

# テレワークおよび時間集積の経済・不経済を 考慮した通勤均衡モデル

岩見 悠太郎<sup>1</sup>・和田 健太郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 筑波大学 理工学群 社会工学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)  
E-mail:iwan2229yuuta0819@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)  
E-mail:wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

情報技術の進展によって注目を集めるテレワークは集積の経済・不経済に大きな影響を与えうる。従来研究ではその影響について空間的な側面からアプローチしてきたが、本研究では時間的な側面に与える影響を明らかにする。具体的には、時間集積の経済・不経済を考慮した Takayama<sup>1)</sup> の通勤均衡モデルに、テレワークモデルを導入し、その均衡状態・社会最適状態の分析を行った。その結果、テレワークの普及は始業時刻の集積を引き起こすこと、テレワークの導入により各企業・個人の生産性が上昇する高度なテレワークが実現する場合、社会全体の生産性が低下しうること、の二点が明らかになった。以上より、テレワークの普及にあたっては他の混雑緩和施策との整合性や社会全体の生産性低下の危険性を十分考慮する必要があると言える。

**Key Words :** telecommuting, bottleneck congestion, production effects, departure time choice

## 1. はじめに

テレワークは情報技術の進展や昨今の社会情勢によって、現在注目を集める労働形態の一つであるといえる。テレワークの特徴としては通勤費用がかからず居住地選択の幅が広がる点などが挙げられる。つまり、テレワークは空間集積に大きな影響を与える。そのため、Ota<sup>2)</sup>やOry and Makhtarian<sup>3)</sup>, Safirova<sup>4)</sup>など過去に空間集積とテレワークに関する研究は多く行われてきた。

一方で、テレワークは空間集積だけでなくピーク時の通勤混雑の緩和やコミュニケーションの減少による企業の生産性低下という形で時間集積の経済・不経済にも大きな影響を与えうる。こうした時間的な集積の経済・不経済のトレードオフを明示的に考えた最初の研究として、時差出勤の効果を分析した Henderson<sup>5)</sup>がある。しかしこの研究では通勤費用が静的な枠組みで表現されているため、渋滞現象を考慮することができていなかった。これに対して Takayama<sup>1)</sup>は Henderson<sup>5)</sup>を、ボトルネック渋滞を考慮した形で拡張し、時差出勤の効果の分析を行った。ただしこれらの研究ではテレワークの影響について考慮されておらず、テレワークが通勤混雑へ与える影

響や時差出勤との違いについては明らかになっていない。

本研究ではテレワークが通勤混雑、企業の生産性に与える影響や時差出勤との違いを明らかにすることを目的にする。具体的には時間集積の経済・不経済を考慮した通勤均衡モデルにテレワークを導入し、均衡分析を行う。また、社会最適状態との比較も行う。

## 2. モデル化

### (1) 都市と交通の状況設定

今回想定する都市は住宅地と CBD が単一の道路によって結ばれており、CBD の直前に容量  $\mu$  のボトルネックが存在する。このボトルネックでは FIFO 原則が満たされており、待ち行列を point queue モデル<sup>6)</sup>で表現する。住宅地から CBD への所要時間はボトルネックまでの移動時間とボトルネックでの待ち時間で表現される。企業の選択する始業時間は  $T$  種類の選択肢  $\mathbf{T} \equiv \{t_1, \dots, t_i, \dots, t_T\}$  から決定する。選択可能な  $\mathbf{T}$  はいずれも一定の時間間隔  $\tau$  で並んでおり、 $t_i = t_{i-1} + \tau$  が成立する。全企業の労働時間は  $H$  で同一であり、必

ず全企業が同時に業務を行う時間帯が存在 (*i.e.*,  $t_T \leq t_1 + H$ ) する。企業は始業時間に加えて、テレワーク比率を  $K$  種類の選択肢  $\mathbf{K} \equiv \{e_1, \dots, e_k, \dots, e_K\}$  から決定する。この時、始業時刻を  $t_i$ 、テレワーク比率を  $e_k$  とする企業を企業  $(i, k)$  と呼ぶ。

