

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03177

研究課題名(和文)ピロリン酸の多様な機能の分子細胞生物学的解明：エネルギー・代謝・シグナル

研究課題名(英文)Molecular and cell biological elucidation of the multiple functions of pyrophosphate: energy, metabolism, and signaling

研究代表者

前島 正義 (Maeshima, Masayoshi)

中部大学・応用生物学部・教授

研究者番号：80181577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：液胞膜H<sup>+</sup>輸送性ピロホスファターゼ(H<sup>+</sup>-PPase)と可溶性ピロホスファターゼ(可溶性PPase)、そしてその基質である無機ピロリン酸(PPi)に注目し、次の結果を得た。

(a) H<sup>+</sup>-PPaseと可溶性PPaseの遺伝子発現(酵素量)がPPi濃度に影響し、コルメラ細胞でのデンプン形成、蜜腺での糖蜜合成を支えていることが明らかになった。(b) 遺伝子改変株等での実験によりシロイヌナズナは土壌のPPiを吸収し利用する能力をもつ可能性は否定的であった。(c) サボテンのH<sup>+</sup>-PPaseは、その一次構造はやエナリ酵素と類似性が高いが、高温に極めて耐性であり安定であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

H<sup>+</sup>-PPaseは植物の液胞膜に局在し、液胞の酸性化能と細胞質PPiを加水分解する機能をもつ。本研究では根端コルメラ細胞に注目した。この細胞ではH<sup>+</sup>-PPase遺伝子は発現せず液胞も小さい。人為的にコルメラ細胞にH<sup>+</sup>-PPaseを発現させると重力屈性に必要なデンプン粒の形成が強く抑制された。デンプン合成はPPi濃度が高い条件で進行する。すなわち重力屈性を駆動するコルメラ細胞でのデンプン粒形成、液胞増大を抑制するためにH<sup>+</sup>-PPase遺伝子の発現を抑制していると推定される。また高温耐性のサボテンのH<sup>+</sup>-PPaseは50℃で最大活性を示すなど環境に応じたH<sup>+</sup>-PPaseに進化している知見も得た。

研究成果の概要(英文)：We focused on vacuolar membrane H<sup>+</sup>-translocating pyrophosphatase (H<sup>+</sup>-PPase) and soluble pyrophosphatase (soluble PPase) and their substrate, inorganic pyrophosphate (PPi), and obtained the following results.

(a) Gene expression of H<sup>+</sup>-PPase and soluble PPase affected PPi concentration and supported starch formation in columella cells and glucose synthesis in nectar glands. (b) Experiments with wild type and mutant strains have ruled out the possibility that *Arabidopsis thaliana* has ability to absorb and utilize PPi from the soil. (c) The cactus H<sup>+</sup>-PPase was found to be extremely resistant to high temperature and heat stable. Its primary structure is slightly different from that of the mung bean enzyme.

研究分野：植物分子生理学

キーワード：エネルギー変換酵素 液胞 プロトンポンプ ピロホスファターゼ ピロリン酸 代謝酵素 高温耐性酵素

## 1. 研究開始当初の背景

生物種を問わず、細胞でのエネルギー循環としてATPを中心とするシステムが成立している。本研究では、もう一つのリン酸化合物として無機ピロリン酸 (PPi) に注目した。高エネルギーリン酸化合物であるATPのADPとPiへの加水分解による標準自由エネルギー変化は $-30.5 \text{ kJ/mol}$ であるのに対して、PPiの加水分解は $-19.2 \text{ kJ/mol}$ の値である。十分に高いエネルギーを放出するため、そのエネルギーを他の反応に供与することができる。植物細胞では、PPiはDNA、タンパク質、セルロース、デンプン等の合成反応の副産物として生成する。これらの高分子合成では、 $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AMP} + \text{PPi}$  に代表される反応によりPPiが生成する。高濃度PPiは、これらの高分子合成反応を化学平衡論的に抑制するので、細胞内PPi濃度は低く維持されている。植物細胞内でPPiを加水分解するのは、液胞膜H<sup>+</sup>輸送性ピロホスファターゼ (H<sup>+</sup>-PPase) と可溶性のピロホスファターゼ (可溶性PPase) である。H<sup>+</sup>-PPaseによる液胞内へのH<sup>+</sup>能動輸送は、液胞内の酸性維持とともに、液胞膜における各種イオン輸送系にpH勾配あるいは膜電位差としてエネルギーを供与している (図1 参照)。そして、PPiは解糖系の中でも利用され、ヌクレオチド代謝にも利用される (図2)。

