

コミュニケーションと政策の実現可能性 ～社会ネットワークの観点から

大平 悠季¹・松井 宏樹²・織田澤 利守³

¹正会員 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 680-8550 鳥取市湖南町 4-101)

E-mail: ohira@sse.tottori-u.ac.jp

²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: 164t135t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学准教授 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

本研究では、社会ネットワークと個人のコミュニケーション行動選択とを関連づけた Helsley & Zenou (2014) の提案する枠組みを拡張し、交通政策・都市政策について検討する。2 地域からなる都市空間上で、社会ネットワーク上でつながりを持つ主体同士が都心のミーティング施設を訪問することによってコミュニケーションを行う状況を想定し、システム全体としての均衡における主体間のコミュニケーション水準を解析的に導出する。その際に交通混雑を考慮し、最善政策および政策代替案について検討する。最善政策の実施に必要な私的情報が入手困難であることを指摘し、次善政策の提案に際しては、政府の情報利用可能性に言及する。社会ネットワーク情報を用いない逐次的な政策によって、長期的に社会的最適状態を達成し得ることを示す。

Key Words : social network, social interactions, traffic congestion, social externality, evolutionary implementation of optimal toll scheme

1. 背景と目的

知識社会と呼ばれる現代社会において、コミュニケーションの担う役割は、その重要性を一層増しつつある¹⁾。特に、フェイス・ツウ・フェイスのコミュニケーションを通じて行われる高度な知識や技術の交換と、それをベースにした創造的な活動は、社会の発展の原動力となっている。都市に多様な主体が集積するメリットの一つに、それぞれが保有している知識やアイデアの交換、およびそれをベースにした創造的な活動を容易に行える点が挙げられる³⁾。その一方で、都市には交通混雑のようなデメリットも存在する。交通現象に対しては、料金政策など膨大な政策研究が蓄積されており²⁾、交通混雑を対象とした主な施策は、限界費用原理に基づいてピグー混雑料金を課す混雑料金制度である。ただし Arnott²⁶⁾ が、集積の経済と交通混雑の 2 種類の外部性が存在する経済において、一方の外部性のみに着目した政策が非効率となる可能性を指摘しているように、何らかの市場に対する政策を実施する際は周辺市場への影響に注意を払う必要がある。本研究が着目するフェイス・ツウ・フェイスのコミュニケーション（対面形式の交流）には、自分以外の他の主体とも活発なコミュニケーションを行っている主体とのコミュニケーションからは限界的に高い効用が得られるという相乗効果（正の外部性）が存在する¹⁰⁾。同時に、フェ

イス・ツウ・フェイスによる交流は交通行動を伴うため、交通混雑の負の外部性をも内包している。

本研究は、高度なコミュニケーションが活発に行われる社会を実現するための政策的検討を行う。具体的には、社会ネットワークと個人のコミュニケーション行動選択とを関連づけた Helsley & Zenou (2014) の提案する枠組みを拡張し、交通政策・都市政策について検討する。2 地域からなる都市空間上で、社会ネットワーク上でつながりを持つ主体同士が都心のミーティング施設を訪問することによってコミュニケーションを行う状況を想定し、システム全体としての均衡における主体間のコミュニケーション水準を解析的に導出する。その際に交通混雑を考慮し、最善政策を規定する。その上で、最善政策が社会ネットワークの完全情報の利用を前提とするものである点を指摘し、次善政策の提案に際しては、政府の情報入手可能性に言及する。提案モデルをポテンシャルゲームとして解釈し、社会ネットワーク情報を用いない逐次的な料金政策によって、長期的に社会的最適状態を達成し得ることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2. では、関連する既存研究の整理に基づいて本研究の位置づけを述べる。3. で主体のコミュニケーション行動のモデルを定式化し、立地を外生とした下で、各主体の私的な最適化行動の結果として達成される均衡コミュニケーション水

準を導出する。さらに、4. で社会的最適化問題を定義し、社会的に最適なコミュニケーション水準を導出した上で、最善政策を検討する。5. では政策実行上の情報の入手可能性に言及し、社会ネットワークの情報を扱うことなく実行可能な政策が、社会を長期的に社会的最適に導くことが出来ることを明らかにする。6. にてまとめと今後の展望について述べる。

2. 既存研究と本研究の位置づけ

社会ネットワークにおける主体の位置とその合理的な行動選択とを関連づけた既存研究には Ballester et al.²⁰⁾がある。Helsley & Zenou²¹⁾は、Ballester et al. に地理的空間を導入し、都市への訪問行動および立地選択を社会ネットワークの観点から分析している。ただし、ここでは交通混雑は考慮されておらず、都市経済におけるコミュニケーション行動に対する政策的検討を行う上では不十分な枠組みに留まっている。

均衡状態が社会的最適と比較して非効率であるとき、両者の乖離を解消するための政策が必要となる。Helsley & Zenou²¹⁾は、コミュニケーションの正の外部性をファーストベストな補助金によって内部化する最善政策を提案している。この政策は、政府が社会ネットワークの完全情報を入手した上で、個々人に対して社会ネットワーク上の位置に応じて異なる値の補助金を与える提案である。社会ネットワークは私的情報であるため、Helsley & Zenou が自ら指摘するように、最善政策実施は困難であると言わざるを得ない。これに対し、Sandholm²⁸⁾はポテンシャルゲームとして記述されるゲームに社会的最適の「進化的遂行」を導入している。進化的遂行とは、ある状況に対してすぐに (1-shot で) 社会的最適を達成しようとするのではなく、每期、その期に実現した状態に応じて経済を刺激しながら、長期的に最適状態を達成しようとするものである。Fujishima²⁹⁾は、社会的最適の進化的遂行を都市システムモデルに適用し、人口移動動学の下で大域的に最適な人口分布が安定的に実現することを示している。その際、情報の入手可能性に言及し、政府の知りえない私的情報を用いずに実行可能な政策を提案している。

本研究では、Helsley & Zenou に交通混雑を導入して拡張し、交通政策について検討する。コミュニケーション行動に内在する正の外部性に着目し、さらに社会ネットワークによって規定される主体間の異質性を考慮して、都市におけるコミュニケーションの外部性 (戦略的補完性) と混雑との関係を分析し、政策的検討を行う。ここで、本モデルがポテンシャルゲームの構造を有している点に着目し、Sandholm の提案する社会的最適の進化的遂行を援用して、社会ネットワークに関する情

