社会的ネットワークに基づく交通需要の理論モデル分析

大平 悠季[1]・織田澤 利守[2]

[1]学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒 658-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail:121t110t@stu.kobe-u.ac.jp
[2]正会員 博（工）神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒 658-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail:ota@opal.kobe-u.ac.jp

社会的ネットワークは主体間の結びつきを記号化した概念であり，コミュニケーション行動の動機そのものである．その意味で，コミュニケーションに派生する交通需要は社会的ネットワークに規定される．本研究は，交通需要の集積・分散の様子と社会的ネットワークとの関係性の解明を試みる．社会的ネットワーク上でつながりのある相手との交流から便益を得る主体は，交通ネットワーク上の特定の経路を介してこれを実現しているとし，この想定を効用最大化問題として定式化する．効用には戦略的補完性（活発に交流活動を行う相手との交流はより高い効用をもたらす性質）と多様性選好（多様な相手との交流を好む性質）が作用するとする．上記の設定の下，実現するナッシュ均衡解を解析的に導出する．さらに，簡単な数値事例を通じて，社会的ネットワーク及び交通ネットワークの位相幾何学的構造と交通需要の関係を分析する．

Key Words *::social network, transportation network, travel demand, social externality*

1. はじめに

近年，SNS（Social Networking Service）の急速な普及によって注目を集めた社会的ネットワーク（Social Network）は，元来主体間の結びつきを記号化した概念であり，コミュニケーションの動機そのものである．SNS 上のネットワークには実生活における社会的ネットワークが少なからず反映される．SNS にはリアルな社会的ネットワーク上では直接的な知人関係にない相手ともダイレクトに通信を行うことができる機能が備わっており，これを利用して新たな友人・知人を得たり，疎遠になっていた友人との交信が復活したりする現象もしばしば発生している．このような友人・知人関係の伸展，すなわち社会的ネットワークの拡大はコミュニケーションの動機である他人とのつながりが増加することを意味し，コミュニケーション活動の活発化を促進する．コミュニケーション行動の目的は，友人同士の親交・ビジネスパーソン同士の交渉等様々であるが，face-to-face で行われるコミュニケーションは総じて交通行動を伴う．このようなコミュニケーションを求めて移動する行動を，出発点と目的地という切口から集計したものが OD 交通量であるといえ，この意味で，OD 交通需要は本質的に社会的ネットワークに規定される．ある地点が出発点，あるいは目的地たり得るのもそこにコミュニケーションを需要する主体の存在があるからである．交通需要発生のメカニズムを記述するという見地からも，交通行動の起源である社会的ネットワークの視座からの議論が必要であるといえる．現行の交通需要予測手法は集計レベルでの四段階推定法が中心であるが，これは現象から傾向を実証的に捉え直すのみで，行動論的基盤を欠く．誰が誰とコミュニケーションをとるためにその交通行動が発生しているのかを明らかにすることができれば，交通行動を動機から捉えられ，OD 交通需要を抜本的に把握することが可能になる．

また，都市とは，近接に立地することで主体間の相互作用が促進されることに起因する様々なメリットが生んだ地理空間の一形態と捉えることができるが，都市内の交通現象であれ都市間のそれであれ，各主体の物理的な相対関係が交通行動に大きく影響することが容易に想像される．よって，主体の立地点およびそれらを結ぶ交通環境の集合体である交通ネットワークを，社会的ネットワークと同様に交通行動の主要な構成要素と捉えて構造化し，議論を進めることが重要である．

本研究では社会的ネットワークと交通ネットワークを同時に考慮し，交流相手を明示的に表現したモデルを構築することで，OD 交通需要の発生メカニズムを明らかにすることを目的とする．社会的ネットワークと交通ネットワークの状況は，組合せを考慮すると膨大なバリエーションが考えられるが，ある状況に対してどのような環境的条件（同一の社会的ネットワークに対

