

2024年3月14日
国立大学法人 東京農工大学
学校法人 明治大学
学校法人 中部大学

植物ホルモン「アブシジン酸」が植物の葉を老化させる 仕組みを解明

国立大学法人東京農工大学大学院農学研究院の梅澤泰史教授、大学院生物システム応用科学府博士後期課程の李揚丹氏らをはじめとする国際共同研究グループは、植物が乾燥ストレスを受けた際に、植物ホルモンの一つであるアブシジン酸（ABA）が葉を老化させるメカニズムの一端を解明しました。MBD10 と呼ばれるタンパク質が、細胞内で ABA の情報を伝える上で重要な役割を担うことを発見し、さらに MBD に情報を伝えるタンパク質も明らかにしました。今回の研究は、なぜ干ばつ時に植物の葉の老化が早まるのかという疑問に答えるとともに、乾燥時でも葉を緑に保つことが可能な植物などへの応用につながることで期待されます。

本研究成果は、2024年3月13日に植物科学分野の学術誌である『The Plant Journal』誌へ掲載されました。

論文タイトル： Group C MAP kinases phosphorylate MBD10 to regulate ABA-induced leaf senescence in Arabidopsis

URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tpj.16706>

背景：近年、世界人口の増加や経済発展に伴って、食料需要が高まっています。同時に、地球温暖化などの影響で、干ばつ等による農業被害が深刻化しています。植物が長期間水不足にさらされると、植物ホルモンの一種であるアブシジン酸（ABA）（注1）が蓄積され、乾燥に耐えるための様々な応答が引き起こされます。葉の老化はその一つで、これは水分や栄養素を花や種子などの重要器官に優先的に供給し、次世代につなげるための生存戦略であると考えられています（図1）。

ABA が植物細胞に作用するときには、細胞内で ABA の情報を伝える仕組み（シグナル伝達）が

働いています。ABA のシグナル伝達経路では、タンパク質リン酸化酵素（注 2）である SnRK2（注 3）が中心的な役割を果たしており、SnRK2 は様々なタンパク質をリン酸化することで ABA 応答を誘導することがわかっています。近年の研究から、SnRK2 が乾燥時の葉の老化に関わることがわかってきていましたが、詳細な分子機構は解明されていませんでした。

研究体制：本研究は、国立大学法人東京農工大学大学院農学研究院生物システム科学部門の梅澤泰史教授、同大学院生物システム応用科学府の李揚丹氏、神山佳明博士、山下昂太氏、片桐壮太郎氏と高瀬緋奈乃氏、明治大学 農学部の川上直人教授、大谷真彦博士と東城僚氏、米国ミズーリ大学 生化学部門の Scott C. Peck 教授と Gabrielle E. Rupp 氏、および中部大学 応用生物学部の鈴木孝征教授から構成される国際共同研究グループによって実施されました。本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (B) (23H02497)、学術変革研究 (A) (23H04192)、およびムーンショット型農林水産研究開発事業 (20350427) の支援を受けて行われたものです。

研究成果：本共同研究グループは、MBD タンパク質（注 4）と呼ばれる種類のタンパク質の中から、MBD10 と呼ばれるタンパク質が ABA に応答してリン酸化修飾を受けることをヒントに、植物の ABA 応答や乾燥ストレス応答に何らかの形で関わっているのではないかと考えて、研究を進めました。

まず、MBD10 を過剰に発現させたシロイヌナズナを作成したところ、野生型に比べて葉の老化が極端に早まることがわかりました（図 2）。このことから、MBD10 は葉の老化に関係するのではないか、と推測しました。次に、MBD10 遺伝子を欠損させた *mbd10* 変異体を調べてみると、老化が抑制されたことから、MBD10 が ABA 誘導性の葉の老化を促進する働きを持つことを突き止めました（図 2）。

