

Keywords 【前十字靭帯：ACL、スポーツへの復帰：return to sport、代償運動パターン：compensatory movement patterns、スクワット：squat、大腿四頭筋：quadriceps】

前十字靭帯再建術後に非対称性を有するアスリートのためのエクササイズ選択の最適化

Optimizing Exercise Selection for the Asymmetric Athlete After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Dan Ogborn,^{1,2} PT, Ph.D., CSCS

¹ Pan Am Clinic Foundation, Winnipeg, Manitoba, Canada

² Department of Physical Therapy, Rady Faculty of Health Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada

要約

前十字靭帯 (ACL) の再建術後には、大腿四頭筋の筋力低下が長期間続くが、スポーツへの安全な復帰を促すためには、この問題に対処する必要がある。傷害を負った膝関節をかばう非対称的な運動パターンは、健側下肢や患側下肢の他の関節に要求を移行するため、通常のストレングスエクササイズにおいて、弱化した大腿四頭筋を強化する効果が制限される可能性がある。スクワット中に左右対称に負荷する状態へ早期回復することに焦点を合わせることで、個別エクササイズとしてのニーエクステンションをプログラムに取り入れること、さらに、スプリットスクワットやランジなど、スプリットスタンスの動作を含めるようエクササイズの変更することなど、多面的な取り組みが ACL 再建術後における大腿四頭筋の筋力を回復させると考えられる。

はじめに

前十字靭帯 (ACL) の傷害は、着地や回転が必要なスポーツに参加するアスリートに比較的多くみられ、外科的再建が成功したにもかかわらず、アスリートは後遺症としての機能低下、対側下肢における ACL 再損傷リスクの増加 (67) および変形性関節炎などの慢性疾患の早期発症リスク増加 (17,81) などにしばしば直面する。ACL 再建術 (ACLR) 後の復帰率からは、多くのアスリートがスポーツに復帰するものの、それはより低いレベルでのパフォーマンスや競技レベル以外のスポーツへの復帰であることが示されている (34)。Ardern ら (6) は、アスリートの 63% が受傷前に参加していたスポーツ

に復帰するが、同レベルに戻るはその半数以下であることを明らかにした。より最近のレビュー研究でも類似の統計が示され (5)、ACLR 後のアスリート (32) および高校生、大学生アスリートを含む全レベルのアスリートに及んでいる (51)。ただし、よりハイレベル、もしくはプロのアスリートにおける復帰率は改善する可能性がある (43,45)。スポーツにより大きく異なる可能性はあるが、スポーツに復帰したにもかかわらず、競技特異的なパフォーマンスが ACLR 後に低下することを示唆するエビデンスが増加している (51,56)。

競技に復帰するプロセスには連続的な 3 つの段階がある。第 1 段階は、単に参加への復帰であり、アスリートはまだリハビリテーションを行なっている段階だが、身体的に活動的であり、修正されたトレーニングや修正を加えた競技活動には参加できるものの、試合に出場することは許可されない (4)。その次の段階が競技への復帰である。アスリートは競技への復帰を許されるが、比較的低いレベルの試合やパフォーマンスに限られる。最後の段階はパフォーマンスへの復帰であり、アスリートは、傷害を負った時点またはそれ以上のパフォーマンスレベルで競技に完全に参加する。アスリートはすでに医学的治療を終え、医師から許可を得て競技に復帰するため、この連続的段階の後半では多くの場合、ストレングス & コンディショニング (S&C) 専門職がアスリートにとって唯一の接点となる。したがって、S&C 専門職は、アスリートが単にスポーツに復帰する段階から、傷害以前のレベル、またはそれ以上のレベルのパフォーマンスへと回復するまでの推移を促す中心的な役割を担う。パフォーマンスの完全復活を促すために、S&C 専門職は、ACLR 後のリハビリテーションに

