TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

数理モデルによる物流施設の立地の説明可能性に関する研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2011-12-15
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 松下, 修 , 小杉, のぶ子 , 苦瀬, 博仁, 延東, 晃
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/370

Journal of the Tokyo University of Marine Science and Technology, Vol. 6, pp. 33-45, 2010

数理モデルによる物流施設の立地の説明可能性に関する研究

松下　修[*1]・小杉　のぶ子[*1]・苦瀬　博仁[*1]・延東　晃[*2]

（Accepted October 30, 2009）

A Study on the Applicability of Mathematical Models to Location of Logistics Facility

Osamu MATSUSHITA[*1], Nobuko KOSUGI[*1], Hirohito KUSE[*1] and Akira ENDO[*2]

Abstract: Theory of the location of industries or operations research (OR) have been used for analyzing the location of logistics facilities. However, it is difficult to explain the real location of logistics facilities by these methods. This is due to the fact that road network or land use regulation influences on the location of logistics facilities. The purpose of this paper is to clarify the applicability of mathematical models to explain the mechanism for location and relocation of logistics facilities. This paper tried to analyze the mechanism for the location and relocation of logistics facilities by evolutionary game theory and Markov Chain. In conclusion, it is clarified that these mathematical models are useful tools to explain the location and relocation of logistics facilities.

Key words: Logistics, Logistics Facility, Mathematical Model, Evolutionary Game Theory, Markov Chain

第一章　はじめに

産業施設の立地については、経済立地論による分析が多いが、これらは工場立地に見られるように生産機能に焦点を当てた例が多く、輸配送などの物流に関して考えることは少ない。一方で配送計画などは、OR（オペレーションズリサーチ）で多くの分析例があるが、このとき物流施設の立地を考えるときには、配送距離最小の条件で求めることになる。

現実の施設立地では、道路ネットワークや用途地域制などもあって、必ずしも理論通りには行かないことが多い。しかし、経済立地論や OR の理論通りに実態を説明できないとしても、そこには法則性があるはずである。

このため施設立地についても、従来の経済立地論や OR の考え方以外に、物流施設の立地の実態を説明できる新たなツールを求めていく必要がある。

そこで本研究では、物流施設の立地問題に着目し、従来とは異なった視点として、数学のゲーム理論や確率論の応用可能性を明らかにしたい。

第二章　研究の目的と考え方

1. 研究の目的

本研究の目的は、物流の分析における数理モデルの応用可能性を示すことである。具体的には、①物流施設の集積をゲーム理論で説明する、②物流施設の移転を確率過程で説明する、の 2 つである。

2. 研究の方法

本研究では、物流施設の立地問題を、①物流施設の集積問題、②物流施設の移動問題の 2 つに集約する。

前者は、「物流施設は、なぜ特定の地区に集積するのか」という問題である。従来からも、類似施設は近くに立地することが経験的に明らかにされてきているが、理論的に説明することは困難であった。なぜならば、経済立地論や OR では、地理的に同じ条件の地点が同じような物流施設の立地の機会を得ていることになるから、交通条件や土地利用条件が同じであっても、なぜ物流施設が集積したり、逆に集積しないかについて、説明が困難だからである。

*1 Department of Logistics and Information Engineering, Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan
（東京海洋大学海洋工学部流通情報工学科）
*2 Course of Maritime Technology and Logistics, Tokyo University of Marine Science and Technology 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan
（東京海洋大学海大学院海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻）

後者は、「物流施設は、なぜ移転していくのか」という問題である。この点については、すでに「撤退、移転、拡張」などの概念から、基本的な考え方は示されているが、移転に当たって郊外化していくメカニズムは明らかでなかった。これにも、交通条件や土地利用条件などを加味する必要があると考えられる。

3. 本研究での物流施設と施設立地の考え方

1）物流施設の定義

物流施設とは物流機能（輸送、保管、流通加工、包装、荷役、情報）を主たる機能とする施設であり、代表例として輸送施設（配送センターなど）と保管施設（倉庫）がある。

また、流通業務団地は流通業務市街地整備法により、「大都市における流通機能の向上及び道路交通の円滑化を図るため、幹線道路、鉄道等の交通施設の整備に照らして流通業務市街地として整備することが適当であると認められる区域について都市計画に定めた地区」と定義されている。

2）物流施設の立地の基本的な考え方

物流施設の立地の基本的な考え方は、小池ら（1991）がすでに明らかにしている範囲では、以下で説明できる。

物流施設の集積の度合いを、物流施設延床面積で表せるとする。すると、物流施設の増減は、２時点間における物流施設延床面積の変化量で表すことができる。よって、物流施設延床面積とその変化量は、以下の式で表すことができる。（式 1、2）（Fig.1）

すなわち、ある時点（t）で立地している物流施設の量を床面積で表すことができるとする。そして、物流施設の変化を時点（t）と次の時点（t+1）の間の床面積の変化で表すことができるものとする。

このとき、この時点（t+1）での物流施設の増加面積は、ある時点（t）から次の時点（t+1）の間に、新たに立地した物流施設の床面積（立地）と既存の物流施設が拡張した床面積（拡張）を加えたものとなる。一方、時点（t+1）での物流施設の減少面積は、ある時点（t）から次の時点（t+1）の間に、既存の物流施設が縮小した床面積（縮小）と、既存の物流施設が他の地区に移転した場合の床面積（移転）との和になる。そして、増加面積と減少面積を差分が物流施設の面積の増減を示すことになる。

3）地域ないしゾーン内での物流施設の集積と移転

物流施設が特定地区に集積したり移転したりすることは、その地区が物流施設の立地に適しているものと考えられる。

物流施設の集積とは、物流施設の立地と拡張が縮小や移転を上回り、総延床面積が増加していくことを意味している。一方で、物流施設の移転とは、既存の立地場所から新たな立地場所へ移転していくことを意味している。

そして個別の物流施設が立地・拡張、縮小・移転（ミクロな視点）を繰り返すが、これを複数の物流施設の総体としてマクロで同じ傾向を示すときに、地域単位ないしゾーン単位（マクロな視点）で、物流施設が集積ないし移転していくと考えることができる。

$Fd^{t+1} = Fd^{t} + \triangle Fd^{t}$　　（式 1）

$\triangle Fd^{t} = \triangle Fd^{t}p - \triangle Fd^{t}m$　　（式 2）

ここで、

Fd^{t}：t での物流施設延床面積

$\triangle Fd^{t}$：t 時点での物流施設延床面積の変化

$\triangle Fd^{t}p$：t 時点での物流施設延床面積の増加面積

$\triangle Fd^{t}m$：t 時点での物流施設延床面積の減少面積

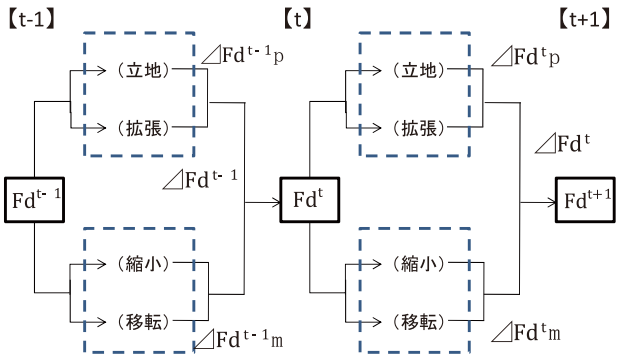


Fig.1　物流施設の集積と移転の考え方

第三章　物流施設の集積問題への数理モデルの応用

1. 物流施設の集積要因の考え方

1）物流施設が集積する要因の考え方

先に研究の方法でも記述したが、物流施設が集積する要因の分析とは、「物流施設は、なぜ特定の地区に集積するのか」という問題の解明である。

このとき、物流施設の親近性と忌避性を考えることができる。すなわち、複数の物流施設が集積するということは、物流施設やその類似施設（工業施設など）が互いに親近性を持つからと考えることができる。逆に、物流施設を近接して立地すると互いに迷惑となるような場合は、互いに立地を避けることになる。たとえば、貨物自動車の出入りが激しい物流施設と、静穏な居住環境を好む居住施設は、互いに離れて立地した方がよい。

