

CASE 1

葉の初期発生を制御する
WOX4遺伝子

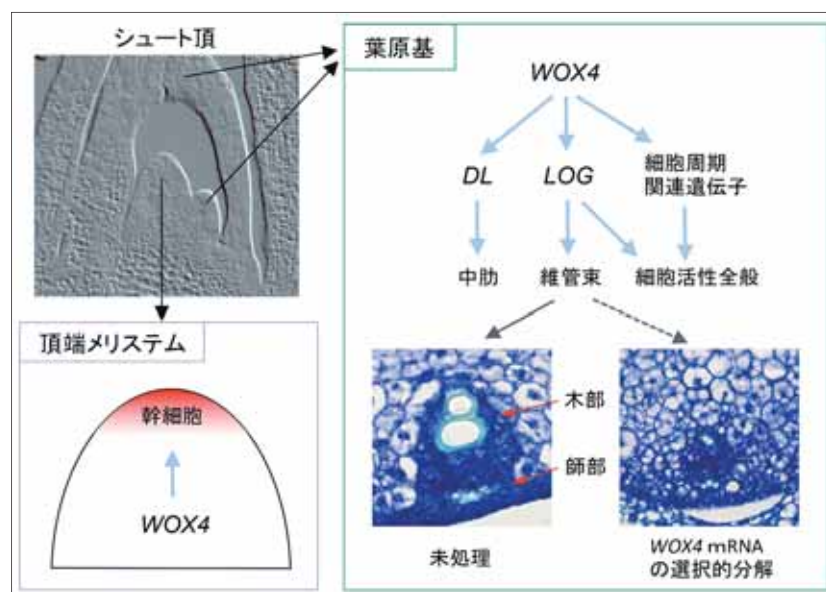
植物の葉は私たちの生活に潤いを持たせてくれると同時に、光合成を行い、生物界全体を循環する物質の源をつくり出す。

葉には、光合成を行う葉肉組織や水分や物質の輸送に関わる維管束組織など、さまざまな組織が存在する。

これらの組織は、未分化性の高い葉の原基細胞から分化するが、

この過程に関わる葉の初期発生の制御機構に関しては、未解明のことが多い。

私たちは、WOX4という遺伝子が、イネの葉の初期発生を制御する重要な鍵因子であることを明らかにした。



図：頂端メリステム（左下）と葉の初期発生における（右）WOX4のはたらき。WOX4は、DLやLOGなどのいろいろな遺伝子を制御することにより、葉の初期発生の鍵遺伝子としてはたっている（ブルーの矢印は、正の作用を示す）。右下の写真は、WOX4の発現を3時間阻害するだけで、維管束を構成する木部や師部の発達が大きく妨げられていることを示している。

植物と動物の発生や形態形成の機構は大きく異なっている。動物では、多くの場合、胚発生時に分化した組織や器官がそのまま成体の一部となる。これに対し、植物では、胚発生時に作られた幼植物（芽生え）は成体とは大きく異なっており、成長した植物の葉や茎などの器官は、胚発生後に、頂端メリステム^{注1)}（分裂組織）から分化する。メリステムから葉の原基が形成されると、細胞の分化が起こり、葉肉や維管束などの組織が形成される。

私たちは、イネ (*Oryza sativa*) を単子葉類のモデル生物として研究しており、数年前に、WOX4という遺伝子が頂端メリステムの幹細胞を維持するために必須であることを解明した。今回の研究では、WOX4が葉の初期発生においても、重要な鍵因子としてはたっていることを明らかにした。

幹細胞が維持されないと植物は、成長できず枯死してしまう。したがって、幹細胞維持に必須な

WOX4遺伝子が、葉の発生にどのようなはたらいているのかを調べるには工夫が必要である。そのため、私たちはWOX4のmRNAを選択的に分解することを目的として、薬剤処理によってRNAサイレンシング^{注2)}を誘導する実験系を確立した。この実験方法では、処理時にすでに葉原基として分化している葉を解析対象とすることができるので、WOX4のメリステムにおける機能と葉における機能を切り分けて調べることができる。

