土木学会論文集 No. 590／IV-39, 11-22, 1998.4

フェイス・ツゥ・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

小林潔司[1]・福山敬[2]・松島格也[3]

[1]正会員　工博　京都大学教授　大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
[2]正会員　Ph.D　鳥取大学助教授　工学部社会開発システム工学科(〒680-0945 鳥取市湖山町南4丁目101)
[3]正会員　工修　京都大学助手　大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究では，フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション過程が，個人がミーティングを行う相手を求めて探索を行うマッチング過程と，ミーティングを行うかどうかを判断する合意形成過程により構成できることを指摘し，個々人間のミーティング行動をベルマンの最適性原理を用いて表現する．都市内において長期的な定常状態において実現するミーティング均衡を，多くの主体による非協力な動的過程における合理的期待均衡として定義する．さらに，ミーティング均衡の特性について理論的に考察する．

Key Words : *face-to-face communications, meeting equilibrium, search, rational expectations*

1．はじめに

現代都市には膨大な量のアイデアや知識が集積している．人間の間でのアイデア交換の容易さが，大都市の集積の効果という外部経済を形成している．フェイス・ツゥ・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．

ランダム効用モデルを用いた交通行動モデルの発展により，交通行動の表現方法の自由度は著しく増加した．これらの研究は，交通現象を個々人による独立な行動に還元し，それを集計化することにより理解しようという方法論に基づいている．しかし，多くの交通行動において，交通主体は他人の意思と無関係にその行動のすべてを決定できるものではない．特に，フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション行動をモデル化するためには，従来無視されてきた個人間の意思決定における相互作用を明示的に考慮する必要がある[1)]．

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．多くの人間が，互いにミーティングに対するニーズが一致する相手を発見し，ミーティングに対する合意を形成し，ミーティングを繰り返す．このようなミーティングの繰り返しにより得られる効用水準も，ミーティング相手の意思決定の結果に依存して決定される．ミーティングが形成されるか否かは偶然的な要素にも左右されよう．フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションのメカニズムを理解するためには，ミーティングがランダムに繰り返される過程とそこにおける確率的均衡をモデル化することが重要な課題となる．

本研究では，人間のフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションを異なる相手とのミーティングが繰り返される過程として記述し，その長期的なミーティング均衡をモデル化する．さらに，交通施設の整備がミーティング均衡に及ぼす影響について分析する．その際，最も基本的なミーティングの形態である２人ミーティングに焦点を絞ることとする．以下，２．では本研究の基本的な考え方を示す．３．で，システム全体でのミーティング過程を，４．で個人のミーティング行動をモデル化する．５．ではミーティング均衡について理論的に考察し，今後の研究課題をとりまとめる．

2．本研究の基本的な考え方

（１）従来の研究の概要

伝統的な交通行動モデリングでは，個人の行動を他人の意思決定とは切り離してモデル化するという方法論が採用されてきた．もちろん，他人の意思決定の結果が個人行動に及ぼす影響が無視されてきたわけではない．例えば，確率的ネットワーク均衡[2)3)]や合理的期待均衡[4)5)]のように，個人行動の結果は交通ネットワークのパフォーマンスを通じて集計化された形で個人の効用に影響を及ぼすように取り扱われてきた．近年，個

人の意思決定の相互作用を明示的にモデル化するアプローチがいくつか提案されている．小林等[6]はランダム・マッチングモデルにより個人間の意思決定の相互作用を直接モデル化している．森川等は，他人の効用水準がreference pointとなり自分の効用に影響を及ぼすようなランダム効用モデル[7]を提案している．これらの研究は，個人の交通行動分析のレベルにとどまっており，システム全体での均衡を定義できるような一般的な内容を持ち合わせていない．著者等の知る限り，意思決定の相互作用を考慮したコミュニケーション行動の確率的均衡を分析した研究事例は見あたらない．

フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション過程においては，ミーティング相手の探索行動が重要な意味を持つ．このような探索行動に関しては，すでにオペレーションズ・リサーチにおいて探索理論[8]という確立した研究分野となっている．経済活動を行ううえで個人間の取引が必要不可欠であることから，経済学の分野でも探索行動に関する研究が進展している．例えば，Diamond[9], Mortensen[10] は需要サイドと供給サイドの人間が取引相手を探索するモデルを構築し，その均衡状態の非効率性を分析している．Howitt[11] は，探索費用が必要な市場行動を分析し，取引相手の希少性から生じる外部不経済について分析している．さらに，これらの研究成果は，ゲーム理論の分野を中心にtwo-sided matching gameとして発展を遂げつつある[12]．これらの研究の特徴は，需要者と供給者という２種類の異なるサイドの間の市場取引を分析した点にある．フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションでは，各個人がミーティングの需要者と供給者としての役割を状況に応じて演じわける点に特徴がある．したがって，フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション行動をモデル化するためには，新たにnon-sided matching gameに関する分析枠組みを開発する必要がある．

（２）ミーティング形成の特徴とその分類

ミーティングを行うためにはまず少なくとも２人の個人がミーティングを行う意思を持って出会う必要がある．さらに，当該の個人がミーティングを形成することに合意しなければならない．つまり，複数の個人がミーティング形成に合意するまでの過程（以下，ミーティング過程と呼ぶ）は，１）ミーティングを行う対象となりうる相手と出会う過程，２）出会った後双方がミーティングを行うことに合意する過程で形成される．本研究では，前者の過程を「マッチング過程」，後者を「合意形成過程」と呼ぶこととする．ミーティングは，ミーティングが「自発的になされるか」,「強制的になされるか」により「自発的ミーティング」,「強制的ミーティング」に分類できる[1]．前者は，友人関係等の私的交際，あるいは多くのビジネス会合のように該当する個人の自由意思によって形成されるミーティングである．自発的ミーティングは，異なる個人がミーティングの潜在的な相手と「どのようにして知り合うのか」,「どのように交渉をはじめるのか」を規定する技術（マッチング技術）によって（３）で述べるように分類できる．一方，後者はミーティングの当事者の一方，あるいは第三者が強制力を行使することにより実現することが義務づけられるようなミーティングである．強制的ミーティングでは，権力を有する個人や組織がマッチング開催の詳細を決定する．以下，本研究では個人の自由意思により形成される「自発的ミーティング」に焦点をあてることとする．

（３）自発的ミーティングとマッチング技術

自発的ミーティングでは，ミーティング相手を探索するためのマッチング技術が重要な役割を果たす．マッチング技術は，異なる個人が時間軸上で出会い合意を形成していく過程を支えており，１）情報チャンネル，２）探索戦略，３）統合ルールにより記述される．情報チャンネルとはミーティング相手の存在を見い出すために個人が利用する情報源を意味し，１）個人情報，２）組織情報，３）市場情報に大別できる．１）は，ミーティング相手を組織化されない情報に基づいて探索する方法を意味しており，最も単純な情報チャンネルである．個人は学会等の組織に参加することにより探索情報費用を大幅に節約できる．さらに，情報チャンネルの技術革新により，市場でミーティング相手に関する情報を購入することも可能となろう．個人がいずれの情報チャンネルを利用するかは，情報費用や必要とする知識・情報の内容に依存する．

