



助教  
越水 静

#### 経歴

2013年 東京農業大学農学部 卒業

2018年 総合研究大学院大学生命科学研究科  
5年一貫制博士課程 修了

2018年～2020年 明治大学研究・知財戦略機構  
研究推進員

2020年～現在 明治大学農学部生命科学科 助教

## 花の構造色を利用した新体系「フォトニクス農業」

### 1. 背景と目的

植物には、花卉に「構造色」を持つ種が存在する。花の構造色は、ハチを誘引することが知られており (Moyroud et al., 2017)、構造色を作物に応用することができれば、未だ人工授粉に頼っている農作物生産をより効率的かつ省力的に行うことが可能となる。申請者は、昆虫の視覚的効果を利用した新しい農業体系「フォトニクス農業」を提案し、それを実現するための研究を推進している。本研究では、花卉にて構造色を発色するための分子メカニズムを明らかにし、構造色を作物に付与するための基盤技術を構築することを目的とする。

#### —構造色について—

構造色は、物質そのものが色を持たないにも関わらず、物体表面の微細構造によって生じる色のことである。構造色を持つ例として、コンパクトディスク (CD) や、昆虫の翅 (モルフォチョウやタマムシ) が挙げられる (図 1)。構造色は植物の花弁にも発見されており (図 2、左)、構造色を示す花卉細胞の断面を観察すると、微細な突起構造 (幅  $1 \mu\text{m}$  以下) が1つの細胞表面に複数形成されている (図 2、右)。この細胞外マトリックスにおける微細な凹凸により光が干渉し、構造色が生じる。



図 1. 構造色の例 [Wikipedia]

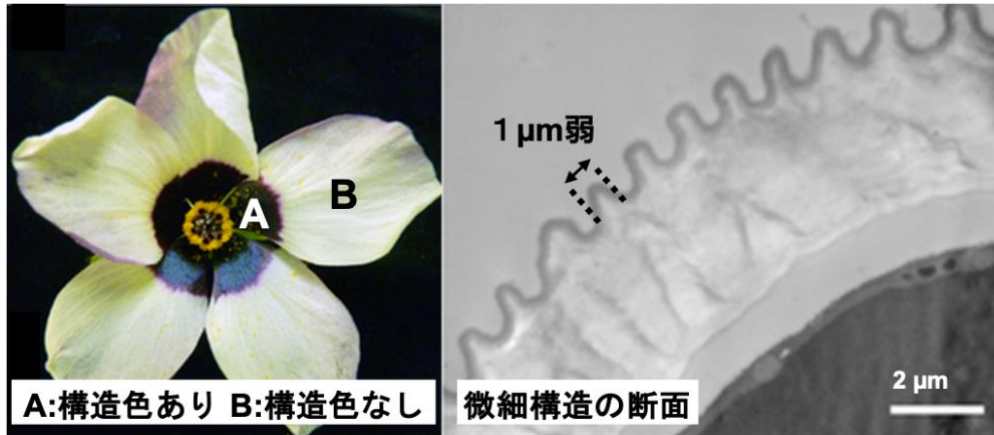


図2. 花卉の構造色微細構造 [Vignolini et al., 2015]

### —これまでの実験と結果—

花の構造色は、農業の新体系創出の可能性という大きな価値がある一方で、応用に必要な、構造色を呈する凹凸形成メカニズムの知見は皆無であった。そこで研究代表者は、1枚の花弁で構造色を示す部分と示さない部分を作り分けるギンセンカ (*Hibiscus trionum*) (図2、左) を花の構造色のモデル植物として新たに選定し、培養系や形質転換系の確立など、挑戦的に研究を行っている(越水, 未発表データ)。

またギンセンカの花弁において、構造色を示す部分と示さない部分にて RNA-seq を行い、両者間で発現レベルに有意な差のある遺伝子群を選抜した。研究代表者は、これら候補遺伝子群に着目し、細胞外マトリックスの凹凸形成を行う分子メカニズムを明らかにする。そして「フォトニクス農業」の実現に向けた、基盤技術の確立を目指す。

