

意識における時間の流れはいかに作り出されているか

On the origin of the conscious perception of time

茂木健一郎

生体の科学第46巻第1号 p.82-86 収録

〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1

理化学研究所

国際フロンティア研究システム

思考ネットワーク研究チーム

Tel 048-462-1111 内線 6444

Fax 048-462-9881

現在の所属

ソニーコンピュータサイエンス研究所

〒141-0022

東京都品川区東五反田 3-14-13 高輪ミュージズビル

Tel 03-5448-4380

Fax 03-5448-4273

kenmogi@csl.sony.co.jp

<http://www.csl.sony.co.jp/person/kenmogi.j.html>

1、「意識」における時間の流れ

21世紀は、科学者にとって、脳の世紀となるだろうと予測されている。すなわち、科学にとって、真のフロンティアは、脳科学であるということである。そして、脳の様々な属性の中でも、「意識」の問題は、最もその究明が困難な、しかし、同時に、本質的な問題であると考えら

存在しなければ実行できないのかという問題は、それ自体が未解決の問題であって、慎重な議論が行われなければならないが、本稿では、異なるモダリティの情報を、単一の時間

れている 1-3)。「意識」の問題に対するアプローチにはいろいろあるが、科学的なアプローチとして有力なものは、「意識」が、脳における情報処理過程において、どのような役割を果たしているかという設問である。端的に言えば、「意識」と呼ばれるような実体が存在しなければ、実行できないような情報処理が存在するのかという問題である。どのような情報処理が、「意識」が存

と空間の枠組みの中で統合することが、「意識」の計算論的な意義であるという作業仮説を採用することにする。

上の作業仮説をとりあえず認めた

として、それでは、「意識」における単一の時間と空間の枠組みは、どのようにして生じてくるのだろうか？ この問題に、現時点で科学的にアプローチするとしたら、どのような手法が可能なのだろうか？

我々の「意識」における主観的な時間の流れには、次のような特性がある。

(1) 意識的に知覚される時間には、ある最小の単位があるように見える。
(2) 上のような最小単位があるにも関わらず、隣り合う最小単位どうしの「ずれ」は、任意に小さくすることができる。従って、「意識」の時間経過は滑らかであり、離散的な、特別な時間の点は存在しない。

上のような「意識」における時間の流れの特性は、「意識」を支える物質的なプロセスの特性を反映しているはずである。

本稿で、私は、「意識」における時間の流れの問題に、次のような基本的な問題意識からアプローチすることを試みる。すなわち、アクソン上のアクション・ポテンシャルを通して相互作用するニューロンの系の発展を記述するのに適切な時間のパラメータは、どのように構成されるべきかという問題である。この設問自体は、「意識」の問題というよりも、脳の神経回路網のダイナミックスの記述自体に関わる極めて基本的なものであるが、従来、その重要性が認識されてこなかった。何故なら

ば、私たちは、通常、「時間」は実験的に存在し、その「時間」を用いて、脳の神経回路網のダイナミックスは適切に記述できると考えがちだからである。

私は、「意識」における統一された時間と空間の枠組みがどのように生じてくるかという問題を考える上で、「相互作用同時性」の原理(Principle of Interaction Simultaneity)を適用することを提唱する。この原理は、様々な系において、その系の発展を記述するのに適した時間パラメータをいかに構成するかの指針を与えるものである。この原理を、神経回路網に適用した場合、上に挙げた「意識」における時間の流れの基本的な属性が導出できることを示すのが本稿の主な狙いである。

2、因果的記述の条件

相互作用同時性の概念を述べる前に、何故この概念が必要とされるのかということを理解するために、科学における因果的記述の基礎について復習しておこう。

あらゆる科学的な記述の前提は、ある「系」(system)を措定し、その中の物質(matter)と相互作用(interaction)を確定し、さらにある時空構造(space-time structure)を定義した上で、その系においてお互いに相互作用を受けながら物質が時間的に発展していく様子を因果的に記述するということである。(神経回路網で言えばニューロンの細胞体が

「物質」に、アクソンを伝わるアクション・ポテンシャルが「相互作用」に相当する。)そして、因果的記述とは、その系のある時刻 t における状態が与えられたとき、その情報によって、またその情報のみで、その系の $t + dt$ (微小時間後) における状態を導出できるという原理である。

ここで、重要なことは、一般に、時空構造が先験的に与えられていて、その中に物質と相互作用が埋め込まれると考えがちであるが、実際には物質と相互作用が先に存在しているのであって、その後で、その系の物質と相互作用の性質からその記述に適した時空構造が定義されてくるのである。このような考え方は、まず、19世紀の哲学者 Ernst Mach によって明確にされ、1905年に、Albert Einstein によって、「相対性理論」という形で初めて科学理論の中に導入された(4-5)。「相対性理論」の要点は、要するに、我々は世界を「光」(すなわち電磁波)を通して観測し、認識しているので、我々の認識する時空構造は、物質の間の相互作用としての光の性質で決まるというものである。つまり、科学的記述においては、記述の対象となっている物質と相互作用の性質から、逆に時間と空間の構造を導き出されなければならないのである。

