

## 2. 土地利用地球環境保全プロジェクト (LU/GEC) の展開と一般チューネンモデルの開発

AN OVERVIEW OF LU/GEC PROJECT AND

THE DEVELOPMENT OF GENERALIZED THÜNEN MODEL

小長谷一之<sup>\*</sup> ・ 大坪国順<sup>\*\*</sup>

Kazuyuki KONAGAYA, Kuninori OTSUBO

**ABSTRACT;** The land use phenomena is the basis for almost all global environmental problems at ground level such as desertification, deforestation, conservation of species and cultural heritages, polutions in developing countries; besides it has both natural and social scientific aspects because human activities are the principal driving forces causing land use changes. LUCC is the joint core project of IGBP and IHDP for 'land use/cover change'. LU/GEC (Land Use for Global Environmental Conservation) is the largest LUCC-related project in Japan by NIES (National Ins. for Environmental Studies). The purpose is to construct land use prediction models in Asia-Pacific region by many teams of researchers. Phase I (1995.4-1998.3) has successfully finished with 5 original land use models. 4 of them consist of land use representation function  $f$  and economic growth function  $g$ . Ordinary linear regression and logistic function choice for  $f$  functional form showed poor performance in land use data. Konagaya (1997a,b, 1998) extended the normative Thünen model, the exact fundamental theory of land market, to be able to apply it to real land use ratio data. This new model (Generalized Thünen Model: GTM) improved explanatory performance and has a merit to give the intuitive picture of 'movement of land use frontier' a exact theoretical foundation, which enables us to predict the land use change in the future.

**KEYWORDS;** land use, modelling, LU/GEC, Genaralized Thünen Model, Asia-Pacific region

### 1. 地球環境保全のための土地利用研究

#### 1. 1 LU/GECとは

土地利用は、事象面からみた地球環境問題である砂漠化、森林破壊、生物や文化遺産の保存、途上国の公害など、地表に関わるほとんどの現象の基礎となっている。また自然科学と社会科学の双方にまたがる現象であるため、社会経済面からみた地球環境問題のほとんどと関わっている。したがって、信頼にたる土地利用予測モデルの構築は、地表面に関わる地球環境保全のための計画策定・政策形成の基礎といってもよい。

国際学術連合 (ICSU) による全世界的地球環境研究体制である IGBP および IHDP 双方のコア・プロジェクトとして LUCC (土地利用被覆変化研究) が存在している。環境庁・国立環境研究所では、以上のような問題意識に基づき、1995 年度より LUCC 対応の研究プロジェクト LU/GEC (Land Use / Global Environmental Conservation 地球環境保全のための土地利用) をスタートさせた。これは日本全国の研究者のチームによって、経済発展著しいアジア・太平洋地域に的を絞り、土地利用変化の予測モデルを構築し、土地利用の持続的なあり方を検討しようとするものである。LUCC 関連の他地域のプロジェクト (ヨーロッパの IASA 関係) などと関係をはかり、最終的には全地球的な土地利用モデルへの貢献を目指す。

---

<sup>\*</sup> ; 大阪市立大学経済研究所 Inst. for Economic Research, Osaka City Univ.,

<sup>\*\*</sup> ; 環境庁国立環境研究所 National Ins. for Environmental Studies, Environmental Agency of Japan.

## 1. 2 LU/GECフェーズI (1995.4 ~ 1998.3) の構成と結果

LU/GECは第I期(1995.4 ~ 1998.3)が終了し、モデルの開発と、アジア太平洋諸国の土地利用データへの実証分析をおこなった。

### (A) モデル開発

#### (1) モデルの統一的構成

モデル開発部門で開発したモデルは、以下のような統一的な構造を有する。

1) 2つの変数：被説明変数としての土地利用比率変数 $P_{ic}$  ( $i$ 地区の $c$ 番目の土地利用カテゴリー)と、社会経済変数 $X_{ik}$  ( $i$ 地区の $k$ 番目の項目)からなる。

