2）運動学習における大脳基底核の役割

運動制御における大脳基底核の役割は，大脳皮質で計画された運動プログラムに基づいて，**必要とされる運動**（desired movement）を促通し，不要な運動を抑制することである[21]．すなわち，運動の速度や力などの運動学的パラメータの設定には関与せず，学習された運動の順序を自動的に遂行すること[22]や（24頁コラム「系列反応時間課題」参照），運動プログラムの抽出ならびにそれらの切り換えを行っており[23]，外界の手がかりに応じた適切な運動を，経験を通じて選択していく**条件付運動学習**（conditional motor learning）に関与する[24]．

その解剖学的・神経生理学的特徴は，第1に複数の大脳皮質―大脳基底核回路が存在し，運動学習においてもそれらが独立して機能すること[25,26]，第2にそれらは，快／不快という情動信号をもたらすドーパミン入力，ならびにコリン作動性介在ニューロン[注6]による修飾作用を受けることである．

(1) 運動学習における大脳皮質―大脳基底核回路の役割

大脳基底核が運動学習に果たす機能の特徴の1つは，複数のループ回路による運動関連情報の並列的処理である．例えば，はじめての相手に電話をかける際には番号を視覚的に確かめながら押すが，何度も電話をかけているうちに，ワーキングメモリに保持された記憶のリハーサルによって，空間座標が運動順序の座標として記憶され，番号を見なくても押せるようになる．このように，学習の初期においては，前頭前野／頭頂葉連合野から尾状核を介して前頭前野に投射する前頭前野ループ（視覚ループ）が視覚情報を処理して運動を出力するが，その運動順序が運動座標でコードされ，リハーサルが繰り返されると，補足運動野から被殻を介して補足運動野へ投射する運動ループによる運動出力へ置換されると考えられている[31]．

代表的な大脳皮質―大脳基底核回路の運動学習における役割は，

- 感覚運動領野を介するループ回路：一定の行動様式の自動化と運動技能の潜在記憶学習
- 連合領野を介するループ回路：新しい指示や報酬に関する情報の記憶，課題解決，運動の選択
- 辺縁領野を介するループ回路：情動や恐怖に関する情報に基づいた動機付けや報酬刺激に対する運動パターンの学習

などである[32]．

(2) 運動学習におけるドーパミンの役割

線条体の投射ニューロンである中型有棘細胞におけるシナプス可塑性の発現が，海馬や小脳，大脳皮質における可塑性と明らかに異なる点は，その誘導にドーパミン受容体の活性化を必要とする点である．中脳ドーパミン細胞の神経活動は，予期しないときに報酬が与えられると増加し，報酬が与えられることが予測できる場合には持続的に活動し，予測された報酬が得られなかった場合には減少する[33]．これらはドーパミン細胞が，強化信号と

注6）線条体コリン作動性介在ニューロンは，主に予測していない刺激に対してその持続性活動を休止する形で応答し[27]，それはドーパミン依存性であること[28]，コリン作動性ニューロン自体のシナプス可塑性が関与する可能性があること[29]が示され，運動学習において中脳ドーパミン細胞と本質的に同様の機能を有することが示唆されている[30]．

して報酬をコードするだけでなく，報酬の予測誤差情報を伝達する機能をも担うことを示している．大脳基底核は，ある行動を行うことによってどのような成果が得られるかを予測(prediction)し，その成果と予測とが一致するようになるまで運動を変化させ，そして習得された運動を記憶・再現する運動学習，すなわち強化学習[注7]に基づく運動学習に関与する[34]．線条体ニューロン[注6]は，感覚手がかりの持つ報酬価値の大小によって放電頻度を増大・減少させ，望ましい選択肢への意思決定（decision-making）とその行動発現に従事している．

II．小脳

1）小脳の神経回路

小脳は，機能的に**脊髄小脳**（虫部と小脳半球中間部[注8]），**皮質小脳**（小脳半球外側部）および**前庭小脳**（片葉小節葉）に分けられる．これらはそれぞれ異なる部位からの情報を処理して，協調運動や姿勢調節に関与している．小脳の出力細胞である**プルキンエ細胞**には，視覚，聴覚，深部感覚などのさまざまな感覚入力があり，小脳では，それらの情報に基づいた無意識下での運動の円滑化・適正化，すなわち，「**潜在学習**」が行われる[35]．近年では，運動以外の高次認知活動への小脳の関与が明らかとなってきており[36]，運動学習における小脳の役割を考えるためには，大脳-小脳連関の機能解剖をよく理解する必要がある．それでは，運動学習に関連する大脳-小脳連関について整理しておこう．

(1) 脊髄小脳と皮質小脳

① 小脳への入力（図 2-10）

小脳前葉の広い領域を占める脊髄小脳へは，脊髄小脳路（苔状線維）を介して四肢・体幹からの意識にのぼらない深部感覚情報が入力されるとともに，虫部には視覚・聴覚などの情報が，小脳半球中間部には大脳皮質からの情報が入る．

一方，新小脳にほぼ相当する小脳半球外側部，すなわち皮質小脳には，橋小脳路（苔状線維）を介して一次運動野，運動前野，一次体性感覚野などの大脳皮質情報（皮質橋路）が入力される．これらは，脊髄および橋核，三叉神経核，前庭神経核，網様体などの「小脳前核」と呼ばれる脳幹諸核からの**苔状線維**（mossy fiber）による興奮性入力である．苔状線維から入力を受けた小脳の顆粒細胞の軸索は，上行してT型に二分し，**平行線維**（parallel fiber）となってプルキンエ細胞の扇状に広がる樹状突起に興奮性入力をもたらしている（図 2-11）．

以上の入力に加えて，下オリーブ核から下小脳脚を経て対側小脳皮質全域に投射する登上線維入力がある．

注7）強化学習とは，試行錯誤によってさまざまな試行を試しながら，より良好な結果を得るための出力を決定することであり，その学習過程で得られる報酬は正の強化信号（reinforcement signal），失敗したときの罰は負の強化信号となる．ドーパミン細胞はエラー訂正のための TD (temporal difference) 信号を提供する役割を担っている．

注8）小脳半球中間部からの下行性出力は，中位核・対側赤核を経由して，赤核脊髄路として交差して屈筋運動に関与する．小脳半球外側部からの下行性出力は，橋網様体脊髄路を経て四肢伸筋，体幹筋の運動に関与し，筋緊張や反射を調節する．

263-00969

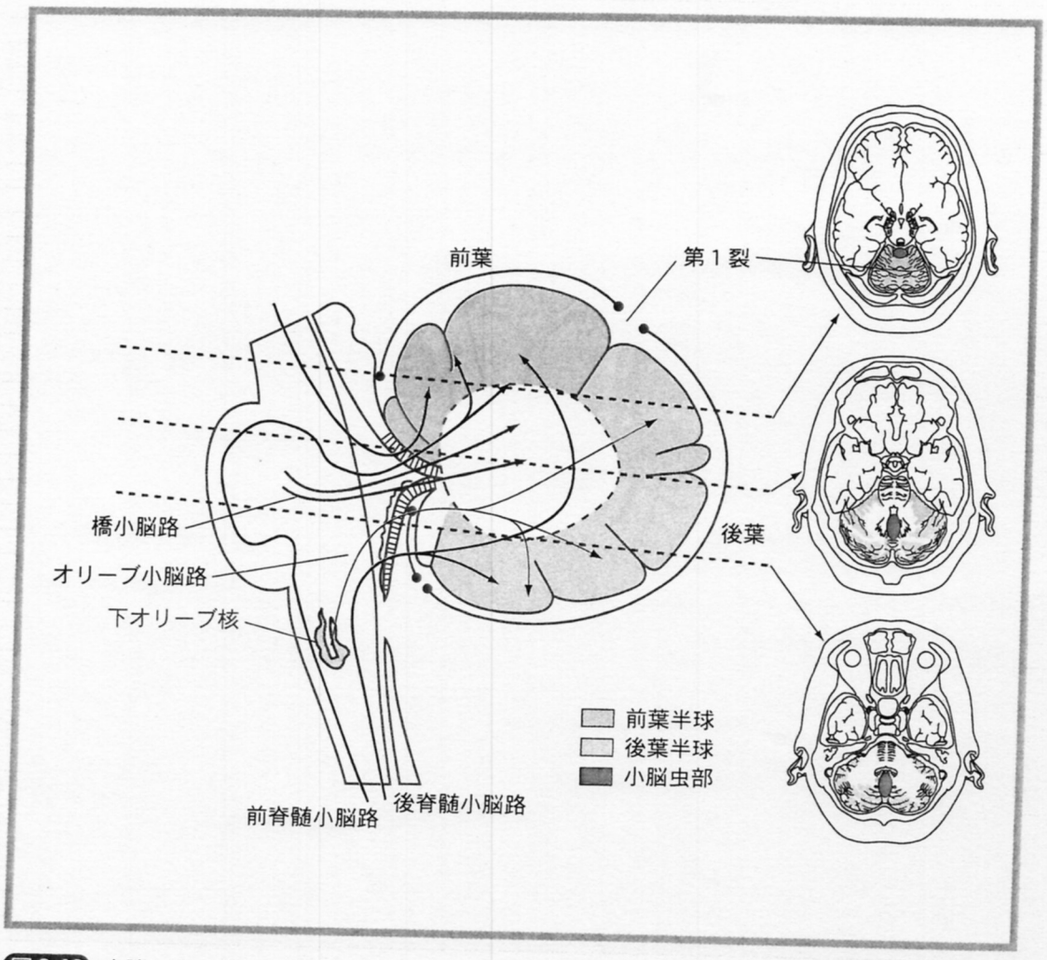


図2-10 小脳への感覚情報の入力経路

脊髄からの深部感覚情報は，大部分が下小脳脚内を通り，ごく一部が上小脳脚内を通って，前葉の広い領域に投射し，姿勢保持・調節に関与する．橋核からの求心性入力（苔状線維）は中小脳脚を経由して小脳半球皮質に投射する．小脳半球の病変では，協調運動障害(asynergia)，測定障害(dysmetria)，運動の分割(decomposition)が起こる．オリーブ小脳路を介する登上線維入力は，虫部・半球部に帯状に投射する．
手続き学習において，新しい課題における運動のタイミングなどの習得段階では，両側小脳後葉半球部－連合皮質（右側頭葉内側部など）－大脳基底核前部のループ（視覚座標系）が機能し，一方，課題に習熟した段階での運動実行系として，右小脳前葉外側部－運動関連皮質(左補足運動野など)－大脳基底核中央および後部のループ(運動座標系）が関与する．

② 小脳からの出力

虫部・小脳半球中間部プルキンエ細胞からの上行性出力は，小脳核である室頂核・中位核を経由して視床外側腹側核に送られて一次運動野に投射する．小脳半球外側部からの上行性出力は，歯状核・視床外側腹側核を経由して一次運動野，運動前野腹側を中心とした運動関連領野，前頭前野に投射している(図2-12 b 参照)．また，小脳赤核路を経て赤核オリーブ路を下行した線維は，下オリーブ核を介して小脳皮質外側部にフィードバックする．

⑵ オリーブ小脳路

運動前野腹側および前頭前野などの大脳皮質，脊髄，および小脳核からの運動に関連する感覚情報は，下オリーブ核を経由して小脳皮質全域の帯状に伸びた領域に投射される．

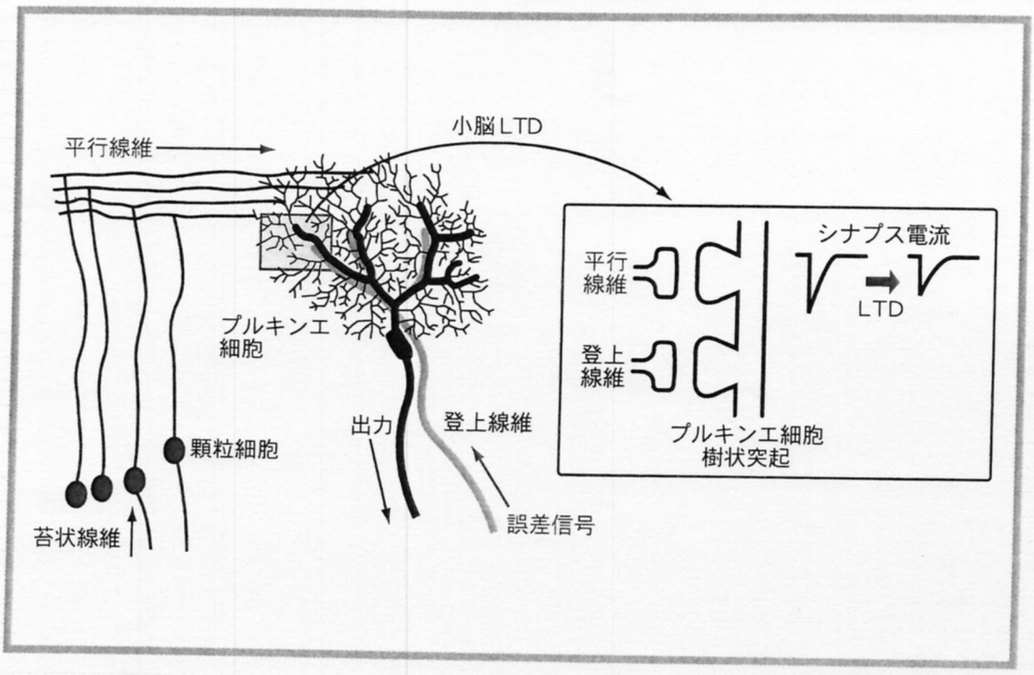


図2-11 記憶・学習に関わるシナプス可塑性のモデル

プルキンエ細胞は，下オリーブ核から興奮性の登上線維（climbing fiber）入力を受け，顆粒細胞は，脊髄および橋核，三叉神経核，前庭神経核，網様体などの「小脳前核」と呼ばれる脳幹諸核から，興奮性の苔状線維（mossy fiber）入力を受ける．
顆粒細胞の軸索は上行してT型に二分し，平行線維（parallel fiber）となってプルキンエ細胞の扇状に広がる樹状突起に興奮性入力をもたらす（simple spike：単純スパイク）．
登上線維の発火は，運動時においても1 Hz程度であるが，出力細胞であるプルキンエ細胞に極めて大きな興奮性シナプス後電位をもたらし（complex spike：複雑スパイク），平行線維―プルキンエ細胞シナプスの伝達効率に長期的に影響する．登上線維が伝える誤差には，運動の結果として起こる「結果誤差」，系の内部で生じる「予測誤差」や「初期誤差」がある[35]．

