



Proud to be a Japanese!

エネルギー環境論  
担当教官: 谷本 潤 教授

第7回講義

進化ゲームから社会物理学へ



# 感染症に対するリスク評価が 社会ネットワーク上における 自発的ワクチン接種行動に及ぼす影響

九州大学大学院 総合理工学府  
環境エネルギー工学専攻

福田 枝里子

# 発表内容

## 1. 研究背景

- ・感染症の蔓延とワクチン接種
- ・ワクチン接種ジレンマ

## 2. モデル

- ・ワクチン接種ゲーム
- ・戦略適応方法
- ・シミュレーション条件

## 3. 結果と考察

- ・個人ベースリスク評価モデル
- ・戦略ベースリスク評価モデル: 正方格子
- ・戦略ベースリスク評価モデル: BA-SF

## 4. まとめと今後の展望

# 1. 研究背景 感染症の蔓延とワクチン接種

## 感染症の蔓延



⇒ **先制的ワクチン接種**が有効

- 感染の予防や重篤化を防ぐことが可能
- ワクチン接種は個人の自主性に委ねられている
- ワクチン接種により感染症を完全に根絶させた例は天然痘のみ

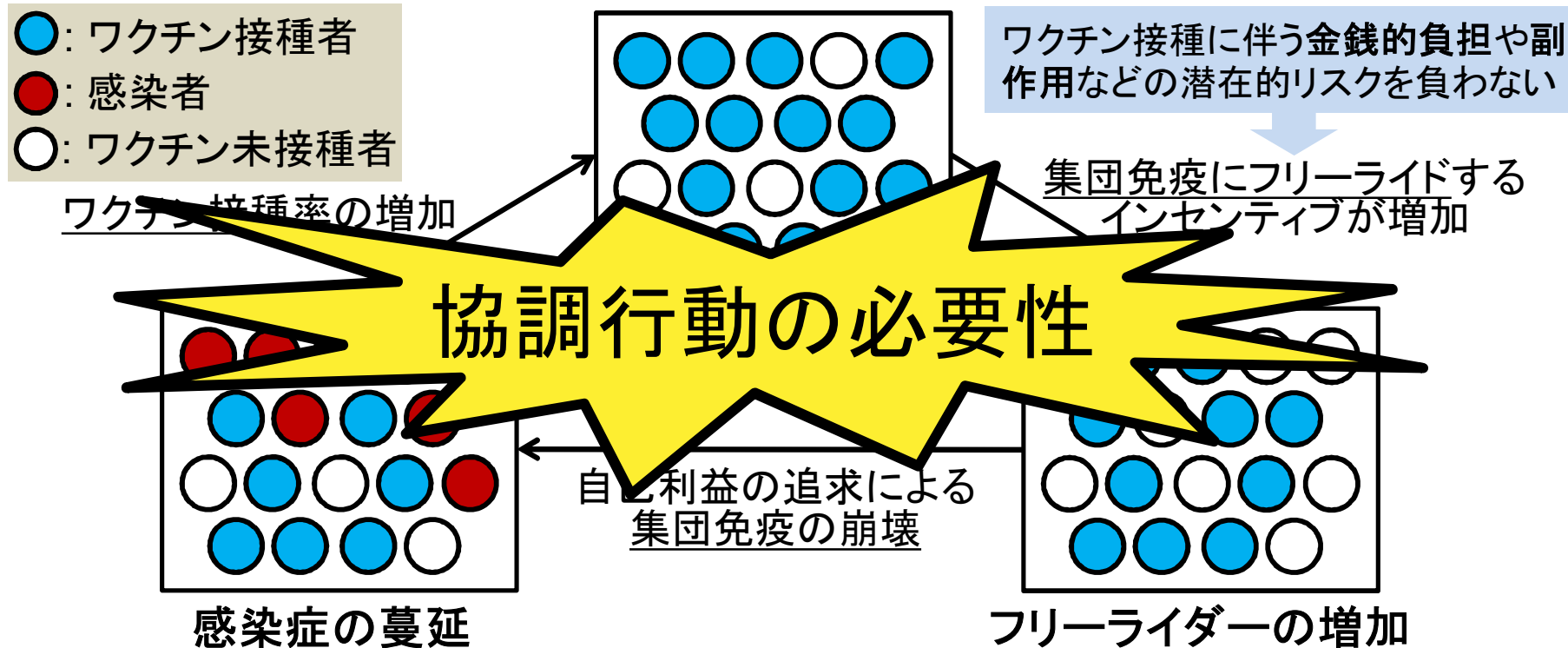
(1980年 世界保健機構が宣言)

根絶を困難にしているのは…

**「疫学固有のパラドックス」**

# 1. 研究背景 集団免疫とワクチン接種ジレンマ

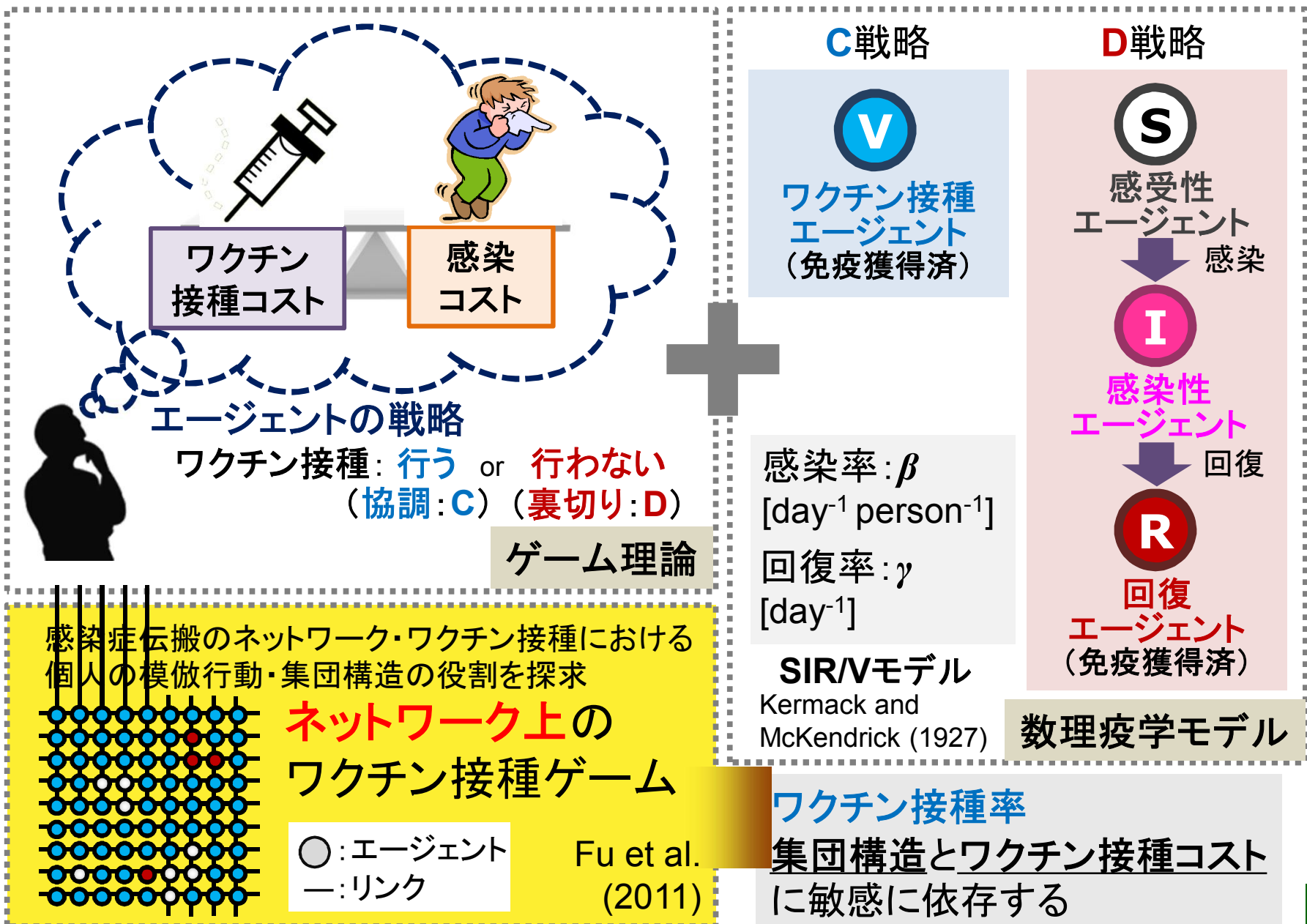
- 個人免疫: 個人がワクチン接種を行うことで免疫を獲得し, 発症や重篤化を防ぐ
- 集団免疫**: 集団の接種率がある閾値を超えた結果, 感染症が発生したとしてもその蔓延を防ぐことが可能となるような状態⇒**公共財的性質**



公衆衛生上有用な施策を提言するためには・・・

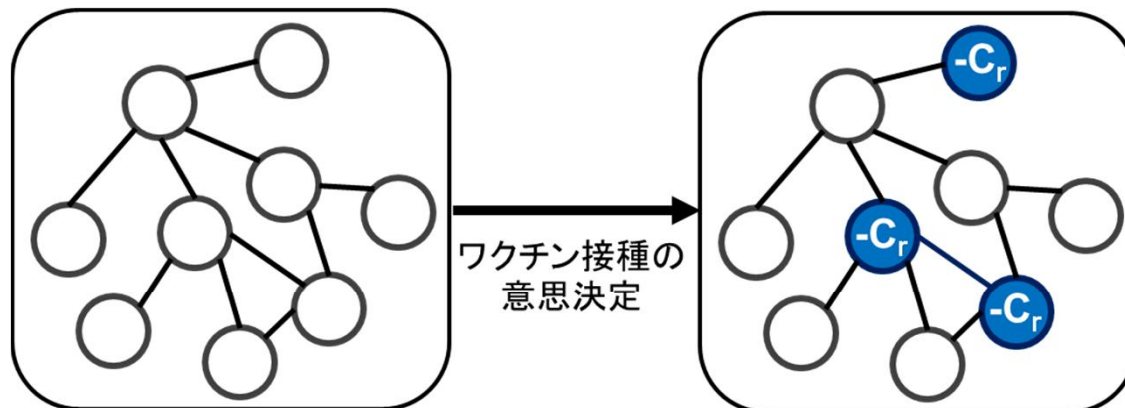
ワクチン接種率・集団全体の罹患率・個人のワクチン接種行動  
がもたらす結果を動的かつ定量的に再現・予測する必要がある

## 2. モデル ワクチン接種ゲーム

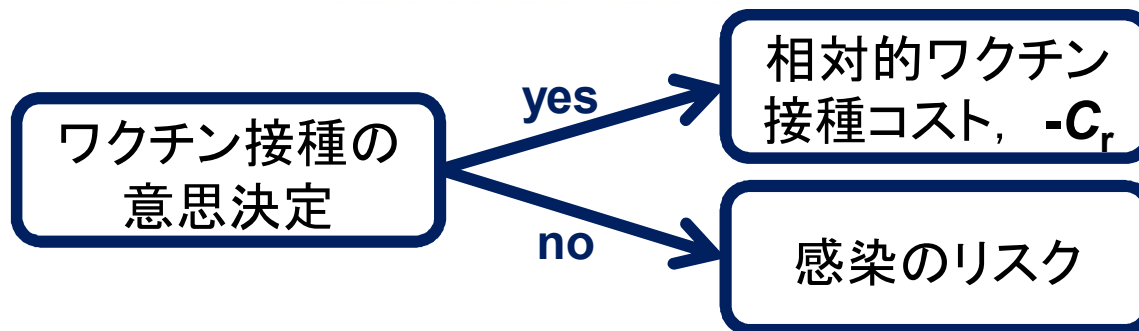


## 2. モデル ワクチン接種ゲーム

Fu et al. (2011)



第1ステージ  
ワクチン接種キャンペーン

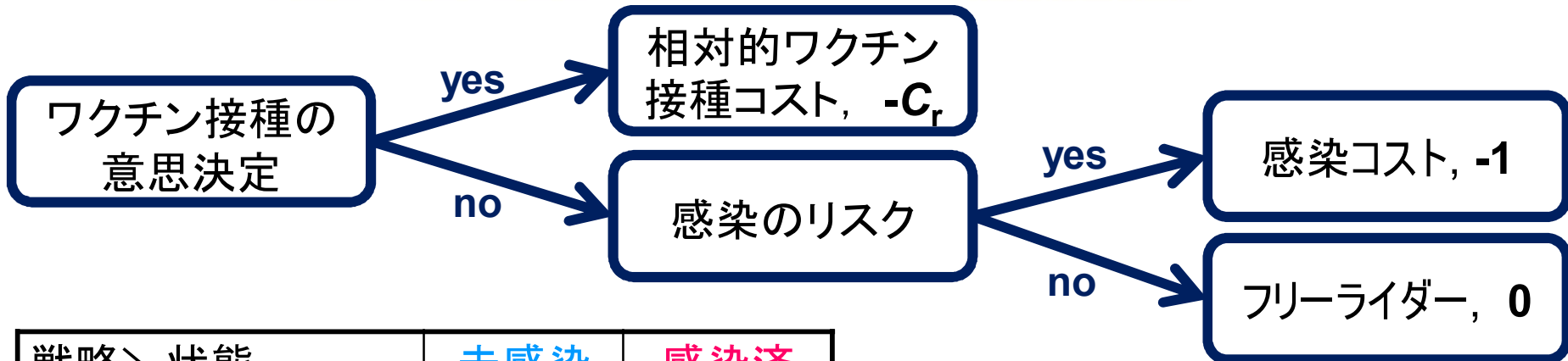
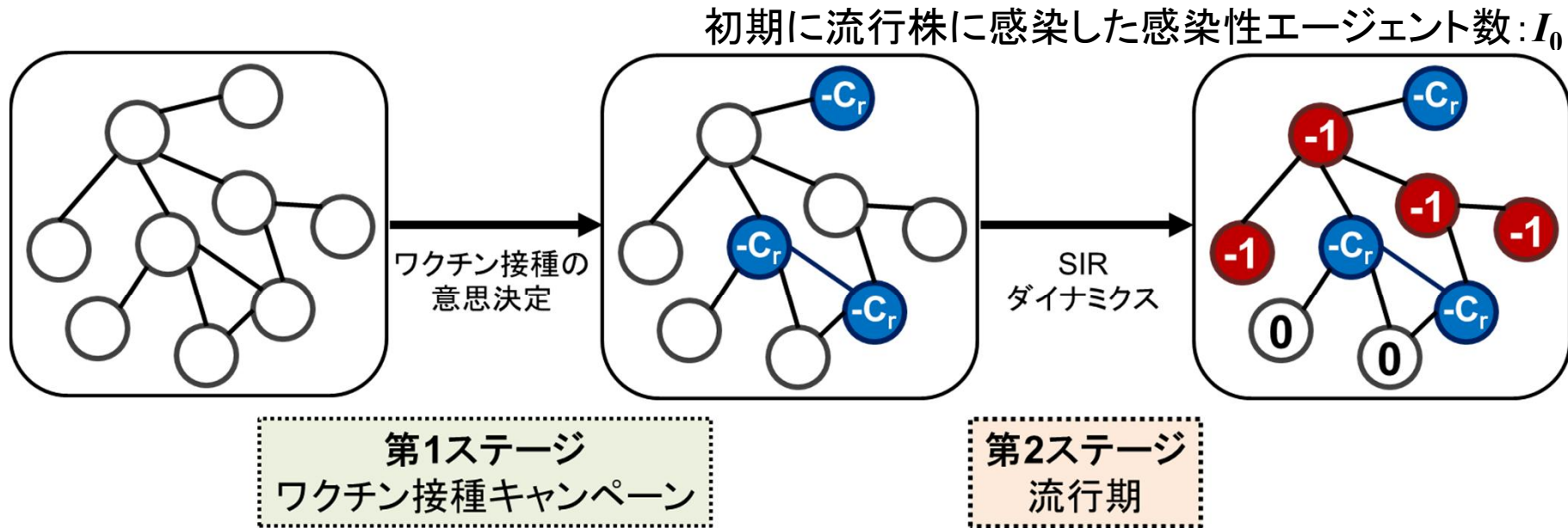


戦略	
ワクチン接種 (C)	$-C_r$
ワクチン非接種 (D)	感染のリスク

$C_r = C_v / C_i$  ( $C_r \in [0, 1]$ ,  $C_i = 1$ )  
 $C_v$ : ワクチン接種コスト,  $C_i$ : 感染コスト

## 2. モデル ワクチン接種ゲーム

Fu et al. (2011)

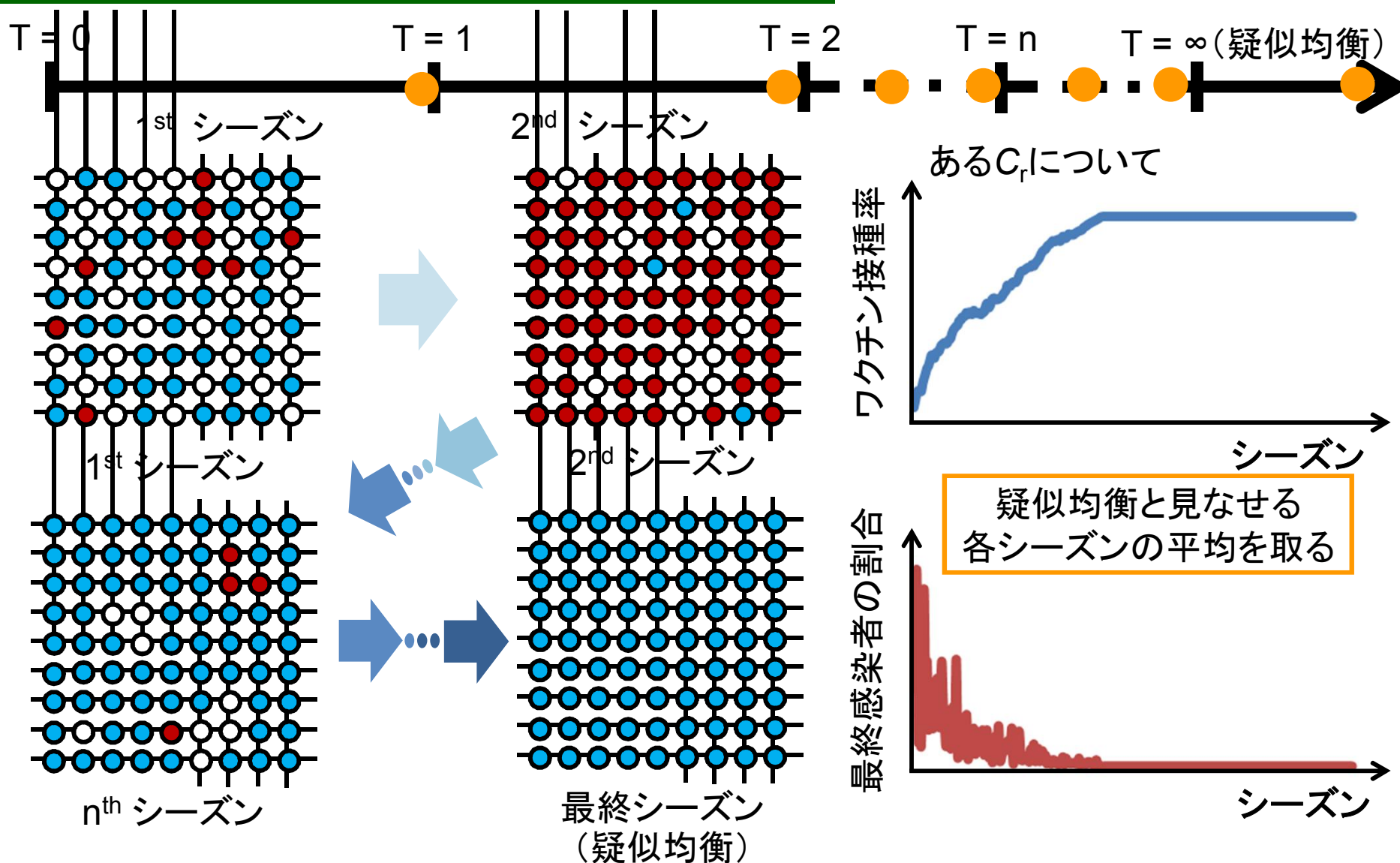


戦略 \ 状態	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● $-C_r$	／
ワクチン非接種 (D)	○ 0	● -1

$C_r = C_v / C_i$  ( $C_r \in [0, 1]$ ,  $C_i = 1$ )  
 $C_v$ : ワクチン接種コスト,  $C_i$ : 感染コスト



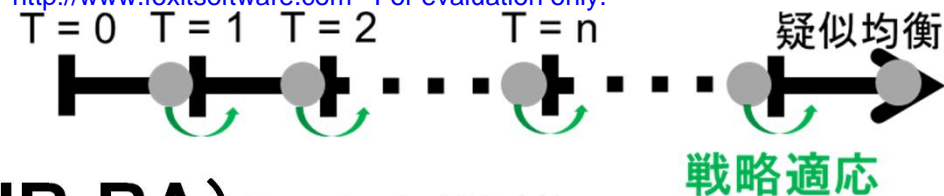
## 2. モデル ワクチン接種ゲーム



●: ワクチン接種エージェント ●: 感染済エージェント ○: フリーライダー

ある  $C_r (\in [0,1])$  に対しての **ワクチン接種率**・**最終感染者の割合** が得られる

## 2. モデル 戦略適応方法



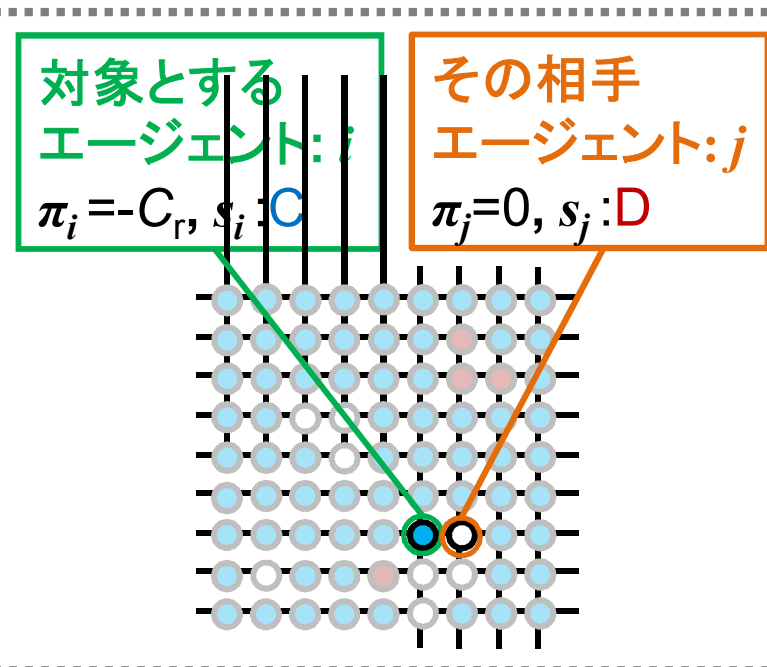
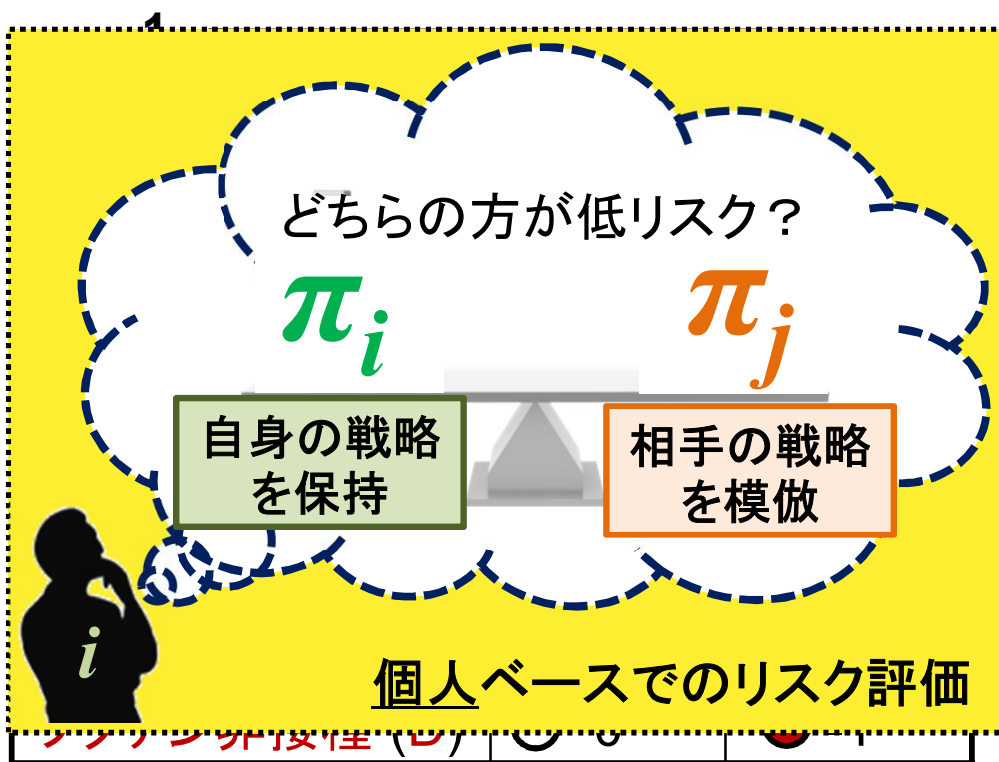
### 個人ベースでのリスク評価 (IB-RA) Fu et al. (2011)

自身の隣人の中から1人をランダムに選択し、両者の利得差をpairwise比較することによって確率的にその相手の戦略を模倣する. Szabo, G. and Toke, C. (1998)

$$P(S_i \leftarrow S_j) = \frac{1}{1 + \exp[(\pi_i - \pi_j) / \kappa]} \dots (1)$$

$\pi_i, \pi_j$ : 利得  
 $S_i, S_j$ : 戦略  
 $\kappa$ : 利得差に対する敏感度 ( $\kappa = 0.1$ )

↑ エージェントの非合理的な意思決定や勘違いなどを反映



## 2. モデル 戦略適応方法



マスメディア(テレビ, 新聞など)

- 人々の行動に影響を及ぼす潜在能力を持つ
- 感染症についての客観的な情報の提示を行うことができる

⇒ 適応的にワクチン接種を行う確率を調整することが可能

### 2×2ゲーム(囚人のジレンマ)

戦略適応時に各エージェントが相手のエージェントの**戦略がもたらした平均利得の情報**を用いることで協調行動が促進される。

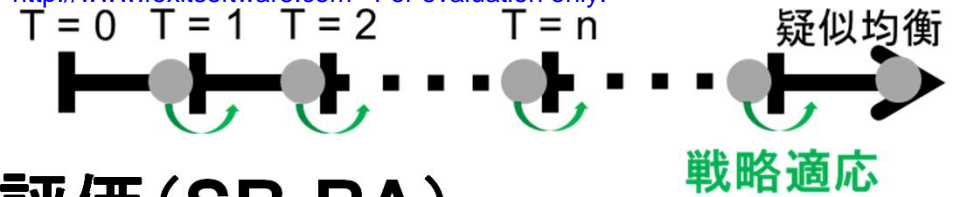


Shigaki et al. (2012)

