

農業分野におけるエコロジカル・フットプリント分析の 応用と研究の動向

車 競飛*・金 紅実**

1. はじめに

自然資本とは、将来にわたって有益な財と価値あるサービスを生み出してくれるあらゆる種類の自然資産ストックであり、そして生態系の構成要素とそれらの間の構造的関係性のすべてを含んでいるものである。自然資本のとらえ方として、環境経済学の物質代謝論的なアプローチが挙げられる。物質代謝論的なアプローチのなかでも、エコロジカル・フットプリント分析は、自然資本の持続可能な合理的利用とそこから生み出されるフローとしての生態系サービスの関係を包括した分析する手法として知られている。エコロジカル・フットプリント指標の推計方法は、分析目的によって異なる場合が多く、また分析対象の選択も多種多様である。

農業は、人工資材と自然資材を投入し、自然資本を利用して生態系サービスを生み出す人間活動である。農業分野において、エコロジカル・フットプリント分析は、持続可能性を定量的に評価する代表的な手法として、広く使われている。本稿では、エコロジカル・フットプリント分析の農業分野における応用とその研究の動向を整理したうえで、今後の課題を展望していきたい。

2. エコロジカル・フットプリント分析の理論的枠組み

2.1. エコロジカル・フットプリント分析の概要

エコロジカル・フットプリントは、1990年代初頭においてカナダのプリティシュコロンビア大学大学院コミュニティー地域計画学研究科のウィリアム・リース教授と当時大院生であったマティス・ワケナゲルによって開発されたものである。その定義は次のとおりである。すなわち、「ある特定の地域の経済活動、またはある特定の物質水準の生活を営む人々の消費活動を永続的に支えるために必要とされる生産可能な土地および水域面積の合計（ある地域で必要とされる資源を永続的に産み出し、且つそこで排出される廃棄物質を継続的に吸収処理するために必要となる生態系・水土の面積の合計）」[18]である。エコロジカル・フットプリント指標は、表1に示したように、6つの土地カテゴリーによって構成されている。

これらの土地カテゴリーから構成された需要側のエコロジカル・フットプリントと、供給側のバイオキャパシティとのバランスを比較することによって、人間活動のオーバーシュートを定量的に示すことができる。また、異なった製品・技術と行動パターンのエコロジカル・フットプリントを推計し、持続可能性の比較も可能である。エコロジカル・フットプリントの分析を通して、政策、プロジェクト、技術的な選択肢などの環境に与える影響を、定量的な判断基準で客観的に評価して

* 京都大学大学院経済学研究科 博士後期課程

** 龍谷大学政策学部 准教授

表1 エコロジカル・フットプリントの土地カテゴリー

耕作地	穀物、飼料、イグサ、棉花など生産のために必要とされる土地。
牧草地	酪農製品、食肉製品、羊毛などの生産のために必要とされる土地。
森林地	家具、建材や紙製品などの生産のために必要とされる優良森林地。
エネルギー 関連用地	化石燃料燃焼から排出される二酸化炭素を吸収するための土地、または、 バイオマス代替燃料を生産するための土地。
生産能力阻 害地	道路、建物、廃棄物最終処分場など土地の生産ポテンシャルが阻害されて いる土地。
漁場	魚や海藻などを生み出す海洋、河川や湖沼等の水域。

筆者作成

優先順位を決定することが可能となる。

エコロジカル・フットプリントは、開発された当時では Appropriated Carrying Capacity (ACC) という名称で呼ばれていた。Appropriated とは、「他から持って来られた」、「収奪された」などの意味の英語である。Carrying Capacity は、「環境収容力」、または「環境容量」と訳されている。したがって、全体的に言うならば、ACC とは、「他から持って来られた環境収容力」のことである。しかし、この呼称は専門的過ぎて、堅苦しいイメージが強い。計画学の研究者たちの間では、学問の研究成果を社会の変革に結びつけるには、行政の計画官だけでなく一般市民の問題に関する理解や変革プロセスへの参加が重要だと認識されている。そのため、市民にも受け入れ易い代替名称を模索した。その結果、イメージしやすく、抵抗感の少ない言葉として Ecological Footprint が選ばれたという経緯がある[28]。