2）用途地域制にもとづく物流施設の親近性と忌避性

都市において施設が立地するときには、土地利用計画にもとづき用途地域制度がある。この用途地域制度では、建築物の用途、容積、高さを規制している。

この用途地域制度により、物流施設は特定の用途地域（例、工業地域、工業専用地域など）に立地せざるを得ない

ために、結果としてこのような用途地域に集積することになる（親近性）。一方で住居専用地域などでは、物流施設は立地できないから、低層の住宅が集中して立地しているような地域には、物流施設は立地しない（忌避性）。

3）交通条件にもとづく物流施設の親近性と忌避性

また、物流施設は交通に利便な地点が好条件になるので、高速道路のインターチェンジや幹線道路沿いは、物流施設が立地しやすい（親近性）。しかし、道路幅員の狭い住宅地などは大型貨物自動車が通行できないこともあって、物流施設は立地しないことが多い（忌避性）。

2. 物流施設の立地状況

1）土地利用図による工業施設の立地状況

昭和 59 年度の東京都南部における土地利用図を示した（Fig.2）。住宅地、工業地（物流施設を含む）、商業地がいずれも集積していることが明らかである。

このうち商業地は都心に集積している（Fig 2 中の右）。工業地は、郊外や臨海部（港湾や空港の近くで、幹線道路や線路沿い）に集積している。住宅地は郊外に立地する傾向にある（Fig 2 中の左）。また、住宅地は商業地と隣接して立地する傾向にあり、逆に住宅地と工業地は隣接して立地する傾向は少ない。

2）物流施設の立地状況

第 4 回東京都市圏物資流動調査（2003）では、物流事業者を対象とした事業所調査をおこない、物流施設の立地場所を、搬出重量別に明らかにしている（Fig.3）。調査の結果から、物流施設は、臨海部の港湾エリア、高速道路、幹線道路の周辺に立地していることが分かっている。

3. 物流施設の集積要因の分析

1）重回帰分析による物流施設の集積要因の分析

物流施設の集積要因を明らかにするために、小池ら（1991）が過去に行った分析をここで紹介する。この分析は、昭和 56 年度における江東区、品川区、大田区の物流施設延床面積比率 3%以上のメッシュ（土地利用の実態を分析するために、地図を網目状に区分したもの）および隣接する 361 メッシュを対象に、物流施設床面積（Fd^t）を目的変数とし、以下を説明変数として重回帰分析をおこなっている。（Table1）

この分析によれば、物流施設は、工業系建物床面積と昼間人口が多いほど、床面積が大きくなる。このことから、工業施設と親近性があると考えられる。逆に、夜間人口が多いほど、床面積が小さくなる。このことから、住宅地と忌避性があると考えられる。また、Table1 における交通指標（高速道路のインターチェンジからの距離と道路率）は、回帰式で十分な説明力がなかった。

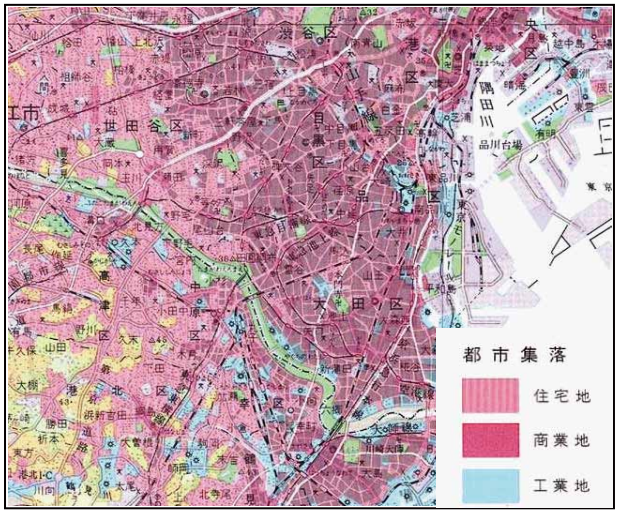


Fig.2　土地利用図及び凡例

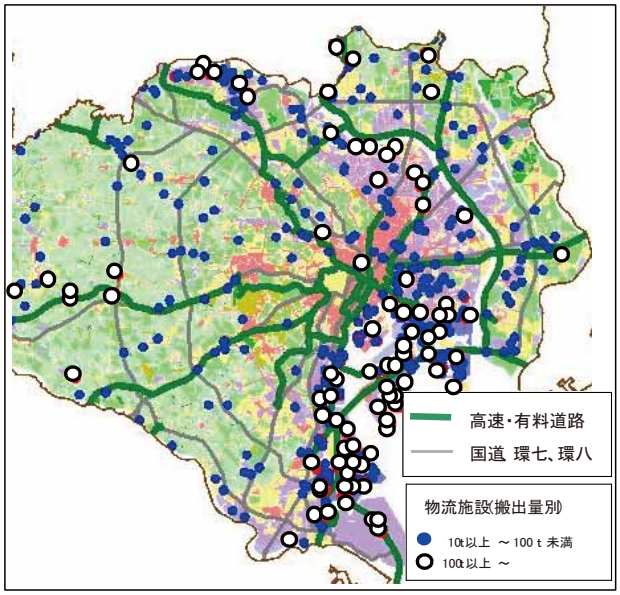


Fig.3　東京 23 区における物流施設の立地状況

Table 1　重回帰分析に用いた変数

分　類	変　数
人 口 指 標	昼間人口
	夜間人口
土地利用指標	住宅系建物延床面積
	工業系建物延床面積
	商業系建物延床面積
交 通 指 標	高速道路のインターチェンジからの距離
	道路率

小池・苦瀬・呉・中川（1991）

$$Fd^t = 0.599Fi - 0.362Pn + 0.466Pd \quad \text{（式 3）}$$
$$(12.24) \quad (-6.77) \quad (4.44)$$

ここで、Fd：物流施設延床面積
Fi：工業系建物延床面積
Pn：夜間人口
Pd：昼間人口
R：0.887、F 値：134.1、（ ）内は t 値

2）アンケート調査による物流施設の集積要因の分析

重回帰分析と同じ地域を対象に、そこに立地する物流業者に立地理由についてアンケート調査した結果を紹介する（小池ら）。

立地理由として「敷地面積が適当」、「交通条件（集配送地域への距離、主要交通施設への距離）」、「同業企業の集積」、「用途地域が適当」などの回答が得られている。上記の 4 つの理由のうち、「交通条件」と「同業企業の集積」は物流施設の立地に当たって「親近性」を示しているものと考えられる。また「用途地域が適当」という回答は、先述したように「親近性」と「忌避性」の両方を示しているものと考えられる。

4. ゲーム理論を用いた物流施設の集積と移転の説明

1）本節の目的

本節の目的は、物流施設の集積を、進化ゲーム理論を用いて分析することである。物流施設は工業地に含まれることから、以下においては住宅地と工業地のゲームに注目し、分析を行なうこととする。

まず、ゲーム理論について簡単にまとめ、さらに進化ゲームのリプリケーター・ダイナミックスについて説明する。

2）ゲーム理論と進化ゲーム

ゲーム理論は前史があるが、数学者のフォン・ノイマンと経済学者のオスカー・モルゲンシュテルンの共著「Theory of Games and Economic Behavior（1944）」をもって始まるとされている。ゲームの構成要素は 3 つある。その第一として、プレイヤーが挙げられる。プレイヤーの重要な仮定として、完全に合理的に思考し行動するとされる。そして、各プレイヤーは与えられた戦略を選択して、ゲームの終了後に各プレイヤーが利得を得る。

