



第37回 サイエンスカフェ
聞いてみよう！
秋の彩り キクの秘密
－ 遺伝子組換えによる青い花の開発 －

柴田道夫

東京大学農学生命科学研究科 生産環境生物学専攻
園芸学研究室 教授



自己紹介：柴田道夫 (Michio SHIBATA)

1979年 東京大学農学部農業生物学科卒業
1979年 農林水産省野菜試験場研究員
1991年 同省野菜・茶業試験場研究室長
2003年 (独) 農研機構花き研究所生理遺伝部長
2008年 農林水産省農林水産技術会議事務局研究開発企画官
2010年 (独) 農研機構花き研究所所長
2012年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授



本日のはなし

1. キクの来歴
2. キクの生産
3. キクの開花調節
4. キクの花のかたち
5. キクの花の色
6. 遺伝子組換えによる青い
花の開発

キクの学名の変遷(クリサンセマム)

Chrysanthemum morifolium Ramat. 1798

chrysos

anthos

金(黄)の

花



タイプ: シュンギク

Chrysanthemum coronarium



Dendranthema grandiflorum Kitamura 1978

大きなキク属から小さなキク属へ



Chrysanthemum morifolium Ramat. 1798

イギリスの植物学者からChrysanthemum
の英名は広く使われているとの意見



新タイプ: シマカンギク

Chrysanthemum indicum

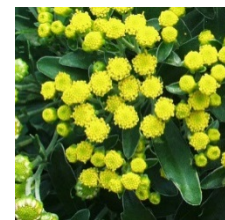
セントルイスでの国際植物学会議(1995)



舌状花（黄） + 管状花



舌状花（白） + 管状花



管状花のみ

10倍体
($2n=90$)

8倍体
($2n=72$)

6倍体
($2n=54$)

4倍体
($2n=36$)

2倍体
($2n=18$)

オオシマノジギク

コハマギク

イソギク

サツマノギク

イワギク

シオギク

ノジギク

イワギク
チョウセンノギク

オオイワ
インチン

サンインギク
シマカンギク

シマカンギク

ワカサ
ハマギク

ナカガワ
ノギク

キクタニギク

リュウノウギク

チシマ
コハマギク

イワインチン

日本に自生するキク属植物 （中田1994をもとに作図）

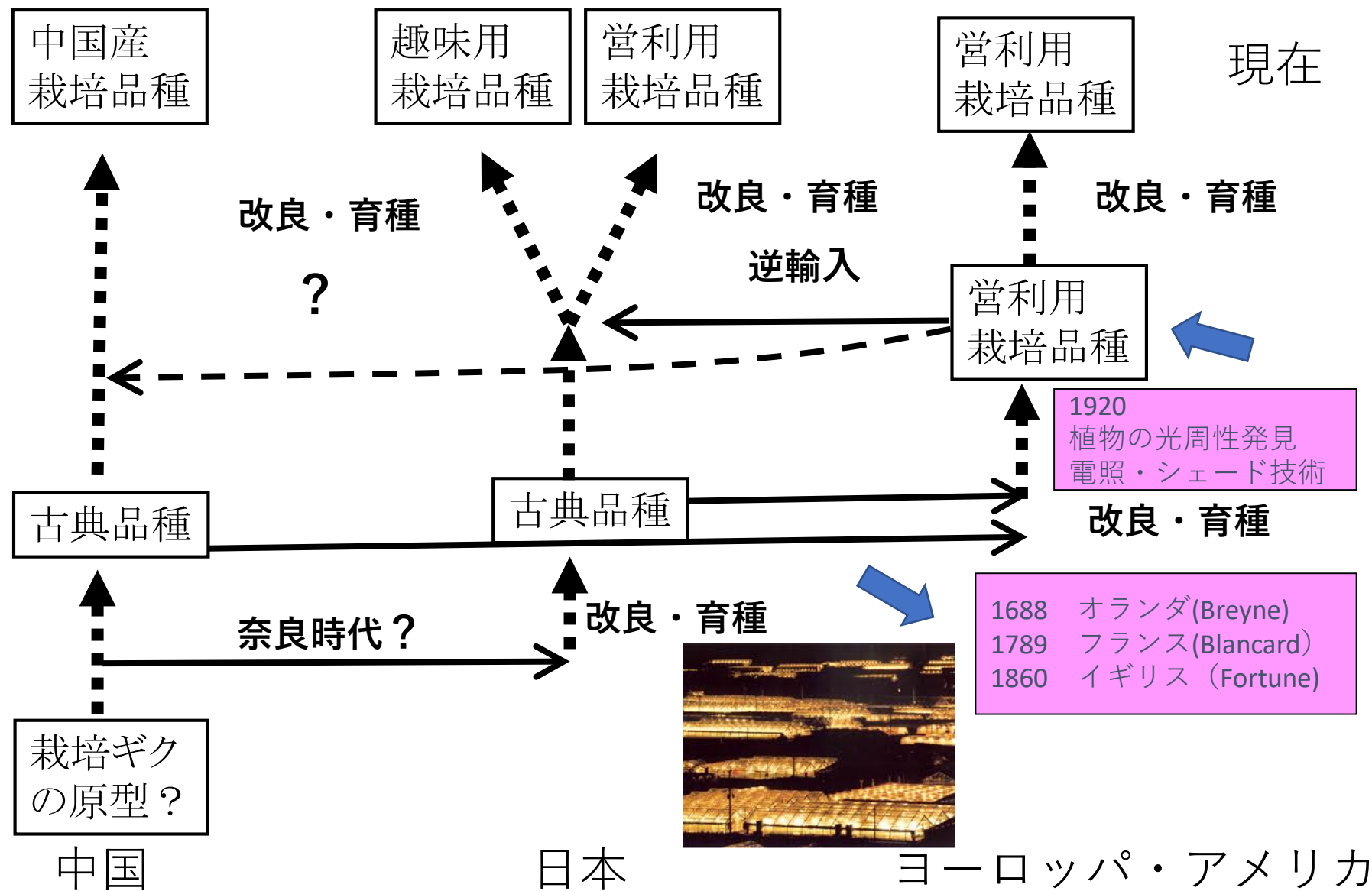


「日本の日本」と
いう名の動植物

ハマギク
*Nipponanthemum
nipponica*

トキ
Nipponia nippon







大菊花壇



一文字・管咲きギク



大作り（千輪仕立て）



肥後ギク花壇

秀嶋英露「養菊指南車」

新宿御苑「菊花壇展」毎年11月1日～15日に開催(起源:明治11年)