この下オリーブ核からの**登上線維**（climbing fiber）によるプルキンエ細胞への入力は強力であり，さまざまな感覚信号をプルキンエ細胞に供給している**平行線維**（parallel fiber）のシナプス伝達効率を持続的に抑制する**長期抑圧**（LTD；long-term depression）（図2-11）．この登上線維入力は，小脳に誤差信号を伝達する役割を担っており，運動学習において重要な役割を果たすと考えられている．

2）運動学習における小脳の役割

実行された運動の軌道や結果に関する情報は，**感覚情報**（sensory consequences；SC）として中枢神経系にフィードバックされる．このフィードバックされた感覚情報“SC”が，意図していた感覚情報“predicted-SC”と異なる場合，目的とするパフォーマンスを実現するためには，その誤差を修正して運動指令を書き換えるシステムが必要となる．小脳は，課題を繰り返す間にSCにおける誤差を検出して，**長期抑圧**（LTD）に基づいてその誤差を減少させる「**誤差学習**」を行う場と位置付けられている[35]．

ある運動指令に基づいて行われた運動が，計画していた運動の通りにできたか否かの照合は，

263-00969

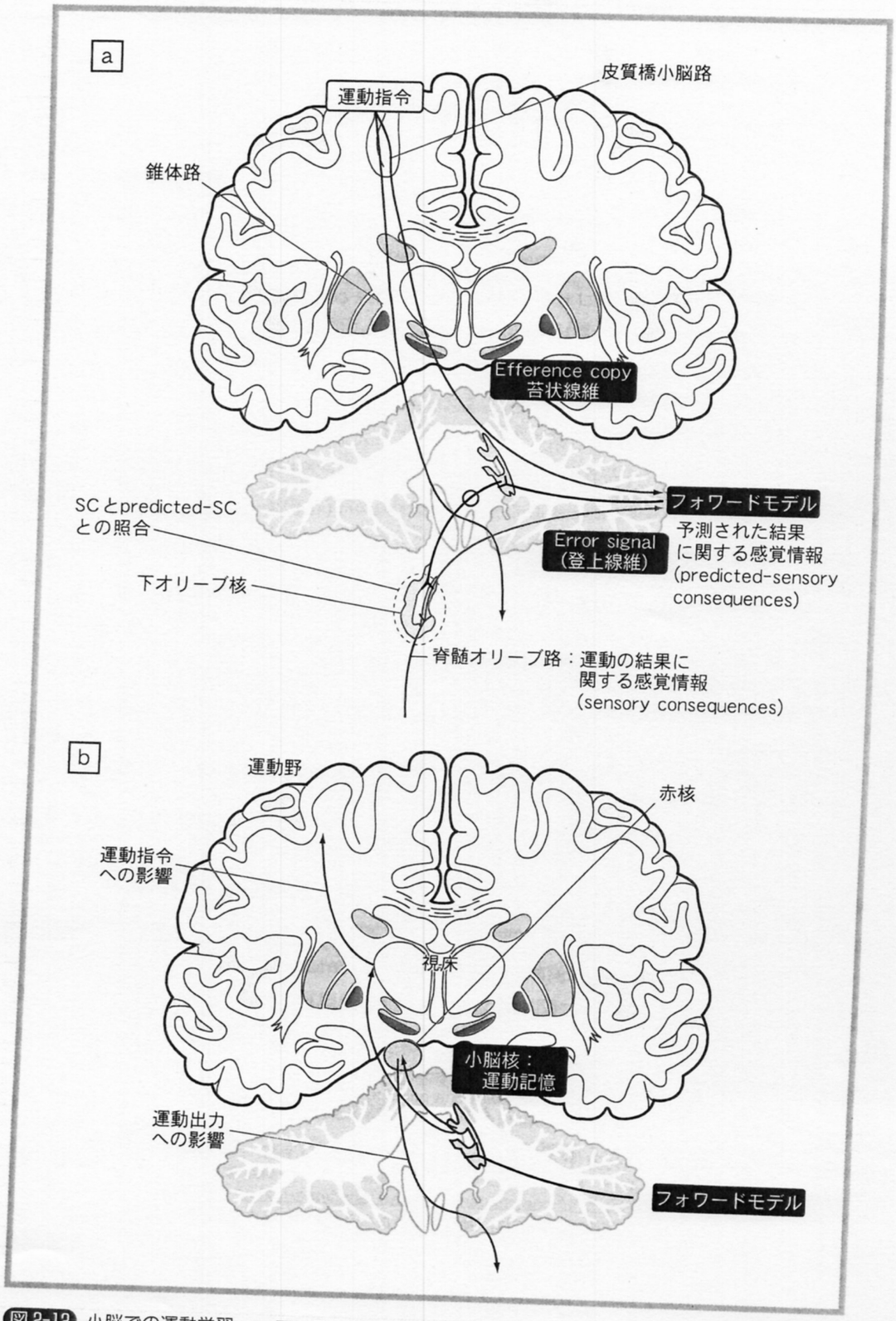


図 2-12 小脳での運動学習――フォワードモデル

・運動指令を表す信号がコピーされ(efference copy)，それに基づく運動のモデル[注9)]が記憶されていること（**フォワードモデル**：forward model）
・その結果として得られるはずの感覚情報が予測されていること（predicted-SC）
・実際に行われた運動の結果としてもたらされた感覚情報が予測していたものと比較されて，“エラー”シグナルが新たなフォワードモデルを形成すること

に基づいている（図 2-12）[37]．

(1) 運動学習における大脳-小脳連関

運動皮質からの運動指令は，錐体路を介して出力されると同時に，皮質橋小脳路を介して運動指令の信号が小脳半球にコピーされる（efference copy）．このコピーされた運動指令が実現されることで，得られるはずの**感覚情報**（predicted-SC）は，小脳核から下オリーブ核に送られる．一方，実際に出力された運動に由来する感覚情報は，脊髄オリーブ小脳路によって下オリーブ核に伝達され，ここで意図した運動と実際の運動に関する感覚情報が照合される（図 2-12 a）．その結果として検出された誤差信号が登上線維を介して小脳にフィードバックされると，苔状線維を経由した平行線維-プルキンエ細胞シナプスの伝達効率が長期抑圧を受けて，コピーされた運動のモデルが書き換えられる．それは，視床を介して運動皮質にフィードバックされるとともに，赤核脊髄路を介して運動出力に関与する（図 2-12 b）．

(2) 運動学習における小脳の役割

意識にのぼらない深部感覚情報を受ける小脳前葉は運動実行系として機能し，自転車に乗る，スキーを滑る，という無意識的な運動スキルの習得（手続き学習）に関与する．課題に慣れた段階において運動スキルを自動化する役割を担っており，両手協調動作課題においても右小脳前葉（外側）は運動記憶の場として考えられている[39]．

両側小脳半球外側部は，随意的・意図的に行う単一の運動要素を円滑なる複合運動として組み立てる役割を担い，その障害によって運動の分割（decomposition）が起こる．予期しない感覚刺激に対して実行中の運動を制御する役割を果たし（左半球優位），新しい課題の中で運動のタイミングなどを獲得する段階に機能する[40]．

(3) 高次脳機能；小脳の関与

近年，前頭前野（9，46）から歯状核への投射が明らかにされ[41]，行動のゴールのような**抽象的事象**（abstract term）に関する活動関連情報の処理に関与すると考えられている．また，視床を中継した小脳出力は前頭前野に達しており，遂行機能やワーキングメモリとの関連が指摘されている．小脳障害に起因する認知・情動障害や自閉症，学習障害児にみられる小脳病変など，運動実行系にのみならず，高次脳機能を司る神経回路として，小脳における学習障害をとらえる必要性がでてきている．

注 9）順モデルと逆モデル；小脳の神経回路には，意図していたパフォーマンスと実際の運動出力との誤差を検出するために，他のシステムの動特性をコピーしたモデルが形成されると考えられている．この運動のモデルを内部モデル（図 2-12 におけるフォワードモデル）と称し，順モデルと逆モデルが想定されている．すなわち，「ある運動指令がどのような動作を引き起こすか」（順モデル）あるいは「ある動作を行いたいときに，どのような運動指令を出せばよいか」（逆モデル）[37]を誤差信号に基づいて学習することで，感覚フィードバックに頼らずとも早くて正確な運動制御が可能となる．Kawato ら[38]は，「フィードバック誤差学習スキーマ」という学習モデルにおいて，小脳を感覚情報に基づいた運動学習の場として位置付けている．

263-00969

文献

1) Nudo, RJ. et al. : Role of adaptive plasticity in recovery of function after damage to motor cortex. *Muscle Nerve* 24 : 1000-1019, 2001.
2) 丹治 順：脳と運動――アクションを実行させる脳．共立出版，1999.
3) Ivanco, TL. et al. : Morphology of layer 3 pyramidal neuron is altered following induction of LTP in sensorimotor cortex of the freely moving rat. *Synapse* 37 : 16-22, 2000.
4) Iacoboni, M. et al. : The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Rev Neurosci* 7 : 942-951, 2006.
5) Ashe, J. et al. : Cortical control of motor sequences. *Curr Opin Neurobio* 16 : 213-221, 2006.
6) Ridderinkhof, KR. et al. : The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science* 306 : 443-447, 2004.
7) 設楽宗孝：帯状皮質における動機づけ・報酬期待の情報処理機構．*Clin Neurosci* 23 : 1236-1240, 2005.
8) Hollerman, JR. et al. : Involvement of basal ganglia and orbitofrontal cortex in goal-directed behavior. *Prog Brain Res* 126 : 193-215, 2000.
9) Damasio, AR. et al. : Descartes's error and the future of human life. *Sci Am* 271 : 144, 1994.
10) Grafton, ST. et al. : Neural substrates of visuomotor learning based on improved feedback control and prediction. *NeuroImage* epub : 2007.
11) 川村光毅：脳と精神――生命の響き．慶應義塾大学出版会，2006.
12) Gehring, WJ. et al. : Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nat Neurosci* 3 : 516-520, 2000.
13) Rüsseler, J. et al. : Human error monitoring during implicit and explicit learning of a sensorimotor sequence. *Neurosci Res* 47 : 233-240, 2003.
14) Atkinson, RC, et al. : The control of short-term memory. *Sci Am* 225 : 82-90, 1971.
15) 三村 將・他： ワーキングメモリをめぐる最近の動向．リハ医学 40 : 314-322, 2003.
16) Barbas H : Connections underlying the synthesis of cognition, memory, and emotion in primate prefrontal cortices. *Brain Res Bulletin* 52 : 319-330, 2000.
17) Krakauer, JW. et al. : Consolidation of motor memory. *Trend Neurosci* 29 : 58-64, 2006.
18) Groenewegen, HJ. et al. : The basal ganglia and motor control. *Neural Plast* 10 : 107-120, 2003.
19) Kelley, AE. et al. : Glutamate-mediated plasticity in corticostriatal networks : role in adaptive motor learning. *Ann N Y Acad Sci* 1003 : 159-168, 2003.
20) Rothwell, J. : Control of human voluntary movement. 2 nd ed, Chapman Hall, London, 1994.
21) Mink, JW. : The basal ganglia; focused selection and inhibition of competing motor programs. *Prog Neurobiol* 50 : 381-425, 1996.
22) Marsden, FA. et al. : The functions of the basal ganglia and the paradox of stereotaxic surgery in Parkinson's disease. *Brain* 117 : 877-897, 1994.
23) Hikosaka, O. et al. : Central mechanisms of motor skill learning. *Curr Opin Neurobiol* 12 : 217-22, 2002.
24) Wise, SP. et al. : Arbitrary associations between antecedents and actions. *Trends Neurosci* 23 : 271-276, 2000.
25) Alexander, GE. et al. : Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex. *Ann Rev Neurosci* 9 : 357-381, 1986.
26) Middleton, FA. et al. : Basal ganglia output and cognition; evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies. *Brain Cogn* 42 : 183-200, 2000.
27) Ravel, S. et al. : Reward unpredictability inside and outside of a task context as a determinant of the responses of tonically active neurons in the monkey striatum. *J Neurosci* 21 : 5730-5739, 2001.
28) Aosaki, T. et al. : Effects of the nigrostriatal dopamine system on acquired neural responses in the striatum of behaving monkey. *Science* 265 : 412-415, 1994.
29) Suzuki, T. et al. : Dopamine-dependent synaptic plasticity in the striatal cholinergic interneurons. *J Neurosci* 21 : 6492-6501, 2001.
30) Zhou, FM. et al. : Cholinergic interneuron characteristics and nicotinic properties in the striatum. *J Neurobiol* 53 : 590-605, 2002.
31) 中原裕之・他：順序動作の学習の脳内ネットワーク．脳の科学 22 : 1075-1085, 2000.
32) Brooks, DJ. : Imaging basal ganglia function. *J Anat* 196 : 543-554, 2000.
33) Schultz, W. et al. : A neural substrate of prediction and reward. *Science* 275 : 1593-1599, 1997.
34) Schultz, W. et al. : Changes in behavior-related neuronal activity in the striatum during learning. *Trend Neurosci* 6 : 321-328, 2003.
35) 伊藤正男：小脳研究の展望――過去・現在・未来．*Brain Med* 19 : 7-12, 2007.
36) 谷脇考恭・他：小脳と高次脳機能――小脳の機能．分子精神医学 7 : 37-44, 2007.
37) Ramnani, N. : The primate cortico-cerebellar system : anatomy and function. *Nature Rev Neurosci* 7 : 511-522, 2006.
38) Kawato, M. et al. : The cerebellum and VOR/OKR learning models. *Trends Neurosci* 15 : 445-453, 1992.
39) Puttemans, V. et al. : Changes in brain activation during the acquision of a multifrequency bimanual coordination task: from the cognitive stage to advanced levels of automaticity. *J Neurosci* 25 : 4270-4278, 2005.
40) Matsumura, M. et al. : Role of the cerebellum in implicit motor skill learning : a PET study. *Brain Res Bull* 63 : 471-483, 2004.
41) Middleton, FA. et al. : Cerebellar projections to the prefrontal cortex of the primate. *J Neurosci* : 700-12, 2001.

