

エコロジカル・フットプリント算定手法

— NFBA の基礎手法とフレームワーク —

VERSION 1.1 (2026 年 9 月)



エコロジカル・フットプリント・ジャパン (EFJ)

はじめに

本資料は、エコロジカル・フットプリント（EF）およびバイオキャパシティ（BC）の国際標準である **National Footprint and Biocapacity Accounts（NFBA）** の算定手法について、その基礎となる学術論文およびガイドブックをもとに整理したものである。英語で提示されている方法論の全体像を把握するための補助資料として位置づけている。

特に以下の論文を中核として構成している：

- Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Iha, K., Larson, J., Lazarus, E., Morales, J.C., Wackernagel, M., & Galli, A. (2013). *Accounting for demand and supply of the Biosphere's regenerative capacity: the National Footprint Accounts' underlying methodology and framework*. Ecological Indicators, 24, 518–533.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X12002968>
- D. Lin, L. Hanscom, J. Martindill, M. Borucke, L. Cohen, A. Galli, E. Lazarus, G. Zokai, K. Iha, D. Eaton, M. Wackernagel. 2019. Working Guidebook to the National Footprint and Biocapacity Accounts. Oakland: Global Footprint Network.
https://www.footprintnetwork.org/content/uploads/2019/05/National_Footprint_Accounts_Guidebook_2019.pdf

エコロジカル・フットプリントおよび **NFBA** の開発と普及は、グローバル・フットプリント・ネットワーク（**GFN**）を中心とした研究と実務の蓄積によって支えられている。本資料はこれらの知見に基づき作成されたものであり、ここに敬意と謝意を表する。

本資料は、算定手法の理解とその考え方の把握を目的とする整理資料である。研究者、実務者、政策担当者が、環境負荷の定量評価や意思決定の基礎資料として活用することを想定している。なお、厳密な適用や詳細な検討にあたっては原典である英語文献を参照されたい。

本資料は **Version 1** として公開するものであり、今後の研究の進展や国際的な手法の更新等に応じて内容は随時アップデートされる予定である。

本資料に関するご質問等は、エコロジカル・フットプリント・ジャパンのウェブサイトよりお問い合わせいただきたい。<https://ecofoot.jp/contact/>

本資料を引用する場合は、以下の形式を推奨する：

エコロジカル・フットプリント・ジャパン（2026）『**NFBA** 算定ガイド（日本語訳）

Version 1』〔解説資料〕 <https://ecofoot.jp/data-and-methodology/>

内容

はじめに	1
1. 会計枠組み.....	3
2. 基本方程式	6
3. 収量係数（Yield Factors）	9
4. 等価係数（Equivalence Factors）	11
5. 消費者ベースのアプローチ	13
6. 土地利用タイプ別の算定特性.....	14
① 耕作地（Cropland）	14
② 牧草地（Grazing Land）	14
③ 漁場（Fishing Grounds）	15
④ 森林地（Forest Land）	16
⑤ 二酸化炭素吸収地（Carbon Footprint）	17
⑥ 生産能力阻害地（Built-up Land）	17

1. 会計枠組み

エコロジカル・フットプリント（EF）は、1990 年代初頭にカナダ・ブリティッシュコロロンビア大学におけるマティス・ワケナゲルの博士研究として、ウィリアム・リースとの共同で開発された、持続可能性を定量的に測定する指標である。その後、EF の概念は世界的に普及し、「フットプリント」という語が人間の環境への影響を象徴する用語として広く使われるようになった。国家、都市、企業、コミュニティ、個人など、あらゆるスケールで活用され、特に 21 世紀の大きな課題である「オーバーシュート（超過）」の可視化に貢献してきた。

この指標の発展を支えてきたのが、2003 年に設立されたグローバル・フットプリント・ネットワーク（GFN）である。GFN は、国際連合などの統計データに基づき、各国の EF とバイオキャパシティを毎年算出・公表しており、2019 年以降は、ヨーク大学および Footprint Data Foundation（FoDaFo）がその運営を担っている。1961 年から 2022 年までのデータセットが整備されており、専門家によるレビュー体制のもと、年々その透明性と精度が向上している。

National Footprint and Biocapacity Accounts（NFBA：国別フットプリント&バイオキャパシティ勘定）は、生態系サービスの年間供給量と人類の年間需要量を定量化するための会計フレームワークであり、以下の 2 つの指標を中核に据えている（Wackernagel et al., 2002）。

