

エコロジカルフットプリントとバイオキャパシティの予測を用いた持続可能社会実現策の導出  
 環境システム学専攻 47116680 松下明史 (2014年3月修了)

指導教員：影本浩教授・阿久津好明准教授

キーワード：持続可能社会,エコロジカルフットプリント,バイオキャパシティ,環境クズネツ曲線

1. 研究の背景・目的

戦後の急激な人口増加と経済成長によって現在、人類は地球の環境許容量を超えた活動をしている。本研究では人類が与える環境負荷の指数としてエコロジカルフットプリント(以下 EF),地球がもつ環境許容量の指数としてバイオキャパシティ(以下 BC)を用いる(単位は,平均的な生産能力を持つ土地 1ha を示す gha)が,EF>BC の状態をエコロジカルオーバーシュートと呼ぶ。これは地球の資源生産能力や廃棄物処理能力を超えて人類が活動していることを示していて,1980年代に初めて EF>BC となって以降毎年 EF>BC となっている。2007年においては全世界の一人当たりの数値が EF=2.7,BC=1.8,EF/BC=1.5 となっていてこれは人々が地球 1.5 個分の生活をしている状態を表す。エコロジカルオーバーシュートを起こした結果,地球上には処理しきれない温室効果ガスや廃棄物が蓄積され,それは大気中の二酸化炭素濃度上昇や生物多様性と森林面積の減少などにつながっている。

本研究で EF,BC をモデル化した上で環境と経済発展の関係に重点を置きながら推移予測をし,その予測を基に EF<BC となる持続可能社会を実現するにはどのような施策が必要であるのかの導出を目的とする。

2. EF,BC,GDP の相関

経済発展と環境負荷には相関が高いことが多く,例えば二酸化炭素排出量と一人当たり GDP の間には環境クズネツ曲線が成り立つことが先行研究によって証明されている。この環境クズネツ曲線とは,「経済発展の初期から中期段階においては経済成長に重点が置かれ,汚染水準は経済成長に伴って悪化する。しかし,経済発展がある水準を超えると,環境を守りたいという意識の強まりや,公害などとして実害化することで環境政策の実施あるいは環境技術の開発・導入等が行われ,汚染水準が低下し始める」という仮説に基づく曲線のことである。

表 1 2007 年における日本の EF,BC

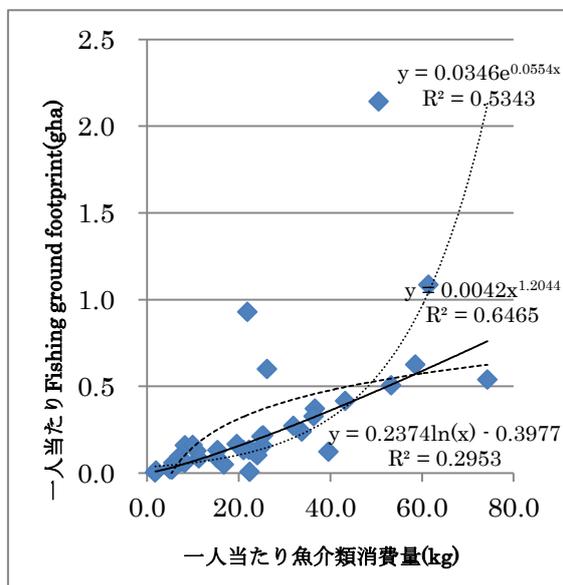
EF	Cropland footprint(農作物生産のために必要な土地面積)	Fishing ground footprint(水産物生産のために必要な水域面積)	Grazing land footprint(家畜飼料生産のために必要な土地面積)	Forest footprint(木材生産のために必要な土地面積)	Build-up footprint(インフラなどの生産能力阻害地のために必要な土地面積)	Carbon footprint(二酸化炭素吸収のために必要な土地面積)
4.70	0.57	0.62	0.07	0.27	0.06	3.13
BC	Cropland	Fishing ground	Grazing land	Forest	Built land	
0.60	0.12	0.07	0.00	0.34	0.06	

本研究で用いる EF ではこの曲線が成り立たないことが先行研究によって証明されているために GDP との相関だけで EF をモデル化することはできない。次に BC と GDP の相関を調べたところ相関は見受けられなかった(相関係数 0.19)

### 3. EF,BC のモデル化

GDP との相関だけでは EF,BC はそれぞれモデル化できないので,EF,BC が内包する項目に分解し,一つずつに説明変数を見つけて回帰式として表すことでモデル化を試みる。ここでの手法は多変量統計解析を用いる。具体的には項目の回帰式に含まれる可能性のある説明変数との相関を相関係数から調べ,相関が見受けられる説明変数に関しては,どのような関係であるかを近似曲線から導出し,最後に重回帰分析を行う。重回帰後の重決定の値が  $R^2 = 0.75$  以上の回帰式を原則として採用し,相互に相関が高い説明変数は排除する。

