

Bi-monthly

No.18

# Fruit & Tea Times

最新の研究成果をわかりやすく楽しく解説

## 巻頭言

「カンキツ病害のいま」

[P. 1](#)

## 特集記事

- 「カンキツの育種技術研究の最前線」
- ・カンキツの育種を劇的に効率化  
-多胚性を制御する遺伝子の発見-
  - ・種なしカンキツを効率よく育種する技術

[P. 4, P.9](#)

## カチャカチャTIPS

「隔年結果ってどうして起きるの？」

[P. 15](#)

## カンキツかいよ う病

カンキツかいよう病  
菌 (*Xanthomonas*  
*campestris pv. citri*)

により引き起こされる  
カンキツ類の病気で、  
果実、葉、枝などに  
発生し、果実の外観  
を損ねて商品性を  
低下させる。進行  
すると葉や枝が枯れ、  
著しく樹勢を低下  
させる場合もある



カンキツ研究領域長  
**塩谷 浩**

巻頭言

# 「カンキツ病害のいま」

## 地球温暖化やグローバル化がカンキツ病害にも影響

**カ**ンキツでは、樹を衰弱させて死に至らしめるカンキツグリーニング病が只今、猖獗を極めており、米国フロリダ州のグレープフルーツが著しく減収するなど世界的に大きな問題となっています。本病の地球規模での流行には、この病気を媒介する昆虫「ミカンキジラミ」が越冬できる地域が地球温暖化の進行により広がったことが影響しています。また、グローバル化の著しい進展も本病の広域伝搬をもたらしました。困ったことにカンキツグリーニング病に明らかな抵抗性を示すカンキツ種・品種はこれまでのところ確認されておらず、効果的かつ省力的な対策が立ちません。これもま

た、瞬く間に本病が拡がった理由のひとつ  
でしょう。日本での発生は関係各位の尽  
力により徳之島以南の南西諸島で止めて  
いますが、今後も最大限の警戒を要する  
病害です。

## グ

ローバル化を背景として国際問  
題となったカンキツ病害は他に  
もあり、元祖といえはカンキツかいよう  
病が挙げられます。本病は細菌による  
病害で、カンキツの葉、枝、果実にかい  
よう状の円形病斑を作ります(前ページ  
写真)。被害はもっぱら果実の外観を損  
ねて商品価値が下がるところにありま  
すが、ひどく発病すると落葉や枝枯れ  
を引き起こして樹が弱ります。全てのカ  
ンキツ種・品種で発病しますが、本病に  
対しては種・品種間で抵抗性が異なり  
ます。我が国では古くから本病に強い



紀州みかんや温州みかん等が栽  
培されていたため、本病について  
は気にも掛けていませんでしたが、  
明治に入って国際交流が活発に  
なると海外で問題となりました。  
1913年、レモンやオレンジなど  
本病に弱いカンキツが広く栽培  
されているアメリカ合衆国で新  
病害Citrus cankerとして確

## しおたに・ひろし

### カンキツ研究領域長

カンキツの病害、特にカンキツかいよう病  
菌の生態や宿主との相互作用について研究す  
るほか、カンキツの輸出検疫に係る研究を進  
めてきました。また、近年はスマート農業、  
とくにドローンによるカンキツ・カキの病害  
虫防除技術の開発にも携わっており、現場か  
らの期待の大きさをひしひしと感じていると  
ころです。

認されたのです。もともと本病は  
米国には存在せず、日本産の早  
生温州みかんの苗木を介して侵  
入したとされました。そのため、  
当時の米国では本病を「Japanese  
canker」と我が国にはまことに不  
名誉な名前と呼び、本病発生地  
域からの輸入は苗木だけでなく  
果実も禁止されることとなりま

ました。日本産温州みかん果実の米国向け輸出は厳しい検疫条件のもとで1967年に再開され、2014年からは大幅に条件が緩和されましたが、なお「果実の表面殺菌」等は引き続き条件として残されており依然として警戒され続けています。