2) 2つの関数：土地利用 $P$ を社会経済変数 $X$ に関係づける「土地利用表現関数 $f$ 」と、社会経済変数の変化を予測する(未来時点の $X$ を現時点の $X$ に関係づける)「経済成長関数 $g$ 」の二段階構成からなっている。

$$P_{ic} = f_c(\{X_{ik}\}_k) \quad (\text{両辺は同時点})$$

$$X_{ik}^{(T+1)} = g_k(\{X_{il}^{(T)}\}_l) \quad (\text{左辺は未来時点、右辺は現時点})$$

3) 予測方程式： $P_{ic}^{(T+1)} = f_c(\{X_{ik}^{(T+1)}\}_k) = f_c(g_k(\{X_{il}^{(T)}\}_l))$

#### (2) モデルバリエーション

主として上記の $f$ の取り方によって5通りのモデルが考えられる。

1) マルチロジスティックモデル(Kitamura, Kagatume)： $f$ としてロジットモデルの形式を仮定する。

$$f_c = \exp(\sum_k a_{ck} X_{ik}) / \sum_d (\exp(\sum_k a_{dk} X_{ik}))$$

2) チューネン型ロジスティックモデル(Konagaya)： $f$ として一般チューネンモデル(オリジナル、以下参照)を仮定する。

3) 一般化KSIM法(Gong)： $f + g$ にKSIM法の一般化した形式(オリジナル)を仮定する。

4) 定弾力性均衡モデル(Sunsun)：需要および供給にCES(定弾力性)関数を仮定し、需要・供給均衡方程式を解いて、土地利用の需給関係を予測する(以下参照)。

5) 土地利用空間分布予測モデル(Himiyama)：地図パターンの近接性からシミュレーションで変化を予測する(geographically explicitなモデル)。

### (B) アジア太平洋諸国の土地利用の実証分析

アジア太平洋地域を、日本(近畿地域、関東地域)、中国(東北部)、中国(華東地域・上海周辺部)、東南アジア(インドネシア、タイ等)、インド等その他諸国の5つの地域に分け、それぞれのグループが上記の基本モデルを適用し土地利用の分析を行った。

## 1. 3 定弾力性均衡モデル(スンスンモデル)の概略

ここでは、上記4)の定弾力性均衡モデル(以下スンスンモデルと略称)について若干概略する。上記2)のチューネン型モデルについては、次章以降で概説する。

スンスンモデルでは、供給側方程式は土地利用面積変数 $x$ と土地利用生産性変数 $y$ 、需要側方程式は粗需要変数 $F$ と補正因子 $C$ からなっている。

この4変数に対し、需給均衡方程式から自由度は3となる。さらに、 $F$ にロジスティック関数を仮定する飽和成長モデル等を用いることによって自由度は2となる。ここで、以下の2つのシナリオの下で予測をおこなう。

①土地利用生産性の改良がなかったときに、社会の成長はどう抑制されるか？

( $y = 1$ の仮定のもとで $F$ を解く)

②持続的な社会経済発展のためには、土地利用生産性をどこまで高めなければならないか？

( $C = 1$ の仮定のもとで $y$ を解く)

## 2. 一般チューネンモデル (GTM) の構造

### 2. 1 一般チューネンモデルの意味

上記の  $f$  としては通常、多重線形回帰、ロジスティクなどが用いられることが一般的であるが、発表者の一人（小長谷）は、土地利用の厳密な基礎理論であるチューネンモデル（理想的モデル）に基づきながら、実際の確率的な土地利用比率データに適用できるように拡張し、効果をあげた。このモデルの利点は、「土地利用前線の後退による」森林破壊や砂漠化といった直感的な描像に厳密な基礎を与え、計算・予測できるようにすることである。

すなわち、図2-1のように、土地利用のもっとも厳密な理論（チューネン理論）は、地代にもとづく土地利用の同心円的構造を予測する。しかし、これは各場所が1種類の土地利用に支配される理想的モデルで、現実のデータをあてはめることができなかった。Konagaya (1998) 小長谷 (1997a,b) では、厳密な地代理論に基づきながら、ファジーな土地利用混合が許されるモデルとなっている（図2-2）。

図2-1

Thünen Model (Thünen 1928)

