

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05642

研究課題名（和文）多階層光遺伝学による大脳皮質の認知・学習機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of cognitive and learning mechanism of cerebral cortex by multiscale optogenetics

研究代表者

大木 研一（Ohki, Kenichi）

東京大学・大学院医学系研究科（医学部）・教授

研究者番号：50332622

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 156,200,000 円

研究成果の概要（和文）：光遺伝学を用いてスパインの機能イメージング法を開発し、視覚野の細胞の方位・位相選択性形成のメカニズムを解明した。深層学習を用いて高次視覚野の細胞の複雑な受容野を系統的に調べる方法を開発した。大脳皮質の領野をつなぐ結合が、発達時に精密に形成されるメカニズムとその学習則を解明した。視覚野の細胞集団に表現されている視覚情報を再構成し、正常・疾患動物の知覚を理解する道を開いた。新規図形の視覚弁別課題をマウスに学習させ、学習に伴いスパースな表現様式に変化することを見出した。全脳の神経活動を計測しつつ細胞集団を活性化・不活性化する方法を開発し、光刺激により、人工的に知覚・可塑性を誘導することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

視覚野の細胞集団に表現されている視覚情報を再構成する方法の開発は、マウスが何を見ているのかを理解する道を開き、今後の正常・疾患マウスを用いた知覚研究に対して強力な方法論となる。深層学習を用いた視覚野の神経細胞の非線形で複雑な受容野を系統的に調べる方法の開発については、実際の脳活動をニューラルネットワーク上に写しこんで解析しており、脳活動を模した脳型人工知能の開発にもつながる。大脳皮質の領野をつなぐ階層的かつ並列的なネットワークが発達時に精密に形成されるメカニズムを初めて解明したことは、網膜からの活動伝播の重要性を示唆し、早期失明の病態理解にもつながる。

研究成果の概要（英文）：We developed a functional imaging method for spines using optogenetics to elucidate the mechanisms of orientation and phase selectivity formation in cells of the visual cortex. We developed a method to systematically investigate the complex receptive fields of cells in higher visual cortex using deep learning. We elucidated the mechanisms and their learning rules by which the connections between cortical areas are precisely formed during development. We reconstructed the visual information represented in cell populations in the visual cortex, paving the way for understanding perception in normal and diseased animals. We trained mice in a visual discrimination task for novel shapes and found that with learning, a sparse representation pattern emerges. We developed a method to activate and inactivate cell populations while measuring neural activity in the whole brain, and were able to artificially induce perception and plasticity using light stimulation.

研究分野：神経科学

キーワード：視覚野 イメージング 光遺伝学 神経回路 情報処理

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脳はどのようにして複雑な情報処理を行っているのだろうか？脳はどのようにして学習を通して神経回路を改変し、複雑な機能を獲得しているのだろうか？脳の情報処理の素過程として、個々の神経細胞がどのような情報の入力を受け、それを組み合わせて、複雑な情報を出力しているのかを解明することを第一の目標とする。次に、学習・記憶の素過程として、個々のシナプスに入力する情報がどのように変化するのか、シナプス可塑性の学習則をとくに情報の視点から解明し、それがその細胞の機能の変化とどう関係しているのかを解明することを第二の目標とする。

2. 研究の目的

上記2つの目標を達成するため、光遺伝学を駆使してスパインレベルの機能イメージング法を開発し、個々のシナプスに入力する情報を可視化し、その変化を観察し、脳の情報処理の素過程と、学習・記憶の素過程をシナプスレベルで解明する。さらに、細胞集団のイメージングと組み合わせて、これらの素過程がネットワーク全体としての学習にどのように寄与しているのかを解明する。最後に、光遺伝学を用いて細胞集団を人工的に活性化し、細胞集団の活動が知覚・学習と因果関係を持つかどうかを検討する。以上、シナプスレベルから全脳レベルにいたる多階層で、脳の認知と学習の素過程から個体レベルでの認知・学習との因果関係を検証し、脳の情報処理と学習則の原理を解明する。

3. 研究の方法

(1) 光遺伝学を用いたスパインレベルの機能イメージング法の開発

個々の神経細胞に入力する数千のシナプスについて、どのような情報が入力しているのかを網羅的に調べる方法を開発する。GCaMPの性能向上により、スパインイメージングによって、個々のスパインにどのような情報が入力するかを計測し、それが細胞体の活動電位とどのように関係するかを調べる方法が現実的になってきた。しかしながら、細胞体で活動電位が発生すると、樹状突起へ逆伝播し、電位依存性のカルシウムチャンネルを開く。これにより発生するカルシウム流入は、スパインのNMDA受容体からの流入量を遙かに凌駕し、シナプス入力のシグナルをマスクしてしまう。この問題に対処するため、*in vivo*で活動電位の逆伝播を停止させながら、スパインの2光子カルシウムイメージングを行う方法を開発する。

(2) 脳の情報処理の素過程の解明

大脳皮質の神経細胞は、数千の入力を受け取り、その情報を組み合わせることによって、段階的に複雑な機能を実現している。このような情報処理の素過程について、その複雑な機能を実現する神経回路は、ほぼ全く知られていない。この問題を解決するため、深層学習を用いて視覚野の神経細胞の非線形で複雑な受容野を系統的に調べる方法を開発し、項目(1)の方法を用いて、視覚野の神経細胞が、どのような入力を受け取り、それを組み合わせて物体の形等の複雑な情報を抽出しているのか、その素過程を解明する。

(3) 脳の学習の素過程と学習則の解明

大脳皮質の神経細胞は、新規図形を学習し、それに対する反応性を獲得することができる。この学習はシナプスレベルで起こっていると考えられるが、実際にどのような変化が起こっているのか全くわかっていない。本計画では、動物が新規図形を学習しているときの視覚野の神経細胞の反応性の変化を継時的に観察し、学習則を情報という新しい視点から明らかにする。そのため、マウスに新規図形のペア(図形A、B)を提示し、図形Aを提示しているときに舌を出すと水が貰え、図形Bを提示しているときは貰えないというタスクを学習させる。

