操作-応答系におけるノイズ検出力と操作中止判断¹

上田 祥代 お茶の水女子大学 薬師神 玲子 青山学院大学 石口 彰 お茶の水女子大学

Ability to perceive operation-response noise and the decision to stop system operation

Sachiyo Ueda (*Ochanomizu University*), **Reiko Yakushijin** (*Aoyama Gakuin University*),
and **Akira Ishiguchi** (*Ochanomizu University*)

The responses of an information-processing system such as a computer contain noise. As this noise increases, the system becomes uncontrollable and the operator may be exposed to a significant risk. In this study, we investigated whether operators' ability to perceive operation-response noise influenced the decision to stop the operation of the system under the condition in which the operation system became gradually uncontrollable. In Experiment 1, we examined the correlation between operators' ability to discriminate the variance of operation-response noise and their performance in the stop-operation decision-making task. In Experiment 2, we trained a group of operators in variance discrimination task, and investigated the training effect on the performance in the stop-operation decision-making task. We demonstrated that the higher the operator's ability to discriminate variance, the earlier they decide to stop the system operation. However, the ability to discriminate variance did not influence to other indices of this decision-making. These results indicate that sensitive perception of operation-response noise causes the earlier stop operation, but it is not sufficient to lead to optimal decision-making in this regard.

Key words: variance discrimination, operation-response noise, risk, decision-making, uncontrollability.

The Japanese Journal of Psychology

2015, Vol. 86, No. 2, pp. 121–131

J-STAGE Advanced published date: March 10, 2015, doi.org/10.4992/jjpsy.86.14004

コンピュータや車、ロボット、あるいは、原子力発電などの大規模なシステムに至るまで、私たちは日常的にさまざまなシステムを制御している。制御状態とは、システムに命令を入力したときに、システムが規則に則った応答を返す状態のことである。このような関係性が成り立つ間は、私たちはシステムを利用し、様々な意味で利益を得ることができる。しかし、システムの制御が不完全になると、意図する結果を得られないだけでなく、事故や想定外の損失を被るリスクに晒される。そのため、システムが完全に制御不能となる前に、システムの使用を中止するなどして、損失を最小限にするための行動をとらなければならない。これは、一般にはリスク知覚 (risk perception) の問題と

考えられるが、自ら操作するシステムが制御不能に陥る状況において、どのような情報を基にリスクを知覚するのかについて検討した知覚実験研究はこれまで見当たらない。本研究ではこの問題に焦点を当て、システムが徐々に制御不能状態に陥る状況の一側面に注目し、その状況でのリスク知覚を基にした操作中止判断について検討した。

システムの制御不能状態は、“被制御システムの応答と人間の操作との間の因果関係が完全になくなった状態”と定義できる。つまり、操作者がシステムに対してどのような働きかけを行っても、システムは意図する応答を全く示さない状態である。この状態は、“システムが完全に停止した状態”と、“システムが暴走した状態”に分けられる。損失を最小にするためには、このような状態に至る前にシステムの不調に気づくことで、システムの使用を中止するなどの判断を行うことが必要である。ここで手がかりとなるものには、特に後者の場合、操作とシステムの応答との間に含まれるノイズ (分散) の大きさが考えられる。このノイズ

Correspondence concerning this article should be sent to: Sachiyo Ueda, Department of Human Developmental Sciences, Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University, Ohtsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610, Japan (e-mail: g1070304@edu.cc.ocha.ac.jp)

¹ 本研究は JSPS 科研費 23330214 の助成を受けた。

は正常な状態でも含まれているが、微小であるため問題が生じることはない。しかし、システムの異常によりノイズが増大して信号ノイズ比が限りなく小さくなると、信号（操作）と無関係にシステムが作動することになり、暴走した状態となる。そのため、ノイズ、即ち分散の分布における信号ノイズ比をモニタリングして、ある程度の大きさのところでシステムの使用を止めるという判断を行うことで、利得を得る（または損失を最小限にする）ことが望まれる。したがって、信号ノイズ比またはその変化を正しく認識する能力と、信号ノイズ比の限界を正しく判断する能力の2つが重要になる。

本研究では、システムの制御不能状態、特にシステムが暴走する状態に注目し、操作-応答ノイズが徐々に増加する状況における操作中止判断について検討する。信号ノイズ比の変化を正しく認識する能力とは、この場合、操作-応答ノイズの分散の増加を正しく知覚する能力である。この能力が高いほど、システムの異常を敏感に察知できると考えられる。しかしながら、システムの操作中に異常な大きさのノイズを知覚したとしても、誰もが即座にその使用を中止するわけではない。特に、システムを用いて課題達成を行おうとしている場合は、異常ノイズの大きさが比較的小さいうちには、課題達成による利得を勘案して、システムの使用を続行すると判断することもある。操作-応答ノイズの大きさの変化を観察し、事故などの損失につながるほどにリスク確率が大きくなった、あるいはこれ以上操作を継続しても利得は得られないと評価したときに初めて、システムの使用を中止する場合もある。つまり、状況に応じて、正しく信号ノイズ比の限界を判断し、リスク回避の判断をする能力が必要となってくる。

以上をまとめると、課題達成などの目的のある状況下でシステムが制御不能状態に陥る場合、操作中止行動に至るまでには3つのステップが含まれると考えることができる。第1段階は、正常状態と比較して大きな操作-応答ノイズ、即ち異常ノイズが存在することを知覚する段階である。第2段階は、その時点でのノイズの大きさに応じて適応的な操作を決定する段階であり、応答-操作学習ということもできる。ただし、この段階は、システム操作の種類によっては、必要としない場合もある。第3段階は、これらの知覚された操作-応答ノイズの大きさに基づいてリスクの程度を推定し、利得と損失の大きさを考慮した上で、操作を継続するか否かの決定を行う段階である。システムの制御不能状態（制御不能状態に陥る前段階を含む）での操作中止行動に関わる認知特性について検討するためには、これらの段階がどのように関わり、最終的な操作中止に至るのかを調べる必要がある。

