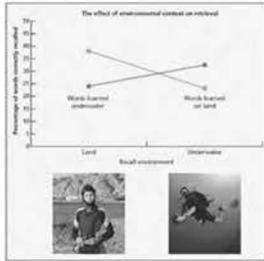
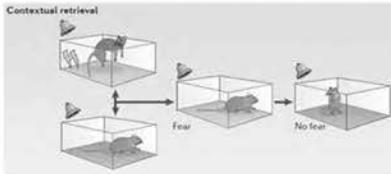
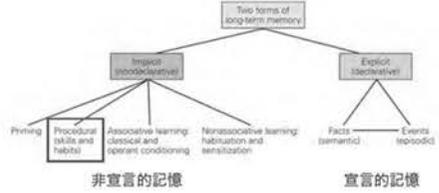



**東京大学**  
**文脈に応じて形成される運動記憶**  
 - 構造、機能とその操作 -  
 東京大学大学院教育学研究科  
 身体教育学コース・教授  
 野崎 大地

**文脈依存性の記憶**  

 どこでどのように記憶を形成したかという「文脈（コンテキスト）」が記憶想起に大きく影響する。  
*Baddeley et al., "Memory" 2nd ed., 2014*

**文脈依存性の記憶**  

 恐怖条件付けの記憶は文脈に応じて形成される。  
*Maren et al., Nat Rev Neurosci 2013*

**記憶の分類**  

 非宣言的記憶  
 宣言的記憶  
*Kandel et al., Principles of Neural Science 5th ed., 2013*

**運動の記憶**

- 「身体が覚えるプロセス」
- 実際に覚えるのは脳
- 通常の物事を覚えたりするような記憶（宣言的記憶）とは異なった脳内過程が関与している（手続き記憶）

**患者HM**

- てんかん発作治療のため、側頭葉内側部を切除
- 知能には特別な問題なし
- 長期記憶（宣言的記憶）の形成が不可能

### 患者HMの症例：登場人物

**Patient HM**



From Wikipedia  
深刻な麻痺症状

**William B. Scoville**



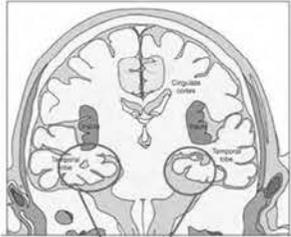
From Stanley Finger, Origins of Neuroscience

**Brenda Milner**



From The History of Neuroscience Autography Vol 2

### 側頭葉内側部



Medial temporal lobes

<http://www.cso.buffalo.edu/~rapaport/575/F07/medtemplobes.jpg>

What's new with the amnesic patient H.M.?

NATURE REVIEWS | NEUROSCIENCE  
VOLUME 3 | FEBRUARY 2002 | 583

Suzanne Corkin

Milner shows H.M.'s significant learning of a sensorimotor skill within and across days — the first experimental demonstration of preserved learning in amnesia<sup>19</sup>.

運動技能の記憶能力は維持されている



PERMANENT PRESENT TENSE

The UNFORGETTABLE LIFE of the AMNESIC PATIENT, H.M.

SUZANNE CORKIN

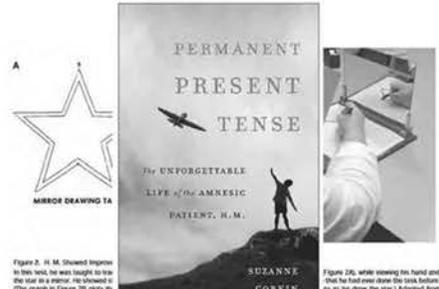


Figure 2. H. M. showed progress in this task, but was taught to trace the star in a mirror. He showed no other graph in Figure 2B (data by Milner (1962)).

Figure 2B. While knowing his hand position, he had never done the task before. He is so far above the star & beyond from

