

# クマ被害軽減と生物保全のための最適土地利用政策

吉田 惇<sup>1</sup>・井元 智子<sup>2</sup>・河野 達仁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北大学大学院情報科学研究科 博士研究員 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: j-yoshida@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 東北大学大学院農学研究科 准教授 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

E-mail: t-imoto@tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東北大学大学院情報科学研究科 教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: kono@plan.civil.tohoku.ac.jp

日本各地でクマによる農作物被害や人身被害が増加している(秋田県, 宮城県, 新潟県など)。本研究は, 生物保全とクマ被害軽減を同時に考慮した社会的に望ましい土地利用のあり方を理論的に分析する。具体的には, (a)生態系サービス, (b)農作物被害, (c)農地におけるクマ遭遇リスク(人身被害, 恐怖感)の外部性を同時に考慮し, ブナ科樹木の本数および住宅地と農地それぞれの最適総土地面積条件を導出する。分析により, クマが住宅地に侵入しない場合は, 市場均衡で決まる総住宅地面積は社会的最適と一致すること, 最適総農地面積は, 農地拡大による生態系サービスの質の低下とクマ被害の減少のトレードオフに依存して, 市場均衡より大きい場合も小さい場合もあることを明らかにする。各外部性が最適政策へ与える影響についても整理する。

**Key words** : *Urban economics model, Land use, Ecosystem services, Damage by bears, Labor transitions*

## 1. はじめに

近年, クマが農地や住宅地へ侵入し, 農作物被害や人身被害が増加している。農水省<sup>1)</sup>によれば, 農作物被害はシカやイノシシに比べて少なく, 野生鳥獣被害全体の1~3%程度である。しかしながら, クマは人と遭遇した際に痛ましい事故となる可能性が他の動物と比べて高い。この問題に対し, 多くの自治体で駆除やクマの出没情報マップを用いた市民への注意喚起が行われている(例: 仙台市, 札幌市)。

一方で, クマは貴重な生物であり, 中でもツキノワグマ(以下, クマ)は国際自然保護連合(IUCN)のレッドリスト<sup>2)</sup>で危急種に分類されている。そのため, 人身および農作物被害を軽減し, 同時にクマを保全することが望ましい。そのためには, 人間と動物の住み分けを促すように住宅地, 農地, 森林の土地利用を調整する必要がある。

クマが人里に出没する原因は生息環境と自然現象による2つの要因が指摘されている<sup>3)</sup>。生息環境による要因として, 農業から都市部主体の産業への労働移動による里山の荒廃や耕作放棄が進み, 人と出会

う危険が低下したことによって, クマの生息適地が都市側へ拡大していることが指摘されている<sup>4)</sup>。人里周辺は果樹や圃場, 家畜, 生ゴミ等のクマのエサとなり得る対象が集中的に存在しており, クマにとって採食に適している地域である。自然現象の大きな要因として, ブナ科樹木の豊作凶作の影響が明らかにされている<sup>5)6)</sup>。凶作時には, 行動範囲を広げ, エサを探して都市部へ来ることがある<sup>7)8)</sup>。耕作放棄により, 凶作時であっても容易にエサを代替できるようになった。

人間と動物の住み分けを促すためには, 農業とその他産業の適切な労働分配と健全な採餌環境の確保(ブナ科樹木を増やし, 豊作凶作を考慮した平均的な採餌可能量の増加)が必要である。本研究では, 以上の出没要因を踏まえ, i) ブナ科樹木の最適本数, ii) 住宅地と農地の境界規制, iii) 農地と森林の境界規制の最適条件を導出する。ii)とiii)の政策は, 住宅地および農地の総土地面積の調整に加えて, 農業とその他の産業の従業人口調整の役割をもつ。

クマ被害に関しては, 主として生態学および農学の分野でクマの行動パターンに着目した研究が行われている。有本ら<sup>4)</sup>はGPS首輪を用いて自然地域と

集落における食物資源の分布とクマの行動の関係を調査した。その結果、集落周辺に自然地域と異なった状態で特異的に食物資源が豊富である場合、集落周辺に出没することを示した。出口ら<sup>9)</sup>は、作物成熟度とクマ行動の関係を明らかにした。しかしながら、都市、農地、クマ生息地といった土地利用全体を考慮した分析ではない。

経済学分野では、生態系保全のための都市の総面積規制に関する研究が行われてきた（例、Walker<sup>10)</sup>、Eppink et al.<sup>11)</sup>）。Eichner and Pethig<sup>12)</sup>は生物ゾーンと都市ゾーンを統合した 2 ゾーンモデルを開発し、それをを用いて最適な都市の総面積は市場均衡よりも小さいことを示した。Yoshida and Kono<sup>13)</sup>は動物被害規模の空間的な異質性考慮するために、連続空間を考慮できる都市経済学モデルを利用して自然生態系の保全と動物被害軽減のための望ましい土地利用の在り方を示した。しかし、これらの研究では農業と工業の労働移動が考慮されていないため、耕作放棄地の増加に伴う獣被害の増加に対して社会的に望ましい農地および森林管理の在り方について言及できない。農業とその他産業の労働移動と土地利用を考慮した先駆的な都市経済学モデルとしてTakuma and Sasaki<sup>14)</sup>がある。

本研究では、Takuma and Sasaki<sup>14)</sup>モデルに森林と森林に存在する生物、動物被害を加え、農業と合成財生産業の労働移動、生物個体数を内生的に扱う。単一中心閉鎖都市に森林が隣接している世界を考える。都市エリアは住宅地と農地で構成され、住宅地には合成財生産企業で働く労働者が、農地には農家が居住する。具体的な分析のために、農地にクマが侵入し、農作物被害や人身被害を引き起こす場合を取り扱う。住宅地にクマが侵入する場合も考察する。

生物モデルはEichner and Pethig<sup>12)</sup>やYoshida and Kono<sup>13)</sup>と同様に、種の存続を目的とした子どもの純増加数の最大化行動をモデル化する。より多くの子どもを産むためには、エサが必要であり、エサを求めて行動圏を拡大する。その一方で、農地に侵入した場合は人に駆除される危険を感じている。クマは森林エリアでは、主としてブナ科樹木の堅果類を食べる。大井<sup>15)</sup>によれば、クマと食物取得に関する競合の候補となるニホンザルの間で干渉型食物競争は起きにくい。そこで、本研究ではクマとブナ科樹木の堅果の捕食被捕食関係を考え、動物の個体数ダイナミクスを構築し、定常状態を分析する。

本研究では、次の3つの外部性、(a)生態系サービスの質、(b)農作物被害、(c)農地におけるクマ遭遇リスク（人身被害や遭遇するかもしれない恐怖感）を

同時に考慮して最適政策を分析した。分析の結果、i) ブナ本数は、ブナ追加による生態系サービスの質の改善とそれに伴うクマ増加の外部性がブナ調整費用と一致するように調整すべきであること、ii) 外部性(a), (b), (c)がある場合であっても、住宅エリアにクマが侵入しない場合は、市場均衡で定まる住宅地の総土地面積は社会的最適と一致すること、iii) 最適な農地の総面積（農業人口）は市場均衡よりも大きくすべき場合も小さくすべき場合もあることが明らかになった。その理由は、農地拡大による生態系サービスの質の低下とクマ被害の減少のトレードオフがあるからである。外部性(a), (b), (c)がそれぞれ最適政策に与える影響についても整理した。

