

両義運動刺激の持つ知覚的曖昧性が知覚潜時に及ぼす影響

竹井 成和 ***・西田 眞也 ***

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 G2-1

** NTT コミュニケーション科学基礎研究所

〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

(受付：2008年10月30日；受理：2009年2月22日)

The Effect of Perceptual Ambiguity in a Bistable Motion Stimulus on Perceptual Latency

Shigekazu TAKEI^{*,**}, Shin'ya NISHIDA^{*,**}

* Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering

G2-1, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan, 226-8502

** NTT Communication Science Laboratories

3-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa, Japan, 243-0198

(Received 30 October 2008; Accepted 22 February 2009)

Previous studies suggest that cognitive ambiguity, such as that in categorical judgments, increases response latency. However, whether or not perceptual ambiguity for bistable stimuli, in which two perceptual interpretations are mutually competitive, also cause an increase in perceptual latency remains unknown. In this study, reaction times were measured for the judgment of the perceived direction of a two-frame bistable rotational apparent motion stimulus, while manipulating the angle of rotation to control the magnitude of ambiguity. Our results show that the response time for perceptually ambiguous rotation angles (~45 deg) was only slightly longer than that of unambiguous angles (~20 deg). In contrast, response times obtained for very small angles, where motion signal weakness made the percept ambiguous, were much longer. These findings suggest that an effect of perceptual ambiguity generated by bistable stimuli on perceptual latency is very small, if at all.

1. 序 論

感覚器が刺激を受け取ったあと、知覚はいつ成り立つのか。知覚潜時決定のメカニズムを探ることは、人の知覚を理解し、また知覚から行動への連携を理解する重要な研究課題である。これまで、心理物理、脳機能イメージング、電気生理学等様々な方法が試みられてきたが¹⁻⁴⁾、多くの問題が未解決に残されている。知覚とは感覚器によって捉えられた情報から外界の構造

を推定することである。しかし、多くの知覚推定は、感覚情報のみから正しい解を一意に決定することのできない不良設定問題になっている⁵⁾。感覚情報と一致する数多くの解の中から、物理的な拘束条件や事前知識、先行情報などをもとに、一つの解を導き出す必要がある。このような曖昧性の解消は、知覚過程の本質的な機能と言える。曖昧性の解消が知覚潜時にどのような影響を与えるのか。これが、本研究で解明を目指す問題である。

知覚潜時を明らかにするには、知覚潜時を測るのに適した指標を用い、それに影響を与える要因を探る必要がある。心理物理学的に知覚潜時を計測する方法として、見かけの順序や同期などの主観的な時間関係を判断させて、そこから相対的な知覚潜時を推定しようという試みが行われることもあるが(例えば⁶⁾)、主観的な時間判断は外界の時間関係の解釈であって必ずしも知覚処理時間を反映しないという考えもあり⁷⁻¹⁰⁾、主観判断から知覚潜時を測定するのは問題が多いと我々は考える。一方、反応時間は、主観的な時間判断を用いずに知覚潜時を測ることができる行動指標である^{1,11)}。反応時間とは、ある刺激が提示されてから被験者が判断を行い反応するまでの時間であり、神経伝達、感覚特徴の符号化、知覚判断、反応・運動形成などの段階を合算した指標である^{1,11)}。知覚成立から反応までの時間に違いがないと考えられる条件間の比較においては、相対的な知覚潜時の違いを反応時間から推定することができる。このように、反応時間を用いることによって主観的な知覚という現象の時間的側面を客観的時間として捉えることができ、神経生理的に測定される潜時なども反応時間等の行動データと対照することでその理解を深めることができる(例えば^{4,12,13)})。よって、我々は反応時間決定のメカニズムを分析することで知覚潜時の解明を試みた。

反応時間に対する曖昧性の影響に関して、これまでは判断の曖昧性の影響が検討されてきた。Grinbandら¹⁴⁾や、RatcliffとRouder¹⁵⁾は、カテゴリー判断の曖昧性が反応時間を延ばしているという結果を示した。ただし、これら先行研究で用いられた課題は記憶されたカテゴリーへの分類であり、その曖昧性は知覚が成立した後の記憶との対照過程において生じていると考えられる。そのため、得られた反応時間の遅れは、我々が問題にしたい知覚形成の潜時ではなく知覚が成立した後の段階における遅れを反映している可能性がある。

本研究の目的は知覚潜時に影響を与える要因

としての曖昧性の検討であるため、知覚形成段階における知覚的曖昧性を扱う必要がある。そこで、知覚潜時と曖昧性の関係を検討するために、両義刺激に対する知覚判断の反応時間を観察した。両義刺激は一つの刺激が二つの知覚的解釈を持つ刺激で、感覚信号の段階で曖昧性を生じさせると考えられる¹⁶⁾。

本研究では両義刺激として回転仮現運動を用いた。仮現運動は、対応点が曖昧になることで、知覚が変化することが知られている¹⁷⁾。回転仮現運動の回転角度を操作し、回転方向の判断に要する反応時間を計測した。右または左回転の回転角が逆回転より十分に小さいときには、その方向の回転がほぼすべての試行で知覚される。一方、右回りと左回りの回転角が等しくなる条件では、どちらかの方向の回転がほぼ同じ比率で知覚され、知覚的な曖昧性が最大になる。本研究では、後者の条件で前者より知覚潜時が遅れ、反応時間が延びるのかどうかについて検討した。比較条件として、回転角度が小さすぎて判断が困難になり、反応が曖昧になるような条件を設けた。このような条件では反応時間が延びることが予想されるが、その延び量を一つの基準として知覚的曖昧条件の反応時間の変化量を評価した。

ただし、回転角は、知覚または判断の曖昧性だけではなく、運動信号の強度にも影響する。回転角が非常に小さいときには運動信号が微弱で、それから回転角度が大きくなるにつれ運動信号は強まり、ピークを迎え、そののち運動信号が徐々に弱まると考えられる¹⁸⁾。刺激強度は、反応時間に影響を与える要因として、課題成績と反応時間を変化させることが知られている¹⁹⁻²⁵⁾。よって、結果の解釈においては、回転角度が反応時間に与える影響が、刺激強度の効果としてのみ説明可能なのか、それともそこに曖昧性の効果が加算されるのかが問題となる。

