方向統計学を用いた渋滞現象の分析：道路網とOD需要の角度分布による記述的モデル

長崎　滉大[1]・瀬尾　亨[2]

[1]学生会員　東京工業大学　環境・社会理工学院（〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）
E-mail: nagasaki.k.ab@m.titech.ac.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　東京工業大学准教授　環境・社会理工学院（〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）
E-mail: seo.t.aa@m.titech.ac.jp

都市スケールの交通渋滞の多くは需要に対して道路網の供給が不十分である場合に生じる．既往研究では，渋滞現象を道路網の接続関係などのトポロジーと需要の関係から分析してきた．しかし，これらの研究では道路網の物理的形状と渋滞現象を結びつけることは困難であった．ここで、道路網の物理的形状は各道路の向いている方角という角度指標を用いて定量化できる．さらに，需要側も OD 間の方角という角度指標で記述可能である．これらの角度指標を用いれば，渋滞の原因を今までと違った観点から見出せる可能性がある．そこで本研究では，これらの需要と道路網の角度分布を用いて，角度を扱う統計学である方向統計学の手法を用いて交通現象をモデリングする．さらに，実際のデータを用いて提案したモデルの性質を評価，考察する．

Key Words: *directional statistics, angular indicator, congestion model, road network analysis*

1. はじめに

都市スケールの交通需要と道路網などの供給については多くの研究で分析されてきた．例えば，道路網の接続関係などのトポロジー的性質と渋滞現象などの交通状態は広く研究されている[1),2),3),4),5),6)]．また，エリアベースの分析も多く行われており，continuous modeling approach[7),8),9)] や，network/macroscopic fundamental diagram[10),11),12),13),14)] などがこれにあたる．このようなトポロジーベース，エリアベースのアプローチは都市スケールの交通現象に対して多くの知見をもたらしている．

交通現象として，特定の方向に多くの需要が集中しているパターンと，様々な方向に分布しているパターンでは，同じ需要量でも全体の交通状態に与える影響は異なることが予想される．また，道路網についても格子状か否かなどの物理的形状（モルフォロジー）で，交通網としての性質は異なることが予想される．

これらの特性は前述した既存のアプローチでは説明が難しい．例えば，全体の需要が与えられている場合，個々の OD 間の旅行者の平均速度などの交通状態を定量化することは可能である．しかし，需要のパターンによって個々の旅行者が受ける影響の違いを定量的かつ包括的に説明することは難しい．さらに，道路網の物理的形状は前述の分析手法では定量化できない．そのため，道路網の物理的形状が交通状態に与える影響の一般的な定量化も難しい．

ここで，需要のパターンや道路網の物理的形状は角度分布を用いて定量的に区別することが可能である．需要の面では，OD 需要は各旅行者が起点から終点まで移動する方角を集計することで角度の分布として記述できる．道路網の面では，道路網の物理的形状は範囲内の道路網の各道路が向いている方角を集計することで角度の分布として記述できる．

角度指標を用いて交通現象を分析することで，現象をより深く理解できる可能性がある．例えば，角度分布を用いて需要パターンを定量的に記述すると，個々の OD 間の旅行者の交通状態と全体の需要パターンの関係の分析が容易になる．このことにより，需要パターンによる交通状態の変化をより包括的に説明できる可能性がある．さらに，道路網内の各道路が向いている方角を集計した角度分布を用いると，道路網の物理的形状と交通状態の関係を分析できる．

このように角度指標は交通現象の解釈に新たな知見をもたらす可能性を秘めているが，その数理的扱いは難しい．その理由の一つに，角度が持つ周期性がある．例えば，1° と 359° の差は 358° ではなく 2° である．このように，周期 360° もしくは 2π ラジアンの周期性に

より，既存の分析で多く用いられている通常の統計処理は適さない．この課題を克服するために，統計学の分野では方向統計学[15] と呼ばれる角度専門の分野が発展してきた．方向統計学では角度データを扱うための方法論が確立されているが，交通分野の研究への応用は多くは見られない．

一方，交通の様々な側面を表現するために角度指標を適用した研究はいくつか存在する．例えば，Boeing[16] や長崎ら[17] はある範囲内の各道路が向いている方角を集計した分布を，方向統計学内のヒストグラムであるバラ図を用いて可視化している．一方，Zhou[18] はシカゴで取得した大量の自転車シェアリングデータを，各 OD 間の方向をバラ図で集計して分析した．しかし，需要側と供給側の両方の角度を考慮して交通現象を分析した研究は存在しない．

そこで本研究は，需要と道路網の二つの角度分布を用いて，ある領域内の交通状態や交通現象を表現する新しいモデルを開発することを目的とする．本モデルでは，方向統計学の手法を用いて，需要と道路網の二つの角度分布を用いて方向別の交通状態を記述する．さらに，東京で実際に観測された交通データと道路網データを用いて，提案したモデルの性質を評価・考察する．

