

運動感覚の抗加齢：筋骨格系が備える自己フィードバック機構

Anti-aging of proprioception: Muscle proprioceptive feedback for sensorimotor control

佐々木 空†

Hiroshi SASAKI†

†: リガーレカイロプラクティック sasaki@ligare-chiro.com

概要： 運動イメージとは実際の運動時中の運動感覚の想起であり、自分の身体が空間の中でどのような姿勢なのかという身体内座標は固有受容器によってモニタリングされる。固有受容器を介した運動錯覚は運動指令時と似通った脳活動を惹起するため、運動学習への応用が期待される。固有感覚は正確な運動をするために必要だが、関節の加齢とともに減退を起し高齢者の転倒などに関与する。老化の予防のためには正常な関節運動の維持と筋力トレーニングが必要とされる。筋骨格系の固有感覚と機能、その老化についてカイロプラクターの視点から紹介する。

1. カイロプラクティックとは

脊柱とは脳と脊髄(中枢神経)を保護する動的なシェルターのようなものである。重力に対して身体を支える支柱としても機能しているため、その役割が担うところは非常に大きい。脊柱は、24 個の椎骨がそれぞれ 3 つの関節で連結しており、その隙間からは末梢神経と呼ばれる手足の先まで伸びる神経の枝を出す。全身の感覚や運動と脳のコミュニケーションはそこを通して行われている。脊柱の関節の機能障害が起ると、関節運動の異常に伴い近接した神経系へ影響を及ぼす。

カイロプラクティックとは、脊柱に対する徒手療法「脊柱マニピュレーション」を用いて脊柱の運動機能を正常に回復することで、痛みやそれらに伴って起こる神経障害を取り除くことを目的とした代替医療である。日本を除く先進国を中心とした世界 44 の国と地域で大学教育化・法制化されており、レントゲン撮影や診断権を含む国家資格が世界保健機構(WHO)の管理下に置かれている。主に腰痛や頸部痛などの脊柱周辺の障害に対する効果が認められており、例を挙げると「腰痛ガイドライン」では薬物療法と同等の効果を認めるエビデンスがある[1]。また、脊柱マニピュレーションが運動制御の正確性を向上するという研究結果もあり[2]、アスリートのパフォーマンス向上にも利用されている。オリンピック選手チーム等にもカイロプラクターが同行することも一般化している。

脊柱マニピュレーションが痛みなどの症状や健康状態を改善するという現象は古くから経験的に知られて

おり、紀元前5世紀ギリシアのヒポクラテスの著書「関節について」にはすでに脊柱マニピュレーションの記録がある[3]。カイロプラクティックという言葉自体は約 120 年前のアメリカ人 D.D.パーマーによって初めて使われた。彼が難聴の症状を持つ使用人の頸椎が異常に飛び出ているのに気付いて脊柱マニピュレーションを行ったところ耳が聞こえるようになったというエピソードが残っている。このことから、背骨が正常な位置から逸脱していると神経系を圧迫することで異常をきたすのではないかと仮説に繋がった。現在では、椎骨のミスアライメントによって神経が圧迫され神経障害が起こるという極端な考えは支持されていないが、例えば老化や不良姿勢、外傷などにより関節運動が正常に機能していない(Fixation)状態が存在すると関節からの位置感覚が変化し、感覚-運動系の異常な学習が起こるのではないかと(Maladaptive Plasticity)という考え方が近年の研究で明らかになってきている[4]。本稿では関節を扱うカイロプラクターの視点から、身体の位置感覚と運動の関連性、その老化についての知見を紹介する。

2. 運動のイメージ

通常は運動の指導をする際、「他人が運動しているところ＝視覚イメージ」を見せる方法を用いる。しかしながら、複雑な動きにおいてはこの方法は効果的ではない。成功率の低い運動に成功したときの自分自身のビデオをアスリートに観てもらったところ、運動の実行に関わる脳領域の活動が高くなるが、一般学生に見せるとそのような脳活動は起こらない[5]。一方で、

