

側頭葉ニューロンの視覚刺激に対する応答の 情報量解析

- 情報表現の時間変化 -

講 師：菅生 康子

レポーター：久保雅義、加藤英樹

平成 11 年 8 月 23 日

(タイトル OHP) 私は今回、サルの前頭葉のニューロン活動を、顔を見せたときの応答からとりその情報量解析を行ないました。そのとき情報量の解析の方法などについて、自分の研究を中心に詳しく話をしようと思います。(OHP) 脳の中で視覚の情報がどのように処理されているのかについては、午前中に佐藤先生が非常に詳しくお話しして下さいましたが、私たちの見ている視野の、右視野は左の半球で、左視野は右の半球でそれぞれ外側膝状体を通して視覚一次野に到達します。視覚一次野では非常に受容野が狭く、線や傾きおよびある一定方向の動きなどに対して特異的に反応するニューロンが報告されています。それから下部側頭葉などに行きますと、もっと複雑な形に反応するニューロンが報告されています。(OHP) 私はその視覚野でも、視覚情報の最終段階の処理をしている側頭葉でニューロンの応答を記録したのですが、そのときに用いた視覚刺激は顔です。顔は、人間のコミュニケーションにおいて非常に重要な役割を果たしているのは自明なことです。それはヒトでもサルでもそういうことが考えられます。顔という、視覚パターンとして非常に複雑な刺激から、個体とか表情といった情報をどのようにニューロンの反応から引き出せるかどうかを調べました。まずサルの表情を見ていただこうと思います。(VTR) 今サルが「クー」と言いましたが、これはサルが他の個体を呼ぶときの顔で、主に子サルが親サルを呼ぶようなときに見られる表情です。(VTR) これはややサルがイライラしてしまっていて、そのようなときに「キーキー」という声とともにこういう表情をします。(VTR) これはサルが怖がっているときの表情で、実験者がこのときはヘビのおもちゃを見せているときにこういう表情をしています。サルはこのような非常に表情に富んだ生き物で、こういう顔や表情といった情報の違いなどを脳の側頭葉の部分では如何に処理しているかを記録しました。(OHP) まず、顔や表情に反応するニューロンの研究は、1970年代からあります。これはサルの脳の側面で、これが内側面、それからこれはサルの脳をこのように切ったときの断面図です。ここに上側頭溝という溝があり、視覚一次野、OA、TEO、TE、それから側頭葉下部のあたりが視覚連合野といって、

視覚情報の処理の最終的段階を司っていると言われていたところ。顔に反応するニューロンは、この上側頭溝のあたり、そして側頭葉の下部で報告されています。これは1981年にブルースが報告した顔に反応する細胞ですが、この細胞は受容野が大きくだいたい15度あります。そこにサルの顔やヒトの顔を呈示するとこの細胞が反応します。この縦にビッビッとなっているのが細胞（ニューロン）の action potential 所謂スパイクと呼ばれているものです。このように顔を呈示したときにスパイクが発生することが分かります。このニューロンの場合はヒトの顔から目をとると、その反応がやや弱くなっているのが分かると思います。グリーバルの時に、このようなガチャガチャした線にも反応しませんし、これはサルの顔をランダムにゴチャゴチャに混ぜたものですが、それでも反応はひいています。こういう複雑な刺激の中で、顔という特定の刺激に反応し顔のどのような情報をコードしているのかという問題については、1989年のハッセルモラの仕事があります。彼らは visual discrimination task といつてある視覚刺激とそれ以外の視覚刺激を discrimination する、つまり例えばある視覚刺激ならそれに反応すると塩水がでてしまうけれどもそれ以外の視覚刺激だったらレバを押すとジュースが出てくるというようなタスクをやらせています。見せた顔は、この3個体で3つの表情を見せています。このとき彼らは個体の違いに反応するニューロンや表情の違いに反応するニューロンを発見しました。これらの刺激を1秒間呈示して、そのうちの呈示後100～600m秒の間のニューロンのスパイク数を解析してこのような結果が得られています。これは表情がCと小さいpと大きなPというような表情です。LL, ML, MMというのはそれぞれこちらの刺激の個体になっています。このニューロンは、個体の違いにかかわらず、表情のCという普通の顔に対して反応の大きいものです。このニューロンのMMは少し違いますが、LLとFFという個体に関しては、Pという口を大きく開けた表情に対しては反応するけれど、普通の顔や少し口を開けた顔に対しては反応が弱いというものです。こちらの右側の2つのニューロンは表情ではなく、個体によってニューロンの反応を変えるものです。この場合では、MM, LL, FFと個体によってニューロンの反応が小さい・中くらい・大きいとなっています。この下のニューロンでは個体のLLに対してはどんな表情でも反応しませんが、MMとFFに対しては表情が何であっても反応していることが分かります。そしてこれらの表情の違いを反映して応答するニューロンや個体の違いを反映して応答するニューロンは分布が違うということを報告しています。つまり先程の上側頭溝といわれるこの溝の部分の上下の溝のところには表情の違いを反映していると思われるニューロンがあり、もっと下の側頭回の部分には個体の違いを反映していると思われるニューロンが分布していたと報告されています。