ワクチン接種を行うか否かの**戦略がもたらした平均利得の情報**

⇒ 個人の**ワクチン接種行動**に影響を与えうる

## 2. モデル 戦略適応方法



### 提案: 戦略ベースでのリスク評価 (SB-RA)

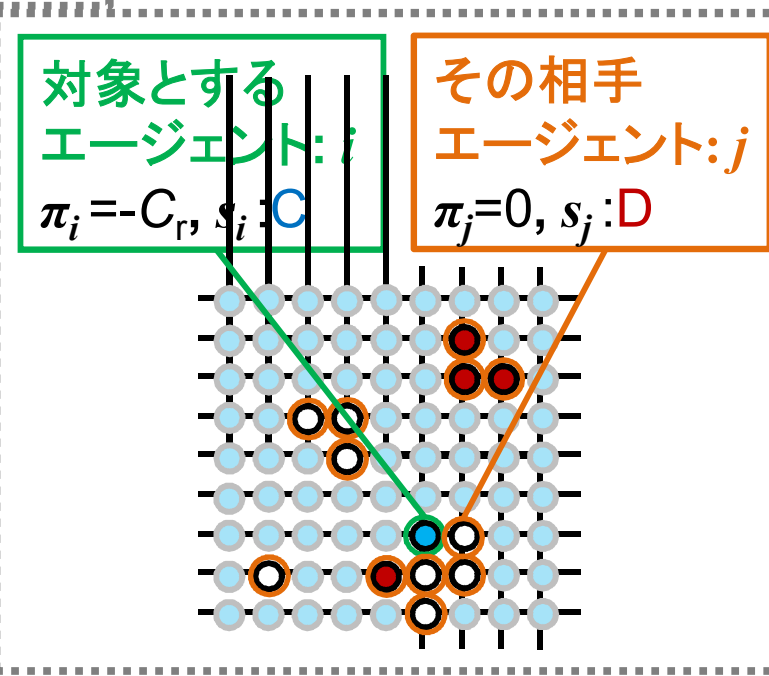
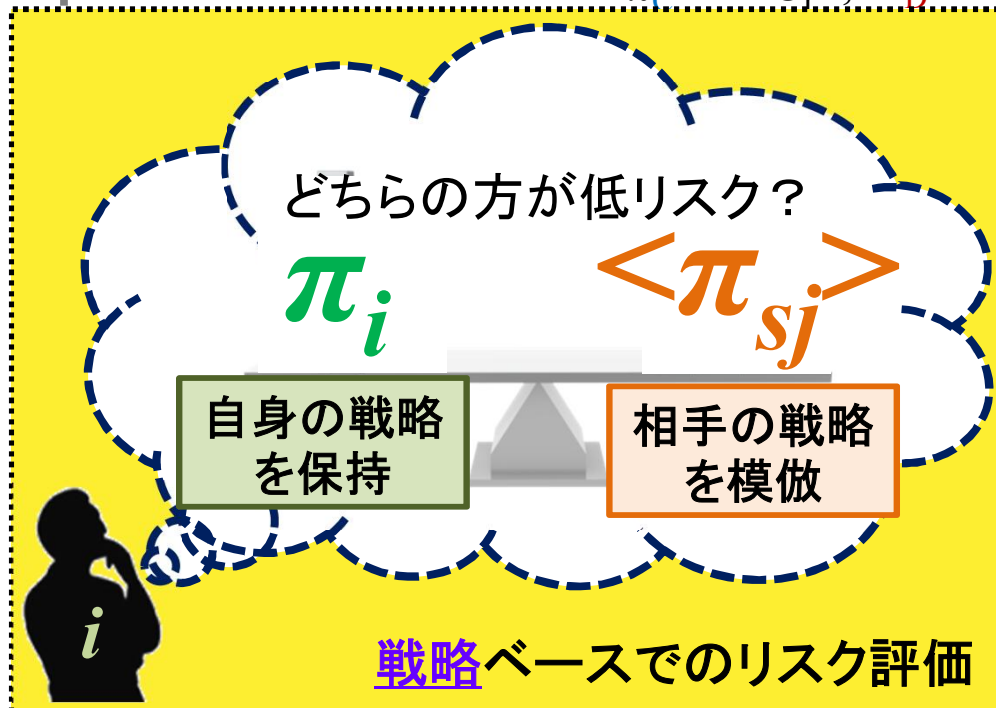
自身の隣人の中から1人をランダムに選択し、その相手の戦略がもたらした利得  $\langle \pi_{s_j} \rangle$  と自身の利得差を pairwise 比較することによって確率的にその相手の戦略を模倣する。

$$P(S_i \leftarrow S_j) = \frac{1}{1 + \exp[(\pi_i - \langle \pi_{s_j} \rangle) / \kappa]} \dots (2)$$

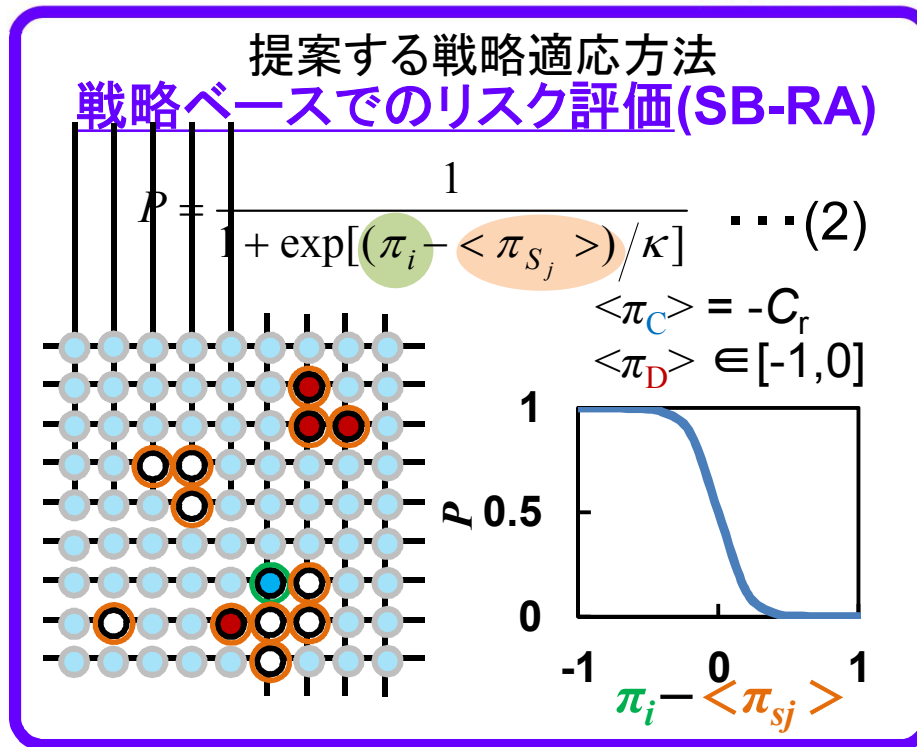
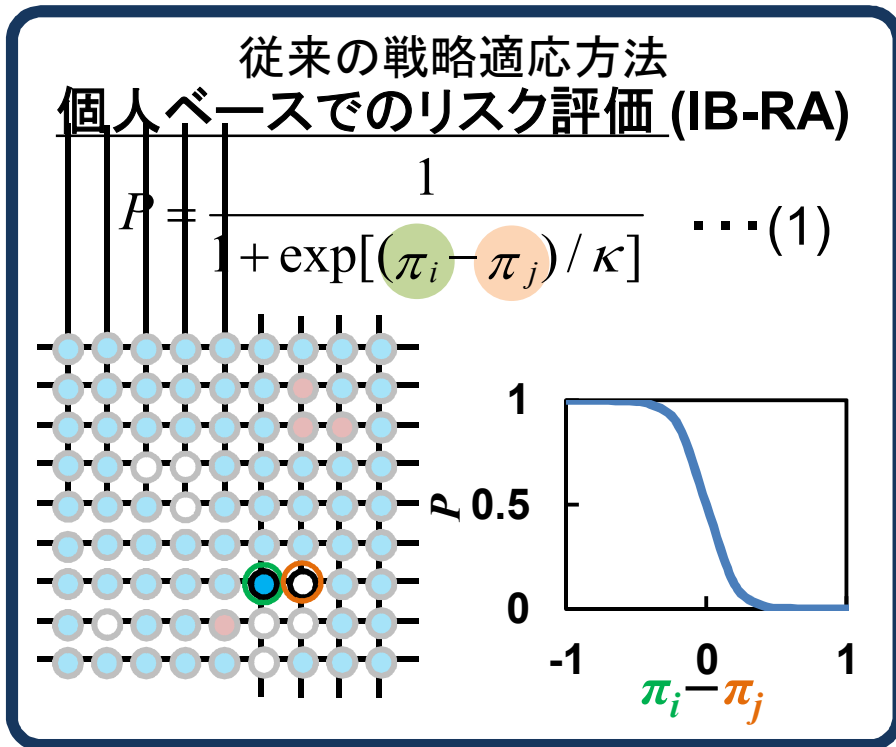
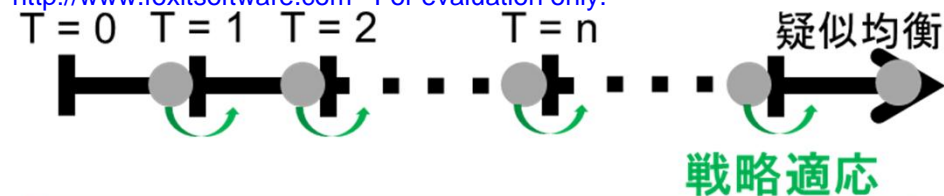
$$\langle \pi_C \rangle = -C_r, \langle \pi_D \rangle \in [-1, 0]$$

$\pi_i, \pi_j$ : 利得,  $s_i, s_j$ : 戦略  
 $\kappa$ : 利得差に対する敏感度 ( $\kappa = 0.1$ )

戦略  $s_j$  をとっているエージェントの利得の平均値



## 2. モデル 戦略適応方法



戦略 \ 状態	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● $-C_r$	△
ワクチン非接種 (D)	○ 0	● -1

・同じ確率を与える

ワクチン未接種  
エージェント

模倣

ワクチン接種  
戦略

・異なる確率を与える

ワクチン接種  
エージェント

模倣

ワクチン非接種  
戦略

## 2. モデル シミュレーション条件



### □ シミュレーションの流れ

ある $C_r$ について

#### 初期状態

ワクチン接種エージェントと未接種エージェントがランダムに分布

#### ワクチン接種ゲーム

第1ステージ: ワクチン接種ゲーム  
第2ステージ: 流行期

#### 戦略適応 (リスク評価)

翌年に接種するか否かを再度検討

疑似均衡に達する

#### 疑似均衡

ワクチン接種率と最終感染者の割合を得る

繰り返し  
ワクチン接種率や感染者の割合が更新される

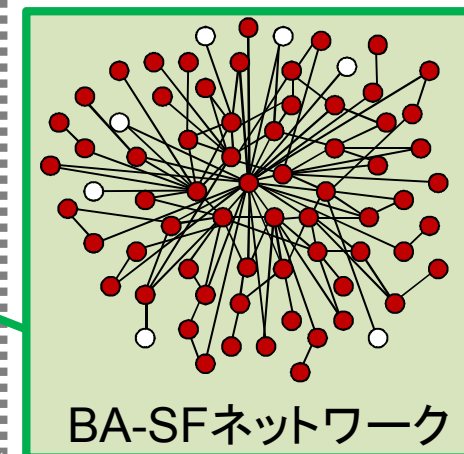
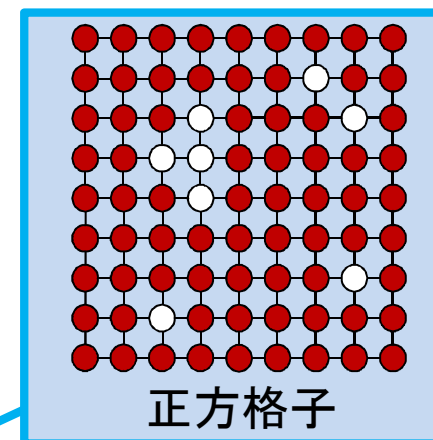
独立に100回の試行

## 2. モデル シミュレーション条件

### □ シミュレーション条件・パラメータ設定方法

- 集団サイズ:  $N = 4900$
- ネットワーク:
  - 正方格子 (von Neumann近傍)
  - BA-SFネットワーク (平均次数  $\langle k \rangle = 4$ )
- 戦略適応方法:
  - Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )
- 初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$
- 感染率: ← 感染リスクが等しくなるような値
  - 正方格子:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$
  - BA-SFネットワーク:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$
- 回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$  (平均感染日数: 3日)
- 初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$
- アンサンブル数: 100

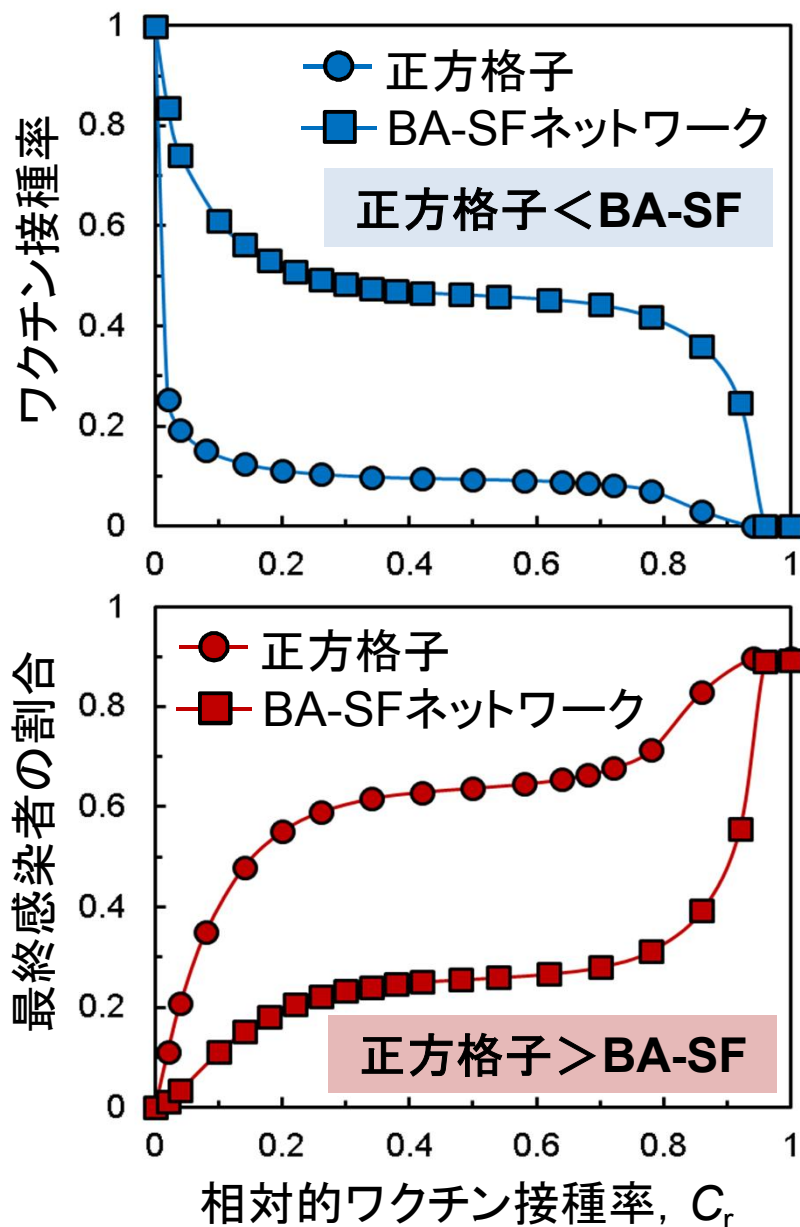
最終感染者の  
割合が約9割



SB-RA ( $\langle \pi_{s_j} \rangle$  の算出)

戦略  $s_j$  をとっているエージェントをサンプリングする割合: 100%

### 3. 結果と考察 個人ベースリスク評価モデル



集団サイズ:  $N = 4900$

ネットワーク: 正方格子 (von Neumann近傍)

BA-SFネットワーク ( $\langle k \rangle = 4$ )

戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較

( $\kappa = 0.1$ )

初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$

感染率: 正方格子:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$

BA-SFネットワーク:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$

回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$

初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$

アンサンブル数: 100

• SFネットワークの次数のべき性(不均一性)

より低い感染率でも疾病が蔓延しやすい

⇒ 集団免疫へのフリーライドが厳しい

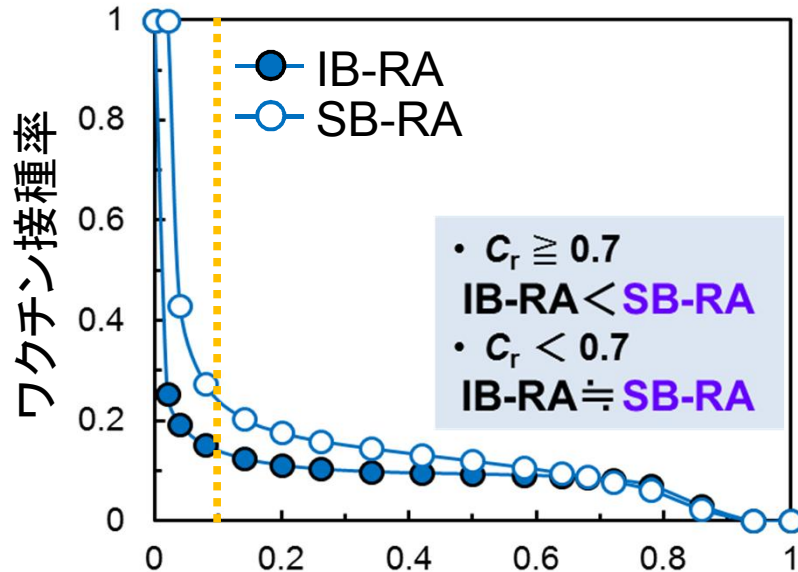
• 正方格子のような次数が均一なグラフ

平均パス長が大きいいため, 比較的集団中に疾病が拡大しにくい

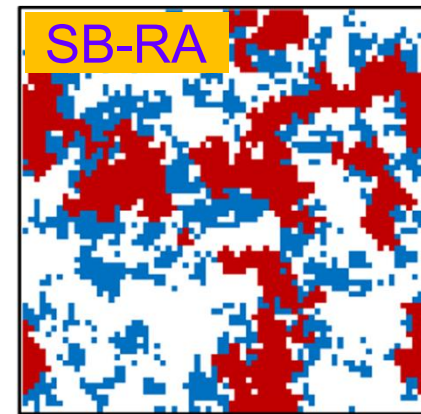
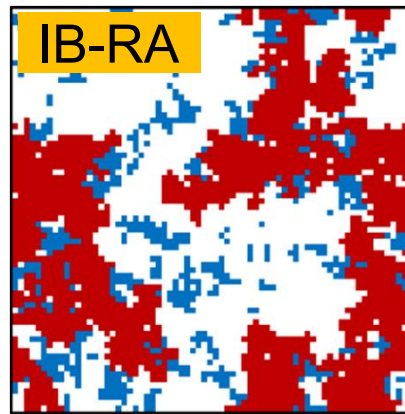
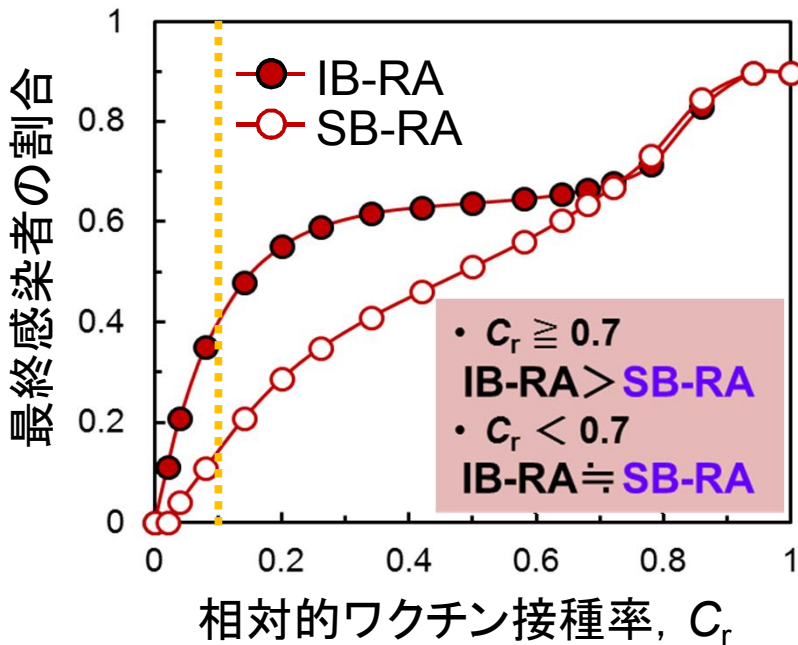
次数のべき性がBA-SFネットワーク上の  
エージェントの自主的なワクチン接種を促進



# 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: 正方格子



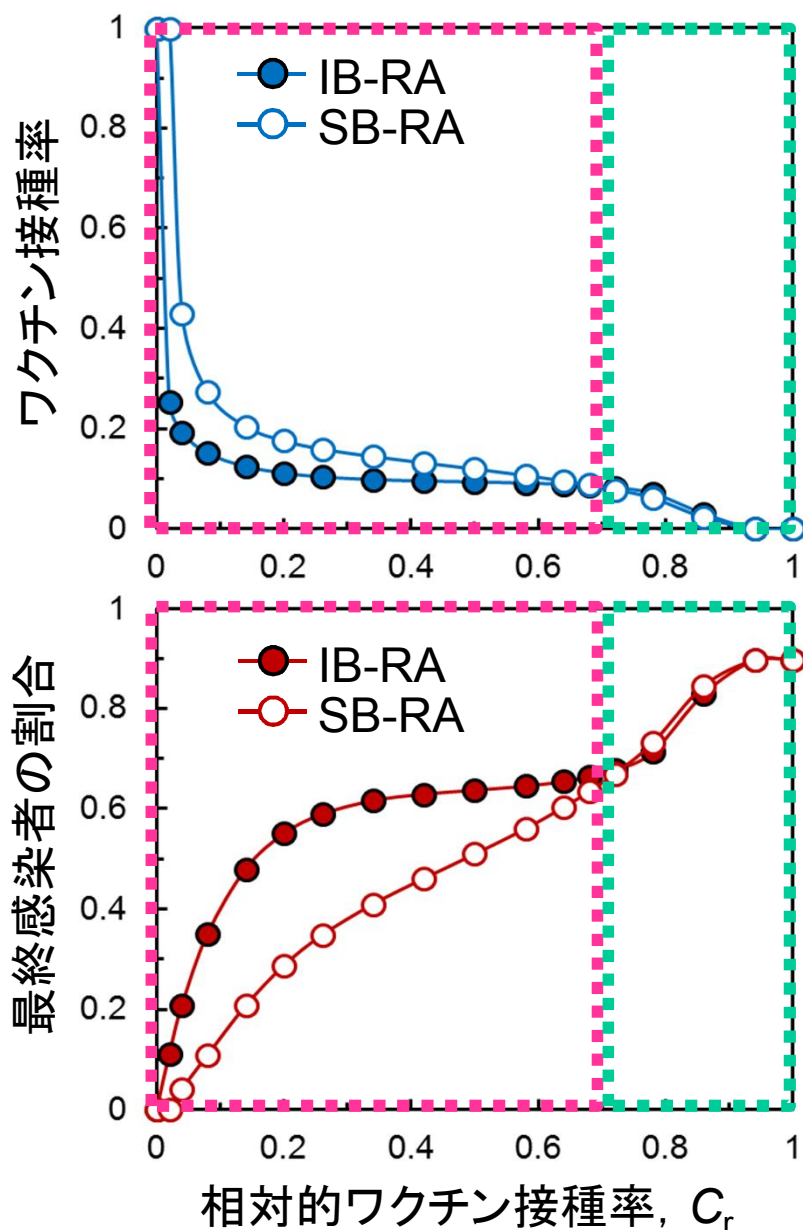
集団サイズ:  $N = 4900$   
ネットワーク: 正方格子 (von Neumann近傍)  
戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較  
( $\kappa = 0.1$ )  
初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$   
感染率:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$   
回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$   
初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$   
アンサンブル数: 100



均衡到達時のスナップショット( $C_r = 0.1$ )

■ : ワクチン接種エージェント  
■ : 感染済エージェント □ : フリーライダー

### 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: 正方格子



キーポイント

**C**戦略のエージェントがいかに自身の戦略を保持するか

正方格子上の感染症の蔓延の特性

小さい $C_r$ においても各エージェントは自主的ワクチン接種は行われず, 最終感染者の割合も比較的高い

•  $C_r$ : 小~中

$\Rightarrow -C_r > \langle \pi_{sj} \rangle$

相手がフリーライダー(利得0)場合

IB-RA: フリーライダーの戦略を模倣する可能性が高い

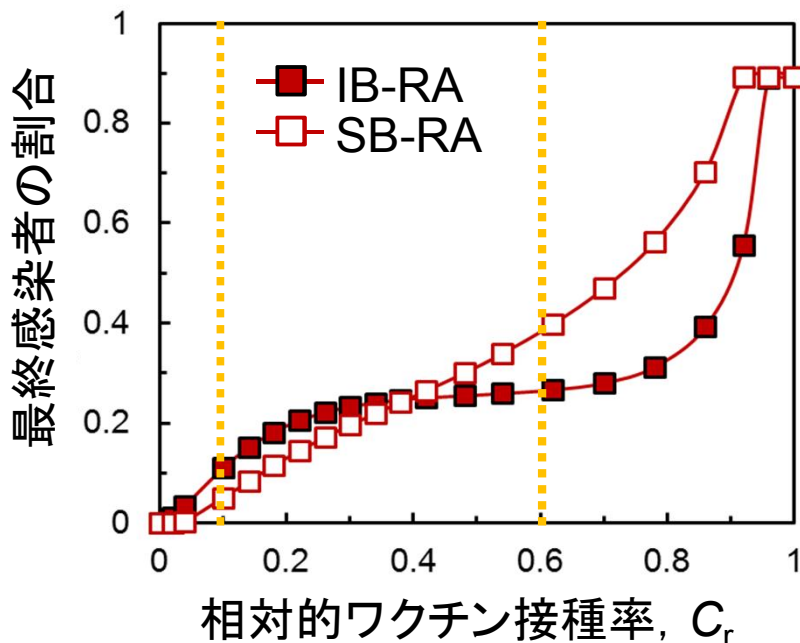
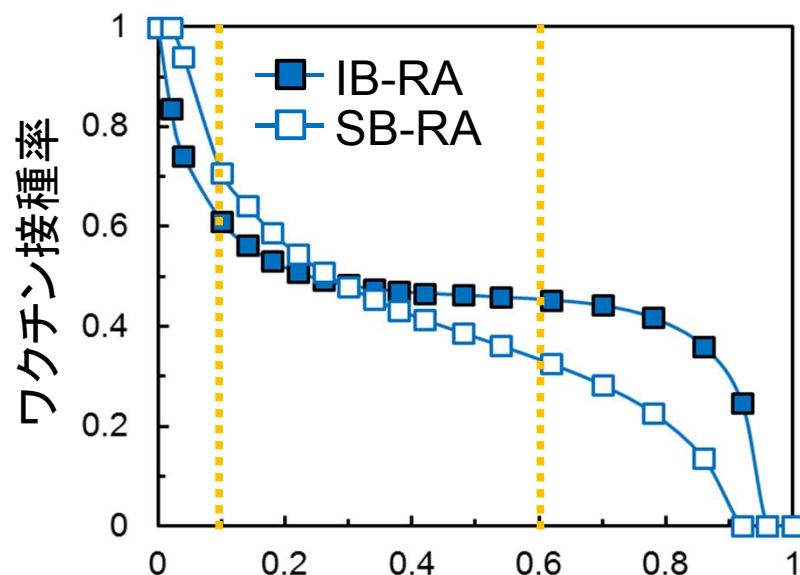
SB-RA: 自身の戦略を保持する可能性が高い