263-00969

3. 運動療法で展開される運動学習の戦略

長谷公隆 慶應義塾大学医学部リハビリテーション医学教室

運動療法がリハビリテーション医療にもたらす最大の成果は，心身の機能障害によって実行できなくなった標的動作を再獲得させることである．廃用などによる運動出力系の可逆的な障害に対しては，筋力増強などを施して機能を回復させ，病前のパフォーマンスに戻すことが目標となる．しかし，内部環境の変化が一定期間以上継続し，動作を行ううえで従来の方法とは異なる運動制御や補装具を使用せざるを得ない場合には，新たな運動スキルを習得させるための**運動学習**が必要となる（図3-1）．また，代償手段を用いて動作の目的が果たせている場合においても，安全性，正確性，スピードなどに改善するべき点があれば，学習課題を設定して，運動スキルの最適化を図る．これらの治療は，標的動作の分析に基づく**課題設定**と学習理論に基づく**フィードバック**の提供によって行われる．

リハビリテーション医療における運動学習が，スポーツや音楽などと異なる最大のポイントは，障害に起因する能力の格差が著しく，運動機能や学習能力の分析に基づいた個別的な**ゴール設定**と，それを達成させるための**課題設定**が要求されることである．運動療法の第一段階は，標的動作の分析に基づいた**運動課題**の設定であり，学習能力に適合した課題設定ができれば“学習に基づく運動療法”の展開は保障される．運動療法で展開される**運動学習**は，① 学習者が運動スキルを習得する過程，② セラピストによって教示されるフィードバック，③ 運動学習理論に基づいた課題設定，の3要素によって支えられている．これらは密接に関連しており，すなわち，学習過程に対応した課題設定なくして学習効果は得られず，適切な課題設定がなければフィードバックの効果的な呈示は不可能である．本章では，**運動学習の過程**と**フィードバック**の関係を明らかにしながら，これらの関連についてみていこう．

運動学習の過程とフィードバック

運動スキルを学習する過程は，① 学習するべき課題を認知する段階（**認知段階**：

263-00969

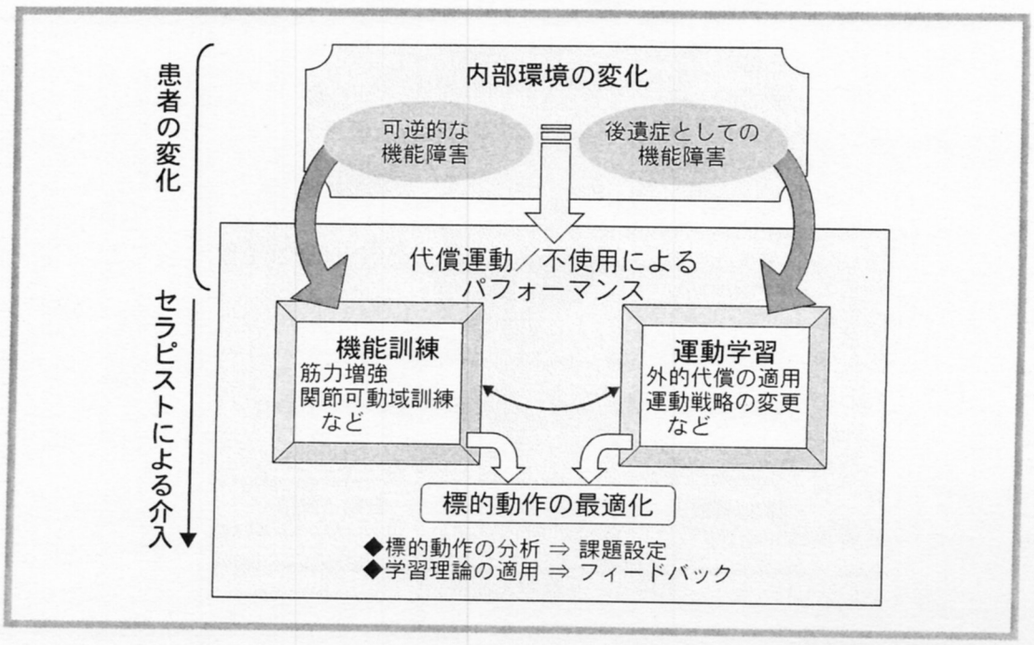


図 3-1 運動療法の治療戦術

障害による内部環境の変化によって，少なくともある一定期間以上，異なる運動戦略を用いて標的動作を達成しなくてはならない場合（たとえば骨折後の松葉杖の使用など）に，セラピストは課題を設定して，運動学習に基づく治療を患者に施さなくてはならない．機能訓練によって機能回復が得られれば，運動学習の効果は高められる．一方，標的動作を習得するための運動学習は，代償手段の適用のバランスによって，麻痺肢の機能回復を高める場合もあれば，障害された肢の不使用を誘導する場合もある．

cognitive stage)，② 運動スキルを磨く段階（**連合段階**：associative stage)，③ 意識することなく運動スキルを再現する段階（**自動化段階**：autonomous stage）を経る（図 3-2)．この学習の道筋は，新しい運動スキルを習得する際の動機付けから，運動記憶の定着までの長期的な運動学習過程に相当するだけでなく，運動スキルの一部をフィードバックに基づいて修正するような短期的学習においても必ずたどる過程である．すなわち，何らかの課題に対するフィードバックがあれば，学習者はそれを認知し，エラーの修正を試みて，その課題をクリアするという学習の周期を繰り返す．

フィードバックは学習段階を前進させる役割を担うべきであり，課題に相対する学習者の態度や運動スキルの優劣に応じて，その学習段階に応じたフィードバックの適用が不可欠である．例えば認知段階にある学習者は注意の大部分を運動スキルの実行に配分しているため，言語教示によるフィードバックは，的を絞って簡潔に呈示されなくてはならない．また，運動スキルを統合していく段階において，フィードバックが頻繁に与えられると学習者がフィードバックに依存することとなり，自動化の段階に進めなくなってしまうこともある．それでは，学習を誘導する手段である**フィードバック**にスポットを当ててみよう．

Ⅰ．フィードバック（図 3-3）

ある課題をマスターするために後天的に習得される運動スキルは，運動指令に基づいた筋活動―出力―運動（軌跡）によって構成され，その運動スキルがさまざまな環境下で駆

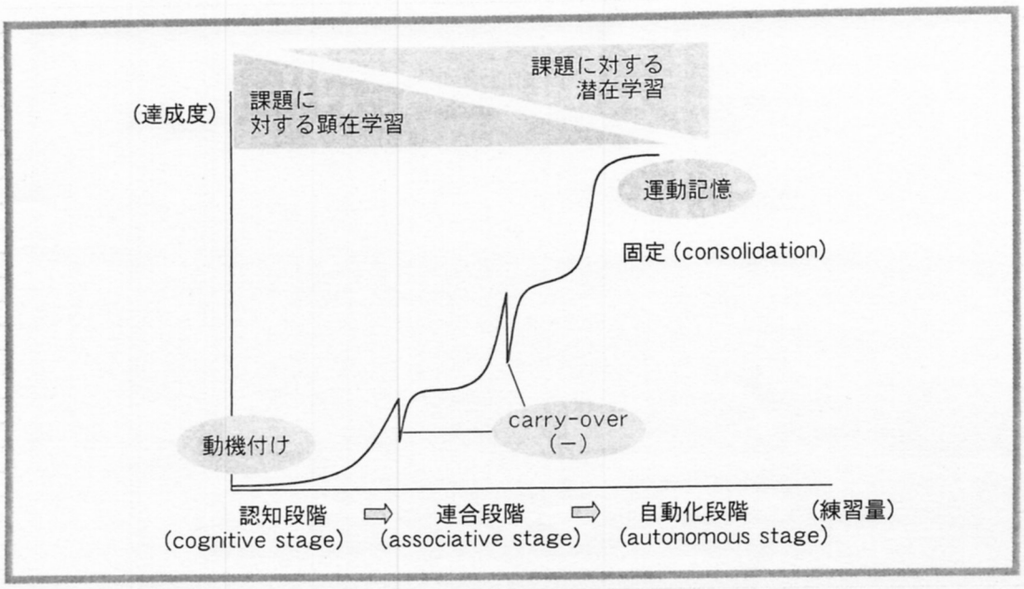


図 3-2 運動スキルの習得過程―学習曲線

運動学習における基本的動機付けは，標的動作を習得できることへの期待による．学習者は，顕在化された運動課題に対して，さまざまなフィードバックを処理しながらスキルの統合を図ると同時に，その課題の達成に必要なさまざまなスキルの潜在学習を行う．顕在学習と潜在学習は，学習が進むうちにオーバーラップしてくる場合がある（図 2-5 参照）．学習を積み重ねてスキルアップを図る過程では，前日の学習効果が持ち越され（carry-over），それを基に次のステップへ進むという手続きを踏む．しかし，課題の難度が高ければ，キャリーオーバーが得られにくくなり，再学習を要する場面があり得る．目的とする運動スキルを習得するうえで，キャリーオーバーが得られにくい段階こそが，学習者にとって極めて重要な学習場面である．

使された結果を，われわれは**パフォーマンス**として見ることができる．**フィードバック**とは，運動スキルを習得するために必要な感覚情報そのものであり，学習者がパフォーマンスを構築するうえでの拠り所である．フィードバックは，課題実行時の運動スキルに関する情報が，学習者自身の視覚や深部感覚などを通じて入力される**内在的フィードバック**（intrinsic feedback）と，課題におけるパフォーマンスやその結果が外部から教示される**外在的フィードバック**（extrinsic feedback）[注1]の 2 つに分類される．

■内在的フィードバック

内在的フィードバックとは，学習者が実施した運動そのものから学習者自身が得る感覚情報である．学習者は，視覚や固有感覚を介した内在的フィードバックを潜在的あるいは顕在的に処理して，次に行うパフォーマンスに応用するという手続きを踏みながら，**運動スキルを構築する（試行錯誤による学習**：trial & error learning）．ここで，内在的フィードバックに関して注意しておきたい事項を列挙しよう．

(1) 運動学習に利用される感覚情報のほとんどが，内在的フィードバックであることを再確認しよう．内在的フィードバックが脳のなかで処理されなくては，外在的フィードバッ

注 1）外在的フィードバックは人工的に付加される情報であり，付加的フィードバック（augmented feedback）と呼ばれることも多い．

263-00969

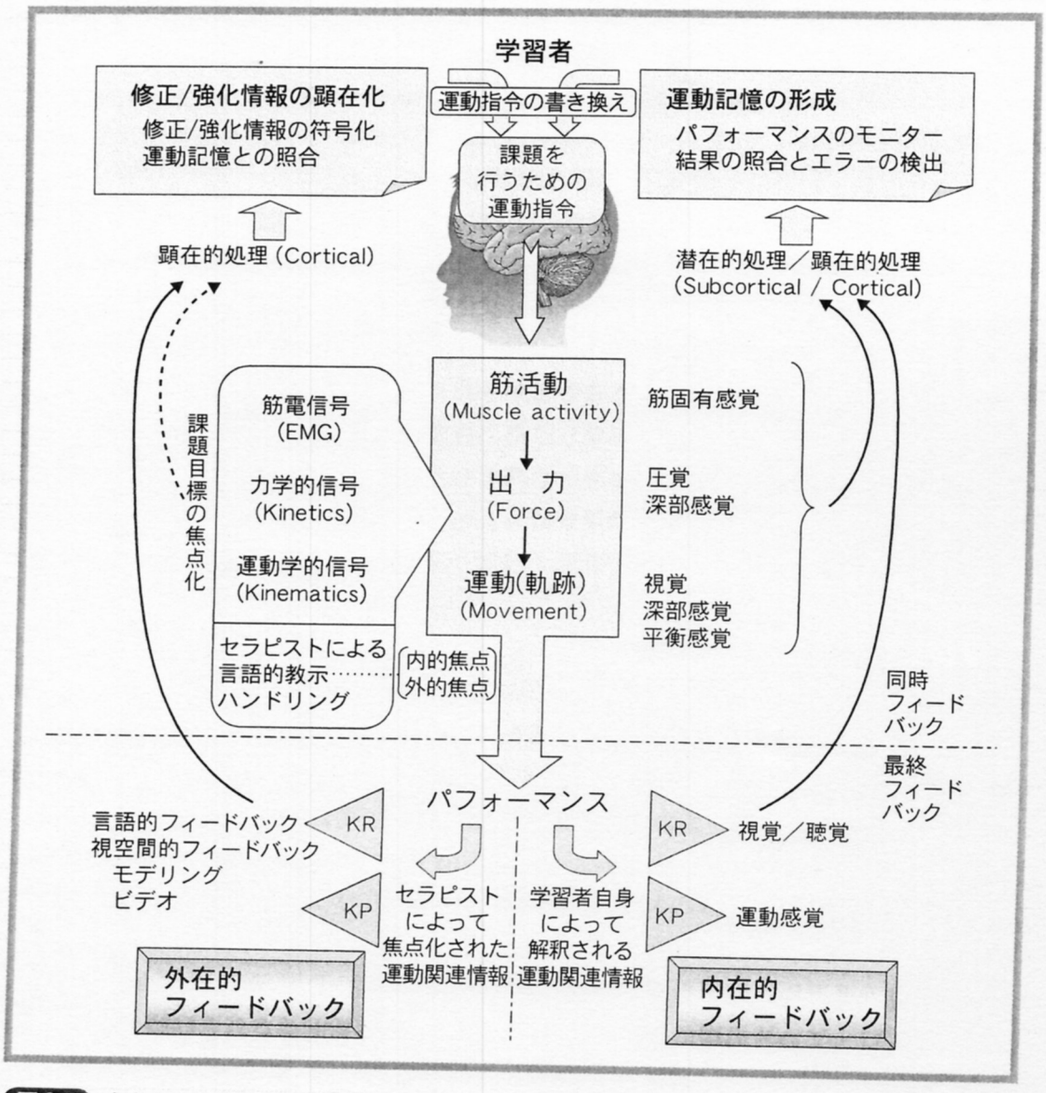


図 3-3 内在的フィードバックと外在的フィードバック

内在的フィードバックの内容はセラピストが設定する課題に依存する．学習者が内在的フィードバックのなかにエラーを検出した場合に，運動指令は学習者によって書き換えられる．外在的フィードバックの同時フィードバックは，課題目標を顕在化するとともに，その指標に基づく運動から得られた内在的フィードバックを介して運動記憶の形成を促す．セラピストから与えられる最終フィードバックは，修正あるいは強化するべき運動スキルを顕在化し，内在的フィードバックによって形成された運動記憶をもとに運動指令の書き換えを促す効果を有する（KR；knowledge of results，KP；knowledge of performance）．

