

地球環境保全のための土地利用研究 とジャワモデル

Land Use Study for Global Environmental Conservation and Jawa Model

小長谷一之^{*}・大坪国順^{**}・スンスン^{***}

Kazuyuki KONAGAYA^{*}・Kuninori OTSUBO^{**}・Sunsun Saefulhakim^{***}

ABSTRACT: Land use study is one of the important field in understanding, systematizing and laying the foundation of the 'environment as a system' in relation to human beings and their society. Also it is the subject of social environmental engineering that encompasses both natural and social scientific aspects.

LU/GEC(Land Use for Global Environmental Conservation) Project of NIES aimed at constructing land use prediction models for Asia-Pacific region. This article presents Indonesian results especially Jawa results using the following two principal models.

'CEDEq-LU(Constant Elasticity Dynamic Equilibrium of Land Use) Model' (Sunsun1998) can predict the future change of supply-demand relationships of land market by solving the equilibrium equations that are composed of both supply functions with land use area and land use productivity variables and demand functions with basic demand and correction factor valuables.

'GT(Generalized Thünen) Model' (小長谷 1997a,c, 1998, Konagaya1997a, 1998a,b) is the extension of traditional normative Thünen model, the exact fundamental theory of land market, to be able to explain the real land use ratio data. This new model successfully give a exact theoretical interpretation to the intuitive picture of 'movement of land use frontier' such as deforestation or desertification, and enables us to predict the land use change in the future. This model tells us the realization of the land use with strong rent-bidding power.

Both models interpret urbanization processes driven by globalization as the prime factor producing land use changes. Thus, one of the environmental implication of land use is how to reconcile both globalization and sustainability: the search for land use activities with **low** environmental impact and **high** rent-bidding ability.

KEYWORDS: land use modelling, LU/GEC project, Generalized Thünen Model, Constant Elasticity Dynamic Equilibrium Model of Land Use, Rent-Bidding Ability, Globalization, Sustainability

^{*} ; 大阪市立大学経済研究所 *Ins. for Economic Research, Osaka City University,*

^{**} ; 環境庁国立環境研究所 *National Ins. for Environmental Studies, Environmental Agency of Japan,*

^{***} ; インドネシア・ボゴール大学 *University of Bogor, Republic of Indonesia*

1. 地球環境保全のための土地利用研究（LU/GECプロジェクト）

環境を人および人の生活する社会との関連のもとでシステムとしてとらえ、体系化を図るとともに、社会と環境の基礎づくりをシステム面から実現させていく上で、欠かすことのできない分野が土地利用である。土地利用は、自然科学・工学・人文社会科学のすべての面を有する文理融合的な社会的環境工学の対象である。現在、土地利用変化の最大の Driving Force は Globalization にもとづく人間活動であり、土地利用は人間・社会的側面からみた地球環境問題の中心課題の一つといつてよい。

環境庁・国立環境研究所の地球環境保全のための土地利用研究では、このような問題意識のもとで、LU/GEC（Land Use for Global Environmental Conservation: 地球環境保全のための土地利用変化研究）プロジェクトを開始し、アジア各国の土地利用変化モデル構築とその予測をおこなってきた。本研究ではその成果を、インドネシア、特にジャワ島の事例をもとに発表する。

2. 定弾力性均衡モデル（スンスンモデル）

2.1 供給関数

生産量 $Q_s(t)$ は、各 i タイプの土地利用ごとの生産量 $q(i, t)$ のべき関数からなっていると仮定する（モデルの名はべき関数が定弾力性であることからくる）。

$$Q_s(t) = a_0 \Pi_i (q(i, t))^{a_i}$$

土地利用生産量 $q(i, t)$ は、土地利用面積 $x(i, t)$ と土地利用生産性 $y(i, t)$ に分けられる。

$$q(i, t) = x(i, t) y(i, t)$$

2.2 需要関数

消費量 $Q_D(t)$ は、各 k タイプの因子ごとの需要量 $D(k, t)$ のべき関数からなっていると仮定する。

$$Q_D(t) = b_0 \Pi_k (D(k, t))^{b_k}$$

需要量 $D(k, t)$ は、需要因子 $F(k, t)$ と補正因子 $C_i(k, t)$ に分けられる。

$$D(k, t) = F(k, t) C_i(k, t)$$

2.3 需給方程式

需要と供給が均衡していると仮定する方程式： $Q_s(t) = Q_D(t)$

を時間微分し、着目変数である、 i 番目の土地利用面積 $x(i, t)$ について解いて、積分すると、

$$\ln x(i, t) = \sum \beta \ln F(k, t) + \sum_{j \neq i} \alpha \ln x(j, t) + (\text{補正項})$$

