

# 「メテオグラム」の活用を通じた 地域での長期的環境バランス変化の可視化 ーその改善可能性に関する試論ー

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: s1430162@sk.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 株式会社ライテック (〒162-0826 東京都新宿区市谷船河原町11)

E-mail: odakayoko3@gmail.com

<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

持続可能性向上のために、人間の生活に伴う環境負荷量と自然環境の受容量、及びそれらのバランスを可視化することが重要である。本研究では、エコロジカル・フットプリント指標を用いて、過去における環境バランスの変化と将来における潜在的な改善可能性を可視化手法「メテオグラム」で明らかにした。この結果、1) 過去50年の環境バランスの達成状況が年々悪化しているを判別された；2) 環境バランスを回復したケースが見られた；3) 環境負荷削減策によっては環境バランスの達成の可能性が潜在していることが示された；4) 潜在的な可能性については都市間に大きな差が存在していることを明らかにした。

**Key Words :** *environmental balance, sustainability, ecological footprint, time series*

## 1. 研究の背景と目的

持続可能な社会の実現が喫緊の課題とされ久しいが、2015年に開催されたCOP21<sup>1)</sup>において確認されたのは、1997の京都議定書の合意が十分に果たされず、有効な手立てを打つことができていなかったということであった。持続可能な社会の実現に大きな進展が見られない一方で、その考え方自体を見直す動きが見られる。特にトリプル・ボトム・ラインとして経済・社会・環境の3本柱がその根幹とされてきたが、近年、「環境という土台があってこそ社会が成り立ち、その上に経済が成り立つ」と認識を改めるべきとの提言もなされている<sup>2)</sup>。すなわち、環境こそが人間の生活の根本として支配的な要素であり、環境の受容量に見合った生活（環境バランス）ができていないかが持続可能性実現への第一歩といえる。

また、環境や資源をめぐる諸条件が長期的に見て厳しくなっていることにより、人間の可住域（エクメーネ）も少なからぬ影響を受けていると類推される。特に外部にその多くを依存している地域では、自らのみならず、その周囲も含めた存立可能性にも大きな影響を与えている。検討を進める上での一つの極論であるが、各地域が

自ら必要とする環境資源を、自らの地域内での地産地消でカバーできているのであれば、そもそもこのような外部不経済を周囲に発生させることはない<sup>3)</sup>。したがって、自らの地域内での地産地消でカバーできる量をその傾向として把握することは、地域の計画において非常に重要なことである。すなわち、環境バランスがどの程度達成できているかということで、持続可能性の達成状況を端的に示すといえる。そこから得られる情報を通じて地域スケールで政策や個人の生活の見直しをはかることは持続可能性の向上を検討するうえで必要不可欠といえる。また、それは環境基本法等の主要な環境政策の中でも提起されていることでもある。

なお、環境や資源、および消費、行動をめぐる動向は時代と共に推移しているため、現実を知る上でデータの許す範囲で過去にまで遡って検討を行うことが求められる。また、地域での政策検討につなげる上で、地方自治体（市町村）が望ましいが、最低でも都道府県のスケールで分析を進める必要がある。

一方、環境や消費に関連する統計データは多岐に渡っており、それらを単に羅列するだけでは一般市民の行動をも促すような情報にはなりえない。このような問題を

解決するために、データを整合的に「統合」し、かつわかりやすく「可視化」することが求められる。

統合指標については現在までに数多くのものが提案されている<sup>3)</sup>。本研究では、上記の問題意識から、整合的にわかりやすく環境バランスを表現できるエコロジカル・フットプリント指標(以下EF)とバイオキャパシティ指標(以下BC)を使用する。EFは環境負荷量に相当し、「ある一定の人口あるいは経済活動を維持するための資源消費量等を生産可能な土地面積に置き換えて表現した指標」<sup>4)</sup>と定義される。BCについても同じ土地面積尺度で表現すれば、環境バランスはこの両者の比を取ることによって簡便に提示できることになる。本研究では都道府県と地方自治体を対象に、この環境バランスの長期的変化を明らかにし、持続可能な社会を実現していく上での今後の課題を一般市民にも理解できる形で見える化することを目的とする。

## 2. 研究の位置付けと研究内容

### (1) 研究の位置付け

地域レベルで EF を算出した研究例は国内外を通じて数多い。EF 指標の基本的な算出式としては、Wackernagel and Rees<sup>4)</sup>が考案したコンパウンド法がある。WWFなどの「Living Planet Report」では、コンパウンド法を用いて、世界約 150 カ国の EF 指標値を算出した<sup>5)</sup>。日本では和田<sup>6)</sup>により個人に対し、谷口ら<sup>7)</sup>により地域(都道府県)に対し EF 指標値が算出されている。また、清岡ら<sup>8)</sup>は、都道府県レベルからさらにブレイクダウンした市町村レベルにおける EF 指標値の算出方法を提案し、市町村レベルでの改善検討方策について氏原ら<sup>9)</sup>、Chen ら<sup>10)</sup>による研究が進められてきた。なお、これら先行研究では、「単一時点」の検討に留まっており、EF 指標値の長期的な変化に言及した研究は国レベルの極めて粗い検討しかなされていないのが実情である<sup>11)</sup>。

一方で、Bicknell ら<sup>12)</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。日本においても、伊藤・高橋<sup>13)</sup>、余川ら<sup>14)</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。この方法であれば原理的には長期的な変化についても分析はある程度可能といえる。しかし、産業連関表を市町村などの自治体スケールで広く作成することは現実としては作業量的にも不可能である。また、財が金銭ベースで評価されるため、時系列的に数字が出せても環境バランスそのものがその時々のおおまか等によって左右されてしまうという問題もある。

BC に関しても様々な捉え方による研究がみられる。谷口ら<sup>15)</sup>は、その土地においてどの程度の人口を養うこ

とができるのかという形で、食料の生産力、石高による評価を行っている。再生可能エネルギー資源の賦存量もまた BC の要素の一つであるといえ、倉阪<sup>16)</sup>、竹内・斎藤<sup>17)</sup>など、多数の研究が見られる。また、竹端ら<sup>18)</sup>は「森林生態系サービス」という形で BC を捉えて政策評価を行っている。

