

視床で中継される情報を大脳新皮質で分析する活動のモデル

唐澤 信司

宮城工業高等専門学校 電気工学科〒981-1239 宮城県名取市愛島塩手字野田山 48

E-mail: shinji-karasawa@cup.ocn.ne.jp

あらまし 本文では網膜および第1次視覚野(V1)のしくみを次のように説明する。網膜では双極細胞が脱分極型と過分極型があり、光によってインパルスを出さず電位を変化しており、その電位にアマクリン細胞が間隙接合するので時間遅延したインパルスが加わり、動いた物体の像と静止物体の映像データを別にして送り出す。網膜の神経細胞と第1次視覚野 V1 の神経細胞を接続する線路を視床で制御する。V1 の眼球優位のカラムでは映された映像データの活動を短期記憶ループ群で集積し、上位の領域や他の活動領域に転送しており、他の領域に転送する際には元の短期記憶の活動を消去し、更新する状態に混入するのを防止する。脳の回路網に映された活動が解読され、海馬に集められてチェックを通り抜けた活動が実行に移される。

キーワード 網膜, 視覚, 視床, カラム構造, 短期記憶ループ, 海馬, 認識

Brain Mechanism on Understanding of Information Explained by Concept of Activity

Shinji KARASAWA

Miyagi National College of Technology 48, Nodayama, Shiote, Medeshima, Natori-shi, Miyagi-ken, 981-1239 Japan

E-mail: shinji-karasawa@cup.ocn.ne.jp

Abstract Information originates from activities of neuron in a neo-cortex. Every neuron possesses the function of a decoder. But an impulse diminishes soon. Then, a timing control of processing is important for an impulse driven system. Considering the delay time of amacrine cell in a retina, the static data and dynamic data on a picture element are sent to primary visual area (V1) separately. An address of neuron in retina and address in V1 are connected and the connections are controlled by thalamus. There are short-term memories of loops in columnar structure. Nerve circuits in column control the existence of activity. Results of the analyses by means of neo-cortex are collected and those are sent to motor area by way of Hippocampus.

Keyword Retina, Vision, Thalamus, Columnar structure, Short-term memory of loop, Hippocampus, Recognition

1. はじめに

本文では、神経解剖学の知見を電子工学的に考えられるアルゴリズムに照らして考え出された脳神経回路網のしくみを説明するモデルを報告する。

1990年代に脳に関する研究が医学や心理学の分野のみならず情報処理あるいはロボットを開発する分野で活発に行なわれた。視覚に関しても分子レベルから生体のレベルまで調べるとともに、その進化に至るまで調べられた[1]。他方、画像処理では映画ではコマ送りの映像で動きを知覚させ、カラーテレビでは光点の集合で映像を認識させた。文字認識などの画像認識技術も著しく発達した。しかし、視覚のしくみがどのようなものであるか等については不明確であった。

著者は、「インパルスを転送する神経細胞は選択して活動単位を実行するので伝送線路と相違する.」として神経回路の知能のしくみを活動の転送で解明法を提案し、言語情報を処理する組織等の提案をした[2]。

神経回路網では各神経細胞はインパルスのパターンが合った瞬間にだけインパルスを出力して外に影響を及ぼす。意味は回路素子と回路接続にあり、インパルスは稼働のタイミングを表している。

そこで、著者はインパルスが相互に作用するタイミングに注目し、小脳の顆粒細胞が遅延要素としてタイミングを決める役割を果たしているという説明を提案し[3]、網膜や海馬においても顆粒細胞層でインパルスのタイミングを調整する役割があると説明した[4]。

本文では、神経解剖学で報告されている脳神経回路網について、視覚に関係した活動を検討して得られた神経回路網のしくみを説明する。

2. 視覚のしくみ

2.1. 認識は脳神経回路の活動であると定義する

情報は脳の新生皮質の活動として映し出した活動から生まれる。脳の新生皮質なされる神経細胞の活動の目

的は需要と供給の活動のマッチングである。生物は生命活動を維持するという自己目的があり、単細胞生物の状態に具備させた機能を必要に応じて活動させれば多細胞生物が組織できる[5]。それゆえ細胞が生物の本能を具備している。しかし、機械にはそれが無い。

