

## 口蹄疫の防疫判断をサポートするシステムの開発

平田 木乃美<sup>a)</sup>・岩満 海人<sup>b)</sup>・高塚 佳代子<sup>c)</sup>・山場 久昭<sup>d)</sup>・油田 健太郎<sup>e)</sup>・岡崎 直宣<sup>f)</sup>

## Development of Decision Support System for Prevention of Foot-and-mouth Disease

Konomi HIRATA, Kaito IWAMITSU, Kayoko TAKATSUKA, Hisaaki YAMABA, Kentaro ABURADA, Naonobu OKAZAKI

## Abstract

Foot-and-mouth disease(FMD), one of the important domestic animal infectious diseases, has strong propagation power and epidemic measures at the early stage of development are important, however there is a problem that infection can not be confirmed at an early stage because of a latent period. Therefore, in order to formulate an appropriate quarantine strategy, it is necessary to determine the infection status on a daily basis or on a farm-by-farm basis. However, existing research was only predicting the trend of the infection period and the total number of infectious diseases throughout the infected area, and the daily assessment of the situation during the infection period in Miyazaki prefecture in 2010 depended on the intuition of the staff in charge. In the past, we defined and introduced the concept of infection index, which is a numerical value of infection-diffusion situation, based on existing epidemiological model(Keeling model). In this paper, we devise a method to quantitatively handle the trade-off between the prevention pedestal budget and the infection risk which could not be done by using the infection index and infection presumption model developed earlier. Then, we develop an epidemic judgment system that supports the narrowing down of targeted areas. In addition, we show case studies that objective discussion on the epidemic budget which was difficult when infected in 2010 can be made by using the proposed method.

**Keywords:** foot-and-mouth disease, domestic animal infectious diseases, Keeling model

## 1. はじめに

重要家畜伝染病の一つである口蹄疫は伝搬力が強く、発生の早い段階での防疫措置が重要であるが、潜伏期間があるために感染を初期段階で確認できない問題がある。そのため、適切な防疫戦略の策定の為には、日単位・農場単位で感染状況を判断する手立てが必要である。しかし、既存の研究では、感染地域全体にわたる感染期間と総感染頭数の傾向予測に留まり、2010年の宮崎県での感染期間中の日々の状況判断は担当職員の勤に依存していた。先行研究では感染拡散状況の数値化である「感染指数」の概念を既存の疫学モデル(Keelingモデル)に基づき定義・導入した。そして、感染指数を「判別の閾値」とし、各農場の感染の有・無を推定するモデルを開発し、感染推定手法を提案した。また、モデルの精度向上に寄与する要因も明らかにした。

しかし、実際に殺処分対象領域を絞り込む防疫上の判断では、推定精度のみならず、人手・物資・予算といった防疫活

動上の制約の問題が大きくなる。特に今後は予算の制約が防疫活動上のボトルネックとなる可能性が言われている(3.1節参照)。

そこで本研究では、先に開発した感染指数と感染推定モデルを用いることにより、従来はできなかった防疫予算と感染リスクとのトレードオフを定量的に扱うための手法を考案する。そして、殺処分対象領域の絞り込みをサポートする防疫判断システムを開発する。更に、提案手法を用いることにより、2010年の感染時には困難であった防疫予算に関する客観的な議論が可能となることをケーススタディで示す。

## 2. 句読点

## 2.1 Keeling モデル

Keeling モデルは以下の通りである。

$$P_{inf,i}(t) = 1 - \exp(-\lambda_i(t)) \quad (1)$$

$$\lambda_i(t) = \sum_{j \in \text{infections}} c_{ij} N_i N_j h(r_{ij}) \quad (2)$$

$$h(r_{ij}) = h_0(1 + r/r_0)^{-\alpha} \quad (3)$$

$P_{inf,i}(t)$  は着目農場  $i$  が感染初日から  $t$  日目に感染する確率を表す。ここで、 $\lambda$  の構成要素である  $N_i$  は着目農場  $i$  の保有動物数、 $N_j$  は農場  $i$  に影響をおよぼす感染農場  $j$  の感染動物数を表す。また、 $h(r_{ij})$  は農場  $i, j$  間の物理的な距離  $r_{ij}$  が

