

# マルチエージェントシミュレーションによる 千葉県におけるキョン捕獲効果の推定

○中野凌 蓮池隆（早稲田大学）

## Estimation of *Muntiacus reevesi* capture effect in Chiba prefecture by multi-agent simulation

\* R. Nakano and T. Hasuike (Waseda University)

**概要一** 本研究では、マルチエージェントシミュレーションによって千葉県に生息するキョンの捕獲効果の推定を行う。1章では千葉県におけるキョンによる被害状況など現状の問題点を述べる。2章で関連研究の調査を行い、キョンに関して得られたデータをもとに、3章にてモデルのパラメータ設定を行う。4章では3つの施策シナリオを設定し、仮説の構築を行う。5章では3つの施策シナリオについての実験の結果と考察を行う。本研究の結果として、マルチエージェントシミュレーションによって、捕獲圧をパラメータとして変動させながら捕獲効果をシミュレーションすることで、キョンの頭数を横ばい、減少、完全に駆逐するために必要な捕獲圧を推定することができた。

**キーワード:** キョン, 有害鳥獣駆除, 捕獲圧の効果推定, マルチエージェントシミュレーション

### 1 研究背景・目的

日本,特に地方における有害鳥獣の被害は深刻であり,令和2年における国内の被害総額は約161億円である。鳥獣被害が深刻化している要因として,鳥獣の生息域の拡大や,猟師高齢化に伴う狩猟による捕獲圧の低下,耕作放棄地の増加などがあげられる。また,鳥獣被害は,営農意欲の減退や農業従事者の農業離れの原因となることや,耕作放棄地の増加による土砂災害の誘発など,被害額として数字に現れる以上に農山漁村に深刻な影響がある。上記に加えて,千葉県では現在特定外来種「キョン」(*Muntiacus reevesi*: Fig.1)による被害が深刻化しているという問題がある。



Fig.1 キョン<sup>1)</sup>

キョンは中国南東部及び台湾に自然分布しているシカ科の哺乳類で,千葉県におけるキョンの移入源は勝浦市にあった私立観光施設(平成13(2001)年閉園)と考えられており,移入時期は昭和30(1960)年代から昭和60(1980)年代の間であると推定されている。野生生物の本来の移動能力を超えて,人為的に,意図的・非意図的に,他の地域から導入された外来種は,在来種の捕食や競合等,地域固有の生物相や生態系に対する大きな脅威となっている。現在の千葉県の状況から,早急にキョンを防除する必要がある。千葉県の掲げる防除計画について,外来生物法に基づく防除実施計画を策定し,県,市町村,農業者,関係団体,県民等が,それぞれの役割を担い,県内のキョン問題に対する共通の理解を深め,情報の共有化を図ることに

より,効果的で継続的な防除を実施することを目的としている。キョンの防除に関しては,現在千葉県をはじめとする各自治体や地元の猟師による駆除活動が進められている。実態として繁殖に対する駆除が追いついておらず,対症療法的に駆除活動を促進しているのが現状である。千葉県の掲げるキョン防除計画<sup>2)</sup>において,捕獲圧を高めるという表現が用いられているが,実際にキョンの完全駆除を実現するための指標としては,定量性に欠ける部分がある。有害鳥獣における捕獲効果をシミュレーションによって計測するという先行事例はあるが,キョンに関するシミュレーションについてはまだ行われていない。

そこで本研究では,マルチエージェントシミュレーションを用いて,現状のキョンの捕獲効果を推定し,施策を講じることで,キョンを千葉県から完全に駆逐するために必要な捕獲圧の数値を定量的に算出することを目的とする。

### 2 関連研究と本研究の位置づけ

#### 2.1 マルチエージェントシミュレーション

実際のキョンの動きをモデル化し,森林におけるキョンの生態がどのような影響をもたらすのか考察するために,マルチエージェントシミュレーションを用いる。構造計画研究所<sup>3)</sup>によると,マルチエージェントシミュレーションとは「複数のエージェント(人や生物など)に同時進行的に各々のルールのもと,お互いに干渉(相互作用)を受けさせながら実行させるシミュレーション(仮想実験)」である。この手法では,個々のミクロな動きからは予測できないマクロの動きを推測することができる。実際の狩猟現場においても,キョンと猟師はそれぞれの行動を自律的に決定するが,その際に他のエージェントの行動に影響を受けると考えられる。

#### 2.2 鳥獣害対策のシミュレーションに関する研究

坂田ら<sup>4)</sup>は,アライグマを対象とした捕獲効果シミュレーションに関する研究において,侵入初期段階で捕獲圧を高めることで根絶に要する時間が短くなるこ

とを示している。坂田らのシミュレーションでは、アライグマの出生率と死亡率を元にt期からt+1期を求める関数を定義することで線形的なモデルを提案し、年間の捕獲数をパラメータとして変動させながら生息頭数の推移を予測している。しかし、このモデルでは、毎年の捕獲数が分かっている場合のみ適応可能であり、どれくらいの捕獲圧をかければよいかを計画することは難しい。また、線形的なモデルのため不確実性を考慮することが難しく、結果の解釈や活用の範囲はその限界を十分にわきまえる必要があると述べている。そこで、本研究では、マルチエージェントシミュレーションによって、キョンと猟師の相互作用をモデル化することで、捕獲圧をパラメータとして変動させながら捕獲効果をシミュレーションする。また、複数回シミュレーションを行うことでモデルの不確実性を可視化する。

