

「Closed Kinetic Chain のバイオメカニクス研究」

河村顕治

吉備国際大学・保健科学部・理学療法学科

Closed Kinetic Chain(以下 CKC) のコンセプトは 1955 年に Steindler によって臨床分野に紹介され、現在では膝関節のリハビリテーションに不可欠となっている。これまで CKC の研究を行ってきた中で、その優れた特性を利用していくつかのリハビリテーション機器・福祉用具を開発した。今回、研究によって明らかとなった CKC の特性について解説すると共に、これまで開発してきたリハビリテーション機器・福祉用具について発表する。なお、本研究課題は平成 19 年度に採択されたオープンリサーチセンター整備事業「健康寿命を延伸するリハビリテーション先端科学研究プロジェクト 2 (臨床研究):健康増進と障害予防のためのバイオメカニクス」の中心課題に位置づけている。

キーワード: Closed Kinetic Chain、共同収縮、二関節筋、リハビリテーション機器、福祉用具

1. Kinetic Chain とは

Steindler は、1955 年に著書の中で身体運動を Open Kinetic Chain (以下 OKC) による運動と Closed Kinetic Chain (以下 CKC) による運動とに分類した。OKC は肢体の末端が自由な状態で行う運動のことである。各関節の運動は単独で行うことができる。それに対して CKC は肢体の遠位端に大きな抵抗が加わることで末端の運動が抑止されている状態をいう。各関節の運動は連動して行われる。この考え方で膝関節周囲筋トレーニングを分類すると、座位で足関節部に重りや抵抗をかけて行う膝伸展運動は OKC であり、スクワットやレッグプレスは CKC である。

2. CKC における共同収縮

CKC Exercise は主動筋と拮抗筋の共同収縮

が得られるとして、前十字靭帯再建術後のリハビリテーションなどに応用されている。前十字靭帯損傷の再建術を行った場合には再建した靭帯に負荷がかからないようにリハビリテーションを行う必要があり、CKC での運動が注目されるようになった。つまり OKC では膝前面の大腿四頭筋単独の運動であるため脛骨が前方に引き出されて前十字靭帯に負荷がかかる。さらに大腿四頭筋の単独収縮時には、大腿脛骨関節面では荷重面が不均一で関節面の前方部分に過大な負荷がかかり、後方部分には不安定性が生じる。ところがスクワットなどの CKC Exercise では大腿四頭筋とハムストリングの共同収縮によって、膝関節の安定性増大と力学的負荷の増加が起こるため膝関節は安定し前十字靭帯に危険なストレスはかからないのである。さらに関節面全体としてはより大きな力が働くが、均等に負荷がかかるので単位面積あたりでは特定の部位に高い圧が加わるということとはなくなる。現在では膝関節のリハビリテーションに CKC での運動は不可欠となっている。

3. 二関節筋の抑制現象

大腿四頭筋は OKC においては一体として活動するが、CKC の状況下では単関節筋である広筋群と二関節筋である大腿直筋は全く異なった活動様式を示す。すなわち、CKC においては広筋群が活発に活動する一方で大腿直筋の活動は著明に抑制される。大腿直筋は膝関節伸展作用を持つ一方で、股関節屈曲作用も持つため、股・膝関節同時伸展という CKC の運動時には神経生理学的に抑制されると考えられている。著者はファインワイヤー電極を用いて静止して両下肢で体重を支える程度の CKC の状態では二関節筋である大腿直筋が電氣的にはサイレントであることを見出した。同様に、通常のスクワットではハムストリングの筋活動はほとんど見られない。CKC の最大の特徴は二関節筋の抑制現象である。

Basmajian らによる筋電図学的研究によれば二関節筋は股・膝の同時伸展あるいは同時屈曲などの共働の運動(concurrent shift)では弱く収縮し、その逆の運動(countercurrent movement)では最大収縮し拮抗筋は弛緩することが知られている。座位での膝伸展などの

OKC Exercise は countercurrent movement と同義であり二関節筋は単関節筋のように出力に応じて収縮する。一方スクワットやレッグプレスなどに代表される CKC Exercise は concurrent shift とほぼ同義であり、この状態では二関節筋の収縮は抑制される。すなわち CKC において大腿四頭筋は単関節筋の広筋群と二関節筋の大腿直筋に明瞭に分かれて活動する。

