

平成22年度 国立情報学研究所 市民講座 第8回

「脳でモノを見る—脳の中に創られる世界とは?—」

講師： 臼井 支朗

(理化学研究所脳科学総合研究センター 神経情報基盤センター長)

◆ 講 義 ◆

皆さん、こんばんは。

寒い中、大勢の皆さんに参加いただき、ちょっとびびっております (笑)。

一般向けの講演はあまり好きではないし、風邪を引いてのども痛いし、もともと名古屋弁だし・・・。

まあ、それはそのうちばれてしまうので、初めからばれた方がいいかと思っております。

精一杯頑張りますので、お手柔らかにお願いします。

・スライド2「案内文」

これは、今日の講座をあちこちに宣伝していただくためのご案内です！

今日は「見る」ことに関連したお話しをしたいと思います。

最近、デジタルカメラやビデオ、テレビなどいろいろなものがありますが、そもそもカメラで撮ったとしても、その画像は最終的にはわれわれの目を通して認識するしかない訳です。でも、それをどういう仕組みで見ているかは、正直言ってまだ十分分かっていないのです。

だから、「脳の中に作られる世界とは？」の答えは、「分かりません」となりますが、おいおい説明していきますので、その意味が分かっていたらいいかと思えます。一緒に考えましょう。

きっと楽しんでいただけたらと思います。

・スライド3「三省堂大辞林『目』に関する成句」

インターネットで三省堂の「大辞林」を見ると、「みる」には「見る」「視る」「観る」「診る」「看る」といった漢字があり、英語にも、look、watch、see、glance、sight、read、examineなどの単語があります。目に関する成句も「目は心の窓」とか、「目は口ほどにモノを言う」「目を喜ばす」「目の中に入れても痛くない」など、いろいろ面白いですね。

・スライド4「視覚ノート」

これまで、どんなお話をしようかと、あれこれメモを取りながらポイントをまとめてきました。順序は多少前後しますが、大凡こんな内容の話をしようと思っております。

初めに、最近のデジタルカメラの話から始めましょう。

ご存じのように、カメラは昔から絞りとフォーカスを合わせる必要がありましたよね。最近では、絞りもフォーカスもオートになりましたね。「手ぶれ防止」も登場しました。これは驚異的ですね。これで望遠も手ぶれなく撮れるようになりましたし、高速で撮れるようになりゴルフスイングの練習にも役だっています。顔認識もできるようになり、また3次元(立体)カメラ・ビデオも登場してきました。また、画像を連結した長いパノラマ写真とか、360度ぐるっと一回りに撮れるとか、技術は非常に進んできました。

た。

ここで、今日の話に関係している一つの機能は、手ぶれ防止です。カメラやビデオで手ぶれが起きるとどうということになるか。画像が流れ、場合によっては気分が悪くなりますね。しかし、私たちがこうして、右から左へさっと流し見をしても、見ている世界は全く流れませんね。

そういうことを考えて、まず視覚系とカメラの対応を見てみると、絞りとレンズは良しとして、網膜はフィルム、あるいはデジタルカメラでは CCD センサーに当たります。デジタルカメラの場合、CCD センサーの出力を画像処理して、0/1 のデジタル信号にして、ハードディスクに入れたり、メモリに蓄えたり、送信したりします。その信号をメモリチップやディスクから読み込んだり、アンテナで受けたりしてから、復号処理をしてモニターに出します。われわれはその結果を見ている訳ですね。

視覚系では、外界の情報が眼光学系を通り、網膜や視神経を通過して視覚中枢に行き、最後はどうなるか。脳の中は神経インパルスが行ったり来たりしているだけですが、非常に複雑な構造から成っており、具体的にどう処理されているかはまだ全体としては十分判っていません。しかしこうして見える訳です。そこが不思議という訳です。

いずれにしても、われわれに見えているものはカメラで撮った画像とは違います。見えている世界は網膜像そのものではありません。網膜から入ってきた情報に基づいて、脳で処理された結果を見えています。

それは、人間が生活する空間、活動に都合良い視空間を作っているということです。私たちが今見ているもの、見えているものは、自分の脳が作り出している訳です。つまり視空間は、生まれてからの経験や発達、成長によって創られます。自分が見ている情景は、自分の視覚系が作っている訳で、それを見て感動し楽しんでいる訳です。

さて、脳の神経活動とそれによって生ずる知覚を、どう対応づけて理解するかが神経科学です。例えば最近、ミラーニューロンというのが発見されました。我々が動作をするとき、脳の中で神経活動が起こって神経インパルスが発生し、筋肉が収縮して手や足が動く訳ですが、動作をするときだけでなく動作を見ているだけで、脳の中に同じような神経活動が生じているという訳です。自分が動作すること、誰かが動作しているのを見ている脳の活動が、鏡に写したように似ているということです。