クが与えられても，それが持つ意味を解釈することはできない．

(2) 内在的フィードバックには，運動を行っている最中に得られる感覚情報(**同時フィードバック**；concurrent feedback）に加えて，パフォーマンスを終えた後で抽出された運動の記憶，すなわち，運動の結果（書字課題において1分で50文字書けた，など）およびパフォーマンスの状況（書字課題において曲線を書くのに手先を滑らかに動かせた，など）に関する情報（**最終フィードバック**；terminal feedback）が含まれる．

(3) 同時フィードバックによる感覚情報には運動学的に3段階（筋活動―出力―運動）あり

(図 3-3)，運動出力に関わる筋活動や力学的情報はそのほとんどが潜在的に処理される．

(4) 運動の軌跡やパフォーマンスの結果に関する情報のうち，学習者自身が抽出した特定の感覚情報は意識的に，すなわち顕在的に処理される場合がある．

(5) 学習者自身が解釈したパフォーマンスの結果に関する情報，すなわち最終フィードバックは，セラピストが評価した KR・KP と必ずしも一致しない．

内在的フィードバックは，学習者が課題を実施した際の自らの運動スキルをどのように感じたかによって，報酬にもなり，エラーにもなるという性質を有する．その微妙な管理は，セラピストが設定する課題とフィードバックに依存している．運動制御系に問題を有する患者に対する運動療法においては，それぞれの患者で能力に格差が存在することから，個々のレベルに対応した課題設定を行うことがきわめて重要である．運動課題を行うことで得られる内在的フィードバックを処理し，その課題を逐行するために学習者自身が適用しようとしている運動戦略が，セラピストが誘導したい運動戦略と一致していれば，運動スキルの自動化を含めた良好な学習効果が得られるであろう．しかし，セラピストが期待する変化が全く得られなければ，学習課題の難度や課題そのものの変更を余儀なくされることになる．

■外在的フィードバック

学習者に外部から人為的に与えられる**外在的フィードバック**には，学習対象を焦点化することで，課題から得られる内在的フィードバックや運動指令そのものを変える力がある．外在的フィードバックは，運動の試行中に与えるか，終了後に与えるかによって，運動学習に与える影響が異なることに注目しよう．

1）同時フィードバック

(1) 運動課題として呈示される課題目標

運動を行っている最中に人為的に与えられる感覚情報，すなわち**同時フィードバック**の媒体は，内在的フィードバックにおける筋活動―出力―運動の 3 段階に対応して，筋電信号，力学的信号，運動学的信号に分類できる．これらは運動課題における目標として，視覚的あるいは聴覚的に提示されることが多い．前述のとおり，筋活動や力学的情報は潜在的に処理されることが多いため，筋電信号や荷重量を視覚情報として呈示し，課題の目標を焦点化してそれを意識的に制御させることで，新たな運動スキルに基づくパフォーマンスを学習者に体験させることができる．一方で，これらの目標信号に依存することなく，体験した運動スキルを再現できるようにするためには，そのパフォーマンスから得られるほかの感覚情報を意識付けて学習させることが重要である．すなわち，同時フィードバックによって学習目標を提示して行う運動学習では，その結果として実現できた運動スキルに基づく内在的フィードバックが学習を支えているのである．ゆえに，同時フィードバックによって与えられるこれらの外在的フィードバックは，学習目標を明確にするための 1 つの戦術と捉えるべきであろう．

(2) セラピストから呈示される課題目標

同時フィードバックとして与えられる外在的フィードバックには，次に述べる最終

263-00969

フィードバックと同様に，セラピストの評価に基づいた**言語的フィードバック**(verbal feedback)が含まれる．すなわち，運動を行っている最中に，「もっと右足に体重をかけて」，「もう少し右の平行棒に体を寄せて」などの指示によって，運動の目標を焦点化するためのフィードバックである．前者の教示のように，運動における注意を学習者自身の身体の一部に置くことを**内的焦点**（internal focus)，後者のように，何らかの目標に置くことを**外的焦点**(external focus)という．自動化した連続的な運動などでは，注意の焦点を特定の身体部位に向かせると(内的焦点)，それ以外の筋群の協調が損なわれて，運動全体の流暢性を妨げてしまう場合がある．したがって，荷重を促すために目的物に身体全体を近付けるといった外的焦点の利用によって，患者自身が行う運動を妨げないようなフィードバックの提示が推奨されている．

セラピストによるハンドリングも，課題逐行中に外部から人為的に与えられる入力である．これも他の同時フィードバックと同様に，ハンドリングによって誘導された運動出力に関する内在的フィードバックを介した潜在学習が，運動記憶の形成に重要な役割を果たしている．

2）最終フィードバック

(1)「結果の知識」と「パフォーマンスの知識」

運動の試行後に与えられる最終フィードバックは，学習者が課題を実行したことによって得た感覚情報に関する記憶，すなわち運動記憶を顕在化する役割を担う．そのフィードバックの内容によって，課題を行った結果がどのようなものであったかを伝える「**結果の知識**」(knowledge of results；KR）と，実行されたパフォーマンスにどのような特徴があったかを伝える「**パフォーマンスの知識**」(knowledge of performance；KP)に分けられる．これらは，セラピストが修正あるいは強化したい運動スキルを焦点化して学習者の記憶に顕在化し，学習者の運動指令を修正あるいは強化するために用いられる運動学習の重要なツールである．一方，ベッド上で起き上がることができたか否かの結果や書字課題における文字のきれいさ，一定時間内に書くことができた文字数など，学習者自身がKRやKPを知ることができる課題もある．

(2) フィードバックの効果を高めるための手続き

最終フィードバックによるKRやKPを運動学習に用いるための必要条件は，学習者が自身のパフォーマンスに関する運動記憶を保持し，フィードバックされた情報に基づいて必要な記憶を検索して，それを修正する能力が保たれていることである．したがって，KR･KPの効果を高めるためにセラピストは，① フィードバックを与える前に，標的となっている運動スキルに関する運動記憶の符号化処理を促すこと，② 運動指令の適正なる書き換えを促進するフィードバックを呈示すること，③ 運動指令を書き換えるための情報処理・リハーサルを誘導することが必要になる（図3-4)．

① **運動記憶の符号化**：フィードバックの教示前に運動記憶を符号化する手続きには，修正したい運動スキルに関する内在的フィードバックを焦点化したうえで課題を反復させること(**リハーサル**)，課題終了後に内在的フィードバックから得た情報を処理する時間を数秒間設けること（KR-delay interval：**KP遅延間隔**)，などがある．

〈運動記憶の符号化〉

修正を要する運動スキルに関連する感覚情報の呈示

課題試行前
学習課題の焦点化
（注意を要する運動の言語教示など）
課題試行
課題の反復（リハーサル）
同時フィードバック（鏡の利用など）
課題試行後
ビデオフィードバック
（視覚的符号化）

⇒ 感覚情報の呈示後に課題から得た内在的フィードバックを処理するために必要な時間を設定

（KR遅延間隔 (KR-delay interval)）

〈フィードバックの効果的な呈示〉

⇒ 修正情報／強化情報
言語教示
視覚モデリング

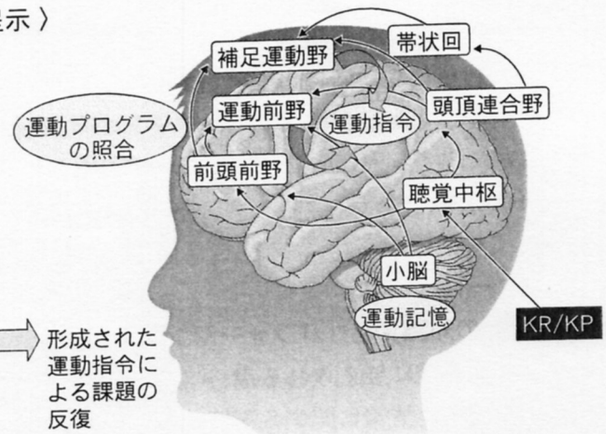
（頻度の調整
ガイダンス仮説）

〈運動指令の形成〉

⇒ 符号化された運動記憶とKR・KPの内容を照合して運動指令を形成するために必要な時間を設定

（KR呈示後間隔 (Post-KR interval)）

⇒ 形成された運動指令による課題の反復



※報酬信号による基底核系回路の関与は省略されている.

図3-4 KR・KPによる運動指令の書き換えに必要な手続き

セラピストから与えられるKR・KPは，課題目標を達成するために修正あるいは強化するべき運動指令を顕在化する．学習者が運動指令を書き換えるためには，内在的フィードバックによって運動記憶が符号化されていること，修正／強化情報が効果的に呈示されること，KR・KPによって形成された運動指令に基づいて課題を試行させることが必要になる．

KPを与える前のパフォーマンスを鏡やビデオを用いて呈示し，「麻痺側の腕を伸ばそうとするときの肩の動きを見て下さい」というように焦点化して，視覚的に運動記憶を符号化しておくことも有効である．

② フィードバックの効果的な呈示：KRやKPを運動学習に用いる必要があるのは，内在的フィードバックのみでは課題の目標を達成できない場合である．例えば，杖や車いすなどの新しい道具の使用や，それまでの日常生活とは異なる運動制御や手順を要する課題については，手引きや誘導によってそれを実際に行わせてみたうえで，修正情報もしくは強化情報を言語的・視覚的に教示する．運動のタイミングや四肢体幹の協調パターンなど，言語教示では伝えにくい運動スキルについては，その模範を視覚的にモデリングする方法が効果的である．前述のごとく，フィードバック前における学習者のパフォーマンスをビデオによって呈示した後で，「麻痺側の腕を伸ばすときの学習目標となる肩の動き」など，モデリングされた運動スキルを呈示して，両者の違いを学習者自身に弁別させることで，問題を焦点化することができる．

263-00969

一方で，パフォーマンスを誘導するためのKRやKPが頻繁に与えられると，フィードバックに依存してしまい，運動スキル習得の妨げとなり得るので，とくに自動化の段階では注意を要する．KRやKPは，パフォーマンスを正しい方向へと導くガイドの役割を果たす（**ガイダンス仮説**：guidance hypothesis）ものであり，セラピストによって顕在化された情報をもとに，運動指令を書き換えるのは学習者自身であることを忘れてはならない．自らのパフォーマンスを監視し，エラーを認知できる患者に対しては，修正するべきエラー情報を患者自身に推定させるように目標を呈示することで，その推定に必要な内在的フィードバックが検索され，運動記憶の符号化が誘導されて，運動指令の書き換えが促進されるであろう．

③ **運動指令の形成**：言語的・視覚的に教示されたKRやKPの内容は直前の運動スキルに関する運動記憶と照合され，連合運動領野において運動指令の修正や強化が行われる．したがって，運動記憶の符号化のための時間を設けたのと同様に，教示された内容に対して学習者がイメージするいくつかの運動戦略のなかから，目標の実現に最適な運動指令を形成するために必要な時間（post-KR interval：**KR呈示後間隔**）をとってから，課題の試行・反復（**リハーサル**）へ移ることが推奨される．

II．運動スキルの習得過程

パフォーマンスの最適化を導く運動学習は，学習するべき運動スキルが抽出され，適切に設定された課題を反復し，その運動スキルが自動化することによって完結する．運動学習において，認知・連合・自動化の各段階を明確に区分することは難しいが，学習効果を促進するためには，それぞれの段階で役割を果たしている大脳皮質―皮質下回路の機能評価に基づいて，その段階に適合した学習目標を設定し，フィードバックの与え方を工夫することが重要である．それでは，「2．運動学習を支える神経機構」で学習した脳機能解剖を確認しながら，運動学習の各段階において必要な学習戦術を考えてみよう．

■認知段階（cognitive stage）（図3-5）

新しい運動課題に学習者が取り組む際には，自らの経験と内的および外的環境に関する情報を処理し，その課題を行う価値があるのか，課題の難度はどの程度か，どのような運動戦略を用いるか，などを意識的・言語的に思考する．学習課題を認知するこの段階においては，**宣言的記憶**（declarative memory）[注2]や**ワーキングメモリ**（working memory）が，運動課題に関する情報の収集・処理に用いられる[1]．

1）動機付けの問題

学習は，それを記憶することによって，欲求を満足できることや，報酬が期待されることで動機付けられる．また，興味，恐怖など，さまざまな情動が関与し，基底核・辺縁系を含む神経回路がそれらを処理している（19頁：図2-4参照）．これらが正常に機能してい

注2）長期記憶は言語などで表現することができる宣言的記憶（顕在記憶）と，表現できない手続き記憶（潜在記憶）に分けられる．宣言的記憶は，経験や出来事に関する記憶（エピソード記憶）と知識の記憶（意味記憶）に分けられる．

