

テストステロン投与が惹起するステイタス効果のモデルと進化的安定性

福住多一

最後通牒ゲームの実験で被験者達にステロイドホルモンの1つであるテストステロンを投与すると、公平な配分提案が増えることを、Eisenegger et al. (2010) は見出した。彼らは、応答者が拒否を選ぶことによって提案者に与えられた資源配分の権限が台無しになることを提案者が恐れ、その結果、公平な提案が増えるというステイタス仮説を提唱している。本論文は、この実験結果を説明するステイタス仮説の理論モデルを提示する。我々は、各プレイヤーは他のプレイヤーの効用を考慮に入れないとする。これが利他主義や公平性という最近の行動ゲーム理論における社会的選好の理論と、我々のモデルの大きな違いである。本論文はプロスペクト理論を応用し、損失回避の傾向と参照点を持つプレイヤーを想定する。そこで、テストステロンの増加がプレイヤーの参照点の上昇をもたらすと考えることで、Eisenegger et al. (2010) の実験結果をモデルは首尾よく説明することができる。提示したこのモデルは、信頼ゲームの実験でオキシトシンを投与した Kosfeld et al. (2005) の実験結果も、うまく説明することができる。高い水準のテストステロン、すなわち我々の仮定のもとで高い水準の参照点を持つとされるプレイヤーは、自らの資源を相手に与える傾向が強まる。よって、その性質が世代を超えて安定的に保持されていくのかどうかは定かではない。本論文は、高い水準の参照点を選好として持つプレイヤーが、適応度に基づく進化動学によって内生的に出現することを、進化的安定性の概念を用いて説明する。

1. イントロダクション

最後通牒ゲーム (ultimatum game) は、提案者と応答者の2人のプレイヤーから成る。提案者は両者間の資源配分の割合を提案し、応答者はそれを容認するか、もしくは拒否する。提案者の提案が容認されれば、その配分案は実現する。提案が拒否されると、両者に配分されるはずであった資源は無くなる。これは、交渉の決裂とも解釈される。このゲームの実験研究では、資源の半分近くを応答者に配分しようとする提案が多く観察される。応答者はこの提案を確実に容認し、結果、2人のプレイヤーの間で公平に近い配分が実現する。これはゲーム理論の実験研究において、定型的事実として認められている¹⁾。

1) Güth et al. (1982) に端を発する最後通牒ゲーム実験のこのような観察結果は、その後、安定的

自分の金銭的利得のみに行動が動機付けられているプレイヤーを想定すると、このゲームの部分ゲーム完全均衡点において、提案者は応答者に全く配分しようとししない。しかし、上記のような公平な配分提案と結果が実験では観察される。この観察結果を理論的に説明するために、プレイヤーの選好に関する理論がいくつか提案されてきた。代表的なものとして、利他主義 (altruism) もしくは公平性 (fairness) といった社会的選好 (social preference) を各プレイヤーが持つと仮定する行動ゲーム理論がある。Fehr and Schmidt (1999) は、自分が相手より多くの資源を得ることの不効用と、相手が自分より多くの資源を得ることの不効用、それぞれの大きさを表すパラメーターを効用関数に導入した。Cox et al. (2007) も同様に、相手プレイヤーの利得と自分の利得からなる効用関数を定義し、両者の利得間の限界代替率を表すパラメーターを導入して実験結果を説明した。これは標準的な消費者理論の2財モデルの応用でもあり操作性に優れている。さらに、Falk et al. (2006) は互惠性の選好を導入して、公平な提案とその容認を説明している。この互惠性の選好は、次のように構成される。まず、相手プレイヤーと自分が得る利得を予想する。その予想に比べて、ゲームプレイの途中で実際の自分の利得が大きくなりそうな選択を相手が行ったことを観察したとする。そのとき当該プレイヤーは、相手の親切を感じ、相手の利得が大きくなるように自分の選択をする。反対に、予想に比べて自分の利得が小さくなるように相手が選択したことを観察すると、相手の利得を減らそうとする。この互惠性の理論の基礎は、相手と自分の利得を予想し、それらを比較考量するという点である。ここに公平性の社会的選好モデルと類似の設定が入っている。以上の理論モデルは、実験結果をよく説明できる場合も多く、その応用を試みた経済モデルも多く提示されている。

これらの社会的選好の理論に共通の弱点は、公平な配分が実現するという実験結果を説明するために、プレイヤーがそもそも公平性を好む選好を持っていると仮定している点である。説明しようとする対象を、そのまま仮定としてモデルに取り込んでいるのである。Harbaugh et al. (2000) の実験研究では、児童期から青年期にかけての発達に伴い、最後通牒ゲームでの被験者行動が、次第に成人の平均的な行動に収束してゆくことが判明した。その成人の提案行動への収束に関して、女子の方が男子よりも低年齢で起こる性差も示された。Sutter and Kocher (2007) は、信頼ゲーム (trust game) においても、ヒトの成長・発達過程にそって行動が成人のそれに収束していくことを見出している。女性の月経周期が引き起こす最後通牒ゲーム実験での行動変化も Buser (2012) で報告されている。Anderson and Dickinson (2010) は、被験者の睡眠時間を制御して、最後通牒ゲームや信頼ゲームの実験を行った。睡眠不足の下では、最後通牒ゲームの応答者は拒否を選ぶ確率を高め、信頼ゲームの貸し手は

に再現性を持って観察されている。多くの実験結果については、Camerer (2003) が参考になる。

貸し出し行動を有意に減らした。これらは、ヒトの社会的選好によって説明されると考えられてきた行動が、生理的な要因を背後に持つことを示唆している。

公平性等に関する選好をそのまま仮定して、モデルに直接導入する社会的選好モデルでは、何がより基礎的な原因となつて、これらの時系列的な行動変化が起こるのかを説明するのは難しい。また、公平性などがどれくらいの程度になるのかといった定量的な疑問に解答することも難しいであろう。個人の発達水準や時系列的に伴う行動変化や、個人間の行動の違いを簡潔に説明するために、社会的選好よりも根源的な説明方法を考える必要があると考えられるのである。我々は、一見、利他主義や公平性の選好に基づくように見受けられてきた行動を、よりシンプルなヒトの生理的な要因に基づいて説明したいのである。

ゲーム理論の実験結果を生理的な見地から説明することができれば、ヒトの行動科学と他の生物種の行動生物学との間に、進化論的な連続性・整合性を保つ説明ともなろう。そのような試みとしては、自分に遺伝的に近い血縁者に対する利他的な選好が生物進化の産物であるという血縁淘汰の理論がある。とはいえ、匿名的な環境で実施されるゲーム理論実験における公平な振る舞いを、血縁度によって説明するのは、ヒトの場合は困難であろう。また、シンプルな利己的動機に基づいて、公平な提案を説明する理論としては、限られたプレイヤー集団内でゲームを繰り返す評判 (reputation) 形成の理論がある。しかし我々がここで探求するのは、極めて匿名性の高い短期間の相互依存関係における、利他的で公平な振る舞いに関する説明である。

内分泌経済学とステイタス仮説

そこで我々がこの論文で焦点を当てるのが、ヒト内分泌物、特に性ホルモンである。性ホルモンの多寡がヒトの情動や行動に与える影響を考察する。性ホルモンは、アンドロゲン（男性ホルモン）とエストロゲン（女性ホルモン）に分類される。しかしこの論文で取り上げるテストステロン（男性ホルモン）とオキシトシン（女性ホルモン）は、男女共に生成され、ともにその受容体を持つ。我々は、特に Eisenegger et al. (2010) の最後通牒ゲームに関する実験研究に注目する。彼らは被験者の舌下からアンドロゲンの1つであるテストステロン (testosterone) を注入し、その血中量をコントロールして最後通牒ゲームの実験を行った。当然、注入前の血中テストステロン濃度や心理的要因も含めて緻密な実験統制をしていた。この実験の結果、次が判明した。

