

June Special

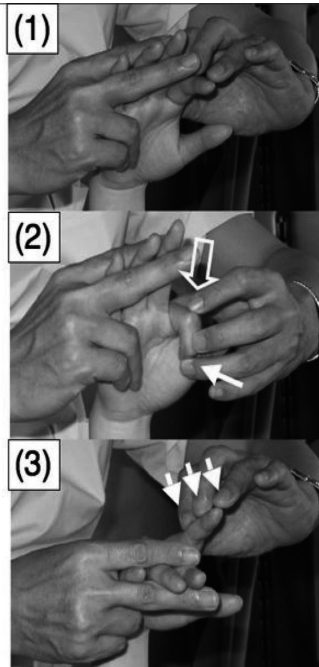
運動と神経科学

ニューロサイエンスと
ニューロリハビリテーション

促通反復療法の治療原理



目標の指に伸張反射と患者の意図によって
指の伸展が実現するメカニズム



運動やリハビリテーションとなると、骨や筋肉、腱、靭帯、関節や関節包などの運動器が問題になることが多いが、その前の段階で脳や神経が関与していることは誰でも知っている。今月の特集では、「運動と神経科学」というタイトルで、3人の先生に、ニューロサイエンス、ニューロリハビリテーション、運動制御と運動学習などをキーワードに解説していただいた。これまであまり扱ってこなかった分野であるが、運動・動作とその仕組みを知り、アプローチするうえで欠かせない。ぜひ楽しみいただきたい特集である。

1 神経科学とリハビリテーション 小松泰喜 P.2

— ニューロリハビリテーションへのいざない

2 身体運動の制御と学習はどのようになされているか? 野崎大地 P.9

— その研究史とともに

3 患者さんに無駄（試行錯誤、迂回）をさせないリハ 川平和美 P.18

— 「川平法」（促通反復療法）を語る

1

運動と神経科学

神経科学とリハビリテーション —ニューロリハビリテーションへのいざない

小松泰喜

日本大学スポーツ科学部 教授
博士(学術)、理学療法士
(公財)日本バレーボール協会 M&M 事業本部
本部長
日本体育協会公認アスレティックトレーナー

運動と神経は切っても切り離せないが、今回の特集を組むにあたって、まず日本大学の小松先生に、神経科学とリハビリテーション、とくにニューロリハビリテーションについて概要を語っていただき、特集の導入としたい。ニューロリハビリテーションという一見スポーツとは関係がないように思われるが動作とその仕組みという点では基礎的な知識は大きく変わらない。スポーツやトレーニング、あるいはアスリートのリハビリテーションを考えるうえでも重要な鍵となる概念であろう。さまざまな想像力をもって読んでいただければさいわいである。

神経科学、ニューロサイエンス、 ニューロリハビリテーション

— スポーツでは外傷・障害が多いということで、整形外科学やリハビリテーション医学の分野で語られることが多いのですが、スポーツというより「運動」と捉えたとき、その制御や学習を中心とし脳や神経から考えるということは欠かせない。運動ということでは同じ領域になる。

小松: 私は同じというより、さらに重要だと考えています。実際には、運動の制御、あるいはもともとは動作やその仕組み、そういったものがどのように行われているのかをみていくうえで、神経科学の領域とは切っても切りはなせないと考えている、そもその興味、関心は、人の動作やその仕

組みを理解することで、それはリハビリテーションとしても大事だし、スポーツ科学としても重要です。筋肉とか関節とか、治療学で言う整形外科学とか、そういうことだけではスポーツは語れないと思っています。

— 当然ですね。

小松: 動作や、その仕組み、制御、さらには学習。そういうことへの理解が、これからいい方向につながっていくのではないかと思います。いい方向というのは、スポーツで言えば、たとえば国際大会で勝つとか、オリンピックで金メダルと取るとか、そんな方向に進んでいくんじゃないか。また、それがトレーニング科学、あるいは実際の試合、ゲームなどの分析につながっていくようになればよいと考えています

— 筋力をどう向上させるか、関節可動域をどう改善するか、それは大事なことだけれどそのもっと前がある。

小松: 運動や動作の起点って結局、脳です。神経ももちろん大事ですけど、関節や筋肉は最終的にいきつくところなので、どうしても見た目、そこを鍛えたがる。しかし、何のためにそれをやっているのかというと、単純に筋を肥大させるということではなく、どんなトレーニング科学をやっている人も、それがスキルやパフォーマンスにつなげる目的で行っているのだと思います。

— しかし、それについてはあまり語られてこなかったというのは、神経科学からの視点のリハビリテーションの世界ではあまりなかったということ?

小松: 縦割り構造の問題というか、教育もその構造のなかにありますから。



小松泰喜(こまつ・たいき)先生

— 理学療法士や作業療法士の教育にもそういうものはあまり入っていない。

小松: しかし最初は、基礎医学として解剖学や生理学を学びます。ただ結局、専門科目になって、神経系とか運動器系というように分かれていく、また分かれていかざるを得ないのですが、そういう縦割りになってしまって、学生も興味関心のあるほうに進んでいってしまう。それについてはたぶん医学科、医師も同じだろうと思います。

— 理学療法士も専門分化しつつあり、専門性が分かれていっている。

小松: そうですね。でも本来、医学教育の中でわれわれ(理学療法士)でしか学べない学問という科目があるわけです。たとえば運動学などがそうです。運動学は非常に歴史もあるし、大きく発展してきた分野です。それが枝分かれして、今で言うところの生体力学・医工学とか、そういった方向になってきているわけです

— 運動学を学ぶのは医療分野では理学療法

士くらい？

小松：理学療法士、作業療法士、柔道整復師くらいですね。

— その運動学には、もちろん脳や神経が……。

小松：入ります。入るといふか学ぶわけですよ。

— 先生は脳神経科学セミナーなどを主宰、また講演などもされていますが、セミナー参加者は理学療法士が多い？

小松：作業療法士や医師などもいますが、多いのは理学療法士です。

— 脳神経科学セミナーは今回で9回。

小松：そうです。第10回で、札幌医科大学で開催されます(表参照)。年に2回やっているの、5年続いています。

— そういう分野へ関心を寄せる人が増えつつある。もともとのきっかけは？

小松：きっかけは、東大の本郷と駒場合同で夏のゼミをやっているんです。私は本郷にいたことがあるので、本郷の仲間に入れてもらってはいるのですが、大学院生たちの研究成果を発表し議論し合うために、夏に長野県東御市でそれぞれの研究室が1つの場所でゼミをやるというものです。自分がやっている研究の発表の場となります。本郷の野崎大地(東京大学大学院教育学研究科身体教育学コース・教授、次項参照)先生の研究室と駒場の中澤公孝先生(東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻・教授)の研究室の院生たちです。

