

個人間における意思決定の相互作用を考慮した交通行動モデルに関する一考察*

TRAVEL BEHAVIOR MODELLING WITH MUTUAL AGREEMENT BY INDIVIDUALS*

松島格也**

by Kakuya MATSUSHIMA**

1. はじめに

フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーションは、人間がアイデアや知識を交換するための重要な手段である。この種のコミュニケーション行動においては、意思決定プロセスに相手の意思が関与するという特徴がある。すなわち、ミーティングを行う当事者達が互いにミーティングを行うことに合意することが、コミュニケーションが成立するための前提となる。個人間の意思決定問題に相互作用がある場合、集計化操作を個人の選択行動の簡単な加算和では表現できない。本研究では、個人がトリップを行うためには相手と出会うことに関して事前に双方で合意する必要があることに着目し、双方合意の必要性を考慮した交通行動モデル構築の可能性について考察する。また、複数主体間の意思決定の相互作用に起因する外部性の存在について言及する。

2. ミーティングと外部不経済

ミーティングが成立するためにはミーティング相手の合意を得ることが前提となる。ある個人がミーティングに合意しない場合、ミーティング相手がミーティングに賛同していてもミーティングは実現しない。その結果、個人の行動が他人の行動に影響を直接及ぼすことになる。このような個人間の意思決定の相互性に起因して、同質な個人により繰り返されるミーティング過程には、1) 混雑現象、2) 市場薄現象 (thin market phenomena)¹⁾²⁾ という外部不経済

が存在する。1) は、都市内の個人のミーティング頻度が高くなると結果的に混雑が生じ、ミーティング相手を探索するための情報費用が高くなるという外部不経済である。一方、2) は、ミーティング相手を選別することにより生じる外部性である。個人がミーティング過程においてより大きな効用を得るためには、より大きな効用をもたらす相手を選択する必要が生じる。しかし、より魅力的なミーティングを実現しようとするれば、ミーティング相手を発見することは困難となり、ミーティング相手の合意を得ることも難しくなる。これはミーティング市場においてミーティングを取引する相手が少なくなる外部不経済であり、取引費用の経済学の分野で市場薄の外部不経済性といわれているものに他ならない。以下では、小林等³⁾にしたがって、トリップを行う前の双方合意の必要性に着目した行動モデル構築の可能性について検討する。

3. 個人のミーティング行動のモデル化

交通ネットワーク上で行われるミーティング行動をモデル化しよう。いま、個人*i*と個人*j*が出会い、互いにミーティングを行うか否かを決定しようとする場面を考える。「ミーティングを行う」、「ミーティングを行わない」という2つの純粋戦略をもっている。ミーティングは2人が同時に「ミーティングを行う」という戦略を選択した場合にのみ形成される。いま、時刻*t*において個人*i*が個人*j*とミーティングを開始すると考えよう。時刻*t*の現在価値で評価した期間長*T*のミーティングの効用をランダム効用モデル

$$U_i^j(t; T, \varepsilon_i^j) = \frac{\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j}{r} \{1 - \exp[-r(T - t)]\} - c_i^j(1)$$

*キーワード：発生交通、交通行動分析

**正員 博士(工) 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5072
kakuya@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

で表現する。なお、 r は時間的割引率、 v_i^j は個人*i*が個人*j*と会うことにより得られる瞬間効用、 ε_i^j は個々のミーティングに特有な瞬間効用（確率変数）であり、これらはミーティング期間中は一定値をとる。時刻 $[t, T]$ で開催されるミーティングの効用を時刻 t で計測した現在価値は時刻 $\tau \in [t, T]$ の瞬間効用を時刻 t に割引いた値 $(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j)\exp\{-r(\tau - t)\}$ を期間 $[t, T]$ に対して積分した値として定義される。一方、 c_i^j はミーティング費用（交通費用）でありミーティングが開始された時点で支払われる。ミーティングの交渉時点でミーティング期間長は確定せず、平均 β^{-1} の指数分布に従うことだけが判っている。この時、時刻 t の現在価値で評価したミーティングの期待効用 $EU_i^j(t; \varepsilon_i^j)$ は次式で表される。

$$EU_i^j(t; \varepsilon_i^j) = \int_t^T U_i^j(t; T, \varepsilon_i^j) \beta \exp\{-\beta(T - t)\} dT = \gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \quad (2)$$

