

Isokinetic Closed Kinetic Chain Exercise における 膝関節反力の筋骨格モデル解析

河村顕治 元田英一* 鈴木康雄* 奥村康成**
角野 歩** 都築常明** グアン リー***

Musculoskeletal Computer Model Analysis of the Knee Reaction Forces
during Isokinetic Closed Kinetic Chain Exercise

Kenji KAWAMURA, Eiichi GENDA*, Yasuo SUZUKI*,
Yasunari OKUMURA**, Ayumi KADONO**, Tsuneaki, TSUZUKI**, Guoan LI***

要 旨

前十字靭帯損傷者の術後リハビリテーションとして閉運動連鎖（CKC）が注目されてきた。CKCで理想的な下肢全体の筋収縮を引き出すためにサイクロイド曲線を利用した等運動性閉運動連鎖型評価訓練機を開発した。足部が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。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データを同期して各関節トルクを求めることができる。この運動について筋骨格シミュレーションモデルを用いて解析し、膝関節に加わるストレスを検討した。健常人では本機により大腿四頭筋とハムストリングのバランスの良い収縮が得られ、膝関節全屈曲角度域にわたって脛骨を前方へ引き出す力はほとんど働いていないことが証明された。CYBEXなどのOKCでは再建靭帯に危険なストレスがかかる可能性があり、本機によるCKCでの筋力評価訓練は安全かつ有用であると考えられる。

キーワード：前十字靭帯、閉運動連鎖、筋骨格モデル解析、膝関節反力

Key words : Anterior cruciate ligament, Closed kinetic chain, Musculoskeletal computer model analysis, Knee reaction force

はじめに

大腿四頭筋訓練の方法として椅子座位での膝伸展やスクワットなど多くの訓練方法がある。これらの内、椅子に座って足部を自由にして膝を伸展するような下肢の末端が自由に動くことができる運動様式はopen kinetic chain (OKC)、下肢末端に適度な抵抗が加わっ

たスクワットのような運動様式はclosed kinetic chain (CKC) と呼ばれている。前十字靭帯 (ACL) 再建術の術後リハビリテーションとして大腿四頭筋強化の訓練が必要とされるが、大腿四頭筋の収縮に伴う脛骨の前方引き出し力が生じるため、ACL再建術後のリハビリテーションとして制限された訓練方法をとらざ

吉備国際大学保健科学部理学療法学科
〒716-8508 岡山県高梁市伊賀町 8
*労災リハビリテーション工学センター
〒455-0018 愛知県名古屋市港区港明 1-10-5
*オージー技研開発部
〒703-8261 岡山県岡山市海吉1835
***ハーバード大学医学部整形外科
バイオメカニクス研究室
米国マサチューセッツ州ボストン

Department of Physical Therapy, School of Health Science, KIBI International University
8, Iga-machi, Takahashi-city, Okayama 716-8508, Japan
*Rosai Rehabilitation Engineering Center
1-10-5 Komei, Minato-ku, Nagoya-city, Aichi(455-0018)
**OG Giken Co.,Ltd Development Department
1835, Miyoshi, Okayama-city, Okayama(703-8261)
***Orthopaedic Biomechanics Laboratory,
MGH/BIDMC, Harvard Medical School 330 Brookline Ave, Boston MA02215, USA

るを得なかった。ACL 再建術を成功させるには ACL 機能の再獲得とともに下肢筋力の温存または増強がきわめて重要となる。いかにして再建後の ACL に負荷をかけずに下肢筋力を増強するかがポイントとなる。また、術前術後の筋力評価を安全かつ正確に行うことも非常に重要である。最近の研究の成果によれば、CKC においては運動の方法により股関節、膝関節、足関節が連動して体重を支えることが可能になり膝関節には拮抗した筋の共同収縮がおり、脛骨の前方引き出し力は打ち消され安定するといわれている¹⁻³⁾。また筋の協調運動による訓練が可能になることから、人間にとって最も基本的な運動である歩行をはじめ、走行、ジャンプ、椅子からの立ち上がりなど各種の日常生活動作に準じた訓練が可能と想定される。このため、CKC 訓練は ACL 再建術後のリハビリテーションだけでなく下肢全体の協調性を訓練可能な方法として注目されている。そこで我々は ACL 再建術後の理想的な訓練のために床上で足部が緩やかな円弧を描くように等運動性運動を行うことのできる CKC 訓練機をサイクロイド曲線の原理を利用して開発した^{4,5)}。本研究は等運動性訓練装置を用いた OKC 運動と、新たに開発した CKC 訓練機を用いた CKC 運動における膝関節に加わる力の相違を筋骨格モデルを用いて比較し

