

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350992

研究課題名(和文) 時間の不確実性が行動選択に与える効果とそのニューロン活動基盤

研究課題名(英文) The effect of temporally uncertain event on decision-making and its neural substrates.

研究代表者

水挽 貴至 (Mizuhiki, Takashi)

筑波大学・医学医療系・助教

研究者番号：60463824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：発生時点が不確実である事象の、現時点におけるインパクトは、発生時点が明確である場合と比べ過大に評価されることを、モデル実験によって示した。アカゲザルに対し、時間不確実選択課題をトレーニングが、この課題を学習することができなかつたため、時間生成課題と単純遅延選択課題とを行わせた。その結果、サルの推定する時間の長さには相当のばらつきがあること、また単純遅延に対する認識感が低いことなどが示された。

研究成果の概要(英文)：A mathematical model showed that the impact of future event tends to be estimated as larger when the onset of that event was uncertain. Then a rhesus monkey was trained to perform decision-making task under temporally uncertain condition. In this task, the monkey must choose one of two alternatives whose delay to reward onset was uncertain. The degree of uncertainty was different between two alternatives. Unfortunately, the monkey failed to learn this task. Instead, time production task and different type of decision-making task under temporally certain condition were introduced. Combined the results from them, I found that the time monkey estimated varied in wide range and the monkey's sensitivity to delay is lower than the cases when the delay to the event was presented as the sequence of discrete steps.

研究分野：神経科学

キーワード：時間 不確実 サル 意思決定 数理モデル 遅延 時間割引

1. 研究開始当初の背景

我々を取り巻く環境に確実といえる事象は無い。そうした不確実性は我々の判断を歪調させてしまう(Bach & Dolan 2012)。例えば、事故や疾病などの不確実な確率的事象に見舞われる率は、その事象が稀であっても実際より過大に見積もられる傾向がある。80年代に北米で行われた調査では、ボツリヌス毒や花火事故、竜巻などで死亡するアメリカ人の人数(毎年数人から90人程度)が、一般の認識では、実際の数倍から数十倍に及んでいることが分かった(Kahneman, Slovic & Tversky, Judgment under uncertainty: Heuristics and biases, 1982 Cambridge university press)。本邦における類似の調査でも同様の結果が示され、誘拐や殺人、虐待などの発生率は、実際より数倍も高率であるかのように認識されていたという(柴田義貞編「リスク認知とリスクコミュニケーション 放射線リスクの正しい理解を目指して」長崎大学 GCOE 報告書、2011)。

稀にしか起こりえない損害を、実際より高頻度であると推定する傾向は、昨年の原子力災害においても認められた。現実には、100mSv以下の年間被曝線量は何ら健康に影響しない(Allison, Radiation and Reason: The Impact of Science on a Culture of Fear, 2009 Wade Allison Publishing)。しかし健康被害は結果の不確かな確率的事象であるため、健康被害が表れかねないという疑心暗鬼は根強く、根拠のない情報が市井を席卷した。(例えば、低線量被曝のリスクは致死被曝線量から線形外挿され、内曝は組織の総被曝線量と無関係に重大視され、量子の不確実性が考慮されず粒子線による癌抑制遺伝子のピンポイント破壊が起こるとされ、崩壊エネルギーの高い生体内自然放射能の影響は無視された)(前掲 Heuristics and biases、長崎大学 GCOE 報告書)。

確率加重(probability weight)は、不確実性に対するこうした過敏な反応の要因とされる。80~90年代にかけて行われた心理実験では、経済損失の額と確率を、様々に組み合わせた二者択一の選択肢を被験者に提示し、その選択割合が比較検討された。その結果、発生確率が小さな損失事象の確率を、実際より過大に認識する傾向(確率加重)が示された(Kahneman & Tversky, Choices, Values and Frames, 2000 Cambridge university press)。確率加重によって、確率の小さな領域のダイナミックレンジが拡大され、損失の危険が認識しやすくなっていると考えられる。

