

## 市街地形状と鉄道網の連携度に関する世界大都市間比較分析

### Comparative Study of the Degree of Linkage between City Shape and Railway Network among Worldwide Major Cities

安 成光\*・松橋啓介\*\*・鈴木 勉\*\*\*

Chengguang An\*, Keisuke Matsuhashi\*\*, Tsutomu Suzuki\*\*\*

In this paper, we propose an index of the degree of linkage between city shape and railway network, as a method for measuring how well the spatial pattern of urban development is supported by public transportation like railway network. We also measure the degree of linkage for targeted forty major cities in the world, including Beijing, Shanghai, Guangzhou as Chinese major cities, grasping urban expansion by using satellite images and open data. We find out, for example, that Chinese cities show relatively low degree of linkage compared with cities in developed countries, and that the typical pattern of the pass due to the delay of railway network construction from the time-series change of the degree of linkage can be observed. We also try to identify area that contributes to urban compaction by average travel time and the degree of linkage.

**Keywords:** urban form, railway network, remote sensing, open network data, compact city

都市形状, 鉄道網, リモートセンシング, オープンネットワークデータ, コンパクトシティ

#### 1. はじめに

人口の都市への集中とそれによる市街地の拡大は依然として全世界的潮流である。特に、開発途上国における都市化が進行し、世界の全人口の半数以上（33 億人）が都市域に居住している。この数は2030 年までに50 億人に増加すると予測されている<sup>1)</sup>。都市人口の増大の90%以上は開発途上国で起きており、増大した人口を収容するために開発途上国の都市面積が2030 年までおよそ20 万 km<sup>2</sup> から60 万 km<sup>2</sup> へと約3 倍に増加すると予測されている<sup>2)</sup>。

成長の著しい開発途上国の急速な都市拡大は、環境との調和を困難にする自動車依存度の高い市街地を生み出すことに繋がる懸念が懸念されている<sup>3,4)</sup>。一方、先進国では公共交通を軸とした公共交通指向型の都市開発(TOD)によって、コンパクトな都市構造を形成することによって都市全体のエネルギー消費や環境負荷を削減する持続可能な都市づくりを実現しようと動きも見られる<sup>5)</sup>。

このような課題に対し、統一的な分析を行うためには、第一に、データの利用可能性の問題がある。都市の形状が公共交通網に沿って成長しているかを明らかにするには、まず都市の市街地エリアの変遷を把握しなければならないが、特に開発途上国の土地利用データは多くの場合未整備である。都市形状の把握については、2.1 節に挙げるような衛星画像に基づく既往研究があるので、それによる把握が可能である。また、公共交通網などの交通ネットワークデータの整備も国や地域によってまちまちである。都市鉄道の変遷に着目した研究<sup>6)</sup>や公共交通とコンパクトなまちづくりの関連性<sup>7)</sup>などの研究例が存在するが、こうした研究はデータの揃っている先進国のものが主である。第二に、比較を行うための適切な評価指標が存在しないという問題がある。都市形状と公共交通網との関係性を評価する指標に関する研究の蓄積は少ない。

そこで、本研究では、市街地拡大による移動時間の拡大と鉄道網整備による移動時間短縮の効果に着目して、市街地が鉄道網に沿って形成されてきたかを、都市形状と鉄道網との連携度という指標を用いて明らかにするとともに、先進国・新興国・途上国の都市を対象に比較を行い、都市毎の特徴を明らかにすることを目的とする。また、各都市の領域内の平均移動時間と連携度の両方に着目して、都市のコンパクト化に寄与する地域を特定することを試みることを目的とする。

具体的には、Landsat 衛星画像を分類することによって、都市毎の市街地形状を抽出するとともに、オープンストリートマップ (Open Street Map, 以降 OSM) のデータから道路データと鉄道データ (地下鉄・路面電車含む) と駅位置データを抽出し、別途調べた鉄道網の開通年次のデータと併せることによって、鉄道網形状の時系列変化を把握することで、相互比較可能な統一的データを構築する。さらに、都市形状と鉄道網の連携性を測る指標を定義し、先進国や開発途上国の都市を対象に比較を行うとともに、中心市街地の密度維持と郊外スプロールの抑制が持続可能性の鍵となる大都市において、鉄道網と連携したコンパクトな都市構造を形成する方向性を示す。本研究では、鉄道網を同様に活用した場合に、その効果が市街地形状とどの程度合致しているのかという観点からのインフラ整備の評価に焦点を絞ることとし、都市毎の鉄道の運行やLOS での違いについては考慮しない。

#### 2. 分析方法

##### 2.1 衛星画像による都市形状の変化の計測

Bagan and Yamagata は、都市の成長を定量的に分析する

\*正会員・株式会社パスコ(PASCO Corporation)

\*\*正会員・国立環境研究所社会環境システム研究センター(National Institute for Environmental Studies)

\*\*\*正会員・筑波大学システム情報系(University of Tsukuba)

ために、Landsat 衛星画像を分類することによって、1972 年から 2011 年までの東京都の土地被覆変化を計測し、国勢調査の基準 (1km) 地域メッシュに集計し、基準地域メッシュの人口変化と比較することによって、市街地拡大と人口密度の変化の関係を分析した<sup>9)</sup>。Haas and Ban は中国の三大都市圏を対象として、Landsat 衛星画像を分類することによって、都市圏の土地被覆変化の大きさと速度を分析し、生態系サービスに与える影響を分析した<sup>9)</sup>。