## (2) 労働者の行動設定

労働者は総数  $N$  人存在しており、全ての労働者は同質、同じ住宅地に居住していると仮定する。各労働者は自らの効用（賃金や通勤費用から構成）を最大化する企業  $(i, k)$  と CBD 到着時刻  $t$  をそれぞれ選択する。具体的には労働者の効用最大化問題は以下のように与えられる。

$$\max_{i,k} . u_{i,k}(t) = \omega_{i,k} - (1 - e_k)c_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $\omega_{i,k}$  は企業  $i, k$  から得られる賃金、 $(1 - e_k)$  はテレワーク比率で決まる通勤頻度を表す。 $c_i(t)$  は渋滞待ち行列費用  $q(t)$  とスケジュール遅延費用  $s(t - t_i)$  から構成される通勤費用である。

## (3) 労働者の行動設定

全ての企業は自由な参入と自由な退出が可能な中、完全競争下で一定のリターンを持つ均質な財を一単位の労働を導入して生産し、利潤最大化を目指す。このとき企業の利潤最大化問題は以下の通り与えられる。

$$\max_{i,k} . \pi = G_i(\mathbf{N})f(e_k) - \omega_{i,k} \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{N}$  とは企業  $(i, k)$  に所属する労働者数  $N_{i,k}$  のベクトルのことである。本モデルでは企業の生み出す財に対して、Henderson (1981)<sup>4)</sup> と同様の CBD で同じ時間帯に働く人が多いほど生産性が上昇していくという生産効果（集積の経済）を導入する。これは、以下のようなスケールファクター  $G(\mathbf{N})$  で与えられる。

$$\begin{aligned} G_i(\mathbf{N}) &\equiv \int_{t_i}^{t_i+H} a \cdot g(t) dt \\ &= a \sum_j \phi_{ij} \sum_k (1 - e_k) N_{j,k} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $g(t)$  はその瞬間にオフィスにいる労働者数を表している。 $\phi \equiv \{H - t|i - j\}$  であり、企業同士の労働する時間帯が同じであるほど生産性が上昇することを意味している。 $f(e_k)$  は労働者一人当たりの生産性を意味する生産関数であり、オフィスワークとテレワークの技術的代替性を捉えている。 $f(e_k)$  は以下のように与えられる。

$$f(e_k) = [(1 - e_k)^\rho + b(e_k)^\rho] \quad (3)$$

ここで、 $e_k (0 \leq e_k \leq 1)$  はテレワーク比率を表すパラメータ、 $b (0 < b \leq 1)$  はオフィスワークに対するテレワークの効率性を表すパラメータ、 $\rho (0 < \rho \leq 1)$  はテレワークの代替性・補完性を表すパラメータである。

ここで、テレワークの性質を現実的なものとして捉えるために、本研究ではテレワークを現代モデル、未来モデルの二つのパラメータ設定に分けて分析を行った。現代モデルはオフィスワークに対する補完性は存在せず、効率性も低い現代的なテレワークを想定している。未来モデルは、将来的にオフィスワークとテレワークは補完的になるべきという藤田・浜口<sup>7)</sup>の提言を基に、現代モデルに比べて補完的かつ効率的な高度化したテレワークを想定した。

## (4) 均衡条件

本モデルでは、短期と長期の二段階の均衡を考える。短期的には、労働者は自らの始業時刻  $t_i$  を与件として、通勤費用を最小化する CBD 到着時刻  $t$  を選択した結果、均衡通勤費用  $c_i^*$  が定まる。その定式化および性質は Takayama<sup>1)</sup> を参照。

長期的には、通勤費用  $c_i^*$  を与件として、企業、労働者が利潤・効用を最大化する始業時刻、テレワーク比率・労働を供給する企業を選択する。その結果、均衡状態における各企業の労働者数が決まる。長期均衡状態が満たす均衡条件は、最終的に次の相補性条件に帰着する。

$$\begin{cases} u^* - \{G_i(\mathbf{N})f(e_k) - (1 - e_k)c_i^*(\mathbf{N})\} = 0 \text{ if } N_{i,k} > 0 \\ u^* - \{G_i(\mathbf{N})f(e_k) - (1 - e_k)c_i^*(\mathbf{N})\} \geq 0 \text{ if } N_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (5a)$$

$$\sum_{i,k} N_{i,k} = N \quad (5b)$$

ここで、 $u^*$  は労働者の均衡効用を表している。以上の条件から、均衡状態での各企業の労働者と効用が求められる。なお、このモデルには正の外部性が含まれているため、複数均衡が存在しうる。したがって、その安定性を考えることで尤もらしい均衡解を求める必要がある。

