

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450361

研究課題名(和文) 周波数応答インピーダンス特性解析によるラメット識別判定法の開発

研究課題名(英文) Recognizing physical underground connections of clonal plants using electric impedance method

研究代表者

元永 佳孝 (MOTONAGA, Yoshitaka)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60334653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：森林などに生育する植物には、クローナル生長(ルートサッカー・伏条などによる)で形成された大型個体(ラメット)が多く存在する。森林群集を解析する際に個体識別は基本的な問題であるが、大型ラメットを含む植生を調査するには地下部掘り起こしによる破壊計測を行うしかなく、森林生態学のブラックボックスの一つになっていた。

本研究では、生体インピーダンス測定技術を応用し、植物体に多周波数の微弱な交流電流を流して個体の接続性を周波数応答特性から解析することで、クローナル生長で形成されたラメットの地下接続を非破壊計測で判定する手法の基礎を確立し、植物群集の動態調査を大きく進展させる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：It has long been problem in forest ecology to recognize ramet size of clonal trees, because clonal trees are sometimes connected by long lateral roots or shoots under ground, and all connected trunks act as a huge integrated organisms. To detect the under ground connection, we had to excavate every roots, resulted in destructive measurement, with heavy labor. In this study, we proposed a new nondestructive method to identify physical underground connection of clonal plants using electric impedance.

AC signals generated by the signal generator were superimposed to cambium of mother trunk, and transferred signals at daughter trunks were measured by the oscilloscope. The AC Signals were transferred clearly among the trunks though soil impedance and grounding impedance were smaller than internal tree impedance. Those results suggested that it was possible to distinguish clonal tree ramets from other timbers without any destruction by using AC signals with relatively low voltage.

研究分野：農業情報工学

キーワード：ラメット識別 クローナル植物 生体インピーダンス 接地インピーダンス 植生調査

1. 研究開始当初の背景

フィールドにおいて植物群集の動態やそれを構成する種の個体群維持機構を調査する場合、個体性(ラメット)の識別は常にやっかいな問題であり、また、それゆえ魅力的な研究対象でもある。野生植物、特に木本植物ではルートサッカー、伏条更新、根株萌芽、埋土幹など様々な方法で土中のクローナル生長が行われており、これによって攪乱後の個体修復、生息範囲の拡大、資源配分の最適化、長寿命化など様々な環境適応を実現できるため、単なる実生更新の補完としての無性繁殖という意味を超えて植物の生活史戦略に奥深さをもたらしている。

植物のクローナル生長の重要性が認識され、研究が積極的に行われるようになったのは1980年代以降であるが、その研究の進捗ははかばかしくない。クローナル生長は、子ラメットが親ラメットから分離する散布型クローナル生長(栄養体繁殖をする草本植物など)と、子ラメットが親ラメットと地下茎などで物理的に接続している非散布型クローナル生長(ササなど)および、その組み合わせ(ヤマナラシなど)に大別できる。これらを識別するためには、DNA分析を行ってジェネット範囲(遺伝的同質性)を特定した上で、掘り起こしを行って物理接続の有無を調べる必要があり、破壊計測になるために長期モニタリングサイトでは調査ができず、また、掘り取りの手間も大きいためサンプル数も限定されるなど、研究手法上のハードルになっている。実際の森林群集では、数百本から数千本単位の幹が全て地下で接続していると推測される事例も珍しくない。インタクトで幹間の地下接続を判定する手法を開発することは、それゆえ研究全体を大きく進展させる突破口になり得る。

2. 研究の目的

本研究は、既存の生体インピーダンス測定技術を応用し、植物体に微弱な交流電流を流して個体の接続性を特定する手法を確立することで、クローナル生長で形成されたラメット群の地下接続を、掘り起こしを伴わない非破壊計測で判定する技術を開発することを目的とする。

幹間での交流伝導を考えた場合、電極と樹体との接触インピーダンス、樹体内部のインピーダンス、根と土壌(地面)との境界インピーダンス、土壌のインピーダンスなど抵抗成分だけでも様々な因子が関係するとともに容量成分も関わってくる。それらの関与を個々に把握するのは困難であるが、土壌と樹体の周波数応答交流伝導特性の把握は最低限必要になる。また、関与因子の相互作用の結果、地下接続の有無による差異を明確に出来れば判定は可能であるため、ポット栽培、圃場栽培の実験過程を踏まえて、野生樹体での実証実験を行う。

