

災害時における企業の始業時刻選択行動と 従業員の出発時刻選択行動の相互作用の分析

松元 野乃花¹・力石 真²・藤原 章正³・神田 佑亮⁴

¹学生非会員 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:b165293@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学准教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島大学教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:afujiw@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 呉工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2-2-11)
E-mail:y-kanda@kure-nct.ac.jp

本研究では、災害時における時差出勤施策検討に資するモデルシステムを構築する第一段階として、まず企業の時間集積性を考慮した災害時における始業時刻選択モデルを構築する。次に、始業時刻を所与とした従業員の出発時刻選択行動を把握するためのSP調査手法を提案する。さらに、様々なシナリオ下での、企業の始業時刻選択・従業員の出発時刻選択・渋滞パターン間の相互作用の結果生じる始業時刻分布及び渋滞分布の均衡状態を導出し、災害時の渋滞発生状況を評価する。始業時刻選択モデル推定結果から、災害時における時間集積性の存在が確認され、時間集積性による相互作用から導かれる始業時刻均衡分布は唯一に定まることが分かった。シミュレーション分析結果から、災害時において大幅な渋滞緩和を達成するような企業の始業時刻変更は自主的には生じない可能性が示され、災害時における大幅な渋滞緩和を達成するためには各企業に始業時刻を遅らせる政策介入が必要であることが示唆された。

Key Words : *staggered working hours, disaster, traffic congestion, work start time, departure time*

1. はじめに

日本では近年、大規模な災害が頻発し、甚大な被害が生じている。平成30年7月豪雨の際には広島県でも多くの人的被害や物的被害が生じ、加えて、交通分野においては深刻な渋滞が問題となった。その原因として、土砂崩れや洪水などによる交通ネットワークの麻痺に伴う交通サービス水準の低下と、復旧・復興関連交通需要の発生が考えられる。本研究では、災害時の渋滞対策として事業所ベースの時差出勤に着目する。

平成30年7月豪雨災害時の国道31号の旅行時間 (図-1) を見ると、災害後には移動時間が平時の3~4倍に増加したことに加え、平時とは異なる時間帯にピークが生じており、復旧段階によって交通状況が刻々と変化していたことが確認できる。災害時において以上のような旅行時間の変動・変化を各企業が自ら把握することは困難であり、企業の自主的な始業時刻の変更による渋滞改善には限界がある可能性が高い。よって、災害時の渋滞緩和に

資する「社会的に最適な」企業の始業時刻選択を促す仕組みを導入することが望ましいが、災害時に始業時刻変更を促すための枠組みは確立されていない。そこで本研究では、災害時における時差出勤政策の意思決定支援ツール開発の一環として、災害時の企業の始業時刻選択、従業員の出発時刻選択を扱うモデルシステムの構築を目指す。ここで本論文では、災害時における「社会的に最適な」状態を、円滑な復興・復旧の観点から主要なOD間を結ぶ道路区間において交通混雑が最も小さくなる状

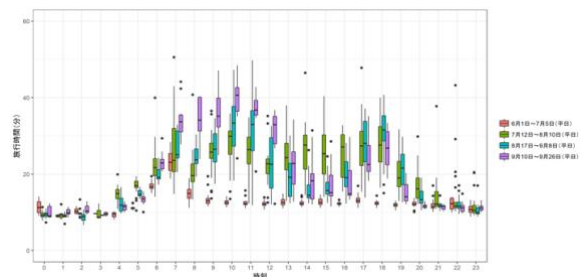


図-1 国道31号の旅行時間の経時変動 (力石ら²⁾ より引用)

態と定義する。

始業時刻変更によって企業・従業員には様々なコストが発生する。例えば、企業の時差出勤導入に伴うコストとしてHenderson¹⁾が提唱した時間集積性の問題が挙げられる。一般に関連企業との商談や協働の効率性の観点から、始業時刻が関連企業とずれることで生産性が低下する可能性があり、企業は他企業と同じ時刻に出勤することにより生産性を高めることができる。企業は渋滞緩和だけでなく、始業時刻変更によるコストも考慮して始業時刻を決定するため、災害時において企業が自主的に決定する始業時刻と「社会的に最適な」始業時刻は異なる可能性が高い。

また、通常時には、従業員の渋滞による旅行時間コストは企業の経済的コスト（優秀な人材を雇用し損ねるなど）として内部化されると考えるケースが多いが、災害時に発生する渋滞は慢性的なものではないため、従業員の旅行時間が増大することが、直接企業の経済コストになるということは考えにくく、災害時に企業が従業員の旅行時間の増大によって時差出勤を選択する行為は、従業員の通勤の負担だけでなく、復旧活動の妨げなど企業による社会全体への配慮に起因していると考えられる。よって災害時の利用者均衡状態を導出するためには、「通勤コストを企業が内部化している」と仮定するのではなく、企業の始業時刻選択モデルと従業員の出発時刻選択モデルを別々に構築し、それらのモデルと渋滞を表現するモデルを用いて、渋滞と時間集積性を通じたモデル間の相互作用を考慮する必要が生じる。以上の点は、災害時の時差出勤問題特有の特徴である。

