

# On joint railway and housing development strategy

Xiaosu Ma and Hong K. Lo  
Procedia - Social and Behavioral Sciences 80(2013) 7–24

2020/6/16

B4 前田歩美

# 目次

1. 導入
2. 定式化
  - 2.1 住民の立地・旅行選択
  - 2.2 デベロッパーの投資判断
  - 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響
  - 2.4 感度分析
3. 数値研究
4. 結論

# 1. 導入

## 鉄道を対象とした Transit Oriented Development (公共交通指向型開発)

- ◎道路混雑を緩和できる
- ◎人口増加に伴うスプロール化を回避できる
- ◎道路・駐車場用地を減らせる(都市のコンパクト化)

→メガシティでは、持続可能な移動手段

×巨額の投資を伴う

→財政的にも持続可能、かつ手頃な運賃で提供するための政策が必要

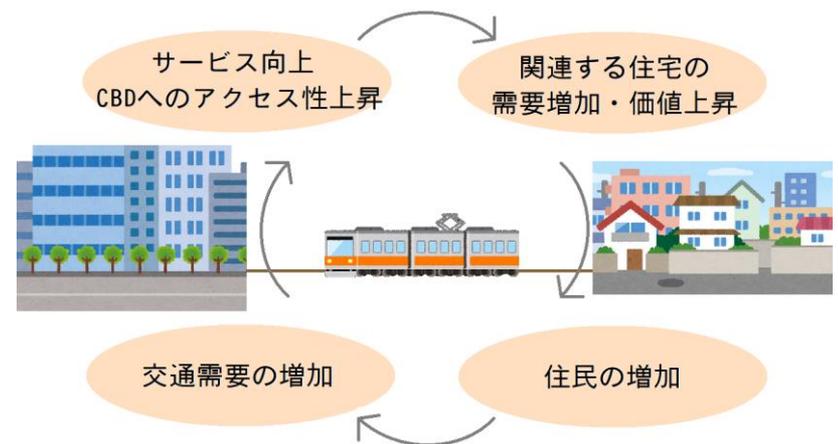
例外(香港)：鉄道会社が鉄道を建設・運用し、同時に駅の真上に住宅を建設した

→鉄道建設の費用を住宅からの収益で補助

### 鉄道・住宅間の相乗効果を利用した開発

鉄道・住宅共同開発の戦略について研究する  
香港の例では、住宅収益が会社の総利益の9割を占める

→戦略は関係する住宅の価値に依存



# 1. 導入

## 交通改善による住宅価値の変化

- ・この種の研究はヘドニック分析でなされてきた  
住宅価格とアメニティへの近接性・交通利便性を関連付ける等  
有用だが、地域全体への効果を考慮することなく、**場所に特化したものになりがち**
- ・TODは統合土地利用交通モデルでも研究された  
→より広範な分析的枠組みを統合し、交通改善の**ネットワークレベルの影響を直接組み込んだ研究**ができれば、目的を達成できそう

### **目標** 統合的なモデル化の枠組みを構築

→鉄道・住宅共同開発が、地域全体の住宅立地、移動選択、及びその結果の住宅価値変化に与える影響をみる

付け値地代理論に基づいた、立地・移動選択に関する同時均衡式

共同開発の相乗効果を研究するため、均衡式に鉄道・住宅の同時最適化を組み込む  
(=単一のデベロッパー)

具体的には、均衡制約付き数理計画 (Mathematical Program with Equilibrium Constraints) として定式化

**下位問題**：付け値地代プロセスを内包する同時均衡式を構築する

**上位問題**：住宅供給の組み合わせ(例：住宅の場所、種類)と鉄道サービスレベル(例：運行間隔、運賃)の決定により、共同開発の複合利益を最大化する

# 2. 定式化

## 2.1 住民の立地・旅行選択

- (1)旅行選択
- (2)立地選択
- (3)同時均衡式

## 2.2 デベロッパーの投資判断

## 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

Proportion1 → Corollary1

Proportion2 → Corollary2

## 2.4 感度分析

- (1)デベロッパーのコストと収益
- (2)消費者の選択と余剰
- (3)目的が異なる場合との比較

## 2. 定式化 2.1 住民の立地・旅行選択

(住宅・交通の供給固定で) 住民の選択を、付け値地代と NL の枠組みでモデル化  
住宅立地の選択(2) → 移動手段の選択(1) → 経路の選択

### (1) 旅行選択

#### ① 鉄道

各ODペア間の鉄道経路は1本のみとして良い

普通鉄道ネットワークは単一会社が運用する有限本の路線で構成される  
+ほとんどの定期利用者は1経路しか使わない

ODペア  $r-s$  間、所得グループ  $k$  の旅行者の鉄道旅行コスト：

$$c_{rail}^{rsk} = (ct_i^{rs} + ct_w^{rs}) * vot^k + cp^{rs}$$

$ct_i^{rs}$  :  $r-s$  間車内旅行時間 (変えられない)

$ct_w^{rs}$  :  $r-s$  間待ち時間 (運行間隔  $hw^{rs}$  に比例  $ct_w^{rs} = \kappa_{cti} * hw^{rs}$ )

$vot^k$  : 所得グループ  $k$  の時間価値

$cp^{rs}$  :  $r-s$  間運賃

∴ 鉄道のサービスレベルは  $hw^{rs}$  と  $cp^{rs}$  で決まる

## 2. 定式化 2.1 住民の立地・旅行選択

### (1) 旅行選択

### ② 自動車

経路  $p$  を使う自動車の旅行コスト：

$$c_{p|auto}^{rsk} = \sum_a \delta_{a,p}^{rs} (vot^k * t_a + \rho_a)$$

$t_a$ ：リンク  $a$  の旅行時間 (BPR リンクパフォーマンス関数)

$\rho_a$ ：リンク  $a$  の通行料金

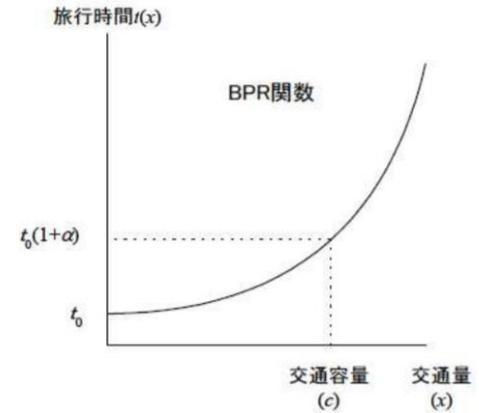
$\delta_{a,p}^{rs}$ ：経路-リンク発生インジケータ (0 or 1)

経路  $p$  の選択確率：

$$Pr_{p|auto}^{rsk} = \frac{\exp(-\beta_{route}^k * c_{p|auto}^{rsk})}{\sum_{p' \in Prs} \exp(-\beta_{route}^k * c_{p'|auto}^{rsk})}$$

自動車の期待旅行コスト：

$$c_{auto}^{rsk} = -\frac{1}{\beta_{route}^k} \ln \left\{ \sum_{p' \in Prs} \exp(-\beta_{route}^k * c_{p'|auto}^{rsk}) \right\}$$



## 2. 定式化 2.1 住民の立地・旅行選択

### (1) 旅行選択

移動手段の選択確率(rail, auto) :

$$\Pr_m^{rsk} = \frac{\exp(-\beta_m^k * c_m^{rsk})}{\sum_{m' \in \{rail, auto\}} \exp(-\beta_{m'}^k * c_{m'}^{rsk})}$$

$c_m^{rsk}$  : 移動手段mの期待旅行コストの確定項

$\beta_m^k$  : 移動手段mのスケールパラメータ (ランダム項に反比例)

$r$ - $s$ 間の期待旅行コスト(負効用、不便度) :

$$\mu^{rsk} = -\frac{1}{\beta_m^k} \ln \left\{ \sum_{m' \in \{rail, auto\}} \exp(-\beta_{m'}^k * c_{m'}^{rsk}) \right\}$$

∴住宅タイプ $v$ 、所得 $G^k$ の旅行者の $r$ - $s$ 間交通量は、

$$\text{鉄道} : q_{rail}^{rvsk} = q^{rvsk} * \Pr_{rail}^{rsk}$$

$$\text{自動車(経路}p\text{)} : f_{p|auto}^{rvsk} = q^{rvsk} * \Pr_{auto}^{rsk} * \Pr_{p|auto}^{rsk}$$