なお、 $\gamma = 1/(r + \beta)$ である。個人*i*は個人*j*とのミーティングで得られる期待効用 $EU_i^j(t; \varepsilon_i^j)$ がある保留効用水準 H_i より大きいときのみミーティングに合意する。保留効用水準は各個人がミーティングを行うか否かを判断する基準を意味するが、その決定メカニズムは後述する。個人*i*が個人*j*とのミーティングに合意する確率は

$$p_i^j = \text{Prob}\{EU_i^j(t; \varepsilon_i^j) \geq H_i\} = \text{Prob}\{\gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \geq H_i\} \quad (3)$$

で表される。一般性を失うことなく、 ε_i^j は平均値0分散1の標準正規分布に従うと仮定する。ここで、標準正規分布関数を $\Phi(\cdot)$ により表すと、個人*i, j*のミーティングの合意確率 p_i^j はそれぞれ次式で表される。

$$p_i^j = \text{Prob}\{\gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \geq H_i\} = \Phi(\bar{v}_i^j - \delta(c_i^j + H_i)) \quad (4a)$$

$$p_j^i = \text{Prob}\{\gamma(\bar{v}_j^i + \varepsilon_j^i) - c_j^i \geq H_j\} = \Phi(\bar{v}_j^i - \delta(c_j^i + H_j)) \quad (4b)$$

ただし、 $\delta = \gamma^{-1}$ である。個人*i, j*による交渉の結果、ミーティングが生起する確率は $P(\Omega_1) = p_i^j p_j^i$ で表せる。個人の同質性の仮定より、個人行動が対称的であり、任意の*i*に対して $H_i = H$ 、 $\bar{v}_i^j = \bar{v}$ 、 $c_i^j = c$ 、

$\varepsilon_i^j = \varepsilon$ 、 $\pi_i^j = \pi$ 、 $EU_i^j = EU$ が成立すると考える。両者がミーティングに合意する確率は次式で表せる。

$$\pi(H, \hat{H}) = \Phi(\bar{v} - \delta(c + H))\Phi(\bar{v} - \delta(c + \hat{H})) \quad (5)$$

\hat{H} は他人が決定する保留効用水準であり、合意形成確率 π は本人と他人の保留効用水準 (H, \hat{H}) に依存している。ミーティングの期待効用の平均値 $EV(H)$ は

$$EV(H) = \frac{\int_{\delta(H+c)-\bar{v}}^{\infty} EU(t; \varepsilon)\phi(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_{\delta(H+c)-\bar{v}}^{\infty} \phi(\varepsilon)d\varepsilon} = \gamma\bar{v} - c + \gamma \frac{\phi(\bar{v} - \delta(c + H))}{\Phi(\bar{v} - \delta(c + H))} \quad (6)$$

となる。ここに、 $\phi(\cdot)$ は正規確率密度関数である。すなわち、ミーティングの期待効用はミーティングの純付加価値 $\gamma\bar{v} - c$ とミーティング相手を保留効用 H に基づいて選別することにより得られるプレミアム（式(6)の第3項）の和として表現される。

すべての個人は各個人は都市内で形成されているミーティングの数に関する共通の主観的期待 $E^s[n/m]$ を有していると考えよう。添字 s は主観的期待であることを表している。この時、彼が計画するマッチングの主観的実現確率は

$$q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t = (\alpha + \hat{\alpha})E^s \left[\frac{n}{m} \right] \Delta t \quad (7)$$