検討したものである。

対象と方法

被験者は健常成人男性（19歳、身長175.8cm、体重74kg）である。レッグエクステンションによる OKC での計測は椅子座位で等運動性訓練装置 CYBEX 6000のアーム軸を膝関節に一致させ、膝伸展筋群について膝屈曲角度90度から0度の間で求心性の伸展運動を角速度60度/秒で行い、その時の膝関節トルクを求めた。CKCでの計測は新たに開発した CKC 訓練機を用いて行った（図1）。CKC 訓練機はアームに取り付けられたフットペダルが、サイクロイド曲線軌跡上等速で往復運動する構造になっている（図2）。背臥位で膝屈曲角度120度から0度の間で膝関節回転速度60度/秒でレッグプレス動作を行わせて右下肢で蹴る力を3軸ロードセルで計測した。膝伸展の方向に求心性収縮が起こるように被験者には常にレバーアームを蹴るよう努力させた。身体位置計測は訓練中に右下肢の矢状面の運動を側面からビデオ撮影し、ビデオ画像をデジタイズして下肢の関節位置を求めた。

これら関節位置のデータと下肢に加わる外力から膝関節モーメントと膝関節間の反力が求まる。しかし、この値は下肢を下腿と大腿とに分けたときの体節間の力であり、筋張力等が含まれているので実際の関節間に働く力とは異なっている。そこで、下肢の筋骨格モ

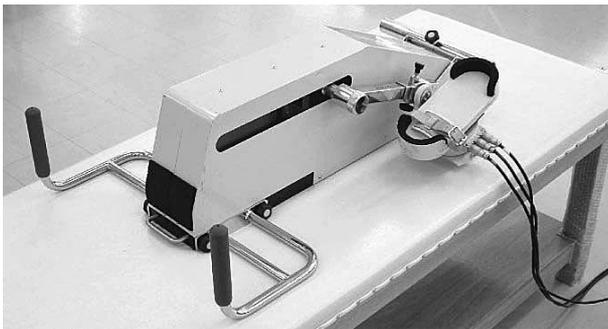


図1 サイクロイドカーブを利用した等運動性閉運動連鎖型評価訓練機



図2 等運動性閉運動連鎖運動

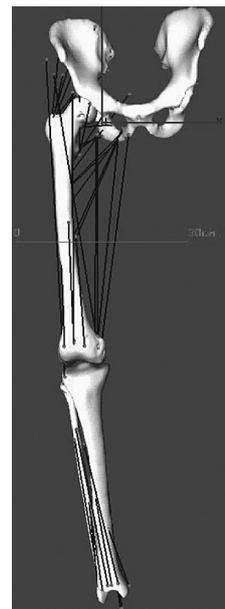


図3 筋骨格シミュレーションモデル

デル（図3）を利用したシミュレーションにより各筋張力を算出すると同時に膝関節に加わる圧迫力と剪断力を求めた。まず被験者の体重や身長、下肢のサイズ長から各体節の物理パラメータを求め、リンクモデルに計測した関節の座標位置データと外量データを入力し、運動中の体節間のモーメントと反力を求めた。次に各関節に作用するモーメントと反力から筋のモデルを考慮した釣り合い式が各関節毎にできるが、そのままでは式の数に比して未知数が多すぎるので筋力の最適化の方法により筋力を求めた。最適化の評価関数は筋の代謝モデルによる運動中の筋のストレスの3乗を最小にするよう選び、下肢の筋骨格モデルの筋には腰部、大腿部、下腿部、足部間の筋37個を選び、その付着位置も被験者の体格に合わせてスケーリングした。これにより得られた各筋の筋張力を各関節において体節間の反力から差し引くことによって関節間の圧迫力と剪断力を求めた。