— それが「運動神経科学研究会」になり、そこが脳神経科学セミナーを開催している。

小松：そうです。

— 小松先生の研究分野は「ニューロリハビリテーション」と言えますか？

小松：そうですね。「神経科学リハビリテーション」というのもおかしい感じがします。歴史的には、1996年くらいに、マーク・ラタッシュ(Mark L. Latash)というペンシルバニア州立大学の先生が「Neurophysiological Basis of Movement」という本を出し、日本では道免和久先生が翻訳され、『運動神経生理学講義』(大修館書店)

Mark L Latash

- 姿勢制御にUCM(UnControlled Manifold)解析を使用し、立位バランスをとるためのそれぞれの筋群の協調性を検討する(関節間協調の解明)
 - 例えば、腕を伸ばして手で重りを持って立位を取り、急に重りを離すと倒れないように無意識に筋肉に力が入るように瞬間的に順応する
 - 筋電図学的解析から、重りを離す前後でそれぞれの筋肉の活動がどう変わるか、そしてそれぞれの筋同士がどのように協調しているのか(冗長性)
 - UCM解析は、筋電図学的に重りを離す前後で筋肉の「協調性」がどう変わるかを、定性的に表すことができる解析である
- 運動制御の仕組みや運動学習や運動の冗長性について客観的に評価することを可能にした



上肢・下肢の運動を組み合わせたリハビリテーションは重要であるが、理学療法や作業療法と別れてほとんど行われず、上肢・下肢の協調運動の回復過程を評価する指標は存在しない



図1

という書名で刊行されています(図1)。

— 副題が「細胞レベルからリハビリまで」

とはおもしろそうですが、細胞とすると、リ

ハビリには関係ないと思う人も多いですね。

小松：そうだと思います。ラタッシュ先生

は、図1に示したように、姿勢制御に関する

2013年(日)
第3回 3/31 運動神経科学研究会
神経脳科学セミナー

日時	2013年3月31日(日) (10:00-16:10)
場所	東京工科大学 3号館10階 31001教室
参加費	9,000円(昼食込) 懇親会に参加される方：懇親会費2,000円
定員	250名
申込方法	下記URLより申し込み、お問い合わせ下さいませ。
http://www.pt-ot-st.net/s_no/-----	
プログラム	
時間	プログラム
9:30	開場
10:00	開会の辞(ゼミネットワークの発展) 運動神経科学研究会 発起人・代表 小松 謙吾
10:10	講義1 『機能回復神経学』 東京工科大学脳神経医学部 神経 道免 和久 国立公衆衛生院 公衆衛生学 公衆衛生学研究所 所長 (脳神経科学研究所 発起人)
11:40	休憩
12:45	講義2 『身体運動制御と学習の観点からニューロリハビリテーションの機序を考える』 池田小松 謙吾
13:00	【上肢運動の制御と学習: リハビリテーション応用可能性を捉えて】 東京工科大学脳神経医学部 神経 道免 和久
14:00	【歩行ニューロリハビリテーションの基礎】 東京工科大学脳神経医学部 神経 中澤 公孝
15:00	【運動学習理論の日常生活動作習得への応用】 新潟県立健康福祉学局健康福祉学系 保健 鈴木 道雄 短大 池田 謙吾
16:10	閉会
	懇親会(12階ラウンジ) (※観覧、立食形式) 懇親会参加費2,000円(昼食込)です。

主催 運動神経科学研究会

協力 東京工科大学医療保健学部理学療法学科 (<http://www.teu.ac.jp/gakubu/medical/pt/index.html>)
東京工科大学大学院教育学研究科身体教育学コース (<http://www.p.u-tokyo.ac.jp/~kweb/>)
公益財団法人身体教育医学研究所 (<http://pedam.org/>)
PT-OT-NET (<http://www.pt-ot-st.net/>)

協賛

研究事業事務局
セミナー運営 株式会社イワミツ (<http://www.iwamitsu.co.jp/>)

講師：柳澤 信夫
東京工科大学大学院教育学研究科身体教育学専攻・教授
【1998年】東京工科大学理学療法士 修士(1998年) 東京工科大学
理学療法士専攻修士課程修了(1999年) 日本学術会議特別研究員(1995-
2002) 博士(教育学) 東京大学(1998年) 東京工科大学理学療法専攻
主任(1998年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1999-2004年) 脳神経
科学センター 身体運動センター 所長(2004年-2009年)
【2001年-2009年】
学術会議特別研究員(2001年) 脳神経科学センター 学長(2001年-2004年)
【2004年-2009年】東京工科大学理学療法専攻主任(2004年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2007年) 東京工科大学理学療法専攻主任(2007-
08) 東京工科大学理学療法専攻センター(2007年) 学長(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年)

講師：野崎 大地
東京工科大学大学院教育学研究科身体教育学専攻・教授
【1990年】東京工科大学(1990年) 東京工科大学理学療法専攻修士課程
修了(1994年) 日本学術会議特別研究員(1995年) 東京工科大学
理学療法専攻主任(1995年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1995-
1998年) 博士(教育学) 東京大学(1998年) エドワーズ大学(1998年)
理学療法専攻主任(1998年) 脳神経科学センター 学長(2001年-2004年)
【2001年-2004年】学術会議特別研究員(2001年) 脳神経科学センター 学長(2001年-2004年)
【2004年-2009年】東京工科大学理学療法専攻主任(2004年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2007年) 東京工科大学理学療法専攻主任(2007-
08) 東京工科大学理学療法専攻センター(2007年) 学長(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年)

