

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K11914

研究課題名(和文)地球と異なる重力環境に植物が適応する能力

研究課題名(英文)Capability of plants to adapt themselves to altered gravity environments

研究代表者

唐原 一郎 (Karahara, Ichirou)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授

研究者番号：60283058

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)：長期の有人宇宙活動を支える宇宙での植物栽培の為には、地球と異なる重力環境に植物が適応する能力を明らかにしていく必要がある。そこでシロイヌナズナとヒメツリガネゴケを用いて、長期の過重力栽培装置の改良と栽培条件の最適化を進め、これらの生活環に対する長期過重力の影響を調べた。長期過重力環境がヒメツリガネゴケのバイオマスを増加させることが判明した。また、長期間の3G過重力環境および微小重力環境がシロイヌナズナの花序柄の内部組織形態に与える影響を調べた結果、予備的であるが、長期間の過重力は各組織の断面積を増加させる傾向がある一方で、重力が髄腔および繊維の形成を抑制する可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Understanding capability of plants to adapt themselves to altered gravity environments is crucial to secure a stable food supply in a long-term space exploration. It is necessary to clarify effects of altered gravity environment on the life cycle of plants to successfully develop such a cultivation system in space. In this study we continued to improve an apparatus to perform long-term plant cultivation under hypergravity and to optimize other environmental conditions than gravity, and examined its effects on the life cycle of Arabidopsis and Physcomitrella. And we found that long-term hypergravity increased biomass of Physcomitrella. We also performed anatomical observation regarding effects of long-term microgravity as well as 3 G-hypergravity on the formation of tissues in the peduncle of Arabidopsis and obtained results, though still preliminary, indicating a possibility that gravity suppress formation of pith cavity as well as fibers.

研究分野：植物形態学, 植物生理学

キーワード：微小重力 過重力 宇宙環境 生活環 植物

1. 研究開始当初の背景

植物は 4.7 億年前に水中から陸上というニッチに進出した。その際、浮力による支持を失ったため、自らの体の重みを支えるため、植物はリグニン合成能力を獲得し、体に機械的強度を与える支持組織を発達させたと考えられる。重力は植物の生活環を通じて常に影響を及ぼすが、全生活環の観点から見ると、植物の生理機能に重力が与える影響について明らかになっていることは、まだ一部に過ぎない。植物栽培は、人類の宇宙進出において、長期の有人宇宙活動を支える生物再生生命維持システムの一部として、また建築資材の生産などの様々な局面で必須である。また、植物の生理機能が地球の重力にどのように適応してきたかを明らかにすることは、陸上植物の進化を探るためのみならず、植物から未知の機能を引き出し、その機能強化に結びつけることができる可能性も秘める。そして宇宙という過酷な環境下での植物栽培の取り組みは、同時に、地球上における環境変動への植物の耐性強化にもつながると考えられる。

2. 研究の目的

これまでの先行研究において、研究代表者らは、市販の遠心装置も用いた実験もすすめながら、長期間過重力下で植物を栽培する装置の特許を取得し、装置を試作していた。本研究では、さらに改良した装置の試作を進め、植物の長期過重力栽培における重力以外の環境条件の最適化を目指した。当初の計画ではモデル植物シロイヌナズナの生活環完了を目指すとともに生活環を栄養成長と生殖成長にわけて、植物の生理基盤に地球の重力がどのように関わっているかをあぶり出すことを目指した。その過程で、栄養成長に関しては、生活環完了に時間のかかる被子植物シロイヌナズナだけでなく、被子植物と同じタイプの光化学系を持ち、体サイズが小さくまた栄養生殖での均質な集団が得られるモデル植物ヒメツリガネゴケを用いて実験系確立のスピードアップも図るとともに、シダ植物であるリチャードミズワラビを用いた調査も行い、陸上植物における重力反応の普遍性を探った。

3. 研究の方法

長期過重力栽培条件の最適化において、過重力実験では遠心力を用いるため、遠心中に振動が発生した場合は問題となる可能性があり、また対照実験において揃えることが難しい条件となる。そこで本研究ではダイレクトドライブ方式を用いた MIJ-17 と、ベルトドライブ方式を用いた MK-3 の 2 台の過重力植物栽培装置の振動特性を解析し、その振動および過重力環境がヒメツリガネゴケの成長に及ぼす影響を調べた。またリチャードミズワラビについては重力屈性反応を調べた。シロイヌナズナにおいては、重力環境によ