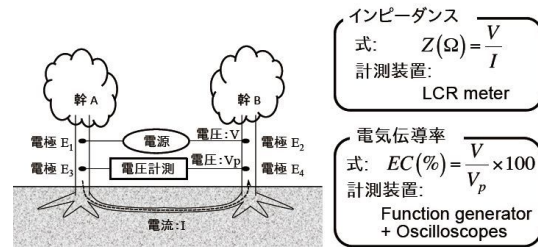


図1 幹間の交流伝導特性の計測

3. 研究の方法

(1) 実験試料

土壌の周波数応答交流伝導特性の計測に用いた土壌は、一般的な砂壤土とした。また、樹体の周波数応答交流伝導特性の計測に用いた樹種はベンジャミン(*Ficus benjamina*)で、ホームセンターで購入し、供試した。

ポット栽培および圃場栽培に用いた樹種は、園芸用にも利用があるラズベリー品種のインディアンサマー(*Rubus idaeus*)である。

野生樹体での実証実験に用いた樹種は、ハリエンジュ(*Robinia pseudoacacia*)とし、新潟大学農学部圃場付近に自生しているエリアを数ヶ所選定し、実験を行なった。

(2) 周波数応答交流伝導特性および電気伝導率特性の計測方法

生体の電気伝導に関する周波数応答特性を計測すること考えると、LCRメーターによってインピーダンスなどを測定することが慣用である。しかし、森林などのフィールドにおいて樹体の幹間の地下茎接続を調査することを考えるとLCRメーターのような計測法は物理的に利用できない。そのため、ファンクション・ジェネレータとオシロスコープを組合せた計測系を考案した。それらの計測手法の概略図を図1に示す。

(3) 実験方法

土壌の周波数応答交流伝導特性の計測

土壌水分を体積含水率(VWC)で3.1%、4.8%、7.8%、9.7%、12.5%にそれぞれ調整し、電極間距離8cmでLCRメーター(GWINSTEK社製LCR-821R、以下LCRメーターはこの機種を使用)を用いて計測した。なお、入力電圧は1Vpp、測定周波数は1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、67kHz、100kHzとした。

樹体の周波数応答交流伝導特性の計測

幹径が20cmの間に6.5mmから1.1mmまで変化する幹を用いて、5cm、10cm、20cmの電極間距離をLCRメーターで計測を行なった。入力電圧および測定周波数はと同様である。

ポット栽培樹体の周波数応答電気伝導率の計測

この計測はファンクション・ジェネレータ(Tektronix社製AFG2021、以下ファンクシ

オン・ジェネレータはこの機種を使用)とオシロスコープ(Tektronix社製 TPS2014B、以下オシロスコープはこの機種を使用)を組合せた計測系で行なった。ファンクション・ジェネレータで発信信号を振幅 10V の正弦波に設定し、発信電極より信号を流した。発信電極および受信電極にオシロスコープのプローブを接続し、信号測定を行なった。また、ファンクション・ジェネレータで発信信号周波数を 1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、100kHz、150kHz に順次変更し、個々に信号測定を行なった。

幹内での計測時の電極間距離は 5cm、10cm、15cm とした。幹間での計測時は、幹 A と幹 B の二つの幹を選定し、幹 A の地上部 20cm に位置を発信電極とし、幹 A の地上部 10cm と幹 B の地上部 25cm および土壌に刺したアース棒(銅杭)を受信電極として計測を行なった。

圃場栽培樹体の周波数応答交流伝導特性の計測

計測には、LCR メーターおよびファンクション・ジェネレータとオシロスコープを組合せた計測系の二通りを用いた。LCR メーターの計測では電圧を 1V、周波数を 1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、67kHz、100kHz、200kHz に設定した。ファンクション・ジェネレータの発信信号は振幅 10V の正弦波、周波数は 1kHz、5kHz、10kHz、20kHz、25kHz、50kHz、75kHz、100kHz、150kHz、200kHz、250kHz に設定した。土壌条件は土壌水分約 4% (VWC) の砂壤土であった。アース棒は根系の半径が約 23cm であったことから、幹中心から約 60cm の位置に敷設した。計測は三つの幹を選定し、そのうち幹 A の地上高 26cm の位置に送信電極を設置し、幹 B と幹 C の地上高 26cm の位置およびアースの 4ヶ所で信号測定を行なった。計測後は掘り起こしを行い、各幹の地下接続を確認した。