ここで、曖昧度や刺激強度といった要因の反応時間への影響がこれまでの研究においてどのようにモデル化されてきたかに触れておきたい(概説として²⁶⁾)。主なモデルである diffusion

モデル²⁷⁾では、入力情報が感覚処理層において符号化され、上層に存在する感覚統合ユニットに送られる。感覚処理層は複数の知覚の候補それぞれに対する信号の強さを連続的に送信し、統合ユニットはその信号を各知覚候補の証拠として統合・蓄積する。統合ユニットは知覚に対応した複数の決定境界線を持っており、蓄積された知覚証拠がその一つの境界を越えたときに知覚判断および反応が形成される。このモデルは当初は心理学的な機能モデルとして提案されたが、近年は神経生理学的な知覚および認知判断メカニズムのモデルとして広く受け入れられている（例として28）。diffusion モデルでは、刺激の持つ信号強度が知覚的証拠蓄積の速度を決定する。その結果、信号強度が弱まった場合、どちらかの知覚に収束しにくくなり、反応が遅延する。曖昧度に関しては、これまでに diffusion モデルでは判断の曖昧度のみが扱われてきた。判断が曖昧な状況では、一つの感覚統合ユニットにおいて競合する知覚証拠が統合される過程で証拠の相殺が生じ、証拠の蓄積が遅れる。そのため、振る舞いとしては曖昧度の増加は信号強度の低下と同等となる²⁶⁾。両義刺激のもつ知覚的曖昧性についても、同様の diffusion モデルが適用できるならば、二つの知覚的証拠が互いに競合的に働くことで、知覚的曖昧性は反応形成までの時間を長くすることが予想される。ただし、同様に証拠が蓄積するモデルであっても、競合する知覚候補の証拠が独立に蓄積され先に決定境界線を越えた方の知覚が成立するという独立レースモデル²⁹⁻³¹⁾を想定するならば、知覚的曖昧性そのものは知覚潜時をほとんど遅れさせないことが予想される。

認知判断レベルの曖昧性と同様に、両義刺激の知覚的曖昧性も知覚潜時を伸ばす可能性を考える根拠はいくつかある。両義刺激を長時間提示することで知覚交代が起きるが、この知覚交代メカニズムは複数の知覚解釈の脳内表象間の競合的な相互抑制によって引き起こされると考えられている（概説として16,32,33）。この競合過程が刺激提示直後の最初の知覚成立段階に

対してどのような影響を与えるのかについてはわかっていないが、もしも競合過程が迅速な知覚成立の妨げとなるならば、両義刺激の持つ知覚的曖昧性は、反応を曖昧にすると共に反応時間を延ばすと考えられる。

また、両義刺激に対する知覚判断に対応する脳活動を調べた研究に Tsuchiya ら³⁴⁾によるものがある。彼らは運動定義の三次元曖昧刺激を用いて、知覚判断課題遂行中のサルの MT 野信号から、知覚される運動をデコードすることを試みた。その結果、物理的に曖昧性の無い刺激条件のみならず、物理的に曖昧な両義刺激条件でも知覚に相関した脳活動を見出すことができたが、後者は前者に比べ、その潜時は大きく遅れた。もし、このような脳活動が知覚判断の潜時に直接対応するものであるとすれば、この結果は知覚的曖昧性の高い状況において知覚成立が遅れる可能性を示唆している。

一方、冒頭で述べたように知覚的曖昧性は不良設定問題である知覚の本質であり、曖昧性によって知覚潜時が遅れるのは生態学的に不都合なシステムである。視覚系は曖昧な状況でも一つの知覚を迅速に選び取るような仕組みになっているのかもしれない。運動刺激を用いた本実験の結果は、視覚系がこのような生態学的に妥当なメカニズムであることを支持するものとなった。

2. 方 法

2.1 被験者

正常な視力を有した五名の被験者を用いた。男性が四名、女性が一名、年齢は25歳から45歳だった。うち二名(ST, SN)は著者であった。その他の被験者は実験の目的を知らず、心理物理実験に慣れていて、

2.2 装置

刺激提示装置としてカラーモニタ (SONY GDM-F520) およびコンピュータ (Apple Power-Book G4 1GHz) を用いた。モニタの解像度は1024×768ピクセルであった。モニタのフレーム周波数は85Hzに設定した。あらかじめモニ

タのガンマ特性を測定し、輝度補正を行った。刺激作成と制御は MATLAB (MathWorks 社) および Psychophysics Toolbox^{35,36)} により行った。観察距離は 67 cm とし、暗室内で顎台を用いて被験者の頭部を固定した。

2.3 刺激

刺激として、2 フレームの回転仮現運動刺激を用いた (図 1)。第一フレームが 480 ms 提示された後、12 ms の ISI をはさんで第 2 フレームが提示された。各フレームでは、エッジをガウシアンフィルタでぼかした黒い円を正方形形状に配置し、灰白色背景に表示した。画面の背景輝度は 51 cd/m^2 に設定した。円は直径 1.6 deg であった。円の中心間の距離は 5 deg であった。円の最暗部の輝度は 1.2 cd/m^2 であった。ガウシアンフィルタをかけることで、微少な移動も正確に提示することが出来る。フレーム間の移動角度に 0 から 89.5 度 まで、20 条件を設けた (0, 0.5, 1, 2, 4, 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 86, 88, 89, 89.5 度)。こうした 2 フレームの仮現運動刺激では、短い回転角度の方向に運動が見える傾向がある。0 度条件では、回転は存在しない。45 度回転条件では、最も曖昧な刺激となる。凝視点として直径 0.4 deg の白色円を用いた。