り花序柄の組織形成が制御されるしくみを調べるため、国際宇宙ステーションにおける「Space Seed 実験」において 33 日間栽培され、花序柄の先端部および基部の節間を切り出し、固定・包埋された試料を用い、微小重力環境がシロイヌナズナの花序柄の内部組織形態に与える影響を調べた。さらに、地上の 3 G 環境下において 45 日間栽培されたシロイヌナズナを用い、過重力環境の影響も調べた。宇宙実験で得られた数少ない貴重な植物試料から解剖学的情報を最大限に取得するため、非破壊的な観察により三次元的な情報が得られる X 線マイクロ CT 法の適用も進めた。

「Space Seed 実験」において、シロイヌナズナの野生型植物体を軌道 1 G 区および μ G 区で 63 日間生育させたところ、長角果形成が影響を受けることが示唆されている。筆者らはこの実験において、軌道上で RNA later 処理された野生型の花芽試料を解析することはできなかったが、Columbia をバックグラウンドに持つ lefty/tua6 変異体の花芽は得られた。そこでこれを用いて、宇宙環境において長角果形成が影響を受けた原因の手掛かりを得るため、トランスクリプトーム解析を行い、花芽における遺伝子発現に宇宙環境および微小重力環境が与える影響について解析を行った。宇宙 1 G 区、 μ G 区、および地上 1 G 区 (富山) で 33 日間栽培し地上に帰還後、回収された lefty/tua6 変異体の植物体より、花芽を切り出し、RNA 抽出を行った。マイクロアレイ解析は Agilent Arabidopsis 2 Oligo Microarray (44K; Agilent Technologies) を用いて行った。

4. 研究成果

その結果、MIJ-17 では不規則な振動が観察され、MK-3 では 10 G でさえほとんど振動は見られなかった。しかし、MIJ-17 の遠心時の振動でさえも、ヒメツリガネゴケの形態形成にはほとんど影響しないことが確認できた。

10 G 下で 25 日間育てたヒメツリガネゴケ集団では、茎葉体密度が増すことでシャレ当たりのバイオマスが増加することが再現性よく確認された。そしてこのとき、実際に葉緑体のサイズ、二酸化炭素コンダクタンス、光合成速度が増加していることも共同研究により確かめられた。シロイヌナズナを用いた過重力栽培により、長期の過重力によりバイオマスが増加することを示唆する結果も予備的に得ており、長期の過重力によるバイオマス増加がある程度陸上植物において共通する可能性が示唆された。長期過重力栽培のシロイヌナズナの生殖生長に対する影響については、栽培条件最適化の検討も含めて詳細な解析は継続中であるが、長期過重力環境下での生活環完了に一部成功している。また、シダのリチャードミズワラビでは、重力ベクトル方向の感知に葉緑体そのも

の関わる可能性を示唆する結果も得られた。

花序柄の組織の発達に長期間(33日間)の微小重力環境が与える影響を調べた結果、これまでの短期間の過重力実験では見られなかった、髄腔や繊維形成に対する微小重力の影響が観察された。そこで地上の3G環境下において、より長期間である45日間栽培されたシロイヌナズナの花序柄の内部組織形態に与える影響を調べた。その結果、現時点では調査試料数がやや少なく予備的であるが3G区の基部では、横断面全体、表皮、篩部、形成層、木部、髄腔の横断面積が、1G区と比べ有意に増加していた。また、先端部の各組織では増加傾向が見られた。先端部での横断面積の増加度合いは10G実験区での増加ほどでなく、重力加速度の大きさの違いを反映していると考えられる。組織横断面積の増加に細胞数の増加が伴うのか否かについては今後の課題である。また、3G区では髄腔の形成が抑制傾向であったが、先行研究での微小重力区では促進傾向であり、重力が髄腔形成を抑制する可能性が示された。

μ G下および宇宙1G下で形成された花芽におけるトランスクリプトームの比較を行った結果、 μ G下では111遺伝子の発現が2倍以上増加しており、光応答の遺伝子群などが含まれていた。また104遺伝子の発現が1/2倍以下に減少しており、防御応答に関連する遺伝子群が比較的多く含まれていた。次に宇宙1G下および地上1G下での比較を行った結果、宇宙1G下において、946遺伝子の発現が2倍以上増加しており栄養状態や飢餓応答に関する遺伝子群などが含まれていた。また1057遺伝子の発現が1/2倍以下に減少しており、高温・光および酸化ストレス応答に関する遺伝子群に加え、花粉形成に関わる遺伝子群が多く含まれていた。

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9件)

Takemura, K., Watanabe, R., Kameishi, R., Sakaguchi, N., Kamachi, H., Kume, A., Fujita, T., Karahara, I., Hanba, Y.T., Hypergravity of 10g changes plant growth, anatomy, chloroplast size, and photosynthesis in the moss *Physcomitrella patens*. *Microgravity Sci. Technol.*, 査読有, 29, 467-473 (2017).

