

# 震災時における給油利便性低下の 空間的要因分析

岩坂 友也<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>・大窪 和明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (980-8577宮城県仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)  
E-mail:iwasaka@cneas.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8577宮城県仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)  
E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東北大学助教授 東北アジア研究センター (〒980-8577宮城県仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)  
E-mail:okubo@cneas.tohoku.ac.jp

2011年3月11日に発災した東日本大震災時には、被災地などのガソリンスタンド（以下GS）で、給油待ちの乗用車がGS前に行列を作り、GS利用者にとっての給油利便性が低下した。本研究の目的は、このような給油利便性の低下現象について、空間的要因に着目して考察することである。ここでは、空間的要因として営業GS数、GS利用形態、営業GS配置に着目し、それらが、震災時に対応する仮定の下で、給油利便性に及ぼす影響を分析した。分析手順として、まず2種類のGS利用形態（移動中利用と居住地利用）における利用者のGS選択を求めるときの最適化モデルを構築する。次にその利用者のモデルを内包するGS運営者の営業GS配置モデルを構築する。その上で3つの異なる営業GS配置を設定し、2種類の利用形態における利用者のGS選択問題を解き、給油利便性の違いを考察する。本研究の成果は、i)空間的要因が給油利便性に及ぼす影響を定量的に示したこと、ii)移動時間を犠牲にしても待ち時間を節約するような、GS利用者の行動が見られることを示したことである。

**Key Words** : *facility selection model, quadratic programming, facility congestion, earthquake disaster, refueling problem*

## 1. 本研究の問題意識と内容

### (1) 背景

2011年3月11日に発災した東日本大震災時においては、被災地などのガソリンスタンド（以下GS）の前には、給油待ちの自動車が行列を作り、給油利便性が低下した。このような給油利便性低下の再発を防ぐためにその実態を把握することは、震災の続発が懸念される今日において重要であるといえる。

### (2) 本研究の目的

震災時に、ある地域でGS混雑によって起こる給油利便性の低下を防ぐ方法は、大きく分けて次の二つがあると考えられる。一つ目は、i)地域外から地域内へ入ってくるガソリンの量を増やす方法。二つ目は、ii)地域内に既にあるガソリンを、GS混雑が起きないように工夫して消費者に販売する方法である。

i)を行なうことは、港湾の耐震化などのハードな整備を必要とし短期的には難しい。しかも国内の石油類の販売量は低燃費車量の普及などで経年的に減少しており、

供給体制の量的な拡大は容易とはいえない。そこで本研究ではii)について考える。ガソリンの販売における工夫としては、整理券配布や価格政策といった方法のほか、営業する店舗の位置を選び利用者を誘導するといった空間的な方法が考えられる。本研究ではこのうち空間的な販売政策のあり方を検討する第1歩として、空間的要因が、震災時における給油利便性の低下に対してどう影響するかを把握することを目的とする。

### (3) 給油利便性低下の空間的要因

本研究では、給油利便性低下の空間的要因として、震災時におけるa)営業GS数、b)営業GS配置、c)GS利用形態に着目する。

#### a) 営業GS数

震災時には、施設の破損、停電や従業員確保の困難化、在庫切れなどのために営業可能なGS数が限られる。営業GS数の減少は混雑につながるため、給油利便性低下の要因となるといえる。

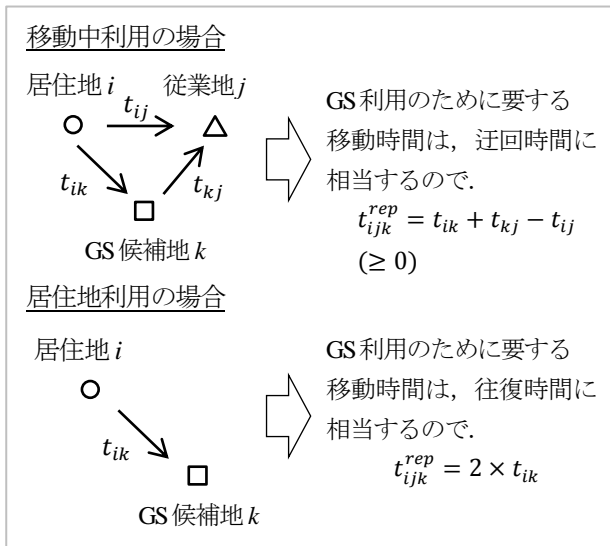


図-1 利用形態ごとの、移動時間の違い

## b) GS 利用形態

GS 利用者の利用形態は、平常時においては通勤等の移動のついでに利用するという利用形態（以下、移動中利用）が主であると考えられるのに対して、震災時には、給油待ち行列に長時間並ぶ必要があるために他の移動の途中で給油することが困難となり、居住地から給油のためだけに GS への往復移動を行うという利用形態（以下、居住地利用）が主になると推測される（図-1）。このような利用形態の変化は、給油利便性の低下要因となり得ると考えられる。

