

学位論文の要約

論文題目 顔の魅力に関する社会的報酬の予測誤差が顔の記憶に与える効果の基盤となる神経機構とその加齢変化

申請者名 三原 萌愛

学位論文の要約

報酬予測誤差 (RPE: reward prediction error)とは、予測された報酬と実際に得られた報酬のアウトカムの差分である。RPEの脳内での処理には、腹側線条体 (VS: ventral striatum)や中脳の黒質 (SN: substantia nigra)／腹側被蓋野 (VTA: ventral tegmental area)を含むドーパミン作動性の報酬関連領域 (RPE-Dopamineシステム)や、ノルアドレナリンが関与し、刺激の顕著性を処理する顕著性ネットワーク (saliency network)の一部である前部島皮質 (anterior insula)や前帯状皮質 (ACC: anterior cingulate cortex)を含む領域 (RPE-Saliencyシステム)がRPEの処理に関与することが報告されており、ヒトにおいてはその中でも特にVSが重要な役割を果たすことが示されている。また、先行する脳機能画像研究において、魅力的な顔のような顔に由来する社会的報酬のアウトカムやそれに対する期待が、顔の記憶を含むヒトのエピソード記憶に促進的な影響を与え、その脳内機構として報酬の処理に関連する領域とエピソード記憶の記銘の成功に関連する海馬との間の相互作用メカニズムが重要であることが明らかにされている (for review, see Tsukiura, 2012)。近年、金銭的報酬のRPEによってヒトのエピソード記憶が促進的な影響を受けることが報告されているが (for review, see Ergo et al., 2020; Pupillo & Bruckner, 2023; Rouhani et al., 2023), 顔に由来する社会的報酬のRPEが顔の記憶を含むヒトのエピソード記憶に与える効果とその基盤となる神経メカニズムについては、これまでにほとんど理解が進んでいない。また、金銭的報酬のRPEやエピソード記憶に関連した脳内での処理能力は加齢に伴って低下することが知られているが (Eppinger et al., 2013; Samanez-Larkin et al., 2014; for review, see Nyberg, 2017), 社会的報酬のRPEがエピソード記憶に与える効果とその基盤となる脳内機構が加齢に伴ってどのように変化するかについては、未だに検証されていない。本論文では、社会的報酬の1つである顔魅力に由来するRPEが、エピソード記憶の中でも特に顔の記憶に与える効果とその基盤となる神経メカニズム、およびこれらの加齢に伴う変化について、機能的磁気共鳴画像 (fMRI: functional magnetic resonance imaging)法を用いた2つの研究によって検証した。

第2章では、社会的報酬の1つである顔の魅力に由来するRPEが顔の記憶に与える影響とその脳内機構について、健康若年成人を対象としたfMRI研究によって検証した。fMRIスキャンを伴う記銘課題における各試行は、Prediction phaseとOutcome phaseから構成された。Prediction phaseでは、最初に顔の目以外の部分が白く遮蔽された1枚の顔写真が提示され、実験参加者はその顔の遮蔽部が外された場合に予想される主観的な魅力度を、8件法 (1: 全く魅力的でない-8: とても魅力的である)で判断するように求められた。後のOutcome phaseでは、Prediction phaseで提示された顔写真と同一人物の顔写真が白い遮蔽が外された状態で提示され、実験参加者はその顔の全体を見た際に感じた主観的な魅力度について、再度同じ8件法で判断するように求められた。各試行におけるRPEは、Outcome phaseにおける顔の魅力度の評価値からPrediction phaseにおける顔の魅力度の評価値を減じた差分値として定義された。この定義に