エコロジカル・フットプリントの推計は、推計対象と規模によって、コンポーネント法とコンバインド法の二つに分けることができる。コンポーネント法は、比較的小さいスケールで、個別の財・サービスあるいは特定な経済活動を対象とするボトムアップ推計手法である。すなわち、個別の財・サービスの消費量について、それらの生産・消費・廃棄のライフ・サイクル全体において、投入された資源と排出された廃棄物の量を測定して、変換係数によってエコロジカル・フットプリントを推計する手法である。一方で、コンバインド法は、より大きなスケールで、ある地域・国あ

るいは特定な産業部門全体を対象とするトップダウン推計手法である。というのは、ある地域・国あるいは特定な産業部門における生産・輸入・輸出のマクロデータから物質消費（排出）量を計算し、変換係数によってエコロジカル・フットプリントを推計する手法である。

また、持続可能性概念の拡張とともに、持続可能性を評価するエコロジカル・フットプリント指標の分析対象と基準は同時に進化している。たとえば、国連開発計画（UNDP）が発表した「人間開発報告書2011」では、世代間公平と世代内公平という2つの公平性（equity）を強調するようになった。エコロジカル・フットプリント分析を用いて、生態系サービスの供給能力（バイオキャパシティ）と需要（エコロジカル・フットプリント）のギャップを計算することを通して、世代間公平を評価することができる。一方、複数の国（地域）の間、あるいはある国と世界平均のエコロジカル・フットプリントの比較を通して、世代内公平の評価も可能になる[7]。

エコロジカル・フットプリント研究は、当初世代間公平を中心として生態赤字に焦点を当てる傾向にあった。すなわち、異なった土地カテゴリーを一つの土地面積に統一し、生態系サービスの需給ギャップの大きさを計算することを通して、よりマクロな視点から社会の持続可能性を判定する（例えば、グローバルフットプリントネットワークは毎年、各国全体なエコロジカル・フットプリントを算定し、その公式をホームページで公表している）。他方、近年では、ある経済・社会活動

に関わるすべての土地タイプを一つの単位に統合せず、特定の土地タイプ（例えば、二酸化炭素吸収地）を比較する研究が行われてきた[10][14][16][22]。さらに、持続可能性概念の拡張とともに、世代内公平を重視する国の間における生態系サービスの移転に関する研究も進まれている[7][8][9][10][11]。

2.2. 実施手順

エコロジカル・フットプリント分析の実実施手順は、グラフ1で示したように、①システム設定、②データ処理と③影響評価・解釈の3つの部分から構成されている。以下では、この構成にしたがって、コンポーネント法とコンバインド法の具体的な計算方法を概説していく。

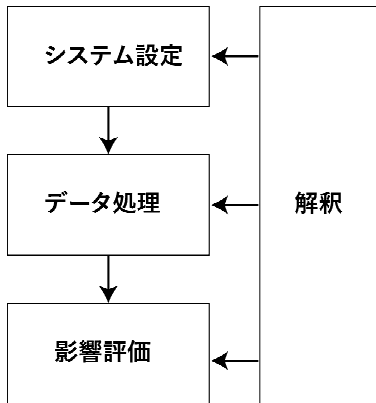


図1 EF分析の実施手順

筆者作成

システム設定は、分析目的と分析対象によって、推計手法とプロセスを設定する段階である。推計手法の選択については、製品レベルで精度高い分析および生産技術の比較などを行うには、生産・消費・廃棄の各段階が細かく設定可能なコンポーネント法を採用する。一方、地域・産業部門レベルの分析は、入手しやすく、整合性が優れたマクロデータに基づいてコンバインド法を用いる。コンポーネント法のプロセスの設定は、各段階における活動に必要とする資源やエネルギーの投入、そして環境負荷や廃棄物の排出などの集計すべき項目を規定し、分析の限界を設定していく。コンバインド法のプロセス設定は、分析対象、分析範

囲とそれに関連する原単位などを確定する。

データ処理段階において、コンポーネント法は、システム設定段階において規定した各項目の資源やエネルギーの投入、および環境負荷や廃棄物の排出に関するフローを示した図を作成し、モデル化する。つぎに、各段階における原材料の投入・排出およびエネルギー原単位のデータについて、その妥当性と整合性を検証しながら、収集する。一方、コンバインド法は、システム設定段階で規定した分析範囲におけるすべての製品の生産量、輸入量、輸出量のマクロデータ、および各製品のエネルギー原単位のデータについて、それぞれの妥当性と整合性を検証し、集計する。