本研究では、これらの方法を参考に、図 1 の手順に従い、市街地形状とその変化を計測するために、Landsat 衛星画像を教師なし分類で分類を行い、各分類毎に TrueColor 画像の目視写真判読によって各クラスの土地利用を判別した。Landsat の空間分解能は基本的に 30m である。土地利用としては、主に植生・水面・市街地の 3 つに分類し、建物・道路・鉄道・工場を主たる構成要素とするものを市街地と定義した。この結果による市街地と判定された面積を 1km メッシュに集計し、メッシュ内の市街地面積の割合が 20% 以上のメッシュを市街地メッシュと判定する。20% 以下のメッシュを除外することによって、郊外部にある小村や高速道路・鉄道網による市街地形状の過大評価の影響を防いでいる。1km メッシュとしたのは、計算量と市街地形状の把握の正確性のバランスを考慮して設定したためである。また、都市毎の行政エリアの形状が異なる影響を防ぐために、本研究では、各都市の交通中心駅から半径 60km 範囲内の市街地を研究対象とする。中心駅は駅名称が都市と

同じ名前のものか、OSM で接続リンク数の最も多い駅であることを基準として選定した。

## 2.2 鉄道網の時系列変化の計測

次に、OSM データから、上と同範囲の各都市の道路データ・鉄道データ・駅データを抽出する<sup>10)</sup>。鉄道は貨物線・地下鉄・路面電車を含める。鉄道路線の開通年次のデータを付加することにより、時系列の鉄道網の変化を計測した。OSM は、フリーの地理情報データを作成することを目的としてオープンコミュニティで作られたものであるが、モバイルアプリ等で使用される程正確性は高く、本研究の目的には十分使用できると考えられる。Landsat 衛星画像と OSM 地図データは世界範囲レベルでデータが整備され、無料で提供されているので、世界中の任意の都市を対象に市街地形状・面積と鉄道網の路線データと延長を分析することが可能になる。

図 2 は、UN-Habitat (2008)<sup>1)</sup>を参考に先進国・発展途上国各国の首都を中心に各大陸から選定 (発展著しい中国からも複数選定) した世界の 16 の巨大都市を対象として、1985 年・2000 年・2015 年の市街地形状の変化と鉄道網の変化を表している。ただし、Landsat 衛星画像については、その年に雲などの影響のない画像が入手困難な場合は、前後で直近の年次 (概ね前後 1 年内) の画像で代用した。先進国大都市では 1985 年以降市街地拡大が少ない一方、新興国や途上国での急速な市街地拡大によって都市形状が顕著に変化したことがわかる。公共交通が発達したロンドンと東京では鉄道延長が高い一方、自動車を中心として発展してき