## 病

害を水際で食い止めるにあたり検疫が最後の砦とはなりません。栽培現場における不断の病害防除が極めて重要です。カンキツグリーニング病は罹病樹の早期発見・伐採とミカンキジラミの防除で病気の封じ込めに成功しており、今後も継続した対策が必要です。また、耐病性品種の利用は最も効果的かつ省力的に発病を抑制でき

### 栽培現場における不断の病害防除が極めて重要。



ることから、現在世界中でカンキツグリーニング病とカンキツかいよう

病の抵抗性品種の開発が精力的に進められています。

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門カンキツ研究拠点（静岡県静岡市清水区）駿河湾と伊豆半島が望める。

温州みかんなどの種から生えてくる個体は、ほとんどが親と同じ遺伝子を持つクローン。カンキツ類の育種の最大の障害であるこの「多胚性」現象を乗り越え、カンキツ類の育種を大幅に効率化できる技術を開発しました。

# 「カンキツの育種を劇的に効率化

## 「多胚性を制御する遺伝子の発見」

島田 武彦

はじめに

# カ

ンキツ類では、一つの種子の中に、受精によって両親の遺伝子を受

け継いだ交雑胚(胚とは、発芽して将来植物体に成長する種子内の組

織)に加え、複数の母親のクローン胚を形成する「多胚性」という



カンキツ品種「清見」：  
[http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/nifts/kih/citrus\\_cat/post\\_35.html](http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/nifts/kih/citrus_cat/post_35.html)

現象がみられます(図1)。多胚性の種子では、クローン胚の方が早く成長するため、交雑胚は競争に負けて途中で死んでしまったり発芽しても生育がとて悪かったりします。そのため、多胚性品種を母親として利用すると両親の遺伝子を引き継いだ個体(交雑胚個体)をほとんど獲得できません。そこで、これまでカンキツの交雑育種では、多胚性

を示さず、交雑胚のみを生じる性質(単胚性)の個体を母親として利用してきました。しかし、単胚性の品種は限られているため、交配組み合わせが狭くなるのが問題でした。優れた特性を持つ多様な単胚性品種を増やし、それを母親として利用できれば、カンキツの育種効率は大幅に改善できると期待されます。

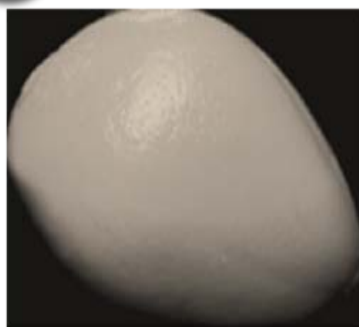
## カンキツ育種を非効率にしている多胚性という性質。まず、それをコントロールしている遺伝子を探求する。

これまでの長年の育種調査により、単胚性の個体に多胚

性の個体を掛け合わせると、得られた交雑胚の個体の半分が多胚性になることか

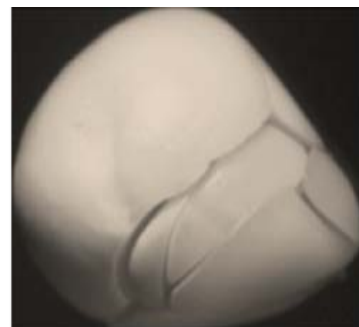
ら、多胚性は単一の優性遺伝子によることがわかっていました。よって、こ

図1 単胚性と多胚性の種子の写真



単胚性の種子

両親のゲノムがまじりあった交雑胚個体が生育します。



多胚性の種子

母親と同じゲノムを持つクローンの個体が生育します。

のような個体の中から単胚性の個体だけを選抜する場合、多胚性を識別できるDNAマーカーが開発できれば、圃場に植える前の芽生えの段階で多胚性の個体を効率的に除去することができ、育種効率が飛躍的に向上します。

