

LTPの学習サイバネティクスの解釈と応用

— 教育現場のための脳科学 —

小嶋 季 輝

0. はじめに

神経脳科学*において、一般に海馬(海馬体) Hippocampus の特定神経細胞のシナプス結合にLTP(長期増強: Long-Term Potentiation)が生じることにより、その推定される生理学的作用が十分条件となり、生物が記憶を行うことが可能になると知られている。

しかし、上述の生理学的な記憶の作用機序が、教育の現場に、科学に基づく理論として提出されたとするとうなるであろうか。神経脳科学の一般的理解に依って立つたものといえども、この極度に専門的な領域の内容について、即座に教授者達に応用を迫ることは不可能であると言える。

OECD CERI (2001) に於いて進められた LEARNING SCIENCES AND BRAIN RESEARCH の東京フォーラムにおいてなされた、学際性 Interdiscipinarity に関する議論に見い出されるように、神経脳科学の周囲に空けられた他分野あるいは他領域との隙間が、多くの研究者に自覚されてきている。そして、その隙間を埋め、交流をはかっていくために、つまり、複数の分野間及び領域間で相互に応用を考えていくために、必要不可欠な共通言語獲得への要求が高まっている (e.g.: Koizumi, 1999)。

現状を含め、これまでの神経脳科学を鑑みれば、それは、神経脳科学の、神経脳科学による、神経脳科学のための研究にとどまっている。有効であり、有用かつ有望な理論も、教育学を含めた他分野へと架橋されてこ

のである。

そこで、本稿では、教育の現場にて、学習者が行う学習を捉える上で、その学習の中心的役割を担う記憶に関係した神経科学の研究成果、特にLTPを、学習サイバネティクスの解釈に基づき記述し、その応用を検討することを目的とする。

ただし、本稿内で引用する神経科学の研究においては、倫理的または技術的理由から、必ずしもヒトを被験動物とする実験による研究成果ではない。そこで、*in vivo* (生体内) 実験においてはその被験動物名を、*in vitro* (生体外) 実験においてはその被験動物名及び被験部位名を付すこととしたい。そして、それら前記の場合においては、つまり、ヒトを実験対象とした研究成果でない場合においては、ヒトへの応用を考える上で、当該研究成果が必ずしも忠実に再現され得るとは限らないことは注意が必要である。

1. LTP

本章では、LTPと記憶の関係を、神経科学の主流の現在までの研究成果をもとに整理する。その際、本稿では、記憶の移行(長期記憶 Long-Term Memory およ

び長期持続性記憶 Long-Lasting Memory と) への新皮質 Neocortex への移行と貯蔵) についての論には触れず、海馬 Hippocampus 内での記憶過程(急速かつ単発的なオンライン形式での記憶形成および長期記憶のための事前処理) に焦点化することを、まず、断っておく。

LTPとは、テタヌス刺激 Tetanus Stimulation (e.g.: 100Hz 以上で 50-100 刺激) の θ バースト刺激 Theta-Burst Stimulation (e.g.: 200msec. の間隔で、100Hz のショック 4-5 回を数発) 、プライムドバースト刺激 Primed-Burst Stimulation (e.g.: プライミング刺激の 200msec. 後に、100Hz のショックを 4-5 回) などの刺激により惹起される、シナプスの情報伝達に持続的な変容を促し、その効率性を亢進させる現象のことである。

LTP は、海馬、特に CA1 の錐体細胞 Pyramidal Cell、歯状回 Dentate Gyrus の顆粒細胞 Granular Cell において確認されている。(Schwartzkroin et al., 1975; guinea pig, hippocampus), (Bliss & Lomo, 1973; rabbit), (Bliss & Gardner-Medwin, 1973; rabbit)

CA1 には CA3 からのシヤンプナー側枝 Schaffer Collateral Fibers、歯状回には嗅内野 Entorhinal Cortex からの貫通線維 Perforant Fibers が入力的作用を果たして

