

農場における家畜感染症の影響推定及び対策検討に対する エージェントベースシミュレーション

○加藤弘祐 Chang Shuang 出口弘 (東京工業大学)

Agent-based Simulation for Estimating Influence of Livestock Disease and Considering Control Measures against Infection at Pig Farm

* K. Kato, S. Chang and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

概要— 本研究ではエージェントベースシミュレーションを用い、代表的な家畜感染症である豚繁殖・呼吸障害症候群に対する主要な感染対策手法である馴致とワクチネーションを対象として、これらの対策の実施有無に応じたシナリオ分析を行った。更に、各シナリオを経済性と農場での生産性を示す指標を用いて評価した。また、モデリングにあたっては、家畜感染症の影響を包括的に推定することを志向し、体重減少や飼料損耗による生産性の低下を考慮した。研究の目的は、家畜感染症の包括的な影響推定を行うことと、感染への有効な対策を検討することである。各シナリオを評価した結果として、離乳期間の育成豚へのワクチン接種と馴致の有効性が確認された。

キーワード: エージェントベースシミュレーション, 家畜感染症, シナリオ分析

1 研究背景・目的

大規模化・集中化の進展した今日の国内養豚経営において、豚を感染対象とした家畜感染症への対策はますます重要なものとなっている。罹患個体の死亡率の向上を招くと同時に、生育速度の鈍化をもたらす豚繁殖・呼吸障害症候群 (PRRS) をはじめとして、感染した豚の生育速度を鈍化させる感染症は多く、農場の生産性低下の一因となっている。家畜感染症の中でも特に対策が重要視されている代表例がこのPRRSである。PRRSは、現在の養豚経営において非常に多大な経済的損失を与えている家畜感染症の一つであり、発生以来、養豚業に大きな影響をもたらす続けてきた。世界中でその経済的被害が報告される状況にあるが、特に我が国における経済損失は年間283億円と推定されている¹⁾。更に、こうした経済損失は単発的なものではなく、損失の発生が慢性化した状況にあり、その点についてもPRRSの影響は深刻なものとなっている。現在では、多くの農場において常在化した状態、すなわちウイルスが農場に蔓延し、農場内で飼養されている豚へのPRRS感染のリスクが高い状態に陥っていると見込まれている。実際に、国内における8割程度の農場がそのような常在化した状態にあることが報告されている²⁾。そうした養豚に対する影響力の大きさを受けて、養豚の現場ではPRRSの発生以来、有効な感染コントロール対策への検討が断続的に続けられており、様々な対策が考案されてきた。しかしながら、家畜感染症への対策を農場ベースで検討することは、農場の規模を舞台とした実験が困難であることから容易ではない。

他方、近年では、シミュレーション研究の分野において、都市空間と人間の意思決定や行動をモデル化し、感染症への効果的な対策を模索する研究が行われ、様々なシナリオ分析が提示されている³⁾⁴⁾⁵⁾。その為の方法論として、個人単位での感染の広がりをシミュレートするエージェントベースシミュレーション (ABS) が特に注目されており、様々なケースを対象とした研

究が盛んに行われている。その結果、感染伝播のダイナミクスの実態を実証的に捉えるのが困難な感染症研究において、そうしたダイナミクスの検討及び感染症対策の考案に対し、シミュレーション研究が有効な知見を与え得るものとして認識され始めている。

そこで、本研究では、家畜感染症の代表例であるPRRSをシミュレーションの対象とし、農場におけるPRRSの感染対策を検討することを目的として、エージェントベースシミュレーションを用いたシナリオ分析を行った。特に、現在、PRRSをはじめとした感染症への対策法として導入が進展している馴致と呼ばれる畜産に特有の手法と、一般的な感染症対策の手法であるワクチネーションの二手法をシナリオ分析の対象として、シミュレーション実験を進めた。

2 モデル

本研究のモデルは、農場における家畜感染症の影響を推定する為にエージェントベースモデリングを適用しており、それにより個々の感染のシミュレーションが表現可能となっているが、更に、感染のモデルに加えて、体重減少を生じさせるというPRRSの性質を加味したフレームワークを提示する。そして、シミュレーションの評価に際しても、体重減少の損失を考慮可能な指標を導入した。本節では、シミュレーションを実行する為に構築したモデルの詳細について、養豚の予備知識と関連付けながら述べる。

2.1 養豚生産モデル

養豚経営は、周知の通り、飼料を与えて肉用に出荷するための豚を育成することが主要なプロセスとなる。したがって、短い期間で出荷に適した体重まで肉用の豚を育成し、出荷のスパンを速めて生産性を高めていくことが重要となる。すなわち、個々の豚の体重増加を順調に促すことが経営状態の改善へとつながる。そ

して、もう一つ重要な点であるのが、飼料の効率を出る限り向上させることである。養豚におけるコストの大部分は飼料にかかる費用であり、豚の食欲不振などを理由に、与えた飼料が無駄になる場合、一定の損失が生じる。

ここで、更に詳細な養豚のプロセスについて述べる。農場における豚の生産は、豚の生育段階に基づいた形で行われ、生育段階に紐付いた畜舎が飼養の場となる。こうした畜舎は、繁殖舎、分娩舎、離乳舎、肥育舎などと分類されることが多い。分娩により生まれた豚は分娩舎で哺乳されながら育成し、その後、離乳舎で離乳のための飼養が行われる⁶⁾。離乳を終えた豚は肥育期に入り、体重を大幅に増加させていく。農場によっては肥育の為の畜舎を前半と後半とに分けて飼養を行っている。出荷用の豚は、180日齢程度、すなわち産まれてから半年程度育成された後に出荷される。こうした出荷の為に育成される豚を本稿では育成豚と呼ぶ。

また、分娩を行う豚である母豚は、一定回数の分娩を終えた後に屠畜され、別の未経産の母豚を導入することとなる。農場によってはこうした未経産の母豚を外部から導入する場合があります、それらの豚は農場に常在化している感染症への免疫を保持していないため、その扱いに注意を要することが知られている。本稿では、こうした外部導入される未経産母豚をギルト豚と呼ぶ。Table 1に、こうした畜舎の概要について整理した。なお、表の中の畜舎数は、本稿で想定している畜舎の戸数を示している。

Table 1: 各畜舎の概要.

畜舎	役割の説明	存在する豚のタイプ	数
繁殖舎	母豚の繁殖	母豚(待機期間, 妊娠期間), ギルト豚	1
分娩舎	母豚の分娩と育成豚の哺乳	母豚(妊娠・授乳期間), 育成豚(哺乳期)	1
離乳舎	育成豚の離乳	育成豚(離乳期)	1
前期肥育舎	育成豚の肥育	育成豚(前期肥育期)	2
後期肥育舎	育成豚の肥育	育成豚(後期肥育期)	4
馴致舎	ギルト豚への馴致	ギルト豚	1

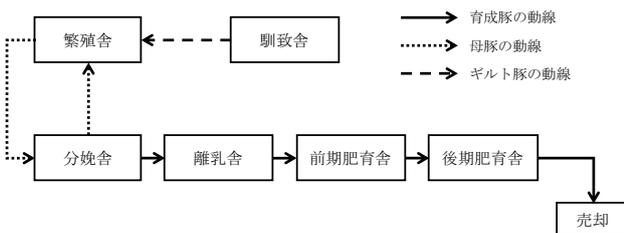


Fig.1: 母豚と育成豚の畜舎間移動の概要

2.2 PRRS の概要

ここで、本稿のシミュレーション対象であるPRRSの概要について述べる。豚の生産過程の中でも、PRRSは育成豚の死亡率の向上及び体重増加の減少、更に母豚の妊娠障害を引き起こすため、農場の生産性に対して非常に著しい影響を与えることとなる。しかしながら、PRRSに罹患した場合でも肉用としての出荷は可能であり、問題無く売却される。そういった点で、発生した場合に殺処分が義務づけられている口蹄疫や鳥インフルエンザなどの家畜感染症とは大きく対応の異なる感染症となっている。PRRSはPRRSウイルス (PRRSV)

