

IV-41

空間相互作用を取り込んだNNモデルの開発

室蘭工業大学 学生員 ○佐々木 恵一

室蘭工業大学 正員 田村 亨

専修大道短大 正員 榊谷 有三

1. はじめに

最近注目を集めている複雑系は、自然科学、社会科学の分野で今までモデル化が困難であった現象の再現という点で多くの成果をあげている。その特徴は、ある簡単な動作をする要素が数多く集まり形成されたシステムが新しい性質や能力を生み出し(これを創発と呼ぶ)、予測が困難な現象を生み出すというものである。现阶段の複雑系研究は現状再現に力を置いているが、複雑系解明には創発の情報論の原理の解明が進んでいるため、複雑な現象を把握して予測するための一手法となる可能性を内包している。

本研究では複雑系の一つであるとされているセルラーオートマトン(Cellular Automaton, 以後 CA と略す)を用い、都市モデルの構築を目的とする。また都市成長を複雑系と捉える際、空間相互作用の把握にはニューラルネットワーク(Neural Network, 以下 NN と略す)モデルを適用する。なお、研究対象は、フィリピンメロマニラ都市圏の都市成長過程である。

2. 空間相互作用と都市モデル

(1)従来の都市モデル

都市モデルの代表例である都市経済学、計量経済学では「人は効用を最大にするように行動する」という仮定を前提に分析がなされてきた。これは人を合理的経済人とする概念である。この前提をもとに、マクロ都市モデルの基本構造は、商業地・就業地を魅力度、距離を抵抗パラメータとし、居住地へ人口を配分する方法が取られてきた。例えば、ピーターアレンは都市に人口が集中することにより雇用が発生し、人口増がもたらされ、その様な都市が相互に影響し合いながら成長するという多都市モデルを開発した。その後都市モデルは多くの変数を導入したグラビティモデルへと発展してきた。しかし、正確に現象を再現することは困難であり理論モデルの域を脱し

ていない。また、現実にはこの仮定が適用できない状況が多いことも指摘されている。その原因としては、従来のグラビティモデルを基本構造とする都市モデルは2都市モデルであるためである。これは、対象の都市の魅力度は他の一都市との比較から効用が算出されるためである。多都市モデルにおいても2都市モデルで比較を行った上で合計し対象都市の魅力度とする。そのため多地域間相互作用が考慮されない。また、この空間相互作用をモデル内に取り込もうとすると、その入力値は膨大な数となり、同時に推計しなくてはならないパラメータ数も膨大な数となる。そのため、パラメータ同定の際、安定的な解を得ることが出来ず、空間相互作用を多地点データで入れることが難しい。

ここ数年、経済学の分野では収穫一定とする伝統的な国際経済学・地域経済学に対して、「新しい空間経済学」の研究が進展してきている。この分野は規模の経済と輸送費用との交互作用により内生的に生じる集積力と自己組織化を中心として、あらゆるレベルにおける空間・地域経済システムの形成と発展を、統一的に理解しようとするものである。この方法は一般均衡理論を中心とする伝統的な数理経済学の拡張として独自に発展してきたものである。

一方、マイクロモデルは合理的経済人を前提とするモデルから限定合理性を導入するモデルまで発展してきているが、これを都市モデルへと拡大することは緒についたばかりである。例えば北村論文、サンフランシスコを対象とした研究(UCLAの研究)などは、一人一人の行動をシミュレーションして都市全域のモデルとしている。また、東大のカルタスモデルはマクロモデルであるが、その構造は商業立地、工業立地、居住立地を企業・家計それぞれの選択モデル(マイクロモデル)として扱い、定量化している例である。

(2)本研究で扱う空間相互作用モデル

Building a Model for Spatial Interaction using NN Approach
by Keiichi SASAKI, Tohru TAMURA and Yuzo MASUYA

本研究では3章でまとめるCAを使って、多地点相互の空間相互作用モデルを構築する。CAの最大の特徴はある時点における多地点相互作用を定式化するとともに、この関係を $t+1$ 時点の予測値と実測値との乖離から評価し、時点 t を自己組織的に再学習すると言うフィードバックループを持っている点である(図1)。このため、時点 t の構造把握は出来るだけ簡単で分かりやすいものを仮定しておいて、多地点相互作用を表し、これを時間発展させる。