報に依存せずに実行可能な政策が長期的に社会的最適に収束することを示す。

3. 混雑を考慮した 2 地域モデル

(1) 環境設定

$N = \{1, \dots, n\}$ ($n \geq 2$) を有限な数の主体の集合とする。主体をノード、主体間のつながりをリンクとする社会ネットワーク g を、隣接行列 $\mathbf{G} = [g_{ij}]$ を用いて表す。ただし、隣接行列の要素 g_{ij} ($i, j \in N$) は、主体 i と j の間にリンクが存在する場合は 1、存在しない場合は 0 である。すなわち、

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{if agents } i \text{ and } j \text{ are directly connected}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

である。なお、コミュニケーションは双方向的に行われるものとし、 $g_{ij} = 1$ であれば $g_{ji} = 1$ であるとする。また、 $g_{ii} = 0$ とする。したがって、 \mathbf{G} は、対角成分に 0 を持つ (0, 1) 対称行列である。なお、 $g_{ij} = g_{ji} = 1$ を満たす 2 主体 i, j のペア (リンク) の集合を E とし、社会ネットワーク g を $g = \langle N, E \rangle$ と表す。例えば、図-1 のような社会ネットワーク g であれば、対応する隣接行列 \mathbf{G} は次のようになる。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

地理空間は中心地 C (Center) と郊外 \mathcal{P} (Periphery) の 2 地域から構成され、2 地域間の距離は 1 に正規化する。主体は中心地または郊外のいずれかの地域に立地し、中心地に存在するミーティング施設を訪問して他の主体とフェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーションを行うことによって効用を獲得する。主体 i ($i = 1, \dots, n$) の立地点を、中心地 C からの距離 $x_i \in \{0, 1\}$ を用いて表し、次式のように定義する。

$$x_i = \begin{cases} 0 & (\text{if agent } i \text{ locates in } C) \\ 1 & (\text{if agent } i \text{ locates in } \mathcal{P}) \end{cases} \quad (2)$$

n 主体の立地点 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ は外生的に与えられるものとする。中心地 C に立地する主体数を n_c 、郊外 \mathcal{P} に立地する主体数を $n_p = n - n_c$ とおく。主体は、他の主体とのミーティングを行うためにミーティング施設を訪問し、その度に自身の立地点 x_i に応じて交通費用を支払う。交通費用は地域 C (中心地) 内・地域間のそれぞれにおいて発生する。地域 C 内の交通費用はすべての主体が支払う一方、地域間交通費用は地域 \mathcal{P} に立地する主体のみが負担する。これらの 2 種類の交通に対して交通リンクは 1 つずつのみ存在し、地域 C 内交通リンクをリンク 1、地域間交通リンクをリンク 2 とする

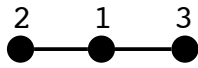


図-1: 例：社会ネットワーク $g = \{\{1, 2, 3\}, \{12, 13\}\}$

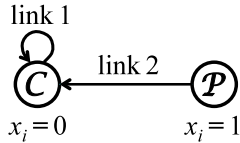


図-2: 地理空間

(図-2)．以上の設定の下で、主体間の社会的距離と地理的距離を同時に考慮した分析を行う。

(2) コミュニケーション行動の定式化

各主体は合成財の消費，社会ネットワーク上でつながり（リンク）をもつ他者とのフェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーションから効用を獲得する。主体 i ($i = 1, \dots, n$) が中心地から距離 x_i ($x_i = 0, 1$) の地点に立地するとき、主体 i の効用 U_i は次式の準線形効用関数によって表されるとする。

$$U_i(v_i, \mathbf{v}_{-i}, g) = z_i + u_i(v_i, \mathbf{v}_{-i}, g) \quad (3)$$

z_i は合成財消費量， $u_i(v_i, \mathbf{v}_{-i}, g)$ は中心地のミーティング施設への訪問を通じた他の主体との交流から獲得する部分効用を、それぞれ表している。 v_i は主体 i によるミーティング施設訪問回数（もしくは頻度）を、 \mathbf{v}_{-i} は $\{v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n\}$ の集合を意味する。なお、ここでは訪問回数をコミュニケーション水準の近似的指標として扱うこととする。主体 i が他の主体との交流から獲得する部分効用 u_i は、次式によって表す。

$$u_i(v_i, \mathbf{v}_{-i}, g) = \alpha v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j \quad (4)$$

α, θ はいずれも非負の定数パラメータである。式 (4) 右辺第 1 項および第 2 項は、主体 i が中心地を訪問すること自体から得る効用であり、第 3 項は他者とのコミュニケーションを通じて得られる相乗的効果を表す。第 1 項・第 2 項より、部分効用関数 u_i は強凸性を有する ($\partial^2 U_i / \partial v_i^2 < 0$) ことから、主体は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）を持つ。第 3 項はコミュニケーションを通じた主体間の相互依存関係を表しており、 θ はその強度を表すパラメータである。社会ネットワーク上でリンクを持つ主体の組 i, j ($g_{ij} = 1$) について、主体 i が j とのコミュニケーションによって得られ

る効用は、主体 i 自身のコミュニケーション水準 v_i および、当該の交流相手である j のコミュニケーション水準 v_j に依存して決まる。具体的には、コミュニケーションを通じた社会的外部効果として、交流相手が自分以外の主体ともより活発にコミュニケーションを行えば、その相手とのコミュニケーションによる限界的な効用が増加するという戦略的補完関係 ($\partial^2 U_i / (\partial v_i \cdot \partial v_j) = \theta > 0$ (for $g_{ij} = 1$)) を仮定している。第 3 項は、他者とのコミュニケーション活動を活発に行う主体には様々な知識や情報が集積し、その結果、そうした主体は交流相手に対して質の高いコミュニケーションの機会を提供するということを表現している。

また、予算制約は次式 (5) で表されるとする。

$$y = z_i + [p + t(x_i, \mathbf{v})] v_i \quad (5)$$

式 (5) において、 $p, t(x_i, \mathbf{v})$ はそれぞれ単位訪問あたりのフェイス・トゥ・フェイス・コミュニケーションに伴って発生する固定費用と交通費用を表す。本モデルでは p ($\alpha > p > 0$) は定数であるとし、時間制約は無視できる状況を想定する。交通費用は中心地と立地点との距離 x_i に依存する。さらに、本稿では交通混雑を考慮し、各交通リンクの交通費用は、当該リンクを利用する全主体のミーティング施設訪問回数に依存するものとする。ここではパラメータ $t_1, t_2 (\geq 0)$ を用いて、リンク 1, 2 の交通費用をそれぞれ

$$t_1 \sum_{j=1}^n v_j, \quad t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j \quad (6)$$

