

階層型道路ネットワーク構成要素に関する 最適解の導出方法

後藤 梓¹・中村 英樹²・浅野 美帆³

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))
E-mail: azusa@genv.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻
E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科 社会基盤工学専攻
E-mail: asano@genv.nagoya-u.ac.jp

本稿は、道路ネットワークを階層型に再編するために必要となる、階層区分数、道路間隔、交差部形式、自由走行速度といった構成要素の最適な組み合わせを、定量的評価に基づいて導出する方法を提案するものである。この提案では、様々な構成要素の組み合わせについて、想定されるODパターンでの利用者均衡状態を再現し、目標拠点間旅行時間を達成することを前提に、総旅行時間、走行安定性の指標を用いた費用対効果から最適解を導出する。このときに、単路部走行時間と交差点遅れを区別して考慮することが、各階層の道路の走行性能を的確に評価する上で重要となる。さらに、提案された方法を用いて、ネットワーク最適解の階層性を確認することにより、階層型ネットワークの利点を定量的に評価することが可能になると期待される。

Key Words : network performance, functional road hierarchy, cost effectiveness, user equilibrium, delay

1. はじめに

わが国では、幹線道路での渋滞や生活道路内の通過交通などの問題を受けて、現状の道路ネットワークを階層型に再編する必要性が提唱されてきた¹⁾⁻³⁾。

階層型ネットワークとは、各道路の担うべきトラフィック機能(交通を円滑に流す機能)やアクセス機能(沿道施設や下位道路への出入のしやすさを表す)に応じてネットワークを階層化し、それに見合う性能が担保されるよう設計されたネットワークである。トラフィック機能とアクセス機能は一般的にトレードオフの関係にあるため、道路が階層化により明確に区分され、利用者の目的に応じて使い分けられることで、効果的に機能すると期待されている。この考え方は、AASHTO⁴⁾やRIN⁵⁾など欧米諸国のガイドラインにおいても採用されている。Xie⁶⁾らによれば、利用者の需要に応じて道路が供給されるとき、ネットワークは自然と階層化されたものになることが示されている。

しかしながら、階層型ネットワークの利点は、今まで定性的に示されるにとどまっており、これにより達成される旅行時間などの定量的評価は行われていない現状にある。このため、ネットワーク性能を大きく左右すると

考えられる構成要素、すなわち階層区分数や、階層ごとの道路間隔、交差部形式、自由走行速度、沿道出入の可否などについては、現行の道路区分や海外ガイドラインなどを参考に、従来決め打ちで議論されてきた¹³⁾。本来、これら構成要素は、拠点間旅行時間など一定の性能目標を満足するように設定された基準のもと、計画・設計されるべきであるが、このような基準は現時点では存在せず、現状再編のための目標となる理想的ネットワークの詳細は不明瞭である。

そこで本稿では、定量的な性能評価に基づき、ネットワークの構成要素に関する最適解を導出する方法について提案し、その妥当性について議論したい。拠点間旅行時間を用いた性能目標を満足することを前提として、達成可能なシナリオについて、円滑性および走行安定性を考慮した評価を行い、費用対効果から最適な組み合わせを最適解とする。導出された最適解の階層性を調べることにより、階層型ネットワークの優位性についての考察も可能となると考えられる。

2. 現行のネットワーク計画と最適解導出手順

最適解導出にあたり、考慮すべき事項を検討するため、まず現状として、(1)節でわが国のネットワーク計画の現状と問題点を把握し、(2)節で典型的な階層型ネットワークをもつドイツの例を整理する。

(1) 日本におけるネットワーク計画と問題点

わが国の道路は、道路構造令により定められた通り、種級区分に従って設計される⁷⁾。道路の種級区分は、道路の種類(高速自動車国道、一般国道など)と地形(平地部/山地部)による種区分(4種)と、計画交通量などによる級区分により決定されるが、トラフィック/アクセス機能などの実際の機能との対応関係は曖昧である¹⁾。また、種級区分が決定されたのちの設計は単路部を基準として進められるため、運用段階において、キー交差点での混雑や著しい遅れなどの問題が生じている。

