

行動経済学的手法による異時点間選択研究の発展*

— 神経経済学の可能性 —

米 田 紘 康

1 はじめに

経済学では有限な資源、たとえば土地、原油、原材料、動植物、時間、労働力などをどのように分配されるべきであるかを探求する。探求された結果、個人であれば効用最大化であり、企業であれば利潤最大化を達成したいと考える。この発想の起点となっているのは規範理論である。しかしながら、現実の世界では必ずしも最適な配分が達成されていない。

最適配分が達成されない理由は、経済学のモデルが前提とする主体（合理的経済人、ホモ・エコノミカス）が合理的、自制的、利己的という3性質を仮定しているからである。極端な例で言えば、これから起こる可能性を何百、何千というシナリオの中から少しでも得をする行動を選ぶことができ、目先の利益・誘惑に飛びつくこともなく、情け無用で自分が得することに専念するという人間である。このような人間の集合体の世界を前提としている。

確かにこのような前提は非現実的に思えるが、理論を構築する上では理にかなっていた。明確な行動指針のもとに効用・利潤が最大化する簡単な関数型を構築する事ができたからである。真空状態での物理運動を説明できた状態と似ている。ところが先にも述べたように現実世界では空気抵抗のような要素が数多く含まれており、モデルの予測通りに物体が着地しない。このモデルと結果の誤差には同じような偏り（バイアス）が多くの調

*本研究はJSPS 科研費20K01710の助成を受けたものです。

査・実験研究から観察されており、行動経済学の考察対象となっている。

本稿では、合理的経済人が仮定する3性質のなかでも自制的な側面に注目し、理論的背景と実験研究について整理する。その上で新たな手法である神経科学的アプローチの可能性について論じる。

2 異時点間選択理論の背景

自制的であるとは、2つの異なる時点において自身にとっての効用を正しく比較し、選択・実行できることを意味する。たとえば、現在($t=0$)に受け取れる報酬に対する効用を u_0 とし、第1期($t=1$)に受け取れる報酬に対する効用を u_1 とすると、現在の報酬を受け取った人は $u_0 > u_1$ と評価している。このとき注意が必要なことは、将来の報酬は割り引く必要がある点である。

たとえば現在100万円を受け取れる状況と1年後に100万円を受け取れる状況では、 $u_0(100\text{万円}) = u_1(100\text{万円})$ とはならず、 $u_0(100\text{万円}) \geq u_1(100\text{万円})$ となる。なぜならば、現在受け取った100万円を安全資産で運用すれば、1年後にはわずかではあるが100万円よりも増えているからである。逆の言い方をすれば、1年後の100万円は現在の100万円よりも価値が小さいことを意味する。どれくらい価値が低いのか(割り引かれるのか)を表すパラメータとして時間割引因子 δ ($0 < \delta \leq 1$) が用いられ、現在価値(Present Value; PV)と第 n 期の将来価値(Future Value; FV)の関係は

$$PV = \delta^n FV$$

となる。 δ が小さいほど、FVの現在価値であるPVは小さくなる。つまり、大きく割り引かれるほど将来の価値を小さく見積もることになり、衝動的な行動を選択することを意味する。