神経細胞は取り巻く周囲の変化の影響を受けてその刺激を筋肉に伝えて動作を起こす。その活動は、活動を持続するための需給関係を満たすことである。神経回路網において現状がどの対応に該当するか照合して活動を選択することが認識であるといえる。

他方、通信機器では解読器によって認識の動作がなされている。その解読器のしくみは「錠に合った鍵で開ける」のようにテンプレートマッチングである。そこには「照合する」とか「選択する」という過程がある。ところが、電子回路の解読器は組み合わせ論理で常に演算できるが、神経細胞の出力である軸索はインパルスを出して自動的に消滅し不応期がある。

2.2. 動的な画像データと静的な画像データを別々に採取するしくみを持つ網膜の機能モデル

図 1. に示すように、網膜 (retina) には光受容体 (photo receptor) の錐体 (cone) と桿状体 (rod) がある。黄斑部では錐体だけが存在し、黄斑部以外の周辺領域では桿体が大部分で、僅な量の錐体が存在する。

光を与えると光受容体は過分極 (hyperpolarizing) してインパルスは発生せず電位を下げ、その電位は外網状層 (outer synaptic layer) で双極細胞 (bipolar cell) と水平細胞 (horizontal cell) に伝えられる。

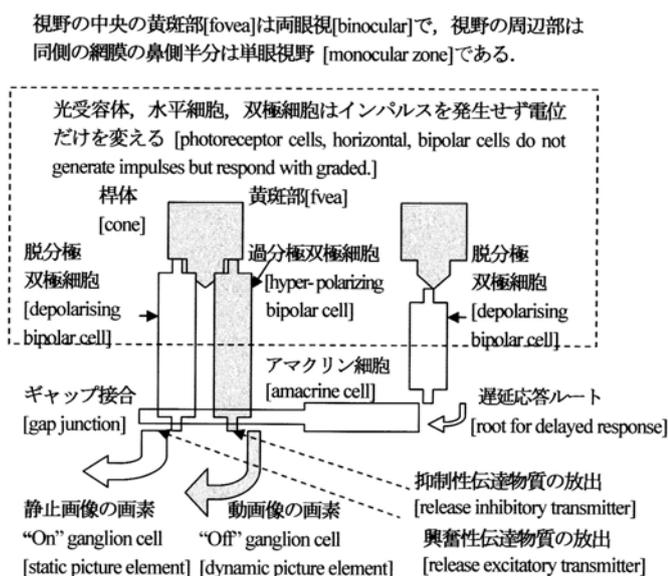


図 1. 画素のデータを採取する網膜のモデル([6] (訳本 pp.588, Box1 を改変).Fig.1. A functional model of the retina, which picks up the data on a picture element (After Daw, Jensen and Brunken, 1990, ([6] pp.595, Box1)

双極細胞は膜の厚み方向に伸びており、光を当てると、過分極するものと脱分極する (depolarizing)ものがある。その過分極型双極細胞はオフ神経節 (ganglion cell) に接続し、脱分極型双極細胞はオン神経節に内網状層 (inner synaptic layer) で接続して電位を伝えている。それゆえ、光点を照射すると神経節細胞には放電頻度が増加する on 中心の反応と、これと反対に光点照射で減少する off 中心の反応が観測される[7]pp.288。この双極細胞と神経節の接合部にアマクリン細胞がギャップ接合して脱分極成の影響を与えている。

神経伝達物質の放出に較べて、電気的結合は迅速であり、双方向性があり、かつ同期作用を持つ。その双極細胞の電位はアマクリン細胞を経由する神経伝達物質による映像より速い。今の映像の電位がアマクリン経由の直前の映像とギャップ接合で出会うこととなる。

