

変形性膝関節症の発症と進行のメカニズム

— screw home movement に代わる膝関節支持機構としての corkscrew movement について—

松本和久^{1, 2)}, 松本典也^{1, 2)}

1) 松本鍼灸院

2) 日本伝統医学研究所

要旨：立位において体幹の alignment が正常で膝関節が完全伸展位である場合には、膝関節の安定に screw home movement (SHM) が作用する。しかし加齢による筋力低下は脊柱の彎曲増加、股関節屈曲・外転、膝関節屈曲などの alignment 変化を引き起こし、その結果 SHM は破綻する。この破綻した SHM の代わりに膝関節の安定に寄与する膝関節支持機構として「corkscrew movement (CSM)」を提唱した。corkscrew はワインボトルのコルク栓を抜くために使用される道具のことであるが、捻りを加えることで直線的な力を増大することから打撃系格闘技でも用いられる。CSM は下腿の外旋が減少する第一期 CSM と、第一期 CSM の状態からさらに脛骨関節面が後内方に偏位する第二期 CSM とからなる。CSM には筋収縮の代わりに“筋硬度の増加と筋短縮”という力源が関与しており、伸張性の欠落した“筋硬度の増加と筋短縮”は変形性膝関節症が増悪する一因となる。

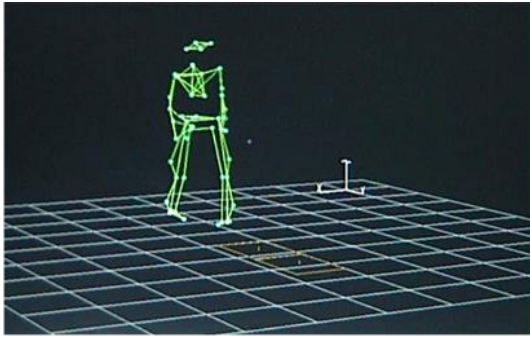
Key words 変形性膝関節症, メカニズム, screw home movement, corkscrew movement, 座屈現象

I. はじめに

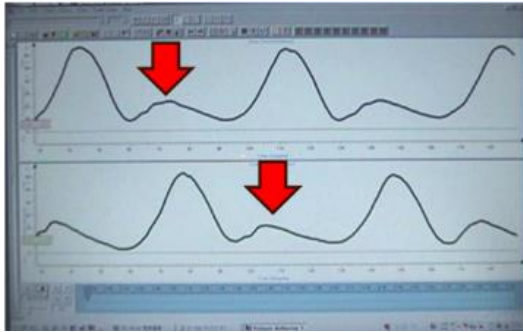
膝関節は大腿骨、脛骨および膝蓋骨からなり、大腿骨の関節面が2つの半球体であるのに対して脛骨の関節面は浅い窪みをもつ平坦な構造で、骨の適合は著しく不安定であるため¹⁾、膝関節は他の荷重関節に比べて周囲筋が発達し、安定性の獲得には「筋性支持」の果たす役割が強いとされている²⁾。そのため一般的に変形性膝関節症（膝OA）の成因には、職業等の日常生活の中で膝関節に加わる何らかの持続的な機械的ストレス^{3, 4)}や、肥満あるいは半月板損傷などの膝関節の不安定性⁵⁾などが指摘されているが、特に力学的環境の破綻が重要であるとされている⁶⁾。但し正常な alignment 姿勢での歩行では、立脚期初期に膝関節が軽度屈曲位となり膝関節が屈曲されようとするに拮抗するために大腿四頭筋は筋活動を示すが（図1）、正常な alignment の安静立位姿勢では、重心線は膝関節の前方に位置するため（図6-a）重力が膝関節の伸展に働き、大腿四頭筋の筋力を必要としない膝関節の安定機構が存在する。この膝関節の安定機構の一つに screw home movement (SHM) がある。SHM は、膝関節が完全伸展

位になる直前に大腿骨に対して脛骨が不随意的に外旋する運動で、大腿骨内・外側顆が平行していないこと、大きさが異なることにより生じるものである¹⁾。

一方山口、鈴木が10代から70代にわたって健常人1801人の脊柱彎曲度を調べた結果、高齢者では胸椎の後彎が大きくなるとし、原田、茂手木らは胸椎の後彎が増大した高齢者ほど膝関節の屈曲角度は増大し、正常では膝関節の前方を通過する重心線が膝関節の後方を通過するようになると報告している⁷⁾。したがって加齢による筋力低下は脊柱の彎曲増加、股関節屈曲・外転、膝関節屈曲などの alignment 変化を引き起こし、その結果 SHM は破綻する。本稿では、この破綻した SHM の代わりに膝関節の安定に寄与する膝関節支持機構として「corkscrew movement」を提唱し、その力源として筋力ではなく筋硬度の増加と筋短縮という概念を加えて、膝OAの発症と進行のメカニズムを考察する。



