

小脳情報処理ラボ

(Cerebellar Information Processing Lab.)

研究項目：コミュニケーションのための内部モデルの小脳内存在に関する
生理学的及び非侵襲脳活動計測に関する研究

研究期間：平成9年度～13年度

1. 研究の背景

ヒトを動物と区別する能力は何か。古からコミュニケーションの能力こそがヒトと動物を峻別する,と考えられてきた。コミュニケーションに関する脳科学の研究が,人間だけが持つ大脳新皮質の言語野を中心に展開してきたのも当然の流れである。

ところが最近になって,運動の制御と学習の文脈で研究してきた小脳が,言語などの高次機能の発現中に盛んに活動していることが明らかになった。これは人間のコミュニケーションの能力も運動制御のメカニズムの延長で理解できる可能性を示唆するとともに,コミュニケーションの脳科学においても小脳が注目に値することを示している(川人, 1996)。

小脳の運動制御,ひいてはコミュニケーションにおける役割を解明する上で「内部モデル」は鍵を握る概念である。内部モデルとは,例えて言えば「脳の外の制御対象の性質を脳の内部に写し取ったモデル」であり,脳の中に作り上げた制御対象のシミュレーターの

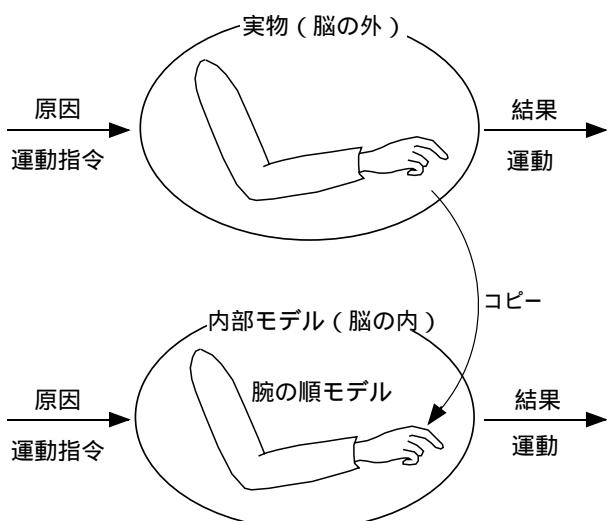


図1 内部モデルとは

ようなものである(図1)。よくできたシミュレーターは現物の代わりになる。腕や手の運動制御の場合にはとても役に立つ。例えば,実際には腕を動かすことなく,こんな指令を送ると手や腕はこんな動きをするだろう,と予測することができる。また,実際に腕を動かす場合でも,動いた腕から結果が戻ってくる前に運動の結果を予測することができるので,予測される誤差を修正するなど次の手をうつことが可能となる。このような原因(運動の指令)から結果(運動)を予測するに使われる内部モデルを「順モデル」と呼ぶ。順があるなら逆もある。こちらは逆に,結果から原因を作るモデルで,望みの運動の結果を入力すると,その運動を実現するような運動指令を計算するような内部モデルである。この逆モデルがあれば,あそこへ手を伸ばしたい,と思っただけで数多くの筋肉に対する適切な指令がたちどころに生成されて,手は思い通りの軌跡を描いて目標に到達する,というわけである。この概念はコミュニケーションにも容易に拡張しうる。例えば「相手の気持ちを読む」ことができるのにはなぜか。「相手」の考え方についての内部モデルを獲得しているからである,といった具合に。

さて内部モデルは脳のどこに獲得されるのだろうか。反射性の眼球運動(追従眼球運動)に関しては,小脳の腹側傍片葉に逆モデルが存在することを強く示唆する電気生理学的なデータが得られている(Shidaraら, 1993)。腕や手の随意運動に関する内部モデルの所在は実はまだ未知であるが,追従眼球運動の場合と同様に小脳が極めて有力な候補である。なぜなら,小脳が破壊されると腕や手の運動の正確さ滑らかさが失われ,ある種の腕の運動の学習が困難となり,また小脳には内部モデルの獲得すなわち学習に適したシナプス可塑性と構造が備わっているからである。コミュニケーションの内部モデルはどこにあるのか。あるとすれば,やはり小脳が候補となるだろう。