MBD10 はもともとリン酸化修飾を受けるタンパク質として同定されたため、次に MBD10 のリン酸化と葉の老化の関係について調べました。すると、MBD10 がリン酸化されることが葉の老化の促進に必要である、ということがわかりました。次の疑問は、MBD10 をリン酸化する酵素は何か、ということでした。当初は SnRK2 が MBD10 を直接リン酸化するのではないかと考えましたが、実験の結果その可能性は否定されました。さらに解析を進めた結果、別のタンパク質リン酸化酵素である MAP キナーゼ (MPK1・2・7・14)（注 5）が MBD10 をリン酸化することがわかりました。

以上の結果から、乾燥ストレス時に植物の中で ABA が合成されると、SnRK2、MAP キナーゼおよび MBD10 の 3 種のタンパク質が連携して、葉の老化を促進するというメカニズムを明らかにすることができました（図 4）。今回の発見は、乾燥ストレスと植物の生長制御に新しい知見をもたらすものであり、将来的には農業生産の持続可能性の向上などにつながることを期待されます。

今後の展開：

- MBD10 がどのような分子メカニズムを介して ABA 誘導の葉の老化を促進するのか、分子レベルで明らかにする必要があります。
- 今回発見した MAP キナーゼや MBD10 が、他のストレス応答（例えば傷害や病害）による老化に関与している可能性を検証します。
- MAP キナーゼや MBD10 を用いて、乾燥ストレス時における植物の葉の老化を人為的に制御できないか検討します。

用語解説：

注 1) アブシジン酸 (ABA)

植物ホルモンは、比較的低濃度で作用する植物の生長調節物質であり、アブシジン酸 (ABA) はその 1 つである。英語名 abscisic acid、分子式 $C_{15}H_{20}O_4$ で表される。代表的な ABA の生理作用として、気孔の閉鎖、乾燥耐性の獲得、葉の老化、種子の成熟や種子休眠の維持などがある。

注 2) タンパク質リン酸化酵素

タンパク質をリン酸化する酵素の総称。ATP 一分子のリン酸基を基質となるタンパク質に付加することで、そのタンパク質の立体構造や相互作用に影響を及ぼし、酵素活性や安定性、細胞内局在など

のタンパク質機能を調節する。タンパク質のリン酸化は、細胞内のシグナル伝達的手段として一般的に見られる翻訳後修飾である。

注3) SnRK2 (SNF1-related protein kinase 2)

タンパク質リン酸化酵素の1種で、シロイヌナズナには10個のSnRK2遺伝子が存在する。そのうち、3つ(SRK2D、SRK2E、SRK2I)がABAシグナル伝達の中核因子として機能する。

注4) MBD タンパク質 (methyl-CpG-binding domain proteins)

MBDタンパク質は、DNA上のメチル化されたシトシンに特異的に結合するタンパク質として同定された。植物のMBDタンパク質は、遺伝子発現の調節や染色体の安定性などの重要な生物学的プロセスに関与することがわかっているが、MBDタンパク質がすべてDNAメチル化と関係するとは限らない。

注5) MAP キナーゼ

分裂促進因子活性化プロテインキナーゼ (Mitogen-Activated Protein Kinase、MAPK) は、タンパク質リン酸化酵素の一種。MAPキナーゼは多様な生物学的プロセスに関与しており、細胞の外部環境への応答に重要であることが知られている。

