

# 社会ネットワークに基づく コミュニケーション行動と政策分析

大平 悠季<sup>1</sup>・織田澤 利守<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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: ohira@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>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 Hellsley & 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、各主体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。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を示し、ファースト・ベストな混雑料金およびコミュニケーションへの補助金を導出した上で、次善政策としての交通政策について数値分析を行う。

**Key Words** : social network, core-periphery model, traffic congestion, spatial interaction, social externality

## 1. はじめに

現代社会において、コミュニケーションが果たす役割の重要性に異論を差し挟む余地はほとんどないであろう<sup>1)</sup>。社会発展の原動力である革新的な概念や技術の多くは、高度な知識や技能を持つ主体同士によるコミュニケーションを通じた相互作用の産物といえる。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<sup>2)</sup>。通信技術が高度に発達した今日においても、主体同士が時間・空間を共にして行うフェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーションがもたらす生産性・創造性の豊かさは、他の交流手段をもって代え難い<sup>3)</sup>。

都市社会において行われる相互交流の水準は、距離に関する 2 つの概念に依存して決まる。1 つは地理的距離であり、いま 1 つは社会的距離である。相互にやり取りされる知識・情報が高度になれば、フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーション (face-to-face communication) がそれらを運ぶ重要な手段となる。対面形式によるコミュニケーションは交通を伴うため、必然的にその水準は地理的距離に依存する。地理的距離は人々や企業といった主体の空間的配置 (立地状況) とそれを取り巻く交通環境 (交通ネットワーク) によって決まる。一方、社会的距離とは、相互の信頼性や必要性、関連性の程度を指す概念である。特に、複雑に入り組んだ主

体間の関連性をグラフを用いて表現した社会的ネットワークは、社会学や人類学、組織論等といった幅広い学問分野において様々なレベルでの行為主体間の相互依存関係を理解する上で有益な枠組みを提供している<sup>5),6)</sup>。地理的距離と社会的距離は、人々や企業の行動選択を通じて互いに作用を及ぼし合いながら都市社会の有り様を決定づける。社会的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.<sup>17)</sup>がある。これは任意の構造を持つネットワーク内における相互依存関係を分析するための均衡モデルを提案するものであり、社会的ネットワークを対象とした応用的研究への可能性を開いた。Hellsley & Zenou<sup>18)</sup>は、Ballester et al. に物理的空間を導入し、都市への訪問行動および立地選択を社会的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、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。本研究では、Hellsley & Zenou に混雑を導入して拡張し、交通政策・都市政策について検討する。

本稿の構成は以下の通りである。2. では、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均衡コミュニケーション水準を導出する。3. では、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、最前政策と政策代替案を検討する。さらに数値例として、各政策シナリオを複数の社会ネットワークに対して適用した結果を示す。4. にてまとめと

今後の展望について述べる。

## 2. 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-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。

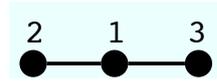


図-1: 例：社会ネットワーク  $g = \langle \{1, 2, 3\}, \{12, 13\} \rangle$

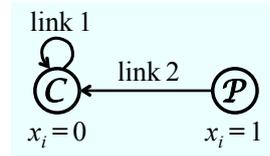


図-2: 地理空間

### (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、および土地消費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。

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

$z_i$  は合成財消費量、 $u_i(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{-i}, g)$  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、 $f(h_i)$  は土地消費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。 $h_i$  は主体  $i$  の消費するロットサイズを表し、土地は不在地主によって所有されるものとする。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。

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

$\alpha, \theta$  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の効果を表す。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、 $\theta$  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な外部効果として、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。

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

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・ツウ・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、交通費用は全主体のミーティング施設訪問回数  $\mathbf{v}$  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であり、 $t(x_i, \mathbf{v})$  はこれらの和であると仮定する。以降、 $t(x_i, \mathbf{v}) = t_i$  と表記する。 $R(x_i)$  は地点  $x_i$  の地代である。本稿では土地市場を明示的には考慮せず、立地費用  $R(x_i)$  を外生として扱う。

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・ツウ・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。コミュニケーションを通じた相互依存関係には様々な形態が存在し、これまでも多くのモデルが提案されている (例えば、ミーティングの形成過程を分析した小林<sup>13)</sup> や技術・アイデアの伝播過程に着目した Jovanovic & Rob<sup>14)</sup>、知識創造過程を扱った Berliant & Fujita<sup>15)</sup> など)。本研究では、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。