以上の背景を踏まえ、本研究では災害時における時差出勤導入に資するモデルシステムを構築する第一段階として、まず企業の時間集積性を考慮した災害時の始業時刻選択モデルを構築する。次に始業時刻を所与とした従業員の災害時の出発時刻選択行動を把握するためのSP調査手法を提案する。さらに、様々なシナリオ下での、企業の始業時刻選択・従業員の出発時刻選択・渋滞パターン間の相互作用の結果生じる始業時刻分布及び渋滞分布の均衡状態を導出し、災害時の渋滞発生状況を評価する。

2. 既往研究レビューと本研究の位置づけ

(1) Point Queueモデル (PQモデル)

出発時刻選択に関する研究の始まりは単一ボトルネックを仮定した待ち行列理論を用いた分析である。桑原³⁾は、Hurdle⁴⁾、Hendrickson et al.⁶⁾⁷⁾、Fargier⁹⁾、Smith¹⁰⁾、Daganzo¹¹⁾等によって固められた単一ボトルネックにおける基礎理論を解説している。これの論文によると、ネッ

トワークに単一ボトルネックを仮定した場合、時刻 t までにボトルネックに流入した総トリップ数を表す流入曲線 $A(t)$ と流出したトリップ数を表す流出直線 $D(t)$ を定義し、待ち行列を物理的な長さを持たないPoint Queueと考え、待ち行列システムにFirst-In-First-Out原則を仮定すれば、各利用者のボトルネックでの待ち時間 $w(t)$ は $A(t)$ と $D(t)$ の間の水平距離で表され、全ての人の待ち時間の合計は $A(t)$ と $D(t)$ で囲まれた部分の面積で表される。Smith¹⁰⁾、Daganzo¹¹⁾、Kuwahara¹²⁾等は、スケジュール費用関数 $f(s)$ が s について凸で、待ち時間費用関数 $f_w(w)$ が w について単調増加且つ $f_w(0)=0$ なら、時間的均衡条件を満たす $A(t)$ 、 $D(t)$ は唯一に決まることを示している。このように提唱された渋滞を簡潔に表現するモデルをPQモデルという。本研究では利用者均衡状態の導出の際にPQモデルを使用する。

(2) 時差出勤と時間集積性に関する既往研究

Henderson¹⁾は時差出勤状況での出発時刻選択に、渋滞による待ち時間費用に加えてプライベートな活動との調整(機会費用)と企業の実産性への影響(時間集積性)を組み入れたモデルを構築し、時差出勤制度の効果を検証するとともに、個人の能力・立場やスケジュール感覚、勤める企業の種類によりそれぞれ望ましい出勤時刻が異なることを示した。Hendersonが提唱した時間集積性の概念はその後の時差出勤やフレックスタイム制に関する研究の基盤となっている。

高山ら¹³⁾は、金沢市において時差出勤の社会実験を行い、実証的に時差出勤制度の導入効果を検証することで、時差出勤には渋滞を緩和し従業員の生活のゆとりが向上したというメリットがあるが、時間集積性の問題に伴う業務活動への影響を考慮して、企業は時差出勤に後ろ向きであるという問題があることを示している。吉村ら¹⁴⁾は、京阪神パーソントリップ調査の個票データを用いて都市内の業務活動の時間帯別発生パターンを分析することで、時間集積性の存在を確認している。原田ら¹⁵⁾は、企業の始業時刻選択をゲーム理論により表現することで時間集積性を持つ企業が他社と同時刻に始業することを明らかにし、柳沼ら¹⁶⁾はそれをさらにN人ゲームに拡張することで、課金による始業時刻の分散効果を検証した。佐藤・赤松¹⁷⁾は、企業の始業時刻選択行動と、家計の出発時刻選択の双方を考慮したモデルを理論的に定式化し、それを解析することで、始業時刻の分布に企業の時間集積性の影響が大きいパターンと家計の渋滞による待ち時間費用の影響が大きいパターンがあり、複数均衡が生じ得ることを示した。

(3) 本研究の位置づけ

既往研究から、時差出勤が渋滞緩和に効果的であるこ

とや、現実的に時間集積性が始業時刻選択に影響を与えることは明らかである。しかし、災害時における始業時刻選好を分析した既往研究は筆者の知る限り存在せず、また、災害時の始業時刻変更を促す関連施策の影響を評価する分析フレームは確立されていない。

本研究で行う研究は以下の特徴を有する。

1. 災害時状況下での企業の始業時刻選好・就業者の出発時刻選好を調査するSP調査票の設計
2. 災害時の時差出勤施策の影響評価に向けたモデルシステムの構築

3. 災害時における始業時刻選択モデルの構築

(1) 企業の始業時刻選択に関するSP調査

本研究では、企業の始業時刻選択に関するコストとして時間集積性（他企業の始業時刻分布とのズレ）・従業員の平均旅行時間を考える。災害状況下で企業がそれらのコストをどの程度重視して始業時刻を決定しているのかを把握するためのSP調査票を設計した。完成したSP調査票では、災害時を仮定し、仮想的に他の企業の始業時刻分布と従業員の通勤にかかる平均旅行時間を提示した上で、5時以前、6時、7時、8時、9時、10時の中で最も望ましい始業時刻を尋ねた。SP調査設計に使用した属性及び水準を表-1に、調査票の例を図-2に示す。水準はランダムに提示し、各企業に異なる水準を使用した5パターンの調査票に回答してもらった。表-1に示した属性を使用することで、様々な企業の始業時刻分布パターン及び従業員の旅行時間（渋滞）が与えられたもとの、企業の始業時刻決定を調査することができる。なお、SP調査に加えて、各企業には図-2に提示している各業種との業務上の関係性を10段階で尋ねた。