Takemura, K., Kamachi, H., Kume, A., Fujita, T., Karahara, I., Hanba, Y.T., A hypergravity environment increases chloroplast size, photosynthesis, and plant growth in the moss *Physcomitrella patens*. *J. Plant Res.*, 査読有, 130, 181-192 (2017).

Mori, A., Kamachi, H., Karahara, I., Kume, A., Hanba, Y.T., Takemura, K., Fujita, T., Comparisons of the Effects of Vibration of Two Centrifugal Systems on the Growth and Morphological Parameters of the Moss *Physcomitrella patens*. *Biological Sciences in Space*, 査読有, 31, 9-13 (2017).

Kamachi, H., Tamaoki, D., Karahara, I., Plasma membrane-anchored chloroplasts are necessary for the gravisensing system of *Ceratopteris richardii* prothalli. *J. Plant Res.*, 査読有, 130, 397-405 (2017).

高橋秀幸, 日出間純, 北宅善昭, 保尊隆享, 唐原一郎, 宇宙環境を利用した植物科学の研究シナリオ. *International Journal of Microgravity Science and Application (Int J Microgravity Sci Appl)*, 査読無, 34, 340202-340201-340208 (2017).

Karahara, I., Yamauchi, D., Uesugi, K., Mineyuki, Y., Three-dimensional imaging of plant tissues using X-ray micro-computed tomography. *Plant Morphology*, 査読有, 27, 21-26 (2015/4).

唐原一郎, 玉置大介, 久米篤, 蒲池浩之, 半場祐子, 藤田知道, 植物栽培における重力環境制御の基礎. *アグリバイオ*, 査読無, 1, 1172-1175 (2017).

唐原一郎, 玉置大介, 久米篤, 蒲池浩之, 植物栽培における重力環境制御の試み. *アグリバイオ*, 査読無, 1, 76-79 (2017).

Karahara, I., Matsuzawa, Y., Bando, T., Tamaoki, D., Abe, J., Uesugi, K., Yamauchi, D., Mineyuki, Y., C2-O-05 Non-destructive observation of aerenchyma development in the primary root of rice using X-ray micro-CT. *Microscopy*, 査読無, 64, i66-i66 (2015).

[学会発表](計33件)

篠筈公隆, 村本雅樹, 玉置大介, 唐原一郎, 3Gの過重力環境がシロイヌナズナの花序柄の組織形成に与える影響, 第59回日本植物生理学会年会, 札幌コンベンションセンター (2018).

黒金智文, 松井亮, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 徹, 嶋., 笠原春夫, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 唐原一郎, ロックウール中で発達したシロイヌナズナ根系のX線マイクロCTによる観察の試み, 第46回根研究集会, 富山 (2017).

黒金智文, 松井亮, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 唐原一郎, X線マイクロCTによるシロイヌナズナ根系形態解析の試み, 日本植物形態学会第29回総会・大会, 東京理科大学 野田キャンパス (2017).

黒金智文, 唐原一郎, 松井亮, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, X線マイクロCTによるシロイヌナズナ根系の可視化の試み, 日本植物学会第81回大会, 野田 (2017).

篠筈公隆, 村本雅樹, 玉置大介, 唐原一郎, 過重力環境がシロイヌナズナの花序柄の組織形成に与える影響, 日本宇宙生物科学会第31回大会, 群馬会館 (2017).

唐原一郎, 黒金智文, 松井亮, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 宇宙における植物の生活環境 - 根系形態解析の試み -, 日本宇宙生物科学会第31回大会 シンポジウム1 重力応答・植物, 群馬会館 (2017).

唐原一郎, 村本雅樹, 筋師洵也, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 笠原宏一, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 竹内晃久, 鈴木芳生, 峰雪芳宣, 蒲池浩之, 西内巧, 久米篤, 曾我康一, 吉田久美, 半場祐子, 神阪盛一郎, 宇宙における植物の生活環境 - 微小重力環境下におけるシロイヌナズナ花序柄の支持組織形成 -, 第31回宇宙環境利用シンポジウム, 相模原 (2017).

唐原一郎, スペースシード試料における根系の可視化の試み, 日本植物学会第81回大会・スペースモス関連集会, 野田 (2017).

Karahara, I., Muramoto, M., Sujishi, S., Tamaoki, D., Yano, S., Tanigaki, F., Shimazu, T., Kasahara, H., Kasahara, H., Yamauchi, D., Uesugi, K., Hoshino, M., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Mineyuki, Y., Kamisaka, S., Morphological analysis of tissues in the peduncle of Arabidopsis grown under microgravity by conventional microscopy and X-ray micro-CT, The 3rd East-Asia Microscopy Conference, EAMC3, Busan, Korea (2017).