そこで、時間を前後した映像が加算される接合では静止した映像の情報が強調される。時間を前後した映像が減算される接合では動く映像の情報が現れる。

2.3. 皮質領域の活動を視床で制御するしくみ

大脳の新皮質には網膜の映像および手や足など身体的な活動がそれぞれの領域に投射される。新皮質に同じ時間に発生する手足の動きや音声や映像の活動が組み合わされて次の活動の選択が行なわれる。注目する活動を制御するためには視床でゲートの操作することが必要になる。

こうして視床の内部には 50 個もの神経核を持ち、身体全体の管制をする。視床が巡回的に全体を管制するために、視床自体は他の神経系の信号と混じり合っていないので独立した構造になっている。

睡眠時に α 波 8~13Hz が観測されて、覚醒時に β 波 14~25(あるいは 14~60Hz)に置き換えられる。そこで、自然発生的に視床を巡ると考えられる巡回刺激の脳波の β 波であると推測される。その発生源の有力候補が大脳皮質の神経細胞と投射神経細胞から入力を受けている視床網様核である[7]pp.219。それ故、視床の動作には割り込みができる。

2.4. 第1次視覚野(V1)と網膜の神経細胞の接続

手や足などの感覚や視覚、聴覚などの活動状況を大脳皮質領域に映す際に、データが投射される皮質部の細胞が配線で接続されるので細胞の番地は固定する。

霊長類の大脳の V1 は眼球優位カラムで構成されている。すなわち、右目由来と左目由来が縞模様になって固定されている。網膜に神経節細胞が配置されて V1 の細胞と接続が固定されるので、網膜の位置と V1 における神経細胞の位置と対応する。その V1 の単純細胞で選択した画素のデータを複雑細胞で認識する。

ループがあり、ループは幾つかの神経細胞で構成されている。それがまとめられて活動単位として活動する。

図 5. の巡回短期記憶回路では転送出力を指示して、元の活動を消去し、元の入力も一時カットしている。

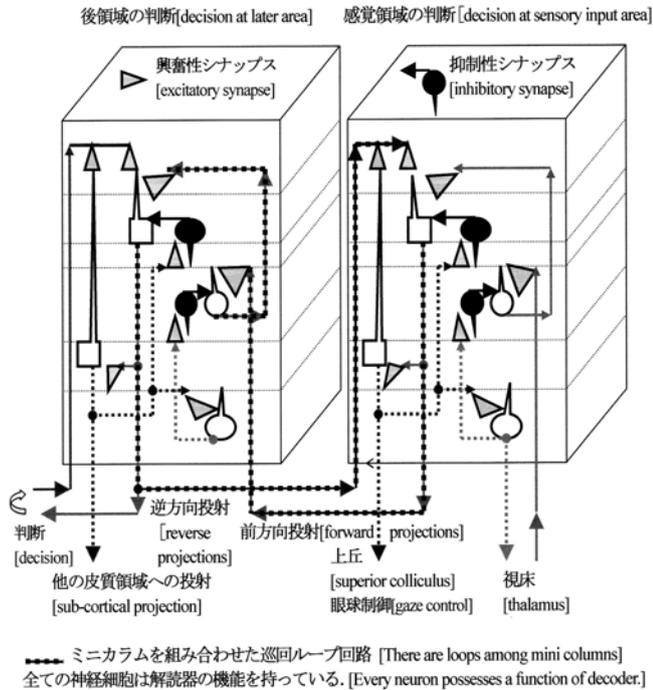


図 5. 短期記憶するループを制御し横方向に情報圧縮を積ねるカラムの神経回路モデル([11]pp.205)

Fig.5. A nerve circuit on columnar structure, in which short-term memory of activity is suppressed after transference of activity ([11]pp.205)