により引き起こされるが、PRRSVは主に一型と二型に区別され、更にウイルス株が多様となっているという大きな特徴を持つ。この点を背景として、対策がより困難なものとなっている。非常に伝播力が強く、空気感染し、感染個体がウイルスを排出する期間も長期に渡るが、消毒や洗浄等による清浄は可能となっている。また、PRRSに関して留意しなければならない点として、豚の日齢や、妊娠しているか否かにより症状が異なる点が挙げられる。妊娠している豚は先述の通り繁殖障害を起こし、流産や不妊などの症状を呈する。また、日齢が低い個体ほど重篤な症状となるのも重要な特徴であり、特に哺乳期間での感染は農場における豚の主要な死因の一つとなっている。こうしたPRRSの特徴について考慮した上でモデルを構築する必要がある。

2.3 エージェントベースモデリングについて

本研究が活用するエージェントベースシミュレーションは、モデルの中で行動を取る役割を持つ主体であるエージェントを設定する必要がある。したがって、ここで、本稿で定義するエージェントについて説明する。

本研究におけるエージェントは農場内に存在する豚であり、こうした豚は、先に触れた母豚と育成豚の二種に主に分けることが出来る。なお、本稿では繁殖の役割を担っている雄の種豚についてはモデルの枠組みには含めないことと設定した。

モデルにおいて、育成豚は飼料を摂取しながら自身の体重を毎日増加させ、更にFig.1のように畜舎を移動することとなる。母豚は、一定の間隔で分娩を行い、農場の中の育成豚を増やしていくための役割を持つ。分娩を終えた後は、哺乳期間の育成豚に授乳を行う。したがって、母豚は分娩と授乳の二つの行動を取ることにになり、Fig.1で参照出来るように動線もそれに応じた形となる。そして、それらのエージェントが存在するための空間として、本モデルではTable 1とFig.1に示される形で、畜舎を設定した。

こうしたエージェントとそのエージェントが存在する空間を定義し、モデリングするためのシミュレータとして、本研究ではSOARS(Spot Oriented Agent Role Simulator)を用いた⁷⁾。SOARSは、エージェントが存在している空間を設定することが可能であり、本研究で構築するモデルに適したシミュレータとなっている。

2.4 感染モデル

感染の伝播については、先行研究の枠組みを活用し、豚と畜舎との汚染の相互作用によってダイナミクスを表現した³⁾⁴⁾⁵⁾。豚をエージェント、豚の存在する畜舎を空間とみなす。

まず、本モデルでは、感染したエージェントがウイルスの汚染を排出し、エージェントが存在する畜舎のウイルス汚染を引き起こすこととなる。時刻*t*において畜舎*k*が感染しているエージェントから受けるウイルス汚染は、Agent Hazard Level (AHL)として定義される。式(1)の通り、その畜舎に存在する感染エージェントが排出する汚染の合計を畜舎が受け取る事となる。

$$AHL(k, t) = \sum_{i \in barn(k)} AHL(i, t) \quad (1)$$

そして、時刻tにおける個々の畜舎の汚染度Barn Contamination Level (BCL)は、時刻t-1における畜舎の汚染であるBCL(k,t-1)と畜舎での汚染の減衰フィルターであるBAF(k,t-1)と、先のAHLを合わせて、式(2)によって表される。

$$BCL(k, t) = AHL(k, t) + BCL(k, t - 1) \cdot BAF(k, t - 1) \quad (2)$$

減衰フィルターは、ウイルスの汚染を減衰させる要因を指し示し、本稿ではバイオセキュリティや農場構造による減衰を想定している。したがって、畜舎での減衰フィルターであるBAF(k,t-1)は、農場の構造によるウイルス汚染の減衰フィルターを表すFarm Structure Filter(FSF)と、農場のバイオセキュリティのレベルを表すフィルターであるBio Security Filter (BSF)の2つのフィルターにより決定される。すなわち、バイオセキュリティを向上させる施策に注力している農場や衛生的な畜舎構造となっている農場ほど、ウイルス汚染が減衰されるということになる。二つのフィルターFSFとBSFの定義域は、両者ともに $0 \leq FSF(k, t-1), BSF(k, t-1) \leq 1$ となり、BAFは式(3)により計算される。

$$BAF(k, t - 1) = BSF(k, t - 1) \cdot FSF(k, t - 1) \quad (3)$$

更に、畜舎における感染伝播を考慮する場合、感染豚と非感染豚との接触率を考慮する必要がある⁸⁾。そこで、本モデルでは感染個体との接触率としてContact Rate(CR)を想定し、個々の畜舎に関して、時刻tにおいて存在する非感染個体数Population of Not Infection (PNI)の逆数を接触確率として設定した。すなわち、畜舎における非感染個体数が多いほど感染個体との接触率は低くなり、非感染個体数が減少すると接触率は増加することとなる。

$$CR(k, t) = \frac{1}{PNI(k, t)} \quad (4)$$

したがって、感染個体との接触確率を考慮した汚染度であるContact Risk by BCL (CRBCL)は、式(5)により計算される。

$$CRBCL(k, t) = BCL(k, t) \cdot CR(k, t) \quad (5)$$

そして、エージェントが自身の存在する畜舎から受ける汚染度Agent Contamination Level (ACL)は、時刻t-1での畜舎の汚染度CRBCL(k,t-1)を考慮すると、式(6)により示されることとなる。

$$ACL(k, t) = CRBCL(k, t) + CRBCL(k, t - 1) \quad (6)$$

そして、時刻tにおける最終的な感染率は、以下のように各エージェントの体調などを考慮したパラメータであるPhysical Condition(PC)を加味した上で、式(7)の通りに表すことができる。

$$P(i, t) = 1 - e^{-PC(i) \cdot ACL(i, t)} \quad (7)$$

この感染確率により非感染状態から感染状態へと移行した時、エージェントの病態が変化することを意味する。本モデルでは病態をAgent Disease Stage (ADS)として定義し、PRRSが引き起こす症状である繁殖障害や食欲不振等に伴う体重増加の減少を、このADSによって表現することとする。したがって、以上で定義した汚

染モデルをシミュレーションに用いることにより、PRRSによる体重増加への影響と飼料摂取への影響に対して、エージェントごとに詳細な設定をすることが可能となるという利点が得られる。特に、育成豚と母豚で症状の性質が異なるため、個々の単位で感染状態を定義することは、モデリング上、重要となる。

2.5 病態遷移モデル

ここから、先述したADSに関する説明を行う。ADSを活用した病態の遷移においては、先に触れた感染の枠組みによって非感染状態(ADS=0)から感染へと遷移した場合、ADSは発症状態(ADS=1)となる。そして、Fig. 2に示されるような遷移を辿る。PRRSの大きな特徴の一つである豚の属性による病態の違いを表現するため、育成豚と母豚とで異なる遷移を辿るように設定した。Fig.2におけるM (Mortality) は感染により死亡へと至った場合であり、RD (Reproductive Disorder) は繁殖障害の症状が生じた場合を表す。R (Recover) は感染状態から回復し免疫を得た状態にあることを表している。ADSが1vとなるのはワクチンを接種した場合である。PRRSの遺伝的多様性とワクチン効果が完全でない点を考慮して、ワクチンを接種した場合に免疫を獲得する確率は、50%として設定した。ワクチン接種して免疫が獲得されなかった場合、元の非感染状態へと戻ることになる。本研究では母豚をワクチン接種の対象として想定していないため、母豚のワクチン接種の病態遷移は設定されていない。

