# 道路の接続構造と取得可能情報に基づいたゾーン間交通量推定手法の開発

佐瀬　瑠璃[1]・杉浦　聡志[2]

[1]学生会員　北海道大学大学院修士課程　工学院（〒060–8628　北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: sase.ruri.i8@elms.hokudai.ac.jp
[2]正会員　北海道大学大学院准教授　工学研究院（〒060–8628　北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

これまでに発着交通量の推定手法は様々なモデルが提案されているが，それらの多くはリンク交通量と利用者の経路選択の過程に基づいて，所与のゾーンペアに対する交通量を推定する．本研究では，道路ネットワークの接続構造に着目することで，経路選択に依存しない Day-to-Day のゾーン間交通量手法を提案する．提案手法では，観測可能リンクを除去したネットワーク中の強連結成分を一つのゾーンと定義することで，実際に観測可能なリンクに応じてゾーンペアを可変とすることができる．また，リンク交通量からゾーン間交通量の推定にはプローブカーデータ等の車両軌跡に基づくゾーン移動経歴情報を利用することで，推定時点の道路交通状況も考慮可能である．この手法は，平常時とは異なる交通行動が予想されるイベント発生時や，発着交通量が Day-to-Day で変動する災害発生直後の交通需要推定に有効だと考えられる．

***Key Words:*** *Day-to-Day O/D trip estimation, traffic demand management after disasters, cut, strongly connected component, probe-vehicle data*

## 1. はじめに

交通実態の把握，ならびに適切な交通需要マネジメントの策定には発着交通量データが必要不可欠である．この発着交通量は，道路交通センサス等の集計データを用いて推定される場合が多いものの，こういった集計的な推定方法は調査の実施コストや推定精度に課題があるとされている．この認識を踏まえ，これまでに交通ネットワーク理論に基づいた OD 推定モデルが様々に提案されてきた．一連のモデルでは，既存の OD 交通量や先決した利用者の経路選択確率をもとに，観測リンク交通量を用いて改訂 OD 交通量を推定する方法が基本である．ただし，利用者の実際の経路選択行動を正確に把握することは困難であることから，必要となる経路選択確率は，均衡状態における理想的な経路選択行動が実現されているという仮定のうえで算出されることが一般的である．

しかしながら，この均衡状態の仮定は現実の道路空間と大きく乖離することがある．例えば，Hara and Asakura[1)] は，東日本大震災直後の石巻市における当時の交通状況を分析し，平常時とは大きく異なる交通行動によって交通渋滞が発生していたことを明らかにした．また，力石ら[2)] は，平成 30 年 7 月豪雨災害時の交通需要と旅行時間の変動特性を分析し，発災 1 ヶ月間は平常時，および均衡状態からも大きく乖離していたことを明らかにした．あるいは災害時以外にも，東京 2020 大会開催時には，予め交通渋滞を防ぐために交通需要マネジメントが行われた結果，利用者は平常時とは大きく異なる経路選択行動を取ったと考えられている[3)]．このように，現実空間における利用者は様々な外的要因から影響を受けながら，理論上理想的とはいえない経路選択行動をしうる．

そこで本研究では，利用者の経路選択の仮定に依存しない発着交通量推定手法の開発をめざす．提案手法では，観測リンク交通量と車両軌跡情報という 2 種類の観測情報に基づき，ゾーン間交通量を推定する．具体的には，観測されたリンクの位置に応じて推定対象とするゾーンペアを内生的に定義したうえで，観測リンク交通量とサンプリングされた車両軌跡情報をマップマッチングして得られるゾーン移動経歴情報を組み合わせて，全体の発着交通量を推定する．ここではゾーンペアを可変とし，実際に観測

された情報に応じて発着交通量の推定精度を保つことを可能にする．また，観測交通量のほかにゾーン移動情報のみを必要とすることで，リンクへのマップマッチングと比較して低い精度の軌跡情報でも利用できる．

さらに，これまでの経路ベースに基づく OD 推定手法ではフロー保存を記述するためにネットワーク上のいずれかのノードに起終点を帰着させる必要があった．一方で本手法では車両のネットワーク上の経路を考慮せず，ゾーン間のフロー保存のみを考慮し，起終点をノードに帰着させる必要がない．例えば従来の交通量配分を伴う OD 推定手法では起終点ノード付近に交通量が集中することが避けられず，実現象では生じないような過度な混雑が生じ，選択される経路もその影響を受けるという課題があった．起終点を各ノードに帰着させず，ゾーンとして粗視化する提案手法ではこの課題が解決される．

本研究の貢献は以下のように整理できる．

- リンク観測機配置を所与として，内生的にゾーンが定義されるゾーン間交通量推定の枠組みを提供する．
- 車両軌跡情報をリンクへマップマッチングさせる必要のない，通過ゾーンのみ判別できる精度でも利用可能とする方法を提供する．
- ゾーン間の交通量推定を陽に記述することにより，起終点をノードに帰着させる必要がない手法を提供する．
- カット構造の性質により，交通量観測，車両のゾーン移動履歴観測に誤差がなく Direct scaling の条件を満たすときには，ゾーン間交通量を完全に特定できる手法を提供する．

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

### (1) 既存の OD 推定モデル

一般的な OD 推定モデルは，想定する推定交通量に応じて，静的モデルと動的モデルとに大別される．静的モデルは，ある時点での状態が一定時間持続するとみなして交通量を推定する（例えば Cascetta[4]，Yang et al.[5]）．一方で，動的なモデルは，交通流の時間変化を陽に考慮し，より短い時間幅での交通量を推定するものである（例えば Cremer and Keller[6]，Sherali and Park[7]）．近年は動的 OD 推定モデルも数多く提案されているが，それらは静的な場合のモデルに基づいて拡張したものと認識されている[8]．