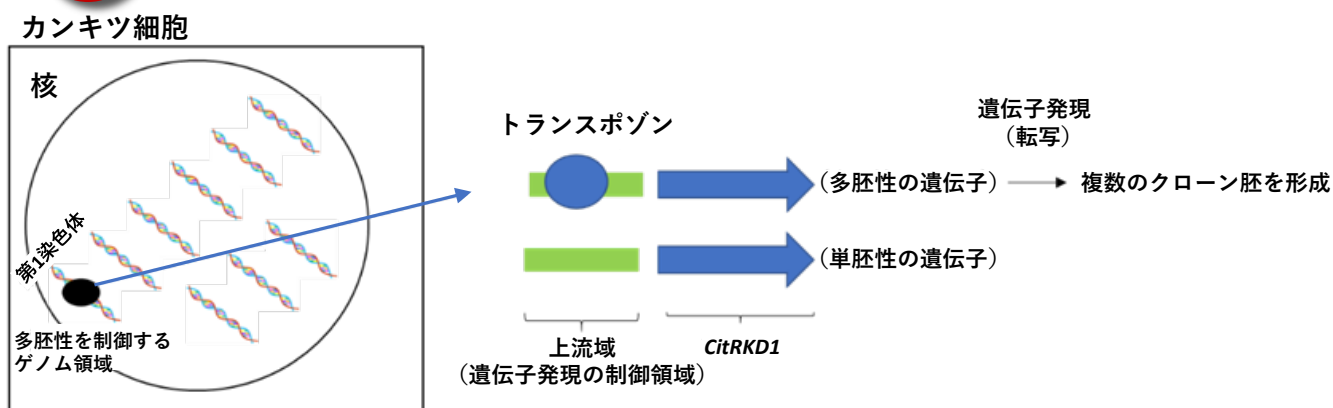
## そ

こで、多胚性の原因となる遺伝子を見つけるための研究をスタートしました。まず、単胚性の品種に多胚性の品種を掛け合わせて得られた種子から沢山の実生を育てます。この実生を結実させて単胚性か多胚性かを調査した上で遺伝解析を行い、多胚性と関連する遺伝子領域がどこにあるのかを調べました。その結果、9本あ

るカンキツの染色体のうち第一染色体上に多胚性と密接に関係する遺伝子領域が存在することを見出しました(図2)。つぎにその近傍のDNAの塩基配列を、次世代シーケンサという機械で解読しました。その結果、解読した塩基配列の中に、植物の細胞を発生初期の段階にリセットする働きのある*RKD* 遺伝子と呼ばれる遺伝子と似た塩基配列を持つ遺伝子が存在することを発見し、*CitRKD1* 遺伝子と名付けました。多胚性の種子を形成するオレンジにおいて、実験的に遺伝子組換え技術を用いてこの遺伝子の働きを抑制したところ、多胚性ではなく単胚性の種子が形成され、*CitRKD1* 遺伝子が多胚性の原因となる遺伝子であることが特定できました(次ページ図3)。

### 図2

#### カンキツの多胚性のメカニズム

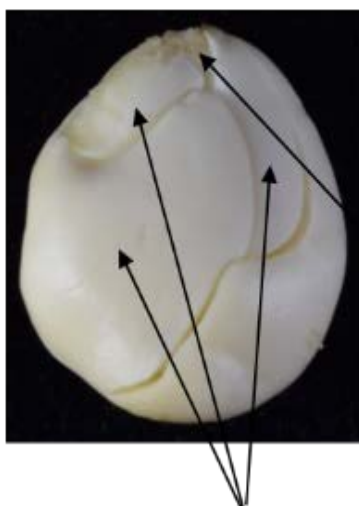


多胚性を制御するゲノム領域は第一染色体上にあり、原因遺伝子である*CitRKD1*には2種類の対立遺伝子が存在します。トランスポゾンが挿入された多胚性の遺伝子をゲノム中に持つと、多胚性の種子が形成されます。このトランスポゾンの挿入の有無を判別できるDNAマーカーの開発により、芽生えの葉のサンプルで胚性を判定できます。

遺伝子組み換え体



オレンジの種子



遺伝子組み換えオレンジの種子



発芽能力を有する複数の体細胞胚

発芽能力を有する交雑胚

図3

*CitRKD1* 遺伝子の発現を抑制した遺伝子組換えオレンジの樹と種子の写真

トランスポゾンが *CitRKD1* 遺伝子を操縦することを発見

多胚性を判別する技術開発に成功。

カンキツ育種の劇的な効率化へ！

さ

らに詳しく調べると、多胚性と単胚性のどちらの品種も *CitRKD1* 遺伝子を持つていました。しかしながら、多胚性品種では花や幼果でこの遺伝子の発現がみられたのに対し、単胚性の品種ではみられません

