BinN理論談話会2022 #12

On joint railway and housing development: Housing-led versus railway-led schemes

Ka Fai Ng & Hong K. Lo (2017)

Transportation Research Part B: Methodological
Volume 106, December 2017, Pages 464-488

2022年6月1日

M1 加藤諒

要旨

TOD（公共交通指向型開発）

- 公共交通沿いのコンパクトな土地利用により自動車への依存から脱却する（Peter Calthorpe, 1992が提唱）
- TODは持続可能な都市の成長と開発を促進するための主要な解決策のひとつ．経済開発，環境持続性，包括的な社会成長につながる（世銀, 2015）

本論文の目的:

住宅開発と鉄道開発を捉える時間依存型のフレームワークを開発（二段階最適化）

上位問題：住宅供給と鉄道開発の最適化戦略
（住宅・鉄道ディベロッパー vs. 居住者[住宅消費者] vs. 政府）

下位問題：Nested-MNLにより家賃，居住者の立地選択，交通手段選択をモデル化

住宅開発・鉄道開発の収益と関係者の最適戦略の分析

主な発見:

- 「住宅・鉄道ディベロッパー」 vs. 「居住者」 vs. 「政府」という3つの視点で住宅・鉄道開発の最適戦略は異なる
- 一定の低い住宅密度の条件のもとでは，ディベロッパーと居住者のwin-win戦略が可能（ディベロッパーの利益最大化と居住者[住宅購入者]の消費者余剰最大化）
- 高所得者と低所得者の2グループを仮定すると，ディベロッパーは利益最大化のために高所得者向けのフェーズと低所得者向けのフェーズの2段階で住宅開発を行う可能性がある

論文の目次

Introduction

TOD（公共交通指向型開発）

- 公共交通沿いのコンパクトな土地利用により自動車への依存から脱却する（Peter Calthorpe, 1992が提唱）
- TODは持続可能な都市の成長と開発を促進するための主要な解決策のひとつ．経済開発，環境持続性，包括的な社会成長につながる（世銀, 2015）

既往研究：単一期間におけるTODを捉える研究が多い（時間概念無し）

e.g., 住宅供給・需要と交通手段選択の相互作用など

Lead-lag現象（先行遅行関係）を表したい

鉄道主導の開発（鉄道ができてアクセスが改善する→地価上昇→住宅ディベロッパーが開発）

or

住宅供給主導の開発（住宅ができて人口が増える→採算の取れる鉄道開発が可能になる）

時間変化を考慮した住宅供給・鉄道開発のモデルを作る

鉄道主導の開発or住宅供給主導の開発のいずれが望ましいか，ステークホルダーごとに分析

1.イントロダクション

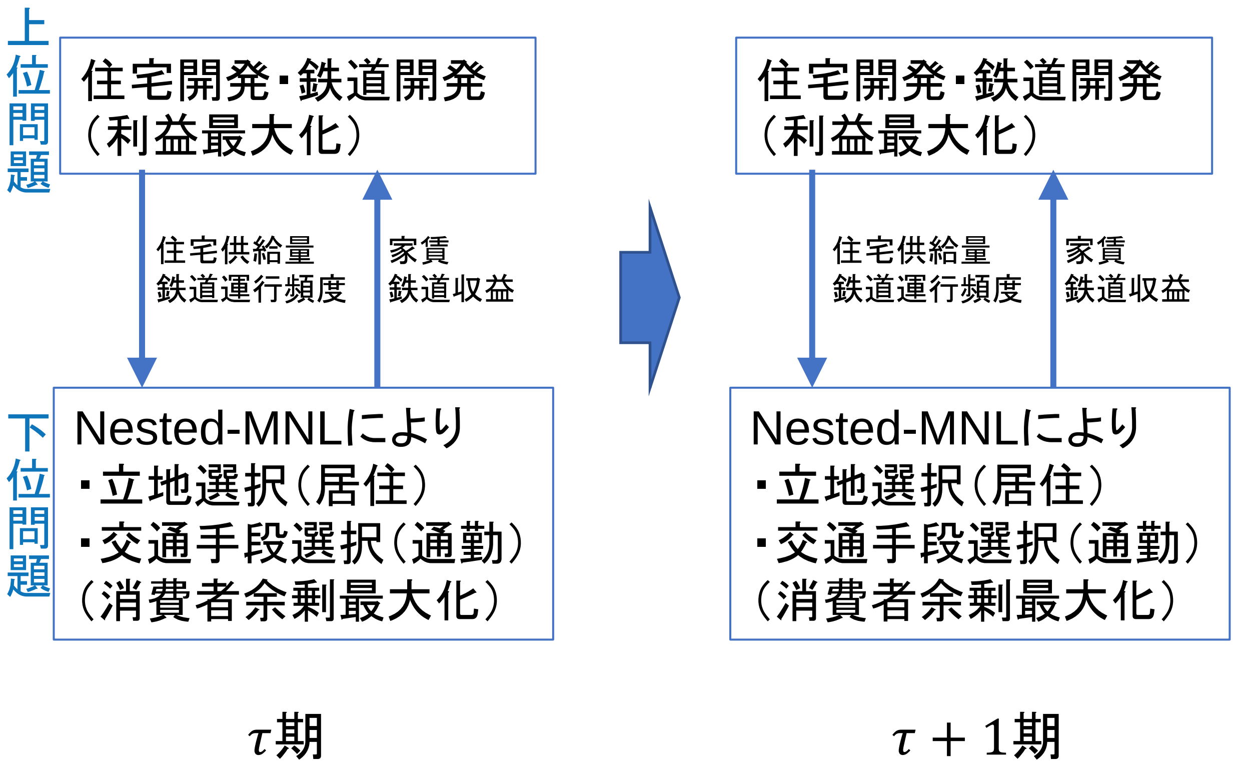
Ma & Lo2012のモデルを時間依存型に拡張

（ODが1組のネットワークについて，付け値地代と住宅供給量を組み合わせたNested-MNLモデル）

捉えたい現象：

住宅：住宅を供給すると，
①給量の増加により価格が下がる，
②住宅が増えることにより収益が増加，
③追加の住宅供給が移住者を引き寄せ付け値地代の上昇
→これらが合わさって家賃が決まる

鉄道：サービスが改善すると利用者の増加による運賃増加．
ただ，これは鉄道建設（改善）のための投資費用より少ないことが多い
→鉄道サービスの向上は移住者を引き寄せ，住宅開発による収益の増加につながる



人口増加を前提とした，最適な交通・住宅供給を時間経過を踏まえて捉えることを目指す．

2.定式化　下位問題 (居住選択･交通手段選択)

交通手段選択（鉄道･自動車の2手段）　　τ : 期間

交通コスト

鉄道

$$c_{rail}^{rsk(\tau)} = \left[\left(it^{rs} + \lambda \cdot hw^{rs(\tau)}\right) \cdot vot^{k} + cp^{rs(\tau)}\right]$$

it^{rs} : rからsまでの鉄道乗車時間(in-vehicle time)
$hw^{rs(\tau)}$: rからsまでの鉄道運行間隔(headway)
λ : 待ち時間パラメータ[0-1]
vot^{k} : 所得 k の人の時間価値
$cp^{rs(\tau)}$: 鉄道運賃

自動車

$$c_{auto}^{rsk(\tau)} = -\frac{1}{\beta_{path}^{k(\tau)}} \ln\left(\sum_{p\in\Omega^{rs}} \exp\left(-\beta_{path}^{k(\tau)} \cdot c_{p,auto}^{rsk(\tau)}\right)\right)$$

where $c_{p,auto}^{rsk(\tau)} = \sum_{a} \delta_{a,p}^{rs}\left(vot^{k} \cdot t_{a}^{(\tau)} + \rho_{a}^{(\tau)}\right)$

$\delta_{a,p}^{rs}$: リンクaがパスpに含まれるとき1
$t^{(\tau)}$: リンクパフォーマンス関数（BPR関数）
$\rho_{a}^{(\tau)}$: リンクaの料金
$\beta_{path}^{rsk(\tau)}$: スケールパラメータ