関する固有の問題をはっきり認識しなければならない(42)。ACLR後には、完全なパフォーマンスに戻る能力を制限する持続的機能制限があること、適切なS&Cプログラム内でその制限に対処する必要があることは明白である。

前十字靭帯再建術後の持続的な機能障害

ACLR後には受動的な膝関節の安定性が回復しているにもかかわらず、神経筋機能および下肢の運動力学的、運動学的機能障害が残存することは、研究により十分に裏づけられている。患側下肢への負荷回避を特徴とする非対称性の運動パターンが、ジョギング、ジャンプ、ウォーキングを含む多数の活動にわたり観察されている(36)。再建された側の膝関節伸展モーメント(主に膝関節伸展筋群により発揮される回転モーメント)の低下が、自重スクワット(31)やシングルレッグスクワット(7)、ステップダウン、ステアクライミング、およびホップやジャンプ(15,22,61,64,66,72,80)で報告されている。ACLR後における運動の非対称性は、自重スクワットのような低い要求の活動では時間経過に伴い減少すると思われるが(31)、ドロップジャンプ、方向転換、またはシングルレッグホップなどの要求の大きな運動では、非対称性はより大きく、またより長く持続すると思われる。非対称性のある下肢における運動力学と運動学は、ジャンプ、着地、ラテラルホップ、ランニング、方向転換などを含む幅広い活動で観察されている(10,46,90)。運動学的変化は、シングルレッグホップなどの活動中における着地と推進局面で明らかであり、この両局面において、再建された下肢の膝関節屈曲と足関節背屈は、健全な下肢に対し相対的に低下する(90)。また、停止-跳躍課題において、膝関節の屈曲角度が同等であるにもかかわらず、鉛直方向の地面反力(vGRFs)の変化が持続することを示唆するエビデンスも若干ある。これは、膝関節の最大屈曲角度だけに基づいて運動学を評価することは、アスリートを評価する際に十分ではないことを示唆している(71)。これらの代償運動パターンは完全に無害とはいえないだろう。Paternoら(68)が示したように、ジャンプの着地パターンが非対称なアスリートは、ACLを再損傷するリスクが増加するからである。

大腿四頭筋の機能低下が、ACLR後における機能的パフォーマンスの変化を説明する因子のひとつである(7)。大腿四頭筋の筋力低下はACLR後に一貫して観察され(33,47,87,88)、場合によってはACLR後、5~20年以上にわたり残存する(70)。大腿四頭筋の筋力に関する障害は、少なくとも早い段階では、骨付き膝蓋腱移植(BPTB)または大腿四頭筋腱移植の患者でより高く、ハムストリングスの脆弱性はハムストリングスを移植した患者よりも大きい(70)。これらの運動パターンにおける大腿四頭筋の脆弱性に関する機序は不明のままであるが、それは大腿四頭筋の脆弱性が膝関節

をかばう代償運動パターンより前にあるのか、それとも結果であるのかがまだ完全に解明されていないからである(18)。確かに、非対称性運動パターンは大腿四頭筋の動員減少をもたらすが、それだけでは、観察される持続的な脆弱性を完全に説明することはできない。その他のメカニズム、例えば手術後における早期の膝関節液浸出に続く関節筋の抑制および大腿四頭筋における廃用後に起こる筋萎縮などが示唆されている(63)。さらにACLR後の患者には、両側における大腿四頭筋の抑制が観察されるため(85)、中枢を介したメカニズムもまた大腿四頭筋における脆弱性の原因となっている可能性があることが示唆される。メカニズムが何かにかかわらず、大腿四頭筋の脆弱性は機能の変化に関与する。大腿四頭筋の筋力低下は、幅跳びや垂直跳びのパフォーマンスやその予測(47,76)、階段を上るなどの日常生活活動(19)、片脚での着地動作の運動学(62)、および自己申告による身体機能の測定値(47,76)と関連しているからである。したがって、大腿四頭筋の筋力を増大させ、再受傷に関連する可能性のある運動パターンを修正する介入は非常に重要であり、S&C専門職は優先的に取り入れるべきである。

