

2023年度 CHAIN教育プログラム 第2回説明会 模擬講義
2023年4月10日(月) 12:45-13:45

脳科学を人文科学の問題 に役立てる

北海道大学

人間知・脳・AI研究教育センター

特任准教授 吉田 正俊



HOKKAIDO UNIVERSITY



Masatoshi Yoshida (吉田 正俊)



1996-2003 東京大学医学部・生理学研究所 (プレドク)
「長期記憶についての神経科学 (ニホンザル)」

2003 学位取得：博士(医学)

2003-2019 生理学研究所 (助教)
「意識、注意についての神経科学
(ニホンザル、マーモセット、ヒト)」

(2010年 南カリフォルニア大学工学部 訪問研究者)

2020- 北海道大学 (特任准教授)
「意識の解明に向けた学際的研究プロジェクト
(マーモセット、ヒト)」

講義開始前の注意事項

- 本講義では動物実験による知見を紹介します。神経科学を理解する上で動物実験の結果は不可欠であるという立場です。
- 不快感を起こしうる画像は講義スライドには含めないようにしてありますが、もし気になる画像がある場合には(リアペ等で)ご指摘ください。

今回の講義の概要

神経科学(基礎脳科学):

「心的状態および行動」と「脳」の関係を明らかにする

応用脳科学:

脳科学の知見を他領域の問題を解決するために活用する

本講義では

まず神経科学の概要を説明したうえで

応用脳科学の事例として

1) 脳を測る 2) 脳を読む 3) 脳をつなげる

について紹介します。

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

1. 神経科学

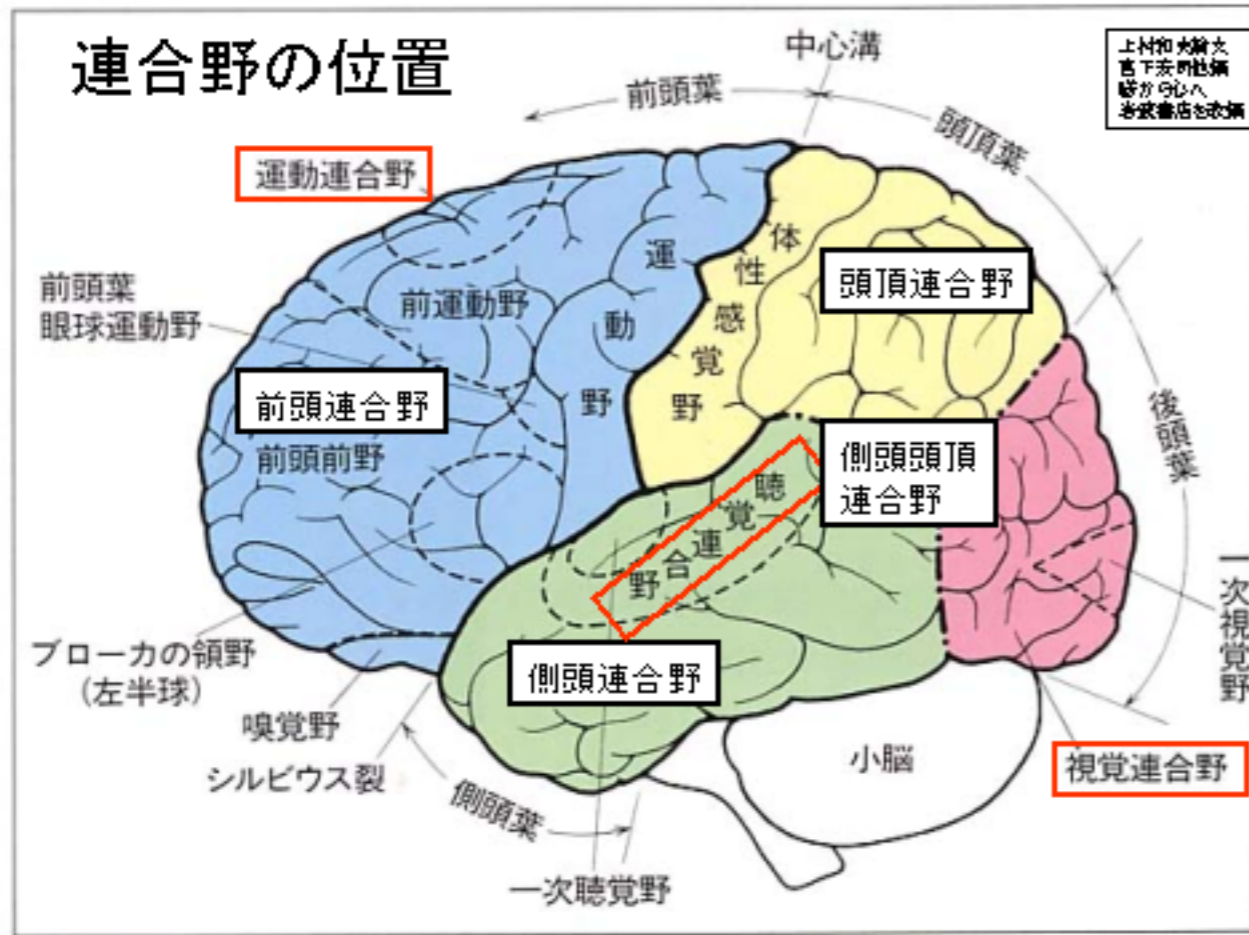
- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

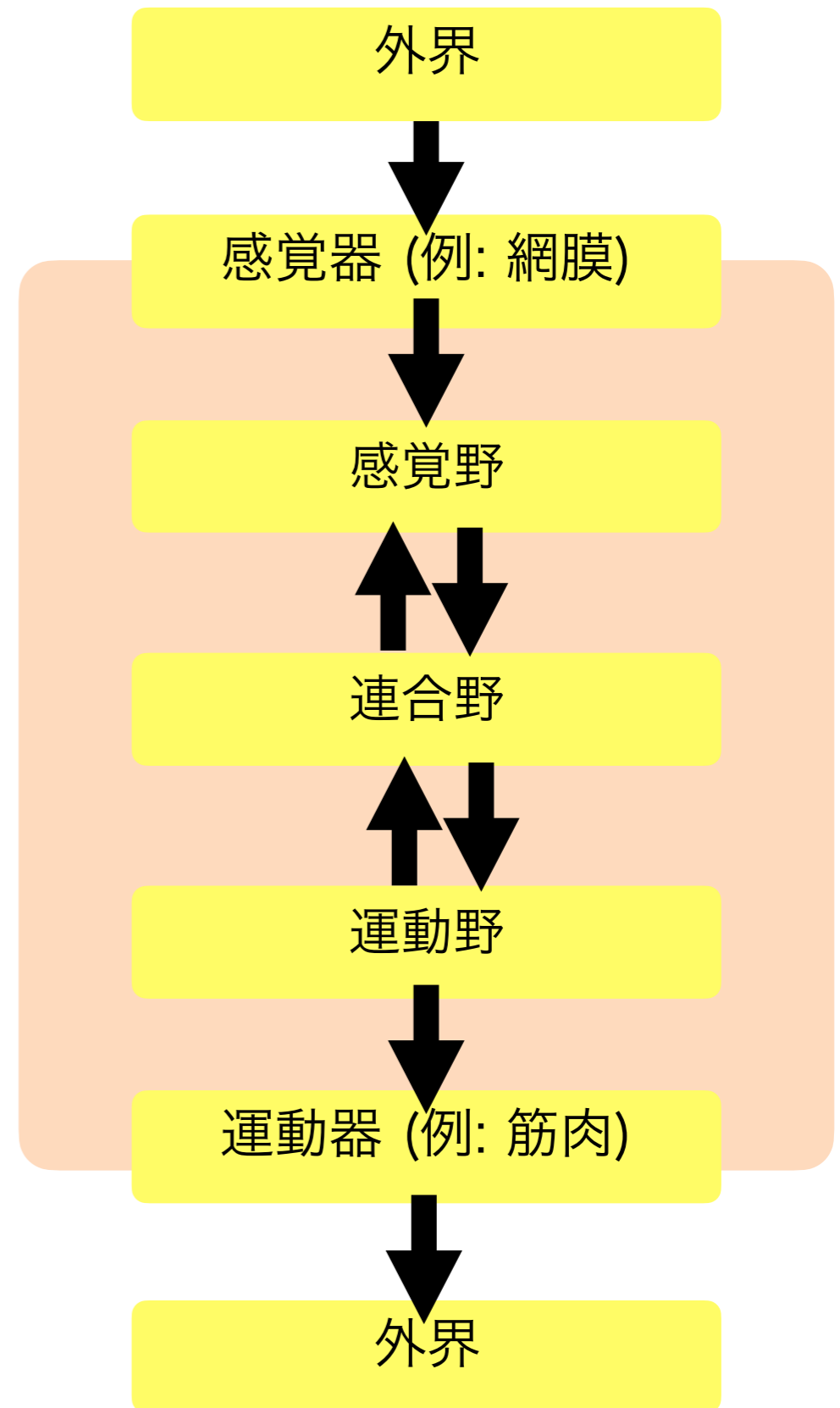
神経科学の目的: 「心的状態+行動」と脳を知りたい



http://gc.sfc.keio.ac.jp/class/2004_14453/slides/12/index_13.html

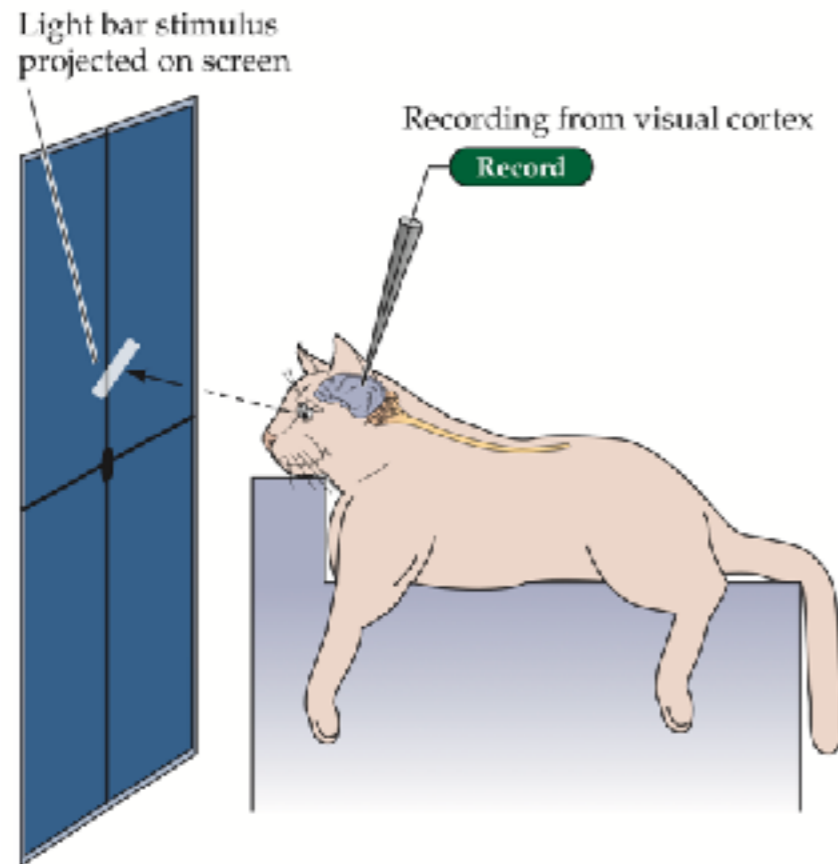
神経科学の基本方針:

- 1) 測る: 環境を操作して、
脳活動を計測
- 2) 操作する: 脳を操作して、
心的状態や行動を計測



視覚刺激(縦棒)に反応する神経細胞

実験セットアップ



記録データの例



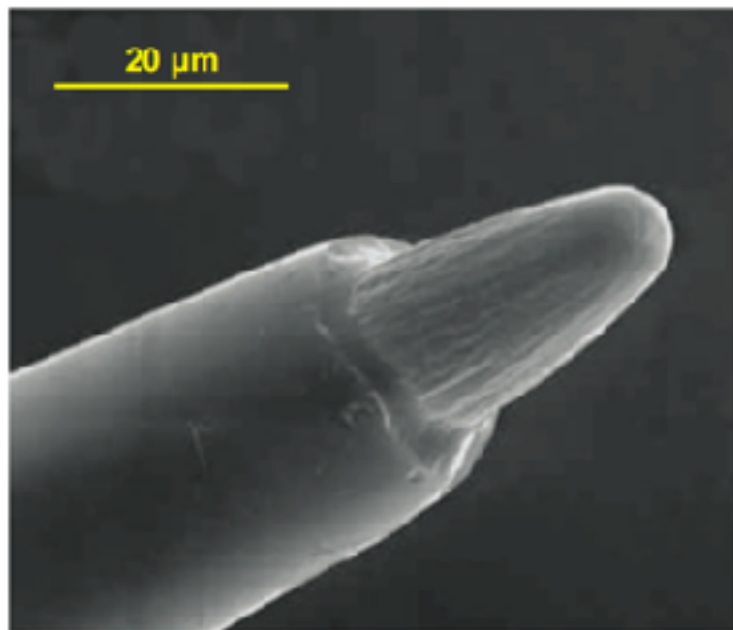
縦棒に強く活動する
横棒には活動しない

ところで「神経活動」
っていったいなに？

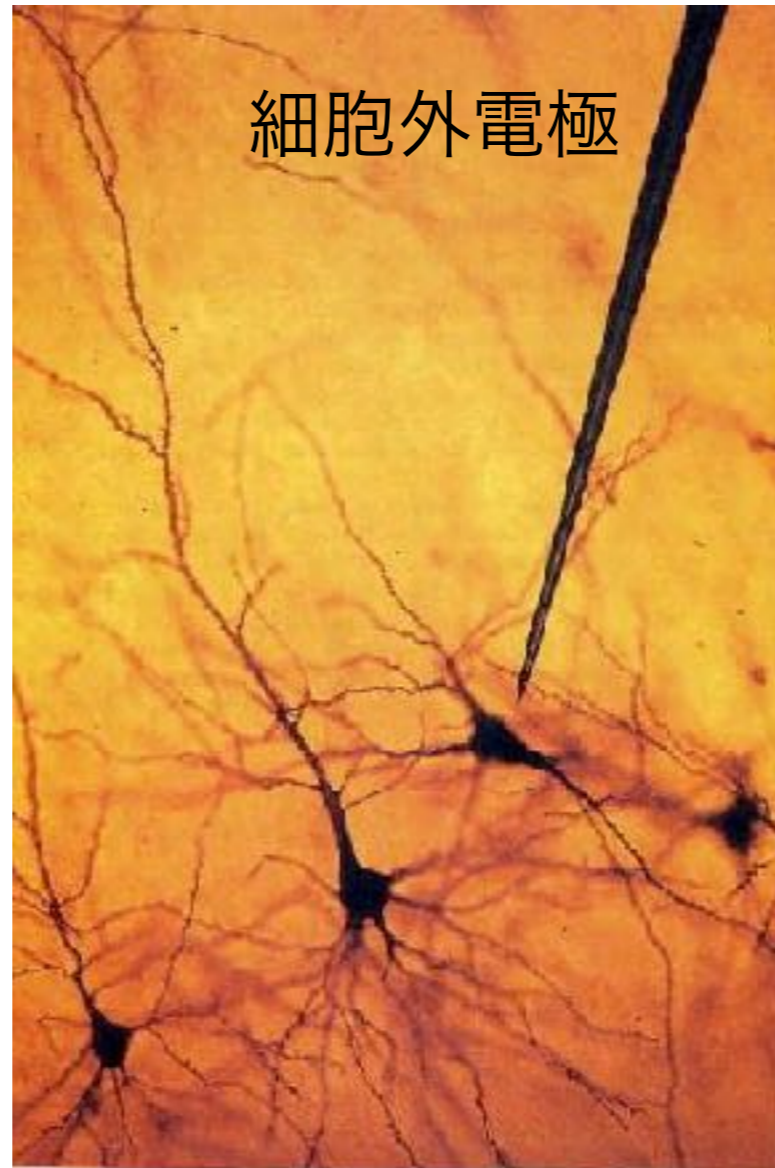
細胞外電極による計測

活動電位 Action potential = スパイク spike = 発火 firing or discharge
≡ 単一ユニット活動 single-unit activity (SUA)