影響評価と解釈段階においては、データ処理分析段階に集計したデータを利用し、土地カテゴリーごとのエコロジカル・フットプリント指標を計算する。解釈は、設定された目的及びプロセス設定とインベントリ分析、影響評価から得られた結果を整合し、エコロジー経済学の観点から説明していく。具体的な計算方法については、下記に示しているとおりである。

- ① 生態系が産み出すバイオマス再生可能資源の消費量を耕作地・牧草地・森林地・漁場の面積を計上する。
- ② バイオマス資源生産能力の阻害となっている土地面積を「生産能力阻害地」として加える。
- ③ 化石燃料消費については、「二酸化炭素吸収地」面積、または、「バイオマス代替燃料を生産するための土地」面積として計上する。
- ④ 金属資源については、その精錬・加工のためのエネルギー（化石燃料）消費として間接的に計上する。
- ⑤ 域内での「純消費」に関する土地水域面積を計算。国（地域）外で生産されたものでも、貿易を通して輸入され、域内で消費されたものについては、消費した国（地域）の責任としてその土地水域面積を加算する（バーチャル・ランド、バーチャル・オーシャン）。逆に域内で生産されたものでも、輸出され、域外で消費されたものの生産に

関する土地水域面積は除外する。

- ⑥ 食物連鎖の上位に位置する生物種の消費に関するエコロジカル・フットプリントは、第一次生産者（緑色植物や植物プランクトンなど）の生産量に換算して、所要面積を産出する。例えば、肉類・酪農製品の消費については、牛舎の面積だけでなく、穀物や牧草などの飼料生産のための農地・牧草地も計上する必要がある。漁業資源についても、魚種の栄養段階を考慮し、魚介類の消費量を植物プランクトンの生産量に還元して算出しなければならない。

エコロジカル・フットプリント計算では、計算根拠（例えば換算係数）が複数存在する場合は、エコロジカル・フットプリント面積が小さくなるような計算根拠を選択することが原則となっている。そのため、需要サイドのエコロジカル・フットプリントは全体として「控え目」な値となる。したがって、エコロジカル・フットプリントの値は「厳格にこの面積である」のではなく、「少なくとも、これだけの面積が必要となっている」ととらえることが適切であるとされている。逆に、供給サイドのバイオキャパシティについては、大きな数値になるような計算根拠を選択することを旨とする。したがって、生態学的ギャップ、すなわち、生態学的赤字、オーバーシュートの幅は、小さめ、控え目になる傾向がある。

2.3. 推計手法の改良

2.3.1. 産業連関分析の導入

ライフサイクル・アセスメントデータを利用したコンポーネント法は、製品レベルで精度の高い分析を行うことによって、特定の製品の分析が可能であるという利点がある。ただ、ライフ・サイクルにおける中間投入財をさらにさかのぼって全サプライチェーンの投入を明確することができず、意図的に限界を設定する必要がある。ゆえに推計の結果は、システムの設定のあり方に大きく左右されるという欠点がある。さらに産業部門あるいは国レベルなどのマクロな視点から持続可能性を評価するには、すべての製品・サービスに対してライフサイクル・アセスメントを行う必要がある。

こうした場合、個別な要素が過剰なため、データの集計ならびに調整が困難になることも予想される[26]。

上記のようなライフサイクル・アセスメントアプローチの欠点を補うため、産業連関分析を導入した。産業連関表を用いて、各産業部門のすべての製品を含んだサプライチェーンを対象として、一国内の複数の産業部門あるいは多国間貿易を行う場合におけるエコロジカル・フットプリントの算定が可能になる。たとえば、Bicknell [2]は、各部門別土地利用面積によって土地係数を求めたうえで、その土地係数を金額ベースの産業連関表に掛け合わせて算出した手法を提案している。その後、Ferng [4]、余川[22]、伊藤[23]は、いずれもBicknellの手法に修正を加えながら、金額ベースの産業連関表を利用して、エコロジカル・フットプリント分析の試みを行った。