さらに一連のモデルは推定方法に応じて，最尤推定モデル[9]，残差平方和最小化モデル[4]，エントロピー最大化モデル[10]，ベイズ推定モデル[11] などに分類できる．これらのモデルでは一般に，既存の初期 OD 交通量や，配分理論に基づく経路選択率をインプットに必要とする．ただし，既存の OD 交通量をインプットとする場合，初期 OD パターンと推定対象時点のそれが大きく変化する場合では，推定誤差が大きくなることが指摘されている[12]．あるいは経路選択率を必要とするモデルでは，現実の経路選択行動を反映できないことで推定誤差を生じさせる可能性がある．

### (2) 個人の移動経歴データを活用した OD 推定モデル

前節で触れたような OD 推定モデルにおける課題は既に広く認識されており，特に，経路選択確率を先決する代わりに，個人の移動経歴データを活用しようとする手法も提案されている．

ドライバーの実際の移動履歴を表す代表的なものにはプローブデータが挙げられる．プローブデータの活用を念頭に置いた初期の文献として，Hellinga[13] は，プローブカーが道路上の車両全体に占める割合とプローブカーのトリップの起終点情報を用いる OD 推定手法を提案した．その後もプローブデータを交通量推定に活用するモデルは様々に展開されており，堀場ら[14] は，経路交通量の推定のために，ランダムにサンプリングしたプローブデータから経路選択確率を得る手法を提案した．三輪ら[8] は，動的 OD 推定を念頭に置き，リアルタイムに取得可能なプローブカーの観測速度情報をもとにリンク交通量を推定し，それを初期 OD 交通量と照会する交通量推定手法を提案した．Yang et al.[15] はプローブデータのサンプルと観測リンク交通量を用いた残差平方和最小化モデルを示している．

あるいは，個人の移動履歴が取得できる他のデータとして，携帯電話の位置情報データが近年使用できるようになっており，これを OD 推定に活用しようとする研究も展開されている．例えば，今井ら[16] は，携帯電話網から取得された人口流動統計と PT 調査等から得られる交通手段分担率を組み合わせて推定した OD 交通量を，道路交通センサスにおける OD 交通量と比較することで，モバイル空間統計データの OD 推定への適用可能性を考察した．また，川上ら[17] は，観光地において人口流動統計を用いた OD 推定を行うことを目的とし，秘匿処理等によって生じる欠損トリップを補完する推定手法を提案した．他にも，Bonnel et al.[18] は，フランスのローヌ・アル

プ地方における携帯電話の空間統計データをもとに OD 推定を行うとともに，推定結果に影響を与えうるデータ特性も整理した．

ただし，以上まで取り上げたようなモバイル空間統計を利用するモデルには，複数の基地局間でデータに重複が生じたり，プライバシー上の問題から少数のトリップが丸められてしまったりするなど，統計処理上の課題が残されている．

### (3) 本研究の位置づけ

本稿では交通量の日変動を観測することを想定し，静的な交通量推定モデルを構築する．ただし一般的に必要とされる経路選択率は使用せずに，代わりに移動経歴を取得するデータとして適用可能性が高いと考えられる，プローブデータの活用を想定する．なお，プローブデータはあくまでも個々の車両から取得されるデータであり直接的に交通量情報は提供しないため，単独で発着交通量を推定することは困難であり，三輪ら[8] で導入されているような Q-V 図等の速度と交通量を結びつけるための事前情報が別途必要となる．もちろんプローブカーの普及率が十分に高く，完全にトリップの起終点を観測できるのであれば，プローブデータのみによって OD 交通量を推定できるが，実際には個人情報保護等の観点から直接的な交通量推定は困難である．

そこで本研究では，交通量データとして観測リンク交通量を使用するとともに，道路ネットワーク中からサンプリングされる車両軌跡情報から参照できる移動経歴を利用してゾーン間発着交通量を推定する．この車両軌跡情報はプローブデータ等から取得できる．観測リンク交通量とプローブデータ等の車両軌跡情報を用いる考え方は先に挙げた Yang et al.[15] などと同様だが，Yang et al.[15] では事前 OD 表を更新していくモデルとなっている一方で，本研究は先験情報に基づかない点，発着交通量をゾーン単位に粗視化しノードに起終点を帰着させない点で異なる．

提案手法では，推定対象となるゾーンペアがリンク交通量観測機の位置によって設定されることを制約とするが，ネットワークデータの他に必要なデータは観測リンク交通量と車両軌跡情報の 2 種類の観測情報のみであり，これらの観測誤差がなく，サンプリングされる車両軌跡情報が全体の交通に対して Direct scaling の条件を満たすならば，ゾーンペアの定義上，正しくゾーン間交通量を推定できることが大きな特徴である．

## 3. 提案手法

### (1) 仮定

以下に，提案手法における仮定を示す．

- 閉じたネットワークにおける Day-to-Day の静的な発着交通量を推定対象とする．
- 観測されたリンクの位置は所与であり，ネットワーク内の全リンクに対して十分な数存在する．
- 取得されたプローブデータには OD ごと，リンクごとの偏りはなく，Direct scaling である．
- 車両はネットワークで定義されたリンクのみを通過し，それ以外には通行できないとする．