でした。その原因をさらに探っていくと、多胚性の品種では、*CitRKD1* 遺伝子の発現を制御するための上流の遺伝子領域にトランスポゾンと呼ばれる DNA 配列が挿入されているこ

とを発見しました。つまり、*CitRKD1* 遺伝子は発現制御領域にトランスポゾンが挿入されていると花や幼果で発現するようになり、胚の細胞の一部が初期化されて多胚性を示すようになるのです。

こ

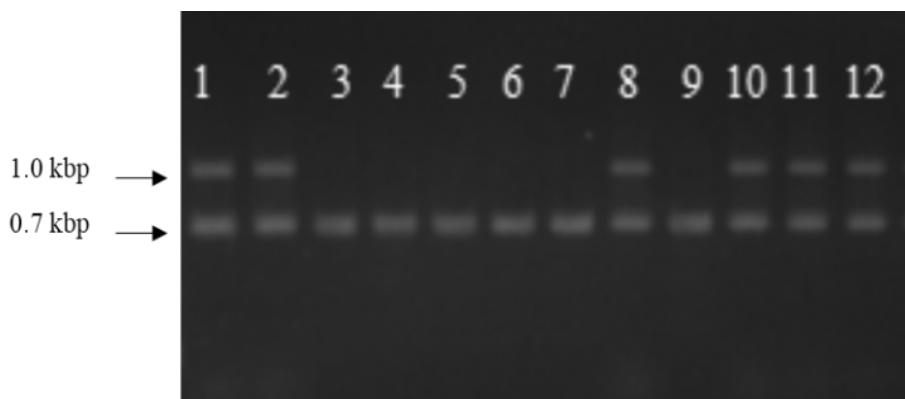
こまで解明できましたので、次のステップ

として、トランスポゾンの挿入の有無で多胚性か単胚性かを判別できる DNA マーカーを開



図4

開発したDNAマーカーによる代表的なカンキツの胚性の判定



約1.0kbpのPCR断片と約0.7kbpのPCR断片は、それぞれ多胚性、単胚性の遺伝子がゲノム中に存在することを示しています。

- 1：ダンカングレープフルーツ（多）、2：ダンシータンジェリン（多）、3：クレメンティン（単）、4：無核紀州（単）、5：谷川ブント（単）、6：ハッサク（単）、7：ヒューガナツ（単）、8：トロビタオレンジ（多）、9：普通イヨカン（単）、10：宮川早生（多）、11：太田ポンカン（多）、12：地中海マンダリン（多）  
（注）（多）は多胚性、（単）は単胚性。

発しました。農研機構で育成したカンキツ品種やその他の代表的な品種について、開発したマーカーで多胚性か単胚性かを判定したところ、100%合致しており、開発したDNAマーカーの有効性が確認できました（図4）。開発したDNAマーカーは、キンカンなどを含む幅広いカンキツ類について利用できます。

**今** 後このDNAマーカーの育種への活用により、多胚性の遺伝子をカンキツの育種素材の中から淘汰することが可能となります。将来的に、カンキツの育種現場で交雑組み合わせを考えると、母親が多胚性かどうかを心配する必要がない日が来ることを期待しています。

本研究は、科学研究費助成事業(16K07608)の支援を受け、静岡大学と共同で行ったものです。

本研究の詳細は下記のURLからご覧いただけます。

[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/nifts/130499.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nifts/130499.html)



しまだ・たけひこ

カンキツ研究領域カンキツゲノムユニット ユニット長

カンキツの優良品種の育成を効率化するためのDNAマーカーの開発に取り組んでいます。

カンキツに種が入っていると食べにくくなるため、種なしは食べやすさを決めるとても重要な性質です。今回はDNAを分析することで、種なしカンキツを効率よく育種する技術を開発しましたので紹介します。