2. モデル

(1) モデルの概要

ある方向 $\theta \in [0, 2\pi)$ の需要の交通状態 $c(\theta)$ を需要の角度分布 $d(\theta)$ と道路網の角度分布 $n(\theta)$ を用いて記述するモデルを開発する．ここで，$c(\theta)$ は，同じ θ 方向以外の需要や道路網の影響を受けると考えられる．例えば，南北方向の需要が多かったり，南北方向の道路網の整備が不十分であった場合，東西方向の需要が混雑する可能性がある．本モデルではこのような面的な交通状態の複雑性を考慮したモデルの開発を目指す．しかし，角度を用いた交通状態分析の先駆的研究として，本論文では出来る限りシンプルなモデルを提案する．

(2) 交通状態モデル

同じ θ 方向以外の需要や道路網の影響を考慮するために，θ との差の変数 $\phi \in (-\pi, \pi]$ と $\eta \in (-\pi, \pi]$ を導入する．需要の角度分布と道路網の角度分布に対して $d(\theta+\phi)$，$n(\theta+\eta)$ とすることで，θ との差を考慮することができる．

また，ϕ や η の値によって，ある方向 θ の需要の交通状態 $c(\theta)$ に与える影響は異なることが予想される．例えば，ϕ や η の値が 0 に近いとき，$c(\theta)$ に与える影響は大きくなり，π に近いときは与える影響は小さい可能性が高い．また，ϕ や η の値が $\pm\pi/2$ に近いときは，多くの交差点が直交していることから特殊な影響があるかもしれない．これらを考慮するために，ϕ，η の値による $c(\theta)$ に与える影響の程度を操作する関数 $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ を導入する．

以上のことを踏まえると，$c(\theta)$ は式 (1) のように記述できる．

$$c(\theta) = \int_{\phi}\int_{\eta} f\big(d(\theta+\phi)\alpha(\phi), n(\theta+\eta)\beta(\eta)\big). \quad (1)$$

この条件で最もシンプルなケースを考え，$d(\theta+\phi)$ と $n(\theta+\eta)$ が独立して $c(\theta)$ に影響を及ぼすとすると，式 (1) は $d(\theta+\phi)$ と $n(\theta+\eta)$ の項の線形結合で表され，

$$c(\theta) = \int_{\phi} d(\theta+\phi)\alpha(\phi) + \int_{\eta} n(\theta+\eta)\beta(\eta) + \gamma, \quad (2)$$

となる．ここで，γ は定数項である．

この時，$\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ は変数が角度指標である円周分布であるため，直接の取り扱いは難しい．したがって，式 (3) で表される変形を施すことにより，円周分布を余弦項と正弦項に分解する[19]．

$$\begin{aligned} \alpha(\phi) &= \sum_{k=1}^{K}(\alpha_{ck}\cos k\phi + \alpha_{sk}\sin k\phi), \\ \beta(\eta) &= \sum_{k=1}^{K}(\beta_{ck}\cos k\eta + \beta_{sk}\sin k\eta). \end{aligned} \quad (3)$$

ここで，K はどの次数の三角項まで合成するのかを操作する外生変数である．この変形ではフーリエ変換のように，周期的な関数を余弦項と正弦項の和で表すことにより，数理的な取り扱いを容易にする．

式 (3) を式 (2) に代入し，

$$\begin{aligned} c(\theta) = &\int_{\phi}\Big\{d(\theta+\phi)\sum_{k=1}^{K}(\alpha_{ck}\cos k\phi + \alpha_{sk}\sin k\phi)\Big\} \\ &+ \int_{\eta}\Big\{n(\theta+\eta)\sum_{k=1}^{K}(\beta_{ck}\cos k\eta + \beta_{sk}\sin k\eta)\Big\} + \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

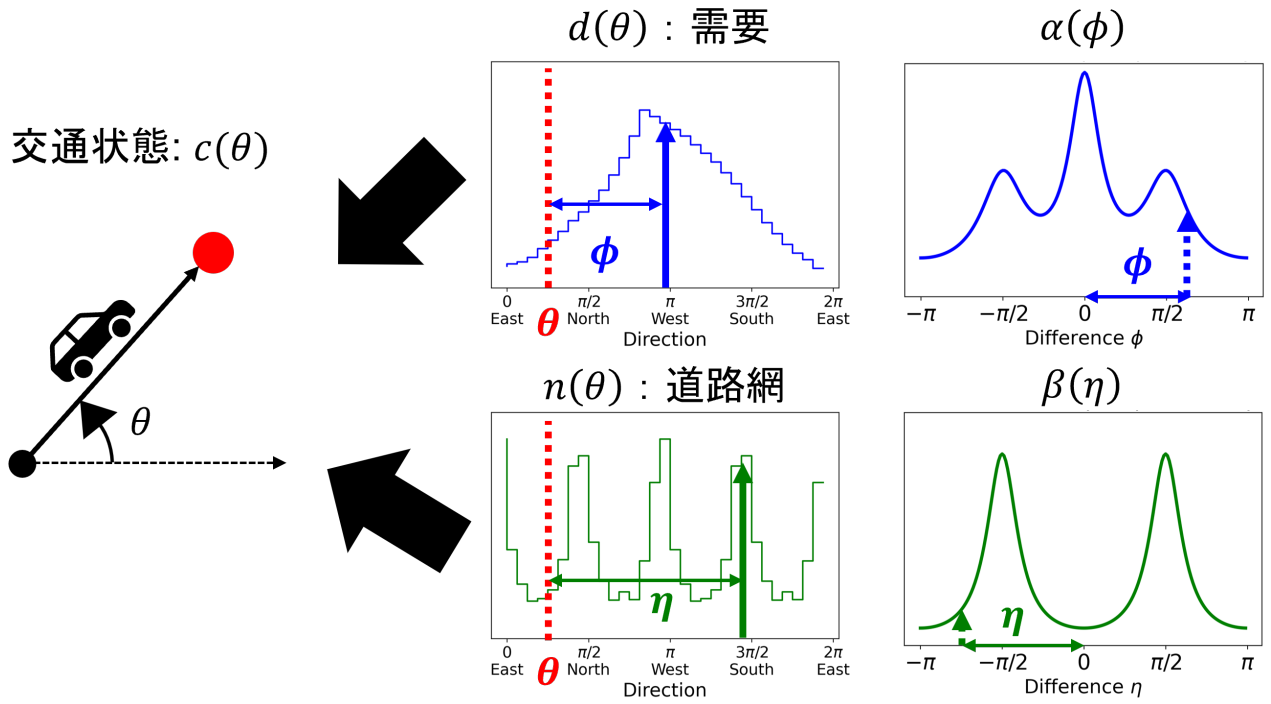
角度分布 $d(\theta)$ と $n(\theta)$ が離散分布の場合，