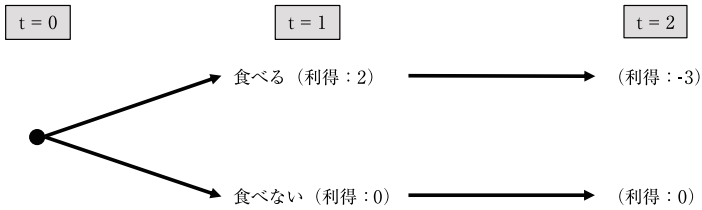


図1 おやつを食べる・食べないの例

このモデルに従うならば、誘惑に負けて選択を変更するということは起こらない。次のような3期モデル（今日、明日、明後日）で考えよう。今日時点（ $t=0$ ）でダイエットを計画しているものがあるとする。翌日おやつを食べると利得2を得られ、明後日には体重が増えた結果として利得-3になるとする。一方、翌日に何も食べなければ、明日と明後日の利得は0とする。このとき $t=0$ の時点でおやつを食べないと決断した場合は、利得の関係は表1に示すように $2\delta + (-3)\delta^2 < 0$ となる（A）。つまり、 $\delta > \frac{2}{3}$ である。逆に $t=0$ 時点で食べる決断をした場合は $2\delta + (-3)\delta^2 > 0$ となり、 $0 < \delta < \frac{2}{3}$ である（C）。 $t=1$ 時点で食べない決断（B）と食べる決断（D）をした場合の δ は、それぞれ $\delta > \frac{2}{3}$, $\delta < \frac{2}{3}$ となる。

表1 割引現在価値と割引因子 δ の一覧

(A) ($t=0$ 時点) 食べないと決断	(B) ($t=1$ 時点) 食べないと決断	(A&B) 一貫して食べない決断
$2\delta - 3\delta^2 < 0$ $\therefore \delta > \frac{2}{3}$	$2 - 3\delta < 0$ $\therefore \delta > \frac{2}{3}$	$\delta > \frac{2}{3}$
(C) ($t=0$ 時点) 食べると決断	(D) ($t=1$ 時点) 食べると決断	(C&D) 一貫して食べる決断
$2\delta - 3\delta^2 > 0$ $\therefore 0 < \delta < \frac{2}{3}$	$2 - 3\delta > 0$ $\therefore \delta < \frac{2}{3}$	$0 < \delta < \frac{2}{3}$

終始一貫して食べないと決断するときは $\delta > \frac{2}{3}$ となり（A&B）、逆に一貫して食べると決断するときは $0 < \delta < \frac{2}{3}$ となる（C&D）。以上のことが

らわかるようにダイエットのような中長期的な利得を目指すことができる主体の δ は、一貫して食べる選択をする主体よりも大きいことがわかる。ところが、現実の人間は当初の決断を翻すことがある。たとえば当初食べると決めていたが翌日おやつを目の前にすると食べない ($C \rightarrow B$)、あるいは食べないと決断していたがおやつを目の前にすると食べてしまう ($A \rightarrow D$) 事例である。一般的にダイエットに失敗するのは後者であるが、どちらも δ を求めることができない。なぜなら $t = 0$ 時点で食べないと決断したということは $\delta > \frac{2}{3}$ であり、 $t = 1$ の時点で食べるならば $\delta < \frac{2}{3}$ となるので、2つの条件を満たす δ は存在しない。つまりこのモデルでは説明できないのである。このような定常的な割引率を持つ指数型割引では実際のヒトの行動は記述できない、と指摘したのはStrotzである[46]。次節ではこれら指数型割引に代わるモデルを導くためにおこなわれた実験について、佐伯[52]を参考に生物学・心理学と経済学の両面から整理する。

3 理論から実験へ

3.1 生物学・心理学からのアプローチ

生物学ではハトやラットを用いた実験がおこなわれる。動物を用いた実験では合理的な意思決定主体を想定している。なぜならば、生命維持や繁殖を促進するような最適な行動を前提としているからである。その点では、経済学と非常に類似している。最適な採餌行動とは、餌から得られるエネルギー量 (e) と採餌に要した時間 (h) を用いて、単位時間あたり摂取エネルギー量 (e/h) として表される[5]。心理学研究から明らかになったハト、ラット、ヒトを用いた代表的な実験について述べる。

ハトを対象に心理物理学の手法を用いて双曲型関数の示したのはMazurである[25]。Mazurは実験箱の中にハトを入れ、与える餌の量と餌がもらえるまでの時間を変化させた。ハトが2つのボタンのうち1つをつつくと、一定の遅延(2秒から20秒)の後に餌が2秒間提示される(標準選択