こうした特徴をもつPPiおよびそれを加水分解する2種類の酵素 (H<sup>+</sup>-PPaseおよび可溶性PPase) に注目し、細胞内の代謝をどのように調節するのか、細胞特異性はないのか、さらにはエネルギーをもつPPiがATP同様にリン酸基供与体となる可能性はないのか、あるいは土壌中のPPiをリン酸栄養の代替として吸収し利用する可能性はないのかを、探索、解明することを研究の目的とした。代謝的にみれば、PPiはATPの特殊な加水分解産物である。すなわちATPの影の存在としてPPiが存在する。その影として生成するPPiに注目した。本研究を計画した当初、図3に示す多様な役割を想定し、検証、実証の研究計画を立てた。

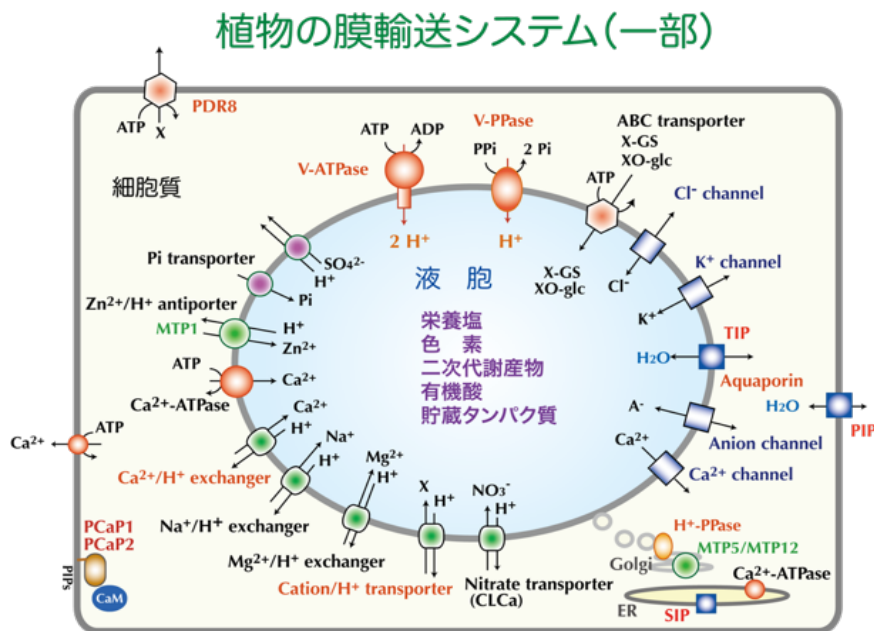


図1 植物の液胞膜輸送システムの模式図

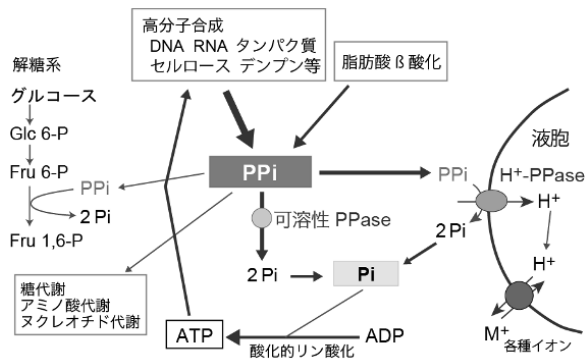


図2 代謝と液胞酸性化における PPI

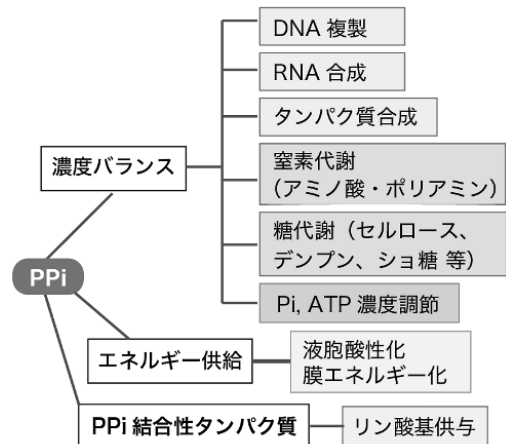


図3 PPI の生理学的位置付け (一部は仮説)

## 2. 研究の目的

動植物、微生物細胞において、PPiが生成する反応、PPiを利用する代謝経路に関する知見は蓄積されたが、PPiをタンパク質のリン酸化反応に利用するか否か、PPiを細胞外から吸収し利用するか否かに関する知見はなく、その解明を一つの研究目的とした。そして、これまでの研究成果を土台として、植物細胞においてPPiを加水分解する液胞膜H<sup>+</sup>-PPaseおよび可溶性PPaseの生理的役割と細胞質PPi濃度がデンプン合成と糖・窒素代謝等に及ぼす影響の解析・解明をもう一つの研究目的とした。これらの目的に沿って、下記の実験を設定した。

- (a) H<sup>+</sup>-PPaseと5種の細胞質可溶性PPaseの特質の解明、遺伝子欠失、過剰・異所発現株での表現型とデンプン・糖蜜合成系への影響の解析
- (b) シロイヌナズナは土壌のPPiを吸収し利用する能力を保持しているか否かの検討
- (c) PPi依存型プロテインキナーゼの探索と解析
- (d) H<sup>+</sup>-PPaseの分子多様性の検証：高温耐性植物がもつH<sup>+</sup>-PPaseの解析