$$\begin{aligned} c(\theta) = &\sum_{\phi\in\Phi}\Big\{d(\theta+\phi)\sum_{k=1}^{K}(\alpha_{ck}\cos k\phi + \alpha_{sk}\sin k\phi)\Big\} \\ &+ \sum_{\eta\in H}\Big\{n(\theta+\eta)\sum_{k=1}^{K}(\beta_{ck}\cos k\eta + \beta_{sk}\sin k\eta)\Big\} + \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで，Φ と H は離散分布の代表値と θ の差の集合である．

推定するパラメータは α_{ck}，α_{sk}，β_{ck}，β_{sk}，γ である．本モデルは単純な線形回帰モデルであり，推定は非常に簡単である．

これまでの議論を図にしたものを**図–1** に示す．提案するモデルでは，$c(\theta)$ が θ 方向の需要の交通状態を表し，$d(\theta)$ と $n(\theta)$ がそれぞれ需要と道路網の角度分布である．この時，$c(\theta)$ が需要と道路網の分布全体から影響を受ける可能性を考慮し，θ 方向との差の変数 ϕ と η



図–1 モデルの概念図

と，θ 方向との差によって $c(\theta)$ に与える影響の大きさを操作する関数 $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ を導入する．すなわち，本モデルは $d(\theta)$ と $n(\theta)$ を対象エリア内の説明変数とし，$\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ をそれぞれのパラメータとして $c(\theta)$ を推定するモデルである．

(3) 各分布の詳細

各分布 $c(\theta)$，$d(\theta)$，$n(\theta)$ の具体的な定義には様々なものが考えられる．本項では，本研究で用いるそれぞれの定義を説明する．

a) 交通状態 $c(\theta)$

ある需要の交通状態を評価する指標としてよく使われるのが，トリップの平均速度またはその逆数（ペース）である．これらの指標はプローブデータなどの車両軌跡データを用いることで簡単に計算ができる．

b) 需要 $d(\theta)$

需要の角度分布 $d(\theta)$ の計算には，対象領域内の起点と終点の情報を含むデータが必要である．この時，起点と終点はトリップ全体の起点と終点ではなく，対象領域内に入る点や出る点でもよい．そのため，車両軌跡データを用いて $c(\theta)$ を導出した場合，そのデータを需要データとして用いることが可能である．

c) 道路網 $n(\theta)$

道路網を角度分布で記述する分析は Boeing[16] や長崎ら[17] で提案されている．この分布では特定の方向を向いた道路が多い場合にその方向のピークが高くなる．そのため，対象領域内の道路網の各道路の方角を集計した分布が道路網の角度分布 $n(\theta)$ に適していると考えられる．

(4) 考察

このモデルは需要と道路網の角度分布を用いた非常に単純なモデルである．推定するパラメータは各次数 k に対応する α_{ck}，α_{sk}，β_{ck}，β_{sk} と，定数項 γ である．これらのパラメータが形成する分布 $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ の形状により，モデルの解釈を行う．

交通現象は様々な要因で発生するため，$\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ の形状は複雑で多峰になる可能性がある．予想される主な結果は，

(a) $\alpha(0)$ は，θ と同じ方向の需要が多いとより混雑すると予想されるため，大きい値になる．
(b) $\alpha(\pi)$ は，θ と反対方向の需要の多寡は θ 方向の交通状態に大きな影響を及ぼさないと考えられるため，0 に近い値になる．
(c) $\beta(0)$ は，θ 方向の道路が十分に整備されていなければ，その方向の需要が混雑すると予想されるため，負の小さい値になる．
(d) $\beta(\pi)$ は，θ と反対方向の道路の整備は θ 方向の交通状態に大きな影響を及ぼさないと考えられるため，0 に近い値になる．