肢)。もう一方のボタンをつつくと、調整された遅延の後に餌が6秒間提示される（調整選択肢）。つまり一方は短遅延小報酬、もう一方は長遅延大報酬となる。もし2回連続で短遅延小報酬を選ぶと、調整選択肢の遅延時間を1秒短くする。逆に2回連続で調整選択肢を選ぶと、調整選択肢の遅延時間を1秒増加する。このような手続きをおこない、調整遅延が安定したときの調整遅延の長さを標準選択肢と調整選択肢の無差別点（indifference point）とする。1セッション64試行として12セッションをハト4個体におこない、双曲型関数

$$V = \frac{A}{1 + kD}$$

の妥当性を示した。ここで A は報酬量、 k は割引の程度を表す割引率、 V は A が割り引かれた後の主観的価値（経済学での PV に相当する）、そして D は遅延時間を表す。

Richardsらはラットを用いた実験をおこなった[41]。Mazurは時間を調整したのに対して、Richardsらは報酬量を調整した点が興味深い。ラットに対して2つの選択肢を提示する。ベースとなる標準選択肢を選択すると、一定の長さの遅延（0秒から2秒刻みで16秒間）の後、0.1mlの水が与えられる。一方調整選択肢を選ぶと即時に x ml が提示される。 x の初期設定は0.007mlと0.35mlであるが、標準選択肢が選択されると x が10%増加する。逆に調整選択肢が選ばれると10%減少する。これにより、標準選択肢と無差別になる報酬量を特定する。Richardsらの研究では選択肢を提示する位置が固定されていたため、特定の方向に反応した可能性も排除できないが、指数型割引と双曲型割引の当てはまりを検証した結果は双曲型を支持している。

代表的な動物実験を取り上げたが、時間または報酬量を変化させた研究の多くで双曲型割引が支持された。また餌と水という報酬の違いでも同様の結果が得られた点からも頑健性が見てとれる。他にも数多くの動物実験

の結果があり、関数型の多少の修正はあるもののおおむね双曲型が支持されている。これはヒトを対象とした実験でも観察されているので、次節で述べる。

3. 2 経済学からのアプローチ

行動経済学では理論に対する逸脱行動（アノマリー）を検証し、新たなモデル構築をおこなう。経済学でのモデルが成立するための前提としていくつか条件があるが、中でも時間整合性と定常性が重要である。

時間整合性とは、選択をおこなう時期が異なっても好みが変わらないということである。任意の t 期において、2つの効用ベクトル (u_1, u_2, \dots) , (u'_1, u'_2, \dots) があるとき、 $(u_1, u_2, \dots) \succeq_t (u'_1, u'_2, \dots)$ を満たすならば、 $t+1$ 期においても $(u_1, u_2, \dots) \succeq_{t+1} (u'_1, u'_2, \dots)$ という選好関係を維持することを意味する。これは今日99万円もらえる状況と明日100万円もらえる状況の2択を迫られたときに前者と答えるならば、365日後に99万円もらえる状況と366日後に100万円もらえる状況でも前者を選ぶ。一見疑う余地がないように思えるが、Read and van Leeuwenの実験研究では逸脱行動を報告している [38]。彼らはアムステルダムの様々な企業で働く会社員200名（うち女性116人）に対して、13種類のお菓子を健康・不健康に分類させ、最終的に6種類の中から今すぐもらえるお菓子と1週間後にももらえるお菓子を選ぶように指示をした。すると、1週間後にもらうお菓子としてチョコレートバーのような不健康なお菓子を選んだ人が約5割いたのに対して、今すぐもらえるお菓子として不健康そうなものを選んだ人は約8割であった。つまり、選好は一貫することなく近視眼的行動が確認されたことになる。

一方定常性とは、同じ時期において選好が逆転することがなく割引率が一定であることを表す。価値を割り引くという行為は、遠い将来の利得について大きく割り引く。これは遠い将来ほど不確実性が増すからであり、