によって表される線形関数とする。 $t(x_i, \mathbf{v})$ はこれらの和であると仮定する¹。以降、 $t(x_i, \mathbf{v}) = t_i$ と表記する。

主体 $i (\in N)$ は、社会ネットワーク構造 g ならびに他主体のコミュニケーション需要 v_j ($\forall j = 1, \dots, n, j \neq i$) を与件として、自らの効用 U_i を最大とするように合成財消費量 z_i とフェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーション需要 v_i を決定する。本研究では、1. 式 (4) 第 3 項に表現したコミュニケーションの戦略的補完性、2. 予算制約 (5) における交通混雑の 2 種類の外部性に着目する。本研究は社会ネットワーク上で行われるコミュニケーション活動の性質に着目するため、コミュニケーション過程の詳細なモデル化は行わず、Helsley & Zenou によって提案された極めて簡潔なモデルを採用した。Helsley & Zenou モデルからの変更は、中心地内の交通を導入した上で交通混雑を考慮した点である。

¹ 均衡解の性質は、モデルの大域的な凸性に関する議論を通じて確認する (5. に詳説)。本研究では議論の見通しを良くするために、効用関数、リンク費用関数ともに、モデルの大域的な凸性が満たされるケースに限定して分析を進めた。一方、一般的な交通リンク費用関数である BPR 関数 $t(x) = \{1 + \alpha(x/C)^\beta\}$ (x : 交通量, C : 交通容量, α, β : パラメータ) において、 $\beta \equiv 1$ となるような推定結果も報告されており¹⁸⁾、本モデルはこのケースに該当すると解釈することも可能である。

(3) Nash 均衡解

各主体は、他の主体の行動を与件として効用最大化行動を行う。式 (3), (5) として定式化された最適化問題において他主体のコミュニケーション需要 v_j ($\forall j = 1, \dots, n, j \neq i$) に対する主体 i の最適応答関数は、

$$v_i^* = \alpha - p - t_1 \sum_{j=1}^n v_j^* - t_1 v_i^* - t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j^* - t_2 x_i^2 v_i^* + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j^* \quad (7)$$

と表すことができる。すべての i ($i = 1, \dots, n$) について式 (7) を導出し、連立して解くとコミュニケーション需要の Nash 均衡解を求めることができる。ここで、 \mathbf{A}, \mathbf{I} をそれぞれ、成分のすべてが 1 である n 次正方形行列および n 次列ベクトル、 \mathbf{X} を k 次対角成分が x_i である n 次対角行列とすると

$$\mathbf{v} = \alpha - t_1(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{v} - t_2\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{X}\mathbf{v} + \theta\mathbf{G}\mathbf{v} \quad (8)$$

となる。 \mathbf{I} は単位行列、 $\alpha = (\alpha - p) \cdot \mathbf{1}$ である。式 (8) を \mathbf{v} について解くと、Nash 均衡解 \mathbf{v}^* が唯一の内点解として得られる。

$$\mathbf{v}^* = [\mathbf{I} - \theta\mathbf{G} + t_1(\mathbf{I} + \mathbf{A}) + t_2\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{X}]^{-1} \cdot \alpha \quad (9)$$

以後、 $\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{G} - (t_1/\theta)(\mathbf{I} + \mathbf{A}) - (t_2/\theta)\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{X}$ 、 $\tilde{\mathbf{M}} = [\mathbf{I} - \theta\tilde{\mathbf{G}}]^{-1}$ と書くこととする。逆行列 $\tilde{\mathbf{M}}$ の存在条件は付録 I を参照されたい。式 (9) より、主体 i の Nash 均衡コミュニケーション水準は

$$\begin{aligned} v_i^*(x_i, \mathbf{x}_{-i}, g) &= \sum_{j=1}^n \tilde{m}_{ij} \cdot (\alpha - p) \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k \tilde{g}_{ij}^{[k]} \cdot (\alpha - p) \end{aligned} \quad (10)$$

と表せる (\mathbf{x}_{-i} : i を除いた $n-1$ 主体の立地点のベクトル)。式 (10) の右辺は、混雑費用を内包する隣接グラフ \tilde{g} におけるノード i の Katz-Bonacich 中心性 (付録 II を参照) に相当する表現である。すなわち、Nash 均衡における主体 i のコミュニケーション水準は、社会ネットワーク g に混雑費用を組み込んだ“混雑費用込みの社会ネットワーク” \tilde{g} 上での主体 i の中心性に一致する。よって、次の命題が導かれる。

命題 1

任意のネットワーク g および十分に小さい ($\theta\rho(\tilde{\mathbf{G}}) < 1$ を満たす) θ に対して、フェイス・ツウ・フェイスのコミュニケーション需要は、内生的な Nash 均衡解として求まる。均衡水準における主体 i ($\forall i \in N$) のミーティング施設訪問需要 v_i^* は、都市内混雑費用込みの社会ネットワーク \tilde{g} 上で、中心地への地理的近接性によって重み付けされたノード i の Katz-Bonacich 中心性と等しい。

均衡コミュニケーション水準 $v_i^*(x_i, \mathbf{x}_{-i}, g)$ が、各パラメータの大きさによってどのように変化するかを考えたい。式 (10) より明らかに、 $v_i^*(x_i, \mathbf{x}_{-i}, g)$ は α に関して

増加する一方で、ミーティングの固定費用 p に関しては減少する。また、社会ネットワークのリンク強度 θ に応じて増加することが分かる。

さらに、均衡における効用水準は次式のように書くことができる。

$$U_i^* = y + \left(\frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i^2\right) v_i^{*2} \quad (11)$$

以上から、 α の増加、 p の減少、 θ の増加の少なくともいずれか 1 つが起これば、主体の均衡効用水準 U_i^* は、増加するか少なくとも変化しないことがわかる。

