

鉄道通勤における最適フレックスタイムパターンの研究*

Study of Patterns for Optimal Flexible Work Hours on Railway Commuting

吉村 充功[†]・奥村 誠[‡]
Mitsunori YOSHIMURA and Makoto OKUMURA

1. はじめに

近年、大都市を中心に通勤混雑の緩和を目的とした各種のTDM施策が実施されている。しかし、時間分散型の施策であるフレックスタイムを見ても、実際に制度を活用できる(導入されている)従業者の割合は7.7%(平成10年現在)と低水準にある。そのため、行政サイドでも制度の導入促進を提唱しているが、実際にどの程度まで導入割合を増やせば社会的に十分なのかどうかはこれまで明らかにされていない。

これまで、筆者らのグループの一連の研究では、鉄道通勤市場の交通行動を理論的に分析できる均衡論的モデルの構築を行った¹⁾。さらに、これを時差出勤施策のような複数始業時刻下において鉄道混雑の緩和効果と業務活動の効率の低下の影響を考慮できる形に発展させ、施策の実現可能性を分析した²⁾。本研究でもモデルの構築において、これらの考え方を援用する。

本研究では、社会的に最も望ましい出社・始業・終業・退社の時刻分布パターンを、数値計算を用いて示す。そのため、大都市圏の主たる交通機関である鉄道通勤を念頭に、通勤者や企業といったそれぞれの主体にとっての効用を定式化する。さらに、フレックスタイムにより始業時刻を変更することによる業務活動の効率の低下の影響を考慮に入れ、社会的に最も効率的な各主体の行動パターンを分析するための理論的なモデルを構築する。以上の分析から、何割の通勤者がフレックスタイムを行えば社会的に十分であるのかを明らかにするとともに、実際に享

受する効用の大きさも明らかにする。

2. 鉄道通勤サービス市場と一般企業の生産活動

(1) 通勤者の出勤・帰宅不効用のモデル化

1つのベッドタウンの中心駅から都心へ直通運転される1本の通勤鉄道を考える。ベッドタウンに住む全通勤者がこの鉄道を利用し、従業場所である都心へ通勤しているとする。ここで、自宅からベッドタウンの駅までのアクセス時間、都心の駅から会社までのイグレス時間は十分に小さいとする。

出勤(帰宅)時において、時刻 t に都心に到着(出発)する通勤者の出勤(帰宅)による部分不効用 $U(t)$ ($V(t)$)を、次式のように列車の混雑度と自宅を早く出発(遅く帰宅)することによるスケジュールコストの和により定義する。

$$U(t) = -(s(t))^\eta - c\{T - (t - w)\} \quad (1)$$

$$V(t) = -(r(t))^\eta - e\{(t + w) - T\} \quad (2)$$

ここで、 $s(t)$ ($r(t)$)は時刻 t に都心に到着(出発)する列車の混雑度を表し、正数である。 η は混雑度に関する弾力値であり、正数である。 w は通勤(帰宅)所要時間であり、時刻に関わらず一定とする。 c (e) > 0 (円/分)は自宅出発(帰宅)時刻が早い(遅い)ことに関するスケジュールコストの勾配を表す。つまり、 c (e)は時間価値を示す。ここでは、簡単化のために出勤時と帰宅時の時間価値は等しく、 $c = e$ とする。スケジュールコストはある基準となる時刻 T を基準に計測する。

(2) 鉄道企業の輸送力供給のモデル化

出勤(帰宅)時において、時点 t に都心に到着(出発)する通勤者に対して供給される輸送力を単位時間当りの通勤者数を用いて $u(t)$ (人/分)($v(t)$)と表す。

* Key words : TDM, 公共交通運用, 最適制御, 交通行動分析

[†] 学生員, 工修, 広島大学大学院 工学研究科

[‡] 正会員, 工博, 広島大学助教授 工学部建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1, TEL&FAX 0824-24-7827)