## 3. 均衡分析

本件研究では企業の始業時刻とテレワーク比率の同時選択を考慮したモデルを扱っているが、最初に企業の始業時刻選択のみを考慮した状況で均衡分析を行うことで、テレワークが始業時刻選択に与える影響を分析する。次にテレワーク比率選択のみを考慮した状況で、テレワーク比率選択自体が均衡に及ぼす影響を分析する。これらの分析を基に、同時選択を考慮した状況で分析を行うことで、テレワークが集積の経済・不経済に与える影響を明らかにする。

### (1) 始業時刻選択のみを考慮した場合

企業が選択できるテレワーク比率  $e$  が一つ、始業時刻  $t$  は  $i, j$  の二つの状況を考える。これは Takayama<sup>1)</sup> モデルに外生的にテレワーク導入効果のパラメータが導

入されたモデルに帰着する。そのため、Takayama<sup>1)</sup> 同様のポテンシャルゲーム・アプローチによる居所安定均衡解の解析を行うことができる。具体的には、始業時刻に全労働者が集積する時刻集積パターンと、二つの始業時刻  $i, j$  に半分ずつ労働者が分散している時刻分散パターンの二種類の均衡解の安定性は図-1と図-2によって示される。

図-1はテレワーク導入前の安定均衡領域、図-2の (a) は現代モデルのテレワーク、(b) は未来モデルのテレワークを導入した際の安定均衡領域を示している。両図の緑の斜線領域は時刻分散パターンが安定均衡であること、白の領域は時刻集積パターンが安定均衡であることをそれぞれ意味している。

図-1と図-2の (a) を比較すると、図-2の (a) の方が、分散パターンが安定均衡となる領域が小さいことが分かる。つまり、テレワークの導入によって企業の始業時刻は集積しやすくなるといえる。これはテレワーク導入によるオフィスワーカーの減少により、通勤混雑を緩和させるためである。

次に図-2の (a) と (b) を比較すると、(b) の方が時刻集積パターンの面積が大きくなっていることが分かる。つまり、テレワークの高度化は始業時刻の集積を発生させやすくすると言える。これはテレワークの性能向上により、一人当たりの生産性上昇が、始業時刻を集積させた際の通勤費用の上昇を上回るためであると説明できる。

最後に、テレワーク導入の社会最適状態を分析した結果、社会最適時は安定時よりも時刻を集積させることが望ましいことが分かった。なお、ここでの社会最適状態は長期均衡における労働者の総効用を最大化するものであり (Takayama<sup>1)</sup> のセカンドベストに対応する)、通勤混雑による外部性は内部化されていないことに注意が必要である。

