

間接的互惠性の個別的評価モデルにおける最適戦略

三 留 颯*
白 倉 孝 行

1. はじめに

社会的な「評価」には、取引において協力を促進し、非協力を抑制する働きがある。人々はそれぞれ評価規準を持ち、他者を観察することによって、相互協力が維持され社会全体の利益が増大する。では、どのような評価の方法が、より多くの利益を得られるのだろうか。(Sigmund, 2010)

OhtsukiとIwasa(2006)はpublic評価モデルにおいてleading eightと呼ばれる8パターンの評価ルールが安定した相互協力を引き起こすことを示した。Uchida(2010)は、private評価モデルにおける評価ルールの特徴について検討した。本研究では、private評価モデルにおける最適な評価戦略は、leading eightから4パターンに絞られることを示す。

2. 方法

2.1 提供ゲーム

間接的互惠性のメカニズムを解明するために、提供ゲーム(donation game)を通して、数値シミュレーションを行う。提供ゲームの流れは以下の通りである(図1)。

N人のプレーヤーを用意する。それぞれのプレーヤーは自らも含めた全てのプレーヤーに対して、goodかbadの2種類の評価を持つ。このときgoodの評価を持つ確率を初期信頼確率 p とする。各ラウンドで、全てのプレーヤーの中からドナーとレシピエントをランダムに決定する。ドナーは自らの行動ルールに基づいて、レシピエントに対して協力するか否かを決める。協力した場合、ドナーはコスト c を失い、レシピエントは利益 b を得る。このとき、利益 b はコスト c よりも常に大きい値とする。協力しなかった場合、両者の総利益は変化しない。その後、ドナーの行動に対して、ドナー自身も含めた全てのプレーヤーが自らの評価ルールに基づいて、ドナーへの新しい評価を決める。ここまでを1ラウンドとし、これを t 回繰り返す。ゲーム終了後、それぞれのプレーヤーが得た総利益を適応度とみなす。

* 岩手大学人文社会科学部人間科学課程平成29年度卒業生。この論文は卒業論文の主要結果をまとめたものである。

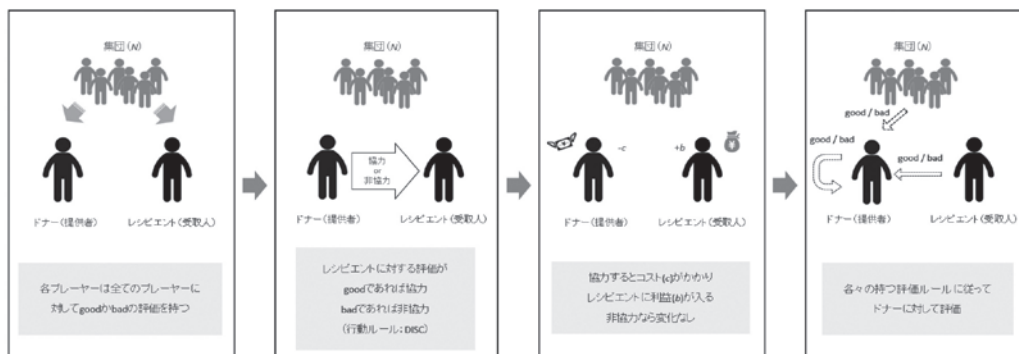


図1：提供ゲーム

2.2 本実験の条件と評価ルール

本実験ではプレイヤーの数を99人 (N=99) とし、それらを33人ずつ、それぞれ異なる評価ルールを持つ3つのグループに分ける。第1グループ、第2グループはそれぞれleading eightのいずれか一つを用い、適応度を比較する。第3グループはそれら以外の評価ルール (表1) の中からいずれか一つを用いる。行動ルールは全てのプレイヤーがDISC (レシピエントがgoodであれば協力する) を使用する。初期状態でgood評価をつける確率は0.7 ($p=0.7$) であり、ラウンド数は60000回 ($t=60000$) に設定する。

本実験では、高次の評価ルールであるleading eightに、低次の評価ルールであるAll C, All D, SCORINGを加えた計11種類のルールを使用する (表1)。leading eightは4つのモジュールの組み合わせによって構成されている。