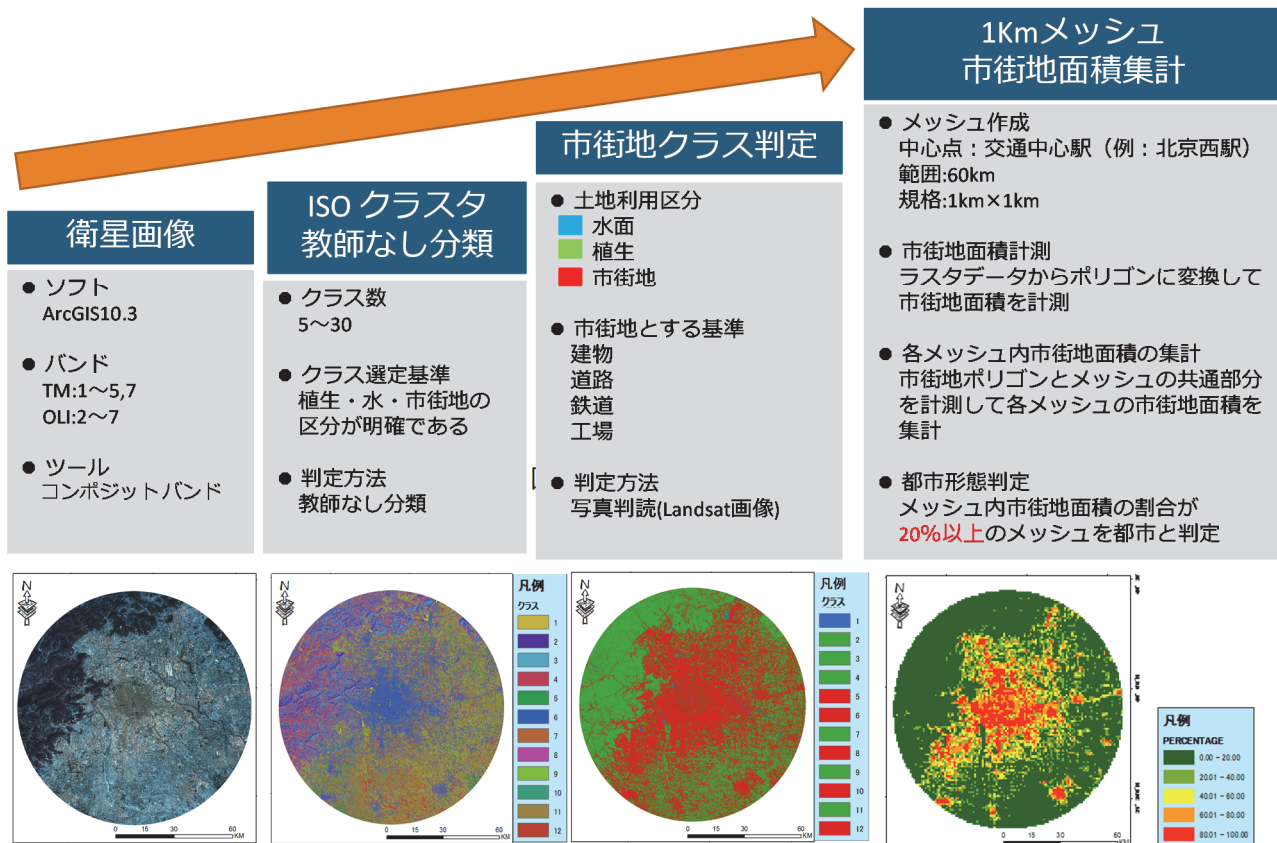


図 1 画像分類の方法

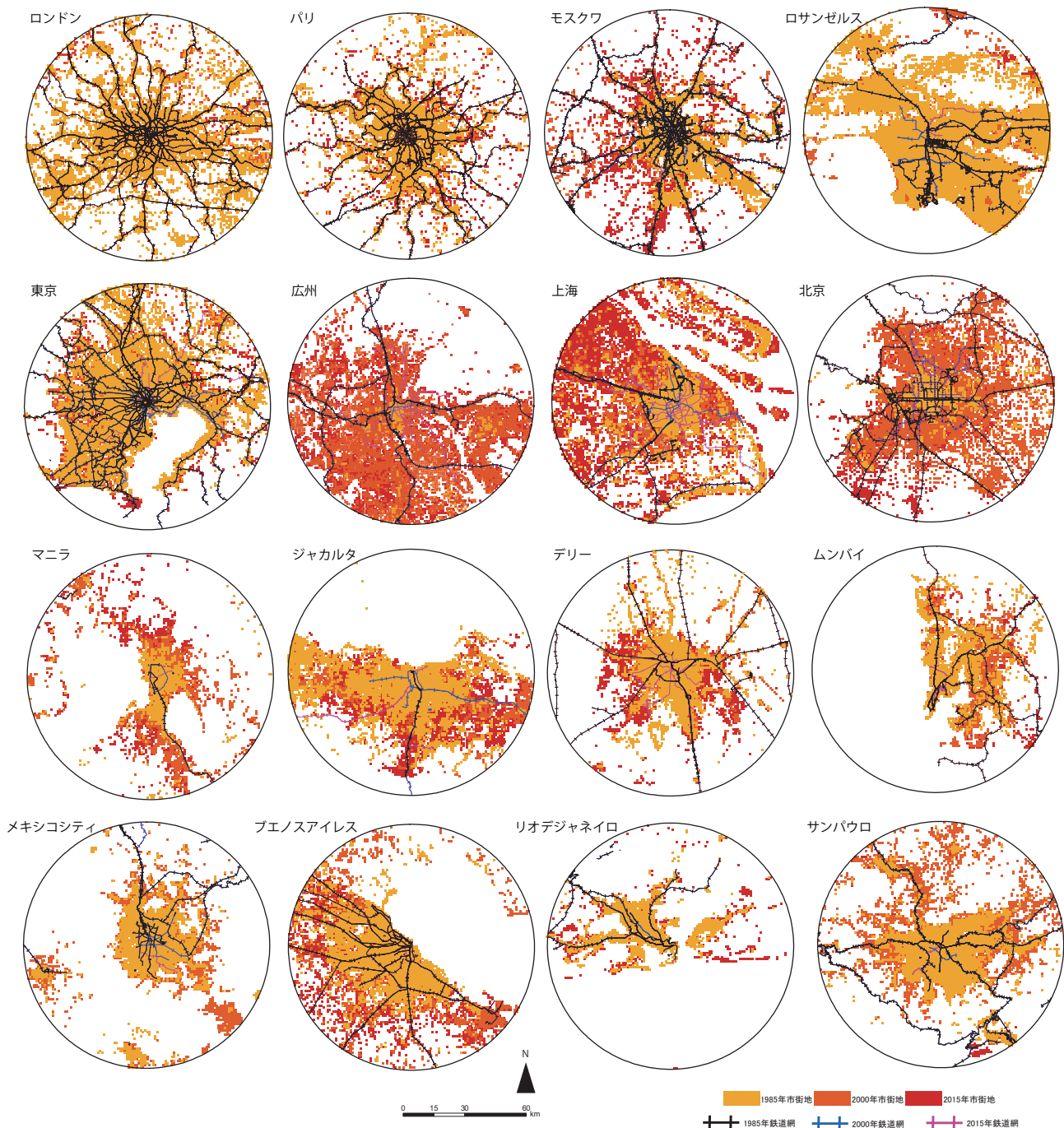


図2 16主要都市の市街地の変遷（1985年・2000年・2015年）

たロサンゼルスでは鉄道網の延長が短く、鉄道の効果の違いがあるであろうことが読み取れる。

### 3. 市街地形状と鉄道網の連携度

一般に、道路上よりも高速で移動可能な鉄道網が十分に整備され、かつ市街地が鉄道網に沿って形成されている場合、都市領域内の総移動時間は鉄道網の恩恵を受けて大きく減少すると考えられる。反対に、仮に鉄道網がある程度整備されたとしても、スプロールが顕著で、鉄道網が及んでいない地域にまで市街地が拡大しているような場合には、鉄道網の恩恵をあまり受けないため、都市領域内の総移動

