

# 地域スケールでの環境バランス評価ツールの開発とその感度分析

陳 鶴<sup>1</sup>・小田 佳代子<sup>2</sup>・谷口 守<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s143062@sk.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: oda.kayoko@sk.tsukuba.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 筑波大学大学院 システム情報系社会工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: mamoru@sk.tsukuba.ac.jp

地球環境問題の解決のためには、地域における日々の暮らし方を見直していく事が不可欠である。本研究ではエコロジカル・フットプリント指標 (EF) を用いて、地域住民が自らの生活によって生じる環境負荷と、地域の環境受容とのバランスを確認できる評価ツールを開発した。さらに、つくば市における特徴の異なる複数の集落を対象に、環境バランスを改善するためのシナリオ実施効果を感度分析を通じてポテンシャルとして明らかにし、あわせて評価ツールの挙動を把握した。その結果、1) 戸建住宅の多い集落では太陽光パネル設置の促進が有効、2) 未利用地の多い集落では自然的土地利用への転換による改善ポテンシャルが高い、3) 都心から離れた集落では公共交通への転換が効果的であること等を明らかにした。

**Key Words :** *ecological footprint, environment management, sensibility analysis*

## 1. はじめに

2012年に国連持続可能な開発会議 (Rio+20) が開催された<sup>1)</sup>。そこでは20年前のリオサミットのフォローアップとして、世界多くの国が参加し、今後10年の環境・経済・社会のあり方の議論がなされた。会議においてはこれまでの20年の間に、地球温暖化・海面上昇などの問題がさらに悪化していることが報告され、人間活動による環境負荷は地球の受容力を既に超えていると認識されている。これはすなわち、環境負荷と環境受容のバランス (以降、環境バランスと呼ぶ) が崩れてしまった状態にあるといえる。

このバランスを少しでも取り戻すためには、我々の日常生活を見直す事がその第一歩といえる。そして見直しを実際に行うためには、簡便な形でその実態を把握する必要がある。換言すれば、身近な環境バランスを評価するための簡便なツールが必要である。ここでいうツールとは、地域における環境負荷と環境受容に関するそれぞれの基本的な情報が与えられる事により、環境バランスが提示できる仕組みを指している (詳細は後述する)。また、どのような生活行動の見直しを行えば、どれだけ改善効果が得られるか、その可能性 (ポテンシャル) に

ついて知見を得ておくことが求められよう。なお、どのような日常生活の見直しを行える可能性があるかということは、その場所によって大きく異なることが容易に予想される。

以上の問題意識に基づき、本研究では身近な生活圏で環境バランスを簡便に評価できるシステムを構築し、日常的な生活の見直しがどのようにバランス改善に影響するかを定量的に検討する仕組みを提示することを目的とする。仕組みの検討が目的であるため、バランス改善を吟味する上で各見直しの影響を把握しやすい対象地を選ぶことがまず求められる。このため、環境受容力が極めて乏しい大都市部や、環境負荷がほとんどない中山間地などは適切な検討対象地とはいえない。以上の理由から、本研究では都市的要素と農村的要素が混在する大都市圏郊外部を取り上げ、比較検討に値する特徴の異なる地域から構成されるつくば市をケーススタディの対象とした。具体的な地域ユニットとしては、従来の生活・生産活動の基礎単位である集落を採用する。

なお、より広域の空間スケールにおいて同様のバランスを算出する試みは後述のレビューで整理するように既に数多く行われてきた。筆者らは環境バランスとしては最終的にはこのような広域なスケールでバランスが取れ

るのであれば何の問題もないと考えている。しかし、そのような広域レベルでの環境バランスが判明したところで、地域や地区のレベルで生活環境が異なる個々人に対し、それぞれに効果的な行動改善につながるような知見が得られる訳ではない。具体的取り組みにつなげていく上で、既存研究では取り扱えていなかったより狭域での検討を行うことは必須の流れと言える。

また、本ツールは本検討で取り上げる集落地域のみならず、大都市部や中山間地においても全く同様に適用できる仕様であり、他地域での適用を否定するものではなく無い。ただ一番最初の取り組みとしてその挙動をわかりやすく理解するためには、具体的取り組みによってバランスが敏感に変化することを観察しやすいと考えられる中間的なエリア（集落）を対象とするのが一つの自然な選択であると考えただけのことである。

なお、環境負荷を表現する指標として、耕作やCO<sub>2</sub>排出にまで至る暮らしの環境負荷を総合的に計測できるエコロジカル・フットプリント指標（EF指標）を用いることとした。同時に都市縁辺部の森林地と耕作地の持つ環境受容効果をバイオキャパシティ指標（BC指標）として定量化する。これら両指標を組み合わせ、環境バランスの達成状況を環境負荷超過率として把握する。以上のように、EF指標、BC指標と環境負荷超過率を用いて、住民の日常生活から発生した環境負荷とその負荷が受容量を超過した程度を評価する計算する一連の方法と手順を、環境バランス評価ツールとして提案する。

日常生活の見直しを通じ、どれだけの環境バランス改善が生じ得るかについては、シナリオ分析手法を用い、特徴的な集落を抽出して検討することとした。シナリオ分析を通じた比較の注意点としては、必ずしもシナリオ間で同一の実現可能性が期待できるとは限らないことである。すなわち、本研究で得られる結果はそのシナリオを目指した場合に達成できる最大限の可能性（ポテンシャル）に過ぎず、シナリオの書き方によっては、その大きさ自体は如何様にもでもなるという点に注意が必要である。大切なことは、地域（集落）の特性が異なる事によって、それぞれのシナリオに対する反応特性（感度）が異なるということであり、本研究ではまさにそこを検討対象としている。その場所にあった（効果を大きくできる）生活の見直しをするべきではないのではないか？という事が本研究の重要な視点である。