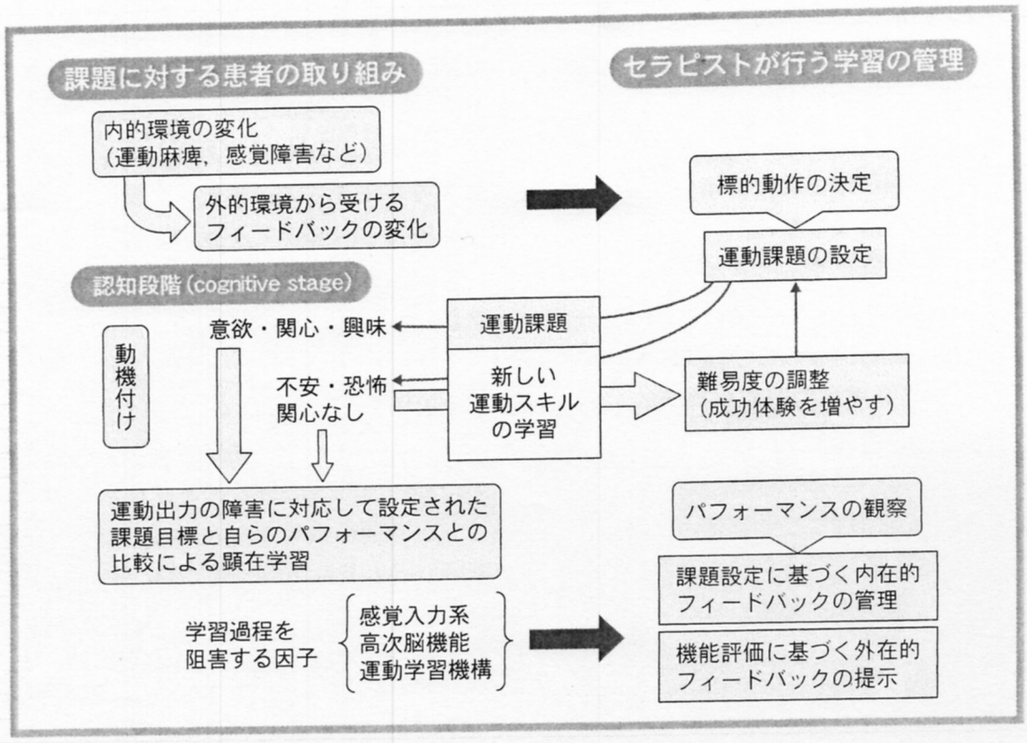


図3-5 運動スキルの習得過程：認知段階（cognitive stage）

れば，学習によって得られた効果を，次の学習段階へ進めるための強化因子として利用することができる．しかし，情動・動機付けの神経回路に問題があるからといって，リハビリテーションを開始しないわけにはいかない．臨床場面では，認知機能に障害がある患者に対しても，動機付けの段階をスキップして運動学習を開始しなくてはならない場合がある．運動制御に障害を持つ患者に対する運動療法には，生活活動を取り戻すという方向性があり，そのポジティブな目標を運動学習によって達成させるという体験そのもの，例えばセラピストによるハンドリングや代償手段の利用によって楽に立位を保てるようになった，などの成功体験を通じて，運動学習を動機付ける状況を形成しなくてはならない．

リハビリテーションの治療場面においてもっとも注意しなくてはならないのは，**負の動機付け**である．障害受容の過程における否認や混乱への対応，痛みの管理，課題目標を阻害する要因の解決（難易度の調整）などを運動学習の展開のなかにおいて盛り込んでいく必要がある．

2）フィードバック法の選定

課題の反復を通じて学習者が処理しなくてはならないフィードバックは，どのような課題が設定されたかによって決定される．それらの**感覚情報**（フィードバック）をもとに自らのパフォーマンスを監視し，課題の目標と照らし合わせて，修正するべきエラーを検出するためには，頭頂葉，吻側帯状領域，運動前野ならびに小脳皮質の機能が必要になる（8頁：図1-5，19頁：図2-4参照）．さらに，検出された情報をワーキングメモリによって一時的に保持し，運動プログラムを書き換える前頭前野背外側部が機能する．

263-00969

感覚―運動統合の過程に問題を抱える患者に対する運動療法では，標的動作がどのようなパフォーマンスで行われているかを観察したうえで，運動学習のターゲットを絞り込み，もっとも効果的に課題達成へと導き得るフィードバックを選定する．ここでは，感覚入力，高次脳機能および運動学習に重要な役割を果たす皮質下神経回路に障害を有する患者へのフィードバックの方法について考えてみよう．

⑴ **感覚入力系の障害**：体性感覚等の障害によって情報入力経路が制限されている患者に対しては，利用可能な感覚入力系による代償を検討する．しかし，たとえば片麻痺患者では，感覚入力に基づいて制御することが可能な非麻痺肢に依存し過ぎてしまうと，いろいろな形で対応することができるはずのパフォーマンスの幅を狭めてしまう．立位における身体の動揺を制御するために，感覚入力も運動出力も非麻痺側に依存した姿勢制御を適用している片麻痺患者に，さらに非麻痺側下肢での重心管理を意識させるような教示(内的焦点)を与えると，身体全体のバランスが損なわれてしまう（76 頁「3．脳卒中：立位」参照）．したがって立位などの姿勢制御を学習する初期段階においては，その不安定さによってもたらされる過剰な感覚入力(**エラー情報**)を管理して，非麻痺側の役割にも余裕を持たせるような課題設定が必要である．むしろ歩行などの動的場面を経験させることで，静的な立位制御における過剰な感覚入力を整理できるかもしれない．

⑵ **高次脳機能の障害**：認知症や注意障害，失認・失行などの高次脳機能障害では，運動学習を実施することがそれらの治療となる（156 頁「15．脳卒中：手工芸（認知症）」参照）．学習の拠り所となるエラー関連情報を患者が処理できるかどうかによって，情報入力の方法を選定する．たとえば，エラーに対する**気づき**(awareness)が見られなければ，内在的フィードバックによる修正は期待できない．その場合には同時フィードバックを用いて学習目標を常に意識させる方法から導入することも検討する（62 頁「1．脳卒中：座位保持」参照）．注意の容量や持続が障害されている場合には，動作を要素に区切って，同時に処理しなくてはならない項目数や課題試行に要する時間を管理し，KR や KP を随時与えて動作を反復させる（116 頁「9．脳卒中：起き上がり動作」参照）．エラーを正しながら試行錯誤を繰り返すことによって行う学習法では，エラーに関する内在的フィードバックが潜在記憶として学習され，これを排除できなくなる場合があるため，言語教示やハンドリングを用いてエラーを経験させない**無誤学習**（errorless learning）の適用を検討する（68 頁「2．脳卒中：移動動作」参照）．これらに対しては，課題に集中できるような環境を設定し，フィードバックに対する応答を確認しながら，教示内容，頻度，タイミングを調整することが大切である．

⑶ **大脳基底核・小脳系の障害**：運動学習を支える神経機構である大脳基底核あるいは小脳系が障害されている場合は，内在的フィードバックに基づく潜在学習の効果は限定的である．運動制御の方法そのものを根本的に変更せざるを得ない場合もあり，学習目標を明確に示したうえで，統一されたチーム医療による対応が必要である．

パーキンソン病では，基底核と強い神経線維連絡をもつ補足運動野の賦活化障害が存在し，順序動作の学習，手続き記憶が障害される．脳内に収められている情報に基づく自発的な運動（internally guided movements）が困難であれば，運動のタイミングを視覚あるいは聴覚的な手掛かりとして与えることで，頭頂葉-運動前野系（externally guided

movements）を賦活し，運動発現を促す（104 頁「7．パーキンソン病：起き上がり動作」，110 頁「8．パーキンソン病：歩行動作」参照）．

小脳性失調では，感覚入力に基づいた運動制御が可能か否かをまず判断する．例えば，視覚フィードバック下で企図振戦が増強する場合には，**同時収縮**（co-contraction）あるいは**行動的リラクセーション**（behavioral relaxation）によるパフォーマンスの改善を確認し，それらの誘導に必要な課題を認知させる．下小脳脚を介した登上線維，中小脳脚を介した苔状線維および後下小脳動脈領域の小脳皮質が，視覚情報に基づく運動の適応に重要な役割を果たしており，後下小脳動脈領域の障害では失調症状が軽度であっても，学習効果が得られにくい可能性がある（11 頁，コラム「プリズム適応課題における小脳の役割」参照）．

■**連合段階**（associative stage）（図 3-6）

連合段階では，学習者の注意は課題の内容にではなく，自らのパフォーマンスに向けられるようになる．すなわち，運動における身体の各部位間の協調，タイミングの調節や力量の制御によって，運動スキルに修正を加えながら，正確性やスピードを向上させる段階である．さまざまな運動関連情報を統合して，運動スキルを最適化していくこの過程において，重要な役割を担うのが，課題の反復によって得られる内在的フィードバックに基づいた潜在学習である[1,2]．セラピストは，患者の運動スキルの達成度に応じて課題の難易度を調整し，KR や KP を付与して運動スキルの再構築を援助する．学習終了後に一定期間をあけてその課題の達成度を評価する**保持テスト**（retention test）や，他の類似課題の達成度を促進するか否かを評価する**転移テスト**（transfer test）によって，キャリーオーバーや転移を確認しながら，運動スキルの自動化に向けた治療的運動学習の基盤形成を行う．

1）標的動作の再現に向けた課題設定とフィードバック

連合段階におけるセラピストの役割は，① 患者の運動スキルに応じて運動課題の難易度を適切に設定すること，② 外在的フィードバックによって修正するべきエラーを管理すること，である．これらの操作に基づいて運動学習の目標である“標的動作”を再現させることが，**課題特異的効果**（task-specific effect）（12 頁参照）を得るための必要条件である．

（1）**運動課題の難易度の調整**：課題目標を認知した患者が，パフォーマンスの修正を試みようとしているにもかかわらず，運動出力系の障害によってどうしても制御できないエラーがあれば，代償手段を併用した課題や難易度を調節した類似課題を設定して，それをもっとも再現しやすい運動条件のもとで集中的に繰り返す**一定練習**（constant practice）を実施する．類似課題を通じた学習成果は，目標となる**基準課題**（criterion task）に現れる必要があり，この効果発現を**転移**（transfer）という．標的動作が複数の運動スキルの組み合わせで構成されていれば（**系列スキル**），その動作分析に基づいて極端に拙劣な運動スキルや正確性を要する運動スキルを抽出し，課題を反復する**部分法練習**を検討する．

片麻痺歩行における反張膝などのように，修正するべき運動スキルが連続した運動のなかで管理されている場合には（**連続スキル**），そのパフォーマンスのなかで修正を試みても，歩行におけるその他の運動が影響されてしまうため，静的な場面での膝関節コントロール

263-00969

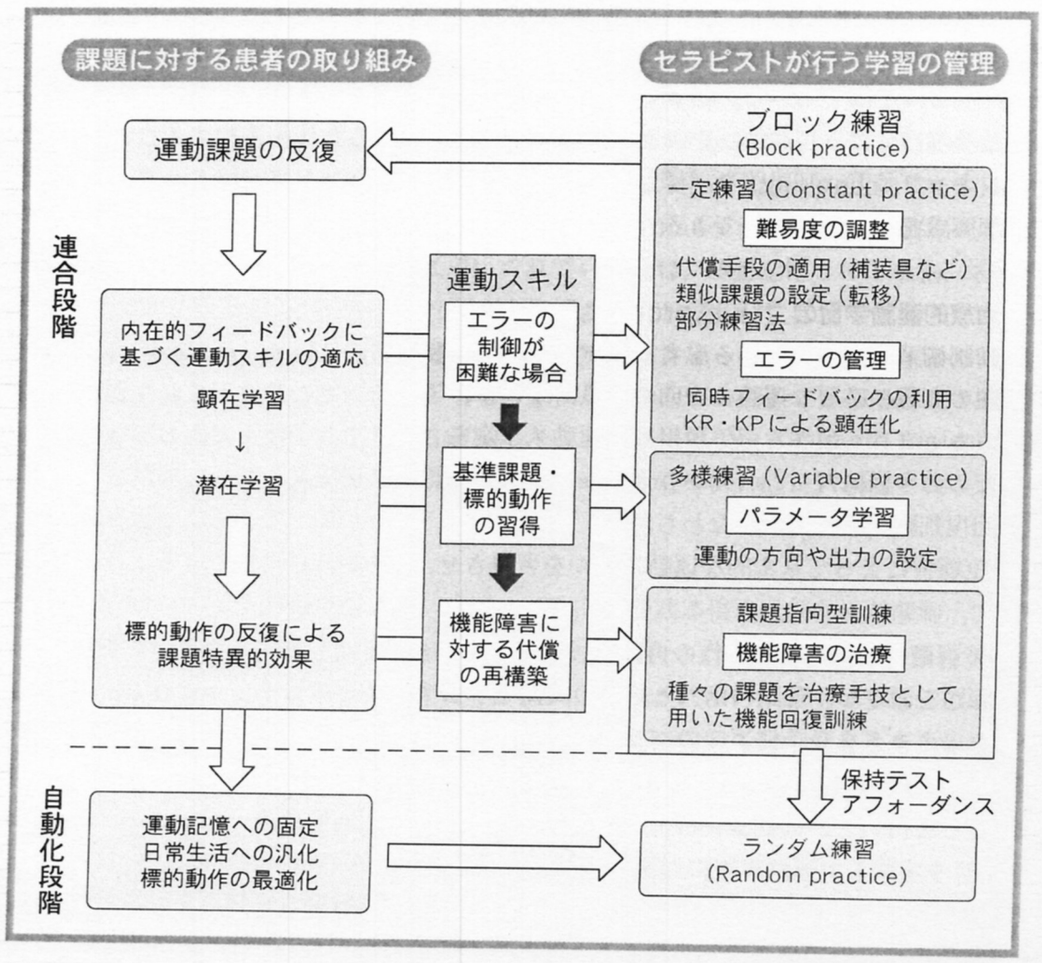


図3-6 運動スキルの習得過程：連合段階（associative stage）から自動化段階（autonomous stage）へ

の練習などに立ち返ることも考慮しなくてはならない（84頁「4．脳卒中：歩行-反張膝」参照）．補装具は，患者が制御しなくてはならない関節の自由度を減らすことで，標的動作の最適化に必要な運動スキルの再現を可能にする．

⑵ 外在的フィードバックによるエラーの管理：患者に**エラーを検出する能力**（error detection capability）があり，学習課題からの内在的フィードバックをもとにエラーを修正しようと試みている場合には，それを促すように外在的フィードバックを与える．その際，患者がフィードバックに依存することがないように，その頻度やタイミングに配慮する必要がある．一方，感覚障害を伴う片麻痺患者の反張膝のように，患者が修正を試みようとしても，それを容易に達成できない場合には，反張膝に関連する異常運動が日常生活場面において学習されないように，補装具などを用いて内在的フィードバックを管理しなくてはならない（84頁「4．脳卒中：歩行-反張膝」参照）．

患者がエラーとして感じていない情報は，外在的フィードバックを加えてそれを顕在化し，学習課題を焦点化する．患者が適用している運動スキルにエラーがあることを認知さ

せるために，① 鏡やビデオを用いた視覚フィードバック，② ハンドリングなどによる学習するべき運動スキルの再現と反復，③ 適用している運動スキルが引き起こすエラーの顕在化，などの手段を用いる．新しい道具の使用などで，動作手順の学習における情報処理が困難な場合には，言語教示やモデリングを用いて関連する動作を連結することによって**チャンキング**（chunking）を誘導し，動作の流れをかたまりとして記憶させることで，情報処理容量を増やすことができる（116 頁「9．脳卒中：起き上がり動作」参照）．