利得の大小は関係ない。しかしながら、Thalerは金額によって割引率が異なることを実験研究から示した[48]。Thalerは今すぐ15ドル貰える報酬と無差別になる1年後の報酬金額を被験者に尋ねた。すると、その平均金額は60ドルであった。同様に今すぐ250ドル貰える金額と無差別になる1年後の金額を尋ねると350ドル、今すぐ3000ドル貰える金額と無差別になる1年後の金額を尋ねると4000ドルであった。これより導かれる割引率はそれぞれ139%、34%、29%であった。このように小さな報酬は大きな報酬よりも割引かれることが示唆された。小額報酬が大きく割引かれるということは、金額が小さいほど衝動的、金額が大きいほど忍耐的判断ができるということである。これをマグニチュード効果という。

このような実験結果の他にも近視眼性が指摘されており、近視眼性を組み入れたモデルが導入された。Stroztにより時間とともに割引率が低下する双曲割引モデルが導入されたが[46]、より扱いやすいモデルとして Phelps and Pollakらの準双曲割引モデル (quasi-hyperbolic discounting model) が導入され[34]、その後Laibsonによってその有用性が再認識された[21]。これは別名 $\beta - \delta$ モデルとも言われ、説明力が高いことが知られている。このモデルの特徴は、従来の指数関数型割引のモデルに近視眼性の度合いを表す β ($0 < \beta \leq 1$) を加えている点である。つまり、 t 期における効用ベクトルの総効用関数は以下のように表記できる。

$$U_t = u_t + \beta (\delta u_{t+1} + \delta^2 u_{t+2} + \delta^3 u_{t+3} + \cdots)$$

このモデルは近視眼性がない場合には $\beta = 1$ となり、指数型割引を包含しており多方面で採用されている。

4 神経科学アプローチの応用可能性

これまで述べてきたことは観察できる行動から意思決定モデルを構築することであった。本来は価値を評価・判断している（と思われる）脳に注

目する必要があったが、21世紀まで手法が確立していなかった。ところが、近年計測技術の進歩とともに手術をすることなく、脳機能を明らかにする手法が登場したことにより多くの実験がおこなわれた。この節では計測方法、代表的な研究結果とその意義・可能性について述べる。

4.1 様々な計測方法

時間的、空間的に詳細な記録をとることができる方法は電気生理学的手法である。時間的とは神経細胞の活動の瞬間を数ミリ秒¹⁾単位で記録することができ、一方空間的とは数マイクロメートル (μm) から数百 μm までの極小電極を用いることで単一ニューロンレベルでの計測が可能である。このような脳を侵襲する実験はラットやマカクザルなどを対象としており、ヒトを対象とした実験は不可能である。それゆえ人間を対象とする実験の多くは非侵襲的撮像手法であるfMRI、PET、fNIRSを利用する。

以下にfMRIのメカニズムについて簡単に説明する。fMRIでは神経活動を直接捉えているのではなく、脳内血流量の変化を捉えている点に注意が必要である。ある領域において神経活動が活発になると酸素とグルコース(糖質)が必要となり、酸素を含むオキシヘモグロビン (oxy-Hb) が酸素を含まない赤血球のデオキシヘモグロビン (deoxy-Hb) に変化する。その直後、血流量が30~50%ほど増加する。当然多くの酸素と結合した酸化ヘモグロビンが流入するわけだが、実際に消費される量は5%程度なので神経細胞周辺にオキシヘモグロビン濃度が急激に増大させる。オキシヘモグロビンは反磁性体であり、デオキシヘモグロビンは常磁性体なので、賦活領域では磁性率が減少する。この特性を利用して安静時と課題をおこなったときを統計処理することで、有意に変化があった活動領域を同定している。血流量の変化を捉えるには数10秒を要するので時間分解能の点で劣るといわれるが、被験者に対して非侵襲的であることを考えると現時点では有効な計測方法である。

