

世界都市の空間分布構造と将来予測手法の研究

紀伊 雅敦¹・秋元 圭吾²

¹正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

E-mail:kii@eng.kagawa-u.ac.jp

²非会員 (財)地球環境産業技術研究機構副主席研究員 システム研究グループ

(〒619-0292 京都府木津市木津川台9-2) E-mail: aki@rite.or.jp

本研究では、都市の空間分布の将来推計にかかわる既往研究を整理し、適合度を考慮した不規則成長モデルに基づく都市規模分布の将来推計手法を定式化した。また、モデル分析の基礎データとして世界の都市通勤圏の設定を試み、これに基づきいくつかの国について都市規模分布を推計した。その結果、最大都市の規模および冪指数について国による差異が認められた。

Key Words : *urban population growth, agglomeration, Zipf's law, random growth network model*

1. はじめに

国連の人口推計では、世界の都市に居住する人口比率は1950年代にはおよそ30%程度だったものが、現在は50%となっており、2050年には70%になると推計されている。人間の活動の場としての都市の重要性は今後も増大すると考えられる。

現在、都市の空間分布に関する地理情報システム (GIS) データが蓄積されつつあるが、それらは行政界あるいは衛星画像解析に基づく土地被覆に基づいており、そこから直接導かれる都市圏は必ずしも温暖化対策の評価に用いる活動単位として適切ではなく、対策効果の将来推計の基礎データとするには多くの工夫が必要である。

本研究は都市圏を通勤圏で定義した上で、日本のデータに基づき都市圏の推計モデルを作成し、これを用い世界の都市圏の設定を試みる。また導出された現況都市規模分布の指数分布への適合性を確認し、将来予測へのネットワークモデルの適用可能性を検討する。以上で将来の都市空間分布の推計手法構築に寄与することが本研究の目的である。

2. 既往研究

都市の人口規模分布は経験的に冪指数が1の指数法則に従うことが指摘されており¹⁾、その法則の説明を試みる様々なモデルが提案されてきた。初期の研究として

Simon²⁾は増加する総人口が人口規模に応じて既存都市に割り当てられると想定することで指数法則を導出している。ただし、このモデルでは冪指数が1に十分近いとすべての人口が1つの都市に集中する結果が導かれる。

Gabaix³⁾は都市の期待成長率とその分散が規模から独立であるという仮定 (Gibrat則) から近似的な指数法則が導かれることを示している。また標準的な都市経済モデルからGibrat則を導き都市規模分布の指数法則を導出する研究⁴⁾も見られるが、期待成長率が規模から独立となる現象の経済的説明は十分明らかではない⁵⁾。

一方、Asadoorian⁷⁾は人口密度分布をベータ分布で表わし将来の人口密度の空間分布を推計している。ここではベータ分布パラメータをGNP、国土平均人口密度の関数で表わし、それらの将来推計を用いて緯度経度1度メッシュごとの将来人口密度を推計している。ただし、具体的なシミュレーション方法は明示されていない。

また、Random Growth Networkモデルの分野では指数法則を解析的に導いている。Barabasi and Reka⁸⁾は接続ノードの選択確率が既存の接続ノード数に依存するとの仮定の下で、接続ノード数分布が漸近的にパレート分布と一致することを示している。ただし、このモデルを都市規模分布の推計に適用する場合、都市が発生した順に規模が大きくなることとなり、必ずしも実際の状況を再現しえないと考えられる。Ergun and Rodgers⁹⁾はノードの適合性を考慮した不規則成長モデルを示しており、やはり解析的に指数法則を導いている。

ここで、都市の成長過程を鑑みると、人口規模が大き
いほど経済的の魅力が増加し、それがさらに人口を引き付
けるといった収穫逓増の性質を有すると考えられる。一
方、都市の発生過程においては交通の要衝であるなど自然
地理的条件が大きく影響するとも考えられる。上記モデ
ルのうちErgun and Rodgersモデルは操作性、指数則の
頑健性、地理条件等の導入の容易性から世界を対象とし
た都市の空間分布の推計に適していると考えられる。そ
こで本研究ではこのモデルを都市空間分布推計に用いる
よう修正したうえで適用可能性を検討する。