### (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、

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

と表すことができる ( $\because x_i = x_i^2$ )。すべての  $i (i = 1, \dots, n)$  について式 (7) を導出し、 $v_i$  について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、 $\mathbf{A}$  を成分のすべてが 1 である  $n$  次正方行列、 $\mathbf{X}$  を  $k$  次対角成分が  $x_k (k = 1, \dots, n)$  である  $n$  次対角行列とし、式 (7) を行列形式で表すと

$$[(1 + t_1)\mathbf{I} + t_2\mathbf{X}]\mathbf{v} = (\alpha - p)\mathbf{1} - t_1\mathbf{A}\mathbf{v} - t_2\mathbf{X} \cdot \mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{v} + \theta\mathbf{G}\mathbf{v} \quad (8)$$

となる。 $\mathbf{1}$  はすべての成分が 1 である列ベクトル、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。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 (逆行行列  $[\mathbf{I} - \theta\mathbf{G} + t_1(\mathbf{I} + \mathbf{A}) + t_2\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A}\mathbf{X})]^{-1}$  の存在条件については、付録 I. に詳述)。

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

式 (9) は、フェイス・ツウ・フェイス・コミュニケーション需要の均衡水準  $\mathbf{v}^*$  が、社会ネットワークにおける主体の位置関係と地理空間上の立地点に依存して決まることを示している。均衡における主体  $i$  のコミュニケーション水準  $v_i$  は、地理空間上の立地点に依存する交通費用 (混雑を含む) を内包した社会ネットワーク  $g$  上のノード  $i$  の Katz-Bonacich 中心性 (付録 II. を参照) と一致する。また、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。

$$U_i^* = y + \left( \frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i \right) v_i^{*2} - R(x_i) h_i + f(h_i) \quad (10)$$

以上の成果は、2 地域のみを対象とした 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) 数値例 1: 社会ネットワークと均衡コミュニケーション水準

本節では、社会ネットワークの変化が均衡におけるコミュニケーション水準と社会厚生に及ぼす影響について調べる。図-3 に示す 3 パターンの社会ネットワークはいずれも  $n = 5$ 、リンク数が 4 で、ノード 1 が最も中心的な位置を占める (i.e. Katz-Bonacich 中心性の値が大きい) ネットワークである。すべての社会ネットワークにおいて、ノード 1, 2, 3 に相当する主体が  $C$  に、ノード 4, 5 の主体が  $P$  に立地するとして、各主体の均

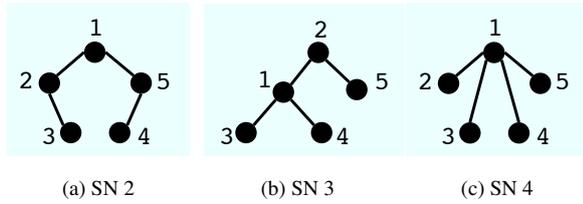


図-3: 社会ネットワーク SN 2-SN 4 (n=5, # of links= 4)

表-1: 均衡コミュニケーション水準および社会厚生

i	SN 2		SN 3		SN 4	
	$v_i^*$	$U_i^*$	$v_i^*$	$U_i^*$	$v_i^*$	$U_i^*$
1	2.46	8.33	2.88	9.56	3.24	10.76
2	2.47	8.36	2.46	8.33	2.15	7.54
3	2.00	7.20	2.08	7.38	2.15	7.54
4	1.50	6.41	1.70	6.82	1.75	6.93
5	1.94	7.38	1.61	6.63	1.75	6.93
$\sum_i v_i^*$	10.38		10.73		11.04	
$\mathcal{W}$		42.69		43.72		44.70

衡におけるコミュニケーション水準と効用ならびに社会厚生の水準を比較する。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

$$\mathcal{W} = \sum_{i=1}^{i=n} [U_i + R(x_i)h_i] \quad (11)$$

と表せる。社会厚生を導出する上では、各主体による地代支払いと不在地主の地代収入がキャンセルアウトする。本数値例では、分析の焦点をコミュニケーション行動に限定するために  $h_i = 1$  に固定し、地代関数も立地点によらず  $R(x_i) = 1$  ( $\forall i$ ) とした。さらに、立地点を外生とした本モデルでは、土地消費による効用が選択行動に影響しないことから、 $f(1) = 0$  ( $\forall i$ ) と基準化した。その他のパラメータの値は、 $\alpha = 2.5, \theta = 0.25, y = 6, p = 0.5, t_1 = 0.05, t_2 = 0.08$  とした。

