



こころの「現在」の科学 時間の錯覚からわかること

The Science of the Mental Present: Implications of Temporal Illusions

北澤 茂*

Shigeru Kitazawa*

Abstract

Mental time consists of the mental present, past, and future. In this review, we aimed to elucidate how the brain constructs the mental present, by assessing several temporal illusions that occur within a time frame smaller than one second. We first reviewed the color phi phenomenon and the cutaneous rabbit phenomenon, followed by the flash-lag effect, and finally, reversal of the subjective temporal order due to arm-crossing and saccadic eye movements. After examining the hypotheses that explain each illusion, we proposed that the mental present is constructed in a postdictive manner by combining different aspects of information, such as motion and spatial positions, which are represented over multiple areas in the cerebral cortex. On the basis of the classic time quantum theory and recent findings in neurophysiology and psychology, we further suggest that the mental present is constructed by combining information from one to several periods of ~100 ms, each consisting a period of the alpha rhythm in the brain.

Key words : mental time, mental present, temporal illusions, arm crossing, saccade

I. こころの「現在」の幅

1977年にデビューしたシンガーソングライター、渡辺真知子の「迷い道」の冒頭は、「現在・過去・未来」という印象的なフレーズで始まる。私たちの誰もが、この歌詞に象徴されるように、現在・過去・未来の区別を了解して暮らしている。この私たちが共有する時間の意識を「こころの時間」と呼ぶことにしよう。

この三者の中で、圧倒的な存在感を示すのが「過去」である。生まれてこの方のおびただしい記憶はいうまでもなく、「シベリアの凍土からマンモスが発見された」と聞けば、自分の生年をはるかに遡って、マンモスが牙を振りかざしていた数万年前にこころは旅する。100億年前のビッグバンですら、繰り返し聞くうちに、身近に感じられるほどである。「未来」は過去に比べれば影が薄いかもしれない。それでも新聞の紙面をにぎわすアベ

ノミクスの効果は2年後に確かめることになっているし、地球温暖化の影響や石油資源の枯渇は数十年の幅で語られる。

それに引換え、「現在」の幅は驚くほど狭い。例えば、100メートル走を考えてみよう。スタートダッシュが終わった時点でも、誰が勝つかは「未来」に属する。つまり、「現在」は10秒より短い。では、1秒はあるだろうか。バスケットボールのフリースローの滞空時間がほぼ1秒だ。手を離れた瞬間には、リングにボールが通るかどうかは未来に属すると感じる人が大部分だろう。「現在」は1秒より短い。

本稿では、「こころの現在」の幅は1秒以内である、として話を進める。ここで注意したいのは、「こころの現在」は物理学的な「現在」そのものではないということである。「こころの現在」は物理世界の直近の入力を糧にして、脳が作り上げた世界の解釈なのだ (Fig. 1)^{1,2)}。「こころの現在」を脳がどのように構築している

* 大阪大学大学院生命機能研究科 [〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-3] Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University, 1-3 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

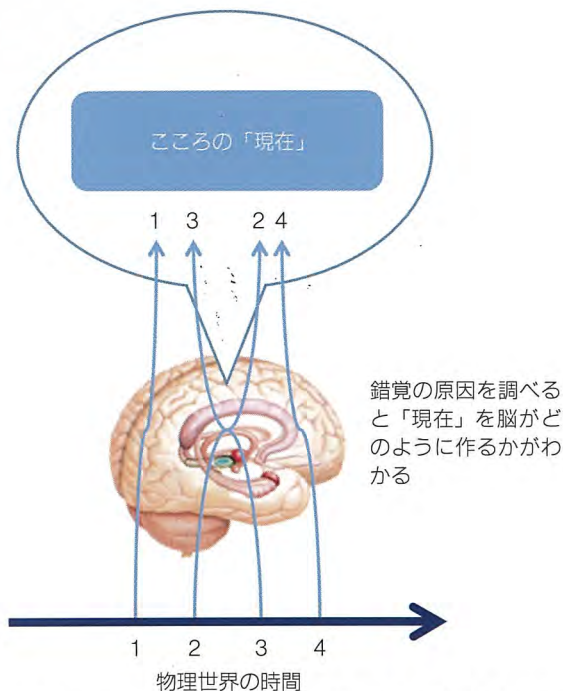


Fig. 1 こころの「現在」と物理世界の時間の関係

こころの「現在」は1秒以内の短い物理世界からの信号(1~4)を入力として、脳が作り出す世界の解釈である。錯覚(例えば信号2と3が逆転している)の原因を調べることで「現在」を脳がどのように作り出すのかについての手がかりが得られる。

のか、という問題にアプローチする際の手がかりになるのが、時間の錯覚である。1秒以内の短い時間で生じる錯覚を手がかりに、「現在」構築のメカニズムについて考察してみたい。

II. 未来が過去を変える

1970年代に報告された2つの錯覚は、あたかも未来が過去を変える、因果律がなり立たないと思わせるような錯覚である。

1. カラーファイ

1つ目は「カラーファイ」として知られる錯覚である^{1,3)}。縦横およそ1°の正方形をフラッシュ提示して、50ms後に4°離れた位置に再度提示すると、その正方形が「滑らかに動いた」ように見える。これが仮現運動である。Kolersとvon Grunau³⁾は2つの正方形の色を変えてみた。例えば1個目の正方形を緑、2個目を赤にして提示したところ、正方形の色は「動きの中央で」突然緑から赤に変わった(Fig. 2 A)。2個目の色を黄色にすれば、「動きの中央で」黄色に変わった。つまり、2

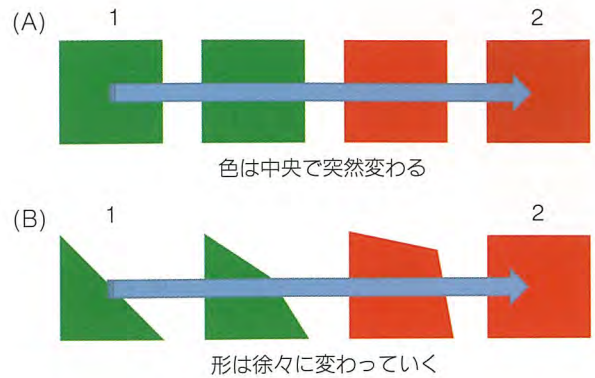


Fig. 2 カラーファイ³⁾

視角0.9°の正方形を、4°離れた1、2の位置に、50msの時間差でフラッシュ提示すると、途中で滑らかな仮現運動が見える。色の違う正方形を見せると、中央で突然色が変わる(A)。三角形と正方形を見せた場合、形は徐々に変わるように見える(B)。

