

長期的動向を踏まえた環境バランスの可視化 —「メテオグラム」の活用を通じて—

陳 鶴¹・小田 佳代子²・谷口 守³

¹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

²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

³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の取組みを進めるためには、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の長期的変化を可視化することが重要である。本研究では環境バランスの数値による評価を踏まえ、より発展的な可視化の手法として「メテオグラム」を提案した。本研究は、都道府県レベルでの環境負荷(エコロジカル・フットプリント)と、地域の環境受容とのバランスの長期的変化を明らかにした。結果：1) 過去50年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；2) 各都道府県の環境負荷超過率は大きな差があり；3) 環境バランスが達成されているのは7つの都道府県に留まっていることが示された；4) 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。

Key Words : *Environmental balance, Sustainability, Ecological Footprint, Time series*

1. 背景

持続可能な社会の実現が喫緊の課題とされ久しいが、2012年に開催されたRIO+20において確認されたのは、20年前のリオサミットの合意が十分に果たされず、その期間、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、「持続可能な社会」の考え方自体を見直す議論がなされている。従来、経済・社会・環境は持続可能な社会を支える同列の柱として説明されてきたが、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も提言されている¹⁾。その定義に従えば、環境が人間の生活の根本として支配的な要素であり、それに見合った生活ができているかどうかということが持続可能性を端的に示すといえる。今後の日本では耕作地荒廃やエネルギー不足などの環境問題がさらに深刻化し、その「土台」を崩れる可能性がある。こういう課題は動的に発展しているから、「持続可能な社会」を進めるには、まず、人間の生活に伴う環境負荷がどのように変化しているのか、環境受容量がそれを吸収できるように増減しているのかと言う過去の状況を把握する必要がある。

また、環境の状況を把握する際に、多くの場合

は、統計データや堪定表などの数字の羅列であり、この状態のままでは目的達成に役立つ有用な情報を伝えることが困難である。このような問題を解決するために、データを探索的に分析し、その結果をグラフで「可視化」という一連の作業が必要になる。

この可視化には持続可能性指標が用いられ、数多くの指標が開発されてきている。本研究では、上記の問題意識から、環境受容量と個人の生活を結びつけることができかつ、改善の検討を促せるようなわかりやすさ、換言すれば、一元的に環境負荷と環境受容量、環境バランスとを示すことのできる指標による検討を進める。その目的に沿う指標として、エコロジカル・フットプリント(以下EF)を使用する。これは、「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を生み出す自然界の生産力、および廃棄物処理に必要とされる自然界の処理吸収能力を算定し、生産可能な土地面積に置き換えて表現する計算ツール」(Wackernagel and Rees, 2004)²⁾である。このEFを用いることで、環境負荷をEFとして、環境受容量をバイオキャパシティ(以下BC)として定量化し、環境バランスが達成されているかどうかによって、持続可能性を評価することができる。

また、持続可能性指標による可視化の際には、一定の閉じた範囲での議論が重要である。現在の日本

人は、生活している地域以外の多くの生産品、さらに海外輸入品に頼ったものであり、これは、地域で賄えないBCを金銭によって地域外から輸送していると言い換えることができる。そのため、日本全体のEFの長期的変化をWWF³⁾によって明らかにしていたが、国スケールより細かい検討が必要となる。

上記を踏まえ、本検討では、日本における47の都道府県の長期的な環境バランスをEFとBCで示す。また、そのうえで、数値による可視化から一歩進め、一元的な図表として示す新たな表現手法の提案を目的とする。

長期的変化については、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。全国における環境負荷(EF)と環境容量(BC)の変遷と各都道府県における異なる発展経路を把握することができる。可視化については、小田ら⁴⁾により提案したメテオグラム図を活用する。その図は検討対象とした都道府県群の動向が流星(meteor)のように流れる図となるため、便宜上この図をメテオグラムと呼ぶ。小田ら³⁾の研究は都市の潜在的な環境改善可能性をメテオグラム図で表すものであり、本研究における長期的な変化を可視化するために有用な情報を提供した。

