

# トロッコ問題を対象とした脳機能計測結果の 検討と自動運転への示唆に関する研究

北爪 皓<sup>1</sup>・室町 泰徳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系  
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)  
E-mail: kitazume.h.aa@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系  
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)  
E-mail: muromachi.y.aa@m.titech.ac.jp

本研究では、心理学等において長年議論が続けられているトロッコ問題を対象とした脳機能計測実験を実施し、その結果から自動運転のコントロールに対する安全面の示唆を与えることを目的としている。自動運転車の大量普及時においては、MITのモラルマシンにおける問題意識に示されるように、トロッコ問題に代表される犠牲者の選択に関わる問題が生じる可能性がある。この問題は、人間の道徳面からの検討を要する問題でもある。本研究では、まず、トロッコ問題を対象とした脳機能計測の先行研究の一部をレビューした。また、東京工業大学男子学生20人を対象として脳機能計測を行った結果を示したうえで、先行研究結果との相違点、一致点を検討した。トロッコ問題と歩道橋問題に対する回答は先行研究と同様な傾向であったが、脳機能計測結果には相違点も見られた。最後に、計測結果が日本における自動運転車の大量普及時における安全面でのコントロールに与える示唆を検討した。

**Key Words :** *Trolley Dilemma, fMRI, Autonomous Driving, Safety*

## 1. はじめに

Christensen et al.<sup>1)</sup>によれば、心理学等におけるモラルジレンマとしてのトロッコ問題の初期の検討は、Foot<sup>2)</sup>やThomson<sup>3)</sup>に見られる。トロッコ問題 (Trolley Dilemma) とは、いくつかの種類があるものの、Greene et al.<sup>4)</sup>に従えば、「ロンは、暴走して線路の分岐点へと近づいているトロッコを運転しています。分岐点の左の線路の先では、5人の工夫が作業をしています。右の線路の先では、1人の工夫が作業をしています。ロンが、もし何もしなければ、トロッコは左の線路を進み、5人の工夫が死にます。5人の工夫の命を守るただ一つの方法は、運転台のスイッチを押し、トロッコを右の線路に進ませることです。そうすると、1人の工夫が死にます。ロンは、5人の工夫の命を守るために、スイッチを押ししました。ロンの行動は正しいと思いますか？」といった究極の状況における意思決定問題を意味している。これと比較する上で、歩道橋問題 (Footbridge Dilemma)、「トロッコが線路を暴走して、作業中の5人の工夫

に向かって進んでいます。トロッコが今のままのコースを進むと、5人の工夫はトロッコにぶつかって死にます。ジョンは、線路にかかる歩道橋の上、進んでくるトロッコと5人の工夫の間にいます。歩道橋の上のジョンの隣には、たまたま非常に大きな体の見知らぬ男がいます。5人の工夫の命を守るただ一つの方法は、この見知らぬ男を押しして歩道橋から線路上に突き落とし、その体でトロッコを止めることです。ジョンがそうすれば、見知らぬ男は死にますが、5人の工夫の死は避けられます。ジョンは、5人の工夫の命を守るために、大きな体の男を押しして線路上に突き落としました。ジョンの行動は正しいと思いますか？」も示されている。

トロッコ問題と歩道橋問題の背景には、心理学における功利主義 (utilitarianism) に対する批判がある。いずれの問題も、犠牲者の数は同じであるが、トロッコ問題におけるロンの行動を支持する人の割合に比べて、歩道橋問題のジョンの行動を支持する人の割合は低いということが実証的に示されている。すなわち、功利主義のみでは、必ずしも意思決定問

題を説明できない状況を想定し得るということになる。このような意思決定問題をモラルジレンマと呼ぶ場合が多くなっている。

2000年前後から、脳機能計測技術、特にfunctional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) 技術の進展により、トロッコ問題と歩道橋問題の意思決定に関わる脳部位を特定し、功利主義に代わるモラルジレンマに対する新たな考え方を導き出そうとする試みが成されている。トロッコ問題と歩道橋問題を主な視覚刺激文としたGreene et al.による初期の研究<sup>4)</sup>では、後者の方が前頭前野背外側部(ぜんとうぜんやはいがいそくぶ)、前頭極(ぜんとうきょく)等、感情と関連する脳部位がより賦活したと報告されている。また、Christensen et al.<sup>5)</sup>は、モラルジレンマに関する既往の研究を整理し、今後、fMRI実験結果の相互比較を可能とする上で必要となる実験条件等に関して示唆を与えている。