本研究のモデルは、2017年以降、政府・与党で検討されている森林整備の財源を賄うための森林環境税の最適値の導出にも利用できる。実際の森林環境税と同様に、森林密度の最適調整にかかる費用を住民からの一括税として徴収するように設定した。したがって、対象地域を決めて数値計算等を行うことで、本モデルのフレームワークの下での森林環境税の社会的最適値を導出することができる。

本論文は、次の構成となっている。2章では、生物モデルと都市経済学モデルを結合させた新しいモデルを示す。3章では、3つの土地利用政策の望ましい在り方を導出する。4章では結論を述べる。

## 2. モデル

### (1) 住宅地、農地、森林

図-1のように、森林エリアが隣接する幅 1 の線形単一中心閉鎖都市を考える。 $x = 0$  の点は中心業務地区 (CBD),  $x \in [0, Z^R]$  は住宅地,  $x \in [Z^R, Z^A]$  は農地,  $x \in [Z^A, \bar{Z}^F]$  は森林で構成される。住宅地ではデベロッパーがマンション等の住宅施設を建設する。農地では農家が一軒家を所有して居住する。総人口  $\bar{N}_h$  のうち、 $N_h^R$  人は住宅地に住み、CBD へ通勤して合成財（農業財と住宅の敷地面積以外の財、ニューメーブルとする）を生産する。 $N_h^A$  人は農地に住み、農業財を生産する。地代収入分配による立地の歪みを分析から取り除くために、土地の公的保有を仮定する。

森林エリアには  $\bar{i}$  種の生物が生息している。生物個体数を  $\mathbf{N} = \{N_1, \dots, N_{\bar{i}}\} \in \mathbb{R}_+^{\bar{i}}$  とする。簡単化のため同一種の生物は同質と仮定する。クマ被害に着目し、クマは他の生物と食物取得に関して競合しないことから、本研究ではブナとクマの捕食被捕食関係に焦点を当てる ( $\bar{i} = 2$ )。森林エリアではブナ科樹

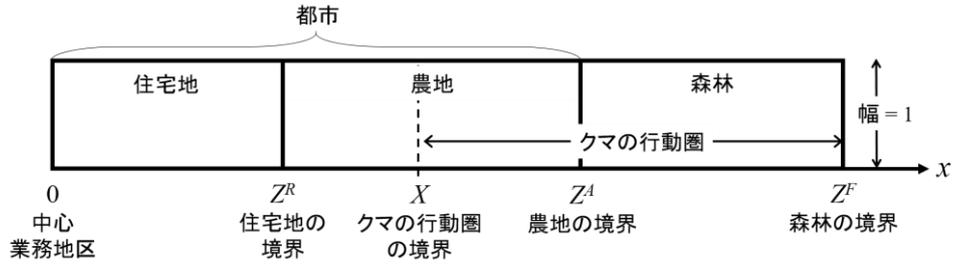


図-1 単一中心都市+森林

木が存在し、その堅実を食べるクマが生息している。クマはエサを求めて農地エリアに侵入する一方で、農家に遭遇し駆除される危険を感じている。農業財消費の限界便益と駆除される限界費用が一致する図-1の点  $X$  まで侵入する。

本論文を通して上付きの添え字  $j$  はエリアの名前を ( $j = R$  は住宅地,  $j = A$  は農地,  $j = F$  は森林), 下付きの添え字  $i$  は行動主体の名前を ( $i = h$  は人間,  $i = 1$  はブナ,  $i = 2$  はクマ), 上付きのバーは外生変数を表す。

## (2) 企業

合成財の生産要素が労働のみであるとし、生産関数は  $F_m(N_h^R) = \omega N_h^R$  と特定化する ( $\omega$  はパラメータ)。合成財がニューメーラールであることを踏まえると、利潤関数は  $\pi_m = \omega N_h^R - w N_h^R$  である。利潤最大化の一階条件は、

$$\omega - w = 0. \quad (1)$$

デベロッパーは地主に底地の地代  $R(x)$  を払ってマンションを建てる。デベロッパーはマンションの高さ  $h(x)$  を決める。利潤関数は  $\pi_d = r^R(x)h(x) - C(h(x)) - R(x)$  である。利潤最大化の一階条件は、

$$r^R(x) - C'(h(x)) = 0. \quad (2)$$

完全競争を仮定すると利潤ゼロ条件から、

$$R(x) = r^R(x)h(x) - C(h(x)). \quad (3)$$

## (3) 人間の行動

Takuma and Sasaki<sup>14)</sup> や宅間・安藤<sup>16)</sup> と同様に同質な選好をもつ都市住民を考える。都市住民は住宅の床面積の消費  $f^j(x)$ , 農業財の消費  $a^j(x)$ , これらの財以外の合成財の消費  $m^j(x)$  から効用を得る。一方で、動物が侵入してきた場合は遭遇する危険を感じ、負の効用を得る。都市住民は、生態系サービ

スの恩恵を受けている。効用関数 (合成財生産労働者ならば  $j = R$ , 農家ならば  $j = A$ ) を以下の準線形効用関数で表す。

$$v^j(x) = U(a^j(x), f^j(x)) + m^j(x) - M^j(x) + E(\mathbf{N}) \quad (4)$$

ここで、 $M^j(x)$  はゾーン  $j$  の地点  $x$  におけるクマに遭遇するかもしれない恐怖感を、 $E(\mathbf{N})$  はブナの本数およびクマの個体数の豊富さで決まる生態系サービスの質を表す。生態系サービスの質は、Eichner and Pethig<sup>12)</sup> や Yoshida and Kono<sup>13)</sup> と同様に生物個体数が豊富であるほど高いとする。農業財消費の限界効用は正、限界効用逓減とする。理論分析の簡単化のため、住宅の床面積を場所によらず同一とし、1 に基準化する ( $f^j(x) = \bar{f}^j = 1$ )。したがって、住宅地の土地供給条件から、各地点の人口密度はマンションの高さ  $h(x)$  で表される。

### a) 合成財生産労働者の行動

住宅地に居住する労働者は、都心に通勤して合成財を生産し、賃金  $w$  を得る。所得制約は、

$$w + \Omega - \Psi = m^R(x) + p_a a^R(x) + r^R(x) \bar{f}^R + \tau^R(x). \quad (5)$$

ここで、 $\Omega$  は地代収入、 $p_a$  は農業財の価格、 $r^R(x)$  は地点  $x$  のマンションの地代、 $\tau^R(x)$  は通勤費 (都心から離れるほど高い)、 $\Psi$  は世帯あたりの森林環境税 (ブナ科管理の費用として住民に一括固定課税する)。