- **エコロジカル・フットプリント（Ecological Footprint: EF）**：その年の技術水準および資源管理の状況下で、人間の活動や集団が生物圏に与える総需要を示す。
- **バイオキャパシティ（Biocapacity: BC）**：人類が必要とする生態系サービスを提供するために利用可能な、生物生産的な土地および水域の容量。すなわち「自然の再生能力」や「生態学的な予算」を表す。

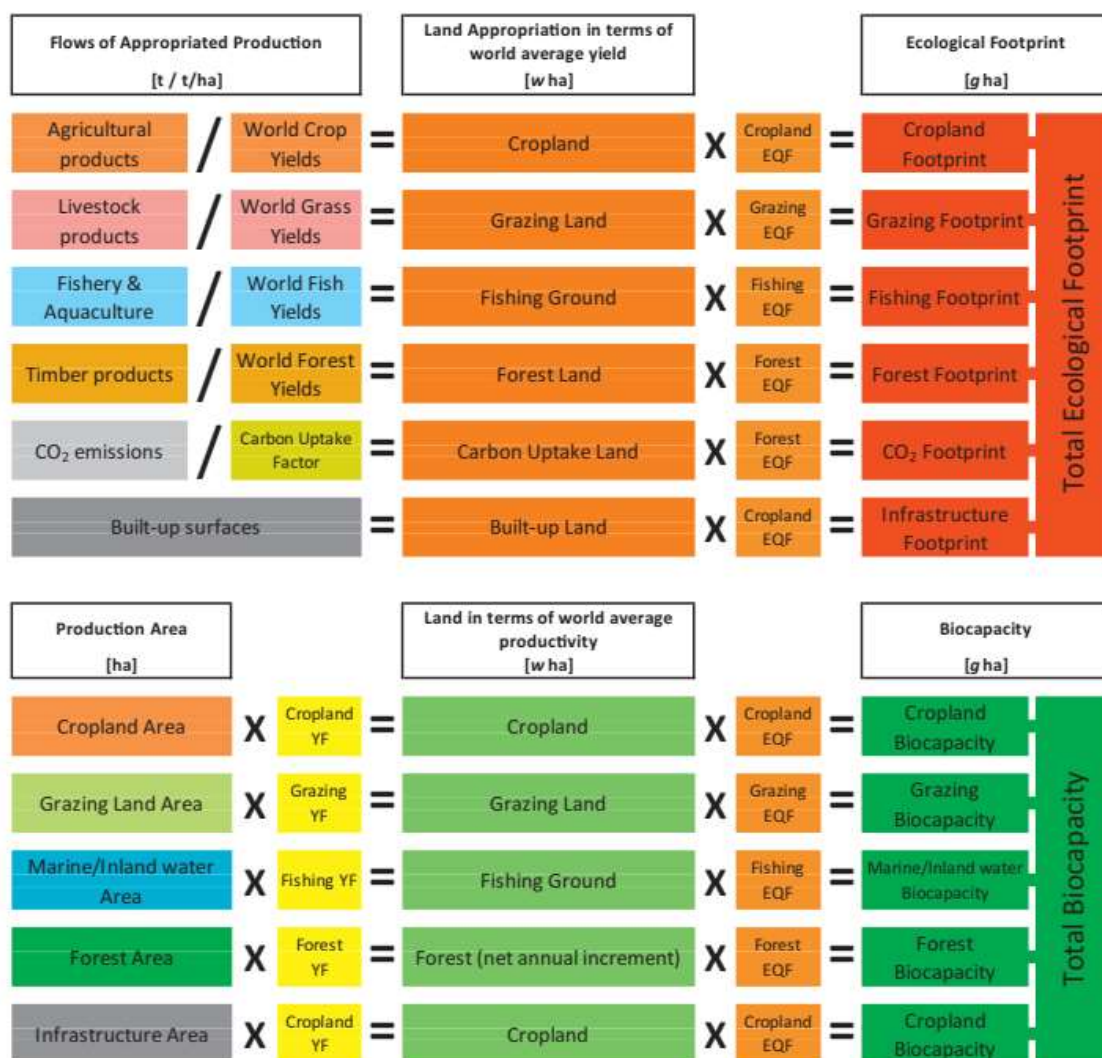
両指標は、生態系サービスを毎年供給または再生するのに必要な生物生産的面積として、相互に排他的な土地利用単位により表現される。土地利用タイプには以下が含まれる：