## 「種なしカンキツを

## 効率よく育種する技術」

後藤 新悟

種がなく食べやすい  
温州みかん。

読

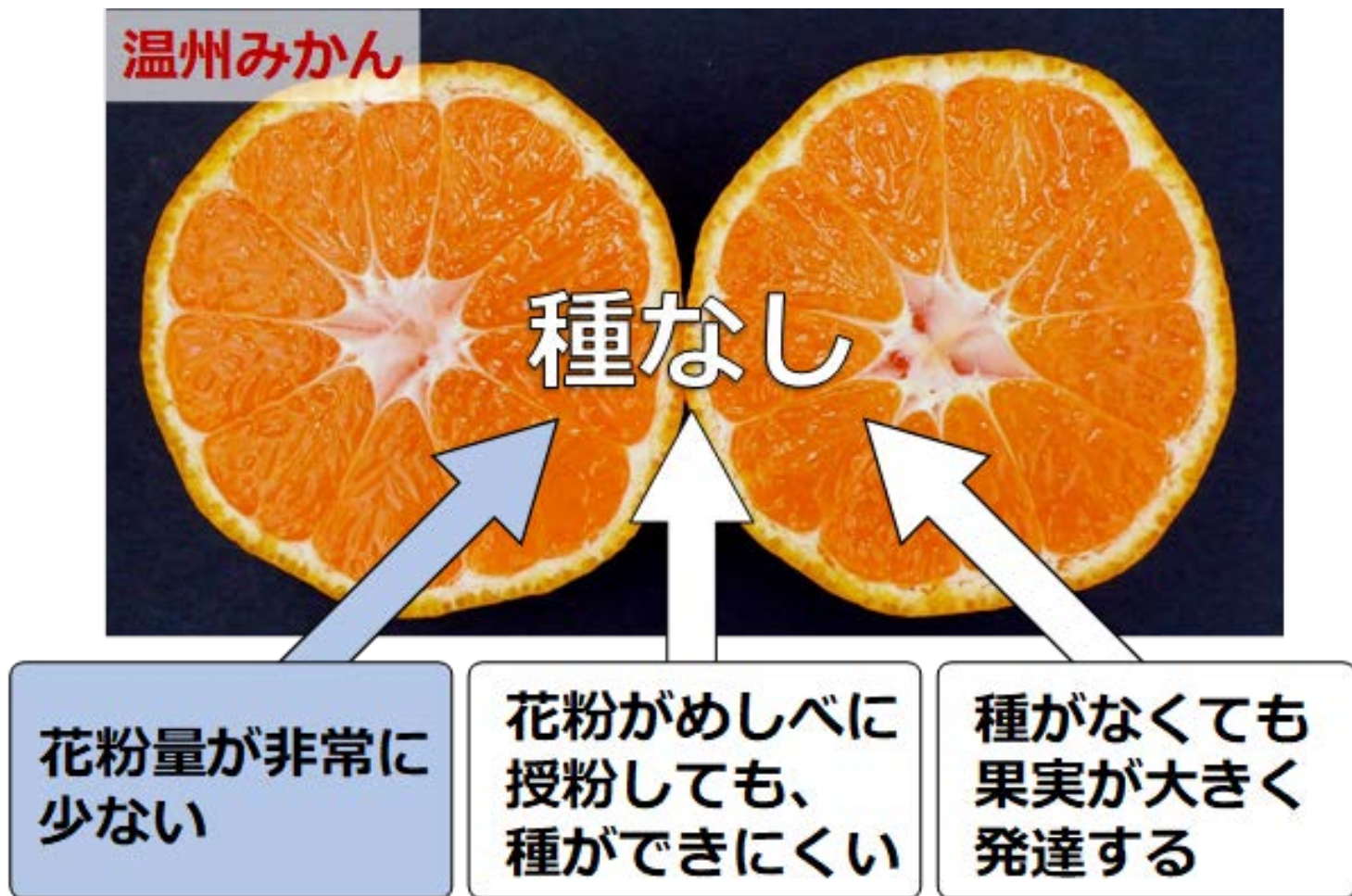
者のみなさまはどのようなカンキツ品種がお好きでしょうか？

とても甘い品種、酸味がきいた品種、香がよい品種。私はなんといっても種なしで食べやすい品種が好きです。その代表格は温州みかんですね。



温州みかん

図 1 温州みかんの種なしのヒミツ



## 温州みかんが種なしのヒミツ。

**生** 物は子孫を残すために、生命活動を営んでおり、植物にとって種は自分の子孫を残す大事なツールです。それなのに、なぜ温州みかんは種がないのでしょうか？それは、花粉量が非常に少ない性質、花粉がめしべに授粉しても種ができてにくい性質、種ができなくても果実が大きく発達する性質を奇跡的に3つそろえて持っているからです(図1、次ページ図2)。「あれっ!?温州みかんに種入っていることが稀にあるんじゃない!?!」という声が聞こえてきそうです、それは昆虫などに運ばれて、他の品種の花粉が雌しべについてしまうことがあるからです。