一方、金額ベースの産業連関表を利用して、物質ベースの指標であるエコロジカル・フットプリントを測定して得られた結果は、正確さと精密さが不十分である。したがって、コンポーネント法を精緻化する過程で、多国間の数量ベース産業連関表（Multi-Regional Input-Output Model、以下MRIO）を利用する計算方法が開発された[3]。これは、通常のMRIOモデルに、土地転換係数の行列を導入し、GTAPデータベースを利用する方法である。多国間における貿易に伴う生態系サービス移転の場合に応用できる[8]。なお、GTAPデータベースには商品種類が限られているため（57品目）、推計結果は実際の国別貿易量とは乖離があることも指摘できる。

2.3.2. グローバル・ヘクタールとローカル・ヘクタールの応用

同じ土地カテゴリーの中でも、土地生産性は土地ごとに異なる。また国ごとの平均土地生産性についても各国バラバラである。それゆえに、一国の平均値を算出することが可能であっても、エコロジカル・フットプリントの国際比較を公平に行うためには、土地生産性の違いをなくす必要がある。すなわち、世界平均土地生産性を利用する必要がある。そのために、各国に固有の土地生産性を世界平均生産性に換算するための係数として、

収量係数（Yield Factor）が考案された。各国別各年別の収量係数を固有の土地生産性を乗じることで、世界平均土地生産性に換算することができる。すなわち、収量係数とは、各国別の同一土地カテゴリー（たとえば耕作地）の土地生産性の統一性を確保するものであり、世界平均土地生産性に換算するための係数である。

さらに、土地生産性の差は、同じカテゴリー内の差だけではない。というのは、たとえ同じカテゴリー内の生産性を世界平均地に換算したとしても、耕作地、牧草地、森林地、漁場のそれぞれの土地生産性の世界平均値は異なる。そのため、生産能力の違う土地カテゴリーの面積をそのまま加算したとしても、りんごとみかんの個数で合計するようなことになり、比較するときに不都合が生じる。なぜなら、生産性の高い土地カテゴリーほど係数は高く、土地生産性が低い土地は小さいからである。この問題を解決するために、土地生産性の高さに応じてウェイトが付けられた土地面積の合計値を計算するための係数としての等価係数（Equivalence Factor）が考案・採用されるようになった。

こうした収量係数および等価係数を用いて、以下の(1)式のように、ヘクタール（ha）をグローバル・ヘクタール（gha）に変換することが可能である。グローバル・ヘクタールとは、「地球上に存在している生産性を持つ土地・水域の総計の世界的平均生産性を有する仮想的な土地1ヘクタール」[3]を意味している。

$$EF_i = P_i / Y_i \times YF_i \times EQF_i \quad (1)$$

ただし、 P_i はある物質の量（米の収穫量、二酸化炭素の排出量など）と定義し、 Y_i は選定された土地の単位面積収穫（または排出、吸収）量である。 YF_i は収量係数である。 EQF_i は異なる土地面積を等価面積に変換する時必要な等価係数である。 YF_i は収量係数と定義し、計算方法は以下の(2)式通りである。

$$YF_i = Y_i / Y_w \quad (2)$$

Y_i は単位面積のあるタイプの土地の収穫（または排出、吸収）量と定義された。(2)式を(1)式に代入し、以下の(3)式になる。

$$EF_i = P_i / Y_w \times EQF_i \quad (3)$$

このように、収穫量、世界平均単位収穫量と等価係数を使用し、 EF_i の単位はグローバルヘクタール（gha）に変換できる。国際比較を行うことが研究目的とすれば、比較の公平性を考慮すべきである。そのためには、固有の土地生産性に収量係数を掛け合わせ、世界平均値（グローバル・ヘクタール）に変換することになる。一方、土地の技術向上努力や工夫の進み具合を見る場合には、土地固有の生産性（ローカル・ヘクタール）を用いることが妥当だと考えられる。

3. 農業分野における応用と展望

3.1. 農業分野における応用

本節では、農業分野に応用されたエコロジカル・フットプリント分析を研究対象別に整理して紹介していく。具体的には、これまで発表された農業と食料を対象とした事例研究に限定して、作物栽培・食料生産、農業管理と食糧貿易の3つのカテゴリーに整理した。なお、農業部門を含んでいる地域・国全体のエコロジカル・フットプリント研究を除外した。管見の限りでは、農業分野におけるエコロジカル・フットプリント研究は表2のようなものが挙げられる。

3.1.1. 作物栽培・食料生産

表2で示したように、作物栽培・食料生産に関するエコロジカル・フットプリント研究は、Feng [6]とNiccolucci et al. [14]、Wada [21]がある。

