システム知の探求
「生物進化と社会システム」

２０１４年7月2日（水）３，４時限

担当　中丸　麻由子

今日の内容

- はじめに
- 自然選択と進化ゲーム　入門
- 罰と協力について

自己紹介

- 専門分野
  - 数理生物学
  - 社会シミュレーション
  - 人間行動進化学
- 人間社会の本質を探る
  - 進化生態学的観点
    - 社会性の起源
      - 協力行動の進化に関する研究
    - 人間特有の形質（言語、学習、文化、他者の意図推論能力、共感、感情など）と人間社会の関係
  - 現在・過去の社会システムの理解

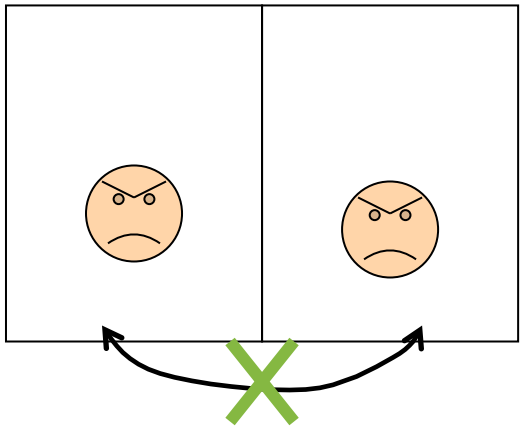
社会の基盤：協力

- 人の協力行動について
  - 学際的な研究分野
    - 心理学、社会心理学
    - 経済学：合理性では説明できない
    - 社会学：秩序問題
    - 政治学：投票行動、社会関係資本
    - 進化生態学：利他行動の進化、血縁淘汰
    - 数理生物学：進化ゲーム
    - 数物系：数理的なダイナミクスへの関心
  - 最先端
    - 脳・神経や遺伝子と協力行動の関係を探る

協力を達成するのは難しい

- 研究で良く用いられるフレームワーク
  - 囚人のジレンマゲーム
  - 公共財ゲーム

囚人のジレンマゲーム



意思疎通できない

非協力ゲーム

囚人Aの利得		囚人B 黙秘	囚人B 告白
囚人A	黙秘	禁固1年	禁固10年
囚人A	告白	禁固半年	禁固3年

囚人のジレンマゲーム

		プレイヤーB	
		協力	非協力
プレイヤーA	協力	$(R = 3, R = 3)$ Reward	$(S = 0, T = 5)$ Sucker
	非協力	$(T = 5, S = 0)$ Temptation to defect	$(P = 1, P = 1)$ Punishment ナッシュ解

条件

$$T > R > P > S$$

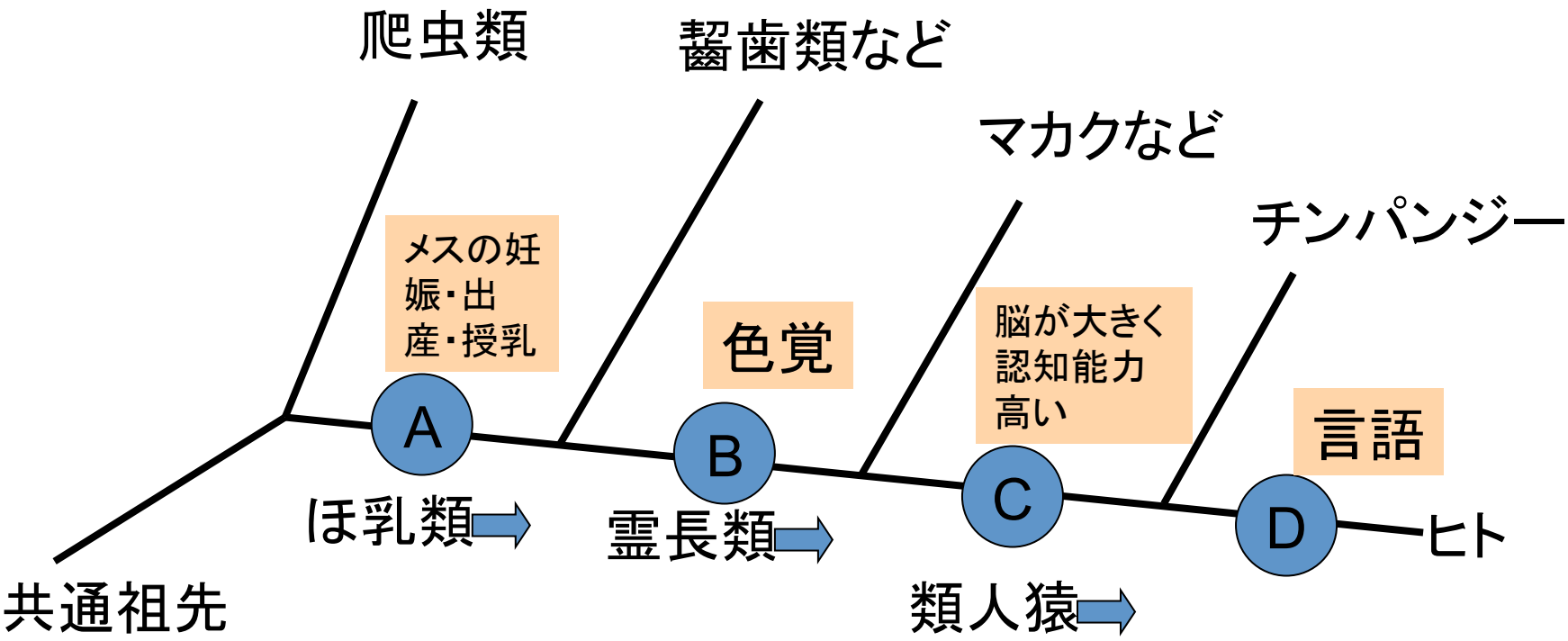
$$R > (T + S)/2$$

協力の進化条件を
進化ゲームで解くとは？

- 進化ゲームの前提となる自然選択を説明

自然選択と進化ゲーム　入門

進化で獲得された形質と系統



シリーズ進化学5『ヒトの進化』p143　岩波書店

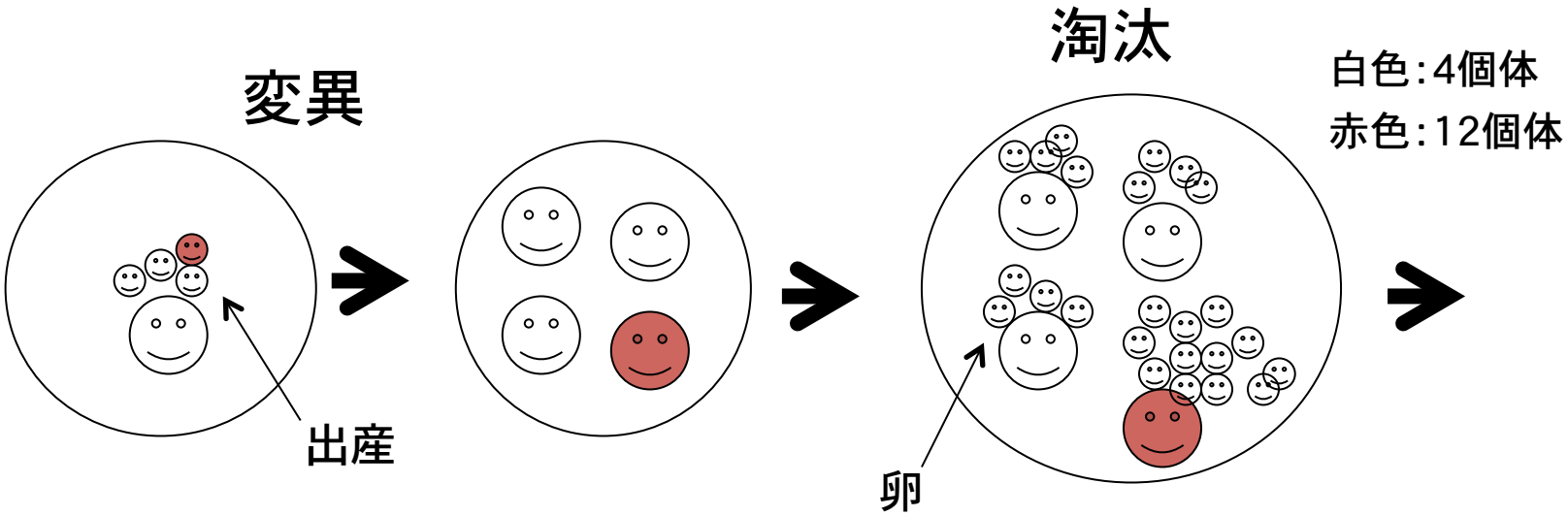
進化ゲーム　→「自然選択」が根底にある

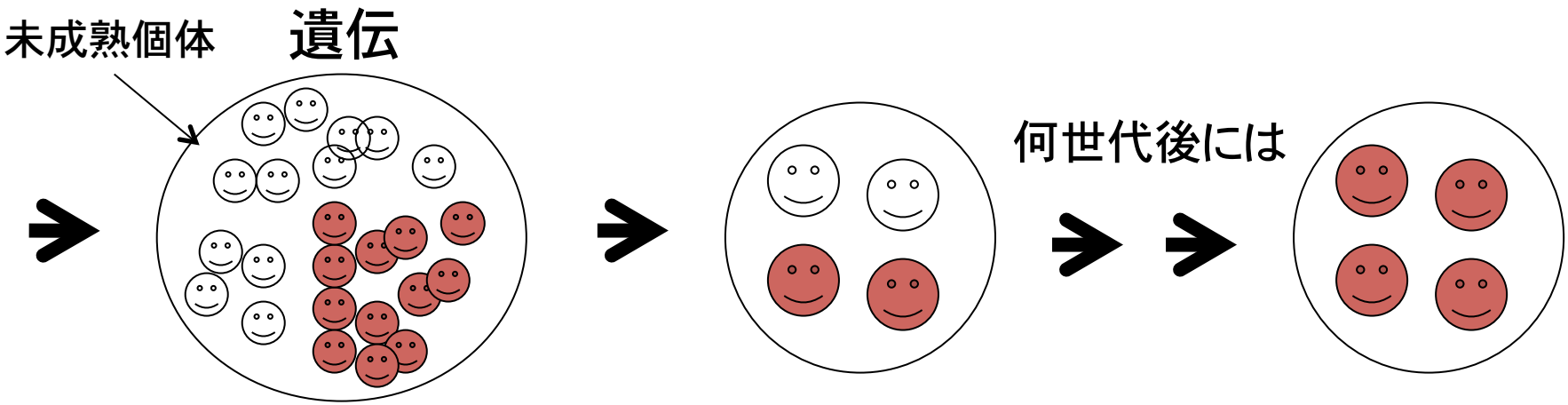
自然選択による進化の起こるための3つ

- **変異：** 個体間である性質の違い
- **選択：** 性質の異なる個体間では、残す子の数の平均や子の生存率が違う
- **遺伝：** その性質は遺伝する（次世代へ伝わる）

酒井など「生き物の進化ゲーム」3ページより

自然選択による進化



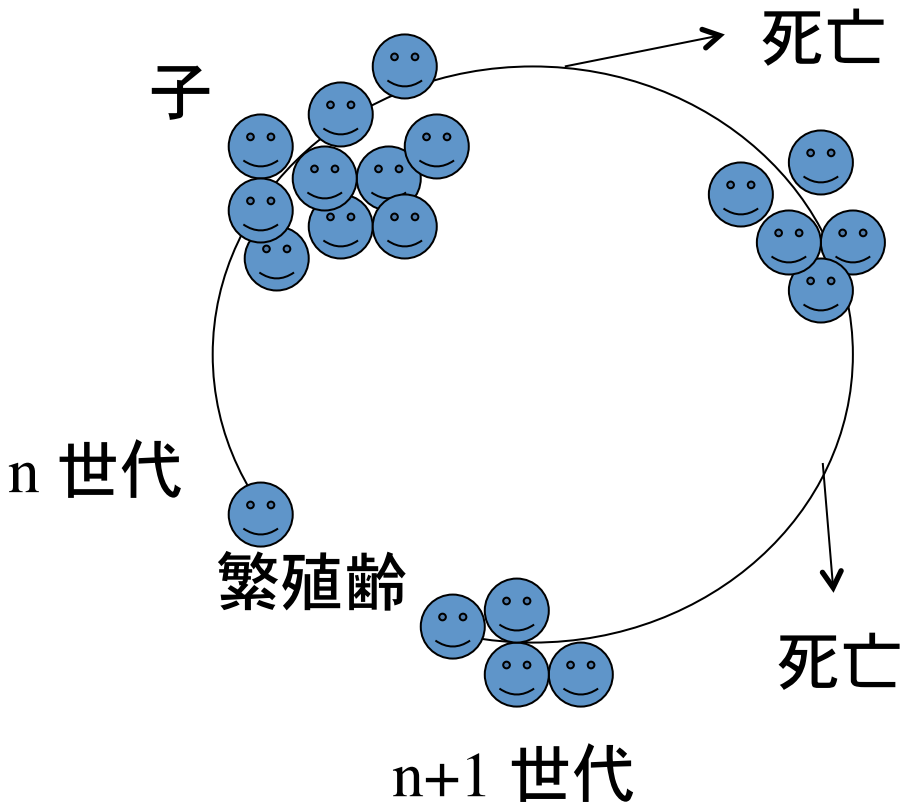


酒井など「生き物の進化ゲーム」page 6より

適応度の定義

ある遺伝的性質を持った型（遺伝子型）の個体が、1個体あたり次世代に残す子の数の平均

＝ 繁殖齢に達した個体が残す子供の数の平均 × 子の繁殖齢までの生存率

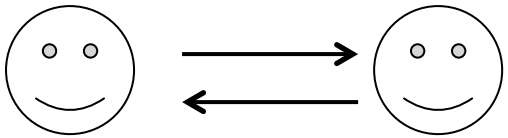


ライフサイクルが一周したら、ある遺伝的性質を受け継ぐ個体が何倍になっているのかを示す言葉でもある

酒井など「生き物の進化ゲーム」page 8より

（生物の）進化ゲームでは

表現型形質A　　表現型形質B



相互作用→ゲーム的状況

相互作用によって

利得が生じる

	A	B
A	*a*	*b*
B	*c*	*d*

利得が適応度に影響する時

進化ゲーム理論の枠組みで扱うことが可能！

2者間の社会的相互作用

他個体の適応度への影響

自分の適応度への影響

	＋	ー
＋	相利	利己
ー	利他	嫌がらせ (spite)

利他行動とは:
自らの適応度を下げてまで相手の適応度を上げる行動

→ 囚人のジレンマゲームや公共財ゲームなどで表現

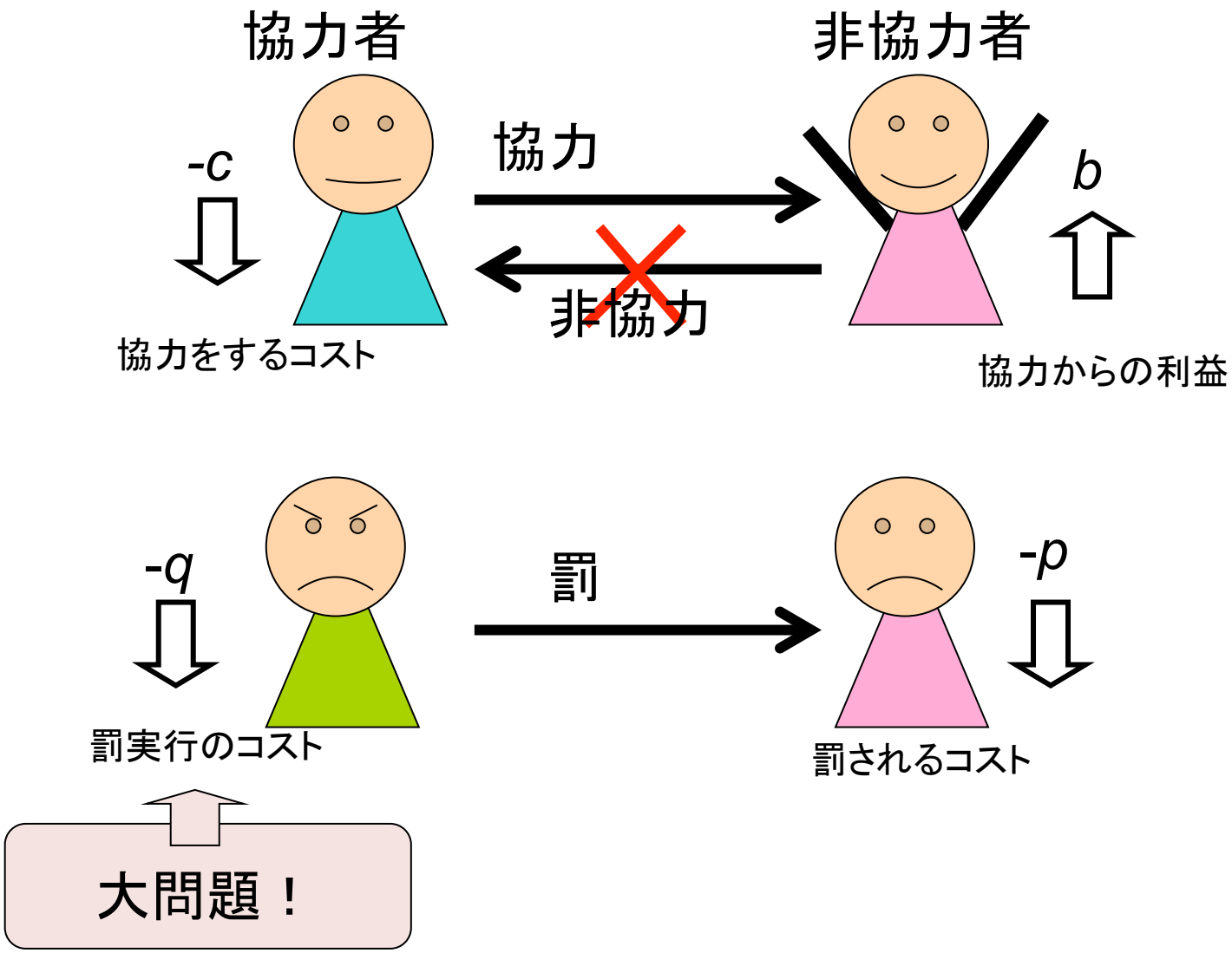
協力の進化条件とは？

	研究例
血縁淘汰	ハミルトンルール
群淘汰	
直接互恵性	繰り返し囚人のジレンマゲーム
間接互恵性	評判、ゴシップ
社会ネットワーク構造	空間構造の影響など
罰　あるいは　嫌がらせ	協力者＋罰行動

etc.....