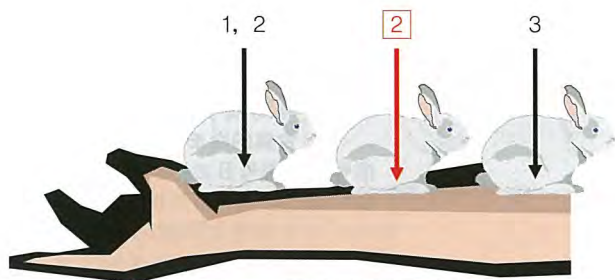
個目の正方形の色が過去に遡って影響を及ぼしているかのように見えるのだ。

実は、彼らはもう1つ実験をやっている。1個目の正方形を斜めに切り取った緑の直角三角形にして左に提示して、2個目を赤の正方形にして右に提示するのである。すると何が起きたのか。被験者には、緑の三角が右に動いて「だんだん膨らんで」「中央で突然緑から赤に色が変わって」「さらに膨らんで緑の正方形として右に到達する」ように感じられた(Fig. 2 B)。未来の色と形が、過去の色と形を変えたかのようなのである。

2. 皮膚ウサギ

もう1つの錯覚は皮膚ウサギ(cutaneous rabbit)である⁴⁾。前腕の内側の3カ所、手首と肘の近くとその中点に皮膚の刺激装置を置く。50msの間隔で手首を5回、続いて中点を5回、さらに肘を5回刺激すると、現実には3カ所を5回ずつ刺激しているだけなのに、刺激が手首から肘に向かって等間隔で飛びながら移動しているように感じられるという。あたかも、「小さなウサギが手首から肘にホップしているかのように」感じるところからcutaneous rabbitと名づけられた。

これは手首を2回、肘を1回刺激しても十分に生じる。この場合は、手首に加えた2回目の刺激が手首と肘との中央に移動して知覚される(Fig. 3)。3回目の肘に加えた刺激が2回目の手首に加えた刺激の位置を変える、という意味で、未来の刺激が過去の刺激の位置を変えているかのようにみえる(Fig. 3)。



2 発目の位置が移動する

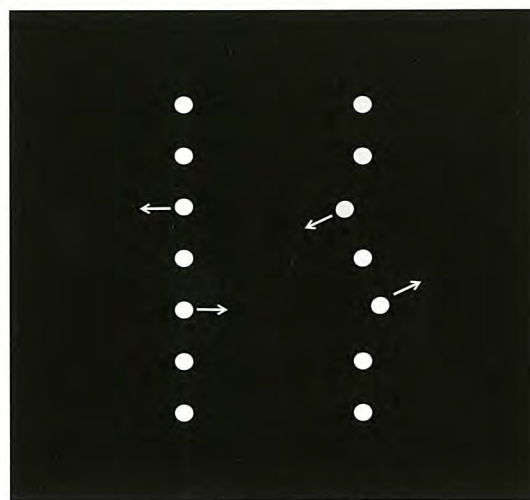
Fig. 3 皮膚ウサギ⁴⁾

前腕内側の1点に2回(1, 2), 10 cm離れた2点目に1回(3), 50 msの時間差で短いタップ(皮膚の刺激)を加えると, 1点目に加えたはずの2回目の刺激が, 1点目と2点目の中央に移動して知覚される(四角で囲んだ2)。

3. 解釈として立ち現れる「現在」

しかし, いずれの現象も, 物理学的な因果律に抵触しているわけではない。もう一度「こころの現在」は脳が作り出すということを思い出そう。「こころの現在」は直近の信号をある程度の時間幅で斟酌して, 一番妥当な解釈として立ち現れると考えれば, 何の不思議もないのである。その時間幅は, カラーファイの場合は刺激時間差が50 msなので50 ms程度である。皮膚ウサギの場合も, 最短条件では50 ms間隔で3発なので100 ms程度である。皮膚ウサギが飛ぶ最大のインターバルは200 msだそう⁴⁾。とすれば, 「400 msの間に3発」が脳がまとめて解釈できる統合の最大値といえそうである。要約すると, 0.1秒程度(最大0.5秒程度)の間に入力してくる複数の信号を総合して, 最も妥当な解釈として「現在」は立ち現れる。

皮膚ウサギの神経メカニズムについて付言しておこう。皮膚ウサギが飛べる範囲は, 投射先の一次体性感覚野の受容野の大きさに制限される。また, 体の正中線を越えて飛ぶことはない⁵⁾。最近の脳機能イメージング法を使った研究によれば, 錯覚が生じた領域を受容野とする一次体性感覚野に信号が検出される⁶⁾。皮膚ウサギ現象は一次体性感覚野を舞台にして生じる錯覚であるように思われる。しかし, 最近Miyazakiら⁷⁾は, 右手と左手の人差し指の間に「箸」を乗せると, ウサギが皮膚を飛び出して「箸」の上を渡ることを示して注目を集めた。皮膚からの信号の時間的な統合と再解釈が左右の半球にまたがって行われうることを示す結果である。

Fig. 4 フラッシュラグ効果⁸⁾

回転する三ツ星の両側に2個ずつ, 計4個の星をフラッシュ提示する。三ツ星と一直線上に提示しても(左), 観察者にはフラッシュが遅れる方向にずれて見える。

III. 動くものは先走るのか — フラッシュラグ効果

回転する三ツ星の延長線上の両外側に2個ずつ計4個の星をフラッシュして提示する。本当は一直線上に7個の星が並んでいるはずなのに, 三ツ星とフラッシュはずれて見える(Fig. 4)。ずれの量は回転速度に比例していて, ほぼ0.1秒の間に回転する角度である(ずれの量は, フラッシュの提示位置を調整して一直線に見える調整量として計測する)。これが有名な「フラッシュラグ(flash-lag; フラッシュは遅れる)効果」である⁸⁾(サッカーのオフサイドに誤審が多いのはフラッシュラグが理由であるという説もある⁹⁾)。この現象を説明する理論は少なくとも3説ある。

外挿(予測)説

発見者Nijhawan自らが唱えている説⁸⁾。動いているものの位置は脳が100 ms後の位置を過去の動きから外挿(予測)している, というもの。

異なる潜時説

動くものは「意識」に上るまでの時間がフラッシュよりも短いため生じる錯覚である, という説¹⁰⁾。たとえば, 動く三ツ星は近い星, フラッシュするのはずっと遠い星, ということである。一直線になったときに光っているのだけれど, 意識のスクリーンには遠い星のフラッシュが遅れて到達するので, 三ツ星の動きに遅れているように見える, というわけだ。動く向きを予