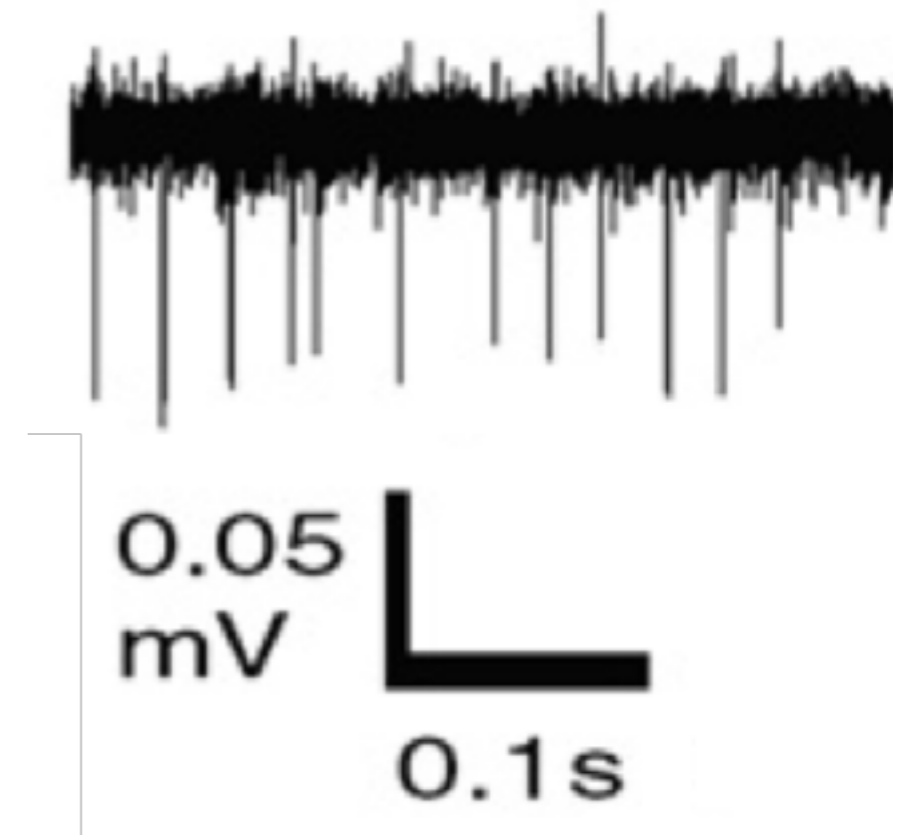
細胞外電極



神経細胞



計測データ

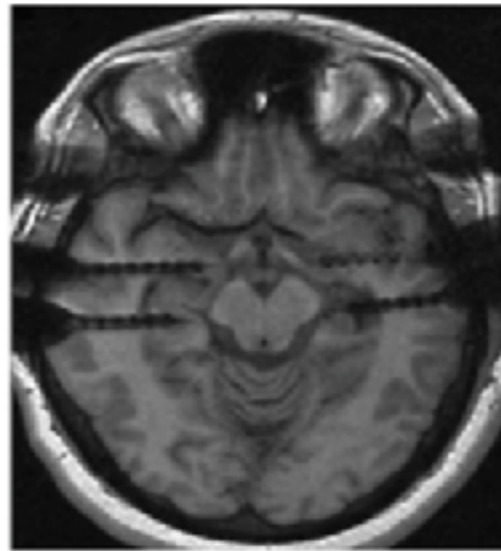


ヒト患者での応用

Hybrid macro-micro depth electrode



Implantation of electrodes to
(pharmacologically intractable)
epileptic patients



Recording of SUA
at bedside



Stereotactic placement of depth electrodes in medically intractable epilepsy.

J Neurosurg. 2014 Mar;120(3):639-44.

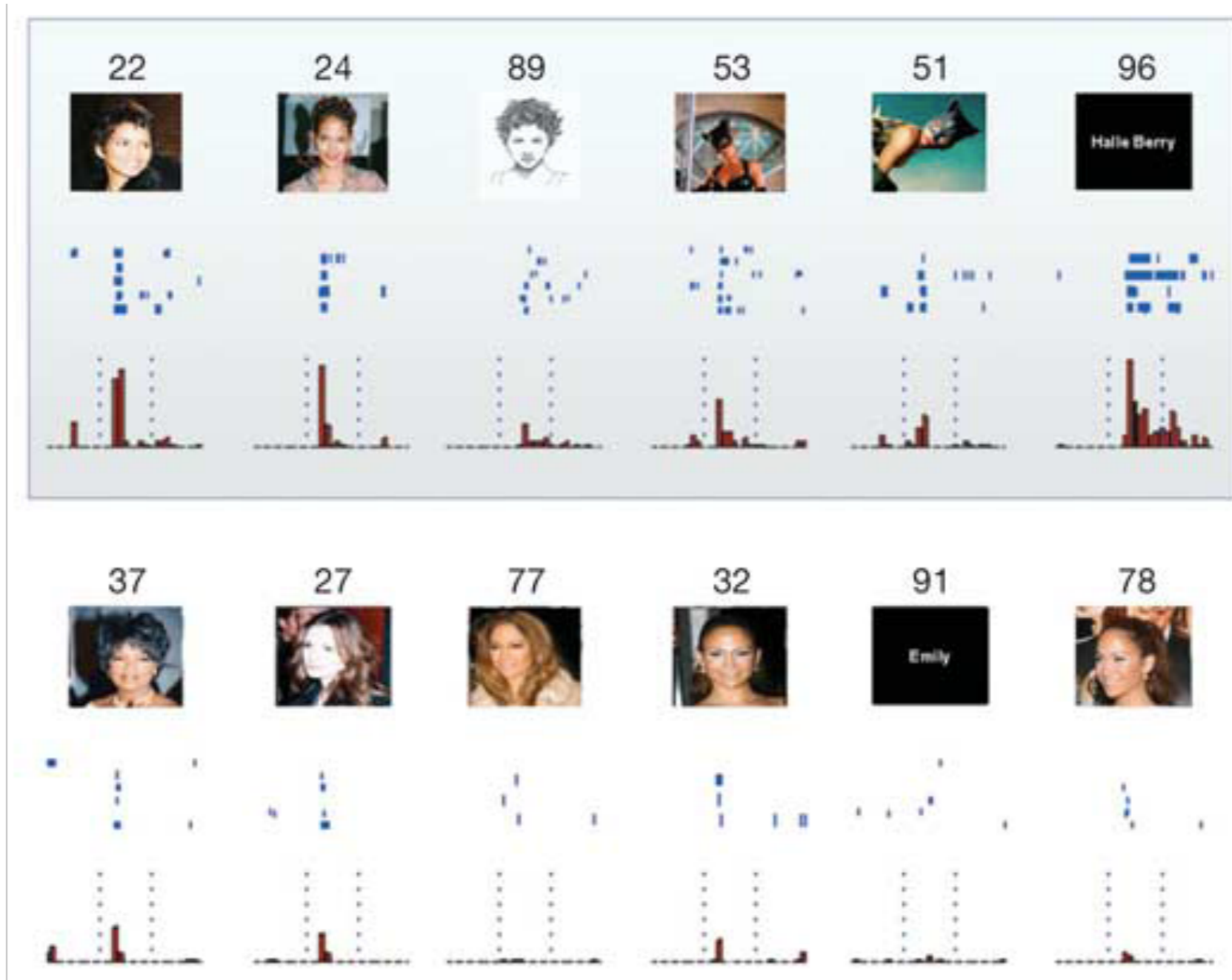
Safety and Utility of Hybrid Depth Electrodes for Seizure Localization and Single-Unit Neuronal Recording.

Stereotact Funct Neurosurg. 2018;96(5):311-319.

Combined Single Neuron Unit Activity and Local Field Potential Oscillations in a Human Visual Recognition Memory Task.

IEEE Trans Biomed Eng. 2016 Jan;63(1):67-75

ハル・ベリー神経細胞



俳優 ハル・ベリーを見たときだけ活動する。
デッサンでも、装束(キャットウーマン)でも反応する。
でも他の女性俳優の顔では反応しない。

Quiroga, R., Reddy, L., Kreiman, G., Koch, C., & Fried, I. (2005).
Invariant visual representation by single neurons in the human brain.
Nature, 435 (7045), 1102-1107

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

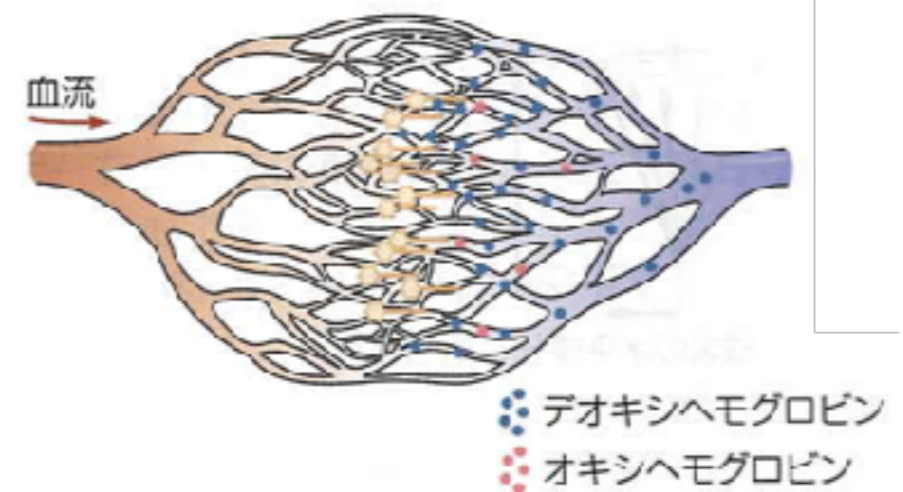
3. 方法論的検討: 逆推論の問題

ヒトの脳を測るツール: 機能的磁気共鳴イメージング (fMRI)

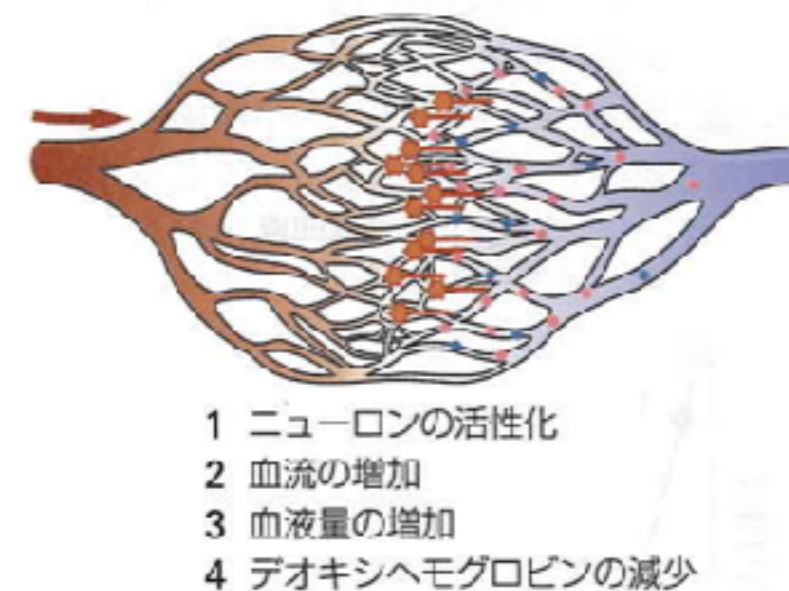
fMRIは局所の脳血流量を
BOLD信号として計測している



刺激なしの組織



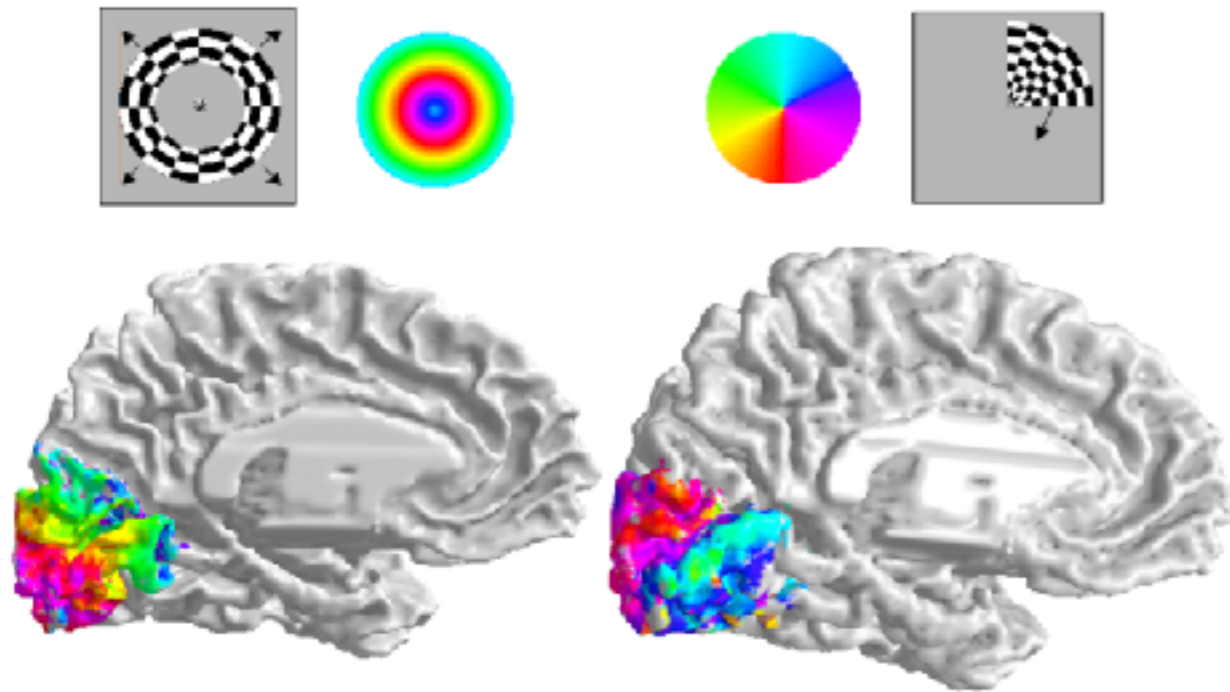
刺激された組織



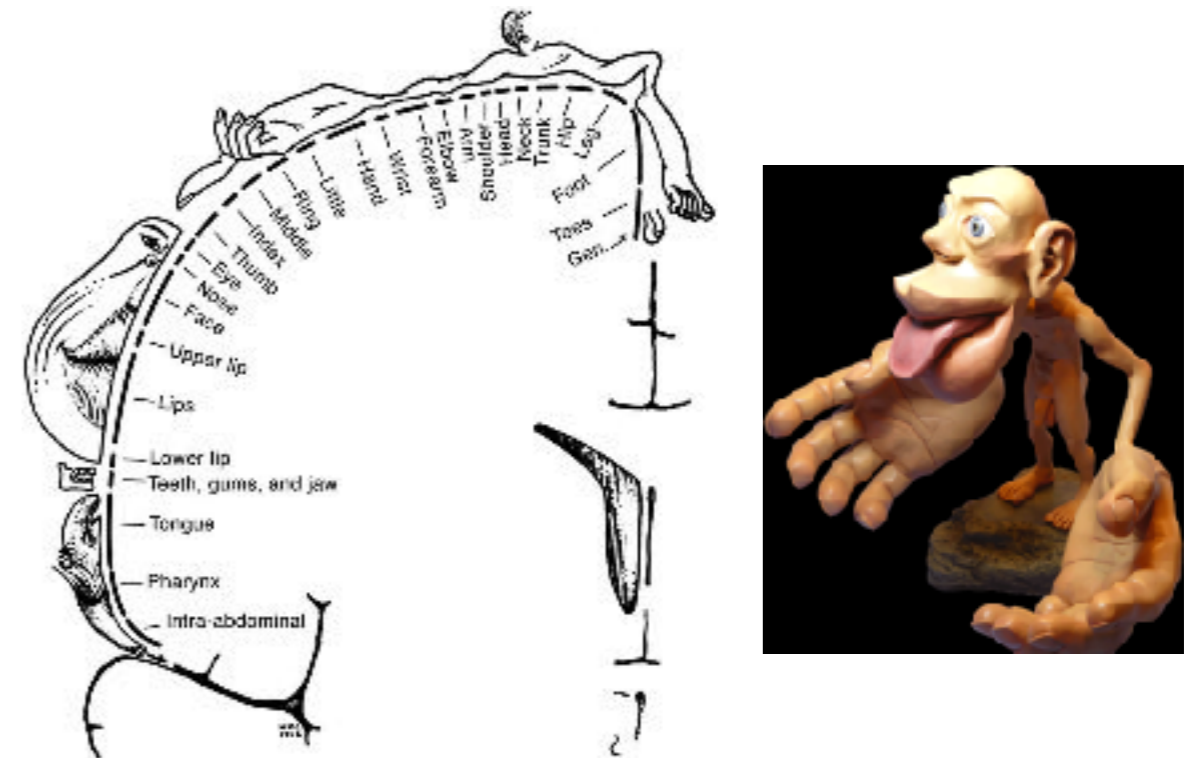
ヒトの脳活動を非侵襲的に計測できる (= 脳に針を刺したりしない)