罰が協力を促進するのか？

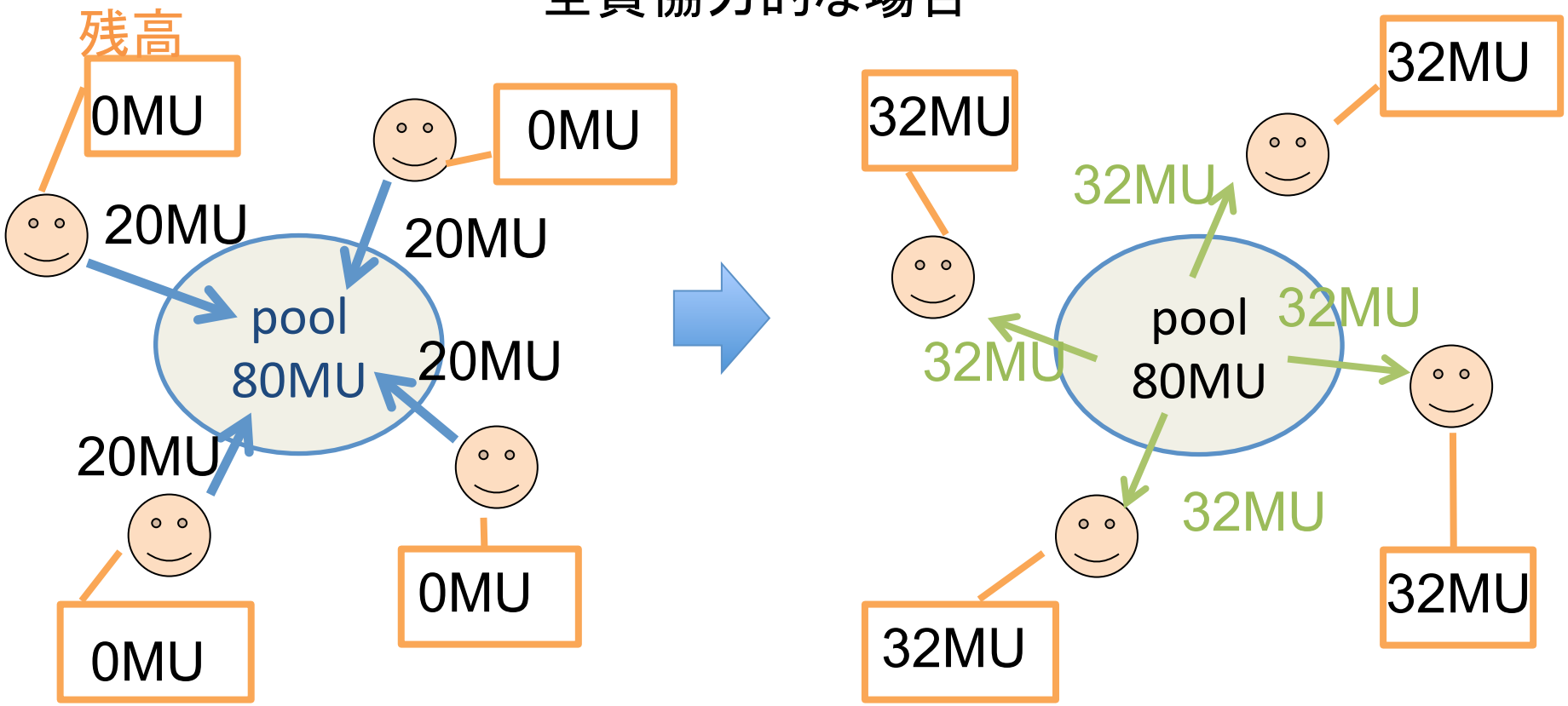
罰は協力を促進？



公共財ゲーム in Fehr & Gachter (2002)

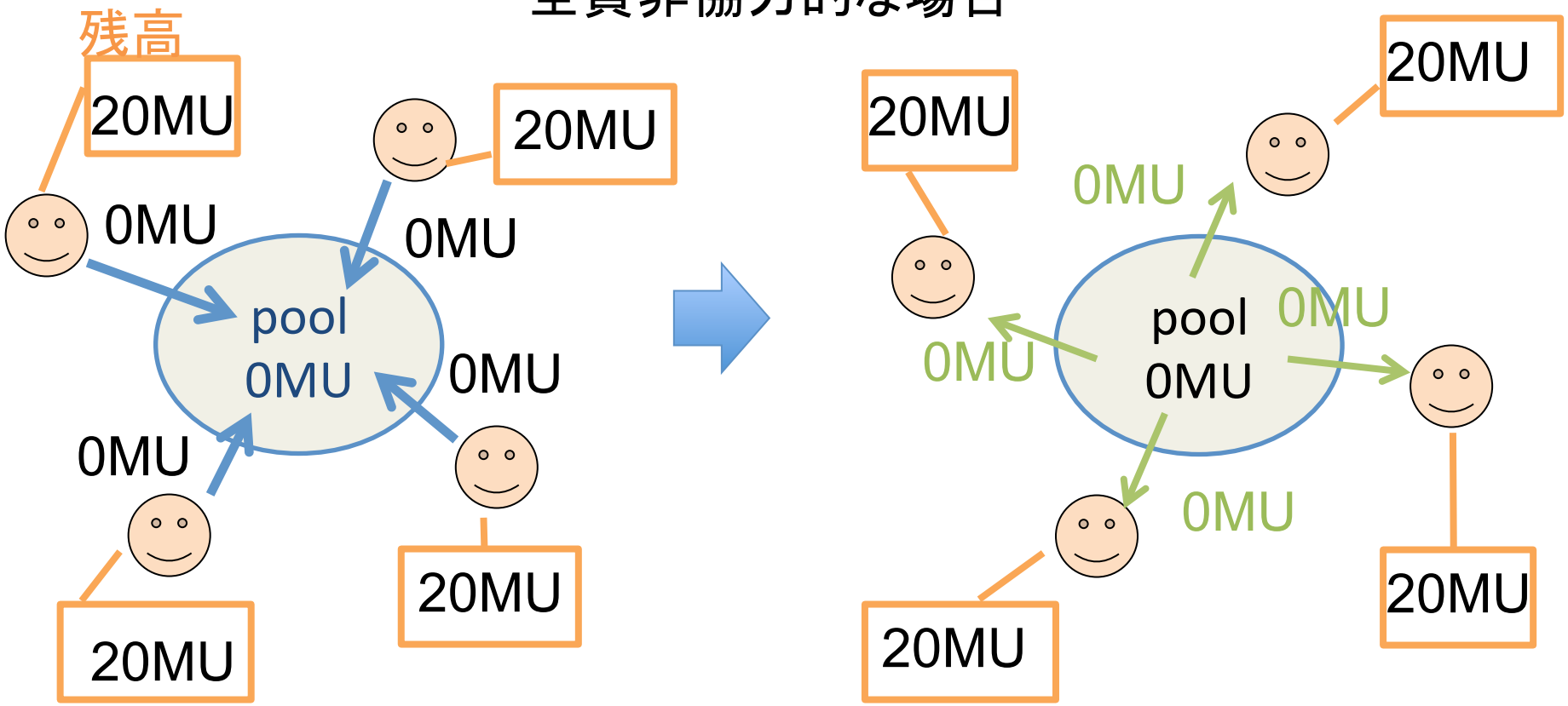
1人:20MU配布
投資額:0-20MU
戻り額:0.4MU/1MUプール

全員協力的な場合



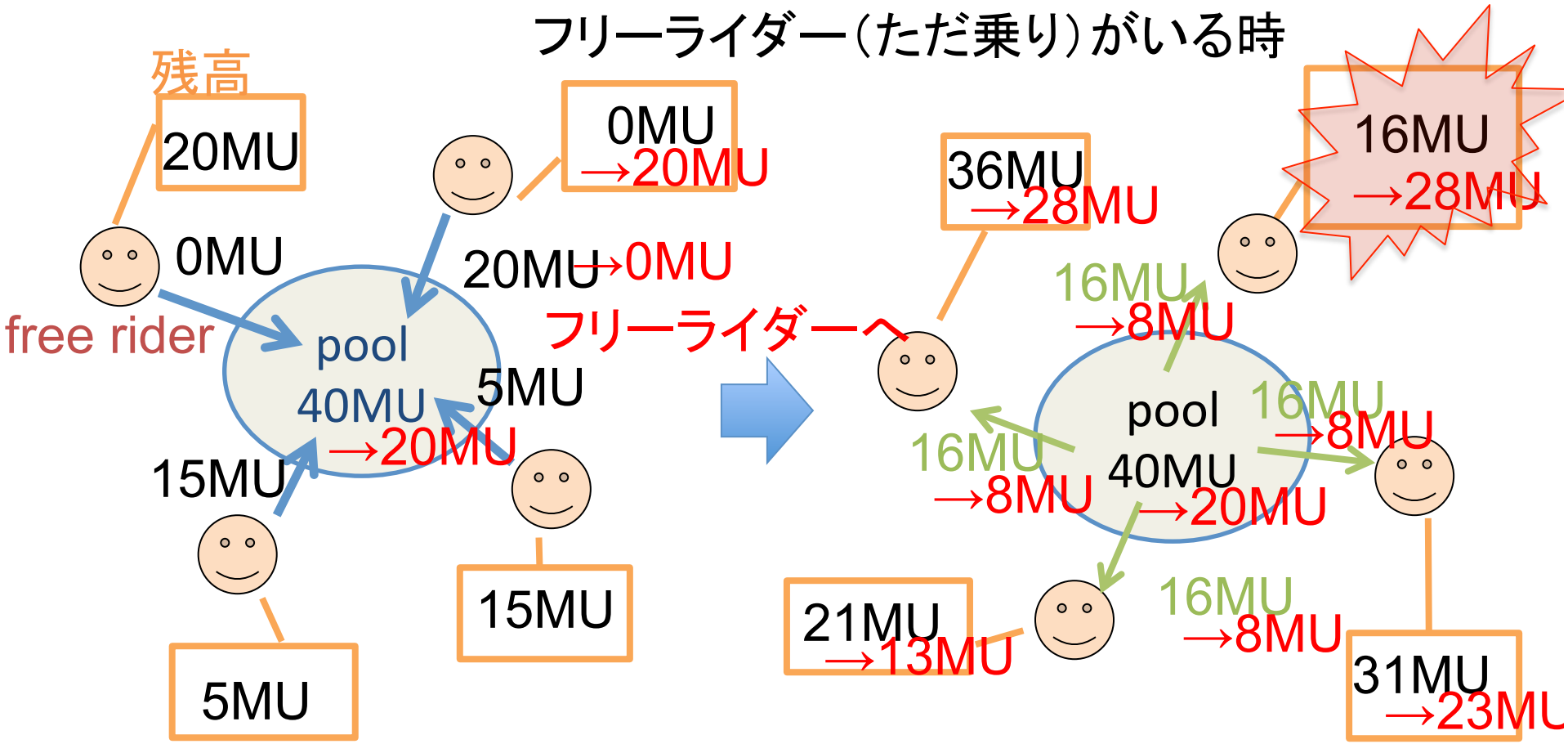
公共財ゲーム in Fehr & Gachter (2002)

全員非協力的な場合



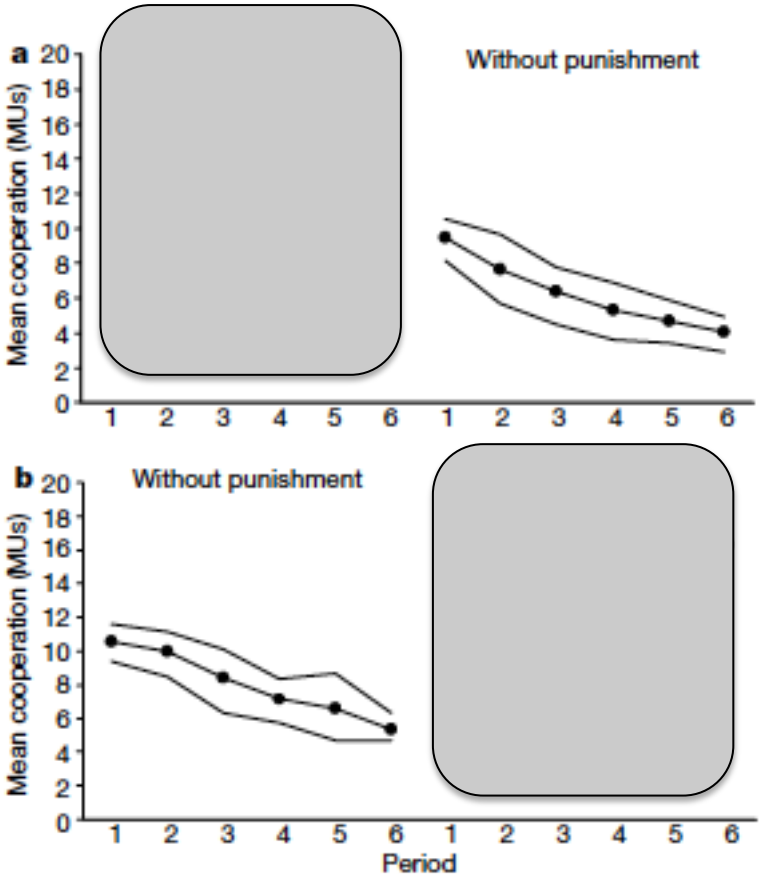
全員協力の時の利得　＞　全員非協力の利得

公共財ゲーム in Fehr & Gachter (2002)