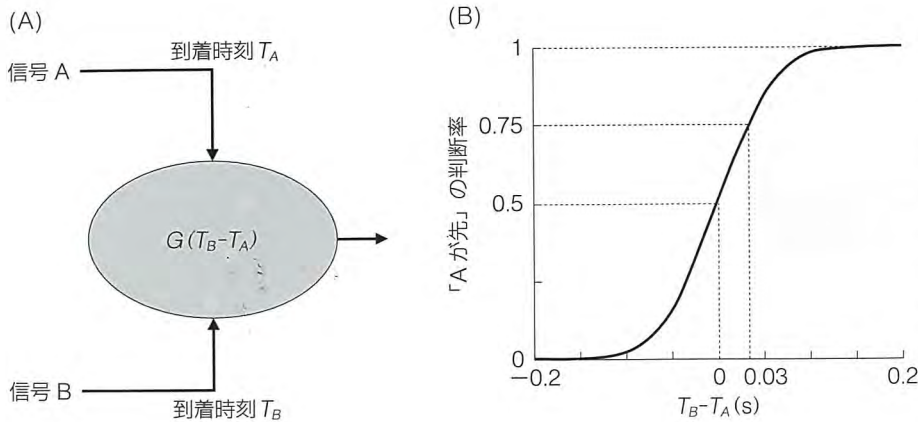


Fig. 5 時間順序判断の決定機構の古典的なモデル

信号Aが信号Bに先行するという判断は決定機構への到着時間差 ($T_B - T_A$) の単調増加関数 G に従う確率で決定されると仮定されてきた¹²⁾ (A)。単調増加関数の一例 (B)。同時点 (50%正解となる時間差) は 0 ms, 弁別閾値 (75%正解を与える時間差と同時点の距離) は $0.03 - 0 = 0.03$ s (30 ms)。

測不能なタイミングで反転させるという条件で、反転の瞬間にフラッシュをたくとどうなるだろうか。外挿説ならフラッシュがそれまでの運動方向に対して遅れるはず。一方、異なる潜時説なら、新しい運動方向に対して遅れるはず。結果は後者であった¹⁰⁾。つまり、外挿説は分が悪い。

後測 (postdiction) 説

脳はフラッシュが届いてから、やおら動いているものの場所を確かめる、という考え¹¹⁾。確かにこれでも説明がつく。Eaglemanら¹¹⁾はフラッシュの後 80 ms 程度の期間の動くものの位置がフラッシュと比較されている、と推定している。

三者の中では外挿説の分が悪い。異なる潜時説と後測説は今のところ甲乙つけ難い。いずれにしても、フラッシュラグがこころの「現在」を作り出すメカニズムについて考える契機を提供していることは確かである。

IV. 順序判断の逆転

1. 2つの逆転例の発見

2つの信号AとBの時間的な順序を弁別する課題を考えよう。物理学の理想的な観測者は1つ1つの出来事が起こった時間を時計で正確に読み取ることができる。このような理想的な観測者がいれば、信号Aと信号Bの順序を判断するのは簡単である。それぞれの信号の到着時刻を観測して、その時刻に従って並べればよい。脳はもちろん理想的な観測者ではない。しかし、理想的な観測者に似た役割を果たす決定機構が仮定されることが多い。

SternbergとKnoll¹²⁾によれば、時間順序の決定機構は信号Aの到着時刻 T_A と信号Bの到着時刻 T_B を読み取って、到着時刻の差 ($T_B - T_A$) の単調増加関数 G に

従う確率で信号の順序を決定する (Fig. 5 A)。このモデルは実際のデータを基本的にはよく説明する (Fig. 5 B)。縦軸に信号Aが早いと判断する確率、横軸に信号AとBの時間差をとってデータをプロットすると、いわゆるシグモイド (S字状) のグラフが得られる。75%正解を与える時間差 (最小弁別値; just noticeable difference: JND) に関しては、経験を積んだ被験者では感覚の種類 (視覚, 聴覚, 触覚) の組み合わせによらずほぼ一定で 20~30 ms 程度であるとされてきた^{13,14)}。最近の研究¹⁵⁾で、触覚はやや分解能に優れ、視覚-聴覚の組み合わせが劣る、と修正されたが、基本的にシグモイドがデータによく合うことには変わりない。

ところが、単調増加のシグモイド曲線とまったく異なるN字型の反応曲線が得られる条件が2つ発見されている。1つは腕の交差に伴う時間順序判断の逆転^{16,17)}であり、もう1つはサッケード直前の時間順序判断の逆転¹⁸⁾である。

1) 腕交差による逆転

手を普通に並べて目を閉じて左右の手に加えた刺激の順序を回答する。この場合は刺激時間差が 100 ms あればほぼ 100%正解できる。しかし、手を交差するとそうはいかない。刺激時間差 100~200 ms をピークとして間違いが増える。極端な被験者では反応曲線がN字型になる¹⁶⁾ (Fig. 6 A)。手に持った棒を交差しても¹⁹⁾、バーチャルリアリティの世界で交差しても²⁰⁾、手と足を交差しても²¹⁾同様の現象が生じることが知られている。

2) サッケード直前の逆転

画面中央 15° の左側の注視点を見ながら、画面の上下 (上 18° と下 18°) に提示される横棒 (60° × 6°) の提示順序を回答する。注視していれば通常のシグモイドの反応が得られる。しかし、サッケードをすると状況が変わる。注視点の右側 30° の場所に点が現れたら被験者はそ

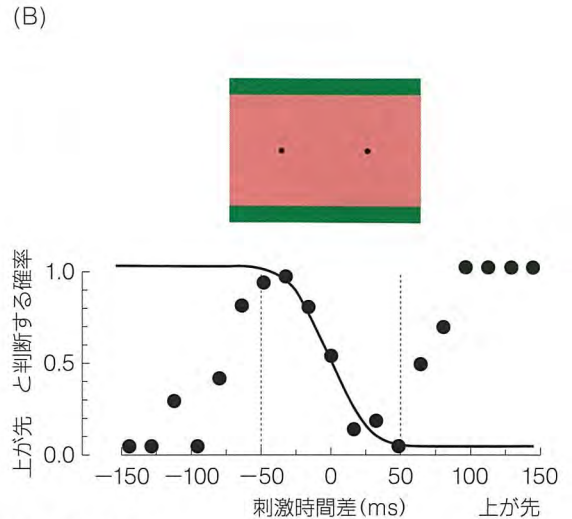
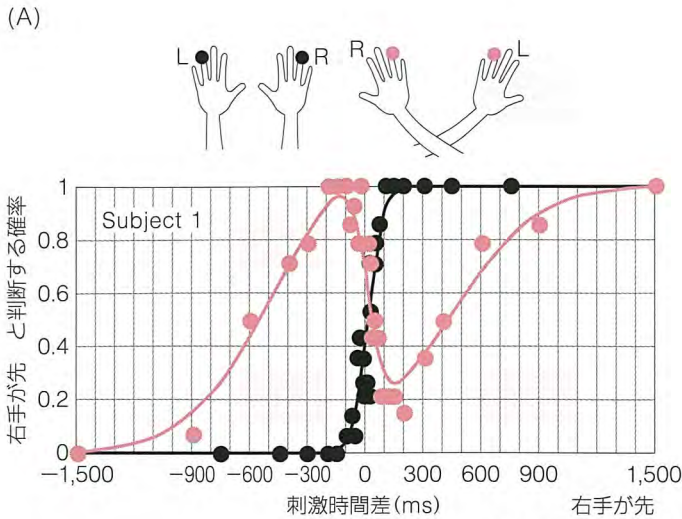


