



Title	発展途上地域における農業活動の持続性評価に関する研究 : ecological footprint と energy flow model による分析
Author(s)	高橋, 義文
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 27(1), 115-197
Issue Date	2005-02-28
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/5624
Type	bulletin (article)
Note	本論文は北海道大学博士論文 (2004年)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	27(1)_TAKA115-181.pdf



[Instructions for use](#)

発展途上地域における農業活動の持続性評価に関する研究*
—— Ecological Footprint と Emergy Flow Model による分析 ——

高橋 義文

(北海道大学大学院農学研究科 農業経済学講座)**

A Study on Sustainable Evaluation of Agricultural Activity in the Rural Area:
Ecological Footprint and Emergy Flow Model Approach

Yoshifumi TAKAHASHI

(Agricultural Economics, Division of Bioresources and Product Science
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589, Japan)

	目次	における持続性概念 ……………128
		D. 小 括 ……………130
第I章	序 論 ……………116	
	A. 課題の背景 ……………116	
	B. 既存研究の限界 ……………117	
	C. 本論文の目的 ……………118	
	D. 本論文の構成 ……………118	
第II章	持続性概念からみたエコロジカル 経済学 ……………120	
	A. 背景と目的 ……………120	
	B. 持続性 (Sustainability) 概念とその 分類 ……………121	
	a. ブントラント (Brundtland) 以 前の持続性について ……………121	
	b. ブントラント以降の持続性につ いて ……………122	
	c. 多様化する持続性概念の分類 ……122	
	C. 環境経済学とエコロジカル経済学に 関する定義とアプローチ ……………124	
	a. 環境経済学の定義 ……………124	
	b. 環境経済学のアプローチ ……………125	
	c. エコロジカル経済学の定義 ……126	
	d. エコロジカル経済学のアプローチ 127	
	e. 環境経済学とエコロジカル経済学	
第III章	中国広西壮族自治区大化县七百弄 郷の紹介 ……………133	
	A. 大化县七百弄郷の概況 ……………133	
	a. 地理的・自然的位置 ……………133	
	b. 社会的・経済的状況 ……………133	
	c. 七百弄郷の歴史の変遷 ……………134	
	B. 大化县七百弄郷の事例の位置付け …134	
	C. 調査データの概要 ……………137	
第IV章	Ecological Footprint を用いた人 間活動の環境面積要求量と環境収 容力の推定 ……………137	
	A. 本章の目的 ……………137	
	B. エコロジカル・フットプリント (Eco- logical Footprint) 分析の理論と既 存研究 ……………139	
	a. 環境収容力 (Carrying Capacity) と囲い込まれた土地扶養能力 (Appropriated Carrying Capac- ity) ……………139	
	b. オーバーシュート (Overshoot) …140	
	c. エコロジカル・フットプリント分 析の定義と概要 ……………141	
	d. エコロジカル・フットプリント分 析を利用した既存研究 ……………142	
	C. 中国西南部七百弄郷への適用 ……143	

*本論文は北海道大学博士論文 (2004 年)

**現在の所属: 農林水産政策研究所

〒114-0024 東京都北区西ヶ原 2-2-1

a. 基本データおよび分析データ ……143	ミュレーション結果 ……167
b. エコロジカル・フットプリントの フレームワーク ……143	b. 家畜のエメルギーフローシミュ レーション結果 ……167
c. エコロジカル・フットプリント計 測の詳細 ……145	c. 農家のエメルギーフローシミュ レーション結果 ……168
c-1. 農地カテゴリーの計算 ……145	d. 森林のエメルギーフローシミュ レーション結果 ……168
c-1-1. 耕種作物生産 ……145	e. 各エメルギーシミュレーション結 果の比較 ……169
c-1-2. 家畜生産 ……147	E. 小 活 ……169
c-1-3. その他の食料 ……149	
c-2. 森林カテゴリーの計測方法…149	
c-2-1. 林産物 ……149	
c-2-2. 二酸化炭素 ……149	
c-3. 生産能力阻害地カテゴリーの 計測方法 ……150	
D. 試算結果 ……150	
a. 最大扶養可能人口の推計結果 ……150	
b. エコロジカル・フットプリントの 分析結果 ……151	
E. 小 活 ……153	
第V章 Energy Flow Modelを用いた人 間活動の定常状態のシミュレ ーション予測 ……155	
A. 本章の目的 ……155	
B. エメルギーフロー分析 (Emergy Flow Analysis) の理論と既存研究 156	
a. エネルギー (Energy) とエメル ギー (Emergy) の概念とその特徴 156	
b. エメルギー分析を用いた既存研究 157	
c. H.T. Odum によるエメルギーフ ローモデルの作成マニュアル ……158	
d. エネルギーフローモデルから微分 方程式への変換 ……158	
C. 中国西南部弄石屯への適用 ……159	
a. 弄石屯におけるエメルギーフロー のマクロモデル ……159	
b. 弄石屯におけるエメルギーフロー のミクロモデル ……159	
c. エメルギーフローモデルの数式化 161	
d. 分析データ ……164	
e. シミュレーションの仮定条件 ……164	
D. シミュレーション結果と考察 ……166	
a. 耕種作物のエメルギーフローシ	
	ミュレーション結果 ……172
	第VI章 要約と結論 ……172
	第I章 序 論
	A. 課題の背景
	本論文の目的は、エコロジカル経済学の視点 から発展途上地域の間人活動（経済活動と日常 の生活）の持続性評価を行い、新しい経済発展 の方向性を示唆することである。なお、本論文 では発展途上地域としているが、ここでいう地 域とは国よりも小規模な単位であり、日本でい う県または市町村の単位と同様の意味で使用し ている*1。
	次に、このような課題設定を行った背景を述 べる。A. Smith の「経済人 (Economical man)」 という仮定の下、人間はより少ない資源で多く の生産量を生み出す効率的な生産活動を行おう としてきた。しかし、現在地球上の至る所で様々 な問題が生じている。
	産業活動が発達した都市地域では、大気汚染、 水質汚染、ヒートアイランド現象、地盤沈下な どの公害問題*2が発生し、農林業従事者の多い 農村地域では、化学肥料・農薬の多投による土 壌汚染、地下水汚染、土壌流出などの環境問題 が発生している。また、都市地域と農村地域の 経済格差（貧困問題）は、都市地域においてス ラム化などの居住環境の悪化を招き、農村地域 においては労働力確保のために多産を行うなど の人口問題を加速させている。さらに、貧困問 題と人口問題は、農村地域における森林などの 豊富な自然資源を都市地域へ廉価で大量売却さ せている。このような資源採取（資源問題）は、 土砂崩れ、土壌流出、洪水などの環境問題を誘

発させ、生活基盤である自然生態系を破壊させることになり、結果として更なる貧困問題を生むことになる。現在、発展途上地域では、資源問題と人口問題を介した貧困問題と環境問題の悪循環に悩まされている。

特に、以上のことは、世界の約1/5の人口を有し、都市地域と農村地域の所得格差が極めて高い中国において重要な問題である。過去、中国は大躍進運動^{*3}の際に、燃料として西部の森林資源の過伐採をおこなってきた。その結果、森林の持つ水資源涵養機能が失われ、下流域での洪水被害が増加したと言われている。また、Brown (2001) は、地球の資源が有限である限り、中国の全人口がアメリカのような大量生産・大量消費・大量廃棄といった経済活動をおこなうことは不可能であると指摘している。しかし、中国を初めとする発展途上地域の貧困層の生活水準を改善することは、世界が抱える重要課題の一つである。

しかしながら、貧困問題を解消するためにも経済成長(GDPの増加など)が必要であると言う目的の下で、もし発展途上地域が、貧困問題対策として先進地域で行われてきた大量生産・大量消費・大量廃棄といった人間活動(経済活動と日常生活活動)を行うならば、より深刻な環境問題、貧困問題、資源問題、人口問題が誘発されることになるだろう。

このような問題を危惧した国々では、環境と開発をテーマに多くの議論が交わされるようになった。しかしながら、先進国(環境保護の立場)と発展途上国(貧困こそ環境問題の根源であるため経済成長促進の立場)のスタンスが異なるため、1987年にブルントラントレポート(Brundtland Report)が発表されるまでお互い歩み寄ることはなかった。ブルントラントレポート^{*4}は、世代間衡平、人口、食糧、資源・エネルギー、自然環境、国際経済などをキーワードに「持続的発展^{*5}」という新たな目標概念を世界に提唱した。この持続的発展という概念により、先進地域と発展途上地域は共通のゴールを目指すようになった。

そして近年、国連の環境/開発会議(2002年ヨハネスブルグ)では、環境問題の原因は貧困

であるとし、貧困問題と環境問題の悪循環を断ち切るために貧困問題の解決を最優先項目とした(吉田他編(2003)の石、太田他編(2003)の毛利を参照)。つまり、環境問題の解決策は、「貧困問題と環境問題の悪循環における貧困問題の部分断ち切ることにある」ことを意味している。この点に関して、早くから寺西(1992)は「貧困と環境破壊といった悪循環の発生原因は、地域社会での生存基盤システムを支えてきた資源や環境に対する長年の収穫行為の結末として、天災への対応能力が極度に貧弱化してしまったケースである」と説明し、自然生態系に対する人間の自然資源の消費活動を再考する必要があることを指摘している。

すなわち、環境問題を解決するには貧困問題を、貧困問題を解決するには環境問題への対応能力を備えた活動基盤(自然生態系)を整えることが重要であるといえる。しかし、寺西の言う自然資源の消費活動の再考は、①消費活動の対象となる自然資源に対してどのような基準(絶対的な限界量)を設けるのかという環境収容力の問題、②「消費活動を行う主体である人間活動の場」と「自然資源を持つ自然生態系」の双方を考慮した分析枠組みが不十分であるという分析枠組みの問題^{*6}により、非常に困難な課題となっている。

このような現状を概観すると、今後は、自然生態系と人間活動の関係をどのようにして求めていくのか、すなわち、自然生態系が持つ「資源供給能力と廃棄物浄化能力の限界点」と現時点での「人間活動の規模^{*7}」がどのような状態にあるのかを把握し、そしてその限られた条件の下での今後の人間活動の方向性を示唆する必要がある。

B. 既存研究の限界

環境問題の解決のために考え出された持続性(Sustainability)概念は重要なキーワードである。本節では、環境問題と持続性を取り扱った経済学の研究領域の既存研究を紹介する。なお、持続性に関する詳細な議論および既存研究の解説は第II章にまとめてある。

従来の経済学的観点から持続性の検証を行った論文は、①財の持つ外部性を市場に内部化し、

社会的費用を含めた価格を求める貨幣アプローチ、②割引現在価値を用い、資源消費と効用の組み合わせの最適経路を求めるモデルアプローチ、③森林、水、土地といった自然資源に注目し、それら自然資源がどのように利用されているかを物量単位で計測する物量アプローチ、などに大別される*8。

①の貨幣アプローチは、環境問題の発生原因は市場の失敗によるものであり、財やサービスとそれ自体の持つ外部性が何らかの方法で適正に評価され価格に反映されるならば、自然資源などは十分に維持・管理され、環境問題が発生しないという考え方に基いている。その外部性を測る具体的な手法には、ヘドニック法 (Hednic Approach)、トラベルコスト法 (Travel Cost Method)、仮想市場評価法 (Contingent Valuation Method)、コンジョイント分析 (Conjoint Analysis) などがある*9。

②の最適経路を求めるモデルアプローチは、現在地球上で起きている環境問題自体に焦点を当てているというよりも、持続性の世代間平衡の原則に従い、将来世代と現在世代の間で総効用が低下しないような資源消費と効用の組み合わせを考えたものである*10。具体的な手法には、成長理論のモデルに (枯渇性) 資源の制約を導入した Dasgupta and Heal のモデルなどがある (浅子他 2002 参照)。

③の物量単位で計測する物量アプローチは、環境問題の直接的原因となる資源消費量、ないしは生産・消費の結果、廃棄することになる環境負荷量に注目し、定量的に表す方法である。具体的には、環境経済統合勘定 (林 (2002), 山本 (2003) 参照), LCA (Life Cycle Assessment: ライフサイクルアセスメント) などがあ (鷺田編 (1999), 増田 (2003) 参照)。

しかしながら、環境問題が発生するメカニズムは、人間が自然生態系から供給される資源量以上に自然資源を採取し、環境負荷物質の浄化可能量以上に環境負荷物質を排出していること (環境収容力に関する問題)、人間が自然資源の持つ有機的連鎖性*11 を考慮していないこと (自然生態系と人間社会の間の分析枠組みに関する問題) などによる。このような環境問題が発生

するメカニズムを踏まえて鑑みると、環境問題に対する経済学的観点からの既存研究には限界があるといえる。

C. 本論文の目的

本論文の研究サイトである七百弄郷は 50 年前までは、自然生態系の持つ資源供給能力と廃棄物浄化能力の機能を十二分に有効活用していたが、近年、所得や福祉などの生活水準の向上を目的に、急激に経済開発がおこなわれている。七百弄郷の自然生態系と人間活動の関係は、めまぐるしい経済開発により激変し、自然生態系の持つ機能が低下しつつある。

しかし、所得や福祉といった生活水準の低い発展途上地域で経済開発をおこなうことは重要であるが、行われる経済開発が従来の資源大量消費型の経済開発では、先進国の二の轍を踏むことになる。そうならないためにも発展途上地域の自然生態系を含めた経済開発がどのようなものであるかを提示することが重要である。

よって本論文の目的は、永きに渡り、自然生態系機能を壊すことなく人間活動に利用されてきた集落である中国西南部七百弄郷を調査対象に、エコロジカル経済学の視点から、発展途上地域の人間活動の持続性評価を行い、新しい経済発展の方向性を示唆することである。分析手法には、自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を表す環境収容力に基づいた Ecological Footprint 分析と Emery Flow Model 分析を採用した。本論文の特徴は、エコロジカル経済学の実証とデータの得にくい発展途上地域の自然科学・社会科学のデータを用いて分析したことである。

D. 本論文の構成

本論文は、序論 (第 I 章)、本論 (第 II 章～第 V 章)、結論 (第 VI 章) の全 5 章で構成されている。

第 I 章では、現在どのような環境問題が起きており、それら環境問題がどのような発生メカニズムで生じているのかを説明した。現在の環境問題の発生メカニズムに対し、既存研究ではどのような解決アプローチが取られてきたかを紹介し、その限界点を示した。さらに、それらの既存研究の限界点を踏まえ、今後どのような

視点からのアプローチが求められるかをまとめた。

第II章では、環境問題を考える上で重要なキーワードである持続性概念の整理をおこなった。また、その持続性概念と密接に関連した学問領域である環境経済学とエコロジカル経済学を整理した。本論文ではエコロジカル経済学の“強い持続性”概念に従った立場で分析を進めていく。

第III章では、本論文の調査対象地域である中国西南部広西壮族自治区大化県七百弄郷の概要、調査対象地域の位置付け、調査の概要を説明した。

第IV章では、環境収容力概念を応用した Ecological Footprint 分析を用い持続性評価を行った。Ecological Footprint 分析は、集落内の農家が生活する上で必要な（または年内に消費した）全ての財を土地面積に換算する手法である。分析の結果、現在の屯集落の生活は、排出した二酸化炭素を吸収するために必要な森林の Ecological Footprint と、投入した窒素量を生産するのに必要なバイオマスの Ecological Footprint の両カテゴリーに強く依存していることが明らかとなった。また、現在の居住人口は、屯集落内の最大扶養可能人口（その集落に居住可能な最大人数）の1.4~2.3倍と過剰な人口規模であることがわかった。つまり、現在の生活水準という条件の下で静学的に判断すると、七百弄郷は既に持続不可能な状態（環境収容力を超えた状態）であることが明らかとなった。

第V章では、人間活動に欠かすことのできないエネルギー (Energy) と、そのエネルギーが往来する自然生態系と社会経済システムの循環経路に注目し、人間活動のシミュレーションを行った。本章では、近年開発されたエメルギー (Emergy) 概念を用い、集落内のエメルギーフローモデル (Emergy Flow Model) を作成した。エメルギーとは、石油や木材といった質の異なるエネルギーを全て太陽エネルギー当りに標準化 (単位: Solar eMjoule) したものである。そのため、エメルギーフローモデルは、質の異なるエネルギー同士の加算や比較という従来の問

題点を改良した分析手法である。具体的なシミュレーション方法は、耕種作物、森林、家畜、農家の4つのカテゴリーに流れるエメルギー量の微分方程式を求め、4つのカテゴリーのエメルギーの貯蓄変化量を導き出すことである。その結果、耕種作物、家畜、農家のエメルギー量は短期においてはエメルギー量が減少傾向をしるし、その後、森林のエメルギー量に連動して残りの3つのカテゴリーも上昇傾向をしるすことが予想された。以上のシミュレーションより、弄石屯の人間活動は、森林のエメルギー量によって規定されると推察した。

第VI章では、エコロジカル・フットプリント分析とエメルギーフロー分析による調査地域の持続性評価を行い、その分析結果から今後の経済発展の方向性を示唆した。

註

- *1 発展途上国内では都市地域と農村地域での生活レベルが全く異なるため、都市地域を含むことになる「国」を使用せず、「地域」を使用した。
- *2 公害の定義に関しては都留 (1972)、宮本 (1989) が詳しい。本論文では、人災と言われる公害問題は、自然災害による環境破壊をも含めた環境問題に包含されるものとする。
- *3 「大躍進運動」は、1958年 (昭33) に「十五年で英国の工業生産を追い越す」をスローガンに始まった政策であり、農工業の生産に力を入れた時代である。中国西部の森林は鉄鋼業などの燃料として大量に伐採された背景を持つ。また人民公社もその過程で設立された。
- *4 ブレントラントレポートをまとめたものが、WECD ed. (1987) の「Our Common Future」である。
- *5 本論文では、持続的発展 (Sustainable Development) は持続可能性、持続可能な発展、持続性、永続性などと同義とする。
- *6 鷺田 (1992) は、社会が永続的 (持続的) な存在を意図する限り生態系の支配下におかれ、生態系が許容する範囲での自由度が

与えられるのみであると指摘している。また、人間の目的により社会を自然生態系から分離させることで、自然生態系と社会の間のチャンネル（物やエネルギーなどのつながり）が少なくなり、本来は密接に絡み合っていたものが単純化されてしまう点を指摘している。

- *7 人間活動の規模とは、人間が生きていくために消費した全てのサービス・財（人工的に生産されたものと自然を起源としたものも含む）の総量および総価格をさす。また、本論文で人間活動と述べた場合は、生産・消費活動といった従来の経済活動をも包含しているものとする。
- *8 その他にも、宮本（1989）が主張する、資本形成、産業構造、民主主義のあり方といった中間システムが環境を決定するという政治経済のカテゴリーもある。しかし、領域が広がるため3つのカテゴリーに限定した。
- *9 近年、これらの分析手法を用いた研究は国内でも盛んに行われており、数多くの研究実績があるため、すべての研究例をあげると枚挙にいとまがない。そこで、環境評価の理論背景、分析手法の解説、ケーススタディを含めた包括的な研究例の一部を紹介すると、浅野（1998）、出村・吉田編（1999）、肥田野（1997）、肥田野（1999）、栗山（1997）、栗山（1998）、大野（2000）、寺脇（2002）、鷺田編（1999）などがある。ただし、浅野（1998）、肥田野（1997）はヘドニック法について、肥田野（1999）、栗山（1997）、栗山（1998）、寺脇（2002）はCVMについて詳細な解説を行っている。出村・吉田編（1999）はヘドニック法、トラベルコスト法、CVMについて、鷺田編（1999）はCVM、コンジョイント分析について、大野編（2000）はトラベルコスト法、ヘドニック法、CVM、コンジョイント分析について解説を行っている。
- *10 このアプローチの重要な概念になるのが Hoteling ルールと Heartwick ルールである。Hoteling ルールとは、将来市場が現存

すると仮定したうえで、現在と将来の間の純収益の差を、現在販売してその収入を投資することで得られる利子と比較するルールである。Heartwick ルールとは、将来世代に対する厚生（効用）の保証が総消費を生み出す再生産可能な人工資本の蓄積によっても達成可能であるとするルールである。これらのルールは持続性概念を考える上で重要なルールとなる。

- *11 有機的連鎖性とは、地域資源が地域固有の生態系の中に位置付けられるがゆえに地域資源相互の連鎖性が生じており、連鎖性が破壊された時に資源の持つ有用性も失われてしまう性質である（永田（1988）参照）。

第II章 持続性概念からみた エコロジカル経済学

A. 背景と目的

持続的発展（Sustainable Development）概念^{*12}は、1987年にブルントラントレポート（Brundtland Report）により定義され、一般的に認識されるようになってきた。ブルントラントによる持続性の定義は、「将来の世代が自らのニーズ^{*13}を充足する能力を損なうことなく、今日の世代の欲求を満たすこと（WECD ed.（1987）：p. 43 参照）」とされている。

しかしながら、このブルントラントの持続性概念の定義において、ニーズがどの程度である必要があるのかという基準の問題、将来世代のニーズを現在世代が決めて良いのかという時間的問題が含まれている^{*14}にも関わらず、持続性というキーワードが、接頭語のように半ば氾濫しているのも事実である。学問領域を自然科学系と社会科学系（ここでは経済学に限定する）に大別し、持続性という接頭語の使われ方を概観すると、自然科学系においては恒常性（Homeostasis）と環境収容力（Carrying Capacity）の研究に関連して使用されている。一方、経済学では自然科学系分野のように明確な特徴を持っておらず、その使用例は多岐にわたり簡潔に説明することは非常に困難である。

だが、経済学の学問領域内にある環境経済学とエコロジカル経済学は、持続性を重要なキー

ワードに掲げており、実際に持続性に関する研究例が多い。環境経済学は90年代頃から盛んに研究が行われ日本での認知度は非常に高いが、エコロジカル経済学は欧米でこそ盛んに研究されているものの、日本での認知度は非常に低い*15。

そこで本章の目的は、①多義的に解釈され易いと言われる持続性概念の整理を行い、②整理した持続性概念の視点から、日本での認知度の低いエコロジカル経済学の解説を行うことである。

B. 持続性 (Sustainability) 概念とその分類

a. ブントラント (Brundtland) 以前の持続性について

持続性に関する議論は、ブントラントの持続性の定義が提唱されてから活発に行われている。そのため、本章ではブントラント以前と以降に区切り、持続性の定義を整理していくことにする。

そもそも持続的発展の接頭語にあたる持続的 (Sustainable) とはどのような意味で使用されてきたのかを考える必要がある。持続性の語源が学術論文の中で使用されたのは、18世紀後半から19世紀初頭にかけてドイツの Robert Lee の『持続可能な収量と社会的秩序 (Sustained-Yield and Social Order)』が最初である (Worster (1993) : p. 202 参照)。当時のドイツは人口増加に伴う資源消費量の増加に危機感を抱いていたため、森林資源を枯渇性資源 (経済基盤) と認識し、安定的な収穫を得るために科学的な維持管理の方策を見つけようとするものであった。次に、持続性に関して言及している研究は、Lee の持続的収量理論をアメリカに輸入した Fernow (1902) の『森林の経済学 (Economics of Forestry)』である (Ibid : p. 203 参照)。当時のアメリカの自由放任主義的な風潮に対し、Fernow (1902) は、自由競争原理の下での森林管理は森林を劣化させやすく、その劣化は物質の状況に好ましくない影響を及ぼすことを指摘している。これは、必ずしも「収量の持続的供給 = 森林の好ましい状況の維持」とは限らず、それらを両立させた状態を維持するには、私的企業の破壊的企業活動に対応した摂理ある

国家の機能行使が必要であることを意味したものであった。

20世紀中頃になると、持続性というキーワードを使った研究がほとんど見受けられなくなった。これは、交通・輸送手段のグローバル化、高速大量輸送化、技術進歩などにより、身近な枯渇性資源を消費せずとも人間活動のための資源確保が可能となり、自然資源の枯渇の不安とそれに伴う不確実な収量の不安も薄らいだためと考えられる。事実、Pearce et al. (1989) が『Blueprint for a Green Economy』で持続性に関する定義を付録としてまとめているが、1970年以前に見つかる定義はない。しかし、局所限定的な自然資源採取や一極集中型の生産・消費・廃棄活動は、農村地域に森林破壊、土壌流出、洪水といった環境破壊的な環境問題を発生させ、都市地域には水質汚染、大気汚染、地盤沈下といった新たな環境問題を発生させることとなった。このような環境問題が1960~70年代にかけて世界中に蔓延すると、1980年に自然保全国際同盟 (IUCN) が「世界保全戦略」の中で、初めて現行の持続的発展という言葉を使用した (Worster (1993) : p. 200 参照)。持続的発展が使用された当初は、「開発 = 環境破壊」、「環境保全 = 経済開発停止」と言った一元論的な判断しかなされなかった。そのため「開発は必要であり環境保全も必要である。しかし両立は無理である」という二律背反的な解釈が一般であったため、世界的なコンセンサスを得ることはなかった。以降、持続的発展は1981年にLester Brownの『Building a Sustainable Society』で使用され、1984年にはNorman Meyersの『Gaia: An Atlas of Planet Management』で使用された。そして、1987年にはブントラントレポートの『Our Common Future』(WECD ed. (1987))において、持続的発展に関する定義が世界に向けて公表された。ここでの定義は、定義自体がどのように達成されるかは別として、一般的に通用する概念を世界に表示し、南北間の思惑を考慮したもの*16となっている分世界中に大きなインパクトを与えることとなった。

つまり、持続性という言葉が初めて使用され

た18世紀後半のその特徴は、①枯渇性の自然資源に対して初めて持続性という考え方を提案したこと、②自然資源が枯渇性資源であっても未だ商品の側面が強かったこと、③自由競争原理の下では持続性（持続的な収量）は達成困難であることの3点であった。しかし、1980年以降の環境問題と貧困問題の深刻化とともに、持続性に対する明確な定義付けがなされるようになると、持続性の持つ特徴は、①環境問題の背景から、定義の中に自然資源の資源供給の機能面だけでなく多面的機能面も持続性概念に含んだこと、②扱う対象が森林などの自然資源から、優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠なものであるニーズへと拡大したこと、③ブルントラントの持続性の定義中に現在と将来と明示してあるように、世代内・世代間の公平性へと時間的広がりを含んだことの上記3点へと拡大した。

b. ブルントラント以降の持続性について

1987年にブルントラント委員会により持続性の定義がなされると、国際機関、各国単位、自治体、NGOなどで広範囲に使用されるようになった。しかし、ニーズの解釈の仕方と時間という言葉は概念上多元論的に解釈され易かったため、持続性に関する定義は各組織ごとに解釈され、挙げれば枚挙に暇がないほどにまで達した。そこで1979年から1989年までの各組織が標榜する持続性の定義をまとめ、持続性とは何かを解説したPearce et al. (1989)の見解を取り上げる。Pearce et al. (1989)のまとめ方は、数多くの環境経済学者に援用されているため、ブルントラント以降の持続性の議論にPearce et al. (1989)を代表にすることは十分妥当である。

Pearce et al. (1989)によると、持続性の主たる目的は将来世代の厚生をそこなわない経済的進歩の道を探ることであると、環境の質の維持によりウェイトを置かなければならないとしている(Pearce et al. (1989) : p. 31 参照)。ここで、厚生とは経済学的用語で福祉という概念に置き換えることが可能であり、さらに経済学的な考え方を突き詰めれば効用として捉えることも可能である(Ibid : p. 36 参照)。そのた

め、より経済学的な視点に立つと、本来優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠なものであったニーズが、厚生・福祉と解釈され、そして最終的に効用として捉えられることを可能にした。このような効用への解釈の広がり、持続性に関する経済学アプローチの応用研究を増やす結果となった。例えば、Beltratti (1996)は、自然資源を統合した成長モデル、世代間公平を考慮したモデル、不確実性に関するモデルなどの分析の研究例をまとめている。この研究例は、従来の経済モデルの中に自然資源を組み合わせの要素として投入し、その効用に割引率を使用することや、情報、閾値、不可逆性といった不確実性に対し選好の確率を使用することで最適ないしは最大の経路を見つけ持続性を達成しようとするものである。しかしながら、本来、ブルントラントの持続性の定義でニーズとされてきたのは、優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠なものであり厚生・福祉に該当するものである。それでは、経済モデルの中に入るニーズは果たして代替可能な条件として適切であろうか、という疑問が残る。この疑問に対し、Pearce et al. (1993)はニーズの解釈により持続性は“弱い持続性 (Weak Sustainability)”と“強い持続性 (Strong Sustainability)”に大別されることを明示した。

つまり、1987年以降は、ブルントラントにより持続性の定義が明確にされたが、各組織がニーズをどのように解釈するかにより、持続性の定義が多様化してしまう問題点を露呈する結果となった(図1参照)。また、ニーズを福祉から最終的に効用へとみなす仮定は、人間の効用をもとに自然資源の消費量を決めるため、自然資源の過度な消費は免れないという問題点を持つことになる^{*17}。そのため、多様化した持続性の問題点を考慮し、ニーズの解釈を効用にまで広げ経済モデルの中に組み込んだ場合の持続性とそうでない場合の持続性に区分する必要がある。次節においては、多様化した持続性概念の分類を行う。

c. 多様化する持続性概念の分類

Pearce et al. (1993)によれば、持続性は一般的に“弱い持続性”と“強い持続性”に区分

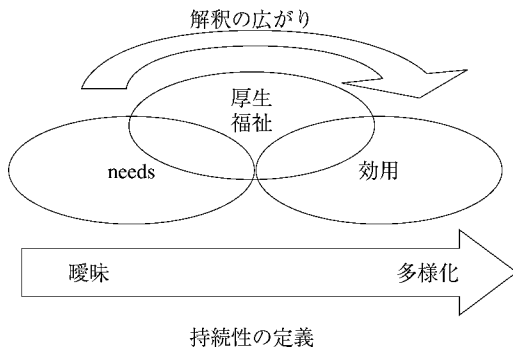


図1 プルトラントの定義のニーズの解釈と持続性の定義の多様化

註1) プルトラントの持続性の定義に従うと、needsとは貧困者に優先的に与えられるべき必要不可欠なものとしてされている。

される。“弱い持続性”とは、自然資本に対してなんらかの市場が存在するか否かである*18。一方“強い持続性”は、人工資本から自然資本への一方的な代替は不可能であり、両者は補完的であるとする概念である。“弱い持続性”と“強い持続性”の具体的な違いは、将来においても価値ある財を生むことのできる森林資源や漁業資源などの自然資本と、人間の手を加えた人工林のような人工資本が代替可能であるか否かによって区分される (Pearce et al. (1993), Van Kooten et al. (2000) : pp. 238~245. 参照)。

“弱い持続性”は自然資本の減少を人工資本の増加で代替可能であるとする立場で、人工資本

と自然資本の総資本量を維持ないしは増加させることが合理的であるとする“コンスタントな総資本ルール”に従っている。例えば、天然林を100単位伐採したとしても、同量の人工林を植樹すれば問題はないとする考え方である。一方、“強い持続性”は自然資本の減少を人工資本の増加で一方的に代替することは不可能であるとする立場で、両資本は常に補完的であるとし、特に一定量以上の自然資本量を維持することが重要であるとする“コンスタントな自然資本ルール”に従っている。例えば、人間活動による天然林の減少を人工林の植樹で補ったとしても、“強い持続性”の立場では人工林が天然林を代替したことにはならない。なぜなら、人工林は天然林を基礎に、育苗、植林というエネルギーを加えただけ、すなわち加工しただけにすぎず、人間活動のために天然林が伐採され続ければ人工林の植林も不可能になるからである。

更に弱い持続性と強い持続性は、取るべき政策戦略でそれぞれ細分化される。Turner et al. (1994)によるとその動きは4つに区分され、表1のように表すことができる (Turner et al. (1994) : pp. 27~37)。1つめは、市場に足かせをはめられる事を嫌い、資源開発的で成長優先の立場をなす“豊饒的技術主義”。2つめは、汚染課徴金などのようにグリーン市場を導入し、資源を保全し管理する立場の“協調的技術主義”。3つめは、マクロ環境基準に規制され経済