質問者：その0のresponseが何でマイナスなのか？

0というのは自発発火状態です。つまり抑制がかかっていると考えられます。(OHP) このヤング・山根の1992年の報告でもサルの側頭葉でニューロンの応答の記録を行い、ニューロンが顔の形の違いをコードしていると報告してあり、これがそのデータです。彼らがサルにやらせたのは face discrimination task といい、文字になっているものは全部顔ですが、全部で30ある顔を見せています。そのうちこの3つを、サルが識別するようにトレーニングします。サルがまずスイッチを押すと顔が600m秒でてきて1秒ブランクがあります。そのあと緑のスポットが1200m秒出てくるのですが、こちらに出てきた3つの顔がでてきた時にはこの緑のスポットが出ている時にスイッチを押す。また他の顔が出て

きたときは緑のスポットが消えてからスイッチを押すことをトレーニングさせます。その刺激呈示後、100 ~ 600 m 秒の下部側頭葉のニューロンの発火頻度を解析してMDSをかけると、このようにこちらの図面上には髪の毛のあるなしのようなものをコードし、真ん中に来るほど顔が細長くなって左右が顔が丸くなっているのが分かると思います。この様にニューロンの集団で顔の形をコードしていることを報告しています。サル下部側頭葉では顔の個体や表情の情報および顔の形の情報などの処理をしているのではないかということが分かってきているのですが、これらの報告ではすべて刺激を呈示したときの平均発火頻度を見ています。(OHP) 平均発火頻度は、ある期間の中に何回スパイクがあったかを表わしますが、実際にこういうデータを見ると分かるようにやはりこの期間すべて一様にスパイクが存在するわけではなく、その中にスパイクの密度の濃いところと薄いところの偏りがあるのか分かると思います。私たちはニューロンの顔に対する応答の時間的なスパイクの変化、スパイク数の変化というものを解析することにしました。(OHP) 私たちが行った研究は側頭葉の単一ニューロンが顔に表れている複数の情報つまりサルであるとか、どの個体であるとか、どういう表情をしているかという複数の情報を時間的にどのようにコードしているのかを調べることにあります。サルのいろいろな表情や個体の顔に対してどのように側頭葉のニューロンが応答を変えるのかを調べるためにニホンザル2頭を使ってそれに注視タスクというただ視覚刺激を見ていればよいというタスクでニューロンの応答を記録しました。その時に静止画像を350 m 秒間呈示しました。注視タスクの一回のトライアルは次のようになっています。サルがスイッチを押すとサルの目の前にあるディスプレイの中央に赤い点が現れます。この点をサルが注視し始めてから600m 秒後に250 m 秒間ブランクがありその後、顔が350 m 秒間呈示されます。その後さらに再び赤い注視点が呈示されその色が500 m 秒 ~ 1250 m 秒の間のランダムな時間間隔で青色に変わります。サルはその色が変わったことをdetectしてスイッチから手を放す。そうすると報酬としてジュースが与えられるというタスクです。ブランクの期間や顔が呈示されている期間など注視点の出ていない期間がありますが、この時にもサルは注視点が写っていた場所、つまりそのスクリーンの中央付近を見つめていることが課せられます。ちゃんとサルが注視しているかどうかはCCDカメラを用いた視線位置計測システムで計測していて、1度でもサルの目が中心から外れたら白にしてそこでタスクを終わりジュースなしでまたスタートに戻るといったことになっています。その時に側頭葉のニューロンの細胞外記録を行いました。

