

# 混雑料金が温室効果ガス排出量に与える影響

堀田 真央<sup>1</sup>・高山 雄貴<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: mahi.0204@stu.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学 准教授 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: ytakayama@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では居住地選択と都市人口変化を考慮し、混雑料金による温室効果ガス排出量への影響について分析する。分析手法として、温室効果ガス排出量は総通勤費用に比例すると考え、まず労働者の居住地選択のみを考慮した閉鎖都市モデルを用いて、混雑料金導入前後の総通勤費用を比較した。さらに、労働者の居住地選択と都市人口変化を考慮できる、小開放都市モデルにおいても同様の分析を行った。その結果、後者において、混雑料金の導入が温室効果ガスの排出量を増加させることが明らかにされた。

**Key Words** : 混雑料金, 温室効果ガス, 総通勤費用, 居住地選択・都市人口変化

## 1. はじめに

近年の都市における問題の一つとして人口密度が高いことによる交通混雑があげられる。交通混雑が起こると移動時間が増加し、車の排気ガスなどによる温室効果ガス排出量が増加する。そのため気候変動に対する対策を交通で行うことは重要であると考えられる。現在その対策の一つとして混雑料金が用いられている。これまでの研究蓄積により、混雑料金導入は交通混雑の緩和・総所要時間の減少といった効果をもたらすことが明らかにされている(土木学会<sup>1)</sup>)。その結果、同時に温室効果ガス排出量が減少する効果が期待されている。しかし既存研究では出発地が変わらないことが前提となっているという課題が残っている。混雑料金導入は、通勤・移動に伴う費用を変化させるため、長期的には家計の居住地変更・都市空間の構造の変化を生じさせる。この影響を既存研究では考慮することができていない。

家計の移住を考慮しているかどうかは混雑料金導入の影響を解析する上で大きな影響を与えることが予想される。Gaigné et al.<sup>2)</sup>による研究では都市人口が変化する場合のコンパクトシティ化の影響について分析している。そして、都市のコンパクト化は都市人口・物流の変化により温室効果ガスの排出量を増大させる可能性があることを示している。しかし、この研究では運輸部門の温室効果ガス排出量に重要な影響を与える交通混雑現象を考慮していない。

そこで本研究では居住地選択・都市人口変化を考慮した上で混雑料金導入が温室効果ガス排出量削減につながるのか明らかにすることを目的とする。分析手法として混雑料金導入前後の温室効果ガス排出量の変化

は総通勤費用の変化に比例すると考え、総通勤費用を比較する。これにより、混雑料金導入の効果を適切に分析することができる。

## 2. モデル

### (1) 都市の設定

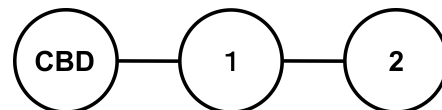


図-1 都市の設定

本モデルは、図-1 に示すような、1 箇所の CBD と  $A$  箇所の居住地が直列に結ばれている単一中心都市を考える。居住地は、CBD から近い順にインデックスを付け、その集合を  $\mathcal{A} \equiv \{1, 2, \dots, A\}$  と表す。各居住地の面積は全て同一で  $L$  であると仮定する。各居住地を結ぶ道路は全て均質であり、居住地  $a-1$  と  $a$  の間の道路を“道路  $a$ ”と呼ぶ。道路  $a$  を通過する際にかかる交通費用  $c(x_a)$  は、交通量  $x_a$  の単調増加、凸関数であると仮定する。

本モデルにおける温室効果ガス排出量は、総交通費用と正の相関を持つと仮定する。これは、交通費用は所要時間に応じて定まること、所要時間が温室効果ガスの排出量に大きな影響を与えることから、一定の妥当性があると考えられるためである。

労働者はすべて均質であり、都市の総人口は  $N$  である。労働者は、居住地  $a \in \mathcal{A}$  を選択し、CBD に通勤する。居住地  $a$  の労働者数を  $N_a$  と表す。このとき、道

