

曖昧運動刺激に対する知覚潜時は修飾刺激提示の タイミングにより変化するか

竹井 成和***・藤崎 和香***・西田 眞也***

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

〒 226-8502 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 厚木市森の里若宮 3-1

*** 独立行政法人産業技術総合研究所

〒 305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6

(受付：2008 年 11 月 7 日；受理：2009 年 2 月 4 日)

Is the Latency for Perceiving Ambiguous Motion Affected by the Timing of Modulatory Stimulus Presentation?

Shigekazu TAKEI***, Waka FUJISAKI* and Shin'ya NISHIDA***

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

** NTT Communication Science Laboratories

*** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

(Received: 7 November 2008; Accepted 4 February 2009)

Perception of one event is affected by another event (modulator) that occurs either before or after the event (prediction and postdiction). A possible account for these temporal interactions is that the processing of an event does not start immediately, but waits a constant period for potentially relevant input. This hypothesis predicts that the perceptual latency of the target event is invariant to changes in the timing of modulator presentation. We tested this prediction by measuring the reaction time to judge an ambiguous motion event either as “bounce” or “stream” while changing the modulator (sound or flash) timing. The results showed that the modulator timing had little effect on RT for “stream” perception, but significantly modulated RT for “bounce” perception—the earlier the modulator, the shorter the RT. These results reject the constant delay hypothesis, but suggest more situation-adaptive temporal processing such as accumulating perceptual evidence over time.

1. 序 論

刺激が提示されてから脳で情報処理が行われ知覚が成立するまでには時間がかかる。しかし、実際にどれだけ時間がかかるのか、明確な答えは分かっていない。知覚成立時点の解明を難しくしている要因の一つに、入力と知覚の時間的関係が複雑であることが挙げられる。すなわち、ある一つの入力の知覚内容はそれ単体では決ま

らず、前後の入力との関連性の中で決定されるのである。過去の入力が未来の知覚の予兆となる prediction に対して、未来の入力が過去の知覚内容に影響を与える現象は postdiction といわれる¹⁾。前後の入力との関連性の中で知覚が決定される例として、仮現運動²⁾、ブライミング³⁾、順行および逆行マスキング⁴⁾、フラッシュラグ効果⁵⁾などが挙げられる。

ストリームバウンズ運動知覚⁶⁾も同様に pre-

diction および postdiction の影響を見ることが出来る。ストリームバウンズ運動刺激とは同一軸線上を反対方向に運動する二つの物体による両義的運動刺激である⁷⁾。刺激の見えは、接近後衝突して跳ね返る運動（以下バウンズと呼ぶ）か、あるいは接近後すり抜けて運動方向を変えずに動き続ける運動（以下ストリームと呼ぶ）のどちらか一方になり、この両義的な運動刺激に対して音や光などの修飾刺激を衝突付近のタイミングで出すことによって、バウンズ知覚が増えることが知られている^{6,8)}。修飾刺激が物体の接触よりも前のタイミングで提示されても、後ろのタイミングで提示されてもバウンズ知覚が増えることから^{6,8)}、prediction と postdiction の両方の相互作用を観察することができる。

本研究では、あるイベントの知覚内容が前後の入力との関連性により変化するような prediction や postdiction といった状況において、イベントの知覚処理時間がどのように決定されるのかを調べた。そのために、ストリームバウンズ刺激を用いて、知覚成立の時間的機序を検討した。一つのイベントについての知覚が、過去、あるいは未来の修飾刺激によって変化した際に、その処理時間の変化を観察することによって、どのような知覚処理が行われているのかについての手がかりを得ることができる。修飾刺激として音（実験1）や光（実験2）を提示し、その提示タイミングの変化がストリームバウンズ刺激の知覚内容と処理時間にどのような影響を与えるのかを観察した。

知覚の処理時間を検討するために、知覚処理時間を反映する適切な指標を選ぶ必要がある。本研究では反応時間をその指標として用いた。その理由をまず述べる。知覚がいつ成り立つのかについて、心理物理的手法、非侵襲脳活動計測、電気生理的手法等を利用したさまざまな検討が行われてきた⁹⁻¹⁶⁾。しかし、知覚の成立時点を特定することは難しい。例えば、神経科学的立場から、脳活動のタイムコースから知覚時点を探ろうとしても、ある単一の信号入力に対してさまざまな脳の領野が活動し、かつその潜

時がばらついていることから¹⁷⁾、どの領野のどのタイミングの活動が主観的な知覚形成に対応しているのかを判断することは容易ではない。一方、心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も一般的である（例えば Moutoussis と Zeki の研究¹⁸⁾）。しかし、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^{12,19-21)}、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。

反応時間は古典的な方法であるものの、主観的判断を反映した客観的な指標として最も有効な手法であると我々は考えている。このことは、近年の神経生理学を用いた研究において、細胞の活動パターンと知覚を関連づけるために反応時間が用いられていることから示唆される（例えば Cook と Maunsell の研究¹⁰⁾）。反応時間は神経伝達、知覚形成、判断形成、運動系の四つの段階の処理時間を足し合わせたものと考えられているが^{14,22-24)}、本研究においては、刺激強度の高い、明確な知覚が成立する両義刺激を用い、知覚内容を判断すべき物理イベントは常に同じものであったため、知覚段階以外に要する時間は一定であり反応時間変化は知覚判断の潜時の変化を反映しているとして研究を行った。知覚判断の潜時と知覚の潜時は異なるという反論もあるが、知覚判断の潜時と知覚潜時の区別は理論的にも現実的にも難しい。

さて、postdiction を可能にする時間処理メカニズムについて、過去にモデルが提案されている²⁵⁾。そのモデルをもとに予想される一つの結果を紹介する。図1の横軸は、物理時間を示す。簡便のため、イベントのオンセットから知覚処理ユニットに信号が到達するまでの神経伝達時間は一定と仮定し、図中では省略した。まず、postdiction を説明できない単純なモデルを図1aに示す。このモデルでは、知覚システムは信号の入力からすぐに処理を始め、処理途中には他の入力を受け入れず、一定時間を処理に要