いる(図1)。それぞれの入力において、シナプス結合のシナプス前細胞、そして、シナプス後細胞に前述した刺激に合致する質の刺激が与えられることでLTPが起る。

その結果、シナプス前細胞における神経伝達物質の放出量、シナプス後細胞における神経伝達物質の受容量(受容体数)に持続的な変化が生じ、神経伝達に係る効率性が増大することとなる。(Bliss et al., 1993)。

以上が、海馬内に生じる、LTPによる神経伝達経路の効率性の変様である。

そして、その海馬の記憶における役割については、神経心理学事典に、次のようにまとめられている。

「新しい出来事の記憶(出来事記憶)と事実の記憶(意味記憶)は、海馬損傷によって重度に障害される(…海馬が損傷されても、発症より数カ月までに起きた古い出来事の記憶は比較的健全に残っている、このことは、海馬が永続する長期記憶の貯蔵庫ではないことを示す。」(Beaumont et al., 1996)

このように、海馬は、明示的な記憶を取扱いはするものの、それを保持し続けることは出来ず、主に記憶の形成と再生に係る処理および長期化のための事前処理に関

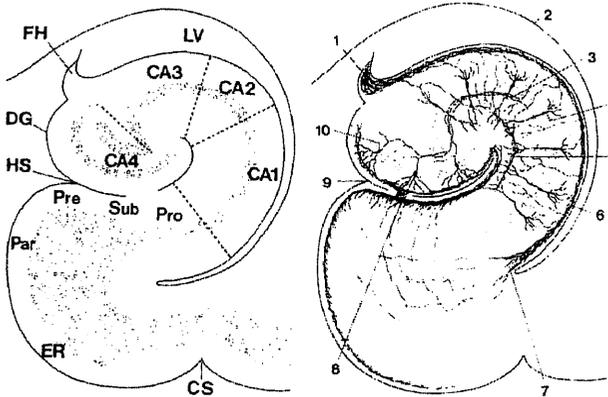


図1：海馬の構造

DG：歯状回 Dentate Gyrus

4：CA1-錐体細胞 Pyramidal Cell

5：シャッフアー側枝 Schaffer Collateral Fibers

8：貫通線維 Perforant Fibers

10：歯状回 Dentate Gyrus-顆粒細胞 Granular Cell

(岩堀修明(1998),『神経解剖学』, pp.432-433 より引用)

わっていると云える。そして、その記憶の処理は、先に述べたLTPの作用機序により変化した脳の性質、すなわち、シナプス可塑性によって支持されることとなる。

2. サイバネティクス

アノゾビ、Warren McCullochの学際性Interdisciplinarityの考えを受け、Norbert Wienerによって創始されたサイバネティクスCyberneticsという学問がある。

当時、すでに複雑化し、細分化されていた科学においては、あらゆる科学とその概念を自由に操れる人間というものは、存在することが出来なくなっていた。それぞれが自身の専門領域を限定し、研究することが当然のものでされていたのである。しかし、一方で、ある異なる複数の分野において扱われている同一の現象が、それぞれの分野ごとに定義され、別の名前が付けられていることがあり、また、それに関する相互の研究成果の交流がはかられていないという現状があった。

そこで、Wienerは、自身も参加する研究討論会に、心理学、社会学、人類学、統計学、統計力学、論理数学、生物物理学、神経解剖学、神経生理学、通信工学、制御工学、電気工学などの多岐にわたる分野の研究者を招き、

グループ内での討論と協働を通し、サイバネティクスの理論体系を構築していった(Wiener, 1961)。

サイバネティクスによって提出された理論には、代表的なものとしては、フィードバックFeed Backやシステム思考Systems Thinkingといったものが挙げられる。そして、それらは、今では、特定の領域内において、改めて定義や引用を行う必要性を有さず、共通の認識と合意を持って、明に暗に現象の説明に利用されている。