表1 持続性の分類

持 続 性			
弱い持続性		強い持続性	
非常に弱い持続性	弱い持続性	強い持続性	非常に強い持続性
豊饒的技術主義 Cornucopian	協調的技術中心主義 Accommodating	共同体主義 Communalist	ディープ・エコロジー Deep Ecology
資源開発的で成長優先	資源を保全し管理する	資源を保護する	極度に資源を保護する

資料：Turner et al. (1994) をもとに作成した。

註1) 非常に強い持続性は経済成長で解決できるとする立場である。

弱い持続性は自然資本と人工資本の間に代替関係を認める立場である。

強い持続性は自然資本と人工資本の関係は常に補完的であるとする立場である。

非常に強い持続性は現時点で経済成長を認めない立場である。

註2) 保全とは資源を利用目的で維持することであり、保護は利用目的に関わらず資源を維持することである。

的インセンティブ手段により資源保護される“共同体主義的生態中心主義”。4つめは、資源採取を最小にとどめ経済規模を縮小させる生態中心主義の最終系である“ディープ・エコロジー”である。

このような持続性の違いが、現実の社会にどのような影響を与えるかについてまとめた利得表 (Payoff Matrix) が表2である (Costanza (1989)参照)。この表では世界の現実の状態と現在の政策のタイプによる利得表がしめされている。現在の政策を技術楽観主義の方策で行い、もし現実の世界が楽観的である見通しが立つのなら大きな利得が得られる。しかしながら、現実の世界が悲観的であるような場合は、一転して修正の効かない大惨事状態に陥ることになる。これは環境問題のような不確実性と不可逆性という点を考えれば至極当然のことである。そのため、世界の現実の状態が自然資本と人工資本の間で代替可能な状態 (つまり楽観的) なら、政策タイプが楽観的でも悲観的でも現状よりプラスになる。しかし、世界の現実の状態が自然資本と人工資本で代替不可能な状態 (つまり悲観的) なら、政策タイプが楽観的であれば大きな損失を生み、悲観的なら修復の効く範囲に留まることができる。世界の現実の状態に対する情報が不完全な時は、政策タイプを悲観的に想定した方が、取り返しのでない損害を被ることがない分リスク回避的であるといえる。すなわち、世界の現実の状態がどうであれ、政策タイプに自然資本と人工資本の代替を認めな

い悲観的な立場 (強い持続性) を取ることは、予防原則に従った考え方であるといえる。

C. 環境経済学とエコロジカル経済学に関する定義とアプローチ

a. 環境経済学の定義

環境経済学はどのように定義されているのか。経済学に冠している“環境”の意味は、水や空気などを指す自然的“環境”と、生活空間や町並など人工化された社会的“環境”を指す。さらに植田他 (1991) によれば、“環境”の語源はフランス語の「ミリュー (milieu) : 中心を取り巻く場所」に行き着くとされる。ここで重要なのは、中心を取り巻く場所の中心が何を示すかである。現在の“環境”の定義が社会的環境も含むことを考えれば、中心となる部分は“人間”を指すと考えられる。次に、環境の後に続く“経済学”とはどのような意味を持つのか、“経済学”の代表的な定義としてしられる P.A. サミュエルソンの定義は、「複数の代替的用途をもちうる希少な生産資源をいかに使うか、時間を通じて種々の商品をいかに生産するか、そしてそれらを、現在および将来における消費のために、社会における様々な人の間、グループの間いかに分配するかなどについて、人々ないし社会が貨幣を使用しつつあるいはこれを使用せずに、いかなる選択を行うかの研究である」としている。簡約すると、P.A. サミュエルソンの「経済学」の定義は、資源配分の問題、分配の問題、さらに時間的要素を組み入れた最適経路の問題に対する人間活動の行動研究である。

表2 技術的楽観論者と用心深い悲観論者による利得表

		世界の現実の状態	
		楽観論者が正しい	悲観論者が正しい
政策のタイプ	楽観的	大きな利益 (High)	厄災・大失敗 (Disaster)
	悲観的	ほどほどの利益 (Moderate)	我慢できる災害 (Tolerable)

資料: Costanza (1989) より抜粋した。

註1) 技術的楽観論者とは技術中心主義 (弱い持続性) を表す。

表中の楽観的, 楽観論者は技術中心主義に該当する。

註2) 用心深い悲観論者は生態系中心主義 (強い持続性) を表す。

表中の悲観的, 悲観論者は生態系中心主義に該当する。

そしてその手段として貨幣の使用・未使用は問わないとするものである。これらの環境と経済学の定義を踏まえれば、環境経済学は人間を取り巻く自然資本と人工資本の双方を考慮した資源配分、所得配分、時間的最適経路の行動研究であると考えられる。

なお、工藤（1980）は環境経済学を環境の経済学として、「環境問題を経済学的に分析すること。その方法論として資源配分と利用資源の効率性の分析や、環境問題とそれへの対処が所得配分に対して持つ含蓄如何ということである（工藤（1980）：p. 543 参照）」と定義している。また、宮本（1989）は「環境経済学は、経済（主として資本主義経済）の発展にともなう『環境』の変化、それから生まれる公害やアメニティ（良好な居住環境）の破壊という『環境問題』、そして公害を防止しアメニティを保全・創出しようとする『環境政策』の三局面を政治経済学の方法によって体系的に明らかにしようとするもの（宮本（1989）：p. 45 参照）」とより厳密に定義している。

b. 環境経済学のアプローチ

環境経済学のアプローチは、植田他（1991）によると、2つに大別でき、さらに5つにアプローチに細分化できる^{*19}。以下要約すると、それはまず第一に、現実の環境問題に従来の経済学の規律（Discipline）を適用しようとする方法と、第二に従来の経済学の規律（Discipline）の利用有無に関わらず、その規律とは異なる原理を新たに導入するか、あるいは従来の理論的枠組みそのものを改めて問い直そうとする方法に大別される。さらに5つに細分化すると、①森林資源、水資源、水産資源などを環境資源^{*20}とし、それを経済問題に組み入れた「環境資源論アプローチ」、②A.C. ピグーによる外部不経済の考えを用いたもので、環境問題による被害を市場に内部化するという考えに端を発している「外部不経済論アプローチ」、③K.W. カップの制度派経済学の考えを利用した「社会的費用論アプローチ」、④経済体制が異なると環境問題の発生や発生に対する効果が異なりうるとみなす「経済体制論アプローチ」、⑤人間と自然の物質代謝の課程を対象にした「物質代謝論アプロー

チ」、の上記5つに分けられる（植田（1991）：pp. 51～120 参照）。

①「環境資源論アプローチ」は、自然資源を枯渇性資源として扱い、世代間衡平の点から持続性を評価するため、現在の資源経済学が担う分野である。R. ソローの成長モデルを改良したもののや、Heartwick（1977）による Heartwick ルールを用いた世代間衡平性のモデルが該当する^{*21}。

②「外部不経済論アプローチ」と③「社会的費用論アプローチ」は、市場取引の外部に置かれている外部性を取り扱うという点で共通している。そのため、寺西は両アプローチは比較的混同され易いと指摘している（佐和隆光・植田和弘編（2002）：pp. 68～69 参照）。その違いを寺西に依拠してまとめると、「外部不経済論アプローチ」は市場の網から漏れた外部性を市場に内部化して資源利用の経済的効率性をはかることに基礎的な特徴がある。つまり、市場の失敗や市場の欠落といった問題視角に立ったアプローチである。一方、「社会的費用論アプローチ」は外部不経済によって発生する社会的費用が市場取引の内部・外部のどちらで発生しようとなら問題視していない。重点は、外部不経済を発生させる経済主体の費用計算方法や、それに基づく意思決定のあり方が現実社会にとって好ましくないことにある。つまり、外部不経済論のように市場の内部化に重点を置いたものではなく、制度の失敗や制度の欠落という問題視角に立ったアプローチである。「外部不経済論アプローチ」は、A. マーシャルによる外部性の概念および A.C. ピグーによる私的純生産物と社会純生産物の乖離の研究といったケンブリッジ学派の流れが強く、「社会的費用論アプローチ」は A. マーシャルや A.C. ピグーの影響を受けた K.W. カップの影響が強いといえる。

④「経済体制論アプローチ」は、環境問題発生メカニズムの背後にある現代社会の経済体制のあり方を認識し「素材面」と「体制面」からの分析を行う分野である。ここでの「素材面」とは原材料、生産プロセス、排出物などをいい、「体制面」とは経済制度や法的側面、社会制度などを指す。公害現象の「経済体制論アプロー

チ」を代表する都留(1972)は、「たとえ生産技術や都市化の段階が同じでも、経済体制が違えば、公害の発生やそれに対する対応策の効果が、体制的な理由により異なりうるとみなす(都留(1972): p.1 参照)」ことを主張している。これは、経済法則の普遍性を求めた古典派経済学よりも、それぞれの経済体制状況に対応した異なる経済学体系を求めた歴史学派や、歴史学派に影響を受けた制度派経済学の考えに近い。

⑤「物質循環論アプローチ」は、資源や廃棄物、エネルギーといった物質(エネルギー)に注目し、物量収支やその物質またはエネルギーの循環過程から経済の分析を行うものである。このような物質循環の点に注目し、従来のカウボーイ型の人間活動批判を行った論文が1966年のK. ボールディングの『*The Economy of Coming Spaceship Earth*』である。また、G-Roegen(1971)は量的質的尺度を表すエントロピーの自然法則を経済学に応用させている。日本では、植田(1986)、室田(1979)などの研究例がある*22。植田(1986)はG-Roegenのエントロピーの自然法則を改良した開放定常理論を提唱している。室田(1979)は窒素やリンといった物質の諸循環に持続性の重要性を見出している。このようなエントロピーに注目した「エントロピー経済学」や、物質循環に注目した「循環型経済学」は、エコロジカル経済学とほぼ同じ流れをくむといわれている(和田(2001): p.26 参照)。前述してあるように、環境経済学は環境問題に対して従来の経済学の理論を適用させる方法と、異なる理論を導入するかないしは既存の経済理論の枠組みを変える方法に大別できることから、「物質循環論アプローチ」はエントロピー理論や物質循環の考え方を新たに導入した後者のタイプであり、残りの4つのアプローチは従来の経済学の理論を適用させたタイプであることがわかる(図2参照)。すなわち、環境経済学には5つのアプローチがあり、その中の「物質循環論アプローチ」はエコロジカル経済学の流れをくむものである*23。

c. エコロジカル経済学の定義

エコロジカル経済学とはどのように定義されているのか*24。Costanza(1989)は「エコロジ

カル経済学とは、エコロジカル経済学として行ったものがエコロジカル経済学になりえるだろう(Costanza(1989): p.2 参照)」と言わば結果論的な見解を示している、その主たる理由は、エコロジカル経済学が独自のパラダイム(paradigm: 規範, 枠組み, 時代を反映させた考え方)や分析手法(tool)を持ちえず、その定義の議論に時間を費やしてきたことにある*25。ゆえに、エコロジカル経済学の定義は未だ明確にされていない。そのため、本節ではEcological EconomicsのEcology(生態系, 生態学)の定義からはじめる。

自然科学系の生態工学研究会の辻田(1997)は、EcologyについてE.H. ヘッケルとH.T. Odumの例をあげて以下のようにまとめている。Ecologyの源流はゲーテ思想に強い影響を受けたドイツの生物学者E.H. ヘッケルにより用語が作り出されたのが始まりである。ヘッケルはEcologyを「動物とその有機的、無機的環境に対する全ての関係である」と定義付けている。また、生態学者のH.T. Odumは「自然の組織と構造の研究である(Sutdy of the Structure and Function of Nature)」とし、機能面から生態系の特徴を1. energyの回路, 2. 食物連鎖, 3. 時間・空間的多様性のパターン, 4. 物質循

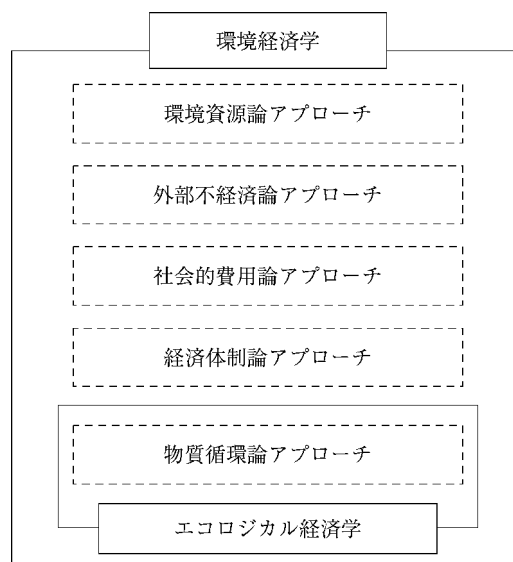


図2 環境経済学のアプローチ区分とエコロジカル経済学の関係

環, 5. 遷移, 6. 系内の制御, の6つに分けて説明している(辻田(1997)参照)。

また, 社会科学系の分野からは, Drengson(1995)が「エコロジー(生態学—Ecology—かつて oecology と綴られていた)は, 自然システムのエネルギーの流れ, 相互性, 結びつき, 因果関係のネットワークを研究する科学の一分野である(Drengson(1995): pp. 203~204 参照)」としている。Alier(1987)もまた「エコロジーはエコシステム(生態系)におけるエネルギーフローだけでなく, 物質循環についても研究するものである(Alier(1987): p. 17 参照)」と述べている。

つまり, エコロジカル経済学とは, 従来の経済学が対象とする経済主体間同士の関係に, 自然生態系をなす森林, 土壌, 水, 植物, 動物といった要素を組み込み, その物質やエネルギーの流れ, 因果関係などを考慮した人間活動(生産・消費・廃棄)の研究を行う分野であるといえる*26。

d. エコロジカル経済学のアプローチ

エコロジカル経済学の分析アプローチには前述した通りオリジナルのアプローチはない。そのため, 従来の経済学やその他の分野で用いられている分析アプローチを利用した折衷主義である。Norgaard はエコロジカル経済学が取り扱う分析アプローチを大きく3つに分類している(石(2002): pp. 156~159 参照)。まず, ①自然科学から得られる洞察と経済学の関係性を分析するアプローチ, ②経済学の結合生産性の概念を用い, 自然科学と経済の関係性を分析するアプローチ, ③経済学のモデルを全く使用せず, 自然科学に基づく方法だけで人間の現状を把握するアプローチ, の3つが挙げられている。

①に該当するのは, エコロジカル・フットプリント(Ecological Footprint), エコロジカル・リュックサック(Ecological Rucksack), エコロジカル・パーソン(Ecological Person)といった生物物理学分析アプローチなどである*27。エコロジカル・フットプリントは, ある一定人口が必要とする財・サービスをすべて土地および水域面積に換算し, その面積と一定人口の住む面積を比較することで持続性を判断する方法で

ある。エコロジカル・リュックサックはドイツのヴッパタール研究所によって開発された分析手法であり, 「製品が背負った重荷」という和訳があるように, 見えない部分で発生している環境負荷を測ろうとする方法である(Wuppertal ed.(2002)参照)。日本では「隠れたフロー」として国立環境研究所によって平成12年度環境白書などで紹介されている。この手法は, 製品のライフサイクル過程の中で他の物質の消費を背負った重さの単位を用いて環境負荷を評価するものである。現在, 鉄1tの消費は, 鉄資源1tの採掘・精製の際に廃棄される物質量が14tもあることがわかっている。また国立環境研究所の研究例では, 日本の物質消費量は一人当たり45t/年であり, そのうち75%が国外資源を消費して作られたものであるという結果を出している。エコロジカル・パーソンは, ドイツのマックスプランク研究所によって開発された分析手法であり, “人類が利用可能な太陽エネルギー量(J)÷現在の世界人口(人)”の関係式から得られた“一人に割り当てられた持続可能な太陽エネルギーの利用量(J/人)”で生活する人をいう。例えば, 地球に降り注ぐ太陽エネルギーが年間100GJであり, 世界人口が100億人であるなら, エコロジカル・パーソンは1GJ/人となる。しかし, 実際に100億人の人口で使用した総エネルギー量が年間200GJであるなら, 持続可能なエネルギー利用量の2倍使用していることになる*28。このような, 生物物理学分析アプローチのメリットは, 環境収容力(Carrying Capacity)や資源ストックを考える上で重要な指標になる点である。なお, 生物物理学分析で利用する環境収容力は, Daily and Ehrlich(1992)の「生物物理的な環境収容力」と「社会的な環境収容力」に該当するであろう*29。前者は生命維持のためといった意味合いが強く, 後者は人間として生活するためといった意味合いが強い。

②に該当するのは, 従来の経済学に対する批判分析によるアプローチであると考えられる。具体例として, Norgaard は石油精製の例を挙げて説明している(石(2002): p 157 参照)。石油精製により生産されるものはジェット燃料か

らタームまで幅広い。これは従来の経済学的視点から見れば、一つの物を生産するに当たり、あくまでも副次的に生産された物と認識される。しかし、現実にはそれぞれを単独で生産することは難しいにも関わらず、従来の経済学では製品だけに注目してモデルを単純化し、発生する副産物や廃棄物までをも考慮して見ることはない。このような視点から自然科学と新たな経済学の接点を見出そうとする分析アプローチである。

③に該当するのは、全く他分野で考案されてきた分析手法を用いるケースである。具体的な手法としては、エメルギー(Emergy)概念^{*30}を用いたエメルギーフロー分析や間接効果(Indirect effects)分析などである。エメルギー概念を考案したOdumは、エメルギー概念を使用することにより、価値と豊かさの新しい指標を見出す方法になると提案している。これは、自然生態系と社会経済システムを往来・循環するエメルギー量に注目し、エメルギーの最大量を求める点にある。エメルギーの量が多ければ、テレビや車といった多くのエメルギーが濃縮された財の消費も可能になる。そのため消費者が一定なら、より多くのエメルギー量を持つことは生活レベルの高さを表すことになる。また一人当たりの消費エメルギー量を一定とするなら、より多くのエメルギー量を持つことは多くの人間を養うことができることを意味する。これらの点でOdumは、エメルギーが人間活動に必要な資源としての面だけではなく、資産(集約されたエメルギー)としての側面を持つことも説明している。間接効果分析は、生物種間の複雑さや柔軟さを生み出す隠れた作用を明らかにする分析方法である(Higashi(1991)参照)。本来、自然生態系や生物種間などといった生態的關係について考えると、それは常に一定であることはなく、何種類かの生物種の置かれる状況によって大きく、時には質的にさえ変化する。例えば、ある生態系においてA、B、Cという3種類の生物種が存在し、AとBは共生関係を持ち、BとCは捕食者と非捕食者の関係であるとする。AとBの生物種が変化(減少、進化、学習、発達)せずとも、生物種Cの変化が生物

種AとBの間の共生関係を質的に変化させることもある^{*31}。生物種AとCには直接的な関係がないにも関わらず、生物種Cの変化により生物種AとBの関係が変化するとき、生物種Cは生物種Bに直接効果を与え、生物種Cは生物種Aに間接効果を与えたという。このようにある特定の生物種の影響(進化、学習、除去)が、直接的な関係を持たない他の生物種間の関係を質的にまで変化させるような生物種を「キーストン種」という。間接効果分析の利点は、人間活動が自然生態系に与える影響から、生物種間の関係性がどのように変化するかをより深く知ることができる点にあり、「キーストン種」を中心に人間活動の影響力の波及効果を調べることも可能である。

e. 環境経済学とエコロジカル経済学における持続性概念

前節までに持続性概念とそれを対象にした研究領域を解説してきた。そこで本節では、環境経済学とエコロジカル経済学の定義および特徴と持続性概念の関係を整理する。環境経済学とエコロジカル経済学に関する持続性の関係は、図3のようになっている(富士(2001): p. 126。参照)。

図3は、ブルントラントの持続性の概念が提唱されるまでの経済学の流れと、それ以降の環境経済学とエコロジカル経済学の出自をまとめたものである。この図では、“技術的楽観論者”であるリカードの“絶対的希少性”と“用心深い悲観主義”であるマルサスの“相対的希少性”の違いが重要である。マルサスの相対的希少性は、食料が算術級数的増加をすることに対し、人口が幾何級数的増加を行うため、いずれは食料供給量に人間の生活レベルが制約されてしまうことをいう。リカードの絶対的希少性は、人間生活を支持する自然環境の容量(食料供給量)は技術開発で補うことができることをいう。この違いは技術進歩や投資による開発を過大評価するか否かであり、前者は“用心深い悲観論者”と言われ、後者は“技術的楽観論者”という。マルサスの考えを基にシミュレーションを行ったものにローマクラブ報告書、Meadows et al.(1972)の『成長の限界』がある。成長の限界

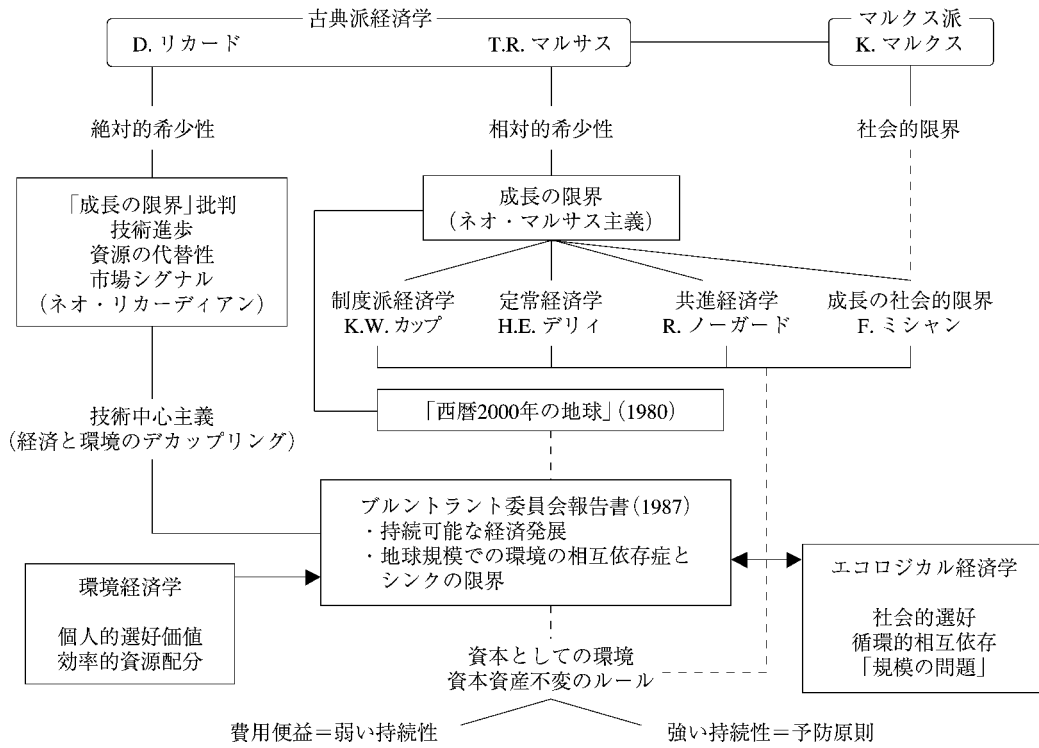


図3 持続性から見た環境経済学とエコロジカル経済学の出自

資料：福士（2001）の Turner et al. より部分抜粋した。

註1）環境経済学から伸びる矢印は（→）ブルントラントの持続性に適応していることを表す。エコロジカル経済学から伸びている矢印（←→）は適応していないことを表す。

註2）実線は強い関係性を表し、破線は弱い関係性を表す。

では、人口、資源、公害という項目を設けシミュレーションを行っている。また、『成長の限界』の考えを援用し、独自にアメリカが人口、資源、環境の諸傾向を見るためにシミュレーションを行ったものに『西暦2000年の地球』がある。しかし、いずれも将来地球は限界点に達するであろうという警鐘をなすものであった。これに対し、リカードの考えをもとに、代替資源の開発や技術進歩による効率性の点から『成長の限界』を批判する流れも発生した。その批判は環境と経済のデカップリングという技術中心主義が引き継ぐことになる。このような流れの中で、Turner et al. は、ブルントラントの持続性はリカードの“絶対的希少性”を主張する古典派経済学から発展し、『成長の限界』に対する批判やそれを継承した新古典派の流れの延長線上にあると指摘している（福士（2001）：pp. 125～127

参照）。この“絶対的希少性”と“相対的希少性”の2つの流れにより、環境問題に対する経済学的分析も2つに分かれたとされている。リカードの“相対的希少性”の考えを引き継いだ延長線上にあるのが現在の環境経済学であり、マルサスの“絶対的希少性”の考えの延長線上にあるのがエコロジカル経済学である。

つまり、環境経済学は“相対的希少性”をベースにしており、持続性に関する認識は比較的緩い“弱い持続性”に該当する。“弱い持続性”は自然資本と人工資本の代替関係を認めるという“資本間の代替可能性を主張”しているため、自然資本と人工資本の総計が重要な意味を持つ。一方、エコロジカル経済学は“絶対的希少性”をベースにしており、持続性に関する認識は比較的厳しい“強い持続性”に該当する。“強い持続性”は“自然資本と人工資本は常に補充

的にあることを主張⁹しており、人間の創造できない自然資本が常に一定の水準を保たれていることが重要な意味を持つ(表3参照)。

D. 小 括

本章の目的は、持続性の概念整理を行うと共に、持続性を重要なキーワードにしている環境経済学とエコロジカル経済学の定義とアプローチ、特に認知度の低いエコロジカル経済学の紹介を行うことであった。

持続性の概念の整理を行った結果、ブルントラント以前からの持続性概念(Robert Lee)は、森林(自然資源)を対象に利用したものであり、

その内容は自然資源を商品としてみなし、収量を安定確保する意味(政策的な提言も含んでいる)で使用されていた。ブルントラント以降の定義は環境問題、貧困問題といった時代背景を含んだものであるため、持続性の定義の中のニーズ(優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠なもの)と時間的要素(将来と現在の資源割引率の問題や現在世代が将来世代に必要なものを決めても良いのかといった問題)に関する疑問が生まれた。特に持続性の定義のニーズ(優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠なもの)に対する疑問は、持続性に対する定義

表3 環境経済学とエコロジカル経済学の概要

分野	環境経済学			
	エコロジカル経済学			
定義	人間を取り巻く自然要素と人工要素も含んだ資源配分, 所得配分, 最適経路の行動研究分野		従来の経済学が対象とする経済主体間同士の関係に, 自然生態系をなす森林, 土壌, 水, 植物, 動物といった要素を組み込み, その物質やエネルギーの流れ, 因果関係などを考慮した人間活動(生産・消費・廃棄)の研究を行う分野	
アプローチ	環境資源論アプローチ 外部不経済論アプローチ 社会的費用論アプローチ 経済体制論アプローチなど		物質(エネルギー)循環論アプローチ 生物物理学アプローチなど	
主義	技術中心主義		生態中心主義	
持続性の分類	弱い持続性		強い持続性	
	非常に弱い持続性	弱い持続性	強い持続性	非常に強い持続性
立場の分類	豊饒的 Cornucopian	協調的 Accommodating	共同体主義者 Communalist	ディープ・エコロジー Deep Ecology
戦略	効率的価格付けにより, 市場の失敗を是正する。	貨幣評価法を広範に適用。	固定基準(環境収容力)アプローチ。予防原則。	費用便益分析を棄却。生命倫理学的な考え
具体例	足かせのない自由市場が, あらゆる「希少性・限界」の制約(資源供給と汚染浄化)を緩和することができる無限の代替を保証する。	非常に強い持続性のように自然資本と人工資本の無限の代替は否認。自然資本と人工資本の総計が重要な判断基準になる「コンスタントな総資本ルール」に従っている。	自然資本と人工資本は補完的なものであり, 一定の自然資本が確保されていなければならないとする「コンスタントな自然資本ルール」にしたがっている。生態系全体の「健康」が非常に重要である。	経済と人口を減少させる。自然の本源的価値を認めた活動(生命倫理学的な考えに従い, 人間以外のあらゆる種と環境の非生物部分にさえ道徳的権利と利益が与えられるとするものである)。

資料: Turner et al. (1994) より一部抜粋し, 定義とアプローチなどについては加筆した。

を技術中心主義と生態中心主義へと大きく二分させ、さらに4つに細分化させたことを紹介した。

次に、持続性を重要なキーワードにする環境経済学とエコロジカル経済学に関する定義とアプローチの整理を行った。環境経済学とエコロジカル経済学の関係について、分析アプローチの区分の関係からエコロジカル経済学は環境経済学に含まれる関係にあることを示した。エコロジカル経済学が環境経済学内に包まれる理由は、そもそもの出自の違いが反映されており、自然資本と人工資本の関係をどう扱うかによるものである。エコロジカル経済学は、基本的に自然資本と人工資本はお互いに補完的であるとし、人間が創造できない自然資本を常に一定水準保たなければならない（コンスタントな自然資本ルール）とする固定基準（環境収容力）により持続性を判断する傾向があり、環境経済学はそこからさらに基準を緩和した自然資本と人工資本の総資本量（または資本を所有することによる効用）で持続性を判断するものであった。つまり、持続性の観点からより厳しい（自然生態系にとって好ましい）判断基準を伴うものがエコロジカル経済学であり、エコロジカル経済学での持続性の判断基準を緩和したものが環境経済学である。

このような環境経済学とエコロジカル経済学の関係性と先に記した表2の利得表を考えると、環境問題が深刻な地域や自然生態系と社会人間システムが密接に関連した農村地域などでは、エコロジカル経済学による持続性評価の方がリスク回避的であるため望ましいと思われる。しかし、発展途上地域のように生活質の向上を望む地域においては、効用という人間の満足尺度を利用した持続性の指標も必要である。そのため、今後は環境経済学による持続性の評価とエコロジカル経済学による持続性の評価を行い、両アプローチから持続性の評価を得るような研究が望ましいと言える。ただし、持続性の評価が分かれた場合は、政策のタイプを悲観的にした方が、世界の現実の状態が自然資本と人工資本で代替不可能な状態（悲観的）であった時の予防にもつながるため、強い持続性概念

に基づいたエコロジカル経済学による持続性の評価を採用すべきであろう。よって、本章での持続性評価は「強い持続性（共同体主義者）」の視点から分析を行っている。

註

- *12 本論文では持続的発展は、持続的開発、持続可能な開発、持続可能な発展、持続可能性、持続性、永続性と同義であるとする。
- *13 ニーズ (needs) とは、生活に必要なものではあるが、貧困者に優先的に与えられるべき必要不可欠なものをいう (WECD (1987) : p. 34 参照)。
- *14 室田他編 (1990) : p. 4, Worster (1993) : p. 199, p. 205 を参照。また, Daly は, プルトラントの持続性概念が多義的に解釈される点を指摘し, さらに, プルトラントの持続性の定義の矛盾点を指摘している (Daly (1996), (1999), Gooldland et al. ed (1991) 参照)。
- *15 Kolstad は, 「これら両分野は異なる視点からの学問領域であり, 共に環境問題解決の社会的手助けになる点を認めつつも, 非英語圏では, 環境 (environment) と生態 (ecology) という言葉が類似しており, 2つの分野の違いは訳において無くなってしまっている」と指摘している (Kolstad (1999) : p. 6 参照)。
- *16 北米人は文化的歴史から自然を賞賛し, 汚染を非難し, 「自然に帰れ」的な解決策を提案する傾向にある。一方, 第三世界の人達はかつて植民地であった歴史的経緯から, 環境悪化の社会的な原因や人間的な問題に関心を寄せる傾向がある (Norgaard (1994) : pp. 18~19 参照)。そのため先進国は地球の環境保護を主張し, 発展途上国は環境保護よりも経済成長による住居環境, 労働環境などの改善を主張するといった南北間での思惑が異なっている。
- *17 Solow は, 「財の間の代替可能性は, 環境 (自然資源) を他の財に変えることで厚生は (おそらく) 増加する (Bertratti (1996) : p. 83 参照)」と述べている。これは, 自然資