表1 移動時間計算上の速度設定パターン

パターン	$T_{\max}$	$T_{\text{obs}}$	$T_{\min}$
鉄道速度	鉄道なし	60km/h	60km/h
道路速度	30km/h	30km/h	60km/h

時間はあまり減少しないと考えられる。

このような考え方のもと、市街地と判定された1kmメッシュの中心点を起点もしくは終点として、以下の3つのそれぞれの仮定により、3種類の都市内移動時間を計測する（表1）<sup>11)12)</sup>。

- (1) 道路網のみでの所要時間：鉄道網がないものとし、道路網のみを用いて、起終点それぞれの最寄りの道路上

の点間の最短道路距離を 30km/h で移動すると仮定したときの所要時間  $T_{max}$

- (2) 道路と鉄道の組合せによる所要時間:道路網に加えて、鉄道網上を 60km/h で移動できるものとし、道路と鉄道を組み合わせて利用した最短時間経路による所要時間  $T_{obs}$
- (3) 道路も鉄道速度で移動可能としたときの所要時間: 仮想的に道路網も鉄道と同じ 60km/h の速度で移動できるとした仮定したときの所要時間  $T_{min}$

この3種類の所要時間を全てのメッシュ間について計測し、それを用いて、市街地が鉄道網に沿って形成されてきたかを以下の指標で表すことを考える<sup>13)14)</sup>。

### 3.1 連携度

都市全体を評価する指標として、全ての市街地メッシュから全ての市街地メッシュまでの移動についての総移動時間が鉄道網の恩恵を受けて短縮された割合を連携度とし、式(1)で定義する。値が1に近づくほど都市形状と鉄道網の連携が高いと見なす。

$$\frac{\sum_i \sum_j p_i p_j T_{max}^{ij} - \sum_i \sum_j p_i p_j T_{obs}^{ij}}{\sum_i \sum_j p_i p_j T_{max}^{ij} - \sum_i \sum_j p_i p_j T_{min}^{ij}} \quad (1)$$

$p_i, p_j$ はそれぞれ起点・終点メッシュの市街地面積の割合を表す。

### 3.2 短縮度

ある特定の地点を評価する指標として、一つの市街地メッシュ  $i$  から全ての市街地メッシュまでの移動についての総移動時間が鉄道網の恩恵を受けて短縮された割合を短縮度と定義すると、式(2)で表される。値が1に近づくほど当該地区の鉄道網との連携が高いと見なす。

$$\frac{\sum_j p_j T_{max}^{ij} - \sum_j p_j T_{obs}^{ij}}{\sum_j p_j T_{max}^{ij} - \sum_j p_j T_{min}^{ij}} \quad (2)$$

## 4. 連携度の都市間比較

図3は、図2に示した16都市を含めた都市鉄道を有する世界の41主要都市の2015年の連携度を、鉄道路線延長の市街地面積に対する密度(鉄道密度)と対比させて示している。鉄道が高密度に整備されると、都市領域内の移動時間が鉄道網によってより大きく短縮されるため、鉄道密度が高くなるほど連携度も高くなるという関係が見られる。欧州諸都市は鉄道密度が高いため、充実度も高い状況が確認できる。日本の諸都市の鉄道密度は十分高くないが、連携度は同水準を達成するものになっている。一方、発展途上の国々の都市は、鉄道密度が低い分、連携度も低いことがわかる。

また、図4は、図2に示した16都市の1985年・2000年・2015年の連携度変化を表している。ロンドン、東京、パリ、モスクワではもともと鉄道密度が高く、連携度も高い。ロサンゼルスは、自動車交通を中心に発展してきた背景から、鉄道密度と連携度が低かったが、1990年以降から都市内の交通問題を緩和するため、公共交通を整備し、連携度が順調に上昇している。一方、発展途上の諸都市では、連携度

はもっと低い水準にあり、鉄道整備によって連携度が上昇しつつあることが読み取れるが、北京、広州、上海といった中国の都市では、鉄道密度の変化も大きい。それ以上に市街地の拡大が急激に進行していることから、鉄道密度の上昇がこれに追いつかず、連携度があまり上昇しない結果となっている。

鉄道の恩恵は場所毎に異なる。図5は、2015年についての各都市の中心駅から60km範囲内の短縮度の地理的分布を表している。東京とロンドンでは、市街地全体を満遍なく結ぶ鉄道網が存在するので、全ての市外地が鉄道の恩恵を受けて移動時間が多く短縮され、短縮度の高い地区が他の都市に比べ多い結果となっている。一方、北京、上海、広州では、短縮度の高い地域は一部に限定されている。短縮度は、鉄道密度の高い地区や結節点、そして郊外であっても鉄道によって多くの地区と結ばれている地区が高くなることが読み取れる。

## 5. コンパクト化寄与地区の分析への応用

三浦・古藤は、平均距離を用いてコンパクト性を向上することに寄与する地域を分析している<sup>15)</sup>。ここでは、この考え方を応用して、まず第一に、あるメッシュからの全市街地への平均移動時間に着目し、この場所に立地することが全体の平均移動時間より短いときにコンパクト化に寄与する場所と見なす場合、第二に、あるメッシュの短縮度が全市街地の連携度より大きければ、そこが鉄道のメリットの大きい場所であるので、ここに立地することが全体の連携度を押し上げる、すなわち公共交通利用に資する場所と判断し、コンパクト化に寄与する場所と見なす場合の2つを考える。すなわち、