<sup>a)</sup>工学専攻機械・情報系コース大学院生

<sup>b)</sup>情報システム工学科学部生

<sup>c)</sup>教育研究支援技術センター技術専門職員

<sup>d)</sup>情報システム工学科助教

<sup>e)</sup>情報システム工学科准教授

<sup>f)</sup>情報システム工学科教授

近いほど大きい値を取るよう定式化された「感染し易さ」を表し、 $c_{ij}$  は農場  $i, j$  双方の保有動物種の組合せによって決まる農場間での感染率を表す。なお、パラメータ  $h_0, r_0, \alpha$  は、一感染事例で得られる一まとまりの感染データを用い、各農場の感染日での感染確率が最大となるように最尤推定で求められる。

## 2.2 感染指数と感染推定手法

未感染農場がどの程度感染し易い状況におかれているかを表す指標として“感染指数”という概念を導入した。これは、より多くの動物を保有する感染農場が、より近くに、よりたくさんあるほど大きな値を取る指標と捉えられる。Keeling モデルのパラメータ  $\lambda$  を求める式 2 は、上記指数の概念そのままの式構成となっていることから、この Keeling モデルの  $\lambda$  を求める計算式 (2) を感染指数の値を求める定義式とし、 $\lambda$  を感染指数と呼ぶこととした。また、このような感染指数  $\lambda$  に基づく感染推定モデル、及び本モデルに基づく感染推定手法を考案した。具体的には、過去の感染事例データから、個々の農場が感染した日の感染指数を実データから算出し、感染指数の分布のヒストグラム (図 1-(1) 参照) を作成し、その累積相対度数分布を作成し、これを感染推定モデルとする (図 1-(2) 参照)。本手法では、この感染推定モデルの分布に基づき、未感染/感染を立分ける感染指数の閾値  $\lambda$  を統計的に見出すという方法を取る。先行研究では、推定失敗率が最小となる閾値  $\lambda$  の検出を、感染事例データを使って実際に行った。

## 2.3 推定精度の評価

推定精度は、未感染/感染を立て分ける感染指数  $\lambda$  の閾値をどこに設定するかで異なる。そこで本研究では、閾値ごとの推定成功率を、横軸を閾値  $I_T$ 、縦軸を推定成功率  $S_R$  とするグラフ (“推定成功率グラフ”と呼ぶ) にプロットし、推定精度を視覚的に分かりやすくする方法を考案した。感染推定成功率  $S_R$  は、臨床検査の性格を決める指標である偽陽性と偽陰性の発生率  $F_P, F_N$  を使って次のように定義した。

$$S_R = 1 - (F_P + F_N) \quad (4)$$

偽陽性率  $F_P$ 、偽陰性率  $F_N$  の定義では、まず、各農場の感染日を含む連続した 5~10 日程度の任意に指定する期間を“感染日付近”として定義し、これを使って感度  $S_E$ 、特異度  $S_P$  と併せ、以下のように定義した。

$$F_N = 1 - S_E, S_E = (p + q)/(p + q + r) \quad (5)$$

$$F_P = 1 - S_P, S_P = (q + r)/(p + q + r) \quad (6)$$

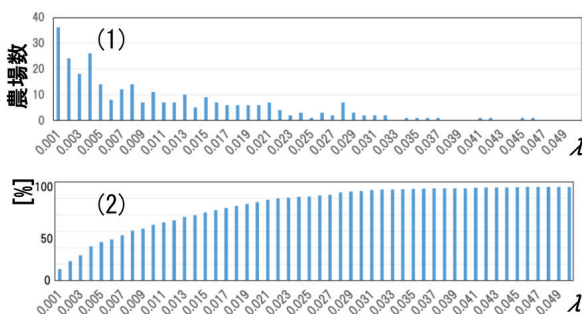


図 1. (1) 各農場の感染日の感染指数の分布  
(2) 感染指数の累積相対度数分布

$q$  : 感染日付近で正しく感染推定される農場の数  
 $p$  : 最終的に感染しないか、或いは感染日付近より早過ぎる時期に誤って感染推定される農場の数  
 $r$  : 感染が見逃されるか、或いは感染日より遅過ぎる時期でしか感染推定されない農場の数