### (2) カット構造を用いたゾーン間交通量推定

本研究で提案するカット構造を用いた発着交通量推定手法の概観を示す．

#### a) カットの性質と観測交通量の関係

まず，カットの特性を整理する．任意のグラフ $G(V,E)$ 上の任意のノードペア $(s,t)|s,t \in V$ において，$(s,t)$ カットとは，ノード集合を $S,T|s \in S, t \in T, S \bigcup T = V, S \bigcap T = \emptyset$ に分割するリンクの集合である．任意の $(s,t)$ カットを $A^{\phi}_{st}$ としよう．カットの定義から，$G(V, E - A^{\phi}_{st})$ において $(s,t)$ 間には経路が存在しない．言い換えれば，$(s,t)$ 間の経路は必ず $A^{\phi}_{st}$ に含まれるリンクを経由する．$A^{\phi}_{st}$ 上にリンク観測機が設置されたとき，$(s,t)$ ペアの交通は全て観測されることが約束される．

この性質が本研究の提案の原点であり，これまでの経路ベースの手法に残された経路選択における不確実性の課題を解決するものである．利用者の $(s,t)$ 経路の多様性を認めた上でも，$(s,t)$ 間の交通は $A^{\phi}_{st}$ 上を必ず通過するため，$A^{\phi}_{st}$ 上の交通量の総和は $(s,t)$ の交通需要のすべてを必ず含む．このことから，$(s,t)$ 間の交通量を $q_{st}$，リンク $a$ で観測された交通量を $v_a$ とすると，以下の式 (1) が成立する．

$$\sum_{a \in A^{\phi}_{st}} v_a \geq q_{st} \tag{1}$$

(1) 式における等号は，例えばネットワーク上に $(s,t)$ ペアがただ一つしかない ($|W| = 1$) のときに成立する．一方で $|W| \geq 2$ であれば，ある一つの $A^{\phi}_{st}$ 上には $q_{st}$ でない他のペアの交通量 $q_{od}|(o,d) \in W$ が通過しうるため，そのときには不等号が成立する．ゾーン間交通量を推定する対象は $|W| \geq 2$ であろうから，$\sum_{a \in A^{\phi}_{st}} v_a$ から直接 $q_{st}$ を特定できない．

この課題に対して，本研究では強連結成分分解に基づくゾーン定義を用いること，車両軌跡情報によ

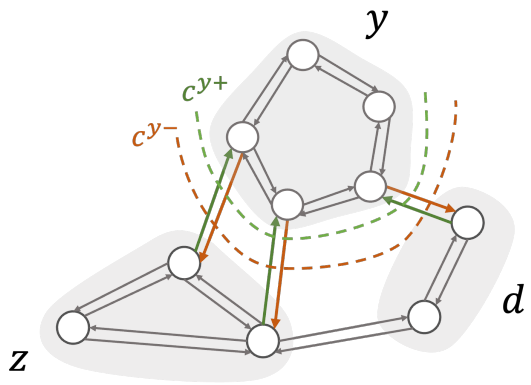



**図-1**　強連結成分とそれらの境界に存在するカット

るカットを通過する台数を用いることで $q_{st}$ を推定する．特に提案手法は取得されたプローブデータが Direct scaling である仮定の下では，ゾーン間交通量が誤差なく完全に特定できることを示す．

**b)　有向グラフ中の強連結成分によるゾーン定義**

ある有向グラフ $g(\dot{V},\dot{E})$ おいて，任意の 2 点 $(u,v)|u,v \in V$，および $(v,u)|v,u \in V$ の間に相互の有向道が存在するとき，$g(\dot{V},\dot{E})$ は強連結であるといい，そのような $g(\dot{V},\dot{E})$ が有向グラフ $G(V,E)$ において極大で強連結な部分グラフである場合，$g$ は $G$ の強連結成分という．例えば**図-1** において，橙，緑に着色されたリンクに観測機が設置されているとする．観測リンクを除去したグラフ G は強連結成分が $y,z,d$ の 3 つ存在する．提案手法ではこれらの強連結成分をゾーンと定義する．観測リンクを除去したグラフでは，強連結成分の定義上，異なる強連結成分どうしの間には必ずカットが存在する．ゾーン境界は観測されたリンク集合により形成されることから，観測されたリンク集合はゾーン間に少なくとも片方向のカット構造をなす．本稿では観測機を所与として，それらが構成する強連結成分をゾーンとみなすことから，与えられるゾーン間交通量は観測機リンクの配置に依存して決定される．なお分析者がゾーンを所望の領域で設定する場合には，強連結成分が所望の領域となるように観測リンクを配置させる必要がある．

**c)　ゾーン境界カット上の観測交通量と OD 交通量の関係**

ここで，任意のゾーンを $z$ で表記し，その集合を $z \in Z$ とする．$c^{z-} \subset E$ はゾーン $z$ を定義し，ゾーン $z$ から流出するリンクで構成されるカットであり，ネットワーク上のすべてのゾーン $z \in Z$ から流出するリンクのカット集合を $C^-$ とする．$c^{z+} \subset E$ はゾーン $z$ を定義し，ゾーン $z$ へ流入するリンクで構成されるカットであり，ネットワーク上のすべてのゾーン $z \in Z$ から流入するリンクのカット集合を $C^+$ とする．カットを流出・流入に区別する必要がないとき，任意のカットは $c^{\phi} \in C(=C^+ \bigcup C^-)$ と表記する．

連結成分により形成されたゾーンの境界，すなわち任意のゾーン $z$ を定義するカットで，流出する交通を捉える $c^{z-}$ に着目しよう．カット $c^{z-}$ を通過する交通は，以下の 2 種類のみが存在する．

