

# On the supply curve of ride-hailing systems

Zhengtian Xu, Yafeng Yin, Jieping Ye

Transportation Research Part B, 132, (2020), 29-43

---

M1 鈴木 大樹

# 目次

---

1. 導入
2. サービスの供給と利用者のコスト
3. 等方的e-hailing市場における後屈型供給曲線
4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線
5. 異方的市場における後屈型供給曲線
6. 結論

# 1. 導入

---

- スマートフォンの普及により急成長を遂げているe-hailingは、いくつかの問題点を抱えている。
  - ✓ タクシー業界との不当な競争
  - ✓ サービス中の車両による混雑悪化
  - ✓ サージプライシング
  - ✓ **WGC (Wild Goose Chasing) →システムの非効率性**
    - 遠く離れたドライバーと客とがマッチングされ、配車のために長時間浪費しなくてはならない状況
    - 需要に対して供給が不足しているときに生じる
- いつ、どのようにしてシステムの非効率性が引き起こされるかを調べ、効率性を保つ方法について議論する。



- ✓ システムの容量
- ✓ 1時間帯で供給できるトリップの数
- ✓ 現在のシステムは効率的なのか否か
- ✓ システムをどのようにして効率的にすれば良いのか

## 2. サービスの供給と利用者のコスト

### ■供給 $S$

- 市場が等方的：1時間帯・単位面積あたりで供給できるトリップ数（**トリップ供給率**）
- 市場が異方的：1時間帯で供給できるトリップ数

### ■利用者のコスト

- e-hailing：マッピング待ち時間・配車待ち時間・乗車時間・運賃により決定

マッピング時間 平均運賃

$$C = W_e(w^c, w^m, F)$$

利用者のコスト 配車待ち時間

混雑の影響は無視→定数

- street-hailing：マッピング待ち時間と運賃のみ

$$C = W_s(w^c, F)$$

- ✓ 偏微分は正 = 時間・金額の増加によりコストは単調に増加

$$\frac{\partial W_e}{\partial w^c} > 0, \frac{\partial W_e}{\partial w^m} > 0, \frac{\partial W_e}{\partial F} > 0$$

$$\frac{\partial W_s}{\partial w^c} > 0, \frac{\partial W_s}{\partial F} > 0$$

# 3. 等方的e-hailing市場における後屈型供給曲線

## ■e-hailingの供給曲線の後屈：Castillo et al. (2018)のモデル

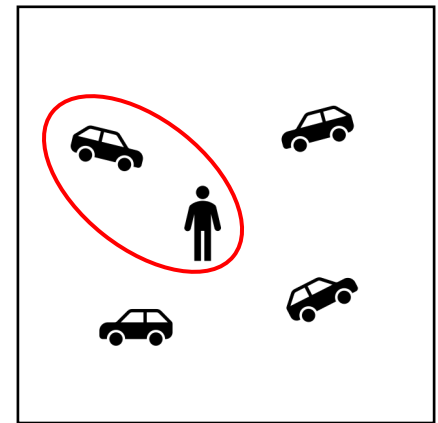
- 全車両の密度 = 空車の車両の密度 + 迎車の車両の密度 + 貸走の車両の密度

$$N = N^v + w^m Q + tQ$$

空車の車両の密度
平均乗車時間  
全車両の密度
トリップ供給率

※車両数は一定

- 十分広い平面上に空車の車両が一様に分布している
- 利用依頼を行った利用者は、**最寄りの空車の車両とマッチング**される
- マッチング時間は0と仮定 ( $w^c = 0$ )
- 運賃  $F$  は固定