## 2.4 推定精度を向上させる要因

サンプル全体を、何らかの要因によってグループ分けし、個々のグループの特徴付けをし易くする層別という方法がある。本手法では、推定精度を向上させる方法として、対象農場全体を然るべき要因に基づき層別し、層別の結果得られるサンプル集団各々に対し感染推定モデルを別々に作成し感染推定する方法を、推定精度を向上させる方法として取り入れた。各要因の層別効果の評価・比較は、推定成功率グラフを生成し行った。層別する場合の推定成功率の評価は、着目要因での層別の結果得られる複数の感染推定モデル各々に対し感染推定成功率グラフを作成し、その成功率グラフ全体を一つのグラフの統合し評価するという方法を取った。また要因毎の層別効果の比較は、成功率グラフの最大値同士と比較するようにした。2010 年の宮崎県の口蹄疫発症事例データを使用し評価実験を行った結果、感染農場全体の重心からの距離 (以降“重心からの距離”と書く) を考慮したケースの推定成功率が総じて良く、次いで農場規模を考慮したケースの結果が良いということがわかった。

## 3. 提案手法

### 3.1 問題の所在と基本方針

冒頭で述べたように、適切な防疫判断をするためには、感染状況を推測しながら、感染地域の制約の範囲内で殺処分を行う対象農場の絞込みを行う必要がある。感染地域の制約としては、人手、物資、埋却地等が考えられるが、人手と物資に関しては 2010 年の段階で既に国レベルでの対応が取られており、大きな問題は起きなかった<sup>9)</sup>。一方、埋却地に関しては、この不足と準備遅延の問題が大きく、このことが防疫活動進捗を妨げるボトルネックとなった。しかし、その後の有識者による検討と対策により、問題は解消される見込みである。そこで、将来発生する感染での防疫活動のボトルネックは「予算」と言われている。

一般に予算編成の方式には、トップダウン方式とボトムアップ方式がある。前者は全体管理を行う管理者 (部門) が予算を設定し、それを現場に伝えて遂行させる方法である。スピード感を持った計画立案が可能である反面、現場感覚の欠如による現実性のない計画に注意が必要である。後者は逆の考え方で、現場が予算の原案を決め、予算を積み上げていき、最終

<sup>9)</sup> 人手に関しては、人の数が足りないという問題はなかった。しかし、防疫活動グループの編成等、人・コミュニケーションの問題はあり、現在議論されている。

的に管理部門などでまとめあげる予算設定方法である<sup>h)</sup>。より現状に沿った予算設定ができるが、失敗を避けたいがゆえのゆとり予算になりやすいというデメリットがある。防疫予算立案は、スピードが要求されるため、トップダウンで決められることが多い。2010年に宮崎県で発生した口蹄疫の際もそうであった。その結果、トップダウン方式特有の問題が多発し、予算立案担当(国)と現場(宮崎県)との間での軋轢を生んだ。しかし、ボトムアップ方式での防疫予算編成には原理的に無理がある。予算積み上げの前提条件のパターンが無数に存在するためである。このことは、2010年の宮崎県での口蹄疫災害による経済的損失の試算を現地で実際に行った経済学者の見解である。

以上を踏まえ、本研究では、防疫予算はトップダウンで設定されることを前提とし、その与えられた額の適否の判断をサポートする方法を検討することとした。

### 3.2 提案手法の考え方

前節を踏まえ、次期感染時の防疫活動のボトルネックは予算であること、また、予算はトップダウンで与えられることを前提とする。提案手法では、(1)まず所与の予算の範囲内で実施可能な殺処分頭数を算出し、(2)過去の感染データに基づき作成された感染推定モデルに基づき、(ある感染状況下での)各農場の感染指数を評価し、殺処分対象農場を特定する。この時の上限が(1)で求められた頭数となる。次に、(3)感染しているにもかかわらず殺処分対象から外れた(以降“取りこぼし”と呼ぶ)農場の分布を推定する。そして、(4)その取りこぼし農場の分布を初期感染状況とし、感染拡大シミュレーションを行い、一定期間後の感染拡大状況を明らかにする。