また、EF と BC 両者を統合した環境バランスの観点に基づき、メテオグラムと言う可視化手法を提案した研究がある<sup>19)</sup>。この可視化図は、数値による可視化から一歩進め、EF と BC を統合した環境バランス関係に基づき、EF・BC・環境バランスの三者の変化状況を簡便に表す表現手法である。なお、検討対象とした地域の動向が流星(meteor)のように流れる図となるため、便宜上「メテオグラム」と言う愛称で呼ぶ。しかし、メテオグラムを提案したが、EF・BC 指標の改善改良することができず、長期的な環境バランスの変化と傾向性を把握することができなかった。

以上な研究を踏まえて、長期的な視点で、両者を統合した環境バランスという観点から、都道府県から地方自治体までの政策スケールに対応し、一般市民にも伝わるようなわかりやすいメテオグラム図で示すことが本研究の明確な位置づけとなっている。

### (2) 研究内容

本研究では、長期的な視点で、地域における環境バランスの変化と潜在的な改善可能性を定量的に評価することを目的とする。地域での政策検討につなげるために、まず、過去における環境や消費に関する情報を網羅的に把握する必要がある。そのため、本研究ではまず3章で、データの許す限度内で過去にまで遡って検討を行い、都道府県の範囲内で環境バランスの変遷と達成状況を評価する。

一方、日本においては地方分権化が積極的に進められており、各市町村がそれぞれの計画にビジョンと責任を持つことが求められるようになってきている。また、東京などの大都市より、地方都市には豊かな環境資源が存在し、地産地消能力も相対的に高いと考えられる。そのため、4章では、地方都市を対象にし、環境バランスの潜在的な可能性を加味した環境バランスを可視化する。

過去の変化については、1970年から10年毎の5時点における環境バランスを評価する。日本では、高度経済成長期における経済問題に伴う環境問題も深刻している以降。このような問題に対して、1972年には国連人間環境会議<sup>20)</sup>から地球規模での環境問題への取組みに主眼が置かれるようになった。その後、1992年には環境と開発に関する環境サミットが開催され、「アジェンダ 21」等が採択されるに至っている<sup>21)</sup>。19世紀70年代から、ライフスタイルの変化と共に、環境問題への対策も積極的に

実施されている。また、長期的検討が可能なデータは限られている。戦前には主なデータが存在せず、19世紀60年代には集計方法・項目を改訂されたデータが沢山ある。以上なことによって、1970年からの環境バランスの可視化は、環境問題を理解する上で適切であると判断できる。

潜在的な可能性については、まず地方自治体を対象にし、個人の生活にともなう EF と BC との現況を定量評価する。また、EF について個人の生活の見直しによる削減シナリオを設定し、潜在的な改善可能性を加味した環境バランスを可視化する。これにより、自治体の範囲内だけで「持続可能であるのか」を試みる。

4 章の分析対象地は「21 世紀の国土のグランドデザイン」<sup>20)</sup>の中で、多自然居住地域の拠点として位置づけられる地方中心都市、38 都市とする。地域の持続可能性を考慮する際、人間活動が集中し BC に乏しい都心や、逆に BC は豊富だが人間活動の基盤存続が危ぶまれる中山間地域において困難であることが容易に推測される。その中間として位置づけられる地方中心都市における検討がより必要であると考えられるためである。

可視化については、小田ら<sup>19)</sup>により提案したメテオグラム図を活用する。その図は環境負荷値を縦軸、環境受容量を横軸にし、各ポイントより伸びる矢印が環境バランスの変化を示している。本研究では、小田ら<sup>19)</sup>の可視化図を参考にした上、長期的な視点で地方自治体における持続可能性の検討を試みる。

### 3. 過去における環境バランスの長期的変化

#### (1) 環境バランスの評価手法

##### a) EFとBCの計算手法

EF 指標とは、人間活動に伴う CO<sub>2</sub> 排出量や各種資源消費等を土地面積に換算して表す総合的な環境指標である<sup>4)</sup>。EF を構成する要素を表-1 に示す。BC とは、EF 指標値の各構成要素受け入れるための土地利用面積。EF 指標値と BC 値とを比較することで、人間活動のオーバーシュート（環境負荷超過率）を定量的に示すことができる。

また、EF 指標値は国際間比較のようなマクロスケールでの分析のため、「等価係数」を用いた「グローバル・ヘクタール(gha)」<sup>11)</sup>として表現する手法がある。一方、本研究では、対象とする地域で必要とする土地面積 (EF) とその場所が持つ土地面積 (BC) とのバランスを実際の面積ベースにて比較することに意義があると考えられる。今回のようなローカスケールでの分析に対しては、「gha」の考えを採用せず、「ha」を分析単位とする。

EF と BC の計算手法については、対象とする都道府県

内に居住している人々の個人消費に着目した氏原ら<sup>20)</sup>より、Ujihara-Taniguchi Model (以下 UT モデル)を参考して改良する。この UT モデルによる計算が、個人の生活による EF と都市の有する BC と持続可能性とを結び付けて分析しようとするため、本検討に最適である。

EF の基本式は式(1)のように定義される。各構成する要素の算出式は表-1 に示す通りである。

$$EF^k = EF_{fg}^k + EF_p^k + EF_b^k + EF_h^k + EF_t^k + EF_T^k \quad (1)$$

$EF^k$  : 都道府県kにおける環境負荷量 (ha)

$EF_{fg}^k$  : 都道府県kにおける食料・衣料を生産するための耕作地と牧草地面積 (ha)

$EF_p^k$  : 都道府県kにおける製紙材料を採取するための森林地面積 (ha)

$EF_b^k$  : 都道府県kにおける都市的な活動のための土地面積 (ha)

$EF_h^k$  : 都道府県kにおける民生部門から排出された二酸化炭素を固定するために必要な森林地面積 (ha)

$EF_t^k$  : 都道府県kにおける交通部門から排出された二酸化炭素を固定するために必要な森林地面積 (ha)

$EF_T^k$  : 都道府県kにおける輸送部門から排出された二酸化炭素を固定するために必要な森林地面積 (ha)

BC の基本式は式(2)のように定義される。

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

$BC^k$  : 都道府県kにおける環境受容量 (ha)

$bc_{fm}^k$  : 都道府県kにおける耕作地面積 (ha)

$bc_f^k$  : 都道府県kにおける森林地面積 (ha)

$bc_g^k$  : 都道府県kにおける牧草地面積 (ha)

$bc_b^k$  : 都道府県kにおける都市用地面積 (ha)

