第 38 回　獣医疫学会学術集会
シンポジウム“感染症と疫学―感染症対策への疫学の貢献―”

2010 年にわが国で発生した口蹄疫の疫学解析

早山陽子*

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構
動物衛生研究所ウイルス・疫学研究領域

Epidemiological Analyses of the 2010 Foot-and-mouth Disease Epidemic in Japan

Yoko HAYAMA*

Viral disease and epidemiology research division National Institute of Animal Health
National Agriculture and Food Research Organization

Summary

A large-scale foot-and-mouth disease (FMD) epidemic occurred in Japan in 2010. During the epidemic, the emergency vaccination strategy was conducted for the first time in Japan. Ultimately, this epidemic was contained within 3 months, and then led a total of 292 detected farms and nearly 290,000 culled animals including vaccinated animals. Such a large-scale epidemic of FMD has never experienced in Japan, and it caused severe damage to the local livestock industry and related industries. In this article, some epidemiological analyses of the FMD epidemic are introduced.

First, descriptive and spatial analyses were conducted to understand the character of the epidemic. The epidemic was primarily localized within 20km of the north-south area of Miyazaki Prefecture. The epidemic area features a densely populated livestock area even in Miyazaki, which has been known as one of the major livestock farming regeion in Japan. A spatial clustering of the disease was detected by the spatial analysis and this cluster was located in an area more densely populated with both cattle and pig. This implies that high density of livestock animals was a crucial aspetc of the epidemic and pig farms played an important role to induce the dissemination of the disase in the area.

Next, a case-control study was conducted to investigate the risk factors associated with FMD transmission under the movement restriction. This study resulted that in the highly affected area the disease was likely to spread regardless of the movements of people and vehicles, and physical barriers around barns such as walls or clumps of trees were found to be a protective factor. Meanwhile, in the less affected area movements of people and vehicles was strongly associated with the disease spread.

Lastly, an FMD transmission model was developed using the epidemic data to evaluate the effects of several control measures. The transmission model demonstrated that prompt culling on infected farms or early detection of an index case could contribute effective and efficient prevention of the disease spread in the epidemic area. As an optional strategy, preemptive culling demonstrated good effectiveness in reduction of the number of infected farms. However, applying this strategy in the densely populated areas may have practical difficulties because it required a large amount of resources. The vaccination strategy with the wide range in the early phase of the epidemic also showed the potential to contain the epidemic on a small scale, but vaccination strategy posed some difficulties in management of vaccinated animals whether they are culled or not.

連絡先：早山陽子*
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構
動物衛生研究所ウイルス・疫学研究領域
〒305−0856
Tel : 029−838−7769
E-mail : hayama@affrc.go.jp

1.　はじめに

2010 年 4 月 20 日，日本で 10 年ぶりとなる口蹄疫の発生が宮崎県で確認された。この発生では，国内で初めてとなる口蹄疫の緊急ワクチン接種が行われ，流行を宮崎県の一部地域に封じ込めることができたものの，終息までの約 3 ヵ月間で 292 農場で感染が確認され，ワクチン接種家畜も含め約 29 万頭の家畜が処分された。このような口蹄疫の大規模な流行は，日本では経験したことがないものであり，流行地域の畜産業に甚大な被害を与えただけでなく，地域の社会・経済活動にも大きな影響を及ぼした。今後，この発生の教訓を生かし，国内における口蹄疫の防疫対策の充実を図るためには，今回の口蹄疫の流行の特徴と防疫対策の効果を十分に分析することが重要である。本稿では，まず初めに，記述的な分析により当時の流行を振り返るとともに，地理的解析により明らかとなった流行地域の特徴について述べる。次に，流行地域において移動制限下で感染が広がった要因をケース・コントロールスタディによって解析した結果について紹介する。最後に，流行データの解析結果に基づき，当時の流行を再現する口蹄疫の伝播モデルを構築し，この伝播モデルを用いてシミュレーションを行い，殺処分やワクチン接種など防疫措置の効果を評価した研究について解説する。

