

東京都市圏における業務交通トリップの 空間構造の分析とマッピング

村上 大輔¹・山形 与志樹²・瀬谷 創³・堤 盛人⁴

¹筑波大学 大学院システム情報工学研究科 博士後期課程 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)

E-mail: muraka51@sk.tsukuba.ac.jp

²国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

³国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

⁴筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)

パーソントリップ調査より得られる業務交通トリップデータは産業の空間構造の把握に有益である可能性がある。しかしながら、小ゾーン単位の業務交通トリップを用いた研究は極めて希薄であり、また、その空間構造を詳細に分析した研究は見当たらない。そこで本研究では、東京23区を対象に、産業分類別業務交通トリップデータ（小ゾーン単位）の空間的な構造を詳細に分析する。具体的には、まずGuo (2009)の方法を用いて産業分類別の業務交通トリップを視覚化することで、各業務交通トリップの大局的な空間特性を明らかとする。次に、Tango indexに基づいたローカルな統計量を用いて各業務交通トリップの空間的な集積の検定を行うことで、各業務交通トリップのより局所的な空間特性を明らかとする。

Key Words: *spatial agglomeration, Tango's index, person-trip survey, visualization*

1. はじめに

空間データから必要な情報を抽出して視覚化する操作はマッピングと呼ばれる (Waller and Gotway, 2004)。統計データに基づいて色分けを行う方法や、空間的なクラスターを抽出することでホットスポットを視覚化する方法、空間的に滑らかな関数を用いてデータの潜在的な構造を抽出・視覚化する方法など、これまでに様々なマッピングのアプローチが適用に用いられてきた。

マッピングは、経済学においては産業集積の分析に用いられることが多い。例えば、Robert and Bernat (1997)はアメリカ合衆国においては産業集積が賃料を上昇させることを、Paci and Usai (1999)は新たな技術の伝搬が産業の空間集積の影響を強く受けることを、Mori and Smith (2010)はわが国の産業が階層的な空間集積の構造を持つことを、Guillain and Le Gallo

(2011)はパリにおける産業が空間的な集積を持つことを、それぞれ明らかとした。

産業集積の主因の一つに移動費用の低減がある。従って、例えば中央官庁の集積地である霞ヶ関周辺で移動距離の短い（移動費用の小さな）公務トリップが活発となるなど、産業集積が業務トリップに強い影響を及ぼしている可能性がある。しかしながら、筆者らのレビューした限り、業務交通トリップに関する研究は極めて希薄であり（例えば、土井ら, 1997; 吉村ら, 1999; 安西, 2011）、我が国の産業の空間的な構造を、小ゾーン単位のパーソントリップ調査（以後、PT 調査）・業務交通トリップデータを用いて詳細に分析した研究や、同データをマッピングすることで産業構造を分析した研究は見られない。

その一因に、フローデータのマッピングの難しさがある。これは、一般に、フローデータのサイズは大きくなりがちであり（例えば東京都区部における

PT データのサイズは 247 ゾーン×247 ゾーン=69696), また, ゾーン毎ではなくゾーン間毎にデータが与えられるためである (Gue, 2009). 例えば, アメリカ合衆国における, アラスカ州とハワイ州を除いた 48 州間の人口移動データであったとしても, 全てのフローを表示するという条件の下で視覚的に自然なマッピングを行うことは困難であることが知られている. その一方で, フローデータを視覚的に自然にマッピングする方法もいくつか提案されており (例えば, Phan, 2005; Ellis and Dix, 2006; Rae, 2009; Gue, 2009), それらを用いることで, 例えばわが国の小ゾーン別の業務交通トリップを自然に視覚化できる可能性がある.

また, 産業集積の分析にあたっては, 統計的に有意な集積を抽出することが目的とされることが多く (例えば, Duranton and Overman, 2005 ; Mori and Smith, 2010), 有意な業務交通トリップの集積をマッピングすることもまた, 我が国の産業構造を理解するにあたっては重要といえよう. しかしながら, わが国の産業の集積を, 業務交通トリップを用いて抽出した研究もまた, 筆者らの知る限り存在しない.

以上を踏まえ, 本研究では, まず, Gue (2009)の方法を用いることで東京 PT 調査の業務交通トリップのマッピングし, その結果を元に各産業分類別・業務交通トリップの特性を整理する. 次に, 各業務交通トリップの空間的な集積を, Tango's index (Tango, 1984) を元にしたローカルな統計量を用いてマッピングする.

2. 東京大都市圏における業務交通トリップのマッピング

(1) データ

本研究で使用するデータは, 1978, 1988, 1998 年 3 時点の東京 PT 調査の産業分類別・目的別業務交通トリップデータ (小ゾーン単位) である. 対象地域は東京都区部とする. 対象地域内の小ゾーン数は 264 である.