3. 適合性を考慮したRandom Growth Urban Model

ここではErgun and Rodgersモデルに基づき適合性を考
慮したRandom Growth Urbanモデル（以下、RGUモデル）
を構築する。

人口 k 、都市の適性指数 μ の都市数を $N_k(\mu)$ とし、時間当
たり国全体で1単位の人口が増加するとき、 (k, η) の都市
数の時間変化率を次式で表す。

$$\frac{\partial N_k(\mu)}{\partial t} = \frac{1}{M} \left[(k + \mu - 2)N_{k-1}(\mu) - (k + \mu - 1)N_k(\mu) \right] + \delta_{k1} f(\mu) \quad (1)$$

ここで、右辺第1項は1期前に人口が $k-1$ で今期1単位の
人口を獲得し k となる都市数の期待値、第2項は今期人口
が k で1単位人口を獲得し $k+1$ となる都市数の期待値、第3
項は新たに発生する都市数の調整項で、 $f(\mu)$ は適性指数 μ
の都市の発生確率を表す。 δ_{k1} は $k=1$ のときのみ1で他はゼ
ロとする。また、 M は正規化項であり次式で与えられる。

$$M = \sum_{k, \eta} (k + \mu - 1)N_k(\mu) \quad (2)$$

ここで、人口、都市数の時間増加率をそれぞれ q 、 n と
すると次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k, \eta} k N_k(\eta) \right) = q \quad , \quad \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k, \eta} N_k(\eta) \right) = n \quad (3)$$

また、適性指数の期待値を m と表記すると

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k, \eta} \mu N_k(\mu) \right) = m \quad (4)$$

これより、式(2)は次のように表わされる。

$$M = (q + n(m - 1)) \cdot t \quad (5)$$

なお、オリジナルのErgun and Rodgersモデルでは接続
ノード数を推計するため $M=(m+1)t$ となっている。都市数
も時間に対し線形で増加すると想定し以下のように表す。

$$N_k(\eta, t) = m_k(\mu) \quad (6)$$

これより、式(1)は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & (1 + n \cdot (m - 1)/q + (k + \mu - 1)) \cdot n_k(\mu) \\ & = (k + \mu - 2) \cdot n_{k-1}(\mu) + (q + n \cdot (m - 1)) \delta_{k1} f_k(\mu) \end{aligned} \quad (7)$$

この漸化式とスターリングの公式を用いて、 μ 、 m に
対して k が十分大きいとするならば($k > K, \mu$)の都市数の時
間増加率と K について以下の関係が導かれる。

$$n_{k > K}(\mu) \propto (K + \mu - 1)^{-(1+n(m-1)/q)} \quad (8)$$

以上より、都市規模の累積分布の冪指数は $1+n(m-1)/q$
となる。

4. 現況都市規模分布の推計

近年の実証研究¹⁰⁾¹¹⁾では都市規模分布の冪指数が有意
に1と異なる国が少なからず存在することが示されている。
本研究でも、現状の都市規模分布の把握を試みる。
ただし、現時点では国際的に比較可能な都市圏人口のデ
ータは存在しないことから、日本の都市雇用圏¹²⁾に相当
する都市圏を推計するモデルを作成し、これに基づき世
界の都市圏を設定する。

(1) 使用データ

まず、都市人口データとしてWorld Gazetteer¹³⁾を用いる。
これは各国統計年報やアトラス等の2次データに基づき
行政単位での都市人口と座標を与えている。本研究では
人口5千人以上の約46,400都市のデータを対象とする。