そこで、以下の記述のために、記号を設定する。

定義 $G = (N, \{S_i\}_{i \in N}, \{f_i\}_{i \in N})$ が次の①、②、③ を満たすときに戦略 n 人ゲームという。

① $N = \{1, 2, \dots, n\}$
② $\forall_i \in N$ に対して、S_i は空でない集合
③ $\forall_i \in N$ に対して、$f_i : S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n \to \mathbf{R}$
　$\mathbf{R}$ は、実数全体の集合とする。

N の要素をプレイヤー（player）、S_i をプレイヤー i の戦略集合、その要素を戦略（strategy）という。また、f_i をプレイヤー i の利得関数という。

以上の設定の下、ゲーム理論はナッシュ（1950）による n 人非協力ゲームの均衡点の発見等、多くの理論の発展をみたが、進化生物学者のメイナード・スミス（1982）はゲーム理論が生物進化を分析するために有用であることを見出した。その手法が生物学にとどまらず、広く社会現象を分析する道具を提供した。

3）進化ゲームの内容

進化ゲームとは次のようなものである。いま、ある個体（エージェント）の集合を X として、X の分割を $\{X_1, \dots, X_n\}$ とする。但し、この分割は時刻 t によって変化する。したがって、本来は、$X_i = X_i(t)$ とするべきものである。さらに、$x_i = |X_i| / |X|$ とおく。すなわち、各 X_i は分割 X_i の X におけるシェアーであり、時刻 t の関数である。当然、$x_i \geq 0$ であり、$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1$ だから、$x = (x_1, \dots, x_n)$ は $\{X_1, \dots, X_n\}$ 上の確率分布を与える。

各 X_i に属する個体は、同じ戦略をとるものとし、X の個体は、他の個体と出会って（ランダムマッチング）なんらかの利得を得るとする。こうした個体の集合の分割と利得状況において、次のような問題を考察する。

① X に外部から、つまり X に属さない個体が進入可能か。
② X に属する個体が突然変異して、新たな部分集合 X_{n+1} を構成したとき、この個体群は消滅するか否か。また、安定的多数を確保できるか。
③上記以外の場合において、分布 $(x_1, \dots, x_n)$ はどう変化するか、均衡点はあるか。もしあったとして、いかなるものか。

上の問題③の解答を与えるツールとして、リプリケーター・ダイナミックスがある。

記号は上述のとおりとする。このとき、Hofbauer（1998）は個体x_iが個体x_jに出会ったときに得られる利得をa_{ij}, とし、

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$ とすると、

微分方程式 $\dfrac{dx_i}{dt} = ((Ax)_i - {}^tXAx)x_i \quad (i = 1, \dots, n)$

が成り立つとしている。

この方程式をリプリケーター方程式または、リプリケーター・ダイナミックスと呼ぶ。特に、n = 2 の場合を考える。

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$ とする。簡単な計算より、

$$((Ax)_1 - {}^tXAx)x_1 = \{(a - c)x_1 - (d - b)x_2\}x_1x_2$$

したがって、 $$A' = \begin{pmatrix} a - c & 0 \\ 0 & d - b \end{pmatrix}$$ とすると、

$$((Ax)_i - {}^tXAx)x_i = ((A'x)_i - {}^tXA'x)x_i$$

ゆえに、リプリケーター・ダイナミックスを考える場合は、A のかわりに、A'を利得行列としてよい。

A'を A の local shift という。$\alpha = a - c$、$d - b = \beta$ とおくと、

$$A' = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}$$

$$\frac{dx_1}{dt} = (\alpha x_1 - \beta x_2)x_1 x_2$$
$$= \{(\alpha+\beta)x_1 - \beta\}x_1(1-x_1)$$

次に、リプリケーター・ダイナミックスを用いて、住宅地と工業地（物流施設）の集積を考察する。

5. 物流施設の集積に関する 3 つのモデル

1）ゲーム理論を用いたモデルの概要

物流施設の集積要因を親近性と忌避性から考えたとき、特に忌避性を取り上げ、住宅地と工業地（物流施設も含む）が混在した状況を進化ゲーム理論で分析する。このとき、ある地区において、住宅地の住民と物流施設の経営者のゲームを次のように考える。

仮定として、都市内には住宅が多く集積している地区（住宅地）、物流施設や工業施設が多く立地して集積している地区（工業地）があるとする。そして両地区は、都市内でランダムに位置しているとする。住宅地の占める割合 x_1 工業地の占める割合を x_2 とする。当然、$0 \le x_1 \le 1, 0 \le x_2 \le 1$ であり、$x_1 + x_2 = 1$ を満たす。簡略化のため、商業地はないものとする。

このとき、住宅地の住民（以下、R と記す）と工業地の関係者（以下、I と記す）とのゲームを考える。住宅地が工業地に隣接した場所に立地する場合とそうでない場合の R の利得、一方、工業地（物流施設含む）が住宅地に隣接した場所に工業施設（物流施設も含む）を立地する場合とそうでない場合の I の利得を考慮して次の 3 つのモデルを考える。

2）物流施設の安定均衡モデル（モデル１）

このモデルは、R と I が互いに利益を与え合う状況をモデル化したものである。すなわち、住宅地に居住すると工業地に隣接することにより仕事を得ることができ、一方工業地は、住宅地より労働の提供を受ける。

そこで、この地区に住もうとする者にとって、R に住む場合は利得 1 、I に住む場合は利得 2 とした。同様に、工業施設をこの地区に置こうとした者にとって、R に住む場合は利得 2、I に住む場合は利得 1 としてモデル化した。その結果の利得表は次のようになる。

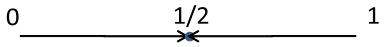
	R	I
R	1	2
I	2	1

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

このゲームのリプリケーター・ダイナミックスは次の方程式で与えられる。

$$\frac{dx_1}{dt} = (1-2x_1)x_1(1-x_1)$$

この方程式の右辺がゼロとなるのは、$x_1 = 0,1,1/2$ であるので、これら 3 点が定常点である。また、右辺が正となるのは、$0 < x_1 < 1/2$ のとき、更に、負となるのは、$1/2 < x_1 < 1$ のときである。したがって、$t \to \infty$ とすれば、$x_1 \to 1/2$ となる。すなわち、このモデルでは、0, 1 が不安定定常点であり、1/2 が漸近安定点である。



このモデルから示されることは、R と I が協力関係にあるときは、両者が安定的に混在するようになる。実際の事例から見ると、協力関係が崩壊するのは、公害などの住宅地に悪影響をもたらす以前は、互いに利益を与えていたと考えられる。事例として、葛飾区が挙げられる。葛飾区では、小規模な町工場が多く、それらの多くが住宅地と混在している。

しかし、時代が進むにつれ次第に軽工業から重工業にシフトし、公害が大きな社会問題となる。そのような時代のモデルが次のモデル 2 である。

3）物流施設の不安定均衡モデル（モデル 2）

このモデルは工業地が住宅地に隣接した場合、公害、交通量の増大から、R からみれば利得が負となる場合である。一方、I が工業施設をこの地区に置こうとする場合、R から反感視され利得が負となる。

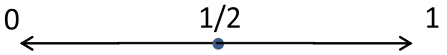
	R	I
R	1	−1
I	−1	1

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

このゲームのリプリケーター・ダイナミックスは次の方程式で与えられる。

$$\frac{dx_1}{dt} = (4x_1 - 2)x_1(1-x_1)$$

この方程式の右辺は、モデル 1 のときの符号が異なるだけで、絶対値は等しい。定常点は、0, 1, 1/2 となって、モデル 1 のときと同じであるが、符号が異なるため、右辺が負となるのは、$0 < x_1 < 1/2$ のとき、更に、正となるのは、$1/2 < x_1 < 1$ のときである。したがって、このモデルでは、0, 1 が漸近安定点であり、1/2 が不安定定常点である。