- ゾーン $z$ を起点としその他のゾーンに流出する車両
- ゾーン $z$ 以外を起点とし，ゾーン $z$ を通過する車両

2 種類の車両のみが $c^{z-}$ を通過することから，これらの交通量の総和は $\sum_{a \in c^{z-}} v_a$ と一致する．ただし，ゾーン $z$ を起点としない通過交通 $q_{st}|o \neq z$ はそのすべてが通過するとは限らない．加えて，2 種類の車両いずれも，ゾーン $z$ から流出後に再度ゾーン $z$ へ流入，流出して目的地に到達する場合も存在しうる．そこで，$(o,d)$ 交通量 $q_{od}$ に対して，カット $c^{z-}$ の通過平均回数を示す係数 $\kappa_{od}^{z-}$ を考える．例えばゾーン $z$ を起点とする車両は必ず 1 度以上カット $c^{z-}$ を通過するため，$\kappa_{od}^{z-} \geq 1$ である．この係数を考慮することで (1) 式は等式化が可能となり，以下 (2) 式が得られる．

$$\begin{aligned}\sum_{a \in c^{z-}} v_a &= \sum_{o,d|o=z,(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z-} q_{od} \\ &+ \sum_{o,d|o\neq z,(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z-} q_{od} \\ &= \sum_{(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z-} q_{od}\end{aligned} \tag{2}$$

ここまでは起点に焦点をあてて議論したが，終点側をゾーン $z$ としても同様に成立して (3) 式が得られる．

$$\begin{aligned}\sum_{a \in c^{z+}} v_a &= \sum_{o,d|d=z,(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z+} q_{od} \\ &+ \sum_{o,d|d\neq z,(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z+} q_{od} \\ &= \sum_{(o,d)\in W} \kappa_{od}^{z+} q_{od}\end{aligned} \tag{3}$$

(2),(3) 式で起終点ともに成立することから，起終点ゾーン，流入・流出カットによる区別は不要であり，(4) 式が成立する．

$$\sum_{a \in c^{\phi}} v_a = \sum_{(o,d)\in W} \kappa_{od}^{\phi} q_{od} \tag{4}$$

以上より，カットの通過台数と，$(o,d)$ ごとのカット $c^{\phi}$ の平均通過回数が得られれば，ゾーン $(o,d)$ 間交通量とカット通過交通量に関する等式が得られる．

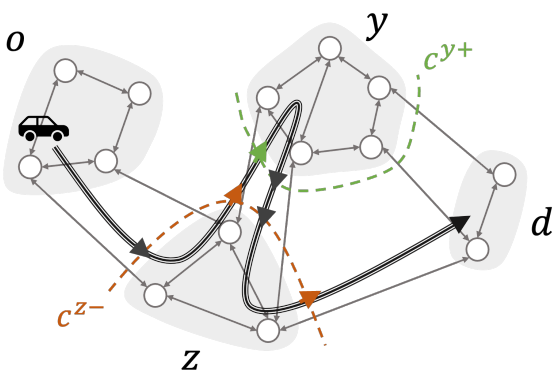



**図-2**　ある車両軌跡のカット通過回数の記録

### d)　車両軌跡情報による通過交通量比率の特定

本研究で車両軌跡情報は，ゾーンの通過履歴を取得するために用いる．時系列順の位置情報を利用し，**図-2** のように起終点，および経路中で通過したゾーンを記録する．これをゾーン通過履歴データと呼ぼう．ゾーンの通過履歴のみを必要とするため，リンクへのマップマッチングに求められるような高い精度は不要である．本研究ではゾーンを定義するカット上の総交通量のみで議論するため，通過するゾーンが判別できる程度の精度をもつ車両軌跡情報でも利用可能となる．

例えば**図-2** のように，ある車両のゾーン移動履歴が $\{o,z,y,z,d\}$ であるとき，この車両は起点が $o$，終点が $d$ である．さらに，ネットワーク上のリンク以外を車両が通行できない仮定により，この車両は必ず $\{\{c^{o-},c^{z+}\},\{c^{z-},c^{y+}\},\{c^{y-},c^{z+}\},\{c^{z-},c^{d+}\}\}$ のカットを順に通過したこととなる．このカット通過列をカット通過シーケンスと呼ぼう．すべての車両軌跡情報のカット通過シーケンスを走査することで，それぞれのカットの通過回数をカウントできる．例えば**図-2** ではこのカット通過回数の走査イメージを部分的に抽出したものである．図中に示すある車両軌跡は，ゾーン $z$ の流出方向のカット $c^{z-}$ を 2 回，ゾーン $y$ の流入方向のカット $c^{z-}$ を 1 回通過したことがわかる．同様の考え方により，全てのカットに対してその通過回数が走査される．加えて車両の起終点の位置情報を用いれば，サンプリングされた車両の起終点別にカットの通過回数を得られる．カットの通過シーケンスの走査によるカウントは，一台の車両が複数回同一ゾーンに流入・流出したとしてもそれぞれを 1 回ずつカウントするため，ゾーン間の往復を伴う複雑な経路が含まれても対応できる．

上記走査により得られた，起終点 $(o,d)$ 別のカット $\phi$ を通過した回数を $h_{od}^{\phi}$ と表記する．なお，この走査は軌跡情報を提供する全車両に対して行うため，$h_{od}^{\phi}$ は起終点 $(o,d)$ 別のカット $c^{\phi}$ の通過交通量である．カット $c^{\phi}$ を通過した交通のうち，起終点を $(o,d)$ とする交通の占める比率 $p_{od}^{\phi}$ は (5) 式で計算できる．

$$p_{od}^{\phi}=\frac{h_{od}^{\phi}}{\sum_{(s,t)\in W}h_{st}^{\phi}}\quad\forall(o,d)\in W,\phi\in C \tag{5}$$