共有地の悲劇

Fehr and Gachter 2002 Nature



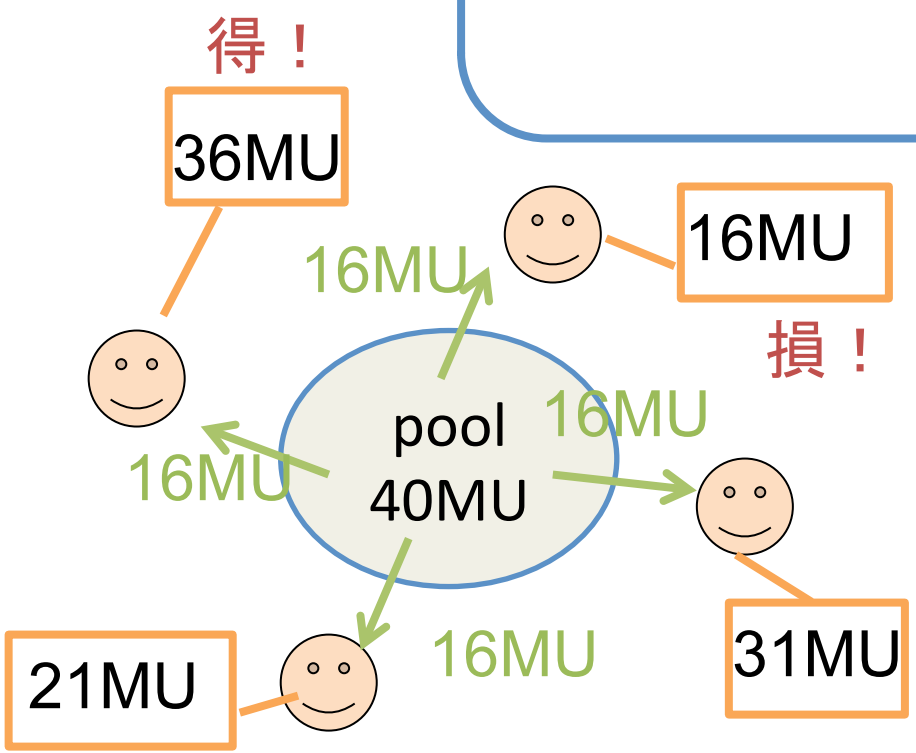
Fehr and Gachter 2002 Nature

罰の導入・・・

0-10ポイントの範囲で罰可能

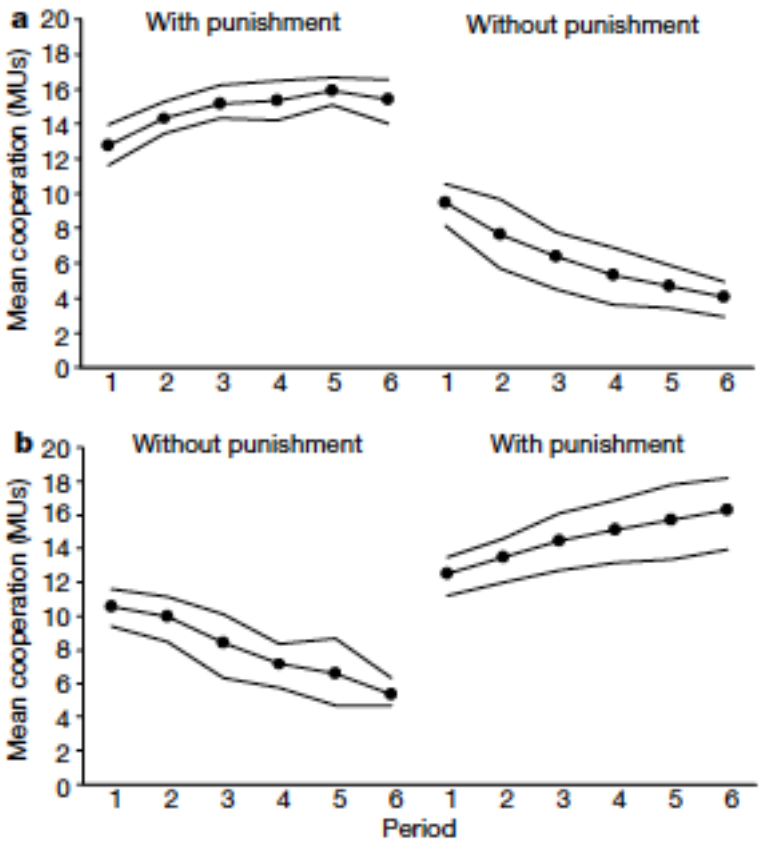
罰1ポイント毎

罰実行者:-1MU
罰された側:-3MU

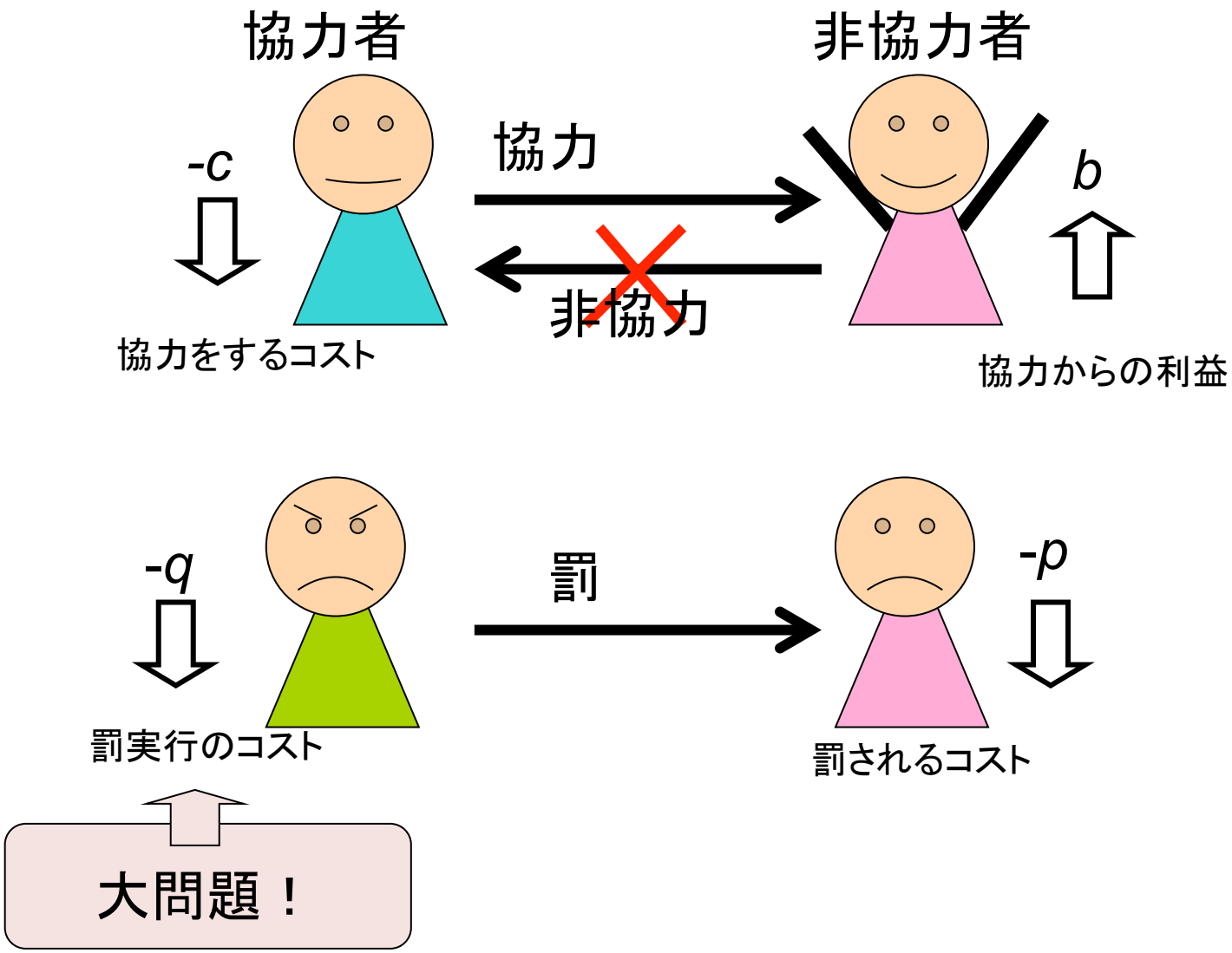


どうなるのか？

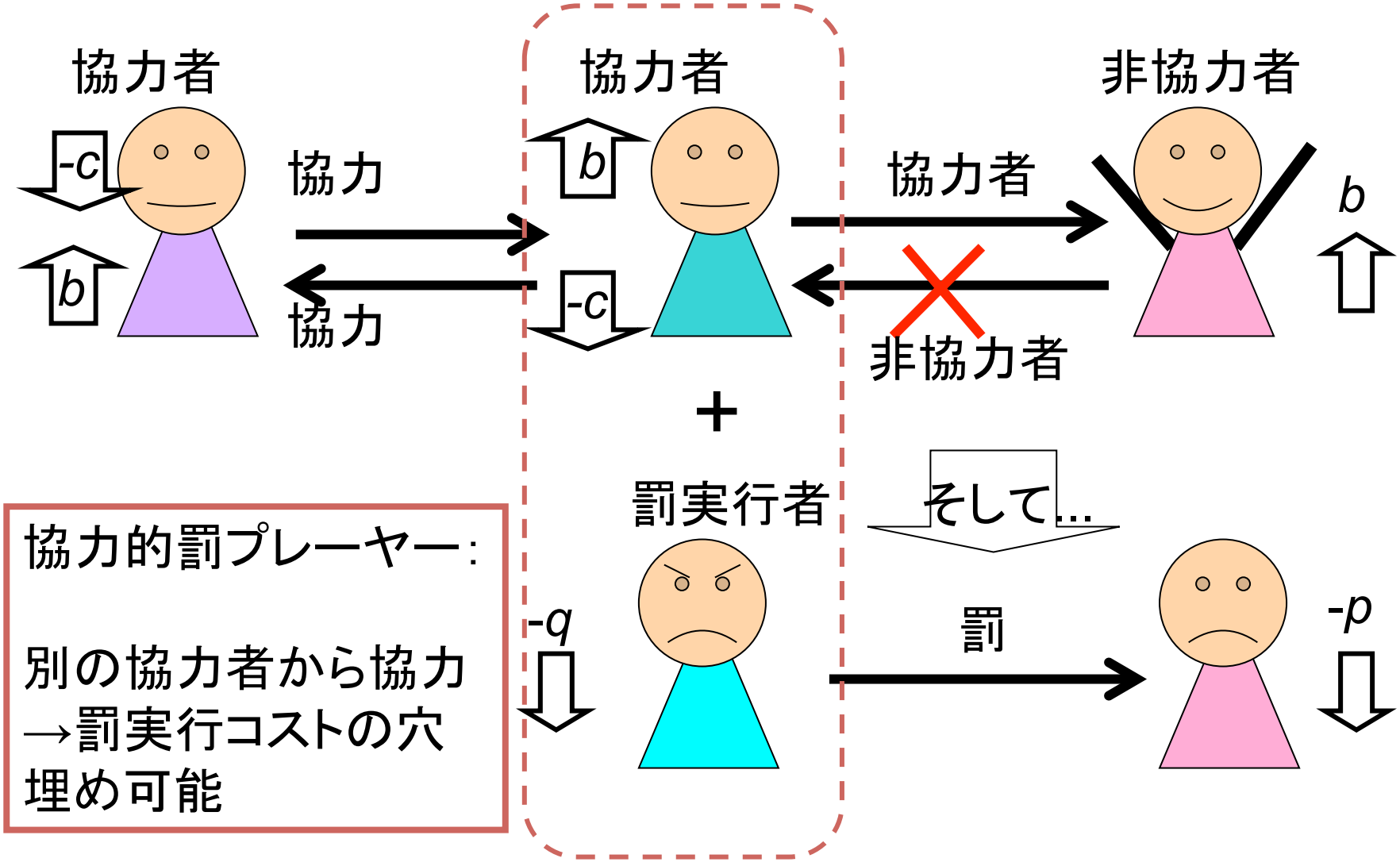
Fehr and Gachter 2002 Nature



罰は協力を促進？



協力的罰



協力的罰プレーヤー:

別の協力者から協力
→罰実行コストの穴
埋め可能

罰と協力の共進化の理論研究

- 非協力者へ、協力者が罰
  - Axelrod(1980年代)
  - Boyd, Richerson, Henrich, Gintis, Bowl
  - Sigmund 等（2000年代以降）
  - Nakamaru & Iwasa (2005, 2006)
  - など

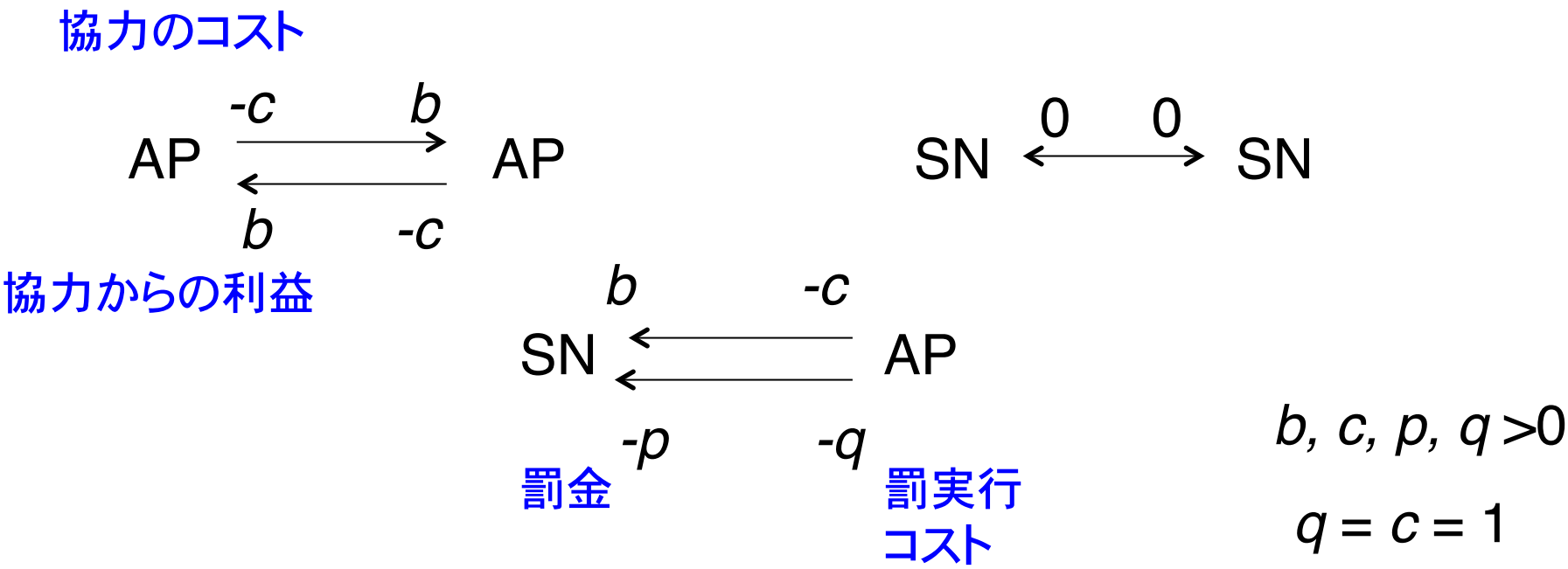
NAKAMARU & IWASA (2006)の紹介

戦略

	罰しない	非協力者への罰
協力	A N altruist-nonpunisher	A P altruist-punisher
非協力	S N selfish-nonpunisher	S P selfish-punisher