平成30年7月豪雨災害を経験した地域である広島県広島市・呉市・東広島市の350社を対象に上記のように設計したSP調査票を含む災害時の始業時刻に関するアンケートを配布し、123社から回答を得た。アンケートの回答結果から、7割近くの企業が災害時に交通機能不全を経験しており、うち約2割の企業が始業時刻変更を促す対策を行ったと回答している。

(2) 始業時刻選択モデル

得られた災害時の始業時刻選択に関する選好意識データを用いて、企業の始業時刻選択行動を記述する以下の多項ロジットモデルを構築した。

$$P_{fks} = \frac{\exp(V_{fks})}{\sum_s \exp(V_{fks})} \quad (1)$$

$$V_{fks} = \beta_{0s} + \beta_1 \sum_k R_{fk} P_{ks} + \beta_2 |s_f^B - s| + \beta_3 T_{fs} \quad (2)$$

ここで、 P_{fks} は業種 k の企業 f が始業時刻 s を選択する確率、 V_{fks} は始業時刻 s の確定効用を表す。また $\sum_k R_{fk} P_{ks}$ は時間集積効果を現し、アンケートより得た企業 f と業種 k の関係性の程度 R_{fk} と、業種 k の企業のうち始業時刻 s を選択する割合 P_{ks} を乗じて全業種の和をとった変数を用いる。 $|s_f^B - s|$ は企業 f の平時の始業時刻 s_f^B と始業時刻 s のずれにより生じるコスト、 T_{fs} は始業時刻 s における企業 f の従業員の平均旅行時間を表す。 β_{0s} は選択時刻 s の定数項、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ は各項のパラメータを表す。

(3) 推定結果

最尤推定法を用いてパラメータ推定を行った。パラメータ推定結果を表-2に示す。表-2より、時間集積性パラメータは正で有意、旅行時間パラメータは負で有意であるため、企業は他企業との始業時刻のズレと従業員の旅行時間を抑制するように始業時刻を選択することが分かった。よって、災害状況下においても時間集積性の存在

表-1 始業時刻選択に関するSP調査の属性と水準

属性	水準
出勤時刻のピーク（業種毎）	7時8時9時
始業時刻の分散	(10%,80%,10%) / (20%,60%,20%) / (30%,40%,30%)
旅行時間ピーク時刻	7時8時9時
平均ピーク旅行時間（分）	60分/90分/120分
旅行時間のピーク時からの減衰割合（ピーク時から1時間ずれる毎に提示された割合分旅行時間を減少）	10%/20%

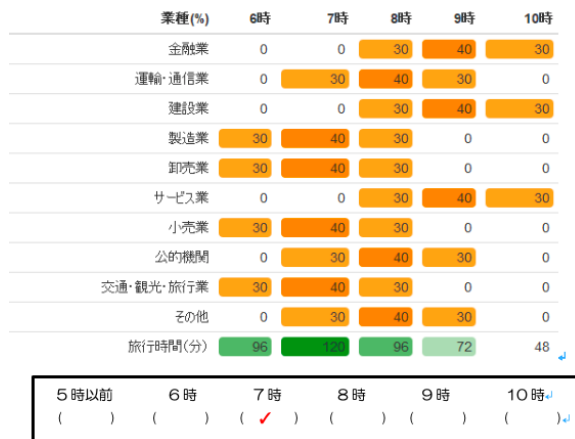


図-2 始業時刻選択に関するSP調査票の例

表-2 パラメータ推定結果

	推定値	t値
時間集積性 β_1	4.39×10 ₁	3.527
平時始業時刻とのずれ β_2	-2.14×10 ₁	-10.26
従業員平均旅行時間(分) β_3	-1.28×10 ₂	-2.014
定数項（6時）	1.559	2.291
定数項（7時）	2.350	5.913
定数項（8時）	1.569	4.170
定数項（9時）	2.62×10 ₁	6.95×10 ₁
標本数	425	
McFadden's Rho square	0.435	

が確認された。また、企業が従業員の旅行時間をコストとして考慮することは、災害状況下で企業が従業員や社会に配慮して始業時刻を決定することを表している。さらに、時間集積性のパラメータ β_1 が複数均衡が生じないことを表す条件式(式(3) Brock & Durlauf 18))を満たすため、時間集積の効果は、複数均衡を生じさせるほどの強度はないことが確認された。

$$\beta_1 < K / \sum_k R_{fk} P_{ks} \quad (K \text{は選択肢数}(= 5)) \quad (3)$$

4. 災害時の出発時刻選好を把握するSP調査

背景で述べたように、災害時の利用者均衡状態を導出するためには、始業時刻選択モデルに加えて災害状況下での従業員の出発時刻選択モデルも構築する必要がある。本研究では、出発時刻選択モデル構築に向けて、就業者の災害時における出発時刻選好を把握するSP調査票を設計した。完成したSP調査票の例を図-3に示す。本研究で設計したSP調査票では、災害時を想定し、仮想的な始業時刻を提示した上で望ましい出発時刻を2択(選択肢(A), (B))で尋ねた。各選択肢にはそれぞれ旅行時間と始業時刻からの早遅着を5パターン提示し、災害時の情報不確実性を反映させた。選択肢(A)は遅着なし、選択肢(B)は5回中1, 2回遅着する可能性があるように設計した。また、SP調査設計には8つの属性(始業時刻・旅行時間ピーク時刻・ピーク旅行時間・ピーク時刻への交通集中度合い・各選択肢の到着時刻の分散・各選択肢の遅着回避度合い)を用いている。さらに今回の設計の大きな特徴として、SP調査票は各就業者の通常時の旅行時間の回答値に基づいて生成されるように設計しており、図-3は回答値が30分の時の調査票の例となる。