講師：中澤 公孝
東京工科大学大学院総合文化研究科広域科学専攻・教授
【1975年】東京工科大学理学療法士(1975年) 東京工科大学理学療法専攻
主任(1975年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1975年)
【1975年-1990年】東京工科大学理学療法専攻主任(1975年)
東京工科大学理学療法専攻主任(1975年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1975-
1990年) スウェーデンに留学(1979年) スウェーデンに留学(1979-1980年)
【1997-2008年】スウェーデンに留学(1997-2008年) スウェーデンに留学(1997-
2008年) スウェーデンに留学(1997-2008年) スウェーデンに留学(1997-2008年)
【2000-2008年】スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-
2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年)
【2008年-2009年】東京工科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工科大学理学療法専攻主任(2008-
09) 東京工科大学理学療法専攻センター(2008年) 学長(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年)

講師：鈴木 誠
新潟県立健康福祉学局健康福祉学系 保健 道免 和久
【1999年】東京工科大学理学療法士(1999年) 東京工科大学理学療法専攻
主任(1999年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1999年) 東京工科大学
理学療法専攻主任(1999年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1999年)
【1999-2008年】東京工科大学理学療法専攻主任(1999年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(1999年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1999-
2008年) スウェーデンに留学(1999年) スウェーデンに留学(1999-2008年)
【2000-2008年】スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-
2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年)
【2008年-2009年】東京工科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工科大学理学療法専攻主任(2008-
09) 東京工科大学理学療法専攻センター(2008年) 学長(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年)

司会：小松 謙吾
東京工科大学理学療法専攻理学療法士学科・教授
【1993年】東京工科大学理学療法士(1993年) 東京工科大学理学療法専攻
主任(1993年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1993年) 東京工科大学
理学療法専攻主任(1993年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1993年)
【1993-2008年】東京工科大学理学療法専攻主任(1993年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(1993年) 東京工科大学理学療法専攻主任(1993-
2008年) スウェーデンに留学(1993年) スウェーデンに留学(1993-2008年)
【2000-2008年】スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-
2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年) スウェーデンに留学(2000-2008年)
【2008年-2009年】東京工科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年) 東京工科大学理学療法専攻主任(2008-
09) 東京工科大学理学療法専攻センター(2008年) 学長(2008年) 東京工
科大学理学療法専攻主任(2008年)



柳澤信夫先生

図2 第3回脳神経科学セミナー(東京)平成25(2013)年3月31日 東京工科大学

EPILOGUE. FUTURE OF RESTORATIVE NEUROLOGY IN REHABILITATION MEDICINE

NOBUO YANAGISAWA

- * 神経系は多数(140億個)のニューロン、多数の神経回路網により、単純な運動、感覚から高度な精神機能までを司るユニークな器官である
- * 破壊された神経細胞は再生しないが、脳は広汎かつ高度の代償機能(可塑性)を有する
- * 現状では基礎および臨床神経科学は神経機能解明の車の両輪である
- * 神経リハビリテーションのゴールが、身体的および社会的な機能回復を一義的な目標として、必ずしも障害からの回復の神経機序の解明を目的としないのは賢明である
- * 急速に発展している領域には以下が含まれる
 - 1) 手指の運動・感覚のneural control interface
 - 2) 姿勢・歩行障害への種々な介入療法(薬物、理学療法、手術手技による)
 - 3) 理論的根拠に基づく痙縮の治療 (柳澤信夫氏提供)

図 3

Restorative Neurologyの手続き

障害の評価(質・量)

↓
責任病巣、発現機構の診断・解明

↓
対策の決定、実施

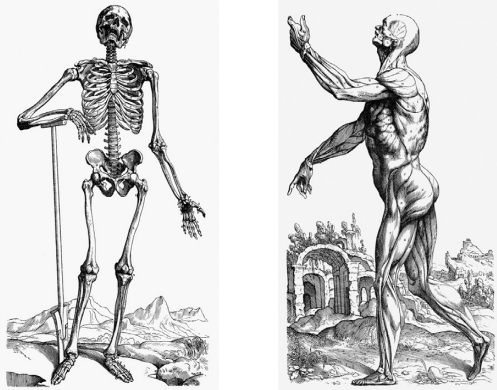
- ・ 薬 物
- ・ 補助具(感覚代替装置を含む)
- ・ 訓 練
- ・ 手 術
- ➡ ・ Functional Stimulation
- ・ その他

(柳澤,1989)

(柳澤信夫氏提供)

図 4

二足の起立と歩行は高度の神経発達を要した



(A. Vesalius, 1543)

(柳澤信夫氏提供)

図 5

ニューロモデュレーション

・ ニューロモデュレーション

- 電気刺激療法研究会
 - ・ 第1回1985年
- 脊髄刺激装置及び脳深部刺激装置等を使用し、質の高いかつ経済的な治療を、安定提供する体制の維持・向上に努めること
 - ・ 末梢神経刺激による鎮痛、遷延性意識障害の治療、痙縮・尖足の治療、頻尿・尿失禁・排尿障害の治療、脳脊髄刺激による除痛、不随意運動の治療などがテーマとなっている

- 日本ニューロモデュレーション学会 第19回(2005年) <http://www.japan-neuromodulation.org/index.html>



図 6

る解析の研究をしてらっしゃったようです。運動制御のしくみ、運動学習、運動の冗長性、そのようなことを客観的な解析手法によって動作やその仕組みを評価する、そういう研究をされているということですよ。

機能回復神経学とニューロリハビリテーション

— 運動の冗長性ってなんですか？

小松：手先の位置を決めるときにそこまでの位置の決め方は無数にあり、その無数にある手先の位置を決める動きやその仕組みを冗長という。つまりヒトや生物の運動は冗長だらけとなる。

— あまり意味ないのに動いている。必要以上に動いているとか、余計なことをしているみたいなの。

小松：余計なこともあれば余分なこともあ

るんですけど、それが結果として意味のあること(手先の位置を決める)だったりする。

— おもしろそうですね。

小松：そうなのですが、「運動の冗長性」は用語としてあまり普及はしていませんね。私はこのセミナーで必ず歴史的な背景について触れるのですが、「機能回復神経学」という言葉を使っている人もいます。これは柳澤信夫先生とあって私の恩師にあたる先生なのですが、神経内科医です。パーキンソン病の世界的な大家です。2013年の脳神経科学セミナーで講演していただきましたが(図2右写真)、パーキンソン病の症状の主たるものは運動障害です。ご存知のように顔が仮面様、無表情になり、動作がすくみ足になったり、筋肉が固縮をおこすといった症状を呈し、運動障害をきたす疾患です。柳澤先生はその研究