- ・テストステロンの増加により、提案者は自分への配分を有意に減らす。
- ・応答者の決定には有意な変化が無い。

このような行動の変化により、公平な資源配分がプレイヤー間で実現し、提案が拒否されることも減り、効率性が上昇した。加えて、次の結果も得た。

・ プラシーボの被験者も含めて、自分がテストステロンを投与されたと信じていた提案者群は、自分への配分を有意に増やした。

テストステロンはステロイドホルモンである。つまり脂溶性があり、細胞の核に影響を与えるため、ヒトを含めた多くの動物の骨格や筋肉の発達を促進し、一般に男性的と呼ばれる行動を促進する。特に、テストステロンがヒト以外の動物の攻撃行動や、雄の生殖活動を促進するという実験結果、また、重大な犯罪を犯した囚人のテストステロン量が多いという調査結果はよく知られている²⁾。実験倫理上、プラシーボもしくはテストステロンのいずれかを投与されていると被験者に知らせる必要がある。Eisenegger et al. (2010) は、男性ホルモンの効果に関して流布されたこのような偏見が、自分はプラシーボではなくテストステロンを投与された、と信じた被験者の不公平な提案行動を引き起こしたのではないかと論じている。

偏見と述べたように、男性ホルモン（アンドロゲン）であるテストステロンは、攻撃性と結び付けて捉えられることが多い。しかしこのホルモンは、純粋な攻撃とは異なるもう1つ重要な行動を促進する。多くの動物で、縄張りや自分の社会的地位に対する挑戦的な攻撃を受けたときに、テストステロンは多く分泌され、その効果を発揮する。テストステロン量やその受容体のレベルが高いと、激しい防御行動を誘発する。そして、縄張りや社会的地位を守ることに成功した固体は、より一層、テストステロン量やその受容体も増える³⁾。そこで引き起こされる動物の行動は、一見、攻撃性や積極性と表現される行動を伴うことが多い。そのため利他的な動機や公平な振舞いの促進に、テストステロンが役立つとは、一見、想像し難い。

しかし、テストステロン量の上昇を、単純にヒトの攻撃行動の促進のみに当てはめるのは早計である。最後通牒ゲームの文脈では、提案者からすれば、応答者の拒否という行動は挑戦的な行動である。提案者には、資源の配分割合を決定する権限がある。一定の資源を保持したいと提案者が強く想起すれば、尚更、応答者の拒否は挑戦的な行動と考えられる。このような応答者の挑戦を阻止するには、匿名性の保証された最後通牒ゲームの実験では、その方法が唯一に限られる。応答者が合意するような配分提案を、提案者はしなければならないのである。したがって、テストステロンの増加が、提案者自らの権限の維持や資源の確保への強い執着をもたらすならば、攻撃的ではなく公平な提案をすることによって、応答者から

2) テストステロンがヒトの社会的情動や行動に与える影響に関する多くの事例のレビューとしては、Eisenegger et al. (2011) を参照されたい。テストステロンだけでなくエンドロゲンのペプチドホルモンであるオキシトシンも含め、ヒトにこれらの性ホルモンを体外から短期的に投与した場合の、情動および行動への急性効果については Bos (2012) に詳しい。

3) 縄張りへの挑戦的な進入行動に対する積極的な防御行動とテストステロン量の関係が最初に見出されたのは、鳥類に関する研究である (Wingfield et al. (1990))。

の拒否を避けようとすると考えられる。Eisenegger et al. (2010) では、このようにテストステロンが情動に与える影響によって公平な提案がなされるという考え方を社会的ステイタス仮説 (status hypothesis) と呼んでいる。

ステイタス仮説のモデル構築

我々は、このステイタス仮説をプロスペクト理論 (Kahnemann and Tversky (1979)) に類似した数学モデルを応用することによって定式化を試みる。プロスペクト理論の特徴の1つとして、被験者が実際に意思決定(行動)をする前に、被験者自身が置かれた状況での意思決定において基準となるような参照点 (reference point) を被験者が定めるということがあげられる。我々は、テストステロン量の変化が、この被験者の参照点を変化させると想定する。具体的には、最後通牒ゲームの提案者が、自らに最低限確保したい資源量を、その提案者の参照点であると想定する。これは自分の配分権限のもとで、最低限、実現すべき資源の量である。この資源量が、テストステロンの増加により上昇すると仮定する。

手にする資源量がその参照点を超えるとき、その超えた大きさをゲームの結果に対する評価の増分とする。同様にして参照点を下回る分を、評価の損失分と考える。この評価増分の限界効用よりも、評価損失の限界効用のほうが大きいという損失回避の特徴を我々は想定する。これもプロスペクト理論の特徴の1つである。Matsumoto and Hikosaka (2009) では、チンパンジーをモデルとする実験で、期待される獲得資源が実現しない場合のみに動機シグナルを伝達するドーパミンニューロン (外側手綱核) を特定化した。つまり、評価の増分と損失分は、それぞれ脳の異なるタイプのニューロンがその興奮を伝える。ヒトにおいても、損失分と増加分の限界効用の大きさが非対称であるという想定は、妥当であると我々は考える。

テストステロンの投与により参照点は上昇する、と我々は仮定する。このとき、最後通牒ゲームのルールのもとでは、もし提案者の提案が拒否された場合には、参照点からの損失分が大きくなることを意味する。損失回避を仮定するので、提案者はその参照点が上昇したがゆえに、容認されやすい提案をします、我々は考えるのである。応答者においては、最後通牒ゲームのルール上、資源配分の権限が存在しないのでテストステロンの影響はないはずである⁴⁾。

我々はこのステイタス仮説をシンプルな数学で定式化した後に、比較静学的手法でこのモデルの含意を探る。そこでは、テストステロン量が非常に低い場合、もしくは非常に大きい

4) ただし、ヒトの発生段階で、母親の胎内におけるテストステロン暴露量との間で負の相関が指摘されている $2D:4D$ rate ($=(\text{人差し指の長さ})/(\text{薬指の長さ})$) が小さいほど、最後通牒ゲームの応答者としては拒否をする傾向が強いという実験結果もある (Burnham (2007))。

場合に、金銭的な動機のみに基づいた行動が観察されやすくなるであろうといった予測も含まれる。このような予測は、我々のように数理モデルを構築することで可能となる。

Eisenegger et al. (2011) では、生物（ヒト）個体のテストステロンの分泌や活性は、それが引き起こした行動が成功して、強化されていく事例が紹介されている。これは、テストステロン分泌量が、適応的もしくは進化的なプロセスにしたがっていることを示唆している。そこで我々は、このテストステロンのステイタス仮説に基づく人間行動への効果が、進化的な安定性を持つかどうかを検討する。これには Güth and Yaari (1992) に始まる間接進化アプローチにしたがった選好進化（preference evolution）モデルを使って説明する。これは、毎期のゲームプレイから得られる、物質的な利得を適応度とみなした適応動学のもとで、そのプレイをもたらした効用が進化的安定性を持つかどうかを検証するモデルである。

そこでは、適当なパラメーターとマッチング方式のもとでは、この高い水準の参照点を持つプレイヤーの選好が、適応過程の下で進化的安定性を持つ。その結果として、公平な配分が安定的に観察されることが示される。これは高い水準のテストステロン分泌量が、進的に安定性を持つことを示唆する結果である。

最後に、信頼ゲームの実験において、エストロゲンの1つであるオキシトシンの外生的な投与が、被験者の高い信頼行動を惹起する実験結果（Kosfeld et al. (2005)）も、我々のモデルで説明をすることができることをみる。オキシトシンはペプチドホルモンである。したがって、その血中濃度の上昇が情動や行動に効果を与える持続時間は、ステロイドホルモンであるテストステロンより極めて短いと考えられる。その観点から、我々は、オキシトシンはテストステロンと異なり、参照点ではなく限界効用の大きさに影響を与えると想定する。

以下、第2節でこのプロスペクト理論を基礎にしたステイタス効果のモデルを提示する。第3節ではそのモデルに従う提案者行動の特徴を探る。第4節では、ステイタス効果の進化的な安定性を、選好進化モデルによって検討する。第5節に本論文のまとめと、我々が提示したモデルが信頼ゲームでのオキシトシン投与の実験結果もうまく説明できることに言及する。

2. モデル

2人プレイヤーの最後通牒ゲームを考える。各プレイヤーをそれぞれ提案者、応答者と呼ぶ。提案者が総金額 $M > 0$ の配分案 $(x, M - x)$ を、応答者に提示する。ここで $x \in [0, M]$ は、この提案者の自分自身への配分金額である。応答者は、提案者の配分案 $(x, M - x)$ を「受容する」(accept) あるいは「拒否する」(reject)。受容すれば、配分案 $(x, M - x)$ がそのまま実現し、拒否すれば両者の利得は0になる。