基づき、記銘時のすべての試行が、Outcome phaseにおける評価値がPrediction phaseにおける評価値よりも低かった（予測された魅力度 > 観察された魅力度）、すなわち負のRPEが発生したRPE-条件と、Outcome phaseにおける評価値がPrediction phaseにおける評価値よりも高かった（予測された魅力度 < 観察された魅力度）、すなわち正のRPEが発生したRPE+条件、Prediction phaseにおける評価値とOutcome phaseにおける評価値の間に差がなかった（予測された魅力度 = 観察された魅力度）、すなわちRPEが生じなかったRPE±条件の3つのRPE条件のいずれかに分類された。記銘課題の際には、実験参加者は後に顔の記憶がテストされることについては教示されなかった（偶発記銘）。記銘課題の直後に、実験参加者はMRIスキャナーの外で顔の再認課題を行った。実験の結果、行動データでは、顔魅力に由来する正のRPEが生じた顔の記憶は、RPEが生じなかった顔の記憶よりも有意に正確に再認された。fMRIデータでは、ヒトにおけるRPEの処理に重要なVSの単変量活動は、顔魅力に由来する社会的報酬の符号つきRPEの増加を反映して、負のRPEから正のRPEにかけて有意に線形に増加していることが認められた。また、MVPA (multivariate pattern analysis)の結果では、ドーパミン作動性のRPE関連領域の多変量賦活パターンによって、顔魅力に由来する社会的報酬のRPEの有無が有意に識別された。機能的結合性解析においては、RPEの処理に関連するVSやSN/VTAを含む領域と、記銘の成功に重要な海馬との間の有意な機能的結合は、顔の魅力に由来する正のRPEが生じた顔の記銘成功時に最も多く認められた。これらの結果から、顔魅力に由来する社会的報酬の正のRPEによって顔の記憶は促進され、その脳内機構としてRPEの情報を表象するドーパミン作動性のRPE関連領域と、記憶に関連する海馬との間の相互作用メカニズムが重要であること、またこの相互作用は顔魅力に由来する社会的報酬の正のRPEによって強化されることが示唆された。

第3章では、第2章で明らかにされた顔の魅力に由来する社会的報酬のRPEが顔の記憶に与える影響の基盤となる脳内機構の加齢による変化について、健常若年成人と健常高齢者を対象としたfMRI研究によって検証した。第3章の研究における記銘課題と想起課題は、第2章の研究と同様の手続きで実施された。実験の結果、行動データでは、健常若年成人と健常高齢者の両群で、顔魅力に由来する正のRPEが生じた顔の記憶が促進されることが示された。fMRIデータでは、RPE-Dopamineシステムに含まれる領域とRPE-Saliencyシステムに含まれる領域の単変量活動は、どちらの年齢群においても顔魅力に由来する社会的報酬の符号つきRPEの増加に伴って有意に線形に増加していた。また、MVPAの結果では、RPE-Dopamineシステムに含まれる領域における多変量賦活パターンによって、若年群では顔魅力に由来する社会的報酬のRPEの正負が識別されたが、高齢群ではいずれのRPE条件間も有意に識別されなかった。RPE-Saliencyシステムに含まれる領域のMVPAにおいては、若年群ではすべてのRPE条件間が有意に識別されたが、高齢群においてはRPE-条件とそれ以外のRPE条件が有意に識別された。機能的結合性解析においては、顔の記銘成功に関連して、若年群においては、RPE-Dopamineシステムに含まれるシード領域と記憶に関連する海馬の間にRPE+条件において有意な機能的結合が認められ、RPE-Saliencyシステムに含まれるシード領域と海馬の間にはすべてのRPE条件において有意な機能的結合が認められた。しかし、高齢群においては、RPE+条件においてのみ、RPE-DopamineシステムおよびRPE-Saliencyシステムに含まれるRPE関連シード領域と海馬の間の有意な機能的結合が認められた。これらの結果から、RPEの処理に関連する領域における顔魅力に由来する社会的報酬のRPEに関する神経表象は加齢によって異なる影響を受け、顔魅力に由来する社会的報酬のRPEに影響を受ける顔の記憶や、その基盤となるRPE関連領域と海馬との間の相互作用メカニズムが、正のRPEが生じた場合にのみ健常高齢者で保持されていることが示唆された。