### 2.3 キョンの個体数推定

浅田ら<sup>5)</sup>は、千葉県南部の59管理ユニットに生息するキョンの個体数推定方法として、状態空間モデルを用いた階層ベイズ法を提案している。結果として、個体群増加率は平均1.294と求めている。浅田らの研究以前までは、野外で捕獲された個体の性齢構成と妊娠率から、年1回の繁殖を仮定した個体群増加率は1.356ないし1.407となることから、無視できない程度に大きい死亡率が個体群動態に寄与していることが示された。

本研究では、浅田らの研究によって推定された各地域でのキョンの頭数をシミュレーションのパラメータとして用いる。また、個体群増加率をシミュレーションによる場合と比較検討することでモデルの妥当性の確認を行う。

## 3 提案モデル

本節では、マルチエージェントシミュレーションにおける対象地域の状況シナリオや各エージェントの初期パラメータの設定方法、行動ルールについて説明する。本研究の実行環境は、オペレーティングシステムとしてWindows10、プログラミング言語はPython 3.8.7を用いた。また、マルチエージェントシミュレーションの実装においてPythonライブラリのmesa<sup>6)</sup>を使用した。

### 3.1 状況シナリオ

Table 1. 千葉県キョン防除実施計画の地域区分<sup>2)</sup>

地域区分	定義	目標
増殖抑制地域	キョンが高密度に生息する地域。分布拡大の供給源となり得るため、生息数の低減のための対策が必要となる地域。	生息数の増加を上回る捕獲圧をかけ、生息数を減少させる。農作物被害及び生活環境被害を防止する。
分布拡大地域	県北部への分布拡大の前線地域であり、分布拡大防止のための対策が必要となる地域。	分布拡大防止ラインの北側への分布拡大を防止する。生息数の増加を上回る捕獲圧をかけ生息数を減少させる。農作物被害及び生活環境被害を防止する。
注意地域	キョンの定着が確認されていないものの、分布拡大に伴い定着するおそれがある地域。	積極的に生息情報を収集し、生息が確認された場合は早期に捕獲することで、定着を防止する。

本研究では、シミュレーションモデルの対象となる都市を4つ設定した。各都市の状況シナリオについて説明を行う。第2次千葉県キョン防除実施計画<sup>2)</sup>では、キョンの生息状況に合わせて以下のTable1のように3つの地域区分を設定している。

本研究では、増殖抑制地域の代表として勝浦市と富津市、分布拡大地域の代表として市原市、注意地域の代表として茂原市を選定する。シミュレーションではキョンの主な生息域である森林をフィールドとして想定する。各都市の森林面積<sup>7)</sup>は以下の通りである。

- ・勝浦市：6,312ha
- ・富津市：12,223ha
- ・市原市：13,822ha
- ・茂原市：1,632ha

本研究のシミュレーションにおける、フィールドの大きさは40×40(1600マス)とし、1マスの大きさは50m×50m(0.25ha)とした。そのため、フィールドの面積は400ha(1600×0.25ha)となる。3.2節以降の各エージェントパラメータの設定などは、各都市の森林面積を400haのスケールに縮小させて計算を行う。例えば、勝浦市の場合は400ha/6312haのスケールに調整してシミュレーションを行う。

### 3.2 エージェントの概要

提案モデルで扱うエージェントは、キョンの食料、キョン、猟師の3種類である。本節では、各エージェントの概要について述べる。

猟師とキョンはランダムウォークにより各セルをランダムに1マスずつ移動する。

キョンは動き回り、キョンの食料のあるセルと同じセルに移動することで食料を食べることができる。各セルの食料は食べられると消えるが一定のスピードで再生する。

キョンは猟師と同じマスに到達すると一定の確率で捕獲される。また、年齢が高くなるほど自然死する確率も高くなる。生後150日以上経つメスのキョンは一定の確率で子を産んで増える。

本モデルのフィールドとエージェント配置のイメージ図をFig. 2に示す。

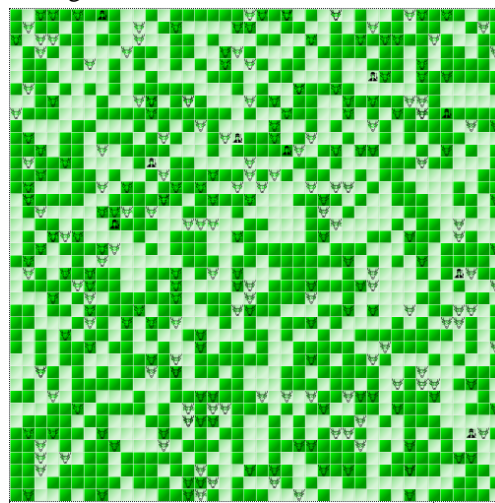


Fig. 2. フィールドとエージェント配置イメージ図

### 3.3 キョンエージェントのパラメータ設定

キョンのパラメータは、各都市ごとの初期頭数と年齢、繁殖確率と自然死亡確率である。令和1年度における各都市のキョンの生息頭数の予測と森林面積から求めたシミュレーション上でのキョンの初期頭数をTable 2に示す。