である．

3. ケーススタディー

(1) データと変数設定

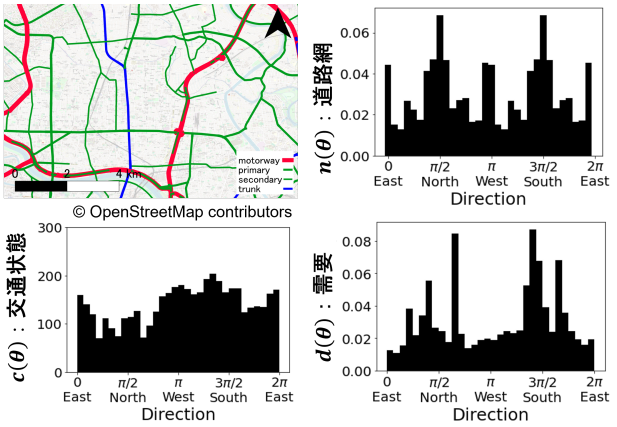
東京都市圏の ETC2.0 データから得られた車両軌跡データと，OpenStreetMap[20] のデータを用いてモデルのケーススタディーを行う．$c(\theta)$ と $d(\theta)$ は 2021/7/12 から 2021/7/16 の平日一週間のオリパラの ETC2.0 データを用いて集計する．この際，各トリップに対してプローブカーが対象領域内に滞在した時間とその移動距離から $c(\theta)$ を計算する．$c(\theta)$ の単位は [s/km] である．需要の角度分布 $d(\theta)$ については，各トリップの起点と終点のなす角を計算し，方向別のトリップ数を集計したものとする．道路網の角度分布 $n(\theta)$ は OpenStreetMap のデータを用いる．全データの中で，“motorway”，“trunk”，“primary”，“secondary” とラベルづけされている主要な道路のみを用いる．この区分は概ね高速道路，国道，都道府県道に相当する．

また，$d(\theta)$ と $n(\theta)$ は正規化し，離散分布の階級数は 32 とする．さらに，推定した分布 $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ を式 (3) で分解する際の解像度 K は 8 とする．道路網の角度分布 $n(\theta)$ においてすべての道路は両方向に移動可能と仮定し，$n(\theta)$ は点対称である．そのため，$\beta(\eta)$ も点対称になるため，k が奇数のときの β_{ck} と β_{sk} は 0 になる．

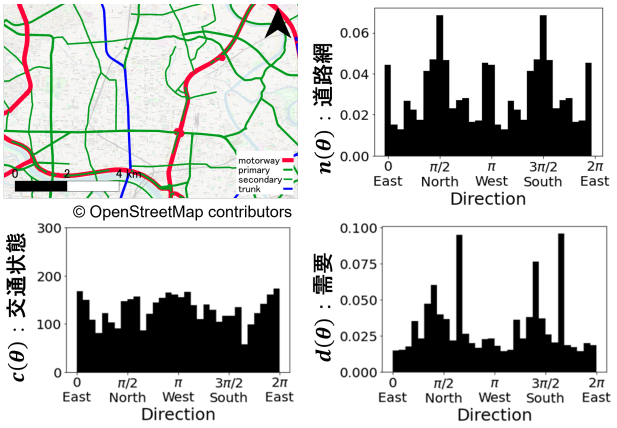
ケーススタディーは三つのケースで行った．ケース 1 は東京都北東部の二次メッシュ533956 の午前 8 時から午前 9 時のデータを用いた．ケース 1 の道路網，道路角度分布，道路網角度分布 $n(\theta)$，角度別交通状態 $c(\theta)$，需要角度分布 $d(\theta)$ を**図–2** に示す．ケース 1 では国道，都道はほぼ東西南北に走っており，高速道路が斜めに走っている．道路網全体の角度分布は概ね東西南北に大きいピークを持つ．需要分布は高速道路と国道に沿った南北方向のピークが鋭い．角度別の交通状態について，都心に向かう南西方向は単位距離を移動するための時間は大きく，逆方向は比較的小さい．

ケース 2 はケース 1 と同じ東京都北東部の二次メッシュ533956 の午後 6 時から午後 7 時のデータを用いた．ケース 2 の道路網，道路角度分布，道路網角度分布 $n(\theta)$，角度別交通状態 $c(\theta)$，需要角度分布 $d(\theta)$ を**図–3** に示す．ケース 2 はケース 1 の夜の交通を対象にしている．需要分布の蛍光はケース 1 と大きく異なる点は見当たらない．一方，角度別の交通状態について，都心から離れる北東方向は単位距離を移動するための時間は大きく，逆方向は比較的小さいというケース 1 と逆の傾向がみられる．

ケース 3 は東京都北東部の二次メッシュ533944 の午前 8 時から午前 9 時のデータを用いた．ケース 3 の道路網，道路角度分布，道路網角度分布 $n(\theta)$，角度別交通状態 $c(\theta)$，需要角度分布 $d(\theta)$ を**図–4** に示す．ケース



図–2 ケース 1 の道路網（左上），道路網角度分布 $n(\theta)$（右上），角度別交通状態 $c(\theta)$（左下），需要角度分布 $d(\theta)$（右下）