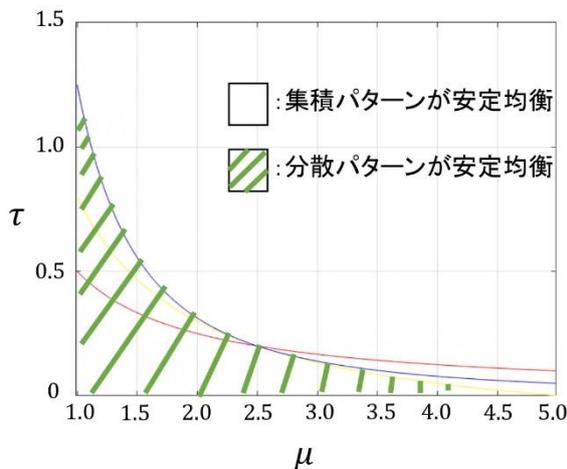


図-1 テレワーク導入前( $e = 0$ )の安定均衡領域

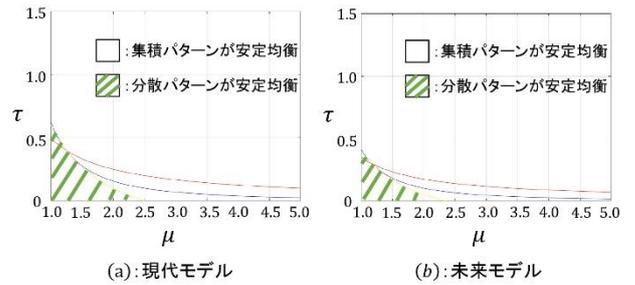


図-2 テレワーク導入時( $e = 0.4$ )の安定均衡領域

## (2) テレワーク比率選択のみを考慮した場合

企業が選択するテレワーク比率の選択肢が二種類 ( $e_1 < e_2$ )、始業時刻  $t$  の選択肢は一つであるという条件を考える。この時、全労働者が低い方のテレワーク比率  $e_1$  を選択する企業1に勤めるテレワーク集積小と、全労働者が高い方のテレワーク比率  $e_2$  を選択する企業2に勤めるテレワーク集積大と、企業1に勤める労働者も企業2に勤める労働者も存在するテレワーク分散の三種類の均衡パターンが均衡の候補となる。それぞれの均衡パターンが実現する条件は、長期均衡条件 (5a) を用いると以下のように表現される。

$$G(N_0^*)\Delta f - c^*(N_0^*) = \begin{cases} \geq 0: \text{テレワーク集積小} \\ \leq 0: \text{テレワーク集積大} \\ = 0: \text{テレワーク分散} \end{cases}$$

$\Delta f \equiv -\frac{f(e_2)-f(e_1)}{e_2-e_1}$  はテレワーク比率を上昇させた際の一人当たりの生産性の減少率、 $N_0$  は総オフィスワーカー数を表す。ここで、Takayama<sup>1)</sup> の例で用いられている関数形を用いると、 $c^*(N_0) = \beta \frac{N_0^2}{2\mu}$ 、 $G(N_0) = aHN_0$ 。また、通勤費用  $c^*(N_0)$  を集積の生産効果  $G(N_0)$  で割り引いたものを実質通勤費用と呼び、 $\frac{c^*(N_0)}{G(N_0)} = \frac{\beta N_0}{4aH\mu^2} = \gamma N_0$  で表すと、均衡条件はさらに単純化される。

$$\begin{cases} \text{テレワーク集積小: } (1 - e_1)N\gamma \leq \Delta f \\ \text{テレワーク集積大: } \Delta f \leq (1 - e_2)N\gamma \\ \text{テレワーク分散: } (1 - e_2)N\gamma \leq \Delta f \leq (1 - e_1)N\gamma \end{cases} \quad (6)$$

これにより、 $\Delta f$  が小さいときテレワーク集積大が均衡解となること、 $\Delta f$  が一定以上大きいときはテレワーク集積小が均衡解となること、その中間でテレワーク分散が均衡解となることが分かる。なお、それぞれの解が唯