膝関節角度



大腿四頭筋 筋電図

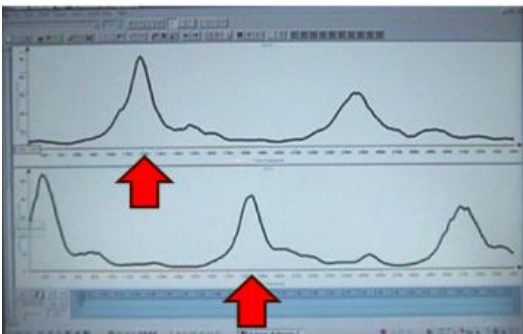


図1. 正常な alignment 姿勢での歩行時の大腿四頭筋の筋活動

II. corkscrew movement とは

“corkscrew”とは、ワインなどのボトルのコルク栓を抜くために使用される螺旋状の針金からなる道具のことであるが（図2）、ボクシングや空手などの打撃系格闘技においてはパンチが当たる瞬間に肩・肘・手首を捻ることで直線的な力を増大するテクニックでもある（図3）。本稿のcorkscrew movement (CSM) で使用する“corkscrew”は後者の意味である。すなわち膝関節の CSM は、矢状面において生じる膝関節の一軸性の伸展運動に螺旋状の力を加え運動軸を変えることで、直線的な伸展運動を増強するものであり、抗重力肢位である立位において膝関節の支持性を担う SHM が破綻した状態を補う機構と定義できる。

CSM を簡単に図示すると、正常では Mikulicz line 上に膝関節の中心が位置し、膝関節の前方に位置する重心線と SHM によって安静立位での膝関節の支持性が保たれる。しかし膝 OA では SHM は機能せず膝関節は完全伸展

位を保つことが困難になり、Mikulicz line の外側に膝関節が位置することで重力は膝関節の内反に作用する。これに加えて立位で足部を固定された状態で股関節が屈曲・外転するため、下腿は回旋・偏位を矯正される。つまり CSM は、重力、股関節屈曲・外転、下腿の回旋・偏位の三つの要素で構成される（図4）。また CSM には下腿の外旋角度が減少する第一期 CSM と、第一期 CSM の状態からさらに下腿（脛骨関節面）が後内方に偏位する第二期 CSM がある（図5）。

次の章では膝 OA において形成される CSM の発生メカニズムについて、過去の論文を参考に考察する。



図2. Corkscrew

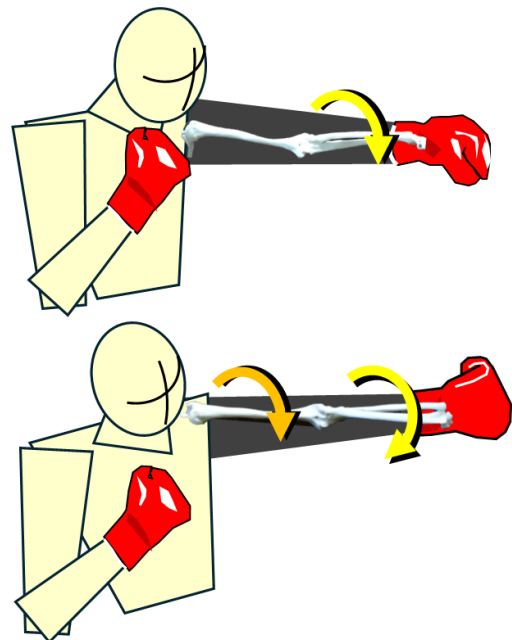


図3. 通常のストレート（上）とコークスクリュー（下）
通常のストレート（上）では前腕を回内する回転を加えるのみで肘関節の伸展運動軸は変化しない。しかしコークスクリュー（下）ではそれに加えて肩関節の内旋を加えるため肘関節の伸展運動軸が変化し、直線的な肘関節の伸展力を増強する。