- (1) **コンパクト化寄与地区**: 平均移動時間短縮に寄与し、かつ連携度向上にも寄与する地区。この地区の人口が増加することによって、都市全体の平均移動時間が短縮され、かつ連携度が向上する。
- (2) **平均移動時間短縮地区**: 平均移動時間短縮に寄与するが、連携度の向上には寄与しない地区。移動距離の短縮は見込めても、鉄道利用はあまり見込めない。
- (3) **連携度向上地区**: 連携度向上に寄与するが、平均移動時間短縮には寄与しない地区。移動距離の短縮は見込めないが、鉄道利用は見込める。
- (4) **スプロール化地区**: 連携度も平均移動時間にも寄与しない地区

の4つに分類する。

図6は、各都市の2015年時点での地区分類を示している。ロンドンと東京では、ともに市街地の中心部がコンパクト化寄与地区になっているが、東京では東京湾による地勢の影響を受けるため、中心部の東方向および南方向に偏っている。ロサンゼルスや北京・上海・広州では、都市の中心部をはじめ、鉄道網に沿ってコンパクト化寄与地区が広がっている。一方、連携度向上地区となるのは、主に郊外の鉄道網が通過している市街地である。郊外で平均移動



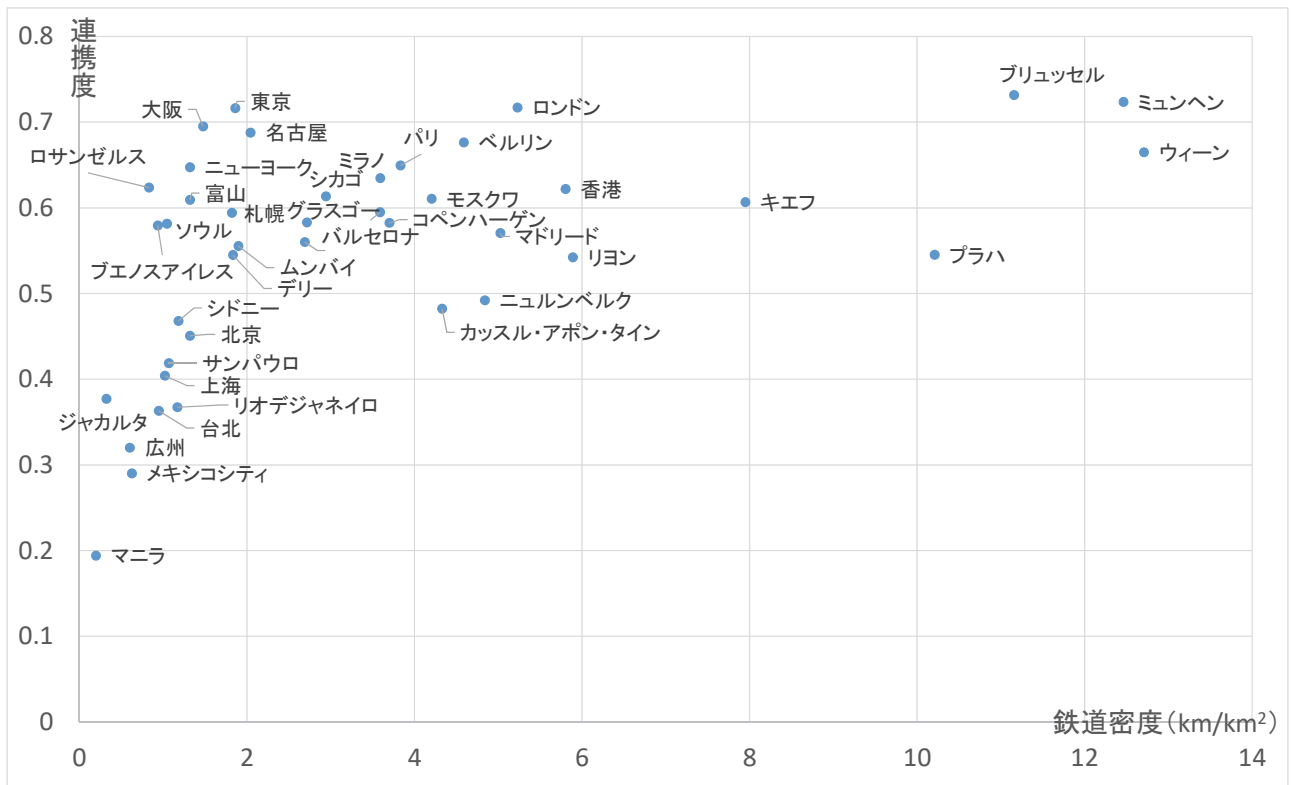


図3 世界主要41都市の鉄道密度と連携度の関係（2015年）

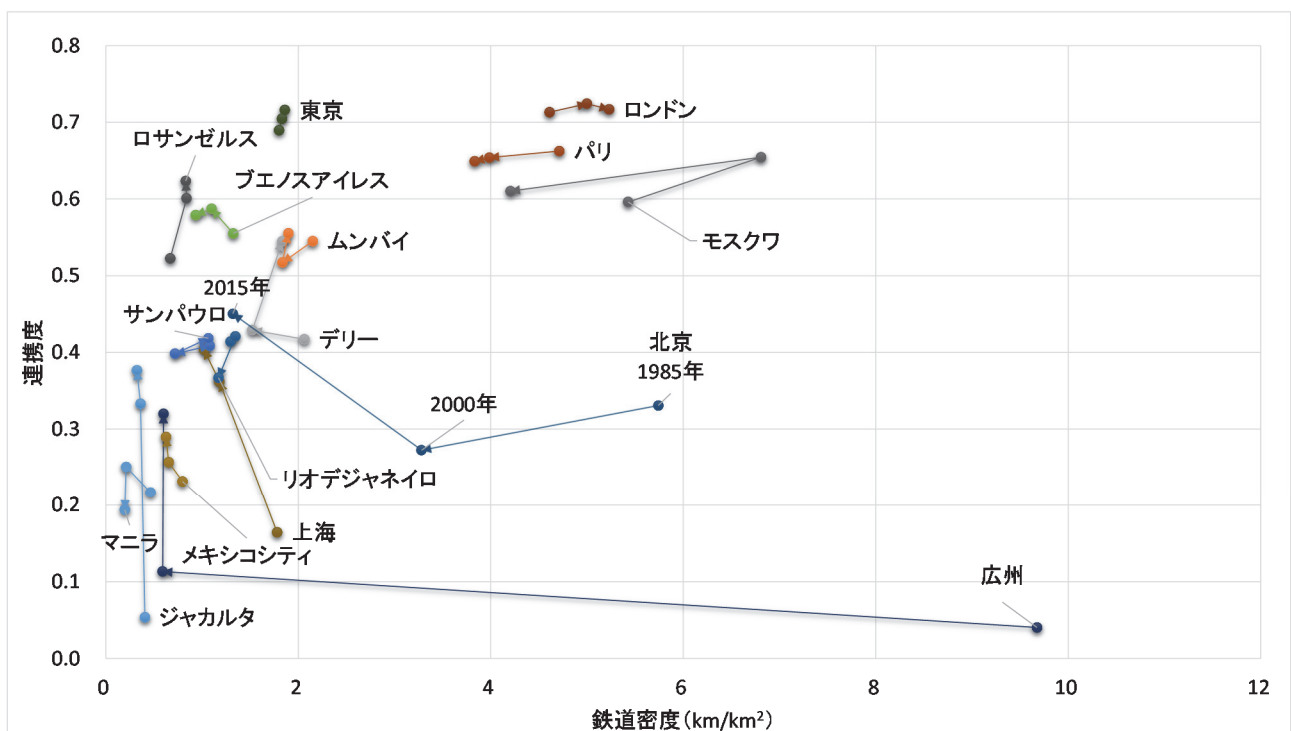


図4 16主要都市の連携度の変化（1985年・2000年・2015年）

距離が長くても一定の鉄道利用が見込めるならば、コンパクト市街地形成に寄与できると考えられる。鉄道網が通過していない地区では、平均移動時間短縮地区とスプロール化地区に区分されるが、コンパクトな市街地形成のためには平均移動時間短縮地区に都市活動を集積させる方がよい

