

農業センサを用いた トルコギキョウの個体損失の確率モデリング

本廣 多胤¹ 花田 裕美² 吉廣 卓哉^{3,a)}

受付日 2019年5月8日, 採録日 2019年11月7日

概要: 農業従事者の高齢化にともない, 農業 IoT の導入による農業の効率化が求められている. センサを農場に設置して常時観測し, 客観的な指標に基づいて栽培における各種判断をすることが期待されている. 従来の経験に基づいた栽培を脱し, 客観的指標に基づいた農業のマニュアル化・大規模化が可能になる. しかし, センサを用いて大量のデータを取得し, 植物の特性を把握したうえで適切な栽培判断の指標を確立するためには, 多くの変数をとまなうデータ分析が必要となる. 本研究では, 経済的価値の高い実用花卉であるトルコギキョウを対象として, 栽培時に起こるロゼット化およびプラスチングと呼ばれる個体損失要因を分析する. 土壌センサを用い, 組合せ的に設計された試験からデータを取得し, 階層ベイズモデルを用いた個体損失の予測モデルを構築することで, 個体損失が発生する条件を解明することを目指す. トルコギキョウにおける既存の知見に基づいて個体損失モデルを設計し, センサの測定値と組合せ的な試験区設計に基づいて取得したデータを適用した. その結果, ロゼット化およびプラスチングに対する各要因の影響の度合いを数値化し, それらの結果が既存の知見と合致することを確認しただけでなく, 個体損失に関する新規の知見を得られる可能性を見出した.

キーワード: 階層ベイズモデル, 農業 IoT, トルコギキョウ, データ分析

Probabilistic Modeling of Individual Loss in *Eustoma Grandiflorum* with Agricultural Sensors

MASATSUGU MOTOHIRO¹ HIROMI HANADA² TAKUYA YOSHIHIRO^{3,a)}

Received: May 8, 2019, Accepted: November 7, 2019

Abstract: As farmers in Japan are getting aged recently, improving efficiency in agriculture with IoT technologies is strongly expected. With sensor data obtained from crop fields, agricultural operations based on objective measurements would be possible. This also enable us to enhance the magnitude of agriculture per person. However, highly sophisticated data analysis method based on large amount of sensor data is required to make proper decision to improve efficiency in agriculture. In this study, we target on several cultivars of lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) and investigate two main cause of loss, i.e., rosetting and blasting. We designed a growth experiment in combination with many environmental conditions and obtained data. We also designed a statistical model to explain the two loss probabilities with sensor data and environmental conditions based on Bayesian hierarchical modeling methodology. As a result of applying data to the proposed model, we not only confirmed that the obtained trends match the knowledge on the specialist of horticulture, but also revealed the possibility to find a new trend on rosetting and blasting.

Keywords: eustoma, Bayesian hierarchical model, IoT in agriculture

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

² 和歌山県農業試験場暖地園芸センター
Horticultural Experiment Center, Wakayama Agricultural Experiment Station, Gobo, Wakayama 644-0024, Japan

³ 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

a) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年、農業従事者の高齢化にともない大量離農への危機感が高まっている。日本の農業は小規模農家の効率的な生産により支えられている。これらは、農業従事者の豊富な経験に裏付けられているが、その経験を新規農業者が得ることは容易ではない。また、離農にともなう耕作放棄地を集約して大規模かつ効率的な農業を行うことが求められるが、そのためには、経験に依存することのない、センサ等の客観的指標に基づいた栽培判断が不可欠となる。

客観的指標に基づいた栽培手法のマニュアル化を実現するための方法として、多様な栽培条件で栽培試験を行い、センサ等の多数の測定値を用いた統計分析により、植物の生育特性を明らかにすることが考えられる。この方法では、対象植物に関する既存の知見から栽培条件を決定し、これを組合せ的に適用する栽培試験を行うことで、対象植物の生育に影響を与える主要条件の影響を分析できる。しかし、現在の農業、特に本研究が対象とする花卉等を栽培する園芸分野では、試験実施の手間や統計分析技術の不足等の理由で、1試験で実施する栽培条件を1種類に絞る等、非効率的な実験がなされることが多い。情報分野で用いられるような高度な分析技術をうまく適用することで、従来に比べてはるかに効率的な栽培試験を行うことができる。さらに、農業IoT技術として各種センサを用いた測定を組み合わせることで、客観的な測定値をデータに加えた、より精密な分析が可能になる。これらの方法により、効率的な栽培判断を行うための、対象植物の生育特性の把握を大きく促進することができる。

本研究では、冠婚葬祭に広く用いることができる経済価値の高い装花であるトルコギキョウを対象とする。トルコギキョウは古くから存在する花卉であるが、近年になって花卉数が多い八重の品種が開発され、この10年程度の間装花として広く用いられるようになった。ゆえに、まだ効率的な栽培手法が確立されておらず、経験に強く依存して栽培されている。また、その生育特性にも未知な部分が多く、特性の解明による安定生産技術の確立が求められている。トルコギキョウは、茎の伸長が止まるロゼット化、蕾が生育を停止し枯死するプラスチックと呼ばれる個体損失を起すことが知られており、栽培中の個体損失率の低減が、効率栽培の1つの鍵である。

本研究では、ロゼット化に対して効果があるとされている複数の処理条件を組合せ的に適用する栽培試験を実施し、土壌センサデータと処理条件から、ロゼット化とプラスチックの発生確率をモデル化する。組合せ的な条件とセンサデータを同時に扱うために、階層ベイズモデルに基づいたモデル設計を行い、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC: Markov Chain Monte Carlo Method) を用いてパラメータ推定を行う。モデル学習により、モデルに組み込まれた各

種要因の個体損失への影響の度合いが定量化される。実際に栽培試験データから予測モデルを構築したところ、提案モデルは高い精度で個体損失確率を説明できることが明らかになった。本研究は一事例にすぎず、実用化に向けては個体損失モデルの検証が必要であるが、個体損失の要因を絞り込み、その影響の程度をモデル式によって定量化することで、個体損失を防ぐための栽培指針が得られる可能性を示した。