Fig. 6 腕交差とサッケードに伴う時間順序の逆転

A: 腕交差に伴う皮膚刺激の順序判断の逆転。B: サッケード直前 (70~30 ms 前) に与えた視覚刺激の時間順序の逆転。N字型の反応曲線に注目。

A は Yamamoto S, Kitazawa S: Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nat Neurosci* 4: 759-765, 2001 より, B は Morrone MC, Ross J, Burr D: Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nat Neurosci* 8: 950-954, 2005 より 改変して転載

の点に向かってサッケードをする。サッケードが終わった後に棒を提示すると、注視時と同様の通常のシグモイド曲線が得られる。しかし、サッケード開始直前 (30~70 ms 前) に刺激を提示すると、N字型の反応曲線が出現した¹⁸⁾ (Fig. 6 B)。N字の逆転のピークは腕交差の場合が 100~200 ms であるのに対し、サッケードの場合は 50 ms である点が異なるが、N字の形状自体はとてもよく似ている。

2. 古典モデルによる説明

Fig. 5 の古典モデルで説明できるだろうか。シグモイドがなだらかになって、分解能が悪くなるだけなら、ノイズを乗せれば簡単に説明できる。しかし、特定の時間差に対して「逆転」するN字型を説明することはできるだろうか。それには2発目の信号が1発目の信号を追い越して先に到着するしくみ、を考える必要がある。

とりあえず、横軸に物理世界の時間、縦軸に「こころの時間」をプロットしてみる (Fig. 7)。「こころの時間」は平常時には物理時間と同じ速さで過ぎる、としてよいだろう。その場合は傾き1の直線に乗ることになる (点線)。(ここでは、y切片の値は問題にしない。Libetら²²⁾がいうように、われわれが生きる「こころの時間」が物理時間に対して500 ms遅れているとすれば、-500 msがy切片である。)

この直線から例えば正規分布関数を引いてみる²³⁾。す

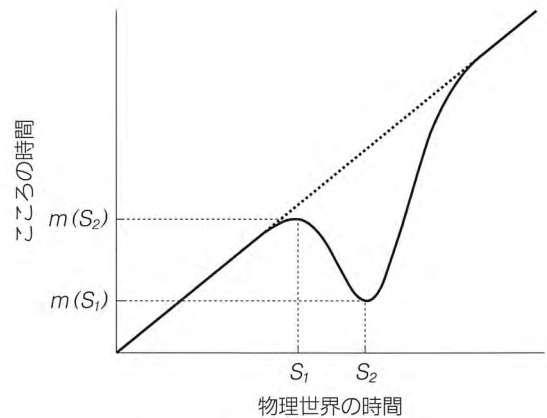


Fig. 7 こころの時間の逆行

通常、「こころの時間」と物理世界の時間は傾き1の点線の上を移動していると考え (点線)。Fig. 6 に示したN字型の応答曲線は、こころの時間の逆行が特定の物理時間 (例えば S_1 と S_2 の間) で生じると考えても説明できる (実線)。

ると「こころの時間」に一時的な逆行をつくることができる。極大に相当する物理時間 (S_1) に1発目、極小に相当する物理時間 (S_2) に2発目を入力すれば、めでたく時間順序は逆転する。このグラフは、2発目の信号伝達を加速する場合に相当する。別に正規分布を足してもよいし (1発目の信号伝達を遅らせることに相当)、何をしても構わない。右下がりの部分をつくりさえすればよい。

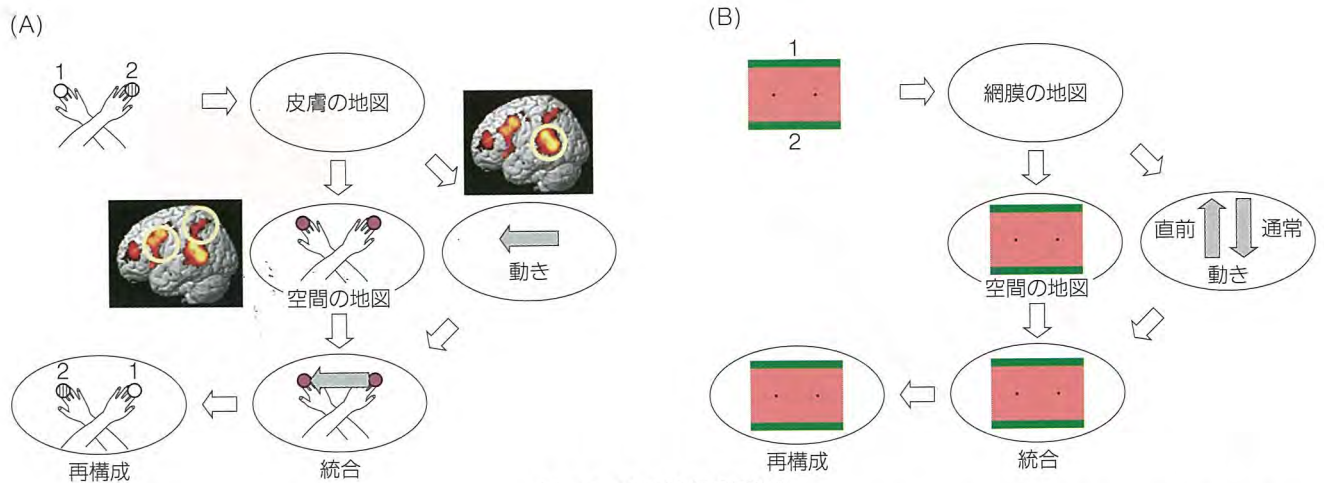


Fig. 8 動き投影仮説^{2,23)}

空間的に異なる2点に加えた刺激の順序は、空間的な位置の情報と、動きの情報に分解されてから、統合されて再構成されるという仮説。主観的な時間順序の逆転は動きベクトルの逆転によって説明する。A：腕交差に伴う逆転。時間順序判断の際に対照課題より有意に活動が上昇した領域も示す²⁵⁾。B：サッケードに伴う逆転。