デベロッパー企業はマンションを最も高い地代を付ける人に貸す。住民は同質であるため、均衡では居住者の効用水準は場所によらず一定となる。したがって、市場均衡の地代は均衡時の効用水準  $V$  が与えられたときの付け値地代と一致する。労働者の付け値地代最大化は、

$$r^R(x) = \max_{m^R(x), a^R(x)} \frac{w - \tau^R(x) + \Omega - \Psi - m^R(x) - p_a a^R(x)}{\bar{f}^R} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } V = U(a^R(x)) + m^R(x) + E(\mathbf{N}).$$

制約式を合成財  $m^R(x)$  について解くと、 $m^R(x) = V - U(a^R(x)) - E(\mathbf{N})$  を得る。これを目的関数に代入し、農業財  $a^R(x)$  に関する一階条件が以下のように得られる。

$$-p_a + U'(a^R(x)) = 0. \quad (7)$$

すなわち、労働者の農業財消費量  $a^R(x)$  は農業財価格  $p_a$  に依存して決まる。そのため、場所によらず一定の値  $a^R(x) = a^R(p_a)$  をとる。これを合成財  $m^R(x)$  に代入して、 $m^R(x) = V - U(a^R(p_a)) - E(\mathbf{N})$ 。この 2 つの変数と  $\bar{f}^R = 1$  を目的関数に代入すると、付け値地代が次のように得られる。

$$\begin{aligned} r^R(x) &= w - \tau^R(x) + \Omega - K \\ &\quad - \left[ V - U(a^R(p_a)) - E(\mathbf{N}) \right] - p_a a^R(p_a) \quad (8) \\ &= r^R(V, E(\mathbf{N}), \Omega - K, p_a) \end{aligned}$$

#### b) 農家の行動

各農家の生産関数は  $F_a(f_a(x))$ 。ここで、 $f_a(x)$  は農家 1 世帯が所有する農地面積である。農家 1 世帯あたりに管理できる農地面積に限りがあることから、各世帯が同じ農地面積を所有していると仮定する。すなわち、 $f_a(x) = \bar{f}_a$  が成立する。したがって、農地の土地供給条件より、農家の人口密度は  $n^A(x) = 1/(\bar{f}^A + \bar{f}_a) = \bar{n}^A$  となり、場所によらず一定の値をとる。

農家は生産した農業財のうち、クマ被害によって  $D(x)$  失い、自身で  $a^A(x)$  だけ消費する。残り  $l(x) = F_a - a^A(x) - D(x)$  を CBD にある市場に出荷し、収入を得る。農家 1 世帯の所得制約は、

$$(p_a - \tau^A(x))l(x) + \Omega - \Psi = m^A(x) + r^A(x)(\bar{f}^A + \bar{f}_a). \quad (9)$$

$\tau^A(x)$  は農作物を CBD まで輸送する費用を表す。農家の市場均衡時の効用水準も場所によらず  $V$  であるので、市場均衡の農地の地代は、農家の付け値地代に一致する。農家の付け値地代は以下のように表される。

$$r^A(x) = \max_{m^A(x), a^A(x)} \frac{(p_a - \tau^A(x))l(x) + \Omega - \Psi - m^A(x)}{\bar{f}^A + \bar{f}_a} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } V = U(a^A(x)) + m^A(x) - M^A(x) + E(\mathbf{N})$$

$$l(x) = F_a(\bar{f}_a) - a^A(x) - D(x)$$

(6)と同様に制約式を目的関数へ代入し、農業財  $a^A(x)$  に関する一階条件を求めると、

$$-(p_a - \tau^A(x)) + U'(a^A(x)) = 0. \quad (11)$$

(11)から、農家の農業財消費量  $a^A(x)$  は農業財価格  $p_a$  と輸送費  $\tau^A(x)$  に依存して決まるため、場所に応じて消費量が異なる。すなわち、 $a^A(x) = a^A(p_a, \tau^A(x))$  となる。合成財消費量  $m^A(x)$  に代入して、さらに付け値地代に代入すると、

$$\begin{aligned} &(p_a - \tau^A(x)) [F_a(\bar{f}_a) - a^A(p_a; \tau^A(x)) - D(x)] \\ r^A(x) &= \frac{+ \Omega - \Psi - (V - U(a^A(p_a; \tau^A(x))) + M^A(x) - E(\mathbf{N}))}{\bar{f}^A + \bar{f}_a} \\ &= r^A(\Omega - \Psi - V - M^A(x) + E(\mathbf{N}), D(x), p_a). \end{aligned} \quad (12)$$

#### (4) 生物モデル

##### a) クマの行動

クマはある一定の期間において、子ぐまの純増加数 (= 出産数 - 駆除される数 - 自然死)  $b$  を最大にするように行動する。子ぐまを増やすためにはエサの摂取が必要であるため、より多くのエサを求めて行動範囲を拡大する。以上の行動を生物学の基本モデルであるロトカボルテラモデルを用いて定式化すると、子ぐまの純増加数  $b$  は以下のように表される。

$$b = \alpha(Q^F + Q^A) - K - \gamma \quad (13)$$

ここで、 $Q^F$  はある期間内におけるブナの実の消費量、 $Q^A$  は農業財の消費量、 $K$  は農地に侵入して駆除される数を表す。 $\alpha$  と  $\gamma$  はパラメータで、それぞれオスとメスの出会い確率を一定としたときのエサ消費量あたりの出産効率と自然死する数を表す。

クマは森林エリアで取得可能なブナの実を食べ尽くし、それでも足りないため農地に侵入し、農作物被害を引き起こす。ある期間で消費できる農業財は、クマの行動範囲の境界  $X \in (Z^R, Z^A]$  と各地点の消費量に依存する。

$$Q^A = \int_X^{Z^A} q(x) dx. \quad (14)$$

$q(x)$  はクマの農地の地点  $x$  における農業財の消費量を表す。

クマは農地に侵入するとエサを得る一方で、人間に駆除される危険を伴う。駆除される確率は農地での滞在時間に依存する。農地の地点  $x$  にクマが滞在

する時間は、地点  $x$  で消費する農業財  $q(x)$  に依存する。人間に駆除される数  $K$  は、

$$K = \int_X^A k(q(x))dx. \quad (15)$$

$k' > 0$ ,  $k'' > 0$  (採食量が増えて滞在時間が長くなるほど駆除されるリスクが高まる) とする。クマはある期間 (例えば、1 年間のうち睡眠や繁殖などに費やす時間を除いたエサ取得に使用できる時間) を自然地域と農地でエサの取得に費やす。時間制約は、

$$\bar{T} = \bar{y}^F Q^F + \bar{y}^A Q^A. \quad (16)$$

$\bar{y}^j$  はエサ摂取量あたりにかかる食事の時間を表す。クマは時間制約のもとで、ネットの子ぐまの数を最大化するために行動範囲  $X$  をきめる。

$$\begin{aligned} \max_{Q, K, X, q} \quad & \alpha(Q^F + Q^A) - K - \gamma \quad (17) \\ \text{s.t.} \quad & (14), (15), (16) \end{aligned}$$