## 3. 研究の方法

### (a) H<sup>+</sup>-PPaseと5種の細胞質可溶性PPaseの特質の解明、遺伝子欠失、過剰・異所発現株での表現型とデンプン・糖蜜合成系への影響の解析

PPiを加水分解するH<sup>+</sup>-PPaseおよび5種の細胞質可溶性PPaseを対象に、それぞれの個別遺伝子欠失株を作製し、さらに複数の遺伝子欠失株を掛け合わせるにより、次の変異株を用意した。なお、可溶性PPase6はプラスチド局在であるため実験対象から外した。また、PPase3はそのタンパク質量が極めて低く生理的な寄与に関する検討対象としなかった。

H<sup>+</sup>-PPase単一欠失株 (*fugu5*)

細胞質可溶性PPaseの単一欠失株: PPase1 (*ppa1*), PPase2 (*ppa2*), PPase3 (*ppa3*), PPase4 (*ppa4*), PPase5 (*ppa5*)

二重欠失株: *fugu5 ppa1*, *fugu5 ppa2*, *fugu5 ppa4*, *fugu5 ppa5*

四重欠失株: *ppa1 ppa2 ppa4 ppa5*

これらの遺伝子欠失株および野生株を用いて、根端部分でのデンプン蓄積、重力屈性、あるいは花卉の蜜腺について詳細を解析し、遺伝子欠失による影響を考察した。

### (b) シロイヌナズナは土壌のPPiを吸収し利用する能力を保持しているか否かの検討

シロイヌナズナを対象として、PPiを吸収できる能力をもつか否かを検討した。実験には、上記で作製した細胞

質PPaseの欠失株3種(H<sup>+</sup>-PPase欠失、PPase1欠失、二重欠失)と野生株を対象とし、これらを通常培地(Pi濃度0.63 mM)、低Pi培地(Pi, 0.06 mM)、および無Pi培地に1 mM PPIを補充した培地(無Pi+PPI培地)で生育させた。仮に、PPIを培地から吸収する能力があれば、無機リン酸を欠く培地においてもPPIを吸収し、細胞内のH<sup>+</sup>-PPaseあるいは可溶性PPaseがPPIを分解してPiを供給することで正常な成長が見られるはずである。