## 温州みかんの種なしの性質は遺伝する。

この温州みかんの子孫として、「清見」「せとか」「はれひめ」「津之香」「津之輝」といった種なし品種が育成されています。特にこれら品種は花粉量が非常に少なく(図2)、種なしの主な原因となっています。カンキツが種なしになるためには花粉量が少ないことがとても重要なのです。農研機構における長年の研究によつて、温州みかんの花粉量が非常に少ない性質は子供に遺伝することが分かっていました。

図2 カンキツの雄しべの花粉量



温州みかん (興津早生)

清見

ハッサク

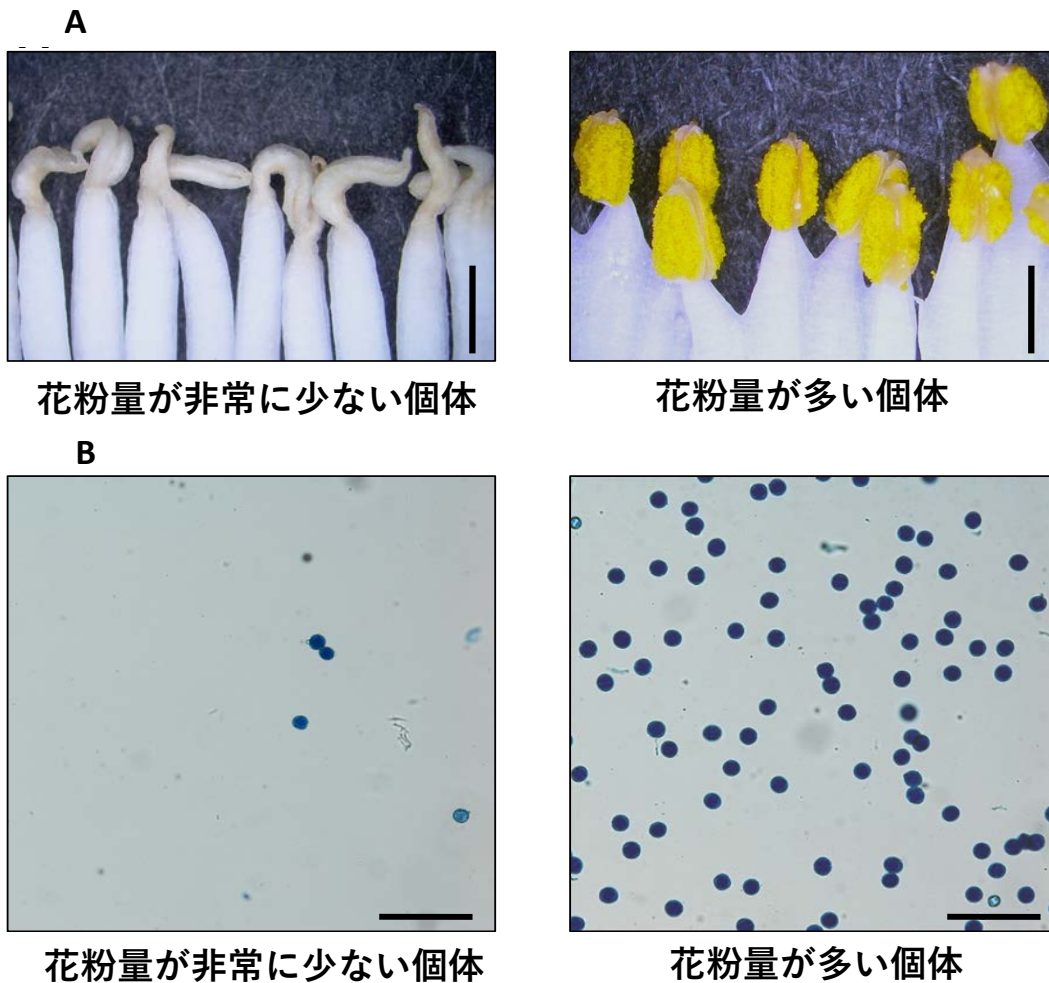
温州みかん(興津早生)は花粉量が非常に少なく、外からは花粉が観察されません。温州みかんの子供である清見においては花粉はほとんどありません。しかし、ハッサクは花粉量がとても多いです。