SP調査票の設計手順を説明する。使用した8つの乱数を表-3に、SP調査票の設計手順を可視化した図を図-4に示す。まず、手順1として回答者が直面する災害時の交通状況を表す出発時刻 t における平均旅行時間分布(式(7))を決定する(図-4の黒い折れ線グラフ)。旅行時間ピーク時刻・ピーク旅行時間・交通集中度合いを表すグラフの傾きを式(4) (5) (6)のように決定し、災害状況下の仮定より、通常時の旅行時間の回答値を下回らないように制限する。

$$\text{旅行時間ピーク時刻 } P = p_2 \quad (4)$$

$$\text{ピーク旅行時間 } T = \text{通常時の旅行時間の回答値} \times p_3 \quad (5)$$

$$\text{交通集中度合い } \alpha = T \times p_4 \quad (6)$$

$$\text{平均旅行時間分布 } f(t) = \begin{cases} T \\ T - \alpha(P - t) \\ T - \alpha(t - P) \end{cases} \quad (7)$$

手順2として、始業時刻(図-4の黒い実線)及び始業

時刻からの遅着回避度合いを考慮した各選択肢の5つの到着時刻(図-4の赤と青の点線)を式(8) (13) (14)のように決定する。ここで、乱数 p_7, p_8 によって選択肢(A) (B)の遅着回避度合いの違いを設定している。

$$\text{始業時刻 } S = p_1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{選択肢(A)の遅着回避度合い } \beta_A \\ & = \text{ロジスティック分布 } N(0, \sigma_A^2) \text{の } p_7 \text{パーセンタイル値(9)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{選択肢(B)の遅着回避度合い } \beta_B \\ & = \text{ロジスティック分布 } N(0, \sigma_B^2) \text{の } p_8 \text{パーセンタイル値(10)} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、 } \sigma_A = T \times p_5 \div 10 \quad (11)$$

$$\sigma_B = T \times p_6 \div 10 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \text{選択肢(A)の5つの到着時刻} \\ & = \text{ロジスティック分布 } N\left(S - \beta_A, \frac{\sigma_A \times f(t_{\text{out}} - \beta_A)}{T}\right) \\ & \text{の } 10, 30, 50, 70, 90 \text{パーセンタイル値} \quad (13) \end{aligned}$$

問 11 以下の(1)~(5)では、仮想的な出発時刻(A), (B)を示します。これらはそれぞれ通勤にかかる時間に関して、それぞれ点線の枠内で囲った特徴を持っています。

(1) 通勤時間に関して以下の特徴がある場合、(A), (B)のどちらの時刻に出発したいですか。

<出発時刻(A)と(B)の特徴>

始業時刻は10時とします。

出発時刻(A)と(B)における通勤にかかる旅行時間と到着時刻は、渋滞状況によって変動する可能性があります。

以下のカードに示す5つの旅行時間と到着時刻の特徴が等しい確率で起こります。

出発時刻(A)		出発時刻(B)	
出発時刻: 7時56分 平均旅行時間: 70分		出発時刻: 8時32分 平均旅行時間: 81分	
到着時刻	旅行時間	到着時刻	旅行時間
5回に1回は始業時刻の78分前に到着	46分	5回に1回は始業時刻の17分前に到着	71分
5回に1回は始業時刻の63分前に到着	61分	5回に1回は始業時刻の11分前に到着	77分
5回に1回は始業時刻の54分前に到着	70分	5回に1回は始業時刻の7分前に到着	81分
5回に1回は始業時刻の44分前に到着	80分	5回に1回は始業時刻の3分前に到着	85分
5回に1回は始業時刻の29分前に到着	95分	5回に1回は始業時刻の3分後に到着	91分

図-3 出発時刻選択に関するSP調査票の例

表-3 出発時刻選択に関するSP調査設計に使用した乱数

乱数	水準
p_1	[6, 7, 8, 9, 10]からランダムに挿入
p_2	[7, 8, 9]からランダムに挿入
p_3	[2, 3, 4]からランダムに挿入
p_4	[0.1, 0.2]からランダムに挿入
p_5	[1, 2, 3]からランダムに挿入
p_6	[1, 2, 3]からランダムに挿入
p_7	一様分布(最小0.9, 最大0.99)からランダムに挿入
p_8	一様分布(最小0.6, 最大0.89)からランダムに挿入

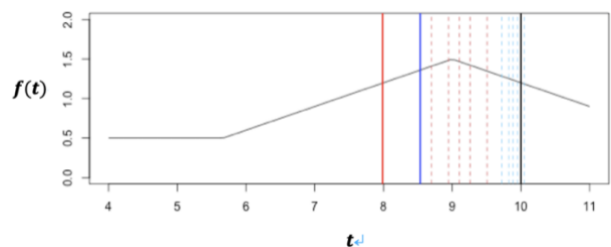


図-4 出発時刻選択に関するSP調査設計手順の図

選択枝(B)の5つの到着時刻
 = ロジスティック分布 $N\left(S - \beta_B, \frac{\sigma_B \times f(t_{ont} - \beta_B)}{T}\right)$
 の10,30,50,70,90パーセンタイル値 (14)