(2) ドイツにおける階層型ネットワークの設定

ドイツのネットワーク区分に関する指針であるRIN⁹⁾によると、ネットワークの階層区分は、図-1に示す通り、生活圏中心、中核市などといった拠点レベルに応じて、拠点間を結ぶ階層の段階構成が決定される。例えば、大都市間の連絡には最も上位の階層0、個別施設から地方中心都市までの連絡には階層Vと階層IIによりまず中核市に連絡してから階層IIを用いる、というようにして各拠点間を連絡する道路の階層が設定される。

これにより決定された階層に応じて、目標旅行速度が設定される。このときの目標旅行速度は、交差点の遅れを考慮した上で達成されるべき平均速度とされている。

しかしながら、RINにおいても目標旅行速度算出の根拠は記載されていない。また、Friedrichら⁸⁾が指摘するように、ネットワークで実現される旅行速度は、交差点形式などの構成要素と密接な関係があるにも拘らず、これらに関する定量的な研究は充分ではない。

(3) ネットワーク最適解導出の手順

(1)(2)の現状を受けて、本稿では、ネットワーク構成要素と性能の定量的関係に基づいた最適解導出が必要と考え、図-2の手法を提案する。

この手法では、まず様々なネットワーク構成要素の組み合わせを仮定したシナリオを構築し、あるOD交通量分布を与えたときの交通状況を利用者均衡状態によって再現する。このとき、運用段階で問題となる交差点の取り扱いについて考慮することで、計画・設計から運用まで一貫したネットワーク計画を実現することを目的とした均衡配分を行う(3章)。

この結果得られるネットワーク性能が、ある目標拠点間旅行時間を達成しているかを照査し、ここで目標を達成しない場合は、道路ネットワークシナリオを見直すこ

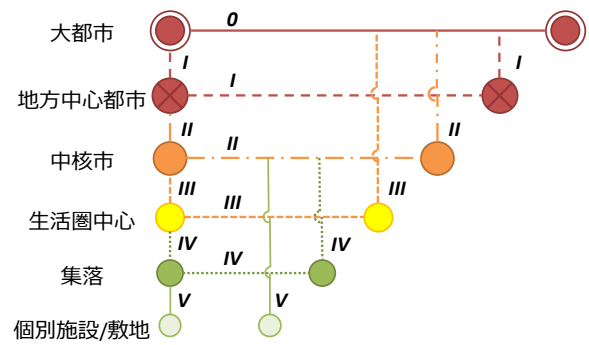


図-1 ドイツにおける拠点レベルに応じた階層の段階構成

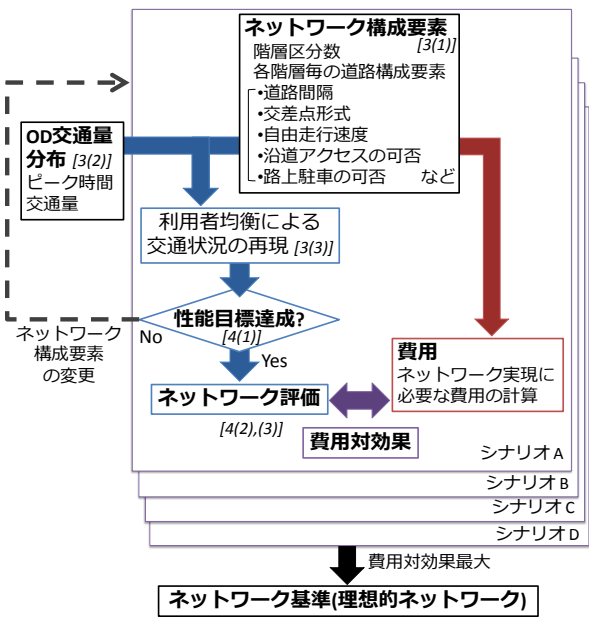


図-2 ネットワーク基準設定の手順

ととする。目標達成可能なシナリオは複数存在すると考えられるが、総旅行時間と走行安定性を調べることで、円滑性、安全性・快適性の観点から評価を行い、費用対効果により最適解を選択する(4章)。