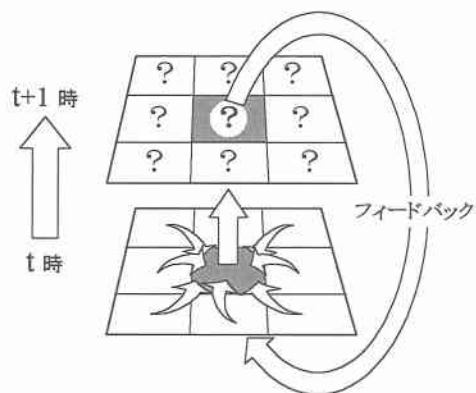


図1 CAによる空間相互作用¹⁾

3. 複雑系におけるCA

複雑系とは、エレメント(要素)がたくさん集まって出来た一つのシステムであり、そこでエレメントが集まった時、新しい性質や能力が生まれるシステムである。現在の状況が決まれば、未来の状況が一意に決まるシステム(決定論的系)においても未来の予測が困難な運動(カオス)が生じる時がある。このカオスの存在は、現在の状況を知ることが出来れば未来は確定的に予言できるとする力学的世界観に大きな影響を与えた。一方、複雑系では要素間の関係から個々の要素の性質からはただちに予測できない創発を考える。この創発は、系のすべての現象はそれぞれを構成している要素の性質から説明できるとする要素還元主義の限界を示す複雑系の重要なキーワードである。²⁾

キャストイは複雑系を以下のように定義している。³⁾

定義1: モデルを構成している要素の数は中程度。つまり、少なすぎてもいけないし、多すぎてもいけない。しかし、この中程度と言うのはモデルに依存している。

定義2: エレメントは個性を持っている。経済や政治などにおいて各要素(個人かもしれないし企業かもしれない

が)は、知的な決定をしている。

定義3: 各要素は局所的な情報にもとづき相互作用する。完全な情報を知って意思決定しているのではなく、限られた情報にもとづいてしか、意思決定が出来ない。

また、複雑系では局所的なルールが与えられた要素から構成された系にマクロなふるまいが創発を生じ、これが要素にフィードバックする(図1)。例えば、人が集まると人間関係(=局所的なルール)が生まれ、それが広がると社会が構成され(=創発)、そして自ら構成した社会規範が個人の行動原理(=ルール)に影響を与える(=フィードバック)というシステムである。すなわち、局所ルールからはただちに分からない創発の情報論的な原理の解明が、複雑系科学の主要な課題となってきた。しかし、複雑な系を理解する適切な方法を、現在の物理学は持っていない。例えば、脳および脳の力学系モデルを考えてみる。これらの系は巧みにデザインされ機能を付与されている。このような複雑系の運動を認識するためには、運動に内包されている「価値」や「合目的性」を視野に入れた新しい認識方法が必要になる。

このような複雑なシステムと関連して何故かその答えが分からない現象を説明しようとする理論として「複雑適用系」が誕生した。その理論の特徴は①その制御が分散されていること、②複数のレベルの組織に分かれていること、③すべての複雑適用系が、人間の予見や意識を越えた未来に対する予感を内包していること、④それがシステムによって、新しい機会を作り、進展し、常に変化していることである。この理論の手法としては、経済学では非線形動学(不均衡理論)や生物論的アプローチがあるが、どれも研究途上であり体系化するには至っていない。

近年、自然科学の分野で注目されているCAは、簡単なルールに従って時間とともに機械的に発展する細胞状の要素の集まりのことであり、CAの時間発展するルールはごく単純であるのに、挙動がフラクタルやカオスになる。この性質は複雑適用系を理解するにあたり有効と考えられ、注目を集めている。

複雑系とは別の見地から発展してきたシステムの中にNNモデル、カオスがある。人間の脳をモデリングすることを目的として発展してきたNNモデルは、内部をブラックボックス的に扱うため、構造の把握は出来ないが、その優れた現状再現能力は複雑な現象のモデリングに多く