### ロボットアーム（マニピュランダム）を用いた運動学習実験



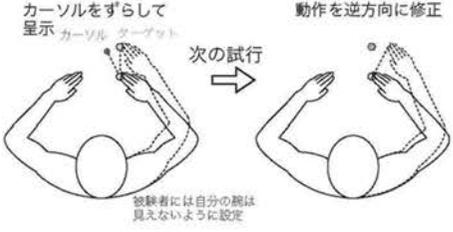
Kinarm, Bkin Technologies, Canada

### 誤差に基づく運動修正

カーソルをずらして  
呈示 カーソル ターゲット

動作を逆方向に修正

次の試行



被験者には自分の腕は見えないうように設定

予測との誤差情報を参照して学習が進行

### 無意識のうちにやられる運動学習

回転角度を漸増

被験者が気付かないうちに、手を動かす方向が、回転角度と反対方向にシフト

Honda et al, PLoS One 2012を改変

### 正反対の回転変換をかける?

Hirashima & Nozaki, Current Biology 2012

### 手を動かす方向が同一方向に収束

被験者が見ているカーソルの動き      実際の手の動き

物理的には同じ運動を行なっているにも関わらず、被験者本人は、別々のターゲットに向かってリーチング運動していると信じている。

Hirashima & Nozaki, Current Biology 2012

### 身体で覚える過程：その潜在性

視覚運動回転課題

試行を繰り返すと視覚情報が変換された環境に適應し、運動エラーが減少する。

Mazzoni & Krakauer, J Neuroscience, 2006

### 身体で覚える過程：その潜在性

予め回転情報を明示的に与えていたら? 「ターゲットの左隣を狙ってください」

頭ではうまく知っていることが解っているのに、手の動きがさらにずれていく。

Mazzoni & Krakauer, J Neuroscience, 2006

### フィードフォワード制御器の学習

フィードフォワード制御器の学習

運動の誤差情報に基づいて、フィードフォワード制御器が修正・再構築される。

### ロボットアームを用いて新奇な力場を作用させる

ハンドルの動きに応じた新奇な力場

$$F = Bv$$

例えば

$$B = \begin{pmatrix} 0 & -10 \\ 10 & 0 \end{pmatrix}$$

力の方向が運動方向に常に直交

腕到達運動 (リーチング運動)

Shadmehr and Mussa-Ivaldi, J Neurosci 1994

### 力場への適応過程 運動学習研究の実験手法

自動的

学習期

Baseline

ウォッシュアウト

後効果→学習の度合い

試行数

キャッチ トライアル

### 小脳、大脳基底核

Smith and Shadmehr, J Neurophysiol 2005

### 状態空間モデル

$$x_{n+1} = ax_n + bu_n$$

$$y_n = z_n + du_n$$

Throughman man and Shadmehr, Nature 2000

### 運動学習系の非柔軟性

ターゲットの色に応じて加わる力の向きが逆転

異なる文脈に応じた複数の内部モデルがどのように構築されるのか? → 運動制御・学習研究の大きな問題の一つ (Shadmehr et al., Ann Rev Neurosci 2010)

Shadmehr et al., 2002

### 学習効果の部分的転移

片腕で学習

両腕で学習

片腕キャッチ トライアル

両腕キャッチ トライアル

片腕キャッチ 学習後

両腕キャッチ 学習前

片腕キャッチ 学習前

運動学習効果の部分的転移は内部モデルの部分的乖離を反映している

片腕運動学習後 → 両腕運動への転移

両腕運動学習後 → 片腕運動への転移

Nozaki et al., Nature Neuroscience, 2006

適応と脱適応

Lateral deviation (cm)

Trial Number

learning phase

learning phase with catch trials

△ uni-catch

速やか(10回以内)に baselineレベルに復帰

学習効果がwashoutされた

Learning Washout

学習効果の部分的残存

Unimanual learning

Uni Bi → Uni Bi

Final learning After unimanual washout

Unimanual learning → Bimanual washout (x10) → Unimanual washout (x10)

Lateral deviation (cm)

Trial number

Bimanual washout Unimanual washout

1st uni-washout last bi-washout

1cm

一方だけ憶えている

片腕運動でスキル学習 → 両腕運動でスキルを忘れる → 片腕運動を行うとまだスキルが覚えられる

両腕運動でスキル学習 → 片腕運動でスキルを忘れる → 片腕運動を行うとまだスキルが覚えられる

両腕運動モードの左腕は忘れ去っているのに片腕運動モードの左腕は憶えている

腕の運動は片腕で行っても両腕で行っても見かけ上ほとんど同じ、しかし、

運動学習

片腕だけで動かす左(右)腕運動と両腕運動時の左(右)腕運動では、動作に関与する脳内過程は異なっている。

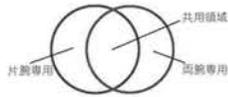
文脈依存性の運動記憶形成

Right-hand force bias (RFB)

Left-hand force bias (LFB)

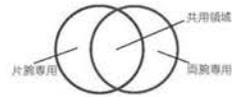
Nozaki et al., Nat Neurosci 2006; Yokoi et al., JNS 2011; Kadota et al., JNS 2014

### 運動学習メモリの切り替わり



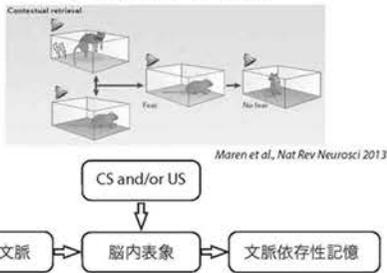
- 1.機序  
どのように切り替わりが達成されているのか？
- 2.機能的意義  
どうして同じメモリを使い回ししないのか？

