

〈研究発表〉

仮想水投入を考慮したエコロジカル・フットプリント指標

吉川 直樹¹⁾, 押川 由希¹⁾, 天野 耕二¹⁾, 島田 幸司²⁾

¹⁾立命館大学 理工学部環境システム工学科

(〒525-8477 草津市野路東 1-1-1、E-mail: n-yoshik@fc.ritsumeai.ac.jp)

²⁾立命館大学 経済学部 (〒525-8477 草津市野路東 1-1-1)

概要

持続可能性指標のなかでも、エコロジカル・フットプリント (EF) 指標は、指標の包括性や理解のしやすさから多くの適用例があるが、たとえば食料消費に適用する場合、水資源消費をはじめとした重要な環境負荷が含まれていないことが問題となる。本稿では、仮想水投入を考慮したエコロジカル・フットプリント指標を提案し、その意義や適用可能性について検討した。さらに、これを日本国内の食料消費に適用して評価を行い、その結果、仮想水投入に伴う EF は、品目ごとの水需要構造や各国の水資源状況に依存することを確認した。

キーワード: エコロジカル・フットプリント、仮想水、食料消費

1. はじめに

人間活動の持続可能性の評価に関する指標が、現在までに複数提案されている。なかでも、様々な環境への負荷を統合し、土地面積の形で表現したエコロジカル・フットプリント (EF) 指標は、指標の包括性や直感的理解のしやすさなどから多く用いられている。既存の EF の推計^{1,2)}においては、一般的に①農地・牧草地、②森林地、③海洋・淡水域、④二酸化炭素吸収地、⑤生産能力阻害地を推計対象としている (Table 1) が、食料の生産など、水資源を多く消費する分野においては、その環境負荷を無視することができない。そのため、環境負荷の総合的な指標であるエコロジカル・フットプリントにおいても、水資源を明示的に評価に加えることが望ましいと考えられる。

そこで本稿では、仮想水概念を包含したエコロジカル・フットプリント指標を提案する。さらに、この指標を適用して、わが国の食料消費に起因する環境負荷の評価を行う。

2. 仮想水を考慮した EF 指標

2.1 EF 指標への仮想水消費の導入意義

従来の EF 指標は、Table 1 の 5 つのカテゴリから構成される。これらは、二酸化炭素吸収地を除き、直接的な土地利用や土地資源 (水域も含む) で生産される消費に由来する生態系の踏みつけ面積を表す。二酸化炭素吸収地は、化石燃料起源の二酸化炭素排出を吸収するための森林面積であり、仮想的に当該目的に利用するための面積を示している。

一方、EF の評価に含まれない淡水資源の消費も、人間活動の大きさを表すうえで重要な指標である。製品あるいは地域レベルでの水資源消費状況を表す指標のひとつである仮想水 (バーチャルウォーター) は、貿易品を輸入国側で生産した場合に必要な水資源量である。すなわち、貿易を通じて輸入側で節約される (間接的に国外に依存している) 水資源量を表す。

このような水資源消費の環境容量との相対的な関係を土地面積という形で記述し、EF 指標として統合的に扱うことができれば、指標としての理解の容易性を失うことなく、EF 指標の包括性をより高めることができると考えられる。特に、食料等の貿易に伴い間接的に水資源を輸入しているとされるわが国では、仮想水を含む指標は重要な意味を持つと思われる。また、食料消費に限らず、地域分析や水資源消費の多い産業においても、同様に応用可能であるといえる。

Table 1 Land category in ecological footprint

土地カテゴリ	定義
農地・牧草地	農作物および食肉、乳製品、鶏卵を生産するのに必要な農地および牧草地
森林地	木材や紙の製造に必要な森林地
海洋・淡水域	水産物の生産に必要な海洋・淡水域
二酸化炭素吸収地	エネルギー消費に伴い排出される二酸化炭素の吸収に必要な森林面積
生産能力阻害地	本来生物的生産性があるにもかかわらず、道路、建物、その他の利用のために生産可能性が阻害されている土地