栽培ギクの倍数性（六倍体）

$X=9$ を基本数

$2n=18, 36, 54, 72, 90$

ヒトは46本

栽培ギクは六倍体($2n=54$)
を中心とした異数性



ゲノムサイズの比較

大腸菌	4.64Mb
シロイヌナズナ	100Mb
イネ	565Mb
ヒト	3Gb
キク	18Gb

キク属の細胞遺伝学的特徴

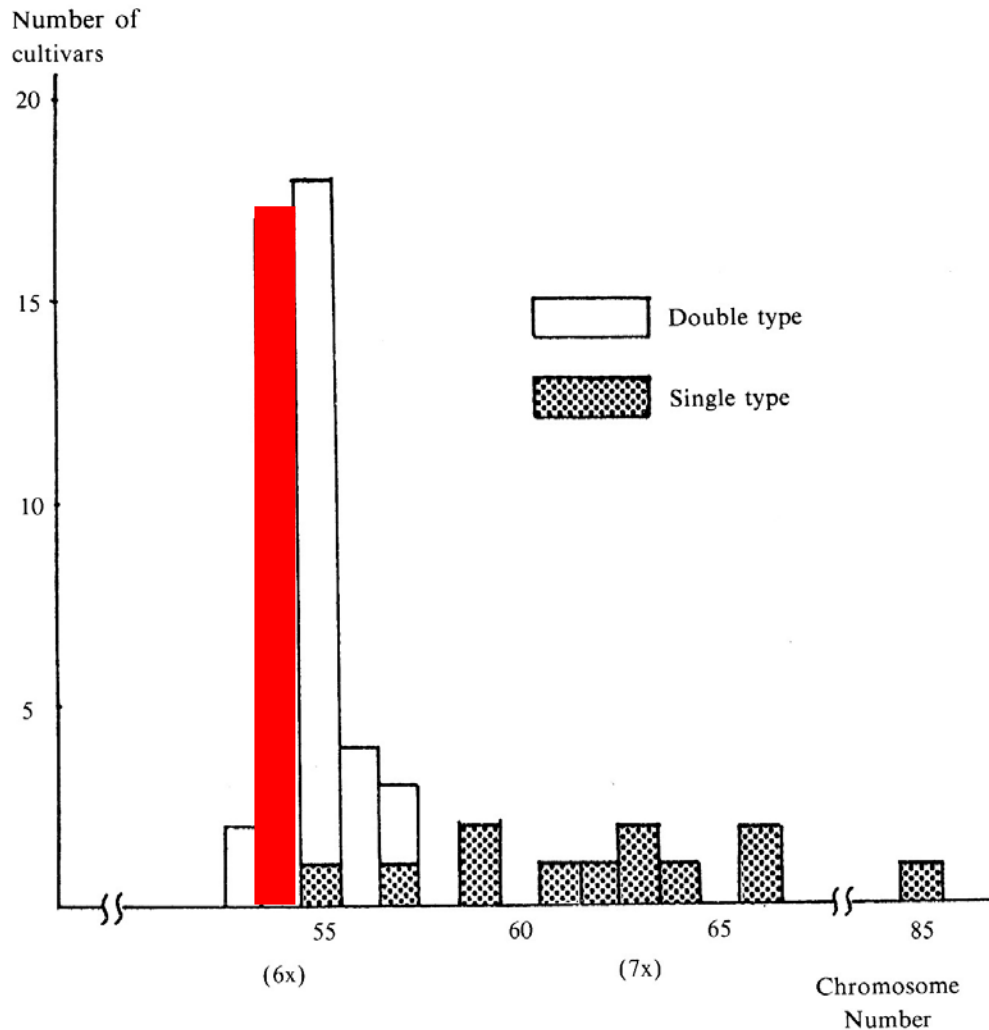


Fig. 1. Chromosome number of July to October flowering cultivars.

栽培ギクは六倍体を中心とした広い異数性を有している。現在までの変異は36～85。奇数の品種もかなり多く存在するが稔性には影響がない。

日本は世界一のキク生産国

平成26年花き生産統計	作付面積 (ha)	出荷数量 (千本・鉢)	産出額 (億円)
合 計	28,820	—	3,732
切り花類	15,090	3,949,000	2,086
キク	5,007	1,573,000	632
ユリ	772	144,100	214
バラ	378	276,500	187
カーネーション	326	283,000	123
トルコギキョウ	424	100,000	111
鉢ものの類	1,764	233,600	958
シクラメン	194	18,600	88
洋ラン類	210	15,900	312
観葉植物	315	42,900	119
花木類	424	48,200	174
花壇用苗ものの類	1,491	692,400	310
パンジー	294	144,400	51
花木類	4,178	84,627	246

日本は世界一？のキク生産・消費国

2014年のキク切り花の種類別生産動向

	輪ギク	小ギク	スプレーギク
作付面積 (ha)	2,627(52.4%)	1,651(33.0%)	728(14.5%)
出荷数量 (百万本)	855(54.3%)	476(30.2%)	241(15.3%)