- **耕作地（Cropland）**：植物性食品や繊維製品の供給を担う。
- **牧草地（Grazing Land）**：畜産製品の供給、ならびに飼料作物栽培の一部に関与。
- **漁場（Fishing Grounds）**：海洋および内水域における水産資源の供給を支える。
- **森林地（Forest Land）**：木材およびその他の森林製品の供給。
- **二酸化炭素吸収地（Uptake Land）**：人為的に排出された CO₂を吸収するために必要な土地。

- **生産能力阻害地 (Built-up Land)**：都市化やインフラ開発により生物生産的な土地が転換されたもの。

NFBA の算定に用いられるデータは、主に国際連合やその関連機関による公開データベースに基づいている。具体的には、国際連合食糧農業機関（FAO, FAOSTAT）、国連統計部（UN Comtrade）、国際エネルギー機関（IEA）などのデータが用いられる。加えて、査読付き学術論文や、専門機関による特定主題に関するデータセットも補完的に活用されている。

図 1 NFBA 算定フレームワーク



NFBA の算定結果は、製品カテゴリ、土地利用タイプ、あるいは総合指標として集約・表示される（図 1 参照）。最も一般的な表示形式は、全土地利用タイプの合計を単一の値として示す方法である。この総合化には、収量係数（Yield Factor）と等価係数

(Equivalence Factor) が用いられる。これにより各土地利用タイプの生産性を補正し、異なる土地利用の値を加算可能な形に変換する（詳細は 3 章および 4 章参照）。

算定値を単一指標へと統合することにより、次のような利点が得られる：

- 人間活動全体に対する自然界の再生能力のバランスが把握できる。
- 気候変動、漁業資源の枯渇、土地利用の変化、土地劣化、食料システムなど、複数の環境課題を統合的に可視化できる。
- 通常個別に評価される環境問題を、「ピーク・エブリシング (Peak Everything)」という全体的視点の中で理解する枠組みを提供する (Heinberg, 2007)。

このように、NFBA は多様な環境負荷を統合的に評価することを可能にし、環境政策・戦略の立案において、より全体論的な意思決定の基盤を提供する。

2. 基本方程式

EF は、人間活動による自然資源の消費を土地面積（gha）に換算して評価するものであり、主に 6 つの需要カテゴリ（消費側）と 5 つの土地利用タイプ（供給側）を対象とする。この二者の数が一致しないのは、「森林製品」と「二酸化炭素吸収」の両方が森林という同一のバイオキャパシティを利用するためである。

土地利用ごとの生物生産性は国や地域によって異なる。そのため、EF とバイオキャパシティの比較を公平に行うには、世界平均の生物生産性を基準とした単位、すなわち「グローバル・ヘクタール（global hectare, gha）」が用いられる。この単位により、異なる国・地域・土地利用間での比較が可能となる。

Gha は、単に重量（weight）で測定する方法よりも多くの情報を提供する。重量単位では、使用された土地や海域の範囲を捉えることができず、また、単なる物理的な面積では、その土地にどの程度の生態学的生産が関連しているかを把握することができない。この問題を解決するために、収量係数（Yield Factors, YF）および等価係数（Equivalence Factors, EQF）という 2 つの重要な係数が用いられる。これらの係数により、異なる国や地域のデータを標準化し、比較可能な単位に変換することが可能になる。これらの仕組みにより、国別の EF（およびバイオキャパシティ）の結果を比較するだけでなく、製品ライフサイクル分析、または特定国における消費と供給のバランス評価など、多様な応用に対応している。

特定の国における生産フットプリント（EF_P）は、その国が持つバイオキャパシティに対する需要を表し、以下の式で計算される。

$$EF_P = \sum_i \frac{P_i}{Y_{N,i}} \cdot YF_{N,i} \cdot EQF_i = \sum_i \frac{P_i}{Y_{W,i}} \cdot EQF_i \quad (1)$$

ここで：

- P は、各生産物 i の国内生産量
- Y_{N,i} は、商品 i の国内年間平均収量（または CO₂吸収能力）
- YF_{N,i} は、その土地の収量係数（国別）
- Y_{W,i} は、商品 i の世界平均収量
- EQF_i は、その商品に関連する土地利用タイプの等価係数

収量係数 YF_{N,i} は、Y_{N,i} と Y_{W,i} の比として定義されるため（詳細は第 3 章を参照）、式（1）の第 2 項と第 3 項は等価である。このため、NFBA の計算では、後者の表記が使用される。

