

# センサデータに基づいたトルコギキョウのロゼット化の確率モデリング

本廣 多胤<sup>1</sup> 花田 裕美<sup>2</sup> 吉廣 卓哉<sup>3</sup>

概要: 近年, トルコギキョウと呼ばれる花卉が注目を浴びている。トルコギキョウは花束や装花として用いられ, サイズや色等, バリエーションが豊富で需要が高く, 経済的価値が高い花卉である。しかし, トルコギキョウは, 栽培時に茎が伸長しなくなるロゼット化という個体損失を起こす。そのため, ロゼット化する個体を減らし, トルコギキョウを安定生産する技術の確立が求められている。また, 近年では, 農業センサを用いることで, 農業の生産性を向上させる取り組みである農業 IoT が注目されている。農業センサによって圃場や作物の状態の経時的把握が可能になり, また, センサデータと栽培試験を組み合わせることで, より複雑な統計モデルを用いた生育分析が可能となる。本研究では, センサを用いて取得した栽培試験データに対して, トルコギキョウの個体損失を表す統計モデルを階層ベイズモデルに基づいて設計することで, トルコギキョウのロゼット化要因の分析を行う。

## Probabilistic Modeling of Rosetting in Eustoma with Sensor Measurement Data

MASATSUGU MOTOHIRO<sup>1</sup> HIROMI HANADA<sup>2</sup> TAKUYA YOSHIHIRO<sup>3</sup>

### 1. はじめに

近年, トルコギキョウと呼ばれる花卉が注目を浴びている。トルコギキョウは花束や装花として用いられ, サイズ, 色, 花の咲き方等, バリエーションが非常に豊富で需要が高く, 経済的価値が高い花卉である。しかし, トルコギキョウは, 栽培時に茎が伸長しなくなるロゼット化という個体損失を起こす。そのため, ロゼット化する個体を減らし, トルコギキョウを安定生産する技術が求められている。

近年では, 農業センサを用いることで, 農業の生産性を向上させる取り組みである農業 IoT が注目されている。農業センサによって圃場や作物の状態の経時的把握が可能になり, また, センサデータと栽培試験を組み合わせること

で, より複雑な統計モデルを用いた生育分析が可能となる。本研究の目的は, トルコギキョウのロゼット化要因を特定することで, トルコギキョウを安定生産する技術を確立することである。本研究では, これを実現するために, 栽培試験データと栽培時に各畝に設置されたセンサから得られた土中のデータを用いて, トルコギキョウの個体損失を表す統計モデルを, 階層ベイズモデルに基づいて設計することで, トルコギキョウのロゼット化要因の分析を行う。実施された栽培試験では, トルコギキョウのロゼット化の要因を追求するために, ロゼット化を回避するための処理や栽培条件を組み合わせ的に変え, さらに, 栽培期間中の圃場にセンサを設置し, 土中の体積含水率, 温度, 電気伝導度といった土壌の状態を測定した上で, 複数の品種のトルコギキョウを栽培した。

栽培試験から得られたデータをモデルに適用するにあたって, ロゼット化への影響のない項目を省き, ロゼット化要因を適切に説明するモデルにするために, モデルに適用する説明変数を選別する事前分析を行った。事前分析では, 栽培試験で得られたデータに対して基礎的な統計処理

<sup>1</sup> 和歌山大学大学院システム工学研究科  
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

<sup>2</sup> 和歌山県農業試験場暖地園芸センター  
Horticultural Experiment Center, Wakayama Agricultural Experiment Station

<sup>3</sup> 和歌山大学システム工学部  
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

を適用することで、ロゼット化と関係がある処理や栽培条件を絞り込んだ。

学習したモデルから算出されるロゼット化確率と実データのロゼット化個体の割合を比較し、予測精度を調べた結果、提案する階層ベイズモデルは高い精度でロゼット化を予測でき、ロゼット化要因を説明することが明らかになった。事前分析と提案モデルにより、ロゼット化回避のための処理や栽培条件のロゼット化への影響の大きさを示すことができた。また、トルコギキョウの品種ごとのロゼット化のしやすさも定量化した。

本論文は全6章で構成されており、第2章では、本研究の対象となるトルコギキョウについて述べる。第3章では、本研究の基礎となる統計手法について述べる。第4章では、本研究の提案モデルを説明する。第5章では、提案モデルの評価、及び、分析結果の考察を行い、第6章で本論文をまとめる。