して最適な交通ネットワークの形態，あるいは社会的ネットワークも交通ネットワークも固定の状況下での交通費用等）がどの程度厚生に作用するのか，また，交通-コミュニケーション行動の量的な集積の様子を分析することを関心の中心に置く．以下，2 章では既存研究の整理と本研究の位置づけを述べる．3 章で，交通ネットワークと社会的ネットワークの重層的な構造をモデル化し，その上で各主体間に発生する交通需要を効用最大化行動として定式化し，解析的に均衡解を得られることを示す．4 章では簡単な数値事例を示し，主体の社会的ネットワーク上のポジションと交通ネットワーク上の立地点，さらにこれらと交通需要との関係について分析する．5 章にまとめと今後の展望を述べる．

2. 既存研究と本研究の位置づけ

社会的ネットワークにおける個人の位置とコミュニケーションとを関連づけた既存研究に Helsley & Zenou [1)]があり，都市への訪問行動および立地選択を社会的ネットワークの観点から分析している．これは訪問行動の頻度が高いほど他人とのコミュニケーションが行いやすくなるという枠組で，都市（the City）と郊外（the periphery）からなる二地域モデルであり，交通ネットワークを考慮していない．都市には人や物が集中するプラットフォーム的側面があるとはいえ，現実の人々は，道路環境に応じてコミュニケーションをとりたい相手と自分自身の立地条件に基づく移動コストを考慮しながら，交通行動を決定している．交通需要が実際に観測される交通量として顕在化する過程では，交通ネットワークの様態が大きく影響するはずである．交通行動という観点から見たときに，交通ネットワークが社会的ネットワークとどのような重層的構造を形成しているのか，両者がどのような相互関係にあるのかが明らかになれば，その結果として表面化する混雑や，誘発需要も同じ枠組で議論し得ると考えられる．

井料ら[2)]は OD 交通需要モデリングに社会的ネットワーク理論を適用し，それまでは外生的に与えることがほとんどであった交通（=「目的をもった移動」）の「移動の目的」を一部内生化している．社会的ネットワークとは，それ自体がノードである各主体間に異質性を定義づけるものである．社会的ネットワーク上でどのようなポジションを占めるかということは，コミュニケーション活動の水準を決定づける，各主体のアイデンティティであるともいえる．この点を考慮すると，主体がリンクでつながっている相手は，それぞれに異なる効用をもたらすはずである．井料ら[2)]において社会的ネットワークについてはトポロジー的特徴を考慮するに留まり，交流相手の異質性に言及していない．経済社会におけるコミュニケーション活動は,「誰か」と会うことから価値を引き出すというよりも,「誰と」会うかによって相異なる便益を獲得するための行為と捉えられる．交通量分析においては OD ペアに着眼する手法が汎用されているが，Origin（出発地）の元に，あるいは Destination（目的地）の先にいるのは社会的ネットワーク上にリンクを張るノードとしての主体である．これらの主体間にインタラクションが存在しなければ，そもそも交通どころか「移動の目的」も発生しないのであり,「移動の目的」の起源である社会的ネットワークに基づく交通需要のモデル化は現状分析および将来的な交通需要予測の双方に有意な示唆を与えると考えられる．また，井料ら[2)]は特定の状況設定に対する数値的分析に終始しており，解析的な手法に基づく知見は得られていない．

本研究は，社会的ネットワークおよび交通ネットワークの位相幾何学的構造と OD 交通需要の関係を，モデル分析を通じて明らかにする．ネットワーク上の各主体の効用最大化行動の定式化の過程で，Ottaviano-Tabuchi-Thisse(2002)[3)]の提案する複数の異質財から主体が得る効用を表現した関数形を用いることで，コミュニケーション相手の異質性を表現している．井料ら[2)]と同様のモチベーションに基づいているがモデリングの手法は大きく異なっており，解析的なアプローチを試みるものである．