質問者：最後のランダムに消すのは、何のためなのですか？

ランダムにしてないとサルが真面目にタスクを行わないからです。いつも同じタイミングで切っているとすっかり注意力が散漫になり途中で眠ってしまいますので、そのようなことをしています。この350 m 秒間に色々な顔や視覚刺激を見せました。(OHP) これがサルの顔です。初めて見るとこれが本当に1匹のサルの顔なのかと思うかもしれないのですが、こちらに答えが並んでいます。1頭、2頭、3頭、4頭の顔です。縦方向に表情が並んでいて、これが普通の表情、これが先づルルなどの他の個体を呼ぶといった口を丸く開けた顔です。それからこれが少しおびえているときになる大きく口を開けた顔で、一番右側が叫んだり威嚇したりするときになる口を中くらいに開けた顔です。(OHP とスライド) これがヒトの顔として使ったものです。ここに個体が並んでいてこちら側が表情になっています。ヒトは、普通の顔と笑った顔、それから驚いた顔、怒った顔を使いまし

た。(スライド) それから顔以外のものとして非常に簡単な図形を使いました。丸と四角で色は赤, 青, 緑, それから肌色と茶色になっています。肌色と茶色に関してはサルの顔からとってきたものです。これらの視覚刺激を呈示したときの記録部位ですが, こちらがサルの頭の側面, ニホンザルです。この断面がこちらです。記録をしたのは下部側頭葉でもかなり前の部分でこの STS 側頭溝といわれる溝の上壁, それから下壁それから側頭回の部分で行いました。電極は頭の上の方からこのように挿入しているのでこのような記録の場所になりました。全体として2頭のサルの両半球, 4半球から記録を行いまして, 1874 個のニュー・ロンの活動を単離しました。そのうち, 刺激に対して応答を調べてみたところ, 158 個のニュー・ロン, 約 8 せしたヒトの顔, またはサルの顔のどれか1つに反応しました。反応したとは、顔を呈示する前の平均発火頻度の 2 SD を超えれば反応したと判断しています。この 158 個の顔に反応したニュー・ロンのうち, 86 個を定量的に解析しました。なぜ 86 個を解析したかという、1つの顔に対して1回の反応しかとれなかった場合には統計的な解析ができないので、1つの刺激に対して4回以上のトライアルでニュー・ロン応答の加算がとれたものを解析にかけています。(スライド) これが 86 個のうちの1つのニュー・ロンの応答の例です。一番上に呈示した視覚刺激がありその下がニュー・ロンがどう応答したかを点で示してあります。この太い黒い線のところで顔を呈示しています。その下はスパイク・ラスター・プロット, スパイク・デンシティ・プロット(スパイク密度関数)で上のこのラスター・プロットのヒストグラムに 12 m 秒のガウシアン・フィルタをかけたものです。これから分かるように、このニュー・ロンは呈示した全てのサルの顔に対して反応をします。しかし、ニュー・ロンの反応のパターンは、表情によって違うことが分かります。このニュー・ロンの場合では、大きく口を開けた顔に対しては刺激呈示期間中、持続的に反応しておりますが、普通の顔や口を丸く開けた顔などにはその反応が一過性に終わっていることが分かると思います。(スライド)これは同じニュー・ロンのヒトの顔に対する反応です。このニュー・ロンはヒトの顔に対しても反応しました。ヒトの顔でも口を開けた顔に対してはやや強く反応しているかな、という感じはありますが、はっきりした傾向は分かりません。(スライド)しかし、このニュー・ロンは、図形に対しては殆ど反応しませんでした。このニュー・ロンの発火のパターンを刺激について分類してどのような情報が含まれているのかを解析しました。解析は、単一ニュー・ロンの応答が刺激を分類する情報をコードしているのかどうかを情報量の経時変化というものをを用いて計算しました。まず、情報の分類ですが、今回は2段階の分類を行いました。1つはグロ・バル・カテゴリ-といって、サル, ヒト, 図形というカテゴリ-です。他の4つのカテゴリ-は、ファイン・カテゴリ-で、サルの顔とヒトの顔を個体や表情によって分類したものです。これではサルのどの個体(1番, 2番, 3番, 4番)が普通の顔, 口を丸く開けた顔, 大きく開けた顔, 中くらいに開けた顔のどの表情かに応じて、情報量で解析を行いました。(スライド) (OHP)ニュー・ロンの応答に照らし合わせて考え、そのニュー・ロンの発火頻度で刺激を分類できるかどうかを計算しました。例えば2種類の表情で発火頻度が表情1では大きく、表情2では小さかった場合には発火頻度から表情を2つに分類できます。このとき最大2つに(0か1かの2つに)分類できるわけですから、最大値の1 bit になります。また表情1でも表情2でも発火頻度が変わらなかった場合には、発火頻度から表情を分類できないので最小値の0 bit をとります。実際にはニュー・ロンの反応はこんなにはっきりしていませんから、最大値と最小値の間のどれかの