Morrone らが報告したサッケードの前の「逆転」のデータは、横軸をサッケード開始からの時間として $S_1 = -75 \text{ ms}$, $S_2 = -25 \text{ ms}$ になるようにパラメータを選べば再現できる。その場合、サッケード開始前 25 ms の入力は、通常よりも 100 ms 程度短い潜時で計時センターに到着することになる。Morrone らはさらに、サッケードの影響を受けないと想定される「音刺激」を比較対象として、視覚刺激が知覚される時刻がサッケードの前後でどのように変わるかを調べた²⁴⁾。その結果、サッケード開始前の $-100 \sim -75 \text{ ms}$ のところに下向きの「とげ」、つまり潜時の短縮があることを発見した。しかし、サッケード前の -25 ms で提示した視覚刺激はむしろ遅れて知覚される傾向を示した。つまり、 $S_1 = -75 \text{ ms}$, $S_2 = -25 \text{ ms}$ という最も逆転が生じやすいタイミングで提示した場合には、むしろ正解率が上昇することを示唆する結果となっている²⁴⁾。2005 年の N 字型¹⁸⁾ を十分に説明するデータとは言い難い。

腕交差に伴う逆転を古典モデルで説明するには、どうすればよいだろうか。1 発目の刺激が 2 発目の刺激の伝達を早くする、と考えるしかないだろう。1 発目の刺激がきっかけとなって、2 発目の信号の伝達路の「加速」が始まって 200 ms 後には、1 発目の潜時に比べて 300 ms 程度潜時を短縮できれば、説明できることになる。しかし、伝達時間を 300 ms も短縮する神経メカニズムとなると、なかなか思い浮かばない。

3. 動き投影仮説による説明

筆者らはかねてより、いずれの逆転も統一的に説明で

きる仮説として「動き投影仮説」を提案してきた²³⁾。このモデルでは、2つの刺激が空間内の位置の情報と、「動き」のベクトル情報に分解されてから、再統合されて時間順序が構成されると考える (Fig. 8 A)。時間順序の逆転は、動きベクトルが逆向きになることで説明する。この仮説に矛盾しないデータは徐々に蓄積されつつある。①左右の手の皮膚に刺激を加えると、手を交差する場合もしない場合も、刺激時間差 200 ms をピークとする「動き」の感覚が生じる²⁵⁾。②視覚的な「動き」刺激で触覚の時間順序判断を逆転させることができる²³⁾。③交差・非交差にかかわらず、時間順序判断課題で上側頭溝周辺のいわゆる biological motion に対して反応する領域が活動する²⁵⁾。④交差・非交差にかかわらず頭頂間溝周辺や運動前野など空間の位置を表現する領域が活動する²⁵⁾。

腕を交差して、触れられた手に目を向けるように指示すると、反応時間が短いときは間違った手に向かって目が動き、400 ms 以内に正しい手に向かう^{26,27)}。腕を交差して手を刺激すると、刺激から 50 ms 後には反対側の手の近傍の光刺激に対する反応時間が短縮するが、200 ms 後には刺激した手の周辺の視覚刺激に対する反応時間が短縮する²⁸⁾。これら、皮膚刺激に対する曲がったサッケードやキューイング効果 (事前の刺激提示で次の刺激の反応時間が短縮する効果) の研究の結果は、手の刺激はまず誤った手にマップされ、その後 200 ms 程度かけて正しい手に再マップされることを示している²⁹⁾。その再マップが完了する前に 2 発目が入力すると、間違ったマップの間で逆向きの「動きベクトル」が

作られるのではないかと考えている^{2,23)}。

サッケードに伴う「逆転」を動き投影仮説で説明してみよう (Fig. 8 B)。この場合は、サッケードの直前に、「動き」ベクトルが逆転する必要がある。動きの中枢である大脳皮質の MT, MST 野の方向選択性ニューロンの中にはサッケード中に選好方向が逆転するものがある³⁰⁾。Thiele ら³⁰⁾ は、半数程度のニューロンの選好方向の逆転が、サッケードに伴う網膜像のずれの知覚の遮断のメカニズムであると主張している。サッケード中に半数の選好方向を逆転させるとしても、サッケード後には元に戻さねばならない。とすれば、サッケード開始直前には半数よりも多くを逆転させておいて、サッケード終了に向けて逆転する細胞の割合を漸減させているに違いない。もしサッケード開始前に選好方向の変化が過半数のニューロンで生じているとすれば、サッケード直前に「上、下」の刺激に反応するニューロンの過半数は、平常時には「下、上」の刺激に反応するニューロンとなり、動きベクトルの解釈が「下から上」と実際の物理現象とは逆転することが説明できる。

動きに応答するニューロンの選好方向を逆転させる、などというのは大それたことのように思われる。しかし、実はそうでもないのだ。選好方向とは相対的なものであって、8割程度の MT 野の方向選択性ニューロンは、選好方向の刺激から短潜時で強い入力を受け、正反対の方向の刺激（反選好方向）から長潜時で弱い入力を受けている^{31,32)}。正反2系統の入力をもともと受けているとすれば、大規模なネットワークの切替は不要で、2系統の入力のゲインを調整するだけで、選好方向の逆転も中和もお手の物になるはずである。筆者らは、動き逆相間法を使って、動きに関連するさまざまな領域でこの仮説の検証を進めている。

V. 「デカルト劇場」対「マルチ筋書き」モデル

「現在」は脳がある程度の時間幅の入力情報を総合して作り上げた脳の解釈である、と述べた。そう考えれば、カラーファイも皮膚ウサギも当たり前の話で、錯覚とも呼べない気がしてくる。しかし、脳の中にすべての情報が集まってくる中枢があって、そこに入力する情報がそのままの順序で意識に上るという考え方に立つと、事情が変わる。Dennet と Kinsbourne¹⁾ は、松果腺に意識の中枢があると考えたデカルトにちなんで、この考え方を“Cartesian Theater”（デカルト劇場）モデルと呼んだ。

この劇場のスクリーンに映し出される映像がそのまま

意識されるとするならば、赤い四角の情報が到着する前に、赤い四角の動きが見えるのは都合が悪いし、3つ目の刺激が肘に加えられる前に、手首と肘の間に触覚が「飛ぶ」のは都合が悪い。つまり、これらの現象はデカルト劇場モデルが破綻している証拠である¹⁾。時間順序判断の古典モデル (Fig. 5) はデカルト劇場モデルの最たるものだ。フラッシュラグ効果を潜時の差として説明する説も、信号が到着する「中枢」を暗黙のうちに仮定しているという点では、こちらに属するといえるだろう。