3. ネットワークを考慮した交通需要モデル

(1) 設定

n 人の主体およびそれぞれの立地点からなる経済環境を想定する．各主体は，社会的ネットワーク上でリンクしている相手それぞれとの交通を伴うコミュニケーション活動から便益を得，達成されるコミュニケーションは相手によって異質であると仮定する．主体 i は予算制約の下で，相手 j $(i \neq j)$ のところに赴く交通-コミュニケーション行動 q_{ij} および相手が自分の立地点を訪れることで達成される交通-コミュニケーション行動 q_{ji} の両方から得る効用を最大化するように，自身のコミュニケーション需要 q_{ij} を決定する．Ottaviano-Tabuchi-Thisse(2002)[3)]は，複数の異質財から主体が得る効用をモデル化しいてるが，本章のモデルはここで提案されている効用関数形を採用し，コミュニケーション相手に関する多様性選好：より多くの異なる相手と交流することでより高い満足を得る性質を表現する．さらに，戦略的補完性：活発にコミュニケーション活動を行っている相手とのコミュニケーションからは大きい便益を得る性質を効用関数形に組み込んで，主体の行動を定式化する．主体の効用最大化行動の基盤となる要素は，

社会的ネットワーク，コミュニケーション相手に関する多様性選好・戦略的補完性および交通ネットワークである．

(2) 交通費用と混雑

各主体は，社会的ネットワーク上のリンクでつながっている相手とのみコミュニケーションを取り，コミュニケーションのための交通行動に際して道路ネットワーク上の経路の最短経路のみを利用する．いずれの主体の組合せにおいても，二者間に発生する交通行動に経路の変更はないものとする．

n 人の主体からなる社会的ネットワークを $n \times n$ 行列（これを隣接行列 $\mathbf{G}$ と呼ぶ）でグラフ化すると，その（i,j）成分 $[g_{ij}]$ は次のようになる：

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{(agent } i \text{ and } j \text{ is directly connected)} \\ 0 & \text{(otherwise)} \end{cases}.$$

$[g]$ は無向グラフであり，$g_{ij} = 1$ であれば $g_{ji} = 1$，また $g_{ii} = 0$ である．

社会的ネットワークと道路ネットワーク上の混雑の関係を記述するために，次に示す行列 $\mathbf{P}$ および $\mathbf{C}_\lambda(\mathbf{t})$ を定義する．$\lambda \times n^2$ 行列 $\mathbf{P}$ は，主体 i と主体 j（$\forall i, \forall j = 1,2,...,n$）を結ぶ最短経路が道路ネットワーク上のリンク λ（$\forall\lambda = a,b,...,\phi$）を含むか否かを表している．すなわち，主体 i と j との間に発生する交通行動が道路リンク λ を通れば $\mathrm{p}_{ij\lambda} = 1$，そうでなければ $\mathrm{p}_{ij\lambda} = 0$ である．なお，主体 i と j が社会的ネットワーク上でリンクしていない i と j の組合せに対してもこれは定義する．すなわち隣接行列 $\mathbf{G}$ の要素が $g_{ij} = 0$ であるような (i,j) についても，この二者間に交通行動が発生したとしたら利用する最短経路に，リンク λ が含まれれば $\mathrm{p}_{ij\lambda} = 1$，そうでなければ $\mathrm{p}_{ij\lambda} = 0$ である．また $\mathrm{p}_{ii\lambda} = 0$ ($\forall i = 1,2,\cdots,n, \forall\lambda = a,b,...,\phi$) とする．$\phi \times \phi$ 行列 $\mathbf{C}_\phi(\mathbf{t})$ は各経路を利用する際に要するコストのパラメータ t_λ の組合せ $\mathbf{t}$ を反映した対角行列であり，対角成分は $t_a, t_b, ..., t_\phi$，その他の成分はすべて 0 である．各主体は，道路リンク λ を通過する度にコスト t_λ を支払う．

$q_a, q_b, ..., q_\phi$ はそれぞれ，道路リンク $a,b,...,\phi$ に発生する交通需要の総和を表す．これを $\mathbf{C}_\phi(\mathbf{t})$ に右側からかけるとそれぞれのリンクの混雑に応じて要する費用のベクトルが得られ，さらにその左側から $\mathbf{P}^{\mathrm{T}}$：$\mathbf{P}$ の転置行列をかけると，ネットワーク上の主体のあらゆる組合せ (i,j) 間に発生する交通需要に対する費用を表すベクトルが得られる．この費用は構造的に，自身（個人 i）の交通需要および他人（i 以外の個人）の交通需要のいずれの増加に対しても増加する：すなわち混雑の概念を導入している．