- 源としてそのまま残しておくことよりも、人間の手によって使用、代替されたほうが人間にとって（おそらく）満足度の高いものになるということを意味している。
- *18 自然資本 (Natural Capital) とは、サービスや財を継続的に生む自然資産 (Natural Assets) のストックを指し、その主な機能は、魚や森林などの資源生産、二酸化炭素吸収や汚水分解などの廃棄物浄化、紫外線保護や生物多様性などの生活サポートサービスを含んでいる (Chamber et al. (2000) : p. 178 参照)。自然資源 (Natural Resource) は魚や森林などの再生産資源と石油や石炭などの非再生産資源を指す。
- *19 現在この5つのアプローチの区分以外にも、寺西は、さらに固有価値論アプローチ、権利論アプローチ、経済文明論アプローチを付け加える必要があると述べている (佐和隆光・植田和弘編 (2002) : pp. 67~69 参照)。しかし、本論文ではこれらアプローチを理解するのに必要な経済思想史に関しては触れていない。そのため、上記3つのアプローチは含めないことにする。
- *20 本論文では、環境資源と自然資源は同じ意味で使用している。
- *21 Heartwick ルールは、枯渇性資源所有者の利潤を全て資本への投資に向けることで各世代の消費が同一になるというシンプルな世代間公平性の考えである。つまり、枯渇性資源と資本ストックの代替可能性があれば世代間公平性が実現可能であることを意味する。
- *22 K. ボールディングは、エントロピー増大則はエネルギーにのみ当てはまり物質に適用されないとし、エネルギーさえあれば物質はリサイクル可能であるとしていた。しかし、G-Roegen はリサイクルで重要なのはエネルギーではなく低エントロピーであることを説明している。つまり、K. ボールディングの宇宙船地球号 (閉鎖的な地球) と G-Roegen のエントロピー増大則を考えると、地球は何もせずとも必ず環境汚染と窒息死という熱的死を迎えることになる。しかし、この悲観的な状況を現在世代が迎えていない理由に、シュレーディンガーのネグエントロピー (負のエントロピー) 論と植田エントロピー廃棄説がある。植田のエントロピー廃棄説 (開放定常理論) は、エントロピーが水の循環により地球外へ放出されることで定常状態を保っていることを実証している。
- *23 アプローチが新古典派経済学の理論が適用されているものは環境経済学であり、適用されていないものはエコロジカル経済学であるとする区分の考え方もある。
- *24 エコロジカル経済学 (Ecological Economics) という命名について数多くの議論がなされてきた。その議論内容は、なぜ「Economical Ecology」, 「Ecology & Economics」, 「Ecolonomics」, 「Econology」ではいけないのかという議論であった。これに対し、エコロジカル経済学者達は、「経済は地球の生命科学系の枠組みの中に内包され、その中で作用する」という自然科学者の一般的な大前提に従い、「経済学」に「エコロジー」を冠することにしたのである。これは後述の本文中に記してあるが、国際エコロジー経済学会の理念に基づいたものである。
- *25 エコロジカル経済学が定義され難い理由としては、エコロジカル経済学が長い歴史を有しているにも関わらず、主流派経済学にほとんど何の影響も与えず (Alier (1987) : p. iv 参照), 長い間エコロジカル経済学的史料編集の揺籃期にあったためである (Ibid : p. ix 参照)。また、Norgaard は『Ecological Economics』において、エコロジカル経済学は従来の経済学の既存手法を援用するといった折衷型であるため定義されにくいのであると言及している (Timmerman ed. (2001) : pp. 37~48 参照)。
- *26 前述した通りエコロジカル経済学に関する定義は明確にはされていないので、1989年に設立された国際エコロジー経済学会 (The International Society for Ecological Economics) の理念を示す主要な規約

を紹介する。①経済は、太陽エネルギーに依存した地球という大きな生命化学系の中で機能しているものとして捉えなければならない。②環境が持続可能かどうかは社会システムの質に依存する。③人と自然の相互の豊かさは、過剰な消費と富の著しい偏在によって妨げられている。

*27 ここでは生物物理学分析だけを紹介しているが、G-Roegen はエントロピー理論を用い、現実の経済を分析している。また Norgaard は生態学の「共進化」という言葉を用い、経済の分析を行っている。詳しくは Norgaard (1994) 参照。

*28 エコロジカル・パーソンを用いた学術的な文献はほとんどない。山本良一「脱物質経済は可能か——私達はどれだけ消費を下げるべきか——」, 財団法人エネルギー総合工学研究所(2002)「新エネルギーの展望循環型社会の構築」において若干触れられている程度である。参考 URL eco.goo.ne.jp/magazine/files/lesson/yamamoto.pdf, www.iae.or.jp/publish/pdf/2001-1.pdf

*29 「環境収容力とは、対象とする生物がどのような種であれ、その生息地を無期限に継続して養う事のできる生物の最大個体数である」と定義される (Daily et al. (1992) : p. 762 参照)。また、より人間らしい生活を送る上で人類経済学者の Hardin (1986) は「文化的環境収容力」を付け加えている (Hardin (1986) 参照)。なお生物物理的な環境収容力<社会的な環境収容力<文化的環境収容力の順に環境収容力の基準は厳しく(値は少なく)なる。

*30 エメルギーとは、ある財を生み出すために必要な標準化されたエネルギーの総量を指し、財自体のエネルギーを指すものではない。ここでいう標準化とは異なるエネルギーをある一つの統一したエネルギーに変換することをいう。現段階では太陽エネルギーへ統一するのが一般的である。エメルギーに関しては Odum et al. (2000b) 参照。

*31 具体例として「殺虫剤の逆理」がある。「殺

虫剤の逆理」とは、野菜と野菜を食べる害虫、そしてその害虫の天敵のみが存在し、かつ害虫被害を抑えるために殺虫剤を散布した時を想定する。殺虫剤は天敵と害虫を駆除し、一時的に野菜の収量を増加させる(直接効果)。しかし、天敵の減少は同時に害虫の子孫の増加を招く(間接効果)ことになる。一時的には直接効果は間接効果に勝るが、長期間を通じて見た時には間接効果の方が勝ることがある。また、「殺虫剤の逆理」以外にも、3種間では補完関係にあった関係性が、ある生物種の減少により対立関係に転じることもある。

第III章 中国広西壮族自治区大化县七百弄郷の紹介

A. 大化县七百弄郷の概況

a. 地理的・自然的位置

調査対象地域である大化县七百弄郷は、中国の西南部地方、ベトナムとの国境沿いの広西壮族自治区にある。さらに、広西壮族自治区の中心都市の南寧から北西に大化县七百弄郷は位置している。七百弄郷は起伏の激しいカルスト地形にあり、その周囲の3,570個の険しい山々は1,124個の弄(山々に囲まれたくぼ地)を形成し、そのうちの324個の弄に人間が居住している。弄底部から山頂部までの標高差は、数十mから最大で400~500mに達する。

七百弄郷は中国西南部に位置することから、亜熱帯に属し、太陽輻射熱は年間90~110 kcal/cm²である。平均気温は17~22°C、平均降水量は1,738 mmである。七百弄郷は雨季と乾季があり、雨季に降雨量が多くなるとカルスト地形ということもあり、土壌流出が問題になっている。また過度な森林伐採と急勾配な地形条件のため、斜面は石灰岩が露出したままの状態になっている。

b. 社会的・経済的状況

調査対象地は、大化县七百弄郷の中にある4つの屯集落(弄石屯、歪線屯、波坦屯、弄力屯:屯は生産隊の意味)である。そこには少数民族の瑶族、壮族、及び漢族が住んでおり、500年以上も農耕文化を中心とした伝統社会を形成して

きた。七百弄郷の各屯集落の詳しい概況は表4にまとめたとおりである。人口・面積は、弄石屯が164人・124ha、歪線屯が50人・109ha、波坦屯が74人・80ha、弄力屯が69人・48haである。作物生産は玉蜀黍、大豆、さつま芋などを生産し、家畜生産は豚を中心に山羊、家禽類を肥育している。主要な産業は農業であり、第二次産業や第三次産業はおこなわれていない。主産業である農業生産活動において、各集落とも単収増加の目的で化学肥料を投入している。ただし、波多野によると、作物の窒素吸収の限界から農地には大量の余剰窒素が残留していた。各集落で農地へ投入した化学肥料が作物に吸収された割合は、弄石屯で25%、歪線屯で21%、波坦屯で22%、歪線屯で32%と非常に低く、ほとんどの化学肥料が農地に残留していた(出村他(2002)参照)。また、波多野の窒素フロー分析から、化学肥料(Chemical Fertilizer)と有機肥料(Manure)の一人あたりの施肥量が多い集落は歪線屯の22.2kgN/人であり、一番少ない集落は弄力屯の14.3kgN/人であった(出村他(2002)参照)。

家畜への給餌方法は、歪線屯以外の3集落で飼料を煮て与えている。燃料となる森林資源は歪線屯が豊富であり、波坦屯は少なく、弄石屯・弄力屯は中程度である。森林資源の管理形態は、歪線屯のみ集落が管理している。

次に、中国の行政組織を説明すると図4の通りである。まず、大化县といった「県」レベルでの組織を持つ役割は行財政、司法、立法、税などの機能を果たし、旧体制の人民公社の時と大きな変化はない。しかし、七百弄郷といった「郷」政府になると、以前の人民公社のような経営に関する機能が除外されている。経営の機能は、その下層の組織である、屯(生産隊)や屯の構成人員である農家に受け渡されている。つまり、農家は土地の所有(土地使用権の保持)が可能になり、自ら生産を行い、税金を納めるという制度に変化している。表4の森林の管理が生産請負制になっている背景には、このような制度の変革もあるが、生産請負制として割り当てれば適正な維持管理を行うと見込んでいた点もある。しかし、目先の利益により森林資源

はさらに伐採されることになった。

c. 七百弄郷の歴史の変遷

過去に七百弄郷屯集落は、交通手段がなかったことと標高差のある山岳地帯で物資の移出入が困難であったため、物資の移出入は必要な物資のみで、それ以外は狩猟や山菜取りなど自給自足の生活をしてきた(表5参照)。生活体系は、豊富な森林資源を少しずつ切り開き農地へと開墾していくことで、狩猟から農業へと変化していった。さらに、1950年代に入ると急傾斜地の開墾をおこない、1980年代には化学肥料を投入するようになった。

次に、図5を用いて七百弄郷の各屯集落の人口動態をみると、1962年の七百弄郷の人口は12,956人であった。その6年後の1968年に国道が開通し、外部との交流が活発になると、農産物の販売・購入が増え始め、野生生物、漢方薬などといった比較的軽量の森林の副次産物の販売がはじまり、やがて森林そのものを木材として販売するようになった。道路開通から19年の間に、豊富な自然資源の販売利益などにより、集落内の人口は1962年の約1.7倍の21,542人までに増加した。その増加し続けてきた人口をまかなう食料と家畜飼料を確保するために、化学肥料の多投をおこない、アヒル、鶏、兎といった家畜の飼育頭数を倍以上に増加させた(しかしヤギは森林資源の減少によるためか半減している)。1990年になると、森林伐採などの環境破壊の認識が深まり移民政策がとられ、七百弄郷の人口は減少しはじめた。森林被覆率に関しては、1958年の大躍進運動により燃料として伐採され44.8%に減少した。その後、1960年代前後は木材の販売目的で伐採され、1980年以降は農業生産責任制の実施により山は自留地として分配された。しかしそれにも関わらず、所得を得るために更に伐採が続けられ、1995年には平均森林被覆率は16.6%までに急減した。現在深刻な森林減少に伴い、中国政府は国策として封山育林政策、退耕還林政策^{*32}などを実施している。

B. 大化县七百弄郷の事例の位置付け

本論文の調査対象地域である七百弄郷は、標高差の激しい擂鉢上の底部に生活空間があると

表4 調査対象地域（各屯集落）の概要

	弄石屯 (Nong Shi Tun)	歪線屯 (Wai Xian Tun)	波坦屯 (Bo Tan Tun)	弄力屯 (Nong Li Tun)
戸数 (農家数)	21戸	12戸	14戸	11戸
人口 (人)	164人	50人	74人	69人
耕地が分布してある弄数	5個	8個	3個	4個
主作物	トウモロコシ,大豆,サツマイモなど	トウモロコシ,大豆,サツマイモなど	トウモロコシ,大豆,サツマイモなど	トウモロコシ,大豆,サツマイモなど
化学肥料の施肥状況	有	有	有	有
主な飼育家畜	豚, 山羊, 鶏, 兎など	豚, 鶏, 兎など	豚, 山羊, 鶏, 兎など	豚, 山羊, 鶏, 兎など
飼育頭数の増減	1997年から2000年にかけて鶏, アヒル, 兎は倍増した。ヤギは半減した。豚は若干減少した。			
使用燃料	薪中心 (一部メタンガス)	薪中心	薪中心	薪中心
森林状況	中 (急傾斜地から森林)	豊富 (傾斜地にも単木が散在)	少 (山頂付近のみ)	中 (良好な二次林が残存)
山林の管理形態	生産請負制	集落管理	生産請負制	生産請負制
山林の経営方式	火入れなし	火入れなし	火入れあり	火入れなし
郷中心部からの距離	比較的近い	遠い	比較的近い	比較的近い
表土状況	表土は全体的に60cmほど	表土は薄く, 弄底部の耕地でも30cmほど	表土は全体的に薄く20cmほど	不明
傾斜地利用状況 (註1)	緩傾斜地は全て耕地化	石積耕地化に消極的, 手を付けず露岩化	石積耕地が斜面一面に広がる	石積耕地化に消極的, 家畜飼育に利用
弄の形状 (註2)	底一中, 高一中	底一短, 高一短	底一短, 高一長, 傾一長	底一短, 高一長, 傾一長
農地面積 (草地, 畑地)	3,780a	1,340a	4,290a	1,600a
林地面積 (高木林, 低木林)	7,750a	9,610a	3,190a	3,220a
岩礫・崩壊地面積	880a	0a	550a	40a

資料：出村他 (2000) の鄭より引用, 一部修正・加筆してある。

註1) 石積耕地化とは, 弄の斜面の等高線上に石を積み重ねて作った段々畑のことである。土壌流失の防止にもなる。

註2) 底はドリーネ底部, 高はドリーネ底部から山頂部までの高さ, 傾は傾斜地を意味する。

註3) 各屯集落の所有する弄の各地目面積は, 衛星 IKONOS および地形図を利用して推計したものである。

註4) 人口は 2002 年のものである。

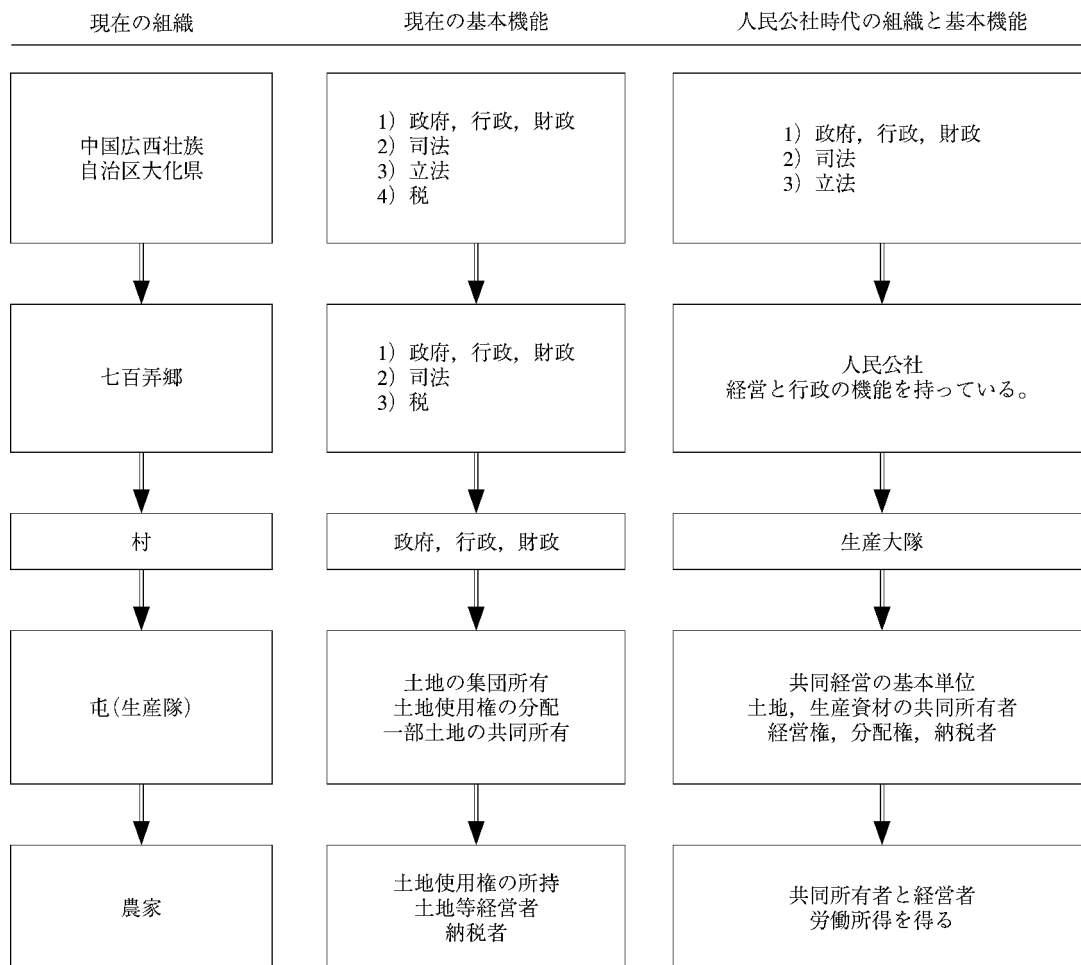


図4 七百弄郷の組織構造

資料：出村他（2000）の鄭より抜粋し，修正した。

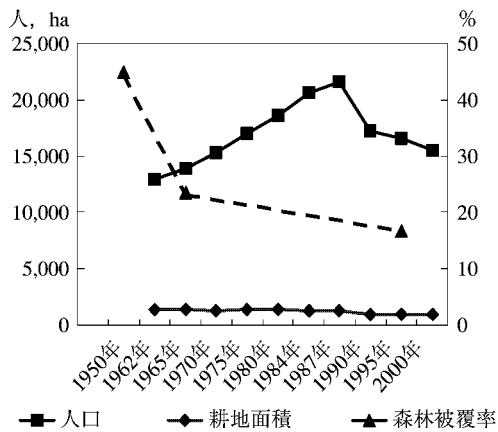
表5 七百弄郷の変遷

	生活方法	森林状況	人口
15～6世紀	狩猟 焼畑	手付かず 豊富	入植 少数
↓			
20世紀前半	緩傾斜地 の開墾	伐採 崩壊開始	増加
↓			
1950～60年代	急傾斜地 の開墾	崩壊過程	増加
↓			
1980～90年代	出稼ぎ 肥料投入	崩壊	増加 減少

資料：出村他（2000）の鄭より引用，一部修正・加筆してある。

いう特殊事例である。また，この地域は，長い間，自然生態系機能の持つ物質循環機能を基礎にした生活が営まれてきたが，現在は所得や福祉などの生活水準の改善を目的にインフラ整備などの開発計画が実施され，自然生態系の機能が低下しつつある。

このような特殊事例を研究サイトとして選定した理由には以下の3点が挙げられる。第一に，農業生産活動は自然生態系に依存した生産活動であるため，農業が主産業の発展途上地域の持続的発展を考える際，従来のような化学肥料に依存した農業生産活動は行うのではなく，自然生態系という枠組みの中で農業生産活動を考え



■ 人口 ◆ 耕地面積 ▲ 森林被覆率
 図5 七百弄郷の人口，耕地面積，森林被覆率
 資料：人口に関しては都安県統計資料，大化県統計資料から作成した。森林被覆率は出村他(2002)の竹下から作成した。

ていくことが非常に重要である。そのため，周囲の自然生態系とより密接な関係を保ち続けたまま農業生産活動を行っている七百弄郷は，特異ではあるが，本論文の課題を実施するのに適した事例といえる。第二に，本論文で行う分析手法は，エコロジカル経済学に従ったもので，人間活動と自然生態系の関係性を明らかにするために多くの物量データを使用する。そのため，外部からの余計な条件が入り易い開放的で利便性の良い地域よりも，物資の移出入の関係および自然科学系データの収集を行うのに適した閉鎖的な地域である七百弄郷の方が望ましいといえる。第三に，本対象地域は西部大開発地区に指定されているため，今後の経済発展が予想される地域である。この地域が将来どのような経済発展経路を歩むのか，その方向性を示唆することは七百弄郷政府にとっても貴重な情報になる。

C. 調査データの概要

調査は1998年～2002年の5カ年にわたる実験データ(自然科学系)と4つの屯集落46戸に対する農家聞き取り調査(社会科学系)によるものである。

実験データは以下の3カテゴリーから区分される。窒素，リン，熱(気温の変化)，水などが系内をどのように物質循環しているのかを解明する物質循環グループ，限られた条件下で作物

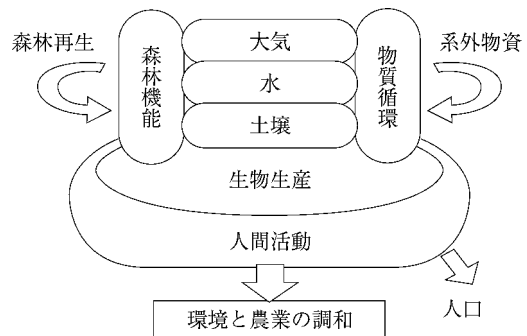


図6 基本的人間・生態系モデル

の最大収量を得る持続的生物生産グループ，衛星(IKONOS)画像判読を利用して森林生態系および森林バイオマス量を解明する森林生態系グループから構成される。本論文で使用するデータは，以上の3カテゴリーの実験データから得られたものである。

農家聞き取りの主な調査項目は，家族構成，農業(各作物の作付面積と収量，投入窒素量，家畜への飼料量など)，その他屯集落外部との財の移出入(灯油，洋服，食糧品など)，燃料となる薪などの消費量，さらに現時点の生活状態に関する効用(現在の生活に関する不満や希望)などの聞き取り調査を行った。

註

*32 封山育林政策は山頂部への立ち入りを禁止する政策であり，退耕還林政策は畑地を植林などにより林地に還す政策である。しかし，退耕還林を行えば，農家は農地を失うことになり，さらに苗木の植樹費用も負担しなければならなくなる。そのため，政府は退耕還林政策にかかる費用は全て政府が負担している。具体的には，農家が耕作地を還林すると1ム(0.0667 ha)あたり150 kgの食糧が支給され，一回の果樹苗木費を50元補助するやり方である。

第IV章 Ecological Footprint を用いた人間活動の環境面積要求量と環境収容力の推定

A. 本章の目的

アメリカ合衆国人口調査局国際プログラムセ

表6 各 Carrying Capacity の定義

区分	定義	関係式	備考
古典的 Carrying Capacity 概念	ある一定面積に於いて、 将来の維持能力を損なう ことなしにある生物を養 うことのできる最大規模 数	(1) $\frac{\text{家畜の最大飼育頭数}}{\text{土地面積}}$	同種の家畜では資源消費量や廃棄物排出量に差がないため有効である。しかし、人間のよう所得水準により、資源消費量水準や廃棄物排出量水準に差がある場合には有用ではない。
人間の Carrying Capacity 概念	一定面積の自然生態系に 無理なく負荷を負わせる ことのできる人間の消費 (経済) 活動による負荷 の上限	(2) $\frac{\text{人間活動によって生じる最大環境負荷量}}{\text{土地面積}}$	分子はA国の資源供給量と廃棄物排出量の限界量を表し、その数を仮に100とする。現在A国の国民1人あたりの資源消費量と廃棄物排出量が20である。分母はA国の国土面積である。現時点での人間の Carrying Capacity は $(100/20)/A$ 国面積で $5人/A$ 国面積となる。所得が上がれば、A国民の資源消費量と廃棄物排出量の水準が50になったとすると、 $(100/50)/A$ 国面積で $2人/A$ 国となる。しかし、現実には国土面積が小さく、所得水準の高いうオランダや日本などは人間の Carrying Capacity では説明できない。つまり、貿易という手段により分子の100を幾らでも増やせることになる。そのため、この方法は貿易を想定しない閉鎖系のみで有用である。
Appropriated Carrying Capacity 概念 (Ecological Footprint)	一定人口の経済活動による 環境負荷を無理なくか つ継続的に負わせるため に必要な土地 (水域) 面 積	(3) $\frac{\text{必要な土地 (水域) 面積}}{\text{一定人口の経済活動による環境負荷量}}$	ある国に何人居住可能かというような分母を固定するのではなく、ある国の国民が必要とする土地面積は何 ha かに変更した。つまり、この概念は所得水準と貿易による移入の問題を解決した概念である。

資料：和田 (1998) をもとに作成した。

ンターによると、世界人口は約 63 億人(2003 年 12 月 1 日現在)と推計されている。そのプログラムでは 1971 年に初めて 40 億人を超えてから、わずか 32 年の間に 23 億人増加したことになる。人口増加の多くは、人口増加が停滞傾向にある欧米や日本などの先進地域ではなく、アジア、アフリカといった発展途上地域におけるものである。人間は生活する上で何らかの消費活動をおこなわなければ生きていけないため、人口増加はダイレクトに自然生態系に環境負荷を与える。そのため、その地域に住むことのできる人口を知ることは、生活基盤である自然生態系の自然資源供給量と廃棄物浄化量が一定水準以上に保たれているかという健全な状態を維持するのに欠かせない情報である。

ある地域で生存可能な人口を表す人口規模に対する既存研究は数多くおこなわれているが(Cohen (1995) 参照)、それら既存研究のほとんどは食料生産量などを一人当たりの消費量で割るといった内容のものであった。しかし、この推計方法は、食料生産活動の結果として産出される生産物に焦点を当てており、食料生産活動によって消費する資源量や食料生産活動によって排出される廃棄物など、自然生態系に与える環境負荷などを考慮したものではない。仮に、100 億人分の食料を産出できたとしても、自然生態系の浄化可能量以上の廃棄物を排出するようでは人間は生存不可能である。つまり、自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を表す環境収容力と、人間活動による資源消費量と廃棄物排出量の関係を考慮したものではなかった。今後は、森林や土壌といった自然生態系の要素の循環機能に注目し、人間活動と自然生態系の関係からその地域に住むことのできる人口を推計することが重要である。図 6 は、人間活動と自然生態系の関係を表した図である。人間が生活するために必要な物質や森林資源は、水、土壌、大気といった要素から一定の速度で生産されている。さらに自然生態系から得られる森林資源や物質は生物生産を助け、生物生産は人間活動の営みに利用される。このように、人間の生存条件は自然生態系の資源供給量と廃棄物浄化量の再生産能力

に規定される。

欧米では、自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を意味する環境収容力に基づいた Ecological Footprint (以下 EF と略す) 分析が近年開発されている^{*33}。この手法は、土地面積という生物物理量の観点から、人間活動により発生する環境負荷量と自然生態系の環境収容力の関係を明示的に表すものである。

そこで本章では、発展途上地域である七百弄郷の 4 集落を対象に、環境収容力概念を応用した Ecological Footprint 分析を行い、①自然生態系の持つ環境収容力の制約下での最大扶養可能人口^{*34}を推計すること、②自然生態系に与えている環境負荷量の実態を明らかにすることの 2 点を目的とする。

B. エコロジカル・フットプリント (Ecological Footprint) 分析の理論と既存研究

a. 環境収容力 (Carrying Capacity) と囲い込まれた土地扶養能力 (Appropriated Carrying Capacity)

環境収容力とは、自然生態系のもつ自然資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を意味し、持続性を語るうえで重要なキーワードである。その概念は時代を遡ると、もともとはプラトンの言葉に端を発している。Wackernagel et al. (1995) によると、プラトンは人口と土地の関係性について初めて言及し、「土地は、適度に快適な状態にある人口を維持するのに十分なほど拡大されなければならない」ということを説明している。これは、適正な人口は土地の生産能力という環境収容力により決定されること意味する。生物学分野などではその考え方を援用して、土地を環境収容力の目安として利用し、家畜の飼育規模を計る手段として使用してきた。このように旧来より利用されてきた古典的な環境収容力は、通常「一定面積の区切られた土地(水域)に、ある種の動物を放し飼いにし、長期的にその土地(水域)の生産力を損なわない形で養うことができる最大の頭数」と定義され、その概念は、表 6 の(1)式によって説明される。

さらに、和田 (1998) によると、この考え方

を人間に応用したのが Catton である。Catton は、人間の所得水準や生活様式により、個人の資源消費量が異なることを考え、所与の土地面積に何人の人間が生活できるかという土地面積あたりの人口を求めるのではなく、土地面積あたりどの程度までその土地の自然生態系に負荷をかけられるかという視点から環境収容力を求めようとした。そのため、Catton が人間に適応させた環境収容力（以下人間の環境収容力）は「一定面積の生態系に無理なく負荷を負わせることのできる人間の消費活動による負荷の上限」と定義され、その概念は表 6 (2) によって説明される。

しかし、Catton の定義による人間の環境収容力では、自己の住む地域で得られないものがあれば、貿易を通して不足を克服することが可能となる。つまり、与えられた一定面積の地域における資源供給量の限界は、貿易が活発化するなどの経済のグローバル化の中で解消されてしまう可能性がある。例えば、人間が一定面積の区切られた場所で生活している時は、自分の生命を維持するためにも、所与の空間を荒廃させない範囲で自然生態系に環境負荷を課していた。

しかし、貿易が可能になると、自分の生活する所与の空間を荒廃させることなく、他地域で環境に負荷を発生させて生産された財を輸入し、それを消費することが可能になる。すなわち、貿易という手段によって、一定地域の人間の環境収容力は容易に拡大可能であるという問題を生むことになる。

そこで、貿易によって環境収容力が変化（移出入）してしまうのであれば、はじめから人口を固定し、その人口の消費活動を持続的に支えるためにどれくらいの土地・水域面積が必要なのかという Appropriated Carrying Capacity（囲い込まれた土地扶養能力：以下 ACC）概念が考案された。この概念は、土地面積あたりの負荷の上限を求める方法である人間の Carrying Capacity（環境収容力：以下 CC）から、一定人口がどの程度の環境負荷を排出しているのかを求める方法に視点を変えたものである。すなわち、古典的な環境収容力概念をより現在の

人間の消費活動に合わせて改良した ACC 概念は、「一定人口の経済活動による環境負荷を無理なく、かつ継続的に負わせるためにはどれだけの面積の土地と水域が必要になるか」と定義される。現在の人間活動を鑑みれば、貿易が盛んに行われているので、人間の CC は大きく変化することが予想される。したがって、持続可能性の目安として利用される概念は、CC 概念を原理とした ACC 概念が有効であると思われる。

この ACC 概念を基に開発された分析手法が前述した EF 分析であり、その概念は表 6 (3) 式によって説明される。次節では環境収容力を取り入れた具体的な概念論を「オーバーシュート」というキーワードを用いて解説する。なお、持続性を考えるうえで重要なキーワードである環境収容力とは、自然生態系のもつ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を表す。前述した古典的な環境収容力、人間の環境収容力、ACC は自然生態系の環境収容力をもとに計算された二次的な結果である。本論文において単独で環境収容力と使用しているときは、自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を意味する。

b. オーバーシュート (Overshoot)

自然生態系の持つ環境収容力以上の生産・消費・廃棄活動をおこなうことをオーバーシュートという。オーバーシュートとは、和田(2002)によれば、「環境収容力を超える量の資源・サービスの消費が継続しているか、その消費量が増大している一時的な状態」と定義されている(図 7 参照)。これは銀行(地球)の預金(自然生態系のストック量)から得られる利子分(サービスのフロー量)以上に引き出し分(資源消費量)の方が多く、預金の元本(自然生態系のストック量)をも切り崩すことで引き出し(資源消費量)を可能にしている。そのため、元本がなくなるまでの期間は、資源消費量を維持、増大させることが可能である。図 7 は、環境収容力というキーワードを用いて地球上で発生する環境問題のメカニズムを説明している。この図の解説を行うと、縦軸は資源消費量を表し、横軸は時間を表している。環境収容力は自然生態系の

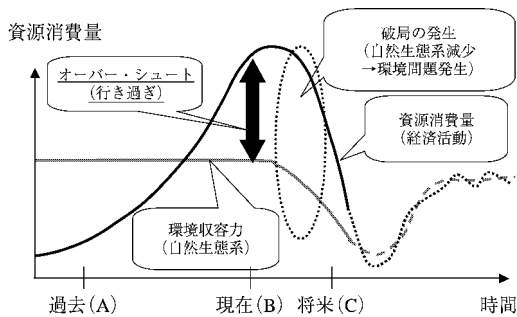


図7 オーバーシュートの概念図

資料：Wackernagel et al. (1995) より抜粋。一部加筆してある。

- 註1) 資源消費量とは、人間のおこなう活動によって消費された全ての資源量、廃棄物を浄化するために費やした資源量を表す。
- 註2) 環境収容力とは、自然資源の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を表す。
- 註3) 本論文のEF分析では、資源消費量はEF、環境収容力は集落面積を表す。