EF の算定においては、一次製品（例：大豆、小麦、丸太など）のみならず、それらを原料とする派生製品（例：豆油、小麦粉、木材製品など）も分析対象に含まれる。そのため、派生製品ごとの有効収量（Yield per hectare, Y_W ）を適切に算出することが求められる。

$$Y_{W,D} = Y_{W,P} \cdot \text{EXTR}_D \quad (2)$$

ここで、 $Y_{W,D}$ は派生製品 D の世界平均収量、 $Y_{W,P}$ は一次製品 P の世界平均収量を表す。

通常、 EXTR_D は、派生製品とそれを生産するために必要な一次投入量の質量比である。この比率は、技術変換係数（Technical Conversion Factor, TCF）としても知られている。いくつかのケースでは、同じ一次製品から複数の派生製品が同時に生成されることがある。例えば、大豆（soybeans）からは、大豆油（soybean oil）と大豆粕（soybean cake）が同時に抽出される。このような場合、派生製品の一次生産物換算量を合計すると、二重計算が発生する。この問題を解決するために、一次製品の EF は、同時に生産される派生製品の間で分配される。

派生製品 D の抽出率の一般式は、以下のように定義される。

$$\text{EXTR}_D = \frac{\text{TCF}_D}{\text{FAF}_D} \quad (3)$$

ここで、 FAF_D （Footprint Allocation Factor: フットプリント配分係数）は、派生製品の EF の配分係数を表し、 TCF_D は派生製品の技術変換係数である。この FAF_D は、価格加重（TCF-weighted prices）を用いて算出され、一次製品のフットプリントを派生製品間で適切に分配する。派生製品の価格は、その一次製品の収穫インセンティブに対する相対的な寄与を示す。NFBA フレームワーク全体において、貨幣データを物理的フローの割り当てに使用する唯一のポイントは、この FAF_D である。さらに、この手法では、価格と質量の比率が時間の経過とともに一定であることを仮定しているが、実際には必ずしもそうとは限らない。

派生製品 D のフットプリント配分係数は、以下の式で表される。

$$\text{FAF}_D = \frac{\text{TCF}_D \cdot V_D}{\sum \text{TCF}_i \cdot V_i} \quad (4)$$

ここで、 V_i は、各同時派生製品の市場価格を表す。生産チェーンに 1 つの派生製品しか存在しない場合、 $\text{FAF}_D=1$ となり、抽出率は技術変換係数と等しくなる。

特定の国におけるバイオキャパシティは、以下の式で計算される。

$$BC = \sum_i A_{N,i} \cdot YF_{N,i} \cdot EQF_i \quad (5)$$

ここで、 $A_{N,i}$ は、その国において商品 i の生産に利用可能な生物生産的な面積を表す。

$YF_{N,i}$ は、商品 i を生産する土地に対する国別の収量係数を示す。 EQF_i は、商品 i を生産するために使用される土地利用タイプの等価係数を示す。

3. 収量係数（Yield Factors）

収量係数（Yield Factors, YFs）は、特定の土地利用タイプにおける各国の生産性の違いを補正するために用いられる係数である。この値は国ごとに異なり、土地利用タイプごとおよび年ごとに変動する。収量係数は、降水量や土壌条件といった自然要因のみならず、施肥・耕作技術といった人為的管理の影響も反映している。

例えば、ある国の耕作地における単位面積あたりの作物収量が世界平均より高い場合、その国の収量係数は 1 より大きくなる。一方、収量が平均を下回る場合には、係数は 1 未満となり、その土地が持つ相対的な生産性の低さを示すことになる。特定の土地利用タイプ L に関して、国の収量係数 YF_L は以下の式で定義される：

$$YF_L = \frac{\sum_{i \in U} A_{W,i}}{\sum_{i \in U} A_{N,i}} \quad (6)$$

ここで、 U は土地利用タイプ L に対応するすべての一次生産物の集合を表す。また、 $A_{W,i}$ および $A_{N,i}$ は、それぞれ世界平均および当該国において商品 i を生産するのに必要な土地面積である。これらは以下の式に基づき算出される：

$$A_{N,i} = \frac{P_i}{Y_{N,i}} \quad \text{and} \quad A_{W,i} = \frac{P_i}{Y_{W,i}} \quad (7)$$

ここで、 P_i はその国における商品 i の年間生産量、 $Y_{N,i}$ は国別収量、 $Y_{W,i}$ は世界平均収量を意味する。したがって、 $A_{N,i}$ は国内で商品 i を生産するのに実際に必要な土地面積、 $A_{W,i}$ は世界平均の生産性を前提とした場合に必要となる面積である。