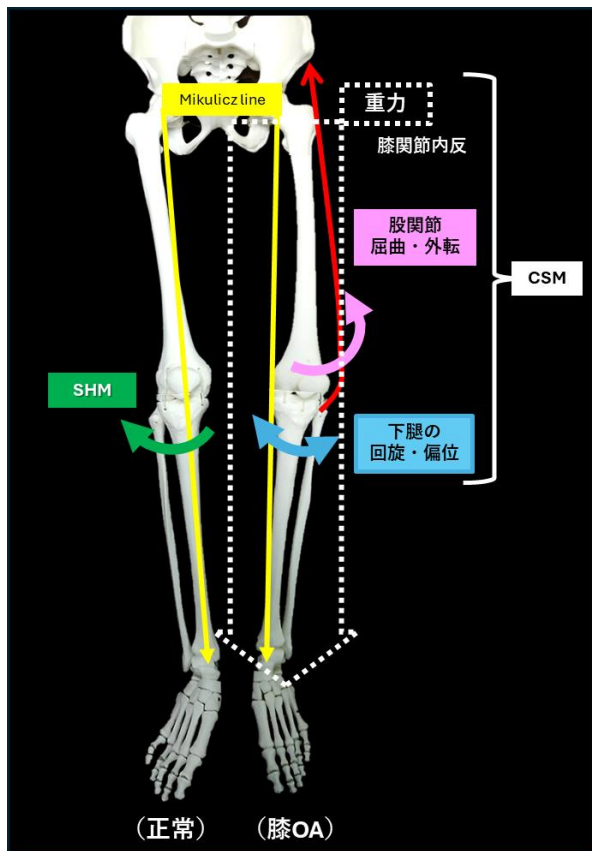
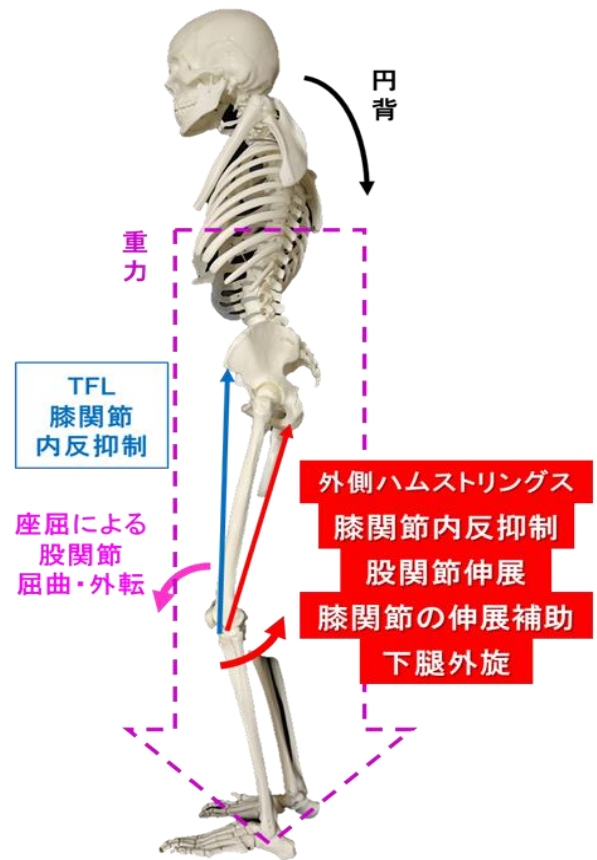
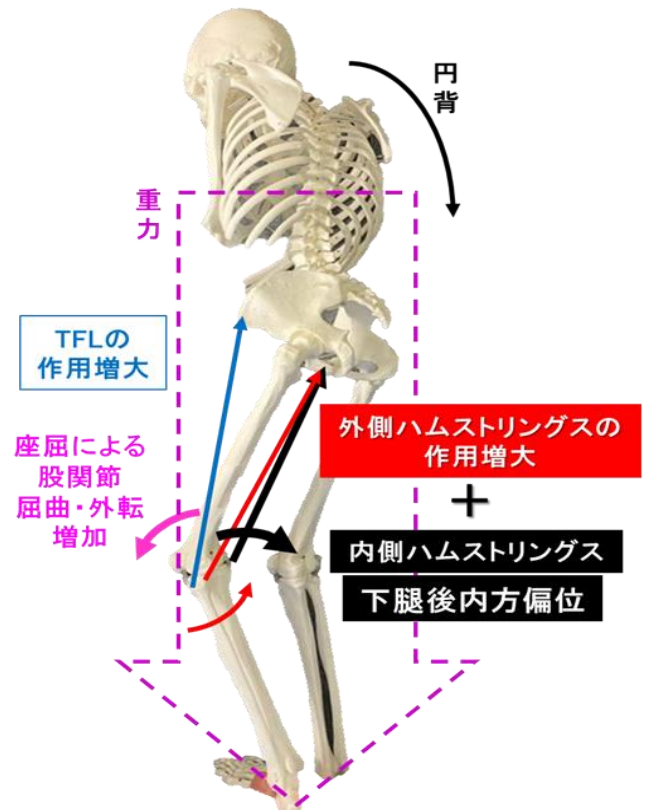


図4. CSMの構成要素

正常ではMikulicz line上に膝関節の中心が位置し、膝関節の前方に位置する重心線とSHMによって安静立位での膝関節の支持性が保たれる。膝OAではSHMは機能せず膝関節は完全伸展位を保つことが困難になるが、Mikulicz lineの外側に膝関節が位置することで重力は膝関節の内反に作用する。これに加えて立位で足部を固定された状態で股関節が屈曲・外転するため、下腿は回旋・偏位を矯正される。つまりCSMは、重力、股関節屈曲・外転、下腿の回旋・偏位の三つの要素で構成される。



