

# 栄養バランスの導入による Agricultural Economy Model の拡張

高 橋 義 文  
棧 敷 孝 浩

# 栄養バランスの導入による Agricultural Economy Modelの拡張

高橋 義文  
 棧 敷 孝 浩

## 目次

1. はじめに
2. IMAGE内のTES (Terrestrial Environment System) とその5つのサブモデル
  - 2-1. IMAGEを構築する3システムの概要
  - 2-2. TES内の5つのサブモデルについて
  - 2-3. 既存のAEMの基本概念
  - 2-4. AEMの数式モデルと均衡解の導出
3. 本研究におけるAEMの改良モデル
4. 考察

## 1. はじめに

近年、メタボリックや隠れ肥満という言葉が頻繁に耳にするように、健康問題に対する関心が高まりつつある。一方で、食料不足に悩む国も世界中には数多く存在する。日本の食料自給率は40%と低いが、実際には食べ残しなどによる食品残渣の多い国として有名である。

このような国内での食料生産問題と栄養摂取のバランスをシミュレートした比較的新しい研究として、気候変動に関する統合指標IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment) のサブモデルであるAEM (Agricultural Economy Model) がある。IMAGEに内包されるAEMは、日本での認知度はまだ低いものの、IMAGEに必要なデータとして食料需要の変化を計測する役割を担っている。具体的には、世界13カ国を対象に、主要な食料品12品目の摂取量と生産

量の比率を推計し、将来のシミュレーションも行っている。

AEMは効用理論を基礎とした分析アプローチであり、土地1ha当りの生産可能な農産物(熱カロリー単位)と、ある作物を1kcal生産するのに要求される土地面積単位を用い、現実の作物単収を制約条件に総カロリーを最大化(経済学でいう効用最大化)するような需要を求める方法である。

しかし、本来食料の需要を推計するのであれば、先に説明したような健康問題の点も考慮する必要がある。なぜなら、先に述べたカロリーベースの計算は、効用を満足させかつカロリー量の多い作物ばかりを生産することで、総カロリー量を簡単に上昇させることができる。仮に、日本の農地全てにおいて米や馬鈴薯のみを生産してしまえば、カロリーベースでの自給率は上昇するであろう。また食の欧米化にちなんで畜産品を多く生産すれば健康被害(肥満、高脂血症)が生まれるであろう。

栄養学の観点から見れば、日本人が健康な生活を送るのに必要とされる栄養バランス(PFCバランス)は、P(タンパク質):F(脂質):C(炭水化物)=13%:27%:60%という比率が理想的と言われている。そのため、これまでのAEMに加え、さらに日本人が健康な生活を送るのに必要とされる栄養バランスを取り入れたモデルへの改良が望まれる。

そこで本研究の課題は、1)日本において認知度の低いAEMの解説を行うとともに、2)AEM内の制約条件に栄養バランスの代理指

標であるPFC比率を加えることで、より現実に即したモデルに改良することである。

## 2. IMAGE内のTES (Terrestrial Environment System) とその5つのサブモデル

### 2-1. IMAGEを構築する3システムの概要

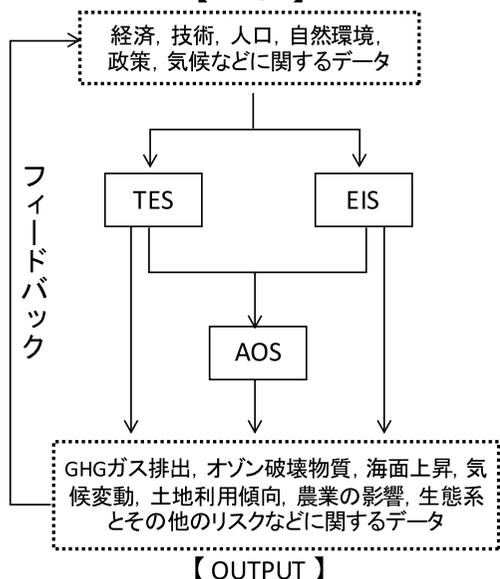
IMAGEは気候変動に関する統合指標であり、地球環境の変化を動的に求めることを目的として、オランダ王立研究所 (Dutch National Institute for Public Health and the Environment: RIVM) によって開発されたものである。<sup>(注1)</sup> IMAGEは、大きく分けて3つのシステムを含有しており、各々が複数のサブモデルを有している。3つのシステムは、TES (Terrestrial Environment System), EIS (Energy Industry System), AOS (Atmosphere Ocean System) と呼ばれ、各々が独自の役割を持っている (図1参照)。取り扱うデータは多種多様なデータであり、さらに各システムで計算された結果の中には、