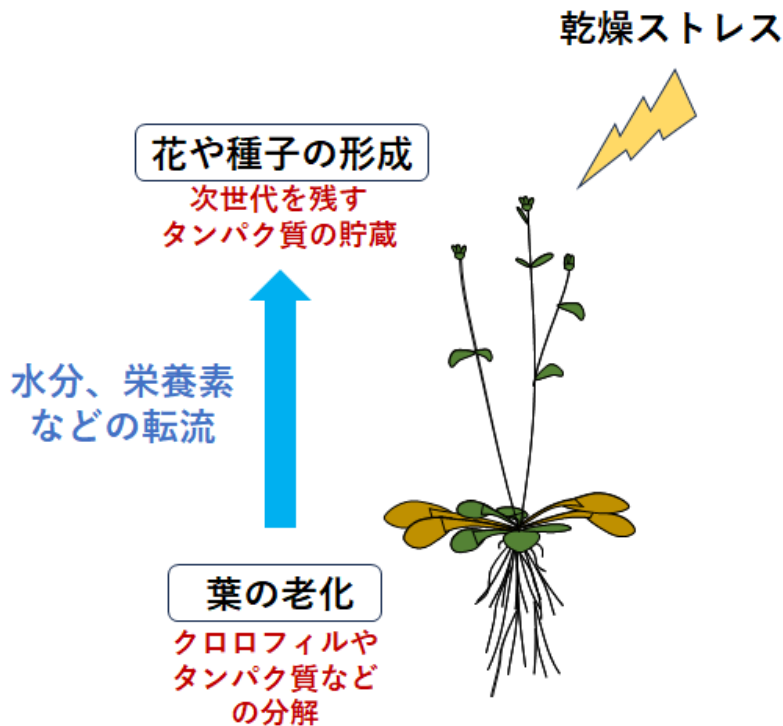


図1: 乾燥ストレスを受けた植物の葉の老化

乾燥ストレス時における葉の老化は、古い組織から新しい組織へ水分や栄養素を配分する植物の生存戦略の一つと考えられている。

MBD10過剰発現植物

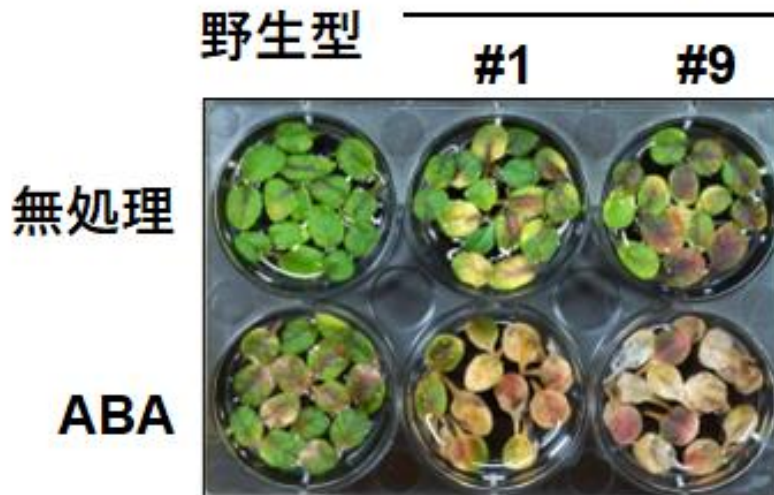


図2：MBD10 過剰発現植物では老化が早くなる

野生型の植物に ABA を処理すると、老化が早まることが観察される（左下）。一方、MBD10 を過剰発現させた植物では、無処理でも老化が早く、ABA を処理するとそれがより顕著に表れるようになった。これらの結果から、MBD10 は老化を促進する働きを持つことが示唆された。