AP と SNの利得

		相手	
		AP	SN
自分	AP（協力的罰）	b-c	-c-q
	SN（非協力）	b-p	0

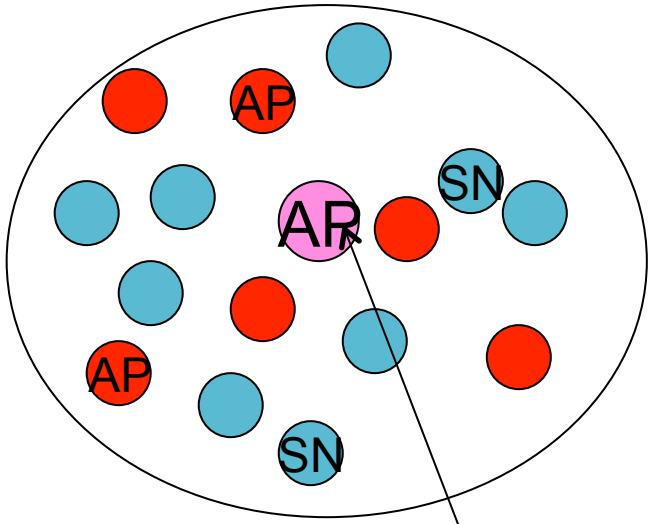


$b, c, p, q > 0$

$q = c = 1$

プレーヤーの配置

完全混合モデル
（ランダムマッチング）

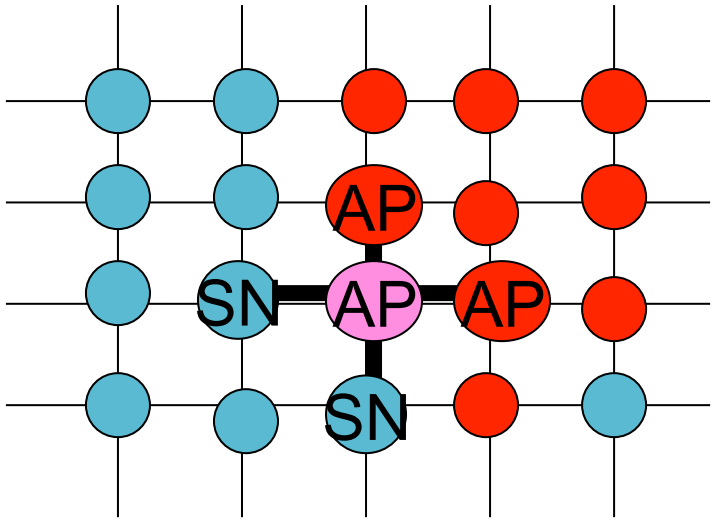


ランダムに出会った相手とゲーム

桃色の“AP”の得点

$= 2(b\text{-}c)+2(\text{-}c\text{-}q)$

格子モデル



隣の4個体とそれぞれゲーム

桃色の“AP”の得点

$= 2(b\text{-}c)+2(\text{-}c\text{-}q)$

微分方程式とコンピュータによって解析

戦略更新ルール：得点依存増殖率モデル

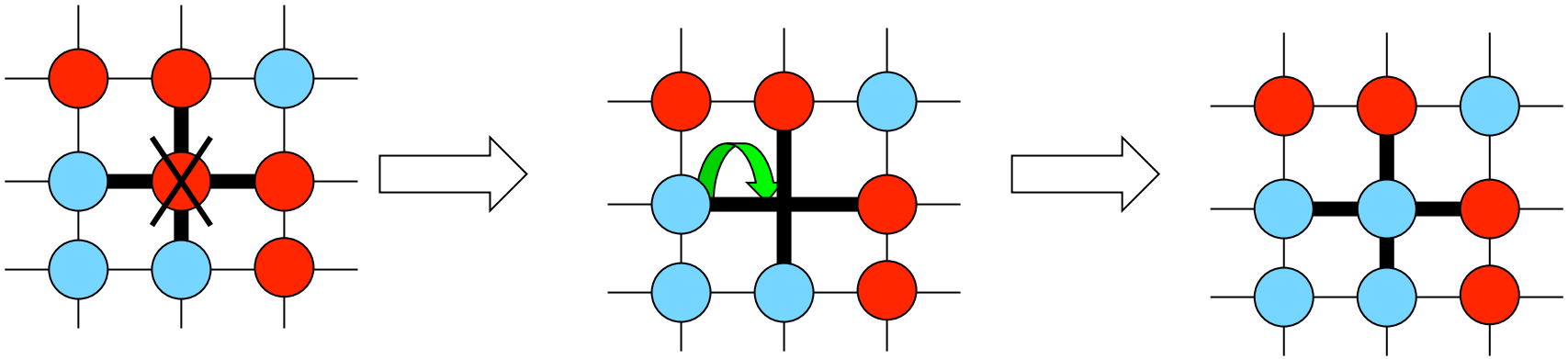
増殖率：ゲームの利得

死亡率：ランダム

(1)ランダムに死亡

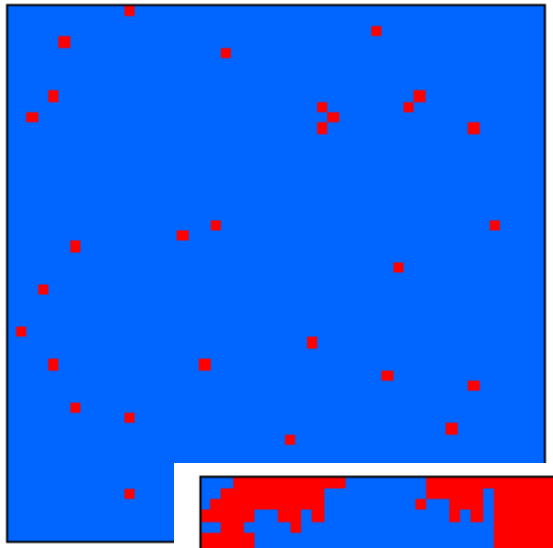
(2)隣接の4プレーヤーのうち一つが、利得に比例した確率で選ばれる

(3)子どもを空白へ産む

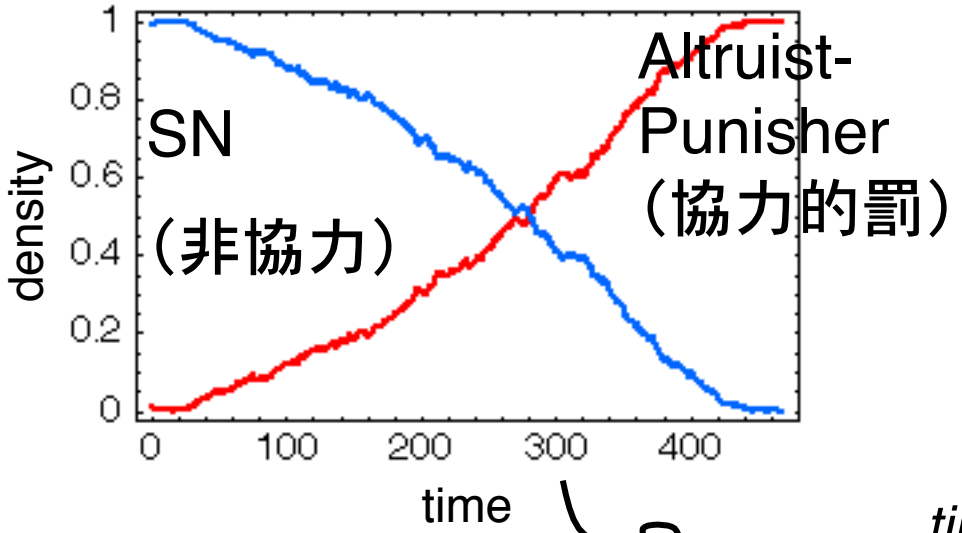


２次元格子での、得点依存増殖率モデルのシミュレーション結果

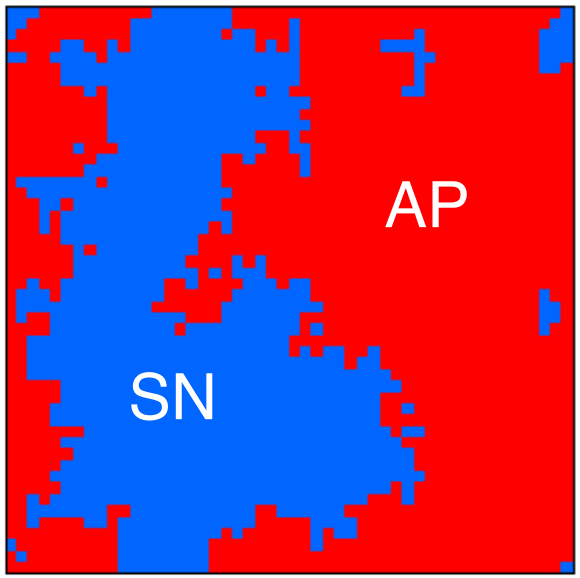
time = 0



b = 4, *p* = 2
initial AP = 0.01, initial SN = 0.99

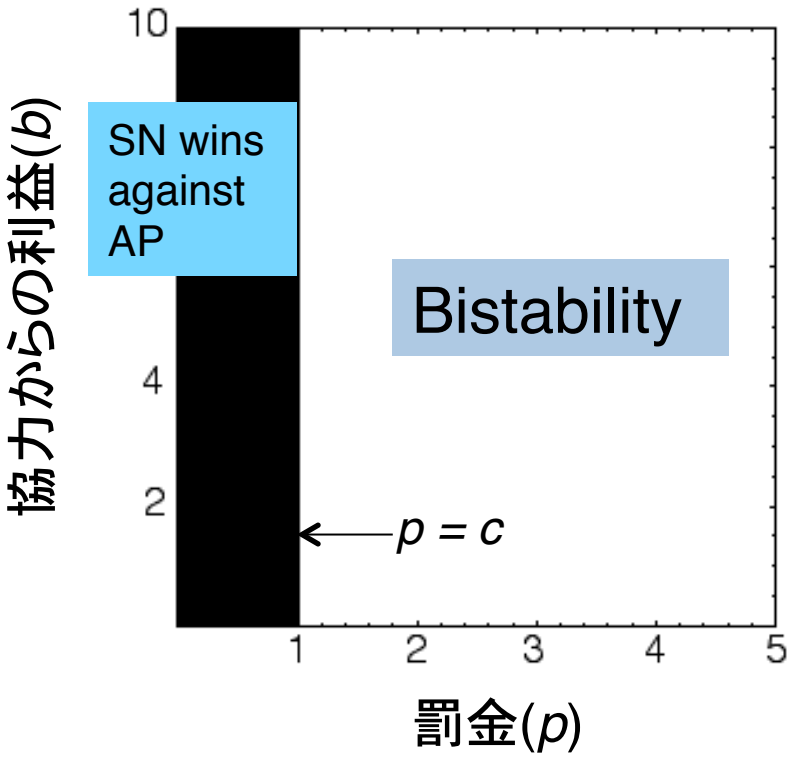


time = 300

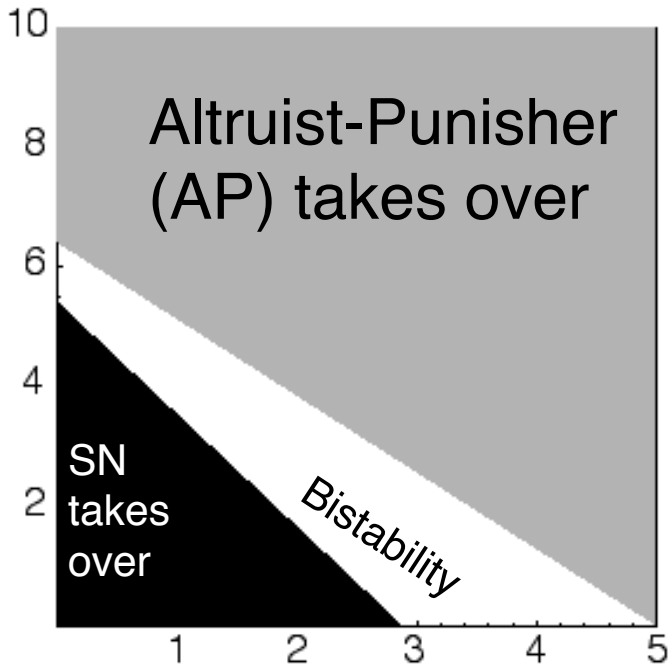


得点依存増殖率モデルの結果

完全混合モデル
-微分方程式-



2次元格子モデル
-コンピュータシミュレーション-



戦略更新ルール：得点依存生存率モデル

増殖率：ランダム

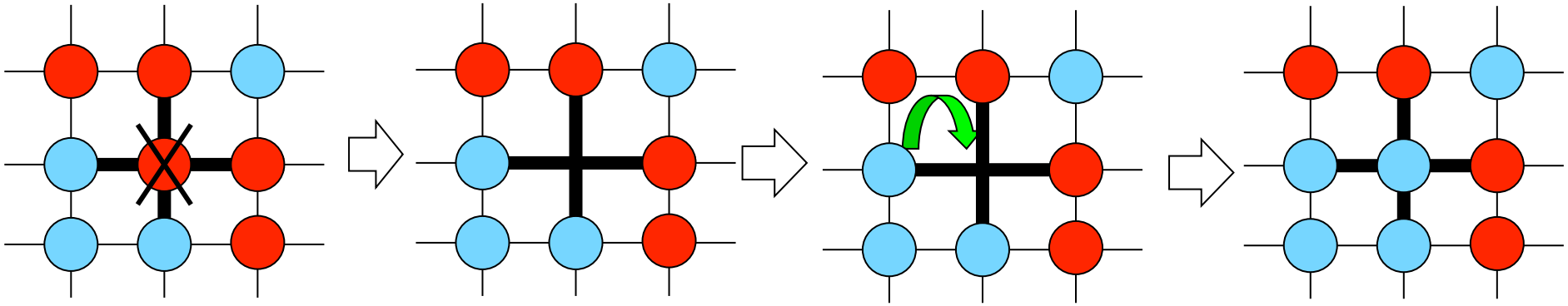
死亡率：ゲームの利得

(1)プレーヤーをランダムに選ぶ

(2)利得が低いほど死亡

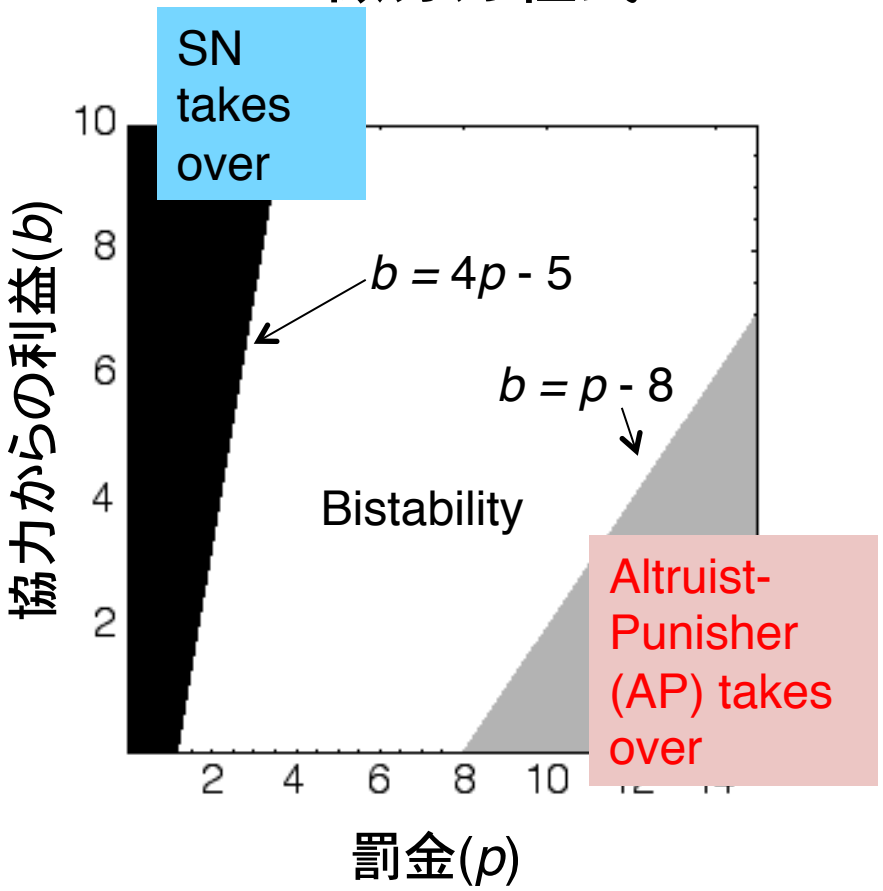
(3)隣接4つのうち1つがランダムに選ばれる

(4)子どもを空白へ産む

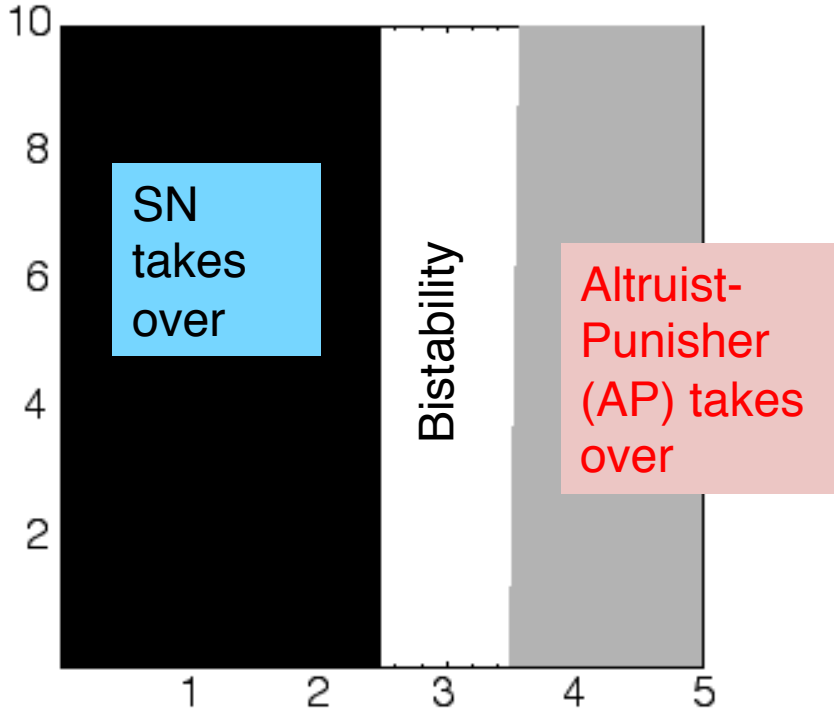


得点依存生存率モデルの結果

完全混合モデル
-微分方程式-

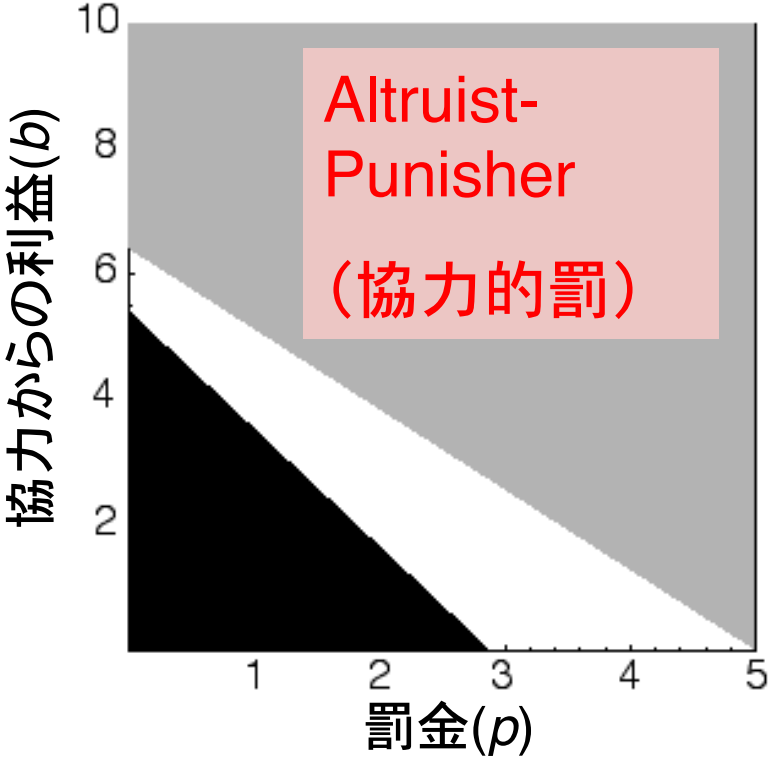


2次元格子モデル
-コンピュータシミュレーション-

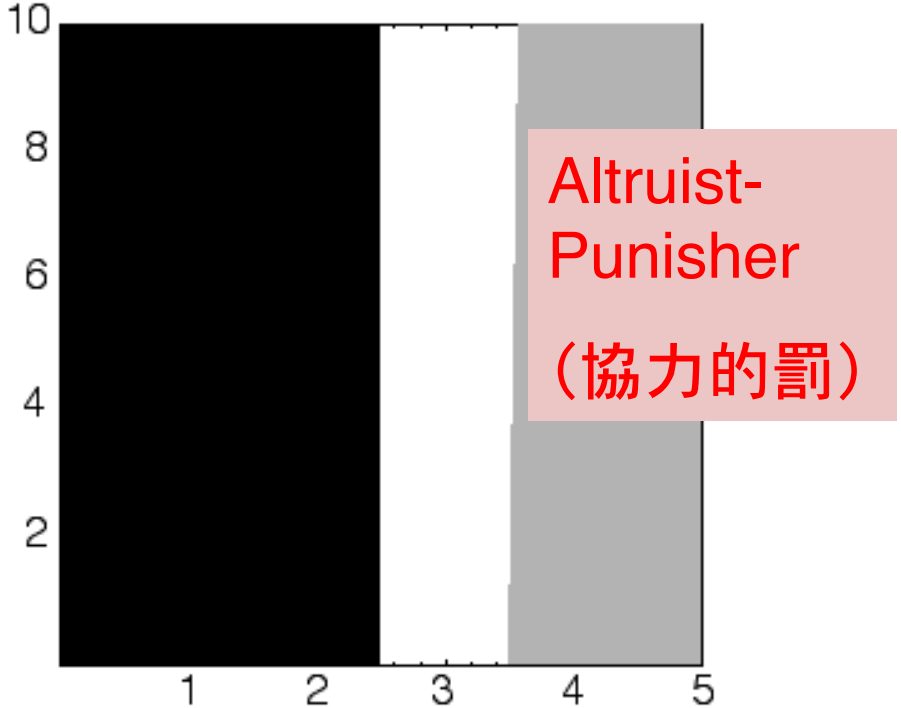


格子モデルの比較

得点依存増殖率モデル



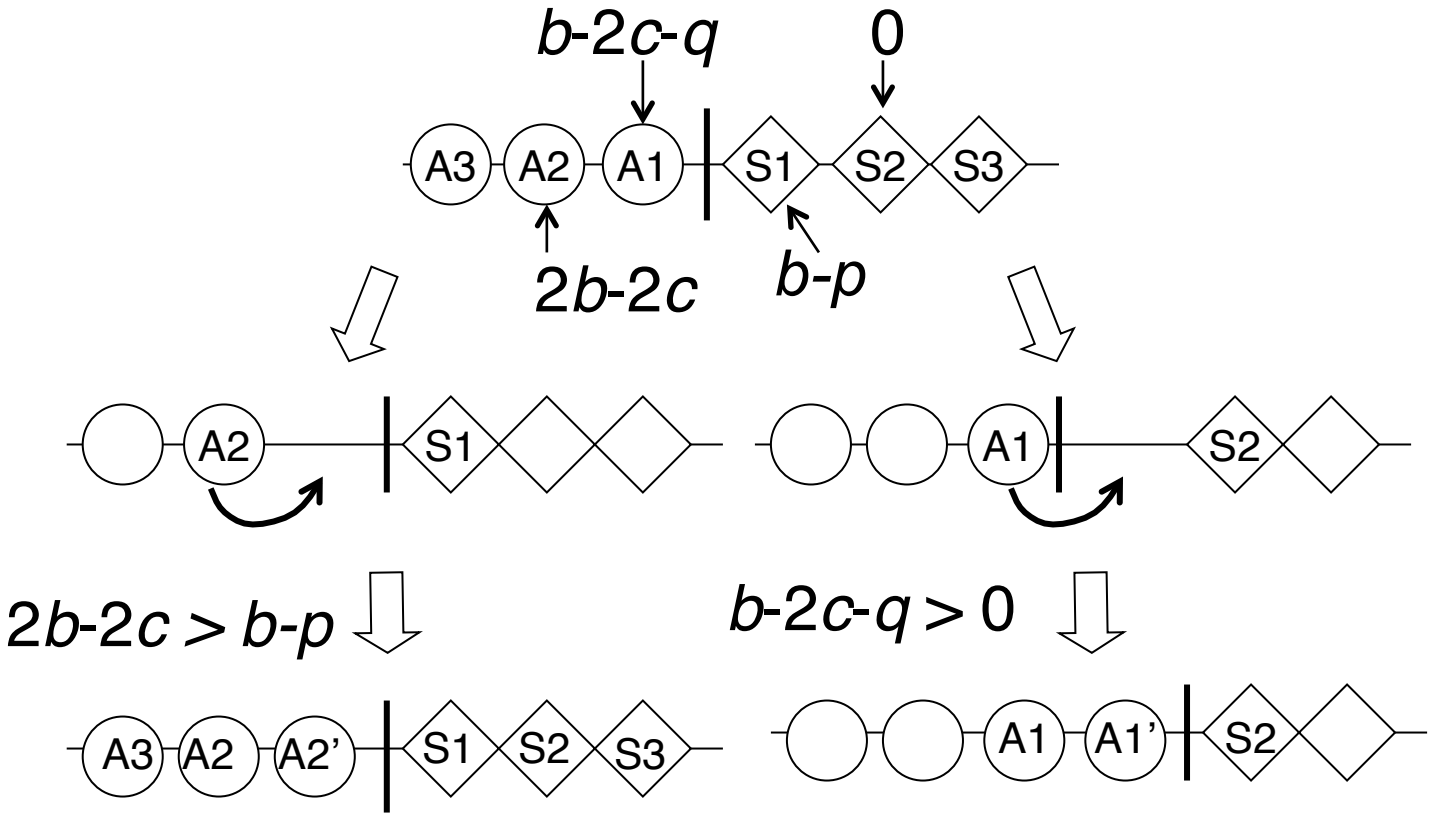
得点依存生存率モデル



協力からの利益 (*b*)と罰金 (*p*)が
協力的罰行動の進化に影響

罰金 (*p*) が協力的罰
の進化に影響

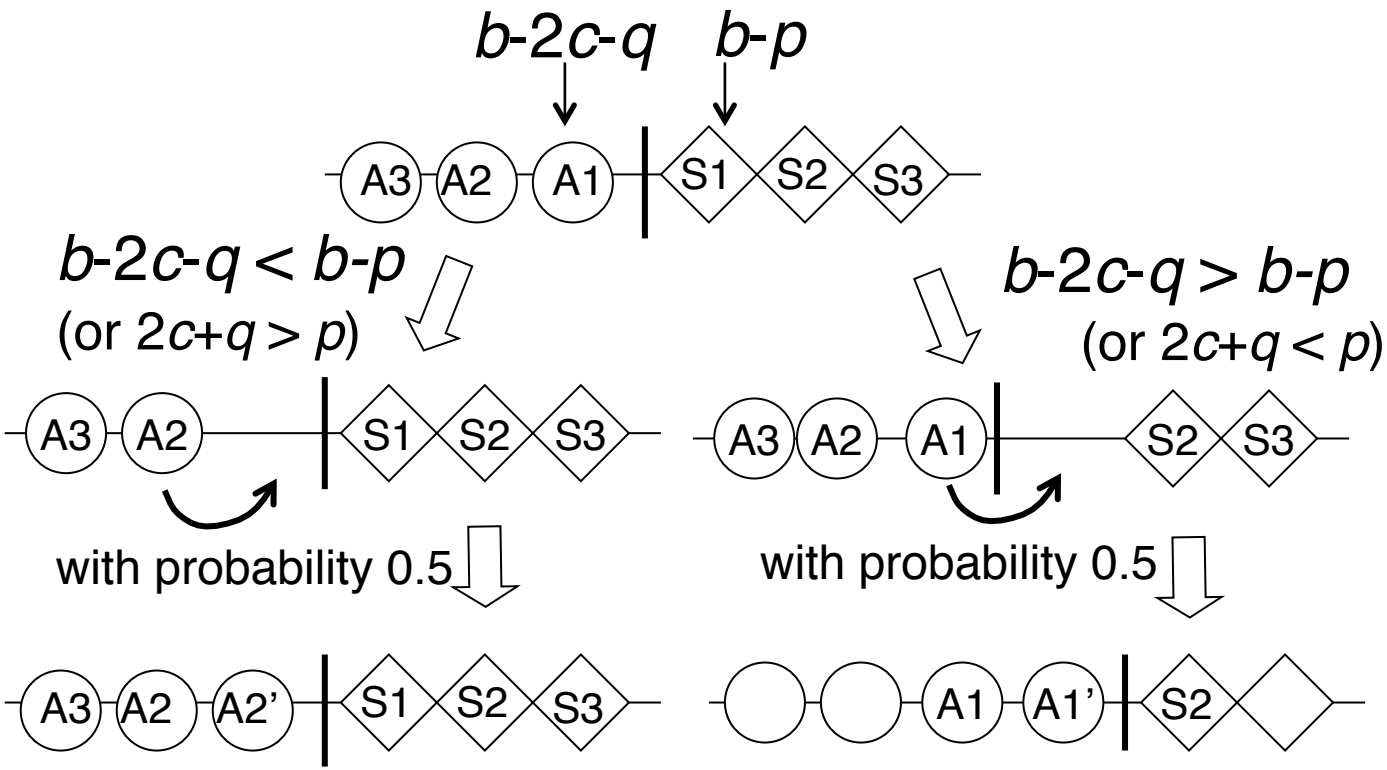
得点依存増殖率モデル



隣同士ではない（つまりゲームをしない）A2 と S1が場所を巡って競争ー＞

隣と協力し合ってゲームの利得を高くしたほど、子孫を増やすチャンスが増える

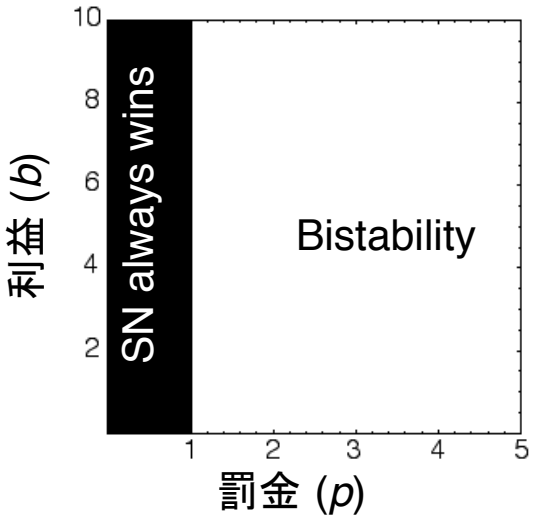
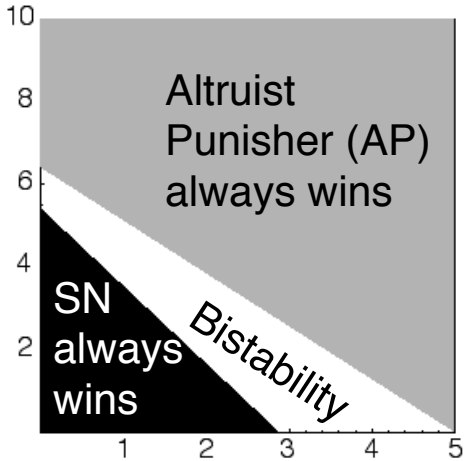
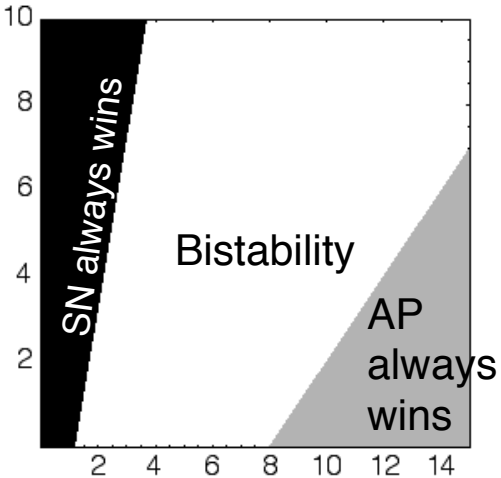