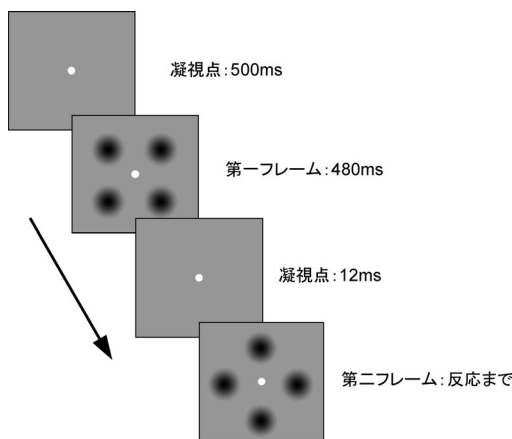


図 1 刺激模式図。

2.4 手続き

被験者の課題は、四つの円で作られた正方形が左右どちらに回転したのかを早く正確にボタン押しにより回答することであった。ボタン押しにはキーボードの F, J キーを用い、それぞれ左右の人差し指を用い、左回転は F, 右回転は J を用いて回答した。被験者の知覚を反映した試行のみを解析に用いるために、誤ったボタンを押したと被験者が判断した試行では、反応直後に被験者自身がその試行をキャンセルした。試行中凝視点は常に提示された。試行開始後 500 ms して運動刺激が提示された。第 2 フレームは回答まで提示された。回答後、被験者が適当に反応することを避けるために、物理的に回転角度が小さくなる回転方向をフィードバックとして与えた。フィードバックとして、ヘッドフォン (Sennheiser HDA 200) を用いて聴覚刺激を提示した。被験者が角度が小さい方の回転を選択した時は弱い音を、逆の場合は強い音を提示した。回転が 45 度の時は、被験者の回答に関わらず、弱い音と強い音が同試行数ずつランダムに与えられた。試行間は 2 秒のブランクが設けられた。第 1 フレームに提示される正方形の傾きとして 6 条件 (垂直から 15, 30, 45, 60, 75, 90 度) 設けた。実験は 9 セッション行われ、1 セッションは開始角度 6 条件 \times 回転角度 20 条件 $\times 2$ の 240 試行からなり、各条件はランダムに提示された。

2.5 データ処理

反応時間は第 2 フレームのオンセットからボタン押しまでの時間とした。反応時間が 0.8 s を超える試行は分析から除外した。開始角度の 6 条件について、実験の結果同様の傾向が得られたため、合算して分析を行った。また、合計して 90 度になる回転角度条件同士は、回転方向が異なるだけで回転角度は等しいため、分析では一つにまとめた。結果においても両条件は同様の傾向を示した。各回転角度条件において短距離運動選択率を計算した。回転角度 0、および 45 度条件では、全試行の半数ずつを任意に右回転短距離運動あるいは左回転短距離運動と

し、短距離運動選択率を計算した。これにより、回転方向の知覚および反応のバイアスの影響を除くことが出来る。反応時間の代表値として、各回転角度条件で、回答に関わらずデータを合算した分布からメジアンを計算した。

3. 結果と考察

図 2a-e に個人毎の短距離運動選択率、図 2f に短距離運動選択率の平均値、図 3a-e に個人毎のメジアン反応時間を示す。エラーバーはブートストラップ法により算出した 95% 信頼区間を示す。全ての被験者において、0 度と 45 度回転条件で短距離運動選択率が 50% 付近、10 度から 30 度で 100% 付近となった。この結果の

傾向は、競合する運動軌道候補をもつ仮現運動刺激において短距離方向の運動知覚が生じるといった、過去の仮現運動に対する知見^{17,18)}から予測されるものによく一致している。素早い反応を求められた状況であったが、被験者は刺激に無関係な反応をしていたのではなく、正しく知覚を反映した回答を行っていたことが示唆される。短距離運動選択率が 100% となる回転角度 20 度付近で最も早い反応時間 (250 ms~300 ms) が得られ、角度が小さくなるにつれて反応時間が延び、0 度条件の反応時間は、20 度付近の反応時間に対して最大約 25~35% 延びた。それに対して、短距離運動選択率が 50% に近づいていく回転角度 35 度、40 度、45 度と