$q^{rvsk}$  : 住宅タイプ $v$ 、所得 $G^k$ の $r$ - $s$ 間総交通量(次節)

## 2. 定式化 2.1 住民の立地・旅行選択

### (2) 立地選択

付け値地代と多項ロジットの枠組みで立地選択問題を定式化

住民は、予算制約下で効用を最大化するよう入札

所得 $G^k$ , 職場 $s$ の入札者の、住居タイプ $v$ , 住宅地 $r$ の住居に対する**支払意思額 (Willingness-to-Pay)** :

$$WP^{sk/rv} = b^{sk} - \mu^{rsk} + \alpha^k * ls^v + wp$$

$b^{sk}$  : 効用指数 (均衡時に入札者の希望する効用レベル)

$ls^v$  : 住居タイプ $v$ のヘドニック属性 (今回は敷地面積)

$\alpha^k$  : 経路敷地面積の嗜好パラメータ

$wp$  : 校正パラメータ

住宅の総供給量 = 総需要量 ( $\sum_{r' \in R} \sum_{v' \in V} \Psi^{r'v'} = \sum_{s' \in S} \sum_{k' \in K} D^{s'k'}$ ) のとき、

$b^{sk}$  を調整すれば、全ての人が入居できる状態での需給均衡を達成できる

$\Psi^{r'v'}$  : 住居タイプ $v'$ , 住宅地 $r'$ の住宅供給量 (デベロッパーが決定)

$D^{s'k'}$  : 所得 $G^{k'}$ , 職場 $s'$ の住民の総数 (所与)

## 2. 定式化 2.1住民の立地・旅行選択

### (2)立地選択

住居タイプ $v$ ,住宅地 $r$ の住居を、所得 $G_k$ ,職場 $s$ の住民が使用する確率：

$$P_{r^{sk/rv}} = \frac{\exp(\beta * WP^{sk/rv})}{\sum_{s'k' \in SK} \exp(\beta * WP^{s'k'/rv})}$$

∴住宅タイプ $v$ 、所得 $G_k$ の $r$ - $s$ 間総交通量：

$$q^{rvsk} = \Psi^{rv} * P_{r^{sk/rv}}$$

(供給量の影響を考慮した)期待最大支払意思額 = 最終的な家賃：

$$\varphi^{rv} = \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \sum_{s'k' \in SK} \exp(\beta * WP^{s'k'/rv}) \right\} - \frac{1}{\beta} \ln(\Psi^{rv})$$

所得 $G_k$ ,職場 $s$ の住民が、住居タイプ $v$ ,住宅地 $r$ の住居に入ったときの消費者余剰：

$$CS^{rvsk} = WP^{sk/rv} - \varphi^{rv}$$

CS(=消費者の効用)は、住居選択の際のインセンティブ

←効用最大化原則

## 2. 定式化 2.1 住民の立地・旅行選択

### (3) 同時均衡式

未知量：

経路 $p$ の交通量 $f_{p|auto}^{rvsk}$ ， 鉄道の交通量 $q_{rail}^{rvsk}$ ， 効用指数 $b^{sk}$

均衡条件：

$$f_{p|auto}^{rvsk} = \Psi^{rv} * P_r^{sk/rv} * Pr_{auto}^{rsk} * Pr_{p|auto}^{rsk}$$

$$q_{rail}^{rvsk} = \Psi^{rv} * P_r^{sk/rv} * Pr_{rail}^{rsk}$$

$$\sum_{rv \in RV} \Psi^{rv} * P_r^{sk/rv} = D^{sk}$$

## 2. 定式化 2.1住民の立地・旅行選択

### (3)同時均衡式 [解き方]

住宅の総供給量 = 総需要量 のとき、上の均衡問題を等価な非線形相補性問題に落とし込める

$$f_{p|auto}^{rvsk} (f_{p|auto}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr^{sk/rv} * Pr_{auto}^{rsk} * Pr_{p|auto}^{rsk}) = 0, \quad \forall r, v, s, p, k$$

$$f_{p|auto}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr_{rv}^{sk} * Pr_{auto}^{rsk} * Pr_{p|auto}^{rsk} \geq 0, \quad \forall r, v, s, p, k$$

$$f_{p|auto}^{rvsk} \geq 0, \quad \forall r, v, s, p, k$$

$$q_{rail}^{rvsk} (q_{rail}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr_{rv}^{sk} * Pr_{rail}^{rsk}) = 0, \quad \forall r, v, s, k$$

$$q_{rail}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr_{rv}^{sk} * Pr_{rail}^{rsk} \geq 0, \quad \forall r, v, s, k$$

$$q_{rail}^{rvsk} \geq 0, \quad \forall r, v, s, k$$

$$b^{sk} \left( \sum_{rv \in RV} \Psi^{rv} * Pr^{sk/rv} - D^{sk} \right) = 0, \quad \forall s, k$$

$$\sum_{rv \in RV} \Psi^{rv} * Pr^{sk/rv} - D^{sk} \geq 0, \quad \forall s, k$$

$$b^{sk} \geq 0, \quad \forall s, k$$

上の問題はさらに、非拘束最適化問題に書き換えられる

$$\begin{aligned} \min G(\mathbf{Z}) = & \sum_{rvskp} \vartheta(f_{p|auto}^{rvsk}, f_{p|auto}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr^{sk/rv} * Pr_{auto}^{rsk} * Pr_{p|auto}^{rsk}) \\ & + \sum_{rvsk} \vartheta(q_{rail}^{rvsk}, q_{rail}^{rvsk} - \Psi^{rv} * Pr_{rv}^{sk} * Pr_{rail}^{rsk}) + \sum_{sk} \vartheta(b^{sk}, \sum_{rv \in RV} \Psi^{rv} * Pr^{sk/rv} - D^{sk}) \\ & \vartheta(c, d) = \frac{1}{2} \phi^2(c, d), \quad \phi(c, d) = \sqrt{c^2 + d^2} - (c + d) \end{aligned}$$

$G(\mathbf{Z}) = 0$ で均衡状態が達成

## 2. 定式化 2.2 デベロッパーの投資判断

デベロッパーの利益を最大化するように、  
住宅供給数・鉄道サービスレベルを決定

鉄道の運用コスト： $B_{\bar{T}} = B_{\bar{T}C} + st * b_{\bar{T}O}$

$B_{\bar{T}C}$ ：建設費用

$st$ ：運行本数

$b_{\bar{T}O}$ ：電車1台あたりの運用コスト

鉄道の運用収益： $R_{\bar{T}} = \sum_{rs} q_{rail}^{rs} * cp^{rs}$

$q_{rail}^{rs}$ ：r-s間の鉄道交通量

$cp^{rs}$ ：r-s間の運賃

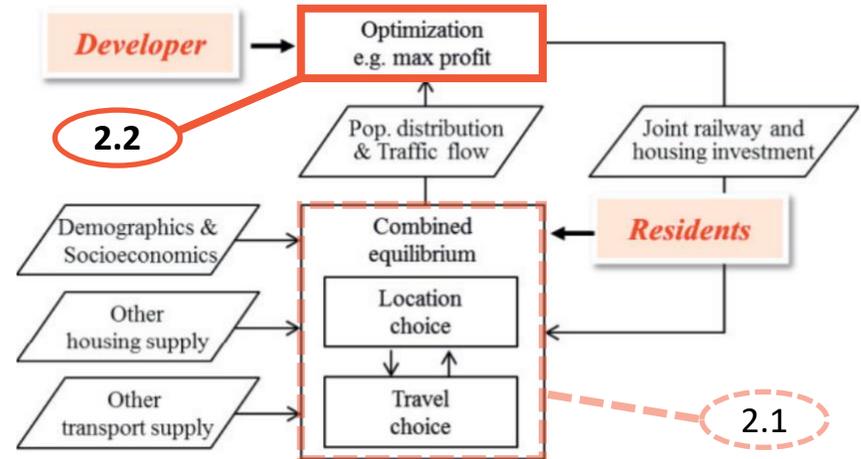
住宅の運用コスト： $B_H = \sum_v \sum_r b_H^v * \Psi^{rv}$