Dennett と Kinsbourne が対立仮説として挙げたのが“multiple draft”（マルチ筋書き）モデルである。脳の中には並行して複数の筋の下書きが違う場所で走っていて、矛盾を調停したり書き換えたりしながら筋書きを決めていく、という考え方である。フラッシュラグの後測説や動き投影仮説は、複数の領域の情報をある程度の時間をかけて総合して解釈を決める、と主張している点でマルチ筋書きモデルの一種といえるだろう。しかし、複数の領域の情報を統合したり、筋書きを調停する「中枢」を仮定してしまつたら、古典モデルに逆戻りである。何が情報「統合」の実態なのだろうか。

VI. 「現在」を統合するモード

複数の領域の情報を「統合」とはいかなることか。1990年代に注目されていたのは γ 波帯域（ ~ 40 Hz）の同期である³³⁾。麻酔したネコの一次視覚野の7 mm離れた2個のニューロンは、それぞれの受容野を通る線分が受容野の外で1本につながっていると40 Hzで同期して活動し、線分が切れていると同期が失われた³⁴⁾。この Singer らの画期的な発見を出発点として、7 mm よりももっと長距離の領野間の情報統合、例えばりんごの赤い色と輪郭の情報の統合、の背景にも γ 波の同期があると信じられるようになった³⁵⁾。そして実際、覚醒したヒトで、車の写真を短冊状に切ってそのまま見せた刺激と、短冊を入れ替えて何であるかがわからない刺激を見せた場合を比較すると、「車だ」とわかる刺激を提示した200 ms後に γ 波のパワーが脳の広い領域で上昇する、ことなどが相次いで報告された³⁵⁾。

しかし、Yuval-Greenberg ら³⁶⁾ の衝撃的な報告によれば、刺激提示後200 ms程度で一過性に生じる γ 帯域の応答は、眼球のマイクロサッケードの量と見事に相関していた。要するに、小さな目の動きのアーチファクトを脳の活動と見間違えていた、ということだ。覚醒したヒトで、離れた領域の間の情報を「統合」するのに γ

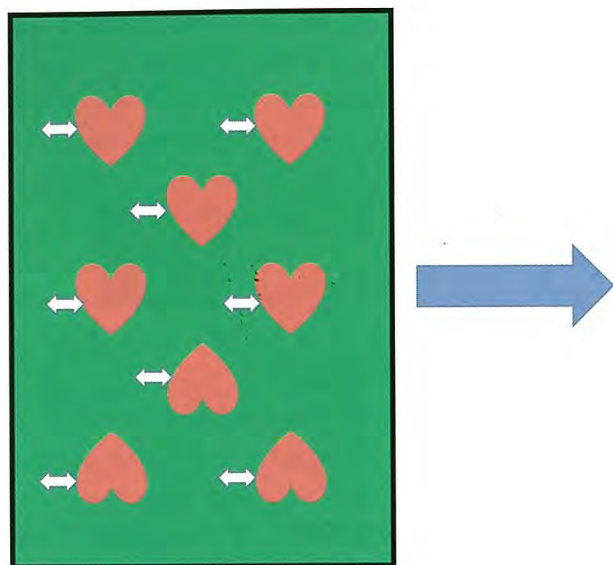


Fig. 9 揺れるハート⁴⁰⁾

カードを振ると、等輝度のハートの境界は、輝度が異なるカードの境界に比べて遅れて動いて見える。カードを一定の方向に動かし続けると、ハートは10 Hzで遅れては戻りのジッターを繰り返す。

波が貢献していることを示す根拠は消えてしまった。しかし、同期説がすべて否定されたわけではない。 γ 波は一次視覚野程度の広さの局所的な情報の統合に貢献する一方、大域的な情報の統合にはより長い周期のモードが使われている、という考え方が提案されている³⁷⁾。

こころの「現在」の統合のモードとして、私が注目してきたのが10 Hzの α 波である。調べてみるとSingerらの報告³⁴⁾よりも20年以上前の1967年に、「 α 波の1周期が脳の時間量子である」という論文が発表されていた³⁸⁾。著者のKristoffersonは α 波の1周期中に2つのイベントが生じると同時と感じられ、違う周期にまたがると異なる時刻のイベントと感じられる、と考えた。実際、光と音、2つのイベントの同時・非同時を判断する際の弁別閾値が α 波の周期と正の相関を示したという。その後1981年にVarelaら³⁹⁾は仮現運動が見えるか、同時に見えるかの確率が α 波の位相に依存して変わると報告した。 α 波の負のピークで刺激を入れると90%以上の確率で同時に点灯したように見えるのに対し、正のピークだと50%未満になったという。Kristoffersonの時間量子仮説を支持する知見といえるだろう。

もう1つ例を挙げよう。「揺れるハート」と呼ばれる錯視がある (Fig. 9)。黒枠で囲った緑地に、等輝度で赤いハートが描かれたトランプのカードがある。このカードを左右に揺らすと、カードはもちろん揺れるのだが、「カードの中でハートが揺れ動く」ように見える。あた

かも、ハートが枠の動きについて行けずに遅れてしまい、動きと逆の枠に近づくように見えるのだ。これは色の違いで定義された境界が、輝度の違いで定義された境界よりも遅く処理されるために生じると考えられている。

ではカードを1方向に動かし続けたらどうなるだろうか。ハートは遅れ続けると枠からはみ出さざるをえないが、そもいかないので元に戻る。遅れては戻り、遅れては戻り、を繰り返すのだ⁴⁰⁾。そしてその「リセット」の周期が10 Hzであるという⁴¹⁾。この周期は、カードを動かす速さによらず一定である。つまり枠からはみ出しそうになるたびに元に戻る、のではない。10 Hzで動きと位置の情報の統合過程が「初期状態」にリセットされているようなのだ。

最近のネコの生理学的な研究で、 α 波と同期して外側膝状体のニューロンが周期的な抑制を受けることが明らかになった⁴²⁾。ヒトでは、視覚刺激の知覚される閾値が α 波の位相に応じて変動することも知られている⁴³⁾。これだけでは単なる周期的抑制メカニズムということになってしまい、あまり面白くない。しかし、とうとう最近、大脳皮質の領野間をつなぐ視床枕が、 α 波の周期で覚醒したサル複数の視覚領域のニューロン活動を同期させていることが示された⁴⁴⁾。ヒトでは特に視床枕が発達しているから、視床枕を通じた10 Hzの「同期」した情報交換が広域の大脳皮質ネットワークの情報の「統合」に寄与していることは十分に考えられる。今後、視床枕と視床枕がつなぐ皮質領域間の α リズムを手がかりとして、物理現象としては複数領域の活動の「同期」、現象学的には複数の情報が統合されて「現在」として意識の中に立ち現れること、の神経メカニズムの解明が進むことが期待される。

