

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：11302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14597

研究課題名(和文) 飛行能力がもたらす戦闘能力の急速な局所適応：人工群島のクモ群集をモデルとして

研究課題名(英文) Rapid local adaptations through airborne dispersal in spider communities formed on artificial islands

研究代表者

林 守人 (Hayashi, Morito)

宮城教育大学・教員キャリア研究機構・研究員

研究者番号：70625037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：英国アッテンボロー自然保護区は、120の若い人工島を有し、群集形成や進化の初期状態を観測する事が出来る、稀有の研究サイトである。そこで、この人工群島に生息するクモをモデルとし、個体の行動とその進化がいかにして集団の形成に関わっているか研究した。具体的には、風が吹いている間クモが体を縮こめる陸上行動と、水面に糸を放ってブレーキをかける水上行動を負の移動能力として計測した。その結果、これらのクモは数十年という短い期間、つまり人工島が造成された直後から、急速に移動能力が小さくなる様に進化する事が分かった。また、島の年代が古くなるに従い、個体のアグレッシブさや、活動度も小さくなる事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)： Young artificial islands created in Attenborough Nature Reserve is an ideal model system to observe initial conditions of communities and evolution. This research is focused on harnessing the miniature archipelago in combination with spiders' behavioural experiments aimed at addressing the most profound question of how a population and community are created based on behaviours of individuals.

Rapid evolutionary decreases of dispersal tendencies were found through the experiments measuring behaviours against prevailing wind in which spiders shrink their body to stay on land and release silken anchors to brake on water. These behaviours significantly increase through time, hence from younger to older populations/islands, meaning that spider individuals showing staying motivations have remained and settled gradually in populations on the artificial archipelago. Similar tendencies were also found from other behavioural features such as active levels or aggressiveness.

研究分野：進化生態学，遺伝学，群集生態学，分散生態学，ビッグデータ解析，都市生態学，環境教育学

キーワード：島嶼 分散生態学 動物行動学 群集生態学 進化生態学 風媒 サラグモ アシナガグモ

1. 研究開始当初の背景

島嶼の生物が、独特の進化の道筋を辿る事はよく知られており、昔から生物進化を研究するためのモデルとされてきました (1)。しかし、これまで研究で用いられてきたハワイやモーレア、小笠原といった洋上の海洋島は形成年代が、数十万～数百万年と非常に古く、島の生物の進化や群集形成が頭打ちになっています。従って、これらの海洋島では、進化の終着地点を観察する事は出来ても、出発地点を見る事が出来ません。実際に、形成直後の海洋島を研究した例もあるのですが (2)、同一の海域にまとまった数の島々が形成される事は稀であり、リプリケートが乏しくなります。また、仮に多数の島が一度に海上に姿を現す様な奇跡的な地質イベントがあったとしても、私達の短い一生で、そこから数十年間、生物のモニタリングを続ける事の現実性には疑問が残ります。

英国における、一連の研究を開始する以前、筆者が伊豆諸島をモデルとしていた理由は、これらの若い海洋島では、進化の初期段階が観測できると考えたからです。しかし、研究を進めるうちに「進化初期の方向性に大きな影響を与える行動や群衆形成といった要因は、島嶼集団形成直後から働き始める」のではないかと疑い始めました。

一方、世界の島嶼生物学の流れを見ると2000年を超えた頃から、少しずつ島嶼の定義が変わり始めます。それまで、海洋島の固有の生物進化が中心となり、島嶼と言えばほとんどが海洋島を指していたこの分野で、石灰岩の山 (3)、都市緑地 (4)、果ては通常のハビタットパッチ (5) といった、ハビタット間に何らかの隔離があるものを、島嶼のモデルとして扱う動きが出てきたのです。そして、このムーブメントは、島嶼生物学に元々あった集団生物学的な側面を拡大させていく事になります (e. g. 6)。

筆者が研究してみたいと考えていた、形成初期の島の集団、これを選定する上で、譲れなかったのは「新しい島のモデル」である事、理想的には「形成直後の海洋島のモデル」を研究したいという点です。そして結果的に研究モデルとして選んだのは、英国のアッテンボロー自然保護区 (ANR) にある、人工の島々でした。人工島の研究と言えば、最も有名なものは、通称 BCI と呼ばれる、パナマのバロ・コロラド島です (e. g. 7)。しかし、この人工島は、パナマ運河を通す時に谷に水が入り、山の部分が水上に残った、大陸島のモデルであり、島の数も一つだけに留まります。