### 運動学習メモリの切り替わり

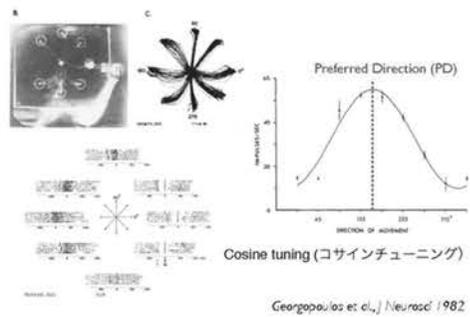


- 1.機序  
どのように切り替わりが達成されているのか？
- 2.機能的意義  
どうして同じメモリを使い回ししないのか？

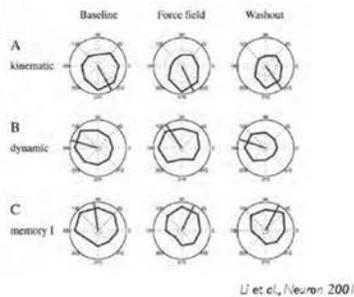
### 文脈依存性の記憶



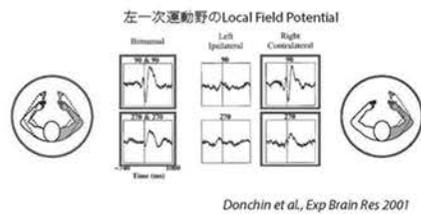
### リーチング運動時のMIニューロン応答

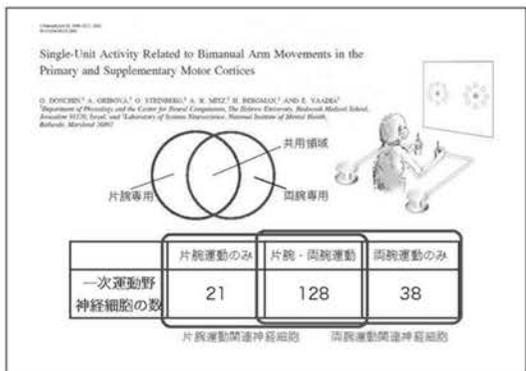


### Force field適応に伴うMIニューロン応答特性の変化



### 反対側の運動の有無に依存した一次運動野の状態変化





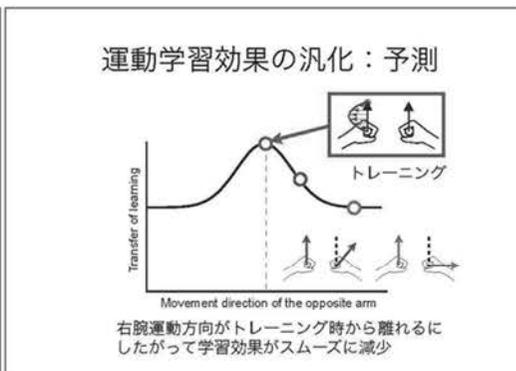
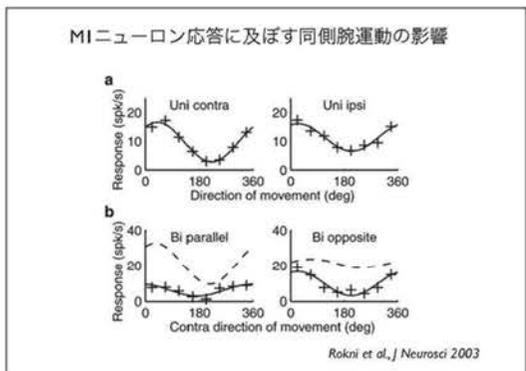
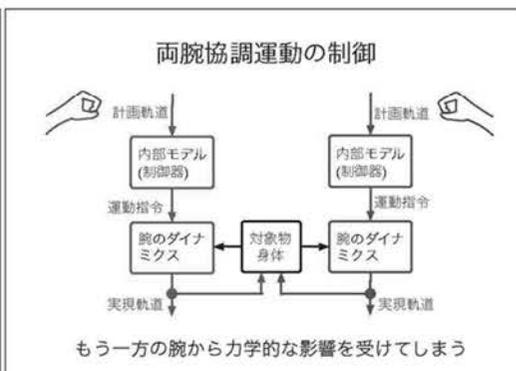
### 運動学習メモリの切り替わり