「自分が運動している一人称イメージ」も運動イメージであり、これは身体内座標のイメージである。運動とは感覚のフィードバックと常に連動しており、一般的に言われる運動イメージとは、実際の運動時中の運動感覚の想起であるといえる。それゆえに自分が経験したことのない動きに対する運動イメージによる学習は難しいと言われる。

自分の身体がどこにあり、空間の中でどのような範囲を占め、どのような姿勢なのか(身体の各パーツの相対的位置感覚)といった身体内座標は、固有受容器(mechanoreceptor)によってモニタリングされる神経入力を脳が認知することによって形成される。固有受容器は関節、筋肉、腱、皮膚に存在し、身体の各パーツの位置と動きを検知している。これらの情報が絶え間なく更新され続けることで、時間的・空間的に正確な運動コントロールが可能となり、バランスや姿勢の制御、運動学習などが行われる。

その中でも、関節位置覚や動きの感覚に寄与する受容器として近年注目されているのが筋紡錘という筋肉内に存在するストレッチ受容器であり[6]、これが身体の各パーツの相対的位置関係やその変化をモニタリングすることで、脳は自分の身体が空間内でどのような姿勢をとっているのかを把握することが可能となる。

3. 筋紡錘とは

筋紡錘とはすべての骨格筋内に存在し、筋がストレッチされる際に発火する受容器である。関節が動くと必ず筋の長さに変化があるため、この情報は関節の位置感覚と運動感覚として機能する。筋紡錘には二つのタイプがありそれぞれ異なる刺激に対応する。一つは核袋線維(bag fibre)と呼ばれ、主に加速度の変化に対して発火する。筋がストレッチされている最中にのみ反応し、動きが止まると発火しなくなる。もう一つの核鎖線維(chain fibre)は、筋の絶対的な長さをモニタリングする機能を有し、筋の長さに応じて常に信号を発する。また、一旦伸びた筋紡錘は筋肉を収縮させた際に元の感度にかリブレーションされる。こうして我々は、体の動きと位置の感覚を無意識下に受け取っている。

では、この身体内座標を形成している固有感覚を他者に伝えることは可能だろうか。

4. 運動の錯覚

我々は五感からの感覚入力を同時に解釈し、いわ

ば内的リアリティを脳で形成している。これら様々なモダリティからの入力同士は、普通に生活している上ではあまり矛盾が生じない。例えば机の上にあるペンに手を伸ばして握る運動感覚と、自分の手がペンを握る様子の視覚入力が同時に起こっていることで、自分はペンに手を伸ばしている、と認識できている。しかし例えば、触覚や固有感覚のような位置情報と他の情報の間に齟齬が生じると、認識にエラーが起こることがある。

4.1. ピノキオ・イリュージョン

筋紡錘は筋の伸張に対して発火するが、振動刺激でも同様に発火させることができる(5mm 振幅、80Hz 程度)。視覚入力を遮断した条件下にて手で鼻をつまみ、同側の上腕二頭筋腱にバイブレーション刺激を加えると上腕二頭筋がストレッチされている(つまり肘が伸展している)感覚に襲われる。指は鼻に接触しているという感覚も同時に入力されているため、あたかも自分の鼻が伸びているような錯覚に陥る。また、後頸部の筋へ振動刺激を与えると、体幹と頭部の相対的な位置関係に錯覚が起こり、その場で足踏みをさせると自然と方向転換してしまう現象が起こる。このように固有感覚の入力によって運動錯覚や位置錯覚を起こすことができる。また、先程の運動イメージと同様に、こうした運動錯覚は実際の運動指令や四肢の動きを伴わないものであるにも関わらず、運動指令に関わる一次運動野の活動が錯覚中に観察される[7]という報告もあり、このようなヴァーチャルな運動体験と運動学習・リハビリテーションの親和性は今後ますます注目される可能性がある。