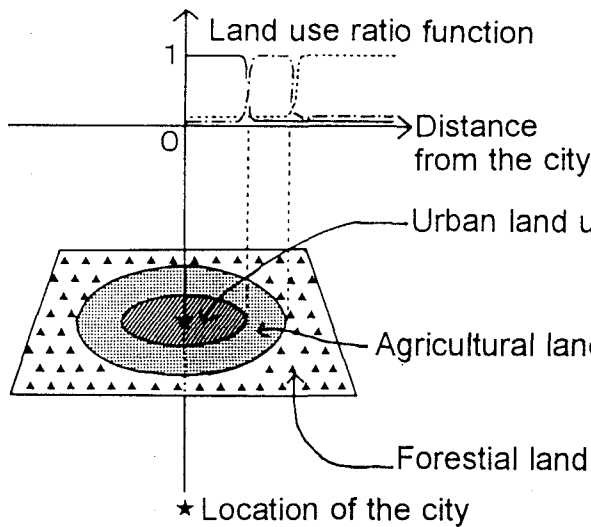
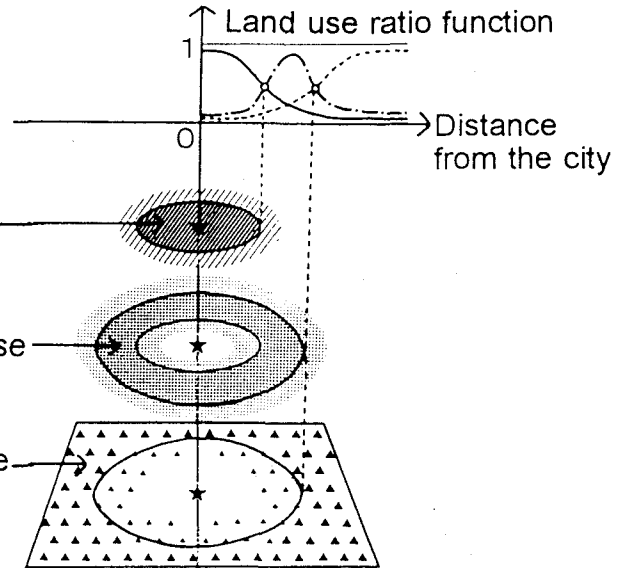


図2-2

Generalized Thünen Model (Konagaya 1998)



### 2. 2 一般チューネンモデルの数理的基礎

#### (A) 付け値地代関数

都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  の経済活動の土地利用者が、地区  $i$  の土地を利用したいとする。彼の得る便益関数を  $A^{(t)}(\alpha)$  とし、彼の払う費用関数を  $c^{(t)} \cdot d_{i\alpha}$  とする（すなわち費用については地区  $i$  から中心都市への距離  $d_{i\alpha}$  に比例するものと仮定する）。このとき、都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  の土地利用者の地区  $i$  の土地に対する付け値地代（払ってもよいと考える仮想的金額） $R^{(t)}_{i\alpha}$  が、ランダムな誤差をのぞいて確定できるとする。すなわち、

$$R^{(t)}_{i\alpha} = A^{(t)}(\alpha) - c^{(t)} \cdot d_{i\alpha} + \varepsilon^{(t)}_{i\alpha}$$

ここで  $\varepsilon^{(t)}_{i\alpha}$  は、ワイベル分布に従うランダム変数であるとし、それ以外の便益と費用の差、

$$r^{(t)}_{i\alpha} = A^{(t)}(\alpha) - c^{(t)} \cdot d_{i\alpha}$$

は、付け値地代の確定成分である。

#### (B) 確率論的チューネン原理

地区  $i$  のある土地を考えると、それが都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  の土地利用者に占められる可能性は、都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  の土地利用者の付け値地代がもっとも高くなる場合である。それは、都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  以外のすべての土地利用者、すなわち都市  $\beta$  に基礎をおくカテゴリー  $s$  の

土地利用者で  $(s, \beta) \neq (t, \alpha)$  であるものすべてについて、

$$r^{(t)}_{i\alpha} + \varepsilon^{(t)}_{i\alpha} \geq r^{(s)}_{i\beta} + \varepsilon^{(s)}_{i\beta}$$