ここで、 t_{ont} は $f(t)$ で移動した場合に始業時刻 S に到着するような出発時刻である。

$$t_{ont} = \begin{cases} S - T & (P + T = S \text{ の場合}) \\ \frac{S - T + \alpha P}{1 + \alpha} & (P + T > S \text{ の場合}) \\ \frac{S - T - \alpha P}{1 - \alpha} & (P + T < S \text{ の場合}) \end{cases} \quad (15)$$

手順3として、各選択枝の出発時刻(図-4の赤と青の実線)を決定する。手順1で決定した平均旅行時間 $f(t)$ で移動すれば、手順2で決定した到着時刻の50パーセンタイル値に到着するように各選択枝の出発時刻を定める。

本設計の特徴は2つある。1つ目の特徴は、回答者の通常時の旅行時間に合わせてSP設問を生成するという点である。通常時の旅行時間の回答値を使用することで各回答者に合わせたSP調査票を提示することができ、回答者にとってSP設問のリアリティが高まることで、より精度の高い選好意識データを得ることができると考えられる。2つ目の特徴は、8つの属性を使用し、災害に起因する渋滞状況下の早遅着コストを推定できるように設計した点である。設計手順で述べたように、まず通常時の旅行時間の回答値を用いて災害時の交通状況(平均旅行時間分布 $f(t)$)を仮定し、その交通状況に基づいてSP設問に提示する数値を決定することで、各回答者に災害状況下での出発時刻選択場面を提示することができる。

5. 利用者均衡状態のシミュレーション分析

(1) Point Queue (PQ) モデルの感度分析

本研究では、ネットワークとして単一ボトルネックの10Dを仮定し、PQモデルを用いて「社会的に最適な」時差出勤の形を検証するための感度分析を行った。時差出勤が行われた状況を想定し、ボトルネックへの総流入人数は13000人に固定したまま、利用者の流入パターンの変更による渋滞状況の変化(0:30~12:30までの平均待ち時間)を比較した。ただし今回の検証では、道路の交通量は1000台/時で、一台あたり1.3人が乗車しており、ボトルネックへの累積流入人数 $A(t)$ は1時間ごとに一定のペースで増加していくものと仮定する。検証する5パターンのボトルネックへの流入分布を図-5に、各パターンの総待ち時間と平均待ち時間を表-4に示す。パターン1と2,3と4,5の待ち時間を比較すると、流入時刻が分散することで、渋滞は緩和されることが確認できる。また、パターン2,4と3,5を比較すると、早い時刻に流入分布の

ピークがあるより遅い時刻に流入分布のピークがある方が待ち時間は小さいことが分かった。以上のことから、利用者が時差出勤により出発時刻を分散させることで渋滞は緩和されることが確認できるとともに、出発時刻を早い時刻に変更させるより遅い時刻に変更させる時差出勤の方が、より渋滞緩和に効果的であるという理論的示唆と同様のことが改めて確認された。

(2) 災害時における利用者均衡状態の導出手順

1でも述べたように、災害状況下での利用者均衡状態を導出するためには、企業の始業時刻選択モデルと従業員の出発時刻選択モデルと渋滞を表現するモデルを用いて、渋滞と時間集積性を通じたモデル間の相互作用を考慮した繰り返し計算を行う必要がある。今回のシミュレーションでは、3で構築した始業時刻選択モデルと、仮想の出発時刻選択モデルとPQモデルを使用する。ここで、従業員の出発時刻選択モデルには、従業員は経験した旅行時間を考慮して始業時刻ちょうどに到着するように出発すると仮定した仮想モデルを適用する。以上の3つのモデルを用いた場合、始業時刻選択モデル・出発時刻選択モデル・旅行時間モデルの間で発生する全ての相

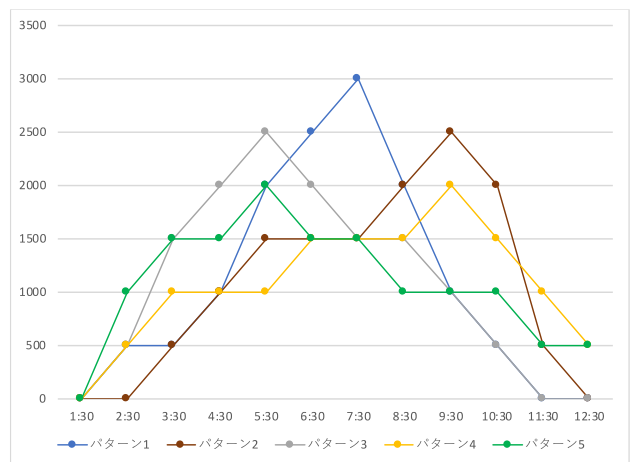


図-5 検証する5パターンのボトルネック流入分布 (人)

表-4 各パターンの渋滞による待ち時間

	総待ち時間	平均待ち時間
パターン1	19900時間	1時間32分
パターン2	11150時間	52分
パターン3	17846時間	1時間22分
パターン4	5400時間	25分
パターン5	7125時間	33分