Table 2. 令和1年度におけるキョンの頭数とシミュレーション上での初期頭数

都市名	キョン頭数 (R1)	シミュレーション上の初期頭数
勝浦市	3,888 頭	250 頭
富津市	4,538 頭	150 頭
市原市	2,884 頭	83 頭
茂原市	40 頭	10 頭

次にキョンの年齢について設定する。寿命と年齢構成 捕獲個体の分析によると、最高齢はメスで6~7歳、オスで5~6歳であった。個体数では、2歳以上が最も多く、次いで1歳、0歳(6か月未満)、0歳(6か月以上)の順で多かった。これより、シミュレーション上のキョンの初期年齢は平均が1.5歳(540日)分散が0.5の対数正規分布を仮定した。例として勝浦市におけるあるシミュレーション上のキョンの初期年齢の分布をFig. 3に示す。各キョンエージェントは1ステップごとに1日ずつ年齢が加算される。

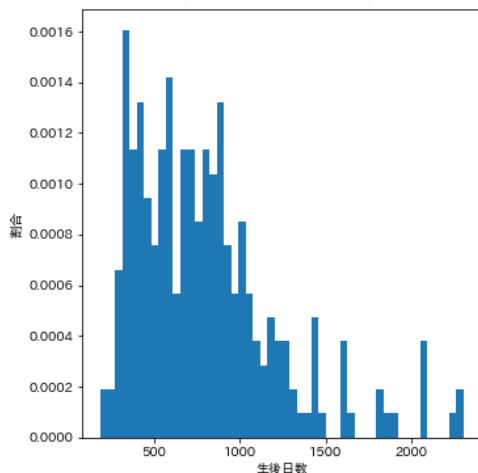


Fig. 3. 勝浦市のキョンの初期年齢の分布

次にキョンの繁殖確率について設定する。キョンのメスは1産1子であり、早ければ生後半年程度で妊娠し、約210日の妊娠期間を経て出産する。また、飼育下のキョンでは出産直後に発情・妊娠し、同一個体が1回/年を超す出産を行うことが知られている。これより、キョンの繁殖確率は生後150日以上のメスのキョンは210日に1回のペースで出産することができるとして、以下の式(1)で表す。

$$Kyon_{breed} = \begin{cases} \frac{1}{2} \times \frac{1}{210}, & Kyon_{Age} \geq 150 \\ 0, & Kyon_{Age} < 150 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $Kyon_{Age}$ はキョンが生後何日かを表す。また、繁殖確率を2で割っている理由は、提案モデルでは各キョンエージェントのオスとメスを区別していないためである。

最後にキョンの自然死亡確率を設定する。本研究における自然死亡確率とは、キョンの寿命や事故など、猟師に捉えられる以外の原因により死亡する確率とする。前述のキョンの寿命を参考として、自然死亡確率を以下の式(2)で表す。

$$Kyon_{dead} = \frac{1}{1000} \times \frac{Kyon_{Age}}{540} \quad (2)$$

式(2)より、キョンの最高齢と年齢ごとの個体数を加味して、1000日に1回を死亡確率の基準とし、生後540日を過ぎてから確率を高まるように設定した。

### 3.4 猟師エージェントのパラメータ設定

猟師のパラメータは、わな数とキョンの捕獲成功確率である。ここで、捕獲圧と呼ばれる言葉の定義を行う。捕獲圧は、様々な解釈が取られているが、本研究では、「単位面積当たりの捕獲期待値」として定義し、捕獲圧=わな数×捕獲成功確率で表す。

まず捕獲成功確率を設定する。本モデルの捕獲成功確率の定義は、50メートル四方のセルの中でキョンと遭遇した場合に猟師がキョンを捉えられる確率とする。令和元年におけるキョンの捕獲方法別捕獲数割合を以下のFig. 4に示す。

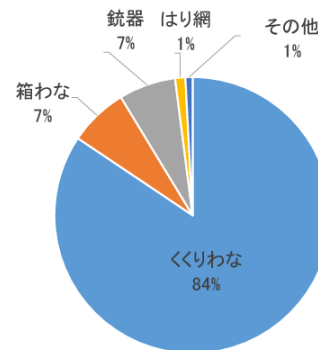


Fig. 4 捕獲方法別捕獲数割合<sup>3)</sup>

Fig. 4に示すように現在のキョンの捕獲方法としてくりわな(Fig. 5)が主流である。くりわなとは、動物の通り道に仕掛け、動物が踏むことで木と結び付けられたワイヤーが外れて足をかけるわなである。



Fig. 5 くりわな<sup>8)</sup>



わなにかかった動物による事故を回避するため、猟師はわなを仕掛けた後は1日に1回見回りを行う必要がある。見回った際に、わなにキョンがわなにかかっている確率は約10～20%であるため、本研究での捕獲成功確率の初期値は15%として設定した。

