

新しい気孔閉鎖メカニズムを発見

◎共同発表者の氏名（所属）

岩井純夫（鹿児島大学農学部 教授）

赤池孝章（熊本大学大学院生命科学研究部 教授）

山田直隆（九州大学大学院農学研究院 助教）

◎発表のポイント

1. 気孔閉鎖を司る新物質を発見しました。
2. 気孔の開閉を制御することで、農業生産の向上、乾燥に強い作物の育成、大気中の二酸化炭素の削減につながると期待されます。

◎研究成果の概要

植物葉の表面には気孔（[図1](#)）^{（注1）}と呼ばれる小さな孔があり、この孔を通じて植物は二酸化炭素を取り込み、酸素と水分を放出します。その開閉は複雑かつ精緻に制御されており、世界中で多くの研究者がその仕組みを解明しようとするのぎを削っています。この度、鹿児島大学農学部、熊本大学大学院生命科学研究部（医学）と九州大学大学院農学研究院からなる研究グループは、新しい気孔の開閉メカニズムを発見しました。

植物は乾燥するとニトロ-cGMP^{（注2）}という化合物の生成を誘導し、明所での気孔閉鎖を誘発しました。一方、ニトロ化^{（注3）}されていないcGMP^{（注4）}には気孔閉鎖能力はありませんが、暗所での気孔開口能力を持っていました。このように、cGMPとニトロ-cGMPは孔辺細胞では別の役割を果たしていることを明らかにしました。

この成果により、気孔の開閉を制御する第一歩が築かれ、大気中の二酸化炭素削減、農業生産性の向上や乾燥に強い作物育成など、さまざまな応用展開が期待できます。

◎研究成果の内容

気孔は植物葉表面に存在する小さな孔で、この孔を通して光合成に必要な二酸化炭素が取り入れられる一方、水と酸素を放出します。この開閉がうまくいか

ないと植物の生存に関わるため、環境の変化に応じて気孔は素早く開閉を繰り返しています。環境の変化を細胞内へ伝えるために様々な化合物が使われていますが、その中でも、活性酸素^(注5)と一酸化窒素(NO)^(注6)が現在注目されています。従来、活性酸素は細胞に障害をもたらす悪玉と思われていましたが、実は、様々なシグナルを伝える生存に必須な分子だということが分かってきました。活性酸素はヒトでは各種疾病や病態を引き起すばかりでなく、細胞保護、細胞分化、増殖、細胞の制御などに密接に関わりあっています。植物でも活性酸素は重要な役割を果たしており、根の発達、種子発芽、病害抵抗性誘導の発現や気孔閉鎖の重要な要因です。乾燥、二酸化炭素、菌類の感染、アブシジン酸^(注7)などの環境要因によって気孔は閉じますが、いずれの場合もNOと活性酸素が二次メッセンジャー^(注8)として働いています。

本研究グループの一員である熊本大学グループはNOと活性酸素からニトロ-cGMPという新規化合物が動物細胞内で生成され、活性酸素・NOシグナルを細胞内で伝達する役割を担っていることを明らかにしておりますが、今回、研究グループはニトロ-cGMPが気孔閉鎖に果たす役割について検討しました。まず、乾燥ホルモン・アブシジン酸で処理したシロイヌナズナ葉中に本化合物が存在することを確認しました(図2)。植物でこの化合物の存在が確認されたのは初めてのことです。次いで、アブシジン酸によって生成誘導される活性酸素とNOが本化合物の生成を誘導することを明らかにしました(図3)。今まで、植物での活性酸素シグナルとNOシグナルとの関係は明らかではありませんでしたが、ニトロ-cGMPでその二つが出会い統合されることが明らかになりました。ニトロ-cGMPはカルシウムを介してアニオンチャンネル^(注9)を活性化し、孔辺細胞(図1)からアニオンを流出させて気孔を閉じることも分かりました(図4)。

ニトロ化されていない裸のcGMPには明所での気孔閉鎖能力はありませんが、暗所では逆に気孔を開かせることができます。ニトロ化されたcGMPには気孔を閉鎖することは出来ませんが、気孔開口能力はありませんでした。このように、同じような化合物でありながらニトロ化したものとならないものとは、孔辺細胞では全く逆の働きをしているのです。

◎今後の展開

本研究成果は、気孔の開閉を決める要因がcGMPのニトロ化にあることを明らかにしたものです。気孔の開閉を調節することができれば、植物の光合成能力と水分損失を制御できる可能性が開け、将来的には、食料生産性の向上、乾燥に強い作物の開発や大気中の二酸化炭素削減につながるものと期待されます。