2.　記述的・地理的解析による口蹄疫流行の特徴の把握

2010 年の口蹄疫の初発事例は，宮崎県の肉用牛繁殖農場で確認された。初発事例の摘発後，発生農場での家畜の殺処分と埋却，発生農場周辺の移動制限などの防疫措置が直ちに実施された。しかしながら，4 月下旬に豚農場で発生が確認されると，摘発農場が急激に増加し，5 月初旬～中旬には，1 日当たりの摘発戸数が 10 戸を超えた（図 1）。更に，この時期になると，感染の急速な拡大に伴い，摘発農場における感染家畜の殺処分と死体の埋却が滞りはじめ，多いときには 100 戸以上の摘発農場が殺処分に着手されることなく残されていた（図 2）。このような状況から，流行地域のさらなる拡大を防止するために，5 月 22 日～26 日には，移動制限下にある農場を対象に緊急ワクチン接種が実施された。その後，ワクチン接種の効果と効率的な殺処分の実施体制が整ったことが相まって発生件数は減少し，7 月初旬の発生を最後に流行が終息した。

このように感染が急激に拡大した背景には，今回の流行地の地理的な特徴が挙げられる。空間クラスター解析によって，流行地域における発生農場の空間的な集積性（クラスター）を分析したところ，川南町を中心とする地域にクラスターが検出された。クラスター内部では 6 割以上の農場が感染しており，クラスター外部と比べると，飼養密度が非常に高く，牛農場に対する豚農場の比率が有意に高かった。これらのことから，流行地域では牛と豚の飼養密