私たちは見たいところに視線を移すとき、眼球が目標に向かって急速に動きます。また、何かを注視しているときも実は微妙に動いていて、その動きがなくなると視界が一瞬にして灰色になってしまいます。これは固視微動といって、こういう働きが視覚系のポイントの一つなのです。カメラは手振れ防止機能が大事ですが、視覚系は常に微妙な動きをしていないと機能しないのです。

今日の話の要点を最初に言ってしまう。われわれが歩いていても、世界は動きません。世界ではなく、自分が動いているということが分かります。なぜでしょう？ 分からないのです。私たちが見ている世界はなぜ動かないのか。網膜から入ってくる情報は、視線を動かすとどんどん変わりますよね。そういう情報が脳に伝わっているのに、なぜ世界はこのように安定していて、物はちゃんとそこにあって動かないのか。われわれは、「安定した世界像・外界像の中に自分がある」と脳が処理し解釈しているとしか考えられません。

・スライド5「カエルの視覚系」

それでは初めに、カエルの動作をみてみましょう。

・スライド6「Expanding dark spot (small)」(ムービー)

このように、モニター画面の前にカエルがいます。逃げるといけないからプラスチックでカバーしてあります。画面に小さな黒いスポットが出てきますから、カエルがどうするか見てください。何もしませんね。

・スライド7「Expanding dark spot (large)」(ムービー)

次は、円が大きくなります。

このように、カエルは大きな黒い物が近づいてくると逃げますが、小さいと逃げません。ハエなどが飛んでくれば反射的にぱくっと食べます。カエルもこんな高級な行動をするのですね。

・スライド8「脳(視覚系)の基本的な役割」

このように視覚系は、外界情報の変化に適切な行動を取るように判断しています。つまり、外界や体の変化に常に適応的であることで個体を維持し、生き残る術を持っています。カエルはそれほど下等な動物ではなく、実際、Lettvinらは1959年、「What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain」という当時としてはセンセーショナルな論文をIEEE(米国電気電子学会)の前身のIRE(米国無線学会)の学会誌に発表しています。

・スライド9「ヒトの眼」

では、ヒトの眼の話に移りましょう。

これは青目なので外国人ですね。真ん中の黒い部分は瞳孔です。

周りの網目状の部分は虹彩です。これが伸びたり縮んだりして瞳孔の大きさが調整されます。

・スライド10「眼球及び周辺のCT断層写真」

眼のレベルでCT断層写真を撮ると、このようになっています。中央の鼻をはさんで、右眼と左眼があります。眼球は6本の外眼筋によって左右・上下に、また回転もし、視線を動かしている訳です。

・スライド11「中心窩と周辺視野」

眼球を縦に輪切りにすると、こんな構造をしています。直径24mmくらいの球体です。真ん中が瞳孔。まわりに虹彩があり、その後ろにレンズが1枚あります。レンズはその周辺が毛様体筋で引っ張られ円盤のようになっています。周りの筋肉が緩むと風船のようにレンズが膨らみます。遠くを見るときは周囲八方からレンズが引っ張られます。するとレンズが薄くなり、焦点が長くなって、遠くにフォーカスが合います。近視や遠視はレンズの焦点が網膜にあるか、その前か後ろに来るかの問題です。

眼球の内側に網膜が張り付いています。その真ん中、レンズの光軸がまっすぐ当たるところが中心窩と言って分解能の高いところです。中心窩はたった2度ぐらいしかありません。この中心窩で色を受容

し、細かな情報が取り込まれる訳です。

・スライド12「眼光学系と網膜像」

網膜にどんな像が映るかは、眼光学系モデルできちんと計算することができます。

左の図は、近視の人(TK)の目の空間的な屈折力を可視化した特性です。縦にちょっとひずんでいて、赤いところが上下にあります。これは乱視が入っている訳です。裸眼、つまり眼鏡なしの場合はこんな特性です。

近視用メガネを掛けると真ん中の図のようになります。左の図で上下方向の変化がかなり大きかったのが、かなり改善されています。さらに、シリンダーレンズで乱視を矯正すると右の図のようにCの文字の切れ目もきれいに網膜上にフォーカスすることがわかります。

なぜこういうことをするかというと、網膜にどんな画像が映っているかをきちんと知っておかないと、その後の視覚系の研究に関係してくるからです。

・スライド13「盲点」

眼底写真を撮られたことのある方も多いと思いますが、右がその写真で、この真ん中が中心窩です。そこから5度くらい離れた盲点から視神経が出て行きます。100万本くらいの視神経が脳に行くのですから、そこは穴が開いているようなもので光を感じる視細胞はありません。ですから、その部分の映像は脳には行かないのです。センサーがないのですから、しょうがないですね。しかし、別に視野に穴が空いて抜けているようなことはないですよ。