しかし、確率加重は不確実性に対する反応の一面しか説明しえない。一般集団のリスク評価傾向を調査した冒頭の報告を検討すると、発生確率が過大に見積もられる事象の多くは、事故や災害、事件などの偶発的な損失事例が多い。これらは「どの程度の率で」見舞われるかという確率の不確実性のみならず、

「いつ」見舞われるかという時期の不確実性も伴う。例えば入試の時期は明らかなので、入試のリスク評価には不合格の確率だけを考慮すればよい。だが白血病については、発症の有無のみならず、いつ発症するかという時期も不確実である。事象の頻度と時期の双方が不確実だと、心理・行動面の反応はより先鋭化し極端になる。事象の予測に必要な情報が不確実であるほど、対処行動に多くのコストを要するからである。このため、あまり着目されてこなかった時期の不確実性に対する反応を分離・抽出し、詳らかにする必要があったと考えた。

2. 研究の目的

遅延時間が不確実な事象に対する心理学的、神経科学的な反応を調べることが本研究の目的である。

ごく稀にしか起こらない事象の発生確率は、実際の発生確率よりも過大に推定される。これは確率荷重と呼ばれる。この原因として、まれな事象が頻回に報道されることによる情報への過度の暴露が挙げられている。

しかし確率荷重の原因には別の可能性がある。ごく低頻度には起こらない事象は、いつ発生するかを予測しにくい。事実、高頻度で発生する事象は、事象と事象の間隔(inter-event interval: IEI)のばらつきは小さくなる傾向がある。一方、低頻度である場合には、IEIは大きくなり、「次にいつ起こるか」が推定しにくくなる。

事象発生までの遅延時間が不確実なために予期困難となる場合には、確実である場合と比較して、事象到来に備えるための物理的、経済的、心理的負担は増大する。いつ起こるか分からない事象に対しては、絶えず対策を怠ることができないからである。したがって、発生までの遅延時間が不確実な事象がもたらす心理的インパクトは増大するのではないかと、という仮説を立てた。

事実、我が国のスーパーコンピュータの性能について、「二位じゃダメなんですか」という政府高官の発言が政治問題化したことがかつてあった。この発言は、政治的に問題ではあったが、発言の背景にある心理的機序は、(本仮説が正しいとすれば)説明することができる。すなわち、先端技術の開発競争において、二位に転落してそのプライオリティーを失うという危険には、いつ見舞われるか予測できない。こうした予測不可能性によって、二位転落という事象のインパクトを過大に推計し、反応した可能性がある。

だとすれば、遅延時間が不確実な事象は、その不確実性の程度によって、我々の意思決定に影響を与える可能性がある。したがって本研究の目的は、事象発生までの遅延時間の不確実性の、意思決定への影響を調査することとした。

3. 研究の方法

数理モデルによる検討と、サルを用いた実験を行った。

数理モデルによる検討：

将来発生することが予見される事象のインパクトは、現時点においては割り引いて知覚される。すなわち、その事象の発生時点が遠い将来であればあるほど、現時点における事象のインパクトは弱く知覚される。これは時間割引モデルと呼ばれ、

$$V = \frac{R}{e^{kD}} \quad \text{ないしは} \quad V = \frac{R}{1+kD}$$

といったモデル式で表現される。なお V は現時点において割り引いて知覚される将来の事象のインパクト、 R は事象そのもののインパクト、 D は事象発生までの遅延時間、 k は個体ごとに決定される定数である。前者の式は双曲線割引モデル、後者の式は指数割引モデルと呼ばれている。

ここで、もし対象となる事象が、遅延時間 t_1 から t_2 の間で発生することが予測されるが、その発生時点を一時点に限定することはできない、という状況を考える。このとき t_1 から t_2 のあいだの発生確率の分布は不詳であり、一様分布であると仮定する。この場合、現時点におけるインパクトの期待値は、 $t_1 \cdot t_2$ 間の1周期矩形窓と時間割引モデルを畳み込み、 $t_2 - t_1$ で除してやる (= 平均する) ことで得られる値に相当するはずである。

これをモデル化すると、双曲線割引を前提とした場合には、

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{R}{1+kD} dD \\ &= \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{R}{k} \log \left| \frac{1+kt_2}{1+kt_1} \right| \end{aligned}$$