ANR は、セメント企業 CEMEX がコンクリート用の砂利を採集する採掘場です。砂利採集時には、コンクリートの強度を弱めてしまう粘土を湖に廃棄します。湖底から積みあげられる粘土は、海底火山の様に成長し、島がひとつずつ形成されていく訳です。この様なプロセスで造られた島ですから、当然形成直後には陸上動物の一切生息しない、無人島が出

来上がります (8)。従って、これらの島は海洋島のモデルとして扱う事ができます。

ここから、筆者は ANR の人工群島に生息するクモをモデルとして研究を始めました。クモは、多彩な行動を見せると同時に (9)、その行動はロボットの様に正確であるため、行動の研究に適した生き物です。またクモには、バルーンという、風の力を使って飛行する能力がある為、クモは出来たばかりの島や、耕された後の農耕地に、一番最初に侵入してくる動物です。これは、形成直後の島々で起こる進化や群集形成を観察する上で、大きなアドバンテージとなります。

例えば、クモがバルーンを開始する時には、ティップトローイングといって、つま先立ちをしながら腹部を振る特徴的な行動を見せます。これは飛行をする際、気流中に帆の代わりになる、飛行モード専用の糸をたなびかせる為です。ちなみにこの糸が飛行専用だと分かったのは、筆者が今この報告を書いている前日にドイツチームが発表した論文のおかげです (10)。話を戻すと、クモではティップトローイングにより、その個体が飛行するかどうか判断出来る訳です。

こうして飛行 (移動) 能力を定量化できる事は、集団や群集の動向を研究する上で、非常に大きなメリットになります。なぜなら、集団形成時には、個体はその集団に留まるはずであり、そういった個体は移動能力が小さくなる可能性が高いからです (11)。

ANR の人工群島は約 120 島を数え、リプリケートは十分ですが、この島々には更なる研究上の利点があります。それは、これらの島々がわずか 2 キロ四方のエリアに分布するために、周囲の植生がほぼ同じであり、また島の構成物質もその形成過程も同じである為、形成年代を除いて、どの島も環境ほとんど同じだという事です (8)。先に述べた、バルーンを例にとると、クモの飛行頻度は、気温 (12)、ハビタットの攪乱 (13)、エサの豊富さ (14) 等様々な条件によってその発生頻度が変わってきます。従って、島毎に気温が同じで、人間による攪乱が無く、植生が酷似している当人工群島は、最初の頃に筆者がイメージしていた島嶼のモデルを越える、稀有の研究モデルなのです。

2. 研究の目的

集団形成初期にどういった進化生態的な要素が特徴的に観測できるのか、という点を明らかにする事が目的です。特に、一般的な海洋島では観察の難しい、行動形質の進化を検出し、これがどんなスピードでどの様に進行するのかを明らかにします。行動の中でも、最も注目するのは、移動能力やアグレッシブさという、集団や群集の形成において、大きな意味を持ちそうな形質です。従って筆者は、伝統的な島嶼生物学が開封できなかった、ブラックボックスをこじ開けるつもりで、研究を行ってきました。

3. 研究の方法

クモの採集は、手漕ぎボートで島に渡って行います。採集したクモは一個体ずつ、湿ったキムワイプを蓋の裏側に貼り付けた 30 ml のユニバーサルチューブ内に収め、20 °C に調整された実験室内で保管します。採取したクモは、最初の 24 時間は静かにしておきます。これは、採集直後の個体は興奮状態にある可能性が捨てきれず、これが行動実験に影響を与えるかもしれないからです。

その後、陸上および水上での行動を一個体ずつ記録します。陸上では、実験開始からのタイミングでどの行動を行ったか、Etholog (15) というソフトを使って記録します。行動はあらかじめ、ソフトに登録しておき、例えば、開始後クモが顔を拭く様なグルーミングをすれば G をタイプ、先に述べた飛行開始前のティップトローイングを行えば T をタイプします。またこれらの行動が停止した時に S をタイプする事により、先にタイプした行動の継続時間を解析する事が出来ます。こうやって行動のシーケンスを求め、データを蓄積していきます。実験に使用した淡水と海水は、蒸留水に海水魚飼育用のインスタントシーソルトを入れて、それぞれ $6 \times 10^{-5} \%$ と 3.5% に調整したものを使用しました。