間の値をとっていきわけです。情報量の経時的変化を計算することによってどのタイミングで何の情報処理しているのかを解析しました。相互情報量を計算しましたが、それは刺激のエントロピーからニューロンの応答があった時の情報量を引いたものとしてこのように形式化をしました。まず、ニューロンの応答の R に何をを用いるかということですが、私たちの場合はスパイク数を用いました。情報量の計算方法ですが、ニューラルネットを使った方法などもリッチモンドらにより開発されていますが、今回の場合は直接この式から計算を行っています。直接行っている理由はスパイク数からその情報量の有意性の検定をしたいという目的があるからです。（OHP）（スライド）ニューロンの反応が分類の情報をコードすると考えられるので、まず分類ごとにニューロンの反応をまとめました。先程のニューロンについて、グローバルカテゴリでサルと図形というようにニューロンの応答をまとめました。ここでサルとヒトに対しての応答と図形に対しての応答が全く異なっていて、刺激呈示期間全体を通じて異なっていることが分かります。刺激呈示期間の部分は点線になっています。サルに対する応答を表情によって分類すると、やはり口を大きく開けた顔に対しては持続的に反応が続いており、その他の顔に対しては1個体の顔で持続的に応答が続いたけれども、あとは普通の顔や口を丸く開けた顔に対しては一過性に反応が終わっています。

質問者：刺激の種類はランダムにやっているのですか？

そうです。

質問者：それを見て並べ替えたのですね？

はい、並び替えました。

質問者：あの横じまになっているのは並び替えた後ですね？

そうです。これは刺激ごとに一度まとめてからそれを並び替えたのでこういうふうになっていますが、実際はランダムに見せています。

質問者：見せてる例えばヒトの顔というのは、普段の実験でも見慣れているヒトの顔を見せているのですか？

3人のうち一番上にいた1人の顔は、サルは既知ですが、下の2人は見たことがありません。

質問者：そういうので何か反応とか変わったりしますか？

今までとってきたニューロンの中で下の2人に対して強く応答するニューロンは得られたのですが、上の1人に対してはなくて、よく見慣れているからニューロンがあるという傾向はまだ得られていません。

質問者：逆だということですか？

そうです、どちらかと言うと逆でした。

質問者：見せているサルの顔の方は知っているのですか？

サルの顔の方は知ってます。

質問者：先行研究でいろいろなサルの表情等を区別してそれに反応するニューロンがわかってきたという話がでてましたが、それをふまえて今回、また新たに調べられたのは？まずは個体とか表情とか一つのニューロンが複数の情報をコードしているのかどうかを知りたかったというのがあります。また顔という視覚刺激自体はそこから普段私たちが種々の情報を得ていますが、それに対するニューロンの反応を時間的に解析を行うことでニュー

- ロンのコードしている情報がどのように変化しているのかを知りたいというのがあげられます。

質問者：ヒトの表情に関して言いますと、サルに関しては作ったような表情で実際に怒って見えなかったという場合には解析にもあられますか？

解析と言いますか、サルがヒトの表情を分類して反応しているニューロンというのはまだとれてきておりません。

このように分類ごとにまとめたニューロンから情報量を計算していくわけですが、実際にどのように解析したかを示します。先ほど呈示した相互情報量の式で例えば、(OHP) 刺激が2種類で、刺激回数がそれぞれ15回だったとします。このとき刺激に関するエントロピーは1 bit です。ニューロンの応答があったときに、例えば刺激1に対してはスパイク数が1あったときは2トライアル、刺激2に対してはスパイク数が1回あったのが11トライアルというようにこのような分布をしたとしますと、ニューロンの応答があったときのエントロピーがそれぞれ(OHP) 次のように計算され0.82ビットになります。相互情報量として $1 - 0.82 = 0.18$ bit というように計算をしていきました。情報量の経時変化をどのように求めたかと言いますと、50 m 秒間のウインドウを、刺激呈示開始から8 m 秒ずつ移動して計算していきました。50 m 秒間のウインドウの中で情報量を計算をしてそれを刺激呈示開始から8 m 秒ごとに移動して経時的に移動して解析を行っています。こちら側では、上側にニューロンの反応で下側に情報量の経時変化が示されています。グローバル・カテゴリの情報の経時変化では、サルの刺激、およびヒトの刺激に対するニューロンの反応はピークが一致しています。