東京 PT 調査の業務交通トリップは, いくつかの目的に分類できるが, このうち本研究では, 「打合せ・会議 (1978 年は打合せ・会議等)」に着目した分析を行う. また, 東京 PT 調査のトリップデータには, フロー毎に産業分類のフラグ (サービス業, 運輸通信業, 卸売小売業, 金融保険不動産, 公務, 鉱業建設業, 製造業, 電気ガス水道, 農林漁業) が付加されており, 本研究においては, それらのうち

の公務, 及び第三次産業であるサービス業, 運輸通信業, 卸売小売業および金融保険不動産に着目した分析を行う.

(2) 手法

上述のように, フローデータのサイズは大きくなりがちであり, また, ゾーン間毎にデータが付与されるため, そのマッピングは容易ではない (Guo, 2009). 例えば, 本研究で対象とする東京 23 区内の 264 の小ゾーン間のトリップデータの視覚化にあたっては, 合計 69696 (264 の 2 乗) ものトリップを考慮しなければならない. ある 1 ゾーンからのフローのみをマッピングすることで自然な視覚化を行うこともできるものの (例えば Ellis and Dix, 2006), この方法ではデータ全体の特性を把握することができなくなってしまう. また, 周辺におけるフローの密度を 2 次元平面に投影することでマッピングする方法 (例えば, Rae, 2009) も存在するものの, この方法もまた, 地域間のつながりが不明瞭となるなどの短所を持つ (Guo, 2009).

大規模なフローデータを, 地域間のつながりを明示しながらマッピングする手法に Guo (2009)がある. 彼の手法は, (1)グループ内のフローがグループ間のフローに比べてできるだけ大きくなるように対象地域をグループ分けし, 次に, (2)各グループ間のフロー量を集計により求める, という手順 (但し複数のフローデータを同時に視覚化する場合は, この後に自己組織化マップで両フローデータを色分けする必要がある) を踏むことで, フローの大局的な空間パターンを視覚化する手法である. 同手法について, より詳しくは Guo (2009)を参照されたい.

本研究では, Spatial Data Mining and Visual Analysis Lab (<http://www.spatialdatamining.org/>) 提供のフリーのソフトウェアである GraphRECAP と FlowMap を用いて Guo(2009)の手法を実装することで, 各産業分類のトリップを視覚化し, その結果を元に, 各業務交通トリップの空間特性を明らかとする.

(3) 分析

サービス業, 運輸通信業, 卸売小売業, 金融保険不動産業, 及び公務の 1998 年における業務交通トリップを, Guo (2009)の手法を用いて視覚化した (図 1). 図 1 より, 各産業に共通する傾向として, 池袋, 新宿, 渋谷, 霞ヶ関, 大手町で囲まれた地域でトリップが活発であることが確認できる. また, この地域と南西部と間のトリップが活発であり, 一方で北部

や東部には活発なトリップが存在しないという、トリップの空間的な偏在も共通してみられた。

次に産業分類に傾向をみると、サービス業のトリップは、新宿、渋谷、霞ヶ関、大手町で囲まれた地域（山手線の南半分と中央線で囲まれた地域）において、他の産業よりも活発であることが確認できる。運輸通信業や卸売小売業のトリップは大手町・霞ヶ関から品川にかけての山手線沿線において活発なトリップが確認できる。金融保険不動産産業についても大手町、霞ヶ関周辺におけるトリップが活発であるものの、その範囲は運輸通信業や卸売小売業に比べて狭い。公務は霞ヶ関周辺に加え、池袋-新宿-渋谷間でもトリップが活発であることが確認できる。なお、各産業とも、年度間に顕著な差異はみられなかった。

以上より、業務交通トリップの大域的な空間特性を産業分類毎に明らかとした。次章以降では、中央官庁が立地している霞ヶ関と、金融機関等の本社が集積している大手町を着地とするトリップの空間的な集積に着目した、よりローカルな分析を行う。

3. 東京大都市圏における産業分類別・業務交通トリップの空間的な集積の分析

(1) 空間的な集積を抽出するための手法

空間的な集積の検定統計量は、空間的な集積の有無のみを検定するものと、それに加えてクラスターの位置も検出するものに分類できるが（Kulldorf, 1998）、本節では後者のみに着目することとする。