## 2. 方法と結果

### —ギンセンカのゲノム配列決定—

候補遺伝子群を CRISPR/Cas9 システムによりノックアウトし、微細構造の形成に関わる遺伝子の同定を行うが、そのためにはオフターゲットの予測が不可欠である。オフターゲット予測にはゲノム配列が必要となり、構造色のモデルとして新たに選定したギンセンカは二倍体との報告があるため (Tachibana et al., 1956)、ゲノム配列の決定に問題はないと思われた。そこでまず、自殖3世代目の十分に純化されたであろうギンセンカのゲノムシーケンスを行い、ショートリードを得た。ショートリードのシーケンスデータがあれば、k-mer 解析によるゲノムサイズ推定ができる他、ロングリードデータを得た際のエラー補正

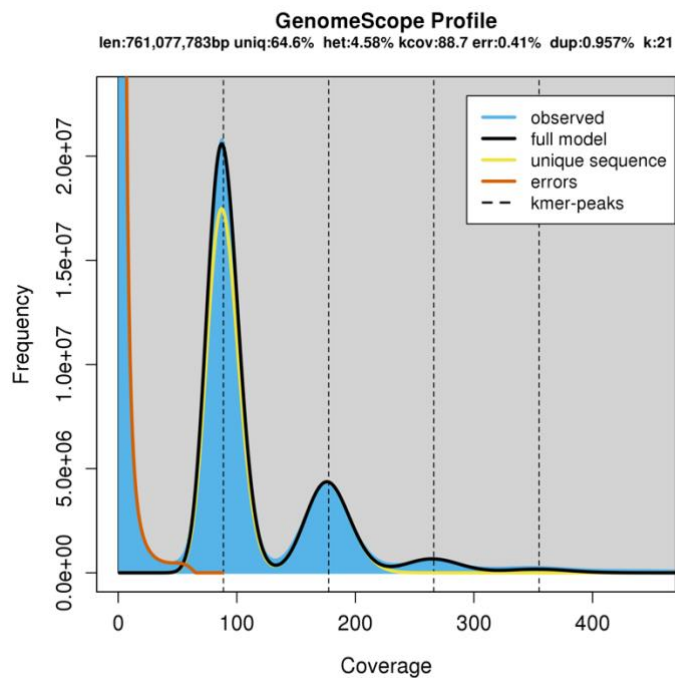


図3. k-mer 解析によるプロット

にも使用できる。しかし k-mer 解析の結果、そのプロットはギンセンカが四倍体であることを示唆した (図 3)。四倍体の系統はゲノム配列決定や CRISPR/Cas9 システムによるノックアウト個体の作成が困難になるため、二倍体のギンセンカ系統を探索する必要がある。海外には二倍体であることが確認されたギンセンカ系統がすでに存在しているが、名古屋議定書の対象となってしまうため、将来的にも国内のギンセンカであることが望ましい。日本全国でギンセンカを取り扱っている植物園や園芸店から植物体を集め、核相の調査 (鳥取大学との共同研究) とフローサイトメーターによる倍数性の推定を行った。その結果、国内でも二倍体のギンセンカの系統を発見することに成功した。現在、二倍体のギンセンカ系統にてゲノム配列の決定中である (理研との共同研究)。

### —微細構造の形成時期とメカニズム—

花の構造色は花卉表皮細胞の細胞外マトリックスに形成される微細な凹凸構造により発色する。花卉の発生段階を追って微細構造の形成過程を走査型電子顕微鏡にて観察した (図 4)。その結果、1.5 cm 程度の蕾段階では微細構造の形成は起きておらず、1.8 cm 程度の蕾 (開花前日) にて微細構造が形成し始める。この時、細胞と細胞の間の領域から微細構造が形成されることがわかった (図 4 矢印)。開花した花卉では構造色の発色に十分な微細構造が形成されている。また、ギンセンカの花卉において構造色を示す部分と示さない部分の境目の領域を観察すると、微細構造のある細胞とない細胞が特定の領域を境に完全に分かれていることが明らかになった。このことから、微細構造の有無は 1 細胞レベルで制御されているということが示唆された。また、花卉細胞は成長に伴い細胞が長方形型に伸長する (図 4)。Airoidi et al. (2021) によると、その際に細胞に加わる力によって機械的な座屈起き、微細な凹凸構造が形成される。しかし、同じように細胞が長方形に伸長する花卉の裏側の細胞では微細な凹凸構造は形成されない。これらのことから、微細構造されるためには、①細胞が伸長することによって物理的な力が加わることと、②力が加わった時に座屈が