近年では、MITのモラルマシンにおける問題意識に示されるように<sup>6)</sup>、自動運転のコントロールに対する安全面の示唆を与えることを目的として、トロッコ問題に関する検討が進められている。自動運転車の大量普及時においては、自由度の高い自動運転車群を究極の状況下で、どのようにコントロールするか、あるいはどのようにコントロールすることが社会的に許容されるか、といった問題に対して、トロッコ問題が1つの重要な視点を提供するものと考えられている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、まず、本研究で実施したトロッコ問題と歩道橋問題に関するfMRI実験の概要を説明したのち、両問題に対する単純集計結果とfMRI実験の集団分析結果に基づく賦活脳部位を示す。最後に、日本における自動運転車の大量普及時における安全面でのコントロールに与える示唆を検討する

## 2. fMRI実験の概要

東京工業大学 fMRI 実験室の fMRI スキャナーを用いて、fMRI 実験を行った。本装置は非常に強力な磁石となっており、周囲に磁場 (3 テスラ) を発生させる。被験者はこの装置の中に仰向けの状態で入り、スクリーンに映った質問形式の文章を専用のゴーグルを介して読む。被験者は質問に対し、レスポンスパッドの YES か NO のどちらかのボタンを押すことで返答し、その際の脳の働きの撮影する。撮影した画像は、隣室にあるコンピューターで管理される。被験者はすべて 20~25 歳、右利きの日本人男性 20 人を対象とした。

実験当日における被験者のコンディション管理については、被験者に実験前と実験後に体調等を尋ねる質問票に回答してもらっており、被験者 20 名全員の体調が実験前後で良好であったことを確認している。実験中においては、被験者は fMRI スキャナー中に約 1 時間入っていることになる。被験者の回答の質の向上を図るために、実験に入る前に例題に回答して慣れてもらう他、実験中の 4 回の区切りにおいて体調の確認と休憩を行った。また、被験者には実験途中でも被験者に不利になることなく、実験を中止できることを周知しているが、今回の実験では実験の中止は生じなかった。

また、眠気や関心の低下により被験者が呈示文章を読まずに回答するケースも想定できるが、眠気に関しては、実験中の 4 回の区切りにおいて被験者の体調を確認する目的から話しかけをしており、ある程度は防いでいるものと考えられる。また、関心の低下に関しては、二者択一の回答結果がある程度バラついていることから、実験結果に大きな影響を与えるほどには生じていないと判断した。

なお、本研究は、東京工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会 (A16130「社会的ジレンマ状況における行動意識に関する研究」承認番号第 2016124 号) (旧疫学研究等倫理審査委員会 (A14078) 承認番号第 2014060 号) の承認を得ており、被験者に対するインフォームド・コンセント、情報の管理と匿名化等は委員会の規定に従って実施している。

実験被験者は、東京工業大学構内における合法駐輪者・違法駐輪者の中から募集した。全体で集団分析を実施可能とする 20 人に協力を募った。内訳は合法駐輪者 10 名違法駐輪者 10 名となっている。募集場所は大学食堂横の合法駐輪場所とその脇の違法駐輪場所とし、被験者がいずれの駐輪場所に駐輪したかを確認した後、協力を要請した。合法駐輪場所は昼休み時間帯を中心に学生や職員が集中して混雑するものの、当該場所から歩いて 1~2 分のところにも空いている代替的な合法駐輪場所が存在することが周知されている。したがって、違法駐輪者は募集当日、常習的にせよ非常習的にせよ何らかの理由で「非協力的行動」である違法駐輪を選択したことが観測された被験者である、と言える。一方、募集当日、「協力的行動」である合法駐輪を選択したことが観測された被験者の中には、別の日に違法駐輪を選択している可能性があり、常に合法駐輪を選択する被験者として想定することは難しい。しかし、被験者に対して一般的な自転車撤去の経験を質問票により尋ねたところ、合法駐輪者 10 名中 9 名、違法駐輪者 9 名中 2 名が「経験なし」と回答していることから、

ある程度「非協力行動」選択被験者と「協力行動」選択被験者の分類はできていると考えられる。

実験結果の解析には、専用ソフトウェア SPM8 を用いた。解析手法の詳細に関しては、先行研究と同様である<sup>9)</sup>。また、fMRI 実験は以下のような設定で行った。