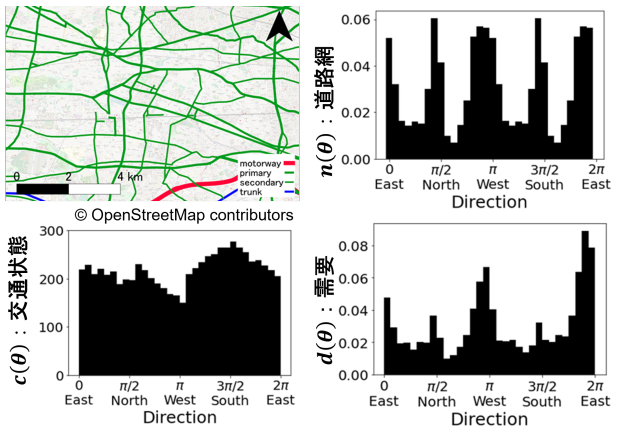
図–3 ケース 2 の道路網（左上），道路網角度分布 $n(\theta)$（右上），角度別交通状態 $c(\theta)$（左下），需要角度分布 $d(\theta)$（右下）

3 では都心に向かう東西方向の道路が多く整備されており，東西方向の道路の接続のために南北方向の道路も整備されている．道路網全体の角度分布は概ね東西南北にピークを持つが，東西方向のピークの方が幅が広く，全体に占める割合は大きい．需要分布も東西方向が大きく，特に都心に向かう東方向のピークが鋭い．角度別の交通状態は全体的に大きい値を示すが，南北方向は大きく，東西方向の比較では都心に向かう東方向が都心から離れる西方向よりも値が大きい．

(2) 推定結果

推定した $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ の形状を**図–5** に，データ数，決定係数 R^2，F 統計量とその有意確率を**表–1** に示す．なお，推定した各パラメータの値と t 値は付録に示されている．ここで，**図–5** の $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ は 5% 有意であったパラメータのみを用いている．

モデルそのものの有意度を表す F 統計量の有意確率



図–4 ケース 3 の道路網（左上），道路網角度分布 $n(\theta)$（右上），角度別交通状態 $c(\theta)$（左下），需要角度分布 $d(\theta)$（右下）

表–1 各ケースのデータ数，決定係数 R^2，F 統計量とその有意確率

ケース	サンプル数	R^2	F 統計量	有意確率
1	10969	0.307	302.8	0.000
2	9557	0.174	126.0	0.000
3	3517	0.206	56.6	0.000

はすべてのケースで 0.000 であるため，すべてのケースでモデルは有意に働いている．各ケースにおける分布の形状を決めるパラメータについて，計 16 個の α_{ck} と α_{sk} のうち，ケース 1 では 14 個，ケース 2 では 13 個，ケース 3 では 10 個のパラメータが有意であった．一方，計 8 個の β_{ck} と β_{sk} のうち，ケース 1 では 5 個，ケース 2 では 8 個，ケース 3 では 6 個のパラメータが有意であった．また，すべてのケースで定数項 γ は有意であった．

(3) 考察

ある θ における ϕ，η の値別に $d(\theta+\phi)$ と $n(\theta+\eta)$ が $c(\theta)$ に与える影響の程度を表したのが**図–5** である．例えばケース 1 では，$d(\theta)$ が 0.1 の場合，$c(\theta)$ は約 25 増加し，$d(\theta+\pi)$ が 0.1 の場合，$c(\theta)$ は約 40 減少する．しかし，逆方向の需要が混雑を減少させるとは考えにくい．逆にそのような需要は混雑を減少させるのではなく，影響を与えないと考えるのが自然である．そのため，$\alpha(\phi)$ はその値ではなく最小値からの増分で解釈する．

全てのケースにおいて，$\alpha(\phi)$ が $\phi=0$ 付近で大きい値を示している．この結果は大きい需要と同じ方向の移動では混雑に巻き込まれることを意味するため，予想に即している．さらに，$\alpha(\phi)$ が $\phi=\pi$ 付近で小さい値を示している．この結果も予想に即した結果になっている．

しかし，$\alpha(\phi)$ の形状はケース 1 とケース 2 で大きく異なっている．ケース 1 とケース 2 は同じ対象領域であるため道路網の角度分布 $n(\theta)$ は完全に一致しており，**図–2**，**図–3** の $d(\theta)$ の傾向も大きく異なってはいないように見える．$\alpha(\phi)$ の形状の差は，朝のピーク時間帯は東京都心方面の交通量が多く，需要の大多数を占める高速道路でも混雑が発生していることに起因していると考えられる．一方，夕方は高速道路の混雑が緩和され，郊外方向の移動速度も速くなる．このような要因から，ケース 1 とケース 2 の $\alpha(\phi)$ が異なると考えられる．

また，ケース 1 とケース 3 では，$\alpha(\phi)$ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ までの広い範囲で大きい値を示しており，ケース 2 では大きく振動している．この不一致は，ケース 1 とケース 3 の $d(\theta)$ にはピーク方向以外にも比較的多くの需要が分布しているためであると考えられる．その結果，朝の時間帯のように広い範囲に需要が分布している場合には混雑が発生しやすいと解釈可能である．