我々はテストステロン量の変動が提案者の行動に与える影響に関心がある。そしてテストステロンの変動はプレイヤーの社会的ステイタス (social status) に関する情動に影響を与え

ると我々は想定する。ただし応答者には、配分に関して拒否するかしないかという判断しか許されていない。Eisenegger et al. (2010) にも「...responders' behaviour cannot be affected by testosterone-induced changes in this motive」とある⁵⁾。この節では、我々は応答者の行動は Güth et al. (1982) や Camerer (2003) にある実験研究で観察された定型的な行動分布に従うと仮定する。

応答者の行動に関する仮定

- ・ 応答者への配分が大きくなるにつれて、応答者がその案を受容する確率は大きくなる。
- ・ 応答者は総金額 M の半分以上を提示されると確実に受容する⁶⁾。

この仮定を満たす応答者のシンプルな行動戦略の例を考える。確率 $p(a|x) \in [0, 1]$ を、提案 $(x, 1-x)$ に対して応答者が受容 (a) を選択する確率とする。

$$p(a|x) = \min\left\{1, 1 - \left(x - \frac{M}{2}\right) \frac{2}{M}\right\}, \quad \text{for each } x \in [0, M].$$

ただし、提案者は自らの利得評価をするとき、この例のような客観確率をそのまま用いるわけではない。期待効用理論ではこの客観的確率を使って効用の荷重平均をとる。しかし Kahnemann and Tversky (1979) に端を発するプロスペクト理論やその一般化であるランク依存型効用の理論 (Quiggin (1982)) によれば、この重みに相当する**決定加重** (decision weight) には、客観確率が非常に小さいときにその確率を大きく評価し、客観確率が非常に大きいときはそれを小さく評価するというバイアスがある。我々は、提案者が意思決定に用いるその決定加重を**予想容認確率**と呼び、それを $q(a|x)$ で表す。これを、提案者が $(x, M-x)$ を提示するときの応答者の容認確率と想定する。我々はプロスペクト理論を受け入れ、この容認確率が次の性質を満たすとする。

予想容認確率 $q(a|x)$ の性質

$$\exists k \in [0, 1], \quad \forall x \in [0, M], \quad p(a|x) < k \Leftrightarrow p(a|x) < q(a|x).$$

5) テストステロンが応答者の行動に影響を与えている可能性は、完全には否定はできない。Burnham (2007) では拒否行動を選択する応答者のテストステロン量が多いことを見出している。ただし Burnham (2007) は被験者にホルモンを投与して、その量をコントロールするような実験は行っていない。

6) ただし Henrich et al. (2004) には、半分以上の配分を提示された応答者がその提案を拒否する少数民族での実験例がある。

我々は分析の簡単化のために、この性質を持つ予想容認確率 $q(a|x)$ を次のように特定化する。

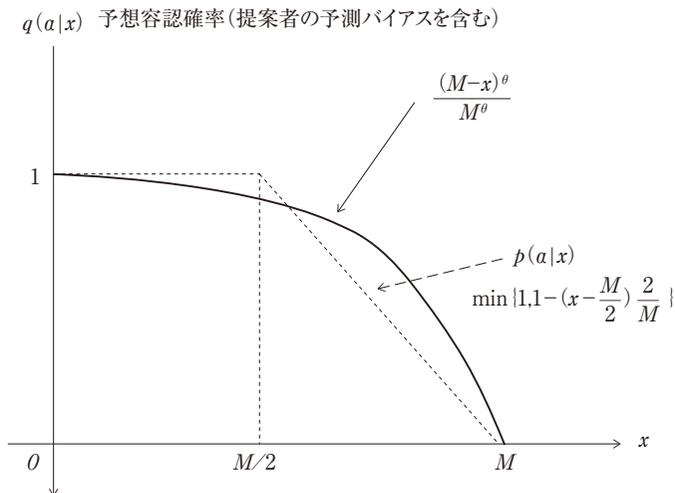
$$q(a|x) \equiv \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \quad (1)$$

ただし $\theta \in (0, 1)$ とする。

この関数 $q(a|x)$ の例と客観確率 $p(a|x)$ のグラフを図 2-1 に示す。

期待効用理論と同様に、プロスペクト理論ではゲームの結果に対する評価を先の予想容認確率で加重平均化して、そのゲームの結果を評価する。この容認確率で重み付けされる提案者の評価関数を $v(x)$ で表す。ここで x は提案者の自分自身への配分である。プロスペクト理論では、まず意思決定者にとっての参照点 (reference point) が決まるとする。これは意思決定者にとってのフレームが決まるとも言える。その参照点における評価値は 0 である。我々は、提案者の参照点を $R \in [0, M]$ で表す。提案者が $(x, M-x)$ を提案してそれが受容され、自らに $x > 0$ の配分が実現する場合、提案者は $x - R$ の配分の増加 ($x < R$ の場合は配分の減少) を実感すると想定する。よって提案が拒否された場合、提案者にとって $x = 0$ の配分が実現するので、 $-R$ の大きさの利得の減少を実感する。我々は通常のプロスペクト理論の仮定に沿って、その参照点から利得が増える時の限界効用よりも、利得が減る時の限界効用のほうが大きいとする (Kahneman and Tversky (1979))。

図 2-1 実際の応答者の容認確率 $p(a|x)$ と、それに対する提案者の予想容認確率 $q(a|x)$ のグラフ



提案者がゲームの結果を評価するときの仮定

配分 $(x, M-x)$ が実現した場合、その評価値 $v(x)$ を次とする。

$$v(x) \equiv \begin{cases} \alpha(x-R) & \text{if } x \geq R, \\ \beta(x-R) & \text{if } x < R \end{cases} \quad (2)$$

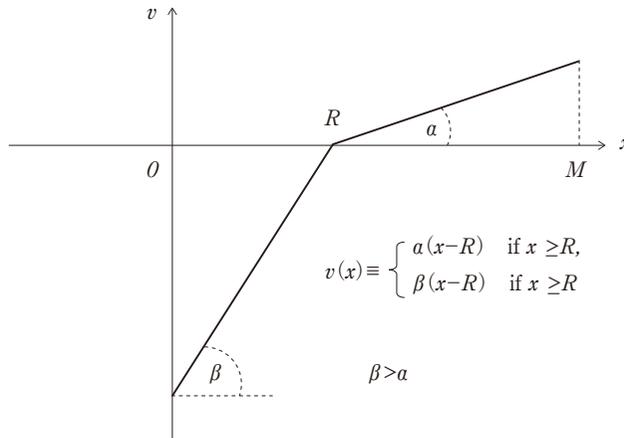
ただし α, β は正の定数で $\beta > \alpha$ となる値である。この関数 $v(x)$ の概形が図 2-2 に示してある。

以上 (1) (2) 式より、最後通牒ゲームで $(x, M-x)$ を提案するときの提案者の予想評価 $Ev(x) \equiv q(a|x)v(x) + (1-q(a|x))v(0)$ は、

$$Ev(x) = \begin{cases} \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \{ \alpha(x-R) \} + \{ 1 - \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \} \beta(-R) & \text{if } x \geq R, \\ \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \{ \beta(x-R) \} + \{ 1 - \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \} \beta(-R) & \text{if } x < R \end{cases} \quad (3)$$

となる。この予想評価を最大化する提案 $(x^*, M-x^*)$ を提案者は選択する。

図 2-2 提案者の評価を表すグラフ



(注) x は提案者への配分量, R は提案者の参照点の値, α は利得増加の限界効用, β は利得損失の限界効用。

3. 分 析

提案者の予想評価関数 $Ev(x) : [0, M] \rightarrow \mathbf{R}$ の最大化点 x^* を探す。この関数 $Ev(x)$ は閉区間上の連続関数であるため、最大値の存在は保証される。具体的にこの関数の最大化点を探すために、この関数のグラフの形状の特徴を調べる。この関数は $x = R$ で微分不可能である。そこでこの関数 $Ev(x)$ を構成する $x \geq R$ の部分と $x < R$ の部分を、それぞれ定義域を非負の実数全体に拡張した関数 $Ev_h, Ev_l : \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}$ を考える。つまり、

$$Ev_h(x) \equiv \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \{\alpha(x-R)\} + \left\{1 - \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta}\right\} \beta(-R),$$

$$Ev_l(x) \equiv \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \{\beta(x-R)\} + \left\{1 - \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta}\right\} \beta(-R),$$