本論文では，鉄道サービス水準である$hw^{rs(\tau)}$を変化させている（decision variable）

ロジット選択モデル

鉄道選択確率:
$$\Pr_{rail}^{rsk(\tau)} = \frac{\exp\left(-\beta_{mode}^{k(\tau)} \cdot c_{rail}^{rsk(\tau)}\right)}{\exp\left(-\beta_{mode}^{k(\tau)} \cdot c_{rail}^{rsk(\tau)}\right) + \exp\left(-\beta_{mode}^{k(\tau)} \cdot c_{auto}^{rsk(\tau)}\right)}$$

$\beta_{mode}^{k(\tau)}$: スケールパラメータ

自動車選択確率:
$$\Pr_{auto}^{rsk(\tau)} = 1 - \Pr_{rail}^{rsk(\tau)}$$

2.定式化　下位問題 (居住選択･交通手段選択)

家賃&居住者立地選択

住宅への支払い意思額$\boldsymbol{WP}$:

$$WP^{rsk(\tau)} = I^{k(\tau)} - g\left(U^{sk(\tau)}\right) + \sum_i \alpha_i^{rk(\tau)} \cdot z_i - \mu^{rsk(\tau)} + wp^{(\tau)}$$

家賃$\boldsymbol{\Phi}$:

$$\phi^{r(\tau)} = \frac{1}{\beta^{(\tau)}} \ln\left(\sum_{s\in W, k\in K} \exp\left(\beta^{(\tau)} \cdot WP^{rsk(\tau)}\right)\right) - \frac{1}{\beta^{(\tau)}} \ln\left(S^{r(\tau)}\right)$$

$I^{k(\tau)}$: 所得階級kの所得
$g(U^{k(\tau)})$: 住宅費以外の出費
$\alpha^{rk(\tau)}$: z_iを所得階級kの視点で価値化する項
z_i : 観測可能な住宅の特徴
$u^{rsk(\tau)}$: 前ページの交通手段選択より定まるrs間の移動コスト
$wp^{(\tau)}$: 補正パラメータ

$S^{r(\tau)}$: rでの住宅供給量
$\beta^{(\tau)}$: スケールパラメータ

本論文では，住宅供給量$S^{r(\tau)}$を変化させている（decision variable）

居住者の消費者余剰

$$CS^{rsk(\tau)} = WP^{rsk(\tau)} - \phi^{r(\tau)}$$

居住者は消費者余剰を最大化する居住地rを選択（選択確率Pr）

$$\Pr^{rsk(\tau)} = \frac{\exp\left(\beta^{(\tau)} \cdot CS^{rsk(\tau)}\right)}{\sum_{r'\in R} \exp\left(\beta^{(\tau)} \cdot CS^{r'sk(\tau)}\right)}$$

2.定式化　下位問題 (居住選択･交通手段選択)

解析的に解くため，ここまでの定式化を非線形相補性問題NCPとして記述しなおす

$$f_{p|auto}^{rsk(\tau)} \cdot \left(f_{p|auto}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{auto}^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{p|auto}^{rsk(\tau)} \right) = 0, \quad \forall r, s, k, p, \tau,$$

$$f_{p|auto}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{auto}^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{p|auto}^{rsk(\tau)} \geq 0, \quad \forall r, s, k, p, \tau,$$

$$q_{rail}^{rsk(\tau)} \cdot \left(q_{rail}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{rail}^{rsk(\tau)} \right) = 0, \quad \forall r, s, k, \tau,$$

$$q_{rail}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{rail}^{rsk(\tau)} \geq 0, \quad \forall r, s, k, \tau,$$

$$b^{sk(\tau)} \cdot \left(\sum_r S^{r(\tau)} \cdot \Pr^{sk/r(\tau)} - D^{sk(\tau)} \right) = 0, \quad \forall s, k, \tau,$$

$$\sum_r S^{r(\tau)} \cdot \Pr^{sk/r(\tau)} - D^{sk(\tau)} \geq 0, \quad \forall s, k, \tau,$$

$$f_{p|auto}^{rsk(\tau)} \geq 0, \quad \forall r, s, k, p, \tau,$$

$$q_{rail}^{rsk(\tau)} \geq 0, \quad \forall r, s, k, \tau,$$

$$b^{sk(\tau)} \geq 0, \quad \forall s, k, \tau.$$

$f_{p|auto}^{rsk(\tau)}$: rs間のパスpにおける自動車交通量
$q_{rail}^{rsk(\tau)}$: rs間の鉄道交通量
$D^{sk(\tau)}$: 目的地sで働く住民の住宅需要
$b^{sk(\tau)}$: 効用指数（所得から住宅以外の支出を引いたもの）

上のNCPはギャップ関数$G(Z)$を用いることで最小化問題に帰着する

$$\begin{aligned} \min G(\mathbf{Z}) = & \sum_{rskp\tau} \vartheta \left(f_{p|auto}^{rsk(\tau)}, f_{p|auto}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{auto}^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{p|auto}^{rsk(\tau)} \right) \\ & + \sum_{rsk\tau} \vartheta \left(q_{rail}^{rsk(\tau)}, q_{rail}^{rsk(\tau)} - D^{sk(\tau)} \cdot \Pr^{rsk(\tau)} \cdot \Pr_{rail}^{rsk(\tau)} \right) \\ & + \sum_{sk} \vartheta \left(b^{sk(\tau)}, \sum_r S^{r(\tau)} \cdot \Pr^{sk/r(\tau)} - D^{sk} \right), \end{aligned}$$

where

$$\vartheta(a, b) = \frac{1}{2}\theta^2(a, b) \quad and \quad \theta(a, b) = \sqrt{a^2 + b^2} - (a + b).$$

2.定式化　上位問題　利益最大化戦略

- **住宅供給量$S^{r(\tau)}$と鉄道サービスの水準$hw^{rs(\tau)}$の2つを変**数として，ステークホルダーの利益の最大化を行う

- ステークホルダー
  - 住宅・鉄道ディベロッパー（単一の開発主体を想定）：
    総利益P最大化

$$P = P_h + P_r$$

P_h：住宅開発による利益
P_r：鉄道開発による利益

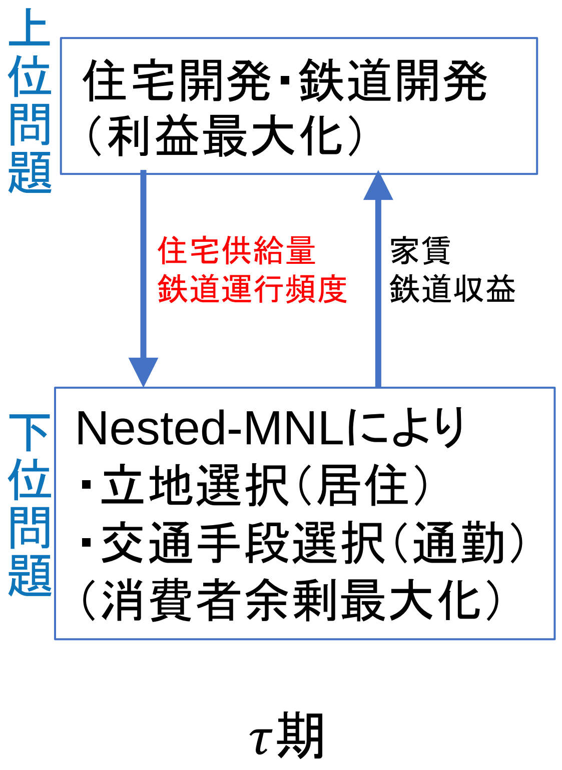
  - 住民：
    消費者余剰CS_t の最大化（支払い意志額WTP－実際の価格）

$$CS_t = \sum_{rsk\tau} \frac{1}{(1+i)^{\tau}} \cdot n \cdot q^{rsk(\tau)} \cdot CS^{rsk(\tau)}$$

i：割引率
n：各期τの日数
$q^{rsk(\tau)}$：居住人口
$CS^{rsk(\tau)}$：消費者余剰

  - 政府：
    社会厚生SWの最大化

$$SW = P + CS_t$$



2.定式化 上位問題 住宅･鉄道ディベロッパーの利益

住宅開発の利益

$$P_h = \sum_{\tau} \frac{1}{(1+i)^{\tau}} \left(R_h^{(\tau)} - C_h^{(\tau)} \right)$$