3.4. 短期記憶の活動を連結し、その活動を上位の短期記憶活動で代替する新皮質のしくみ

図 5. の左側の上位ブロックを連ねるとオーバーラップして短期記憶活動の階層構造領域ができる。こうして形成されるマクロカラムは新皮質の表面横方向に沿って広げられる。この活動も他の皮質へ出力する指示すると、送り元のループの入力も一時的に遮断し、その短期記憶回路の活動を消去し、更新される活動に混入が起らないようにする。短期記憶ループの巡回活動単位群によって表現される情報はインパルスが同時に存在するパターンにより特徴が表現されており、そのデータは映像のみならず思考言語でもよい。

3.5. 焦点の物体を認識する視覚のしくみ

分析の対象を切り出す(セグメンテーション)には、静止的な背景画像を消去し、移動体一つ一つを焦点に合わせたテンプレートマッチングにより認識する。その映像を視野の中央に置き、その時間変化を追うことで、その物体の動作のセットをパターンで認識する。

移動物体だけの映像を切り出すには、時間経過の順序(t1,t2,t3)に並べた 3 枚の連続画像の先の 2 つ(t1,t2)の画像の差分の画像(t1-2)と後の 2 つの画像の差分の画像(t2-3)を比較すると、差分の画像(t1-2)と差分の画像(t2-3)に共通の画像(論理積)として変化した物体の映像が得られる。

この動く物体の移動を映すには都合 4 段のレジスタが必要になる。他方、昆虫の複眼では複眼に近い方から 4 つの領域で処理されている [12] pp.264.

人間が 100 ミリ秒程度の外界の情報を脳に取り入れている。移動体の認識には時間を隣接した 2 枚の映像が必要である。データ採取時間として 2 枚の映像を採取する約(2/25)秒=80 ミリ秒以上の時間が必要である。

3.6. 認識に連動した眼球制御のしくみ

顔の向きを変え始める時に、視野が少し変化し、最初に視野の中央にあった視点の映像は中央から少しずれる。そのずれを補うように視軸を動かせば、自分の顔の向きを変えても同じ画像が目に入る。

不必要な追跡を行なうことを避けるために、焦点の探索対象の映像を追跡目的物の分析ルールで照合して、照合で追跡をやめるべき条件が検出されれば追跡を取り止める。もし、新たな状況が発生すれば建て増し方式で新たな活動を付け加える。

4. 出力の集合ルートとなる海馬の機能

4.1. 哺乳類の大脳の新皮質と海馬の結びつき

内外の種々の活動を大脳新皮質に映し、分析を重ねる際に、活動領域はその領域を後戻りしないので新皮質の神経回路網を広げてゆき海馬に至る。海馬を種々の皮質部の活動をまとめるルートとして行動に移す。

魚類や両生類や爬虫類は嗅覚と海馬で行動している。他方、中生代に物質代謝率の高い昆虫を捕食し、虫を捕らえるために外界を映す新皮質を進化させた食虫動物が哺乳類の祖先となった。哺乳類は恒温機能と新皮質を進化させて、新生代の気候や環境に適応した [1] pp.76.

人間の中隔には、透明中隔(septum pellucidum)と真性中隔(septum verum)がある [7] pp.440. ヒトの発達した透明中隔は、脳弓(fornix)と脳梁(corpus callosum)(帯状回:cingulate gyrus に囲まれている)の間にあり、この領域を経由して新皮質と回路を作っている。

海馬の出力ルートの一つである中隔にリンクする回路は原始哺乳類及び哺乳類になって大脳基底核とは隔離されて、大脳新皮質へ接続する透明中核膜が発達した [7] pp.233]. 爬虫類では中隔と大脳基底核が発達していて大脳基底核は運動の中核となる部位である。

4.2. 海馬を経由する大脳の活動の流れ

図 6. に網膜→視床→新皮質→海馬→行動という活動のルートを示す. 感覚入力から行動出力に至る活動では視床および海馬が大脳の活動に関与している. 海馬は大脳皮質部に映し出された諸活動を出力部に橋渡しする場所である.

