

## 総 説



# 脳卒中患者の歩行介入についての一考察

## — 歩行介入の戦術と運動制御・運動学習 — \*

倉山太一<sup>1, 2)</sup>

### 緒 言

脳卒中患者を対象とした歩行介入に於いて、運動量は強いエビデンスを有している<sup>1)</sup>。一方で、歩行介入に於ける運動療法の質的側面—「どのような課題を、どのように行えばよいのか」—については明確な根拠が少なく、担当する理学療法士の選択に任されている。本報告では、運動量を原則とした歩行介入を実施する中で、どのような視点で介入の質的側面を捉えるべきか、運動制御や運動学習といったキーワードを絡めて考察した。

### 歩行介入に於ける運動量の重要性

勉強に於いて重要なことの一つは目標を具体的に定め、その達成に必要なことを明確にすることである。受験勉強であれば、目標とする大学を定め、目標とする学部を定め、目標とする学科を定め、更に目標とする将来像からその大学で何を学ぶか、構想を練ることが大切である。目標が精鋭化するほど、必要な勉強は絞られ、学習すべき内容が最適化される。さて、目標がしっかりと決まったとして、勉強すべき内容も定まり、後は学習するだけ、となったとする。そして日々努力を続けるが、しばらくすると、ある問題が発生する。学習し続けることは意外と難しく、成果もすぐには出てこない、遊びたい、寝たい。そこで我々の殆どは月並みにこう考える「もっと良い方法はないだろうか…？別のもっと効果的なやり方がある

のではないかと…。もっと興味を持って継続出来る方法があるのでないか？もっと楽に点数を上げられるのではないだろうか？」等々である。真剣に決意して取り組んだ時でもこのような考えが頭をよぎる。もちろん効率的でない勉強方法の間違ひを見つけ、正しく修正することは重要である。しかし、究極的には特別な戦術など存在しないことは明らかだ。要は、大量に勉強するしかない。学習量を確保してこそ成績が上がるというのは、戦術と言うよりも、ある種の物理学的法則である。この摂理を破ることは不可能である。そして、ふと、ある重要な言葉を思い出し、発起して再び勉強に取りかかる。それはたとえば「忍耐」といったキーワードだ。我々は堪え忍んで量をこなさなければ学習効果が上がらないことを知っている。

患者・家族に「脳卒中のリハビリの本質は、動作の学習にあるのですか？」と聞かれれば、大抵のPTは肯定的な回答をするだろう。人によっては「脳卒中のリハビリは学習そのものです」と、具体例を挙げて科学的背景を説明するかもしれない。さて、脳卒中患者の運動療法が学習であるとすれば、学習効果に最も寄与するのはその“学習量”であるから、脳卒中患者に於ける運動療法において最も重要なのは“運動量”であるということになる。運動機能向上における最も重要なファクターは「高強度で頻回に運動すること」である。

脳卒中患者に於ける機能回復と運動量の関連を最も端的に表す例としてはCI療法<sup>2)</sup>が挙げられる。標準的なCI療法では非麻痺側の運動制限を行いながら、麻痺側を1日最低6～7時間、2週間集中して訓練することで麻痺側上肢機能のレベルアップを達成できる。慢性期脳卒中患者の“廃用手”が“実用手”へと変化する顕著な回復事例を著者も実際に経験した<sup>3)</sup>。脳卒中患者における運動療法が学習と定義された以上、学習則に基づい

\* Therapeutic interventions to improve walking in patients with stroke

1) 東京湾岸リハビリテーション病院  
(〒275-0026 千葉県習志野市谷津 4-1-1)  
2) 千葉大学大学院医学研究院  
(〒260-8670 千葉県千葉市中央区亥鼻 1-8-1)  
Taichi Kurayama. PT. PhD: <sup>1)</sup> Tokyo Bay Rehabilitation Hospital. <sup>2)</sup> Graduate school of Medicine, Chiba University.