耕作地以外の土地利用タイプ、すなわち牧草地、森林、漁場については、それぞれ単一の一次生産物（例：牧草、木材、水産物）の供給を想定している。そのため、これらのタイプにおける収量係数の算定は次のように簡略化される。

$$YF_L = \frac{Y_{N,i}}{Y_{W,i}} \quad (8)$$

生産能力障害地（Built-up Land）は、都市化などによって本来の生産機能を喪失した土地である。こうした土地に固有の生産性を割り当てることは困難であるため、NFBA ではこの土地利用タイプの収量係数を耕作地と同等と仮定している。これは、都市がかつて農地であったとする合理的仮定に基づくものである。

また、水力発電により水没した地域についても、同様にその土地が元々世界平均の生産性を有していたと仮定する。炭素吸収地（Uptake Land）の収量係数は森林と同じものが適

用される。これは、森林以外の土地利用タイプにおける二酸化炭素吸収能力に関する信頼できるデータが乏しいためである。

さらに、内水域（湖沼、河川など）の生産性については、世界全体で統一的に適用できる包括的データが存在しない。そのため、**NFBA** ではすべての内水域に収量係数 **1** を割り当て、標準的な生産性を仮定する形としている。

4. 等価係数 (Equivalence Factors)

EF およびバイオキャパシティの値を、異なる土地利用タイプ間で統合的に比較するには、もう一つの補正係数が必要となる。それが、等価係数 (Equivalence Factors, EQFs) である (Galli et al., 2007)。この係数は、各土地利用タイプの世界平均の生物生産性を基準として、すべての土地を共通単位である「グローバル・ヘクタール (gha)」に換算するために用いられる。EQF は土地利用タイプごと、かつ年ごとに異なる値が設定される。

EQF の背後にある基本的な考え方は、面積の大小ではなく、その土地が本来持つ生物資源の供給能力に基づいて重み付けを行うことである。すなわち、単なる現時点の生産量ではなく、その土地のポテンシャルとしての生産性に着目して換算を行う点が特徴である。

この等価係数の算出には、国際連合食糧農業機関 (FAO) と国際応用システム分析研究所 (IIASA) が共同で開発したグローバル農業生態学的ゾーン (Global Agro-Ecological Zones: GAEZ) モデルが用いられている。このモデルは、農業投入を一定とした場合に見込まれる作物の潜在的生産性を計算し、それに基づいて世界中の土地を以下の 5 つの適性クラスに分類している：

- 非常に適している (Very Suitable, VS) – 0.9
- 適している (Suitable, S) – 0.7
- やや適している (Moderately Suitable, MS) – 0.5
- ほとんど適していない (Marginally Suitable, mS) – 0.3
- 適していない (Not Suitable, NS) – 0.1

EQF の算定においては、国ごとに最も生産適性の高い土地が耕作地に、次に高い土地が森林に、最も適性の低い土地が牧草地に割り当てられるという仮定が用いられる (Wackernagel et al., 2002)。この仮定のもとで、それぞれの土地利用タイプの世界平均適性スコアを算出し、それを全体の平均スコアで割ることで EQF を導出する。

図 2 等価係数の計算を示す概略図

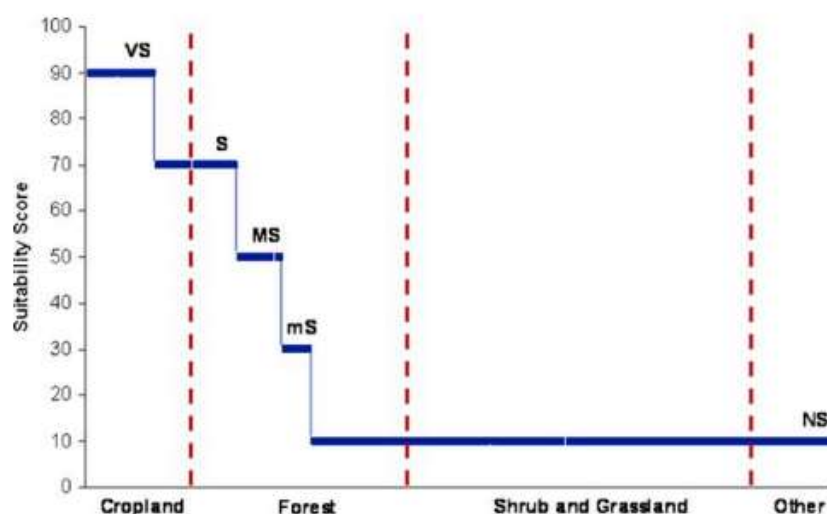


図 2 では、この計算手順の概略を視覚的に示している。横軸は各土地利用タイプの総面積を、縦軸はそれぞれの適性指数を示しており、それらを組み合わせて加重平均を算出している。土地の適性に応じた面積分布をもとに、耕作地、森林、牧草地の生産性が相対的に評価されている。