2.2 仮想水のEF指標への導入における考え方

仮想水投入量を EF 指標に加えるためには、何らかの形で土地面積に換算する必要がある。本研究では、

水資源の利用は、当該水資源の集水域の利用であると考へ、利用する水資源を集めるのに必要な集水域面積を算出し、この面積を EF の算出にあたり考慮することとする。この取り扱いにより、各国の水資源の希少性のある程度反映した評価が可能になる。

従来の EF は、表 1 の土地利用カテゴリを合算することで算出されている。二酸化炭素吸収地を除く 4 つのカテゴリは、土地資源、海洋・淡水資源の利用であり、それらを合算することは概念上重複せず、問題とならない。二酸化炭素吸収地は、実際に二酸化炭素吸収目的で利用されていないが、EF 推計にあたっては、ある土地が、同時に 2 つ以上の土地利用カテゴリに属することができないことから、概念的に重複することがなく、5 つのカテゴリを合計することができる。

しかし、集水域として利用される土地は、概念的に他の土地カテゴリ（海洋・淡水域のうち海洋域を除く）と重複して利用することが可能であることに注意が必要である。すなわち、水資源の集水域であることが、森林・農地・建築・道路などの土地利用を妨げるものではないと考へる。たとえば、天水農業では、農耕地は農業用水利用のための集水域でもあると解釈することができる。耕作エネルギー等の外部からの投入を除けば、その EF は、農耕地面積と等しくなるであろう。灌漑農業では、天水以外にも灌漑用水を用いるため、その水資源を得るための集水域が必要になる。そのため、集水域面積は農耕地面積よりも大きくなるが、集水域面積と農耕地面積を加算して EF を求めることは、Ef 指標で定義される環境容量が（水域を含む）世界全体の土地面積であることを鑑みても過大評価といえる。

したがって、水資源を考慮した EF 指標の推計においては、算出した集水域面積を海洋域以外の各土地カテゴリとは合算せず、値を並列させることで比較を行い、より面積の大きい方を EF として採用し評価する手法をとることが望ましいと考へられる（Fig.1）。一方の面積を採用した場合でも、他方の影響はその面積の中に包含されているといえることから、この方法を用いても、どちらかの影響を評価しないとといった論理的な矛盾を生じないといえる。

なお、従来の EF 評価では、土地利用カテゴリごとに生物的生産性が異なり、土地の利用による生態系への踏みつけの程度が異なることから、係数（等価ファ

クタ）を用いて重み付けを行い、土地カテゴリごとの面積を合算することも広く行われている¹⁾。しかし、仮想水の導入に関しては、生物的生産性に基づく重み付けは困難である。そのため、本稿では等価ファクタを用いないこととする。

3. 日本国内消費食料の EF 評価

3.1 仮想水を考慮した EF 推計手法

本稿では、ケーススタディとして、仮想水を考慮した EF 評価を、食料消費に適用する。本節では、その具体的な推計手法を述べる。

(1) 農地・牧草地

農地・牧草地面積は、食料の生産に必要な農地面積であり、式(1)を用いて推計する。

$$EF_a = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij}}{P_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 EF_a :農地・牧草地面積 (ha)、 i :品目、 j :生産国、 x_{ij} : j 国で生産された品目 i の国内消費量(t)、 P_{ij} : j 国で生産された品目 i の土地生産性(t/ha)

畜産物に関しては、その生産に必要な飼料生産のための農地・牧草地面積から、間接的な土地生産性を推計し、EF を算出した。なお、畜産品については、輸入品の土地生産性が国産品と同等であるとして推計を行った。