注 () 内は切り花ギク全体に対する比率

15億7300万本
(切り花花きの約40%)の生産は世界一。輸入分の3億本も含めたキクがほぼ国内で消費。



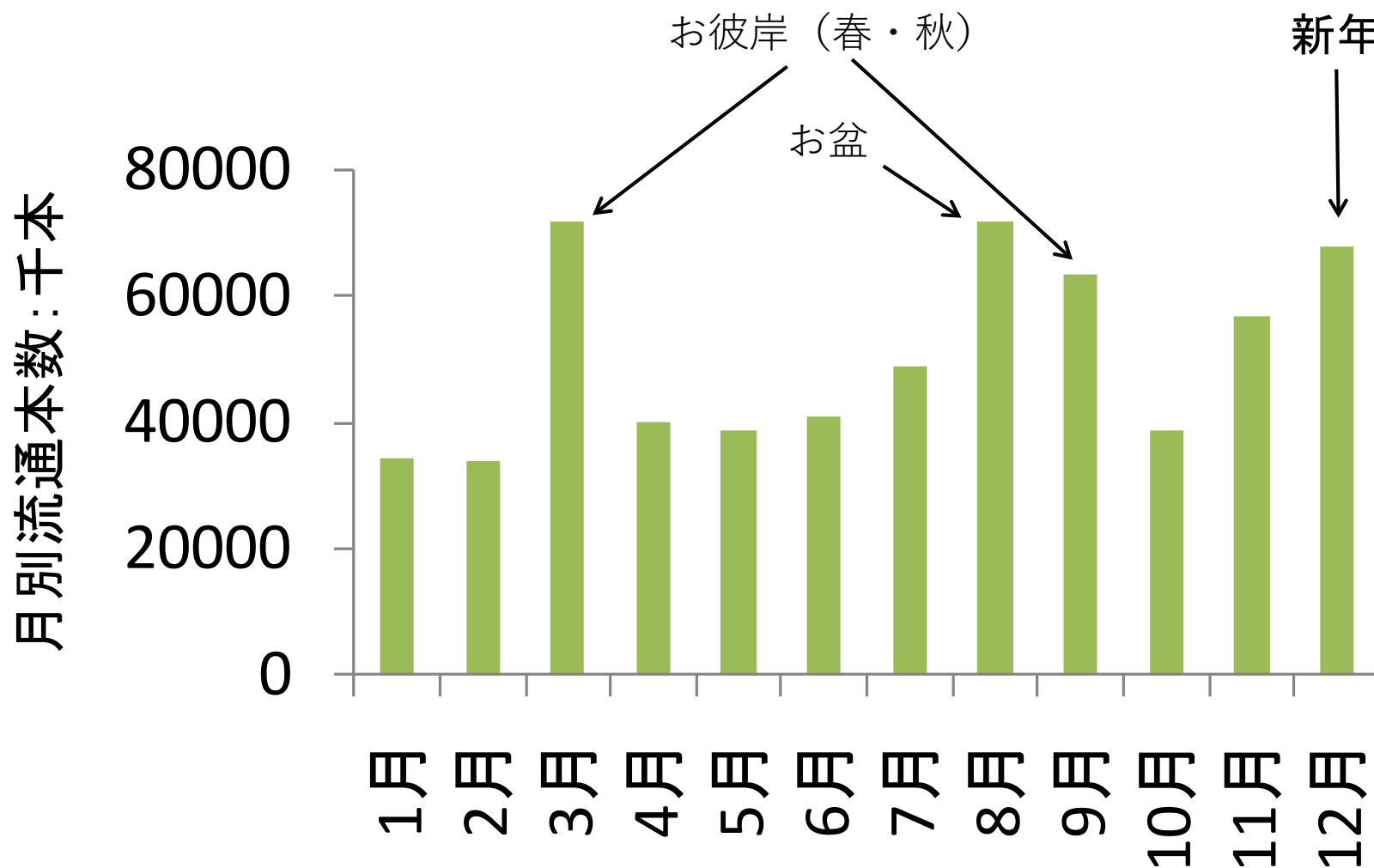
輪ギク



スプレーギク

摘蕾労力不要、
省力生産可能
1974年、川田穰一
氏により導入

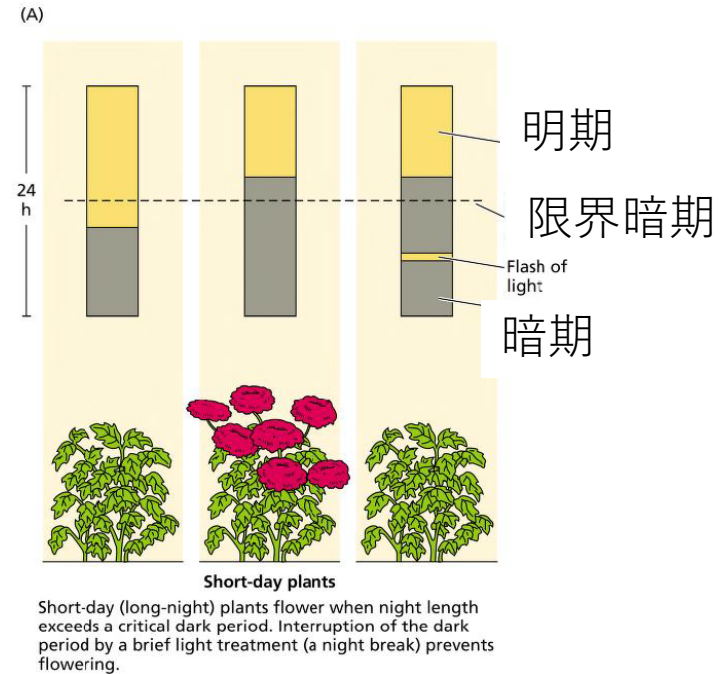
主要卸売り市場のキクの月別卸売り本数



光周性 (Photoperiodism)の発見



Plant Physiology and Development 6th edition より



PLANT PHYSIOLOGY 3rd edition Figure 24.19

1920年にGarnerと Allardによって発見

昼（または夜）の長さを感じて開花する

1930年代には人為的な日長制御による
キクの商業生産が開始



日本におけるキクの電照栽培

沖縄（露地）



愛知（ガラス温室）

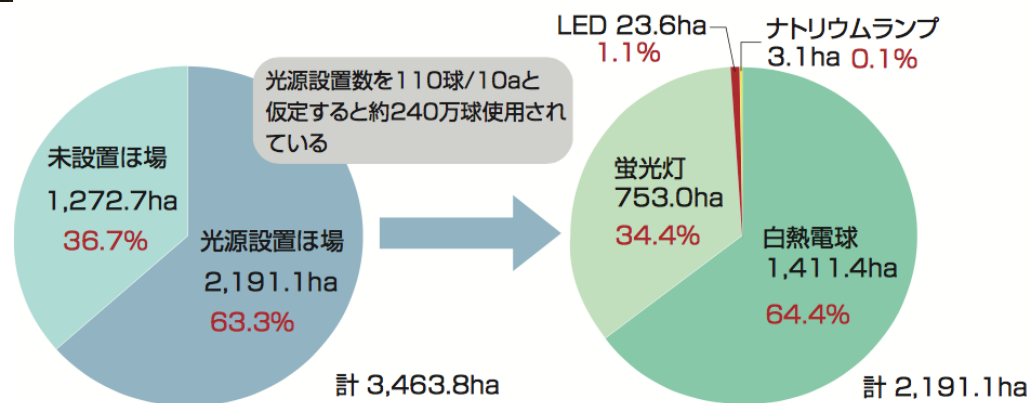
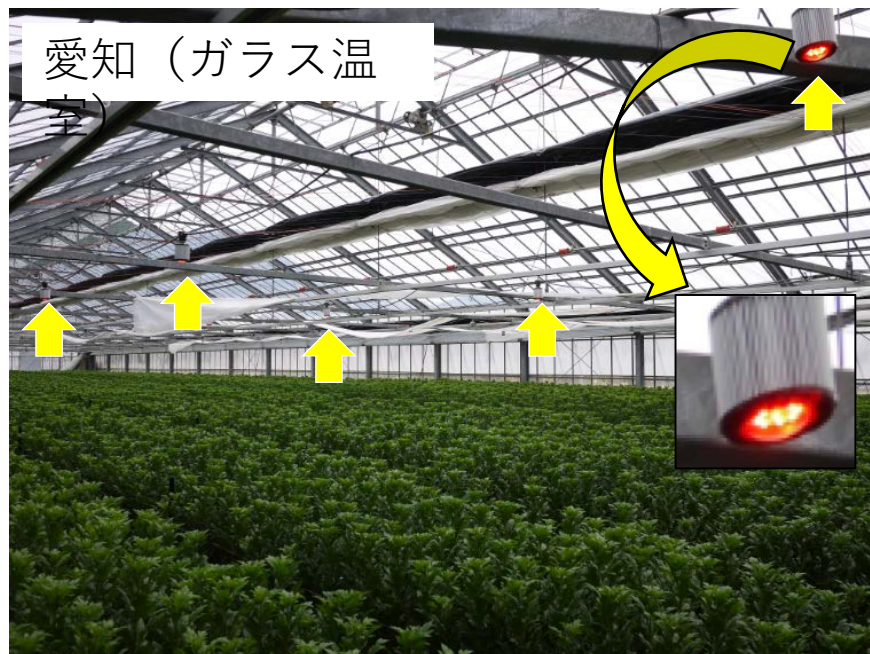


図1 光源設置ほ場の割合

図2 光源設置きく類栽培ほ場に占める各種光源の割合

全国キク栽培圃場の約**63%** (2,191 ha)に電照用光源が設置

(郡山 2014)

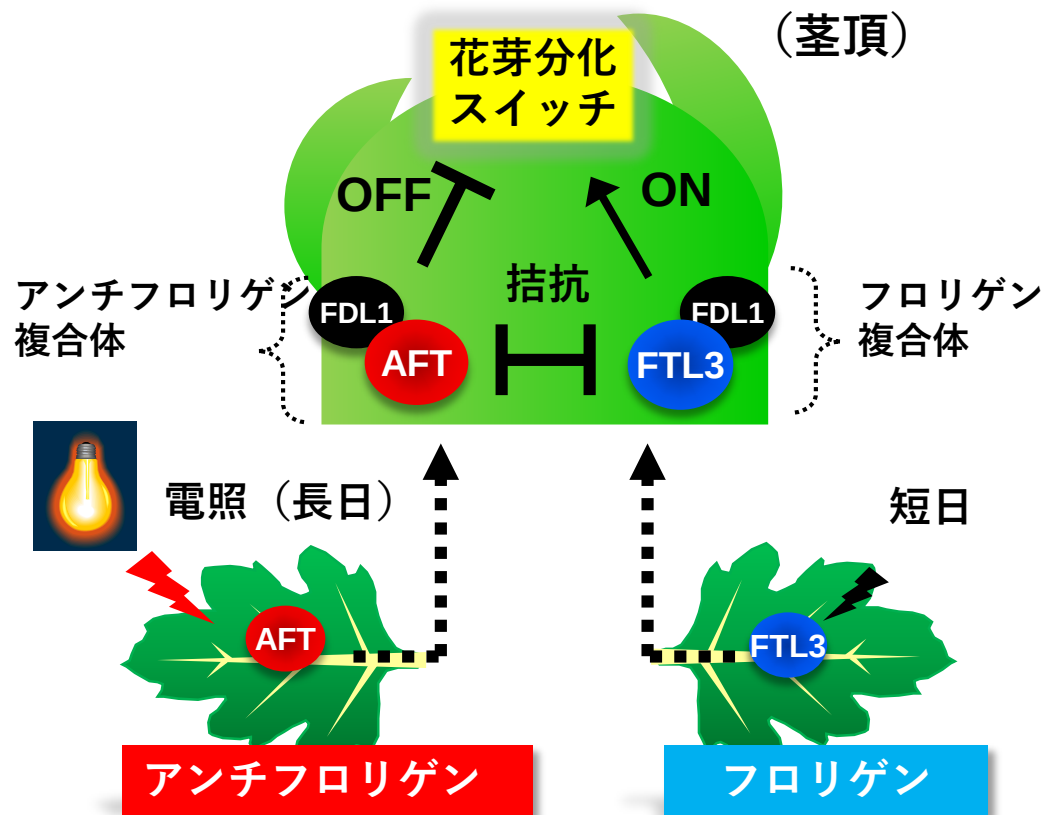
オランダにおけるキク周年生産（2012-2）



これまでに解明された キクの花成の分子機構



キクタニギク
(*C. seticuspe*)
二倍体 ($2n=2x=18$)