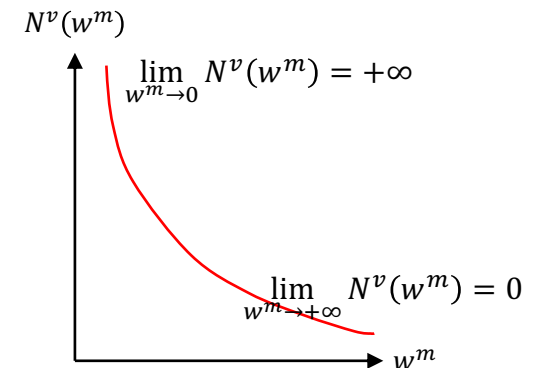
$$C = W_e(w^m)$$

$$N = N^v(w^m) + w^m Q + tQ$$



マッチング半径に制限なし

$$Q = s_e^\infty(C) = \frac{N - N^v(W_e^{-1}(C))}{W_e^{-1}(C) + t}$$



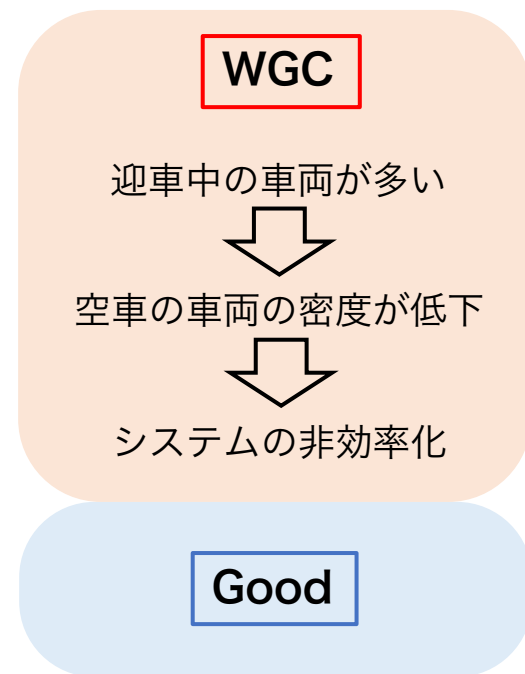
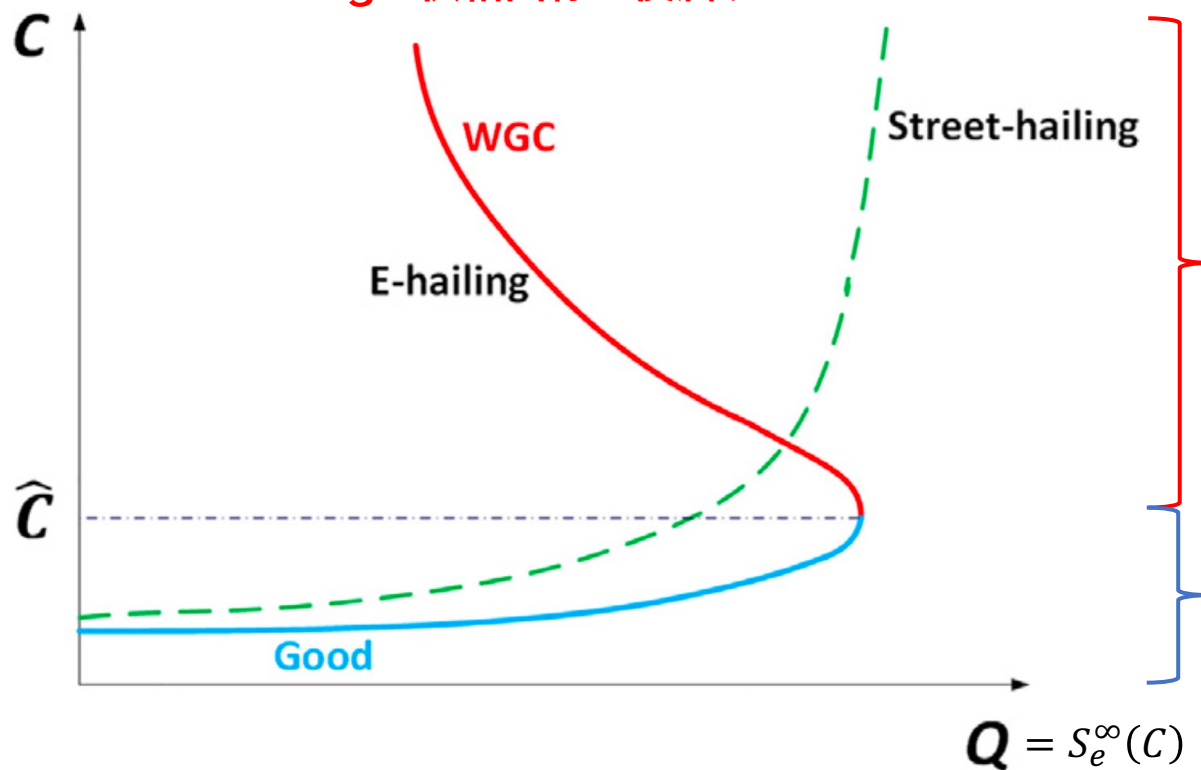
### 3. 等方的e-hailing市場における後屈型供給曲線

#### ■e-hailingの供給曲線の後屈：Castillo et al. (2018)のモデル

##### 命題1

$N > 0$ のとき、ある $\hat{c}$ が存在して、 $c < \hat{c}$ のとき $s_e^{\infty'}(c) > 0$ 、 $c > \hat{c}$ のとき $s_e^{\infty'}(c) < 0$ が成り立つ。