そのまま他のシステムの計算にフィードバックされるなどIMAGEのシステム間の相互関係は非常に強く複雑である。そのため、ここでは本研究の課題であるAEMを含むTESの部分のみを解説し、TES以外の解説は紙面の制約上からも省略する (残りの2つのシステムに関してはAlcamo et al. [1], Bouwman et al. [2]を参照)。

### 2-2. TES内の5つのサブモデルについて

IMAGEの下位システムの一つであるTESは、TVM (Terrestrial Vegetation Model), LCM (Land Cover Model), TCM (Terrestrial Carbon Model), LUEM (Land Use Emission Model) そしてAEM (Agricultural Economy Model) と呼ばれる5つのモデルから構成されている (図2参照)。図2から見て取れるように、TESがIMAGEの中で果たす役割は、主に世界の土地利用や土地被覆の変化、そしてそれらの効果 (影響) が“温室効果ガス”, “オゾンを破壊するような先駆物質 (ozone precursors) の排出”そして“生物圏と大気圏間の炭素の流動”に対してどのように現れるのかをシミュレートすることである。すなわち、TESとは地球の土地利用、土地面積、陸生植物群の分布状況のデータを用い、陸生植物群の持つ潜在的な生産能力や炭素吸収能力を明らかにするシステムと言える。以下、このシステムに内包される5つのサブモデルの役割を簡単に解説する。

図1 IMAGEを構成する3システムとその関係  
【INPUT】



出所: Alcamo et al. [1]をもとに作成

### <TVMの概要>

TVMの目的は、気候パラメータ、水収支データ、土壌や植生分布といった自然科学データをもとに、食物や天然植物の潜在的な植生分布を計算することにある。TVMの計算には、3つのプロセスを踏む必要がある。まず初めに、植物に大きな影響を与える霜に関する発生やその強さに関するデータ、生育期間 (growing season) の特徴、水に関するデー

タなどを用いて気候指標 (climate indices) を計算する。その計算結果を、第2のプロセスである BIOME モデル<sup>(注2)</sup>に投入し、最後にそれら計算結果を AEZA に投入することで穀物ならびに自然植生の分布状況がシミュレートされることになる。上記 BIOME モデルとは、植物が行う呼吸と光合成の関係から計算される NPP をもとにしたモデルである。モデルのシミュレートに際しては、緯度・経度を0.5グリッド間隔で区切った空間分布が用いられ、針葉樹 vs. 広葉樹、落葉性 vs. 常緑性、樹木 vs. 草地といった主要植物の潜在的な植生分布がシミュレートされる。AEZA でも BIOME 同様に空間分布を用いて、多種多様な穀物の潜在的な植生分布がシミュレートされる。

に説明したモデル同様、空間分布を用いてシミュレートされる。LCM のシミュレートには、他の4つのサブモデル全てが関係するため、TES の中で最も重要なパートを担っていると見えよう。TVM, AEM などのシミュレート結果をもとにして得られた LCM のシミュレート結果 (土地被覆の変化) は、先の TVM, TCM, LUEM などのサブモデルにフィードバックされる。

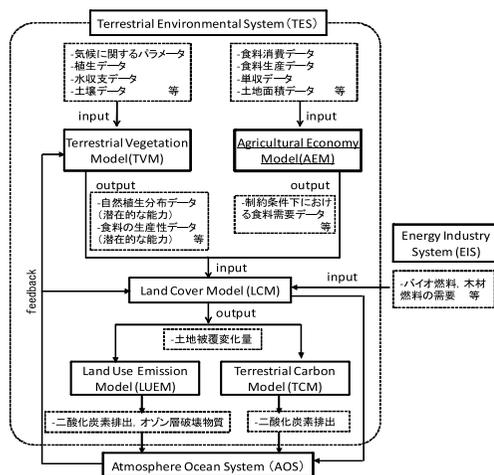
### <TCM の概要>

TCM の目的は、大気圏と生物圏の間を往來する炭素流量 (carbon fluxes between atmosphere and biosphere) を計算することにある。TCM の基本的な計算方法は、NPP と NEP の計算と TVM のようなグリッドセルの空間分布を用いた計測からなる。投入されるデータは、TVM からの土壌の水分データと LCM からの土地被覆変化量データである。TCM では、それらデータをカリブレートすることで大気圏と生物圏の間の炭素流量を計測し、LCM, LUEM, AOS (図2の AOS 参照) にフィードバックさせる役割を持つ。