•  $C_r$ : 大

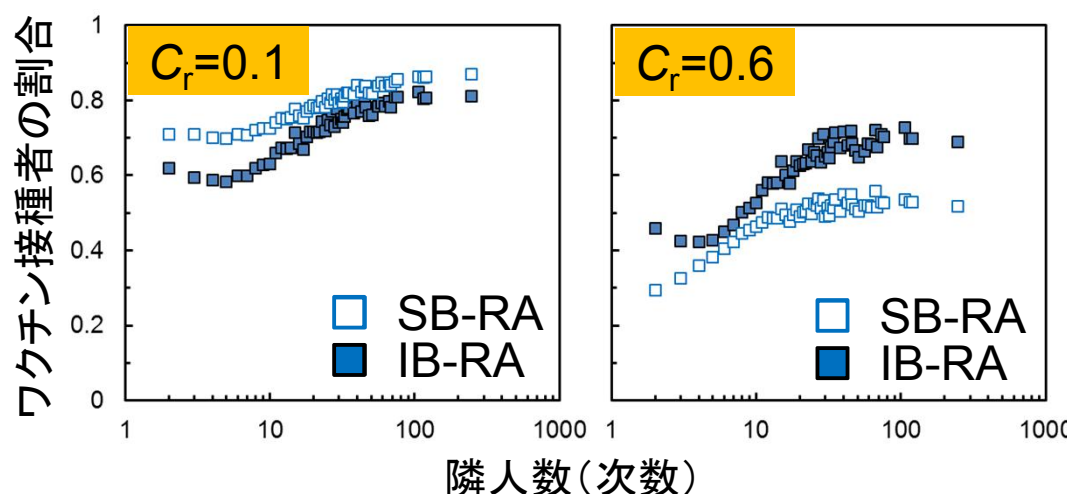
$\Rightarrow -C_r \doteq \langle \pi_{sj} \rangle$

SB-RA: 自身の戦略を保持しやすくなるような効果は期待できない

# 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: BA-SF

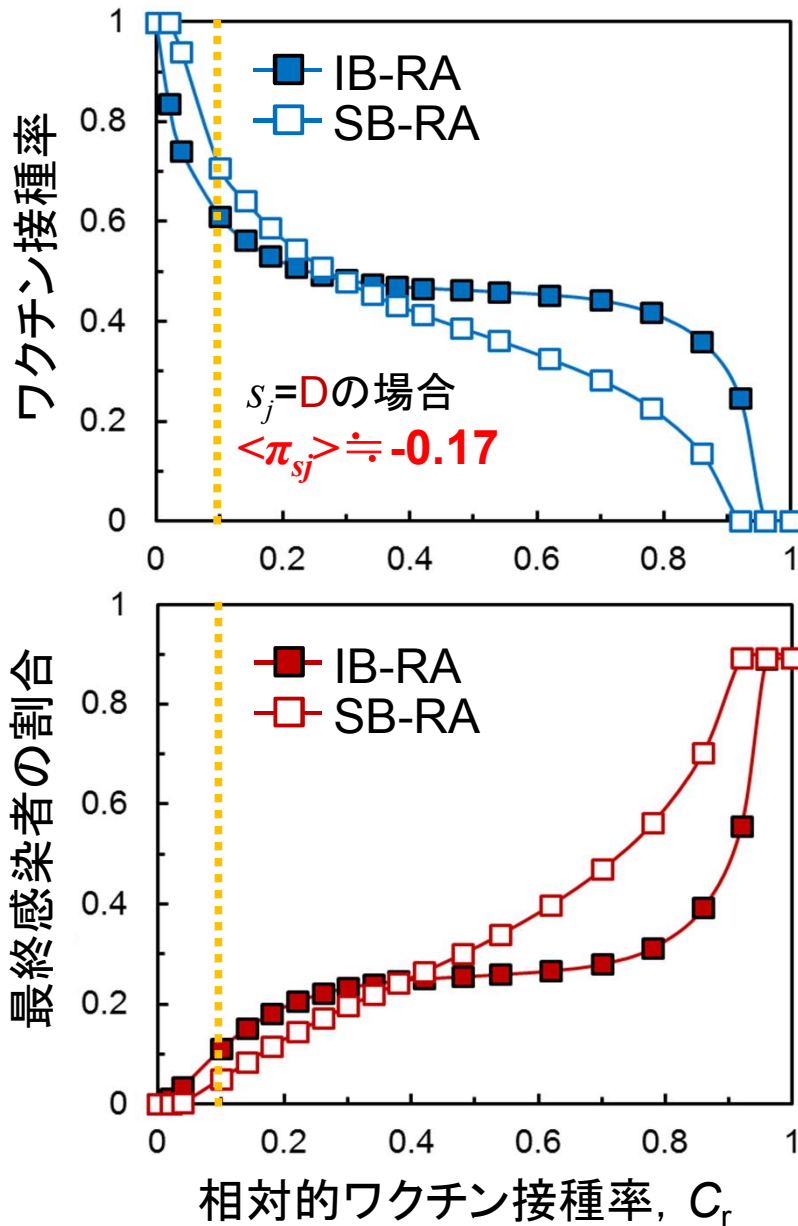


集団サイズ:  $N = 4900$   
ネットワーク: BA-SFネットワーク ( $\langle k \rangle = 4$ )  
戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )  
初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$   
感染率:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$   
回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$   
初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$   
アンサンブル数: 100



BA-SF上でのSB-RA  
 $C_r$ が小さい範囲では若干効果があるが,  $C_r$ がある程度以上大きくなるとむしろ**逆効果**

# 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: BA-SF

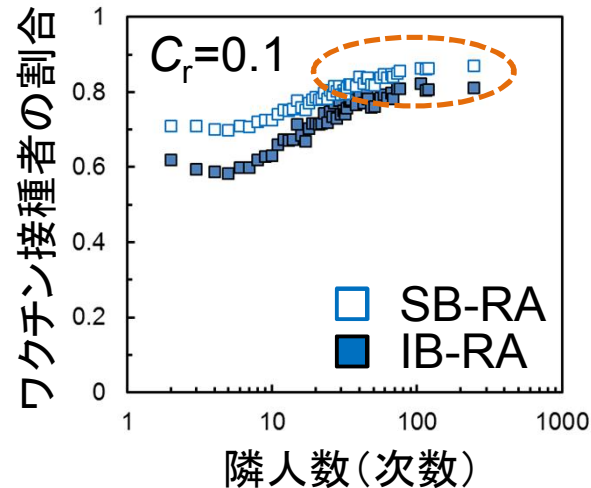


キーポイント

**C**戦略の高次数エージェントがいかに自身の戦略を保持するか

BA-SFの感染症の蔓延の特性

スーパースプレッターとなり得るハブの存在により, 疾病が蔓延しやすい



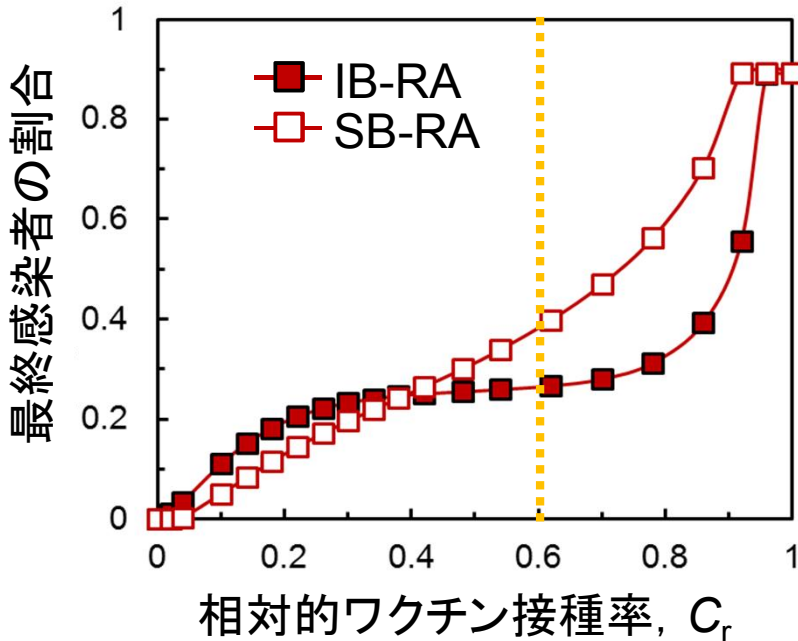
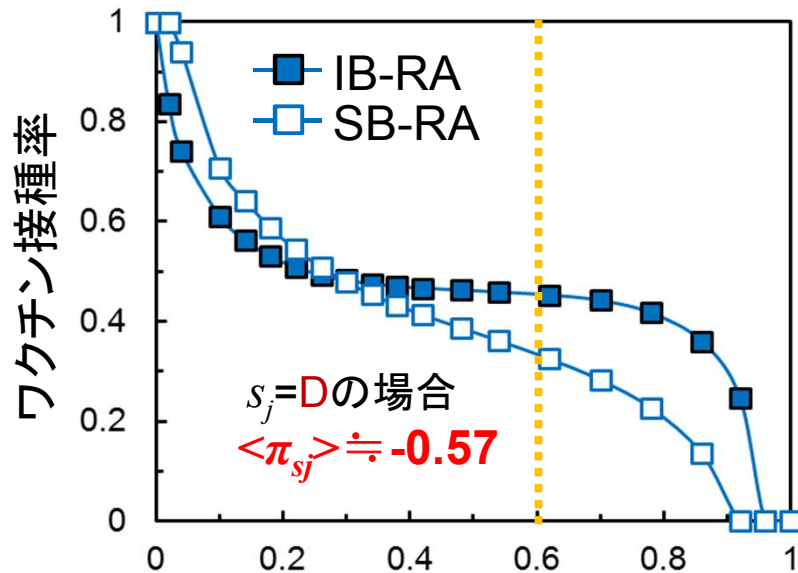
•  $C_r$ : 小  
⇒  $-C_r > \langle \pi_{sj} \rangle$

SB-RA: 自身の戦略を保持する可能性が高い

自主的なワクチン接種を行う高次数者の意思決定に大きな影響を与えることができない

最終的な感染者の割合を大きく抑制する効果が得られなかった

# 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: BA-SF

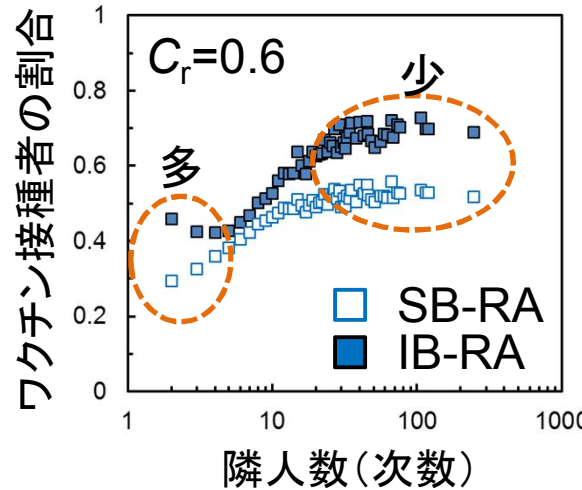


キーポイント

**C**戦略の高次数エージェントがいかに自身の戦略を保持するか

BA-SFの感染症の蔓延の特性

スーパースプレッターとなり得るハブの存在により、疾病が蔓延しやすい



•  $C_r$ : 中~大  
⇒  $-C_r < \langle \pi_{s_j} \rangle$

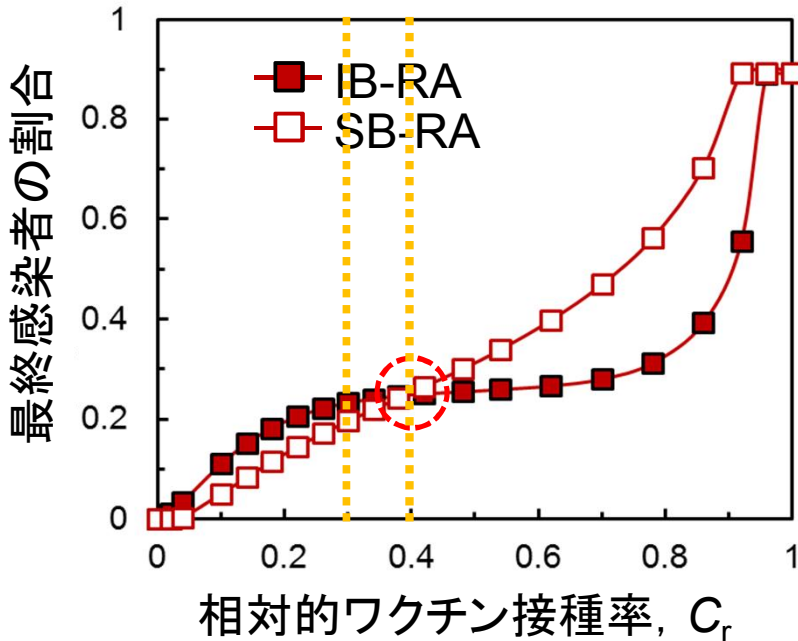
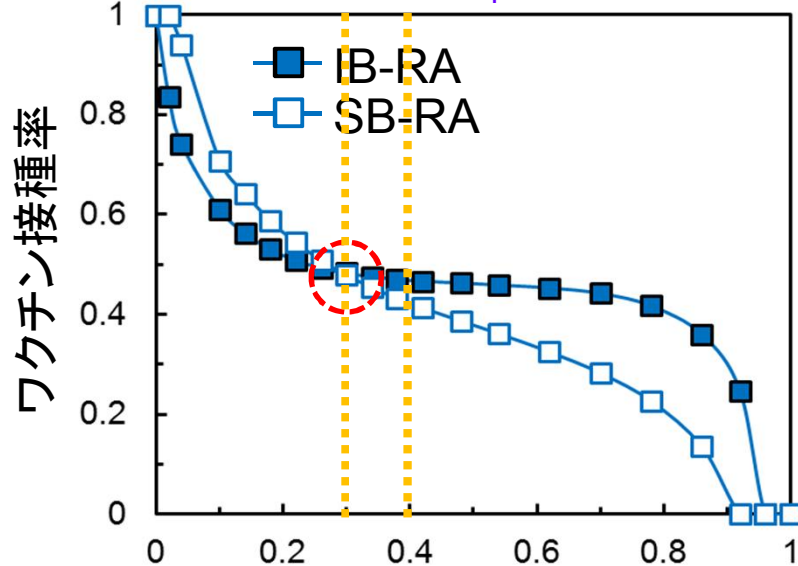
SB-RA: 自身の戦略を保持しにくい  
⇒ 接種を行うインセンティブが大きく低下

高次数エージェントがワクチン非接種を選択することで、ワクチン接種率の大幅な減少を招く

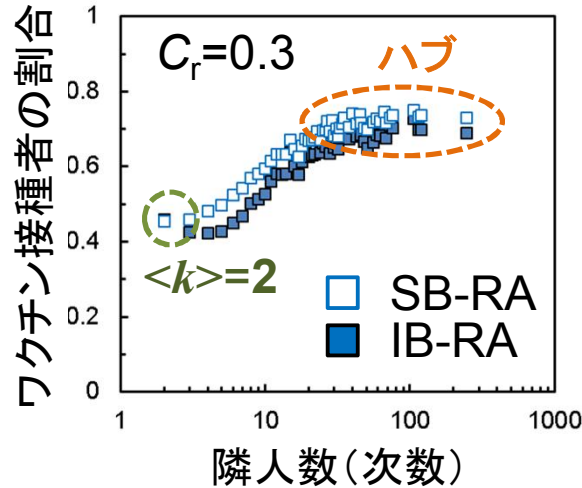
最終的な感染者の割合が高くなった

# 3. 結果と考察 戦略ベースリスク評価モデル: BA-SF

◆クロスオーバーする $C_r$ の値について



◆ $C_r$ が0.3以上0.4未満



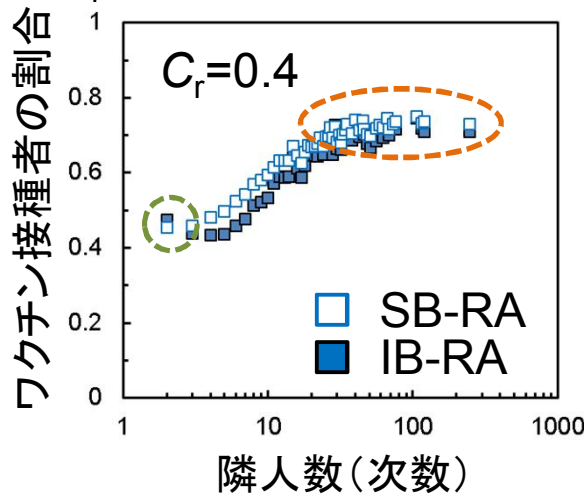
約半数を占める低次数者のワクチン接種率のより大きな減少

⇒ 集団平均ワクチン接種率の逆転

高次数者のワクチン接種率はSB-RAの場合の方がIB-RAの場合よりも高い

⇒ 最終感染者の割合は抑制

◆ $C_r$ が0.4以上



高次数者のワクチン接種率もIB-RAの場合よりも下回る

⇒ 最終感染者の割合の逆転

## 4. まとめと今後の展望

- ◆ ワクチン接種を行うか否かの意思決定を下す際のリスク評価方法(個人ベース or 戦略ベース)が、感染症の蔓延と自発的ワクチン接種行動にどのような影響をもたらすのかを検討した。
- ◆ ネットワーク構造とワクチン接種コストに依存して、感染症の蔓延と自発的ワクチン接種行動に大きな差が生じる。
- ◆ 集団が感染封じ込めにとってより望ましいリスク評価を行うためには、各個人が自身の置かれているネットワークの構造を認識するか、もしくは行政機関が地域ごとのネットワーク構造を認識した上で社会全体の感染症の情報を公開すべきかどうかを判断しなければならない。
- ◆ 相対的ワクチン接種コストが小さい場合には、ネットワーク構造に関わらず提案したリスク評価方法(SB-RA)の方がワクチン接種率を増加させ、最終感染者の割合を減少させることができた。ワクチン接種に対する適切な額の公的補助など、何らかの方法で相対的接種コストを下げる事が出来れば、社会ネットワーク構造に関係なく感染を抑制する効果が期待できる。
- ◆ ワクチンの有効性についても検討していかなければならない。

▶ ご清聴ありがとうございました



# 感染症伝搬ネットワークと 戦略相互作用ネットワークの相違が 自発的ワクチン接種行動に及ぼす影響

九州大学大学院 総合理工学府  
環境エネルギー工学専攻  
福田 枝里子



# 1. 研究背景 感染症の蔓延とワクチン接種

## 感染症の蔓延

- 都市域の人口密度の増加
- 長距離移動手段の発展



⇒ **先制的ワクチン接種**が有効

- 感染の予防や重篤化を防ぐことが可能
- ワクチン接種は個人の自主性に委ねられている
- ワクチン接種により感染症を完全に根絶させた例は天然痘のみ

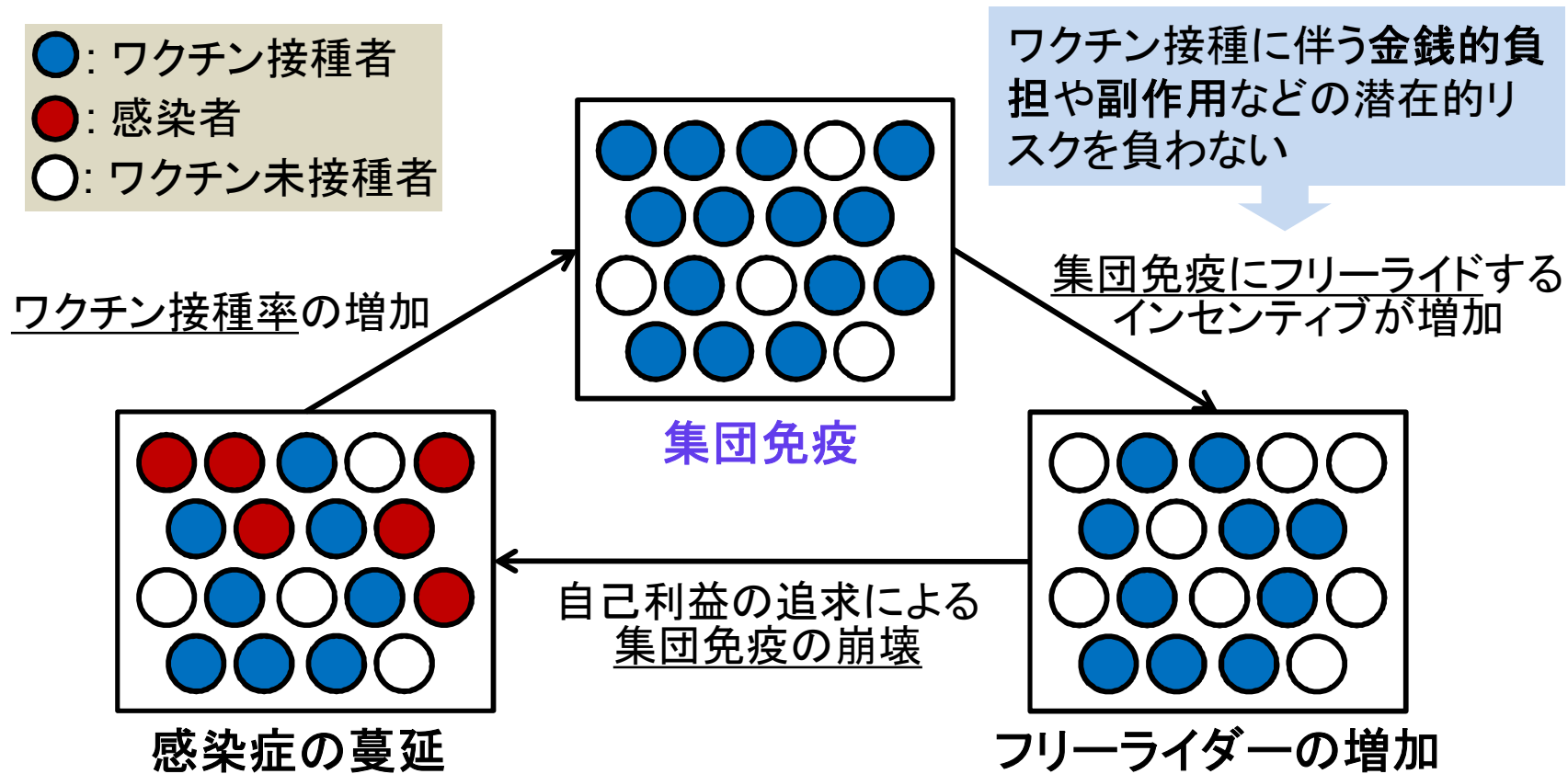
(1980年 世界保健機構が宣言)

根絶を困難にしているのは…

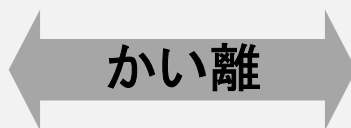
「ワクチン接種に伴う**ジレンマ**」

# 1. 研究背景 集団免疫とワクチン接種ジレンマ

- **集団免疫**: 集団の接種率がある閾値を超えた結果、感染症が発生したとしてもその蔓延を防ぐことが可能となるような状態⇒**公共財的性質**



各個人にとって最適なワクチン接種行動



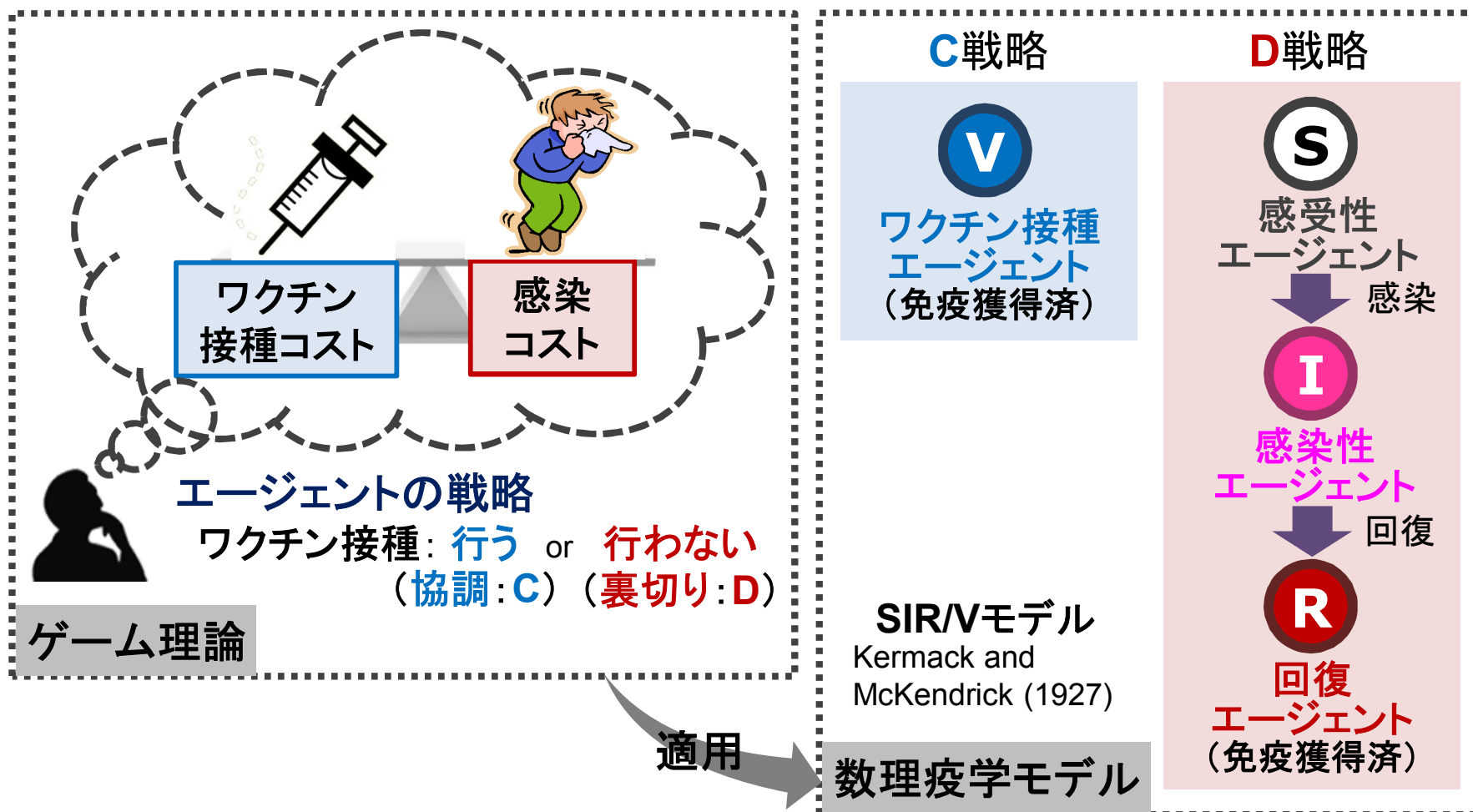
社会全体にとって最適なワクチン接種率

## 2. モデル ワクチン接種ゲーム

感染症の伝播過程に個人のワクチン接種行動の影響を取りこんだモデルの構築

⇒個人の意思決定が感染症の蔓延に与える影響の検討

Fu et al. (2011)

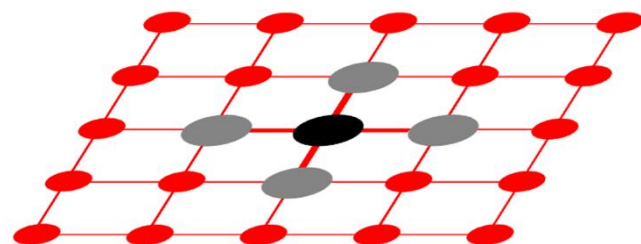


## 2. モデル 感染症伝搬および戦略相互作用ネットワーク

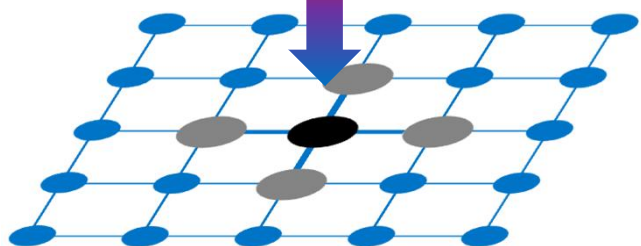
感染症の伝播過程に個人のワクチン接種行動の影響を取りこんだモデルの構築

Fu et al. (2011)