これらの現象を別の観点から解釈すると、静的な CKC Exercise では関節中心に近い遅筋（単関節筋）が強く収縮して、関節中心から遠い位置にある速筋（二関節筋）が抑制されている。これは、高齢者などの虚弱者のトレーニングとしては最適である。なぜなら、変形した関節の負担となる強いトルクを発生する外側の筋肉があまり収縮せずに、関節を保護する深部の筋肉（固定筋）が主に収縮するからである。

4. 単関節筋と二関節筋の連動

動的な CKC Exercise では単関節筋と二関節筋が協調して運動を行う。広筋群が膝を伸展し、膝伸展により二関節筋である半腱様筋が突っ張り股関節を伸展する。また、大殿筋が股関節を伸展し、股関節伸展により二関節筋である大腿直筋が突っ張り膝関節を伸展する。CKC ではこのように下肢全体の筋肉が協調して動くため、OKC の運動のみでは CKC の運動能力を高めることはできないと言われている。人間の動きとして基本的な歩行や椅子からの立ち上がり動作などはすべて CKC であり、CKC Exercise が重視される所以である。

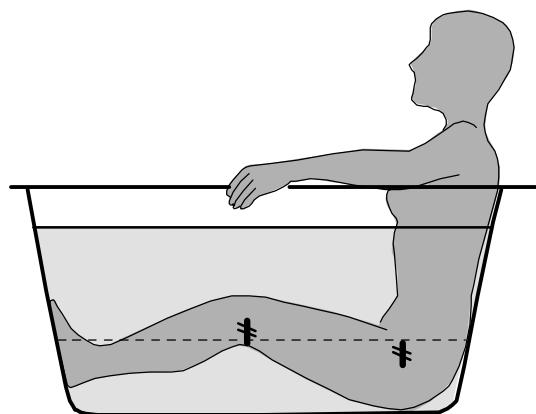
5. 軟骨代謝に及ぼす影響

CKC Exercise の代表である歩行において膝関節軟骨は約 4MPa の圧縮刺激を繰り返し受けている。関節軟骨は血管やリンパ管を持たず、荷重による圧縮刺激が引き起こす関節液の流れが軟骨代謝に貢献していると考えられている。動物実験の結果では適度な歩行運動は関節軟骨の厚みとプロテオグリカンの含有量を増すことが示されている。一方、生理的範囲を超える圧縮ストレスは軟骨に損傷を与えることが知られており、軟骨細胞がアポトーシスを引き起こすストレス閾値は 15~20MPa 程度とされている。

さらに OA の関節軟骨は変性のため正常な関節軟骨よりも力学的強度が弱いことが知られている。

また、圧縮刺激についてはその頻度が問題となり、軟骨細胞生成反応には負荷振動数依存性があると考えられている。すなわち 1Hz 前後の負荷振動数の時に最も軟骨細胞代謝は刺激される。負荷振動数が極端に低頻度であるとか高頻度であると軟骨細胞代謝は抑制される。したがって、適度な歩行やリズムカルなレッグプレス運動は軟骨代謝を刺激する効果があると考えられる。

6. 簡便な CKC 運動



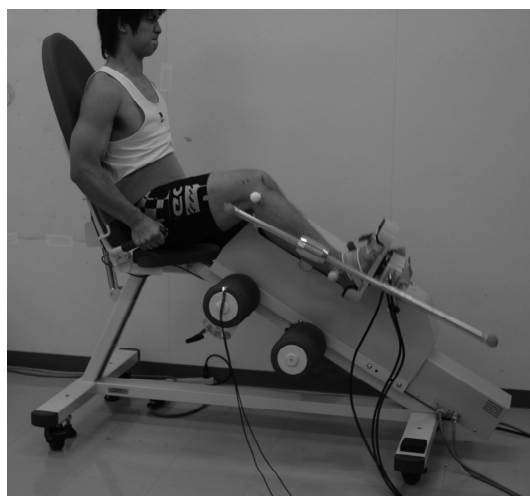
高齢者のリハビリとして安全で簡便に行える入浴エクササイズがある。入浴時に両足底をバスタブの前方の壁にあてて足部からの反力が膝関節と股関節に均等にモーメントを生じるようにして等尺性にリズムカルな蹴りの動作を行う。蹴りの動作は膝に痛みがでない程度の強さで、ゆっくり 30 回程度行う。

