

関節可動域制限に対する固有感覚刺激を用いた治療戦略

～徒手抵抗による治療の可能性を探る～

瀬戸口 淳¹⁾

1) 医療法人永広会 島田病院

キーワード：関節可動域制限・固有感覚・徒手抵抗

【はじめに】

運動器疾患に対する理学療法において筋、腱、靭帯などは治療対象になることが多く、これらはCT、MRIあるいはレントゲンやエコーなどの検査により視覚的に状態を確認することが可能である。ただ、これらのうち筋には筋紡錘という感覚器が存在しており、視覚的な検査では確認できない固有感覚の存在を考慮した上で理学療法を展開する必要がある。つまり、運動器障害は感覚器障害でもあるという解釈が必要である。そして、今回は多くの理学療法士が治療に難渋している関節可動域制限に問題点を絞り、固有感覚の解釈とともに治療戦略について提案する。

【問題点を感覚という側面からみる】

(1) 不動による関節可動域制限の責任病巣

Johns によればネコの手関節の伸展時における関節運動時の組織抵抗寄与率は、骨格筋（以下、筋）で43%、関節包で30%（表1）とされており、多くの場合に関節可動域制限の責任病巣は筋と関節包にあると報告している。そして、筋による関節可動域制限の原因を捉える上で、その制限因子が機能的変化なのか、あるいは器質的变化を伴うものなのかを整理して考えることは非常に重要である。

表1. 関節運動時の組織抵抗寄与率¹⁾

| 組織 | 中間域 | | 終末域 | |
|-----|-----|------|-----|-----|
| | 伸展 | 屈曲 | 伸展 | 屈曲 |
| 皮膚 | 19% | -38% | 11% | -9% |
| 骨格筋 | 43% | 37% | 43% | 37% |
| 腱 | 8% | 13% | 11% | 33% |
| 関節包 | 30% | 88% | 35% | 39% |

※不動後およそ4週間まで

(2) 関節可動域制限をどのように捉えるか

臨床で関節可動域制限と向き合う場合、1回の介入による即時的変化や長期的な改善の限界は、多くの理学療法士が悩んだ経験を持っているのではないだろうか。その解決方法の1つとして、制限因子が機能的変化によるものか、あるいは器質的变化を伴うものかを整理して捉えることにあると考える。

機能的変化とは、神経系メカニズムにおける変化であり、いわゆる筋緊張由来の変化などである。そのため、中枢神経系を中心とした神経系メカニズムに関わる様々な器官が関節可動域に影響を及ぼすと言える。また器質的变化とは、いわゆる関節構成体の変化であり、骨折や変形による骨変化、緩み、不安定性などの様々な器質的变化を伴う関節可動域制限である。

実際の臨床場面ではこれら両者が混在しており、病歴の聴取も含めて詳細に情報を整理して制限因子を捉えていく必要がある。

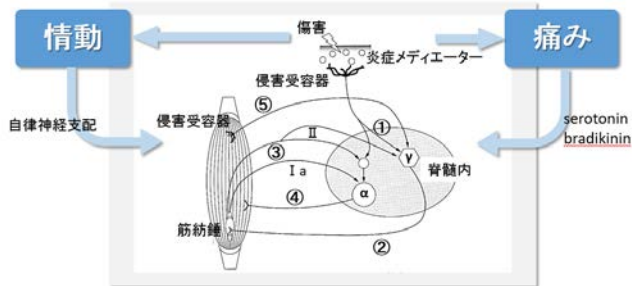
(3) 関節可動域制限の要因となる機能的変化の発生機序

骨折や手術、あるいは不動などにより侵害受容器が刺激されると、その刺激は運動神経を興奮させる。これは感覚器である筋紡錘を刺激し、そして錘外筋線維の緊張を引き起こし、関節可動域制限を招くことになる（図1）。

また Maier²⁾らは、ネコの一側足関節を底屈位でギプスにより不動化し、対側を無処理としたモデルを用いて、腓腹筋内側頭を他動的に2mmずつ伸張した際の求心性神経活動の変化を検討している。この結果、不動側で顕著に求心性神経活動が増加し、不動後は筋紡錘の感受性が増加すると報告している。