4.2 代表的な研究結果

不確実性と遅延の共通点として、報酬に遅延がある場合や受け取る報酬量が多いほど割引が緩やか、つまり双曲型であることが示されている [12, 37]。そのような共通点から、不確実性下の意思決定と異時点間選択は同じ心理メカニズムを利用しているのではないかという議論がなされた [44]。この議論では次の2つの考え方が提示されている。ひとつは遅延報酬というのは本来リスクがあるので、異時点間選択は不確実性下の意思決定の一部分だというものである [10, 18]。もう一方は報酬の受取確率が小さい繰り返しゲームで考えれば、リスクは遅延の一部であるという考え方がある [13, 26, 23]。HaydenとWeberを参考に行動データ、神経データ、薬理学的研究の視点から整理する [13, 50]。

まず行動データでは、不確実性と異時点間選択が同じ基盤を持つならば、不確実性に対する価値割引と時間に対する価値割引の間に相関があるだろうという仮説が導かれた。これらの研究には、強い相関が見られるもの [6, 11, 29, 42] と弱い相関または相関が見られないもの [32, 40] の両方がある。さらに報酬量の変化によって異時点間選択と不確実性下の意思決定では反対の効果が見られる。たとえば、確実な状況下では小額報酬よりも高額報酬の方をより選好するが、不確実な状況下では高額報酬を選好する比率が低下する [4, 12, 24, 36, 49]。このような違いから不確実性下の意思決定と異時点間選択は共通の基盤を持たないのではという批判もあるが、心理学的特徴から行動の共通性を支持する研究もある [35]。

また、神経科学的アプローチによる研究は行動データだけでは明らかに出来ないような共通点と差異を見いだしている。fMRIを用いた多くの研究があり、これらの結果より不確実性下の意思決定では前頭前野 (PFC)、後頭頂皮質 (PPC) や島皮質の活動が観察されている [8, 14, 15, 16, 20, 33, 43]。一方、異時点間選択の実験は少ない。McClureらの研究では即時報酬を含む意思決定では線条体、腹内側PFC、後帯状回 (PCC)、辺縁皮質

(paralimbic cortex) など中脳ドーパミンシステムと関連の深い領域が賦活し、遅延報酬を含む意思決定では前頭前野や後頭頂皮質などの領域が賦活した [27, 28]。さらにそれを支持するようにいくつかの研究グループでは即時報酬選択課題に対して報酬関連領域（とりわけ線条体）の賦活を示している [47, 51]。しかしながらKable and Glimcherは、McClureらのような解釈ではなく、腹側線条体、mPFC、PCCの神経活動が遅延報酬の主観的評価を反映するという結果を示した [17]。

薬理的アプローチでも多義的な結果を示している。喫煙が遅延価値割引に影響を与えるとする研究 [29, 32] がある一方、喫煙と不確実性評価の相関を報告している研究もある [39]。また両方に影響を与えると報告している研究もある [40]。他にも喫煙者を対象にした実験では、ニコチン不足が不確実性評価と遅延割引の両方に影響を与えると報告している [30]。アルコールでは遅延割引に影響を与えないとする研究結果もある [42]。ヒト以外の研究では、ラットのOFC損傷 [19] と側座核損傷 [1, 2] は不確実性評価と遅延割引に大きく影響を与える。しかし、ラットの背側内側縫線核群の損傷は時間割引率だけを上昇させる [31]。

4. 3 その意義と今後の可能性

将来の報酬をどのように評価し、意思決定をおこなうかというのは、日常生活でよくおこなわれることである。その判断が極端に上手くおこなうことができない場合には、強迫性障害、薬物依存症、ADHD（注意欠如・多動症）や摂食障害となる。一見すると衝動的行動という同じような症状でも、発生メカニズムが異なれば治療方法も異なる。このような医学的発展に経済学者が本当に関われるのかという批判もあるが、神経科学者が解き明かそうとする意思決定メカニズムに経済学の意思決定理論が応用されている点では無縁とは言えない。心理学や行動経済学の理論の精緻化がおこなわれるとともに神経科学の計測精度が向上することで、ますます神経