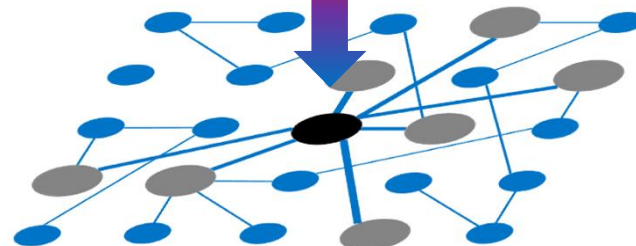
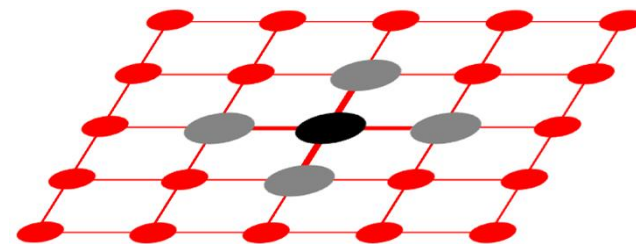
感染症伝搬(表)  
ネットワーク  
(感染症の伝搬ルート)



戦略相互作用(裏)  
ネットワーク  
(情報の伝搬ルート)



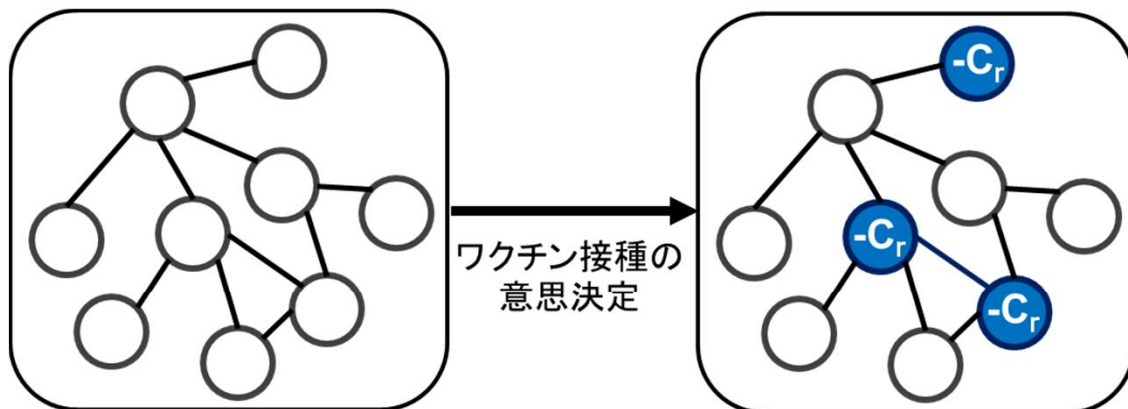
(a) Real networkモデル  
(RNモデル)



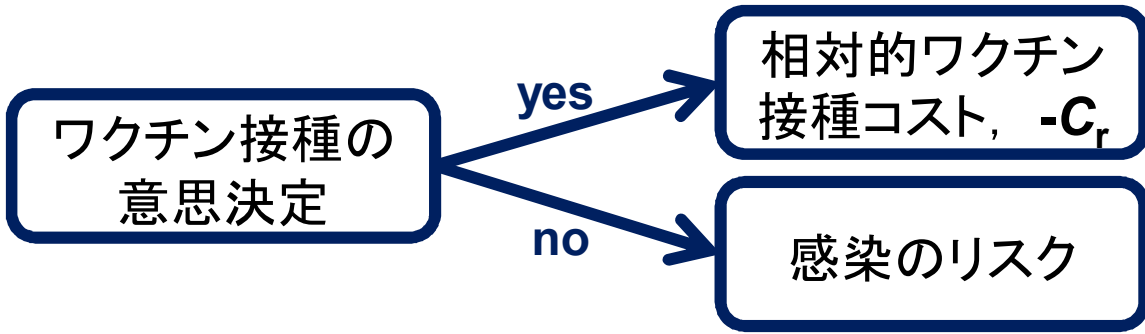
(b) Social networkモデル  
(SNモデル)

⇒ 表裏のネットワークの一致・不一致の影響を検討

## 2. モデル ネットワーク上のワクチン接種ゲーム



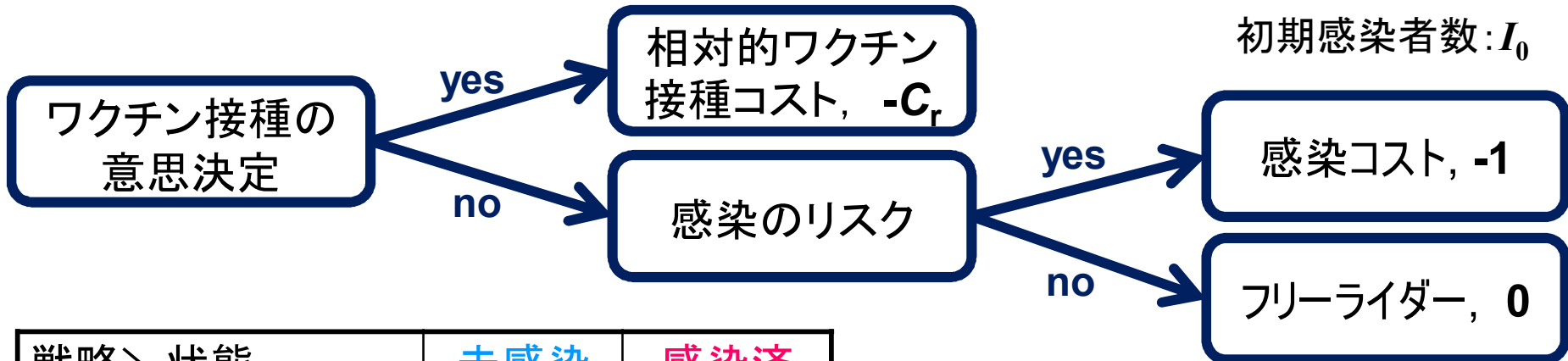
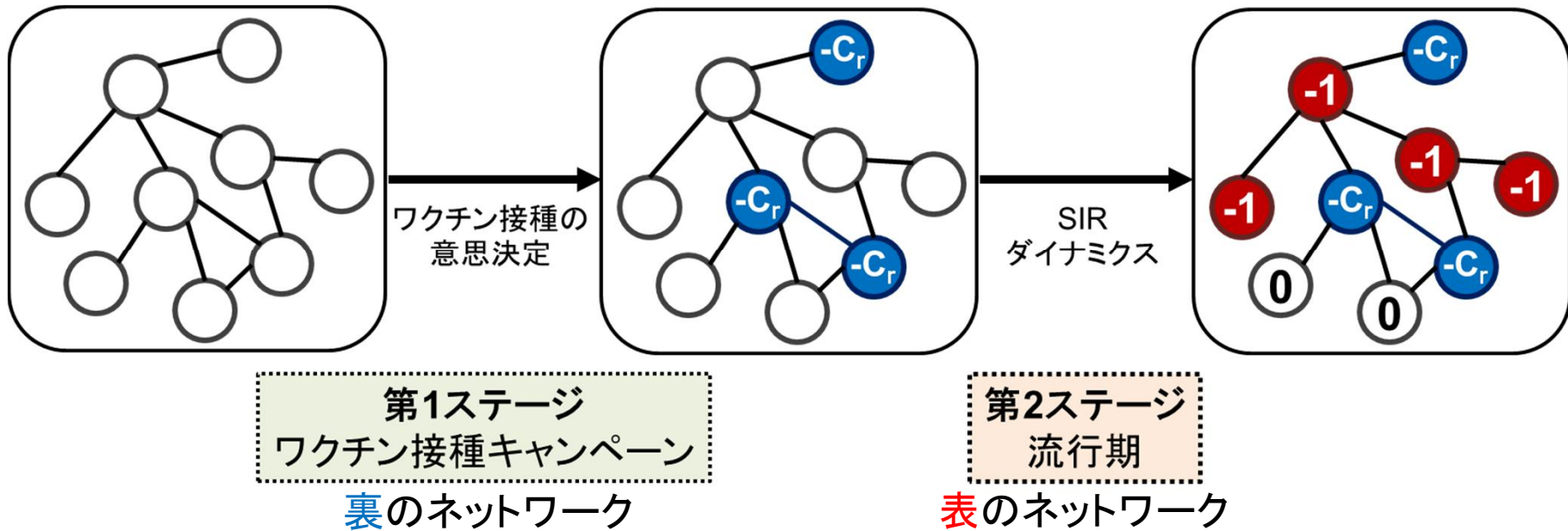
第1ステージ  
 ワクチン接種キャンペーン  
 裏のネットワーク



戦略	
ワクチン接種 (C)	$-C_r$
ワクチン非接種 (D)	感染のリスク

$C_r = C_v / C_i$  ( $C_r \in [0, 1]$ ,  $C_i = 1$ )  
 $C_v$ : ワクチン接種コスト,  $C_i$ : 感染コスト

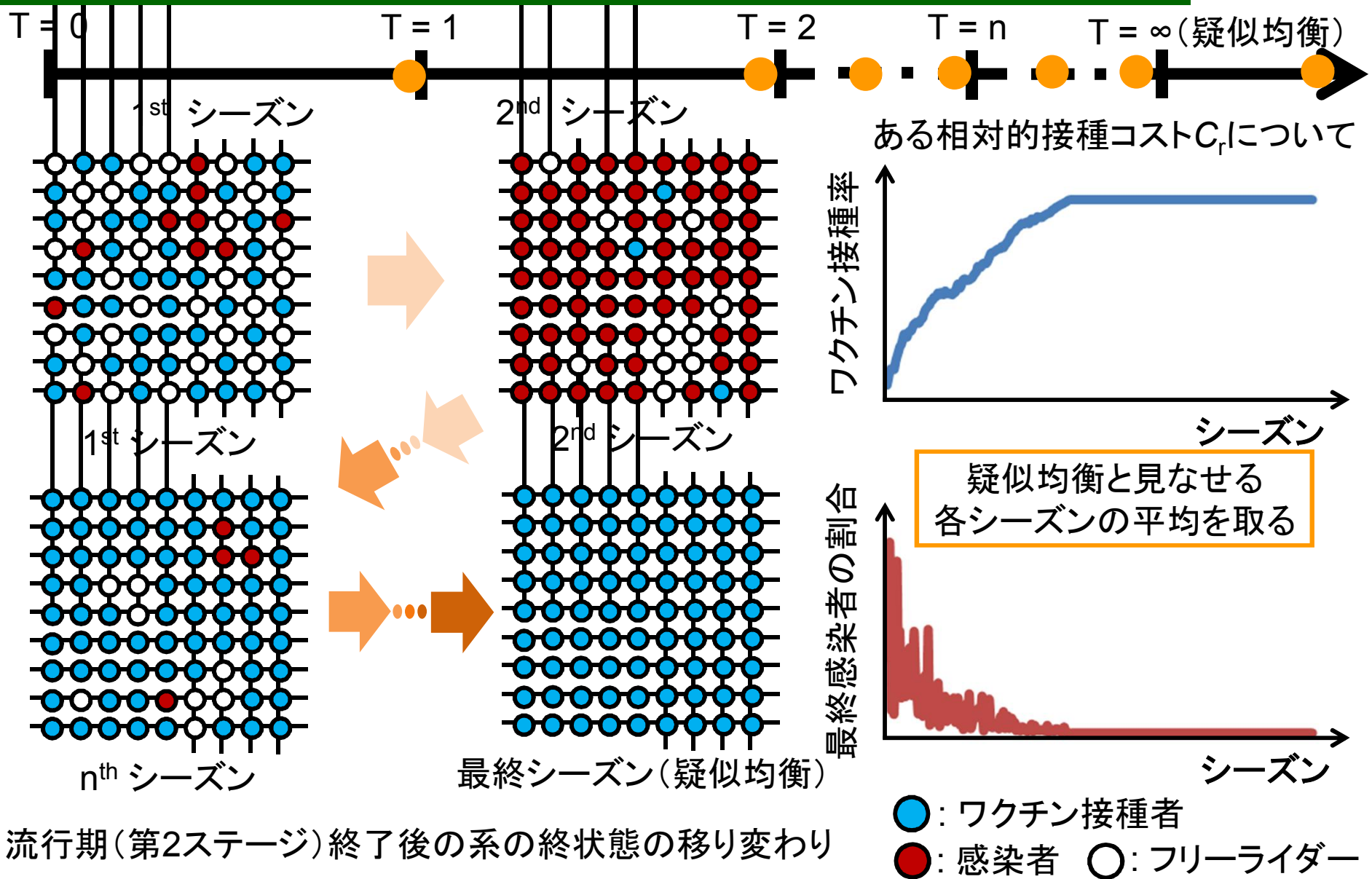
## 2. モデル ネットワーク上のワクチン接種ゲーム



戦略 \ 状態	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● $-C_r$	／
ワクチン非接種 (D)	○ $0$	● $-1$

$C_r = C_v / C_i$  ( $C_r \in [0, 1]$ ,  $C_i = 1$ )  
 $C_v$ : ワクチン接種コスト,  $C_i$ : 感染コスト

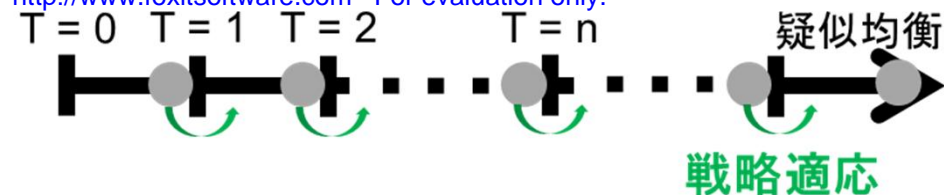
## 2. モデル ネットワーク上のワクチン接種ゲーム



流行期(第2ステージ)終了後の系の終状態の移り変わり

ある  $C_r (\in [0,1])$  に対しての **ワクチン接種率**・**最終感染者の割合** が得られる

## 2. モデル 戦略適応方法

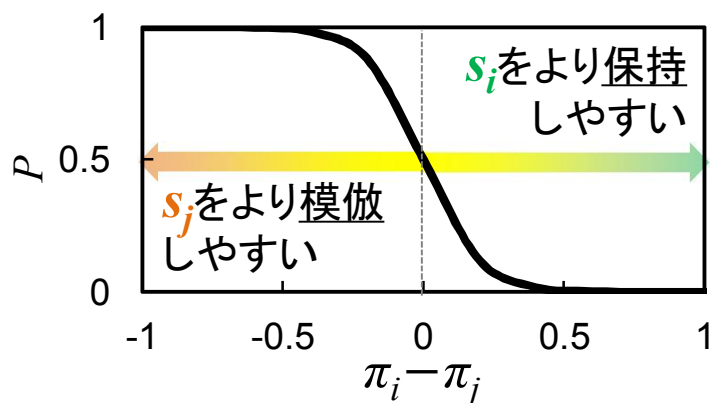


### Fermi関数によるpairwise比較 Szabo, G. and Toke, C. (1998)

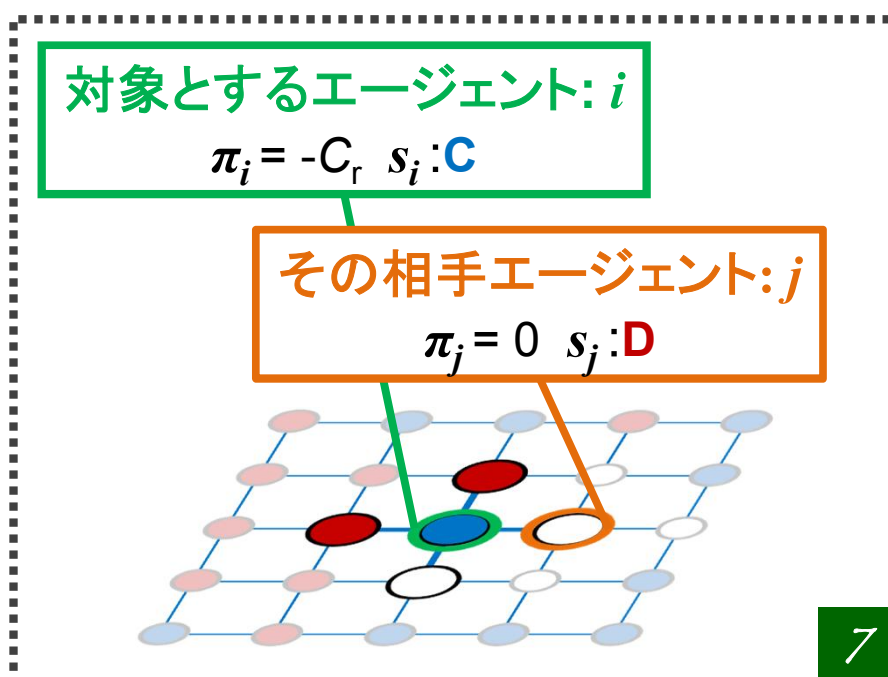
裏のネットワーク上の自身の隣人の中から1人をランダムに選択し、両者の利得差をpairwise比較することによって確率的にその相手の戦略を模倣する。

$$P(s_i \leftarrow s_j) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi_i - \pi_j}{\kappa}\right)} \dots (1)$$

$\pi_i, \pi_j$ : 利得  
 $s_i, s_j$ : 戦略  
 $\kappa$ : 利得差に対する敏感度 ( $\kappa = 0.1$ )  
 ↑ エージェントの非合理的な意思決定や勘違いなどを反映

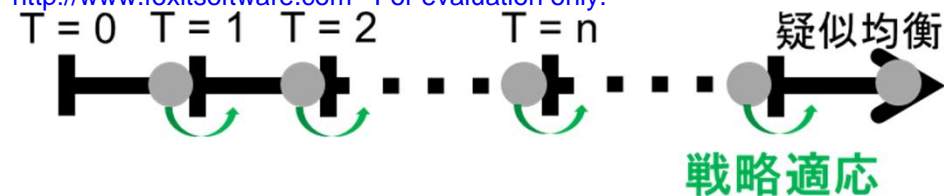


戦略 \ 状態	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● $-C_r$	
ワクチン非接種 (D)	○ 0	● -1

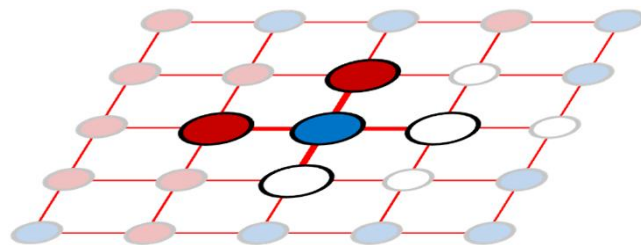




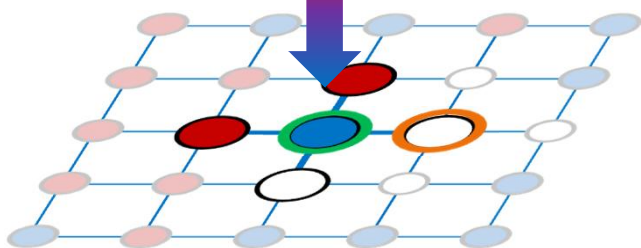
## 2. モデル 戦略適応方法



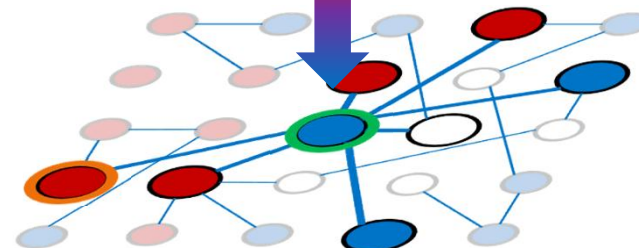
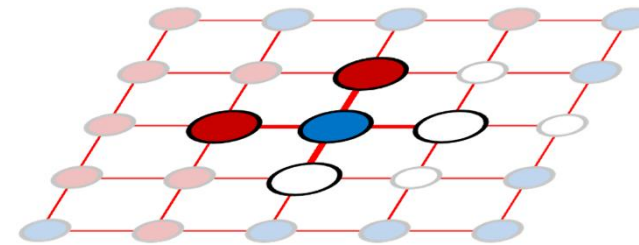
感染症伝搬(表)  
 ネットワーク  
 (感染症の伝搬ルート)



戦略相互作用(裏)  
 ネットワーク  
 (情報の伝搬ルート)



従来の枠組み  
 表裏のネットワークが一致  
 (a) Real networkモデル  
 (RNモデル)



提示する枠組み  
 表裏のネットワークが不一致  
 (b) Social networkモデル  
 (SNモデル)

戦略 \ 状態	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● $-C_r$	
ワクチン非接種 (D)	○ 0	● -1

戦略適応方法

$$P(s_i \leftarrow s_j) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi_i - \pi_j}{\kappa}\right)} \dots (1)$$

## 2. モデル シミュレーション条件



### □ シミュレーションの流れ

ある相対的接種コスト $C_r$ について

#### 初期状態

ワクチン接種エージェントと未接種エージェントがランダムに分布

#### ワクチン接種ゲーム

第1ステージ(裏): ワクチン接種ゲーム  
第2ステージ(表): 流行期

#### 戦略適応

翌年に接種するか否かを再度検討

疑似均衡に達する

#### 疑似均衡

ワクチン接種率と最終感染者の割合を得る

繰り返し  
ワクチン接種率や感染者の割合が更新される

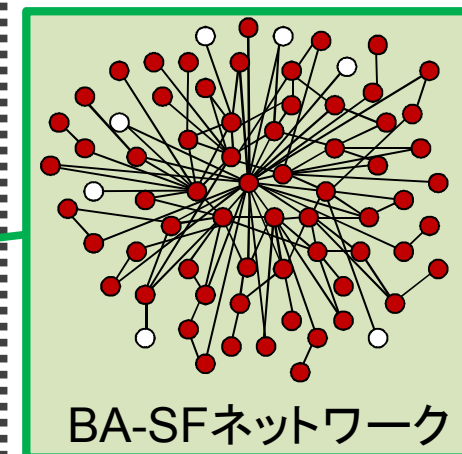
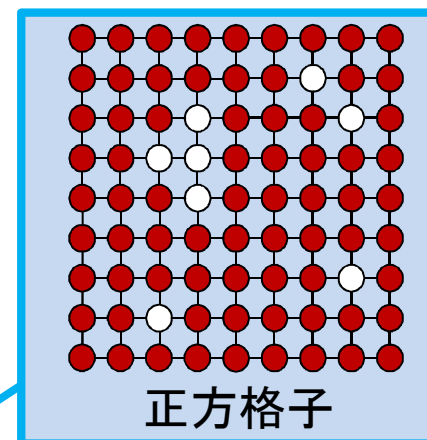
独立に100回の試行

## 2. モデル シミュレーション条件

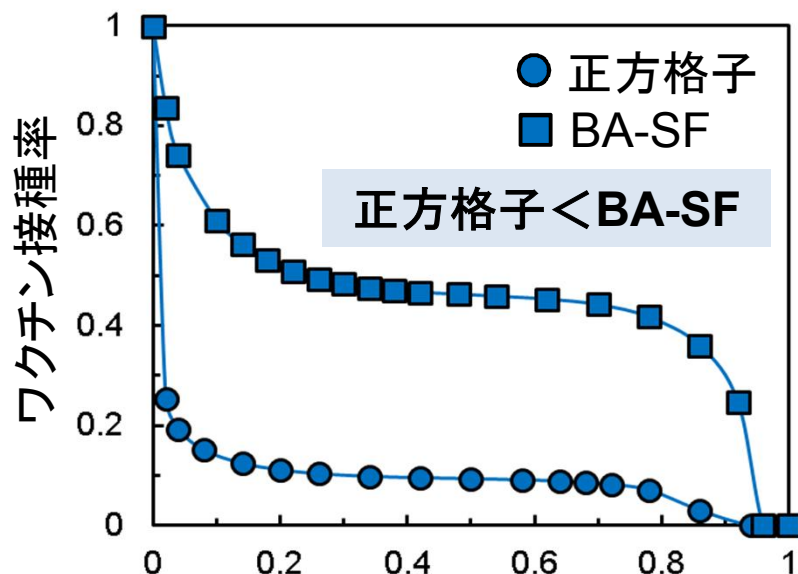
### □ シミュレーション条件・パラメータ設定方法

- 集団サイズ:  $N = 4900$
- 表のネットワーク:
  - 正方格子 (von Neumann近傍)
  - BA-SFネットワーク (平均次数  $\langle k \rangle = 4$ )
- 裏のネットワーク:
  - 正方格子 (von Neumann近傍)
  - BA-SFネットワーク (平均次数  $\langle k \rangle = 4$ )
  - RRG ( $k = 4$ )
- 戦略適応方法:
  - Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )
- 初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$
- **感染率:** ← 感染リスクが等しくなるような値
  - 正方格子:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$
  - BA-SFネットワーク:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$
- 回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$  (平均感染日数: 3日)
- 初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$
- アンサンブル数: 100

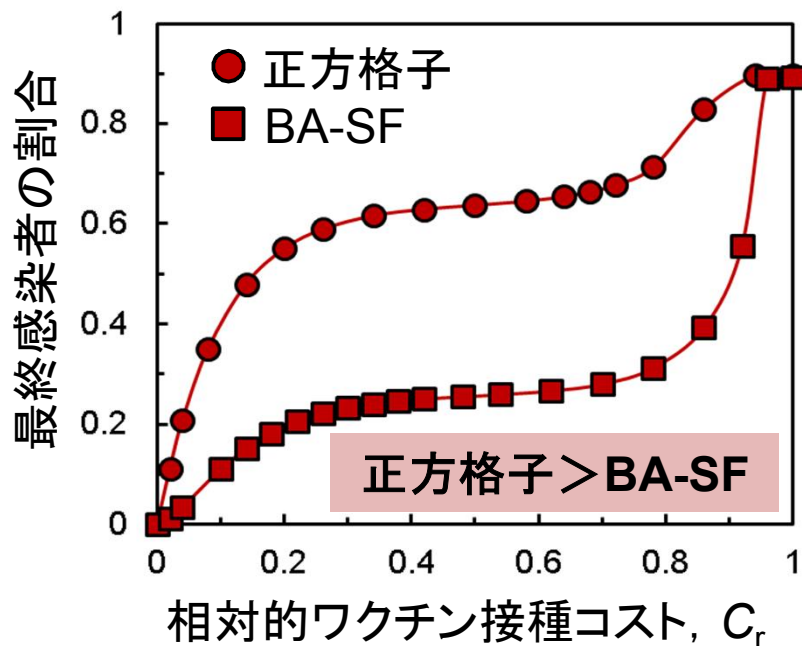
最終感染者の  
割合が約9割



### 3. 結果と考察 RNモデル



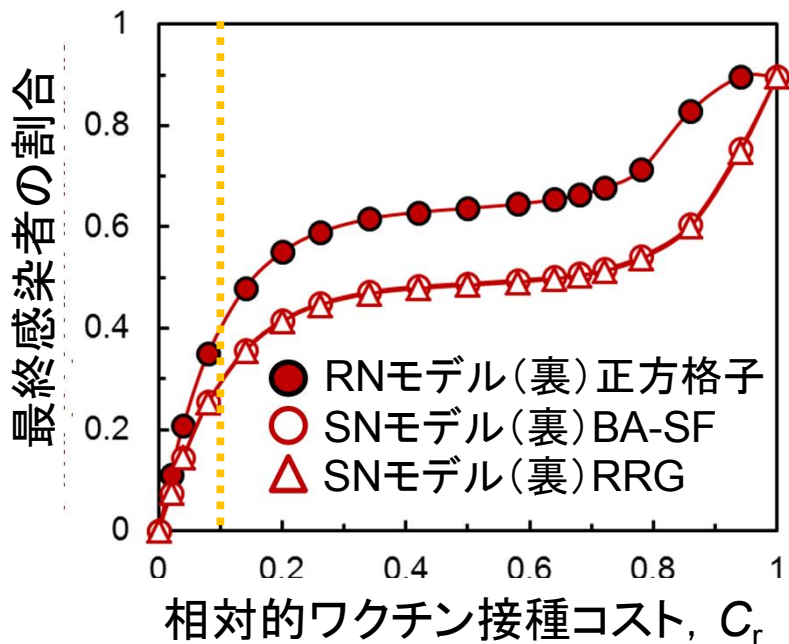
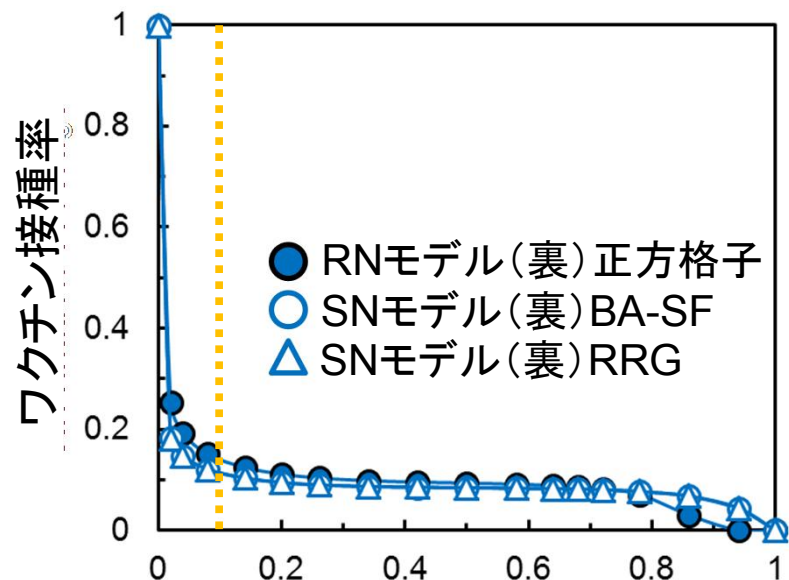
集団サイズ:  $N = 4900$   
表裏のネットワーク: 正方形格子 (von Neumann近傍)  
BA-SFネットワーク ( $\langle k \rangle = 4$ )  
戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )  
初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$   
感染率: 正方形格子:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$   
BA-SFネットワーク:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$   
回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$   
初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$   
アンサンブル数: 100