e-hailingの供給曲線は後屈する



# 3. 等方的e-hailing市場における後屈型供給曲線

## ■e-hailingの供給曲線の後屈：Castillo et al. (2018)のモデル

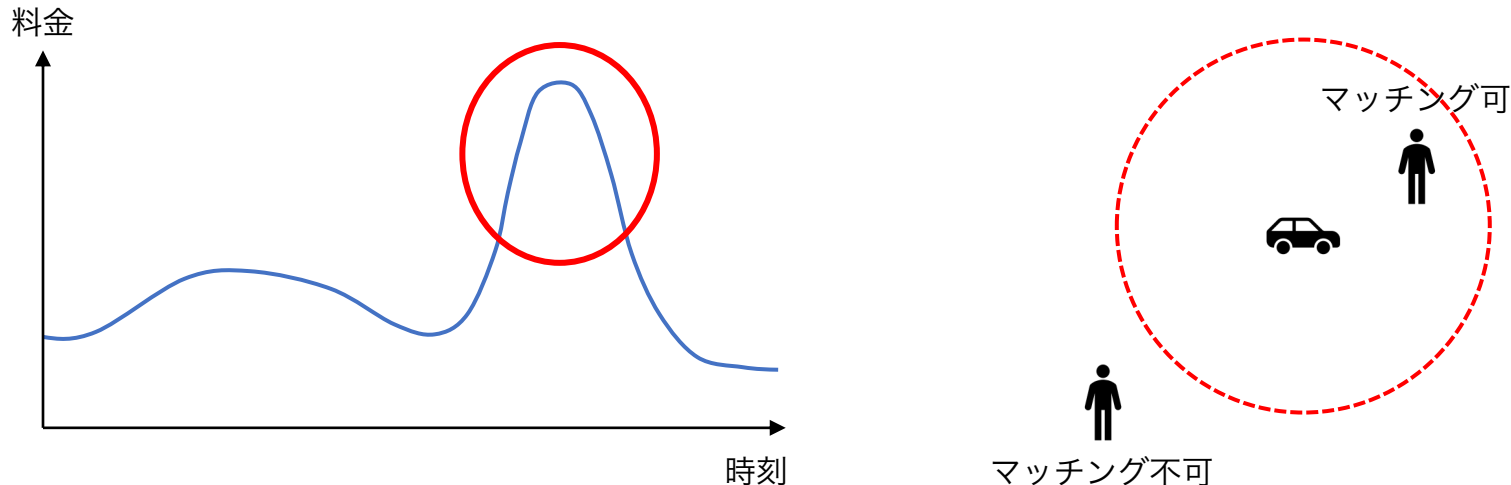
- WGCは主に利用者の需要が大きいつきに発生する

### ○解決策①：サージプライシング

- 過剰な需要を抑えるためにサージプライシングを実施
- 価格の吊り上げに対して批判が生じる場合がある

### ○解決策②：マッチング半径への制限

- サージプライシングに比べて批判が生じにくい
- マッチング半径を制限しても供給曲線の後屈は発生する（4.で説明）



# 3. 等方的e-hailing市場における後屈型供給曲線

## ■street-hailingの供給曲線

- street-hailingにおいては、**迎車の車両は存在しない**  
$$N = N^v + tQ$$
- street-hailingにおいては、車両と利用者とのマッチングは**相互探索**により実現するので、トリップ供給率 $Q$ は空車の車両の密度 $N^v$ と乗車前の利用者の密度 $N^r$ との両方に依存する

乗車前の利用者の密度

$$Q = M(N^v, N^r)$$

where  $\frac{\partial M}{\partial N^v} > 0, \frac{\partial M}{\partial N^r} > 0$

↓

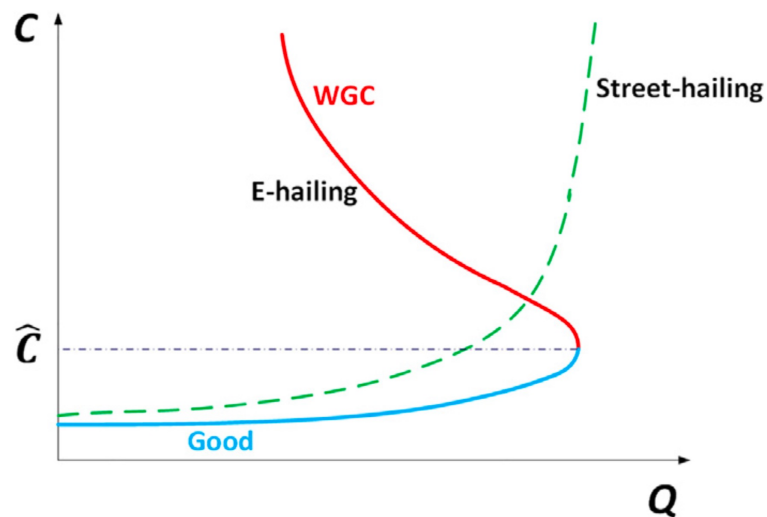
$$N = N^v + tQ$$
$$N^r = w^c Q = Q w_s^{-1}(C)$$

$$Q = S_s(C) = M(N - tQ, Q w_s^{-1}(C))$$

### 命題2

供給関数 $S_s(C)$ は $C$ について単調増加する。

street-hailingの供給曲線は後屈しない

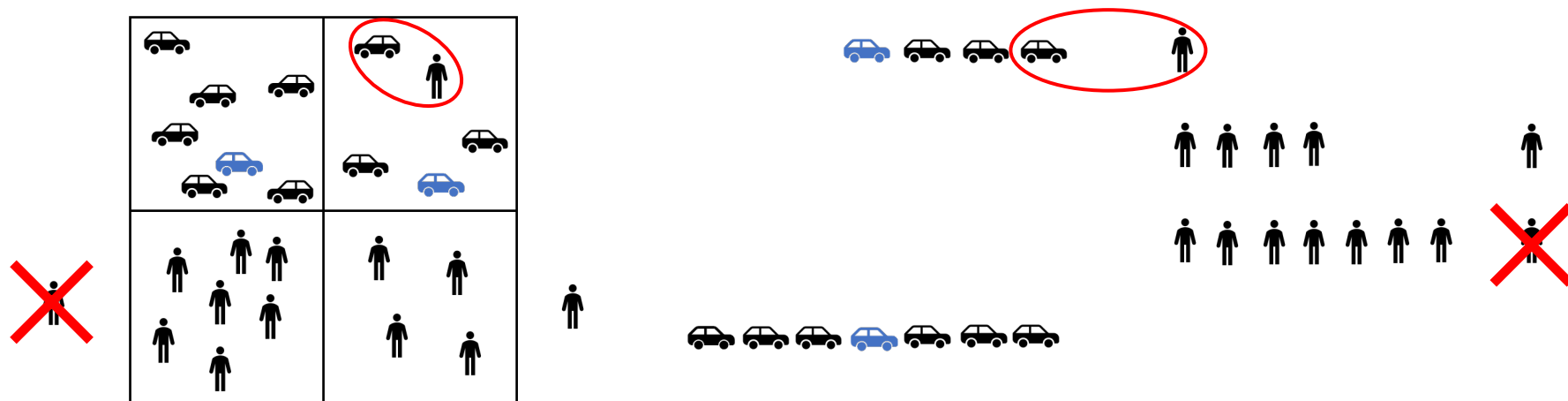




## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■等方的市場の両端待ち行列モデル

- 空車の車両の到着率 $\lambda^t$ が利用依頼の到着率 $\lambda^c$ よりも小さい場合を考える
- 等方的空間を面積 $A$ のブロックに分割（マッチング半径は $\sqrt{A}$ スケール）
- 空車の車両が存在する状態で利用依頼が入った場合は、最寄りの空車の車両とマッチングする
- 空車の車両がない場合は、利用依頼は仮想的な待ち行列に加わり、新たに到着した空車の車両とマッチングする
- 利用者の期待待ち時間が閾値 $w_0^c$ を超えたら、利用依頼は待ち行列に加わらない（キャンセル）
- 車両の期待待ち時間が閾値 $w_0^t$ を超えたら、そのブロック内の車両のいずれかが別のブロックに移動する