次に、大都市圏は通常複数の行政単位から構成されて
いるため、都市圏単位で規模分布を把握するためにはこ
のデータのグループ化が必要である。そこで、一次グル
ープ化を行うために30秒メッシュの都市域データを用い
る。ここではUSGS-IGBP¹⁴⁾およびCIESIN-GRUMP¹⁵⁾を使
用した。これら2つのデータソースはそれぞれ異なる方
法で構築されており、個別にみると一部大都市域が欠け
ているなど課題があるため、両者をプールした都市域を
用いる。

この都市域メッシュをラベリングにより連担する市街
地を1つの圏域とみなすことで都市をグループ化する。
都市域メッシュデータと上述の都市ポイントデータを
GIS上でオーバーレイ処理したところ、メッシュに含ま
れる都市ポイントデータは約33,600都市となった。

なお、単純にラベリング処理した場合、都市圏域を過
大に評価することになる。図1は関東の都市域メッシュ
を示しているが、この場合、宇都宮から静岡までを一つ
の圏域とみなすことになる。このため、ここで得られた
都市グループを分割し、都市雇用圏に相当する都市のグ
ループ化を試みる。

(2) 都市雇用圏の推計結果

日本について都市雇用圏のポリゴンデータを作成し、
これとWorld Gazetteerの都市のポイントデータをオーバ
ーレイすることで都市雇用圏のデータを作成した。次に、
都市の影響圏は都市人口に応じて増加すると仮定して以

下のように表す。

$$R_i = \alpha_1 Pop_i^{\alpha_2} + \alpha_3 \quad (9)$$

ここで、 Pop_i は都市*i*の人口、 α はパラメータであり、 R_i は都市の影響圏である。ここで、近隣の都市までの直線距離 d_{ij} が R_i よりも小さい場合都市*j*は都市*i*の雇用圏に含まれると仮定すると、都市圏*i*に含まれる都市の集合は以下のようにあらわされる。

$$M_i = \tilde{M}_i \cup_{j \in \tilde{M}_i} M_j \quad \text{where, } \tilde{M}_i = \{j | d_{ij} \leq R_i\} \quad (10)$$

このため、推計される M_i とGISデータから得られる都市雇用圏の集合 M_i^* の対称差の要素数が最小となるようパラメータを推計した。その結果推計されたパラメータとGISデータへの適合度を表1に示す。

表より、都市数の的中率は63%だが、人口で見ると86%であり、大都市ほどモデルの再現性が高い。一方、的中しなかったものは、実際には他の都市圏に含まれているものを独立した都市と推計している場合が多い。よって、このモデルは小規模都市の数を多めに評価する可能性がある。都市雇用圏に対応する都市グループの推計結果を図2に示す。これより市街地は連担しているが、都市圏は分割されている様子がわかる。

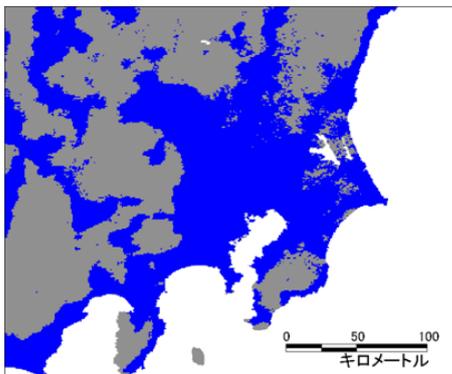


図1 メッシュデータによる都市領域

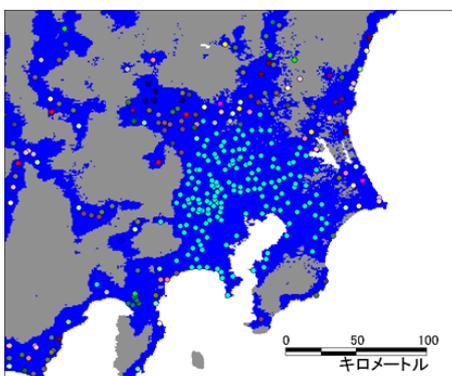


図2 推計された都市グループ

表1 都市雇用圏推計モデルの再現性

	値		比率	
	都市数	人口(万人)	都市数	人口
適合	562	9208	63%	86%
不適合1	299	1265	34%	12%
不適合2	11	140	1%	1%
不適合3	19	99	2%	1%
総計	891	1.07E+04	100%	100%