一方，$\beta(\eta)$ について，$\beta(0)$ はケース 3 では負であるが，ケース 1 とケース 2 では正である．$\beta(0)$ が正である場合，ある移動方向と同じ方向の道路が多く整備されている場合に混雑が発生することを意味し，予想とは矛盾する結果である．この矛盾は，ケース 1 とケース 2 の道路網における東西南北の下道と斜め方向の高速道路の方向の違いに起因している可能性が高い．斜め方向の $c(\theta)$ は高速道路が整備されているため小さいが，その方向の道路は多く存在しないため，$n(\theta)$ も小さい値である．そのためケース 1 とケース 2 の $\beta(0)$ は正の値であると考えられる．

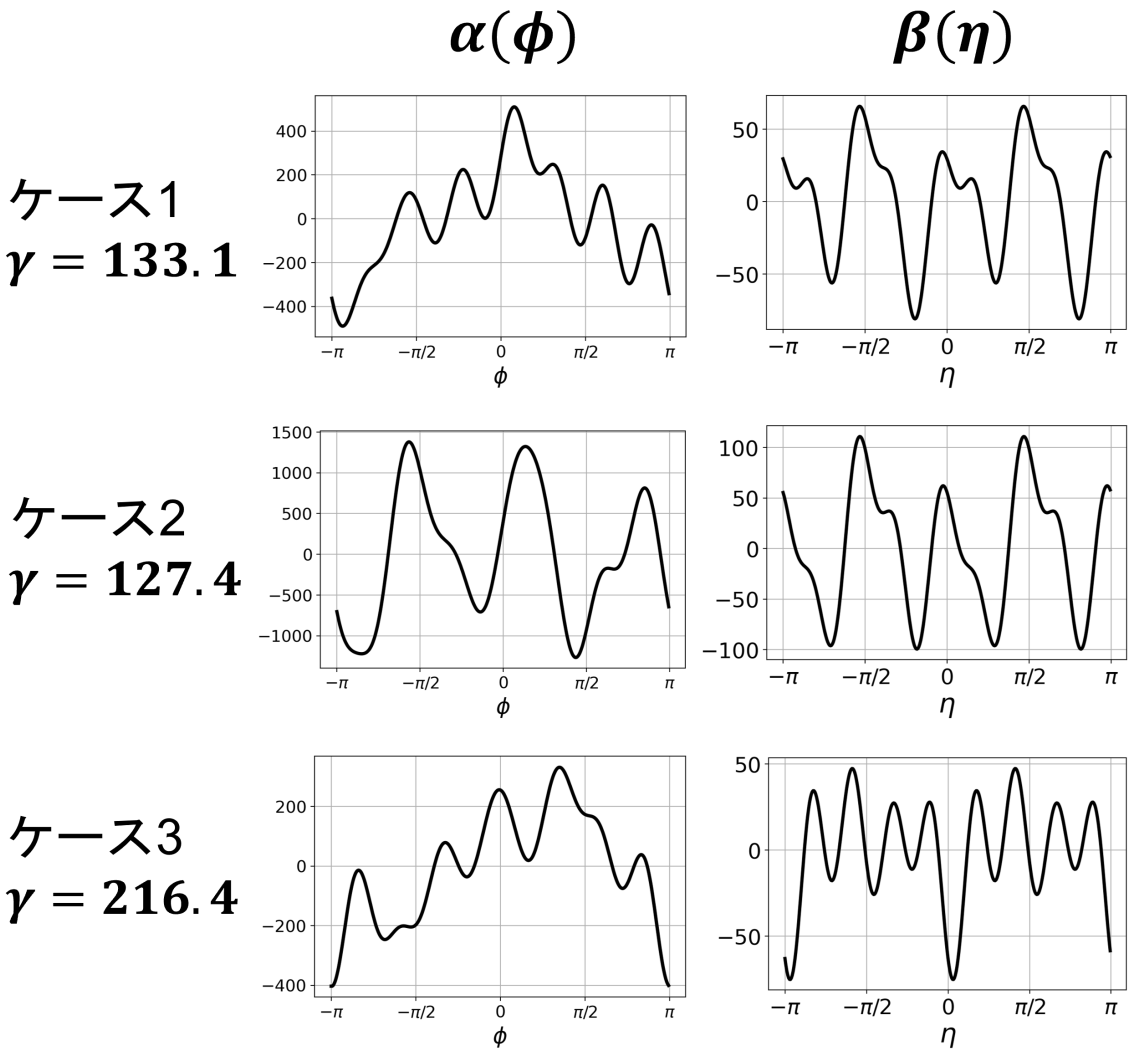
また，ケース 1 とケース 2 の $\beta(\eta)$ は似た形をしており，道路網が交通状態に与える影響は朝夕ともに同じような傾向が見られる．この結果は，Daganzo and Geroliminis[12] の結果と一致している．

ケース 1 とケース 2 では，$\beta(\eta)$ に 4 つのピークが確認でき，これは道路網分布 $n(\theta)$ にも 4 つのピークがあるためだと考えられる．しかし，ケース 3 では $n(\theta)$ が同様に 4 つのピークを持つにもかかわらず，$\beta(\eta)$ は 8 つのピークを持つ．この現象の解釈は現段階では不明である．

