芽の数と気温がサフラン子球生産とクロシン総量に及ぼす影響

宮川沙千¹・伊藤博通¹・宇野雄一¹・黒木信一郎¹・宮地大樹¹・
北秋広徳¹・植田頼親²・小林真土²・鍛冶研一²

¹神戸大学大学院農学研究科 657–8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1–1

²関西鉄工株式会社 660–0834 兵庫県尼崎市北初島町 56

Effect of Plant Shoot Number and Air Temperature on Saffron (*Crocus sativus* L.) Corm Production and Total Crocin Content

Sachi MIYAGAWA¹, Hiromichi ITOH¹, Yuichi UNO¹, Shinichiro KUROKI¹, Daiki MIYAJI¹,
Hironori KITAOKI¹, Yorichika UEDA², Masato KOBAYASHI², Kenichi KAJI²

¹Graduate School of Agricultural Science, Kobe University, Rokkodaicho 1–1, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657–8501, Japan

²Kansai Tekko CO., LTD., Kitahatsushimacho 56, Amagasaki-shi, Kobe, Hyogo 660–0834, Japan

Abstract

Saffron (*Crocus sativus* L.) is one of the medicinal bulbous plants. Stigmas of saffron contain crocin, which is a major medicinal property in saffron. The life cycle of saffron comprises four stages: flower bud formation, flowering, formation of daughter corms (FD) and development of daughter corms (DD). Several studies have reported that air temperature induced the transition from one stage to the next and that if corm weight exceeded 20 g, almost all corms flowered. In this study, the effects of air temperature and number of shoots on the production of daughter corms were examined.

In experiment 1, eight experimental treatments were prepared. Eight corms were hydroponically cultivated in each treatment. After flowering, either one or two shoots were allowed to grow. Air temperature was set at 17/17 °C or 15/6 °C (light/dark) in FD and changed to 18/15 °C or 15/7 °C in DD. Daughter corms were harvested when half the length of leaves withered. In experiment 2, the harvested daughter corms from experiment 1 were planting and air temperature was set at 17/17 °C in flowering. After flowering, stigmas were harvested and crocin concentration in dry stigmas, and total crocin content per corm was measured.

The results revealed that fresh weight of daughter corms exceeded 20 g in all conditions. Moreover, fresh weight of daughter corms and crocin concentration increased when the air temperature in DD was 15/7 °C. Total crocin content obtained from flowers of a mother corm was higher under the condition of two shoots than that obtained when there was only one shoot. It was concluded in this study that optimal conditions for saffron production were obtained when two shoots were allowed to grow at 15/7 °C in DD.

Keywords: crocin, daughter corm, development, formation, saffron

2015 年 3 月 26 日受付

2015 年 8 月 12 日受理

Corresponding author: Hiromichi Itoh

(hitoh@kobe-u.ac.jp)

緒 言

サフラン (*Crocus sativus* L.) は秋咲きクロッカスの一種で地

中海沿岸からインドに至る地域を原産とする多年生草本である。一般に香辛料や染料として用いられているが、日本薬局方にも登録されており医薬品としても高値で取引されている¹⁾。厚生労働省が定めたサフラン 1 g あたりの薬価は 354.0 円と高値に設定されている²⁾。可食部は柱頭で、主成分として、赤色のカロテノイド色素、辛味成分であるピクロクロシン、香りの良いサフラナールなどがある³⁾。カロテノイド色素の中に含まれているクロシンには抗腫瘍活性があることが分かっている³⁾。日本の伝統薬である漢方薬の有効性に関する研究の進歩により漢方薬の認知度が上がり、漢方・生薬製剤などの需要は増加している⁴⁾。サフランもその例に漏れず、2008 年における日本国内の生薬としての使用量は 541 kg であったのに対し、翌年 2009 年では 1211 kg、2010 年では 941 kg であることから⁵⁾、近年、急激に需要が増加していることが分かる。しかし、使用量に対する中国を含む他国の生産量の割合は 2008 年では約 93 %、2009 年では約 97 %、2010 年では約 99 %⁵⁾と年々増加しており、供給のほとんどを他国からの輸入に依存している。サフランの栽培方法には球茎を植え付け、植え付けたままで採花を行い、そのまま球茎を肥大させる露地栽培と、球茎を室内で開花させた後に畑地に植え付け、球茎を肥大させる室内栽培の 2 つの方法がある。日本では室内栽培が行われており、天候に左右されず採花作業を行うことができる。病害の発生が少ない⁶⁾、クロシンの含有量が他地域のサフランに比べて高含有である³⁾といった利点がある。しかし、露地栽培に比べ球茎の増殖率が低い、良質な球茎が得られにくいという問題がある。