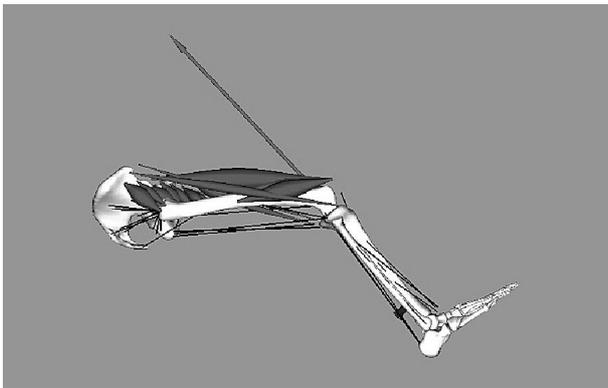


図4 OKC運動のシミュレーション

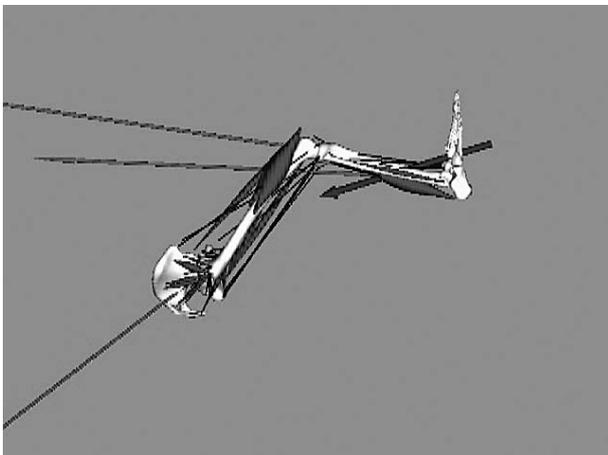


図5 CKC運動のシミュレーション

結果

筋骨格モデルを用いて行った筋張力の算出結果を膝関節まわりの筋張力について見るとCYBEX 6000を用いたOKC運動では大腿四頭筋（大腿直筋、外側広筋、内側広筋、中間広筋）の単独収縮を認めた。新たに開発したCKC訓練機を用いて行ったCKC運動では大腿四頭筋（外側広筋、内側広筋、中間広筋）、ハムストリング（大腿二頭筋、半膜様筋）および下腿三頭筋（腓腹筋）の共同収縮が現れた。

膝屈曲角度60度におけるそれぞれの筋張力の大きさを筋の太さで示したモデルを図4と図5に示す。図中筋力の大きさは筋の太さで示してある。また、同じく筋骨格モデルから関節間反力が計算できるので、膝関