多くの研究は、競技動作と日常生活動作における非対称性運動パターンの役割に焦点を合わせてきたが、これらの代償パターンがS&C介入の有効性に影響を及ぼすこともありうる(18)。患側の膝関節をかばう代償運動パターンは、通常行なわれるストレングストレーニングが大腿四頭筋に適切な負荷をかける能力に影響を及ぼし、そのため、S&Cプログラムの効果を減じる可能性がある(18)。歩行、ジャンプ、ホップまたは自重リハビリテーションエクササイズ中の代償運動に関しては多くの観察が報告されているが、一方、よく行なわれるストレングスエクササイズ中におけるACLR後の非対称性運動パターンや、負荷の増加により非対称性がどのように影響を受けるかについては、わずかし明らかなになっていない。医師から許可を得て競技を再開する回復後半段階のアスリートは、さらなる介入を必要とする、大腿四頭筋における特徴的な筋力の非対称性がまだ認められる可能性がある(19,47,86)。S&C専門職は、ストレングスエクササイズ中に、どのように代償的で非対称的な運動パターンが生じるかを認識しなければならず、大腿四頭筋の筋力回復および最終的には競技パフォーマンスを促進させるために、それらの代償運動を少なくするようにプログラムを適応させねばならない。

ストレングスエクササイズ中の代償運動パターン

両下肢におけるパフォーマンスの非対称性は、健康な集団では10~15%程度と考えられている。この値は通常、リハビリテーション中において、調整された身体活動や競技に段階的に復帰するための目標として用いられる(53)。この閾値の

正当性は、シングルレッグホップや等速性ダイナモメータ上でのニーエクステンションなど、動的動作のパフォーマンスにおいて非対称性がみられることに由来するので(48,55)、負荷をかけたストレングスエクササイズを検討する際に、同等の値を想定することは妥当ではないと思われる。研究は主として、日常生活活動における非対称性の特徴を明らかにすることや、損傷リスクに対する非対称性の影響に焦点を合わせているため、競技パフォーマンスに対する影響(9)やストレングストレーニングによる適応をどのように調整するか(18)に関してはあまり多くは知られていない。

健康な集団に関して、両脚スタンスでのスクワット中におけるvGRFsを検討すると、下肢の対称性に関して広範囲な値が生じる。Websterら(86)は、疲労していない状態と疲労している状態では、自重スクワット遂行中におけるvGRFの非対称性は、それぞれ1.9%および1.7%であることを明らかにした。左右の下肢を比較すると、バーベルスクワットの両下肢間におけるvGRFsの差は3%であったが、利き足を考慮するとその差は6%に増加した(60)。Flanagan & Salem(28)は、バックスクワット中の左右下肢間におけるvGRFsの差が6%であること、また負荷を3RMの15%から100%に増加しても非対称性が增大することはなかったことを明らかにした。Lakeら(44)は、21%を超えるかなり大きなvGRFsの非対称性を観察したが、負荷が1RMの30%、60%、および90%であっても、この値が変化しなかったことを報告した。vGRFの非対称性に関するデータは、健康な集団においては曖昧であるが、負荷が増加しても感知可能な程度にまで非対称を増大させないという点では一貫しているように思われる。我々の現在における理解はいまだ限定的であり、定量化と正規化の方法における不一致が研究間の正確な比較を困難にしている(9)。