- **BA-SF**  
より低い感染率でも疾病が蔓延しやすい  
⇒ 集団免疫へのフリーライドが厳しい
- **正方形格子**  
比較的感染症が拡大しにくい

↓  
次数のべき性がBA-SF上のエージェントの自主的なワクチン接種を促進

### 3. 結果と考察 表のネットワーク: 正方格子



集団サイズ:  $N = 4900$

裏のネットワーク: 正方格子 (von Neumann近傍)

BA-SFネットワーク ( $\langle k \rangle = 4$ )

RRG ( $k = 4$ )

戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )

初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$

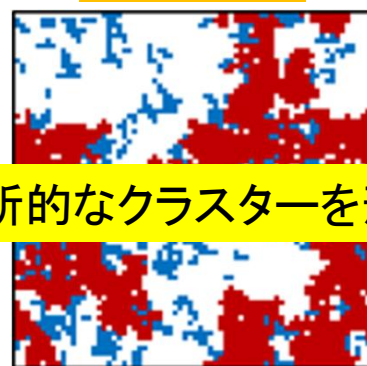
感染率: 正方格子:  $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$

回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$

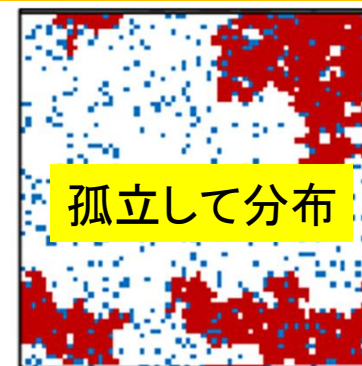
初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$

アンサンブル数: 100

RNモデル



SNモデル(裏: BA-SF)

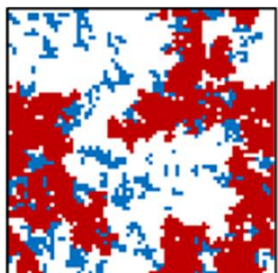


表のネットワーク上の均衡時のスナップショット( $C_r = 0.1$ )

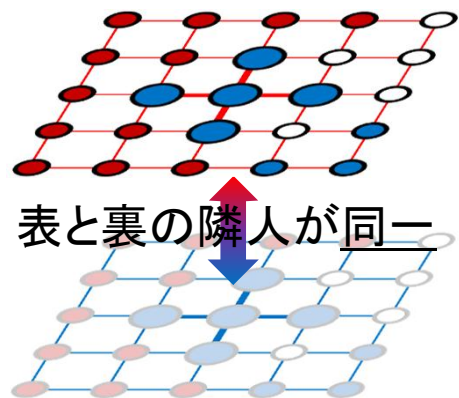
■ : ワクチン接種者 ■ : 感染者  
□ : ワクチン未接種者

### 3. 結果と考察 表のネットワーク: 正方格子

#### RNモデル



- が局所的なクラスターを形成  
⇒ ■が存在しない領域において感染が広範囲に拡大

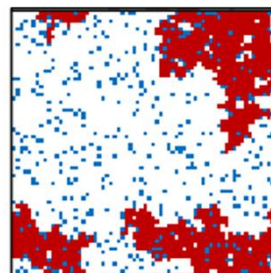


表と裏の隣人が同一

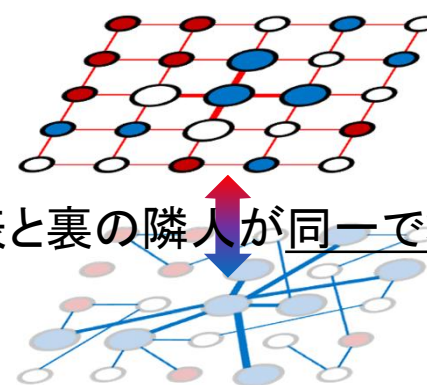
■は表でも裏と同様のクラスターを形成

■: ワクチン接種者 ■: 感染者  
□: フリーライダー

#### SNモデル



- がまんべんなく分布  
⇒どこで初期■が発生したとしてもある程度感染の拡大抑制が可能

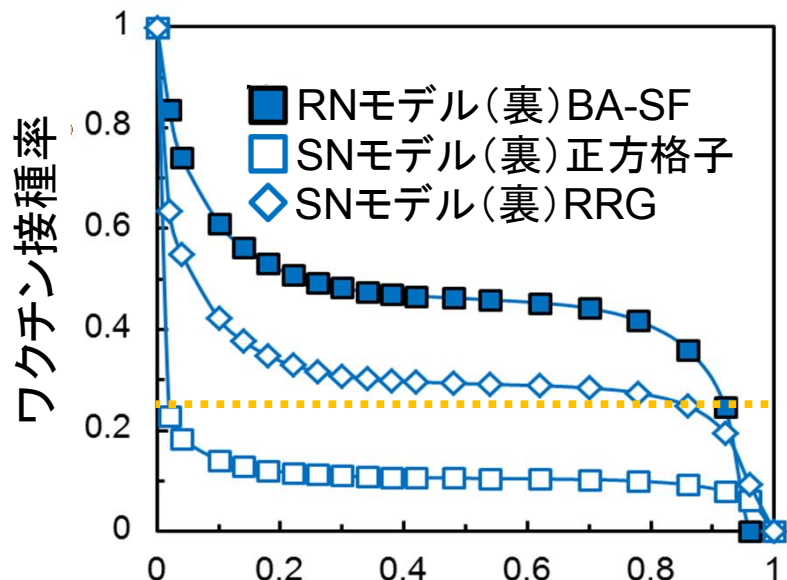


表と裏の隣人が同一でない

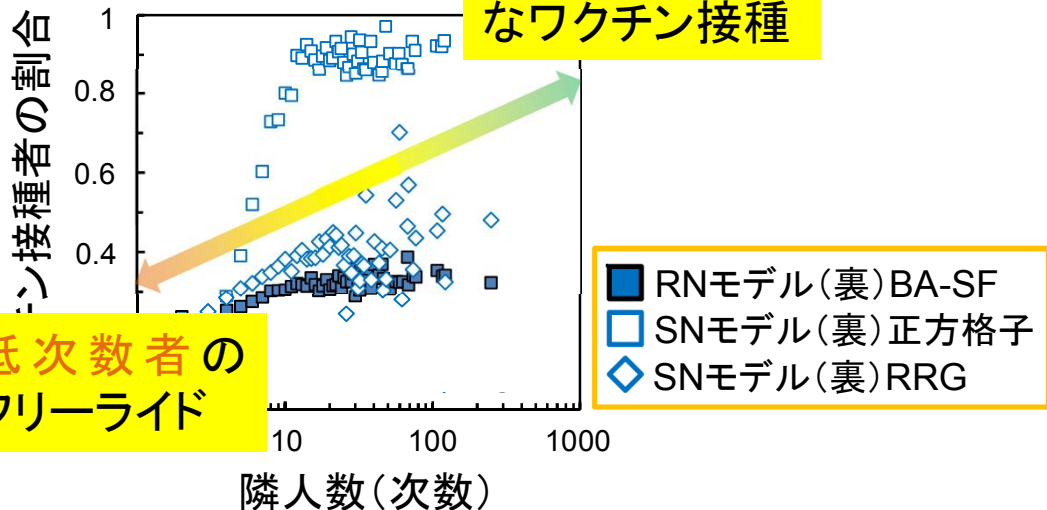
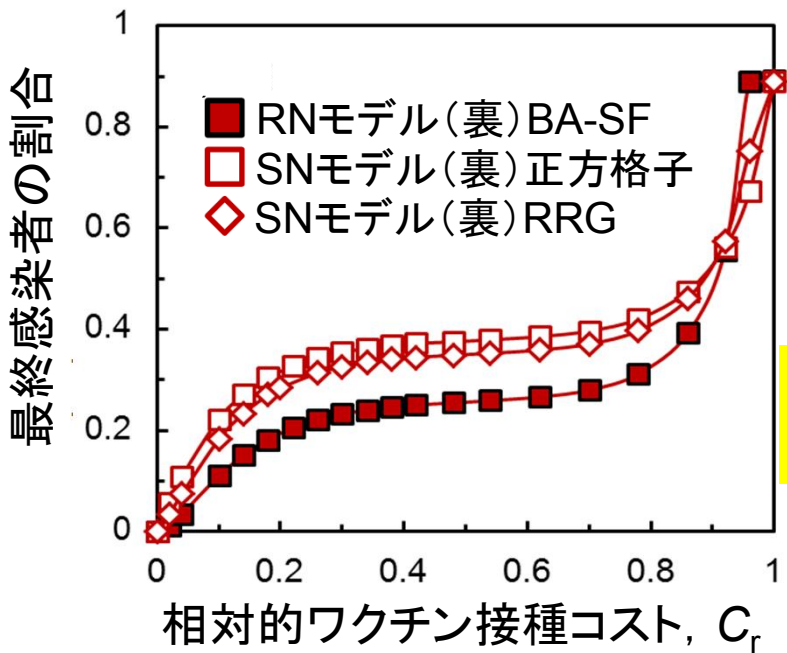
裏で繋がっている隣人と■のクラスターを形成  
⇒空間構造の異なる表では■は孤立して存在しているように見える

表裏のネットワーク構造の相違により、効果的に感染拡大を抑えられる孤立したワクチン接種者の空間分布が表のネットワーク上に実現される

# 3. 結果と考察 表のネットワーク: BA-SF



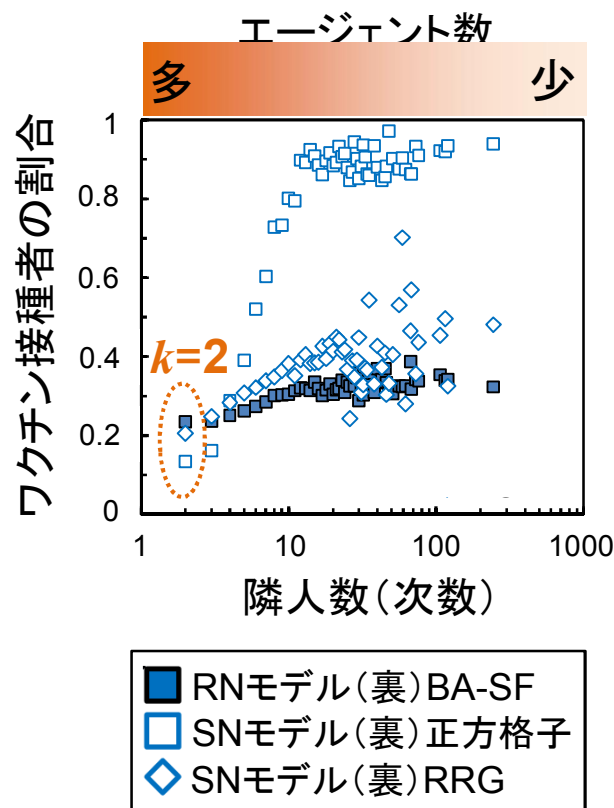
集団サイズ:  $N = 4900$   
 裏のネットワーク: BA-SFネットワーク ( $\langle k \rangle = 4$ )  
 正方形 (von Neumann近傍)  
 RRG ( $k = 4$ )  
 戦略適応方法: Fermi関数によるpairwise比較 ( $\kappa = 0.1$ )  
 初期ワクチン接種率:  $f_{c0} = 0.5$   
 感染率: BA-SFネットワーク:  $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$   
 回復率:  $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$   
 初期に流行株に感染した感染者数:  $I_0 = 5$   
 アンサンブル数: 100



表のネットワーク上の均衡時の次数別ワクチン接種者の割合 (ワクチン接種率  $\approx 0.25$ )

### 3. 結果と考察 表のネットワーク: BA-SF

#### 1. なぜSNモデルの方が集団のワクチン接種率の減少と最終感染者の割合の増加を引き起こしたのか？



BA-SF上の最終感染者の割合の抑制  
 (1) より多くのエージェントのワクチン接種  
 (2) パンデミックを誘発するハブのワクチン接種

BA-SF: より低い感染率でも疾病が蔓延しやすい  
 ⇨ エージェントの自主的なワクチン接種を促進

モデル	RNモデル	SNモデル
表		
高次数者 (ハブ)	感染リスクが高い	感染リスクが(RNモデルより)高い
低次数者	ハブの意思決定の影響を受けやすい	ハブの意思決定の影響を受けにくい

(1) ○ (2) ○

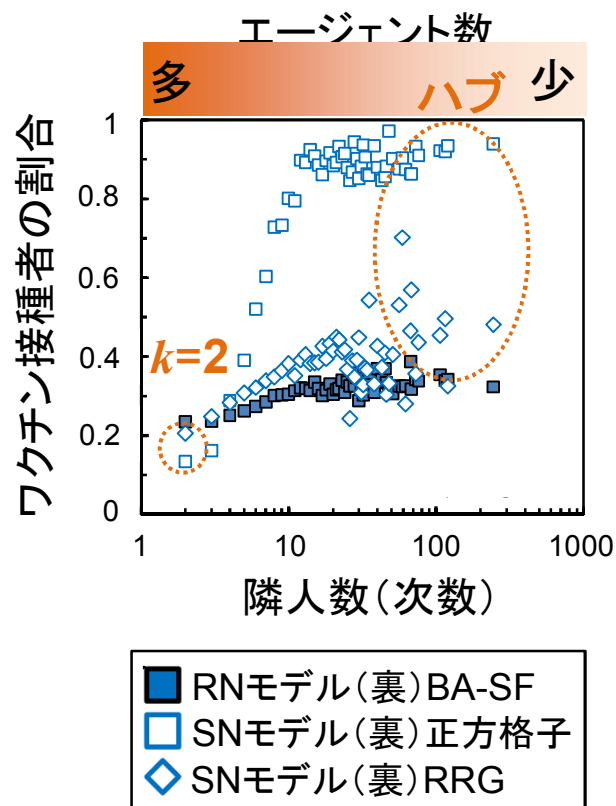
(1) △ (2) ◎

集団の約半数を占める低次数者のワクチン接種率の減少が集団のワクチン接種率の減少と最終感染者の増加を引き起こした



### 3. 結果と考察 表のネットワーク: BA-SF

2. なぜSNモデルにおいて裏が正方格子の方がRRGよりも効率的に最終感染者の割合を抑えられているのか？



BA-SF上の最終感染者の割合の抑制  
 (1)より多くのエージェントのワクチン接種  
 (2)パンデミックを誘発するハブのワクチン接種

	裏	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k = 4</math></li> <li>• <math>C = 0</math></li> <li>• <math>L \doteq 35</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k = 4</math></li> <li>• <math>C \doteq 0</math></li> <li>• <math>L \doteq 7.1</math></li> </ul>
表		<b>正方格子</b>	<b>RRG</b>
高次数者 (ハブ)		感染リスクが(RRGより)高い	感染リスクが高い
低次数者		ハブの意思決定の影響を(RRGより)受けにくい	ハブの意思決定の影響を受けにくい

(1) × (2) ◎

(1) △ (2) ○

ハブがより自発的にワクチン接種を行っている正方格子の方がRRGよりも効率的に感染症の蔓延を抑え込んだ

## 4. まとめと今後の展望

- ◆ 感染症伝搬ネットワーク(表のネットワーク)と戦略相互作用ネットワーク(裏のネットワーク)の一致, 不一致が感染症の蔓延と自発的ワクチン接種行動にどのような影響をもたらすのかを検討した.
- ◆ 感染症の伝搬ルートとなり得る隣人の戦略を模倣すべきなのか, それとも情報の伝搬ルートとなり得る知人の戦略を模倣すべきなのかネットワーク構造に依存する.
- ◆ 集団が感染封じ込めにとってより望ましい意思決定を行うためには, 各個人が自身の置かれている表のネットワークの構造と裏のネットワーク構造を認識する必要がある.
  - ⇒裏の情報を共有するネットワーク(対人関係, SNS, メールなど)は一般にSF性を持つ. したがって、裏については(詳細な構造の把握は厳しくとも), SF性を持つネットワークであると期待される. 一方, 表の構造の把握については, 感染症の種類や地域など様々な要因によって変わり得るため, 構造を仮定することは難しい.
- ◆ ネットワーク構造が個々人の自発的なワクチン接種行動に与える影響を詳細に検討しなければならない.
- ◆ ワクチンの有効性についても検討していかなければならない.

ご清聴ありがとうございました

# Application; Analytical approach concerning equilibrium (steady-state) for Nonlinear systems

2-player 2-strategy game (2 by 2 game)

Class	Dilemma?	GID	RAD
Prisoner's Dilemma; PD	Yes	Yes	Yes
Chicken (Snow Drift; Hawk-Dove)	Yes	Yes	No
Stag Hunt; SH	Yes	No	Yes
Trivial	No	No	No

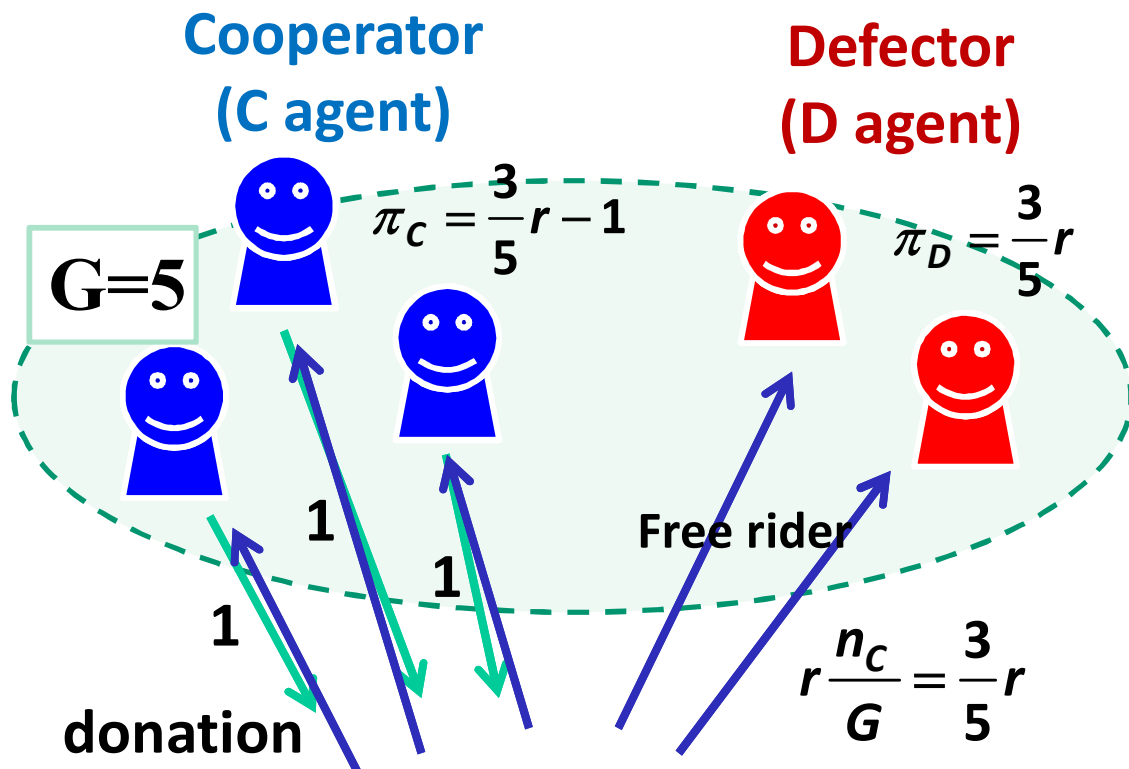
## Basic Assumption

- Infinite population.
- One-shot game; well-mixed situation (with neither social viscosity nor assortment among agents).



# N-players game; Multi players game

## Public Goods Game (PGG) ; N-Prisoner's Dilemma



Multiplying  $\times 3$  with all donations  
 $\rightarrow n_C \cdot r = 3r$

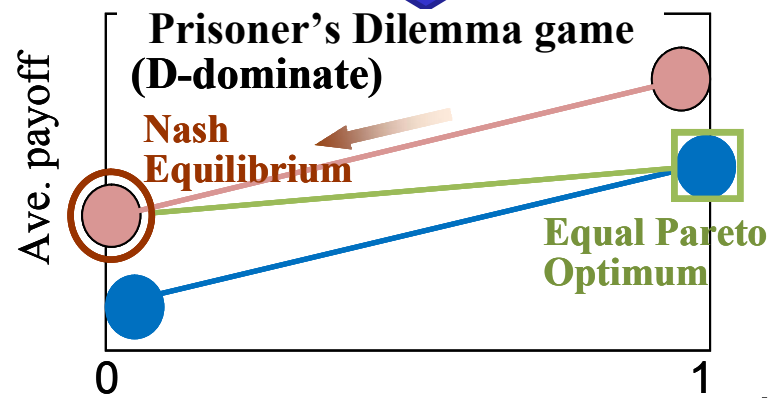
Payoff structure

$$\pi_C = r \frac{n_C}{G} - 1$$

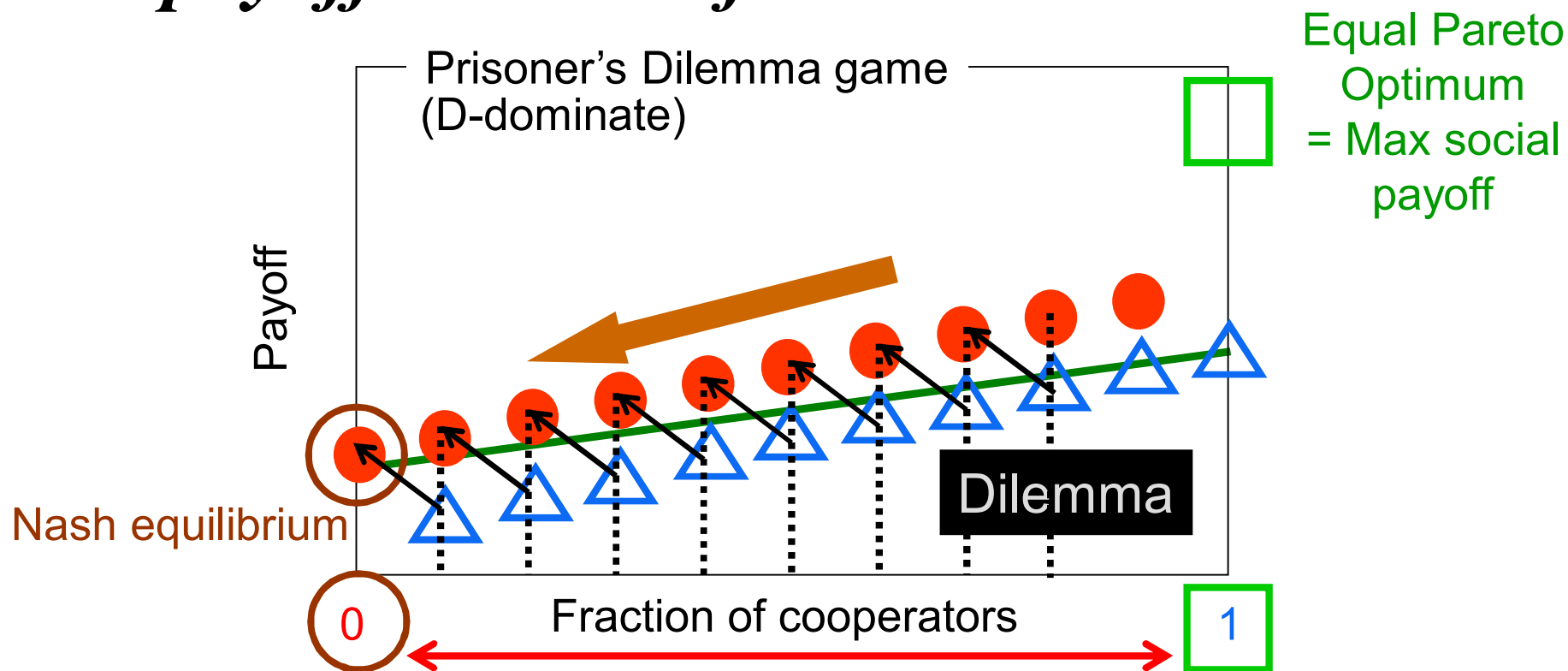
$$\pi_D = r \frac{n_C}{G}$$

$r$ : amplifying factor  
 $n_C$ : number of C agents  
 $G$ : number of game participants