$b_H^v$ ：住居タイプ $v$ の住居の運用コスト(敷地面積に比例)

$\Psi^{rv}$ ：住居タイプ $v$ ,住宅地 $r$ の住居供給数( $\Psi^{rv} = \Psi * Pr^{rv}$ , 総供給数 $\Psi$ 固定)

住宅の運用収益： $R_H = \sum_v \sum_r \varphi^{rv} * \Psi^{rv}$

$\varphi^{rv}$ ：住居タイプ $v$ ,住宅地 $r$ の住居の均衡時家賃



## 2. 定式化 2.2 デベロッパーの投資判断

デベロッパーの利益最大化戦略は、均衡制約付き最大化問題

$$\max_{Pr^{rv}, hw^{rs}, cp^{rs}} \Pi = R_H + R_{\bar{T}} - B_H - B_{\bar{T}}$$

$G(\mathbf{Z}) = 0$  (立地・移動選択の均衡)

$$\sum_v \sum_r Pr^{rv} = 1, \quad Pr^{rv} \geq 0, \forall r, v$$

$B_H + B_{\bar{T}} \leq B$  (予算制約)

$\underline{hw} \leq hw^{rs} \leq \overline{hw}, \quad \underline{cp} \leq cp^{rs} \leq \overline{cp}, \quad \forall r, s$  (運行間隔/運賃の技術的限界と計画的規制)

として解ける。

※上の数理問題は非線形・非凸だが、市販のソフトで解ける

※大域的な解の最適性は保証されていないが、いくつかの簡略化条件下では、ある程度の結果が解析的に導出されることがある (→次節)

## 2. 定式化 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

2.1：住宅・交通を所与としたときの住民の立地・旅行選択をモデル化

2.2：デベロッパーの利益最大化戦略をモデル化

投資戦略が違くと、利害関係者(住民/デベロッパー)間の利益再配分の結果も異なる

2.3：モデルの興味深い特性を示す

10Dペアの場合の分析から

←一般に、複数移動手段のある10Dペアでの解析結果は、複数ODペアのネットワークモデルで行った数値研究と同様の結果となる (→3章)

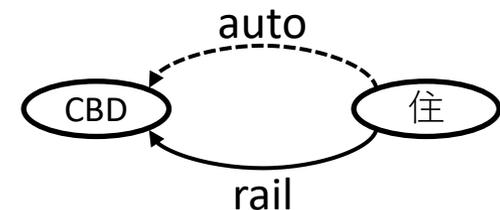
**条件** (以下 $r,s$ 省略)

$H_0$ ：ネットワークは1住宅地と1CBDのみ。住民は異なる所得グループ( $k=1,\dots,K$ )に属する。各所得 $G$ の住宅需要数 $H^k$ 。

$H_1$ ：住宅タイプ $v$ は敷地面積 $ls^v$ で分類し、 $ls^1 < \dots < ls^V$ 。住宅供給数 $\Psi^v = \Psi * Pr^v$ 。住宅の総需要数 $H = \sum_k H^k = \Psi$ 。

$H_2$ ：移動手段は自動車・鉄道の2種類、経路は1つずつ。自動車のリンクパフォーマンス関数はBPR関数。

$H_3$ ：住民は異なる時間価値 $vot^1 < \dots < vot^K$ を持つ。



## 2. 定式化 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

Proportion1: 条件 $H_0 \sim H_3$ 下で、鉄道運用の変更(運行間隔、運賃)は、住民の**住居タイプの選択を変化させない**。

Proof:

Proportion1  $\Leftrightarrow$  「各住居タイプ $v$ の選択確率の変化量=0」

運行間隔の変化 $\partial hw$ , 運賃の変化 $\partial cp$ に対応する支払意思額の変化量を $\Delta W P^{k/v}$  ( $= \Delta b^k - \Delta \mu^k$ ) ( $\because W P^{sk/rv} = b^{sk} - \mu^{rsk} + \alpha^k * ls^v + wp$ )とおくと、

$$\Delta P r^{k/v} = \frac{\exp(\beta * (W P^{k/v} + \Delta W P^{k/v}))}{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * W P^{k'/v} + \Delta W P^{k/v})} - \frac{\exp(\beta * W P^{k/v})}{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * W P^{k'/v})} = 0 \dots (*)$$

$$\Leftrightarrow \Delta W P^{k/v} = \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \frac{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * W P^{k'/v} + \Delta W P^{k/v})}{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * W P^{k'/v})} \right\}$$

$\therefore \Delta W P^{1/v} = \dots = \Delta W P^{K/v}$  (右辺が $k$ に関係なく等しい)  $\dots (*)$

ロジットモデルでは、グループ間の相対的な効用のみが重要なので、所得G1の効用指数 $b^1$ を固定すると $b^k, k = 2, \dots, K$ は一意に決まる。

今、変更前後の所得G1の効用指数を $b^{1(1)} = b^{1(0)} = 0$ とすると、

$$\Delta W P^{1/v} = \Delta b^1 - \Delta \mu^1 = b^{1(1)} - b^{1(0)} - \Delta \mu^1 = -\Delta \mu^1$$

$$\Delta W P^{k/v} = b^{k(1)} - b^{k(0)} - \Delta \mu^k$$

(\*)より、変更後の効用指数を $b^{k(1)} = b^{k(0)} + \Delta \mu^k - \Delta \mu^1$ とおけばそれらは(\*)を満たし、その結果均衡条件も満たされる。各所得Gの住宅需要数も不変。 $\Delta q^{vk} = \Psi^v * \Delta P r^{k/v} = 0$ . ■

## 2. 定式化 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

Corollary1: 条件 $H_0 \sim H_3$ 下で、鉄道運用の変更(運行間隔、運賃)は、**個人の消費者余剰も総消費者余剰も変化させない。**

Proof:

家賃の変化量は、 $\varphi^v = \frac{1}{\beta} \ln\{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * WP^{k/v})\} - \frac{1}{\beta} \ln(\Psi^v)$  より

$$\Delta\varphi^v = \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \frac{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * (WP^{k/v} + \Delta WP^{k/v}))}{\sum_{k' \in K} \exp(\beta * WP^{k/v})} \right\} = \Delta WP^{k/v} = -\Delta\mu^1$$

つまり家賃は支払意思額と同じ分だけ変化し、個人の消費者余剰は

$$\Delta CS^{vk} = \Delta WP^{k/v} - \Delta\varphi^v = 0$$

※もし移動手段が鉄道のみ、かつ全住民の時間価値が等しい場合、  
交通改善による旅行コストの減少分 = 家賃の増分

上式 = 「消費者は交通改善による利益を得られない」  $\Rightarrow$  総消費者余剰も変化なし。 ■

※各所得 $G$ の住民に対する交通改善の影響が同じという訳ではない。

高所得なほど時間価値が高いため、交通改善による通勤時間短縮で得られる利益 $-\Delta\mu^k$ が大きい

一方、家賃の増分は全住民で等しく $-\Delta\mu^1$ (所得 $G1$ が交通改善で得る利益)

$-\Delta\mu^1 < -\Delta\mu^k$ より、**高所得 $G$ の方が得する**

## 2. 定式化 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

Proportion2: 条件 $H_0 \sim H_3$ 下で、運行間隔・運賃に関して、旅行の不便度は単調増加し、家賃は単調減少する。

Proof:

運行間隔 $hw$ について示す。

$$\textcircled{1}\textcircled{2} \text{より } \frac{\partial c_{rail}^k}{\partial hw} = vot^k * \kappa_{cti} > 0$$

$$\textcircled{3} \text{より } \frac{\partial c_{auto}^k}{\partial hw} = vot^k * \frac{\partial t_a}{\partial q_{auto}} * \frac{\partial q_{auto}}{\partial hw}$$