## 花粉量が非常に少ない性質を決定する染色体の場所を見つける。

そこで、温州みかんがもつ花粉量が非常に少ない性質を決める染色体の場所を見つけ、育種に応用することを考えました。温州みかんの孫で花粉が非常に少ない品種である「カンキツ興津46号」と花粉が多い品種である「カンキツ興津56号」を交配し、多数の種子を採りました。そして、種をまき、苗を育てて、花を咲かせました。全部で57本の苗から代表的な花を3個ずつ採取して雄

しべをとり(図3A)、1葯あたりの花粉量を顕微鏡を使つてカウントしました(図3B)。花粉量が少ない個体では葯の中に花粉が収納されているので、このような個体では、一つずつ葯を精密ピセットで割つて中の花粉をカウントしました(図3A)。このような気が遠くなるような地道な調査を続け、「カンキツ興津46号」と「カンキツ興津56号」の子供には花粉量が非常に少なくなる個体と花粉量が多い個体の両方が出現することがわかりました。さらにこれら57個体のDNA全体をそれぞれ

図3 「カンキツ興津46号」 × 「カンキツ興津56号」 の子の花粉量の調査



A: それぞれの個体の雄しべを採取しました。そのうちの代表的な個体を示しています。雄しべの先端の膨らんだ組織が葯です。花粉量の非常に少ない個体では、この中に少量の花粉が収納されています。一方、花粉の多い個体では花粉は外に飛び出ています。黒いバーは1mmを示しています。B: 葯を雄しべから切り落とし、染色液に浸しました。そうして、花粉を青く染色しました。顕微鏡で花粉の写真を取り、花粉の数を数えました。黒いバーは0.1mmを示しています。

図4 花粉量が非常に少ない性質を決定する染色体の場所

### 第8染色体



花粉量が非常に少ない性質を決定する場所

花粉量データとDNA全体を分析したデータを統計学的に解析することで第8染色体に花粉量が非常に少ない性質を決定する場所を見つけました。

れ分析し、57個体の花粉量のデータとあわせて、統計学的に解析を行いました。その結果、第8染色体に花粉量が非常に少ない性質を決定する場所を見つけることができました(図4)。

## カ

ンキツの育種では、果実の性質を調べる必要があるため、

## カンキツ 育種への応用。

長い年月と多くの個体を植え付ける広い畑が必要です。しかし、若い苗の段階でDNAを分析するだけで、良い特性を持つ個体を確実に判別できる技術があれば、効率よく育種を進めることができます。今回の研究で、花粉量が非常に少ない性質を決定する染色体の場所を見つけることができましたので、若い苗の段階でその染色体の場所のDNAを分析するだけで、花粉量が非常に少ない個体を判別することができますようになりました。花粉量が非常に少ないと判別された個体のみを畑に植え付けることで、効率よく種なしカンキツを育種す

図 5 DNA分析による種なしカンキツ育種の効率化



本研究の詳細は下記のURLからご覧いただけます。  
[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niffts/129018.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niffts/129018.html)

ることができます。  
 (図5)。この技術は既に実証試験を終え、カンキツ育種の現場で使われ始めています。種が入りにくく食べやすいおいしいカンキツ品種を育成し、1日でも早くみなさんに届けたいと思います。寝る間を惜しんで研究に勤しんでいます。