以上の手順で得られる感染拡大状況の規模は、推定精度のみならず、与えられた予算に依存する。したがって、(3)で明らかにされる感染拡大の規模は与えられた予算の額の適否を議論する根拠となり得る。この議論とは、簡単には、感染頭数より経済的損失の概算ができるということである。更に、前提条件の与え方によっては、感染動物そのものの損失(直接的被害)のみならず、その損失の経済波及効果による損失(間接的被害)も考慮した議論が可能である。しかし前節で述べたように、損失算出の前提条件は一意には設定できない。このため、一般性を考慮し、本研究でターゲットとするのは、直接的被害を示す感染頭数とその分布を明らかにするところまでとする。以下、3.3、3.4、3.5節にて提案方法(1)~(4)の詳細を順に示す。

### 3.3 殺処分対象農場の絞込み

まず、予算( $B$ )に対し、殺処分可能な頭数( $S_B$ )が決まる(図2-(1)参照)。次に、殺処分対象動物の総数が高々その頭数( $S_B$ )となるような感染指数の閾値( $\lambda_{S_B}$ )を特定する(図2-(2)参照)。具体的には、感染指数がある値( $\lambda'$ )を越す全ての農場の家畜の総数( $N_{\lambda'}$ )が殺処分可能な頭数( $S_B$ )を越さない最大の感染指数 $\lambda_{S_B}$ を特定する。

$$\lambda_{S_B} = \max.\{\lambda' | N_{\lambda'} \leq S_B\} \quad (7)$$

<sup>h)</sup> 損失試算と予算積み上げの間には、与えるべき前提条件に共通する項目が多い。

$\lambda_{S_B}$  が求めれば、感染指数が閾値 $\lambda_{S_B}$ を越す農場の全てが、当該予算の範囲で実施可能な殺処分対象農場として特定される。

### 3.4 取りこぼし農場の分布の推定

上述の $\lambda_{S_B}$ を越さない農場全て、つまり当該予算の下で殺処分対象から外れた農場全て(図2-(4)の青と赤で示す農場全て)の動物総数を $M^{\lambda_{S_B}}$ とする。一方、感染指数 $\lambda_{S_B}$ の下で感染推定した場合の偽陰性率を、過去の感染事例データに基づく統計的手法で求められる感染推定モデルより算出し<sup>1)2)</sup>、これを $F_{N^{\lambda_{S_B}}}$ とする(図2-(3)参照)。このとき、実際は感染しているにもかかわらず殺処分されない取りこぼしの頭数 $MX$ は以下ようになる。

$$MX = M^{\lambda_{S_B}} * F_{N^{\lambda_{S_B}}} \quad (8)$$

ここで、当該予算の下で殺処分対象から外れた農場のうち、感染指数が最も大きい農場 $F^1$ の動物頭数を $m^{\lambda_{S_B^1}}$ 、2番目に大きい農場 $F^2$ の動物頭数を $m^{\lambda_{S_B^2}}$ 、…、 $j$ 番目を $m^{\lambda_{S_B^j}}$ とする。

$$\sum_{i=1}^{k'} m^{\lambda_{S_B^i}} \leq MX \quad (9)$$

を満たす最大の $k'$ を $k$ とすると、取りこぼし農場は、 $F^1$ から $F^k$ (図2-(4)の赤で示す農場)と推定される。以上が本稿で提案する取りこぼし農場の分布の推定方法である。

### 3.5 感染拡大状況の算出

取りこぼし農場 $F^1 \sim F^k$ を初期感染状況とし、所定の期間に関する感染拡大シミュレーションを実施する。その結果得られる感染拡大状況は、当該予算で実施可能な防疫措置の効果の程度を知る目安となる。また、予算の額を変えてシミュレーションした結果を相互に比較することにより、予算と損失のトレードオフの議論が可能になる。なお、感染シミュレーションは従来手法に従う<sup>3)</sup>。即ち、農場が感染する確率をKeelingモデルの(1)式を使って毎回決め、そのベルヌーイ過程のモンテカルロシミュレーションで行う。

## 4. ケーススタディ

2010年の宮崎県の感染事例データ<sup>4)</sup>を使用し、提案手法を用いて予算と感染リスク(以降“損失”と同義とする)のトレードオフの関係の定量化の一例を示す(4.2)。また、この定量化の考え方により、防疫予算の額に関する客観的な議論が可能となることを示す(4.3)。