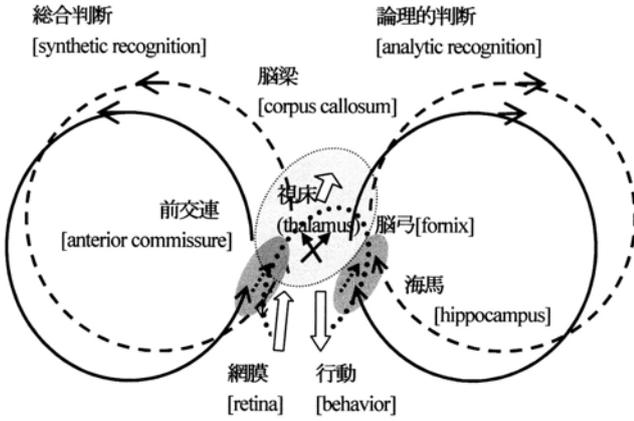


図 6. 映像により行動を開始するまでの活動の流れ
Fig.6. Flows of activities from sensing to behavior

4.3. 海馬における槌状顆粒細胞層の必要性

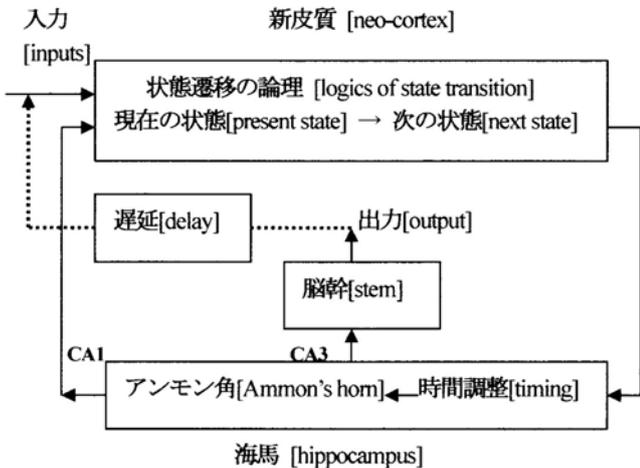


図 7. 海馬と新皮質で構成した動作を繰り返す脳のモデル.
Fig.7 Functional block diagram of brain that is composed with neo-cortex and hippocampus

図 7. に一過性の動作を繰り返す脳のモデルを示す. 人間の眼球動作を含む視覚の活動のサイクルでは $(1/24)=0.042$ 秒ごとに変わる静止画像の映画を違和感なく見るので, 約 40 ミリ秒間隔以上の時間間隔で入力するデータを大脳新皮質の活動状態を更新して, 経験より学んだ対処のルートを選択している.

視覚に伴う動作による状態変化は神経回路の伝達より時間がかかるので, 多くの神経回路の活動は一過

性で間歇的に行なわれると考える. 顆粒細胞層では神経細胞が近接しているので影響を及ぼし合えば同期作用が生まれる. その顆粒細胞層を経由させてインパルス間のタイミングを微調節していると推察される.

4.4. 大脳の新皮質の活動を統合する海馬の構造

脳幹の周囲をリング状に囲んでいる海馬は「つ」の字の上下を逆にした 2 つを上部の中央(前交連)を接した形状である. 海馬にはエンドウ豆の鞘のような歯状回があり, 歯並び方向に直角に輪切ると羊の角のような構造が得られる [13] 図 112. 角の中は槌状の顆粒細胞層があり, それに重ねて錐体細胞層 CA4, CA3, CA2, CA1 を巻き込む構造で, その接続関係を図 7. に示す.

この回路は新皮質から貫通経路を経て顆粒細胞に入りその細胞の軸索である苔状繊維を経て CA3 に至る. その顆粒細胞群に入力する複数のインパルスが繊維束に乗せられて, 総合判断ができる. CA3 の出力はシェffer側枝を経て CA1 に至り, その出力は海馬支脚(subiculum)から新皮質へ向っている [7] pp.433.