## 2. 対象植物：トルコギキョウ

### 2.1 トルコギキョウ

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。日本では、トルコギキョウ、リシアンサス、ユーストマなどと呼ばれている。ユーストマグランディフロラム、ユーストマエグザルタトゥムの二種類があり、現在流通しているトルコギキョウは、前者のユーストマグランディフロラムである（本論文におけるトルコギキョウは、このユーストマグランディフロラムを指す）。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されており、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、一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、青等があり非常にバラエティに富んでいる。切り花用の草丈の高いものだけでなく、鉢花用の矮性種も開発され、装花や花束等用途の幅が広く、日持ちが良いため需要が高い花となっている。

トルコギキョウは、茎が正常に伸びなくなるロゼット化という問題を起こす植物であり、栽培の難易度が高い植物とされている。そのため、ロゼット化を回避するための栽培方法などが研究され、育苗方法などがまとめられている [1]。しかし、その条件で栽培をしても、完全にロゼット化を回避することはできておらず、ロゼット化の原因を解明し、ロゼット化する個体数を低減しトルコギキョウを安定生産する技術の確立が求められている。

### 2.2 栽培の過程

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ヶ月で発芽する。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ヶ月ほど光を遮断した暗黒条件の下、10℃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か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、クーラーで低温管理された空間で育苗を行うクーラー育苗、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か月で出蕾するが、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4ヶ月の栽培の後収穫を行う。出荷する時期によってそれぞれ栽培時期や期間は異なるが、これらがトルコギキョウの栽培の過程の概要である。

### 2.3 ロゼット化

植物が成長する過程で茎が伸長せず、節が詰まった状態で地表近くで葉が広がることをロゼット化と呼ぶ。トルコギキョウの生産において、ロゼット化は、開花遅延を引き起こす重大な問題である。トルコギキョウはストレスに弱く、環境変化のストレスなどでロゼット化を起こす。特に育苗期間に高温にさらされることが大きな原因とされている。

ロゼット化を回避するために、種子冷蔵処理、クーラー育苗、夜間冷房育苗等の冷却処理が有効であることが知られているが、栽培する地域によっては処理の効果が適切な条件設定が異なる場合があり、条件の調整が必要である。特にトルコギキョウの冬期出荷の作型においては、ロゼット化が起こりやすく、冬期におけるトルコギキョウの安定生産する技術が求められている。

## 3. 基礎となる統計手法

### 3.1 階層ベイズモデル

階層ベイズモデルとは、モデルが持つ各パラメータが従う確率分布が階層構造を持つベイズ統計モデルである [2]。ベイズ統計モデルとは、パラメータが一つの値ではなく、確率分布によって表される統計モデルである。階層ベイズモデルは、パラメータが従う確率分布が更に別の確率分布によって表される階層構造になっている。モデルに入力されたデータから、パラメータが従う確率分布を推定しパラメータの値を更新することを学習と呼び、学習前の確率分布を事前分布、学習後の確率分布を事後分布と呼ぶ。階層ベイズモデルのパラメータの推定には、一般に、MCMC (Markov chain Monte Carlo methods) と呼ばれる数値最適化アルゴリズムが利用される。MCMCは、乱数を用いた確率的サンプリングを繰り返し、最も入力データに対して当てはまりの良いパラメータの事後分布を推定する。階

層ベイズモデルは、パラメータの事前分布を階層化することにより、モデルに変量効果を表すパラメータが複数ある場合であってもパラメータの事後分布の推定を可能にする。変量効果とは、サンプル全体に共通する特徴と、サンプル全体に共通する特徴ではなく、一部の条件に属する特定のサンプルにのみ当てはまる特徴の差を表したものである。モデル設計の際に変量効果を組み込むことで、一部の条件に属する特定のサンプルにのみ当てはまるような局所的な影響を及ぼす要素を取り除くことができ、より正確なモデルの設計が可能となる。一般的に、モデルのパラメータは尤度推定によって求められるが、変量効果を表すパラメータがモデルに複数ある場合には尤度推定によるパラメータの推定は多重積分を伴うため、計算が困難になる場合がある。それに対して、階層ベイズモデルでは、MCMCを用いてパラメータの推定を行うことができるため、変量効果を表すパラメータが複数あるモデルであってもパラメータの推定が比較的容易になる。

### 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 (MCMC: Markov chain Monte Carlo methods) 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 [3]。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当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伴う場合があるが、MCMC では比較的容易な計算の繰り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

トルコギキョウのロゼット化の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ロゼット化の関係を表すモデルを作成する。

