちに、交配実験、花粉管の発芽など様々な実験観察を伴う探究活動に使用できることが期待された。そこで、切り花にした三倍体のヒガンバナに二倍体のヒガンバナを交配し、交配後様々な日数で一部を切開し胚珠が見えるようにした子房の胚珠培養を行なった結果、切開した部位の胚珠が次第に生育し種子になる様子を撮影することができ、また発芽種子も得ることができた。一方、3倍体の花粉を Hirano and Hoshino (2009)の液体花粉発芽培地で発芽させたところ発芽率は著しく低い事が明らかになった。これらの実験・観察は培養の面を除き、高校生でも実施可能であり、高校生のレベルを考えながら、探究活動を組み立てる題材として提案した。

雄性側：比較的短時間で観察可能な人工培地を用いた花粉発芽および花粉管伸長の基礎的条件の検討と ICT 教材化

植栽され、比較的入手しやすいボタンの花粉を供試し、人工培地を用いた花粉発芽培地の検討と、花粉管伸長課程における雄性配偶子の挙動をフローサイトメーターにより解析した。Hirano and Hoshino (2009)の液体花粉発芽培地を用いて、ボタンの花粉を発芽させたところ、高頻度の花粉発芽および花粉管伸長が観察された(図2)。また、ボタンの花粉をマイナス30℃で保存した花粉においても、花粉発芽を観察することができた。

同培地中で花粉の培養を続け、経過時間に沿って花粉管をフローサイトメーターで解析した。培養後、15時間以降において雄原細胞が分裂し、精細胞を形成していることを意味する核相の変化をフローサイトメーターで捉えることができた。

園芸作物のペチュニアおよびアルストロメリアにおいて人工培地による花粉発芽の検討と、より簡便な培地組成を開発するために、培地への多糖類の添加試験を行った。Hirano and Hoshino (2009)の培地組成で花粉発芽が見られることが確認されたペチュニアおよびアルストロメリアにおいて、培地中に含まれる酵母エキスと酵母マンナン、グルコマンナンに置換して花粉発芽に及ぼす影響を調査した結果、酵母マンナン、グルコマンナンも酵母エキスと同様に花粉発芽を促進した。フローサイトメーターで核相の変化のパターンを解析したところ、酵母エキス、酵母マンナン、グルコマンナンそれぞれを添加した培地で培養した花粉において花粉管内の核相の変化のタイミングに違いは見られなかったため、花粉発芽を

高める要因は、培地への多糖類の添加であると結論づけられた。

以上の成果は、身近な栽培植物の花粉を用いて花粉の発芽を観察できるプロトコル開発に資するものであり、発展的な内容として、精細胞の形成時期をフローサイトメーターのデータから思考する教材開発の応用も可能である。これらの知見をもとに、映像資料によって完結可能な花粉発芽および花粉管伸長の動画制作を行った。

タイムラプス顕微鏡を使用し、花粉発芽および花粉管伸長のプロセスを示す動画制作を行った。培地中で発芽する花粉の様子を捉えた動画を作成し、探求型の教材に利用できるように改変を行い、多糖類の違いによる花粉発芽の差異を動画化し、花粉発芽の差異と培地組成の違いから、花粉発芽に促進的に働く物質を考察する教材を試作した。