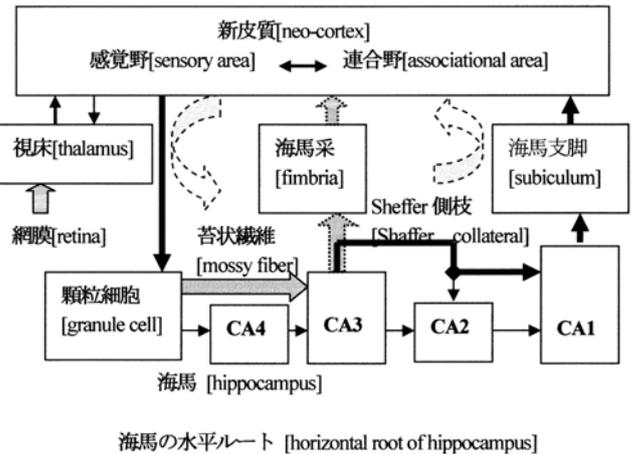


図 8. 海馬の神経回路と視覚を担う大脳新皮質の関係
Fig.8. Nerve circuit of hippocampus for vision

4.5. 海馬の神経回路で観測される長期増強(LTP)

高頻度(5~400Hz)で, ある程度の時間(~30 秒)持続するテタヌス刺激(tetanus)を与えると, 興奮性シナプス電位が長期増強(LTP: long-term potentiation)される海馬で確認された長期増強(LTP)のシナプスには次の 4 種がある [14] pp.101.

- (1) [貫通枝→顆粒細胞]
- (2) [苔状繊維→CA3]
- (3) [Schaffer 側枝→CA1]
- (4) [貫通枝→CA1]

これらの長期増強(LTP)が確認されている海馬の神経細胞の接続関係は次のように説明できる.

(1)[繊維束を用いた複数のインパルスの伝達]
貫通経路を通して歯状回の顆粒細胞の列に投入された

インパルスは繊維束を通路として複数のインパルスを伝達できる。

(2) [活動単位のパターン情報の記憶]

顆粒細胞の軸索群は苔状繊維群として CA3 の錐体細胞の周辺にインパルスを提供し、CA3 の錐体細胞が受けるさまざまなルートに由来するインパルスを集めたパターンが CA3 の錐体細胞にシナプスを作る。

(3) [パターンの認識]

苔状繊維群に送られてくるインパルス群が CA3 の錐体細胞とテンプレートマッチングすればその錐体細胞が認識したというインパルスを出力する。

(4) [解読した出力インパルスの分配]

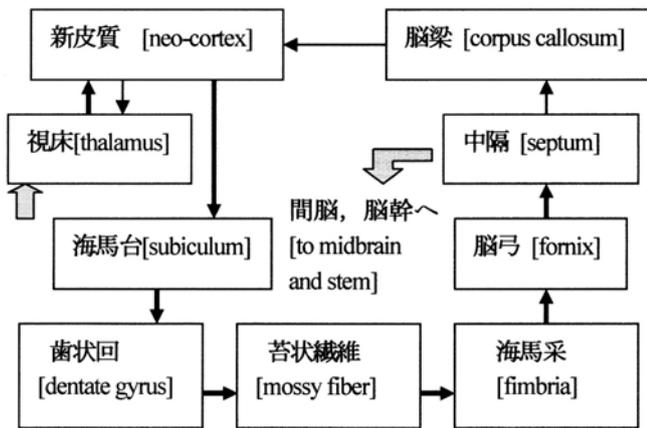
一つパターンの情報を選択した CA3 の出力インパルスは次の2つのルートに分岐される。

[1] 中隔(septum)に送られるルート。

[2] Schaffer 側枝を通して CA1, 乳頭体ルート

CA1 の出力は海馬支脚を経由して皮質の部内嗅領につながり、内嗅領にはさまざま神経繊維が入っている。

4.6. 海馬を経由する運動系への出力と巡回ルート



海馬の海馬采垂直ルート[fornix vertical root on hippocampus]

図 9. 海馬を循環回路の一部とする脳の活動のモデル
Fig.9. Flow of the activities in the brain that hippocampus is a part of a loop of activity

図 9. に海馬から出力に至る経路を示す。海馬を中心に活動が巡回されるルートにはパペッツの情動回路(emotional circuit of Papez)がある[13]図 123.