(4) 学習・記憶にともなう細胞集団による情報表現の変化

個々の神経細胞に入力する情報が、学習に伴って変化するとき、ネットワーク全体としての情報表現がどのように変化するのかを解明する。最近我々は、自然界の風景が、一次視覚野の非常に少数の細胞(5%以下)に表現されていて、逆にそれらの細胞の活動から動物がみた風景を再構成できることを示した。従って動物が見たことがある画像はごく少数の細胞にスパースに表現され、新規の画像は多数の細胞に表現されているのではないかと予想される。したがって、新規図形の学習に伴って、スパースな表現様式に変化が起こるのではないかと仮説を立て、これを検証する。

(5) 全脳での領野レベルでの光抑制の方法の開発、領野内の細胞集団の光活性化

細胞集団の活動と知覚の因果関係を検証するために、光抑制と光活性化の二つの方法を開発する。全脳にGCaMPを発現している組換えマウスが課題を遂行している時に、マクロズーム顕微鏡を用いて全脳から神経活動に由来するカルシウムシグナルを計測する。マクロズーム顕微鏡に光刺激用のレーザーを装着し、大脳皮質の任意の場所にレーザーを照射できるシステムを開発する。これを抑制性細胞にオプシンを発現している動物に用いて領野単位で不活性化を行い、または興奮性細胞にオプシンを発現している動物に用いて細胞集団を活性化し、課題への影響をマッピングする方法を開発する。

(6) 高次視覚野における細胞集団の活動と知覚・学習の因果関係の検証

(5)で開発した2つの方法を用いて、細胞集団の活動と知覚の因果関係を検証する。まず、領域単位で不活性化を行う方法を用いて、多数の高次視覚野を一つ一つ不活性化し、(3)で用いる課題の遂行に対して、どこの領野を不活性化したときに成績が最も大きく低下するかを検証し、どの領野が課題遂行に最も重要であるか調べる。次に、その領野の細胞集団の活動を(4)の方法を用いて調べ、図形AもしくはBに対して活性化される細胞集団を同定する。これらの細胞集団を(5)の方法を用いて活性化し、視覚刺激を与えなくても課題を遂行できるかどうか、これらの細胞集団の活性化が知覚の代替えとなるかを検証する。さらに、特定の細胞集団を繰り返し活性化したときに、細胞体の活動が変化するか

どうか、これによって人工的に記憶を作り出すことができるかどうか検証する。

4. 研究成果

(1) 光遺伝学を用いたスパインレベルの機能イメージング法の開発

興奮性ニューロンに、カルシウムセンサータンパクGCaMP6sとステップ関数型の抑制性光遺伝学タンパクSWiChR++(Berndt et al., 2016)をCre-loxPシステムを使って少数の細胞に発現させた。SWiChR++にはKv2.1フラグメントを付けて細胞体に限局して発現させた。これにより、一過性の光照射で細胞体を約1時間不活性化し、活動電位の逆伝播が生じない条件下で、スパイン活動を記録することが可能になった。これにより、個々のスパイン活動を、逆伝播シグナルの混入なく、正確に測定することが出来るようになった(Kondo et al., submitted)。これにより、(2)の脳の情報処理の素過程の研究を精密に行うことが初めて可能になった。

(2) 脳の情報処理の素過程の解明

(2-a) 深層学習を用いた高次視覚野の神経細胞の複雑な受容野を系統的に調べる方法の開発
様々な視覚刺激に対する高次視覚野の細胞の反応を、深層学習のネットワークに忠実に写し取り、そのネットワークの挙動を詳細に調べることによって、高次視覚野の細胞の機能を系統的に解析する方法を開発した。7200枚の異なる自然画像をマウスに提示している間、マウス高次視覚野の腹側経路に属しているV1、LM(V2)野およびLI(V3)野の9000個以上のニューロンの活動を広域2光子カルシウムイメージング(3x2mm)で同時測定し、これらの細胞のImageNetデータベースの7200枚の画像に対する反応を深層学習のネットワークに写し取った。深層学習ネットワーク上で、これらのユニットの応答を最大化する画像を求めたところ、LMやLIのニューロンはV1とは異なり、複雑な図形に最大の応答を示すことが観察され、腹側経路の階層を上がると、複雑な図形を表現していることが示唆された(Ishida et al., in prep.)。これにより、高次視覚野の複雑な受容野を系統的に調べることが可能になった。

(2-b) 視覚野の細胞の方位選択性形成の素過程の解明

V1において、個々の神経細胞がどのような入力を受け取り、それをどのように組み合わせて方位選択的な応答を出力しているのかその素過程の解明を試みた。動物に視覚刺激を提示し、視覚野の個々の興奮性ニューロン細胞体の活動を記録したのち、(1)で確立した実験系を用い、細胞体活動を光抑制し、スパインの活動を2光子カルシウムイメージングにより記録した。個々の興奮性ニューロンの基底樹状突起上にある約1000個のスパインの活動を記録することに成功した。これをもとに、シナプス統合のメカニズムを解析した。その結果、細胞体と同じ方位選択性を持つスパインが最も多数存在すること、さらにこれらのスパインが、特定の枝にクラスターを形成していることが分かった。樹状突起統合モデルを立て、各スパインのカルシウムシグナル変化から細胞体の反応の予測を行ったところ、スパイン入力の単純な加算では細胞体の反応をあまりよく予想できなかった。一方、ある方位に反応するスパインが数個以上クラスターになっている樹状突起のみ細胞体の反応に寄与すると考えると、細胞体の反応にかなり近い予想が得られた。さらに、細胞体で活動電位が発生するときの閾値を考慮すると、細胞体の反応に非常に近い予想が得られた。クラスターする枝は細胞当たり平均7本存在し、枝全体の約20%に相当した。クラスターに関係するスパイン数は、細胞当たり平均63個で、スパイン全体の約7%に相当した。以上の結果から、細胞体の活動はスパイン入力の数とクラスター、活動電位の閾値により決まり、多数のスパインの中でもごく少数のスパインが細胞体活動の決定に強く関係していることが示唆された(Kondo et al., submitted)。大脳皮質の神経回路網は、1つのニューロンが何千ものシナプス結合を持つ密なネットワークであると考えられてきたが、今回の結果は、特定の情報処理に使われるシナプス結合はごく一部であり、密なネットワークの中に疎なネットワークが埋め込まれていて、シナプスレベルでsparseな伝達が起きていることを示唆する初めての研究成果である。