Karahara, I., Muramoto, M., Sujishi, S., Tamaoki, D., Yano, S., Tanigaki, F.,

Shimazu, T., Kasahara, H., Kasahara, H., Yamauchi, D., Uesugi, K., Hoshino, M., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Mineyuki, Y., Kamisaka, S., Morphological analysis of the peduncle of Arabidopsis grown under microgravity by conventional anatomy of cross sections as well as X-ray microCT, 第58回日本植物生理学会年会 (鹿児島), 鹿児島 (2017).

蒲池浩之, 玉置大介, 唐原一郎, Chloroplast anchoring to the plasma membrane is necessary for gravisensing of the fern *Ceratopteris richardii* gametophytes シダ植物リチャードミズウラビ配偶体の重力センシングには原形質膜への葉緑体のアンカリングが必要である, 第56回日本植物生理学会年会, 盛岡 (2016).

村本雅樹, 唐原一郎, 筋師洵也, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 笠原宏一, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 竹内晃久, 鈴木芳生, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 微小重力環境下で栽培したシロイヌナズナの花序柄の形態学的解析, 第62回日本宇宙航空環境医学会大会・日本宇宙生物科学会第30回大会・合同大会, 長久手 (2016).

村本雅樹, 唐原一郎, 筋師洵也, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 笠原宏一, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 竹内晃久, 鈴木芳生, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 微小重力環境下で生育したシロイヌナズナの花序柄の解剖学的解析, 日本植物形態学会第28回大会, 沖縄 (2016).

唐原一郎, 玉置大介, 高橋郁佳, 西内巧, 久米篤, 蒲池浩之, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 曾我康一, 吉田久美, 神阪盛一郎, 宇宙における植物の生活環境, 第30回宇宙環境利用シンポジウム, 相模原 (宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス) (2016).

唐原一郎, 村本雅樹, 筋師洵也, 玉置大介, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 笠原宏一, 山内大輔, 上杉健太郎, 星野真人, 竹内晃久, 鈴木芳生, 峰雪芳宣, 神阪盛一郎, 微小重力環境がシロイヌナズナの花序柄における支持組織形成に与える影響, 日本植物学会第80回大会, 沖縄コンベンションセンター (2016).

唐原一郎, 宇宙におけるシロイヌナズナの支持組織発達, 日本植物学会第80回大会 (沖縄) スペース・モス関連集会, 沖縄コンベンションセンター (2016).

半場祐子, 竹村香里, 阪口直哉, 渡辺璃那, 久米篤, 唐原一郎, 藤田知道, 蒲池浩之, 過重力がヒメツリガネゴケの成長と光合成に与える影響, 第 30 回宇宙環境利用シンポジウム, 相模原 (宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス) (2016).

久米篤, 蒲池浩之, 唐原一郎, 半場祐子, 藤田知道, 植物成長の重力影響実験において考慮すべき栽培環境について, 第 30 回宇宙環境利用シンポジウム, 相模原 (宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス) (2016).

Yokoi, M., Fujita, T., Kume, A., Kamachi, H., Hanba, Y.T., Karahara, I., Emerging Model Plant, the Moss *Physcomitrella patens* for Experiments on International Space Station: Response to Gravity or Space Radiation, The 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), Sapporo (2016).

Takemura, K., Mori, A., Kamachi, H., Kume, A., Yokoi, M., Fujita, T., Karahara, I., Hanba, Y.T., A long-term hypergravity responses in the moss *Physcomitrella patens*, MOSS2016, Leeds, The University of Leeds (2016).

⑳ Takemura, K., Kamachi, H., Kume, A., Fujita, T., Karahara, I., Hanba, Y.T., Hypergravity Environment Changes Plant Growth, Anatomy, Chloroplast Sizes and Photosynthesis of a Moss *Physcomitrella patens*, The 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), Sapporo (2016).

㉑ Sakaguchi, N., Kameishi, R., Watanabe, R., Kamachi, H., Karahara, I., Kume, A., Fujita, T., Hanba, Y.T., Photosynthetic Capacity and Morphological Change of *Physcomitrella patens* to Hypergravity, The 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), Sapporo (2016).

㉒ Karahara, I., Muramoto, M., Sujishi, S., Tamaoki, D., Yano, S., Tanigaki, F., Shimazu, T., Kasahara, H., Kasahara, H., Yamauchi, D., Uesugi, K., Hoshino, M., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Mineyuki, Y., Kamisaka, S., Effects of microgravity on the development of supporting tissues in the peduncle of *Arabidopsis*, The 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), Sapporo (2016).