また、一般に、PRRSに感染した際には育成豚においては日齢が低くなるにつれて事故率、すなわち死亡率が高くなるため、日齢に応じて死亡率を変化させている。更に、母豚は育成豚とは異なり、死亡することは無いものとして遷移を設定した。

以上の病態遷移の確率は、Table2に示される通りとなる。なお、未経産の状態にあるギルト豚は肥育期間にある育成豚と同じ病態遷移確率を取ると設定した。また、本稿では再感染は想定していない。

Table 2: 病態遷移確率の一覧表

豚のタイプ	ADS	遷移先のADS					
		0	1/1s	2/2s	3/3s	R	M/RD
育成豚 (哺乳期)	0	-	0.9	-	-	-	0.1
	1	-	-	0.95	-	-	0.05
	2	-	-	-	0.2	0.78	0.02
	3	-	-	-	-	1	-
育成豚 (離乳期)	0	-	1	-	-	-	-
	1	-	-	0.95	-	-	0.05
	2	-	-	-	0.2	0.79	0.01
	3	-	-	-	-	1	-
	1v	0.5	-	-	-	0.5	-
育成豚 (離乳期) ギルト豚	0	-	1	-	-	-	-
	1	-	-	0.97	-	-	0.03
	2	-	-	-	0.2	0.8	-
	3	-	-	-	-	1	-
母豚	0	-	0.3	-	-	-	0.7
	1s	-	-	0.4	-	-	0.6
	2s	-	-	-	0.2	0.3	0.5
	3s	-	-	-	-	1	-
	RD	-	-	-	-	1	-

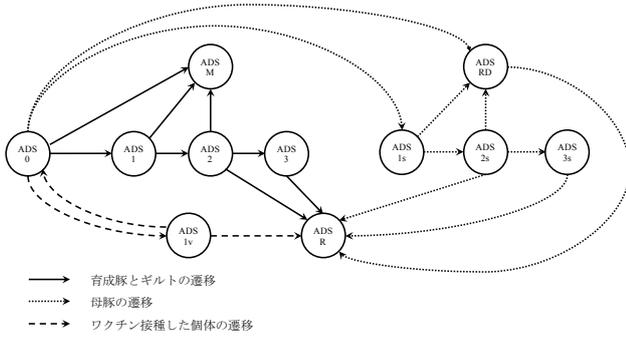


Fig. 2: 病態遷移図

2.6 成長曲線モデル

先述した通り、養豚生産において重要となるのは、育成豚を効率良く成長させ、出来る限り適切な体重での出荷を目指すことである。そして、養豚の大部分のコストを占める飼料の損失を可能な限り抑え、少ない飼料量で育成豚の体重を増加させることが望ましい。PRRSは、こうした豚の体重増加に対して影響を与えることとなるため、そのための定式化がモデル構築の上で必要となる。

そこで、この体重増加と体重に対する影響を定義するために、生物の成長の推移を関数として表現することの可能な成長曲線を用いる。成長曲線には様々な関数を用いられるが、本モデルでは一般的に用いられる関数の一つであるvon Bertalanffy関数を成長曲線として設定する⁹⁾。体重をBW (Body Weight) [kg]とし、日齢をt[day]とすると、体重BWは、式 (8) により表現される。なお、本稿で設定するパラメータは、豚の標準的な体重増加に基づいた上で、A= 307.6165366、B= 0.82731915、k= 0.00583399と決定した。

$$BW_{normal}(t)[kg] = A(1 - B \cdot e^{-kt})^3 \quad (8)$$

ここで、式 (8) の成長曲線に基づいた上で、PRRSによる体重増加の減少をモデル化するために、体重の減少量を表す定数としてWeight Loss[kg]を導入する。式 (9) はPRRSの影響を受けた個体の体重の成長関数となる。

$$BW_{prrs}(t)[kg] = A(1 - B \cdot e^{-kt})^3 - WeightLoss \quad (9)$$

Weight Lossは感染期間の間に減少することとなった累積の体重減少量である。一日当たりの体重増加量ADWG (Average Daily Weight Gain) [kg]は式 (10) のように当日の体重から前日の体重を引くことにより計算される。ここで、体重増加に対してPRRSが与える減少量を本モデルに取り込むために、PRRSの影響を示す係数としてLoss Rate ($0 \leq Loss Rate \leq 1$)を設定する。Loss Rateの値は、感染個体の病態と日齢に応じて変化し、Table4での体重減少の割合に相当する。Table4に示される通り、日齢が低い程、体重減少の割合が大きくなる。Loss Rateにより、Weight Lossは式 (11) の通りに計算されることとなる。

$$ADWG(t)[kg] = BW_{prrs}(t) - BW_{prrs}(t-1) \quad (10)$$

$$WeightLoss = LossRate \cdot \sum ADWG(t) \quad (11)$$

また、育成豚が一日に摂取する平均飼料量ADFI (Average Daily Feed Intake) についても、体重を用いた多項式によって表現することが可能である。ADFIは、式 (12) によって算出される。ここでのパラメータは先行研究を参照し、 $c=55.36$ 、 $d=0.251$ と設定した¹⁰⁾。

$$ADFI_{normal}(t)[g] = c \cdot BW_{normal}(t) - d \cdot BW_{normal}(t)^2 \quad (12)$$

PRRS感染の影響を受けたADFIは、式 (13) によって表される。つまり、感染した際には非感染の場合の同一日齢個体と比べて、飼料の摂取量が減少することとなる。

$$ADFI_{prrs}(t) = c \cdot BW_{prrs}(t) - d \cdot BW_{prrs}^2(t) \quad (13)$$

ここで、一日あたりに与える飼料の量を日齢に対する標準的体重に合わせた量、すなわちPRRSの影響が無い場合に与える飼料量と仮定すると、一日あたりの飼料消費量Average Daily Feed Consumption (ADFC) は、式 (14) で表現される。

$$ADFC(t) = ADFI_{normal}(t) \quad (14)$$

したがって、本モデルでは、PRRSにより体重が減少した分に相当する飼料がロスとなる。PRRSがもたらす飼料ロスFeed Lossは、式(15)により定義される。

$$FeedLoss(t)[g] = ADFC(t) - ADFI_{prrs}(t) \quad (15)$$

飼料ロスも含めた一日あたりの農場の飼料消費量Total Feed Consumption (TFC) は、育成豚全頭分の飼料を集計し、式 (16) で表される。

$$TFC_{day} = \sum ADFC(i,t) \quad (16)$$

なお、本稿での非感染時の体重増加推移と摂取飼料量は、以上で設定した成長関数と飼料関数とを用いることで、それぞれ Fig.3, Fig.4 に示される通りに表現される。Fig.3 からは、一定の生育日数を経ると一日あたりの体重増加量が向上することが確認出来る。体重変化による摂取飼料量推移を示した Fig.4 からは、体重が増えるのに伴って摂取量が増加することが分かる。