「ドナーに対する元々の評価」がgoodのときは、T1型かT2型、どちらかのモジュールが用いられる。一方、badのときは、T1型、T2型、ST型、JU型のいずれかを用いる4パターンが

表1：leading eightとその他の評価ルール

ドナーに対する 元々の評価	good				bad			
	good		bad		good		bad	
レシピエントに対する 元々の評価								
協力(C) or 非協力(D)	C	D	C	D	C	D	C	D
TYPE1	○	×	○	○	○	×	○	○
STANDNIG	○	×	○	○	○	×	○	×
xTYPE2	○	×	○	○	○	×	×	○
xJUDGING	○	×	○	○	○	×	×	×
xTYPE1	○	×	×	○	○	×	○	○
xSTANDING	○	×	×	○	○	×	○	×
TYPE2	○	×	×	○	○	×	×	○
JUDGING	○	×	×	○	○	×	×	×

+

	good				bad			
レシピエントへの評価								
協力C or 非協力D	C	D	C	D	C	D	C	D
T1型	○	×	○	○	○	×	○	○
ST型	○	×	○	×	○	×	×	×
T2型	○	×	×	○	○	×	×	○
JU型	○	×	×	×	○	×	×	×

○:ドナーに対する評価をgoodにする
×:ドナーに対する評価をbadにする

	good				bad			
レシピエントに対する 元々の評価								
協力(C) or 非協力(D)	C	D	C	D	C	D	C	D
ALL C	○	○	○	○	○	○	○	○
ALL D	×	×	×	×	×	×	×	×
SCORING	○	×	○	×	○	×	○	×

ある。このとき、前者のモジュールが同じで、後者のモジュールがT1型かST型、もしくはT2型とJU型で異なる評価ルールの組み合わせを同系統のルールと呼ぶこととする。すなわち、TYPE1とSTANDING, xTYPE2とxJUDGING, xTYPE1とxSTANDING, TYPE2とJUDGINGは同系統のルールである。これらは、「ドナーに対する元々の評価」がbad, 「レシピエントに対する元々の評価」がbad, 「ドナーの行動」が非協力という状況で、ドナーの評価をgoodに変更するか、badのままにするかという点のみで異なる。

2.3 収入率と支出率

各評価ルールがゲーム終了後に獲得する総利益は、利益 b とコスト c の比率によって変化する。例えば、第1グループがTYPE2, 第2グループがJUDGING, 第3グループがSCORINGの社会でゲームを行った場合、 $b=2$, $c=1$ の条件ではJUDGINGがより多くの総利益を獲得するが、 $b=4$, $c=1$ の条件ではTYPE2のほうが得られる総利益が多くなる(図2)。

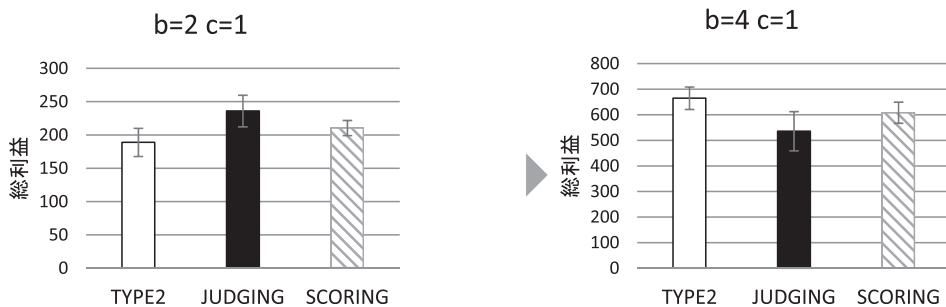


図2 利益とコストの比率による総利益の変化 (10回の独立試行の平均と標準偏差(エラーバー)を示す)

このように、1回の取引で移動する利益とコストの値が変化すると、評価ルール間の優劣も変化してしまう。そこで本研究では、利益とコストの比率が変わってもルール間の優劣を比較できるように、収入率 i と支出率 o という値を調べる。

収入率とは、あるプレーヤーが利益を得た回数の割合であり、1ゲーム中にそのプレーヤーが協力された(利益を得た)回数をレシピエントに選ばれた回数で割ることによって求められる。一方、支出率は、あるプレーヤーがコストを払った回数の割合であり、1ゲーム中にそのプレーヤーが協力した(コストを払った)回数をドナーに選ばれた回数で割ることによって求められる。これらの値を用いることで、利益とコストの割合に影響されず、ルール間の適応度を比較することができる。