このように、サイバネティクスは、その理論が広く展開されると共に応用され、あらゆる理論の背景に存在し得る学問領域である。

「系」とそれを構成する「要素」、そして、その「要素」間の「コミュニケーション」が存在するところにおいて、サイバネティクスは、有効性をもって機能しているのである。

序章にて、神経脳科学の応用が一般の教授者達には困難であるという点を指摘した。同様な状況を示す例がWienerによって提出されている。

「たとえば、私が1本の鉛筆を拾いあげようとするでしょう。そうするには私は筋肉を動かさなくてはならない。しかし少数の解剖学専門家をのぞいては、だれもそ

れがどの筋肉であるか知ってはいない。また、専門家でさえも、どういう筋肉が次々に収縮していくかを意識しながら動作できる人はほとんどないであろう。われわれの意図するところは、単に鉛筆を拾いあげることなのである。」(Wiener, 1963)

この後の考察において、この例は、当時の運動学、医学、神経生理学の研究成果を統合、そして、応用し、このマイクロスリップにおける（体性感覚フィードバックの作用機序を示唆するものとして、サイバネティクスの記述された (ibid.)。

このように、複雑かつ専門的な内容を学際的な立場から記述し、報告及び説明する力を持つものがサイバネティクスなのである。

これより、このサイバネティクスを用いて、特に、学習への応用を覗んだサイバネティクス、すなわち、学習サイバネティクスの立場から、前述のLTPに基づく記憶に関する神経脳科学の研究成果について、教育現場に応用可能な形で記述を試みる。

3. LTPの学習サイバネティクスの解釈と応用

3. 1 新奇性とLTP

夏目らの研究により、 θ リズム Theta Oscillation中は歯状回 Dentate Gyrus 抑制性神経が抑制されていること、すなわち、歯状回の活動が活性化しやすいことが確認され、 θ リズム (θ リズムポジティブピーク)中に誘導されたLTPは、 θ リズム外で誘導されたLTPにくらべて有意(5%水準)に増強の効果を有することが分かっている(夏目ら、1998; guinea pig, hippocampus)。

また、長期記憶 Long-Term Memory (六戸らの分類によれば、中期記憶)形成過程で、 θ リズムにより情報の選択あるいは分離を行っていることも指摘されている(六戸ら、2003)。

ところで、 θ リズムとは、「覚醒時、正常成人ではほとんどみられ」ず、REM睡眠時等に出現する「4Hzから8Hz未満の周波数をもつ律動である」(堀ら、1999)。

海馬内における θ リズムは、REM睡眠中以外に、探索行動 Exploratory Behaviour 中においても観察されている (Mehta et al. 2000; rat)。この探索行動の、外部

環境刺激により惹起される動因 Drive については、「より新しく、変化し、複雑な刺激は、それに接近し探索しようとする行動を起させ、その意味あいにおいて、動因事態を生ぜしめる」と指摘されている（藤田、1959）。

前記の探索動因 Exploratory Drive によって導かれる行動との関係に着目すれば、その動因は新奇性の要求であり、探索行動とは、新奇性の獲得を意味するものである。

つまり、認知的および動機的に、新奇性を獲得していく過程が LTP に影響を与えるのである。

これらの研究成果を、学習サイバネティクスの解釈にそって記述すれば次のようになる。

まず、この際の学習は、学習者が新奇性を感じることから始められなくてはならない。事前のフィードバック Feed-Forward 情報により形成される心理的構えが、学習者の動機による始発的機能に影響を与えるように形成される必要がある。ただし、この動機による始発的機能が新奇性に基づくものでなくてはならず、興味などの他の諸要因と区別され、示されなくてはならない。

また、新奇性により知的好奇心が一時的に喚起されることは、よくあることである。しかしながら、一過性の

効果だけでなく、持続的な効果を望むためには、提示可能な課題の数や質に否応なく制限のかかる教育場面において、適度のフィードバックにより、新奇性を失いつつある要素については、リダンダントな（冗長な）情報を減じていくことが求められる（Cube, 1982）。

以上のように、新奇性に関するリダンダンシー Redundancy を授業の時系列にそって減じていくような、段階的なフィードバックを構成要素とする授業展開が望ましい。学習者に学問（授業内容）を探索させていくように構成され、（教授者の適度な誘導により）制御された授業によって、海馬内リズムにより積極性の促進を受けた LTP が、学習の効果を高めていくこととなる。