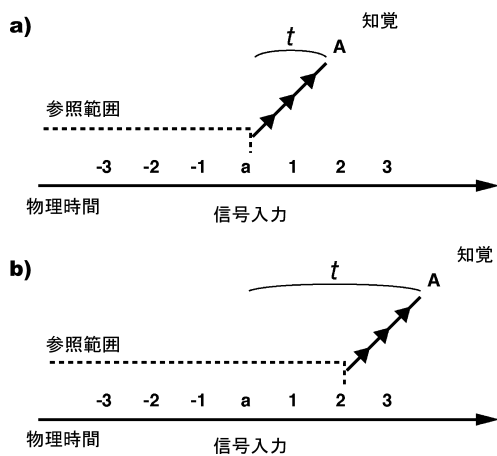


図1 知覚潜時モデル。実線は刺激処理過程，点線はあるイベントの処理に関して参照する時間範囲を表す。 t は知覚潜時を表す。a) 単純モデル，b) 一定時間入力待ちモデル。

した後に知覚が生じる。イベント a が起こった時、その時点までの入力を利用した知覚処理が即座に開始され、一定時間後に知覚 A となる。このモデルでは、postdiction のように、後から来る信号によって知覚が変化するという現象を説明できない。postdiction を説明するモデルとして考えられるのが、図 1b に示す「一定時間入力待ちモデル」である。このモデルでは、ある信号（図ではイベント a）が入力された時、その解釈を確実にするためにそれより未来の入力を待つ。しかし、いつまでも待つというわけにはいかないので、一定の時間制限を設け、制限時間までの入力（物理時間 = 2 までの入力）全てに関して考慮した処理を、入力を締め切った段階から開始し、一定時間後に知覚 A が成立する（脚注 1）。この一定時間入力待ちモデルは postdiction を説明できるが、入力に対する知覚が確実な場合でも一定時間待つということを行うため、冗長な処理を行っている。

もし、一定時間入力待ちモデルが正しいなら

ば、修飾刺激にかかわらず物体の接触から一定時間後に処理を開始し、一定時間後に知覚が成立するため、修飾刺激の提示タイミングは反応時間に差を生じさせないと予想される。しかし、本研究で得られた結果は、反応時間は修飾刺激の提示タイミングによって変化し、さらにその効果が特定の知覚（バウンス知覚）のみに現れた。このことから、一定時間入力待ちモデルより柔軟な知覚処理が為されていることが示唆された。こうした柔軟な知覚処理モデルとして、反応時間データを説明するモデルとして一般的な diffusion モデル²⁶⁾（概説として Bogacz ら²⁷⁾）を応用した、独立レース diffusion モデルが適用できる可能性を本研究では見いだした。

2. 実 験 1

2.1 方法

2.1.1 被験者

正常な視力、聴力を有した六名の被験者を用いた。男性が三名、女性が三名、年齢は 21 歳から 45 歳であった。うち二名 (ST, SN) は著者であった。その他の被験者は心理物理実験の経験はあったが、実験の目的を知らされていないかった。

2.1.2 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 PowerBook 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 85 Hz に設定した。あらかじめモニタのガンマ特性を測定し、輝度の補正を行った。刺激作成と制御は MATLAB (MathWorks 社) および Psychophysics Toolbox^{28,29)} 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。

2.1.3 刺激

ストリーム刺激を提示する背景として、灰色

脚注 1 : Rao, Eagleman, & Sejnowski (2001) はこのような発想に基づいた仮説を smoothing モデルと名付け、フラッシュラグに関する postdiction 効果¹⁾を説明している。ただし、Rao らのモデルでは入力時間と処理時間を区別せず、それらを合わせた知覚処理時間が常に一定となるモデルを設定しているのに対し、ここでは説明のためこれらを区別している。

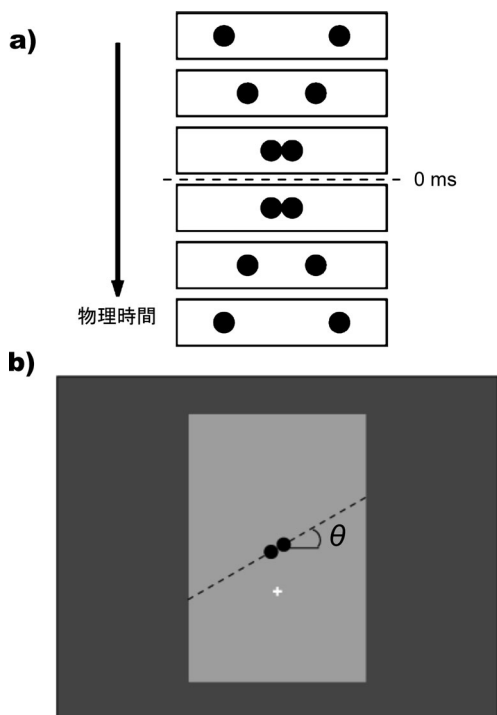


図2 刺激模式図. a) 軸角度が0度条件におけるステップ毎のディスクの動きと、ディスク接触時の位置関係および反応時間計測開始時点, b) 刺激画面. 点線は軌道を示す. 軌道条件毎に θ の値を変化させた.