ヒト第一次視覚野 の視野マップ

網膜の極座標



ヒト 体性感覚野マップ (ホムンクルス)



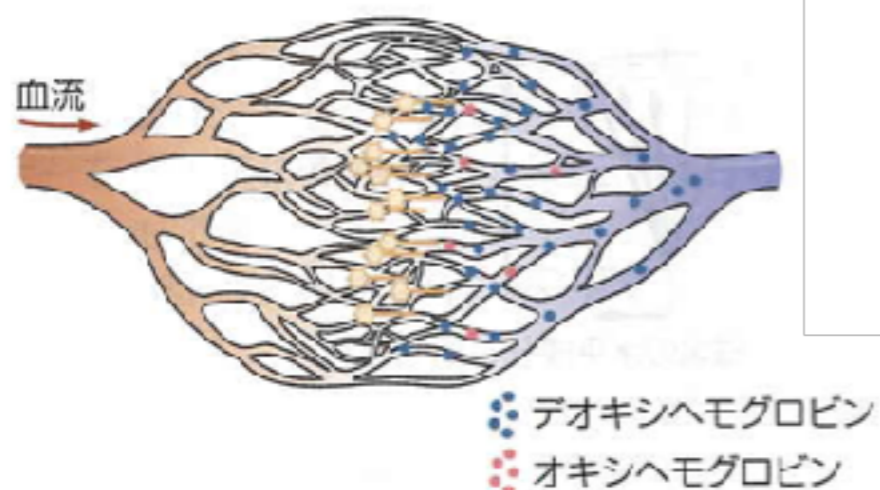
Dougherty RF, Koch VM, Brewer AA, Fischer B, Modersitzki J, Wandell BA. Visual field representations and locations of visual areas V1/2/3 in human visual cortex. J Vis. 2003;3(10):586-98.

Reproduced image in: Di Noto PM, Newman L, Wall S, Einstein G. Cereb Cortex. 2013 May;23(5):1005-13. https://en.wikipedia.org/wiki/Cortical_homunculus#/media/File:Side-black.gif CC BY-SA 4.0