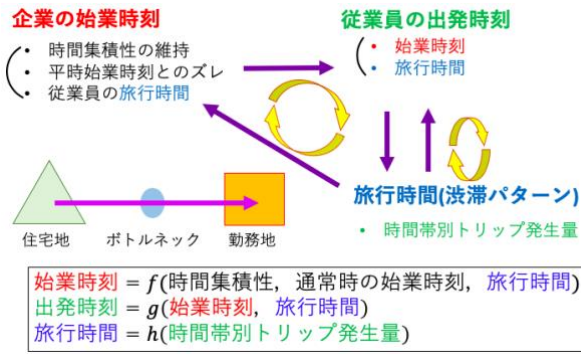


図-6 3つのモデル間に発生する相互作用

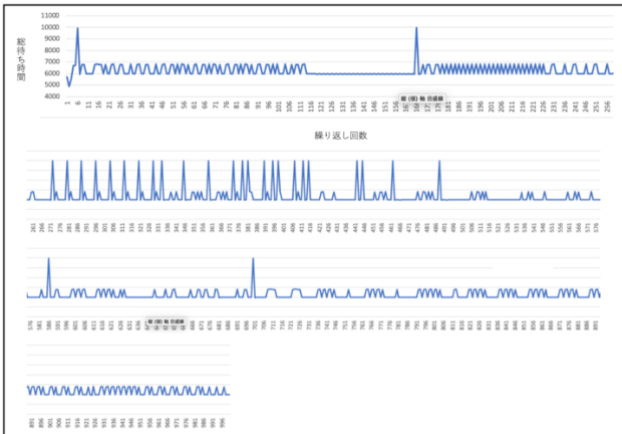


図-7 繰り返し計算による総待ち時間の変化

相互作用は図-6のように表される。実際に本研究では、災渋滞と時間集積性による交互作用を考慮した繰り返し計算を以下の手順で行い、利用者均衡状態の導出を試みた。

1. 初めは各企業の従業員が、出発時刻を平時の始業時刻と自由流の場合の旅行時間に基づいて決定すると仮定し、集計した時間帯別トリップ発生量から交通状況を表すPQモデルを構築する。
2. PQモデルから災害時の様々なシナリオ下における出発時刻ごとの従業員の旅行時間が計算できる。各従業員は変化した旅行時間を学習し、出発時刻を変更する。各従業員の出発時刻の変更により、時間帯別トリップ発生量が変わり、新たな交通状況を表すPQモデルが構築される。
3. 2を何度も繰り返し、出発時刻が変化しなくなった(今回は出発時刻の変化が小さくなった)状態で、各企業の平時の始業時刻に基づいて従業員が選択する災害時の出発時刻と形成する交通状況(PQモデル)が決定される。
4. 3で決定した従業員の出発時刻と交通状況から、式(2)の T_{fs} (企業が始業時刻を6時,7時...10時に設定した場合の従業員の旅行時間)を導出する。
5. 各企業の他業種との関係性 R_{fk} と平時の始業時刻割合 P_{ks} (2回目以降はn-1回目に導出した始業時刻割合)と4で導出した T_{fs} を式(2)に入力し、各企業

の始業時刻選択確率を求める。求めた始業時刻選択確率を業種ごとに集計したものを、新たな始業時刻割合 P_{ks} に決定する。

6. 5で導出した各企業の始業時刻選択確率と4で導出した T_{fs} (新たな始業時刻と前回経験した旅行時間)に基づいて各従業員の出発時刻を決定し、時間帯別トリップ発生量から新たなPQモデルを構築する。ここで、本来1企業に対して始業時刻は1つであるが、今回は企業の始業時刻選択確率に基づいて、従業員ごとに始業時刻を割り当てている。例えば、従業員数が10人である企業の始業時刻選択確率が、7時が50%,8時が50%であった場合、その企業の5人の始業時刻は7時、他の5人の始業時刻が8時であると設定する。
7. 2~6の過程を繰り返すことで、やがて「繰り返しても始業時刻の変更が起こらない」利用者均衡状態に落ち着くと、様々なシナリオ下における始業時刻均衡分布が導出される。また、その時の渋滞パターンはPQモデルより確認できる。

まず、340社に勤める計7000人の従業員(業種と平時の始業時刻は企業へのアンケート結果から設定)が、10D(広島→呉の通勤者を仮定)かつ単一ボトルネック(交通容量1000台/時)を持つ仮想的な都市を通勤する場面を想定し、仮想企業の始業時刻変更と従業員の出発時刻変更が繰り返し行われた場合を仮定して上記の手順で繰り返し計算を行った時の、繰り返し回数 n [1~1000]回目の総待ち時間の変化を図-7に示す。ここで、繰り返し回数とは先述した手順2~6を1サイクルとする計算回数である。

図-7に示したように、手順1~6の繰り返し計算を行った結果、相互作用を考慮した始業時刻分布は1つの解に収束せず、総待ち時間は振動してしまった(均衡状態に落ち着かなかつた)。この原因としては、始業時刻が6,7,8,9,10時の離散的な数であるため、従業員の出発時刻の決定方法から出発時刻も5つの時刻に限定されてしまったこと、仮想企業に対して業種ごとに同じ R_{fk} を設定したため、企業ごとの始業時刻選択の違いが十分に考慮できていなかったことなどが考えられる。以下では、1000回連続計算した時の始業時刻分布と交通状況を利用者均衡状態として定め、様々なシナリオ下における始業時刻分布と総待ち時間の均衡状態を比較する。