を得る。これは、ある土地利用面積 $x(i, t)$ が、人口・GDPといった需要因子および、自分以外の土地利用面積と線形関係にあることを示している。これを CEDEq-LU 方程式とする。

2.4 キャリブレーション結果

土地利用を5カテゴリとし、1961年から1989年までのデータに対し、多重回帰でパラメータを決定する。これを用いてインドネシアの人口成長の予測をおこなうことができる（図1）。

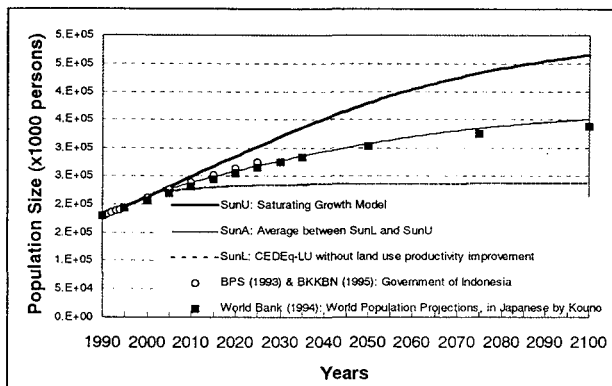


図 1

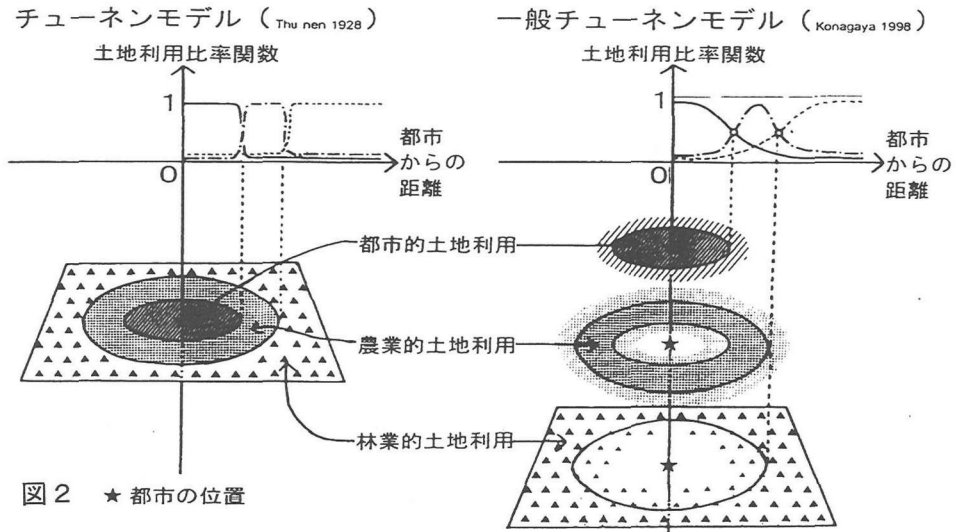
①最低位予測は、このC E D E q - L U方程式で土地利用生産性の改善がまったくなかった場合である。この場合、上記で補正項を落とせるので、完全な多重線形回帰となる。インドネシアの人口は、2003年までは成長するがその後停滞し、2億5千万を越えることがなく静止する。成長がかなり抑制されるシナリオである。

②最高位予測は、F（人口とGDP）にロジスティック関数を仮定した飽和成長モデルの結果である。ロジスティック成長率は人口が2.9%、GDPが6.1%である。最終的な飽和状態に到達すると、GDPは1997年時点の95倍、人口は2.5倍の5億人まで可能となる。その結果、一人当たりGDPは約40倍に拡大する。

③興味深いことに、この両者の平均が、世界銀行およびインドネシア政府の一般人口予測にほぼ一致する。したがって、C E D E q - L Uモデルは、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？を示唆していると考えられる。

3. 一般チューネンモデル（GTモデル）

一般チューネンモデル（小長谷 1997a,c, 1998, Konagaya 1997a, 1998a,b）は、土地利用の厳密な基礎理論であるチューネン理論に基づきながら、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たものである。このモデルの利点は、「土地利用前線 land use frontier 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・予測できるようになることである。この視点では地代克服力の大きい土地利用が実現することが導かれる。すなわち、図2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の構造を予測する。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。