(2) 海洋・淡水域

海洋・淡水域面積は、消費される水産物の生産に必要な水域面積と定義する。本稿では、既往の研究事例²⁾に従い、水産物の品目別に、生産物を得るのに必要な一次生産のための海域面積を推計する。

$$EF_m = \frac{x_i J_{iq} (1 + L_q) \cdot 10^{(M_{iq}-1)}}{9N_q} \quad (2)$$

ただし、 EF_m :水産物生産に必要な海洋・淡水域面積(ha)、 q :水域(淡水域および5海域)、 J_{iq} :水産物品目 i の水域 q における存在率、 L_q :水域 q の平均混獲率、 M_{iq} :水産物品目 i の海域 q における栄養段階、 N_q :水域 q の単位面積当たり一次生産量(tC/ha)

なお、このうち海産物生産に必要な海洋域($q \neq$ 淡水域)面積を EF_{mo} で、淡水産物生産に必要な淡水域($q =$ 淡水域)面積を EF_{mf} で表す。

(3) 二酸化炭素吸収地

二酸化炭素吸収地は、消費食料の供給に伴う二酸化炭素排出量を吸収するために必要な森林面積と定義す

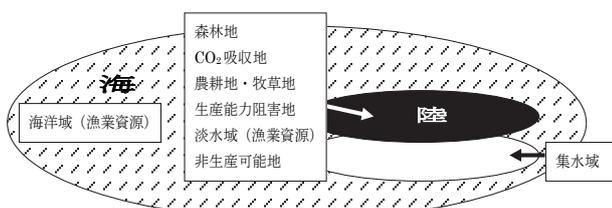


Fig. 1 Concept of ecological footprint considering virtual water input

る。ライフサイクルアセスメント(LCA)手法に基づく食料の生産・輸入に伴う二酸化炭素排出量を推計し、これを世界の森林の単位面積あたり平均二酸化炭素吸収量で除することでEFを算出する(式(3))。

$$EF_{CO_2} = \frac{\sum_i \sum_j (c_i + sD_j)x_{ij}}{C} \quad (3)$$

ここで、 EF_{CO_2} :二酸化炭素吸収地面積(ha)、 c_i :品目*i*の単位重量生産あたりライフサイクル二酸化炭素排出量(tCO₂/t)、 s :外航海運の輸送トンキロあたり二酸化炭素排出量(t-CO₂/tkm)、 D_j :*j*国から日本までの輸送距離(km)、 C :森林の単位面積あたり平均二酸化炭素吸収量(t-CO₂/ha)

(4) 食料生産用集水域

食料生産用集水域面積は、消費食料の生産に必要な水資源の集水域面積とし、次式により推計する。

$$EF_{vw} = \sum_j \sum_i \frac{vw_i x_{ij}}{d_j} \quad (4)$$

$$d_j = \frac{W_j}{A_j} \quad (5)$$

EF_{vw} :食料生産用集水域面積(ha)、 vw_i :品目*i*の生産における仮想水原単位(m³/t)、 d_j :*j*国における仮想的平均水深(m)、 W_j :*j*国における水資源量(m³)、 A_j :*j*国の国土面積(m²)

すなわち、水資源消費量からEFを算出するための換算係数として、国土全域を集水域と仮定し、土地面積との相対的な水資源の豊富さを示す仮想的平均水深を推計する。国別に推計した仮想的平均水深を用いて、各国での食用生産に必要な(仮想)水資源を得るための集水域面積に換算し、これを食料生産用集水域面積とする。

(5) エコロジカル・フットプリントの評価

各土地カテゴリの推計値から、総合的なEFを推計する。総合的なEFの算出では、本研究では、2.2節で述べたように、等価ファクタを用いないこととした。そのため、農地、海洋・淡水域については実際の利用面積をそのままEFに算入することとなる。農地・牧草地、海洋・淡水域、二酸化炭素吸収地の合計値が従来のEFであり、このEFと、海洋域と食料生産用集水域の合計を比較し、より大きい値を、仮想水を考慮したEFとする。

$$EF_{all} = \max\{EF_a + EF_m + EF_{CO_2}, EF_{vw} + EF_{mo}\} \quad (6)$$

ただし、 EF_{all} :仮想水を考慮した総合エコロジカル・フットプリント(ha)