植物工場は閉鎖空間で作物を生産するため、天候に左右されずに安定的で安全な作物生産が可能であるという利点がある。しかし作物の生育環境を全て人工的に制御するため、設備費やランニングコストなど、高い生産コストを必要とする。このため高付加価値植物の生産が必要である。高付加

価値植物の安定生産という点に鑑みてサフランは植物工場で生産する植物として適していると考えられ、サフランの生産性を向上させる環境調節技術が必要である。

サフランは分球によって増殖することから、サフランを安定的に栽培するためには良質な子球を生産する必要がある。子球重量の違いによって開花率が異なり、20 g 以上の球茎ではほぼ 100 % 開花する⁶⁾ことから球茎の質の指標の一つとして球茎重量が挙げられる。そこで本研究では、環境制御によって重量が大きく、多くの柱頭とクロシンが得られる良質な子球の生産を実現するための最適な栽培条件を解明し、植物工場の採算性の改善に寄与することを最終目的とする。

サフランの生育段階は花芽創始、花芽分化、花芽発達などの過程を経て花芽を形成する花芽形成期、花芽形成が終了して開花する開花誘導期、子球形成期、子球肥大期の 4 段階に分けることができる。一般に球根植物の生育段階の変化は温度の影響を受けていることが知られている^{7,8)}。そこで本報では球茎重量に対するサフランの子球形成・肥大期の環境条件の影響を検証するために実験 1 を行った。また、実験 1 で得られた子球から収穫できる柱頭乾燥重およびクロシン濃度を指標として子球の品質を評価するために実験 2 を行った。

材料及び方法

1. 検証項目

サフラン球茎の子球重量に影響を与える環境条件を検討するために以下の検証項目を設定した。

1.1 検証項目 1 芽の数

サフラン栽培で次世代の球茎となる子球は母球表面から出芽した芽の基部に形成され、芽の数だけ子球が形成される。しかし、芽の数が過大であると多くの子球が得られるが、

Table 1 Eight combinations of the three environmental conditions.

Experimental treatment	Low-temperature processing in FD ^z	Air temperature in DD ^y	Number of shoots
a	Off ^x	High ^v	1
b	Off	High	2
c	Off	Low ^u	1
d	Off	Low	2
e	On ^w	Low	1
f	On	Low	2
g	On	High	1
h	On	High	2

^zFD: formation of daughter corms, ^yDD: development of daughter corms

^{x, w}: Temperature condition is 17 / 17 °C (light / dark) and 15 / 6 °C in the case of Off and On, respectively

^{v, u}: Temperature condition is 18 / 15 °C (light / dark) and 15 / 7 °C in the case of High and Low, respectively

子球重量が小さくなる⁶⁾。芽の数は子球重量に影響を与える重要な要因の1つであると考えられる。予備実験の結果では芽の数を3つとすると大きな子球が得られなかった。そこで子球重量に対する芽の数の影響を検証するために芽の数が1つの試験区と2つの試験区を設けた。

1.2 検証項目2 子球形成期の低温処理の有無

フリージアやチューリップのように秋植え球根植物の中には子球形成のために低温遭遇が必要な種がある⁷⁾。そこでサフランの子球形成に対する低温処理の必要性、また子球重量に対する低温処理の影響を検証するため、低温処理試験区と未処理試験区を設けた。

1.3 検証項目3 子球肥大期の温度条件

Mohamedらは春咲きのクロッカス (*Crocus vernus* L.) は12/8℃または18/14℃(明期/暗期)で栽培すると12/8℃の方で球茎乾燥重量が増加したと報告している⁹⁾。この知見から、子球重量に対する子球肥大期の温度条件の影響を検証するために高温条件試験区と低温条件試験区を設けた。

