

2 者間インタラクションにおける痛みに対する 生理反応の収束プロセス

村田藍子^{†1} 亀田達也^{†2} 渡邊克巳^{†1}

概要：誰かが痛みを受ける場面を観察することで、自分が痛みを感じたときと類似の神経活動や生理反応が生じることが知られている。こうした現象は情動伝染と呼ばれ、マウスやラットとも共通する原初的な反応であると考えられている。また、マウスにおいて、二個体が同時に痛みを受ける場面で、痛みに対する身体表出が相互の反応に影響を受けて増減することが示されている[1]ことから、情動伝染は双方向的に影響を与えるものであると考えられる。しかし、こうした双方向的な情動伝染を示す証拠は主に身体表出に基づくものであり、情動の直接的な指標である不随意的な生理反応がどのような影響を受けているのかについては十分に検討されてこなかった。本研究では、二人の参加者が同時に痛みを与えられた際の生理反応を計測することで、双方向的に情動伝染が生じるメカニズムを検討した。実験では、対面した二人の参加者の前腕部に、同時に湯で熱したアルミ棒を繰り返し提示し、刺激に対する自律神経系の生理反応として指尖容積脈波を計測した。二人にそれぞれ同強度の刺激を提示した条件では、刺激の強度に応じて脈波の反応が大きくなったのに対し、異なる強度の刺激を提示した条件では、実際の刺激強度に関わらず、高温刺激を受けた参加者と低温刺激を受けた参加者との間で脈波の反応に差が見られなかった。ここから、マウスで確認された双方向的な情動伝染が、人間でも不随意的な生理反応のレベルで生じることが明らかになった。また、前半の試行では二人の参加者の脈波の同期は確認されなかったが、後半の試行で二人の脈波が同期していたことから、相互作用を繰り返す中で次第に互いの反応から影響を受けあうようになるというプロセスが明らかになった。

キーワード：情動伝染，指尖容積脈波，2 者間インタラクション

Convergence of physiological responses for pain under face-to-face interaction

AIKO MURATA^{†1} TATSUYA KAMEDA^{†2}
KATSUMI WATANABE^{†1}

1. はじめに

「痛み」は刺激に対する生理的な反応の現れであり、個人の主観的体験であるが、認知神経科学研究において、他者の痛み表出を知覚することで、痛みに関わる神経回路が活動することが発見され、他者の「痛み」を共有する神経基盤を持つことが明らかになった。例えば、隣にいる恋人が電気ショックを受ける場面では自分が電気ショックを受けたときと共通の神経回路 (anterior insula, anterior cingulate cortex) が活動し[2]、誰かの手や足が痛みを受ける場面 (ドアに指を挟むなど) の写真を観察しただけでも、同様に自身が痛みを感じた際と同じ神経回路が活動することが示されてきた[3]。このような、他者の情動状態から影響を受ける現象は情動伝染と呼ばれ、共感や社会性の基盤であると考えられている[4]。

これらの研究では、「他者が痛みを感じる状態」を刺激とした際にそれに対する観察者の情動反応を計測するという一方向的なアプローチによって、情動伝染の受け手の側のプロセスについて検討されてきた。しかしながら、情動伝染のプロセスは双方向的な影響を生じさせる可能性があ

る。現実のコミュニケーション場面では、人々は互いの反応を参照できるため、他者の情動反応から影響を受ける「受け手」となると同時に他者の情動反応に影響を及ぼす「送り手」ともなるため、相互に影響を与え合う可能性が想定される。つまり、他者の反応から影響を受けたことによって生じる自身の反応が、表情・しぐさなどを通して表出され、再び他者の反応に影響を及ぼすという双方向的なダイナミクスが生じると考えられる。

また、Gallotti と Frith は、社会において相互作用する個人同士は、“we-mode”と呼ばれる集合的な認知モードにおいて、互いの心的状態を共有していると論じており、この種の認知特性は個人内の認知能力 (心の理論など) のみを対象にした研究では測りきれないと主張している[5]。こうした着想に基づき、我々は、苦痛情動の共有についても個人間の相互作用場面における反応を対象とすることで初めて捉えられる現象があるのではないかと考えた。