3. 1 モデルの基礎

モデルの構造は、小長谷・大坪（1998）を参照のこと。

3. 2 キャリブレーション結果

信頼すべきデータが得られている西ジャワ、カリマンタンを対象とする（スマトラについては小長谷・大坪 1998 参照）。以下では、 i ：地区番号（ $i = 1 \cdots M$ ）、 α ：都市人口（ $\alpha = 1 \cdots N$ ）、 N ：都市数、土

地利用を考える対象地区は、西ジャワの 19 県＋カリマンタンの 24 県の 43 地区であり、 $M = 43$ となる。土地利用に影響を与える都市は、西ジャワの 5 都市＋カリマンタンの 5 都市の 10 都市であり、 $N = 10$ となる。土地利用カテゴリーは、都市的土地利用 ($t = 1$)、農業的土地利用 ($t = 2$)、林地的土地利用 ($t = 3$) の 3-カテゴリーモデルを考える。被説明変数は $P^{(t)}$ ；地区 i の t カテゴリーの土地利用比、説明変数（独立変数）は q_{α} ：都市 α の人口（×万人）、 $d_{i\alpha}$ ：地区 i と都市 α 間の距離（km）である。

3. 3 1980 年の結果

GA（遺伝的アルゴリズム）によってキャリブレートされたモデルは、

$${}^{80}P^{(1)}_i = K_i [0.31; 1.16] / \{K_i [0.31; 1.16] + K_i [0.56; 0.45] + K_i [0.26; 0.00]\}$$

$${}^{80}P^{(2)}_i = K_i [0.56; 0.45] / \{K_i [0.31; 1.16] + K_i [0.56; 0.45] + K_i [0.26; 0.00]\}$$

$${}^{80}P^{(3)}_i = K_i [0.26; 0.00] / \{K_i [0.31; 1.16] + K_i [0.56; 0.45] + K_i [0.26; 0.00]\}$$

$K_i [0.31; 1.16] = \sum_{\alpha} \exp(0.31 \cdot q_{\alpha} - 1.16 \cdot d_{i\alpha})$ 、 $K_i [0.56; 0.45] = \sum_{\alpha} \exp(0.56 \cdot q_{\alpha} - 0.45 \cdot d_{i\alpha})$ 、 $K_i [0.26; 0.00] = \sum_{\alpha} \exp(0.26 \cdot q_{\alpha} - 0.00 \cdot d_{i\alpha})$ となる。モデルの適合度は、 $R^2 = 0.89$ 、 $SRMSE = 0.33$ である。

3. 4 1990 年の結果

GA（遺伝的アルゴリズム）によってキャリブレートされたモデルは、

$${}^{90}P^{(1)}_i = K_i [0.42; 0.98] / \{K_i [0.42; 0.98] + K_i [0.59; 0.39] + K_i [0.42; 0.07]\}$$

$${}^{90}P^{(2)}_i = K_i [0.59; 0.39] / \{K_i [0.42; 0.98] + K_i [0.59; 0.39] + K_i [0.42; 0.07]\}$$

$${}^{90}P^{(3)}_i = K_i [0.42; 0.07] / \{K_i [0.42; 0.98] + K_i [0.59; 0.39] + K_i [0.42; 0.07]\}$$

$K_i [0.42; 0.98] = \sum_{\alpha} \exp(0.42 \cdot q_{\alpha} - 0.98 \cdot d_{i\alpha})$ 、 $K_i [0.59; 0.39] = \sum_{\alpha} \exp(0.59 \cdot q_{\alpha} - 0.39 \cdot d_{i\alpha})$ 、 $K_i [0.42; 0.07] = \sum_{\alpha} \exp(0.42 \cdot q_{\alpha} - 0.07 \cdot d_{i\alpha})$ となる。モデルの適合度は、 $R^2 = 0.88$ 、 $SRMSE = 0.33$ である。

3. 5 2025 年の結果

上記の 2 時点の結果から、以下の諸点がわかる。(1) 説明力：多変数の投入をおこなうことも可能であるが、わずかの説明変数で土地利用を説明する場合もっともよいパフォーマンスを示しているのではないかと考える。この理由は、いうまでもなく、通常のポテンシャル法ではパラメータを先験的に設定して適用をおこなうが、一般チューネンモデルでは逆にもっとも適合度の高いパラメータを後験的に探索するからである。しかも一般チューネンモデルは厳密な理論的基礎をもっているところが、これまでのポテンシャル法と異なる。ただしパラメータに対し表式が非線形なため、通常の方法では解くことができない。このため、GA（遺伝的アルゴリズム）という新しい方法でキャリブレーションをおこなう。(2) パラメータの時間的安定性：上記のようにパラメータが時間的に非常に安定していることがわかった。一般に多くのモデルでは、各時点ごとにパラメータが大きくかわることが多く、その場合、予測のためには単なる説明変数の成長変化だけでなく、パラメータ自身の変動をも予測する必要がでてくるが、難しいことが多い。一般チューネンモデルの安定性の結果、パラメータの時間的変化をさらに複雑な社会経済的關係から推論することなく、一定とみなし、人口成長モデルのみと組み合わせて安定した予測をおこなうことが正当化される。この点から、2025 年までの人口変化をトレンドで予測（ただし DKI ジャカルタだけは 1200 万人で固定）し、1980 年 90 年の平均値をパラメータに代入したモデルが出した結果を、図 3 に示した。