た量の確保は大前提である。運動療法に於いて運動量の追求無しに、科学的な介入を行っているとは言えない。運動量の確保は、脳卒中中の運動療法に於いてもはや公理である。出来るだけ高強度・高難度で目的動作を続ける方法が最もエビデンスの高い戦術である。

2008年に出版された *Stronger after stroke*<sup>4)</sup> は、最先端の研究結果を患者向けに書き下ろしたメディカルガイドブックである（現在、第二版が出版されている）。脳卒中になった人々がどのように運動障害と向き合うべきか、神経科学や臨床試験の結果など最新の知見を元に、丁寧に解説されている。書中で「限界は無い」と言え！」と述べられるなど患者を奮起させるような表現も多く、大変エネルギーギッシュな書籍である。その序論にこんな一文がある。－「もし誰かが、“努力を要しない特別な方法であなたを回復させることができる”と言って来たら、財布をつかんで逃げなさい！」－。日本の教科書では余り見かけないユニークな注意書きである。

運動療法において量の重要性を主張し、これを患者に対して要請することは、その逆よりも難しいことが多々ある。人間には、できるだけ楽をしたい、できるだけ近道をしたい、という効率性を重視する考えがある。運動量をひたすら主張するPTよりも、マッサージや負荷の少ない運動療法を実施するPTが患者の満足度を上げることも多い。正しいと分かっていることでも現場で実践するには困難が伴う。しかしそれでもなお、真理は曲げられないのである。楽をしたいと言う発想は様々な科学的発見を生み出したことは承知している。だが脳卒中患者の運動療法に於いて、まだそのようなエビデンスはないし、それは運動療法には当てはまらない可能性が高いのではなからうか。そのような戦術は今のところ理学療法士の仕事では無いように思える。現時点ではリスク管理をしながら、起立-着座訓練など下肢の運動療法を可能な限り多く実施することが最も科学的である。色々な講習会で、量を追求しない運動介入を習うこともあるかもしれない。だがそこに本当に科学的根拠があるか、自分で吟味することが必要である。我々が与えられた診療時間で何を行うか、裁量権は確かに我々にある。しかしこの裁量権は自分が自由な介入を行うための裁量権ではない。患者にとって最適な運動療法をアレンジするための裁量権である。運動量を削って根拠の明かでない介入を行うことは避けなければならない。講習会の先生がどんなに権威のある人でも、その科学的

根拠や介入効果の保証はしてくれないのである。…first do no harm（先ず害を成すなかれ）とは、古くからある格言だそうだが、これは医療に携わる者にとって最も重要で難しいテーマであると思う。最適なものが分かっているのに、それを提供できなかったら、結果的に harm である。

## 実用歩行獲得に必要な三つの要素～戦術のターゲット～

聞けば当たり前と思う教科書的な知識でも、自分の中では整理されていないことが多い。実用歩行に必要な三要素を定義せよ、と聞かれて明確に根拠を持って答えられることは、専門家として必要であるが意外と盲点である。経験的に体得されていても、言葉として表現出来るとは限らない。図1にその三要素を引用<sup>5)</sup>するが、一端自分の中で三要素を考えてから見ていただくとある種の自己評価になるかもしれない。引用した書籍では実用歩行に必要な条件が6つ挙げられているが、これらは大まかに歩行速度、歩行距離（耐久性）、安定性（転倒）の三要素に集約される（最後の一文は応用歩行）。紹介した書籍では、特に「歩行速度」が重要視されており、筆頭項目として挙げられている。実際には、新入理学療法士にこの質問をすると、「歩行速度」の要素が最後まで出てこないことが多い。しかし患者の歩行速度が遅いと実用性に欠けるため、早々と車いす移動に遷移してしまう症例を経験するし、研究でも脳卒中患者の移動範囲と歩行速度は強く関連することが知られている<sup>6)</sup>。この三要素は患者個人の単位で見れば相当大まかな指標であることは確かだが、これらの要素を念頭に置くことで歩行介入の目標はある程度精鋭化され、介入戦略を最適化することに役立つ。実用歩行獲得のための最も端的な戦略は、

### The criteria for gait competency in the community include the ability to:

- Walk at speeds fast enough to cross streets safely: at least 1.1-1.5 m/sec.
- Walk for a long enough time and far enough to accomplish daily tasks – about 500m.
- Turn the head while walking.
- Use anticipatory strategies to avoid or accommodate obstacles.
- React quickly enough to slips and trips and avoid a fall by stepping.
- Negotiate stairs, curbs, ramps, moving, footways, and carry object.