(3) 利用者均衡状態のシミュレーション分析

(2)で説明した方法を用いて、災害時の様々な状況を仮定した利用者均衡状態が導出できる。まず、大災害により通勤道路において土砂崩れや道路の破損が発生した

表-5 交通容量の減少による利用者均衡状態の変化

	6時	7時	8時	9時	10時	総待ち時間
1000 台/時	1.098%	12.400%	33.198%	45.142%	8.162%	5963 時間
800 台/時	1.670%	12.227%	33.430%	43.481%	9.190%	13595 時間
700 台/時	1.788%	13.656%	41.128%	36.553%	6.876%	19168 時間

表-6 特定時刻の交通量増加による利用者均衡状態の変化

	6時	7時	8時	9時	10時	総待ち時間
災害対応車両なし	1.098%	12.400%	33.198%	45.142%	8.162%	5963 時間
6:30~8:30	1.002%	12.802%	37.720%	38.968%	9.509%	8551 時間
7:30~9:30	1.068%	12.656%	35.546%	41.919%	8.810%	6906 時間

状況を想定し、交通容量の減少に伴う始業時刻分布と総待ち時間の均衡状態を比較する。交通容量以外の設定は(2)と同様で、交通容量が1000台/時、800台/時、700台/時の時の始業時刻分布（全企業平均）と総待ち時間の均衡解（1000回繰り返し計算結果）を導出した。各交通容量とその時の均衡解を表-5に示す。

表-5から、交通容量が減少するにつれて総待ち時間は増加し、始業時刻ピーク割合が低くなることが確認できる。また、交通容量が1000台/時から700台/時に減少すると、始業時刻のピークが9時から8時に移動していることが読み取れる。以上のシミュレーション結果から、災害時に交通容量が減少した際、企業は始業時刻を分散させるが、分散させる時間帯としては早い時刻に変更する傾向があるということが分かった。(1)に記述したPQモデルの感度分析結果から、出発時刻を遅い時刻に変更させる時差出勤の方がより渋滞緩和に効果的であることが理論的に証明されているため、企業が災害時に自主的に決定する始業時刻（利用者均衡状態）は、災害時の渋滞を最小化する「社会的に最適な」始業時刻とは異なることが分かった。つまり、企業は災害時において一定程度渋滞を緩和する方向に始業時刻を変更するものの、時間集積効果の維持や災害前始業時刻からの変更回避といった理由から、大幅な渋滞緩和を達成するほどの始業時刻変更は自主的には生じない可能性が示された。このことは、災害時における大幅な渋滞緩和を実現するためにはさらに始業時刻を遅らせる必要があることを伝える/そのためのインセンティブを付与するといった政策介入が必要であるということを示唆している。

次に、ある時間帯に災害対応が行われる状況を想定し、ある時間帯の交通量のみを増加させた時の始業時刻分布と総待ち時間の均衡状態を比較する。今回は、災害対応によって1時間あたり200台交通量が増加することとし、増加交通量以外の設定は(2)と同様で、災害対応車両

なし、災害対応車両流入時刻6:30~8:30、7:30~9:30の時の始業時刻分布と総待ち時間の均衡解（1000回繰り返し計算結果）を導出した。ここで、災害対応車両有りの2パターンは、車両流入時刻は違うが、増加交通量は同じ（2時間で400台）である。表-6に各災害対応状況とその時の始業時刻分布と総待ち時間の最終解を示す。また災害対応が行われた場合の均衡解を示す。

表-6から、災害対応により交通量が増えると総待ち時間が増加するとともに、始業時刻のピーク割合が低くなるができる。また、増加交通量が同じでも、災害対応車両流入時刻が7:30~9:30より6:30~8:30の方が総待ち時間がかなり大きいことがわかる。以上の結果から、災害への対応のために交通量が増加した場合、企業は始業時刻を変更し始業時刻は分散するが、災害対応車両の通過時刻によって渋滞の程度には大きな差が発生するということが分かった。

このように、渋滞と時間集積性を通じた相互作用から決定される始業時刻・出発時刻・渋滞の均衡パターンをモデル化することで、様々なシナリオ下における利用者均衡状態を導出することができる。災害時における利用者均衡状態のモデル化することで、災害時の時差出勤政策を議論する上で、渋滞を最小化する「社会的に最適な」始業時刻に変更させるための関連政策の影響を評価することができるだけでなく、災害時に想定される状況を提示することで、企業の始業時刻変更を促進する際の説得材料にもなり得ると考えられる。

6. おわりに

本研究では、災害時における時差出勤関連政策検討の支援ツールとして、災害状況下での利用者均衡状態を導出するモデルシステムを開発することを念頭に、その第

一段階として、災害時の企業の始業時刻選好及び従業員の出発時刻選好を把握するSP調査を設計し、企業の始業時刻選択モデルを構築した。また、構築した始業時刻選択モデル・仮想の出発時刻選択モデル・PQモデルを用いて、渋滞と企業の時間集積性を通じたモデル間の相互作用から導出される利用者均衡状態を導出し、様々なシナリオ下における災害時の交通状況をシミュレートした。本研究の主な成果は、(1)災害時における企業の始業時刻選好・従業員の出発時刻選好を把握するSP調査票を設計した点、(2)災害状況下における企業の時間集積性の存在を確認した点、(3)災害時における利用者均衡状態をシミュレートした結果、災害状況下で企業が自主的に決定する始業時刻は「社会的に最適な」始業時刻とは異なる可能性があることを示した点である。従って、本研究において定義した災害時における「社会的に最適な」状態を達成するためには、企業に始業時刻を遅い時刻に変更させるような政策介入が必要であることが示唆された。