#### (c) PPI依存型プロテインキナーゼの探索と解析

植物細胞にATPの代わりにPPIをリン酸供与体とするプロテインキナーゼの探索のために、シロイヌナズナ磨砕液から可溶性画分を調製し、この試料にATPあるいはPPIを添加し、タンパク質をSDS-PAGEで分離し、抗リン酸化セリン、抗リン酸化トレオニン抗体を用いてリン酸化タンパク質を検出し、ATPとPPIでの差異を確認する実験計画を立てた。

#### (d) H<sup>+</sup>-PPaseの分子多様性の検証：高温耐性植物がもつH<sup>+</sup>-PPaseの解析

H<sup>+</sup>-PPaseの分子多様性を検討するため、高温耐性のサボテン組織から液胞膜を精製し、これを試料としてH<sup>+</sup>-PPase活性の温度依存性を解析した。さらに、高温下に一定時間静置した液胞膜画分を試料として、H<sup>+</sup>-PPaseの残存活性を解析した。H<sup>+</sup>-PPaseはPPIの加水分解機能とH<sup>+</sup>能動輸送機能をもつが、H<sup>+</sup>輸送機能は膜そのものの健全性(H<sup>+</sup>不透過性)が温度の影響を受ける可能性が高いと推定されたので、本実験ではPPI加水分解活性のみを解析した。

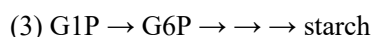
### 4. 研究成果

#### (a) H<sup>+</sup>-PPaseと5種の細胞質可溶性PPaseの特質の解明、遺伝子欠失、過剰・異所発現株での表現型とデンプン・糖蜜合成系への影響の解析

PPIを加水分解するH<sup>+</sup>-PPaseおよび可溶性PPaseを対象に、両酵素の生理機能に関する解析を進めた。H<sup>+</sup>-PPaseおよび可溶性PPaseの各単独破壊株、そしてH<sup>+</sup>-PPaseと可溶性PPaseとの二重破壊株を、アンモニウム欠失培地で栽培すると葉の組織細胞、および細胞壁が異常となり、本葉の細胞死が生ずる。関連遺伝子の欠失により、細胞内のPPI濃度を低く保つ機構が崩壊しているため、各組織の細胞分裂と細胞成長、窒素代謝等に異常が生じていると判断した。

こうした知見はPPI濃度が広く代謝機能に影響を与えることを示しており、本研究ではデンプン合成とPPI濃度との関連を解析した。緑色蛍光タンパク質(GFP)を連結したH<sup>+</sup>-PPase(野生型酵素同等の活性をもつ)を発現する株を用いて細胞特異性を解析したところ、デンプン粒を形成する三層のコルメラ細胞でほとんど発現していなかった。H<sup>+</sup>-PPaseが存在しないことは、PPI濃度が高く維持されていることとなる。その点も確認した。

コルメラ細胞は重力屈性機能を発揮するためにデンプン粒形成が生理学的に必須である。このコルメラ細胞ではH<sup>+</sup>-PPaseが発現していない点について考察する。光合成産物としてのショ糖がデンプン合成に利用される反応では、PPI濃度が高くなることにより、下記の一連の反応が進行すると推定される。



すなわち、上記(2)の反応をすすめるためにはPPIが必要であり、PPI濃度を維持するためにH<sup>+</sup>-PPaseの発現を抑制していると推定される。コルメラ細胞は根端成長ならびに重力屈性にも寄与する重要な細胞である。コルメラ細胞特異的なプロモーター(ADF9)を用いてH<sup>+</sup>-PPaseを異所発現させたところ、デンプン顆粒形成の抑制ならびに重力屈性の低下も観察された。この現象は、H<sup>+</sup>-PPaseの人為的異所発現によりPPI濃度が低下し、デンプン合成が抑制されたためと考えられる。コルメラ細胞でも、前述のようにPPIはタンパク質合成、デンプン合成等の高分子合成反応の副産物として供給される。デンプン粒が重力に従って細胞内を移動するためには、その移動を細胞空間を満たす液胞が止めてはならない。これらの点を総合的に考察すると、H<sup>+</sup>-PPaseが存在