以上のような見通しの上にたって、非侵襲脳活動計測と電気生理学的な手法の両方を用いて小脳内部モデル仮説を検証し、コミュニケーションにおける小脳内部モデルの存在と機能について明らかにしていくことが本研究の目的である。

2. これまでの研究経過と現状

2.1 非侵襲脳活動計測

エッセイの朗読を聴き取る際の脳活動領域を、磁気共鳴画像を撮影することによって明らかにした。小脳が確かに活動していることを確認すると共に、聴き取りの際の脳活動に明瞭な男女差があることを発見した。即ち、男性は主として左の側頭葉だけを使って理解するのに対し、女性は側頭葉を両側性に用いていることが明らかになった(図2)。

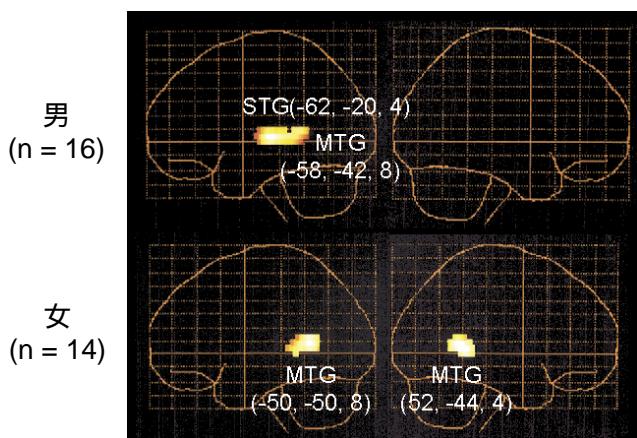
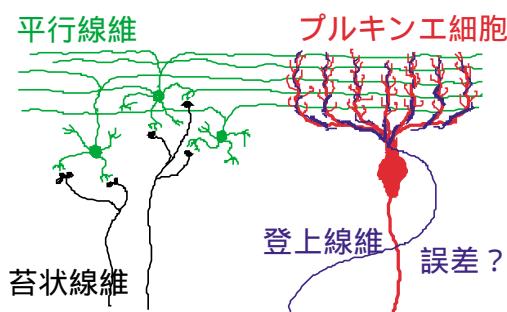


図2 エッセイ朗読聴き取り理解の際の脳活動の男女差



2.2 小脳で内部モデルの学習はできるのか？

小脳における学習の仕組みについては、1970年前後にMarr, Albus, 伊藤らによって基本的な仮説が立てられた。彼らは小脳の主要な細胞であるプルキンエ細胞に2種類の入力が入ることに注目した。一つは苔状線維からの入力で、これは顆粒細胞と平行線維を経て、プルキンエ細胞に収束する。1個のプルキンエ細胞には1000のオーダーの数の顆粒細胞からの入力が収束する。もう一方は脳幹の下オリーブ核に起始する登上線維からの入力である。極めて対照的なことには、1個のプルキンエ細胞はただ一つの登上線維からのみ入力を受ける。小脳の学習仮説では、この登上線維からの入力が教師役を果たし、平行線維とプルキンエ細胞の間のシナプスを可塑的に変化させる、と仮定されてきた。可塑性の仮定は80年代に入り伊藤らによって証明された。すなわち、登上線維の刺激と平行線維の刺激を組み合わせると平行線維とプルキンエ細胞の間のシナプス効率が長期にわたって抑制される(長期抑制)ことが証明された。しかし、登上線維信号が学習用の信号たりうるかどうか(図3左)は、特に腕の運動に関してはごく最近まで議論が続いてきた。これは内部モデルが小脳に獲得され得るかどうか、を解明する上でも避けて通れない問題である。議論が長く続いて来たのには理由がある。登上線維の信号は極めてまれにしか生じないので、腕の運動中には平均して1Hz未満でしかなく、学習を進めるべき運動中にはほとんど発火しないという報告すらある。