である。これらの関数 $Ev_h(x), Ev_l(x)$ のグラフの形状の特徴をまず検討する。

補題 1

関数 $Ev_h(x), Ev_l(x) : \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}$ はともに、 $\{x \in \mathbf{R} \mid 0 < x < M\}$ 上で狭義凹関数となっている。

証明. まず関数 $Ev_h(x)$ について考える。

$$\frac{\partial Ev_h(x)}{\partial x} = \frac{(M-x)^{\theta-1}}{M^\theta} \{\theta\alpha(R-x) + \alpha(M-x) - \theta\beta R\} \quad (4)$$

より、

$$\frac{\partial^2 Ev_h(x)}{\partial x^2} = \frac{(M-x)^{\theta-2}}{M^\theta} \theta[\alpha\{(\theta+1)x + (1-\theta)R - 2M\} + (\theta-1)\beta R]$$

を得る。

参照点の範囲は $R \leq M$ なので、 $0 < x < M$ なるすべての x において、

$$\alpha\{(\theta+1)x + (1-\theta)R - 2M\} < \alpha\{(\theta+1)M + (1-\theta)M - 2M\}$$

となる。そこで $\theta < 1$ であることに注意すれば、 $\frac{\partial^2 Ev_h(x)}{\partial x^2} < 0$ となることがわかる。よって関数 $Ev_h(x)$ は区間 $(0, M)$ 上で狭義凹関数である。

次に関数 $Ev_l(x)$ について考える。

$$\frac{\partial Ev_l(x)}{\partial x} = -\frac{(M-x)^{\theta-1}}{M^\theta} \theta\beta x + \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta} \beta \quad (5)$$

より、

$$\frac{\partial^2 Ev_l(x)}{\partial x^2} = \frac{\theta\beta}{M^\theta} \{(\theta-1)(M-x)^{\theta-2}x - 2(M-x)^{\theta-1}\}$$

を得る。

$\theta < 1$ なので, $0 < x < M$ なるすべての x について, $(\theta-1)(M-x)^{\theta-2}x - 2(M-x)^{\theta-1} < 0$ となり, $\frac{\partial^2 Ev_l(x)}{\partial x^2} < 0$ となることがわかる。よって区間 $(0, M)$ 上で関数 $Ev_l(x)$ は狭義凹関数である。□

予想評価関数 $Ev(x)$ は, $x \leq R$ の範囲で上記の $Ev_l(x)$ と一致し, $R \leq x$ の範囲で上記の $Ev_h(x)$ と一致する。そして $x = R$ においてこれら 2 つの関数の値は一致する。つまり $Ev(x)$ は連続関数である。この関数 $Ev(x)$ の最大化点 x^* を提案者は自分への配分として提案する。グラフの概形を考察することによって, この最大化点 x^* は次の定理のように 3 つの場合に分類できる。

定理 1

提案者は自身への配分 x^* を以下のように提案する。

$$(1.1) \quad 0 < \theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right) \text{ ならば, } x^* \in \{x \in \mathbf{R} \mid R < x < M\} \text{ であり,}$$

$$x^* = \frac{\theta(\alpha - \beta)R + \alpha M}{\alpha(\theta + 1)}. \quad (6)$$

$$(1.2) \quad \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right) \leq \theta < \frac{M}{R} - 1 \text{ ならば, } x^* = R, \text{ つまり提案 } x^* \text{ は参照点の値 } R \text{ に一致する。}$$

$$(1.3) \quad \frac{M}{R} - 1 \leq \theta < 1 \text{ ならば, } x^* \in \{x \in \mathbf{R} \mid 0 < x \leq R\} \text{ であり,}$$

$$x^* = \frac{M}{\theta + 1}.$$

証明. 関数 $Ev_h(x) : \mathbf{R} \rightarrow R$ の最大化点を x_h^* で表す。この点の 1 階の条件式は (4) 式より,

$$\frac{\partial Ev_h(x_h^*)}{\partial x} = \frac{(M - x_h^*)^{\theta-1}}{M^\theta} \{ \theta\alpha(R - x_h^*) + \alpha(M - x_h^*) - \theta\beta R \} = 0$$

である。これを解いて $x_h^* = \frac{\theta(\alpha - \beta)R + \alpha M}{\alpha(\theta + 1)}$ を得る。 $M \geq R$ であることに注意すれば, 不等号

$$M - x_h^* = \frac{\alpha(\theta + 1)M - \{R\theta(\alpha - \beta) + \alpha M\}}{\alpha(\theta + 1)} = \frac{\alpha(M - R) + \beta R}{\alpha(\theta + 1)} > 0$$

が示され、 $x_h^* < M$ であることがわかる。

参照点の値 R よりも x_h^* が大きくなる必要十分条件は、

$$\frac{\theta R(\alpha - \beta) + \alpha M}{\alpha(\theta + 1)} - R = \frac{\theta R(\alpha - \beta) + \alpha M - \alpha(\theta + 1)R}{\alpha(\theta + 1)} > 0$$

である。これを整理すると不等号条件

$$\theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right) \quad (7)$$

となる。(7)式が成立しない場合、すなわち $\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right) \leq \theta$ であるとき、関数 $Ev_h(x)$ は $0 < x \leq R$ なる x で最大値をとる。この関数 $Ev_h(x)$ は、補題1より狭義凹関数であるから、この場合は $\{x \in \mathbf{R} \mid R \leq x \leq M\}$ 上で減少関数となる。

次に関数 $Ev_l(x) : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ について調べる。この関数の最大化点を x_l^* で表すと、この点の1階の条件式は (5)式より、

$$\frac{\partial Ev_l(x_l^*)}{\partial x} = -\frac{(M - x_l^*)^{\theta-1}}{M^\theta} \theta \beta x_l^* + \frac{(M - x_l^*)^\theta}{M^\theta} \beta = 0$$

である。これを解いて $x_l^* = \frac{M}{1+\theta}$ を得る。この解から、 x^* は明らかに正の数である。また、 $x_l^* \geq R$ となる必要十分条件は、 $x_l^* > R$ より

$$\frac{M}{R} - 1 > \theta \quad (8)$$

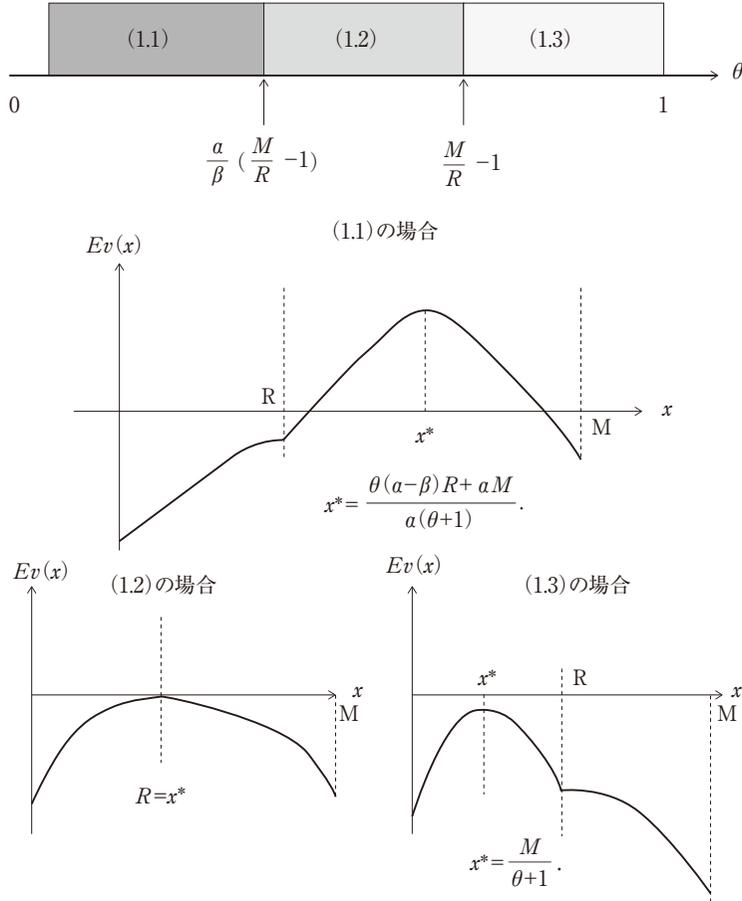
となる。

補題1より関数 $Ev_l(x)$ は狭義凹関数であるから、この (8)式が成立しているとき、関数 $Ev_l(x)$ は $\{x \in \mathbf{R} \mid 0 \leq x < R\}$ 上で増加関数となっている。(8)式が成立していないとき、関数 $Ev_l(x)$ は $0 < x \leq R$ なる x で最大値を持ち、補題1より凹関数でもあることから $\{x \in \mathbf{R} \mid R < x \leq M\}$ 上で減少関数になっている。