3. 6 土地利用変化の動向

ジャカルタ首都圏（Jabotabek という）の郊外 3 県では、1990 年時点ですでに都市的土地利用比は高く、2025 年には、全面積の 3 分の 1 が市街地化するとみられる。これに対してもっとも都市化の急激なのは、さらに外側にある拡大首都圏の超郊外 3 県である。特に東郊のカラワン県、ブルワカルタ県は、9%→28%、3%→25%と、もっとも急速に都市化が進むと予測される。その他、より大きなスケールでは、ジャカルタとバンドン（国内第 3 位都市）をつなぐ軸にそって、20%以上の高都市化進展地域となっている。こう

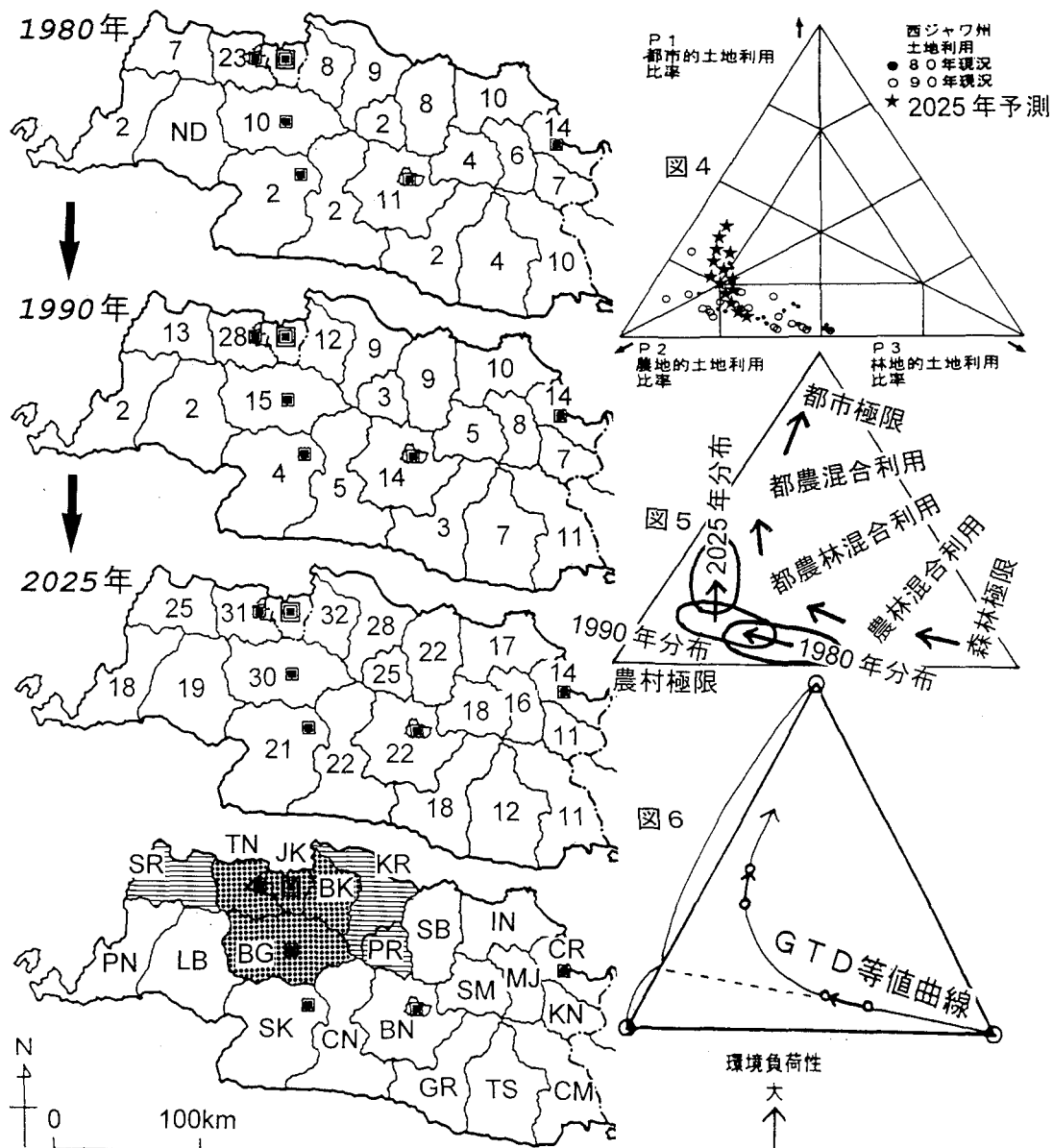


図3：西ジャワの土地利用予測（都市的土地利用%）

都県名

首都圏ジャバ・タベック JK:ジャカルタ、TN:タンゲラン、BG:ボゴール、BK:バタビ

拡大首都圏 SR:セラン、KR:カラワン、PR:プルワカル

その他

SB:スバング、IN:インドラヤ、CR:チホング、KN:クニガン、
MJ:マジャレンガ、SM:スマタング、BN:バントング、CM:チミス、TS:タシマラヤ、
GR:グルト、CN:チンジュル、SK:スカグミ、LB:レバタ、PN:パングラン

図7

した急速な郊外の発展を小長谷（1997b）では、「FDI型の新中間層都市」と呼んだ。

3. 7 三角座標空間における挙動

土地利用比率の変数では、変数を平等に扱うため3角座標空間表示が有効である。図4、図5のように、1980年、1990年、2025年の順に、土地利用表現点は、右下から左に向かい、さらに上方に向かって移動していく傾向がある。これはモデルから解釈が可能である。もし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1997c）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（図6）。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：農林混合利用）の段階をへる。これは図5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中で曲線が上方に折れ曲がる部分にあたる（都農林混合利用）。最後は都農混合利用をへて都市極限に近づく。

4. のぞましい土地利用とは

上記いずれのモデルにおいても、Globalizationにもとづく都市化が土地利用変化の最大の要因となっている。いいかえると、土地利用変化からみた最大の課題は「GlobalizationとSustainabilityをいかに調和させるか」ということである。一般論としては地代克服力が大きくなると環境負荷性は高まる（図7）。そこで「環境負荷性小＋地代克服力大」（経済性を有しSustainable）という土地利用を追求すべきであろう。