探索理論[8]に基づけば，個人がミーティング相手を探索する際に利用する代表的な（停止）戦略として１）近視眼的方法，２）代替案を作成する方法，３）選択肢集合を用いる方法が考えられる．近視眼的方法とは，最も簡単な探索戦略であり，ミーティング相手を逐次探索し自分の保留効用を上回った最初の相手とミーティングの交渉を行う戦略である．２）は，いくつかの代替的な相手を探索しその中から適切な相手を選択するという方法である．３）は常時，交際を行う相手の集合を確保しておき，その中から適切な相手を選択するという戦略である．通常，ミーティング相手の探索情報費用を節約するため，個人は基本的には探索戦略３）を採用しながら，他の探索戦略を併用し相手集合を適宜修正しているのが実態であろう．

ミーティング過程は時間軸上で繰り返される動的現象であり，生起時刻を調整する統合ルールが必要となる．統合方式は，１）外生方式，２）逐次決定方式，３）

ダイヤリー方式に大別できよう．1）では，外生的にミーティングが計画され，個人は参加するか否かのみを決定する．2）3）は，基本的に個人がミーティング過程を管理する方式である．2）では，相手の探索とミーティングの実施が相互に繰り返される．3）では，あたかも個人が手帳の中にミーティング予定を埋めるようにミーティング過程が調整されていく．ミーティングは，情報チャンネル，探索戦略，統合ルールの組み合わせにより分類できるが，1つのモデルによりすべてのタイプのミーティングを表現できるわけでない．本研究ではミーティングのプロトタイプとして，最も単純な「個人情報・近視眼的戦略・逐次決定」方式による同質な個人集団における2人ミーティング過程をとりあげる．この方式によれば，ミーティング相手の探索は毎期独立に行われ，ミーティング過程は歴史に依存しない．現実のミーティング過程の複雑性を考慮すれば，本研究では極めて限定されたミーティング過程に焦点を置いていることは否めない．しかし，このような簡単なモデルを用いても，次節で述べるようなミーティング過程に付随する外部経済性を十分に表現することが可能であり，交通施設等の整備がミーティング均衡に及ぼす影響を効果的に分析できるという利点を有している．なお，本論文で提案するモデルを拡張することにより，より複雑なミーティング過程を表現することが可能になるが，このようなモデルの拡張性についてはのちに5.(5)で考察する．

(4) ミーティングと外部不経済

前述したように，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)[11]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[11]といわれているものに他ならない．のちに，5.(3)で考察するように，市場薄の外部不経済性はミーティング均衡の成立に対して極めて重要な役割を果たすことになる．以上の外部不経済性は多くのミーティング過程に付随する本質的な外部不経済性である．本研究で提案するモデルは極めて単純な構造を有しているが，これら2種類の外部不経済性を効果的に表現できるという利点を持っている．

3．ミーティング過程のモデル化

(1) モデル化の前提

同質な個人が2人ミーティングを繰り返すミーティング過程をとりあげる．個人はミーティング相手に関する記憶を持たない．いま，ある都市内に $2m+1$ 人の個人が生活し，互いにミーティングの相手を個人的な情報に基づいて探索していると考えよう．ここでは，記述の簡略化のため，個人数を奇数 $2m+1$ に設定するが，個人数が十分多くなればこの仮定は問題にはならない．各個人は「ミーティングの相手が見つかったり」，あるいは「他人からミーティングに対する申し込みがあった」場合，当該の相手とミーティングを行うかどうかを判断する．双方の当事者が，ミーティング形成に合意した場合は，そこで探索行動は打ち切られ，直ちにミーティングが形成される．ミーティング形成に関する合意が成立しなかった場合，両者ともミーティング相手の探索を再び開始する．ミーティングが形成された場合，ある時間が経過すればミーティングが終了し，2人の個人は互いに離ればなれになり，再びミーティングの相手を捜し始める．ミーティングの最中は，探索行動は一時中止される．また，ミーティングの申し込みがあっても申し出を断ることとする．また，探索過程において，過去にミーティングを行った相手と再びミーティングを形成することを妨げない．すなわち，探索過程において，過去にミーティングを形成したことのある相手とそうでない相手を区別しない．以下では，すべての個人がこのようなミーティングの形成を繰り返す過程を出生・死滅過程として記述しよう．

(2) ミーティング過程のモデル化

ある時刻 t において $2n+1$ $(0<2n+1\leq 2m+1)$ 人がミーティングを行っておらず，$2(m-n)$ 人がミーティングを行っていると考える．各個人には $2n$ 人の（自分以外の）潜在的な交渉相手が存在している．ミーティングの形成・終了する事象が稀少であり，ある微小時間 Δt の間に2組以上のミーティングが形成される（ある

いは2組以上のミーティングが終了する，あるいはその両方が生起する）確率を無視できるものとする．すなわち，ある時刻tから微小時間 $t+\Delta t$ の間におこりうる状態の変化としては，1）1組のミーティングが成立する，2）1組のミーティングが解消される，3）そのどちらもおこらない，のいずれかである．時刻tにおいて，ミーティングを行っていない各個人が$2n$人の潜在的なミーティングの交渉相手を有しているとき，ある微小時間Δtにおいてミーティングが形成される割合を$a(n)$，1組のミーティングが終了する割合を $b(n)$ で表そう．これらの割合は，いずれも潜在的なミーティングの交渉相手の数$2n$に依存している．$a(n), b(n)$の具体的な形式は次節で特定化する．時刻$t+\Delta t$において，ミーティングを行っていない個人が$2n$人のミーティング相手を有している確率 $P_{t+\Delta t}(n)$ $(n=0,1,\cdots,m)$ は，出生死滅過程

$$P_{t+\Delta t}(0)=a(1)\Delta t P_t(1)+(1-b(0)\Delta t)P_t(0) +o(\Delta t)!, \tag{1a}$$

$$P_{t+\Delta t}(n)=a(n+1)\Delta t P_t(n+1)+b(n-1)\Delta t \cdot P_t(n-1)+[1-a(n)\Delta t-b(n)\Delta t]P_t(n) +o(\Delta t)!, \quad (n=1,2,\cdots,m-1) \tag{1b}$$

$$P_{t+\Delta t}(m)=b(m-1)\Delta t P_t(m-1)+[1-a(m)\Delta t] \cdot P_t(m)+o(\Delta t)!, \tag{1c}$$

$$\sum_{n=0}^{m} P_t(n)=1 \tag{1d}$$

により記述される．ここに，$o(\Delta t)!$は高次の微小項である．式(1a)-(1c)の両辺をΔtで割り，$\Delta t \to 0$の極限で$\lim_{\Delta t \to 0} o(\Delta t)!/\Delta t=0$が成立すれば次式を得る．

$$\dot{P}(0)=a(1)P(1)-b(0)P(0), \tag{2a}$$

$$\dot{P}(n)=a(n+1)P(n+1)+b(n-1)P(n-1) -[a(n)+b(n)]P(n), \ (n=1,2,\cdots,m-1) \tag{2b}$$

$$\dot{P}(m)=b(m-1)P(m-1)-a(m)P(m) \tag{2c}$$

$$\sum_{n=0}^{m} P(n)=1, \tag{2d}$$

ただし，$\dot{P}(n)=\lim_{\Delta t \to 0}\{P_{t+\Delta t}(n)-P_t(n)\}/\Delta t$である．$a(n) \geq 0, b(n) \geq 0$ が成立するとき，$t \to \infty$ の極限でシステム(2a)-(2c)は定常状態に収束する．定常状態では，$\dot{P}(n)=0$ $(n=0,\cdots,m)$であり，