(2-c) 視覚野の細胞の位相選択性形成の素過程の解明

次に、V1の単純細胞の位相選択性の形成メカニズムを調べた。まず、マウスV1に位相選択性について機能マップがあるかどうか調べ、位相選択性についての機能マップがあることを初めて明らかにした。さらに、(1)で開発した方法を用いて、V1の単純細胞から、細胞あたり約700のスパインの位相選択性を記録することに成功した。このマップから、単純細胞はその細胞体の位相選択性と似た位相選択性の入力を集めていることがわかった。さらに、位相選択的な入力は、位相選択性のマップに対応する形で樹状突起上に分布していることがわかった(Fukuda et al., in prep.)。これは、V1の局所回路で、単純細胞の位相選択性が保たれるメカニズムを初めて明らかにしたものである。

(3) 脳の学習の素過程と学習則の解明

GCaMPを発現した組換えマウスを用いて新規図形の go/no-go 視覚弁別課題を訓練させることに成功した。視覚刺激としては、新規図形(L字および逆L字)を go(報酬刺激)及び no-go(無報酬刺激)として用いた。マウスは約1-3週間の訓練後、75%以上の正答率を示した。この課題を用いて、(4)の情報表現の変化、(6)の細胞集団の活動と学習の因果関係を調べた。この課題を学習しているときの学習則については(4)で説明する。さらに、生後すぐの発達時に大脳皮質の領野間をつなぐ結合が形成されるとき学習則の解明については、次に(3')で説明する。

(3') 脳の発達時の学習則の解明

大脳皮質にある多数の領野をつなぐ結合が、発達時に精密に形成されるメカニズムを世界で初めて解明した(Murakami et al., 2022, Nature)。ヒトの大脳皮質には180にも及ぶ多数の領野が存在し、これらの領野間を結ぶ数千にも及ぶ精密な神経回路による階層的かつ並列的な情報処理は、私たちの脳が

複雑かつ汎用的な知性を獲得するための基盤となっている。従来の神経回路発達の研究では、感覚器から大脳皮質の入り口まで(視覚の場合、網膜から一次視覚野まで)の神経回路形成については詳細に調べられてきたが、大脳皮質の領野間をつなぐ無数の結合がどのようなメカニズムで3次元の脳内で精密に混線なく配線されるのかについてはほとんど分かっていなかった。そのメカニズムの一つとして領野の階層性に従ってより低次の領野からより高次の領野へと順に形成していけば混線なく配線できると考えられるが、マウスでは生後から開眼までの2週間の間に多数の領野間の結合を全て作る必要があるが、このメカニズムでは時間がかかり過ぎる。それでは、このような複雑な無数の領野間結合を短時間に混線なく形成するためのメカニズムは何だろうか。

まず我々は開眼前の未成熟な状態の遺伝子改変マウスを用いて、大脳皮質視覚野全体の自発的神経活動を広視野カルシウムイメージングにより観察した。自発活動の時空間的なパターンを機能的相関解析したところ、生後5日というまだ領野間結合が形成される前から、各高次視覚野がレチノトピー構造を持つことを発見した。このレチノトピー構造からV1と複数の高次視覚野の正確な位置を同定することができ、領野間結合の発達を追跡することが可能となった。

我々は同定した領野間結合の発達を解剖学的に調べるために、自発活動の解析から同定した一つの視覚野にトレーサーを注入し、他の領野で逆行性に染まる細胞を観察した。その結果、視床核から大脳皮質視覚野への投射[低次視床核 V1、高次視床核 高次視覚野]が、大脳皮質の領野間結合よりも先に形成されることを発見した。さらに低次・高次視床核はそれぞれ独立の経路で網膜から入力を受けており、網膜からV1と高次視覚野まで並列な経路(モジュール)として形成されていることを明らかにした。また、我々は解剖学的手法だけでなく、薬理的な抑制実験を用いて、これらの並列モジュールは網膜からの自発活動を大脳皮質まで伝播していることも明らかにした。これによりV1だけでなく高次視覚野も早期から網膜のレチノトピーの情報を自発活動として受け取り、大脳皮質の領野間結合はこの網膜から伝わる自発活動を元にして効率的に形成していることが示唆された。最後に我々は並列モジュールを伝播する網膜自発活動の、大脳皮質の領野間結合の形成に対する役割を調べるために、産まれた直後から網膜自発活動を除去し、V1から高次視覚野への投射形成における影響を調べた。その結果、網膜自発活動を除去したマウスではV1から高次視覚野への投射が乱れており、このことは網膜自発活動が大脳皮質の領野間結合の形成に重要であることを示している。従って、発達期の領野間結合形成に関する学習則は、網膜から伝播する自発活動を網膜の位置を符号化する教師信号として用い、神経回路が形成されていくことが示唆された。これは、大脳の多数の領野間をつなぐ結合が精密に発達するメカニズムを世界で初めて示した研究である。