質問者：先ほどの情報量の計算のときにはスパイク数を、0から1のどちらかだと言っていました。50 m 秒の窓の中ではスパイクはたかだか1個しか出てないのですか？

50 m 秒の窓の中で、スパイクがいくつあるかということですね？ このピークの時点では、スパイク数が0から7ぐらいまであります。実際この場合(OHP)では、スパイク数が0カウントから7カウントくらいまで分布しています。これは情報量がピークのときのニューロンのスパイク・カウントで、またこれはその中で対応して分布する刺激のヒストグラムです。この場合では、スパイク・カウントが0回から1回というところに図形が分布しており、他のところにヒトとサルの刺激が分布しています。縦軸はトライアル数を示しています。情報量の有意性検定は北沢らが1998年にNatureに論文を出しましたが、その論文にのっとっています。つまり、それぞれのスパイク・カウントのところでニューロンの応答があったときの刺激のプロバビリティが刺激自体のプロバビリティと同じかどうかをカイ二乗で検定します。この場合では、それぞれのスパイク・カウントにおいて顔とヒトとサルがイ・ブンに分布していることになります。しかし、このピークの時点においては、 $p = 0.001$ 以下でアンイ・ブンで分布していました。

質問者：それは情報量の有意性ではなくて分布密度関数の違いの検定ではないのですか？

結局そういうことですが、これを使って情報量を計算しているので、情報量を計算するために使っている分布の違いの有意性についても50 m 秒のウインドウの中でずっと計算をしていきました。

質問者：今のグラフから神経細胞の活動は0から7の活動の区分があると考えていいわけですね。1つ前のスライドでは0か1ですね。

そうです。

質問者：今の7個のクラスに分類してこれは0の状態，1の状態，2の状態，3の状態という感じでそのような確率分布を作りその確率分布に対して情報量を計算するとどうなりますか？

それぞれのウィンドウの中でスパイク・カウントは変わりますので難しいと思います。

質問者：例えばあるウィンドウでは7つまで発火したのがあり、別のウィンドウでは5つまでしかなかった場合は確率分布を5個のクラスに圧縮してそこでまた情報量を決めているわけですね。

5個しかなかったら，5個でやるということになります。

質問者： $P \log P$ で要するに P は0なので $\log P$ はなくなってもよいのですか？

検定に関しては，モンテロ - ルのコレクションをかけて7個あれば0.05の7分の1で検定をしています。

質問者：50 m 秒というのはどうやって選んだのですか？

50 m 秒というのは1995年のフェラ - らの論文に従いました。ITのニュー - ロンの時間分解能の限界が50 m 秒だという彼らの報告があり，私の場合でもこれより短いウィンドウにしたのですが，その場合発火頻度の高いニュー - ロンでは50 m秒より短くしても情報量が出ますが，非常に短くした場合に究極的にいえば，0か1になってしまうわけですね。それでは非常に不安定になるので，今回の場合は一律に50 m秒で出しています。ウィンドウの幅に関しては検討する必要があると考えています。

質問者：ウィンドウの幅を変えていったときに，定性的な違いはどこにありますか？狭くしていけば多分暗くなっていくと思われそうですが，上がっていくとか下がっていくとかの違いがでできますか？

短くしていくとこのニュー - ロンではややピ - クといますが，この幅が狭くなりますが，上がって下がってというこういう時間的な変化は残ります。情報量を計算するときの刺激の分布に対するニュー - ロンの応答およびその検定結果は点線と実線で示してあり，点線の部分というのは， P が0.05に満たなかったものでここは有意ではないという扱いにしています。実線は P が0.05以上のところ。立ち上がりの最初の部分から実線になっています。

質問者：そうすると，右側に書いてある基準は R ごとにスパイク・カウントが0の場合，1の場合，2の場合というようにそれぞれ検定するわけですね？

そうです。

質問者：そうすると，全部が有意だったんですか，どれかが有意だったのですか？

どれかが有意だったということになります。

質問者：なぜ検定する必要があるのですか？別にPSバ - が R のときPSでもいいわけですね。そのときは相互情報量が出てこないと考えられて結論的にはそちらの方へ考えられたらよい気がするのですが，なぜ途中で変わる部分を計算する必要があるのですか？

カイ二乗検定をする一つの意味は，情報の立ち上がりの latency を決めたかったというのが一番の目的です。latencyの基準となるものとして，このカイ二乗検定が有意になりはじめるところを考えています。