この手法において、最適解は、性能目標を達成することを前提に、費用制約の中で最大性能を発揮する理想的ネットワークとなる。

3. 利用者均衡による交通状況の再現

最適解導出のため、各シナリオに対して、想定されるOD交通量分布のもとでの利用者均衡状態を数値計算(静的配分)によって再現する。

(1) ネットワーク構成要素(シナリオ)

ネットワークを構成する要素として、a) 階層区分数、階層ごとのb) 道路間隔、c) 交差点形式、d) 単路部での自由走行速度を考え、費用制約下で性能目標を達成する各階層の理想的な組み合わせを最適解として導出する。

a) 階層区分数

まず全く階層性を持たないネットワークにおいては、全ての道路が沿道施設からの出入可能な最下層の道路で構成されると仮定することができる。このとき、沿道アクセスの影響や、歩車共存道路であるべきことから、道路はある程度低い旅行速度しか実現できず、性能目標を達成できない場合が生じる。こうして、上位の道路の必要性が生じる。すなわち、階層数は性能目標や拠点配置によって異なると考えられる。

b) 道路間隔

各階層の道路間隔は、これが大きいほど、迂回距離や上位の道路へのアクセスに必要な距離を増大させ、旅行時間が長くなる(桑原ら⁹⁾)。一方で、これが小さいほど交差点の増加すなわち遅れ時間の増大を意味する。このような、上位道路へのアクセス性と交差点遅れのトレードオフを考慮して決定する必要があると考えられる。

c) 交差点形式

一般道におけるボトルネックは基本的に交差点であり、遅れ時間の大半は交差点遅れとみなすことができる(大口ら¹⁰⁾)ことから、立体交差、信号交差点、無信号交差点、ラウンドアバウトといった交差点形式は、円滑性に大きな影響を与え、計画段階でも無視できない。また、対車両、対歩行者・自転車との交錯機会は交差点形式によって変わるため、交通安全上も重要な要素である。

d) 単路部での自由走行速度

単路部での自由走行速度は、その道路で実現される速度の上限値を表し、交通の円滑性、安全性に直接関係するものである。設計にあたっては、この値に応じて、道路の線形、車線幅員や勾配、ハンプ・クランクなどの幾何構造要素が決定されるべきである。

(2) OD間分布交通量

実際の交通量は時間的に変動するが、今回の目的は、最適解すなわち理想的ネットワークの導出にあるため、想定される最大交通量であるピーク時間交通量を与える。

特に階層性を持たせたときのネットワークの性能は、ODやトリップ長の組み合わせに影響されると考えられ、これらに応じて最適解は異なる予想される。

(3) 静的配分による利用者均衡状態の計算

仮定された道路ネットワークシナリオとOD間分布交通量を入力として、図-3に示す手順で、利用者均衡状態配分により交通状況を再現する。ここでは、単路部をリンク、交差点をノードとし、各リンク*i*での交通量の均衡解 x_i を求める。

利用者均衡配分においては、繰り返し計算によって、各リンク交通量 x_{mi} とリンク旅行時間 t_{mi} の関係(m は繰り返し回数)から最適解を導出するが、今回、交差点形式に

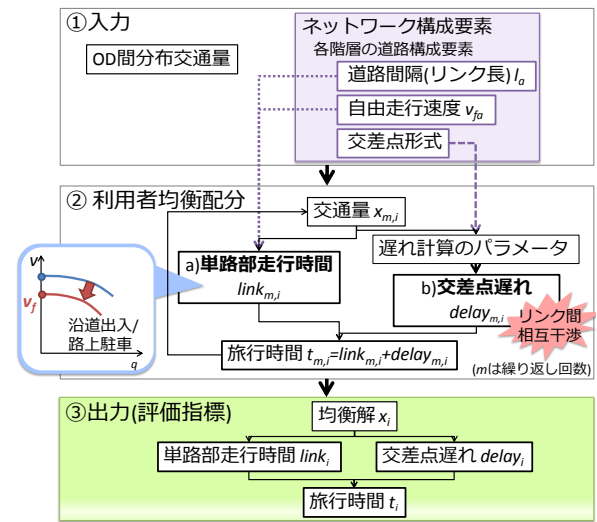


図-3 利用者均衡配分の手順

よるネットワーク性能への影響を明示的に評価するため、旅行時間 t_{mi} を、単路部走行時間 $link_{mi}$ と交差点遅れ $delay_{mi}$ の合計とし、両者を区別して計算する(式(1))。