をずっとなさってらっしゃって、機能回復神経学(restorative neurology)について述べておられます(図3、4)。40年近く前、先生ご自身がハーバード大学留学時代に取り組みされた学問領域です。すなわち言葉としては「ニューロリハビリテーション」という以前に、それに近い学問領域があったということになります。柳澤信夫先生は機能回復神経学会というものも主宰されています。仮に「ニューロリハビリテーション」を日本語にすると、もしかすると「機能回復神経学」なのかもしれないと思ったりもします。

— 神経というのはつまりは脳？

小松：脳ですね。結局運動障害に対する治療としてどこにアプローチしたかという、やはり神経なんです。基本は薬理学でしようが、二足の起立と歩行に神経学的に何らかのアプローチをして治療の評価、神

2

運動と神経科学

身体運動の制御と学習は どのようなになされているか？ ——その研究史とともに

野崎大地

東京大学大学院教育学研究科 身体教育学
コース 教授
博士（教育学）

身体運動の制御と学習について研究されている野崎先生はもともと工学部の出身だが、大学院から教育学に進み、現在東京大学運動会漕艇部の部長も務めておられる。ここでは、身体運動の制御と学習についてのイントロダクション的レクチャーとして先生自身の研究とともに解説していただいた。

フィードバック制御と フィードフォワード制御

——先生は、身体運動の制御や学習を研究されていますが、まず制御からお願いします。

野崎：まず、身体運動制御の基本スキームであるフィードバックシステムというものがあります。図1に示すように、フィードバックシステムでは、脳がこういう運動をしたいという計画運動軌道をもっている。

脳から、フィードバック制御器を通して、筋肉・身体に指令が行き実際に動く。しかし、実際の動きは、思ったとおりとは限らないので、その違いを使って制御するというやり方が、いわゆるフィードバック制御と言われるものです。これは歴史があって、60～70年くらい前にMITのノーバート・ウィナー（Norbert Wiener）という人が、こういった制御のやり方でヒトの運動の制御も理解できるのではないかと語っていた。

しかし、ここ30年くらいで少し違った考え方が出てきました。フィードバック制御はとてもパワフルなスキームで、産業用ロボットのようなものを動かすときは、極めて有効に働きます。しかし、この30年くらいで言われてきたことは、ヒトの身体への制御はフィードバック制御ではうまくいかないのではないか、ということです。なぜかと言うと、ひとつは神経系に時間がかかる。先日、陸上競技の桐生選手がスタートダッシュの反応時間が0.184秒で少し遅れた

と言っていました。要するに時間がかかる。実際にこう動いたという情報を脳が受け取って何かするまでには0.2秒とかそれくらいかかります。ところが、たとえばピッチングというのは一瞬で終わってしまいます。ということは0.2秒間に何かあってもそれは制御できないと



野崎大地（のぞき・だいち）先生

いうことになってしまいます。

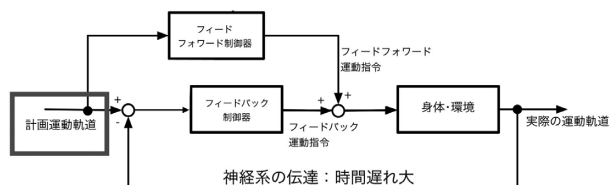
——間に合わないということですね。

野崎：間に合わない。ヒトの動きではもっと速いものが多いではないかということです。日常、手を伸ばして何か物をつかむのも0.2～0.3秒で終わってしまいます。そうすると実際にズレの比較などとやっている余裕はない。そこで考えだされたアイデアが「フィードフォワード制御」というものです。これは、こういうふうに動かしたいのであれば、こういうふうに筋肉に運動の指令を送りなさいというのを、経験などに則って覚えておくとかたいはいはうまくいくだらうということです。うまくいかなかった部分はフィードフォワード制御器で吸収すればいい、と。

——スポーツでは馴染みのある考え方ですね。

野崎：そうです。スポーツをやっている人はそう思っているでしょうね。あとで詳しく説明しますが、図の「身体・環境」が少々変わってもその変化に適応して覚えればう

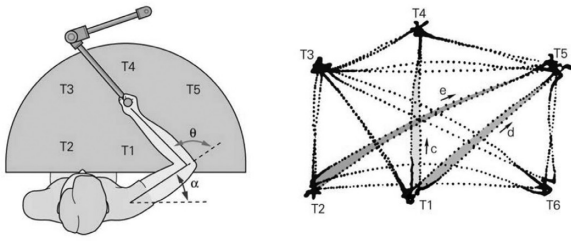
身体運動制御の基本スキーム



- ・フィードバック制御：計画した運動と実際の運動のずれの情報を使って制御
- ・フィードフォワード制御：計画した運動が実行されるように、過去の経験を使って予測的に制御

図 1

運動軌道の普遍的特徴



Morasso et al., *Exp Brain Res*, 1981

図2 Kandel et al., *Principles of Neural Sciences* 5th ed, 2012 より引用

まくいく。それは学習ですね。子どもの頃から、だんだん身体が大きくなっているはずですが、それでもなぜうまくかかるといって、経験に応じて徐々に適応していくからです。

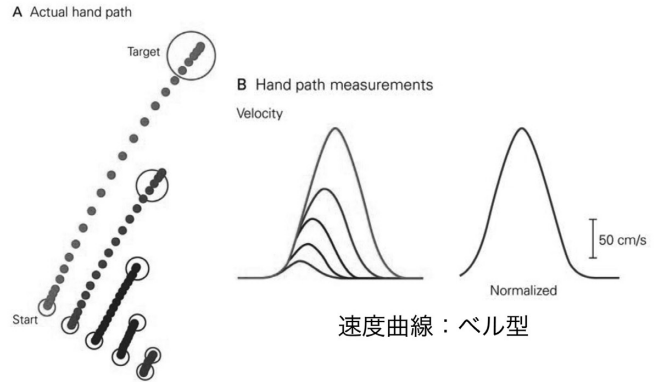
計画運動軌道

—— 身体・環境が変わってもフィードフォワード制御があるからうまくできる。

野崎：いずれにしても身体運動制御の基本スキームというのは、「このように動かしたい」という「計画運動軌道」がまずあるということです。身体運動の制御を研究している人は、この「計画運動軌道」とは何かということから入るわけです。