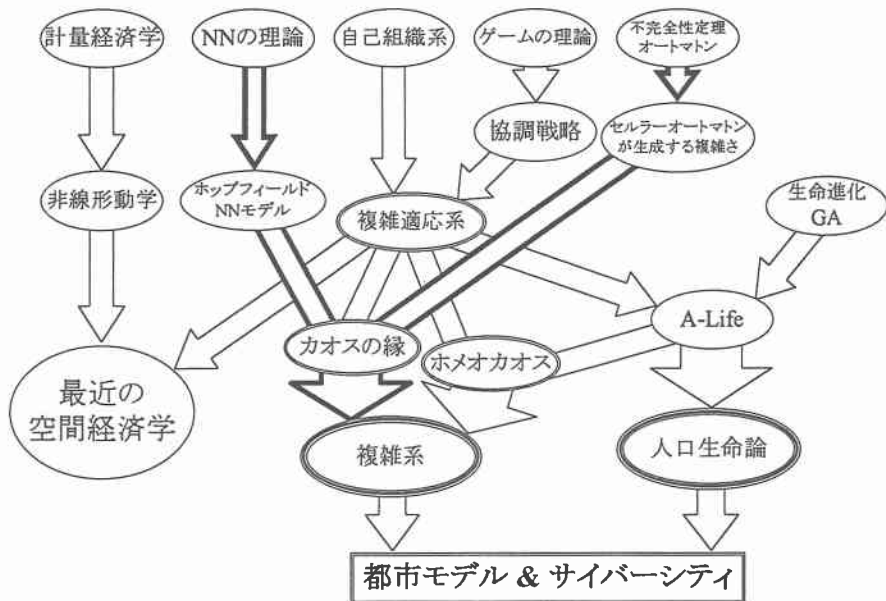


図2 複雑系と土木計画学⁴⁾

適用されている。一方、物理学の分野で発展してきたカオスは複雑な現象の中には初期状態に強く依存し、予測不可能と思われた現象も周期的な挙動を示すことを表し、力学的世界観に大きな影響を与え、複雑系という存在を示し、その研究分野への入り口となった。

このようなシステムに対し、従来の土木計画学では線形計画の決定の理論に重点が置かれ、非線形計画の議論が始まったのはつい最近である。線形計画を多用した背景には、計画学が「予測」を中心に展開され、モデルの操作性や分かり易さを求めたためである。近年、土木計画学においても生物的アプローチ手法の適用例は多くある。しかし、これらのモデル思考が現象の再現にあるのに対し、予測を前提としてモデルを構築するため、実用を念頭にいたモデルの構造把握の面で問題点が多い。しかし、社会現象は非線形でしかも動学化されているのが一般的である。⁹⁾

4. CA を用いた空間相互作用モデル

都市の成長過程を分析する際、マクロとミクロの空間相互作用を考慮しなくてはならない。ミクロの相互作用とは周りの地域との相互関係である。また、マクロの相互作用とはミクロの相互作用により系の内部に同じ挙動を示す集団が形成され、その集団が相互作用するものであり、本研究の目的はこの両者を内生化したモデル構築であ

る。本研究においてはこの2つを以下のように考え分析を行った。

(1) NN モデル

本研究で扱った NN モデルは入出力間の非常に複雑な関係をも取り込んで適合させるモデルであり、モデルの安定性、汎用性、多変量性、非線形性の面から見て非常に優れたモデルである。そこで CA との融合を念頭に空間を考慮した土地利用モデルへの適用を試みた。

清水ら¹⁰⁾は2層 NN モデルを空間相互作用モデルへ適用し、さらに意味解釈を行ったが、3層 NN モデルへの適用は行っていない。また土井ら¹¹⁾は土地利用モデルに3層 NN モデルを適用し、中間層において意味解釈を試みている。この他 NN モデルを土地利用モデルへ適用した例は多くあるが、空間相互作用への考慮はなされていない。

NN モデルへの空間相互作用の導入については文献6に示されているように、NN モデルの入力値は互いに相互作用をしながら出力値を出す。ここで重要なのは、空間の位置関係を入力素子に対応させて入力することである。文献6では各入力素子がゾーンに対応しているが、本研究においては地域を格子状に分割し、各格子を入力素子に対応させることにより位置関係を対応させている(図3)。