上述の設定の下で、均衡コミュニケーション水準、均衡効用水準および社会厚生を導出した結果が表-1である。いずれの社会ネットワークにおいても、ネットワークにおける中心性とコミュニケーション水準  $v_i^*$  は概ね対応している。また、より活発なコミュニケーションが行われる社会が高い構成水準を達成するという結果を得た。一部、社会ネットワーク上の位置は対称である(中心性が等しい)にも関わらずコミュニケーション水準が異なる場合(SN 2の主体2と5, 主体3と4; SN 3の主体3と4; SN 4の主体2,3と4,5)が存在する。こ

れらは、社会ネットワーク上で対称である場合、(i) 当該主体  $i$  自身の立地点が  $C$  である、(ii) 交流相手 (i.e.  $g_{ij} = 1$  である主体  $j$ ) の立地点が  $C$  である、のいずれか、あるいは両方を満足している場合に、より高水準のコミュニケーションが達成されるためと解釈できる。(i) が満たされるとき、当該主体のコミュニケーションの限界費用が小さくなるため、 $\mathcal{P}$  に立地している場合よりもより多くのコミュニケーションを行うことが最適な選択となる。一方(ii)の場合は、(i)の理由に基づいて高水準のコミュニケーションを行う相手  $j$  との交流によって、戦略的補完性からコミュニケーションの限界効用が高まるために、当該主体  $i$  自身もより高度なコミュニケーション水準を選択することが最適反応となる。SN 3やSN 4のケースは(i)に、SN 1のケースは(ii)に該当する。また、SN 1においては主体2が最も高水準のコミュニケーションを達成しているが、これは(ii)の効果によって、最も中心的な主体1のコミュニケーション水準を上回った結果であると考えられる。

### 3. 社会的最適と政策代替案

#### (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加える。ここでは式(11)で定義した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。

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

1階条件より、任意の  $i$  について

$$\alpha - p - 2t_1 \sum_{j=1}^n v_j - 2t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j - v_i + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij}v_j = 0 \quad (12)$$

が満たされている必要がある。これより、

$$v_i^O = \alpha - p - 2t_1 \sum_{j=1}^n v_j - 2t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij}v_j \quad (13)$$

が成立する。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

$$v_i^O = v_i^* - t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j - t_2 x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij}v_j \quad (14)$$

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：

$$d_{1i}^O = t_1 \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j, \quad d_{2i}^O = t_2 x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j \quad (15)$$

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：

$$s_i^O = \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \quad (16)$$

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、

$$\begin{aligned} U_i &= y - p v_i - t(x_i, \mathbf{v}) v_i - (d_{1i}^O + d_{2i}^O) v_i - R(x_i) h_i \\ &\quad + (\alpha + s_i^O) v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j + f(h_i) \\ &= y - \left[ p + t_1 \left( \sum_{j=1}^n v_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j \right) \right. \\ &\quad \left. + t_2 x_i \left( \sum_{j=1}^n x_j v_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j v_j \right) \right] v_i - R(x_i) h_i \\ &\quad + \alpha v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + 2\theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j + f(h_i) \quad (17) \end{aligned}$$

となる。上式右辺 1 行目第 4 項および 2 行目第 2 項は、2. の均衡モデルにおいて主体  $i$  の訪問需要が限界的に増加した際に  $i$  自身を除いた他主体の交通に影響する混雑外部性を、3 行目第 3 項は、主体  $i$  の限界的なコミュニケーション需要に内在するコミュニケーション外部性を、それぞれ表している。すなわち式 (17) は、混雑税・補助金政策の実施によって 2. の均衡モデルにおいては外部効果であったものが内部化されていることを意味する。混雑税政策および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、

$$\mathbf{v}^O = [\mathbf{I} - 2\theta \mathbf{G} + 2t_1 \mathbf{A} + 2t_2 \mathbf{X} \cdot \mathbf{A} \mathbf{X}]^{-1} (\alpha - p) \mathbf{1}$$

となる。このとき主体  $i$  の効用  $U_i^O$  は、効用 (式 (17)) 最大化の 1 階条件を用いて整理することにより

$$U_i^O = y + \left( \frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i \right) v_i^{O2} - R(x_i) h_i + f(h_i) \quad (18)$$