上のような時間と空間に対する現代的な認識は、神経科学においては、従来あまり反映されていない。これは無理もない話であって、通常、神

経科学が対象としている現象の記述においては、私たちが普通先験的に前提としている時間や空間で十分だからである。しかし、「意識」という現象が、神経回路網の振舞いからどのように導き出されるのかという本質的な問題に取り組む上では、より根源的な視点から時間や空間を問い直す必要がある。

「相互作用同時性」の原理は、相対性理論が扱った「光」を通しての相互作用(電磁相互作用)のみでなく、神経回路網を含むより一般的な相互作用を持つ系について、その系のダイナミックスを記述するのに適した時間と空間の構造を構成する方法を与えるのである。

3、相互作用同時性の原理

「相互作用同時性」の原理(Principle of Interaction Simultaneity)は、ある系の発展を、因果的に記述するのに適した時空構造を、その系における相互作用から導き出す原理である。

「相互作用同時性」の原理は、形式的には、次のように述べることができる。

ある系における同時性(simultaneity)の世界線(world line)は、その系における「相互作用」の世界線に一致する。

上の要請は、「相対性理論」においては結論の一つに過ぎない。この要請を議論の出発点(公理)にする

ことによって、より一般的な系において枠組みとしての時間を議論できるのである。ここで、「世界線」(world line)とは、物質と相互作用のそれぞれの時空内での変化の軌跡を表す概念である。上の原理をわかりやすく言い替えれば、もしある相互作用が有限の大きさの速度で伝播するものであるならば、それが伝播している間は、系にとっては同時刻(時間が経過しない)であるということである。

「相互作用同時性」の原理が神経回路網において具体的にどのようなことを意味するかということ、考えてみよう。今、二つのニューロンAとBがあったとする。AからBに長さ L_{BA} のアクソンが伸びており、そこを c_{BA} の速度でアクション・ポテンシャルが伝播するものとする。このとき、ニューロンAからニューロンBにアクションポテンシャルが伝播するには、 L_{BA} / c_{BA} の時間がかかる。従って我々は通常、ニュー

ロンAが発火した時刻を t とすれば、アクション・ポテンシャルがBに到達した時刻は $t + L_{BA} / c_{BA}$ であると考えられる。しかし、「相互作用同時性」の原理が要求することは、ニューロンAが発火した時刻 t と、そのアクション・ポテンシャルがニューロンBに到達した時刻 $t + L_{BA} / c_{BA}$ が、同時刻であることを見なすことなのである。何故ならば、ニューロンAから出発しニューロンBへ到達したアクション・ポテンシャルは、まさに神経回路網における「相互作用」に相当し、「相互作用同時性」の原理によって、この相互作用が伝播している間は系にとっての時刻は経過しないということになるからである(図1)。