野生樹体での実証実験

森林などのフィールド調査を想定し、ファンクション・ジェネレータとオシロスコープを組合せた計測系での実験、検証を行なった。ファンクション・ジェネレータの発信信号は振幅 10V の正弦波、周波数は 1kHz、2.5kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、100kHz、200kHz とした。比較的狭いエリアに数本の同種の幹が存在していても地上部だけの観察では地下接続があるかは確認できないため、各幹の地上高 30cm から 40cm の位置に電極(銅釘)を打ち、順次計測を行なった後に掘り起こしにより地下接続の確認を行なった。

4. 研究成果

(1) 土壌の周波数応答交流伝導特性

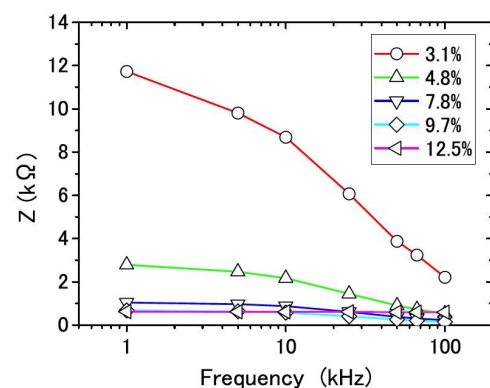
図 2 に土壌の周波数応答交流伝導特性を示す。図 2(a) はインピーダンス特性を、図 2(b) は位相差特性である。インピーダンス特性は

抵抗成分を、位相差特性は容量成分を意味する。図 2(a) から土壌水分 (VWC:%) の増加と周波数の上昇に伴い、インピーダンス(Z) は低下する傾向を示した。ただ、土壌水分 12.5% では周波数の上昇に伴うインピーダンスの低下は認められるものの、その変化は他のものと比較すると微小で、周波数 100kHz では土壌水分 4.8%、7.8%、9.7% のインピーダンスより大きい結果となった。また、図 2(b) の位相差特性から土壌水分 12.5% はいずれの周波数においても位相差が 0 であったことから容量成分は存在しないことが分かった。土壌水分 9.7% 以下では容量成分が存在し、周波数の上昇に伴い、位相差は大きくなることが示された、ただ、土壌水分に変化による位相差の相違はほとんど認められなかった。

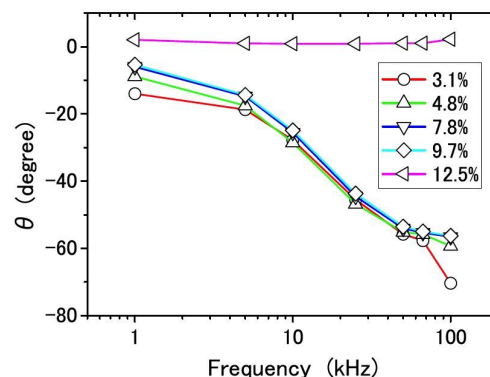
これらのことから、土壌のインピーダンスは、土壌水分の増加および周波数の上昇に伴い、低下することと、土壌水分 9.7% 以下では容量成分が存在し、周波数の上昇に伴い、位相差が大きくなるものの、土壌水分 12.5% 以上では抵抗成分のみとなることが分かった。また、周波数 100kHz で土壌水分 12.5% のものより 4.8%、7.8%、9.7% のインピーダンスが低くなった要因として容量成分の影響が考えられた。