### e)　観測誤差がない条件における OD 交通量の特定

本稿での仮定，取得された車両軌跡情報は OD ごと，リンクごとの偏りがない Direct scaling を満たすとは，以下の (6),(7) 式を満たすものとする．ただし，$\dot{q}_{od}$ は車両軌跡情報で得られた同じ起終点 $(o,d)$ を持つサンプルの観測数であり，$\gamma$ は起終点を $(o,d)$ とする全車両中に占める $\dot{q}_{od}$ の比率の逆数，すなわち拡大係数とする．

$$q_{od}=\gamma\dot{q}_{od}\quad\forall(o,d)\in W \tag{6}$$

$$\frac{h_{od}^{\phi}}{\dot{q}_{od}}=\frac{\gamma h_{od}^{\phi}}{q_{od}}=\kappa_{od}^{\phi}\quad\forall(o,d)\in W,c^{\phi}\in C \tag{7}$$

(7) 式はサンプル車両数と，そのカットの通過シーケンスでカウントされた値の比率が $\gamma$ によって拡大されても，同じ比率となることを意味する．なお，$\kappa_{od}^{\phi}$ は $(o,d)$ を起終点に持つ交通が当該のカットを通過した平均回数を示すことから，前項で述べた $\kappa_{od}^{\phi}$ と等価である．

任意のカット $c^{\phi}$ を通過する交通量の和を示す (4) 式と (7) 式を考慮して，

$$\begin{aligned}\sum_{a\in c^{\phi}}v_a&=\sum_{o,d|(o,d)\in W}\kappa_{od}^{\phi}q_{od}\\&=\gamma\sum_{o,d|(o,d)\in W}\kappa_{od}^{\phi}\dot{q}_{od}\\&=\gamma\sum_{o,d|(o,d)\in W}h_{od}^{\phi}\end{aligned} \tag{8}$$

が成立する．(5) 式に (8) 式を代入すれば，

$$\begin{aligned}p_{od}^{\phi}&=\frac{\gamma h_{od}^{\phi}}{\sum_{a\in c^{\phi}}v_a}\\&=\frac{\kappa_{od}^{\phi}q_{od}}{\sum_{a\in c^{\phi}}v_a}\end{aligned} \tag{9}$$

となる．以上の議論は，導出の過程から明らかなように任意の OD ペア，カットで成立する．くわえて，$\gamma$ は導出の過程で除去されており，観測された $\kappa_{od}^{\phi}$，および $p_{od}^{\phi}$ で表現されている．したがって，direct scaling の仮定を満たし，$\kappa_{od}^{\phi},p_{od}^{\phi}\neq 0$ であるとき，任意の $(o,d)\in W$ 間交通量は以下 (10) 式を満たす．

$$\begin{aligned}q_{od}&=\frac{p_{od}^{\phi}}{\kappa_{od}^{\phi}}\sum_{a\in c^{\phi}}v_a\\\forall(o,d)\in W,c^{\phi}\in C,\kappa_{od}^{\phi}\neq 0,p_{od}^{\phi}\neq 0\end{aligned} \tag{10}$$

(10) 式は任意の流出，流入カットで成立し，$\kappa^{\phi}_{od}, p^{\phi}_{od} \neq 0$ であればいずれのカットで計算しても値が等しくなる．すなわち，ゾーンの境界リンクを通過する交通量とカット通過シーケンスの情報のみからゾーン間交通量が誤差なく特定できる．ただし，これが成立するのは $\gamma$ がすべての OD で同一であるという強い仮定に基づく．実際の車両軌跡情報でこの条件が成立するのは軌跡を提供可能な車両がすべてのゾーンで均質に分布しているときのみとなる．

以上の定式化からも明らかなように，提案手法では，車両の起終点をネットワーク上のノードに帰着させる必要がないことがわかる．

## 4. Nguyen-Dupuis Network における適用例

以上の解説を踏まえ，サンプルネットワークにおける計算例を示す．具体的には，ゾーン境界のリンク交通量とカット通過シーケンスの情報がいずれも誤差が含まれないとき，正しく OD 交通量を推定できることを示す．ここでは，**図-3** に示す Nguyen-Dupuis Network を用いる．このネットワークはノード数 13，リンク数 38 である．ただしここでは実際の道路ネットワークを想定して有向グラフとして扱う．なお，リンク長を含むネットワークの基本データは Tu et al.[19] のものを参考にした．

以下の試算ではサンプルネットワークを使用するため，観測リンク交通量や車両軌跡情報といった観測情報を得ることはできない．そこで，**表-1** に示す OD 交通量を Dial 配分した結果を観測リンク交通量とみなす．また，車両軌跡情報が全車両について完全に得られている場合 (i.e., $\gamma = 1$ ) を想定し，所与の OD 交通量をもとにしたカット通過回数の真値を用いる．本稿の提案手法はすべてのゾーンペアで $\gamma$ が同一であることを求めるが，その値は $0 \leq \gamma \leq 1$ であれば構わない．しかしながら計算過程の理解簡単のためにこの設定を与えた．また，提案手法ではカット通過シーケンスをゾーン単位の粒度で取得したものを想定しているが，ここではカット平均通過回数やカット上の観測交通量がノードに起終点を帰着させた OD ペア（セントロイドペア）ごとに得られるため，推定対象は OD 交通量となる．

