

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06770

研究課題名(和文)植物の陸上進出とペプチド性シグナル分子の進化～植物ペプチドホルモンの起源～

研究課題名(英文)Evolution of peptide signaling molecules during the plant terrestrialization process &amp;#8211; the origin of land plant peptide hormones

研究代表者

古水 千尋(Furumizu, Chihiro)

広島大学・自然科学研究支援開発センター・助教

研究者番号：90808479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の主要な成果として、以下の5点を挙げる。1)系統的に多様な植物について、既知のペプチド・受容体の保存性を解析し、研究成果を査読あり英語総説2編として出版した。2)植物の情報伝達分子RGFファミリーペプチドの配列の進化を明らかにして、成果を査読あり英語原著論文1編として出版した。3)CLEファミリーペプチドとその受容体の進化を分析し、和文総説1編として出版した。4)植物ペプチド情報伝達系の受容体の進化を明らかにし、研究成果を査読あり英語原著論文1編として出版した。5)TPD1-EMS1情報伝達系のゼニゴケにおける機能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物自身によって作られ、植物の成長を調節する短いペプチドが次々と見つかり、植物の生育を制御する技術の開発における生体内ターゲットとしても注目されている。本研究では、これらの生理活性ペプチドやその受容体をコードする遺伝子の進化について解析し、植物がもつペプチド情報伝達系の全容がダイナミックに進化してきた一端を明らかにした。本研究の成果は、新規の生理活性ペプチドの同定にも役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Major achievements of this research project include the following: (1) it was shown how widely homologs of known peptide hormones and their receptors are present in land plants. The results were published as two refereed review articles; (2) sequence diversity was revealed in the RGF family signaling peptides. The results were published as a refereed research article; (3) evolution of the CLE peptide signaling system was examined and published as a review; (4) evolutionary trajectories of a subfamily of receptor-like kinases were elucidated and published as a refereed research article; and (5) the putative TPD1-EMS1 signaling pathway was functionally characterized in *Marchantia polymorpha*.

研究分野：植物分子遺伝学、進化生物学、分子生物学

キーワード：植物ペプチド情報伝達系 植物ペプチドホルモン ゼニゴケ 陸上植物の進化 分子進化 共進化 遺伝子重複 生物間相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

植物の発生や生理、生態を制御する内生因子として、10種類以上の低分子ペプチドが発見され、古典的な植物ホルモンと並ぶ重要な役割を担うことが明らかになりつつある(図1)。活性型ペプチドは細胞外に分泌され、別の細胞の膜上受容体に認識されることにより、ペプチドホルモンを介した細胞間コミュニケーションが成立する。

陸上植物の進化の過程では、ペプチドホルモンの種類の増加が認められ、多様化したペプチドホルモン情報伝達系は、より複雑な構造や生理機構の進化に貢献したと推測される(図2)。植物はペプチドホルモン伝達系をどのように獲得したのだろうか？

陸上植物は、淡水性藻類から進化したと考えられている(図2)。単純なボディプランを持つ藻類から、1倍体・2倍体世代がいずれも多細胞の体を持つ陸上植物が進化した過程では、細胞間コミュニケーションの必要性が高まり、これに植物ペプチドホルモン情報伝達系の進化が寄与したと推測される。基部的な陸上植物は5種類のペプチドホルモンを持つが、いずれも近縁藻類からは見つかっていない(図2)。一方で、ペプチドホルモン受容体の相同遺伝子は藻類に存在しており、受容体の起源は藻類にさかのぼると考えられる。



図1. 被子植物のペプチドホルモンは植物の一生を通じて、形態形成や環境応答、生殖などを制御している。

### 2. 研究の目的

本研究では、植物の陸上化に貢献した植物ペプチドホルモン情報伝達系の成立過程を紐解くために、鍵となる問いかけを行う：「最初の植物ペプチドホルモン」はいつ、どこで誕生したのか？

既知の植物ペプチドホルモンは全て被子植物で発見され、その相同遺伝子が他の分類群で解析されてきた。しかし被子植物を起点とする従来の研究には限界がある。例えば、派生的な分類群である被子植物では失われたホルモンは見落とされてきたであろう。

このような植物ペプチドホルモンの進化を解明する鍵となるミッシングリンクを埋めて、植物ペプチドホルモンの起源を明らかにするために、本研究では従来よりも包括的に植物ペプチドホルモンを探索する。このために、現生陸上植物のなかで基部的な位置を占めるコケ植物と陸上植物の姉妹群であるシャジクモ藻類に注目し、① コケ植物のペプチドホルモンを網羅的に同定し、その機能を解明することと、② 藻類と陸上植物に共通するペプチドホルモンの有無を明らかにすることを目的とする(図2)。

