

口蹄疫の最適感染リスク抑止モデルの開発

阿部 真育

本研究では、口蹄疫の空間伝染過程をマルコフ連鎖過程としてモデル化し、口蹄疫の空間伝染確率を予測するモデル (空間伝染モデルと呼ぶ) を推計するための方法論を提案する。その際、現実には観測される口蹄疫の観測データには、1) 潜伏期間における感染可能性、2) 予防的殺処分等による人為的政策による影響が介在する。その結果、口蹄疫の感染・伝染過程においては、口蹄疫の発症状態のみが観測可能であり、地域における家畜の感染状態を完全には把握できないという問題が発生する。本研究では、このような特性を有する口蹄疫の空間伝染モデルを MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法を用いて推計する方法論を提案する。さらに、2010 年に発生した宮崎県における口蹄疫災害を対象として、本研究で提案した方法論の有効性を実証的に検証する。

1. はじめに

口蹄疫 (foot-and-mouth disease) は、家畜伝染病の中では最も感染力の強い疾病の 1 つであり、口蹄疫の発症が確認された農場においては、直ちにすべての家畜が殺処分され、口蹄疫の発症が確認されていない農場においても、口蹄疫に感染するリスクのある家畜を予防的に殺処分することが求められる。口蹄疫の感染は地域において畜産・酪農業を営む家計や地域経済に甚大な被害をもたらす災害であり、口蹄疫の感染・伝染による被害を軽減するための抑止計画を事前に策定しておくことが必要である。口蹄疫の発症が確認された場合、感染農場の周辺地域に位置する未感染農場において、家畜の予防的殺処分が実施される。したがって、口蹄疫の空間伝染の抑止計画を策定するためには、地域における畜産・酪農業を営む農家が口蹄疫の潜在的な感染リスクを把握・理解すると同時に、家畜が口蹄疫を発症したときの対応を地域全体のルールとして事前に合意形成しておくことが重要である。本研究では口蹄疫の空間伝染リスクを評価することを目的として、口蹄疫の空間伝染過程をマルコフ連鎖過程としてモデル化するとともに、現実の口蹄疫の感染・伝染過程に関する観測結果から、口蹄疫の空間伝染確率を予測するモデル (以下、空間伝染モデルと呼ぶ) を推計するための方法論を提案する。

2. 既往の研究概要

Kermack and McKendrick¹⁾により提起された感染症流行モデルは、その後の研究の蓄積を経て数理疫学モデルとして体系化されるに至っている。いま 1 つの方向性は、感染症流行の空間拡大過程を表現する空間伝染モデルの発展である。空間伝染モデルに関しては、研究の緒についたばかりであり、研究成果が十分に蓄積されているとは言えないのが実情である。解析的に空間伝染過程をモデル化することが難しいため、シミュレーションモデルを用いた空間

伝染モデルが提案されている。口蹄疫に関しては、2000 年の宮崎県における伝染過程の調査結果²⁾が報告されている。さらに、Tildesley 等は英国における口蹄疫の伝染事例に基づいて、口蹄疫の空間伝染モデルを提案している³⁾。

$$\rho_i(\mathbf{S}_h) = 1 - \exp \left\{ - \left(\sum_{r=1}^R \zeta^r m_i^r \right) \sum_{j \in J(\mathbf{S}_h)} \kappa(d_{ij}) \right\} \quad (1)$$

$$\kappa(d_{ij}) = d_{ij}^{-\gamma} \quad (2)$$

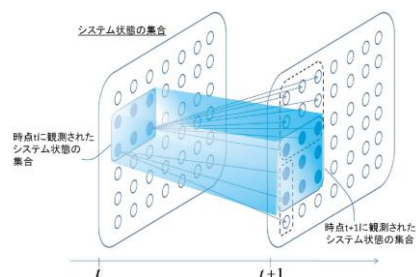
ここで、 $\mathbf{S}_h$ は各農場状態変数の集合を表しており、 r は家畜の種類、 d は農場間距離、 ζ は家畜毎の感受性パラメータ、 γ は距離抵抗パラメータを表す。従って、状態推移確率 $\pi_{s_i^h s_i^g}(\mathbf{S}_h)$ は農場ごとの状態変数の s を用いて、

$$\pi_{s_i^h s_i^g}(\mathbf{S}_h) = \begin{cases} q_i(\mathbf{S}_h) & s_i^h = 0, s_i^g = 0 \text{ の時} \\ \rho_i(\mathbf{S}_h) & s_i^h = 0, s_i^g = 1 \text{ の時} \\ 1 & s_i^h = k, s_i^g = k+1 \text{ の時} \\ & (k = 1, \dots, \iota_i + 1) \\ 1 & s_i^h = \iota_i + 2, s_i^g = \iota_i + 2 \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (3)$$