また、以下のような特殊な土地利用タイプに対しては、次のような仮定に基づいて EQF が割り当てられる：

- 生産能力阻害地（Built-up Land）：都市化によってかつての生物生産性を失った土地とされるため、その EQF は原則として耕作地の EQF と同一とする。ただし、その土地が耕作地でなかったことが明確な場合は例外が認められる。
- 二酸化炭素吸収地（Uptake Land）：森林による炭素吸収能力に依存していると考えられており、EQF は森林地と同一とされる。
- 水力発電用貯水地：元々は生物生産的土地であったと想定されるため、EQF は 1 と設定されている。
- 海洋域（Marine Area）：海域 1gha あたりで得られるサケのカロリー量と、牧草地 1gha で得られる牛肉のカロリー量が等しくなるように調整されている。これは、陸上と海洋における動物性タンパク質の価値を、人間の消費において同等とみなすという前提に基づく。
- 内水域（Inland Water）：海洋域と同様の生産性があると仮定し、同じ EQF が適用されている。

このように、EQF は異なる土地利用タイプを公平に比較するための鍵となる係数であり、自然資本の供給能力を正確に評価し、EF およびバイオキャパシティの統合評価を可能にする重要な要素である。

5. 消費者ベースのアプローチ

すべての製品および製造活動は、何らかの形でバイオキャパシティの利用に依存している。たとえば、原材料の採取、製品の加工・輸送、さらには最終的な廃棄に至るまで、各段階で生態系サービスが必要とされている。これらの過程を経て生産されたすべての製品には、その背後にある資源使用を反映した「内包フットプリント（Embodied Footprint）」、すなわち組み込まれた EF が存在する。この考えに基づくと、国際貿易の流れも、単なる貨物やサービスの移動ではなく、バイオキャパシティの需要が国境を越えて移動している現象として捉えることができる。つまり、貿易は「組み込まれた生態学的需要（Embodied Demand）」のフローでもあるといえる。

こうした視点のもと、NFBA では、ある国の人々の消費パターンを支えるために必要なバイオキャパシティを正確に把握することを目的に、消費者ベースのアプローチ（Consumer-Based Approach）を採用している。この手法では、生産・輸入・輸出のフットプリントをもとに、国内消費によって必要とされるバイオキャパシティを算定する。各土地利用タイプごとに、消費による EF（EF_C: Ecological Footprint of Consumption）は、次の式で求められる：

$$EF_C = EF_P + EF_I - EF_E \quad (9)$$

ここで：

- **EF_P** は国内における生産活動に伴うフットプリント（Ecological Footprint of Production）である。
- **EF_I** は輸入された商品に組み込まれたフットプリント（Embodied Footprint of Imports）である。
- **EF_E** は輸出された商品に含まれるフットプリント（Embodied Footprint of Exports）である。

このアプローチによって、実際に国民の消費によって生じた EF が明らかになり、国内で発生した影響だけでなく、海外で生じた間接的な影響も含めて可視化することが可能となる。

6. 土地利用タイプ別の算定特性

EF の算定では、6 つの土地利用タイプが対象となる。それぞれのタイプには独自の特性と算定方法が存在し、利用可能なデータや生物生産性の前提も異なる。本節では、土地利用タイプごとの特徴および算定における考慮点を整理する。

① 耕作地 (Cropland)

耕作地は、すべての作物の生産に利用される土地を指し、主食用作物に加えて、飼料作物、魚粉、油糧種子、さらには天然ゴムなどの特殊作物も含まれる。NFBA における土地利用タイプの中では最も生物生産性が高く、したがって、同じ物理的面積で比較した場合、グローバル・ヘクタール (gha) への換算後の面積は実面積よりも大きくなる傾向がある。

耕作地フットプリントの算定では、主要作物およびその派生品の生産・輸入・輸出に関する統計データを用い、各作物の収量を世界平均収量と比較して必要とされる面積を推定する。このとき、耕作地のフットプリントは、あくまで既存のバイオキャパシティの範囲内で計算される。つまり、耕作地が持つ年間の再生可能な生産能力を上回ってフットプリントを算定することはできない。