図 1 Fishing ground footprint と魚介類消費量の散布図



例: Fishing ground footprint は魚介類消費量との間で累乗近似曲線が最も相関が高いので累乗の項を重回帰分析でも候補に入れる。

結果として EF は項目ごとに以下の回帰式が導出された。

表 2 EF が内包する項目の回帰式

回帰式	補正後重決定 $R^2$
Carbon footprint = $-0.2GDP^2 + 1.79GDP$	0.816
Cropland footprint = $0.716GDP^{0.2653} + 0.482A^2$	0.874
Fishing ground footprint = $0.0448GDP + 1.07F^{1.2}$	0.605
Grazing footprint = $0.27LA$	0.821
Forest footprint = $-0.017GDP^2 + 0.111GDP - 0.0215W^2 + 0.379W$	0.893
Built up land = Built land	1.00

ここで GDP は一人当たり GDP (\$10,000),A は一人あたりの農作物消費量(t),F は一人当たり魚介類消費量(100kg),LA は一人当たり家畜頭数,W は一人当たり木材消費量 (m<sup>3</sup>)

Carbon footprint に関しては環境クズネツ曲線が先行研究において成り立つことが証明されており,Carbon footprint は GDP に伴い増加するが,ある水準でピークを迎えその後は減少する。本研究での転換点は一人当たり GDP\$45,000 (当時アメリカにおいて一人当たり GDP は\$46,349)

感度分析の結果と合わせると EF に含まれる項目に関しては基本的に GDP の増加によって多少増加するものの,消費量が大きければ大きいほど環境負荷も大きいという,一次線形の関係に近いことが多い。(Forest footprint に関してはあまりに消費量が多い国[Finland など]に関しては非常に効率のよい生産方法を確立しているために消費量は多くても環境負荷は小さくなっている式が成り立っている。)

すべての説明変数のデータが入手できる 36ヶ国で EF の実際値と,モデルの算出値を比較したところ,両者の間には傾き 0.938 の一次曲線(重決定

0.940)の近似曲線が導出されたので再現度は高いモデルといえる。

次に BC は項目ごとに以下の回帰式が導出された。

表 3 BC が内包する項目の回帰式

回帰式	補正後重決定R <sup>2</sup>
$Crop\ Land = 0.69CP - 0.096CP^2 + 0.0423GDP$	0.757
$Grazing\ Land = 0.511LA$	0.580
$Forest = 0.628FA^{0.816} + 0.427FP$	0.666
$Fishing\ Ground = 0.789GDP + 21.3HC - 61HC^2 + 0.123S$	0.723
$Built\ up\ land = Built\ land$	1.00

ここで GDP は一人当たり GDP (\$10,000),CP は一人あたりの農作物生産量(t),LA は一人当たり家畜頭数,FA は一人当たり森林面積(ha),FP は一人当たり木材生産量(m<sup>3</sup>),HC は一人当たり漁獲量(t),S は一人当たり海洋面積(1000km<sup>2</sup>)

BC に含まれる項目に関しては生産量が多い国ほどキャパシティは大きいという関係式になるものと,CroplandやFishing groundのように,あまりに生産量が大きすぎるとその資源が枯渇に近づいているためにキャパシティとしては減少していることを示す式がある.50ヶ国でBCの実際値とモデルの算出値を比較したところ,両者の間には傾き0.996の一次曲線(重決定0.899)の近似曲線が導出されたのでEFよりは精度が劣るものの再現度の高いモデルが構築できた。

本研究ではEF/BC<1となるように説明変数を変化させる施策の導出が目的であるのでEF/BCに対する説明変数ごとの感度分析を行った結果,EF/BCの変化に最も影響を及ぼすのはGDPであり,EF/BC減少に影響が大きいのは,一人あたりの森林面積を増やし,木材生産量を向上させ,木材消費を削減することであった。

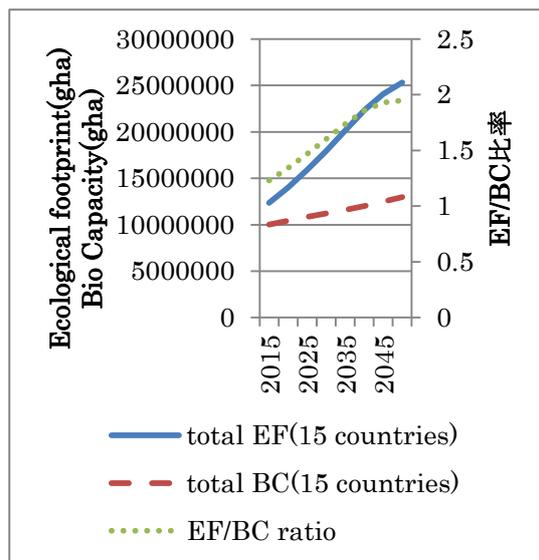
さらに,EF,BCともに含まれる一人あたりの家畜

頭数に関しては増やした方がEF/BCは減少することがわかった.さらに,Built landに関しては上下50%変化したとしてもEF/BCに0.05%以内の変化しかもたらさないので定数として将来予測を行っても影響はないと仮定する。