と記述できる。ここで $1+kD=h$ として置換積分を行うと、

$$V = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{R}{k} \cdot \frac{1}{h} dh$$

となる。また、指数割引を前提とした場合のモデルは、

$$V = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{R}{e^{kD}} dD$$

となり、これを展開すると

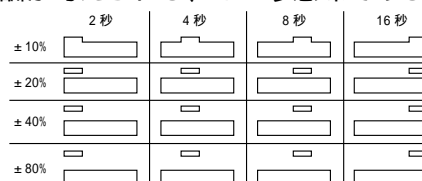
$$V = \frac{1}{t_1 - t_2} \cdot \frac{R}{k} (e^{-kD_2} - e^{-kD_1})$$

が得られる。

この二つのモデルに対して、現実的と考えられる範囲で k を様々に変化させつつ、 V がどのように推移するかを確認した。

サルを用いた実験：

サルに対し、時間不確実事象選択課題を訓練した。この課題では、報酬投与と連合した視覚刺激を2つ提示した。報酬投与までの遅延時間は2、4、8、16秒の4通り、遅延時間は $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 40\%$ 、 $\pm 80\%$ の4通りの範囲でランダムに変動させた。すなわち、遅延時間4通り \times 遅延変動割合4通りの、16通りのターゲットを用意した。例えば、4秒 $\pm 20\%$ のターゲットは、このターゲットを選択してから3.2秒から4.8秒の間のどこかの時点で報酬が与えられる、という意味である。



視覚ターゲットは上の図に示すとおり照度、面積を統一し、視覚的顕著性に違いがないように留意した。これら16通りの視覚刺激セットの中から、2つの視覚刺激をランダムに選択してサルに提示し、そのいずれかをサル自身に選ばせる。

提示される2つの選択肢と連合した報酬のインパクトを、それぞれ V_1 、 V_2 とおく。このときサルの選択は、両選択肢のインパクトの差分に依存すると考えられる。この差分を g とおき、シグモイド関数によって $[1, 0]$ の確率空間に写像することで、実際の選択確率を表現してやるのが可能になる。これは、次式のように表現することができる。

$$g = V_1 - V_2 \quad P = \frac{1}{1 + e^{-ag}}$$

ここで、 P は実際の選択確率を表し、 a はシグモイド曲線の勾配決定係数である。実際に得られた選択確率に対し統計的あてはめを行い、 a 、 k を算出した。

なお本課題の難易度は高く、課題の学習が困難となりうる可能性が考えられ、次のような対処を検討した。

ターゲットの弁別が困難と思えるような場合には、ターゲットの形状やテクスチャーを変更する、選択肢の学習が困難である場合には選択肢の数を $3 \times 3 = 9$ ないし $2 \times 2 = 4$ 程度に減らすこととした。遅延時間の弁別が困難であると考えられた場合には、長い遅延時間を割り当てることとした。

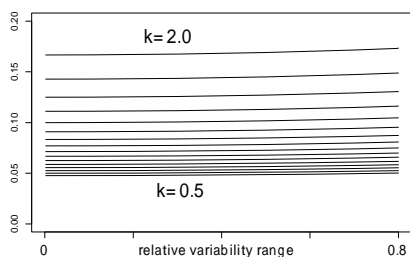
個々の選択肢の、報酬までの遅延時間が変動するという本実験パラダイムにおいては、まずは各選択肢の遅延時間の期待値を学習しないと、うまく選択行動が行えない。こうした抽象性の高い課題の構造が学習を妨げていると考えられた場合には、遅延時間を変動させない選択肢に変更することとした。この場合、遅延時間の不確実性を直接検証することはできなくなるが、スケジュール選択課題の結果との比較や、time production 課題(指定時間だけ経過したと判断したら行動反