$q_{auto} = \Psi - q_{rail} = \Psi - \sum_v \sum_k q^{vk} Pr_{rail}^k$  を代入して、

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{auto}^k}{\partial hw} &= -vot^k * \frac{\partial t_a}{\partial q_{auto}} * \sum_v \sum_k \left( \frac{\partial q^{vk}}{\partial hw} Pr_{rail}^k + \frac{\partial Pr_{rail}^k}{\partial hw} q^{vk} \right) > 0 \\ &\quad \begin{array}{c} \text{正} \\ \text{負} \end{array} \\ \therefore \frac{\partial \mu^k}{\partial hw} &= \frac{\partial \mu^k}{\partial c_{rail}^k} \frac{\partial c_{rail}^k}{\partial hw} + \frac{\partial \mu^k}{\partial c_{auto}^k} \frac{\partial c_{auto}^k}{\partial hw} = Pr_{rail}^k \frac{\partial c_{rail}^k}{\partial hw} + Pr_{auto}^k \frac{\partial c_{auto}^k}{\partial hw} > 0 \end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned} \frac{\partial WP^{k/v}}{\partial hw} &= -\frac{\partial \mu^1}{\partial hw} < 0 \\ \therefore \frac{\partial \varphi^k}{\partial hw} &= \sum_k \left( Pr^{k/v} \frac{\partial WP^{k/v}}{\partial hw} \right) < 0 \end{aligned}$$

運賃 $cp$ についても同様。 ■

$$c_{rail}^{rsk} = (ct_{i}^{rs} + ct_{w}^{rs})vot^k + cp^{rs} \textcircled{1} \quad ct_{w}^{rs} = \kappa_{cti} * hw^{rs} \textcircled{2} \quad c_{p|auto}^{rsk} = \sum_a \delta_{a,p}^{rs} (vot^k * t_a + \rho_a) \textcircled{3}$$

## 2. 定式化 2.3 鉄道・住宅共同開発による影響

Corollary2: 条件 $H_0 \sim H_3$ 下で、鉄道・住宅共同開発の生産者余剰を最大にする運行間隔が存在する。さらに、生産者余剰は運賃に関して単調減少する。

Proof:

$$\begin{aligned} \text{生産者余剰は } \Pi &= R_H + R_{\bar{T}} - B_H - B_{\bar{T}} \\ \frac{\partial R_H}{\partial hw} &= \frac{\partial(\sum_v \varphi^v * \Psi^v)}{\partial hw} = \sum_v \frac{\partial \varphi^v}{\partial hw} \Psi^v = \sum_v \frac{\partial WP^{k/v}}{\partial hw} \Psi^v \\ &= \Psi \frac{\partial WP^{k/v}}{\partial hw} < 0, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial R_{\bar{T}}}{\partial hw} = \left( \sum_v \Psi^v \sum_k Pr^{k/v} \frac{\partial Pr_{rail}^k}{\partial hw} \right) cp < 0$$

$$\frac{\partial B_H}{\partial hw} = 0$$

$$\frac{\partial B_{\bar{T}}}{\partial hw} = b_{\bar{T}O} * \frac{\partial st}{\partial hw} < 0$$

つまり、 $hw$ に関して $R_H, R_{\bar{T}}$ は単調減少、 $B_{\bar{T}}$ は単調増加し、 $B_H$ は変化しない。

∴  $\Pi$ を最大にする $hw$ が存在する。

一方、

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_H}{\partial cp} &= \sum_v \Psi^v \sum_k \frac{\partial \varphi^v}{\partial WP^{k/v}} \frac{\partial WP^{k/v}}{\partial \mu^k} \frac{\partial \mu^k}{\partial cp} \\ &= \sum_v \Psi^v \sum_k Pr^{k/v} * Pr_{rail}^k = -q_{rail} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial R_{\bar{T}}}{\partial cp} = q_{rail} + cp \frac{\partial q_{rail}}{\partial cp}$$

$$= q_{rail} + cp \sum_v \Psi^v \sum_k Pr^{k/v} \frac{\partial Pr_{rail}^k}{\partial cp}$$

$$\frac{\partial B_H}{\partial cp} = 0$$

$$\frac{\partial B_{\bar{T}}}{\partial cp} = 0$$

$$\therefore \frac{\partial \Pi}{\partial cp} = cp \sum_v \Psi^v \sum_k Pr^{k/v} \frac{\partial Pr_{rail}^k}{\partial cp} < 0$$

$$(\because \frac{\partial Pr_{rail}^k}{\partial cp} < 0) \quad \blacksquare$$

デベロッパーは、生産者余剰を大きくするために**運賃をほぼ0にする**。(家賃の上昇分が相殺)

もし移動手段が鉄道のみならば、デベロッパーの利益は変化しない。  $\frac{\partial \Pi}{\partial cp} = 0$

$$\begin{aligned} \text{鉄道の運用コスト } B_{\bar{T}} &= B_{\bar{T}C} + st * b_{\bar{T}O} \\ \text{鉄道の運用利益 } R_{\bar{T}} &= \sum_{rs} q_{rail}^{rs} * cp^{rs} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{住宅の運用コスト } B_H &= \sum_v \sum_r b_H^v * \Psi^{rv} \\ \text{住宅の運用利益 } R_H &= \sum_v \sum_r \varphi^{rv} * \Psi^{rv} \end{aligned}$$

## 2. 定式化 2.4 感度分析

2.3で示した特性を、感度分析で図解する

条件： $H_0 \sim H_3$ に加えて、

電車の待ち時間 $ct_w = \frac{1}{2}hw$

住居タイプは2種類 {Big, Small}

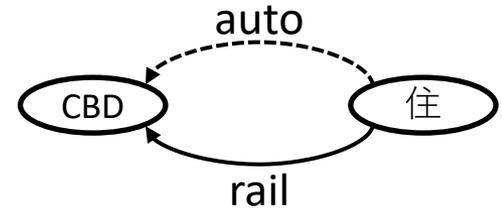
所得 $G$ は2つ {High, Low}

均衡時における、低所得 $G$ の効用指数を $b^L = 0$ で固定

2つのシナリオで分析を実施

シナリオ1: 運賃固定で、運行間隔と住居タイプの組み合わせを決定

シナリオ2: 運行間隔固定で、運賃と住居タイプの組み合わせを決定



(1)デベロッパーのコストと収益

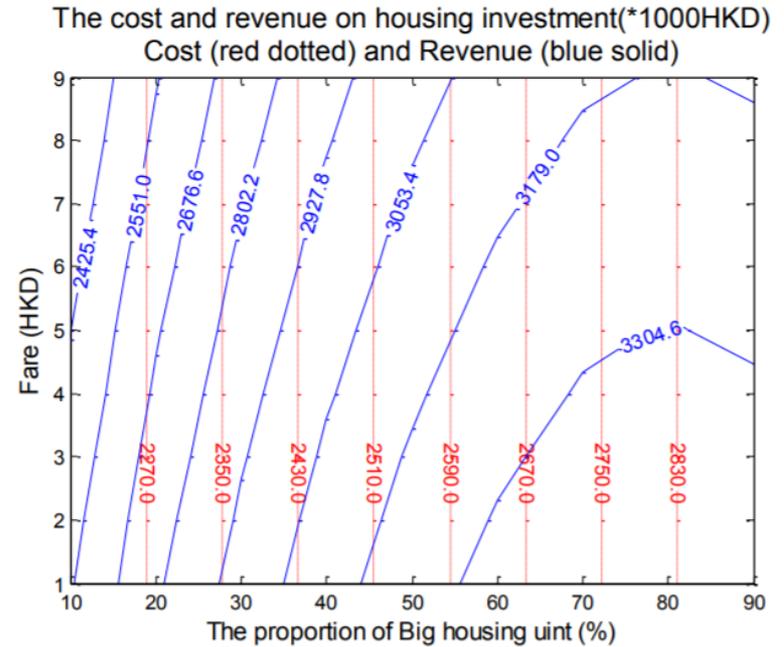
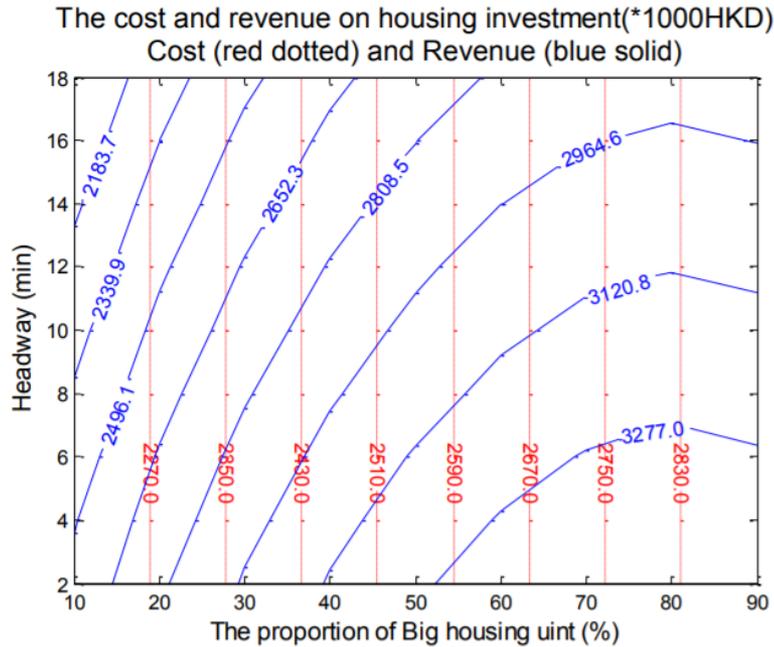
(2)消費者の選択と余剰