2.4 実行エラーと不完全情報

我々は現実の社会で、しばしば観察を怠ったり判断を間違えたりする。このように、モデルをより現実に近いにするためのオプションとして、実行エラーと不完全情報を導入する。実行エラーは、プレーヤーが本来レシピエントに対して協力をしようとしていたところを、誤って非協力行動をとってしまう場合のことで、この確率を ε とする。また、プレーヤーがドナーの行動を観察できる確率を q とし、 $1-q$ の確率でプレーヤーはドナーの観察に失敗することになる。この状態を不完全情報と呼び、ドナーの観察に失敗したプレーヤーはドナーに対する元々の評価を変更しない。

3. 結果

TYPE1とSTANDINGの収入率を比較すると、ほとんど差異はみられない(図3)。これは、わずかなエラー ($\varepsilon=0.1$, $q=0.9$) が存在する場合でも同様である。支出率をみてみると、同様に顕著な差異はみられないが、All D、JUDGINGが第3グループの場合、TYPE1の支出率のほうがやや大きくなることがわかる。わずかなエラーを入れた状態では、第3グループがどの評価ルールでもTYPE1の支出率がSTANDINGより大きくなる。このことから、TYPE1とSTANDINGは常に同等の利益を得ているが、TYPE1のほうが多くのコストを支払っている分、最終的に獲得できる総利益が少なくなる。したがって、ST型モジュールを用いるSTANDINGがより社会に適応しやすい傾向にある。この優劣関係は、利益 b とコスト c の割合が変わっても変化しない。

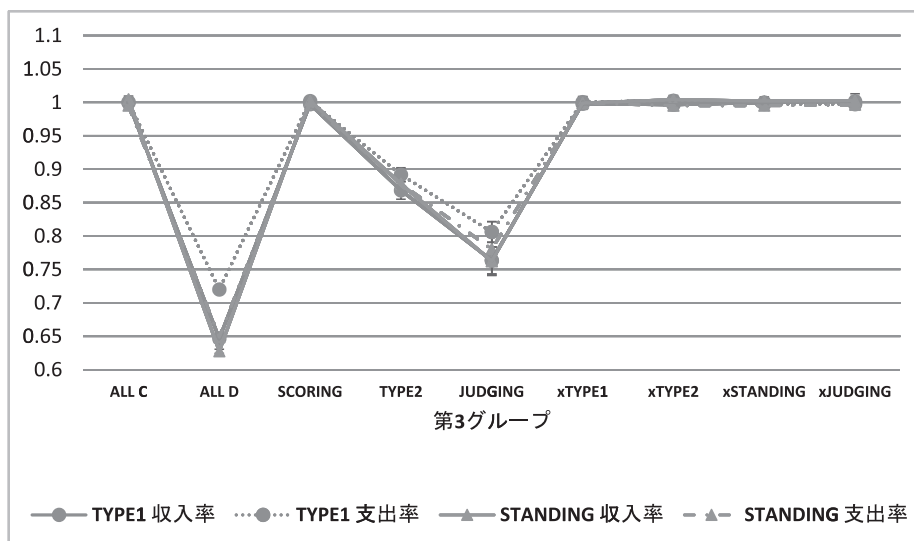


図3 TYPE1とSTANDINGの収入率・支出率(10回の独立試行の平均と標準偏差(エラーバー)を示す)

xTYPE2とxJUDGING, xTYPE1とxSTANDINGも同様の関係になる。すなわち、xTYPE2とxTYPE1が、それぞれ支出率が大きくなるため、ST・JU型モジュールを用いるxJUDGINGとxSTANDINGが獲得する総利益がより多くなる。したがって、TYPE1, xTYPE2, xTYPE1が最適な戦略になることはない。

TYPE2とJUDGINGの関係のみ、上記3つとは異なる(図4)。All CとAll Dが第3グループの場合を除くと、収入率、支出率ともにTYPE2のほうが大きい。また、TYPE2は収入率よりも支出率が大きく、JUDGINGは支出率よりも収入率が高いという特徴を持つ。したがって、1回の取引で得られる利益が大きくなり、支払うコストが少なくなるにつれてTYPE2がより多くの総利益を獲得できることになり、利益が小さく、コストが大きい状況ではJUDGINGが有利になる。