VII. こころの「現在」からこころの時間学へ

こころの「現在」は複数の領域に表現されている情報を「統合」して脳が作り出した「解釈」である。その「統合」の過程には100 ms程度の周期活動が関与していて、「統合」が及ぶ時間幅は最大で数周期分程度である。今回紹介した錯覚を統一的に「説明」できる作業仮説として現状で提案できる仮説はこの程度であろう。この作業仮説の弱点も含め、今後解かれるべき問題を列挙して本論を締めくくる。

1. 「同期」と「統合」の関係

「統合」の神経メカニズムとして無批判に「同期」を

取り上げたが、「同期」は複数の領域の間に結合と信号のやり取りがあることを示すに過ぎない。「統合」の本質はまったく別のネットワークの性質として表現されるべきものかもしれない。例えば、Tononi^{45,46)}がネットワークに対して定量的に定義した“integrated information (統合情報量)”が領域間「統合」の指標として有効であるかもしれない。必要に応じて「統合」されるべき領域間の統合情報量だけが上昇する、というダイナミックな変化が生じている可能性もある。

2. 「現在」から「過去」・「未来」へ

こころの「現在」が、私が10年余り研究してきたフィールドである。ここでも十分面白い現象や、「意識」にもつながる深いテーマが発掘できるのではあるが、こころの時間には過去から未来に及ぶ豊かな広がりがある。現在が過去に変わる過程や、現在から未来を展望する過程には、今後の大きな発展の可能性があると考える。

例えば、「現在」が「過去」に定着される過程を、それぞれの基本モードに注目して研究するのも面白いと思う。「現在」の基本モードが α 波の ~ 10 Hzであるとすれば、「過去」の入り口にあたる海馬の基本モードは θ 波の ~ 5 Hzである。モードが倍数だと、共振して情報の伝達が起こりやすくなる。つまり、記憶される情報が増えるのではないか。一方、周波数の比が黄金比(1.62)の関係を示す2つの周波数は決して共振することがない⁴⁷⁾。 θ 波帯域でも6.5 Hzは10 Hzと黄金比の関係にあり、脳が黄金比のモードで動作するときは記憶が形成されにくい可能性もある。脳はこのような同期と脱同期をうまく使い分けて、過去として残すべき「現在」の情報をより分けているのかもしれない。検証してみたい仮説の1つである。

3. 言語学とこころの時間

「迷い道」の歌詞はストレートに現在・過去・未来をうたっているが、われわれの言説は暗黙のうちに現在・過去・未来を区別している。「よい天気ですね」と言えば現在、「暑かったですね」と言えば過去、「晴れますように」と言えば未来である。言語学の時制と相の理論では、speech time, reference time, event timeの3軸で時制と相を説明する。言語の時制をすばやく区別して使いこなすヒトの脳の中には、単純な現在・過去・未来の1軸ではなくて、これら3軸が埋め込まれているかもしれない。言語学と相互作用することで、ヒトに特有なこころの時間の神経基盤、希望をこめて「時間地図」、が

解明される可能性がある。

4. こころの時間の進化

こころの時間のありようは、ヒトとヒト以外の動物でどの程度違うのか。もちろんヒト以外の動物は言語を話さないし、今日の日付を気にしないから、差があるだろうことは確かである。しかし、ヒトのこころが進化の産物であるならば、こころの時間も進化の過程で生まれたものと考えるべきだろう。類人猿から齧歯類まで、幅広い種を対象に研究することで、「現在」の見当識を含めたこころの時間の進化の過程が明らかになる可能性がある。

おわりに

こころの「現在」から最後はこころの「時間」全体に風呂敷を広げてみた。「こころの時間」を対象とした研究には、「こころの時間学」と称するにふさわしい広がりや深さがあると信じている。

文献

- 1) Dennett D, Kinsbourne M: Time and observer: the where and when of consciousness in the brain. *Behav Brain Res* 15: 183-247, 1992
- 2) Fujisaki W, Kitazawa S, Nishida S: Multisensory timing. Stein BE (ed): *The New Handbook of Multisensory Processes*. MIT Press, Cambridge, 2012, pp301-318
- 3) Kolers PA, von Grunau M: Shape and color in apparent motion. *Vision Res* 16: 329-335, 1976
- 4) Geldard FA, Sherrick CE: The cutaneous “rabbit”: a perceptual illusion. *Science* 178: 178-179, 1972
- 5) Geldard FA: Saltation in somesthesia. *Psychol Bull* 92: 136-175, 1982
- 6) Blankenburg F, Ruff CC, Deichmann R, Rees G, Driver J: The cutaneous rabbit illusion affects human primary sensory cortex somatotopically. *PLoS Biol* 4: e69, 2006
- 7) Miyazaki M, Hirashima M, Nozaki D: The “cutaneous rabbit” hopping out of the body. *J Neurosci* 30: 1856-1860, 2010
- 8) Nijhawan R: Motion extrapolation in catching. *Nature* 370: 256-257, 1994
- 9) Baldo MV, Ranvaud RD, Morya E: Flag errors in soccer games: the flash-lag effect brought to real life. *Perception* 31: 1205-1210, 2002
- 10) Whitney D, Murakami I: Latency difference, not spatial extrapolation. *Nat Neurosci* 1: 656-657, 1998