このモデル 2 は、なんらかの原因で住宅地が均衡点（この場合は 1/2 である）を越えて増大した場合は、工業地は撤退することを示している。一方、逆に工業地が均衡点を越

えて増大する場合、住宅環境の低下のため、住宅地には不適となり、工業地が集積することになる。

4）物流施設の移転モデル（モデル 3）

このモデル 3 は、対象としている地域の都市化が進行し、土地価格の高騰、また、企業規模の拡大等により、各工業施設が手狭となった場合を考える。この場合は、各 I はこの地区に施設を置く利得は激減する。このモデル 3 では、モデル 2 の利得行列の 2 行から、3 を減じた。

	R	I
R	1	−1
I	−4	−2

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -4 & -2 \end{pmatrix}$$

このゲームのリプリケーター・ダイナミックスは次の方程式で与えられる。

$$\frac{dx_1}{dt} = (4x_1 + 1)x_1(1 - x_1)$$

このモデル 3 では、定常点は 0, 1 である。右辺が正となるのは、$0 < x_1 < 1$ である。したがって 1 が漸近安定点であり、0 が不安定定常点である。したがって、$t \to \infty$ とすれば、$x_1 \to 1$ となる。

つまり、次第に工業施設は移転し、住宅地となっていくことを示している。

6. ゲーム理論による物流施設集積の説明可能性

以上 3 つのモデルを提示した。例外もあると考えられるが、おおよそ、軽工業に始まり、続いて重工業が発展した日本における工業の歴史の流れにそったモデルといえる。

R と *I* が協力的であった時代から、重工業化等により工業地の施設が住宅地の環境に負の影響をもたらす時代となり、さらに、都市化の進行により、物流施設の立地が、不適となった。つまり、*I* と *R* の利得表が時間の関数として変化してきた。

本研究で示した 3 つのモデルは、その時間の流れによる利得構造の変化より、工業地（物流施設を含む）の住宅地との混在、集積、拡大、移転を説明していると言える。

第四章　物流施設の移転問題への数理モデルの応用

1. 物流施設の移転要因の考え方

1）物流施設が移転する要因の考え方

物流施設が移転する要因の分析とは、「物流施設は、なぜ特定の地域や地区に移転するのか」という問題の解明である。これにより、物流施設を移転する場合の最適な位置を考えることができる。

苦瀬（1999）は、物流施設の最適な位置は、物流施設の建設と運営に必要な費用（ノードコスト）と配送に必要な費用（リンクコスト）の合計が最小となる位置とした。物流施設の最適位置が郊外に移動するのは、都心のノードコストが高くなるときと、リンクコストが低くなるときである。物流施設が都心に移動するのは、都心のノードコストが低くなるとき、リンクコストが高くなるときである。（式 3）（Fig.4）

$$\min.\ C = CN + \sum_{j=1}^{m} CLj \qquad \text{（式 3）}$$

ここで、

m：配送件数

C：物流施設のコスト

CN：物流施設のノードコスト＝初期費用＋運営費用

CLj：j 番目の配送先に対する物流施設のリンクコスト

$\sum_{j=1}^{m} CLj$ ＝配送費

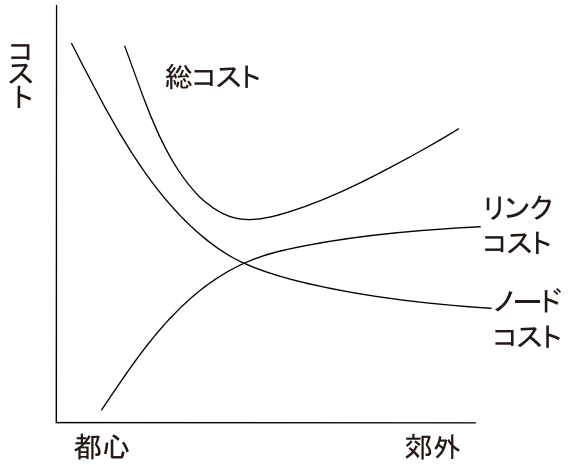


Fig.4　物流施設の最適位置の算出の概念

2）移転して遠距離化したときの考え方

物流施設が移転すると、物流施設から配送地点まで遠距離化する場合がある。しかし、苦瀬ら（1996）の分析によると、配送のタイプによっては、物流施設が遠距離化しても、総コストを低減できる場合がある。

配送のタイプを、以下の 3 つとする。

タイプ 1 : 問屋配送型（例 : メーカーから販売会社や問屋への配送）
タイプ 2 : 店舗配送型（例 : スーパーマーケットの物流施設から各店舗への配送）
タイプ 3 : デポ配送型（例 : デパートの贈答品などの配送といった、商品センターから配送所への配送）

このとき、配送先が少ないタイプ 3（デポ型配送）よりも、配送先が多いタイプ 1（問屋配送型）は距離による配送コスト（リンクコスト）の増加度合いが大きくなる。このため配送先が少ない場合には、施設コスト（ノードコスト）を重視して、ある程度の距離の幅をもって物流施設の位置を決定してよいことになる。

2. 物流施設の立地と移転の変遷

1）物流施設立地と高速道路整備の関係

第 4 回東京都市圏物資流動調査（2003）では、物流施設の立地場所を、開設年代別に明らかにしている。(Fig.5, 6, 7, 8)

1959 年以前は、物流施設は都心に多く立地している。近年にかけては、臨海部や新たに整備された高速道路付近への立地が多い。

2）環状道路沿いの物流施設の移動状況

第 4 回東京都市圏物資流動調査（2003）の事業所調査から、環状道路沿いの物流施設の開設数が年代別に明らかとなっている。環状道路が通っている市区町村における物流施設の開設数を Table2 に示した。

Table2　年代別・環状道路沿いの物流施設の開設数

年代	1960’	1970’	1980’	1990’
環状 6 号線	106	99	38	96
環状 7 号線	337	362	382	475
環状 8 号線	207	178	219	347
国道 16 号	1495	1564	1869	2508
圏央道	319	356	390	557
合計	2464	2559	2898	3983

注）表中の値は、環状道路を含む市区町村における物流施設数である。

3）環状道路の開設に合わせた物流施設の移転

環状道路の開通に合わせ、物流施設が郊外化していく傾向がある。(Fig.9)