(3) 主体の効用最大化行動

主体 i ($\forall i = 1,\cdots,n$) は，予算制約（式 (3)）の下でネットワーク構造 $[g_{ij}]$ と他の主体の交通需要 q_{jk} ($\forall j, \forall k = 1,\cdots,n, j \neq i$) を所与として，自身の効用 U_i を最大化するように交通需要水準 q_{ij} を決定する．

$$\max_{q_{ij},z} \quad U_i(q_{ij}, \mathbf{q_{-i}}, g) = z_i + u_i(q_{ij}, \mathbf{q_{-i}}, g), \qquad (1)$$

$$u_i(q_{ij}, \mathbf{q_{-i}}, g) = \alpha \sum_{j=1}^{n} \bar{q}_{ij} - \frac{\beta - \gamma}{2} \sum_{j=1}^{n} (\bar{q}_{ij})^2 - \frac{\gamma}{2} \left(\sum_{j=1}^{n} \bar{q}_{ij} \right)^2 + \theta \sum_{j=1}^{n} g_{ij} q_i q_j, \qquad (2)$$

sub. to

$$q_i = \sum_{j=1}^{n} q_{ij}, \quad q_{ii} = 0, \quad \bar{q}_{ij} = g_{ij} q_{ij} + g_{ji} q_{ji},$$

$$y_i = z_i + p_T \sum_{j=1}^{n} \bar{q}_{ij} + \sum_{j=1}^{n} g_{ij} q_{ij} \left(\sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij} \right). \qquad (3)$$

ここで，y_i は所得，z_i は基準財を表し，式 (3) は予算制約である．$\theta(>0)$ は社会的ネットワークのつながりの強さを表すパラメータである[1]．$\alpha(>0)$ は異質財を分散して消費することへの選好の強さ，β, γ は $\beta > \gamma$ の下で，消費者である主体がバラエティの分散型消費へ偏する性質を表す．ある値の β に対して γ は各異質財間の代替可能性を表現する：すなわち，$\beta > \gamma$ が保たれている下では，γ の値が β に近付くほどそれぞれの財同士の代替性が強い．さらに，$\beta > \gamma$ であることから，U_i は q_{ij} に関して狭義に増加関数である．

p_T は単位量あたりの face-to-face コミュニケーションに要する固定費用を表すパラメータ，$\mathrm{p}_{ij\lambda}$ は，主体 i と主体 j を結ぶ交通ネットワーク上の経路に道路リンク λ が含まれる（$p_{ij\lambda} = 1$）か否（$\mathrm{p}_{ij\lambda} = 0$）かを表象する（ただし，$\mathrm{p}_{ij\lambda} = \mathrm{p}_{\lambda ij}, i = j$ のときは $\mathrm{p} = 0$）．t_λ は道路リンク λ を通過する際に発生する交通コストである．

準効用関数 (2) の最右項 $\theta \sum_{j=1}^{n} g_{ij} q_i q_j$ は，Ottaviano-Tabuchi-Thisse(2002)[3] の提案する関数中にはないものであるが，Helsley & Zenou(2011)[1] のモデルにおける効用関数で戦略的補完性を表す項 $\theta \sum g_{ij} v_i v_j$ のアイデアを踏襲している．$g_{ij} = 1$ であるような (i,j) の組に対して，主体 i と相手 j のそれぞれが友人・知人全員と行う交通-コミュニケーションの総和 q_i, q_j が，相補的に主体 i の効用に貢献することを表す．これは，「相手が自分以外の友人とも活発にコミュニケーションを行っている（すなわち q_{ji} だけではなく q_j が大きくな

る）ということが，その相手との単位あたりのコミュニケーションの質を高めるように作用し，主体 i の効用も増加する」という仮定を反映している．この仮定は，交流関係を，特定の相手に限らず多くの人々とコミュニケーションを行っている主体は，話題も情報も豊富で，交流する相手に質の高いコミュニケーションの機会を提供するという着想に基づく．

式 (1), (2) の効用最大化問題を解くことで，各主体が社会的ネットワーク上で直接つながりを持つ相手それぞれに対してどれほどの交通-コミュニケーションを需要するかがわかる．ここで得られる需要量は他の主体の行動を所与として同時手番的に決定されるものであり，Nash 均衡解であるといえる．