### 4.1 使用する感染推定モデルについて

取りこぼし農場の分布推定結果は、使用する感染推定モデルによって決まる。本実験では、推定精度向上に有用な“重心からの距離”および“農場規模”の双方を考慮した層別のモデル(2.4節参照)を使用する。

### 4.2 予算に対する損失の定量化実験

前提条件として、動物1頭の殺処分に掛かる諸経費を1万と仮定する。また、着目日を地域感染発生から10日目とする。以下では、式(7)~(9)中の(図2中の)各記号に関連付けながら説明する。

(1) 殺処分対象農場の絞込み 予算1億2千万円(= B) が与えられたとする。この時殺処分可能な頭数は 12000 頭(=  $S_B$ )となる。殺処分対象動物の総数が高々 12000 頭となるような感染指数、即ち 12,000 頭を越さない判断上の閾値は(7)式より  $20(= \lambda_{S_B})$ となる。従って、感染指数(閾値)の 0~100 で正規化された値が 20 を越す農場の全てというのが、当該予算で最大限実施可能な殺処分対象農場となる。

(2) 取りこぼし農場の分布の推定 着目日において、上述の閾値  $20(= \lambda_{S_B})$  を越さない農場全て、つまり当該予算の下で殺処分対象から外れた農場全て(図 3-(B)-“直後”の青と赤で示す農場全て)の動物総数は  $180,952$  頭(=  $M^{\lambda_{S_B}}$ )となった。一方、感染指数  $= \lambda_{S_B}$  の下での偽陰性率を算出すると 21% (=  $F_{N^{\lambda_{S_B}}}$ )となる(図 3-(B) 参照)。このとき、実際

は感染しているにもかかわらず殺処分されない取りこぼしの推定頭数は(8)式より 23,338 頭(MX)となる。ここで、当該予算の下で殺処分対象から外れた農場のうち、取りこぼし農場は、(9)式を使って求められ、図 3-(B)-“直後”の赤で示す 53 農場と推定される。

(3) 感染拡大状況の算出 上述の取りこぼし農場分布を初期の感染農場分布とし、所定の期間に関する感染拡大シミュレーションを試行回数 100 回で実施した結果、本実験では、10 日後の被害総数の平均値は 78,806 頭となった。図 3-(B)-“3 日後”、“10 日後”は、100 回の試行中のある 1 ケースの結果を图示したものであり、赤丸は感染農場を表す。

4.3 異なる予算設定での損失比較実験

5 億 5 千万、1 億 2 千万、9 千 5 百万、6 千 4 百万の 4 パターンの予算を設定し、前節と同じ方法で、殺処分農場の絞込みから感染拡大シミュレーションまで行った。その結果を表 1 と図 3 で示す。以下は実験の考察である。

・与えられる予算が大きいくほど閾値は厳しく設定され、偽陰性率は小さくなり、取りこぼし農場(動物)の数は減り、感染拡大による被害頭数も少ないという結果が得られた。このことから、予算と損失の関係の傾向分析のための一手段として、本方法の一定の妥当性は確認できた。

・表 1 に基づき、予算百万増当たりでの被害頭数減少量の比較分析を行った。その結果、予算 A-B 間では 34 頭減、B-C 間では 120 頭減、C-D 間では 148 頭減となり、予算の増分と損失の減り方は比例しないことが分った。このことから、本方法を用いると、上述のような傾向分析のみならず、予算の少しの積み増しで損失を大きく引き下げる可能性を探る調整手段としても利用可能と考えられる。

表 1. 異なる予算設定での損失比較 (数値データ)

	予算 [百万]	殺処分実施直後				10 日目	
		未実施		取りこぼし(推定)		感染(試行回数:100)	
		農場 (図中●●)	頭数	農場 (図中●)	頭数	農場 (図中●)	頭数 (平均)
(A)	550	223	137,287	37	23,338	図3はシミュレーション結果の一例	35,055
(B)	120	257	180,952	53	37,999		78,806
(C)	95	251	183,232	84	56,801		81,835
(D)	64	279	185,034	108	72,163		86,430