これは、物流業者が、既存道路における渋滞を避けるためや、主要幹線道路とのアクセスを重視し、新設される環状道路沿いに物流施設を移転するためである。

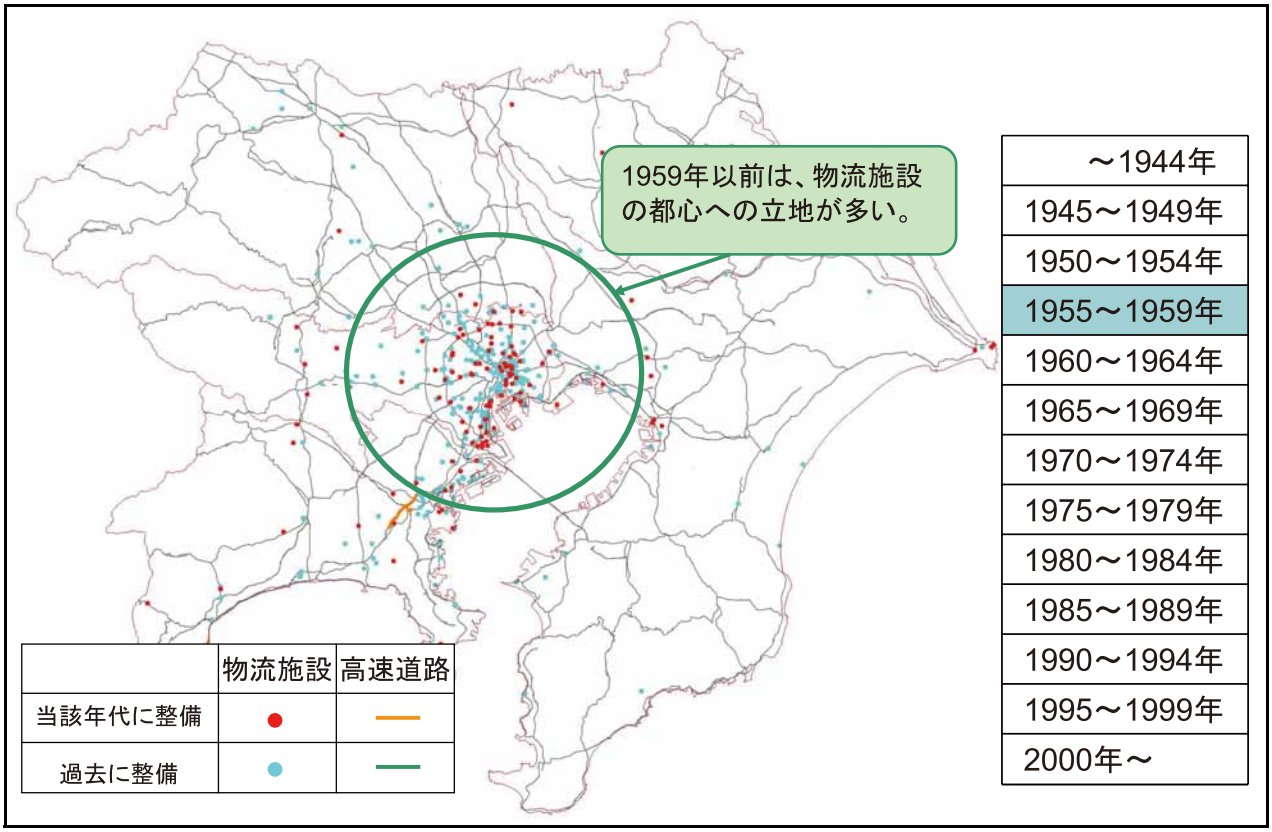


Fig.5　1955 ～ 1959 年の物流施設の立地場所

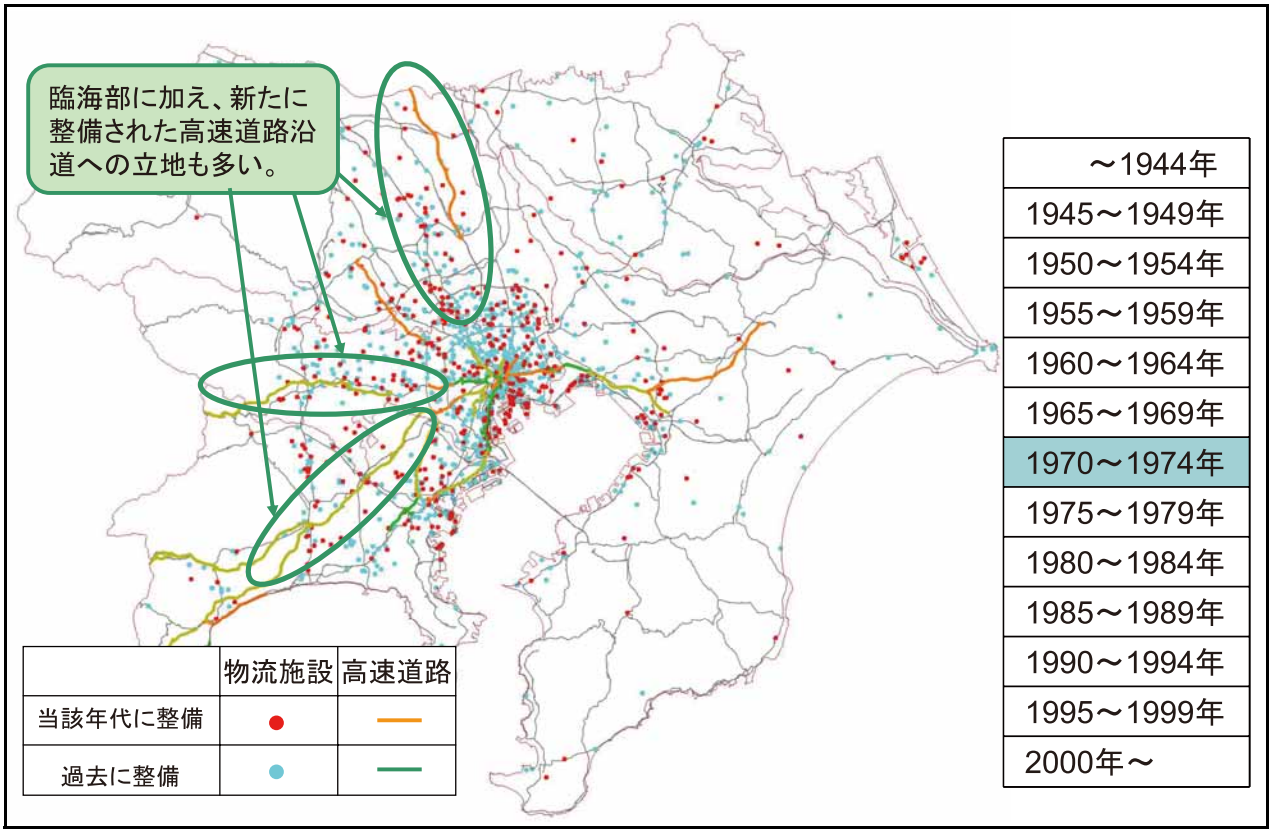


Fig.6　1970 ～ 1974 年の物流施設の立地場所

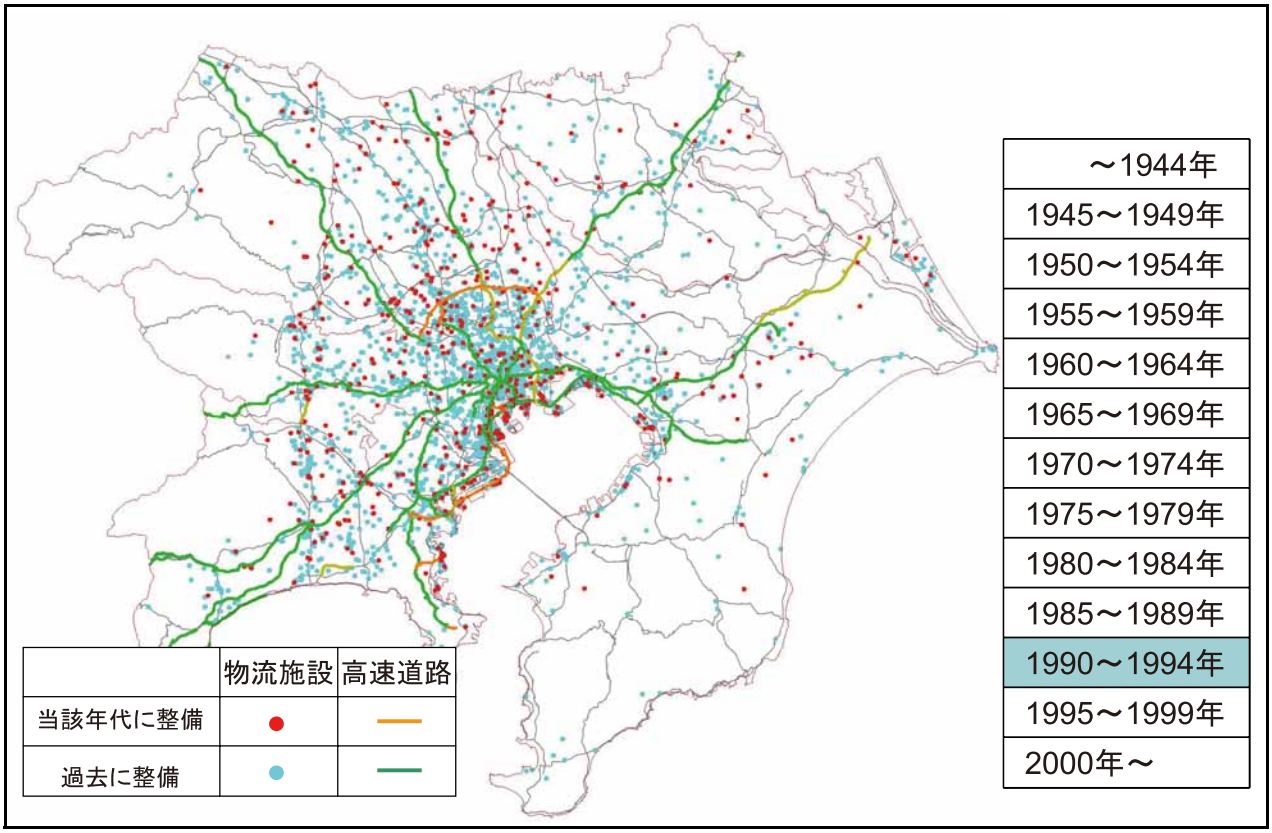


Fig.7　1990 ～ 1994 年の物流施設の立地場所

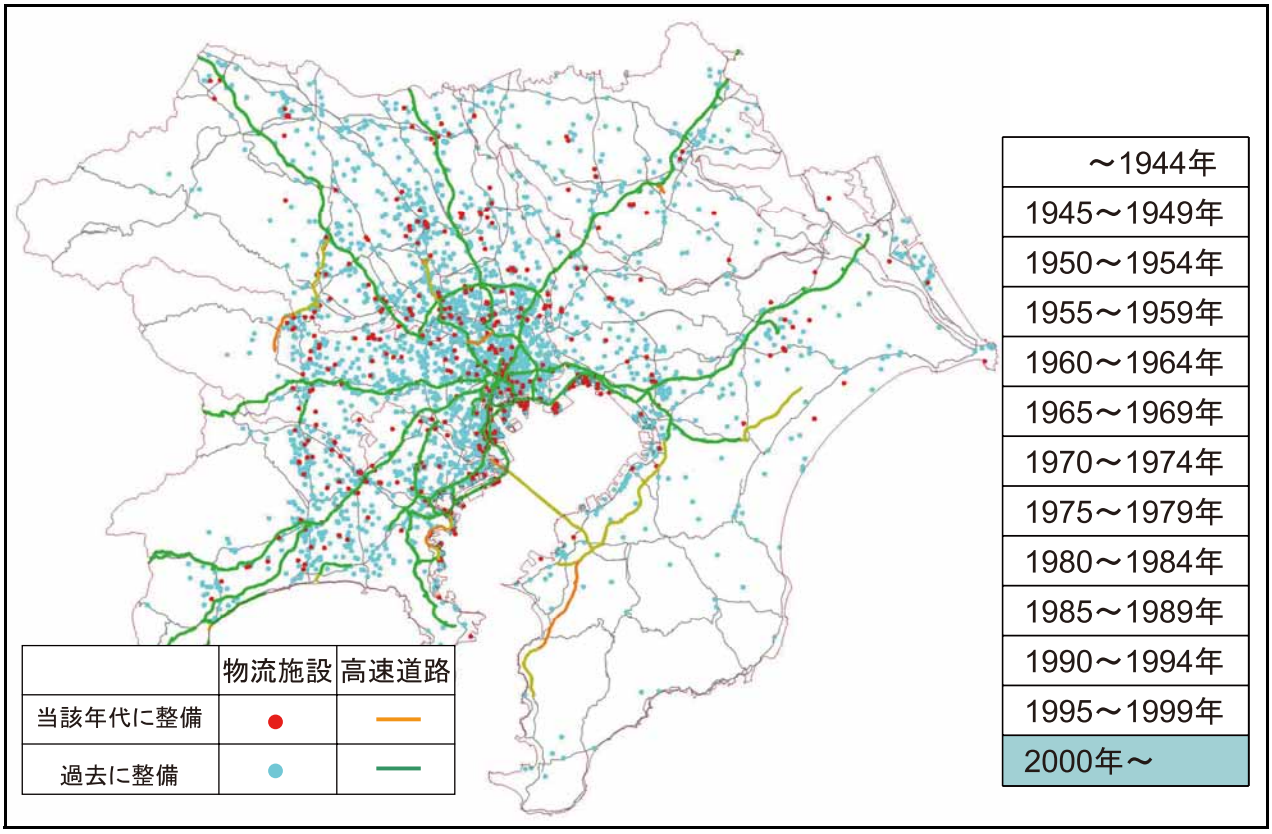


Fig.8　2000 年以降の物流施設の立地場所

Fig.9　環状道路ごとの物流施設の移動の例
国土交通省道路局ホームページより作成

3. 物流施設の移転要因の分析

1）判別分析による物流施設の移転の要因の分析

物流施設の移転要因を明らかにするために、小池ら（1991）が過去に行った分析をここで紹介する。

特定地域における物流施設延床面積の変化量 ($\triangle Fd^t$) (昭和 56 年度から 61 年度) を目的変数とした判別分析から、その増減の要因が明らかとなっている。

結果、物流施設は、工業系建物床面積と昼間人口が多いほど、延床面積が増加しているため、工業施設と「親近性」があると言える。反対に、住宅系建物面積が大きいほど、延床面積が減少するため、住宅施設との「忌避性」があると言える。

また、F 値は 1%の有意水準を満たしていない物流移設延床面積が正の係数を持っていたため、物流施設延床面積が大きいほど増加し、インターチェンジからの距離が小さいほど物流施設延床面積が増加することを示していた。

2）アンケート調査による物流施設の移転要因の分析