### <LUEM の概要>

LUEM の目的は、多種多様な温室効果ガスとオゾン層破壊物質の吸収量を計算することにある。LUEM の基本的な計算は、既に説明した他のサブモデルから得られた多くのデータを用いて行われる。また、TVM, LCM や TCM 同様にグリッドセルの空間分布を用いて温室効果ガスなどの吸収量がシミュレートされる。先述した TCM と LUEM は、グリッドセルを用いた空間分布を用いる点や、土地利用状況 (LCM からのデータ) や TVM (潜在的な植生分布データ) などのデータを用いてシミュレートを行う点など類似する部分があり混同されがちであるが、TCM は大気圏と生物圏内を対流する炭素量に注目しており、LUEM は温室効果ガスやオゾン層破

図2 TES と5つのサブモデル



出所: Alcamo et al. [1] をもとに作成

### <LCM の概要>

LCM の基本的な考え方は、ある地域で要求される土地の需要が完全に満たされるまでに、どれだけの土地被覆を変化させるのかというものである。つまり LCM の目的は、“土地利用に対する需要”と“土地のポテンシャル”を調和させることで土地利用の変化をシミュレートすることにある。LCM も先

壊物質などの吸収量に注目しているという点で大きな違いがある。

### 2-3. 既存の AEM の基本概念

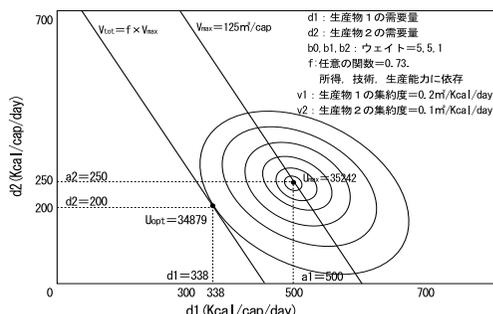
AEM の基本的な考え方は、経済学の効用理論に基づいている。そのため、本節では、AEM について無差別曲線を用いて説明を行う。

図3はAEMの基本的な概念を表している。経済学で学ぶ無差別曲線と予算制約線が描かれた一般的な図とは若干異なる<sup>(注6)</sup>。従来の無差別曲線の図と異なる点を説明すると、AEMでは、①人間の消費は日常食( $d$ )のみであり、②その日常食( $d$ )は生産物1( $p1$ )と生産物2( $p2$ )から構成されている。③また生産物1( $p1$ )と生産物2( $p2$ )の需要は、それぞれ需要1( $d1$ )と需要2( $d2$ )として表され、④X軸に生産物1( $p1$ )の需要( $d1$ )、Y軸に生産物2( $p2$ )の需要( $d2$ )を取ることができる。⑤X軸、Y軸で用いられる単位は、個数ではなく kcal/cap/day である<sup>(注7)</sup>。さらに、⑥生産物の価値の大きさを表すために土地集約度の単位を用いている(価格単位を用いない)。ここでは、生産物1と生産物2の土地集約度を、それぞれ土地集約度1( $v1$ )と土地集約度2( $v2$ )としている。

よって図3は、X軸とY軸にそれぞれ生産物1と生産物2の需要( $d1$ )と需要( $d2$ )を置き、生産物1と生産物2の最適なエネルギー消費量の組み合わせを表した無差別曲線である。また、図3に描かれている直線Vは、生産物1と生産物2の土地集約度から描かれた土地面積の(予算)制約線を表している。つまり、図3の点 $U_{opt}$ は、土地面積の予算制約のもと、個人の効用を最大にするような生産物1と生産物2の摂取エネルギー量の組み合わせを表す。すなわち、土地面積Vの下で、生産物1(338kcal/per/day)と生産物2(200kcal/per/day)を消費する(=生産する)ことが効用を最大にすることにな