と考えられる。

## 6. 結論と今後の課題

本研究により、以下のことが明らかとなった。

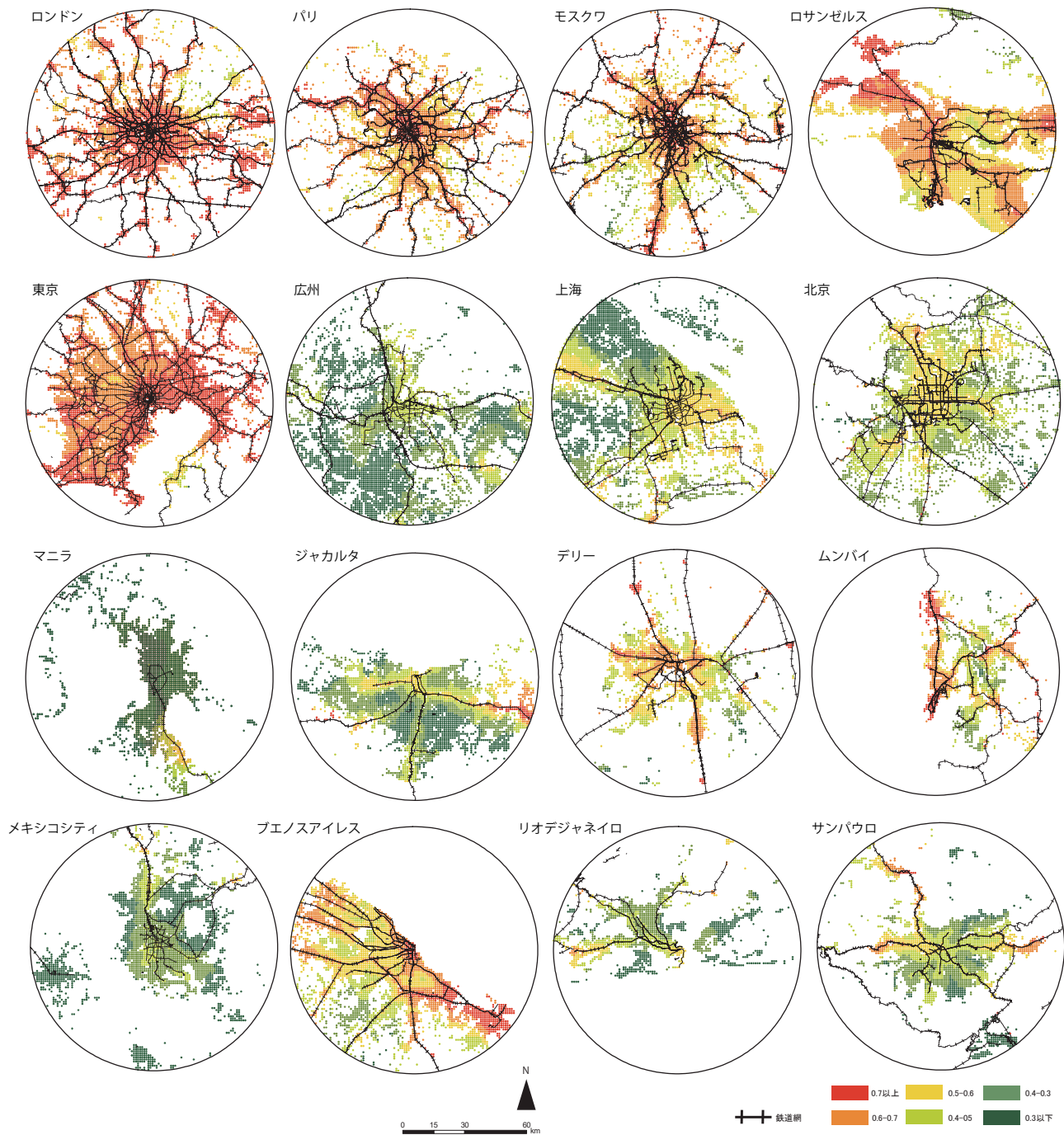


図5 16主要都市の短縮度の分布 (2015年)

- (1) Landsat 衛星画像を分類することによって、都市毎の1985年、2000年、2015年の市街地変化を、また、OSM地図データから、鉄道網の時系列変化を計測し、都市間の比較を行った。先進国の大都市では1985年以降市街地拡大が少ない一方、新興国や途上国での急速な市街地拡大によって都市形状が顕著に変化したことや、都市毎の鉄道路線整備に差異が見られることを明らかにした。
- (2) 市街地拡大による移動時間増加と鉄道網整備による移動時間短縮効果に着目して市街地形状と鉄道網との連携度を評価するために連携度および短縮度の指標を定義し、鉄道網の充実度との対比を行った。公共交通が発達したロンドンと東京は連携度が高く評価された一方、中国三大都市では、鉄道整備が行われ連携度が上昇しているものの、市街地拡大が鉄道網の延伸を凌ぐ勢いで郊外部まで広がったため、連携度が低いレベルにあることなどが明らかになった。一般に、都市毎の比較を通じて、同じ鉄道延長でも、鉄道網形状の差異によって連携度が異なることが明らかになった。
- (3) 市街地領域内の移動時間に着目して、平均移動時間の