$$t_{m,i} = link_{m,i} + delay_{m,i} \quad (1)$$

単路部走行(図-3. ②-a)では、実際には沿道出入・路上駐車などによる容量や走行速度の低下が考えられる(Access Management Manual¹¹⁾、早河ら¹²⁾)。しかし、その影響は信号交差点での遅れに比較するとかなり小さいものであると考えられるとともに、旅行時間の関数に直接組み込むことが容易でない。このため、沿道出入や路上駐車が可能道路については、自由走行速度自体を下げるにより間接的に表現し、単路部は低減された自由走行速度で走行すると仮定する(沿道出入台数等と速度低下率の関係については、今後議論が必要であろう)。このとき、単路部走行時間 $link_{mi}$ は、リンク長 l_i 、低減されたリンク自由走行速度 v_{fi} 、リンク交通量 x_{mi} のみの関数として表せる。

交差点遅れ $delay_{mi}$ (図-3. ②-b)は、交差点形式別に計算されるが、リンク交通量 x_{mi} だけでなく、対向方向・交差方向リンクの交通量の影響が無視できず、リンク間に相互干渉のある利用者均衡配分を用いることになる¹³⁾。この均衡配分では、遅れ計算に必要なパラメータのうち、リンク相互干渉に関係するもの(信号交差点におけるスプリットなどが、繰り返し計算中で毎回更新される。

利用者均衡配分の結果として、各リンク交通量の均衡解 x_i と、このもとでの単路部走行時間 $link_i$ 、交差点遅れ $delay_i$ 、旅行時間 t_i が得られる(図-3. ③)。

4. ネットワーク性能評価

3章で述べた利用者均衡配分によって、旅行時間のう

ち、全く性質の異なる単路部走行時間と交差点遅れを区別して計算することが可能となる。これより、ネットワーク性能として、従来の旅行時間による円滑性の評価のほか、特に交差点における停止に伴う走行安定性も考慮することができる。

(1) 拠点間旅行時間

二層の広域圏¹⁴⁾によれば、通勤圏域は中心都市から概ね1時間圏、医療・買物依存圏域は概ね30分圏であり、また都市間の移動は概ね3時間以内に短縮されると交通量が大幅に増加することが示されている。このように、拠点間旅行時間はネットワーク性能上、重要な指標である。このため最適解は少なくともこれらのような重要拠点間につき一定の目標を達成していることが必要である。

ドイツでは、RIN⁹⁾において、中心地(zentrale Orte)と呼ばれる地域の拠点が4段階に分けられ、それぞれの拠点間について乗用車による目標旅行時間が表-1の通り設定されている。これは、図-1における同じ拠点レベル同士を結ぶ移動(横方向の移動)に対する目標旅行時間を示す。

拠点間旅行時間は、人口や土地利用、経済、産業、危機管理など様々な側面を考慮して設定されるべきものであるが、わが国においては、具体的な目標は示されていない。このため、ドイツの例と日本の都市配置、人口分布や地勢条件等との対応関係を考慮した上で、妥当な値を設定するのが現実的であると考えられる。

(2) 総旅行時間

目標拠点間旅行時間が達成されたシナリオに対し、ネットワーク全体としての時間費用を量るため、総旅行時間による評価を行う。総旅行時間 TT は、ネットワーク I 全てに含まれるリンクの交通量と旅行時間の積の合計として式(2)から求められ、これが最小となるネットワークが望ましいと考えられる。

$$TT = \sum_{i \in I} (x_i \cdot t_i) \quad (2)$$

(3) 走行安定性

交差点での頻繁な停止や長い待ち時間は、円滑性だけでなく安全性・快適性の観点からも望ましくないことから、交差点における停止に伴う走行安全性を評価する。

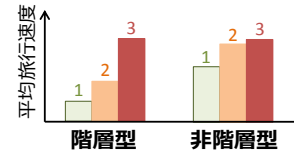
式(3)のように、あるトリップにおいて経路 R を使用したときの旅行時間 T に対する停止回数 N_{stop} と停止時間 T_{stop} の加重和の割合 S を求めることで、走行安定性の指標とする。

$$S = \frac{\alpha \cdot N_{stop} + \beta \cdot T_{stop}}{T} = \frac{\alpha \cdot N_{stop} + \beta \cdot \sum_{a \in R} delay_i}{\sum_{i \in R} (link_i + delay_i)} \quad (3)$$