本研究は 1970 年から 10 年毎の値を算出する。EF の計算の手順としては、まず、構成要素 1)~4)については、UT モデル<sup>20)</sup>に基づき算出する。要素 1)と 2)については、年齢階層別人口と消費量は国勢調査<sup>24)</sup>と国民栄養調査<sup>25)</sup>により把握する。土地生産性は貿易統計<sup>26)</sup>からの輸入量を考慮した上、農林水産省作物統計<sup>27)</sup>と輸入先の土地生産性<sup>28)</sup>を用いて総合的な生産性を算出する。要素 3)の木材パルプ・チップ需要量<sup>29)</sup>及び輸入先別の森林蓄積成長量<sup>30)</sup>を用いて、製紙材料を採取するための森林面積を算出し、さらにその数値を家計消費割合<sup>31)</sup>で乗じることによって求める。要素 4)の都市的な活動のための土地面積は「日本の統計」<sup>32)</sup>から算出する。

要素 5)の民生部門と家庭部門については、「総合エネルギー統計」<sup>33)</sup>のデータを使用し、家庭で消費した年間の電力・ガス・灯油・ガソリンの量を把握して、それを吸収するための森林面積を算出する。輸送部門は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にし、具体的な輸送量を貿易調査<sup>26)</sup>から把握する。

データ収集が困難な項目がある。構成要素 1)と 2)の衣料・毛系については、2010年の値を算出して、その以前のは家計調査<sup>34)</sup>の被服費により推計する。構成要素 4)は2010年のデータを使用する。構成要素 5)について、「総合エネルギー統計」<sup>33)</sup>は1990年からしか存在していない。1990年以前は「エネルギーバランス表」の全国消費量と、1990年における「総合エネルギー統計」の地方別一人当たり消費量に基づいて推計する。

以上ような分析を通じ、過去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、現在できる最大限の内容で把握することが可能となる。一方、本研究では、信頼性の高い正確な数値を把握することが困難だったため、家具製品・タバコなどの消費財、住居建設に関わる木材消費、魚介類に関わる消費が対象から除外している。そのため、実際の環境負荷を過小評価している。しかし、本研究では環境バランスの全体像を可視化の重点に考察することを目的にする。現在使用しているデータは粗いながらも環境バランスの変化を明らかにすることができる。

BC の計算には、農林業センサス<sup>35)</sup>と林業統計<sup>36)</sup>の各土地利用面積のデータを採用した。また、EF の構成要素 4) (都市面積) に対しても、都市活動を受容される土地として環境受容量にも含めて算出した。

#### b) 環境負荷超過率の算出

環境負荷超過率は、「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。環境負荷超過

率( $r_k$ )の算出式を以下に示す。

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

#### (2) 都道府県別環境バランスの長期的変化

日本全国47都道府県の環境バランスを表すメテオグラムを図-1に示す。Y軸に各都市におけるEF/人、X軸にBC/人をプロットしており、各都道府県のポイントより伸びる矢印が、長期的な変化を示している。また、各都道府県におけるの一人当たりのBC値のばらつきが小さい。見やすいために、X軸を長くしている。それはBC値がEF値より大きいというわけではない。矢印の方向は1970年から2010までである。傾き $r=1$ よりも下部にプロットされる都道府県が地区内のBCに見合った生活を達成しており、本研究で設定した前提のもとでの環境バランスを達成したといえる。

この結果から、以下のような考察ができる。

- 1) 1970 年から 2010 年までに、一人当たりの EF 値が急激に増加してきた。それに対して、BC 値の変化は顕著ではない。結果としては、日本におけるすべての都道府県の環境バランスが悪化していることを明らかにした。
- 2) 1970 年においては、都道府県で環境バランスを達成できているのは半数ぐらいであることが分かった。2010 年になると、バランスを達成したのは北海道、岩手県、秋田県、山形県、長野県、愛媛県と和歌山県の 7 つの県に留まっている。現在はほとんどの都道府県において十分に環境バランスが達成できていないことが示された。
- 3) 一人当たりの EF 値に関しては、番号 1-7 の都道府県の流星は 2000 年から増加する程度が弱くなり、一部の県に削減する傾向を現れた。それは北海道と東北におけるエネルギーの消費量が減少しているからである。
- 4) X 軸に関しては、1970 年から徐々に減少したが、その後人口減少の原因によって一人当たりの値が増えたケースが見られている。各年度の EF 値を見ると、都道府県毎の差が少ないが、BC の差が顕著である。
- 5) 図の中で  $r$  の右下にある都市ほど環境負荷超過率が小さいことになる。北海道と東北の県は 1970 に環境バランスが達成したが、青森県・山形県・福島県は 1990 年から EF 値の急増により、2000 年で環境超過率が 1 以上になった。6 番の山形県は一人当たりの BC が増えたことにより、2010 年から環境バランス達成になった。三大都市圏における都道府県は BC の値がより小さい一方、EF 値は高いである。その結果、1970 年からバランスが達成できない。
- 6) 各都道府県の環境負荷超過率は大きな差があり(2010

表-1 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  | $F_j^k = \sum_{n=1}^{10} p_n^k \times f_{nj}$                                       | $f_{nj}$ : 年齢階層 $n$ における品目 $j$ の一人あたり消費量 (ton/人)<br>$\alpha_j$ : 品目 $j$ の土地生産性 (ton/ha)   |
|            |                     | 衣料     |   |   |
| 2)         | 牧草地                 | 食肉、牛乳  | $EF_{fg}^k = \sum_{n=1}^{10} \frac{F_j^k}{\alpha_j}$                                | $p_n^k$ : 都道府県 $k$ における年齢階層 $n$ の人口 (人)<br>$j$ : 国民栄養調査による 14 区分<br>$n$ : 国勢調査による 10 区分   |
|            |                     | 毛系     |   |   |
| 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 $m$ のパルプ・チップ需要量 (日本) (mT3)<br>$\beta_m$ : 輸入先別 $m$ 森林蓄積成長量 (mT3/ha)<br>$p$ : 日本の人口 (人)<br>$q$ : 家計消費割合 (%)   |
| 4)         | 都市用地                |        | $EF_b^k = b_i^k$  | $b_i^k$ : 都道府県 $k$ における項目 $i$ の面積 (ha)  |
| 5)         | CO <sub>2</sub> 吸収地 | 民生家庭部門 | $EF_h^k = p_n^k \frac{E_e^k \times r_e}{r_s}$                                       | $E_e^k$ : 都道府県 $k$ のエネルギーの年間消費量 (kWh/人)<br>$r_{e0}$ : エネルギーの調整後排出係数 (ton-CO <sub>2</sub> /kWh)<br>$r_s$ : 森林の二酸化炭素効率 (ton-CO <sub>2</sub> /ha)<br>$S$ : 3 区分 (電気・ガス・灯油) |
|            |                     | 民生交通部門 | $EF_t^k = p_n^k \frac{E_e^k \times r_g}{r_s}$                                       | $C^k$ : 都道府県 $k$ の年間ガソリン消費量 (CC/人)<br>$r_{g0}$ : ガソリンの調整後排出係数 (ton-CO <sub>2</sub> /CC)   |
|            | 輸送部門                |        | $EF_T^k = \frac{p_n^k \times r_g}{p \times r_s} \sum W \times U_{co_2(k)} \times L$ | $W$ : 輸送量 (ton)<br>$U_{co_2(k)}$ : 交通手段 $k$ の CO <sub>2</sub> 排出原単位 (g-CO <sub>2</sub> /ton・km)<br>$L$ : 輸送距離 (km)  |