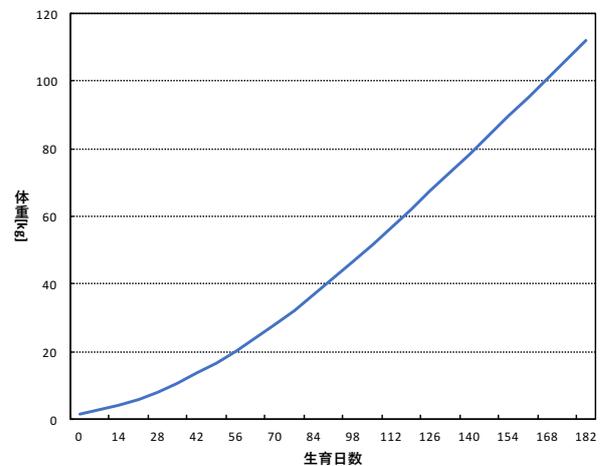


Fig. 3: 生育日数による体重の推移

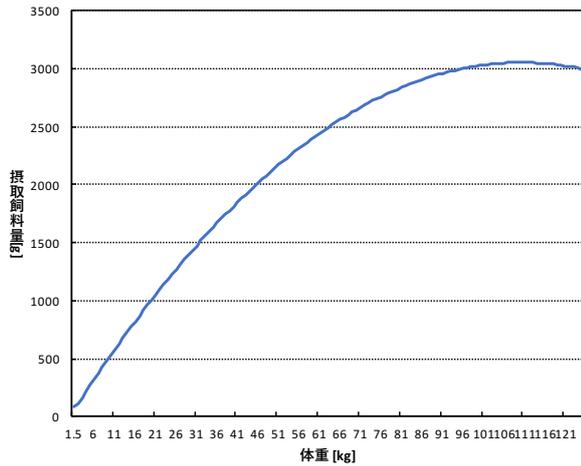


Fig. 4: 体重による摂取飼料量の推移

2.7 対策法のモデリング

ここで、対策について説明し、モデリングの概要を述べる。特にPRRSの対策として重要視されているのが、本稿の分析対象となっている、免疫を安定化させるための方策である馴致である。馴致は、一般的には、未感染豚を意図的にウイルスに感染させ免疫を持たせる手法であり、農場での免疫の安定化を目指す為の方策である。馴致は、主に感染豚と同じ畜舎に滞在させることを行うことが多い。特に、外部から導入したギルト豚に対して採用されることが多い手法となっている。

本稿では60日間を馴致期間とし、馴致を実施する間、馴致舎に存在するギルト豚が感染個体の存在する畜舎からの汚染値(CRBC)を受け、感染が生じるよう設定した。つまり、本稿での馴致の対象はギルト豚に限定される。なお、本稿のシミュレーションでは後期肥育舎からの汚染を受ける設定としている。

本シミュレーションでの母豚に対するPRRSの影響は流産数の増加であるため、馴致はこの流産を防止する効果が期待される。

もう一つの分析対象の対策法であるワクチネーションは、ワクチン接種により免疫を付与させる方策であるが、接種の対象となる豚の日齢は用法上限定されており、哺乳豚相当の日齢の場合の接種は対象外となっている。そこで、本稿での接種対象は哺乳を終えた後の離乳期間の育成豚(22日齢)を想定した。ワクチン接種は、先述の通りADSを活用して設定した。

3 評価指標

各シナリオを評価するための評価指標として、本研究では経済指標を活用する。まず、飼料コストが養豚経営の大部分を占め、それと同時に、農場の収益は、育成豚の出荷体重により決定づけられる出荷枝肉量に依拠するため、農場におけるPRRS発生が引き起こす経済損失の推定については、先の成長曲線による体重モデル・飼料モデルによって計算される収益と損失を軸に求める。更に、それに加えてワクチン費用を集計し、生産性の推定及び経済損失の推定を行う。

また、各シナリオの評価基準となる指標として、二

種類の指標を用いる。一つは、農場での生産性を示す指標である育成豚飼料要求率(Feed Conversion Ratio: FCR)である。FCRは、単位あたりの体重増加に対して、どの程度の飼料を摂取させる必要があったのかを表すものである。飼料要求率は個体単位の飼料効率を示す場合と農場単位での飼料効率を示す場合があるが、ここでは農場単位、特に育成豚に限定した飼料要求率を指す。育成豚飼料要求率の算出は消費飼料の量が多くなる肥育期間のみを対象とする場合などがあるが、式(17)で示されるように、本稿での育成豚飼料要求率は育成豚に対して与えた全期間の飼料を対象として出荷体重で割った数値とする。したがって、本稿では母豚やギルトの摂取した飼料は算出の対象外とする。また、途中で死亡した個体が消費した飼料についても、集計の対象としている。なお、哺乳期間において算出される飼料量も集計の対象である。

もう一つの評価指標として、粗利益GP(Gross Profit)による比較を行う。ここでの粗利益は、PRRSによる損失に焦点を置くため、豚の出荷により得られる収益から飼料によるコストを除き、更にワクチン接種を行った場合にはワクチン費用を除いたものとする。

なお、粗利益の算出については、より包括的に行う為にはPRRSの発生に伴って生じる労働費用や医療費用、事故個体の屠畜処理に伴う処理費用などを加味することが求められるが¹¹⁾、それらの費用は農場により大きく変動し得るものであるため、本研究では算出の対象外としている。したがって、本稿では粗利益の中でも特に上記で設定したものを算出に用いることとしている。

育成豚飼料要求率FCRは、TFCの合算で求められる総飼料消費量を、各育成豚の出荷体重の合算により割ることで得られる。計算式は式(17)となる。

$$FCR_{feeder\ pig} = \frac{\sum TFC_{day}}{\sum BW_{shipment}} \quad (17)$$

次に、本稿で取り扱う農場における主要コストは、飼料コストとワクチン費用から算出され、式(18)で表すことが出来る。Feed Priceは単位あたりの飼料価格であり、Vaccine Costはワクチン費用の合計である。

$$Cost = FeedPrice \cdot \sum TFC_{day} + VaccineCost \quad (18)$$

ここで、1頭当たりの枝肉、すなわち商品として売れる肉の部位の割合をCarcass Yield(CY)、枝肉のkg当たりの価格をCarcass Price(CP)とすると、収益Revenue、粗利益Gross Profit(GP)はそれぞれ式(19)、(20)で表される。

$$Revenue = CY \cdot CP \cdot \sum BW_{shipment} \quad (19)$$

$$GP = Revenue - Cost \quad (20)$$

4 シミュレーション概要

ここで、本モデル内におけるエージェントの行動フローについて説明する。母豚は、Fig.5の分娩から授乳、繁殖までの待機期間、妊娠期間の計140日間を一つのサイクルとして行動を取る。分娩日の5日前に母豚は繁殖舎から分娩舎へと移動し、分娩舎での授乳期間を終えた後に繁殖舎へ戻る。その後、5日間の待機期間

へと移行する. 待機期間終了後は再び妊娠を開始する.

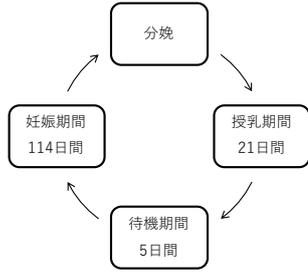


Fig. 5: 母豚の行動

そして、外部導入されるギルト豚は、農場に導入される際に馴致の有無によって行動が変化する. 行動のフローチャートは Fig.6 の通りとなり、馴致を実施する場合には 60 日間馴致舎に滞在し、馴致を実施しない場合には 60 日後に ADS=0 の状態で繁殖舎に入り妊娠を開始する.

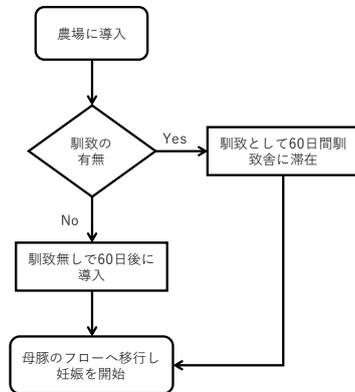


Fig. 6: ギルト豚の行動フロー

育成豚は、出生時に存在する分娩舎を起点として、生育日数の経過に応じて各畜舎を移動し、日齢が 180 日に達した時点で出荷される. したがって、育成豚の動線は一方方向となり、シミュレーションにおいてはその他に行動を取らない. なお、本稿では前期肥育舎は 2 戸、後期肥育舎は 4 戸存在しているが、複数存在する畜舎へと移動する際には、存在する育成豚数が一定となるように移動を行う.