今から35年くらい前にMorassoという研究者がある実験を始めました。今から見ると原始的な実験ですが、図2のような機械を使って、到達運動、リーチング運動と言われるものですが、手先の軌道がどんな形を描くかを研究しました。この実験から何がわかったかと言うと、これは当たり前ですが、だいたい直線的に動かすということです。しかし、興味深いのは、比較的短い距離から、長い距離まで、どんな距離を動かそうとしても、図3に示すように、手先のスピードの曲線（縦軸が速度、横軸が時間）はだいたいベル型になるという普遍的特徴があることです。ですからまったくデタラメに動かしているわけでは

運動軌道の普遍的特徴



速度曲線：ベル型

図3 Kandel et al., *Principles of Neural Sciences* 5th ed, 2012 より引用

運動軌道の普遍的特徴

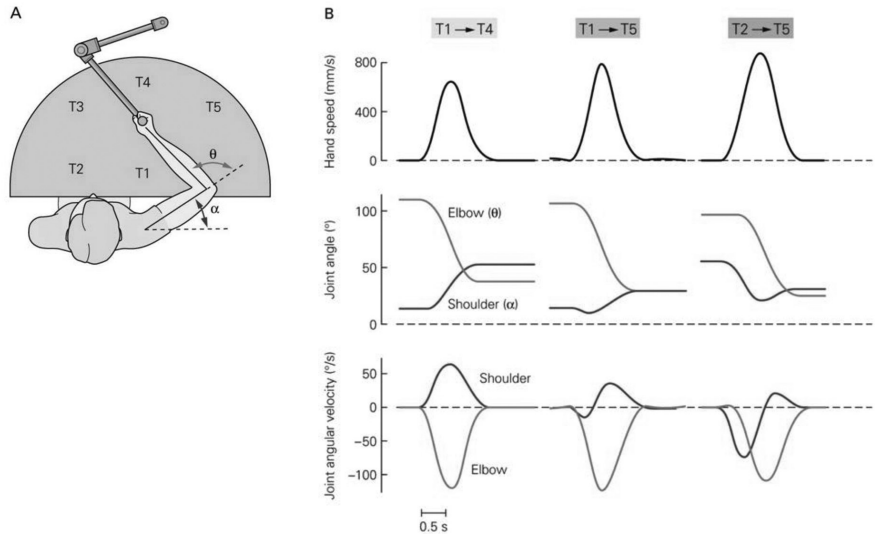


図4 Kandel et al., *Principles of Neural Sciences* 5th ed, 2012 より引用

なくて、必ずこのようなきれいなベル型になるということ Morasso が初めて言ったわけです。障害を受けたりするとベル型の曲線の形が乱れるのですが、健康な人が動かす限りは必ずこのようなベル型になります。どんな距離を動かそうとしてもベル型になるし、どこからどこに動かそうとしてもベル型になる。

図4の一番上が手先の波形なのですが、T1 → T4 の位置に向かって動かすときも、T1 → T5 に向かって動かすときも、

概ねベル型です。どこからどこに動かしてもベル型になります。当たり前のように思うかもしれませんが、実は当たり前ではありません。手を伸ばすときは、肘と肩を考えてみると、肘と肩も単調に動いているように思えます。しかし実際は T1 → T5 に動かす場合、肩の前方から右前方に動かすとき、たしかに手先を見ると、なめらかにベル型を描いているのですが、Morasso が示したのは、肩の関節は一度反対側に振れてから動くこともあるということ

す。要するに肩や肘の動きを見ると、スタート位置と最終到達位置に応じて割とあっちに行ったり、こっちに行ったりしているのだけれども、手先の動き方は変わらないということです。ここで初めて「理想軌道（計画運動軌道）」という概念が出てきたのです。こんな感じで動かしたらいいなという計画を脳はあらかじめもっているのではないかと。ここから計画運動を実現するようにフィードフォワード制御とかフィードバック制御を使って制御するという考え方ができます。この研究は単純な運動ですが、まずは単純なところから研究していこうというのが身体運動制御研究のスタンスです。

「躍度最小モデル」

野崎：運動軌道についてはほかにもいろいろな法則がほかにもたくさんあって、「2/3乗則」というものもあります。たとえば図5の左上図のように、デタラメに紙の上に鉛筆を走らせているように見えるのですが、どんなスピードで鉛筆を走らせているか、急激に曲がるところと、あまり曲がらないところのスピードの関係を調べてみると、急激に曲がるところではスピードが遅くなり、あまり曲がらないところではスピードが速くなっている。そして、速くなるなり方、遅くなるなり方は、手先の動く角速度が曲率の2/3乗に等しいという2/3乗則に則っています。デタラメに動かしているようですが、そうではない。

では、なぜ図3のようなベル型になるのだろうかということが調べられたのが1985年で、MITのFlashとHoganの2人によるものです。彼女たちの“The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model（腕の動きのコーディネーション：実験によって確かめられた数学的モデル）”（The Journal of Neuroscience, 1985）という論文では、「躍度最小モデル」というアイデアが提案されました。この躍度というのは加速度をさらに時間微分したもの

です。具体的に言うと、加速度というのは位置を2階微分したのですが、躍度は位置を3階微分します。たとえばバスで立っていたときに突然ストップをかけられると身体が揺れますが、なぜ身体が揺れるかということ、身体が加減速によってバスから力を受けるからです。どうい