次にわな数について設定する。本モデルにおけるわなとして、くくりわなを考える。1人当たりが仕掛けることのできるくくりわなの上限数は30個と決められているが、実際では約10個ほど仕掛ける猟師が多い。そのため、実際に必要な猟師の人数はわなの数の10分の1と考えることができる。キョンの捕獲は主に猟銃会に属する猟師によって行われている。例として、勝浦市の猟銃会の人数は約50人であり、本モデルのシミュレーション上のスケールでは(16分1のため)、約3人となる。3日に1人が稼働すると1日に行動できる猟師は1人となり、わなの数は10個と設定する。

また、令和4年度における各都市のキョンの捕獲計画数(勝浦市<sup>9)</sup>、富津市<sup>10)</sup>、市原市<sup>11)</sup>、茂原市<sup>12)</sup>)と本モデルのサイズに調整した捕獲頭数、上記の勝浦市を基準に算出した捕獲に必要なわなの数を以下のTable 3に示す。

Table 3. 令和4年度におけるキョン捕獲計画数とシミュレーション上の捕獲計画数及び必要なわなの数

都市名	キョン捕獲計画数 (R4)	シミュレーション上の捕獲計画数	必要なわなの数
勝浦市	1,300 頭	80 頭	10 個
富津市	50 頭	20 頭	5 個
市原市	35 頭	5 頭	3 個
茂原市	20 頭	3 頭	2 個

Table 3 における各都市のシミュレーション上の捕獲計画数を達成するために必要なわなの数を後述の4章: 実験2, 3における基準パラメータ値として設定する。

### 3.5 キョンの食料エージェントのパラメータ設定

キョンは、千葉県においては年間を通して主に木の葉を食べ、秋にはシイ・カシ類の堅果も多く食している。同じ地域に生息するニホンジカと比較すると、キョンは常緑広葉樹や堅果を多く、枯葉、木の枝などは少なく採食していることがわかっており、ニホンジカよりも質のよい食物を選択している。そのため、キョンの繁殖による農作物被害や生態系破壊への影響が懸念される。本研究では各セルにキョンの食料を設置し、キョンに食べられると2ステップ後に再生する設定にした。キョンに食べられた食料の数をカウントすることでキョンによる被害状況を近似的に表すことができる。

## 4 実験設定

### 4.1 施策シナリオ

本研究では以下のTable 4の3つの施策シナリオを設定する。

Table 4. 施策シナリオ

実験名	施策シナリオ
実験1	捕獲を行わない場合
実験2	現状の捕獲数の目標を達成した場合
実験3	施策を講じて捕獲圧を高めた場合

実験1では、捕獲を行わない場合のキョンの自然増加率を推測することでモデルの妥当性の検証を行う。

実験2では、Table 3の現状の捕獲数の目標を達成するための必要なわなの数を設定した場合のキョンの頭数の推移を予測することで、現状の打ち手の効果を検証する。

実験3では、施策を講じて捕獲圧を高めた場合のキョンの頭数の推移を予測することで施策効果を検証する。施策の種類は、わなの数を増やす施策と捕獲成功確率をあげる施策の2パターンである。前者の施策は、現状のくくりわなの個数を増やす施策で、猟師の増員やわなの見回りの効率化によって実現できる。猟師の数が限られていることから、捕獲作業や記録の効率化を図ることが重要である。このため、自動通報装置等のICT技術を積極的に推進することにより、わなの見回りを省力化する等して、効率的な捕獲につなげることができる。後者の施策は、現状のくくりわなよりも50メートル四方における捕獲成功確率の高い方法を開発する必要がある。キョンは警戒心の強い動物であるため、くくりわななどの待ち伏せ型の捕獲方法よりもドローンを用いて誘導したり餌を用いておびき寄せたりなどの追い込み型の捕獲方法の方が成功確率が上がる可能性がある。

### 4.2 シミュレーション期間

シミュレーション時間は、第2次千葉県キョン防除実施計画<sup>2)</sup>に定められた期間(令和3年4月1日から令和8年3月31日まで)に基づき、6年間(2190日間)とする。シミュレーションの1ステップを1日とするため、2190ステップのシミュレーションを行う。

## 5 実験結果・考察

本章では、4.1節の施策シナリオであげた3つの実験結果とその考察を述べる。

### 5.1 実験1：捕獲なしシナリオ

実験1では、勝浦市、富津市、市原市、茂原市について、捕獲を行わない場合のキョンの自然増加率を推測した。6年分の結果をFig.6に最初の1年分の結果をFig.7に示す。