空間的な集積の有無を検定するにあたっては帰無仮説を適切に与えることが重要である（Waller and Gotway, 2004）。用いられることの多い帰無仮説の一つに、「観測値は空間上に一様に分布したランダムな変数の実現値である」というものがある。この仮説は、比較的、計量地理学の研究で用いられることが多く、同仮説に基づいた代表的な統計量として local Moran's I 統計量（Anselin, 1995）や local G 統計量（Getis and Ord, 1992）が知られている。また、Berglund and Karlström (1999)は、local G 統計量をフローデータの集積を検定するための統計量に拡張しており、彼らもまた上の仮説を用いて人口移動の空間的な集積を検定した。しかしながら、彼らの手法

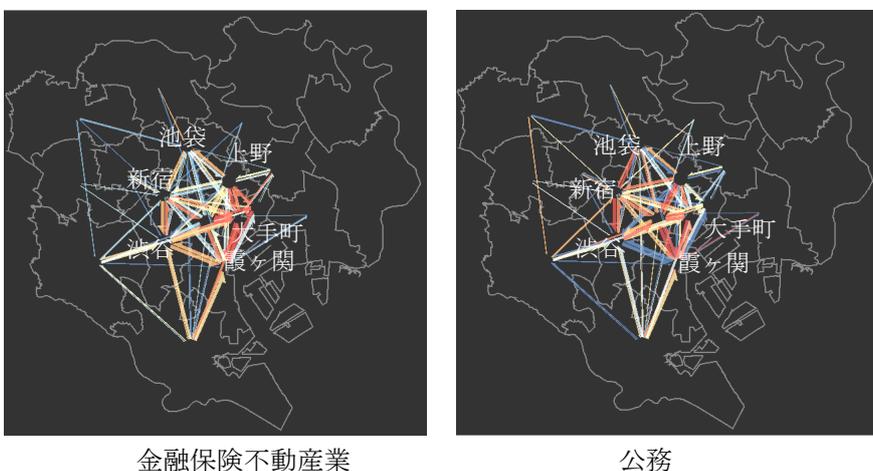
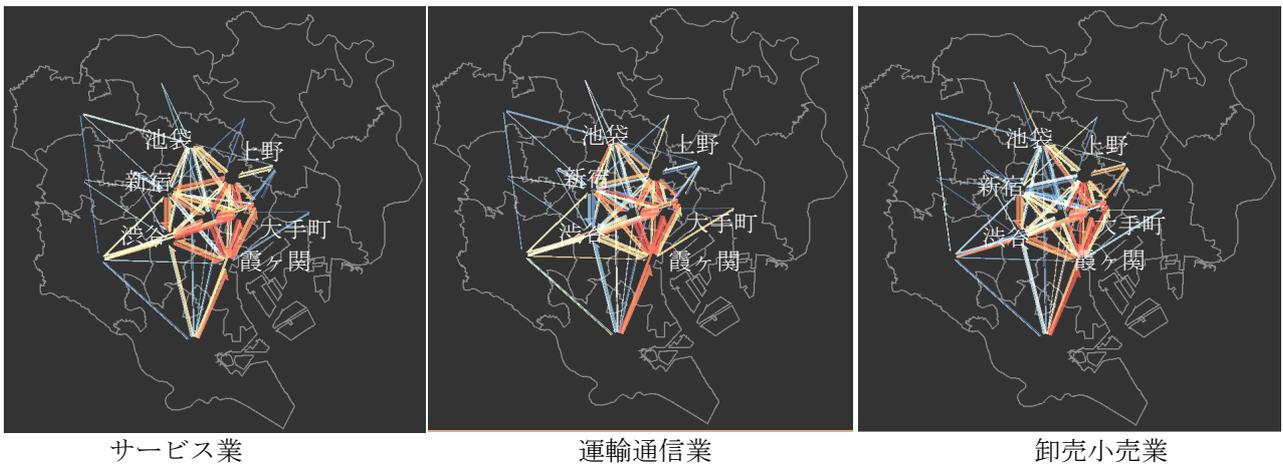


図-1 1998年における業務フローの視覚化（赤に近い色であるほどフローは活発）

は、フローデータ自体ではなく、フローデータからトレンドを除去することで得られる成分（≒残差）を検定ことを前提とした手法であるため、結果の解釈が困難となる可能性がある。

一方で、空間疫学や経済学においては「各観測値はポテンシャル（所与）を期待値とした分布（例えば χ^2 分布）から得られた実現値である」という帰無仮説の下で検定が行われることが多い。即ち、ポテンシャル（所与）から期待される値よりも、有意に高い観測値を持つ地域を、集積地域として抽出するのである。例えば、サービス業の集積の検定であれば全産業の総事業所数などに基づいてポテンシャルを与えることができ（詳しくは次節参照）、これにより、サービス業が他の産業に比べてより集積した地域を抽出できる。このアプローチを用いた場合は観測データ毎の異質性がポテンシャルにより除外されるため、説明変数等を用いることなくデータ自体の集積を検定することができる。