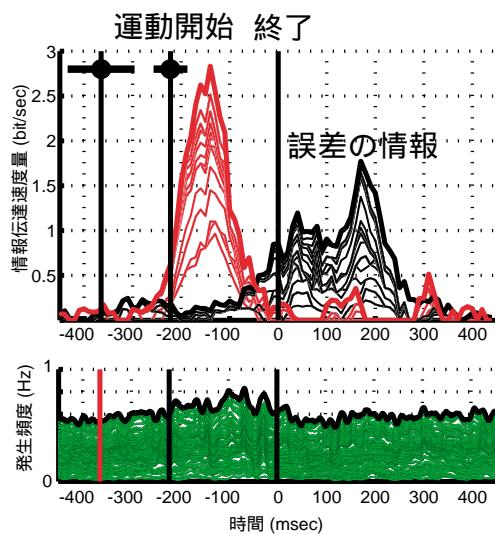


図3 登上線維信号は内部モデル学習用の誤差信号か？

そこで私たちは腕の運動として目標に手を伸ばす , という単純な課題を設定して課題運動中 運動後のサルの登上線維信号が運動の誤差に応じて発生しているのかどうかを調べることにした。サルには速い(300 ms 以内)運動を課したので運動の最中に発生する登上線維信号は高々 1 個で , 登上線維信号が出ない試行も多い。しかも発生頻度は目標提示前とほとんど変わらない(図 3 右下 緑線) にもかかわらず , 300 回から 2000 回の試行にわたって記録したデータを使って登上線維信号が持つ誤差についての情報量を計算してみると , 運動の終了直前から直後に表現されている運動の誤差の情報が浮かび上がってきた(図 3 右上 黒線) 一見 , 気紛れに出現しているようしていく , やるべきことはやっていたのである。運動の誤差は即ち内部モデルの不完全さを表わすから , この登上線維信号は内部モデルを改善するための信号として利用できるということになる。

3. 研究成果のインパクト

我々の研究は , 小脳の学習理論が仮定する学習信号が確かに登上線維によって与えられることを腕の運動の場合にも示した。内部モデルの更新 , 獲得のために必要な情報が小脳内に揃っていることを示す成果である。また , 本来狙っていたことではないが , 文章全体の意味をとるような時間制限の緩い言語機能では脳の使い方が男女で異なることを見出した。高次機能を発現するための設計にはかなりの自由度があることを示している。これらの成果は今後コミュニケーションを行う機械の設計思想に反映させることができるものだろう。

4. 今後の研究展開の方向

生理学的研究では , 内部モデルの獲得 , 更新が必要な状況を作り出し , サルのプルキンエ細胞の活動を記録して内部モデルの更新過程と新規獲得の仕組みを解明していく。

非侵襲計測法を用いた研究では , 大脳新皮質と小脳の活動部位の相関を調べ , コミュニケーションにおいていかなる内部モデルが小脳に獲得される可能性があるのか , 仮説を立てる。

参考文献

- 1) Kitazawa S., Kimura T., Yin PB : Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements, *Nature* 392: 494-497 (1998) .
- 2) Kansaku K., Yamaura A., Kitazawa S. : Sex-differences in lateralization revealed in the posterior language areas, *Cerebral Cortex* (in press)(2000).
- 3) 北澤 茂 : 小脳と手の運動学習 , *神経進歩* 42: 124-137 (1998).

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数 3 名)

職員(1 名) 北澤 茂*(情報科学部)

職員以外(2 名) 山本憲司(科学技術特別研究員), 神作 憲司(千葉大学)

* ラボリーダ