本論文の構成を以下に示す。2章ではトルコギキョウおよび関連研究について述べる。3章では、本研究の基礎となる統計手法について述べる。4章では、本研究の提案モデルを説明する。5章では、提案モデルの評価、および、分析結果の考察を行い、6章で本論文をまとめる。

2. トルコギキョウと関連研究

2.1 トルコギキョウと栽培過程

トルコギキョウとは、北アメリカ南西部から、南部、メキシコ、南アフリカ北部の平原や河口に広く分布するリンドウ科ユーストマ属の植物である。自然環境下では夏に開花する植物であるが、需要が高い植物であるため冬期生産も行われており、市場では1年を通して取り扱われている。

日本では、昭和10年代に導入された後、品種改良により多くの品種が作られた。花の咲き方には、一重咲き、八重咲き、1本の茎に多くの花を咲かせるスプレー咲きがあり、花の色には白、紫、黄、ピンク、青等があり多様である。特に、八重の品種は美しいだけでなく、花持ちが良く冠婚葬祭のすべてに使えることから、この10年程度の間に広く用いられるようになり、品種改良もさかんである。世界的にも、主に日本で品種改良が進められている品種である。

トルコギキョウの栽培は、まず、播種から始まり、播種後2週間から1カ月で発芽する。播種の時期が夏前になる場合は、高温によるロゼット化を回避するための処理として、1カ月ほど光を遮断した暗黒条件下、摂氏10度の冷房環境に置く種子冷蔵処理を行うのが一般的である。発芽した後、約2カ月の育苗期間を経て定植を行う。育苗期間に関しても、時期が夏ごろになる場合は高温によるロゼット化回避のための処理として、クーラで低温管理された空間で育苗を行うクーラ育苗、夜間のみ低温管理する夜間冷房育苗が行われる。

定植後は約1カ月で出蕾するが、上位節から発生する側枝の生育を助け、全体の開花を揃えるために最初の頂花出蕾時は早期に摘蕾する。定植後約3カ月~6カ月の栽培の後収穫を行う。栽培される季節により栽培期間や方法が若干異なるが、おおむね上記過程により栽培される。

2.2 関連研究

2.2.1 トルコギキョウの個体損失に関する研究

トルコギキョウは、学術的には主に園芸分野で研究が進

められる植物であり、ロゼット化やプラスチックによる個体損失の低減が研究されている [1]。ロゼット化は苗が高温に晒されると起こり [2]、低温処理することでロゼット化を回避する一定の効果がある [3], [4] ことが知られている。文献 [5] は、摂氏 10 度暗黒条件で種子冷蔵処理することでロゼット化を抑える効果があることを示した。また、文献 [6] は、種子冷蔵後の育苗時における昼夜の気温が生育に大きく影響することを報告しており、特に夜の気温が抽苔率に影響することを明らかにした。このようにロゼット化を防ぐための方法が研究されているが、いずれも各処理単体の調査にとどまっており、組合せ的に効果の度合いを定量化した研究は存在しない。

ロゼット化と同様に、プラスチックに関する研究も主に日本人によって進められている。プラスチックは低日照と窒素過剰により引き起こされるといわれており、生物学的には生殖器官の分化および発達が抑制される現象であることが知られている [7]。プラスチック対策として、一般に夜間電照 [8] や二酸化炭素の付与 [9] が行われる。本研究では主にロゼット化を対象とした栽培試験を行ったが、処理条件によってプラスチック個体の発生率に変動が見られ、ロゼット化を回避するための低温処理がプラスチック個体の割合を増大させる可能性が示唆された。ロゼット化抑制処理である低温処理とプラスチックの関係はこれまでに指摘されていない。

ロゼット化とプラスチックはいずれも生育不良の一種と見ることができる。トルコギキョウの生育と環境条件の関係を調べた論文もいくつか存在する。文献 [12] では、生殖成長期の温度によって花弁数が変化することを報告した。また、文献 [13] は、成長時期における窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムの欠乏が成長に大きく影響することを報告した。しかし、これらも単一処理の影響を見る研究であり、組合せ的な処理の影響を調べたものではない。

トルコギキョウの栽培においては、これらの知見をもとに主に種子成熟期や育苗時期の低温処理がなされるが、一般に栽培地域が異なると処理の効果が異なり、地域環境に合わせた最適な処理条件を定める必要がある。しかし、従来からなされてきた単一の処理条件を変化させる栽培試験では、特定環境下での植物の反応を短期間に明らかにすることは容易ではない。その結果、栽培試験を通じて得た知見をもとに、勘と経験に依存した栽培がなされている。複数の処理条件を組合せ的に適用した栽培試験の実施は、栽培や調査の手間がかかるだけでなく、高度な統計分析およびモデル学習が必要であり、園芸分野と情報・統計分野の技術者が連携することが望ましい。しかし、トルコギキョウだけでなく園芸分野全体でも、栽培最適化のために複数の処理条件を組み合わせ、情報や統計分野の研究者が連携して階層ベイズモデルのような統計モデルを適用する試み

は、著者らが調べた限りでは存在しない。

2.2.2 階層ベイズモデルの適用事例

本研究では、組合せ的な処理を行う栽培試験を実施し、階層ベイズモデルを適用することにより各処理の影響の度合いを定量化する。階層ベイズモデルによりモデル化を行い、各要因の影響を高精度に定量化できれば、各環境における個体損失の発生確率を予測できる。これにより、栽培時に個体損失を抑える環境制御が可能になる。しかし、著者らが調べた限り、園芸分野だけでなく、野菜や花卉等のハウス栽培や露地栽培に対して階層ベイズモデルを用いた分析を行った例は存在しない。一方で、植物に対する階層ベイズモデルの適用は、近年は植物生態学の分野で活発に行われている [10]。農業に関連した内容では、マクロな視点から気候変動に対する農業生産量の予測を行う研究があり、地理的あるいは時間的にマクロな統計データを用いた農業生産量のモデル化がなされている。しかし、個別農家のハウス栽培や露地栽培を対象とした階層ベイズモデルの適用事例が見られない現状がある。IoT 技術を用いることで、将来的には複数の要素を組み合わせた栽培最適化の試みがなされると考えられる。本研究はセンサデータと組合せ処理を用いた階層ベイズモデル化を行う先駆的事例であり、事例研究として価値があると考えられる。