(14)–(16)を目的関数に代入して、 $q(x)$  の一階条件を求めると、

$$\alpha - \alpha \frac{\bar{y}^A}{\bar{y}^F} - k'(q(x)) = 0. \quad (18)$$

$X$  の一階条件は

$$\alpha \frac{\bar{y}^A}{\bar{y}^F} q(X) - \alpha q(X) + k(q(X)) = 0. \quad (19)$$

上の 2 つの一階条件は、いずれもエサ消費の限界便益 (限界的に増加する子ぐまの数) と限界費用 (駆除される危険の限界的な増加) が一致するところで値が決まることを表している。

#### b) ブナ

森林エリアにおけるブナの木の本数は、

$$N_1 = \int_{Z^A}^{Z^F} \bar{n}_1(x)dx + A. \quad (20)$$

$\bar{n}_1(x)$  は森林エリアの地点  $x$  で自生しているブナの木の数である。  $A$  は政策によって植えるまたは伐採するブナの木の数を表す。クマが採餌可能なブナの実の生産量はブナの木の木の本数に依存するので、森林エリア全体における採餌可能なブナの実は  $F_1(N_1)$  と表される ( $F_1'(N_1) > 0$ ,  $F_1''(N_1) < 0$ )。

#### c) クマ個体数の定常解

本研究では定常状態を分析する。定常状態を分析することで、今期の政策がダイナミクスを通じて、

どのような定常状態にたどり着くかを検討できる。 $b$  はある期間に生き残るクマ 1 匹の子ぐまの数を表すため、クマ個体数のダイナミクスは以下のように表すことができる。

$$\frac{dN_2}{dT} = N_2 b = N_2 (\alpha(Q^F + Q^A) - K - \gamma) \quad (21)$$

採餌可能なブナの実の総数はクマ  $N_2$  匹のブナの実の消費量と一致するため、

$$F_1(N_1) = Q^F N_2. \quad (22)$$

この関係式を用いると、

$$\frac{dN_2}{dT} = \alpha_2 F_1(N_1) + \alpha Q^A N_2 - K N_2 - \gamma N_2. \quad (23)$$

定常解は  $dN_2/dT = 0$  より、以下のように表される。

$$N_2 = \frac{\alpha F_1(N_1)}{\gamma + K - \alpha Q^A} \quad (24)$$

#### (5) 市場均衡条件

農家がクマに遭遇する可能性に対する恐怖感は、クマが侵入する回数、すなわちクマの農作物消費量と総個体数に依存する。農地の各地点に住む農家が感じる恐怖感  $M^A(x)$  は以下で表される。

$$M^A(x) = \rho(q(x)N_2) \quad (25)$$

地点  $x$  における農作物被害は、クマが消費する農業財の量と一致する。

$$D(x)\bar{n}^A = q(x)N_2 \quad (26)$$

合成財および農業財の市場均衡条件はそれぞれ次のように表される。

$$F_m(N_h^R) = \int_0^{Z^R} m^R(x)h(x)dx + \int_{Z^R}^{Z^A} m^A(x)\bar{n}^A dx, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \int_{Z^R}^{Z^A} F_a(\bar{f}_a)\bar{n}^A dx &= \int_0^{Z^R} a^R(x)h(x)dx \\ &+ \int_{Z^R}^{Z^A} a^A(x)\bar{n}^A dx + N_2 \int_X^{Z^A} q(x)dx. \end{aligned} \quad (28)$$

総人口条件および合成財生産の労働人口、農業人口の市場均衡条件はそれぞれ、次の式で表される。

$$\bar{N}_h = N_h^R + N_h^A, \quad (29)$$

$$N_h^R = \int_0^{Z^R} h(x)dx, \quad (30)$$

$$N_h^A = \int_{Z^R}^{Z^A} \bar{n}^A dx = \bar{n}^A (Z^A - Z^R). \quad (31)$$

住宅地と農地の境界では、住宅地の地代と農地の地代が一致する。

$$R(Z^R) = r^A(Z^R) \quad (32)$$

農地と自然地域の境界では、農地の地代が森林を農地として開拓する費用  $r^F$  と一致する。

$$r^A(Z^A) = r^F \quad (33)$$

都市の土地の公的保有により、住民一人当たりの地代収入  $\Omega$  は、

$$\Omega = \frac{\int_0^{Z^R} [R(x) - r^F] dx + \int_{Z^R}^{Z^A} [r^A(x) - r^F] dx}{\bar{N}_h}. \quad (34)$$

以上から、この経済生態系システムは 19 の方程式 (1)–(3), (14), (15), (18)–(20), (24)–(34) に対して、未知の内生変数 13 個  $\{w, p_a, V, \Omega, N_h^R, N_h^A, N_1, N_2, X, Z^R, Z^A, Q^A, K\}$ 、内生関数 5 個  $\{h(x), M^A(x), R(x), D(x), q(x)\}$  で構成される。ワルラス法則より、方程式は 1 つ除外される。

### 3. 土地利用政策

#### (1) 社会厚生関数

都市政府は動物行動および都市住民の経済行動を所与として、社会厚生を最大化するために、i) ブナ科樹木の本数  $A$ 、ii) 住宅地と農地の境界  $Z^R$ 、iii) 農地と自然地域の境界  $Z^A$  を調整する。政策 i) はブナの本数を増加させ、クマの採餌可能なブナの実の量を増加する役割をもつ。政策 ii) および iii) は住宅地、農地、森林の総土地面積の調整と、農業と合成財産の従業人口割合を調整する役割をもつ。これらの政策は動物行動および経済行動を変化させるため、最適に調整することで、農作物および人身被害の軽減と動物の個体数の保全に効果がある。

社会厚生関数  $W$  は、都市住民の効用の総和で表す。

$$W = \bar{N}_h V \quad (35)$$

森林密度の調整費用は森林環境税（一括税） $\Psi$  で徴収する。

$$\Psi = \frac{p_1 A}{\bar{N}_h} \quad (36)$$

$p_1$  はブナを 1 本植えるまたは伐採する費用を表す。

#### (2) ラグランジュ関数

各政策の最適条件を以下のラグランジュ関数を用いて導出する。(18) から  $q(x)$  は地点  $x$  に依存しないパラメータによって決まるため、 $q(x) = \bar{q}$ 。したがって、各地点で農作物被害の程度は等しくなるため、 $D(x) = D$  を得る。また、クマが各地点で滞在する時間も場所によらず一定であるため、 $M^A(x) = M^A = \rho(N_2)$ 。ワルラス法則より合成財産生産量の市場均衡条件(27)を外す。以上を考慮すると、ラグランジュ関数は以下のように表される。