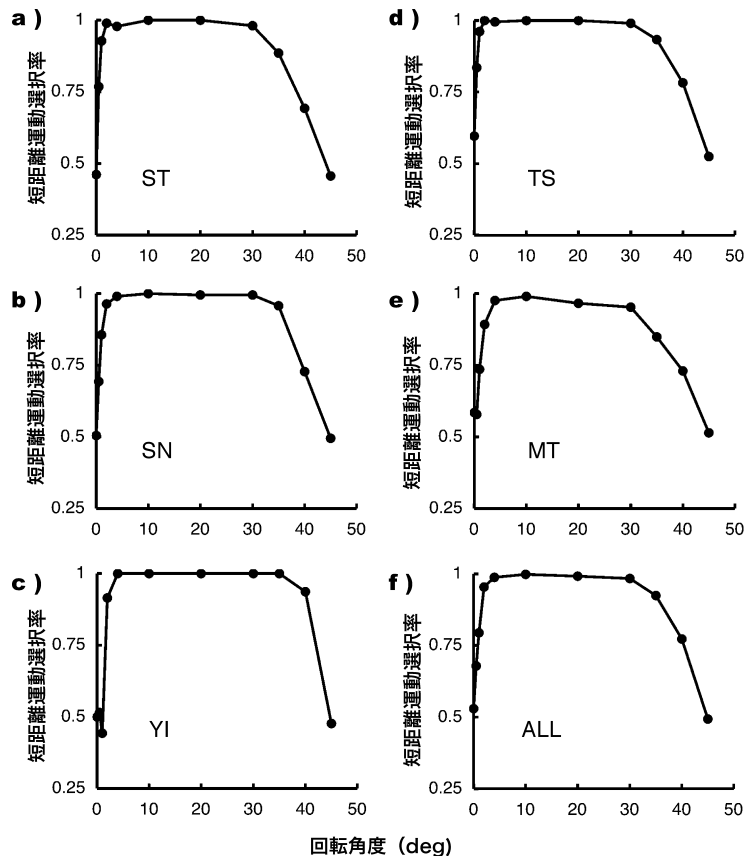


図 2 各回転角度条件における短距離運動選択率。横軸：回転角度 (deg)、縦軸：短距離運動選択率。a-e) 各被験者の正答率、f) 全被験者の平均値。

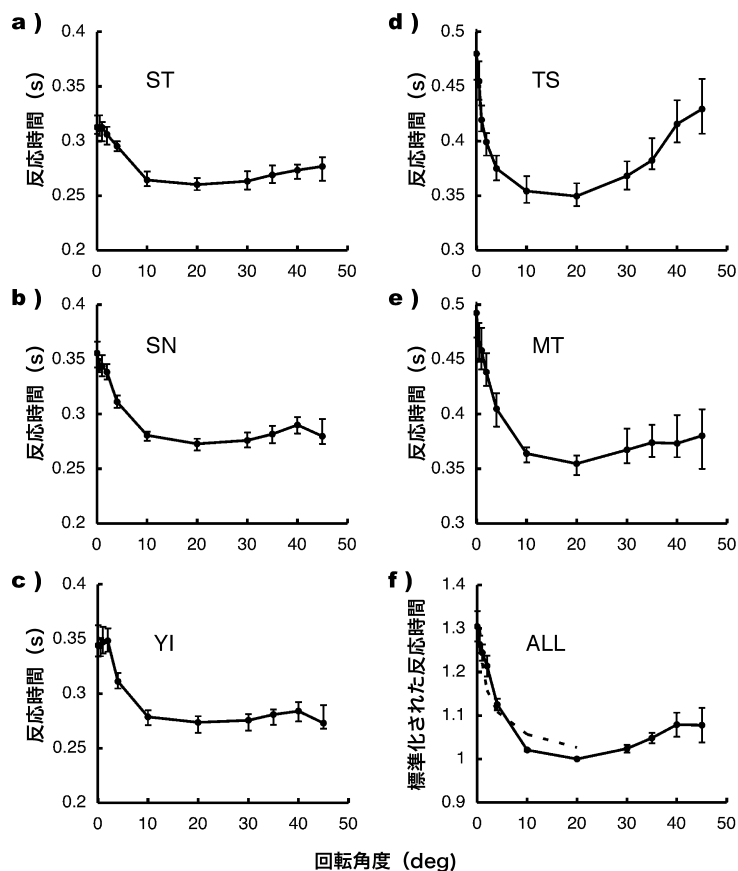


図3 各回転角度条件における反応時間。横軸：回転角度 (deg)，縦軸：反応時間 (s)。a-e) 各被験者のメジアン反応時間。エラーバーはブートストラップ法により求めた 95% 信頼区間を示す。f) 全被験者の標準化された反応時間の平均値。エラーバーは ± 1 標準誤差を示す。点線は 20 度以下の条件における平均反応時間に対して Piéron 則をフィッティングしたもの。

いった条件では、一名の被験者 (TS) を除けば反応時間はほとんど変わらなかった (脚注 1)。95% 信頼区間から判断して、TS を除く各被験

者の結果においては、0 度と 20 度の間には統計的に有意な差があるが、20 度と 45 度の間には差がなかった。

脚注 1：被験者 TS における反応時間は、回転角度 20 度以上の条件において、20 度以下条件群と同様の傾きで伸びていた。実験後の質問では、この被験者は動き自体は見えるが、それがどちらの回転だったかの判断は難しかったと答えた。この結果についてはいくつかの解釈の可能性がある。第 1 に、他の被験者と異なり、この被験者では 20 度以上の条件における運動対応強度の低下が顕著だった可能性がある。その結果、刺激強度の効果として反応時間が長くなったのかもしれない。45 度を超える角度において TS 以外の被験者においても大きな潜時の遅れが見いだされたことは (図 5)、TS の個人差が定量的な違いであることを示唆している。第 2 に、この被験者では何らかの理由で知覚的に曖昧性が解消されなかった可能性がある。例えば透明視的に両方の運動が見えたのかもしれない。その結果、判断の段階に曖昧性が持ち込まれ、反応形成に遅れが生じたのかもしれない。第 3 の可能性として、被験者特異的に知覚的曖昧性が反応時間を延ばしたという解釈もあり得る。しかし、ルビンの壺を用いた別実験では、この被験者においても両義刺激の持つ知覚的曖昧性による反応の遅れは見られなかった³⁷⁾。よって個人差の原因は、知覚的曖昧性ではなく、今回の曖昧運動刺激に対する反応の違いにあると考えるべきだろう。

さらに、反応時間のグループデータに対する統計分析を行った。個人間で絶対的な反応時間に差があったので（20度回転条件で100msほど）、標準化を行った。全被験者で20度回転条件において反応時間が最速となるため、20度回転条件の反応時間を基準値1として各被験者内で各回転条件のメジアン反応時間を標準化した（図3f、エラーバーは±1標準誤差）。標準化により、個人毎の回転角度条件間の反応時間の標準偏差について、被験者間で最大値と最小値の比が、約2.5倍（最大0.05、最小0.02）から約1.7倍（最大0.14、最小0.08）に圧縮された。反応時間に対する一要因分散分析の結果、回転角度について主効果が見られた（ $F_{(10,44)}=24.99, p<0.001$ ）。Tukeyの下位検定を行った所、0度と20度の間には統計的に有意な差が見られたのに対して（ $p<0.001$ ）、20度と45度の間には有意な差は見られなかった（ $p>0.05$ ）。

ボタン押しを間違えたと判断し試行をキャンセルした率の全被験者の平均値を求めたところ、回転角度が1度、2度、4度の時にキャンセル率が10%に近くなり、その他の条件ではほぼ5%以下のキャンセル率となった。この結果は、微小な角度条件における反応時間の遅れが反応速度と精度のトレードオフによってもたらされたものではないこと、および被験者が高い精度で知覚内容を報告していたことを示唆する。