2）治療的運動学習の“Due-process”

運動制御系に障害を有する患者に対する**治療的運動学習の“Due-process”**は，① 基準課題の実現に必要な運動の方向や力量，リズム，手順を一定の条件下で繰り返す**一定練習**（constant practice），② 習得した運動スキルをさまざまな条件下で出力できるようにするための**多様練習**（variable practice），③ 課題目標を達成するための運動学習による機能回復訓練，である．すなわち，

(1) 一定練習によって基本的な運動スキルを習得させ，標的動作を再現できるようにすることで，課題特異的効果を得る基盤を作ること[3]．

(2) 基準課題あるいは標的動作の再現が可能になったら，運動出力のパラメータを変化させた課題を設定し，運動の出力と結果の関係を学習する多様練習によって，実生活で要求されるさまざまな条件下でのパラメータ制御を獲得させること．

(3) 一定練習，多様練習によって習得した運動スキルで達成できる種々の基準課題を治療手技として用いて，神経制御機構の再構築をはかる**課題指向型訓練**（task-oriented training）を実践し，運動障害に対する代償的適応のバランスを再検討すること．

以上によって，習得すべき運動スキルの自動化に向けた基盤形成を行う．

日常生活においては，標的動作をもっともたやすく再現できる運動出力で，パフォーマンスが反復されている．この日常生活での一定練習によって形成される運動指令に適応能力を付加するためには，通常とは異なる力量やタイミングで運動を出力した場合における感覚情報（スピード感などの同時フィードバック）や，運動の成果の違いを“経験”させる必要がある．運動出力の大きさやタイミングなどのパラメータを変えて実施した運動から得られる感覚情報に基づいて，運動出力のパラメータと運動結果との関数関係を確立する過程を**パラメータ学習**という[注3]．

一方，代償手段を適用したパフォーマンスを反復するうちに，運動機能の回復が得られれば，その運動スキルはおのずと高められる．運動療法における治療的運動学習は，常に**機能障害指向型訓練**（impairment-oriented training）と併行して進められられなくてはならず，種々の運動学習を治療手技として用いて，機能回復を目指す課題指向型訓練の有

注3）「ボールを投げる」という動作において，投げる距離や速さが異なる運動の基準を別々に記憶するには，投球動作を記憶するためだけでも無限の貯蔵庫が必要になる．また，過去に経験がない動作を初めて行う場合においても，その動作に類似する運動の経験があればうまく行えるということからも，共通した運動パターンを基準として，運動の再生と学習が行われるとするスキーマ理論が Schmidt によって提唱された．スキーマ理論において，共通した運動パターンの基準となる一般運動プログラム（GMP；generalized motor program）の概念については，その後の運動学習に関する研究から見直されてきているが[3]，運動の再生（recall schema；運動を生成する機構）と再認（recognition schema；運動が期待通りであったかを評価する機構）の過程を通じたパラメータ学習の理論は，運動スキルの習熟と運動記憶の枠組みを形成している．

263-00969

効性が示されてきている．

■**自動化段階**（autonomous stage）

運動学習によって習得した運動スキルは，実際の生活環境においてそれを自動的に適用できるようになってはじめて実用的となる．顕在学習によって習得した運動スキルは，キャリーオーバーが得られ，**パフォーマンス変化**（performance change）が学習場面で認められても，その運動スキルが意識的に用いられている間は，運動記憶として小脳，基底核，運動皮質に**固定**（consolidation）されたとは限らない．日常生活に必要な運動スキルの自動化とは，プロスポーツのように特定の環境で特別なパフォーマンスを披露するためではなく，標的動作を何も考えずに，むしろその動作を行いながら別のことが処理できるような自動性が求められる．したがって，運動スキルの実用化の手続きでは，さまざまな状況下で必要なパフォーマンスが楽に再現できるように，生活場面の設定，代償手段の適用などの検討も重要になる．

1）運動記憶への固定の手続き

運動記憶は，運動を用いて目的を達成するために構造化された運動スキルを**保持**（retention）し，**再生**（recall）する役割を果たす．脳にはリーチ，歩行，ジャンプなどのさまざまな運動スキルが分割されて記憶されており，日常生活においては，それらを再生する環境や状況に応じて，個々の運動スキルの方向や力量などのパラメータや，目的達成に必要な運動スキルの順序・組み合わせを臨機応変に出力している．したがって，習得した運動スキルを日常生活のなかに自動化する段階では，運動学習の成果を発揮する場面を想定し，運動のパラメータを変える多様練習に加えて，異なる課題をバラバラに混ぜて実施させる**ランダム練習**（random practice）[注4]を取り入れながら，標的動作を再現するための運動記憶を定着させなければならない．

運動学習の成果は，保持テストや転移テストによって時間的・空間的にその達成度が判定されるが，リハビリテーション治療の成果は，学習した運動スキルが患者の実生活においてどのように利用されているかで評価する場合が多い．**同時課題**（concurrent task）の試行，例えば会話しながら学習したパフォーマンスを再現できるかどうかによって，運動スキルの自動化を確認するのも1つの方法である．運動スキルの自動化は，実際の生活場面のなかで推し進められるべきであり，そのための手続きは，患者自らがそのパフォーマンスから好ましい運動スキルの定着に有用なKR・KPを得ることができるか否かで，対応を変える必要がある（図3-7）．

(1) 書字や調理などでは，字のきれいさや筆先の動き，包丁さばきなどを外在的フィードバックとして患者自身が利用し，動作を反復することが可能である．したがって，環境や代償手段を設定し，連合段階で習得した基本的な運動スキルを日常生活で反復できるよ

注4）同一課題を繰り返すブロック練習（block practice）によって基本的な運動スキルが習得されたら，異なる運動スキルによって行わなくてはならない課題をさまざまな序列で実施させるランダム練習（random practice）によって，運動記憶への定着をはかる．複数の課題をランダムに練習することによって，学習者は，ある課題から異なる課題へ移行するたびに運動記憶を検索する必要が生じ，課題間の差異をよく理解するようになる（文脈干渉効果；contextual interference effect）．

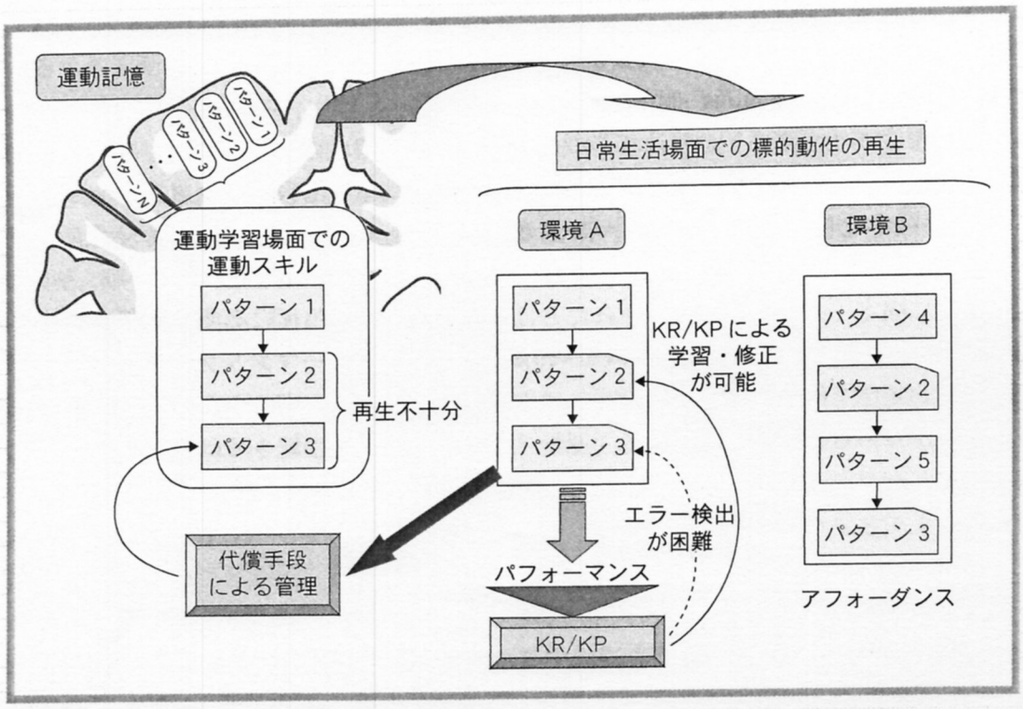


図3-7 運動記憶に固定するための手続き

標的動作をパターン1,2,3で構成される運動スキルで達成するように指導してあり，パターン2（患者自身がKR/KPを得られる）およびパターン3（患者がエラーを検出しにくい）の再生が不十分である課題を定着させる場合，

・日常生活場面でKR/KPを得ることができるパターン2については，学習・修正が試みられていれば，課題反復を促せばよい．

・患者がエラーを検出しにくいパターン3については，補装具や環境整備によって，エラーを管理する．

標的動作が同じでも，環境からの情報によって異なる運動パターンが用いられる場合がある（アフォーダンス）．

うにすることが自動化への手続きとなる．同様に，起き上がりや移乗動作のように成功・不成功が明確な課題は，それらを実施できるようになりさえすれば，日常生活における環境のなかで，より効率的なパフォーマンスを患者自身が発掘することもまれではない．課題を反復するための生活環境を設定することで，好ましい動作の自動化を誘導するとともに，その安全性を管理することがセラピストの責務である．

(2) 患者自身がKR・KPを得にくい課題―その代表が歩行における歩容の問題である―では，顕在学習によって習得させたい運動スキルが意識的な管理を要する限り，それを日常生活で用いることは難しい．患者自身がエラーを検出しにくい課題では，逆に好ましくない運動パターンを日常生活のなかで学習してしまう場合があり，潜在学習によって強化された運動スキルを修正することは困難である．また，運動制御系に障害を抱える患者が，標的動作を達成するために利用できる運動スキルの種類は極端に制限されており，そのなかでもっとも使い勝手がよい方法に収束してしまうと，環境変化への対応ができなくなるばかりか，反復される関節への過剰なストレスによって疼痛や変形を招きかねない．自動化の過程のなかで，患者が強化していく運動スキルの是非を医学的に判断し，学習されては困る運動スキルは環境設定や補装具によって管理しなくてはならない．

263-00969

2）自動化の手続きにおけるアフォーダンスの問題

日常生活においては，学習したはずの運動スキルが適用されず，期待とは異なるパフォーマンスが誘導されてしまう場合がある．その原因の1つが**アフォーダンス**(affordance)である．環境は非常に強力な情報を保有し，異なる動作を誘導するような情報を人に**提供する**(afford)のである．例えば，解けた靴ひもを結ぶときに，低い台があればその上に足を載せて，立ったまま結ぼうとするであろうが，台がある程度の高さになれば，それに腰掛けて結ぶようになるであろう．アフォーダンスとは，環境と動物の相補性を表す概念をGibsonがaffordの名詞形によって表現したものである．

リハビリテーションを終えて，疲れた患者が自室のベッドに移乗するときに，訓練室で学習した方法によってではなく，ゴロンと寝転がるように移ってしまう運動行動を生態心理学から解釈すれば，「横になる」ためのベッドが提供した情報が誘導した結果ととらえられる(68頁「2．脳卒中：移乗動作」参照)．すなわち，アフォーダンスによって導かれたパフォーマンスは，学習したものとは異なる運動記憶によって再生された運動スキルに依存している．裏を返せば，アフォーダンスを利用することによって，好ましい運動スキルの自動化を誘導することが可能である．したがって，これらの環境要因は，動機付けの過程，運動スキルの統合の段階においても十分に考慮されなくてはならない．

3）標的動作の最適化

運動制御系に障害を抱えながら標的動作を達成するには，再現することができない運動を代償するための手段が適用されなくてはない．代償に基づいたパフォーマンスを足場にした運動課題の反復は，患者に生活活動を獲得させるだけでなく，運動機能の回復あるいは維持に重要な役割を果たすであろう．機能回復の程度に応じて，その過程に応じた運動スキルを再学習することは可能であり，中枢神経系はそうした柔軟性を備えた指令系統を有している．

一方で，代償に依存した運動スキルの習得が，機能障害を有する肢の“不使用”を誘導してしまう場合があることを忘れてはならない．中枢神経系は，代償に基づいた運動スキルを用いることで，楽に目標を達成できることを見出すと，その運動指令を優先し，それはしばしば機能障害を有する肢の参加を排除してしまう．標的動作の早期達成を目指して，代償に重きを置いた運動課題から導かれる運動スキルは，**“学習された不使用”**を誘導する可能性を秘めている．リハビリテーション医療が目指す運動スキルの最適化は，麻痺肢の使用を促す課題を設けて，機能障害を治療する意識を常に持つことによって達成される．患者のパフォーマンスのなかで，代償運動や補装具などをどのようなバランスで適用し，標的動作を達成させるかは，その最適化を目指すリハビリテーション医療の専門性に委ねられている．

文献

1) Hubert, V. et al.: The dynamic network subserving the three phases of cognitive procedural learning. *Human Brain Map* 28：1415-1429, 2007.
2) Grafton, ST. et al.: Neural substrates of visuomotor learning based on improved feedback control and prediction. *NeuroImage epub*, 2007
3) Shea, CH. Wulf, G.: Schema theory: a critical appraisal and reevaluation. *J Motor Behavior* 37：85-101, 2005.