発芽5日後の植物に対してWOX4のmRNAの選択的分解を3時間誘導し、さらに通常条件下で5日間育てると、維管束や中肋^{注3)}の組織分化が阻害され、葉全体の成長も低下することが判明した。また、WOX4のmRNAの選択的分解は、維管束分化や中肋形成を制御する主要遺伝子の発現低下を引き起こした。さらに、WOX4は、細胞増殖に関わるサイトカニンというホルモンの合成系遺伝子の発現制御を通して、細胞活性にも影響を与えていることが判明した。これらの結果は、WOX4遺伝子が葉の組織分化や細胞増殖を制御する主要遺伝子のさらに上位に位置し、葉の初期発生の中核的遺伝子としてはたっていることを示している（図）。

一方、シロイヌナズナでは、WOX4遺伝子は維管束幹細胞を制御していることが判明しているものの、イネのようなマルチな機能は報告されていない。イネにおいてWOX4が幹細胞の維持と葉の初期発生をそれぞれどのように制御しているのか、その分子機構を解明し、被子植物の進化の過程でWOX4遺伝子がどのように機能分化してきたのかを明らかにすることが、今後の課題である。

本研究は、Yasui et al., *PLOS Genet.* 14: e1007365 (2018) に掲載された。

(2018年4月26日プレスリリース)

注1) 茎などの先端にある植物の発生に重要な組織で、ドーム上の構造をしている。ドームの頂端部には幹細胞が常に維持されており、幹細胞の分裂によって増えた細胞は側生領域へと押し出され、葉や花器官などを構成する細胞へと分化する。

注2) ターゲットとする遺伝子の一部を含む特殊なRNAを発現させ、人為的にその遺伝子の発現量を低下させる方法。

注3) イネなどの薄く細長い葉が直立するために必要な、葉の中央部にあるやや太く堅固な組織。

CASE 2

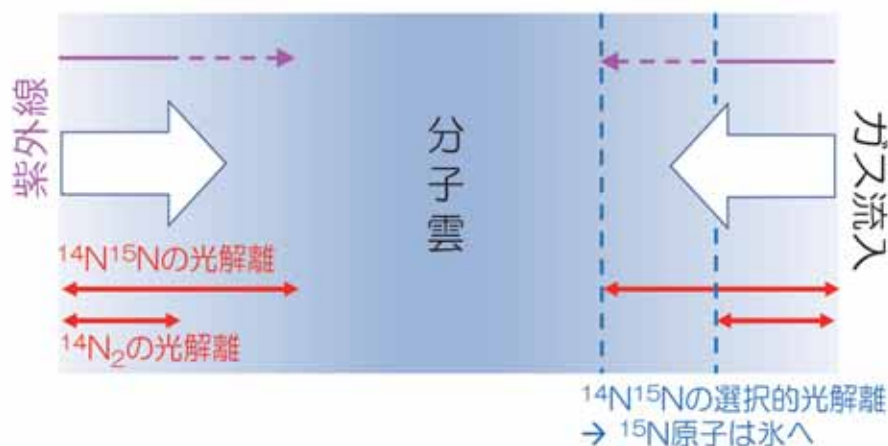
彗星にはなぜ重い窒素が多いのか？
なぞを解く鍵は太陽が生まれる前にあった！

元素には中性子数の異なる安定同位体が一定の割合で存在する。ところが、分子に含まれる同位体の比が、元素の同位体比と異なる現象がある。これは同位体分別とよばれ、それらの分子や物質が生成した反応や環境を探る指標となる。星形成の現場である星間分子雲や、太陽系形成時の記憶を残す太陽系始原物質でもさまざまな同位体分別がみられる。このうち窒素についての同位体分別は、その原因がこれまで不明であった。謎を解く鍵は分子雲の形成過程にあった。

窒素のほとんどは質量数（陽子数と中性子数の和）が14であるが、中性子を1つ多く含む質量数15の安定同位体も太陽系には約440分の1の割合で存在する^{注1)}。同位体が同じ確率で分子に取り込まれるならば、分子の同位体比（たとえば $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比）は元素同位体比と等しくなるはずである。しかし太陽系始原物質である彗星では $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比は150分の1であり ^{15}N に富んでいる。いっぽう、星間分子雲において、窒素を含む主要分子の1つである窒素分子では、 ^{15}N が少ない^{注2)}。