年においては、北海道の0.62と東京都の93；1970年においては、北海道の0.35と東京都の42), そのばらつきが大きいことが確認された。また同じ環境負荷超過率を取っていても(同じ $r$ の傾き上にあっても)そのベースとなるEFやBCの値が大きく異なることが一目で判別できるようになった

#### 4. 地方中心都市における潜在的な改善可能性

3章ではEFとBC指標を用いて、過去における環境バランスの変化を「メテオグラム」図で示した。その図によって、すべての都道府県環境バランスが悪化していることを明らかにした。一方、前述のように、日本では地域主権改革などの地方分権に向けた法整備が進んでおり、環境問題に対する自治体レベルでの取り組みが環境問題解決のために重要となる。都道府県環境バランスの達成については、最終的に各自治体がそれぞれ責任をもって政策・制度を整えるべきだと考えられる。そのため、本章では、自治体における潜在的な環境改善可能性を明らかにすることを目的とする。対象自治体は、2章で述べたように多自然居住地域の拠点として位置づけられる地方中心都市とする。

#### (1) 環境負荷超過率改善シナリオの設定とその計算手法

EF指標の観点からみると、「持続可能性」向上の方策には大きく分けて、EFの削減と、BCの増加が考えられる。その内、個人の生活の範囲で普遍的に可能であると考えられるのはEFの削減である。

そのEFの削減において、個人の生活の範囲で改善行動の及ぶ項目として「電力使用」、「食生活」、「自家用車利用」についてそれぞれ、「住宅用太陽光発電の導入」「交通の自家用自動車から公共交通への転換」「国産品選好による海外輸入食料品輸送の減少」におけるCO<sub>2</sub>排出の減少を想定しシナリオ分析を行う。

シナリオの基本的な考え方としては、それぞれの削減項目の母数である物理的な削減ポテンシャルのうち、どの程度の削減が実現されるのかを加味し、潜在的な削減量とする。物理的な削減ポテンシャルについては、公開統計を用いて推計する。どの程度の削減が実現されるのかについては、アンケート調査に基づき、ライフスタイルの見直しを实践したい人の割合により把握する。その割合をシナリオの「強度」と定義する。式(4)~(8)はシナリオの計算式を示す。また、各シナリオにおける生活グループ毎の強度設定については、b)に示す。