4.2. 幻肢痛とミラーセラピー

失われたはずの手足の痛みを感じることもある。これを幻肢痛と呼ぶが、運動指令と関節位置覚の齟齬が機序の一つであるとされている。通常、脳が筋に対し運動指令を行う際には、脳にはエフェレンスコピーという指令内容の「控え」の情報が残される。実際に運動が遂行されると関節は動き、変化した関節位置覚は脳へと伝えられる。そこで運動結果のフィードバックと先程のエフェレンスコピーが照合され、実際の意図と結果が同じであることが確認される。しかし四肢が失われている状況ではこの照合は失敗し、この運動と感覚の食い違いが生じる。これが痛みの原因となるのではないかという仮説がある。これに対しミラーセラピーという、視覚を利用して失われた四肢があ

たかも動いているように見せる手法があり、幻肢痛の痛みは実際に緩和される。

5. 固有感覚の老化

上述した現象は、いかに固有感覚が我々の身体内座標の決定や運動学習に貢献しているかを改めて認識させるものであるが、他の体性感覚と同様に、固有感覚も老化の影響を免れ得ない。加齢と共に固有感覚の正確性は低下し、関節の位置感覚や[8, 9]運動感覚の検出感度を低下させる[10]。さらに、就労や日常生活の姿勢の保持、過去の外傷などによる関節可動域の減少は”健康者”においてもしばしば観察され、高齢であるほどこの傾向は顕著である印象がある。

固有感覚の精度の低下は粗雑な運動コントロールの獲得に繋がり、関節そのものの生体力学を変化させる。例えば歩行などの日常生活動作における関節運動の異常な「学習」を引き起こす。ひいては関節運動軸の逸脱が生じ、長期的には変形性関節症などの障害のリスクにもなりうる[8]。

仙腸関節(骨盤の関節)へのマニピュレーションが、上肢の運動時における体幹筋群の先行収縮(Feed-Forward Activation)を回復することや[11]、頸椎の可動域制限へのマニピュレーションで腕の位置再現性の精度が増加することも[12]、関節の固有感覚が正確な運動コントロールに寄与することを示唆している。

こうした位置情報のモニタリング機構の機能低下とそれに伴う正確な運動コントロールの減退は高齢者におけるバランス感覚の低下に大きく寄与し[13]、転倒のリスクを増大させる一因であるとされている[14]。高齢者の転倒は怪我の危険性のみならず死亡率を増加させる要因であるため、こうした加齢による固有感覚の減退を防ぐことが重要となる。

6. 固有感覚の抗加齢

日常的な身体活動は、固有感覚減退の予防に役立ち、特に関節位置覚に大きく関与する筋紡錘機能の改善が報告されている[15]。トレーニングによって筋紡錘の形態や代謝能が変化し、伸張反射のレイテンシの減少と振幅の増加が見られるようになる[16]。例を挙げると、プロのバレエ団員は同年齢の健康な人と比較して有意に関節位置感覚の感度が高いとされ[17]、また長期にわたる太極拳の実施者は関節の位置と方向の再現に高い正確性があると報告

されている[18]。カイロプラクティックを受けた高齢者の被験者の反応速度が、受けなかった被験者と比較して100ms程度早くなるという研究結果もあり[19]、関節の正常な可動域の維持は正確な運動コントロールに寄与する可能性がある。

日常生活の中での活動として歩行の健康への効果が近年注目されており[20]、固有感覚の加齢を防ぐためにも推奨されるべきである。しかし先に述べた通り、異常な運動学習の結果として正常でないフォームでの歩行が行われている場合があり、将来的に関節障害を引き起こす可能性があると考えられる。歩行の解析には筋電計等が用いられるが一般的に利用できるものではない。また静的な立位姿勢の分析においても、筋骨格系の立体的なアライメントを正確に定量化できるツールは限られている。例えば画像等による歩様・姿勢解析で関節の運動軸や筋活動のタイミングの評価が可能になり、日常生活動作のフォームのモニタリングが可能になれば、関節のダメージを減じ、ひいては固有感覚の老化を防ぐツールになるかもしれない。そのためには今後の分野横断的研究が期待される場所である。

7. 著者紹介

リガーレカイロプラクティック横浜副院長。日本カイロプラクターズ協会正会員。応用理学士、カイロプラクティック理学士、博士(カイロプラクティック)。筋骨格系の障害の大半は日常生活のフォームの崩れに起因するという考えから、行動姿勢研究会、カイロプラクティックネットワークプロジェクトに参画し、企業に向けた指導等を行っている。