以上を踏まえ、本研究では、後者の帰無仮説に基づいた、Tango index に基づいたローカルな検定統計量（Rogerson, 1999）を用いてフローの集積を検定することとする。

(2) Tango index と local Tango index

Tango index (T) とは、空間的な近接性を考慮した空間集積の指数であり、(1)式で定義される。

$$T = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)' \mathbf{W} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (1)$$

$$\mathbf{r} = \left(\frac{n_1}{n}, \frac{n_2}{n}, \dots, \frac{n_i}{n}, \dots, \frac{n_I}{n} \right) \quad n = \sum_i n_i$$

$$\mathbf{r}_0 = \left(\frac{N_1}{N}, \frac{N_2}{N}, \dots, \frac{N_i}{N}, \dots, \frac{N_I}{N} \right) \quad N = \sum_i N_i$$

ここで、 i は地域の添え字 ($i=1,2,\dots,I$)、 n_i は地域 i におけるデータの実現値、 N_i は地域 i におけるポテンシャルを表わす。例えば、産業 p の集積を検定する場合であれば、 n_i は地域 i における産業 p の事業所数、 N_i は地域 i の総事業所数で与えることができる。 \mathbf{W} は地点間の近接性を表現する行列であり、その i 行 j 列は、例えば指数型距離減衰関数で与えることができる。(1)式が正に大きいことは、周辺地域と自地域の各実測値が、ともに期待された値よりも高い（低い）値を示す傾向があり、空間的な集積がみられることを意味する。

集積性がないという仮定の下では、 \mathbf{r} は漸近的に次の分布に従う（丹後ら, 2007）。

$$\sqrt{I}(\mathbf{r} - \mathbf{1}/I) \sim N(0, \mathbf{V}/I^2) \quad (2)$$

$$\mathbf{V} = \Delta(\mathbf{I}) - \mathbf{1}\mathbf{1}'$$

$\mathbf{1}$ は 1 を要素に持つ $I \times 1$ のベクトル、 $\Delta(\mathbf{I})$ は \mathbf{I} を対角要素とする $I \times I$ の対角行列である。(2)式を用いることにより、(1)式を基準化することで得られる(3)式は漸近的に自由度 ν の χ^2 分布に近似できる (Tango, 1995)。

$$\frac{T - E(T)}{\sqrt{\text{Var}(T)}} \sim \chi^2(\nu) \quad (3)$$

$$E(T) = \frac{\text{tr}[\mathbf{W}\mathbf{V}]}{I} \quad \text{Var}(T) = 2 \frac{\text{tr}[(\mathbf{W}\mathbf{V})^2]}{I^2}$$

(3)式を用いることで、空間的な集積の有無を検定することができる。

次に示すように、Tango index は地域毎の成分(5)式の和の形で表すことができる (Rogerson, 1999)。

$$T = \sum_i T_i \quad (4)$$

$$T_i = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)' \mathbf{W}_i (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (5)$$

ここで \mathbf{W}_i はその第 i 行は \mathbf{W} の第 i 行と同一、それ以外の全ての行の全要素は 0 で与えられた $I \times I$ の行列である。 T_i (以降、local Tango index と呼称することとする) は Tango index に基づいたローカルな統計量であり、その値が大きいことは地域 i とその周辺の各観測値が、同地域で期待される水準よりも高いこと（あるいは低いこと）を表わす。

local Tango index(5)式は Tango index (1)式と同一であるため、(3)式の導出と同様の手順で下式を導くことができる。

$$\frac{T_i - E(T_i)}{\sqrt{\text{Var}(T_i)}} \sim \chi^2(\nu) \quad (6)$$

$$E(T_i) = \frac{\text{tr}[\mathbf{W}_i \mathbf{V}]}{I} \quad \text{Var}(T_i) = 2 \frac{\text{tr}[(\mathbf{W}_i \mathbf{V})^2]}{I^2}$$

(6)式を用いることで、各地域周辺のクラスターの有無を検定できる。

(3) 分析

霞ヶ関と大手町を着地とする産業分類別・業務交通トリップの空間集積の有無を local Tango index を用いて検定する。この検定を行うにあたって必要となるトリップ間の近接性 \mathbf{W}_i (ここでは i は地域ではなく地域間の組み合わせを表わす添え字となる) は、ここでは、Berglund and Karlström (1999) に倣い発地ゾーン間の隣接の有無で定義することとする。また、

ポテンシャル N_i は i に相当地域間の業務交通トリップの総数で与える。この検定は、霞ヶ関あるいは大手町へのトリップ数が全産業分類の平均水準に比べて有意に多い地域をクラスターとして抽出することを意味する。