また、不動によって感覚器である筋紡錘そのものが器質的に変化するという報告もある。Jozsa ら³⁾によれば錘内筋線維の核袋Ⅰ線維で14%、核袋Ⅱ線維で19%、核鎖線維で20%ほど萎縮が認められるとしている。また、筋紡錘の被膜の厚さが約2倍になるとともに、紡錘腔は縮小していたと報告している(図2,3)。

つまり、この筋紡錘そのものの器質的变化がどの程度機能的変化を引き起こすかは明らかではないが、何らかの固有感覚による求心性フィードバックに影響を与えることが仮説として考えられる。さらに、この仮説を臨床で検証するためには、この固有感覚の変化が関節運動にどのような影響を与えるのかを理解した上で理学療法を展開する必要がある。



- ①侵害受容器による刺激がγ運動神経の興奮性を引き起こす。
- ②γ運動神経が筋紡錘を刺激する。
- ③Ia線維がα運動神経の興奮性を、Ⅱ線維がα運動線維とγ運動線維の興奮性を引き起こす。
- ④α運動線維が錘外筋線維を収縮させる。
- ⑤筋内筋に存在する侵害受容器がさらにγ運動線維の興奮性を引き出す。

図1. 関節可動域制限の要因となる機能的変化の発生機序¹⁾

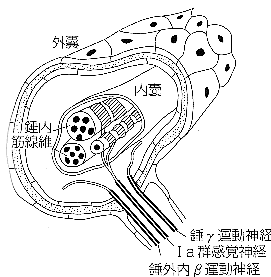


図2. 筋紡錘の構造⁴⁾



図3. 筋紡錘の横断面⁵⁾

(図中の*は紡錘腔を示す)

これらは術後早期の Total Knee Arthroplasty (以下、TKA) 患者の状態を想像すると理解しやすい。手術の麻酔から目を覚ますと、これまでの膝とは全く別のメカニズムで機能する膝になっている⁶⁾。これはTKA患者にとって劇的な変化であることは容易に想像できる。その理由として、手術による関節包や靭帯の侵襲により固有感覚の求心性フィードバックが変化することで中枢神経系の混乱が起こり、それが運動戦略や身体図式の異常を引き起こすと考えられる⁷⁾。筆者の臨床場面でも、術後早期に他動と自動の可動域が乖離する症例は多く経験することができる(図4)。

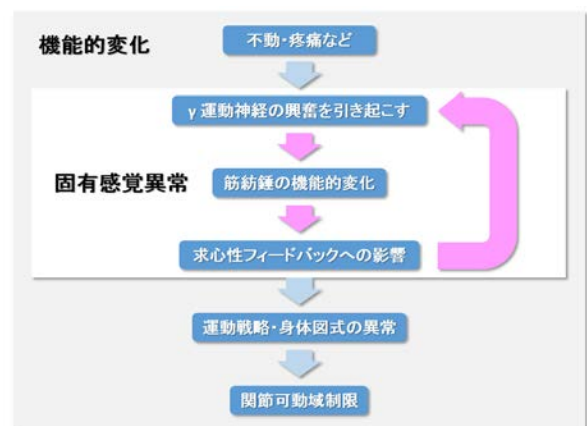


図4. 固有感覚異常と関節可動域制限の仮説モデル

【固有感覚における筋紡錘という存在】

1940年代に生理学者であった Sherrington⁸⁾により固有感覚 proprioception という言葉が使用された。

歴史的にみると、肢体の相対的位置や運動および筋に発生する力を知る運動感覚は、Sherrington 以来、筋、腱、関節などの受容器からの複合的求心性情報によって形成されると考えられてきた。しかし、1960年代には筋紡錘からの情報が知覚される点については否定的であった⁹⁾。理由としては、筋や腱からの求心性情報が脳皮質一次体性感覚野へ投射しているかどうかは明確でなかったことなどによる。1980年代以降は、Abbruzzese¹⁰⁾らによってヒトの筋伸張感覚信号が脳に投射されていることが報告され、筋紡錘からの信号が位置覚や運動覚に深く関わっていることがわかってきており、筋紡錘Ia群情報が脳皮質一次体性感覚野へ投射しているのは確実とみなされている⁴⁾⁹⁾。