がなりたつ場合である。

確率論的モデルでは付け値地代の誤差のため、ある一種類の土地利用に占有的に決定されない。いいかえ  
ると、地区  $i$  のある土地が都市  $\alpha$  に基礎をおくカテゴリー  $t$  の土地利用となる確率  $p^{(t)}_{i\alpha}$  は、都市  $\beta$  に基礎  
をおくカテゴリー  $s$  の土地利用者で  $(s, \beta) \neq (t, \alpha)$  であるものすべてについて、

$$p^{(t)}_{i\alpha} = \text{Prob} (r^{(t)}_{i\alpha} + \varepsilon^{(t)}_{i\alpha} \geq r^{(s)}_{i\beta} + \varepsilon^{(s)}_{i\beta})$$

であたえられる。 $\varepsilon$  がワイベル分布のランダム変数であることを前提とすると、上式はロジットモデル同様  
 $\varepsilon$  について容易に積分できて  $\varepsilon$  を消すことができる。

$$p^{(t)}_{i\alpha} = \exp (r^{(t)}_{i\alpha}) / \sum_{t' \neq t} \exp (r^{(t')}_{i\alpha})$$

土地取得メカニズムにおいて他の条件を一切同等とすると、地区  $i$  のカテゴリー  $t$  の土地利用比率  $P^{(t)}_i$   
は、上記の確率をすべての都市について足しあわせたものと同じである。このように単一都市の場合と異なり、  
すべての都市の土地利用者の影響を考慮しなければならない。かくして、一般チューネンモデル  
(Generalized Thünen Model : 以後 G T M とよぶ) の最終公式

$$P^{(t)}_i = \sum_{\alpha} p^{(t)}_{i\alpha} = \sum_{\alpha} \exp (r^{(t)}_{i\alpha}) / \sum_{t'} \{ \sum_{\alpha} \exp (r^{(t')}_{i\alpha}) \} = K^{(t)}_i / \sum_{t'} K^{(t')}_i$$

をえる。ここで式内に現れるウェイト関数は、

$$K^{(t)}_i \equiv \sum_{\alpha} \exp (r^{(t)}_{i\alpha}) = \sum_{\alpha} \exp (A^{(t)}(\alpha) - c^{(t)} \cdot d_{i\alpha})$$

である。

### (C) 便益関数の簡単化

これまでは、便益関数はすべて、都市ごとに固有のパラメータとしてきた。したがって全都市と同じ数だけ  
パラメータを特定化しなければならない。そこで簡単のため都市  $\alpha$  に基礎をもつカテゴリー  $t$  の活動の便  
益を、人口で、 $A^{(t)}(\alpha) = a^{(t)} \cdot q_{\alpha}$  と計測できるとしよう。

ここで、 $q_{\alpha}$  は都市  $\alpha$  の人口である。すると付け値地代の確定成分は、 $r^{(t)}_{i\alpha} = a^{(t)} \cdot q_{\alpha} - c^{(t)} \cdot d_{i\alpha}$   
となり、G T M に含まれるパラメータは、 $a^{(t)}$ 、 $c^{(t)}$  ( $t = 1 \cdots T$ ) の  $T$  (土地利用カテゴリー数)  $\times$   
2 個となる。このときウェイト関数は、 $K^{(t)}_i [a^{(t)}; c^{(t)}] \equiv \sum_{\alpha} \exp (a^{(t)} \cdot q_{\alpha} - c^{(t)} \cdot d_{i\alpha})$   
となる。以下ではこの簡単化を採用する。

## 3. インドネシア・スマトラ島の土地利用変化の特性

モデルは、インドネシアの土地利用で観察される以下の法則性 (小長谷 1996) を説明する必要がある。  
いま、3 つの土地利用カテゴリーを考え、森林的土地利用比率を  $F$ 、農業的土地利用比率を  $A$ 、都市的土  
地利用比率を  $U$  とする。1980 年度、1990 年度のデータを添え字 8、9 を付けて表すと、比率であるこ  
とから、 $F8 + A8 + U8 = 1$ 、 $F9 + A9 + U9 = 1$ 、がなりたつ。変化分を  $\Delta$  を付けて表すと、 $\Delta F =$   
 $F9 - F8$ 、 $\Delta A = A9 - A8$ 、 $\Delta U = U9 - U8$ 、から、 $\Delta F + \Delta A + \Delta U = 0$ 、がなりたつ。