経済学の進化がすると思われる。

5 まとめ

本稿では将来の報酬をどのように評価し意思決定するのかをテーマとする異時点間選択理論の背景と実験研究の発展について述べてきた。特に実験研究では動物を中心に行動モデルを組み立てる心理学と、ヒトに対して単純化された選択課題をおこなわせる経済学の双方から近視眼性を組み入れたモデルを構築してきた。

しかしながら、近視眼性を持つ主体が本人の意思で「好きなものを食べる」という決定をしたとしても、本来はダイエットするほうが望ましいことがある。このようなケースではコミットメントすることが社会全体の厚生を高めることがあり、行動厚生経済学 (behavioral welfare economics) として研究が進められている。貯蓄に関する研究 [9, 22, 45] や退職行動に関する研究 [7] や貯蓄および年金 [3] に関する研究などがおこなわれている。研究だけでなく行動経済学を参考にした保険商品として住友生命が「Vitality」を2018年7月に販売した。これは健康増進に積極的な行動をとることで保険料が割引され、逆の場合は割高となる。今後このような行動経済学を組み込んだ金融商品や政策が打ち出されると思われる。それゆえ、理論研究、実証研究、実験研究がますます重要になってくるであろう。それらに加えてfMRIなどを用いた神経経済学 (Neuroeconomics) の登場により、行動として表出しない部分を捉えることができるようになってきた。これらの知見がすぐに経済理論に反映されることはないだろうが、まずはマーケティングや医療の分野において活用される可能性が期待される。

注

- 1) 1ミリ秒 (ms) とは1000分の1秒。

参考文献

- [1] R. N. Cardinal and T. H. Cheung. Nucleus accumbens core lesions retard instrumental learning and performance with delayed reinforcement in the rat. *BMC neuroscience*, 6 (1):9, 2005.
- [2] R. N. Cardinal and N. J. Howes. Effects of lesions of the nucleus accumbens core on choice between small certain rewards and large uncertain rewards in rats. *BMC neuroscience*, 6 (1):37, 2005.
- [3] G. D. Carroll, J. J. Choi, D. Laibson, B. C. Madrian, and A. Metrick. Optimal defaults and active decisions. *The quarterly journal of economics*, 124 (4):1639-1674, 2009.
- [4] G. B. Chapman and B. J. Weber. Decision biases in intertemporal choice and choice under uncertainty: testing a common account. *Memory & cognition*, 34 (3):589-602, 2006.
- [5] E. L. Charnov. Optimal foraging: attack strategy of a mantid. *The American Naturalist*, 110 (971):141-151, 1976.
- [6] J. P. Crean, H. de Wit, and J. B. Richards. Reward discounting as a measure of impulsive behavior in a psychiatric outpatient population. *Experimental and clinical psychopharmacology*, 8 (2):155, 2000.
- [7] P. Diamond and B. Köszegi. Quasi-hyperbolic discounting and retirement. *Journal of Public Economics*, 87 (9-10):1839-1872, 2003.
- [8] J. Dickhaut, K. McCabe, J. C. Nagode, A. Rustichini, K. Smith, and J. V. Pardo. The impact of the certainty context on the process of choice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100 (6):3536-3541, 2003.
- [9] E. Duflo, M. Kremer, and J. Robinson. Nudging farmers to use fertilizer: Theory and experimental evidence from Kenya. *American economic review*, 101 (6):2350-90, 2011.
- [10] L. Green and J. Myerson. Exponential versus hyperbolic discounting of delayed outcomes: Risk and waiting time. *American Zoologist*, 36 (4):496-505, 1996.
- [11] L. Green and J. Myerson. A discounting framework for choice with delayed and probabilistic rewards. *Psychological bulletin*, 130 (5):769, 2004.
- [12] L. Green, J. Myerson, and P. Ostaszewski. Amount of reward has opposite effects on the discounting of delayed and probabilistic outcomes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25 (2):418, 1999.