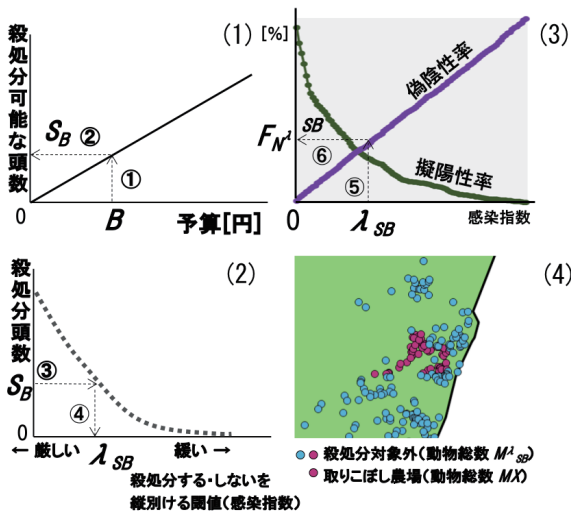


図 2. 提案手法の流れのイメージ  
(1),(2) 殺処分対象農場の絞込み  
(3),(4) 取りこぼし農場の分布の推定

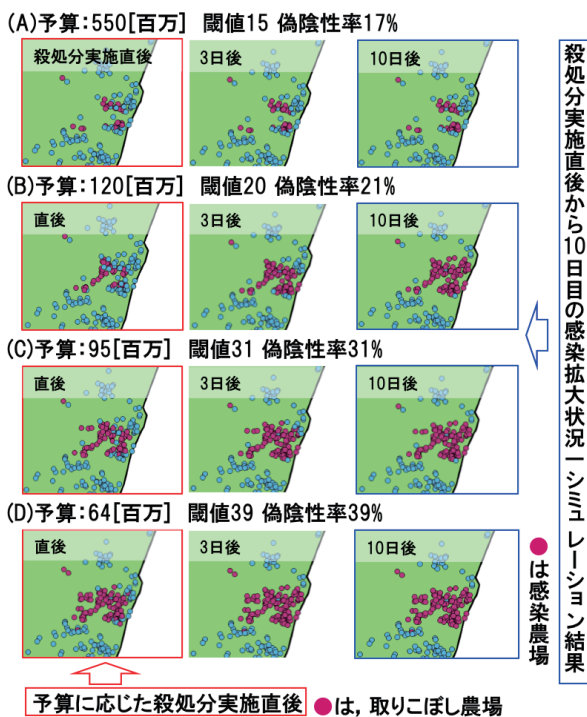


図 3. 異なる予算設定での損失比較 (イメージ)

5. まとめ

本研究では、防疫予算の適否の客観的な議論を助けるための手法を考案した。具体的には、予算と感染リスクとのトレードオフの関係を定量化する一方法を提案した。本提案方法は、先行研究の成果である口蹄疫の感染指数の概念と、それを用いた感染推定のためのモデルを用いることにより実現した。2010 年の宮崎県の感染データに本手法を適用し、防疫予算に関する客観的な議論が可能となることをケーススタディで示した。農場データの数や分布状況のパターンを変えながら傾向分析し、今後の防疫活動に役立つ知見を幅広く見出すことが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 程内星守：口蹄疫の感染推定失敗が招く損失を考慮した殺処分対象領域決定方法の検討, 宮崎大学工学部情報システム工学科卒業論文 (2017).
- 2) 経営を学ぶ～経営学・MBA・起業～,  
<http://keiei-manabu.com/accounting/budget-setting-method.html> (2017).
- 3) Y. Hayama, et.al. :Mathematical model of the 2010 foot- and-mouth disease epidemic in Japan and evaluation of control measures. Preventive Veterinary Medicine, pp.183-193(2013).
- 4) 農林水産省：2010年の宮崎県における口蹄疫発生に関する情報,  
[http://www.maff.go.jp/j/souan/douei/katiku\\_yobo/k\\_fmd/22fmd.html](http://www.maff.go.jp/j/souan/douei/katiku_yobo/k_fmd/22fmd.html)  
(2018/02/08).
- 5) 小長谷一之・前川知史編 (2012)『経済効果入門 -地域活性化・企画立案・製作評価のツール』, 日本評論社 (2012).