### 3. 1 説明すべき法則性 - (1) 中間地帯の仮説

林地比が 40% ~ 60% 程度の所で森林が急速に減少する。すなわち、 $0.4 < F8 < 0.6$  程度の地域で、  
 $\Delta F$  が負の大きい値をとる (図 3-1)。いいかえると、図 3-2 のように、森林比率が大きい純粋林地  
では森林の変化は少なく、逆に森林比率が少ない非森林でも森林の変化は少ない。その中間の地域で森林  
減少が激しい。

### 3. 2 説明すべき法則性 - (2) 比率法則

都市的土地利用対農業的土地利用が 1 対 5 程度であり、森林減少分もこの比率で配分される。まず、図  
3-3 のように、大部分の地域で  $U : A = 1 : 5$  が成り立つ。上記から  $-\Delta F = \Delta A + \Delta U$  で、森林減  
少分は農地か都市地域に変化する。この際、 $\Delta U : \Delta A = 1 : 5$  となる。

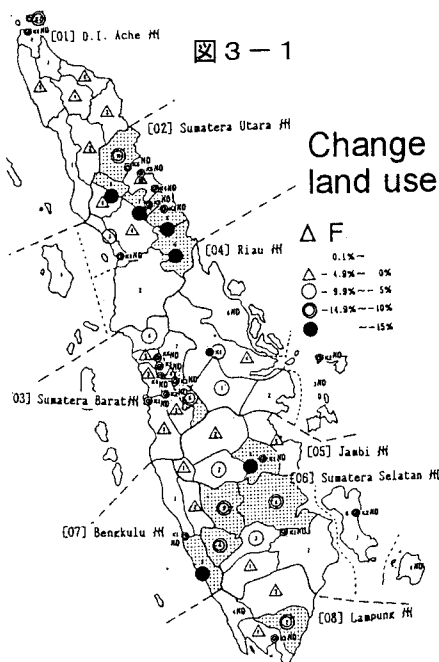


図 3-1

### Change of forestial land use ratio

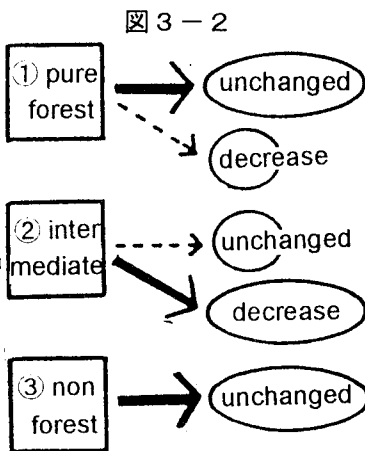


図 3-2

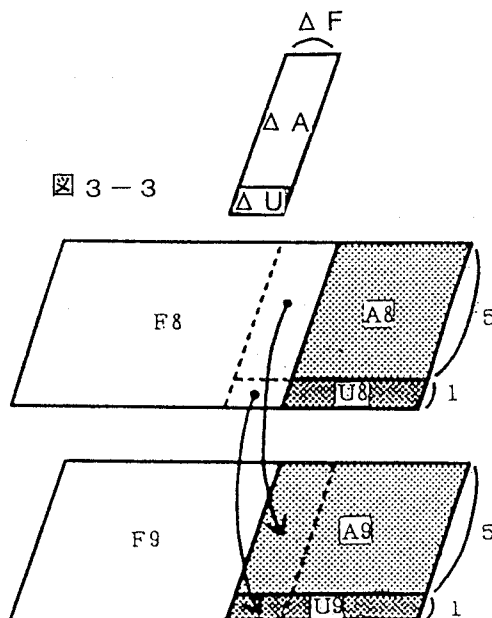


図 3-3

## 4. 一般チューネンモデルの適用結果

モデルは非線形のため、最近開発された進化的戦略（遺伝的）アルゴリズム Genetic Algorithm で解く必要がある。この結果の予測値と原データの分布は図 4-1 の通り、 $R^2$  は 0.7 ~ 0.9 程度であった。これは人口と距離以外の説明変数を含まない土地利用モデルとしては極めて良い説明力といえる。