- [13] B. Y. Hayden and M. L. Platt. Temporal discounting predicts risk sensitivity in rhesus macaques. *Current Biology*, 17 (1):49-53, 2007.
- [14] M. Hsu, M. Bhatt, R. Adolphs, D. Tranel, and C. F. Camerer. Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making. *Science*, 310 (5754):1680-1683, 2005.
- [15] S. A. Huettel, A. W. Song, and G. McCarthy. Decisions under uncertainty: probabilistic context influences activation of prefrontal and parietal cortices. *Journal of Neuroscience*, 25 (13):3304-3311, 2005.
- [16] S. A. Huettel, C. J. Stowe, E. M. Gordon, B. T. Warner, and M. L. Platt. Neural signatures of economic preferences for risk and ambiguity. *Neuron*, 49 (5):765-775, 2006.
- [17] J. W. Kable and P. W. Glimcher. The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature neuroscience*, 10 (12):1625-1633, 2007.
- [18] G. Keren and P. Roelofsma. Immediacy and certainty in intertemporal choice. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 63 (3):287-297, 1995.
- [19] S. Kheramin, S. Body, M.-Y. Ho, D. Velazquez-Martinez, C. Bradshaw, E. Szabadi, J. Deakin, and I. Anderson. Role of the orbital prefrontal cortex in choice between delayed and uncertain reinforcers: a quantitative analysis. *Behavioural processes*, 64 (3):239-250, 2003.
- [20] B. Knutson and R. Peterson. Neurally reconstructing expected utility. *Games and Economic Behavior*, 52 (2):305-315, 2005.
- [21] D. Laibson. Golden eggs and hyperbolic discounting. *The Quarterly Journal of Economics*, 112 (2):443-478, 1997.
- [22] D. I. Laibson, A. Repetto, J. Tobacman, R. E. Hall, W. G. Gale, and G. A. Akerlof. Self-control and saving for retirement. *Brookings papers on economic activity*, 1998 (1):91-196, 1998.
- [23] R. W. Lent, S. D. Brown, and G. Hackett. Toward a unifying social cognitive theory of career and academic interest, choice, and performance. *Journal of vocational behavior*, 45 (1):79-122, 1994.
- [24] G. Loewenstein and D. Prelec. Negative time preference. *The American Economic Review*, 81 (2):347-352, 1991.
- [25] J. E. Mazur. An adjusting procedure for studying delayed reinforcement. *Commons, ML.; Mazur, JE.; Nevin, JA*, pages 55-73, 1987.
- [26] J. E. Mazur. Theories of probabilistic reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 51 (1):87-99, 1989.
- [27] S. M. McClure, K. M. Ericson, D. I. Laibson, G. Loewenstein, and J. D.