しかしながら、社会心理学のパニックに関わる古典的理論[6]や人類学のフィールドにおけるデモンストレーション[7]はあるものの、情動反応の双方向的な影響がどのようなメカニズムで生じ、どのような効果を持ちうるかについては、実証的な検討が十分になされていない。数少ない例外としては、マウスを用いた実験により、苦痛情動の共有が個体間に双方向的な影響を与えることを検証した研究が挙げられる。Langford らは、二個体のマウスに痛みを誘発

^{†1} 早稲田大学
Waseda University
^{†2} 東京大学
The University of Tokyo

する刺激を与え、その際の痛みに関わる行動（身悶えなど）を計測し、二個体同時に痛み刺激を提示した場合では、二個体のうち一個体が痛みを与えられた場合や、一個体が単独で痛みを与えられた場合に比べて、痛みに伴う行動が増加することを示している[1]。また一連の実験により、この痛みの増幅は二個体の間に不透明な板を置くことで視覚情報を遮断すると生じなくなることも示されている。さらに、二個体に異なる強度の痛み刺激を与えた場合には、相手が表出する痛みの強弱に合わせて痛み表出が増減したことから、痛みに伴う情動が二個体の間で双方向的に影響を与え合っており、その結果として各個体の痛み刺激に対する反応が変容することが示唆された。この知見は、従来の一方向的なアプローチでは捉えきれなかった興味深いものであるが、こうした双方向的な影響が人間においてどのように生じるかは十分に検討されていない。また、Langford ら[7]は痛みに伴って生じる「行動」のみを指標としており、痛み刺激に対する情動反応は計測していないため、彼らの主張する通り、痛み表出の増幅がリアルタイムで生じる情動伝染によって生み出されるものであるという直接的な証拠も得られていない。そこで、本研究では人間を対象として、参加者の自律神経系の生理反応を測定することにより、二者間の情動反応の連動が不随意に生じる生理反応のレベルでも生じるのかについて検討した。

実験1では、向かい合った二者に熱刺激を同時に繰り返し提示し、刺激に対する情動反応を自律神経系の生理反応（指尖容積脈波、Blood volume pulse: BVP）により計測した。その際、Langford ら[1]の視覚情報を遮断するパラダイムを参考に、互いの反応を観察できるように向かい合って座る条件と互いの反応を観察できないように二者の間にパネルを設置する条件を設定することで、相互作用が二者の情動反応の連動を引き起こすかを検討した。

実験2では、Langford ら[1]の情動伝染の双方向的な影響を検討したパラダイムを参考に、向かい合った二者が異なる強度の痛み刺激を受けた場合に、互いが感じる痛みの強弱に合わせて、痛みに伴う情動が双方向的な影響を与え合うかどうかを検討した。具体的には、ペアの一方には、比較的高温の刺激を提示し、もう一方には比較的低温の刺激を提示する条件と、ペアの二人に同時に同じ強度の刺激を提示する条件を設定し、前者において、自律神経系の生理反応が互いの反応から影響を受けるかを検討した。

2. 実験1

2.1 方法

実験参加者

北海道大学の学生80名（女性36名、男性44名）が参加し、実験終了後に参加謝礼として2000円を受け取った。

条件

参加者が互いの反応を参照できるように向かい合って座るFace-to-Face条件と、互いの反応が参照できないよう、相手の上半身が隠れるようなパネルを設置したPanel条件を設定した。初対面の同性の参加者2名がリクルートされ、Face-to-Face条件かPanel条件のどちらか一方の条件にランダムに配置された。