今後、従業員の出発時刻選択に関してもSP調査結果からモデルを構築し、災害時の利用者均衡状態を導出するモデルシステムを確立する必要がある。検討すべき課題としては、アンケート結果から離散選択モデルを構築しているため、始業時刻や出発時刻が数パターンの離散量に限定されてしまうため利用者均衡状態が収束していないことが挙げられる。一定の仮定のもとこの離散量を連続量に変換することでより現実的なシミュレーションを行うことができ、連続計算から得られる均衡解は収束することが期待される。また、「社会的最適性」についても十分に議論を深めた上で最適状態に導くための政策変数を導入し、その影響を評価・考察する必要がある。

参考文献

- 1) Henderson, J.V. : The Economics of Staggered Working Hours, *Journal of Urban Economics*, Vol.9, No.3, pp.349-364, 1981.
- 2) 力石真・浦田淳司・吉野大介・藤原章正：交通ネットワーク被災時の発生・集中・内々交通量及び旅行時間の変動特性，土木学会論文集，Vol.75, No.1, pp.214-230, 2019.
- 3) 桑原雅夫：道路交通における出発時刻選択に関する研究解説，土木学会論文集，No.604, pp.73-84, 1998.
- 4) Hurdle, V.F. : The Effect of Queueing on Traffic

- Assignment in a Simple Road Network, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Sydney, pp.519-540, 1974.
- 5) Hurdle, V.F. : Equilibrium Flows on Urban Freeways, *Transportation Science*, Vol.15, No.3, 1981.
- 6) Hendrickson, C., and Kocur, G. : Schedule Delay and Departure Time Decisions in a Deterministic Model, *Transportation Science*, Vol.15, No.1, pp.62-77, 1981.
- 7) Hendrickson, C., Nagin, D., and Plank, E. : Characteristics of Travel Time and Dynamic User Equilibrium for Travel-to-Work, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Toronto, Canada, pp.321-347, 1981.
- 8) Hendrickson, C., and Plank, E. : The Flexibility of Departure Times for Work Trips, *Transportation Research*, Vol.18A, No.1, pp.25-36, 1984.
- 9) Fargier, P.H. : Effects of the Choice of Departure Time on Road Traffic Congestion, *Proceedings of Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Toronto, Canada, pp.223-266, 1981.
- 10) Smith, M.J. : The Existence of Time-Dependent Equilibrium Distribution of Arrivals at a Single Bottleneck, *International Symposium on Frontiers in Transportation Equilibrium and Supply Models*, Montreal, 1981.
- 11) Daganzo, C.F. : The Uniqueness of a Time-Dependent Equilibrium Distribution of Arrivals at a Single Bottleneck, *Transportation Science*, Vol.19, pp.29-37, 1985.
- 12) Kuwahara, M. : A Time-Dependent Network Analysis for Highway Commute Traffic in a Single Core City, *Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, Dissertation Series, UCB-ITS-DS-85-2*, 1985.
- 13) 高山純一，谷英賢，木村実，小村正隆：金沢市における時差出勤制度の社会実験，土木計画学研究・論文集，No.15, pp.821-830, 1998.
- 14) 吉村充功，奥村誠，塚井誠人：都市内業務トリップにおける時間的集積の経済性，都市計画論文集，第 34 巻，pp.217-222, 1999.
- 15) 原田知可子，鍋山弘道，岩倉成志：ゲーム理論を用いた企業の始業時刻推定手法に関する研究，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.743-744, 2004.
- 16) 柳沼秀樹，岩倉成志：N人ゲームを用いた企業の始業時刻決定モデルの構築，土木計画学研究・講演集，2005.
- 17) 佐藤慎太郎，赤松隆：企業と家計の相互作用を考慮した始業・出発時刻均衡モデル，土木計画学研究・論文集，No.23, pp.903-910, 2006.
- 18) Brock, W. A. and Durlauf, S.N. : Multinomial choice with social interactions, *National Bureau of Economic Research Technical Working Paper Series*, No.288, 2003.

(?????.?? 受付)

ANALYSIS OF INTERACTION BETWEEN WORK START TIME CHOICE and DEPARTURE TIME CHOICE DURING DISASTER

Nonoka MATSUMOTO, Makoto CHIKARAISHI, Akimasa FUJIWARA and Yusuke KANDA

As a first step in constructing a model system that contributes to staggered working hours in disaster, this study constructs a work start time choice model and propose an SP survey method to understand the

departure time choice behavior of employees based on the work start time. Furthermore, this study simulates user equilibrium during disaster using the constructed model and evaluate traffic congestion. From the parameters of the start time choice model, it was confirmed that the start time choice in disaster also had temporal agglomeration, while it was found that the work start time equilibrium distribution was uniquely determined. In addition, the simulation analysis shows that there is a possibility that companies won't voluntarily change the work start time that achieves significant congestion mitigation. It was suggested that a policy intervention to delay the work start time was necessary.