## c) 営業 GS 配置

営業 GS 数が減少すると「数が限られた営業 GS をどう配置するか（どの店舗を開けるか）」というように、営業 GS 配置問題を考える必要が出てくる。この配置の適否が、給油利便性低下の要因となり得ると考えられる。

## (4) 既存研究

Hodgson<sup>1)</sup>は、居住地利用と移動中利用という 2 種類の利用形態を前提とする施設配置計画問題が、0-1 変数を含む混合整数線形計画問題として定式化できることを示し、都市における保育施設の配置問題における利便性を比較して、移動中利用の有効性を示している。この研究で用いられたモデルには、施設の混雑によって生じる待ち時間は考慮されていない。

## (5) 本研究の内容

まず 2 種類の GS 利用形態（移動中利用と居住地利用）における利用者の GS 選択を求めるための最適化モデルを構築する。次にその利用者のモデルを内包する GS 運営者の営業 GS 配置モデルを構築する。その上で 3 つの異なる営業 GS 配置案を営業 GS 数ごとに設定し、2 種類の利用形態における利用者の GS 選択問題を解いて、給

油利便性の違いを考察する。

## 2. モデルの説明

### (1) 利用者の行動と給油利便性の評価指標

震災時においてもガソリン価格は平常時のままで販売されていたことから、利用者が給油に当たって必要としてコストの大半は時間的なコストであったと考えられる。すなわち各利用者は、「GS までの移動時間（以下、移動時間）」と「GS において給油待ち行列に並ぶことによって生じた待ち時間（以下、待ち時間）」の和の時間（以下、給油時間）」を負担したと考えられる。なお、個人の待ち時間は直感的には、その個人の前に並んでいる利用者の長さ依存するように見える。しかし、各個人が GS の営業時間よりも前の時点から並び始めることも可能であるなら、営業開始後の待ち時間のコストが節約できる分と等しいコストを支払って営業時間前から並ぶという行動が起こる。結果的には営業時間前の待ち時間と営業時間後の待ち時間のコストを合わせたものは、同じ GS を利用するどの利用者にとっても等しいという状況に落ち着くと考えられる。

社会全体の給油利便性の評価指標としては、以上の 1 人当たり給油時間、1 人当たり移動時間、1 人当たり待ち時間または、それらを社会全体で集計した総給油時間、総移動時間、および総待ち時間を用いることができる。後述するように、本研究では 1 日に給油を行う利用者の数を所与と考えるため、1 人当たりの指標を用いても総計の指標を用いても結果は変わらない。

### (2) モデル化に当たっての準備

モデルに使用する文字と変数を次のように定義する。

$i$ :居住地ゾーン  $j$ :従業地ゾーン

$k$ :GS 候補地ゾーン  $p$ :営業 GS 数

$t_{ij}$ : $ij$ 間の移動時間  $c_{ij}$ : $ij$ 間を移動する利用者数

$w$ :単位利用者当りの、GS における給油作業時間

$X_{ijk} (\geq 0)$ : $ij$ 間を通勤する全利用者の GS $k$ への配分比

$Y_k \in \{0,1\}$ : $k$ における GS の存在を表す 0-1 変数

$Z$ :目的関数

$t_{ijk}^{rep}$ :移動時間。ただし以下のようになる（図-1 参照）

$$t_{ijk}^{rep} = \begin{cases} t_{ik} + t_{kj} - t_{ij} (\geq 0) & (1a) \\ 2 \times t_{ik} & (1b) \end{cases}$$