㉓ Karahara, I., Botany in space - Effects of altered gravitational environments on

plant growth -, Invited lecture at School of Life Sciences, The Chinese University of Hong Kong Life Science Seminar, Hong Kong (2016).

㉔ Fujita, T., Kume, A., Kamachi, H., Hanba, Y., Karahara, I., Towards Microgravity Experiments in Moss: Emerging Model Land Plant, *Physcomitrella patens* for Experiments on International Space Station, The 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), Sapporo (2016).

㉕ 高橋郁佳, 片山瑞紀, 久米篤, 蒲池浩之, 唐原一郎, 10 G の過重力環境がシロイヌナズナにおけるロゼット葉の形態及びクロロフィル蓄積に与える影響, 日本宇宙生物科学会第 29 回大会, 東京 (帝京大学) (2015).

㉖ 藤田知道, 蒲池浩之, 唐原一郎, 久米篤, 坂田洋一, 高林厚史, 田中歩, 長嶋寿江, 西山智明, 橋本博文, 長谷部光泰, 半場祐子, 日渡祐二, 松田修, 本村泰三, 矢野幸子, コケ植物を用いた宇宙実験に向けて: スペース・モスの活動報告, 第 29 回宇宙環境利用シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所 (相模原キャンパス) (2015).

㉗ 蒲池浩之, 半場祐子, 竹村香織, 長嶋寿江, 唐原一郎, 久米篤, 藤田知道, コケ植物ヒメツリガネゴケの過重力応答反応と宇宙環境利用, 日本宇宙生物科学会第 29 回大会, 東京 (帝京大学) (2015).

㉘ 玉置大介, 唐原一郎, 西内巧, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 榎田大輔, 曾我康一, 若林和幸, 橋本隆, 保尊隆享, 神阪盛一郎, 微小重力環境がシロイヌナズナの花芽におけるトランスクリプトームに与える影響 -lefty 変異体を用いた解析-, 日本宇宙生物科学会第 29 回大会, 東京 (帝京大学) (2015).

㉙ 山内大輔, 唐原一郎, 峰雪芳宣, X線マイクロ CT を用いた種子発芽過程の研究, 日本植物学会第 79 回大会シンポジウム 形態学と生理学の融合に向けて 植物の「形」と「現象」の狭間を埋める研究の最前線, 朱鷺メッセ (新潟コンベンションセンター) (2015).

㉚ 村本雅樹, 唐原一郎, 筋師洵也, 矢野幸子, 谷垣文章, 嶋津徹, 笠原春夫, 神阪盛一郎, 微小重力環境下で生育したシロイヌナズナの花茎の形態学的解析, 第 56 回日本植物生理学会年会, 東京農業大学世田谷キャンパス

(2015).

③② Karahara, I., Matsuzawa, Y., Bando, T., Tamaoki, D., Abe, J., Uesugi, K., Yamauchi, D., Mineyuki, Y., Non-destructive observation of aerenchyma development in the primary root of rice using X-ray micro-CT, The 2nd East-Asia Microscopy Conference (EAMC2), Himeji (2015).

③③ Fukuda, A., Karahara, I., Yamauchi, D., Tamaoki, D., Uesugi, K., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Mineyuki, Y., 3-D cell geometrical analysis of epidermal and cortical cells in hypocotyl-root axes in arabidopsis seeds using X-ray micro-CT, The 2nd East-Asia Microscopy Conference (EAMC2), Himeji (2015).

③④ 唐原一郎, 宇宙におけるシロイヌナズナの生活環, 日本植物学会第 79 回大会 スペースモス関連集会, 朱鷺メッセ (新潟コンベンションセンター) (2015).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

唐原一郎 (KARAHARA, Ichirou)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・
教授

研究者番号: 60283058

(2) 研究分担者

蒲池浩之 (KAMACHI, Hiroyuki)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・
教授

研究者番号: 40262498

玉置 大介 (TAMAOKI, Daisuke)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・
特命助教

研究者番号: 20793053

(3) 連携研究者

峰雪芳宣 (MINEYUKI Yoshinobu)

兵庫県立大学・生命科学研究科・教授

研究者番号: 30219703

山内 大輔 (YAMAUCHI, Daisuke)

兵庫県立大学・生命科学研究科・教授

研究者番号: 40220222

西内 巧 (NISHIUCHI, Takumi)

金沢大学学際科学実験センター・准教授

研究者番号: 20334790

(4) 研究協力者

該当無し