- 11) Eagleman DM, Sejnowski TJ: Motion integration and postdiction in visual awareness. *Science* **287**: 2036-2038, 2000
- 12) Sternberg S, Knoll R: The perception of temporal order: fundamental issues and a general model. Kornblum S (ed): *Attention and Performance IV*. Academic Press, New York, 1973, pp629-685
- 13) Hirsh IJ, Sherrick CE Jr: Perceived order in different sense modalities. *J Exp Psychol* **62**: 423-432, 1961
- 14) Pöppel E: A hierarchical model of temporal perception. *Trends Cogn Sci* **1**: 56-61, 1997
- 15) Fujisaki W, Nishida S: Audio-tactile superiority over visuo-tactile and audio-visual combinations in the temporal resolution of synchrony perception. *Exp Brain Res* **198**: 245-259, 2009
- 16) Yamamoto S, Kitazawa S: Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nat Neurosci* **4**: 759-765, 2001
- 17) Shore DI, Spry E, Spence C: Confusing the mind by crossing the hands. *Brain Res Cogn Brain Res* **14**: 153-163, 2002
- 18) Morrone MC, Ross J, Burr D: Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nat Neurosci* **8**: 950-954, 2005
- 19) Yamamoto S, Kitazawa S: Sensation at the tips of invisible tools. *Nat Neurosci* **4**: 979-980, 2001
- 20) Moizumi S, Yamamoto S, Kitazawa S: Referral of tactile stimuli to action points in virtual reality with reaction force. *Neurosci Res* **59**: 60-67, 2007
- 21) Schicke T, Roder B: Spatial remapping of touch: confusion of perceived stimulus order across hand and foot. *Proc Natl Acad Sci U S A* **103**: 11808-11813, 2006
- 22) Libet B, Wright EW Jr, Feinstein B, Pearl DK: Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience: a functional role for the somatosensory specific projection system in man. *Brain* **102**: 193-224, 1979
- 23) Kitazawa S, Moizumi S, Okuzumi A, Saito F, Shibuya S, et al: Reversal of subjective temporal order due to sensory and motor integrations. Haggard P, Rossetti Y, Kawato M (eds): *Sensorimotor Foundations of Higher Cognition (Attention and Performance XXII)*. Academic Press, New York, 2008, pp73-97
- 24) Binda P, Morrone MC, Burr DC: Temporal auditory capture does not affect the time course of saccadic mislocalization of visual stimuli. *J Vis* **10**: 7, 1-13, 2010
- 25) Takahashi T, Kansaku K, Wada M, Shibuya S, Kitazawa S: Neural correlates of tactile temporal-order judgment in humans: an fMRI study. *Cereb Cortex* **23**: 1952-1964, 2013
- 26) Groh JM, Sparks DL: Saccades to somatosensory targets. I. behavioral characteristics. *J Neurophysiol* **75**: 412-427, 1996
- 27) Overvliet KE, Azanon E, Soto-Faraco S: Somatosensory saccades reveal the timing of tactile spatial remapping. *Neuropsychologia* **49**: 3046-3052, 2011
- 28) Azanon E, Soto-Faraco S: Changing reference frames during the encoding of tactile events. *Curr Biol* **18**: 1044-1049, 2008
- 29) Kitazawa S: Where conscious sensation takes place. *Conscious Cogn* **11**: 475-477, 2002
- 30) Thiele A, Henning P, Kubischik M, Hoffmann KP: Neural mechanisms of saccadic suppression. *Science* **295**: 2460-2462, 2002
- 31) Perge JA, Borghuis BG, Bours RJ, Lankheet MJ, van Wezel RJ: Temporal dynamics of direction tuning in motion-sensitive macaque area MT. *J Neurophysiol* **93**: 2104-2116, 2005
- 32) Girard P, Salin PA, Bullier J: Response selectivity of neurons in area MT of the macaque monkey during reversible inactivation of area V1. *J Neurophysiol* **67**: 1437-1446, 1992
- 33) Singer W, Gray CM: Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annu Rev Neurosci* **18**: 555-586, 1995
- 34) Gray CM, Konig P, Engel AK, Singer W: Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature* **338**: 334-337, 1989
- 35) Tallon-Baudry C, Bertrand O: Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends Cogn Sci* **3**: 151-162, 1999
- 36) Yuval-Greenberg S, Tomer O, Keren AS, Nelken I, Deouell LY: Transient induced gamma-band response in EEG as a manifestation of miniature saccades. *Neuron* **58**: 429-441, 2008
- 37) Varela F, Lachaux JP, Rodriguez E, Martinerie J: The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nat Rev Neurosci* **2**: 229-239, 2001
- 38) Kristofferson AB: Successiveness discrimination as a two-state, quantal process. *Science* **158**: 1337-1339, 1967
- 39) Varela FJ, Toro A, John ER, Schwartz EL: Perceptual framing and cortical alpha rhythm. *Neuropsychologia* **19**: 675-686, 1981
- 40) Arnold DH, Johnston A: Motion-induced spatial conflict. *Nature* **425**: 181-184, 2003
- 41) Amano K, Arnold DH, Takeda T, Johnston A: Alpha band amplification during illusory jitter perception. *J Vis* **8**: 3, 1-8, 2008
- 42) Lorincz ML, Kekesi KA, Juhasz G, Crunelli V, Hughes SW: Temporal framing of thalamic relay-mode firing by phasic inhibition during the alpha rhythm. *Neuron* **63**: 683-696, 2009

- 43) Mathewson KE, Gratton G, Fabiani M, Beck DM, Ro T: To see or not to see: prestimulus alpha phase predicts visual awareness. *J Neurosci* **29**: 2725-2732, 2009
- 44) Saalmann YB, Pinsk MA, Wang L, Li X, Kastner S: The pulvinar regulates information transmission between cortical areas based on attention demands *Science* **337**: 753-756, 2012
- 45) Tononi G: Integrated information theory of consciousness: an updated account. *Arch Ital Biol* **150**: 56-90, 2012
- 46) Tononi G: Consciousness as integrated information: a provisional manifesto. *Biol Bull* **215**: 216-242, 2008
- 47) Pletzer B, Kerschbaum H, Klimesch W: When frequencies never synchronize: the golden mean and the resting EEG. *Brain Res* **1335**: 91-102, 2010

BRAIN and NERVE 神経研究の進歩

特別定価 3,990円(本体3,800円+税5%)
年間購読 好評受付中!
電子版もお選びいただけます

▶ 2013年7月 増大号 [Vol.65 No.7]

増大
特集

あしたの脳梗塞

特集記事

- 一過性脳虚血発作(TIA)―過去、現在、そして未来
／佐藤祥一郎、他
- 虚血性脳卒中の臨床診断update／伊井裕一郎、他
- あしたの静注血栓溶解療法／豊田一則
- これからの抗凝固療法―脳塞栓と心房細動／上坂義和
- 抗血小板療法―再発予防update／内山真一郎
- 微小脳梗塞の画像診断update／山田 恵
- 加齢性白質病変(leukoaraiosis)update／三木幸雄、他
- 認知症の診断と治療を目指した小血管病の管理／猪原匡史
- CADASILの診断と治療／水野敏樹
- 無症候性脳微小出血の診断と治療／ト蔵浩和、他
- 脳アミロイド血管症の病態と治療
―家族性トランスサイレチン型脳軟膜アミロイドーシスを
含む／池田修一

脳表へモジデリン沈着症の診断と治療／山脇健盛、他

血管障害の疫学update／長田 乾、他

酸化ストレスによる脳血管病態／軸丸美香、他

脳小血管病変―脳アミロイド血管症の病理を中心に
／緒方 絢、他

主要目次

- 症例報告
初期に失行が目立った大脳皮質基底核変性症の1剖検例
／本間 琢、他
- 現代神経科学の源流
ジョン・C・エックルス【後編】
／伊藤正男、酒井邦嘉
- 連載
神経学を作った100冊(79)
／作田 学



医学書院

〒113-8719 東京都文京区本郷1-28-23
[販売部] TEL: 03-3817-5657 FAX: 03-3815-7804
E-mail: sd@igaku-shoin.co.jp http://www.igaku-shoin.co.jp 振替: 00170-9-96693

携帯サイトはこちら