式(1a)は移動中利用の場合の移動時間（迂回時間）を表し、式(1b)は居住地利用の場合の移動時間（往復時間）を表す。

### (3) 待ち時間の折れ線近似

給油利便性の評価指標である総待ち時間について説明する。

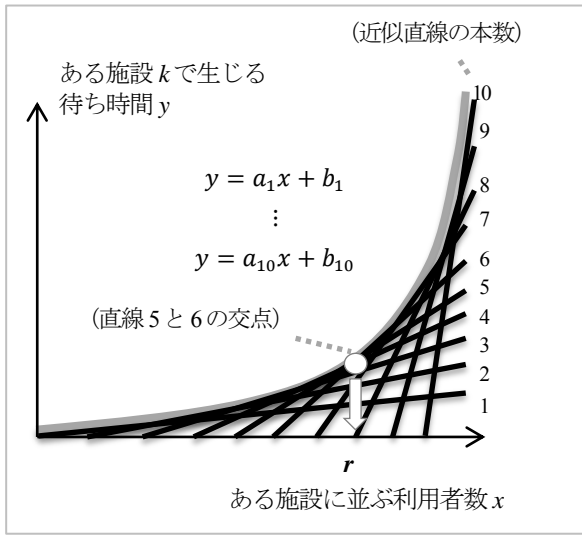


図-2 待ち時間項の折れ線近似

ある 1 件の GS に並んでいる人数を  $c_{ij}X_{ijk}$ , その GS で生じる総待ち時間を  $y$ , 利用者 1 人当りの給油作業に単位時間当り  $w$  かかるとする. このとき, GS における総待ち時間  $y$  は, 次の式のように利用者数の 2 乗に比例する量となる.

$$y = \frac{w}{2} \left( \sum_{i,j} c_{ij}X_{ijk} \right)^2 \quad (2a)$$

モデルを線形計画として解くために, 式(1a)の二次関数を  $N$  本の折れ線で近似することを考える.

$$y_k = a_n \sum_{i,j} c_{ij}X_{ijk} + b_n \equiv g_{nk} \quad (2b)$$

$n = 1, 2, \dots, N$

ただし,  $a_n$  と  $b_n$  はそれぞれ傾きと切片である. 図-2 に  $N = 10$  の場合を示す.

次に, 全ての利用者が各営業 GS に均等に並んだときの, 1 件当りに並んでいる人数を  $r$  人とする. ある 1 件の GS に並ぶ利用者が, 0 人から増加していき, ちょうど  $r$  人だけ並んだとき, その GS で生じる待ち時間が,  $N/2$  本目の折れ線に初めて乗るように, 各折れ線の傾きと切片を設定する (図-2 参照).

#### (4) 利用者最適 GS 利用モデル (UO-A)

営業 GS 配置  $Y_k$  が与件の下で, 各利用者が自由に GS を選択する状況を考える. このとき,  $ij$  間を通勤する全利用者の施設  $k$  への配分比は, 次のワードロップの均衡条件式を満たすように決まる.

$$X_{ijk} \left( t_{ijk}^{rep} + w \sum_{i,j} c_{ij}X_{ijk} - u_{ijk} \right) = 0 \quad (3a)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad (3b)$$

$$t_{ijk}^{rep} + w \sum_{i,j} c_{ij}X_{ijk} - u_{ijk} \geq 0 \quad (3c)$$

ただし  $u_{ijk}$  は最短所要時間である. すなわち,  $ij$  間を通勤する利用者がゾーン  $k$  にある GS を利用する場合の所要時間が最短所要時間よりも大きければ, ゾーン  $k$  を利用する利用者はいない ( $X_{ijk} = 0$ ) ことを意味している. このワードロップ均衡条件式を一階の最適化条件を持つような最適化問題を考えることにより, 利用者の GS 選択行動を求めるモデル (User Optimum - Allocation モデル) は以下のように定式化できる.

$$\min_{X_{ijk}, T_k} Z = \sum_{i,j,k} c_{ij}X_{ijk} t_{ijk}^{rep} + \sum_k T_k \quad (4a)$$

$$s. t. \sum_k X_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \quad (4b)$$

$$X_{ijk} \leq Y_k \quad \forall i, j, k \quad (4c)$$

$$T_k \geq g_{nk} \quad \forall k, n = 1, 2, \dots, N \quad (4d)$$

ただし

$$t_{ijk}^{rep} = \begin{cases} t_{ik} + t_{kj} - t_{ij} (\geq 0) \\ 2 \times t_{ik} \end{cases} \quad (4f)$$

$$(4g)$$

各式の意味を以下に示す.

式(4a) : 目的関数.

第 1 項が移動時間, 第 2 項が待ち時間.

式(4b), : 全利用者がいずれかの GS に配分される

式(4c) : GS が存在するゾーンのみ利用者配分する

式(4d), : 利用者数の 2 乗に比例して増加する総待ち時間関数を,  $N$  本の折れ線で近似したもの.

#### (5) 利用者最適 GS 配置モデル (UO-L)

つぎに, このような利用者の行動を前提として, 総給油時間が最小となるように, 利用者分布と営業 GS 配置を求めるモデル (User Optimum - Location モデル) は以下のように定式化できる.

$$\min_{X_{ijk}, Y_k, T_k} Z = \sum_{i,j,k} c_{ij}X_{ijk} t_{ijk}^{rep} + \sum_k T_k \quad (5a)$$

$$s. t. \sum_k X_i = 1 \quad \forall i, j \quad (5b)$$

$$X_{ijk} \leq Y_k \quad \forall i, j, k \quad (5c)$$

$$\sum_k Y_k = p \quad (5d)$$

$$T_k \geq g_{nk} \quad \forall k, n = 1, 2, \dots, N \quad (5e)$$

ただし

$$t_{ijk}^{rep} = \begin{cases} t_{ik} + t_{kj} - t_{ij} (\geq 0) \\ 2 \times t_{ik} \end{cases} \quad (5f)$$

$$(5g)$$

各式の意味を以下に示す.