(3)目的が異なる場合との比較

# 2. 定式化 2.4 感度分析

## (1) デベロッパーのコストと収益

### ① 住宅 建設コスト(赤)と収益(青)

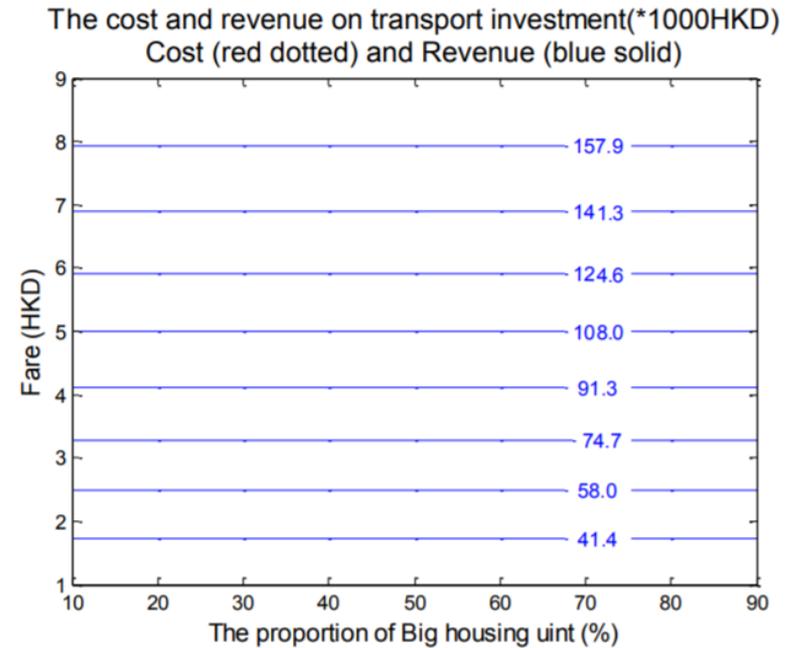
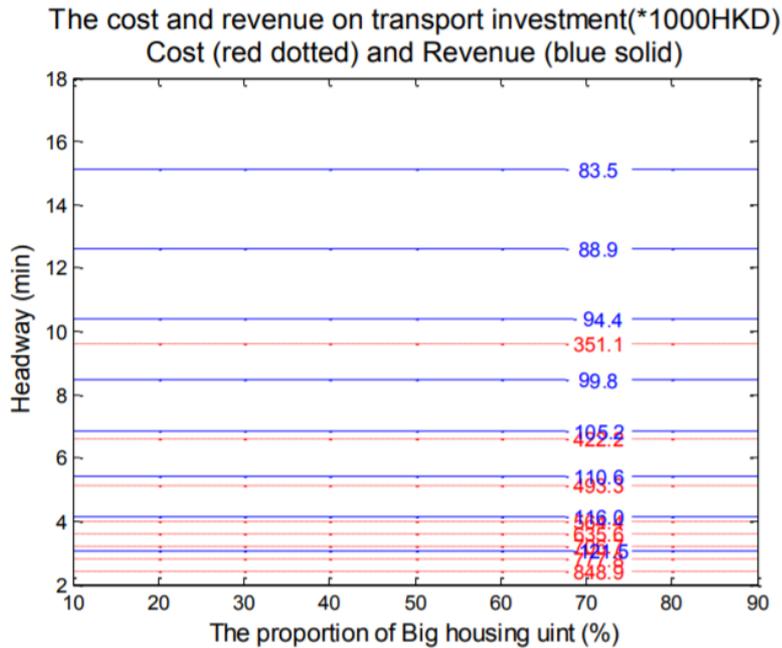


- ・コストはBig住居割合が高いほど大きい(自明)
- ・収益は運行間隔・運賃が低いほど大きい (Proposition 2:  $\frac{\partial \varphi^k}{\partial hw} < 0, \frac{\partial \varphi^k}{\partial cp} < 0$  と矛盾しない)
- ・収益はBig住居割合は約80%のとき最大になる

# 2. 定式化 2.4 感度分析

## (1) デベロッパーのコストと利益

## ② 鉄道運用 コスト(赤)と収益(青)

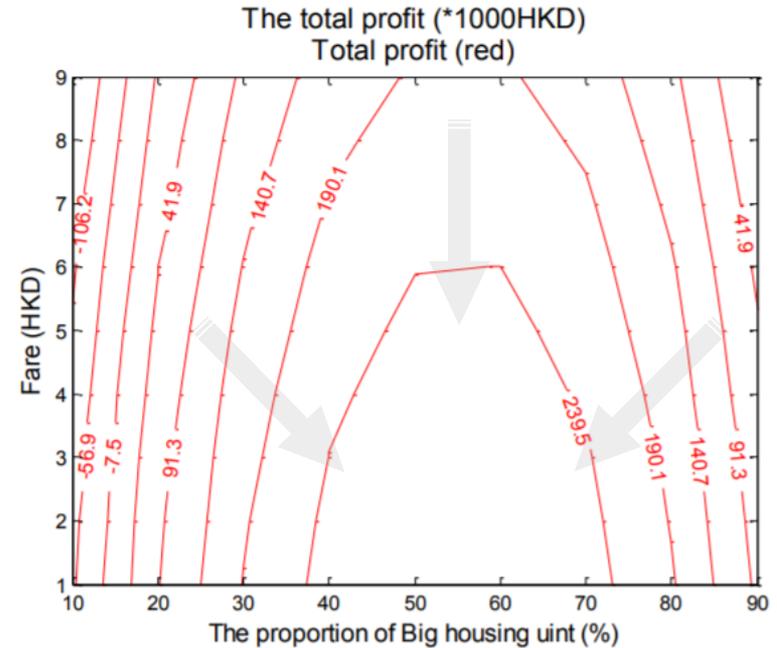
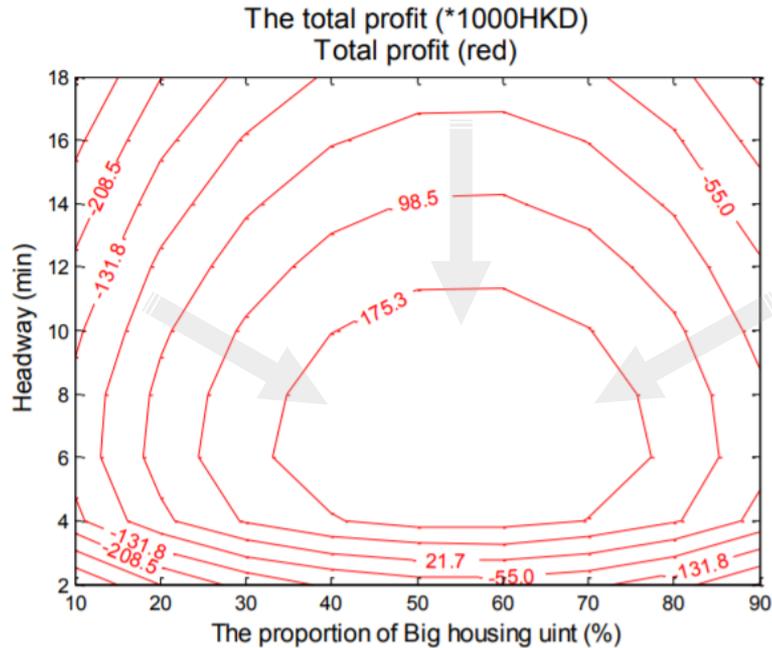