(2) 樹体の周波数応答交流伝導特性

図 3 に樹体の周波数応答交流伝導特性を示す。図 3(a) は電極間距離 5cm のインピーダンス特性で、図 3(b) は電極間距離 20cm のイン

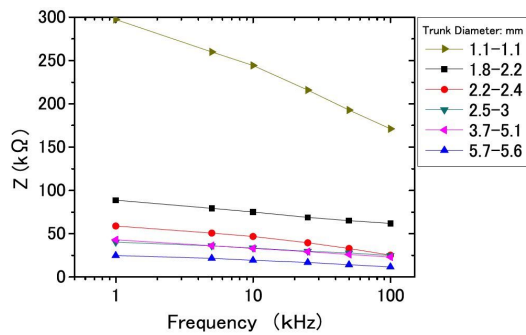


(a) インピーダンス特性

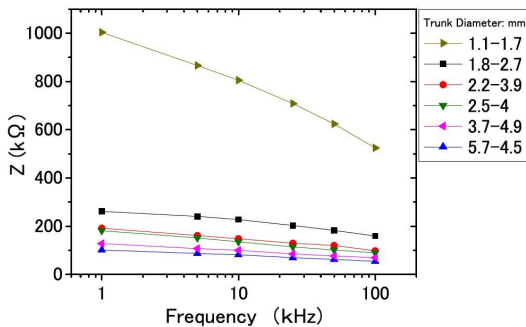


(b) 位相差特性

図 2 土壌の周波数応答交流伝導特性



(a) 距離 5cm のインピーダンス特性



(b) 距離 20cm のインピーダンス特性

図 3 樹体の周波数応答交流伝導特性

ピーダンス特性である。これらの結果から樹体内部のインピーダンスは、周波数の上昇と幹径の増加に伴い、低下する、つまり交流伝導性が向上することが示された。また、電極間距離が大きくなるとインピーダンスは高くなることも分かった。特に、周波数が高くなるにつれ、インピーダンスが低下する変化は図からも分かるように直線的であり、指数関数で表現できることも示唆された。位相差については、周波数の変化に伴って、僅かな変化傾向は認められるものの、土壌のようなダイナミックな変化は認められなかった。この傾向は電極間距離、幹径についてもほぼ同様の結果となった。

(3) ポット栽培樹体の周波数応答電気伝導率

図 4 にポット栽培された樹体の幹内での周波数応答電気伝導率特性を示す。全ての周波数領域において電極間距離が長いほど EC (電気伝導率) は低下することが示された。また、周波数が高くなるにつれ、EC は指数的に低下する傾向を示した。次に、ポット栽培された樹体で、地下茎接続された幹間での周波数応答電気伝導率特性を図 5 に示す。凡例の A-Gnd は幹 A と土壌間での電気伝導率特性、A-A は幹 A 内での電気伝導率特性で電極間距離は 10cm であり、A-B は幹 A と幹 B 間 (地下接続) での電気伝導率特性である。周波数応答特性は幹内での結果と同等であった。幹 A と幹 B 間の特性と幹 A と土壌間の特性は似た傾向を示した。実験後の根系観察の結果、幼根がポットの細部まで存在したため、アース棒 (銅杭) と幼根が接触していたのが原因であると