応を起こす)の結果と総合することで、時間の不確実性に対する反応を推定できる可能性がある。

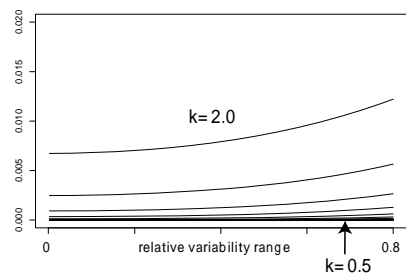
4. 研究成果

数理モデルによる検討：

双曲線割引モデルを仮定した場合の結果を次に示す。なお横軸は事象の遅延時間の不確実の程度を表す相対的な数値である。もし遅延時間が 10 秒で、relative variability range が 0 であるならば、遅延の不確実な変動幅は 0、すなわち確実に 10 秒経過した時点で事象発生を予測できるものとする。一方 relative variability range が 0.8 であれば、10 秒 ± 4 秒 (=80%変動幅)の範囲で、事象発生の遅延時間が変動しうるものとする。縦軸は現時点における相対的な事象のインパクトを表す数値である。なお割引率 k は 0.5 から 2 までの間で、0.1 ステップで変化させた。

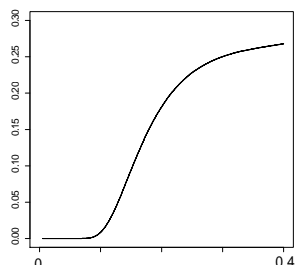


以上に示す通り、変動幅が大きく予測困難になるほど、インパクトは増大する傾向がみられた。これは現実的な範囲で k を変化させると、いずれの場合でも同じ傾向を認めた。次に指数関数モデルを仮定した場合の結果を示す。



やはり同様に、変動幅の増大に伴いインパクトが増加することが見て取れる。

以上のモデルは、不確実な範囲を示す時間窓を矩形窓(すなわち発生時点は窓の内部で一様分布)と仮定した。ここで、分布が期待値を中心とした正規分布の場合の例を示す。正規分布を矩形窓に畳み込み、双曲線割引で $k=1.0$ と仮定した場合次のようになる。

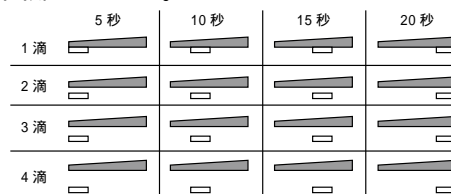


やはり変動幅の増大がインパクトの増加をもたらすことが示された。指数関数割引でも同様の結果であった。

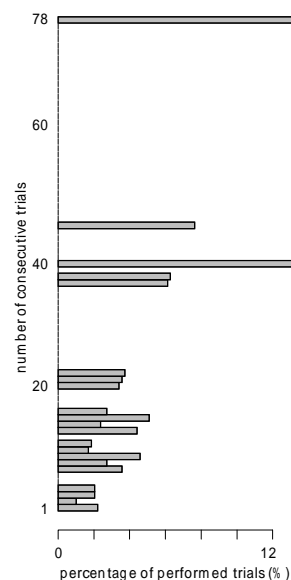
以上より、数理モデル上は、遅延時間が不確実であるほど現時点における事象のインパクトは増大する傾向が確認された。

サルを用いた実験による検討：

サルにはまず時間不確実事象選択課題を訓練したが、学習は困難であった。この理由として、用いた視覚刺激の顕著性に違いが乏しかったことが考えられたので、次図の視覚刺激に変更し、選択肢の種類を計 16 種から 4-8 種程度に減らして訓練を行ったが、なお学習困難であった。



訓練中のサルは常に一側のターゲットのみを連続して選択していた。

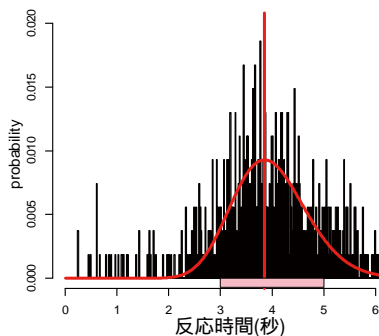


縦軸は、右ないし左の一方の選択肢のみを何回連続して選択したか、横軸は、連続選択数が、全試行数のうちの何%を占めていたかの割合を示す。一方の選択肢を漫然と選択し続け、比較考慮していないのは明らかである。