第一期CSM



第二期CSM

図5. 第一期CSMと第二期CSM

III. corkscrew movement (CSM) 発生のメカニズム

1. 第一期 CSM の発生メカニズム

高井らは10代から70代の健康人1801名を対象にした山口らの研究を参考に、加齢により頸椎、胸椎の彎曲が増大し、特に胸椎の後彎が著明で、その頂点は下方に移動するとともに膝関節は屈曲し、重心線は膝関節の後方に位置するようになると報告している⁷⁾。この状態を図6-bに示す。この時の前額面の状態は、渡辺らが住民膝検診に参加した1401名（女性809名；65.6±12.9歳、男性592名；67.2±13.1歳）を対象に膝OAと円背との関係を調査した結果では、膝OAと円背の間には関連性を認め、Grade 3～4の膝OA群はGrade 0、1の非膝OA群よりも円背の割合が有意に多かったと報告していることから⁸⁾、図6-cのような状態であると考えられる。ただし図6-aの状態から突然、図6-b、6-cの状態に変化するわけではなく、徐々に変化する。特に膝関節の屈曲角度と重心線の位置は大腿四頭筋の筋活動に影響を及ぼす。竹内らは大腿脛骨外側角（Femoro-Tibial Angle：FTA）が180°以上185°未満の群（185°未満群）とFTAが185°以上190°未満の群（190°未満群）、FTAが190°以上の群（190°以上群）、185°未満群・190°未満群・190°以上群の反対側の膝関節で何ら症状がなくFTAが175°前後の群（175°前後のOA反対側群）、および24～30歳の健康成人男子の群（健康群）で、安静立位姿勢の下肢筋の筋活動を調査している。その結果、健康群（図6-aの状態）の二倍の筋活動を175°前後のOA反対側群で認めたと報告している⁹⁾。また佐々木は、健康者、膝OA Grade 1、膝OA Grade 2、膝OA Grade 3を対象に膝関節部における下腿外旋角度を調査した結果、健康者よりも膝OA Grade 1、膝OA Grade 1よりも膝OA Grade 2の下腿外旋角度は有意に減少しており、膝OA Grade 1と膝OA Grade 2は内反変形を呈しておらず明らかな膝関節の屈曲拘縮を認めない状態であることから、この段階でSHMが破綻していることを指摘している¹⁰⁾。この加齢による体幹や膝関節のalignmentの変化は、ちょうど膝関節は正常発達における出生直後の内反傾向と、歩行開始から5歳ごろまでの外反傾向のような¹⁾、筋力不足による支持性の不足がもたらす座屈現象と考えられる（図5）。正常発達では筋力が徐々に増強し支持性が向上することで正常なalignmentを獲得するのにに対し、膝OAは崩れていくalignmentに対して抗おうとする筋収縮を認める。前述した佐々木の報告では、内側広筋（VM）や内側ハムストリングス（MH）の膝関節の内側に位置する筋群（内側筋群）と外側広筋（VL）、大腿二頭筋（LH）、大腿筋膜張筋（TFL）の膝関節の外側に位置する筋群（外側筋群）の立位時の筋活動比率は、健康者は117.6±10.1、膝OA Grade 1は150.3±17.1、膝OA Grade 2は207.8±26.0、膝OA Grade 3は287.3±30.5と、Gradeが進行するほど外側筋群の筋活動が有意に増加しており¹⁰⁾、外側筋群の筋活動比率の増加は座屈現象による膝関節の内反を抑制

する⁹⁾（図5）。またLHは股関節伸展に作用し股関節がさらに屈曲するのを抑制すると共に、大腿骨を後方に引くことで膝関節の伸展を補助する（図5）。LHは下腿を外旋する方向に作用しているが（図5）、大腿骨（股関節）がより外旋するため相対的に下腿の外旋角度が減少する（図7）。これが第一期CSMの発生メカニズムである。