(4) 学習・記憶にともなう細胞集団による情報表現の変化

(4-a) 視覚野の細胞集団による情報表現の可視化

まず、二光子カルシウムイメージングにより、V1の局所の細胞集団の活動を網羅的に計測し、その活動から刺激として提示された自然画像の復元を行った。

まず、自然画像に対してV1の少数の細胞がスパースに活動することが観察された。続いて、集団活動から画像の復元を行ったところ、スパースな活動からもある程度の精度で刺激画像を復元できた。特に、個々の画像は平均20個程度の良く応答する細胞から復元でき、その精度は全ての細胞からの復元と同程度であった。また、同じ刺激画像を繰り返し提示すると、応答する細胞やその活動の大きさには揺らぎがあったが、その活動から復元される画像は比較的安定していた。この安定した情報表現は個々の細胞の持つ情報が部分的に重複していることにより達成されていた。これらの結果から、V1のスパースな活動には、神経活動の揺らぎにも関わらず、安定した視覚情報が表現されていることが示唆された(Yoshida et al., 2020, Nature Communications)。この研究は動物の細胞レベルの集団活動から知覚のデコーディングを行った初めての研究であり、正常または疾患動物の知覚を理解する道を開いた。

(4-b) 新規図形の学習にともなう細胞集団による情報表現の変化

次に(3)の学習課題に関連した神経活動を調べるため、広域カルシウムイメージングを行い、学習後のマウスの課題遂行中の神経活動を記録した。報酬刺激(Go)と無報酬刺激(No-go)に対する視覚野での応答パターンを比較すると、視覚野の一部の領域で報酬刺激に対する応答が大きかった。これらの活動パターンを基にして、刺激に対するマウスの行動を予測することができた。加えて、(6-a)で後述するように、この応答差がある部位の神経活動を光遺伝学により抑制すると、報酬刺激への行動応答(飲水)が減少した。従って、視覚野における報酬刺激と無報酬刺激の応答差を基にして課題を遂行している可能性が示唆された。さらに、視覚野以外に、脳梁膨大後部皮質、体性感覚野、運動野などでも、行動応答を示した場合には、神経活動が増大することが分かった。

この視覚野における報酬刺激と無報酬刺激間での応答の差が学習の前後でどのように変化するかを調べるために、学習前と学習後の神経活動を広域カルシウムイメージングにより記録した。学習初日では報酬刺激、無報酬刺激への応答パターンが比較的似ており、応答差がわずかであるが、学習過程で無報酬刺激への応答が抑制されることにより応答差が増大した。この結果から学習過程では必要な情報は維持されつつ、不要な情報が抑制されることを示唆された(Yoshida et al., in prep.)。このことは、新規図形の学習に伴って、スパースな表現様式に変化が起こるのではないかと仮説とも合致し、学習によるスパース化を支持する重要な結果である。

(5) 全脳での領野レベルでの光抑制の方法の開発、領野内の細胞集団の光活性化

(5-a) 全脳の神経活動を計測しつつ領野内の細胞集団を活性化する方法の開発

マクロズーム顕微鏡に光刺激用のレーザーを装着し、大脳皮質の任意の場所に径300-500ミクロンのレーザー光を照射できるシステムを開発した。性能確認のために、GCaMP発現マウスの興奮性ニューロンにChrimson(Klapeetke et al., 2014)をAAVで発現させ、カルシウムイメージングと同時にV1の活

動を光遺伝学的に活性化させた。その結果、直接刺激した V1 内の領域だけでなく、その領域から投射がある高次視覚野 (LM, AL, PM, RL) においても活動の上昇が確認でき、この顕微鏡システムの有用性が確認された。これを用いて、(6-b)の光による細胞集団の活性化による知覚の代替の実験を行った。

さらに、Spatial Light Modulator を用いて超短パルスレーザーのホログラムを脳内に作り、任意の細胞集団を活性化する方法も開発した。ChroME、C1V1、ChRmine を比較したところ、三者の中では ChRmine が一番効率よく、多数の細胞を任意の時空間パターンで活性化することが可能になった。これを用いて、(6-c)の光による細胞集団の活性化による学習の代替の実験を行った。

(5-b) 全脳の神経活動を計測しつつ全脳の任意の場所を領野単位で不活性化する方法の開発

(5-a)と同じシステムを用い、視覚刺激を与えながら全脳のイメージングをすると、V1 および高次視覚野に視覚応答が見られた。V1 の抑制性ニューロンに Chrimson を発現させ、V1 を光刺激して抑制すると、V1 および高次視覚野の活動が消失した。V1 の視覚応答および高次視覚野への伝播が抑制されたと考えられる。これを用いて、(6-a)の図形弁別課題に重要な高次視覚野の同定および、(5-a') 光遺伝学を用いた視覚情報の伝播経路解析を行った。

(5-a') 光遺伝学を用いた視覚情報の伝播経路解析

(5-a)で開発した全脳の神経活動を計測しつつ任意の場所を領野単位で不活性化する方法を用いて、マウス V1 および高次視覚野で視覚情報がどのように伝播しているか調べた。マウスや霊長類の解剖学的な研究から V1 と複数の高次視覚野は階層的な神経回路を構成していることが示唆されてきたが、実際に視覚応答が階層的に伝播するかどうかは検証されていなかった。視覚刺激提示と同時に特定の1領野へ光刺激を行いその領野の視覚応答を抑制したときに、他の領野への視覚応答の伝播が抑制されるかどうかを調べた。まず V1 を抑制する実験を行ったところ、すべての高次領野 (LM, AL, RL, PM) で視覚応答が減弱した。このことから、高次領野へ伝播する視覚情報は V1 経由であることが確認された。また、高次視覚野はその応答特性から形を処理する腹側経路 (LM, LI, PM) と動きを処理する背側経路 (AL, RL) に分類される。それぞれの経路を特異的に活動させる視覚刺激条件で実験を行ったところ、腹側経路活性化条件では、LM を抑制すると、LI/PM の視覚応答が減弱し、V1→LM→LI/PM という階層的な伝播が示唆された。一方、背側経路活性化条件では AL または RL をそれぞれ抑制した際には、他の領野への影響が小さく、V1→AL/RL という並列処理が示唆された。以上の結果から、マウス視覚野において腹側経路では階層的な、背側経路では並列な情報伝播を行っていることが示唆された (Ishida, Murakami et al., in prep)。領野の階層性は従来解剖学的な構造から提案されてきたが、視覚応答の伝播という点から階層性を因果的に示した初めての研究である。