次節でその解を求める過程を示す．

(4) Nash 均衡解

式 (1) に準効用関数（式 (2)）および予算制約式 (3) を代入すると，1 階条件より

$$\frac{\partial U_i}{\partial q_{ij}} = (\alpha - p_T)g_{ij} - g_{ij}\left(\sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij}\right) - g_{ij}\left(\sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij}\right) - (\beta-\gamma) g_{ij}\bar{q}_{ij} - \gamma g_{ij}\sum_{j=1}^{n}\bar{q}_{ij} + \theta g_{ij} q_j$$

$$= g_{ij}\left\{\alpha - p_T - \sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij} + \sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij}\right) - (\beta-\gamma)\bar{q}_{ij} - \gamma \sum_{j=1}^{n}(\bar{q}_{ij}) + \theta q_j\right\} = 0 \quad (4)$$

これより，$g_{ij}=0$ のときは 1 階条件が常に成立し，そうでないとき，すなわち $g_{ij}=1$ のときは

$$(\beta-\gamma)\bar{q}_{ij} = \alpha - p_T - \sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij} + \sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij}\right) - \gamma \sum_{j=1}^{n}(\bar{q}_{ij}) + \theta q_j \quad (5)$$

が成り立つ必要がある．

上式を，q_{ij} に関する n^2 元連立 1 次方程式と見なしてベクトル形式で表記するにあたって，以下にいくつかの行列およびベクトルを定義する．

行列 $\mathbf{I}$ は単位行列である．社会的ネットワーク g を表す隣接行列 $\mathbf{G}$ を $n^2 \times n^2$ 正方行列 $\mathbf{G}_e = g_{zw}^{[xy]} (\forall x, \forall y, \forall z, \forall w = 1, \cdots, n)$ に拡張する．

$$g_{zw}^{[xy]} = \begin{cases} 1 & (\text{if } x = y = i, z = w = j \text{ and } g_{ij} = 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

行列 $\mathbf{G_e}$ と同様に，$n^2 \times n^2$ 行列 $\mathbf{B}$ の左から x 番目，上から y 番目の $n \times n$ 小行列の (z, w) 要素を $b_{zw}^{[xy]}$ と表記する（後述の行列 $\mathbf{D}, \mathbf{E}$ に関しても同様に $d_{zw}^{[xy]}$，$e_{zw}^{[xy]}$ とする）と，

$$b_{zw}^{[xy]} = \begin{cases} 1 & (\text{ if } z = y \text{ and } w = x) \\ 0 & (\text{ otherwise}) \end{cases},$$

すなわち，$(1,1)$ 小行列の $(1,1)$ 成分，$(2,1)$ 小行列の $(1,2)$ 成分，$(3,1)$ 小行列の $(1,3)$ 成分，... ，$(n, n-1)$ 小行列の $(n-1, n)$ 成分，(n, n) 小行列の (n, n) 成分は 1，その他の成分はすべて 0 である．$d_{zw}^{[xy]}$，$e_{zw}^{[xy]}$ については，

$$d_{zw}^{[xy]} = \begin{cases} 1 & (\text{ if } x = y \text{ }) \\ 0 & (\text{ otherwise }) \end{cases},$$

また

$$e_{zw}^{[xy]} = \begin{cases} 1 & (\text{ if } z = y \text{ }) \\ 0 & (\text{ otherwise }) \end{cases}$$

である．$n^2 \times n^2$ 行列 $\mathbf{D}$ の対角に位置する小行列の成分はすべて 1，その他の成分は 0 であり，同じく $n^2 \times n^2$ 行列 $\mathbf{E}$ は，$(1, y), (2, y), ..., (n, y)$ 小行列の y 行成分はすべて 1，残りの成分はすべて 0 であるような行列である．また前節で定義した通り，$\mathbf{P} = [\mathrm{p}_{\lambda ij}]$ を $\lambda \times n^2$ 行列，$\lambda \times \lambda$ 行列 $\mathbf{C}(\mathbf{t})$ は $t_a, \cdots, t_\lambda$ を対角成分に持つ対角行列とし，$\mathbf{1}$ は成分がすべて 1 であるような列ベクトルとする．$g_{ij} \neq 0$ であるような (i, j) について，

$$(\beta-\gamma)(g_{ij}q_{ij} + g_{ji}q_{ji}) = \alpha - p_T - \sum_{\lambda=a}^{\phi} \mathrm{p}_{ij\lambda} t_\lambda \left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij} + \sum_{j=1}^{n} \mathrm{p}_{\lambda ij} g_{ij} q_{ij}\right) - \gamma \sum_{j=1}^{n}(g_{ij}q_{ij} + g_{ji}q_{ji}) + \theta q_j$$