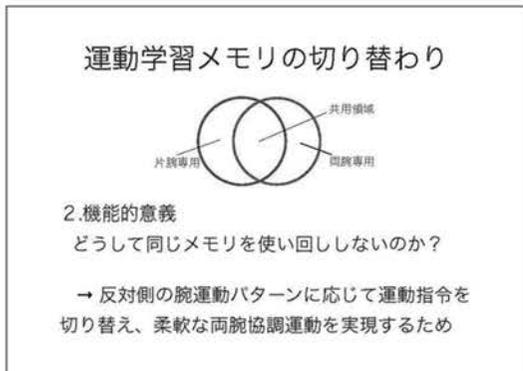
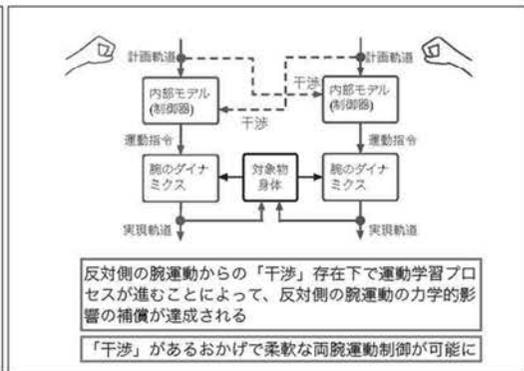
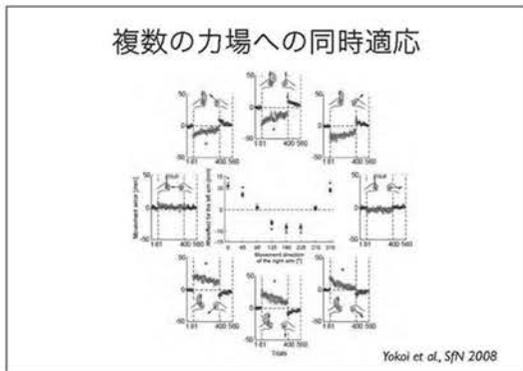
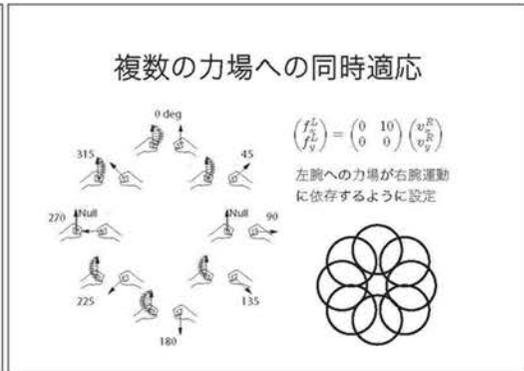
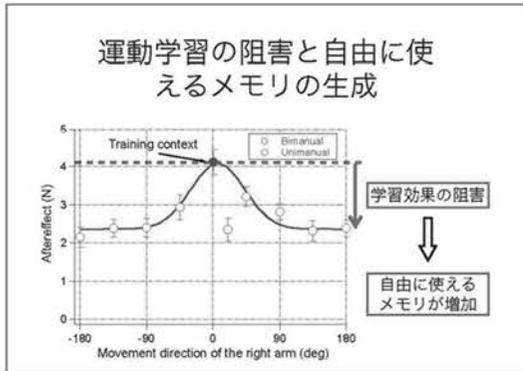
1. 機序  
 どのように切り替わりが達成されているのか？  
 → 反対側の腕運動に伴う脳 (MI等) の状態変化

### 運動学習メモリの切り替わり

1. 機序  
 どのように切り替わりが達成されているのか？

2. 機能的意義  
 どうして同じメモリを使い回ししないのか？





- ### 運動学習メモリの切り替わり
- 1.機序  
どのように切り替わりが達成されているのか?
  - 2.機能的意義  
どうして同じメモリを使い回ししないのか?
  - 3.外部操作  
強制的に別々のメモリを形成・想起させることは可能か?



## 謝辞

Stephen Scott (Queen's Univ)  
平島健也 (CINet)  
磯井 淳 (UCL)  
J.J. Orban de Xivry (KU Leuven)  
Isaac Kurtzer (NY Col Osteo Med)  
門田 宏 (産大工科大)  
白高一郎 (東京大学)  
池上 剛 (QNet)  
春日翔子 (慶応義塾大学)  
藤井進也 (Toronto Univ)

本村岳希 (高知工科大)  
本多卓也  
林 拓志  
今川弘貴  
佐々木彰一  
根町繁也  
阿部晋田  
遠矢英子  
内藤 尚  
安念 暁



本講義で紹介した研究は、文部科学省科研費（若手S、基盤A、基盤C）、最先  
端次世代研究開発支援プログラム、日本－ベルギー二国間共同研究事業、カシ  
オ科学振興財団、日本－カナダ二国間研究派遣事業の補助を受けて行われた。