式(5a) : 目的関数.

第 1 項が移動時間, 第 2 項が待ち時間.

式(5b), : 全利用者がいずれかの GS に配分される.

式(5c), : 総 GS 数は  $p$  個である.

式(5d) : GS が存在するゾーンのみ利用者配分する.

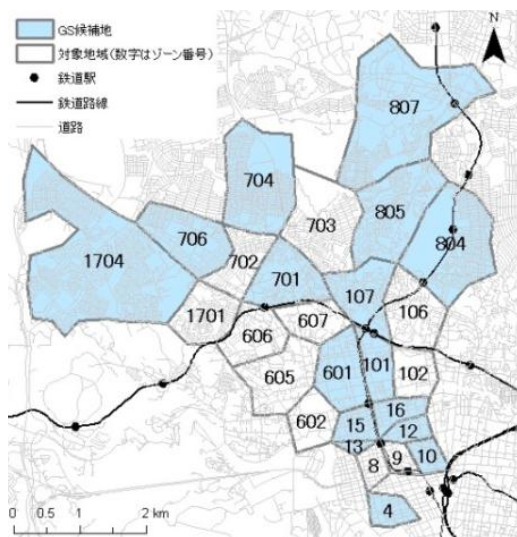


図-3 分析対象地域

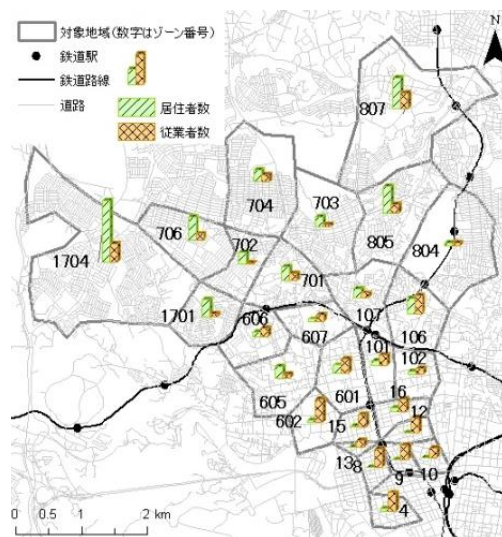


図-4 居住者と従業者の分布

式(5e), : 利用者数の 2 乗に比例して増加する総待ち時間関数を,  $N$  本の折れ線で近似したもの。

### 3. 分析方法

#### (1) 手順

はじめに UO-L を用いて次の 3 つの営業 GS 配置を求める。すなわち i) 移動中利用時の給油時間を最小とする営業 GS 配置 (移動中配置), ii) 居住地利用時の給油時間を最小とする営業 GS 配置 (居住地配置), iii) 平常時に利用者数が多い順に開けていく営業 GS 配置 (売上配置) を求める。このとき i), ii) は, UO-L において移動時間  $t_{ijk}^{rep}$  をそれぞれ式(5f), 式(5g)と置いて計算することができる。iii) については, UO-L において全 GS が営業している状態 (すなわち平常時) のときの利用者配分を求め, 配分された利用者が多い順に GS に優先度を付け, その優先度順に営業 GS を配置していくものとする。

次に i)-iii) の各配置を所与として移動中利用, 居住地利用の各場合について UO-A を解き, 計 6 通りの利用者分布, 1 人当り給油時間, 1 人当り移動時間, 1 人当り待ち時間を求め, その結果を考察する。

#### (2) 分析対象地域

宮城県仙台市の都心部に向かって, 北部から通勤する人々を取り上げ, 図-3 に示した地域を対象地域とする。なお, ゾーン区分は 2002 年仙台都市圏 PT (パーソントリップ) 調査の中ゾーン区分に従っている。

#### (3) パラメータの設定

モデルを計算する上で, a) 利用者数 OD, b) ゾーン間移動時間, c) GS 候補地ゾーン集合, d) 待ち時間曲線の

折れ線近似パラメータ (傾きと切片) の 4 つを決める必要がある。以下それぞれの作成方法を説明する。

#### a) 利用者数 OD

初めに 2002 年仙台都市圏 PT 調査において「目的種類が通勤」かつ「代表交通手段が乗用車」であるサンプルの拡大係数を OD ペアごとに合計する。このとき, 全 OD ペアの拡大係数の合計値は約 5000 であったことから, 対象地域内を乗用車で通勤している人数は約 5000 人であるといえる。このときの, 居住者分布と従業者分布を図-4 に示す。次に, 「分析対象日には, 対象地域内を乗用車で通勤している人々の 20% だけが給油する」と仮定し, 先の拡大係数合計値の 20% を計算し, これを利用者数 OD とする。