それは、片方の盲点はもう片方の眼から見て反対側、つまり眼軸の内側にあつて、右と左では盲点の位置が反対なので、脳の中でお互いの情報で埋め合わせていると考えられていました。ちなみにこれは平成17年の東大入試に、なぜ盲点は知覚できないのかという問題として出ました。

・スライド14「盲点の体験実験」

ご存知の方も多いと思いますが、盲点の存在を実感できる簡単な方法です。

紙の真ん中に+を書き、その右に○を書きます。右眼で+をじっと見ながら距離を変えていくと、ある距離で○が消えてしまいます。それは、盲点の上に○が来たからです。このように、盲点の情報が脳に行かないということを実際に確認できる訳ですね。

・スライド15「画像工学的応用」(アニメ)

研究室の佐藤俊治さん(現、電通大)は、視覚皮質の生理学的知見に基づいて、盲点の周囲情報で欠けた内部を補填する数理モデルを構築し、その仕組みを応用して電子消しゴムを考案しました。

例えば、左側の画像は格子状に50パーセントが黄色くマスクしてあります。ごみで消えてしまっていると思って下さい。この黄色のところは全部ゴミ、つまり盲点が沢山あるとします。そこで、それぞれの黄色の周りの画像情報で、その内部を補填する処理を施すと、右図のようになります。一瞬にして黄色い部分が補填され、このように修復できるのです。もともと50パーセントしか画像がなかったのですよ。この程度に補正されればよいでしょう。Adobeのフォトショップの「消しゴム」より、こちらの方が絶対に優れています。

脳は他にも、もっと巧みな処理をしていると思うとすごいですよね。

われわれの目的は、こうした視覚系のような高度な機能を解明して何とか実現したいということです。

・スライド16「眼球と網膜」

次に網膜の話に移ります。網膜は眼球の内側に0.2mmくらいの厚さの細胞の層です。ここに光を感じる視細胞があり、その直下で複雑な情報処理がされて最後の細胞で神経インパルスに変換され、視神経から脳へ出て行くのです。

・スライド17「錐体・桿体の分布」

視細胞の密度分布はこうなっています。

グラフの真ん中にすごく細くとんがっている部分がありますよね。これが中心窩です。その周りには、月夜の光を感じることのできる感度の高い桿体（かんたい）という細胞があります。その中に盲点があります。桿体は暗いところの光に反応し、錐体は明るいところで色に反応すると思っていただければ結構です。

・スライド18「網膜断面」

色が見えるのは、中心窩のところの視細胞が色に感度を持っているからです。

テレビカメラのCCDは赤・緑・青（RGB）の三原色のセンサーが一樣に配置されていますが、われわれの眼は中心2度くらいの範囲に、赤・緑・青の錐体視細胞があります。そこでどんな情報処理がされているかを説明します。

これは網膜断面の模式図です。

このように赤と緑と青の視細胞があります。黒いのが桿体、視細胞・水平細胞と次の層との間をつないでいるのが双極細胞です。このあたりは網膜外網状層と呼ばれていて、詳細は後でお話ししますが、色情報の変換と中心・周辺拮抗的な受容野機構に基づく空間的な情報処理をしています。その下層の内網状層では、タコのような形をしたアマクリン細胞が時空間的な情報処理をしています。時間的にシャープにしたり、動きの方向を抽出したりという処理をして、最後にそうした情報が神経節細胞(G-cell)で神経インパルスに変換され、視神経を介して中枢に運ばれる訳です。

ところで、光は外から来るので網膜の内側にある視細胞は光の来る方に向いて並んでいます。しかも、視細胞が一番奥にあるのです。なぜでしょうか。

視細胞は非常に高感度なので、活性が高く、多くの酸素を必要とします。つまり、酸素をたくさん補給しなければなりません。血管は眼球の外から酸素を供給しているので、その後ろ側に視細胞が突き刺さっているのです。

いずれにしても、視細胞は直径数ミクロンでフォトン1個にも感度を持つすごいセンサーなのです。ノーベル賞の小柴先生は1987年、カミオカンデでニュートリノを観測されましたが、それを可能にしたのは直径50cmというおぼけのような光電子増倍管を1万個以上ならべた地下1000mの装置でした。

・スライド19「生きている網膜の断面（霊長類）」（ムービー）

これは研究室の石金浩史さん（現、専修大）が作ってくれたムービーで、コイの網膜を短冊上に切って、横から顕微鏡で見たものです。上の方が視細胞で、それから双極細胞、下の方に神経節細胞などが見てとれます。

・スライド20「網膜神経節細胞が脳に送っている電気信号」(ムービー)