【参考文献】□大坪国順編（1996）『アジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測（Ⅰ）《LU/GEC平成7年度報告書》』□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《LU/GEC平成8年度報告書》』□大坪国順編（1998a）『環境庁地球環境研究総合推進費終了報告書：地球環境保全に関する土地利用・被覆変化研究（平成7年度～平成9年度）《LU/GEC平成9年度報告書》』□大坪国順編（1998b）『環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書：地球環境予測のための情報のあり方に関する研究（平成7年度～平成9年度）』□小長谷一之・大坪国順（1998）「土地利用地球環境保全（LU/GEC）プロジェクトの展開と一般チューネンモデルの開発」『第6回地球環境シンポジウム講演論文集』土木学会□小長谷一之（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（上記報告書に収録）□小長谷一之（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（上記報告書に収録）□小長谷一之（1997b）「アジア都市経済と都市構造」『季刊経済研究』20-1□小長谷一之（1997c）「土地利用と一般チューネンモデル」『理論地理学ノート10』東京都立大学□小長谷一之（1998）「チューネン型ロジスティックモデル」「モデルによる国別土地利用変化予測結果」「地域レベルでみた土地利用・被覆変化」他（上記報告書に収録）□Konagaya（1997a）"On the Generalized Thünen-Alonso Model" *Urban Economics Workshops, Kyoto University* □Konagaya（1998b）"The Generalized Thünen-Alonso Model for Land Use Change in Sumatra Island" *Geographical & Environmental Modelling* □Konagaya（1998a）"LU/GEC Fundamental Model and the Generalized Thünen-Alonso Modeling" in *THE EARTH'S CHANGING LAND: GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change, Barcelona, Spain* □Konagaya（1999）"Land Use Dimensionality in 3-Category Thünen-Alonso Model" *Geographical & Environmental Modelling*（投稿予定）□Sunsun（1997）"Land Use Change of Java and its modeling"（上記報告書に収録）□Sunsun（1998）"Constant Elasticity Dynamic Equilibrium Model of Land Use"（上記報告書に収録）