次に、図4に反応の曖昧度と反応時間の関係をより分かりやすく図示した。反応の曖昧度は、短距離運動選択率を基にして、エントロピー理論から導かれる情報量を便宜的に利用して、以下の数式(1)によって計算した（単位：bit）。

曖昧度 = $-p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p)$ (1)
 p は短距離運動選択率を表す。回転角によって選択運動方向が完全に決まる場合には曖昧度は0、回転角と無関係に二つの運動方向が等確率で選択される場合には曖昧度は1となる。図4における記号の違いは角度条件の違いを表している。図から、小さな回転角度と両義刺激になる大きな回転角度で、曖昧性による反応時間への効果に違いがあることが明確に読み取れる。

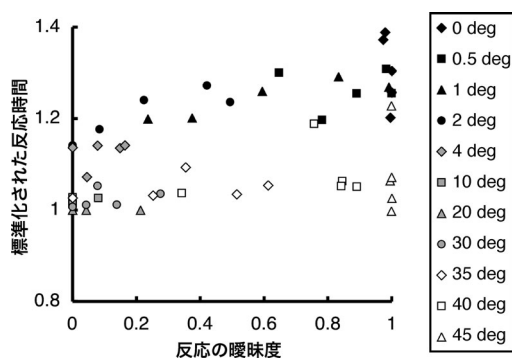


図4 反応の曖昧度と各被験者内で標準化したメジアン反応時間。横軸：反応の曖昧度，縦軸：標準化されたメジアン反応時間。

回転角度が小さい条件群では、反応時間が相対的に長く、反応の曖昧度が増えるにつれ反応時間が延びる明瞭な傾向が見られた。それに対して、45度付近の回転角度が大きい条件群では、反応時間が相対的に短く、曖昧度が上昇しても反応時間の上昇は小さい回転角度条件群で見られたほどではない。図4は回転角による知覚潜時の変化が反応の曖昧性だけでは説明できないことを示している。

では、今回の結果はどのような反応時間の決定過程を考えれば説明できるのであろうか。回転角の操作によって変化する要因には、反応の曖昧性だけでなく、刺激強度がある。今回の刺激状況において角度の変化に対して刺激強度がどのように変化していたのかを直接に知ることは容易ではないが、理論的には刺激強度に二つの成分があると考えられる。一つは運動方向強度で、右回転らしさ・左回転らしさを反映し、回転角度が0のとき最低で、角度の増大とともに急激に強くなると考えられる。もう一つは運動対応強度で、仮現運動の強さを反映し、これは回転角度が0のとき最大で、角度の増大とともにゆっくり弱くなると考えられる。この運動対応強度を反映して、競合的な仮現運動状況では、短距離の運動が長距離の運動より高い確率で選択される^{18,38}。この二つの成分の組み合わせで運動強度は決定されるため、今回の刺激状況では、回転角度の増加とともに、運動強度は

いったん強まってそののち弱まると考えられる。このような仮定のもと、以下のように知覚潜時と刺激強度の対応を分析した。

反応時間と刺激強度との間には次の数式 (2) が成り立つことが知られている (Piéron 則¹⁹⁻²¹⁾).

$$RT = t_0 + \beta I^\alpha \quad (2)$$

RT は単純反応時間, t_0 は漸近値, α は関数の指数, β は自由なパラメータ, I は刺激強度を表す。この法則は、単純反応時間だけでなく、選択反応時間にも適用可能であることが分かっている²²⁾。今回の場合、少なくとも回転角度が微小な条件では、回転角度とともに増大する運動方向強度が、運動刺激強度の変化を決定すると考えられる。そこで、式 (2) の刺激強度に

回転角度を代入し、0 から 20 度の回転角度条件の反応時間 (被験者平均) に対して、Piéron 則によるフィッティングを行った (図 3f)。その結果 R^2 値が 0.89 となり、Piéron 則がよく成り立つことが分かる ($t_0=0.9$, $\alpha=0.32$, $\beta=0.31$)。このフィッティングは大きな回転角度で反応時間が緩やかに再上昇する傾向は説明できない。しかし、この範囲では運動方向強度は飽和し、運動対応強度は弱まるために、全体的な刺激強度は回転角とともにゆっくりと低下することが予想される。この刺激強度の変化が、知覚潜時の上昇を生んだという解釈が可能である。以上の分析から、回転角度による反応時間の変化は刺激強度の要因によって簡潔に説明可能であり、それに加えて曖昧性の要因が反応時間に影響し

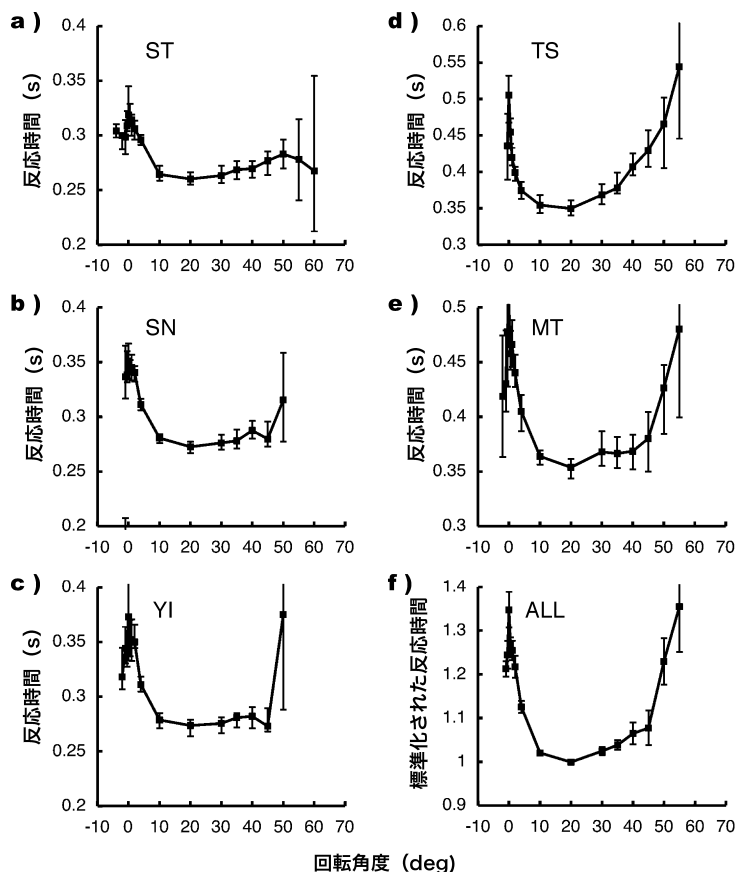


図 5 選択された回転角度とその反応時間。横軸：回転角度 (deg), 縦軸：反応時間 (s)。a-e) 各被験者のメジアン反応時間。エラーバーはブートストラップ法により求めた 95% 信頼区間を示す。f) 全被験者の標準化された反応時間の平均値。エラーバーは ± 1 標準誤差を示す。