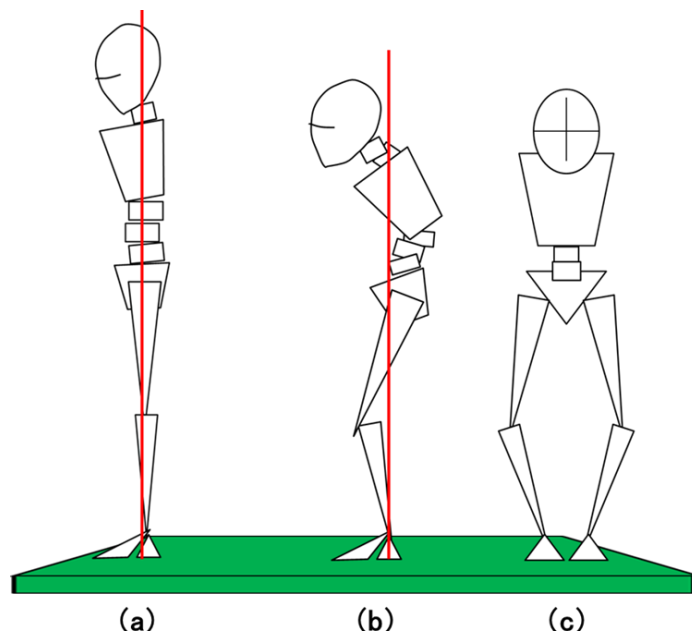


図6. 加齢による姿勢の変化

aは健康成人の矢状面、bは高齢者の矢状面、cは高齢者の前額面

2. 第二期 CSM の発生メカニズム

佐々木は、健康者、膝OA Grade 1、膝OA Grade 2、膝OA Grade 3を対象に膝関節部における下腿外旋角度を調査した結果、健康者よりも膝OA Grade 1、膝OA Grade 1よりも膝OA Grade 2の下腿外旋角度は有意に減少するが、膝OA Grade 2よりも膝OA Grade 3では下腿外旋角度は逆に有意に増加すると報告している¹⁰⁾。すなわち佐々木の報告における膝OA Grade 1と膝OA Grade 2の対象は第一期CSMの状態であり、さらに進行した膝OA Grade 3は第二期CSMの状態と考えられる。

第一期CSMの状態からさらに筋力が低下しalignmentが崩れてくると、股関節の屈曲・外転角度は増大し膝関節は屈曲・内反位を呈するようになる。そのためLHの作用は増大し、加えて外方に偏位する大腿骨を引き寄せるためにMHが強力に作用する。その結果、下腿（脛骨関節面）は後内方に偏位する（図5、7）。これが第二期CSMの発生メカニズムである。

膝OAの下腿の回旋については、下腿が外旋とする意見や¹¹⁾逆に内旋とする意見¹²⁾がある。富永は下腿の回旋角度の測定において、運動軸を何処に設定するかで値が変わってくるとしている¹²⁾。第二期CSMでは変形が著明で、大腿骨と脛骨の位置関係が大きく歪み、下腿回

旋角度の計測時には少なからず歪みの矯正が必要となるため(図7), 下腿の回旋角度が変化する。

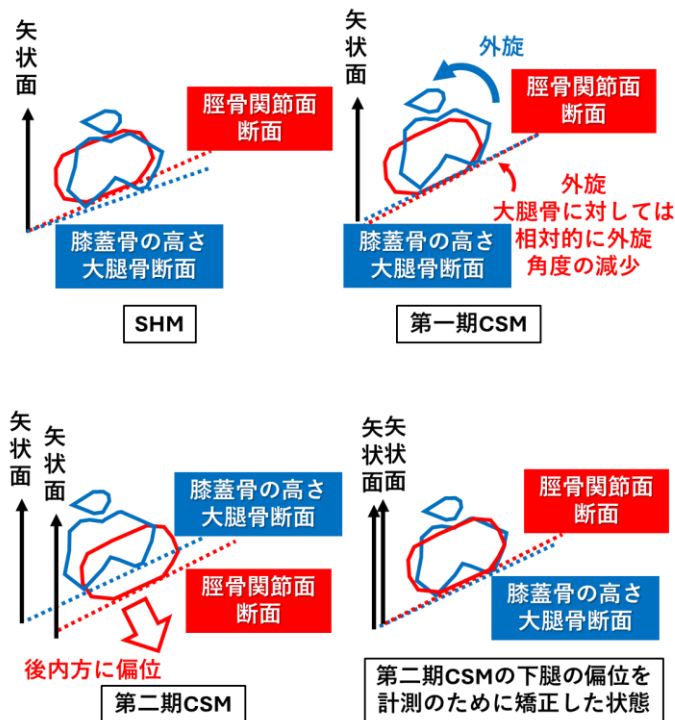


図7. SHM, 第一期CSM および第二期CSM の水平面における大腿骨と脛骨の位置

IV. 力源としての筋硬度の増加と筋短縮

第一期CSMでは、崩れているalignmentに対して抗おうとする筋活動を認め、この筋活動は正常なalignmentの筋活動よりも大きいことは先に述べた。しかし加齢により大腿四頭筋の筋線維の形態的変化が生じ、膝伸展筋力が低下することが報告されている¹³⁾。したがって膝関節の安定性を確保するためには、筋活動に代わる力源が必要となる。

Ebyらのshear wave elastographyを用いた高齢者の上腕二頭筋の筋硬度の調査では、60歳以上では筋硬度と年齢に正の相関関係があることが報告されている¹⁴⁾。またDomireらの50歳から70歳の高齢者を対象としたmagnetic resonance elastographyを用いた前脛骨筋の筋硬度の測定結果では、筋硬度が高値を示した3名の平均年齢は 67 ± 3 歳で他の対象の平均年齢の 60 ± 7.2 歳よりも有意に高齢であった¹⁵⁾。これは加齢により筋の断面積、線維総数、サイズが減少し、筋内の脂肪や結合組織の割合が増加する¹⁶⁾影響と考えられる。また筋硬度が高まった状態が持続すると筋は徐々に短縮する。