また、耕作地は人為的に管理された土地であり、年ごとの収穫量と成長量が一致すると見なされるため、特定地域においてフットプリントがバイオキャパシティを超過することは基本的でない (Kitzes et al., 2009) ¹。ただし、今後より詳細な収量データが整備され、長期的な持続可能性を評価可能になれば、作物の過剰搾取や土壌劣化の兆候をより正確に把握することができるようになることが期待されている (Bastianoni et al., 2012) ²。

② 牧草地 (Grazing Land)

牧草地フットプリントは、家畜が必要とする飼料のうち、草地から得られる部分の面積を測定対象とする。これは、栽培された牧草地のみならず、天然の草原や半自然草地も含み、家畜の食料供給に関わる広範な土地利用を反映している。

このフットプリントは、草地の年間平均地上部純一次生産量 (Net Primary Productivity: NPP) を収量とし、式 (1) に基づいて算出される。計算に用いられる「総放牧草需要 (PGR)」は、家畜が必要とする飼料量から、既に作物飼料などで供給されている量を差し引いて導かれる。以下はその基本式である：

¹ Kitzes J, Galli A, Bagliani M, Barrett J, Dige G, Ede S, Erb K, Giljum S, Haberl H, Hails C, Jungwirth S, Lenzen M, Lewis K, Loh J, Marchettini N, Messinger H, Milne K, Moles R, Monfreda C, Moran D, Nakano K, Pyhälä A, Rees W, Simmons C, Wackernagel M, Wada Y, Walsh C, Wiedmann T., 2009. A Research Agenda for Improving National Ecological Footprint Accounts. *Ecological Economics*, 68(7), 1991-2007.

² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X11003396>

$$P_{GR} = TFR - F_{Mkt} - F_{Crop} - F_{Res} \quad (10)$$

ここで：

- TFR：総飼料需要（Total Feed Requirement）
- F_{Mkt} ：市場で供給される作物由来の飼料量
- F_{Crop} ：飼料専用作物から得られる供給量
- F_{Res} ：作物残渣（Crop Residues）から供給される飼料量

NFBA における牧草地フットプリントの算定は複雑であり、過去 10 年にわたり継続的に手法の改善が図られてきた。たとえば、家畜の種別ごとの飼料ニーズの細分化、魚粉や動物性飼料の考慮、さらに援助物資としての飼料供給の追加などが行われている（Ewing et al., 2010a）。

しかしながら、現時点では草地の収量はその年の生産性のみを反映しており、過去からの蓄積や土壌ストックの消耗は考慮されていない。さらに、EF の手法自体が土壌の枯渇（soil depletion）や構造的劣化を明示的には捉えていないため、過放牧などによるオーバーシュート（過剰利用）の兆候を定量的に示すことには限界がある（Kitzes et al., 2009）。

③ 漁場（Fishing Grounds）

漁場フットプリントは、水産資源を持続的に収穫するために必要な一次生産量に基づいて評価される。この「一次生産要件（Primary Production Requirement, PPR）」は、収穫される水生生物の質量をその栄養段階（Trophic Level）ごとに必要な生産量へと変換することにより求められる。

PPR は、Pauly and Christensen（1995）の研究に基づいて以下の式で定義される。

$$PPR = CC \cdot DR \cdot \left(\frac{1}{TE} \right)^{(TL-1)} \quad (11)$$

ここで、

- CC: 湿重量の魚の炭素含有量
- DR: 混獲（Bycatch）の廃棄率
- TE: 栄養段階間のバイオマス移動効率（Transfer Efficiency）
- TL: 対象となる魚種の栄養段階

混獲に関しては、すべての魚種に対して $DR = 1.27$ が一律に割り当てられている。これは、1 トンの魚を漁獲するごとに 0.27 トンの混獲が発生することを意味する。（Pauly and

Christensen, 1995)。この混獲率は、PPR の計算式内で一定の係数として適用されており、混獲の栄養段階が主な対象魚種の栄養段階と同じであると仮定している。より高精度な混獲データが存在しないため、これらの近似値が用いられている。また、TE はすべての魚種について 0.1 と仮定されており、これはバイオマスの 10%が次の栄養段階へと移動することを意味する (Pauly and Christensen, 1995)。