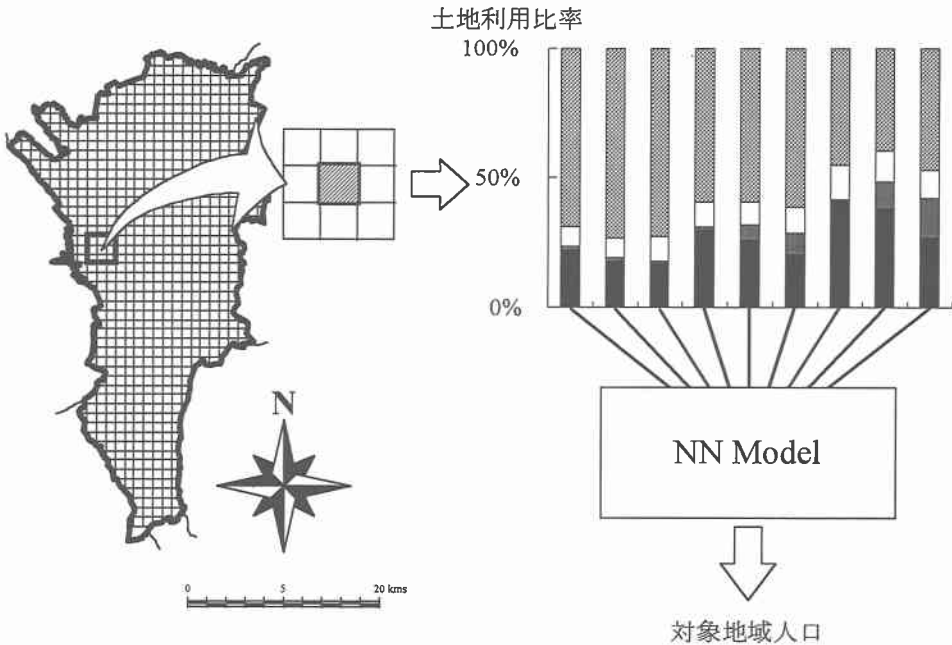


図3 都市成長モデル概念図

(2)空間相互作用モデル

本研究が目指すモデルは、空間特性を把握したセルが集まり、同期的に動作することにより一つのシステムを自立的に構築するモデルである。すなわち CA を用い、各セルを並列処理し、時間発展する上で都市成長と呼ばれている複雑現象を再現することである。従来の科学的方法は現象を記述する構造式について差分近似などを適用し、数値解析法により現象の特性を得るものであった。一方、CA では隣合うセル間の相互作用を系全体で繰り返すことで特性を得る。また、CA の大きな利点は自然界の不規則性(複雑性)を人間の手を介入させることなく再現できることにある。図4は1次元 CA の基本構造を示したものである。この様に初期の出力は時間を重ねるとともに隣へと波及して行き、それと同時に自分へも戻ってくる(フィードバック)。ここで、初期の入力は一つのセルにのみに作用するのではなく、すべてのセルがある初期入力を受ける。そのため、波及効果も相互に作用し合い、初期状態からは予測がつかない挙動(創発)が生じ、さらに自己も再構築していく。この方法を拡張し、2次元、3次元 CA が形成される。しかし、CA では各セルは他のセルとの相互作用を考慮してパターンを認識してはならない。そのため CA で都市モデルを構築する際には、まずどのようにセルにパターン認識させるかの議論

が重要である。

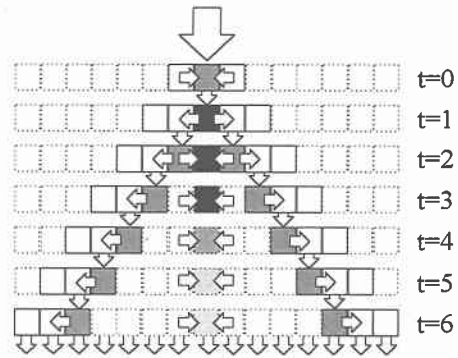


図4 1次元 CA

(3)空間相互作用のパターン認識

本研究ではNNモデルの空間相互作用モデルへの適用を目的として分析を行った。基本構造は3層 NN モデルであり、入力層、中間層、出力層を持つ構造となっている。本研究で特筆すべきは入力層の構造であり、本研究の目的である空間相互作用の分析のため次のようにした。まず、対象地域全域を 1km 四方のメッシュに分割し、各メッシュについて単位面積当たりの人口と、土地利用構成比を算出した。その際、407 個のセルに分割され、これらがそれぞれ隣との関係を保持しながら動作している。