MBD10ペプチド ATpTPTPDKEPLLK

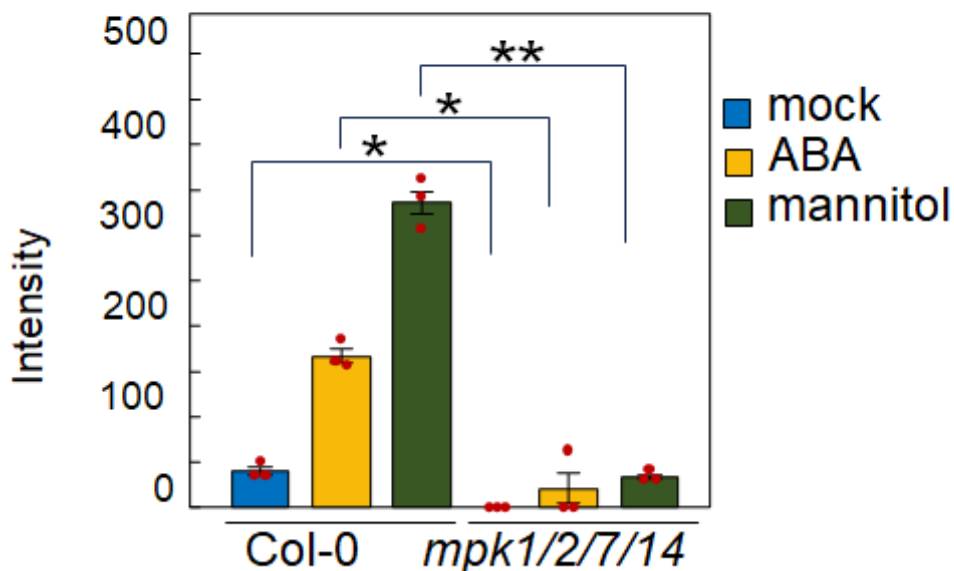


図3：MAP キナーゼの変異体では MBD10 がリン酸化されなくなる

質量分析計を用いて、MBD10 のリン酸化レベルを分析した。縦軸はリン酸化レベルを示す。MBD10 は、野生型 (Col-0) では ABA 処理や浸透圧 (マンニトール) 処理によってリン酸化される。一方、タンパク質リン酸化酵素の一種である MAPK を 4 つ破壊した変異体 (*mpk1/2/7/14*) ではリン酸化されないため、これらの MAPK が MBD10 をリン酸化していることが推測できる。

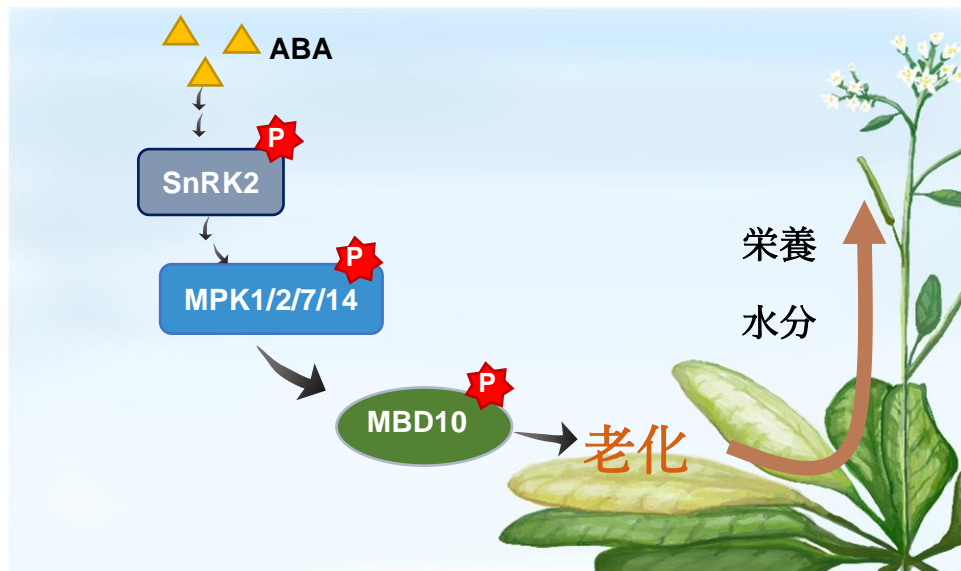


図4:本研究で明らかとなった葉の老化のメカニズム

植物が乾燥ストレスを受けると、ABAが合成され、SnRK2が活性化する。SnRK2は転写制御を介してMPK1/2/7/14に影響を与えることが、過去の研究から明らかになっている。今回の研究では、MAPKがMBD10をリン酸化することで老化を促進することが明らかとなった。

◆研究に関する問い合わせ◆

東京農工大学大学院農学研究院
 生物システム応用科学府 教授
 梅澤 泰史 (ウメザワ タイシ)
 TEL/FAX : 042-388-7364
 E-mail : taishi@cc.tuat.ac.jp