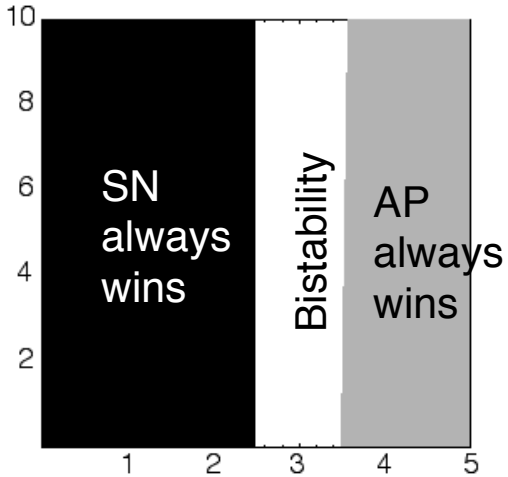
得点依存生存率モデル



隣同士(たとえば、A1 と S1) が場所を巡ってい競争ー＞

ゲームをする時に相手の利得を下げる行動（スパイト）が有効

まとめ

	完全混合モデル	格子モデル
得点依存増殖率モデル		
得点依存生存率モデル		

得点依存生存率モデルにおいて
AP は少数はであっても進化できる

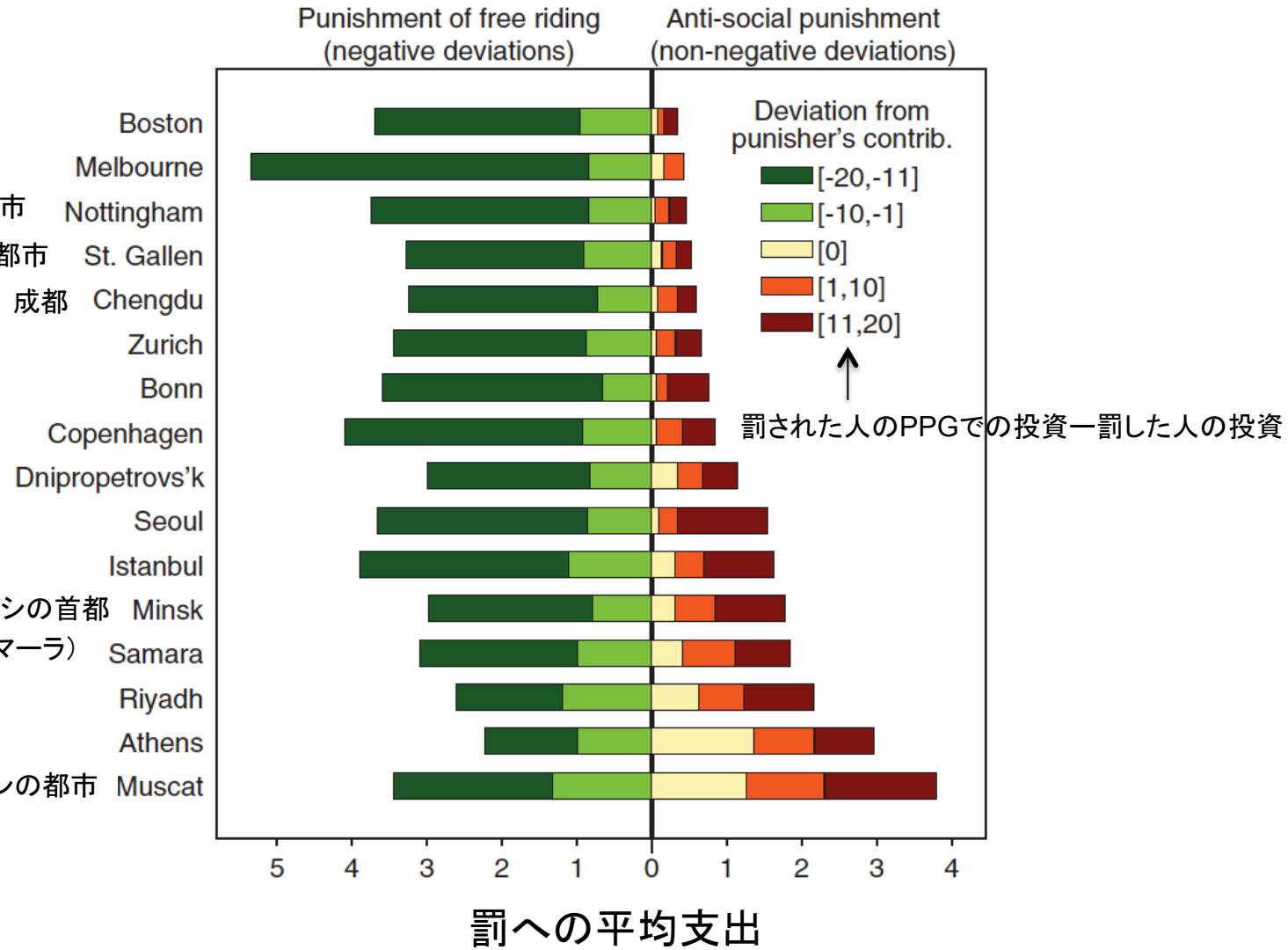
格子モデルは協力と罰の共進化を促進する.

一方で、協力者へも罰？！

- Herrmann et al. (2008) “Antisocial Punishment across societies,” Science
  - Antisocial Punishment=反社会的罰（協力者への罰）
- １６カ国での公共財ゲーム実験
  - Fehr and Gachter (2002)と同じ枠組みを使う
  - プレーヤーは匿名
- 主な結果
  - ある地域では、非協力者へも協力者へも罰
  - 別の地域では、非協力者へのみ罰される

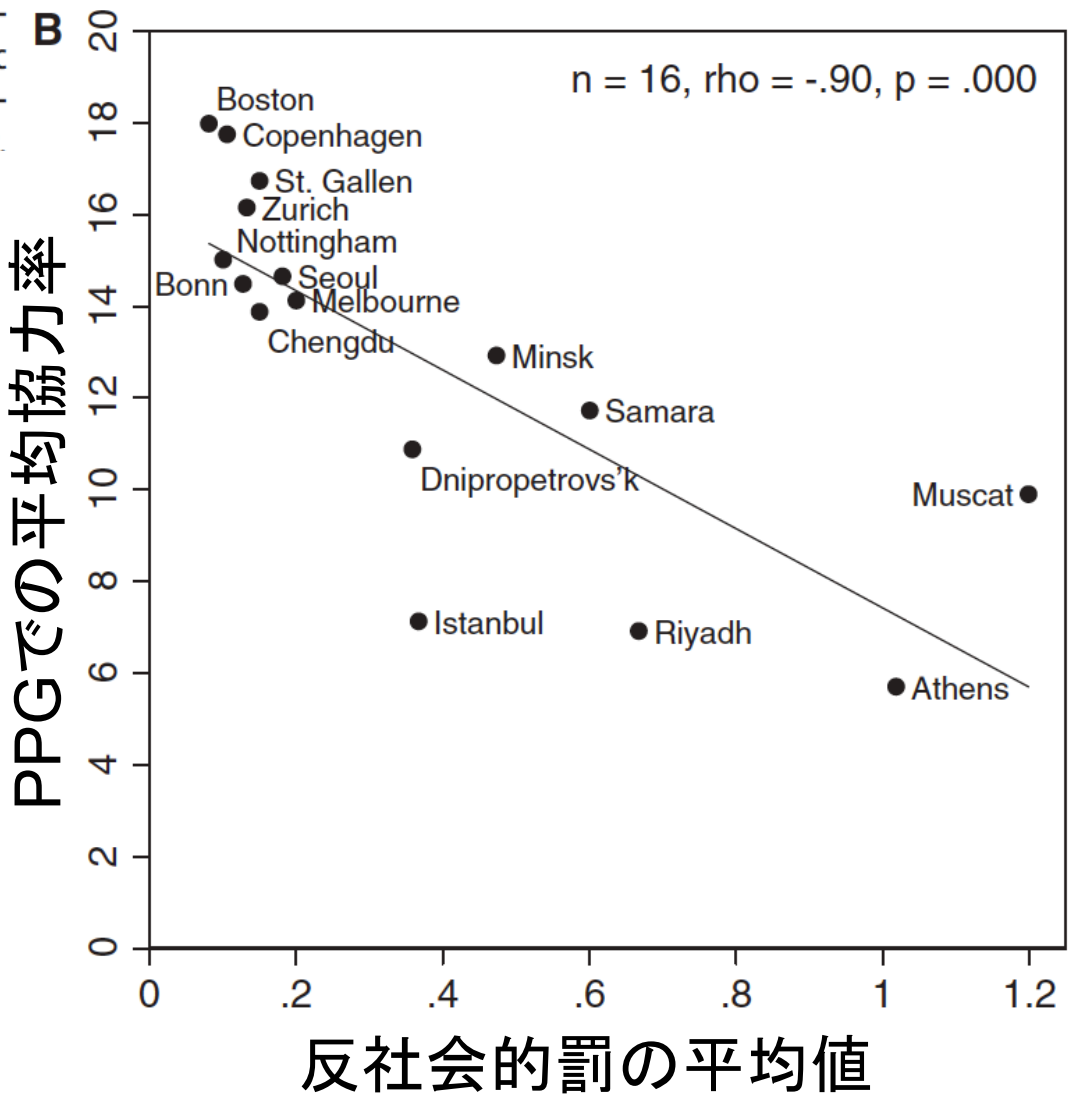
Herrmann et al. (2008)

Fig. 1. Mean punishment expenditures for a given deviation from the punisher's contribution. The deviations of the punished pa contribution fro punisher's contribution are grouped into five intervals, where [–20, –11] indicates that the punished participant contrib- uted betw tokens less than the punishing participant, [–10, –1] indicates th punished tributed between 1 and 10 tokens less than the punishing participant [0] indicates that the ished participant contributed exactly the same amount as the punishing participant, [1, 10] indicates that the punished participant contributed between 1 and 10 tokens more than the punishing



Herrmann et al. (2008)

Fig. 2. (**A**) Mean contributions to the public good over the 10 periods of the P experiment. Each line corresponds t the average contributio of a particular partic pant pool. The numbe in parentheses indicat the mean contributio (out of 20) in a particula participant pool. (**B**) Mea antisocial punishment an mean contribution (acro all periods) per partic pant pool. Rho indicate Spearman rank order co relation between partic pant pool averages.