5. むすび

活動のタイミングを考慮することによって神経細胞の回路で認識のモデルを見出すことができた。具体的には網膜で動く物体の画像データと静止画データを別々に採取する動作および第 1 次視覚野で画像を認識する動作である。全体としては外界刺激を新皮質に映

してテンプレートマッチングした時に呼び起こされるルールが知能のフレームであり、その神経回路網により様々な情報が理解され、情報が発信される。

視覚においても映像認識のルール群で認識しており、外部環境の変化を理解する因果関係の刷り込みが必要である。それは視覚が実世界から得た刺激で行動を決める脳の活動であり、ヒトが経験で得た視覚をロボットに組み込むことは可能である。

今後の課題として、身体制御系と連携した脳神経系のしくみの検討が残されている。まだ、大脳基底核など身体制御系の神経回路の解明はなされていない。

本報告が映像を含めて情報を認識するしくみを理解することと、今後の知能技術の開発に寄与することができれば幸いである。

文 献

[1] 三上章充編,視覚の進化と脳,朝倉書店, ISBN4-254-10120-1, 1993.

[2] S. Karasawa, Attributes of language use explained by activities of neurons, IEICE Technical Report TL2006-12(2006-07), ISSN 0913-5685, pp.31-36, 2006.

[3] S. Karasawa, J. Oomori, Impulse circuits for a distributed control inspired by the neuro-anatomical structure of a cerebellum, pp.185-190, Intelligent Engineering System through Artificial Neural Networks, Vol.10, ASME Press series, ISBN:0-7918-0161-6, 2000.

[4] 唐澤信司,“顆粒細胞層による網膜, 海馬及び小脳のタイミング制御”第 16 回生体・生命工学工学研究会,東北大学電気通信研究所, No.16-5, March, (URL: http://www17.ocn.ne.jp/~shinji-k/index.htm) 2007.

[5] 唐澤信司,活動による生物の進化,宮城工業高等専門学校研究紀要, 第 42 号, ISSN 0286-3707, pp.7-14, 2006.

[6] J. Nicholls, A.R. Martin, and B.G. Wallace, From neuron to brain, 3rd Edition, Sinauer associates, Inc. , ISBN:0-87893-580-0, 1992.(ISBN4-567-64811-0)

[7] 岩堀修明「神経細胞学」金芳堂, ISBN4-7653-0904-5, 1988.

[8] 岩田誠監修,脳のしくみ」ナツメ社, ISBN4-8163-2351-1, 1999.

[9] W. H. Calvin, G. A. Ojemann, Conversation with Neil's Brain, Perseus Books, ISBN:0-201-48337-8, 1998.

[10] S. Karasawa, The strategy of impulse driven working memory for visual perception, Pro. of Inter. Conf. on Imaging Science, Systems, and Technology, Vol. II , pp.729- 735, ISBN:1-892512-94-7, Las Vegas, 2002.

[11] R. Cotterill, Enchanted Looms, Cambridge, Univ. Press, ISBN:0521624355,1988.

[12] F. DELcomyn 著, 小倉明彦, 富永恵子訳, ニュウロンの生物学, トップラン, ISBN4-8101-8985-6, 1999.

[13] R. Poritsky (嶋井和世訳), Neuroanatomy – a functional atlas of parts and pathways, Mosby-Year Book, Inc. (広川書店),ISBN4-567-61060-1, 1998.

[14] 松本元・大津展之, 神経細胞が行う情報処理とそのメカニズム, 培風館,ISBN4-563-01423-0, 1991.