サービス業、卸売小売業、金融保険不動産業、公務の各フローに local Tango index を適用した結果を図 2～図 5 に示す。最初にサービス業についての結果をみると、霞ヶ関へのトリップと大手町へのトリップの両方について、霞ヶ関自身（大手町自身）を含む地域に有意なクラスターがあることが確認できる。

霞ヶ関への卸売小売業トリップは、毎年、霞ヶ関とその周辺に有意な集積が生じていることが確認できる。一方で大手町については各年を通して安定的な集積はみられなかった。以上の差異は、霞ヶ関への卸売小売業トリップと大手町への同トリップが異質であったために生じた可能性がある。

金融保険不動産業についても両地区で異なる傾向がみられた。霞ヶ関へのトリップは同地区周辺の有意な集積が 1998 年に顕著である。一方で、大手町へのトリップについては、1978 年に強い有意性を示していた霞ヶ関周辺の集積が、1998 年には消失していることが確認できる。これはきにゅう保険不動産業の拠点が大町から霞ヶ関に移動したためである可能性がある。

最後に公務トリップについてみると、霞ヶ関へのトリップのみについて、同地区周辺に有意な集積が検出された。霞ヶ関周辺は公務の拠点であることからこの結果は直観と整合的である。

以上より、会議・打合せトリップの空間的な集積が産業によって異なることを明らかとした。また、霞ヶ関へのトリップと大手町へのトリップは異質であるとの示唆を得た。

参考文献

Anselin, L.: Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, Vol.27, (2), pp.93-115, 1995.
Berglund, S. and Karlström, A.: Identifying local spatial association in flow data, *Journal of Geographical Systems*, Vol.1, No.3, pp.219-236, 1999.
Ellis, G. and Dix, A.: Enabling Automatic Clutter Reduction in Parallel Coordinate Plots, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.5, pp.717-724, 2006.
Duranton, G. and Overman, H.G.: Testing for

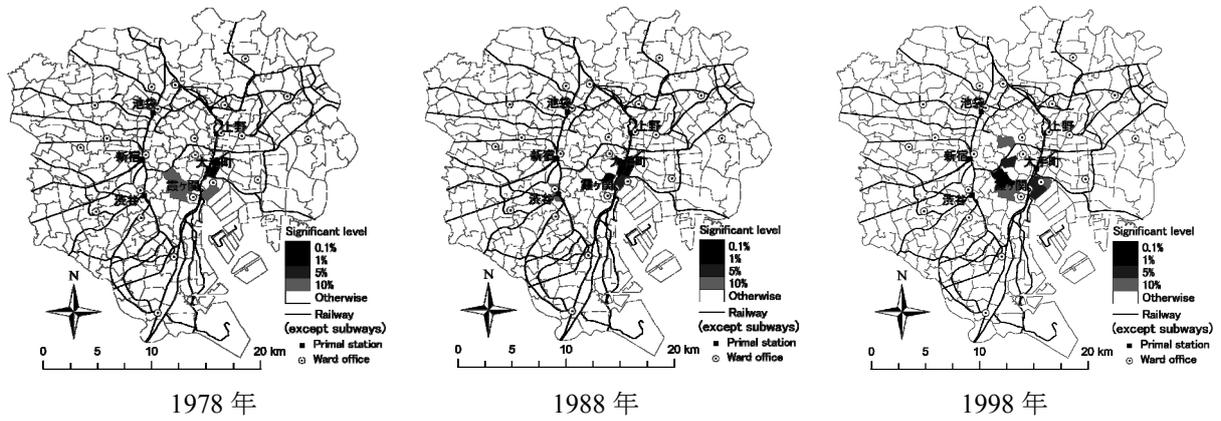
Localization Using Micro-Geographic Data. *The Review of Economic Studies*, Vol.72, No.4, pp.1077-1106, 2005.
Getis, A. and Ord, J.K.: The analysis of spatial association by use of distance statistics, *Geographical Analysis*, Vol.24, No.3, pp.189-206, 1995.
Guillain, R. and Le Gallo, J.: Agglomeration and dispersion of economic activities in and around Paris: an exploratory spatial data analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.37, pp.961-981, 2010.
Guo, D.: Flow Mapping and Multivariate Visualization of Large Spatial Interaction Data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.15, No.6, pp.1041-1048, 2009.
Kulldorff, M.: Statistical methods for spatial epidemiology: Tests for randomness. In Gatrell, A. and Loyntonen, M. eds. *GIS and Health*, Taylor & Francis, pp.49-62, 1998.
Mori, T. and Smith, T.E.: A probabilistic modeling approach to the detection of industrial agglomerations, KIER Discussion Paper, 2009.
Paci, R. and Usai, S., Externalities, Knowledge Spillovers and the Spatial Distribution of Innovation. *GeoJournal*, Vol.49, pp.381-390, 1999.
Phan, D., Xiao, L., Hanrahan, P. and Winograd, T.: Flow Map Layout. *IEEE Symposium on Information Visualization*, 2005.
Rae, A.: From Spatial Interaction Data to Spatial Interaction Information? Geovisualisation and Spatial Structures of Migration from the 2001 Uk Census, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.33, No.3, pp.161-178, 2009.
Robert, M. and Bernat, A.Jr.: Rural Industry Clusters Raise Local Earnings manufacturing industry. *Rural Development Perspectives*, Vol.12, No.3, pp.18-25, 1997.
Rogerson, P.A.: The Detection of Clusters Using a Spatial Version of the Chi-square Goodness-of-Fit Statistic. *Geographical Analysis*, Vol.31, No.2, pp.130-147, 1999.
Tango, T.: The detection of disease clustering in time. *Biometrika*, Vol.40, pp.15-26, 1984.
Waller, L.A. and Gotway, C.A.: *Applied Spatial Statistics for Public Health Data*. Wiley-Interscience, 2004.
安西崇博: オフィスビルの大型化が業務交通に与える影響-東京都区部を対象として, 都市住宅学,