- 運行間隔が短いほどコスト大(自明)、収益也大(利用者が増える)
- 運賃は高いほど利用者は減るが収益は上がる
- 鉄道のコスト・収益はBig住居割合に寄らない (所得Gごとの旅行需要は一定のため)

# 2. 定式化 2.4 感度分析

(1) デベロッパーのコストと利益

② 生産者余剰



- ・シナリオ1で余剰が最大になるのは、運行間隔6分、Big住居割合55%のとき
- ・シナリオ2で余剰が最大になるのは、**運賃ほぼ0**で、Big住居割合55%のとき (Corollary2)

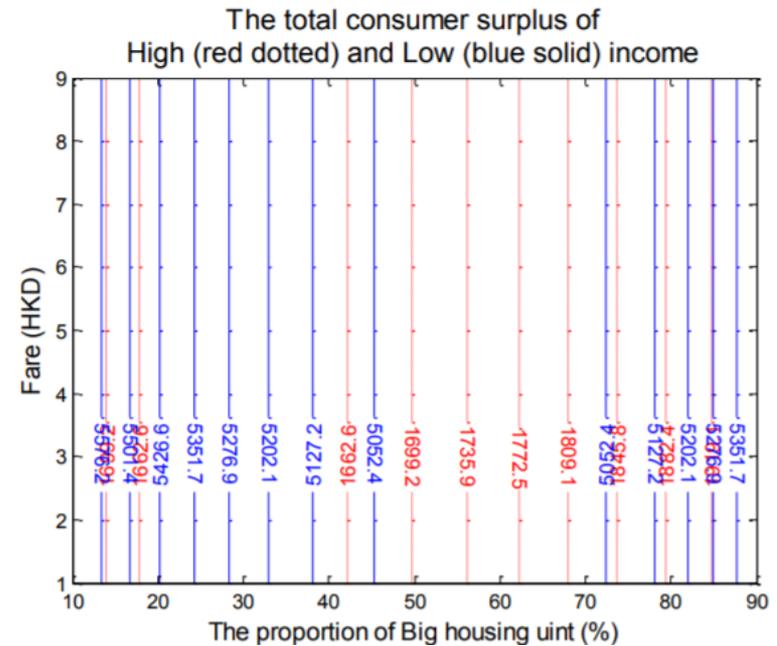
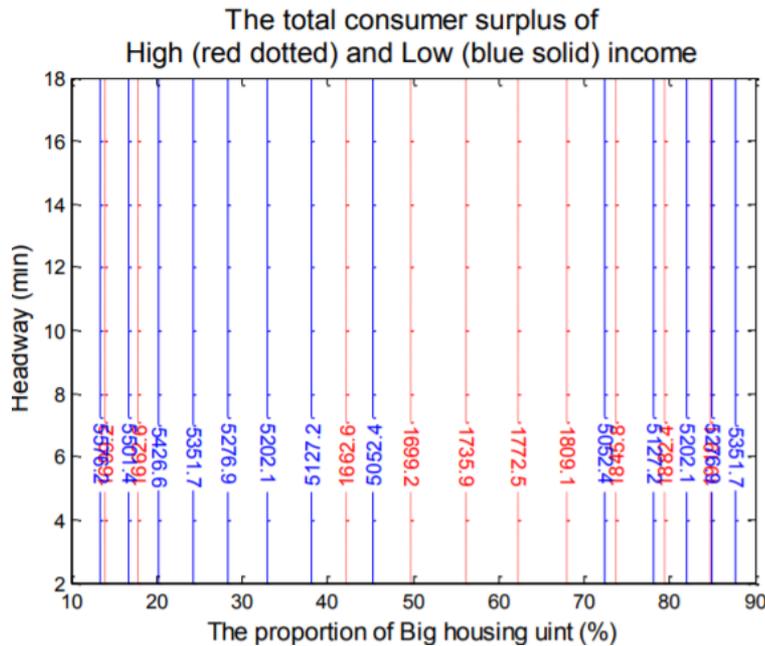
※この数値がいつでも得られるわけではない

# 2. 定式化 2.4 感度分析

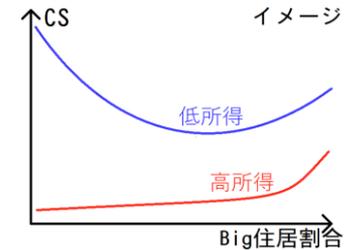
## (2)消費者の選択と余剰

住宅供給・鉄道サービスレベルの組み合わせが違ふとき、住民はそれに応じた立地・旅行選択をする→利益(CS)分配の結果も異なる

### ①消費者余剰CS 高所得G(赤)と低所得G(青)



- CSは交通改善によって変化しない (Corollary1, 家賃上昇分で相殺)
- Big住居割合の変化は住民の選択を変化させ、CSも変わる  
高：単調増加 低：60%あたりで最小

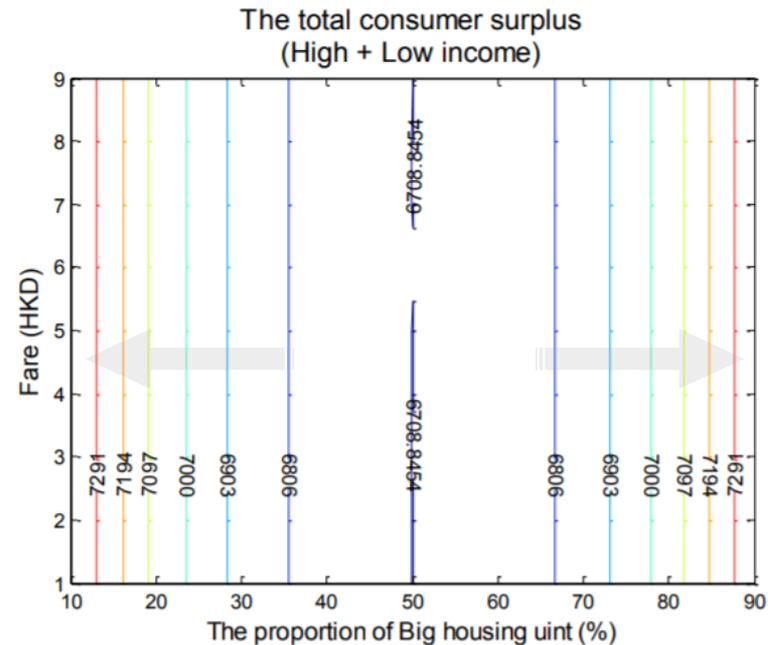
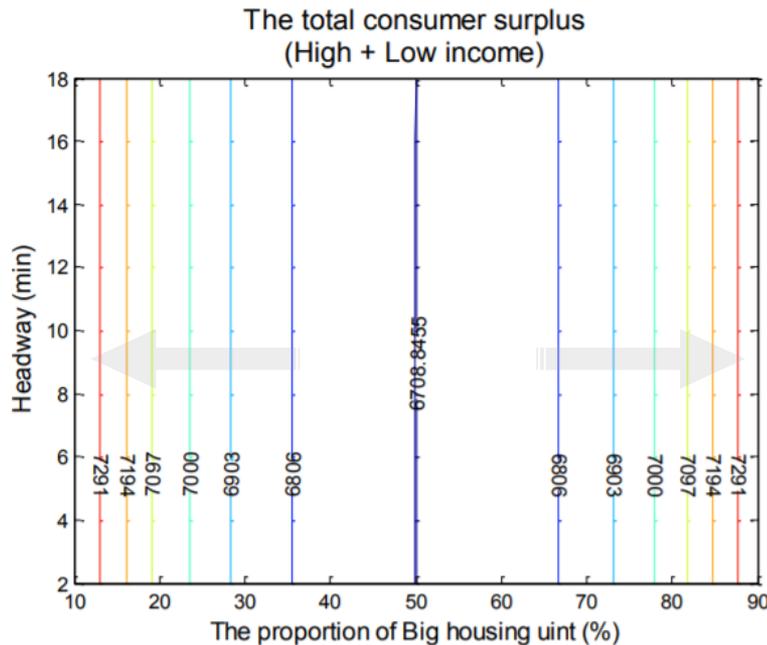