この各セルの動作を NN モデルで学習するのだが、NN モデルの入力値の構造は対象メッシュを中心とした 11km 四方の土地利用構成比を入力し、人口密度を出力することとした。そのため対象のセルとその周りの 120 個のセルの土地利用状況 605 のデータが入力値である。学習については対象地域図のようなセル 407 個を対象に土地利用を入力し、人口を出力するようにした。つまり対象のセルを移動させすべてのセルについて学習させたものを一つのセルとし、それで並列計算を行う。図 5 はその機構を簡略化したのである。このようにセルの挙動を学習した NN モデルが並列に並び、かつ隣の入力値を共有しながら一つのシステムを構成する。

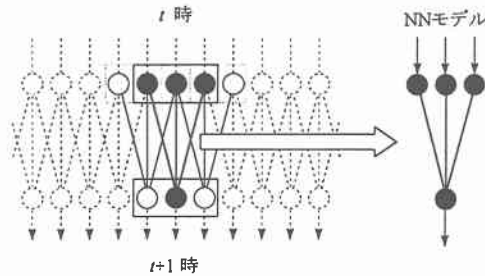


図 5 CA と NN モデル

5. ケーススタディ

(1) マニラ首都圏の現状

マニラ首都圏 (17 市町村から成る) の面積は東京都区部とほぼ同じ、636km² であり、そこに全国人口の約 13% に当たる 945 万人 (1995 年国調) が住んでいる。そして、農村部から流入する人口は年 3% (1980~1995) の伸びを続け、2010 年には 1,200 万人になると予測されている。これらの流入する人々の多くはスコッター (不法占拠者) と言われ、その数は 300 万人にも達しており、彼らの居住地区の人口密度は 1,000 人/ha を超えてその環境の悪化が指摘され続けている。そのためスコッターを含めたマニラ首都圏における土地利用と人口の関係を定量的に把握する必要がある。フィリピン大学で収集・整備した土地利用データは、バランガイと呼ばれる区画単位 (平均人口 3,000 人) で調査したものである。調査は航空写真を用いて区画の全ての建物・道路等を GIS 上に入力したものを地図として出力し、調査員が区画をまわって、この地図上に建物現況利用状況を記入していくという、莫大な作業により作成されたものである。

土地利用分類と 1986 年におけるマニラ首都圏の土地

利用構成を表 1 に示す。

表 1 マニラ都市圏の土地利用構成

Metro Manila	面積(ha)	構成比(%)
Residential	15,200	26.93
Commercial/Business	1,616	2.86
Industrial	3,531	6.26
Government/Quasi-Public	448	0.79
Educational	1,057	1.87
Sports/Athletics	610	1.08
Health/Welfare	238	0.42
Park/Recreational	331	0.59
Religious/Cemetery	718	1.27
Transport/Service Facility	899	1.59
Military	1,114	1.97
Agricultural Land	5,202	9.22
Grassland	3,784	6.70
Forest	759	1.34
Water Related	2,453	4.35
Open Space	8,432	14.94
River/Creek	1,307	2.32
Road	5,240	9.28
Unknown	3,501	6.20
Under Construction	0	0.00
Total	56,438	100.00

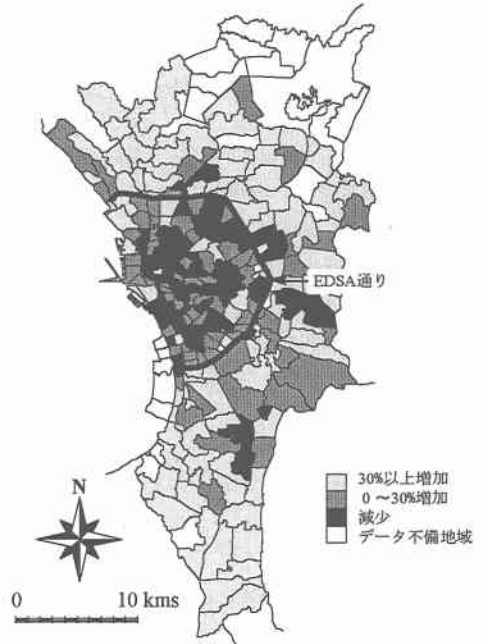


図 6 人口変化図

図 6 は、1985 年と 1995 年の 10 年間ににおける人口密度の変化を変化率で分析した結果である。EDSA 通りの内側において、人口密度の伸びが鈍化し、密度が減少している地区が多いことが分かる。