より，これを行列表記すると，

$$(\beta-\gamma)(\mathbf{I}+\mathbf{B})\mathbf{G}_e\mathbf{q} = (\alpha - p_T)\mathbf{1} - \mathbf{P}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{t})\mathbf{P}(\mathbf{I}+\mathbf{D})\mathbf{G}_e\mathbf{q} - \gamma(\mathbf{D}+\mathbf{E}^{\mathrm{T}})\mathbf{G}_e\mathbf{q} + \theta\mathbf{E}\mathbf{G}_e\mathbf{q}$$

$$\therefore\ \mathbf{G}_e\mathbf{q} = \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\beta-\gamma}\mathbf{P}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{t})\mathbf{P}(\mathbf{I}+\mathbf{D}) + \mathbf{B} + \frac{\gamma}{\beta-\gamma}(\mathbf{D}+\mathbf{E}^{\mathrm{T}}) - \frac{\theta}{\beta-\gamma}\mathbf{E}\right)^{-1} \frac{\alpha - p_T}{\beta-\gamma}\mathbf{1} \quad (6)$$

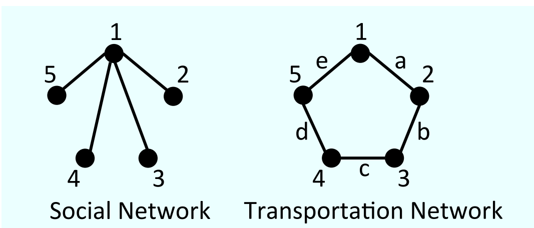
となる．ただし，以上の計算過程においては $q_{ij}=0$ としているために，式 (6) は $q_{ij}=1$ である (i, j) のみに限定する形で対応することに留意する必要がある．

式 (6) より，交通-コミュニケーション需要は，道路ネットワークによる空間的条件および社会的ネットワー

ク構造の両方の影響を受けて決定される．各主体の交通需要は，空間的立地条件と社会的なポジションを所与として Nash 均衡解として求まることがわかる．式 (6) は，定数項に相当する $\dfrac{\alpha - p_T}{\beta - \gamma}\mathbf{1}$ に左側から社会的ネットワークの構造を反映する $\mathbf{I} - \dfrac{\theta}{\beta - \gamma}\mathbf{E}$ の逆行列をかけた形になっており，これは Helsley & Zenou[1)] で示される Katz-bonacich 中心性を求める式に準ずる．さらに，$\dfrac{1}{\beta - \gamma}\mathbf{P}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{t})\mathbf{P}(\mathbf{I} + \mathbf{D})$ の部分が交通費用と混雑による影響，$\mathbf{B} + \dfrac{\gamma}{\beta - \gamma}(\mathbf{D} + \mathbf{E}^{\mathrm{T}})$ が多様性選好の影響を，それぞれ反映する形になっている．よって，各交通リンクのコスト，交流相手に関する多様性選好，および交通量に対する戦略的相補性を考慮することで，交通需要 q_i や効用 u_i の変化および大小関係の多くを説明できる．仮定したこれらの性質を投影しつつ，行列計算により解析的に Nash 均衡解が得られる．また，交通リンクごとの交通量を計算すると，交通ネットワークが全く同一でも社会的ネットワークの違いによって混雑が大きい交通リンクと，そうでないものとの差が拡大することがわかる．混雑現象が観測される場合，背景に交通環境以外の要因が存在する可能性が示唆される．