3. 基礎となる統計手法

3.1 階層ベイズモデル

階層ベイズモデルは、対象となる事象を確率分布で表した確率モデルであり、そのパラメータが別の確率分布により表現され、階層構造を持つ [10]。モデルの各パラメータには（無情報）事前分布を設定しておき、マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC: Markov chain Monte Carlo methods）と呼ばれる乱数を利用した最適化法により、入力データに対して最適な事後分布を推定できる。この方法を用いることにより、最尤推定を適用できない複雑なモデルであっても、近似的に最適なパラメータ値の推定が可能である。

3.2 マルコフ連鎖モンテカルロ法

マルコフ連鎖モンテカルロ法とは、マルコフ連鎖を定常分布とする確率分布のランダムサンプリングを行うアルゴリズムの総称であり、代表的なアルゴリズムにメトロポリス法、ギブスサンプリング等がある [11]。MCMC は、ランダムサンプリングによるパラメータのモデルへのあてはめ繰り返すことにより事後分布を推定する。そのため、尤度推定では多重積分のような複雑な計算をとまなう場合であっても、MCMC では比較的容易な計算の繰返しのみで事後分布の推定が可能である。

4. 提案モデル

4.1 モデル化の方針

トルコギキョウの個体損失要因の分析を行うために、トルコギキョウを栽培する環境と個体損失の関係を表すモデルを設計する。

提案モデルでは、栽培試験において、複数の処理条件を組合せ式的に適用することを想定する。1つの処理条件は複数の処理区分を含む。たとえば、処理条件「種子冷蔵処理」に対しては「有」「無」の2区分があり、処理条件「育苗温度」においては「なりゆき」「夜間冷房」「クーラ」の3区分がある。トルコギキョウの品種も個体損失を調べるうえで重要な要素であるが、本分野の他研究にならって品種により個体損失に一定の影響があると仮定して、処理条件と同様に扱う。また、個体損失への影響が大きいと考えられる測定値として、土壌センサの値を扱う。

一方、目的形質である個体損失は、個体ごとに2値（損失した、しなかった）で表現される。これを確率的に扱うために、同一条件の個体群の個体損失割合を測定し、この割合を確率分布により説明することを試みる。つまり、個体損失割合を目的変数、センサの測定値と処理条件を説明変数として確率モデルを構築する。

先述のように、個体損失は2値で表現できるので、個体損失の発生確率をベルヌーイ分布を用いてロジスティック回帰モデルで表す。ロジスティック回帰モデルは、線形予測子と分布を関連付けるリンク関数として標準シグモイド関数を用いることで、予測値を区間(0,1)の値で表すことができ、事象の発生確率を表すのに適している。つまり、説明変数の線形関数を定義し、その値をリンク関数で(0,1)の区間に写像することで、個体損失確率を表現する。

4.2 提案モデル

トルコギキョウの処理条件とセンサ測定値を用いて、個体損失確率を説明する階層ベイズモデルを提案する。提案モデルは、扱う個体損失によらず同じ構造であり、目的変数としてロゼット化またはプラスチングの発生確率をとる。後述する線形予測子は、過学習を防ぐために複雑さを抑えた線形式とした。提案モデルを図1に示す。楕円が確率分布、五角形がリンク関数、四角形が線形予測子を表す。矢印は、各オブジェクトがどの変数を説明するかを示す。

本提案モデルは、個体損失がベルヌーイ分布に従うという仮定の下で、センサ測定値と処理条件を説明変数として、目的変数である個体損失の発生確率を表現する。ベルヌーイ分布とは、確率 p で1、確率 $1-p$ で0をとる分布であり、個体損失のようにある確率で2値の値をとる場合に適用される。個体損失が従う分布を誤差構造と呼び、以下の式で表す。

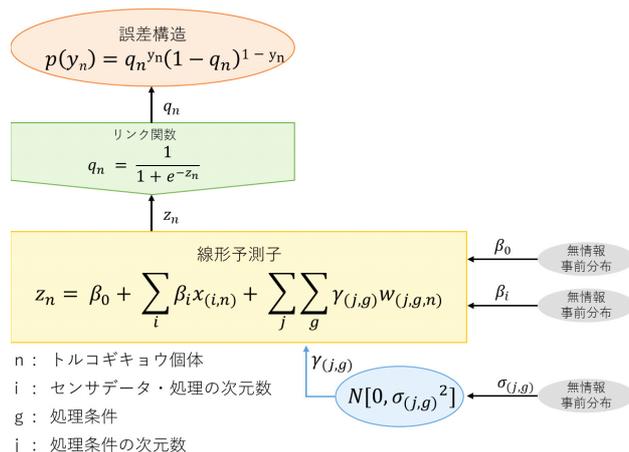


図1 提案モデルの構造

Fig. 1 Structure of the Proposed Model.

$$p(y_n) = q_n^{y_n} (1 - q_n)^{1 - y_n} \quad (1)$$

y_n は1か0の値をとり、1が損失する、0が損失しないことを表す。 y_n が1をとる確率 $p(y_n)$ を、個体 n が損失する確率 q_n を用いてベルヌーイ分布で表す。

リンク関数は、説明変数を線形結合した値を区間(0,1)の値に変換することで、確率で表現可能にする。リンク関数は以下の式で表され、線形予測子の出力 z_n を、標準シグモイド関数で区間(0,1)の値をとる q_n に変換する。

$$q_n = \frac{1}{1 + e^{-z_n}} \quad (2)$$

線形予測子は、各説明変数の個体損失に対する影響力の和を表し、以下の式で表される。

$$z_n = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_{(i,n)} + \sum_j \sum_g \gamma_{(j,g)} w_{(j,g,n)} \quad (3)$$