質問者：結果を別の視点から見て補強しようとしているのですね。本来、情報量の有意性検定ができればいいのですが、それは難しいですね。

難しいと思います。

(スライド) このスライドはそこで計算した情報量の時間経過およびニュー・ロンの応答の平均発火頻度、平均の firing rate を経時的に示し比較したものです。このニュー・ロンの平均の firing rate も同じく 50 m 秒間のウインドウで計算してそれを 8 m 秒ごとにプロットしてあります。赤いトレースがグローバルカテゴリ - の情報量の経時的変化を、黒いトレースがサル表情の情報の経時的変化を示しています。この図から、グローバル・カテゴリ - の情報量の経時的変化とニュー・ロンの発火の平均とは非常によく似ています。それに対してサル表情の情報の経時的変化は遅れているのが分かります。この横線に示してあるのがそれぞれの情報量の有意性の検定で初めて有意であると出てきた部分です。この矢印のところがニュー・ロンの応答の latency を示しています。グローバル・カテゴリ - の情報の latency とニュー・ロンの応答の latency は非常に近いのですが、サル表情の情報の latency はそれに 40 m 秒ほど遅れていました。(スライド) これはまた別のニュー・ロンです。このニュー・ロンはヒトには反応しますが、サルや図形には反応しません。ヒトに対する反応を個体に分類してプロットしますとヒトの個体 1 と 3 に対しては一過性にしか反応しませんが、個体 2 に対しては刺激呈示中に持続的に反応を続けるというのが分かります。(スライド) このニュー・ロンの情報量解析の結果です。先程と同じように黄色いのがニュー・ロンの応答の平均の推移、赤いトレースがグローバルな情報の推移、黒いトレースがヒトの個体の分類の情報量の経時的変化です。このニュー・ロンでも発火の立ち上がり部分からグローバル・カテゴリ - の情報がコードされ、それに 50 m 秒ほど遅れてヒトの個体を分類する情報が立ち上がりピクも遅れていることが分かります。86 個の定量的な解析をしたニュー・ロンのうち 32 個のニュー・ロンが今示した 2 つのニュー・ロンのようにグローバル・カテゴリ - の情報と、ファインなカテゴリ - 、つまりサルや表情、ヒトの個体や表情の両方の情報をコードしていました。その残りの中で 43 個のニュー・ロンはグローバルまたはファインな情報をコードしており、残りの 11 個のニュー・ロンはこの検定を行ったところ、有意な情報をコードしていませんでした。(スライド) グローバルとファインな情報の両方をコードしていた 32 個のニュー・ロンについてその情報量の経時的変化をまとめたものです。それぞれの情報を加算しています。グローバルな情報に関しては 32 個ニュー・ロン、全てについて 32 ケースありますが、ファインな情報の方は 1 つのニュー・ロンが例えばサルやヒトの個体の情報をコードしていたり、というように 2 つ以上の情報をコードすることがありますので、全体として 56 ピースを加算しています。この図からも明らかなように加算した情報量でもやはりグローバルな情報の方がファインな情報より先行しています。latency の平均では 51 m 秒、それからピクの平均でも 48 m 秒先行していることが分かります。よって側頭葉ではグローバルな情報の方が先にニュー・ロンの応答にコードしていることが分かりました。

質問者：個体というのは他のものを全部足している値ですか？

はい、個体と表情を全部足しています。(OHP) これらのニュー・ロンの分布ですが、レコーディングした 14 部分のうち上側頭溝の上壁と下壁、それから側頭回の部分に分布していて、この場合では、黄色い点が両方のグローバルとファインと情報をコードしていたニュー・ロンですが、主に側頭回と上側頭溝の下壁に分布しています。緑の点はグローバ

ルまたはファインのどちらかの情報をコードしていたものです。(OHP)(スライド)まとめですが、サルの側頭葉のニューロンは顔に関する複数の情報をその情報のレベルによって時間的に分類してコードしていきまして、グローバルな情報の方がニューロンの応答の開始直後からでファインな情報、サルの個体や表情、ヒトの個体や表情の分類はそれに約 50 m 秒遅れてコードされているのが分かってきました。この研究は電総研の山根先生、河野先生、それから東大の上野先生との共同で行ったものです。このようにニューロンが大まかな分類情報というのを詳細な分類情報に先行させてコードしているのがどういうメカニズムでなされているのかというのが私たちの非常に興味のあるところで、神経細胞のコネクションなどもこれから詳しく調べていく必要があると思っております。ATRの岡田先生などが非常にきれいなシミュレーションやモデルなどを考えておられるので、非常に期待しております。私の発表は以上です。