路  $a$  の交通量  $x_a$  は以下のように表される:

$$x_a = \sum_{b=a}^A N_b. \quad (1)$$

## (2) 労働者の行動

### a) 混雑料金の導入前

労働者は均質で、同一の効用関数を有する。したがって、この労働者は、居住地  $a \in \mathcal{A}$  により特徴づけられる。この労働者の効用は、都市経済学分野で広く用いられる、合成財の消費量  $z_a$ 、土地面積  $l_a$  の準線形効用関数で与える:

$$u(z_a, y_a) = z_a - \frac{\beta}{l_a}. \quad (2)$$

合成財をニューメレールとすると、予算制約は以下の式で与えられる:

$$y \geq z_a + r_a l_a + \sum_{b=1}^a c(x_b). \quad (3)$$

ここで、 $y$  は所得、 $r_a$  は地代を表す。所得  $y$  は、賃金に加え地代収入からなる。賃金は生産外部性の影響で CBD の就業者数の単調増加関数で与えられると仮定する。さらに、土地所有に関しては local landownership を仮定するため、都市全体の地代収入は居住する労働者に均等に再配分される。以上の仮定から、賃金  $y$  は以下で与えられる:

$$y = w + \kappa \sum_{a \in \mathcal{A}} N_a + w_R, \quad (4)$$

$$w_R = \frac{L \sum_{a \in \mathcal{A}} r_a}{\sum_{a \in \mathcal{A}} N_a}. \quad (5)$$

ここで、所得  $y$  の第 1 項は固定的な賃金、第 2 項は賃金の生産性効果分、第 3 項は地代の再配分による収入を表す。

財消費に関する効用最大化問題より、 $z_a, l_a$  が得られる:

$$z_a = y - \sqrt{\beta r_a} - \sum_{b=1}^a c(x_b), \quad l_a = \sqrt{\frac{\beta}{r_a}}. \quad (6)$$

また、土地の需給均衡条件より、 $r_a$  は以下の通りとなる:

$$r_a = \beta \left( \frac{N_a}{L} \right)^2. \quad (7)$$

以上より、間接効用関数  $v_a$  は次のように表される:

$$v_a = y(\mathbf{N}) - \frac{2\beta}{L} N_a - \sum_{b=1}^a c(x_b), \quad (8a)$$

$$y(\mathbf{N}) = w + \kappa \sum_{a \in \mathcal{A}} N_a + \frac{\beta \sum_{a \in \mathcal{A}} N_a^2}{L \sum_{a \in \mathcal{A}} N_a}. \quad (8b)$$

ここで、 $\mathbf{N} = (N_a)_{a \in \mathcal{A}}$  である。

### b) 混雑料金の導入後

本稿では、導入される混雑料金は、混雑外部性を内部化することのできる水準に設定する。すなわち、各道路  $a \in \mathcal{A}$  に料金  $x_a c'(x_a)$  が賦課され、その交通費用  $c_a$  が以下で与えられる状況を考える:

$$c_a = c(x_a) + x_a c'(x_a). \quad (9)$$

混雑料金の導入により得られることとなる料金収入  $R$  は、その都市に居住する労働者に均等に再配分されると仮定する。この料金収入  $R_C$  と各労働者への再配分額  $w_C$  は、以下の通りとなる:

$$R_C = \sum_{a \in \mathcal{A}} N_a \sum_{b=1}^a x_b c'(x_b), \quad w_C = \frac{R_C}{N_1 + N_2}. \quad (10)$$

上記の設定より、混雑料金を導入することで変化するのは、労働者の通勤にかかる交通費用と所得のみである。したがって、混雑料金が導入された後の間接効用関数  $\hat{v}_a$  は、以下で与えられる:

$$\hat{v}_a = \hat{y} - \frac{2\beta}{L} N_a - \sum_{b=1}^a c_b, \quad (11a)$$

$$\hat{y} = y(\mathbf{N}) + \frac{\sum_{a \in \mathcal{A}} N_a \sum_{b=1}^a x_b c'(x_b)}{\sum_{a \in \mathcal{A}} N_a}. \quad (11b)$$

### (3) 均衡条件

労働者は、(8) で与えられる間接効用  $v_a$  (または (11) で与えられる  $\hat{v}_a$ ) を最大化する居住地  $a \in \mathcal{A}$  を選択する。したがって、均衡状態は以下の条件が成立する状態である:

$$\begin{cases} v^* = v_a & \text{if } N_a > 0, \\ v^* \geq v_a & \text{if } N_a = 0, \end{cases} \quad (12a)$$

$$N_1 + N_2 = N. \quad (12b)$$

条件 (12a) は、労働者の居住地選択に関する無裁定条件を表す。すなわち、この条件は、均衡状態では、どの労働者も自らの居住地を変更するインセンティブを持たないことを意味している。条件 (12b) は、労働者数の保存則である

### (4) 閉鎖都市と小開放都市

本稿では、混雑料金を導入する影響を考える際に、次の 2 種類の状況を考える。

#### ● 閉鎖都市

最初に考えるのは、都市の総人口  $N$  を外生的に与える“閉鎖都市 (closed city)”である<sup>1</sup>。この設定の下では、混雑料金の導入は労働者の居住地選択に影響を与える一方で、都市の総人口は変化させない。