ここで、 β_0 は切片、 β_i が説明変数 i にかかる回帰係数、 $x_{(i,n)}$ が個体 n における説明変数 i の値を表す。 $\gamma_{(j,g)}$ は、グループ g における区分 j の効果を表す。 $w_{(j,g,n)}$ は、個体 n がグループ g における区分 j に属するか否かを表し、属するなら1、属さないなら0をとる。パラメータである $\beta_0, \beta_i, \gamma_{(j,g)}$ は事前分布を持ち、そのうち $\gamma_{(j,g)}$ は平均0、分散 σ_j^2 の正規分布に従い、以下の式で表される

$$\gamma_{(j,g)} \sim N[0, \sigma_j^2] \quad (4)$$

また、 σ_j^2 もパラメータであり、事前分布を持つ。 $\beta_0, \beta_i, \sigma_j^2$ は無情報事前分布に従うとする。

本モデルの説明変数 i とグループ g に栽培試験の項目を割り当てることで、モデル式が完成する。複数の処理条件をモデルに適用するため、説明変数やグループの数には制限を設けていない。説明変数 i には、連続値をとる項目が割り当てられる。たとえば、本試験では土中センサの測定値（本来は時系列データであるが、後述のように全期間の平均値を用いる）や、処理の有無のように1か0の2値で

表現される処理条件の区分は $x_{(i,n)}$ に代入される. グループ g には, 2 値またはそれ以上の区分を持つ処理条件が対応する. 処理条件やトルコギキョウの品種は $w_{(j,g,n)}$ に代入され, その個体が属する区分ならば 1, 属さなければ 0 をとる. これに係数 $\gamma_{(j,g)}$ かけることで, その区分のグループ効果の大きさを表す.

モデル式に代入する処理区分やセンサの測定値は, 個体損失の種類によって異なるため, 次章で述べる.

5. 評価

5.1 評価の概要

栽培試験により得られたデータを入力として提案モデルのパラメータ学習を行い, 提案モデルの個体損失に関する説明能力を評価する. また, 上記モデルを通じたトルコギキョウの個体損失要因を分析する. 栽培試験は, 多数の処理条件を組合せ的に適用する試験区設計とし, 1 回の試験で複数要因の効果を測定できるようにした. また, 各試験区において, 個体損失との関係が深いと考えられる土中センサの値を測定した.

本研究では, 試験区ごとの個体群を単位として個体損失率を測定し, これを提案モデルに適用する. このため, 試験区の数だけしか測定値が得られず, この分野としては栽培試験の規模が大きいかかわらず, 得られるデータのサイズは小さい. このため, モデルに含める変数の数を少なく抑え, モデルの自由度を低くする必要がある. このために, 本研究では事前分析として, 各処理条件の効果を基礎的な統計処理を用いて見積もり, 提案モデルに適用する処理条件を絞り込んだ. そのうえで, 提案モデルに絞り込まれた処理条件とセンサデータを適用し, 個体損失確率を説明する確率モデルを学習する.

5.2 栽培試験

個体損失の中でも特に重要視されるロゼット化の発生要因を組合せ的に調査する栽培試験を設計した. 栽培は和歌山県農業試験場暖地園芸センター内の 2 軸 2 層式の硬質フィルム温室 (被覆材: AGC グリーンテック社のエフクリーン) で行った. 温室内にうね幅 60 cm の隔離ベットの 10 本設置し, 栽培用土 (真砂土: バーク堆肥が 1:1, pH6.8, EC0.17) を深さ 20 cm で入れ, 白黒マルチ被覆を行い, 株間 10 cm, 条間 10 cm の 4 条植えで定植した. 施肥は液肥 (OAT アグリオ社の OKF-1) を定植時から開花終了時まで 10 日ごとに 1000 倍液を 400 リットル/温室で施用した. 本試験では, 隔離ベットにコンクリートミキサで攪拌した栽培用土を入れることで, 土質の均一化を図り再現性を高めた. 実施した栽培試験の様子が図 2 である. 各試験区に適用した試験条件を表 1 に示す. 種子冷蔵処理, 苗冷蔵処理, 育苗温度, 灌水方法の 4 種であり, 各試験区において 5 種類の品種を生育した. 各処理の説明を下



図 2 実施した栽培試験の様子

Fig. 2 A Picture of the Cultivation Test.

表 1 処理条件と処理区分

Table 1 Conditions in the Cultivation Test.

種子冷蔵処理	有 無
苗冷蔵処理	有 無
育苗温度	なりゆき 夜間冷房 クーラ
灌水方法	ミスト灌水 底面給水
トルコギキョウの品種	プロポーズ ポヤージュ (I 型) さくら ハピネスホワイト レイナホワイト レイナラベンダ

記に示す.

種子冷蔵処理 種子を播種後十分吸水させ, 摂氏 10°C の冷蔵庫内に 5 週間静置した. 処理区分は, 処理の有無の 2 種類である.

苗冷蔵処理 苗の定植前の 14 日間, 暗黒条件下で 10°C に温度管理された条件に置く処理である. 処理区分は, 処理の有無の 2 種類である.

育苗温度 育苗温度の処理区分は 3 種類であり, なりゆき (2017 年 6 月 22 日~8 月 5 日和歌山県御坊市), 夜間冷房 (昼はなりゆき, 17:30-7:00 は 15°C に冷房), クーラ (6:00-19:00 は 25°C, 5:00-6:00 と 19:00-20:00 は 20°C, 20:00-5:00 は 15°C に冷房) である.

灌水方法 灌水方法の処理区分は, ミスト (頭上から 6:00-19:00 の間 30 分ごとに 60 秒のスプリンクラによるミスト灌水を行う) と底面給水 (鉢に水を溜め底面から給水) の 2 種類である.

同時栽培可能数の制限から 10 の試験区を用意した. 各試験区に適用した処理区分を表 2 に示す. 各試験区におい

表 2 試験区

Table 2 Divisions in the Cultivation Test.