Herrmann et al. (2008)

- この実験結果の解釈
  - civic cooperation（市民としての協力）に関する社会規範が強固かどうかに影響？
    - civic cooperationに関する社会規範＝税金支払い逃れ、社会保障制度の悪用、交通機関のただ乗りなどに対する態度として現れる
    - この規範が強固であるほど、フリーライダーは許されないと感じる→規範的に望ましい行動をしている人は罰をされないだろう

Herrmann et al. (2008)

- 実験の解釈
  - World Value Surveyを用いて検討すると、上記を裏付けていた
    - Civic cooperationへの規範が強固で法の支配が強い地域
      - 公共財ゲームへの投資（協力）が（罰しようとするプレーヤーと比べて）低いプレーヤーに、罰をする
    - Civic cooperationへの規範が弱く、法の支配が弱い地域
      - 反社会的罰の度合いが強くなる → なぜ？（論文では決定的な議論は無し）

罰と協力の共進化の理論研究

協力者へ罰をする場合も考慮

	全く罰をしない	非協力者への罰	協力者への罰	誰に対しても罰
協力				
非協力				

Rand et al. (2010)

Nakamaru and Iwasa (2006)と同じ枠組み

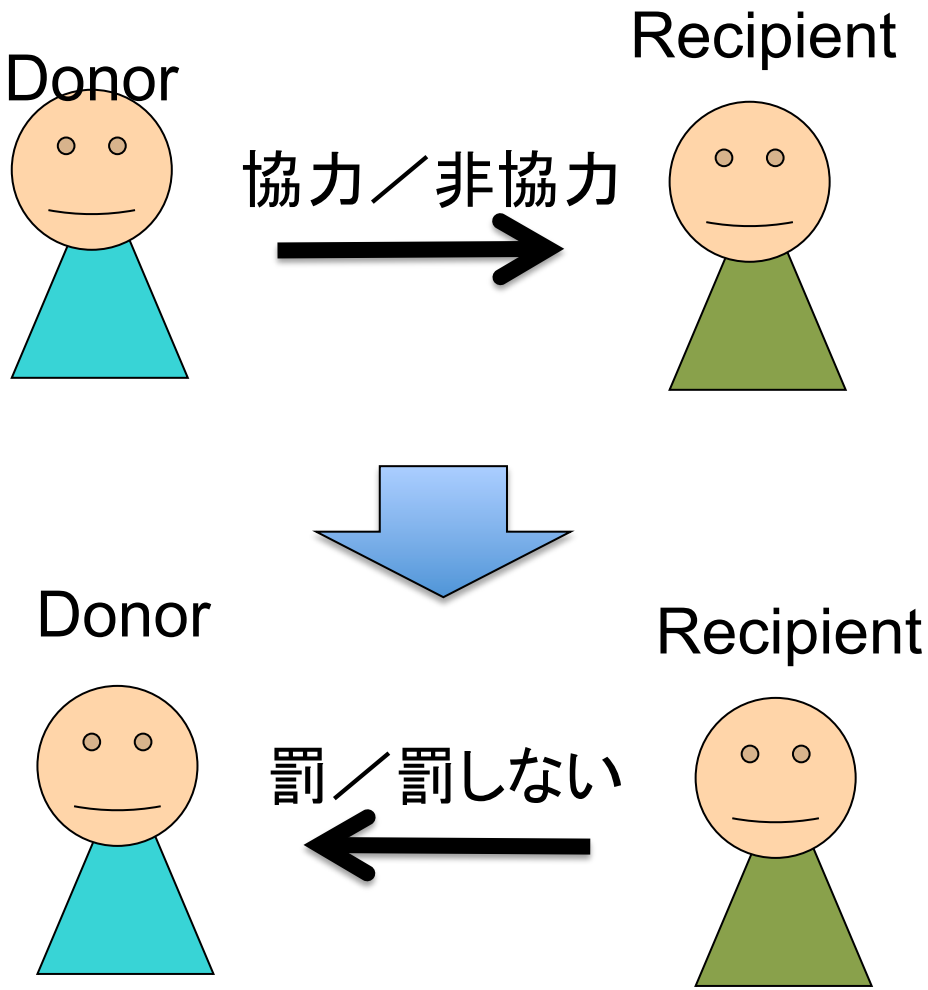
罰　４種類の導入

→協力者が罰をされてしまうため、「協力＋非協力者への罰」は進化しにくくなる

罰と協力の共進化の理論研究

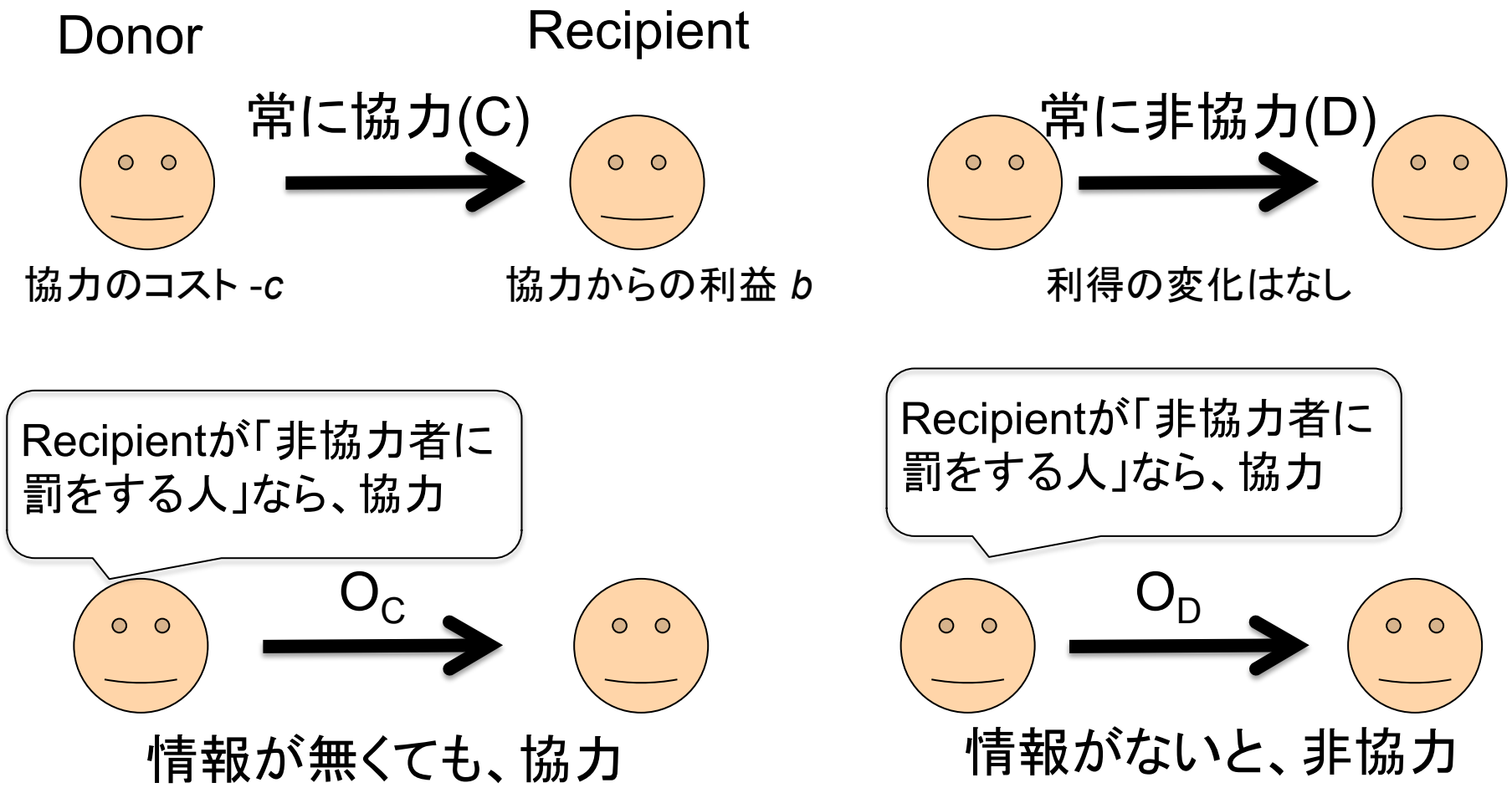
- Hilbe and Traulsen (2012)
  - 協力者に罰をするプレーヤーが存在するとき
  - 「非協力者に罰をする人」という評判がたっている人には協力する場合を考慮

進化ゲームによる解析
例）Hilbe and Traulsen (2012)



Hilbe and Traulsen (2012)

Donorの戦略　4種類



λ: Recipient の情報が得られる確率

Hilbe and Traulsen (2012)

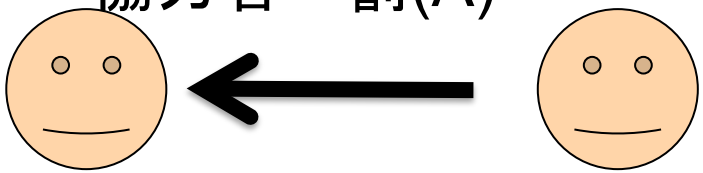
Recipient の戦略　4種類

Donor　　Recipient

Responsible Sanction
非協力者へ罰(R)

罰されるコスト -β　　罰するコスト -γ

Antisocial punishment
協力者へ罰(A)



-β　　-γ

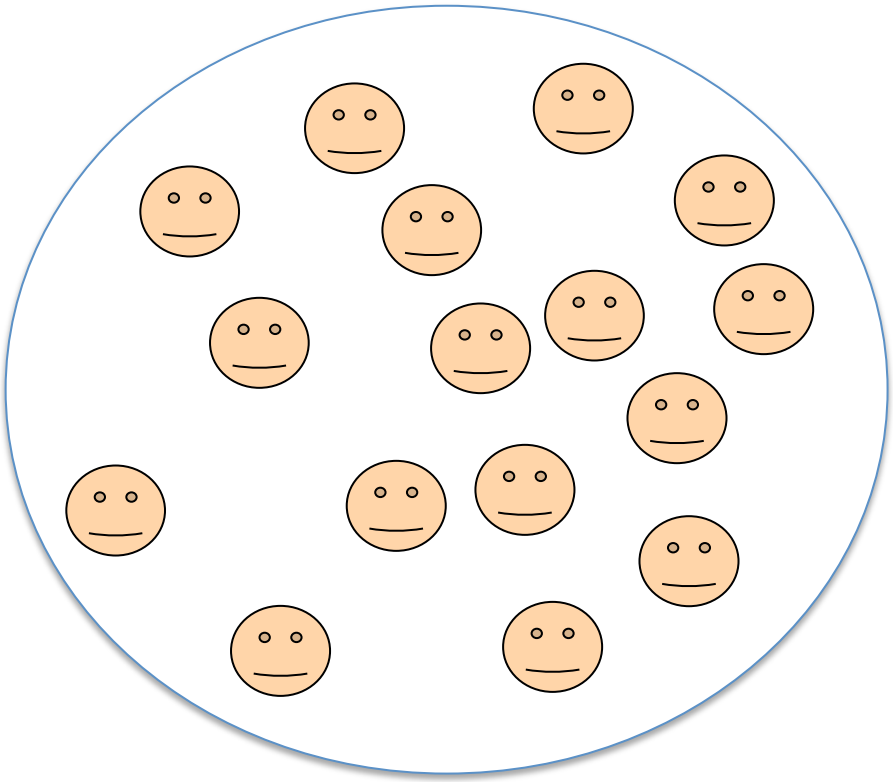
Spiteful punishment
誰にも罰(S)

-β　　-γ

Non punishment
誰にも罰しない(N)

Hilbe and Traulsen (2012)

集団サイズ　n



2人プレーヤーを
ランダムに選ぶ

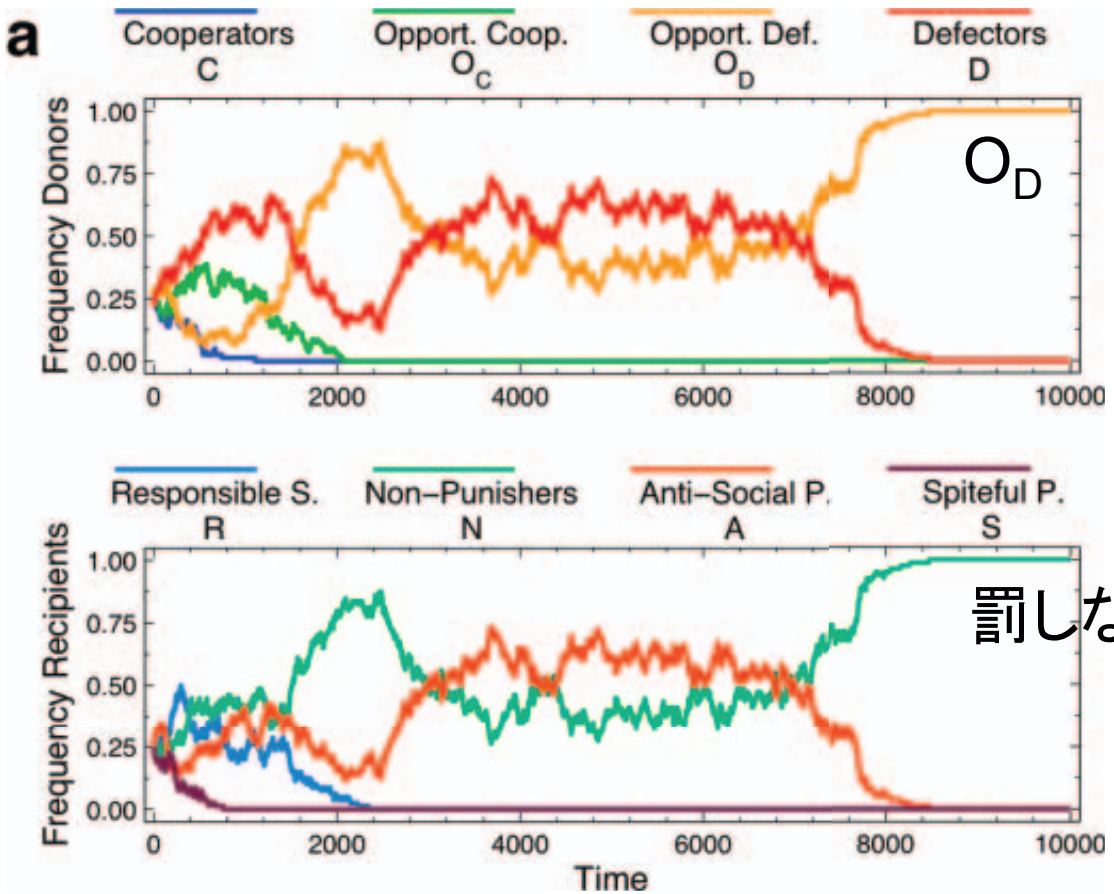
・利得を比較し、高い利得のプレーヤーの戦略を真似（social learning）
・ランダムに戦略を変えることも（exploration）

Hilbe and Traulsen (2012)

非協力者へ罰したかどうかの情報（評判）が無いとき

Donor

Recipient



罰しない(N)

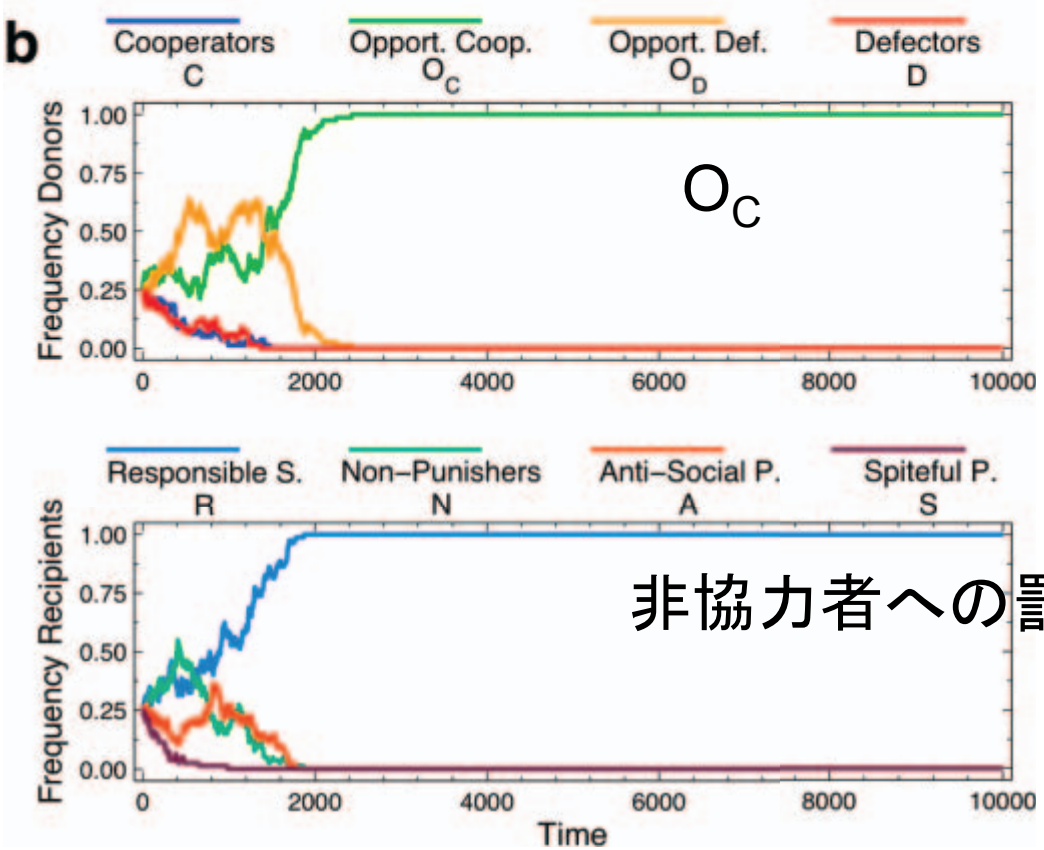
Hilbe and Traulsen (2012)