上記の3つのステップのうち、第1段階の“分散の

知覚”に関しては、傾き（Morgan, Chubb, & Solomon, 2008; Motoyoshi & Nishida, 2001; Solomon, 2010）や、大きさ（Solomon, Morgan, & Chubb, 2011）、オブジェクト知覚（Liu, Knill, & Kersten, 1995）などの視覚系において、人間の知覚能力について検討する研究が行われている。Morgan et al. (2008) は、2つのテクスチャ間の傾きの分散識別の JND と、標準刺激の分散の大きさとの間には、ひしゃく型（dipper）関数で表される関係性が存在することを示した。つまり、標準刺激の分散の大きさがごく小さい時には標準刺激の増大とともに JND は低下するが、その後ある程度標準刺激が大きくなると、標準刺激と JND の関係はウエーバーの法則に従う（標準刺激が大きくなるにつれて JND は増大する）、即ち“ひしゃく型”になることが示された。しかしながら、本研究で扱う操作-応答ノイズについて検討した先行研究は数少ない（Ueda, Yakushijin, & Ishiguchi, 2012）。

第2段階の応答-操作学習については、運動意思決定（motor decision making）の分野で研究が行われている。例えば、自分の身体運動に内在するノイズを知覚できている場合、そのノイズがもたらす不確実性のもとで最適な結果が得られるように、自身の運動を適応的に変化させることができることが示されている（Neyedli & Welsh, 2013; Trommershäuser, Maloney, & Landy, 2003a, 2003b）。なお、本研究では第1段階（分散の知覚）が第3段階（リスク状況下での意思決定）に与える影響を検討することが主眼であるため、この第2段階については、できるだけ学習の必要性を排除する設定を行った。

第3段階のリスク状況下での利得／損失を考慮した意思決定については、認知心理学や経済学の分野において非常に多くの研究が行われている。その中で、バルーン課題（Balloon Analog Risk Task: BART）と呼ばれるパラダイムを用いて、個人のリスク志向行動に関連する要因や認知メカニズムについて検討を行うリスク知覚研究がある（Lejuez, Read, Kahler, Richards, Ramsey, Stuart, Strong, & Brown, 2002; Pleskac, 2008; Wallsten, Pleskac, & Lejuez, 2005）。これは、課題を続けることによって利益獲得が期待されるが、同時に重大な損失を招く可能性もあるという状況において個人のリスク志向（リスク回避）傾向を検討しているという点、また、徐々にリスクが増大する中で連続的に意思決定を行うという点において、本研究で想定するリスク状況と類似している。ただし、バルーン課題ではペイオフを伴う課題を繰り返し行うことで、どのようにリスク志向行動が変化するかを検討することを目的しており、一方、本研究では、応答の変化の知覚がリスク状況の推定に及ぼす影響を検討することを目的としている点が異なる。

また他の研究では、人間は一般的に、異なる利得／

損失の確率を示す選択肢がある場合に、確率が明示されているにもかかわらず、最適値以下の意思決定を行うことが示されている (Kahneman & Tversky, 2000; Trommershäuser, Maloney, & Landy, 2008)。これは、リスク確率の評価の段階で認知バイアスがはたらくためであると説明されており (プロスペクト理論: Kahneman & Tversky, 1979), このような意思決定を最適なものにするためには、実際にペイオフを伴うようなリスク判断課題を繰り返し経験しなければならないことが指摘されている (Barron & Erev, 2003; Hertwig, Barron, Weber, & Erev, 2004; Jessup, Bishara, & Busemeyer, 2008; Lejarraga & Gonzalez, 2011)。これに従えば、分散の知覚が向上しても、それを最適決定に利用するためにはリスク判断状況での訓練が必要と考えられる。しかしながら、本研究で扱うようなノイズが時系列を追って増大する状況では、リスク判断が時系列的に行われると捉えることもでき、分散学習が自然と最終的な操作中止行動の改善につながる可能性も考えられる。

本研究では、操作-応答ノイズの分散を増大させていくことで、システムが徐々に深刻な制御不能事態に陥る状況を実験的に設定し、操作-応答ノイズの分散の知覚能力が、操作中止判断にどのように影響を与えるかを検討した。その際、以下の2つの相対する仮説が考えられた。

仮説1 操作-応答ノイズの分散の変化に敏感な場合操作中止判断が早まる。

仮説2 操作-応答ノイズの分散の変化に敏感な場合、現在のシステムの状態を正確に把握できるようになるため、損失を被るリスクに晒される直前までシステムの操作を続ける (即ち、操作中止判断が遅くなる)。

実験では、操作-応答ノイズの分散増大率を識別する課題 (分散識別課題) と、同様の刺激を用いながらリスク状況を加えた課題 (操作中止判断課題) を実施した。そして、実験1において、分散識別能力と操作中止判断課題との間の相関関係を、実験2において、学習によって分散識別能力が向上した場合に操作中止判断にどのような影響を及ぼすのかについて検討を行った。

操作-応答系に基づく操作中止判断課題

本研究は、実験1と実験2の2つの実験からなり、その両方で同じ操作-応答系に基づく操作中止判断課題を設定した。この課題の特徴としては、利益や損失を招く確率を、自分の操作する刺激の応答の変化を知覚することによって推定できることが挙げられる。つまり、知覚される操作-応答ノイズの大きさの変化が、操作中止判断のための重要な情報となる。これは、利益や損失に関わる確率を明示する、あるいは、パルー

ン課題のように全く知らせない条件を設定している先行研究と異なる。このような状況において、操作システムの応答のばらつき (操作-応答ノイズの分散) に関する知覚能力が、最終的な操作中止判断のタイミング (リスク回避傾向) にどのような影響を与えるのかを検討した。