る。また、点 $U_{max}$ は、土地面積という制約条件を無視し、個人の選好に従い効用を最大化させる組み合わせを表している。この際、個人が消費する生産物1と生産物2の最適な組み合わせは(500, 250)ということになる。さらに、この点 $U_{max}$ を満たすためには、一人当たり土地面積125 $m^2$ (= $V_{max}$ )を必要とすることになる。

図3 AEMの基本的コンセプト



資料: Alcamo et al. [1]から抜粋

直線 $V_{tot}$ との違いは、 $V_{tot}$ が実際の土地面積(以下“現実的土地面積”)であるのに対し、 $V_{max}$ は個人の選好を満たす望ましい組み合わせを選択した結果の土地面積(以下“理想的な土地面積”)を表している。

なお、図3で用いられている $b0, b1, b2, f$ はTES内のサブモデルでシミュレートされた結果が用いられているため、実際にAEMを分析するにはTES内のサブモデルを理解する必要がある。

最後にAEMの特徴を簡潔にまとめると、従来の経済学の効用理論とAEMの理論は基本的に同じであるが、前者は財の価格と数量を用いており、後者は生産物(財)の土地集約度とエネルギー量を用いているということである。

### 2-4. AEMの数式モデルと均衡解の導出

AEMの基本的な考え方は前項2-2.で示した通りであるが、本項では実際にエネルギー

の観点から個人の効用を最大にするような生産物に対する消費行動の最適な組み合わせを推計する。まず、図3の無差別曲線<sup>(註9)</sup>を定式化すると式(1)右辺のように表され、この式(1)が目的関数となる。

なお、以下の関係式(1)から(4)までの変数について、詳細は Alcamo et al. [1] に依拠し、表1にまとめた。

$$\max U_r = \sum_f [b_{r,f} (a_{r,f} \times \ln d_{r,f} - d_{r,f})] + b_0 \left( \sum_f a_{r,f} \times \ln \sum_f d_{r,f} - \sum_f d_{r,f} \right) \dots (1)$$

次に、最適化のための制約条件式は、土地面積と土地集約度から定式化され、式(2)、式(3)、式(4)として表される。

式(2)は、各生産物の需要量に各生産物の土地集約度を乗じた総和が、現実の土地面積よりも多くなることはないことを表している。

$$s.t. \sum_f (v_{r,f} \times d_{r,f}) \leq V_{totr} \dots \dots \dots (2)$$

式(3a)の左辺は、現実の土地面積を表している。この土地面積は、右辺分母の生産物の生産性、開墾技術そして所得で理想的な土地面積を除すことで、現実の土地面積が得られることを表している。

$$V_{totr} = \frac{V \max_r}{1 + \left( \frac{\alpha_r}{Y_r} \right)^\beta \times Q_r^{-\gamma} \times T_r^{-\delta}} \dots \dots \dots (3a)$$

式(3b)は、土地集約度(v)と生産物に対する選好(a)を乗じた総和から、図3の点 Umax. を満たすような理想的な土地面積 (Vmax.) を表している。

$$V \max_r = \sum (v_{r,f} \times a_{r,f}) \dots \dots \dots (3b)$$

式(4)で用いられている SI は、不足指標 (Scarcity Indicator) と呼ばれ、実際の土地面積の不足分を調整する変数である。<sup>(註10)</sup>

$$\sum_f (v_{r,f} \times d_{r,f}) \leq V_{totr} \times SI_r \dots \dots (4)$$

次に、上記式(1)から(4)を用いて最適化を行うが、ここでは計算の簡略化のために単純化したモデルに変更する。単純化したモデルでは、生産される生産物は affl (奢侈品) と bas (必需品) の2つであり、生産地域も1地域と仮定する。その結果、表1の f, r, Q, T などのパラメータが消え、単純化したモデルは式(5)から(8)のように表すことができる。

$$\max U(t) = b_{affl} \{ a_{affl} \times \ln d(t)_{affl} - d(t)_{affl} \} + b_{bas} \{ a_{bas} \times \ln d(t)_{bas} - d(t)_{bas} \} + \{ a_{tot} \times \ln d(t)_{tot} - d(t)_{tot} \} \dots (5)$$

$$s.t. \{ v(t)_{affl} \times \ln d(t)_{affl} \} + \{ v(t)_{bas} \times \ln d(t)_{bas} \} \leq V(t)_{tot} \dots (6)$$

$$V(t)_{tot} = \frac{V(t)_{max}}{1 + \left( \frac{\alpha}{Y(t)} \right)^\beta} \dots \dots \dots (7)$$

$$V(t)_{max} = \{ v(t)_{affl} \times a_{affl} \} + \{ v(t)_{bas} \times a_{bas} \} \dots (8)$$