$$L = \bar{N}_h V + \mu \left[ \int_0^{Z^R} [r^R(\Omega - \Psi - V + E(\mathbf{N}), p_a) h(x) - C(h(r^R)) - r^F] dx + \int_{Z^R}^X [r_n^A(\Omega - \Psi - V + E(\mathbf{N}), p_a) - r^F] dx + \int_X^{Z^A} [r_b^A(\Omega - \Psi - V - \rho(N_2) + E(\mathbf{N}), D, p_a) - r^F] dx - \bar{N}_h \Omega \right] + \chi [\bar{N}_h \Psi - p_1 A] + \theta \left[ \bar{N}_h - \int_0^{Z^R} h(x) dx - \int_{Z^R}^{Z^A} \bar{n}^A dx \right] + \int_0^{Z^R} \theta^R(x) [r^R(\Omega - \Psi - V + E(\mathbf{N}), p_a) - C'(h(x))] dx + \phi [\bar{q}(Z^A - X) - Q^A] + \phi [k(\bar{q})(Z^A - X) - K] + \eta (D - \frac{\bar{q} N_2}{\bar{n}^A}) + S_1 \left[ \int_{Z^A}^{Z^F} \bar{n}_1(x) dx + A - N_1 \right] + S_2 \left[ \frac{\alpha F_1(N_1)}{K + \gamma - \alpha Q^A} - N_2 \right] + \lambda \left[ F_a(Z^A - Z^R) \bar{n}^A - N_2 \bar{q}(Z^A - X) - a^R(p_a) \int_0^{Z^R} h(x) dx - \int_{Z^R}^{Z^A} a^A(p_a - \tau^A(x)) \bar{n}^A dx \right] \quad (37)$$

$\{\mu, \chi, \theta, \theta^R(x), \eta, \phi, \phi, S_1, S_2, \lambda\}$  はラグランジュ乗数である。Appendix A に内生変数、内生関数および政策変数の一階条件を示す。

#### (3) 最適政策

政策 i), ii), iii) の最適条件を導出する。本研究では、次の 3 つの外部性、(a) 生態系サービス、(b) 農作物被害、(c) 農地でのクマ遭遇の恐怖感、を考慮する。

この章では、外部性(a), (b), (c)を同時に考慮した場合の社会的に望ましい土地利用政策のあり方について述べる。各政策の最適条件の導出は Appendix B に示す。その後、各外部性が最適政策へどのように影響しているか個別に述べる。

各政策の最適条件を導出する前に、生物の社会的限界価値を導出する。その理由は、政策によって変化する生物の個体数が社会厚生にどのように影響を与えるかを知る必要があるためである。植物(ブナ)およびクマの社会的限界価値  $S_1, S_2$  はそれぞれ以下の式で表される。

・ブナの社会的限界価値

$$S_1 = \underbrace{\bar{N}_h \frac{\partial E}{\partial N_1}}_{>0 \text{ 生態系サービスの質の改善}} + S_2 \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial F_1} F'_1(N_1)}_{<0 \text{ クマ増加の社会的影響}} \quad (38)$$

・クマの社会的限界価値

$$S_2 = \underbrace{\bar{N}_h \frac{\partial E}{\partial N_2}}_{>0 \text{ (i) 生態系サービスの質の改善}} + \underbrace{\int_X^{Z^A} \frac{\partial r_b^A}{\partial D} dx}_{<0 \text{ (ii) 農作物被害の増加}} + \underbrace{\int_X^{Z^A} \frac{\partial r_b^A}{\partial \rho} \rho' dx}_{<0 \text{ (iii) クマ遭遇の恐怖感の増加}} \quad (39)$$

ブナの社会的限界価値は生態系サービスの質とクマの増加が社会厚生に与える影響で構成されている。クマは 1 匹増加すると生態系サービスの質は改善するが、農作物被害の増加とクマ遭遇の恐怖感が増加する。そのため、それぞれの大きさに応じて社会的限界価値は正も負もとり得る。クマによる農作物被害や恐怖感がない場合は、両生物の社会的限界価値は常に正である。

次は、森林エリアのブナの本数の最適条件を導出する。

・ブナの本数に関する最適条件

$$\underbrace{\bar{N}_h \frac{\partial E}{\partial N_1}}_{>0 \text{ ブナの本数の増加による生態系サービスの質の改善}} + S_2 \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial F_1} F'_1(N_1)}_{>0 \text{ or } <0 \text{ ブナの実の増加} \Rightarrow \text{クマの増加}} = p_1 \quad (40)$$

植樹コスト

ブナの木を 1 単位増加すると生態系サービスの質が改善する。しかし、ブナの実が増加するためクマの個体数が増加する。クマ増加の外部性は、クマの

社会的限界価値  $S_2$  の符号に依存する。価値が負の場合は、負の外部性となる。この外部性がブナを植える限界費用と一致するようにブナの本数を調整することが最適である。均衡時のブナの本数は、ブナの生産関数や生産効率等のパラメータに依存しているため、最適値との乖離は現状の本数が(40)式を満たしているかに基づいて決まる。ブナ生産パラメータに応じて、最適値は現状よりも多い場合も小さい場合もあり得る。

クマが住宅地に侵入していない場合における都市と農地の境界位置の最適条件は以下である。

$$R(Z^R) - r^A(Z^R) = 0 \quad (41)$$

これは、外部性がある場合でも、住宅地にクマが侵入していない場合は、市場均衡で決まる住宅地の総面積は社会的最適と一致することを意味する。その理由は、住宅地と農地の境界が限界的に変化しても農地の途中まで来ているクマの行動には影響を与えないからである。

住宅地にクマが侵入した場合の拡張は以下である。住宅地が拡大し農地が縮小すると、農地で採餌可能な農作物が減る一方で、住宅地で採餌可能なゴミが増える。したがってクマ個体数は増加する場合も減る場合もある。さらにクマの社会的価値の符号は、住宅地に侵入した場合も正負どちらもあり得るので、最適な住宅地の総面積は、市場均衡よりも大きい場合も小さい場合もあり得る。

農地と森林の境界位置の最適条件は次のように得られる。

・農地と森林の境界位置の最適条件

$$r^A(Z^A) - r^F = \underbrace{S_1 n_1(Z^A)}_{>0 \text{ ブナ林の減少} \Rightarrow \text{生態系サービスの損失}} - S_2 \left[ \frac{\partial N_2}{\partial Z^A} + \frac{\partial N_2}{\partial \Lambda} \right], \quad (42)$$

<0 ブナ林の減少 ⇒ クマの減少      >0 農作物被害の増加 ⇒ クマの増加

ただし、

$$\frac{\partial N_2}{\partial \Lambda} \equiv \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial Q} \bar{q}}_{>0 \text{ 農作物被害の増加}} + \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial K} k(\bar{q})}_{<0 \text{ クマと農家の遭遇回数の増加}} > 0. \quad (43)$$