(6) 高次視覚野における細胞集団の活動と知覚・学習の因果関係の検証

(6-a) 光抑制による図形弁別課題の遂行に重要な高次視覚野の同定

(5-b)で開発した領域単位で不活性化を行う方法を用いて、一次および高次視覚野を網羅的に不活性化し、(3)で用いた図形弁別課題を学習後のマウスについて、課題遂行に対して、どこの領野を不活性化したときに成績が最も大きく低下するかを検証した。V1 の一部または LM, AL の一部を抑制した際に、報酬刺激への行動応答 (go 応答) が大きく減少した。この領域は、(4-b)で明らかにした報酬刺激と無報酬刺激の差が顕著な領域に対応していた。一方、無報酬刺激への行動抑制 (nogo 応答) は視覚野付近の光抑制では阻害されなかった。この結果から、視覚野の一部の神経活動のみが図形弁別時の行動の実行に使われていることが示唆された。さらに視覚野以外の領域に対する光抑制を行ったところ、二次運動野付近で無報酬刺激への行動抑制が阻害される傾向が見られた。これらの結果より、報酬刺激への行動応答と無報酬刺激への行動抑制は異なる脳領域・経路で制御されている可能性が示唆された (Yoshida et al., in prep.)。

(6-b) 光による細胞集団の活性化による知覚の代替

(5-a)で述べた光刺激を用いて、視覚刺激を用いず、視覚野の人工的な活性化をマウスが感知できるかどうかを検証した。視覚野内の特定の場所への光活性を go 刺激 (報酬刺激)、皮質外への光刺激を nogo 刺激 (無報酬刺激。この場所への光刺激は神経活動を惹起しない) とした。マウスは約5日で光刺激による視覚野の人工的な活性化に対して選択的な行動応答を学習した。学習後に、視覚野の人工的な活性化は知覚の代替となっているのか、すなわち視覚刺激による視覚野の活性化により代替できるのかを検証するために、学習後のマウスの視野内の様々な場所に視覚刺激を提示した。その結果、視覚刺激は報酬とは関連づけられていないにも関わらず、光刺激を行った視覚野領域の受容野に対応する視野の位置に視覚刺激を提示した時のみ、マウスは行動応答を示した。この結果は、マウスが視覚野の人工的な活性化と視覚刺激を同様に知覚している可能性を示唆する (Tamura, Yoshida et al., in prep.)。これにより、神経活動の人為的な操作により、知覚を代替できる可能性が示された。

(6-c) 光による細胞集団の活性化による学習の代替

V1 の神経細胞の方位選択性は、学習により変化することが知られているが、そのメカニズムは不明な点が多い。そこで二光子光遺伝学による細胞レベルの活動制御を利用し、マウス V1 細胞での方位選択性の可塑的変化の誘導を試みた。