##### a) 住宅用太陽光発電の導入

都市 $k$ における住宅用太陽光発電設備導入によるEF

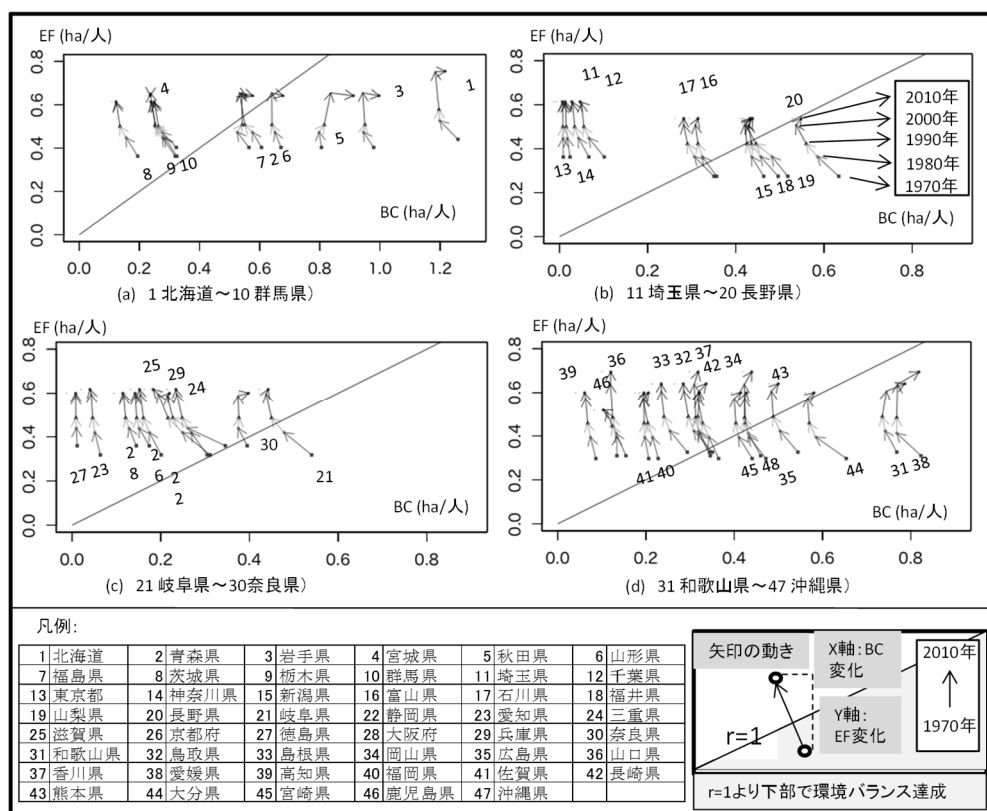


図-1 環境バランスの変化のメテオグラム図

削減量(以下「太陽光シナリオ削減量」),  $EF_{cut.solar}^k$  は式(4)で表される。太陽光シナリオ強度は後述の(2)の「潜在設置率」を用いる。また、住宅用太陽光発電の導入には、設置に必要な面積、設置に必要な耐震基準を満たしているかどうか、という物理的な制限を考慮しなくてはならない。その物理的な制限 $EF_{cut.solar.pot.}^k$  は式(5)に示す。生活グループ別の潜在設置率はアンケート調査結果の太陽光発電施設の導入意向を用いる。標準的な住宅用太陽光発電設備の設置に必要な面積<sup>38)</sup>を有しているかどうかについては、「平成 22 年国勢調査 建て方、延べ床面積階層別戸数」<sup>24)</sup>、「平成 20 年住宅・土地統計調査建て方、建築面積階層別戸数」<sup>39)</sup>によって判断する。また、耐震基準を満たしているかどうかについては、建築時期が昭和 56 年以降である戸建数の割合を算出することにより判断する。以上の条件を満たす住宅を導入可能戸数とする。日射量等の条件については、都道府県別年間予想発電量<sup>40)</sup>を用いる。

$$EF_{cut.solar}^k = \sum_{j=1}^6 \left( \frac{p_j^k}{p_s^k} \cdot r_j^{solar} \cdot EF_{cut.solar.pot.}^k \right) \quad (4)$$

$EF_{cut.solar}^k$  : 都市  $k$  における太陽光シナリオ削減量[ha]  
 $p_j^k$  : 都市  $k$  における生活グループ  $j$  の人口[人]  
 $p_s^k$  : 都市  $k$  におけるシナリオ人口[人]  
 $r_j^{solar}$  : 太陽光シナリオ強度(生活グループ  $j$  の潜在設置率)  
 $EF_{cut.solar.pot.}^k$  : 都市  $k$  における住宅用太陽光発電設備導入による EF 削減量の物理的限界量[ha]

$$EF_{cut.solar.pot.}^k = \frac{H_{area}^k \cdot r_q^k \cdot S \cdot E_{year}^k \cdot r_e^k}{r_s} \quad (5)$$

$EF_{cut.solar.pot.}^k$  : 都市  $k$  における住宅用太陽光発電設備導入による EF 削減量の物理的限界量[ha]  
 $H_{area}^k$  : 都市  $k$  の導入可能戸数[戸]  
 $r_q^k$  : 都市  $k$  の一戸建て住宅における建築時期が昭和 56 年以降である割合  
 $E_{house}^k$  : 都市  $k$  における一戸当たりの年間予想発電量[kWh/戸・year]  
 $S$  : 住宅一戸あたりの住宅用太陽光発電設備における標準的な導入システム容量[kW/戸]  
 $E_{year}^k$  : 都市  $k$  のシステム容量 1kW 当たり年間予想発電量[kWh/kW・year]  
 $r_e^k$  : 都市  $k$  における電力事業者の調整後排出係数[t-CO<sub>2</sub>/kWh]<sup>27)</sup>  
 $r_s$  : 森林の CO<sub>2</sub> 吸収効率[t-CO<sub>2</sub>/ha]

#### b) 交通の自家用自動車から公共交通への転換

輸送量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量は自家用自動車よりもバスや鉄道のほうが少ない<sup>41)</sup>。自家用自動車による移動を徒歩や自転車、公共交通で代替した分だけ、CO<sub>2</sub> 排出量は削減可能といえる。したがって、本研究では自家用自動車による移動のバスへの転換を仮定し、その CO<sub>2</sub> 排出量

削減による EF 削減量を分析する。公共交通への転換による CO<sub>2</sub> 減による EF 削減量(以下「交通シナリオ削減量」),  $EF_{cut.car}^k$  は式(6)、その物理的な制限 $EF_{cut.solar.pot.}^k$  は式(7)に示す。そして、交通シナリオ強度は、後述のアンケート調査結果から算出する。「自家用自動車の利用を減らす際に、公共交通への転換が選択肢になるかどうか」という意識について、交通シナリオ強度として用いる。

平成 22 年全国都市交通特性調査<sup>42)</sup>及び平成 22 年度道路交通センサス<sup>43)</sup>を用いて、自家用自動車による利用量を把握し、それを平成 21~25 年家計調査<sup>39)</sup>の都市階級別ガソリン消費量の平均によって重みつけし自家用自動車から公共交通への転換による EF 削減量の物理的限界量を推計する。

$$EF_{cut.car}^k = \sum_{j=1}^6 \left( \frac{p_j^k}{p_s^k} \cdot r_j^{car} \cdot EF_{cut.car.pot.}^k \cdot r_g^k \right) \quad (6)$$

$EF_{cut.car}^k$  : 都市  $k$  における交通シナリオ削減量[ha]  
 $p_j^k$  : 都市  $k$  における生活グループ  $j$  の人口[人]  
 $p_s^k$  : 都市  $k$  におけるシナリオ人口[人]  
 $r_j^{car}$  : 交通シナリオ強度(生活グループ  $j$  の交通転換率)  
 $EF_{cut.car.pot.}^k$  : 都市  $k$  における自家用自動車から公共交通への転換による EF 削減量の物理的限界量[ha]  
 $r_g^k$  : 全国を 1 とした時の都市  $k$  の規模別ガソリン購入量比

$$EF_{cut.car.pot.}^k = \frac{(r_a - r_b) \left\{ \sum_{m=1}^2 (a_m^w \cdot r_c \cdot t_c \cdot v \cdot day^w) + \sum_{m=1}^2 (a_m^h \cdot r_c \cdot t_c \cdot v \cdot day^h) \right\}}{r_s} \quad (7)$$

$EF_{cut.car.pot.}^k$  : 都市  $k$  における自家用自動車から公共交通への転換による EF 削減量の物理的限界量[ha]  
 $d$  : 一日当たり・一人当たりの平均旅行距離[km/人・day]  
 $a_m^w$  : 平日における目的  $m$  のトリップ生成原単位[トリップ/人・day]  
 $a_m^h$  : 休日における目的  $m$  のトリップ生成原単位[トリップ/人・day]  
 $r_c$  : 自動車分担率  
 $t_c$  : 自動車 1 トリップ当たりの所要時間[min]  
 $v$  : 自動車の平均旅行速度[km/min]  
 $day^w$  : 平日日数[day]  
 $day^h$  : 休日日数[day]  
 $r_a$  : 自家用自動車の輸送量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量[g-CO<sub>2</sub>/人・km]  
 $r_b$  : バスの輸送量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量[g-CO<sub>2</sub>/人・km]  
 $r_s$  : 森林の CO<sub>2</sub> 吸収効率[t-CO<sub>2</sub>/ha]