この網膜に電極を挿すと神経信号が記録できます。時々大きなパルスが出ますよね。これが神経インパルスです。神経インパルスは100ミリボルトくらいあります。100ミリボルトというのは、どれくらいか分かりますか。乾電池は1.5ボルトですね。100ミリボルトは0.1ボルトですから、10個直列につなげたら1ボルト、15個つなげたら1.5ボルトになります。ということで、神経細胞はとても身近な存在だと判っていただければと思います。

・スライド21「桿体と3種の錐体」

次は錐体の話です。錐体は色光に感度があります。これは虹の七色で、赤から青へ変化しています。赤は長波長、青は短波長です。赤、緑、青の錐体は、それぞれ図のようなスペクトル感度を持っています。こうした特性についてはいろいろ複雑な話がありますが、きちんと説明する時間はないのでここでは省略させていただきます。

・スライド22「錐体細胞の分布」

赤、緑、青の視細胞はこんな感じで網膜に分布しています。丸の部分は中心窩の中心部分で、そこには赤と緑の錐体しかなく、青錐体はその周辺にあります。

・スライド23「魚類における反対色生成過程」

先ほどお話したように、視細胞には、赤、緑、青といった色光に感度をもつ3つの錐体があります。左上は620nmあたりの赤味の色に感度が高い赤錐体です。緑錐体は540nm、青錐体は440nm辺りの色味に大きく反応します。このように3種の錐体視細胞は簡単に言えば三原色信号をとらえているのですが、それぞれの錐体の直下で右の図のように三つのタイプの水平細胞と特異な回路結合を作っており、そこで反対色信号に変換されるのです。

反対色というのは、赤に対しては緑、黄色に対しては青という残像の色です。それは、RGB信号だけでは明るさ情報と色情報を分離できないため、それらの差信号を作っている訳です。さらに、網膜で取り込まれ処理された大量の画像情報を、視神経によって中枢に伝えるために情報圧縮をやっているとも言えます。

少し詳しく説明しますと、赤錐体からH1水平細胞に入っているのです。H1は赤錐体と同じスペクトル応答になります。H1から緑錐体にフィードバックすると反転して、マイナスだったものがプラスになります。従って、H2では赤がプラス、緑がマイナスになります。さらに、H2水平細胞から青錐体にフィードバックして3番目のH3水平細胞に行きます。これは赤がマイナス、黄色がプラス、青がマイナス、つまり反対色信号になります。この実験データは、1965年に慶應義塾大学医学部生理学教室の富田恒男先生がコイの網膜から記録されたものです。

こうした回路構造は直交化プロセスとあって、三原色信号を反対色信号に変換するとともに、信号の

効率を良くする情報圧縮の一つの機構になっています。色覚を持つ脊椎動物の網膜は基本的には大凡こうした構造を持っています。テレビも原理的には同じ方式で三原色から反対色の表現に変換しています。自然はこうした仕組みをどうやって実現したのでしょうか。不思議です。

・スライド24「新たなフィードバック仮説」

最近、このフィードバック機構について、水平細胞からプロトンが放出されフィードバック信号として作用しているという新説が出ました。これも富田先生のお弟子さんの金子先生と、そのお弟子さんで現在、研究室にいる平沢統君が2003年に発見しました。目下、研究室でその詳細を分析していき、新しい数理モデルを作りつつあります。つまり、このようにプロトンによるフィードバックにより三原色信号から反対色信号へと変換されるということです。

・スライド25「なぜリンゴは赤いのか？『リンゴが赤いから』ではありません」(アニメ)

これで網膜の話は終わり、少し、色とか錯視とか面白そうな研究を紹介します。ここにバナナやリンゴ、オレンジなどがあります。ニンニクもありますね。今から簡単な実験をしましょう。まじめにやった人は面白い経験ができますから、言ったとおりにやってください。

今、リンゴだけに青い光を当てますと、こうなりますね。では、全面に同じ青い光を当てるとどうなるか、見てください。全体にはブルーの光が当たっているのですが、リンゴはやはり赤いですね。レモンは黄色いですね。これが先ほどお話しした、色の恒常性です。しかし、これは青い光で照らしているのですから、最初の絵とは、スペクトル、反射率、色の成分が物理的に違います。でも、リンゴは赤く見えてしまうのです。

お肉屋さんに行くと、美味しそうに見せようと赤い蛍光灯で照明している店がありますが、色にだまされてはいけませんよ(笑)。

では、もう一つ。今度はもっと面白いですよ。

・スライド26「絵の中央をなるべく目を動かさず見てください」(アニメ)

先ほどのカラー画像のネガ、つまり反対色で作ったカラー写真をお見せします。レモンの辺りをじっと見てください。目を動かしては駄目ですよ。では、これを白黒画像にします。何が見えるでしょう。