- ・パルス系列（または撮像シーケンス）… EPI 法
- ・エコータイム (echo time; TE) … 30 ms
- ・繰り返し時間(repetition time; TR) … 2000 ms
- ・フリップアングル (flip angle; FA) … 78°
- ・観測視野 (field of view; FOV) … 20 × 20 cm
- ・スライス厚 (slice thickness) … 4mm
- ・スライスギャップ(slice gap) … 1mm
- ・獲得行列 (Acquisition Matrix) … 64 × 64
- ・加算回数 (number of excitation; NEX) … 1.00
- ・使用した fMRI 機器 … 3.0-T General Electric Signa scanner

解剖学的撮像に関しては、TR = 7.284 ms、TE = 2.892 ms、FA = 11 degrees、Band Width = 31.25 kHz、voxel size = 1 mm、-20° から -30° の傾斜でスライスして撮像するように設定している。

次に、視覚刺激であるが、実験で用いる視覚刺激文は全 40 アイテムあり、これらは(o)一般(a)道徳的問題(b)非人身的道徳ジレンマ(c)人身的道徳ジレンマの 4 条件に分類され、1 条件あたり 10 アイテムとなる。(o)(b)(c)はそれぞれ Greene et al.の既往研究<sup>4)</sup>の Non-moral、Moral-impersonal、Moral-personal に相当する。また、(o)(b)(c)において本研究で用いる文章の多くは、Greene et al.の研究<sup>4)</sup>等において用いられた文章を和訳したものである。既往研究では、道徳意識を喚起しないジレンマに関する文章を Non-moral とし、道徳意識を喚起するジレンマの内、以下の条件に全て該当するものを Moral-personal、一つでも該当しないものを Moral-impersonal としている。トロッコ問題は後者、歩道橋問題は前者に分類される。以下が、Moral-personal と Moral-impersonal を区別する条件である。

- ・深刻な身体的損傷が発生する
- ・その損傷が特定の人物に降りかかる
- ・その損傷自体は人々への脅威を逸らす事からは生じない（損傷自体が人々への脅威を逸らす手段である）

また、(a)については「道徳的問題」という項目を設定し新たに文章を作成した。内容は、社会的ジレンマの文脈において、「非協力行動」を行った時に発生する「私的利益」と「公共的損失」に関するものとなっている。なお、本研究では、直接的に道徳的問題を分析することはない。

表-1 視覚刺激文の分類

(o)一般	タイトル	人命	先行研究	当事・非当事	対象
①	カブの収穫	○	○	当事	個人
②	頭痛薬	○	○	当事	個人
③	クッキー	○	○	当事	個人
④	パソコン	○	○	当事	個人
⑤	車宝くじ	○	○	当事	個人
⑥	卒業単位	○	○	当事	個人
⑦	ビデオデッキ	○	○	当事	個人
⑧	就職	○	○	当事	個人
⑨	シャワー	○	○	当事	個人
⑩	調査	○	○	当事	個人
(a)道徳的問題		人命	先行研究	当事・非当事	対象
①	列の割り込み	○	×	当事	社会
②	過度な車利用	○	×	当事	社会
③	違法駐車	○	×	当事	社会
④	過度なクーラー利用	○	×	当事	社会
⑤	違法駐輪	○	×	当事	社会
⑥	制限速度の遵守	○	×	当事	社会
⑦	鉄道と徒歩の選択	○	×	当事	社会
⑧	運転手法による燃費の改善	○	×	当事	社会
⑨	過度な車利用2	○	×	当事	社会
⑩	車と徒歩の選択	○	×	当事	社会
(b)非人身的道徳ジレンマ		人命	先行研究	当事・非当事	対象
①	ワクチンの奨励の有無	×	○	非当事	社会
②	飛行機の墜落	×	○	当事	社会
③	換気スイッチ	×	○	非当事	個人
④	トロッコ	×	○	非当事	個人
⑤	環境汚染に関する法案の採択	×	○	非当事	社会
⑥	潜水艦内の酸素供給配分	×	△	当事	個人
⑦	持ち主不明の財布の盗み	○	○	当事	個人
⑧	悪評判のネット書き込み	○	×	当事	社会
⑨	スピードボートの無断拝借	△	○	非当事	社会
⑩	人命救助のための彫刻の破壊	△	×	非当事	個人
(c)人身的道徳ジレンマ		人命	先行研究	当事・非当事	対象
①	歩道橋	×	○	非当事	個人
②	病院までの経路の選択	×	○	当事	社会
③	潜水艦内の酸素供給配分	×	○	当事	個人
④	換気システムの破壊	×	△	非当事	個人
⑤	船上火災	×	○	当事	社会
⑥	腎臓の摘出	△	○	非当事	個人
⑦	ワクチンと毒薬の注射	△	○	非当事	社会
⑧	HIV	○	○	非当事	社会
⑨	脳折	△	○	非当事	社会
⑩	道端での怪我人救助	△	○	当事	個人