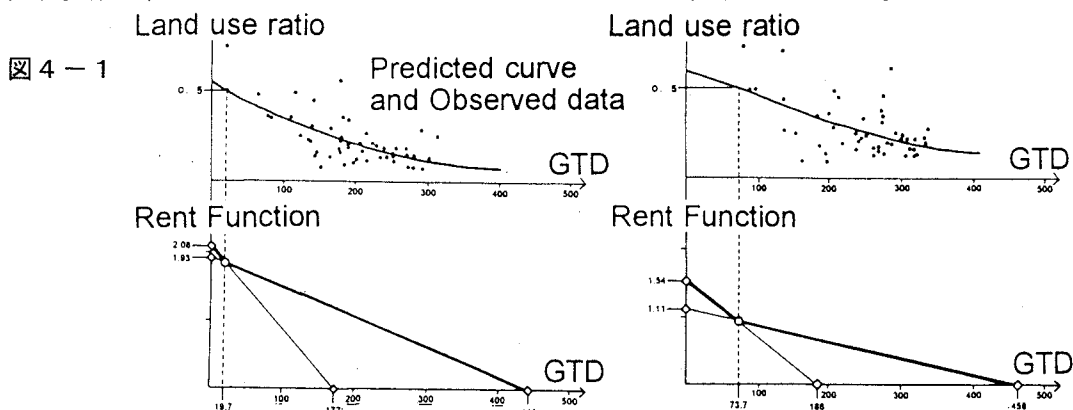


図 4-1

## 5. 一般チューネンモデルによる土地利用変化の説明

### 5. 1 多都市の影響の取り込み

実際には、個々の地域の土地利用に対して、その周辺の多くの都市の影響力がオーバーラップして存在している。一般チューネンモデルでは、一種の複合的な距離である一般チューネン距離（Generalized Thunen Distance : GTD）をつくることのできる。この等高線を図 5-1 に示した。

### 5. 2 中間地帯の仮説の説明

横軸に GTD をとると、図 5-2 のように、一般チューネンモデルは、ロジスティック的な曲線によって表現される。上段図が、 $t$  時点における 3 つのカテゴリー間の土地利用比率で、都市からの仮想的距離（GTD）に従って配列されている。 $t+1$  時点になると、これが右方向に移動する（中段の図）。その結果、両者の差を取った土地利用変化は、土地利用境界の付近で鋭い山を作る。このことは土地利用境界付近で激しい土地利用変化が起こることを良く表している。このように、一般チューネンモデルの利点は、これまでしばしばいわれてきた「土地利用前線 land use frontier の移動による土地利用変化」という直感的描像に厳密な基礎付けを与え、正確な計算・予測をすることができるようになることである。図 3-1 でも、北部スマトラ州のメダンと南部スマトラ州のパレンバン（スマトラ全体の第 1 位、第 2 位都市）の周辺のリング状の地帯で、もっとも激しい森林減少が起こっていることがわかる。