はい、どうですか？

カラーに見えた人は？ あちこち視線を動かして見てください。この写真はカラーではないことがわかりますよね。もともと反対色の写真を見せたので、残像としてその反対である本来の色が見えたのです。リンゴも赤く見えたでしょう。このくらい劇的に皆さんの網膜が順応したのです。

もう一回だけやります。まじめに実験した人だけ色が見えるのです。

はい。鮮やかですよ。でも、色なんか無いのですよ。白黒写真なのです。今の赤みはどこにあると思いますか。頭の中にしかありませんよね。

・スライド27「枯れ葉の画像」

もう一つ、研究室の観音隆幸君がやっている研究で、視覚系はぼけた画像にも順応します。

右はシャープな紅葉したモミジの画像です。左はぼけていますね。真ん中に緑の星印があるので、先ほどと同じように、それをじっと見てください。さて、皆さんの視覚系が順応したらどうなるでしょう。

・スライド28「枯れ葉の画像」

はい、どうですか？どちらがシャープに見えましたか。左ですよ。でも、実はこの画像は右も左も同じだけぼかした画像なのです。皆さんの視覚系がぼけた画像に順応したので、左側の方がシャープに見えたのです。こういった例はいくらでもあります。

・スライド29「影を影として視るということ」

例えば、これは影を影として見える例です。ここに円柱があって、その影があります。そしてAとBのパッチがあります。Aは黒、Bは白、その間も黒、白、黒、白・・・と思ったら大間違いです。実はAとBは同じ色なのです。このように、真ん中にグレーの線を表示して比べると、色の差は何もないですよ。「うそでしょう？」と思うでしょう。でも、本当なのではないのです。

このように、私たちが見ているものはみんな錯覚なのです。すべて錯覚です。「おれの目の黒いうちは、、、」なんて言わない方がいいですよ（笑）。

・スライド30「北岡明佳の錯視のページ」

これは立命館大学の北岡先生が作られた「蛇の回転」という、静止画の錯視図形です。どんなふうに見えますか。じわーっと回って見えますよね。

われわれの眼は固視微動という微細な動きをしているのですが、それによって、こうした知覚が生じるような巧妙なパターンになっているのです。このように、視覚系はないものを勝手に解釈して見ているのです。素晴らしいですよ。

・スライド31「スーザン・バリー『視覚はよみがえる—3次元のクオリア』」

さて、色や錯視など、いろいろ見てきましたが、もう一つ面白いのは立体視でしょうね。そのあたりのことを少しお話します。

最初に言いましたが、眼球は右眼と左眼の二つしかないのです。最近、立体カメラも出て来ましたが、要は右眼と左眼の写真を同時に撮る訳です。3次元のものを2次元の写真にしたら、1次元減りますよね。どこか情報が欠落します。だから、2次元の画像から3次元の世界なんて再現できませんよね。計算できません。方程式の数が足りないから解けないのです。こういう問題を不良設定と言います。中学校でも高校でも習いましたね、未知数の数と式の数の関係です。きちんと解けるためには、未知数の数に対して、方程式、条件式がそれ以上なければいけません。そこで、視差の情報とかを入れて解く訳です。視覚系はそうしたことをやっています。

この本は年末に出たので、正月に読んだら、とても面白かったのでぜひ紹介しようと思った次第です。アメリカのスーザン・バリーという人の本です。

彼女は子どもの頃に、内斜視といって、寄り目の子だったのです。

寄り目になると、二つの目が融合しません。私たちは近いところを見ると、視線を合わせるために二つの目が寄りますよね。そしてレンズの厚みを調整して、なおかつ瞳孔が縮瞳するのです。縮瞳すると焦点深度が深くなるので、フォーカスがよりシャープになります。輻輳とレンズ調節と瞳孔径のシステムが一体になって機能しているのです。

近いところを見るときは、両眼の角度が狭くなるので目が寄り、遠いところを見るときは目が離れます。それができると、右眼と左眼の融合したところで視差の計算などができるのですが、彼女は斜視だったので、できなかったのです。でも、他の情報を使って、一応、立体になっているという感じは理解していたみたいです（後にも述べますが、平面的なイメージだったそうです！）。

彼女はまず、外科手術で斜視を治療しました。

大人になって、40代半ばから視能療法（目の訓練）をした結果、突然、われわれが見るような立体感を獲得したのです。このあたりの彼女の表現は劇的です。この本は絶対読んでください。いかにこの感覚が不思議かということに感激しますから。