ここで、単純遅延の長さを認識する能力がそもそも不完全であることが、課題の学習を困難にし、ひいては将来の事象のインパクトの推定をゆがめている可能性があるのではないかという疑いが生じた。一般的に、離散量は連続量よりも認識が容易である。単純遅延の場合には事象発生までの遅延時間が連続量に相当すると思われる。著者は以前、作業負荷としてスケジュール数が 1-4 回にまたがるスケジュール選択課題をサルに訓練し、その結果を学会等で報告してきた。経験上、

遅延がスケジュール単位の離散的なステップを取りうる場合、単純遅延を学習させる本課題と比べて、課題の学習は極めて容易である。

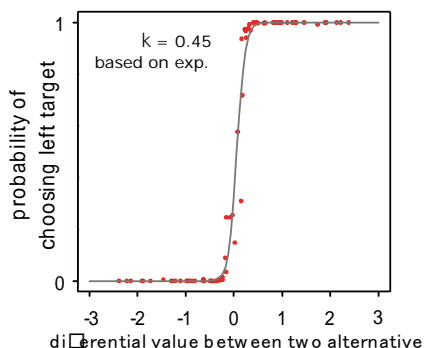
そこで time production 課題を急ぎよサルに訓練し、時間の認識に対する正確性を検証した。この課題では、サルに対し、視覚刺激が消えてから4秒後にバーから手を放すことを訓練する。4秒±25%以内に手を放すことができれば成功とみなし、報酬である水を与える。結果を次の図に示す。



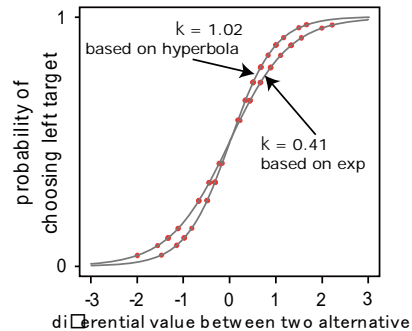
横軸はバーが消えてからの時間、縦軸は反応確率を示す。正答範囲は3-5秒の間である。ヒストグラムは反応数を20msの階級ごとにカウントしたものである。ガンマ分布に基づくモデルであてはめを行い推定したピーク時間と分布を重ね書きした。正解範囲は3-5秒とかなり広めであるが、反応時間の分布はそれを超える広がり呈しており、かなりの割合で誤反応をしていることが分かる。

この反応時間の分布を、遅延時間の範囲に畳み込んだものが、実際にサルが認識している時間に相当すると考えられるため、想定を超えて不確実性が増大していた可能性があり、このことも課題の学習を困難にした可能性がある。

次に、時間に対するサルの感度を評価するために、スケジュール選択課題における行動と比較した。次図の縦軸は左選択肢を選択した確率、横軸は両選択肢の価値の差分を示す。統計的あてはめを行うと、割引定数 k は0.45であった。なお、双極割引モデルは発散し、あてはめ不能であった。選択肢の数は4スケジュール×4滴報酬=16通りなので、プロットした点の数は ${}_{16}C_2=120$ ある。



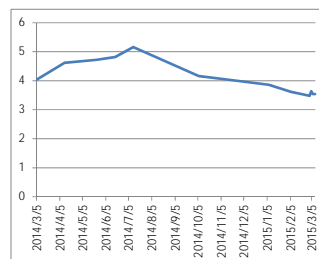
さらに、単純遅延を選択させた場合の行動を示す。サルはこの課題の学習が困難であったため条件数は減らし、2遅延×4報酬=8通りとした。用いたモデル式は上と同様で、両選択肢の価値の差分を、シグモイド関数に従って確率空間に写像させた。統計的あてはめは、双曲線割引でも指数関数割引でも可能であった。