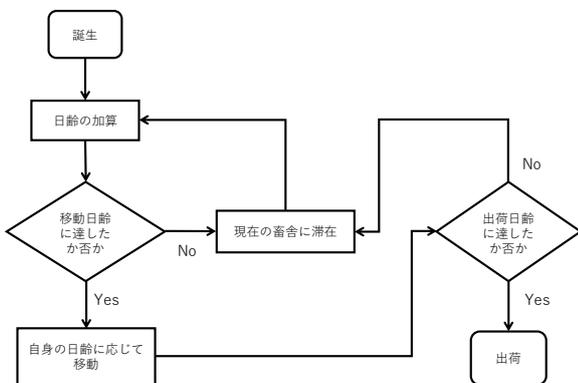


Fig. 7: 育成豚の行動フロー

4.1 シミュレーションフロー

この節では、シミュレーションのフローについて概説する. 本稿のシミュレーションは育成豚が存在しない状態から開始し、母豚が分娩を行なっていくことで育成豚の頭数を増加させた上で、日数の経過に基づきシミュレーションが進行する. したがって、シミュレーションのフローとしては、母豚の分娩を軸に進めることとなる. Fig.8 に示すように、本シミュレーションでは一頭の母豚が計 4 回の分娩を行う. なお、ギルト豚と、入れ替わりの豚はそれぞれ 2 回の分娩となる.

そして、母豚は Fig.5 の行動フローに示されるように、繁殖・分娩・授乳・次の妊娠までの待機期間という一連の行動を 140 日間で行うこととなる. シミュレーションの開始時には、これらの期間の内、母豚は分娩から行動を開始する.

母豚全体のダイナミクスに関しては、母豚の 3 頭を 1 グループとし、その 3 頭が 2 日ごとに育成豚を分娩するように設定している. この一連のダイナミクスを本稿では分娩サイクルと呼ぶ. 1 回目の分娩が全頭完了した際に、分娩サイクルの 1 回目が終わりと、2 回目の分娩サイクルが開始することになる.

初期感染の発生は、その分娩サイクル 1 回目の終了と同時に生じる、この初期感染により、PRRS が農場で陽性となった状態を設定する. なお、この初期感染は育成豚の 10%が発症し、母豚は 10%の確率で発症すると設定した. 第 1 回目の分娩サイクルは、この感染の初期状態を作り出すためのものとして設定しているため、この時に生まれた育成豚は PRRS の影響を受けたかどうかに関わらず最終的な出荷体重や消費飼料の中には集計しない.

第 2 回目の分娩サイクルで生まれた育成豚は、出荷体重と消費飼料の集計の対象となる. 1 回目のサイクルとは異なり、この時の分娩は感染の影響下にあるため、病態によって母豚の分娩数が変化することとなる. また、ワクチネーションを実施する際には、この第 2 回目と第 3 回目の分娩サイクルで生まれた育成豚がワクチン接種の対象となり、第 4 回目は対象外となる.

第 3 回目の分娩サイクルでは、母豚の 1 グループ 3 頭の内の 1 頭がギルト豚と入れ替わることになる. このサイクルはギルト豚を導入する際の馴致の効果を評価する役割があるため、集計の対象とする.

最後の第 4 回目のサイクルは農場の頭数を一定に保つための役割であるため、集計の対象とはしない.

したがって、本シミュレーションで評価の対象となるのは、4 回の分娩サイクルの内、2 回目と 3 回目のサイクルとなる. 以上の分娩サイクルの概要を整理したものととして、Table3 を示す.

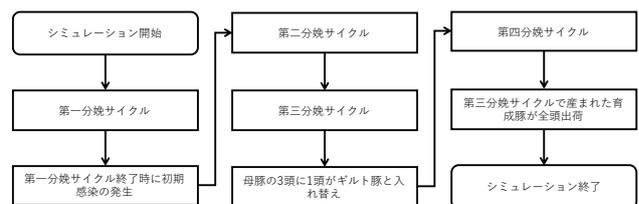


Fig.8: シミュレーションの主要フロー

Table 3: 分娩サイクルの詳細

回数	説明	出荷体重・ 飼料の集計	標準育成豚 分娩全頭数
分娩サイクル1回目	3頭の母豚が2日ごとに1頭あたり10頭ずつ分娩。140日間で1回目が終了	無し	2100
分娩サイクル2回目	感染発生下で1回目と同様に母豚が分娩する。1頭あたり分娩数は感染状態により変化。	有り	2520
分娩サイクル3回目	同日に分娩していた3頭の内の1頭が、2回目の授乳を終えた後にギルト豚と入れ替わる。	有り	2520
分娩サイクル4回目	畜舎の頭数を一定に保つ為に行う分娩サイクル。母豚1頭あたり10頭分娩する。	無し	2100

4.2 シミュレーションでの固定パラメータ

本シミュレーションで使用する固定パラメータについて整理する。まず、PRRS による一日あたりの増加体重の減少については、日齢が低い個体の方が長期に渡って影響を受けることと、時間が経過するにつれ影響が和らいでいくことが報告されているため¹²⁾¹³⁾、本稿でもその点を考慮した上でパラメータを設定した。病態に応じた PRRS の影響パラメータは Table4 に示す通りとなる。なお、表に示される育成豚に対する体重増加の減少割合は一日あたりのものであり、この値が式 (11) での Loss Rate に相当する。母豚の流産数については、先行研究を参照した上で数値を設定した¹⁴⁾。

Table 4: PRRS に感染した場合の影響

感染した日齢	0,3,R	ADS		
		1	2	
育成豚	哺乳期	-	55%増体重減少	40%増体重減少
	離乳期	-	50%増体重減少	35%増体重減少
	前期肥育期間	-	45%増体重減少	30%増体重減少
	後期肥育期間	-	40%増体重減少	25%増体重減少
母豚	RDに遷移した時期		ADS	RD
	妊娠期間 0-80日		1頭流産	
	妊娠期間 81-100日		2頭流産	
	妊娠期間 101-114日		3頭流産	
	授乳・待機期間		-	

農場に存在する母豚の頭数は農場の規模を意味することとなるが、本シミュレーションでは国内の平均的な母豚頭数を想定している¹⁵⁾。また、母豚に関連する各期間についても、平均的な状況を想定した。それぞれの期間の関係性は Fig.5 に示した通りとなる。更に、本稿では感染モデルで定義した感染フィルターを固定パラメータとして想定した。以上を含めた本稿での固定パラメータは Table5 に整理した。

Table 5: シミュレーションの固定パラメータ

項目	値	説明
母豚頭数	210頭	母豚の頭数
ギルト入れ替え率	33%	入れ替わるギルト豚割合
標準分娩頭数	12頭	分娩サイクル2,3回目の非感染母豚の分娩数
妊娠期間	114日	母豚の妊娠期間
授乳期間	21日	母豚の授乳期間
待機期間	5日	母豚の待機期間
哺乳期間	0-21日齢	分娩舎に存在する育成豚の日齢
離乳期間	22-45日齢	離乳舎に存在する育成豚の日齢
前期肥育期間	46-90日齢	前期肥育舎に存在する育成豚の日齢
後期肥育期間	91-180日齢	後期肥育舎に存在する育成豚の日齢
出荷日齢	180日齢	出荷する日齢
BSF	0.5	バイオセキュリティによるフィルター
FSF	0.5	農場の構造によるフィルター
PC	0.4	体調パラメータ