これら3つの検証項目を組み合わせ、a～hの8試験区を設定した。各試験区の検証項目の組み合わせをTable 1に示す。

2. 実験1

子球重量に対する芽の数および気温の影響を解析するための実験を行った。

2.1 供試作物

供試作物として大分県竹田市産のサフラン球茎を使用した。球茎は2012年10月9日に神戸大学に到着後、室温23℃に設定した暗黒条件の室内で6日間静置した。その後、水耕栽培を行った。到着した球茎の花芽形成の進行程度は確認していない。しかし、サフランは4月中旬頃に球茎を収穫する⁶⁾。また、Molinaらは収穫した球茎を25℃で保存した場合、約90日で雌ずいの形成が確認されたと報告している¹⁰⁾。そのため竹田市産の球茎は入手した時点で花芽形成が終了していたと考えられた。球茎は試験区毎に球茎重量の平均値に有意差が見られないよう選択した。

2.2 栽培方法

2012年10月15日に実験1を開始し、水耕栽培を行った。水耕栽培は育成チャンバー(日本医工器械製作所株、人工気象器LPH-410SPC)2台の中で、栽培容器(青色コンテナ(三甲株、サンボックス#7))に養液を入れ、その上に穴を8個開けた栽培用プレート(アクリルサンデー株、アクリルサンデーEX板、440mm×278mm)を設置して行った。定植する際に球茎の外皮を除去し、球茎の周囲をスポンジ(約5cm×20cm)で巻き、発根を促すため球茎底面に湿らせた正方形のスポンジ(約5cm×5cm)を球茎裏面に取り付け、栽培用プレートに設置した。養液には大塚ハウスA処方1/2倍

Fig. 1 Position of each experimental treatment after transplanting in the experiment 1.

Fig. 2 The measurement points for the calculation of bulbing ratio. Bulbing ratio is a ratio of the basal-portion diameter of shoot to the daughter corm diameter.

濃度を約5L使用し、週1回養液の交換を行った。また、栽培中はバブリング(テクノ高槻株、エアポンプHIBLOW AIR PUMP GP-30)を行った。光源には蛍光灯(NEC FHF32 EX-N-HX-S, NEC FL20SEX-N-HG)を使用した。一台の育成チャンバーの上下左右に4個の栽培容器を配置し、合計8容器を設置した。各容器が試験区となる。育成チャンバー①には試験区a, b, c, d、育成チャンバー②には試験区e, f, g, hを配置した。試験区の初期配置をFig. 1に示す。

定植後、開花を誘導するために先行研究¹¹⁾を参考に全試験区で開花に最適な温度である17℃に設定した。また日長は先行研究を¹¹⁾、その他の環境設定値は竹田市の環境条件を参考にした。環境設定値をTable 2に示す。

全試験区で開花終了を確認後、2012年11月21日に子球形成期と見なした。子球形成期では、試験区a, c, e, g

Table 2 Environmental conditions in each growing stage.

Factors	Parameters				
Growing stage	Flowering	FD ^z		DD ^y	
Temperature treatment	—	Off	On	High	Low
Humidity (%)	85	70			
Temperature (°C) Light / Dark	17/17	17/17	15/6	18/15	15/7
CO ₂ concentration(ppm)	400				
Photoperiod (h) Light / Dark	8/16	10/14			
Photon flux density($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	223 ~ 281				

^zFD: formation of daughter corms, ^yDD: development of daughter corms

は芽が1つ、試験区 b, d, f, h は芽が2つになるように摘芽を行った。なお、球茎最上部の腋芽を優先的に残した。その後、子球形成に対する低温処理の必要性を検証するために、育成チャンバー②の気温を15/6℃(明期/暗期)に変更し試験区 e, f, g, h に対し低温処理を行った。低温処理の温度条件は大分県竹田市の12月の気温を参考にした。また、育成チャンバー①の試験区 a, b, c, d は花芽形成が終了してから開花させるまでの開花誘導期の気温条件である17℃のままで栽培を継続した。日長およびその他環境条件は12月の竹田市の環境条件を参考にした。子球形成期の環境条件をTable 2に示す。