以上の成果は、Helsley & Zenou と基本的に同様であるが、政策的検討を行うべく交通混雑を考慮できる枠組みに拡張した点が本研究の貢献である。

4. 社会的最適と最善政策

(1) 最適コミュニケーション需要

前章で導出した均衡需要 v_i^* および効用 U_i^* について、効率性の観点から分析を行う。社会厚生について、本研究ではベンサム型の社会厚生関数を採用することとすると、社会厚生関数 \mathcal{W} は、地代収入を考慮した上で

$$\mathcal{W} = \sum_{i=1}^n U_i \quad (12)$$

と表せる。ここでは社会厚生の最大化に関心をおくため、以下の最適化問題を解くことになる。

$$\max_{v_i (\forall i \in N)} \mathcal{W} = \max_{v_i (\forall i \in N)} \sum_{i=1}^n U_i \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &= \max_{v_i (\forall i \in N)} \sum_{i=1}^n \left\{ y - [p + t(x_i, \mathbf{v})] v_i \right. \\ &\quad \left. + \alpha v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

1 階条件より、任意の i について

$$\alpha - p - 2t_1 \sum_{j=1}^n v_j - 2t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j - v_i + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j = 0 \quad (15)$$

が満たされている必要がある。これより、

$$v_i^O = \alpha - p - 2t_1 \sum_{j=1}^n v_j^O - 2t_2 \sum_{j=1}^n x_j v_j^O + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j^O \quad (16)$$

が成立する。社会厚生最大化問題の解の存在条件は、 $\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{G} - (t_1/\theta)\mathbf{A} - (t_2/\theta)\mathbf{XAX}$ とおくと $2\theta\rho(\tilde{\mathbf{G}}) < 1$ より得られる。ただし、 $\rho(\tilde{\mathbf{G}})$ は $\tilde{\mathbf{G}}$ の固有値の絶対値の最大値である ($\tilde{\lambda}_i$ ($i = 1, 2, \dots$) を $\tilde{\mathbf{G}}$ の固有値とすると、 $\rho(\tilde{\mathbf{G}}) = \max_i |\tilde{\lambda}_i|$)。式 (7) と比較すると、最適なコミュニケーション需要 v_i^O と均衡需要 v_i^* との関係は

$$v_i^O = v_i^* - \sum_{j=1, j \neq i}^n t_1 v_j - t_2 \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \quad (17)$$

であり、Nash 均衡におけるコミュニケーション水準が非効率的であることがわかる。次節では、均衡需要 v_i^*

を最適水準に近付けるための混雑税政策及び補助金政策を考える。

(2) 最善料金政策

最適な水準のコミュニケーションを達成するために、各主体のミーティング施設への訪問に対する交通混雑税およびコミュニケーション補助金を考える。具体的には、主体 i による単位訪問あたりの交通リンク 1, 2 の利用に対しては、それぞれ混雑税

$$d_{1i}^O = t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j, \quad d_{2i}^O = t_2 x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j \quad (18)$$

を課し、同時に単位訪問あたりに達成されるコミュニケーションに対しては補助金：

$$s_i^O = \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \quad (19)$$

を与える政策を検討する。これらの料金政策の下で各主体が最大化する効用は、

$$\begin{aligned} U_i &= y - p v_i - t(x_i, \mathbf{v}) v_i - (d_{1i}^O + d_{2i}^O) v_i \\ &\quad + (\alpha + s_i^O) v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j \\ &= y - \left[p + t_1 \left(\sum_{j=1}^n v_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j \right) \right. \\ &\quad \left. + t_2 x_i \left(\sum_{j=1}^n x_j v_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j \right) \right] v_i \\ &\quad + \alpha v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j \quad (20) \end{aligned}$$

となる。式 (20) は、式 (18), (19) の混雑税・補助金政策の実施によって 2. の均衡モデルにおける外部効果がすべて内部化されていることを示している。最適混雑税政策および最適補助金政策を同時に適用した下での均衡コミュニケーション需要は、

$$\mathbf{v}^O = [\mathbf{I} - 2\theta \mathbf{G} + 2t_1 \mathbf{A} + 2t_2 \mathbf{XAX}]^{-1} \alpha$$

となる。このとき主体 i の効用 U_i^O は、効用 (式 (20)) 最大化の 1 階条件を用いて整理することにより

$$U_i^O = y + \left(\frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i \right) v_i^{O2} \quad (21)$$

と表せ、これは式 (11) と対応する。以上の結果は次のように要約される。

命題 2

Nash 均衡におけるフェイス・トゥ・フェイス・コミュニケーション需要 v_i^* は、社会的最適水準と比較して非効率的である。交通リンク 1, 2 の利用に対する単位あたりの訪問行動に対してそれぞれ $d_{1i}^O = t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j, d_{2i}^O = t_2 x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j$ の混雑税を課し、同時に単位あたりのコミュニケーションに $s_i^O = \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j$ に等しい補助金

を与えれば、混雑税・補助金政策下での均衡状態として社会的最適状態が達成される。

また、このときの社会厚生は、式 (21) に整理した各主体の効用、政府の混雑料金収入および補助金支出を考慮するため、次式ようになる。

$$\begin{aligned} \mathcal{W}^O &= \sum_{i=1}^{i=n} \left[U_i^O + d_{1i}^O v_i^O + d_{2i}^O x_i v_i^O - s_i^O v_i^O \right] \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} \left[y + \left(\frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i \right) v_i^{O2} \right. \\ &\quad \left. + t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j^O v_i^O - \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j^O v_i^O \right] \quad (22) \end{aligned}$$

5. ポテンシャルゲーム

(1) 均衡モデル

社会ネットワーク情報 $[g_{ij}]$ は私的情報であり、政府が入手することは困難である。そのため、 $\mathbf{G} = [g_{ij}]$ の情報の利用を前提としている前章の最善政策は、実現困難である。現実的な政策を提案する上では、私的情報を用いずに実行し得る政策を検討する必要がある。

非協力ゲームを用いた分析においては、Nash 均衡の導出・解析が主な関心の対象となるが、均衡の性質を調べるどころかその導出さえ困難な場合がしばしば存在する。Monderer & Shapley²⁷⁾ は、非協力ゲームにポテンシャルの概念を導入し、ポテンシャルをもつクラスの非協力ゲームをポテンシャルゲームと名付けた。ポテンシャルゲームの Nash 均衡は最適化問題と関連している。均衡の性質 (存在, 一意性, 安定性等) を知る上で最適化問題の知識を用いることができるため、ポテンシャルの分析を通じて、元の非協力ゲームの Nash 均衡の性質をより簡便に調べることが可能となる。Sandholm²⁸⁾ は、ポテンシャルゲームに対して社会的最適の進化的遂行を導入し、私的情報を用いない政策によって長期的に社会的最適状態を達成することを提案している。Fujishima²⁹⁾ はこれを都市システムモデルに適用し、政府が観測可能な価格と人口分布に基づいて実行可能な政策によって長期的に最適な人口分布が達成されることを示した。