コラム　動作を学習する際にどんな習熟をめざすのか

大高洋平 東京湾岸リハビリテーション病院

動作の学習をどのように進めるかを考える際に大切なことは，動作をどのように習熟するか，習熟させるかである．すなわち，動作の学習過程に伴い習熟度が上がるわけであるが，その方向性を明確にすることである．

たとえば，動作の習熟度といった場合，いくつかの要素から考えることが可能である．ここでは，リハビリに関連する3つの要素に分けて考える．**動作の正確性**（accuracy），**効率性**（efficiency），そして**安定(安全)性**（stability）である．

しばしば，臨床場面において正常からの逸脱，すなわち異常を評価し，正常に近づけようと努力しているようにみられる場合がある．たとえば，筋トーンが正常に比して高いので，落とさなくてはいけないというように考える．果たしてこれは動作の学習という場合において有効な戦略であろうか．正常からの逸脱を評価することは重要なことであるが，それを正常に近づけようとする努力が有効な試みなのかは，正常に近づくという保証がない場合においては，少し考える必要がある．

脳卒中後の中枢神経の可塑性に期待し，「**治る**」に近い回復機構もあると考えられるが，リハビリテーションの治療の過程の主体は，治癒ではなく**適応**(adaptation)の過程の部分が大きい．新しい神経系や効果器の状態において，動作をどのように再学習していくかという過程である．重要なことは，動作の学習の目的は，「**元の通りになること**」ではない．むしろ，目的とする動作をどのような方向性で習熟するかを考えることで治療戦略は立てやすい．脳卒中片麻痺でいえば，「左右対称になること」ではなく「**それぞれの動作においてどのように習熟したいかを明確にし，それにむけて学習をすすめる**」のが，治療戦略を考えるうえで糸口となる．

上記の例でいえば，正常より逸脱して筋トーンが高いと評価した．そのつぎに考えることは，正常に近づけることではなく，この緊張が，目的としている動作の習熟にどう影響するかを考えることである．たとえば歩行時に麻痺側の下肢の筋トーンが高い．この場合，この筋トーンは，動作の習熟度の3つの要素とどう関連しているかを考える．たとえば，その患者が筋トーンを利用して歩行を行っているとすれば，代償機能として安全性には有効に働いていると考えられる．一方で，正確な動きすなわち正常に近いスムースな歩容の妨げにはなっているし，場合によっては効率も悪いかもしれない．そのような視点で観察した後，その患者において今どの方向の習熟が必要なのかを考え，最終的に今ある筋トーンの扱いを考える必要があるのである．繰り返しになるが，正常に近づけようと試みるのではなく，今行っている学習過程との関係で評価を考える必要がある．

また，重要なことは脳卒中片麻痺患者のように限られた機能である場合，この3つの要素の間には trade-off が生じる．安全性を優先すれば，効率性や正確性を失わせるかもしれないし，逆に効率性や正確性を重んじれば，安全性は低下する．たとえば，バランス能力が低い状態で支持基底面を増大させるために wide-base で歩いているということを考える．安全性を担保するために，代償し適応した結果で，そのような戦略を用いている段階で，むりやり正常な歩容に近づけようと正確性を向上させようとすれば，安全性は低下し，効率性も損なうであろう(図 3-8)．理想的には，この3つの要素すべてに満足がいくレベルに動作が習熟することが望ましいが，かならずしもすぐに達成できるとは限らないし，達成するにしてもどのような過程をたどるかも重要な点である．そこで，この3つの要素の優先順位が重要になる．それは学習しようとしている動作の種類や対象者の状態によって変化する．

263-00969

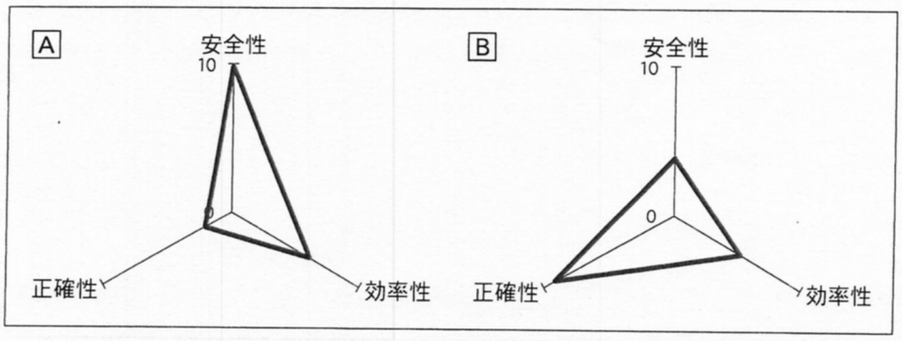


図 3-8 習熟度における trade-off

バランスが悪いために代償的に支持基底面を広くして安全性を重視した歩き方をしている状態(A)の患者に，支持基底面を狭くして正確性(歩容)を重視した場合，安全性や効率性を損なう(B)．

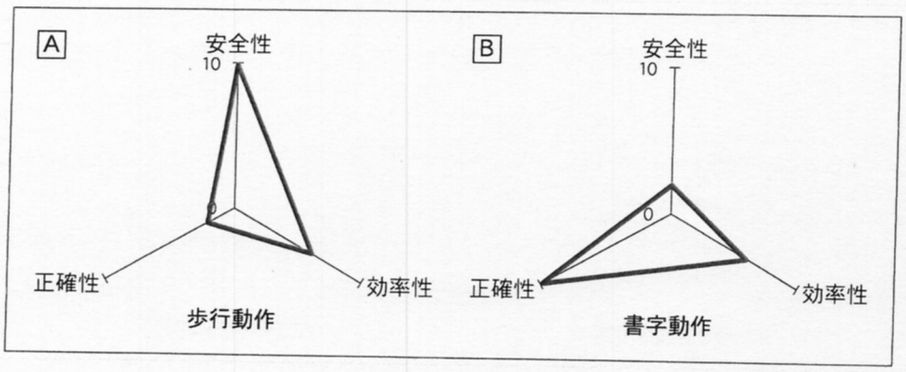


図 3-9 動作によってどの方向性に習熟させるかは異なる

歩行動作では，安全性が最重要視されるが，書字動作では正確性が要求される．

たとえば，脳卒中患者が学習する歩行動作と麻痺手での書字動作というものを考えてみる．この 2 つの動作は，難易度調整を主体とする運動学習のストラテジーという点では共通点も多いが，どの要素の習熟を目的に学習を行うかは動作によって異なる．歩行動作においては，安全性が最重要であり，つぎに効率性が重要である．一方で書字の場合は，安全である必要はなく，むしろ書字そのものの意味からは正確性が最重要であり，つぎに効率性であろう(図 3-9)．このように，動作によってどのような習熟をまず目指すかは異なるし，機能のレベルにおいても異なる．歩行においても安全性，効率性が向上したのちには，歩容についてもこだわることができるであろう．

また，同じ動作でも対象者が違えば，状況は異なる．たとえば，極端な例をあげれば，子どもの歩行発達と，脳卒中後の高齢者が歩行を覚える過程は，大きく異なる．子どもの発達過程では，多くの転倒を経験しながら歩行を獲得していく．つまり転倒しないという安全性をそれほど重要視する必要はない．むしろ言うなれば，転倒というエラーを利用しながら獲得していく過程でもある．一方，骨脆弱性を有する高齢脳卒中患者においては，そのような歩行の覚え方では，歩行を覚える前に，骨折でも生じてしまうに違いない．そこで，まずは安定性を優先した踏み出しと立ち止まりの繰り返しのような不連続な歩行の獲得から進め，最終的に効率的なリズムのある歩行を目標とすることが重要となってくるのである．

4. 運動学習の成果を導く課題設定

長谷公隆 慶應義塾大学医学部リハビリテーション医学教室

運動指令を形成する過程での情報処理や，運動指令の伝達システムが破綻した患者の生活を支える唯一の根本的治療は，出力できなくなった機能を補完し得る運動スキルを，運動学習によって構築することである．運動学習は課題を通じて得られる感覚情報を，学習者自身が処理することに基づくことから，課題設定にかかわる以下の項目が運動学習の成果を左右する．

(1) 運動学習の目標：
[課題の反復によって習得できる運動スキルは標的動作の最適化に有効か？]

(2) エラーの管理：
[課題におけるエラーが的確に処理されて運動スキルの習得に役立っているか？]

(3) 効果的な学習法の選定：
[学習を司る脳機能の評価に基づいた学習方法が設定されているか？]

運動学習の目標

障害を抱える患者が達成しようとする**標的動作**は，本来は簡単に行えていたパフォーマンスである．すなわち，学習の動機は人間として安定した生活を送るためのもっとも基本的な欲求によることが多く，しかも障害が残存すれば，自らの経験によるイメージとは異なる運動スキルによって，それを達成せざるを得ない．これは，マズローが提唱する欲求（動機）の階層構造（図 4-1）において，下位に位置する欠乏充足欲求であり，代償手段を駆使して標的動作が習得できても，患者はそれに満足することはできないのである．

一方，医師を含めた**“治療者”**は，学習者である患者と同じ身体条件にはなく，自らの経験に基づいた運動スキルを指導できるわけではない．だからこそ，個々の患者が有する障害や価値観に基づいて学習目標を共有し，標的動作を最適化するために学習するべき**運**

263-00969

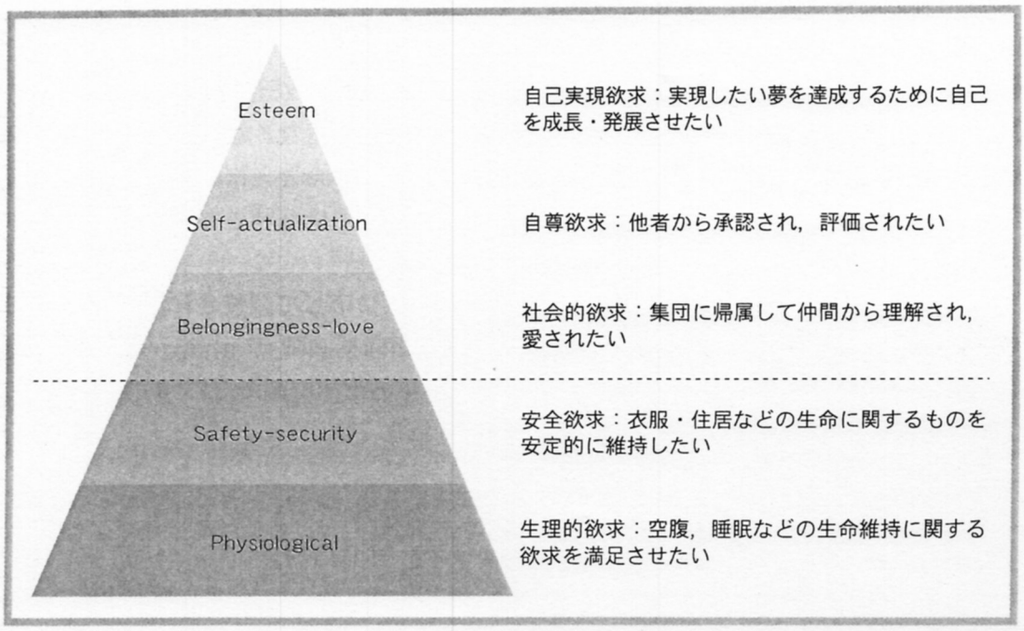


図4-1 マズローの5段階欲求説

人間の精神的成長過程では，下位の欲求が満たされることで，より上位の欲求を充足させるための行動の動機付けが，段階的に行われていくとする説．後遺症によって，生活を営むことに不満足感を抱える患者は，生理的事象や安全などの低次に位置する欠乏充足欲求が満たされない状態にあり，そのパフォーマンスの外見に対する羞恥心やスピードの遅さ，易疲労，不安定さなどの不満足に耐えながらの生活を余儀なくされている．

動スキルを，障害医学の専門家として設定しなくてはならない．

1．代償的適応の設定――能力低下の克服と機能障害に対する治療

代償手段をどのようなバランスで適用するかは，運動障害をもつ患者に対する運動学習の課題設定とその成果を決定付けるもっとも重要な問題である．つまり，麻痺肢を使わせるか，使わせないかによって，運動課題の設定とその目標は全く異なる．一般に，日常生活の自立を目指す急性期から回復期においては，代償手段を利用した運動スキルの習得による能力低下への対処が優先される．しかし，代償手段への過度な依存は，リハビリテーション医学に携わるものが第一義に考慮しなくてはならない機能回復を阻んでしまう可能性を含んでいる．一方で，神経疾患によって引き起こされた機能障害の回復に限界があることは，紛れもない事実である．したがって，運動学習に基づく治療が，どのような障害にどの程度の効果をもたらすかを検証し，習得させた運動スキルを日常生活で反復させることによって，さらなる機能回復が導かれるような治療目標の設定が望まれる．

2．運動学習の目標設定における留意点

運動制御系に障害を抱える患者に対する運動学習の目標設定で，留意するべき点は以下の2つである．

第一に，**運動モーメントを出力する支点の力量とタイミングの再構築**に主眼を置くこと

である．外見的に観察される異常運動は，その運動に関与している外力（重力など）を内力（筋出力）によって処理しきれずに，そのひずみを代償することで生じる．治療的運動学習は，運動学や神経生理学の知識に基づいた課題設定なくして達成することはできず，代償に起因する異常運動の治療は，代償運動を適応せざるを得なくなった運動出力の不全を，再構築するための課題に基づいて行われるべきである．たとえば，片麻痺患者の麻痺側遊脚期にみられる内反は，股関節伸展が不十分な肢位から麻痺肢を振り出すための適応と考えて，立脚期の運動制御に関する運動スキルを学習課題とする（90頁「5．脳卒中：歩行-麻痺側下肢制御の再構築」参照）．機能障害の程度に応じて調整された難易度の課題を組み合わせて，運動麻痺の改善を目指す**機能障害指向型訓練**（impairment-oriented training）[1]は，運動出力の不全を再構築するための根本的治療である．機能回復が得られれば，その成果に基づいて患者自身が運動スキルの最適化を模索し，パフォーマンスの安全性と効率性がおのずと高められるであろう．

第二に，**目標とする運動スキルの習得によって二次的障害の発生を予防できること**である．リハビリテーション医学のエビデンスに基づいて，関節変形や疼痛，転倒リスクなどが管理できる治療目標が設定されなくてはならない．たとえば，片麻痺歩行において麻痺側下肢への荷重が適切に誘導されれば，痙縮を増悪させることはなく，むしろ尖足や槌状趾などの変形予防に有効である．機能評価と動作解析に基づいて，安全性と効率性の二局面を比較しながら，習得させるべき運動スキルの目標を医学的に設定したうえで，それを患者と共有する必要がある．

エラーの管理

運動スキルの記憶への定着は，内在的フィードバックからのエラー情報を，学習者がどれだけ処理できたかに依存する．外在的フィードバックとして教示されるKR・KPが，運動指令を修正／強化する効果も，内在的フィードバックによって形成された運動記憶との照合に基づいて導かれる．すなわち，内在的フィードバックにおけるエラー情報を，いかに効果的に学習者に提供できるかが，運動学習の成否を担っている．