全試験区で子球形成を確認後、2013年1月8日に子球肥大期の環境条件に移行した。子球形成の判断基準にはbulbing ratio¹²⁾を使用した。Bulbing ratioとは茎の基部の最大径で子球直径を除いた値を示し(Fig. 2), bulbing ratioが1.5以上を示した時に子球形成が完了したと見なした。子球肥大期ではまず、育成チャンバー①の試験区 c, d と育成チャンバー②の試験区 g, h の位置を入れ替えた。そして育成チャンバー①(試験区 a, b, g, h)を高温条件、育成チャンバー②(試験区 c, d, e, f)を低温条件の環境に変更した。高温条件および低温条件の環境設定値をTable 2に示す。子球肥大期の温度条件は先行研究^{9, 13)}を参考にし、1日の平均気温が高温条件で16.3℃、低温条件で10.3℃になるよう設定した。試験区内の全球茎の葉の長さの半分以上が枯れた時に、試験区内の子球を収穫した。

3. 実験 2

柱頭乾燥重およびクロシン濃度に対する芽の数および気温の影響を解析するために実験を行った。

3.1 供試作物

供試作物には実験1で収穫した子球を使用した。子球の収穫時期は試験区毎に異なった。試験区 a, b は2013年4月24日、試験区 g, h は2013年4月26日、試験区 f は2013年5月20日、試験区 e は2013年5月24日、試験区 c は2013年6月11日、試験区 d は2013年6月19日に子球を収穫した。実験1の定植日を栽培日数0日目として子球

Table 3 Number of days from transplanting to harvest in the experiment 1.

Experimental treatment	Number of days for cultivation (d)
a	191
b	191
c	239
d	247
e	221
f	217
g	193
h	193

を収穫するまでの合計栽培日数をTable 3に示す。早く収穫した子球は最後の試験区収穫日まで、既に栽培が終了していた育成チャンバー①の中で子球肥大期の高温条件で保管した。全試験区の子球収穫後、文献¹⁰⁾を参考に恒温器(Panasonic, 冷凍機付きインキュベーター MIR-154)の中で90日間25℃で子球を静置して花芽形成処理を行った。

3.2 栽培方法

2013年9月17日に実験2を開始した。全試験区において実験1と同様2台の育成チャンバーを使用し水耕栽培を行った。実験1で試験区 a から収穫した子球を試験区 a として定植した。他の試験区も同等に実験1と試験区の名称を合致させた。実験1で8個以上の子球が収穫できた試験区では重量が大きい順に8個選択した。試験区間で球茎重量の平均値に対しクラスカル・ウォリス検定¹⁴⁾を行った所、有意水準5%で有意差が見られた。球茎の外皮を除去し定植する際に、実験1とは異なり球茎の状態を観察しやすくするため、スポンジは使わず栽培用プレートの裏に網を張った。網の上に球茎を静置後、養液が球茎底面に触れるようにタコ糸で球茎の高さを調節した。各栽培容器には実験1と同様に大塚ハウスA処方1/2倍濃度養液約5Lを使用し、週1回養液を交換した。育成チャンバー①に試験区 a, b, c, d, 育成チャンバー②に試験区 e, f, g, h を配置した(Fig. 1)。開花を誘導するために育成チャンバー内をTable 1の環境設定とした。開花後、柱頭を収穫し柱頭乾燥重とクロシン濃度を測

Fig. 3 Criterion for determination of full bloom. Solid line and circle indicate the diameter of flower. Broken line indicates maximum distance between edges of flower petals in opposite direction. A; Not full bloom. B; Full bloom.

定した。

3.3 柱頭の収穫方法

採花は1日の決められた時間に行った。サフラン柱頭に含まれる薬効成分であるクロシンの含有量は花が満開期に最大になることが分かっている³⁾。そこで花を真上から見た時に花の直径と向かい合った花びらの先同士の間隔の最大値が1:1となった時を満開期と定義し、満開期に採花した(Fig. 3)。花から柱頭をピンセットで引き抜いた後、柱頭の赤色の部分以外を除去した。その後、柱頭を収穫し、すぐに恒温乾燥器(エスベックミック(株), LC-123)で60℃6時間乾燥した。そして電子天秤(新光電子(株), 高精度・音叉式天びんAJ II-220)で柱頭乾燥重を測定した。乾燥させた柱頭はシリカゲルを敷き詰めた密閉容器に入れ、-20℃で保存した。