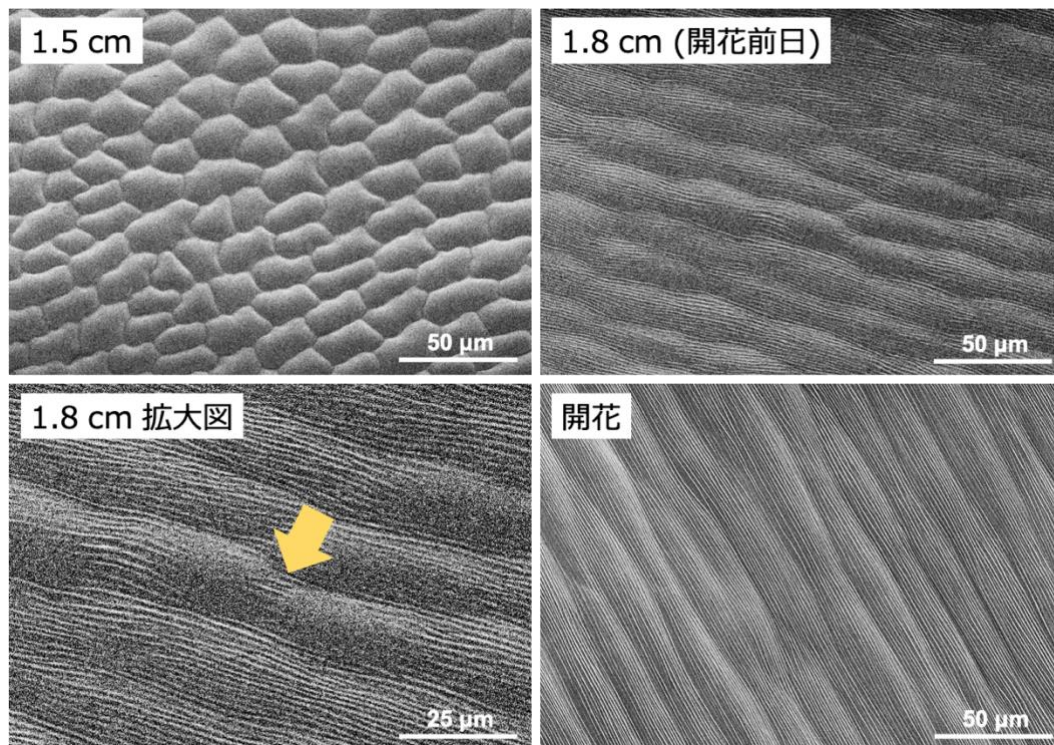


図 4. 花の発生段階における微細構造



起きる条件に細胞外のマトリックスの物性がマッチすることの2つの条件が必要と考えられる。

本研究では事前に構造色を示す部分と示さない部分とで発現遺伝子の比較解析を行っており、細胞外のマトリックスの物性を決定する原因因子はその候補遺伝子群に含まれているはずである。細胞外マトリックス（細胞壁やクチクラワックス層）の形成やそれらの成分合成に関わる因子群を本研究にて選抜した。ここからさらに候補因子を絞り込むため、細胞外マトリックスの成分分析を行い、微細構造のある細胞とない細胞にて比較解析を行う（産総研との共同研究）。

### —昆虫の視覚と花卉の誘引性—

花の構造色は、ハチを誘引することが示唆されており、花粉媒介者である昆虫を誘引するための収斂進化ではないかと考えられている (Moyroud et al., 2017)。花の構造色は、花卉細胞の細胞外マトリックスに形成される微細な凹凸構造に由来する。この微細な凹凸構造は、構造色の発色だけでなく、偏光が起きている (図5、新学術領域「植物の周期と変調」P-MIRU チームとの共同研究)。