刺激

対面する参加者に熱刺激を二人同時に繰り返し提示した。熱刺激は、2本のアルミ製の棒を湯の入ったビーカーに入れ、アルコールランプで加熱し、湯が一定の温度に達した時点でその中に入れていたアルミ棒を取り出し、二人の右手前腕の内側に同時に一秒未満提示した。したがって、向かい合った二人の参加者には同じ強度の熱刺激が提示された。痛みの有無に関わらずアルミ棒の提示自体に驚くことで参加者の生理的喚起水準が高まる可能性も考えられたため、初めにアルミ棒を当てられることへの馴化を目的とし、「最初に人肌程度の温度を提示します」と教示した上で40℃の湯から取り出したアルミ棒を1度提示した。その後はアルコールランプを使い湯を温め、2試行おきに5℃ずつ温度を上げて、合計12試行を行った。なお、参加者は具体的な温度については知らされないまま課題を行ったが、アルコールランプで徐々に加熱される様子を視認できたため、刺激が上昇系列であることと、相手と同じ強度の刺激を受けていることは認識できる状況設定であった。Panel条件でもFace-to-Face条件と同様に、どちらの参加者もアルコールランプで湯が徐々に加熱される様子を確認することはできたため、相手の様子は参照できないという点以外は条件間で共通していた。

実験手続き

二人の参加者は個室に案内され、向かい合って着席した。まず、実験状況に慣れてもらうため、二人で会話をするセッションが設けられた。実験者が提示した簡単なテーマに沿って、約2分間二人で話すよう指示された（e.g., 「この前の週末は何をしていましたか？」）。その後、参加者の左手に生理計測用の電極を装着した後に課題を開始した。なお、課題中に参加者同士が会話することはなかった。Panel条件では、この際に参加者同士が互いの様子を確認できないようにするために、二人の間に小さなパネルを設置した。湯が一定温度に達すると、アルミ棒を湯から取り出し、5秒間のカウントダウン（“5, 4, 3, …”）の後に二人の参加者の右腕前腕部の内側に熱刺激を同時に提示した。

痛みに対する反応の評価

指尖容積脈波（BVP）を計測することで、熱刺激に対する自律神経系の生理反応を計測した。課題中、BIOPAC社

製の脈拍測定トランスデューサ (TSD200) を参加者の左手中指の第一関節部分に装着し, BIOPAC 社製 MP150 システムを用いて BVP を計測した. BVP のローデータは 2000Hz のサンプリングレートで 0.05Hz の High Pass フィルタをかけて抽出され, BIOPAC 社のソフトウェアである acqknowledge により記録された. その後, Matlab (MathWorks 社) により波動の振幅値を 100Hz のサンプリングレートで算出し, 分析に用いた.

データ解析

BVP の計測不備のため, 6 ペアのデータを解析から除外した (計 34 ペアとなる). 本研究では, 二者に同時に同じ強度の刺激を提示しているため, もし二者の情動反応が正に相関したとしても, 刺激強度によって誘発された疑似相関である可能性を排除できない. したがって, 対面した二者の間の相互作用によって生じた情動反応の相関を評価するためには, 純粋に刺激によって誘発される相関と比較した際により強い相関を示していることを確認する必要がある. そこで, 実際のペアになった相手以外のすべての参加者同士で総当たりの組み合わせ (仮想ペア) を生成し, 比較対象とした. 仮想ペアの場合, 経験した刺激強度は同一であったが, ペアの相手との間に相互作用はなかったため, 二者間の情動反応の相関は純粋に刺激のみによって誘発されたものであると解釈できる. そのため, もし実際のペアにおける情動反応の相関が仮想ペアのものに比べて高ければ, 相互作用によって二者の情動反応が連動したと解釈することができる. 二人の参加者の刺激に対する情動反応の相関を検討するために, 試行ごとに, 刺激提示開始 11 秒前から刺激提示 8 秒後までの計 19 秒間を生理反応の応答範囲として設定した. 波動の振幅値は 100Hz のサンプリングレートで算出されたため, 1 試行ごとの振幅値は 1900 のデータポイントをもつ時系列データであった. 試行ごとに, ペアの二者間の振幅値の時系列変動が類似しているかを検討するため, 実際のペア及び仮想ペアの振幅値の相関係数を算出し (=12 個の相関係数 / 1 ペア), 解析に用いた.