以下、実験1, 2に共通する操作中止判断課題の実験方法について説明する。

装 置

刺激は Power Mac (Mac OSX) によって作成し (使用ソフト: MatLab7, Psychtoolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997)), 高解像度 CRT モニタに提示した。画面解像度は $1,152 \times 864$ pixel で、リフレッシュレートは 75 Hz に設定した。提示画面の観察には、あご置き台を使用し、参加者から 57 cm の距離にモニタを設置した。参加者による視覚刺激の操作、および、課題への回答は、Apple Keyboard (テンキー付き) を用いた。

刺激と課題

モニタ上の黒の背景画面の中央に1本の緑色の水平線が呈示され、また、その中央線と平行する2本の白線が、それぞれ中央線から上下視角 3.3° の距離に呈示された。この3本の線分の長さはすべて視角 30° であった。中央線の左端には直径視角 1° の白円が呈示され、スタートボタンとともに、自動的に、右上 45° 、または右下 45° のどちらかの方向に進んだ。どちらの方向に進むかはランダムであり、視角 4.5° /秒の速さで等速直線運動を行った。参加者による操作が行われない場合、白円は約1秒で中央線から白線 (上下どちらか) へ到達した。

参加者はテンキーを用いて白円の動きを操作することができ、その操作によって、白円をできるだけ多く中央線に重ねることが求められた (白円の一部が中央線付近に留まれば“重なった”と見なすが、横切った場合には“重なった”といは見なさない)。白円は、“8”キーを押した場合は真上に、“2”キーを押した場合は真下に、視角 1.2° 移動した。キー操作によって移動した白円は、その直後、再び右上 45° 、または右下 45° のどちらかの方向 (ランダム) に自動的に動きだした。そのため、参加者は白円を中央線に重ねるために、キー押し操作を断続的に行うことが求められた。

参加者には、白円を中央線に重ねるたびに1点を獲得することができることが教示された。また、白円が中央線を横切る形で移動した場合は得点が加算されないこと、および、白円が上下の白線を越えるとその試行の得点が全て没収され0になってしまう (白円全体が白線を越えた場合であり、一部のみ越えた場合は除く) ため、白線を越えないよう注意することも教示された。参加者に分かりやすいよう、白円が白線を越え

てしまったときは、円の色が赤に変化した。また、白円が水平線の右端の位置に到達すると、垂直方向の座標は維持したまま、瞬間的に水平線左端の位置に移動した。

実験では、このような状況において、参加者がキー操作を行ったときの白円の移動距離（視角 1.2° ）に操作-応答ノイズが加えられた。この操作-応答ノイズは、平均 0、分散 σ^2 の正規分布に従う乱数であり、キー押し操作のたびに分布から決定された。また、徐々に操作が制御不能になる状況を想定しているため、 σ （操作-応答ノイズの SD）は 1 試行内で徐々に増大した。操作-応答ノイズの分散が大きくなるほど、白円の移動距離のばらつきが大きくなるため、白円を中央線に重ねることが難しくなると同時に、白線を越えてしまうリスクも大きくなる。参加者には、時間とともにキー操作時の白円の動きのばらつきが大きくなることを教示し、白線を越えるリスクを回避するため、左手でメインキーボードの“1”キー（ストップキー）を押すことで、現試行を中止し、次の試行へ進むことができることを伝えた。ただし、ストップキーを押さない限りはその試行を続行できた。その上で、白円の動きのばらつきの大きさを見極め、得点をできるだけ多く得られるようなタイミングで現試行を中止する判断を行うことを求めた。各試行の得点はブロック内で累積されるため、各試行の最後には、その時点での得点（現試行の得点と前試行までの得点の合計）が呈示された。白円が白線を越えてしまった場合は、その試行の得点は 0 になるが、前試行までの得点は保持されたままであった（Figure 1a）。次の試行へ進むと、操作-応答ノイズは 0 の状態に戻り、同様の課題を繰り返した。

操作中止判断課題のパフォーマンスの指標として

は、各参加者の（a）操作中止判断時のノイズ SD の平均、（b）操作中止判断時のノイズ SD の標準偏差、（c）操作中止判断課題の得点、（d）操作中止判断課題全 128 試行中、その試行の累積得点が 0 となる前に操作中止判断を行った試行数を算出した。（a）は操作中止判断のタイミングを示す。課題ではノイズ SD が大きいほど得点が 0 になる確率は大きくなるため、そのような損失のリスクに対し、ノイズ SD がどの程度の大きさのときに操作中止判断を行うかは、本課題におけるリスク志向／回避傾向の重要な指標となる。（b）は各参加者が操作を中止すべきであると判断した時のノイズ SD のばらつきの指標であり、これが小さいほど操作中止判断が一定で安定していることを示す。課題では時間とともにノイズ SD が大きくなるが、その増大率は試行ごとにランダムであるため、操作中止判断がノイズ SD の大きさに関する情報をもとに行われないう限りは（例えば、試行開始からの経過時間が操作中止判断と大きく関わっているような場合）、操作中止判断時のタイミングにばらつきが生じる。つまり、操作中止判断時のノイズ SD の大きさが安定していることは、ノイズ SD の情報を有効に用いて判断を行っていることを意味する。（c）と（d）は、操作中止判断課題において、最適な判断を行えたかどうかの指標となる。（c）は操作中止課題での得点であり、白円が中央線に重なった回数と損失を相殺したものととなる。できるだけ長く、かつ、損失（白円が白線を越え、その試行での累積得点が 0 になる）を被る前の最適なノイズ SD の大きさに操作中止判断を行えることが、この指標の高得点につながると考えられる。（d）は、操作中止判断課題中、得点が 0 となる損失を避けられた試行の回数である。操作中止判断が早い場合もこの指標

Figure 1. (a) Schematic view of stimuli used in the stop-operation decision-making task. When the observer presses the stop button before the circle crosses the side lines, the score of the trial is added to the total score (left). If the circle crosses the side lines, the score of the trial becomes zero (right). (b) Schematic view of stimuli used in the variance discrimination task.