の長方形（横 9.6 deg, 縦 18.5 deg, 輝度 51 cd/m^2 ）を画面中央に提示した. 長方形の周辺輝度は 25.5 cd/m^2 であった. ストリームバウンス刺激として, 黒いディスク（直径 0.4 deg）を, 同一軸上を対向する方向に運動させた（図2）. ディスクの運動は 35.4 ms（1 コマ, 3 モニターフレーム）毎に 0.4 deg 移動させたため, 運動速度は 11.3 deg/s であった. 図 2a に, 軸角度が 0 度条件におけるステップ毎のディスクの動きと, ディスク接触時の位置関係および反応時間計測開始時点を示す. ディスクは画面中央部分で接触した. 接触時の画像ではディスクの端点が接して並ぶ状態となった（図 2a）. 接触時にはディスクが並ぶ状態が 2 コマ続いており, ストリーム解釈のときにはこの中間でディスクが入れ替わり, バウンス解釈のときはそのまま留まるように見える. そこで, 2 コマ目のオン

セットを接触時点として, 反応時間計測の開始とした. 凝視点として, 白色の十字を常に提示した. 凝視点と衝突位置との距離が離れることによってバウンス知覚の頻度が上がるため³⁰, 凝視点と接触点の距離は, 被験者毎に, バウンス知覚率が最大 80% 程度になるように調節した. 凝視点提示位置は画面中央から下に, 偏心度 1 から 2.5 deg 以内に提示された. 知覚的順応を避けるために, ストリーム運動の軌道軸の傾きを 5 条件設定し (0 deg, ± 15 deg, ± 30 deg), ランダムに提示した. それぞれの軌道軸では軌道の長さが変わるため, 刺激提示時間が変化するが, ディスク同士が接する接触点は各条件で同位置, 接触タイミングは軌道の中央地点であった. 修飾刺激として 1.8 kHz, 10 ms の純音（約 70 dB SPL）を提示した. 音刺激に対して, 前後に 2.5 ms のコサイン窓をかけた. 音はヘッドフォン（Sennheiser HDA 200）によって提示された. 音提示とディスプレイの同期はオシロスコープ（Tektronix TDS3000B）を用いてあらかじめ調整した. 音修飾刺激条件として, 無音条件と, 音とディスクの接触の SOA を変化させた条件を設けた. SOA は -140, -70, 0, 70, 140 ms の 5 条件設けられた. マイナスは音が先行して提示されることを示す.

2.1.4 手続き

課題はディスクの接触に対する知覚がバウンスなのかストリームなのかを, 出来るだけ早く正確にボタン押しによって回答することであった. 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, 被験者自身がその試行をキャンセルした. 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て回答した. バウンスかストリームかの知覚に対するキーの割り当ては実験の前半と後半で変更された. 実験は二日に分けて行われたため, 一日の中では同一割り当てで回答した. どちらの割り当てで実験を開始するのかは, 六人の被験者を同数ずつランダムに二つのグループに分けた. 試行中凝視点は常に提示された. 試行開

始から1~1.5s後にディスクが現れ運動を開始した。音刺激が提示される条件では、SOAがマイナスの条件ではディスクの接触到に先行して、プラスの条件ではディスクの接触到に続いて音刺激が提示された。試行間は1sのブランクが設けられ、被験者は誤ってボタンを押した場合、この間にキャンセルを行った。実験は12セッション行われ、1セッションは軌道角度5条件×音修飾刺激6条件×5の150試行からなり、各条件はランダムに提示された。両義刺激では試行間の履歴効果により知覚が影響されやすいが、音刺激の提示条件がランダムに提示されることにより、条件内で履歴効果は押さえられていると考えられる。

2.2 結果と考察

個人毎の音修飾刺激条件によるバウンス選択率の変化および、全被験者の平均バウンス選択率の変化を図3に示す。軌道角度条件間で同様の結果が得られたため、条件を統合して分析した。各被験者とも、音の提示によりバウンス知覚の割合が増加した。無音条件ではストリーム運動が優勢で、バウンス選択率は20%程度であった。音を提示することによりバウンス率が上昇し、SOAが-140msと-70msの時に最も

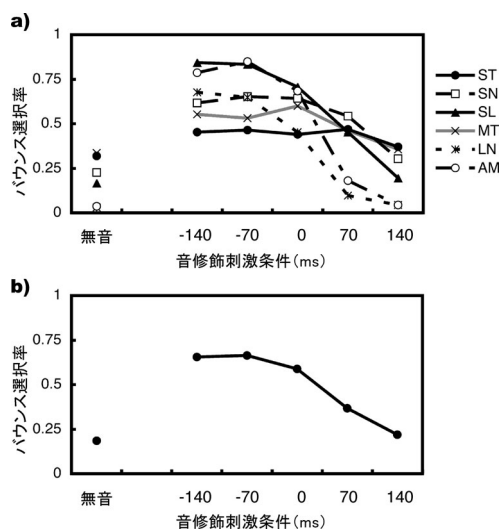


図3 実験1における音修飾刺激条件ごとのバウンス選択率。a) 各被験者におけるデータ、b) 全被験者平均値。

バウンス率が高かった。音の提示タイミングが遅れる毎にバウンス率は低下し、SOA 70msでは音の影響は見られるが、SOA 140ms条件では音の影響が見られないレベルまで低下した。

知覚に対応した反応時間を観察するために、ストリーム選択試行とバウンス選択試行について、各被験者の音修飾刺激条件毎のメジアン反応時間を図4に示す。実線はストリーム選択試行、点線はバウンス選択試行の反応時間を示す。図のエラーバーはブートストラップ法によって求めた95%信頼区間を示す。反応時間分布の歪みの影響を避けるため¹⁴⁾、平均ではなくメジアンを各被験者データの代表値として用いた。まず、ストリームと答えた試行では、音の有無、提示タイミングによって反応時間に差が見られず、どの被験者でも条件間の差が約50から100msの幅に収まっていた。それに対してバウンスと答えた試行では、音が提示された条件では、音が先行して提示されるほど反応時間が早くなり、音の提示タイミングの最も早い条件と遅い条件で、個人毎に約100msから200msほどの差が見られた。音の影響がなくなるSOA 140ms条件では無音条件と同等の反応時間が得られた。

図5に知覚に対応した各音修飾刺激条件における平均反応時間を示した。反応時間は個人差の影響を排除するために、各被験者内でストリーム選択試行の無音条件におけるメジアン反応時間を基準として、標準化を行った。標準化された値を全被験者で平均した。図のエラーバーは±1標準誤差を示す。ストリーム選択試行では各音修飾刺激条件で無音条件と変わらなかったのに対して、バウンス選択試行では音の提示が一番早い条件が最も早く、提示タイミングが遅れていく毎に反応時間が延びた。無音条件とSOA 140ms条件では反応時間はほぼ同じだった。