$\beta > \alpha$ であることに注意しながら、以上をまとめると関数 $Ev(x)$ のグラフの概形が明らかになる。(図3-1に関数 $Ev(x)$ のグラフの可能なパターンを示してある。) $\beta > \alpha > 0$ であるから、(7)式が成り立つならば、(8)式が成り立つ。よって (7)式が成り立つならば、関数 $Ev_h(x)$ は $R < x < M$ なる x で最大値を持ち、関数 $Ev_l(x)$ は区間 $[0, R]$ 上で増加関数となっている。したがって (7)式が成り立つとき、関数 $Ev(x)$ は区間 (R, M) 上で最大化点 $x^* = x_h^*$ を持つ。

(8)式が成立しないならば、(7)式は成立しない。 $\frac{M}{R} - 1 \leq \theta$ ならば、関数 $Ev_l(x)$ は $0 < x \leq R$ なる x で最大値をとり、関数 $Ev_h(x)$ は区間 $(R, M]$ 上で減少関数となる。よって

図 3-1 予想評価関数 $Ev(x)$ のグラフ



(注) 定理 1 の場合分けにしたがって示してある。

関数 $Ev(x)$ は区間 $(0, R]$ 上に最大化点 $x^* = x_l^*$ を持つ。

最後に (8)式は成立しているが, (7)式が成立していない場合を考える。このとき関数 $Ev_l(x)$ は区間 $[0, R]$ 上で増加関数であり, 関数 $Ev_h(x)$ は区間 $[R, M]$ 上で減少関数である。 $Ev_l(R) = Ev_h(R)$ であるから関数 $Ev(x)$ の最大化点は $x^* = R$ となる。 □

続けてこの最大化点 x^* の性質をみていく。多くの哺乳類において, テストステロンはプレイヤーの社会的地位に対する他のプレイヤーの挑戦的な行動に対して効力を発揮する。自らの資源を確保するように行動を仕向ける。我々が検討している最後通牒ゲームの場合, 応答者の拒否という行動が, 配分権限を持つ提案者の地位や資源確保をおびやかす。この「提案者が地位を守ろうとする動機が, 最後通牒ゲームで公平な提案を生む」という仮説を, Eisenegger

et al. (2010) では、**社会的ステイタス仮説** (social status hypothesis) と呼んでいる。我々のモデルに従えば、提案者が持つ参照点 R は、配分する資源量に対する提案者の配分権限の大きさと解釈できる。これがテストステロンの投与量で変化すると解釈する。

・テストステロンの増加によって、社会的ステイタスを強く意識するようになる提案者の参照点 R の値は大きくなると想定する。

この参照点 R の値の変化が提案者の行動に与える影響を次の定理 2 で示す。

定理 2

(2.1) $0 < \theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right)$ ならば、参照点 R の値が大きくなると提案者が提示する自らの配分量 x^* が減少する。その結果、最後通牒ゲームでより公平な配分が実現する。

(2.2) $\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right) \leq \theta < \frac{M}{R} - 1$ ならば、参照点の値 R が大きくなると提案者が提示する自らの配分量 x^* も増加する。

(2.3) $\frac{M}{R} - 1 \leq \theta < 1$ ならば、参照点の値 R が変化しても提案者の提案は変化しない。

証明. (2.1) は定理 1 の (1.1) の場合に対応する。(6)式を R で微分し、 $\alpha < \beta$ に注意すると以下の式を得る。

$$\frac{\partial x^*}{\partial R} = \frac{\theta(\alpha - \beta)}{\alpha(\theta + 1)} < 0.$$

よって参照点の値 R の増加は提案者の自らへの配分を減らすことになる。

(2.2) は定理 1 の (1.2) の場合に対応している。 $x^* = R$ であることから、この定理の主張は明らかに成立する。(2.3) は定理 1 の (1.3) の場合に対応している。 $x^* = \frac{M}{\theta + 1}$ であることからこの定理の主張は明らかに成立する。□

Eisenegger et al. (2010) では、テストステロンを投与されたグループが、有意に自分への配分を減らす提案をしている。我々の定理 2 の (2.1) は、彼らの実験結果を説明している。Winking and Mizer (2013) は、最後通牒ゲーム実験の匿名性を厳しく保持するために、あえて工夫された野外実験を行った。その実験では、通常の実験室での定型的な提案者行動よりも、提案者は自らの配分を多くする部分ゲーム完全均衡点に近い行動が観察された。彼らの実験では、被験者の匿名性を非常に強く保持することで、提案者が資源配分の権限に関するステイタスを強く意識しなかったことが予想される。我々の定理 1 において、 R が小さくなるにつれて (1.1) の条件に当てはまる θ の範囲が広がることに注意しながら、(1.1) において、

$$\lim_{R \rightarrow 0} x^* = \frac{M}{\theta + 1}$$

となることが容易にわかる。 θ が小さくなるにつれて、各 x の予想容認確率 $q(a|x) = \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta}$ は大きくなっていく。この極限 $\frac{M}{\theta+1}$ も、 θ が小さくなっていくと、部分ゲーム完全均衡点に収束していく。つまり Winking and Mizer (2013) のフィールド実験も、我々のモデルは説明していると言えよう。

提案者の社会的ステイタスに対する挑戦的な行動とは、応答者が提案者の示した提案を拒否することである。それを強く嫌う提案者は β の値が大きくなっているのかもしれない。限界効用、限界不効用の大きさと提案の関係は次の定理で述べられる。

定理 3

$0 < \theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right)$ の場合、 β が増加すると提案者の自らに対する配分提案 x^* は減少し、 α が増加すると配分提案は増加する。この他の場合、 α, β はともに x^* とは無関係である。

証明. 定理 1 で求めた x^* を α, β それぞれで微分する。

$$\frac{\partial x^*}{\partial \alpha} = \frac{\theta \beta R}{(\theta + 1) \alpha^2} > 0, \quad \frac{\partial x^*}{\partial \beta} = -\frac{\theta R}{(\theta + 1) \alpha} < 0. \quad \square$$

この定理 3 は単純な定理であるが、注意すべき点がある。それは、これら限界効用（不効用）の値 α, β の変化が、提案者の行動に影響するには、参照点 R の値がゼロではないことが必要であるということである。何らかの理由で参照点をゼロに固定している被験者が提案者となる場合、限界効用を変化させてもその提案は変化しないと予測される。テストステロンの投与により β 値も大きくなると解釈できるかもしれないが、この点に関しては、後のまとめで述べるように、限界効用はステロイドホルモンよりも、短期的に効果が消えるペプチドホルモンの影響が現れやすいと我々は解釈したい。

実験研究では応答者が一定の割合で提案を拒否することが知られている。その拒否確率は、我々のモデルでは $1 - q(a|x) = 1 - \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta}$ で表される。したがって、 θ の値が小さい拒否確率の分布は、その値が大きい拒否確率の分布を確率支配する。確率支配する分布は、提案者にとって自らの配分が大きい提案をしてもそれが受容されやすいことを意味する。次の定理は我々のモデルにおける提案者が、受容されやすい応答者の行動の分布に直面したとき自らに有利な提案をする誘引があることを示している。

定理 4

$0 < \theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right)$ または $\frac{M}{R} - 1 \leq \theta < 1$ ならば、拒否確率の分布を確率支配する他の拒否確率の分布に提案者が直面すると、提案者は自らの配分を大きくする配分案を提示する。

証明. θ が提案者の最適な提案に関係するのは定理 1 の (1.1) と (1.3) のケースであり、その

提案 x^* を微分すれば定理を得る。前半の条件では、

$$\frac{\partial x^*}{\partial \theta} = \frac{(\alpha - \beta)\alpha R - \alpha^2 M}{\{\alpha(\theta + 1)\}^2} < 0$$