させないことによるPPi濃度の上昇がデンプン合成を促進し、そして液胞酸性化の駆動力が低下し液胞が増大せず、重力屈性を支えるデンプン粒の細胞内での自由な移動を可能にしている、と推察できる。

もう一つの特異な細胞としてシロイヌナズナの花蜜腺に焦点を当てた。遺伝子発現量を解析したところ、蜜腺細胞ではH<sup>+</sup>-PPaseおよび可溶性PPase1が高発現していることが明らかになった。PPi濃度を低下させることで、糖がデンプン合成を促進するのではなく、単糖、二糖のまま貯留するためと解釈できる。その点を確認するために両遺伝子を欠失させたところ、蜜液(グルコース、フルクトース)が減少し、デンプンが増えた。したがって、正常な蜜腺細胞はデンプン形成を抑制するために、H<sup>+</sup>-PPaseとPPase1が高発現しているものと推定した。代謝の詳細な調節機構解明は今後の課題である。

上記の研究は、瀬上紹嗣博士(現 基礎生物学研究所助教)、木下悟博士(現 学術振興会海外学振PD、ドイツ在住)と共に進めた。研究成果をまとめた論文を作成中である。

#### (b) シロイヌナズナは土壌のPPiを吸収し利用する能力を保持しているか否かの検討

シロイヌナズナを対象として、PPiを吸収できる能力をもつか否かを検討した。H<sup>+</sup>-PPaseおよび細胞質PPaseの欠失株3種(H<sup>+</sup>-PPase欠失、PPase1欠失、二重欠失)と野生株を、通常培地(Pi濃度0.63 mM)、低Pi培地(Pi, 0.06 mM)、および無Pi培地に1 mM PPiを補充した培地(無Pi+PPi培地)で生育させた。野生株および3種の変異株いずれも、通常培地での生育がよく、低Pi培地は生育が抑えられ(野生株では新鮮重約50%に抑制)、無Pi+PPi培地での生育は強く抑制されていた(野生株では新鮮重が約15%に抑制)。そして、いずれの株においても1 mM PPi添加による効果は見られず、シロイヌナズナは培地PPiを吸収してリン酸源として利用する能力をもたないと判断した。

#### (c) PPi依存型プロテインキナーゼの探索と解析

植物細胞にATPの代わりにPPiをリン酸供与体とするプロテインキナーゼの探索のために、シロイヌナズナ磨砕液からの可溶性画分にATPあるいはPPiを添加し、タンパク質をSDS-PAGEで分離し、抗-リン酸化セリン、抗-リン酸化トレオニン抗体を用いてリン酸化タンパク質を検出し、ATPとPPiでの差異を確認する実験計画を立てた。コロナ禍で学生および研究補助者の実験時間に制約もかかり実験が遅れている。現在、実験を継続中である。

#### (d) H<sup>+</sup>-PPaseの分子多様性の検証： 温耐性植物がもつH<sup>+</sup>-PPaseの解析

H<sup>+</sup>-PPaseの分子多様性を検討するため、高温耐性のサボテン組織から精製した液胞膜を試料としてH<sup>+</sup>-PPase活性の温度特性を解析したところ、50°Cにおいて最大活性を示し、55°Cでも最大活性の66%の値を示した。比較対象とした温冷帯で栽培されるジャガイモのH<sup>+</sup>-PPase活性は40°Cで最大値であった。さらに、サボテン酵素は、50°Cに40分間静置しても活性の低下は見られないなど、サボテンのH<sup>+</sup>-PPaseが高温機能型、高温安定型であることが明確になった。個別酵素の高温安定性は、サボテンの高温耐性に寄与する基盤的な特徴の一つと考えられる。これらの成果は、地球温暖化状況での作物の高温適応を考える基盤となる。