住宅収益: $R_h^{(\tau)} = n \cdot \sum \phi^{r(\tau)} \cdot S^{r(\tau)}$

住宅開発コスト: $C_h^{(\tau)} = (1+j)^{\tau} \cdot \sum_{r} \upsilon_{h_1} \left(\Delta S^{r(\tau)} \right)^{\upsilon_{h_2}}$

i :利子率
n :各期τの日数
$\phi^{r(\tau)}$:家賃
$S^{r(\tau)}$:住宅供給量
j :インフレ率
$\upsilon_{h1\sim h2}$:パラメータ

鉄道開発(サービス改善)の利益

$$P_r = \sum_{\tau} \frac{1}{(1+i)^{\tau}} \left(R_r^{(\tau)} - C_{r,i}^{(\tau)} - C_{r,o}^{(\tau)} \right)$$

$q_{rail}^{rsk(\tau)}$:鉄道交通量
$cp^{rs(\tau)}$:鉄道運賃
$\overline{hw}$:鉄道運行間隔の上限
$\widehat{hw}$:パラメータ
$\upsilon_{r1\sim 4}$:パラメータ

鉄道収益: $R_r^{(\tau)} = n \cdot \sum_{rsk} q_{rail}^{rsk(\tau)} \cdot cp^{rs(\tau)}$

鉄道運行費用: $C_{r,o}^{(\tau)} = (1+j)^{\tau} \cdot \upsilon_{r_4} \left(\overline{hw} - hw^{rs(\tau)} \right)$

鉄道改良費用:

$$C_{r,i}^{(\tau)} = (1+j)^{\tau} \cdot \left(\upsilon_{r_1} \left(\left(\widehat{hw} - hw^{rs(\tau)} \right)^{\upsilon_{r_2}} - \upsilon_{r_3} \right) \right), \ \tau = 1,$$

→初期投資

$$C_{r,i}^{(\tau)} = (1+j)^{\tau} \cdot \left(\upsilon_{r_1} \left(\left(\widehat{hw} - hw^{rs(\tau)} \right)^{\upsilon_{r_2}} - \upsilon_{r_3} \right) - \upsilon_{r_1} \left(\left(\widehat{hw} - hw^{rs(\tau-1)} \right)^{\upsilon_{r_2}} - \upsilon_{r_3} \right) \right)$$

$\tau = 2, 3, \ldots, T$

→改良費用

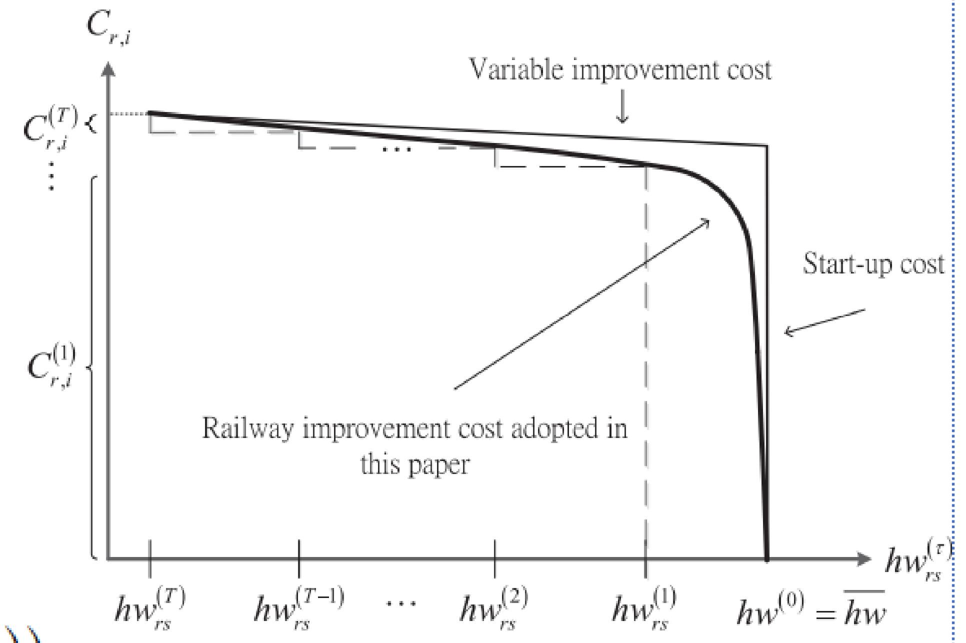


Fig. 1. Railway improvement cost function.

鉄道改良費用$C_{r,i}^{(\tau)}$

2. 定式化 二段階モデル

τ期から$\tau+1$期までの住宅開発$\Delta S^{r(\tau)}$と鉄道サービス改善$\Delta hw^{rs(\tau)}$を変数として，各ステークホルダーの効用最大化を行う

$$\Delta S^{r(\tau)} = S^{r(\tau)} - S^{r(\tau-1)},\ \ \tau = 1, 2, \ldots, T$$

$$\Delta hw^{rs(\tau)} = hw^{rs(\tau)} - hw^{rs(\tau-1)},\ \ \tau = 1, 2, \ldots, T$$

$$\underset{\Delta S^{r(\tau)},\ \Delta hw^{rs(\tau)}}{\text{Max}} \quad P$$ 住宅･鉄道ディベロッパーの総利益の最大化

s.t.

$$G(\mathbf{Z}) = 0,$$ 下位問題（交通手段選択と居住地選択の均衡）

$$\sum_{s\in W, k\in K} D^{sk(\tau)} = \sum_{r\in R} S^{r(\tau)}, \quad \forall \tau,$$ 各期において住宅供給量と人口が一致（モデルの仮定）

$$\Delta S^{r(\tau)} \geq 0, \quad \forall r, \tau,$$ 住宅は減らない（モデルの仮定）

$$\Delta hw^{rs(\tau)} \leq 0, \quad \forall r, s, \tau,$$ 鉄道サービスは改悪しない [運行間隔は減少しつづける]（モデルの仮定）

$$\sum_{\tau}\sum_{r} \Delta S^{r(\tau)} = \sum_{sk} \Delta D^{sk},$$ 最終的な住宅供給量を外生的に与える（右辺）

$$\sum_{\tau} \Delta hw^{rs(\tau)} = \Delta \underline{hw}^{rs}, \ \forall r, s,$$ 最終的な鉄道サービスのレベルを外生的に与える（右辺）