Vol.74, pp.86-91, 2011.

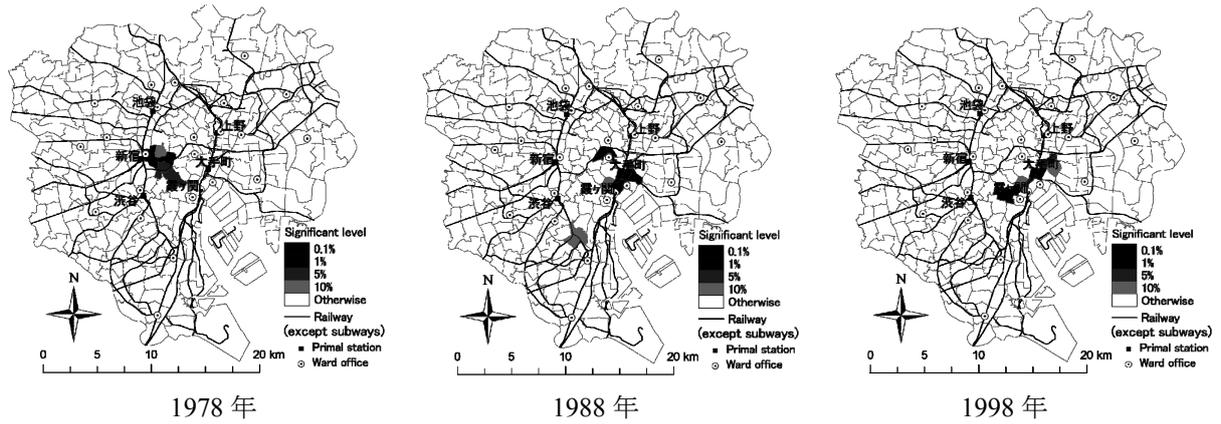
丹後俊郎, 横山徹爾, 高橋邦彦: 空間疫学への招待
—疾病地図と疾病集積性を中心として—, 医学統計
学シリーズ7, 朝倉書店, 2007.

土井健司, 宮津智文, 原伸行: 業務トリップから見
た東京圏の産業・地域構造の変容に関する研究, 土
木計画学論文集, Vol. 14, pp.243-251, 1997.

吉村充功, 奥村誠, 塚井誠人: 都市内業務トリップ
における時間的集積の経済性, 都市計画論文集, Vol.
34, pp.217-222, 1999.