今後の展望として、これら筋紡錘への機械的刺激が筋紡錘からの求心性フィードバックにより形成される固有感覚にどのような可塑的变化を与え、さらに中枢神経系にどのような影響を及ぼすかということではないかと考える。

また、前述の固有感覚の可塑的变化について考える上で、情報処理システムについて理解しておく必要がある(図5)。最も基本的な回路は発散と収束であり、普遍的にニューロン間にみられる構造である。次に、すべての処理が1本のライン上に配列される直列情報処理というものがある。これらはコンピュータが行う情報処理構造として知られている。そして、中枢神経系における情報処理システムといわれているのが、並列情報処理システムである。このシステムは、一見無駄と思えるようなオーバーラップがあり、損傷に強いという特徴を持っている¹¹⁾。

これらのうち、生体感覚情報処理システムは並列情報処理を基本構造とし、冗長性を持ったシステムだといわれている⁹⁾。このようなシステムを非線形システムと呼ぶ。非線形システムであることの重要な意味は、要素を足し合わせてもシステム全体の性質が決まらないことである¹²⁾。つまり、「同じ刺激を受けても、いつも同じ反応をすることは限らない」ということである。これは、生体の固有感覚を理解する上で非常に重要な考え方である。

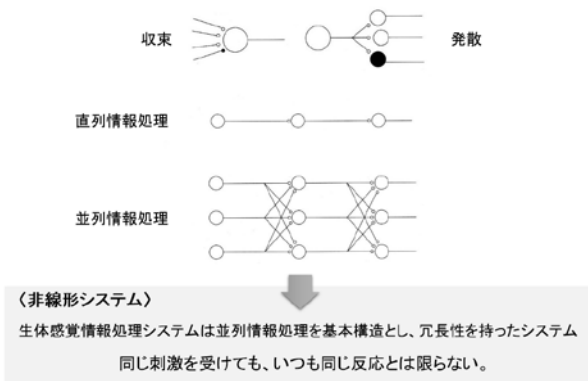


図5. 固有感覚における情報処理システム

【関節可動域制限に対する治療の本質を考える】

(1) 治療の4原則

次に、関節可動域制限に対する治療について考えていく。奈良¹³⁾は、治療 treatment とは、患部に「手を当てていたわる」という意味が含まれているとし、治療の4原則を

述べている。すなわち、①除去、②刺激、③誘導、④補助の4つである(表2)。これらのうち、理学療法士にとって②刺激と③誘導が非常に重要と思われる。これは関節可動域制限に対する治療でも同じことが言える。

表2. 治療の4原則

| | |
|------|--|
| ① 除去 | 組織を外科的治療によって取り除くこと。 (手術) |
| ② 刺激 | 生体内部もしくは外部からなんらかの刺激を加え、望ましい反応を引き起こす。 (生体内部: 投薬、生体外部: 物理療法、運動療法) |
| ③ 誘導 | 生体内部もしくは外部からの働きかけにより、望ましい状態に誘導する。 (生体内部: 食事療法、薬物療法、生体外部: 運動療法) |
| ④ 補助 | 身体の一部の欠損や機能不全を身体の内外部および外部から補う。 (内部: 点滴、ペースメーカー、外部: 眼鏡、補聴器、義肢装具) |

筋紡錘による固有感覚を「刺激」していく1つの方法として、徒手抵抗がある。「抵抗」という言葉からすると運動を妨げるようなイメージがあるかもしれない。しかし、治療で用いる徒手抵抗は決してそうではない。患者にとっては環境情報の一部であり、むしろ運動を「誘導」するものとなる。

(2) 評価をどのように考えるか

前述のように関節可動域制限を感覚という側面から捉えていく場合、評価 (evaluation) をどのように考えていくかが非常に重要である。それは、関節可動域検査(test)による量的な測定だけでなく、その制限因子が筋性によるものと仮定した場合、筋のどのような要素によるものかという質的な原因を捉えていくということである。さらにそこで重要となるのが、機能的変化は即時的効果が得られるということである(図6)。