3.4 クロシン濃度の測定方法

日本薬局方に定められた方法を参考にして行った¹⁾。柱頭を乾燥後、試験区毎に乳鉢で粉末にした。粉末0.100gを1サンプルとした。粉末0.100gに温湯150mLを加え、振とう恒温槽(タイテック(株) WATER BATH SHAKER PERSONAL-11)を用いて120min⁻¹, 70℃で30分加温した。室温まで冷却後、定性濾紙(アドバンテック(株) No.131)でろ過した。ろ液1mLをメスフラスコに入れ10mLに定容した。これを試料溶液とした。カルバゾクロムスルホン酸ナトリウム三水合物0.0980gをメスフラスコに入れ蒸留水を加え100mLに定容した。その溶液5mLをメスフラスコに入れ蒸留水を加え正確に100mLに定容し、これを標準溶液とした。試料溶液および標準溶液を紫外可視分光光度計(島津製作所(株)分光光度計UV-160A)で、蒸留水を対照とした波長438nmにおける吸光度を測定した。標準溶液は2回、試料溶液は1サンプルにつき4回測定した。標準溶液の吸光度より試料溶液の吸光度が大きかった場合、医薬品の規格基準

を満たす¹⁾。試験区同士の吸光度を比較するため、試料溶液の吸光度から標準溶液の吸光度を引いた値をクロシン濃度と定義した。

4. 解析方法

2群間の平均値の検定にはノンパラメトリック検定の一種であるウィルコクソン検定を使用した¹⁴⁾。また3群以上の分散分析にはクラスカル・ウォリス検定を使用した¹⁴⁾。

結果と考察

1. 子球重量

子球重量は実験2の定植直前に測定した子球の重量である。各試験区の子球重量の結果をFig. 4に示す。開花率がほぼ100%となる子球重量20g以上の球茎を全試験区で収穫することができた。

芽の数の影響を検証するために芽の数のみが違い温度条件が同じ試験区同士(試験区aとb, 試験区cとd, 試験区eとf, 試験区gとh, Table 1)を比較した。芽が1つの試験区の方が2つの試験区より子球重量が大きい傾向が見られた。試験区ab間, ef間では有意差が見られた($p < 0.01$)。

低温処理の有無にかかわらず、全ての芽の基部に子球の形成を確認した。多くの秋植え球根植物は球根形成には低温遭遇が必要であるが、サフランの子球形成には低温遭遇は必要ないと考えられた。子球重量に対する子球形成期の低温処理の有無の影響を検証するために子球形成期の温度条件のみが違う試験区同士(試験区aとg, 試験区bとh, 試験区cとe, 試験区dとf)を比較した。試験区bh間では低温処理ありの試験区hの方が有意に大きかった($p < 0.05$)。しかし試験区df間では低温処理未処理試験区dの方が有意に大きかった($p < 0.01$)。また試験区ag間、試験

Fig. 4 Results of daughter corm weight after flower bud formation. Error bars represent standard deviation. (a, c, e, g: $n = 8$; b: $n = 14$; d, f, g: $n = 13$) petals in opposite direction. A; Not full bloom. B; Full bloom.

Fig. 5 Results of number of flowers and dry stigma weight. Error bars represent standard deviation. ($n = 8$)

区 ce 間では有意差は見られなかった。以上の結果から子球重量に対する低温処理の有無の影響に一貫した傾向が見られなかった。

子球重量に対する子球肥大期の温度条件の影響を検証するために子球肥大期の温度条件のみが違う試験区同士 (試験区 a と c, 試験区 b と d, 試験区 e と g, 試験区 f と h) を比較した。肥大期に低温条件の試験区の方が高温条件の試験区より子球重量が大きくなる傾向が見られた。試験区 ac 間では $p < 0.10$, 試験区 bd 間, 試験区 eg 間では $p < 0.01$ で有意差が見られた。サフランは 10 月中旬から 11 月中旬に開花し, 11 月から 4 月中旬の子球収穫までに子球を形成・肥大させ, 葉の長さの半分以上が枯死した時に子球を収穫する⁶⁾。そのため, 自然条件下では気温が低い時期に子球が肥大している。実験 1 において低温条件で子球重量が大