Carr et al 2011(文献5)より転載 (© 2011 by Elsevier)

出来るだけ難しい道を，出来るだけ長く，出来るだけ早く，歩くことである。

### 歩行介入に於ける運動制御学的な視点<sup>7)</sup>

アインシュタインは「宇宙はこうなっているはずだ」と，トップダウン的に理論を展開したという。当時（19世紀）の物理学は「黒雲が現れた」<sup>8)</sup>と形容されるほど行き詰っていたが，彼の視点は相対性理論や量子力学といった20世紀の重要な物理理論の発展に大きく寄与した。ヒトの運動に於いても「脳が何を目的として，何を計算しているのか」というような，理論的背景<sup>9)</sup>を元に，トップダウン的に運動を捉えることで理解が容易になる場合がある。

ヒトの随意運動は大きく，フィードバック制御（feedback control：FB制御）とフィードフォワード制御（feed forward control：FF制御）の二つに分類することが出来る。FB制御は感覚情報を前提とした運動制御であり，感覚器から入力される情報に基づいて，運動誤差を修正する制御方法である。この機能のおかげで真っ暗なデコボコ道でも転倒せずに歩くことが出来るが，反面，感覚情報を運動に反映するのに時間遅れが生じるため，ゆっくりとしか歩けない。そこでヒトは投球動作のような素早い動きについては，時間遅れを避けるため，主にFF制御を用いた運動制御を行う。FF制御は反復学習によって獲得された「内部モデル」と呼ばれる脳内の計算システムを利用して，目標軌道から逆算した運動指令を出力する，予測的な運動制御である。健常者の歩行は左右交互に足を振り出す律動的動作と見なせるが，通常，一步に要する時間は0.5秒程度であるためFF制御を利用しなければ歩行できない。したがって脳卒中患者の歩行介入に於いても，健常者が行っているような自動化された歩行運動の再獲得を目指す場合には，FF制御に働きかけるような戦術が必要といえる。ではFF制御に働きかけるために留意すべき条件とはどのようなものだろう。それは大きく2つと考えられる。まず，FF制御は“素早い”動きであるという点である。歩行動作を例にとれば，健常者は一步が0.5秒程度であることから，それ以内に終了するような動作でなければFF制御のトレーニングとは言い難い。またもう一つの条件は，FF制御を司る回路（内部モデル）を脳内に構築するためには少なくとも数百回単位の反復が必要といわれ，脳卒中患者を対象とした研究もこれを支持していることである<sup>10-11)</sup>。歩様改善を意識するあまり，ゆっくりとしたステップング動作を反復しても，実際の歩行には汎化されない

可能性がある。

なお，FF制御を動員しながら歩様改善を図るための一例として，高速で高頻度の反復練習が可能な split-belt treadmill<sup>12)</sup>を用いた歩行介入が挙げられる。左右下肢で異なるベルトスピードを再現することで意図的に立脚時間やストライド幅を伸縮させ，片麻痺患者の異常歩行の代表である左右非対称性にアプローチするものである。このような特殊なトレッドミルはまだ研究段階であり普及していないが，ハーネスを利用することにより安全に実施できるFF制御トレーニングとして可能性を有していると思われる。特に，2009年のKahnらの報告は split-belt treadmillの効果を一般のトレッドミルでも実施できる可能性を示した点で興味深い。彼らは，麻痺側下肢をベルトの傍らでスタンスさせ，非麻痺側下肢だけをトレッドミル上に乗せて素早くステップングさせるトレーニングを20分間実施し，非麻痺側下肢の立脚時間の延長，歩幅の延長などの効果が10回の訓練で2週間持続したことを報告している<sup>13)</sup>。一世を風靡した免荷式トレッドミルは現時点で歩行自立度，歩行速度などの有効性については，世界最高峰の臨床医学雑誌である *The New England Journal of Medicine* において決定的に否定されてしまったが<sup>14)</sup>，Kahnらのように使用方法を工夫することで，左右非対称性の改善に利用できる可能性は残されている。