持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量である。地球の自然生態系規模は決まっているため基本的に一定である。図中のA地点は自然生態系が豊富で人間の資源消費量が少ない時期であり、主に産業革命が始まる以前の状態である。B地点は人間活動が急激に活発になり、人間の資源消費量が自然生態系の持つ環境収容力を超過している現在の状況である。C地点は更に資源消費量を増加させ、自然生態系の環境収容力を超過した(過度な負荷をかけた)状態を表している。C地点の状態は、資源が枯渇し、自然生態系は汚染され、人間が住めない状態を表している。

つまり、資源消費量といった人間活動が自然生態系の持つ環境収容力内に収まるようであれば、持続可能な状態を表している。そのため、今後は資源消費量を表す曲線と環境収容力を表す曲線との乖離を無くすような対策を行う必要がある。

c. エコロジカル・フットプリント分析の定義と概要

EF分析は、カナダのプリティッシュコロンビア大学のWackernagelとReesらの研究グループによって開発された。Rees (1996) によ

ると、EFは「ある特定の地域の経済活動、または、そこに住む人々が一定水準の物質消費レベルで生活を維持するために必要となる生産可能な土地および水域面積、すなわち、ある地域で必要とされる資源の要求量を生み出し、排出物質を同化してくれる土地および水域面積の合計」と定義されている。

この分析手法は、人間活動を行うのに必要とする資本の量を土地(水域)という面積の尺度に換算し、表示するツールである。すなわち、EF分析は、ある特定地域の人間活動、または、そこに住む人々の生活を持続的に維持していくために、どれくらいの土地(水域)面積が必要であるかを表示するものである。例えば、我々の生活は、食料を生産するための農地、生活の場を確保するための居住地、水産物を得るための海水・淡水域、何らかの人間活動の結果として排出した二酸化炭素を吸収するための森林地、などによって支えられている。そのため、我々が実生活で必要とする各地目(水域)面積を合計することで、我々の生活に必要な土地(水域)面積であるEFが推計される。

EFが何故面積換算されるのかという理由については以下の4点が挙げられる。第一に、面積換算は我々にとって馴染みやすい単位であり、自然に対する環境負荷の大きさを容易に想像することができる。第二に、EFにより得られた面積(資源消費量)と地球の面積(環境収容力)の関係を持続性の判断基準に置き換えることができる点である。なぜなら、人間が地球の住人である以上、地球の崩壊を招くような人間活動は本末転倒である。当然、EF分析により求められる人間活動のEFも、地球の有限な土地(水域)面積を越えるようでは本末転倒である。第三に、人間を含めて生態系を包括的に見ようとする際、人間が主体となって価値付けした貨幣評価よりも、土地(水域)面積という物量で見の方がバイアスが少なく考えられる点である。第四に、我々の消費している財・サービスを作るための根源が土地(水域)であるという点である。なぜなら、土地(水域)からある財を生産することは可能であるが、ある財から土地(水域)を生産することはできないという不可逆性

が存在するからである。

前述したように、EFは面積で表されるため、人間が生活する上で必要となる面積すなわち要求量と、実際に使用可能な領域面積すなわち供給量のギャップを定量的に表すことができるという特徴を持つ。例えば、行政が環境政策に関する幾つかの政策手段を選択する場合や、企業が新しい生産技術を選択する際に、それら選択肢がどれくらいの負荷を自然生態系に与えるのかを定量的に提示することができるなど、社会のあらゆる側面で有用な情報を与えてくれる。また、一人あたりのEFとその地域での利用可能面積から、その地域で持続的に扶養できる人口（最大扶養可能人口）を予想することも可能である。

d. エコロジカル・フットプリント分析を利用した既存研究

前節ではEF分析の定義と特徴を解説したが、実際に、既存研究の中でEF分析がどのようなケースに適用されてきたかを整理し、それら既存研究の特徴を紹介する。

EF分析を用いた過去の研究業績には、Folke et al. (1997), Folke et al. (1998), Parker (1998), Wackernagel et al. (1998), Rees (1999), Wada (1993), Wada (1999), Leitmann (1999), WWF (2001) などがある。それら研究は、大別すると3つに分類される。

第一に、Folke et al. (1997), Wada (1993) のように特殊な産業技術に注目し、その特殊な産業技術が自然生態系に及ぼす影響力を定量的に表示したものである。Folke et al. (1997) は、バルト海沿岸域を事例にEF分析を行い、現在の漁業、海産物養殖業の経済活動が海域・沿岸のマリン・エコシステムに負荷量を与えすぎていることを明らかにした。Wada (1993) は、トマトの水耕温室栽培と露地栽培を対象にEF分析を行い、前者は経営的な意味で効率的ではあるが、自然生態系への環境負荷分を考慮した生態学的な意味で非効率であることを実証した。

第二に、Folke et al. (1998), Leitmann (1999) のように、EF分析が、自然資本の管理や政策の計画段階で有用であるという、EFの実社会への適用方法を示唆するものである。Folke et al.

(1998) は、前述のバルト海沿岸地域のマリン・エコシステムに負荷を与えすぎているというEF分析結果を利用して、海域・沿岸を管理する主体側や政策を行う主体側は、魚介類を生産するためのマリン・エコシステムの環境負荷に対する許容範囲を明示的に説明し、投資しなければならないという政策的含意を述べている。Leitmann (1999) は、ロンドンの住民の財・サービス消費活動を事例対象にしたEF分析結果を利用し、EF分析が環境計画や環境管理を行う際に非常に有用であるということを紹介した。

第三は、Folke et al. (1997), Parker (1998), Wackernagel et al. (1998), Rees (1999), Wada (1999), WWF (2001) のように、国ないしは都市の住民の財・サービスの消費活動を対象にEF分析を行い、国ないしは都市が自然生態系にどれくらいの負荷をかけているかという実態を明らかにしたものである。Folke et al. (1997) は、バルト海沿岸地帯の29都市において、都市住民の消費活動を対象にEF分析を行った。この研究では、人間活動によって生じる廃棄物に、従来の二酸化炭素以外にも SO_x , NO_x を考慮して計測したことが特徴である。Parker (1998) は、1961年から1995年までの期間の日本を事例にしてEF分析を行い、EF分析の結果と日本の実質GDPの成長率を比較した。その結果、日本は60年代から90年代までに、投入資源量が60年代より2倍に増加したが、同期間で実質GDPも60年代より3倍に増加するという省資源型経済成長を遂げた。しかし、その一方で、消費活動も60年代よりも2倍に増加していることを明らかにした。Wackernagel et al. (1998) は、貿易が地域資源の枯渇化を促進させているという仮説を裏付けるために、日本を含む主要12カ国を対象にEF分析を行い、貿易が地域資源の枯渇化を促進させていることを実証した。Rees (1999) は、カナダのバンクーバーとその周辺のフレーザー川下流域の2地域を対象にEF分析を行った。その結果、バンクーバーのような都市型の経済活動は自然生態系に大きな負荷をかけており、都市としての経済活動を維持するために、周辺地域の自然生態系に大きく依存していることを説明した。Wada (1999)

は、「弱い持続性」の概念で持続可能な国とされる日本を対象にEF分析を行った。その結果、日本は「強い持続性」では持続不可能であることを実証した。WWF(2001)は、約150カ国の国ごとのEF分析結果をまとめた。その結果、現在の地球は、持続可能性の基準値を少なくとも30%超過しているということを明らかにした。

以上の既存研究の対象事例をみると、ほとんどがトマトの生産やシーフードの生産という一生産物の特殊な生産技術に焦点を当てているか、あるいは一定地域、都市、国などを対象にしたものである。また、これらの研究の対象事例の特徴を見ると、ほとんどが先進地域である。確かに、新技術の導入を頻繁に行い、自然資本を大量に消費するような先進地域を対象にEF分析することは非常に有用である。しかし、今後、地球規模での持続性を考えていく際に、先進地域のみならず、人口増加率の著しい発展途上地域の分析も考慮する必要がある。そのためにも、発展途上地域でEF分析を試みることは持続性を考える上で大きな一歩といえる。唯一、WWF(2001)が発展途上国も事例対象に含めてEF分析を行っているが、発展途上国特有の経済状況、生産技術、生活習慣などという実態を反映させた結果ではない。

C. 中国西南部七百弄郷への適用

a. 基本データおよび分析データ

分析に使用したデータは、1998年～2002年の5カ年にわたる自然科学系の実験データと社会科学系の4つの屯集落46戸に対する農家聞き取り調査によるものである。各集落における総面積の推定・土地利用区分は、衛星(IKONOS)画像判読に基づき推計した(データおよび計測方法の詳細は、出村他(1998～2003)を参照)。主な調査項目は、家族構成、農業(各作物の作付面積と収量、投入窒素量、家畜への飼料量など)、燃料となる薪などの消費量のデータであり、それらデータを用いてEFを推計した。

4つの屯集落の中では弄石屯に関するデータの精度が高い。弄石屯以外の集落では、農地が零細であり分散錯圃であることや、平地と傾斜地での作物を区別して保管していないため正確な単収データが取れなかった。そのため、他の

集落でデータが不足しているものに対しては、弄石屯の単収データなどを入れて計算してある。それ以外の特別な条件に対しては別途註に記入してある。

b. エコロジカル・フットプリントのフレームワーク

EF分析に関する既存研究では、EFの計測方法にそれぞれ違いがあり、必ずしも統一的な方法がとられているわけではない。しかし、計測に関する基本的な考え方は同じであるため、以下、基本的な計測方法を概説していく。

はじめに、我々が年間に消費する全ての財を1. 農地、2. 牧草地、3. 森林地、4. 二酸化炭素吸収地、5. 生産能力阻害地、6. 海洋・淡水域、の6つの面積カテゴリーに分類する。農地、牧草地、森林地、海洋・淡水域にはそれぞれ農地、牧草、森林、海洋・淡水域を起源に生産されるものが該当する。二酸化炭素吸収地はエネルギーの消費により発生した二酸化炭素量を吸収するために確保されなければならない林地が該当する。生産能力阻害地はもともと何かを生産することが可能な土地であったが、建築物の建設や舗装などにより、何も生産することができなくなった土地の面積が入れられる。

次に、農地と森林地に属する各財の年間消費量を生産するために使用した面積を求める。面積そのもののデータが存在しない場合は、消費量と土地生産性データを用い推計する。畜産品(加工品含む)については、牧草や穀物飼料の使用にかかわる土地面積を用い、森林の場合は、年間の単位あたりの成長量を使用する。

そして、二酸化炭素吸収地の面積を算定する。具体的には、ある一定地域内で化石燃料や木材、廃棄物などの燃焼により発生した二酸化炭素排出量を求め、世界の森林の平均二酸化炭素固定能力で除すことで二酸化炭素吸収地面積を推計する。

さらに、既存の統計資料から生産能力阻害地を求め、最後に海洋・淡水域を起源とする財の年間消費量を算定する。海洋・淡水域の面積は、漁獲された魚と同量の魚が回復するのに必要とされる植物性プランクトン量から求められる。例えば、アジに関して説明すると、100gのアジ

は生きるために1kgの動物性プランクトンを必要とし、その1kgの動物性プランクトンは10kgの植物性プランクトンを必要とする。このように、全ての魚介類に関して必要とされる植物性プランクトンの量を計算すると、魚介類が必要とする植物性プランクトンの総量が推計される。さらに、その得られた数値を水域の単位面積当たりの植物性プランクトン量で除し、魚介類の海洋・水域面積を求める。以上の作業手順を経て、各項目から得られた面積を合計した総面積がEFとなる。

以上の手順を踏まえ、調査対象地域である七百弄郷に適用させていく。まず七百弄郷で消費されている財は表7に記すとおりである。第III章でも述べてあるが、本対象地域では第二次産業、第三次産業は一切おこなわれていないため、主に農業生産に関わる財が多い。またEFの考えを視覚的にまとめたものが図8であり、実際に七百弄郷に適用するに当たり用いたモデルが図9である。図8は、我々が消費する各財をすべて土地面積に変換し、得られた各カテゴリーの土地面積を合計することでEFが求められるという流れを表したものである。図9は、実際に七百弄郷の人間活動のフロー図である。このフロー図の結果から、七百弄郷では、耕種作物や家畜生産に使用された土地面積を表す“農地カテゴリー”、何らかの活動で消費した燃料により発生した二酸化炭素を吸収するのに必要な林

地面積を表す“二酸化炭素吸収地カテゴリー”、耕種作物へ投入した化学肥料量と有機肥料量のエネルギー量を生産するのに必要な農地・林地

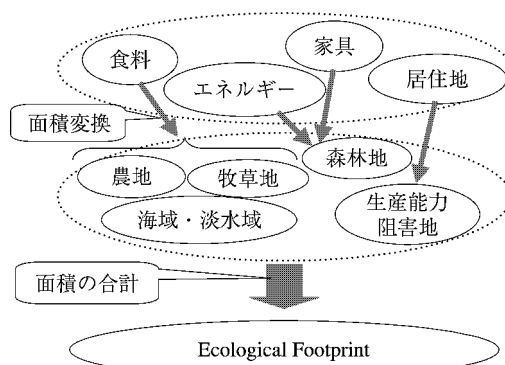


図8 エコロジカル・フットプリントの分析方法

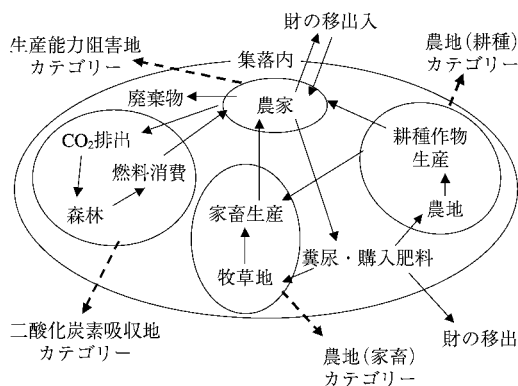


図9 エコロジカル・フットプリントの七百弄郷への適用

表7 七百弄郷の各集落で消費した財

消費した財のカテゴリー	消費した財
耕種作物	トウモロコシ, 大豆, 米, サツマイモ, レンコン, バナナ, カボチャ, 火麻
化学肥料	尿素, リン肥料, (カリ肥料)
有機肥料	液肥, 堆肥, 草木灰
家畜生産	雌豚, 子豚, 肥育豚, 兎, 山羊, 鳩, 鶏, 鶏卵, アヒル, (役牛)
その他の食料	(食塩), トウモロコシ酒, 豚油
燃料	薪, 茎葉, 木材, 灯油, (メタンガス)
木材	(建築資材), (家具類)
生産能力阻害地	建物, 道路, (貯水槽)

註1) 括弧内の財に関してはデータの制約上推計することができなかった。

面積を表す“農地・林地バイオマスカテゴリー”，道路や家屋といった“生産能力阻害地カテゴリー”が使用されている。なお、海水・淡水域を起源とした財を消費していないため、本章でのEF分析に海水・淡水域は含まれていない。

c. エコロジカル・フットプリント計測の詳細

ここではEF分析の詳細な手順ならびに分析方法を紹介する。各カテゴリーの分析結果とトータルの分析結果は付表1-1から付表5までにまとめている。なお、ここでは代表的な集落である弄石屯を中心に分析手順を詳述する。

c-1. 農地カテゴリーの計算

c-1-1. 耕種作物生産

耕種作物生産に関するマトリックスは、各作物目を実際に作付した面積と作物に投入した化学肥料および有機肥料を生産するのに要した土地面積から構成されている。付表2-1の破線で囲まれたA-1群は耕種作物の生産量ないしは消費量を表し、A-2群は耕種作物に投入した化学肥料や有機肥料の総量を表す。行項目には、弄石屯の住民が消費または生産した財の項目が入る。列項目には各消費項目の総生産量、販売量、購入量、自家消費量などの量的な項目と、総作付面積、販売品作付面積、購入品作付面積、自家消費作付面積などの空間的な項目が入る。

耕種作物のEFの推計にあたっては、はじめにA-1群のセルから実際に作付した土地面積を推計し、次にA-2群のセルから各作物に投入した化学肥料および有機肥料を生産するのに必要とした土地面積を推計した。A-1群の(1, I)から(8, V)のセル内には現地調査から得られたデータが入る。

以下具体的な推計手順を紹介するが、表記上の簡略化のために、販売品作付面積はX、購入品作付面積はY、自家消費作付面積はZとして表す。

・トウモロコシ

トウモロコシの各作付面積は、トウモロコシの総生産量と総作付面積から、弄石屯におけるトウモロコシの反収を求め、それを基に総生産量、販売量、自家消費量に関する各作付面積を推計した。

総生産量：自家消費量＝総作付面積：自家消費量作付面積

$$1175.63 : 1166.25 = 27.39 : Z$$

$$Z = 27.17 \text{ (a)} \rightarrow (1, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

弄石屯の住民はトウモロコシを446.25 kg購入している。購入されたトウモロコシは、弄石屯以外の土地を利用して生産されているため、弄石屯外から弄石屯内への土地面積の移入に相当する。EF分析で重要なことは、購入先をどこに想定するかによってEFが大きく変化してしまう。そのため、Wada(1999)では、購入先は限定できないとして世界平均を採用している。しかし、本稿でのトウモロコシの購入品作付面積の推定には、世界平均のトウモロコシの反収ではなく、中国のトウモロコシの反収を採用した。中国の反収を用いた理由は、中国が世界的なトウモロコシの輸出国であることから、弄石屯へ移入されるトウモロコシも中国で生産されていると想定したためである。FAOによると、2000年の中国におけるトウモロコシの反収は459.92 (kg/10 a)である。これを利用して、トウモロコシの購入品作付面積を推定した。

$$Y = \text{購入量} \div \text{中国のトウモロコシの反収}$$

$$Y = 446.25 \div 45.99 \text{ (kg/a)}$$

$$Y = 9.70 \text{ (a)} \rightarrow (1, \text{VII}) \text{ 計上値}$$

・大豆

大豆に関する計測方法もトウモロコシと同様の計測方法によって計測した。はじめに、総生産量と総作付面積から大豆の反収を求める。次に、得られた反収と自家消費量、販売量の関係から販売品作付面積、自家消費作付面積を推計する。

総生産量：販売量＝総作付面積：販売品作付面積

$$X = \text{販売量} \times \text{総作付面積} \div \text{総生産量}$$

$$X = 3.38 \times 6.25 \div 39.75$$

$$X = 0.53 \text{ (a)} \rightarrow (2, \text{VI}) \text{ 計上値}$$

総生産量：自家消費量＝総作付面積：自家消費量作付面積

$$Z = \text{自家消費量} \times \text{総作付面積} \div \text{総生産量}$$

$$Z = 30.38 \times 6.25 \div 39.75$$

$$Z = 4.78 \text{ (a)} \rightarrow (2, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・米

米の購入品作付面積は、中国の米の反収を用いて推計した。米もトウモロコシ同様、中国が世界的な輸出国であることから、弄石屯に移入される米も中国で生産されているものと想定した。FAOによると、2000年の中国における米の反収は622.55(kg/10a)である。これを利用して、米の購入品作付面積を推計した。

購入品作付面積=購入量÷中国の米の反収

$$Y=100.13 \div 62.25 \text{ (kg/a)}$$

$$Y=1.61 \text{ (a)} \rightarrow (3, \text{VII}) \text{ 計上値}$$

・サツマイモ

サツマイモに関する各作付面積は、以下の計測方法で推計することができる。

総生産量：自家消費量=総作付面積：自家消費用作付面積

$$319.38 : 294.38 = 12.88 : Z$$

$$Z=294.38 \times 12.88 \div 319.38$$

$$Z=11.87 \text{ (a)} \rightarrow (4, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・バショウイモ

バショウイモに関する各作付面積は、以下の計測方法で推計することができる。

総生産量：自家消費量=総作付面積：自家消費用作付面積

$$408.75 : 360 = 5.54 : Z$$

$$Z=360 \times 5.54 \div 408.75$$

$$Z=4.88 \text{ (a)} \rightarrow (5, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・バナナ

バナナに関する各作付面積は、以下の計測方法で推計することができる。

総生産量：販売量=総作付面積：販売品作付面積

$$57 : 1.13 = 0.73 : X$$

$$X=1.13 \times 0.73 \div 57$$

$$X=0.01 \text{ (a)} \rightarrow (6, \text{VI}) \text{ 計上値}$$

総生産量：自家消費量=総作付面積：自家消費用作付面積

$$57 : 55.5 = 0.73 : Z$$

$$Z=55.5 \times 0.73 \div 57$$

$$Z=0.71 \text{ (a)} \rightarrow (6, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・かぼちゃ

かぼちゃに関する各作付面積は、以下の計測方法で推計することができる。

総生産量：自家消費量=総作付面積：自家消費用作付面積

$$6.9 : 6.9 = 1.83 : Z$$

$$Z=6.9 \times 1.83 \div 6.9$$

$$Z=1.83 \text{ (a)} \rightarrow (7, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・火麻

火麻に関する各作付面積は、以下の計測方法で推計することができる。

総生産量：自家消費量=総作付面積：自家消費用作付面積

$$22.35 : 18.98 = 14.01 : Z$$

$$Z=18.98 \times 14.01 \div 22.35$$

$$Z=11.89 \text{ (a)} \rightarrow (8, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

次に、耕種作物を生産するために投入した化学肥料と有機肥料に関する計測方法を解説する。化学肥料と有機肥料の施肥状況であるが、有機肥料の一部が大豆に施肥されている以外は、主作物であるトウモロコシに施肥されている。化学肥料と有機肥料の特徴を踏まえ、トウモロコシと大豆に投入した化学肥料と有機肥料の投入量を求め、(9, I) から (18, IV) の該当するセルに計上した。化学肥料と有機肥料を土地面積に換算する変換式の詳細は、Wada (1993) の方法を自然科学の実証データからより妥当なものに改良して行った(付表5参照)。

付表5では窒素1kg、リン1kg、カリウム1kgをそれぞれ生産するのに必要とするエネルギー量をまとめたものである。この表から、投入された各化学肥料が生産されるのに必要としたエネルギー量を求め、そのエネルギー量を作るために、自然生態系の中ではどれくらいの土地面積を必要とするかを求めることで、化学肥料生産に必要な土地面積を推計した。具体的には、投入した尿素1kgを生産するために必要としたエネルギー量36.6MJを、地球の地表面が太陽から受けるエネルギー量からバイオマス変換できる4GJ/haで除すことによって推計することが可能である(地表面に降り注ぐ太陽エネルギーは80GJ/haである。しかし、バイオマス変換できる割合は自然科学的知見から5%程度とされている)。有機肥料についても同様の手法を用いて推計することが可能である。

なお、リン肥料についてはデータの制約上推

計することができなかった。尿素については、前述した Wada (1993) の研究で利用されている 36.6 MJ/kg の既定値を採用した。カリ肥料に関しては、弄石屯では使用していないため推計していない。堆肥、液肥、草木灰の生産に必要なエネルギー量は、出村他 (1998~2003) のデータを利用し、N-P-K の構成比率の平均値を求め、同様の方法に従って各有機肥料のエネルギー量を推計した。

・窒素

窒素の購入品作付面積は、窒素の製造エネルギー量を 4 GJ/ha で除すことにより推計した。

$$Y = 1 \text{ kg あたりの窒素のエネルギー量} \times \text{窒素の購入量} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Y = 88.83 \times 73.84 \text{ (MJ/kg)} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Y = 163.99 \text{ (a)} \rightarrow (9, \text{VII}) \text{ 計上値}$$

・堆肥

堆肥の各作付面積の計測方法は、窒素 1.97%、リン 0.47%、カリ 2.73% の構成比率から、この堆肥と同程度の肥料を製造するためのエネルギー量を付表 5 で推計し、4 GJ/ha で除すことにより推計した。

$$Z = 1 \text{ kg あたりの堆肥のエネルギー量} \times \text{堆肥の総生産量} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 1.787 \times 2,452.5 \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 109.62 \text{ (a)} \rightarrow (14, \text{V}) \text{ 計上値}$$

・液肥

液肥の各作付面積の計測方法は、堆肥と同様の計測方法で推計した。

$$Z = 1 \text{ kg あたりの液肥のエネルギー量} \times \text{液肥の総生産量} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 5.131 \times 444.38 \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 57.01 \text{ (a)} \rightarrow (15, \text{V}) \text{ 計上値}$$

・草木灰 (トウモロコシ)

草木灰の各作付面積の計測方法は、トウモロコシの草木灰と同様の計測方法で推計した。

$$Z = 1 \text{ kg あたりの草木灰のエネルギー量} \times \text{草木灰の総生産量} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 0.5535 \times 1,008.75 \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$Z = 13.96 \text{ (a)} \rightarrow (16, \text{V}) \text{ 計上値}$$

・草木灰 (大豆)

草木灰の各作付面積の計測方法は、堆肥と同様の計測方法で推計した。ただし、大豆は他地

域にも販売を行っていることから、草木灰の投入量も生産量に合わせ案分し、総作付面積、販売品作付面積を推計した。

$$\text{総作付面積} = 1 \text{ kg あたりの草木灰のエネルギー量} \times \text{草木灰の総生産量} \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$\text{総作付面積} = 0.5535 \times 264.38 \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$\text{総作付面積} = 3.66 \text{ (a)} \rightarrow (18, \text{V}) \text{ 計上値}$$

$$X = 1 \text{ kg あたりの草木灰のエネルギー量} \times \text{草木灰の販売量} \div 80 \text{ GJ/ha}$$

$$X = 0.5535 \times 22.45 \div 4 \text{ GJ/ha}$$

$$X = 0.31 \text{ (a)} \rightarrow (18, \text{VI}) \text{ 計上値}$$

以上の計算結果から、弄石屯では耕種作物の生産の場として年間 79.40 (a/世帯) 使用している事がわかる。また、耕種作物生産のために投入した肥料を生産するために年間 347.92 (a/世帯) 使用している事がわかる。ここで肥料として使用したエネルギー量を賄うために、一定の土地面積に太陽エネルギーをあてる必要がある。その土地面積は農地、林地を問わず降り注がれる事から、調査対象地域の地目割合から案分して農地カテゴリー内に 114.05 (a/世帯)、後述するが、林地カテゴリー内に 233.87 (a/世帯) を使用した肥料製造の EF として割り当てた。

c-1-2. 家畜生産

家畜生産に関する農地の EF マトリックスは付表 3-1 である。破線で囲まれた A-3 群は家畜の年間肥育量ないしは購入・販売量を表し、A-4 群は家畜の肥育のために与えられた年間の飼料の量を表している。A-3 群のセルと A-4 群 I 列のセル内の数値は、現地調査から得られたデータである。残りの A-4 群のデータは A-3 群のデータから推計した。以下、各飼料の項目ごとに投入した飼料の量と、その飼料の量を生産するのに必要とした土地面積の計測方法を解説する。

・トウモロコシ

トウモロコシは、豚、鶏、鳩に与えられているので、豚、鶏、鳩の総生産量の合計とこれら家畜に与えたトウモロコシの総量の関係から、トウモロコシの販売量と自家消費量を推計した。

$$\text{販売量} = (\text{豚, 鶏, 鳩}) \text{ の販売量} \times \text{トウモロコシの総生産量} \div (\text{豚, 鶏, 鳩}) \text{ の総生産量}$$

販売量 = $(93.75 + 0.3 + 4.91) \times 792.56 \div (168.937 + 10.575)$
 販売量 = $98.96 \times 792.563 \div 179.512$
 販売量 = 436.93 (kg) → (9, II) 計上値
 自家消費量 = (同上)の自家消費量 × トウモロコシの総生産量 ÷ (同上)の総生産量
 自家消費量 = $(70.05 + 0.53 + 5.51) \times 792.56 \div (168.937 + 10.575)$
 自家消費量 = $76.79 \times 792.563 \div 179.512$
 自家消費量 = 335.93 (kg) → (9, IV) 計上値
 上記で求めたトウモロコシの販売量と自家消費量の推計結果と弄石屯におけるトウモロコシの反収の関係から、トウモロコシの各作付面積を推定した。計算式は以下の通りである。
 $X = \text{販売量 (9, II)} \div \text{トウモロコシの反収}$
 $X = 436.93 \div (1,175.63 \div 27.38)$
 $X = 10.17$ (a) → (9, VI) 計上値
 $Z = \text{自家消費量 (9, IV)} \div \text{トウモロコシの反収}$
 $Z = 335.93 \div (1175.63 \div 27.38)$
 $Z = 7.82$ (a) → (9, VIII) 計上値

・ サツマイモ

サツマイモは豚のみに与えられているので、豚の総生産量、販売量、自家消費量の比を用いて、飼料の総生産量、販売量、自家消費量を案分した。計測式は以下の通りである。

販売量 = 豚の販売量 × サツマイモの総生産量 ÷ 豚の総生産量
 販売量 = $93.75 \times 273.75 \div 168.9375$
 販売量 = 151.91 (kg) → (10, II) 計上値
 自家消費量 = 豚の自家消費量 × サツマイモの総生産量 ÷ 豚の総生産量
 自家消費量 = $70.05 \times 273.75 \div 168.937$
 自家消費量 = 113.51 (kg) → (10, IV) 計上値
 上記で求めたサツマイモの販売量や自家消費量の推計結果と、弄石屯におけるサツマイモの反収の関係から、サツマイモの各作付面積を推定した。計算式は以下の通りである。

$X = \text{販売量 (10, II)} \times \text{サツマイモの反収}$
 $X = 151.91 \times (12.88 \div 319.38)$
 $X = 6.13$ (a) → (10, VI) 計上値
 $Z = \text{自家消費量 (10, IV)} \div \text{サツマイモの反収}$
 $Z = 113.51 \times (12.88 \div 319.38)$
 $Z = 4.58$ (a) → (10, VIII) 計上値

・ 野菜

野菜は豚のみに与えられているため、豚の総生産量、販売量、自家消費量の比を用いて、飼料の総生産量、販売量、自家消費量を案分した。計測式は以下の通りである。

販売量 = 豚の販売量 × 野菜の総生産量 ÷ 豚の総生産量

販売量 = $93.75 \times 2,692.50 \div 168.9375$

販売量 = 1,494.17 (kg) → (11, II) 計上値

自家消費量 = 豚の自家消費量 × 野菜の総生産量 ÷ 豚の総生産量

自家消費量 = $70.05 \times 2,692.50 \div 168.937$

自家消費量 = 1,116.45 (kg) → (11, IV) 計上値

野菜に関する各作付面積の推計は、家畜に与えている野草、サツマイモのツル、青菜などの反収のデータ制約上推計することができなかった。しかし、一番ウエイトの大きいと考えられる野草の反収は自然科学班の現地調査により 2,400 kg/ha と推計されている(出村他(1998~2003))。本研究ではその推計値を利用して、家畜に給仕した野草を生産するのに必要な土地面積を推計した。

総作付面積 = 野草の総生産量 ÷ 弄石屯における野草の単収

総作付面積 = $2692.50 \div 2400$ (kg/ha)

総作付面積 = 112.19 (a) → (11, V) 計上値

$X = \text{野草の販売量} \div \text{弄石屯における野草の単収}$

$X = 1494.17 \div 2400$ (kg/ha)

$X = 62.26$ (a) → (11, VI) 計上値

$Z = \text{野草の自家消費量} \div \text{弄石屯における野草の単収}$

$Z = 1,116.45 \div (2400 \text{ kg/ha})$

$Z = 46.52$ (kg) → (11, VIII) 計上値

・ 購入した家畜に与えられていた飼料の量

弄石屯の住民が購入した家畜の総量は、現地調査によると一人当たり、豚が 9.38 kg、兎が 0.15 kg、鶏が 0.11 kg であった。弄石屯の住民の生活は、それら購入した家畜を消費することによって支えられているため、購入先が購入した家畜を肥育するために与えていた飼料の量を推計する必要もある。しかし、それら購入した家