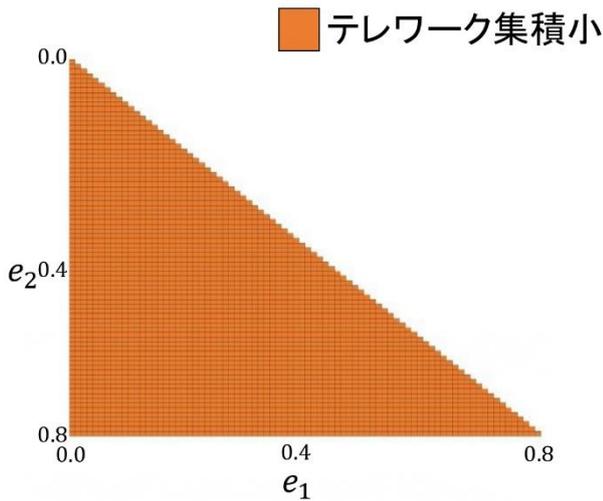


図-3 現代モデルにおける安定均衡分布

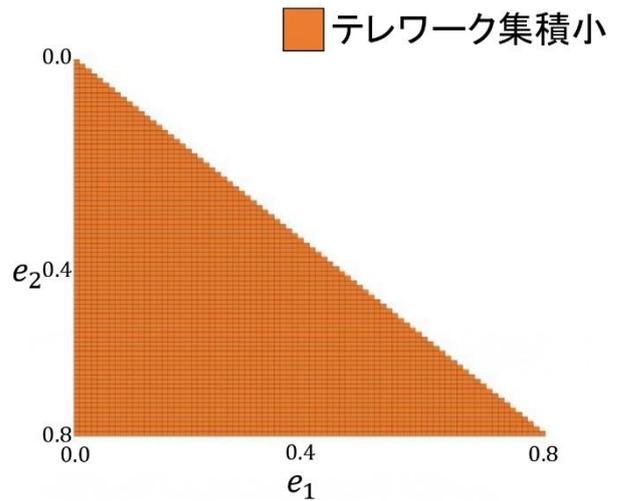


図-5 現代モデルにおける社会最適分布

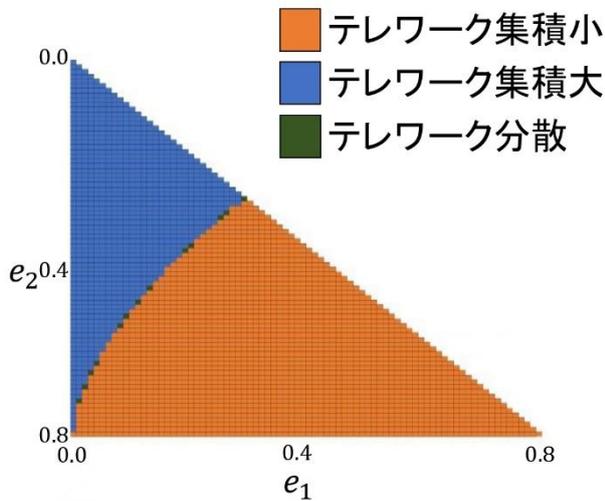


図-4 未来モデルにおける安定均衡分布

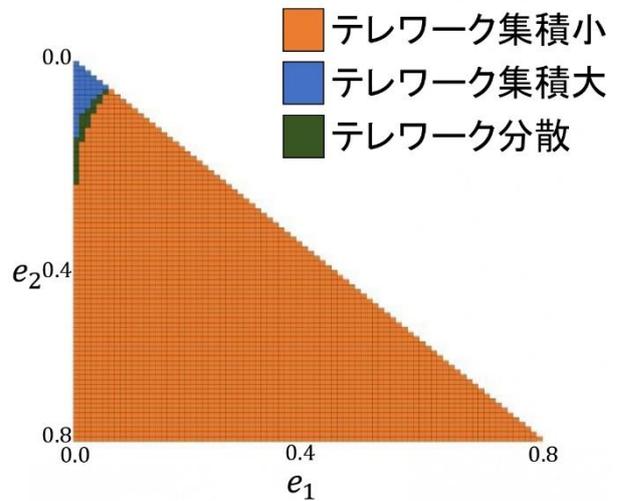


図-6 未来モデルにおける社会最適分布

テレワークが現代モデルであるときの安定均衡分布を示したものが図-3である。横軸は  $e_1$ 、縦軸は  $e_2$  のテレワーク比率を示している。オレンジの領域はテレワーク集積小が安定均衡であることを意味している。また、テレワークが未来モデルであるときの安定均衡分布を示したものが図-4である。オレンジの領域はテレワーク集積小、青の領域はテレワーク集積大、緑の領域はテレワーク分散が安定均衡であることを意味している。

図-3を確認すると、どのテレワーク比率の組み合わせにおいてもテレワーク集積が安定となっていることが分かる。これは現代的なテレワークでは、比率を上昇させるほど一人当たりの生産性が低下するので、労働者は常に比率の小さな企業1を選択するためである。一方で図-4を確認すると、左上においてテレワーク集積大が安定均衡となっていることが分かる。これはテレワークの高度化によって補完性が生まれると、一定のテレワーク比率までは一人当たりの生産性が上昇するので、労働者

は比率の大きな企業2を選択するためである。しかし、未来モデルであっても、比率を上げすぎると、補完性を効率の悪さが上回って一人当たりの生産性は減少してしまうので、右下部分ではオレンジ（テレワーク集積小）を示すのである。

次に社会最適状態を分析する。本研究では社会最適状態を労働者の総効用を最大化する状態と定義する。つまり、社会最適状態の各企業の労働者は以下の最大化問題の解から与えられる。

$$\max_{N_1, N_2} .SW(\mathbf{N}) \equiv G(N_0) \sum_k f(e_k) N_k - c^*(N_0) N_0 \tag{7a}$$

$$\sum_k N_k = N \tag{7b}$$

社会最適領域を示したものが図-5と図-6である。図-3と図-5を比較すると、現代モデルにおける安定領域と社会最適領域は一致していることが見て取れる。一方で、図-4と図-6を比較すると、社会最適領域の方がテレワー