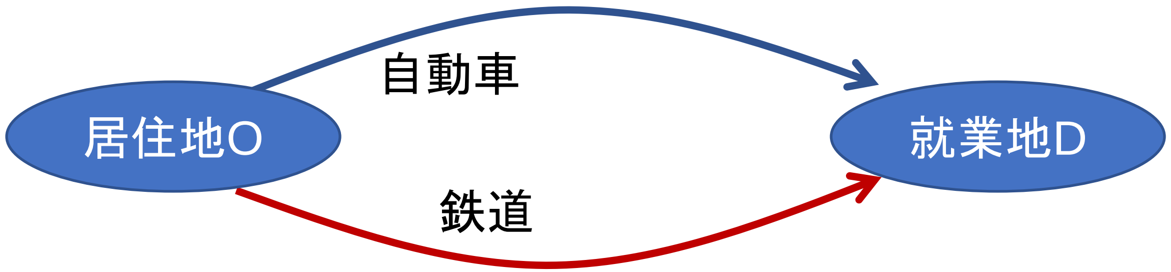
$$P \geq 0,$$ ディベロッパーの費用回収条件を満たす

→非凸の数理計画問題MPECであり，大域的最適解は保証されない

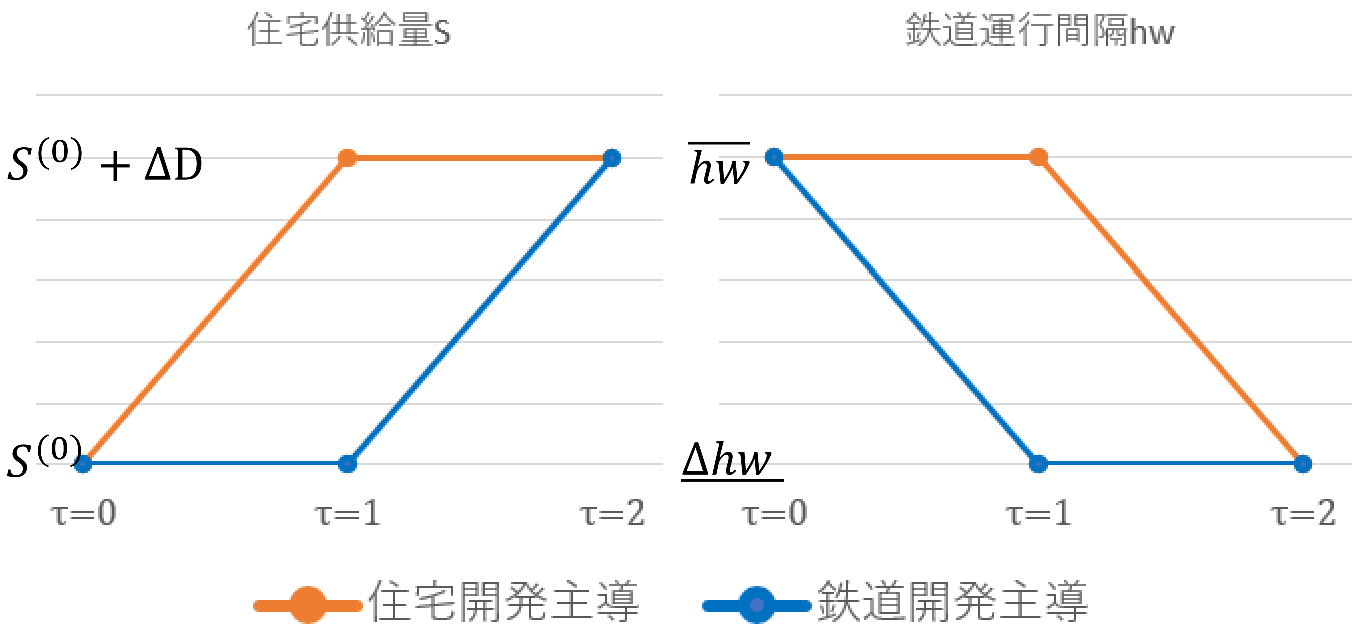
3. モデルの感度分析（住宅開発主導or鉄道開発主導）

以下の仮定のもと, $\tau = 0,1,2$の3期で住宅・鉄道ディベロッパーの最適戦略を考える（利益最大化）

H0: 1組のOD
H1:所得は全員均一
H2:開発される住宅はすべて均一
H3:ディベロッパーの費用回収条件P≥0を満たす



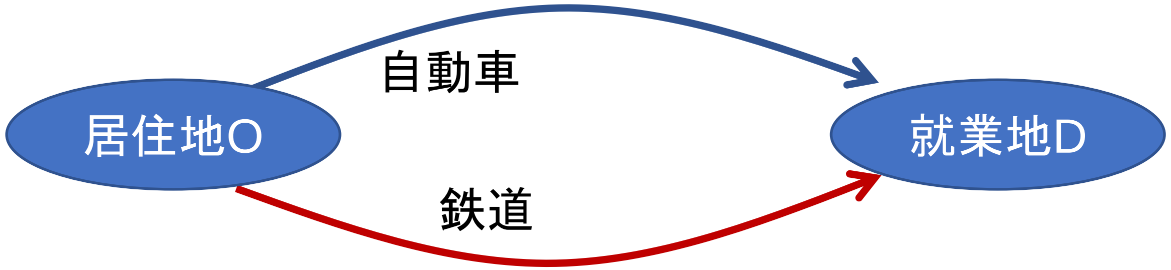
交通の初期条件 / 住宅の初期条件	悪い交通NW	良い交通NW
低い住宅密度	住宅開発主導	住宅開発主導
高い住宅密度	鉄道開発主導	–



3. モデルの感度分析(住宅開発主導or鉄道開発主導)

前頁の仮定のもと，$\tau = 0,1,2$の3期で住宅･鉄道ディベロッパーの最適戦略を考える(利益最大化)

住宅の初期条件 ＼ 交通の初期条件	悪い交通NW	良い交通NW
低い住宅密度	住宅開発主導	住宅開発主導
高い住宅密度	鉄道開発主導	−



命題: 住宅供給の初期値$S^{(0)}$が十分小さく以下が成り立つとき，

$$\underset{(++)}{\phi^{(1)}} - \Delta S^{(1)} \cdot \underset{(-)}{\frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} + cp^{(1)} \cdot \underset{(+)}{\frac{\partial q^{(1)}_{rail}}{\partial \Delta S^{(1)}}} - \underset{(-)}{\frac{1}{\beta^{(1)}}} > \underset{(+)}{\frac{(1+i)}{n}} MC_{\Delta S^{(1)}}$$

$$-\Delta S^{(1)} \cdot \underset{(-)}{\frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} + cp^{(1)} \cdot \Delta S^{(1)} \cdot \underset{(-)}{\frac{\partial \Pr^{(1)}_{rail}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} > \underset{(--)}{\frac{(1+i)}{n}} MC_{\Delta hw^{(1)}}$$

$\tau = 1$期にすべての住宅供給がなされ，鉄道サービス改善は最終期($\tau = 2$)になされる

$\phi^{(1)}$:1期の家賃
$\Delta S^{(1)}$:1期の住宅供給量
$\mu^{(1)}$:1期のOD間の移動コスト
$cp^{(1)}$:1期の鉄道運賃
$q^{(1)}_{rail}$:1期の鉄道利用者数
$\beta^{(1)}$:1期の下位問題のパラメタ
i:利子率
n:各期の日数
$MC_{\Delta S^{(1)}}$:1期の住宅供給の限界費用
$\Pr^{(1)}_{rail}$:1期の鉄道選択確率
$MC_{\Delta hw^{(1)}}$:1期の鉄道サービス改善の限界費用

3. モデルの感度分析（住宅開発主導or鉄道開発主導）

命題： 住宅供給の初期値$S^{(0)}$が十分小さく以下が成り立つとき，

$$\underset{(++)}{\phi^{(1)}} - \underset{(-)}{\Delta S^{(1)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} + \underset{(+)}{cp^{(1)} \cdot \frac{\partial q_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} - \underset{(-)}{\frac{1}{\beta^{(1)}}} > \underset{(+)}{\frac{(1+i)}{n} MC_{\Delta S^{(1)}}}$$

$$-\underset{(-)}{\Delta S^{(1)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} + cp^{(1)} \cdot \underset{(-)}{\Delta S^{(1)} \cdot \frac{\partial \Pr_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} > \underset{(--)}{\frac{(1+i)}{n} MC_{\Delta hw^{(1)}}}$$

$\tau = 1$期にすべての住宅供給がなされ，鉄道サービス改善は最終期$(\tau = 2)$になされる

$\phi^{(1)}$：1期の家賃
$\Delta S^{(1)}$：1期の住宅供給量
$\mu^{(1)}$：1期のOD間の移動コスト
$cp^{(1)}$：1期の鉄道運賃
$q_{rail}^{(1)}$：1期の鉄道利用者数
$\beta^{(1)}$：1期の下位問題のパラメタ
i：利子率
n：各期の日数
$MC_{\Delta S^{(1)}}$：1期の住宅供給の限界費用
$\Pr_{rail}^{(1)}$：1期の鉄道選択確率
$MC_{\Delta hw^{(1)}}$：1期の鉄道サービス改善の限界費用

$$\frac{\partial P}{\partial \Delta S^{(1)}} = \frac{n}{(1+i)} \left(\phi^{(1)} - (\cancel{S^{(0)}} + \Delta S^{(1)}) \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}} - \frac{1}{\beta^{(1)}} + cp^{(1)} \cdot \frac{\partial q_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}} \right) - MC_{\Delta S^{(1)}} > 0$$