これらの結果と過去の知見を合わせて、顔に由来する社会的報酬による顔の記憶の促進効果を媒介する脳内メカニズムについては、それぞれの顔に由来する社会的報酬の処理過程に関連する領域とエピソード

ード記憶の記銘の成功に重要な海馬との間の相互作用メカニズムが重要であることが示唆された。このような報酬によるエピソード記憶の促進には、ドーパミンやノルアドレナリンの海馬への直接投射によって誘発される記憶の後期長期増強 (LTP: long-term potentiation) が潜在的なメカニズムとして機能していることが、複数の研究から示唆されている (for review, see Lisman et al., 2011)。また、顔に由来する社会的報酬による顔や顔に関連した情報の記憶の促進効果の基盤となるもう1つの脳内メカニズムとして、顔に関連する情報を処理する顔のネットワーク (face network) に含まれる領域と海馬との相互作用が重要であることが示唆されている (Tsukiura & Cabeza, 2008, 2011a)。これらのことから、顔に由来する社会的報酬による顔の記憶の促進効果を媒介する脳内メカニズムには、それぞれの顔に由来する社会的報酬の処理過程に関与する領域と記銘の成功に重要な海馬との間の相互作用メカニズムをコアとして、顔の情報を処理する顔ネットワークと海馬との間の相互作用メカニズムを含む機能的ネットワークが関与していることが示唆された。また、高齢者において、顔に由来する社会的報酬のポジティブな要素に関する顔や顔に関連した記憶や、その基盤となる機能的ネットワークが保持されていることは、高齢者においてはネガティブな情動に対する抑制的な情動調節 (emotion regulation) が強まることや、認知制御に関連する領域による代償 (compensation) 的なメカニズムが機能することによる「ポジティブ効果 (positivity effect)」を反映している可能性がある。

文献

- Eppinger, B., Schuck, N. W., Nystrom, L. E., & Cohen, J. D., (2013). Reduced striatal responses to reward prediction errors in older compared with younger adults. *J Neurosci*, 33, 9905-9912.
- Ergo, K., De Loof, E., & Verguts, T., (2020). Reward prediction error and declarative memory. *Trends Cogn. Sci.*, 24, 388-397.
- Lisman, J., Grace, A. A., & Duzel, E., (2011). A neoHebbian framework for episodic memory; role of dopamine-dependent late LTP. *Trends Neurosci.*, 34, 536-547.
- Nyberg, L., (2017). Functional brain imaging of episodic memory decline in ageing. *J. Intern. Med.*, 281, 65-74.
- Pupillo, F., & Bruckner, R., (2023). Signed and unsigned effects of prediction error on memory: Is it a matter of choice? *Neurosci Biobehav Rev*, 153, 105371.
- Rouhani, N., Niv, Y., Frank, M. J., & Schwabe, L., (2023). Multiple routes to enhanced memory for emotionally relevant events. *Trends Cogn. Sci.*, 27, 867-882.
- Samanez-Larkin, G. R., Worthly, D. A., Mata, R., McClure, S. M., & Knutson, B., (2014). Adult age differences in frontostriatal representation of prediction error but not reward outcome. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, 14, 672-682.
- Tsukiura, T., (2012). Neural mechanisms underlying the effects of face-based affective signals on memory for faces: a tentative model. *Front. Integr. Neurosci.*, 6, 50.
- Tsukiura, T., & Cabeza, R., (2008). Orbitofrontal and hippocampal contributions to memory for face-name associations: the rewarding power of a smile. *Neuropsychologia*, 46, 2310-2319.
- Tsukiura, T., & Cabeza, R., (2011a). Remembering beauty: roles of orbitofrontal and hippocampal regions in successful memory encoding of attractive faces. *Neuroimage*, 54, 653-660.