ここで、フィリピンの土地利用と人口の関係を考える際、構成パターンが3種類に分けられることが重要である。それはスコッター地域に見られるような高密度人口地域、ビレッジのような低密度人口地域、そして中密度人口密度地域である。土地利用構成比からこれらの分類を試みた結果、マニラ市中心部に高密度人口地域と考えられる地域があることが分かった。また、EDSA 通りの内側に中密度地域、外側に低密度地域が存在しており、マニラ市を中心に放射状に都市が発展していることが分かる。

(2)分析結果と従来の方法との比較

従来はゾーン単位で土地利用-人口モデルの構築を目指していた。具体的には一地域の土地利用構成比を入力し、人口密度を出力するモデルである。しかし一地域モデルではスコッター地域のような特異な地点ではモデル構築に至らなかった。この原因として、スコッター居住が多いため、土地利用変化と人口変化の現象が捕らえにくいと考えられる。従って、人口密度中程度の24地域を対象に適用を試みた。その地域とは、EDSA 通りの内側で人口密度が600人/ha未満の地域である。

従来のモデルと空間相互作用を考慮した NN モデルにおいて実測値との相関係数を示したものが表 2、また収束結果は図 7 のようになる。この2つのモデルを比較すると、従来のモデルでは人口密度200~400人/haの地域で誤差が大きくなっているが、全地域を対象とした多地域モデルでは実測値と予測値がよく一致している。特に、一地域モデルでは適用を行えなかったスコッター地域についてもよく現状を再現していることが分かる。この結果より、本モデルの有効性が高いことが証明できた。

表 2 相関係数の比較

一地域モデル	0.9699
多地域モデル	0.9993

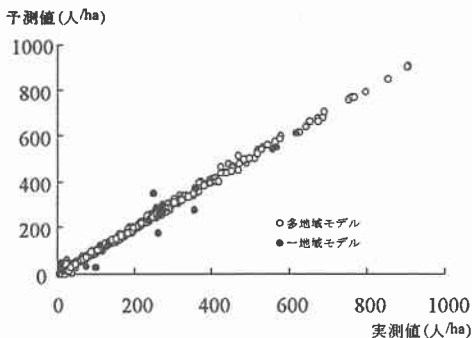


図 7 収束結果

なお、人口密度中程度の24地域を対象に計量経済学の基礎である重回帰モデルを構築した結果、重回帰係数は0.25であり、予測値と実測値の相関係数は0.68と低い値に止まった。また NN モデルを用いてモデルの時間移転性の検討も行った。具体的には、'86NN年モデルを用いて'96年の土地利用データを入力し、'96年の人口密度を推計するものである。その結果、予測値と実測値との相関係数が0.93となり、時間移転性は高いことが分かっている。しかしこれは人口密度中程度の24地域を対象としたモデルであり、CA本来のフィードバックを入れた時間移転モデルに期待される。⁹⁾

6. おわりに

本研究では複雑系の土木計画への適用について議論を進め、CAによる都市モデルの概念を提案した。また、CAとNNモデルの融合を念頭にNNモデルの空間相互作用モデルを構築し、従来のモデルよりも高い相関が得られることを示した。これは、都市の成長は空間相互作用が非常に大きい現象であり、都市モデルが従来のようなゾーン単位での解析ではなく、空間相互作用が内生されたモデルを構築しなければならないことを示している。

参考文献

- 1)加藤恭義,光成友孝,築山洋:セルオートマトン法-複雑系の自己組織化と超並列処理,森北出版株式会社,1998年
- 2)井上政義:やさしくわかる・カオスと複雑系の科学,日本実業出版社,1996年
- 3)今野紀雄:図解雑学・複雑系,ナツメ社,1998年
- 4)Inter Communication:NIT出版,pp144~152,1993年5月
- 5)佐々木,田村,榎谷,斎藤:合意形成過程に関する研究レビューとNNモデルの適用可能性,土木学会北海道支部・論文報告集第53号(B),pp506~511,1997年2月
- 6)清水,宮城,森:ニューラルネットワークの空間相互作用モデルへの適用可能性,土木計画学研究・講演集No.16(1),pp343~348,1993年12月
- 7)土井,紀伊:ニューラルネットワークを用いた知識獲得手法の開発と土地利用分析への適用,土木学会論文集No.590/IV-39,1998年4月
- 8)佐々木,Noriei C. Tigliao,田村:ニューラルネットワークモデルを用いたマニラ都市圏の土地利用モデルの構築,土木計画学研究・講演集No.21(1),pp165~168,1998年11月