であり、後半では

$$\frac{\partial x^*}{\partial \theta} = -\frac{M}{\{(\theta + 1)\}^2} < 0$$

である。 □

我々のモデルの提案者は応答者の行動の変化を予測し、この定理が示すようにその予測に基づいて合理的に自らの配分を提示する。

4. ステイタス効果の進化的安定性

定理1の(1.1)で示したように、適当なパラメーターの範囲で提案者は $x^* = \frac{\theta(\alpha - \beta)R + \alpha M}{\alpha(1 + \theta)}$ という自身への配分を提案する。 $\beta > \alpha$ なので、参照点の値 R の増加は、提案者の自身への配分を小さくする提案を導く。テストステロンは、このように一見、提案者にとって不利な行動を導くように作用している。ここでは、テストステロンが作用して導かれる社会的ステイタス効果が、人類に保持されている理由について考察する。単純化のために、数値例を用いて**選好進化**のモデル化をする⁷⁾。

Eisenegger et al. (2010)にあるように、テストステロン量と最後通牒ゲームにおける実際の応答者の行動には強い相関がない。しかし、テストステロンの増加が、提案者の持つ予想容認確率を低下させる可能性はある。これは、テストステロンの増加が、応答者プレイヤーの行動に対する提案者の警戒心の強化をもたらすと想定するとも言えよう。Burnham (2013)は被験者のテストステロン量を外生的に変動させたのではなく、拒否をする傾向のあるプレイヤーのテストステロン量が、そのような傾向のないプレイヤーよりも多いということを見出している。この想定に基づいて、本節では次の数値例で議論をする。

4-1 数値例

この節で我々は $M = 1, \alpha = 1, \beta = 2$ とおく。 θ と R にはそれぞれ2つの水準があるとする。それらを θ_i, R_i と、添え字をつけて表し、 $\theta_L < \theta_H$ と $R_L < R_H$ とする。そして定理1の(1.1)の条件 $0 < \theta < \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{M}{R} - 1 \right)$ を満たす θ, R に議論の焦点を絞る。この条件は、ここで

7) 我々は選好進化を Güth and Yaari (1992) に始まる間接進化アプローチ (indirect evolutionary approach) にしたがってモデル化する。

の数値例のもとでは $\theta < \frac{1}{2}(\frac{1}{R} - 1)$ であるから、整理すると

$$2\theta_i R_j + R_j - 1 < 0, \quad i, j = L, H \quad (9)$$

となる。先に述べたように、テストステロンが R を増加させるとき、同時に θ も増加させ、予想容認確率 $q(a|x) = \frac{(M-x)^\theta}{M^\theta}$ が各 x において低下すると考える。

テストステロンが提案者の予想に与える効果に関する仮定

テストステロンの増加は、参照点の上昇だけでなく予想容認確率 $q(a|x)$ の低下（予想拒否確率の低下）をもたらす。

予想容認確率 $q(a|x)$ は、そのパラメーター θ が大きくなれば各 x における容認確率が低下する。前節でテストステロンは R の増大をもたらすと考えたので、上の仮定のもとでは R_i と θ_i は正の相関を持つことになる。そこでモデルにおいてシンプルに

$$\theta_i = R_i \quad (i = H, L)$$

と仮定する。この仮定のもとで上の (9) 式が成り立つには $2R_H^2 + R_H - 1 < 0$ でなければならない。この不等式から、

$$0 < R_L < R_H < \frac{1}{2} \quad (10)$$

$$0 < \theta_L < \theta_H < \frac{1}{2} \quad (11)$$

を得る。

4-2 適応度 (fitness) の計算

この最後通牒ゲームのプレイの結果において得られる資源量が、当該プレイヤーの適応度となる。 x_{ij}^* を、提案者自身の参照点が R_i であり、提案者が応答者のそれを R_j と予想している場合の、提案者にとっての最適な自分自身への配分提案とする。仮定した α, β, M の値と上記の仮定から、前節の定理 1 の (6) 式にしたがって

$$x_{ij}^* = \frac{1 - R_i \theta_j}{1 + \theta_j} = \frac{1 - R_i R_j}{1 + R_j} \quad i, j \in \{H, L\} \quad (12)$$

と表すことができる。よって

$$\begin{aligned} x_{ii}^* &= 1 - R_i \quad i = H, L \\ x_{ij}^* &= \frac{1 - R_i R_j}{1 + R_j} \quad i, j \in H, L, i \neq j \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

実際の応答者の行動は、テストステロンの量に影響を受けないと我々は想定している。つまり、応答者は第2節のモデルの説明で想定した客観的な容認確率 $p(a|x)$ を行動戦略としてとり続けるとする。

この数値例は、 $M = 1$ なので、

$$p(a|x) = \min\left\{1, 1 - \left(x - \frac{M}{2}\right) \frac{2}{M}\right\} = \min\{1, 2(1-x)\}, \quad \text{for each } x \in [0, 1],$$

となる。(13)式と、 R_i の値の大きさに関する制約式 (10)から、

$$x_{ij}^* - \frac{1}{2} = \begin{cases} \frac{1}{2} - R_i > 0 & \text{if } i = j, \\ \frac{1 - R_j(2R_i + 1)}{2(1 + R_j)} > \frac{1 - \frac{1}{2}(2 \times \frac{1}{2} + 1)}{2(1 + \frac{1}{2})} = 0 & \text{if } i \neq j \end{cases}$$

が示される。つまり我々の数値例において、提案者は資源の半分以上を自分への配分として提案する。したがって、

$$p(a|x_{ij}^*) = 2(1 - x_{ij}^*), \quad i, j \in \{H, L\}, \quad (14)$$

となる。

各プレイヤーは、ゲームをプレイする際のマッチングにおいて、同一の相手プレイヤーと提案者と応答者の役割を交代で1回ずつプレイする。そしてプレイヤー集団の全員と総当りする。各プレイヤーはマッチングした相手プレイヤーの R_i が、 $i = H, L$ いずれのタイプであるか知っているとする。このマッチング方式や完備情報の仮定は、選好進化の先行研究 Huck and Oechssler (1999) などでも想定されている⁸⁾。こうして R_i のプレイヤーが、 R_j のプレイヤーとマッチングしたときに得る適応度 π_{ij} が次のように定まる。

$$\pi_{ij} = p(a|x_{ij}^*)x_{ij}^* + p(a|x_{ji}^*)(1 - x_{ji}^*), \quad i, j \in \{H, L\}. \quad (15)$$

この式の右辺第1項はこのマッチングにおいて R_i のプレイヤーが提案者の役割になったときの期待適応度であり、右辺第2項はこのプレイヤーが応答者の役割になったときの期待適

8) 相手プレイヤーのタイプに関して不完備情報である場合の選好進化の理論は Ok and Vega-Redondo (2001) がある。

応度を表す。(13)式と(14)式から,

$$p(a|x_{ij}^*) = \begin{cases} 2R_i & \text{if } i = j, \\ \frac{2R_j(1+R_i)}{1+R_j} & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (16)$$

を得る。この容認確率と(13)式を、適応度を定義している(15)式に代入して我々は次を得る。

$$\pi_{ij} = \begin{cases} 2R_i & \text{if } i = j, \\ \frac{2R_j}{(1+R_j)^2}(1+R_i)(1-R_iR_j) + \frac{2R_i^2}{(1+R_i)^2}(1+R_j)^2 & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (17)$$

4-3 利得単調動学

ここで区間 $N = [0, 1]$ をプレイヤー集団の総量と同一視する。つまり全人口が1である。連続時間 $t \in \mathbf{R}$ の動学を想定し、 t 期の $R_i, (i = L, H)$ のプレイヤー人口割合 $n_t(R_i) \in [0, 1]$ がこの動学の状態である。各プレイヤーは各 t において、他のプレイヤーとランダムにマッチングする。すると R_i を持つプレイヤーの t 期の期待適応度 $\Pi_t(R_i)$ は、

$$\Pi_t(R_i) = n_t(R_i)\pi_{ii} + \{1 - n_t(R_i)\}\pi_{ij} \quad (18)$$

と定義される⁹⁾。こうして定まる期待適応度がより高い R_i を持つプレイヤー人口が、 $R_j (i \neq j)$ を持つプレイヤー人口よりも速く増えるとする。これは Samuelson and Zhang (1992) や Friedman (1991) の利得単調動学 (payoff monotone dynamics) にある考え方である。すなわち、

$$\text{sign}(\dot{n}_t(R_i) - \dot{n}_t(R_j)) = \text{sign}(\Pi_t(R_i) - \Pi_t(R_j)) \quad (19)$$