2. 既存研究

EFを用いた各地域の持続可能性評価は国、市町村、集落レベルに至るまで、多くの研究が蓄積されている。EFの算出方法については、EF指標の基本的な算出式としては、Wackernagelら²⁾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⁵⁾手法を用いて、世界約150カ国のEF指標値を算出している。日本においては、和田(1995)⁶⁾によって、日本(人)のEF指標値が算出されたことに端を発した。地域レベルにおいては、谷口ら(2003)⁷⁾により、全国の都道府県を対象としてEF指標値が算出された。また、清岡ら(2005)⁸⁾は、これまでの都道府県レベルからさらにブレークダウンさせ、市町村レベルにおけるEF指標値の算出方法を提案し、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)⁹⁾、Chenら(2013)¹⁰⁾による研究が進められている。EFに関する多くの先行研究では、特定の年の値に焦点を当ててきたが、持続可能な発展を考える上では、時間的視野を持って動学的に分析することが重要である。このような研究が存在しているが¹¹⁾、国レベルの分析に留まっている。

その一方で、Bicknell(1998)ら¹²⁾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、伊藤ら(2006)¹³⁾、余川ら(2009)¹⁴⁾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、また、実際に生産される財(金額ベース)の土地生産

性で評価する場合が多く、例えば物価などの変動によって環境負荷が左右されるといった問題がある。

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(2002)¹⁵⁾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(2013)¹⁶⁾、竹内ら(2013)¹⁷⁾など、多数の研究が見られる。また、竹端ら(2012)¹⁸⁾は「森林生態系サービス」という形で捉え、民生業務部門活動における依存度を評価している。

EFの算出事例は国レベルから地区レベルまであり、本研究における長期的な変化を算出的蓄積が十分である。また、BCに関しても様々な捉え方による研究蓄積があるものの、その個別の精度を高めようとした研究が主体である。本研究はそのそれぞれの精度を従来研究のような視点で高めることを主目的にしたものではない点に注意が必要である。EFとBCのバランスという観点から環境面での持続可能性の変化、行政担当者のみならず住民視点でもわかりやすい視覚的なツール提供とその特性把握を主眼とするもので、その点で強いオリジナリティを有するものである。

3. 算出方法

(1) EF計算手法

EF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て氏原ら(2010)¹⁹⁾より、EFを算出することができる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。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、5)CO₂吸着地の5要素を想定し、そのそれぞれの算出式は表-1に示す通りである。

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

EF_i : 要素*i*のフットプリント値(ha)

i: 対象要素

本研究は1970年から10年毎のEF値を算出する。計算の手順としては、まず、構成要素1)-4)については、UTモデルに基づいて、国民栄養調査²⁰⁾などのデータを用いて算出する。要素5)のエネルギーフットプリントについては、「総合エネルギー統計」²¹⁾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。

データ収集が困難な項目がある。構成要素2)については、2010年において一人当たりの繊維フットプ

リントを UT モデルによって算出して、その以前のは家計調査²²⁾の被服費による推計する。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」²⁶⁾は 1990 年からしか存在しないから、その以前の EF 値は現有のデータを回帰分析を行って推測する。そのような算出モデルは単純すぎるかもしれないが、実際の環境負荷を過小評価している。しかし、本研究は環境バランスの全体像を可視化重点に考察することを目的にする。そのため、現在使用しているデータは環境バランスの変化を明らかにするには適切だと判断する。

(2) BC 計算手法

本分析における BC とは、EF 指標値の各構成要素を入れるための土地利用面積（例えば、対象地域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-1 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、農林業センサス²³⁾と林業統計²⁴⁾各土地利用面積を採用した。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。

$$BC^k = bc_{fm}^k + bc_f^k + bc_g^k + bc_b^k \quad (3)$$

- 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 (farmland) の面積 (ha)
- bc_f^k: 都道府県 k における森林地 (forestland) の面積 (ha)
- bc_g^k: 都道府県 k における牧草地 (grassland) の面積 (ha)