キクには、

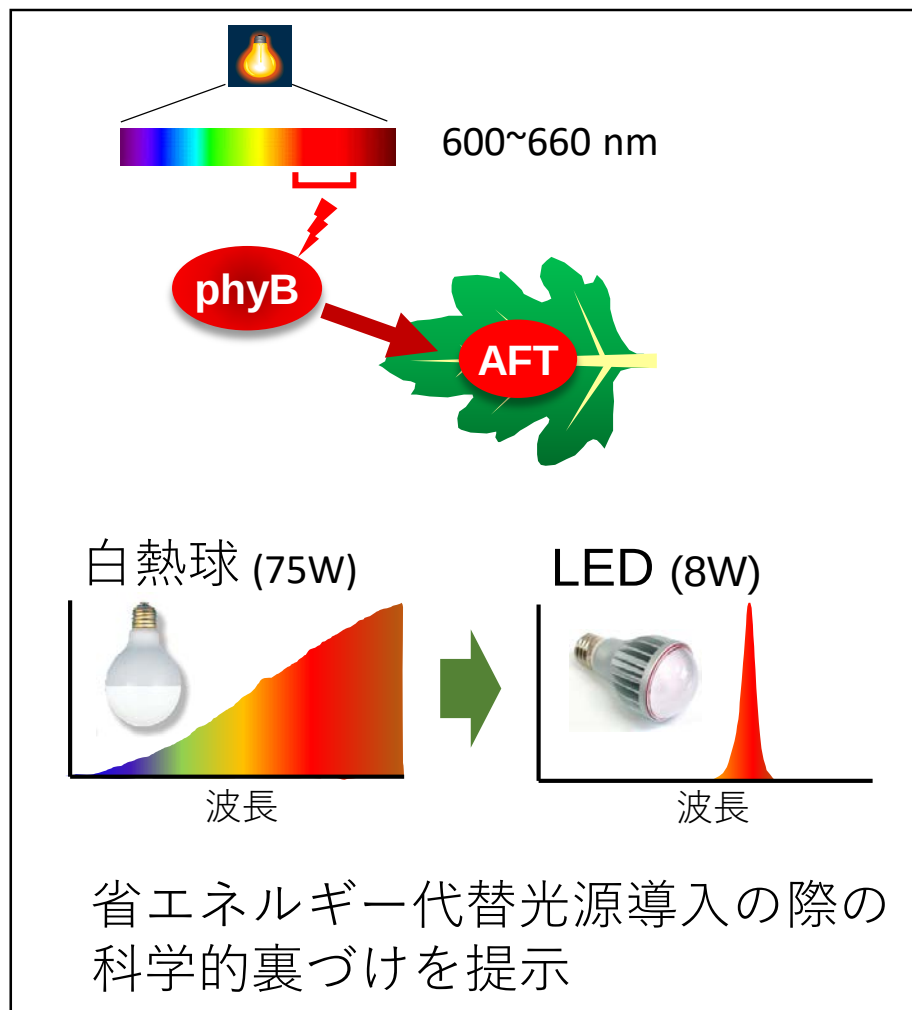
- ・フロリゲンによる
花成促進機構
- ・アンチフロリゲンによる
積極的な花成抑制機構

の2つが存在

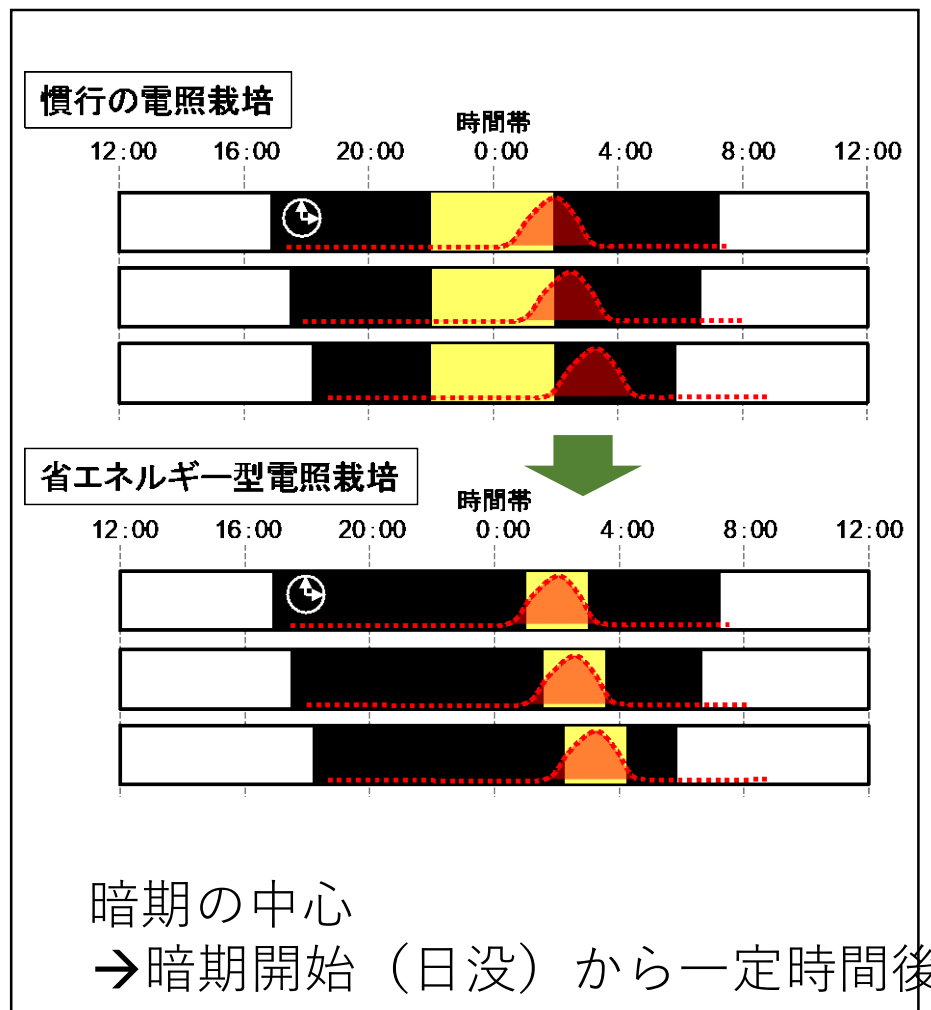


キクの省エネルギー電照栽培技術への応用

電照波長域の最適化



電照時間帯の最適化



前年秋



花弁を取り除き袋かけ



T字状の柱頭に交配

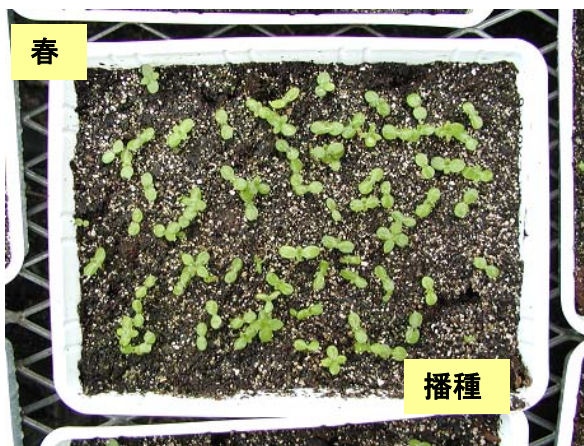
受精で柱頭短縮

冬



交配2か月後に採種

春

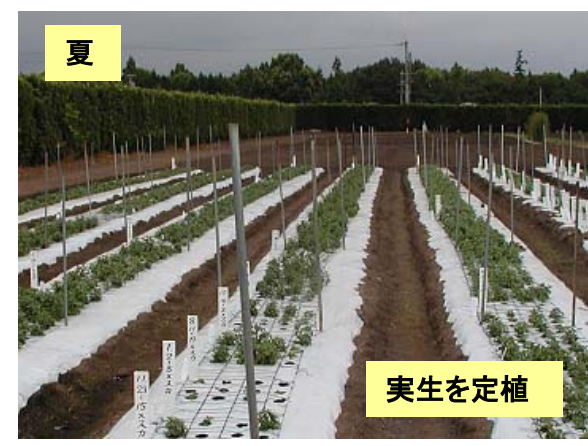


播種



実生を育苗

夏



実生を定植

キクの交配から実生の開花までの流れ

営利生産用の品種育成では、これらの過程はごく最初の部分であり、実際は、一次選抜以降に数年間をかけて数回の選抜を経た上で初めて品種となる。この間、周年生産性を含む開花に関する特性検定、親株のウイルス、ウイロイドの保毒検定、水あげや日持ち性に関する流通適性の検定などが行われる。