本研究の提案するモデルは、すべてのプレイヤーが共通の利得関数をもつ同一利害ゲームの構造を有しており、 $\partial^2 U_i / \partial v_j \partial v_i = \partial^2 U_j / \partial v_i \partial v_j$ が成立することから、ポテンシャルゲームの必要十分条件を満足している。Sandholm の枠組を援用するにあたって、本モデルがポテンシャルゲームとして再定式化できることに着目し、社会ネットワーク情報を用いずに社会的最適状態を達成するための政策を提案する。

利得関数が 2 回連続微分可能であるような戦略型ゲーム $(g_i)_{i \in N}$ を考える。このようなゲームがポテンシャル

ゲームであるための必要十分条件は,

$$\frac{\partial^2 g_i}{\partial a_i \partial a_i} = \frac{\partial^2 g_j}{\partial a_i \partial a_j} \quad (i, j \in N) \quad (23)$$

が成り立つことである.

式 (3) で定義した効用関数は, 2 回連続微分可能である. 本モデルをプレイヤー集合 N , 戦略空間 $V = \prod_{i \in N} V_i$ ($V_i = \mathbb{R}_+$ はプレイヤー $i \in N$ の戦略集合), ならびに利得関数 U_i からなる同一利害ゲームとして再解釈すると,

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial v_j \partial v_i} = \frac{\partial^2 U_j}{\partial v_i \partial v_j} = \theta g_{ij} - t_1 - t_2 x_i x_j \quad (\forall i, j \in N) \quad (24)$$

より本ゲームはポテンシャルゲームである. ポテンシャル関数 f は, 例えば

$$f = \sum_{k=1}^n \left\{ \alpha v_k - \frac{1}{2} v_k^2 + \frac{\theta}{2} \sum_{j=1}^n g_{kj} v_k v_j - \left[p + \frac{t_1}{2} \left(v_k + \sum_{j=1}^n v_j \right) + \frac{t_2}{2} \left(x_k^2 v_k + x_k \sum_{j=1}^n x_j v_j \right) \right] v_k \right\} \quad (25)$$

より与えられる.

ポテンシャルゲームの Nash 均衡は, ポテンシャル関数 f の局所最適解である. f が狭義凹関数であれば, f の局所最適解 (1 階条件を満たす戦略の組) は, 大域的最適値に一致する. したがって, 狭義凹ポテンシャルゲームの Nash 均衡は一意である. ポテンシャル f の狭義凹性を確認するためには, ポテンシャルのヘッセ行列 $\mathbf{H} = \nabla^2 f$ の固有値がすべて負 (複素数の場合は, 実部が負) であることを示せば良い. ここで

$$\frac{\partial^2 f}{\partial v_i^2} = -1 - 2t_1 - 2t_2 x_i^2 \quad (\forall i \in N) \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial v_i \partial v_j} = \theta g_{ij} - t_1 - t_2 x_i x_j \quad (\forall i, j \in N, i \neq j) \quad (27)$$

より, $\mathbf{H} = \theta \bar{\mathbf{G}} - \mathbf{I}$ である. よって, $\bar{\mathbf{G}}$ の固有値を $\bar{\lambda}_i$ ($\forall i = 1, 2, \dots$) とおくと, \mathbf{H} のすべての固有値について $\theta \bar{\lambda}_i - 1 < 0$ が成立するとき, ポテンシャル f は凹関数である. この条件は, Nash 均衡が存在する条件 (付録 I に詳説) $\theta \rho(\bar{\mathbf{G}}) < 1$ の範囲では常に成立する. 以上から, 式 (25) をポテンシャルにもつ本ゲームにおいて Nash 均衡が存在するとき, これは唯一の Nash 均衡である.

(2) 社会的最適の進化的遂行 (A): 社会ネットワーク構造が既知の場合 (ファースト・ベスト政策)

均衡問題に続いて, 社会的最適を考える. ここでは, 政府が各期² に実現した交通量 (ミーティング施設訪問水準) に基づいて最善政策 (混雑税 d_{1i}^0, d_{2i}^0 および補助金 s_i^0) を実施 (ファースト・ベスト政策と呼ぶ) し, それに対して每期ランダムに選ばれた 1 主体が, その

² 動学では連続的な時間を考えるため, 「期」という言葉は正確ではないが, 説明の便宜上この語法を用いることとする. 次節以降も同様.

政策に対して行動を変更するチャンスを与えられるような動学 (Better Response Dynamics) を考える. この主体は, 他の主体の戦略を所与として自分の利得が最も高くなる (best response) か, 少なくとも現在より高くなる (better response) 戦略を選択するため, 経済は, 長期的な到達点において初期状態よりも改善する³¹⁾.

政府がファースト・ベスト政策 $d_{1i}^0, d_{2i}^0, s_i^0$ を実施した場合の各主体の最適反応は, 社会厚生を最大化する. このことは, 式 (15) と式 (20) の 1 階条件との比較により確認できる. 社会厚生最大化問題のポテンシャル関数を f_1 とすると, f_1 は次のように書くことができる.

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \left\{ y - [p + t(x_i, \mathbf{v}) + d_{1i} + d_{2i}] v_i + (\alpha + s_i) v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j \right\} \quad (28)$$

これは社会厚生関数と一致する. よって, ファースト・ベスト政策下のゲームは (12) をポテンシャル関数にもつポテンシャルゲームであることが確認できる. さらに, ポテンシャル関数 \mathcal{W} のヘッシアン $\mathbf{H}^{\mathcal{W}} = \nabla^2 \mathcal{W}$ は,

$$\frac{\partial^2 \mathcal{W}}{\partial v_i^2} = -1 - 2t_1 - 2t_2 x_i^2 \quad (\forall i \in N) \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 \mathcal{W}}{\partial v_i \partial v_j} = 2\theta g_{ij} - 2t_1 - 2t_2 x_i x_j \quad (\forall i, j \in N, i \neq j) \quad (30)$$