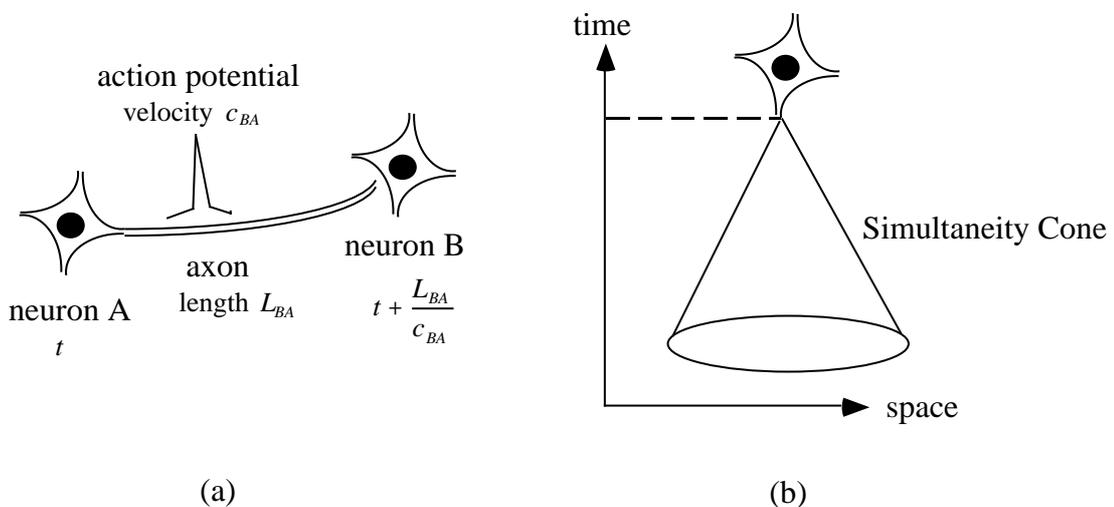


図 1

上のような要求は、一見常識に反しているように思われる。しかし、脳において「意識」がどのように生まれてくるかというメカニズムを考える上での時間は、上のような一見常識に反するような形で定義された時間なのである。このことは、私たちが通常先験的に仮定している時間が、どのような起源を持つものかということを考えれば明らかになる。すなわち、脳の内部の状態の時間的发展を考えるとき、私たちは無意識の中にある瞬間における脳の時間横断的な状態を思い浮かべ、この状態が瞬間を積み重ねた時間の経過の中で変化していく様子を思い浮かべる。しかし、このようなイメージの中に前提とされている時間は、あくまでも「光」を基準にした時間なのである。光の速度は秒速 3×10^8 メートルと大変大きいので、「光」を基準にして定義された時間は、我々が先験的に思い浮かべている時間（歴史的に言えば、Isaac Newton によって導入された「絶対時間」であり、数学的に言えば、空間と合わせて R^4 を構成する時間）で、ほぼ近似できるのである。しかし、アクソンを伝わるアクション・ポテンシャルの伝播速度は、毎秒約 $2 \sim 80$ メートルである。これは、光の速度に比べれば極めて小さく、このような相互作用を基に構築される時空の性質は、「光」を基に構築される時空の性質と、全く異なったものにならざるを得ないのである。端的に言えば、「意識」を持つ脳にとって、自分自身の

内部のニューロンの状態を、観測者が外部から光を用いて観測するようには見ることができないということである。我々が、ニューロン A からニューロン B へ LBA / CBA の時間をかけて伝播するアクション・ポテンシャルのことを議論できるのは、その様子を、外部から「光」を用いて観測できるからである。「意識」を持つ脳にとっては、意味のあるのはアクション・ポテンシャルの伝播ではなく、その結果としてのニューロンの発火だけである。従って、アクション・ポテンシャルが伝播する間の時間は、「意識」を持つ脳にとっては意味がな

いのである。伝播に要する時間、LBA / CBA は、言わば「一点に潰れて」同時刻となってしまうのである。

「相互作用同時性」の原理は、より形式的な言い方をすれば、時刻 t における系の状態が与えられたときに時刻 $t + dt$ における系の状態が導出できるように、時刻 t における物質（神経回路網におけるニューロン）が関連する相互作用を全て同時刻 t に帰属するようにしたということが出来る。このようなアプローチから生まれた時間は、当然、私たちが日常生活で先験的に前提としている時間とは異なる。このような時間の定義から生まれた時間を、ここでは固有時（proper time）と呼ぶことにしよう。すなわち、固有時とは、「相互作用同時性」の原理に基づいて構築された、注目している相互作用を持つ系の発展を記述するのに適した

時間パラメータなのである。そして、「意識」における時間を、外部から観測者が観察した系を記述する時間としてではなく、まさにその「意識」が属する脳にとって意味のある時間として考えるためには、「相互作用同時性」に基づく「固有時」の概念に基づかなくてはならないのである。

4、「相互作用同時性」からの帰結

以上の議論から、「意識」を持つ主体としての脳の中の神経回路網を記述する時間としては、「相互作用同時性」の原理に基づく「固有時」を用いるのが適切であるということがわかる。以後、物理学における慣習に従って、固有時を と書くことにする。

固有時の下に、その発展を記述する場合、一つの系としての脳の中の神経回路網の特徴は、どのようなものであるだろうか？ 本稿では、その詳細を述べることはできないが、重要な点は、次のような点である。

すなわち、アクソンを有限の速度（毎秒約2～80メートル）で伝わるアクション・ポテンシャルを「相互作用」と見て固有時を構成した場合、神経回路網における「瞬間」、すなわち最小の時間の単位は、ある有限の広がりをもつということである。この、最小の時間単位の大きさは、神経回路網の大きさをアクション・ポテンシャルの伝達速度で割る

ことによって求めることができる。すなわち、「脳」内のアクソンの最大の長さを10センチメートル程度とし、さらにアクション・ポテンシャルの伝達速度として律速の毎秒2メートルを採用すれば、最小単位は50ミリ秒程度となる。

次に、このように有限の広がりを持つ時間で記述される神経回路網であるが、その時間のずれは、任意に小さくすることができる。すなわち、ある「瞬間」の脳の状態という場合には、必然的にそれは50ミリ秒程度の広がりを持たなければならないが、このような「瞬間」をどれくらいずらして重ね合わせられるかということになると、その「ずれ」の大きさは、任意に小さくすることができるのである。