表-1 に実験で使用した全視覚刺激文の分類を示す。「人命」は○が両方の選択肢が人命に関わらないもの、△が一方の選択肢が人命に関わるもの、×が両方の選択肢が人命に関わるものを表している。「先行研究」は、○が Greene et al.<sup>4)</sup>や Koenigs et al.<sup>7)</sup>の先行研究をほぼ全て和訳したもの、△は一部を参考にしたもの、×は新たに文章を作成したものを表している。「当事・非当事」は、「三人称」の人物が、行為の選択によって自らが何らかの影響を受けるか否かを表す。「対象」は、行為が与える影響が個人的なレベルに留まるか、社会的なレベルに及ぶものかを表している。

文章呈示方法については、各文章は、段落ごとに「背景」「選択」「行動」の3つに分かれており、順に呈示される。「行動」画面が表示されている間に被験者には質問に対して回答してもらう。文章の呈示が終わると、画面上には「+」のマークが表示され、被験者にはそれを何も考えないで見てもらう。以上を1試行とし、これを40回繰り返す。呈示はランダムに(o)(a)(b)(c)を選び、10回の試行毎に休憩を挟む。

図-1に、トロッコ問題、歩道橋問題を以外の(b)非人身的道徳ジレンマ(c)人身的道徳ジレンマ(o)一般の視覚刺激文の例を一つずつ示す。



## (b) 非人身的道徳ジレンマの文章例

## &lt;背景&gt;

ジェフは、病院の夜間警備員です。隣の建物の事故で、病院の換気システムから猛毒の煙が病院へ入ってきています。ある病室には 3 人の患者がおり、別の病室には 1 人の患者がいます。もし、何もしなければ、煙は 3 人の患者がいる病室に充満し、3 人の患者は死にます。

## &lt;選択&gt;

3 人の患者の死を避けるただ一つの方法は、換気システムのボタンを押して、煙を 3 人の患者がいる病室に行かないようにすることです。そうすると煙は 1 人の患者の病室に充満し、その 1 人の患者が死にます。

## &lt;行動&gt;

ジェフは、3 人の患者の死を避けるために、換気システムのボタンを押しました。  
ジェフの行動は正しいと思いますか？  
正しいと思ったら人差し指のボタンを、正しくないと思ったら中指のボタンを、15 秒以内に押してください。

## (c) 人身的道徳ジレンマの文章例

## &lt;背景&gt;

ロンは、病院の夜間警備員をしており、今病院の屋上にいます。ロンの隣には、たまたま非常に大きな体の見知らぬ男がいます。隣の建物で事故があり、病院の換気システムから猛毒の煙が病院へ入ってきています。病院の病室には 3 人の患者がおり、もし、何もしなければ、煙は 3 人の患者がいる病室に充満し、3 人の患者は死にます。

## &lt;選択&gt;

3 人の患者の死を避けるただ一つの方法は、この見知らぬ男を押して屋上から病院の換気システムの上に突き落とし、その体で換気システムを破壊して止めることです。ロンがそうすれば、見知らぬ男は死にますが、3 人の患者の死は避けられます。

## &lt;行動&gt;

ロンは、3 人の患者の死を避けるために、見知らぬ男を押して屋上から病院の換気システムの上に突き落としました。  
ロンの行動は正しいと思いますか？  
正しいと思ったら人差し指のボタンを、正しくないと思ったら中指のボタンを、15 秒以内に押してください。

## (o) 一般の文章例

## &lt;背景&gt;

ジョンは、農場で働いており、トラクターに乗ってカブの収穫をしに行くところです。ジョンは、トラクターの運転中、左右の道に分かれる分岐点にさしかかりました。

## &lt;選択&gt;

ジョンがトラクターを操作して右の道に進めば、20 トンのカブを収穫できます。左の道に進めば、10 トンのカブを収穫できます。何もしなければ、トラクターは自動的に左の道に進んでいきます。