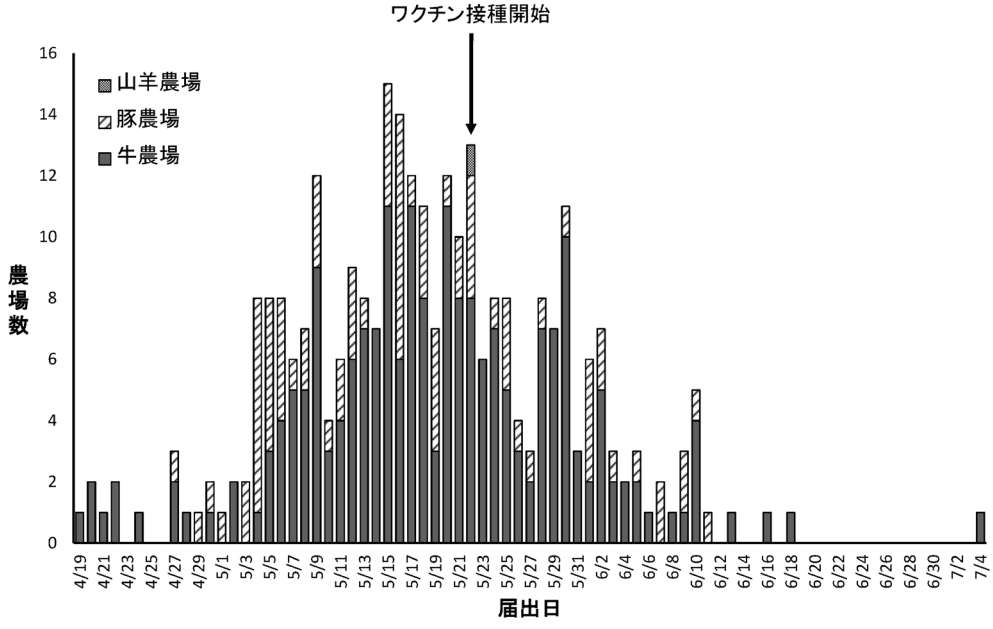


図 1　摘発農場数の推移

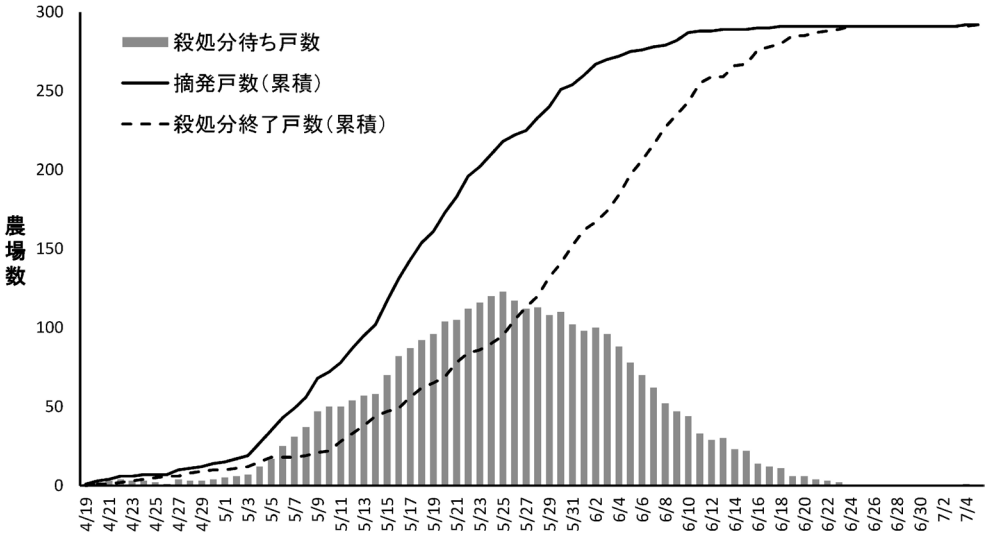


図 2 摘発戸数，殺処分終了戸数及び殺処分待ち戸数の推移

度が高かったことが感染拡大の要因の 1 つとして挙げられ，特に，豚農場が多かったことが口蹄疫の流行に大きな影響を与えていたと考えられた。

3. ケース・コントロールスタディによる伝播要因の解析

ケース・コントロールスタディでは，移動制限開始後に感染したと推定される農場を「ケース」，流行期間中に感染しなかった農場を「コントロール」として，移動制限下での口蹄疫の感染拡大要因について検討した。調査対象農場は，牛と豚では口蹄疫に対する感受性や感染力が異なること，また，飼養管理も大きく異なることから，牛農場と豚農場で分けた。また，地域についても，2 で述べたように，疾病が特に集中していた川南町とそれ以外の地域では，伝播リスクが異なる可能性があったことから，「川南町」と「川南町より南の地域(木城町，高鍋町，新富町及び西都市)」で分けた。動物種及び地域の区分に応じて，ワクチン接種区域内の農場を対象に無作為抽出を行い，調査協力を得られた農場について，川南町の牛農場（ケース 49 戸，コントロール 48 戸）と豚農場（ケース 59 戸，コントロール 15 戸），及び川南町より南の地域の牛農場（ケース 37 戸，コントロール 73 戸）の調査を実施した。

調査では，飼養規模や飼養形態など農場の概要と飼養管理に関すること，獣医師や従業員，農業関係者など農場に出入りした人に関すること，飼料運搬車や自家用車など農場に出入りした車輌に関すること，畜舎や農場周辺の環境に関することについて，農場管理者に聞き取りを行った。

ロジスティック回帰分析による多変量解析の結果を表 1 に示す。川南町では，人や車輌の移動はほとんど行われておらず，これらの移動が制限されている中で感染が広がっていたことが明らかとなった。このような状況の中，牛農場においては，農作業の際に利用する農業機材を他農場と共有したことがリスク要因として関連が認められた。また，豚農場においては，肥育農場よりも繁殖・一貫農場であること，通いの従業員を雇用していたことがリスク要因として確認され，畜舎に隣接して住居や生け垣などの障害物があったことは防御要因として関連があった。一方，川南町より南の地域の牛農場においては，畜産関連業者や飼料運搬車の出入りがリスク要因として関連が認められた。以上のことから，川南町では，発生農場と非発生農場の間に人や車輌の移動はほとんど行なわれておらず，人や車輌の出入りを介さなくても周辺から感染を受けやすい状況下にあったことが示唆された。一方，川南町より南の地域では，農場外からの人や車輌の動きを介して農場間に疾病が伝播した可能性が高いと考えられた。