非協力者へ罰したかどうかの情報（評判）があるとき

$\lambda = 0.3$

Donor

Recipient



Hilbe and Traulsen (2012)

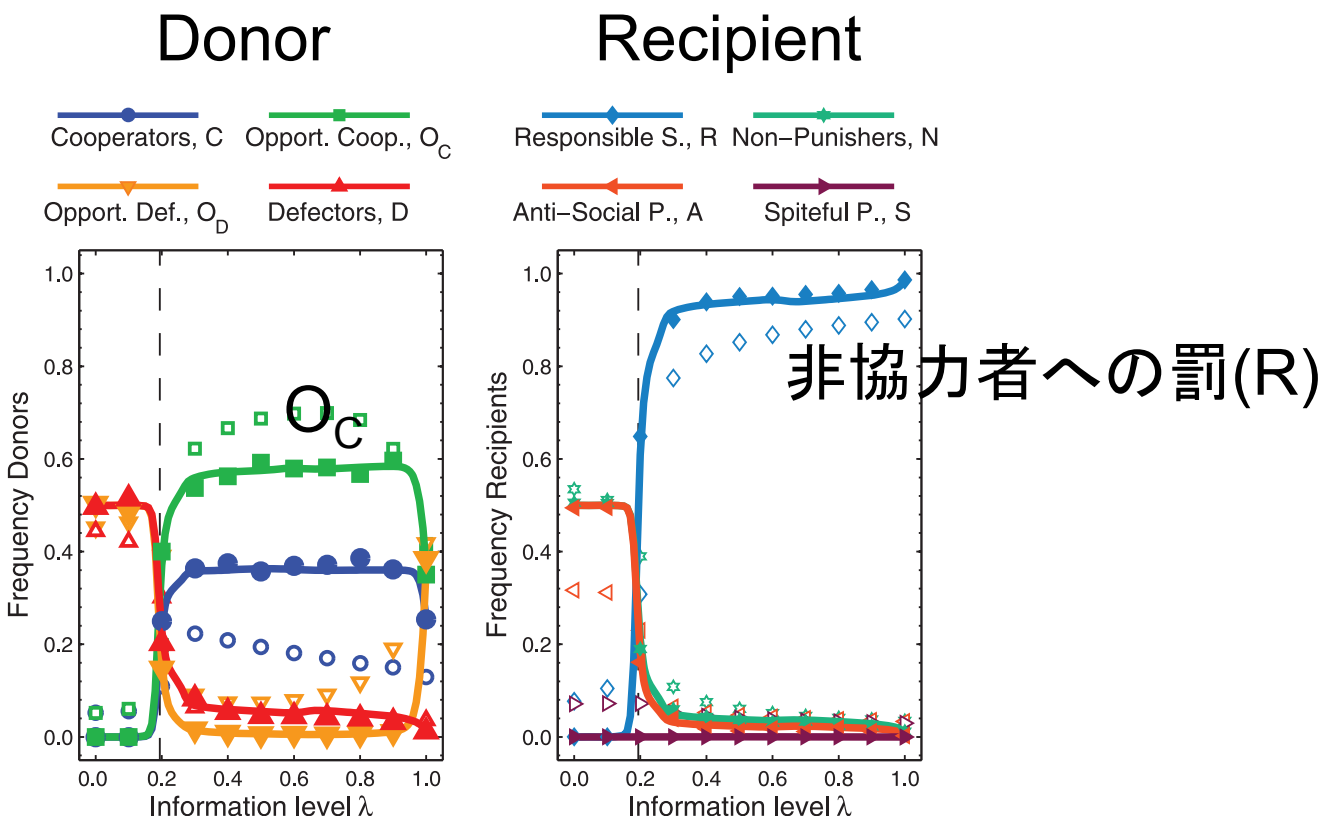


Figure 1 | Information promotes the co-evolution of cooperation and responsible punishment. Time-averaged frequencies for the strategies of donors (left graph) and recipients (right graph), respectively. Solid lines indicate exact results for the limiting case of rare exploration. Filled symbols represent simulation results for low exploration rates (μ = 0.0001) and open symbols are simulations for high exploration rates (μ = 0.1). The black dashed line represents the critical information level given by

罰と協力の進化の理論研究

協力／非協力、罰する／しない、という戦略を仮定

	全く罰をしない	非協力者への罰	協力者への罰	誰に対しても罰
協力				
非協力				

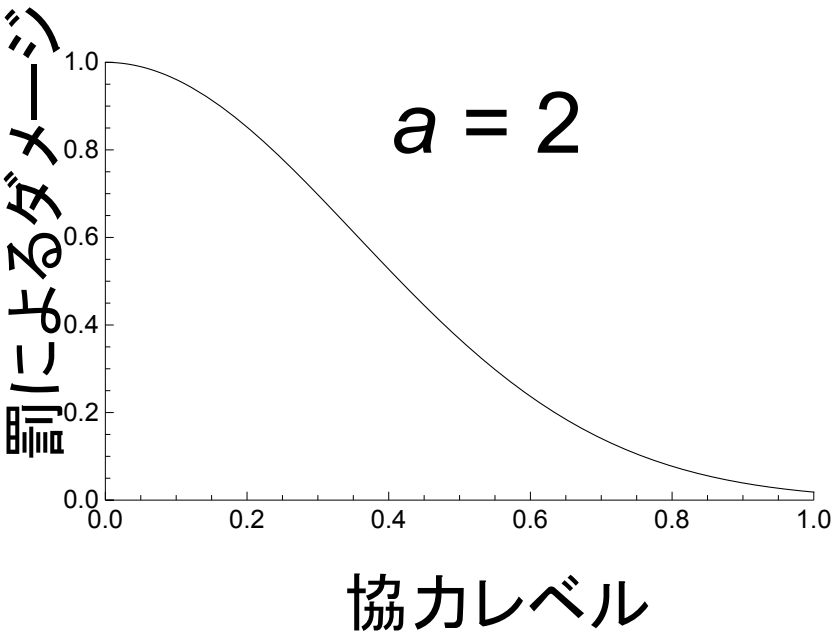
協力レベルに対する反応としての罰

- 協力や罰には度合いがある
  - 社会や集団として制裁を与える時に協力レベルに応じて罰を与える
    - オストロムの共有地管理のルール
      - ルールを逸脱する度合いに応じて罰も与える
    - 刑法の罰則
- →個人の認知メカニズムにおいて、そのような傾向があるのか？

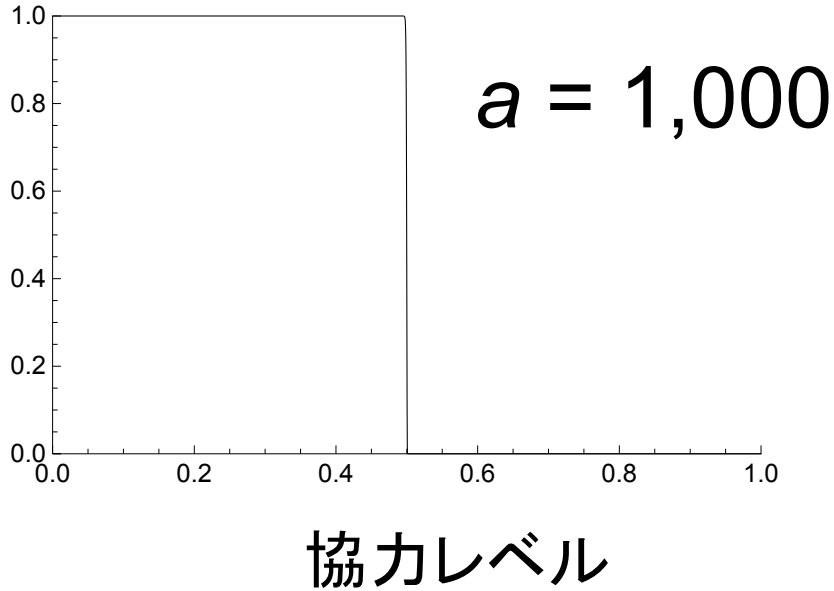
進化ゲームによる解析

SHIMAO AND NAKAMARU (2013)の紹介

graduate punishment



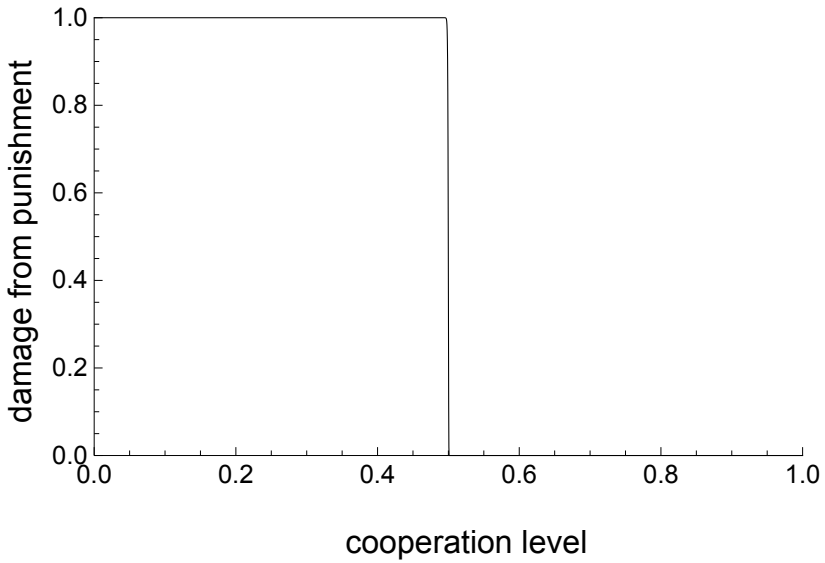
strict punishment



$$\beta f_i \exp\left(-\left(\frac{x_j}{u_i}\right)^{a_i}\right)$$

Nakamaru & Dieckmann (2009)

- 完全混合モデル
  - 協力と罰は共進化しない
- 格子モデル
  - strict punishmentが協力レベルを高く進化する



完全混合モデルでは
どのような罰が進化？

- モデルの仮定の一つとして
  - 更新ルール：得点依存生存率モデルの導入
    - スパイトが効果的
  - 完全混合モデルにおいて協力と罰の共進化が起こりやすいだろう
- どのような罰関数型が協力を促進？

Shimao and Nakamaru (2013) の説明

- 4つ進化形質
  - x 協力量、公共財ゲームの投資量　$0 \le x \le 1$
  - f 罰強度　$0 \le f \le 1$
  - u 相手が協力者かどうかの判断の閾値 $0 \le u \le 1$
  - a 罰関数型　$0 \le a <$ infinity

$$\beta f_i \exp\left(-\left(\frac{x_j}{u_i}\right)^{a_i}\right)$$

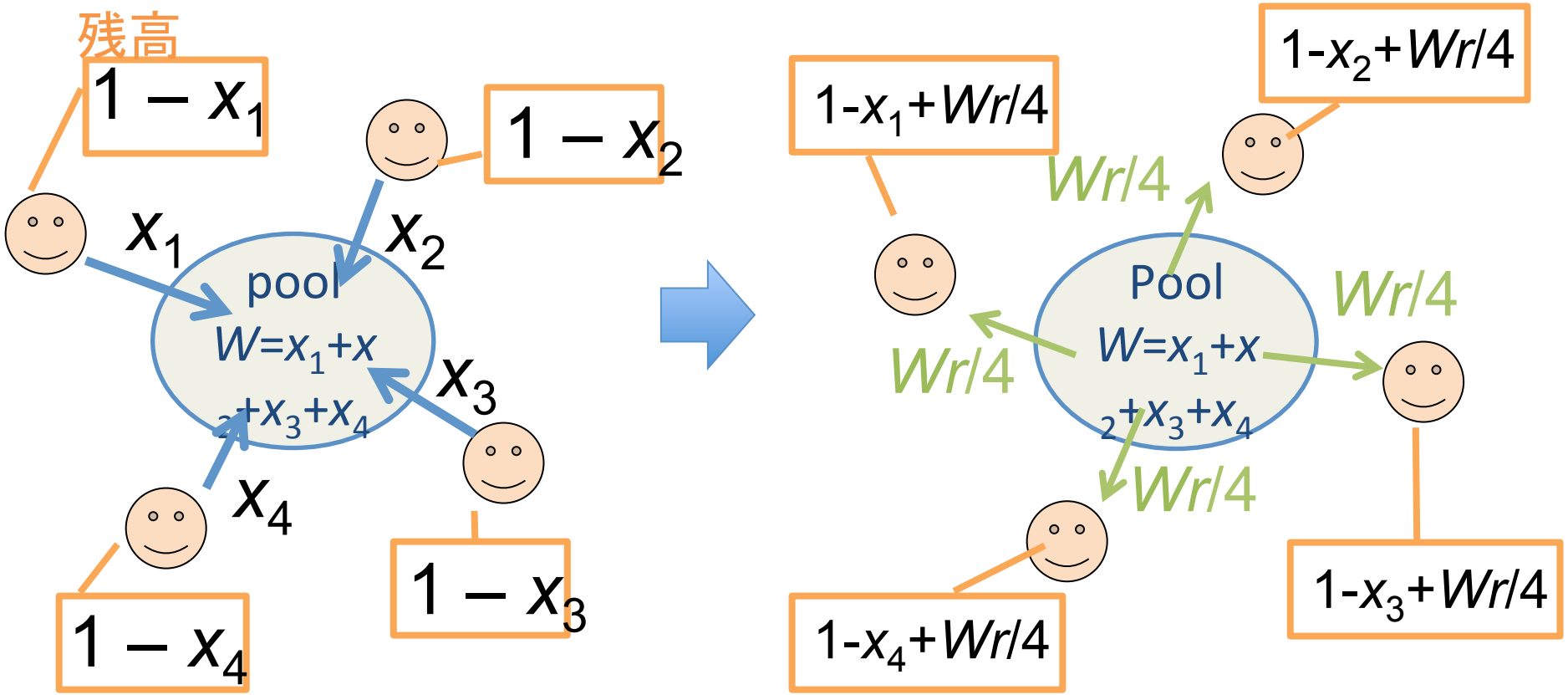
罰の意思決定の関数

アルゴリズム

- 公共財ゲームをするメンバーを選ぶ
- 公共財ゲームを行う
  - 協力量（投資量） x
  - プール金が配当されるときの利子：r
- 各メンバーが、他のメンバーの協力量に応じて、罰関数（罰の意思決定）に従って罰を返す
  - 全員が、全員へ罰をする
- 更新：得点依存生存率モデル
  - 利得が低いほど死にやすい
  - 相互作用をしたメンバーのうち、ランダムに選ばれたプレーヤーが子を産む