そこで彼女は、大人の神経系の可塑性（神経系の構造が変わること）に関する従来の研究者の見解が狭く、その要因の一つは、科学者や医師たちが研究室や臨床治療を計画するときのやり方に問題があると言っています。つまり、被験者・患者から脳回路だけを切り離して研究しても、ニューロンの可塑性は理解できないという訳です。環境や順応、反応を考慮して初めて本当の意味で人間の脳の驚くべき可塑性を探求できると言っています。

これに関しては臨界期という歴史的な研究があります。

アヒルだったか、カモだったかは、臨界期に見た対象を母親だと思って一生ついて歩くというのがあります。これをインプリンティング（刷り込み）と言います。「母親はこれだ」と脳に刷り込まれてしまうクリティカルな時期があり、それ以降、脳は変化しないというのが定説だったのです。でも、それはとんでもないということを彼女は言っています。「損傷から回復したり、新しい技能を学んだり、知能を向上させたり、さらには新たな主観的な感覚（クオリア）を身につけたりするために、脳は一生、配線を変え続けているのだ」と。つまり彼女は、脳は変わるのだ、変えられるのだと言っているのです。

今日の話を聞きになった方は、きっと脳の神経回路が変わっていますよ、本当に（笑）。なぜなら、今まで聞いたことがない話だから。昨日まで乗れなかった一輪車に今日乗れたら、確実に神経回路（コントローラー）ができています。そうでなければ乗れる訳がありません。ただ、実証するのは難しいので、好い加減なことは言わない方がいいですけれども、彼女はそれを実体験して示したのです。

もう一つ、ランダムドット・ステレオグラムといって、立体に見える絵があります（左図）。右眼と左眼の視野がうまく融合すると立体的な箱のような物体が飛び出しているように見えます。最近、1枚でも立体的に見える絵もありますよね。

彼女は、それまではすべてが平面的だったと言うのです。立体的に見えるということは、われわれは

3次元の世界のここに自分がいるという知覚です。例えば、手の届く範囲の空間認識は非常に精密なのです。皆さん、真っ暗の部屋で寝ていて夜中にのどが渴いた時、手を伸ばせばぱっとペットボトルを取れますよね。われわれの手の届く範囲の空間知覚の精度は高いのです。あと、道具を使うとその範囲が道具の先まで広がるという研究もあります。そういう意味では、われわれの脳の中には空間マップのようなものがあるようです。

・スライド32-33「大脳皮質」

では、脳はどうなっているのでしょうか。

大脳皮質には第1次視覚野(V1)、第2次視覚野(V2)などがあり、その他、運動系、前頭葉、側頭葉など脳は機能が分担され、こんな構造をしています。

・スライド34「第1次視覚野のレチノトピー」

この図には、右眼と左眼があり、女性の鼻を見ています。

女性の右半分は、中心窩より内側に映ります。外側の像は同じ側へ行き、内側の像は右眼と左眼でクロスします。つまり右脳にはこの女性の右半分の情報が伝わり、左半分は左脳に行くのです。

「ええ、うそだ、私の見ている外界は真ん中で切れていませんよ」と言われるかもしれませんね。ただ、真ん中は微妙にダブっています。しかも右脳と左脳の間にはすごい束の神経が情報のやり取りをしていて、その結果、立体感が生まれるのだらうと言う訳です。

もう一つ、視覚野を通らず、その前段の部位から上丘という部位へ行く経路もあります。この機構により、視覚的イメージ知覚を失った人でも、画像を見せるとちゃんと判断出来るとか、面白い研究がありますが、時間がないので省略します。

・スライド35「受容野構造：G-cell, LGN, V1」

視覚情報の処理は数理的に言えば、中心と周辺という空間フィルターの組み合わせにあると思ってください。これが視神経を介して外側膝状体(LGN)を通して第1次視覚野に行きます。そこで、傾きに感度を持つ細胞などが出てくるのです。これを傾き検出細胞といいます。

・スライド36「第1次視覚皮質の細胞の受容野」

これはヒューベルとヴィーゼンがやった実験ですが、ネコの第1次視覚野の一つの細胞に電極を刺しておき、こういう刺激パターンをモニターで見せます。すると、ある方位の傾きのとき神経パルスがバリバリと出るのです。傾きを変えると反応が弱くなります。彼らは、このような傾きを検出する細胞があることを実験的に発見し、ノーベル賞を受賞しました。

・スライド37「V1のハイパーカラム」

第1次視覚野では右眼から来た信号と左眼から来た信号が入れ子になっています。しかも、見ている対象にはいろんな傾きの画素がありますので、それぞれの傾きを検出する細胞が並んでいます。さらにそれらが一つのブロックになって網膜座標に対応して2次的に並んでいます。右眼と左眼のこれだけの

塊、一ブロックがそれぞれ担当する範囲の画素にどのような傾きやエッジがあるかなどを検出しているのです。脳の中でこうした処理が同時並行的にリアルタイムで行われているのです。すごいでしょ。