と表せ、これは式 (10) と対応する。以上の結果は次のように要約される。

命題 1

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  $d_{1i}^O = t_1 \sum_{j=1}^n v_j, d_{2i}^O =$

$t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j$  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 (18) に整理した各主体の効用と不在地主の総地代収入、政府の混雑料金収入および補助金支出を考慮するため、以下のようになる。

$$\begin{aligned} W^O &= \sum_{i=1}^{i=n} \left[ U_i^O + R(x_i) h_i + d_{1i}^O v_i + d_{2i}^O x_i v_i - s_i^O v_i^O \right] \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} \left[ y + \left( \frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i \right) v_i^{O2} + f(h_i) \right. \\ &\quad \left. + t_1 \sum_{j=1}^n v_j v_i + t_2 x_i \sum_{j=1}^n x_j v_j v_i - \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \right] \quad (19) \end{aligned}$$

(3) 政策代替案

前節では、最善政策として各交通リンクへの混雑税  $d_{1i}^O, d_{2i}^O$  およびコミュニケーション補助金  $s_i^O$  を定義した。これらはいずれも主体ごとに異なる値をとる上に、特に  $s_i^O$  の設定に際しては社会ネットワーク構造を把握する必要があるが、多くの場合は情報の入手可能性および個々の主体に対して異なる水準の補助金を賦与することの技術的な煩雑さから、政策実施が非常に困難であると考えられる。

本研究では、次善政策として交通政策を検討するため、各交通リンクに対して 1 単位の交通 (i.e. 1 単位のミーティング施設訪問行動) あたりに一定額の課税または補助金を与える政策代替案を考える。交通リンク 1, 2 に対して課す税金 (または、与える補助金) をそれぞれ  $c_1, c_2$  とすると、各主体の最適化行動は、立地点  $\mathbf{x}$  が固定の下で次のように記述される。

$$\begin{aligned} \max_{v_i} U_i &= y - p v_i - \left( t_1 \sum_{j=1}^n v_j + c_1 \right) v_i \\ &\quad - \left( t_2 \sum_{j=1}^n x_j v_j + c_2 \right) x_i v_i - R(x_i) h_i \\ &\quad + \alpha v_i - \frac{1}{2} v_i^2 + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_i v_j + f(h_i) \quad (20) \end{aligned}$$

式 (20) において、 $c_1, c_2 > 0$  であれば交通リンク 1, 2 における 1 単位の交通あたりにそれぞれ  $c_1, c_2$  の通行税を課し、 $c_1, c_2 < 0$  のときは補助金を与えることを意味する。1 階条件より、任意の  $i$  について

$$v_i = \alpha - p - c_1 - c_2 x_i - t_1 - t_1 v_i - t_2 x_i v_i + \theta \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \quad (21)$$

が成り立つ。均衡条件を満足する  $v_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) を  $\hat{v}_i$  と表すこととすると、 $\hat{v}_i$  をすべての  $i = 1, \dots, n$  について連立して解くことにより政策下での均衡コミュニケー

表-2: 次善政策下でのコミュニケーション水準および社会厚生

$i$	SN 2		SN 3		SN 4	
	$\hat{v}_i$	$\hat{U}_i$	$\hat{v}_i$	$\hat{U}_i$	$\hat{v}_i$	$\hat{U}_i$
1	3.40	11.37	4.37	15.49	5.08	19.19
2	3.54	11.90	3.71	12.58	3.51	11.78
3	2.89	9.59	3.27	10.87	3.51	11.78
4	1.55	6.51	2.01	7.54	2.33	8.41
5	2.17	7.96	1.86	7.19	2.33	8.41
$\sum_i$	13.55	47.33	15.22	53.67	16.75	59.56
$C_1$		-11.16		-16.74		-20.99
$(c_1)$		(-0.82)		(-1.10)		(-1.25)
$C_1$		2.38		3.30		3.18
$(c_2)$		(0.64)		(0.85)		(0.68)
$\hat{W}$		43.54		45.23		46.75

ション水準  $\hat{v}_i$  が得られる。式 (21) を行列形式で表すと、次式のようになる。

$$v^* = [I - \theta G + t_1(I + A) + t_2 X(I + AX)]^{-1} \cdot [(\alpha - p - c_1)I - c_2 X] \mathbf{1} \quad (22)$$

また、次善政策下での均衡効用水準は、均衡コミュニケーション水準  $\hat{v}_i$  を用いて

$$\hat{U}_i = y + \left(\frac{1}{2} + t_1 + t_2 x_i\right) \hat{v}_i^2 + f(h_i) - R(x_i)h_i \quad (23)$$