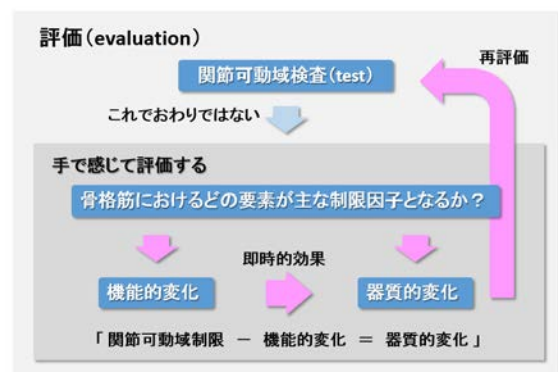


図6. 関節可動域制限の質的評価

つまり、機能的変化と器質的变化が混在する関節可動域制限において、まず機能的変化を即時的効果によって取り除き、両者がある程度整理した状態で関節可動域制限を捉えていくことが可能となる。この過程こそが質的評価に他ならないのであり、手で感じて評価する他ないのである。

(3) 手で何を感じるか

では、「手で何を感じるか」であるが、これを理解するには、前述の非線形システムを理解しておく必要がある。つまり、「同じ刺激を受けても、いつも同じ反応をするとは限らない」ということである。筋による機能的変化を捉えていく場合、例えば1回の膝伸展運動においても、その運動中に患者の反応は刻一刻と変化する。さらに言うならば、二度と同じ反応が得られることはないと言える。この変化をセラピストが手で感じ、そして加える刺激を変化させて捉えていく必要がある(図7)。

機能的変化の場合

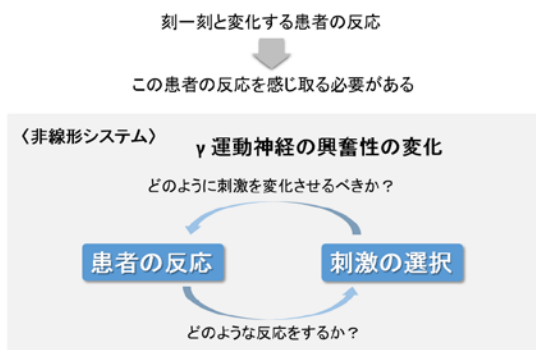


図7. 「手で何を感じるか」

(4) 感覚から知覚へ、そして知覚は循環する

Anokhin¹⁴⁾によると、動物の条件反射が成立するまでの学習過程において、感覚受容器から得られた感覚入力も含めた環境情報により知覚情報を得るとしている。つまり、徒手抵抗により刺激された固有感覚入力は、環境情報の一部だと言える(図8)。

また、Neisser¹⁵⁾は、知覚循環という言葉を用いている。これは、ヒトは環境からの無限の情報から、動くことで知覚を得る。得た知覚により、身体図式の修正を図る。そして、修正された身体図式はさらに次の探索を方向づけると解釈できる(図9)。

これら知覚を、筋紡錘に入力される機械的刺激として考えれば、徒手抵抗であっても、床からの情報であっても同じ環境情報ということに異論はないのではないだろうか。

そして、関節可動域制限に対する戦略もこの循環の中にあると考えることができる。

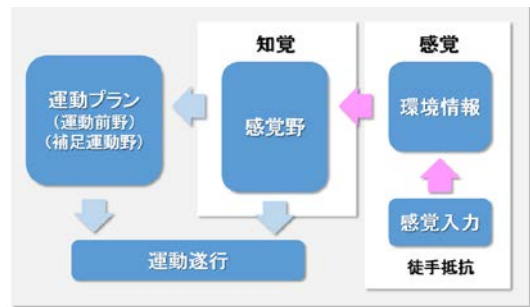
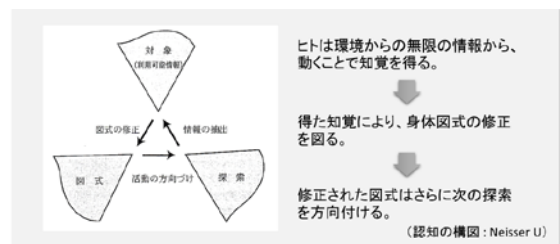