(42)の左辺 = 0 が市場均衡を表すため、最適な総農地面積は市場均衡とは異なる。最適な総農地面積は、外部性(a), (b), (c)の大きさに応じて異なる。

森林を農地として開拓すると、ブナ林が減少するため生態系サービスの質が悪化する ((42)の右辺第 1 項)。また、ブナの本数が減少するため、採餌可能なブナの実が少なくなり、個体数は減少する ((42)の右辺第 2 項)。一方で、農地拡大によってクマはより多くの農作物を消費できるため、個体数は増加する (農地拡大によって駆除されるリスクも増加する。しかし、(18), (19)より、農地に侵入している時点で農作物を消費する限界便益の方が大きいので、(43)の右辺第 1 項 > 右辺第 2 項の関係は常に成立する。つまり、均衡では農作物消費によるクマ増加量は駆除による減少量よりも常に大きい)。以上から、農地拡大に伴いクマの個体数は減少と増加のどちらもあり得る。さらに、クマの社会的限界価値の符号も正負どちらもとり得るので、最適農地面積は均衡農地面積よりも大きい場合も小さい場合もありうる。

**(4) 各外部性が最適政策へ及ぼす影響**

この節では、外部性(a), (b), (c)がそれぞれ政策にどのように影響を与えているかを整理する。個別の外部性のみ存在する場合を分析し、住宅地と農地の総面積については最適値と市場均衡を比較して、ブナ本数については最適本数と自生本数を比較して、それらの大小に各外部性がどのように影響を与えているか明らかにする。

**a) 生態系サービスの影響**

$S_1$  は(38)と同じである。ただし、 $S_2$  は(39)から農作物被害を表す右辺第 2 項と人身被害を表す第 3 項を除いた次の式で表される。

$$S_2 = \underbrace{\bar{N}_h \frac{\partial E}{\partial N_2}}_{\text{生態系サービスの質の増加}} > 0 \quad (44)$$

そのため、 $S_1$  の符号は常に正である。

ブナの本数の最適条件は(40)と同じである。しかし、 $S_2 > 0$  であるため、クマ増加により社会厚生が増加する ((40)の左辺第 2 項が正となる)。したがって、ブナの本数は外部性(a), (b), (c)を同時に考慮した最適よりも多い。ただし、現状の本数をどのくらい修正すべきかについては、ブナの生産関数や生産効率等のパラメータに依存して、増加させる場合も減少させる場合もあり得る。

生態系サービスの外部性が農地の総面積の最適条件(42)に与える影響は、(42)式から農作物被害を表す右辺第 3 項と第 4 項を除いた次の式で表される。

$$r^A(Z^A) - r^F = \underbrace{S_1 n_1(Z^A)}_{\substack{>0 \\ \text{ブナの本数の減少による} \\ \text{生態系サービスの損失}}} - \underbrace{S_2 \frac{\partial N_2}{\partial Z^A}}_{\substack{<0 \\ \text{ブナ林の面積の減少} \\ \Rightarrow \text{クマの減少}}} > 0 \quad (45)$$

(45)から、農地拡大により生態系サービスの質の低下が起きるため、最適農地面積 < 均衡農地面積であることが言える。つまり、最適農地政策において、生態系サービスの外部性は農業人口を市場均衡よりも減らす方向に働く。

**b) 農作物被害の影響**

農作物被害が各生物の社会的限界価値へ与える影響は次の式で表され、いずれも符号は負である。

$$S_1 = S_2 \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial F_1} F'_1(N_1)}_{\text{クマ増加の社会的影響}} < 0 \quad (46)$$

$$S_2 = \underbrace{\int_X^{Z^A} \frac{\partial r_b^A}{\partial D} dx}_{\text{農作物被害の増加}} < 0 \quad (47)$$

農作物被害が森林密度の最適条件(40)に与える影響は、(40)から生態系サービスを表す左辺第 1 項を除いた次の式で表される。

$$S_2 \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial F_1} F'_1(N_1)}_{\substack{<0 \\ \text{ブナの実の増加} \\ \Rightarrow \text{クマの増加}}} - p_1 < 0 \quad (48)$$

(47)より  $S_2 < 0$  であるため、クマの増加は社会厚生に負の影響を与える。したがって、最適森林政策において、農作物被害の外部性はブナ科樹木を減らす方向に働く。

農作物被害が農地と森林の境界位置の最適条件(42)に与える影響は、(42)式から生態系サービスを表す右辺第 1 項を除いた次の式で表される。

$$r^A(Z^A) - r^F = -S_2 \left[ \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial Z^A}}_{\substack{>0 \\ \text{ブナ林の減少} \\ \Rightarrow \text{クマの減少}}} + \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial \Lambda}}_{\substack{>0 \\ \text{農作物被害の増加} \\ \Rightarrow \text{クマの増加}}} \right] \quad (49)$$

$S_2 < 0$  より、クマの増加は社会厚生を低下させる。 $S_2$  の符号が一意に決まるものの、農地拡大に伴う森林エリアの減少によるクマの減少とクマの農作物消

表-1 外部性が最適政策に与える影響

	個別の外部性のみ存在			総体 (a) + (b) + (c)
	(a) 生態系サービス	(b) 農作物被害	(c) クマ遭遇の恐怖	
ブナの価値 $S_1$	+	-	-	+ or -
クマの価値 $S_2$	+	-	-	+ or -
総住宅地面積	市場均衡 = 最適	市場均衡 = 最適	市場均衡 = 最適	市場均衡 = 最適
総農地面積	市場均衡 > 最適	市場均衡 < (>) 最適	市場均衡 < 最適	市場均衡 $\leq$ 最適
理由	生物減少による生態系サービスの質の低下	採食可能な農作物の増加によるクマの増加数 > (<) ブナ減少によるクマの減少数	クマ減少によるクマ遭遇リスクの低下	個別外部性の効果と生物の社会的価値の符号に応じる
ブナ本数	自生本数 $\leq$ 最適	ゼロ	ゼロ	自生本数 $\leq$ 最適
理由	自生するブナの本数と最適条件(40)の関係に応じる.	クマ増加による農作物被害の増加	クマ増加によるクマ遭遇リスクの増加	自生するブナの本数, 個別外部性の効果, 生物の社会的価値の符号に応じる

注：“ $\leq$ ” は < と > どちらもあり得ることを示す.