式(6)、(7)、(8)を制約条件として式(5)の最適化を求めると、生産物 (affl, bas) の均衡解は以下のように表される。<sup>(註11)</sup>

$$\left( a_{affl} + \frac{v_{affl} \times b_{bas}}{v_{bas} \times b_{affl}} (d_{bas} - a_{bas}), - \frac{B \ln(v_{affl} \times Z) - a_{affl} \times v_{affl} - a_{bas} \times v_{bas}}{Z (A \ln v_{affl} + \ln v_{bas})} \right) \dots (9)$$

最後に、上記式(9)に必要なデータおよびパラメータをあてはめることで、奢侈品 (affl) と必需品 (bas) の最適な土地利用割合が推計されることになる。

表1 AEMのパラメータ

$f$	農産物に対する指標 ( $f=1, \dots, 12$ )
$r$	地域に対する指標 ( $r=1, \dots, 13$ )
$U$	農産物から生産される日常食に対する効用
$a$	選好レベル: Preference level (kcal/cap/yr)
$b_0, b$	ウェイト: Weighting constants
$d$	消費レベル: Consumption level (kcal/cap/yr)
$v$	集約度: Intensity ( $\text{m}^2/\text{kcal}$ )
$V_{tot}$	効用関数に対する利用可能な土地制約 ( $\text{m}^2/\text{cap}$ )
$V_{max}$	満足のいく日常食を生産するのに要求される総土地面積 ( $\text{m}^2/\text{cap}$ )
$Y$	所得 (US\$/cap/yr)
$Q$	Average quality of agricultural land (based on potential productivity)
$T$	農地開拓をするための平均的な技術水準
$\alpha$	Half-life (US\$/cap/yr)
$\beta$	所得の弾力性: Income elasticity
$\gamma$	質の弾力性: Quality elasticity
$\sigma$	技術の弾力性: Technology elasticity

### 3. 本研究における AEM の改良モデル

第2節では、本研究の第一課題である AEM の基本的な考え方とモデルの展開について解説した。そこで第3節では、本研究のもう一つの課題である“PFC バランスを考慮した AEM へとモデル改良”することにする。

具体的には、第2節で用いた単純化したモデルを改良する。第2節では、生産物は奢侈品 (*affl*) と必需品 (*bas*) から構成されていたが、本節では、炭水化物、タンパク質、脂質から構成されるものとした。その結果、栄養バランスの代理指標を表す変数 PFC を伴った目的関数は式 (イ) のようになり、制約条件式も (ロ) から (ニ) のようになる。なお、生産物  $d$  の下添え字 1 はタンパク質、2 は脂質、3 は炭水化物を表している。

$$\begin{aligned} \max U(t) = & b_1 \{a_1 \times \ln d(t)_1 - d(t)_1\} \\ & + b_2 \{a_2 \times \ln d(t)_2 - d(t)_2\} \\ & + b_3 \{a_3 \times \ln d(t)_3 - d(t)_3\} \\ & + \{a_{tot} \times \ln d(t)_{tot} - d(t)_{tot}\} \end{aligned} \quad (イ)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & \{v(t)_1 \times \ln d(t)_1\} + \{v(t)_2 \times \ln d(t)_2\} \\ & + \{v(t)_3 \times \ln d(t)_3\} = V(t)_{tot} \end{aligned} \quad (ロ)$$

$$V(t)_{tot} = \frac{V(t)_{max}}{Z} \quad \text{ただし } Z = 1 + \left(\frac{\alpha}{Y(t)}\right)^\beta \quad (ハ)$$

$$\begin{aligned} V(t)_{max} = & \{v(t)_1 \times a_1\} + \{v(t)_2 \times a_2\} \\ & + \{v(t)_3 \times a_3\} \dots \dots \quad (ニ) \end{aligned}$$