たと考える根拠は乏しい。

以上の分析では、物理的な回転角度に対して反応時間を分析したが、知覚される運動方向と運動回転角度に対応した形で分析することも可能である。それにより、知覚に対応した反応時間をさらに詳しく観察することが出来る。例えば、30度回転条件では、30度の短距離運動と60度の長距離運動が提示されている。短距離運動を選択する試行がほとんどだが、まれに60度の長距離運動が選択される試行も存在する。そうした場合、反応時間は知覚される運動方向に応じて変化するのだろうか。図5に知覚に対応した反応時間を示す。長距離運動を選択した試行はその長距離運動角度にデータをプロットした。ただし、長距離運動選択率が5%を下回る条件では、認知的な混乱により選択されていた可能性があるためプロットから除外した。その結果、プロットはほぼ-10度から60度の幅に収まった。-10度のプロットは10度回転条件において長距離運動を選択した試行、60度のプロットは30度回転条件において長距離運動を選択した試行を指す。0度および45度では、短距離運動と長距離運動の区別が存在しないため、全試行をまとめて表示した。図中、a-eは個人毎のメジアン反応時間と95%信頼区間、fは標準化されたメジアン反応時間の平均および標準誤差を示している。図から、多くの被験者において回転角が45度を越えた運動を選択した場合、反応時間が相当延びていたことがわかる。45度で反応時間がピークとなるわけではないため、この延びは知覚的曖昧度を反映していたわけではない。理論的には、運動対応強度は45度を越えても低下し、その結果、短距離運動に比べ45度以上の長距離運動が知覚されにくくなると考えられる。そのため、得られた反応時間の変化は、45度を越えた部分を含めて、回転角の増加とともに運動対応強度が低下したこと

で説明することができる。こうした結果は、刺激強度が知覚潜時を決定づけていた可能性を高める。

4. 総合考察

先行研究では、知覚的曖昧性と知覚潜時の関係について議論されないまま、反応の曖昧さは反応時間の増加を引き起こすとされてきた。本研究では、知覚的曖昧性を引き起こす回転仮現運動刺激に対する知覚判断の反応時間を計測し、反応の曖昧性との関係を分析した。回転角が小さく、刺激強度が弱まることで反応が曖昧になった場合、反応時間が大きく遅れることを確認した。一方、左右の回転角度が等しい両義回転刺激、およびその近傍の回転角度条件において、知覚判断が曖昧になった条件では、反応が曖昧になっているにもかかわらず反応時間はほとんど増加しなかった。また、この結果は、今回用いた運動刺激に特異的なものではない。我々は他の曖昧刺激（例：運動定義3次元図形（脚注2）、ルビンの壺）を提示した際の知覚判断においても、知覚的曖昧度は反応をほとんど遅らせないことを確認している³⁷⁾。すなわち、少なくとも今まで調べた3つの両義刺激に関しては、知覚的曖昧性の解消が知覚潜時を遅らせる原因となる明確な証拠はなかったと結論できる。不良設定問題である知覚は常にある種の曖昧性の解消を含んでいることを考えると、知覚的曖昧性が知覚潜時の遅れを生まない生態学的に妥当な仕組みがそこにあることが我々の研究から示唆される。ただし、両眼立体視では曖昧性が知覚潜時に影響するという可能性も示唆されており³⁹⁾、今回の実験結果が本当に課題に依存しないかどうかに関してはさらなる検証が必要である。

今回の結果と先行研究から、反応の曖昧さをもたらず3つの状況において、反応時間との関

脚注2：この刺激はTsuchiyaら³⁴⁾がサル³⁴⁾のMT野における活動との相関を見たものとはほぼ同じである。彼らが曖昧刺激の知覚に対応する脳活動の潜時が長いことを発見したことは我々の結果とは一件矛盾する。知覚判断が別の脳領域でコードされているということなのか、人とサルの種間差を反映したものなのか、等々、興味深い検討課題が残される。

係性を以下のように記述することができる。(1) 刺激強度を変えず、カテゴリー判断過程によって反応が曖昧になる場合、反応時間は遅れる¹⁴⁾。これは、知覚潜時ではなく知覚成立後の記憶との参照過程などにおける遅れを含んでいると考えられる。(2) 刺激強度が低下することによって反応が曖昧になる時、知覚潜時は遅れる。これは、判断に到るまでの知覚証拠の蓄積に時間がかかることで説明できる²⁵⁾。(3) 最後に、本研究で示したように、両義刺激の持つ知覚的曖昧性によって反応が曖昧になる場合、知覚潜時は曖昧度に対応して遅れない。

知覚的曖昧性が反応時間に対応しなかったという今回の結果は、diffusion モデルにおいて知覚的証拠が互いに競争的に働いた結果、反応時間が遅れるという可能性とは矛盾する。diffusion モデルは、知覚より上位の認知過程まで含めた、反応時間総体の振る舞いを説明するモデルといえるが、今回の結果は、diffusion モデルが適用できるのは認知判断過程における差が結果の差を生じさせる課題についてであり、知覚形成段階を反映する課題に直接適用することが不適当であることを示している。さらに、記憶との照合過程のような高次の段階では解釈の競争的関係が存在するのに対して、知覚形成段階では信号が抑制的に働いていないことを示している。競争的な抑制入力を受ける統合ユニットを仮定するという diffusion モデルの構造を維持