なお、サボテン液胞膜におけるH<sup>+</sup>-PPaseの量は、比較的多いとされるヤエナリ等とほぼ同程度であった。成長の遅いサボテンであってもH<sup>+</sup>-PPaseを多く含むことは、単に細胞の高速成長を支えるだけでなく、液胞機能の維持とPPi濃度調節をとおして、幅広く生育と細胞機能維持に寄与していることを推測させる。なおサボテンH<sup>+</sup>-PPaseとヤエナリH<sup>+</sup>-PPaseのアミノ酸配列一致率は87%であった。全体的には、N端側の150残基ほどに配列のユニークさが見られた。そのことが立体構造にどのような変化をもたらすのかを、今後、分子構造シミュレーションにより検討していく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Uno, H., Tanaka-Takada, N., Hattori, M., Fukuda, M., and Maedhima, M.	4. 巻 132
2. 論文標題 A cell-wall protein SRPP provides physiological integrity to the Arabidopsis seed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Plant Research	6. 最初と最後の頁 145-154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10265-018-01083-6	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 Kimata, Y., Kato, T., Higaki, T., Kurihara, D., Yamada, T., Segami, S., Morita, M., Maeshima, M., Hasezawa, S., Higashiyama, T., Tasaka, T., and Ueda, M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Polar vacuolar distribution is essential for accurate asymmetric division of Arabidopsis zygotes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 2338-2343
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.1814160116	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 Kato, M., Tsuge, T., Maeshima, M., and Aoyama, T.	4. 巻 99
2. 論文標題 Arabidopsis PCaP2 modulates the phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate signal on the plasma membrane to attenuates root hair elongation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Plant Journal.	6. 最初と最後の頁 610-625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/tpj.14226	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 Asaoka, M., Inoue, S., Gunji, S., Kinoshita, T., Maeshima, M., Tsukaya, H., and Ferjani, A.	4. 巻 60
2. 論文標題 Excess pyrophosphate within guard cells delays stomatal closure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant & Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 875-887
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pcp/pcz002	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 Tanaka-Takada, N., Kobayashi, A., Takahashi, H., Kamiya, T., Kinoshita, T., and Maeshima, M.	4. 巻 60
2. 論文標題 Plasma membrane-associated Ca <sup>2+</sup> -binding protein PCaP1 is involved in root hydrotropism of <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant & Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 1331-1341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcz042	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 Sato, R., and Maeshima, M.	4. 巻 100
2. 論文標題 The ER-localized aquaporin SIP2;1 is involved in pollen germination and pollen tube elongation in <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 335-349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11103-019-00865-3	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 Rahman, A., Kawamura, Y., Maeshima, M., Rahman, A., and Uemura, M.	4. 巻 61
2. 論文標題 Plasma membrane aquaporins PIPs act in concert to regulate cold acclimation and freezing tolerance responses in <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant & Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 473-487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcaa005	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 Kim, A., Chen, J., Khare, D., Jin, J.Y., Maeshima, M., Zhao, Y., Marinoia, E., Hwang, J.-J., Lee, Y.	4. 巻 39