・スライド38「第2次視覚野 V2」

第2次視覚野には、物理的には存在しない主観的輪郭に対して活動する神経細胞があります。これはカニツァの三角形といいます。赤いパックマンがいて、三角形の上にもう1個、素直な人には真っ白な三角形が載っているように見えますよね。しかもこの白い三角形は他の部分より、一層白く見えますよね。しかし、物理的には色の違いは全くないのです。

その下は生理実験によるものです。

上の黒い二つの円にある傾きを見せたとき、下の場合、第2次視覚野の細胞が発火して縦の傾きを検出していることが分かりました。では、傾きのない刺激ではどうでしょうか。例えば、下のように縦に線が並んでいて、真ん中で横に切れている上の場合、実際には存在しない横の線があるように見えますが、この場合は反応しません。しかし下の様に横に線が並んでいて、真ん中で縦に切れている場合は、縦の仮想的なエッジ線みたいなものに反応しています。要するに、上の二つの円は実際の傾きの線があり、下の二つの円は実際には線はないのですが、その主観的輪郭を検出できているのです。

・スライド39「サル視覚経路」

サルの視覚系はこのように網膜から中枢まで、いろんな機能が段階的に処理されています。つまり、図のように方位、方向、色、形、動き、空間周波数などが、脳のいろいろな部位で別々に処理されるのです。

・スライド40「情報が順次、脳の中で処理される」

これを最も簡単に言うと、網膜から外側膝状体を通して視覚野へ来ると、形、奥行き、色の情報は側頭葉へ、空間、動きの情報は頭頂連合野で処理されているという感じです。

例えば赤いボールが飛んでくる場合を考えてみます。「赤」は色ですね。ボールは「丸い」、これは形ですね。それが飛んできて、先ほどのカエルの実験のようにだんだん大きくなります。「赤」くて「丸い」ものが近づいてきて「大きく」なった。少なくとも三つの情報があります。これらがそれぞれ別々の脳の部位で検出されるのです。それがどうして一瞬にして、「あ、赤いボールが飛んできた！よけよう」と行動できるのでしょうか。

これは結合問題といって、情報は個別回路で検出・処理されるのですが、最後にそれが全部統合されて、そういう知覚が生ずると言われています。いわゆる「hard problem (難しい問題)」と言われているものです。

・スライド41「果物の写真」

さて、ここで、これまで私どもがやってきたニューラルネットモデルによる色の研究を紹介します。

先ほどの三原色と反対色信号の特性をニューラルネットに学習させると、色覚異常の場合、この自然画像がどんな色で見えているかを計算することができます。左上はオリジナルです。赤錐体が欠損して

いる場合は右上のように、緑錐体が弱い場合は左下のように、青錐体が弱い場合は右下のように見えます。これは色覚異常の色知覚を可視化した初めての例として、ドイツで行われた色覚異常学会に招待され発表したのですが、大変好評でした。

・スライド42「V4 野神経細胞の活動は色知覚と一致する」

色の恒常性に関して Zeki は、脳の V4 野の神経細胞に色味に反応する色細胞があることをサルの実験で明らかにしました。青の照明下でもリンゴが赤く見えるという先程の話です。

・スライド43「Color Transformation from Trichromacy to Higher-Order Representation」

虹の7色の波長に選択的に応答する色細胞の特性をモデル的に与え、それが3つの錐体視細胞の色光特性からどういう変換によって得られるかを三層のニューラルネットに学習させました。

・スライド44「Acquired Internal Representation (Color Confusion Line)」

するとうまく学習でき、結局、中間層には先程お話しした反対色（赤/緑、黄/青）の情報表現が獲得されたのです。左がサルの実験、右がニューラルネットに学習させた混合色軌跡の結果です。この結果は反対色表現の必然性が、計算論的にも妥当であることを示しています。

・スライド45「Nonlinear Compression of Surface Reflectance of Munsell Color Chips」

これまでお話ししてきたように、色は主観であって、物理的には存在しないのです。これはマンセルの色立体です。学校の保健室へ行くときこういうプラスチックの立体が飾ってありましたね。人が見える色を立体的に表したものです。一つずつカラーチップになっていて、倒して床に散らばってしまうと、並べ直さないといけないので大変です。でも、色味は分かるので、われわれは並べられますよね。近い色は近いところに置けばいいのですから。明るい色は上です。色相は円周状になっていて、中心からの距離は鮮やかさです。つまり、明度、色相、彩度という心理物理量の座標で並べてあるのです。