図8. 環境情報としての徒手抵抗

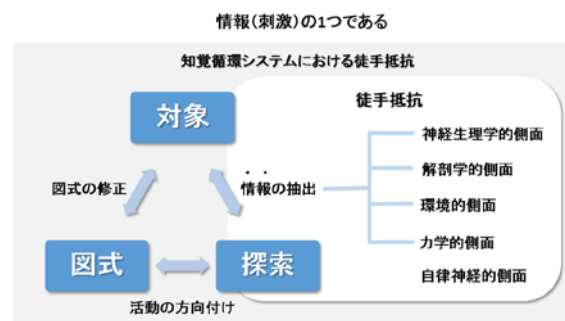


動くことで知覚を得る。
知覚を得ることで動くことができる…
つまり、関節可動域に対する戦略もこの循環の中にある

図9. 知覚循環

【固有感覚刺激を用いた治療戦略】

関節可動域制限に対して徒手抵抗を治療として用いるには、徒手抵抗による①神経生理学的側面、②解剖学的側面、③環境的側面、④力学的側面における影響を整理した上で、これら①～④を戦略的に用いていく必要がある(図10)。この徒手抵抗の最大の利点は、刻一刻と変化する患者の状況に合わせて、その瞬間に最も適した刺激を与えることが可能ということである。これは人の手以外による治療手段では難しい。



動きを妨げるのではなく、動きを誘導する

図10. 知覚循環システムにおける徒手抵抗

①神経生理学的側面

a. α - γ 連関

これは徒手抵抗の神経生理学側面を考える上で、最も重要なメカニズムだと思われる。錘外筋収縮時に筋紡錘が弛緩しないように、上位中枢が α 運動線維と γ 運動線維の発射頻度を調整するというメカニズムである。運動中に徒手抵抗を持続して固有感覚刺激を入力し続ける理論的な根拠となる(図11)。

b. 筋と筋紡錘の配置

錘外筋に対して腱紡錘は直列、筋紡錘は並列に配置されている。これも、筋紡錘による固有感覚刺激を入力するには錘外筋収縮時に固有感覚刺激が必要であることの根拠となる(図11)。



図11. 徒手抵抗による持続的な固有感覚刺激

c. 加重現象 Summation

加重現象には、時間的荷重現象と空間的荷重現象の2つがある。これらのうち、徒手抵抗を用いる場合に重要となるのが、空間的荷重である。そのため、常に両手で抵抗を加えるということが必要となる(図12)。



図12. 徒手抵抗による空間的荷重現象

d. 反回抑制によるリラクゼーション

固有感覚刺激により筋を抑制させる場合に有効となる理論である。つまり、最大収縮後の最大弛緩を利用することとなる(図13)。



図13. 反回抑制による収縮後の弛緩

e. 相反抑制によるリラクゼーション

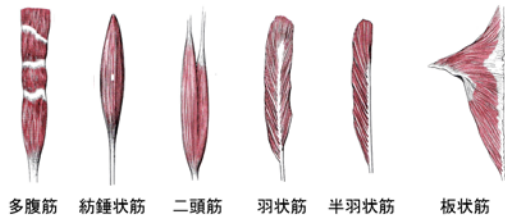
これは関節運動にとって大きな理論的根拠となる。つまり、主動作筋の収縮時には、同時に拮抗筋に抑制のインパルスが発射されているということである(図14)。



図14. 拮抗筋の相反抑制による主動作筋の抑制

②解剖学的側面

ここでいう解剖学は、筋線維の腱に対する位置関係である(図15)。これにより徒手抵抗を加える方向が異なってくる。例えば、半羽状筋である内側広筋を固有感覚刺激するためには、大腿の長軸方向に対する徒手抵抗ではなく、回旋方向への刺激も必要となる(図16)。