海洋収量を計算するために用いられる年間一次生産量の推定値は、19 種類の水生生物グループの持続可能な年間収穫量 (Sustainable Annual Harvest) に基づいている (Gulland, 1971)。これらの収穫量は、式 (11) を用いて一次生産量に換算され、その合計が世界の漁業が持続可能に収穫できる総一次生産要件 (PP_S) とされる。PP_S は以下の式で計算される。

$$PP_S = \sum (Q_{S,i} \cdot PPR_i) \quad (12)$$

ここで、

- QS,i: 生物種グループ i に対する持続可能な収穫量
- PPRi: その種グループの平均栄養段階に対応する一次生産要件

したがって、世界平均海洋収量 (Y_M) は、PPR の観点から次のように定義される。

$$Y_M = \frac{PP_S}{A_{CS}} \quad (13)$$

ここで、

PPS: 式 (12) で求められる世界の持続可能な収穫量

ACS: 世界の大陸棚総面積

NFBA では、漁場フットプリントの精度向上のため、抽出率 (Extraction Rates) の見直し、養殖の追加、水産飼料に関する考慮など、近年にわたり大幅な改善が加えられている (Ewing et al., 2010a 参照)。

④ 森林地 (Forest Land)

森林地フットプリントは、木材および燃料用木材といった森林製品の供給に必要な土地面積を評価する指標である。この算定には、商業的に収穫可能な森林の年間純増量 (Net Annual Increment, NAI) を基礎とした収量が用いられる。

生産性データは、国連欧州経済委員会 (UNECE) や国連食糧農業機関 (FAO) が実施する「森林資源評価 (Forest Resource Assessment)」および「グローバル繊維供給 (Global

Fiber Supply)」などから取得されている。これらに基づき、世界平均では、1 ヘクタールあたり年間約 1.81 立方メートルの木材が商業的に利用可能と推定されている (UNECE and FAO, 2000; FAO, 1998)。

NFBA では、13 種類の主な木材製品および 3 種類の燃料木材製品の生産量をもとに森林フットプリントを算定する。さらに、国際貿易に関する計算には、30 種類の木材製品および 3 種類の燃料木材製品が含まれている。

⑤ 二酸化炭素吸収地 (Carbon Footprint)

二酸化炭素吸収地は、唯一「廃棄物」を対象とする土地利用タイプであり、人為的に排出された CO₂ を吸収するために必要な面積を表す。バイオキャパシティが明確に定義されていない点で、他の土地利用タイプとは異なる。

二酸化炭素 (CO₂) の長期的な貯蔵能力を持つ生態系タイプは森林以外にも牧草地や耕作地があるが、生物圏における炭素吸収の大部分が森林で行われることから、NFBA ではこの吸収地を森林のサブセットとして取り扱っている。これにより、木材や燃料木材の生産のための森林と、炭素吸収のための森林が分離されることはない。

CO₂ 排出の源は多様であり、化石燃料の燃焼や土地利用の変化などの人為的要因に加え、火山活動や森林火災、呼吸などの自然要因も含まれる。NFBA では、人為的排出に対応する吸収必要量のみを追跡している。

二酸化炭素吸収フットプリントは、次の式で表される。

$$EF_C = \frac{P_C \cdot (1 - S_{\text{Ocean}})}{Y_C} \times EQF \quad (14)$$

ここで、

- PC: 年間の人為的な二酸化炭素排出量 (生産量)
- S_{Ocean}: その年に海洋によって隔離 (吸収) された人為的な二酸化炭素排出量の割合
- Y_C: 世界平均の森林 1 ヘクタールあたりの年間炭素吸収量を示す。

⑥ 生産能力阻害地 (Built-up Land)

生産能力阻害地フットプリントは、住宅地、インフラ、工業地、水力発電用貯水池など、人間活動により生産機能を失った土地の面積に基づく。

NFBA では、こうした土地がかつて耕作地であったと仮定して算定を行っている。この仮定は、人間の居住地は一般的に、肥沃で高収量の耕作地になりうる地域に位置しているという観察に基づいている (Imhoff et al., 1997; Wackernagel et al., 2002)。例外的に非耕作

地である明確な証拠が存在する場合には、その仮定は適用されない（例：アラブ首長国連邦）。

水力発電用の貯水池に関する包括的な世界データが存在しないため、**NFBA** では貯水池が世界平均の生物生産的土地を発電能力に比例して覆っていると仮定している。

生産能力阻害地におけるバイオキャパシティは、その土地に対応するフットプリントの値と常に一致する。これは、人間のインフラにより占有された土地が、本来持っていた生物生産性と等しい価値を失っていると見なされるためである。さらに、**NFBA** では、生産フットプリントと消費フットプリントの値も常に一致する。これは、輸出入される製品やサービスに含まれる生産能力阻害地の面積が、現時点の計算体系では考慮されていないためである。このようなデータの欠如により、ネット輸出国では生産能力阻害地のフットプリントが過大に評価され、反対にネット輸入国では過小に見積もられる可能性がある。