標準化した平均反応時間について、音修飾刺激条件による反応時間の差が、知覚に伴って変化しているのかを統計的に分析した。被験者の反応は予め設定した要因計画に含まれないため、

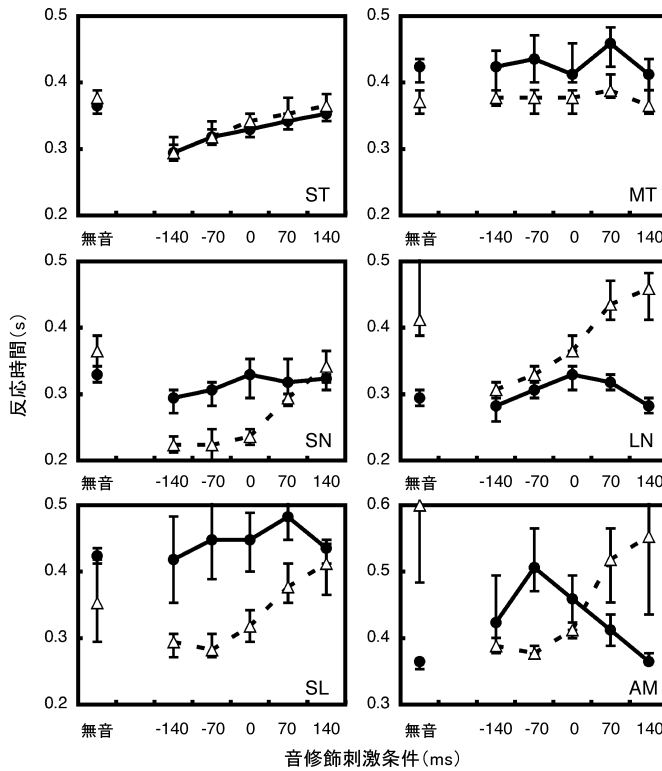


図4 実験1における各被験者の反応に対応した反応時間（メジアン）。黒丸はストリーム選択時、白三角はバウンス選択時の反応時間を示す。エラーバーは、ブートストラップ法により計算した95%信頼区間を示す。

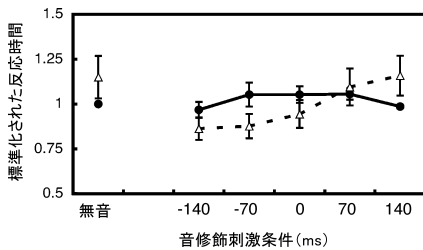


図5 実験1における反応毎の、標準化された反応時間の平均値。黒丸はストリーム選択時、白三角はバウンス選択時の反応時間を示す。エラーバーは、 ± 1 標準誤差を示す。

知覚反応 × 音修飾刺激条件の二要因ではなく、知覚反応毎に音修飾刺激条件についての一要因分散分析を行った。その結果、ストリーム反応試行では、主効果が得られなかったのに対して ($F_{(5,25)}=1.58, p=0.20$)、バウンス反応試行では音修飾刺激条件についての主効果が見られた ($F_{(5,25)}=9.81, p<0.001$)。また、バウンス選択試

行において、ライアン法による多重比較の結果、最も遅い SOA 140 ms 条件と SOA 0 ms 条件との間 ($p<0.01$)、SOA 140 ms 条件と SOA -70 ms、SOA -140 ms 条件との間 ($p<0.001$)、また、SOA 70 ms 条件と SOA -70 ms との間 ($p<0.01$)、SOA 70 ms 条件と SOA -140 ms 条件との間に有意な差があった ($p<0.001$)。また、無音条件と SOA -70 ms、SOA -140 ms との間 ($p<0.001$)、無音条件と SOA 0 ms の間 ($p<0.01$) にも有意な差が見られた。

実験の結果、音修飾刺激の提示タイミングによって、バウンス知覚の反応時間のみ変化することが示された。その反応時間の変化は、修飾刺激の提示タイミングが早いほど、反応時間が短くなる傾向が得られた。一定時間入力待ちモデルの予測では、SOA の違いによる反応時間の差は生じない。よって実験1の結果は、一定時間入力待ちモデルを支持するものではなかった。

3. 実験 2

実験 1 において、音がディスクの接触より先に提示される prediction 条件ではバウンス反応の反応時間は短く、音がディスクの接触より後に提示される postdiction 条件ではバウンス反応の反応時間は長くなる傾向が得られた。しかし、運動刺激と修飾刺激のモダリティが異なる実験 1 の結果は、postdiction 条件を含んでいなかった可能性がある。入力信号に対する潜時は聴覚野において視覚野よりも早くなることが知られており³¹⁾、この視聴覚間の潜時差により、音の入力がディスクの接触より未来の入力になっていなかった可能性があるからである。そこで、実験 2 では光刺激を修飾刺激として用い、運動刺激と修飾刺激のモダリティを揃え、潜時の違いを小さくした。光刺激は音刺激と同様にバウンス知覚頻度を上昇させることが知られている⁸⁾。

3.1 方法

実験 1 からの変更は、修飾刺激を音から光刺激に変更した点である。また、被験者として三名の男性と二名の女性が参加した。うち二名は著者 (ST, SN) であった。年齢は 28 歳から 45 歳で、どの被験者も正常な視力と聴力を有し、心理実験の経験があり、著者以外は実験の目的を知らされていない。刺激提示の背景刺激として、実験 1 で提示した長方形の輝度を 31.9 cd/m^2 、その周辺を 0.02 cd/m^2 に変更した。凝視点は画面中央から下に偏心度 2 deg に提示された。光修飾刺激はフラッシュを用い、背景の長方形の輝度を 35.4 ms (3 モニターフレーム) の間、 102 cd/m^2 に上昇させた。また、光修飾刺激がストリームバウンス知覚に影響する時間範囲が狭いため⁸⁾、ディスクの接触と光修飾刺激オンセットの SOA を $-70, -35, 0, 35, 70 \text{ ms}$ に変更した。マイナスは光修飾刺激が先行して提示されることを示す。