と表わされ、各パラメータの推計を行う事で感染確率を求める事が出来る。

3. 空間伝染モデルの基本的な考え方

口蹄疫に限らず、感染症の多くは潜伏期間を有し、また潜伏期間中も感染力を持つものがほとんどであるため、感染症リスクの把握のためには潜伏期間を考慮した上で抑止戦略を検討・実施することが必要となる。しかしながら、感染症に感染し潜伏期間の状態にある個体を観測することは、疫学調査をしない限り不可能であり、疫学調査のみにより、その個体が潜伏期間何日目かといった感染状態を確実に把



図－1 不完備情報の概念図

握する事は物理的に不可能と言える。これは、時点 t において観測されたある個体群の状態から予測される次の時点 $t+1$ の個体群の状態の内、実際に時点 $t+1$ で観測されるのはその一部だけであることを示しており、この状態を不完備情報下において部分的に観測可能な状態であると言う（図－1）。情報が不完備である事を鑑みて、観測可能な発症状態を個体の状態とするのではなく、潜伏期間の経過日数も考慮に入れて個体の状態変数を設定し、口蹄疫の空間伝染モデルをMCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法を用いて推計する。

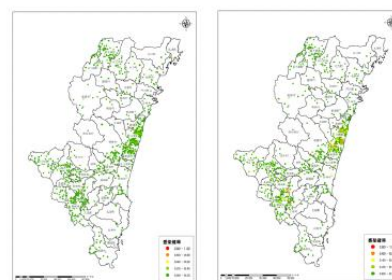
4. ケーススタディ

4.1. 適用事例

本研究では、2010 年に発生した宮崎県における口蹄疫の発生事例のデータを用いて口蹄疫の空間伝染モデルを推計する。農林水産省は、2010 年における宮崎県の口蹄疫発生・伝染過程とそれに対する対応実績について公開している。これらの情報源より、口蹄疫に感染した家畜頭数、家畜の種類、感染発覚日、殺処分実施日、ワクチン投入日に関する情報が入手可能である。また、本研究では、2005 年度の宮崎県の農林業センサス（集落別）データを用いて、農場の位置情報に関するデータベースを作成した。

4.2. リスク評価

時点 $t = 0$ において、宮崎県の事例と同一の農場において口蹄疫の初期感染が確認されたと考える。対象期間中の各時点における口蹄疫の空間伝染リスクを評価するために、最初の発症事例が観察されてから、殺処分の実施が実施されるまでの一定期間にわたり未処置のまま時間が経過し、そののち口蹄疫の発症が確認された農場において、直ちに殺処分がされるようなシナリオを考える。その結果を図－2 に示しており、左側が初期対応期間がないケース、右側が初期対応期間が4 週間のケースを表している。この結果より、初期対応期間が長引き殺処分が遅れた分だけ空間伝染リスクが高まっていることが分かり、初期対応の遅れにより感染拡大の様子が再現されている。



図－2 空間的殺処分実施範囲

5. おわりに

本研究では、感染症リスクの内、主に家畜が感染対象となる口蹄疫のみに注目した。しかし、口蹄疫に焦点を絞っても以下のような研究課題が残されている。第1 に、口蹄疫の発生・伝染確率モデルの精緻化が必要である。現実には口蹄疫に感染した一部の家畜が、感染例として確認されている可能性がある。現実の感染事例に関するモニタリング結果より、その背後にある現実の感染過程を推計するような予測モデルの開発が必要である。第2 に、家畜の移動が許容されているような状況下では、家畜の移動可能性や接触ポテンシャルを考慮にいれた伝染過程のモデル化が必要となる。特にヒトも感染可能な疾病の場合、非感染者の移動による伝染性疾患の伝染可能性をモデル化することが極めて重要な研究課題になると考える。最後に、本研究では初期対応速度や殺処分能力を政策パラメータと考え、これらパラメータ値と期待被害額の関係を分析した。政策パラメータの実行可能性を検討するためには、詳細な口蹄疫伝染・拡大抑制方策を検討することが必要となる。

参考文献

- 1) Kermack, W.O. and McKendrick, A.G.: Contributions to the mathematical theory of epidemics I, Proceedings of the Royal Society 115A, pp.700-721, 1927. (reprinted in Bulletin of Mathematical Biology, Vol.53(1/2), pp.33-55, 1991.).
- 2) Tsutsui, T. and Minami, N., et al.: A stochastic-modeling evaluation of the foot-and-mouth disease survey conducted after the outbreak in Miyazaki, Japan in 2000, Preventive Veterinary Medicine, Vol.61, pp.45-58, 2003.
- 3) Tildesley, M.J., Savill, N.J., Shaw, D.J., Deardon, R., Brooks, S.P. Woolhouse, M.E.J., Grenfell, B.T., and Matt J. Keeling, M.J.: Optimal reactive vaccination strategies for a foot-and-mouth outbreak in the UK, Nature, Letters, pp.83-86, 2006.