小池ら（1991）は、上記の地域の事業所を対象として、移転の理由と、移転の際考慮する条件についてアンケート調査している。移転の理由としては、「施設が手狭になった」といった敷地に関する理由が上位を占めていた。移転の条件としては、「敷地面積」、「集配送域との距離」、「都心との距離」、「幹線交通施設との距離」などが上位となっている。

4. 物流施設の移転問題説明のための確率過程

1）本節の目的

本節の目的は、物流施設の移転を説明するために用いる確率過程（マルコフ連鎖）の概要を述べることである（詳細については Ross, 2000 参照）。

2）マルコフ連鎖

マルコフ連鎖とは、未来の確率分布が過去の履歴とは無関係に、現在の状態のみで決まるような確率過程のことである。単純に言えば「記憶のない確率過程」である。

定義 4.1. 確率変数の列 $\{X_n; n = 0,1,2, ...\}$ を考える。各 X_n は状態空間 $S = \{x_1,x_2, ... , x_N\}$ の中に値をとるとする。このとき、

$$P(X_{n+1} = x_j|X_0 = k_0, X_1 = k_1, ... , X_{n-1} = k_{n-1}, X_n = x_i) = P(X_{n+1} = x_j|X_n = x_i) \quad (4.1)$$

$$x_i, x_j, k_0, k_1, ... , k_{n-1} \in S$$

が成り立つならば、X_n をマルコフ連鎖という。

(4.1) の確率が時刻 n と無関係に決まっているマルコフ連鎖を「時間的に一様なマルコフ連鎖」という。

$$p_{ij} = P(X_n = x_j|X_{n-1} = x_i)$$

で定義される p_{ij} を状態 x_i から x_j への推移確率という (i, j = 1,2, ... , N)。このとき p_{ij} を (i, j) 成分とする行列 Q を推移行列という。

$$Q = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{12} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{pmatrix}$$