スクワットエクササイズは通常、パフォーマンスに焦点を置いたりハビリテーションプログラムで用いられるが(77)、ACLR後の患者では、持続的な代償運動パターンが観察される。これらの「膝をかばう」代償運動は、膝を通る力を最小限に抑えようとするが、それがひいては大腿四頭筋の適応を損ない、機能的な障害を完全解決する防げとなる可能性がある。Chan&Sigward(16)は、術後3ヵ月におけるvGRFsの減少を観察し、またSigwardら(79)は、術後3ヵ月目および5ヵ月目に、スクワット中の膝関節伸展モーメントの低下を見出した。患者は、身体的要求を患側の膝関節から同側の股関節に移し、また負傷していない下肢への負荷を増大させた。類似の代償パターンは、ACLRの1年後(13,73,74,86)、2年後(15)、3年後(75)に、また最大7年を超えても観察された。Garrisonら(31)は、自重スクワット中において、大腿四頭筋の筋力と膝関節のエネルギー吸収率(膝をかばうこと)との間における

負の相関関係を明らかにし、また各脚における大腿四頭筋の筋力と膝関節のエネルギー吸収率との間に中程度の正の相関関係を明らかにした。これらの代償の程度と時間に伴う持続性は議論の余地がある。Clarkら(20)は、術後の時期とACLR後における膝関節の負荷吸収率の軽減程度に関連性はないことを見出したが、一方、Neitzelら(59)は、ACLR後における膝関節の代償運動が時間とともに少なくなったことを明らかにした。さらに、下肢間および下肢内における代償は、個人間でその程度が様々に異なると思われる(73)。これらを総合すると、術後早期のスクワットにおける下肢間および下肢内の代償運動の組み合わせが存在することを予想することは妥当である。下肢間の代償運動は術後に時間とともに減少する可能性があるが、股関節への依存を増大させることによる下肢内の対策は持続する可能性がある。しかし、個人間でかなり大きな変動があることは予想すべきである。

これらの代償行動は両脚スタンスのスクワットに特異的なものではなく、大腿四頭筋の筋力回復のために追加する下肢エクササイズの効果にも影響を与えられる。Ernstraら(26)は、ラテラルステップアップエクササイズを評価し、患側下肢の総合的なモーメントは健側下肢および健康なコントロール群と同等であったが、膝関節伸展モーメントは低下していたことを明らかにした。この結果は、Alkjaerら(1)の研究データとも一致する。彼らはフォワードランジ中に、踏み込み足である術後の下肢のvGRFsと動作完了時間が同程度であることを明らかにしたが、それでも膝関節伸展モーメントはなお、ACL障害を有する(ACLd)患者とACLR後10ヵ月の患者双方において低下していた。これは、下肢内の代償パターンが持続していたことを示唆し、準一側性のエクササイズ、すなわちスプリットスタンスエクササイズの実施は下肢間の代償を防ぐが、下肢内の代償はなお持続する可能性があることを示唆している。Bellら(7)は、シングルレッグスクワットにおいて、ACLR後の下肢内伸展モーメントが健康なコントロール群に比べ低下していること、またACLR患者と健康なコントロール群との間で、膝関節の屈曲減少および股関節内転を含む運動学に違いが認められることを明らかにした。移植片の種類により運動学は異なり、ハムストリングスを移植した患者は、再建された下肢における体幹の前屈と側屈がBPTB移植患者や健康なコントロール群と比較して大きい。シングルレッグスクワットの運動学については若干議論の余地がある。Yamazakiら(92)が明らかにしたように、ACLR後の患者は、健側下肢と比べると、再建術側の下肢は股関節内転がより大きく、膝関節内反が少ない。また、ACLR後の患者は、健康なコントロール群と比較すると股関節屈曲が小さく、股関節外旋および内転が大きく、さらに膝関節屈曲が驚くほど大きい。このデータは、ACLR後における下肢

のvGRFと下肢内の膝関節伸展モーメントの低下からも明らかのように、スクワットのような対称的な両脚スタンスのエクササイズは、下肢間および下肢内両方の代償運動パターンを誘発する可能性があることを示唆していると思われる。またランジやスプリットスクワットなどのスプリットスタンスエクササイズでは、またより明確に言えばシングルレッグエクササイズでは、下肢内の代償だけが用いられると思われる。それにもかかわらず、アスリートが膝関節をかばうこと、すなわち他方の下肢に頼ること(下肢間の代償)または患側の他の関節に頼ること(下肢内代償)を通して、患側の膝関節にかかる力を減じることは、ACLR後における大腿四頭筋の筋力不足に適切に対処するためのストレングスエクササイズの効果を制限すると思われる。