畜に与えられた飼料の量を正確に推計することは、家畜の購入先の肥育調査データも必要になるため不可能である。そこで、本稿では Wada (1999) が使用した計測方法を用いることで、家畜に与えた飼料の量を推計することを可能とした。Wada (1999) は、家畜に与える飼料の重さと畜産品の増加量には、牛：豚：家禽類：酪農品=16：6：3：1 となる関係式が成り立つという Lappé の研究成果を利用して、家畜に与えた飼料の量の推計を行っている。なお、上記の関係式にない家畜種の扱いは、Wada (1999) の方法に従って比率を 11 とした。計測式は以下の通りである。

購入した家畜に与えられた飼料の量=豚の購入量×6+兎の購入量×11+鶏の購入量×3
 購入した家畜に与えられた飼料の量=9.38×6+0.15×11+0.11×3

購入した家畜に与えられた飼料の量=58.24 (kg)→(15, III) 計上値

上記で求めた飼料の量を中国のトウモロコシの反収で除すことにより、購入品作付面積を推計した。なお、家畜に与えられる飼料をトウモロコシと仮定した点と、中国のトウモロコシの反収を用いて推計した理由は、中国が世界的な豚肉の輸出国である点と、中国における家畜飼料の代表作物がトウモロコシである点を考えれば妥当であると判断したためである。計測式は以下の通りである。

購入品作付面積=購入量÷中国のトウモロコシの反収

$Y = 58.24 \div 459.92$ (kg/10 a)

$Y = 1.27$ (a)→(15, VII) 計上値

c-1-3. その他の食料

その他の食料品に関する農地の EF であるが、弄石屯では一般的な食料品として食塩、酒、豚油などが消費されていた。しかし、データの制約上 EF 分析することができなかつたため、その他の食料に関する付表の解説は割愛した。

c-2. 森林カテゴリーの計測方法

本節では、森林の EF に関するマトリックスである付表 4-1 の説明を行う。付表内の破線で囲まれた B-1 群は林産物の生産量ないしは消費量を表し、B-2 群は、ある人間活動によって

消費されたエネルギー燃料となる薪材、茎葉などを表している。データの制約上 B-1 群のセルに計測値を計上することができなかつた。B-2 群のセルの行項目には、弄石屯の住民がエネルギーを得るために消費した財の項目が入る。列項目には各財の総生産量、販売量、購入量、自家消費量等の量的な項目と、総作付面積、販売品作付面積、購入品作付面積、自家消費作付面積などの空間的な項目が入る。しかし、付表 4-1 ではデータの制約から (2, I) から (7, V) までのセルを十分に埋めることはできなかつた。

c-2-1. 林産物

林産物に関する森林の EF は、付表 4-1 の破線で囲まれた B-1 群が該当する。しかし、データの制約から、一般財として消費されている財を特定することができなかつたため、林産物に関する EF の推計は行っていない。

c-2-2. 二酸化炭素

弄石屯の住民が炊事などで使用するエネルギー源は、薪材、茎葉など何も加工を施すことのない一次生産物と、メタンガス、石油など何らかの加工を施した二次生産物に区分される。これらエネルギー源の燃焼により発生する二酸化炭素量は、北海道環境生活部『北からの発信“減らす CO₂”「北海道地球温暖化計画」』2000 より、木屑の二酸化炭素排出係数 0.45 (kgC/kg) と灯油の二酸化炭素排出係数 0.6896 (kgC/kg) を採用した。また、発生した二酸化炭素量を吸収するための森林面積の推計には、Wackernagel et al (1995) が利用した世界の森林の平均二酸化炭素吸収量を用いて推計した。

・薪材

木屑によって発生する二酸化炭素排出係数は 0.45 (kgC/kg) であるため、この二酸化炭素排出係数に消費した薪材を乗じることで二酸化炭素排出量を推計することができる。また、得られた二酸化炭素排出量を世界の森林の平均二酸化炭素吸収量 1.8 tC/ha で除すことにより、二酸化炭素吸収用の森林面積を推計することができる。

なおデータの制約上ここでの推計は、薪材=

木屑，自家消費量＝総生産量と仮定している。

$Z = \text{木屑の二酸化炭素排出係数} \times \text{薪材の自家消費量} \div \text{世界の平均二酸化炭素吸収量}$

$$Z = 0.45 \times 10,539.38 \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Z = 4742.72 \text{ (kgC)} \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Z = 263.48 \text{ (a)} \rightarrow (2, \text{V}) (2, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・茎葉

茎葉の燃焼により発生した二酸化炭素量の吸収に関する森林面積の推計も、前述した薪材と同様の推計方法を用いて行った。ここでも、木屑＝茎葉，総生産量＝自家消費量と仮定した。

$Z = \text{木屑の二酸化炭素排出係数} \times \text{茎葉の自家消費量} \div \text{世界の平均二酸化炭素吸収量}$

$$Z = 0.45 \times 926.25 \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Z = 416.81 \text{ (kgC)} \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Z = 23.16 \text{ (a)} \rightarrow (3, \text{V}) (3, \text{VIII}) \text{ 計上値}$$

・灯油

灯油の燃焼により発生した二酸化炭素量の吸収に関する森林面積の推計も、前述した薪材と同様の推計方法を用いている。しかし、北海道環境生活部によると、灯油の二酸化炭素排出係数は0.6896となっているため、灯油の燃焼によって発生する二酸化炭素量の推計に際してはこの係数を用いて推計した。

$Y = \text{灯油の二酸化炭素排出係数} \times \text{灯油の自家消費量} \div \text{世界の平均二酸化炭素吸収量}$

$$Y = 0.6896 \times 6.98 \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Y = 4.81 \text{ (kgC)} \div 18 \text{ (kgC/a)}$$

$$Y = 0.27 \text{ (a)} \rightarrow (5, \text{VII}) \text{ 計上値}$$

以上のことから、森林カテゴリのEFは森林資源を起源とする加工物の消費によるEFは求める事ができなかったが、生活するうえで必要な燃料の消費によって排出される二酸化炭素を吸収するためのEFは年間286.91(a/世帯)であることが明らかとなった。

また、耕種作物生産の際に、投入した肥料分のエネルギー量を賄うために、林地カテゴリ内には別途233.87(a/世帯)を投入した肥料製造のEFとして割り当てた。

c-3. 生産能力阻害地カテゴリの計測方法

弄石屯の生産能力阻害地に関するEFであるが、生産能力阻害地に関する大部分を占めるデータは道路と家屋である。そのため単純に道

路面積，家屋面積を計測する事で生産能力阻害地カテゴリのEFを得ることができた。弄石屯では2.89(a/世帯)，歪線屯1.15(a/世帯)，波垣屯0.52(a/世帯)，弄力屯0.69(a/世帯)であった。比較的小きな値であることから付表は割愛した。

D. 試算結果

a. 最大扶養可能人口の推計結果

各集落の最大扶養可能人口の推計結果は表8のようになった。弄石屯で71人，歪線屯で36人，波垣屯で35人，弄力屯で33人であった。現実の居住人口とEFによる最大扶養可能人口の相対的な超過比を表す表8中の②をみると，森林が豊富で人口が少ない歪線屯が1.4であり，他の屯は2倍以上の過剰人口を抱えている。しかし，いずれの屯も最大扶養可能人口の許容量を超えており，土地単位あたりの人口が過剰であることが明らかとなった。次に各屯集落が利用できる林地(草地)，農地すべての土地面積と，住民の人間活動から要求されるEFの比率である環境インパクトを表す表8中の③をみると，森林資源が豊かで，人口の少ない歪線屯以外はいずれも環境への負荷が大きくなっていた^{*35}。

このように，七百弄郷において土地面積あたりの人口が過剰な状態であるにも関わらず，現在の人口を維持できる理由は，4つの屯集落の人間活動量が，自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量よりも多く，再生産をおこなう自然資本の元本を切り崩して現在の活動をおこなっているためであると考えられる。つまり，4つの屯集落は，資源消費量が環境収容力を超過した図7中でのB地点に位置し，自然生態系の持つ資源供給量や廃棄物浄化量といった機能を発揮する自然資本の元本自体を消費している状態にある。事実，第三章での七百弄郷の歴史をみると，森林被覆率は急激に減少し，人口増加と森林被害の深刻さに移民政策がとられるほど深刻な状態であった。そのため，現在の人口は一時的なものであり，長期にわたって維持し続けることは不可能であるといえる。

今後は，環境収容力と資源消費量との間の乖

表8 各集落の最大扶養可能人口と環境インパクト

集落名	弄石屯	歪線屯	波坦屯	弄力屯
世帯人員 (人/世帯)	4.8	3.9	4.7	5.3
① 最大扶養可能人口 (人)	71	36	35	33
④ 農地に規定される最大扶養可能人口	74.7	36.9	83.0	33.1
総農地面積 (a)	3,780	1,340	4,290	1,600
1人当りの農地のEF (a/人)	50.58	36.34	51.67	48.33
⑤ 林地に規定される最大扶養可能人口	71.6	64.8	35.1	35.6
総林地面積 (a)	7,750	9,610	3,190	3,220
1人当りの林地のEF (a/人)	108.22	148.20	91.01	90.43
② 最大扶養可能人口超過率	2.3	1.4	2.1	2.1
人口 (人)	164	50	74	69
最大扶養可能人口 (人)	71	36	35	33
③ 環境インパクト	2.1	0.8	1.3	2.0
集落全体のEF (a/人)	26,140	9,243	10,566	9,583
所有する弄の土地面積 (a)	12,410	10,950	8,030	4,860

註1) 最大扶養可能人口とは、現在の生活水準で、その集落に最大何人住めるかを意味する。最大扶養可能人口超過率とは、本来の最大扶養可能人口に対する現在の人口の超過割合を表す。環境インパクトとは、集落の住民の人間活動が集落内の自然生態系に与えた負荷量を表す。数値は大きいほど自然生態系への環境負荷が大きい。絶対的基準ではないが1.0以下が良好な数値である。

註2) ここでの最大扶養可能人口は、人間活動量であるEFと集落内の農地・林地面積の割合から計算される。つまり弄石屯を例にあげると、弄石屯の住民は年間50.58 a/人の農地面積と108.22 a/人の林地面積を使用して生活している。それに対し、弄石屯集落の実際の土地面積は農地3,780 aと林地7,750 aであるため、農地に関しては74人(=3,780 a ÷ 50.58 a/人)、林地に関しては71人(=7,750 a ÷ 108.22 a/人)が限界点となる。さらに、最大扶養可能人口はより低い数値の限界点に規定されるため、現在の弄石屯の人間活動水準では、林地に規定される71人が最大扶養可能人口となる。

註3) 集落全体のEF=(1人当りの農地のEF+1人当りの林地のEF)×人口により求められる。

離をなくすこと、つまり図7中の資源消費量曲線を下方シフトさせることが重要である。以下、各集落のEFの内訳がどのようなになっているのかを明らかにし、資源消費量を下方シフトさせるのに有効な方策を考察する。

b. エコロジカル・フットプリントの分析結果

各集落のEF分析結果の内訳は図10に記すようになった。図10をみると、各集落における年間のEFの結果は、弄石屯で159.3 a/人、歪線屯で184.8 a/人、波坦屯で142.7 a/人、弄力屯で138.8 a/人であった(EF結果は小数点第2位以下を切り捨てた値)。また、その内訳は、耕種作物生産のために投入した化学肥料と有機肥料を生産するために確保しなければならない農地・林地バイオマスに関するEFと、燃料の燃焼

により発生した二酸化炭素を吸収するために確保しなければならない二酸化炭素吸収に関するEFで全体の約8割を占めていた(弄石屯:82.3%、歪線屯:87.2%、波坦屯:85.5%、弄力屯:77.4%)。EF分析結果の内訳の中で大きなウェイトを占める二酸化炭素吸収に関するEFをみると、多少の差はあるものの各集落とも54~67 a/人の間であった。七百弄郷での二酸化炭素吸収に関するEFは、主に調理や暖房などの目的で薪などの燃料を燃やし、そこから発生した二酸化炭素を吸収するという計算である。調理や暖房に使用する燃料の消費量は各集落間で大きな差は見られなかった。

次に、耕種作物生産のために投入した化学肥料と有機肥料を生産するために確保しなければならない農地・林地バイオマスに関するEFを

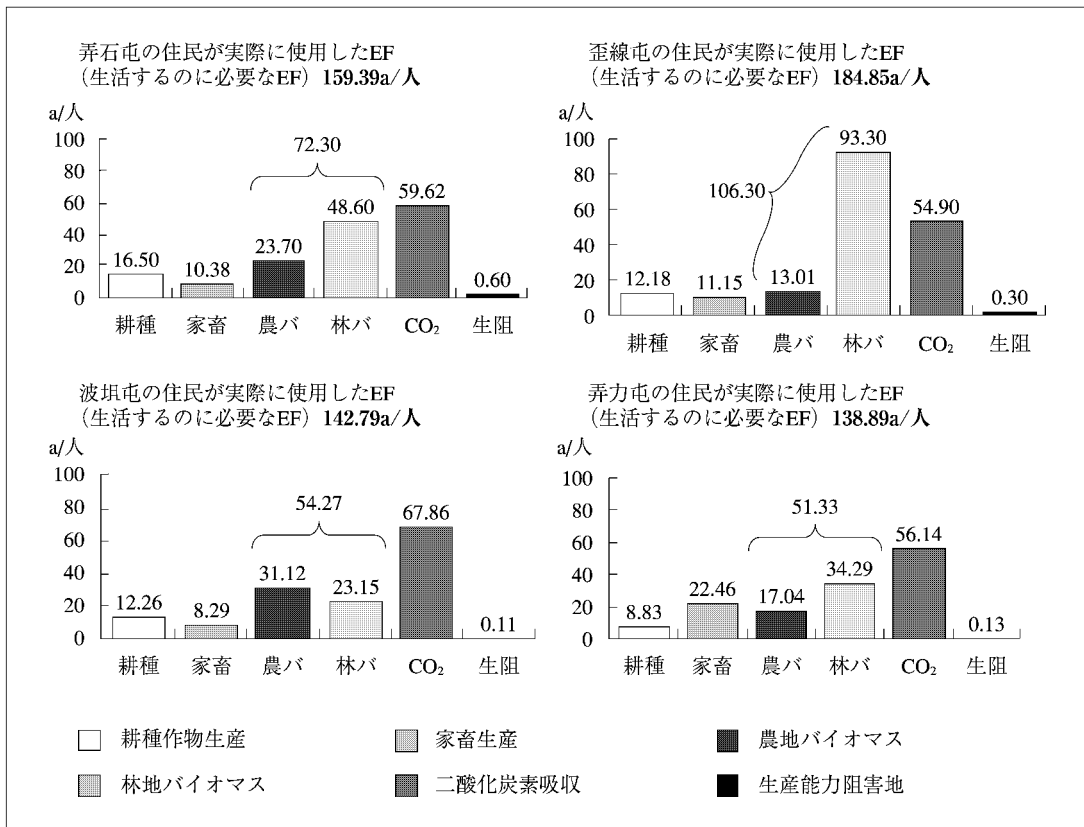


図10 各集落におけるエコロジカル・フットプリント結果の内訳

註1) 各集落の詳細な結果は付表にまとめてある。

註2) 二酸化炭素吸収とは、燃料燃焼により排出された二酸化炭素量を吸収するために必要な林地面積をいう。

註3) 農地バイオマス、林地バイオマスとは、耕種作物生産のために農地へ投入した化学肥料、有機肥料のエネルギー分を生産するのに必要な土地面積をいう。確保する土地面積の計算方法は、全てのエネルギーは太陽エネルギーを起源に作られるため、1haあたりに年間降り注ぐ太陽エネルギー量から計算される。本分析では、太陽エネルギーは農地や林地に関係なく降り注ぐため、実際の地目面積の割合から案分して土地面積の計算をおこなった。

みると、集落ごとにばらつきがある。農地・林地バイオマスに関するEFは、農地への投入肥料のEFを表すものであり、EF値が高いほど農地へ肥料を多投していることになる。最も肥料投入に関するEFが高かった集落は、歪線屯の肥料の生産に関する林地バイオマスのEFであった。また一番肥料投入に関するEFが低かった集落は弄力屯であった。この理由は、第III章でも述べてあるが、歪線屯の一人あたりの化学肥料と有機肥料の投入量が一番多く、弄力屯の一人あたりの化学肥料と有機肥料の投入量が一番少なかったためであると考えられる。ま

た、肥料投入に関するEFの中でも林地バイオマスのEFが高かった理由は、化学肥料、有機肥料を生産するのに必要な農地バイオマス、林地バイオマスの面積の推計が実際の地目割合に依存する仮定条件に従うためである。逆に、実際に林地面積の少ない波垣屯では、地目割合に依存する仮定条件により、林地バイオマスのEFは農地バイオマスのEFよりも低くなっている。

EFの内訳結果からは、4つの屯集落において二酸化炭素吸収に関するEFと肥料投入に関するEFの値が全てのEFの8割強を占めるこ

とを明らかにした。現在4つの屯集落は、前述した通り土地単位あたりの人口が過剰な状態にあり、環境収容力（集落の土地面積）と資源消費量（住民のEF）の乖離をなくすことが求められている。そのため、各集落においては、二酸化炭素に関するEFと肥料投入に関するEFを減少させるような方策が、自然生態系への環境負荷量を減らすのに効果的であるといえる。ここで意図することは、環境収容力を超過した発展途上地域に対し、資源消費量の規制を呼びかけるものではなく、資源消費のスリム化をおこなう場合の一情報を提示してくれることである。EFは比較的理解されやすく概念上有効な指標であるが、具体的な政策を提言するまでの情報はもっていない（石川（2002）参照）。そのため、最終的な決断を下すのは個人ないしは政策当局に委ねられることになる点に留意されたい。

最後に、EF分析結果の移出入関係の内訳をみることにする。本分析では4集落の移出入結果を求めているが、前述してある通り、弄石屯の精密なデータに比べ他の3集落は、データ収集の限界から若干の仮定条件を用いて計測を行っている。しかし、各集落とも移出入の結果に対して大きな差はなかった。そのため、弄石屯のEFの移出入結果である図11を用いて考察する。

図の移入された土地面積と移出された土地面積を比較すると、移入された面積の方が多かった。これは、弄石屯集落内の土地面積だけでは現在の人口の消費活動を満たすことができず、外部からの物資に依存していることを意味している。一見人里離れた閉鎖空間に見えるが、外部からの物資に依存しなければならないほど深刻な状態であることがわかった。それほど七百弄郷において、人口圧の問題が深刻であることが明らかとなった。また、移入したEFの大半は化学肥料生産のために必要な農地バイオマス、林地バイオマスに関するEFであった。一方、移出したEFはほぼ家畜生産に関するEFであった。農地面積が少ないことから、家畜生産を行い、家畜を移出することで化学肥料を購入していることがわかった。しかし、弄石屯を含む4

つの屯集落では、すでに農地に大量の余剰窒素が残っており、化学肥料の投入は窒素汚染という環境問題をさらに悪化させる恐れがある。このような状態が改善されない理由は、農家調査の聞き取り結果によると、作物に必要な投入量の情報を知らないため、“投入量に比例して収量が伸びる”、“化学肥料を投入することが一種のステータス”などであった。

つまり、各集落とも二酸化炭素吸収に関するEFと化学肥料と有機肥料に関するEFが高かったが、化学肥料と有機肥料に関するEFは、農家が自ら購入し自然生態系に環境負荷を与えているという実態が明らかとなった。

E. 小 活

本章では七百弄郷の4つの屯集落の最大扶養可能人口（ある地域で環境問題を発生させることなしに最大何人生活できるか）を推計し、EF分析結果から中国農村地域の実態を明らかにした。

4つの屯集落では土地単位面積あたりの人口が過剰な状態であり、表8をみると各集落1.4~2.3倍の過剰人口を抱えていることが明らかとなった。各集落が過剰な人口を抱えることのできる理由は、4つの屯集落の“資源消費量(EF)”が“自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量(環境収容力)”よりも多く、再生産をおこなう自然資本の元本を切り崩して現在の活動をおこなっているためであると考えられる。実際、七百弄郷の歴史をみると、森林被覆率は急激に減少し、人口増加と森林被害の深刻さに移民政策がとられるほど深刻な状態であった。そのため、自然資本の元本を切り崩している状態では、現在の人口を長期にわたって維持し続けることは不可能であり、資源消費量を自然生態系の持つ環境収容力の範囲内におさめる必要がある。そこで、各集落の図10のEF結果の内訳をみると、耕種作物生産のために投入した化学肥料と有機肥料を生産するために確保しなければならない農地・林地バイオマスに関するEFと、燃料の燃焼により発生した二酸化炭素を吸収するために確保しなければならない二酸化炭素吸収に関するEFで全体の約8割を占めていた。そのため、各

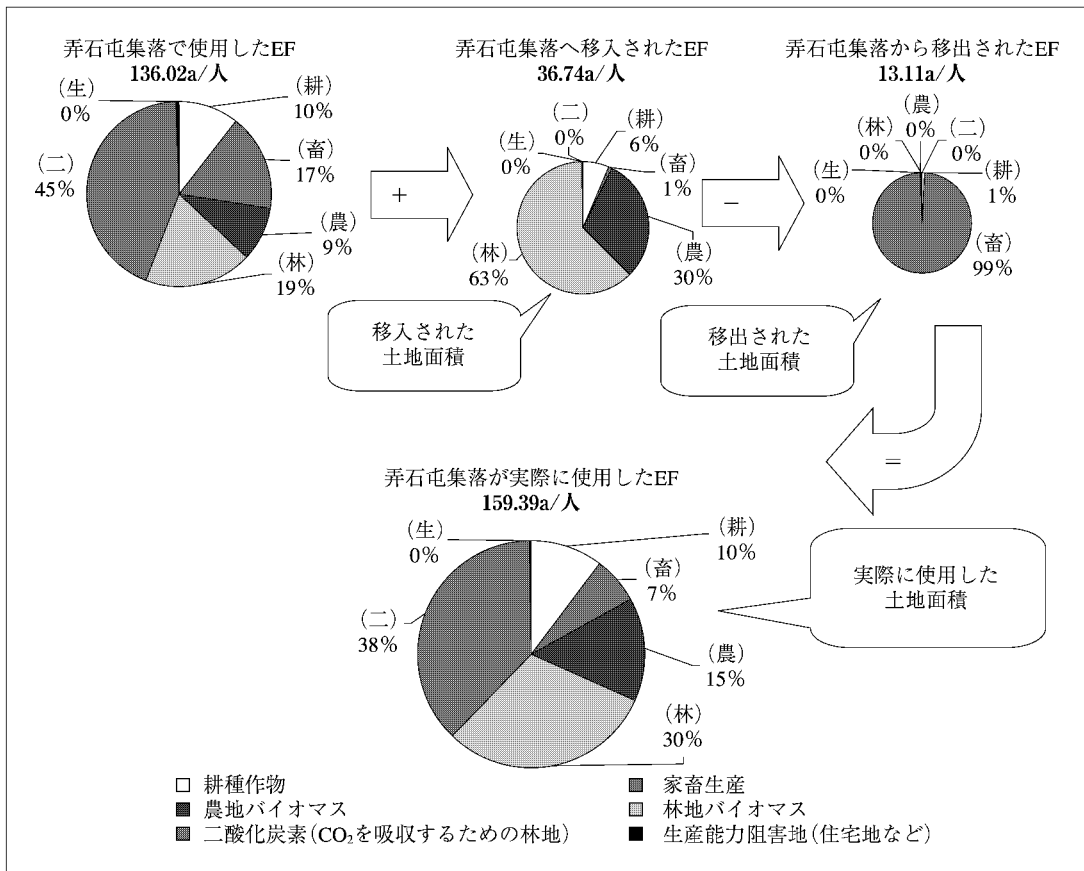


図 11 弄石屯のエコロジカル・フットプリントの移出入

註 1) 「集落で使用した EF」とは、集落内の自然生態系に与える人間活動量、すなわち環境負荷量を表している。「移入された EF」とは、集落外の住民が集落外の自然生態系に与える環境負荷量である。しかし集落内の住民の需要に起因した環境負荷量であるため、集落内の住民の人間活動量を推計する場合は加算する必要がある。「移出された EF」とは、集落内の自然生態系に与える環境負荷量である。しかし、集落外の住民の需要に起因した環境負荷量であるため、集落内の住民の人間活動量を推計する場合は差引く必要がある。

註 2) 図中の円の大きさは人間活動量（自然生態系に与えた環境負荷量）の大きさを表すものではなく、各カテゴリーの内訳を表すものである。

註 3) 弄石屯以外の 3 集落も類似な傾向をしるしていたため、弄石屯を代表に分析をおこなった。

集落においては、二酸化炭素に関する EF と肥料投入に関する EF を減少させるような方策が、自然生態系への環境負荷量を減らすのに効果的であるといえる。

次に、図 11 の EF 分析結果の移出入関係の内訳をみると、移入した EF の大半は化学肥料生産のために必要な農地バイオマス、林地バイオマスに関する EF であった。一方、移出した EF はほぼ家畜生産に関する EF であった。各集落とも農地面積に制約があるため、家畜生産を行

い、家畜を移出（販売）することの対価として化学肥料を移入（購入）していることが明らかとなった。しかし、弄石屯を含む 4 つの屯集落では、すでに農地に大量の余剰窒素が残っており、化学肥料の投入は更なる窒素汚染という環境問題を悪化させるだけである。

今後は七百弄郷の農家に対して、作物生産に必要な化学肥料の投入量などの知識を伝える基本的な営農指導が何よりも必要である。農家への営農指導は、化学肥料の多投を抑え自然生態

系への環境負荷量を減らすだけでなく、高価な化学肥料を購入しなくなるため、農家の可処分所得も増えることになる。

註

- *33 環境面積要求量と呼ばれ、人間の何らかの活動によって踏み付けられた自然生態系面積を意味する。
- *34 現在の消費水準で当該集落に生活することのできる最大人口。最大人口によって消費される資源量（ここでは踏み潰される土地面積）は生活基盤である自然生態系が供給できる範囲内に収まっている。
- *35 環境インパクトは、ある集落に住む人間が自然生態系に与えた環境負荷の大きさを表しているが、自給率という形で表した馴染みある概念に変更することもできる。まず、比較対照として熱供給量をベースにした食料自給率は、弄石屯 78%、歪線屯 89%、波垣屯 87%、弄力屯 77%であったが、環境インパクトの逆数を取った形である土地資源自給率は、弄石屯 47%、歪線屯 118%、波垣屯 76%、弄力屯 51%であった。歪線屯以外は自給率が低下した。歪線屯以外の集落で減少した理由は、食料自給率は食料のみが持つエネルギーに関しての自給率であり、土地資源自給率は全ての活動に関して使用した土地資源に対する自給率を表すため、食料自給率よりも低くなりやすい（土地資源自給率とは、EF 分析の結果である総使用土地面積を利用して求めることができる。具体的には、表 8 中の $h \div g$ により求めることが可能である）。ただし、歪線屯のように、一人あたりの土地面積が大きい集落などでは増加することもある。日本の食料自給率が、海外からの輸入飼料を考慮した場合とそうでない場合とでは異なる結果になるのと同じ関係である。食料自給率は、EF 分析の耕種作物と家畜生産の付表を利用して、“集落内で生産される各食料の総生産量”×“該当する熱供給量”により“集落内で生産可能な総熱供給量”を求める。次に食料の移出入を加味した“実際に消費し

た総熱供給量”を求める。最後に“実際に消費した総熱供給量”÷“集落内で生産可能な総熱供給量”により求めた。

	弄石屯	歪線屯	波垣屯	弄力屯
食料自給率	78%	89%	87%	77%
土地資源自給率	47%	118%	76%	51%

第 V 章 Energy Flow Model を用いた人間活動の定常状態のシミュレーション予測

A. 本章の目的

第 I 章で解説したように、近年の貧困問題と環境問題の悪循環を断ち切るには、自然生態系に対する人間の収奪行為を再考する必要性が指摘されている。しかし、収奪行為の再考は、①収奪行為の対象である自然資源に対してどのような基準を設けるのか（環境収容力の問題）、②収奪行為を行う「社会の物的ネットワーク（社会経済システム）」と収奪される「自然の物的ネットワーク（自然生態システム）」の双方を考慮した分析枠組みが不十分（分析枠組みの問題）である、などの理由で非常に困難な課題であるとされてきた。

しかしながら、Odum (1971) は、経済活動の第一要素であるエネルギー (Energy) 量を用い、自然生態系と社会経済システム間を往来するエネルギーの流れに注目し、全ての財をエネルギーに変換する分析方法を構築している。さらに、Odum et al. (2000b) では、種類の異なるエネルギー同士では単位あたりの仕事の寄与率が異なるという問題点 (Career の問題) を改良した独自の単位である Emergy (エメルギー) 概念を用いた分析方法を開発している。この分析アプローチは、Emergy という物量単位と自然生態システムを考慮した循環経路に焦点を当てている点で、第 II 章で区分したエコロジカル経済学の物質循環論アプローチに該当する。

そこで本章では、エメルギーとエメルギーの循環経路に注目し、現在の活動水準のまま人間活動を行うとどのような帰結 (成長・定常・衰退) を迎えるのかをシミュレーションする。本

章でシミュレーションを行う意義は、将来の見通しが良くも悪くもその活動の中での重要な要素が何であるかを認識することにある。シミュレーションにより得られた情報は、今後の進むべき人間活動の方向性を示唆してくれるものとなるであろう。

B. エメルギーフロー分析(Energy Flow Analysis)の理論と既存研究

a. エネルギー (Energy) と エメルギー (Emergy) の概念とその特徴

現在、我々がエネルギーという単語から連想するものは、ほとんどが食糧、石油、石炭、電力といった日常的なものである。さらに、これら物質の持つエネルギーは全てカロリー(cal)ないしはジュール(joule)の単位に換算することが可能であり、その結果を加算したり比較することが可能であるとして疑ってこなかった。

しかし、Odum やエネルギー・資源学会編(1996)によると、このエネルギーに関する認識は、①エクセルギー (Exergy) とアネルギー (Anergy) という異なるタイプのエネルギーの総計を指しており、エネルギーとエクセルギーの区別が明確になされていないこと、②石油の持つエネルギー量、太陽光線の持つエネルギー量という具合にエネルギーの種類が異なれば、エネルギー1単位あたりの仕事の寄与率が異なること、などの問題を抱えていた。

以下、上記①と②の問題点を踏まえたエネルギーの認識がどのように変化・改善されていったかを説明する。第一に、前述した通り、エネルギーはエクセルギーとアネルギーから構成されている。図12に示すように、エクセルギーは経済活動に有効に利用できるエネルギーであり、アネルギーは経済活動に有効に活用できないエネルギーである。エネルギーとエクセルギーを明確に区別することで、分析手法も見かけのエネルギー分析と実質エネルギー分析に区別される。エクセルギー分析は、アネルギーという有効利用できないエネルギーを含んでいない点で、エネルギー分析に比べて精度の高い分析方法であるといえる。また、エネルギー分析に比べ分析枠組みの適用範囲が広いのも特徴的

である(図13参照)。

第二に、エネルギーの種類によって1単位あたりの仕事をこなす寄与率が異なるという点であるが、これは1kcalの有機物を生産するために必要なエネルギーが太陽エネルギーで1,000J(熱量単位のジュール、単位はJoule:以下J)であり、石油エネルギーで400Jであるとした時、太陽エネルギーと石油エネルギー1Jの行う活動の量は異なることになる。なぜなら、石油エネルギーは太陽エネルギーを集約させたエネルギーであるためである。このように、単純に単位が同じ1Jであるという理由で異なる種類のエネルギーを比較することはできない。このようなエネルギーの質の違いに対する問題点に対し、OdumはTransformityという独自の係数をエクセルギーに乘じ標準化させたエメルギーという単位を用いることで解決している。エメルギーとは、質の異なるエクセルギー同士を比較可能にするために標準化したエネルギーをいう。つまり、エメルギー分析は、上述した従来のエネルギー分析やその改良版であるエクセルギー分析よりも精度の高い分析手法であるといえる。さらにエメルギー分析は、エメルギー同士を加算したり、比較することも可能であるため、分析の適用範囲が他の分析手法に比べて幅広いというメリットを持っている。