4. 数値解析

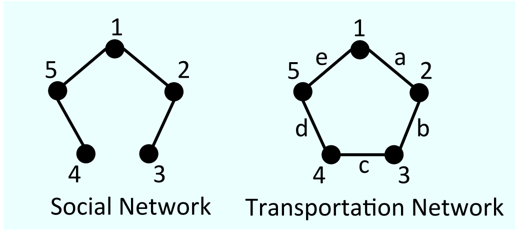
第 3 章 (4) で得られた解を，以下のような簡単な例について適用し，数値計算結果を示す．Case 1（図 1）と Case 2（図 2）は，共に 5 人の主体 $1, \cdots, 5$ と 5 本の交通リンク $a, \cdots, e$ からなる経済環境である．それぞれ同一の交通ネットワークに対して相異なる社会的ネットワークを想定しており，前者は主体 1 が社会的に最も中心的な存在であり，後者は比較的中心性が分散した形状である．



図–1 Ex. 1: Social Network / Transportation Network

Transportation Network（交通ネットワーク）をレーストラック型にすることで，交通経路の選択肢がほとんど自動的に唯一に決定されるような設定とした．各 OD ペアに対して，利用する交通経路をあらかじめ定めたものに限る，という本研究の仮定は恣意的な要素が大きいことは否定し難く，今後の課題の一つである．

交通-コミュニケーション需要 q_{ij} および各主体の準



図–2 Ex. 2: Social Network / Transportation Network

効用 u_i は下表 2 のような結果となった．なお，いずれのケースにおいても $q_{ii} = 0, i = 1, \cdots, 5$ は自明のものとして割愛している．また，各パラメータの値には Case 1, Case 2 とも表 1 の値を用いた．

表–1 パラメータ値

α	β	γ	p_T	t_a	t_b	t_c	t_d	t_e	θ
50	30	0.01	1	1	1	1	1	1	0.15

表–2 数値計算結果—各主体の交通量と効用

		Case 1		Case 2	
			$\sum_{j=1}^{5} q_{ij}$		$\sum_{j=1}^{5} q_{ij}$
q_1	q_{12}	0.276		0.583	
	q_{13}	0.158	0.869	0	1.166
(u_1)	q_{14}	0.158	(161.2)	0	(82.98)
	q_{15}	0.276		0.583	
q_2	q_{21}	1.137		0.927	
	q_{23}	0	1.137	0.240	1.167
(u_2)	q_{24}	0	(40.85)	0	(82.99)
	q_{25}	0		0	
q_3	q_{31}	1.144		0	
	q_{32}	0	1.144	1.268	1.268
(u_3)	q_{34}	0	(39.83)	0	(41.51)
	q_{35}	0		0	
q_4	q_{41}	1.144		0	
	q_{42}	0	1.144	0	1.268
(u_4)	q_{43}	0	(39.83)	0	(41.51)
	q_{45}	0		1.268	
q_5	q_{51}	1.137		0.927	
	q_{52}	0	1.137	0	1.167
(u_5)	q_{53}	0	(40.85)	0	(82.99)
	q_{54}	0		0.240	
$\sum_{i=1}^{5} q_i$			5.432		6.036
($W = \sum_{i=1}^{5} u_i$)			(322.6)		(331.99)

また表 3 は，表 2 の結果を $\bar{q}_{ij} = q_{ij} + q_{ji}$ のタームで整理し直したものである．コミュニケーションの消費量，という観点から結果を分析する上では，q_{ij} すなわち自らの発信量のみならず，相手が自分の元を訪問し