## 2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

以下では本研究で用いる指標のうち、現在まで最も研究蓄積のあるEF指標に主眼をおき、既存研究のレビューを行う。EF指標はW.Wackernagelらによって、1990年代

初めにカナダで開発された指標である<sup>2)</sup>。EF指標の基本的な算出式としては、Wackernagelらが考案したコンパウンド法がある。なお、EF指標を用いた分析の一貫性の確保を目的として、2006年にはEF指標に関わる研究者・実務者らから構成されるGlobal Footprint Networkにおいて「ECOLOGICAL FOOTPRINT STANDARDS 2006」<sup>3)</sup>が、2009年9月にはその改訂版<sup>3)</sup>が公表されている。また、Kitzedら(2009)<sup>4)</sup>によって、国家レベルにおけるEF指標の算出方法の改良点についてまとめられるとともに、さらなる展開に向けたアプローチも提示されている。WWFなどの「Living Planet Report」では、コンパウンド<sup>5)</sup>手法を用いて、世界約150カ国のEF指標値を算出している。広域的スケールでは日本においては、既に谷口ら(2003)<sup>6)</sup>によって都道府県レベルで、清岡ら(2005)<sup>7)</sup>によって、市町村レベルでの検討はなされている。さらに市町村レベルでの改善検討方策について氏原ら(2008)<sup>8)</sup>、Chenら(2013)<sup>9)</sup>による研究が進められている。

その一方で、Bicknell(1998)ら<sup>10)</sup>は、産業連関表を利用してEF指標値を算出する手法を初めて提案している。その後、Feng(2001)<sup>11)</sup>によって、Bicknell(1998)らの算出方法における誤りが指摘され、修正が加えられている。わが国においても、伊藤ら(2006)<sup>12)</sup>、余川ら(2009)<sup>13)</sup>によって、それぞれ国際産業連関表あるいは、地域間産業連関表を用いたEF指標値の算出が行われている。しかし、産業連関表を作成するにあたり、そのためのデータ整備が膨大となることや、地域スケールで利用できるデータ自体が存在しないなど、多くの課題があることも事実である。

また、特定の生産品などを対象とした研究も見られる。例えば、和田(2003)<sup>14)</sup>は露地栽培と温室水耕栽培におけるトマトの生産方法の違いによるEF指標値の比較する研究や、Kissingerら(2010)<sup>15)</sup>によって、イスラエルにおける穀物に対するLCAを、EF指標を用いて分析した研究なども行われている。

これら既存研究の利害得失を踏まえた上で、本研究は以下のような特長を有している。

- 1) 地域スケールで環境バランスの改善効果を感度分析的に簡便に検討できる新規性の高いシステムである。
- 2) 地域住民が自らの地域の環境バランスを若干のサポートのもとで自主的に確認できる有用性を有している。
- 3) 地域における居住者特性や地域特性を反映することで、地域にあったメニューを把握することが可能になる。
- 4) 国勢調査小地域統計や都市計画基礎調査など、近年全国一律で整備が進められている地域統計があれば算出が出来るよう配慮しており、他地域においても活用できる高い汎用性を有している。

### 3. 対象地域

#### (1) 分析対象都市と対象集落

本研究では先述したとおり、大都市圏郊外部で特性の異なる多様な地域(集落)から構成される茨城県つくば市を対象とする。つくば市は図-1に示す6つの地区から構成され、筑波研究学園都市の開発によって、都心地区は都市的施設・建物が1960年代より順次整備された。さらに、つくばエクスプレスの開通に伴い、交通の利便性が向上、沿線の都市開発も急速に進展している。本研究では研究学園地区として図-1に示す開発が完了した地区を除くすべての市域における集落を環境バランスの実態を検討するための分析対象とした。

なお、本研究では分析を行うに当たり「地図で見つづつくば市の変遷」<sup>16)</sup>を用いて集落の確認を個別かつ詳細に行うとともに、そのスケールに対応する齟齬の無い統計情報の範囲として大字を採用した。特に都市計画基礎調査の土地利用統計区分に対応したデータ<sup>17)</sup>がこのスケールで入手可能である。検討の結果、134の集落(大字)を分析対象候補として選定した。

#### (2) シナリオ分析の対象集落

さらにこれらの集落の中から、生活の見直しを行うシナリオ分析の対象とする集落を下記の観点から選定した。

- 1) 規模が大きすぎたり小さすぎたりする集落は相互比較に適していないため、同じ規模の集落で比較検討を

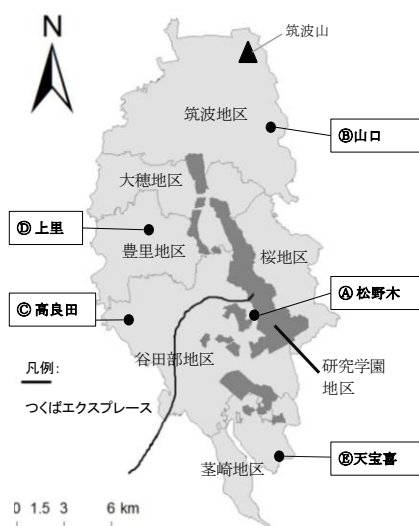


図-1 つくば市の構成と対象集落

表-1 対象集落の概要

	都市的利用 土地面積(ha)	人口	高齢者 比率	耕作地 面積(ha)	荒地面積 (ha)	森林地 面積(ha)	人口密度 (人/㎡)
①松野木	16.2	572	8.7%	16.6	2.2	0.6	16.1
②山口	29.3	471	27.4%	65.1	12	326.6	1.1
③高良田	28.5	451	24.2%	61	21.2	0	3.6
④上里	27.7	451	24.6%	88.4	0	6.6	3.7
⑤天宝喜	18.9	411	46.2%	18	1.1	17.7	7.4