ルール間での優劣関係が切り替わる利益とコストの比率を求めるために、境界値という値を考える。境界値とは、コストを1 ($c=1$) としたとき、評価ルール1が評価ルール2よりも最

最終的に獲得できる総利益が大きくなる時の利益の値 b_c のことである。評価ルール1と評価ルール2の収入率、支出率をそれぞれ i_1 , i_2 , o_1 , o_2 と置くと、境界値 b_c は以下の式 (1) で表すことができる。

$$b_c i_1 - o_1 = b_c i_2 - o_2$$

$$\therefore b_c = \frac{o_1 - o_2}{i_1 - i_2} \quad \dots (1)$$

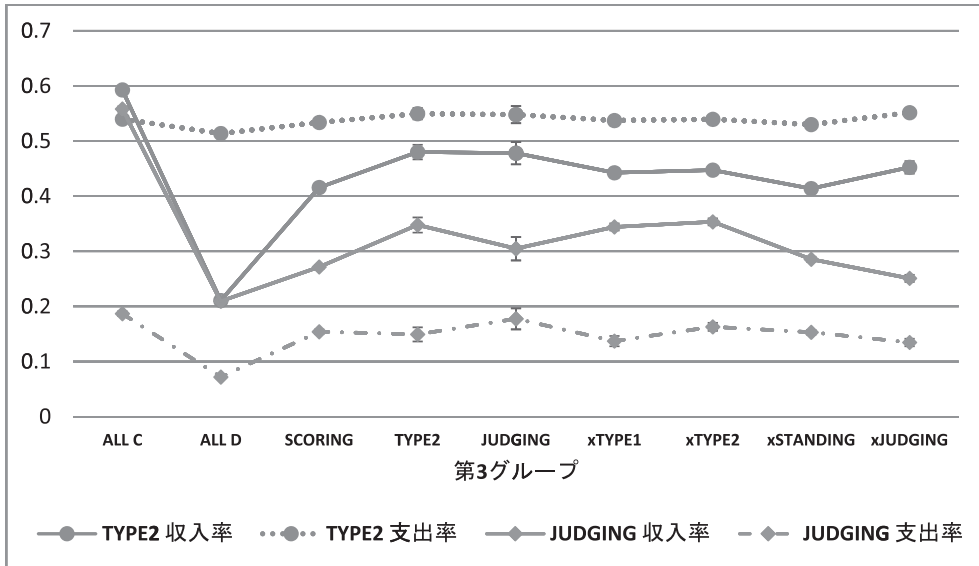


図4 TYPE2とJUDGINGの収入率・支出率（10回の独立試行の平均と標準偏差（エラーバー）を示す）

TYPE2とJUDGINGの境界値をみてみると（図5），第3グループが用いる評価ルールにかかわらず， $b_c > 2$ となる。そのため，TYPE2がJUDGINGよりも多くの総利益を獲得するためには，1回の取引で得られる利益の割合が大きい状況である必要がある。

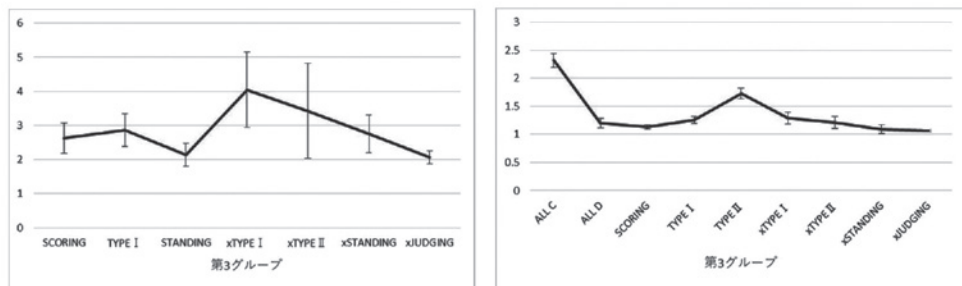


図5 評価ルールの境界値（左：TYPE2とSTANDING, 右：STANDINGとJUDGING）

しかし，利益の割合が大きい状況でも，TYPE2が最適な戦略になるわけではない。TYPE2, JUDGING, STANDINGで構成される社会を考えた場合，TYPE2はSTANDINGよりも常に総