#### b) ゾーン間移動時間

a) と同じ PT 調査において「代表交通手段が車」であるサンプルのトリップ時間を, 同じ OD ペアごとに重みづけ平均した値を算出する。さらに, この値にダイクストラ法を適用し, i) サンプルが得られなかった OD ペアの値を補完し, ii) 経路の変更によって移動時間が短縮できる OD ペアについては, その移動時間の値を短縮後の値とした。

#### c) GS 候補地ゾーン分布

GS 候補地ゾーン分布は, 国土交通省国土政策局 GIS ホームページ<sup>2)</sup> の燃料給油所データ (作成時点 2010 年 8 月) を基に作成した。その際, 対象地域内において GS が少なくとも 1 件存在するゾーンを GS 候補地ゾーンとした。対象地域内における GS 候補地ゾーンは図-3 の中で着色して示した通りである。なお, 本研究では同一ゾーン内に GS が複数存在しても, それらをまとめて 1 件の GS として扱っている。



#### d) 待ち時間曲線の折れ線近似パラメータ

2章(3)節で示した考え方において、 $w = 2.5$ (分)、 $N = 10$ として傾きと切片を求めた。

#### (4) 震災時を想定した状況設定

分析に際し以下(i)~(v)の状況を設定する。これらの設定は分析の都合上置いたものであり、必ずしも震災時直後の実態を反映していないという点に注意が必要である。

- (i) ガソリン在庫は十分にあり、GSに並んだ利用者は必ずガソリンを購入できる。
  - (ii) 自動車通勤ODとしては平常時のものを与える
  - (iii) 各利用者は、配置された全ての営業GSまでの移動時間に関する情報と、各GSに並ぶことで被る待ち時間に関する情報を持っている
  - (iv) 分析対象の期間を1日とし、その日のGS営業GS数開始時に、その日給油する全利用者がGS前に並び終えている。
  - (v) 各利用者の効用関数は互いに等しいとする。
- 各仮定の設定理由を説明する。

はじめに仮定(i)と(ii)について。本研究が分析対象とする状態は、通勤ODが平常時のものに戻り、GSへのガソリン供給が安定した状態である。よって(i)と(ii)とを仮定した。「そのような状態が実際にあったのか」ということを問題にするのではなく「そのような理想的な状態においてもなお起こる、給油利便性の低下を見る」ことに主眼を置いている。

仮定(iii)について。本研究では、給油利便性に影響を与えた要因として、GS利用形態に着目している。利用形態の影響を抜き出すためには、利用形態以外の条件を一定として、利用形態の差異が給油利便性に及ぼす影響のみを抜き出す必要がある。すなわち、「各利用形態において、(iii)という、給油利便性最大化のための理想的な条件が整っていたとしても、給油利便性に差異が見られる」ならば、それは利用形態の差異がもつ影響を抜き出せていることになる。つまり、実際には(iii)という条件が整っていたわけではないが、分析のための理想的な条件として(iii)を定めた。仮定(iv)について。(iv)は、利用者の、GSへの到着の仕方を定めている。(iv)の仮定により、全利用者が同時にGS前に行列をつくるので、待ち時間は「最大値」となる。ここでもし「ランダム到着」を仮定してしまうと、待ち時間が偶然大きくなったり小さくなったりする可能性がある。本研究においては、その偶然性を排し、「待ち時間の最大値」を扱うことを考え、仮定(d)を置く。

仮定(v)について。本研究では、利用者全体としての効率性の低下を問題としており、利用者一人ひとりの効用関数の差異を問題にしない。よって(v)のように、利用者が互いに同質であるものと仮定する。

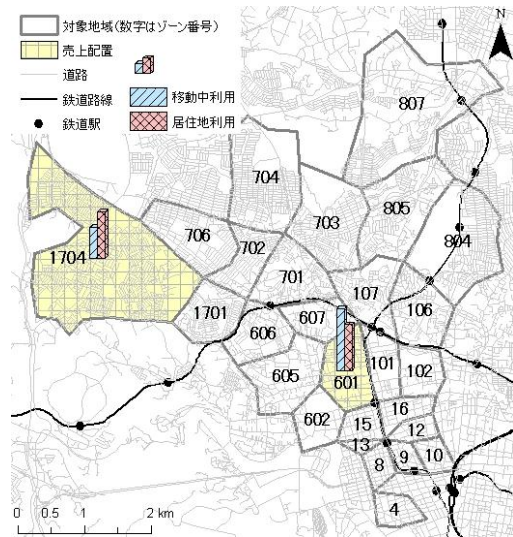


図-5 利用者数分布 (営業GS数2件)