行う。集落では、農業生産活動の維持や向上、冠婚葬祭やその他の生活面における互助の結びつきが残っており、その核は、神社や家屋により形成される居住域、すなわち都市的な土地利用がなされた区域といえる。本研究では、その都市的土地利用面積を集落規模として捉え、つくば市内における平均的な規模の集落を選出した。つくば市の集落の都市的土地利用面積の中央値は21haであり、全体の50%以上を都市的土地利用面積が10～30haである集落が占めている。以上の条件を踏まえ、都市的土地利用面積が10～30haである集落を、同規模の集落での比較検討に適した、対象集落の候補とする。

- 2) 人口が集中していて、環境に対する負荷が高い集落から、自然資源が豊富であり、環境の受容力が高い集落まで、環境バランスを検討する上で幅広い特性を有する集落が含まれるよう配慮する。

- 3) 具体的には、上記1)の候補の中から、人口密度、耕作地面積、森林面積、荒地面積、高齢者比率がそれぞれ最大となる集落を抽出した。

これらの集落を人口の多い順に整理すると、表-1、及び図-1に示す通り①松野木、②山口、③高良田、④上里、⑤天宝喜の5集落となる。①松野木は研究学園地区に隣接しており、5集落の中で最も人口密度が高くなっている。この①松野木の高齢者比率が10%未満であるのに対し、⑤天宝喜は46.2%であって、日本平均の25%を大幅に上回っている。③高良田は荒地面積、④上里は耕作地面積、②山口は森林地面積が最も広がっており、それぞれ特徴的な土地利用構成となっている。

### 4. 環境バランス評価ツールの構築と適用

#### (1) 環境バランス評価ツールの構築

##### a) 環境負荷量

本研究ではEF指標を用いて集落に発生する環境負荷が実際にどの程度存在するかを定量化する。EF指標の構成要素としては、地区スケールでの適用を念頭に開発が進められている氏原・谷口モデル(以下、UTモデルと略記)<sup>6)</sup>の算出方法を参考する。EFの基本式は式(1)のように定義される。また、本研究ではEFを構成する要素として①耕作地、②牧草地、③森林地(紙製品)、④都市用地、⑤CO<sub>2</sub>吸着地の5要素を想定し、そのそれぞれの基本式は表-2に示す通りである。また、環境負荷の総量は以下の式(1)で算定することができる。

$$EF^k = \sum EF_i^k \quad (1)$$

EF<sup>k</sup>: 集落kにおけるのエコロジカル・フットプリント(ha)

$EF_i^k$ : 集落 $k$ における要素 $i$ のフットプリント値 (ha)

$k$ : 対象集落

$i$ : 対象要素

算出の手順としては、まず、構成要素①～③はUTモデルを骨組みとして、年齢階層別人口数などにより詳細なデータを用いて算出する。次に、構成要素④～⑤は独自に改良したパラメータを開発する。特に構成要素④については、都市的な活動のために利用される土地として、都市計画基礎調査データの都市的土地利用面積を採用した。さらに、EF指標値の中でも一般的に構成割合の最も多くなる構成要素⑤については、より精度の高い検討を可能とするため、民生家庭部門、民生交通部門と運輸部門に分類している。これらの算出に関しては、既存のUTモデルでは、対象課題の有する特性を十分に反映した検討が不可能である。そこで⑤に関しては、下記のような改良を加えている。

- 1) 民生家庭部門については、環境省・経済産業省が「京都議定書の削減約束達成に向けた「国民行動の目安」」<sup>18)</sup>の中で発表した地方別の世帯あたりのエネルギー消費量(住宅の種類、世帯人員別)の数値、また、国勢調査小地域統計の住宅別人口と世帯別人口<sup>19)</sup>を用いて算出する。
- 2) 民生交通部門については、家計調査により世帯人員別1世帯当たりの年間ガソリン購入量<sup>20)</sup>と都市圏パーソントリップ調査により最小ゾーン別の平均自動車利用時間を用いて算出し、それを各集落の値として割り当てる。
- 3) 運輸部門については、本研究では全体の環境負荷に対して相対的に大きな比重を占める海外と国内の間の貨物輸送によって発生したCO<sub>2</sub>排出量を計算の対象とする。貨物輸送のCO<sub>2</sub>排出量は輸送距離、輸送量、CO<sub>2</sub>排出原単位を乗じることによって算出する。貨物の輸送量については、財務省貿易統計に基づき、輸送距離については、航空マイレージ<sup>21)</sup>と海運距離<sup>22)</sup>に基づいている。

このような構成に基づく分析を通じ、集落における住民の暮らしから直接発生した環境負荷の実態と環境バランスの現状を簡便に、また他地域にも応用可能という目的を満たす範囲において、現在できる最大限の内容で把握することが可能となる。

なお、本研究ではその集落での生活に直接関わらない工場等の施設から生じる環境負荷に関しては、今回の環境バランス改善ツールの開発主旨から考えて、意図的に計算から排除している。

#### b) 環境受容量

本分析におけるBCとは、EF指標値の各構成要素を受け入れるための土地利用面積(例えば、対象地域内の食料消費に伴って必要となる農用地を、その対象地域内で

どれだけ準備できているか等)のことを指す。つまり、表-2の各構成要素に対応する形で、それぞれの集落内に存在する環境受容量を定量的に示すこととする。BCの基本式は式(2)のように定義される。

この部分に用いるデータは、都市計画基礎調査における小ゾーンごとの各土地利用面積<sup>17)</sup>を採用した。また、EFの構成要素④(都市面積)に対しても、都市活動を受容れる土地として環境受容量にも含めて算出した。

$$BC^k = bc_{fm}^k + bc_f^k + bc_g^k + bc_b^k \quad (2)$$

$BC^k$ : 集落 $k$ における環境受容量 (ha)

$bc_{fm}^k$ : 集落 $k$ における耕作地 (farmland) の面積 (ha)

$bc_f^k$ : 集落 $k$ における森林地 (forestland) の面積 (ha)

$bc_g^k$ : 集落 $k$ における牧草地 (grassland) の面積 (ha)