<sup>1</sup> このとき、都市内部に居住する効用  $v^*$  は内生的に定まる。

● 小開放都市

次に考えるのが、都市の総人口  $N$  が内生的に定まる“小開放都市 (small open city)”である。このケースでは、都市の外部 (以降では、便宜上、都市の外部のことを“農村”と呼ぶ) の効用  $v^*$  を与件とすることで、都市人口  $N$  が内生的に定まる。したがって、混雑料金の導入は、都市内部の労働者分布だけでなく、都市の総人口にまで影響を与えることとなる。

本稿では、これら 2 種類の状況別に分析を実施し、混雑料金の導入効果を比較・検証することで、都市総人口の変化の有無が結果に与える影響を検証する。なお、閉鎖都市の解析は第 3 章、小開放都市の解析は第 4 で実施する。

### 3. 閉鎖都市での混雑料金の導入効果

本章では、閉鎖都市において混雑料金を導入した場合の、温室効果ガスの排出量削減効果を調べる。

なお、本章以降では、混雑料金の導入効果を解析的かつ明解に示すために、モデルの設定に関して、追加で以下の仮定を導入する。なお、この仮定の緩和に大きな困難は伴わないものの、今後の課題とする。

**仮定 1** 居住地数を 2 箇所限定 (i.e.,  $A = 2$ ) し、各居住地の人口が正になるパラメータ値の集合のみを考える。

**仮定 2** 交通費用関数は次の線形関数とする：

$$c(x) = \alpha x. \quad (13)$$

**仮定 3** 都市人口が増加するほど、都市に居住する効用が増加する状況を除外する。すなわち、以下の条件を満足するパラメータ集合を考える：

$$\frac{dv^*(N)}{dN} < 0. \quad (14)$$

ここで、 $v^*(N)$  は、均衡状態における都市の効用水準を都市人口  $N$  の関数として表したものである。これは、小開放都市において、都市人口が無限大に発散することを防ぐための仮定である。

#### (1) 混雑料金導入前・後の均衡状態

混雑料金導入前の均衡条件を用いると、均衡状態における各居住地の人口  $N^*$  が以下のように求められる：

$$\begin{cases} N_1^* = \frac{\alpha L + 2\beta}{\alpha L + 4\beta} N, \\ N_2^* = \frac{2\beta}{\alpha L + 4\beta} N. \end{cases} \quad (15)$$

この結果から、総交通費用  $TC^* = \sum_{a \in A} x_a c(x_a)$  は以下の通りとなる：

$$TC^* = \alpha N^2 \left\{ 1 + \left( \frac{2\beta}{\alpha L + 4\beta} \right)^2 \right\}. \quad (16)$$

次に、混雑料金が導入されている条件下での均衡条件を解こう。このとき、各居住地の人口  $N^*$  は、以下のように与えられる：

$$\begin{cases} N_1^o = \frac{\alpha L + \beta}{\alpha L + 2\beta} N, \\ N_2^o = \frac{\beta}{\alpha L + 2\beta} N. \end{cases} \quad (17)$$

したがって、総通勤費用  $TC^o$  は以下の通りとなる：

$$TC^o = \alpha N^2 \left\{ 1 + \left( \frac{\beta}{\alpha L + 2\beta} \right)^2 \right\}. \quad (18)$$

#### (2) 混雑料金導入前後の総交通費用の比較

混雑料金の導入前・後の総交通費用を比較することで、温室効果ガスの排出量削減効果を調べよう。前節で得られた結果から、 $TC^* - TC^o$  は以下ようになる：

$$TC^* - TC^o = \alpha N^2 \left\{ \left( \frac{2\beta}{\alpha L + 4\beta} \right)^2 - \left( \frac{\beta}{\alpha L + 2\beta} \right)^2 \right\} > 0. \quad (19)$$

この結果より、閉鎖都市では、混雑料金の導入により温室効果ガスの排出量が削減されることが確認できる。

### 4. 小開放都市での混雑料金の導入効果

本章では、小開放都市の設定下での混雑料金の導入効果を検証する。なお、この設定下では、農村での移動に伴う温室効果ガス排出量は、都市に比べて無視できるほど小さいと考える。そのため、農村から都市への移住は、単純に都市内部の交通費用の増加分だけ温室効果ガスの排出量が増加すると仮定する<sup>2</sup>。