本研究では議論を単純化するため、高密度で運行されている路線を想定し、輸送力を時間軸上の連続関数として扱う。このとき、時刻 t 以前に都心に到着(出発)する累積通勤者数の割合を $m(t)$ ($l(t)$) とすると、次式が成立する。

$$\dot{m}(t)N = s(t)u(t) \quad (3)$$

$$\dot{l}(t)N = r(t)v(t) \quad (4)$$

ただし、 $\dot{m}(t) = dm(t)/dt$ 、 $\dot{l}(t) = dl(t)/dt$ である。 N は総通勤者数である。

鉄道企業の出勤(帰宅)時間帯の運行費用は各時点ごとにかかる費用を積み上げたものであり、各時点の費用はその時点 t の輸送力 $u(t)$ ($v(t)$) の関数であると仮定する。よって、費用関数 TRC_m (TRC_e) を次式により定義する。

$$TRC_m = \int_{T_0}^{T_2} \zeta (u(t))^l dt \quad (5)$$

$$TRC_e = \int_{T_1+H}^{T_3+H} \zeta (v(t))^l dt \quad (6)$$

ここで、 l は費用関数の弾力値で、 $l > 1$ の定数であると仮定する。 ζ は輸送費用の比例係数で、正数である。また、 T_0, T_2 (T_1+H, T_3+H) はそれぞれ、すべての通勤者のうち都心へ最も早く到着(出発)する通勤者の時刻、最も遅く到着(出発)する通勤者の時刻を表す。

鉄道の運賃は総括原価方式に従い、時間帯にかかわらず一定の運賃を設定していると仮定する。そのため、各通勤者の通勤にかかる往復の運賃 RC は次式で表される。

$$RC = (TRC_m + TRC_e) / N \quad (7)$$

(3) 一般企業の生産活動のモデル化

すべての一般企業は都心に立地する労働者管理企業であり、労働力のみを投入し、ニュメレール財を生産する。つまり、従業員 1 人あたりの生産額が、そのまま、その従業員の賃金として分配されると仮定する。ここでは、都市内のすべての一般企業は相互に関連があり、業務活動における時間的集積の経済性が働くと仮定する³⁾。

時刻 t に始業する 1 従業員あたりの 1 日の生産額 $Y(t)$ (=賃金) は次式のように、ある時点で都市内で

労働している従業員数を取り入れた瞬間的な生産関数を労働時間帯 $[t, t+H]$ に渡って積み上げたものとして定義できる。

$$Y(t) = \int_t^{t+H} A(\rho(\tau)N)^\alpha d\tau \quad (8)$$

ここで、 H (分) は労働時間であり、すべての従業員で一定である。 $\rho(t)$ は時点 t に業務を行っている従業員数の比率を表す。 A は各一般企業の技術水準を表すパラメータであり、1つの都市内では一定値をとるとする。 α は時間的集積の経済性の大きさを表すパラメータである。 α は自動車製造・鉄鋼産業のような装置依存型の産業では大きく、コンサルタント業・学術研究機関のような知識集積型産業などでは小さい値をとる。

$Y(t)$ は α が大きい場合には自身の労働時間帯に、より多くの従業員が労働している方が高くなる。一方、 α が小さい場合には時間的集積の効果が小さく、他の従業員が労働していなくとも十分な賃金が得られる。

(4) 社会的厚生水準のモデル化

政府の目的は、すべての一般企業の総生産額と通勤者の鉄道通勤による不効用、鉄道企業の輸送費用の和である「社会的厚生水準」を最大にすることにある。社会的厚生水準 SW は次式により定義できる。

$$SW = \int_{T_0}^{T_3+H} [\dot{n}(t)N \cdot Y(t) + \dot{m}(t)N \cdot U(t) - \zeta u(t)^l + \dot{l}(t)N \cdot V(t) - \zeta v(t)^l] dt \quad (9)$$

ここで、 $\dot{n}(t)$ (= $k(t)/N$ とおく) は時刻別始業者数の割合を表す。式 (9) の右辺第 1 項は総生産額 (= 総賃金)、第 2 項は総出勤不効用、第 3 項は総出勤輸送費用、第 4 項は総帰宅不効用、第 5 項は総帰宅輸送費用を表す。

3. フレックスタイム下の最適始業時刻分布の分析

(1) フレックスタイムの分析の前提

フレックスタイム下では、各通勤者は出勤時刻・始業時刻を考える際に、帰宅時刻のことを考慮する必要が生ずる。なぜなら、労働時間は一定であるため、始業時刻を変更すれば、その分だけ終業時刻も変化する

るからである。つまり、通勤者は1日のスケジュールの決定において、出社時刻、始業時刻(終業時刻)、退社時刻を同時に考えることになる。ここでは、労働時間が十分に長く、全員が勤務する時間帯 $[T_2, T_1 + H]$ が存在すると仮定する。なお、最遅始業時刻は最遅出社時刻 T_2 に等しく、最早終業時刻は最早退社時刻 $T_1 + H$ に等しいと仮定する。

