

イネ科雑草の葉や茎が放射状に広がる理由を解明

～植物が重力に逆らうことで地面を這う仕組み～

ポイント

- ・ イネの野生種・栽培種の枝（分げつ）の三次元的な動きを表す数理モデルを構築。
- ・ 重力に逆らって育つ性質（重力屈性）と稈の傾きにより、分げつが地面を這うことを解明。
- ・ 「植物が形を変えることで環境に適応する仕組み」の理解が深まることに期待。

概要

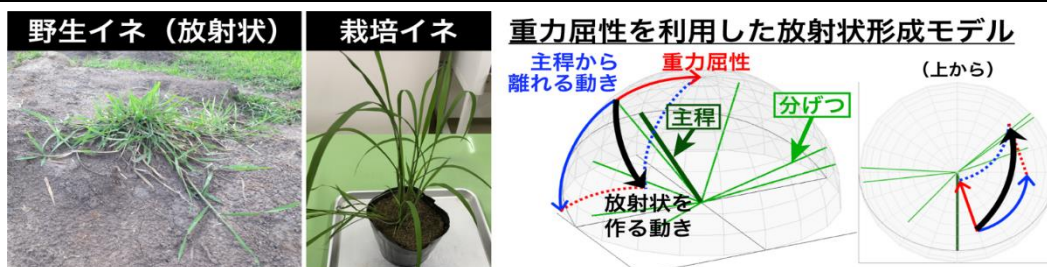
北海道大学大学院農学院修士課程の徳山芳樹氏，同大学院農学研究院の小出陽平助教らの研究グループは，数理モデルを用いて，イネ科単子葉植物の枝（分げつ）が放射状に配置するメカニズムを解明しました。

日本人が主食とする栽培イネは直立した形をしており，水田での密植や収穫の省力化に役立っています。一方，アジアに自生する野生イネは，稈^{かん}*1が倒れて放射状に広がった形をしており，この形は自然条件での受光能力の向上に役立っていると考えられています。イネは茎の周りに左右交互に葉がつく「二列互生」植物であり，葉と同じく分げつも左右交互に枝分かれします。そのため，栽培イネは稈が一直線に並んだ扇のような形をしています。一方，野生イネは二列互生であるにも関わらず，その形は地面に這うよう放射状に広がります。しかしながら，どのようなメカニズムにより二列互生植物から放射状の形が生み出されるのかについては全くわかっていませんでした。

本研究では，「分げつの枝分かれ後の動き」に着目し，数理モデルを用いてそのメカニズムを解明しました。野生・栽培イネの三次元的な動きの計測と数理モデルのシミュレーションにより，主稈（中心にある稈）が倒れていれば，重力に逆らう「上向きの動き」が，放射状の形成に必要な「水平方向の動き」を生み出すことがわかりました。また，イネの稈が倒れる原因としてすでに知られている遺伝子たちが，放射状の形成にどのように関わっているかがわかりました。

この放射状配置は，イネだけでなく，コムギやヒエなどの二列互生イネ科植物に共通した特徴です。つまり，これらの植物は，重力を利用することで，地面を這うような放射状の形を生み出していると考えられます。本研究で得られた知見により，植物が環境に応じて形を変化させ適応する仕組みの理解が深まることが期待されます。

なお，本研究成果は，2021年7月15日（木）公開の *in silico* Plants 誌に掲載されました。



(左) 野生イネの稈が放射状に這うのに対し，栽培イネの稈は直立し，扇状に開く。

(右) 重力屈性（赤）と主稈から離れる動き（青）が組み合わさることで，放射状を作る動き（黒，水平方向の動きを含む）が生み出される。

【背景】

日本人が主食とするイネ栽培種 (*Oryza sativa*) は、栽培化^{*2}の歴史の中で、栽培に適した形のものを選抜されてきました。その結果、現在水田で植えられているイネの稈は直立しており、密植が可能になっています。一方で、アジアに自生する栽培イネの祖先種 (*Oryza rufipogon*) は栽培イネと異なり、稈が地面に向かって倒れた形をしています。この形は自然条件での受光能力^{*3}の向上に役立っていると考えられています。先行研究により、栽培化の過程で *PROG1* という遺伝子に生じた変異が、分げつの根元の部分を上向きに曲げることで、栽培イネの分げつを起き上がらせるということがすでに明らかにされています。