利益が少なくなることがわかった。TYPE2とSTANDINGでは安定的な境界値が算出できないため、利益の割合を大きくしていったときの、それぞれの総利益を比較する（図6）。

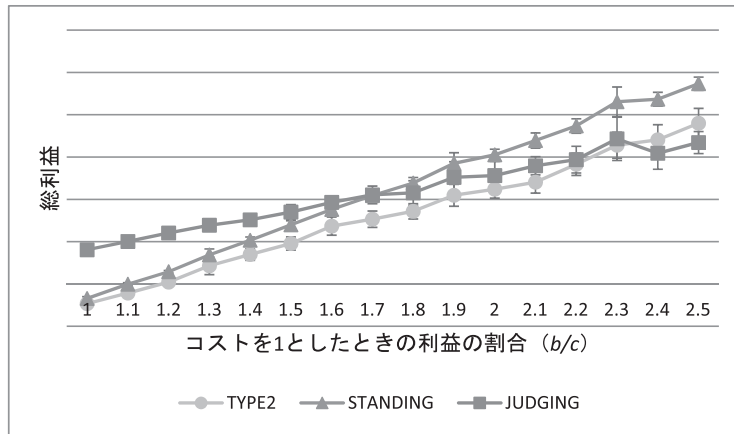


図6 利益の割合に対する総利益 (TYPE2・JUDGING・STANDING)

利益の割合が小さいときは、JUDGINGが最も多くの総利益を獲得する。利益の割合が約1.7になると、優劣が切り替わり、STANDINGが有利になる。TYPE2は、JUDGINGとの境界値である約2.3の値でJUDGINGよりも獲得する総利益が多くなるが、STANDINGと比較すると少ないままである。したがって、TYPE2が最適な戦略になることはない。

以上の結果から、本研究のモデルにおいては、T1型、T2型モジュールのみで構成されるTYPE1, xTYPE2, xTYPE1, TYPE2は淘汰され、ST型、JU型モジュールを用いるSTANDING, xJUDGING, xSTANDING, JUDGINGが生き残ることが示唆される。したがって、public評価モデルでは8つの評価ルール（leading eight）が合理的な戦略となるのに対し、private評価モデルでは4つの評価ルール（以下、leading fourと呼ぶことにする）が合理的な戦略となる。

続いて、leading four同士についてさらに比較する。STANDINGとxJUDGINGの収入率、支出率には、ほとんど差異がみられない。わずかなエラー（ $\varepsilon=0.1$, $q=0.9$ ）が存在する場合においても同様の結果となる。xJUDGINGとxSTANDINGでは、エラーが存在しない場合、xJUDGINGの収入率、支出率がわずかに大きくなり、利益の割合が大きい状況でやや有利になる傾向がみられるが、その差は極めて小さく不安定である。また、エラーが大きくなるにつれてxSTANDINGの収入率、支出率が上昇するため、一概に優劣を定めることはできない。このように、STANDING, xJUDGING, xSTANDINGの関係についてはほとんど差異がみられず、同等の適応度といえる。

JUDGINGのみが異なる特徴を持つ。STANDINGとJUDGINGを比較すると（図7）、収入率、支出率ともにSTANDINGのほうが大きくなる。また、STANDINGは収入率よりも支出率が大きく、JUDGINGは支出率よりも収入率が大きくなるため、両者の関係が切り替わる境界値が存在する（図5）。その境界値はTYPE2とJUDGINGの関係とは異なり、 $1 < b_c < 2$ の現実的な範囲で変動する。したがって、1回の取引で得られる利益が大きい状況ではSTANDINGが有利になり、小さい状況ではJUDGINGが有利になる。以上の結果から、leading fourの適応度は利益とコストの比率によって変化する。