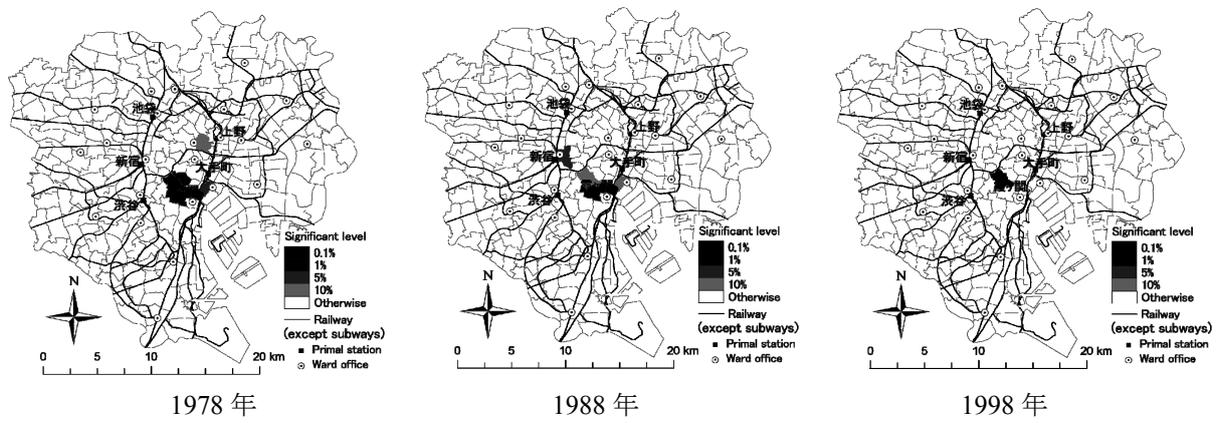


霞ヶ関へのフロー

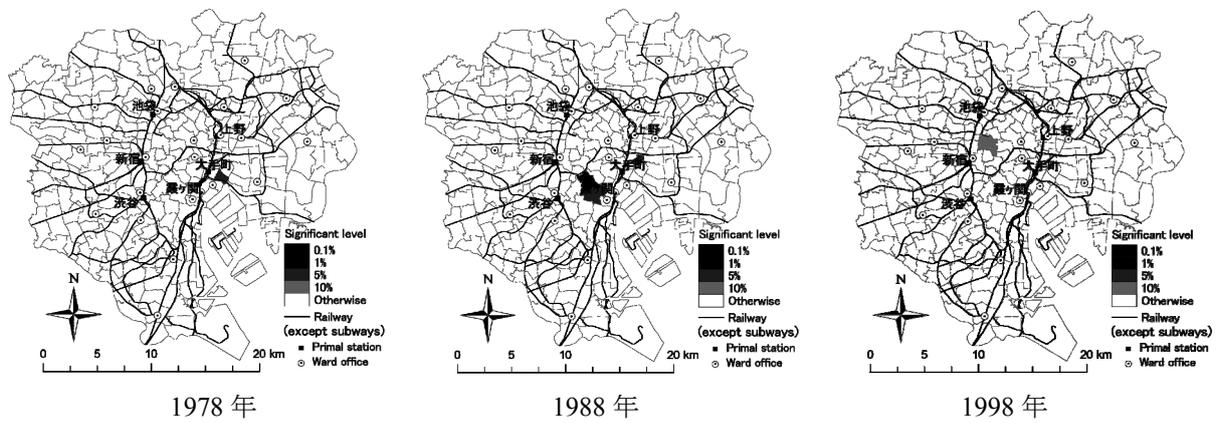


大手町へのフロー

図-2 サービス業フローの空間集積

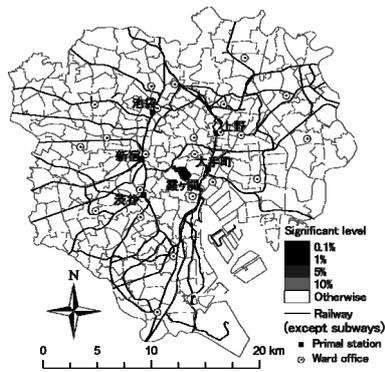


霞ヶ関へのフロー

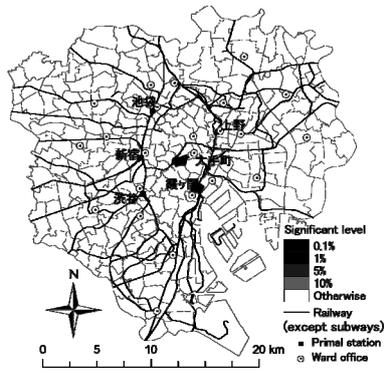


大手町へのフロー

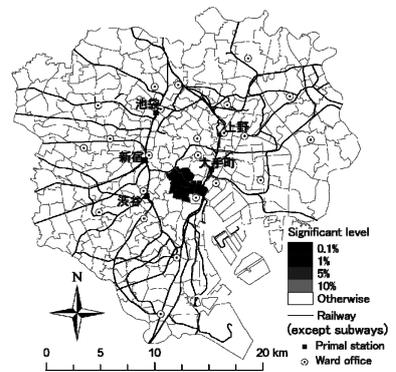
図-3 卸売小売業フローの空間集積



1978年

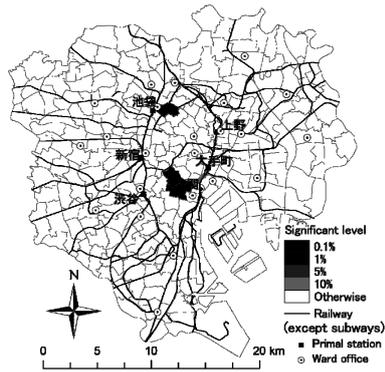


1988年

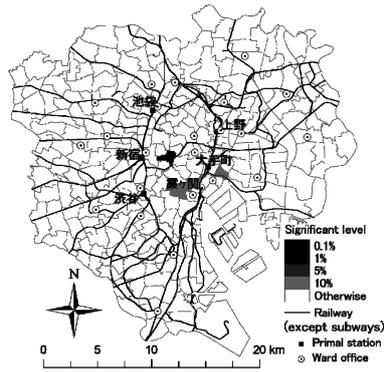


1998年

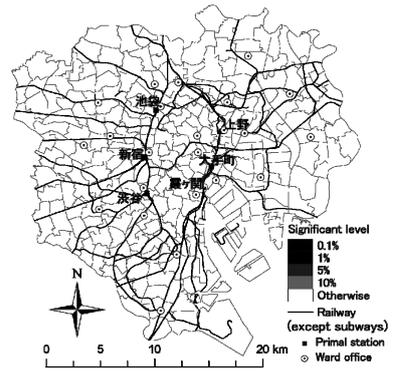