の値は高くなるため、この指標が必ずしも最適な判断を示すものではないことには注意が必要であるが、指標 (c) と合わせ、最適な判断を行えているかを検討するための指標として設定した。また、(c) と (d) はともに、操作中止判断のタイミングだけでなく、キー操作の熟練度によっても左右される可能性のある指標である。本課題はそのような操作の学習の必要性を極力排除するものとしたが、もしノイズ分散の識別能力の違いによってこれらの指標に差が出たならば、分散の知覚能力によるキー操作への影響(前述の第2段階)を考慮する必要もあるだろう。

先行研究のバルーン課題などと異なる点として、本課題では、白円が白線を越えた場合であっても、ストップキーを押さない限りはその試行を続行できた。その場合、得点は0から再度加算していくことができた。これは、操作-応答ノイズの分散が小さい状態でも白円が白線を越えてしまう可能性があるため、白円が白線を越えた場合に自動的に現在の試行が中止され次の試行に進む設定にすると、参加者自身による“操作中止判断”が行われなくなるからである。

実 験 1

実験1では、操作-応答ノイズの分散の知覚能力が操作中止判断にどのように影響を与えるかを検討するために、操作-応答ノイズの分散増大率を識別する課題(分散識別課題)によって参加者の丁度可知差異(JND)を測定し、操作中止判断課題のパフォーマンスとの間の相関を調べた。

方 法

実験参加者 10人の正常な視力を持つ女性(18—26歳)。全員が実験の目的を知らなかった。

分散識別課題 装置は、操作中止判断課題と同じものを用いた。刺激も同様であるが、得点化は行わず、また途中で停止の判断も行わない。操作-応答ノイズのSDは、視覚刺激(白円)操作シークエンス開始時は0であり、その後1.5秒間隔で同じ比率で増大した。1シークエンスは6秒間続くので、シークエンス内でノイズのSDは3回増大した。この操作-応答ノイズSDの増大のタイミングは1.5秒間隔で固定されており、参加者のキー押しのタイミングや回数とは関係がない。参加者のキー押しのタイミングは任意であるが、なるべく白円が中央線に重なるようにキー押し操作を行うよう教示されたため、刺激と課題の設定上、多くのキー押し反応が行われることが必要とされた。

本試行に入る前に、参加者は、操作-応答ノイズのない状態でキー押しによる白円の操作を練習した(20シークエンス)。1シークエンス内で平均18回程度のキー押し操作が行われた。

続いて、本試行ではキー操作時の白円の動きにばら

つきが生じること、および、白円の動きのばらつきの大きさは徐々に大きくなることが伝えられた。参加者の課題は、2つの連続するシークエンスで、なるべく白円が中央線に重なるように操作を行いながら、操作-応答ノイズのばらつきの増大率が大きいと思う方のシークエンス番号(1または2)を答えることであった(二肢強制選択法, Figure 1b)。各試行では、シークエンス番号が500 ms 呈示された後、各シークエンスが6秒間続き、2つのシークエンスが終わった後、“Answer”の文字が画面に呈示された。この後、参加者はノイズのばらつきの増大率が大きいと思う方のシークエンス番号をメインキーボードの“1”または“2”キーで答えた。

手続き 分散識別課題ではQUEST (Watson & Pelli, 1983)を用い、操作-応答ノイズの標準偏差(SD)の増大率識別の閾値を求めた。標準刺激のSD増大率は視角0.1°の1種類であった。1ブロック40試行で閾値を求め、8ブロックの閾値の平均を個人の閾値とした。JNDは、閾値から標準刺激のSD増大率である0.1を減算することで求めた。分散識別課題の後、10分休憩を挟み、続けて操作中止判断課題を実施した。

操作中止判断課題では、操作-応答ノイズの標準偏差(SD)は、各試行の最初の1.5秒間0であり、その後2秒ごとに同じ比率で増大した。分散増大のタイミングを分散識別課題での1.5秒間隔よりも長い2秒間隔としたのは、分散が早い段階で大きくなりすぎてしまい、参加者間の操作中止判断のタイミングに差が出なくなることを避けるためである。ノイズのSDの増大率は4条件あり、それぞれ視角0.1°, 0.2°, 0.4°, 0.8°であった。1ブロック内で、ノイズSDの増大率4条件×8試行がランダムに呈示された。課題は4ブロック行われたため、合計128試行が行われた。実験後、参加者には4ブロックで獲得した点数の平均と同額の現金が支払われた。

結果と考察

操作-応答ノイズSD増大率識別におけるJNDの大きさ(分散識別能力)と操作中止判断課題でのパフォーマンスがどのような関係にあるのかについて検討するため、“分散識別能力(JND)”と“操作中止判断課題のパフォーマンス指標(a, b, c, d)”を用い、両者の相関を検討した(Figure 2)。その結果、分散識別能力(JND)との相関が有意となったのは、(a)操作中止判断時のノイズSDの平均($r(8) = .757, p < .05$)、(b)操作中止判断時のノイズSDの標準偏差($r(8) = .706, p < .05$)であり、(c)操作中止判断課題の得点($r(8) = .133, ns$)、(d)その試行の累積得点が0となる前に操作中止判断を行った試行数($r(8) = -.077, ns$)は有意とはならなかった。つまり、分散識別能力が高いほど、操作-応答ノイズSDが小さい段階で操

作中止判断を行い、その判断が安定している（操作中止判断を行うノイズ SD のぶれが小さい）ことが示唆された。この結果は仮説 1 を支持し、操作-応答ノイズの分散の増大を敏感に検出するほど、早い段階で操作中止判断を行うことを示唆している。一方で、分散識別能力が高くても、操作中止判断課題において高い得点が得られるとは限らず、また、損失を避けることができなかった。