第2節と同様に、上記式 (ロ)、(ハ)、(ニ) を制約条件式として式 (イ) の最適化を求めると、ラグランジュ関数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{i=1}^3 b_i (a_i \times \ln d_i - d_i) \\ & + \left( \sum_{i=1}^3 a_i \times \sum_{i=1}^3 (\ln d_i) - \sum_{i=1}^3 d_i \right) \\ & + \lambda \left\{ \sum_{i=1}^3 (v_i \times a_i) - Z \times \sum_{i=1}^3 (v_i \times \ln d_i) \right\} \end{aligned} \quad (ホ)$$

式 (ホ) のラグランジュ関数を最大にする条件は以下のようになる。

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial d_i} = \frac{b_i \times a_i}{d_i} - d_i - \frac{\lambda \times Z \times v_i}{d_i} = 0 & (i=1, \dots, 3) \\ \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^3 (v_i \times a_i) - Z \times \sum_{i=1}^3 (v_i \times \ln d_i) = 0 & (i=1, \dots, 3) \end{cases} \quad (ヘ)$$

以上の条件を満たす  $d_2$  (脂質),  $d_3$  (炭水化物) を求めると,

$$d_2 = a_2 - \left( \frac{v_2 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_2} \right) + d_1 \times \left( \frac{v_2 \times b_1}{v_1 \times b_2} \right)$$

$$d_3 = a_3 - \left( \frac{v_3 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_3} \right) + d_1 \times \left( \frac{v_3 \times b_1}{v_1 \times b_3} \right)$$

となる。

ここで、上記  $d_2$ ,  $d_3$  の右辺第 2 項, 第 3 項を計算の簡略化のために,  $d_2$  右辺第 2 項を A, 同第 3 項を B,  $d_3$  右辺第 2 項を C, 同第 3 項を D として置き換えると,  $d_3 = a_3 - A + d_1 \times B$ ,  $d_2 = a_2 - C + d_1 \times D$ , となる。<sup>(注12)</sup>

これら  $d_2$ ,  $d_3$  を式 (へ) の  $\partial\phi/\partial\lambda$  に代入すると、以下の  $d_1$  を得ることができる。

$$d_1 = -\{a_1 \times v_1 + a_2 \times v_2 + a_3 \times v_3 - A \ln(v_3 \times Z) + a_3 \ln(v_3 \times Z) - a_2 \ln(v_2 \times Z) + C \ln(v_2 \times Z)\} \div Z(B \ln v_3 - \ln v_1 - D \ln v_2)$$

ゆえに、現実の土地面積を制約条件として効用を最大化させるようなタンパク質 (P), 脂質 (F), 炭水化物 (C) の最適な生産割合は、以下ようになる (ただし、タンパク質の推計値内の A, B, C, D, Z は本項で簡略化のために置き換えた値と同じものである)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{タンパク質} = -\{a_1 \times v_1 + a_2 \times v_2 + a_3 \times v_3 \\ \quad - A \ln(v_3 \times Z) + a_3 \ln(v_3 \times Z) \\ \quad - a_2 \ln(v_2 \times Z) + C \ln(v_2 \times Z)\} \\ \quad \div Z(B \ln v_3 - \ln v_1 - D \ln v_2) \\ \text{脂質} = a_2 - \left( \frac{v_2 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_2} \right) + d_1 \times \left( \frac{v_2 \times b_1}{v_1 \times b_2} \right) \\ \text{炭水化物} = a_3 - \left( \frac{v_3 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_3} \right) + d_1 \times \left( \frac{v_3 \times b_1}{v_1 \times b_3} \right) \end{array} \right.$$

最後に、上記最適解に該当するパラメータを実際に代入することで、個人の選好に基づいたタンパク質 (P), 脂質 (F), 炭水化物 (C) の最適な生産 (消費) 組み合わせを推計することが可能になる。また、実際に得られた推計値と PFC バランスを比較すること

で、個人の選好に基づいた最適な生産の組み合わせが、健康面の観点から一ひいては健康な生産物の生産を行っているかという土地利用政策の観点からも一望ましいか否かを判断することができる。