3.2 結果と考察

図 6 に各被験者のバウンス選択率および全被験者の平均バウンス選択率を示した。軌道角度

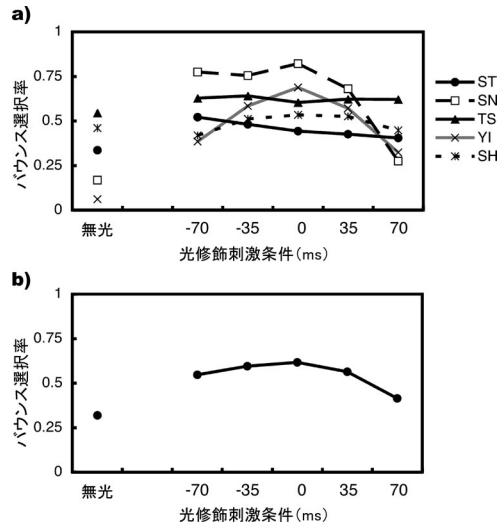


図 6 実験 2 における光修飾刺激条件ごとのバウンス選択率。a) 各被験者におけるデータ、b) 全被験者平均値。

条件間で同様の結果が得られたため、条件を統合して分析した。各被験者では光修飾刺激の効果量にばらつきが見られたが、全ての被験者で光修飾刺激によりバウンス選択率が 10% 以上増えた (図 6a)。全被験者の平均バウンス選択率では、光修飾刺激を提示しない条件に比べ、 $-70 \sim 35 \text{ ms}$ の範囲の SOA でバウンス選択率が増えた。SOA 0 ms 条件でバウンス知覚が最も多く、平均で 60% であった (図 6b)。

図 7 に各被験者の各光修飾刺激提示条件におけるメジアン反応時間について、知覚に対応した試行を別々に示した。実線はストリーム選択試行、点線はバウンス選択試行の反応時間を示す。図のエラーバーはブートストラップ法によって求めた 95% 信頼区間を示す。各被験者とも、バウンス選択試行、ストリーム選択試行共に反応時間は条件間で 50 ms から 100 ms の差に収まっていた。バウンス選択試行における光修飾刺激の提示 SOA による反応時間の変化は、各被験者で、変化は小さいものの光刺激提示タイミングが早いほど反応時間が早くなる傾向が得られた。ストリーム選択試行については、SOA の効果は一貫しては見られず、SOA 間で変化がないか、あるいはランダムにばらつく傾向を示

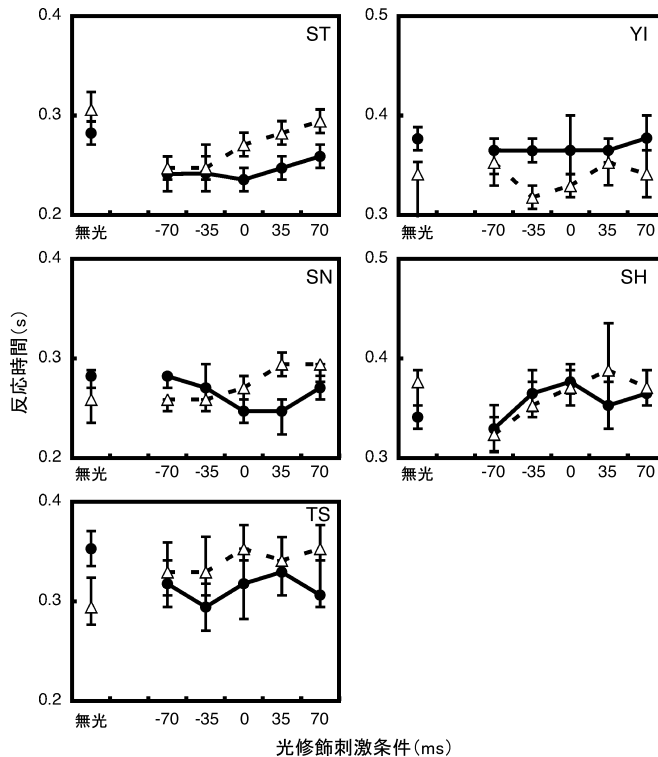


図7 実験2における各被験者の反応に対応した反応時間（メジアン）。黒丸はストリーム選択時，白三角はバウンス選択時の反応時間を示す。エラーバーは，ブートストラップ法により計算した95%信頼区間を示す。

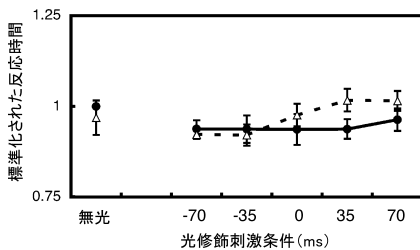


図8 実験2における反応毎の，標準化された反応時間の平均値。黒丸はストリーム選択時，白三角はバウンス選択時の反応時間を示す。エラーバーは， ± 1 標準誤差を示す。

した。

図8に各被験者で標準化した反応時間の平均を示す。標準化は，光修飾刺激を提示しなかった条件においてストリームと答えた試行のメジアン反応時間を基準に行った。標準化した平均反応時間に対して，光修飾刺激条件についての一要因の分散分析を，知覚反応毎に行った。そ

の結果，ストリーム反応試行では，有意な主効果が見られなかった ($F_{(5,20)}=1.36, p=0.28$)。バウンス反応試行では，有意な主効果が見られた ($F_{(5,20)}=3.04, p<0.05$)。しかし，バウンス反応試行に対してライアン法による下位検定の結果，条件間で有意な差は現れなかった。これは，光修飾刺激を提示しなかった条件においてバウンス反応試行数が少ないため，この条件において反応時間が個人間でばらついていたためであると考えられる。光修飾刺激を提示しなかった条件を除いて一要因の分散分析を行ったところ，主効果が見られ ($F_{(4,16)}=7.20, p<0.01$)，ライアン法による下位検定の結果，SOA 70ms条件での反応時間と，SOA -35ms, SOA -70ms条件での反応時間との間に有意な差が見られた ($p<0.01$)。また，SOA 35ms条件とSOA -35ms, SOA -70ms条件との間にも有意な差が見られた ($p<0.01$)。