3.2 情動と LTP

Ikegaya et al. の研究により、扁桃体 Amygdala の亜核 Subnucleus である BMA（扁桃体基底内側核：Basomedial Amygdala）および BLA（扁桃体基底外側核：Basolateral Amygdala）が刺激されることにより、それぞれ独立に、貫通線維 Perforant Fibers でのテタヌス刺激 Tetanic Stimulation 等によって惹起される菌状

(ibid.)。

これらを、学習サイバネティクスの解釈に基づき記述すれば以下のようになる。

刺激に対する反応としての側面をもつ情動であるから、その喚起には先行する刺激が不可欠である。その先行刺激に関して、次の2種類が想定される。

1つは、フィードフォワードとして、学習に先駆けて情報が与えられる場合である。この場合、そのフィードフォワードが学習者の中で受け止められ、心理的な構えとして、情動の喚起を促す。

もう1つは、同様の場面の刺激を既に獲得しており、その時々フィードバック経験の蓄積がある場合である。こちらの場合には、学習者内部にその学習への評価が定まっておき、学習と自己との関係から、得意意識あるいは苦手意識としての認知的評価が情動の喚起を促す。

これらの情動の喚起が、活性型のものであれば、Ikegaya et al.の研究が示す通り、LTPによって記憶作用が亢進することとなる。

一方で、ネガティブな情動を喚起する負のフィードバックについては、特別な注意が必要である。

授業内での学習活動に対して、負のフィードバック経

験の蓄積が苦手意識という心理的構えを生成し、強化していくこととなる。この構えによる情動の喚起もまた、LTPを促進するであろう。しかしながら、この文脈で促進されるLTPに依存する記憶の中心は、「学習内容について」ではなく、「負の経験や出来事について」となることが予想される。このようなネガティブな情動を喚起する教授はぜひとも避けなくてはならない。

苦手意識を植え付けるようなメタメッセージ（メタ情報）のフィードバックは避け、学習者の伸張性という意味だけでなく、他者の中の学習者という社会的文脈も考慮に入れたフィードバックが必要である（十島、1989）。これは、苦手意識の発生が個人内に起因するものだけではなく、環境との自己制御過程によるものともとれるからである。すなわち、ここで語られるフィードバックとは、教授者が能動的に与える情報のみを指すのではなく、学習者が受け取る情報全般を指している。教授者は、これらの学習者を取り巻く包括的情報の制御の技能を要するのである。

3.3 ストレスとLTP

過度なストレスが心身に与える影響について、我々は

経験的にも推して知ることが出来る。そして、当然、このネガティブな影響については、学習および記憶に関してもいうことが出来、科学的な実験によって示されている。

外部から与えられるストレスが「HP」の誘発を阻害し (Foy, 1987: rat. hippocampus)、行動を制限されることで生じるストレス反応もまた、「HP」を抑制することが知られている (Xu et al. 1997, rat)。

さらに、恐怖経験によるストレスが、海馬内における記憶の処理機能を減弱することも分かっている (Paxson et al. 2008: rat)。

そして、それらストレス反応の「HP」における影響は、そのストレスラーおよびストレス状況の制御可能性に大きく関わる (Shors, 1989: rat)。

このような持続的なストレスラーが生体に与える影響は、それらが望ましいものでないことは容易に想像出来たものであった。その点では、前記を始めとする一連の実験により、具体的に学習、そして、記憶との関連で、その機能が阻害されることが確認されてきたのである。