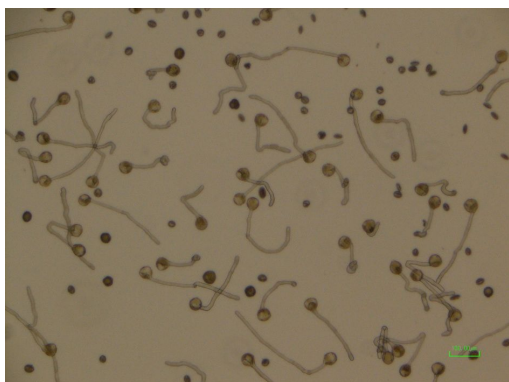


図2 人工培地中のポタンの花粉管伸長

(3) 植物の紫外線防御物質と理科教材への応用

標高が高い高山は、生物にとって有害な紫外線の量が多く、人間の場合は登山時に日よけ対策が必要である。このような紫外線が強烈に降り注ぐ高山で生きている植物には、何らかの紫外線対策が生存のために必要と考えられる。日本の高山植物の葉に蓄積される化学物質を調査したところ、ケルセチン(ケルセチン)をはじめとする抗酸化能力の高い紫外線防御物質が発見された。さらに、ヒマラヤに分布する高山植物 *Thermopsis barbata* の花にも、クロロゲン酸などの抗酸化性の高い紫外線防御物質が蓄積しており、これらの物質の蓄積が高山帯の強烈な紫外線に対する防御対策であることが強く示唆された。

これらの物質と紫外線の間接的な関係をもとに探究的な活動を簡便に行えるような実験教材の開発を試みた。高山の紫外線と同等の役割としてUVランプを用い、シャーレ内に紫外線防御物質としてケルセチンを含む溶液と含まない溶液を入れ、紫外線検知材ラベルSをシャーレの下に置き、その着色程度で高山植物内に蓄積している物質が紫外線防御を行なっていることを実感させる教材を試作した。分光光度計を利用すれば、

様々な物質や、抽出物のスペクトルを測ることもでき、吸収波長と目に見える色とのかかりなどについても同時に学習できることが期待された。

ケルセチン(図3)は水には難溶であり、また水溶液の場合は十分な量(5 ml)がないとシャーレ面に広がりにくい、エタノールやメタノールには溶解し、その溶液は1 mlで十分に小型シャーレ面に広がり、紫外線ランプの照射により1分間で色の変化を観察することが可能であった(図4)。

本教材の試作品を植物園の一般向けセミナーで使用した結果、植物の紫外線防御物質への高い関心が得られていることがアンケート結果に表れており、学習支援の題材としての魅力的であると判断された。

植物だけではなく、人間に対する紫外線の効果や影響についても盛り込み、授業と実験を行うことにより、動くことができない植物の紫外線防御対策の理解を深められる可能性が見出された。

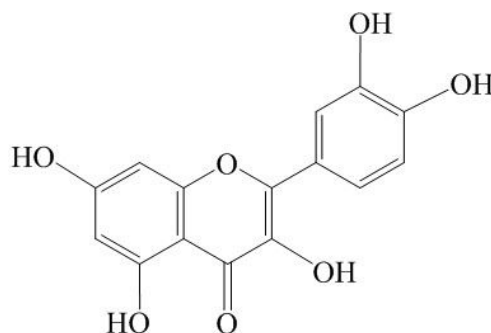


図3 ケルセチンの分子構造



図4 ケルセチンの紫外線防御効果(左側のケルセチンなしのコントロールでは1分で紫外線感知を示すピンクの呈色が見られた)

(4) 異なる波長帯の光が種子発芽に及ぼす影響の映像資料化

植物は動きが少なく動物と比べると人気がない教材である事が多い。しかし、発芽時は大きく成長することから、その成長をタイムラプス画像にすることは大きなインパクトを生徒たちに与える。さらに、色は生徒のやりたい実験の一つのようである。

そこで、種子の発芽における光の影響をタイムラプス化を行った。コスモス、アスター、アサガオ、カンパニュラ、ストックの計7品種で予備実験を行なった結果、発芽率は80%を超えるものがあるもののタネのサイズが制限要因となる可能性が示唆された。そこで、最適であったストックの1品種を用い、次亜塩素酸ナトリウムで殺菌後、5色のLEDを横方向より照射し、その発育過程を撮影した結果、程度は大きく異なるが白、青、緑は光の方向に成長するのに対し、オレンジ、赤は光なしのものと同じ屈地性の方を強く表現していた。近年青色光受容体などが植物で見出されてきており、アルビノ植物などを用いた場合の比較などへの発展により、より深い内容でも対応できる基礎的教材となりうる事が期待される。