実験の結果、反応時間に大きな差は見られなかったが、実験1と同様に、バウンス選択試行において光修飾刺激提示タイミングによって反応時間に差が生じる傾向が見られた。すなわち、修飾刺激が先に提示される prediction、後に提示される postdiction のいずれの状況に関わらず、修飾刺激を提示した条件間で、修飾刺激の提示タイミングが早いほど反応時間が短く、遅いほど反応時間が長くなる傾向が得られた。

4. 総合考察

ストリームバウンス刺激において、ディスク接触に対する知覚判断の反応時間について、修飾刺激の提示タイミングが影響するかどうかを検討した。実験の結果、被験者がストリームと知覚した試行では提示タイミングが影響しなかった一方、被験者がバウンスと答えた試行では、修飾刺激（音、光刺激）の提示タイミングが早いほど、反応時間が早くなった。この結果は、あるイベントの知覚処理時間は一定ではなく、イベントに関係する入力によって処理時間が変化することを示している。また、最終的に成立する知覚内容によって修飾刺激が影響する場合と影響しない場合があることが分かった。以上の結果は、一定時間入力待ちモデルによる、SOAの違いは反応時間の差を生じさせないという予測とは異なっている。

今回の実験では視覚刺激に対する知覚を判断し回答を行わせたが、その回答には正解を決めることが出来ないため、反応が知覚を反映しているのか定かではない。そのため、被験者が知覚を反映しない形で反応する方略、例えば修飾刺激に対して直接的に反応を行うといった方略をとっていたとしても、実験は成立する。バウンス選択の山型のチューニングカーブ（図3, 6）が、素早く回答することを求められていない先行研究^{6,8,32}）とほぼ一致することは、今回の被験者が教示に従った反応を行っていたことの傍証となるが、知覚を反映しない反応が部分的に含まれていた可能性を完全に否定することは難しい。

今回用いた刺激は、刺激解釈が競合する両義刺激であったため、知覚処理過程ではなく、判断の迷いによって反応時間が延びた結果、差が生まれたのではないかという指摘が考えられる。我々は別研究において、曖昧仮現運動の運動方向の知覚判断潜時を用いて、両義刺激の持つ知覚的曖昧性がほとんど反応時間を遅らせないことを確認している^{33,34}。このことは両義刺激知覚において判断の迷いが反応時間に影響しないことを示唆している。実際に、本研究で得られた結果においてもこの考えが当てはまるかどうかについて検討した。反応の曖昧度と反応時間の関係を見るために、バウンス選択率から反応の曖昧度を計算した。曖昧度は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)。

$$\text{曖昧度} = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p) \quad (1)$$

p はバウンス選択率を表す。バウンス、あるいはストリームが常に知覚される場合には曖昧度は0、知覚が曖昧となりバウンス選択率が50%となる場合には曖昧度は1となる。反応の曖昧度と各被験者のバウンス選択試行におけるメジアン反応時間を標準化した反応時間をプロットしたものを図9に示す。音修飾刺激を用いた実験1より得られたデータを黒、光修飾刺激を用いた実験2より得られたデータを白で示す。曖昧度が反応時間に影響するならば、プ

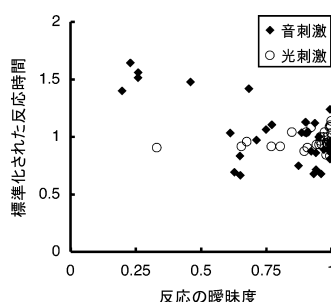


図9 反応の曖昧度と各被験者内で標準化したバウンス反応試行のメジアン反応時間。横軸：反応の曖昧度、縦軸：標準化されたメジアン反応時間。黒いシンボルは音刺激を用いた実験1におけるデータ、白いシンボルは光刺激を用いた実験2におけるデータを表す。

ロットされたデータは右肩上がりの分布を示す。しかし、得られた結果は実験 1, 2 共にそうはならなかった。よって、知覚の曖昧度は本研究においても反応時間にほとんど影響しなかったことが示唆される。

バウンス知覚時には反応時間が修飾刺激の入力タイミングにより変化するという今回の実験結果は、一定時間入力待ちモデルを棄却するものだった。一定時間入力待ちモデルでは、処理の開始時点が一定時間遅らせ、そこから開始される処理に要する時間も一定とした。ここに、修飾刺激がバウンス知覚の刺激強度を促進させ、また刺激処理時間がその刺激強度により決まるという拡張を加えれば、今回の結果を説明することができる。しかし、この拡張された一定時間入力待ちモデルは、修飾刺激によって処理時間が変化する過程がブラックボックスとして残されており、本質的な説明になっていない。以下に述べるモデルでは、処理時間の変化を説明できる、より包括的な説明を目指した。

今回の結果を包括的に説明することができるモデルとして考えられるのが、常時入力が可能な処理を行うモデルである。反応時間データを説明する際に一般的に用いられる diffusion モデルでは、時間毎にサンプリングされた感覚量が一つの連続量として蓄積されていく過程が存在し、感覚量が閾値に達した時知覚及び反応が形成される。この感覚証拠蓄積過程の大きな特徴は、刺激処理途中において新たな入力の持つ感覚証拠を、それまでの蓄積過程に反映させることができる、という点であり、このように感覚証拠の蓄積が常時行われる処理であれば、一定時間入力待ちモデルのように一定時間処理を遅らせる必要がない。本研究の、修飾刺激の提示が早いほど反応時間が早くなるという結果は、知覚潜時が可変であるということを示しており、この感覚証拠蓄積過程を利用することによって説明することが可能である。また、今回得られ