公共財ゲーム

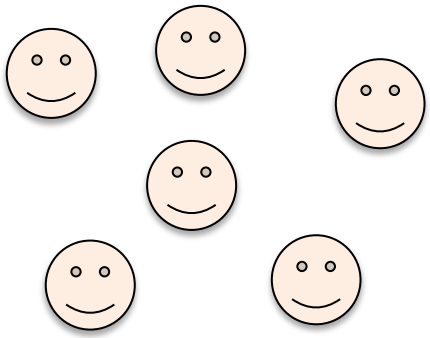
1人:1単位 配布
投資額:0〜1
戻り額:プール額 × r / 4



プレーヤーの空間配置

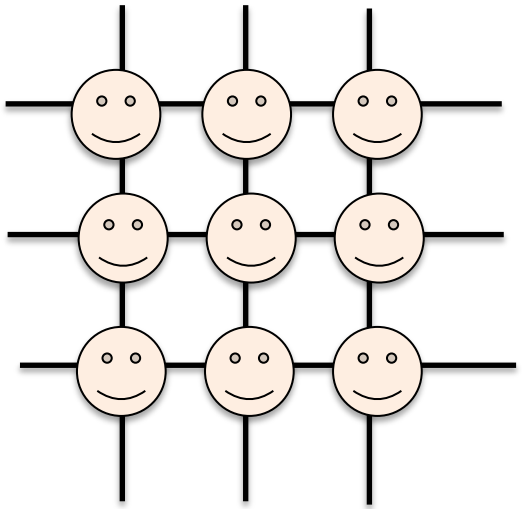
完全混合モデル

- 公共財ゲームのメンバー
  - ランダムに選ぶ
- 解析
  - シミュレーション
  - adaptive dynamicsによる近似計算



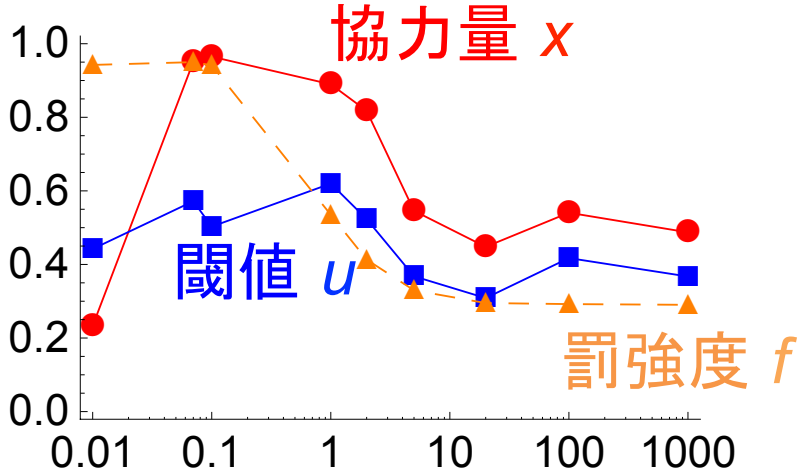
格子モデル

- 公共財ゲームのメンバー
  - 隣接するプレーヤー
- 解析
  - シミュレーション



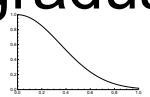
関数型を固定した時の罰と協力の進化

完全混合モデル
（ランダムマッチング）



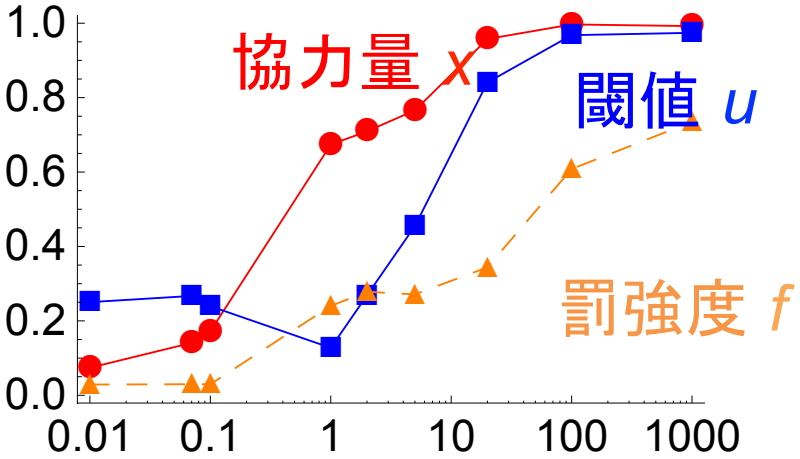
罰の関数型 a

graduate



strict

格子モデル



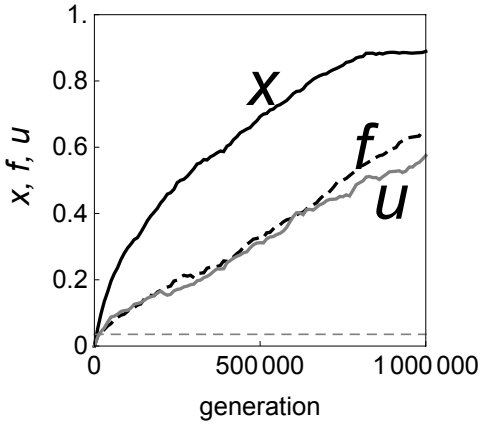
罰の関数型 a

graduate

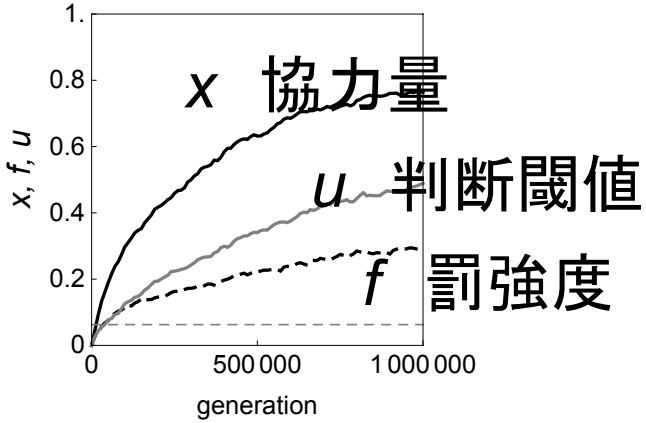
strict

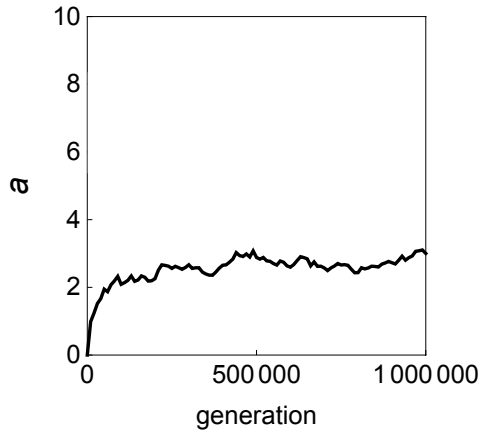
結果

完全混合モデル



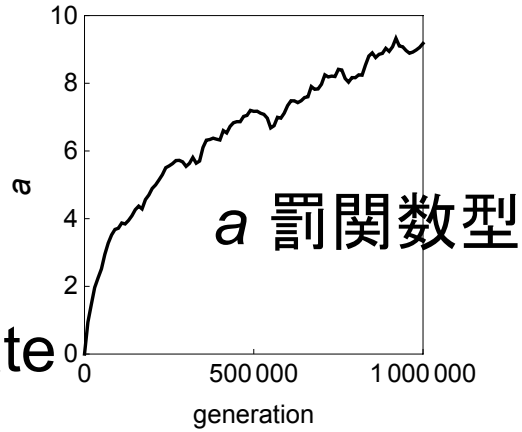
格子モデル





strict

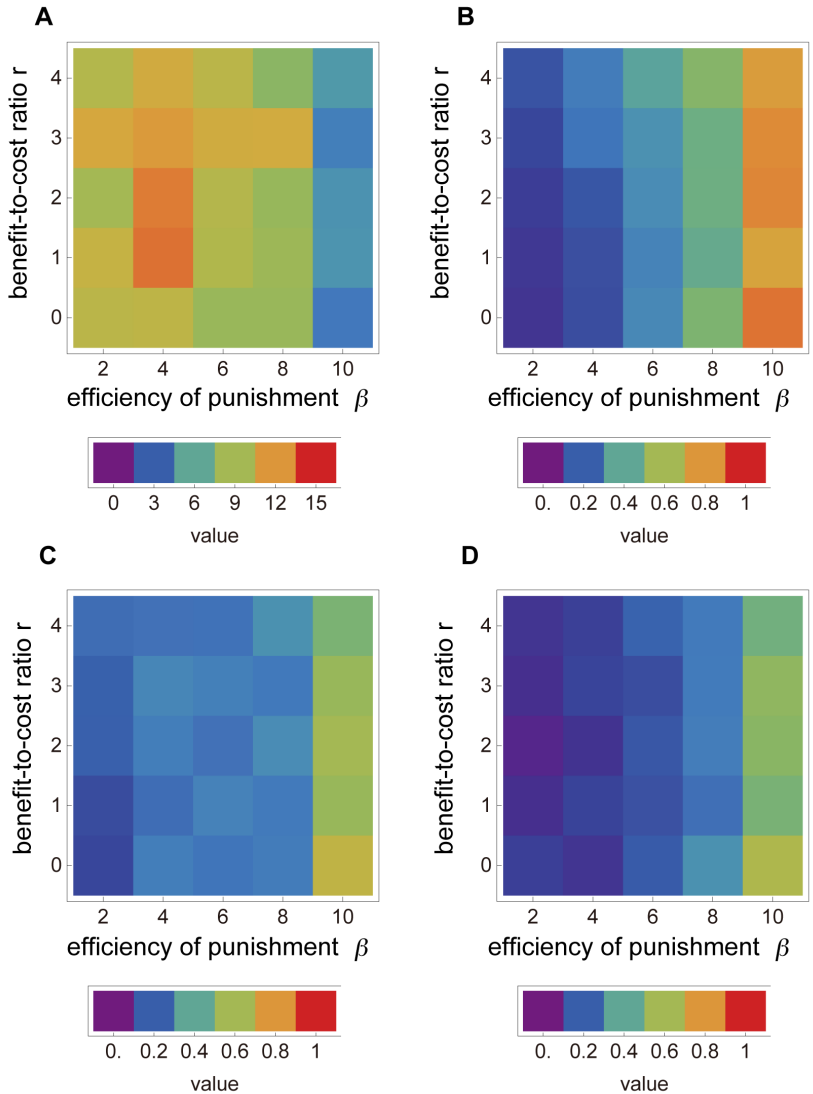
graduate



パラメータ依存性：完全混合モデル

a:罰関数型

f: 罰の強度



x: 協力レベル

u: 閾値

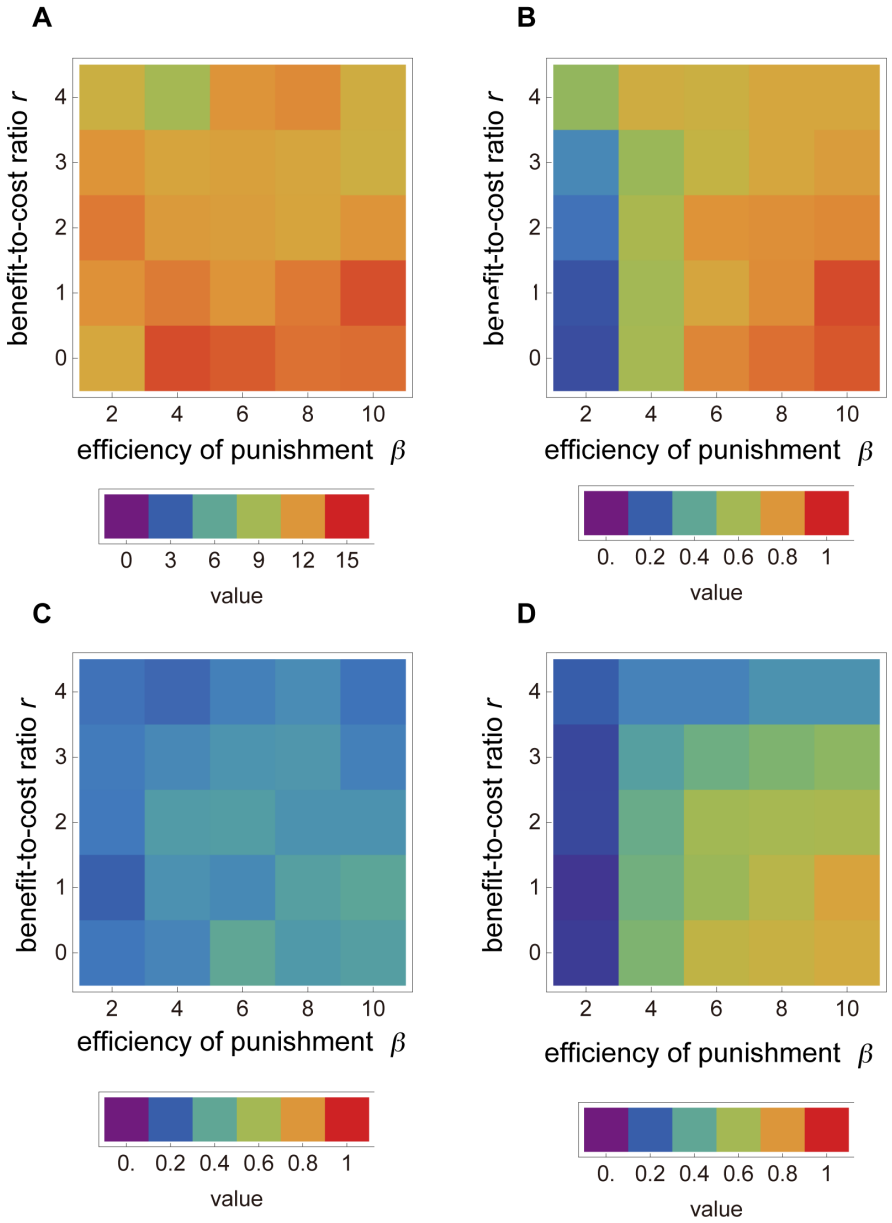
パラメータ依存性：格子モデル

a:罰関数型

x: 協力レベル

f: 罰強度

u: 閾値



まとめ

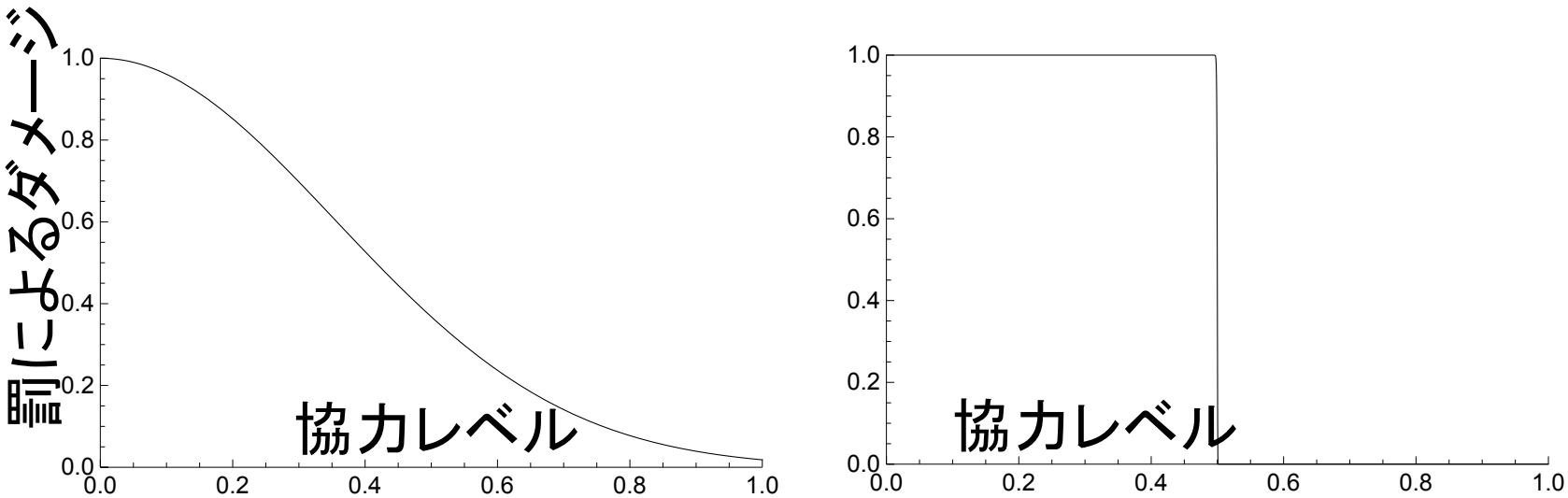
- 完全混合モデル
  - graduate punishment が協力レベルを上げる
- 格子モデル
  - strict punishmentが協力レベルを上昇
  - Nakamaru & Dieckmann (2009)と同じ

完全混合モデルでgraduate punishmentが協力を進化させた理由

- モデルの仮定の一つとして
  - 更新ルール：得点依存生存率モデル
    - Nakamaru & Iwasa (2006)
    - スパイトが効果的
    - 完全混合モデルにおいて協力と罰の共進化
- Shimao & Nakamaru (2013)
  - 完全混合モデルにおいて罰と協力は共進化すると予測
  - では、罰関数型はどのようになるのか？

完全混合モデルでは。。

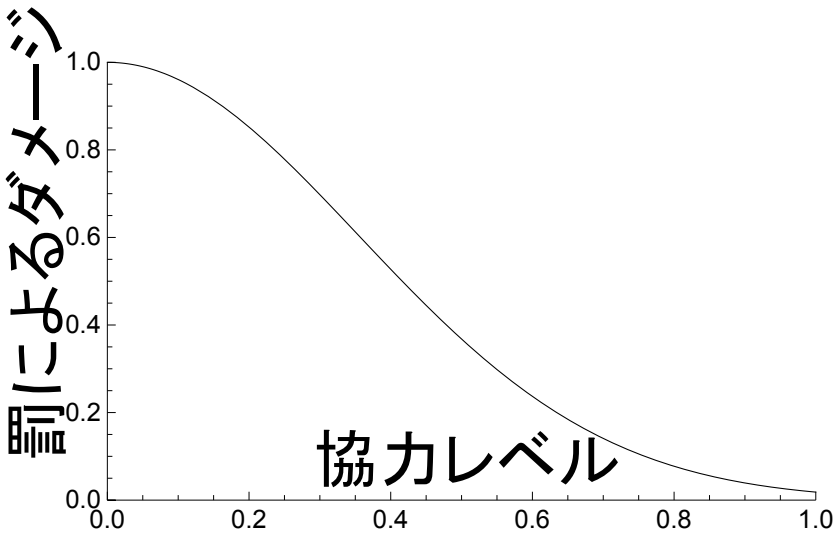
graduate punishment　　strict punishment



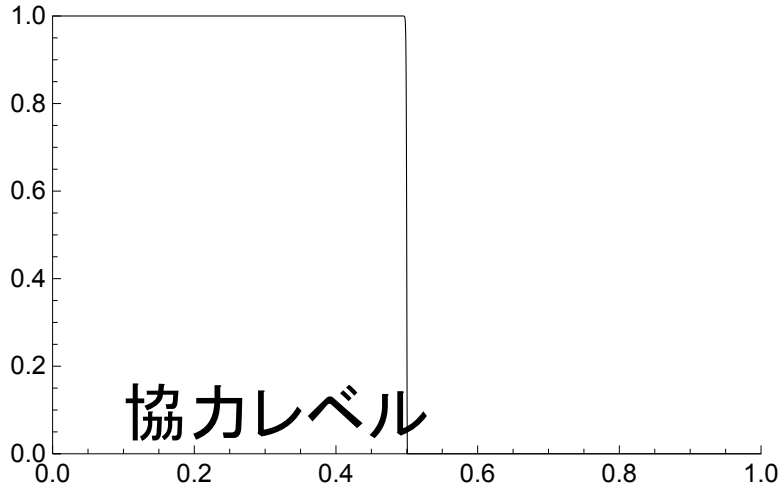
完全混合モデル：様々な協力レベルのプレーヤーと
であってゲームを行う

格子モデルでは。。

graduate punishment



strict punishment



格子モデル：同じ協力レベルのプレーヤーがかたまりやすい

最後に

- 人間社会の基盤：協力
  - 「協力の進化」条件を探る研究
    - 進化ゲーム理論を例に

社会の基盤：協力

- 人の協力行動について
  - 学際的な研究分野
    - 心理学、社会心理学
    - 経済学：合理性では説明できない
    - 社会学：秩序問題
    - 政治学：投票行動、社会関係資本
    - 進化生態学：利他行動の進化、血縁淘汰
    - 数理生物学：進化ゲーム
    - 数物系：数理的なダイナミクスへの関心
  - 最先端
    - 脳・神経や遺伝子と協力行動の関係を探る

理工系の活躍の場