$$b(0)P(0)=a(1)P(1), \tag{3a}$$

$$a(n+1)P(n+1)+b(n-1)P(n-1) =[a(n)+b(n)]P(n) \ (n=1,2,\cdots,m-1) \tag{3b}$$

$$b(m-1)P(m-1)=a(m)P(m) \tag{3c}$$

を得る．式(3a),(3b),(3c)より帰納的に次式が成り立つ．

$$a(n+1)P(n+1)=b(n)P(n) \quad (n=1,\cdots,m-1) \tag{4}$$

漸化式(4)を境界条件(3a)(3c)及び条件(2d)の下で解くことにより，定常確率は次式で表される．

$$P(0)=\frac{\prod_{i=1}^{m} a(i)}{\prod_{i=1}^{m} a(i)+\sum_{k=2}^{m}\left\{\prod_{i=k}^{m} a(i)\prod_{j=0}^{k-2} b(j)\right\}+\prod_{j=0}^{m-1} b(j)} \tag{5a}$$

$$P(n)=\prod_{l=1}^{n}\frac{b(l-1)}{a(l)}P(0) \ (n=1,\cdots,m-1) \tag{5b}$$

$$P(m)=\frac{\prod_{j=0}^{m-1} b(j)}{\prod_{i=1}^{m} a(i)+\sum_{k=2}^{m}\left\{\prod_{i=k}^{m} a(i)\prod_{j=0}^{k-2} b(j)\right\}+\prod_{j=0}^{m-1} b(j)} \tag{5c}$$

（3）ミーティングの生成・死滅割合

時刻tで$2n+1$人がミーティング相手を探索していると考える．彼らは，自分以外の$2n$人の潜在的な交渉相手とミーティングを行う可能性を持っている．しかし，当該の個人は誰がミーティングを行っていないかという情報を事前には持ちえず，結局，自分以外の$2m$人全員を対象としてミーティング相手の探索を行わなければならない．ミーティングの交渉相手と出会う機会として，1）本人の探索により相手を発見する場合と2）相手からミーティングの申し込みがある場合がある．ここで，個人iによる探索努力を個人iが単位時間当たりに相手を発見する確率測度α_i（以下，探索強度と呼ぶ）を用いて表現しよう．本人の努力によりミーティングの交渉相手を発見する確率は当該時刻においてミーティングを行っていない相手が個人全体に占める割合$2n/2m$に依存すると考えよう．微小時間$[t, t+\Delta t]$にミーティング相手を発見する確率$s_i\Delta t$は

$$s_i\Delta t=\alpha_i\frac{n}{m}\Delta t \tag{6}$$

と表せる．s_iは単位時間当たりにミーティングの交渉相手を発見する確率測度である．すべての個人が対称的であり，探索強度がすべて同一であると仮定しよう．個人i以外の代表的個人（他人）の探索強度をα^iと表す．個人iは変数α_iを制御できるが，他人の探索強度α^iを制御することはできないため，変数α_iとα^iを区別する．このとき，自分を除く$2n$人が探索強度α^iでミーティング相手を探索しているときに，そのなかの1人が微小時間$[t, \Delta t]$において自分自身を発見してくれる確率は$(\alpha^i/2m)\Delta t$である．したがって，$2n$人のうち，誰か1人からミーティングの申し込みを受ける確率$s^i\Delta t$は

$$s^i\Delta t=\alpha^i\frac{n}{m}\Delta t \tag{7}$$

と表せる．ここに，s^iは単位時間当たりにミーティングの交渉相手として発見される確率測度である．したがっ

て，個人iがマッチング相手と$[t, t+\Delta t]$において出会う確率$h_i(n)\Delta t$は次式で表される．

$$h_i(n)\Delta t = (\alpha_i + \alpha^i)\frac{n}{m}\Delta t \tag{8}$$

形成されたマッチングペアにおいて当事者同士がミーティングに同意し，ミーティングが形成される確率をπ_iとしよう．ミーティングが形成されるか否かという合意は瞬時に形成されると仮定すれば，微小時間$[t, t+\Delta t]$においてミーティングが形成される確率$\xi_i(n)\Delta t$は

$$\xi_i(n)\Delta t = \pi_i(\alpha_i + \alpha^i)\frac{n}{m}\Delta t \tag{9}$$

で表される．マッチング過程において，双方がミーティングを行うことに合意すればその時点で探索行動は中止され，直ちにミーティングが形成される．一方，ミーティングに対する合意が成立しなかった場合には再び探索行動を始める．ここで，個人が対称的であり定常状態において，$\xi_i(n) = \xi(n), \pi_i = \pi, \alpha_i = \alpha, \alpha^i = \hat{\alpha}$が成立すると仮定しよう．時刻$t$にミーティングを行っていない$2n+1$人が互いに独立にミーティング相手を探索するとき，都市システム全体の中でΔtにミーティングが新しく形成される確率は次式のようになる．

$$\begin{aligned} a(n)\Delta t &= \frac{\xi(n)(2n+1)\Delta t}{2} \\ &= \pi(\alpha+\hat{\alpha})\frac{n(2n+1)}{2m}\Delta t \end{aligned} \tag{10}$$

一方，ミーティングの継続時間が平均継続期間長 β^{-1} の指数分布に従うと仮定する．t 期に $m-n$ 個のミーティングが行われ，単位時間 Δt 中にミーティングが終了する確率 $b(n)\Delta t$ は，次式のように表せる．

$$b(n)\Delta t = \beta(m-n)\Delta t \tag{11}$$

4．個人のミーティング行動のモデル化

(1) ミーティング合意形成行動

マッチング相手の探索は主として，情報・通信ネットワークを用いて行われると考える．マッチング相手とのアポイントメントがとれれば，ミーティングが形成されフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションが行われる．ミーティング場所までの移動には交通ネットワークが用いられる[1]．ミーティングが開催されるか否かに関わらず，ミーティング相手を探索するためには情報費用が必要となる．一方，交通費用はミーティングが開催される場合にのみ必要となる．

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．ミーティングのための場所，費用負担等も重要な合意形成項目である．このような合意形成問題は，bargaining game[13]を用いることによるアプローチが可能であるが，ここでは，簡単化のためにミーティングに要する費用は当事者が互いにある一定額を負担すると仮定する．

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

$$\begin{aligned} U_i^j(t:T,\varepsilon_i^j) &= \int_t^T (\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j)\exp\{-r(\tau-t)\}\mathrm{d}\tau - c_i^j \\ &= \frac{\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j}{r}\{1-\exp[-r(T-t)]\} - c_i^j \end{aligned} \tag{12}$$

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．ミーティング費用は個人i, jのうち，どちらがミーティングを申し出るかにより異なった値をとるが，前述したようにミーティングをどちらが申し込んだかによらず一定値をとると考えよう．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．

$$\begin{aligned} EU_i^j(t:\varepsilon_i^j) &= \int_t^\infty U_i^j(t:T,\varepsilon_i^j)\beta\exp\{-\beta(T-t)\}\mathrm{d}T \\ &= \gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \end{aligned} \tag{13}$$

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$H_i$より大きいときに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

$$\begin{aligned} p_i^j &= \mathrm{Prob}\{EU_i^j(t:\varepsilon_i^j) \geq H_i\} \\ &= \mathrm{Prob}\{\gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \geq H_i\} \end{aligned} \tag{14}$$

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.