始業時刻が t の従業員の終業時刻は $t + H$ で表されるので、ここでは分析の簡単化のために終業時刻と退社時刻を $-H$ (分) だけずらして考える。つまり、累積終業者数の割合 $p(t + H)$ を時刻 t 以前に始業している累積始業者数の割合 $n(t)$ に、累積退社者数の割合 $l(t + H)$ を $l(t)$ に変換して取り扱う。

(2) 最適始業時刻分布の分析

$s(t), u(t), r(t), v(t), k(t)$ を制御変数とする社会的厚生水準 SW の最適決定問題⁴⁾は、以下のよう
に定式化できる。

$$\max_{\substack{s(t), u(t) \\ r(t), v(t), k(t)}} SW = \int_{T_0}^{T_3} [\dot{m}(t)N \cdot U(t) - \zeta u(t)^c + \dot{l}(t)N \cdot V(t) - \zeta v(t)^c + \dot{n}(t)N \cdot Y(t)] dt \quad (10a)$$

$$s.t. \quad \dot{m}(t) = s(t)u(t)/N \quad (10b)$$

$$\dot{l}(t) = r(t)v(t)/N \quad (10c)$$

$$\dot{n}(t) = k(t)/N \quad (10d)$$

$$\dot{Y}(t) = \begin{cases} A \{ (1 - n(t))^\alpha - n(t)^\alpha \} N^\alpha \\ \text{if } (T_1 \leq t \leq T_2) \cap (\dot{n}(t) \neq 0) \\ 0 \quad \text{if } (t < T_1, T_2 < t) \cup (\dot{n}(t) = 0) \end{cases} \quad (10e)$$

$$h_1(t) \equiv -l(t) \leq 0 \quad (10f)$$

$$h_2(t) \equiv l(t) - n(t) \leq 0 \quad (10g)$$

$$h_3(t) \equiv n(t) - m(t) \leq 0 \quad (10h)$$

$$h_4(t) \equiv m(t) - 1 \leq 0 \quad (10i)$$

ここで、(10b)-(10e)は状態変数 $x(t) = (m(t), l(t), n(t), Y(t))$ の状態拘束を表す。(10f)-(10i)は $x(t)$ の状態制約条件を表し、物理的可能条件である。

最適制御理論⁴⁾を用いてモデルの求解を行うと、 $t \in [T_0, T_3]$ における最適軌道 $x(t) = x^o(t)$ は、(10f)-(10i)が0か否かの組み合わせにより、a) 全員が一斉始業・終業、b) フレックスタイムと一斉始業・終業が混在、c) 全員がフレックスタイム、の3つのパターンに分類される(数値例の図1-図3参照)。

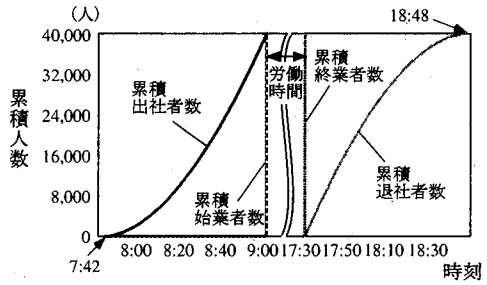


図-1 全員が一斉始業・終業の解

(3) 最適軌道の数値計算例

数値計算に用いる各変数の値を我が国の大都市圏の通勤鉄道を対象とする過去の実証研究⁵⁾を参考に $\eta = 4.5, \iota = 3.1, \zeta = 0.0008$ (円/分), $c = 10$ (円/分), $N = 40,000$ (人), $H = 450$ (分), A : 全通勤者が一斉始業のときの1通勤者あたりの1日の賃金が20,000(円)になるように設定する。また、結果の表示の便宜上、フレックスタイム導入前の労働時間帯を9:00-17:30(昼休憩1時間)とし、各個人は慣例的に9:00と17:30が最も望ましい始業、終業時刻と考えているとする。

(a) 全員が一斉始業・終業の解

時間的集積の経済性の大きさを表す α を1.0に設定した上で数値計算により解を求めると、累積者数の時間変化は図-1のようになる。

これは、すべての従業員が9:00始業、17:30終業の一斉始業・終業を行うケースである。混雑を避けるために7時台から出社する従業員が存在するが、 α が大きく、出社直後の $\rho(t)$ が小さい時間帯に始業しても得られる賃金が少ないため、各従業員は全員が出社するのを待って始業する。終業、退社時も同様に考えられる。

このときの1人当たりの平均効用は19,000円である(賃金:20,000円, 往復スケジュールコスト:-554円, 往復混雑不効用:-182円, 往復運賃:264円)。