Wada (1993) は、カナダにおける加温型温室水耕栽培と機械化された露天栽培のトマト生産方法のACC、土地生産性の推計、及び財務分析を行った。その結果、露天栽培よりも、温室水耕栽培の土地生産性が5～9倍高いが、ACC指標から見ると、14～21倍効率が悪いことが明らかになった。一方、財務分析を評価してみると、水耕栽培

表2 農業分野に適用されたエコロジカル・フットプリント分析

文 献		分析対象	分析手法
栽培・生産方式			
Wada	1993	トマト	LCA
Ferng	2005	米	IO Model
Niccolucci et al.	2008	ワイン	LCA
農産物消費・貿易			
Kissinger & Rees	2009	カナダ農業貿易	IO Model
Kissinger & Gottlieb	2010	イスラエルの穀物貿易	LCA
Ferng	2011	台湾の米と小麦貿易	LCA
Kissinger & Gottlieb	2012	イスラエルの小麦貿易	Hybrid
Kissinger	2013	カナダ食料消費	Hybrid
Song et al.	2015	中国食料消費	MRIO
Galli et al.	2017	地中海食料貿易	EE-MRIO
車	2018	国産米・輸入米	LCA
農業管理			
Passeri	2013	農業技術	LCA
Blasi	2016	農場生産計画	LCA

筆者作成

は、露天栽培の純利益より約2～10倍高くなる。ゆえに、農家は、露天栽培のような経済効率が悪い生産方式を放棄し、環境負荷の高い水耕栽培に転換する傾向があると指摘した。

また、Ferng (2005) は、土地潜在的生産性ランキングシステムをバイオキャパシティの推計に応用し、台湾の食用米に関するエコロジカル・フットプリント需給バランスを計算した。土地潜在的生産性ランキングシステムは、気象、土壌と農業技術などの実際の条件によって、土地の生産性をランクつけるシステムである。この方法は、実際に生産される財の土地生産性で評価をしているに対して、通常のエコロジカル・フットプリント分析にはその土地において穀物生産等を行った場合の生産性でその土地を評価している。この違いは、EF 概念の根本にかかわる問題であり、これをエコロジカル・フットプリント分析と呼んでよいのかどうかは十分に議論される必要があると指摘された[23]。

Niccolucci et al. (2008) は、イタリアのトスカナにおける慣行農法と有機農法で栽培したブドウ

を用いて醸造したワインの環境への影響を評価した。ブドウの栽培、ワインの醸造、包装出荷と流通の4つの段階において、投入された資材とエネルギーをコンポーネント法で生産性のある仮想な土地面積に変換し、比較を行った。慣行農法は、栽培と包装出荷段階に有機農法より多くの資材投入が必要となり、結果として、約2倍の土地面積が必要である。そこで、化石燃料と農薬などを控えるために使用する有機農法への転換、包装出荷段階に再生可能資材の多用など、エコロジカル・フットプリントを減少するための実現可能な方法を提言した。また、食品生産に関する研究のうち、最初にグローバルヘクタールという単位を導入したとも評価される。

3.1.2. 農業管理

また、農業管理に関するエコロジカル・フットプリント研究としては、Blasi et al. [1]と Passeri et al. [15]があげられる。

Passeri et al. (2013) は、農業技術の導入が考慮されない GFN による作物のエコロジカル・フットプリントの計算モデルを改良し、新しい方法

論的なアプローチを提言した。GFN のモデルにおいて、農業技術の導入が考慮されない GFN による作物のエコロジカル・フットプリントの計算モデルを改良し、新しい方法論的なアプローチを提言した。GFN のモデルにおいて、人造的な「自然資本」である耕作地の供給側（バイオキャパシティ）は需要側の大きさによって決めるようにした。だが、そのモデルには農業技術という要素が含まれていないため、エコロジカル・フットプリントへの影響は計測しにくい。そこで、Passeri は、有機農業と統合農業、そして慣行農業との比較実証研究を通して、農業技術の改良がもたらす追加的生産性の計算を既存モデルに導入し、GFN モデルの改良を試みた。