$bc_b^k$ : 集落 $k$ における都市利用の土地の面積 (ha)

表-2 集落スケールでのEFの各構成要素

EF指標の各構成要素		算出式	変数説明
① 耕作地	食料、飼料 衣料	$F_j^k = \sum_{n=1}^{10} p_n^k \times f_{nj}$	$F_j^k$ : 集落 $k$ における品目の総消費量(ton) $p_n^k$ : 集落 $k$ における年齢階層 $n$ の人口(人) $f_{nj}$ : 年齢階層 $n$ における品目 $j$ の一人あたり消費量(ton/人)
	食肉、牛乳		$f_{nj}$ : 年齢階層 $n$ における品目 $j$ の一人あたり消費量(ton/人)
② 牧草地	毛糸	$EF_{fg}^k = \sum_{j=1}^{10} \frac{F_j^k}{\alpha_j}$	$\alpha_j$ : 品目 $j$ の土地生産性(ton/ha) $j$ : 国民栄養調査による14区分 $n$ : 国勢調査による10区分
③ 森林地(紙製品)		$EF_p^k = \frac{p_n^k}{p} \times q \times \sum_{m=1}^3 \frac{w_m}{\beta_m}$	$W_m$ : 輸入先別 $m$ パルプ・チップ需要量(日本)(m <sup>3</sup> ) $\beta_m$ : 輸入先別 $m$ 森林蓄積成長量(m <sup>3</sup> /ha) $p$ : 日本の人口(人) $q$ : 家計消費割合(%) $m$ : 3区分(温帯(国内含む)、熱帯、寒帯)
④ 都市用地		$EF_b^k = \sum_s b_s^k$	$b_s^k$ : 集落 $k$ の土地利用 $i$ $s$ : 都市計画基礎調査による13区分(住宅用地・商業用地・工業用地・運輸施設用地・公共用地・文教厚生用地・公共空地・公園・防衛用地・道路用地・鉄道用地・駐車場用地とその他の空地)
⑤ CO <sub>2</sub> 吸収地	民生家庭部門	$EF_h^k = \sum_{x=1}^2 \sum_{y=1}^4 \frac{P_x^k \times C_x^k + P_y^k \times C_y^k}{\gamma}$	$C_x^k$ : 集落 $k$ の住宅の建て方 $x$ の二酸化炭素排出量(ton) $C_y^k$ : 集落 $k$ の世帯人員 $y$ の二酸化炭素排出量(ton) $P_x^k$ : 集落における住宅建て方 $x$ の人数(人) $P_y^k$ : 集落における世帯人員 $y$ の世帯数(世帯数) $\gamma$ : 二酸化炭素吸収効率(ton-CO <sub>2</sub> /ha) $X$ : 2区分(戸建て・集合) $Y$ : 国勢調査による4区分
	民生交通部門	$EF_t^k = \sum \frac{P_y^k \times C^k \times k_c \times (t/T)}{\gamma}$	$C^k$ : 集落 $k$ におけるガソリン消費量(CC/人) $k_c$ : 二酸化炭素係数 $t$ : ゾーン別の平均自動車利用 $T$ : つくば市平均自動車利用時間
	輸送部門	$EF_r^k = \sum W \times U_{co_2(k)} \times L \times K_c$	$W$ : 輸送量(ton) $U_{co_2(k)}$ : 交通手段 $k$ のCO <sub>2</sub> 排出原単位(g-CO <sub>2</sub> /ton・km) $L$ : 輸送距離(km)



### c) 環境負荷超過率の算出

本分析では環境負荷超過率を、「対象とする地の環境受容量に対して、その集落から発生する環境負荷量が、どの程度超過(オーバーシュート)しているのか、それら環境受容量と環境負荷量とのバランスを示す定量的な指標」と定義した。つまり、その指標値が1.0以下の地区は、他地域における環境負荷を自集落内での土地利用において負担(吸収)しているとも言える。集落レベルでの環境負荷超過率( $r$ )の算出式を以下に示す。

$$r^k = \frac{EF^k}{BC^k} \quad (3)$$

$EF^k$ : 集落 $k$ におけるEF指標値(ha)

$BC^k$ : 集落 $k$ における環境受容量(ha)

### (2) 環境バランス評価ツールの適用

ツールの適用にあたって、可能な限り直近の情報を使用することにつとめた結果、都市計画基礎調査(つくば市)は2010年<sup>17)</sup>、国勢調査小地域統計は2010年<sup>19)</sup>、家計調査は2011年<sup>20)</sup>、都市圏パーソントリップ調査(東京)は2008年(以下、PT調査と省略)<sup>23)</sup>、財務省貿易統計は2008年<sup>24)</sup>の情報をそれぞれ用いている。本ツールを用いて、つくば市を対象として環境バランスの評価を行った結果を図-2に示す。

計算の結果、つくば市の平均環境負荷超過率は4.29、茨城県の平均値は2.97で、谷田部・桜地区ではつくば市の平均値を超過している集落があることが示された。それらの地域は都市活動が集積している研究学園地区に隣接しその都市化の影響を受けていると考えられる。いわば、都市活動の滲み出しが存在している。また、筑波・茎崎地区では、茨城県の平均値を超過している集落が見られ、都市機能が郊外部へ拡散している状況がEF指標の観点から明らかにできたと言える。筑波・豊里地区では環境負荷超過率が1以下、すなわち、日常的な生活で発生した環境負荷が環境受容量を本分析で考慮した範囲で超過しておらず、本研究で考慮した範囲で環境負荷に見合うだけの環境受容量を有している集落も少なからず存在していることが明らかとなった。