試験区	種子冷蔵	苗冷蔵	育苗温度	灌水方法
1	有	無	なりゆき	ミスト灌水
2	無	無	なりゆき	ミスト灌水
3	有	無	夜間冷房	ミスト灌水
4	有	無	夜間冷房	底面給水
5	有	無	クーラ	底面給水
6	有	有	なりゆき	ミスト灌水
7	無	無	クーラ	底面給水
8	有	有	夜間冷房	ミスト灌水
9	有	有	夜間冷房	底面給水
10	有	有	クーラ	底面給水

て、特性の異なる5種類の品種（プロポーズ、ボヤージュ（I型）さくら、ハピネスホワイト、レイナホワイト、レイナラベンダの5種類）を各40-60本生育した。また、試験区ごとに、土の深さ20cmの地点に土壌センサを設置した。土壌センサは、土中の体積含水率、温度、電気伝導度（EC）を測定できる。土壌センサはARP社のWD-3-WET-5Yを用いた。

上記の栽培環境は、和歌山県下で再現可能な環境を意図して設計されている。気候条件は、実施場所である暖地園芸センターと類似した気候であれば一定の再現性が確保される。土質も再現可能性を考慮して市販品の混合で実現している。また、苗冷蔵処理、育苗温度、灌水方法等の試験区の処理条件も、文献[1]等にも記載がある一般的な条件設定を用いた。

5.3 土壌センサ値の分析

深さ20cm地点の土中温度は1日の周期で変動し、夏季8月にはおおむね摂氏25°Cから33°C、冬季12月には13°Cから22°Cの範囲で変動が見られた。各試験区は独立した隔離ベットで栽培されるが、ビニルハウス内の配置により、最高気温が最大3度、平均気温が2度程度の差異が見られた。ここで、各試験区の時系列変動は類似性が高く、平行移動した形状であったため、各試験区のセンサ値の系列に対して簡単なノイズ除去処理を施したうえで全期間の平均値を求め、これを分析に用いた。

土壌の体積含水率と電気伝導度は灌水時を除き変動が小さく、安定した値をとる。これら2系列も、土中温度と同様の理由から、ノイズ除去をしたうえで全期間の平均を求めた。表3に、各試験区に対して計算されたセンサ値の平均値を示す。各試験区の体積含水率、電気伝導度、および土中温度の間には互いに相関が見られた。表4に相関係数を示す。相関が見られることから、これらの中で最も試験区間の差が明確に表れていた体積含水率を選択し、提案モデルに適用した。

表 3 各試験区のセンサ値の平均値

Table 3 Averages of Sensor Valued in Each Divisions.

試験区	土中温度	体積含水率	電気伝導度
1	20.87	32.39	0.041
2	21.22	42.91	0.057
3	22.37	27.64	0.029
4	22.26	35.53	0.033
5	21.67	28.38	0.032
6	21.69	31.21	0.034
7	21.91	27.93	0.026
8	22.20	26.20	0.022
9	22.15	22.51	0.027
10	21.93	29.61	0.040

表 4 センサデータ間の相関係数

Table 4 Correlation Coefficient among Sensor Values.

体積含水率と土中温度	-0.53
体積含水率と電気伝導度	0.90
土中温度と電気伝導度	-0.69

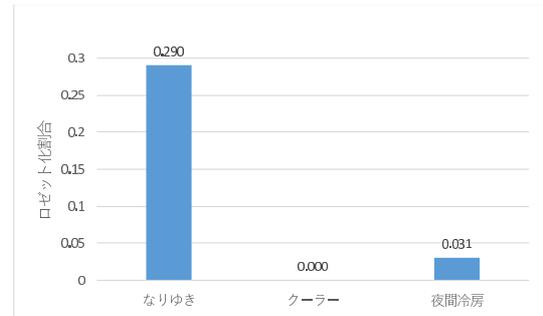


図 3 育苗温度ごとのロゼット化割合

Fig. 3 Rosette Ratio with Nursery Temperature.

5.4 ロゼット化の要因分析

5.4.1 事前分析

栽培試験データを提案モデルに適用する前に、基本的な統計処理によって個体損失に対する各処理条件の効果の有無を見極め、個体損失への効果が高い項目を絞り込んだ。効果が高い項目のみを用いてモデルを構築することで、説明能力の高いモデルの構築を目指す。

ロゼット化に関する事前分析の結果、結論からいうと、4つの処理条件のうち、育苗温度「なりゆき」の区分の個体のみを提案モデルで分析し、モデルの中には種子冷蔵処理のみをグループ効果として適用することにした。

過程の詳細を以下に示す。図3に、育苗温度ごとのロゼット化個体の割合を示す。温度制御をしないなりゆきではロゼット化割合が高く、夜間冷房を行うとロゼット化割合が低くなり、昼間もクーラで冷房をするとロゼット化個体が現れなかった。これは、育苗時の低温処理がロゼット化を防ぐうえで有効という従来の知見を裏付けている。

育苗温度の各区分ごとにさらなる分析を試みた。クーラ区にはロゼット化個体が存在せず、さらなる分析はできな

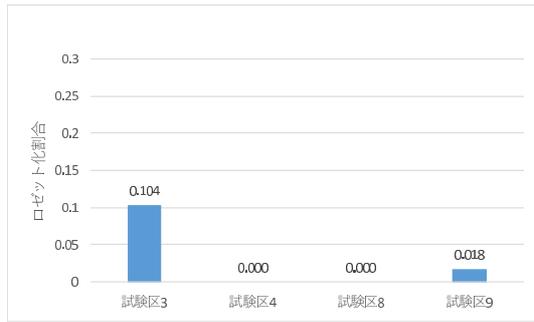


図 4 試験区 3, 4, 8, 9 のロゼット化割合
Fig. 4 Rosette Ratio in Division 3, 4, 8 and 9.

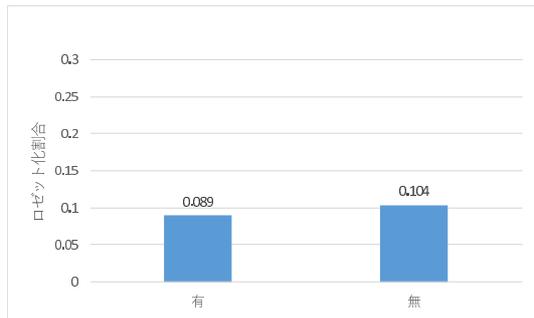


図 5 苗冷蔵処理ごとのロゼット化割合
Fig. 5 Rosette Ratio with Seedling Refrigeration.

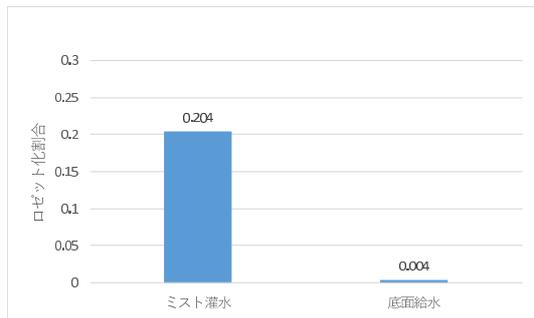


図 6 灌水方法ごとのロゼット化割合
Fig. 6 Rosette Ratio with Irrigation Methods.