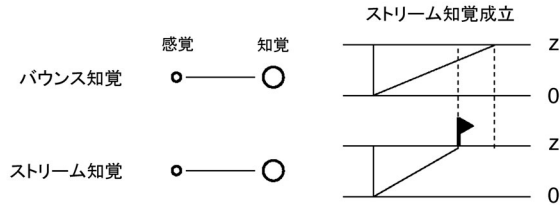
た結果は、ストリーム知覚時の反応時間に修飾刺激の影響が見られなかったため、一方の知覚潜時が促進された場合もう一方の知覚潜時は遅延するような、相互抑制を持った一般的な拮抗型の diffusion モデルではなく、相互抑制を仮定しない、複数ある知覚ユニット間での競争によって知覚が決定されるモデルがより妥当であると考えられる。本研究では、このようなモデルを独立レース diffusion モデルと呼ぶ。独立レースモデルについては類似のモデルが存在するが、それらは証拠量を離散的数値として蓄積を行う³⁵⁻³⁷⁾。本研究では証拠量を連続量として表す²⁷⁾。

図 10a は独立レース diffusion モデルの模式図と、修飾刺激がない場合の一試行における証拠蓄積軌道を示す。小円は感覚ユニット、大円は知覚ユニットを表し、感覚ユニットから知覚ユニットへと感覚証拠が送られる。各知覚ユニットにおいて感覚証拠が蓄積される。図の垂直の実線は接触イベント生起時点を示している。イベントの生起時点に初期値 0 から証拠蓄積過程が開始される。実際には知覚ユニットまでの信号伝達遅れが存在するが、入力待ちとの混同を避けるため、ここでは遅れを 0 として描いてある。図ではストリーム知覚の蓄積が早く閾値 z を超えたため、その時点でストリーム知覚が成立している。

図 10b に修飾刺激の入力タイミングの違いによる独立レース diffusion モデルによる予測を示した。左から、修飾刺激が接触イベントよりも早い場合、同時の場合、遅い場合を示す。斜め模様で示されるような時間経過で修飾刺激の影響が発現すると考える。右肩上がりの太い実線は証拠蓄積軌道を示す。確率的揺らぎは省略して描いてある。修飾効果が現れるとバウンス知覚の証拠蓄積が促進され、破線で示す修飾効果がないときの証拠蓄積軌道より傾きが急になる（脚注 2）。修飾刺激提示が早いほど、バウ

脚注 2：証拠蓄積過程における促進方法には閾値を下げるなど他の方法も考えられるが、いずれも効果は等しいので、ここでは証拠蓄積率の傾きを変化させる形の影響を考えている。また、修飾刺激の効果とバウンス知覚処理を一体として考えることにより、修飾刺激が現れた時点で知覚処理が始まっていると考えることが可能であるが、そうした場合もここで示したモデルと同様の振る舞いを見せるため、ここではそれらを分けて提示している。

a)



b)

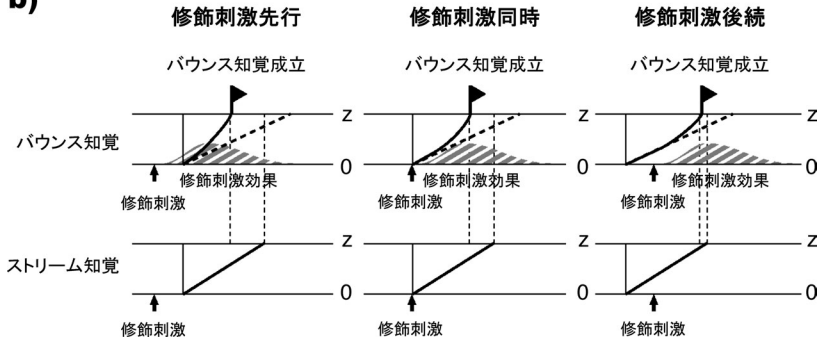


図 10 a) 独立レース diffusion モデルの模式図と修飾刺激がない条件における一試行の証拠蓄積軌道. b) 独立レース diffusion モデルから予測される証拠蓄積軌道の変化. 左から, 修飾刺激が先行したとき, 同時, 遅れたときの順序で予想を示す. 斜線は修飾刺激の効果を示す. 太い点線は修飾刺激が提示されないときの証拠蓄積軌道, 実線は修飾刺激により変化した証拠蓄積軌道, 黒矢印は修飾刺激提示時点, 旗印は知覚が成立した時点を示す.

ンス知覚は競争に勝ちやすくなり相対的に知覚率が増えるとともに反応時間が早くなる. 図に示した実線は平均的な軌道であり, 確率的揺らぎによって閾値に到達する時点は前後する. そのため, 平均的にはバウンス知覚のスピードが速くなった場合でもストリームが成立することもあり得る. バウンスが遅い場合にストリームが成り立ち, またストリーム知覚の証拠蓄積軌道には修飾刺激は影響しないので, ストリーム知覚の反応時間はほぼ影響を受けないことが予想される. このように, 独立レース diffusion モデルは, 今回得られた知覚の頻度および反応時間の結果を少なくとも定性的に説明することができる.

今回得られた実験結果は, 一定時間入力待ちモデルでは説明できず, 常時入力を受け付ける独立レース diffusion モデルによって包括的に説明できることを示唆している. 今後このモデルの妥当性を検討する必要があるが, その際, postdictive な入力によって知覚成立が遅れるか

どうかという点は興味深い. postdictive な入力によって知覚成立が遅れるという現象は, 独立レース diffusion モデルでは簡単には説明できないが, 拮抗型の diffusion モデルを用いれば, ストリームにいったん向かった証拠の蓄積軌道がバウンス側に戻ってくるといった説明により可能であると思われる. 本研究では, 光刺激を修飾刺激として用いた実験 2 において, 光を後に提示した条件において無光条件よりもバウンス知覚時の反応時間が遅れている傾向が見られた. ただし, 実験 2 における無光条件に対する反応時間の増加は統計的に有意ではなく, また実験 1 ではそもそもそのような傾向は見られないため, 本研究の結果は独立レース diffusion モデルを示唆している. この点に関しては今後さらなる検討が必要である.