全ての行動実験が終わった後に、クモを 70 % エタノールで固定し、種の同定を行いました。これを最後にした訳は、実験前に二酸化炭素による麻酔を行い、クモの同定を行うと、その後の行動に影響が出る可能性があるからです。また、筆者は分類のエキスパートでは無いので、同定作業はそれほど得意ではありません。従って、全部の実験が終わってから同定作業を一度に行った方が、目が慣れる分だけ早く作業が終わります。

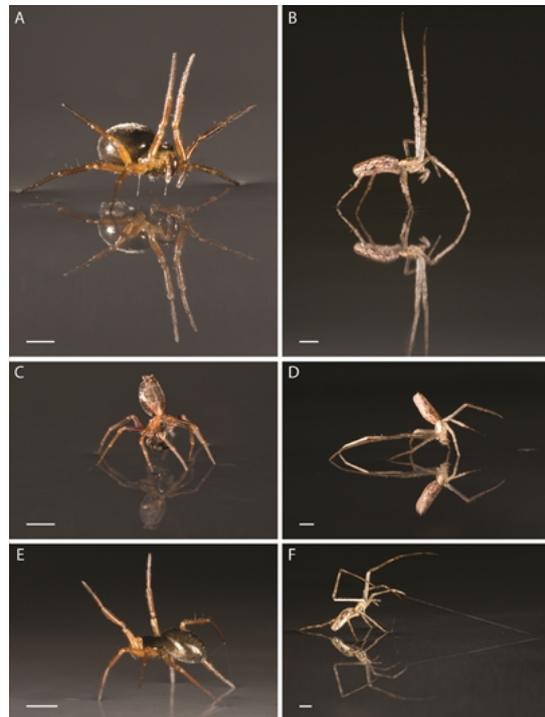
9 種類の異なる実験を、一個体ずつ行った為、個体はある程度の期間、ユニバーサルチューブの中で過ごします。この飼育期間には、毎日すべての個体の状態をチェックし、エサにしていたショウジョウバエを食べたか、円網と呼ばれる巣を張ったかどうか等をデータシートに記録しました。

実験結果は、全てエクセルにまとめ、データベースを構築しました。これには実験結果に加え、各種インデックスが含まれる為、最終的に、この人工島プロジェクトに関するデータベースは約 120 万セルに達しています。これらは、新しいデータを追加すれば、関数が自動的にインデックスを表示します。また逆に、論文執筆に必要なデータのみを切り出すと、別のシート上で、そのデータの傾向を示すグラフが現れる様になっています。

4. 研究成果

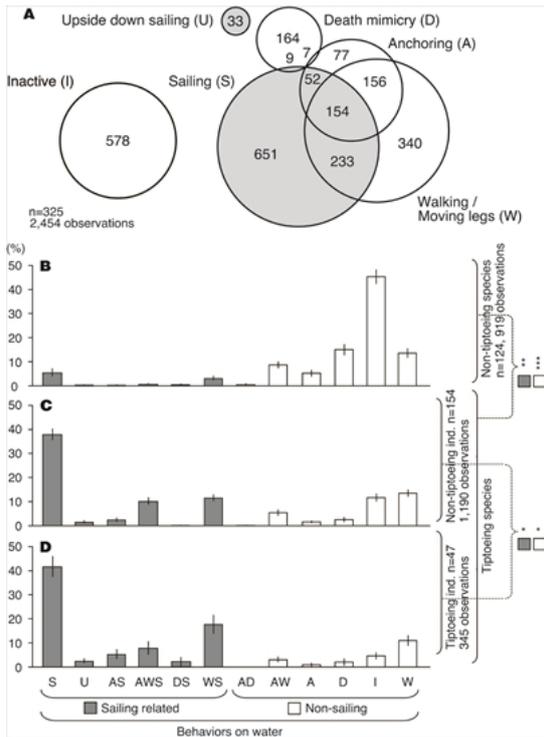
まず、本研究期間では、クモの風媒飛行と水上行動に関する発見についての発表を行いました。本研究で用いたサラグモ (16) は、クモの代表的な教科書 (9) では、水に落ち