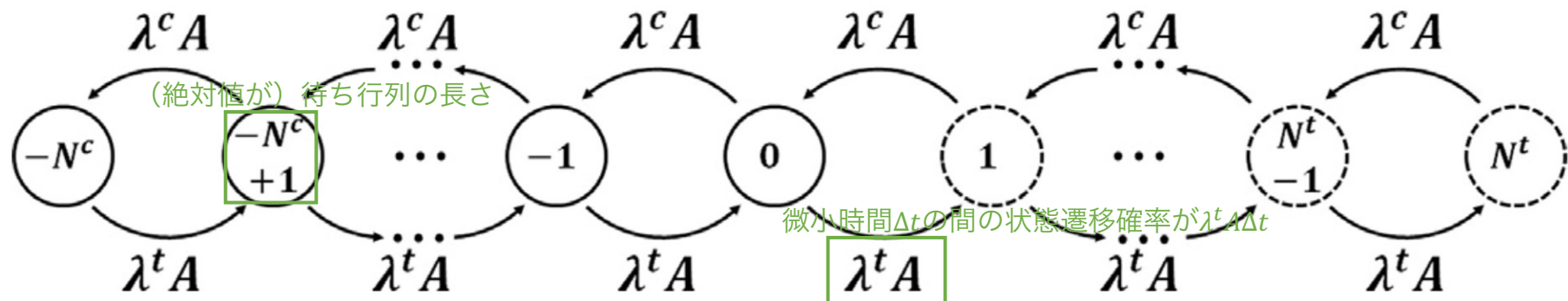


# 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

## ■等方的市場の両端待ち行列モデル

$N^c = A\lambda^t w_0^c$  : 利用者の行列の長さの最大値

$N^t = A\lambda^c w_0^t$  : 車両の行列の長さの最大値



利用者待ち行列が発生している状態

車両待ち行列が発生している状態

- 定常状態において、以下の式が成り立つ。

状態*i*の定常状態確率

$$A\lambda^t \cdot \pi_i = A\lambda^c \cdot \pi_{i+1} \quad i \in \{-N^c, N^t - 1\} \text{ 状態集合 } \Omega = \{-N^c, -N^c + 1, \dots, N^t\}$$

$$(A\lambda^c + A\lambda^t) \cdot \pi_i = A\lambda^c \cdot \pi_{i+1} + A\lambda^t \cdot \pi_{i-1} \quad i \in \Omega \setminus \{-N^c, N^t\}$$

$$\sum_{i=-N^c}^{N^t} \pi_i = 1$$



$$\pi_i = \frac{\rho^{i+N^c} \cdot (1 - \rho)}{1 - \rho^{N^c+N^t+1}}$$

where  $\rho = \frac{\lambda^t}{\lambda^c} < 1$

## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■ マッチング半径がシステムの性能に与える影響

- 深刻な供給不足にある状況を考える ( $\rho \ll 1$ )
- 空車の状態は短時間であるので、**車両のブロック間の移動はないとする** ( $w_0^t = +\infty$ )

○ キャンセル確率： $p_a$

$$p_a = \pi_{-N^c} \approx 1 - \rho$$

○ 利用者の平均マッチング待ち時間 (=待ち行列の平均待ち時間)： $w^c$

$$w^c = w_0^c \cdot \left(1 - \frac{\rho + \rho^2 + \dots + \rho^{N^c}}{N^c}\right) = w_0^c \cdot \left(1 - \frac{\rho + \rho^2 + \dots + \rho^{A\lambda^t w_0^c}}{A\lambda^t w_0^c}\right)$$

○ 平均配車待ち時間： $w^m$

$$w^m = \frac{\sqrt{A}}{\boxed{v}} \cdot \left[ d(1) - \rho^{A\lambda^t w_0^c} \cdot \left( d(1) - \frac{1-\rho}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^{+\infty} \boxed{d(i)} \cdot \rho^i \right) \right]$$