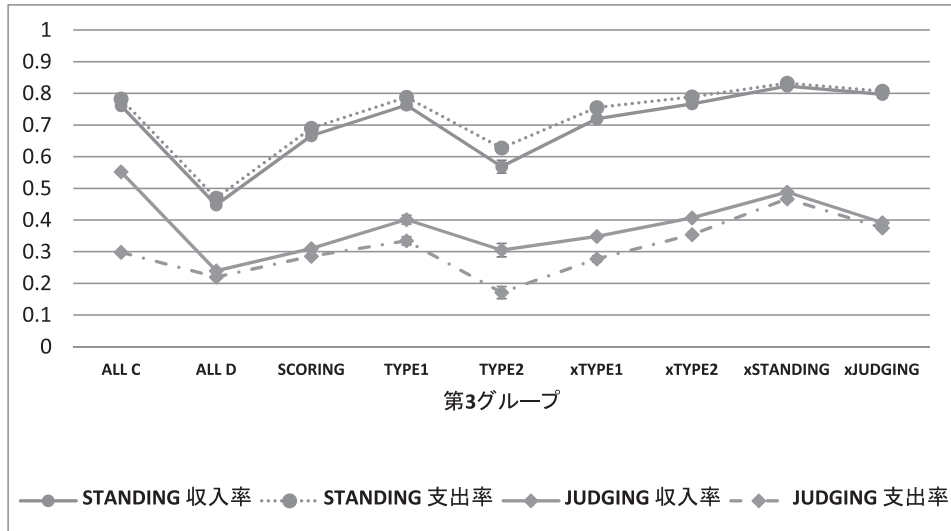


図7 STANDINGとJUDGINGの収入率・支出率（10回の独立試行の平均と標準偏差（エラーバー）を示す）

4. 考察

leading fourの適応度が高くなる理由として、それらがコストを節約する特徴をもつことが考えられる。ST型・JU型モジュールを用いるleading fourと、T1型・T2型しか用いないそれ以外の評価ルールとの決定的な違いは、「ドナーに対する元々の評価」がbad, 「レシピエントに対する元々の評価」がbad, 「ドナーの行動」が非協力という状況で、ドナーの評価をgoodに変更するか、badのままにするかという点である。そうすることにより無駄なコストを節約できることは、TYPE2とJUDGINGを比較するとわかりやすい。

TYPE2のみの社会では、2つの排他的グループが形成されることが Oishiら（2013）により示された。一方、Isagozawaら（2016）は、JUDGINGのみが存在する社会では、多数の排他的グループが形成されることを示した。排他的グループは、同じグループのメンバーに対しては協力をを行い、それ以外のプレイヤーに対しては常に協力をしない性質を持っている。TYPE2も排他的グループを形成する評価ルールであるが、形成されるグループは2つまでである。すなわち、TYPE2は条件を満たせば自身に対して協力を行わないプレイヤーに対してもグループのメンバーとみなしてしまうため、一方的に搾取される危険性がある。一方、JUDGINGはbadなドナーがbadなレシピエントに非協力でもドナーの評価をbadのままにするので、そのような搾取を排除することができる。すなわち、JUDGINGプレイヤーは「敵の敵は必ずしも味方とは限らない」という判断を下すことにより、無駄なコストを抑えることができる。

しかし、必ずしもこのような厳しい評価が最適な戦略とは限らない。取引が活発に行われている場合は、より寛大な評価基準を持つことが、より多くの総利益を獲得することにつながる。本実験で、利益の割合が大きいときはSTANDINGが有利になり、小さいときはJUDGINGが有利になるという結果となった。この結果は、我々の社会において、インフレーションのような状況では寛大な評価ルールが生き残り、デフレーションのような状況では厳格な評価ルールが生き残ることを示している。

謝辞

本研究の検証にあたり、2015年度岩手大学卒業生である砂子澤綾美さんのシミュレーションプログラムを拡張・利用させていただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- Isagozawa, A., Shirakura, T. and Tanabe, S. "Instability of group formation through indirect reciprocity under imperfect information and implementation error", arXiv:1603.04945 (2016) .
- Ohtsuki, H. and Iwasa, Y. "The leading eight: Social norms that can maintain cooperation by indirect reciprocity", J. Theor. Biol. **239** (2006) 435-444.
- Oishi, K., Shimada T. and Ito, N. "Group formation through indirect reciprocity", Phys. Rev. E **87** (2013) 030801 (R) .
- Sigmund, K. "The Calculus of Selfishness" (2010) Princeton University Press.
- Uchida, S. "Effect of private information on indirect reciprocity", Phys. Rev. E **82** (2010) 036111.