3.2 使用データの概要

本稿では、2002年を基準とした日本国内消費食料の

仮想水を考慮したエコロジカル・フットプリント評価を行う。評価対象は、穀類・いも類・豆類・野菜・果実・油脂類・砂糖・きのこ類・水産物・畜産物である。なお、本稿では、生鮮食料・原料の生産・輸入に伴う環境負荷のみを推計し、食料加工・外食部門における環境負荷は対象外とする。

食料の国内生産・輸出入や農地・牧草地のデータとして、農林水産省⁴⁾⁷⁾、FAO⁸⁾を用いた。

海洋・淡水域面積は、既存事例のデータ²⁾を用いて推計した。なお、国内生産分では、養殖用餌との二重計上を避けるため、養殖魚を除いて推計を行った。

二酸化炭素吸収地面積の算出のうち、食料生産にかかる二酸化炭素排出量は、国内産業部門別のライフサイクル環境負荷データ⁹⁾を用いた。輸入品については、網羅的なデータの入手が困難であるため、国産と同じ値を適用した。ただし、輸入品については海上輸送を仮定し、別途二酸化炭素排出量を推計した。森林の単位面積あたり二酸化炭素吸収量には、世界の平均的な値である1.42t-C/ha/yr²⁾を用いた。

食料生産に関する仮想水原単位は沖¹⁰⁾を用いた。各国の仮想的平均水深の推計には、FAO¹¹⁾を用いる。推計された主な国の仮想的平均水深をTable 2に示す。

Table 2 Example of estimated virtual average water depth in catchment area by countries

	総再生可能水資源量 (km ³ /year)	集水域仮想平均水深(m)
日本	420	1.11
中国	2897	0.30
タイ	410	0.80
アメリカ	3069	0.32
オーストラリア	492	0.06
アルゼンチン	814	0.29

3.3 評価結果

Fig.2に、海洋域を除く(淡水域は含む)土地カテゴリ別の推計結果を示す。食料生産用集水域とそれ以外の土地カテゴリは重複可能であるため、並列し、国内・国外依存分に分けて示している。農地・牧草地、二酸化炭素吸収地、淡水域の合計では、二酸化炭素吸収地の割合が、国内・国外ともに最も高い。

国内依存分では、食料生産用集水域がその他の土地カテゴリのEFを下回り、国外依存分ではこれを上回っている。これは、生産量あたりの仮想水原単位の小さい野菜・果実の食料自給率が比較的高いのにに対し、比較的原単位の大きい飼料穀物の自給率が低いことと、輸入相手国の水資源の希少性(仮想的平均水深)の影響によるものと考えられる。

Fig.3は、海洋・淡水域面積を加えた総合的なEFの推計結果である。本指標の考え方により、集水域面

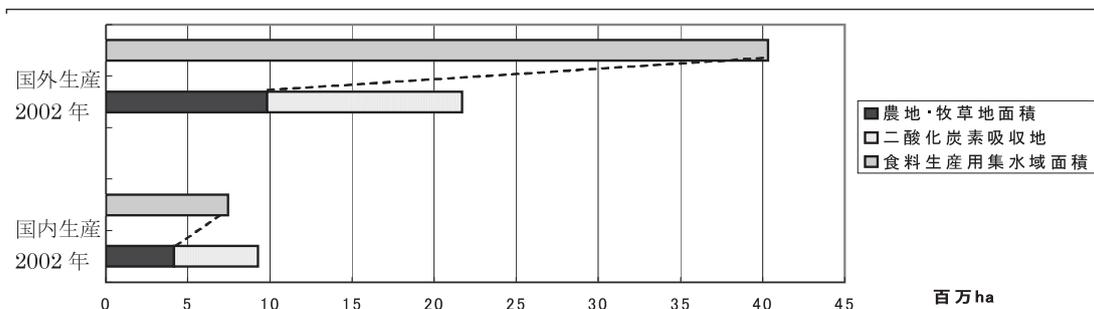


Fig.2 Ecological footprint of Japanese food consumption by land category (excluding marine area)