ク分散パターン小の領域が大きくなっていることが分かる。その結果、安定均衡と社会最適の間に乖離が発生していることが見て取れる。つまり、補完性が生じた未来モデルなテレワークにおいては、社会的に望ましくない均衡パターンが均衡解となってしまう可能性があると言える。

そこで、次に安定均衡と社会的最適状態に乖離が起きる原因を解析する。目的関数 (7a) を微分して一階条件を求めると以下のような式が与えられる。

$$\frac{dSW(N_0)}{dN_0} = G_{N_0}(N_0)Z(N_0) + G(N_0)Z_{N_0}(N_0) - c^*(N_0) - c^*(N_0)N_0 \quad (8)$$

ここで、 $Z(N_0) \equiv f(e_1) \frac{N_0 - (1 - e_2)N}{e_2 - e_1} + f(e_2) \frac{N_0 - (1 - e_1)N}{e_1 - e_2}$  である。このとき  $G_{N_0}(N_0)Z(N_0)$  は正の外部性、 $c^*(N_0)N_0$  は負の外部性を表す。この正の外部性に負の外部性を足し合わせた外部性全体の式  $G_{N_0}(N_0)Z(N_0) - c^*(N_0)N_0$  を  $ET(N_0)$  とする。このとき、通勤混雑が極端に高い場合を除いた一般的な社会を表すパラメータ設定であれば基本的に  $ET(N_0) > 0$  となると考えられる (i.e., 生産性に関する正の外部性の影響の方が通勤費用に関する負の外部性の影響よりも強い)。

式 (8) と目的関数の KKT 条件より各均衡パターンの社会最適条件を求めると、以下の通り表現される。

$$\begin{cases} \text{テレワーク集積小} : (1 - e_1)N\gamma \leq \Delta f + ET \\ \text{テレワーク集積大} : \Delta f + ET \leq (1 - e_2)N\gamma \\ \text{テレワーク分散} : (1 - e_2)N\gamma \leq \Delta f + ET \leq (1 - e_1)N\gamma \end{cases} \quad (9)$$

条件 (6) と条件 (9) を比較すると社会最適条件では一人当たりの生産性の減少率に外部性  $ET$  が足されていることが分かる。そのため、足された正の外部性が大きいほど、テレワーク集積パターン小は社会最適になりやすく、テレワーク集積パターン大は社会最適になりにくくなる事が分かる。

以上の結果から、均衡状態は労働者個人の生産性の減少率の大小によって決定されるのに対して、社会最適状態はこれに加えて正の外部性も考慮して決定されることが分かる。そのため、補完性が働くことで一定の比率までは一人当たりの生産性が上昇する未来モデルのテレワークにおいては、外部性を無視して個人のインセンティブのみを考慮したテレワーク比率選択を行うと、集積の経済の効果が大きく損なわれてしまう。その結果、社会的に望ましくない均衡が導かれ、図4と図6のような乖離が発生してしまうと解釈できる。一方でテレワーク比率を上げるほど一人当たりの生産性が減少する現代モデルのテレワークでは、個人のインセンティブのみを考慮したテレワーク比率選択を行うと常に低い方の比率が選