また、シナリオ分析の対象集落に関しては、④松野木は5つの集落でもっとも都市中心部に隣接しており、環境負荷超過率が最も高くなっている( $r=10.90$ )。⑤山口は環境受容量が相対的に高いため、環境負荷超過率は最も低くなっている( $r=0.70$ )。③高良田、①上里、⑥天寶喜に関しては、それぞれの $r$ 値は3.26、2.43、4.09である。その5つの集落は環境負荷が高い集落から、超過の見られない集落まで、環境面を検討する上で幅広い特性を持つ集落を捉えた。

## 5. 集落特性による環境改善効果の感度分析

### (1) シナリオの設定

先述のように、本研究では日常生活の見直しを通じ、どのような手法によってどれだけの環境バランス改善効果が得られるかをシナリオ分析する。さらに、集落の特性により、それぞれのシナリオに対する感度が異なることを踏まえ、その環境バランス改善の感度分析によって、その場所にとってより適性の高い環境改善方法の検討を模索する。

本研究では実際に地域でも検討が進められており、何らかの形で実現可能性があると考えられる4つのシナリオ、「a) 太陽光パネル発電施設の導入」、「b) 空間リサイクル」、「c) 食料自給率の向上」、「d) 公共交通の促進」を設定した。なお、冒頭で記述した通り、本稿ではツールの挙動検討のためにあくまでこれら具体策の実施による環境バランスの改善が見やすい地域を対象にして試算している。これら各シナリオの実施効果が最大になることが期待される地区をあらかじめ選んだ訳でもなく、またこれら各シナリオ実施によるより大きな効果が得られる地域への本ツールの適用を否定するものでも全くない。それぞれのシナリオにおける環境負荷超過率の改善効果の算出方法の概略を表-3に示し、その詳細を以下に整理する。

#### a) 太陽光パネル発電施設の導入

環境問題の深刻化から環境負荷低減が大きな課題となる中、再生可能エネルギーの積極的な導入が進められるようになってきた。このシナリオでは、対象集落におけるすべての住宅で太陽光パネル発電施設を導入する設定をした。具体的な算出手順は以下の通りである。

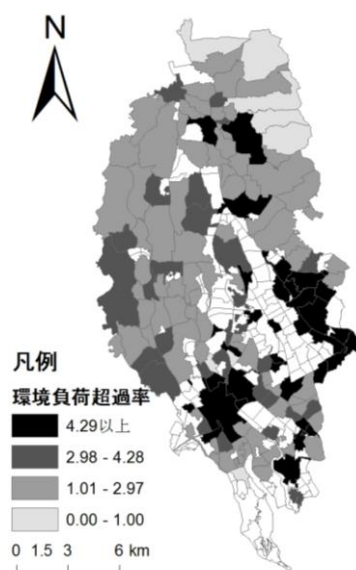


図-2 つくば市における集落の環境負荷超過率

- 1) 住宅面積は数値地図 2500 (空間データ基盤) の GIS 情報<sup>29)</sup>によって、各集落における住宅の屋根面積を算出し、太陽光が当たる南側半分にパネルが設置されると仮定する。
- 2) 住宅屋根に太陽光が当たる時間の長さである日照時間<sup>29)</sup>を調査し、日照時間が 5 時間以上の住宅比率を算出する。耐震基準<sup>27)</sup>を考慮して、1980 年以降の建築比率データを考慮に加え、各集落太陽光パネル設置面積を推定する。
- 3) 日射量に関しては、最も日射量が得られる 30 度の傾斜角で設置されると想定し、その条件で設置した場合の単位あたり必要面積 11.55 (m<sup>2</sup>/kW)<sup>28)</sup>で太陽光パネ

ル設置可能面積を除することで、太陽光パネル容量を算出する。

- 4) この太陽光パネル容量に日射量データベース<sup>29)</sup>で得たつくば市の年間日射量とシステム出力係数 0.7 を掛け合わせることで、市区町村別時間別太陽光パネル発電量を推定する。
- 5) 太陽光パネル発電量に二酸化炭素排出係数<sup>30)</sup>を掛けて、CO<sub>2</sub> 排出削減量を算出する。さらに二酸化炭素吸収率<sup>31)</sup>で CO<sub>2</sub> 排出量を除することで、CO<sub>2</sub> を吸収するための森林地削減量を算出する。

#### b) 空間リサイクル

荒地・耕作放棄地の増加という問題が顕在化してきている。中長期的な視点に立ち、今後の人口減少社会を考えると農村部や都市郊外部における未利用地を、自然的土地利用に再生(リサイクル)するなどの施策が重要になってくると考える。そこで、このシナリオは以下に示す耕作地利用率向上、荒地活用の2つの要素の実施可能性を同時に考える。

まず、耕作地利用率向上については、2005年農林業センサス<sup>32)</sup>を用いて、つくば市の各地区における耕作面積・作付延べ面積の分布状況を把握した。また、都市計画基礎調査によって、各対象集落の耕作地面積を把握し、耕作地利用率を用いて、集落毎の耕作面積と作付延べ面積を算出する。

また、荒地活用については、対象集落における荒地の状況を都市計画基礎調査により把握し、これらの土地が森林地に再生されたケースを考える。

#### c) 食料自給率の向上

1965 年度に 73%の水準であったカロリーベースの食料自給率は、長期的に低下傾向にあり、2000 年度以降は、40%前後の水準で推移している。自給可能な米の供給熱量全体に占める割合が大きく低下する一方、畜産物や油脂類の割合が大きく上昇している。このように供給熱量ベースの食料自給率低下の背景には、米の消費量の減少に加え、輸入飼料穀物や輸入油糧作物に依存する傾向が高い畜産物や油脂の消費量の増加がある。このような食料自給率の低下は、海外輸入に伴う大量の二酸化炭素排出によって地球温暖化、海面上昇などの問題を助長している。そこで、このシナリオでは住民の食生活を改善し、食料自給率を向上する設定をした。それによって環境負荷超過率の改善効果を以下のように算出した。