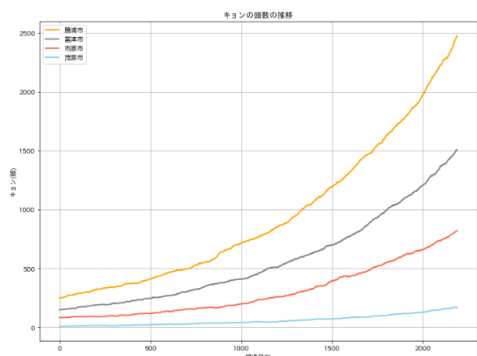


Fig. 6 実験1：6年分の結果

Fig. 6より、初期頭数の多い都市ほど6年後のキョンの増加数が多いことが分かる。

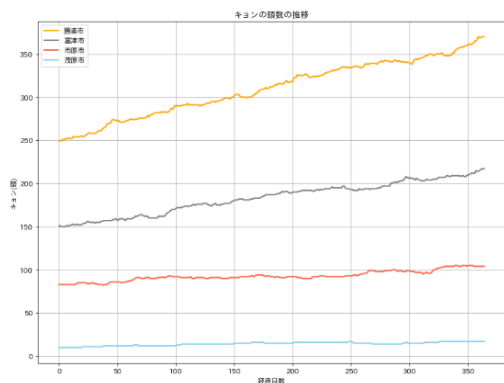


Fig. 7 実験1：最初の1年分の結果

また、Fig.7より、各都市のキョンの増加数と自然増加率（個体群増加率）をTable5に示す。

Table 5 各都市のキョンの増加数と自然増加率

都市名	初期頭数（頭）	1年後頭数（頭）	増加数（頭）	自然増加率
勝浦市	250	370	120	1.48
富津市	150	216	66	1.44
市原市	83	104	21	1.25
茂原市	10	17	7	1.7

Table5より、本モデルのパラメータ設定によるシミュレーションの自然増加率は、浅田ら<sup>5)</sup>の研究で算出されている自然増加率の平均1.294と比較しておおむね妥当な値であるといえる。

### 5.2 実験2：現状維持シナリオ

実験2では、現状の捕獲数の目標を達成するための必要なわなの数を設定した場合のキョンの頭数の推移を予測することで、現状の打ち手の効果を検証する。Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11に各都市における初期パラメータで10回シミュレーションを行ったのキョンの頭数の推移を示す。

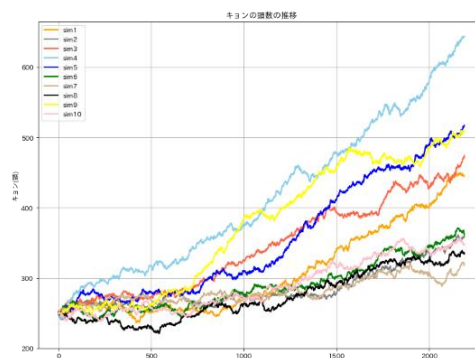


Fig. 8 実験2：勝浦市の現状維持シナリオ

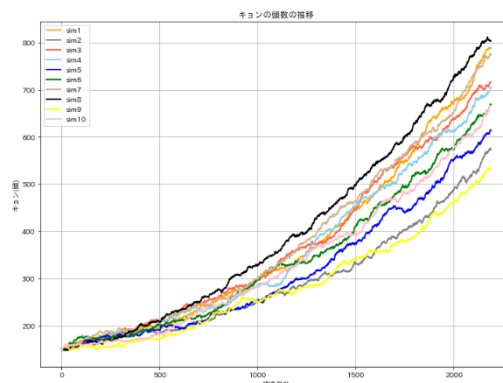


Fig. 9 実験2：富津市の現状維持シナリオ

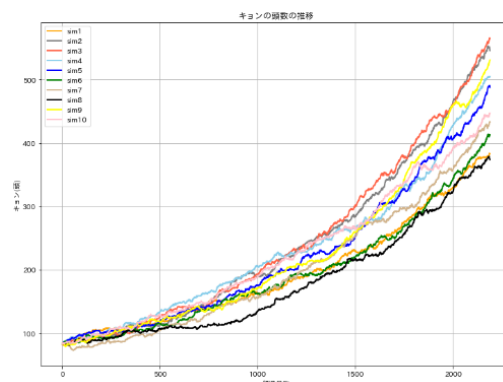


Fig. 10 実験2：市原市の現状維持シナリオ



Fig. 11 実験2：茂原市の現状維持シナリオ

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に Fig. 8~11 における sim1~sim10 のキョンの出産数, 自然死亡数, 捕獲数, 増減数の平均値を示す。