実験 2

実験 2 では、実験 1 の結果を踏まえ、学習によって分散識別能力が向上した場合に、操作中止判断のパフォーマンスが変化するかを検討した。実験 1 で、分散識別能力が高いほど、操作-応答ノイズ SD の小さい段階で操作中止判断を行い、その判断が安定していることが示唆された。そこで、分散識別能力の効果を確かめるため、分散識別課題に学習セッションを設け、操作-応答ノイズの分散増大率識別能力を向上させる群を設定し、学習セッションの前後のテストにおける操作中止判断のパフォーマンスを比較した。もし序論で説明した仮説 1 が正しいならば、学習によってさらに安定して小さな分散時で停止するようになるだろう。また、分散知覚能力と操作中止判断時のリスク回避傾向との間の相関が、個人の特性によって得られたものではなく、分散知覚能力とリスク知覚との間の直接的影響によるものであるならば、分散識別の向上に

よって個人内での操作中止判断ポイントの変化が見られるだろう。さらに、実験 2 では、操作中止判断を損失回避判断と作業コスト回避判断に分けた分析も行った。これは、損失（得点が 0 になる）を被った後も操作を続行できる本研究の操作中止課題のような状況では、損失を回避するために操作を中止する判断と、損失を被った後に、利益に見合わない作業コストを回避するために操作を中止する判断の両方が存在すると考えられるためである。例えば、ロボットを用いて荷物を運ぶ場合、不調により荷物が落下することは損失であり、これを避ける判断が損失回避判断である。一方で、不調がそれほど深刻でないうちであれば、ロボットを使用し続けることで効率よく荷物を運搬するという利益が得られる。だが、不調が深刻になり荷物の落下頻度が増えたと作業コストが大きくなってしまう。この推定される利益と作業コストを比較して行うのが、作業コスト回避判断である。実験 2 では、この 2 つの操作中止判断それぞれに、分散知覚能力が及ぼす影響について検討する。

方法

実験参加者 実験 1 の参加者のうち、6 名を分散識別学習群に、4 名を分散識別非学習群にランダムに割り当てた。ただし、分散学習群の参加者のうちの 1 名が、学習セッション後のテストの操作中止判断課題の指標 (d) で逸脱して小さな値を示したため、分析か

Figure 2. Correlation between the measurements in the variance discriminability task and the four performance measurements in the stop-operation decision-making task.

Note: “noise SD ” means standard deviation of noise. “Loss avoidance count” means the count of stop-operation before the moving circle crosses the side lines.).

ら除外した。指標 (d) が著しく小さいということは、損失を避けて操作中止判断を行うという課題の目的を無視していると考えられるためである。そのため、分散識別学習群は5名として分析を行った。

装置と刺激 実験1と同じである。

手続き 学習セッションは5日に分けて行われ、学習群は、1日8ブロックずつ分散識別課題を行った。学習セッションの分散識別課題では、ビーブ音によって参加者の反応の正誤に対するフィードバックが与えられた。テストセッションは、実験1と同じく、分散識別課題と操作中止判断課題で構成され、分散識別課題の後、10分休憩を挟み、続けて操作中止判断課題が行われた。実験1をテスト1とし、分散識別学習群の参加者は、テスト1の後、別の日に学習セッションに参加した。学習セッションの後、別の日にテスト2が行われた。分散非学習群には、テスト1の後日、テスト2のみを実施した。テスト1とテスト2は、約1週間空けて行われた。

結果と考察

分散識別課題の学習効果 分散識別課題の学習効果の結果を Figure 3 に示す。操作-応答ノイズのSD増大率識別のJNDについて、テスト(2水準:テスト1, 2) × 群(2水準:分散識別学習群, 分散識別非学習群)の2要因分散分析を行った(“テスト”は参加者内要因, “群”は参加者間要因)。その結果、テストの主効果($F(1, 7) = 7.363, p < .05$)と、群とテストの交互作用($F(1, 7) = 5.804, p < .05$)が有意であった。群の主効果は有意ではなかった($F(1, 7) = .540, ns$)。交互作用が有意であったため、分散識別学習群、分散識別非学習群それぞれにおける、テストの単純主効果について下位検定を行ったところ、分散識別学習群においては有意であったが($F(1, 7) = 14.761, p < .01$)、分散識別非学習群においては有意ではなかった($F(1, 7) = .004, ns$)。つまり、分散識別学習群では、テスト1よりテスト2において操作-応答ノイズのSD増大率識別

のJNDが低下したが、分散識別非学習群では、テスト1, 2間でJNDの変化がなかった。このことから、操作-応答ノイズのSD増大率の識別において、学習による知覚能力の向上効果があることが示された。

操作中止判断課題のパフォーマンスにおける分散識別課題学習群と非学習群の比較 分散識別課題の学習によって操作-応答ノイズSD増大率識別のJNDの低下が示されたため、分散識別学習群において操作中止判断課題のパフォーマンスに変化が生じているかについて検討を行った(Figure 4)。操作中止判断課題の4つのパフォーマンス指標、即ち、(a) 操作中止判断時のノイズSDの平均、(b) 操作中止判断時のノイズSDの標準偏差、(c) 操作中止判断課題の得点、(d) 操作中止判断課題全128試行中、その試行の累積得点が0となる前に操作中止判断を行った試行数について、テスト(2水準:テスト1, 2) × 群(2水準:分散識別学習群, 分散識別非学習群)の2要因分散分析を行った(“テスト”は参加者内要因, “群”は参加者間要因)。結果、(a) について、テストの主効果($F(1, 7) = 4.003, p < .10$)と、群とテストの交互作用($F(1, 7) = 3.649, p < .10$)が有意傾向であった。(b) は、テストの主効果($F(1, 7) = 10.836, p < .05$)が有意であり、群とテストの交互作用($F(1, 7) = 4.651, p < .10$)が有意傾向であった。(c) は、テストの主効果($F(1, 7) = 5.727, p < .05$)、群の主効果($F(1, 7) = 9.875, p < .05$)が有意であった。(d) は、テストの主効果($F(1, 7) = 10.289, p < .05$)が有意であった。それ以外のテストの主効果、群とテストの交互作用、および、群の主効果はすべて有意ではなかった。続いて、(a), (b) について、分散識別学習群、分散識別非学習群それぞれにおける、テストの単純主効果について下位検定を行ったところ、学習群では、(a) ($F(1, 7) = 8.637, p < .05$)、(b) ($F(1, 7) = 16.699, p < .01$)ともに有意であったが、非学習群では、どちらも有意ではなかった。