#### c) 国産品選好による海外輸入食料品輸送の減少

海外輸入食料品は同じ国産食料品と比べた際に、輸送にかかる CO<sub>2</sub> 排出が大きい。したがって、海外輸入食料品の消費を国産食料品に代替した際には、その量と生産国との距離に応じた CO<sub>2</sub> 排出量が削減される。その海外輸入食料品輸送の減少による EF 削減量(以下「国産品

選好シナリオ削減量」)， $EF_{cut,food}^k$ の算出方法は式(8)に表す。

具体的には、品目別の消費量と自給率から海外輸入食料品消費について削減余地を推定し、海外輸入食料品輸送にかかるCO<sub>2</sub>減によるEF削減について、どの程度の強度が見込めるかを検討する。品目別の平均年間消費量は、平成24年国民健康・栄養調査<sup>29)</sup>から、海外輸入食料品の輸送にかかるCO<sub>2</sub>については平成25年の貿易統計<sup>29)</sup>、及びCFP算定用二次データ<sup>40)</sup>より品目ごとに重量ベースの排出原単位を推計する。国産品選好シナリオ強度(生活グループ $j$ の国産品選好度)は、後述のアンケート調査結果による。

$$EF_{cut,food}^k$$

$$= \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{12} \{f_i^k \cdot p_j^k (r_j^{food} - r_{suff,i}) \cdot r_{imp,i}\} / r_s \quad (8)$$

$EF_{cut,food}^k$  : 都市 $k$ における国産品選好シナリオ削減量[ha]

$f_i^k$  : 都市 $k$ における品目 $i$ の平均年間消費量[kg/人・year]

$p_j^k$  : 都市 $k$ における生活グループ $j$ の人口[人]

$r_j^{food}$  : 国産品選好シナリオ強度(生活グループ $j$ の国産品選好度)

$r_{suff,i}$  : 品目 $i$ の自給率

$r_{imp,i}$  : 品目 $i$ のCO<sub>2</sub>排出原単位[t-CO<sub>2</sub>/t]

$r_s$  : 森林のCO<sub>2</sub>吸収効率[t-CO<sub>2</sub>/ha]

## (2) 生活グループごとの潜在的シナリオの強度設定

個人の生活の見直しについてはシナリオ分析を行うが、その強度の設定においては陳ら<sup>37)</sup>の行った環境配慮行動と意識についてのアンケート調査結果に基づき、より地に足の着いた評価を試みる。各強度の意味は以下となる。

- 1) 潜在設置率：アンケート調査による「今後住宅用太陽光発電を導入したい」と回答した人の割合；
- 2) 交通転換率（通勤・通学）：アンケート調査による「自家用自動車の利用を減らす際に、移動目的が通勤・通学の移動手段を公共交通へ転換したい」とする人の割合；
- 3) 交通転換率（私事）：アンケート調査による「自家用自動車の利用を減らす際に、移動目的が通勤・通学の移動手段を公共交通へ転換したい」とする人の割合；
- 4) 国産品選好度：アンケート調査による「高くても海外輸入品よりも国産品を購入したい」と回答した人の割合。

また、生活の様態は、そのライフステージによって異なる。本検討では、陳ら<sup>37)</sup>の環境配慮行動と意識に関するアンケート調査及び、その結果に基づく生活グループの設定を参考に、生活グループごとの各シナリオにおけ

る実現の強度設定を行った。グループ別の強度を図-2に示す。(1)で記述したように、「潜在設置率」は太陽光シナリオ強度、「交通転換率（通勤・通学）」と「交通転換率（私事）」は交通シナリオ強度、「国産品選好度」は国産品選好シナリオ強度と設定し、各シナリオ削減量を算出する。

## (3) 地方中心都市の持続可能性の現在と潜在的な改善可能性

まずは、地方中心都市の環境バランスをUTモデル<sup>29)</sup>で算出する。また、(1)で記述したような三つのシナリオを設定し、(2)で明らかにしたシナリオ強度を用いて生活グループ別の潜在的環境負荷削減量を算出する。さらに、生活グループは職業と年齢によるものであり、国勢調査から広く得ることのできるごく基礎的な個人属性によって分類されている。したがって、対象都市の統計データより生活グループごとの人口を整理することで、その人口構成ごとに強度を適用した計算が可能となっている。

対象38都市の現在の環境負荷超過率と、潜在的な改善可能性の計算結果を表す散布図を図-3に示す。具体的にはY軸に各都市のEF、X軸にBCをプロットしている。各都市のポイントより伸びる矢印が環境バランスの変化の動きを示し、その長さがEFの潜在的な削減量となっている。また、図-3右側の拡大図は $r=1$ に近い4都市の3シナリオごとの潜在的改善量を示しているものである。傾き $r$ の小さい都市ほど環境負荷超過率が小さくなる。