かった。夜間冷房区は、試験区 3, 4, 8, 9 が該当し、苗冷蔵処理と灌水方法が異なる。しかし、これらのロゼット化割合を見ると（図 4）、試験区 3（苗冷蔵無＋ミスト）と試験区 9（苗冷蔵有＋底面給水）の場合にロゼット化個体が見られ、2つの処理とロゼット化割合の相関は見られない。よって、さらなる分析を断念することとなった。

なりゆき区の個体に対しては提案モデルを適用するが、その際に、苗冷蔵処理と灌水方法を除き、種子冷蔵処理のみをモデルに含めた。図 5 に、栽培試験の全個体の、苗冷蔵処理に対するロゼット化割合を示す。苗冷蔵処理はロゼット化割合に差異を与えていない。苗冷蔵処理の有無は試験区全体ではほぼ偏りなく試行されていることから、この傾向は正しいと判断し、提案モデルから除いた。図 6 に、全個体の灌水方法に対するロゼット化割合を示す。ミスト灌水のロゼット化割合が高いが、これは、ロゼット化個体

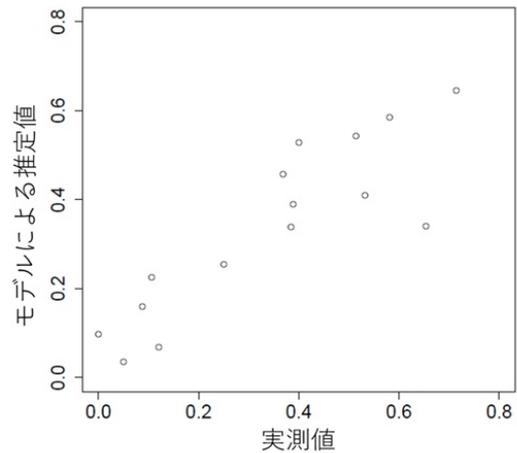


図 7 ロゼット化割合の実測値と推定値
Fig. 7 Real and Estimated Values of Rosette Ratio.

が多いなりゆき温度の試験区 1, 2, 6 がすべてミスト灌水であることが原因であり、ミスト灌水がロゼット化の原因とは認められない。また、なりゆき区がすべてミスト灌水であるため、なりゆき区の個体を対象とした次項の提案モデルに灌水方法を組み込むことはできない。

5.4.2 提案モデルの適用

栽培試験で得られたデータを提案モデルに適用し、モデルの学習を行った。ロゼット化の分析では、事前分析の結果から、なりゆき区の試験区 1, 2, 6 の品種ごとのロゼット化割合を目的変数とした。説明変数は、土中の体積含水率を回帰項の項目に、品種と種子冷蔵処理をグループ項の項目に割り当てた。提案モデルを R と stan で構築し、MCMC 法によりパラメータ推定を行った。

図 7 は、3つの試験区（試験区 1, 2, 6）で栽培された 5 品種のそれぞれ、つまり合計 15 の組合せに対して、横軸をロゼット化割合の実測値、縦軸を提案モデルによるロゼット化割合の推定値としてプロットした散布図である。相関係数は 0.87 となった。加えて、無相関検定の結果 p 値は 2.01×10^{-5} となり $p < 0.01$ であったため、有意水準 1% で有意であり、提案モデルによるロゼット化割合の推定値は実データのロゼット化割合と相関があると考えられる。これらのことから、提案モデルは実際の値をよく説明できており、優れたモデルが構築できたことを示している。

MCMC により学習されたモデルパラメータ値を表 5 に示す。種子冷蔵処理の係数が大きな負の値であり、ロゼット化の低減に大きな効果があることを示している。一方で、体積含水率も一定の効果があることを示している。体積含水率は土中温度との一定の負の相関があり、土中温度が低ければロゼット化に一定の効果があることを示す。これは、生物学的にも納得のできる傾向である。ほかには、品種ごとのロゼット化耐性に差があることが示されるが、これは、一般にいわれる品種ごとの傾向に合致する値であった。以上より、なりゆき区の個体を対象として得られたロ

表 5 ロゼット化モデルのパラメータ推定結果

Table 5 Estimated Parameter Values in the Rosette Model.

項目名	パラメータ	推定値
切片	β_0	17.06
土中の体積含水率	β_1	-0.42
種子冷蔵処理	β_2	-4.38
トルコギキョウの品種：プロポーズ	$\gamma(1,1)$	-1.94
トルコギキョウの品種：ボヤージュ (I型) さくら	$\gamma(1,2)$	0.47
トルコギキョウの品種：ハビネスホワイト	$\gamma(1,3)$	-0.40
トルコギキョウの品種：レイナホワイト	$\gamma(1,4)$	0.65
トルコギキョウの品種：レイナラベンダ	$\gamma(1,5)$	0.96

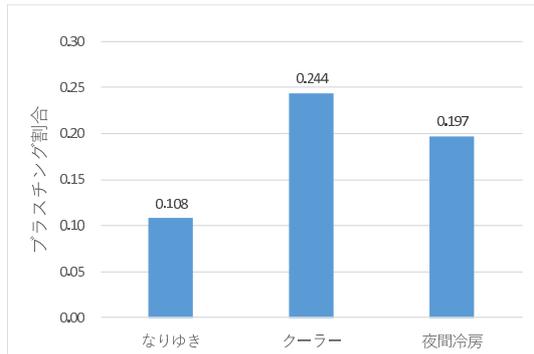


図 8 育苗温度ごとのブラスチング割合

Fig. 8 Blasting Ratio with Nursery Temperature.