秋



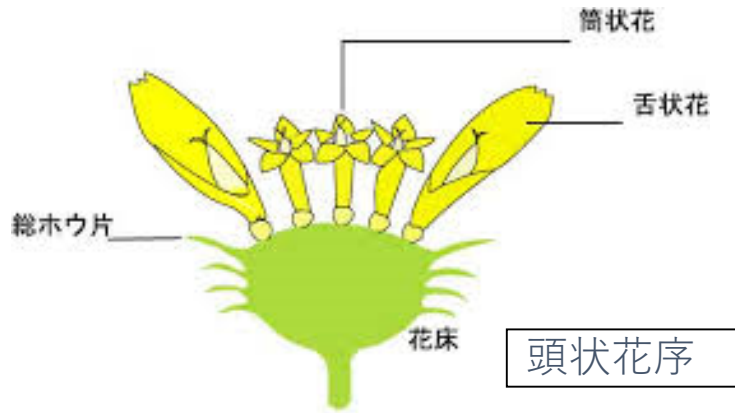
一つ一つが
オリジナル

実生の開花



傑出した品種は十万あるいは百万に一つの確率とされる

キク科の花の特徴（集合花：頭状花序）



筒状花と舌状花（キク科）



キク: 栄養繁殖性 (挿し芽で殖やすことができる)

主要切り花品目の異なる季節における花持ちの調査

品目	品種	処理	花持ち日数
夏季試験			
輪ギク	岩の白扇	23°C・DW	20.0±0.0
スプレーギク	クラリス	23°C・DW	20.0±0.0
バラ	ロ・テロ・ゼ	23°C・DW	6.7±0.0
SPバラ	パリ	23°C・DW	7.7±0.0
カーネーション	エキモ	23°C・DW	10.2±0.0
SPカーネーション	キス	23°C・DW	11.3±0.0
ガーベラ	キムシ	23°C・DW	13.7±0.0
ヒマワリ	サンリッチマンゴ -50	23°C・DW	10.0±0.0
秋季試験			
輪ギク	神馬	23°C・DW	20.0±0.0
スプレーギク	ディックモナ	23°C・DW	20.0±0.0
バラ	ロ・テロ・ゼ	23°C・DW	6.7±0.0
SPバラ	パリ	23°C・DW	11.7±0.0
カーネーション	こまち	23°C・DW	16.0±0.0
SPカーネーション	オレンジ	23°C・DW	7.3±0.0
ガーベラ	キムシ	23°C・DW	12.2±0.0
ダリア	黒蝶	23°C・DW	4.3±0.0

市村ら（花き研報）2011より作表

キク:花持ち性に優れる



第3図 秋季試験における花持ち検定の様子
A. 輪ギク「神馬」切り花（23°Cで保持，花持ち検定開始後22日目）。左：DW，右：GLA。B. コギク「桜岡」切り花（23°Cで保持，花持ち検定開始後14日目）。左：DW，右：GLA。C. ダリア「黒蝶」切り花（23°Cで保持，花持ち検定開始後6日目）。左：DW，右：GLA。

キクの花色に関する色素



アントシアニン

カロテノイド



フラボノイド

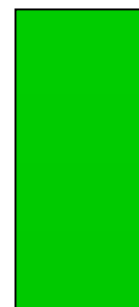
アントシアニン

カロテノイド



種間交雑で得られた藤色の
雑種‘キク安濃1号’

キクには青色はない



クロロフィル

ヨーロッパで10年間トップ

Reagan (セイローザ)



80品種以上の枝変わり

突然変異育種により生まれた花色変異（レーガン系品種） 25

キク属の細胞遺伝学的特徴

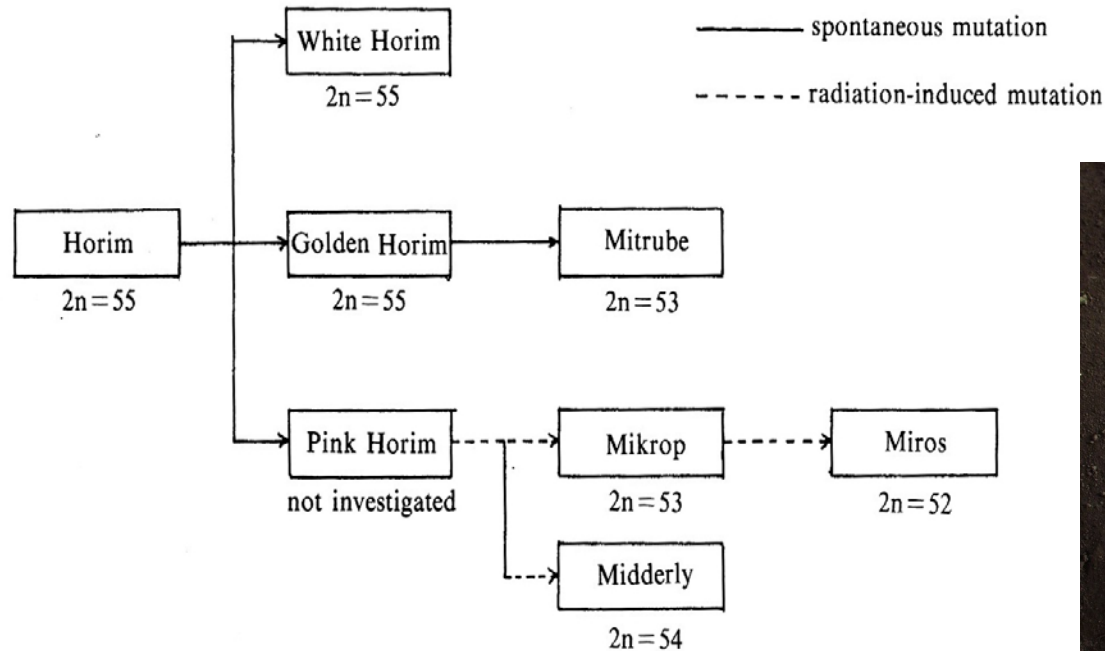


Fig. 3. The process of mutation breeding in Horim series.

枝変わりは染色体数の減少を伴う場合が多い。スプレーギク枝変わり品種群「ホリム」では3本の減少が確認されている。

キクの枝変わりの異数性を伴う周縁キメラ構造



小花培養

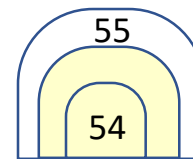
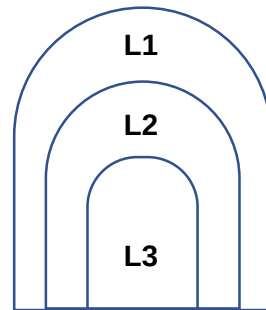