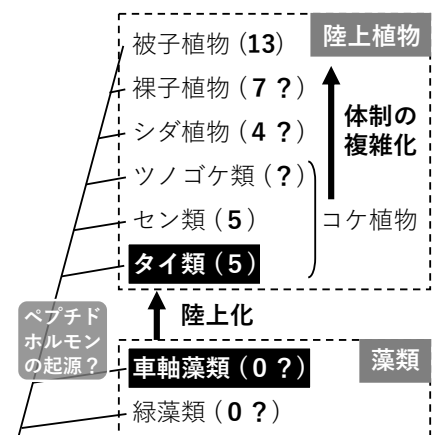


図2. 原生陸上植物と近縁藻類の系統関係。括弧内の数字は代表種が持つ既知ペプチドホルモンの種類の数。

### 3. 研究の方法

以下に述べるように3つの研究課題を設定し、研究を計画的に遂行する。

#### 課題1. コケ植物におけるペプチドホルモン遺伝子の探索

- 全ゲノム配列情報からのペプチドホルモン候補遺伝子の絞り込み  
ゲノム解読が完了しているゼニゴケ *Marchantia polymorpha* やヒメツリガネゴケ *Physcomitrella patens* などのモデル植物を主な対象として、ペプチドホルモンをコードする可能性がある遺伝子を網羅的に探索する。
- ペプチドホルモン候補遺伝子の発現データ解析  
ペプチドホルモンをコードする遺伝子は、発生や環境の刺激によって、必要なときにのみ発現するように制御されることが多い。そこで既報の遺伝子発現データを用いてペプチドホルモン候補遺伝子の発現パターンを解析する。

#### 課題2. コケ植物ペプチドホルモンが他の分類群に存在する可能性の検討

- コケ植物ペプチドホルモン候補遺伝子の相同遺伝子の探索  
GenBank や IKP・10KP プロジェクトなどの遺伝子配列データベースや種ごとのゲノム配列

情報を使って、課題 1-1A の候補遺伝子の相同遺伝子を藻類や陸上植物で探索する。

### 課題 3. コケ植物ペプチドホルモンの機能の解明

#### ○遺伝子組換え植物の作製によるペプチドホルモン候補遺伝子の機能解析

本実験には遺伝子操作が容易なゼニゴケを用いる。同定されたゼニゴケのペプチドホルモン遺伝子の機能を明らかにするために、機能破壊株や過剰発現株、発現レポーター系統を作製して解析する。

## 4. 研究成果

本研究の主要な成果として、以下の 5 点を挙げる。

### (1) 植物ペプチド情報伝達系の進化について、俯瞰的に分析した

#### 【成果の概要】

植物ペプチド情報伝達系についての先行研究を分析し、「少数のモデル植物へのデータの偏り」を課題として見出した。この解決に向けて、系統的に多様な植物について既知のペプチド・受容体の保存性を明らかにした。

#### 【論文発表成果】

- ① [Furumizu C, Aalen RB \(2023\) Peptide signaling through leucine-rich repeat receptor kinases - insight into land plant evolution. New Phytol. 238\(3\): 977-982. doi: 10.1111/nph.18827.](#)
- ② [Furumizu C, Krabberød A, Hammerstad M, Alling RM, Wildhagen M, Sawa S, Aalen RB \(2021\) The sequenced genomes of non-flowering land plants reveal the innovative evolutionary history of peptide signaling. Plant Cell. 33\(9\): 2915-2934. doi: 10.1093/plcell/koab173.](#)

### (2) 情報伝達分子として働く RGF ファミリーペプチドの配列の進化を明らかにした

#### 【成果の概要】

RGF ファミリーペプチドの配列進化を明らかにした。コケ植物の RGF ファミリー遺伝子の分子遺伝学的解析を行い、ペプチドホルモンの前駆体をコードしている可能性が高いことを明らかにした。

#### 【論文発表成果】

- ① [Furumizu C, Sawa S \(2021\) The RGF/GLV/CLEL family of short peptides evolved through lineage-specific losses and diversification and yet conserves its signaling role between vascular plants and bryophytes. Front. Plant Sci. 12: 703012. doi: 10.3389/fpls.2021.703012.](#)