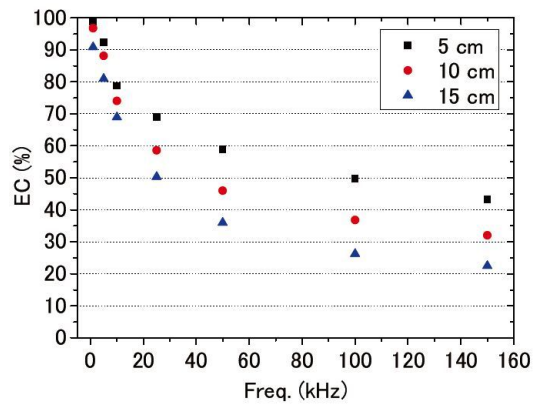


図 4 ポット栽培された樹体の幹内での周波数応答電気伝導率特性

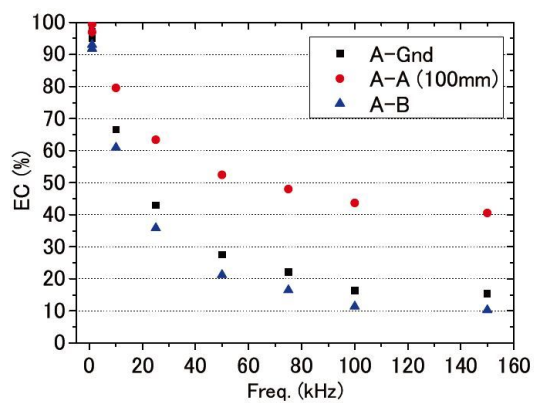


図 5 ポット栽培された樹体での周波数応答電気伝導率特性

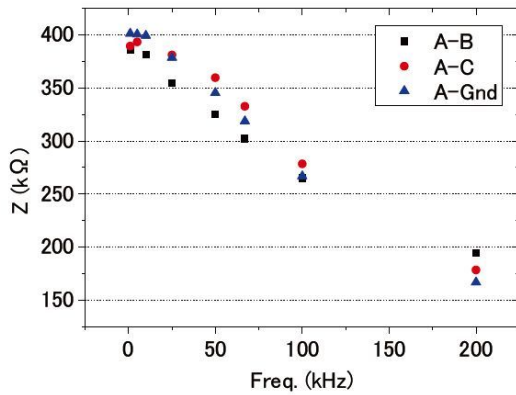
考えられた。

これらのことから、ポット栽培での樹体の電気伝導率特性としては、周波数が高くなるにつれ、EC は指数的に低下することが示された。また、土中の根系にも十分に電気が流れることが分かった。

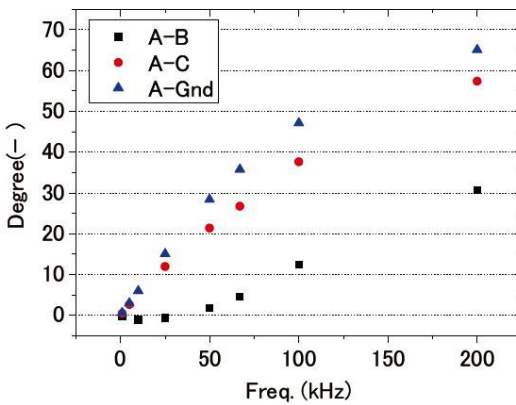
(4) 圃場栽培樹体の周波数応答交流伝導特性

圃場で栽培されている樹体の幹間での交流伝導特性を図 6 に示す。図 6(a)、図 6(b)とも凡例の A-B は幹 A と幹 B 間、A-C は幹 A と幹 C 間、A-Gnd は幹 A と地面 (土壌) 間の周波数応答交流伝導特性を表す。図 6(a) から多少の相違はあるものの A-B、A-C および A-Gnd とも周波数が高くなるにつれ、ほぼ同じような値でインピーダンスは低下する結果となった。また、図 6(b) から A-C と A-Gnd はやや A-C の方が低い値を推移するものの、周波数の上昇に伴い、位相差は同じように大きくなる傾向を示したが、A-B は大きく異なった変化傾向を示した。

次に、電気伝導率特性の結果を図 7 に示す。幹 A と幹 B 間での EC の周波数応答特性は 150 kHz 付近まで指数的に高くなり、その後やや低下する傾向を示した。幹 A と地面間の EC は全ての周波数において計測不能であった。



(a) インピーダンス特性



(b) 位相差特性

図6 圃場栽培樹体での周波数応答交流伝導特性

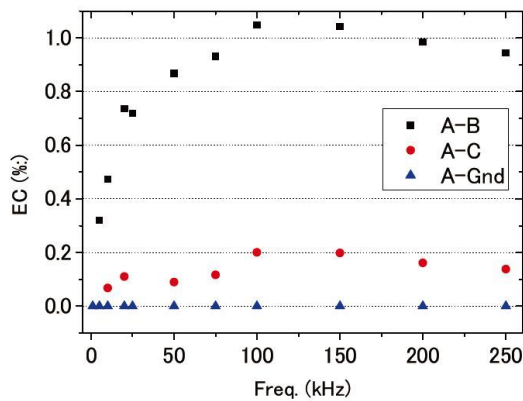


図7 圃場で栽培された樹体での周波数応答電気伝導率特性

幹 A と幹 C 間の EC は全ての周波数で非常に低かった。

また、実験後の根系調査の結果、幹 A と幹 B は地下茎接続していたが、幹 A と幹 C の地下茎は細根で絡み合っていたものの接続は認められなかった。これらのことから、EC および位相差を用いることで、地下茎接続の判定が可能であることが示された。