推移行列は条件付き確率を並べたもので、第 i 行の成分は、状態 x_i から $x_1, x_2, ... x_N$ に推移する確率を順番に並べたものになっている。したがって、各行の成分の和は必ず 1 になっている。

推移確率 p_{ij} は 1 回の推移で状態 x_i から状態 x_j へ移る確率をあらわしているが、n 回の推移で状態 x_i から x_j へ移る確率を $p_{ij}^{(n)}$ であらわす。

n = 1 のときは、$p_{ij}^{(1)} = p_{ij}$ となる。

n ≥ 2 のとき、次の定理が知られている。

定理 4.1. （チャップマン・コルモゴロフの方程式）

n ≥ 2, 1 ≤ m ≤ n − 1 とし、$p_{ij}^{(n)}$ で n 回の推移で状態 x_i から x_j に移る確率をあらわすとする。このとき、次の等式が成り立つ。

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_{r=1}^{N} p_{ir}^{(m)} p_{ri}^{(n-m)} \quad (4.2)$$

いま、$p_{ij}^{(n)}$ を (i, j) 成分とする正方行列を $Q^{(n)}$ であらわす。すなわち、

$$Q^{(n)} = \begin{pmatrix} p_{11}^{(n)} & p_{12}^{(n)} & \cdots & p_{1N}^{(n)} \\ p_{21}^{(n)} & p_{22}^{(n)} & \cdots & p_{2N}^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1}^{(n)} & p_{N2}^{(n)} & \cdots & p_{NN}^{(n)} \end{pmatrix}$$

この $Q^{(n)}$ を n 次推移行列という。$p_{ij}^{(n)}$ と $p_{ij}^{(n-1)}$ の間にはチャップマン・コルモゴロフの方程式で m = 1 とおいた関係式が成り立ち、これを推移行列であらわせば、

$$Q^{(n)} = QQ^{(n-1)}$$

となる。この関係をくり返せば

$$Q^{(n)} = Q^n$$

がえられる。

マルコフ連鎖の確率法則は、初期分布（すなわち X_0 の確率分布）と推移行列 Q によって決まる。すなわち、

$$P(X_n = x_j) = \sum_{i=1}^{N} P(X_0 = x_i)P(X_n = x_j|X_0 = x_i)$$

$$= \sum_{i=1}^{N} P(X_0 = x_i)p_{ij}^{(n)} \quad (4.3)$$

が成り立つ。

5. 物流施設の移転に関する推移行列

1）マルコフ連鎖による解析に用いるデータ

物流施設の立地状況について、マルコフ連鎖の推移行列を用いて説明する。確率過程 X_n は、(1960 + 10n) 年代の物流施設開設の立地状況をあらわすものとする（n = 0, 1, 2,

3)。$\{X_n\}$ は状態空間 $S = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ に値をとるとする。ここで、

x_1：環状 6 号線沿いにある状態
x_2：環状 7 号線沿いにある状態
x_3：環状 8 号線沿いにある状態
x_4：国道 16 号線沿いにある状態
x_5：圏央道沿いにある状態
をあらわすとする。

解析には、前述した Table2 に示す年代別の環状道路沿いの物流施設の開設数を用いた。各年代の合計をそれぞれ 1 とした割合別の表に書きなおし、推移確率の計算を行う。(Table3)

Table3 年代別・環状道路沿いの物流施設の開設数の割合

	1960's	1970's	1980's	1990's
環状 6 号線	0.043019	0.038687	0.013112	0.024102
環状 7 号線	0.136769	0.141462	0.131815	0.119257
環状 8 号線	0.08401	0.069558	0.075569	0.08712
国道 16 号	0.606737	0.611176	0.644928	0.629676
圏央道	0.129464	0.139117	0.134576	0.139844
合計	1	1	1	1

注）表中の値は、環状道路を含む市区町村における物流施設数の割合である

2）マルコフ連鎖の推移行列

最初に、時刻毎の推移行列を求める。前述のとおり、X_0 は 1960 年代、X_1 は 1970 年代、X_2 は 1980 年代、X_3 は 1990 年代の物流施設開設の立地状況をあらわしている。以下、それぞれの時刻の推移確率を

$$P(X_1 = x_j | X_0 = x_i) = \alpha_{ij}$$
$$P(X_2 = x_j | X_1 = x_i) = \beta_{ij}$$
$$P(X_3 = x_j | X_2 = x_i) = \gamma_{ij}$$

であらわし、推移行列を

$$A = (\alpha_{ij}),\quad B = (\beta_{ij}),\quad C = (\gamma_{ij})$$

とおく。

$$a_i = P(X_0 = x_i),\ b_i = P(X_1 = x_i)$$
$$c_i = P(X_2 = x_i),\ d_i = P(X_3 = x_i)$$

として、

$$(a_1\ a_2\ a_3\ a_4\ a_5)A = (b_1\ b_2\ b_3\ b_4\ b_5)$$

となる推移行列 $A = (\alpha_{ij})$ の近似値を式 (4.3) を用いて求める。なお、推移行列 A の各成分 α_{ij} は以下の条件をみたすとし、実際のデータとの誤差の二乗を最小にする推移確率を Excel のソルバーを用いて求める。

$$\sum_{j=1}^{5} \alpha_{ij} = 1 (i = 1,2,3,4,5)$$
$$\alpha_{ij} \geq 0 (i,j = 1,2,3,4,5)$$

行列 B, C についても同様の方法を用いて求める。この結果得られた推移行列は以下のとおりである。なお、推移確率は、小数点以下第 3 位までで表記した。

$$A = \begin{pmatrix} 0.323 & 0.402 & 0.176 & 0.099 & 0.000 \\ 0.039 & 0.652 & 0.117 & 0.190 & 0.002 \\ 0.046 & 0.008 & 0.547 & 0.302 & 0.096 \\ 0.024 & 0.053 & 0.000 & 0.914 & 0.009 \\ 0.008 & 0.016 & 0.000 & 0.008 & 0.969 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.297 & 0.403 & 0.195 & 0.104 & 0.000 \\ 0.000 & 0.613 & 0.177 & 0.210 & 0.000 \\ 0.006 & 0.009 & 0.600 & 0.316 & 0.069 \\ 0.000 & 0.042 & 0.000 & 0.958 & 0.000 \\ 0.009 & 0.024 & 0.007 & 0.027 & 0.933 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.301 & 0.400 & 0.200 & 0.099 & 0.000 \\ 0.001 & 0.607 & 0.193 & 0.192 & 0.006 \\ 0.001 & 0.000 & 0.617 & 0.296 & 0.086 \\ 0.028 & 0.046 & 0.014 & 0.895 & 0.018 \\ 0.016 & 0.033 & 0.025 & 0.027 & 0.900 \end{pmatrix}$$

ここで、推移行列を用いて求めた分布と実際のデータとのそれぞれの誤差の二乗の合計について、A の場合には、1.51×10^{-14}，B の場合には，7.49×10^{-13}，C の場合には、9.6×10^{-13} となっている。

6. マルコフ連鎖による物流施設移転の説明可能性

これらの結果から考察する。推移行列 A，B，C の対応する（i, j）成分で 0.1 を超えるもの（上三角に含まれるもの）は、概ね近似した値になった。これはすなわち、物流施設の移転をあらわすのに、時間的に一様なマルコフ連鎖を仮定することが可能であることを示している。