ロゼット化を表すモデルを作成するにあたって、モデルに組み込むことができるトルコギキョウを栽培する環境等、ロゼット化に影響を与える可能性がある項目について述べる。トルコギキョウを栽培する環境のデータとしては、センサを用いて測定することができる、土中水分量、土中温度、土中電気伝導度等がある。また、栽培時の処理や条件としては、ロゼット化を回避するための処理として種子冷蔵処理、苗冷蔵処理があり、条件として、育苗時の温度管理、灌水方法、それら以外にも、ロゼット化に影響を与える可能性があるものとしては、トルコギキョウの品種といったものがある。これらの項目からロゼット化を表すのに適切なモデルを考える。

モデルを作成するうえで目的変数となるロゼット化は、

ロゼット化する、ロゼット化しないの二値で表すことができるので、提案モデルは、事象の発生確率をベルヌーイ分布を使って表すロジスティック回帰のモデルとして作成する方針が考えられる。ロジスティック回帰のモデルは、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する値を0から1の間で表すことができ、事象が起こる確率を表すのに適している。よって、トルコギキョウを栽培する環境で説明する線形結合の式を立て、それをリンク関数で変換し、ベルヌーイ分布でロゼット化を表すモデルを作成する。また、モデルに組み込む説明変数のうち、トルコギキョウの品種や栽培条件は変量効果として扱う。ここで、変量効果となる項目が多い場合は最尤推定が困難になる場合がある。そのため、変量効果が従う確率分布を階層構造化し、MCMCを用いたランダムサンプリングによって、複数の変量効果を含んだモデルのパラメータ推定を可能とする階層ベイズモデルとして作成する。

### 4.2 提案モデル

トルコギキョウを栽培する環境で、ロゼット化の関係を表す階層ベイズモデルを提案する。モデルの構造を図1に示し、これを説明する。

まず、図の見方を説明する。図1には、楕円、四角形、五角形、矢印の4種類のオブジェクトがある。オブジェクトの内、楕円は確率分布を表しており、オブジェクト内の式はそのオブジェクトが表す確率分布を示している。四角形は、線形予測子を表している。線形予測子とは、目的変数をパラメータと説明変数の線形結合の式で表したものである。五角形は、リンク関数を表している。リンク関数とは、線形予測子の式で算出された目的変数の値を誤差構造の確率分布に合うように変換する関数である。誤差構造とは、目的変数が従う確率分布のことである。オブジェクト間の矢印とその隣に添えられた文字は、各オブジェクトがどの変数を表しているかを示している。

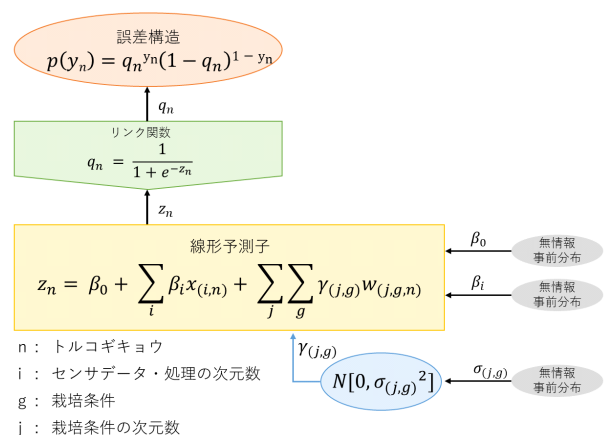


図1 提案モデルの構造

次に提案モデルの設計を説明する。本提案モデルは、ロゼット化がベルヌーイ分布に従うという仮定の下で、トルコギキョウを栽培する環境のデータ項目を説明変数として、トルコギキョウのロゼット化が発生する確率を目的変数とする。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、ロゼット化のように、ロゼット化する、しないの二値で表せる対象に適している。目的変数を予測するための、説明変数とパラメータを線形結合の式で表した線形予測子から算出される値をベルヌーイ分布に当てはめるために、リンク関数として標準シグモイド関数を用いている。標準シグモイド関数による変換で、目的変数が 0 から 1 の間の値になるように調整でき、目的変数として確率を扱える。以下で各式について説明する。

ロゼット化に従う分布である誤差構造は、以下の式で表される。

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

ここで、 $y_n$  は 0 か 1 の値をとり、 $y_n$  が 1 であれば個体  $n$  がロゼット化すること、0 であればロゼット化しないことを表す。 $y_n$  の生起確率  $p(y_n)$  を、個体  $n$  がロゼット化する確率  $q_n$  を用いてベルヌーイ分布で表す。