ると死んでしまうと書いてあります。しかし、サラグモはクモの中で最も長距離を飛行するとされ、世界中に分布する普遍種です。1832 年 10 月 31 日南米沖 100 キロを航海中だったダーウィンも生物の風媒飛行に対して、疑問を投げかけています。甲板に下りてきた無数のクモを目撃した彼は「説明のつかない現象だ」と航海日誌に書き残しています (17)。七割を水で覆われたこの地球上で、風任せの長距離飛行を行えば、着水のリスクがつきまとうはずで。つまり、この風媒飛行は一見すると適応的な行動には見えない訳です。ダーウィンが説明出来ないと言うのは、もちろん彼自身が唱えた、自然選択 (18) の論理に反しているという意味です。それでは、サラグモは本当に水に落ちると死んでしまうのでしょうか。まず、写真 (9, Alex Hyde 撮影) を示します。

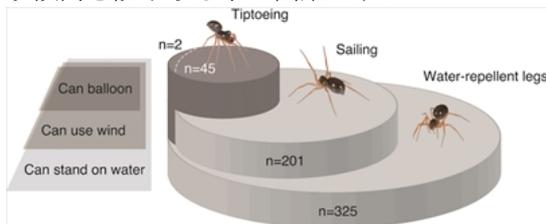


この写真は、サラグモとアシナガグモの水上行動を撮影したものです。このうち写真 A, B はクモが脚で、また C, D は腹部で風を受けて、水面をヨットの様に帆走しているところです。また写真 E, F は水面に糸を放ち、風に逆らってブレーキをかけているところです (スケールバー 1 mm)。クモの脚には撥水性がある為、ほとんど水との抵抗が無く、こうでもしなければ水面で停止する事は出来ません。また、写真 A, C, E はサラグモ、B, D, F はアシナガグモといって、全く異なる分類群なのですが、これらの水上行動は酷似しています。この事から、同様の水上行動は、クモに一般的に見られる行動形質である可能性が高いと推測出来ます。飛行グモは水に落ちると死ぬどころか、摩擦のほとんど無い脚の特性を利用して、風の力で帆走する水上移動にも特化した生物だったのです。さて、それではこれらの水上行動は、飛行能力とどういう関係があるのでしょうか、次に示すグ

ラフにその答えがあります (19) .



このグラフのAは水上行動の割合を示したもので数字はそれぞれの行動が観察された回数を表しています。ここで灰色の部分が帆走行動(セイリング)の頻度を示しています。またB, C, Dは風媒飛行を行う事を示すティップトローイングという行動を行ったかどうかによって区別されており、棒グラフで水上行動の割合を表しています。ここで、Bは飛行しない種、Cは飛行する種の中で飛行しない個体、Dは飛行する種の中で飛行する個体です。これを見ると、飛行する種に属するCとDは灰色の棒グラフ、つまり水面で帆走行動を行う割合が大きくなっています。対して、Bの飛行しない種に属する個体は、灰色の割合が小さく、あまり帆走行動をしないという事が分かります。従ってこの解析から「風に乗って飛行するクモは水上行動を行う」という傾向を読み取る事が出来ます。



そして、この上の図(19)は帆走行動(Sailing)をするクモでなければ風媒飛行(Tiptoeing)をしないという事を示しています。つまり、帆走行動の進化が、クモという草原生態系のトッププレデターの風媒飛行を進化させる原因となった事が推測出来ます。クモが水面で脚をあげるだけの小さな行動ですが、これによってクモの飛行が始まり、生態系に大きな影響を与えられる、という事を考えると、動物の行動は生態系と密接

につながっている重要なファクターだと、改めて言えそうです。そして、ダーウィンが「自然選択で説明出来ない」と書き記した風媒飛行の謎の答えは、「風媒飛行をするクモは着水しても生き残る術をもっている」という単純なものだったのです。