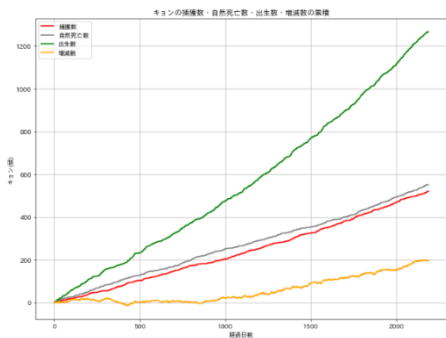


Fig. 12 実験 2 : 勝浦市におけるキョンの出産数, 自然死亡数, 捕獲数, 増減数

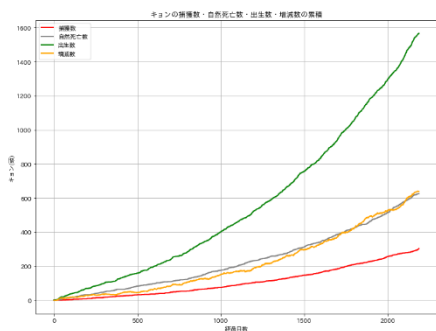


Fig. 13 実験 2 : 富津市におけるキョンの出産数, 自然死亡数, 捕獲数, 増減数

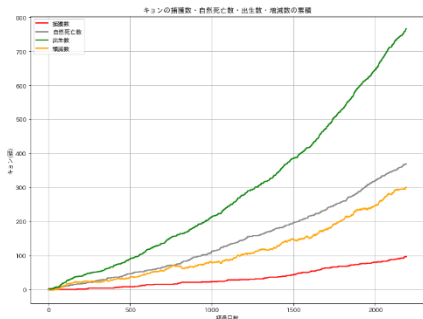


Fig. 14 実験 2 : 市原市におけるキョンの出産数, 自然死亡数, 捕獲数, 増減数

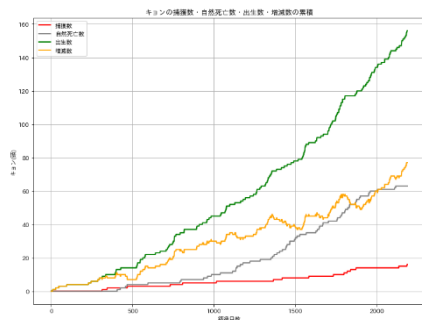


Fig. 15 実験 2 : 茂原市におけるキョンの出産数, 自然死亡数, 捕獲数, 増減数

Fig. 8~11 より, すべての都市において現状の目標捕獲数を達成したとしてもキョンの頭数は増加傾向に推移することがわかった。勝浦市と茂原市においては, 最初の1年は横ばい傾向であるが, 6年後には増加傾向となっている。一方で富津市と市原市は始めから常に増加傾向がみられ, 1000~1500日後には勝浦市の頭数を超えている。これは, 勝浦市はキョンの捕獲のノウハウが蓄積されてきており, 捕獲目標数が高く設定されているのに対し, 富津市と市原市はキョンの捕獲実績が少ないため, 捕獲目標数も少なく設定されてしまっていることが原因だと考えられる。茂原市については, 初期頭数が少ないため繁殖スピードが抑えられ, 増加数は他の3都市に比べると少ないが, 6年後をみると増加傾向にあるため早い段階で施策を講じる必要があると考えられる。

また, Fig. 12~15 より, 勝浦市は捕獲数が自然死亡数を上回っているのに対し, 富津市と市原市と茂原市は自然死亡数が捕獲数を上回っていることがわかる。黄色の折れ線グラフのキョンの増減数は, 出産数から捕獲数と自然死亡数を引いた値である。勝浦市の増減数をみると1000日までは横ばい傾向を維持できているため, 増殖を抑制できている。一方でその他の都市では黄色の線が増加傾向になっているため, 農作物被害の拡大や他の地域への進出などが引き起こされる可能性がある。

### 5.3 実験 3 : 施策実行シナリオ

実験 2 において, 現状維持シナリオではキョンの増加を止めることが難しいことがわかった。そこで, 実験 3 では, 捕獲圧を高めるため, わなの数を増やす施策と捕獲成功確率を高める施策を講じたときの効果をそれぞれ推定する。