きくなる傾向が見られたことから, 自然条件と同様に低温が子球肥大を促進する要因であると考えられる。低温条件下で子球肥大が促進された原因として, シンク能の持続が考えられる。Mohamed らは, 春咲きのクロッカス (*Crocus vernus* L.) は高温条件下では球茎の細胞成長は早い但し停止も早いと報告している⁹⁾。Lundmark らは春咲きクロッカスの球茎成長が高温条件で抑制されるのは炭素分配が変化し細胞伸長から分化に切り替わることで細胞の成長期間が短縮されるからであると述べている¹³⁾。またサフランはシンク能が減少することで葉が枯れると考えられている¹⁵⁾。子球収穫は葉が半分以上枯れた時に行った。Table 3 から肥大期に高温条件であった試験区 a, b, g, h は他の試験区と比較して葉が枯れる時期が早かった。このことからサフランでも肥大期の高温によって炭素分配の様子が早く切り替わり, 細胞の成長が停止した

Fig. 6 Relationship between daughter corm weight and dry stigma weight. ($n = 64$)

Fig. 7 Results of crocin concentrations. Error bars represent standard deviation. (a, c, h: $n = 4$; e: $n = 12$; f, g: $n = 8$)

ことによるシンク能の抑制が早期に起こったため、高温条件で子球重量が小さくなったと考えられる。一方で、低温条件では高温条件で見られた現象が起こらず、高温条件よりシンク能が持続し、子球が肥大したと考えられる。

2. 採花数および柱頭乾燥重

子球あたりの採花数および柱頭乾燥重の結果を Fig. 5 に示す。採花数および柱頭乾燥重は試験区毎に大きく異なった。Douglas らは球茎重量の増加に伴い、採花数および柱頭生体重が増加すると報告している¹⁶⁾。採花数および柱頭乾燥重は球茎重量の影響を大きく受けると考えられる。Fig. 5 から各試験区に対する採花数と柱頭乾燥重の変化が同様の傾向を示していることから、サフラン栽培の収量を示す柱頭乾燥重に注目した。柱頭乾燥重と球茎重量の関係を Fig. 6 に示す。柱頭乾燥重と球茎重量との相関係数 r_s は 0.2337 という低い値を示した。また試験区 d では球茎重量が 40 g 以上もある大きな球茎であっても開花しない球茎があった。このため子球重量に影響を与える芽の数や気温などの検証項目とは別の要因が採花数や柱頭乾燥重に影響していると考えら

れる。この要因の 1 つに花芽形成の進行の違いが挙げられる。Molina らは花芽形成期間が短期化および長期化のどちらの場合でも採花数が減少したことを示している¹³⁾。実験 1 で子球の収穫時期は試験区毎に異なった。しかし実験 2 の定植は一斉に行った。そのため試験区毎に花芽形成期間が異なった。この花芽形成期間の差異が花芽形成の進行および採花数、柱頭乾燥重に影響を与えていたと考えられる。そのため柱頭乾燥重の結果は検証項目以外に花芽形成期間の温度履歴の影響を受けている可能性がある。

3. クロシン濃度

各試験区のクロシン濃度の結果を Fig. 7 に示す。試験区 b, d は吸光度測定に必要な量の乾燥柱頭が得られなかったため、吸光度を測定できなかった。吸光度が測定可能であった全試験区で試料溶液の吸光度が標準溶液の吸光度を上回っていた。従って試験区 a, c, e, f, g, h では日本薬局方の基準を満たしており、医薬品としての販売が可能であることが示された。

子球形成の温度条件の影響を検証するために子球形成

Fig. 8 Results of total crocin content. Error bars represent standard deviation. ($n = 8$)

期の温度条件のみが違う試験区同士 (試験区 a と g, 試験区 c と e) を比較した。しかし有意差は見られなかった。このことから子球形成期の気温はクロシン濃度には影響を与えなかったと考えられる。

子球肥大の温度条件の影響を検証するために子球肥大期の温度条件のみが違う試験区同士 (試験区 a と c, 試験区 e と g, 試験区 f と h) を比較した。肥大期に低温条件の試験区のクロシン濃度が大きい傾向が見られた。試験区 a, c 間 ($p < 0.05$) および試験区 e, g 間, 試験区 f, h 間 ($p < 0.01$) で有意差が見られた。またクロシン濃度と球茎重量との相関係数 r は 0.8833 を示し子球重量とクロシン濃度との間に正の相関が認められた。クロシンは光合成産物のグルコースを起点としてメバロン酸経路または非メバロン酸経路を通り, β -カロテン, ゼアキサンチン, クロセチンを経て生合成される^{17, 18)}。重量の大きい子球にはグルコースの貯蔵形態であるデンプンが多量に含まれていた可能性がある。そのため肥大期に低温にすることで子球重量とクロシン濃度が大きい高品質な子球を収穫できると考えられる。