最後に，$\alpha(\phi)$ の値は $\beta(\eta)$ の約 10 倍となっており，道路網の形状よりも需要のパターンの方がより交通状態に影響を及ぼすと解釈できる．

4. 結論

本研究では，道路網の形状と需要の方向パターンの二つの角度分布を用いて交通現象を表現する新しい記述的モデルを開発した．具体的には，対象地域におけ



図–5 各ケースで推定された $\alpha(\phi)$ と $\beta(\eta)$ の形状

るトリップの出発地と目的地間の方向によって記述される需要の角度分布と，領域内の道路が向いている方角を集計した道路網の角度分布を用いて交通状態を説明する．この二つの角度分布をモデルに組み込むため，角度分布を余弦項と正弦項に分解した．このことにより，角度指標を用いた単純な線形回帰モデルで交通現象を記述できる可能性を示した．さらに，提案モデルのケーススタディーを東京都市圏で実施し，提案したモデルは有意に働いていることを確認した．

著者らの知る限り，本モデルはを方向統計学を用いて交通状態を角度指標から記述する最初の試みであり，さらなる発展の余地を残している．まず，Macroscopic Fundamental Diagram[12] のような，すでに交通工学において確立された概念との関連性を検討する必要がある．また，このモデルを拡張する方向として，時間の項を組み込んだダイナミックなモデルを開発することが挙げられる．時間は 24 時間でループしているため，角度として記述できる[21]．需要と時間という二つの角度軸を持つデータは，ドーナツ状の曲面であるトーラスという概念で記述できる．方向統計学の最新の知見を用いたより高度なモデルの確立は，本研究の発展方向の一つである．

謝辞： 本研究の一部は，東京 2020 大会データ提供事務局の協力のもとで，東京 2020 大会の交通・輸送に関する各種データを用いて行った．また，本研究の一部は日本学術振興会科学研究費（特別研究員奨励費：22J11294）の助成により行われた．この場を借りて厚く御礼申し上げる．

付録　推定したパラメータ

各ケースの推定したパラメータを**表–2**，**表–3**，**表–4** に示す．なお，*印は 5% 有意を意味する．

表–2 ケース 1 のパラメータ推定結果

	推定値	標準誤差	t 値		推定値	標準誤差	t 値
γ	133.08	0.51	*258.96				
α_{c1}	263.11	5.63	*46.76	α_{s1}	52.58	6.86	*7.66
α_{c2}	-18.40	2.01	*-9.14	α_{s2}	21.84	1.89	*11.58
α_{c3}	54.03	12.33	*4.38	α_{s3}	85.40	11.56	*7.39
α_{c4}	1.47	0.46	*3.23	α_{s4}	-6.62	0.43	*-15.24
α_{c5}	-54.29	6.61	*-8.21	α_{s5}	55.51	6.81	*8.15
α_{c6}	-3.14	4.38	-0.72	α_{s6}	6.27	5.02	1.25
α_{c7}	61.55	14.11	*4.36	α_{s7}	108.00	13.98	*7.72
α_{c8}	-21.25	2.01	*-10.58	α_{s8}	17.16	2.06	*8.32
β_{c2}	-14.4	1.17	*-12.30	β_{s2}	8.22	1.09	*7.52
β_{c4}	43.93	3.14	*14.01	β_{s4}	18.34	3.12	*5.87
β_{c6}	1.54	1.13	1.36	β_{s6}	-0.54	1.06	-0.50
β_{c8}	-0.49	1.75	-0.28	β_{s8}	-23.37	1.73	*-13.51

表–3 ケース 2 のパラメータ推定結果

	推定値	標準誤差	t 値		推定値	標準誤差	t 値
γ	127.39	0.64	*198.93				
α_{c1}	298.21	35.85	*8.32	α_{s1}	-158.73	33.74	*-4.70
α_{c2}	-49.84	2.53	*-19.70	α_{s2}	-3.55	2.38	-1.49
α_{c3}	263.20	88.45	*2.98	α_{s3}	979.97	80.58	*12.16
α_{c4}	-6.82	0.36	*-19.09	α_{s4}	0.33	0.39	0.85
α_{c5}	-196.84	54.38	*-3.62	α_{s5}	162.29	54.16	*3.00
α_{c6}	-48.58	4.80	*-10.12	α_{s6}	19.50	5.39	*3.62
α_{c7}	193.99	60.28	*3.22	α_{s7}	14.78	64.19	0.23
α_{c8}	-39.92	2.44	*-16.33	α_{s8}	22.32	2.47	*9.02
β_{c2}	-28.49	1.53	*-18.65	β_{s2}	-9.76	1.43	*-6.82
β_{c4}	69.37	3.96	*17.52	β_{s4}	17.30	3.89	*4.45
β_{c6}	6.89	1.04	*6.63	β_{s6}	7.89	1.00	*7.86
β_{c8}	7.61	1.83	*4.15	β_{s8}	-32.95	1.80	*-18.28