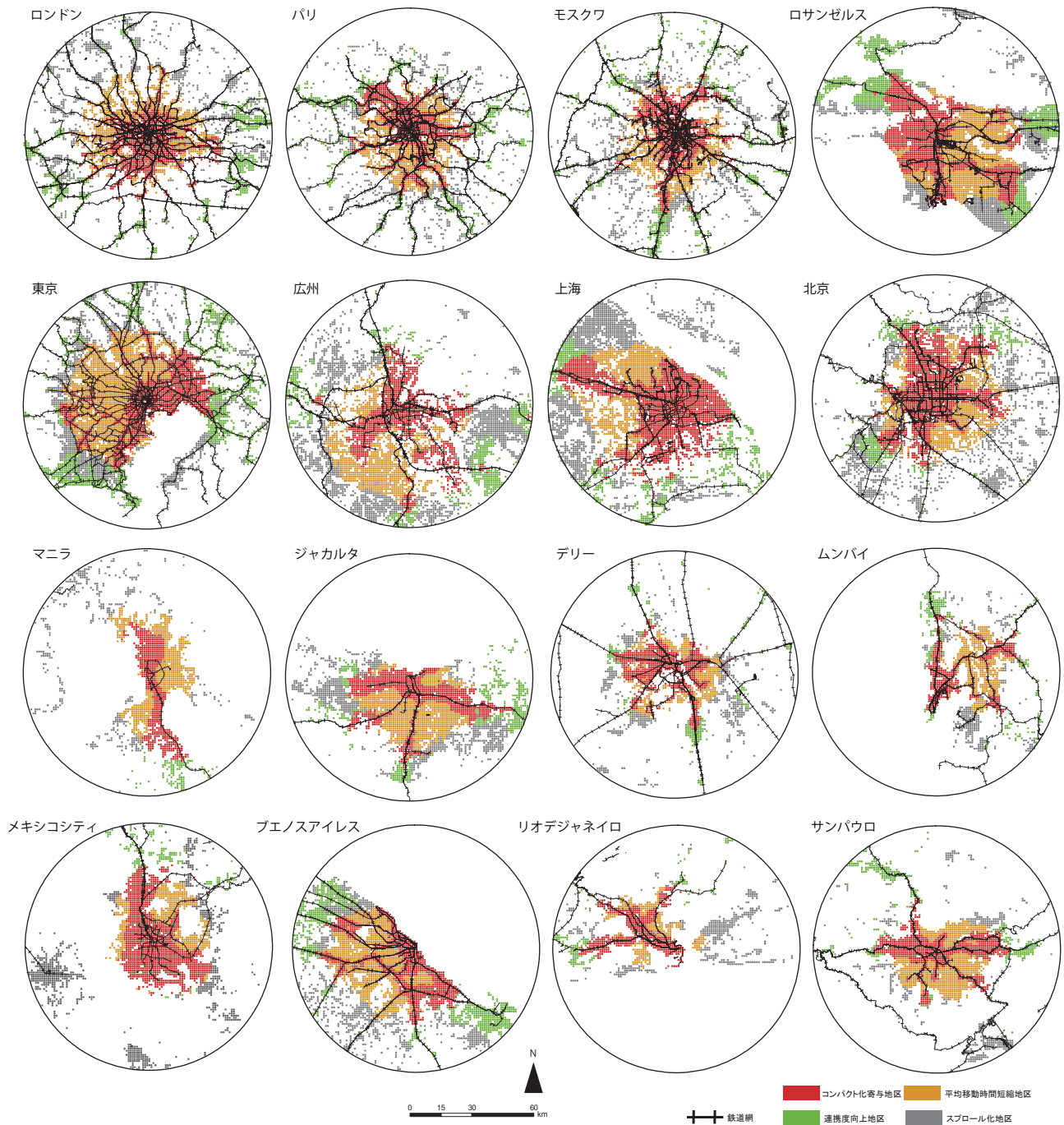


図6 16主要都市のコンパクト化寄与地区分類 (2015年)

短縮と連携度上昇の両面から都市のコンパクト化寄与地区の分析を行った。平均移動時間を短縮する意味では中心市街地がコンパクト化寄与地区となるが、連携度指標が高い(鉄道の時間短縮効果の高い)という意味では、鉄道網沿線や鉄道網が整備された郊外部の市街地がコンパクトな市街地形成に寄与できると考えられる。

本研究では、各都市の人口分布や交通需要分布は考慮されていない。したがって、個々の都市の連携性の評価のためには、人口指標、パーソントリップデータや流動データ

を考慮した連携度指標の開発が今後の課題とされる。また、鉄道網の運行形式やその結果としてのサービス水準(LOS)は千差万別である。鉄道網の効用については、道路網のそれを含めてLOSも考慮されなければならない。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費補助金 24241053, 26289170, 26560162 による助成を受けた。また、筑波大学吉野邦彦教授には有益なコメントを頂いた。ここに記して感謝いたします。



## 参考文献

- [1] UN-Habitat (2008): *State of the World's Cities 2008-2009: Harmonious Cities*. Earthscan.
- [2] Angel, S., Sheppard, S., Civco, D. L., Buckley, R., Chabaeva, A., Gitlin, L., Kraley, A., Parent, J., Perlin, M. (2005): *The Dynamics of Global Urban Expansion*. Washington, DC: World Bank, Transport and Urban Development Department. 205 p.
- [3] 中村一樹・林良嗣・加藤博和・福田敦・中村文彦・花岡伸也 (2012): アジア開発途上国都市における低炭素交通システム実現戦略の導出. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), **68**(5), I 857-I 866.
- [4] ATRANS: *An Analysis of Vehicle Kilometers of Travel of Major Cities in Thailand*. ATRANS Research Report, 2010. [http://www.atransociety.com/2010/research.html#2009\\_2010](http://www.atransociety.com/2010/research.html#2009_2010)
- [5] 国土交通省 (2009): 「低炭素社会に向けた国土構造のあり方を考える」.  
[http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/iten/service/newsletter/i\\_02\\_68\\_1.html](http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/iten/service/newsletter/i_02_68_1.html)
- [6] 日比野直彦・山下良久・森田泰智・仮屋崎圭司 (2011): 都市鉄道における政策・研究課題. 第43回土木計画学研究発表会・講演集.
- [7] 小谷通泰 (2005): コンパクトなまちづくりを支える公共交通システムー米国ポートランド都市圏を対象として. 国際交通安全学会誌, **30**(2), 92-101.
- [8] Bagan, H. and Yamagata, Y. (2012): Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years. *Remote Sensing of Environment* **127**, 210-222.
- [9] Haas, J. and Ban, Y. (2014): Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **30**, 42-55.
- [10] OpenStreetMap Japan : <http://openstreetmap.jp/>
- [11] 三浦英俊・腰塚武志 (1993): 2種類の交通手段を持つ領域の移動時間について. 都市計画論文集, **28**(3), 397-402.
- [12] 鈴木勉・腰塚武志 (2004): 交通路の存在する都市空間における距離・時間分布. 日本応用数理学会論文誌, **14**(2), 99-116.
- [13] 安成光・鈴木勉 (2015a): 衛星画像とオープンデータを利用した都市形状と鉄道網の連携度評価. 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, 214-215.
- [14] 安成光・鈴木勉 (2015b): 都市形状と鉄道網との連携度の都市間比較. 地理情報システム学会講演論文集.
- [15] 三浦英俊・古藤浩 (2013): 平均距離を用いた地域のコンパクト性の計測. 都市計画論文集, **48**(3), 903-908.

(2016年 3月 28日 受付)