霞ヶ関へのフロー



1978年



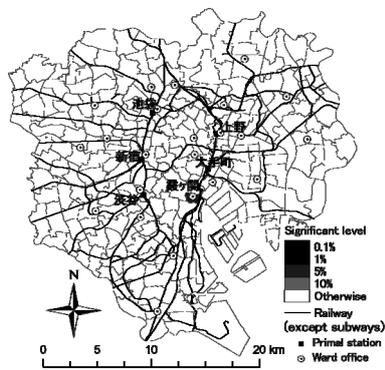
1988年



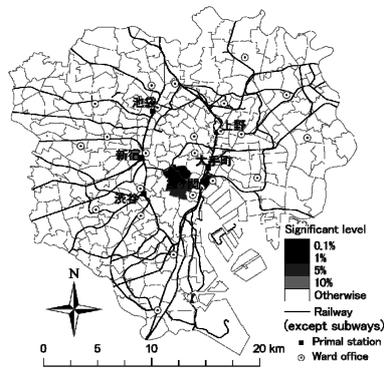
1998年

大手町へのフロー

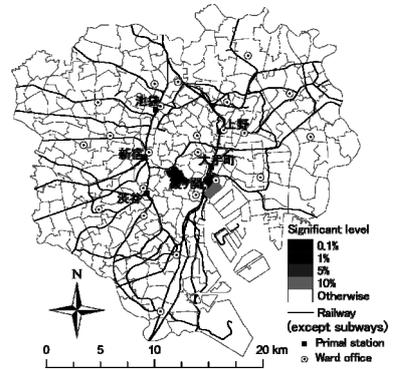
図-4 金融保険不動産業フローの空間集積



1978年

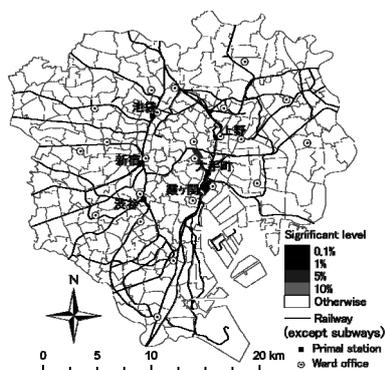


1988年

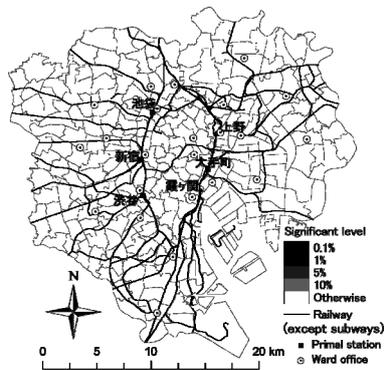


1998年

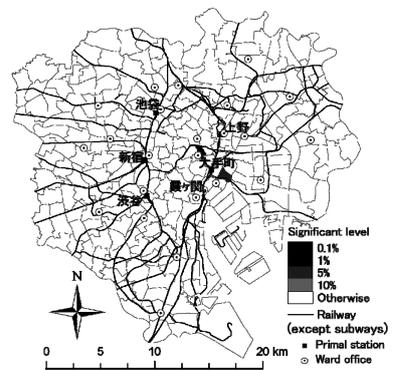
霞ヶ関へのフロー



1978年



1988年



1998年

大手町へのフロー

図-5 公務フローの空間集積