提案手法が経路選択の仮定に依存しない解を提供でき，ネットワーク内に多様な経路が存在する場合でも元の OD 交通量を正しく特定できることを示す．ここでは，経路選択の不確実性を表現するために，Dial 配分アルゴリズムを用いて，そのうえで異なる分散パラメータを与えたときの結果を示す．具体的には，例 1 では分散パラメータを $\theta = 1$, 例 2 では $\theta = 0.001$ とし，それ以外の条件は同一に設定した 2 例の計算結果を示す．分散パラメータの値の大小から，例 2 はより多様に経路選択が行われている状態である．

**表-1** 2 つの例に共通の OD 交通量

| OD | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0 | 400 | 800 |
| 3 | 600 | 200 |

このネットワークにおいて，**図-4** 中で太線で示す 12 本のリンク $\{0, 5, 6, 7, 8, 16, 19, 24, 25, 26, 31, 33\}$ が観測されているとすると，3 つのゾーン $i, j, k$ が定義され，ゾーン境界上には流入，流出方向を区別すると合計 6 つのカットが存在する．そのうち，観測されたリンクによるカットは 4 つ形成され，それぞれ，$c^{i-}$，$c^{i+}$，$c^{j-}$，$c^{k+}$ と表記する．各リンクがどのカットに含まれるか，そして Dial 配分に基づくリンク交通量の値を整理したものが**表-2** である．例えば，**表-2** で確認できるように，カット $c^{j-}$ は，リンク $8, 16, 24, 25, 26, 31, 33$ で構成され，合計交通量は例 1 で 1225.67, 例 2 で 1320.04 である．

この試算では $\gamma = 1$ としたため，各 OD ペアに対する各カットの通過回数は OD 別カット交通量で与えられ，これをもとに $\kappa^{\phi}_{od}$ が得られる．また，(5) 式より，カット $c^{\phi}$ 上の OD 別カット交通量とその全 OD ペアの和の比をとることで，$p^{\phi}_{od}$ を得られる．$\kappa^{\phi}_{od}$, $p^{\phi}_{od}$ が各 OD ペアについて得られ，(10) 式を用いて OD 交通量 $q_{od}$ を取得した．

以上の手順により推定された値を整理したものが**表-3** である．**表-3** で確認できるように，分散パラメータの変動に関わらず誤差なく元の OD 交通量を推定できている．ただし，$c^{i+}$ については，$\sum_{a \in c^{i+}} v_a = 0$ であることから，このカット上を通過する交通が存在せず，(10) 式における変数の条件である $\kappa^{\phi}_{od}, p^{\phi}_{od} \neq 0$ を満たさないため，このカット $c^{i+}$ は，交通量推定に利用されない．

以上で示したように，観測情報に誤差がなく，カット通過シーケンスを提供する車両が全ての OD ペアについて均質に分布している仮定を満たせば，経路選択仮定に依存せずに，OD 交通量を誤差なく推定できることが確認できた．

## 5. おわりに

本研究では，カット上の観測リンク交通量と車両

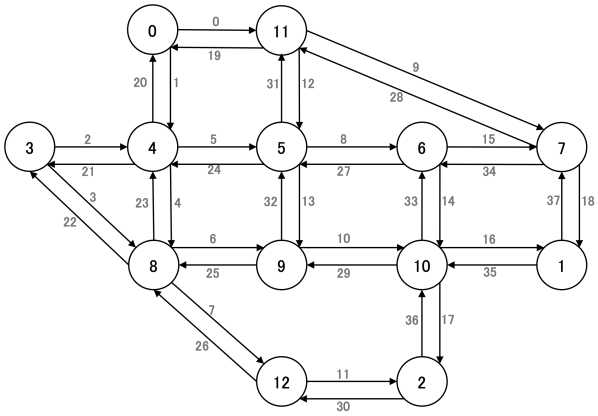



**図-3**　Nguyen-Dupuis Network

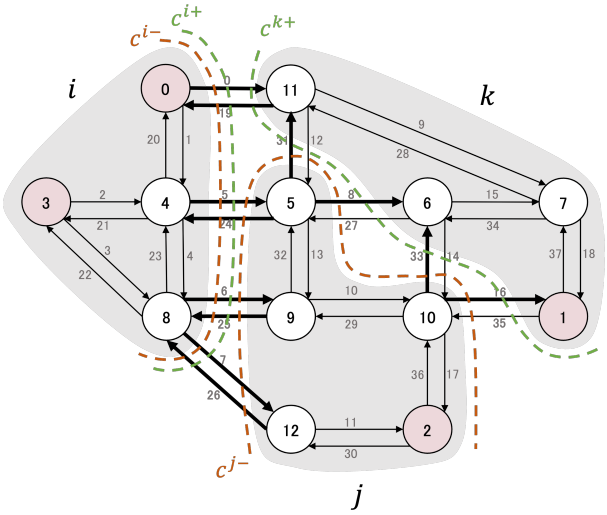



**図-4**　観測されたリンクを境界にもつゾーン定義

軌跡情報という 2 種類の観測情報のみに基づいた発着交通量推定手法を提案した．この手法は，観測されたリンクがカット構造を形成するよう内生的にゾーンを定義するとともに，観測リンク交通量とカット平均通過回数の観測情報により発着交通量を推定するものである．手法の特徴として，経路選択の仮定に依存しない点，推定対象をゾーン単位で考えることで車両軌跡情報をリンクにマップマッチングする必要がない点，起終点をノードに帰着させる必要がなくセントロイド設定による課題を解決できる点が挙げられる．本稿では，提案手法の枠組みを示すとともに，サンプリングされた車両軌跡情報が全体を代表する Direct scaling の仮定のもとでは推定交通量が誤差なく得られることを示した．