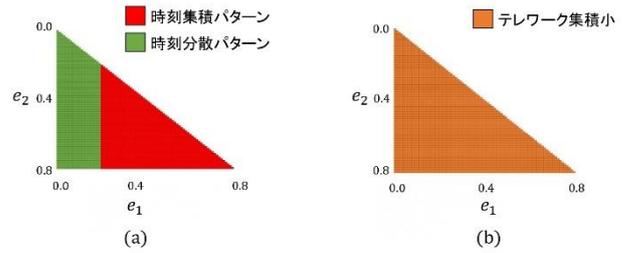


図7 現代モデルの同時選択時の安定均衡分布

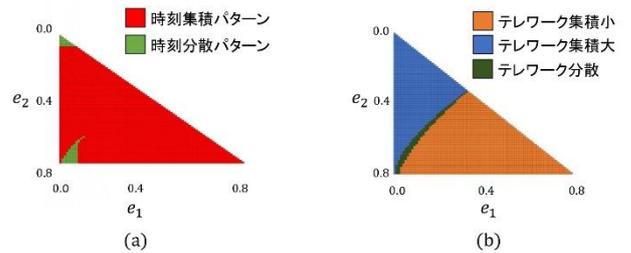


図8 未来モデルの同時選択の安定均衡分布

択されるので、外部性を無視した選択であっても、集積の経済の効果は維持されるので図3と図5のように安定均衡と社会最適は一致すると解釈できる。

### (3) 始業時刻とテレワーク比率の同時選択を考慮

企業が始業時刻とテレワーク比率の同時選択を行う状況を考える。この状況の結果を示したものが図7、図8になる。図7は現代モデル、図8は未来モデルの安定均衡分布を表している。なお、ここでは数値的に安定均衡解を求めた。(a)は始業時刻選択の安定分布であり、赤は時刻集積、白は時刻分散を表している。(b)はテレワーク選択の安定分布であり、オレンジはテレワーク集積小、青はテレワーク集積大、緑はテレワーク分散を意味している。

各図の(a)を確認すると、選択される比率が高いほど始業時刻は集積する傾向が見て取れる。また、その傾向はテレワークが高度化するほど高まることも確認できる。各図の(b)を確認すると、現代モデルにおいては常にテレワーク小が安定均衡となること、未来モデルの左上部分はテレワーク集積大、右上部分はテレワーク集積小が安定均衡となることが分かる。つまり、この状況の均衡は先の二つの分析で求められた結果と同様であった。つまり、本研究の同時選択問題は段階的に組み合わせる分析できることが示唆される。

#### 4. 終わりに

本研究ではテレワークと時間集積の経済・不経済を考慮した通勤均衡モデルを構築することで、テレワークが時間集積の経済・不経済に与える影響を分析した。得られた結果は以下のとおりである。

- ・ テレワークの導入は始業時刻の集積を引き起こす。また、社会最適時には安定時よりも集積することが望ましい。
- ・ テレワークの導入により各企業・個人の生産性が上昇する高度なテレワークが実現する状況では、社会全体の生産性・社会厚生が低下する。

一つ目の結果は通勤混雑の緩和によるものであり、テレワークの普及施策と時差出勤は両立しない(必要ない)ことを意味する。二つ目の結果はテレワークの高度化(補完性上昇)は必ずしも集積の経済不経済に良い影響を与えるわけではないことを意味する。

藤田・浜口<sup>7)</sup> は都市の進化を促すためにはテレワークは補完的に機能するべきであると提言している。しかし、本研究の結果から、ただテレワークを補完的にするだけでなく、他の混雑緩和施策との整合性や社会全体の生産性低下の危険性を十分考慮することがテレワーク普及後の都市の発展には重要と言える。

#### 参考文献

- 1) Takayama, Y. : Bottleneck congestion and distribution of work start times: The economics of staggered work hours revisited, *Transportation Research Part B*, pp.830-847, 2015.
- 2) Ota, M. and Fujita, M. : Communication technologies and spatial organization of multi-unit firms in metropolitan areas, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.23, pp.659-729, 1993.
- 3) David, T. Ory. and Patricia, L. Mokhtarian. : Which came first, The telecommuting or the residential relocation? An empirical analysis of causality, *Urban Geography*, Vol27, No7, pp.590- 609, 2006.
- 4) Safirova, E. : Telecommuting, traffic congestion, and agglomeration: a general equilibrium model, *Journal of Urban Economics*, Vol52, pp.26-52, 2002.
- 5) Henderson, J. V. : The economics of staggered work hours, *Journal of Urban Economics*, Vol.9, No.3, pp.349-364, 1981.
- 6) Vickrey, W. S . : Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, Vol.59, No.2, pp.251-260, 1969.
- 7) 藤田昌久, 浜口伸明: 「第 18 章 文明としての都市とコロナ危機」, 小林慶一郎, 森川 正之 「コロナ危機の経済学」, pp301-314, 東京経済新聞出版, 2020.

(2021. 3. 2 受付)

### A MORNING COMMUTE PROBLEM CONSIDERING TELECOMMUTING AND TEMPORAL AGGLOMERATION (DIS-)ECONOMIES

Yutaro IWAMI and Kentaro WADA