#### 4. 考察

本研究の課題は、1) 日本において認知度の低い AEM の解説を行うとともに、2) AEM 内の制約条件に栄養バランスの代理指標である PFC 比率を加えることで、より現実に即したモデルに改良することであった。第 2 節では、効用理論に依拠した AEM の基本概念の解説を行い、実際に数式モデルの展開を行った。第 3 節では、第 2 節で取り上げたモデルのカテゴリーを、PFC という人間の生活に必要な三大栄養素のカテゴリーに拡張したうえで、土地面積を制約条件とした効用最大化 (総カロリー最大化) を行い、タンパク質 (P), 脂質 (F), 炭水化物 (C) の最適解を推計した。

本研究で得られたタンパク質 (P), 脂質 (F), 炭水化物 (C) の最適解は、個人の選好に従って生産される組み合わせを表した値である。そのため、健康的な PFC バランス (P:F:C=13%:27%:60%) と比較することで、人間の食べ物に関する選好が健康的な食生活を望んでいるか否かを明らかにすることが可能となる (健康問題に関しての情報提供)。また、推計値が PFC バランスとかけ離れた最適解になった場合、健康的な食事をするには他地域から足りないカテゴリーの生産物を移入しなければならないことを表す。すなわち、地産地消 (PFC バランスを考慮した形での食糧供給) がどれだけ推進されているのかを表してくれる (持続的な土地利用政策に関しての情報提供)。

最後に、本研究では PFC バランスを導入することで AEM のモデルの拡張を図った。

しかし、近年においては、環境問題の深刻化とともにバイオマス燃料作物の生産のためにも土地が利用されている。国においては食料生産以上にバイオマス燃料作物の生産に土地面積を割く国もある。IMAGEでは他のシステム内でバイオマスを考慮しているためAEMでは取り扱っていないが、AEMにもバイオマス燃料生産のカテゴリーを独自に加えることで、AEMのモデルとしての有用性を高めることが今後の課題である。

## 注

- 1) IMAGE ver2.1までは、アメリカ、カナダ、南アメリカ、西ヨーロッパ、東ヨーロッパ、南アフリカ、南アジア、日本など世界の複数地域を対象に環境変化に対するシミュレーション分析を行っている（詳細は Alcamo et al. [1]参照）。
- 2) BIOMEに関する詳細は Prentice et al. [13]を参照。
- 3) Agro-Ecological Zone Approachの略である。AEZAは穀物に関する潜在的植生分布をシミュレートする手法である。AEZAの詳細は Prentice et al. [14]を参照。
- 4) Net Primary Productivityの略であり、生物学などで用いられる用語である。純第一次生産量と訳されることが多く、“NNP=植物の光合成量-植物の呼吸量”の関係式で表される。
- 5) NNPに関しては注4を参照。NEP (Net Ecosystem Productivity) は純生態系生産量と呼ばれ、関係式は  $NEP=NNP-土壤呼吸量$  で表される。
- 6) AEMで用いられている効用関数は、従来用いられるようなパラメトリックな効用関数ではなく、現実の世界により対応した特殊なノンパラメトリックな形となっている。本研究で取り扱っている特殊な効用関数の詳細については、Huiberts, R. G. J., *Agricultural Economy Model van IMAGE 2. Modelbeschrijving en calibratie*, RIVM, Bilthoven, Augustus 1997. を参照。
- 7) X軸とY軸で用いられている単位 (kcal/cap/day) は、1人の人間が1日に生産物1と生産物2をそれぞれ何キロカロリー必要とするかを表したものである。

るかを表したものである。

- 8) AEMではエネルギー単位で物を考えているため、土地集約度とは生産物1 kcalを生産するために投入された土地面積量を言う。つまり、土地集約度が高いとは、生産物1 kcalを生産するために多くの土地面積量を投入したことを言い、生産物の希少性の高さも表している。
- 9) この無差別曲線を表す式は特殊であり多くの説明を要するが、その詳細は前述した注3の Huiberts [1997] に譲る。
- 10) モデルの詳細な説明については、Alcamo et al. [1], の注6)の Huiberts[1997]を参照。
- 11) ただし、上記式のA, B, Zは以下の通りである。

$$A = \frac{v_{affl} \times b_{bas}}{v_{bas} \times b_{affl}}$$

$$B = \frac{v_{bas} \times b_{affl} \times a_{affl} - v_{affl} \times b_{bas} \times a_{bas}}{v_{bas} \times b_{affl}}$$

$$Z = 1 + \left(\frac{\alpha}{Y}\right)^\beta$$

- 12) ただし、A, B, C, Dは以下の通りである。

$$A = \left(\frac{v_0 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_0}\right), B = \left(\frac{v_0 \times b_1}{v_1 \times b_0}\right),$$

$$C = \left(\frac{v_2 \times b_1 \times a_1}{v_1 \times b_2}\right), D = \left(\frac{v_2 \times b_1}{v_1 \times b_2}\right)$$