他方、Blasi et al. (2016) は、イタリアのトスカナにある典型的な地中海農場の生態系サービス需給バランスと財務分析をすることを通して、地中海農場の代表的な 4 種類の作物の環境負荷と経済効率とのトレードオフを明らかにした。これらの作物の収益率と環境負荷は単純な線形関係ではない。そのため、生産計画に関する系統的な分析が必要であると指摘した。また、農場収益を最大化させる以外、農場主は、農場の自然資本をメンテナンスするという役割があるとも指摘した。

3.1.3. 食料消費・貿易

食料貿易に関するエコロジカル・フットプリント研究は最も多く、Feng [7]、Galli et al. [9]、Kissinger & Rees [10]、Kissinger & Gottlieb [11]、Kissinger & Gottlieb [12]、Kissinger [13]、Song et al. [19] と車 [27] が挙げられる。

Kissinger & Rees (2009) は、1991 年～2006 年カナダの農業部門における物質とエネルギーのフロー、及び主要な農産物の貿易に関するエコロジカル・フットプリントの推移を推計した。貿易の拡大とともに、エコロジカル・フットプリントの半分以上がほかの州に占められたという結果になった。現在のような貿易の恩恵を受けるため、経済の効率性だけでなく、土壌、水資源、生物多様性などの自然資本を包括した新たな貿易メカニズムを構築する必要があると指摘した。さらに、気候変動と貿易における様々な不安定な要因を対応するため、すべての国は、自国自然資本の保護と

回復および自給率の向上をすべきだと主張した。

Kissinger & Gottlieb (2010) は、イスラエルの穀物貿易の分析を行った。消費された穀物を生産するために、エコロジカル・フットプリントの輸入先と輸入量を明らかにした。また、イスラエルの農産物生産条件によって、穀物の生産は、輸入よりエコロジカル・フットプリントの消費が大きくなる。すなわち、イスラエルにとって、輸入に依存する穀物供給システムはより持続可能であると指摘した。

Feng (2011) は、ローカル・ヘクタール (Taiwanese ha) を利用し、1989 年～2008 年台湾において米と小麦の消費に関するエコロジカル・フットプリント分析を行った。その結果、2002 年 WTO 加盟後、米と小麦貿易の拡大とともに、台湾地域内で供給したエコロジカル・フットプリントは、海外輸入分に代替された。さらに、輸入されたエコロジカル・フットプリントの供給国を確認した。これらの結果は持続可能の発展に関する理論的な根拠として、政府が貿易政策を制定する際に利用できると結論づけている。

また、Kissinger & Gottlieb (2012)、Kissinger (2013) は、LCA、ローカル・ヘクタールと産業連関分析などの既存の分析手法を利用し、カナダの食料システムとイスラエルの小麦貿易がもたらす環境負荷を推計した。これらの実証分析を通して、既存の推計手法のメリットとデメリットを明らかにし、今後の研究に理論的根拠を提供した。

Song (2015) は、17,110 人の家計消費における 1935 種の食料のエコロジカル・フットプリント分析を行った。そして中国において、食料消費、食料浪費とそれに伴う環境負荷の規模と様式に関する情報は、持続可能な家計消費に大きく影響していることを明らかにした。食料浪費のわずかな改善でも、それによる環境負荷の改善効果が顕著であると指摘した。すなわち、一人あたり 5g の食料浪費を減らせば、中国における食料エコロジカル・フットプリントは 10.79Mgha も減少できる。また、一人あたりの牛肉消費の半分を豚肉で代替すれば、エコロジカル・フットプリントは、12Mgha 減少できると Song が指摘している。この研究は、少なくとも食生活と環境負荷の改善と

は強い関連性を持っていることを提示した点が評価できるといえよう。

そして、Galliet al. (2017) は、食料安全保障に焦点当て、EE-MRIO モデル (Ecological-Footprint-Extended Multi-Regional Input-Output Model) を用いて、地中海15か国間食料貿易による生態系サービスの移転を分析した。食生活様式の変化 (適正カロリーの食事など) は、地中海地域のエコロジカル・フットプリント需要量を8%~10% 減少させることができる。また、同研究では15カ国の政府が食料政策の干渉程度と持続可能な消費と生産パターンを支える潜在的な能力の有無も確認した。そして、EE-MRIO モデルとGTAP9 データベースを用いて、世界130個以上の国の間に食料貿易がもたらす生態系サービスの移転を分析できると述べた。