2.2 結果

まず, Face-to-Face 条件 (17 ペア) および Panel 条件 (17 ペア) において, 実際のペアにおける二者の情動反応の相関が仮想ペアに比べて高いかどうかを検討するため, BVP 振幅値の相関係数の確率分布について比較を行った. 実際のペアと仮想ペア (実際のペアでない総当たりの組み合わせ) のサンプル数が極端に異なっていたため, コルモゴロフ・スミルノフ検定を用いた. その結果, 互いの反応が観察不可能な Panel 条件では, 実際のペアと仮想ペアの相関係数の分布の間に有意な違いは見られなかった ($D = 0.050$, $p = .38$, 片側検定). それに対し, 互いの反応が観察可能な Face-to-Face 条件では, 実際のペアと仮想ペアの相関係数

の分布が有意に異なっており ($D = 0.121$, $p = .003$, 片側検定), 実際のペアの方が二者の BVP の相関が高いことが示唆された (see Figure 1). ここから, 対面状況において, 互いの反応を観察し, 参照することにより, 情動反応が連動するという現象が確認された.

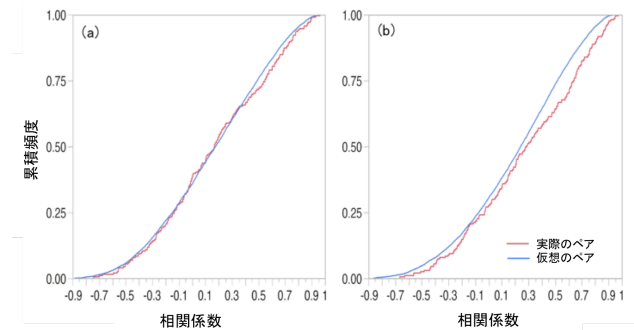


Figure 1 (a) Panel 条件および (b) Face-to-Face 条件におけるペアの BVP の相関係数の累積頻度

2.3 考察

実験 1 により, 二者が互いの様子を観察できる Face-to-Face 条件では実際のペアの情動反応は仮想ペアに比べて高い相関を示したが, 互いの様子が確認できない Panel 条件ではこうした効果は見られないことがわかった. つまり, 二者が互いの様子を観察することで, 刺激に対する情動反応の連動が生じるという現象が確認された. この結果は, ヒトでも, マウスの知見[1]と同様に, 相互作用による痛みの連動が生じることを示唆しており, さらに, それが不随意の生理反応のレベルで生じることを示している.

この知見は, 痛みに対する生理反応が相互作用により似通ることを示唆しているが, ペアのうちの両方が互いの反応に合わせた結果なのか (双方向的な調整が生じたのか), それともペアのうちの一方が他方に合わせた結果なのか (一方向的な調整が生じたのか) を判別することは困難である. また, 試行ごとに刺激の強度を変えていたため, 相互作用を繰り返すことが (試行を経ることが) 生理反応の連動を引き起こしたのか, 1 回の相互作用でも生理反応の連動が生じるのかを検討することが困難な手続きであった. そこで実験 2 では, Langford ら[1]の情動伝染の双方向的な影響を検討したパラダイムを参考に, 向かい合った二者が異なる強度の痛み刺激を受けた場合と, 同強度の刺激を受けた場合とを比較することによって, 互いが感じる痛みの強弱に合わせて, 痛みに伴う情動が双方向的な影響を与え合うかどうかを検討した. また, 各試行で提示する刺激強度を一定にし, 試行の前半と後半におけるペアの生理反応の連動の仕方を検討することにより, 相互作用を繰り返すことが生理反応の連動に寄与するかについて調べた.