車両の平均速度 i台の空車の車両があるときの最寄りの車両までの平均最短距離

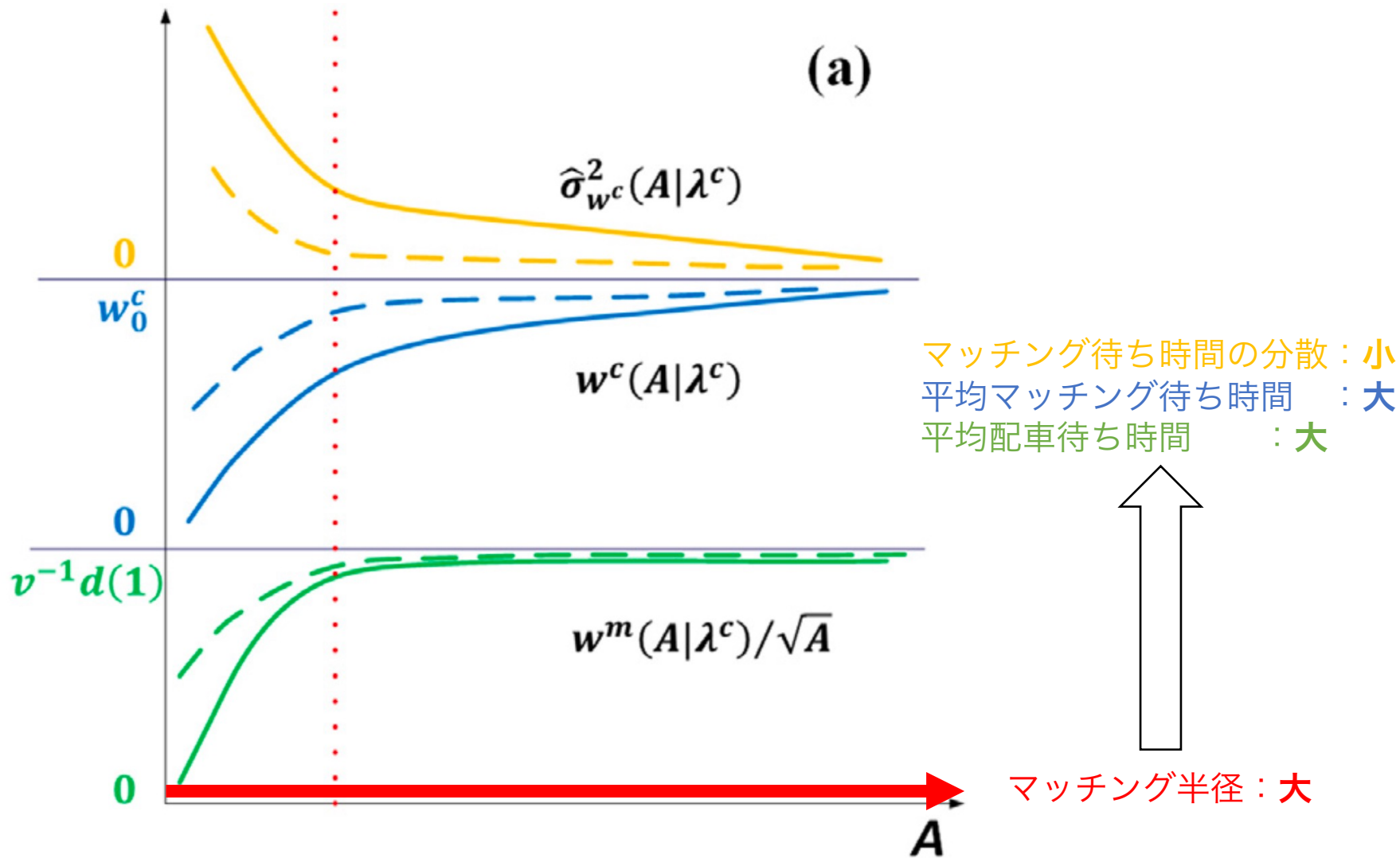
○ 利用者のマッチング時間の分散 (連続近似値)： $\hat{\sigma}_{w^c}^2$

$$\hat{\sigma}_{w^c}^2 = w_0^{c^2} \cdot \left[ 1 - \frac{(\rho^{N^c} - \ln \rho^{N^c})^2 - 1}{\ln^2 \rho^{N^c}} \right] = w_0^{c^2} \cdot \left[ 1 - \frac{(\rho^{A\lambda^t w_0^c} - \ln \rho^{A\lambda^t w_0^c})^2 - 1}{\ln^2 \rho^{A\lambda^t w_0^c}} \right]$$

全て**A**に関する**1変数関数**となる

## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■ マッチング半径がシステムの性能に与える影響



## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■ マッチング半径と供給曲線との関係

- 以下の2式を解くことで供給関数 $S_e^t(C)$ が求まる

$$N = \lambda^t \cdot w^m(\lambda^t | \lambda^c, A) + \lambda^t \cdot t = \lambda^t \cdot [w^m(\lambda^t | \lambda^c, A) + t]$$
$$C = W_e(w^c(\lambda^t | \lambda^c, A), w^m(\lambda^t | \lambda^c, A))$$

- $S_e^t(C)$ を直接求めることはできないので、 $\lambda^c$ を変化させたときの $\lambda^t$ 及び $C$ の変化を見ることで、供給関数の性質を調べる