上の2つの特徴のうち、2番目は特に重要である。つまり、脳における「時間」に最小単位があるということになると、隣り合う最小単位の「継目」のところで不連続性が生ずるように思われるからである。しかし、2番目の特徴により、このような不連続性は回避される。このような、固有時の下で時間発展する系としての脳の神経回路網の特徴は、冒頭に挙げた「意識」における時間の流れの特徴と一致している。

以上の特性に加えて、固有時の下での脳の神経回路網というシステムの重要な特徴は、異なる時刻における状態の間に重なりがあることである（図2）。すなわち、通常、異なる時刻における系の状態は、因果律

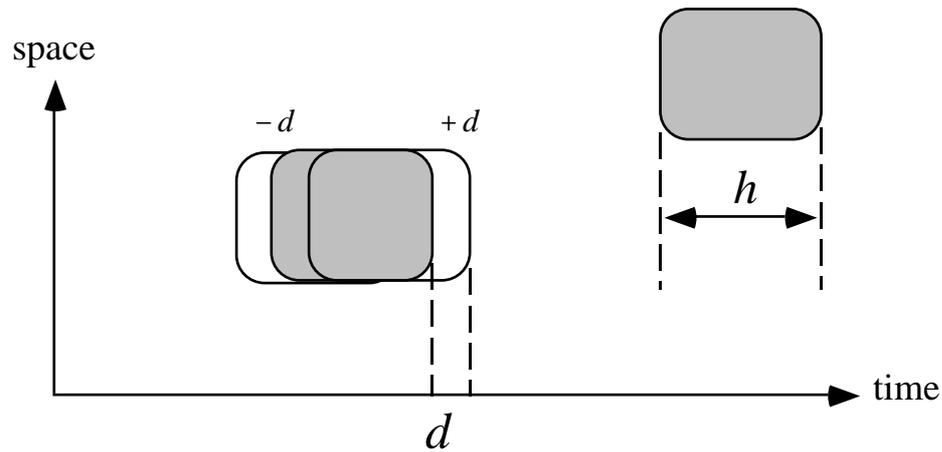


図 2

による相関はあるものの、状態としては別（重なりがない）と考えられているが、固有時の下での系においては、異なる時刻における系の状態でも、その時間差が最小時間単位以内であれば重なりが存在するのである。この特徴は、「意識」において、時間がばらばらの瞬間の連続ではなく、お互いに滑らかに連続した、一連の時間の流れとして認識されることと関係していると思われる。なお、以上の特性は、固有時における系を（ ）とし、最小時間単位を h とした場合、下のように書くことができる。ここに、 \emptyset は、空集合を表す記号である。

5、結論

本稿においては、「意識」における時間の流れの知覚について、「相互作用同時性」という概念からのアプローチを示した。

私が強調したいことは、ここに示した議論は、神経回路網の時間発展を記述するのに適した枠組みを見い

だすという観点からは、論理的に避けることのできない、言わば任意性の少ない議論であるということである。また、「相互作用同時性」は、「相対性理論」を単に言い替えたものではない。「相互作用同時性」の原理の方が、「相対性理論」よりも「光」以外の一般の相互作用を扱う点においてより普遍的なのである。

神経回路網における「時間」については、ニューロン間の非対称結合の下での非平衡状態がどのように関わってくるかという問題がある6)。また、ある時刻において、意識に表象されている様々なモダリティの感覚情報が、どのように統合されて認識に到るのかという問題もある。そこには、何か新しい確率的発展の法則が関与している可能性もあるだろう7)。

このように、「意識」における「時間」の問題は、極めて多面的で難しい。本稿で示した「相互作用同時性」が、「意識」における「時間」の問題を解明する上でどれ程有効か、現時点では明らかではない。しかし、少なくとも、前章の最後に示した数

学的構造の示唆する「時間」構造をきちんと定式化することだけでも、「意識」における時間の問題を考える上で、極めて興味深い未解決の課題であることは確かであることを指摘したい。

謝辞

「相互作用同時性」の問題に関する有益な議論に対し、加藤英之、小島有加利、近藤秀樹、塩谷賢、鈴木航、竹内薫、田中繁、田森佳秀、中沢一俊、矢野良治の各氏に感謝します。また、日頃からの有益な御指導に対し、伊藤正男先生に感謝致します。

参考文献

- 1) 伊藤正男(編著)「脳と思考」 紀伊国屋書店 1991.
- 2) Dennet, D. C. Consciousness Explained. Little, Brown & Company 1991.
- 3) Crick, F. The Astonishing hypothesis. Charles Scribner's Sons. 1994.
- 4) Einstein, A. Ann. der Phys. 17, 891-921. 1905.
- 5) Minkowski, H. Ann. der Phys. 47, 927-938. 1915.
- 6) Mogi, K. Phys. Rev. E 49, 4616-4626, 1994.
- 7) Mogi, K. Proc. Roy. Soc. Lond. A 445, 529-541, 1994.