# 2. 定式化 2.4 感度分析

## (2)消費者の選択と余剰

住宅供給・鉄道サービスレベルの組み合わせが違ふとき、住民はそれに応じた立地・旅行選択をする→利益(CS)分配の結果も異なる

### ②総消費者余剰

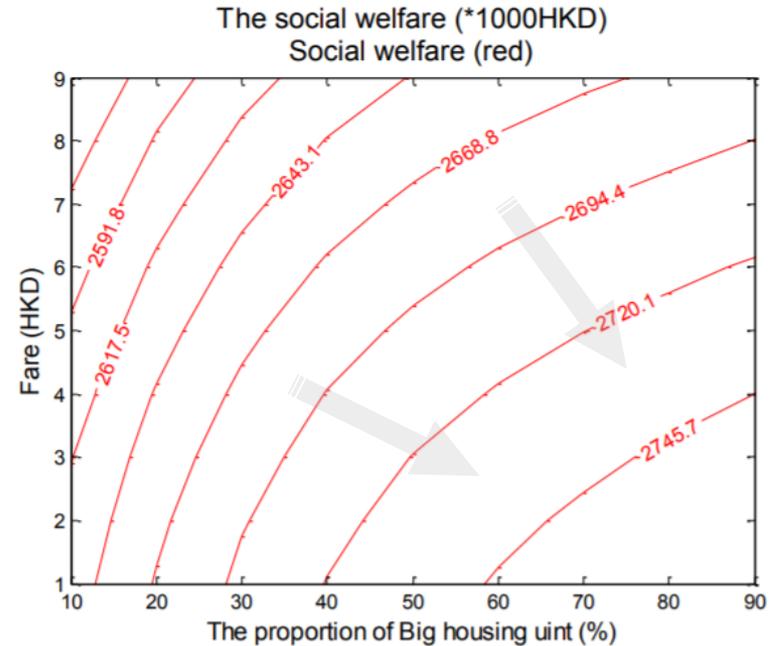
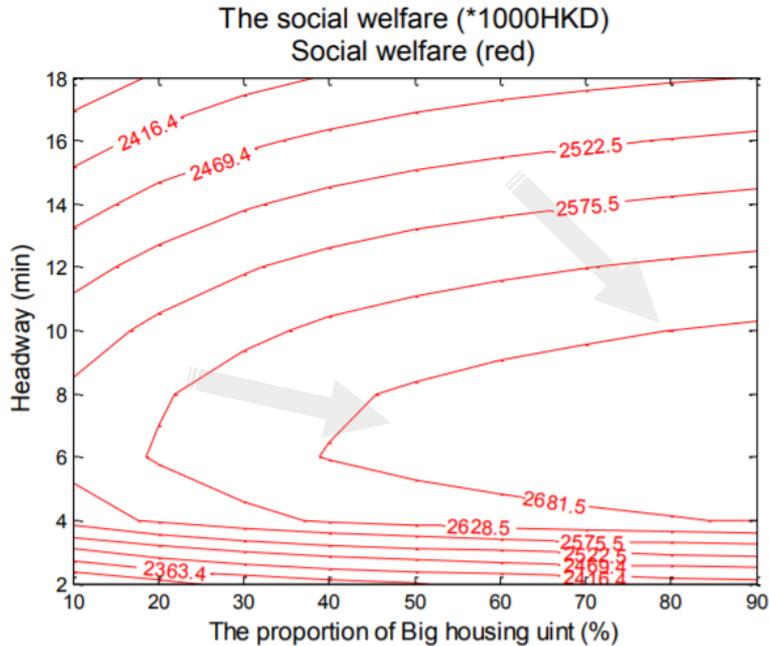


- ・ 総CSは、**全てBig住居 or 全てSmall住居のとき最大**になり、50%ずつのとき最小になる
- ・ この結果が今回のみ成り立つのか、様々な設定下でも成り立つのかを調べるために、さらなる研究が必要
- ・ 高所得GのCS、低所得GのCS、全体のCSの間にはトレードオフがある

# 2. 定式化 2.4 感度分析

## (3) 目的が異なる場合との比較

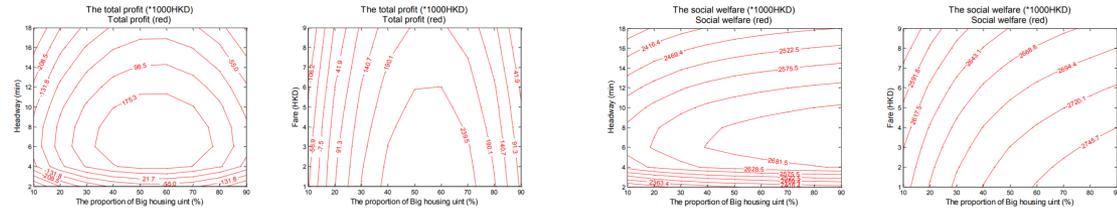
社会的余剰 = 消費者余剰 + 生産者余剰



- 社会的余剰が最大になるのは、
  - シナリオ1：運行間隔6分、Big住居割合100%
  - シナリオ2：運賃0、Big住居割合100%

# 2. 定式化 2.4 感度分析

## (3)目的が異なる場合との比較



# 3. 数値研究

## 設定

- ネットワークモデル

単心都市(1CBD, 4住宅地)