正常なalignmentと第一期CSMのalignment, および第二期CSMのalignmentのモデルでTFL, LH, MHの長さを比較すると(図8), 正常なalignmentを100%として、第一期CSMのalignmentではTFLは92.6%, LHは82.4%, MHは88.8%, 第二期CSMのalignmentではTFLは91.4%,

LHは81.7%, MHは84.5%である。つまり、これらの筋の長さが同程度短縮すれば大腿骨と脛骨は第一期CSMおよび第二期CSMの位置に偏位し、膝関節の運動軸が破綻するため、筋活動は必要なくなる。竹内らはFTAが 180° 以上から 190° 未満までは大腿四頭筋の筋活動は増加するが、FTAが 190° 以上になると逆に大腿四頭筋の筋活動は減少することを報告している⁹⁾。またFTAが 190° 以上の膝OAの歩行において大腿四頭筋の筋活動がほとんど認められないのは、この力源を用いているためと考えられる(図9)。

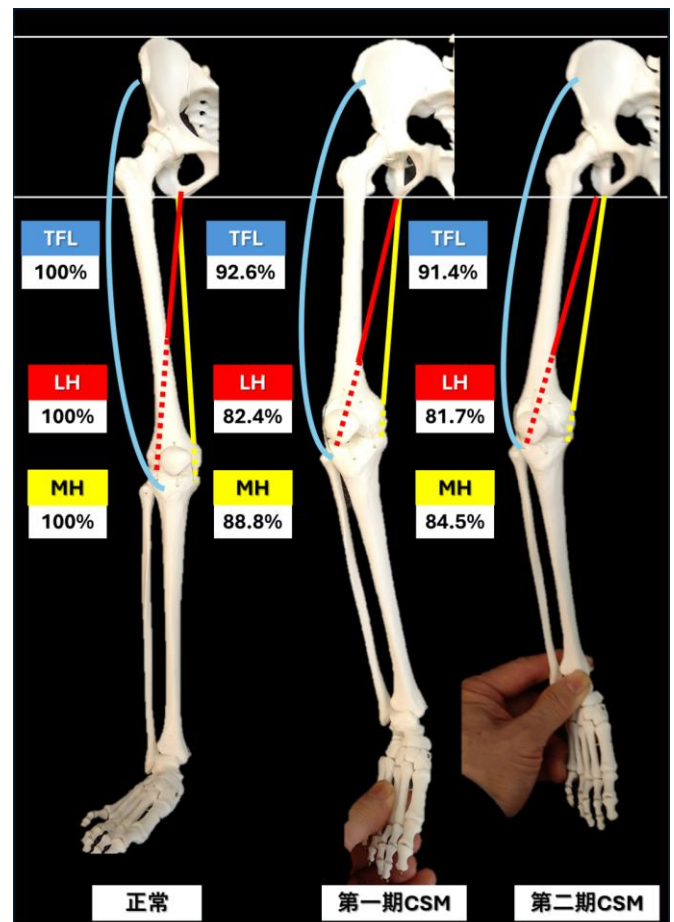
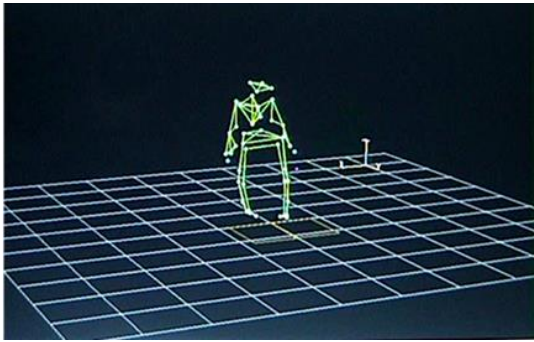
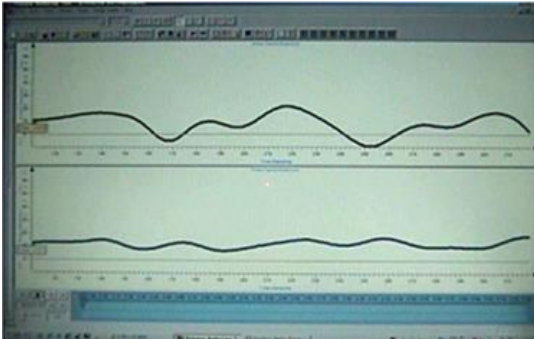