うときにわれわれは身体がグラッとくるかということ、加速度が急に変わるときです。加速度が高いからグラッとくるわけではありません。加速度が急に変わるとき、つまり躍度が高いときにグラッとくるのです。躍度というのは、文字からも推測できるかと思いますが、滑らかさの逆数みたいなものです。躍度最小モデルというのは、われわれが手を動かすとき、手先の動きができるだけ滑らかになるように軌道が決まっているのではないかとこの仮説なのです。そして理論的にその軌道を導くことにより、実験結果（図2、3）どおりベル型の曲線になることを示しました。われわれの脳は知らず知らずのうちに手先の滑らかさというのを実現するように、そのような計画の軌道を持っているというのです。先ほどのHoganらによる“Movement Smoothness Changes during Stroke Recovery（脳卒中・梗塞回復期における動きの滑らかさの変化）”（The Journal of Neuroscience, 2002）という研究があります。それによると、片麻痺患者の場合、到達運動を行うと手先のスピードに滑らかさが失われ、ちゃんと伸ばさず躍度が高い値躍度が高い値となります（図6）。しかし、しっかりとリハビリテーションを行うことによって、躍度が減少し、動きの滑らかさが増すということが示されました。

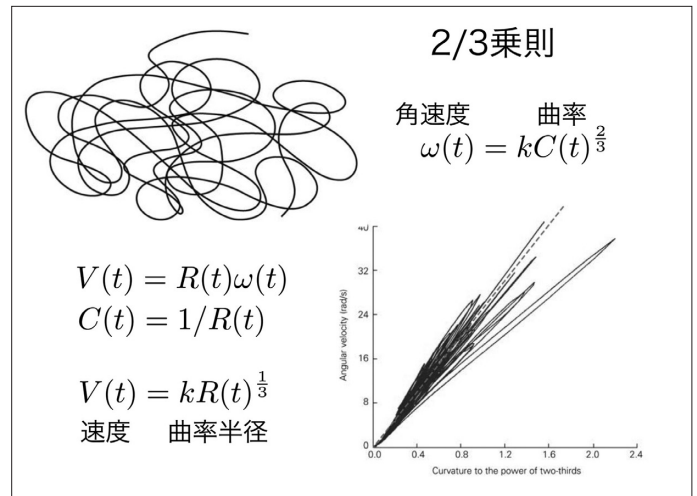


図5 Kandel et al., Principles of Neural Sciences 5th ed, 2012 より引用

信号強度依存性ノイズが運動計画を決める

野崎：しかし、この躍度最小モデルには問題点があります。ある所からある所まで手を伸ばすときに、その区間にわたって全部、躍度を計算して積分しないとけない。こんなことを脳ができるのだろうか。また、滑らかな軌道を実現していると言うけれども、なぜ滑らかで、滑らかな軌道の何が正しいかがこれではわからない。ということで1998年、Nature誌にWolpert、当時はロンドン大学で今はケンブリッジ大学にいますが、とHarrisが非常におもしろい考え方を提案しています。それは「信号強度依存性ノイズが運動計画を決める」（“Signal-dependent noise determines motor planning”）というものです。どうということかと言うと、われわれの筋肉は非常にエネルギー効率が高いし、性能も高いけれども、ひとつ問題点は一定の力を出せない。自分で一定の力を出せたと考えていても、ある程度ばらついてしまう。ロボットのモーターだったら10という力を出しなさいとしたら、絶対に10です。しかしわれわれの筋肉は10という力を出そうと主観的に思っている、9になったり11になったり、結構ばらついてしまいます。そのばらつきの量というのは、当たり前のお話ですが出す筋力が強ければ強いほど余計にばらつきます。それを信号強度依存性の

3

運動と神経科学

患者さんに無駄(試行錯誤、迂回)をさせないリハ ——「川平法」(促通反復療法)を語る

川平和美

鹿児島大学名誉教授
同大学院客員研究員
国際医療福祉大学大学院 特任教授
藤田保健衛生大学大学院 客員教授

「川平法」と呼ばれる促通反復療法で知られる川平先生は、4月に東京・渋谷に川平先端リハビリボを開設、そこでのセミナーや講習会を通じて促通反復療法の指導、普及を図る活動を始められた。その促通反復療法とは神経回路という発想でリハビリテーションを考え、理論化し実践しておられるものである。ニューロリハビリテーションの理論と実践の例として取材した。

「まずは一生懸命やってみる」 ではダメ

川平：麻痺がある患者さんに対して行われているリハビリテーション(以下、リハ)では、残念ながら目標とする運動実現までの具体的な方法や道筋が見えないなかで、ただ患者さんに一生懸命やらしていることが多いのです。私が強調したいのは、要するに神経回路の再建・強化という発想でリハビリテーションを考えないといけないということです。運動ひとつにしても、ある運動を回復したければ、その運動をまさに実現しなければいけないわけです。言葉を換えると、「患者さんの運動努力を迷路から目標の神経路に導いて運動を実現する」、そういうリハなければいけないのです(図1)。ただいろいろやらせたら、なぜかはわからないけれど、こういうふうによくなったということではもうダメな時代なのです。しかし実際には、患者さんにとにかくたくさんやらせて、その結果うまくいけば

いいんじゃないかというレベルの発想でまだけ行われていることが多いのです。

——「一生懸命がんばってやる」だけではダメ。

川平：一生懸命やってもらえば、なんとかかなるだろうという発想ではダメです。スポーツ、たとえばテニスのコーチが有望な選手を引き受けて、強い球を返せるラケットの振り方を習得させたいと考えたとします。そのラケットの振り方をつくるためにはどんな身体の使い方をしたらいいか、細かく指導して、まず求める振り方を実現し、それを繰り返していきます。優秀なコーチにとっては、それは当たり前ですね。ところが、表現は悪いかもしれませんが、時間があるから一生懸命やってみると、そうしたらそのうち何か見つかるだろうというのが今の患者だけに努力を求めるリハです。そうではなくて、目標の運動をちゃんとこちらが実現するだけの操作あるいは方法を与えて、試行錯誤なしに実現させて、それを繰り返してもらわないと、患者さんは実現させたい運動がなかなか実現できない。それでは患者さんも困ります。

——それでは、患者さんもセラピストもお互いに無駄な時間、無駄な努力を重ねているという結果になりやすいということですね。

川平：リハの治療課程を考えると、もちろん麻痺の回復こともそうですけれど、片脚が麻痺になって、その状態で歩くときはまったく新しい歩き方を覚えるわけです。つまり、それは運動学習そのものです。もちろん、できるだけ早期(急性期)から歩行訓練を行って、姿勢制御の低下や廃用性筋力低下を予防します。多くの例は長・短下肢装具や杖などいろいろな方法を用いま