本研究では、ここからさらにサラグモの移動能力を、島の年代毎に解析しました。そうすると、クモは島の年代が古くなるに従い、その場所に留まろうとする傾向が強くなる事が分かりました。この解析で移動能力の指標としたのは、シュリンキングという、クモが風に飛ばされないように、体を縮める陸上行動と、前述した水面に糸を放ちブレーキをかける行動です。

サラグモはわずか数ミリの小さなクモです。縮尺を考えれば、私達にとっては大して強く無い風でも、このクモにとっては非常に風速の速い風になるはずですが。そういった事を考慮に入れると、吹きさらしの湖上の島々で、時間の経過と共に、風に吹き飛ばされないようにする行動が進化した事は、不思議ではありません。そして、こういった行動をとる個体が、人工群島における集団形成に寄与してきた、という事が予測出来ます。

さらに解析を続けたところ、島の年代を考慮したときに同じパターンで進化する行動形質としては、アグレッシブさや活動度があげられます。これは、移動能力の大きなクモには、活発で行動的なものが多いため、これらの行動形質が同じ進化のパターンになったのではないかと考えられます。

「集団形成初期には、移動能力やアグレッシブさ、活動度が小さくなる様な進化が急速に起こる」という結果は、集団という生物学の基本単位が形成される具体例であり、とても重要です。また、この結果は「島の生物が移動能力を失う」という島嶼生物学者を魅了してきた仮説(1, 18)を裏付けるものでもあります。以上より、人工群島のクモを用いた本研究では、進化生態学上の重要な仮説を様々な角度から検証する事に成功しました。

<引用文献>

- ① Grant, P. R. (1998). Evolution on islands. Oxford University Press, USA.
- ② Thornton, I. W. (1997). Krakatau: the destruction and reassembly of an island ecosystem. Harvard University Press.
- ③ Schilthuizen, M., Van Til, A., Salverda, M., Liew, T. S., James, S. S., Elahan, B. B. & Vermeulen, J. J. (2006). Microgeographic evolution of snail shell shape and predator behavior. Evolution, 60(9), 1851-1858.

- ④ Cheptou, P. O., Carrue, O., Rouifed, S. & Cantarel, A. (2008). Rapid evolution of seed dispersal in an urban environment in the weed *Crepis sancta*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(10), 3796-3799.
- ⑤ Riba, M. et al. (2009). Darwin's wind hypothesis: does it work for plant dispersal in fragmented habitats? *New Phytologist*, 183(3), 667-677.
- ⑥ Richardson, J. L., Urban, M. C., Bolnick, D. I. & Skelly, D. K. (2014). Microgeographic adaptation and the spatial scale of evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(3), 165-176.
- ⑦ Putz, F. E. (1984). The natural history of lianas on Barro Colorado Island, Panama. *Ecology*, 65(6), 1713-1724.
- ⑧ Hayashi, M. & Goodacre, S. (2014). Artificial Islands Created through Industrial Activity Contribute to Environmental Education and Evolutionary Ecology. *Research Bulletin of Environmental Education Center, Miyagi University of Education*. 2014, 16: 39-43.
- ⑨ Foelix, R. F. (1996) *Biology of Spiders*. Oxford University Press, New York, 2nd.
- ⑩ Cho, M., Neubauer, P., Fahrenson, C., & Rechenberg, I. (2018). An Observational Study of Ballooning in Large Spiders: Nanoscale Multi-Fibres Enable Large Spiders' Soaring Flight. *bioRxiv*, 206334.
- ⑪ Hanski, I., Erälahti, C., Kankare, M., Ovaskainen, O., & Sirén, H. (2004). Variation in migration propensity among individuals maintained by landscape structure. *Ecology letters*, 7(10), 958-966.
- ⑫ Bonte, D., Travis, J. M., De Clercq, N., Zwertvaegher, I. & Lens, L. (2008) Thermal conditions during juvenile development affect adult dispersal in a spider. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(44):17000-17005.
- ⑬ Entling, M. H., Stämpfli, K. & Ovaskainen, O. (2011) Increased propensity for aerial dispersal in disturbed habitats due to intraspecific variation and species turnover. *Oikos* 120(7):10.
- ⑭ Mestre, L. & Bonte, D. (2012) Food stress during juvenile and maternal development shapes natal and breeding dispersal in a spider. *Behav. Ecol.* 23(4):759-764.
- ⑮ Ottoni, E. B. (2000). *EthoLog 2.2: a tool for the transcription and timing of behavior observation sessions*. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 32(3), 446-449.
- ⑯ Catalog, W. S. (2015) *World spider catalog, version 16*. Natural History Museum Bern;
- ⑰ Darwin, C. *Journal and Remarks*. 1832-1836 in R. Fitzroy, (ed.), *Narrative of the Surveying Voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the Years 1826 and 1836*. Vol. III. (Henry Colburn, London, 1839).
- ⑱ Darwin, C. (1859) *On the Origin of Species*. J. Murray, London.
- ⑲ Hayashi, M., Bakkali, M., Hyde, A. & Goodacre, S. L. (2015). Sail or sink: novel behavioural adaptations on water in aerially dispersing species. *BMC evolutionary biology*, 15(1), 118.