## 引用・参考文献

- [1] Alcamo, J., Kreilman, E., Krol, M., Leemans, R., Bollen, J., Minnen, J. V., Schaeffer, M., Toet, S. and Vries, B. D., *Global Changes Scenario of the 21<sup>st</sup> Century*, Result from the IMAGE2.1 Model, Pergamon, 1998.
- [2] Bouwman, A. F., Kram, T. and Goldewijk, K. K. ed., “Integrated modeling of global environmental change: An overview of IMAGE2.4,” Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, 2006.
- [3] Faaij, A., “Biomass resource potentials; where are they,” *Food, Fuel or Forest? Opportunities, threats and knowledge gaps of*

- feedstock production for bio-energy*, 2007, pp.13-19.
- [4]FAO, The Digitized Soil Map of the World (Release 1.0), World Soil Resources Report67/1, Rome, 1991.
- [5]FAO, *Report on the Agro-ecological Zone Project, Vol 1: Methodology and results for Africa*, Food and Agricultural Organization, Rome, 1978.
- [6]Goldewijk, K.K., van Minnen, J.G., Kreileman, G.J.J, Vloedveld, M. and Leemans, R., "Simulating the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere" *Water, Air and Soil Pollution*, vol.76, 1994, pp.199-230.
- [7]Kineman, J.J., Global Ecosystems Database Version 1.0 (on CDROM) User's guide, Key to Geographical Records Documentation No26, USDOC/NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, Colorado, 1992.
- [8]Leeman,G. and van den Born, G.J., "Determining the potential global distribution of natural vegetation, crops and agricultural productivity," *Water, Air and Soil Pollution*, Vol.76, 1994, pp.133-161.
- [9]Leeman,R. and van den Born,G.J., "Determining the potential distribution of vegetation, crops and agricultural productivity" *Water, Air, and Soil Pollution*, vol.76, 1994, pp.133-161.
- [10]Leemans, R. and Cramer W., The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, Research Report RR-91-18, International Institute of Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1991.
- [11]Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery ed., *The demand and supply table for agricultural products*, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, 2008.
- [12]Olson, J., Aatts, J. A. and Allison, L. J., *Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: a database*, NDP-017, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1985.
- [13]Prentice, C.I., Cramer, W., Harrison, S. P., Leeman, R., Monserud, A. and Solomon, A.M., "A Global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate" *Journal of Biogeography*, vol.19, 1992, pp.117-134.
- [14]Prentice, C.I., Sykes, M. T. and Cramer, W., "A simulation model for the transient effect of climate change on forest landscape" *Ecological Modelling*, vol.65, 1993, pp.51-70.
- [15]Strengers, B.J., "The Agricultural Economy Model in IMAGE 2.2," RIVM research for man and environment, 2006.8.
- [16]Veldkamp, A., Zuidema, G. and Fresco, L.O., "A model analysis of the terrestrial vegetation model of IMAGE2.0 for Costa Rica," *Ecological Modeling*, vol.93, 1996, pp.263-273.
- [17]Zuidema, G., van den Born, G.J., Alcamo, J and Kreilman, G. J. J., "Simulating changes in global land cover as affected by economic and climate factors" *Water, Air and Soil Pollution*, vol.76, pp.163-198.

[Abstract]

## A Study on Extending of the Agricultural Economy Model to consider PFC Balance

Yoshifumi TAKAHASHI  
Takahiro SAJIKI

The purposes of this paper are 1) to introduce the Agricultural Economy Model which is not acknowledged in Japan, and 2) to point out an untouched subject of the Agricultural Economy Model, and to extend that model to consider PFC balance. The model we propose in this paper overcomes the untouched subject that our utility is increased only by the amount of energy. Our model for PFC balance is more model for real society.