では、ロボットにこうした並べ直しができるでしょうか。ロボットに色味が見えているかどうかは疑問ですが、分光波長は物理的に測ることはできます。私どもは、図のように各色の分光スペクトルデータを入力し、それを一旦情報圧縮し、それから入力スペクトルを再現させる恒等写像を五層のニューラルネットに学習させました。

・スライド46「Acquired Internal Representation」

獲得された真ん中の三つのニューロンの値を3次元座標に再現すると、マンセル色立体とよく似た、明度、色相、彩度の空間で座標値が出力されるようなネットワークができたのです。ということは、色チップの分光反射率を入力すると、x、y、zの座標値が出力され、「この色はここにあった」と教えてくれる訳です。こんな簡単な回路で物理量から心理物理量に変換できるというのは非常に面白いことです。

・スライド47「How do we develop a large scale model?」

最後に、これまでお話しした眼球から網膜、視覚中枢のモデルをパーツとして、それを繋いで視覚系全体をシミュレーションしようという研究を紹介します。

・スライド48「ローテーティング・スネーク」(ムービー)

先程の「蛇の回転」の画像を見ている人の眼の動きを実測し、その眼球運動によって生じる網膜像を網膜モデルに入力します。そのときの網膜像が左上のこれで、網膜から出力される四つのタイプの神経節細胞の神経インパルス可視化し動画にしたものがこの4つの画像です。網膜神経回路でこんな情報処理が行われているということが判るわけです。

・スライド49「Models for retinotopic map of V1 or MT」

次に、これは研究室の稲垣圭一郎君のやっている研究です。コントラスト配置の異なる二種類の「蛇の回転」画像を視覚中枢モデルに入力してみました。動きベクトルの方向性を表す右下の絵はぐちゃぐちゃですが、右上のベクトルは左上方向に流れていますね。つまり、このようなモデルでシミュレーションすると、左に回ることが判りました。これはサルの視覚中枢の実際の神経インパルスを記録して、それを基にしてモデルで計算したのです。サルがこうした回転を感じているかどうかは分かりませんが、コンピュータ上でのシミュレーションで確認できた訳です。かゆいところに手が届かない感じですが、しょうがないですね。

・スライド50「視覚ノート」

そんな訳で、最初の話に戻りますが、結局は、自分の視覚は自分で育てるということですね。頑張れば頑張っただけ、いい視覚系ができると思います。

音楽を聴いたり、絵画を見たりして感動できるのは、あなた次第です。

おいしさを解せない人にごちそうしても価値がありません。

「違いの分かる男」になってほしい訳です。視覚系も同じです。

一番大事なポイントは、安定した外界の中に自分がいるという視覚世界が脳の中に作られるということです。この視覚世界は目をつむると一瞬にして消えます。目を開けば、ぱっと再現します。網膜に映った外界情報が、脳で瞬間的に行われる複雑で膨大な情報処理の結果、知覚されるのです。こうした視覚情報が脳の中でどのように表現されているか、頭にあるのは脳ミソだけです。興味深いことですが、私も何も分かっていないのです。

・スライド51「推薦書の例」

最後に推薦書を紹介します。

『見る』とはどういうことか—脳と心の関係をさぐる(化学同人、2007)は、阪大教授の藤田一郎さんの著書です。さすが藤田先生、本質を突いた良書です。

立命館の北岡先生が監修された「知覚は幻—ラマチャンドランが語る錯視の脳科学」(別冊日経サイエンス、2010)はロビーで売っていますので、買ってお帰りください。

そして、スーザン・バリーの「視覚はよみがえる—3次元のクオリア」、これは本当に感動ものです。

もう一つ、「音のイリュージョン—知覚を生み出す脳の戦略」（柏野牧夫、岩波科学ライブラリー168、2010）という面白い本が出ています。これは聴覚と視覚を比較しています。音の知覚とわれわれの視覚は、クオリアの次元が違うだけで、似たような感じですが、なぜ440Hzの音が「ラー」と聞こえるのでしょうか。音は物理的には単なる空気の粗密波です。塩も砂糖も化学物質です。塩は辛いんですよね。あの塩の辛さは、塩自身にはありません。塩はNaClですから。われわれはすべて感覚系を通して勝手に外界を知覚しているのです。感じることによって外界を認識している訳です。

以上、あまりいい答えになっていないかと思いますが、言いたいことの多少はお分かりいただけたかと思います。こんな感じで楽しく研究しているのですが、皆さんもそう思われたら幸いです。ご清聴ありがとうございました。

（拍手）

（講義資料の一部に出版物やインターネットで公開されている図などを改変・利用させていただきました。各位のご了解をお願い申し上げますとともに感謝いたします。また、講義は市民講座という事で判りやすさを優先し、話を単純化したり、そのために曖昧な表現・用語などを用いた箇所もあったかと思ひます。ご理解を頂ければ幸いです）。