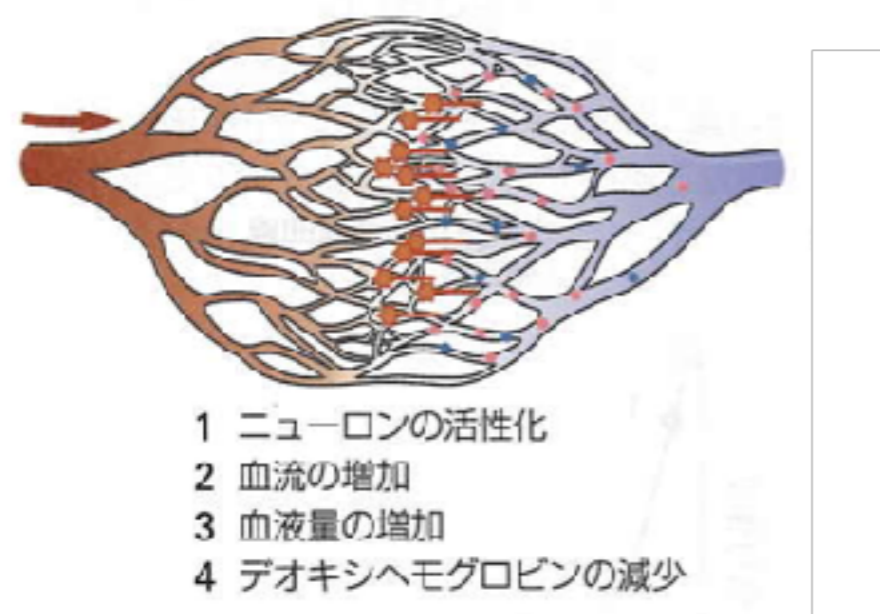
fMRIの弱点

fMRIは局所の脳血流量を計測している

刺激なしの組織



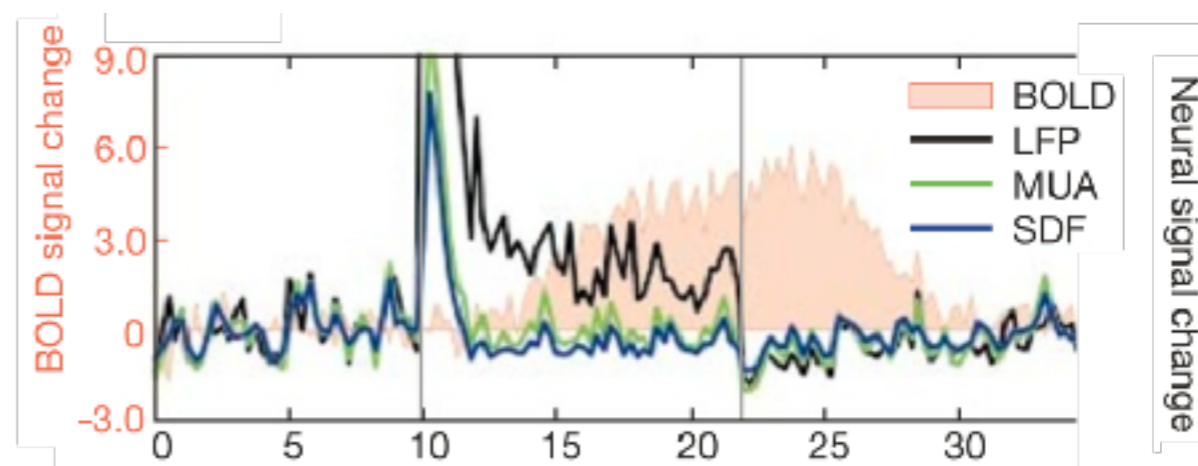
刺激された組織



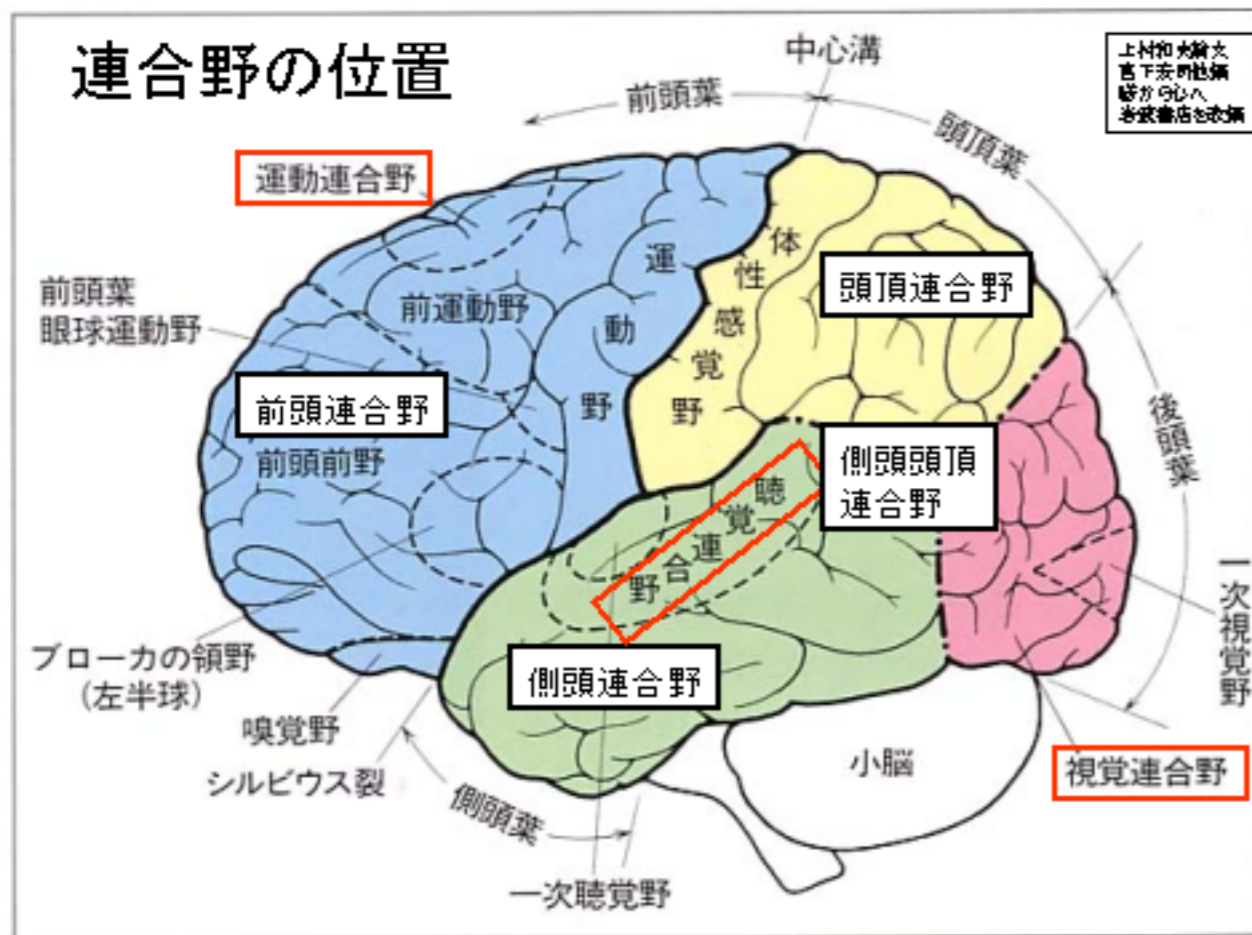
弱点1: 神経活動そのものを計測しているわけではない

弱点2: 興奮性ニューロンの活動も抑制性ニューロンの活動も一緒くたつまり、MRのシグナルが大きい = 脳の活性化、とは限らない。

弱点3: 神経活動(黒)よりもMRシグナル(赤)は時間応答が遅い



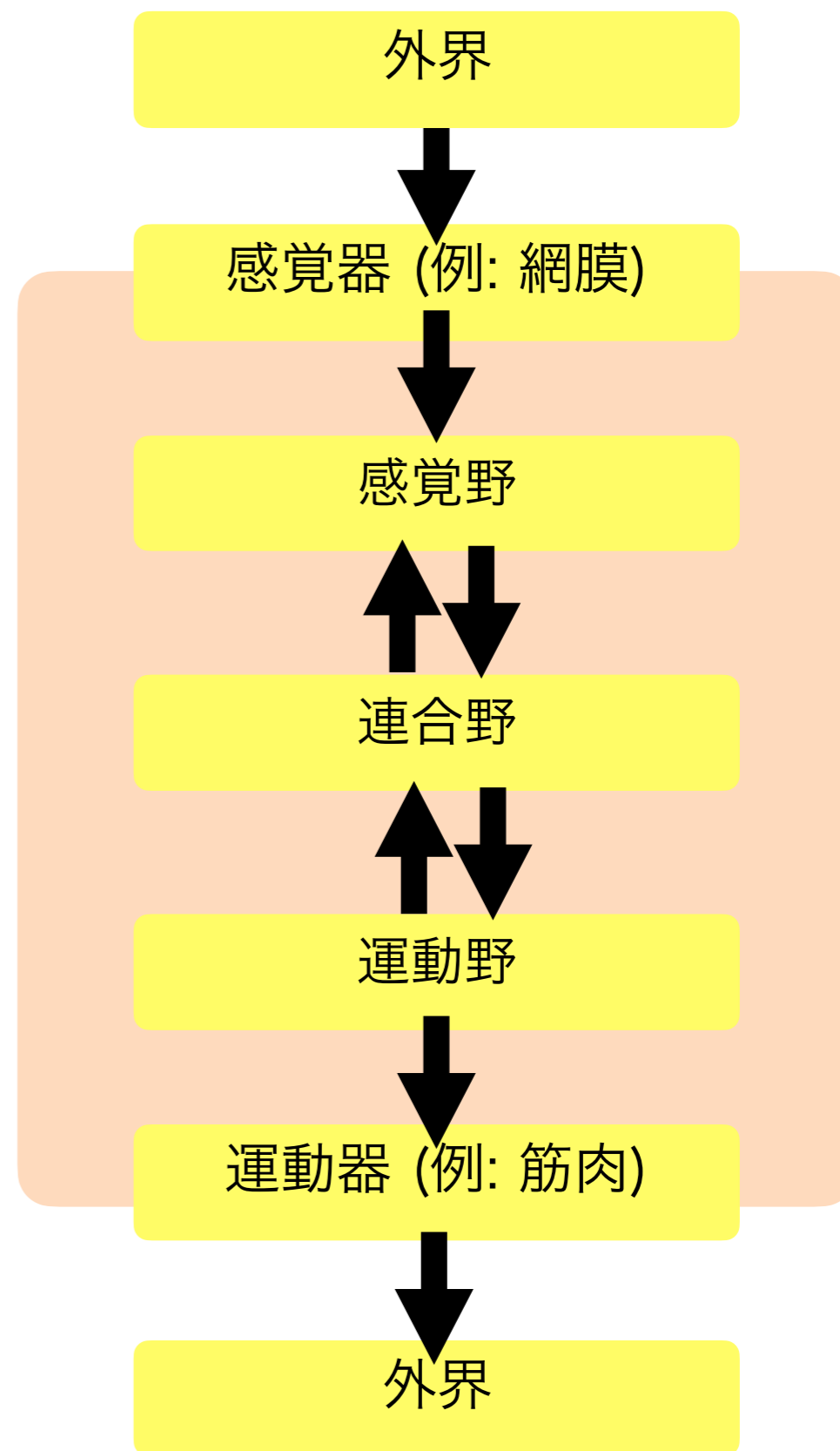
神経科学の目的: 「心的状態+行動」と脳を知りたい



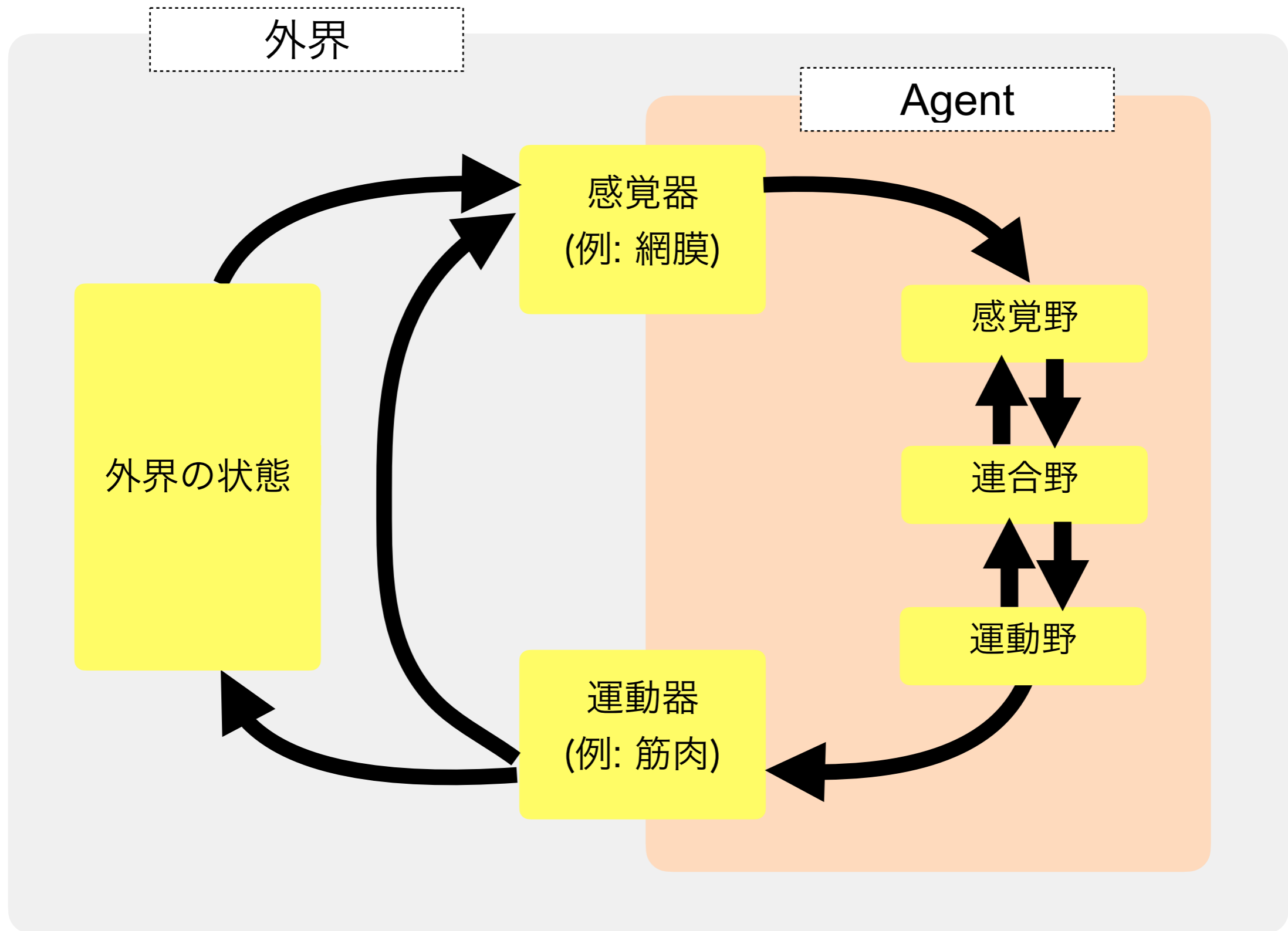
http://gc.sfc.keio.ac.jp/class/2004_14453/slides/12/index_13.html

神経科学の基本方針:

- 1) 測る: 環境を操作して、
脳活動を計測
- 2) 操作する: 脳を操作して、
心的状態や行動を計測



でもちょっと注意



Agentと外界は因果関係がループになっている

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

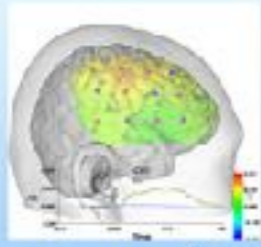
2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

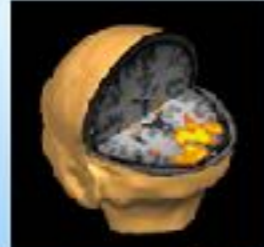
3. 方法論的検討: 逆推論の問題

応用脳科学

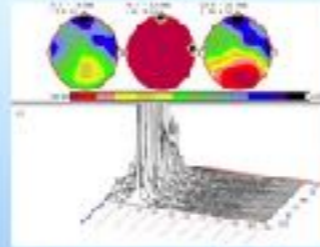
基幹技術である脳の可視化技術の進歩



NIRSによる脳の分析画像
((株)島津製作所様ご提供)



fMRIによる脳の分析画像
((株)ATR-Promotions様ご提供)



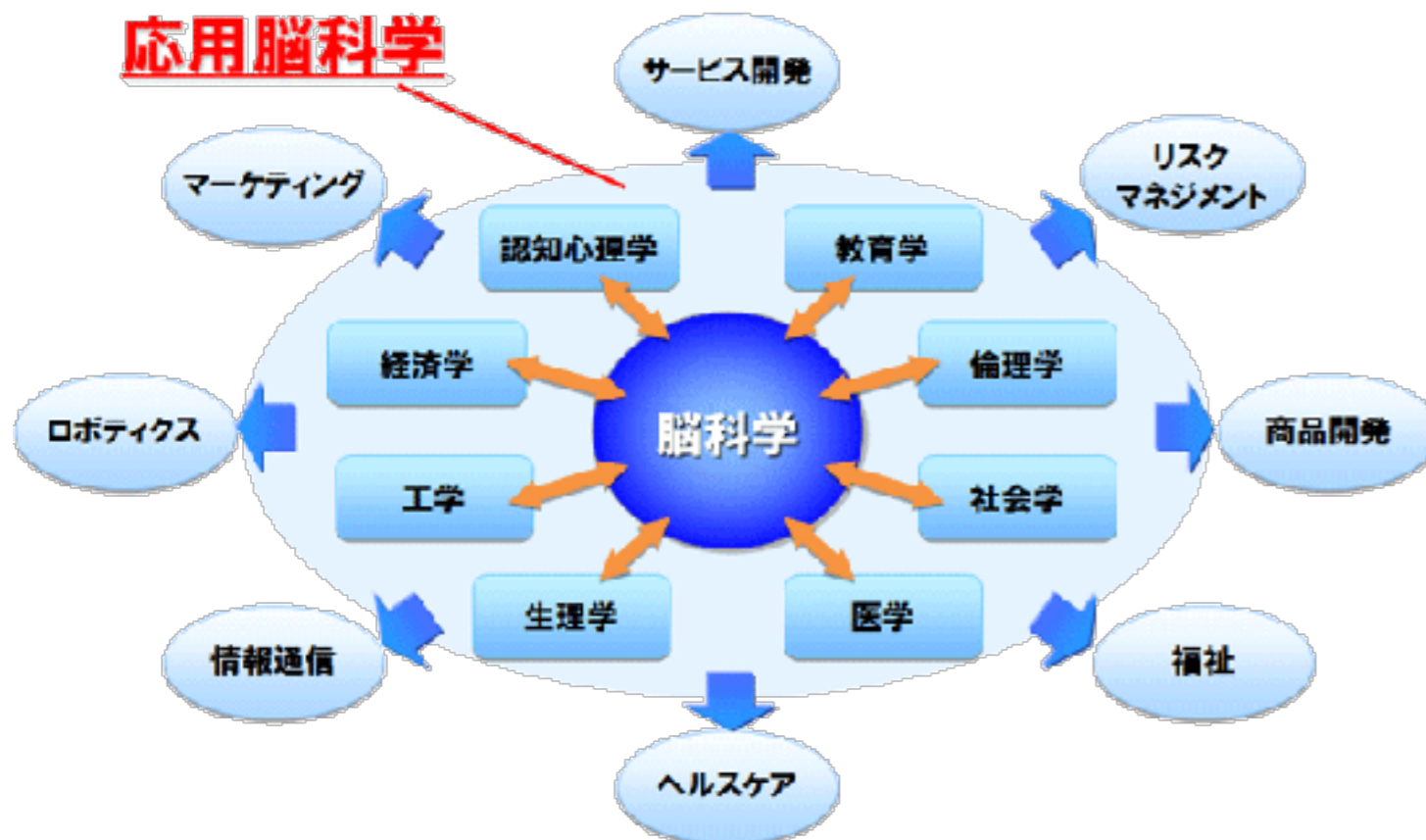
EEGによる脳の分析画像
((株)脳機能研究所様ご提供)

認知・行動・記憶・思考・情動・意志といった「心」の働きに関する研究の進展

経済学・社会学・生理学・認知心理学等の様々な研究領域と融合

医療・福祉分野に加えて、経済分野、産業分野へ応用脳科学研究が拡大

- 医療、福祉、教育、経済、産業などへの貢献
- 人文社会学の問題解決への貢献



ニューロテック / ブレインテック

ブレインテックの全体像

- ブレインテックとは、脳 (Brain) × テクノロジー (Technology) を組み合わせた造語。
 - ・ インプット：認知状態や感覚体験等の脳活動を専用の装置 (fMRIやEEG) (注1) で計測。
 - ・ アウトプット：それらの結果をデコーディングやニューロフィードバック等へ応用。

インプット (脳活動の計測) 2章 P.8~

アウトプット (活用例・関連事例) 3章 P.14~

【脳活動の計測】

運動意図、認知状態・スキル、感覚体験などの脳活動をfMRIやEEG等の装置で計測。



fMRI



EEG

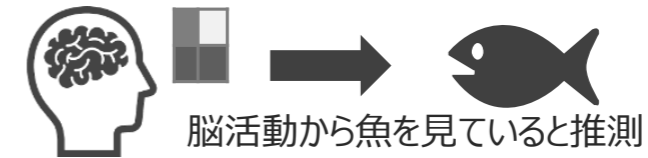
脳活動例

運動意図		移動、把握、到達、停止、操作 等
認知状態・スキル		脳の健康状態、認知能力、好きな気持ち・心地よい感覚 等
感覚体験		視覚、聴覚、嗅覚、味覚、感覚、等

デコーディング

＜活用例＞
マーケティング

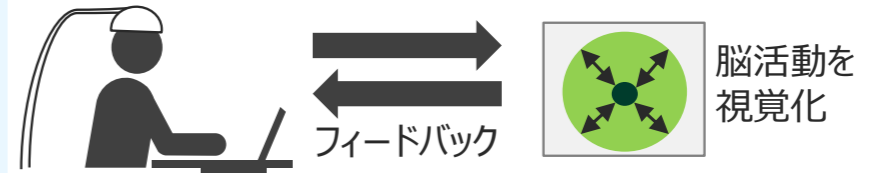
本人しか知らない主観的な意識や知覚を解読。



ニューロフィードバック

＜活用例＞
ヘルスケア

脳活動をモニタリングしながら、自己制御する。

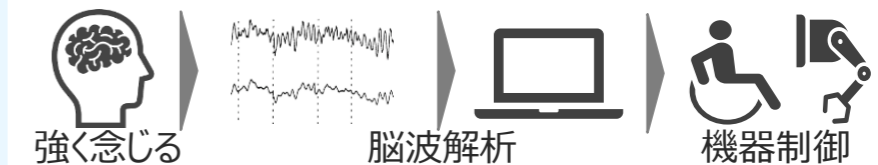


BMI

(Brain Machine Interface)

＜活用例＞
医療・リハビリテーション

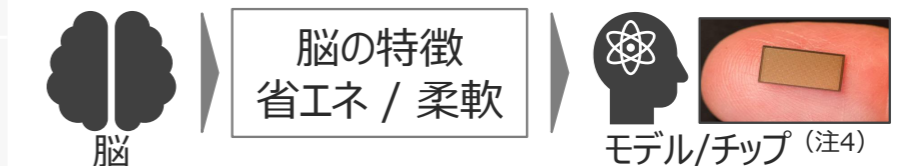
脳活動に合わせた行動支援・機器制御 (注2)。



ニューロモルフィックコンピューティング (注3)

＜活用例＞
チップ、AIモデル高度化

脳の仕組みを参考にコンピュータ開発に活かす。



(注1) fMRI : functional Magnetic Resonance Imagingの略。磁気共鳴機能画像法。脳の血流変化を観測。 EEG : Electroencephalogramの略。脳波計。脳の電気信号を頭皮上の電極から観測。

(注2) 機械から脳へ電気刺激等を行うBMIもある。(注3) 神経模倣工学。脳の仕組み(知覚、運動制御など)を実装したシステムを指す。

(注4) 画像出所 : <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/newsroom/news/intel-unveils-neuromorphic-loihi-2-lava-software.html> © 2022 The Japan Research Institute, Limited

1. 神経科学

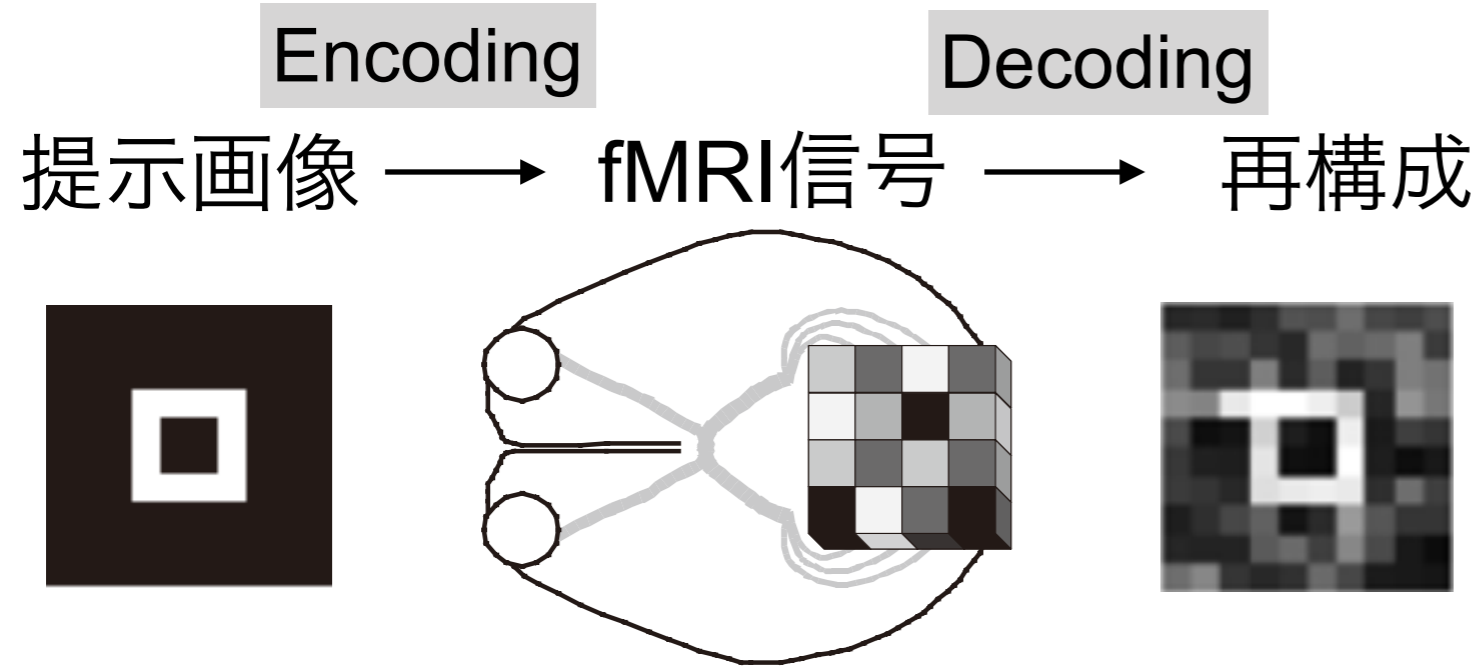
- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