より $\mathbf{H}^{\mathcal{W}} = 2\theta \bar{\mathbf{G}} - \mathbf{I}$ と表される. $\bar{\mathbf{G}}$ の固有値 $\bar{\lambda}_i$ ($i = 1, 2, \dots$) に対して $\mathbf{H}^{\mathcal{W}}$ の固有値は $2\theta \bar{\lambda}_i - 1$ と表され, その内の最大であるものは少なくとも $2\theta \bar{\lambda}_1 < 1$ を満たす. よって, 社会厚生最大化問題 (14) の均衡解が存在する条件の下では, $\mathbf{H}^{\mathcal{W}}$ の固有値がすべて負となり, ポテンシャル \mathcal{W} の狭義凹性は満足される. したがって, 式 (14) に定義された社会厚生最大化問題の解が存在する範囲では, 最善政策 $d_{1i}^0, d_{2i}^0, s_i^0$ によって, ポテンシャル関数 \mathcal{W} の大域的最大解, すなわち唯一の社会的最適が安定的に到達可能となる. ただし, 社会ネットワークの情報の利用を前提としている最善政策 $d_{1i}^0, d_{2i}^0, s_i^0$ は実現が困難であるため, 社会厚生最大状態を達成する代替的な政策を検討する必要がある.

(3) 社会的最適の進化的遂行 (B): 社会ネットワーク構造が未知の場合 (セカンド・ベスト政策)

前節のファースト・ベスト政策を実施する上では, 政府は (a) 社会ネットワークの完全情報および (b) 非集計のコミュニケーション行動水準 v_i ($\forall i \in N$) を知る必要がある. 本研究では, 社会ネットワークに関する情報利用可能性を問題とするため, (b) は利用可能であるものの (a) は未知であるような状況を想定して政策代替案を検討する. 交通行動は, ETC の普及や交通系 IC カードの普及に伴ってミクロなレベルで観察可能になりつ

つあり、非集計の行動データを用いるという想定は現実的であると言える。

本節でも (2) 節と同様の Better Response ダイナミクスに基づき、政府が各期において経済を刺激しながら長期的に社会的最適を達成しようとする政策を考える。以下では、逐次的な料金政策（セカンド・ベスト政策と呼ぶ）によって、経済が長期的に到達する状態が前節の社会的最適状態と一致することを示す。

第 k 期において、政府はその期で観測されるコミュニケーション水準 $v_{1,k}, \dots, v_{n,k}$ に基づいて、下記のようなセカンド・ベスト政策を実行する。

- 主体 i ($\forall i \in N$) に、その期の限界外部交通費用 $t_1 \sum_{j \neq i} v_{j,k}$ および $t_2 x_i \sum_{j \neq i} x_j v_{j,k}$ に相当する金額 $\tau_{i,k}$ を、次期の混雑税として課す。
- 主体 i ($\forall i \in N$) に、その期の限界外部性 $\theta \sum_j g_{ij} v_{j,k}$ に相当する金額 $\sigma_{i,k}$ を、次期のコミュニケーション補助金として与える。

ただし、

$$\tau_{i,k} = t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_{j,k} + t_2 x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_{j,k} \quad (31)$$

$$\sigma_{i,k} = v_{i,k} - (\alpha - p - t_1 v_{i,k} - t_1 \sum_{j=1}^n v_{j,k} - t_2 x_i) \quad (32)$$

である。式 (32) に示す通り、コミュニケーション補助金を社会ネットワーク $[g_{ij}]$ の情報を用いずに決定する点が、この政策の特徴である。式 (7) からわかるように、この補助金は、均衡状態におけるコミュニケーションの外部性を匪襲型のコミュニケーション水準を用いて評価したものである。よって $\sigma_{i,k}$ は、均衡問題における効用最大化の 1 階条件が成立する場合に限りコミュニケーションの外部性に一致するが、ここで考える動学のほとんどの期において、これは成立しない。すなわち、厳密なコミュニケーション外部性と補助金額との間には「ずれ」が存在する。以降では、このようなずれを内包したセカンド・ベストな補助金政策の下でも社会的最適が長期的に遂行され得ることを示す。

セカンド・ベスト政策の下では、主体は混雑税および補助金の額を一定と見なして行動する。よって、この政策を実施した後の主体の行動は、

$$f_2 = \sum_{h=1}^n \left\{ \alpha v_{h,k} - \frac{1}{2} v_{h,k}^2 + \frac{\theta}{2} \sum_{j=1}^n g_{hj} v_{h,k} v_{j,k} + \sigma_{h,k-1} v_{h,k} - \left[p + \frac{t_1}{2} \left(v_{h,k} + \sum_{j=1}^n v_{j,k} \right) + t_2 x_i \left(v_{i,k} + \sum_{j=1}^n x_j v_{j,k} \right) + \tau_{h,k-1} \right] v_{h,k} \right\} \quad (33)$$

をポテンシャルにもつポテンシャルゲームである。ポテンシャル関数 f_2 のヘッセ行列が均衡ゲームのヘッセ

行列 $\mathbf{H} = \nabla^2 f$ と一致することから、 f_2 は $\theta \rho \bar{\mathbf{G}} < 1$ の範囲で狭義凹性を有している。よって、政策下のゲームの Nash 均衡は一意的かつ安定であり、ポテンシャルゲームの大域的最適解に一致する。

いま、ポテンシャルゲームの 1 階条件より

$$\begin{aligned} \sigma_{i,k} &= \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_{j,k} \\ &= v_{i,k} - \left[\alpha - p - t_1 \left(v_{i,k} + \sum_{j=1}^n v_{j,k} \right) - t_2 x_i \left(v_{i,k} + \sum_{j=1}^n x_j v_{j,k} \right) \right] + \tau_{i,k-1} - \sigma_{i,k-1} \end{aligned} \quad (34)$$

が成り立つ。ダイナミクスの不動点、すなわち長期的な定常状態においては $\tau_{i,k-1} = \tau_{i,k}$ および $\sigma_{i,k-1} = \sigma_{i,k}$ がそれぞれ成立する ($\forall i \in N$) ため、

$$\sigma_{i,k} = \frac{1}{2} \left\{ v_{i,k} - \left[\alpha - p - t_1 \left(v_{i,k} + \sum_j v_{j,k} \right) - t_2 x_i \left(v_{i,k} + \sum_{j=1}^n x_j v_{j,k} \right) \right] + \tau_{i,k} \right\} \quad (35)$$