4. クロシン総量

吸光度で定義したクロシン濃度を柱頭乾燥重 0.100 g 当りのクロシンの量と仮定して, 1 個の球茎から得られるクロシン総量を求めた。球茎あたりのクロシン総量を (1) 式に示す。

$$T = \frac{C}{0.100} \times W \quad (1)$$

T はクロシン総量, C は試験区の平均のクロシン濃度, W は個々の球茎から得られた柱頭乾燥重 (g) を表す。

各試験区の球茎あたりのクロシン総量の結果を Fig. 8 に示す。試験区 b と d はクロシン濃度を測定できなかったためクロシン総量を算出できなかった。柱頭乾燥重は花芽形成期間の影響を受けている可能性があるため, Table 3 より栽培日数がほぼ同じ, 即ち花芽形成期間がほぼ同様な試験区同士 (試

験区 e と f, 試験区 g と h) を比較した。比較した試験区同士は芽の数だけが違う。芽が 1 つの試験区の方においてクロシン総量が大きい傾向が見られた。ef 間では有意に芽の数が 1 つの試験区 e の方が大きくなった ($p < 0.05$)。これは芽が 1 つの試験区の方で子球重量が大きい傾向があったからであると考えられる。芽の数が 2 つの試験区内で同じ母球から生産された子球を 2 群に分け, 検定を行った結果, 有意差がなかった。従って芽が 2 つの試験区ではほぼ重量の等しい子球が 2 個得られると考えられる。また, 試験区 c, d は芽の数だけが違い環境条件は同一であるが, ほぼ同程度の重量の子球が得られた。そのため, 試験区 c, d のように環境条件によっては芽が 2 つの試験区でも芽が 1 つの試験区と同程度の重量を持つ子球を生産できることから, 将来的に芽の数が 2 つの試験区では芽が 1 つの試験区より多くの球茎が収穫でき, 2 倍のクロシン総量が得られる可能性がある。また実際に栽培する際に 1 個の球茎につき 1 個の子球しか生産できないと仮定すると, 1 個でも子球の育成に失敗すると次世代のサフランの収量が低下するという危険性がある。また, 全ての試験区の平均子球重量はほとんど全ての球茎が開花する子球重量である 20 g 以上になった (Fig. 4)。さらに, 試験区 b 以外は母球の球茎より球茎重量の大きい子球を得ることができた (データ省略)。以上のことからクロシン総量増加のためには芽の数が 2 つの方が良いと考えられた。

5. 収穫後温度処理の検討

実験 2 の 25 °C 90 日間という温度処理の条件は文献¹⁰⁾を参考に決定した。しかし, 文献では球茎を掘り上げてから 25 °C の温度処理を行うまでに球根の乾燥, 農薬処理といった作業期間が存在した。今回の実験では子球を収穫後すぐに 25 °C 90 日間の温度処理を行った試験区 d は採花数が少なかった。従って, 最適な採花数を増大させる温度処理期間はもう少し長いと考えられる。また, 試験区 d 以外の試験区の球茎

Table 4 Accumulated temperature from the harvest date to transplanting date (A) ($n = 8$) and total number of flowers in each treatment (B).

Experimental treatment	A (°C · d)	B
a	3202	26
b	3202	11
c	2386	19
d	2250	11
e	2692	37
f	2760	30
g	3168	24
h	3185	20

は収穫後から花芽形成処理を開始するまで花芽形成の最適温度である 25 °C¹⁰⁾ よりも低い温度 (18 / 15 °C (明 / 暗)) で保管されていたが、採花数は試験区 d 以上であった。このため、最適温度よりも低い温度 (18 / 15 °C (明 / 暗)) でも花芽形成が進行したと考えられた。ハカタユリは開花までに必要な積算温度が約 1400 °C であると報告されている¹⁹⁾。そこで、子球収穫後から定植までの積算温度に注目した。各試験区の子球収穫直後から定植までの積算温度の平均と合計採花数を Table 4 に示す。試験区 e で採花数が最大となっており花芽形成が最も適切に進行したと考えられる。そのため採花数を増大させる最適な収穫から定植までの積算温度の目安は 2700 °C · d であると考えられる。