$\alpha_1=2.85, \alpha_2=0.63, \alpha_3=0.55$

不適合1:他の都市圏に含まれるものを独立と推計。

不適合2:独立しているものを他の都市圏に属すと推計。

不適合3:他の都市圏に属すものを別の都市圏に属すと推計。

なお、このモデルを海外にも適用し世界の都市圏人口データを作成するが、当然のことながら国や都市圏ごとの交通行動特性や交通基盤の整備状況等が大幅な誤差をもたらすことに留意が必要である。本来、都市圏ごとの人口データが得られていることが望ましいが、そのようなデータは現時点で存在しないため推計せざるを得ない。また、ここでは都市間の直線距離により近接性を与えているが、通勤圏を推計する上では所要時間や交通費用等を用いることが望ましい。しかし、そうした交通基盤データが整備されているのは一部の先進国に限られており、国際比較を行ううえでデータ整備状況は不十分である。今後こうした都市データの整備が望まれる。

(3) 現況都市規模分布の推計結果

以上のモデルを世界の33,588都市に適用した結果、28,590都市圏が得られた。いくつかの国について横軸に人口規模の対数、縦軸に累積順位の対数を取りプロットしたものを図3～5に示す。

これより、多くの国で最大規模の都市を除きおおむね冪法則が成立していると言えるが、大規模都市については国により傾向が異なっている。フランス、タイ、インドネシア、ロシアでは大規模都市の人口が突出しているが、ドイツ、インド、中国では最大規模の都市もほぼ直線に乗っており、日本、米国、イギリスはその中間に位置づけられる。

これより、中央集権的な国では最大規模の都市が突出し、分権的な国では都市規模分布が冪法則に従う傾向が示唆される。

また、図より冪指数はおおむね1前後であることが読み取れるが、日本と米国のように国による差異も認められる。こうした差は自然地理条件のほか、国の中央集権度など政治体制にも起因すると考えられている¹⁰。今後はそれらを3章で示したモデルパラメータに反映したうえで将来推計を行う予定である。

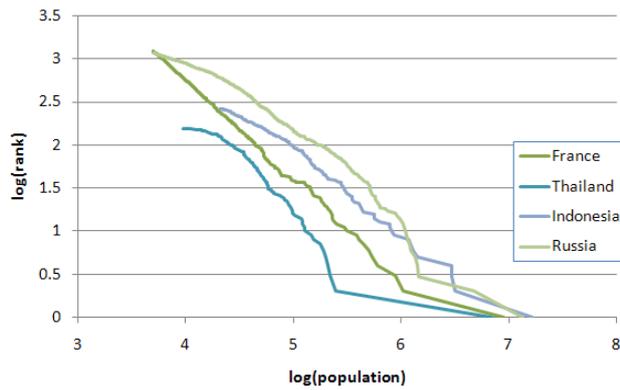


図3 都市規模分布 (仏, 泰, 尼, 露)

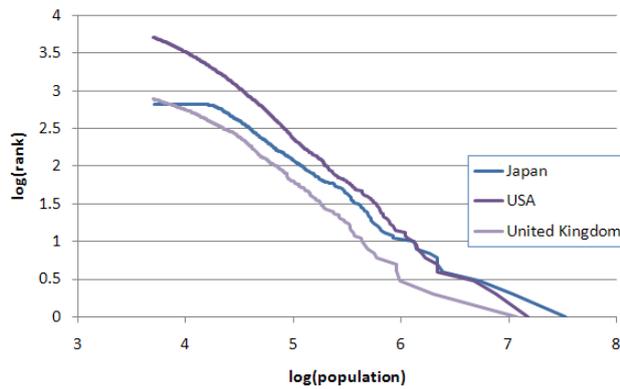


図4 都市規模分布 (日, 米, 英)