がいえる。これを f_2 の均衡条件に代入すると

$$0 = \frac{1}{2} \left(\alpha - p - v_{i,k} - 2t_1 \sum_{j=1}^n v_{j,k} - 2t_2 \sum_{j=1}^n x_j v_{j,k} + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_{j,k} v_{i,k} \right) \quad (36)$$

となる。式 (36) は、社会厚生最大化問題の最適性条件と一致する。すなわち、限定的な情報に基づいて混雑税 τ_i および補助金 σ_i を逐次的に適用するセカンド・ベスト政策の下で、各プレイヤーがプレーするゲームの長期的な定常状態は、社会厚生最大化点に一致する。これらの結果より、次の命題が導ける。

命題 3

各時点において、観測される非集計行動データおよび主体の選好の情報によって規定されるセカンド・ベスト政策 $\tau_{i,k}, \sigma_{i,k}$ ($i = 1, 2, \dots$) を考える。均衡モデルおよび社会的最適モデルの各々において Nash 均衡が存在する条件 $\theta \rho((\bar{\mathbf{G}})) < 1, 2\theta \rho((\bar{\mathbf{G}})) < 1$ が成立する範囲内で、セカンド・ベスト政策は社会的最適を進化的に遂行する。

6. おわりに

本研究は、フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーション行動に内在する 2 種類の外部性に着目し、主体のミーティング施設訪問行動と社会ネットワークとの関連性を社会厚生観点から分析した。ファースト・ベストな混雑税およびコミュニケーション補助金を定義した上で、ファースト・ベスト政策は情報利用可能性の

観点から非現実的であることを指摘し、人々の私的情報（ここでは社会ネットワークに関する情報）を用いず実行可能な政策代替案を提案した。提案モデルをポテンシャルゲームとして再解釈することによって、社会ネットワークの情報を用いずに規定される逐次的な料金政策（セカンド・ベスト政策）の長期的な到達点が、社会的最適状態に一致することを示した。

今後の課題は以下の通りである。まず第一に、本モデルは分析の簡便性および見通しの良い議論を進めることを優先したために、利得関数、リンク費用関数とも非常に限定された関数型に対する分析に留まっている。これに伴って、本稿で提案したセカンド・ベスト政策は、非集計の行動データおよび主体の選好を政府が把握していることを前提としている。これらの仮定を緩和した、より一般的な設定での分析は、今後の重要な課題である。本モデルの拡張可能性として、1つには多地域からなる交通ネットワークへの拡張が考案げられる。社会ネットワークを明示的に考慮した本研究の枠組と既存の交通料金政策とを対応づけることによって、都市内に集積する多様な経済主体間の相互作用をより効率的かつ活発にするような交通政策が検討可能となる。さらに、立地選択の枠組に拡張し、立地政策等の都市政策の観点からも政策代替案を検討することによって、都市における集積現象に対してより多面的な示唆を得ることが期待される。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究 C(課題番号：25420547) の助成を受けて行った。ここに記して感謝する。

付録

I. 逆行列の存在条件

Corchòn and Mas-Colell²⁵⁾ に準拠すると、逆行列 $[\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1}$ が存在する必要十分条件は

$$\theta \cdot \rho(\mathbf{G}) < 1 \quad (37)$$

が満たされていることである。ここで $\rho(\mathbf{G})$ は、非負行列 \mathbf{G} の最大固有値の絶対値である。本稿で採用したモデリングに対しては

$$\begin{aligned} & \mathbf{I} - \theta\mathbf{G} + t_1(\mathbf{I} + \mathbf{A}) + t_2\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{X} \\ &= \mathbf{I} - \theta \left\{ \mathbf{G} - \frac{t_1}{\theta}(\mathbf{I} + \mathbf{A}) - \frac{t_2}{\theta}\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{X} \right\} \\ &= \mathbf{I} - \theta\bar{\mathbf{G}} \end{aligned} \quad (38)$$

について同様の条件を導出すればよく、

$$\theta \cdot \rho(\bar{\mathbf{G}}) < 1 \quad (39)$$

がこれに相当する（正方行列 $\bar{\mathbf{G}}$ は、式 (38) の定義より、対角成分に $-2t_1/\theta - 2t_2x_i^2/\theta$ 、非対角成分に $g_{ij} - (t_1/\theta) - (t_2x_i x_j/\theta)$ をもつ対称行列である）。

II. Bonacich 中心性²⁴⁾

ネットワーク分析において、ノード（点）の中心性や重要性を表す様々な指標が存在する。Bonacich 中心性は、ノードの中心性を当該ノードから発するすべてのパス（経路）の距離に応じた加重和によって表した指標であり⁶⁾、最近になってネットワーク・ゲーム理論の枠組みにおいて非常に有用であることが示されている²⁰⁾。 n 次隣接行列 \mathbf{G} を k 乗 (k は自然数) することによって得られる行列 \mathbf{G}^k はネットワーク中のノード間の間接的なつながりを再現する。 \mathbf{G}^k の要素 $g_{ij}^{[k]} \geq 0$ は、ネットワーク g において i から j へのパスの中で長さが k ($k \geq 1$) であるものの数を表す。また、 $\mathbf{G}^0 = \mathbf{I}$ である (\mathbf{I} は単位行列)。あるスカラー $\theta > 0$ とネットワーク g が与えられたとき、 θ が十分に小さければ、次のような行列 \mathbf{M} が定義できる。

$$\mathbf{M}(g, \theta) = [\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1} = \sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k \mathbf{G}^k$$

θ は、パスの相対的な重みをパス長に応じて減衰させるように作用するパラメータである。非負行列 $\mathbf{M}(g, \theta)$ の成分 $m_{ij}(g, \theta) = \sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k g_{ij}^{[k]}$ は、ネットワーク g におけるノード i から j へのパスで長さが k であるものの数を、 θ^k で重みづけして足し合わせたものである。なお、行列級数 $\sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k \mathbf{G}^k$ は、

$$\|\mathbf{G}\| < r = \liminf_{k \rightarrow \infty} |\theta^k|^{-1/k} = \frac{1}{\theta}$$

のとき、またこのときに限り収束する。ここで、 r は収束半径、 $\|\mathbf{G}\|$ は行列 \mathbf{G} のノルムである。このノルムは一般に \mathbf{G} のスペクトル半径と呼ばれ、 $\rho(\mathbf{G}) = \max_i |\Lambda_i|$ で表される (Λ_i は \mathbf{G} の固有値)。すなわち、 $\theta\rho(\mathbf{G}) < 1$ であれば前述の行列級数が収束し、行列 \mathbf{M} が定義できる。