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	$F_j^k = \sum_{n=1}^{10} p \times f_j$	f _j : 品目 j の一人あたり消費量 (ton/人) α _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 P: 日本の人口 (人)
衣料		
2) 牧草地	$EF_{fg} = \sum_j \frac{f_j}{\alpha_j}$	
食肉、牛乳 毛糸		
3) 森林地 (紙製品)	$EF_p = \frac{q}{p} \times \sum_{m=1}^3 \frac{w_m}{\beta_m}$	W _m : 輸入先別 m ノバルブ・チップ需要量 (日本) (m ³) β _m : 輸入先別 m 森林蓄積成長量 (m ³ /ha) q: 家計消費割合 (%)
4) 都市用地	$EF_b^k = \frac{1}{p_k} \sum_{i=1}^{13} b_s^k$	b _s ^k : 都道府県 k の土地利用 i の土地面積 s: 「日本の統計」による 13 区分 p _k : 都道府県 k における人口 (人)
5) CO ₂ 吸収地	$EF_h = \frac{E_e^k \times r_e}{r_s}$	E _e : 都道府県 k の使用エネルギーの年間消費量 (kWh) r _e : 使用エネルギー e の調整後排出係数 (t-CO ₂ /kWh) r _s : 森林二酸化炭素吸収効率 (ton-CO ₂ /ha) e: 三区分 (電力、ガス、灯油)

bc_b^k: 都道府県 k における都市利用の土地の面積 (ha)

(3) 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_k) の算出式を以下に示す。

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

- EF^k: 都道府県 k における EF 指標値 (ha)
- BC^k: 都道府県 k における環境受容量 (ha)

4. 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、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) 全ての県中に北海道の EF 値がとても高いが、BC も最も大きいである。それは面積が広いと人口が少ないだけでバランスが達成していた。
- 6) 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。
- 7) 各都道府県の環境負荷超過率は大きな差があり(2010 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

5. 結論

本検討では長期的な EF 及び BC および両者のバランスの把握、及びその潜在的な改善可能性を視覚的に表現する「メテオグラム」の提案を行った。本研究では過去 50 年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。

本研究では、過去のデータにより環境バランスを評価したが、今後どのような政策を取り組むべきかについて言及していない。それについて、具体的な行政・企業・住民の意識を把握した上に、シナリオなどの手法で環境改善の可能性について深く分析することが求められている。また、地方分権が進む事によって、地方自治体の自立が求められる中で、それぞれの環境上の立ち位置を把握できるとともに、各自自治体の特性に応じた環境バランスの分析と効果的な戦略が求められている。

今後は、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⁴⁰⁾、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) Griggs, D., Mark S., Owen G., Johan R., Marcus C., Öhman, Priya S., Will S., Gisbert G., Norichika K., and Ian N.: Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, no.495, pp.305-307, 2013.
- 2) Wackernagel, M. and W. E. Rees. 和田喜彦訳：エコロジカル・フットプリント。2004. 合同出版。
- 3) WWF ジャパンレポート：http://www.wwf.or.jp/activities/upfiles/lha_GFN.pdf, (最終閲覧 2015.7)
- 4) 小田佳代子・陳鶴・谷口守：さいごに生き残る都市を考えるーローカスケールにおける環境バランスの視点からー, 都市計画報告集/13(4)/pp.174-179, 2015-03
- 5) WWF: LIVING PLANET REPORT 2012: http://www.wwf.or.jp/activity/lib/lpr/wwf_lpr_2012.pdf, (最終閲覧 2015.7)
- 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ー日本人の資源消費水準は持続的か?, 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., 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
- 11) Wackernagel M., Monfreda C., Erb K.H., Haberl H., Schulz NB. '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 and Use Policy*, Volume 21, Issue 3, P261-269, 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ー方法論と地域への適用ー, 産業連関, 14, 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 2015.7.
- 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

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) 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.138, pp.245-251, 2010.
- 20) 厚生労働省. 「国民栄養調査」. http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html. 最終閲覧 2015.7.