て達成されるコミュニケーションも加えた $q_{ij}+q_{ji}$ の量で比較することが重要である．

表–3 数値計算結果—各主体の相互交流量と効用

i	j	Case 1 $\bar{q}_{ij}$	Case 1 $\sum_{j=1}^{5}\bar{q}_{ij}$ (u_i)	Case 2 $\bar{q}_{ij}$	Case 2 $\sum_{j=1}^{5}\bar{q}_{ij}$ (u_i)
1	2	1.413	5.432 (161.2)	1.511	3.021 (82.98)
	3	1.303		0	
	4	1.303		0	
	5	1.413		1.511	
2	1	1.413	1.413 (40.85)	1.511	3.018 (82.99)
	3	0		1.508	
	4	0		0	
	5	0		0	
3	1	1.303	1.303 (39.83)	0	1.508 (41.51)
	2	0		1.508	
	4	0		0	
	5	0		0	
4	1	1.303	1.303 (39.83)	0	1.508 (41.51)
	2	0		0	
	3	0		0	
	5	0		1.508	
5	1	1.413	1.413 (40.85)	1.511	3.018 (82.99)
	2	0		0	
	3	0		0	
	4	0		1.508	
$\sum_{i=1}^{5} q_i$ ($W=\sum_{i=1}^{5} u_i$)			5.432 (322.6)		6.036 (331.99)

コミュニケーション需要 q_{ij} とそれから得られる効用 u_i，およびそれらの変化について，以下のことがいえる．

- 主体 i が交流相手 j と行う交流活動を構成する q_{ij}（主体 $i\rightarrow$ 相手 j への交通行動）と q_{ji}（相手 $j\rightarrow$ 自分 i への交通行動）の大小関係，また主体間の準効用の大小関係は，社会的ネットワークにおける中心性に従うとは限らない（ここでの中心性は Bonacich 中心性[4)]を指す）．各 Case について，Bonacich 中心性の大小関係は，Case 1 では 主体 $1>2=3=4=5$，Case 2 では 主体 $1>2=5>3=4$ である）．
- 中心性が一人の主体のみ高い水準である Case 1 においては，主体 1 の交通需要は他の主体と比べて少なく，主体 1 のもとに他の主体から発信されるコミュニケーション行動が集中する．他方 Case 2 においては，主体 1 と主体 2, 5 は交通-コミュニケーション需要 q_{ij} も効用水準 u_i も非常に近い値であり，中心性が分散するときにコミュニケーション行動も分散化している．
- 混雑がコミュニケーション需要や効用に影響するといえる．これは，表 3 Case 2 より，中心性の観点では中程度の存在である主体 2, 5 が，わずかにではあるものの主体 1 よりも多くの交通-コミュニケーションを達成し，高い水準の効用を得ていることから示唆される．
- 社会的厚生 $W=\sum u_i$ は経済全体の交通需要に対応しており，コミュニケーション活動が活発な社会がより望ましいといえる．

5. おわりに

本研究では，社会的ネットワークと交通ネットワークを同時に考慮することで，交通需要を本源的な動機から捉えるモデルを構築し，解析的に解を得た．さらに数値計算により，社会的ネットワークが OD 交通需要に大きく影響する過程を確認した．また，解の安定性の確認・Wardrop 均衡の概念の導入・二種類のネットワークに同時に言及する中心性指標の提案といったモデルの精緻化，両ネットワークの動的な相互関係の記述，社会的ネットワークの成長の内生化は，今後の課題である．

参考文献

1) Helsley, R. W. and Zenou, Y. (2002). *Social Networks and Interactions in Cities*, CEPR Discussion Paper No. 8244.
2) 井料隆雅, 岡崎有吏子, 朝倉康夫：社会ネットワークとゲーム理論による交通需要のモデリング, 土木計画学研究発表会・講演集, 41, 2010: CD-ROM.
3) Ottaviano, G., Tabuchi, T. and Thisse, J. F. (2002). *Agglomeration and Trade Revisited*, International Economic Review, Vol.43, No. 2, pp. 409-435.
4) 例えば，Jackson, M.O.(2008). *Social and Economic Networks.* Princeton: Princeton University Press.

(平成 24 年 5 月 7 日 受付)

A THEORETICAL ANALYSIS OF TRAVEL DEMAND ORIGINATED WITH SOCIAL NETWORKS

Toshimori Otazawa and Yuki OHIRA

Social networks affect activity-travel behavior. People and firms make trips in order to have the face-to-face communications with friends and business partners who are embedded in social networks. Their locations in geographical space also affect activity-travel behavior. Physical proximity enhances joint activeties of agents and increase frequency of traveling each other. In this paper, we incorporate both social and transportation networks into equilibrium model of social interactions and examine how activity-travel behavior depends on topology of these networks. By analyzing the model and conducting simple simulations, it is revealed that both networks greatly influences on agents' travel demand.