- 1) 栄養バランスが良いとされ、かつ食料自給率(カロリーベース)が50%以上である1975年の食生活を参考とする。具体的には、2011年食料需給表<sup>33)</sup>により1980年と2011年の品目別自給率と食料供給カロリーを把握する。
- 2) 国民栄養調査<sup>34)</sup>により2011年の1日1人品目別消費量を把握する。これに品目別純食料中の成分量をかけて、

表-3 環境負荷超過率改善効果算出方法

シナリオ	環境バランス改善可能量	変数説明
a) 太陽光パネル発電施設の導入	$\hat{EF}_1^k = \hat{EF}_k^h = \frac{S_r \div 2 \times \rho_{sun} \times \rho_e}{11.55} \times METPV \times 0.7 \times k_c \times \gamma$ $\hat{BC}_1^k = 0$	$S_r$ : 住宅屋根面積(m <sup>2</sup> ) $\rho_{sun}$ : 一日屋根の日照時間が5時間以上の住宅の比率 $\rho_e$ : 昭和55年以降建築住宅の比率 $METPV$ : 年間日射量(kwh/m <sup>2</sup> ) $k_c$ : 二酸化炭素係数 $\gamma$ : 二酸化炭素吸収効率(ton-CO <sub>2</sub> /ha) $\hat{EF}_1^k$ : シナリオa)による集落kのEFの変化量(ha) $\hat{EF}_h^k$ : 集落kにおける民生家庭部門のEFの変化量(ha) $\hat{BC}_1^k$ : シナリオa)による集落kのBCの変化量(ha)
b) 空間リサイクル	$\hat{EF}_2^k = 0$ $\hat{BC}_2^k = \hat{bc}_{fm}^k = S_{fm} \times (1 - \rho_{fm}) + S_w$	$S_{fm}$ : 耕作地面積(ha) $\rho_{sun}$ : 耕作地利用率 $S_w$ : 荒地面積(ha) $\hat{EF}_2^k$ : シナリオb)による集落kのEFの変化量(ha) $\hat{bc}_{fm}^k$ : 集落kにおける耕作地面積の変化量(ha) $\hat{BC}_2^k$ : シナリオb)による集落kのBCの変化量(ha)
c) 食料自給率の向上	$\hat{EF}_3^k = (EF_f^k - EF_f^{k'}) + \frac{EF_r^{k'}}{P} \times p_n^k$ $\hat{BC}_3^k = 0$	$EF_f^k$ : 集落kにおける耕作地フットプリント(ha) $EF_f^{k'}$ : 食事スタイル改善後の集落kにおける耕作地フットプリント(ha) $EF_r^{k'}$ : 食事スタイル改善後の集落kにおける運輸部門エネルギーフットプリント(ha) $P$ : 日本人口(人) $p_n^k$ : 集落kにおける人口(人) $\hat{EF}_3^k$ : シナリオc)による集落kのEFの変化量(ha) $\hat{BC}_3^k$ : シナリオc)による集落kのBCの変化量(ha)
d) 公共交通の促進	$\hat{EF}_4^k = \hat{EF}_t^k = \frac{T_p^k / T_a^k \times C^k \times k_c}{\gamma}$ $\hat{BC}_4^k = 0$	$T_p^k$ : 集落kにおける公共交通へ代替可能な総時間(min) $T_a^k$ : 集落kにおける交通(移動)の総時間(min) $C^k$ : 集落kにおけるガソリン消費量(CC/人) $\hat{EF}_4^k$ : シナリオd)による集落kのEFの変化量(ha) $\hat{EF}_h^k$ : 集落kにおける民生交通部門のEFの変化量(ha) $\hat{BC}_4^k$ : シナリオd)による集落kのBCの変化量(ha)
環境負荷超過率改善効果	$\hat{r}_i^k = \frac{EF_i^k - \hat{EF}_i^k}{BC^k + \hat{BC}_i^k}$ $E_i^k = \frac{r_i^k - \hat{r}_i^k}{r_i^k}$	$EF_i^k$ : シナリオd)による集落kのEFの変化量(ha) $i$ : シナリオ(1~4) $E_i^k$ : 環境負荷超過率改善効果

1日に消費したカロリーを算出し、1975年の食生活をベースとしたカロリー消費量を推定する。さらに、その結果によって、食料消費量を算出する。

- 3) この結果から、4.(1)で設定した耕作地EFの算出方法で、食生活を改善した後の耕作地EFを算出する。
- 4) 2011年現在の食料消費量と改善した食料消費量の差を算出して、海外輸入される食料の削減可能性を把握する。その量を用いて、4.(1)で記述された運輸エネルギーEFの算出方法を参考にして、食料自給率向上による運輸エネルギーEFの削減量を算出する。
- 5) 4)の結果に踏まえて、食料自給率向上による環境負荷超過率の削減効果を算出する。

#### d) 公共交通の促進

日本の運輸部門からの二酸化炭素排出量は、2004年度において2億6,200万トン(総排出量の20.4%)となっており、1990年比で20.3%も増加している<sup>30)</sup>。このうち、特に自家用自動車からの排出量は1990年比で50%も増加しており、運輸部門の約半分を占めている。これは、モータリゼーションの進展に伴い徒歩や公共交通を代替したことが大きな要因であると考えられる。今後、高齢化社会が進展している中に、公共交通機関が衰退することで、多くの交通弱者が生まれるおそれもある。このような状況を踏まえて、公共交通の維持と促進が重要である。

具体的な計算方法は以下の通りである。

- 1) PT調査による移動手段別・移動目的別のトリップ時間を集計することで、各ゾーンに総トリップ時間を算出する。
- 2) 公共交通の利便性を高め、モビリティ・マネジメントを推進することで、「通勤」・「通学」・「帰宅」・「通院」・「買い物」を目的としたトリップの一部は公共交通へと代替可能であると仮定する。これらのトリップの半数が公共交通利用にシフトするという状況を想定した。代替割合に4.(1)で算出したゾーン別の年間ガソリン購入量を掛けて、削減可能なガソリンの量を推測する。さらに、二酸化炭素排出係数を掛けて、公共交通利用促進によるCO<sub>2</sub>排出削減量を算出する。二酸化炭素吸収率でCO<sub>2</sub>排出量を除することで、CO<sub>2</sub>を吸収するための森林地削減量を算出する。