7. 開発したリハビリテーション機器・福祉用具

(1) Isokinetic Closed Kinetic Chain Exercise

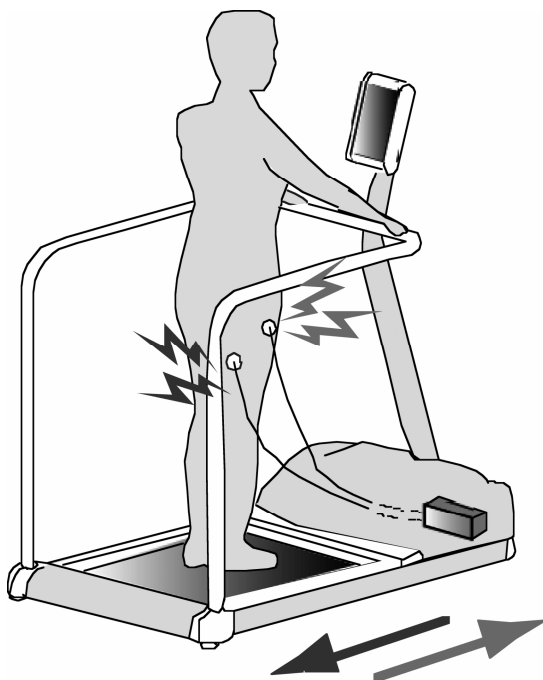
コンピューターによる制御であらかじめ設定した一定のスピードでレッグプレス運動を行うシステムである。単純なレッグプレスではなく、サイクロイドの原理で足部が緩やかな円弧状運動を行うことで股関節、膝関節に均等にトルクを分散しスムーズで安全な運動が可能となる。フットプレートに装着したロードセルによる足部出力の計測と、ビデオキャプチャーのデータを同期することにより各関節トルクを求めることができる。足部出力をフィードバックして電

気刺激により筋収縮を制御して、安全な出力パターンに補正することも可能とした。



(2) 荷重立位周期的動揺刺激と筋電気刺激による筋力維持・廃用防止法

周期的な身体揺動刺激とそれに同期した電気刺激を同時に加えると刺激レベルが低くても遅筋と速筋の両方が活動し、相乗効果で効率的な運動刺激となるのではないかと考えられる。従来、廃用に陥った筋肉では電気刺激のみでは筋肥大まで到達することは非常に困難であったが、荷重立位では抗重力メカニズムで筋肉が能動的に活動するため、それに電気刺激を併用すると効率的な筋力増強効果が期待できる。



(3) 大腿直筋の二関節筋機能を模した介護用ベルト

二関節筋機能に着目して座位保持と移乗介護動作を補助する機能を持つ装具（ダイヤ座位保持ベルト及びシーティングベルト）を開発した。健常人においては、大殿筋やハムストリングの股関節伸展作用を大腿直筋や大腿筋膜張筋などの二関節筋が膝伸展作用に転換するメカニズムが存在する。介護者が被介護者の腰を引く動きが股関節伸展モーメントを引き起こし、これがベルトによって膝伸展モーメントに転換される。



(4) CKC における二関節筋機能を利用した下肢筋力増強用着衣

ファインワイヤー電極による針筋電図計測を行ってみたところ、CKC において静止して両下肢で体重を支持する程度の荷重レベルでは広筋群は活動するが大腿直筋は電氣的にサイレントであることが判明した。二関節筋である大腿直筋には股関節屈曲作用があるため抑制されるものと解釈されるが、大腿直筋に相当するシーティングベルトを突っ張ると、この張力を打ち消すために大殿筋や大腿四頭筋だけでなくハムストリングが強力に収縮する（拮抗筋の共同収縮）ことが判明した。適度な弾力性を持ったシーティングベルトが開発できれば日常生活における運動中に下肢筋力増強をはかることができ、高齢者の介護予防やスポーツトレーニングへの利用が可能になる。