### 歩様の運動方程式？

歩行動作においては中枢神経系の制御があるのは確かだが，地上で動くもの全てが力学に支配される以上，“歩様”と呼ばれるもののある部分は物理的に規定されていると考えることはごく自然である<sup>15)</sup>。MochonとMcMahon(1980)は，ヒトの歩行を単純な工学モデルを用いて（解析するための数学は決して簡単ではないが）物理学的に記述できることを示し（図2）<sup>16)</sup>，実際に重力と慣性だけで半永久的に歩行できる二足歩行ロボットを制作した。歩行は制御工学的には下肢を軸とした逆振り子が振動を繰り返す「リミットサイクル」であり，エネルギーが失われない理想的な系では，緩い下り坂を利用して安定的に歩行する受動歩行モデルを再現できる。本邦でも名古屋工業大学・佐野教授らの研究グループが実際にこのモデルを応用した受動歩行ロボットを作成しており<sup>17)</sup>，連続歩行のギネス記録を保持している（受動歩行モデルについて詳細は，同研究に関わった池俣の論文<sup>18)</sup>が分かりやすい）。またGarciaらはネット上にシミュレーションを行うためのプログラムを公

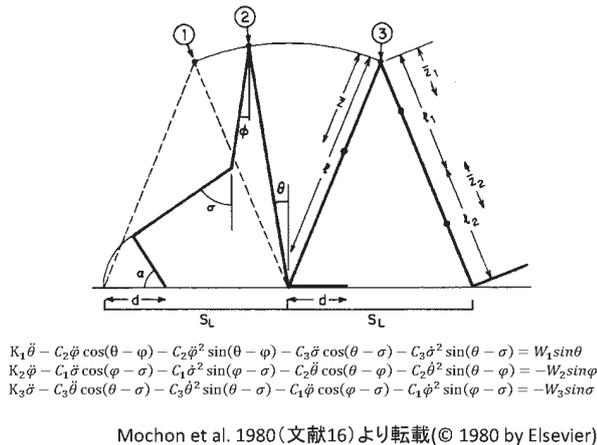


図2

開しており<sup>19)</sup>、坂道の角度や、足の長さ、質量など各種パラメータを変化させたときの変化をアニメーションで観察することが出来る。

患者の表出する歩様の大部分は、法則によって“自然に”決められた、二次的な結果である。つまり歩様は、歩行学習の結果が最終的に表出した“歩行の見た目”と思われる。子どもは「美しく歩こう」とか、「正しく歩こう」などとは考えなくとも標準的な歩様を獲得できる。各自の身体アライメントと、それに応じた物理的効果を基盤として、脳が動作を最適化した結果である。患者の歩様を美しくすれば歩行機能が向上するのではなく、歩行機能を向上させることで結果的に歩様が整うと考える方が自然ではないだろうか。少なくとも担当する理学療法士が、見た目でその人の「正しい歩様」を決め、型にはめるような歩行練習を行うことには疑問を感じる。

## 再学習の問題

岡本らによれば、ヒトは筋力・バランス機能の発達により生後一年で独立歩行を習得しその後2年の反復練習を経て、3歳ごろに安定した成人型歩行を獲得するとされている<sup>20)</sup>。ここで述べられている2年間の反復練習は、幼児が実用歩行を獲得するまでの道のりであるが、先に述べた実用歩行の三要素と照らし合わせると、その猛特訓ぶりが良く理解できる。たとえば転倒しない方法に関しては、転倒を繰り返す課程の中で学習してしまう。時には擦り傷を作るがそれでも懸命に歩いているのは転倒、を繰り返す。また歩行距離、歩行速度といった条件については、そのトレーニングの基準は自分の数倍の足の長さを持つ“大人”である。幼児は大人と一緒に歩きたい一心で、必死について行こうとする。さらに階段などの段差は2歳児

ではほとんど膝の高さにある。我々はそんな段差を何段も昇ったら相当疲労してしまう。ヒトは幼い時から歩き続け、体の成長に合わせて最適化された歩行制御は、強固な運動プログラムとして中枢神経に規定される。