また、植物の形を決める大きな要因として、葉の茎周りの配置である「葉序」があります。葉序には、螺旋状に葉がつく「螺旋」や一つの節に複数の葉がつく「輪生」など様々なものがあります。イネの葉序は左右交互に葉がつく「二列互生」であり、葉だけではなく枝も葉と同じ位置から出るため、左右交互に枝分かれます。そのため、栽培イネの分げつは、中心の稈である「主稈」を含めて一直線に並んでいます。

しかし、野生イネでは、栽培イネと同様に二列互生であるにもかかわらず、分げつは一直線に並んだまま倒れるのではなく、放射状に広がって倒れています。このことから、枝分かれました後に分げつが水平方向に動いていることが示唆されました。この現象のメカニズムは、*PROG1* の研究でも報告がありませんでした。さらに、野生イネのみならず、コムギやヒエなどのイネ科植物でも放射状の形が見られます。

そこで、今回の研究では、数理モデルと植物を使った実験を組み合わせることで、直感的には一直線に並ぶはずの稈が、放射状に配置するメカニズムの解明を試みました。

【研究手法】

まず、野生イネ (*Oryza rufipogon*)・栽培イネ (*Oryza sativa*) 1系統ずつと、栽培イネに野生イネ型の *PROG1* を導入した系統を用意しました。さらに、重力屈性を失った(稈が倒れる)栽培イネの *LAZY1* 遺伝子変異体を育てました。そして、これらのイネ系統の主稈・分げつの三次元的な角度を毎日計測し、その動きのパターンから考えられるメカニズムを数理モデルで表現しました。イネを斜めにして重力の方向を変えて育成し、その場合の角度変化を記録しました。さらに、扱った系統における数理モデルのパラメータ値を求め、遺伝子の効果を定量しました。

【研究成果】

主稈・分げつの詳細な角度測定の結果、野生イネでは、分げつのみならず、主稈も(初めは上向きに育ちますが)倒れるということがわかりました。また、倒れている主稈から枝分かれました分げつに、その後起き上がる動きが見られたことから、「野生イネの稈は倒れるけれども重力屈性は失っていない」という仮説が立てられました。さらに、重力屈性を失った変異体では、分げつは倒れても放射状には広がらず、このことから放射状形成に重力屈性が関わっている可能性が示唆されました。ここで提示された疑問は、「本来は稈を起き上がらせる性質であるはずの重力屈性が、稈が地面を這う仕組みにどう関わっているのだろうか」というものです。

実際に、観察結果である「主稈が倒れる」「稈には重力屈性がある」という条件を組み込んだ数理モデルを構築し、分げつの動きをシミュレーションしたところ、枝分かれのタイミングで主稈が倒れている場合は、重力屈性が水平方向の動きを生み出しうるということがわかりました(分げつが主稈から離れ

ていく動きとの組み合わせによる) (図 1)。

そこで、この「重力屈性を利用した放射状形成メカニズム」の存在を実験で確かめました。まずは①野生イネにも重力屈性がある証拠が必要です。そして、②その重力屈性が放射状形成に必須であることを示します。①を示すために、野生イネの苗を暗闇で横に寝かせて、その後の様子を観察したところ、野生イネには重力屈性があることが確認されました。そして、②を示すために、植物を斜めに育てることにより重力の向きを変えて成長を記録したところ、放射状にはならない場合があることがわかりました。これらのことから、野生イネは重力屈性を利用して放射状に地面を這うということが明らかになりました。

さらに、角度測定からもう一つわかったことは、野生イネ型の *PROG1* を栽培イネに導入しても、分けつは倒れるようになるものの、主稈は倒れず、その結果放射状にはならないということです。このことから、野生イネの放射状形成を司る遺伝子が少なくとも *PROG1* だけではないということも明らかになりました。