4. シミュレーションモデルを用いた防疫措置の評価

口蹄疫の伝播に関するシミュレーションモデルでは，まず，移動制限開始後からワクチン接種前までの流行データを用いて農場間の伝播率を最尤推定法で求め，推定した農場間伝播率を用いて口蹄疫伝播モデルを構築した。さらに，当時の流行をより忠実に再現するため，摘発後の殺処分対象戸数に応じて殺処分日数が変化するものと仮定し，これをベースラインモデルとした。この伝播モデルを用いて，ワクチン接種区域内の 1,210 戸（牛 1,080 戸，豚 130 戸）

表 1　ケース・コントロールスタディの多変量解析の結果

区分	変数	水準	オッズ比	95% 信頼区間		p 値
				下限	上限	
川南町（肉用牛）	農作業機械を共有している	はい	9.6	1.1	80.2	0.04
		いいえ	1			
川南町（豚）	繁殖又は一貫農場である	はい	13.1	2.3	73.2	＜0.01
		いいえ	1			
	通いの従業員を雇用している	はい	20	1.8	226.9	0.02
		いいえ	1			
	畜舎周囲に物理的障壁がある	はい	0.1	0	0.5	＜0.01
		いいえ	1			
南部地域*（肉用牛）	畜産関連業者が出入りしている	はい	20.4	1.1	383	0.04
		いいえ	1			
	飼料運搬車が出入りしている	はい	5.1	1.5	16.7	0.01
		いいえ	1			

*川南町より南の地域（木城町，高鍋町，新富町及び西都市）

を対象に，移動制限開始後の感染拡大のシミュレーションを行った。シミュレーションは，移動制限時に既に感染していたと推定された11戸から感染拡大をスタートさせ，流行期間180日，シミュレーション回数1万回で行った。

ベースラインモデルを用いて，移動制限開始からワクチン開始前までの感染の広がりを再現したところ，ワクチン接種直前（移動制限開始31日目）の累積感染戸数は，実際の流行データでは233戸だったのに対し，モデルでは中央値で228戸（5th–95th パーセンタイル138–298戸）と推定され，今回のモデルは移動制限開始からワクチン接種前までの感染拡大を概ね再現できることが確認できた。ベースラインモデルにおける最終的な感染規模を推定したところ，感染戸数651戸（605–689戸），流行期間120日（106–138日）と推定された。これらの結果は，ワクチン接種区域内での実際の感染戸数278戸と流行期間68日よりも大幅に増加しており，ワクチン接種などの防疫措置の介入を行なわなかった場合は，今回の流行地域では感染が更に拡大していた可能性が示唆された。

次に，ベースラインモデルに幾つかの防疫措置を加えて効果を比較したところ，以下の結果が得られた（表2，図3）。

1）感染農場を摘発後24時間以内に早期殺処分した場合，感染戸数はベースラインモデルの約3割に抑えられた。感染農場を摘発後48時間以内又は72時間以内に早期殺処分した場合であっても，ベースラインモデルのほぼ半分の流行規模に抑えられた。

2）予防的殺処分（摘発農場周辺0.5km又は1kmの農場を48時間以内に殺処分）を行なった場合，流行規模は早期殺処分シナリオよりも更に小さくなり，感染戸数はベースラインモデルの1割以下に抑えられた。しかしながら，予防的殺処分の場合，1日当りの殺処分対象戸数が大幅に増加した。24時間以内の早期殺処分シナリオでは，1日当たりの殺処分対象戸数が最大4戸（3–9戸）だったのに対し，0.5km及び1km予防的殺処分シナリオでは，それぞれ22（18–55戸），53（53–84戸）に達していた。

3）ワクチン接種について4つのシナリオを検討したところ，移動制限開始後7日目に摘発農場周辺10kmで接種した場合，まん延防止効果が高く，感染戸数はベースラインモデルの1割以下に抑えられた。一方，移動制限開始後7日にワクチン接種を行なったとしても，摘発農場周辺3kmのワクチン接種では10kmワクチン接種ほどの十分なまん延防止効果は得られなかった。移動制限開始後28日目に摘発農場周辺10kmのワクチン接種を行なった場合，感染戸数はベースラインモデルの約4割に減少した。ただし，ワクチン接種シナリオでは，殺処分戸数とワクチン接種戸数の合計が多くなり，ワクチン接種農場の家畜を殺処分する場合には，7日目ワクチン接種では700戸以上が，28日目ワクチン接種では1,000戸以上が，殺処分の対象となると推定された。