感染のパラメータとして重要なものとなる AHL については、PRRS の基本再生産数を推定した研究を参照し調整を行なった¹⁶⁾。それらの AHL のパラメータは Table6 の通りに設定されている。なお、感染率の計算に影響するシミュレーションの時間間隔については、4 時間間隔と設定した上で調整を進めた。

Table 6: 病態に応じた AHL のパラメータと感染期間

ADS	AHL	期間	状態
0	0	-	未感染
1, 1s	5.0×10^{-4}	14日間	感染前期 (重篤症状)
2, 2s	4.0×10^{-4}	14日間	感染後期 (軽微症状)
3, 3s	2.0×10^{-4}	20日間	ウイルス排出のみ
1v	1.0×10^{-4}	14日間	ワクチン接種
R	0	-	免疫獲得
RD	5.0×10^{-4}	0から遷移 28日間	繁殖障害
	4.0×10^{-4}	1sから遷移 14日間	
	0	2sから遷移 1日間	
M	-	-	死亡

5 シミュレーション結果

5.1 シナリオの設定

評価するシナリオとして、本稿では馴致の実施、ワクチネーションの実施に応じた四つのシナリオを想定した。なお、本稿でのシミュレーション結果は各シナリオごとに 10 回ずつ行い、各々の平均値をとったものとして算出している。

Table 7: シナリオ名と条件

シナリオ名	馴致の実施	ワクチネーションの実施
Scenario A	×	×
Scenario B	○	×
Scenario C	×	○
Scenario D	○	○

ここで、粗利益 GP の算出に必要な値について整理する。まず、豚一頭から得られる枝肉割合は標準的な値である 70%と設定した。更に、枝肉の kg 単位あたりの価格は農林水産省が公開している豚枝肉卸売価格の推移を参照し 440 円とした¹⁷⁾。また、飼料価格については 1 トンあたり 63,749 円としている¹⁸⁾。なお、ワクチン価格は先行研究を参照した上で、1 本あたり 327 円と想定した¹⁹⁾。

5.2 シミュレーションの結果

シミュレーションの結果を整理した表として Table8 と Table9 を示す。Table8 には本稿の主要な評価指標である FCR, GP とその他の関連する結果を整理しており、Table9 では各シナリオでの感染に関わる頭数の結果をまとめている。なお、Table8 の FCR 以外の値は、有効数字 3 桁として表記している。

また、シミュレーションにおける畜舎ごとの平均陽性率の推移を Fig.9~Fig.12 に示した。このグラフでの期間は、感染の発生時から、ギルト豚を含めた全ての母豚が第 3 回目の分娩を終了した時点までである。そ

れ以降の期間は、5 回目の分娩が無い関係から、特に分娩舎での頭数が異なる傾向で推移するため集計外とした。この陽性率は、畜舎内の全頭数に対する感染数であり、免疫個体は非陽性として算出している。そして、Fig.13~Fig.15 で分娩回ごとの平均陽性率の推移を示す。ここでの陽性率は分娩された頭数に対する累積の感染数割合により算出される。グラフの期間は分娩回数によって異なり、1 回目は感染発生から 1 回目に産まれた育成豚が全頭出荷されるまでである。2 回目は、2 回目の分娩開始から 2 回目に産まれた育成豚全頭が出荷されるまでである。3 回目も 2 回目と同様に最初の育成豚が分娩されてから全頭が出荷されるまでの期間であるが、ギルト豚導入で、より長期となる。

Table 8: FCR や GP などの主要結果の平均値一覧

項目	単位	シナリオ名			
		Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
育成豚飼料要求率 (FCR)	kg/kg	3.068	3.067	2.993	2.993
出荷体重総量	kg	443000	450000	459000	465000
飼料摂取総量	kg	1240000	1260000	1300000	1310000
飼料ロス総量	kg	125000	127000	83400	84500
粗利益 (GP)	円	49900000	50600000	52400000	53000000
出荷売上 (Revenue)	円	137000000	139000000	141000000	143000000
飼料費用	円	86700000	88000000	87600000	88700000
ワクチン費用	円	0	0	1460000	1480000

Table 9: 各シナリオでの感染に関わる被害の概要と出荷頭数。値は全て平均値である。

項目	分娩群	シナリオ名			
		Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
流産数	-	346.4	272.6	346.9	283.7
哺乳期間感染数	2	164.5	152.2	179.3	181.1
離乳期間感染数	2	909.3	917.9	287.6	285.9
前期肥育期間感染数	2	608.6	626.15	355.45	346.3
後期肥育期間感染数	2	2.9	2.7	20.2	25.7
哺乳期間感染数	3	1572.9	1572.8	1663.1	1722
離乳期間感染数	3	811.8	861.6	380.1	379.4
前期肥育期間感染数	3	0	0	24.3	24.4
後期肥育期間感染数	3	0	0	0.1	0.1
哺乳期間死亡数	2	18.4	14.8	17.9	20.3
離乳期間死亡数	2	28.4	28.7	8.6	9.3
前期肥育期間死亡数	2	54.3	53.3	27.2	25.8
後期肥育期間死亡数	2	1.8	1.1	5.1	4.8
哺乳期間死亡数	3	181.7	191.4	200.9	208
離乳期間死亡数	3	86.1	89.3	55.1	56.8
前期肥育期間死亡数	3	0	0	8.2	7.8
後期肥育期間死亡数	3	0	0	0.1	0
出荷頭数	-	4322.9	4388.8	4370	4423.5