脳を読む



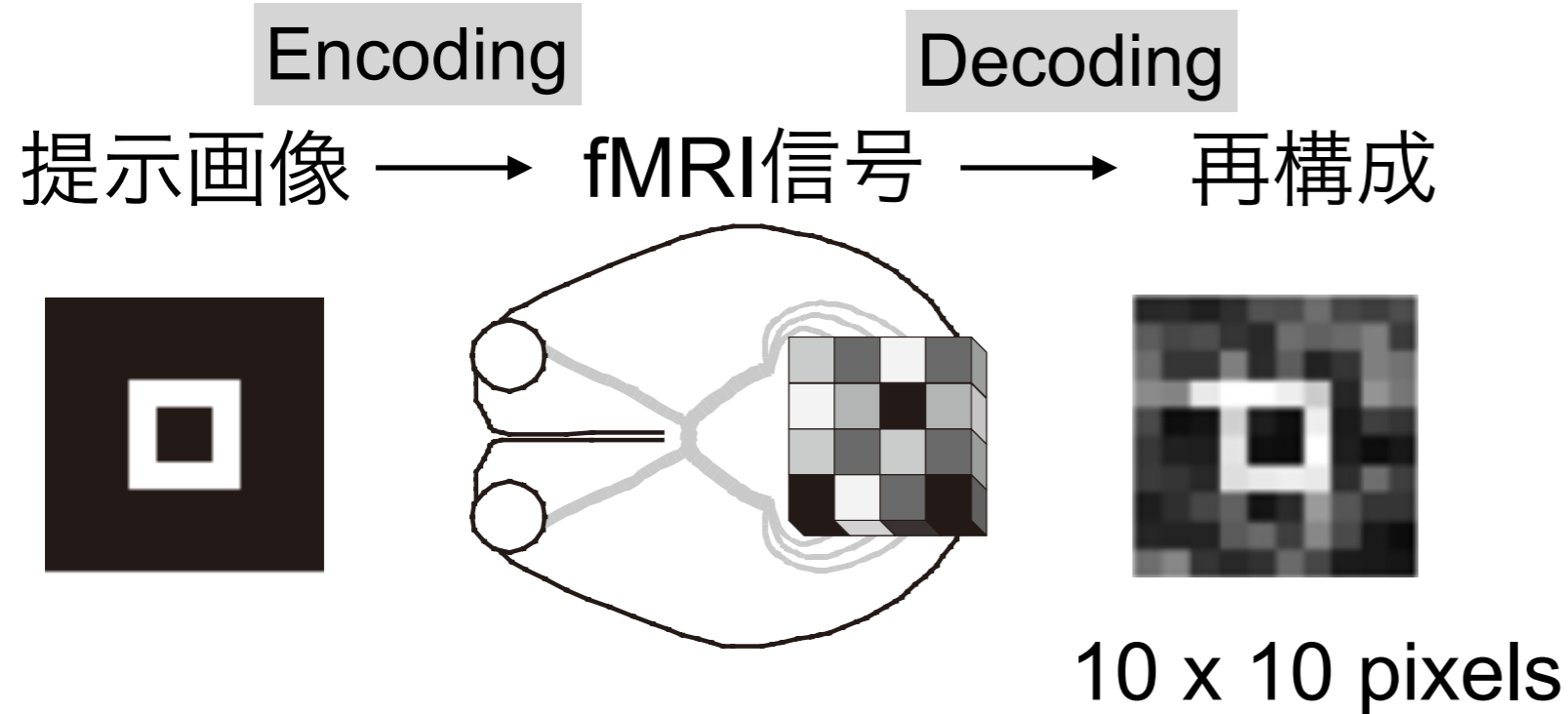
Miyawaki Y et al (2008) Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders. *Neuron*. 60(5):915-29.

堀川 友慈, 宮脇 陽一, 神谷 之康 (2014) 脳活動から心を可視化する *光学* 43(3), 104-110

Encoding (符号化): 視覚野は視覚刺激にどのように応答するか
Decoding (復号化): 視覚野からどういう情報を取り出し可能か

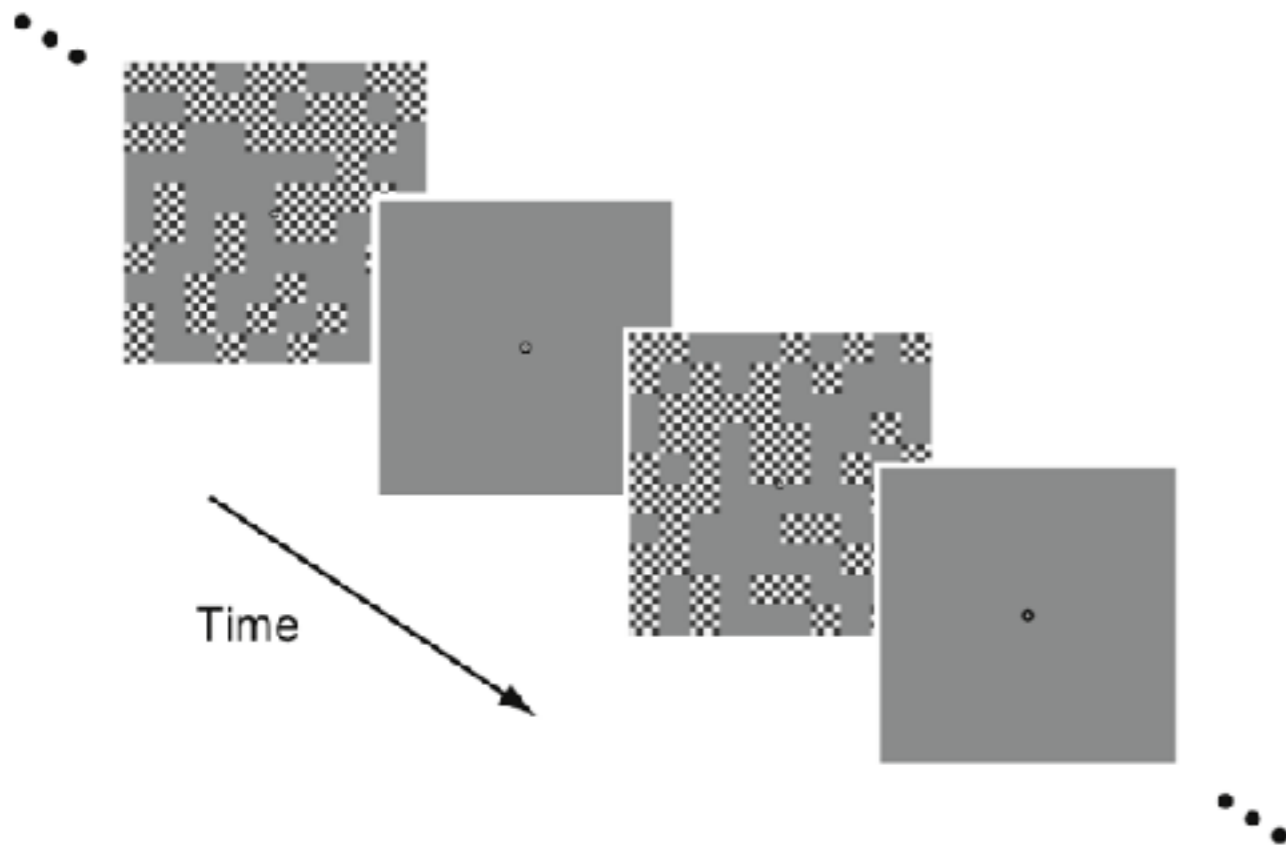
Encoding (符号化) のデータを取得して、
これをもとに機械学習を用いて、
脳活動から視覚刺激を推定するデコーダー(復号器)を作る。

脳を読む



Miyawaki Y et al (2008) Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders. *Neuron*. 60(5):915-29.

堀川 友慈, 宮脇 陽一, 神谷 之康 (2014) 脳活動から心を可視化する *光学* 43(3), 104-110



あらかじめ
多量のランダム刺激(440枚)
とその応答のデータを
取得する(encoding)。
これをもとに機械学習で
デコーダーP(入力画像|fMRI信号)
を構築。

脳を読む

動画を提示して、視覚野の活動だけから再構成

Presented
movies

A



C



Reconstructed
movies (AHP)



1. 神経科学

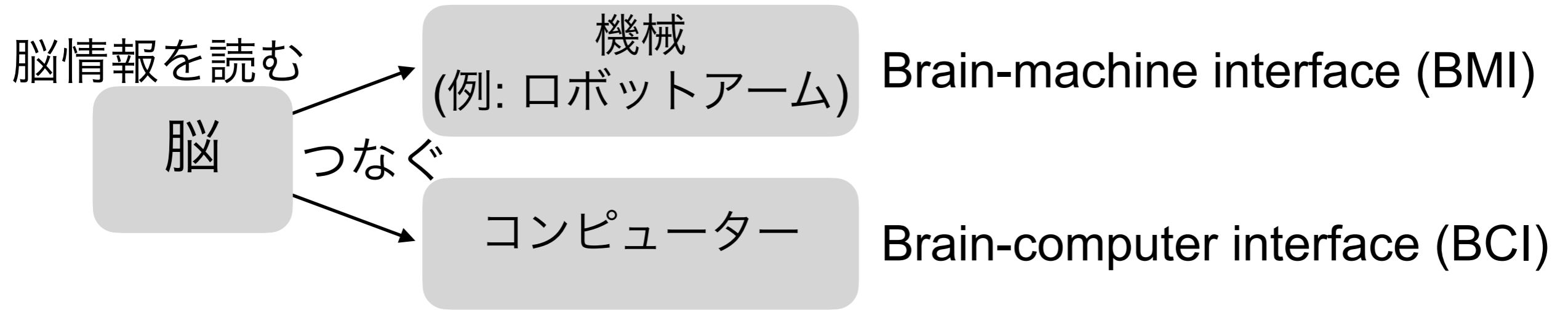
- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- **応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI**
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

脳をつなぐ: What is BMI / BCI?



侵襲型 (電極を設置)

脳内



(Elon Muskの)
Neuralink社のLINK

米FDA承認まだ

(脳表)



脳血管内



Synchron社の
Stentrode

米FDA承認2021
臨床試験開始

ALS患者がツイート
に成功

非侵襲型

脳波計



例) g.tec ME社
g.Nautilus

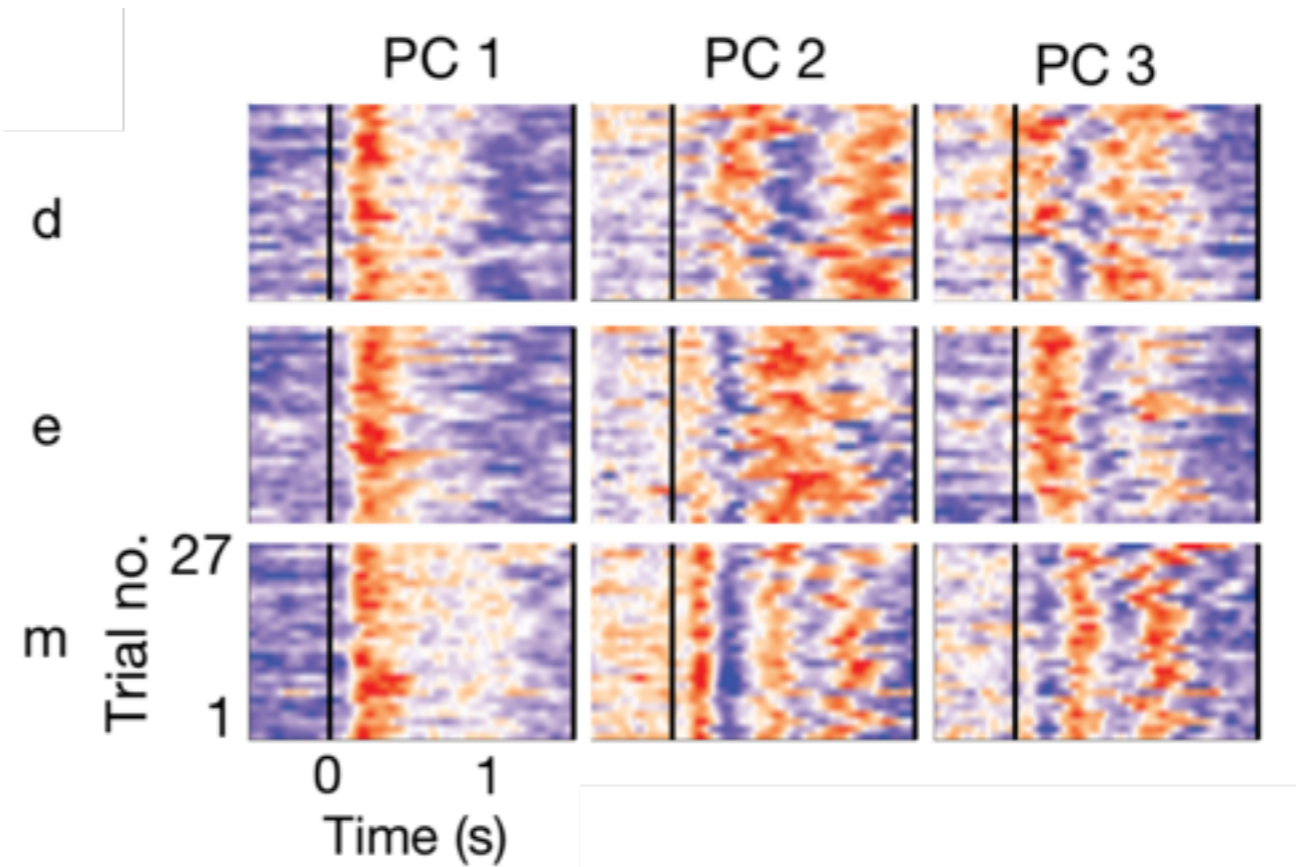
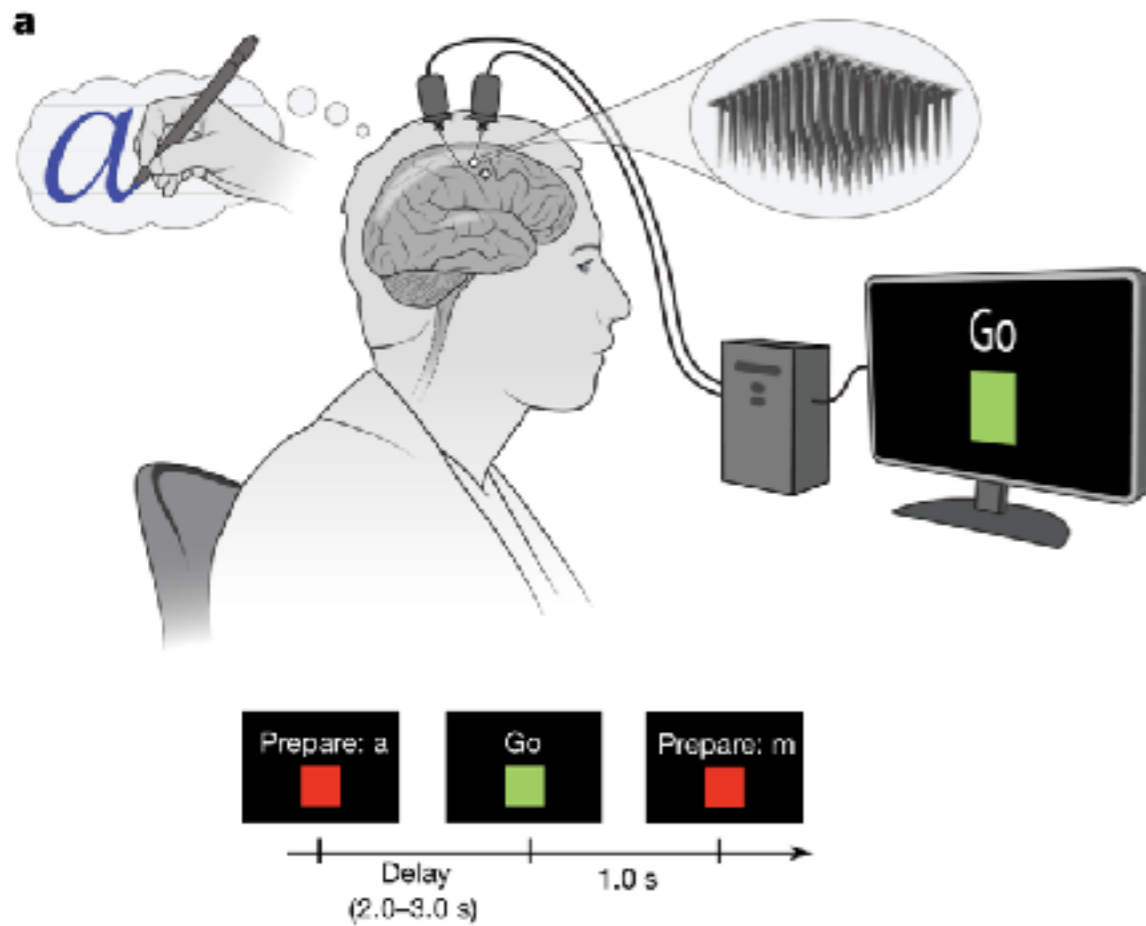
FBは脳波VRを断念(2021)
「簡易脳波デバイス」はお勧めし
ない