- 21) 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/. 最終閲覧 2015.7.
- 22) 日本化学繊維業会. 「家計の費目別最終消費支出」. <http://www.jcfa.gr.jp/data/various/>
- 23) 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 2015.7.
- 24) 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 2015.7

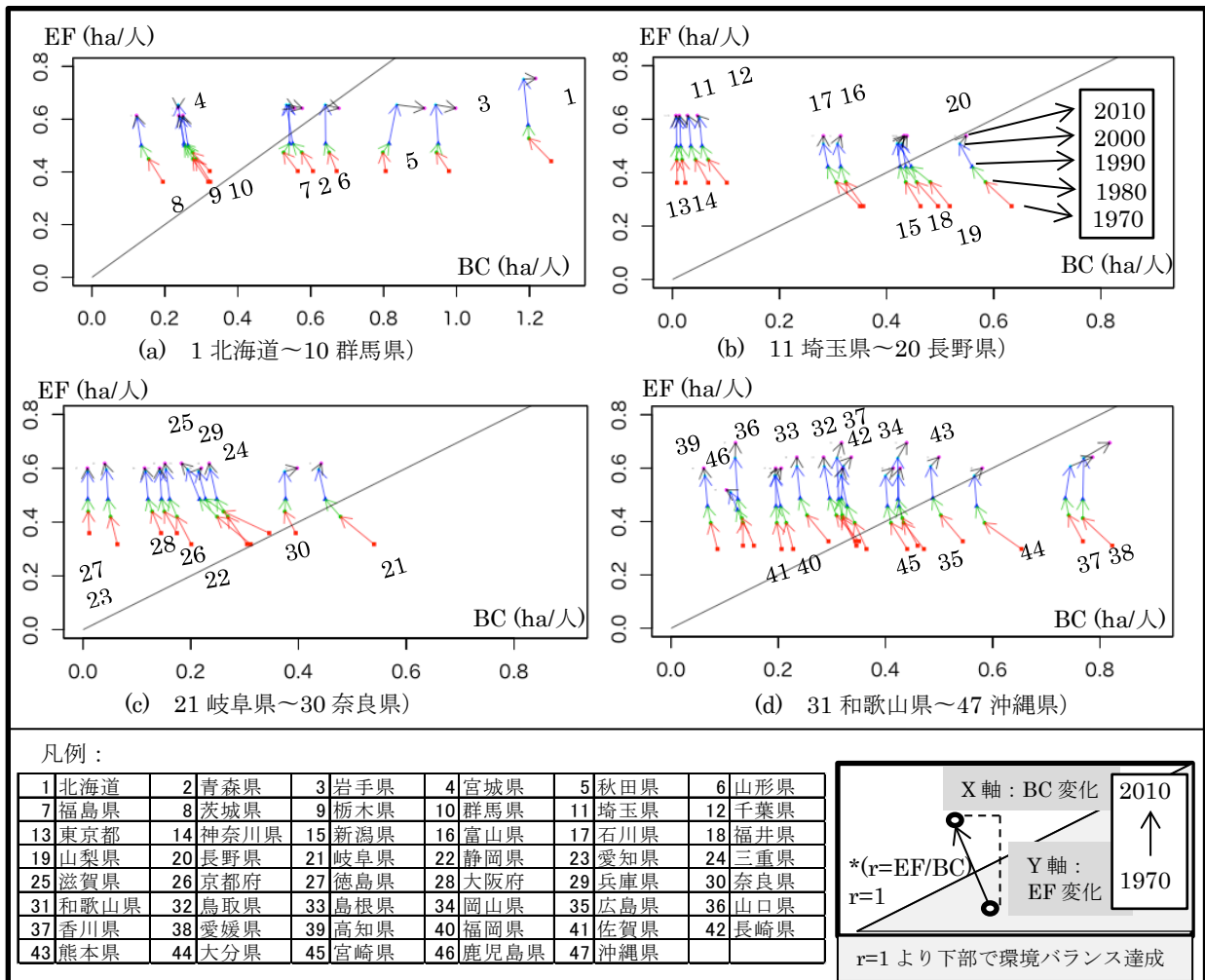


図-1 環境バランスの変化のメテオグラム図