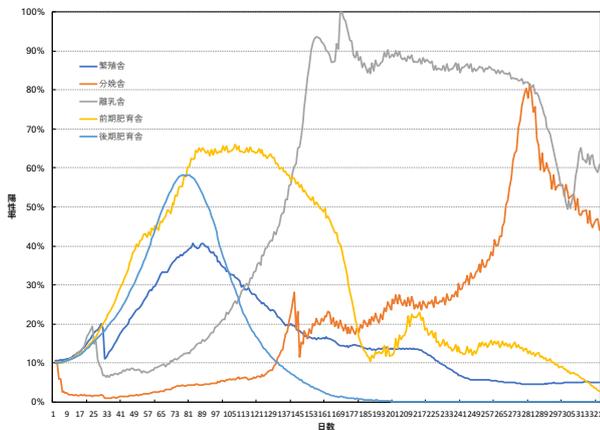


Fig.9: シナリオ A での各畜舎の平均陽性率の推移

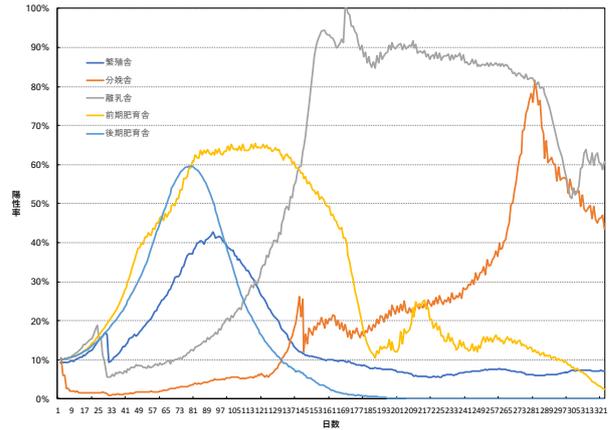


Fig.10: シナリオ B での各畜舎の平均陽性率の推移

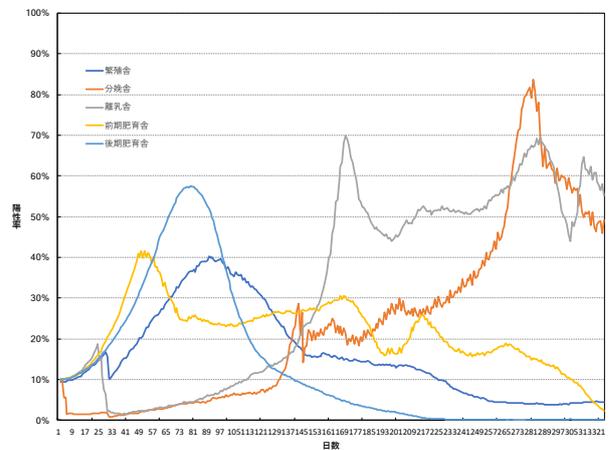


Fig.11: シナリオ C での各畜舎の平均陽性率の推移

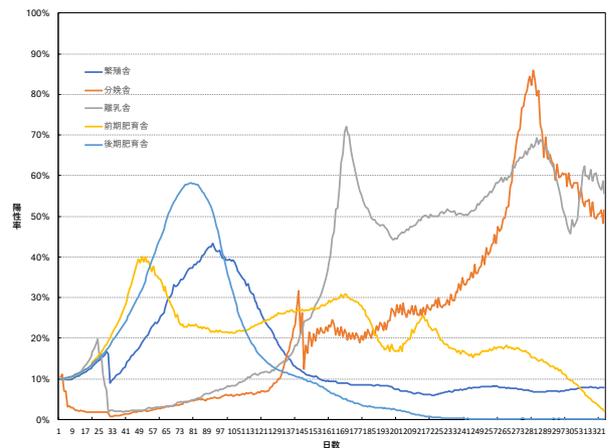


Fig.12: シナリオ D での各畜舎の平均陽性率の推移

5.3 シミュレーション結果に対する評価と考察

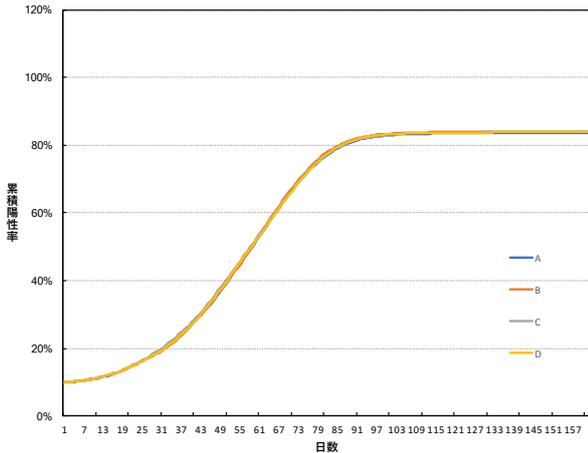


Fig. 13: 各シナリオにおける分娩サイクル第1回目の育成豚群の平均累積陽性率の推移

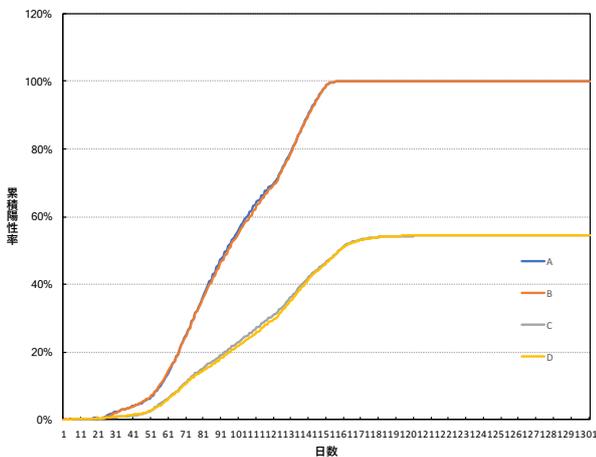


Fig. 14: 各シナリオにおける分娩サイクル第2回目の育成豚群の平均累積陽性率の推移

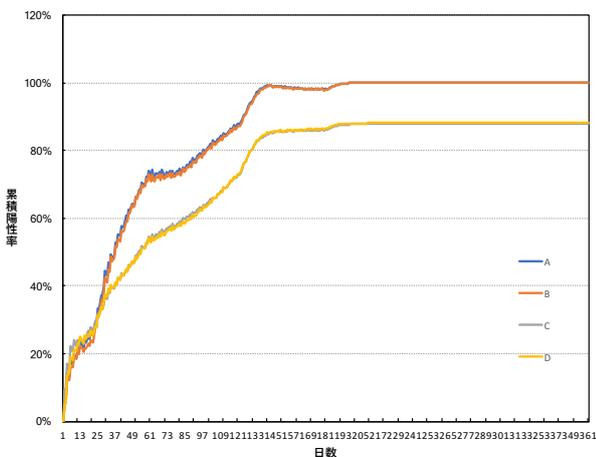


Fig. 15: 各シナリオにおける分娩サイクル第3回目の育成豚群の平均累積陽性率の推移

シミュレーション結果に対する評価と考察について述べる。まず、FCRとGPの結果からは、馴致と離乳期間の育成豚へのワクチネーションが一定の効果を持っていることが確認出来る。特に、ワクチネーションはFCRの改善において効果があるのに対し、馴致はFCRには影響を与えないもののGPの改善に寄与していることがわかる。馴致を実施したシナリオでは、流産数が明確に減少しており、それにより出荷頭数が馴致を実施しないシナリオと比較して増加していることから、馴致によるGPの改善が見られたのだと推察される。流産数が減少したのは、妊娠期間以前にPRRSに感染し免疫を得たギルト豚が多く、馴致が効果的に作用したことが理由だと考えられる。

また、ワクチネーションの実施によりFCRが改善した理由は、ワクチン接種による免疫を獲得した育成豚に対する飼料ロスが抑制されたからだと思われる。しかしながら、Fig.15の通り、第3回目分娩サイクルの育成豚は哺乳期間での感染が多く、ワクチネーションの効果が第2回目と比較して低下していると予測されることに注意する必要がある。これはPRRSの感染伝播速度が速いことを反映した結果だと考えられる。

更に、出荷体重量の結果を参照すると、馴致及び離乳期間の育成豚へのワクチネーションは、農場の生産性改善に一定の効果があることが予想される。そして、出荷による売上(Revenue)については、両方の対策を実施したシナリオが最も成績が良く、両者を併用することの有効性が示されていると考えられる。

次に、Fig.9~Fig.15に示されている畜舎あるいは育成豚の群における陽性率の推移について評価する。まず、これらの結果からは、サイクルの経過に応じた感染伝播の早期化が確認された。また、Fig.9からFig.12において確認出来るように、分娩舎では途中まで陽性率が上昇し続け、あるタイミングをピークに陽性率が低下していくことがわかる。ピークは、ほぼ、ギルト豚以外の全ての母豚の3回目の分娩が終了した時点である。これは、分娩舎に滞在する母豚の免疫が安定化し、非感染状態となった母豚の頭数の分、陽性率が低下したものだと考えられる。しかし、畜舎内での感染個体数減少が感染伝播を阻害する可能性は高く、したがって、育成豚への感染伝播に対して、母豚の免疫を安定化させることが一定の有効性を持つ可能性が推察される。この点については、本シミュレーションの結果のみでなく、シミュレーションの期間をより拡張した結果を得てから論じる必要があるであろう。