筋線維の腱に対する位置関係によって種々の筋型が分類

図 15. 筋線維方向と固有感覚刺激¹⁶⁾

固有感覚刺激を用いた治療戦略
徒手抵抗の意味
解剖学的側面

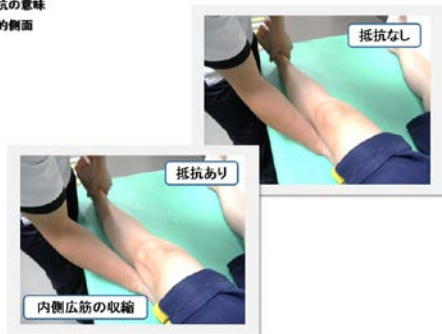


図 16. 内側広筋の固有感覚刺激

③環境的側面

a. 重力と徒手抵抗

ヒトは地球上で生活する限り、必ず重力の影響を受ける。当然、理学療法でもこの重力の影響を大きく受けており、治療戦略を組み立てる上でも考慮に入れる必要がある。

例えば下肢伸展運動の際に、仰臥位で行う場合と側臥位で行う場合は、作用する筋群が異なった反応となる (図 17)。

固有感覚刺激を用いた治療戦略
徒手抵抗の意味

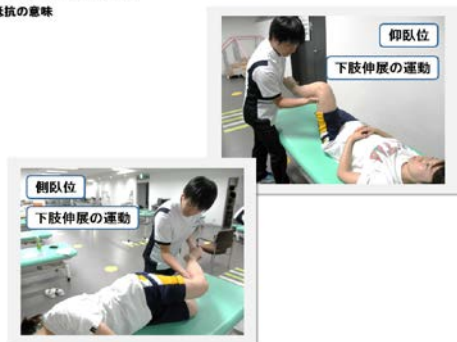
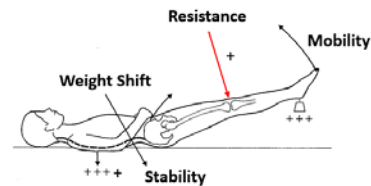


図 17. 肢位の違いによる反応の違い

b. 支持面と徒手抵抗

運動と支持面の関係を理解するのに Klein-Vogelbach の考え方が非常に参考となる。例えば、Active SLR のように一側下肢を挙上する際に、体幹あるいは対側下肢などは支持面を強く床方向に押しつけて固定作用として働く。この反応が、関節可動域制限の治療に重要な考え方となり得る。つまり徒手抵抗により、固定作用となる部位は強く支持面を押すこととなり、支持面から環境情報としての感覚が多く入力されることが考えられる (図 18、19)。



徒手抵抗により、支持面の Stability (固定点) はさらに強化される。

そこに可動域を求めることも可能 (Mobility on Stability)。

(Functional Kinetics: S.Klein-Vogelbach 一部改変)

図 18. 徒手抵抗による支持面の強化¹⁷⁾

固有感覚刺激を用いた治療戦略
徒手抵抗の意味

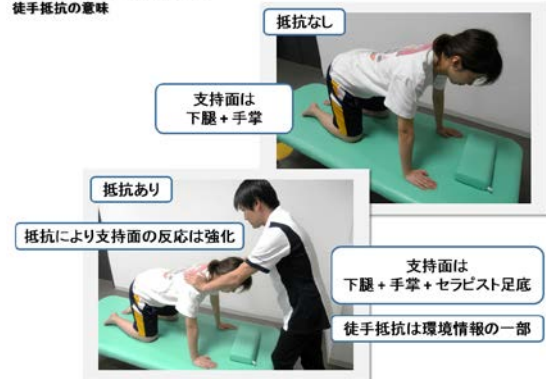


図 19. 抵抗による支持面の強化

④力学的側面

a. ニュートンの第 3 法則 (作用・反作用の法則)

ある物体 A が別の物体 B に力を作用させるとき、同時に物体 B も物体 A に力を加えている。この 2 つの力は同一作用線上で力の大きさが等しく、向きが反対である。

つまり、徒手抵抗を加えるときは、骨の長軸方向に対して垂直に加えるのが基本となる (図 20)。

固有感覚刺激を用いた治療戦略
徒手抵抗の意味
力学的側面



図 20. 作用・反作用と徒手抵抗

b. 力のモーメント

これは、ある軸のまわりに物体を回転させる作用の大きさのことであり、力のモーメント = 力 × 軸から力の作用線に下した垂線の長さで表される。

徒手抵抗を加えるときに、軸となる関節から把持する位置までの距離によって抵抗量に違いがあることは言うまでもない。

c. バランス反応

このバランス反応の理解にも Klein-Vogelbach の考え方が非常に役立つ。このバランス反応も徒手抵抗を加えることで反応を強化することが可能である (図 21)。そして、バランス反応を利用した上で支持面を上手く環境設定することで関節可動域の改善を図ることが可能である (図 22)。