この手法は大規模イベント発生時など均衡状態から大きく乖離が生じうる場合や，観測機の故障等により観測できる情報が限定される場合に有効な手法だと考えられる．特に災害発生後においては復旧状況に応じ，日毎に交通状態が大きく変化することが想定され，そのような場合にもこれらの特徴を踏まえて交通量を推定できることは貢献が大きいだろう．

今後の課題を以下に挙げる．まず，本稿では，観測情報に関して，観測交通量やサンプリングされた車両軌跡情報に誤差がないこと，そしてその車両軌

**表-2**　各リンクのカット分類状況と配分リンク交通量

| link-id | cut | リンク交通量 | |
|---|---|---|---|
| | | $\theta$ = 1(例 1) | $\theta$ = 0.001(例 2) |
| 0 | $c^{i-}$,$c^{k+}$ | 347.31 | 655.28 |
| 1 | | 852.70 | 629.97 |
| 2 | | 766.64 | 647.11 |
| 3 | | 77.54 | 152.90 |
| 4 | | 1052.77 | 440.81 |
| 5 | $c^{i-}$ | 566.57 | 751.03 |
| 6 | $c^{i-}$ | 86.12 | 410.09 |
| 7 | $c^{i-}$ | 1000 | 183.62 |
| 8 | $c^{j-}$,$c^{k+}$ | 568.36 | 548.22 |
| 9 | | 344.99 | 398.59 |
| 10 | | 86.64 | 869.59 |
| 11 | | 1000 | 183.62 |
| 12 | | 2.31 | 341.33 |
| 13 | | 0.52 | 459.50 |
| 14 | | 570.66 | 633.99 |
| 15 | | 0.01 | 85.49 |
| 16 | $c^{j-}$,$c^{k+}$ | 657.31 | 687.19 |
| 17 | | 3.65E-4 | 816.39 |
| 18 | | 342.69 | 312.82 |
| 19 | $c^{i+}$ | 0 | 0 |
| 20 | | 4.32E-04 | 85.24 |
| 21 | | 0 | 0 |
| 22 | | 0 | 0 |
| 23 | | 0 | 0 |
| 24 | $c^{i+}$,$c^{j-}$ | 0 | 0 |
| 25 | $c^{i+}$,$c^{j-}$ | 0 | 0 |
| 26 | $c^{i+}$,$c^{j-}$ | 0 | 0 |
| 27 | | 0 | 0 |
| 28 | | 0 | 0 |
| 29 | | 0 | 0 |
| 30 | | 0 | 0 |
| 31 | $c^{j-}$,$c^{k+}$ | 3.94E-07 | 84.65 |
| 32 | | 0 | 0 |
| 33 | $c^{j-}$,$c^{k+}$ | 0 | 0 |
| 34 | | 2.31 | 171.27 |
| 35 | | 0 | 0 |
| 36 | | 0 | 0 |
| 37 | | 0 | 0 |

表-3　分散パラメータを変化させたときのカット別推定量

| $\theta = 1$ (例 1) | | | | | | $\theta = 0.001$ (例 2) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 通過交通量 | OD | $\kappa^{\phi}_{od}$ | $p_{od}\phi$ | $q_{od}$ | | 通過交通量 | OD | $\kappa^{\phi}_{od}$ | $p_{od}\phi$ | $q_{od}$ |
| $c^{i-}$ | 2000.01 | (0,1) | 1.0000 | 0.2000 | 400 | $c^{i-}$ | 2000.00 | (0,1) | 1.0000 | 0.2000 | 400 |
| | | (0,2) | 1.0000 | 0.4000 | 800 | | | (0,2) | 1.0000 | 0.4000 | 800 |
| | | (3,1) | 1.0000 | 0.3000 | 600 | | | (3,1) | 1.0000 | 0.3000 | 600 |
| | | (3,2) | 1.0000 | 0.1000 | 200 | | | (3,2) | 1.0000 | 0.1000 | 200 |
| $c^{i+}$ | 0 | (0,1) | - | - | - | $c^{i+}$ | 0 | (0,1) | - | - | - |
| | | (0,2) | - | - | - | | | (0,2) | - | - | - |
| | | (3,1) | - | - | - | | | (3,1) | - | - | - |
| | | (3,2) | - | - | - | | | (3,2) | - | - | - |
| $c^{j-}$ | 1225.67 | (0,1) | 0.2650 | 0.0865 | 400 | $c^{j-}$ | 1320.04 | (0,1) | 1.1426 | 0.3462 | 400 |
| | | (0,2) | 3.21E-07 | 2.10E-07 | 800 | | | (0,2) | 0.2857 | 0.1731 | 800 |
| | | (3,1) | 1.8661 | 0.9135 | 600 | | | (3,1) | 1.0020 | 0.4554 | 600 |
| | | (3,2) | 2.69E-07 | 4.40E-08 | 200 | | | (3,2) | 0.1662 | 0.0252 | 200 |
| $c^{k+}$ | 1572.98 | (0,1) | 1.1333 | 0.2882 | 400 | $c^{k+}$ | 1975.32 | (0,1) | 1.7139 | 0.3471 | 400 |
| | | (0,2) | 3.52E-07 | 1.79E-07 | 800 | | | (0,2) | 0.7126 | 0.2886 | 800 |
| | | (3,1) | 1.8661 | 0.7118 | 600 | | | (3,1) | 1.1441 | 0.3475 | 600 |
| | | (3,2) | 2.69E-07 | 3.43E-08 | 200 | | | (3,2) | 0.1662 | 0.0168 | 200 |