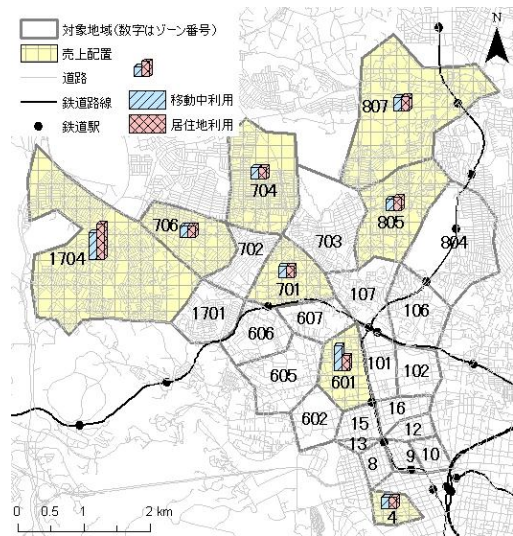


図-6 利用者数分布 (営業GS数8件)

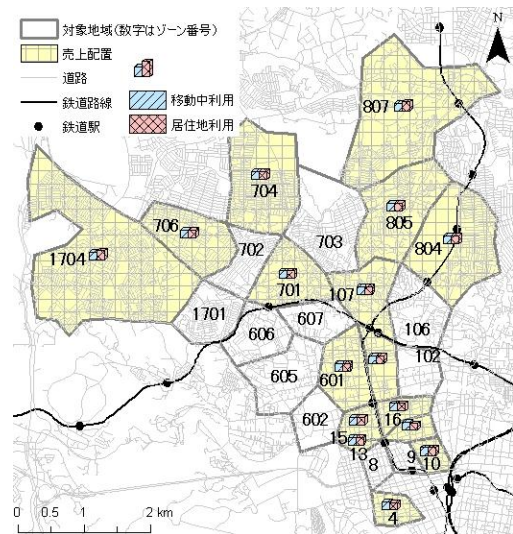


図-7 利用者数分布 (営業GS数16件)

## 4. 分析結果と考察

### (1) 分析結果

営業GS数が2件、8件、16件の各場合の、売上配置における利用者分布を図-5~図-7に示す。

利用形態ごとの1人当り給油時間の値と、(移動中利用の値) / (居住地利用の値)を、移動中配置(図-8)、居住地配置(図-9)、売上配置(図-10)の各場合について示す。同様に1人当り移動時間についても、移動中配置(図-11)、居住地配置(図-12)、売上配置(図-13)の各場合について示し、1人当り待ち時間についても、移動中配置(図-14)、居住地配置(図-15)、売上配置(図-16)の各場合について示す。

### (2) 考察

#### a) 空間的要因ごとの、給油利便性低下の定量的把握

1人当り給油時間を示した図-8、図-9、図-10を見ると、営業GS配置が異なっても給油時間の値にほとんど差がないことがわかる。また、どの営業GS配置の場合でも移動中利用の値が居住地利用の値よりもわずかに小さくなっており、給油利便性を高めるためには、GSを移動中利用した方が居住地利用するよりも有効であることが示唆されている。

しかし、同じく図-8、図-9、図-10から見て取れることは、利用形態を居住地利用から移動中利用に切り替えることによる給油時間の減少量よりも、単純に営業GS数が増加することによる給油時間の減少量の方が大きいということである。

#### b) モデルに待ち時間を考慮したことの影響

1人当り移動時間を示した図-11、図-12、図-13を見ると、居住地利用の場合に、営業GS数が増加しても、直感とは異なり、1人当り移動時間が増加してしまう場合があることがわかる。この現象は、先行研究<sup>9)</sup>では示されていないものである。以下、この現象について考察する。

1人当り給油時間を示した図-8、図-9、図-10を見ると、営業GS数が増加するにつれて1人当り給油時間は順当に短くなっている。1人当り待ち時間を示した図-14、図-15、図-16を見ても同様に営業GS数が増加するにつれて待ち時間は減少している。

このことから、「移動時間が増加しても、それを打ち消せるほどに待ち時間が減少すれば、両者の和である給油時間は小さくなる」というメカニズムが成立していると想定できる。具体的には以下のようなことが生じている。