MRI
MEG
ほか

コンパクト
化が必須

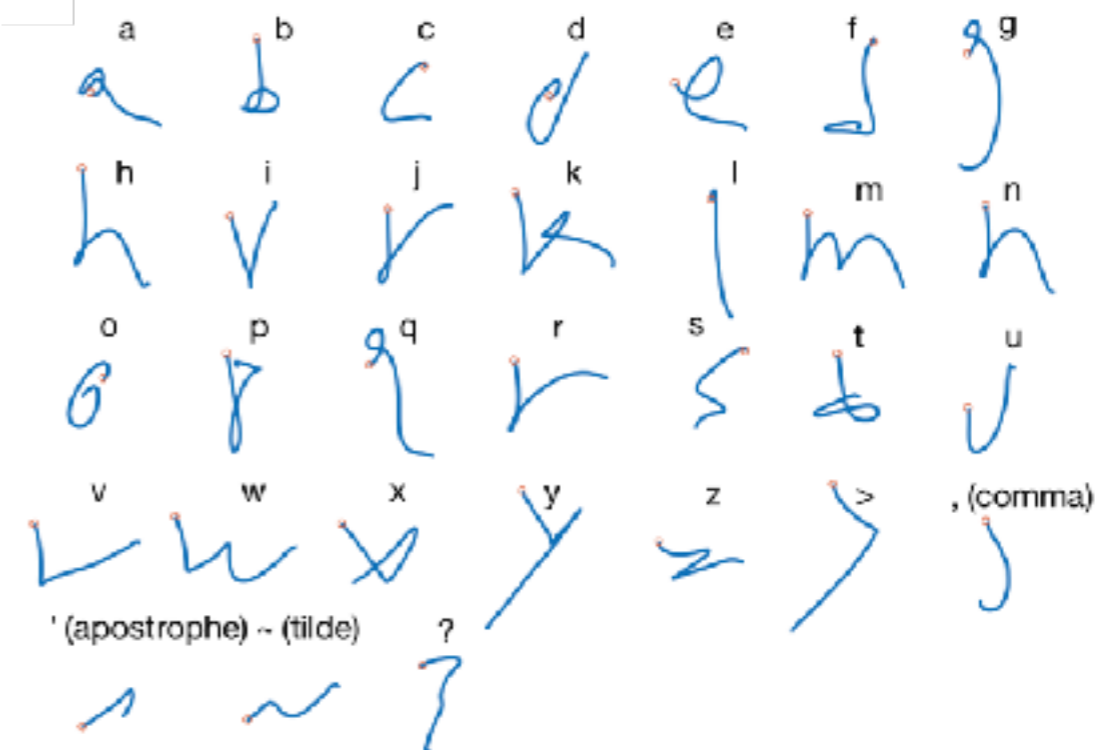
NIRS

最新の状況



脊髄損傷による麻痺患者が
手書き文字の生成に成功。
(正答率94%で90文字/分)

Willett FR, Avansino DT, Hochberg LR,
Henderson JM, Shenoy KV. High-performance
brain-to-text communication via handwriting.
Nature. 2021 May;593(7858):249-254.



ニューロテック / ブレインテック

ブレインテックの全体像

- ブレインテックとは、脳 (Brain) × テクノロジー (Technology) を組み合わせた造語。
 - ・ インプット：認知状態や感覚体験等の脳活動を専用の装置 (fMRIやEEG) (注1) で計測。
 - ・ アウトプット：それらの結果をデコーディングやニューロフィードバック等へ応用。

インプット (脳活動の計測) **2章 P.8~**

アウトプット (活用例・関連事例) **3章 P.14~**

【脳活動の計測】

運動意図、認知状態・スキル、感覚体験などの脳活動をfMRIやEEG等の装置で計測。






fMRI



EEG

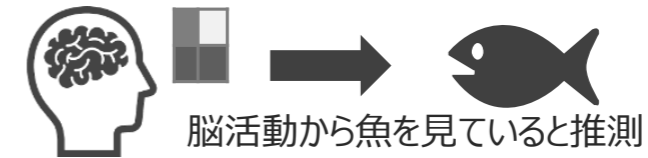
脳活動例

運動意図		移動、把握、到達、停止、操作 等
認知状態・スキル		脳の健康状態、認知能力、好きな気持ち・心地よい感覚 等
感覚体験		視覚、聴覚、嗅覚、味覚、感覚、等

デコーディング

＜活用例＞
マーケティング

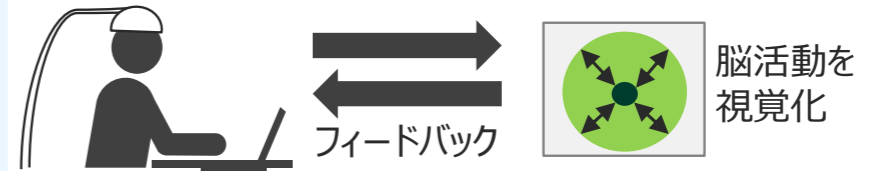
本人しか知らない主観的な意識や知覚を解読。



ニューロフィードバック

＜活用例＞
ヘルスケア

脳活動をモニタリングしながら、自己制御する。

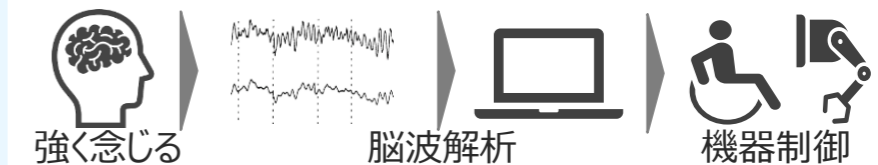


BMI

(Brain Machine Interface)

＜活用例＞
医療・リハビリテーション

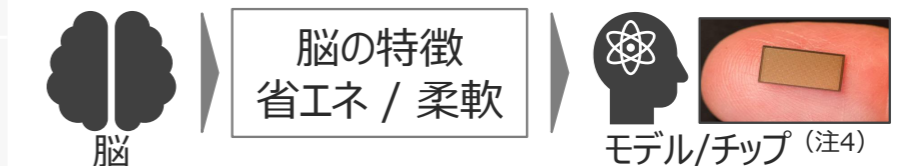
脳活動に合わせた行動支援・機器制御 (注2)。



ニューロモルフィックコンピューティング (注3)

＜活用例＞
チップ、AIモデル高度化

脳の仕組みを参考にコンピュータ開発に活かす。



(注1) fMRI : functional Magnetic Resonance Imagingの略。磁気共鳴機能画像法。脳の血流変化を観測。 EEG : Electroencephalographの略。脳波計。脳の電気信号を頭皮上の電極から観測。

(注2) 機械から脳へ電気刺激等を行うBMIもある。(注3) 神経模倣工学。脳の仕組み(知覚、運動制御など)を実装したシステムを指す。

(注4) 画像出所 : <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/newsroom/news/intel-unveils-neuromorphic-loihi-2-lava-software.html> © 2022 The Japan Research Institute, Limited

ニューロテック / ブレインテック に興味を持ったなら



<https://neurotechjp.com/jp/>



紺野 大地, 池谷 裕二 (2021) 脳と人工知能
をつないだら、人間の能力はどこまで拡張
できるのか 脳AI融合の最前線. 講談社

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

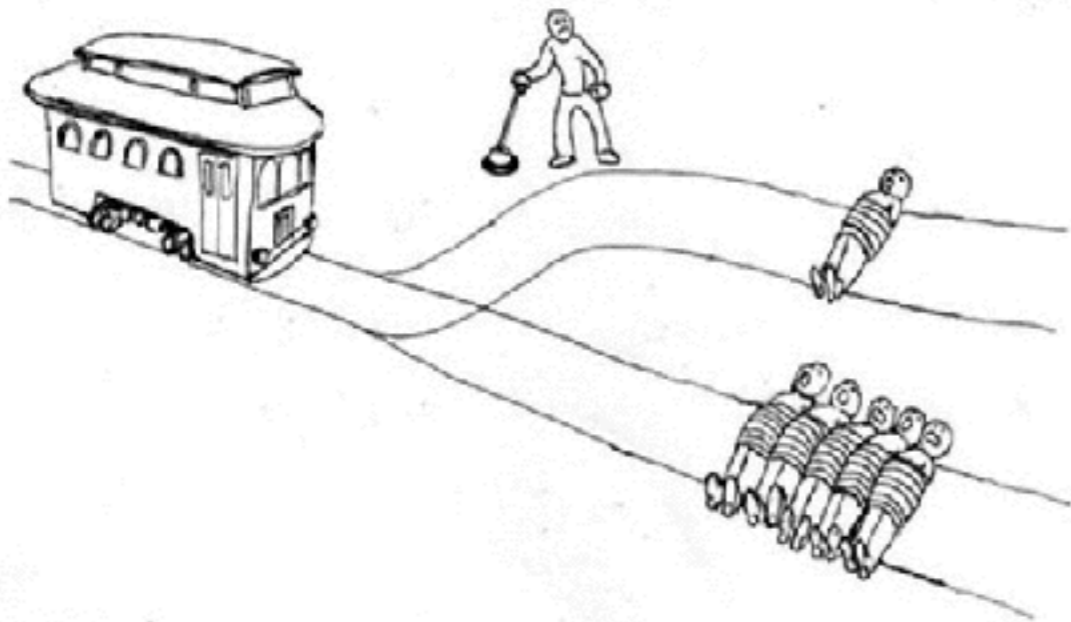
人文社会学における問題の解決への貢献

- 認知神経科学 <- 認知心理学 (記憶、注意、情動...)
- 意識、自己の神経科学<- 知覚心理学
- 神経哲学、神経現象学 <- 心の哲学、現象学
- 神経経済学 <- 不確実な状況での意思決定
- 社会(性)神経科学 <- 社会心理学
- 脳神経倫理学 (倫理の神経科学)
- (政治学、美学、文化人類学、教育学...)

<=> 人文社会学の対象としての脳科学

- 脳神経倫理学 (神経科学の倫理) <- 生命倫理、医療倫理
- 科学哲学や科学史の対象としての神経科学

トロッコ/トロリー問題

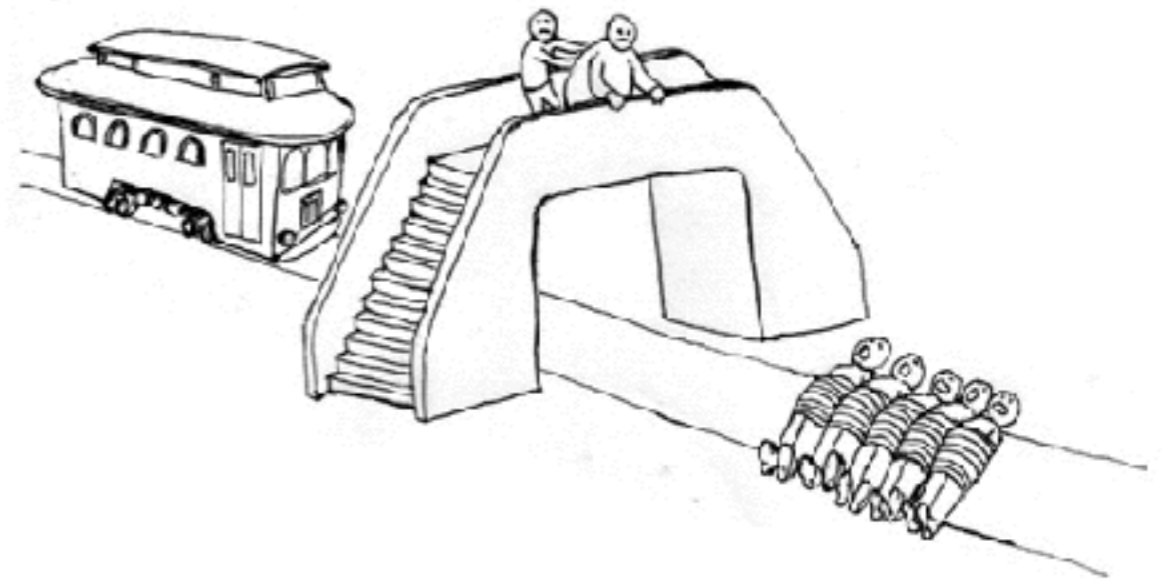


非人身的、道徳的な内容を持つジレンマ (Impersonal moral dilemma)

状況: あなたは線路のポイント切り替えの脇にいて、暴走トロッコが線路の先の分岐点に急速に向かっています。分岐点の左の先では5人が作業しており、右の先では1人が作業しています。

あなたが何もしなければトロッコは左側を進み、5人を轢き殺します。5人を救う唯一の道は、ポイントを切り替えてトロッコの進路を右側にして、1人の作業員を轢き殺すことです。