- Cohen. Time discounting for primary rewards. *Journal of neuroscience*, 27 (21):5796-5804, 2007.
- [28] S. M. McClure, D. I. Laibson, G. Loewenstein, and J. D. Cohen. Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science*, 306 (5695):503-507, 2004.
 - [29] S. H. Mitchell. Measures of impulsivity in cigarette smokers and non-smokers. *Psychopharmacology*, 146 (4):455-464, 1999.
 - [30] S. H. Mitchell. Effects of short-term nicotine deprivation on decision-making: Delay, uncertainty and effort discounting. *Nicotine & Tobacco Research*, 6 (5):819-828, 2004.
 - [31] S. Mobini, T.-J. Chiang, M.-Y. Ho, C. Bradshaw, and E. Szabadi. Effects of central 5-hydroxytryptamine depletion on sensitivity to delayed and probabilistic reinforcement. *Psychopharmacology*, 152 (4):390-397, 2000.
 - [32] Y. Ohmura, T. Takahashi, and N. Kitamura. Discounting delayed and probabilistic monetary gains and losses by smokers of cigarettes. *Psychopharmacology*, 182 (4):508-515, 2005.
 - [33] M. P. Paulus, C. Rogalsky, A. Simmons, J. S. Feinstein, and M. B. Stein. Increased activation in the right insula during risk-taking decision making is related to harm avoidance and neuroticism. *Neuroimage*, 19 (4):1439-1448, 2003.
 - [34] E. S. Phelps and R. A. Pollak. On second-best national saving and game-equilibrium growth. *The Review of Economic Studies*, 35 (2):185-199, 1968.
 - [35] D. Prelec and G. Loewenstein. Decision making over time and under uncertainty: A common approach. *Management science*, 37 (7):770-786, 1991.
 - [36] H. Rachlin, J. Brown, and D. Cross. Discounting in judgments of delay and probability. *Journal of Behavioral Decision Making*, 13 (2):145-159, 2000.
 - [37] H. Rachlin, A. Raineri, and D. Cross. Subjective probability and delay. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 55 (2):233-244, 1991.
 - [38] D. Read and B. Van Leeuwen. Predicting hunger: The effects of appetite and delay on choice. *Organizational behavior and human decision processes*, 76 (2):189-205, 1998.
 - [39] B. Reynolds, K. Karraker, K. Horn, and J. B. Richards. Delay and probability discounting as related to different stages of adolescent smoking and non-smoking. *Behavioural Processes*, 64 (3):333-344, 2003.
 - [40] B. Reynolds, J. B. Richards, K. Horn, and K. Karraker. Delay discounting

- and probability discounting as related to cigarette smoking status in adults. *Behavioural Processes*, 65 (1):35-42, 2004.
- [41] J. B. Richards, S. H. Mitchell, H. De Wit, and L. S. Seiden. Determination of discount functions in rats with an adjusting-amount procedure. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 67 (3):353-366, 1997.
 - [42] J. B. Richards, L. Zhang, S. H. Mitchell, and H. De Wit. Delay or probability discounting in a model of impulsive behavior: effect of alcohol. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 71 (2):121-143, 1999.
 - [43] R. D. Rogers, A. M. Owen, H. C. Middleton, E. J. Williams, J. D. Pickard, B. J. Sahakian, and T. W. Robbins. Choosing between small, likely rewards and large, unlikely rewards activates inferior and orbital prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 19 (20):9029-9038, 1999.
 - [44] J. B. Rotter. *Social learning and clinical psychology*. Johnson Reprint Corporation, 1954.
 - [45] F. Schilbach. Alcohol and self-control: A field experiment in india. *American economic review*, 109 (4):1290-1322, 2019.
 - [46] R. H. Strotz. Myopia and inconsistency in dynamic utility maximization. *The review of economic studies*, 23 (3):165-180, 1955.
 - [47] S. C. Tanaka, K. Doya, G. Okada, K. Ueda, Y. Okamoto, and S. Yamawaki. Prediction of immediate and future rewards differentially recruits cortico-basal ganglia loops. In *Behavioral economics of preferences, choices, and happiness*, pages 593-616. Springer, 2016.
 - [48] R. H. Thaler and H. M. Shefrin. An economic theory of self-control. *Journal of political Economy*, 89 (2):392-406, 1981.
 - [49] B. J. Weber and G. B. Chapman. Playing for peanuts: Why is risk seeking more common for low-stakes gambles? *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 97 (1):31-46, 2005.
 - [50] B. J. Weber and S. A. Huettel. The neural substrates of probabilistic and intertemporal decision making. *Brain research*, 1234:104-115, 2008.
 - [51] M. Wittmann and M. P. Paulus. Decision making, impulsivity and time perception. *Trends in cognitive sciences*, 12 (1):7-12, 2008.
 - [52] 佐伯大輔「価値割引の心理学 動物行動から経済現象まで」昭和堂