$$p_i^j = \mathrm{Prob}\{\gamma(\bar{v}_i^j + \varepsilon_i^j) - c_i^j \geq H_i\} = \Phi(\bar{v}_i^j - \delta(c_i^j + H_i)) \quad (15a)$$

$$p_j^i = \mathrm{Prob}\{\gamma(\bar{v}_j^i + \varepsilon_j^i) - c_j^i \geq H_j\} = \Phi(\bar{v}_j^i - \delta(c_j^i + H_j)) \quad (15b)$$

ただし，$\delta = \gamma^{-1}$である．個人i, jによる交渉の結果，生起する事象としては1）両者ともにミーティングに合意する（状況Ω_1），2）個人iは合意するがjは拒否をする（状況Ω_2），3）個人jは合意するがiは拒否をする（状況Ω_3），4）両者ともに拒否をする（状況Ω_4），の４通りが存在する．いま，式(15a),(15b)において，ランダム効用項ε_i^jが互いに独立であると仮定しよう．この時，各状況が生起する確率$P(\Omega_i)$ $(i = 1, \cdots, 4)$は，

$$P(\Omega_1) = p_i^j p_j^i \quad (16a)$$

$$P(\Omega_2) = p_i^j(1 - p_j^i) \quad (16b)$$

$$P(\Omega_3) = (1 - p_i^j)p_j^i \quad (16c)$$

$$P(\Omega_4) = (1 - p_i^j)(1 - p_j^i) \quad (16d)$$

と表せる．ミーティングが生起する確率は式(16a)で表せる．このような合意確率は，例えばランダムマッチングモデル[6)]を用いて記述できる．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．

$$\pi(H, \hat{H}) = \Phi(\bar{v} - \delta(c + H))\Phi(\bar{v} - \delta(c + \hat{H})) \quad (17)$$

$\hat{H}$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．正規確率密度関数$\phi(\varepsilon)$に対して$\int \varepsilon\phi(\varepsilon)d\varepsilon = -\phi(\varepsilon), \phi(\varepsilon) = \phi(-\varepsilon), \Phi(\varepsilon) = 1 - \Phi(-\varepsilon)$が成立することより，ミーティングの期待効用の平均値$EV(H)$は

$$EV(H) = \frac{\int_{\delta(H+c)-\bar{v}}^{\infty} EU(t:\varepsilon)\phi(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon}{\int_{\delta(H+c)-\bar{v}}^{\infty} \phi(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon} = \gamma\bar{v} - c + \gamma\frac{\phi(\bar{v} - \delta(c + H))}{\Phi(\bar{v} - \delta(c + H))} \quad (18)$$

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(18)の第３項）の和として表現される．

（２）最適探索行動の決定

任意の時刻において，各個人は都市内で形成されているミーティングの数を正確には知ることはできない．個人は各時刻を通じて交渉相手が個人全体に占める真の割合n/mを知りえない．各個人は不確実な環境の下で意思決定を繰り返し，長期的な学習過程を通じて交渉相手の個人全体に占める割合の期待値$E[n/m]$に関する合理的期待を形成しうる．このような合理的期待形成の問題は５.（１）で改めて議論することとし，以下ではひとまずすべての個人はあ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

$$q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t = (\alpha + \hat{\alpha})E^s\left[\frac{n}{m}\right]\Delta t \quad (19)$$

と表せる．ただし，$\hat{\alpha}$は他人の平均的探索強度を表す．対称性の仮定より$\alpha = \hat{\alpha}$が成立するが，変数を支配している主体を明確にするために当面両者を区別する．式(19)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の現在価値に割り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

$$\overline{EU}(t,\varepsilon) = \int_t^{\infty} \bar{U}(t:T,\varepsilon)\beta\exp\{-\beta(T-t)\}\mathrm{d}T \quad (20)$$

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．

$$R(t) = \frac{\int_{\delta(c+H)-\bar{v}}^{\infty} \overline{EU}(t,\varepsilon)\phi(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon}{\int_{\delta(c+H)-\bar{v}}^{\infty} \phi(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon} \quad (21)$$

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$p(\omega_1), p(\omega_2), p(\omega_3)$は以下のようになる．

$$p(\omega_1) = \pi(H, \hat{H})q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t \quad (22a)$$

$$p(\omega_2) = \{1 - \pi(H, \hat{H})\}q(\alpha, \hat{\alpha})\Delta t \quad (22b)$$

$$p(\omega_3) = \{1 - q(\alpha, \hat{\alpha})\}\Delta t \quad (22c)$$

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[14)]より

$$V(t) = \max_{\alpha\geq 0, H}\left\{-C(\alpha)\Delta t + \frac{\pi(H,\hat{H})q(\alpha,\hat{\alpha})\Delta t}{1+r\Delta t} \cdot R(t+\Delta t) + \frac{1-\pi(H,\hat{H})q(\alpha,\hat{\alpha})\Delta t}{1+r\Delta t}V(t+\Delta t)\right\} \quad (23)$$

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，

$$C(0)=0,\frac{\partial C(\alpha)}{\partial\alpha}\geq 0,\frac{\partial^2 C(\alpha)}{\partial\alpha^2}\geq 0 \qquad (24)$$

を満足すると仮定する．式(23)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(23)において定常状態を仮定し$\Delta t\to 0$の極限をとれば再帰方程式

$$rV=\max_{\alpha\geq 0,H}\{-C(\alpha)$$
$$+\pi(H,\hat{H})q(\alpha,\hat{\alpha})[EV-\rho V]\} \qquad (25)$$

を得る（**付録I**参照）．ただし，$\rho=r/(r+\beta)$，EVはミーティングの期待効用の平均値(18)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(25)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

$$Z=\max_{\alpha\geq 0,H}\{-C(\alpha)$$
$$+\pi(H,\hat{H})q(\alpha,\hat{\alpha})[EV(H)-\rho\bar{V}]\} \qquad (26)$$

の1階の最適化条件は次式で与えられる．

$$\frac{\partial\pi(H,\hat{H})q(\alpha,\hat{\alpha})\{EV(H)-\rho\bar{V}\}}{\partial H}=0 \qquad (27a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial\alpha}=\pi(H,\hat{H})\frac{\partial q(\alpha,\hat{\alpha})}{\partial\alpha}\{EV(H)-\rho\bar{V}\} \quad (27b)$$

式(17),(18)を用いて最適化条件(27a)を展開すれば

$$(\rho\bar{V}-H)q(\alpha,\hat{\alpha})\phi(\bar{v}-\delta(c+H))=0 \qquad (28)$$

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

$$H^*=\rho\bar{V} \qquad (29)$$

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．このことを明示的に示すために，式(29)を用いて最適化条件(27b)を書き換える．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．ここで，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．この時，すべての個人は対称的な最適戦略$H^*(\bar{V}),\alpha^*(\bar{V})$をとることになる．そこで，最適戦略$H^*(\bar{V})$を式(17),(18)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

$$\pi^*(\bar{V})=\Phi(\bar{v}-\delta c-r\bar{V})^2 \qquad (30)$$

$$EV^*(\bar{V})=\gamma\bar{v}-c+\gamma\frac{\phi(\bar{v}-\delta c-r\bar{V})}{\Phi(\bar{v}-\delta c-r\bar{V})} \qquad (31)$$

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(27b)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(19),(30),(31)を考慮すれば，最適化条件(27b)は次式のように書き換えることができる．

$$\frac{\partial C}{\partial\alpha}=\pi^*(\bar{V})E^s\left[\frac{n}{m}\right]\{EV^*(\bar{V})-\rho\bar{V}\} \qquad (32)$$