図8. 正常, 第一期CSM および第二期CSM モデルのTFL, LH, MHの長さの比較



膝関節角度



大腿四頭筋 筋電図

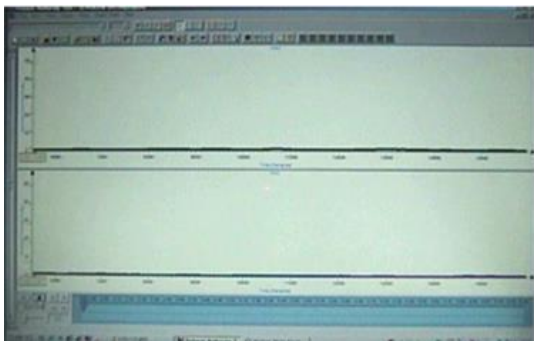


図9. 第二期 CSM が進行した膝 OA の歩行時の大腿四頭筋の筋活動

V. 膝 OA の進行のメカニズム

関節軟骨には血管が存在せず、滑膜から分泌される滑液によって栄養される¹⁾。すなわち関節軟骨はスポンジのような構造で、加圧と減圧を繰り返すことにより滑液が関節軟骨に浸透する。しかし、力源としての筋硬度の増加と筋短縮は関節の可動性を阻害するばかりか関節軟骨に対して持続的な加圧を強いるため、関節軟骨は栄養不足になり、微細な損傷を修復できないだけでなく関節軟骨そのものが破壊され、膝 OA は進行する。

VI. CSM の臨床的意義

膝関節の抗重力支持機構である CSM の主たる力源は筋力ではない。そのため CSM は意図的に用いられるものではなく、保有する下肢筋力以上の長時間の立位姿勢の保持や歩行などの過度な負荷が加わった時、無意識に CSM を用いることになる。CSM を用いた結果、本来の CSM を用いない運動様式なら過度の負荷で膝関節の不安定感や過度

の筋疲労を感じるはずが、一時的な膝関節の安定とそれとは不釣り合いな筋疲労のなさを経験し、CSM を用いることを是とする負の学習が成立する。

第一期 CSM の発生メカニズムで述べたように、第一期 CSM を呈している膝 OA 患者に対して大腿四頭筋をはじめとする下肢筋の筋力増強訓練を行うことは、座屈現象による膝関節の内反を抑制する効果が少なからずあると考えられる。一方で股関節は屈曲・外転、膝関節は屈曲・内旋・内反方向に偏位がはじまっている。その状況で、例えば大腿四頭筋の筋力増強訓練として端坐位で抵抗を加えた膝関節の伸展運動を実施する場合、股関節が外転位で膝関節が内旋位を呈している可能性があり、そのまま膝関節の伸展運動を実施すると TFL をはじめとする外側筋群のみを強化することになり、外側筋群の筋硬度の増加や筋短縮を助長し、反って CSM を進行させることにつながる可能性を有している。また第二期 CSM を呈している膝 OA 患者では、膝関節の運動軸は偏位し、力源を筋硬度の増加と筋短縮に依存していることから、例えば、前述のような大腿四頭筋の筋力増強訓練として端坐位で抵抗を加えた膝関節の伸展運動などは無意味である。先ず筋硬度の増加や筋短縮を呈している筋に対して経路経筋伸張法^{17, 18, 19)}のような関節運動を介さない方法を用いて筋硬度を弛緩させ短縮した筋を伸張した後に、本来の膝関節の運動軸に矯正した上で、筋再教育や筋力増強訓練などのしかるべき介入が必要となる。当然、体幹や股関節の alignment を矯正する介入も必須である。そしてこれらの介入を実施する前には、介入後に立位バランスの低下や立位・歩行の持久性が著しく低下すること、下肢の筋疲労を感じるようになることなどを説明し、同意を得てから実施しなければならない。なぜなら、第二期 CSM を呈している膝 OA 患者は無意識に増加させた筋硬度や筋短縮に依存して立位・歩行をはじめとする日常生活を営んでおり、その生活習慣そのものが膝 OA の悪化の原因となっていることには全く気付いていないからである。

CSM の臨床的意義は、これまでの膝 OA に対する保存療法概念を根本から見直す示唆を与えるものである。今後の研究に期待したい。

VII. 研究の限界

Kimura はハムストリングスを徒手的に伸張することでハムストリングスの筋硬度が有意に低下し、下腿の外旋角度が有意に増加したことを報告している¹⁹⁾。ただし、筋硬度の計測は再現性を担保することが容易ではない。筆者は筋硬度測定 of 再現性を担保するためにプローブアダプターを作成したが²⁰⁾、広い面積を有する背部のような場所でしか使用できない。また筋の短縮を正確に評価すること、ならびに運動軸が破綻し変形した膝関節の大腿骨と脛骨の位置関係を数値化することも現状では困難である。したがって本研究の限界は、過去の論文とモデル