さて、Schmidtらの主張する運動プログラム(general motor program)の概念<sup>21)</sup>に基づけば、脳卒中で失った歩行機能の再獲得に関して、上述したような生来的に獲得されたプログラムを無視できないという問題、つまり新規学習と、再学習の違いがもたらす問題が存在することに気が付く<sup>22)</sup>。

たとえばある患者において、評価の結果、能力的に「そろえ足歩行」が安全であると判断された場合でも、患者が素直に適応するとは限らない。元々学習されているプログラムの影響が強い場合、意図せず「交互歩行」を表出してしまい、「そろえ足歩行」が出来ない場合もある。そのような患者に於いては、強制的に「そろえ足歩行」を習得させることが正しいのだろうか？そして患者がそれを習得した後、機能改善の変化に応じて、再び「交互歩行」に移行できるのだろうか？正解を判定できる科学的根拠はない。著者個人の考えでは患者の適応に任せ、「交互歩行」を採用、という選択をすることが多いが、この考察が正しいかどうか、判定できる科学的根拠も、もちろん存在しない。このような既存の運動プログラムが他の動作に及ぼす影響は「学習の転移」と定義<sup>23)</sup>されており、特にスポーツ教育の分野では議論の対象となっている。なお、以前学習したことが、後の学習に影響を与えることで促進的に働く場合を正の転移、妨害的に働く場合を負の転移という。

実際には患者の多くは、脳卒中によって身体機能に変化しているため、あらゆる動作に於いて以前とは異なる運動制御を要求される。したがって、総合的には患者全員が新しい動作を制御するためのプログラムを新規に学習する必要があると考えられるが、ここで幼児との対比で明らかに異なる点がある。それは、幼児では白紙の紙にプログラムを書くような運動学習が、成人では既に書かれたプログラムを横目に見ながら、残り少ない“余白”に新しいプログラムを加筆するような格好になることである。脳卒中患者に於ける再学習は“書き換え”と称されることもあるが、原稿を書くときのように、一中枢神経系に構築された回路を消去し、さらに上書きをする—そんな手順が踏めるのだろうか？

記憶・学習の神経科学は主に動物実験により

発展しており、とくに遺伝子操作によって学習効果（記憶力）を高めることには10年以上も前に成功している<sup>24)</sup>。一方で、記憶を消去する方法は明らかになっていない。事実、“記憶の消去”は神経科学におけるトピックスの一つである。ヒトにおける長期記憶は削除不能の可能性もあり、もし選択的な記憶消去技術が確立されればノーベル賞級の快挙となるだろう。ちなみに映画「Men in Black」で使用されている記憶消去のための“ニューライザー”はもちろん架空のツールだが、実際にSDラットに電子ビームを当てると直前4秒間の記憶が消去されるという報告がある<sup>25)</sup>。話が逸脱したが、では再学習の際、過去に覚えた運動プログラムの記憶はどうなるのであろうか。動物における単純な記憶実験の結果からは、以前学習された記憶が不要になった場合でも、それは抑制されるだけで削除されないことが明らかになっている<sup>26)</sup>。このことは運動再学習に於いても、過去の類似のプログラムは削除されず、抑制されるのみで、同時進行で新しいプログラムを加筆する課程の必要性を示している。一時代を席卷した、神経生理学的アプローチは講習会のデモンストレーションなどで“即時的効果”を見せることは得意に見えた。しかし、運動の再学習においては、患者自身の長時間にわたる反復練習が必要であり、結果的に効果を得られなかった可能性を、神経科学は指摘する。即時的効果を有する運動課題は既に多く報告されているが、問題はそれを長期的効果として定着させるための反復頻度と継続時間をどのようにして確保するかということにあるのだろう。CI療法はその一つの成功例であるといつて良いと思う。

## 結語

脳卒中患者の歩行介入のための戦術について、公理としての運動量の重要性について強調し、その上で、介入の質的側面について個人的見解を述べた。運動制御・学習については多くの研究報告があるが、脳卒中患者の歩行介入に直接関連するような報告はまだ少ない。理学療法士は患者に直面する職業として、介入手法の質的側面を運動制御・学習の観点から検証できる立場にある。自戒を込めて、今後の研究成果に期待したい。