最後に、エメルギーとエメルギーを求めるのに必要なTransformityの定義を解説する。Odum(2000b)によると、エメルギーは「物・

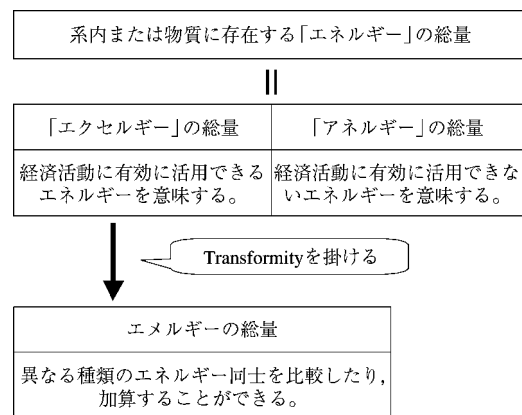


図12 「エネルギー」、「エクセルギー」、
「エメルギー」の区分と概要

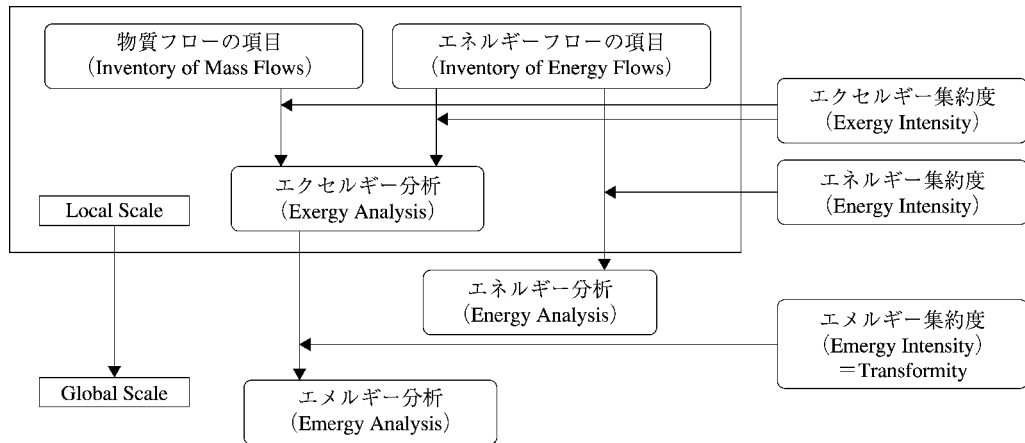


図 13 各分析の枠組み

資料：Federici (2003) より引用した。

サービスを生み出すために、直接ないし間接的に消費された任意の有効エネルギーであり^{*36}、エクセルギー(実質エネルギー)×Transformityにより求められる。またその単位はエマジュール(eMjoule)と表される」と定義されている。また、エメルギーの定義中にも使用されている Transformity は、「ある生産エネルギー1 Jを作るのに必要な任意のエネルギー量であり、エメルギー÷エクセルギーの関係式からなる」と定義される。このエメルギーと Transformity の定義を具体的に説明する。米を生産するのに労働力と肥料のみが必要であると仮定した場合、まず米生産に費やした労働力と肥料それぞれの実質エネルギーを求め、次に各エネルギーに対応した Transformity を乗じてエメルギーに変換する。そして最後にその得られたエメルギーを合算することで米のエメルギーが推計されることになる。その他にも、米に関する Transformity がすでに求まっているのなら、それを米のエクセルギーに乗じるだけで米のエメルギーが求められる。

b. エメルギー分析を用いた既存研究

エメルギー分析は、近年開発された新しい概念であることと、異質のエネルギーを標準化しなければならないというデータ上の制約から、報告書レベルでの研究例ばかりであり、学術的な研究例が少ないのが現状である。

先行研究を見てみると、Odum(2000)、Odum

et al. (2000b)、Brown et al. (1999)、Brown et al. (2003)、Federici (2003)、Serrano et al. (2002)の研究報告がある。Odum(2000)では、エメルギー分析に使用する技術用語の定義、エメルギーの推計に必要な Transformity の係数とその推計手順などを詳細に解説している。Odum et al. (2000b)では、エメルギー概念の解説、エネルギーフローの記号論の構築などエメルギー分析のマニュアルを前半部で提示し、単純なタンクモデルから経済システムや情報システムを含んだマクロモデル、自然生態システムにまで拡張したグローバルモデルの実証分析を行っている。Brown et al. (1999)では、エメルギー分析を用いて、世界総生産(Gross World Product)と自然資源の関係性を評価している。その結果、1950年に比べ生物圏(Biosphere)に4倍の環境負荷を与える一方、1ドルあたりのエメルギー購買力(エメルギー/1ドル)が減少していることを明らかにしている。Brown et al. (2003)では、セメント産業を対象にエメルギー分析を行っている。その結果、高エメルギー物質(seJ/g)のリサイクルの有用性を明らかにし、エメルギー量が、物質のライフサイクル指標やリサイクルの方向性を示唆する可能性があることを述べている。Federici et al. (2003)では、太陽エネルギーで標準化した Solar eMjoule (ソーラーエマジュールと呼び、単位は sej である)は、生態環境下における全物

質の構成要素の新しい測度になるとし、鉄道輸送と道路輸送といった環境面から人と物の輸送に対して持続性の評価をしている。Serrano et al. (2002) では、農業生産活動に注目し、エメルギーを効率性・持続性の指標にして複数農家の持続性評価を行っている。

c. H.T. Odum によるエメルギーフローモデルの作成マニュアル

エメルギーフロー分析の手順の第一は、システム内を流れるエメルギーフローモデルを作成することである。その視覚的に表したモデルを微分方程式 (Differential Equation) に変換し直すことが手順の第二となる。以下ではまず、Odum et al. (2000b) の手順に従ってエメルギーフローモデルの作成を解説する^{*37}。大まかな手順は下記の①～⑧の通りである。

①分析対象となるシステムの境界フレームを描く。例えば、北海道などといった境界フレームを作成する。

②境界フレームへ流入・流出する全ての重要な投入経路 (Input Pathways) のリストを作る。そして、フレーム周辺に左から右へと大まかにそれぞれの資源を表す記号 (Source Symbol) を置いていく。置く順番はエントロピーの低い順番、つまり低質エネルギーから高質エネルギーの順に置いていく^{*38}。例えば、北海道という境界フレームの外側から流入してくる資源のリストを作成し並べることである。つまり、太陽エネルギー、風力、水などは低質エネルギーであり、境界フレーム外から移入される作物や工業製品などは様々なエネルギー集約の結果の産物であるため高質エネルギーとなる。そして置いた記号に名称を付ける。

③境界フレーム内に存在し、重要と考えられる要素のリストを作る。境界フレームの中に、②と同様に左から右へとエントロピーの低い順に要素を置き、記号に名称を付ける。例えば、北海道では太陽の光エネルギーを受けて生産活動を行う植物などの生産者、その植物などを食すことで成長する家畜などの消費者、植物や家畜などを消費する人間といった、より高次元な消費者などが存在する。それら項目を境界フレームの中に置いていく。他にも、高質エネ

ルギーを消費して新たな生産物を作る工場や都市なども該当する。

④①で定義した境界フレーム内に存在する重要と考えられる流入・流出の過程 (Process) のリストを作る。それら流入・流出の過程は、記号に接続している経路を表すために使用される。例えば、植物を表す記号から家畜や人間といった記号に食料 (エネルギー) が流入する。

⑤物質は保存 (Conserve) されるということ念頭におき、間違いがないかモデル中に自分が配置した各物質のフローと貯蓄 (Storage) をチェックすべきである。これは境界フレーム内外に配置した項目と項目間の経路が正しいかの確認段階である。

⑥境界フレーム内の閉ざされた空間内での貨幣フローや、境界を超えて流入する貨幣フローと流出する貨幣フローなどをチェックする。なお、貨幣フローの経路を作る際に、エネルギーの経路と混同しないように異なる線種を使用する必要がある (Odum は貨幣フローの経路に破線を使用している)。これは、エネルギーの流れと反対に貨幣が流れるという理に従った物である。例えば、石油 (エネルギー) を購入して使用することはエネルギーの循環を誘発させることになり、購入という行為自体に伴って貨幣も循環していることをモデルに記す必要がある。

⑦エネルギーフローが適当であるか全ての経路をチェックする。これは実際にエネルギーの流入・流出量が妥当であるかの確認である。

⑧もし、モデルが25以上の記号を含むような複雑なものとなったなら、有用な項目や投入の情報などを書き留めた上で、もう一度書き直す。なぜなら、政策議論、シミュレーションの際には、シンプルなモデルの方が望ましいためである。

以上が、Odum によって紹介されたエネルギーフローモデル作成の基本的な手順である。エメルギーフロー分析をおこなうためには、さらにモデル内の経路を流れるエクセルギーに Transformity を乗じる必要がある。

d. エネルギーフローモデルから微分方程式への変換

次に、実際に作成したモデルのシミュレー

ションを行う段階であるが、視覚的なモデルを微分方程式に変換する必要がある。エネルギーフローモデルのシミュレーションは、差分方程式 (Difference Equation) が微分方程式 (Differential Equation) と類似の性質を持つという特徴を利用したものである。そのためエネルギーフローモデルのシミュレーションは、差分方程式と微分方程式の体系から派生したシステムダイナミクスの分野に該当すると考えられる。

エネルギーフローモデルのシミュレーションで重要なことは、エネルギーの量が減少傾向、増加傾向、定常のいずれの状態³⁹にあるのかを知ることである。エネルギーの量の増減を計測する意義は、地球上の全ての資源は、直接的、間接的に太陽エネルギーを受けて生産された産物だからである。なぜなら、ある一定の速度で注がれる太陽エネルギー量を目安に、資源消費量の速度を調整できるためである。つまり、エネルギーは成長に必要な資源量の目安となるばかりでなく、貯蓄された資産や資本の代替指標も兼ねている。したがって、エネルギーの増減の傾向を見るために、作成したモデル中の貯蓄記号 (Storage Symbol) に注目し、実際の調査データから貯蓄に流入するエネルギー量、貯蓄から流出するエネルギー量、流出量と流入量の差分を求める。そしてそれに関する微分方程式を展開することで、エネルギーの貯蓄に関する関係式が求められる。

以上の分析概要を踏まえ、次節において具体的に実証する。

C. 中国西南部弄石屯への適用

本論文では中国西南部大化县七百弄郷弄石屯集落を対象に、前節での分析手順に従いエネルギーフローモデルを作成した。弄石屯集落とその周辺地域との関係を表したエネルギーフローのマクロモデルが図 14 であり、弄石屯集落の内部の循環過程を詳細に表したエネルギーフローのミクロモデルが図 15 である。本節では、はじめに図 14 を用いてマクロモデルの概説を行い、次に図 15 を用いてミクロモデルを解説する。

a. 弄石屯におけるエネルギーフローのマクロモデル

①丸型 (○) の記号は起動力を持つ外部から

の物質・エネルギー源を表す。ここではエントロピーの一番低い左側に位置するため、太陽や雨といった自然資源が該当する。

②丸型の記号から流れる矢印 (→) (Pathway Lines) は、エネルギーの流れる経路を表している⁴⁰。

③次に、資源からの矢印を受ける弾丸型 (◐) の記号は低質エネルギーなどを転換し濃縮する生産者単位 (Producers) を表す。ここでは太陽エネルギーや雨といった低質エネルギーを転換できる生産者単位として、弄石屯 (農村地域) を選択した。

④そして、弾丸型から流れる矢印を受けた六角形 (◑) の記号は高質エネルギーを使用する消費者単位 (Consumers) を表す。消費者単位を表す六角形の記号の中には、弾丸型の生産者記号や傘型 (◒) の貯蔵記号を内包していることが多い。

⑤最後に、生産者単位と消費者単位である農村地域と都市地域から下に向かって矢印が伸びている。この矢印 (⊥) は熱放散・償却 (Heat Sink) と呼ばれ、仕事に用いられた後に放散した熱エネルギーの流出を意味する。そしてその熱エネルギーは再利用不可能である。具体的には機械などの減価償却などが該当する。

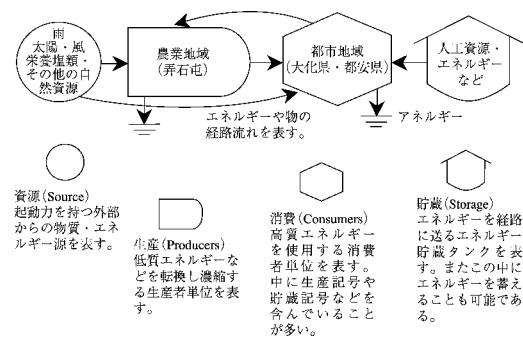


図 14 弄石屯のマクロ的エネルギーフローモデル
註 1) 図中内の記号の持つ定義、性質は Odum et al. (2000b) に依拠する。

b. 弄石屯におけるエネルギーフローのミクロモデル

①弾丸型の生産者記号である弄石屯集落到に流入・流出してくるエネルギーのリスト、および

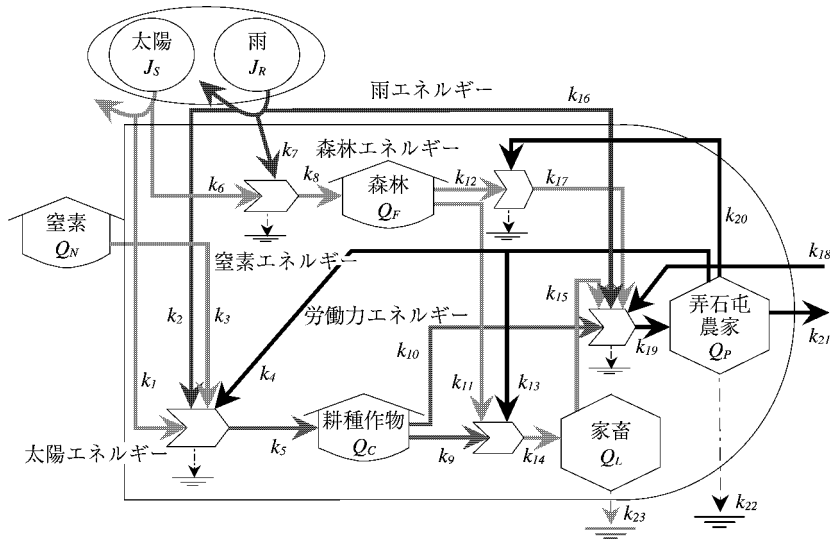


図15 弄石屯のミクロ的エメルギーフローモデル

註1) 図中内の記号の持つ定義, 性質は Odum et al. (2000b) に依拠する。

註2) 図中の羽根型 ($\langle \rangle$) の記号は相互作用 (Interaction Symbol) と呼ばれる物であり, 低質エネルギー同士を合流させ, より高質なエネルギーとして産出させる機能を表す記号である。例えば, 養分, 土壌, 水, 太陽の低質エネルギーが合流し, 植物という高質のエネルギーを生むことを意味する。

弄石屯集落内部で行われる循環過程のリストを作成した。本章では, 太陽 (J_s), 雨 (J_r), 窒素 (Q_n) の資源記号と, 耕種作物 (Q_c), 森林 (Q_f) の貯蔵記号と, 家畜 (Q_l), 農家 (Q_p) の消費記号をモデル内に配置した。

②はじめに, 弾丸型の生産者記号 (弄石屯集落外) の外側から窒素と太陽エネルギー, 雨に含まれる鉱物 (マグネシウム, カルシウム), 窒素などのエネルギーが流入してくる。

③耕種作物 (Q_c) 生産活動に関するエネルギーの循環過程について解説する。

弄石屯集落内では, 太陽, 雨, 窒素, 農家からの労働力のエネルギーを得て耕種作物が生産される。そのため, 耕種作物 (Q_c) は, 太陽, 雨, 窒素, 農家の記号から矢印を受ける (エネルギーの流入) ことになる。また, 耕種作物は農家と家畜によって消費されるので農家と家畜に矢印を出す (エネルギーの流出) ことになる。

④家畜 (Q_l) 肥育活動に関するエネルギーの循環過程について解説する。

弄石屯集落内では, 耕種作物, 森林, 農家からの労働力のエネルギーを得て家畜が成長 (家

畜の体重増加) する。そのため, 家畜 (Q_l) は, 耕種作物, 森林, 農家の記号から矢印を受ける (エネルギーの流入) ことになる。一方, 家畜は農家によって消費 (食料および販売目的) されるので農家に矢印を出す (エネルギーの流出) ことになる。また, 家畜の記号から下に向かって出ている矢印 (Heat Sink) は, 家畜の成長にエネルギーを投入したにも関わらず, 消費することなく死亡した家畜のエネルギーが該当する。

⑤農家 (Q_p) の人間活動に関するエネルギーの循環過程について解説する。

弄石屯集落内では, 耕種作物, 家畜, 森林, 衣服, 灯油など屯集落外部からの物資のエネルギーを得て農家は生活している。そのため, 農家 (Q_p) は, 耕種作物, 家畜, 森林の記号および屯集落外部から矢印を受ける (エネルギーの流入) ことになる。一方, 農家は耕種作物と家畜へ労働力を提供しているので耕種作物と家畜に矢印を出す (エネルギーの流出) ことになる。さらに, 農家 (Q_p) のエネルギーの貯蓄量が増加するにつれ森林の消費量 (燃料) も多くなる

ので、農家 (Q_P) の増加に合わせて森林消費量を増加させるように矢印を出している。また、農家から屯集落外へ矢印が出ているが、これは家畜の販売という形でのエネルギーの流出である。この家畜の販売により、弄石屯集落外からの物資の移入が可能となっている。最後に、農家の記号から下に向かって出ている矢印 (Heat Sink) は、農家から流出するエネルギーは全て労働力と仮定しているため、農作業に従事しない子供が消費したエネルギーが該当する。

⑥森林 (Q_F) の成長活動に関するエネルギーの循環過程について解説する。

弄石屯集落内では、太陽と雨のエネルギーを得て森林が成長する。そのため、森林 (Q_F) は、太陽と雨の記号から矢印を受ける (エネルギーの流入) ことになる。また、森林は農家 (燃料) と家畜 (食料) によって消費されるので農家と家畜に矢印を出す (エネルギーの流出) ことになる。

c. エネルギーフローモデルの数式化

エネルギーフローモデルから、耕種作物、森林、家畜、農家に対する微分方程式を求めることにする。なお、本節で求めている数式の記号と図 15 および表 9 の記号は対応している。

①耕種作物 (Q_C) 生産に関するエネルギーの微分方程式について説明する。

耕種作物 (Q_C) の移出入の差分から耕種作物の貯蔵に関する方程式、すなわち微分方程式を求める。耕種作物の持つエネルギー貯蔵の微分方程式は $\dot{Q}_C = DQ/DT$ である。右辺は耕種作物 (Q_C) へ流入するエネルギー量、耕種作物 (Q_C) から流出するエネルギー量、耕種作物 (Q_C) に関連する係数 k_n 、太陽 (J_S) と雨 (J_R) と農家の労働力 (Q_P) に関するエネルギー源から求めることができる。

図 16 は数式を作成し易いように耕種作物に関する部分のみ抽出したものである。はじめに、傘型の貯蓄記号 (Q_C) に向けられる矢印部分 (エネルギー流入) に関する方程式を作り、次に傘型の貯蓄記号 (Q_C) から出て行く矢印部分 (エネルギー流出) に関する方程式を作る。それは数式(1)のように表すことができる。

$$\dot{Q}_C = (k_5 \times Q_N \times Q_P \times J_R \times J_S) - (k_9 \times Q_C) - (k_{10} \times Q_C) \dots\dots\dots(1)$$

(1)式の両辺を Q_C で除すことで、左辺は対数を取り時間 t で微分した形になる。そこで両辺に dt を掛け、両辺を積分すると次式となる。

$$\int d \log Q_C = \int \left\{ \frac{1}{Q_C} (k_5 \times Q_N \times Q_P \times J_R \times J_S) - k_9 - k_{10} \right\} dt. \dots\dots\dots(2)$$

(2)式を解くと、右辺に積分定数 Q_{C0} を加えた Q_C の方程式となる。

$$\log Q_C = \left\{ \frac{1}{Q_C} (k_5 \times Q_N \times Q_P \times J_R \times J_S) - k_9 - k_{10} \right\} t + Q_{C0}. \dots\dots\dots(3)$$

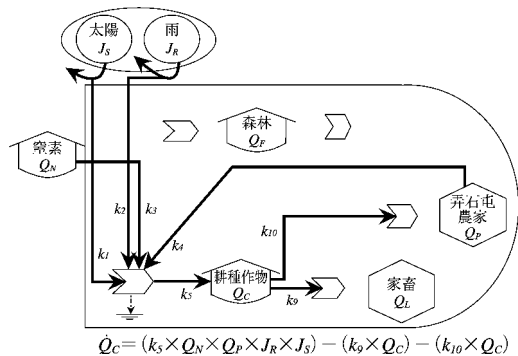


図 16 耕種作物に関する方程式の作成

②家畜 (Q_L) 肥育に関するエネルギーの微分方程式について説明する

家畜 (Q_L) の移出入の差分から森林の貯蔵に関する微分方程式を求める。家畜の持つエネルギー貯蔵の微分方程式は $\dot{Q}_L = DQ_L/DT$ である。右辺は家畜 (Q_L) へ流入するエネルギー量、家畜 (Q_L) から流出するエネルギー量、家畜 (Q_L) に関連する係数、耕種作物 (Q_C) と森林 (Q_F) と農家の労働力 (Q_P) に関するエネルギー源から求めることができる。

図 17 は数式を作成し易いように家畜に関する部分のみ抽出したものである。はじめに、傘型の貯蓄記号 (Q_L) に向けられる矢印部分 (エネルギー流入) に関する方程式を作り、次に傘型の貯蓄記号 (Q_L) から出て行く矢印部分 (エネルギー流出) に関する方程式を作る。それは

表9 弄石屯集落を循環する太陽エネルギー量とその係数

名称および変数	係数 ①	エネルギー量 (J/年) ②	Transformity (seJ/J) ③	太陽エネルギー量 (seJ) ④=②×③
太陽エネルギー (JS)	——	5.167E+12	1	5.167E+12
雨水エネルギー (JR)	——	1.028E+11	89,900	9.245E+15
土壌中窒素の貯蔵エネルギー (QN)	——	2.297E+06	4,620,000,000	1.061E+16
森林バイオマスの貯蔵エネルギー (QF)	——	6.606E+10	11,000	7.267E+14
耕種作物の貯蔵エネルギー (QC)	——	3.443E+08	85,187	2.933E+13
家畜肥育の貯蔵エネルギー (QL)	——	4.406E+07	2,140,000	9.429E+13
農家への貯蔵エネルギー (QP)	——	321149979.8	7,380,000	2.37009E+15
k 1	0.015241935			7.875E+10
k 2	0.036328273			3.358E+14
k 3	0.509578544			5.407E+15
k 4	6.062E-01			1.43683E+15
k 5	2.442E-47			2.93285E+13
k 6	0.03125			1.615E+11
k 7	0.007294183			6.743E+13
k 8	1.521E-15			7.26458E+13
k 9	2.910E-01			8.53377E+12
k 10	0.68187921			1.99985E+13
k 11	9.745E-06			7081800000
k 12	1.949E-02			1.41625E+13
k 13	1.418E-01			3.36121E+14
k 14	1.867E-30			9.42889E+13
k 15	9.171E-01			8.64707E+13
k 16	0.034750328			3.212E+14
k 17	8.223E-18			1.41625E+13
k 18	6.719E-03			1.59237E+13
k 19	4.387E-75			4.578E+14
k 20	0.000E+00			0.000E+00
k 21	2.113E-02			5.00714E+13
k 22	2.520E-01			5.97287E+14
k 23	7.754E-02			7.31104E+12

註1) 弄石屯の調査データをもとに計算された数値である。
 註2) 太陽エネルギーは、弄石屯のエメルギーフローモデル内を実際に循環しているエメルギー量を表す。
 註3) 係数は、弄石屯内を循環するエメルギーの割合から求めた値である。
 註4) セル中の“——”は係数が存在しないことを表す。灰色は省略したことを表す。

数式(4)のように表すことができる。

$$\dot{Q}_L = (k_{14} \times Q_C \times Q_F \times Q_P) - k_{15} \times Q_L - k_{23} \times Q_L \dots\dots\dots(4)$$

(4)式の両辺を Q_L で除すことで、左辺は対数を取り時間 t で微分した形になる。そこで両辺に dt を掛け、両辺を積分すると次式となる。

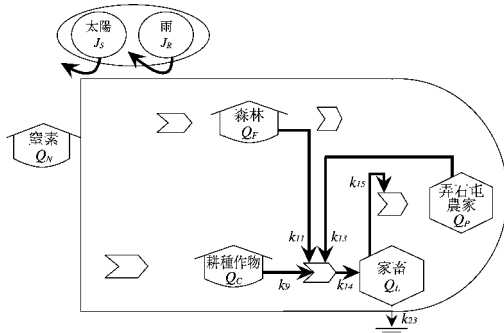
$$\int d \log Q_L = \int \left\{ \frac{1}{Q_L} (k_{14} \times Q_C \times Q_F \times Q_P) - k_{15} - k_{23} \right\} dt \dots\dots\dots(5)$$

(5)式を解くと、右辺に積分定数 Q_{L0} を加えた Q_L の方程式となる。

$$\log Q_L = \left\{ \frac{1}{Q_L} (k_{14} \times Q_C \times Q_F \times Q_P) - k_{15} - k_{23} \right\} t + Q_{L0} \dots\dots\dots(6)$$

③農家 (Q_P) の人間活動に関するエネルギーの微分方程式について説明する。

農家 (Q_P) の移出入の差分から農家の貯蔵に関する微分方程式を求める。農家の持つエネルギー貯蔵の微分方程式は $\dot{Q}_P = DQ_P / DT$ である。右辺は農家 (Q_P) へ流入するエネルギー量、農家 (Q_P) から流出するエネルギー量、農家 (Q_P) に関連する係数、それに雨 (J_R)、耕種作物 (Q_C)、森林 (Q_F)、家畜 (Q_L) そして農家の労働力 (Q_P) に関するエネルギー源から求めるこ



$$\dot{Q}_L = (k_{14} \times Q_C \times Q_F \times Q_P) - (k_{15} \times Q_L) - (k_{23} \times Q_L)$$

図 17 家畜に関する方程式の作成

とができる。

図 18 は数式を作成し易いように農家に関する部分のみ抽出したものである。はじめに、傘型の貯蓄記号 (Q_P) に向けられる矢印部分 (エネルギー流入) に関する方程式を作り、次に傘型の貯蓄記号 (Q_P) から出て行く矢印部分 (エネルギー流出) に関する方程式を作る。それは数式(7)のように表すことができる。

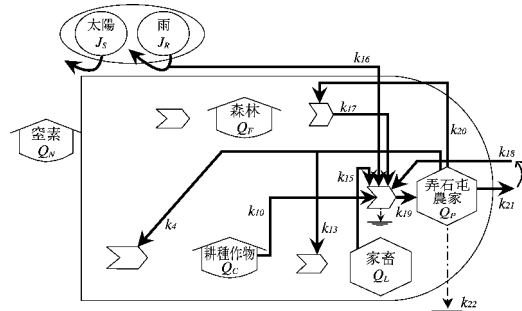
$$\begin{aligned} \dot{Q}_P &= (k_{19} \times Q_C \times Q_L \times J_R \times Q_P \times Q_F \times Q_P) \\ &\quad - (k_4 \times Q_P) - (k_{13} \times Q_P) - (k_{20} \times Q_P) \\ &\quad - (k_{21} \times Q_P) - (k_{22} \times Q_P), \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

(7)式の両辺を Q_P で除すことで、左辺は対数を取り時間 t で微分した形になる。そこで両辺に dt を掛け、両辺を積分すると次式となる。

$$\begin{aligned} \int d \log Q_P &= \int \left\{ \frac{1}{Q_P} (k_{19} \times Q_C \times J_R \right. \\ &\quad \times Q_L \times Q_F \times Q_P) - k_4 - k_{13} \\ &\quad \left. - k_{20} - k_{21} - k_{22} \right\} dt, \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

(8)式を解くと、右辺に積分定数 Q_{P0} を加えた Q_P の方程式となる。

$$\begin{aligned} \log Q_P &= \left\{ \frac{1}{Q_P} (k_{19} \times Q_C \times Q_L \times Q_F \times Q_P) \right. \\ &\quad \left. - k_4 - k_{13} - k_{20} - k_{21} - k_{22} \right\} \\ &\quad t + Q_{P0}, \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \dot{Q}_P &= (k_{19} \times Q_C \times Q_L \times J_R \times Q_P \times Q_F \times Q_P) \\ &\quad - (k_4 \times Q_P) - (k_{13} \times Q_P) - (k_{20} \times Q_P) - (k_{21} \times Q_P) - (k_{22} \times Q_P) \end{aligned}$$

図 18 農家に関する方程式の作成

④森林 (Q_F) 成長に関するエネルギーの微分方程式について説明する。

森林 (Q_F) の移出入の差分から森林の貯蔵に関する微分方程式を求める。森林の持つエネルギー貯蔵の微分方程式は $\dot{Q}_F = DQ_F / DT$ である。右辺は森林 (Q_F) へ流入するエネルギー量、森林 (Q_F) から流出するエネルギー量、森林 (Q_F) に関連する係数 k_n 、太陽 (J_S) と雨 (J_R) と農家の労働力 (Q_P) に関するエネルギー源から求めることができる。

図 19 は数式を作成し易いように森林に関する部分のみ抽出したものである。はじめに、傘型の貯蓄記号 (Q_F) に向けられる矢印部分 (エネルギー流入) に関する方程式を作り、次に傘型の貯蓄記号 (Q_F) から出て行く矢印部分 (エネルギー流出) に関する方程式を作る。それは数式(10)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{Q}_F &= (k_8 \times J_R \times J_S) - (k_{17} \times Q_F \times Q_P) \\ &\quad - (k_{11} \times Q_F), \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

(10)式の両辺を Q_F で除すことで、左辺は対数を取り時間 t で微分した形になる。そこで両辺に dt を掛け、両辺を積分すると次式となる。

$$\begin{aligned} \int d \log Q_F &= \int \left\{ \left(\frac{1}{Q_F} (k_8 \times J_R \times J_S) - k_{17} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times Q_P - k_{11} \right) \right\} dt, \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

(11)式を解くと、右辺に積分定数 Q_{F0} を加えた Q_F の方程式となる。

$$\log Q_F = \left\{ \left(-\frac{1}{Q_F} (k_8 \times J_R \times J_S) - k_{17} \right) \times Q_P - k_{11} \right\} t + Q_{F0} \dots\dots\dots(12)$$

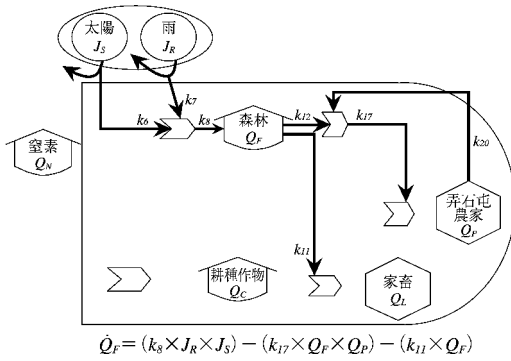


図19 森林に関する方程式の作成

d. 分析データ

分析に使用した基本データは、1999年から2003年までの5か年に及ぶ現地調査結果をまとめた報告書を利用した(出村(1998~2002, 2003), 梁(2002)参照)。主に使用したデータは、太陽輻射熱, 降雨量, 雨水の成分, 窒素循環量, 衛星IKONOSによる土地面積の推計, 家畜の肥育状況, 耕種作物の生育状況, 農家労働時間, 水の使用目的と使用量, 摂取カロリー, 衣服・灯油といった屯集落外部からの物資の移出入量などである。データ制約上, エネルギー(J)換算できなかったものは, 科学技術庁資源調査会編(『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』, 大蔵省印刷局)のデータで代用した。

また, エメルギーを推計する上で必要な Transformity の係数は, Odum et al. (2000a), Odum (2000), Brown (2001), Williams (2001) らの研究によるエメルギーハンドブック (Emergy of Handbook Folio # 1~4) の1巻から4巻と, Serrano et al. (2002) のものを利用した。ハンドブックでは, テーマ毎にそってエメルギーに必要な Transformity の計算を行っている。ハンドブックの1巻 (Folio # 1) では, 紹介と世界の予算「Introduction and Global Budget」というタイトルで, 主に石油, 天然ガス, 土壌, リンなどといった資源に関する Transformity の係数の計算であった。第2