リンク関数は、以下の式で表される。

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

ここでは、各説明変数のロゼット化することに対する影響の大きさの和である  $z_n$  を標準シグモイド関数でベルヌーイ分布に合う確率の形  $q_n$  に変換している。

線形予測子は、以下の式で表される。

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

この式は、各説明変数のロゼット化に対する影響の大きさの和の式である。 $\beta_0$  は切片、 $\beta_i$  が項目  $i$  にかかる回帰係数、 $x_{(i,n)}$  が個体  $n$  におけるの項目  $i$  の値を表す。 $\gamma_{(j,g)}$  は、グループ  $g$  における変数効果の項目  $j$  の変数効果を表す。 $w_{(j,g,n)}$  は、個体  $n$  がグループ  $g$  における変数効果の項目  $j$  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  $\sigma_j^2$  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、 $\sigma_j^2$  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。

最後に、本提案モデルへのデータ項目の適用に関して説明する。センサデータ、栽培時の処理、栽培条件、トルコギキョウの品種を提案モデルに適用する項目としており、データの適用の際は、線形予測子の式 (3) の対応する変数

にそれぞれの項目の値が代入される。また、複数の項目をモデルに適用することを想定しているため項目の数に制限は設けていない。代入される項目のうち、連続値をとるセンサデータの値や 1 か 0 の二値で表せる栽培時の処理は  $x_{(i,n)}$  に代入される。センサデータは、センサデータの値に係数  $\beta_i$  をかけることでロゼット化への影響を表す。栽培時の処理は、センサデータと同様に栽培時の処理に係数  $\beta_i$  をかけることによりロゼット化への影響として扱うが、栽培時の処理を表す変数は 1 か 0 の二値をとり、それにより処理を行った場合と行わなかった場合を表す。栽培条件やトルコギキョウの品種の値は  $w_{(j,g,n)}$  に代入される。代入される値は、その個体が属するグループであれば 1、属しないグループであれば 0 をとり、係数  $\gamma_{(j,g)}$  をかけることで、その個体が属するグループにのみ当てはまる変数効果として表す。

これらにより、ロゼット化へ影響がある項目でロゼット化を表し、局所的な影響を及ぼす項目を変数効果として組み込むことで、よりの確にロゼット化を表すモデルとしている。

## 5. 評価

### 5.1 評価の概要

評価では、実際に栽培されたトルコギキョウのデータを入力としてモデルを学習し、学習したモデルがどれだけうまくデータを表すことができているかを確認することで、提案モデルの性能評価、及び、ロゼット化要因の分析を行う。そのために、まず、提案モデルに適用するためのサンプルデータの栽培試験が必要である。次に、栽培試験により得られたサンプルデータの各項目とロゼット化の関係を調査し、モデルに適用する項目の選定のために事前分析を行う。そして、事前分析でロゼット化との関係があると認められた項目にモデルを適用し学習させる。最後に、学習したモデルの結果から、提案モデルの性能評価、及び、ロゼット化要因の分析を行う。

### 5.2 栽培試験の方法

提案モデルの性能評価を行うために、提案モデルに適用するサンプルデータの栽培試験に関して説明する。栽培試験では、ロゼット化と関係があると考えられる要素である、トルコギキョウの品種、栽培中に施す処理、栽培条件、灌水方法の組み合わせによって、10 種類に分けて栽培され、育苗期間終了後、同一ハウスの 10 本の畝に分けて栽培した。

トルコギキョウの品種、栽培中に施す処理、栽培条件、灌水方法に関してまとめたものが表 1 である。それぞれの項目に関して詳しく述べる。トルコギキョウの品種に関しては、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、レイナラベンダーの 5 種類を供試品種として、品種によるロゼット化の発生率の差を見

表 1 栽培試験の試験条件

トルコギキョウの品種	プロポーズ ボヤージュ (I 型) さくら ハビネスホワイト レイナホワイト レイナラベンダー
種子冷蔵処理	有 無
苗冷蔵処理	有 無
育苗時の栽培条件	なりゆき育苗 夜間冷房育苗 クーラー育苗
灌水方法	ミスト灌水 底面給水