ライオンヤギーヘビ

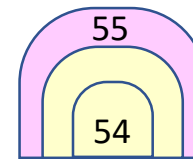


キメラ

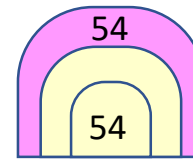
茎頂の起原層



ポリッシュドマーブル



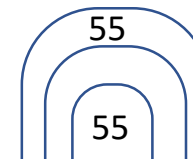
アプリコットマーブル



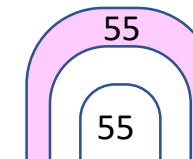
コーラルマーブル



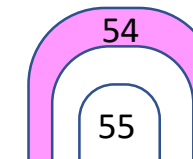
アントシアニン



ホワイトマーブル



ピンクマーブル



ブルーマーブル



カロテノイド

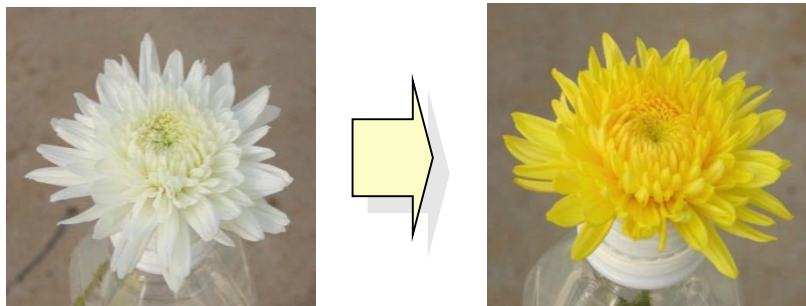
2n染色体数

2006年 *CmCCD4a*遺伝子の発見

栽培ギクの花弁の黄色は主にカロテノイドによる。

白色(優性) > 黄色(劣性)である。白色から黄色の枝変わりが生じるが、その逆は起こらない。

カロテノイド生合成抑制遺伝子の存在が推測されていた。



舌状花特異的に発現するカロテノイドを分解する遺伝子があることがわかった。

白色のキクでも一旦カロテノイドは生成されており、カロテノイド酸化開裂酵素遺伝子(*CmCCD4a*)によって分解される。

1979年 無側枝性ギクの育成

長野県のキク育種家、小井戸直四郎氏が無側枝9月咲きギク品種「松本の月」を発表。

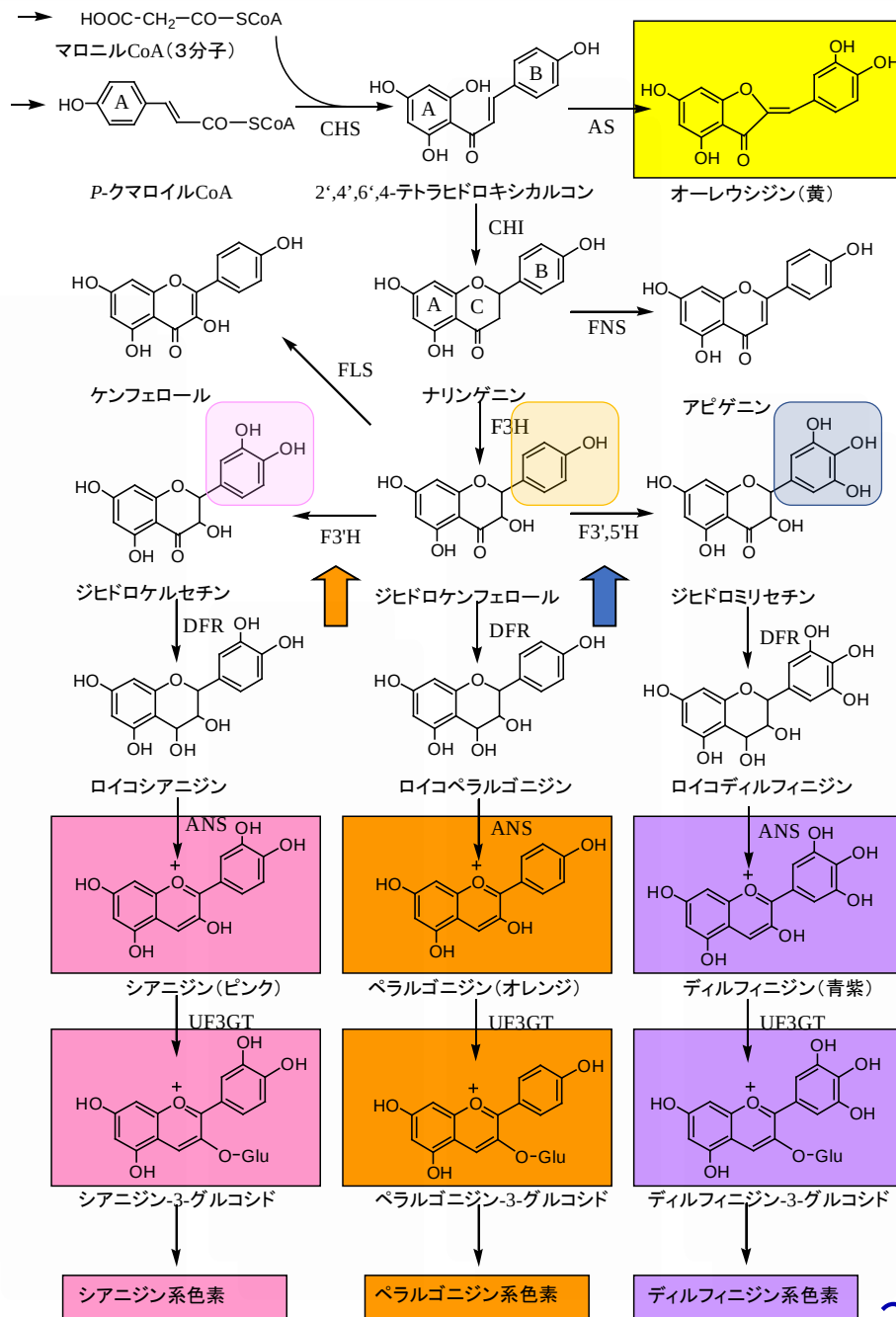


現在の無側枝性代表品種
省力生産用輪ギク
「精の一世」



ペラルゴニンジン
シアニンジン

シアニンジン



カルコン

F3'5'H

青色遺伝子

F3'H

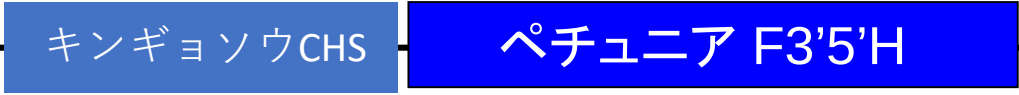
デルフィニンジン



カーネーション・バラの花色改変(サントリー)