(b) フレックスと一斉始業・終業が混在する解

α を0.5に設定した上で数値計算を行うと図-2のような最適解が得られる。

この解では、約6割の従業員が9:00(17:30)に一斉始業(終業)を行い、残りの4割の従業員がその前後の18分間に連続的に始業(終業)するフレックスタ

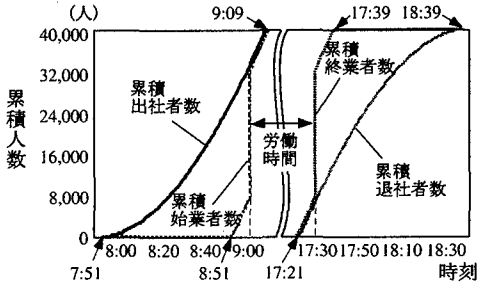


図-2 フレックスと一斉始業・終業が混在する解

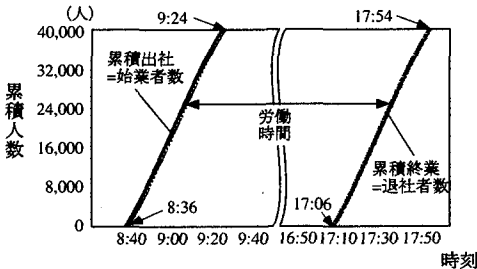


図-3 全員がフレックスタイムの解

ムを行う。出勤・帰宅時の単位スケジュールコスト、弾力値のパラメータなどに比べて、 α がある程度小さいため、混雑を避けるために出社(退社)時刻をずらしたり、待ち時間を減らすために始業(終業)時刻をずらすことのメリットが賃金の減少分を上回る従業員が存在する。

このときの1人当たりの平均効用は19,091円である(賃金:19,917円, 往復スケジュールコスト:-376円, 往復混雑不効用:-183円, 往復運賃:266円)。

この数値例の場合、フレックスタイムの導入が困難な企業が存在しても、他の4割の通勤者に制度を導入することができれば、最適な状況を作り出すことが可能である。

(c) 全員がフレックスタイムの解

α を0.2に設定した上で数値計算を行うと、図-3のような最適解が得られる。

この解では、全従業員が8:36-9:24(17:06-17:54)の48分間に連続的に始業(終業)するフレックスタイムを行う。このとき、全従業員が出社と同時に始業し、終業と同時に退社する。 α が小さく、労働時間帯を他の従業員とずらしても十分な賃金が得られる。そのため、混雑を避けたり、待ち時間を減らすために出社、退社時刻を他の従業員とずらすことが有利と

なるパターンである。

このときの1人当たりの平均効用は19,184円である(賃金:19,816円, 往復スケジュールコスト:0円, 往復混雑不効用:-258円, 往復運賃:374円)。

この数値例の場合には、最適なパターンを実現するには全従業員にフレックスタイム制度を導入する必要がある。

ここで、 $\alpha = 0.2$ のケースにおいて一斉始業を行う(フレックスを認めない)と、(a)と同じ効用が得られる。これと(c)の最適解を比較すると、賃金は180円程度の減少でほとんど減らないが、待ち時間がなくなるためスケジュールコストが0になり、結果として効用は上回る。ただし、運賃や混雑は悪化している。これは、混雑を最も緩和することが必ずしも社会全体の効用を最大化するわけではなく、都市ごとにその効果を吟味する必要があることを意味している。

4. おわりに

本研究では、大都市の鉄道通勤に対する最適なフレックスタイムのパターンの理論的な分析を行った。さらに、最適な状況を作り出すには、何割の従業員がフレックスタイムを行えばよいかの数値例を示し、定量化できることを明らかにした。なお、以上のような最適解は、各主体の自由な行動の下では実現されないが、フレックスタイム下において、時刻別に異なる運賃システム、あるいは始業時刻別に差別化された事業所税の制度を導入することにより、誘導することが可能である。

参考文献

- 1) 奥村誠・永野光三・小林潔司：始業時刻の設定が鉄道通勤交通に及ぼす影響に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.15, pp.831-840, 1998
- 2) 永野光三・奥村誠・小林潔司：鉄道時差出勤の導入インセンティブに関する分析，土木計画学研究・講演集，No.21(2), pp.885-888, 1998
- 3) Henderson, J.V.: Economic Theory and the Cities, Academic Press, Chap.8, 1985.
- 4) 志水 清孝：最適制御の理論と計算法，コロナ社，pp.54-104, 1994.
- 5) 志田 州弘・古川 敦・赤松 隆・家田 仁：通勤鉄道利用者の不効用関数パラメータの移転性に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.12, pp.519-525, 1989.