## &lt;行動&gt;

ジョンは、10 トンではなく 20 トンのカブを収穫するために、トラクターを操作して右の道に進みました。  
ジョンの行動は正しいと思いますか？  
正しいと思ったら人差し指のボタンを、正しくないと思ったら中指のボタンを、15 秒以内に押してください。

図-1 (b) 非人身的道徳ジレンマ(c) 人身的道徳ジレンマ(o)一般の文章例

## 3. 実験結果

まず、(b) 非人身的道徳ジレンマと(c) 人身的道徳ジレンマ両問題に対する回答のYes/No単純集計結果を図-2に示す。図-2に示されているように、単純集計結果において、総じて合法駐輪者と違法駐輪者の相違は認められなかった。(b) 非人身的道徳ジレンマに分類されるトロッコ問題(b4)と(c) 人身的道徳ジレンマに分類される歩道橋問題(c1)に関しては、前者の方がYesの割合が高く、先行研究と同様な結果が得られている。また、同様な問題として、図-1に示した視覚刺激文(b3)と(c4)に関しても、前者においてYesの割合が高くなっている。

しかしながら、(b) 非人身的道徳ジレンマに分類される視覚刺激文の中で、(b5)、(b7)、(b8)のようにYesの割合が低くなっているものや、(c) 人身的道徳ジレンマに分類される視覚刺激文の中で、(c2)、(c3)、(c5)、(c7)、(c8)、(c9)のようにYesの割合が高くなっているものもある。従って、非人身的道徳ジレンマと人身的道徳ジレンマの分類にも立ち返って、モラルジレンマの分類について再検討を行う必要があるものと考えられる。

表-2に、fMRI実験の集団分析結果に基づく賦活脳部位を示す。なお、ベースは(o)一般となっている。

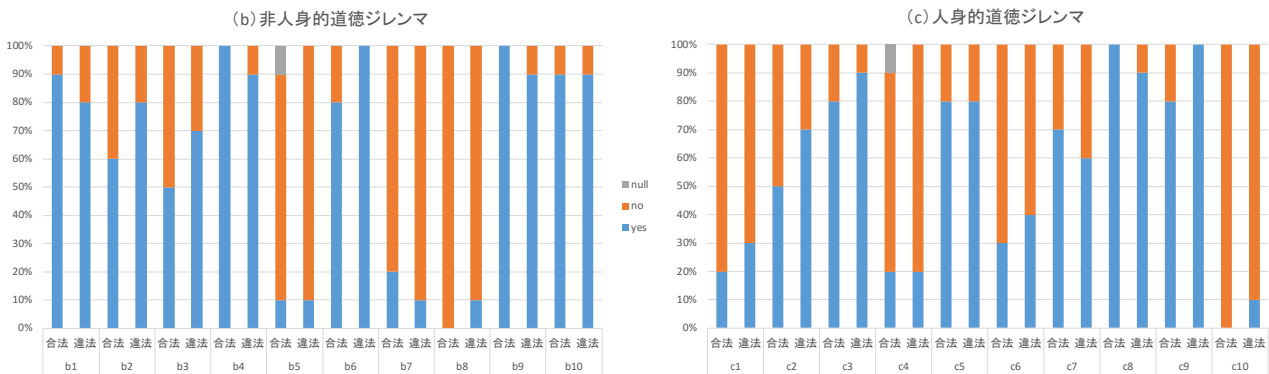


図-2 (b) 非人身的道徳ジレンマと(c) 人身的道徳ジレンマに対する Yes/No 回答分布

表-2 (b) 非人身的道徳ジレンマと(c) 人身的道徳ジレンマに関する集団分析結果 (1%有意)

	楔前部	側頭極	前部帯状回	中部帯状回	後部帯状回	中側頭回	島皮質前部	上前頭回	中前頭回	下前頭回	外側眼窩回	後眼窩回	尾状核	被殻	海馬	海馬傍回
a-o	2.89	-	4.17	4.02	3.31	-	3.93	-	3.87	2.55	-	-	-	2.91	-	4.05
b-o	3.27	2.69	5.98	5.96	4.17	4.09	3.89	4.06	3.15	2.56	-	3.81	-	-	-	3.01
c-o	3.59	3.4	4.77	3.38	4.65	2.98	3.88	3.63	3.36	2.73	-	-	2.98	2.68	2.93	2.72