以上の分析の結果、分散識別課題の学習により操作-応答ノイズ増大率の知覚能力が向上することによって、(a) 操作を中止すべきであると判断するノイズSDが小さくなり、かつ、(b) 操作を中止すべきであると判断する際のノイズSDの値が安定したことが示唆された。しかし、(c) 操作中止判断課題における得点や、(d) 損失を避けられる回数には影響を及ぼさなかった。また、(c), (d) に関しては、テストの主効果が有意で、群とテストの交互作用が有意ではなかったことから、分散識別課題の学習の有無ではなく、利得と損失を伴う操作中止判断課題を経験することが、得点の向上や損失を避けることにつながるが示唆された。

損失回避判断と作業コスト回避判断における分散識別課題学習の効果 分散識別能力の向上による操作中止判断への影響を示す上記の結果(指標(a), (b))は、

Figure 3. The mean JND in the training and no-training groups for Test 1 and Test 2. The error bars show standard error.

操作中止判断課題で想定されるリスクを回避する傾向が強まったことを示唆する。しかし、本研究の操作中止判断課題では、白円が白線を越えて得点が0になった後も操作を続行できるため、想定されるリスクとしては、得点が0になる損失のリスクと、得られる得点に見合わない労力をかけて操作を続けてしまうという作業コストのリスクの両方が考えられる。即ち、操作中止判断には、損失回避判断と作業コスト回避判断の2つの段階の判断が含まれると想定される。そこで、操作中止判断における分散識別能力向上の効果が、損失回避判断と作業コスト回避判断それぞれに対してどのような影響を及ぼしたのかについて検討するため、得点が0となる前に操作中止判断（損失回避判断）を行った試行と、得点が一度0となった後に操作中止判断（作業コスト回避判断）を行った試行に分け、それ

ぞれについて、指標（a）、（b）の分析を行った（Figure 5）。

その結果、損失回避判断については、指標（a）はテストの主効果のみ有意傾向であり（ $F(1, 7) = 4.484$, $p < .10$ ）、指標（b）はいずれの主効果、交互作用も有意ではなかった。一方、作業コスト回避判断は、指標（a）と（b）の両方について、学習群におけるテストの主効果のみ有意であった（ $F(1, 7) = 7.478$, $p < .05$ ）、（ $F(1, 7) = 11.880$, $p < .05$ ）。この結果から、分散識別能力の向上によって、操作中止判断に効果があったのは、その一部である作業コスト回避判断であることが示された。即ち、小さく（指標 a）、安定した（指標 b）ノイズ SD の大ききで作業コスト回避判断を行うようになった一方、損失回避判断に対しては影響を及ぼさなかった。

Figure 4. The mean values of four measurements for the training and no-training groups for Test 1 and Test 2. The error bars show standard error.

Figure 5. The mean values of measurements (a) and (b) for Test1 and Test2 in the training and the no-training groups. Figures on the left concern “loss avoidance” judgment and on the right “work-cost avoidance” judgment. The error bars show standard error.

全体的考察

本研究では、自分の操作するシステムが徐々に制御不能に陥る状況を想定し、操作-応答ノイズの分散増大率の検出が操作中止判断にどのような影響を及ぼすかを検討した。検討対象となる操作中止判断のパフォーマンスの指標として、(a) ノイズ SD がどのくらいの大きさのときに操作中止判断を行うか、(b) 操作中止判断を行う試行間で、リスク回避時のノイズ SD がどれだけ安定しているか、(c) 利得と損失を伴う操作中止判断課題で得られた得点、(d) 操作中止判断課題全 128 試行中、その試行の得点が 0 となる前に操作中止判断を行った試行数の 4 つを用いた。

実験 1 では、操作-応答ノイズの分散増大率識別能力と操作中止判断のパフォーマンスとの間に相関が見られ、分散識別能力が高いほど、操作-応答ノイズの分散が小さいときに操作中止判断を行い（指標 (a)）、またその判断が安定していた（指標 (b)）。これは、仮説 1 を支持し、分散の増大を敏感に検出することによって、制御不能事態というリスクを大きく評価し、早い段階で操作を中止する判断をしたことを示唆する。さらに、操作中止判断を行うノイズ SD の値が安定していることは、分散の増大率を正確に把握していること、また、その情報を有効に用いて操作中止判断を行えることを示している。

実験 2 では、実験 1 の結果について分散識別能力の効果を確認するため、分散識別課題を学習するセッションを設け、操作-応答ノイズの分散増大率識別能力を向上させる群を設定し、学習セッションの前後のテストにおいて操作中止判断にどのような変化が見られるかを調べた。結果、学習によって分散増大率の知覚能力が向上すると、操作-応答ノイズの分散が小さいときに操作中止判断を行うようになり、またその判断が安定することが示された。これは、実験 1 の結果が分散識別能力の違いによるものであることを支持する結果である。

実験 1, 2 の結果から、分散識別能力が大きく影響を与えるのは、制御不能状態へのリスクを知覚する操作-応答ノイズの大きさであり、分散識別能力が高いほどより早い段階でリスクを知覚し、操作-応答ノイズの大きさに関する情報に基づいた意思決定を行うことが示唆される。ただし、実験 2 の考察で述べたように、本研究の操作中止判断課題では、システムが制御不能状態になった際のリスクとして、損失（得点が 0 になる）を被るリスクと、得点に見合わない作業コストをかけてしまうというリスクの 2 つが含まれており、分散識別能力が影響を与えるのは後者の作業コストに対するリスクの知覚であることが示された。