質疑応答

質問者：統計データでグローバルな情報処理とグローバルでないものでは時間的に違うという結果についてですが、それは結局、1個のニューロンがどういう振る舞いをする事から出てきているのですか？ まず最初、1つのニューロンがあって刺激がくると最初はヒトか形かサルかに対してとりあえず反応していて、その後、今度は表情などをみて反応するかどうかでテールが出るものと出ないものの2種類があります。最初の山では個体識別で、サルがグローバルな情報を識別するためのもので、シッポの部分はさらに表情で例えば怒りに反応しやすいニューロンだったら怒っている時にテールが出る。そのような感じのイメージでいいのですか？

最初の部分がサルであるかヒトであるか、図形であるかによって応答が変わり、その後の応答はある表情に対しての応答にだけに起こる。他の表情に対しての応答は逆に抑制されているかどうか定かではありませんが、なくなるということになります。

質問者：その情報のレベルによって時間的に2つに分けて前後でコードされていることを示唆する結果が出ているのですね。

そうです。

質問者：デュアル・コーディングですか？ つまりニューロンは、ファインとグローバルで多少 anatomical な場所が離れているのでしょうか、それとも重なっているのでしょうか？

重なっています。

質問者：つまりデュアル・コーディングと考えられるのですか？ ファインの情報はある場所のニューロン集団で行い、グローバルな情報は別のある場所にいったいようにはなっていないのですね。

そうですね。今までのレコーディングしてきたニューロンの数についてももう少し検討してみないといけないのですが、私たちが今まで解析したところでは、統計的に有意には分布は別れていません。

質問者：segregate はしていないということですか？

segregate はしていないと思われまます。

質問者：一番簡単には winner takes all 的なものとして考えられるわけですね。つまり人間の顔を見てとりあえず発火し、一番反応として残りやすいものが選ばれてあとは全部消えるという1つそのモデルが考えられます。ファインに反応するニューロンとは、

winner takes all でみんな相互作用しあってその上で発火するものとかんがえることができますね。

質問者：このファインの情報をコードしているものだけを抑制しているニューロンはないのですか？

結局ファインな情報だけをコードしているニューロンのその立ち上がりが非常にゆっくり上がってくるニューロンがありますのでと思われる。

質問者：ウィンドウを短くしたら、スパイクカウントが0または1になることについてですが、その場合において例えば時系列的に0 1 0 1となるものに対して情報量を考えて場合に、もしトライアルごとに同じ結果が得られれば短期的な時間でのこのようなコーディングの可能性が検討できるのではないかと思うのですが？

ということは、ウィンドウの幅を1 m秒にして行うのですか？

質問者：今だと1つのファイン情報に対して1つの値を出しますね。1つのニューロンが5とか7とか1つの値、1つのレスポンスを出しますね。

1回のトライアルが1つのレスポンスです。

質問者：R と書いてあるのは1つの数ですが、でも別にそこはいくつかの数、いくつかの変数でも構わないわけですね。

ということは、その時系列的に0 1 0 1にしたものの時間的なものを考えるのですか？

質問者：でも、もしかするとあとで違う結果が出る可能性がありますね。

質問者：取り方によって情報量はかなり変わる気がします。

絶対値はあまり信用していません。

質問者：けれども定性的に残る性質があると思います。定性的には色々なピンが争ってもあまり変わらないと思います。

定性的には大まかな情報と詳細な情報がくっついてしまうことはないので、差はあまりみられません。定量的に50 m 秒としたのは、ウィンドウの幅を変えていく可能性があったからです。

質問者：必ずしもグローバルな情報とファインな情報が1個のニューロンにコードされているとみなすことはないと思います。グローバルからファインというのは階層的なコードなので階層的なモジュールを使えばいいと思われる。例えばあるニューロンは最初はグローバルに対して発火するけれども、処理が進んだ上の方からトップダウンとして戻ってきて偶然それによってアクティブトされてしまう場合も考えられますね。

この反応形式がでるのですか？

質問者：ファインが情報処理までいくのに時間がかかるのは、次のプロセスまで進んでそこからまた戻ってきているから遅れて立ち上がる、という解釈もできると思います。

どうしてこのようになっているかは、3つ可能性が考えられます。もともとV1から来るときに既にそのようになっているという場合と、ITでこのようになってしまう場合と、ITに前頭葉や扁桃核などから反応が戻ってくる場合などが考えられると思います。