◎発表論文

タイトル : Nitrated cGMP Modulates Guard Cell Signaling in *Arabidopsis*

著者 : Takahiro Joudoi, Yudai Shichiri, Nobuto Kamizono, Takaaki Akaike, Tomohiro Sawa, Jun Yoshitake, Naotaka Yamada and Sumio Iwai

発表雑誌：The Plant Cell オンライン版 2013年2月8日掲載

◎研究グループ

鹿児島大学農学部（岩井純夫教授）、熊本大学大学院生命科学研究部（赤池孝章教授）と九州大学大学院農学研究院（山田直隆助教）との共同研究として実施しました。

◎研究助成

本研究は文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究（研究領域提案型）」『活性酸素シグナル伝達機能』の助成を受けて行われました。

◎参考資料

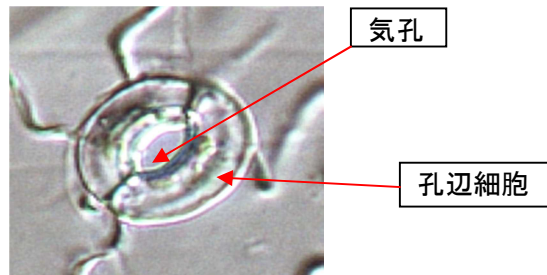


図1 シロイヌナズナの気孔

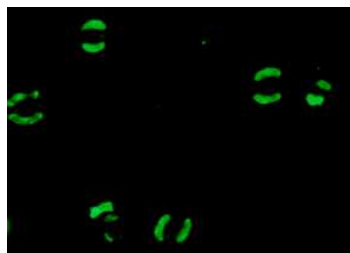


図2 免疫染色^(注10)