さらに、車 (2018) は、エコロジカル・フットプリント指標を利用し、日本における米の消費という経済活動の持続可能性を評価した。その結果、生産段階だけ見れば、近代農法が普及した日本とアメリカとは、エコロジカル・フットプリント指標から、大きな差が見られないが、米の国内市場の開放が限定的であることを前提にした場合、生産段階と流通段階を統合して分析すると、日本産の米は、アメリカ産の米を日本で消費する、より持続的であるということを明らかにした。さらに、日本の米市場の自由化が進んで、日本の米生産を部分的に放棄せざるを得ないおそれがある。そうなれば、日本国内の「耕作地」の一部が耕作放棄地になり、生態学的な生産能力を損失してしまい、生態学的な持続可能性が低下することを示唆した。

4. おわりに

エコロジカル・フットプリント分析は、環境経済学の物質代謝論的、物質循環論的なアプローチに属しており、人間活動に関わる生態系サービスの需給を土地面積に転換して、需給バランスの比較を通して持続可能性を評価する手法である。本稿は、これまで農業分野におけるエコロジカル・フットプリント分析の研究を整理した。以下では、農業分野におけるエコロジカル・フットプリント

分析の研究動向についてまとめていきたい。

本稿の整理で明らかにしたように、農業分野におけるエコロジカル・フットプリント分析の分析対象については、農産物消費・貿易、地産地消など、食料流通システムに着目する研究が最も多く、掲載年度はほとんど2010年代以降である。作物・食料生産に関わる持続可能性の評価は2010年以前においても行われていたが、数が比較的に少ない。また、研究の数はまだ少ないが、最近、農業管理に関するエコロジカル・フットプリントの分析も見られるようになった。そして、分析手法については、ライフサイクル・アセスメントと産業連関分析は、各半分ほど占めている。最近では、二つの方法を同時に利用した Hybrid 分析も多くなってきたと指摘できる。

こうした研究動向が見られるようになった要因としては、以下のことが考えられる。① GATT から WTO 体制に移行した後、農産物の自由化が進んできた。とりわけ、2000年代後半から、EPA の交渉も急速に展開し、貿易政策の意思決定を巡る問題が注目され、経済の合理性だけでなく、農産物の貿易や消費がもたらす生態系サービスの移転の重要性に対しても注目が高まってきた。② ライフサイクル・アセスメントアプローチの精緻化過程で出現した産業連関分析は、データ更新の遅延、流通段階データの欠損などの欠点が存在したため、国際貿易を分析する際に欠かせない流通段階におけるライフサイクル・アセスメントが活用されるようになった。③ 一方、フットプリント分析のスタンダードである国別フットプリント勘定 (National Footprint Account) においては、農業技術による生産性の向上が含まれていないため、フットプリント推定手法を改善するために、最近農業管理に関する研究が現れたと考えられる。

食料自由化が急速に進んでいる現在、食料需給システムのグローバリゼーションも加速している。国際間生態系サービス移転に状況に関して、より精確と詳細な解明が求められている。そのためには、現存分析手法の改良と整合だけではなく、それにあわせた事例の蓄積も必要である。これは、今後エコロジカル・フットプリント研究を発展する方向だと考えられる。