1．学習の推進力としてのエラー情報

エラー情報は運動学習を押し進める原動力となる．セラピストは，ハンドリングや介助によって課題の再現を補助し，そのパフォーマンスにおけるエラーを修正するために必要な運動スキルを誘導する．患者自身がエラー情報を認知していない場合には，外在的フィードバックを用いてそれを顕在化する．運動学習を進めていくうえで，内在的フィードバックによるエラー情報を患者が適切に処理できているかを評価することは，もっとも重要なセラピストの役割である．エラー情報が存在して初めて学習課題としての意義をもつのであり，エラーのないパフォーマンスは，最適化された運動スキルがすでに習得されていることを意味している．

263-00969

2．誤った学習成果をもたらすエラー情報

患者がエラー情報を処理することによって，**好ましくない運動スキルが習得される場合があること**に留意しなくてはならない．たとえば，片麻痺患者が感覚脱失した麻痺側下肢に荷重するたびに転倒の恐怖を感じるような課題では，扁桃体を介した運動学習によって

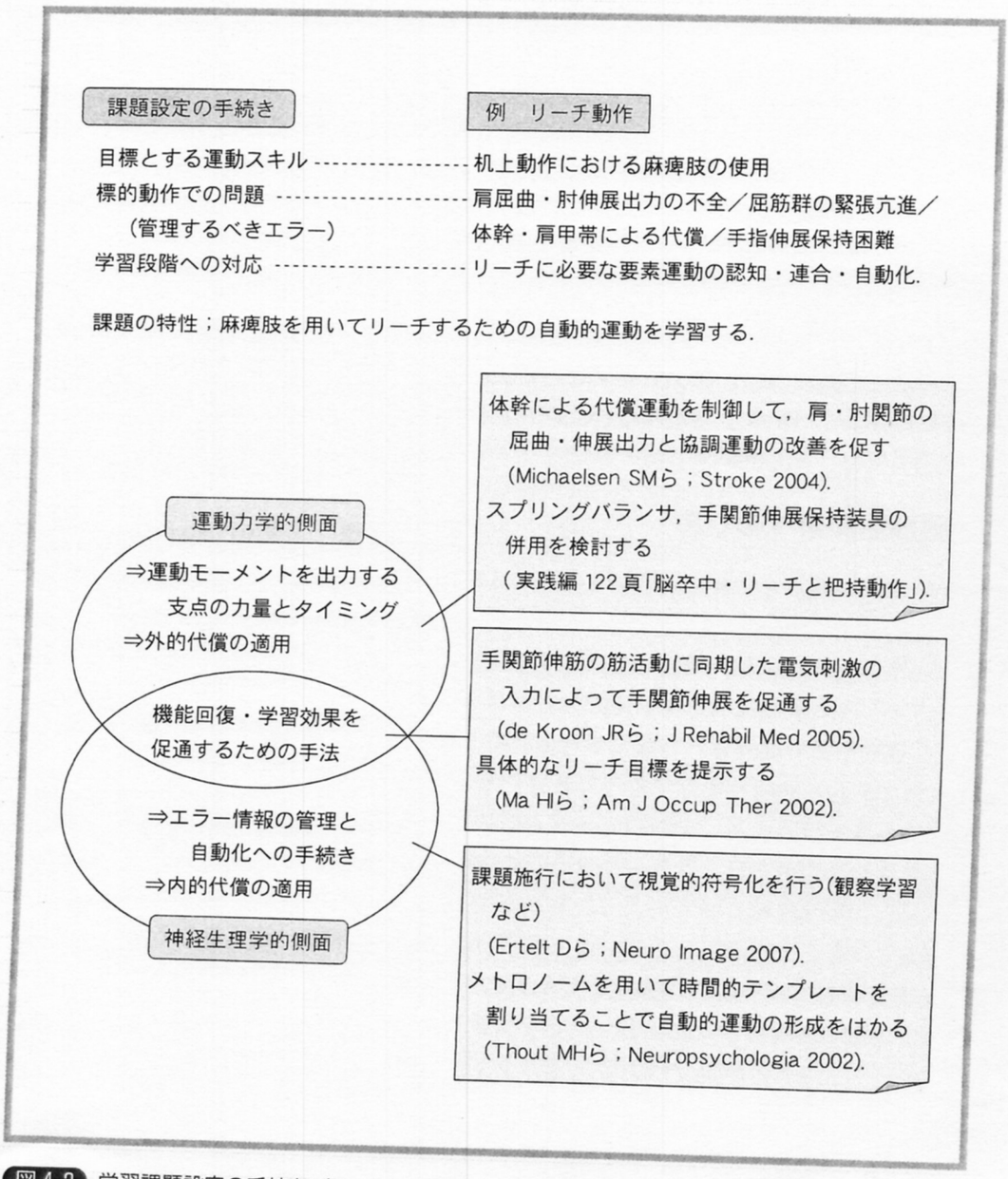


図 4-2 学習課題設定の手続き（例：リーチ動作）
運動課題の設定に際しては，課題を再現するために必要な代償手段の適用を含めた運動力学的ならびに神経生理学的側面に対するアプローチを検討する．機能回復を促すために利用できる手法をできるだけ取り入れることが望ましい．
課題が自動的運動であるか，順序運動であるかによって，フィードバックの方法を検討する必要がある．

それを回避するための運動スキルが構築される．内在的フィードバックを正常に処理した結果，安全を確保するために運動の速度を下げ，患者は四肢体幹の筋緊張を高めて安定を確保するための運動戦略を学習するであろう．重度な感覚障害を有する患者の運動学習は，麻痺肢以外から入力される平衡感覚を含めた内在的フィードバックを，補装具などを用いて管理することが重要であり，好ましくないパフォーマンスの定着を阻止することに重点を置く必要がある．

学習方法の選定

標的動作の分析によって，習得させるべき運動スキルと，管理するべきエラーが明確になったら，運動課題を再現させる過程で解決しなくてはならない問題を抽出し，それらの実用的な解決方法を臨床研究の成果に基づいて列挙する（図 4-2）．運動制御系に問題を抱える患者に対する運動学習法の選定においては，運動力学および神経生理学的側面から，運動麻痺などの機能障害の回復を促すことが実証されている手法が盛り込めるとよい．

以下に，運動学習に関わる脳機能の問題を解決する方法と，運動記憶の定着・固定に有効な学習方法について，臨床研究の成果をもとに概観しよう．

1．脳機能障害への対応

エラー情報が入力されても，それを処理する中枢神経機構が障害されていれば，学習効果は限定的となる．すでに述べたように，学習過程の認知・連合・自動化を司る脳機能に障害がある場合には，標的動作の達成に必要な運動スキルを選定し，課題目標を絞り込んでその学習効果を検証しながら，患者に呈示する情報の量と質を管理する必要がある（34 頁「3．運動療法で展開される運動学習の戦略」参照）．たとえば，ワーキングメモリの障害によって情報を同時に処理できなければ，その変数を減らして，患者が混乱を来さないように難易度を調整する．記憶障害や感覚情報処理システムの障害によって，エラー情報を識別できない患者では，エラーを含む運動スキルをそのまま自動化してしまうリスクがあるため，エラーを起こさないような運動学習の展開（**無誤学習**：errorless learning）が検討される．

運動学習を支える小脳・大脳基底核系の障害に対しては，**内的代償に基づいた運動戦略の誘導**が必要になる．すなわち，

表 4-1　運動学習課題が具備するべき条件

- 学習者によって認知された具体的な運動目標の設定．
- 学習目標を表象する具体的な感覚情報の呈示．
- 適度な成功体験が得られる難易度の設定．

263-00969

(1) 小脳性失調では，感覚入力に基づいた運動制御がどの程度可能かを見定めたうえで課題の難易度を設定し，目的とするパフォーマンスを達成するために必要な姿勢調節や四肢協調運動を行うための筋収縮様式を，同時収縮やリラクセーションによる制御へ転換することが検討される．

(2) パーキンソン病では，自発的に運動を開始することが困難であり，さらに基底核と強い神経線維連絡をもつ補足運動野の賦活化障害が，順序動作の障害を引き起こすと考えられている．したがって，運動のタイミングを視覚あるいは聴覚的な手掛かりとして与えて，頭頂葉-運動前野系（externally guided movements）を賦活化し[2]，運動発現を促す方法が用いられる．

2．学習効果を支える感覚情報の入力

成果の獲得を意図するように設定された課題（表 4-1）は，学習者自身が内在的フィードバックを処理して，パフォーマンスにおけるエラーを検出し，運動スキルの修正を能動的に試みようとするので，高い学習効果が期待できる[3]．ゲーム形式を用いた課題設定やロボティックスで制御された運動軌道の反復，ヴァーチャルリアリティ（virtual reality）からの感覚情報入力などの学習効果が，運動療法の場面で検証されている．

課題の難易度は，運動スキルの修正に必要なエラー情報を供給しながら，それを管理することで得られる成功体験（報酬）が，望ましい運動スキルを強化するレベルに設定する必要がある．ところが，運動制御が困難な患者に対する運動療法では，運動課題そのものを再現できない場合が多く，患者が運動指令を変換するだけで目標とするパフォーマンスを行えるというような場面はきわめて少ない．したがって，運動を制御すること自体が困難であれば，代償手段を適用することで難易度を調整しながら，外在的フィードバックを入力して課題を焦点化する必要があり，フィードバックへの依存を懸念してエラー関連情報の供給を制限する必要はない[4]．一方で，目標の達成度が学習者自身にも明確にわかる課題――たとえば，一定時間内にできるだけ多くのペグを移動する課題での「ペグの本数」など――では，「結果の知識：KR」を外在的フィードバックとして呈示しても，その達成度にもたらされる効果は限られている[4]．

運動課題に関連した感覚情報入力は，麻痺肢の機能改善を導くことが示唆されてきており，利用できる手法は積極的に取り入れるべきである．たとえば，随意運動に連動した電気刺激等による感覚入力が麻痺肢の運動制御機構を再構築し，機能回復を誘導することが明らかになってきており[5]，その効果を促通するような課題の開発が望まれる（136 頁「12．脳卒中：把握動作」）．また，後および前大脳動脈領域に障害がない片麻痺患者の上肢機能訓練において，日常生活上の上肢動作に関するビデオを用いた観察学習が，その後の上肢機能訓練の効果を高めることが示唆されている[6]．

3．運動記憶への定着――自動化への手続き

日常生活で用いる運動スキルは，標的動作を安全かつ楽に再現できるように自動化されなくてはならない．随意運動の制御は重力に抗して身体を支持し，動的場面で重心を管理する能力が土台となっており，姿勢制御のための運動指令は日常生活でのありとあらゆる

動作を行うなかで潜在的に構築される．姿勢制御に問題を抱える患者では，重心を管理できる支持基底面が狭まっていることから，重心がその基底面から逸脱しないように，運動の速度や範囲を制限して安全を確保する制御が自然と身についている．したがって，安全が確保された運動学習の場面では，患者が自らの姿勢保持能力を最大限に発揮できる場面を設定して，重心を管理するために必要な種々の感覚情報を運動記憶に**符号化**(encoding)することが重要である[7]．その際には，バランスに関する問題を意識付けて行うよりも，種々の運動課題の反復による潜在学習によって習得させるほうが，会話などの他の課題を同時に実施しながら姿勢を制御する運動スキルを定着させることができる[8]．

一方，道具の使用などの順序学習では，その手順で行う必要性や決まりごとを理解して，複数の動作を**分節化**（chunking）するなどの情報処理が学習過程に必要であることから，誤りを繰り返しながらの学習（**試行錯誤による学習**：trial & error learning）のほうが，脳卒中患者に対しても，良好なキャリーオーバーが得られる可能性がある[9]．運動スキルを自動化するための手続きは，それを実際に使用する場面で，感覚情報の顕在的処理が必要であるか否かによって，エラー情報の顕在化を主とした学習法を選定するかどうかを決めるべきであろう．

近年，歩行訓練によって片麻痺患者が歩行速度などの能力を高める過程において，下肢筋活動のパターンは訓練前後で変化しないことが臨床研究によって示唆された[10]．すなわち，運動指令の基本的なパターンは歩行という標的動作を習得した時点で定着し，その指令に基づいたパラメータ学習によって運動記憶が形成されることを意味している．運動制御系に障害をもつ患者では，適用できる運動スキルが限定されることから，習得された運動パターンを変えるためには，難易度を高く設定した課題を行わせることで，日常で用いる運動スキルへの転移をはかることも重要である(90頁「5．脳卒中：歩行-麻痺側下肢制御の再構築」参照)．

文献

1) Platz, T. : Impairment-oriented training (IOT) —scientific concept and evidence-based treatment strategies. *Restor Neurol Neurosci* 22 : 301-15, 2004.
2) Samuel, M. et al. : Evidence for lateral premotor and parietal overactivity ion Parkinson's disease during sequential and bimanual movements; A PET study. *Brain* 120 : 963-976, 1997.
3) Ma, HI, Trombly CA. et al. : A synthesis of the effects of occupational therapy for persons with stroke, Part II: Remediation of impairments. *Am J Occup Ther* 56 : 260-274, 2002.
4) Van, V. et al. : Extrinsic feedback for motor learning after stroke: what is the evidence? *Disabil Rehabil* 28 : 831-840, 2006.
5) de Kroon, JR. et al. : Relation between stimulation characteristics and clinical outcome in studies using electrical stimulation to improve motor control of the upper extremity in stroke. *J Rehabil Med* 37 : 65-74, 2005.
6) Ertelt, D. et al : Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *Neuro Image* 36 : T 164-T 173, 2007.
7) Pollock, A. et al.: Physiotherapy treatment approach for the recovery of postural control and lower limb function following stroke: a systematic review. *Clin Rehabil* 21 : 395-410, 2007.
8) Orrell, AJ. et al.: Motor learning of a dynamic balancing task after stroke: implicit implications for stroke rehabilitation. *Phys Ther* 86 : 369-380, 2006.
9) Mount, J. et al.: Trial and error versus errorless learning of functional skills in patients with acute stroke. *Neuro Rehabil* 22 : 123-132, 2007.
10) Denn, O. et al.: Gait recovery is not associated with changes in the temporal patterning of muscle activity during treadmill walking in patients with post-stroke hemiparesis. *Clin Neurophysiol* 117 : 4-15, 2006.

263-00969