表 2 畝ごとの組み合わせ

畝番号	種子冷蔵処理	苗冷蔵処理	育苗時の栽培条件	灌水方法
1	有	無	なりゆき育苗	ミスト灌水
2	無	無	なりゆき育苗	ミスト灌水
3	有	無	夜間冷房育苗	ミスト灌水
4	有	無	夜間冷房育苗	底面給水
5	有	無	クーラー育苗	底面給水
6	有	有	なりゆき育苗	ミスト灌水
7	無	無	クーラー育苗	底面給水
8	有	有	夜間冷房育苗	ミスト灌水
9	有	有	夜間冷房育苗	底面給水
10	有	有	クーラー育苗	底面給水

る。種子冷蔵処理に関しては、ロゼット回避のための処理である、種子時に 35 日間、暗黒条件下で 10℃に温度管理された条件に置く種子冷蔵処理の有無によるロゼット化の発生率の差を見る。苗冷蔵処理に関しても、種子冷蔵処理と同様に、定植前の 14 日間、暗黒条件下で 10℃に温度管理された条件に置く苗冷蔵処理の有無によるロゼット化の発生率の差を見る。育苗時の栽培条件に関しては、育苗期間の間、温度管理を行わずハウス内で育苗を行うなりゆき育苗、17 時 30 分から 7 時までの夜間のみ 18℃に管理された条件で育苗を行う夜間冷房育苗、クーラーによって 9 時から 17 時の昼間は 25℃、17 時から 9 時までの夜間は 15℃に管理された条件で育苗を行うクーラー育苗の三種類の栽培条件によるロゼット化の発生率の差を見る。灌水方法に関しては、スプリンクラーによるミスト灌水と鉢に水を溜め底面から給水させる底面給水の二種類の灌水方法によるロゼット化発生率の差を見る。

畝ごとのこれらの項目の組み合わせをまとめたものが、表 2 である。トルコギキョウの品種に関しては、すべての畝で供試品種 5 種類全てが栽培されているため省いた。

表 2 のように分けて栽培し、ロゼット化を起こした個体と起こさなかった個体の数を調べた。加えて、畝に埋められたセンサによって、うねごとの土中の体積含水率、温度、電気伝導度を測定した。この栽培試験の結果をモデルに適

用する。

### 5.3 事前分析

栽培試験の結果をモデルに適用するにあたって、ロゼット化への影響のない項目を省き、ロゼット化要因を適切に説明するモデルにするために、モデルに適用する説明変数を選択する事前分析を行った。

事前分析の結果、モデルに適用する項目から、土中の温度と電気伝導度、苗冷蔵処理、育苗時の栽培条件、灌水方法を除き、モデルに適用する項目を、土中の体積含水率と種子冷蔵処理、トルコギキョウの品種に絞り込んだ。以下にその過程を説明する。

まず、センサデータに関して説明する。各畝に設置したセンサの値を概観した。土中の温度は一日の周期で変動し、夏季である 8 月には概ね摂氏 25 度から 33 度、冬季である 12 月には 13 度から 22 度の範囲で変化していた。各畝は、その配置等によって一日の最高気温において最大 3 度、平均気温において 2 度程度の差異が見られた。各畝のグラフの形状はほぼ同じであり、上下に平行移動した形になっていた。各畝の温度差は栽培期間中には概ね同じであったが、畝 3 のみ、9 月中旬ごろから急に上昇し、高い気温を示すようになった。土中の体積含水率は灌水時を除いてはあまり変動せず、安定した値をとる。畝間の値の相対値は土中の温度と逆の関係が強く見られ、土中の温度が高いほど体積含水率は低い値となる。畝 3 に関しては、9 月中旬から地温が上昇したのに伴い、体積含水率は下がる挙動が見られた。電気伝導度はごく一部の期間を除いて全体的に安定した一定の値をとる。また、畝間の値の相対値は体積含水率と相関がみられ、体積含水率の値が高いほど電気伝導度は高い値になる。上記より、畝 3 を除いては、栽培期間における値の平均値をとり、これをモデルに適用することで、これらの値の栽培への影響を見る。表 3 に、求めた各畝ごとのセンサデータの平均値を示す。平均値を計算するにあたって、特定の時間のみ他の時間より低い値は、前処理で取り除いた。また、センサデータごとの相関係数は、表 4 のようになった。センサデータ間には相関が見られるため、モデルの適用は最も畝ごとの値の差が顕著な体積含水率を選択し、土中の温度と電気伝導度は除くこととした。