と表せる。 $i$  に依存しない定数  $c_1, c_2$  は、次の最大化問題を解くことによって求められる。

$$\max_{c_1, c_2} \hat{W} = \max_{c_1, c_2} \sum_{i=1}^{i=n} \left\{ \left[ \hat{U}_i + R(x_i)h_i \right] + c_1 v_i + c_2 x_i v_i \right\} \quad (24)$$

右辺第 3 項および第 4 項は、交通リンク 1, 2 で徴収した通行税収入（または補助金支出）を表し、以下では

$$C_1 = \sum_{i=1}^n c_1 v_i, \quad C_2 = \sum_{i=1}^n c_2 x_i v_i$$

とおく。以上のような次善の政策シナリオを社会ネットワークに適用し、 $c_1, c_2$  を数値的に導出した例を次節に示す。

#### (4) 数値例 2：社会ネットワークと政策分析

前節において定式化したの政策シナリオを複数の社会ネットワーク例に対して適用し、数値分析を行う。図-3 の 3 種類の社会ネットワークに対して、数値例 1 と同一の設定下で、式 (24) で表される社会厚生  $\hat{W}$  を最大にする  $c_1, c_2$  を数値的に導出した (表-2)。同時に、参照点としてファースト・ベストな混雑料金とコミュニケーション補助金による最善政策シナリオの結果を表-3 に示す。表中の  $T_1, T_2$  および  $S$  は、それぞれ交通リ

表-3: 最善政策下でのコミュニケーション水準および社会厚生

$i$	SN 2		SN 3		SN 4	
	$v_i^o$	$U_i^o$	$v_i^o$	$U_i^o$	$v_i^o$	$U_i^o$
1	3.76	12.76	4.91	18.25	5.97	24.58
2	3.74	12.71	3.75	12.72	3.25	10.79
3	2.49	8.42	2.90	9.63	3.25	10.79
4	1.28	6.03	2.27	8.24	2.46	8.81
5	2.53	9.03	1.69	6.80	2.46	8.81
$\sum_i$	13.80	48.94	15.51	55.64	17.38	63.79
$T_1$		7.40		9.31		11.66
$T_2$		0.52		0.61		0.97
$S$		18.06		25.05		34.04
$W^o$		43.8		45.51		47.38

ンク 1, 2 において徴収した混雑税による収入、およびコミュニケーション補助金への支出を表す。

$$T_1 = \sum_{i=1}^n d_{1i}^o v_i^o, \quad T_2 = \sum_{i=1}^n d_{2i}^o x_i v_i^o, \quad S = \sum_{i=1}^n s_i^o v_i^o$$

最善政策下での社会厚生  $W^o$  は、式 (19) よりこれらを用いて

$$W^o = \sum_{i=1}^{i=n} \left[ U_i^o + R(x_i)h_i \right] + T_1 + T_2 - S \quad (25)$$

と表せる。まず均衡と社会的最適の各状況を比較すると、社会ネットワーク SN 3, 4 においては、いずれの主体の均衡コミュニケーション水準  $v_i^*$  も最適水準に対して過小であることがわかる。一方 SN 2 のネットワークの場合は、一部の主体が均衡において過剰なコミュニケーションを行っている。主体 4 については、コミュニケーション行動に内在する 2 種類の外部性のうちコミュニケーションの外部性よりも交通混雑の外部不経済の効果の方が大きく、均衡における行動水準は過剰となっていると考えられる。SN 2 の主体 1 と 2 のコミュニケーション水準は、均衡では  $v_1^* < v_2^*$  であるのに対して最適な水準は  $v_1^o > v_2^o$  となっている。ファースト・ベストな料金政策の下で混雑外部性が内部化された結果、主体 2 の交流相手のコミュニケーション水準が相対的に低減したために、戦略的補完性の効果が減じたためである。

次に次善政策の効果について見ると、SN 2-SN 4 のすべてにおいて  $c_1$  が負の、 $c_2$  は正の値をとっていることから、本数値例の結果は都市内交通リンク 1 の交通 1 単位に対しては補助金が、都市間交通リンク 2 には通行税が導入される状況を表している。いずれの社会ネットワークにおいても、次善政策の適用によって社会厚