3. 実験 2

3.1 方法

実験参加者

東京近郊の学生 78 名 (女性 26 名, 男性 52 名) が参加し, 実験終了後に参加謝礼として 2000 円を受け取った。

条件・刺激

同じ強度の刺激を同時に提示される Same 条件 (21 ペア, 女性 8 ペア) と, 異なる強度の刺激を同時に提示される Different 条件 (18 ペア, 女性 5 ペア) を設定した。Same 条件では, 実験 1 の Face-to-Face 条件と同様に, 参加者には互いの反応を参照できるように向かい合って座ってもらい, 同じ温度の刺激をペアの二人に同時に, 繰り返し提示した。刺激は 2 種類あり, 参加者はペアごとに, 50°C を提示されるペアか 60°C を提示されるペアのどちらかにランダムに割り振られた。Different 条件では, ペアの一方向の参加者が 50°C を提示され, もう一方の参加者が 60°C を提示された。

実験 1 同様, 対面する参加者に熱刺激を二人同時に繰り返し提示した。各参加者には同じ温度 (50°C/60°C) の刺激を繰り返し提示したが, 刺激が同一強度であることが参加者に分かってしまうと, 刺激に対する馴化により生理的喚起水準が低減してしまう恐れがあったため, アルコールランプの代わりに IH クッキングヒーターを使い, ビーカーの代わりに不透明のホーロー鍋を使うことで, 熱刺激の温度を参加者から推測されにくいように工夫した。さらに, 提示される刺激の強度に対する予期を形成させないために, IH クッキングヒーターを参加者から加熱メニューの表示が見えないように設置した上で操作し, 毎試行, 加水しながら温度調整を行った。試行と試行の間は目安として 30 秒以上となるようにした。時間の経過と温度の確認をした後, 二人の参加者の前腕の内側に同時に熱刺激を一秒未満提示した。なお, 痛みの有無に関わらずアルミ棒の提示自体に驚くことで参加者の生理的喚起水準が高まる可能性が考えられたため, 最初に馴化を目的としてアルミ棒を一度提示し, その後 6 試行を行った。

実験手続き

二人の参加者は実験室中央のスペースに設置された机をはさみ, 向かい合って着席した。実験 1 と同様, 実験状況に慣れてもらうため, 二人で会話をするセッションが設けられた。実験者が提示した簡単なテーマに沿って, 約 2 分間二人で話すよう指示された (e.g., 「この前の週末は何をしていましたか?」)。その後, 参加者の左手に BVP を計測するための電極を装着し, 課題の準備を行った。刺激は実験 1 同様, 5 秒間のカウントダウン (“5, 4, 3, ...”) の後に二人同時に提示した。

データ解析

刺激提示時の BVP の計測方法, および振幅値の算出方法は実験 1 と同様である。刺激に対してどの程度生理的喚起水準が高まったかを調べるための指標として, BVP 収縮率を用いた。BVP 収縮率 {1-反応時 (刺激提示後から 8 秒間) の最小振幅値/ ベースライン時 BVP (刺激提示 11 秒前から 6 秒前まで) の平均振幅値} は自律神経系のストレス反応の指標であり, 収縮率が高いほど生理的喚起水準が高いことが知られている。

3.2 結果

条件ごとの各刺激に対する平均 BVP 収縮率を Figure 2 に示す。分散分析の結果, 条件と刺激の交互作用効果が有意であり ($F_{1,76} = 6.36, p = .01$), Same 条件では, 50°C の刺激に対する生理反応に比べて 60°C の刺激に対する生理反応が大きかった ($t_{40} = 2.58, p < .05$, Bonferroni 調整後) のに対し, Different 条件では, 実際に提示された刺激の強度に差があったのにも関わらず, 生理反応には差が見られなかった ($t_{33} = -1.10, n.s.$, Bonferroni 調整後)。また, Different 条件における 50°C の刺激に対する生理反応は Same 条件のものに比べて相対的に大きかったのに対し, 60°C の刺激に対する生理反応は Same 条件のものに比べて相対的に小さかったことから, 二人が異なる強度の刺激を提示される Different 条件では, 互いの反応から双方向的に影響を受けたことが示唆された。