したまま、いくつかの仮定を付加することで、今回の結果を説明することは不可能ではないが(脚注 3, 4)、知覚的な曖昧性の説明には、以下に述べる独立レースモデルがより有望ではないかと我々は考えている。

diffusion モデルでは反応の曖昧度は反応時間の遅れを引き起こすが、独立レースモデルでは反応は曖昧になったとしても反応時間が遅れない状況を説明することが出来る。独立レースモデルでは、知覚は複数ある知覚ユニット間での競争によって決定される。そして、最も早く知覚証拠蓄積量が閾値を超えたユニットに対応した知覚が、閾値を超えた時点で成立する。証拠蓄積過程は確率的揺らぎを含むと考えられるため、知覚ユニット間での刺激強度の比が反応の割合を決定すると考えられる(概説として²⁶⁾)。この形であれば知覚証拠の蓄積過程において競争が生じないため、刺激強度が反応時間を決定する主要因となると考えられる。また、相対的な強度が、知覚される回転方向を決定するので、刺激強度が相対的に強い短距離回転方向がより高い確率で知覚されることが予想される。よって、45 度を超えた角度で反応時間がほぼ延びているという結果(図 5)は、独立レースモデルによる予測と一致している。現時点では反応時間決定メカニズムについてこれ以上の深い議論をする十分な材料はないが、以上の考察は、競争が存在しない独立レースモデルのようなメカ

脚注 3：感覚刺激入力の初期段階で感覚処理ユニット間の相互抑制の方向が速やかに決定され、一方の感覚処理ユニットが抑制されることで、統合ユニットにおける感覚情報の統合に影響が出ないという非線形相互作用を仮定したモデルや、刺激強度が強い場合には知覚証拠蓄積過程の分散が大きくなり、一方の解に素早く収束する⁴⁰⁾という仮説などが考えられる

脚注 4：Niwa と Ditterich は、コヒーレント運動の各要素運動が同強度のコヒーレンシーを持つ時に、刺激の運動方向判断に要する反応時間を計測している。課題では、3つの方向に同強度のコヒーレント運動を提示し(例：20%、20%、20%)、運動方向を判断させた(どの方向でも正解)。その結果、同強度の一方向運動刺激(20%、0%、0%)に比べ、選択反応時間が長くなった。この結果は、知覚的曖昧性で反応潜時が遅れないという我々の仮説と矛盾しているようにも思える。しかし、彼らの刺激では複数の方向の運動が別々のドットによって構成されており、両義刺激のように一つの運動の知覚が他の運動の知覚を排除してしまう状況ではない。そのため、彼らの運動刺激では知覚的に曖昧性が解消されず、その結果生じた判断の曖昧性により、反応段階の遅れが生じていた可能性がある。ただし、Niwa と Ditterich⁴⁰⁾は、曖昧刺激態の反応時間が刺激強度とともに短くなることを示しており、さらにそれを、diffusion モデルを用いて感覚信号の強度増強に伴う知覚証拠蓄積過程の分散の増加による説明を試みている。彼らの考えで我々の結果を説明できる可能性は残っている。

ニズムによって知覚潜時が決定されている可能性を示唆している。知覚的曖昧性は diffusion モデルを中心とする反応時間理論を知覚潜時の理論として発展させていく上で重要なポイントになる。

最後に、両義刺激は知覚交代の文脈でよく議論される。この知覚交代を引き起こすと考えられる感覚信号の競合が、どの段階で解消されるのかについては様々な議論がある（例えば¹⁶⁾）。この点に関して、今回の結果を、競合メカニズムは一方の知覚解釈が最初に成立する段階ではほとんど働かないという様に解釈するならば、知覚交代は高次の知覚表象間の競合を含んだプロセスである可能性が高い。また、今回の結果は、長時間提示される両義刺激の知覚交代において、一回目の交代までの知覚特性がそれ以降とは異なるという知見⁴⁾を支持し、その原因に関して新たな洞察を与えるものである。

5. ま と め

知覚的曖昧性と知覚潜時の関係を調べるために、知覚段階に曖昧性を持つ、両義刺激に対する知覚判断の反応時間を計測した。回転仮現運動刺激に対する回転方向判断課題を行ったところ、回転角度が小さい条件および刺激解釈が曖昧になる条件において、反応が曖昧になった。回転角度が小さい条件では角度が小さくなるにつれて反応時間が延びたのに対して、回転角度が両義刺激に近づいても反応時間は大きく遅れなかった。この結果は、反応の曖昧さと反応時間は必ずしも直結せず、曖昧性の解消が知覚潜時を遅らせる原因にならないことを示唆している。このことは、不良設定問題である知覚形成局面において、素早い判断を行うという生態学的に妥当な仕組みを備えている事を意味する。

謝辞 この研究の一部は、日本学術振興会グローバル COE プログラム“フォトニクス集積コアエレクトロニクス”の支援を受けて行った。

文 献

- 1) R. D. Luce: Response Times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization. Oxford University Press, New York, 1986.
- 2) K. Amano, N. Goda, S. Nishida, Y. Ejima, T. Takeda and Y. Ohtani: Estimation of the timing of human visual perception from magnetoencephalography. *Journal of Neuroscience*, **26**, 3981–3991, 2006.
- 3) H. R. Heekeren, S. Marrett, D. A. Ruff, P. A. Bandettini and L. G. Ungerleider: Involvement of human left dorsolateral prefrontal cortex in perceptual decision making is independent of response modality. *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **103**, 10023–10028, 2006.
- 4) E. P. Cook and J. H. Maunsell: Dynamics of neuronal responses in macaque MT and VIP during motion detection. *Nature Neuroscience*, **5**, 985–994, 2002.
- 5) D. Marr: Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. W.H. Freeman and Company, 1982.
- 6) K. Moutoussis and S. Zeki: A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision. *Proceedings of The Royal Society B Biological Science*, **264**, 393–399, 1997.
- 7) S. Sternberg and R. L. Knoll: The perception of temporal order: fundamental issues and a general model. S. Kornblum (Ed.), *Attention and Performance (Vol. IV)*. Academic Press, 1973.
- 8) P. Jaskowski: Simple reaction time and perception of temporal order: dissociations and hypotheses. *Perceptual and Motor Skills*, **82**, 707–730, 1996.
- 9) D. C. Dennett and M. Kinsbourne: Time and the Observer. *Behavioral and Brain Sciences*, **15**, 183–247, 1992.
- 10) S. Nishida and A. Johnston: Marker correspondence, not processing latency,