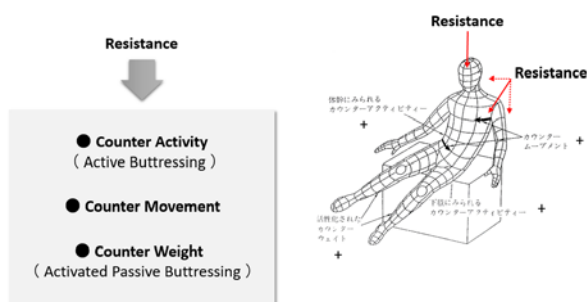


図 21. 徒手抵抗によるバランス反応の強化¹⁸⁾

固有感覚刺激を用いた治療戦略
徒手抵抗の意味
力学的側面

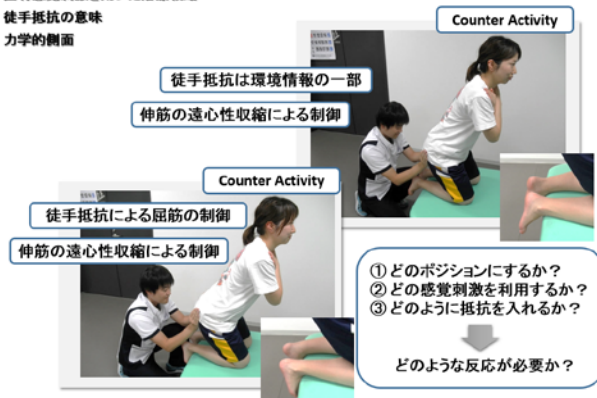


図 22. バランス反応を利用した膝関節に対する介入

これまで述べてきたように、関節可動域制限に対する固有感覚刺激を用いた治療では、様々な要因を整理し、そして戦略的に組み立てていく必要がある。ただ、その治療としての可能性は、セラピストの工夫次第で無限である。

【おわりに】

関節可動域制限に対する治療は多くの場合いわゆる構造的な治療展開であり、他動的な戦略がほとんどである。ましてや固有感覚への影響を考慮したものはほとんどみられない⁴⁾。また、文献などでも病態に関するテーマが多く、治療戦略にはほんの僅かしか触れられていない。我々理学療法士が固有感覚に目を向けることで、決して新しいものではない徒手抵抗の治療の可能性が見えてくるのではないだろうか。

【文献】

- 1) 沖田 実：関節可動域制限，三輪書店，2013，pp50-66，
- 2) Maier A, et al: The effects on spindles of muscle atrophy and hypertrophy. Exp Neurol 37, pp100-123, 1972
- 3) Jozsa L, et al: The effect of tenotomy and immobilization on muscle spindles and tendon organs of the rat caif muscles. A histochemical and morphometrical study. Acta Neuropathol 76, pp465-470 1988
- 4) 伊藤文雄：筋感覚研究の展開，協同医書出版，2005，pp225-376
- 5) 上崎順三：筋紡錘の神経支配，顕微鏡，Vol. 45, No2, 2010
- 6) 石井慎一郎：運動器疾患における運動課題の設定と結果の知

識の付与方法, 理学療法, 第 22 卷, 第 7 号, pp989-1000

- 7) 井原秀俊: 考える膝, 全日本病院出版会, 2002
- 8) Sherrington, C. S.: The Integrative Action of the Nervous System (2ed ed.) , pp132-133
- 9) 田崎京二 他: 新生理科学大系 感覚の生理学, 医学書院, pp314
- 10) Abbruzzese G, et al: Exp Brain Res 58, 544, 1985
- 11) 松村道一: ニューロサイエンス入門, サイエンス社, 2006, pp39-40
- 12) 多賀厳太郎: 脳と身体の動的デザイン, 金子書房, 2007, pp6
- 13) 奈良勲: 理学療法の本質を問う, 医学書院, 2002, pp68
- 14) 細田多穂 他: 理学療法ハンドブック, 協同医書出版, 2004, pp514
- 15) U·Neisser: 認知の構図, サイエンス社, 1991, pp20-24
- 16) 越智淳三: 解剖学アトラス, 文光堂, 2002, pp17
- 17) S.Klein-Vogelbach: Functional Kinetics, Springer-Verlag, 1990, pp109-139
- 18) 富田昌夫: 体幹と骨盤の関節可動障害とそのアプローチ, 理学療法, 第 10 卷, 第 2 号, pp143-151