分散識別能力の影響が作業コスト回避判断でのみ見られた理由としては、以下の 3 点が考えられる。1 点

目として、今回の課題で設定した損失が軽微なものであったことがある。損失が重大な場合には、損失を被る前の段階で現在の状況を正確に把握して敏感な反応を行う必要があり、ノイズの大きさの情報を有効に損失回避判断に利用することが考えられるが、損失が軽微な場合は、状況に対する感覚が比較的高まらず、ノイズ情報を有効に使うメカニズムが十分に働かない可能性がある。2 点目として、今回の課題の場合、損失回避判断が可能であるまでの時間が短かったことが、ノイズの情報を有効に用いることができなかった一因とも考えられる。3 点目として、今回のように損失があった後も操作を続行できるような場合、次の段階として作業コストとの兼ね合いの問題が生じ、その段階では、現在の状況を正確に把握して利益とコストとを比較しなければならず、ノイズの分散情報を利用した判断が必要となると考えられる。まとめると、ノイズの分散情報を利用したリスク回避判断は、現在のシステムの応答状況を敏感に把握する必要性が高く、また状況を分析できる十分な時間のある場合に行われ、そのような状況においては、分散の知覚能力によって最終的な操作中止判断が影響を受けることが考えられる。このように、システムの制御不能状況下でのリスク知覚メカニズムは、リスクの大きさや状況によって変化する可能性も考えられるため、今後は、損失量や操作-応答時間などの要因を組み入れ、分散の知覚能力が高い場合に損失回避判断がどのような影響を受けるのかについて検討することが必要である。

次に、以下の点も重要である。実験 1 では、操作-応答ノイズの分散増大率識別能力と、操作中止判断課題での得点（指標 (c)）や損失を避けられた試行数（指標 (d)）との間には相関がなかった。また、実験 2 においても、分散識別課題の学習効果は、操作中止判断課題での得点や損失を避けられた試行数には見られなかった。むしろ、分散識別学習の有無に関係なく、2 回目のテストにおいて、リスク回避判断課題での得点が高くなり、損失を避けられた試行数も増加した。これらの結果が得られた理由としては、2 つが考えられる。1 つは、分散識別能力を有効に操作中止判断に活用するためには、別途ペイオフを伴う操作中止判断状況での訓練が必要だという可能性である。これは、明示的な確率呈示に基づくリスク判断についての先行研究 (Jessup et al., 2008; Redelmeier & Tversky, 1992) の結果より十分に考えられる。もう 1 つは、応答-操作学習が不十分であったため、操作中止行動のタイミングにノイズが生じ、結果として分散識別能力の違いがリスク回避判断課題の成績に影響を与えなかったという可能性である。しかしながら、序論でも述べたように、本研究ではこの応答-操作学習に関わる要素はキー押しの選択とタイミングというごく単純なものに限定されていることや、分散識別学習群では非学習群より

も多くの実験刺激操作を経験している（したがって応答-操作学習は非学習群よりも進んでいると想定される）にもかかわらずその効果がないことから、この第二の理由についてはあまり大きな要因ではなかったと考える。また、学習群では操作中止判断を早めに行うようになったにもかかわらず、2 回目の操作中止判断における指標（d）の増加が非学習群と差がなかったことは、学習群において損失回避判断は変化しておらず、得点が一度 0 になった後での操作中止判断（作業コスト回避判断）のみが早くなっていたことから説明できる。

本研究で得られた結果をまとめると、操作-応答ノイズの分散を敏感に検出することによって、制御不能事態というリスクに対する早めの操作中止判断を行うようになるが、それは主に、作業コストリスクへの回避傾向が強まったことによるものと考えられた。また、損失を回避し、かつ、得点を最大にできるような最適なポイントで操作中止判断できるようになるには分散識別能力の向上のみでは十分ではない、ということが示唆された。

本研究は、私たちが操作-応答ノイズの分散を知覚することができ、その情報が実際の行動（本研究では操作中止行動）につながる認知過程に影響を及ぼしうることを示した点で重要である。分散知覚に関しては、受動的に呈示される視覚刺激の分散に関する研究は行われているが（Morgan et al., 2008; Solomon et al., 2011）、観察者の能動的な操作とその応答である視覚運動刺激との間のずれの分散について検討した研究はほとんどない（Ueda et al., 2012）。したがって、心理物理学的方法を用いて操作-応答ノイズの分散知覚能力を測定し、さらに先行研究ではほとんど検討されていない分散知覚の学習効果を示した本研究は、分散の知覚に関する新たな知見を提供したと言える。また、リスク知覚研究の観点では、リスク確率に関する情報を知覚する段階が最終的な操作中止判断に影響を及ぼすことを示し、リスク志向/回避傾向の基礎となる認知処理過程に関わる新たな要因を示した。バルーン課題を用い、リスク知覚の基礎となる認知メカニズムを検討した研究では、リスク志向/回避傾向を決定する認知的な処理段階はリスク確率に対する意思決定の段階であり、リスク確率を推測する段階には差がないことが示すものがある（Pleskac, 2008; Wallsten et al., 2005）。バルーン課題では、リスク確率に関する情報が実験参加者に全く知らされない設定となっていたが、本研究では、現実場面の制御不能状況の物理的特性である操作-応答ノイズの分散の増大を実験的に再現することで、リスク確率を評価する前の段階である、リスク確率の推測時の能力がリスク回避判断に影響を及ぼしうることを示した。このことは、より多様な状況におけるリスク回避行動での認知的要因の検討の必

要性を示唆するものである。

これまで、“制御”に関する研究は数多く行われてきおり、特に、自分自身の行為が外界の変化を引き起こしたというコントロール感（制御感）や、身体運動の主体者である感覚、agency について、予測と結果の一致度や、行為選択時の流暢さが大きいほどその制御感が強くなることなどが示されてきた（Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998; Chambon & Haggard, 2012; Sato & Yasuda, 2004; Short & Ward, 2010）。しかしながら、制御可能状態から制御不能状態へと変化する際に、私たちがその状況をどのように認知し、どのような行動をとるのかという点について検討したものはない。現実場面において私たちが直面するリスクを考慮すると、制御不能状況における人間の認知特性を調べることは非常に重要である。本研究では、リスク情報の“知覚”の段階と“リスク判断”の段階を統合的に検討し、操作-応答ノイズというリスク情報の検出能力と最終的なリスク回避判断との間の関係性を示したが、リスク確率の知覚能力を考慮した上で、個人のリスク傾向をモデル化することは今後必要となってくるだろう。