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)

- ① Hayashi, M., Bakkali, M., Hyde, A., & Goodacre, S. L. (2015). Sail or sink: novel behavioural adaptations on water in aerially dispersing species. *BMC evolutionary biology*, 15(1), 118. (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Hayashi M. Flying sailors impacting on global ecosystems. Invited to the symposium of Almiqui research, Museo

de Historia Natural Tomás Romay,
Santiago de Cuba, Cuba, 21st Sep, 2017.

- ② 林 守人 昆虫食は人を幸せにするか
ービッグデータの自動解析から発掘する
データの個性ー. 環境教育学会, 盛岡,
岩手, 日本. 2017年9月3日.
- ③ 林 守人 溶岩に乗るカタツムリと波に
乗るクモの成功秘話 ー生物進化におけ
る地質・環境のインパクトー. 地層科学
研究所創立20周年記念講演, 東京, 日本.
2016年6月17日.
- ④ Hayashi M. Adaptations to water
increase wind-borne gamblers. Invited
to the Science Seminar Series
(Organized by Prof. Takahiro Asami),
Shinshu University, Nagano, Japan, 8th
Jan 2016.

[その他]

ホームページ等

報道 (本人インタビュー有から抜粋)

- ① Cressey, D. Airborne spiders can sail
on seas. Nature
(doi:10.1038/nature.2015.17906).
<https://www.nature.com/news/airborne-spiders-can-sail-on-seas-1.17906>
- ② Viegas, J. Seafaring spiders use sails
and anchors. Discovery Channel, 2015.
- ③ Coghlan, A. Ocean-going spiders can
use their legs to windsurf across water.
New Scientist, 2015.
- ④ Jozuka, E. How Spiders Can Cruise
Across Water. Motherboard, 2015.
https://motherboard.vice.com/en_us/article/8qxjpx/spider-sailors
- ⑤ Santen, H. v. Deze spinnen zeilen over
het water. NRC Handelsblad, 2015
- ⑥ Haas, L. German Public Radio aka
Deutschlandfunk, 2015.
- ⑦ Larousserie, D. Des araignées habiles
sous le vent. Le Monde, 2015.
- ⑧ Nicholls, H. Get this: spiders can
“sail” on water. The Guardian, 2015.

報道 (本人インタビュー無から抜粋)

- ① Flying spiders also sail on water.
Nature, 2015, 523: 130-131.

<https://www.nature.com/articles/523130d>

- ② Airborne Spiders Can Sail on Seas.
Scientific American, 2015.
- ③ Seafaring Spiders Set Leggy Sails and
Drop Silken Anchors. NBC News, 2015.

プレスリリース

- ① 宮城教育大学
<http://www.eec.miyakyo-u.ac.jp/blog/2015/07/bmc-evolutionary-biology.html>
- ② Natural History Museum, London
<http://www.nhm.ac.uk/discover/news/2015/july/long-distance-spiders-sail-across-high-seas.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 守人 (HAYASHI Morito)

宮城教育大学・教員キャリア研究機構・研究員

研究者番号 : 70625037

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

モハメド バッカリ (Mohammed BAKKALI)

アレックス ハイデ (Alex HYDE)

フレッド ナグス (Fred NAGGS)

サラ グッドエーカー (Sara GOODACRE)