一般に、分子の同位体比が元素の同位体比と異なる同位体分別には2つの原因が考えられている。1つ目は分子のゼロ点振動エネルギーの差と環境の温度に起因するものである。重い同位体を含む分子は振動エネルギーが低いため、低温で同位体交換反応が起きると、分子は重い同位体に富むようになる。2つ目の原因は、星からの紫外線による解離反応である。分子雲表面に星からの紫外線が照射すると、存在比の高い分子は自己遮蔽効果によりごく表面に存在する分子だけが壊される。いっぽう、存在比の少ない同位体分子は自己遮蔽が効きにくく、より深い領域まで解離が進む（図）。これを選択的光解離という。

図：分子雲形成過程での選択的解離と同位体分別



彗星が ^{15}N に富むことは定性的には低温での交換反応を示唆し、分子雲の窒素分子が ^{15}N に乏しいことは選択的光解離を示唆する。しかし、実際に交換反応の効果を取り入れた数値計算を行うと、観測されているほど ^{15}N に富む氷をつくることは難しい。また、窒素分子には選択的光解離が確かに効くが、分子雲表面の薄い領域でしか起こらず、なぜ観測されている分子雲領域の全体で ^{15}N に乏しいのかは謎であった。

そこで筑波大学計算科学センターの古家健次助教とわれわれは、分子雲の形成段階を考えた。分子雲は、銀河内の星間ガスが超新星爆発などで掃き寄せられて形成する。このガス内での分子生成を選択的光解離を考慮して数値計算で調べると、すべてのガスは必ず選択的光解離領域を通るため、分子雲全体で窒素分子は ^{15}N に乏しくなることが示された。さらに、光解離で生じた ^{15}N 原子は星間塵表面でアンモニアなどに変化し、 ^{15}N に富む氷を生成することも分かった。

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（通称ALMA望遠鏡）の完成により現在、惑星系形成の現場である原始惑星系円盤においても、ガス分子の窒素、水素などの同位体比観測が進んでいる。今後、太陽系始原物質で測られている固体の同位体比とガス分子観測から分かる気相の同位体比を組み合わせると、惑星系形成過程に迫るさらなる研究の進展が期待できる。分子雲での同位体分別過程の理解はその土台となる。

本研究成果は、K. Furuya & Y. Aikawa, *The Astrophysical Journal* 857,105 (2018) に掲載された。

(2018年4月27日プレスリリース)

注1) 現在の星間空間では $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比は200-300分の1と推定されている。太陽系の元素同位体比との違いは、太陽系誕生後46億年の間に起こった銀河系内の星々の元素合成の影響であると考えられている。

注2) 窒素分子 N_2 にプロトンが1つ付いた N_2H^+ を観測する。

CASE 3

力ミナリ雲の中に隠れた天然の加速器の破壊

けたたましく光と轟音を放つ雷。

その発生源である雷雲が数分にわたって、高いエネルギーをもつ放射線を発していることが、ここ30年の観測で分かってきた。雷雲内の強い電場が電子を光速近くまで加速しており、まさに「天然の加速器」といえる。

われわれは10年以上続けてきた放射線の地上観測に加え、地上での電場測定、雷から発せられる電波の測定を組み合わせることで、雷放電^注が「天然の加速器」を破壊していたことを明らかにした。

「加速器」というと素粒子・原子核実験や医療診断・放射線治療で用いられるもの思い浮かぶ。レントゲン写真は、真空中で高電圧を印加して加速した電子から得られるX線を利用しており、身近な加速器の例である。では高い電圧が印加されれば自然界、たとえば雷雲の中でも電子が加速されるのではないか。この素案は実に90年以上前の1925年にウィルソン(C.T.R. Wilson)によって発表されている。その予言通り、航空機で雷雲の中に入ったり、雷の多い高山、あるいは雷雲が地面に接近する冬の北陸地方に検出器を置くことで、雷雲の中で発せられる放射線、とくにX線・ガンマ線が観測されてきた。驚くべきは、これらの放射線が数秒から数分、まれに数十分も継続することである。

濃密な大気中で電子を加速させるのは容易ではない。電子は大気中の原子とぶつかって他の電子を叩き出す電離損失により、すぐに減速してしまう。しかし、雷雲の中に電離損失に打ち勝つだけの強い電場が存在していれば電子は加速され、ま