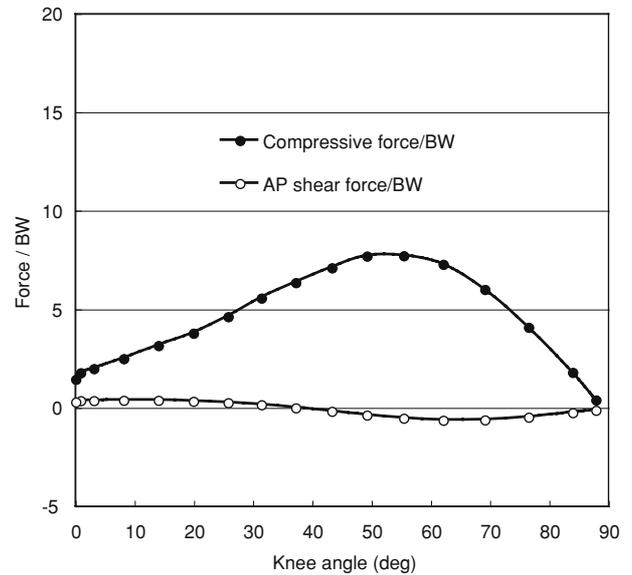


図6 OKCにおける脛骨引き出し力と圧迫力

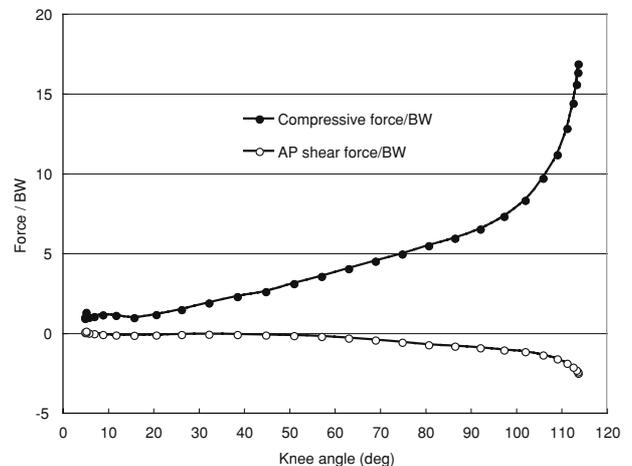


図7 CKCにおける脛骨引き出し力と圧迫力

節反力を図中に矢印で大きさと方向を示した。脛骨の引き出し力を推定する値として膝関節の反力から矢状面内における脛骨の長軸に垂直な方向の力をとりあげる。さらに脛骨の長軸方向に働く力を圧迫力とした。これを図6と図7に示す（図では脛骨を前方に引き出す力を正としている）。

今回の結果では、OKC 運動であるレッグエクステンションの場合に膝関節屈曲角度が40度以下になると脛骨を前方に引き出す方向に力が働いており、膝伸展位に近いところで最大0.39BW となった。圧迫力は膝屈曲50度近辺で最大7.7BW となった。CKC 運動では全屈曲角度域にわたって脛骨を前方へ引き出す力はほとんど働いていなかった。むしろ屈曲角度が大きくなるにつれて後方へ引き出す力が大きく最大2.6BW となった。圧迫力は膝屈曲角度が大きくなるほど増大し最大17.6BW であり、膝伸展時に最小0.9BW であった。

考 察

従来行われてきた整形外科領域での膝関節周辺のリハビリテーションではほとんどがOKC 訓練であり、この時大腿四頭筋の単独収縮によって生じる脛骨前方引き出し力が特に再建されたACL に対して過度なストレスとなり問題であった。一方、CKC 訓練は大腿四頭筋とハムストリングの共同収縮を引き起こし、ACL に働く脛骨前方引き出し力を減少させると言われている^{6,7)}。これまでの研究でCKC 訓練の持つ利点は徐々に認められつつあるが、どの程度膝関節にストレスを与えているのか明確でない。そのため今回は等運動性訓練機を用いたOKC 運動とCKC 運動の評価をシミュレーション技法により行った。その結果によれば、脛骨を前方に引き出す力はOKC 運動における膝屈曲角度が小さい場合に働き、CKC 運動では全角度域で出現しなかった。このことは従来から言われているように⁸⁾膝関節まわりの筋の働きの違いに関連づけられる。本手法による結果でも、OKC 運動では膝伸展のための大腿四頭筋の単独収縮であったものが、CKC 運動ではハムストリングや腓腹筋などの拮抗した筋の同時収縮が起っていた。拮抗筋が働く条件として膝関節と股関節に屈曲モーメントが同時に働け

ば股関節を伸展させる筋であるハムストリングにより膝には拮抗した筋力が働くようになる。そのような場合、外力による力ベクトルは膝関節と股関節の間を通過する⁹⁾。実際に計測した結果もCKC 運動のほとんどで足部に加わる力ベクトルの方向は股関節と膝関節の間を通過しており、これを裏付けている。

さらに、これまでに行った新たに開発したCKC 訓練機を用いてACL 損傷膝における運動様式を検討した結果では、CKC 運動では下肢関節のトルクを分散させることによって、膝関節伸展トルクを減少させることが可能であった¹⁰⁾。患側では足部出力方向を変化させることによって、股関節伸展筋群とハムストリングを収縮させて膝関節を伸展しており、脛骨前方移動を抑制することが可能であると思われる。よって、ACL 損傷膝及び再建膝における等運動性CKC 運動はより安全な筋力訓練法と考える。