費量の増加によるクマの増加の両方の効果があるため、最適農地面積  $\leq$  均衡農地面積である。

c) クマ遭遇の恐怖感

クマ遭遇の恐怖感がブナ社会的限界価値へ与える影響は(46)、クマの社会的限界価値に与える影響は(50)で表され、いずれも負である。

$$S_2 = \int_X^{Z^A} \underbrace{\frac{\partial r_b^A}{\partial \rho}}_{\text{農家の恐怖感の増加}} \rho' dx < 0 \quad (50)$$

クマ遭遇の恐怖感が森林密度の最適条件(40)に与える影響は、外部性(b)農作物被害の場合と同様に(48)で表される。

クマ遭遇の恐怖感が農地と森林の境界位置の最適条件に与える影響は、(42)から生態系サービスを表す第 1 項と農作物被害を表す右辺第 3 項を除いた次の式で表される。

$$r^A(Z^A) - r^F = - S_2 \underbrace{\frac{\partial N_2}{\partial Z^A}}_{\substack{>0 \\ \text{ブナ林の減少} \\ \Rightarrow \text{クマの減少}}} < 0 \quad (51)$$

$S_2 < 0$  より、農地拡大によるクマ減少によって社会厚生は増加する。右辺  $< 0$  であるため、最適農地面積  $>$  均衡農地面積が得られる。つまり、最適農地政策において、クマ遭遇の恐怖感は農業人口を市場均衡よりも増やし、森林を縮小する方向に働く。

以上の結果を表-1 にまとめる。生物の社会的限界

価値の符号と個別の外部性が各政策へ与える影響、全ての外部性が存在する場合の最適政策を示す。

4. 結論

本研究では、(a)生態系サービス、(b)農作物被害、(c)クマ遭遇による人的被害や恐怖感の異なる 3 つの外部性を同時に考慮し、社会的に望ましい i) 広葉樹林の本数, ii) 住宅地の総土地面積, iii) 農地の総土地面積の在り方

分析の結果、i) ブナは、ブナ追加による生態系サービスの質の改を、連続空間モデルを用いて明らかにした。善とそれに伴うクマ増加の外部性がブナ調整費用と一致するように本数を調整すべきであること、ii) 外部性(a), (b), (c)がある場合でも、住宅地にクマが侵入していない場合は、最適な住宅地面積は市場均衡と一致すること、iii) クマ被害の負の外部性と生態系サービスの正の外部性の大きさに応じて、最適農地面積は均衡農地面積よりも大きい場合も小さい場合もありうることを明らかにした。

本モデルは 2 種の食物連鎖を考慮しており、クマ以外にもシカなどの草食動物被害にも適用可能である。その際は、事例に合わせて外部性(a), (b), (c)を適宜考慮すればよい。

本研究で得られた条件から、外部性の有無に応じて現状の土地利用をどのように修正すべきか明らかにした。今後の課題は、本研究の結果を実際の政策に反映することである。定量的な政策設計のために、

各都市で生産関数やブナの成長関数，都市規模が大きく異なることを考慮し．現在の土地利用および森林環境税を具体的にどの程度修正すべきか定量分析を今後行うことが必要である．

参考文献

- 1) 農水省：特定鳥獣保護・管理計画作成のためのガイドライン（クマ類編），2017．（2018. 7. 11 アクセス）  
[http://www.env.go.jp/nature/choju/plan/plan3-2c/H28\\_ku\\_maguideline.pdf](http://www.env.go.jp/nature/choju/plan/plan3-2c/H28_ku_maguideline.pdf)
- 2) The IUCN Red List of Threatened Species: Ursus thibetanus. (2018. 7. 11 アクセス)  
<http://www.iucnredlist.org/details/22824/0>
- 3) 環境省：ツキノワグマの大量出没に関する調査報告書，2005.
- 4) 有本 勲，岡村 寛，小池 伸介，山崎 晃司，梶 光一：集落周辺に生息するツキノワグマの行動と利用環境，哺乳類科学 54 巻 1 号，pp.19-31，2014.
- 5) Oka, T., Miura, S., Masaki, T., Suzuki, W., Osumi, K., and Saitoh, S.: Relationship between changes in beechnut production and Asiatic black bears in northern Japan. *Journal of wildlife management*, 68(4), pp.979-986, 2004
- 6) 水谷 瑞希，中島 春樹，小谷 二郎，野上 達也，多田 雅充：北陸地域におけるブナ科樹木の豊凶とクマ大量出没との関係，日本森林学会誌，95 巻 1 号，pp. 76-82，2013.
- 7) Arimoto, I., Goto, Y., Nagai, C., and Furubayashi, K.: Autumn food habits and home-range elevations of Japanese black bears in relation to hard mast production in the Beech family in Toyama Prefecture. *Mammal Study* 36(4), pp.199-208, 2011.
- 8) Kozakai, C., Yamazaki, K., Nemoto, Y., Nakajima, A., Koike, S., Abe, S., Masaki, T., and Kaji, K.: Effect of mast production on home range use of Japanese black bears. *Journal of Wildlife Management*, 75(4), pp.867-875, 2011.
- 9) 出口善隆，佐藤衆介，菅原和夫：飼料用トウモロコシ圃場におけるツキノワグマ（*Ursus thibetanus*）の行動および被害の実態，日本畜産学会報，74 巻 3 号 pp.383-388，2003.
- 10) Walker, R.: Urban sprawl and natural areas encroachment: linking land cover change and economic development in the Florida Everglades. *Ecological Economics*, 37(3), pp.357-369, 2001.
- 11) Eppink, F. V., J. van den Bergh, Rietveld, P.: Modelling biodiversity and land use: urban growth, agriculture and nature in a wetland area. *Ecological Economics*, 51(3), pp.201-216, 2004.

- 12) Eichner, T., and Pethig, R.: Economic land use, ecosystem services and microfounded species dynamics. *Journal of Environmental Economics and Management*, 52(3), pp.707-720, 2006.
- 13) Yoshida, J., and Kono, T.: Land use policies for biodiversity. Social Sciences Research Network (SSRN) Working Paper. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2998463>, 2017.
- 14) Takuma, F., and Sasaki, K.: Spatial structure of a metropolitan area with an agricultural hinterland. *Journal of Urban Economics*, 48(2), pp.307-320, 2000.
- 15) 大井徹：採食行動の比較からツキノワグマとニホンザルの種間関係を考える，霊長類研究，29，2013，pp.123-135，2013.
- 16) 宅間文夫，安藤朝夫：農家の行動を考慮した都市圏経済モデルによる農産物自由化の分析．土木学会論文集(632)，pp.51-62，1999.