V1 の興奮性細胞に GCaMP と C1V1 を発現させ、生後3 - 4週令のマウスで実験を行った。可塑性誘導の条件付け刺激として、特定の傾きを持った動く縞模様を視覚刺激として提示すると同時に標的とする細胞の活動を光刺激により活性化させた。この条件付け刺激の前後で、各細胞の方位選択性を計測し、その変化を調べた。予備的実験の結果、条件付けを行った細胞で、条件付け刺激時に提示した方位に対する視覚応答の増強が観察された。また、条件付けの標的とした細胞のみならず、周囲の細胞においても視覚応答の変化が観察された (Yoshida et al., in prep.)。これにより、神経活動の人為的な操作により可塑性を誘導できることが示され、学習を代替できる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Ukita J, Ohki K	4. 巻 167
2. 論文標題 Adversarial attacks and defenses using feature-space stochasticity.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 875-889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2023.08.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li R, Ohki K, Matsui T	4. 巻 678
2. 論文標題 Ketamine-induced 1-Hz oscillation of spontaneous neural activity is not directly visible in the hemodynamics.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biochemical and Biophysical Research Communications	6. 最初と最後の頁 102-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrc.2023.08.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanita Frey, Murakami T, Maki K, Kawaeue T, Tani N, Sugai A, Nakazawa N, Ishiguro K, Adachi T, Kengaku M, Ohki K, Gotoh Y, *Kishi Y	4. 巻 22
2. 論文標題 Age associated reduction of nuclear shape dynamics in excitatory neurons of the visual cortex.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aging Cell	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/accel.13925	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Murakami T, Ohki K,	4. 巻 17
2. 論文標題 Thalamocortical circuits for the formation of hierarchical pathways in the mammalian visual cortex.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in neural circuits	6. 最初と最後の頁 1155195-1155195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncir.2023.1155195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pham TQ, Matsui T, Chikazoe J	4. 巻 12
2. 論文標題 Evaluation of the Hierarchical Correspondence between the Human Brain and Artificial Neural Networks: A Review.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biology (Basel)	6. 最初と最後の頁 1330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/biology12101330.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Noro Y, Li R, Matsui T, Jimura K,	4. 巻 12:16
2. 論文標題 A method for reconstruction of interpretable brain networks from transientsynchronization in resting-state BOLD fluctuations.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroinformatics	6. 最初と最後の頁 960607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fninf.2022.960607.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsui T, Yamashita KI,	4. 巻 13
2. 論文標題 Static and Dynamic Functional Connectivity Alterations in Alzheimer's Disease and Neuropsychiatric Diseases.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Brain Connectivity	6. 最初と最後の頁 307-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/brain.2022.0044.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tezuka Y, Hagihara K M, Ohki K, Hirano T, Tagawa Y	4. 巻 11
2. 論文標題 Developmental stage-specific spontaneous activity contributes to callosal axon projections	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 1330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7554/eLife.72435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Murakami T, Matsui T, Uemura M, Ohki K,	4. 巻 608
2. 論文標題 Modular strategy for development of the hierarchical visual network in mice.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 578-585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-05045-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsui T, Taki M, Pham TQ, Chikazoe J, Jimura K,	4. 巻 16
2. 論文標題 Counterfactual Explanation of Brain Activity Classifiers Using Image-To-Image Transfer by Generative Adversarial Network.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroinformatics	6. 最初と最後の頁 802938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fninf.2021.802938.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsui T, *Pham TQ, Jimura K, Chikazoe J	4. 巻 249
2. 論文標題 On co-activation pattern analysis and non-stationarity of resting brain activity.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neuroimage	6. 最初と最後の頁 118904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2022.118904.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsui T, Hattori Y, Tsumura K, Aoki R, Takeda M, Nakahara K, Jimura K,	4. 巻 249118892
2. 論文標題 Executive control by fronto-parietal activity explains counterintuitive decision behavior in complex value-based decision-making.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neuroimage	6. 最初と最後の頁 118892
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2022.118892.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kondo S, Kiyohara Y, Ohki K	4. 巻 16
2. 論文標題 Response Selectivity of the Lateral Posterior Nucleus Axons Projecting to the Mouse Primary Visual Cortex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Neural Circuits	6. 最初と最後の頁 825735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncir.2022.825735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chatterjee S, Ohki K, Reid RC	4. 巻 12
2. 論文標題 Chromatic micromaps in primary visual cortex	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-22488-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Pham TQ, Yoshimoto T, Niwa H, Takahashi HK, Uchiyama R, Matsui T, Anderson A K, Sadato N, Chikazoe J	4. 巻 -
2. 論文標題 Vision-to-value transformations in artificial neural networks and human brain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 BioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2021.03.18.435929	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hagihara KM, Ishikawa AW, Yoshimura Y, Tagawa Y, Ohki K	4. 巻 31
2. 論文標題 Long-Range Interhemispheric Projection Neurons Show Biased Response Properties and Fine-Scale Local Subnetworks in Mouse Visual Cortex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 1307 ~ 1315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/cercor/bhaa297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida T, Ohki K.	4. 巻 11
2. 論文標題 Natural images are reliably represented by sparse and variable populations of neurons in visual cortex.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-14645-x.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 松井鉄平, 大木研一	4. 巻 10
2. 論文標題 神経 グリア fMRI信号を繋ぐ脳活動イメージング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 実験医学増刊号「グリア」	6. 最初と最後の頁 第5章
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsui T, Murakami T, Ohki K	4. 巻 29
2. 論文標題 Neuronal Origin of the Temporal Dynamics of Spontaneous BOLD Activity Correlation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 1496 ~ 1508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/cercor/bhy045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計76件 (うち招待講演 31件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Kondo S, Kikuta K and Ohki K
2. 発表標題 Combined dendritic and somatic non-linear integration of synaptic inputs determine the output tuning in the mouse primary visual cortex neurons.
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nakano M, Yoshida T, Ohki K
2. 発表標題 Inter-stimulus activity in mouse primary visual cortex encodes the timing of future visual events
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木 研一
2. 発表標題 マウスの視覚 サルの視覚
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kato T, Uemura M, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 Functional imaging of axonal projections from V1 and LPN to higher visual areas in developing mice
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshida T, Saitou K, Ohki K