図-3から、地方中心都市のなかでも、環境負荷超過率が0.59（鶴岡）から18.4（大牟田）までと大きな差がで

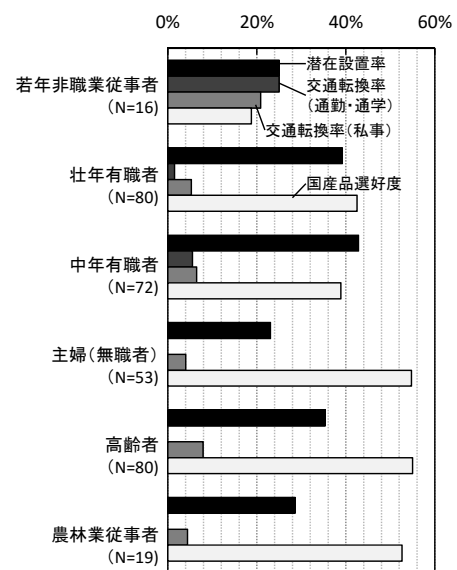


図-2 生活グループごと、シナリオごとの強度設定

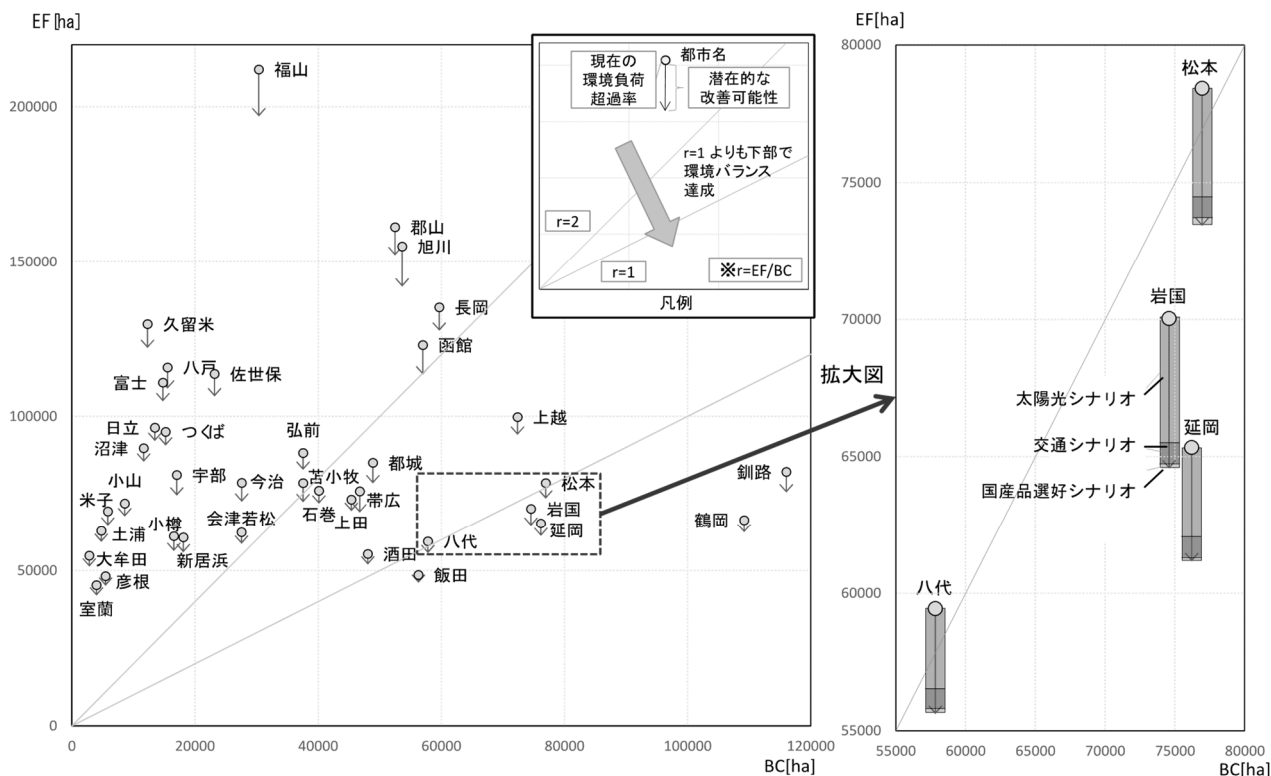


図-3 シナリオによる環境バランスの潜在的改善可能性

ていることを明らかにした。また、ほとんどの都市で十分に環境バランスが達成できていないことが示された。38 都市中で環境バランスを達成できているのは、釧路、鶴岡、岩国、延岡、飯田の 5 都市に留まっている。また松本、八代、酒田のように、環境負荷削減の対策次第では、環境バランスの達成を目指せる都市も見受けられた。上記の都市の中でも例えば飯田は BC が最も小さく、潜在的な EF 削減量も小さい。一方で、釧路や鶴岡は BC も潜在的な EF 削減量も相対的に大きい。この前者と後者では今後の施策の展開における自由度が異なってくると考えられる。なお、 $r=1$  に近い 4 都市について、潜在的な EF 削減量 3 シナリオにおける内訳（図-3 右側拡大図）を見ると、その構成に大きな差異は見られない結果となった。

## 5. 結論

本検討はメテオグラム図を用いて粗いながらも環境バランスの視覚化を実現することで、長期的な EF 及び BC および両者のバランスの把握し、分権化の進んだ地方自治体の持続可能性の吟味を行った。

過去については、50 年間の環境バランスの変化を明らかにし、環境バランスの達成状況が年々悪化していることを判別できた。また、人口減少の原因によって環境

バランスを回復したケースが見られた。将来の潜在的改善可能性については、地方中心都市のなかでも、環境バランスを達成できている都市は 38 都市中 5 都市に留まっていること、また、環境負荷削減策によっては環境バランスの達成の可能性が潜在している都市も存在していることが示された。都市間には大きな差が存在していることが判明した点も一つの成果である。

本研究では 2010 までの環境バランスを算出したが、将来の継続的な記録と評価が望まれている。潜在的な改善性については、EF の改善しか検討できておらず、各都市の土地利用特性に応じて、BC と両方の改善によりさらに多くの都市の環境バランスの達成が期待されている。それに伴って都市ごとの対応する政策談義も幅広い展開が可能になると考えられる。また、分析の精度をさらに高めて行くとともに、多少の改善では環境バランスが達成できそうにない地域に対し、キャップアンドトレードのような仕組みも含めてどのように政策的に対応していくのが望ましいか、検討をさらに加える必要がある。

**謝辞：**本研究の実施においては JSPS 科学研究費 (26289170) の助成を得た。記して謝意を申し上げる。

## 参考文献

- 1) United Nations, Framework Convention on Climate Change, [http://unfccc.int/meetings/paris\\_nov\\_2015/meeting/8926.php](http://unfccc.int/meetings/paris_nov_2015/meeting/8926.php) (最終閲覧 2016.1)