4）初発農場の早期摘発シナリオとして，初発農場の摘発をベースラインモデルよりも14日間早かったと想定し，感染農場3戸から感染拡大をシミュレーションしたところ，感染戸数の中央値は4戸，流行期間も16日と短く，流行は小規模に終息した。しかし，感染戸数の95th パーセンタイル値は，ベースラインモデルと

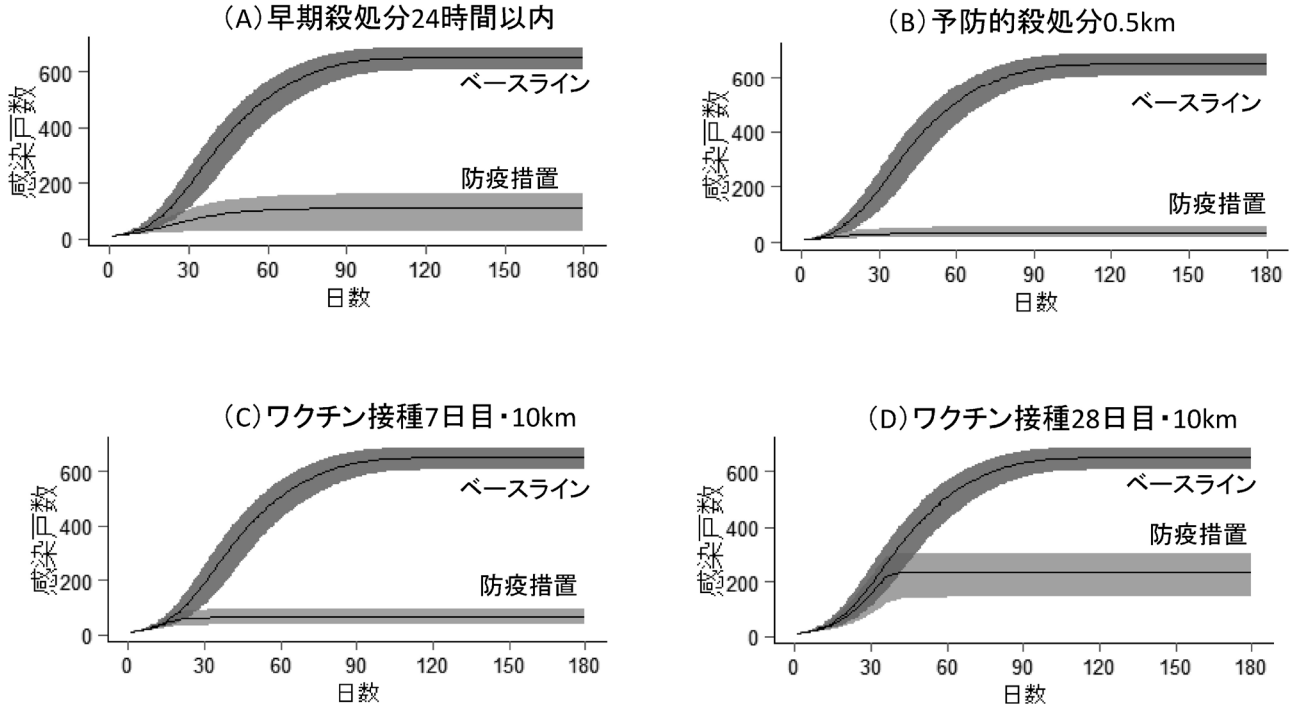


図 3 ベースラインと防疫措置シナリオの累積感染戸数の比較

表 2 シミュレーションモデルの結果 : 防疫措置シナリオの感染戸数の比較

防疫措置シナリオ	感染戸数*		低減効果**	
ベースライン	651	(605–689)	1	—
早期殺処分				
摘発後 24 時間以内	190	(117–244)	0.29	(0.19–0.35)
摘発後 48 時間以内	244	(182–296)	0.37	(0.30–0.43)
摘発後 72 時間以内	293	(236–344)	0.45	(0.39–0.50)
予防的殺処分				
摘発農場周辺 0.5 km	51	(24–78)	0.08	(0.04–0.11)
摘発農場周辺 1 km	22	(13–34)	0.03	(0.03–0.05)
ワクチン接種				
7 日目・周辺 3 km	278	(84–382)	0.43	(0.14–0.55)
7 日目・周辺 10 km	76	(43–115)	0.12	(0.07–0.17)
28 日目・周辺 3 km	354	(268–447)	0.54	(0.44–0.65)
28 日目・周辺 10 km	284	(193–352)	0.44	(0.32–0.51)
初発農場の早期摘発				
14 日早く摘発	4	(3–674)	0.0061	(0.005–0.98)

* 中央値（5th パーセンタイル–95th パーセンタイル）

** ベースラインを基準としたときの感染戸数の割合

ほぼ同等の流行規模を示しており，1 万回のシミュレーションのうち 35% で感染戸数が 500 戸以上に達していた。

以上の結果から，防疫措置のスタンダードである早期殺処分と早期摘発は，感染拡大を効果的・効率的に防ぐことができた。ただし，当該地域では早期摘発を行った場合であっても，大規模流行が起こる可能性が残されていた。また，予防的殺処分やワクチン接種といった追加的措置を行った場合，感染戸数の大幅な減少が確認されたが，これらの措置は 1 日当たりの殺処分戸数の増加やワクチン接種に伴う防疫対象戸数の増加など実行する際に解決が必要な課題を有していた。

5. おわりに