次に、図 2 に、育苗時の栽培条件毎のロゼット化割合を示す。温度調節をしないなりゆき育苗はロゼット化割合が高く、夜間冷房育苗を行うとロゼット化割合が低くなり、クーラー育苗の場合にはロゼット化個体が現れなかったことが分かり、育苗時の栽培条件はロゼット化と強い関係があることが明らかとなった。このため、以後は各栽培条件に分けて、ロゼット化の要因を深く探る。

まず、クーラー育苗はロゼット化個体がなく、効果が十分に高いと結論付けられる。このため、さらなる分析の余地がないため、以後の分析からは除く。なりゆき育苗につ

表 3 畝ごとのセンサデータ平均値

畝番号	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

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

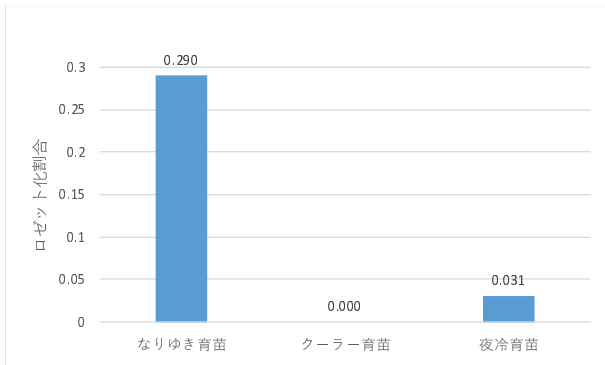


図 2 育苗時の栽培条件毎のロゼット化割合

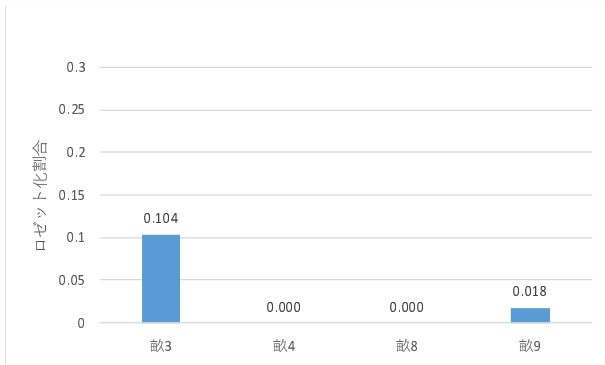


図 3 畝 3,4,8,9 のロゼット化割合

いては、次節以降で、提案する階層ベイズモデルを用いた分析を行う。夜間冷房育苗については、結論から述べると、本栽培試験において、ロゼット化要因となり得る処理が存在しないため、ロゼット化要因の特定が困難であり、さらに深い分析ができない。図 3 に畝 3 と 4, 8, 9 のロゼット化割合を示す。畝 3 と 9 のみにロゼット化個体がある。ここで、苗冷蔵処理は、畝 3 と 4 が処理有、8 と 9 が処理無であるため、この処理の効果ではロゼット化傾向を説明できない。灌水方法は、畝 3 と 8 がミスト灌水、畝 4 と 9 が底面給水であり、これも同様にロゼット化傾向を説明できな

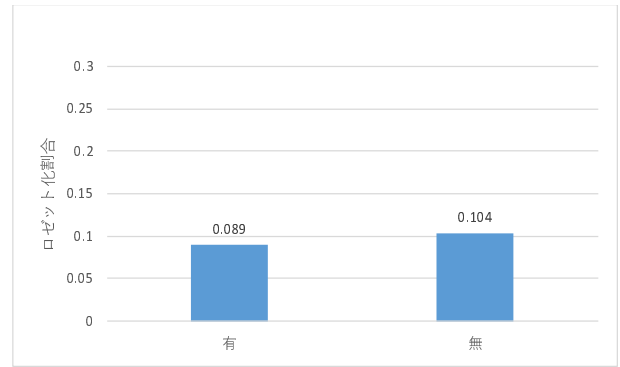


図 4 苗冷蔵処理毎のロゼット化割合

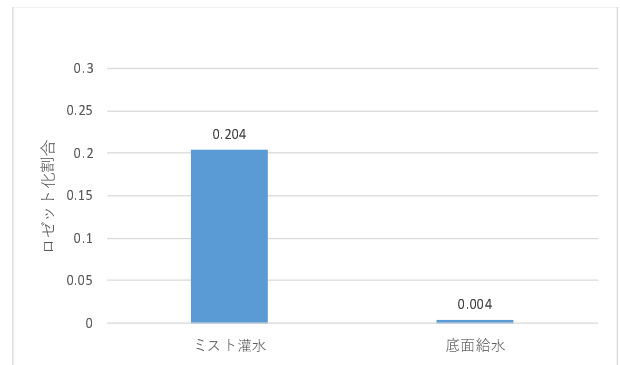


図 5 灌水方法毎のロゼット化割合

い。前述の通り、畝 3 のみセンサデータ傾向が異なるため、畝 3 のみに生じた何らかの理由によりロゼット化割合が高くなった可能性がある。しかし、それを考慮しても、センサデータの傾向を含めて、夜間冷房育苗におけるロゼット化傾向を適切に説明できる差異は、本試験結果からは発見できなかった。