#### 定理1

マッチング半径が固定されていれば、供給曲線は後屈したままである。

#### 定理2

マッチング半径が小さくなれば、供給曲線の後屈は緩やかになる。マッチング半径が小さい方が、同コストでより多くの供給がなされる。

#### 定理3

すべての供給曲線について、供給曲線をより外側に押しやるようなより小さいマッチング半径が常に存在する。

## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■マッチング半径と供給曲線との関係

#### 定理1

マッチング半径が固定されていれば、供給曲線は後屈したままである。

#### 定理2

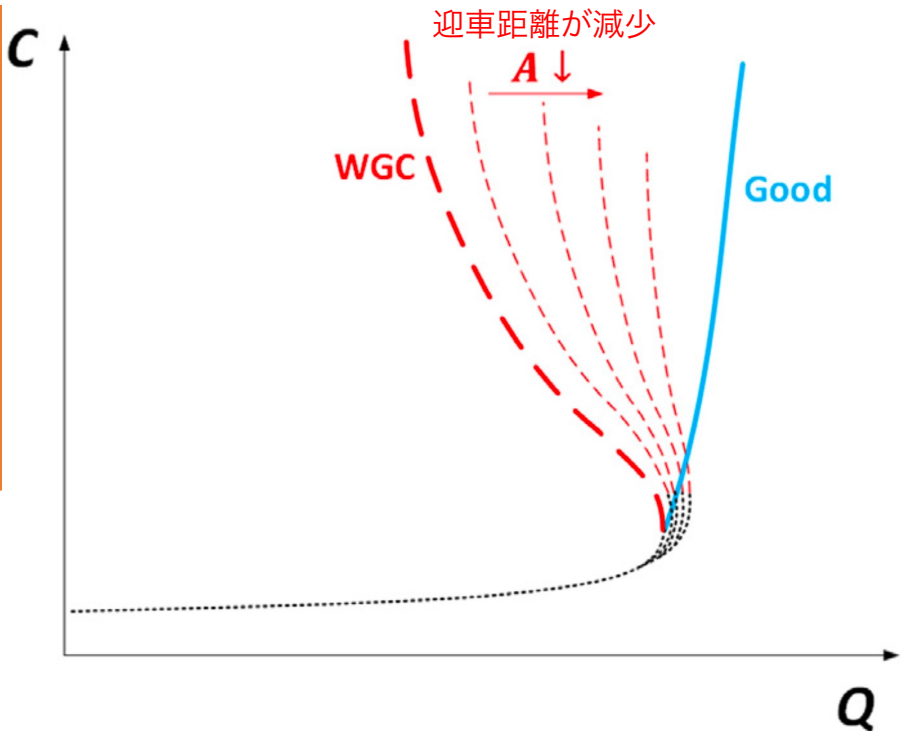
マッチング半径が小さくなれば、供給曲線の後屈は緩やかになる。マッチング半径が小さい方が、同コストでより多くの供給がなされる。



マッチング半径を小さくすれば供給曲線の後屈を緩やかにできるが、マッチング半径が一定である限り、常に後屈する

#### 定理3

WGCが発生しているすべての供給状態について、供給曲線をより外側に押しやるようなより小さいマッチング半径が常に存在する。



適応的にマッチング半径を調整することで、供給曲線の後屈を完全に解消できるような運用戦略がある！

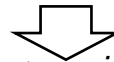
## 4. 有限マッチング半径の等方的e-hailingシステムにおける供給曲線

### ■空車車両がブロック間をランダムに移動することの影響

- 比較的緩やかな供給不足にある状況を考える ( $\rho \ll 1$ は成り立たない)
- 車両の待ち時間の閾値 $w_0^t$ を考慮し、車両のブロック間の移動を考える
- 移動先のブロックをランダムに決定すると仮定
- あるブロックに流入する車両 = 利用者の送迎をそのブロックで終えた車両 + 待ち時間が閾値を超えて別のブロックから移動してきた空車の車両

賃走車両の到着率    空車車両のブロック移動確率

$$\lambda_e^t = \lambda^t \cdot [1 - \pi_{N^t}(\lambda^t)]$$



$$\pi_i = (1 - \rho_e) \cdot \rho^{i+N^c} \quad \forall i \in \Omega$$

$$\text{where } \rho_e = \frac{\lambda_e^t}{\lambda^c}, \rho = \frac{\lambda^t}{\lambda^c}$$

#### 定理4

空車車両がランダムにブロック間を移動するとき、利用者の平均マッチング時間 $w^c$ と平均配車待ち時間 $w^m$ とは、車両の行列の長さの最大値 $N^t$ についての減少関数である。



空車車両がランダムにブロック間を移動すると、サービスレベルの低下を招く可能性がある

# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

---

- ライドヘイリング市場における異方性＝サービスの供給状態が、小区域におけるローカルな運用方法のみならず、**小区域同士の相互作用**にも依存する
  - ✓ 区域間の人や車両の移動があるため
- 実際の市場は等方的ではなく異方的