ところで、この文脈で語られているストレスとは、外部のストレスラーにより知覚し、認識され得るものであ

る。しかしながら、学習あるいは教育を中心に据えた議論を行う際には、学習者の欲求の充足度に関係する肉体的なストレス感についても理論の中で語られる必要があるだろう。

そして、入力されるストレスに関しては、その種類と影響が配慮されなくてはならない (Kim et al. 1998)。

以上を踏まえ、学習サイバネティクスのな解釈に立ち、記述すれば次のようになる。

まず、用意された課題について、その方向性および方法が不明確であったり、過度に高度で困難なものである場合には、学習者には、不安やいらだちが喚起され、それらがストレスラーとして認識されるであろう。つまり、フィードフォワードおよびフィードバックとして、ストレスラーを提示しているようなものである。適度に複雑かつ困難である場合には、その活動を通じて、発達の最近接領域に発達過程を構成し (Vygotksky, 1935)、現状値 Ist Wert と目標値 Soll Wert の間の積極性のテンション (現状値を目標値に近づけるベクトル) となり得る (Frank, 1969)。教授者の役割は、学習者の現状を把握し、適正な目標を立てることからはじまるのである。

さらに、授業場面においては、自己意識を肯定してい

けるようなフィードフォワードを提示しておくことはもとより、ポジティブなフィードバックにより、授業内で一貫して安定し、リラクセスした心理的構えの生成に尽力しなくてはならない。もちろん、高圧的な教授者の態度は、あつてはならないものである。

また、学習者との相互作用により心理的構えを生成する可能性のある環境要因を考慮しておく必要がある。学習者が学習を継続していく上で、その活動を支える教材及び教具の適切さ（不便さを感じないこと）、あるいは、即時のフィードバックが可能な支援体制等の学習環境整備が前提になくなくてはならない。

4. おわりに

以上で論じてきた、これらの神経脳科学の成果を、サイバネティクスを記述と説明のためのツールとして利用することを通して、教育の現場への応用をはかるという本稿の取り組みは、教育という観点からも、学際性 Interdisciplinarity という研究の観点からも、現在ある要求に合致するものであり、意義深いものであると思われる。

また、応用可能なサイバネティクスの解釈にそつて記述された理論が、実際に我々が、これまでの学習の際に、実感し、実践してきたであろう経験則に照らしめても、何ら矛盾する点がないことは興味深い。この際、その応用の記述は、出来得る限り単純なものとなるように心がけた。このことにより、一層の実感と、先端の科学を教育に持ち込めるという強い認識が持たれた筈である。

現場においては、この矛盾がなく、無理がないということが重要な意味を持ち、抽象的な理論よりも、具象的に方向性を示唆する研究が求められているのである。このような「応用を念頭に置いた科学」が発展していくことにより、異なつた分野間及び領域間の隙間を埋め、実践される理論として、真の学際性が発揮されることとなる。

そして、その総じた結果として、先端の科学理論に支持される教育学の発展が望めるのである。現状においては、そのための理論背景、共通言語として、この上なく、サイバネティクスが有効性を持つと考えられる。

註

* 本稿では、筆者が研究を進める認知情報処理に関する脳科学と区別あるいは対比する高図も含め、神経科学における脳科学という意味で、神経脳科学という用語を使用する。

参考文献

- Beaumont, J. G., Kanealy, P. M., Rogers, M. J. C. 監著 (1996): 『若木重夫はな記 (2007)』『神経心理学事典』、医学書院
- Bliss, T. V., Lømo, T. (1973), 'LONG-LASTING POTENTIATION OF THE SYNAPTIC TRANSMISSION IN THE DENTATE AREA OF THE ANAESTHETIZED RABBIT FOLLOWING STIMULATION OF THE PERFORANT PATH', *Journal of Physiology*, vol.232, pp.331-356
- Bliss, T. V., Gardner-Medwin, A. R. (1973), 'LONG-LASTING POTENTIATION OF THE SYNAPTIC TRANSMISSION IN THE DENTATE AREA OF THE UNANAESTHETIZED RABBIT FOLLOWING STIMULATION OF THE PERFORANT PATH', *Journal of Physiology*, vol.232, pp.357-374
- Bliss, T. V., Collingridge, G. L. (1993), 'A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus', *Nature*, vol.361, no.7, pp.31-39
- Cube, F. (1982): 『国語辞書』(1987)、『サイエンス・ネット』、学習理論 - 教育の S-O の試み -』、東洋館出版社
- Foy, M. R., Stanton, M. E., Levine, S., Thompson, R. F. (1987), 'Behavioural Stress Impairs Long-Term Potentiation in Rodent Hippocampus', *Behavioural and Neural Biology*, vol.48, pp.138-149
- Frank, H. G. (1969), 'Kybernetische Grundlagen der Paedagogik', 2. voellig neubearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage, W. Kohlhammer Verlag
- 藤田統 (1959)『「動物の好奇心・探索行動に関する研究」』、心理学研究 vol.30, no.2, pp.122-133
- 堀浩・高橋光雄、下河内裕、井上健、西浦信博 (1999)『脳波・筋電図用語辞典』改訂第2版、永井書店