質問者：3枚目のグラフで単にニューロンのビットを足していったグラフがありましたね。その情報量を足すことは、ニューロンそれぞれ独立に振る舞っているとすると数学的に意味があると思いますが、これはそのようなことを仮定してやられているのですか、ただ単に平均的な振る舞いをやられているのですか？

ええ、ただ単に平均的な振る舞いです。独立ではないと思いますので、これはアップ-リミットだと思って加算をしていることになります。

質問者：実際、複数の細胞でどのようにコ-ディングされているかについての解析は行われていますか？

それについては、まだやっていません。可能であれば本当にやりたいと思いますが。

質問者：ベクトルでの情報量を考えることは可能ですか？ また今回は点を見ていればいいので、顔を自分の behavior につなげる形ではないけれども、顔の discrimination とか、fixation をやらせた場合には何か反応とか変わることはあるのですか？

タスクによって IT のニュー-ロンの反応が discrimination の時と fixation してるときとで少し変わってくると思いますが、discrimination をこちらが教えてしまうことでサル認識自体に変化が起きてしまうこともありうるので、今回の場合は、fixation でこれから discrimination などでもできればさせたいと思っています。

質問者：動画で見せたらどうですか？ どのように変わりますか？

動画では今見せていません。静止画でもこの様にダイナミックに反応が変わってくるので、動画で見せたらどうなるのかわかりませんが、非常に興味があります。このビットをもとに動画でもやりたいと思います。

質問者：自分の表情に対して、このニュー-ロンがどう応答するのかというのを調べられているのですか？

サルは自分の顔ではやっていません。ニホンザルは鏡に対して自分に威嚇をして自分だということに気がついていないというのが、サルを研究している人の impression です。

質問者：そうではなくて、自分の顔を見せないで自分が怒った時の運動関連の情報がここに影響しているのかどうか、ということなのですが。

それは筋肉の活動などを計っていないので分かりません。ただ、まだ解析をしていないのですが、瞳孔のサイズは計ってあるので、emotional な変化があった場合にはそれを解析しようと思っています。

質問者：図形が粗いかファインかという分類もあると思うのですが、その場合にもこの概念は適用できるものなのですか？

先ほどの丸か四角かとか色などについて同様の計算をするとこのようにきれいには別れず、ばらばらになります。立ち上がりの最初に図形に反応するものでは立ち上がりの最初から色の情報コ-ドしていたりするので適用は困難と思います。

質問者：そうすると、ラフかどうかは恣意的ではないですか？ もっと複雑な図形で主成分空間で正確にラフかファインかを区別することはできませんか？ そうな場合の情報量解析した結果はありませんか？

いまはまだやっていません。

質問者：グローバルの範囲というのは、概念上の話で、サルか人間が決めたことですが、空間的な意味でもやはりサルの顔と人間の顔とは特徴量として大きな意味で違うと思います。表情のタスクでは非常にグローバルかつ空間的な変化が小さい時に反応する必要がありますが、その場合に今回の話からだけではどちらをコ-ドしているのかは必ずしも明確ではないと思います。つまり大きな特徴を捉えてから細かいことを見るという解釈が成り立つかどうかは明らかではないと思います。また例えば図形の区別をするよう

な課題で全体を見ればすぐ区別できるものと、細かいところまで見ないと区別できないものについてはどの様に考えられますか？

それを確かめるためには非常にパラメ - タのはっきりした刺激で調べる必要があると思いますが、今のところでは両方の解釈が成り立つと思います。

質問者：逆の方も大事ですね？ つまり、ロ - カルだけ見ていると大まかな概念に關与していて、グロ - バルはむしろサブカテゴリ - になっているという可能性ですが。

(笑) 困りましたね。

質問者：顔のようにコンプレックスな図形を見せた場合に、例えばサルの個体差とかで見えていく順番とかはどの様になっていますか？ 例えば、見せられた瞬間に最初に目をみて、鼻をみて、口を見るという順番についてですが。

この場合はサルは顔を見せられていても注視点があったところのあたりを常に見なくてはいけないので、サルは目は動かしていません。動かすとニュー - ロンの反応の立ち上がりがばらばらにずれてきます。

質問者： fixation point のところにあるのは、今回の実験では顔のどの辺ですか？

センタ - です。だいたいサルの鼻のすこし上くらいです。