2. 論文標題 Non-intrinsic ATP binding cassette proteins ABCI19, ABCI20 and ABCI21 modulate cytokinin response at endoplasmic reticulum in <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Cell Report	6. 最初と最後の頁 473-487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00299-019-02503-0	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 Fukuda, M., Mieda, M., Sato, R., Kinoshita, S., Tomoyama, T., Ferjani, A., Maeshima, M., and Segami, S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Lack of vacuolar H <sup>+</sup> -pyrophosphatase and cytosolic pyrophosphatases causes fatal developmental defects in <i>Arabidopsis thaliana</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2020.00655	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 Hashizume, H., Kitano, H., Mizuno, H., Abe, A., Yuasa, G., Tohno, S., Tanaka, H., Ishikawa, K., Matsumoto, S., Sakakibara, H., Nikawa, S., Maeshima, M., Mizuno, M., and Hori, M.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Improvement of yield and quality of rice grain by periodic cold-plasma treatment with rice plants in paddy field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Processes & Polymers	6. 最初と最後の頁 e2000181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.202000181	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 Giovannoni, M., Marti, L., Ferrari, S., Tanaka-Takada, N., Maeshima, M., Ott, T., De Lorenzo, G., and Mattei, B.	4. 巻 44
2. 論文標題 The plasma membrane-associated Ca <sup>2+</sup> -binding protein, PCaP1, is required for oligogalacturonide and flagellin-induced priming and immunity.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant, Cell and Environment	6. 最初と最後の頁 3078-3093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/pce.14118	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 Sakamoto, Y., Kawamura, A., Suzuki, T., Segami, S., Maeshima, M., Polyn, S., De Veylder, L., and Sugimoto, K.	4. 巻 34
2. 論文標題 Transcriptional activation of auxin biosynthesis drives developmental reprogramming of differentiated cells.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Plant Cell	6. 最初と最後の頁 4348-4365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plcell/koac218	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 Nakanishi, Y., Kawashima, T., Naganawa, M., Mikami, T., Maeshima, M., and Ishiguro, S.	4. 巻 63
2. 論文標題 Speedy plant genotyping by SDS-tolerant cyclodextrin-PCR.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant & Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 1025-1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcac093	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 前島正義	4. 巻 22
2. 論文標題 液胞膜プロトンポンプ：高分子合成の副産物を利用するエネルギー変換酵素	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 中部大学 生物機能開発研究所 紀要	6. 最初と最後の頁 2-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐藤良介、佐藤心郎、澤田有司、平井優美、榎元廣文、朝比奈雅志、堀部貴紀、柘植尚志、前島正義
2. 発表標題 高い環境適応性をもつサボテンの代謝物の組成と組織内分布
3. 学会等名 日本植物生理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬上紹嗣, 福田茉由, 三枝毬花, 巴山貴晶, 木下悟, Ali Ferjani, 前島正義
2. 発表標題 代謝の変動によるピロリン酸の濃度変化はピロホスファターゼの協働により抑制される
3. 学会等名 日本植物生理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬上紹嗣、島田貴士、嶋田知生、西村いくこ、前島正義
2. 発表標題 GFPやTagRFPによるオイルボディ・液胞形態と植物生長への人為的影響
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中奈月、小林啓恵、高橋秀幸、Liam Dolan、前島正義
2. 発表標題 細胞膜カルシウム結合分子PCaPを介した細胞内情報の新しい変換機構の解明
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ueda, M., Kimata, Y., Kato, T., Higaki, T., Kurihara, D., Segami, S., Terao-Morita, M., Maeshima, M., Hasezawa, S., Higashiyama, T.
2. 発表標題 Live-cell imaging of the polarization dynamics of plant zygote: polar vacuolar distribution is essential for accurate asymmetric division.
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中奈月、水谷未耶、奥田慎平、西浜竜一、河内孝之、前島正義、Liam Dolan
2. 発表標題 新規情報伝達タンパク質PCaP1 のメリステム形成への影響
3. 学会等名 日本植物生理学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬上紹嗣, 福田茉由, 三枝毬花, 巴山貴晶, 木下悟, Ali Ferjani, 前島正義
2. 発表標題 代謝の変動によるピロリン酸の濃度変化はピロホスファターゼの協働により抑制される
3. 学会等名 日本植物生理学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤良介、安藤拓海、吉田雄一郎、鈴木孝征、三田薫、堀部貴紀、柘植尚志、高田-田中奈月、前島正義
2. 発表標題 サボテン液胞膜H <sup>+</sup> -ピロホスファターゼの酵素学的特質と組織分布.
3. 学会等名 日本植物生理学会年会
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 分担者	瀬上 紹嗣  (Segami Shoji)  (00765935)	基礎生物学研究所・生物進化研究部門・助教   (63904)	
研究 分担者	高田 奈月 (田中奈月)  (Tanaka-Takada Natsuki)  (00824070)	名古屋大学・高等研究院(農)・特任助教   (13901)	

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
---------	---------