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(25)を満足しなければならない．すなわち，次式が成立する．

$$r\bar{V}=-C(\alpha^*(\bar{V}))+\pi^*(\bar{V})q(\alpha^*(\bar{V}),\hat{\alpha}^*(\bar{V}))$$
$$\cdot\{EV^*(\bar{V})-\rho\bar{V}\} \qquad (33)$$

すべての個人が所与の主観的期待$E^s[n/m]$の下で，式(32),(33)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．ここで，探索戦略，均衡水準が変化すれば，それと対応して期待値$E^s[n/m]$が変化することに着目しよう．したがって，ミーティング過程の長期均衡状態を定義するためには，個人の主観的期待$E^s[n/m]$の均衡状態を定義する必要がある．

5．ミーティング均衡

（1）ミーティング過程の特性

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．ミーティングから得られる効用は，相手と出会った時点で明らかになるが，相手を探索している段階ではその値を確定的に把握することはできない．さらに，ミーティング過程では，特定の相手と交渉が繰り返されるのではなく相手がランダムに代わっていく．相手との交渉の結果を逐一記憶していくことは不可能に近い．このような状況の中で個々人が完全な合理性を追求するとは考えにくい．むしろ，限られた情報獲得能力の中で，主観的期待や行動を逐次修正していくと考えた方が現実的であろう．このような限定合理性の下で，各個人の行動は，互いに調整されやがて定常政策に収束していく[15]．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[16]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[5]の下での定常ナッシュ均衡として定式化してみよう．

（2）合理的期待均衡

微小時間におけるミーティング生成・死滅強度がそれぞれ式(10),(11)で表されるとき，式(5a)-(5c)より，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（以下，遭遇確率と呼ぶ）は次式で定義される．

$$E\left[\frac{n}{m}\right]=\frac{\sum_{n=0}^{m} nx^n\psi(n)}{\sum_{n=0}^{m} mx^n\psi(n)}=f(x) \qquad (34)$$

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．$m$が十分に大きいとき$f(x)$は次式で近似できる（**付録II**参照）．

$$f(x)=\frac{1}{2}\sqrt{x^2+4x}-\frac{x}{2} \qquad (35)$$

$f(x)$は増加かつ凹関数であり，$f(0)=0, f(\infty)=1$である．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(32)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．このような学習過程は，ベイズ学習モデル[5]を用いて定式化できるが，その詳細は別の機会に発表する．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仮定しよう．このような合理的期待均衡は

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha^*}=\pi^*(EV^*-\rho V^*)f\left(\frac{\beta}{2\pi^*\alpha^*}\right) \qquad (36a)$$

$$rV^*=-C(\alpha^*)+2\pi^*\alpha^*(EV^*-\rho V^*)\cdot f\left(\frac{\beta}{2\pi^*\alpha^*}\right) \qquad (36b)$$

を同時に満足する$(\alpha^*,\cdots,\alpha^*;V^*,\cdots,V^*)$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(30)，最適期待効用(31)である．式(36a)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(36b)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．

式(36a),(36b)より，合理的期待均衡において次式が成立する．

$$rV^*=(2\eta-1)C(\alpha^*) \qquad (37)$$

ここに，$\eta=\{\partial C(\alpha)/\partial\alpha\}/\{C(\alpha)/\alpha\}>1$は費用関数の弾力値であり，均衡効用は探索情報費用にマークアップ率$2\eta-1$を乗じた値となる．

（3）比較静学分析

交通・通信ネットワークの整備がミーティング均衡に及ぼす影響を分析する．ひとまずVを与件と考えよう．ミーティング費用c，保留効用水準Hは合意形成行動に以下のような影響を及ぼす（**付録III**参照）．

[命題1]　期待生涯効用Vを与件とした場合，ミーティング費用，保留効用水準が合意形成行動に及ぼす直接的な影響は以下のように評価できる．

$$\left.\frac{\partial\pi}{\partial c}\right|_{V=const.}\le 0 \qquad \left.\frac{\partial\pi}{\partial H}\right|_{V=const.}\le 0$$

$$\left.\frac{\partial EV}{\partial c}\right|_{V=const.}\le 0 \qquad \left.\frac{\partial EV}{\partial H}\right|_{V=const.}\ge 0$$

命題1より，ミーティング費用の上昇はミーティングの合意形成確率を低下させるとともにミーティングの期待効用を低下させる．保留効用水準の増加は合意形成確率を低下させるがミーティングの期待効用が上昇することに着目しよう．保留効用水準が上昇すれば，個人はより効用の高いミーティングを選択するようになり，結果としてミーティングの期待効用EVは上昇する．

以上では期待生涯効用を一定と考えて，ミーティング費用や保留効用水準がミーティング合意形成行動に及ぼす影響を分析した．しかし，ミーティング費用の変化は個人の情報探索行動を変化させ，結果として生涯効用水準やミーティング生成頻度に影響を及ぼす．ミーティング費用cの変化がミーティング均衡に及ぼす影響は以下の命題に整理できる（**付録III**参照）．

[命題2]　探索費用関数が条件(24)を満足するとき，ミーティング費用cの変化はミーティング均衡に以下のような影響を及ぼす．

$$\frac{dV}{dc}\le 0 \quad \frac{d\alpha}{dc}\le 0 \quad \frac{dE[n/m]}{dc}\gtreqless 0$$

命題2は任意の$m>0$に対して成立する．命題2よりミーティング費用の増加は均衡効用，探索努力を減少させる．しかし，ミーティング費用がミーティング期待生起頻度$1-E[n/m]$に及ぼす影響は複雑である．いま，$dE[n/m]/dc$を展開すれば次式を得る（**付録III**参照）．

$$\frac{\frac{dE}{dc}}{\frac{E}{c}}=-\frac{\frac{\partial E}{\partial x}}{\frac{E}{x}}\left\{\frac{\frac{\partial\pi}{\partial c}}{\frac{\pi}{c}}+\frac{\frac{d\alpha}{dc}}{\frac{\alpha}{c}}+\frac{\frac{\partial\pi}{\partial V}\frac{dV}{dc}}{\frac{\pi}{V}\frac{V}{c}}\right\} \qquad (38)$$

ここに，$E = E[n/m]$である．上式の左辺は，交通施設の整備状況がミーティングの生起頻度に及ぼす影響を変化率を用いて定義したものである．右辺も同様に変化率を用いて定義している．式(38)の右辺第1項はミーティング費用の変化が合意確率に及ぼす直接的な効果を，第2項はミーティング費用の変化が探索努力に影響を及ぼし，結果的にミーティング過程における混雑現象を克服することにより生じる間接的な効果を表している．第3項はミーティング費用の変化が期待生涯効用を変化させ，それがミーティングの合意確率に及ぼす間接効果であり，2．(4) で述べた市場薄の外部不経済に該当する．各項の符号を検討することにより，交通施設の整備(cの減少) により右辺第1項，第2項は増加するが，第3項は逆に減少することが理解できる (**付録III**参照)．すなわち，交通施設の整備がミーティング生起頻度に及ぼす影響は，第1項，第2項で表される直接・間接効果と第3項で表される市場薄の外部不経済の大きさの相対的な関係に依存している．市場薄の外部不経済が第1項，第2項を卓越する場合には，交通施設の整備は期待生涯効用を増加させるが，ミーティングの生起頻度は減少するという事態が生じる．このことはフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションに関する重要な政策課題を示唆しているが，それに関しては次節で改めて言及する．