た電離損失による二次電子の一部も加速され、という具合になだれ増幅する。加速された電子は、周辺の原子核にぶつかって進路が曲げられる際に、制動放射によってX線・ガンマ線を放出する。

2017年2月、能登半島の先端部、石川県珠洲市に設置した放射線検出器が、1分ほどの放射線バーストをとらえた。このとき、同じ観測地に設置した電場計が帯電した雲、すなわち雷雲の通過をとらえた。雷雲がサーチライトのように制動放射で地上を照らしながら、冬の季節風に乗って流れてきたのだ。そして雷雲が検出器のほぼ真上に差し掛かったときに、その放射線バーストは突如として消失してしまった。

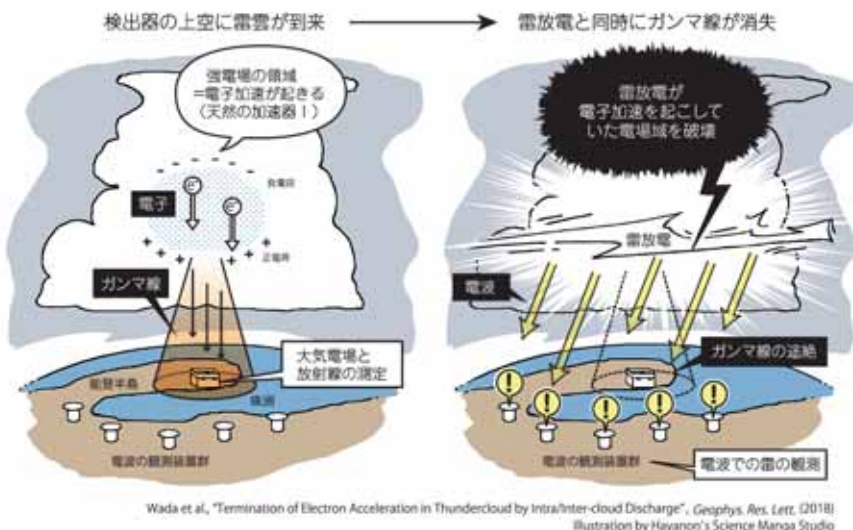
このときに富山湾の5箇所に設置した電波受信機が雷を観測した。放電によって電流が流れば、それに伴いさまざまな波長の電波が放出される。5箇所の受信機に到達するまでの時間差を用いると、放電の位置を評定できる。放電路は東西に伸びた帯状の雷雲に沿って、西から東に向かって70kmも進展しており、その途中で放射線の観測地の南0.7kmの地点を通過している。この通過時刻と放射線バーストの消失時刻が一致していた。このことから放電が「天然の加速器」を構成する強電場の領域を通過し、加速器を破壊したことが明らかになった。

放射線と電場や電波の計測は研究領域が異なるため、同時に行われることは少なかった。今回の同時観測は放射線、大気電場、電波それぞれの専門家による共同研究で成し遂げられ、従来の雷科学と高エネルギー物理学が融合する学際研究「雷雲と雷の高エネルギー大気物理学」の突破口ともいえる成果である。今後の継続的な研究により、たとえば放射線バーストが雷放電の発生にどのような影響を与えるか、といった謎を解明できるのではと期待している。

本研究成果は、Y. Wada et al., *Geophys. Res. Lett.*, 45, 5700 – 5707 (2018)に掲載された。

(2018年5月25日プレスリリース)

図：雷雲から発せられる制動放射（左）とその放射源を破壊した雷放電（右）。能登半島の上空を雷雲が通過した際に、地上の検出器が雷雲内の電子加速によって生成された放射線バーストを検知した。電子の加速メカニズムは雷放電によって破壊され、放射線バーストとともに消滅した。



Wada et al., "Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intra/Inter-cloud Discharge", *Geophys. Res. Lett.* (2018)
Illustration by Hayano's Science Manga Studio

注) 雷放電には、電流が雷雲から地面へと流れる「対地雷」と、雷雲の中だけで完結する「雲間放電」がある。一般的には地上に被害をもたらす対地雷がよく知られているが、「雷雲の中にある加速器の破壊」という観点では、対地雷だけでなく、雲の中だけを駆け抜ける雲間放電も重要な現象である。今回の観測結果は雲間放電によるものである。