本研究の限界と今後の課題

本研究の限界の 1 つとして、参加者の操作・決定方略の調節を検討できなかった点があげられる。操作・決定方略の調節とは、序論で述べた、システムの制御不能状況で操作中止行動に至るまでの認知過程のうち、第 2 段階の“その時点でのノイズの大きさに応じた適応的な操作を決定する段階”に関するものである。本研究の操作中止判断課題では、中央線から 1.2° の位置に白円があるときに中央線の方角に向かってキー押し操作をすることが、多くの得点を得られ、かつ、白円が白線を越える確率を小さくする最適な方略である。しかし、理論上はこのような方略の獲得が想定されるものの、短い試行時間の中では、この方略が実際には最適にならないことがあること、また、白円が自動的に動き始める際の方向がランダムなことなどから最適な方略を用いるような判断の余地は少なかったことが考えられ、第 3 段階の操作中止判断における変化のみを検討対象とした。この点への改良として、運動速度や白線までの幅を変えるなどにより、試行時間を長くしたり、キー押しのタイミングや方向が実験参加者の決定のみに依存する刺激を用いたりすることで、第 2 段階の変化についても検討していくことが可能と考えられる。

また、課題が現実場面でのシステムの制御不能事態やリスク状況と関連があるかという問題があるが、この点については検討の必要があろう。例えば、バルーン課題を用いた先行研究では、薬物経験やギャンブル依存など現実場面でのリスク傾向パーソナリティと、課題で測定されるリスクテイキング傾向との間の相関

を示していた (Lejuez et al., 2002) が、本研究では、個人のパーソナリティと操作中止判断との間の関係については検討していないため、今後これらの指標とシステム制御時のリスク認知との関わりについても検討することが必要である。加えて、本研究では実験参加者が女性に限られていたため、男性の参加者による実験を行い、性差の有無などについて検討することも必要である。

引用文献

- Barron, G., & Erev, I. (2003). Small feedback-based decision and their limited correspondence to description-based decisions. *Journal of Behavioral Decision Making*, **16**, 215–233.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, **1**, 635–640.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**, 443–446.
- Chambon, V., & Haggard, P. (2012). Sense of control on fluency of action selection, not motor performance. *Cognition*, **125**, 441–451.
- Hertwig, R., Barron, G., Weber, E. U., & Erev, I. (2004). Decisions from experience and the effect of rare events in risky choice. *Psychological Science*, **15**, 534–539.
- Jessup, R. K., Bishara, A. J., & Busemeyer, J. R. (2008). Feedback produced divergence from prospect theory in descriptive choice. *Psychological Science*, **19**, 1015–1022.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, **47**, 263–291.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (2000). *Choices, values, and frames*. Cambridge University Press.
- Lejarraga, T., & Gonzalez, C. (2011). Effects of feedback and complexity on repeated decisions from description. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, **116**, 286–295.
- Lejuez, C. W., Read, J. P., Kahler, C. W., Richards, J. B., Ramsey, S. E., Stuart, G. L., Strong, D. R., & Brown, R. A. (2002). Evaluation of a behavioral measure of risk taking: The Balloon Analogue Risk Task (BART). *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **8**, 75–84.
- Liu, Z., Knill, D. C., & Kersten, D. (1995). Object classification for human and ideal observers. *Vision Research*, **35**, 549–568.
- Morgan, M., Chubb, C., & Solomon, J. A. (2008). A “dipper” function for texture discrimination based on orientation variance. *Journal of Vision*, **8**, 1–8.
- Motoyoshi, I., & Nishida, S. (2001). Visual response saturation to orientation contrast in the perception of texture boundary. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, **18**, 2209–2219.
- Neyedli, H. F., & Welsh, T. N. (2013). Optimal weighting of costs and probabilities in a risky motor decision-making task requires experience. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **39**, 638–640.
- Pelli, D. G. (1997). The Video Toolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**, 437–442.
- Pleskac, T. J. (2008). Decision making and learning while taking sequential risks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, **34**, 167–185.
- Redelmeier, D. A., & Tversky, A. (1992). On the framing of multiple prospects. *Psychological Science*, **3**, 191–193.
- Sato, A., & Yasuda, A. (2004). Illusion of sense of self-agency: Discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, **94**, 241–255.
- Short, F., & Ward, R. (2010). Virtual limbs and body space: Critical features for the distinction between body space and near-body space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **35**, 1092–1103.
- Solomon, J. A. (2010). Visual discrimination of orientation statistics in crowded and uncrowded arrays. *Journal of Vision*, **10**, 1–16.
- Solomon, J. A., Morgan, M., & Chubb, C. (2011). Efficiencies for the statistics of size discrimination. *Journal of Vision*, **11**, 1–11.
- Trommershäuser, J., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2003a). Statistical decision theory and the selection of rapid, goal-directed movements. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science & Vision*, **20**, 1419–1433.
- Trommershäuser, J., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2003b). Statistical decision theory and trade-offs in the control of motor response. *Spatial Vision*, **16**, 255–275.
- Trommershäuser, J., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2008). Decision making, movement planning and statistical decision theory. *Trends in Cognitive Sciences*, **12**, 291–297.
- Ueda, S., Yakushijin, R., & Ishiguchi, A. (2012). Variance discrimination of gap size between operation and visual motion feedback. *Poster session presented at the Association for Psychological Science 24th Annual Convention, Chicago, USA*.
- Wallsten, T. S., Pleskac, T. J., & Lejuez, C. W. (2005). Modeling behavior in a clinically diagnostic sequential risk-taking task. *Psychological Review*, **11**, 862–880.
- Watson, A. B., & Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics*, **33**, 113–120.