Always  $\pi_C < \pi_D$



# The payoff structure fraction

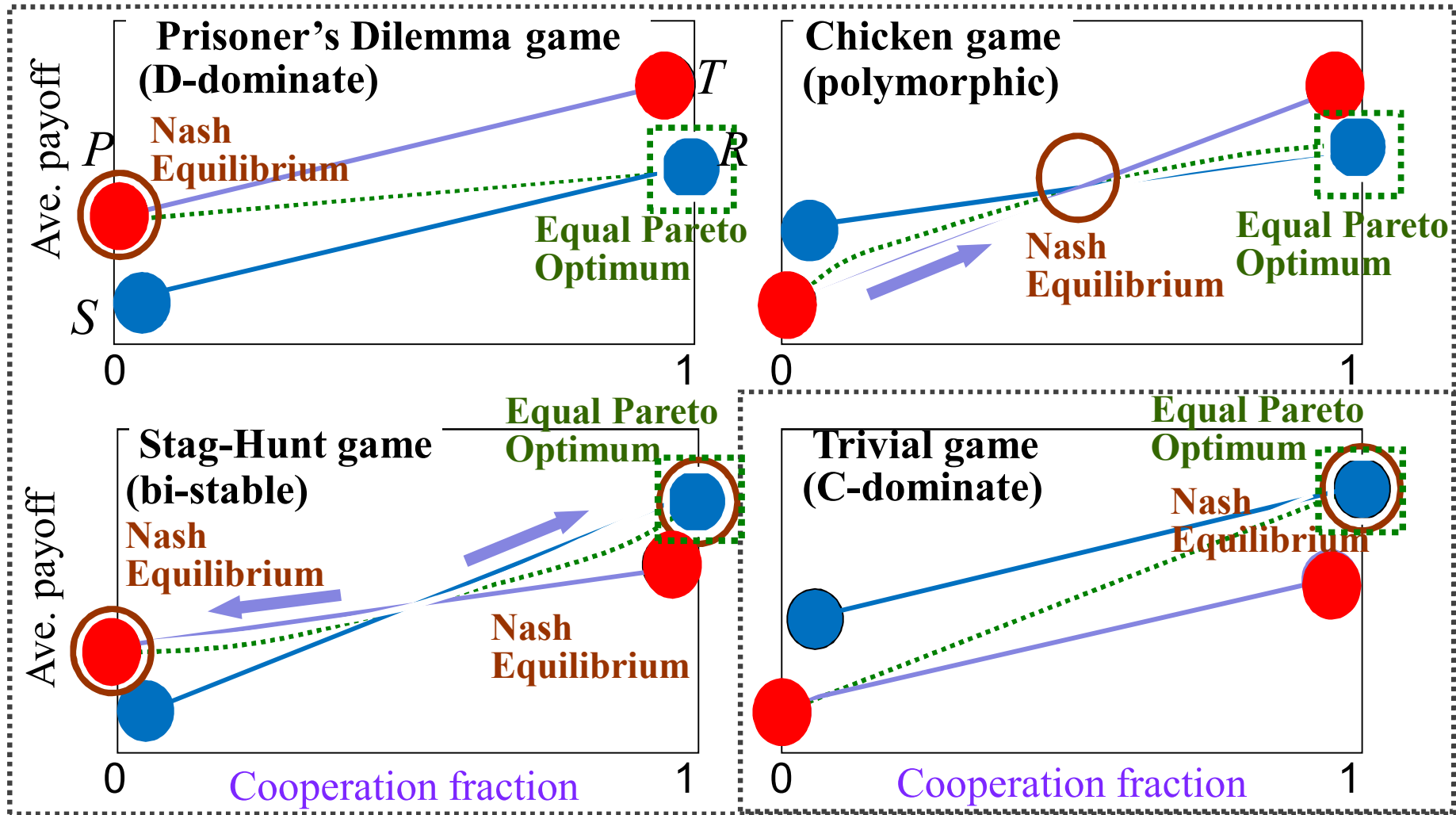


- △ The payoff of C-agents
- The payoff of D-agents

— Social payoff

□ Maximum social payoff ○ Equilibrium point

# Dilemma Structure N-players



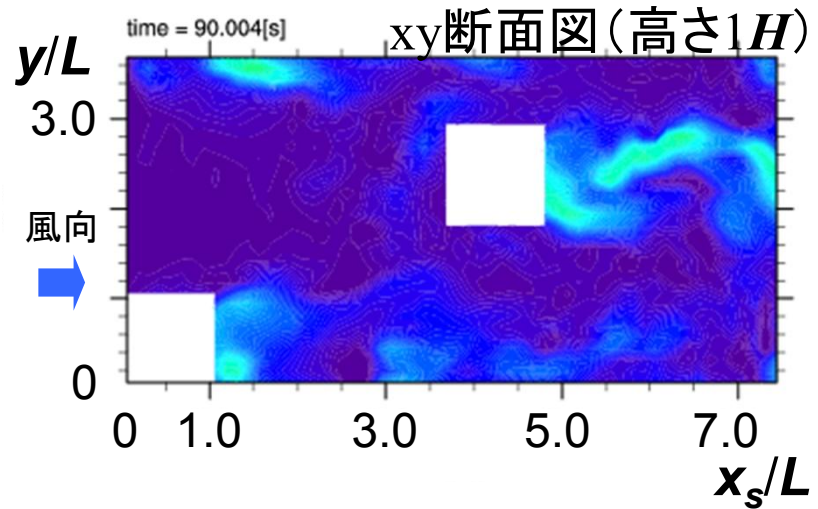
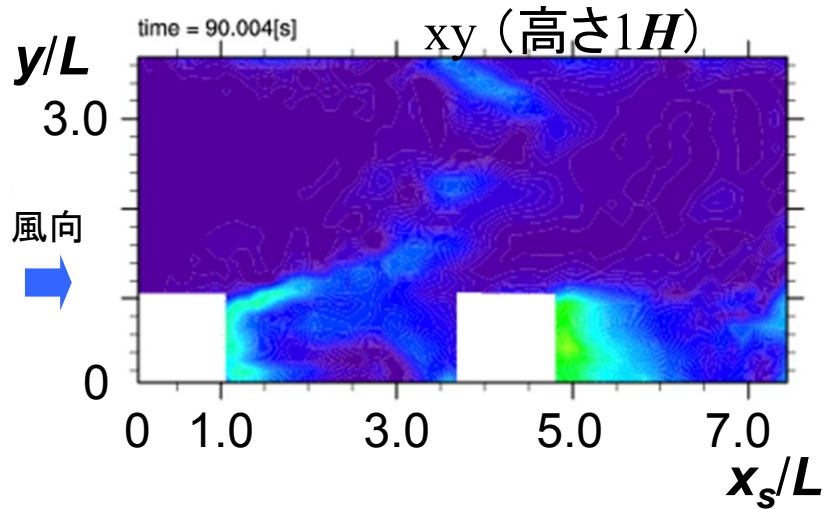
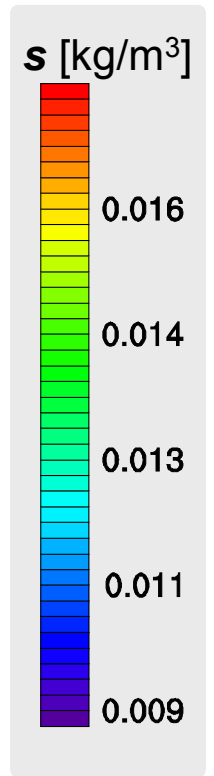
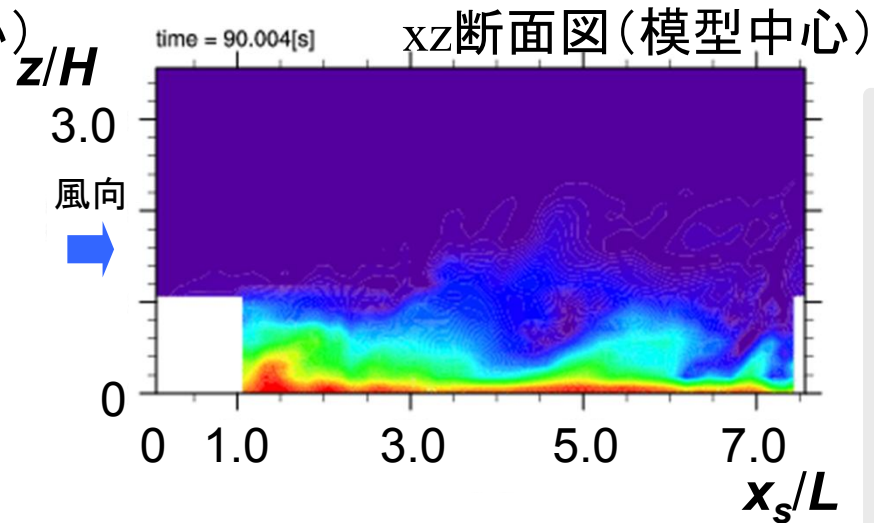
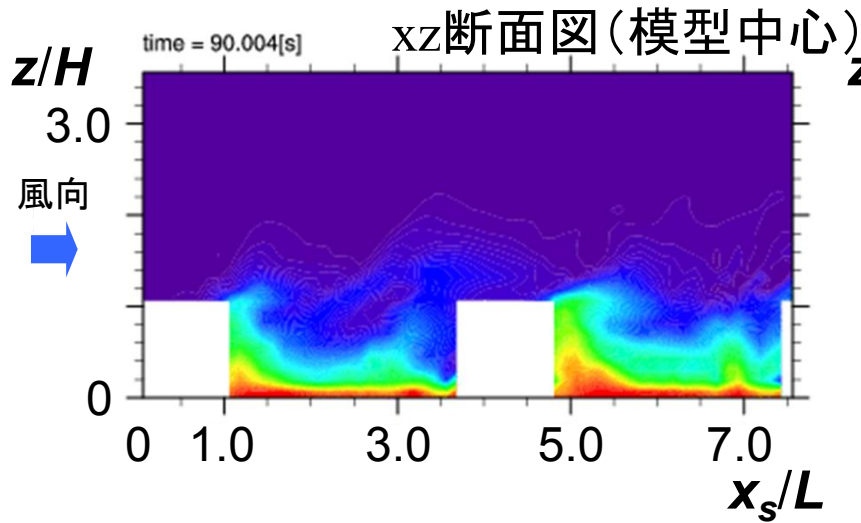
	C	D
Cooperation (C)	R, R	S, T
Defection (D)	T, S	P, P

- Cooperators (C)
- Defectors (D)
- Social payoff
- Max payoff Equal Pareto Optimum
- Equilibrium Nash Equilibrium

# Scalar field at urban canopies by Large Eddy Simulation

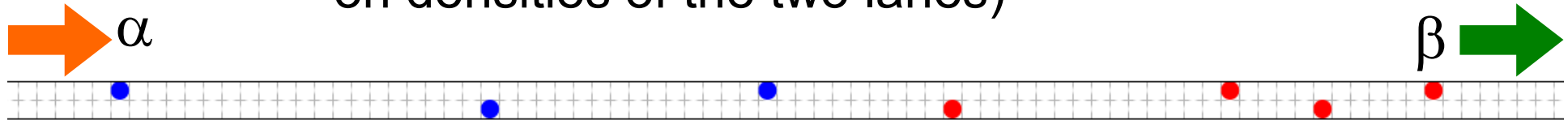
## SQ7

## ST7



# Traffic flow ...flowing many granular objects that are vehicles, or say, agents.

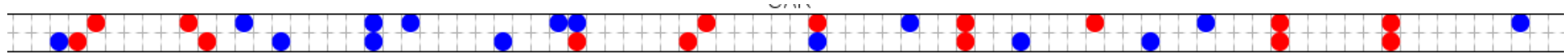
- C-vehicle (Cooperative strategy; keeping its driving lane)
- D-vehicle (Defective strategy; enable to lane-change depending on densities of the two lanes)



Entering probability,  $\alpha=0.1$ ; Exiting probability,  $\beta=1$



Entering probability,  $\alpha=0.7$ ; Exiting probability,  $\beta=0.4$



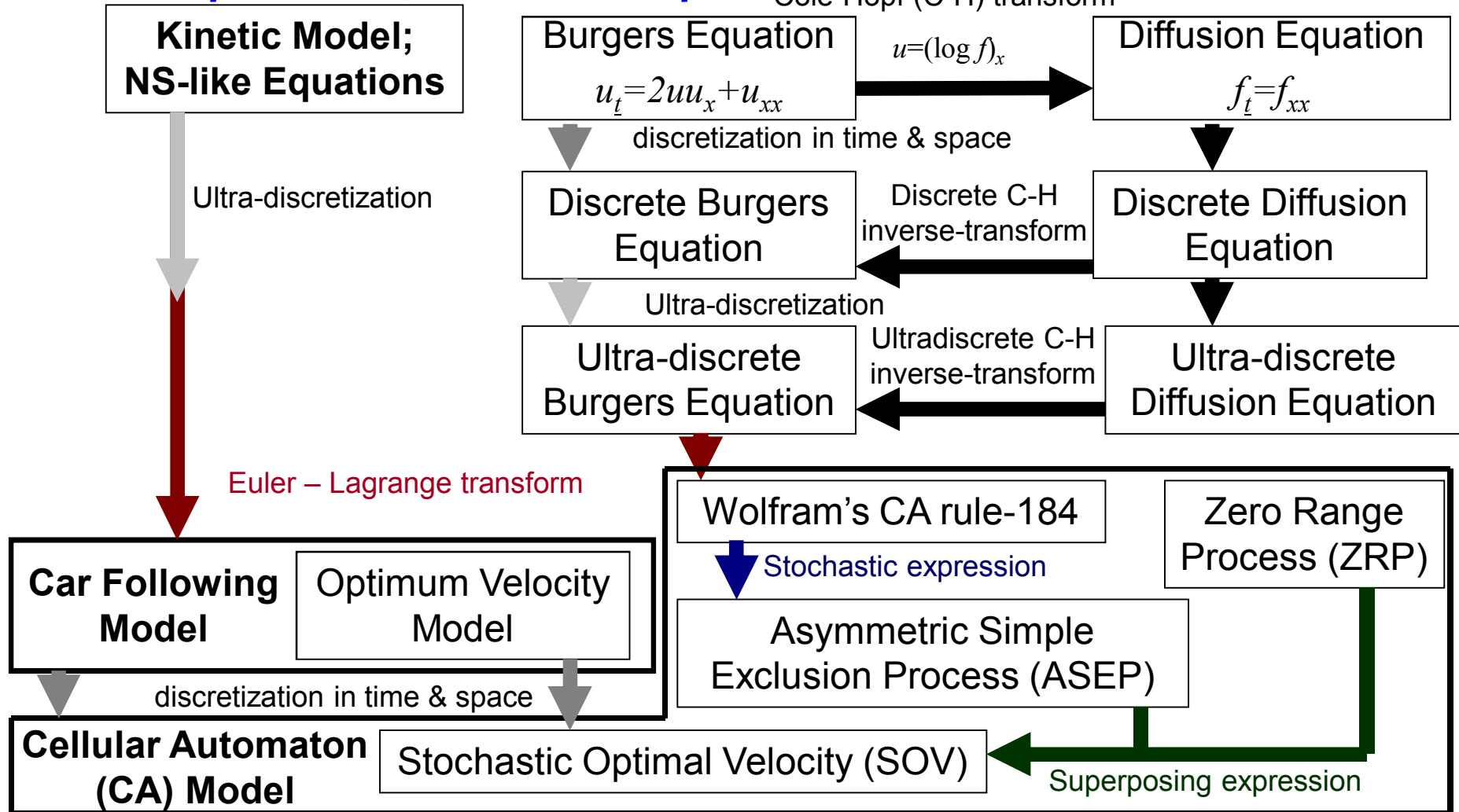
Entering probability,  $\alpha=0.8$ ; Exiting probability,  $\beta=0.9$



Entering probability,  $\alpha=1$ ; Exiting probability,  $\beta=0.1$



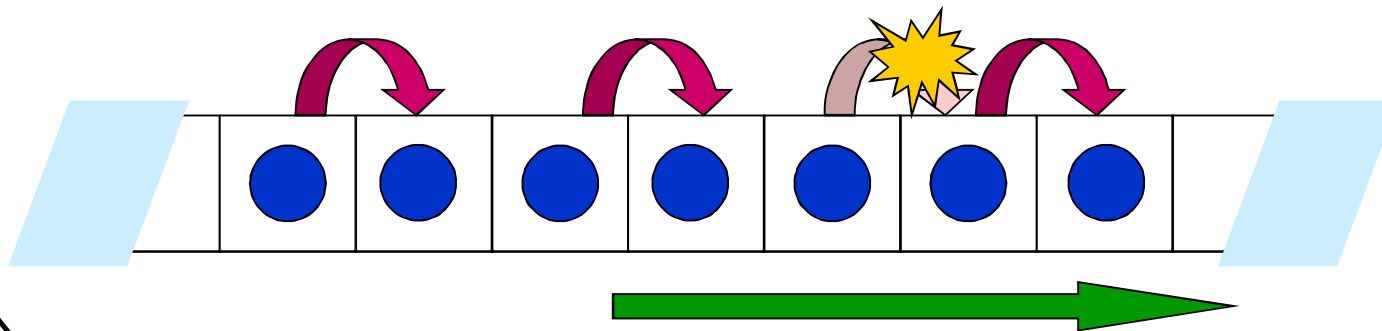
## Macroscopic Model; Eulerian-scope



## Microscopic Model; Lagrangian-scope

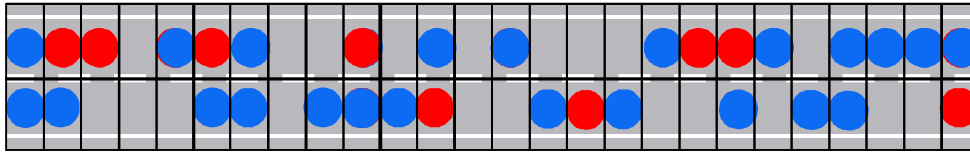
# *The cellular automaton (CA) model*

- Discretization of time and space
- Discretization of property
- Rules for dynamics
- Effect of excluding volume



# Model

## Cellular Automaton (CA) model



Spatial discretization

Temporal discretization

## Revised S-NFS model

Rule1 “acceleration”

$if(rand < r \quad s_i = S, \text{ else } s_i = 1)$   
 $if( g_i \geq G \cup v_i^{(0)} \leq v_{i+1}^{(0)} ) \text{ then } \underline{v_i^{(1)} = \min \{V_{\max}, v_i^{(0)} + 1\}}$

Rule2 “Slow to start”

$if(rand > q) \text{ then } \underline{v_i^{(2)} = \min \{v_i^{(1)}, x_{i+S}^{t-1} - x_i^{t-1} - S_i\}}$

Rule3 “Quick start”

$\underline{v_i^{(3)} = \min \{v_i^{(2)}, x_{i+S}^t - x_i^t - S_i\}}$

Rule4 “Random braking”

$if(rand < p_i) \text{ then } \underline{v_i^{(4)} = \max \{1, v_i^{(3)} - 1\}}$

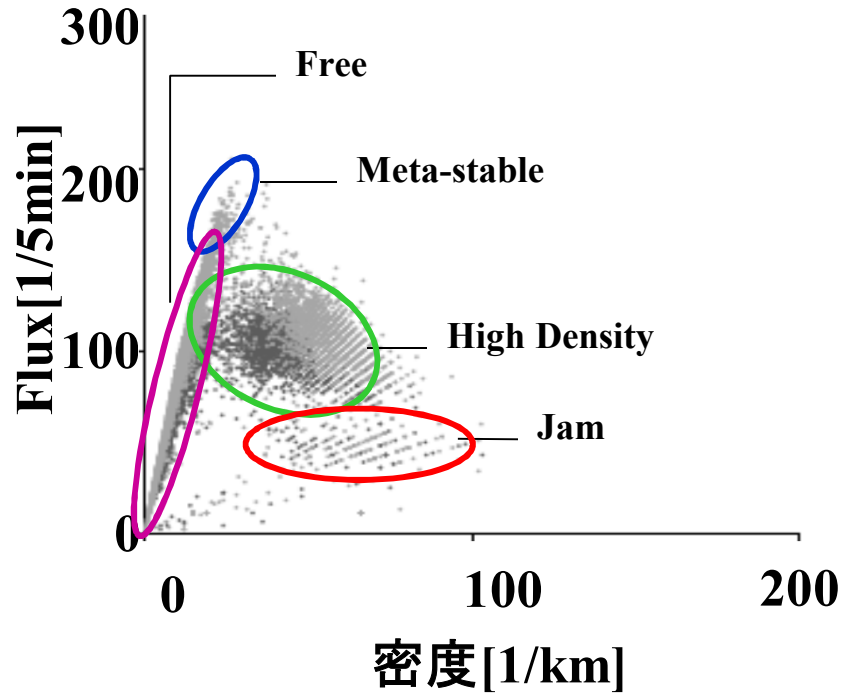
Rule5 “Avoid collision”

$\underline{v_i^{(5)} = \min \{v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(3)}\}}$

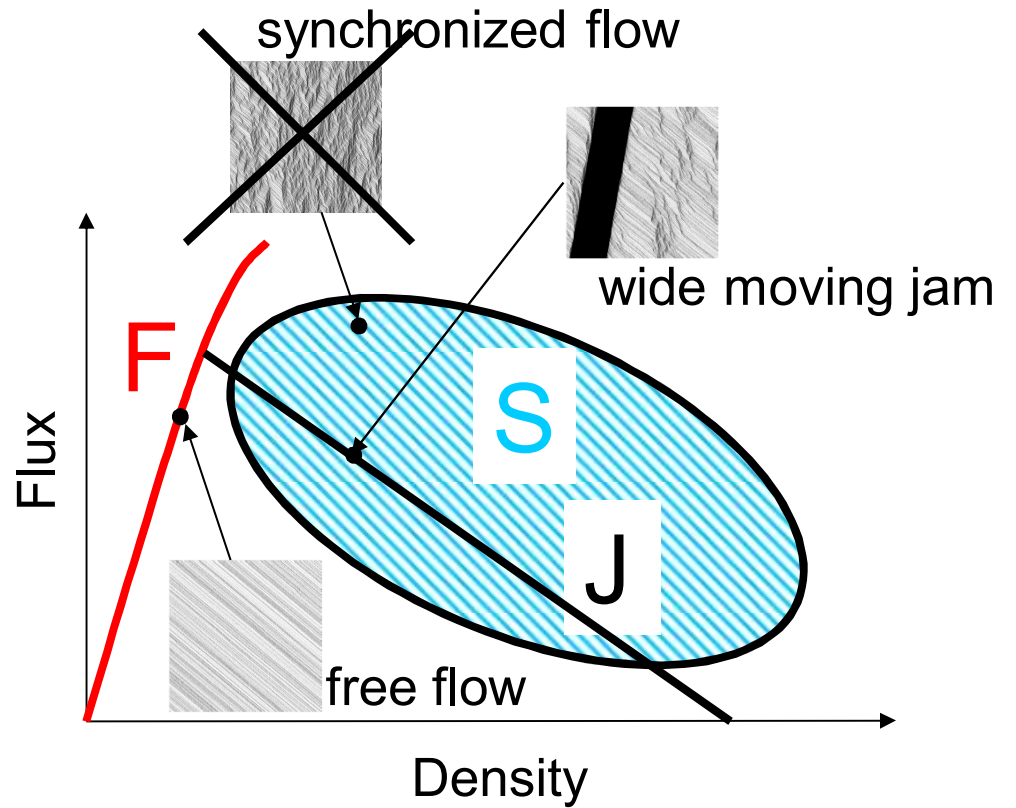
Rule6 “moving forward”

$\underline{x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)}}$

# Real Traffic flow

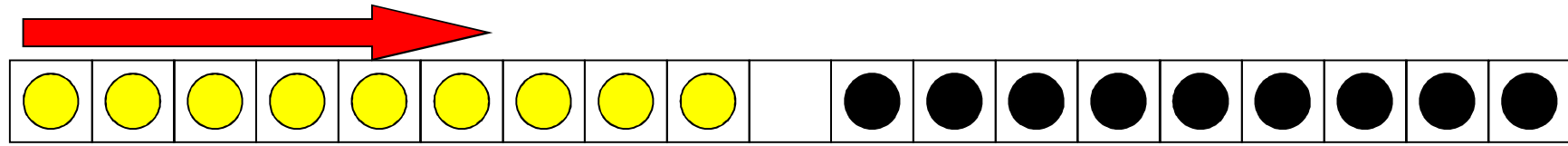


Observed at Tomei highway (Sugiyama et al.)



Kerner's Three Phases Theory

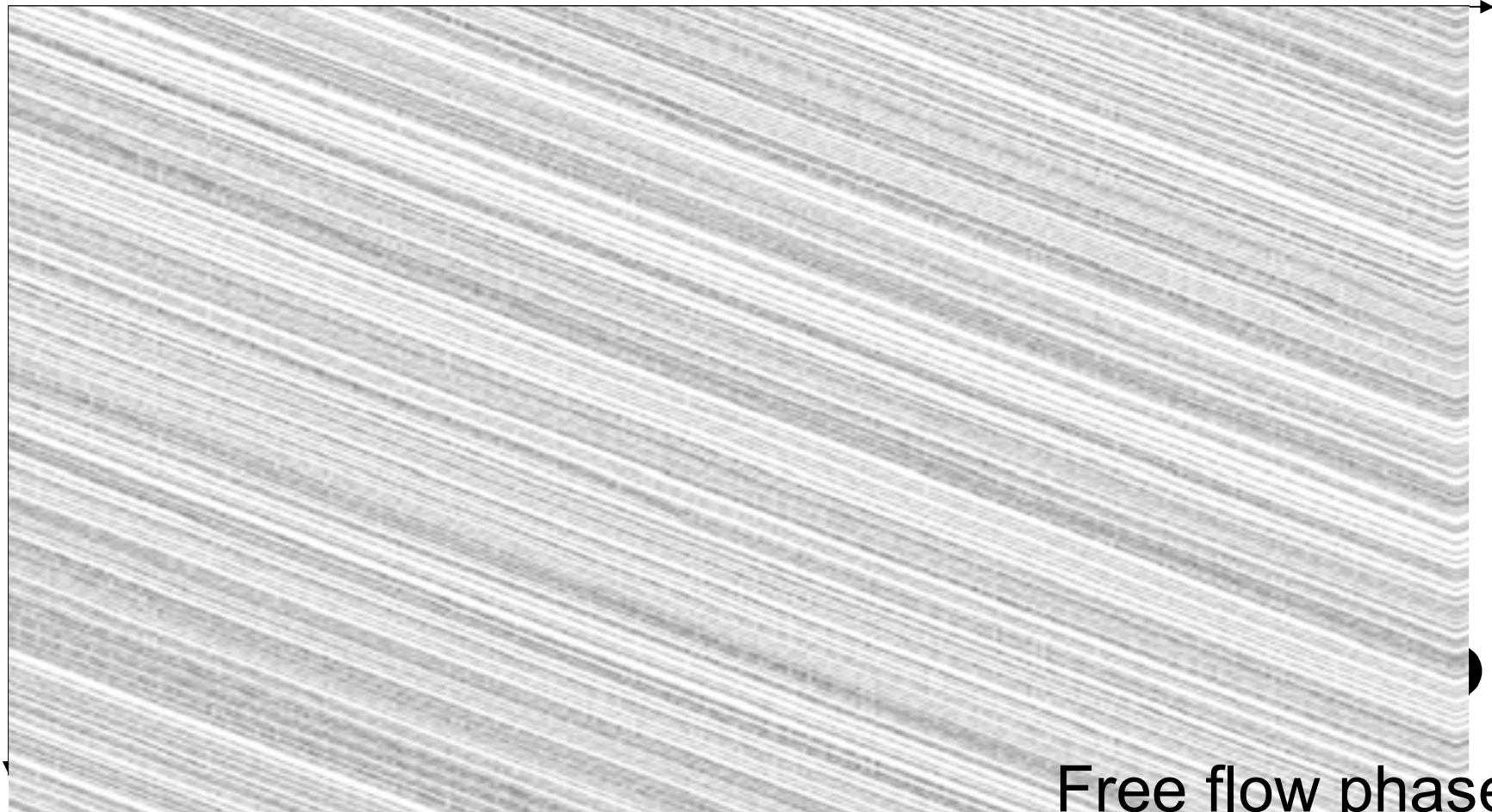
# Spatiotemporal diagram #1



distance

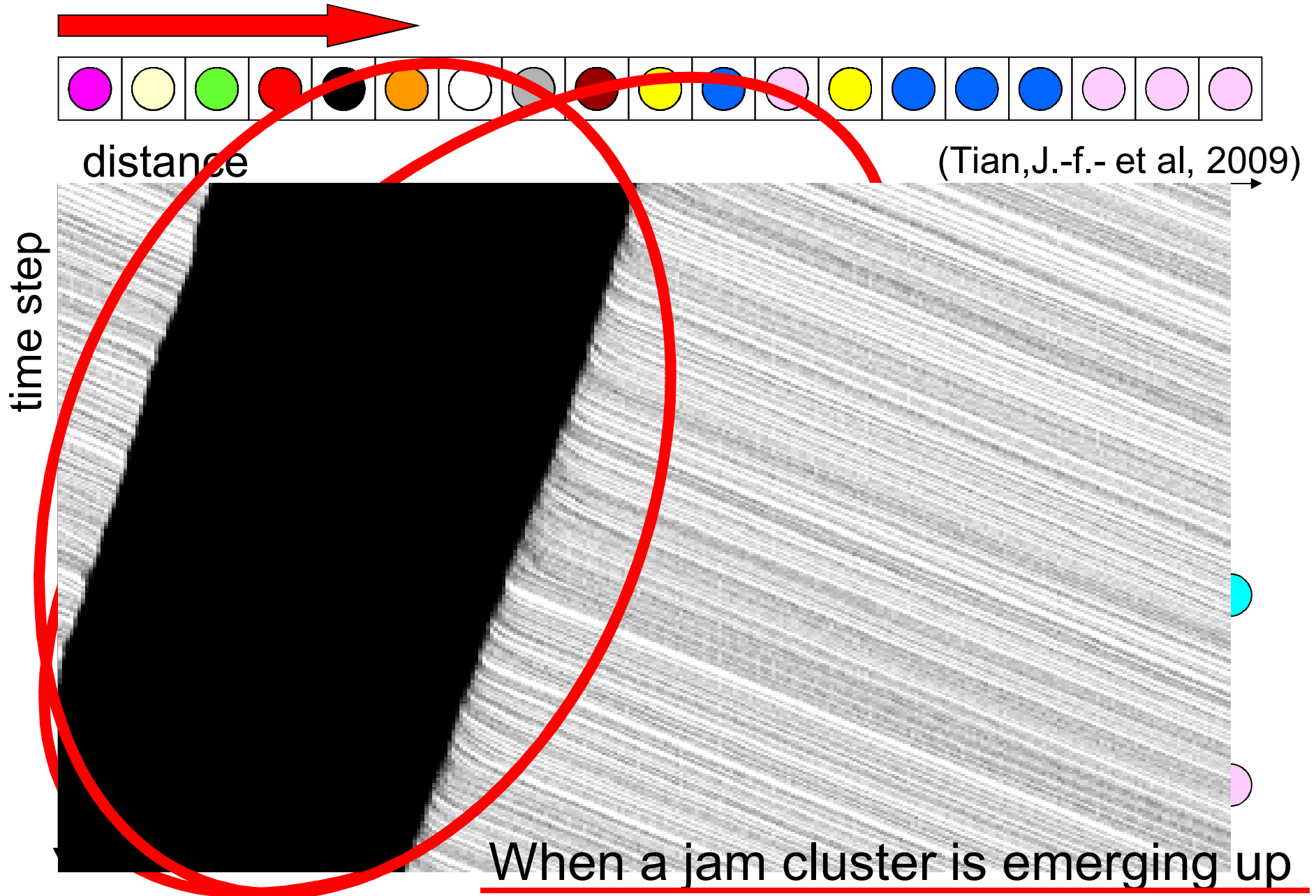
(Tian, J.-f.- et al, 2009)