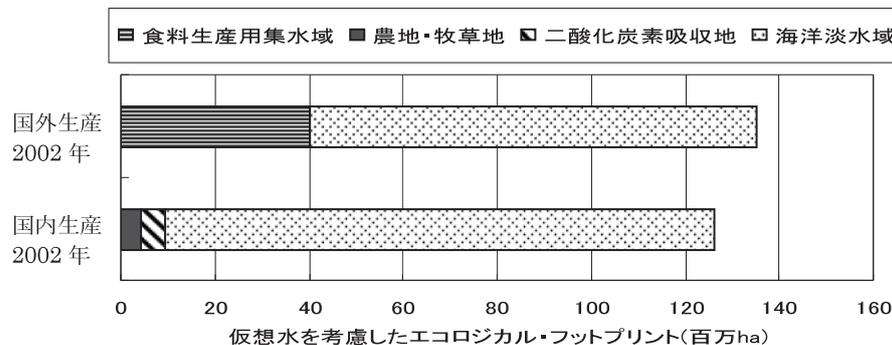


Fig.3 Ecological footprint of Japanese food consumption considering virtual

water

積と他の土地カテゴリのうち面積の広い方を、国内・国外別に採用している。わが国の食料消費による EF は、わが国の国土面積の約 7 倍であり、海洋・淡水域を除いても約 1.5 倍程度であることがわかった。わが国は、食料消費に伴う EF のうち 51% を、海洋・淡水域を除くと 81% を国外に依存していると推計された。

なお、本研究では、前述のように集水域面積の扱いの問題から、EF の算定に等価ファクタを用いていない。仮に等価ファクタを導入した場合、海洋・淡水域の EF については、陸域に比べ生物学的な土地生産性が低いため、重み付けの係数が小さく評価され海洋・淡水域の評価結果は大きく変化する可能性がある。本稿では、仮想水による EF の重み付けのための等価ファクタについて、他の土地カテゴリと整合的になるような取り扱いに関する十分な検討を行っていない。しかし、生態系において水資源の多寡はその生産性に影響することを鑑みると、等価ファクタの概念を応用することは可能であると考えられる。この点に関しては今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、仮想水投入を考慮したエコロジカル・フットプリント指標を提案し、仮想水概念を同指標に取り込むための手法を検討した。さらに、提案した手法を日本国内の食料消費に適用して評価を行った。

今後の課題としては、仮想水を考慮したエコロジカル・フットプリント指標の推計手法の確立が挙げられる。具体的には、土地カテゴリ別の用途の重複に関するより詳細な検討、仮想水の評価と整合的な等価ファ

クタの取り扱いなど評価の精緻化を図る必要がある。

また、水資源消費の指標として、本研究では仮想水概念を用いたが、生産国で実際に消費された水資源量として、ウォーターフットプリント(WF)を用いることも可能である。WF は、ライフサイクル的な水資源消費量を算定することから、3 節での CO₂ 排出量の推計方法ともより整合的であるといえる。また、WF では、汚濁物質を含む排水を環境基準まで希釈するために必要となる水資源量をグレー・ウォーターフットプリントとして取り扱っており、水質汚濁を含むことで指標としての包括性がより高まることも期待される。

前述の課題とあわせ、従来エコロジカル・フットプリント指標を拡張しながらも、信頼性と簡潔性を有する指標としての推計手法の確立を行う必要があるだろう。

参考文献

- 1) WWF: Living planet Report 2008(2008)
- 2) 富士総合研究所: 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)
- 3) 農林水産省: 食料需給表(2005)
- 4) 農林水産省: 海面漁業生産統計調査(2005)
- 5) 財務省: 貿易統計(2005)
- 6) 農林水産省: 作物統計(2005)
- 7) FAO: FAOSTAT
- 8) 日本建築学会: 建物の LCA 指針(2003)
- 9) 沖大幹: ヴァーチャルウォーター (仮想水) 現状と課題、環境管理, Vol.40, No3(2004)
- 10) FAO: AQUASTAT