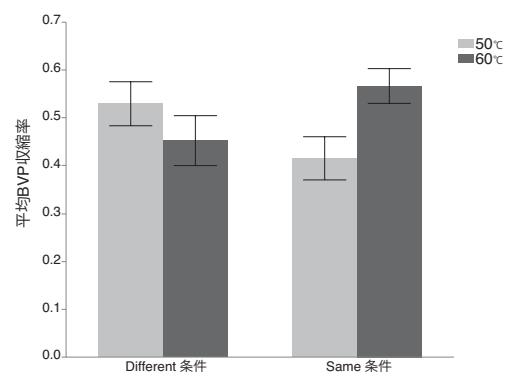


Figure 2 条件ごとの熱刺激 (50°C/60°C) に対する平均 BVP 収縮率

加えて, 実験 1 同様, 二者の情動反応の連動が生じたのか, またその連動は相互作用を繰り返すことによって強まったのかを検討するために, Same 条件のペアについて, 課題の前半 (1-3 試行) におけるペアの BVP の相関と, 後半 (4-6 試行) におけるペアの BVP の相関を調べた。ペアの BVP 値の相関係数 (前半・後半各 3 データ / 1 ペア) について, 実際のペアと仮想ペア (実験 1 と同様, 実際のペア以外のすべての組み合わせから作成) の間の相関係数の確率分布の比較を行った (see Figure 3)。コルモゴロフ・ス

ミルノフ検定の結果、50℃を提示されたペアでは、前半では実際のペアと仮想ペアの間で相関係数の分布に有意な差異が見られなかったのに対し ($D = 0.201, p = .15$, 片側検定), 後半では実際のペアの方が仮想ペアに比べて有意に相関が高かった ($D = 0.320, p = .01$, 片側検定). 60℃を提示されたペアでも同様の傾向が見られ、前半では実際のペアと仮想ペアの間で相関係数の分布に差が見られなかったのに対し ($D = 0.101, p = .67$, 片側検定), 後半では実際のペアの方が仮想ペアに比べて相関が高い傾向があった ($D = 0.259, p = .07$, 片側検定). ここから、対面するペアの生理反応の相関は、相互作用の回数を経ることで、より生じやすくなるものであると解釈できる。

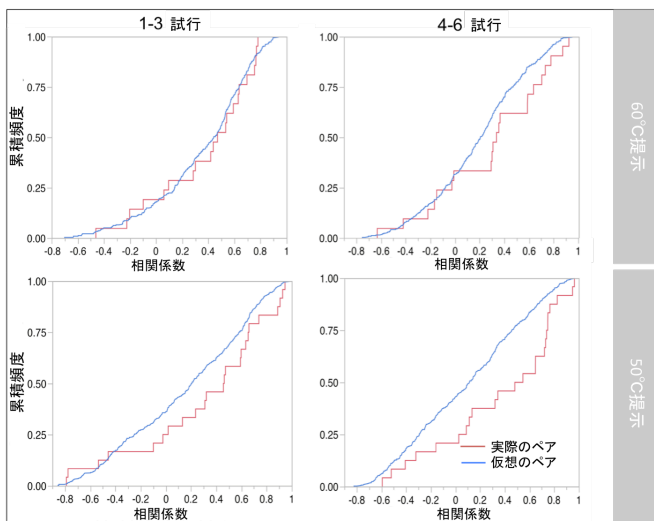


Figure 3 Same 条件の 50℃提示ペアと 60℃提示ペアの前半試行 (1-3 trial)・後半試行 (4-6 trial) における BVP の相関係数の累積頻度

4. 総合考察

本研究の結果から、対面状況において、人々は互いの反応を参照することにより、情動反応が次第に似通ってくるという現象が確認された。実験 1 において、二者が互いの様子を観察できる条件では実際のペアの情動反応は仮想ペアに比べて高い相関を示したが、互いの様子が確認できない条件ではこうした効果は見られなかった。また、実験 2 において、相手が自分とは異なる刺激を提示された場合 (かつ、同一刺激を提示されたと思っている場合) に、相手の反応に合わせて自分の反応を変化させることが示唆された。