跡情報は道路ネットワーク中の各起終点に関して均等に分布しているという強い仮定をおいている．この仮定のもとでは誤差なく真の発着交通量が得られることを示したが，現実にはこれらの観測情報にそれぞれ誤差が含まれる．リンクの観測交通量の誤差，および，本稿で仮定した車両軌跡情報の拡大係数 $\gamma$ がすべての OD で一定とする仮定は，より一般的に利用できるよう仮定の緩和が必要である．したがって，今後は各観測情報の誤差の影響を考慮し，真値を求解する手法の構築に取り組む．また，現時点ではゾーン間の交通は単品種を想定しているが，本研究の発展方針として商用車や貨物車のような多品種のフローを取り扱えるような拡張も有益となろう．

また，観測されるリンクの数や位置と，それにより定義されるゾーンサイズの関係も整理する必要がある．観測されるリンク数が極端に少ない場合や空間的に偏っている場合には，観測されるリンクを境界とする強連結成分として分解できるゾーン数が極めて限定的になる，あるいは分析対象とすべきゾーン間の交通量が取得できない可能性が十分考えられる．したがって，観測リンクの分布の要件を示すべきだろう．

これに付随して，推定対象として望ましいゾーン定義を実現するよう観測すべきリンクを決定する最適化問題を部分問題として考慮する方針も想定される．このような，発着交通量推定の前段階として観測すべきリンク配置を決定する手法はトラフィックセンサ配置問題として様々に存在しており，それらと本手法を組み合わせた拡張も期待される．

**謝辞：**本研究は JSPS 科研費 23H01521, 22H01610 の助成を受けて遂行された．ここで記して謝意を表する．

**REFERENCES**

1) Hara, Y. and Kuwahara, M.: Traffic monitoring immediately after a major natural disaster as revealed by probe data–a case in ishinomaki after the great east japan earthquake, *Transportation research part A: policy and practice*, Vol.75, pp.1–15, 2015.
2) 力石真, 浦田淳司, 吉野大介, 藤原章正: 交通ネットワーク被災時の発生・集中・内々交通量及び旅行時間の変動特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.214–230, 2019.
3) 神田昌幸: 東京 2020 大会のレガシーを生む―大会輸送を可能にした交通マネジメント―, 計画行政, Vol.45, No.3, pp.33–38, 2022.
4) Cascetta, E.: Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalized least squares estimator, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.18, No.4-5, pp.289–299, 1984.
5) Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y., and Asakura, Y.: Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.26, No.6, pp.417–434, 1992.
6) Cremer, M. and Keller, H.: A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.21, No.2, pp.117–132, 1987.

7) Sherali, H. D. and Park, T.: Estimation of dynamic origin–destination trip tables for a general network, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.35, No.3, pp.217–235, 2001.
8) 三輪富生, 山本俊行, 竹下知範, 森川高行: プローブカーの速度情報を用いた動的 od 交通量の推定可能性に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.2, pp.252–265, 2008.
9) Holm, J., Jensen, T., Nielsen, S., Christensen, A., Johnsen, B., and Ronby, G.: Calibrating traffic models on traffic census results only, *Traffic Engineering & Control*, Vol.17, No.4, 1976.
10) Van Zuylen, H. J. and Willumsen, L. G.: The most likely trip matrix estimated from traffic counts, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.14, No.3, pp.281–293, 1980.
11) Maher, M. J.: Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a bayesian statistical approach, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.17, No.6, pp.435–447, 1983.
12) 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, 1998 年, pp. 57–58, 1998.
13) Hellinga, B. R.: Estimating dynamic origin-destination demands from link and probe counts., *Ph.D. Dissertation, Queen's University at Kingston*, 1995.
14) 堀場庸介, 松本幸正, 松井寛, 高橋政稔: プローブデータに基づく推定経路交通量への観測誤差の影響分析と推定経路交通量の更新手法, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, pp.495–506, 2005.
15) Yang, X., Lu, Y., Hao, W., et al.: Origin-destination estimation using probe vehicle trajectory and link counts, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.2017, 2017.
16) 今井龍一, 池田大造, 永田智大, 福手亜弥, 金田穂高, 重高浩一, 鳥海大輔, 廣川和希: 携帯電話網の運用データを用いた人口流動統計から算出した自動車 od 量と道路交通センサスとの比較分析-道路交通分野へのモバイル空間統計の適用可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, No.23-02, pp.619–627, 2016.
17) 川上陸, 宇野伸宏, 中村俊之: モバイル空間統計のデータ特性を考慮した od 推計手法: 京都観光地間流動におけるケーススタディ, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.6, pp.I_379–I_391, 2020.
18) Bonnel, P., Fekih, M., and Smoreda, Z.: Origin-destination estimation using mobile network probe data, *Transportation Research Procedia*, Vol.32, pp.69–81, 2018.
19) Tu, Q., Cheng, L., Li, D., Ma, J., and Sun, C.: Stochastic transportation network considering atis with the information of environmental cost, *Sustainability*, Vol.10, No.11, pp.3861, 2018.

**(Received ??? ?? 202?)**
**(Accepted ??? ?? 202?)**

# Day-to-day O/D trip estimation based on road network topology and observable traffic flow data

Ruri SASE and Satoshi SUGIURA