と表せる。ただし、 $\hat{\alpha}$ は他人の平均的探索強度を表す。式(7)に示すように、マッチングが形成される確率は当人だけでなく他人の探索強度にも依存する。時刻 t でミーティング相手を探索している個人の期待生涯効用を $V(t)$ と表そう。時刻 t に期間長 T のミーティングを開始した場合の生涯効用 $\bar{U}(t; T, \varepsilon)$ は、ミーティング効用の現在価値と時刻 $t+T$ の期待生涯効用を時刻 t の現在価値に割引いた結果の期待値の和 $\bar{U}(t; T, \varepsilon) = U(t; T, \varepsilon) + V(t+T)\exp\{-r(T-t)\}$ で表される。ここで、ミーティング期間長 T が平均 β^{-1} の指数分布に従う時、期待生涯効用は

$$\overline{EU}(t, \varepsilon) = \int_t^{\infty} \bar{U}(t; T, \varepsilon)\beta \exp\{-\beta(T-t)\} dT \quad (8)$$

となる。さらに、 ε が確率変数であることを考慮すれば、最終的に時刻 t にミーティングを開始した時の期待生涯効用 $R(t)$ は次式のようになる。

$$R(t) = \frac{\int_{\delta(c+H)-\bar{v}}^{\infty} \overline{EU}(t, \varepsilon)\phi(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_{\delta(c+H)-\bar{v}}^{\infty} \phi(\varepsilon)d\varepsilon} \quad (9)$$

時間 $[t, t + \Delta t]$ で生起する事象は、1) ミーティングが開始される (事象 ω_1), 2) マッチングは生起するがミーティングに失敗する (事象 ω_2), 3) マッチングに失敗する (事象 ω_3) の3通りであり, それぞれの生起確率 $p(\omega_1), p(\omega_2), p(\omega_3)$ は以下ようになる.

$$p(\omega_1) = \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t \quad (10a)$$

$$p(\omega_2) = \{1 - \pi(H, \hat{H})\}q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t \quad (10b)$$

$$p(\omega_3) = \{1 - q(\alpha, \hat{\alpha})\}\Delta t \quad (10c)$$

個人が時点 t に探索を行っている場合, 時刻 $t + \Delta t$ に確率 $p(\omega_1)$ で期待生涯効用 $R(t + \Delta t)$, 確率 $p(\omega_2) + p(\omega_3)$ で期待生涯効用 $V(t + \Delta t)$ を獲得する. この時, 個人の最適探索行動は Bellman の最適性原理より

$$V(t) = \max_{\alpha \geq 0, H} \left\{ -C(\alpha)\Delta t + \frac{\pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t}{1 + r\Delta t} \cdot R(t + \Delta t) + \frac{1 - \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t}{1 + r\Delta t} V(t + \Delta t) \right\} \quad (11)$$

と表せる. ただし, $q(\alpha, \hat{\alpha}) = (\alpha + \hat{\alpha})E^s[n/m]$ である. また, $C(\alpha)$ は探索情報費用関数であり, $C(0) = 0, \frac{\partial C(\alpha)}{\partial \alpha} \geq 0, \frac{\partial^2 C(\alpha)}{\partial \alpha^2} \geq 0$ を満足すると仮定する. 式(11)の右辺は, 第1項よりそれぞれ 1) 探索情報費用, 2) ミーティングに成功した場合の期待生涯効用の現在価値, 3) ミーティングに失敗した時の期待生涯効用の現在価値を表す. 式(11)において定常状態を仮定し $\Delta t \rightarrow 0$ の極限をとれば再帰方程式

$$rV = \max_{\alpha \geq 0, H} \{-C(\alpha) + \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})[EV - \rho V]\} \quad (12)$$

を得る. ただし, $\rho = r/(r + \beta)$, EV はミーティングの期待効用の平均値(6)であり保留効用水準 H の関数である. また, $EV(H) - \rho V$ は1回のマッチングがもたらす期待生涯効用である. ここで, 式(12)の右辺を最大化する問題を考えよう. 他人の保留効用水準, 及び探索戦略がある水準 $\hat{H}, \hat{\alpha}$ に固定されたと考える. また, 個人は近視眼的に行動し, $\partial E^s[n/m]/\partial \alpha = 0$ が成立すると仮定する. いま, 期待生涯効用が \bar{V} の水準に設定されていると考えれば, 問題

$$Z = \max_{\alpha \geq 0, H} \{-C(\alpha) + \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha}) \cdot [EV(H) - \rho \bar{V}]\} \quad (13)$$