定義 1 (Bonacich 中心性)

ネットワーク g 、 n 次隣接行列 \mathbf{G} および定数 θ を考える。これらを用いて非負行列 $\mathbf{M}(g, \theta) = [\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1}$ が定義できるとき、ネットワーク g におけるパラメータ θ に対する Bonacich 中心性ベクトル $\mathbf{b}(g, \theta)$ は

$$\mathbf{b}(g, \theta) = [\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1}\mathbf{1} \quad (40)$$

で与えられる。また、ノード i の Bonacich 中心性は行列 \mathbf{M} の第 i 行成分の和

$$b_i(g, \theta) = \sum_{j=1}^n m_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k g_{ij}^{[k]} \quad (41)$$

によって表される。

参考文献

- 1) 小林潔司 編著：知識社会と都市の発展，森北出版，1999.
- 2) 円山琢也：都市域における混雑課金の政策分析：レビューと展望，土木計画学研究・論文集 Vol.26, No.1, pp.15-32, 2009.
- 3) Duranton, G. and Puga, D. : Micro-foundations of Urban Agglomeration Economies, In: Henderson, J. V. and Thisse, J. F. (Ed.), *Handbook of Regional and Urban Economics*, Vol. 4, North Holland, pp. 2063-2117, 2004.
- 4) Storper, M. and Venables, A.J.: Buzz: face-to-face contact and urban economy, *Journal of Economic Geography*, Vol.4, pp.351-370, 2004.
- 5) Beckmann, M. J. : Spatial equilibrium in the dispersed city, In: Papageorgiou, G. J. (Ed.), *Mathematical Land Use Theory*, Lexington, MA: Lexington Books, pp. 117-125, 1976.
- 6) Jackson, M. O. : *Social and Economic Networks*, Princeton: Princeton University Press, 2008.
- 7) 金光淳：社会的ネットワーク分析の基礎—社会的関係資本論に向けて，勁草書房，2003.
- 8) 小林潔司：知識社会における交通行動：課題と展望，土木計画学研究・論文集，No. 12, pp.1-13, 1995.
- 9) 例えば，Marshall, A. : *Principles of Economics*, London: Macmillan, 1890.
- 10) Fujita, M. and Thisse, J. F. : *Economics of Agglomeration—Cities, Industrial Location, and Regional Growth*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 11) 高山雄貴，赤松隆：Beckmann 型都心創発モデルの均衡解の一意性と安定性，土木学会論文集 D, Vol.66, No.2, pp.232-245, 2010.
- 12) Mossay, P. and Picard, P.: On spatial equilibria in a social interaction model, *Journal of Economic Theory*, Vol. 146, Issue 6, pp. 2455-2477, 2011.
- 13) Helsley, R.W. and Strange, W.C. : Urban interactions and spatial structure, *Journal of Economic Geography*, pp. 1-20, 2007.
- 14) 小林潔司，福山敬，松島格也：フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーション過程に関する理論的研究，土木学会論文集，No. 590/IV-39, pp.11-22, 1998.
- 15) Jovanovic, B. and Rob, R. : The Growth and Diffusion of Knowledge, *Review of Economic Studies*, Vol. 56, pp. 569-582, 1989.
- 16) Berliant, M. and Fujita, M. : Knowledge Creation as a Square Dance on the Hilbert Cube, *International Economic Review*, Vol. 49, No. 4, pp. 1251-1295, 2008.
- 17) 閣議決定：日本再興戦略，pp. 79-86, 2013.
- 18) 例えば，吉田禎雄，原田昇：均衡配分用 BPR 式パラメータの推計，土木学会論文集 No. 695/IV-54, pp.91-102, 2002.
- 19) 塚井誠人，奥村誠：情報伝達の複雑性を考慮した通信と交通の情報交流分担モデル，土木学会論文集 No. 667/IV-50, pp.113-121, 2001.
- 20) Ballester, C., Calvò-Armengol, A. and Zenou, Y. : Who's who in networks. Wanted: The key player, *Econometrica*, Vol. 74, pp.1403-1417, 2006.
- 21) Helsley, R. W. and Zenou, Y. : Social Networks and Interactions in Cities, *Journal of Economic Theory*, Vol.z 150, pp.426-466, 2014.
- 22) Cabrales, A., Calvò-Armengol, A. and Zenou, Y. : Social Interactions and Spillovers, *Games and Economic Behavior*, Vol. 72, pp. 339-360, 2011.
- 23) 大平悠季，織田澤利守：社会的ネットワークに基づく対面コミュニケーション行動の理論モデル分析，土木学会論文集 D3, Vol.69, No.4, pp.300-314, 2013.
- 24) Bonacich, P. : Power and Centrality: A Family of Measures, *American Journal of Sociology*, Vol. 92, No. 5, pp. 1170-1182, 1987.
- 25) Corchòn, L. C. and Mas-Colell, A. : On the stability of best reply and gradient systems with applications to imperfectly competitive models, *Economics Letters*, Vol. 51, pp. 59-65, 1996.
- 26) Arnott, R.: Congestion tolling with agglomeration externalities, *Journal of Urban Economics*, Vol. 62, pp. 187-203, 2007.
- 27) Monderer, D. and Sharpley, L. S.: Potential games, *Games and Economic Behaviour*, Vol. 14, pp. 124-143, 1996.
- 28) Sandholm, W.H.: Evolutionary implementation and congestion pricing, *Review of Economic Studies*, 69, pp.667-689, 2002.
- 29) Fujishima, S.: Evolutionary implementation of optimal city size distributions, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.43, pp.404-410, 2013.
- 30) Hopfield, J.J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 79, pp.2554-2558, 1982.
- 31) Vega-Redondo, F.: *Economics and the theory of games*, Cambridge University Press, 2003.

Face-to-Face Communications and Political Feasibility: An Analysis Based on Social Network Theory

Yuki OHIRA , Hiroki MATSUI and Toshimori OTAZAWA

In this paper we extend Helsley & Zenou (2014)'s social interaction model and consider traffic congestions. Focusing on negative congestion externalities and positive communication externalities, we define the first-best congestion tax and subsidy on interactions. Since the first-best tax and subsidy policy could be difficult to implement because of difficulties in collection of information about social networks, we propose a second-best price scheme, in which informations about social networks are not required, that globally implements the social optimum. Our implementation analysis relies upon a potential game.