Fig. 16, Fig. 18, Fig. 20, Fig. 22 にわなの数を増加する施策を講じたときのキョンの頭数の推移を示す。

また, Fig. 17, Fig. 19, Fig. 21, Fig. 23 に捕獲成功確率を高め施策を講じたときのキョンの頭数の推移を示す。

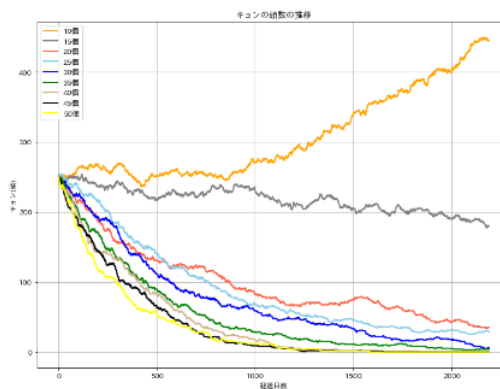


Fig. 16 実験 3 : 勝浦市におけるわなの数を増加したときのキョンの頭数の推移

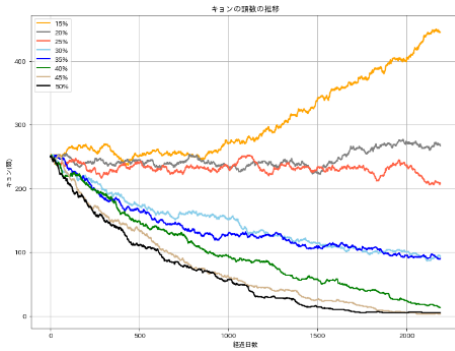


Fig. 17 実験3：勝浦市における捕獲成功確率を高めたときのキョンの頭数の推移

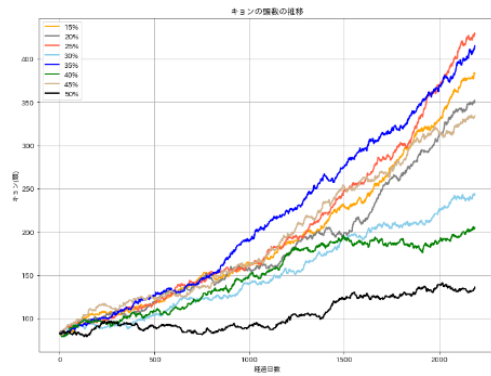


Fig. 21 実験3：市原市における捕獲成功確率を高めたときのキョンの頭数の推移

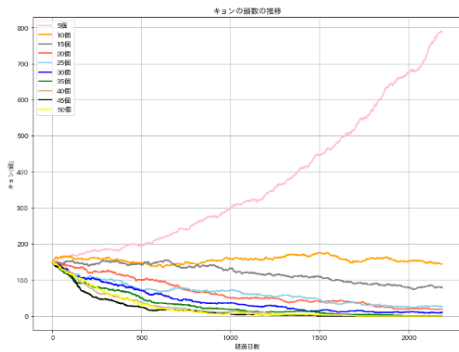


Fig. 18 実験3：富津市におけるわなの数を増加したときのキョンの頭数の推移

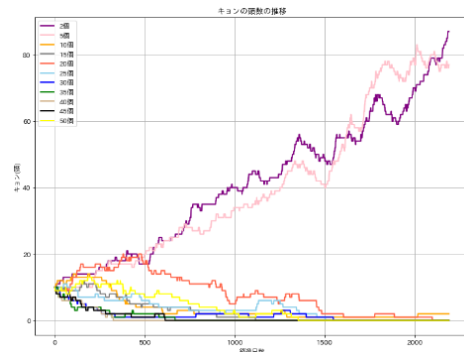


Fig. 22 実験3：茂原市におけるわなの数を増加したときのキョンの頭数の推移

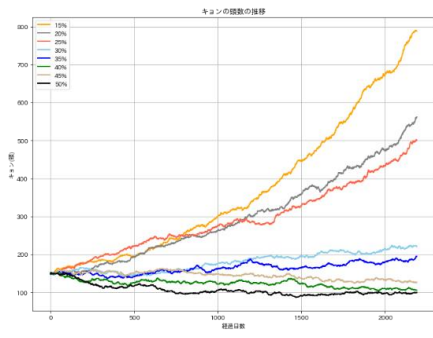


Fig. 19 実験3：富津市における捕獲成功確率を高めたときのキョンの頭数の推移



Fig. 23 実験3：茂原市における捕獲成功確率を高めたときのキョンの頭数の推移

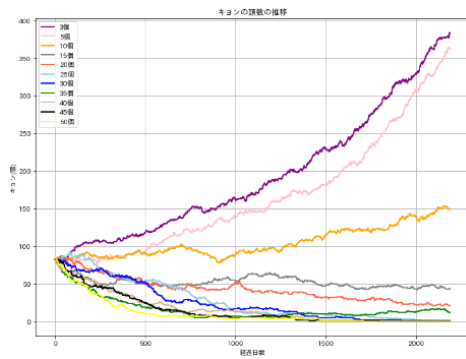


Fig. 20 実験3：市原市におけるわなの数を増加したときのキョンの頭数の推移

Fig. 16 より、勝浦市においてはわなを 20 個以上に増やした場合にキョンの頭数を下降傾向にできることがわかる。Fig. 18, 20, 22 より、他の 3 都市でも同様に、わなの数を 2~3 倍に増やすことで下降傾向になっている。

また、Fig. 17 より、捕獲成功確率を 30%~40% に高めることで、キョンの頭数が減少傾向となり、40~50% まで高めることで 6 年後までにキョンを完全に駆逐することができるという推定になった。一方で Fig. 19, 21, 23 では、捕獲成功確率を 50% まで高めたときも横ばい傾向またはやや増加傾向になっている。これより、捕獲成功確率を高めることによる効果を期待するためには、一定数以上のわなの数が必要であることがわかる。

## 6 おわりに

### 6.1 まとめ

本研究では、マルチエージェントシミュレーションによって千葉県に生息するキョンの捕獲効果の推定を行った。1章では千葉県におけるキヨンによる被害状況など現状の問題点を述べた。2章で関連研究の調査を行い、キヨンに関して得られたデータをもとに、3章にてモデルのパラメータ設定を行った。4章では3つの施策シナリオを設定し、仮説の構築を行った。5章では3つの施策シナリオについての実験の結果と考察を行った。本研究の結果として、マルチエージェントシミュレーションによって、捕獲圧をパラメータとして変動させながら捕獲効果をシミュレーションすることで、キヨンの頭数を横ばい、減少、駆逐するために必要な捕獲圧を推定することができた。

### 6.2 今後の課題

本研究の提案モデルでは、フィールドとして正方形になるようなセルの配置を行ったが、実際の森林は複雑な地形であり、都市によって特色が異なる。また、キヨンの行動範囲の平均はオスが4.0ha、メスが1.7haと推定されている。本研究のシミュレーションの大きさは400haとなっており、キヨンの行動範囲を大きく上回っているという問題がある。同様に、猟師の行動範囲も実際は市街地近くの森林地域が中心となっていることから、現実と異なる部分がある。そこで今後の課題として、実際の地形を考慮したセルの配置によるシミュレーションを行うことやキヨンや猟師の行動範囲を考慮したモデルを作成することがあげられる。