の1階の最適化条件は次式で与えられる.

$$\frac{\partial \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})\{EV(H) - \rho \bar{V}\}}{\partial \alpha} = 0 \quad (14a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \pi(H, \hat{H}) \frac{\partial q(\alpha, \hat{\alpha})}{\partial \alpha} \{EV(H) - \rho \bar{V}\} \quad (14b)$$

式(5),(6)を用いて最適化条件(14a)を展開すれば

$$(\rho \bar{V} - H)q(\alpha, \hat{\alpha})\phi(\bar{v} - \delta(c + H)) = 0 \quad (15)$$

を得る. ここで, $q(\alpha, \hat{\alpha})\phi(\bar{v} - \delta(c + H)) > 0$ が成立することに着目すれば, 最適保留効用水準 H^* は

$$H^* = \rho \bar{V} \quad (16)$$

と表せる. $\rho \bar{V}$ は期待生涯効用が \bar{V} の時のミーティングの平均機会費用であり, 平均ミーティング期間長の時間価値を期待生涯効用を用いて評価した値で表せる. ここで, 最適保留効用水準 H^* は期待生涯効用 \bar{V} を与件として求めたことに留意しよう. これまで, 他人の保留効用水準, 及び探索戦略がある水準 $\hat{H}, \hat{\alpha}$ に固定されていると考えていた. すべての個人の期待生涯効用が \bar{V} に固定されていると仮定しよう. 最適戦略 $H^*(\bar{V})$ を式(5),(6)に代入することによりミーティングの最適合意確率 $\pi^*(\bar{V}) = \pi(H^*(\bar{V}), \hat{H}^*(\bar{V}))$, 最適期待効用 $EV^*(\bar{V}) = EV(H^*(\bar{V}))$ は期待生涯効用 \bar{V} の関数として

$$\pi^*(\bar{V}) = \Phi(\bar{v} - \delta c - r\bar{V})^2 \quad (17)$$

$$EV^*(\bar{V}) = \gamma \bar{v} - c + \gamma \frac{\phi(\bar{v} - \delta c - r\bar{V})}{\Phi(\bar{v} - \delta c - r\bar{V})} \quad (18)$$

と書き換えることができる. 一方, 最適戦略 $\alpha^*(\bar{V})$ は最適化条件(14b)より限界期待便益と限界費用が等しくなる水準で決定される. ここで, 式(7),(17),(18)を考慮すれば, 最適化条件(14b)は次式のように書き換えることができる.

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \pi^*(\bar{V})E^s \left[\frac{n}{m} \right] \{EV^*(\bar{V}) - \rho \bar{V}\} \quad (19)$$

上式を満足するような最適探索強度を $\alpha^*(\bar{V})$ と表そう. 以上では, 期待生涯効用 \bar{V} を与件として, 最適な保留効用水準, 探索強度を求める問題を考えた. 一方, Bellman の最適性原理より期待生涯効用は式(12)を満足しなければならない. すなわち, 次式が成立する.

$$r\bar{V} = -C(\alpha^*(\bar{V})) + \pi^*(\bar{V})q(\alpha^*(\bar{V}), \hat{\alpha}^*(\bar{V})) \cdot \{EV^*(\bar{V}) - \rho \bar{V}\} \quad (20)$$

すべての個人が所与の主観的期待 $E^s[n/m]$ の下で、式(19),(20)を同時に満足するような探索戦略 $\alpha^*(\bar{V})$ と均衡水準 \bar{V} を達成した時、ミーティング過程は均衡状態にあると考えることができる。