図 5-1

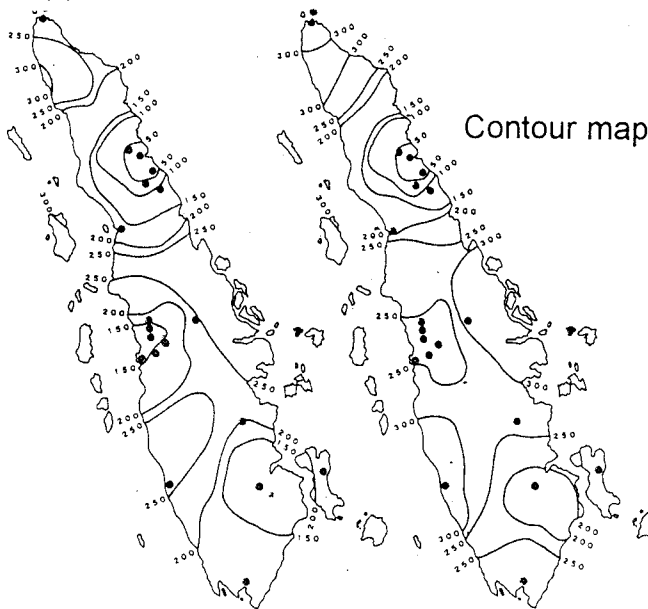


図 5-2

Pt: Land use ratio  
in the year t

Land use category  
in the year t

U: urban

A: agricultural

F: forestal

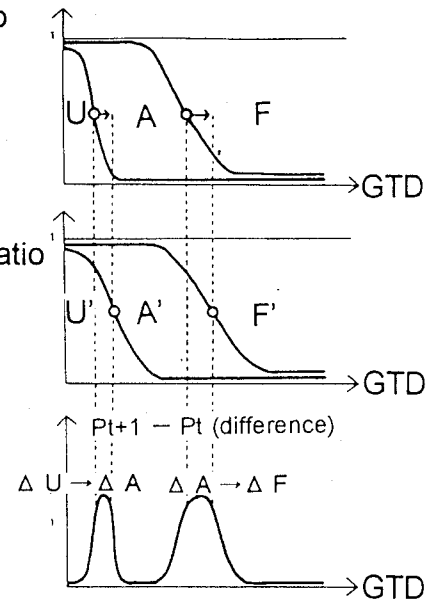
Pt+1: Land use ratio  
in the year t+1

Land use category  
in the year t+1

U': urban

A': agricultural

F': forestal



### 5.3 比率法則の説明

土地利用比率の変数は、制約条件  $F + A + U = 1$  をもち、自由度が2となる。変数を平等に扱うため3角座標空間表示が有効である。上記図3.2のように、比例法則は、土地利用比率変数がつくる3角座標空間内で、1対5の直線上で土地利用混合が変化することと同値である(図5-3)。一方、もしも一般チューネンモデルが厳密になりたつとすると、ある計算(小長谷 1997b)によって、土地利用混合はGTD等値曲線とよばれる近似的な曲線上に配列することが示せる。ここで、まず純粋な林地、森林極限  $(F, A, U) = (1, 0, 0)$  から出発し、じょじょに都市に近づいていくとする。まず農地の拡大(林地の農地への転換)の段階をへる。これは図5-4中左へ進むことにあたる。ある地点で、段々都市化(林地・農地から都市的土地利用への転換)が始まる。これは図5-4中で曲線が上方に折れ曲がる部分にあたる。最後は都市極限に近づく。この農地の拡大部分では近似的に直線になるから、比例法則はモデルから正しく説明される。図5-5はシミュレーション結果である。

図 5-3

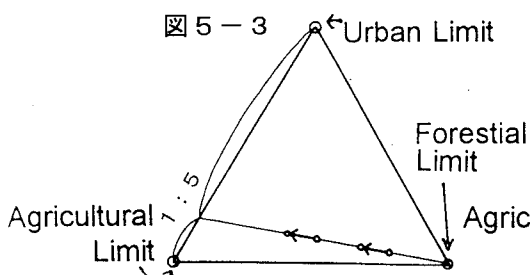


図 5-4

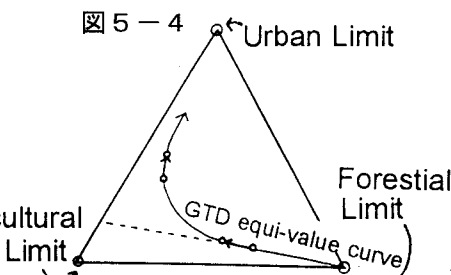
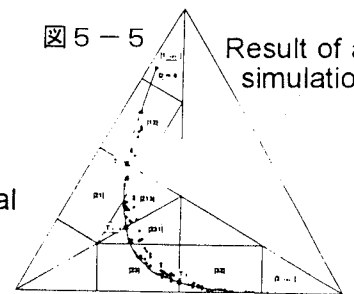


図 5-5 Result of a simulation



【参考文献】 □大坪国順編(1996)『LU/GECプロジェクト報告ーアジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測(Ⅰ)ー』 □大坪国順編(1997)『LU/GECプロジェクト報告ーアジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測(Ⅱ)ー』 □大坪国順編(1998)『LU/GECプロジェクト報告ーアジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測(Ⅲ)ー』 □小長谷(1996)「リンケージモデルの再定式化」「土地利用面積を求める式の定式化」「調査の概要」「インドネシアにおける土地利用変化の実態分析」他(上記に収録) □小長谷(1997a)「LU/GEC基本モデル(LU/GEC-I)の新たな展開」「インドネシアにおける土地利用変化」他(上記に収録) □小長谷(1997b)「土地利用と一般チューネンモデル」『理論地理学ノート10』都立大学 □Konagaya(1998) "The Generalized Thünen-Alonso Model for Land Use Change in Sumatra Island" *Geographical & Environmental Modelling*.