かわひら・かずみ先生

すが、要はご本人が以前と違う条件で一番楽に円滑に歩く歩き方を習得してもらえないといけなわけです。その歩き方を、もっとうこういうふうに進みましょうと修得目標の歩き方を実現して、それを繰り返すことによって最短距離で目標を達成しなければいけません。それに対して、ただ一生懸命、麻痺側下肢に体重をかけて、がんばりましょうという方法ですとやってきているというのが現状の問題だと思っています。

——麻痺側下肢に体重をのせる、それは麻痺を改善させようということですか？

川平：麻痺側下肢の支持力が高まり、麻痺の改善を得られるという発想なのですが、現実起こっていることは、麻痺側下肢に体重をかけると屈筋も伸筋もぐっと硬くなるだけで、麻痺側下肢を随意的に動かすことはうまくなりません(図2)。

非麻痺側下肢でしっかり立つ意味

——むしろ非麻痺側下肢でしっかり立つほうがよい？

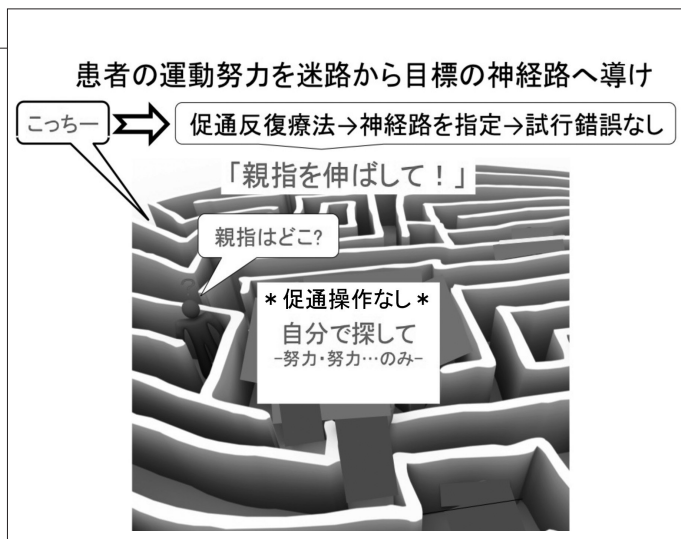


図 1

川平：麻痺側下肢の麻痺を改善するには、まずマットの上に寝た状態、安定した状態で足を曲げる・伸ばす・開くという運動をします。マットの上で楽な条件で麻痺側を動かすことを求めて、うまくできてきたら立ってもできるようになります。そのような基本的なところから始めるべきです。体操選手が難しい技を習得するときでも、いきなりその技をやってみるのではなく、最初は大量のマットを敷いて、あるいはスポンジプールの上で繰り返し練習して、ちゃんとできるようになってから、普通のマットの上でやります。モーグルスキーの選手だったら、グルグルっと回ってプールの中に着地する。それを繰り返して習得できたら、初めて雪の上でやるわけです。そこが従来のリハではどういう条件で何を習得していくかという手順がしっかり考えられていないことが多い。たとえば歩行の特定の運動が上手くできなくても、その運動を実現・反復して歩行の中でもできるように習得させる治療者の技術向上が行われていないのです。

——素人が考えても、非麻痺側のほうに体重をのせて動くほうが楽だろうと想像できる。

川平：姿勢制御を微調整できるのは麻痺のない非麻痺側下肢だけなのです。非麻痺側は小さい動きで調整できますが、麻痺側はギュッとつぶっっていて姿勢制御できないのです。

——患者さんにとっても、入り口としては非麻痺側を使うほうが入りやすい。

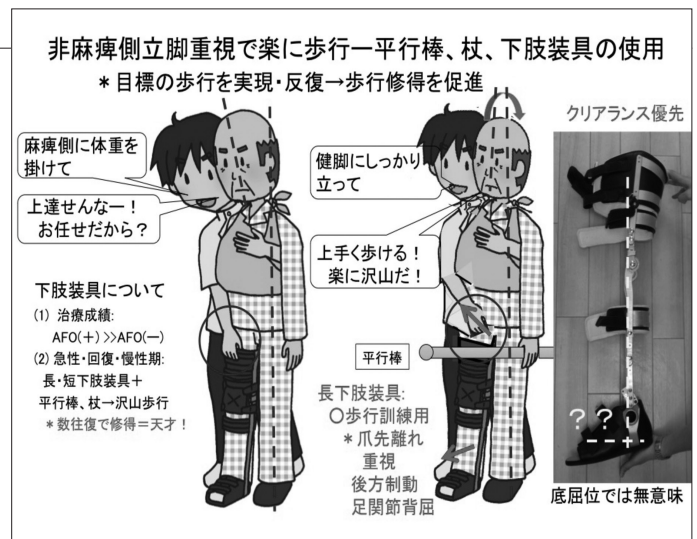


図 2

川平：麻痺側肢に立って、足趾（指）の素早い屈伸までできるくらい麻痺がよくなったら、麻痺側下肢も健側と同じように使いたましようというのでも適した課題でしょう。しかし、まず麻痺の完全回復はないので、何らかの不自由さが残ってしまう。その状態で、健常者と同じ歩き方をしなさい、左右対称の歩き方をしなさいと言っても、できるはずがありません。健常人は歩行で足を前方に振り出すとき、わざわざ足首を背屈してつま先を上げることはしていませんが、つま先が下がっても床に引っかかりません。健常人は床を蹴って下肢をムチのように前方に振り回しているからです。ところが脳卒中の患者さんは、つま先で蹴って下肢を振り回して足を床から浮かすことができません。だから非麻痺側下肢にしっかり立って、麻痺側の骨盤を軽く上げて麻痺側の足を床から浮かし、装具で爪先を上げないと楽に歩けない。楽に歩けるようするには、このような条件を整える必要があります。それを無視した下肢装具なしの歩行訓練は足を床から浮かすために足を過剰に振り上げて床に叩き着けて歩くため、下肢の麻痺と歩行の改善が阻害されます。

——「麻痺側に体重を掛けて、がんばって」と麻痺側の動きをよくしようとしても……

川平：麻痺側の機能を上げようと言うのですが、それは純粋に体重がかかった時の支持力という意味です。しかし、2足歩行ですから、それを言わなくても麻痺側に体重がかかっています。立って2脚で交互に支