time step



Free flow phase

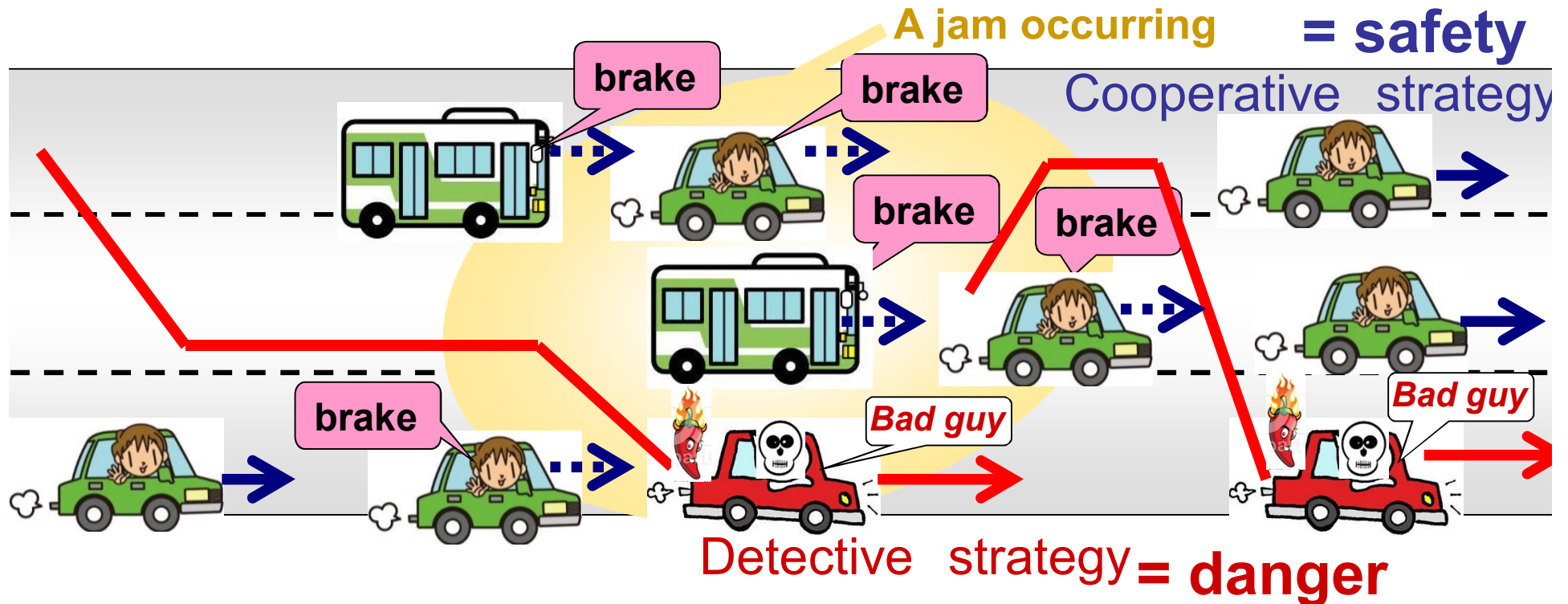
## Spatiotemporal diagram #2



# Scope

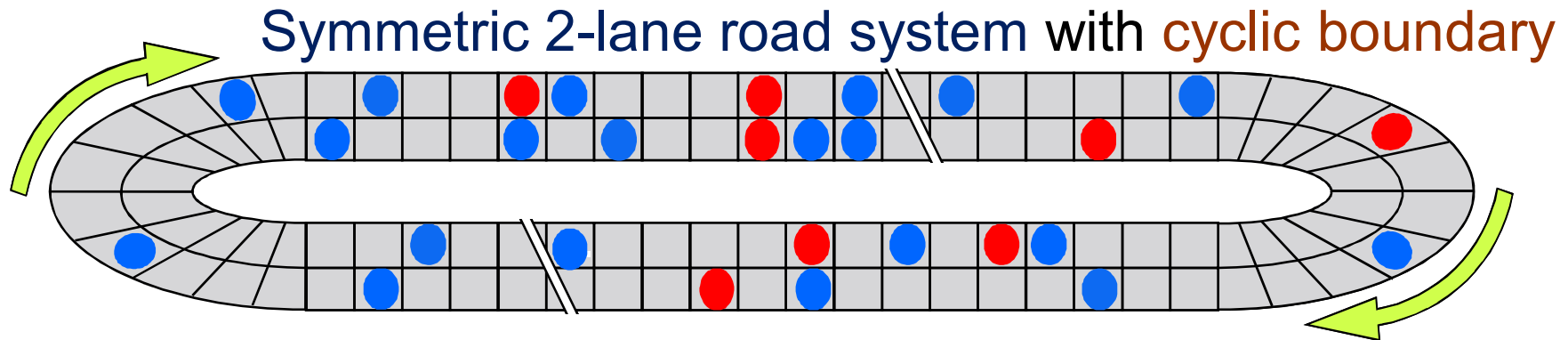
It might be interesting to examine the question of whether frequent lane changes in a 1D-like homogenous road (without any obvious bottlenecks such as a lane-closing, uphill travel, or a tunnel) may also cause another social dilemma. We assume that changing lanes itself could cause a dilemma in a traffic flow.

- C agents; Cooperative, without lane-changing
- D-agents; Defective, with lane-changing



# Simulation model

- C agents; **without** lane-changing
- D-agents; **with** lane-changing



## Procedure

### Setting initial condition

Assume Number of vehicles;  $N_{size}$ , Cooperation fraction;  $P_c$ .  
Generate vehicles having C or D according to  $P_c$  in the system.

### Iteration loop

Run-up period  
Observation period

### What happens in a single time-step;

- Lane-changing,
- Determining random brake probability,
- Refreshing velocity,
- Refreshing locations.

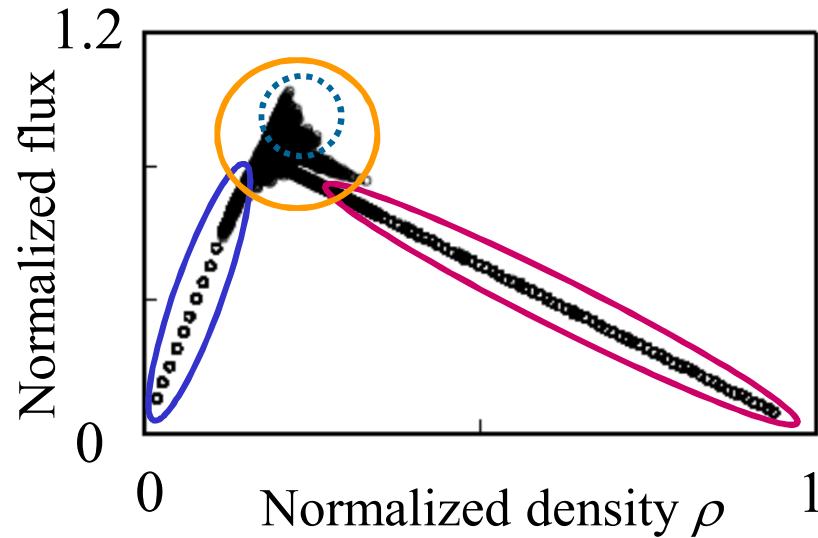
Next condition

Collecting independent 100 realizations.

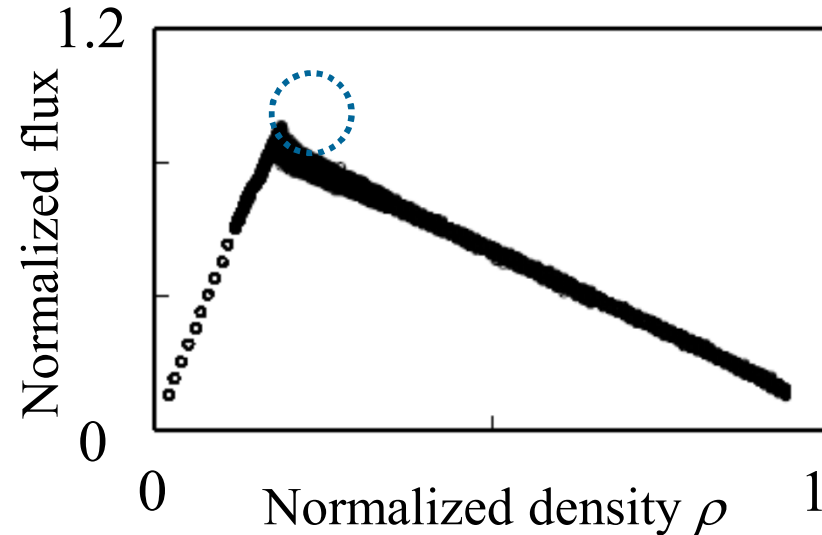


# Fundamental diagram

$Pc=1.0$



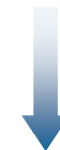
$Pc=0.0$



Definition of Traffic Flux;  
(Flux) = (Velocity)  $\times$  (Density)

Low density: Free flow phase  
Middle density; Phase transition  
F  $\rightarrow$  S  $\rightarrow$  J  
High density: Jam phase

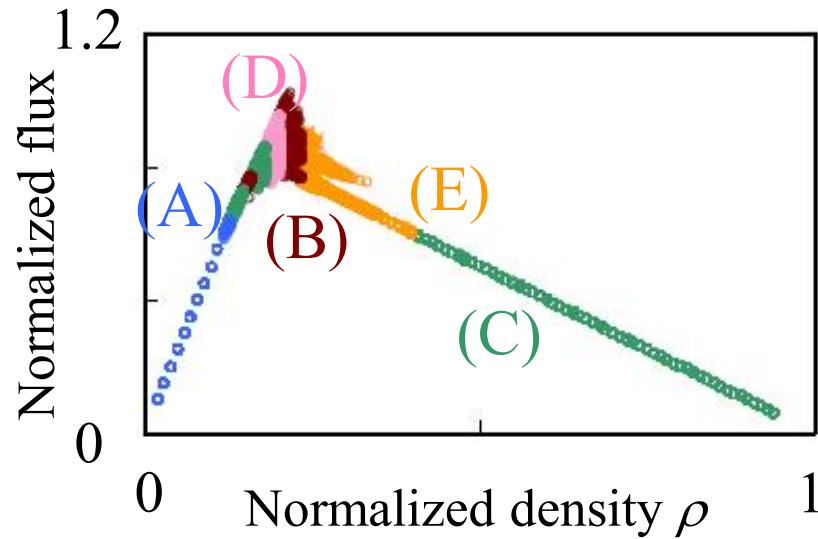
Meta stable: insufficient heading length  
but keeping high speed



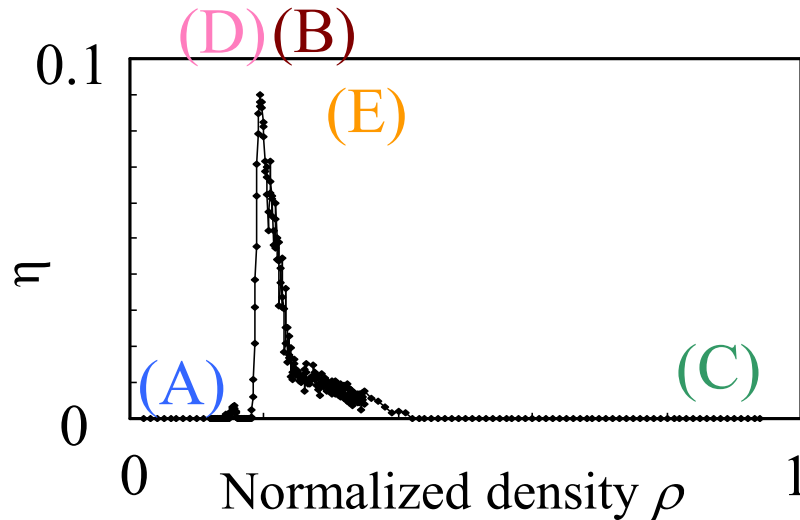
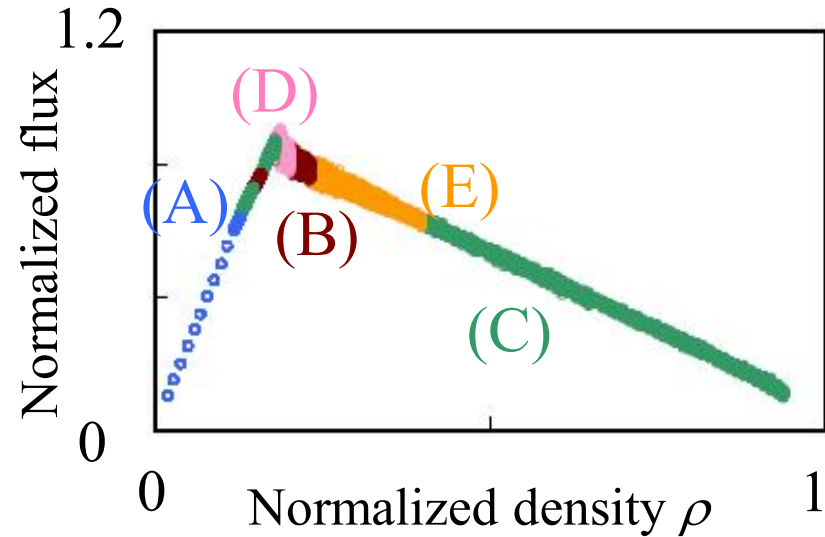
Turbulence by lane-changing brings  
phase transition.

# Dilemma class on fundamental diagram & Strength of dilemma

$P_c=1.0$



$P_c=0.0$

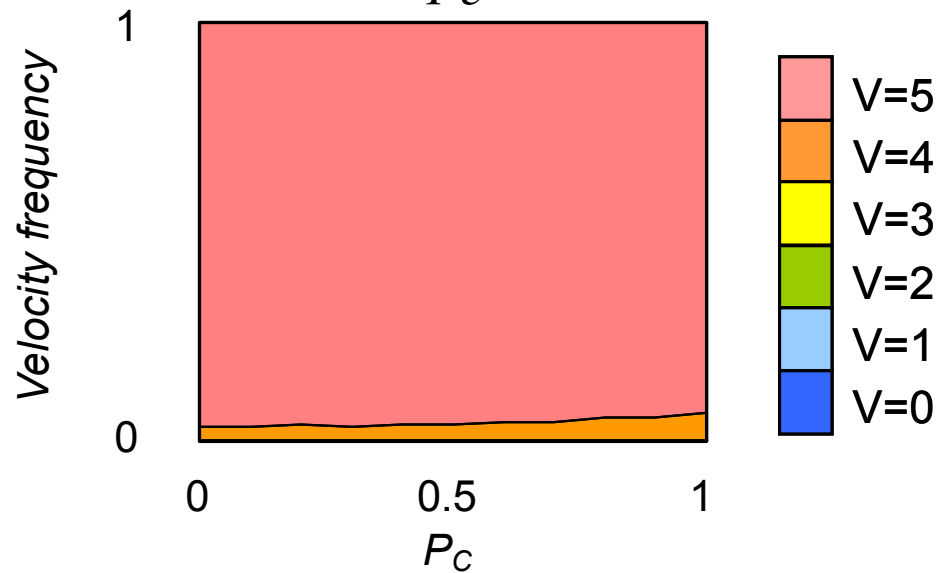
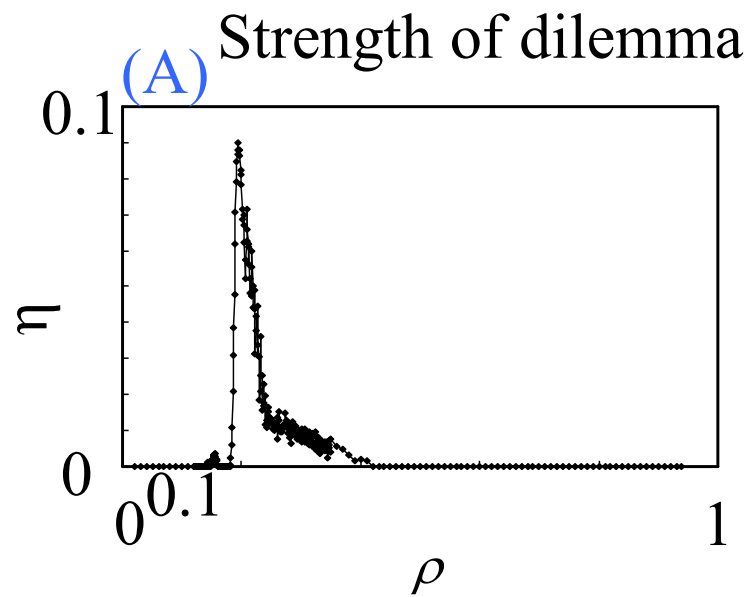
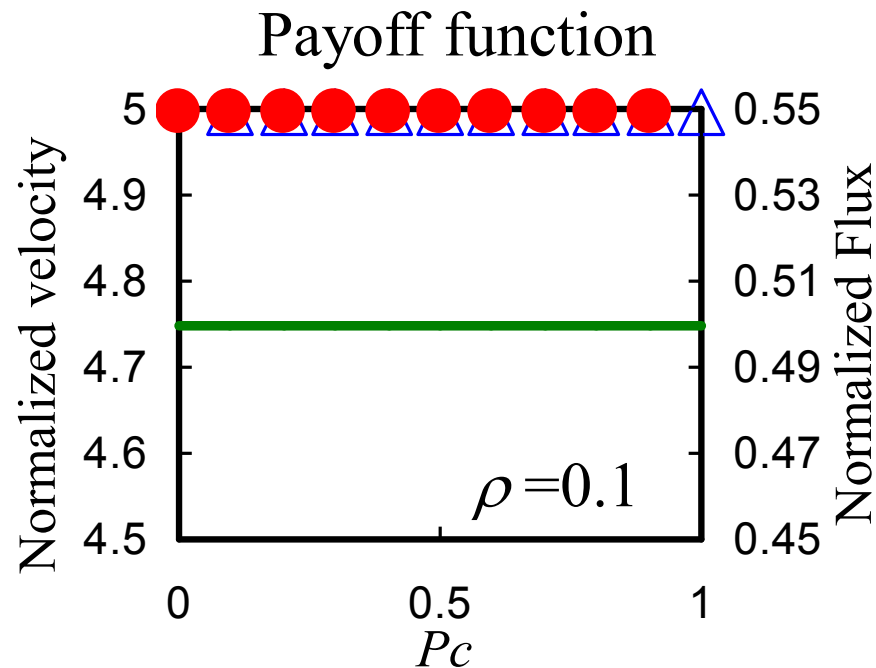
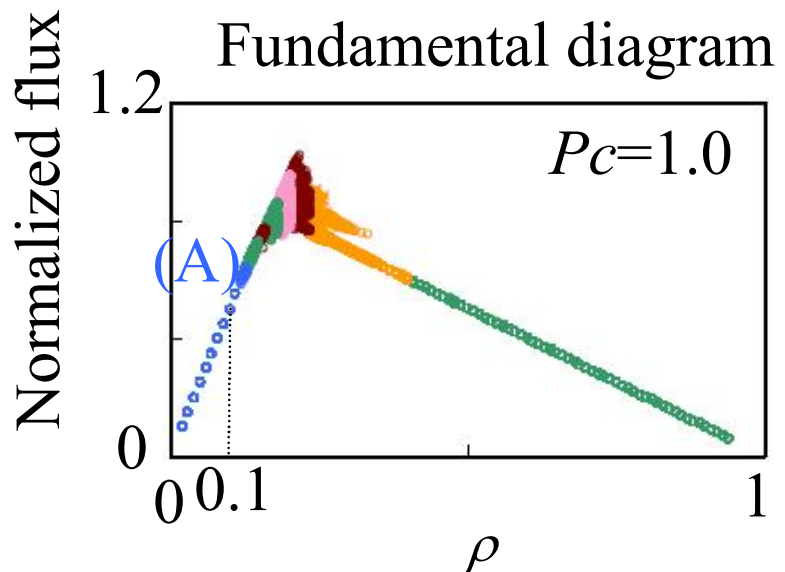


strength of dilemma,

$$\eta = \frac{flux_{\max} - flux_{equ}}{flux_{\max}}$$

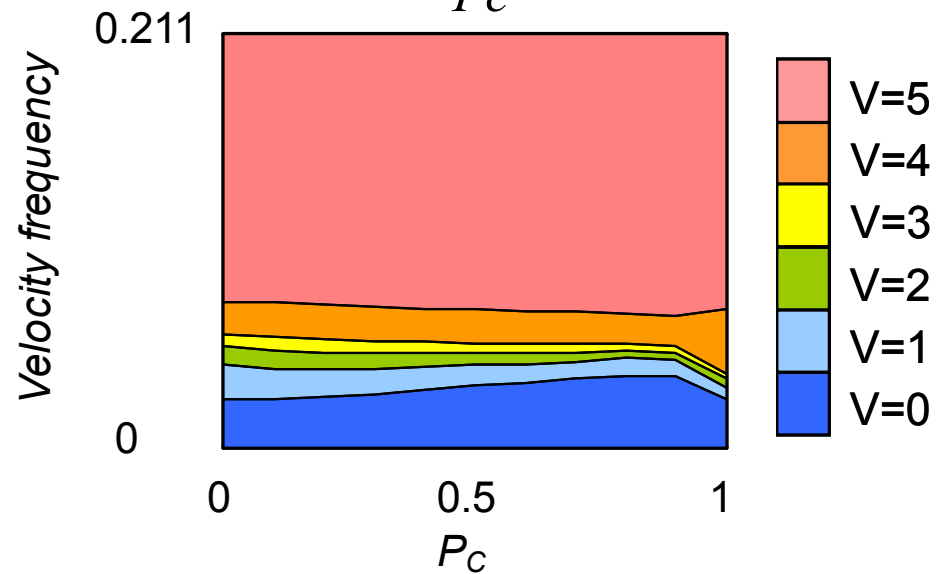
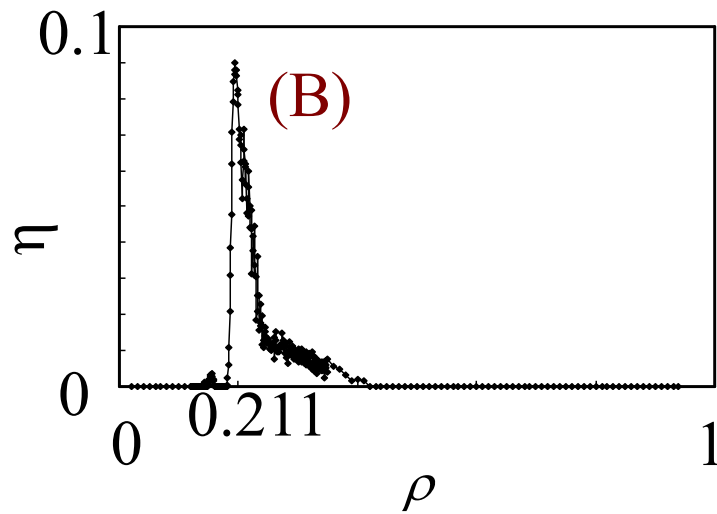
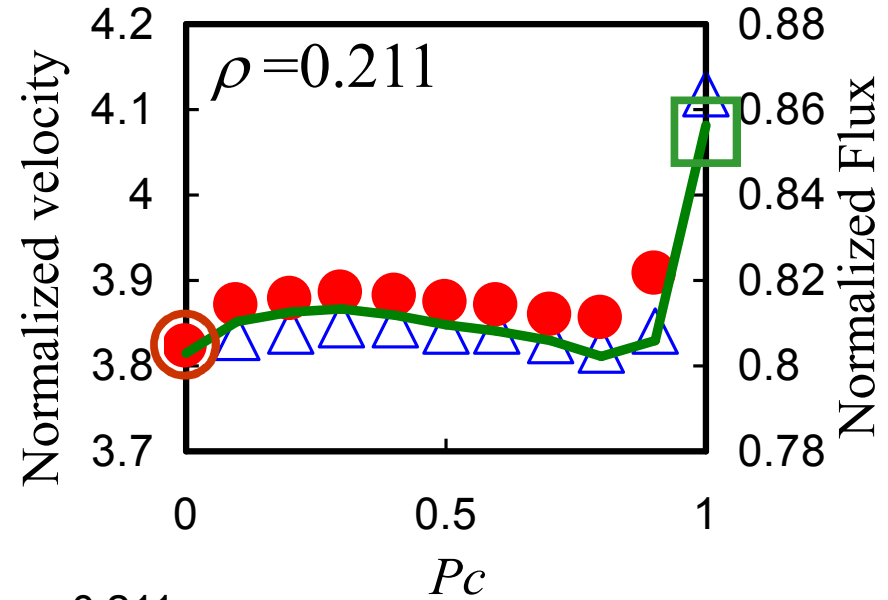
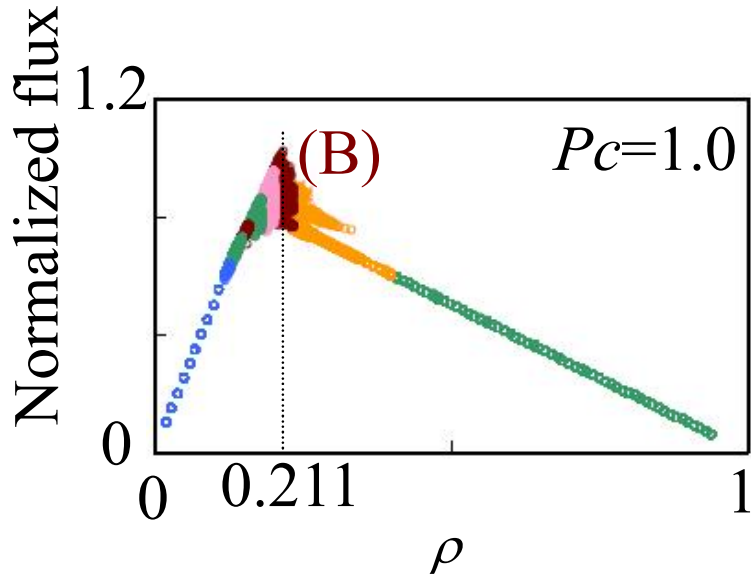
- $\triangle$  C-agent's velocity
- $\square$  Max flux
- $\bullet$  D-agent's velocity
- $\circ$  Nash equilibrium
- Flux