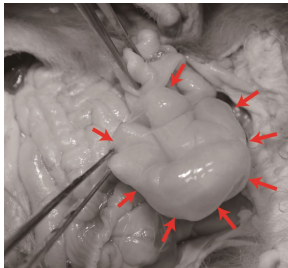
シグモイド曲線の上に点がいささかびつたりと配列しすぎているきらいがあるが、スケジュール選択課題の結果との違いは歴然であった。指数関数割引モデルに従った場合、両課題における割引定数 k の値にそれほど違いはないが(スケジュール選択課題 $k=0.45$ 、単純遅延選択課題 $k=0.41$)、シグモイド曲線の傾斜が大きく異なり、単純遅延を選択させる場合のほうがなだらかである。これは、両選択肢の価値の差分に対する感度が、単純遅延を選択させる場合のほうが、スケジュール選択課題よりも低い、ということを示している。換言すれば、離散的なステップ数の違いはよく認識できるが、連続量である時間の経過については、比較的感度が低い、ということを示している。

「時を刻む」という言葉があるが、まさにこの言葉通り、連続量である時間をそのまま知覚するのではなく、何らかの離散的な指標に置換することで時間経過を認識する場合のほうが、効果的に時間を認識できることがわかった。スケジュール選択課題の選択確率を示すシグモイドの急峻な形状には、こうした心的過程が反映しているものと思われた。

なお、本実験のために導入したアカゲザル2頭がいずれも急性胃腸症を発症し、1頭は回復し実験を導入できたものの、1頭は嘔吐と食思不振によって衰弱が進行し、安楽死せざるを得ない状況に至った。その個体の体重の推移を示す。



回復を期待し、セフェム系、ニューキノロン系の抗生剤投与や、アミノ酸製剤の皮下輸液等を連日行ったが、状態は改善せず、体重 3kg を切ったところでペントバルビタール大量投与による安楽死を行った。



剖検時の腹部所見では、拡張した巨大な虫垂と、虫垂及び回腸末端部の変色、回腸末端部の菲薄化と浮腫、腹水等を認め、虫垂炎が明らかであった。サルの全身状態は実験全体の成否にかかわる大きなリスク要因となりうる。また治療には多くの時間と手間を要す。ニューキノロン系抗生剤によって一時小康状態を呈したもののその後の経過は不良であり、抗生剤の選択や、回復可能かどうか、回復不可能ならエンドポイントはいつにすべきか、といった点を早急に見極めることなどが重要であると思われ、禍根を残す結果となった。

以上より、モデル実験の結果からは、事象の発生時点の不確実性が、また動物実験の結果からは、将来の事象までの遅延を推定する能力そのものの限界が、それぞれ事象のインパクトの推定を不正確にする可能性が示唆された。

確率荷重を引き起こす要因として、メディアを通じた情報への曝露が指摘されている。めったに発生しない事象が発生したばあい、その情報の価値は高く、ニュースとして取り上げられやすい。したがって、まれな事象は繰り返し報道媒体を通じて取り上げられ、実際の発生頻度よりも高頻度で発生しているかのように、視聴者が錯覚してしまう、とされている。

しかし確率荷重に対するこうした従来の仮説には疑問が残る。もしメディアによる情報過多が、確率荷重を引き起こすというのなら、情報過多をもたらそうとする情報媒体ではたく人々の意識過程の内部では、確率は正確に認識されているといえるのだろうか。そもそもメディア関係者の意識の内部において確率荷重が発生しており、報道回数に影響している可能性はないのだろうか。すなわち、確率荷重の発生原因を、心理学的・生理学的に説明することを回避し、別の個体に帰すことで、「デカルトの劇場」論的な議論の後退となっている可能性はないのだろうか。この点について検証がなされた形跡はない。

本研究の結果は、こうした疑問に対し、行動経済学的な回答を付与しうると考えた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Self-choice enhances value in reward-seeking in primates. Setogawa T, Mizuhiki T, Matsumoto N, Akizawa F, Shidara M. *Neurosci Res.* 2014 Mar;80:45-54. doi: 10.1016/j.neures.2014.01.004. Epub 2014 Jan 22. PMID: 24463226 (査読あり)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水挽 貴至 (MIZUHIKI TAKASHI)

筑波大学・医学医療系・助教

研究者番号：60463824