2. 発表標題 Neural activity pattern in the mouse visual cortex related to a behavioral strategy during a visual discrimination task
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田盛史、大木研一
2. 発表標題 マウス一次視覚野における自然画像の表現
3. 学会等名 視覚科学フォーラム2021 (生理学研究所研究会) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木研一
2. 発表標題 マウスの視覚 サルの視覚
3. 学会等名 Brain Club (慶応大学) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ishida H, Ohki K
2. 発表標題 Visualization of extra-classical receptive fields that affect visual representation in mouse V1
3. 学会等名 Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田盛史、斎藤久美子、大木研一
2. 発表標題 視覚弁別課題におけるマウスの行動戦略及び、関連した視覚野の活動
3. 学会等名 生理学研究所研究会 令和3年度大脳皮質を中心とした神経回路：構造と機能、その作動原理 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Ohki
2. 発表標題 Hierarchical neocortical areal network in marmoset visual cortex orthogonalize spontaneous and stimulus-driven activity
3. 学会等名 The 11th Annual Meeting of Japan Society for Marmoset Research (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsumoto H, Murakami T, Nishio N, Yoshida T, Ohki K
2. 発表標題 Multimodal topography-like structures represented in spontaneous activity in a mouse higher visual area during development
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Go C, Murakami T, Nishio N, Yoshida T, Ohki K
2. 発表標題 Somatotopy-like patterns of neural activity in somatosensory and motor cortices of developing mice
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsui T, Nishiyama M, Murakami T, Hagihara K, Ohki K
2. 発表標題 Orthogonality between maps of direction-selectivity and spatial frequency in the cat primary visual cortex
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Ohki
2. 発表標題 Functional Organization of Marmoset Visual Cortex
3. 学会等名 Harvard Neurobiology Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Matsui, T. Hashimoto, T. Murakami, M. Uemura, K.Kikuta, T. Kato, K. Ohki
2. 発表標題 Multiscale calcium imaging of spontaneous activity in the primate visual cortical network
3. 学会等名 生理学研究所研究会「意思決定研究の新展開」生理学研究所(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊田浩平、大木研一
2. 発表標題 モザイク遺伝子ノックアウトを用いた、マウス一次視覚野の神経応答特性の形成におけるNMDA受容体の役割の解明
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野誠大、吉田盛史、大木研一
2. 発表標題 マウス一次視覚野における反応適応と逸脱検知
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西尾奈々、澁木克栄、大木研一
2. 発表標題 マウス側頭皮質の新規高次視覚野は、前後の小領域ごとに異なる神経投射を示す
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村俊貴、村上知成、斎藤久美子、大木研一、田中輝幸
2. 発表標題 in vivo大脳皮質広域カルシウムイメージングによるCdk15機能欠損マウスにおける機能的結合性変化の同定
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古澤孝太郎、根東覚、大木研一、榎本和生
2. 発表標題 聴覚性驚愕反応の馴化におけるマウス大脳皮質の神経応答
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Matsui, T. Hashimoto, T. Murakami, M. Uemura, K.Kikuta, T. Kato, K. Ohki
2. 発表標題 Multiscale calcium imaging of spontaneous activity in the primate visual cortical network
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Li, T. Matsui, K. Ohki
2. 発表標題 Coupling and decoupling between neural activity and hemodynamics revealed by multispectral imaging
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大木 研一
2. 発表標題 細胞集団による情報表現（ランチョンセミナー）
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fukagawa S, Ukita J, Nishio N, Ohki K
2. 発表標題 Deep-learning-based identification of spatiotemporal visual feature representation in the mouse ectorhinal cortex.
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kondo S, Ohki K
2. 発表標題 Visually-evoked spine imaging under the optogenetic inhibition of somatic depolarization.
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kiyohara Y, Kondo S, Ohki K
2 . 発表標題 Response selectivity of LPN projections to the mouse primary and higher visual cortex.
3 . 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Matsui T, Hashimoto T, Uemura M, Murakami T, Kikuta K, Kato T, Ohki K
2 . 発表標題 Structured spontaneous activity in the marmoset visual cortex studied with in vivo calcium imaging.
3 . 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nishio N, Shibuki K, Ohki K
2 . 発表標題 Differential projections from subregions in a novel higher visual area in the mouse temporal cortex.
3 . 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Murakami T, Matsui T, Ohki K
2 . 発表標題 Independent development of lower- and higher-order visual networks.
3 . 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Kasahara C, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 Top-down modulation from the frontal cortex enhances the visual response of higher visual areas.
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kato T, Uemura M, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 Higher visual areas receive functionally specific inputs from the primary visual area soon after eye opening.
3. 学会等名 The 42nd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Multiscale Calcium imaging of Visual Cortex in Marmoset Monkeys The 15th Asia-Pacific Conference on Vision.
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nomura T, Murakami T, Saitou K, Ohki K, Tanaka T
2. 発表標題 In vivo wide-field Ca ²⁺ imaging of the cortical spontaneous activity in the Cdk15 knockout mice.
3. 学会等名 CDKL5 Workshop in Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsui T, Hashimoto T, Uemura M, Murakami T, Kikuta K, Kato T, Ohki K
2. 発表標題 Spatiotemporal structure of spontaneous activity in the primate visual cortex.
3. 学会等名 神経ダイナミクスミニワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kishino F, Uemura M, Trängenap S, Kaschube M, Ohki K
2. 発表標題 Dynamic functional changes of neurons in visual cortex after eye opening.
3. 学会等名 49th Annual Meeting of Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nomura T, Murakami T, Saitou K, Ohki K, Tanaka T
2. 発表標題 In vivo wide-field Ca ²⁺ imaging of the cortical spontaneous activity in the Cdk15 knock-out mice.
3. 学会等名 2019 CDKL5 Forum in Boston (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Robust representation of natural images by sparse and variable population of active neurons in visual cortex.
3. 学会等名 2019 International Conference on Neural Cells, Circuits and Behavior (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西尾 奈々、澁木 克栄、大木 研一
2. 発表標題 Differential projections from subregions in a novel higher visual area in the mouse temporal cortex.
3. 学会等名 生理学研究所シナプス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kondo S, Kikuta K, Ohki K
2. 発表標題 Functional organization of response-selective inputs on dendrites of mouse primary visual cortex neurons.
3. 学会等名 The Eighth International Neural Microcircuit Conference “Synaptic Specificity to Circuit Dynamics” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Functional Organization of Marmoset Visual Cortex.
3. 学会等名 UK-Japan Neuroscience Symposium 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本昂之、松井鉄平、上村允人、村上知成、菊田浩平、加藤利樹、大木研一
2. 発表標題 Functional calcium imaging in marmoset cortical area MT/MST.
3. 学会等名 第9回 日本マーモセット研究会大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsui T, Hashimoto T, Uemura M, Murakami T, Kikuta K, Kato T, Ohki K
2. 発表標題 Development and Application of Multi-Scale Ca2+ Imaging in the Primate Visual Cortical Network.
3. 学会等名 The 8th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kondo S, Kikuta K, Ohki K
2. 発表標題 Functional organization of response-selective inputs on dendrites of mouse primary visual cortex neurons.
3. 学会等名 The 97th Annual Meeting of The Physiological Society of Japan,
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsui T, Hashimoto T, Uemura M, Murakami T, Kikuta K, Kato T, Ohki K
2. 発表標題 Spatiotemporal structure of spontaneous activity in the marmoset visual cortex.
3. 学会等名 The 97th Annual Meeting of The Physiological Society of Japan,