したがって、推移行列としては、これら 3 つの行列の成分の平均値付近の値を与えることにより、1 つの推移行列 Q で表記できると考えられる。

$$Q = \begin{pmatrix} 0.307 & 0.402 & 0.190 & 0.101 & 0.000 \\ 0.013 & 0.624 & 0.163 & 0.198 & 0.003 \\ 0.018 & 0.006 & 0.588 & 0.305 & 0.084 \\ 0.017 & 0.047 & 0.005 & 0.922 & 0.009 \\ 0.011 & 0.024 & 0.011 & 0.021 & 0.934 \end{pmatrix}$$

ここで、推移行列 Q を用いて、1980 年代のデータから 1990 年代のデータを推計すると、

$$(P((X_3 = x_1), P(X_3 = x_2), P(X_3 = x_3), P(X_3 = x_4), P(X_3 = x_5))$$
$$= (0.020\ \ 0.121\ \ 0.073\ \ 0.648\ \ 0.138)$$

を得る。ここで、前述のとおり、X_3 は、1990 年代の物流施設開設の立地状況をあらわし、x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 はそれぞれ、環状 6 号線沿い、環状 7 号線沿い、環状 8 号線沿い、国道 16 号線沿い、圏央道沿いにある状態をあらわす。この推計値と実際の 1990 年代のデータとのそれぞれの誤差の二乗の

合計は、0.000562 となる。

各推移行列 A, B, C について、0.1 を超えない成分（今回の場合、最大の値で 0.053 である）は、0 に近いと考えれば、上三角行列になる。このことは、物流施設が、時間とともに郊外に移転することを示している。

また、今までの分析から、今後の物流施設の移転についても予測することが可能である。すなわち、

$$(d_1\ d_2\ d_3\ d_4\ d_5)Q$$

として、1990 年代の立地の分布に上で得られた推移行列を乗じることにより、2000 年代の立地の分布が導かれることになる。

物流施設の移転をマルコフ連鎖で説明することができた。この理由としては、以下の 2 つが考えられる。

第 1 に、物流施設の集積要因と移転要因である。本研究で紹介した集積要因の分析結果（3 章 3 節）から、物流施設は工業系建物延床面積と昼間人口が大きい地区に集積することが明らかとなっている。また、移転要因の分析結果（4 章 3 節）から、物流施設は工業系建物延床面積が大きく、幹線道路のインターチェンジからの距離が近い土地に移転することが明らかとなっている。物流施設は、上記のような土地を選びながら、集積と移転をしていくことから、マルコフ連鎖で表現できると考えられる。

第 2 に、本研究で分析対象とした東京都市圏では、幹線道路が放射環状に設けられており、物流施設が放射環状の幹線道路に近接して立地することになる。しかし放射道路は古くから整備されていることが多く、新しく物流施設が立地する余地は少ない。このため、環状道路の整備にともない、物流施設が環状道路沿いに立地していったと考えられる。この結果、環状道路の整備にともない、物流施設が移転を繰り返すことで、マルコフ連鎖で示すことができる。

なお本研究のマルコフ連鎖による分析対象は、東京都市圏における物流施設の郊外への移転状況ということ、「大都市圏」、「環状道路の整備」という 2 つの特徴がある。

前者の都市の規模については、中小都市において東京都市圏と同じような状況が繰り返し起きるとは考えにくい。つまり、ある程度の規模の都市圏でなければ、郊外への移転が繰返し起きる状況は生まれないと考えられる。

後者の環状道路の整備については、東京都市圏における物流施設の立地が、たまたま環状道路に沿って移転を繰返したと考えるべきである。すなわち上記の理由の第 1 で示したように、物流施設の集積要因と移転要因を踏まえると、物流施設は環状道路に限らず、インターチェンジ周辺など、利便性の高い土地を選ぶように移転を繰り返すことになると考えられる。

第五章　おわりに

1. 本研究の結論

本研究は、物流施設の立地問題を対象とし、その集積と移転について「数理モデルの応用可能性」および、「数理モデルの実態解明への貢献可能性」を目的として進めた。

そして、従来の物流施設の集積や移転の考え方を述べたうえで、物流施設の集積問題には、ゲーム理論を応用した。また物流施設の移転問題には、確率過程を応用した。

これらの結果は、いずれも物流施設の集積や立地を説明できることを示している。さらに OR など従来の方法以外のツールとして、数理モデルが応用できる可能性を示すことができた。

2. 今後の課題

3 章で示したゲーム理論のモデルにおける利得表を、今後は事業者へのヒアリングより、現実に即した利得表を明らかにしていく必要があると考えられる。

4 章におけるマルコフ過程を用いた移転問題の説明では、今回入手できたデータの制約から、各環状道路における開設数の割合だけで計算した。経年ごとの各環状道路における総物流施設数の推移が分かり、総物流施設数に占める開設数が分かれば、推移の状態について、実態により則した推移確率を求めることが可能になる。これにより、今後の推移の予測をする場合にも精度が上がると考えられる。

また今回の分析は、ロジスティクスの実態として、物流施設の集積と移転の問題のみ着目している。そして、物流施設の集積と移転の問題を説明するために応用した数理モデルは、ゲーム理論と確率過程の 2 つであった。

このことから、その他のロジスティクスの実態に、どのような数理モデルを応用することができるのか、明らかにする必要がある。

参考文献

1) 小池慎一郎・苦瀬博仁・呉東建・中川義英 . 都市内物流施設の集積要因と立地指向性の分析．第 26 回日本都市計画学会学術研究論文集．1991 年 ; 494, 495, 496
2) 苦瀬博仁．付加価値創造のロジスティクス．税務経理協会，1999; 145, 147, 148.
3) 土地利用図．国土地理院．1984.
4) von Neumann,J and Morgenstern, O. Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press. 1944.
5) Nash, J F., Equilibrium points in n-person games. Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 1950; 36, 48-49
6) Maynard Smith, J. Evolution and the Theory of Games. Cambridge University Press. 1982.
寺本英・梯正之訳．進化とゲーム理論 闘争の原理．産業図書．1985.

7）Hofbauer,J and Sigmund, K. The Theory of Evolution and Dynamical Systems. Mathematical Aspects of Selection, Cambridge University Press. 1988.
竹内康博・佐藤一憲・宮崎倫子訳．進化ゲームと微分方程式．現代教学社．2001.
8）苦瀬博仁・久保幹雄・二階堂亮・管智彦．配送コストと施設コストにもとづく物流施設の最適数と最適位置のモデル分析．日本物流学会誌 5 号．1996 年 ; 12-20.
9）東京都市圏物資流動調査．東京都市圏交通計画協議会．2003.
10）国土交通省．東京を変える道路　都市圏を変える道路．http://www.ktr.mlit.go.jp/3kanjo/.
11）Ross, Sheldon M. Introduction to probability models. Seventh edition. Harcourt/Academic Press, Burlington, MA. 2000.

数理モデルによる物流施設の立地の説明可能性に関する研究

松下　修[*1]・小杉　のぶ子[*1]・苦瀬　博仁[*1]・延東　晃[*2]

（[*1] 東京海洋大学海洋工学部流通情報工学科
[*2] 東京海洋大学海大学院海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻）

要旨：　従来物流施設の立地を考えるときは、産業立地論をはじめとした経済立地や、配送距離最小の条件で求める OR などが主な手法であった。しかし、現実の物流施設の立地は、道路ネットワークや用途地域制などの立地の制約があり、必ずしも理論通りに行かないことがある。本研究では、物流施設の立地について、従来の経済立地論や OR といった考え方以外の手法として、数理モデルの応用可能性を明らかにすることを目的としている。そして、物流施設の集積と移転問題に着目し、ゲーム理論と確率論による説明を試みた。その結果、物流施設の集積や移転をこれら数理モデルにより説明できる可能性を示すことができた。

キーワード：　ロジスティクス，物流施設，数理モデル，進化ゲーム理論，マルコフ連鎖