ゼット化の確率モデルは既存の知見と矛盾しないモデルであり、本研究は実施地域におけるトルコギキョウ栽培における育苗温度がなりゆきである場合の各処理の効果を定量化できたと結論づけられる。

5.5 ブラスチングの要因分析

5.5.1 事前分析

ブラスチングの事前分析により、提案モデルに組み込む処理条件を、苗冷蔵処理と育苗温度の2条件に絞り込んだ。また、育苗温度「クーラ」の区分は除外した。以下にその過程を示す。

図 8 に育苗温度の区分ごとのブラスチング個体の割合を示す。クーラ区が最もブラスチング割合が高く、次いで夜間冷房が高い値を示しており、ロゼット化とは逆に育苗時の低温付加がブラスチング個体を増加させる傾向が見られる。

次に、試験区 4, 5, 9, 10 のブラスチング割合を図 9 に示す。試験区 4, 5 と 9, 10 は、苗冷蔵処理の有無以外は同条件であることから、苗冷蔵処理（試験区 9, 10）はブラスチング個体の割合を増大させることが分かる。一方、育苗温度では試験区 4, 9 が夜間冷房、5, 10 がクーラの区分であり、苗冷蔵の有無で育苗温度の効果が逆転している。これより、クーラと夜間冷房の効果の大きさの比較は困難である。

2つの処理条件、灌水方法と種子冷蔵については、単純

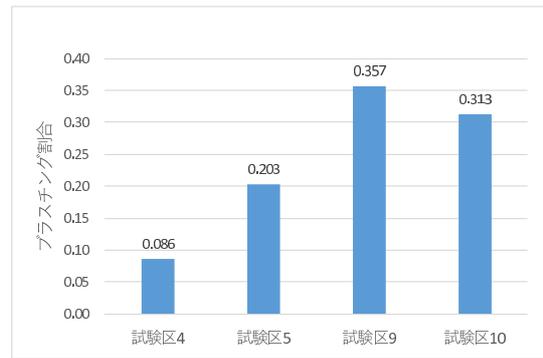


図 9 試験区 4, 5, 9, 10 のブラスチング割合

Fig. 9 Blasting Ratio in Division 4, 5, 9 and 10.

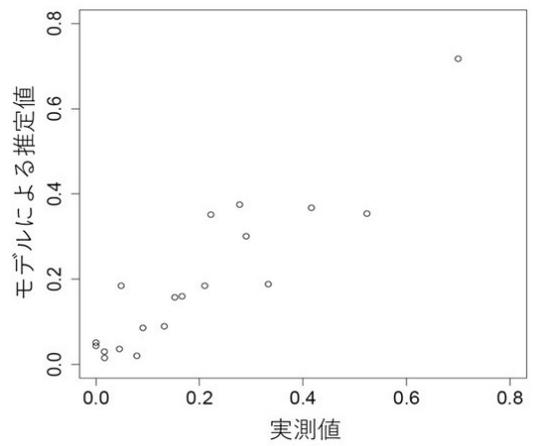


図 10 ブラスチング割合の実測値と推定値

Fig. 10 Real and Estimated Values of Blasting Ratio.

な比較の結果、これらによるブラスチング割合の差異が見られなかったため、分析から除いた。また、モデル学習は、灌水方法がミスト灌水のみに限定され、苗冷蔵処理と育苗温度のすべての組合せが含まれる、試験区 1, 3, 6, 8 の個体を用いて行うことにした。

5.5.2 提案モデルの適用

先述のとおり、試験区 1, 3, 6, 8 の個体を用いて提案モデルを学習した。目的変数は各試験区の品種ごとのブラスチング個体の割合とした。説明変数として、土中の体積含水率を回帰項の項目として苗冷蔵処理、育苗温度、および品種をグループ項の項目として適用した。ロゼット化の場合と同様に、提案モデルを R と Stan で構築し、MCMC 法によりパラメータ推定を行った。

図 10 は、4つの試験区（試験区 1, 3, 6, 8）で栽培された5品種のそれぞれ、つまり合計 20 の組合せに対して、横軸をブラスチング割合の実測値、縦軸を提案モデルによるブラスチング割合の推定値としてプロットした散布図である。相関係数は 0.93 となった。加えて、無相関検定の結果 p 値は 2.2×10^{-16} となり $p < 0.01$ であったため、有意水準 1% で有意であり、提案モデルによるブラスチング割合の推定値は実データのブラスチング割合と相関がある

表 6 プラスチングモデルのパラメータ推定結果

Table 6 Estimated Parameter Values in the Blasting Model.

項目名	パラメータ	推定値
切片	β_0	13.78
土中の体積含水率	β_1	-0.54
苗冷蔵処理	β_2	1.10
育苗温度：なりゆき	$\gamma_{(1,1)}$	-1.36
育苗温度：夜間冷房	$\gamma_{(1,2)}$	1.35
トルコギキョウの品種：プロポーズ	$\gamma_{(2,1)}$	-1.05
トルコギキョウの品種：ポヤージュ (I 型) さくら	$\gamma_{(2,2)}$	-0.84
トルコギキョウの品種：ハビネスホワイト	$\gamma_{(2,3)}$	0.02
トルコギキョウの品種：レイナホワイト	$\gamma_{(2,4)}$	0.11
トルコギキョウの品種：レイナラベンダ	$\gamma_{(2,5)}$	1.61

と考えられる。これらのことから、ロゼット化と同様に、提案モデルは実際の値を高い精度で説明できている。表 6 に、MCMC により学習されたパラメータ値を示す。土中の体積含水率は、ロゼット化と同様に、プラスチングに対して一定の効果があることを示している。また、各品種のプラスチング耐性に差があることが示されたが、これも、ロゼット化と同様、品種ごとの特性として知られる性質と矛盾しなかった。

一方、苗冷蔵処理や夜間冷房の効果は正の値をとり、苗を冷蔵することがプラスチング割合を増大させる悪影響を持つことが示唆される。また、その影響は品種の特性を超える大きな値である。プラスチングは花蕾の生殖活動が停止することにより起こるとされているが、低温によりその確率が增大する可能性を示している。育苗時の低温付加とプラスチングの関係はこれまでに知られていない新規の知見である。

以上より、種子冷蔵「有」、灌水方法「ミスト灌水」の条件下で品種の効果等既存の知見と矛盾しないモデル構築ができたなかで、低温付加による悪影響という新規の知見が示唆される貴重な結果となった。本研究の栽培試験はプラスチングへの対策を意図していないにもかかわらず、処理条件を組み合わせた栽培試験を試み、階層ベイズモデルによる分析を行った結果、新規の知見を得ることができた。