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 根東 覚、清原 悠嵩、大木研一
2. 発表標題 マウス一次視覚野に分布するLPN投射軸索の反応特性
3. 学会等名 第125回日本解剖学会総会・全国学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenichi Ohki
2. 発表標題 Hierarchical neocortical areal network in marmoset visual cortex orthogonalize spontaneous and stimulus-driven activity
3. 学会等名 The 11th Annual Meeting of Japan Society for Marmoset Research (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Modular strategy for the development of hierarchical networks in the mouse visual system
3. 学会等名 SPONT2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nishiyama K, Sasaki K, Hashimoto T, Kimura R, Nishio N, Ohki K
2. 発表標題 Wide-field calcium imaging reveals area map and functional segregation of rat visual cortex
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kimura R, Ohki K, Yoshimura
2. 発表標題 Neuronal activity supporting orientation discrimination at low contrast
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsumoto H, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 Functional identification of the mouse higher visual areas in the dorsal pathway
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Modular strategy for development of the hierarchical visual system
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nishio N, Shibuki K, Ohki K
2. 発表標題 A visual area in mouse temporal cortex represents the size of visual objects and has projections to areas associated with positive or negative behaviors
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hashimoto T, Matsui T, Uemura M, Murakami T, Kikuta K, Kato T, Ukita J, Isomura T, Ohki K
2. 発表標題 Neural basis of motion aftereffect mediated by predictive coding in the marmoset motion-selective visual areas
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kishino F, Yoshida T, Uemura M, Ohki K,
2. 発表標題 Functional reorganization of visual representation after eye opening in the mouse primary visual cortex (V1)
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kato T, Uemura M, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 The role of bottom-up inputs from the primary visual cortex and higher visual thalamus in functional development of higher visual areas
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ishida H, Murakami T, Ohki K
2. 発表標題 Asymmetric information flow in mouse higher visual areas
3. 学会等名 FENS Forum 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木 研一
2. 発表標題 脳機能データベースに学ぶ 霊長類の情報処理
3. 学会等名 脳関連データベース機関連携キックオフシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nishio N, Shibuki K, Ohki K
2. 発表標題 A visual area in mouse temporal cortex represents the size of visual objects and is associated with positive or negative behaviors
3. 学会等名 生理研研究会「機能と構造の視覚科学研究会」視覚科学フォーラム 2022 第25回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Development of next generation AI by modeling brain information
3. 学会等名 Beyond AI 研究成果発表会 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Beyond AI: neuro-inspired network function and formation
3. 学会等名 IRCN & U Tokyo NY Office Event: How does human intelligence arise. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nishio N, Shibuki K, Ohki K
2. 発表標題 A visual area representing object size in mouse temporal cortex can be associated with approach / vigilance behavior
3. 学会等名 「次世代シナプス生理学による脳神経機能の理解」生理学研究所 研究会 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木 研一
2. 発表標題 種を越える脳科学
3. 学会等名 次世代脳：神経科学と情報工学の共創の場から考える脳科学研究の未来予想図 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Modular strategy for development of the hierarchical visual system iPlasticity
3. 学会等名 IRCN International Symposium 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kimura R, Ohki K, Yoshimura Y
2. 発表標題 Neuronal activity that allows us to perceive familiar images even at low contrast
3. 学会等名 3rd International Symposium on Brain Information Dynamics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Noise in the Brain and AI
3. 学会等名 The 3rd International Symposium of the Institute for AI and Beyond 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kimura R, Ohki K, Yoshimura Y
2. 発表標題 A neural mechanism underlying the perception of low-contrast familiar objects
3. 学会等名 5th Stockholm-Tokyo Workshop 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ohki K
2. 発表標題 Cerebral Cortex and AI
3. 学会等名 The 100th Anniversary Annual Meeting of The Physiological Society of Japan, AI technology pioneers a new era of medicine, physiology, and life sciences 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kimura R, Yoshimura Y, Ohki K
2. 発表標題 Neural activity that enables stable behavioral output even when visual input changes slightly
3. 学会等名 The 100th Anniversary Annual Meeting of The Physiological Society of Japan 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukuda Y, Kondo S, Ohki K
2. 発表標題 Synaptic organization of simple and complex cells in the mouse primary visual cortex
3. 学会等名 The 100th Anniversary Annual Meeting of The Physiological Society of Japan 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenichi Ohki,
2. 発表標題 Development of 2-photon functional imaging and study of functional architecture of visual cortex
3. 学会等名 Nakaakira Tsukahara Memorial Award Lecture The 46th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuto Oyamada, Nana Nishio, Kenichi Ohki
2. 発表標題 Auditory responses in a visual area representing object size in the mouse temporal cortex
3. 学会等名 The 46th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nana Nishio, Katsuei Shibuki, Kenichi Ohki
2. 発表標題 An association between a visual area representing object size in the mouse temporal cortex and approach / vigilance behaviors
3. 学会等名 The 46th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kumiko Saitou, Takashi Yoshida, Kenichi Ohki
2. 発表標題 Neural activity underlying the local cue detection during visual discrimination in mouse visual cortex
3. 学会等名 The 46th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mengyuan Chen, Tomonari Murakami, Kenichi Ohki,
2. 発表標題 機能的イメージングを用いたマウス高次視覚野がカバーする視野範囲の同定
3. 学会等名 The 46th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenichi Ohki,
2. 発表標題 Modular strategy for development of the hierarchical visual system
3. 学会等名 The Cold Spring Harbor Asia conference on Advances in Optical Interrogation of Living Cells and Organisms: Focus on the Brain (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nana Nishio, Katsuei Shibuki, Kenichi Ohki
2. 発表標題 A visual area representing object size in the mouse temporal cortex is involved in approach / vigilance behavior
3. 学会等名 視覚科学フォーラム 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース</p> <p>「マウスが見ている世界を再現：不安定な脳活動に隠された安定な知覚」 https://ircn.jp/pressrelease/20200213-kenichiohki</p> <p>"How Does a Mouse's Visual Cortex "See" the World?" https://ircn.jp/en/pressrelease/20200213-kenichiohki</p> <p>「大脳神経回路形成の新戦略 大脳皮質の多数の領野を結ぶ結合を効率よく作るための並列モジュール戦略を解明」 https://www.u-tokyo.ac.jp/content/400193638.pdf</p> <p>"New strategy for cerebral neural network formation Parallel modules strategy which enables the brain to efficiently form numerous interareal connections of the many cortical areas during development" https://beyondai.jp/contents/2022/08/05/20220805/?lang=en</p> <p>「脳のゆらぎを取り入れてAIを安全にする 深層ニューラルネットワークの隠れ層にゆらぎを導入し脆弱性を軽減」 https://ircn.jp/pressrelease/20230915_kenichi_ohki</p> <p>"Brain inspires more robust AI --A new technique to protect sensitive AI-based applications from attackers--" https://ircn.jp/en/pressrelease/20230915_kenichi_ohki</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	松井 鉄平 (Matsui Teppei) (10725948)	同志社大学・脳科学研究科・教授 (34310)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関