質問: 5人を救うために、あなたはポイントを切り替えますか？



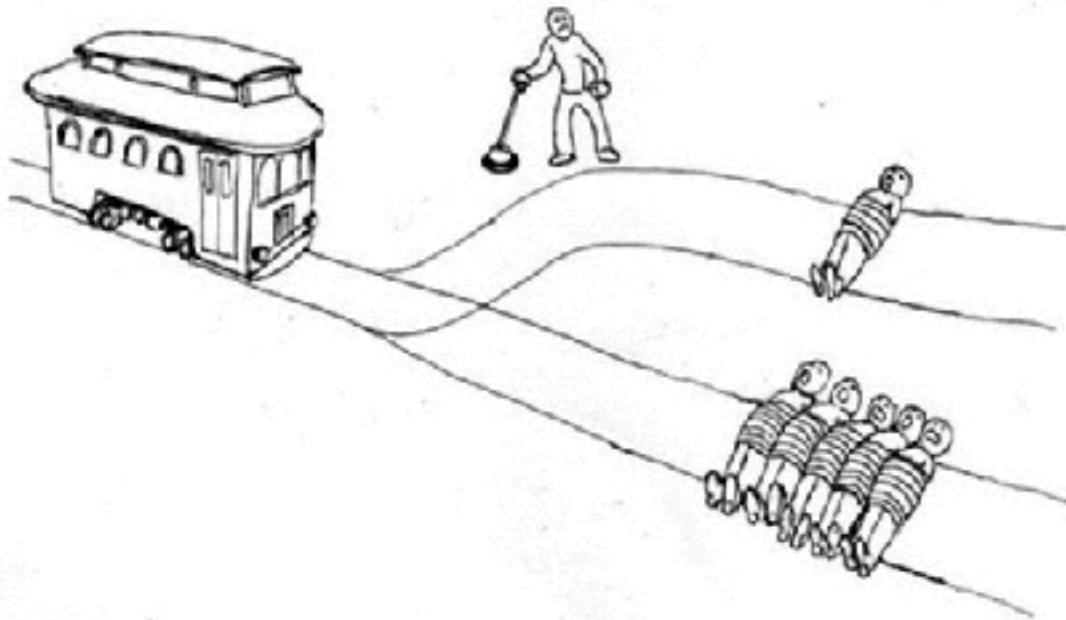
人身的、道徳的な内容を持つジレンマ (Personal moral dilemma)

状況: 暴走したトロッコが線路を駆け下りていき、このまま進むと線路上で作業している5人を轢き殺します。あなたは、迫りくるトロッコと5人の間にある線路上の歩道橋の上にいます。あなたの隣にはたまたま非常に大柄の人がいます。

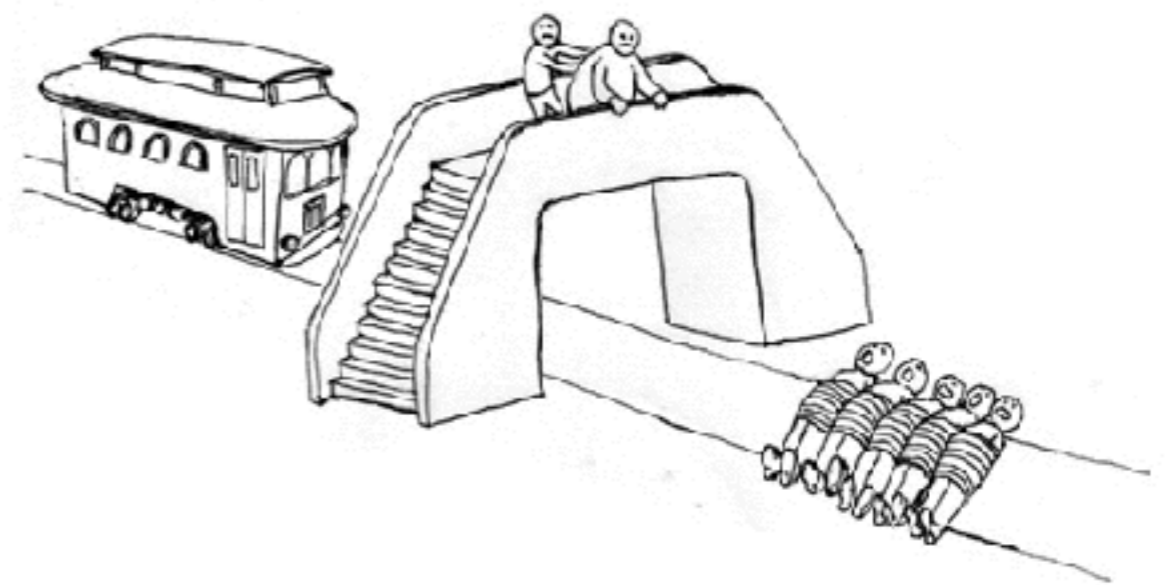
作業中の5人を助ける唯一の道は、隣に立っているその人を橋から線路上に突き落として、その大きな体でトロッコを止めることです。その人は死ぬでしょうが5人は助かります。

質問: 5人を救うために、あなたは隣りにいる人を突き落としますか？

トロツコ/トロリー問題



非人身的 (Impersonal moral dilemma)



人身的 (Personal moral dilemma)

多くの人が以下のように答える。

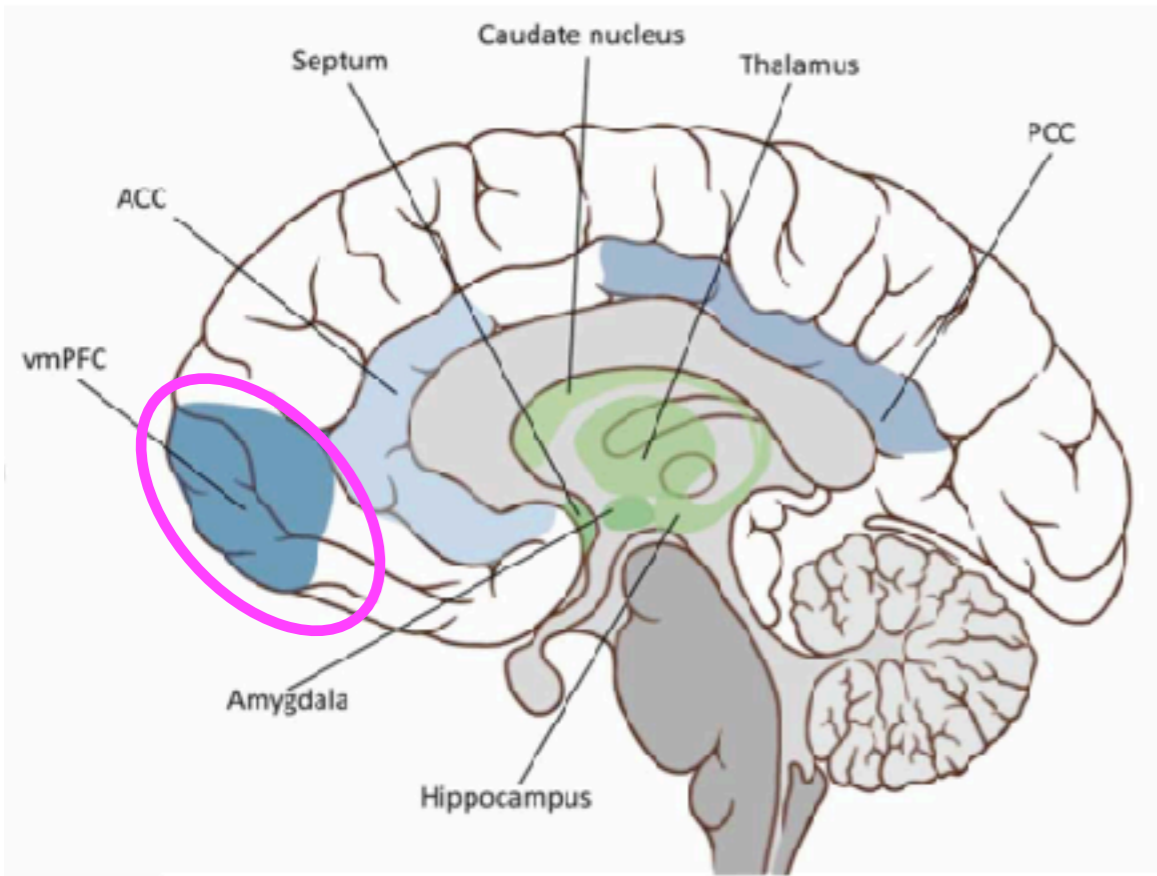
- Impersonal条件ではポイントを切り替えるが
- personal条件では人を突き落とさない。

倫理学の立場からはこれが論争になる。

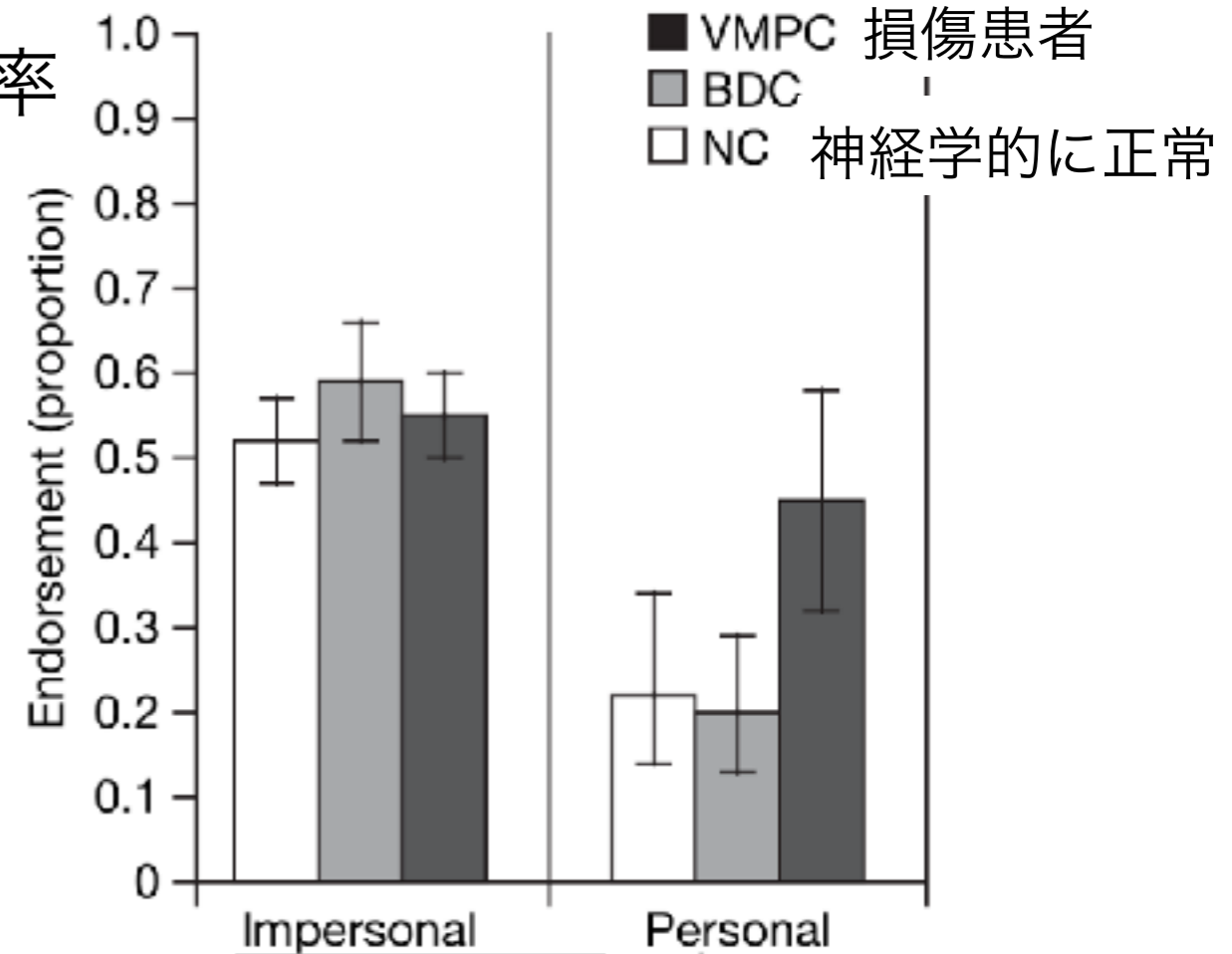
なぜならこれは「救える最大の人数を救うべき」という功利主義的立場utilitarianismからは矛盾するから。

トロッコ問題: 神経科学からの知見(1)

内側前頭皮質vmPFCが損傷した患者さんでトロッコ問題をテスト



‘Yes’
の比率



ポイント切り替え 歩道橋から突き落とす

本研究の結論: vmPFC損傷患者はより功利主義的にふるまう

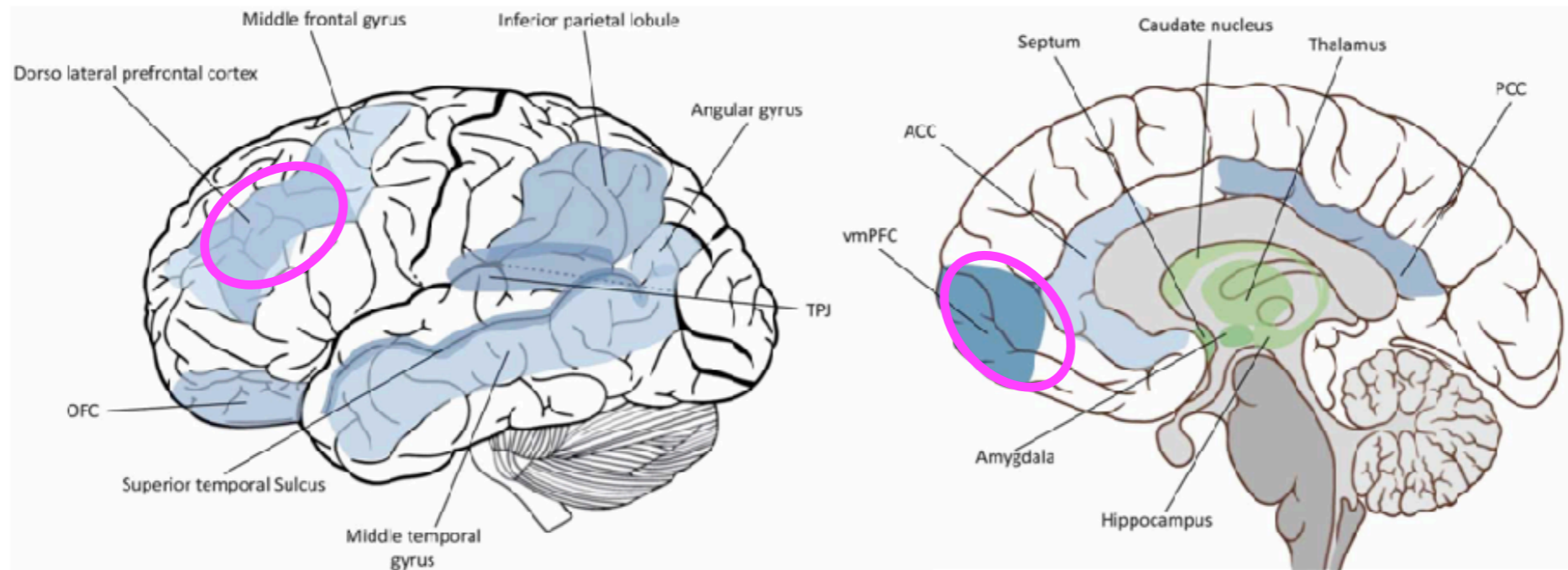
以前の患者研究の知見: vmPFCの損傷で情動に関わる情報処理が変容
健常者の道徳的判断には情動が関わっていることを「示唆」

図のソース: Pascual L, Rodrigues P, Gallardo-Pujol D. (2013) How does morality work in the brain? A functional and structural perspective of moral behavior. Front Integr Neurosci. 7:65.

Koenigs M, Young L, Adolphs R, Tranel D, Cushman F, Hauser M, Damasio A. (2007) Damage to the prefrontal cortex increases utilitarian moral judgements. Nature. 446(7138):908-11.