孔辺細胞に存在する8-ニトロ cGMPが緑色に染まっている。

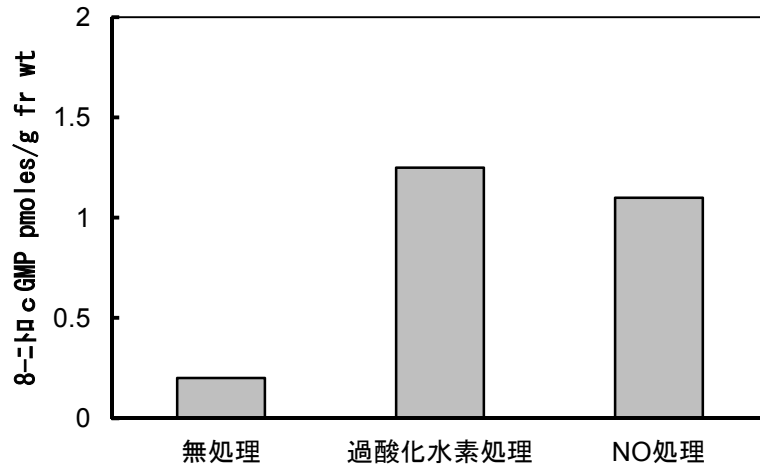


図 3 過酸化水素およびNO処理による 8-ニトロ cGMP 含量の増加
LC-MS/MS^(注1) により測定

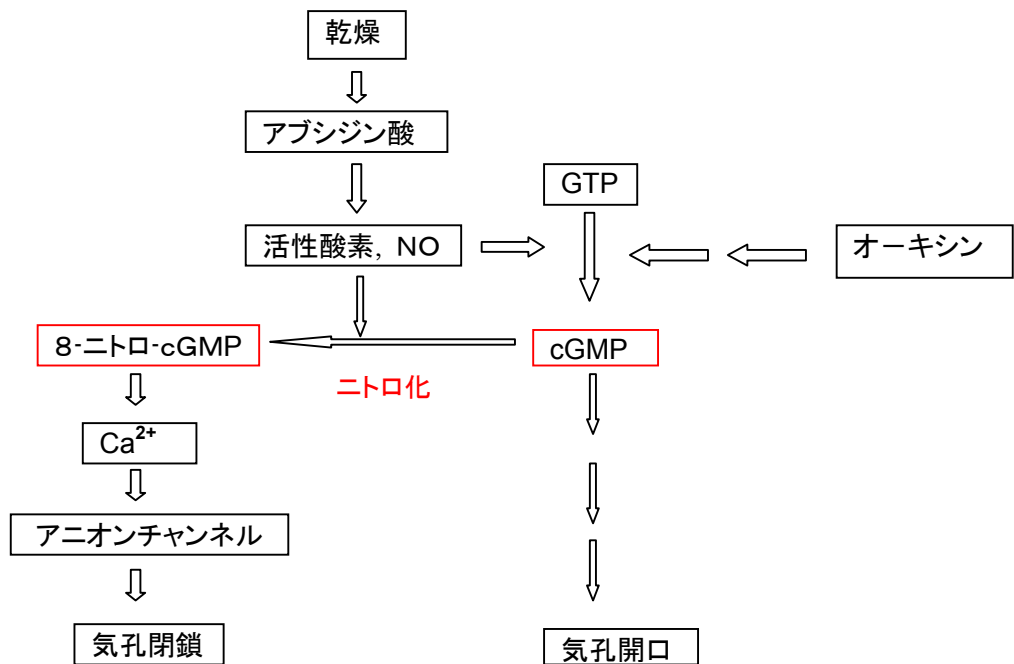


図 4 8-ニトロ cGMP シグナル伝達モデル

[用語解説]

(注1) 孔辺細胞/気孔

植物葉、茎などの表面に空いている小さな孔を気孔と言い、それは三日月状の一对の孔辺細胞で構成されている(図1)。孔辺細胞の浸透圧(膨圧)が高いと気孔は開き、下がると気孔は閉じる。この孔を通じて、植物は二酸化炭素を取り込み、酸素と水分を放出する。また、病原菌もここから侵入する。

(注2) ニトロ - cGMP

cGMP(注4)がニトロ化(注3)されたもの。共同研究者の熊本大学グループによって2007年に動物細胞で発見。

(注3) ニトロ化合物

ニトロ基(-NO₂)が付いた化合物。例、ニトログリセリン。
ニトロ基がつくことをニトロ化という。

(注4) cGMP : 環状グアノシンリン酸(cyclic guanosine monophosphate)

グアノシン三リン酸(GTP)からグアニルシクラーゼによって体内で作られる。血管平滑筋の弛緩や目の情報伝達に関わっている。グアニルシクラーゼは一酸化窒素(NO)によって活性化し、cGMPの生成が誘導される。ED治療薬として知られるバイアグラはcGMPの分解を阻害することが知られている。本研究では、植物グアニルシクラーゼがNOによって誘導される気孔閉鎖に関係していることも明らかにした。

(注5) 活性酸素

酸素が還元されて生じた活性の高い一連の化合物。ヒドロキシルラジカル(・OH)、スーパーオキシドアニオン(O₂⁻)などが含まれ、広義には一酸化窒素も含まれる。生体に非特異的な損傷をもたらす毒性化合物。しかし、低濃度ではシグナルを伝達する働きがあり、近年、その作用が注目されている。

(注6) 一酸化窒素(NO)

窒素(N)と酸素(O)が一つずつ結合した化合物。血管平滑筋の弛緩因子として発見され、その作用の発見者に1998年ノーベル賞が授与された。生体内でシグナル伝達に関与する。

(注7) アブシジン酸

乾燥に応答して植物が体内で生成する植物ホルモンの一種。気孔の閉鎖誘導、種子の休眠や乾燥耐性を誘導する。

(注8) 二次メッセンジャー

細胞外シグナル(一次メッセンジャー、例:アブシジン酸)に応答して細胞内で形成される分子。細胞内へシグナルを伝達する。

（注9）アニオンチャンネル

細胞膜にあるアニオン（負に荷電した分子、陰イオン）を通す狭い透過孔。この開閉でアニオンの細胞への流入出が制御される。

（注10）免疫染色法

抗体を用いて特定の化合物（抗原）の生体組織での存在を明らかにする方法。本研究では、8-ニトロcGMPに対する抗体を用いて、気孔を構成する孔辺細胞に8-ニトロcGMPが存在することを明らかにした。

（注11）LC-MS/MS法（液体クロマトグラフィー・質量分析法）

試料を液体クロマトグラフィー（LC）で分離した後、直結した質量分析器（MS）で質量毎に分離し、更に、特定のイオンを解離させて質量を測定する方法。物質の同定および定量が高感度でできる。本研究では、8-ニトロcGMPの同定および定量に用いた。

（注12）The Plant Cell

米国植物科学会発行 インパクトファクター 10.224（5年間）
植物科学関係誌では最もインパクトファクターが高い。

◎共同プレス発表に関する問い合わせ先

鹿児島大学農学部 岩井純夫教授

Tel: 099-285-8556

Mail: smoiwai@agri.kagoshima-u.ac.jp

[取材に関する窓口]

鹿児島大学広報センター

係員 有川 奈々絵

Tel: 099-285-3852 Fax: 099-285-3854

Mail: sbunsho@kuas.kagoshima-u.ac.jp