したがって、Langford ら[1]によるマウスの知見と同様に、二者が互いの様子を視覚により参照することで、刺激に対する情動反応の類似性が高まることが示された。また、興味深いことに、実験 2 により、こうした情動反応の相関は後半の試行になるにつれて強まる傾向があることがわかつ

た。このことは、情動反応がさまざま無条件に個人間で連動するわけではなく、互いの刺激に対する反応の参照を繰り返す中で次第に似通っていく、謂わば、「情動反応の収束」が生じたことを示唆している。総合すると、本研究で確認された、相互作用場面において二者間の情動反応が連動する現象の背景には、人々が相手の情動反応についてなんらかの視認可能なシグナルを (おそらく非意識的に) 拾い合い、そのシグナルに基づいて自分自身の刺激に対する情動反応を相手の反応に合わせる形で調整するといったダイナミクスが働いていると考えられるかも知れない。しかもこれらの調整は不随意の自律神経系の生理反応のレベルで生じることが示された。しかし、人々が実際にどのようなシグナルを用いて相互に調整しているかは、今回の実験からは明らかにされていないため、今後の検討課題である。また、このような痛みに対する情動反応の連動を生じさせやすい環境要因や条件についても、慎重に特定していくことが望まれる。

本研究において、全般的に人間においてもマウスと類似した知見が得られたことから、苦痛の情動反応の連動は、群居性の哺乳類が共通に直面する適応課題を解いている可能性が高いと考えられるかも知れない。しかし、この現象の機能的側面についてはまだ謎のままである。伝統的な儀式の中には、禊や火渡りなど、集団で同時に苦痛を伴う経験を行うことがあり、近年人類学者を中心として、苦痛を共有することのもつ役割に注目が集まっている。実際に、自他間で苦痛を共有することにより、他者との間の絆が深まるように感じ、協力率が高まることも示されている[8]。このように苦痛の共有が集団生活における絆形成を促進するという可能性も考えられるかも知れない。今後、本研究や Langford らによる研究[1]で確認された、情動伝染に伴って苦痛に対する感受性が変化する現象がもつ役割については、さらなる検討が望まれる。

参考文献

- [1] Langford, D. J., Crager, S. E., Shehzad, Z., Smith, S. B., Sotocinal, S. G., Levenstadt, J. S., ... and Mogil, J. S.. Social modulation of pain as evidence for empathy in mice. *Science*. 2006, vol. 312, no. 5782, p.1967-1970.
- [2] Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., and Frith, C. D.. Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*. 2004, vol. 303, no. 5661, p. 1157-1162.
- [3] Jackson, P. L., Meltzoff, A. N., and Decety, J.. How do we perceive the pain of others? A window into the neural processes involved in empathy. *Neuroimage*. 2005, vol. 24, no. 3, p. 771-779.
- [4] de Waal, F. B.. Putting the altruism back into altruism: the evolution of empathy. *Annual Review of Psychology*. 2008, vol. 59, p. 279-300.
- [5] Gallotti, M., and Frith, C. D.. Social cognition in the we-mode. *Trends in cognitive sciences*. 2013, vol. 17, no. 4, p. 160-165.
- [6] Schultz, D. P.. Theories of panic behavior: A review. *The Journal of social psychology*. 1965, vol. 66, no. 1, p. 31-40.

- [7] Konvalinka, I., Xygalatas, D., Bulbulia, J., Schjødt, U., Jegindø, E. M., Wallot, S., Ordend, G. V., and Roepstorff, A.. Synchronized arousal between performers and related spectators in a fire-walking ritual. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011, vol. 108, no. 20, p.8514-8519.
- [8] Bastian, B., Jetten, J., and Ferris, L. J.. Pain as social glue shared pain increases cooperation. *Psychological science*. 2014, vol. 25, no. 11, p. 2079-2085.