REFERENCES

1) Sheffi, Y.: Urban transportation networks, Vol. 6, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
2) Yang, H. and H. Bell, M. G.: Models and algorithms for road network design: a review and some new developments, Transport Reviews, Vol.18, No.3, pp.257–278, 1998.
3) Yin, Y. and Ieda, H.: Assessing performance reliability of road networks under nonrecurrent congestion, Transportation Research Record, Vol.1771, No.1, pp.148–155, 2001.
4) Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., and Rashidi, H.: A review of urban transportation network design problems, European journal of operational research, Vol.229, No.2, pp.281–302, 2013.
5) Rempe, F., Huber, G., and Bogenberger, K.: Spatio-temporal congestion patterns in urban traffic networks, Transportation Research Procedia, Vol.15, pp.513–524, 2016.
6) Sun, C., Pei, X., Hao, J., Wang, Y., Zhang, Z., and Wong, S.: Role of road network features in the evaluation of incident impacts on urban traffic mobility, Transportation research part B: methodological, Vol.117, pp.101–116, 2018.
7) Beckmann, M.: A continuous model of transportation, Econometrica: Journal of the Econometric Society, pp. 643–660, 1952.
8) Sasaki, T., Iida, Y., and Yang, H.: User-equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow, International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 11th, 1990, Yokohama, Japan, 1990.
9) Wong, S.: Multi-commodity traffic assignment by continuum approximation of network flow with variable demand, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.32, No.8, pp.567–581, 1998.
10) Mahmassani, H. S., Williams, J. C., and Herman, R.: Investigation of network-level traffic flow relationships: some simulation results, Transportation Research Record, Vol.971, pp.121–130, 1984.
11) Williams, J. C., Mahmassani, H. S., and Herman, R.: Urban traffic network flow models, Transportation Research

表–4 ケース 3 のパラメータ推定結果

	推定値	標準誤差	t 値		推定値	標準誤差	t 値
γ	216.41	0.81	*268.16				
α_{c1}	161.30	9.51	*16.97	α_{s1}	138.52	11.52	*12.02
α_{c2}	-30.96	2.67	*-11.61	α_{s2}	1.29	3.13	0.41
α_{c3}	-2.75	18.46	-0.15	α_{s3}	-46.88	20.04	*-2.34
α_{c4}	-12.54	1.53	*-8.19	α_{s4}	-4.75	1.61	*-2.95
α_{c5}	95.96	41.68	*2.30	α_{s5}	35.37	41.88	0.84
α_{c6}	-9.17	5.14	-1.78	α_{s6}	-9.70	4.93	*-1.97
α_{c7}	71.91	35.59	*2.02	α_{s7}	30.41	34.64	0.88
α_{c8}	-30.56	6.18	*-4.95	α_{s8}	3.95	6.10	0.65
β_{c2}	-16.49	1.42	*-11.61	β_{s2}	-0.36	1.67	-0.21
β_{c4}	-14.96	2.03	*-7.38	β_{s4}	-10.02	2.19	*-4.58
β_{c6}	-11.45	5.64	*-2.03	β_{s6}	10.08	5.88	1.71
β_{c8}	-20.13	6.34	*-3.18	β_{s8}	-25.09	6.48	*-3.87

Record, Vol.1112, pp.78–88, 1987.
12) Daganzo, C. F. and Geroliminis, N.: An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.42, No.9, pp.771–781, 2008.
13) Ji, Y., Luo, J., and Geroliminis, N.: Empirical observations of congestion propagation and dynamic partitioning with probe data for large-scale systems, Transportation Research Record, Vol.2422, No.1, pp.1–11, 2014.
14) Saeedmanesh, M. and Geroliminis, N.: Dynamic clustering and propagation of congestion in heterogeneously congested urban traffic networks, Transportation research procedia, Vol.23, pp.962–979, 2017.
15) Mardia, K. V. and Jupp, P. E.: Directional statistics, Vol. 2, Wiley Online Library, 2000.
16) Boeing, G.: Urban spatial order: Street network orientation, configuration, and entropy, Applied Network Science, Vol.4, No.1, pp.67, 2019.
17) 長崎滉大，中西航，朝倉康夫: 方向統計学を用いた道路ネットワークの分析，土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.6, pp.I_199–I_205, 2020.
18) Zhou, X.: Understanding spatiotemporal patterns of biking behavior by analyzing massive bike sharing data in chicago, PloS one, Vol.10, No.10, pp.e0137922, 2015.
19) Johnson, R. A. and Wehrly, T. E.: Some angular-linear distributions and related regression models, Journal of the American Statistical Association, Vol.73, No.363, pp.602–606, 1978.
20) OpenStreetMap contributors: Planet dump retrieved from https://planet.osm.org , https://www.openstreetmap.org, 2023.
21) Nagasaki, K., Kato, S., Nakanishi, W., and Jones, M.: Traffic count data analysis using mixtures of kato–jones distributions on the circle, arXiv preprint arXiv:2206.01355, 2022.

(Received ???? ?, ????)
(Accepted ???? ?, ????)

TRAFFIC CONGESTION ANALYSIS WITH DIRECTIONAL STATISTICS: DESCRIPTIVE MODEL BY ANGULAR DISTRIBUTIONS FOR ROAD NETWORK AND OD DEMAND

Kota NAGASAKI and Toru SEO