(5) 水生植物の生物教材への応用

陸上の生存が困難な水生植物は分布地が限られており、絶滅が危惧されるものも多く存在する。一方、異なる大陸に分布地を広げる植物も存在し、その戦略も明らかになってきた。

野生絶滅種の保全と野生復帰

野生絶滅植物であるコシガヤホシクサの生息域外保全と過去の自生地への野生復帰に関する研究を行った。この一連の成果は、絶滅危惧種、種の保全、生態系の保全を学習する高等学校生物教材での利用が可能であるのみならず、保全活動における研究・市民活動の役割等も考えることができるため、高校生に興味を持たせられる好適な教育題材になると考えられた。

水生植物の長距離種子散布の存在の検証と分布形成への影響の解明

大きく離れた場所での隔離分布がなぜ生じたのかは今まで謎に包まれていた。風や渡り鳥が、植物の新たな分布地を形成することに役立っていることが明らかになってきた。

a) キタミソウ属 (ゴマノハグサ科)

Limosella curdieana は、分子系統と系統地理学的解析の結果、過去のアフリカ南部からの直接あるいは北半球を経由した長距離の種子散布に起源する可能性が高いことが明らかとなった。

b) ビャッコイ属 (カヤツリグサ科) の

Fruitantes 亜属の中で、アフリカからオーストララシアへの長距離散布の可能性が示された。また日本でただ1カ所にだけ生育地のあるビャッコイ *Isolepis crassiuscula* は、これまでに推察されていた通り、オーストララシアから日本への長距離種子散布によって成立したと考えられた。

c) 旧イトクズモ科 (アルテニア属、レピラエナ属、シュードアルテニア属、イトクズモ属から構成される単系統群。現在はヒル

ムシロ科に含まれる) は、分布パターンが特徴的である。分子系統と系統地理学的解析の結果、本グループの中で、オーストララシアから地中海周辺への長距離散布の可能性が示され、さらに、オーストララシアからアフリカ南部、さらに地中海ユーラシアへの長距離散布の可能性が示された。

以上の結果から、水生植物において、長距離種子散布は広く多様な水生植物群において起こりうるもので、これにより成立する長距離隔離分布は、種および属の多様化において重要な役割を果たしていることが明らかになった。また、渡り鳥による散布の可能性が高い南北の移動とは異なるケースが検出された。これは、風も水生植物の長距離散布に寄与する可能性を示した。

これらの研究は、植物の分布形成や進化における種子散布の役割を具体的に示している。また、既知の散布範囲を超えた事象の発見は、種子散布の役割の再認識ともなり、生物の知識が常に更新されていることを知る材料としても有用と考えられた。

水生植物の系統分類に関する研究

近年の分子遺伝学の発展の中で、生物の進化に知見を与える系統分類は教科書に記載されるようになったものの、教員が説明しづらい分野である。それは、研究者は対象物の形態をよく知った上でその分類関係を明らかにする手段として塩基配列の差異を統計的に判断するが、その対象物を教科書などの一部の写真を見ただけの高校生にとっては馴染みが薄いものである。植物園の研究としての系統分類の場合、標本などの視覚資料の存在は必須であり、鍵となる形態的キャラクターの比較も行うことができる良い資料が揃っている。本研究では、水生植物の系統分類に関わる新知見を、ヒルムシロ科ヒルムシロ属(a)、ガマ科ミクリ属(b)、ミャンマーの水草相(c)について明らかにした。進化過程を表す分類は、常に未知の事象を抱えていること、また自然雑種の存在は種の構造や定義を考える機会を与えるものと考えられる。

東日本大震災による三陸海岸のアマモ場の減少と回復における遺伝的多様性の変動

2011年の東日本大震災により三陸海岸のアマモ場は減少した。震災前後でのアマモ場の変動とそれに伴う遺伝的多様性の変動を、集団遺伝学と生態系の保全という観点で研究を行った。