つぎに，情報・通信技術の発展がミーティング均衡に及ぼす影響を分析しよう．技術水準を表すパラメータ$\zeta > 0$を導入した費用関数$C(\alpha : \zeta)$を考える．費用関数は以下の性質を満足すると仮定する．

$$\frac{\partial C(\alpha : \zeta)}{\partial \zeta} \geq 0, \quad \frac{\partial^2 C(\alpha : \zeta)}{\partial \zeta \partial \alpha} \geq 0 \quad \frac{\partial \eta(\zeta)}{\partial \zeta} \geq 0 \tag{39}$$

情報・通信技術の発展によりζが減少すると考える．ここに，以下の命題が成立する (**付録III**参照)．

[命題3]　情報通信技術の変化はミーティング均衡に以下のような影響を及ぼす．

$$\frac{dV}{d\zeta} \gtrless 0 \quad \frac{d\alpha}{d\zeta} \geq 0 \quad \frac{dE[n/m]}{d\zeta} \gtrless 0$$

すなわち，情報通信技術の発展 (ζの減少) により探索努力αは減少する．ζの減少は探索努力を減少させるが，均衡効用が一定である限り合意確率に影響を及ぼさない．探索努力の減少はミーティングの生起頻度を減少させるが，一方で遭遇確率の増加を引き起こす．遭遇確率の増加は，結果的にマッチングの期待効用を増加させる効果を持つ．その結果，ζの減少が探索努力の減少と同時に遭遇確率の増加という拮抗した変化をもたらすため，均衡効用やミーティングの生起頻度に及ぼす変化の方向を定性的に確定することはできない．

(4) 政策論的含意

交通施設の整備はミーティング費用の減少をもたらす．しかし，式(38)に示したようにその効果は複雑である．ミーティング費用の低減は，命題1に示したようにミーティングの期待便益$\bar{v} - c + \varepsilon$を増加させ合意確率$\pi$を増加させる．また，個人の探索努力$\alpha$も増加する．その結果，ミーティングの生起頻度は増加し，ミーティング過程の混雑も増大する．一方，交通施設の整備はミーティング過程で得られる期待生涯効用Vを増加させる方向に作用するが，その結果個人の保留効用Hの増加を招く．すなわち，個人はより高い効用をもたらすミーティングを選択するようになる．命題1に示すように，保留効用Hの増加は，ミーティング合意確率πの減少をもたらす．すなわち，市場薄の外部不経済性が生じる．したがって，命題2に示すように交通施設整備がミーティングの期待形成数$1 - E[n/m]$ (言い換えれば，交通トリップの生成数) に及ぼす影響については，それを増加させる作用と減少させる作用が同時に働くため確定的なことは言えない．交通施設整備によりフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション需要が減少する可能性を否定できない．一方，命題2より，交通施設の整備により1) ミーティング費用の減少と，2) 保留効用の増大が生じるため個人の長期効用は必ず増加することが保証される．特に，2) の効果はより大きな効用を与えてくれるミーティングを選択することにより達成される効果である．このように交通施設の整備がフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションに及ぼす効果は，1) ミーティング回数 (トリップ生成量) の変化，2) ミーティングの付加価値の変化に分類できる．すなわち，命題2は，交通施設の整備がミーティング行動にもたらす効果は，ミーティング回数が変化することだけでなく，ミーティングの付加価値が増加する点にあることを指摘している．このため，交通需要の増加のみに着目して，交通施設の整備便益を評価することは便益の過小評価となろう．特に，交通施設を整備してもミーティングの生起頻度がそれほど変化しない場合には，ミーティングの付加価値の変化が主要な効果として現れる．式(37)より均衡効用水準はマークアップされた探索情報費用に一致する．このことは情報・通信ネットワークを用いた探索情報費用を用いて交通施設の整備便益を計量化しうることを示唆している．一方，命題3は，通信・情報技術の発展は，必ずしもミーティングの付加価値の上昇をもたらすとは限らず，より付加価値の低いミーティングを形成するにとどまる危険性があることを示唆している．ミーティングの付加価値を上昇させるためには交通施設の整備等を通じたミーティング費用の低減が不可欠である．なお，本研究では情報通信技術を単

にミーティング相手の探索手段としてのみ位置づけている．本来，情報通信技術の主たる役割はメッセージ・情報の伝達にあり，メッセージ・情報伝達の高度化がもたらす経済効果は多大なものであろう．この種の便益を測定するためには，交通手段と情報通信手段の選択を同時に考慮したようなモデルの開発が必要である．

（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，本モデルはその一断面を切り取って表現したものにすぎない．本モデルで得られた結論は，2人ミーティング，個人の同質性，ミーティング相手の歴史的非依存性という厳しい仮定の中で導かれたものである．今後，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．本節では，このようなモデルの発展可能性について若干の考察を行っておくこととする．

第1に，現実のミーティング過程においては学会・組織等が開催する会議，シンポジウム等の多人数ミーティングが重要な役割を果たしている．多人数ミーティングは，情報・知識の交換効率を増加させると同時に探索情報費用を大幅に節約する．多人数ミーティングが開催されるためには，それを組織化する個人や組織が必要となる．個々人がミーティングに対して支払い意思を持つ限り，そこに利潤機会やより高度な効用を獲得できる機会が生まれ，多人数ミーティングが自発的に形成される．このような多人数ミーティングや各種の人的ネットワークの形成メカニズムは探索情報費用の外部経済性に基づいて表現することが可能である．第2に，個人の選好の異質性を考慮する必要がある．また情報探索技術も個人によって多様に異なるだろう．個人間に選好や探索技術の差異が存在すれば，特定の人間に必要以上のミーティングの申し込みが殺到するという information pollution が生じたり，ミーティング相手の探索過程における非効率性の問題が生じる．特に，個人間で選好に異質性が存在する場合，選好を共有する個人同士がクラブを形成し，限られたメンバーでミーティングを繰り返す．多くの人的ネットワークや組織は，異なる選好や技術を有する個人がミーティングを繰り返す中で，自発的に形成されたものである．このような人的ネットワークの自己組織化過程のある側面は，進化論ゲーム[17)18)]を用いて記述できよう．第3の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．少なくとも，ランダムマッチングとは異なる概念を用いた分析枠組みを開発する必要があるだろう．最後に，異質な個人の相互作用により生じる人的ネットワークの自己組織化過程は複雑な非線形性を有していることを指摘しておきたい．自己組織化の過程の中で，ある特定の個人やグループがネットワーク中心となりスター的な役割を果たすこともある．複雑な非線形性を有するミーティング過程は複数の定常均衡解を有しており，交通施設の整備は人的ネットワーク構造を基本的に変化させる可能性がある．このようなネットワークの自己組織化とその分岐に関する分析が今後重要な研究課題になると考える．