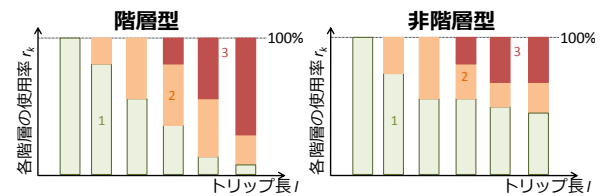
ここで α 、 β はそれぞれ停止回数、停止時間の重みを決定するパラメータである。

表-1 RINにおける拠点間目標旅行時間

拠点のレベル		目標旅行時間
大都市間 (Metropolregionen)	国内外にとって重要度の高い都市	180分以内
地方中心都市間 (Oberzentren)	行政、公共事業、文化や経済の中心となる都市	120分以内
中核市間 (Mittelzentren)	サービスや産業において日常圏以上のより高い活動需要を担う都市	45分以内
生活圏中心間 (Grundzentren)	医療や日常生活の基礎となる中心地	25分以内



(1) 階層性の確保(平均旅行速度の差)



(2) トリップに応じた道路の使い分け

*数字(1~3)は階層のレベル k を表す(1:最下位の階層)

図-4 階層型と非階層型ネットワークのイメージ

複数のシナリオで同一の経路を比較したとき、この値が大きいが、交差点での停止時間が長い一方、単路部の走行時間が短く、走行安定性が低いといえる。

この指標は、加減速に伴う環境負荷の増大とも密接な関係がある。

3, 4章によりネットワーク性能が得られる一方、シナリオ実現に必要な費用は必然的に求められ、費用対効果から最適なネットワーク最適解を導出することができる。

5. ネットワーク最適解と階層性

最適解が求まったとき、この階層性を調べることは、階層型ネットワークの利点を定量的に示す上で非常に重要である。1章で記述したように、階層型ネットワークでは、(1)道路の階層性が確保されていること、(2)道路が利用者の目的に応じて使い分けられていることが求められる。これは、各道路が担うべきトラフィック機能/アクセス機能が満足されているかどうかを表す指標ともいえる。

(1) 階層性の確保

道路の階層性は、階層ごとの平均旅行速度によって把

握できる。階層 k の平均旅行速度 \bar{v}_k は式(4)によって求められるように、交差点遅れを含むものであり、上位の道路では交差点による頻繁な停止を被らないことが重要となる。平均旅行速度が下位の道路で低く、上位の道路で高いとき、階層性が確保されているといえる(図-4(1))。

$$\bar{v}_k = \sum_{i \in K} \frac{l_i}{\text{link}_i + \text{delay}_i} \quad (4)$$

ここに、 K は階層 k に属するリンクの集合を表す。

(2) 目的に応じた道路の使い分け

目的に応じた道路の使い分けを確認するため、トリップ長 l と、トリップ中の階層 k の道路使用率 r_k (式(5))の関係に着目する。短距離トリップで下位の道路が、長距離トリップで上位の道路が使われることで、下位の道路からは通過交通が排除され、上位の道路は高速走行に使用されるようになると考えられるためである。すなわち、トリップ長 l の増大に伴い、下位の道路の使用率 r_{low} が減少し、上位道路の使用率 r_{high} が増大しているとき、ネットワークは階層型といえる(図-4(2))。

$$r_k = \frac{\sum_{i \in K \cap L} l_i}{l} \quad (5)$$

ここに、 L はトリップ長 l となる経路に属するリンクの集合を表す。

ネットワーク最適解は、性能目標を満たすシナリオのうち最も性能の高いものが選択されているので、選択されなかったシナリオよりも最適解の方が階層性が高い場合、階層型ネットワークは優位性が高いと判断することができる。