4. ミーティング均衡

ミーティング過程では、ミーティング相手の探索とマッチングされた相手との合意形成が繰り返される。各プレーヤは各時刻において、実現するであろうミーティングにおいて獲得できる効用水準や真のミーティング形成確率について確実な情報を持ち得ない。このような不確実な情報の中で知り得る情報は、ミーティングで獲得できる期待効用とミーティングの長期的な形成頻度のみである。このような不確実な環境の下で各個人は意思決定を繰り返しながら、意思決定環境に関して合理的期待を形成し最適な探索政策を採用する。ミーティング形成確率に関する主観的期待が合理的期待に収束するとともに、個々人の探索戦略は長期的な定常政策に収束していくと考える。このような最適な長期定常戦略を、合理的期待均衡の下での定常ナッシュ均衡として定式化してみよう。マッチングされた相手がミーティングを行っていない確率は次式で定義される。

$$E\left[\frac{n}{m}\right] = \frac{\sum_{n=0}^m nx^n\psi(n)}{\sum_{n=0}^m mx^n\psi(n)} = f(x) \quad (21)$$

なお、 $x = \beta/\{\pi(\alpha + \hat{\alpha})\}$ 、 $\psi(n) = \prod_{i=1}^n m(m-i)/\{i(2i+3)\}$ 、 $\psi(0) = 1$ であり、 $E[n/m]$ は $x = \beta/\{\pi(\alpha + \hat{\alpha})\}$ の関数 $f(x)$ を用いて表現できる。個人の対称性 ($\alpha = \hat{\alpha}$) を考慮すれば、 $x = \beta/\{2\pi\alpha\}$ と表せる。個人は、日々のミーティング行動を通じてマッチング相手の遭遇確率に関する合理的期待を形成する。式(19)より、遭遇確率に関する主観的期待が異なれば、個人が採用する探索戦略も異なる。個人は遭遇確率の学習を繰り返しつつ探索戦略を逐次修正する。いま、すべての個人が主観的期待を修正するインセンティブをもたないような合理的期待均衡に収束したとき、合理的期待均衡は

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha^*} = \pi^*(EV^* - \rho V^*)f\left(\frac{\beta}{2\pi^*\alpha^*}\right) \quad (22a)$$

$$rV^* = -C(\alpha^*) + 2\pi^*\alpha^*(EV^* - \rho V^*)f\left(\frac{\beta}{2\pi^*\alpha^*}\right) \quad (22b)$$

を同時に満足する $(\alpha^*, \dots, \alpha^*; V^*, \dots, V^*)$ として定義できる。ただし、 $\pi^* = \pi^*(V^*)$ 、 $EV^* = EV^*(V^*)$ はそれぞれ均衡効用 V^* を用いて定義した最適合意確率(17)、最適期待効用(18)である。式(22a)は個人の最適探索行動に関する条件式を意味している。式(22b)は合理的期待均衡において、保留効用の現在価値がミーティング相手を探索することで得られる純期待便益が等しくなることを意味しており、均衡効用水準を定義している。

5. モデルの発展可能性

現実のミーティング過程は、非常に複雑な内容と様式を有しており、ミーティング過程に関する知見を深めていくためには、これらの仮定を緩めると同時に代替的なモデルの枠組みを開発していく必要がある。ミーティング過程の歴史的依存性は、前述したようなクラブや組織の形成過程を記述することにより部分的ではあるが表現することは可能である。しかし、個々人が学習過程を通じて人的なネットワークを拡大していく過程をランダム・マッチング技術により表現することは難しい。ミーティング過程を記述する上で核となるマッチング行動に関しては、小林他が提案したランダムマッチングモデル⁴⁾が適用可能である。残念ながら、都市内で繰り返されているミーティングに関して利用可能なデータは極めて乏しいのが実状である。ミーティング調査の方法論も含めて、実証分析に向かっても極めて多くの研究課題が残されている。

参考文献

- 1) Howitt, P. : Costly Search Recruiting, in: Howitt, P., *The Keynesian Recovery and Other Essays*, pp. 177-196, Philip Allan, 1990.
- 2) 松島格也：戦略的相補性と交通市場，土木計画学研究・論文集，No.21，招待論文，pp.11-22，2004.
- 3) 小林潔司，福山敬，松島格也：フェイス・ツウ・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.
- 4) 小林潔司，喜多秀行，多々納裕一：送迎・相乗り行動のためのランダム・マッチングモデルに関する研究，土木学会論文集，No. 536/IV-31，pp. 49-58，1996.