6．おわりに

本研究では，同質な個人により「個人情報・近視眼的戦略・逐次決定」方式で行われる2人ミーティング過程をとりあげ，そこで生じるミーティング均衡の特性について理論的な分析を試みたものである．そのために，フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションが，ミーティング相手の探索行動と合意形成行動により構成されることを指摘し，個人のミーティング行動を Bellman の最適性原理を用いて表現した．さらに，長期定常状態において実現するミーティング均衡を合理的期待均衡として記述した．本研究の理論分析における重要な知見の1つは，交通施設整備が交通需要の量的な変化だけでなく，ミーティングの付加価値の上昇という質的な変化をもたらすことを明らかにした点にある．著者等の知る限り，このような交通施設整備によるフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションの質的な変化を指摘した研究事例は見あたらない．なお，5.（5）において今後の研究課題について考察したが，本研究で提案したモデルの拡張・発展という点に焦点を絞っても以下のような課題が残されている．第1に，本モデルではある1つの都市の中で繰り返されるミーティング過程を対象としたが，今後，空間や都市システムを明示的に組み込んだようなモデル化が必要となろう．筆者らは，非常に初歩的な段階ではあるが，都市システムにおけるミーティング過程のモデル化を試みている[21)]が，本研究で指摘したような外部経済性を考慮したようなモデルの拡張が必要となろう．第2に，家計だけでなく企業間・企業内部でのミーティング過程のモデル化も必要である．特に，ミーティング過程における集積の経済性に関するミクロ経済分析は，都市核や都市システムの自己組織化の過程を理解するための基礎研究になろう．最後に，実証分析が残されている．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[6]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と言わざるを得ない．このように今後に残された研究課題は極めて多い．しかし，本論文を通じて，従来その重要性が指摘されながらも，ほとんど研究がなされなかったフェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーション過程の数学的モデル化の可能性について一つの方向性を示し得たと考える．

付録I　定常再帰方程式の導出

定常状態では$V(t+\Delta t+T)=V(t+\Delta t)(T>0)$が成立すると仮定しよう．式(21)において積分を実行すれば$R(t+\Delta t)=EV+vV(t+\Delta t)$が成立する．ただし，$v=\beta/(r+\beta)$である．式(23)より次式を得る．

$$\frac{r\Delta t}{1+r\Delta t}V(t)=\max_{\alpha\geq 0,H}\Big\{-C(\alpha)\Delta t+\frac{\pi q\Delta t}{1+r\Delta t}[EV+(v-1)V(t+\Delta t)]+\frac{1}{1+r\Delta t}\{V(t+\Delta t)-V(t)\}\Big\}.$$

上式の両辺を$\Delta t/(1+r\Delta t)$で除することにより

$$rV(t)=\max_{\alpha\geq 0,H}\Big\{-C(\alpha)(1+r\Delta t)+\pi q[EV+(v-1)V(t+\Delta t)]+\frac{V(t+\Delta t)-V(t)}{\Delta t}\Big\}$$

を得る．定常状態で，$\lim_{\Delta t\to 0}V(t+\Delta t)=V(t)=V$, $\lim_{\Delta t\to 0}\{V(t+\Delta t)-V(t)\}/\Delta t=0$が成立することに留意すれば，$\Delta t\to 0$の極限において次式が成立する．

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

ただし，$\rho=r/(r+\beta)$である．

付録II　$E[n/m]$の導出

$P(m+1)=0$が成立することに留意すれば，$E[n^2]=\sum_{n=0}^{m}(n+1)^2P(n+1)$, $E[n]=\sum_{n=0}^{m}(n+1)P(n+1)$が成立．また，$E[n(2n+1)]=2E[n^2]+E[n]$は明らか．一方，式(4),(10),(11)より次式を得る．

$$\begin{aligned}E[n(2n+1)]&=\sum_{n=0}^{m}(n+1)(2n+3)P(n+1)\\&=\sum_{n=0}^{m}(n+1)(2n+3)\frac{2m\beta(m-n)}{\overline{\alpha}\pi(n+1)(2n+3)}P(n)\\&=\frac{2m\beta}{\overline{\alpha}\pi}\sum_{n=0}^{m}(m-n)P(n)=\frac{2m\beta}{\overline{\alpha}\pi}\{m-E[n]\}\end{aligned}$$

$\overline{\alpha}=\alpha+\hat{\alpha}$である．したがって，次式を得る．

$$E[n^2]=-\frac{E[n]}{2}+\frac{m\beta}{\overline{\alpha}\pi}\{m-E[n]\}$$

両辺をm^2で割り$m\to\infty$の極限をとれば次式が成立．

$$E\left[\left(\frac{n}{m}\right)^2\right]=\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}\left\{1-E\left[\frac{n}{m}\right]\right\}\qquad\text{(II.1)}$$

一方，式(34)の両辺をxに関して微分すれば

$$\frac{dE\left[\frac{n}{m}\right]}{dx}=\frac{m}{x}Var\left[\frac{n}{m}\right]\qquad\text{(II.2)}$$

を得る．ここに，$Var[n/m]=E[(n/m)^2]-E[n/m]^2$は分散である．任意の$m$に対して$0\leq E[n/m]\leq 1$, $0\leq E[(n/m)^2]\leq 1$が成立し，分散$Var[n/m]$は任意のmに関して$0\leq Var[n/m]\leq 1$. $E[n/m]$はxの関数$0\leq f(x)\leq 1$. 式(II.2)より，$\lim_{x\to 0}\partial f(x)/\partial x=\infty, \lim_{x\to\infty}\partial f(x)/\partial x=0$. 中間値の定理より，任意の$\infty>u>0$に対して$dE[n/m]/dx=u$となる$x$が存在する．任意の$m$に対して$dE[n/m]/dx=u$が成立するためには$\lim_{m\to\infty}Var[n/m]=0$でなければならない．すなわち，十分大きな$m$に対して近似的に

$$\left\{E\left[\frac{n}{m}\right]\right\}^2+\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}E\left[\frac{n}{m}\right]-\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}=0\qquad\text{(II.3)}$$

が成立する．式(II.3)より次式を得る．

$$E\left[\frac{n}{m}\right]=\frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}\right)^2+4\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}}-\frac{1}{2}\frac{\beta}{\overline{\alpha}\pi}$$

付録III　命題の証明

（命題１） πの定義より，$\partial\pi/\partial c\leq 0,\partial\pi/\partial H\leq 0$は明白．$y=\bar{v}-\delta(c+H)$を定義する．$\delta\gamma=1$. 式(18)より$\partial EV/\partial c=-1+(y\phi/\Phi+\phi^2/\Phi^2)$. Mill's ratio[19]の公式より任意のyに対して$1\geq y\phi/\Phi+\phi^2/\Phi^2\geq 0$が成立[20]．これより$\partial EV/\partial c\leq 0$. 同様に，$\partial EV/\partial H=y\phi/\Phi+\phi^2/\Phi^2\geq 0$も自明．**（命題２）** まず，以下の導関数の符号を評価する．i) 式(II.2)より$\partial E[n/m]/\partial x\geq 0$. ii) 命題1より$\partial(EV-\rho V)/\partial c=y\phi/\Phi+\phi^2/\Phi^2-1\leq 0$ iii) 仮定より$\partial C/\partial\alpha\geq 0$, $\partial^2C/\partial\alpha^2\geq 0$, $\partial\eta/\partial\alpha\geq 0$. iv)$f(x)$が単調増加凹関数，かつ$f(0)=0$であることより，$f-(\partial f/\partial x)x\geq 0$が成立．式(36a),(37)の両辺を均衡解$x^*,\alpha^*,V^*$の近傍で全微分すれば

$$\begin{aligned}&\Xi_c^a dc+\Xi_V^a dV-\Xi_\alpha^a d\alpha=0\\&rdV-\Xi_\alpha^b d\alpha=0\end{aligned}\qquad\text{(III.1)}$$