えて歩いているんですから麻痺側にも体重はかかっている。それをあえて「麻痺側にかける」と言うから、麻痺側に体全体が傾いてしまうのです。

10年以上前に、私は促通反復療法によって下肢の麻痺が改善するかについて、通常治療（2W）と促通反復療法（2W）を交互に行う方法で研究しました。「ブルンストローム（Brunnstrome）ステージ」という評価法を用いていますが、入院されて最初の2週間はいずれの治療法でも麻痺が改善してきます。ところが次の2週以降は促通反復療法なしの期間は麻痺が改善しません。治療内容に依存して麻痺が改善することが明確になりました。

患者が意図した運動（目標）を実現することが大事なのです。麻痺がある患者さんは正常な運動はできないのです。ところがすぐ「正常な運動」、「正常な感覚入力」と言うから長い年月、多くの研究にもかかわらず治療効果を実証できない空虚な治療戦略に陥ってしまうのです。

目標の運動を誘発する強い刺激

——ということは麻痺の改善は新たな運動学習だということですね。

川平：そうです。運動学習ですから、麻痺肢に目標の運動を実現しなければ意味がない。あるいはその運動をより実現しやすくするには、正常な入力に拘っては得るものはない。もっと強力な刺激が必要です。わかりやすく言うと、腕を曲げてごらんと

言って、45度の温水の中につけると曲がります。ところが自分だけで曲げようとしても動かない。

——温度で反射的に。

川平：痛いから逃避反応も誘発されるからずっと曲がるのですね。そうやって動き始めると今度は強い刺激なしでも動くようになっていきます。手指の場合も同じで、動かないと言っている、氷を用いると、冷たさがいやでそれを避けようとして指が曲げやすくなります。

——運動を促す別の刺激を用いるわけですね。

川平：それも強い刺激ですね。運動を誘発する刺激を併用すると、麻痺を改善しやすい。従来の丁寧に何かをやる方がいいことだという発想のリハは何も生みませんでした。もう結論は出ています。過去の研究成果を見ても、いい成績は出ていません。

効果的なリハを目指して、 霊長類研究所、NIHで研究：神経回路の強化という発想

——先生がそういうことにアプローチされるようになったのは、どういうところから？

川平：私は39年前にリハを始めましたけれども、その頃ちょうどPNFとかBobath、Brunnstromなどの神経筋促通法が上田敏先生の紹介で日本に導入されました。当時、私は卒後3年の新米医師でしたが、リハ部門の責任者（助手）になりました。とにかく麻痺をよくしようと、本に書かれていることはほとんど全部やりました。しかし、いろいろ書いてあるけど、全然有効でないもの、一方、もうちょっと工夫すればうまくいくんじゃないかという感触というか、いけそうな予感など、ある程度の目処はついたものがありました。しかし、現実の治療効果を見ると、なかなか思いどおりの成果が出ませんでした。何が足りないのかと考えて、京大の霊長類研究所やNIH（アメリカ国立衛生研究所）に留学して、サルを用いた神経科学の実験を行いました。霊長類研究所やアメリカの実験で、

促通反復療法の治療原理



目標の指に伸張反射と患者の意図によって
指の伸展が実現するメカニズム

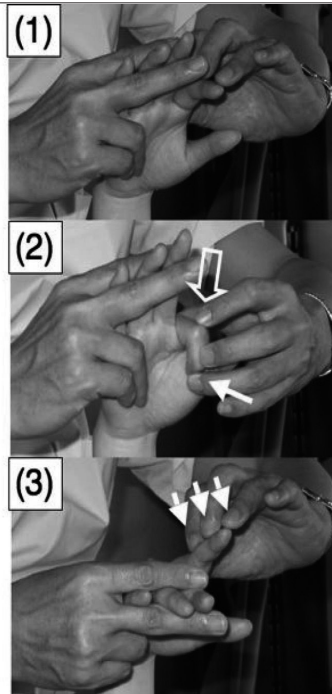


図3

サルに新しい連合学習（特定の信号が出たら、それと対応したボタンを押す）をさせ、正答率が80とか90%を超えたら、やっとう頭にシリンダーを埋め込んで、ニューロンの活動を記録することが始まります。この実験ではすごい回数の練習をやりま。これらの実験や多くの論文に目を通した結論として、神経回路をつくり強化するという発想が決定的に足らないことに気づきました。麻痺を改善するのに不可欠な神経路の再建と強化の為に目標の神経路に興奮を伝え、反復する促通反復療法の治療理論に到達しました。

——日本では、そういう考え方が導入されていなかった？

川平：そうです。たとえば、手を曲げ伸ばしすることでも、治療者が他動で20回程度やれば良いといったレベルでした。留学する前には、とにかく促通、目標の運動を誘発しやすい刺激を入れて曲げて、という方法を私自身はつくっていましたが、それでみんなが改善するかというと、そうでもなかった。私は曲げ伸ばしを自他動で20～30回やって、はい、今日は十分にやりましたと終わっていたわけですから、これでは反復回数が全然足りないことがわかったんです。それでアメリカから帰ってきたからは、とにかく個々の運動パターン

100回ずつ。

——100回！

川平：100回というのは、結局、治療時間が限られているからです。限られた治療時間のなかでいろいろな歩行に必要な運動について、運動パターン毎に何回できるかという、下肢だと5、6パターンを100回ずつ。もちろんそのほかにも健側強化など最低限の治療もします。そういう形でやると、2週間で麻痺改善の差が出ます。私は基本的に2週間で差が出ない治療はダメだと考えています。とくに回復期、脳卒中発症後1～4カ月の人に対する治療で2週間での効果が明らかでないものは、あまりいい治療とは言えない。それぐらいのレベルの治療を、私たちはつくっていかなければダメだと思います。下肢についても、アメリカから帰ってきて、反復回数を増やしてやっていくとうまくいくようになりました。上肢については、とくに問題なのは、個々の指の動かし方ほとんど何もされていないということです。これまで指はちょっと動くと、「あとは自分でがんばってやってください」という話になるのです。

——患者さんが自分だけで苦労しながら、つまんだり、物を動かしたりしているのを見かけますね。

川平：しかし、その指でつまむために必要