【今後への期待】

今回の研究では、葉序によって分けつの位置が決められた後、野生イネでは重力屈性を利用した動きによって、放射状に稈が配置するということがわかりました。葉序の決定メカニズムや重力屈性はそれぞれ数理モデル化されており、理論的な研究が活発な分野ですが、本研究では葉序と重力屈性が組み合わさって植物の形が出来上がるメカニズムがモデル化されました。

二列互生葉序をもちながら放射状を形成する現象は、イネのみならず他の単子葉植物にも見られます。さらに、先行研究によって、様々な種類の葉序の決定が一つの原理の上に成り立っていることがわかっており、重力屈性も多くの植物に共通する仕組みだと考えられています。本研究を起点として、葉序研究と重力屈性研究を結ぶ「植物全体のモデル」を考えていくことで、多様な植物の形がどうやって出来上がるのかを理解することにつながると期待されます。

論文情報

論文名	The mechanical origin of the radial shape in distichous phyllotaxy grass plants
著者名	徳山芳樹 ¹ , 小出陽平 ² , 大西一光 ³ , 曳地 究 ¹ , 大町美空 ¹ , 高牟禮逸朗 ² , 貴島祐治 ² (¹ 北海道大学大学院農学院, ² 北海道大学大学院農学研究院, ³ 帯広畜産大学)
雑誌名	<i>in silico</i> Plants
DOI	10.1093/insilicoplants/diab019
公表日	2021年7月15日(木)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院農学研究院 助教 小出陽平 (こいでようへい)

T E L 011-706-4697 F A X 011-706-4697 メール ykoide@abs.agr.hokudai.ac.jp

U R L <https://integ.synfoster.hokudai.ac.jp/lab/koide/>

配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

植物とモデルシミュレーションの比較（上から見た図）

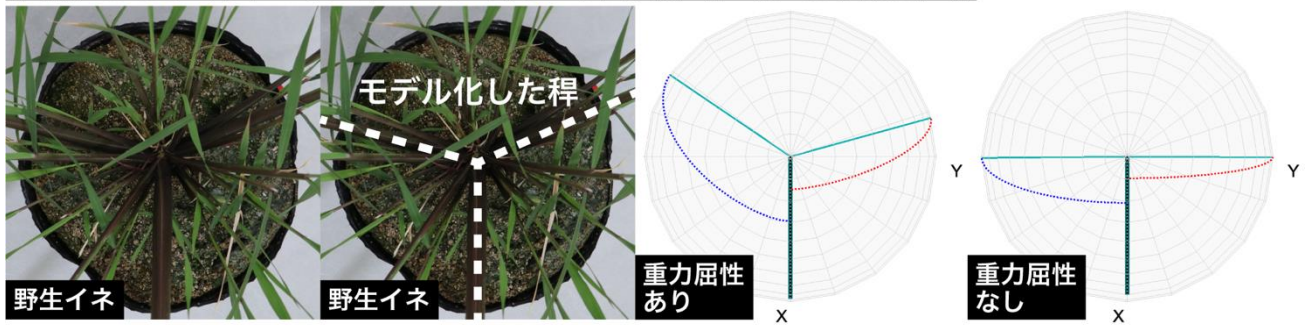


図 1. 分けつの動きのシミュレーション。枝分かれのタイミングで主稈が倒れている場合は、上向きの動き（重力屈性）が水平方向の動きを生み出しうるということがわかった。

【用語解説】

- *1 稈^{かん} … イネ科植物の茎のこと。本研究ではイネの葉のうち、筒状になっている部位である葉鞘も含めて稈と呼ぶ。
- *2 栽培化 … 人類の農耕の歴史の中で、野生の植物を栽培に適した作物に改良する過程。
- *3 受光能力 … 植物が光を受ける力。植物個体が形を変えて光に当たる表面積を大きくすることで、受光能力を上げることができる。