であり、これを我々の選好進化モデルと呼ぶ。

以上の設定のもとで、我々は、高い水準のテストステロンもしくはそれによる強い社会的ステイタス効果を持つプレイヤーが全人口を占める状態 $n(R_H) = 1$ が、我々の選好進化モデルの漸近安定点であることを示すことができる。

定理 5

プロスペクト理論に基づいた我々のモデル(3)式において、 $M = 1, \alpha = 1, \beta = 2$ とする。このとき、我々の選好進化モデルにおいて、 $n(R_H) = 1$ のみが漸近安定点である。

すなわち、高い水準の R_H のみが進化的安定性を持ち、その結果、最後通牒ゲームでは、

9) 個々の各プレイヤーが全人口に占める割合は無い。アトムレス (atomless) なプレイヤー集団を想定している。

より公平な配分提案が安定的に観察される。

証明. まず (17)式で求めた π_{ij} と π_{ii} ($i, j \in \{H, L\}$, $i \neq j$) の値について考える。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \pi_{ij}}{\partial R_i} \\ &= \frac{2R_j}{(1+R_j)^2} \{(1-R_iR_j) - R_j(1+R_i)\} + 2(1+R_j)^2 \left\{ \frac{2R_j(1+R_i)^2 - 2(1+R_i)R_i^2}{(1+R_i)^4} \right\} \\ &= \frac{2R_j}{(1+R_j)^2} (1-2R_iR_j-R_j) + \frac{4R_i(1+R_j)^2}{(1+R_i)^3}. \end{aligned}$$

$R_i, R_j < \frac{1}{2}$ なので、最後の式の第1項において $1-2R_iR_j-R_j > 0$ である。ゆえに $\frac{\partial \pi_{ij}}{\partial R_i} > 0$ であるとわかるので、 π_{ij} ($i \neq j$) の値は、 $R_i, R_j \in (0, \frac{1}{2})$ なる R_i, R_j で R_j の値を固定するとき単調増加となる。

π_{ij} が R_i の連続関数であることに注意しながら、次の極限をとる。

$$\begin{aligned} \lim_{R_i \rightarrow R_j} \pi_{ij} &= \frac{2R_j}{(1+R_j)^2} (1+R_j)(1-R_H^2) + \frac{2R_j^2}{(1+R_j)^2} (1+R_j)^2 \\ &= 2R_j = \pi_{jj}. \end{aligned}$$

よって $i=L, j=H$ であれば、 π_{LH} は増加しながら極限值 π_{HH} に収束する。 $i=H, j=L$ であれば、 π_{HL} は減少しながら極限值 π_{LL} に収束する。ゆえに $\pi_{HH} > \pi_{LH}$ かつ $\pi_{HL} > \pi_{LL}$ であることが言えた。

したがって、期待適応度の定義式 (18) において、任意の $n(R_H) \neq 0$ に対して、

$$\Pi_t(R_H) = n_t(R_H)\pi_{HH} + (1-n_t(R_H))\pi_{HL} > (1-n_t(R_H))\pi_{LL} + n_t(R_H)\pi_{LH} = \Pi_t(R_L)$$

となる。我々の選好進化モデルである (19) 式において、任意の $n(R_H) \neq 0$ に対して、 $\dot{n}_t(R_H) > \dot{n}_t(R_L)$ であることが示されたので、 $n(R_H) = 1$ は漸近安定点である。□

2人プレイヤーの戦略形ゲームで、各プレイヤーの純粋戦略集合を $\{R_H, R_L\}$ とする。図4-1に利得行列を示してある。この定理5によって、この 2×2 ゲームの支配戦略が R_H であるとも言える。したがって、利得単調動学に限らず、進化生物学で通常用いられるレプリケーター動学を用いても、 n_H が唯一の漸近安定点となる¹⁰⁾。

上の定理5の証明でみたように、 $0 < R_L < R_H < \frac{1}{2}$ かつ $n_t(R_H) \neq 0$ であれば、いかなる R_H, R_L の値の組でも、 $\pi_{HH} > \pi_{LH}$ であるから、次は容易に導かれる。

10) 詳しくは Weibüll, J. W. (1995) を参照せよ。

図 4-1 利得行列

| | | |
|----------------|----------------------|----------------------|
| | $R_H \leftarrow$ | $\rightarrow R_L$ |
| $\uparrow R_H$ | π_{HH}, π_{HH} | π_{HL}, π_{LH} |
| R_L | π_{LH}, π_{HL} | π_{LL}, π_{LL} |

$$0 < R_L < R_H < \frac{1}{2}$$

(注) 高い水準の参照点 R_H (高い水準のテストステロン) が支配的になる。

系 我々の数値例において $0 < R_i < \frac{1}{2}$ なる任意の水準 R_i を, $R = \frac{1}{2}$ は支配する。したがって我々の数値例において, 戦略空間 (参照点 R の範囲) を开区間 $(0, \frac{1}{2})$ とする利得単調動学を考慮すれば, 動学は $R = \frac{1}{2}$ に収束する。その結果, 最後通牒ゲームで公平な配分提案が進化的安定性を持つ事になる。

5. まとめと展望

我々は最後通牒ゲームにおける被験者へのテストステロン投与が提案者行動に与える影響に関する実験結果をプロスペクト理論を単純化して説明した。そこでは被験者体内のテストステロン量の増加が, 被験者の参照点 R の増加であると解釈することで, 実験結果を説明できることがわかった。参照点の大きさは被験者の最後通牒ゲームにおける自らの配分権限の大きさに対応する。参照点の値が大きくなると, 応答者に提案を拒否されて資源を喪失することが, 提案者にとって非常に望ましくない事となる。その結果, 最後通牒ゲームでは提案者はより公平な提案をするようになる。我々はこの論文で, 社会的ステイタス仮説はプロスペクト理論に近いモデルで説明できることを示した。

高い社会的ステイタス, つまり大きな参照点を持つことで提案者は自らの配分提案を減らしてしまう。このようなステイタス効果が我々ヒト集団において観察される理由として, 我々は, 選好進化の議論を数値例で行った。そこでは提案者と応答者の役割を交互にプレイするというマッチングを考慮することで, 高い参照点 R を持つことが進化的安定性を持つことを確認した。この結果は, 公平な配分を生む選好のパラメーター値を内生化し, その進化的安定性を持つことを示したと言えよう。

オキシトシン投与実験への応用

内分泌物 (ホルモン) の量と人間行動の関係を検討する内分泌経済学 (endocrinological economics) の研究は, 最後通牒ゲームの実験だけではない。そのなかで精力的に進められているものの1つが信頼ゲームである。Kosfeld et al. (2005) は, 信頼ゲームの被験者に女性ホルモンの1つであるオキシトシン (oxytocin) を吸入させた。その実験結果も我々のモデ

ルは首尾よく説明できることを、以下で簡単に述べておく。

信頼ゲームは匿名的な投資プレイヤーと返済プレイヤーの2人からなる完全情報ゲームである。まず投資プレイヤーに、大きさ $X > 0$ の資源が与えられる。投資プレイヤーは $0 \leq T \leq X$ なる投資量 T を決め、それを返済プレイヤーに渡す。すると返済プレイヤーには、 $(1+r)X$ の大きさの資源が手に入る。ここで r は資源の増加率で正の定数である。返済プレイヤーは、手に入った資源のうちから投資プレイヤーに返済する量 Y を決める。つまり $0 \leq Y \leq (1+r)T$ なる Y の大きさを選んで、投資プレイヤーに返済する。

このゲームの部分ゲーム完全均衡点の結果では、明らかに $T = 0, Y = 0$ となる。しかし Berg et al. (1995) に端を発する一連の実験研究によって、実際の被験者の定型的な行動は、これとは異なることが明らかになっている。そこでは、返済プレイヤーは受け取った投資 T の大きさと比例的に、返済の大きさ Y を選ぶ。投資プレイヤーは平均的には X の5割程度を投資する。