ハチは偏光を見ることができ、天空の偏光にパターンにより方角を認識する。このことから、研究代表者はハチが実際に感知しているものは構造色そのものではなく、偏光または偏光と構造色の両方である可能性を考えている。今後ハチの視覚と植物の進化についても調査を進める予定である。

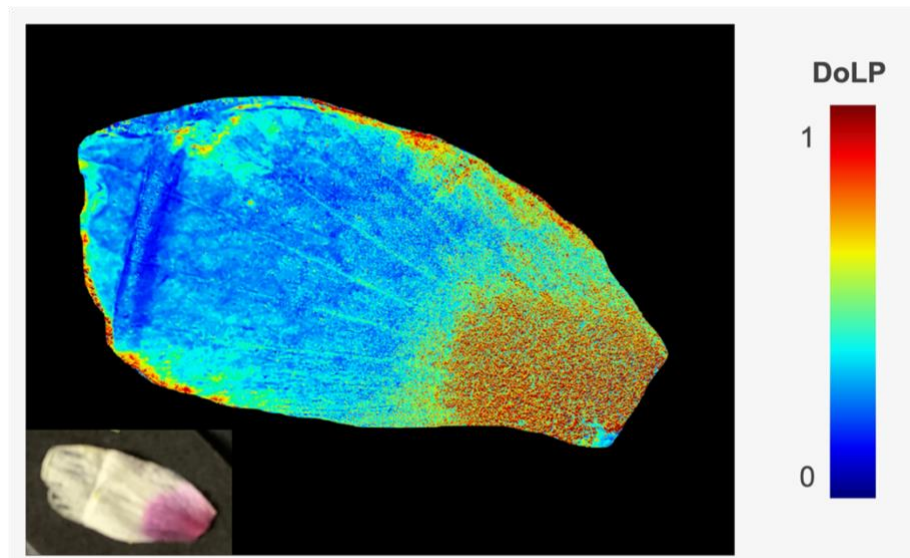


図5. ギンセンカ花卉における偏光の可視化

### 3. 成果発表

これらの成果を下記の学会やセミナーにて発表した。

1. 越水静「Morphological evolution in plant reproduction - taking plant sperms and structural color in flowers as examples -」  
第44回 日本分子生物学会年会（横浜） 2021年12月
2. 越水静「植物の生殖における進化」  
宇都宮大学 植物分子農学セミナー（第85回 C-Bio セミナー） 2022年1月
3. 越水静「花の構造色を呈する微細構造 -フォトニクス農業実現のための基盤構築-」  
ACT-X 「環境とバイオテクノロジー」は 地球環境の危機を救う！II（オンライン） 2022年4月

#### 4. 謝辞

本研究に遂行するにあたり、ご支援いただいたサッポロ生物科学振興財団に深く感謝申し上げます。また実験植物を育成するにあたりサポート頂いた基礎生物学研究所モデル生物研究支援室と走査型電子顕微鏡での観察をサポート頂いた基礎生物学研究所バイオイメージング解析室に深く感謝申し上げます。

#### 5. 参考文献

- Aioldi, C.A., Lugo, C.A., Wightman, R., Glover, B.J., and Robinson, S.** (2021). Mechanical buckling can pattern the light-diffracting cuticle of *Hibiscus trionum*. *Cell Reports* **36**: 109715.
- Moyroud, E., Wenzel, T., Middleton, R., Rudall, P.J., Banks, H., Reed, A., Mellers, G., Killoran, P., Westwood, M.M., Steiner, U., Vignolini, S., and Glover, B.J.** (2017). Disorder in convergent floral nanostructures enhances signalling to bees. *Nature* **550**: 469–474.
- Tachibana, Y., Sakazaki, N., and Ihara, Y.** (1956). Studies on Hibiscus. II. Self- and cross-compatibility and hybridization (1). *Journal of the Japanese Society for Horticulture Science* **25**: 43–48.
- Vignolini, S., Moyroud, E., Hingant, T., Banks, H., Rudall, P.J., Steiner, U., and Glover, B.J.** (2015). The flower of *Hibiscus trionum* is both visibly and measurably iridescent. *New Phytologist* **205**: 97–101.