導入遺伝子の模式図



カーネーション  



変更



変更

バラ 



ペチュニア、リンドウ、チョウマメ、トレニア 由来
F3'5'H → デルフィニジンは蓄積せず

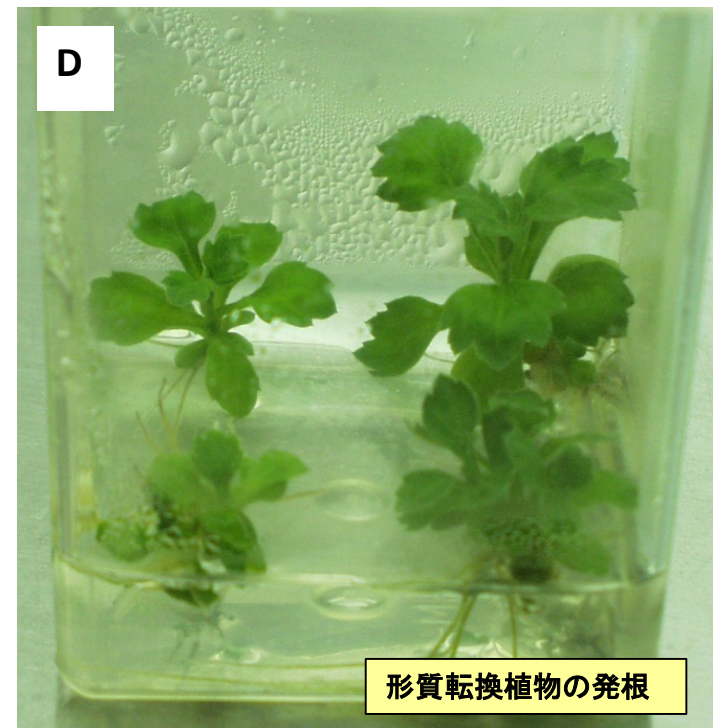
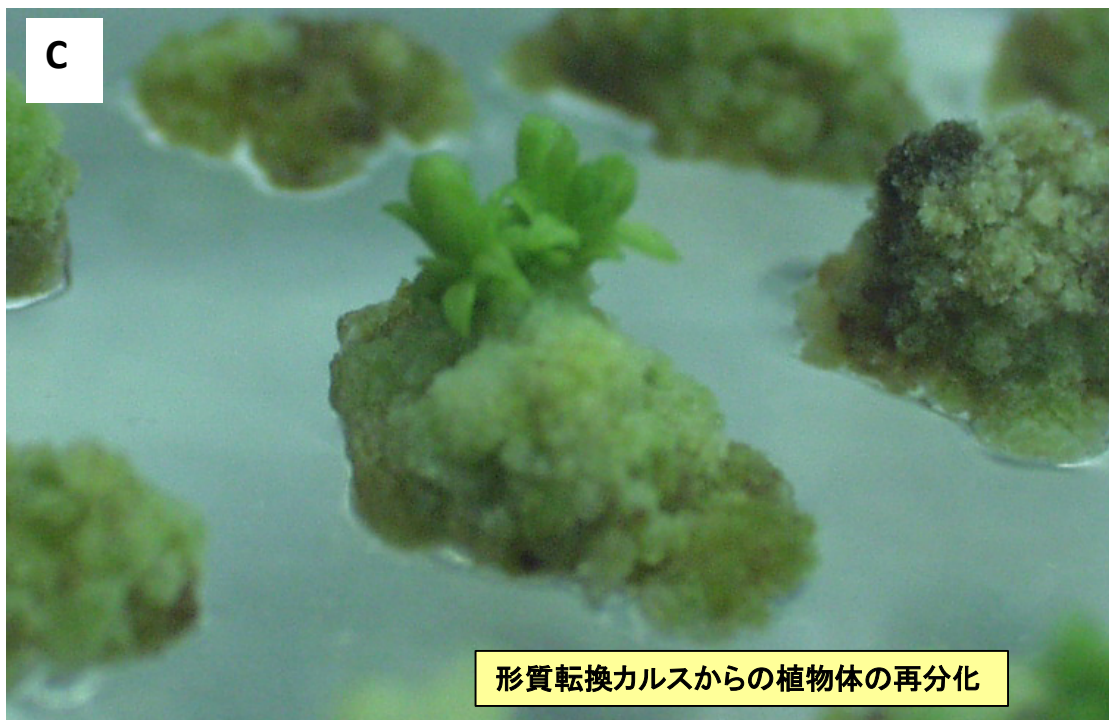
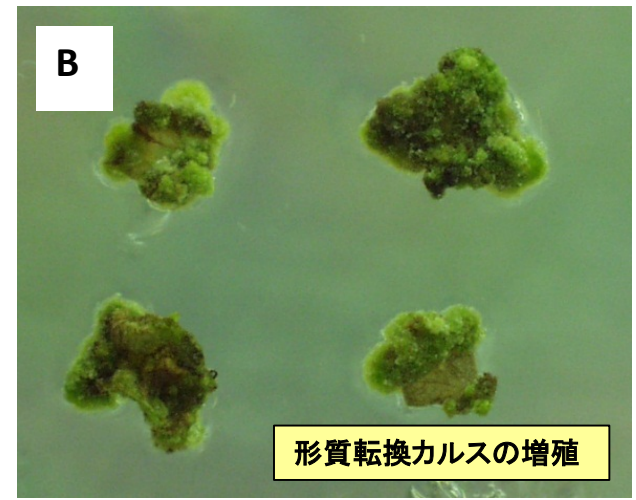
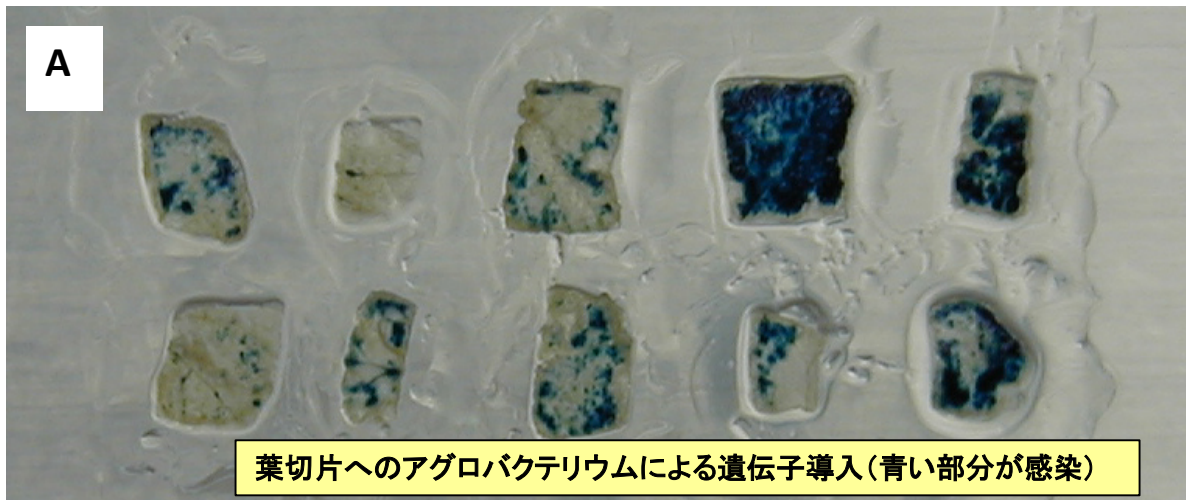
青いカーネーション・ムーンダスト(1997年～)



青いバラ……アプローズ(2009年～)



左：アプローズ、右：元のバラ品種



キクの遺伝子組換えの流れ

青いキクの創出(農研機構・花き研究所)

2003年～2006年 (研究開始は1991年)

タバコ EF1 α	ペチュニア F3'5'H
タバコ EF1 α	パンジー F3'5'H
タバコ EF1 α	ラベンダー F3'5'H



2007年～2008年

プロモーターの検討(7種類)

キク花卉特異的 プロモーター	パンジー F3'5'H
-------------------	-------------



最大で27%
(平均14%)

デルフィニジン
が蓄積!



2009年～2010年

F3'5'H遺伝子の検討(10種類)

キク花卉特異的 プロモーター	カンパニュラ F3'5'H
-------------------	---------------



ほぼ100%

デルフィニジン
が蓄積!



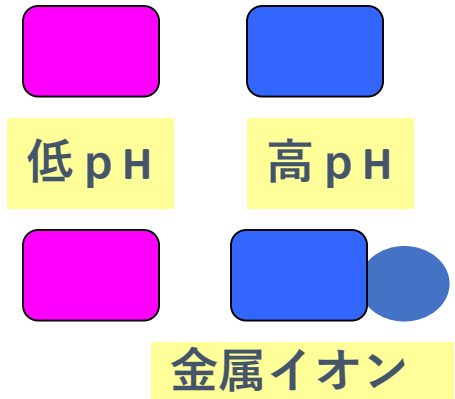
導入元品種

農研機構花き研究所で撮影

カンパニュラ由来の青色遺伝子を導入したキク

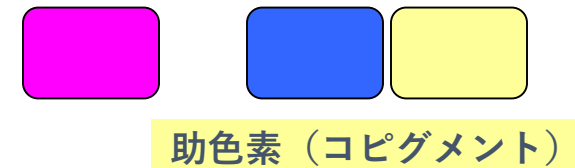
花の色（青色花色の謎）

Willstatter (1913) pHが青色発色に関わっている

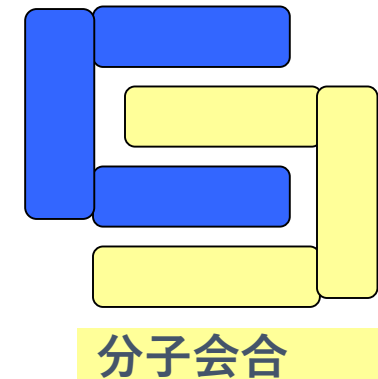


柴田・柴田 (1916～19) 金属イオンが関わっている

Robinson (1930) 助色素が関わっている



Asen, 後藤、林 (1970年代) 分子が会合している



80年近くもの間、謎！

花の色（青色花色の謎）

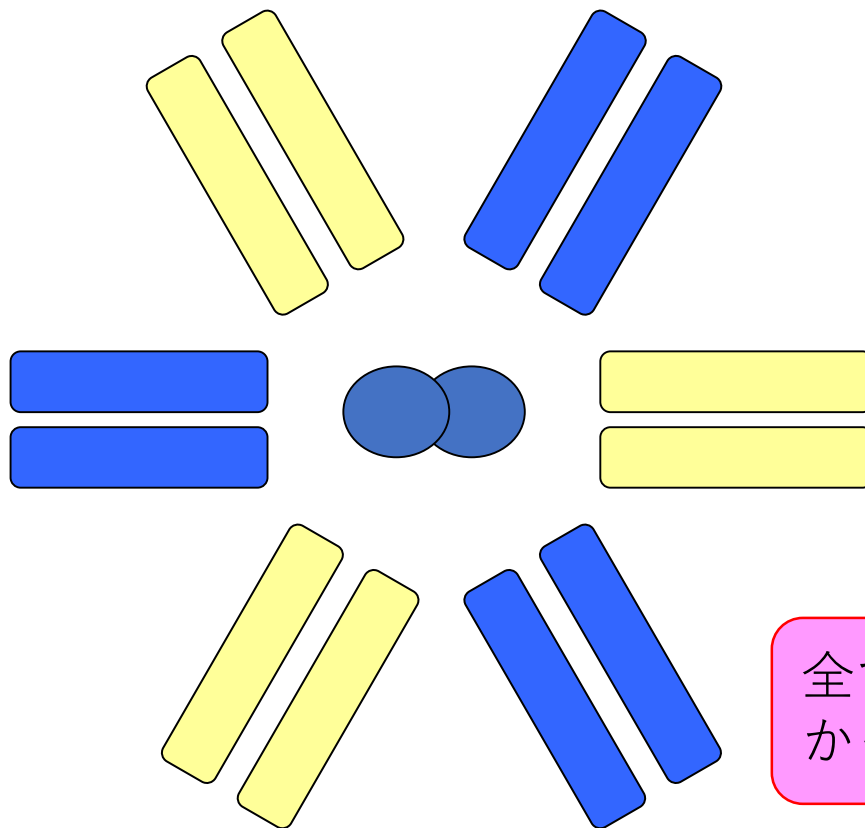


色素（アントシアニン）

助色素（フラボン）

金属イオン（マグネシウム）

1. 金属イオンが関わっている
2. 助色素が関わっている
3. 分子が会合している
4. 高pH条件がこの分子形成に関わっている



全て正しかった！

Kondoら（1992）より作図

ネモフィラの丘－40万株の中に変異体が・・



本当に青いキクの開発(2017.7)