1期に住宅開発$(\Delta S^{(1)} > 0)$
⇒利益P増加

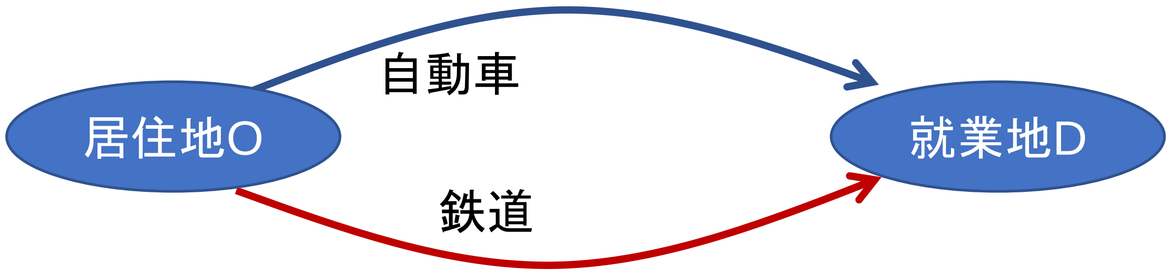
$$\frac{\partial P}{\partial \Delta hw^{(1)}} = \frac{n}{(1+i)} \left(-(\cancel{S^{(0)}} + \Delta S^{(1)}) \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}} + cp^{(1)} \cdot (\cancel{S^{(0)}} + \Delta S^{(1)}) \cdot \frac{\partial \Pr_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}} \right) - MC_{\Delta hw^{(1)}} > 0$$

1期に鉄道改良$(\Delta hw^{(1)} < 0)$
⇒利益P減少

3. モデルの感度分析（住宅開発主導or鉄道開発主導）

p12の仮定のもと, $\tau = 0,1,2$の3期で住宅・鉄道ディベロッパーの最適戦略を考える（利益最大化）

交通の初期条件 ＼ 住宅の初期条件	悪い交通NW	良い交通NW
低い住宅密度	住宅開発主導	住宅開発主導
高い住宅密度	鉄道開発主導	–



命題：

住宅供給の初期値$S^{(0)}$が十分大きく以下が成り立つとき,

$$\underset{(+)}{\phi^{(1)}} - \underset{(--)}{S^{(0)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} + \underset{(+)}{cp^{(1)} \cdot \frac{\partial q_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} - \underset{(-)}{\frac{1}{\beta^{(1)}}} < \underset{(+)}{\frac{(1+i)}{n}} MC_{\Delta S^{(1)}},$$

$$\underset{(--)}{-S^{(0)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} + \underset{(--)}{cp^{(1)} \cdot S^{(0)}} \cdot \frac{\partial \Pr_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}} < \underset{(-)}{\frac{(1+i)}{n}} MC_{\Delta hw^{(1)}},$$

$\tau = 1$期にすべての鉄道サービス改善がなされ, 住宅供給は最終期$(\tau = 2)$になされる

$\phi^{(1)}$:1期の家賃
$\Delta S^{(1)}$:1期の住宅供給量
$\mu^{(1)}$:1期のOD間の移動コスト
$cp^{(1)}$:1期の鉄道運賃
$q_{rail}^{(1)}$:1期の鉄道利用者数
$\beta^{(1)}$:1期の下位問題のパラメタ
i:利子率
n:各期の日数
$MC_{\Delta S^{(1)}}$:1期の住宅供給の限界費用
$\Pr_{rail}^{(1)}$:1期の鉄道選択確率
$MC_{\Delta hw^{(1)}}$:1期の鉄道サービス改善の限界費用

3. モデルの感度分析(住宅開発主導or鉄道開発主導)

命題: 住宅供給の初期値$S^{(0)}$が十分大きく以下が成り立つとき,

$$\underset{(+)}{\phi^{(1)}} - \underset{(--)}{S^{(0)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} + \underset{(+)}{cp^{(1)} \cdot \frac{\partial q_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}}} - \underset{(-)}{\frac{1}{\beta^{(1)}}} < \underset{(+)}{\frac{(1+i)}{n} MC_{\Delta S^{(1)}}},$$

$$\underset{(--)}{-S^{(0)} \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} + \underset{(--)}{cp^{(1)} \cdot S^{(0)} \cdot \frac{\partial \mathrm{Pr}_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}}} < \underset{(-)}{\frac{(1+i)}{n} MC_{\Delta hw^{(1)}}},$$

$\tau = 1$期にすべての鉄道サービス改善がなされ,住宅供給は最終期$(\tau = 2)$になされる

$\phi^{(1)}$:1期の家賃
$\Delta S^{(1)}$:1期の住宅供給量
$\mu^{(1)}$:1期のOD間の移動コスト
$cp^{(1)}$:1期の鉄道運賃
$q_{rail}^{(1)}$:1期の鉄道利用者数
$\beta^{(1)}$:1期の下位問題のパラメタ
i:利子率
n:各期の日数
$MC_{\Delta S^{(1)}}$:1期の住宅供給の限界費用
$\mathrm{Pr}_{rail}^{(1)}$:1期の鉄道選択確率
$MC_{\Delta hw^{(1)}}$:1期の鉄道サービス改善の限界費用

$\Delta S^{(1)} \ll S^{(0)}$より,

$$\frac{\partial P}{\partial \Delta S^{(1)}} = \frac{n}{(1+i)} \left(\phi^{(1)} - \left(S^{(0)} + \cancel{\Delta S^{(1)}}\right) \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}} - \frac{1}{\beta^{(1)}} + cp^{(1)} \cdot \frac{\partial q_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta S^{(1)}} - MC_{\Delta S^{(1)}} \right) < 0$$

1期に住宅開発$(\Delta S^{(1)} > 0)$
⇒利益P減少

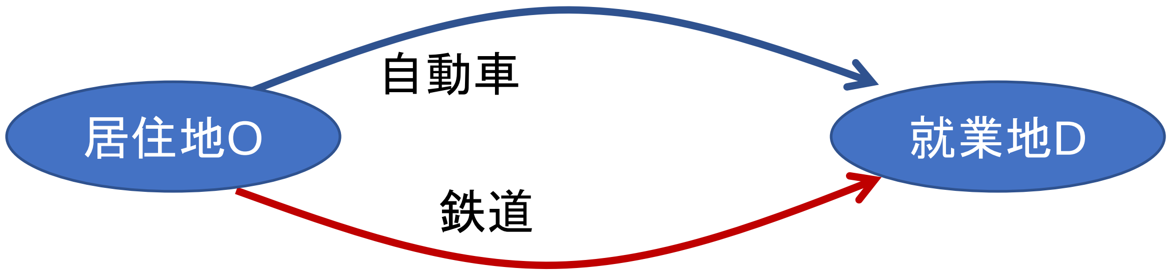
$$\frac{\partial P}{\partial \Delta hw^{(1)}} = \frac{n}{(1+i)} \left(-\left(S^{(0)} + \cancel{\Delta S^{(1)}}\right) \cdot \frac{\partial \mu^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}} + cp^{(1)} \cdot \left(S^{(0)} + \cancel{\Delta S^{(1)}}\right) \cdot \frac{\partial \mathrm{Pr}_{rail}^{(1)}}{\partial \Delta hw^{(1)}} - MC_{\Delta hw^{(1)}} \right) < 0$$