ま と め

等運動性訓練装置を用いたOKC 訓練とCKC 訓練の比較を筋骨格モデルシミュレーションを用いて行った。CKC 訓練の場合には膝関節後面をまたぐ二関節筋が働き、脛骨前方引き出し力が発生しないだけでなく脛骨後方引き出し力が変化する結果を示した。膝関節と股関節に屈曲モーメントが同時に働けば股関節を伸展させる筋であるハムストリングが働くようになる。そのような場合、外力による力ベクトルは膝関節と股関節の間を通過する。足部がサイクロイド曲線を描くCKC 訓練においては下肢に加わる外力の方向が常に膝関節と股関節の間を通過しており、膝関節の運動として理想的である。

ACL 損傷膝及び再建膝における訓練として背臥位で足部がサイクロイド曲線を描く等運動性CKC 訓練は安全で有効である。

Abstract

We developed the isokinetic CKC training and testing system for ACL patients using the cycloid curve principle. With this machine, subjects can move their foot in gradual arc of motions and the co-activation of quadriceps and hamstrings were observed during all the exercise period.

The knee joint compressive and anterior-posterior (AP) shear forces during the isokinetic CKC exercises were calculated using the optimization method. In isokinetic CKC exercises, anterior shear force was not observed. The quadriceps muscles have been shown to produce various levels of anterior translation of tibia, resulting in production of large amounts of strain in the ACL while the hamstrings tend to neutralize this effect. Also, increased compressive loads across the knee joint tend to reduce anterior tibial translation which in turn should reduce ACL strain. In ACL deficient knees with CKC exercises, knee torque was reduced because hip and ankle joint torque was increase for the compensation. From a biomechanical perspective, isokinetic CKC exercises are safer because they produce stresses and forces that are potentially less of a threat to healing structures. These exercises are also more functional than isokinetic OKC exercises since they involve all of the lower extremity muscles.

参考文献

- 1) Steindler (1955) Kinesiology of the human body under normal and pathological conditions. Charles C Thomas, Springfield, IL
- 2) Yack HJ, Collins CE, Whieldon TJ (1993) Comparison of closed and open kinetic chain exercise in the anterior cruciate ligament-deficient knee. Am J Sports Med 21 : 49-54
- 3) Palmitier RA, An KN, Scott SG et al (1991) Kinetic chain exercise in knee rehabilitation. Sports Medicine 11 : 402-413
- 4) 河村顕治、畠中泰彦、中嶋正明 他 (2001) 臥床患者のための閉運動連鎖型訓練機器の開発(1)-CYBEX 6000による下肢出力様式の基礎的研究-。吉備国際大学保健科学部研究紀要 第6号 : 71-79
- 5) 河村顕治、畠中泰彦、中嶋正明 他 (2002) 臥床患者のための閉運動連鎖型訓練機器の開発(2)。吉備国際大学保健科学部研究紀要 第7号 : 103-110
- 6) O'Connor JJ (1993) Can muscle co-contraction protect knee ligaments after injury or repair? JBJS 75-B : 41-48
- 7) Baratta R, Solomonow M, Zhou BH et al (1988) Muscular coactivation. The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. Am J Sports Med 16 : 113-122
- 8) Lutz GE, Palmitier RA, An KN et al (1993) Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. JBJS 75-A : 732-739
- 9) 河村顕治 (2000) 下肢閉運動連鎖における拮抗する単関節筋および二関節筋の協調筋活動パターン。日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.21 : 271-274
- 10) 松尾高行、阿部信寛、河村顕治 他 (2004) 前十字靭帯損傷者における等速性閉運動連鎖運動時の筋出力様式。日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.25 : 203-207

謝 辞

本研究は平成16年度大学院保健科学研究科共同研究費、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究B (課題番号 15300208) の助成による研究の一部でありここに深甚なる謝意を表す。