巻 (Folio # 2) では, 潮の満潮・干潮時のエネルギーといった地球生物圏 (Geobiosphere) に関する Transformity の係数の計算であった。第3巻 (Folio # 3) では, 森林, 湿地に流れるエネルギーといった自然生態系に関する Transformity の係数の計算であった。第4巻 (Folio # 4) では, フロリダ州の農産品に関する Transformity の係数の計算であった。Serrano et al. (2002) はイタリアの農産品に関する分析の中で Transformity の係数を開示していたのでそれも使用している。Transformity の係数として引用したものは, 全て基本単位が Solar eM-Joule (ソーラーエマジュール, 太陽エメルギーと呼び, 単位は seJ と表す) である。なお分析に使用した係数および採用理由は表9と表10に記してある。

e. シミュレーションの仮定条件

データの制約からシミュレーションを行う上で以下の8つの仮定条件を置いた。

本論文でのシミュレーションでは, 技術進歩や情報の蓄積による効果を考慮していない。

貨幣やサービスなどをモデルに組み込むことは分析上可能であるが, 今回は計上していない。

農家 (Q_P) に投入されるエメルギー (耕種作物 Q_C, 家畜 Q_L, 森林 Q_F, 雨水 J_R) や購入物 (食料, 衣服, 灯油など) は, 全て変換されて労働力になると仮定した。これは, 農家のエメルギーの貯蔵量が増えればそれだけの労働力を養えることを意味する。つまり, 農家のエメルギーが増加は農家の裕福さを表すことになる。

農家から耕種作物や家畜, 森林へと流れるエメルギーは, 労働力エメルギーを表す。農作業時間と家畜の放牧時間の監視を調査データから, 農業従事者に割り当てて各時間を計算した。

耕種作物と家畜は, 農家からのエメルギー (労働力) の投入増加量に比例して増加するとした。また森林は農家のエメルギーの貯蔵量が増えると薪の使用量も増加するので, 比例して増加するようにした。

本対象地域では農業生産に窒素を撒いていたが, 今回は窒素フローの部分弄石屯のシステム外に配置した。そのため, 農家や家畜から排出される窒素の脱窒・揮散などは考慮していな

表 10 Transformity 及び係数選択の採用方法 (1/2)

変数	Transformity と変数	採用理由
JS	1	Odum et al. (2000a) より引用。
JR	89900	serrano et al. (2003) より引用。
QN	4620000000	serrano et al. (2003) より引用。
QF	11000	Odum et al. (2000a) より引用。
QC	85187	serrano et al. (2003) より引用, しかしこの Transformity はトモモロコシのものである。
QL	2140000	serrano et al. (2003) より引用, しかしこの Transformity は牛のものである。
QP	7380000	Serrano et al. (2003) より引用。
k1	0.015241935	植物が実際に太陽エネルギー (JS) を利用できるのは 5%程度であるため, その上限値である 0.05 と総土地面積 (124ha) に対する農地面積 (37.8ha) の割合を乗じたもので推計した。k1=0.05×(37.8/124)
k2	0.036328273	橘他 (出村代表: 2003) より, 雨水の利用率は実際に農業生産に使用した水量 (12,360m ³) ÷ 年間降雨量 (173,892m ³) により推計した。つまり, k2=12,360 (m ³)/173,892 (m ³)×0.5111より推計した。0.5111は使用した水量のうち農業に使用した割合を表す (実際に使用した割合も橘他により計測されている。残りの0.4889は生活用水として使用している)。雨水1L に対するカルシウム含有量は 49.58mg (エネルギー量は11.5MJ/kg), マグネシウム含有量は10.59mg (エネルギー量は2.0MJ/kg) であった。カルシウムとマグネシウムのエネルギー量のデータはなかったため, 農林水産省生産局生産資材課監修『ポケット肥料要覧2001』の硫酸化マグネシウムと硝酸カルシウムで代用した。
k3	0.509578544	波多野他 (出村代表: 2003) より, 土壌中の窒素が作物に吸収される量 (266kgN/ha) は土壌中に流入してくる窒素量 (522kgN/ha) の割合で推計した。k3=266/522。Wada (1993) より, 窒素1kg のエネルギー量は73.84MJ である。
k4	0.606233766	農家が摂取したエネルギー量は全て農業活動に使用すると仮定した。はじめに信濃他 (出村代表: 2001) より, 弄石屯の住民が摂取しているエネルギー量 (食料購入分のエネルギー量は含まれてないため, 購入食料分の1,108.43kcal/人を加える必要がある) 2,234kcal/人・日を推計した。しかし, 一般的に供給エネルギーによる換算値より, 実際の摂取エネルギーは300~600kcal/人・日分 (非機械化であるため, 600kcal を採用) 低くなるとされているため, その分を控除して推計した。次に, 弄石屯の農業従事者は57.6人であり, 耕種作物と家畜への労働力エネルギーの配分比率は, 耕種作物: 家畜肥育=389:91である (農家の労働時間は8時間であるものとした)。家畜肥育の労働時間は大久保 (正) 他 (出村代表: 2000) より推計した)。さらに, k4は農家が摂取するエネルギー量のうち耕種作物生産に割く労働力 (エネルギー量) を表すので, k4=(2,234+1,108.43-600)/0.24×57.6×365×(389/480)×7,380,000/QP となる。つまり(2,234+1,108.34-600)/0.24はエネルギー量をジュールに変換している。57.6×365×(389/480)は労働者数×年間×労働力エネルギーの配分比率である。7,380,000は Transformity である。
k5	2.44156 E - 47	生産される耕種作物生産のエネルギー量である太陽, 雨, 窒素, 労働力のエネルギー量の合計値と, その合計値から農産物の熱供給に利用されるエネルギー量割合から k5 を推計した。k5=(82,628,184/0.24×85,187)/(JS×JR×QN×QP)。82,628,184/0.24は弄石屯内で生産された食料エネルギー量 (cal) をジュールに変換した値である。85,187は Transformity である。
k6	0.03125	k1と同様の方法で推計した。k6=0.05 (77.5/124)
k7	0.007294183	大久保他 (出村代表: 2003) より, 弄石屯の森林現存量は3171t である。森林が必要とする降雨量は現時点で推計することができなかった。しかし, 『Handbook of Emergy Evaluation』によれば, 森林バイオマスの役40%は水分であることから, 森林現存量に0.4を乗じて必要な水量割合 k7=(3,171,000×0.4)/173,892,000を推計した。173,892,000は k2でも使用しているが, 弄石屯の年間降雨量である。
k8	1.52096 E - 15	エネルギー・資源学会編『エネルギー・資源ハンドブック』の薪炭の熱量は5,000kcal である。大久保他 (出村代表: 2003) より, 弄石屯における森林資材の純生産量が317t/年であることから森林の成長エネルギー量と, 森林の成長に投入されたエネルギー量の比率から推計した。k8=(317,000×5,000)/(太陽 (JS)×雨 (JR))。
k9	0.2909717	貯蔵されている耕種作物エネルギー量と家畜肥育のために消費されるエネルギー量の関係から推計した。弄石屯集落が消費したエネルギー量は80,141,544kcal である。消費したエネルギー量は, 出村他 (出村代表: 2003) の Ecological Footprint の計算結果と科学技術庁資源調査会編『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』, 『食品成分表』を用いて計算した。また耕種作物の消費エネルギー量の30%は家畜肥育に費やされると仮定しているため, k9=(80,141,544×0.3/0.24)×85,187で推計した。85,187は Transformity である。
k10	0.68187921	k9と同様の方法で推計した。農家が消費する耕種作物のエネルギー量の70%は農家が消費すると仮定した。k10=(80,141,544×0.7/0.24)×85,187。
k11	9,74532 E - 06	出村 (出村代表: 2003) と科学技術庁資源調査会編『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』から, 家畜生産に必要な野草 (ツル, 葉) データ量とエネルギー量を推計した。家畜が消費する野草量のエネルギー量は7,081,800,000である。よって, k11=7,081,800,000/QF。
k12	0.01948912	大久保他 (出村代表: 2003) によると, 弄石屯の森林から農家に流れるエネルギー使用料は206t/年であった。また, 弄石屯で導入している改良釜の熱効率は約30%である (薪の使用は主に調理などの燃料として使用されているため)。k12=((206×1,000×5,000×0.3)/0.24×11,000)/QF。11,000は Transformity である。

表10 Transformity 及び係数選択の採用方法 (2/2)

変数	Transformity と変数	採用理由
k13	0.141818182	k4と同様の方法で、全労働時間：耕種作物への投下労働時間：家畜肥育への投下労働時間=480：389：91の比率から推計した。 $k13 = (2,234 + 1,108.43 - 600) / (0.24 \times 3.6 \times 16 \times 365 \times (91/480) \times 7,380,000)$
k14	1.86663E-30	出村他(出村代表：2003)のEcological Footprint分析結果と科学技術庁資源調査会編『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』、『食品成分表』を用いて、家畜の年間肥育量(増加した体重)並びに、各肉類のエメルギー量 $9.42889E+13$ を求めた。さらに家畜肥育に使用した全エメルギー量との割合からk14を推計した。 $k14 = (9.42889E+13) / (QC \times QF \times QP)$ 。
k15	0.917082244	出村他(出村代表：2003)より、弄石屯の農家へ流入した家畜のエメルギーは自家消費分 $4,091,850$ kcal、販売分 $5,605,794$ kcalである。 $k15 = ((5,605,794 + 4,091,850) / 0.24 \times 2,140,000) / QL$ 。 $2,140,000$ はTransformityである。
k16	0.034750328	k3と同様の計測により、実際に生活用水に使用した水量÷年間降雨量により推計した。つまり、 $k16 = (12,360 \text{ (m}^3\text{)} / 173,892 \text{ (m}^3\text{)}) \times 0.4889$ より推計した。橘他(出村代表：2003)より、 0.4889 は総使用量のうち生活用水として使用した水量の割合である。 0.5111 は農業用水に使用している。
k17	8.22296E-18	農家が燃料として使用する森林のエメルギー量は $1.41625E+13$ である。k17は森林の成長エメルギー量と農家人口に影響を受ける。農家人口(農家の貯蓄エメルギー量)が増えれば、薪の消費量も増えるため、 $k17 = (1.41625E+13) / (QF \times QP)$ として推計した。
k18	0.006718606	出村他(出村：2003)と科学技術庁資源調査会編『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』、『食品成分表』を用いて、系外から移入した財のエメルギー量を推計した。主に移入している財は食料品、灯油などである。各財のエメルギー量は、食料品(耕種作物、家畜などの直接投入エネルギー) = $31,152,534$ kcal、灯油(111.68 kg) = $1,116,800$ kcal、衣類(中衣、肌着、靴下、寝具、タオル男女大小別)一人あたり年4回購入すると仮定した) = $101,694,700$ kcalとなった。その結果、外部からの移入エメルギー量は $57,693,014$ kcal/年となる。その値にTransformityを掛けると移入されるエメルギー量は $1.59237E+13$ となる。このエメルギー量と農家に蓄えられるエメルギー量の関係からk18を推計した。 $k18 = (1.59237E+13) / QP$ 。
k19	4.38702E-75	k3と同様の計測により、実際に生活用水に使用した水量÷年間降雨量により推計した。つまり、 $12,360 \text{ (m}^3\text{)} / 173,892 \text{ (m}^3\text{)}) \times 0.4889$ より推計した。 0.4889 は総使用量のうち生活用水として使用した水量の割合を表す。
k20	0	$k20 = (k17 - QF \times k12) / QP$ より推計した。
k21	0.021126389	農家から弄石屯外へ移出されるエメルギー量と農家に蓄えられるエメルギー量の関係から推計した。そのため、 $k21 = (243,360 / 0.24 \times 85,187 + 5,605,794 / 0.24 \times 2,140,000) / QP$ となる。 $243,360 / 0.24 \times 85,187$ は耕種作物として移出されるエメルギー量(J)に $85,187$ のTransformityを掛けた値である。また $5,605,794 / 0.24 \times 2,140,000$ は家畜として移出されるエメルギー量(J)に $2,140,000$ のTransformityを掛けた値である。
k22	0.25201039	k4とk19を利用して推計した。弄石屯農家調査より、 4.8125 人/世帯のうち、農業従事者が 3.6 人/世帯であり非農業従事者が 1.2125 人/世帯である。 1.2125 人/世帯のエメルギー量が労働力として使用されずに消費されている。その消費エメルギー量は $5.97287E+14$ である。そのため $k22 = (59728E+14) / QP$ として推計される。
k23	0.0775388	弄石屯の農家調査データより、死亡した家畜が持つエメルギー量と家畜肥育のエメルギー量の関係から推計した。死亡した家畜のエメルギー量は $3,416,375$ Jである。そのため $k23 = (3,416,375 \times 2,140,000) / QL$ となる。 $2,140,000$ はTransformityである。

い。実際、窒素循環を組み込んだモデルを用いてシミュレーションを行ってみたが、増減を激しく繰り返す振動を行い計測自体が安定しなかった。そのため、本来はモデルに組み込む必要があるものの、窒素を耕種作物、家畜、農家といった循環経路の中に入れていない。しかし、出村(2003)の中で波多野は窒素フロー分析を行っており、その結果、弄石屯は既に窒素過多の状態であり、耕種作物が吸収可能な窒素量の倍以上が排出されていることが明らかになった。そのため、今回は窒素を弾丸型の弄石屯の生産者単位外において、植物に必要な窒素を恒常的に得ることが可能なモデルにした。

Transformityの項目がないものは全て1とし、エクセルギーを計測できない項目はエネルギーで代用した。

全てのカテゴリーにおいてエメルギーが増加すれば、そのカテゴリー内の個体数ないしは重量は増加、成長することを意味する。例えば、雨と太陽のエメルギーを受けると森林のエメルギーは増加する。これは単純に森林の成長量を表すことになる。

以上、本シミュレーションは上記8つの仮定条件の下で行っている。

D. シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果では、耕種作物(図20

参照), 家畜 (図 21 参照), 農家 (図 22 参照) のカテゴリー群と, 森林 (図 23 参照) のカテゴリーとで異なる傾向を取ることが明らかとなった。そしてそれら結果を踏まえ, 各エメルギーの傾向を総合的に捉えた結果を図 24 と表 11 にまとめ, 考察した。

はじめに, 耕種作物, 家畜, 農家のように減少から回復へと傾向が変化したカテゴリー群について考察する。各カテゴリーは, 耕種作物→家畜→農家→耕種作物といったフィードバックループの過程を持っている。そのため, 各カテゴリー間のエメルギーは, 他のカテゴリーのエメルギーに敏感に反応するという条件に成り立っている。

a. 耕種作物のエメルギーフローシミュレーション結果

耕種作物の計測結果は 1~12 年まで減少傾向をしめしている。耕種作物の貯蔵記号に流入するエメルギー (生産に必要な水, 太陽, 窒素, 労働力などの生産要素) よりも流出するエメルギー (家畜と農家による消費量) の方が大きいためである。事実, 第三章の七百弄郷弄石屯の概要では, 家畜の飼育は増加傾向にあった。さらに, 第四章の分析結果では, 土地資源から見て環境収容力を超過している状況, つまり土地単位あたり人口が過密状態であることがわかっている。すなわち, 耕種作物のエメルギーでは, 現在の弄石屯集落の農家 (=人口分の労働力エメルギー, 以下農家と略す) と家畜を養えるだけのエメルギー規模 (生産規模) ではないことを意味する。

次に 13 年~100 年期は微増ないしは停滞 (変化なし) を続ける。これは, 12 年までの間に耕種作物, 家畜, 農家の負のフィードバックで急激に減少した結果である。耕種作物のエメルギーの急激な減少により, 過剰な家畜と農家は生活ができなくなり, エメルギー流入量=エメルギー流出量まで自然減少を繰り返すことになる。つまり, 流入と流出のエメルギー規模が同じ水準まで低下し, 耕種作物のエメルギーフローの経路と密接に関連する要素はお互いの歩調を合わせ同じペースで増加 (回復) しているものと考えられる。

最後に 100 年以降は増加傾向をしめし, 定常状態に入る。これは, 100 年期まで耕種作物のエメルギーフローの経路に関連した要素 (家畜・農家) と同じペースでエメルギーを増加 (回復) させたことが要因である。エメルギーの消費スピードを考慮しなければ, 1~12 年期で記したように減少傾向をしめすだけである。しかし, 13~100 年期の間に耕種作物の生産の基盤を整え, 正のフィードバックループにより増加傾向に転じたためと考えられる。

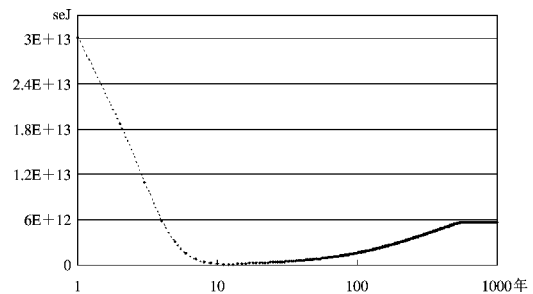


図 20 弄石屯における耕種作物の太陽エメルギーシミュレーション

註 1) 12 年目で最低値 1.361×10^{11} (seJ) をとる。
 註 2) 797 年に 5.675×10^{12} の値で停滞状態に入る。停滞状態とは移入エメルギー量と移出エメルギー量が等しくなり, エメルギーの貯蓄量が増減せず常に一定に保たれた安定状態をいう。この安定した状態は Daly (1999) のいう定常状態を表す。

b. 家畜のエメルギーフローシミュレーション結果

家畜の計測結果は 1~12 年まで減少傾向をしめしている。家畜の貯蔵記号に流入するエメルギー (飼料としての森林, 耕種作物, 労働力などの生産要素) より流出するエメルギー (農家による消費量と死亡数) の方が大きいためである。これは現在の家畜の飼育頭数は, 弄石屯のエメルギー生産規模に見合っていないためである。事実, 第三章の七百弄郷弄石屯の概要では, 家畜の飼育は増加傾向にある。図 21 を見ると, 家畜のエメルギーの減少幅が大きいのがわかる。これは, 農家の次に高濃縮されたエメルギーを消費する生物であり, 人間によって飼育頭数が管理されているためである。そのため,

耕種作物がある一定ラインを超えて減少し、不足すると家畜のエメルギーの調整（飼育頭数の調整）が始まることを表している。つまり、弄石屯で影響を一番受けやすいのは家畜肥育である。

次に13年～100年期は微増ないしは停滞（変化なし）を続ける。これは、12年までの間に耕種作物エメルギーが減少したため、食料を確保できなくなるためである。

最後に100年以降は急激に増加する。家畜へ流入する主要な要因である森林エメルギーの影響が大きいと思われる。森林エメルギーが10年～100年期以降、急激に増加している。これは家畜にとって豊富な飼料量の確保を意味する。そのため、飼育頭数管理された頭数が飼料の回復とともに従来の規模に回復することが考えられる。定常状態が耕種作物よりも高いのは、家畜が販売品として価値があり、耕種作物より贅沢品であるためと考えられる。

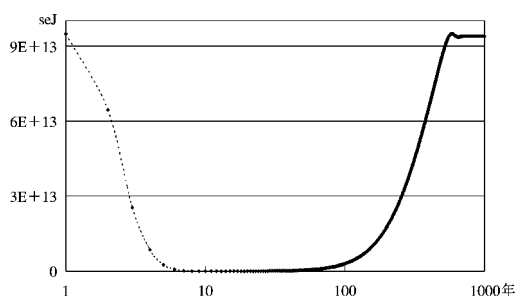


図21 弄石屯における家畜の
太陽エメルギーシミュレーション

註1) 12年目で最低値 $4.233+E9$ (seJ) をとる。
註2) 831年に $9.385+E13$ の値で停滞状態に入る。

c. 農家のエメルギーフローシミュレーション結果

農家の計測結果は1～11年まで減少傾向をしめしている。農家の貯蔵記号に流入するエメルギー（燃料としての森林、食料としての耕種作物、食料と販売のための家畜、衣服や食料といった屯集落外部からの物資）より流出するエメルギー（耕種作物と家畜への労働力、家畜の販売など）の方が大きいためである。これは現在の農家人口が、弄石屯のエメルギー生産規模

に見合っていないためである。事実、第IV章の分析結果では、七百弄郷弄石屯は過剰人口の状態にあることがわかっている。

次に12年～100年期は微増ないしは停滞（変化なし）を続ける。これは、12年までの間に耕種作物と家畜のエメルギーが減少し、農家の生活が厳しくなることを意味する。

最後に100年以降は急激に増加する。これは、森林資源の回復により、燃料を得ることが可能となり直接農家のエメルギーが増加したこと、飼料を得ることで家畜のエメルギーが回復し、結果として家畜を消費する農家のエメルギーが回復したためであると考えられる。

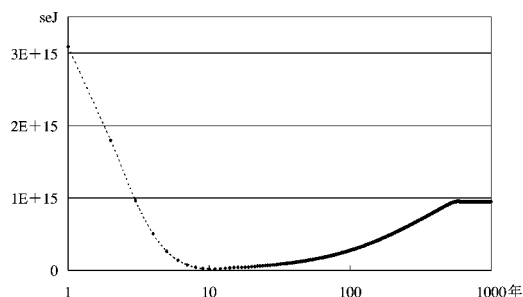


図22 弄石屯における農家の
太陽エメルギーシミュレーション

註1) 11年目で最低値 $2.278+E13$ (seJ) をとる。
註2) 820年に $9.503+E14$ の値で停滞状態に入る。

d. 森林のエメルギーフローシミュレーション結果

森林のエメルギーシミュレーション結果は、1～10年期まで微増・停滞期であった。この理由は、森林に流入するエメルギー（太陽、水といった森林成長のための要素）が流出するエメルギー（燃料や飼料としての消費量）よりも大きいためである。これは森林のエメルギー貯蔵が増加傾向にあるので、将来、森林バイオマスの回復の予兆を意味する。実際、第III章の七百弄郷弄石屯の概要では、中国の国策として退耕還林、封山育林政策が取られ、森林に与える環境負荷が少なくなってきており、森林は回復傾向にある。しかし、第IV章の最大扶養可能人口の推計結果ならびに、農家・家畜のエメルギーフローシミュレーション結果をみると、土地単位

表 11 各カテゴリーの太陽エネルギーの量的変化

	耕種作物	家畜	農家	森林
0～12年	減少	減少	減少	微増(停滞)
13～100年	停滞	停滞	停滞	増加
100年～	増加	増加	増加	増加
定常状態に入る順番	2	4	3	1

註) 定常状態に入るとは、エネルギーの移入量と移出量が等しくなり、ストック量に増減のない状態を表す。

あたりの集落の人口は最大扶養可能人口の2倍以上であり、かつ1～12年までは家畜と農家（人口分の労働力エネルギー）を養うだけの生産規模ではないことがわかっている。すなわち、森林バイオマスエネルギーの消費量が相対的に減ったとしても絶対量が多いため、流入エネルギー＝流出エネルギーという微増・停滞状況にある。

11～100年期は増加傾向にある。この理由は1～12年期まで、森林の流出エネルギーの主要因である家畜と農家が減少傾向をしめしていたためである。これにより、森林は森林のエネルギーの貯蓄基盤を整えることが可能になり、10年期以降は増加傾向を示している。つまり、更なる森林生態系の回復が予想される。

最後に100年以降は指数的に増加傾向をしるす。これは11～100期までに森林のエネルギーの貯蓄盤石を整えたことが原因と考えられる。それ以降は全体のエネルギーフローを通して流入＝流出となる定常状態まで増加しつづける。

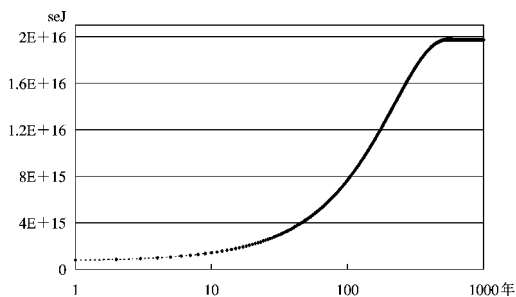


図 23 弄石屯における森林の太陽エネルギーシミュレーション

註 1) 638年に1.975+E16 (seJ) の値で停滞状態に入る。

e. 各エネルギーシミュレーション結果の比較

最後に、弄石屯集落における定常状態について考察する。図24と表11から、各カテゴリーの太陽エネルギーの合計値が定常状態に入る時期は、森林のエネルギーの貯蔵が定常状態に達し、連鎖的に耕種作物、家畜、農家のエネルギーの貯蔵も定常状態に入る時であることがわかる。このシミュレーションでは、森林の回復如何により、現状よりも環境収容力の水準を高めることが可能であることが伺える。環境収容力が現状よりも高いことは、使用できるエネルギーが増えることを意味する。これは、単に人口分の労働力エネルギーの確保（人口を増やせる量的解釈）だけでなく、よりエネルギーの濃縮された財を蓄えることも可能にする（テレビ

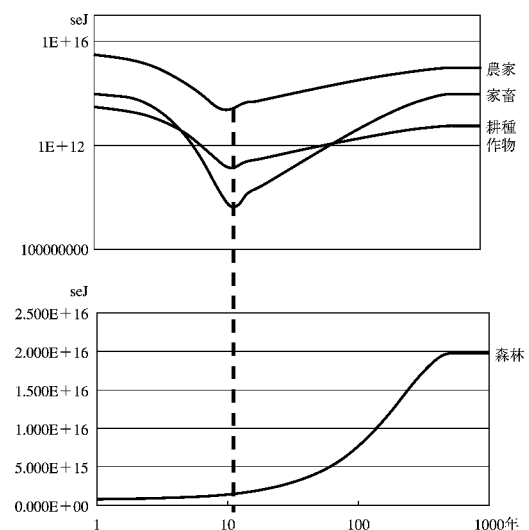


図 24 森林のエネルギー貯蔵関数と他のエネルギー貯蔵関数の関係性

や車など質的解釈)。ここでは家畜が100年期以降増加しているが、家畜販売による貨幣の獲得も可能である。

E. 小 活

本章では、弄石屯地域を対象に太陽エネルギーに標準化した独自の単位であるエメルギーを用い、自然生態系と社会経済システム間に流れるエメルギー量のシミュレーションを行った。以下、耕種作物、家畜、農家、林地の各カテゴリーについてのシミュレーション結果を考察する。

耕種作物のエメルギーについてまとめると、耕種作物のシミュレーション結果は減少から停滞、そして増加といった傾向をしめしていた。初期の段階で耕種作物のエメルギーが減少する理由は、耕種作物に流入するエメルギー（生産に必要な水、太陽、窒素、労働力などの生産要素）よりも流出するエメルギー（家畜、農家の消費量）の方が大きいためである。事実、弄石屯では家畜の飼育は増加傾向にあり（第Ⅲ章参照）、土地単位あたりの人口が過密状態であった（第Ⅳ章参照）。そのため、現在の消費水準のまま生活をおこない続けられれば、過剰状態にある家畜飼育頭数と人口により、耕種作物のエメルギーは消費し尽くされてしまう。つまり、耕種作物のエメルギーでは、現在の弄石屯集落の農家と家畜を養えるだけのエメルギー規模（生産規模）ではないことが明らかとなった。また、耕種作物のエメルギー量の減少は、耕種作物から家畜や農家へ流入するエメルギー量の減少を意味し、この流入するエメルギー量の減少がさらに家畜や農家から流出するエメルギー量の減少（耕種作物へ流入されるエメルギー量の減少）を招く。その結果、耕種作物、家畜、農家の3カテゴリー間を循環するエメルギー量の流れは少なくなり、流入エメルギーと流出エメルギーの量的関係が等しい停滞状態へと移行する結果となった。

家畜のエメルギーについてまとめると、家畜のシミュレーション結果は、減少から停滞、そして増加という傾向をしめしていた。初期の段階で家畜のエメルギーが減少する理由は、家畜に流入するエメルギー（飼料としての森林資源、

食料としての耕種作物、農家からの労働力）より流出するエメルギー（販売品としての家畜、食料としての家畜）の方が大きいためである。これは、家畜の肥育のために給餌される飼料のエメルギーといった流入エメルギーよりも、家畜が販売・消費されるエメルギーといった流出エメルギーの方が多いためである。また、家畜のエメルギー量の減少は、家畜から農家へ流入するエメルギー量の減少を意味し、この流入するエメルギー量の減少がさらに農家から流出するエメルギー量の減少（家畜へ流入する直接的なエメルギー量の減少、農家から耕種作物へ流れ最終的に家畜へ流入する間接的なエメルギー量の減少）を招く。その結果、耕種作物、家畜、農家の3カテゴリー間を循環するエメルギー量の流れは少なくなり、流入エメルギーと流出エメルギーの量的関係が等しい停滞状態へと移行する結果となった。

農家のエメルギーについてまとめると、農家のシミュレーション結果は耕種作物、家畜同様、減少から停滞、そして増加といった傾向をしめしていた。初期の段階で農家のエメルギーが減少する理由は、農家に流入するエメルギー（燃料としての森林、食料としての耕種作物、食料や販売目的の家畜、衣服や食料といった屯集落外部からの物資）より流出するエメルギー（耕種作物と家畜への労働力、家畜を含む財の移出など）の方が大きいためである。これは、弄石屯の土地あたりの人口が過剰な状態にある現状を考えると、自然生態系を考慮した弄石屯集落内を循環する利用可能なエメルギー量以上に、弄石屯の農家のエメルギー消費量が多いことを意味する。つまり、現在の自然生態系を含んだ弄石屯集落内を循環するエメルギー量では、現在の生活水準のまま現在の人口を維持し続けることは不可能であることが明らかとなった。また、耕種作物カテゴリーと家畜カテゴリー同様、農家のエメルギー量の減少は、農家へ耕種作物と家畜へ流入するエメルギー量の減少を意味し、さらにこの流入するエメルギー量の減少が耕種作物と家畜から流出するエメルギー量の減少（農家へ流入する直接的なエメルギー量の減少）を招く。その結果、耕種作物、家畜、農家

の3カテゴリー間を循環するエメルギー量の流れは少なくなり、流入エメルギーと流出エメルギーの量的関係が等しい停滞状態へと移行する結果となった。

森林のエメルギーについてまとめると、森林のシミュレーション結果は、微増・停滞から増加といった傾向をしめしていた。初期の段階で森林のエメルギーが微増・停滞する理由は、森林に流入するエメルギー（太陽、水といった森林成長のための要素）が流出するエメルギー（燃料や飼料としての消費量）より若干多いか同程度のためである。これは、農家が燃料として使用する森林資源消費量と家畜が飼料として使用する森林資源量よりも、弄石屯集落内の森林資源成長量の方が多い。すなわち森林資源量が成長していることを意味し、将来森林資源の成長（回復）の予兆を表している。この背景には、過度な森林伐採から環境問題を引き起こしたという反省から、森林保護政策が実施されている点も影響している。森林保護政策により、森林資源の利用は日常の燃料として使用するに留り、過伐採されることはなくなった。また、森林のエメルギー量の増加は、さらなる森林資源量の成長を意味する。次に、微増から増加傾向に転じる理由は、家畜と農家といった森林の消費主体が初期の段階では過剰な規模（人口、飼育頭数）であったため、森林の成長量が制限されていた。しかし、耕種作物から流入するエメルギー量の減少に伴い家畜の飼育頭数と農家人口が減少すると、森林資源への影響力も減り、森林のエメルギーは増加に転じることとなった。

最後に、耕種作物、家畜、農家のエメルギーが増加する理由について、森林のエメルギーの増加と絡めて考察する（図24参照）。図24をみると、耕種作物、家畜、農家に関するカテゴリーは、過剰な家畜飼育頭数と農家人口を維持するだけのエメルギーを確保できないために、3カテゴリーのエメルギー量は減少傾向をしめし、停滞期に移行する結果となっていた。一方、森林のエメルギー量は、停滞から増加傾向をしめしていた。これは、森林を使用する家畜と農家という消費主体が減少したことにより、森林資

源の消費量が減少したためである。さらに森林のエメルギーが増加することにより、森林資源を飼料として使用する家畜と燃料として使用する農家の各エメルギーも連動的に増加した。家畜のエメルギーと農家のエメルギーの増加は、減少した家畜の飼育頭数と農家の人口の回復を意味する。家畜のエメルギーの増加は、家畜を食料、販売目的に消費する農家のエメルギー量も増加させ、結果として耕種作物のエメルギーも増加させることになる。