#### (2) 集落の特徴をふまえた改善効果の考察

シナリオの実施による環境負荷超過率の削減効果を図-3で示す。先に詳述したが、これらの効果はシナリオを実施した場合の潜在的な効果(ポテンシャル)である。その絶対量は上記のシナリオがどの程度の強度で実施されるかに左右されるため、それほど大きな意味があるわけではなく、同じ政策を実施しても、特徴の異なる集落ごとにその影響の感度が異なるという点が最大のポイントである。分析の結果、以下のようなことが明らかとなった。

トである。分析の結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 1) いずれのシナリオについても、改善率のポテンシャルは感度の高い集落で10%~20%強の割合を占めることが示された。また、いずれのシナリオにも全く感度が無いような集落は存在せず、各集落にあった環境改善策を模索することの意義が全体の傾向から示されたといえる。
- 2) 「a) 太陽光パネル発電施設の導入」のシナリオに関しては、㊦天宝喜、㊦天宝喜、㊦上里などの戸建住宅割合の高い集落において、超過率削減効果が大きくなった。本研究では空地へのメガソーラー導入は個人の日常生活の改変とは直接関係しないため、シナリオとしては特に設定していないが、それらと組み合わせた検討も今後は必要になると考えられる。
- 3) 「b) 空間リサイクル」は集落によってその効果の大きさがかなり異なっている。㊦高良田のように種地となる荒地の面積が広い場合には、この手法は有効に機能する可能性が相対的に高いといえる。もともと森林地面積の比重が高い㊦天宝喜では、比率としてみるとその効果は高くないことが読み取れる。
- 4) 「c) 食料自給率の向上」は集落間で大きな効果の差は見られない。各集落の年齢構成の違いによる食生活の違いはこの差に反映されているが、海外からの輸送による環境負荷は集落が異なっても本質的に大差が無いことの結果といえる。なお、集落内で取れるもので自給する(本来の意味での地産地消)とした場合には、耕作地面積の影響が大きく反映されると類推される。
- 5) 「d) 公共交通の促進」では、㊦上里、㊦天宝喜など都心に相当する研究学園地区から遠い集落の改善効果

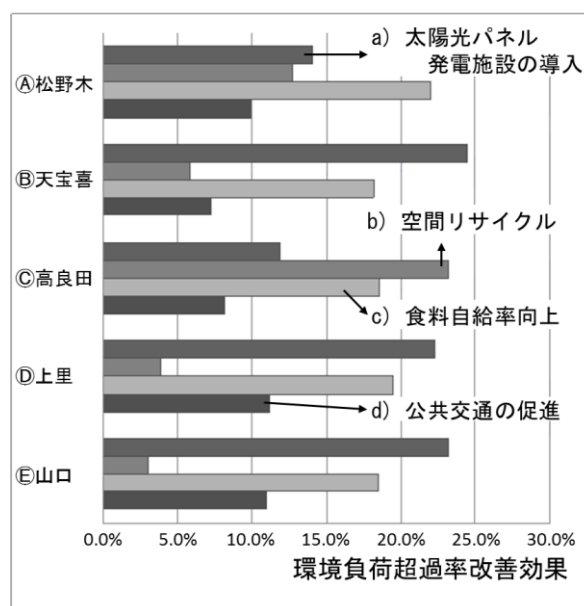


図-3 つくば市における集落の環境負荷超過率改善効果

が相対的に大きくなっている。これらの地区は都心へのトリップ距離が他集落に比較して相対的に長い、公共交通への転換効果が相対的に割合としては大きく表れる傾向にあるといえる。

## 6. 結論

本研究では都市活動に起因するさまざまな環境負荷を土地面積ベースにて評価できる EF 指標を用いることにより、地域スケールでの環境バランスを確認できる評価ツールを開発した。また、そのツールを用いることにより、実際につくば市における集落を対象とした環境バランス評価を実施した。さらに、特徴の異なる複数の集落を対象に、環境バランスを改善するためのシナリオ実施効果をポテンシャルベースで感度分析として検討した。この結果、集落によって効果的なシナリオはそれぞれ異なることが示唆され、またシナリオ設定の強度に応じてどの程度の反応があるのか、その感度を明らかにした。

実際には日常生活の見直しは一つのメニューだけを選んで実施するわけではないため、複数メニューの組み合わせによってどのような交互作用が発生するかを検討する必要もある。また、分析においては極力集落単位でのデータを入手したが、パーソントリップ調査など一部の項目計算ではそれより広いスケール単位でのデータを利用せざるをえなかった。このため、各集落スケールに対応した分析の一層の精緻化が今後更に期待される場所である。