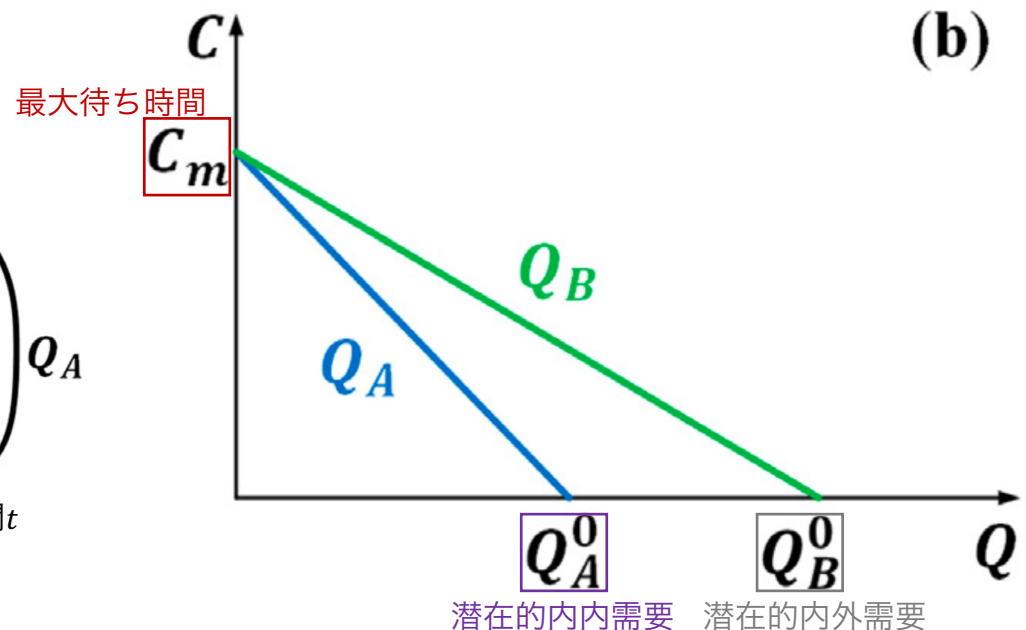
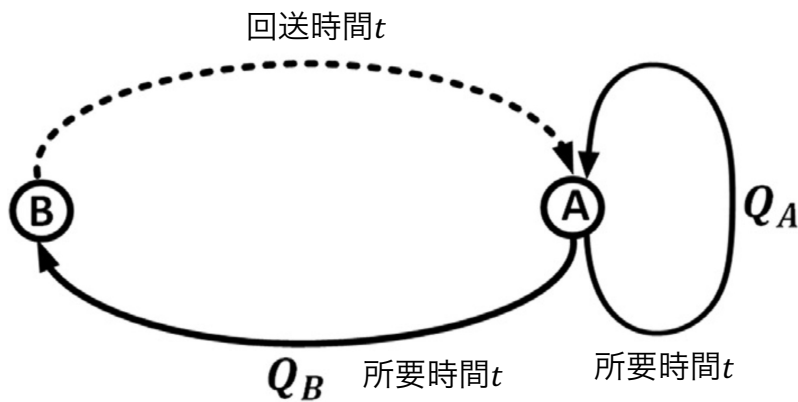
- 異方的市場においても供給曲線の後屈は生じる
- e-hailingとstreet-hailingとの両方で後屈は生じる
- ラッシュ時等、需要が一方向に集中しているときに生じやすい



# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

## ■2ノードネットワークによる例

- 2ノードネットワークを考える
- 内内需要 $Q_A$ と内外需要 $Q_B$ が存在（ノードBからは需要は生じない）
- 所要時間はいずれも $t$ だが、ノードBからノードAまでは回送時間 $t$ がかかる
- 配車時間は $t$ に比べて無視できるとする
- $Q_A \cdot Q_B$ は利用者の待ち時間 $C$ に対して線形に変化
- $Q_A^0 \cdot Q_B^0$ はサービスの価格と所要時間について承諾済みの人のみ含まれている



# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

## ■2ノードネットワークによる例

- 内内需要と内外需要とを**平等**に車両とマッチングする
- $Q_A^0$ を固定して $Q_B^0$ を変化させる
- $N > tQ_A^0$ としても一般性を失わない
  
- $0 \leq Q_B^0 \leq \frac{N-tQ_A^0}{2t}$  : 車両が余る→待ち時間 $C$ は一定のまま、供給 $S$ は $Q_B^0$ に応じて増加
- $Q_B^0 > \frac{N-tQ_A^0}{2t}$  : 車両が不足し、 $(Q_A, Q_B)$ は以下の式に従う

$$\begin{aligned} \frac{Q_A}{Q_A^0} &= \frac{Q_B}{Q_B^0} \\ tQ_A + 2tQ_B &= N \end{aligned}$$



|  |
|--|
| $C(Q_B^0) = C_m \cdot \left(1 - \frac{N}{t \cdot (Q_A^0 + 2Q_B^0)}\right)$ |
| $S(Q_B^0) = \frac{N}{t} \cdot \frac{Q_A^0 + Q_B^0}{Q_A^0 + 2Q_B^0}$        |

$Q_B^0$ の単調増加関数

$Q_B^0$ の単調減少関数

供給曲線に後屈が生じる

- 平等なマッチングをすることで、**長い回送時間**が生じる利用者とマッチングし、効率が低下する→**CSD (countryside delivery)**

# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

---

## ■2ノードネットワークによる例

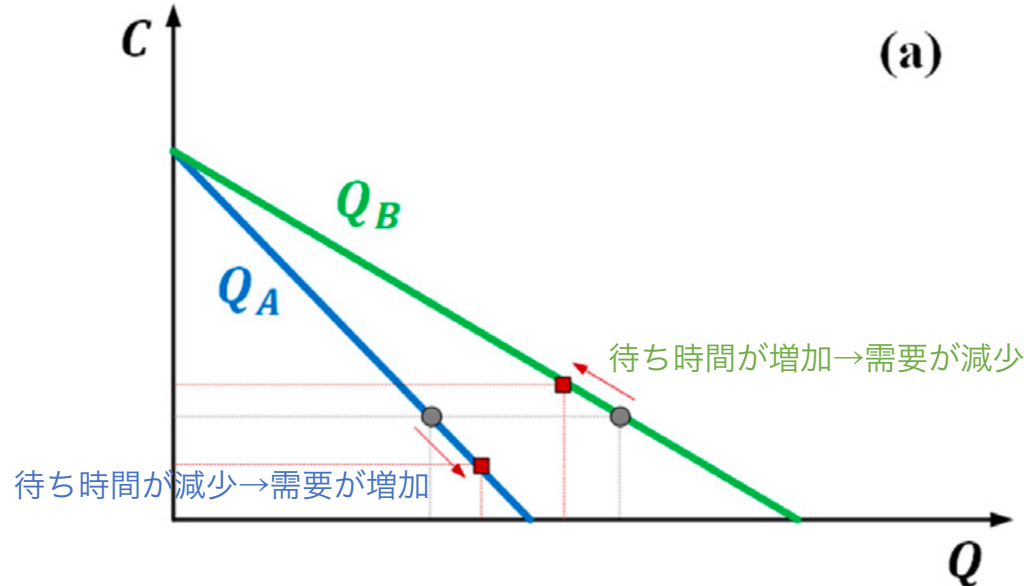
- CSDは、コンサートや試合・通勤ラッシュなど、需要に不均衡が生じており、各車両が hot spotから cold spotへ利用者を輸送しなければならないときに生じることが多い
- サージプライシングを無差別に課すと、代替交通手段に乏しい cold spot への需要を抑えることにつながらず、CSDを更に悪化させてしまう場合がある

# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

## ■CSDの解決策

### ○マッチングに優先順位をつける

- 行き先となる各ゾーンに、そのゾーンに到着後の**期待収益**を割り付ける
- **期待収益が高いゾーンに向かう需要を優先的にマッチング**する
  - ✓ 供給が不足しているゾーン (≒hot spot) の期待収益が高くなる
- hot spotの需要：待ち時間が減少→需要が増加
- cold spotの需要：待ち時間が増加→需要が減少



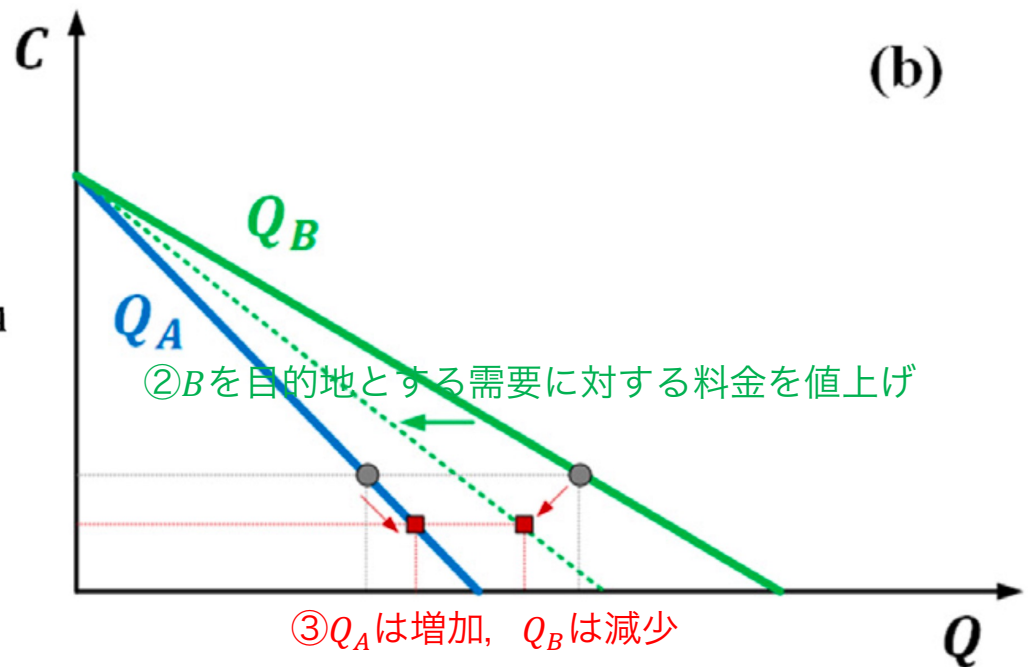
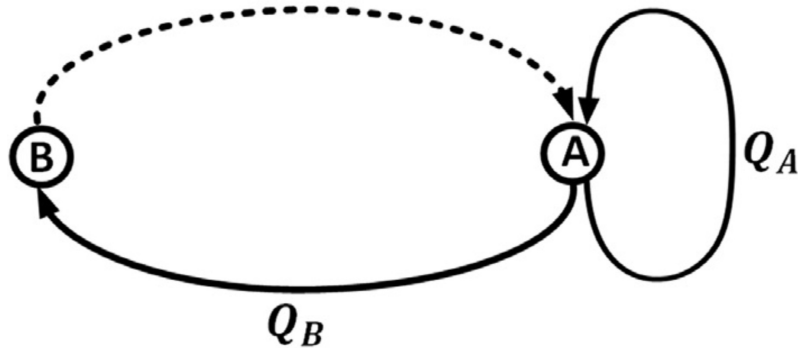
# 5. 異方的市場における後屈型供給曲線

## ■CSDの解決策

### ○目的地ごとに料金を差別化：Bimpikis et al. (2016)

- 収益を最大化させるためには、目的地において車両が利用可能であることと、出発地において車両が利用可能であることとの**相対的境界価値**を、ODごとの料金に反映させる必要がある

①Aにおいて車両が利用可能である限界価値の方が、Bにおいて車両が利用可能である限界価値よりも大きい



# 6. 結論

## 等方的市場

WGCの導入  
と性質

- Castillo et al. (2018)のモデル
- WGCは交通資源に無駄が生じており、供給曲線が後屈する

マッチング  
半径とWGS

- 両端待ち行列モデル
- マッチング半径を小さくすると、後屈が緩やかになる
- 適応的にマッチング半径を調整することで後屈を防止できる可能性

CSD

- 2ノードネットワークの例
- 平等にマッチングすることで供給曲線に後屈が生じる
- マッチングの優先順位付けや目的地別の料金の差別化により対応

## 異方的市場

## 今後の展望

- 後屈を防止するためのマッチング半径の調整方法の解明
- 車両の移動をより現実に近い形でモデル化
- 実データを使ってマッチングの失敗の存在と影響を分析する
- より多くの変数を入れ込んだより現実に近い形で市場をモデル化