さらに、この研究成果を攪乱と自然回復について学ぶための題材として活用する授業展開について提示したデータをグループで議論しながら考察させる方法で検討し実践した。その結果、データ解釈の取り入れが学習者の主体的な考察への参加を促す傾向がみられ、当初に見られた全体傾向よりも部分傾向を重視する議論は、机間巡視時

における助言により解消する傾向がみられた。よく使われる攪乱などの題材と比べて、東日本大震災は多くの日本の学生はそのことをまだ覚えており、受け入れやすかったことも想定される。

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 9 件)

Tanaka, N., O. Yano, Aung, Mu Mu. Newly recorded aquatic plants from Myanmar. Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series B, 査読有、43(4)、2017、99-103.

Murai, Y., R. Yangzom, C. Gyeltshen, K. Dorji, C. Wangmo, and T. Iwashina. Flower pigments of black pea *Thermopsis barbata* (Fabaceae) in Bhutan. Bulletin of the National Museum of Nature and Science, Series B, 査読有、43、2017、87-91.

Ito, Y., N. Tanaka, D.C. Albach, A.S. Barfod, B. Oxelman, A.M. Muasya. Molecular phylogeny of the cosmopolitan aquatic plant genus *Limosella* (Scrophulariaceae) with a particular focus on the origin of the Australasian *L. curdieana*. Journal of Plant Research, 査読有、130、2017、107-116. doi: 10.1007/s10265-016-0872-6

Ito, Y., N. Tanaka, C. Kim, R. B. Kaul and D. C. Albach. Phylogeny of *Sparganium* (Typhaceae) revisited: non-monophyletic nature of *S. emersum* sensu lato and resurrection of *S. acaule*. Plant Systematics and Evolution, 査読有、302、2016、129-135.

Murai, Y. and T. Iwashina. Phenolic compounds from *Sanguisorba obtusa* endemic to Japan. Bulletin of the National Museum of Nature and Science, Series B, 査読有、42、2016、143-147.

〔学会発表〕(計 40 件)

宮崎夏澄・神戸敏成・藤枝秀樹・大鹿聖公・加藤淳太郎 3倍体植物であるヒガンバナにおける種子形成の可視化と探求活動の構想. 日本生物教育学会第 102 回全国大会、2018

宮崎夏澄・田中法生・藤枝秀樹・大鹿聖公・加藤淳太郎 東日本大震災の津波による被害から生態系について学ぶ授業展開. 日本科学教育学会第 41 回年会、2017

大畑慶真・森川正章・渡辺 均・加藤淳太郎・星野洋一郎 花粉発芽培地に添加したマンナンがペチュニアおよびアルストロメリアの花粉発芽に及ぼす影響
園芸学会平成 29 年度春季大会、2017

大鹿聖公・加藤淳太郎・藤枝秀樹 高等学校の生物教育に関する現状と課題 2 -高

校教員を対象とした質問紙調査からの分析 -、日本理科教育学会第 67 回全国大会、2017
村井良徳 厳しい環境に生育する植物におけるフラボノイド、日本植物学会第 80 回大会、2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 淳太郎 (KATO Juntaro)
愛知教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：80303684

(2) 研究分担者

大鹿 聖公 (OSHIKA Kiyoyuki)
愛知教育大学・教育学部・教授
研究者番号：50263653

神戸 敏成 (GODO Toshinari)
公益財団法人花と緑の銀行・中央植物園部・企画情報課長
研究者番号：00393108

藤枝 秀樹 (FUJIEDA Hideki)
国立教育政策研究所・教育課程調査官
研究者番号：20741705

星野 洋一郎 (HOSHINO Yoichiro)
北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授
研究者番号：50301875

村井 良徳 (MURAI Yoshinori)
独立行政法人国立科学博物館・植物研究部・研究員
研究者番号：30581847

田中 法生 (Tanaka Norio)
独立行政法人国立科学博物館・植物研究部・研究主幹
研究者番号：10311143