参考文献

- [1] Blasi, E., Passeri, N., Franco, S., & Galli, A. (2016). An ecological footprint approach to environmental? economic evaluation of farm results. *Agricultural Systems*, 145, 76-82.
- [2] Bicknell, K. B., Ball, R. J., Cullen, R., & Bigsby, H. R. (1998). New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological economics*, 27(2), 149-160.
- [3] Ewing, B., Reed, A., Galli, A., Kitzes, J., & Wackernagel, M. (2010). Calculation methodology for the national footprint accounts. Global Footprint Network, Oakland, CA.
- [4] Ewing, B. R., Hawkins, T. R., Wiedmann, T. O., Galli, A., Erkin, A. E., Weinzettel, J., & Steen-Olsen, K. (2012). Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. *Ecological Indicators*, 23, 1-8.
- [5] Ferng, J. J. (2001). Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity. *Ecological Economics*, 37(2), 159-172.
- [6] Ferng, J. J. (2005). Local sustainable yield and embodied resources in ecological footprint analysis? A case study on the required paddy field in Taiwan. *Ecological Economics*, 53(3), 415-430.
- [7] Ferng, J. J. (2011). Measuring and locating footprints: A case study of Taiwan's rice and wheat consumption footprint. *Ecological Economics*, 71, 191-201.
- [8] Galli, A., Wackernagel, M., Iha, K., & Lazarus, E. (2014). Ecological footprint: Implications for biodiversity. *Biological Conservation*, 173, 121-132.
- [9] Galli, A., Iha, K., Halle, M., El Bilali, H., Grunewald, N., Eaton, D., ... & Bottalico, F. (2017). Mediterranean countries' food consumption and sourcing patterns: An Ecological Footprint viewpoint. *Science of the Total Environment*, 578, 383-391.
- [10] Kissinger, M., & Rees, W. E. (2009). Footprints on the prairies: Degradation and sustainability of Canadian agricultural land in a globalizing world. *Ecological Economics*, 68(8-9), 2309-2315.
- [11] Kissinger, M., & Gottlieb, D. (2010). Place oriented ecological footprint analysis? The case of Israel's grain supply. *Ecological economics*, 69(8), 1639-1645.
- [12] Kissinger, M., & Gottlieb, D. (2012). From global to place oriented hectares? The case of Israel's wheat ecological footprint and its implications for sustainable resource supply. *Ecological Indicators*, 16, 51-57.
- [13] Kissinger, M. (2013). Approaches for calculating a nation's food ecological footprint? The case of Canada. *Ecological indicators*, 24, 366-374.
- [14] Niccolucci, V., Galli, A., Kitzes, J., Pulselli, R. M., Borsa, S., & Marchettini, N. (2008). Ecological footprint analysis applied to the production of two Italian wines. *Agriculture, ecosystems & environment*, 128(3), 162-166.
- [15] Passeri, N., Borucke, M., Blasi, E., Franco, S., & Lazarus, E. (2013). The influence of farming technique on cropland: A new approach for the Ecological Footprint. *Ecological indicators*, 29, 1-5.
- [16] Peters, G. P., & Hertwich, E. G. (2008). CO2 embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology*, 42, 1401-1407.
- [17] Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1994). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy. In: Jansson A., Hammer M., Folke C., Costanza R., Investing in natural capital: the ecological economics approach to sustainability. Island Press, pp 223-248.
- [18] Rees, W. E. (1996). Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability. *Population and environment*, 17(3), 195-215.
- [19] Song, G., Li, M., Semakula, H. M., & Zhang, S. (2015). Food consumption and waste and the embedded carbon, water and ecological footprints of households in China. *Science of the Total Environment*, 529, 191-197.
- [20] Wackernagel, M., Rees, W. E., 1996. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publishers, Gabriola Island.
- [21] Wada, Y. (1993). The appropriated carrying capacity of tomato production: comparing the ecological footprints of hydroponic greenhouse and mechanized field operations (MA, University of British Columbia).
- [22] Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2008). Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint. *Ecological economics*, 66(2-3), 379-391.
- [23] 中野桂・和田喜彦 (2007) 「エコロジカル・フットプリント指標分析の方法論的進歩と最近の論点」 滋賀大学環境総合研究センター研究年報, Vol. 4, No. 1, pp. 11-22.
- [24] 伊藤昭男・高橋義文 (2006) 「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.
- [25] 余川雅彦・加賀屋誠一・萩原亨・内田賢悦 (2008) 「地域間産業連関表を用いたエコロジカル・フットプリント算出に関する研究」 地域学研究, Vol. 38, No. 4, pp. 939-952.

- [26] 佐藤正弘・本間友香里・仲山絃史 (2014) 「多地域間産業連関 (MRIO) モデルを用いたエンボディド・カーボンとエンボディド・エネルギーの推計」 KIER Discussion Paper, No. 1406.
- [27] 車競飛 (2018) 「エコロジカル・フットプリント指標による日本の米消費の持続可能性の評価」『財政と公共政策』 Vol. 40, No. 1, pp. 52-64
- [28] 和田喜彦 (2007) 「エコロジカル・フットプリント指標の応用動向と今後の課題：事後継続的影響管理 (PIM) コストの算入について」日本 LCA 学会誌, Vol. 3, No. 1, pp. 3-10.
- [29] 国連開発計画 (2011) 『人間開発報告書2011「持続可能性と公平性 ― より良い未来をすべての人に」』