- determines temporal binding of visual attributes. *Current Biology*, **12**, 359–368, 2002.
- 11) F. C. Donders: Over de snelheid van psychische processen. Onderzoekingen degaan in het physiologisch Laboratorium der Ugtrechtsche Hoogeschool. *Tweede reeks*, **11**, 92–130, 1868–1869.
 - 12) J. D. Roitman and M. N. Shadlen: Response of neurons in the lateral intraparietal area during a combined visual discrimination reaction time task. *Journal of Neuroscience*, **22**, 9475–9489, 2002.
 - 13) C. Palmer, S. Y. Cheng and E. Seidemann: Linking neuronal and behavioral performance in a reaction-time visual detection task. *Journal of Neuroscience*, **27**, 8122–8137, 2007.
 - 14) J. Grinband, J. Hirsch and V. P. Ferrera: A neural representation of categorization uncertainty in the human brain. *Neuron*, **49**, 757–763, 2006.
 - 15) R. Ratcliff and J. Rouder: Modeling response times for two-choice decisions. *Psychological Science*, **9**, 347–356, 1998.
 - 16) R. Blake and N. K. Logothetis: Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience*, **3**, 13–21, 2002.
 - 17) P. A. Kolars: *Aspects of Motion Perception*. New York: Pergamon Press, 1972.
 - 18) P. Burt and G. Sperling: Time, distance, and feature trade-offs in visual apparent motion. *Psychological Review*, **88**, 171–195, 1981.
 - 19) H. Piéron: Recherches sur les lois de variation des temps de latence sensorielle en fonction des intensités excitatrices [On the laws of variation of sensory processing time as a function of the excitatory intensity]. *L'Année Psychologique*, **20**, 1914.
 - 20) H. Piéron: Nouvelles recherches sur l'analyse du temps de latence sensorielle en fonction des intensit?s excitatrices [Further evidence on the laws of sensory processing time as a function of the excitatory intensity]. *L'Année Psychologique*, **22**, 1920.
 - 21) H. Piéron: The sensations. New Haven: Yale University Press, 1952.
 - 22) D. Pins and C. Bonnet: On the relation between stimulus intensity and processing time: Pieron's law and choice reaction time. *Perception & Psychophysics*, **58**, 390–400, 1996.
 - 23) D. Pins and C. Bonnet: The Pieron function in the threshold region. *Perception & Psychophysics*, **62**, 127–136, 2000.
 - 24) R. Schweickert, C. Dahn and K. McGuigan: Intensity and number of alternatives in hue identification: Pieron's law and choice reaction time. *Perception & Psychophysics*, **44**, 383–389, 1988.
 - 25) J. Palmer, A. C. Huk and M. N. Shadlen: The effect of stimulus strength on the speed and accuracy of a perceptual decision. *Journal of Vision*, **5**, 376–404, 2005.
 - 26) R. Bogacz, E. Brown, J. Moehlis, P. Holmes and J. D. Cohen: The physics of optimal decision making: a formal analysis of models of performance in two-alternative forced-choice tasks. *Psychological Review*, **113**, 700–765, 2006.
 - 27) R. Ratcliff: A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, **85**, 59–108, 1978.
 - 28) R. Ratcliff, Y. T. Hasegawa, R. P. Hasegawa, P. L. Smith and M. A. Segraves: Dual diffusion model for single-cell recording data from the superior colliculus in a brightness-discrimination task. *Journal of Neurophysiology*, **97**, 1756–1774, 2007.
 - 29) D. A. LaBerge: A recruitment theory of simple behavior. *Psychometrika*, **27**, 375–396, 1962.
 - 30) A. R. Pike: Stochastic models of choice behaviour: response probabilities and latencies of finite Markov chain systems. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, **19**, 15–32, 1966.
 - 31) D. Vickers: Evidence for an accumulator model of psychophysical discrimination. *Ergonomics*, **13**, 37–58, 1970.

- 32) R. Blake: A neural theory of binocular rivalry. *Psychological Review*, **96**, 145–167, 1989.
- 33) D. A. Leopold and N. K. Logothetis: Multistable phenomena: changing views in perception. *Trends in Cognitive Sciences*, **3**, 254–264, 1999.
- 34) N. Tsuchiya, A. Maier, N. K. Logothetis and D. A. Leopold: Decoding Monkey’s Conscious Experience During Ambiguous and Unambiguous Motion Percept Reveals Initial Non-conscious Spike Activity and Later Neuronal Correlates of Consciousness in Area MT. Paper presented at the Association for the Scientific Study of Consciousness. 2008.
- 35) D. H. Brainard: The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**, 433–436, 1997.
- 36) D. G. Pelli: The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**, 437–442, 1997.
- 37) S. Takei and S. Nishida: Perceptual ambiguity does not increase perceptual latency of bistable visual stimuli. Paper presented at the Association for the Scientific Study of Consciousness. 2008.
- 38) S. Ullman: *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press, Cambridge, 1979.
- 39) 鬢櫛一夫, 立体視における奥行の消失と反転, *心理学研究*, **50**, 256–264, 1979.
- 40) M. Niwa and J. Ditterich: Perceptual decisions between multiple directions of visual motion. *Journal of Neuroscience*, **28**, 4435–4445, 2008.
- 41) O. Carter and P. Cavanagh: Onset rivalry: brief presentation isolates an early independent phase of perceptual competition. *PLoS ONE*, **2**, e343, 2007.