5. まとめ

時間的に幅を持った内容に対して処理を行う知覚システムにおいて, 知覚処理は時間的にど

のように進むのか。先行研究ではイベントの生起から一定時間入力を受け付けた後に知覚処理が始まるとされていた。本研究ではこの説を検証するために、ストリームバウンス刺激に対する知覚判断時間が、修飾刺激の提示タイミングによって変化するかどうかを観察した。実験の結果、バウンス知覚が生じた時のみ、修飾刺激の提示タイミングに従って反応時間が変化した。この結果は、知覚処理の開始時点がイベント生起から一定時間後という先行研究の説とは一致せず、知覚毎に独立した刺激処理が常に行われるモデルを支持する。

引用文献

- 1) D. M. Eagleman, & T. J. Sejnowski: Motion integration and postdiction in visual awareness. *Science*, **287**, 2036–2038, 2000.
- 2) N. Cowan, & E. Greenspahn: Timed reactions to an object in apparent motion: evidence on Cartesian and non-Cartesian perceptual hypotheses. *Perception & Psychophysics*, **57**, 546–554, 1995.
- 3) C. L. Wiggs, & A. Martin: Properties and mechanisms of perceptual priming. *Current Opinion in Neurobiology*, **8**, 227–233, 1998.
- 4) B. G. Breitmeyer: Visual Masking: An Integrative Approach. Oxford University Press, New York, 1984.
- 5) R. Nijhawan: Motion extrapolation in catching. *Nature*, **370**, 256–257, 1994.
- 6) R. Sekuler, A. B. Sekuler, & R. Lau: Sound alters visual motion perception. *Nature*, **385**, 308, 1997.
- 7) W. Metzger: Beobachtungen über phänomenale Identität. *Psychologische Forschung*, **19**, 1–49, 1934.
- 8) K. Watanabe, & S. Shimojo: Attentional modulation in perception of visual motion events. *Perception*, **27**, 1041–1054, 1998.
- 9) K. Amano, N. Goda, S. Nishida, Y. Ejima, T. Takeda, & Y. Ohtani: Estimation of the timing of human visual perception from magnetoencephalography. *Journal of Neuroscience*, **26**, 3981–3991, 2006.
- 10) E. P. Cook, & J. H. Maunsell: Dynamics of neuronal responses in macaque MT and VIP during motion detection. *Nature Neuroscience*, **5**, 985–994, 2002.
- 11) H. R. Heekeren, S. Marrett, D. A. Ruff, P. A. Bandettini, & 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.
- 12) P. Jaskowski: Simple reaction time and perception of temporal order: dissociations and hypotheses. *Perceptual & Motor Skills*, **82**, 707–730, 1996.
- 13) B. Libet, E. W. Wright, Jr., B. Feinstein, & D. K. Pearl: Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience: a functional role for the somatosensory specific projection system in man. *Brain*, **102**, 193–224, 1979.
- 14) R. D. Luce: Response Times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization. Oxford University Press, New York, 1986.
- 15) M. G. Philiastides, R. Ratcliff, & P. Sajda: Neural representation of task difficulty and decision making during perceptual categorization: a timing diagram. *Journal of Neuroscience*, **26**, 8965–8975, 2006.
- 16) R. Ratcliff, & G. McKoon: The diffusion decision model: theory and data for two-choice decision tasks. *Neural Computation*, **20**, 873–922, 2008.
- 17) M. T. Schmolesky, Y. Wang, D. P. Hanes, K. G. Thompson, S. Leutgeb, J. D. Schall, et al.: Signal timing across the macaque visual system. *Journal of Neurophysiology*, **79**, 3272–3278, 1998.
- 18) K. Moutoussis, & S. Zeki: A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision. *Proceedings of The Royal Society B Biological Science*, **264**, 393–399, 1997.
- 19) D. C. Dennett, & M. Kinsbourne: Time and the Observer. *Behavioral and Brain Sciences*,

- 15, 183–247, 1992.
- 20) S. Nishida, & A. Johnston: Marker correspondence, not processing latency, determines temporal binding of visual attributes. *Current Biology*, **12**, 359–368, 2002.
- 21) S. Sternberg, & 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.
- 22) D. Pins, & 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) R. Schweickert, C. Dahn, & K. McGuigan: Intensity and number of alternatives in hue identification: Pieron's law and choice reaction time. *Perception & Psychophysics*, **44**, 383–389, 1988.
- 24) S. Sternberg: The discovery of processing stages: Extensions of Donder's method. *Acta Psychologica*, **30**, 276–315, 1969.
- 25) R. P. Rao, D. M. Eagleman, & T. J. Sejnowski: Optimal smoothing in visual motion perception. *Neural Computation*, **13**, 1243–1253, 2001.
- 26) R. Ratcliff: A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, **85**, 59–108, 1978.
- 27) R. Bogacz, E. Brown, J. Moehlis, P. Holmes, & 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.
- 28) D. H. Brainard: The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**, 433–436, 1997.
- 29) D. G. Pelli: The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**, 437–442, 1997.
- 30) B. I. Bertenthal, T. Banton, & A. Bradbury: Directional bias in the perception of translating patterns. *Perception*, **22**, 193–207, 1993.
- 31) A. J. King: Multisensory integration: strategies for synchronization. *Current Biology*, **15**, R339–R341, 2005.
- 32) W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino, & S. Nishida: Recalibration of audiovisual simultaneity. *Nature Neuroscience*, **7**, 773–778, 2004.
- 33) S. Takei, & S. Nishida: Perceptual Ambiguity Does Not Increase Perceptual Latency of Bistable Visual Stimuli. Paper presented at the Association for the Scientific Study of Consciousness, Taipei, 2008.
- 34) 竹井成和, 西田眞也: 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 (印刷中)
- 35) D. A. LaBerge: A recruitment theory of simple behavior. *Psychometrika*, **27**, 375–396, 1962.
- 36) 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.
- 37) D. Vickers: Evidence for an accumulator model of psychophysical discrimination. *Ergonomics*, **13**, 37–58, 1970.