1期に鉄道改良$(\Delta hw^{(1)} < 0)$
⇒利益P増加

3. モデルの感度分析（住宅開発主導or鉄道開発主導）

p12の仮定のもと, $\tau = 0,1,2$の3期で住宅・鉄道ディベロッパーの最適戦略を考える（利益最大化）

住宅の初期条件 ＼ 交通の初期条件	悪い交通NW	良い交通NW
低い住宅密度	住宅開発主導	住宅開発主導
高い住宅密度	鉄道開発主導	−



初期条件：高い住宅密度&良い交通NWのとき

スライド7枚目より

住宅への支払い意思額WP

$$WP^{rsk(\tau)} = I^{k(\tau)} - g\left(U^{sk(\tau)}\right) + \sum_i \alpha_i^{rk(\tau)} \cdot z_i - \mu^{rsk(\tau)} + wp^{(\tau)}$$

家賃Φ

$$\phi^{r(\tau)} = \frac{1}{\beta^{(\tau)}} \ln\left(\sum_{s\in W,k\in K} \exp\left(\beta^{(\tau)} \cdot WP^{rsk(\tau)}\right)\right) - \frac{1}{\beta^{(\tau)}} \ln\left(S^{r(\tau)}\right)$$

$I^{k(\tau)}$：所得階級kの所得
$g(U^{k(\tau)})$：住宅費以外の出費
$\alpha^{rk(\tau)}$：z_iを所得階級kの視点で価値化する項
z_i：観測可能な住宅の特徴
$u^{rsk(\tau)}$：前ページの交通手段選択より定まるrs間の移動コスト
$wp^{(\tau)}$：補正パラメータ

$S^{r(\tau)}$：rでの住宅供給量
$\beta^{(\tau)}$：スケールパラメータ

移動コスト$u^{rsk(\tau)}$が小→$WP^{rsk(\tau)}$が大→家賃上がる→住宅開発

↖ ↙

鉄道開発←家賃下がる←**住宅供給$S^{r(\tau)}$が大**

➡ 住宅主導or鉄道主導は場合による

4. 数値実験　住宅･鉄道ディベロッパーの最適戦略

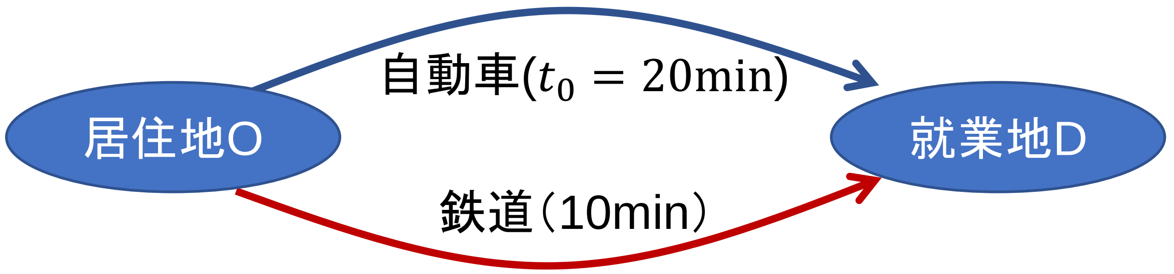
仮定：　1組のODによる簡易ネットワーク

以下の3つの居住地の初期条件

(a) 低密度…住宅供給量200･居住者200

(b) 中密度…住宅供給量2000･居住者2000

(c) 高密度…住宅供給量4200･居住者4200

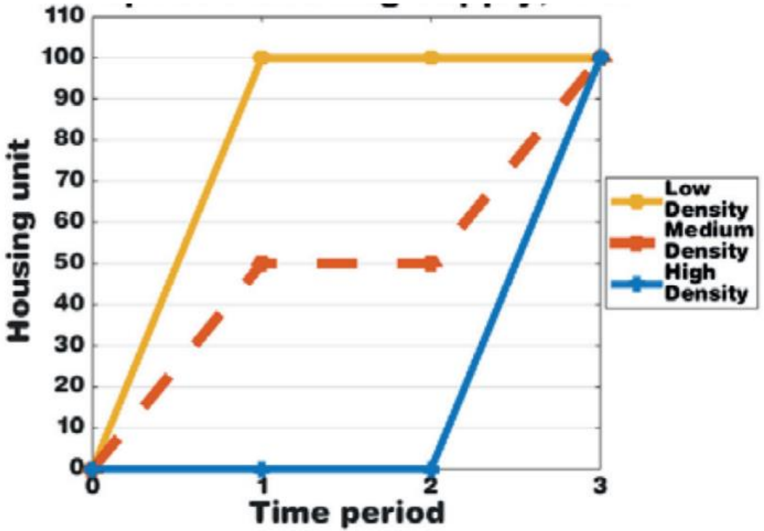


ただし，居住者は高所得者(600HKD/day)･低所得者(400HKD/day)に二分される

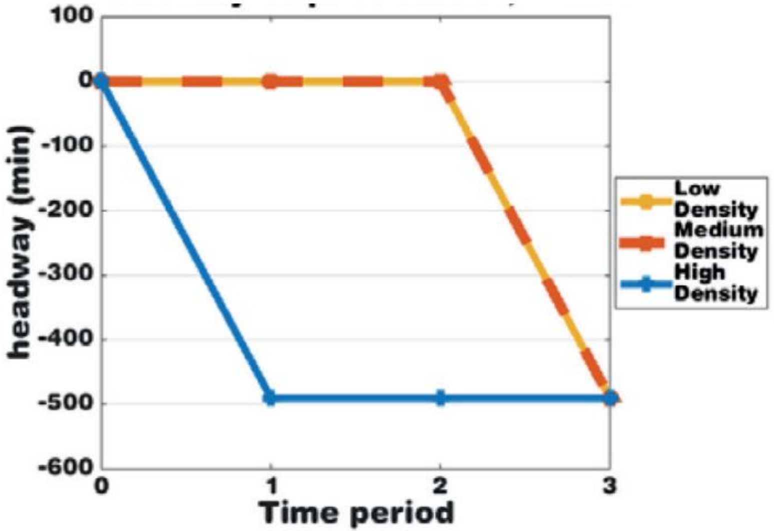
$\tau = 0,1,2,3$の4期の間に，100人増加，鉄道運行間隔は490分改善

(a) Railway performance: $it = 10$ min; $hw^{(0)} = \overline{hw} = 495$ min; $cp^{(\tau)} =$ HKD\$5, $\forall\tau$; $\lambda = 0.5$;
(b) Auto link performance: $t_a^0 = 20$ min; $\gamma_1 = 0.15$; $\gamma_2 = 4$; $C_a = 2000$vph; $\rho_a = \$0$;
(c) Cost functions parameters: $\upsilon_{h_1} =$ HKD\$$9.1 \times 10^5$; $\upsilon_{h_2} = 1$; $\upsilon_{r_1} =$ HKD\$$1.02 \times 10^{10}$; $\upsilon_{r_2} = 0.01$; $\upsilon_{r_3} = 1$; $\upsilon_{r_4} =$ HKD\$$2.4 \times 10^4$; $\widehat{hw} = 496$;
(d) Target population, housing supply and railway services: $\Delta D^{k_{High}} = 50$; $\Delta D^{k_{low}} = 50$; $\Delta S = \Delta D^{k_{High}} + \Delta D^{k_{Low}} = 100$; $\Delta \underline{hw} = -490$ min;
(e) Time period: $\tau = [0, 3]$; 5 years in each time period, $n = 5 \times 365 = 1825$;
(f) Interest and inflation rates: $i = 9\%$ per year $= 54\%$ per 5 years; $j = 2\%$ per year $= 10\%$ per 5 years;
(g) Incomes and values of time: $I^{k_{High}} =$ HKD\$600/day; $I^{k_{low}} =$ HKD\$400/day; $vot^{k_{High}} =$ HKD\$3/min; $vot^{k_{low}} =$ HKD\$2/min;
(h) Others: $\beta_{mode}^{k_{High}(\tau)} = 0.05$; $\beta_{mode}^{k_{Low}(\tau)} = 0.04$; $\beta^{(\tau)} = 0.01$ for $\forall\tau$; $wp^{(\tau)} = 935$; $\alpha_i = 0$.