(5) 野生樹体での実証実験

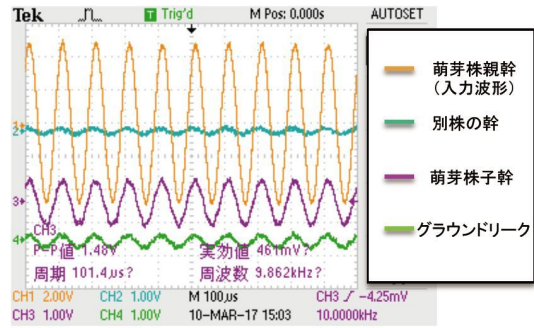


図8 野生樹体での交流信号計測

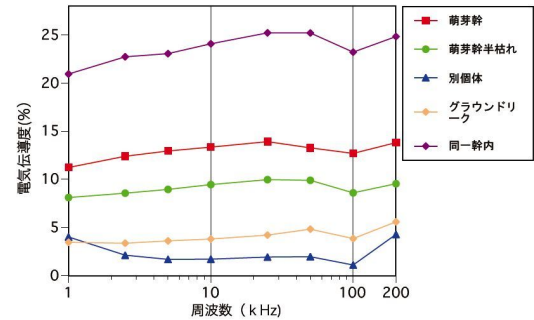


図9 野生樹体での周波数応答電気伝導率特性

野生樹の幹間の地下接続性を検証するため、ファンクション・ジェネレータとオシロスコープで EC 計測を行なった。図 8 は、オシロスコープで計測された各幹および地面での波形の結果である。萌芽株親幹から信号入力を行い、その信号、別株の幹、萌芽株子幹と地面の 4 チャンネルの計測結果が示されているが、縦軸のスケールは親幹に比べ、その他は半分となっている。信号レベルは、親幹を 1 とすると、子幹は約 0.12、地面は約 0.04、別株は約 0.02 となった。樹体から地面への流れ出しである地面での信号レベルと比較すると、地下茎接続された子幹は地面よりレベルが高く、接続がない別株は地面よりレベルが低くなり、EC により判定が可能であることが分かる。また、別株の信号は親幹や子幹の信号と比較して明らかに位相差が生じており、このことも判定因子となる。これらは圃場栽培樹体での知見に一致しており、野生樹体においても適応可能であることが示された。

次に、幹径十数 cm 程度の若木が数本存在するエリアで計測されたもののうち代表的な結果を図 9 に示す。健全な萌芽幹は同一幹内に比べて約半分であるが、これは電極間の距離による影響である。また、健全な萌芽幹と半枯れの萌芽幹では電極間距離はほぼ等しいものの健全なものの方が高い値を示した。別株の幹は地面と同等もしくは低い値を示しており、明らかに地下接続の判定が行えることが分かった。

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 1 件)

元永佳孝、本間航介、ラメット識別のための樹体の交流伝導特性計測、信学技報、査読無、Vol.116 No.308、2016、143-144

[学会発表](計 4 件)

本間航介、元永佳孝、生体インピーダンス法を用いたクローナル植物の地下接続の判定、日本生態学会第64回全国大会、2017年3月16日、早稲田大学・早稲田キャンパス(東京都新宿区)

元永佳孝、本間航介、ラメット識別のための樹体の交流伝導特性計測、農業×計測×情報通信ワークショップ 2016、2016年11月17-18日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

本間航介、元永佳孝、生体インピーダンス法を用いたクローナル植物の地下接続の測定、日本生態学会第63回全国大会、2016年3月20-24日、仙台国際センター(宮城県仙台市)

Y. Motonaga and K. Homma、Characteristics of AC Conductivity of Tree for Detecting Tree Clones、The 34th Chinese Control Conference & SICE Annual Conference 2015、JULY 28-30、2015、Hangzhou, China

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

元永 佳孝(MOTONAGA, Yoshitaka)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 60334653

(2)研究分担者

本間 航介(HOMMA, Kosuke)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 50323960