Kosfeld et al. (2005) は、このゲームの被験者に女性ホルモンの1つであるオキシトシン (oxytocin) を吸入させた。その結果、返済プレイヤーの行動には有意な変化はなかった。投資プレイヤーは、劇的に投資量を増やした。そこでホルモンを投与された投資プレイヤーの行動変化に関し、我々が最後通牒ゲームで考察したモデルを応用してみる。投資者に与えられた資源量 X が、その参照点 R であるとする。また、返済 Y の予想分布は、簡単化のために区間 $[0, (1+r)T]$ 上の一様分布とする。返済によって参照点 R より資源が増える場合と減る場合にわけ、それぞれの限界効用 (不効用) を α, β ($\alpha < \beta$) とする。すると、投資プレイヤーにとって投資量 T の予想評価値 $Ev(T)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} Ev(T) &= \int_T^{(1+r)T} \frac{1}{(1+r)T} \alpha(R-T+Y) dY + \int_0^T \frac{1}{(1+r)T} \beta(R-T+Y) dY \\ &= \frac{(\alpha r^2 - \beta)T}{2(1+r)} + \frac{R(\alpha r + \beta)}{1+r}. \end{aligned}$$

右辺第1項は返済 Y が、投資 T を上回る場合の期待評価値であり、右辺第2項はそれが下回る場合の期待評価値である。この式の第1項の計算結果をみればわかるように、 $Ev(T)$ を最大化する最適な投資額 T^* が正值 $T^* > 0$ であるというのは、 $r > \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}$ ということである。

ここでオキシトシンの増加を、利得増加の限界効用 α の値の増加と解釈してみよう。すると投資の増大率 r がある程度大きいとき、このオキシトシンの増大は、我々のモデルに従えば、手持ちの全額 R を貸し出す投資プレイヤーが増えると予測される。これは Kosfeld et al. (2005) の実験結果と一致している。彼らの実験でもテストステロン投与後に、手持ちの資源をすべて投資する被験者が多く現れた。また、我々はテストステロンの効果と関係しているのは β と R の値であると本論分では考えてきた。信頼ゲームにおけるこの計算結果をみれ

ば、テストステロンを投与された場合、投資をするプレイヤーが減ることはあっても、増えることはない、我々のモデルは予測する。

オキシトシンはエストロゲンであるが、実は、テストステロンも体内での芳香化（アロマテース）により、エストラジオールというエストロゲンに変わる。そのエストラジオールの受容体（ER- α, β ）を制御すると、動物モデル（ラット）の様々な雄性行動が影響されることが判明している（Meisel et al. (1984)）。エストロゲンの行動への影響を検討していくには、この詳しいメカニズムも合わせて詳細に検証していく必要があると思われる。

今後の研究の方向性として、次が考えられる。 β と R は、我々のモデルとともに同じような効果を持つと考えられるが、これらの効果を峻別する実験を設計すべきであろう。また R は、ゲームに対して被験者が持つフレームの1つであると解釈されるが、そのフレームがどのようなメカニズムで定まってくるのかを理論的に検討していく必要がある。後者に関しては、我々がここで考えたように進化ゲーム理論のアプローチが有効であると考えられる¹¹⁾。

参考文献

- Anderson, C. and Dickinson, D.L. (2010), "Bargaining and trust: the effect of 36-h total sleep deprivation on socially interactive decisions," *Journal of Sleep Research* 19, pp.54-63.
- Berg, J. Dickhaut, J. and Kevin, M. (1995), "Trust, reciprocity, and social history," *Games and Economic Behavior* 10 (1), pp.122-142.
- Binmore, K. and Samuelson, L. (2006), "The evolution of focal points," *Games and Economic Behavior* 55, pp.21-42.
- Bos, P.A. Panksepp, J. Bluthé, R.M. and Van Honk, J. (2012), "Acute effect of steroid hormones and neuropeptides on human social-emotional behavior: A review of single administration studies," *Frontiers in Neuroendocrinology* 33, pp.17-35
- Burnham, C. (2007), "High-testosterone men reject low ultimatum game offers," *Proceedings of Royal Society, Biological Sciences* 274, pp.2327-2330.
- Buser, T. (2012), "Digit ratios, the menstrual cycle and social preference," *Games and Economic Behavior* 76, pp.457-479
- Camerer, C.F. (2003), *Behavioral Game Theory: Experiments in Strategic Interaction*, Princeton University Press.
- Cox, J.C. and Friedman, D. and Gjerstad, S. (2007), "A tractable model of reciprocity and fairness," *Games and Economic Behavior*, 59, pp.17-45.
- Eisenegger, C. Haushofer, J. and Fehr, E. (2011), "The role of testosterone in social interaction," *Trends in Cognitive Sciences*, 15 (6), pp.263-271.
- Eisenegger, C. Naef, M. Snozzi, R. Heinrichs, M. and Fehr, E. (2010), "Prejudice and truth about

11) Binmore and Samuelson (2006) は純粋協調ゲームにおけるフレームの確率進化モデルを提示している。

- the effect of testosterone on human bargaining behavior," *Nature* 463, pp.356–361.
- Friedman, D. (1991), "Evolutionary games in economics," *Econometrica* 59, pp.637–666.
- Güth, W. Schmittberger, R. and Schwarze, B. (1982), "An experimental analysis of ultimatum bargaining," *Journal of Economic Behavior and Organization* 3, pp.367–388.
- Güth, W. and Yaari, M. (1992), "An evolutionary approach to explain reciprocal behavior in a simple strategic game," in: *Explaining Process and change – Approaches to Evolutionary Economics*, Witt, U. Edt., Ann Arbor, pp.23–34.
- Hargaugh, W.T. Krayse, K. and Liday, S. (2000), "Children's bargaining behavior: differences by age, gender, and height," *University of Oregon working paper*.
- Henrich, J. Boyd, R. Bowles, S. Camerer, C. Fehr, E. and Gintis, H. (2004), *Foundations of Human Sociality: Economic Experiments and Ethnographic Evidence from Fifteen Small-Scale Societies*, Oxford University Press.
- Huck, S. and Oechssler, J. (1999), "The indirect evolutionary approach to explaining fair allocatios," *Games and Economic Behavior* 28, pp.13–24.
- Johnson, R.T. and Breedlove, S.M. (2010), "Human trust: testosterone raises suspicion," *Proceedings of National Academy of Sciences* 107, pp.11149–11150.
- Kahnemann, D. and Tversky, A. (1979), "Prospect theory: an analysis of decision under risk and uncertainty," *Econometrica* 47, pp.263–291.
- Kosfeld, M. Heinrichs, M. Zak, P.J. Fischbacher, U. and Fehr, E. (2005), "Oxytocin increases trust in humans," *Nature* 435, pp.673–676.
- Matsumoto, M. and Hikosaka, O. (2009), "Two types of dopamine neurone distinctly convey positive and negative motivational signals," *Nature* 459 (11), pp.837–841.
- Meisel, R.L. O'Hanlon, J.K. and Sachs, B.D. (1984), "Differential maintenance of penile responses and copulatory behavior by gonadal hormones in castrated male rats," *Hormonal Behavior* 18, pp.56–64.
- Ok, A.K. and Vega-Redondo, F. (2001), "On the evolution of individualistic preferences: an incomplete information scenario," *Journal of Economic Theory* 97, pp.231–254.
- Quiggin, J. (1982), "A theory of anticipated utility," *Journal of Economic Behavior and Organization* 3:4, pp.323–343.
- Samuelson, L. and Zhang, J. (1992), "Evolutionary stability in asymmetric games," *Journal of Economic theory* 57, pp.363–391.
- Sutter, M. and Kocher, M.G. (2007), "Trust and Trustworthiness across different age groups" *Games and Economic Behavior* 59 (2), pp.364–382.
- Van den Bergh, B. and Dewitte, S. (2006), "Digit ratio (2D:4D) moderate the impact of sexual cues on men's decisions in ultimatum games," *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, 273, pp.2091–2095.
- Weibüll, J. W. (1995), *Evolutionary Game Theory*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Wingfield, J.C. Hegner, R.E. Dufty Jr, A.M. and Ball, G.F. (1990) , "The challenge hypothesis: theoretical implications for patterns of testosterone secretion, mating systems, and breeding strategies," *The American Naturalist* 139, pp.603–622.
- Winking, J. and Mizer, N. (2013), "Natural-field dictator game shows no altruistic giving," *Evolution and Human Behavior* 34, pp.288–293.