### (3) 情報伝達分子として働く CLE ファミリーペプチドとその受容体の進化を分析した

#### 【成果の概要】

CLE ファミリーペプチドとその受容体のホモログの有無や遺伝子発現パターン、生物学的機能について、先行研究を分析した。現生の維管束植物のなかで最初期に誕生した小葉植物に属するイヌカタヒバの分裂組織において、CLE 情報伝達系が発現し、機能している可能性を見出した。

#### 【論文発表成果】

- ① [古水千尋, 平川有宇樹, 澤進一郎. \(2021\) 植物の多様性を理解する手がかりとしての CLE ペプチド情報伝達系. 植物の生長調節 56\(2\): 85-91. doi: 10.18978/jsrnp.56.2\\_85.](#)

### (4) 植物ペプチド情報伝達系の受容体の進化を明らかにした

#### 【成果の概要】

植物内在ペプチド性情報因子の受容体を含む LRR-RLK サブファミリー X に注目し、分子系統解析を行ない、サブファミリー内での配列の多様化の過程を明らかにした。

#### 【論文発表成果】

- ① [Furumizu C, Sawa S \(2021\) Insight into early diversification of leucine-rich repeat receptor-like kinases provided by the sequenced moss and hornwort genomes. Plant Mol. Biol. 107\(4-5\): 337-353. doi: 10.1007/s11103-020-01100-0.](#)

### (5) TPD1-EMS1 情報伝達系のゼニゴケにおける機能を明らかにした

#### 【成果の概要】

TPD1-EMS1 情報伝達系はシロイヌナズナやイネで花粉形成に関わることが知られている。そのゼニゴケホモログの機能を解析し、葉状体の発生に関与することを明らかにした。得られた研究成果を論文投稿する準備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Furumizu Chihiro, Sawa Shinichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 The RGF/GLV/CLEL Family of Short Peptides Evolved Through Lineage-Specific Losses and Diversification and Yet Conserves Its Signaling Role Between Vascular Plants and Bryophytes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2021.703012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Furumizu Chihiro, Krabberod Anders K., Hammerstad Marta, Alling Renate M., Wildhagen Mari, Sawa Shinichiro, Aalen Reidunn B.	4. 巻 33
2. 論文標題 The sequenced genomes of nonflowering land plants reveal the innovative evolutionary history of peptide signaling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Plant Cell	6. 最初と最後の頁 2915 ~ 2934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plcell/koab173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yanagawa Aya, Krishanti Ni Putu Ratna Ayu, Sugiyama Akifumi, Chrysanti Emiria, Ragamustari Safendrrri Komara, Kubo Minoru, Furumizu Chihiro, Sawa Shinichiro, Dara Surendra K., Kobayashi Masaru	4. 巻 76
2. 論文標題 Control of Fusarium and nematodes by entomopathogenic fungi for organic production of Zingiber officinale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Natural Medicines	6. 最初と最後の頁 291 ~ 297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11418-021-01572-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hida Hiroataka, Ebara Rika, Hayashi Shumpei, Kanno Isaku, Furumizu Chihiro, Sawa Shinichiro	4. 巻 141
2. 論文標題 Method for Analyzing an Infection Process of Plant-parasitic Nematodes Using a Microfluidic Device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 141 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.141.141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 古水 千尋、平川 有宇樹、澤 進一郎	4. 巻 56
2. 論文標題 植物の多様性を理解する手がかりとしてのCLE ペプチド情報伝達系	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 植物の生長調節	6. 最初と最後の頁 85 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18978/jscrp.56.2_85	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furumizu Chihiro, Sawa Shinichiro	4. 巻 107
2. 論文標題 Insight into early diversification of leucine-rich repeat receptor-like kinases provided by the sequenced moss and hornwort genomes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 337 ~ 353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11103-020-01100-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuan Na, Furumizu Chihiro, Zhang Baolong, Sawa Shinichiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Database mining of plant peptide homologues	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Biotechnology	6. 最初と最後の頁 137 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.20.0720a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Furumizu Chihiro, Aalen Reidunn Birgitta	4. 巻 238
2. 論文標題 Peptide signaling through leucine rich repeat receptor kinases: insight into land plant evolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 977 ~ 982
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/nph.18827	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古水千尋、澤進一郎
2. 発表標題 陸上植物におけるペプチドシグナル伝達系の進化
3. 学会等名 日本植物学会第84回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古水千尋
2. 発表標題 植物ペプチドシグナルの世も無常？ゲノムが語る栄枯転変の物語
3. 学会等名 日本植物学会第86回大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ボウマン ジョン  (Bowman John L.)		
研究協力者	アーレン レイダン  (Aalen Reidunn Birgitta)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ノルウェー	オスロ大学			