さて、なりゆき育苗に対して階層ベイズモデルの適用を試みるが、その際に、苗冷蔵処理と灌水方法をモデルから除いた。図 4 に栽培試験に用いた全個体の、苗冷蔵処理の有無に対するロゼット化割合を示す。苗冷蔵処理の有無によるロゼット化への影響は見られない。苗冷蔵処理区はすべての育苗条件に対して設定しており、偏りがないことから、苗冷蔵処理のロゼット化への影響は見られないと結論付けられる。図 5 に、灌水方法毎の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。しかし、これは、ロゼット化個体が多いなりゆき育苗の畝 1, 2, 6 が全てミスト灌水であることが原因である。畝 3 と 8 もミスト灌水であり、畝 8 はロゼット化個体が見られないことから (畝 3 はロゼット化個体が見られるが、センサデータからの特殊要因の可能性もある)、灌水方法がロゼット化要因である可能性は高くないと考えられる。なお、なりゆき育苗の分析にミスト灌水を用いるか検討すると、なりゆき育苗区が全てミスト灌水であることから、ミスト灌水は次節の分析で考慮する必要はない。



## 5.4 モデルの適用

提案モデルを R と stan で実装し、栽培試験で得られたサンプルデータを提案モデルに適用し、モデルの学習を行う。次に、各畝、各トルコギキョウの品種ごとの、学習したモデルから算出されるロゼット化を起こす確率と実データのロゼット化した個体の割合を比較し、提案モデルと実データの誤差を確認する。それにより、提案モデルの性能評価を行う。

事前分析の結果から、ロゼット化と関係がある項目にモデルを適用し、モデルの学習を行う。ただし、育苗時の栽培条件に関しては、ロゼット化と関係があると考えられるが提案モデルへの適用ができない。そのため、育苗時の栽培条件の影響を取り除くために、なりゆき育苗が行われた畝番号が、1, 2, 6 の畝で栽培された個体のデータをモデルへの入力データとする。適用するモデルは、トルコギキョウの品種、種子冷蔵処理、土中の体積含水率を入力としてロゼット化した個体の割合を出力する。モデルの学習では、センサデータとして土中の体積含水率、変量効果である栽培条件として種子冷蔵処理の有無、トルコギキョウの品種を代入し、MCMC によるパラメータの推定によりモデルの学習を行った。

## 5.5 結果

各畝、各トルコギキョウの品種ごとの、学習したモデルから算出されたロゼット化を起こす確率と実データのロゼット化を起こした個体の割合の散布図が図 6 である。図 6 は、畝 1, 2, 6, 栽培試験に用いたトルコギキョウの品種ごとの 15 パターンのモデルの予測値と実測値をプロットしてあり、横軸が実データのロゼット化を起こした個体の割合で、縦軸が提案モデルから算出されたロゼット化が起こる確率を表している。

図 6 を見ると、実際にロゼット化があまり起こっていない条件では、モデルのロゼット化確率も低く、ロゼット化が多く起こった条件では、モデルのロゼット化確率も高くなっている。この結果から、提案モデルはうまくデータを表せていると考えられる。

また、MCMC による提案モデルのパラメータ推定の結果の説明を、パラメータの推定結果をまとめた表 5 を用いて行う。パラメータがとる値が、正の値である場合はロゼット化する確率が上がる要因であることを意味し、負の値である場合はロゼット化する確率が下がる要因であることを意味する。そのため、この結果のうち、切片を除外するとトルコギキョウの品種:ポヤージュ (型) さくら, トルコギキョウの品種:レイナホワイト, トルコギキョウの品種:レイナラベンダーはロゼット化する確率が上がる要因であり、 $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , トルコギキョウの品種:プロポーズ, トルコギキョウの品種:ハピネスホワイトはロゼット化する確率が下がる要因であると考えられる。パラメータの絶対値が大きいほ