を得る．$\Xi_c^a=\{f^*-(\partial f^*/\partial x^*)x^*\}(\partial\pi^*/\partial c)(EV^*-\rho V^*)+\pi^*f^*\{\partial(EV^*-\rho V^*)/\partial c\}\leq 0$, $\Xi_\alpha^a=\partial^2C^*/\partial\alpha^2+\pi^*(EV^*-\rho V^*)(\partial f^*/\partial x^*)(x^*/\alpha^*)\geq 0$, $\Xi_V^a=\pi^*f(x^*)\partial(EV^*-\rho V^*)/\partial V^*+(\partial\pi^*/\partial V^*)(EV^*-\rho V^*)\{f^*-(\partial f^*/\partial x^*)x^*\}\leq 0$, $\Xi_\alpha^b=(2\partial\eta^*/\partial\alpha^*)C^*+(2\eta^*-1)(\partial C^*/\partial\alpha^*)\geq 0$である．式(III.1)より

$$\frac{d\alpha}{dc}=\frac{\Xi_c^a}{\Xi_\alpha^a-\Xi_V^a\Xi_\alpha^b/r}\leq 0$$

$$\frac{dV}{dc}=\frac{\Xi_\alpha^b}{r}\frac{\partial\alpha}{\partial c}\leq 0.$$

一方，$\partial E[n/m]/\partial c = -(\partial f^*/\partial x^*)x^*\{(\partial \alpha^*/\partial c)/\alpha^* + (\partial \pi^*/\partial c)/\pi^* + (\partial \pi^*/\partial V^*)(\partial V^*/\partial c)/\pi^*\}$．$\partial \alpha^*/\partial c \le 0, \partial \pi^*/\partial c \le 0, \partial V^*/\partial c \le 0, \partial \pi^*/\partial V^* < 0$ より $\partial E[n/m]/\partial c$ の符号は不定．両辺を E/c で割れば式 (38) を得る．**（命題３）** 均衡解の近傍で

$$\Xi_\eta^{a'} d\zeta - \Xi_V^{a'} dV - \Xi_\alpha^{a'} d\alpha = 0$$
$$rdV - \Xi_\zeta^{b'} d\zeta - \Xi_\alpha^{b'} d\alpha = 0 \qquad \text{(III.2)}$$

を得る．なお，仮定より $\Xi_\zeta^{a'} = \partial^2 C^*/\partial\alpha\partial\zeta \ge 0$, $\Xi_\alpha^{a'} = -\pi^*(EV^* - \rho V^*)(\partial f^*/\partial x^*)(x^*/\alpha^*) - \partial^2 C^*/\partial \alpha^2 \le 0, \Xi_V^{a'} = \pi^* f(x^*)\partial(EV^* - \rho V^*)/\partial V^* + (\partial\pi^*/\partial V^*)(EV^* - \rho V^*)\{f^* - (\partial f^*/\partial x^*)x^*\} \le 0$, $\Xi_\zeta^{b'} = 2(\partial\eta/\partial\zeta)C^* + (2\eta - 1)\partial C^*/\partial\zeta \ge 0$, $\Xi_\alpha^{b'} = (2\eta - 1)\partial C^*/\partial\alpha \ge 0$．式 (III.2) より次式が成立する．

$$\frac{d\alpha}{d\zeta} = \frac{\Xi_\zeta^{a'} - \Xi_V^{a'}\Xi_\zeta^{b'}/r}{\Xi_\alpha^{a'} + \Xi_V^{a'}\Xi_\alpha^{b'}/r} \ge 0$$
$$\frac{dV}{d\zeta} = \frac{\Xi_\zeta^{a'}\Xi_\alpha^{b'} + \Xi_\alpha^{a'}\Xi_\zeta^{b'}}{r\Xi_\alpha^{a'} + \Xi_V^{a'}\Xi_\alpha^{b'}} \gtrless 0.$$

命題２と同様の方法で $dE[n/m]/d\eta$ の符号が不定であることを示すことができる．

参考文献

1) 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.
2) Daganzo, C. F. and Sheffi, Y.: On stochastic models of traffic assignment, *Transportation Science*, Vol. 11, pp. 253-255, 1977.
3) Fisk, C.: Some developments in equilibrium traffic assignment, *Transportation Research*, Vol. 14, B(3), pp. 243-255, 1980.
4) 小林潔司: 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.8, pp. 81-88, 1990.
5) Kobayashi, K.: Information, rational expectations and network equilibria, *The Annals of Regional Science*, Vol. 28, pp. 369-393, 1994.
6) 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.
7) 森川高行: 個人選択モデルの再構築と新展開，土木計画学研究・論文集, No. 12, pp. 15-27, 1995.
8) McMillan, J. and Rothschild, M.: Search, in: Aumann, R. J. and Hart, S. (eds.), *Handbook of Game Theory*, North-Holland, Vol. 2, pp. 905-927, 1994.
9) Diamond, P. A. : *A Search Equilibrium Approach to the Micro Foundation of Macroeconomics*, The MIT Press, 1984.
10) Mortensen, D. T. : The matching process as a noncooperative bargaining game, in: McCall, J. J. (ed.), *The Economics of Information and Uncertainty*, pp. 233-258, University of Chicago Press, 1982.
11) Howitt, P. : Costly Search Recruiting, in: Howitt, P., *The Keynesian Recovery and Other Essays*, pp. 177-196, Philip Allan, 1990.
12) Roth, A. and Sotomayor, M. A. O.: *Two-Sided Matching, A Game-Theoretic Modeling and Analysis*, Cambridge University Press, 1990.
13) Binmore, K. and Dasgupta, P. (eds.): *The Economics of Bargaining*, Basil Blackwell, 1987.
14) Bellman, R.: *Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1957.
15) Kreps, D. M.: *Game Theory and Economic Modelling*, Oxford University Press, 1990, 高森寛, 大住栄治, 長野透訳: 経済学のためのゲーム理論, マグロウヒル, 1993.
16) Muth, J. F.: Rational expectations and the theory of price movements, *Econometrica*, Vol. 29, pp. 315-335, 1961.
17) Weibull, J. W.: *Evolutionary Game Theory*, The MIT Press, 1995.
18) Vega-Redondo, F.: *Evolution, Games and Economic Behaviour*, Oxford University Press, 1996.
19) Mills, J. F.: Table of the ratio: Area to bounding ordinate for any portion of normal curve, *Biometrica*, Vol. 18, pp. 395-400, 1926.
20) Maddala, G. S.: *Limited-Dependent and Qualitative Variables in Econometrics*, pp. 165-170, Cambridge University Press, 1983.
21) 福山敬，小林潔司: 地域間の人的交流行動分析のためのランダム・マッチングモデルに関する研究，第32回都市計画学会学術研究論文集，pp. 139-144, 1997.

(1997. 5. 6 受付)

COMMUNICATION PROCESSES BY FACE-TO-FACE CONTACTS: A THEORETICAL PERSPECTIVE

Kiyoshi KOBAYASHI, Kei FUKUYAMA and Kakuya MATSUSHIMA

The face-to-face communication processes are assumed to be composed of two distinct processes: matching and agreement processes. In the former process, individuals are encouraged to search for meeting partners, while, in the latter, the matched pairs negotiate whether they meet each other. The individual behaviour in a dynamic context is described by using Bellman's principle of optimality. The equilibrium concept emerges as a stationary state where all individuals behave with rational expectations in non-cooperative fashions. A comparative static analysis is made to evaluate the impacts of policy variables upon the individual interactability.