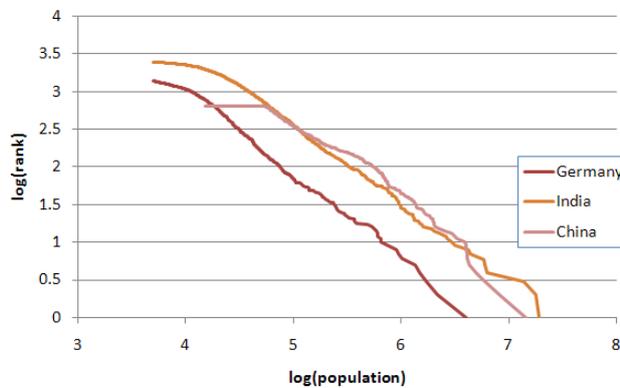


図5 都市規模分布 (独, 印, 中)

5. まとめ

本報は、都市の空間分布の将来推計にかかわる既往研究を整理し、適合度を考慮した不規則成長モデルに基づく都市規模分布の将来推計手法を定式化した。また、モデル分析の基礎データとして世界の都市通勤圏の設定を試み、これに基づきいくつかの国について都市規模分布を推計した。その結果、最大都市の規模および冪指数について国による差異が認められた。

今後は得られたデータに基づき3章で定式化したモデ

ルパラメータを推計するとともに、適合度パラメータを自然地理条件に基づき推計したうえで、将来の都市の空間分布を推計する予定である。

謝辞

本研究の一部は平成23年度科学研究費補助金（若手研究(B), 課題番号：23760490）の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) Zipf, G (1949), Human Behavior and the Principle of Least Effort, New York: Addison-Wesley.
- 2) Simon, H. (1955), On a class of skew distribution functions, Biometrika 42, pp425-440.
- 3) Gabaix, X. (1999), Zipf's law for cities: An explanation, Quarterly Journal of Economics 114(3), 739-766.
- 4) Cordoba, Juan C. (2003), On the Distribution of City Sizes, mimeo, Rice University.
- 5) Rossi-Hansberg, E. and M. L. J. Wright (2003), Urban Structure and Growth, mimeo, Stanford University.
- 6) 藤田昌久, ポール・クルーグマン, アンソニー・J・ベナブルズ (2000), 「空間経済学」, 東洋経済新報社, 215-226.
- 7) Asadoorian, M.O. (2005), Simulating the Spatial Distribution of Population and Emissions to 2100, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 123.
- 8) Barabasi L and A. Reka (1999), Emergence of scaling in random networks, Science, 286, 509-512.
- 9) Ergün, G. and G. J. Rodgers (2002), Growing random networks with fitness, Physica A, Volume 303, Issue 1-2, 261-272.
- 10) Kwok, T.S. (2004), Zipf's Law for Cities: A Cross Country Investigation, CEP discussion paper No.641, Center for Economic Performance, London School of Economics and Political Science.
- 11) Crampton, G. (2005), The Rank-Size Rule in Europe - testing Zipf's law using European data, ERSa conference papers, ersa05p185.
- 12) 金本良嗣, 徳岡一幸 (2002), 日本の都市圏設定基準, 『応用地域学研究』 No.7, 1-15.
- 13) World Gazetteer, <http://www.world-gazetteer.com/>
- 14) GLOBAL LAND COVER CHARACTERIZATION, USGS,
- 15) <http://edc2.usgs.gov/glcc/>
- 16) Global Rural Urban Mapping Project,
- 17) <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/index.jsp>