Appendix A. ラグランジュ関数(37)の一階条件

ラグランジュ関数(37)を制約(34)のラグランジュ乗数  $\mu$  で割り，単位を金額に直したラグランジュ関数から以下の一階条件を導出する．

$$\frac{\partial L}{\partial V} = \frac{\bar{N}_h}{\mu} - \int_0^{Z^R} h(x)dx - \int_{Z^R}^{Z^A} \bar{n}^A dx + \int_0^{Z^R} \theta^R(x)dx = 0 \quad (A1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Omega} = -\bar{N}_h + \int_0^{Z^R} \frac{\partial r^R}{\partial \Omega} [h(x) + \theta^R(x)]dx + \int_{Z^R}^{Z^A} \frac{\partial r^A}{\partial \Omega} dx = 0 \quad (A2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Psi} = \chi \bar{N}_h - \int_0^{Z^R} [h(x) + \theta^R(x)]dx - \bar{n}^A (Z^A - Z^R) = 0 \quad (A3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial h(x)} = -\theta^R(x)C'' - \theta - \lambda a^R(p_a) = 0 \quad (A4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial D} = \eta + \int_X^{Z^A} \frac{\partial r_b^A}{\partial D} dx = 0 \quad (A5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial N_2} = -S_2 + \frac{\partial E}{\partial N_2} \left( \int_0^{Z^R} \frac{\partial r^R}{\partial E} h(x)dx + \int_{Z^R}^{Z^A} \frac{\partial r^A}{\partial E} dx \right) + \int_X^{Z^A} \frac{\partial r_b^A}{\partial \rho} \rho' dx - \eta \frac{\bar{q}}{\bar{n}^A} + \frac{\partial E}{\partial N_2} \frac{\partial r^R}{\partial E} \int_0^{Z^R} \theta^R(x)dx = 0 \quad (A6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial N_1} = -S_1 + \frac{\partial E}{\partial N_1} \left( \int_0^{Z^R} \frac{\partial r^R}{\partial E} h(x) + \int_{Z^R}^{Z^A} \frac{\partial r^A}{\partial E} dx \right) + \frac{\partial E}{\partial N_1} \frac{\partial r^R}{\partial E} \int_0^{Z^R} \theta^R(x)dx + S_2 \frac{\partial N_2}{\partial N_1} = 0 \quad (A7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial A} = S_1 - \chi p_1 = 0 \quad (A8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Z^R} = r^R(Z^R)h(Z^R) - C(h(Z^R)) - r^A(Z^R) - \theta h(Z^R) + \theta \bar{n}^A - \lambda F_a \bar{n}^A + \lambda a^A(Z^R) \bar{n}^A - \lambda a^R(p_a)h(Z^R) = 0 \quad (A9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial Z^A} &= r^A(Z^A) - r^F - S_1 \bar{n}_1(Z^A) + S_2 \frac{\partial N_2}{\partial Z^A} \\ &\quad + \phi \bar{q} + \phi k(\bar{q}) - \theta \bar{n}^A + \lambda F_a \bar{n}^A - \lambda N_2 \bar{q} \\ &\quad - \lambda a^A(Z^A) \bar{n}^A = 0 \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_a} &= \int_0^{Z^R} [h(x) + \theta^R(x)] \frac{\partial r^R}{\partial p_a} dx + \int_{Z^R}^{Z^A} \frac{\partial r^A}{\partial p_a} dx \\ &\quad - \lambda a^{R'}(p_a) \int_0^{Z^R} h(x) dx - \lambda \bar{n}^A \int_{Z^R}^{Z^A} a^{A'}(p_a) dx = 0 \end{aligned} \quad (\text{A11})$$

$$\frac{\partial L}{\partial K} = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial K} - \phi = 0 \quad (\text{A12})$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial Q^A} - \phi = 0 \quad (\text{A13})$$

Appendix B. 最適条件の導出

$$(8) \text{より, } \frac{\partial r^R}{\partial E} = 1, \quad \frac{\partial r^R}{\partial \Omega} = 1, \quad \frac{\partial r^R}{\partial p_a} = -a^R(p_a). \quad (12) \text{よ}$$

$$\text{り, } \frac{\partial r^A}{\partial E} = \bar{n}^A, \quad \frac{\partial r^A}{\partial \Omega} = \bar{n}^A, \quad \frac{\partial r^A}{\partial p_a} = l(x) \bar{n}^A, \quad \frac{\partial r_b^A}{\partial \rho} = -\bar{n}^A,$$

$$\frac{\partial r_b^A}{\partial D} = -(p_a - \tau^A(x)) \bar{n}^A < 0.$$

(A2)と総人口条件より,  $\int_0^{Z^R} \theta^R(x) dx = 0$ . この式と(A1), (A3)をそれぞれ組み合わせて  $\mu = 1$  と  $\chi = 1$  を得る. (A4)の両辺を 0 から  $Z^R$  まで積分し,  $\int_0^{Z^R} \theta^R(x) dx = 0$  を用いると,  $(-\theta - \lambda a^R(p_a)) \int_0^{Z^R} \frac{1}{C''(h(x))} dx = 0 \cdot \int_0^{Z^R} \frac{1}{C''(h(x))} dx \neq 0$  であるため,  $\theta = -\lambda a^R(p_a)$ . これを(A5)に代入して  $\theta^R(x) = 0$  を得る.

$$(A11) \text{と } \theta^R(x) = 0, \quad \frac{\partial r^R}{\partial p_a} = -a^R(p_a), \quad \frac{\partial r^A}{\partial p_a} = l(x) \bar{n}^A \text{ より,}$$

$$\underbrace{-a^R(p_a) \int_0^{Z^R} h(x) dx}_{\text{住宅地内の農業財の消費量}} + \underbrace{\bar{n}^A \int_{Z^R}^{Z^A} l(x) dx}_{\text{農業財の市場出荷量}} = 0$$

$$- \lambda \left[ a^{R'}(p_a) \int_0^{Z^R} h(x) dx + \bar{n}^A \int_{Z^R}^{Z^A} a^{A'}(p_a) dx \right] = 0.$$

上式の第1項+第2項は農業財の需給均衡を表すためゼロである.  $a^{R'}(p_a) \int_0^{Z^R} h(x) dx + \bar{n}^A \int_{Z^R}^{Z^A} a^{A'}(p_a) dx \neq 0$  から,  $\lambda = 0$ . よって,  $\theta = 0$ . 最後に, (A12), (A13)より,  $\phi = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial K}$ ,  $\phi = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial Q^A}$ .

以上を用いて生物の社会的限界価値, 各政策の最適条件を導出する.

・生物の社会的限界価値

(A6)に  $\int_0^{Z^R} \theta^R(x) dx = 0$ , (29)-(30)から得られる総人口条件を代入して,  $S_2$ について解くと, (39)を得る. 同様の方法で(A7)を  $S_1$ について解くと, (38)を得る.

・住宅地と農地の境界位置の最適条件

(A9)と(3),  $\lambda = 0$ ,  $\theta = 0$  を用いて(41)を得る.

・ブナ本数の最適条件

(A8)と,  $\chi = 1$ , (38)を用いて(40)を得る.

・農地と自然地域の境界位置の最適条件

(A10),  $\chi = 1$ ,  $\phi = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial K}$ ,  $\phi = S_2 \frac{\partial N_2}{\partial Q^A}$ ,  $\lambda = 0$ ,  $\theta = 0$

を用いて(42)を得る.

外部性の有無による政策の最適条件の違いの導出方法も同様である.

## Optimal land use policies to mitigate damages by bears and to conserve wildlife

Jun YOSHIDA, Tomoko IMOTO, and Tatsuhito KONO

There is a growing concern that wild bears encroach into cities in Japan, which has adverse impacts on agriculture and human safety. This paper theoretically analyzes the socially optimal land use policies, such as regulating total area of residential and agricultural land and controlling the number of plants that is a main food source of bears, considering the following three externalities: (a) ecosystem services, (b) damages to agricultural products by bears, and (c) farmers' fear of encountering bears. We find that, even if there exist these three externalities, the equilibrium size of residential area is consistent with the social optimum if bears do not enter the residential area, and that the optimal farmland size could be larger or smaller than the equilibrium size, which depends on the tradeoff between the loss in ecosystem services from expanding farmland and the decrease in the number of bears that have damages to the agricultural products and the farmers' fear of encountering bears.