#### (1) 混雑料金導入前・後の均衡状態

混雑料金導入前における均衡条件より、都市内部の各居住地人口は以下のように与えられる：

$$\begin{cases} N_1^* = (w - v^*) \frac{L(\alpha L + 2\beta)(\alpha L + 4\beta)}{\Phi}, \\ N_2^* = (w - v^*) \frac{2\beta L(\alpha L + 4\beta)}{\Phi}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Phi \equiv & \alpha^3 L^3 + 9\alpha^2 \beta L^2 + 24\alpha \beta^2 L + 8\beta^3 \\ & - \kappa L(\alpha L + 4\beta)^2. \end{aligned} \quad (21)$$

<sup>2</sup> この仮定は、通勤交通以外の温室効果排出量については、都市と農村の間に無視できるほどの差しかない、という点も含むことに注意。

したがって、総通勤費用  $TC^*$  は以下のように与えられる:

$$TC^* = \alpha \left\{ (w - v^*) \frac{(\alpha L + 4\beta)L}{\hat{\Phi}} \right\}^2 \times \{(\alpha L + 4\beta)^2 + (2\beta)^2\}. \quad (22)$$

次に、混雑料金導入下における均衡条件より、各居住地の人口が以下のように与えられる:

$$\begin{cases} N_1^o = (w - v^*) \frac{L(\alpha L + \beta)}{\hat{\Phi}}, \\ N_2^o = (w - v^*) \frac{\beta L}{\hat{\Phi}}, \end{cases} \quad (23)$$

$$\hat{\Phi} \equiv \alpha^2 L^2 + 3\alpha\beta L + \beta^2 - \kappa L(\alpha L + 2\beta) \quad (24)$$

したがって、総通勤費用  $TC^o$  は以下のように与えられる:

$$TC^o = \alpha \left\{ (w - v^*) \frac{L}{\hat{\Phi}} \right\}^2 \{(\alpha L + 2\beta)^2 + \beta^2\}. \quad (25)$$

## (2) 混雑料金導入前後の総交通費用の比較

$TC^* - TC^o$  の符号は、解析的に調べるのが困難である。そこで、その値を数値的に分析する。

ここでは、 $\alpha, \beta$  の大きさによって数値が正負どちらになるのか分析した。より具体的には、 $\alpha, \beta$  を 0.01 ずつ 0.01~0.5 まで変化させて、 $TC^* - TC^o$  の符号を確認した (正になる場合は赤、負になる場合は青)。なお、仮定 3 を満たさないパラメータ領域は灰色で表した。

$L = 1, \kappa = 0.4$  の時の図を図 2 に示す。

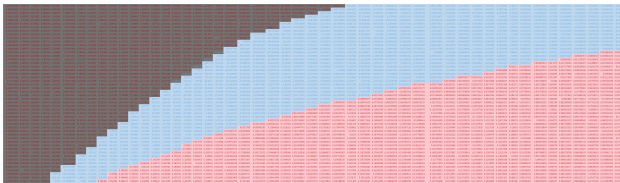


図-2  $TC^* - TC^o$  の符号

図-2 より青の部分がある。これは混雑料金導入下の総通勤費用が、導入前を上回る領域である。これは、小開放都市の場合は、混雑料金導入により温室効果ガス排出量が増加する可能性があることを示している。

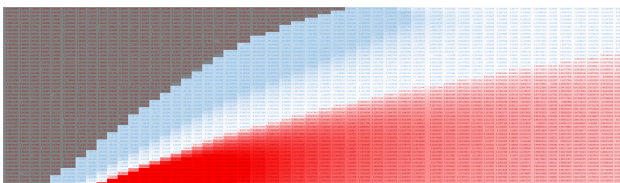


図-3  $TC^* - TC^o$  のコンター図

図-3 より、 $\alpha, \beta$  が小さい場合、混雑料金導入下での総通勤費用の方が大きくなることを確認できる。しかし  $\alpha, \beta$  が大きくなるほど、総通勤費用の差が小さくなる。

## 5. おわりに

本研究では居住地選択・都市人口変化を考慮して混雑料金の温室効果ガス排出量への影響について分析した。分析手法として居住地選択を考慮したモデルを用いて、混雑料金導入前後の温室効果ガス排出量は総通勤費用に比例すると考え、総通勤費用を比較した。その結果、小開放都市では混雑料金を導入することにより、総通勤費用が増加、つまり温室効果ガス排出量が増加しうることが確認できた。

### 謝辞:

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR215M の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解析-, 土木学会, 1998.
- 2) Gaigné, C., Riou, S., and Thisse, J.-F.: Are compact cities environmentally friendly?, *Journal of Urban Economics*, Vol.72, NO.2-3, pp.123-136, 2012.