$\rho \leq 0.128$  Neutral Game



$$0.149 \leq \rho \leq 0.159, \quad 0.203 \leq \rho \leq 0.234$$

Prisoner's Dilemma Game



$$0.149 \leq \rho \leq 0.159, \quad 0.203 \leq \rho \leq 0.234$$

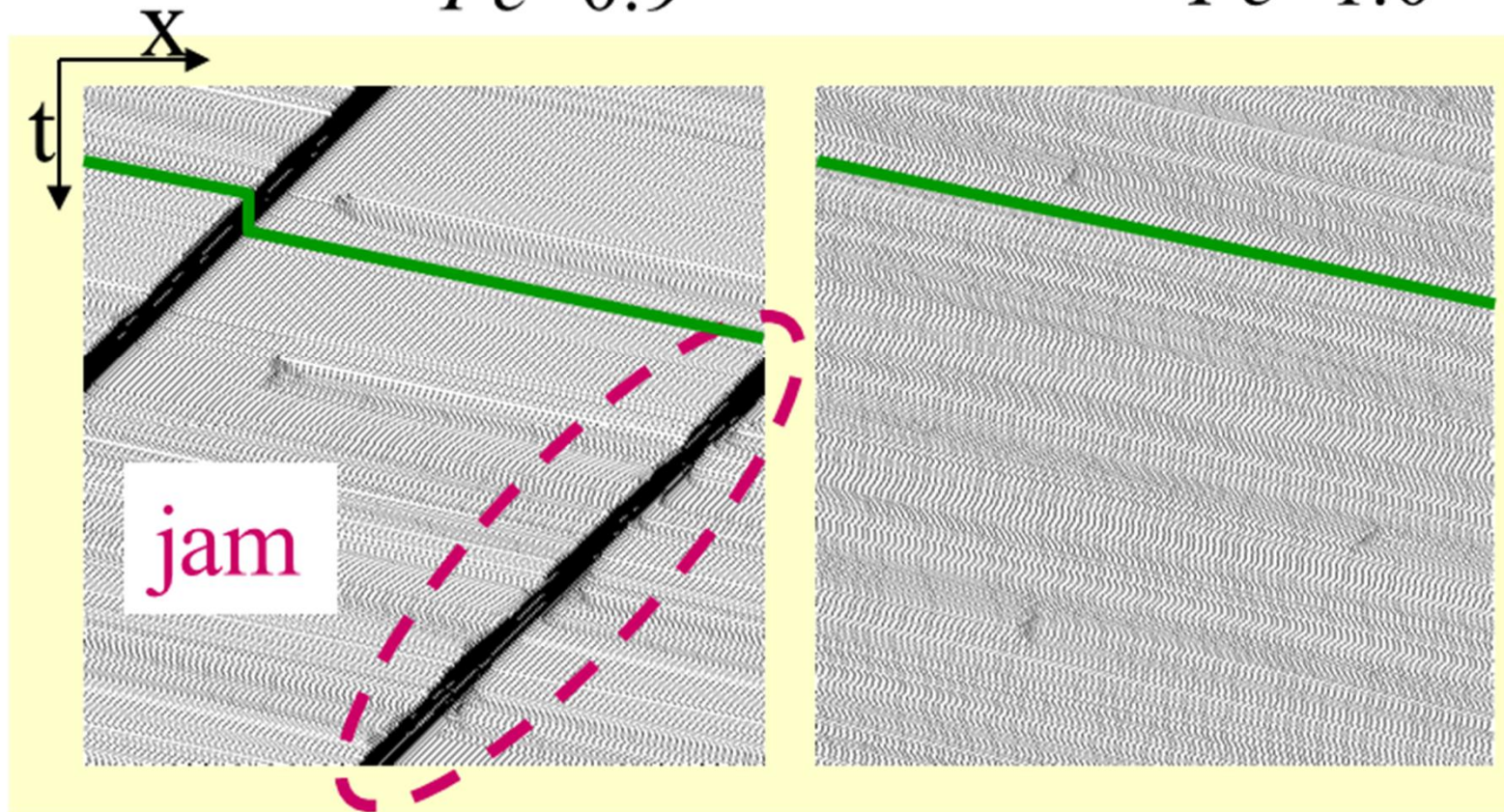
Prisoner's Dilemma Game

Spatiotemporal diagram

$$\rho = 0.211$$

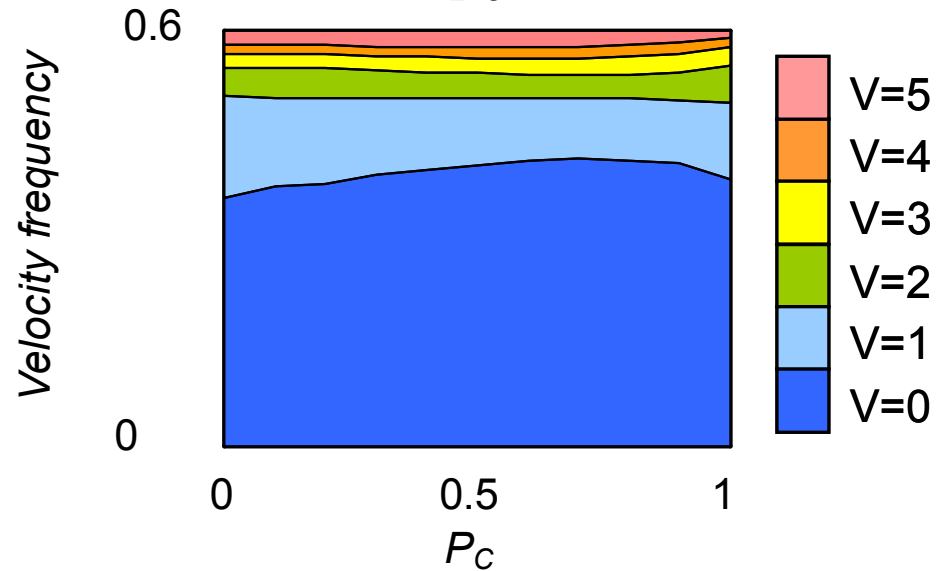
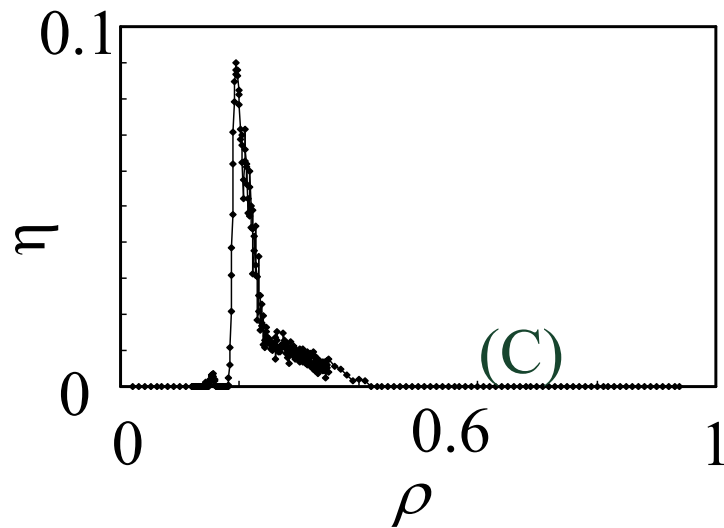
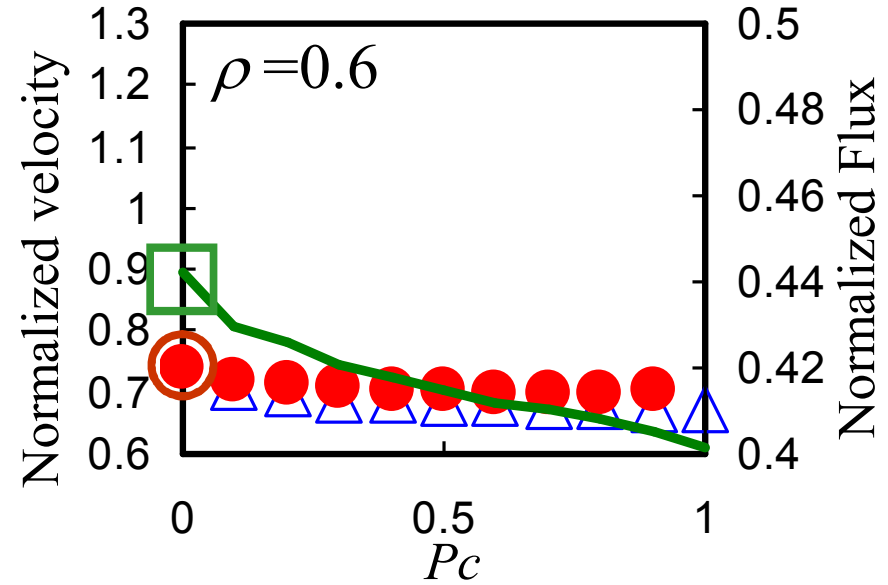
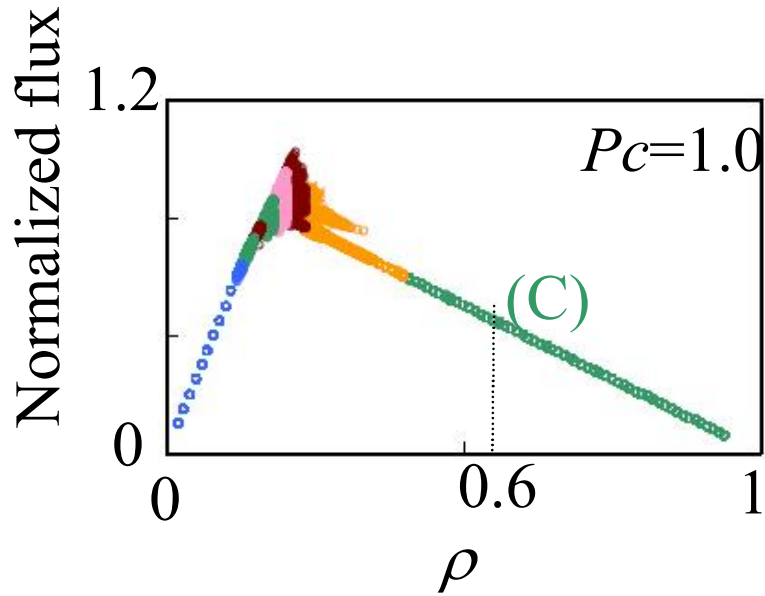
$$P_c = 0.9$$

$$P_c = 1.0$$



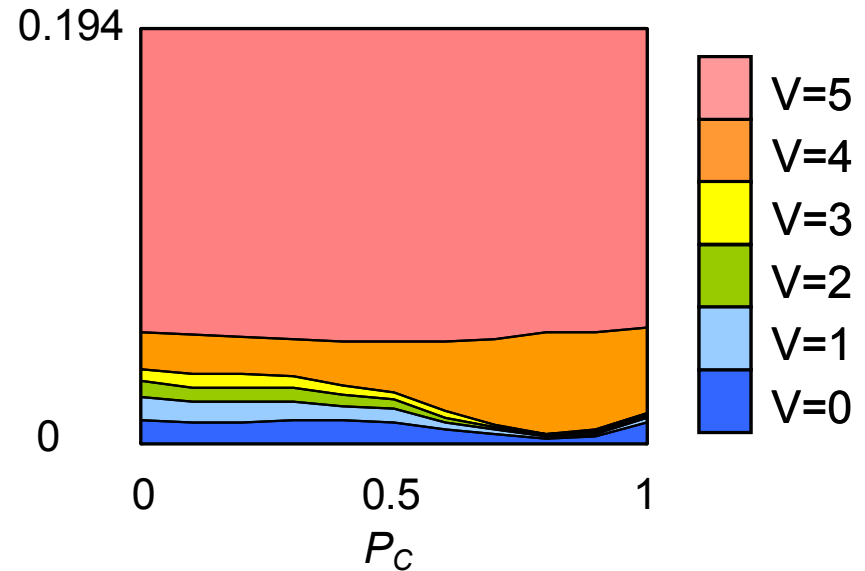
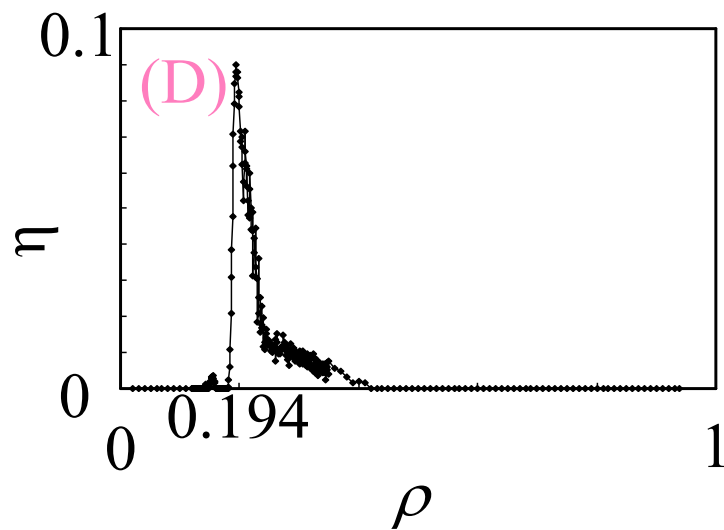
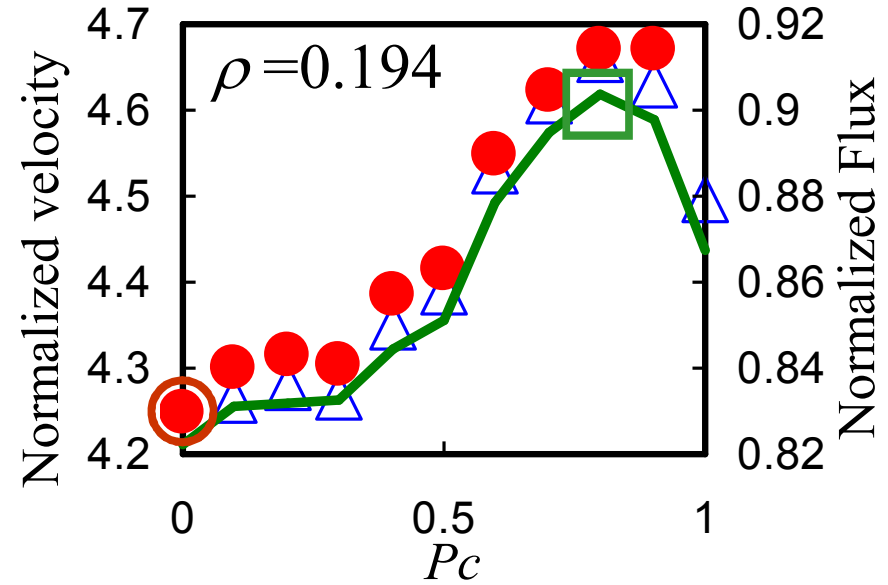
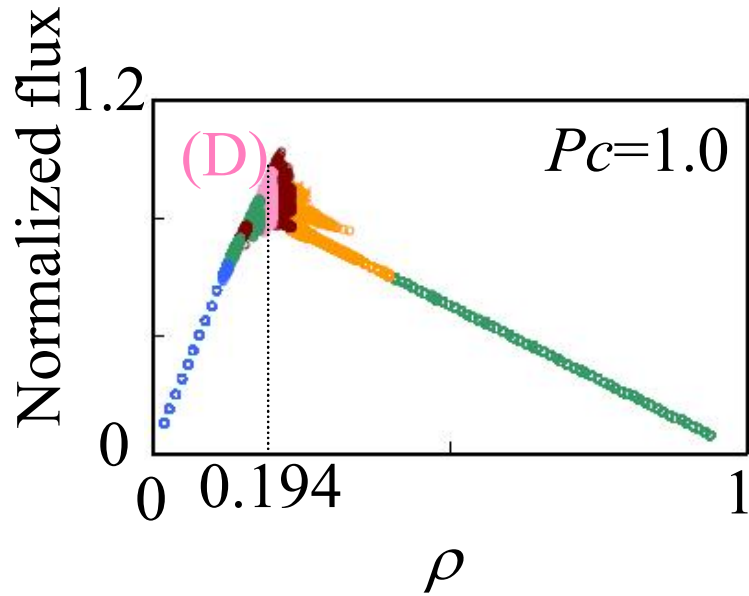
$$0.129 \leq \rho \leq 0.148, \quad 0.16 \leq \rho \leq 0.181, \quad 0.41 \leq \rho$$

D-dominate Trivial Game



$$0.182 \leq \rho \leq 0.202$$

D-dominate quasi-PDG



$$0.182 \leq \rho \leq 0.202$$

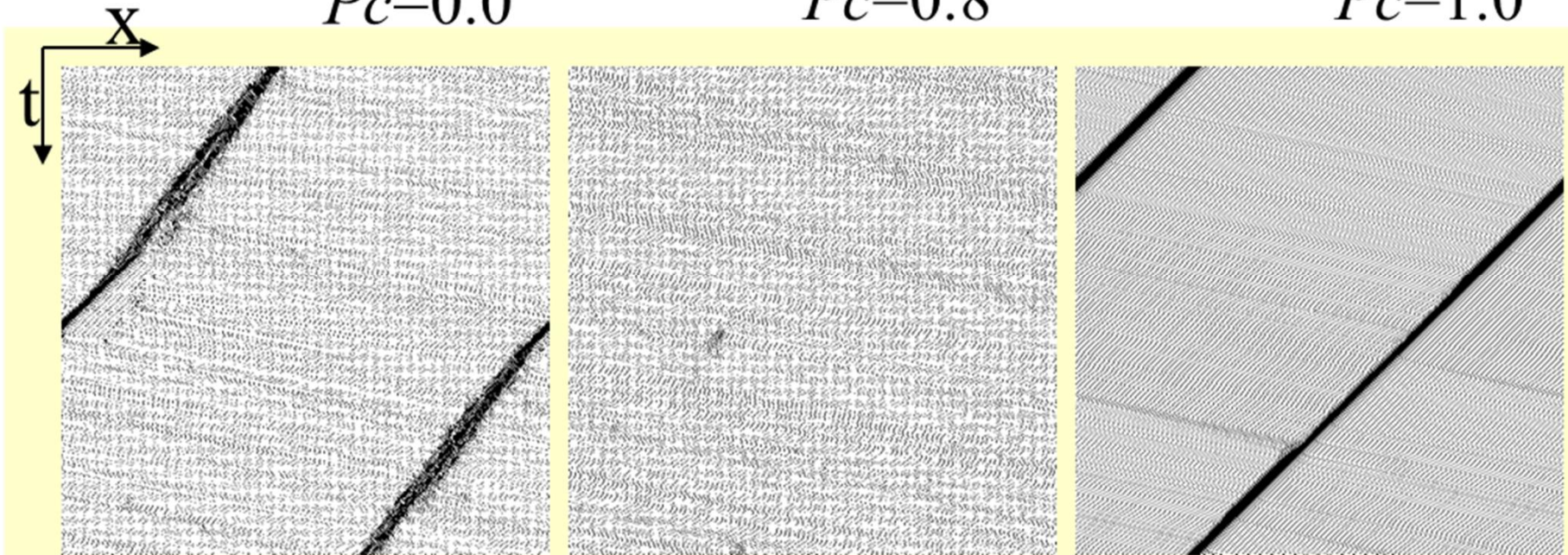
D-dominate quasi-PDG

$$\rho = 0.194$$

$P_c = 0.0$

$P_c = 0.8$

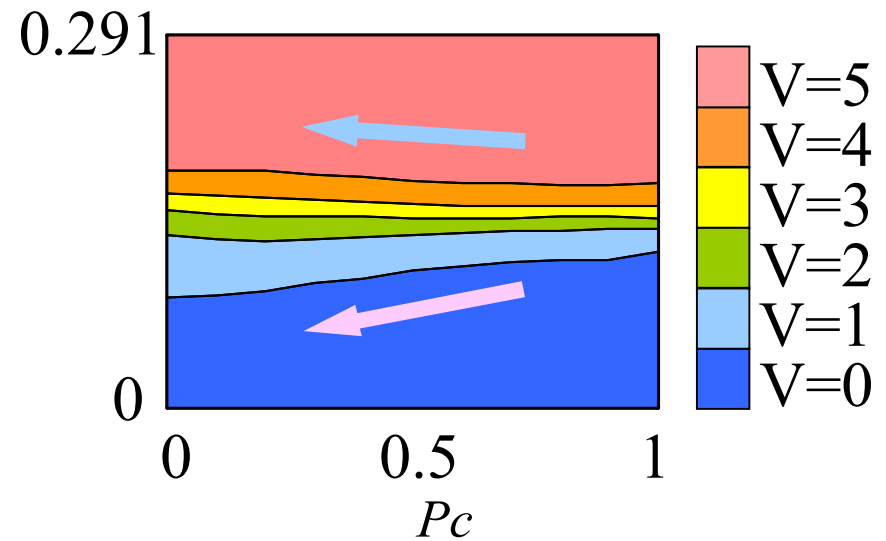
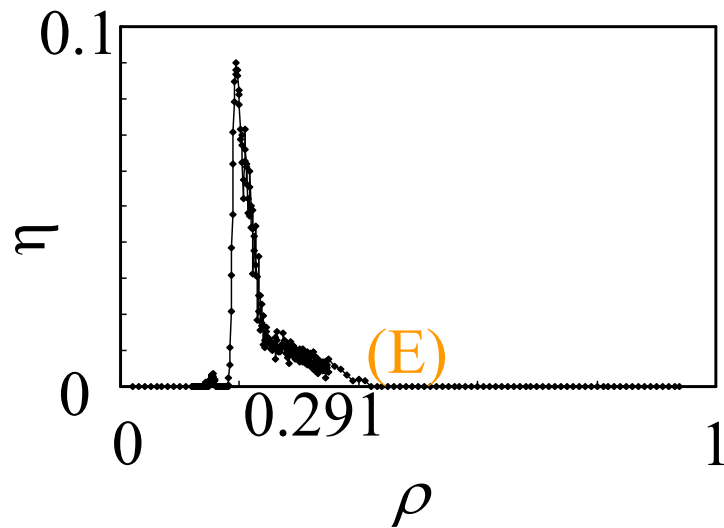
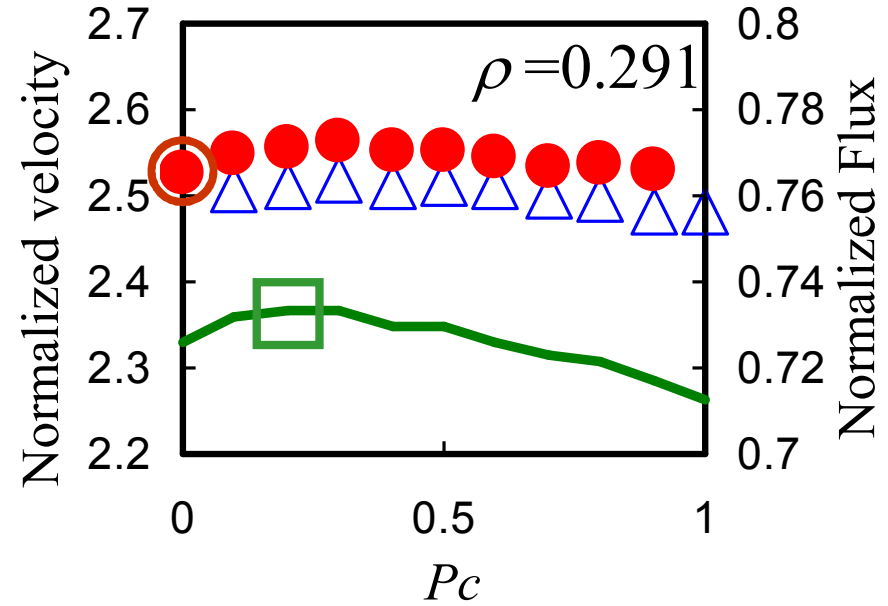
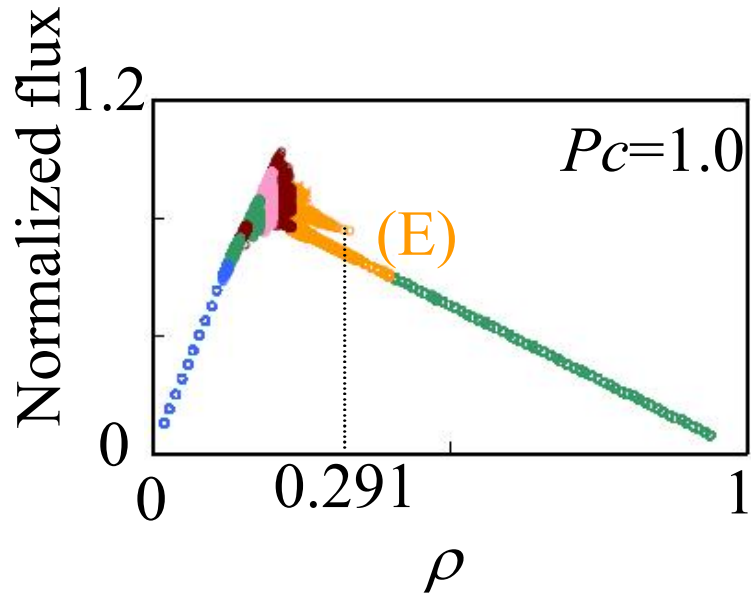
$P_c = 1.0$





$$0.235 \leq \rho \leq 0.4$$

D-dominate quasi-light PDG



# Conclusions

Previous studies of Traffic flow



Congested

Keller Traffic

jam



Free

Our motivation

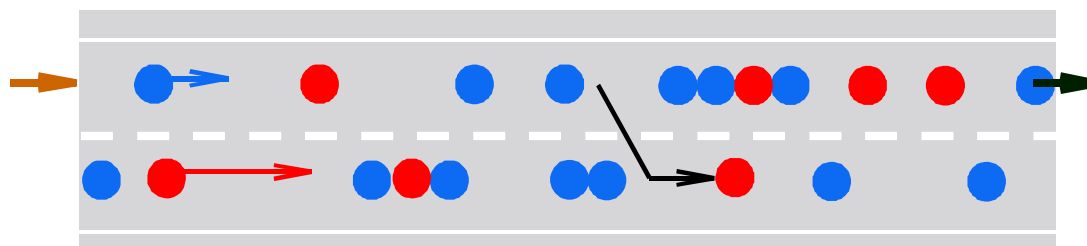
*How lane-change action affects on a traffic flow?*

⇒ **Lane change** → **turbulence** → **Jam** ?

- Driving without lane change
- Change their lane



Lane change?  
Or  
Stay present lane?



Our results imply that social-dilemma structures used by game theorists may underlie traffic flow phenomena that are commonly believed to be mere physics problems.

More information at;

Tanimoto et al.; **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, P07019, 2014.