#### 4. モデルを用いた将来予測

導出されたモデルを用いて様々なシナリオのもとで2050年までのEF,BCの推移予測を行う.GDPの予測は金融機関(Goldman Sachs 2007 report),人口の予測は国際連合のデータを用いる.すべてのパラメータのデータが手に入りEF,BCの予測ができるのは先進国や成長国などの15ヶ国であるが,これらの国で2007年における世界のEF全体の60%,BC全体の61%を占めている。

図 2 ベースシナリオにおけるEF,BC推移予測



15ヶ国全体で2050年におけるEF/BCの値は1.95となり2007年における1.21より大幅に悪化した.そして,2050年においてEF<BCが達成できているのはアメリカ,カナダ,ロシアの三カ国のみで,EF>BCである上にシェアの大きい中国(33.7%),インド(28.4%)のGDPと人口が伸びることで全体のEFも大きくなりEF/BC比率は悪化してしまっている。

そこで一人あたりの食料消費と木材消費を削減すると同時に,生産効率を向上させ森林面積を増加

させるシナリオをシナリオ 1 とし、ここでの目標削減率の設定などは感度分析や実現性の検定を基に調整した。次に、 $EF > BC$  の国では人口増加を抑制し、 $EF < BC$  の国では人口増加を促進するシナリオをシナリオ 2、そして二つ同時に行うシナリオをシナリオ 3 として予測を行ったところ、2050 年までではどのシナリオにおいても全体として  $EF < BC$  を達成することができなかった。そこで 2065 年まで期間を延長して推移予測を行った。

**表 4 2065 年までの推移予測におけるシナリオごとの相違**

scenario	0	1	2	3
EF/BC	1.25	1.04	1.09	0.91
生態学的 負債	35.2	24.5	30.7	21.1

ここで EF/BC は 2065 年時点の数値、生態学的負債とは 2065 年までに地球に蓄積される環境負荷のことであり、大気中二酸化炭素濃度の上昇や個体種の減少などを引き起こす。

2065 年までの予測の結果、ベースシナリオでは EF/BC の値は 2007 年時の 1.11 より悪化して 1.25 となった。さらに 2007 年から 2065 年までの通算の生態学的負債は地球換算で 35.2 個となり、1980 年から 2007 年までの生態学的負債 7.5 個の約 5 倍にもなった。そしてシナリオ 3 のときに初めて  $EF < BC$  を達成することが出来た。

## 5. 結論

食料や木材の過剰消費、過剰廃棄の実態を改善する施策と、環境負荷の大きい国の人口増加を抑制する施策は EF/BC の減少にそれぞれ効果があったが、それら二つの施策を同時に行う時に初めて 2065 年において EF/BC は 0.91 となり、地球 1 個分以内

の生活である  $EF < BC$  が達成できた。このときの 2007 年から蓄積される生態学的負債は地球換算 21.1 個であり、ベースシナリオより 14.1 個分も改善することができた。よって、消費量削減や生産効率向上、植林、人口増加抑制のすべてが持続可能社会実現のためには重要であることがわかった。

そして、インドを筆頭に、今後経済成長と人口増加が著しいと予想されていて環境負荷が環境許容量を上回る国においては年々地球全体に占める環境負荷の割合が大きくなることが予測されるので、経済発展に伴って環境技術を向上させるとともに避妊具の普及などによって人口増加を抑制することが重要である。一方、アメリカやカナダなど、環境技術が発展し、環境許容量が環境負荷を上回る先進国などにおいては環境負荷の大きい国から積極的に移民を受け入れるなどして豊富な環境許容量を活用すべきである。また、今回の対象国が今後世界経済を牽引していくと予想される経済成長著しい主要国であったために、経済水準が転換点を超えて環境クズネツ曲線に沿った Carbon footprint が減少し EF も大幅に減少したが、IPCC の想定によれば途上国においては 2050 年においても一人当たり GDP は \$3,000 程度、世界全体でも \$12,000 程度でまだまだ転換点 (\$45,000) を迎えるには程遠く、環境負荷は大きくなっていくことが予想されるので主要国が率先して環境政策を導入し、環境技術を発展させることが途上国のために地球の環境許容量を残しておくためにも重要である。

## 参考文献

**Yong Wang, Lingyan Kang, Xiaoqing Wu, Yang Xiao**

「Estimating the environmental Kuznets curve for ecological footprint at the global level: A spatial econometric approach」

(Ecological Indicators, Volume 34, November 2013, pp.15-21)

**内山 勝久**。「二酸化炭素排出と環境クズネツ曲線」(日本政策投資銀行設備投資研究所)