参考文献

- [1] 日本整形外科学会/日本腰痛学会(2012), 腰痛診療ガイドライン, 南江堂.
- [2] Haavik, H., & Murphy, B. (2012). The role of spinal manipulation in addressing disordered sensorimotor integration and altered motor control. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(5), 768-776.
- [3] Adams, F. (1985). Hippocrates. On the articulations. *The genuine works of Hippocrates*, 568-654.
- [4] Taylor, H. H., & Murphy, B. (2010). The effects of spinal manipulation on central integration of dual somatosensory input observed after motor training: a crossover study. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 33(4), 261-272.
- [5] Wei, G., & Luo, J. (2010). Sport expert's motor imagery:

- Functional imaging of professional motor skills and simple motor skills. *Brain research*, 1341, 52-62.
- [6] Proske, U. (2005). What is the role of muscle receptors in proprioception?. *Muscle & nerve*, 31(6), 780-787.
- [7] Naito, E., Nakashima, T., Kito, T., Aramaki, Y., Okada, T., & Sadato, N. (2007). Human limb-specific and non-limb-specific brain representations during kinesthetic illusory movements of the upper and lower extremities. *European Journal of Neuroscience*, 25(11), 3476-3487.
- [8] Skinner (1993). Pathokinesiology and total joint arthroplasty. *Clinical orthopaedics and related research*, 288, 78-86.
- [9] Miwa et al. (1995). Dynamic and static sensitivities of muscle spindle primary endings in aged rats to ramp stretch. *Neuroscience letters*, 201(2), 179-182.
- [10] Kaplan et al. (1985). Age-related changes in proprioception and sensation of joint position. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 56(1), 72-74.
- [11] Marshall, P., & Murphy, B. (2006). The effect of sacroiliac joint manipulation on feed-forward activation times of the deep abdominal musculature. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 29(3), 196-202.
- [12] Haavik, H., & Murphy, B. (2011). Subclinical neck pain and the effects of cervical manipulation on elbow joint position sense. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 34(2), 88-97.
- [13] Lord & WARD (1994). Age-associated differences in sensori-motor function and balance in community dwelling women. *Age and Ageing*, 23(6), 452-460.
- [14] Sorock & Labiner. (1992). Peripheral neuromuscular dysfunction and falls in an elderly cohort. *American journal of epidemiology*, 136(5), 584-591.
- [15] Petrella, R. J., Lattanzio, P. J., & Nelson, M. G. (1997). Effect of Age and Activity on Knee Joint Proprioception1. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 76(3), 235-241.
- [16] Hutton (1992). Acute and chronic adaptations of muscle proprioceptors in response to increased use. *Sports medicine*, 14(6), 406-421.
- [17] Barrack et al. (1984). PROPRIOCEPTION OF THE KNEE JOINT: PARADOXICAL EFFECT OF TRAINING. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 63(4), 175-181.
- [18] Tsang & Hui-Chan (2003) Effects of tai chi on joint proprioception and stability limits in elderly subjects. *Med Sci Sports Exerc* 35(12):1962–1971.
- [19] Holt, K. R., Haavik, H., Lee, A. C. L., Murphy, B., & Elley, C. R. (2016). Effectiveness of Chiropractic Care to Improve Sensorimotor Function Associated With Falls Risk in Older People: A Randomized Controlled Trial. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 39(4), 267-278.
- [20] Studenski, S., Perera, S., Patel, K., Rosano, C., Faulkner, K., Inzitari, M., ... & Nevitt, M. (2011). Gait speed and survival in older adults. *Jama*, 305(1), 50-58.

佐々木空: RMIT University カイロプラクティック学科博士課程修了。専門分野である神経生理学、特に筋生理学・体性-体性反射・感覚運動統合に関する研究プロジェクトに携わり、オーストラリア神経学会を中心に発表活動を行ってきた。現在は臨床現場に立ちながら、姿勢に起因する障害、マニピュレーションが発声に及ぼす影響等の研究を進めている。