- 2) Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., Steffen, W., Glaser, G., Kanie, N. and Noble, I. : Sustainable development goals for people and planet, *Nature*, No. 495, pp. 305-307, 2013.
- 3) Tasaki, T., Kameyama, Y., Hashimoto, S., Moriguchi, Y. and Harasawa, H. : A survey of national sustainable development indicators, *International Journal of Sustainable Development*, Vol. 13, No. 4, pp. 337-361, 2010.
- 4) Wackernagel, M. and Rees, W. E. (和田喜彦訳) : エコロジカル・フットプリント, 合同出版, 2004.
- 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 2016.1)
- 6) 和田喜彦 : 「エコロジカル・フットプリント」分析の考え方と日本への適用結果—日本人の資源消費水準は永続的か?, 産業と環境, pp. 58-63, 1995.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Chen, H., Ise, S. and Taniguchi, M. : Concept of ecologically balanced area based on Ecological Footprint, *Sustainable Development and Planning VI* (ISSN: 1746-448X), WIT Press, 2013.
- 11) Wackernagel, M., Monfreda, C., Erb, K. H., Haberl, H. and Schulz, N. B. : Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach, *Land Use Policy*, Vol. 21, Issue 3, pp. 261-269, 2004.
- 12) 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.
- 13) 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, Vol. 14, No. 1, pp. 27-34, 2006.
- 14) 余川雅彦, 加賀屋誠一, 内田賢悦 : エコロジカル・フットプリント算出のための産業連関分析に関する研究, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, No. 41-3, pp. 199-204, 2006.
- 15) 谷口守, 阿部宏史, 足立佳子 : 地域レベルでの環境容量の試算と環境負荷の要素分解—石高データを活用した「成長」と「環境」のアンチノミー分析—, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, No. 2, pp. 255-263, 2002.
- 16) 倉阪秀史 : 永続地帯報告書 2013 年度版, <http://sustainable-zone.org/> (最終閲覧 2016.1)
- 17) 竹内菜穂, 斎藤修 : 森林バイオマス利用によるエネルギー自給ポテンシャルの推定—北海道下川町を事例として—, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 69, No. 6, pp. II\_321-II\_327, 2013.
- 18) 竹端哲郎, 松井孝典, 町村尚, Robert, N. S. : 地域スケールでの民生業務部門活動の森林生態系サービス依存度評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 68, No. 6, pp. II\_15-II\_23, 2012.
- 19) 小田佳代子, 陳鶴, 谷口守 : さいごに生き残る都市を考える—ローカールスケールにおける環境バランスの視点から—, 都市計画報告集, Vol. 13, No. 4, pp. 174-179, 2015.
- 20) United Nations Environment Programme, Report of United National Conference on The Human Environment, <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97> (最終閲覧 2016.1)
- 21) United Nations, Agenda 21 -Report of United National Conference on Environment and Development-. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf> (最終閲覧 2016.1)
- 22) 国土交通省 : 21 世紀の国土のグランドデザイン—第 2 章—第 2 節 地域の個性を生かす新しい文化の創造と発信, 1998.
- 23) 氏原岳人, 古市佐絵子, 白戸智, 谷口守 : エコロジカル・フットプリント指標に基づく自治体レベルの環境バランス評価—実践計算パッケージ「EF-Calc」を用いて—, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol. 38, pp. 245-251, 2010.
- 24) 総務省統計局 : 平成 22 年国勢調査, 都道府県別集計, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index2.htm> (最終閲覧 2016.1)
- 25) 厚生労働省 : 国民栄養調査, [http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou\\_eiyuu\\_chousa.html](http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyuu_chousa.html) (最終閲覧 2016.1)
- 26) 財務省 : 平成 25 年貿易統計—輸送形態別集計, <http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm> (最終閲覧 2016.1)
- 27) 農林水産省 : 作物統計, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/> (最終閲覧 2016.6)
- 28) Food and Agriculture Organization of United Nation: Agricultural Production, <http://faostat.fao.org/> (最終閲覧 2016.6)
- 29) 農林水産省 : 平成 21 年度 森林・年林業白書, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/21hakusho/index.html> (最終閲覧 2016.6)
- 30) 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.
- 31) 総務省 : 平成 17 年産業連関表, <http://www.stat.go.jp/data/io/ichiran.htm> (最終閲覧 2016.6)
- 32) 総務省統計局 : 日本の統計 2016, <http://www.stat.go.jp/data/nihon/index1.htm>
- 33) 経済産業省 : 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」, [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/) (最終閲覧 2016.1)
- 34) 総務省統計局 : 平成 21~25 年家計調査, <http://www.stat.go.jp/data/kakei/> (最終閲覧 2016.1)
- 35) 農林水産省 : 農林業センサス, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/05houkokusyo.html> (最終閲覧 2016.1)
- 36) 林野庁 : 「森林資源の現状」, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/index1.html> (最終閲覧 2016.1)
- 37) 陳鶴, 小田佳代子, 谷口守 : 日常生活の見直しに基

づく環境改善の可能性，土木計画学研究・講演集，Vol. 50, 2014.

- 38) 総務省統計局：平成 20 年住宅・土地統計調査，<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.htm>（最終閲覧 2016.1）
- 39) 国土交通省：平成 25 年国土交通白書，第 7 章 安全・安心社会の構築－第 2 節 自然災害対策－コラム 建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）の改正，<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/index.html>（最終閲覧 2016.1）
- 40) 太陽光発電協会：太陽光発電システム手引書－基礎編，2010.
- 41) 国土交通省：環境：運輸部門における二酸化炭素排出量，[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/so-sei\\_environment\\_tk\\_000007.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/so-sei_environment_tk_000007.html)（最終閲覧 2016.1）
- 42) 国土交通省：平成 22 年度全国都市交通特性調査，[http://www.mlit.go.jp/to-shi/city\\_plan/toshi\\_city\\_plan\\_tk\\_000007.html](http://www.mlit.go.jp/to-shi/city_plan/toshi_city_plan_tk_000007.html)（最終閲覧 2016.1）
- 43) 国土交通省：平成 22 年度道路交通センサス－旅行速度調査，<http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>（最終閲覧 2016.1）
- 44) CFP プログラム：CFP 算定用二次データ，<https://www.cfp-japan.jp/calculating/verify/data.html>（最終閲覧 2016.1）

(2016. 2. 26 受付)

## VISUALIZING THE ENVIRONMENTAL BALANCE: RETROSPECTIVE, PERSPECTIVE, AND PROSPECTIVE

He CHEN, Kayoko ODA and Mamoru TANIGUCHI

Visualizing the environmental balance of consumption from human activity and natural environmental capacity is extremely important to improve sustainability. This study proposes a “Meteor-gram” as a method of visualization. This improved ecological footprint indicator and bio-capacity indicator presents the environmental balance of the past, present, and future. Results show that: 1) the environmental balance of the past 50 years has been worsening year-by-year; 2) population decline and other factors are restoring the environmental balance in some places; 3) balancing environmental consumption and capacity depends on environmental load reduction measures; 4) potential improvement differs greatly among cities.