6. おわりに

本研究では、トルコギキョウのロゼット化およびプラスチングを対象とした個体損失の確率モデル化を行った。まず、ロゼット化に対して有効とされる処理を組合せ的に適用する栽培試験を設計・実施し、ロゼット化への影響が推察される土壌センサの測定値を分析に用いた。次に、階層ベイズモデルに基づいた確率モデルを提案し、処理条件やセンサ測定値を適用することで、個体損失の予測モデルを構築した。評価の結果、構築した予測モデルは高精度で個体損失を説明できることを示した。複数の処理条件から、暖地である和歌山地域でトルコギキョウを栽培するにあ

たっての各処理条件の効果を絞り込み、各効果の大きさを定量的に表現できた。さらに、栽培時の土中の体積含水率、および土中温度の制御がロゼット化対策になりうるという新たな可能性を示したことに加え、ロゼット化対策として用いられる低温処理がプラスチングの要因になる可能性を初めて示し、これまでに知られていない新たな知見を得た。加えて、これらのことから情報分野で用いられる高度な分析技術を用いることで、複数の条件を同時に調査できる効率的な栽培試験を実施した実例を示せた。

今後の課題として、複数年にわたる一連の試験結果をふまえたより発展的なモデル式の構築が考えられる。実施できる栽培試験の規模には限界があるため、複数年にわたって試験を行い、これを数理モデルとして統合することは有益である。しかし、栽培試験ごとに環境や試験条件が異なることから、複数試験結果を 1 つの数理モデルで表現することは容易ではない。少なくとも、できる限り栽培環境や栽培条件を統一し、継続的に試験と検証を実施することが求められるが、その方法論についての検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] 農林水産省：トルコギキョウの低コスト冬季計画生産の考え方と基本マニュアル（確定版），入手先 (http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/eustoma_manual201203.pdf)（参照 2018-05-09）。
- [2] Harbaugh, B.K., Roh, M.S., Lawson, R.H. and Pemberton, B.: Rosetting of Lisianthus Cultivars Exposed to High Temperature, *HortScience*, Vol.27, No.8, pp.885–887 (1992).
- [3] Ohkawa, K., Kano, A., Kanematsu, K. and Korenaga, M.: Effects of air temperature and time on rosette formation in seedlings of *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn., *Elsevier Scientia Horticulturae*, Vol.48, No.1–2, pp.171–176 (1991).
- [4] Ohkawa, K., Korenaga, M. and Yoshizumi, T.: Influence of temperature prior to seed ripening and at germination on rosette formation and bolting of *Eustoma grandiflorum*, *Elsevier Scientia Horticulturae*, Vol.53, No.3, pp.225–230 (1993).
- [5] 福島啓吾, 梶原真二, 石倉 聡, 後藤丹十郎：プライミング種子への吸水種子湿潤低温処理がトルコギキョウ「レイナホワイト」の生育および切り花形質に及ぼす影響, *園芸学研究*, Vol.17, No.1, pp.79–85 (2018).
- [6] 福島啓吾, 梶原真二, 石倉 聡, 勝谷範敏, 今村 仁, 後藤丹十郎：トルコギキョウの生育と切り花形質に及ぼす吸水種子湿潤低温処理後の育苗温度の影響, *園芸学研究*, Vol.15, No.4, pp.377–382 (2016).
- [7] Kawakatsu, K., Ushio, A. and Fukuta, N.: Anatomical Characterization of Flower-bud Blasting and Suppression Following Hormone Application in *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn., *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, Vol.81, No.2, pp.101–108 (2012).
- [8] Ushio, A., Hara, H. and Fukuta, N.: Promotive Effect of CO₂ Enrichment on Plant Growth and Flowering of *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn. under a Winter Culture Regime, *Journal of the Japanese Society for Hor-*

- ticultural Science*, Vol.83, No.1, pp.59-63 (2014).
- [9] 工藤陽史, 山口 茂, 佐渡 旭, 栗山孝浩, 深井誠一: 熊本県のトルコギキョウ冬出し栽培における電照が開花と花蕾のプラスチックおよび茎伸長に及ぼす影響, *園芸学研究*, Vol.11, No.3, pp.363-369 (2012).
- [10] 久保拓弥: データ解析のための統計モデリング入門, 岩波書店 (2015).
- [11] Hastings, W.K.: Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications, *Biometrika*, Vol.57, No.1, pp.97-109 (1970).
- [12] Kawakatsu, K., Harada, T., Ushio, A., Dozono, M. and Fukuta, N.: Thermal Control Suitable for Increasing Petals in *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn., *The Horticulture Journal*, Vol.87, No.3, pp.395-405 (2018).
- [13] Chen, C.T., Lee, C.L. and Yeh, D.M.: Effects of Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Calcium, or Magnesium Deficiency on Growth and Photosynthesis of *Eustoma*, *Hortiscience*, Vol.53, No.6, pp.795-798 (2018).



本廣 多胤 (学生会員)

1995年生。2018年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業。2019年現在、和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程在学中。農業IoTに関する研究に従事。



花田 裕美

1968年生。1991年大阪府立大学農学部卒業。1993年同大学大学院園芸農学科博士前期課程修了。1993年和歌山県入庁、和歌山県暖地園芸センター育種部研究員。2003年大阪府立大学博士(農学)取得。2004年JST地域

結集型共同研究事業サブテームリーダー。2017年和歌山県農業試験場暖地園芸センター園芸部主任研究員。花き、野菜の新品種育成、果樹、花きの遺伝子単離、DNAおよびプロテオームマーカの開発、花きの栽培技術開発研究に従事、園芸学会会員。



吉廣 卓哉 (正会員)

1975年生。1998年京都大学工学部卒業。2000年同大学大学院情報学研究科博士前期課程修了。2003年同研究科博士後期課程修了。博士(情報学)。2003年和歌山大学システム工学部助教。2009年同学部講師、2012年准教授。

グラフ理論、インターネットルーティング、無線アドホックネットワーク、バイオインフォマティクス、データベースシステム等の研究に従事。電子情報通信学会、日本データベース学会、IEEE各会員。本会シニア会員。