Generation of blue chrysanthemums by anthocyanin B-ring hydroxylation and glycosylation and its coloration mechanism
(アントシアニンのB環の水酸化と配糖体化による青いキクの創出とその花色発現のメカニズム)

– Science Advances



Scientists genetically engineer the world's first blue chrysanthemum

– Science News



Scientists Give a Chrysanthemum the Blues

–The New York Times

‘True blue’ chrysanthemum flowers produced with genetic engineering

–Nature News



カンパニュラ由来
F3'5'水酸化酵素遺伝子

チョウマメ由来
A3'5'糖転移酵素遺伝子

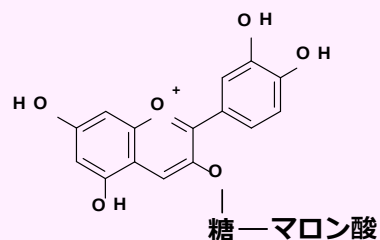


プレスリリース「青いキク」が誕生
農研機構. 2017.8.4

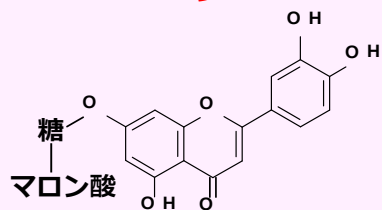


カンパニュラ
F3'5'H

もとのキク



シアニジン型アントシアニン



共存する無色のフラボン

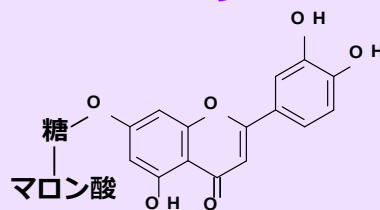


チョウマメ
A3'5'GT

紫色のキク



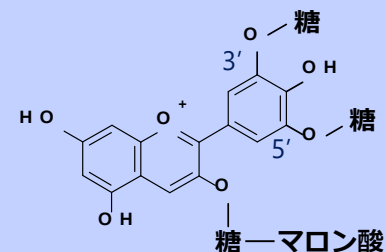
デルフィニジン型アントシアニン



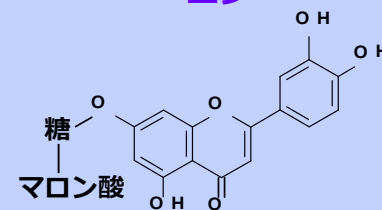
共存する無色のフラボン



青色のキク



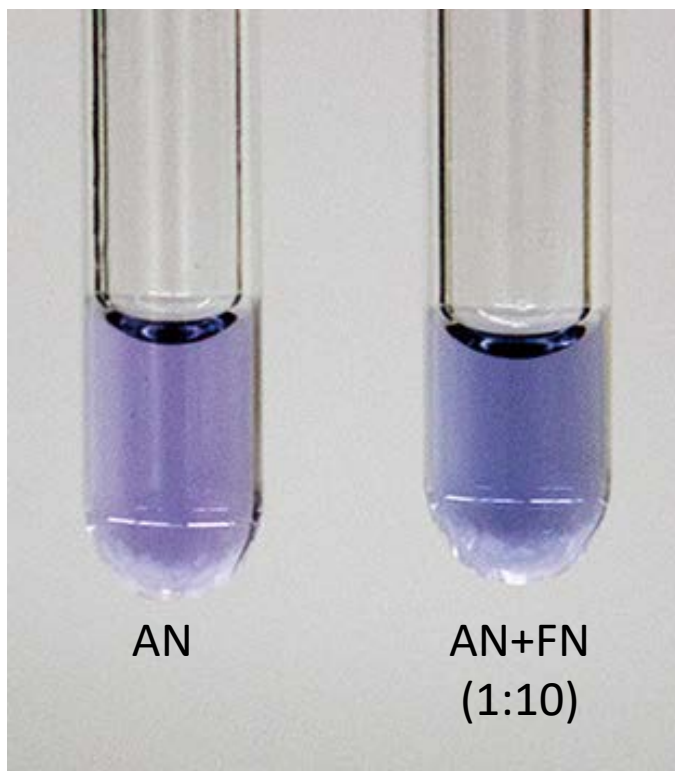
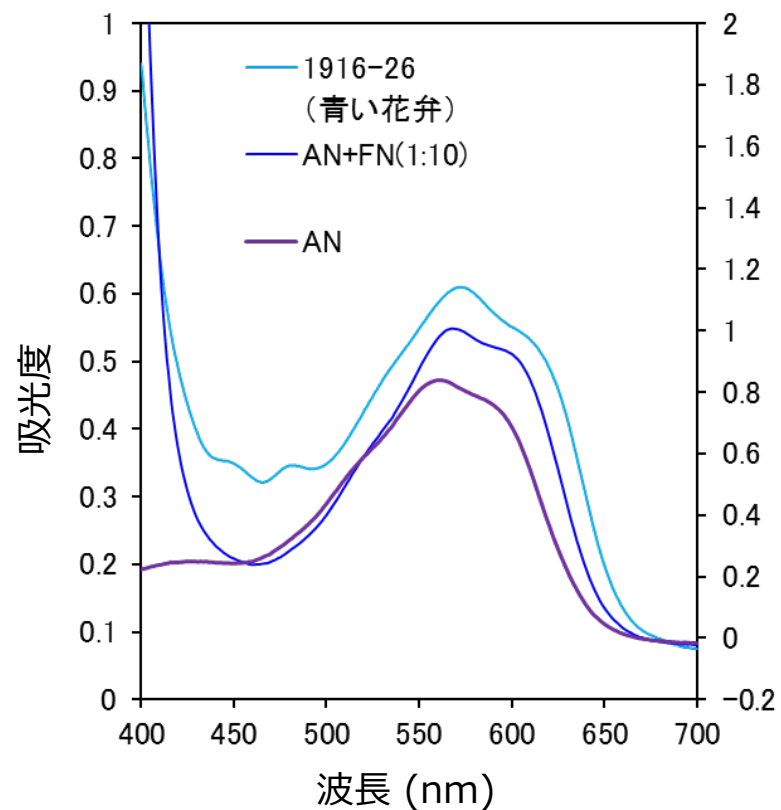
3'位と5'位に糖が結合した
デルフィニジン型アントシアニン



共存する無色のフラボン

青いキクの開発と青色発色の仕組み

(農研機構 野田尚信 原図)

A**B**

アントシアニンとフラボンの共存による
青色発現ーコピグメンテーションー

(農研機構 野田尚信 原図)



デコラ咲き



アネモネ咲き



ポンポン咲き

さまざまな花型の「青いキク」

(農研機構 野田尚信 原図)

新花なくして進化なし

小井戸直四郎

育種改良は遺伝子組換えによる変異の拡大の賜物

種内変異の獲得も遺伝子組換えの結果である

植物では挿し芽繁殖が当たり前

クローン増殖が実用化している

花柱切断授粉法や胚培養の利用

人工授精も実用化している

遺伝子組換えも育種改良に必須な技術

種内変異

品種間交雑

遠縁交雑

遺伝子組換え