## 【引用文献】

- 1) 脳卒中合同ガイドライン委員会（篠原幸人・他編）：脳卒中ガイドライン 2009，協和企画，東京，2010，pp300-304
- 2) 道免和久：CI療法。中山書店，東京，2008
- 3) 倉山太一，渡部杏奈・他：通所リハビリテーションにおけるCI療法の効果。理学療法科学。2009; 24 (6) : 929-933.
- 4) Peter G Levine: Stronger After Stroke. Demos Health, New York, 2008.
- 5) Janet H Carr, Roberta B Shepherd: Neurological Rehabilitation 2nd ed. Churchill Livingstone, Philadelphia, 2011
- 6) Perry J, Garrett M: Classification of walking handicap in the stroke population. Stroke. 1995; 26 (6) : 982-989.
- 7) Eric R Kandel, James H Schwartz, et al: Principle of neural science 5th ed. McGraw-Hill, New York, 2012
- 8) 日本物理学会：21世紀、物理学はどう変わるか，裳華房，東京，2002
- 9) 川人光男：脳の計算理論，産業図書，東京，1996.
- 10) Birkenmeier RL, Prager EM, et al: Translating animal doses of task-specific training to people with chronic stroke in 1-hour therapy sessions: a proof-of-concept study. Neurorehabil Neural Repair. 2010; 24 (7) : 620-635.
- 11) Byl NN, Pitsch EA, et al: Functional outcomes can vary by dose: learning-based sensorimotor training for patients stable poststroke. Neurorehabil Neural Repair. 2008; 22 (5) : 494-504.
- 12) Reisman DS, Wityk R, et al: Locomotor adaptation on a split-belt treadmill can improve walking symmetry post-stroke. Brain. 2007; 130 (7) : 1861-1872.
- 13) Kahn JH, Hornby TG: Rapid and long-term adaptations in gait symmetry following unilateral step training in people with hemiparesis. Physiother. 2009; 89 (5) : 474-83.
- 14) Duncan PW, Sullivan KJ, et al: Body-weight-supported treadmill rehabilitation after stroke. N Engl J Med. 2011; 364 (21) : 2026-2036.
- 15) Garcia M, Chatterjee A, et al: The simplest walking model. J Biomech Eng. 1998; 120 (2) : 281-288.
- 16) Mochon S, McMahon TA: Ballistic walking. J Biomech. 1980; 13 (1) : 49-57.
- 17) <http://drei.mech.nitech.ac.jp/~sano/biped.html> (参照 2012-11-30)
- 18) 池俣吉人：受動歩行の原理およびその工学的応用，名古屋工業大学博士論文 (<http://repo.lib.nitech.ac.jp/handle/123456789/259>)，2006.

- 19) <http://ruina.tam.cornell.edu/~pab47/passivewalker.m> (参照 2012-11-30)
- 20) 岡本 勉, 岡本香代子: 筋電図からみた歩行の発達. 歩行開発研究所. 大阪. 2007. pp132.
- 21) Richard A. Schmidt (調枝孝治・訳): 運動学習とパフォーマンス. 大修館書店, 東京, 1994.
- 22) 大高洋平: リハビリテーションにおける運動学習の特徴. 臨床神経生理学, 2011; 39 (5) : 353
- 23) 橋本圭子: 運動スキル学習における, 転移, 運動イメージ, 意図. 新潟工科大学研究紀要. 2009; 14: 155-168.
- 24) Tang YP, Shimizu E, et al: Genetic enhancement of learning and memory in mice. *Nature*, 1999; 401 (6748) : 63-69.
- 25) Wheeler TG, Hardy KA.: Retrograde amnesia produced by electron beam exposure: causal parameters and duration of memory loss. *Radiat Res.* 1985; 101 (1) : 74-80.
- 26) Myers KM, Davis M: Mechanisms of fear extinction. *Mol Psychiatry.* 2007; 12 (2) : 120-50.