ある居住地*i*の利用者を考える。居住地*i*に最も近い営業GSが、ゾーン*k*にあるとする。*i*に住む利用者の移動時間が最小となるのは、ゾーン*k*のGSを利用したときである。ここで仮に、*k*のGSはすでに他の多くの利

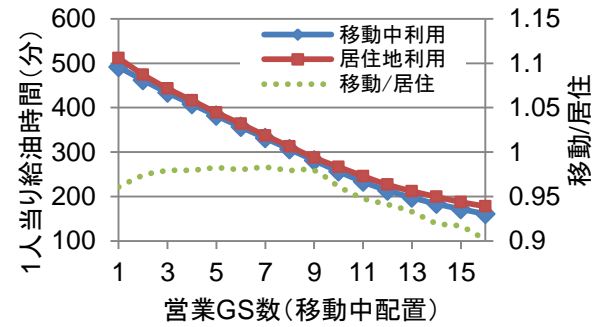


図-8 1人当り給油時間(移動中配置)

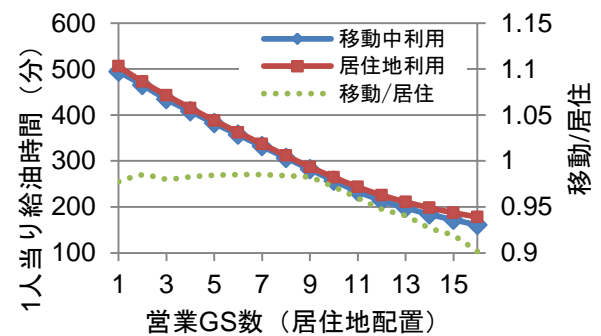


図-9 1人当り給油時間(居住地配置)

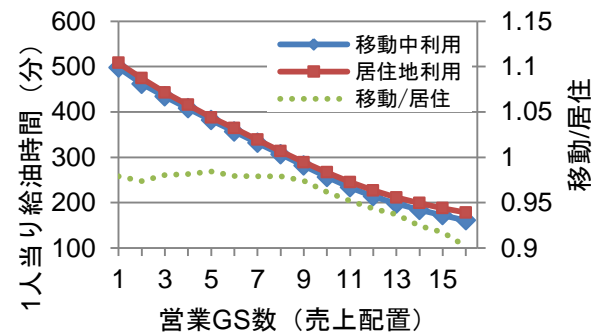


図-10 1人当り給油時間(売上配置)

用者に利用されており、*k*のGSで生じる待ち時間が他ゾーンのGSのそれよりも大きい状態であったとする。このとき*i*に住む利用者にとっては、直近だが混んでいる*k*のGSを利用せず、移動時間を余計にかけても、遠いが空いている他ゾーンのGSを利用して待ち時間を抑えた方が、給油時間は小さくなる場合が起こりうる。なお、この現象は居住地利用の時には観察されるが、移動中利用の時にはほとんど生じていない。これは、移動中利用では移動経路に近い場所にGSが見つかる可能性が高いため、新しく利用できるようになったGSまでの移動距離の増分が小さい可能性が高いためであると考えられる。

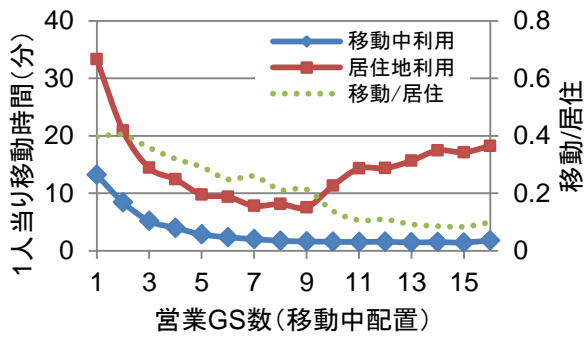


図-11 1人当り移動時間 (移動中配置)

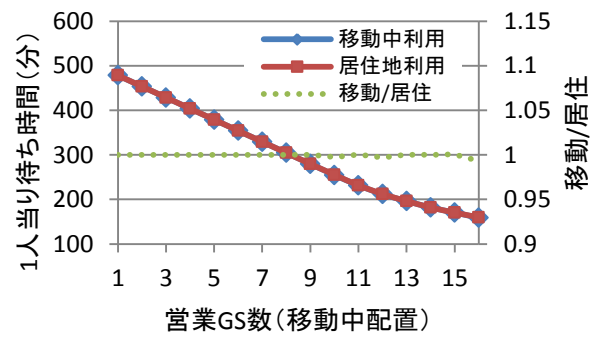


図-14 1人当り待ち時間 (移動中配置)