今回の分析結果では、b-oとc-oの間において先行研究で指摘されるような脳部位の賦活の相違は明確ではなかった。b-oにおいてより賦活が認められた部位としては、前部帯状回、中部帯状回、中側頭回、後眼窩回があげられる。c-oにおいてより賦活が認められた部位としては、側頭極、尾状核、被殻、海馬があげられる。総じて、人身的道徳ジレンマでは対象に直接干渉するため、非人身的道徳ジレンマと比較して、他者による評価を含む広い意味での報酬に関する部位の反応傾向があった。

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では、自動運転のコントロールに対する安全面の示唆を与えることを目的とし、心理学等において長年議論が続けられているトロッコ問題と歩道橋問題を対象としたfMRI実験を実施した。

東京工業大学男子学生20人を対象とした実験結果から、トロッコ問題と歩道橋問題に対する回答は先行研究と同様な傾向、すなわち、前者を支持する割合が高いのに対して、後者を支持する割合は低かった。少なくともトロッコ問題において犠牲者数を少なくするようにコントロールすることに対する支持があることは、自動運転のコントロールに対して功利主義的な考え方を取り入れられる場面もあることを示唆している。

一方、fMRI実験結果には先行研究との相違点も見られた。また、人身的道徳ジレンマでは非人身的道徳ジレンマと比較して、他者による評価を含む広い意味での報酬に関する部位の反応傾向があった。今後は、人身的道徳問題と非人身的道徳問題の分類も

含めて、再検討する必要があるであろう。

**謝辞** 本研究を進めるに際して、東京工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会より、実験計画等に関して多大な支援を受けました。特に、赤間啓之准教授（東京工業大学生命理工学院生命理工学系）には、実験の実施、データ分析、およびその結果の解釈に関して貴重な助言をいただきました。ここに謹んで謝意を表します。また、本研究は科学研究費基盤研究（A）「健康に配慮した交通行動誘発のための学際的研究」（研究課題26249073）の補助を得ています。

#### 参考文献

- 1) Christensen, J.F. and Gomila, A., Moral dilemmas in cognitive neuroscience of moral decision-making: A principal review, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, pp.1249-1264, 2012.
- 2) Foot, P., The problem of abortion and the doctrine of the double effect, In: *Reprinted in Virtues and Vices and Other Essays in Moral Philosophy*. Blackwell, pp.19-32, 1978.
- 3) Thomson, J.J., Killing, letting die, and the trolley problem, *The Monist* 59, pp.204-217, 1976.
- 4) Greene, J.D., Sommerville, R.B., Nystrom, L.E., Darley, J.M., Cohen, J.D., An fMRI investigation of emotional engagement in moral judgment, *Science* 293 (5537), pp.2105-2108, 2001.
- 5) MIT, <http://moralmachine.mit.edu/>, 2019年10月3日アクセス
- 6) 市井健吾・室町泰徳、脳機能計測データを利用した道徳意識と行動との関係性に関する研究、土木学会論文集D3（土木計画学）、Vol.73, pp.I\_1251-I\_1258、2017
- 7) Koenigs, M., Young, L., Adolphs, R., Tranel, D., Cushman,

F., Hauser, M. and Damasio, A.: Damage to the prefrontal cortex increases utilitarian moral judgements, Nature, Vol. 446, No.7138, 2007.

(2019.10.04受付)

## SAFETY IMPLICATIONS FOR AUTONOMOUS VEHICLE CONTROL FROM THE FMRI EXPERIMENT OF TROLLEY DILEMMA

Hikaru KITAZUME and Yasunori MUROMACHI

The purpose of this study is to conduct a fMRI experiment for the trolley dilemma problem, which has been discussed for many years in psychology, and to give safety implications for the control of autonomous driving. At the time of mass deployment of autonomous vehicles, problems related to the selection of victims represented by the trolley dilemma problem may occur, as indicated by the awareness of problems in MIT moral machines. This is a problem that requires human moral considerations. In this study, we first reviewed some of the previous studies on fMRI experiments targeting the problem. In addition, we showed the results of the fMRI experiment for 20 male students from Tokyo Institute of Technology, and examined differences and agreements with previous research results. Responses to the trolley and footbridge problems were similar to those in previous studies, but there were also differences in the results of the fMRI experiment. Finally, we examined the safety implications for traffic control when mass-marketing autonomous vehicles in Japan.