- Ikegaya, Y., Saito, H., Abe, K. (1996), 'The Basomedial and Basolateral Amygdaloid Nuclei Contribute to the Induction of Long-term Potentiation in the Dentate Gyrus In Vivo', *European Journal of Neuroscience*, vol.8, pp.1833-1839
- 岩根修昭 (1998) 『神経科学』 金沢朝日新聞社
- Kim, J. J., Yoon, K. S. (1998), 'Stress: metaplastic effects in the hippocampus', *Trends in Neurosciences*, vol.21, no.12, pp.505-509
- 小池正春著 (1965) 『大脳辺縁系』 中外医学社
- Koizumi, H. (1999), 'A practical approach to transdisciplinary studies for the 21st century - The centennial of the discovery of radium by the Curies -', *The Journal of Seizon and Life Sciences Series B*, vol. 9, pp.5-24
- Mehta, M. R., Quirk, M. C., Wilson, M. A. (2000), 'Experience-Dependent Asymmetric Shape of Hippocampal Receptive Fields', *Neuron*, vol.25, pp.707-715
- 夏田季代入『米谷快男宛 (1998)』「海馬の不思議・学習過程」 物性研究 vol.69, no.6, pp.794-809
- OECD CER1 (2001), 'PRELIMINARY SYNTHESIS OF THE THIRD HIGH LEVEL FORUM ON LEARNING SCIENCES AND BRAIN RESEARCH : BRAIN MECHANISMS AND LEARNING IN AGEING', OECD Web (<http://www.oecd.org/dataoecd/40/39/15302896.pdf>), 最終確認: 11/20/2008
- Park, C. L., Zoladz, P. R., Conrad, C. D., Fleshner, M., Diamond, D. M. (2008), 'Acute predator stress impairs the consolidation and retrieval of hippocampus-dependent memory in male and female rats', *Learning & Memory*, vol.15, pp.271-280
- 大田英明『三宅章吾』佐藤俊治 (2003) 『ハヤナルロンへの勳章を考慮した長期記憶形成モデル』「電子情報通信学会技術研究報告 ニューロロンニューロニクス」 vol.103, no.734, pp.91-96
- Shors, T. J., Seib, T. B., Levine, S., Thompson, R. F. (1989), 'Inescapable Versus Escapable Shock Modulates Long-Term Potentiation in the Rat Hippocampus', *Science*, vol.244, no.4901, pp.224-226
- Schwartzkroin, P. A., Wester, K. (1975), 'Long-lasting facilitation of a synaptic potential following tetanization in the in vitro hippocampal slice', *Brain research*

vol.89, pp.107-119

十島雅藏 (1989)、『心理サイバネティクス』、ナカニシヤ出版

Vygotsky, L. S. (1935): 土井捷三、神谷栄司訳 (2003)、『発達の最近接領域』の理論 - 教授・学習過程における子どもの発達 -』、三学出版

Ku, L., Anwyl, R., Rowan, M. J. (1997). 'Behavioural stress facilitates the induction of long-term depression in the hippocampus.' *Nature*, vol.387, pp.497-500

吉田基治、林初男、石塚智 (2002)、『海馬CA3領域の神経活動の電波を用いた時系列記憶モデル』、電子情報通信学会技術研究報告 非線形問題、vol.101, no.613, pp.1-7

Wiener, N. (1961): 池原止戈夫ほか訳 (1963)、『サイバネティクス』、第2版、岩波書店