最適な住宅供給量S



最適な鉄道サービス改善hw



低密度…住宅主導の開発

高密度…鉄道主導の開発

中密度の場合，まず高所得者のみがOに入居し，次に低所得者が入居

→社会的に望ましくない状況？

4. 数値実験　住宅･鉄道ディベロッパーの最適戦略

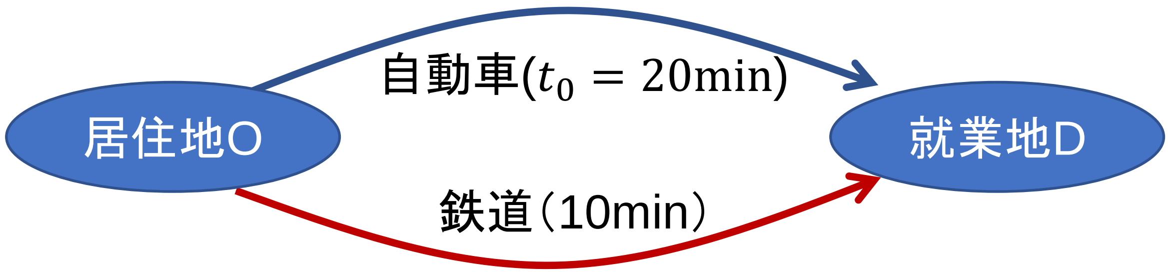
仮定:　1組のODによる簡易ネットワーク

以下の3つの居住地の初期条件

(a) 低密度…住宅供給量200･居住者200

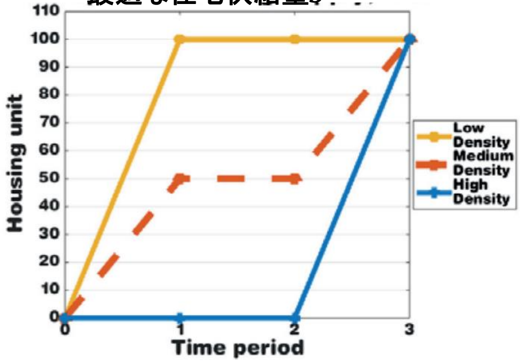
(b) 中密度…住宅供給量2000･居住者2000

(c) 高密度…住宅供給量4200･居住者4200

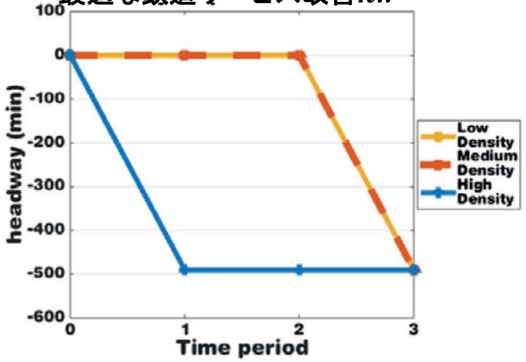


(a) Railway performance: $it = 10$ min; $hw^{(0)} = \overline{hw} = 495$ min; $cp^{(\tau)} = \text{HKD\$5}, \forall\tau$; $\lambda = 0.5$;
(b) Auto link performance: $t_a^0 = 20$ min; $\gamma_1 = 0.15$; $\gamma_2 = 4$; $C_a = 2000$vph; $\rho_a = \$0$;
(c) Cost functions parameters: $\upsilon_{h_1} = \text{HKD\$}9.1 \times 10^5$; $\upsilon_{h_2} = 1$; $\upsilon_{r_1} = \text{HKD\$}1.02 \times 10^{10}$; $\upsilon_{r_2} = 0.01$; $\upsilon_{r_3} = 1$; $\upsilon_{r_4} = \text{HKD\$}2.4 \times 10^4$; $\widehat{hw} = 496$;
(d) Target population, housing supply and railway services: $\Delta D^{k_{High}} = 50$; $\Delta D^{k_{low}} = 50$; $\Delta S = \Delta D^{k_{High}} + \Delta D^{k_{Low}} = 100$; $\Delta \underline{hw} = -490$ min;
(e) Time period: $\tau = [0, 3]$; 5 years in each time period, $n = 5 \times 365 = 1825$;
(f) Interest and inflation rates: $i = 9\%$ per year $= 54\%$ per 5 years; $j = 2\%$ per year $= 10\%$ per 5 years;
(g) Incomes and values of time: $I^{k_{High}} = \text{HKD\$600/day}$; $I^{k_{low}} = \text{HKD\$400/day}$; $vot^{k_{High}} = \text{HKD\$3/min}$; $vot^{k_{low}} = \text{HKD\$2/min}$;
(h) Others: $\beta_{mode}^{k_{High}(\tau)} = 0.05$; $\beta_{mode}^{k_{Low}(\tau)} = 0.04$; $\beta^{(\tau)} = 0.01$ for $\forall\tau$; $wp^{(\tau)} = 935$; $\alpha_i = 0$.

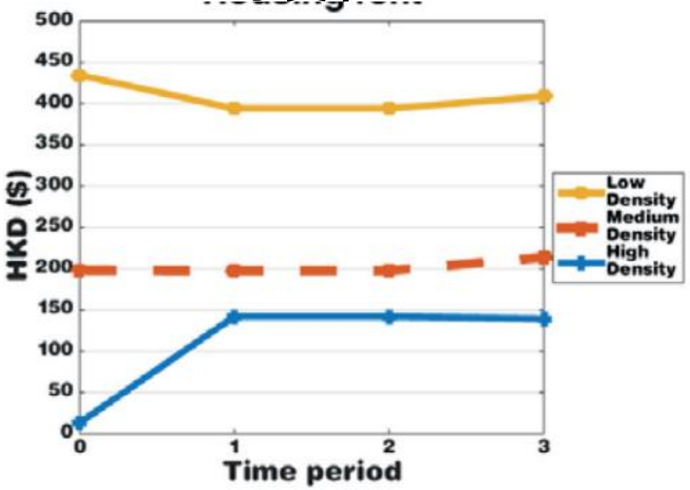
最適な住宅供給量S



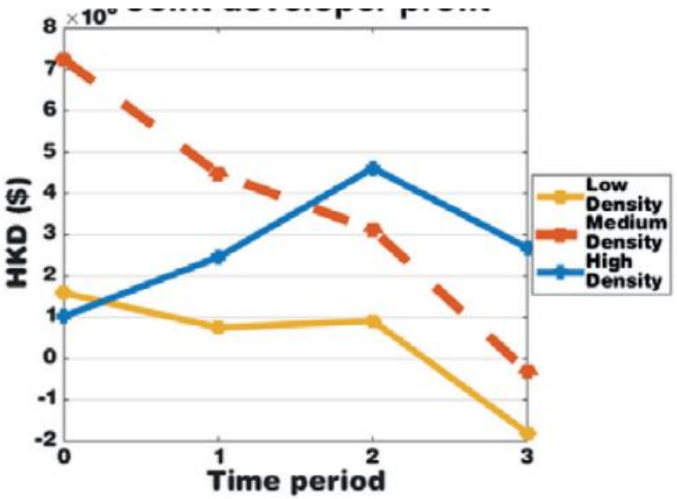
最適な鉄道サービス改善hw



家賃ϕ



住宅鉄道ディベロッパー利益$P^{(\tau)}$



低密度…住宅主導の開発

高密度…鉄道主導の開発

4. 数値実験　3者の最適戦略の比較

- ステークホルダー
  - ○住宅・鉄道ディベロッパー（単一の開発主体を想定）：
    総利益P最大化

$$P = P_h + P_r$$

P_h：住宅開発による利益
P_r：鉄道開発による利益

  - ○住民：
    消費者余剰CS_t の最大化（=支払い意志額WTP－実際の価格）

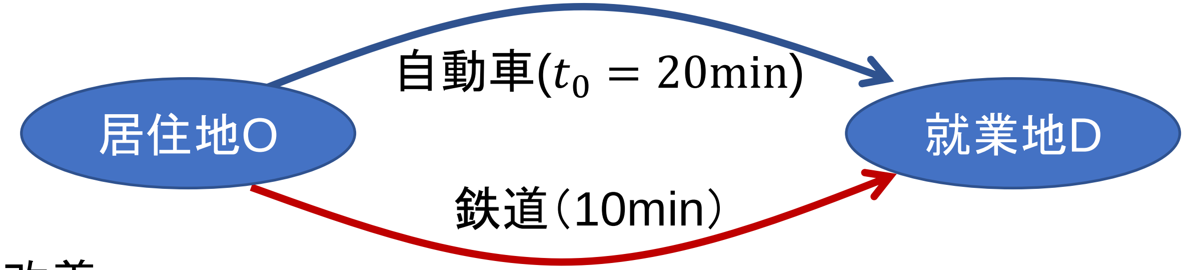
$$CS_t = \sum_{rsk\tau} \frac{1}{(1+i)^{\tau}} \cdot n \cdot q^{rsk(\tau)} \cdot CS^{rsk(\tau)}$$