また、5章の実験3ではわなの数を増やす施策と捕獲成功確率を高める施策のそれぞれを別々に検証したが、2つの施策を組み合わせることでより効果的な施策となる可能性が高い。2つの施策を組み合わせたモデルの効果検証も今後の課題とする。

### 6.3 査読結果を踏まえた今後の展望

エージェントベースシミュレーションのモデルの作り方について、Nigel Gilbert は、抽象モデルとミドルレンジモデルとファクシミリモデルの3つのレベルがあると主張している<sup>13)</sup>。抽象モデルは、世界で起こっていることとはとりあえず直接は関係しないが、実際の現象のさまざまな解釈が可能なモデルである。ファクシミリモデルは、実物とそっくり同じ部分があるように作ったモデルである。そしてこの2つの間にあるのがミドルレンジモデルである。本研究では、千葉県の各地域のキヨンの生息状況について、ファクシミリモデルを適用することで捕獲効果を推定することを目的としたが、モデルにおけるフィールドやエージェント配置については、アブストラクトモデルの水準であることが、実際の捕獲効果の推定において、その妥当性に関して懸念が考えられる。今後の展望として、フィールドワークによる各地域の地形調査やキョ

ンの生息状況の把握をし、各パラメータの再検討を行いたい。日本における千葉県以外のキヨンの生息地として伊豆大島があるが、島を対象としたファクシミリモデルであればより妥当性のあるシミュレーションが可能になると考えられるため、新たなシミュレーション対象地域として検討したい。

また、エージェントシミュレーションとしての面白みを得られるような施策シナリオを追加したい。例えば、キヨンエージェントの行動を実際に空間でシミュレーションし、エサが多い場所にわなを集中配置するといった施策やキヨンエージェントが捕獲された付近には別のキヨンエージェントは離れるようにランダムウォークするなどが考えられる。

## 参考文献

- 1) <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%A7%E3%83%B3>
- 2) [https://www.pref.chiba.lg.jp/shizen/iken/R2/documents/2nd\\_kyon.pdf](https://www.pref.chiba.lg.jp/shizen/iken/R2/documents/2nd_kyon.pdf)
- 3) <https://mas.kke.co.jp/about/>
- 4) 坂田宏志：生息頭数変化に及ぼす捕獲効果のシミュレーション，兵庫 ワイルドライフモノグラフ1号，兵庫県森林動物研究センター，p11-18（2009）
- 5) 浅田正彦，長田穰，深澤圭太，落合啓二：状態空間モデルを用いた階層ベイズ推定法によるキヨン（*Muntiacus reevesi*）の個体数推定，日本哺乳類学会 54(1)，p53-72，（2014）
- 6) <https://mesa.readthedocs.io/en/stable/>
- 7) <http://www.machimura.maff.go.jp/machi/map/12/index.html>
- 8) <https://inohoi.com/products/133>
- 9) <https://www.city.katsuura.lg.jp/div/nou-rin/pdf/keikaku/keikaku2-4.pdf>
- 10) <https://www.city.futtsu.lg.jp/cmsfiles/contents/0000000/692/R02futsushityoujuuhigaibousikeikaku.pdf>
- 11) [https://prdurbanosichapp1.blob.core.windows.net/common-article/602378efece4651c88c188f6/被害防止計画（市原市\\_R2-R4）【最終版】.pdf](https://prdurbanosichapp1.blob.core.windows.net/common-article/602378efece4651c88c188f6/被害防止計画（市原市_R2-R4）【最終版】.pdf)
- 12) <https://www.city.mobara.chiba.jp/cmsfiles/contents/0000000/127/higaiboushikeikaku.pdf>
- 13) N.Gilbert: Agent-based models, SAGE Publications (2008)

## 付録

付録では、本研究で実装したマルチエージェントシミュレーションのソースコードの概要を記載する。

### ● random\_walk.py

RandomWalker エージェントを定義する。このエージェントには、1ステップに1つのセルをランダムに移動する動作を実装されている。キヨンエージェントと 猟師エージェントの両方が RandomWalker エージェント継承する。

### ● agents.py

キヨンエージェントと 猟師エージェントとキヨンの食料エージェントを定義する。各エージェントの初期化とパラメータの設定、1ステップごとの行動の定義を行う。

### ● scheduler.py



1 ステップごとに条件を満たす各エージェントの数を返す `get_type_count` 関数を定義する。例えば、捕獲されたキョンの数を数えるとき、捕獲した猟師に捕獲フラグを持たせてカウントすることができる。

- `model.py`

初期エージェント数などのパラメータを設定し、エージェントの生成を行う。指定されたステップ数を繰り返したのち、シミュレーションの結果を CSV ファイルに書き出す。

- `server.py`

可視化サーバーのタイトルやエージェントの可視化やグラフ生成などの設定を行う。また、サーバー起動時のポート番号を設定する。

- `run.py`

```mesa runserver``` コマンドにて、モデル可視化サーバーを起動する。 <http://127.0.0.1:8522/> にアクセスすることでローカル環境のブラウザでシミュレーションを実施できる。