摘 要

植物工場でサフランの最適な栽培環境条件を解明するため、芽の数、子球形成期の低温処理の有無および子球肥大期の温度条件に注目し栽培を行った。全試験区で 20 g 以上の子球が収穫できたこととクロシン総量は芽が 2 つの試験区の方が大きくなるという結果から芽の数は 2 つが良いと考えられた。子球形成期の低温処理はサフランの子球形成には必要がなかった。子球肥大期に低温条件にすると子球重量とクロシン濃度が大きくなる傾向が見られた。以上の結果、植物工場でサフランを栽培する最適な条件は芽が 2 つで子球肥大期には低温条件にすることであると考えられる。

引用文献

- 1) 厚生労働省．第十六改正 日本薬局方．1507．2011． (<http://jpd.b.nihs.go.jp/jp16/YAKKYOKUHO16.pdf>)
- 2) 厚生労働省．使用薬剤の薬価 (薬価基準) に記載されている医薬品について (平成 27 年 2 月 24 日適用) 全体版．92． (<http://www.mhlw.go.jp/topics/2015/02/dl/tp>

20150224-01_1.pdf)

- 3) 正山征洋．総説 サフランの薬理活性．長崎国際大学論叢．9: 61-71. 2009.
- 4) 川原信夫．生薬・薬用植物の資源確保及び生産流通の動向．技術と普及．8: 25-27. 2013.
- 5) 日本漢方生薬製剤協会 生薬委員会．原料生薬使用量等調査報告書 (2)ー平成 21 年度及び 22 年度の使用量ー．日本漢方生薬製剤協会．1-24. 2013.
- 6) 厚生省薬務局．薬用植物 栽培と品質評価 part4. 薬事日報．東京．27-37. 1995.
- 7) 小西国義．植物の生長と発育．養賢堂，東京．170-183. 1985.
- 8) 今西英雄．花卉園芸．文永堂出版，東京．133-141. 1997.
- 9) Mohamed AB, Peter EHM, Line L. Effects of temperature on the growth of spring ephemerals: *Crocus vernus*. *Physiol. Plantarum*. 130: 67-76. 2007.
- 10) Molina RV, Valero M, Navarro Y, Garcia-Luis A, Guardiola JL. The effect of time of corm lifting and duration of incubation at inductive temperature on flowering in the saffron plant (*Crocus sativus* L.). *Sci. Hortic*. 103: 79-91. 2004.
- 11) Molina RV, Valero M, Navarro Y, Guardiola JL, Garcia-Luis A. Temperature effects on flower formation in saffron (*Crocus sativus* L.). *Sci. Hortic*. 130: 361-379. 2005.
- 12) Le GSF, Hourmant A, Esnault A, Chauvin JE. In vitro Bulb Development in Shallot (*Allium cepa* L. Aggregatum Group): Effects of Anti-gibberellins, Sucrose and Light. *Ann. Bot.* 89: 419-425. 2002.
- 13) Lundmark M, Hurry V, Lapointe L. Low temperature maximizes growth of *Crocus vernus* (L.) Hill via changes in carbon partitioning and corm development. *J. Exp. Bot.* 60: 2203-2213. 2009.
- 14) 石村貞夫．分散分析のはなし．東京図書，東京．289-316. 2004.
- 15) Renau-Morata B, Nebauer SG, Sánchez M, Molina RV. Effect of corm size, water stress and cultivation conditions on photosynthesis and biomass partitioning during the vegetative growth of saffron (*Crocus sativus* L.). *Ind. Crop Prod.* 32: 40-46. 2012.
- 16) Douglassa MH, Smallfieldb BH, Wallaceb AR, McGimpsey JA. Saffron (*Crocus sativus* L.): The effect of mother corm size on progeny multiplication, flower and stigma production. *Sci. Hortic*. 166: 50-58. 2014.
- 17) 塩井祐三，井上弘，近藤矩朗．ペーシックマスター植物生理学．株式会社オーム社，東京．115-262. 2009.
- 18) Bolhassania A, Khavaria A, Bathaieb SZ. Saffron and natural carotenoids: Biochemical activities and anti-tumor effects. *Biochim. Biophys. Acta*. 1845: 20-30. 2014.
- 19) 土谷英真，大久保敬，比呂松道一，金鐘和．ハカタユリ (*Lilium brownie* var. *colchesteri*) の開花調節．九大農学芸誌．61: 65-170. 2006.