i ：割引率
n ：各期τの日数
$q^{rsk(\tau)}$：居住人口
$CS^{rsk(\tau)}$：消費者余剰

  - ○政府：
    社会厚生SWの最大化

$$SW = P + CS_t$$

仮定：　1組のODによる簡易ネットワーク
　　　　居住地の初期条件は
　　　　(c) 高密度…住宅供給量4200・居住者4200



$\tau = 0,1,2,3$の4期の間に，100人増加，鉄道運行間隔は490分改善
　ただし，居住者は高所得者(600HKD/day)・低所得者(400HKD/day)に二分される

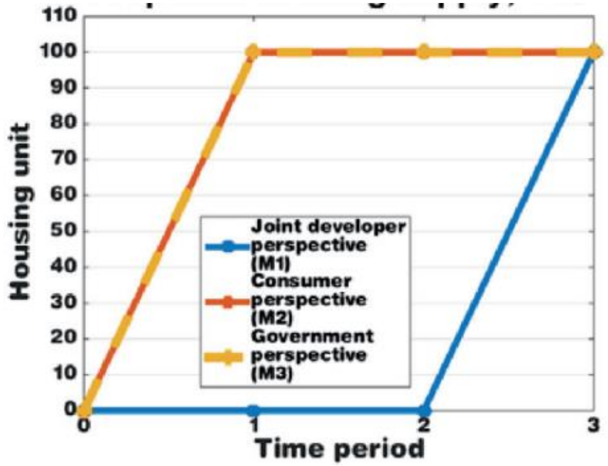
4. 数値実験　3者の最適戦略の比較

- 住宅･鉄道ディベロッパー：　総利益P最大化 (p18,19の(c)高密度)
- 住民：　消費者余剰CS_t の最大化（=支払い意志額WTP－実際の価格）
- 政府：　社会厚生SWの最大化$(= P + CS_{\mathrm{t}})$

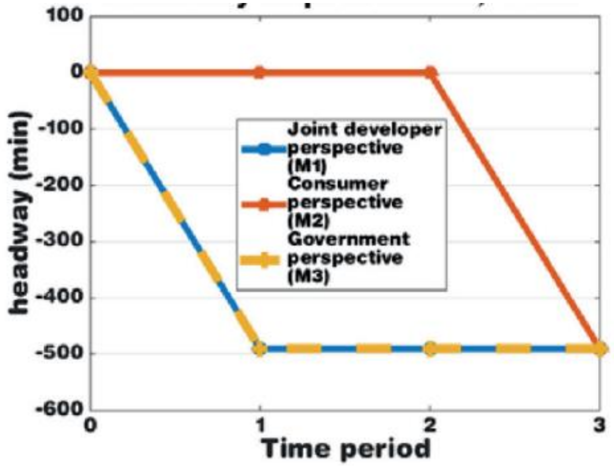
（住民）住宅供給量Sの増加
→家賃の減少

（政府）家賃の減少によるCSの増加
>ディベロッパーの収益減少

最適な住宅供給量S



最適な鉄道サービス改善hw



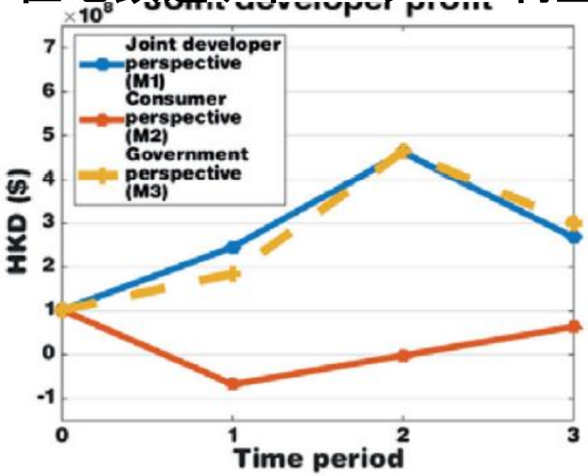
（住民）1組のODのとき，

$\frac{\partial CS_t}{\partial \Delta hw} = 0$ （→p7）

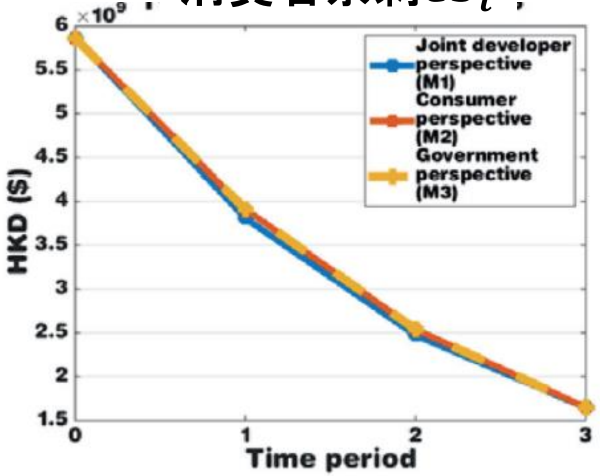
（政府）初期住宅供給大のとき，

$\frac{\partial P}{\partial \Delta hw} < 0$ （→p16）

住宅鉄道ディベロッパー利益$P^{(\tau)}$



消費者余剰CS_t



結論

本論文の成果・発見

住宅開発と鉄道開発を捉える時間依存型のフレームワークを開発（二段階最適化）
→1組のODの簡易ネットワークで実装し，住宅・交通の初期条件の違いによる，住宅開発と鉄道開発のリードラグ現象を再現

- 「住宅・鉄道ディベロッパー」「居住者」「政府」の最適戦略は異なる
- 住宅密度の低い場所→住宅開発が先行
- 高所得者と低所得者の2グループを仮定すると，ディベロッパーは利益最大化のために高所得者向けのフェーズと低所得者向けのフェーズの2段階で住宅開発を行う可能性がある

今後の展望・課題

- 住宅供給量と需要量が等しいという仮定の緩和
- 需要を完全に予測できるという仮定の緩和
- ディベロッパーどうしの競争の記述
- 開発プロジェクトの手法の違いによるリスクの考慮（PPPなど）

参考

- Calthorpe, P. (1992). City of San Diego Transit-Oriented Development Design Guidelines. *Calthorpe Associates (1st ed.). Planning department office of the city architect*. https://www.sandiego.gov/sites/default/files/legacy/planning/community/profiles/southeasternsd/pdf/transitorienteddevelopmentdesignguidelines1992.pdf
- Jamme, H. T., Rodriguez, J., Bahl, D., & Banerjee, T. (2019). A twenty-five-year biography of the TOD concept: From design to policy, planning, and implementation. Journal of Planning Education and Research, 39(4), 409-428. http://dx.doi.org/10.1177/0739456X19882073
- Ma, X., & Lo, H. K. (2012). Modeling transport management and land use over time. *Transportation Research Part B: Methodological*, *46*(6), 687-709. https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.01.010