## ごとう・しんご

カンキツ研究領域カンキツ育種ユニット

上級研究員

作物の性質を決める遺伝子とその遺伝子を利用した育種に興味があり、研究者になりました。現在では、カンキツのゲノム情報を用いた種なし化の研究をしています。柔道が好きで(三段!)、今でも週に一度、柔道で汗を流しています。背負い投げが得意です。カンキツの新しいゲノム編集法を開発するために今年6月から1年間フロリダ大学カンキツ教育研究センターに留学予定です。



# TIPS

## カチャカチャ

(果物とお茶の質問コーナー)

### 質問

「隔年結果ってどうして起きるの？」

回答者

カンキツ研究領域  
ユニット長

深町 浩

### 回答

#### 隔

年結果とは、果実の収穫量が年により大きく変動し、花や果実の多い表年と量の量の少

図1 着花過多樹と適正着花樹



適正着花樹

ない裏年を繰り返す現象のことです。カンキツ、リンゴ、柿などで多く見られ、そのなかでもカンキツ類、特に温州みかんは他の果樹に比べて隔年結果が強くなる傾向があります。その原因と影響について説明します。



着花過多

#### そ

の年の着果量の多少が翌春の着花に最も強く影響します(図1)。着果量が多すぎ

### ① 着果量



ると翌年の着花は減少し、着果量が少ないと翌春の着花は著しく多くなります。これは、着果により冬季の樹体の貯蔵養分が利用され、それが翌年の着花に影響するためです。着果量は発根程度にも影響し、着果量が多いほど発根は減少し活性も低下します。発根が減少すると、土壌からの養水分の吸収も抑制され樹体内の栄養状態がさらに悪化し、翌春の着花の減少に繋がります。

## ② 収穫の早晩

**温** 州ミカンでは早生種ほど隔年結果が軽く、晩生種ほど隔年結果性が強い傾向があります。こ

れは品種の特性というよりも、果実の収穫時期の早晩が大きく影響しています。つまり、極早生温州や早生温州であっても収穫期が遅れると冬季の貯蔵養分が消費され、翌春の着花量は減少してしまいます。逆に、晩生の普通温州であっても収穫が早ければ着花量は正常となります。

## ③ 施肥

①、②でも説明したように、樹体の栄養状態により着花や結実は大きく影響されます。施肥が不十分で樹体内の窒素含量が不足すると着花は減少します。樹体内の窒素含量は光合成に

も影響するので、不足すると貯蔵養分も減少します。そのため、施肥は重要で、施肥量が少ないと隔年結果が強くなります。

## ④ 気象要因

**温** 州ミカンの隔年結果には気象要因も大きく影響します。冬季〜初春の低温とそれに伴う落葉は着花を減少させます。逆に暖冬で気温が高いと着花が増加傾向になります。低温、降雨により発芽、開花、着色、収穫の時期が遅れが生じると、着花不足等になります。隔年結果防止のためには、摘果等の着果管理が極めて重要です。

## 編集後記



**最** 近、皮ごと食べられるブドウ品種が脚光を浴びていますが、これに種なしがセットになるとより食べやすくなります。ブドウにはもともと種のない品種もありますが、種のあるブドウの多くは、開花期の前後にブドウ一房一房をジベレリンという植物ホルモンの溶液に浸すことで、種なしにすることができます。そもそも、この技術を知っている人は少ないと思いますが、さらにそれが日本で開発されたことは、ほとんど知られていないのではないのでしょうか。昭和30年代に、山梨県果樹試験場の岸光男さんたちがジベレリンを使ってデラウェアの果粒を大きくする研究の中で偶然発見し、技術を確立しました。ジベレリン自体も昭和のはじめに台湾総督府農事試験場の黒沢栄一さんが、馬鹿苗(ばかなえ)病菌がイネを著しく徒長させる原因物質として発見したものです。論理的思考力のみならず、偶然に巡り合う幸運と、それを見逃さない観察眼、自由な心。それらがうまくかみ合って生まれた素晴らしい技術です。

ヨッシー

## Fruit & Tea Times

2016年11月1日 創刊  
2020年 2月1日 18号刊行

刊行/国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門

企画・編集/研究推進部・研究推進室 TEL 029-838-6447

住所/〒305-8605 茨城県つくば市藤本2-1

URL: <http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/nifts/>