を用いた検証からの推論が限界である。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人全国柔道整復学校協会監修：運動学改訂第3版. 医歯薬出版, 2020.
- 2) 小野澤敏弘：変形性膝関節症における膝周囲筋の動作筋電図学的研究. 日整会誌, 60, 929-939, 1986.
- 3) Pommer, G.: Funktionelle Theorie der Arthritis deformans vor dem Forum des Tierversuches und der Pathologischen Anatomie. Arch. Orthop. Unfall-Chir., 17: 573-593, 1920.
- 4) Barer, W., Bennet, G. A.: Experimental and pathological studies in the degenerative type of arthritis. J. Bone Joint Surg., 18: 1-18, 1936.
- 5) Smillie, I. S.: Diseases of the knee joint. Churchill Livingstone, Edinburgh and London, 308-359, 1974.
- 6) 二ノ宮節夫, 宮永豊：変形性関節症の進展—組織学的および力学的考察—. 臨整外, 14, 10-16, 1979.
- 7) 高井逸史, 宮野道雄, 中井伸夫, 他：加齢による姿勢変化と姿勢制御. 日本生理人類学会誌, 6(2), 41-46, 2001.
- 8) 渡辺博史, 古賀良生, 大森豪, 他：変形性膝関節症における円背姿勢と膝伸展筋力の関連に関する疫学調査. 厚生連医誌, 20(1), 37-42, 2011.
- 9) 竹内一喜, 武部恭一：変形性膝関節症における下肢筋の筋電図学的研究. 日関外誌, 6(3), 455-471, 1987.
- 10) 佐々木俊二：変形性膝関節症の発症と進行のメカニズムに関する研究—形態学的, 筋電図学的検討—. 日関外誌, 8(3), 361-370, 1989.
- 11) 姫野礼吉, 小林晶, 上崎典雄, 他：変形性膝関節症における下腿の回旋について. 整形・災害外科, 26(2), 187-192, 1977.
- 12) 富永敏弘：膝O.A.の肢位による下腿の回旋度. 整形・災害外科, 35(4), 170-173, 1987.
- 13) 池添冬芽, 浅川康吉, 島浩人ら：加齢による大腿四頭筋の形態的特徴および筋力の変化について—高齢女性と若年女性との比較—. 理学療法学, 34(5), 232-238, 2007.
- 14) Sarah F Eby, Beth A Cloud, Joline E Brandenburg, et al.: Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: influences of sex and age throughout adulthood. Clin Biomech (Bristol.), 30(1), 22-27, 2015.
- 15) Zachary J Domire, Matthew B McCullough, Qingshan Chen, et al.: Feasibility of using magnetic resonance elastography to study the effect of aging on shear modulus of skeletal muscle. J Appl Biomech, 25(1), 93-97, 2009.
- 16) J Lexell, CC Taylor, M Sjöström: What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. J Neurol Sci, 84(2-3), 275-294, 1988.
- 17) Matsumoto K, Kimura A, Tomita K, et al.: Effect of meridian and muscle region stretching on alleviation of delayed onset muscle soreness. 14th International Congress of the World Confederation for Physical Therapy- CD of Abstracts-, 2003: RR-P0-0672.
- 18) 松本和久, 松本典也：妊婦の背部痛に対する経脈経筋伸張法による介入効果の検証. 日本東洋醫學研究會誌, 7, 1-8, 2021.
- 19) Atsushi Kimura: The effects of hamstring stretching on leg rotation during knee extension. J. Phys. Ther. Sci. 25, 697-703, 2013.
- 20) 松本和久, 児玉 香菜絵, 村迫 萌生：剪断波エラストグラフィ測定におけるプローブアダプターの検者内および検者間信頼性の検証. 日本柔道整復接骨医学会誌, 32(1), 16-22, 2023.

Mechanisms of Onset and Progression of Knee Osteoarthritis: The Corkscrew Movement as an Alternative Knee Support Mechanism to the Screw Home Movement

Kazuhisa Matsumoto^{1, 2)}, Fumiya Matsumoto^{1, 2)}

1) MATSUMOTO ACUPUNCTURE MOXIBUSTION CENTER

2) INSTITUTE of JAPANESE TRADITIONAL MEDICINE

Abstract

In the standing position, when the knee joint is fully extended and trunk alignment is normal, the screw home movement (SHM) contributes to the stability of the knee joint. However, age-related muscle weakness leads to postural changes—such as increased spinal curvature, hip flexion and abduction, and knee flexion—that consequently disrupt SHM. These alterations in alignment compromise the mechanical locking mechanism provided by SHM, thereby reducing knee joint stability in older adults. To compensate for this disruption, we propose a novel knee stabilization strategy termed the corkscrew movement (CSM). The term "corkscrew" refers to a tool used to remove corks from wine bottles, and its principle of enhancing linear force through rotational torque is also employed in striking martial arts. CSM consists of two phases: Phase I involves a reduction in external rotation of the lower leg, and Phase II involves posterior-medial displacement of the tibial articular surface following Phase I. Unlike SHM, which primarily depends on active muscle contraction, CSM is driven by increased muscle stiffness and shortening. This lack of extensibility caused by heightened muscle hardness and shortening is considered a contributing factor to the progression of knee osteoarthritis.

keywords

Knee Osteoarthritis, Mechanism, Screw Home Movement, Corkscrew Movement, buckling phenomenon