**謝辞：**本研究の実施に際して、岡山大学大学院環境学研究科の氏原岳人助教とつくば市都市計画課に資料の提供や有益なご示唆を頂いた。なお、本研究の実施に際し、公益信託エスベック地球環境研究・技術基金の助成を得た。記して謝意を申し上げる。

## 参考文献

- 1) United Nations Conference on Sustainable development HP: <http://www.uncsd2012.org/>, (最終閲覧 2014.3)
- 2) Wackernagel, M. and W. E. Rees: Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, New Society Publishers (Canada), 1996.
- 3) Global Footprint Network HP: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/>, (最終閲覧 2014.3)
- 4) Kitzes, J. Galli, A. and Bagliani, M., et al.: A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts, Ecological Economics, Vol.68, pp.1991-2007, 2009.
- 5) WWF: LIVING PLANET REPORT 2012: [http://www.wwf.or.jp/activity/lib/lpr/wwf\\_lpr\\_2012.pdf](http://www.wwf.or.jp/activity/lib/lpr/wwf_lpr_2012.pdf), (最終閲覧 2014.3)
- 6) 谷口守・阿部宏史・重兼薫：「エコロジカル・フットプリントに基づく都道府県別超過環境負荷の算出」, 日本地域学会学術論文集, No.40, pp.41-48, 2003.
- 7) 清岡拓未, 谷口守, 松中亮治：エコロジカルフットプリント指標を用いたローカールスケールでの持続可能型土地利用政策の検討, 都市計画論文集, No.40-3, pp.55-60, 2005.
- 8) 氏原岳人・谷口守・松中亮治：エコロジカル・フットプリント指標を用いた環境負荷の地域間キャップ&トレード制度の提案-“身の丈にあった国土利用”に向けた新たなフレームワークの構築-, 都市計画論文集, No.43-3, pp.877-882, 2008.
- 9) Chen, H., Ise, S., Taniguchi, M., et al.: Concept of ecologically balanced area based on Ecological Footprint, Sustainable Development and Planning VI (ISSN: 1746-448 X), WIT PRESS, 2013.
- 10) Bicknell, K.B., Ball, R.J., Cullen, R. and Bigsby, H.R.: New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy, Ecological Economics, Vol.27, pp. 149-160, 1998.
- 11) Ferng J.J.: Using composition of land multiplier to estimate ecological footprint associated with production activity, Ecological Economics, Vol.37, pp. 159-172, 2001.
- 12) 伊藤昭男・高橋義文：エコロジカル・フットプリントと産業連関分析—方法論と地域への適用—, 産業連関, 第14巻第1号, pp.27-34, 2006.
- 13) 余川雅彦, 辻宣行, 加賀屋誠一：地域間産業連関表に基づくエコロジカル・フットプリント交易解析, 環境システム論文集, Vol.37, pp.245-253, 2009.
- 14) 和田喜彦：エコロジカル・フットプリント指標によるトマト生産の持続可能性評価—ハイテク農業は食糧問題解決の切り札か—, 日本エネルギー学会誌, Vol.82, pp.36-41, 2003.
- 15) Kissinger M. and Gottlieb D: Place oriented ecological footprint analysis —The case of Israel's grain supply, Ecological Economics, 69, 1639-1645, 2010.
- 16) (財)日本地図センター：地図で見るつくば市の変遷, 1996.
- 17) つくば市都市計画課：つくば市都市計画基礎調査, 2010.
- 18) 経済産業省 第1回地球温暖化対策に係る国民運動の運営会議の開催～京都議定書の削減約束達成に向けた「国民行動の目安」を発表～：<http://www.meti.go.jp/press/20050712005/050712ondanka.pdf>, (最終閲覧 2014.3)
- 19) 国勢調査小地域集計：<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/NewList.do?tid=000001039448>, (最終閲覧 2013.7)
- 20) 総務省家計調査：<http://www.stat.go.jp/data/kakei/>, (最終閲覧 2014.3)
- 21) 東京都市圏交通計画協議会：東京都市圏パーソントリップ調査, 2010.
- 22) 航空会社マイレージ比較 HP：<http://www.hikaku.com/mile/>, (最終閲覧 2013.7)
- 23) AXSMARINE HP：<http://www.axsmarine.com/distance/>, (最終閲覧 2014.3)
- 24) 財務省貿易統計：<http://www.customs.go.jp/toukei/latest/>, (2014.3 最終閲覧)
- 25) 国土地理院 HP：<http://www.gsi.go.jp/geoinfo/dmap/>



- dm2500sdf, (最終閲覧 2014.3).
- 26) 総務省統計局：平成 10 年住宅・土地統計調査：  
<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/1998/>, (最終閲覧 2014.3).
  - 27) 総務省統計局：平成 10 年住宅・土地統計調査：  
<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/>, (最終閲覧 2014.3).
  - 28) 河本桂一：太陽光発電の導入ポテンシャル, 『太陽エネルギー』 Vol.38 No.1, 2012.
  - 29) NEDO：日射量データベース, <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html?from=b>, (最終閲覧 2014.3).
  - 30) 経済産業省, 環境省：特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガス排出量の算定に関する省令, <http://law.egov.go.jp/htmldata/H18/H18F15002002003.html>, (最終閲覧 2014.2)
  - 31) 国土交通省, 国土計画局：自然界の物質循環への負荷の少ない社会を目指した資源消費水準のあり方検討調査, 報告書, 2004.
  - 32) 農林水産省 2005 年農林業センサス：<http://www.aff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/05houkokusyo.html>, (最終閲覧 2014.3).
  - 33) 農林水産省平成 23 年食料需給表：<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001108413>, (最終閲覧 2014.3).
  - 34) 国民健康・栄養調査：<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyuu/h23-houkoku.html>, (最終閲覧 2014.3).
  - 35) 環境省, H18 環境白書：<http://www.env.go.jp/policy/hakusho/>. (最終閲覧 2014.02).

(2014. 7.30 受付)

## SENSITIVITY ANALYSIS OF AN ENVIRONMENT ASSESSMENT TOOL AT A LOCAL SCALE

He CHEN, Kayoko ODA and Mamoru TANIGUCHI

To resolve global environmental issues, people must review their lifestyles and take action. This study assessed an improved method to calculate the balance of environmental productivity and consumption capacity based on an ecological footprint (EF), which is used as a tool to measure the environmental load generated directly by a person's daily life activities. Moreover, scenario analyses of several villages in Tsukuba city have been proposed to discuss management methods for environmental improvement. Based on scenario analyses, this study conducted sensibility analyses of the potential of environmental improvement. Results showed that: 1) promotion of solar panels is an effective means to improve the environmental balance in villages with a high rate of detached residences; 2) returning land to forestry or farming shows high efficiency in villages with much unused land; and 3) ameliorating the quality of public transportation is useful in villages that are distant from the city center.