中国，ロシア，モンゴルなど日本の近隣国では，口蹄疫の発生が依然として続いている。また，隣国の韓国では，日本と同じように 2010 年に口蹄疫が発生し，国内に広く感染が拡大した結果，現在でもワクチン接種を用いたコントロールを実施している。このような日本を取り巻く状況や，人や動物，モノの国際交流の活発化に伴い，日本は口蹄疫などの伝染病が海外から侵入するリスクに常に晒されている。したがって，疾病の侵入防止に万全を期すことに加えて，発生による被害を最小限に抑えるためには，国や地域レベルで疾病の発生に備えた危機管理体制の整備・改善を進める必要がある。2010 年に発生した口蹄疫に関しては，流行データの記述的・地理的解析をはじめとして，疫学調査に基づく伝播リスク要因の解明や，伝播モデルを用いた対策の評価など様々な切り口で疫学研究を進めている。これら疫学研究で得られた知見が，防疫体制の整備や防疫対策の意思決定の支援といった危機管理体制の充実に貢献できれば幸いである。

謝　辞

本稿は，農林水産省レギュラトリーサイエンス新技術開発事業「口蹄疫の伝播リスクと防疫措置の評価に関する疫学的研究（課題番号 2304）」において，動物衛生研究所疫学部門が実施した研究をとりまとめたものです。研究の実施にあたって，ご協力を頂いた，畜産農家，宮崎県，農林水産省の方々に心からお礼申し上げます。また，本稿を作成するにあたり，筒井俊之領域長，山本健久主任研究員，小林創太主任研究員，室賀紀彦研究員をはじめとする疫学部門のスタッフにご支援・ご助言を頂きました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

Hayama, Y. et al. : Risk factors for local spread of foot-and-mouth disease, 2010 epidemic in Japan. Res. Vet. Sci., **93** (2), 631−635, 2012.

Hayama, Y. et al. : Mathematical model of the 2010 foot-and-mouth disease epidemic in Japan and evaluation of control measures. Prev. Vet. Med., **112** (3−4), 183−193, 2013.

Muroga, N. et al. : The foot-and-mouth disease epidemic in Japan, 2010. J. Vet. Med. Sci., **74**, 399−404, 2012

Muroga, N. et al. : Risk factors for the transmission of foot-and-mouth disease during the 2010 outbreak in Japan : a case-control study. BMC Vet. Res., **9**, 150, 2013

筒井俊之，早山陽子 : 2010 年に宮崎県で発生した口蹄疫について : 2000 年の発生との比較から，獣医疫学雑誌，第 **14** 巻第 2 号，148−153，2010