トロツコ問題: 神経科学からの知見(2)

機能的MRIで二つの条件の判断をしているときの脳活動を計測した。



Impersonal条件(ポイント切り替え)
ではDLPFCが活動した。

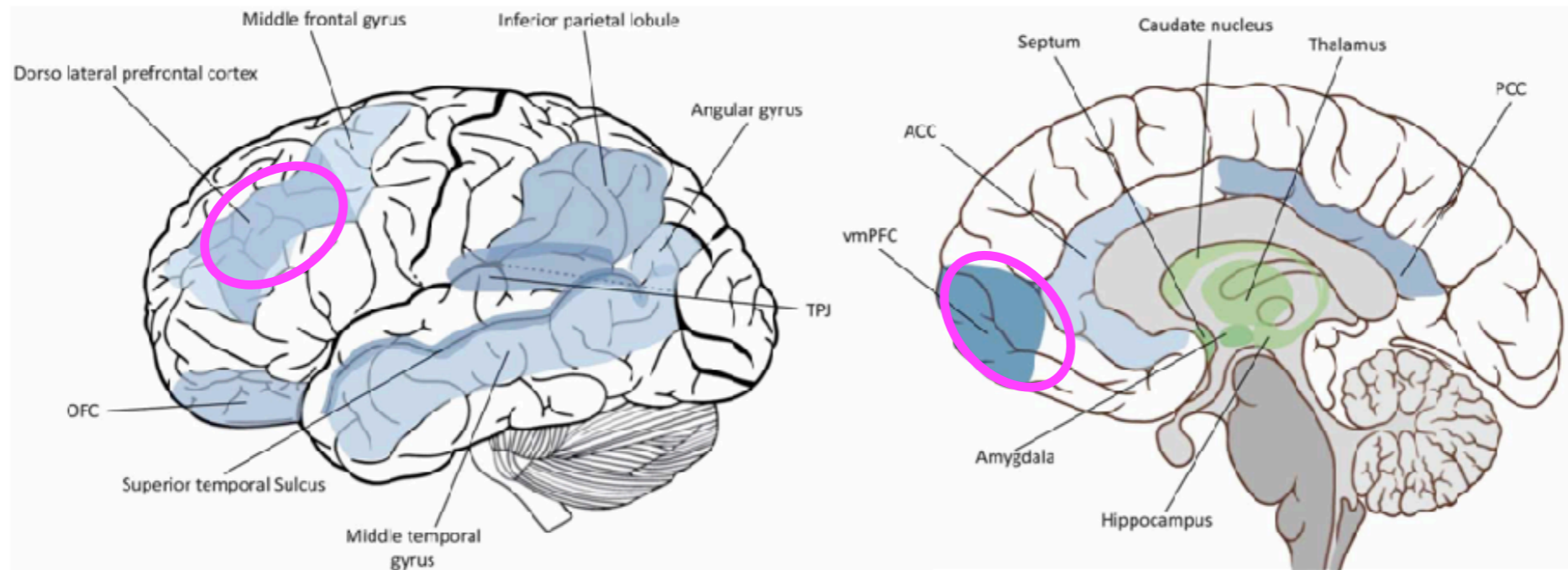
Personal条件(歩道橋)
ではvmPFCが活動した。

図のソース: Pascual L, Rodrigues P, Gallardo-Pujol D. (2013)
How does morality work in the brain? A functional and structural
perspective of moral behavior. Front Integr Neurosci. 7:65.

Greene JD, Sommerville RB, Nystrom LE, Darley JM,
Cohen JD. (2001) An fMRI investigation of emotional
engagement in moral judgment. Science. 293(5537):2105-8.

トロツコ問題: 神経科学からの知見(2)

機能的MRIで二つの条件の判断をしているときの脳活動を計測した。



Impersonal条件(ポイント切り替え)
ではDLPFCが活動した。

Personal条件(歩道橋)
ではvmPFCが活動した。

以前の脳計測研究からの知見:

- DLPFCは認知的処理やワーキングメモリに関わる。
- vmPFCは情動的処理や社会性認知に関わる。

結論: ジレンマは我々の道徳的判断に感情が関わっているために起こる。

トロツコ問題: 神経科学からの知見(2)

結論: ひとびとの二種類の事例に対する道徳的判断は、
統合的な説明が難しいだけでなく、
それぞれ情動(義務論的な判断)と認知(功利主義的な判断)
という異なる機能に関わる脳部位によって
形成されていることが明らかになった。

これは、道徳的判断が状況に応じてそれぞれ異なる機能をもつ
脳内機構によって形成されている証拠である。

したがって、道徳的判断を生み出すような単一の機構は幻想で
ある。

飯島和樹 (2013) 共生のための障害の倫理学と実験倫理学：直観
の地位を巡って. UTCP Uehiro Booklet (2), 89-113, 2013-10

このようにして、脳計測は
「道徳的判断」という人文社会科学における問題について示唆
を与えることができる。

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

ちょっと考えてみてください

「personal条件でvmPFCが活動した。

情動的処理でvmPFCが活動した。

以上から

「personal条件では情動が処理されている」

これは正しい推論だろうか？

注意: この問いに脳科学の知識は必要がない。
あなたの論理的処理の能力が問われています。

ちょっと考えてみてください

「personal条件でvmPFCが活動した。

情動的処理でvmPFCが活動した。

以上から

personal条件では情動が処理されている」

これは正しい推論だろうか？

注意: この問いに脳科学の知識は必要がない。
あなたの論理的処理の能力が問われています。

答え: No.

If A, then B. と

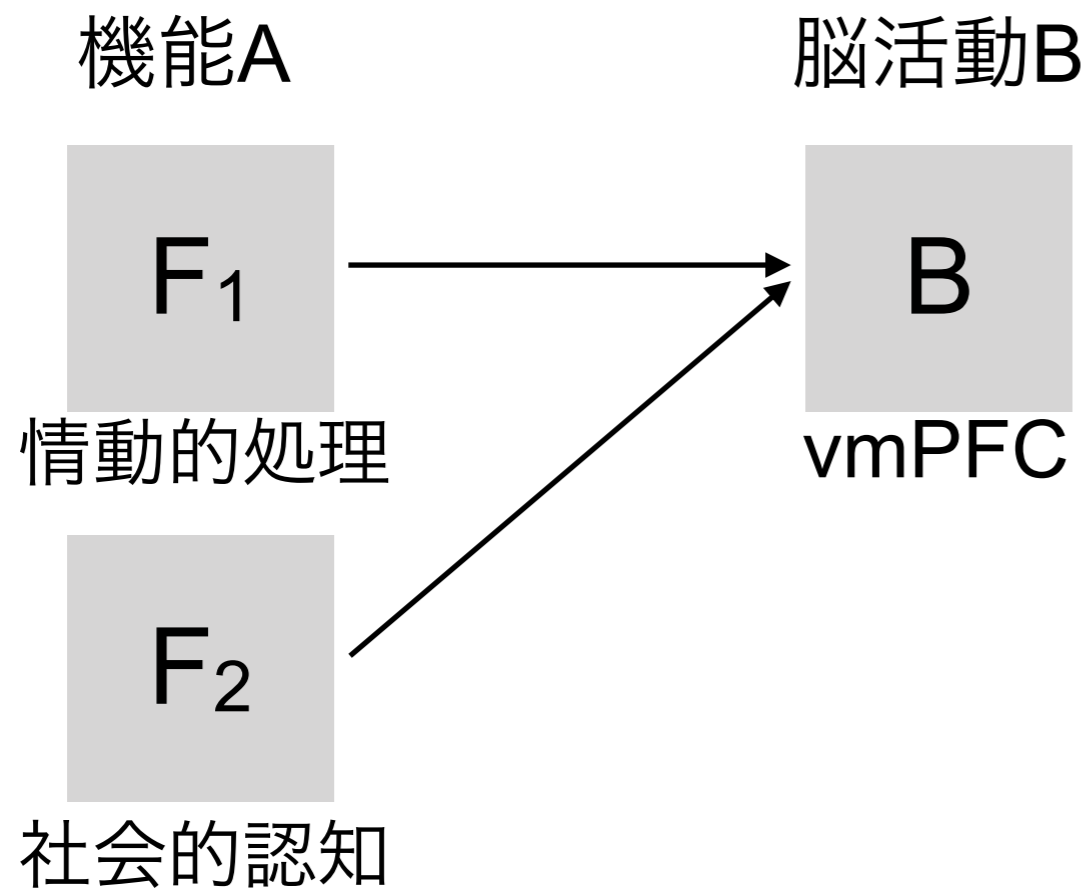
If C, then B. から、

if A, then Cは帰結できない。

逆推論の問題

ある機能 F_1 に関してある脳部位 B が活動したとき、その脳部位 B がその機能 F_1 に関連すると結論することは(比較的)妥当。
しかしその逆、ある脳部位 B が活動したからといって、ある機能 F_1 が行われていると結論する(=逆推論)のは論理的誤謬。

Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? Trends in Cognitive Sciences, 10(2), 59–63.



いまの話で言えば、
vmPFCは情動に関わること以外
でも活動するかもしれない。

ゆえに、厳密に言えるのは、
「impersonal条件にはなくて
personal条件にあるなにか」
がvmPFCの活動と相関/共変
しているということまで。

そこから先は、過去の知見と
組み合わせたうえでの推測。

逆推論の問題: ベイズで考える

順推論: 機能 $F_1 \Rightarrow$ 脳活動 B_1 $P(B_1 | F_1)$ という観察(だけ)から

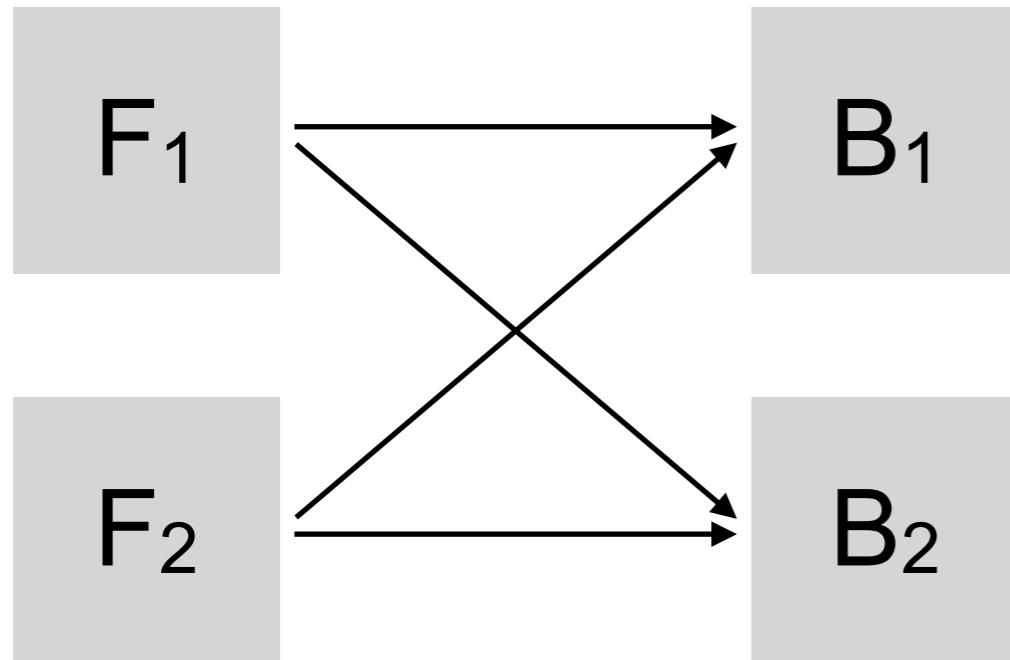
逆推論: 脳活動 $B_1 \Rightarrow$ 機能 F_1 $P(F_1 | B_1)$ を導くことはできない。

$$P(F_1 | B_1) = \frac{P(B_1 | F_1)P(F_1)}{P(B_1)}$$

ベイズの公式より、 $P(F_1)$ を考慮する必要がある。
 $P(F_1 | B_1)/P(F_1)$ が十分大きい必要がある。
(過去の研究データベースを使う)

機能F

脳活動B

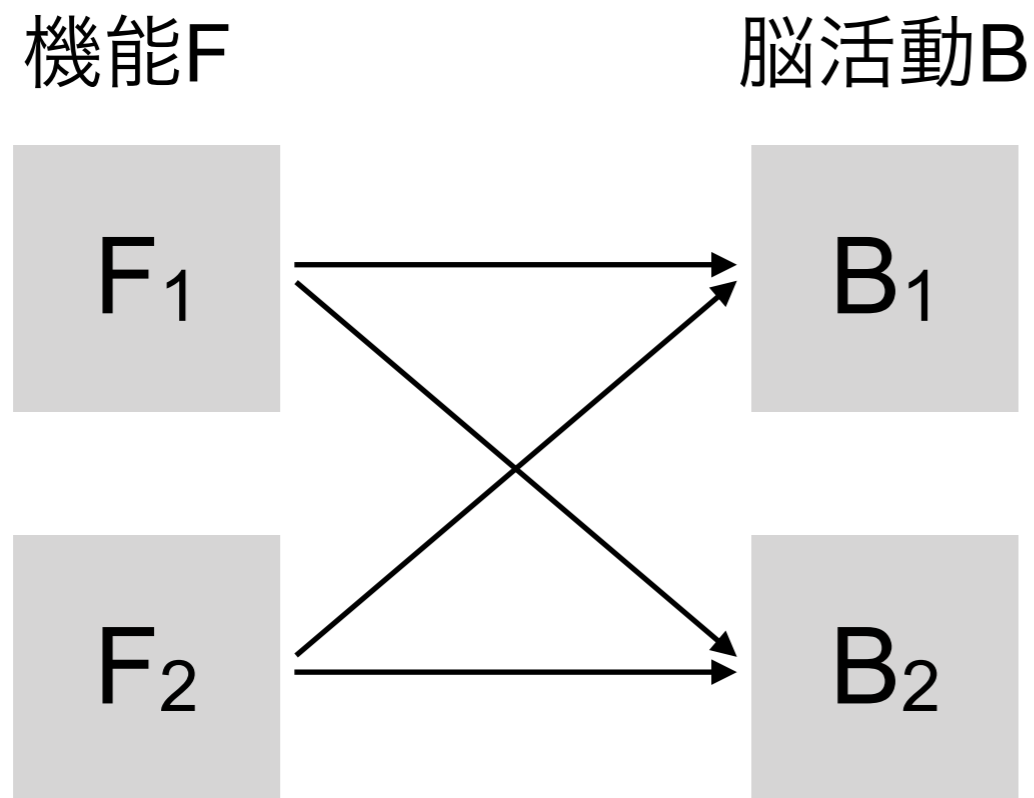


ベイズの公式より、 $P(B_1)$ を考慮する必要がある。
どんな課題をやっても活動する脳部位は $P(B_1)$ が高い。
 $P(B_1 | F_1)/P(B_1)$ が十分大きい必要がある。

逆推論とデコーディング

「脳を読む/デコーディング」ではまさにこの逆推論がなされている。
それはどうして可能か。

$$P(F_1 | B_1) = \frac{P(B_1 | F_1)P(F_1)}{P(B_1)}$$



デコーディングでは

- 1) 機能、脳活動について
十分大きいデータを集めること
- 2) 刺激の空間を絞ること
(視覚の課題では聴覚は無視できる)
でこの問題に対処。
本質的には機械学習の汎化の問題。
(刺激空間、別の被検者への汎化)

1. 神経科学

- 脳を測る: 神経活動計測
- 脳を測る: 機能イメージング

2. 応用脳科学

- 応用1: 脳を読む - デコーディング
- 応用2: 脳を繋げる - BMI/BCI
- 応用3: 脳を測る - トロツコ問題

3. 方法論的検討: 逆推論の問題

Discussion

- まずは各項目のClarification
- 論点1: 脳科学的に問題解決できることの範囲と限界
 - 得られた知見の一般化可能性
 - 再現性問題
- 論点2: 脳を読む、脳を操作する、にまつわる倫理的問題
 - なんらかの社会的合意が必要？

End