移動手段は2種類 {rail, auto}

Zone1,2: 既存の住宅地 供給固定

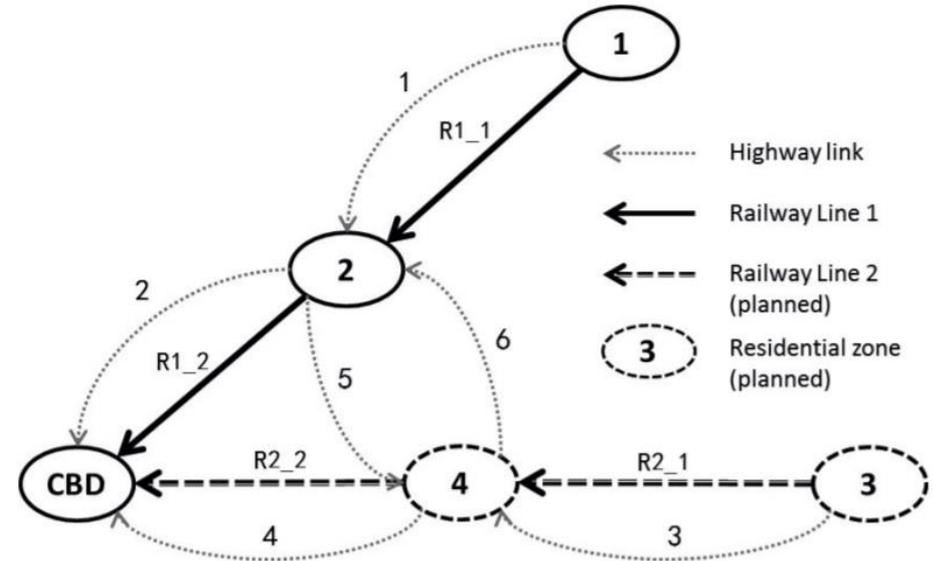
R1: 既存の鉄道路線 運行間隔固定

Zone3,4: 新たに計画する住宅地

R2: 新たに計画する路線

住居タイプは2種類 {Big, Small}

→デベロッパーは**R1の運賃、R2の運行間隔と運賃、Zone3,4の住宅供給**を、生産者余剰の最大化目的で決定



- 住民

1家庭に1労働者。旅行コストに基づいてZoneを選ぶ

各家庭が1住居に入居住居タイプは2種類 {Big, Small}

元からの住民と新規の住民は、開発後に新たな住宅立地を自由に選べる

所得Gは2つ {High, Low}

# 3. 数値研究

## 計算結果

### ①最適戦略

- ・ R2の運行間隔をR1より短くする
- ・ Zone3,4(新しい住宅地)のSmall住居の割合をZone1,2より大きくする

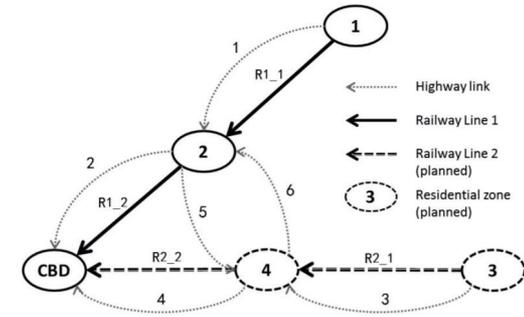


Table 1. The railway investment decisions

Indicators	Unit	R1	R2
Headway	min	5 (fixed)	1.7
Fare	HKD/km	1.8	1.8

Table 2. The housing investment decisions

Housing type	Old areas (in 1000 units)		New areas (in 1000 units)		Sub-total
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	
Big	15	15	2.8 (5.5%)	3.3 (6.5%)	6.1 (12%)
Small	10	10	20.3 (40.7%)	23.6 (47.3%)	43.9 (88%)
Total	25	25	23.1 (46.2%)	26.9 (54.8%)	50 (100%)

# 3. 数値研究

## 計算結果

### ②住民の旅行選択

- 旅行時間は鉄道の方が長いですが、**低所得G**は鉄道を好む(時間価値低)
- **Zone3,4**の住民は鉄道を好む ←R2の運行間隔短い
- **Zone2,4**(CBDに近い住宅地)の住民も鉄道を好む ←Highway link2,4の方が混んでいる

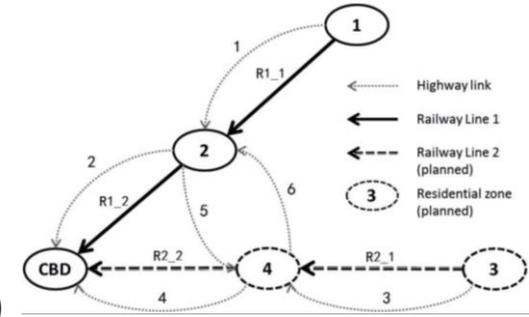


表4：volume to capacity ratios

Table 3. Residents' travel mode choices

Income Group	Mode	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
High	Auto	69%	42%	50%	22%
	Rail	31%	58%	50%	78%
Low	Auto	56%	32%	43%	20%
	Rail	44%	68%	57%	80%

Table 4. The highway link congestion levels (V/C ratio)

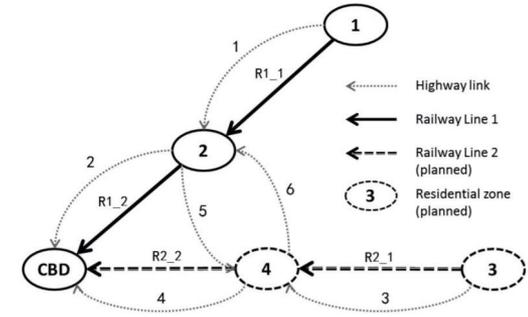
Highway	Link 1	Link 2	Link 3	Link 4	Link 5	Link 6
V/C ratio	0.77	1.04	0.53	1.02	0.55	0.35

# 3. 数値研究

## 計算結果

### ③住民の立地・住居選択

- **Zone 2,4**は高所得Gの住民の方が多い  
 ←時間価値の高い人はCBDの近くに住む
- **Zone 2,4**の家賃は、Big, Smallとも相対的に高い



→交通システムの変更は、住民の移動手段選択だけでなく立地選択・地価にも影響を及ぼす

Table 5. Residents' location and housing choices

Housing type	Income Group	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Big	High	7.0 (46%)	5.4 (54%)	1.3 (49%)	1.9 (58%)
	Low	8.0 (54%)	4.6 (46%)	1.4 (51%)	1.4 (42%)
Small	High	4.4 (44%)	7.7 (51%)	9.3 (46%)	13.0 (55%)
	Low	5.6 (56%)	7.3 (49%)	11.0 (54%)	10.6 (45%)

Table 6. The housing rents

Housing rent	Unit	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Big	HKD/day	109	120	123	131
Small	HKD/day	108	114	106	114

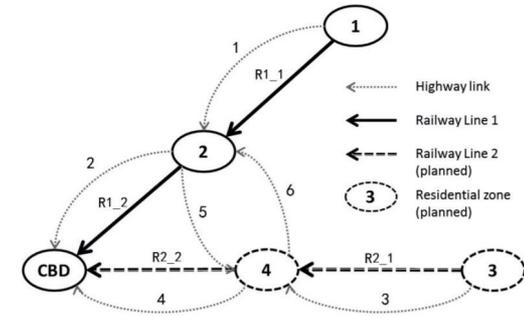
# 3. 数値研究

## ③全体の性能比較

シナリオA：鉄道・住宅共同開発の最適戦略

シナリオB：Zone3,4をZone1,2と、R2をR1と同じにした場合

シナリオC：Zone3,4をZone1,2と同じにし、鉄道のみで最適戦略



- ほとんどの項目でシナリオAの性能が良い

- 生産者余剰だけでなく、消費者余剰・社会的余剰も高い
  - 交通システム性能も自動的に良くなり、総旅行時間が短い

- ∴別々より共同で開発した方が良い

- ←鉄道・住宅の投資・収益のトレードオフを内在化して、柔軟に対応できるため

Table 7. Comparisons of the overall system performance

Outcome indicators	Scenario A (Joint rail and housing investment)	Scenario B (Same rail and housing investment)	Scenario C (Same housing but optimized rail investment)
Total travel time <sup>a</sup>	533	589	539
Total consumer surplus <sup>b</sup>	1,340	1,237	1,238
Housing investment cost <sup>c</sup>	1,736	1,880	1,880
Housing revenue <sup>c</sup>	2,049	2,092	2,104
Railway investment cost <sup>c</sup>	234	212	233
Railway fare revenue <sup>c</sup>	107	62	110
Developer's total profit <sup>c</sup>	185	62	102
Social welfare <sup>c</sup>	187	63	103

<sup>a</sup> The unit is thousand minutes/day; <sup>b</sup> The unit is million HKD/day; <sup>c</sup> The unit is million HKD/year.

# 4. 結論

鉄道・住宅共同開発が、組織的な性能とステークホルダー間の利益配分に与える影響を研究するための、モデル化の枠組みを構築した

- ・問題をMPECで定式化
  - ・複数移動手段、1経路のネットワークについての分析で、地価・鉄道サービスレベル間の単調増加関係を確認
  - ・共同開発の最適戦略の性能を調べるために数値研究を行い、以下を発見
    - ・社会的余剰や鉄道サービスが、別々に開発するより優れている
    - ・共同開発では家賃上昇と引き替えに、交通システムの性能が自動的に良くなる
    - ・社会的余剰の最大化を目指すなら、住宅供給の規制が重要
- ステークホルダー間利益のバランスを取るための規制を研究

香港の例は、民間セクターが鉄道事業に参加する重要性を示している

**Public-private partnership (PPP)**は、固有リスクを公共セクターから、より良いリスク管理ができる民間パートナーに移す方法と考えられる (依頼などで緩和可能)

今回行った定式化を使って、他形式のPPPの性能を比較する等、様々な拡張が可能

公共・民間の間の相互作用も含めて、他形式のPPPを研究することは、鉄道・住宅共同開発のさらなる洞察を生むだろう

## ヘドニック分析

商品の価格を、その商品の様々な属性の価値に関する集合体とみなし、回帰分析を利用してそれぞれの属性価格を推定する手法 (例： $P_i = \sum_m \alpha_m X_{im} + \beta$ )

## 付け値地代

土地の利用希望者のうち、最高の支払意思額を提示した者に土地を売り渡すとする。このときの金額を付け値地代という。一般に、CBDに近いほど地代は高くなる。