生水準がファースト・ベスト水準に近付いていることが確認できる。また、社会ネットワークの構造の違いによって異なる補助金および通行税が導出されており、ネットワークの位相幾何学的構造や主体の位置が、交通政策上無視できないことが明らかとなった。

#### 4. おわりに

本稿では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、次善政策としての交通料金政策について検討した。今回の数値事例では非常に小さなネットワークのみを取り扱ったが、大規模かつ多様なネットワークについて分析を進めることによって、社会ネットワークの位相幾何学的構造と政策効果との関連性を解明できると考えられる。より効率的な分析手法の開発とともに今後の課題としたい。主体の立地点を外生とした本モデルを立地選択の枠組に拡張した上で、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必要がある（講演時には、立地選択を内生化した枠組についても発表予定）。また、本研究では 2 地域とした地理空間を多地域からなる交通ネットワークに拡張することによって、各交通リンクへの交通料金の導入を、社会ネットワークの観点から分析することが可能である。

## 付録

### I. 逆行列の存在条件

Helsley & Zenou<sup>18)</sup>に準拠すると、逆行列  $[\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1}$  の存在する必要十分条件は、

$$\theta \cdot \rho(\mathbf{G}) < 1 \quad (26)$$

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、用いる行列が

$$\mathbf{I} - \theta\mathbf{G} + t_1(\mathbf{I} + \mathbf{A}) + t_2\mathbf{X}(\mathbf{I} + \mathbf{A}\mathbf{X})$$

と複雑化するため、上式のような明確な条件を導出することが出来ていないが、式 (26) に準ずる条件の下で逆行列の存在を判断することになる。

### II. Bonacich 中心性<sup>20)</sup>

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<sup>5)</sup>、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<sup>17)</sup>。  $n$  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、 $\theta$  が十分に小さければ、次のような行列  $\mathbf{M}$  が定義できる。

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

$\theta$  は、長いパスの相対的な重みを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  $i$  から  $j$  へのパスで長さが  $k$  であるものの数を、 $\theta^k$  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 ( $\lambda_i$  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  $\theta$  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  $\theta$  に対する Bonacich 中心性ベクトル  $\mathbf{b}(g, \theta)$  は

$$\mathbf{b}(g, \theta) = [\mathbf{I} - \theta\mathbf{G}]^{-1} \mathbf{1} \quad (27)$$

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

$$b_i(g, \theta) = \sum_{j=1}^n m_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{+\infty} \theta^k g_{ij}^{[k]} \quad (28)$$

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) 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.
- 3) Storper, M. and Venables, A.J.: Buzz: face-to-face contact and urban economy, *Journal of Economic Geography*, Vol.4, pp.351-370, 2004.
- 4) 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.
- 5) Jackson, M. O. : *Social and Economic Networks*, Princeton: Princeton University Press, 2008.

- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 例えば，Marshall, A. : *Principles of Economics*, London: Macmillan, 1890.
- 9) Fujita, M. and Thisse, J. F. : *Economics of Agglomeration—Cities, Industrial Location, and Regional Growth*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Helsley, R.W. and Strange, W.C. : Urban interactions and spatial structure, *Journal of Economic Geography*, pp. 1-20, 2007.
- 13) 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
- 14) Jovanovic, B. and Rob, R. : The Growth and Diffusion of Knowledge, *Review of Economic Studies*, Vol. 56, pp. 569-582, 1989.
- 15) 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.
- 16) 閣議決定：日本再興戦略，pp. 79-86, 2013.
- 17) Ballester, C., Calvò-Armengol, A. and Zenou, Y. : Who's who in networks. Wanted: The key player, *Econometrica*, Vol. 74, pp.1403-1417, 2006.
- 18) Helsley, R. W. and Zenou, Y. : Social Networks and Interactions in Cities, *Journal of Economic Theory*, Vol.z 150, pp.426-466, 2014.
- 19) Cabrales, A., Calvò-Armengol, A. and Zenou, Y. : Social Interactions and Spillovers, *Games and Economic Behavior*, Vol. 72, pp. 339-360, 2011.
- 20) Bonacich, P. : Power and Centrality: A Family of Measures, *American Journal of Sociology*, Vol. 92, No. 5, pp. 1170-1182, 1987.
- 21) 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.

## POLICY ANALYSIS OF SOCIAL NETWORKS AND SPATIAL INTERACTIONS

Yuki OHIRA 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 policy in which a single value of tax/subsidy on each link is applied. Numerical examples are then undertaken for investigating the interrelationships between social networks and public policies.