ネットワーク最適解と階層性の関係は、拠点配置とODパターンによって異なり、階層型ネットワークが優位に機能するパターンとそうでないパターンの両者が存在すると考えられる。この関係を把握することも、今後の階層型ネットワーク議論にとって非常に重要であろう。様々なトリップ長のODをもつ場合の優位性を示すことができれば、階層型ネットワークが道路本来の機能を満足する形であることが帰納的に示唆されるといえる。

6. おわりに

本稿では、利用者均衡を用いた性能評価に基づく、ネットワーク構成要素の最適解導出方法について提案し、さらに階層型ネットワークの優位性を示す方法についてその考え方を示した。

しかしながら、利用者均衡配分におけるリンク間相互

干渉の取り扱い、特に単路部走行時間算定の際の沿道出入等の影響や、交差点遅れにおけるパラメータの計算方法には、未着手の部分もあることから、試行錯誤の余地が多かろう。また、目標拠点間旅行時間の設定方法、性能評価指標とした総旅行時間・走行安定性と階層性の相関関係についても熟慮が必要といえる。

そこで今後は、正方格子状の仮想ネットワークを対象に、提案した性能評価方法の実装を行うことで再現性の確認をしつつ、これらの点について、議論を進めたい。

参考文献

- 1) 中村英樹, 大口敬, 森田綽之, 桑原雅夫, 尾崎晴男: 機能に対応した道路幾何構造設計のための道路階層区分の試案, 土木計画学研究・講演集Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- 2) 下川澄雄, 内海泰輔, 中村英樹, 大口敬: 階層型道路ネットワークへの再編に向けて, 土木計画学研究・講演集Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 3) 高橋健一, 松本幹一, 山川英一, 阿部義典: 性能照査型道路設計における交差・出入制限と階層区分道路の実現に向けた課題, 土木計画学研究・講演集Vol. 43, CD-ROM, 2011.
- 4) AASHTO: A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, pp.1-7, CD-ROM, 2004.
- 5) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, 2008.
- 6) Xie, F., Levinson, D.: Topological evolution of surface transportation networks, Computers, Environment and Urban Systems 33, pp. 211-223, 2009.
- 7) (社)日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2004.
- 8) Friedrich, B., Friedrich, M., Priemer, C.: Impacts of the Service Quality of Single Road Facilities on the Service Quality in Networks, 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, pp.381-390 2006.
- 9) 桑原雅夫, 若公雅敏, 王鋭: 街路の階層的配置によるネットワーク設計に関する一考察, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol.67, No.3, pp.230-243, 2011.
- 10) 大口敬, 中村英樹, 森田綽之, 桑原雅夫, 尾崎晴男: ボトルネックベースで考える道路ネットワーク計画設計試論, 土木計画学研究・講演集Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- 11) Committee on Access Management: Access Management Manual, Transportation Research Board, pp.20, 2003.
- 12) 早河辰郎, 中村英樹: 幹線街路における沿道アクセス機能に応じた旅行速度性能曲線の定式化, 土木計画学研究・講演集Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 13) (社)土木学会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 丸善(株), pp.154-158, 1998.
- 14) 森地茂: 人口減少時代の国土ビジョン 新しい国のかたち『二層の広域圏』, 日本経済新聞社, 2005.

(2011.8.5 受付)

A Concept for the Optimization of Elements for Hierarchical Road Network Configuration through a Cost-effectiveness Analysis

Azusa GOTO, Hideki NAKAMURA and Miho ASANO

This paper aims to introduce a concept to optimize elements for functional hierarchical road network such as number of classes, spacing, types of junctions and free flow speed for each class, based on quantitative evaluation of their performances in terms of travel time and travel stability. In this study, travel stability is estimated as a function of delay and number of stops. User equilibrium which can consider junction delay is used to represent the traffic flow with assumed OD demand distribution. In this optimization, among some scenarios of network elements which can achieve the target travel time between specific centralities, the most cost-effective one is chosen against their construction cost. In addition, a relationship between road hierarchy and performances is proposed to evaluate by using two indices, average travel speed of each class and relationship between trip length and use rate of each class, so that the advantages of hierarchical network can be quantitatively identified.