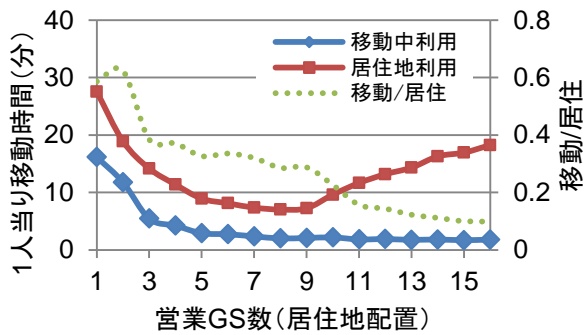


図-12 1人当り移動時間 (居住地配置)

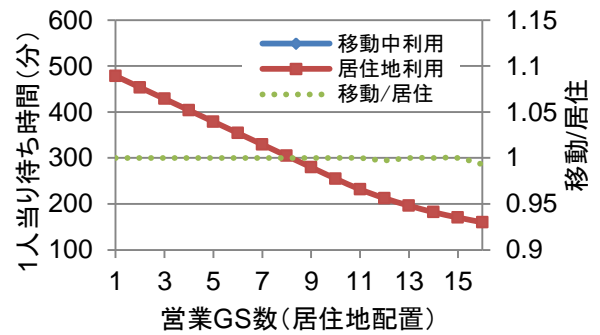


図-15 1人当り待ち時間 (居住地配置)

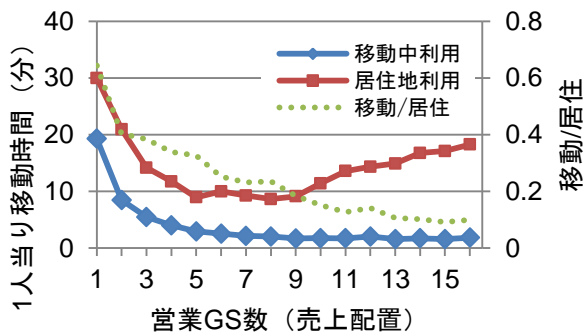


図-13 1人当り移動時間 (売上配置)

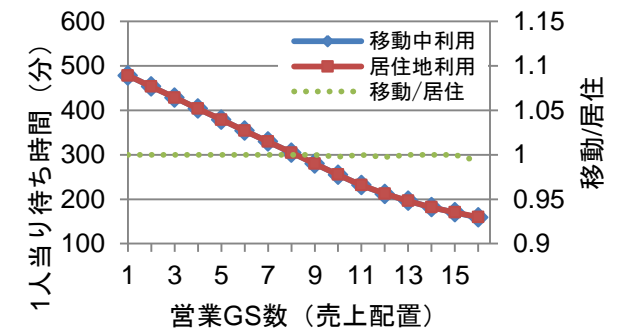


図-16 1人当り待ち時間 (売上配置)

## 5. おわりに

本研究では、震災時における給油利便性の低下現象を生じさせる要因のうち、空間的要因の影響を把握することを試みた。空間的要因として営業GS数、GS利用形態、営業GS配置に着目し、それらを基に利用者給油時間最小化モデルを定式化し分析を行なった。その結果を考察することで、以下2点の知見を得た。

i)空間的要因のうち、給油利便性への影響が大きいものは営業GS数であった。対して営業GS配置とGS利用形態の影響は比較的小さかった。ii)モデルに、移動時間と待ち時間の両方を考えて初めて説明できる利用者行

動として、「移動時間を犠牲にしても待ち時間を節約するような利用者行動」があることを示した

ただし、本研究の分析結果は、分析の都合上置いた仮定(3章4節参照)、パラメータ(給油人数、給油作業時間 $w$ 、待ち時間の近似直線)の下での結果であり、震災時の実態を反映しているわけではないという点に注意せねばならない。より実際的な仮定とパラメータの設定方法は今後の課題である。

## 参考文献

1) M. John Hodgson : The location of public facilities intermediate to the journey to work, *European Journal of Operational Research*, Vol.6(2), pp.199-204, 1981

2) 国土交通省国土政策局 : 国土数値情報ダウンロードサービス <http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html>

(2012. 5. 7受付)

Spatial factor analysis for decline of refueling convenience in great disaster

Yuya IWASAKA, Makoto OKUMURA, and Kazuaki OKUBO

When The Great East Japan Earthquake was happened, cars waiting for the fuel supply created long queue at front of the gas stations. This phenomenon decreased users' refueling convenience. The purpose of this study is to grasp the spacial factors that affected to the phenomenon by user optimization models.

We show i) quantitative evaluation of spatial factor's effects to users' refueling convenience and ii) the proposed model to a gas station selection problem explains consumer's choice of further station to avoid heavy congestion at the nearer stations.