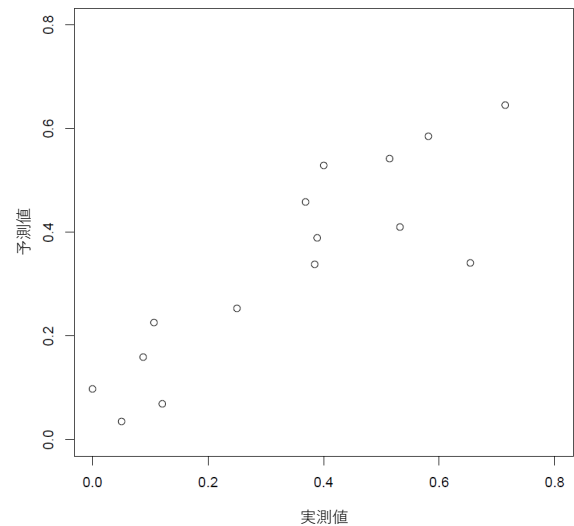


図 6 ロゼット化率の実測値と予測値の散布図

表 5 パラメータの推定結果

項目名	パラメータ	推定値
切片	$\beta_0$	17.06
土中の体積含水率	$\beta_1$	-0.42
種子冷蔵処理	$\beta_2$	-4.38
トルコギキョウの品種:プロポーズ	$g_{(1,1)}$	-1.94
トルコギキョウの品種:ポヤージュ (I 型) さくら	$g_{(1,2)}$	0.47
トルコギキョウの品種:ハピネスホワイト	$g_{(1,3)}$	-0.40
トルコギキョウの品種:レイナホワイト	$g_{(1,4)}$	0.65
トルコギキョウの品種:レイナラベンダー	$g_{(1,5)}$	0.96

どロゼット化に対する影響の大きさが大きいことを意味する。そのため、種子冷蔵処理はロゼット化確率を大きく下げることが期待できる処理であるといえる。また、土中の体積含水率に関しては、パラメータの推定値の絶対値は大きい値ではないが、土中の体積含水率が 0 から 100 の間の値をとる変数であり、本研究で用いたサンプルデータにおいては、30 から 40 の値をとっていたためロゼット化に対する影響は大きいと考えられる。トルコギキョウの品種による差は、他の二項目に比べると絶対値は小さいが、品種ごとの差は十分に見られる。これは、実際にトルコギキョウを栽培する際に生産コスト削減のために、品種ごとにロゼット化回避のための処理の差を設ける指標となり得る。

分析の結果、栽培試験で調査した項目では、トルコギキョウの品種、種子冷蔵処理、土中の体積含水率がロゼット化と関係があることが分かった。トルコギキョウの品種によってロゼット化しやすさが異なること、種子冷蔵処理によってロゼット化を回避しやすくなることはよく知られており妥当な結果だといえる。また、植物は根に高温によるストレスがかかることにより、病気にかかりやすくなることや生育に悪影響が出ることが知られている。土中の体積含水率は土中の温度と負の相関を持っているため、値が

高くなることでロゼット化する確率が下がることは妥当だといえる。

## 6. おわりに

本研究では、まず、農作物の栽培の支援として、サンプルデータに対して基礎的な統計処理を適用し、ロゼット化と関係がある栽培条件を絞り込んだ上で、階層化ベイズモデルを用いた確率的なロゼット化の予測モデルを構築した。次に、実データを提案モデルに適用し、提案モデルによる予測値と実測値を比較しモデルの性能評価を行った。そして、その結果から提案モデルはロゼット化の要因を高い精度で説明することが明らかになった。このことから、提案モデルが農作物栽培の支援となる可能性を示した。

事前分析と提案モデルによる分析から、ロゼット化に影響する要因を特定できた。第一に、ロゼット化においては育苗時の冷蔵処理が非常に有効で、クーラー育苗及び夜間冷房育苗が著しくロゼット化割合を低減することがわかった。また、育苗時に冷蔵処理をしない、なりゆき育苗における分析から、提案する階層ベイズモデルによって、ロゼット化傾向を高精度で説明することが分かった。また、その結果として、栽培時の土中の温度（これは、土中の体積含水率と高い相関がある）と種子冷蔵処理の有無がロゼット化に影響を及ぼすことが分かった。また、品種ごとのロゼット化のしやすさも定量化した。

## 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](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/eustoma_manual201203.pdf)) (参照 2018-05-09).
- [2] 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).
- [3] Hastings W. K., "Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications," *Biometrika*, vol.57, No.1, pp.97-109 (1970).