また、離乳期育成豚へのワクチンの実施有無による陽性率の推移を比較すると、ワクチン接種した場合には、離乳舎での陽性率が、接種しなかったシナリオと比べ低下することが確認される。しかし、上述したようにFig.15の結果からは、第3回目分娩の育成豚は哺乳期間での感染が多く、ワクチンを接種させる前に感染が伝播してしまっていることがわかる。したがって、陽性率推移の結果からは、農場の全体に感染が生じている場合、離乳期間以降のワクチネーションではPRRSの感染伝播に対し十分に対応出来ないことが示されていると思われる。上述の考察と合わせると、哺乳を行う母豚群の免疫安定化の重要性が示唆される。

6 結論と今後の課題

本研究は感染症により引き起こされる育成豚の体重減少や母豚の流産を加味したシミュレーションの枠組みを提示し、特に PRRS を対象としたシミュレーション実験を行なった。そして、馴致と離乳期間の育成豚に対するワクチネーションという二つの対策法を検討するためのシナリオ分析を進めた。各シナリオを評価した結果として、これらの対策法の実施により農場の生産性の改善が見込めることが示唆された。そして、それと同時に、母豚群の免疫安定化の効果の検証を中心として、感染伝播防止の対策を模索する為の更なるシミュレーション実験の必要性が明らかとなった。

今後の課題として、本研究で構築したシミュレーションのフレームワークを活用し、本稿で示した以外の PRRS に関する様々なシナリオ分析を試みる事が挙げられるであろう。特に、感染の伝播を防止する為の他の対策まで含めたシミュレーション実験や、期間・条件などを変更したシミュレーションを進めて、多様なシナリオ分析を行うことが求められる。

また、本稿では、とりわけ PRRS を対象としたシミュレーションの結果を提示したが、本研究のフレームワークは他の体重減少や流産を引き起こす家畜感染症に対しても適応可能なものであると考えられる。したがって、もう一つの今後の課題として、PRRS 以外の家畜感染症についてシミュレーションの枠組みに加えて、農場での感染症の影響の推定や対策への検討に関して、より包括的なモデル設計を進めることが挙げられる。更に、本稿では実際の家畜感染症対策にかかる衛生対策費用などの様々な費用をその変動性の高さから枠組みに加えず、主要コストとして飼料費用とワクチン費用のみを想定したが、より現実に即した形で経済性を評価するためには、それらの費用についても考慮する必要があると考えられる。今後はそれらの費用を枠組みに加えた上でのシミュレーションの構築が求められる。

本研究のフレームワークは、感染コントロール手法の検討に際しての農場経営における意思決定の為の材料の一つとして活用することが可能であると考えられる。しかしながら、本研究において使用されているモデル及びそれによるシミュレーションは、必ずしも現実の様態を反映しているとは限らず、本稿の結果と考察についてもそうした条件や仮定に基づくものであることに注意する必要がある。したがって、先述したように、家畜感染症の影響の推定、及び感染症対策の検討に対して、より適切な評価を行う為、今後、更にシミュレーションやモデリングの改善を図る必要があるであろう。

参考文献

- 1) 山根逸郎, 呉克昌, 石川弘道, 高木道浩, 宮崎綾子, 鈴木孝子, 芝原友幸, 久保正法, 小林秀樹, 國保健浩, 恒光裕: PRRS の発生に関わる呼吸器疾患および繁殖障害などによる経済的な損失調査 (アンケートを用いた疫学調査と全国の被害損額の推定), 豚病会報, **55**, 33/37 (2009)
- 2) 石関紗代子, 石川弘道, 足立吉敷, 山崎尚則, 山根逸郎: 日本の養豚場における PRRS(豚繁殖・呼吸障害症候群)の浸潤状況と生産成績との関連の調査, 日本畜産学会報, **85-2**, 171/177 (2014)

- 3) Hiroshi Deguchi, Yasuhiro Kanatani, Toshiyuki Kaneda, Yusuke Koyama, Manabu Ichikawa, Hideki Tanuma: Anti Pandemic Simulation by SOARS, SICE-ICASE International Joint Conference 2006 in Bexco. Busan. Korea, 4581/4586 (2006)
- 4) Manabu Ichikawa, Hideki Tanuma, Hiroshi Deguchi: INFECTIOUS DISEASE SIMULATION MODEL FOR ESTIMATION OF SPREADING, Developments in Business Simulation and Experiential Learning, **38**, 358/366 (2011)
- 5) Masayuki Ishinishi, Manabu Ichikawa, Hideki Tanuma, Hiroshi Deguchi, Yasuhiro Kanatani: The Effects of Vaccination Strategies Against Smallpox Bioterrorism with Agent-Based Simulation, Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems VII. Agent-Based Social Systems vol.10, 131/145, Springer Japan (2013)
- 6) D. L. Hank Harris: Multi-site Pig Production, Iowa State University Press /Ames, 37/56 (2000)
- 7) SOARS project: <http://www.soars.jp>
- 8) Andréia Goncalves Arruda, Robert Friendship, Jane Carpenter, Amy Greer, Zvonimir Poljak: Evaluation of Control Strategies for Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome (PRRS) in Swine Breeding Herds Using a Discrete Event Agent-Based Model, PLOS ONE, **11-11**, e0166596 (2016)
- 9) CALEB MICHAEL SHULL, MODELING GROWTH OF PIGS REARED TO HEAVY WEIGHTS: Doctor thesis in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign (2013)
- 10) Quiniou, N., S. Dubois, and J. Noblet: Voluntary feed intake and feeding behavior of group housed pigs are effected by ambient temperature and body weight. Livestock Production Science, **63**, 245/253 (2000)
- 11) H. Nathues, P. Alarconb, J. Rushtonb, R. Jolic, K. Fiebigd, M. Jimenez, V. Geurtsf, C. Nathuesg: Cost of porcine reproductive and respiratory syndrome virus at individual farm level – An economic disease model, Preventive Veterinary Medicine, **142**, 16/29 (2017)
- 12) Kelly L Klinge, Eric M Vaughn, Michael B Roof, Elida M Bautista, Michael P Murtaugh: Age-dependent resistance to Porcine reproductive and respiratory syndrome virus replication in swine, Virology Journal, **6**, 177 (2009)
- 13) W. P. Schweer, K. Schwartz, E. R. Burrough, K. J. Yoon, J. C. Sparks, N. K. Gabler: The effect of porcine reproductive and respiratory syndrome virus and porcine epidemic diarrhea virus challenge on growing pigs I: Growth performance and digestibility, J. Anim. Sci., **94-2**, 514/522 (2016)
- 14) N. Nieuwenhuis, T. F. Duinhof, A. van Nes: Economic analysis of outbreaks of porcine reproductive and respiratory syndrome virus in nine sow herds, Veterinary Record, **170**, 225 (2011)
- 15) Hiroki ICHIKAWA, Yuzo KOKETSU: Standard Operating Procedures for Sows and Piglets in Farrowing and Lactation in Japanese Commercial Herds, Journal of Veterinary Medical Science, **74-11**, 1423/1428 (2012)
- 16) Céline Charpin, Sophie Mahé, André Keranflech, Catherine Belloc, Roland Cariolet, Marie-Frédérique Le Potier and Nicolas Rose: Infectiousness of pigs infected by the Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome virus (PRRSV) is time-dependent, Veterinary Research, **43**, 1/11 (2012)
- 17) 農林水産省: 豚枝肉卸売価格の推移, <http://www.maff.go.jp/j/chikusan/shokuniku/lin/attach/pdf/index-74.pdf>
- 18) 独立行政法人農畜産業振興機構: 配合飼料の価格動向, http://lin.alic.go.jp/alic/statis/dome/data2/i_pdf/7021a-7022a.pdf
- 19) Daniel C. L. Linhares, Clayton Johnson, Robert B. Morrison: Economic Analysis of Vaccination Strategies for PRRS Control, PLoS ONE **10-12**, e0144265 (2015)