つまり、現在の自然生態系の状況を考慮したエメルギーフローモデルのシミュレーションでは、農家エメルギーの減少が意図するように、現在の弄石屯の農家人口を維持することは困難であることが明らかとなった。しかし、森林のエメルギーが増加・定常状態に移行すると、森林資源を消費する家畜、農家のエメルギーも連動して増加・定常状態に移行するように、家畜や農家の活動量は森林生態系のエメルギー量に規定されることが明らかとなった。森林のエメルギーの定常状態への移行は、他のカテゴリーのエメルギーも定常状態に移行させている。この定常状態が、自然生態系が許容できる範囲内での持続可能な状態を表している。そのため、人工資本と自然資本の代替を一時的に認めず、コンスタントな自然資本ルールに従う“強い持続性”の観点から持続性を考えるなら、農家の活動の起点となる森林生態系の一定量（定常状態量）の確保が必要であることが明らかになった。

註

*36 エメルギーとはある任意のエネルギーに標準化されたものを言う。そのため、石油エネルギーや水力エネルギーなどに標準化することも可能である。しかし、各エネルギーに標準化するのに必要な Transformity を独自に求めなければならない。一般的には Odum の太陽エネルギーに標準化したものが用いられている。

*37 なお本論文で「モデル」という言葉を使用した時は、経済学で使用される数式ではなく、エメルギーの流れを視覚的に表した図

である。

- *38 Odum は本文中では Transformity の順番と書いているが、モデル作成の段階では、Transformity はわからないので、エントロピーの低い順番からと意識している。
- *39 エネルギーがA, B, Cという場所をA→B→Cの順に流れる場合、BはAからのエネルギーを受け取り(Bへ流入)、BはCへエネルギーを送る(Bから流出)ことになる。ここでBに注目すると、エネルギー流入>エネルギー流出の状態であればBは増加傾向、エネルギー流入<エネルギー流出の状態であればBは減少傾向、エネルギー流入=エネルギー流出の状態であればBは定常となる。
- *40 この矢印は同質のエネルギーであるときのみ、矢印同士が分離・合流することができる。

第VI章 要約と結論

本論文の目的は、従来の環境経済学とは異なるエコロジカル経済学の視点から、発展途上地域の人間活動の持続性評価を行い、新しい経済発展の方向性を示唆することであった。

第I章では、本論文の目的とその背景、既存研究の限界などを説明した。発展途上地域は、環境問題と貧困問題という密接に関連しあった問題に悩まされている。環境問題により発展途上地域の生活基盤をなす自然生態系が破壊され、農業や林業といった経済活動が十分に行えず貧困に陥っている。その結果、住民は生活のために自然資源の過剰な採取や労働力を確保しようと多産を行うことになる。さらに、自然生態系の持つ資源供給能力を考慮せずにおこなう資源消費活動と人間の増加は、生活基盤である自然生態系への環境負荷を増大させることになる。そして自然災害への耐久性を欠いた自然生態系は新たな環境問題を生むことになる。このような環境問題と貧困問題の悪循環を打破するために、自然生態系が持つ「資源供給能力」と「廃棄物浄化能力」の限界点と現時点での「人間活動の規模」がどのような状態にあるのかを知り、その限られた条件の下での新しい経済活

動を示唆するような研究が必要であることを示した。そこで本論文では、長い間、自然生態系の機能を壊すことなく自然資源を人間活動に有効利用してきたが、現在は過度な森林伐採により自然生態系の機能が失われつつある経緯を持つ中国西南部七百弄郷集落を対象に、エコロジカル経済学的な視点から持続性を評価し、今後の経済発展への方向性を示唆することを目的とした。

第II章では、持続性の概念から環境経済学とエコロジカル経済学を整理した。持続性の定義は、ブルントラントの定義中のニーズ（優先的に貧困者に与えられるべき必要不可欠な物）の解釈により、4つの持続性概念に分かれていることを説明した。またその分かれた持続性に従ったアプローチに、環境経済学とエコロジカル経済学があることも解説した。エコロジカル経済学は日本においてまだ認知度が低いため、環境経済学との相違点を明らかにした。エコロジカル経済学の依拠する持続性概念は、自然資本と人工資本の一方的な代替関係を認めず、一定量以上の自然資本の確保が必要であるとするコンスタントな自然資本ルールに従う“強い持続性”であった。なお本論文の持続性評価は、エコロジカル経済学の強い持続性の視点から分析を行った。

第III章では、七百弄郷の概要と歴史的変遷や事例の位置付けを紹介した。本論文で取り上げた調査対象地域は、高い山々に囲まれ、外部との交流が少ない閉鎖的な特殊事例である。しかし、このような利便性の悪い閉鎖的な立地条件は、自然科学・社会科学両面のデータの移出入関係が把握しやすく、外部からの影響を受けにくい分析結果を与えてくれる可能性を持つ。また、本論文の研究対象である七百弄郷は、永きに渡り、自然生態系を壊すことなく、自然資源が人間活動に利用されてきた集落である。現在、七百弄郷では先進地域と発展途上地域間の所得や福祉などの生活水準の格差是正を目的に開発が行われている。しかしながら、従来の経済開発では、先進国の二の轍を踏むことになる。それを回避するためにも、発展途上地域周辺の自然生態系を含めた経済開発が必要であり、具体

的にどのようなものであるかを提示することが重要である。そこで、自然生態系の持つ資源供給量と廃棄物浄化量の再生産速度の限界量を表す環境収容力概念に基づいた Ecological Footprint 分析と Emergy Flow Model 分析をおこなう重要性を示した。

第Ⅳ章では、Ecological Footprint 分析を用いて、七百弄郷の4つの屯集落の最大扶養可能人口（ある地域で環境問題を発生させることなしに最大何人生活できるか）を推計し、Ecological Footprint 結果の内訳から中国農村地域の実態を明らかにした。4つの屯集落では土地単位面積あたりの人口が過剰な状態であり、各集落で1.4～2.3倍の過剰人口を抱えていることが明らかとなった。また、Ecological Footprint の内訳と Ecological Footprint の移出入の結果から、化学肥料と有機肥料を生産するために確保しなければならない農地・林地バイオマスに関する Ecological Footprint が高いことも明らかにした。さらに、各集落とも家畜を販売し、化学肥料を購入するという活動をおこなっていた。すでに大量の余剰窒素が農地に残っている4つの屯集落において、農家の化学肥料の購入は窒素汚染という環境問題をさらに悪化させる恐れがあることも明らかにした。

第Ⅴ章では、自然生態系と生産・消費・廃棄といった人間活動の場を往来するエネルギーに注目し、七百弄郷を対象にエメルギーフローモデルのシミュレーションを行った。その結果、現在の自然生態系の状況を考慮したエメルギーフローモデルのシミュレーションでは、農家のエメルギー量の減少から、現在の弄石屯の農家人口を維持することは困難であることが明らかとなった。また、森林のエメルギー量の増加は、耕種作物、家畜、農家のエメルギー量の増加を促すことから、家畜や農家の活動量は森林生態系のエメルギー量に規定されることも明らかとなった。そのため、人工資本と自然資本の代替を一方的に認めず、コンスタントな自然資本ルールに従う“強い持続性”の観点から考えると、経済活動を含む持続的な人間活動をおこなうには、まず森林生態系の一定量（定常状態量）の確保が必要であることも明らかとなった。

これらの結果から、発展途上地域の一事例の考察ではあるが、自然生態系の質、特に森林資源量のバランスを考えることが人間活動の前提条件であり、物資の移出入を改善させる技術開発が必要であることがわかった。実際に七百弄郷においても、貧困解消のために開発政策が進められており、開放経済への移行は不可避である。また、開発政策は、これら弄集落の自然生態系に影響を与えつつある。これまで閉鎖的生態系・生活圏であった弄集落において、人間活動によって減少し、劣化した森林生態系を修復し、人間活動と共生し得る生態系を再構築することが緊急に必要とされる。

以上のことは他の発展途上地域に対しても同様に当てはまるといえよう（ただし、現実の実施にあたっては、留意すべき点も多い）。よって、自然生態系が供給する窒素や森林資源などの様々なバイオマスを循環利用し、経済活動を含む人間活動の起点となる森林の再構築、ならびに人間活動面から求められる一定量以上の森林資源を確保していくことが、発展途上地域における新しい持続的な発展方向の一つと結論できる。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、指導教官である出村克彦教授（北海道大学大学院農学研究科）、山本康貴助教授（北海道大学大学院農学研究科）には、構想段階から最終段階に至るまで終始多大なるご指導をいただきました。心から深く御礼を申し上げます。

副査をお引き受けくださった波多野隆介教授（北海道大学大学院農学研究科）、吉田文和教授（北海道大学大学院経済学研究科）からは、分野の違った視点から多くの御教授をいただきました。心から感謝の意を申し上げます。

農業経済学講座の黒河教授、長南教授、坂下教授、三島教授、志賀助教授、近藤助教授、朴助教授、飯澤助教授の諸先生方からは、貴重なご助言と暖かい励ましをいただきました。心から御礼を申し上げます。

本論文の作成にあたっては、佐藤和夫講師（酪農学園大学）、林岳研究員（農林水産政策研究所）

との共同研究がなければ本論文は完成しなかったと思われます。また、佐藤和夫講師、林岳研究員からも多くのご指導をいただきました。心から御礼を申し上げます。

さらに、比較農政学分野の大学院生や事務職員の方々、ならびに他分野の大学院諸兄及び事務職員の方々にも論文をまとめる上で励ましの御言葉と多大なご協力をいただきました。心から御礼を申し上げます。

最後に、本論文は日本学術振興会未来開拓学研究推進事業（複合領域）「アジアの環境保全」プロジェクトの研究成果の一部でもあります。本論文の分析を行うにあたり、貴重なデータを惜しみなく提供していただいた各グループの研究者の先生方には心から感謝の意を申し上げます。カウンターパートとして中日共同研究管理オフィスである広西壮族自治区科学技術庁、広西壮族自治区農業科学院、広西壮族自治区大化県の研究者の方々からも惜しまないご協力をいただきました。心からお礼申し上げます。

引用・参考文献

- [1] Asako, K. (1980): "Economic Growth and Environmental Pollution Under the Maxi-min Principle," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.7, pp. 157~183.
- [2] Alier, J. M. (1987): *Ecological Economics*, (工藤秀明(1991):『エコロジー経済学—もう一つの経済学の歴史—』, 新評社.)
- [3] Beltratti, A. (1996): *Models of Economic Growth with Environmental Assets*, (夏目隆監修(2001):『経済成長と環境資産』, 同文館.)
- [4] Bromley, D. W. ed. (1995): *Handbook of Environmental Economics*, Blackwell, Cambridge (USA).
- [5] Brown, L. R. (2001): *Eco-Economy*, W W Norton & Co Inc.
- [6] Brown, M. T. and Buranakarn, V. (2003): "Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options," *Resources Conservation & Recycling*, Vol.38, pp. 1~22.
- [7] Brown, M. T. and Ulgiati, S. (1999): "Emergy Evaluation of Natural Capital and Biosphere Services," *Ambio*, Vol.28(6), pp. 1~24.
- [8] Brown, M. T. (2001): *Handbook of emergy evaluation: Folio # 3 Emergy of Ecosystem*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [9] Bryden, J. M. (1994): *Towards Sustainable Rural Communities*, (岡部四郎・志村英二訳(1998):『持続的農村社会を目指して』, 農文協.)
- [10] Cattom, W. R. (1982): *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change*, University of Illinois Press, Urbana (USA).
- [11] Chambers, N., Simmons, C. and Wackernagel, M. (2000): *Sharing Nature's Interest*, Earthscan, London (UK).
- [12] Cohen, E. J. (1995): *How Many People Can the Earth Support?*, (重定南奈子訳(1998):『新「人口論」—生態学的アプローチ—』, 農文協.)
- [13] Costanza, R. (1989): "What is Ecological Economy?," *Ecological Economics*, Vol.1, pp. 1~7.
- [14] Clark, C. W. (1990): *Mathematical Bioeconomics*, John Wiley & Sons, New York (USA)
- [15] Daily, G. C. and Ehrlich, P. R. (1992): "Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity," *Bioscience*, Vol. 42(10), pp. 761~771.
- [16] Daly, H. E. and Cobb, J. B. Jr. (1989): *For the Common Good*, Beacon, Boston (USA).
- [17] Daly, H. E. (1996): *Beyond Growth*, Beacon, Boston (USA).
- [18] Daly, H. E. (1999): *Ecological Economics and the Ecology of Economics: Essays in Criticism*, Edward Elgar,

- Cheltenham (UK).
- [19] Drengson, A. and Yuichi, I. ed. (1995): *The Deep Ecology Movement: An introductory Anthology*, (井上有一監訳 (2001):『ディープ・エコロジー — 生き方から考える環境の思想 —』, 昭和堂.)
- [20] Federici, M., Ulgiati, S., Verdesca, D. and Basosi, R. (2003): "Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems The case of Siena, Italy," *Ecological Indicators*, Vol. 3, pp. 155~ pp. 169.
- [21] Fernow, B. E. (1902): *Economics of Forestry: a reference book for students of political economy and professional and lay students of forestry*, Crowell, NewYork (USA).
- [22] Folke, C., Jansson, A., Larsson, J. and Costanza, R. (1997), "Ecosystem Appropriation by Cities," *Ambio*, Vol. 26(3), pp. 196~172.
- [23] Folke, C., Kautsky, N., Berg, H., Jansson, A. and Troell, M. (1998), "The Ecological Footprint Concept for Sustainable Seafood Production: A Review," *Ecological Applications*, Vol. 8(1), pp. S63~S71.
- [24] Freeman III, A. M. (1993): *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*, Resources for the Future, Washington DC (USA).
- [25] Gilbert, N. and Troitzsch, K. G. (1999): *Simulation for the Social Scientist*, (井庭崇・岩村拓哉・高部陽平訳 (2003):『社会シミュレーションの技法』, 日本評論社.)
- [26] Goodland, R., Daly, H. E., Serafy, S. E. and Droste, B.V. ed. (1991): *Environmentally Sustainable Economic Development: Building on Brundtland*, UNESCO, Belgium.
- [27] G-Roegen, N. (1971): *The Entropy Law and the Economic Process*, (高橋正立他共訳 (1993):『エントロピー法則と経済過程』, みすず書房.)
- [28] Han Chun-Ru and Frank G. (1984): "Input-Output Relationships of North China Collective Farms," *CIHEAM-Options Mediterraneennes*, IAMZ-84/1, pp. 137~pp. 145.
- [29] Hans, I. (1985): *Natur in der Ökonomischen theorie*, (栗山純訳 (1993):『経済学は自然をどうとらえてきたか』, 農文協.)
- [30] Hardin, G. (1986): "Cultural carrying capacity: a biological approach to human problems," *Bioscience*, Vol. 36(9), pp. 599~606
- [31] Hawken, P., Lovins, E. B. and Lovins, L. Hunter. (1999): *Natural Capitalism-Creating The Next Industrial Revolution-*, (佐和隆光監訳(2001):『自然資本の経済学』, 日本経済新聞社.)
- [32] Hayward, T. (1994):*Ecological Thought: An Introduction*, (小倉武一訳 (1996):『生態の思潮』, 農文協.)
- [33] Heartwick, J. (1977): "Intergenerational Equity and Investing of Rents from Exhaustible Resources," *American Economic Review*, Vol. 66, pp. 972~974.
- [34] Johansson, P-O. (1987): The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits, (嘉田良平監訳 (1994):『環境評価の経済学』, 多賀出版.)
- [35] Kolstad, C. D. (1999): *Environmental Economics*, (細江守紀・藤田敏之監訳 (2001):『環境経済学入門』, 有斐閣.)
- [36] Lappé, F. M. (1991): *Diet for a Small Planet*, Ballantine Books, pp. 69~70.
- [37] Leitmann, J. (1999): *Sustaining Cities*, McGraw-Hill, pp. 106~109, pp. 183~185.
- [38] Leopold, A. (1949): *Sand County Alma-*

- nac*, Oxford University Press, Oxford.
- [39] Lowrance, R., Hendrix, P. F. and Odum, E. P. (2003): "A hierarchical approach to sustainable agriculture," *American journal of Alternative Agriculture*, Vol. 1(4),.
- [40] Meadows, D. H., Mwandows, D. L., Randers, J. and Behrens, III W.W. (1972): *The Limits to Growth—A Report for THE CLUB OF ROMA'S Project on the Predicament of Mankind*—, (大来佐武朗監訳 (1972) : 『成長の限界—ローマクラブ「人類の危機」レポート—』, ダイヤモンド社.)
- [41] Meadows, D. H., Mwandows, D. L. and Randers, J. (1992): *Beyond the Limits*, (茅陽一監訳 (1992) : 『限界を超えて—生きるための選択—』, ダイヤモンド社.)
- [42] Mitchell, R. C. and Carson, T. C. (1989): *Using Surveys Value Public Goods: The Contingent Valuation Method*, (環境経済評価研究会訳 (2001) : CVMによる環境質の経済評価—非市場財の価値計測—)
- [43] Norgaard, R. B. (1990): "Economic Indicators of Resource Scarcity: A Critical Essay," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 19, pp. 19~25.)
- [44] Norgaard, R. B. (1994): *Development Betrayed*, (竹内憲司訳 (2003) : 『裏切られた発展』, 勁草書房.)
- [45] Odum, H., T. (2000): *Handbook of emergy evaluation: Folio # 2 Emergy of Global Processes*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [46] Odum, H., T., Brown, M. T. and Williams, S.B. (2000a): *Handbook of emergy evaluation: Folio # 1 Introduction and Gloval Budget*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [47] Odum, H. T and Odum, E. C. (2000b): *Modeling for all scales*, Academic press, Sandiego (USA).
- [48] Odum, H. T. (1971): *Environment, Power, and Society*, John Wiley & Sons, NewYork (USA).
- [49] Parker, P. (1998): "An Environmental Measure of Japan's Economic Development," *Geographische Zeitschrift*, 86. Jg. • Heft2 • site. 106~119.
- [50] Pearce, D. and Atkinson, G. D. (1993): "Capital theory and the measurement of sustainable development: an indicator of 'weak' sustainability," *Ecological Economics*, Vol. 8, pp. 103~108.
- [51] Pearce, D., Markandya, A. and Barbier, E. B. (1989): *Blueprint for a Green Economy*, Earthscan, (和田憲昌訳 (1994) : 『新しい環境経済学—持続可能な発展の理論—』, ダイヤモンド社.)
- [52] Rees, W. E. (1996): "Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability," *Population and Environment*, Vol. 17(3), pp. 195~213.
- [53] Rees, W. E. (1999): "Commentary Forum Consuming the earth: the biophysics of sustainability," *Ecological Economics*, Vol. 29, pp. 23~27.
- [54] Serrano, S., Domingos, T., and Simoes, A. (2002): "Energy and Emergy Analysis of Meat and Dairy Production in Intensive, Extensive and Biological Systems," Fifth international ESEE conference: FRONTIERS 2, Tenerife, Spain, pp. 12~15.
- [55] Solow, R. (1986): "On the Intergenerational Allocation of Natural Resources," *Scandinavian Journal of Economics*, Vol. 88(1), pp. 141~149.
- [56] Timmerman, P. ed. (2001): *Encyclopedia of Global Environmental Change: Social and Economic Dimensions of Global Environmental Change*, John

- Wiley & Sons.
- [57] Turner, R. K., Pearce, D. and Bateman, I. (1994): *Environmental Economics: An Elementary Introduction*, (大沼あゆみ訳(2001)：『環境経済学入門』, 東洋経済.)
- [58] Van Kooten, G. C. and Bulte E. H. (2000): *The Economics of Nature: Managing Biological Assets*, Blackwell, Malden (USA).
- [59] Veeman, T. S. (1989): "Sustainable Development : Its Economic Meaning and Policy Implications," *Canadian Journal of Agricultural Economics*, Vol. 37(December), pp. 875~886.
- [60] Wackernagel, M. and Rees, W.E. (1995): *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island (Canada).
- [61] Wackernagel, M. and Rees, W. E. (1998): "Perceptual and Structural barriers to investing in Natural Capital: Economics from an Ecological Footprint perspective," *Ecological Economics*, Vol. 20, pp. 3~24.
- [62] Wada, Y. (1993): "The Appropriated Carrying Capacity of Tomato Production: Comparing the Ecological Footprints of Hydroponic GreenHouse and Mechanized Field Operations," B. A Dissertation, University of British Columbia.
- [63] Wada, Y.(1999): "The Myth of 'Sustainable Development': The Ecological Footprint of Japanese Consumption," PhD Dissertation UBC, B. C.
- [64] WECD ed. (1987): *Our Common Future*, Oxford, NewYork (USA).
- [65] Williams, S. B. (2001): *Handbook of emergy evaluation: Folio # 4 Emergy of Florida Agriculture*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [66] Wilson, J. G. and Parkes, A. (1998): "Network Analysis of The Energy Flow Through The Dublin Bay Ecosystem," *Biology and Environment*, Vol. 98B(3), pp. 179~190.
- [67] Worster, D. (1993): *The Wealth of Nature-Environmental History and the Ecological Imigation*, (小倉武一訳(1997)：『自然の富—環境の歴史とエコロジー構想—』, 農文協.)
- [68] Wuppertal Instituts fur Klima, Umwelt, Energie ed. (2002): *Zukunftsfahiges Deutschland*, (佐々木建・佐藤誠・小林誠『地球が生き残るための条件』, 家の光協会.)
- [69] WWF (2001): "Living Planet Report2000," WWF.
- [70] 浅子和美・川西諭・小野哲生 (2002)：「枯渇性資源・環境と持続的成長」『経済研究』, Vol. 53 (3), pp. 236~246.
- [71] 浅野耕太 (1998)：『農林業と環境評価』, 多賀出版.
- [72] 出村克彦 代表 (1998~2002)：「日中共同研究 中国西南部における生態系の再構築と持続的生物生産性の総合的開発報告書平成10~15年度(第1~5報)」, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書.
- [73] 出村克彦 代表 (2003)：「日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書：複合領域3アジア地域の環境保全中国西南部における生態系の再構築と持続的生物生産性の総合的開発」, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書.
- [74] 出村克彦・吉田謙太郎編 (1999)：『農村アメニティの創造に向けて—農業・農村の公益的機能評価—』, 大明堂.
- [75] 出村克彦・高橋義文・林岳 (2002)：「Carrying Capacity からみた自然生態系と人間活動の関係—Ecological Footprintによる中国農村の一考察—」

- 『農経論叢』, Vol. 58, pp. 167~183.
- [76] エネルギー・資源学会編 (1996): 『エネルギー・資源ハンドブック』, オーム社.
- [77] エントロピー学会編 (2001): 『循環型社会を問う』, 藤原書店.
- [78] 福士正博 (2001): 『市民と新しい経済学』, 日本経済評論社.
- [79] 東正彦・安部琢哉編 (1992): 『地球共生系とは何か』, 平凡社.
- [80] 肥田野登 (1997): 『環境と社会資本の経済評価—ヘドニック・アプローチの理論と実際—』, 勁草書房.
- [81] 肥田野登 (1999): 『環境と行政の経済評価—CVM マニュアル—』, 勁草書房.
- [82] 本間正義 (1994): 『農業問題の政治経済学』, 日本経済新聞社.
- [83] 細田衛士・室田武 (2003): 『循環型社会の制度と政策』, 岩波書店.
- [84] 石弘之編 (2002): 『環境学の技法』, 東京大学出版会.
- [85] 石川雅紀 (2002): 「環境の総合リスク分析をどう生かすのか?」『科学』, Vol. 72, pp. 1002~1008.
- [86] 伊藤誠編 (1996): 『経済学史』, 有斐閣.
- [87] 巖佐庸編 (1997): 『数理生態学』, 共立出版.
- [88] 金森久雄・荒憲治朗・森口親司 (1971): 『経済辞典 第3版』, 有斐閣.
- [89] 工藤和久 (1980): 『経済学大辞典II (第2版)』, 東洋経済新報社.
- [90] 林岳 (2002): 「地域における環境経済統合勘定の理論と実証に関する研究」『北海道大学大学院農学研究科邦文紀要』, Vol. 24 (3・4), pp. 225~301.
- [91] 久守藤男 (1993): 「農業資源利用システムの視角と構造」『農林業問題研究』, Vol. 28 (1), pp. 1~7.
- [92] 栗山浩一 (1997): 『公共事業と環境の価値—CVM ガイドブック—』
- [93] 栗山浩一 (1998): 『環境の価値と評価手法—CVM による経済評価—』, 北海道大学図書刊行会.
- [94] ロングワース, J., W. (1991): 「持続的農業発展のための人的資本形成」『農業経済研究』, Vol. 63 (3), pp. 135~138.
- [95] 増田清敬・宿野部猛・出村克彦・山本康貴 (2003): 「LCA を用いた酪農環境問題の定量分析—北海道・オコッペフィールドサービスを事例として—」『2003年度日本農業経済学会論文集』, pp. 341~346.
- [96] 三土修平 (1993): 『経済学史』, 新世社.
- [97] 宮本憲一 (1989): 『環境経済学』, 岩波書店.
- [98] 森田恒幸・植田和弘編 (2003): 『環境政策の基礎』, 岩波書店.
- [99] 森田恒幸・天野明弘編 (2002): 『地球環境問題とグローバルコミュニティ』, 岩波書店.
- [100] 森戸正信・森戸勇 (1999): 『近代経済思想史の系譜』, 多賀出版.
- [101] 両角和夫・合田素行・西沢栄一郎・田上貴彦・宇野雅美 (1998): 「自足型社会としての島嶼地域・離島における生産・生活の存立条件—鹿児島県沖永良部島を例にして—」『農業総合研究』, Vol. 52 (4), pp. 63~112.
- [102] 室田武・多辺田政弘・植田敦編 (1995): 『循環の経済学—持続可能な社会の条件—』, 学陽書房.
- [103] 室田武 (1979): 『エネルギーとエントロピーの経済学—石油文明からの飛躍—』, 東経選書.
- [104] 室田武 (2001): 『物質循環のエコロジー』, 晃洋書房.
- [105] 永田恵十郎 (1988): 『地域資源の国民的利用』, 農山漁村文化協会.
- [106] 沼田真 (1982): 『環境教育論』, 東海大学出版.
- [107] 太田宏・毛利勝彦編 (2003): 『持続可能な地球環境を未来へ—リオからヨハネスブルグまで—』, 大学教育出版.
- [108] 大野栄治編 (2000): 『環境経済評価の実務』, 勁草書房.
- [109] 梁建平 (2002): 「中国における退耕還林の概況とそれが岩溶地区の生態系再構築への影響」『日本学術振興会未来開拓学術

- 研究推進事業研究成果報告書：複合領域
3 アジア地域の環境保全 中国西南部に
おける生態系の再構築と持続的生物生産
性の総合的開発]. 2002年国際シンポ
ジウム, 九州大学.
- [110] 佐藤和夫 (1999): 『農業・農村における
外部効果の経済的評価と費用負担に関す
る環境経済学的研究—北海道農業の公
益的機能と外部不経済—], 北海道大学
大学院農学研究科博士論文.
- [111] 佐和隆光・植田和弘編 (2002): 『環境の
経済理論』, 岩波書店.
- [112] 高橋義文・佐藤和夫 (2002): 「岐阜県掛
斐川町『旧桂川用水路』整備による経済
効果—パラメトリック推定法とノンパ
ラメトリック推定法による評価—」『農
林業問題研究』, Vol. 37(4), pp.188~
192.
- [113] 高橋義文・出村克彦 (2003): 「自然環境
問題と持続的農業農村開発—Carrying
Capacity 概念による人間活動の観点か
ら—」『日本農業経済学会論文集』, pp.
411~416.
- [114] 高橋義文 (2004): 「持続性概念からみた
エコロジカル経済学」『農経論叢』, Vol.
60, pp.175~188.
- [115] 寺脇拓 (2002): 『農業の環境評価分析』,
勁草書房.
- [116] 玉置浩二 (2002): 『地球環境・農業・エ
ネルギー』, 理工図書.
- [117] 玉野井芳郎 (1990): 『生命系の経済に向
けて』, 学陽書房.
- [118] 玉野井芳郎 (1982): 『生命系のエコノ
ミー』, 新評論.
- [119] 寺西俊一 (1992): 『地球環境問題の政治
経済学』, 東洋経済.
- [120] 富岡昌雄 (1993): 「環境保全型農業の要
件と展開方向」『農林業問題研究』, Vol.
28(1), pp.39~47.
- [121] 植田敦 (1986): 『エントロピーとエネル
ギー—[生命]と[生き方]を問う科学
—』, ダイアモンド社.
- [122] 植田敦 (1992): 『熱学概論—生命・環境
を含む開放系の熱理論—』, 朝倉書店.
- [123] 辻田時美 (1997): 「RACES News Let-
ter」, 生態系工学研究会, No.1, 1997.
- [124] 都留重人 (1972): 『公害の政治経済学』,
岩波書店.
- [125] 都留重人 (1999): 『制度派経済学の再検
討』, 岩波書店.
- [126] 植田和弘・落合仁司・北畠佳房・寺西俊
一(1991): 『環境経済学』, 有斐閣ブッ
クス.
- [127] 和田喜彦 (1998): 「エコロジカル・フッ
トプリント分析—生態学的に持続可能
な地球をめざして—」『法政大学産業情
報センターワーキングペーパー』, No.
67.
- [128] 和田喜彦, (2002), 「エコロジカル・フッ
トプリントと持続可能な経済—大地の
恵みのペースで生きる—」『C&G』第6
号, pp.40~43.
- [129] 鷺田豊明 (1996): 『環境と社会経済シス
テム』, 勁草書房.
- [130] 鷺田豊明・栗山浩一・竹内憲司 (1999):
『環境評価ワークショップ—評価手法
の現状—』, 築地書館.
- [131] 鷺田豊明(1999): 『環境評価入門』, 勁草
書房.
- [132] 矢部光保 (1993): 「持続的発展論の視点
による環境経済学の研究課題」『農業総合
研究』, Vol.47(2), 1993, pp.69~101.
- [133] 山本充 (2003): 「北海道における廃棄物
勘定の推計とその検討」『地域学研究』,
Vol.33(1), pp.33~34.
- [134] 吉田文和・宮本憲一編 (2002): 『環境と
開発』, 岩波書店.
- [135] 吉田文和・北畠能房編 (2003): 『環境の
評価とマネジメント』, 岩波書店.
- [136] 吉田謙太郎 (1996): 「コンテインジェン
ト評価法による農村景観の経済的評価」
『農業総合研究』, Vol.50(2), pp.1~45.
- [137] 吉田謙太郎 (1999): 「CVMによる中山
間地域農業・農村の公益性機能評価」『農
業総合研究』, Vol.53(1), pp.45~87.
- [138] 吉田泰治 (1993): 「産業連関表によるエ

エネルギー投入の推計], 『農業総合研究』,

Vol. 47 (3), pp. 65~pp. 85.

(受付: 2004.8.24 受理: 2004.11.11)

Summary

A Study on Sustainable Evaluation of Agricultural Activity in the Rural Area: Ecological Footprint and Emergy Flow Model Approach

Two are the main objectives of this study. The first is to evaluate agricultural activity from the view point of the carrying capacity concept in rural area of China. The second is to find important factors for inhabitants to keep sustainability.

This study consist of six chapters. Chapter 1 introduces the problems of this study. Chapter 2 introduces the concept of sustainability and relationship between environmental economics and ecological economics. Chapter 3 introduces our study area in China. Chapter 4 calculate carrying capacity of these colonies with Ecological Footprint. Chapter 5 simulate energy variation with Emergy Flow Model. Finally, in the last Chapter, conclusions of this study have been explained in detail.

The main results of this study are as

follows.

- (1) The inhabitants of the four villages need spatial ecosystem support —the ecological footprint— 0.8 to 2.1 times the surface area of each village.
- (2) The current population of the four villages is 1.4 to 2.3 times the population that a spatial ecosystem can support.
- (3) The energy of forest recovers some energies (crops, livestock, farmers can use).

These results suggest that some policies for controlling the inhabitants' activities, such as over-harvesting of timber, and increasing agricultural productivity such as, diffusing knowledge of agricultural technologies, are urgently required.