現場への応用

アスリートに代償運動パターンが実際に現れると、それがACLR後における大腿四頭筋の筋力不足や萎縮を緩和するために通常行なうストレングスエクササイズの効果を制限することは明らかである。しかし、そのような筋力不足の確実な回復方法に関する合意はまだない。S&C専門職は、全身および下肢のパフォーマンスを詳細に評価検討し、それらの結果を大腿四頭筋単独の筋力と照らし合わせ、両脚スタンスによるエクササイズ中の対称的な負荷を促進する対策を用いること、アスリートが下肢間および下肢内の代償運動パターンを用いることを制限または阻止するエクササイズを選択すること、そして最終的に、大腿四頭筋に目標を定めた単関節のアイソレーション運動を含む、様々なエクササイズを用いることが必要である。

スクワットにおける対称的負荷パターンへの早期回復

下肢機能の持続的な非対称性が、スポーツへの復帰時やその後の時点で顕著であるならば(19,47,86)、スクワットなどの両脚スタンスエクササイズ中における対称的な負荷パターンを目指す、早期の改善トレーニングが必須である。リハビリテーションプログラムからパフォーマンス改善トレーニングまでの移行期間に、対称的な負荷パターンが完全に回復すると想定することは難しい。Panarielloら(65)は、ACLR後の非対称的なスクワットパターンの早期介入のために、ポスティング(支柱)テクニックを解説した。それによると、ポスティングとは、例えばスクワット中に、健側下肢を低いボックスに乗せて3~6インチ(約7.5~15cm)高く上げることである(図)。Bruntら(11)は、利き足側の下肢を上げることは、非利き足のvGRFを1.57倍に増大させたこと、また健康な対象における椅子からの立ち上がり動作課題において、大腿四頭筋の筋電図活動(EMG)を高めたことを明らかにした。側方

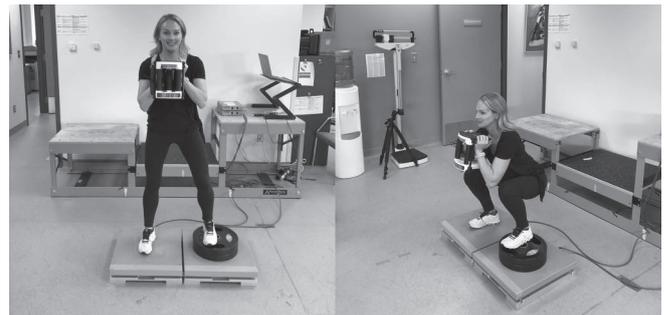


図 DBゴブレットスクワット中のポスティング(支柱)テクニックの実演。健側下肢(非ACLR)をエクササイズ遂行中に低い台に上げておくことにより、患側(ACLR)への負荷を高める。
ACLR=ACL再建手術、DB=ダンベル

運動の非対称性がある一般患者における椅子からの立ち上がり課題中に健側下肢を上げることは、患側下肢のvGRFを正常化し、大腿四頭筋のEMG活動を増大させた。ACLR後の患者において、スクワット遂行中に健側下肢を5cm上げておくことは、両下肢間の膝関節伸展筋群における関節モーメントを同等にしたが、大腿四頭筋の筋活動への影響は検出できなかった(39)。Panarielloら(65)は、このテクニックはリハビリテーション期間の早期に行ない、運動学、またおそらくは運動力学においても対称的な負荷パターンが生じるまで、通常のスクワット動作の実施を遅らせることを推奨している。また、この手法はスクワット動作に負荷をかける際にも有用である。一側性の傷害のある患者においては、無負荷スクワット中の対称的な運動学と運動力学が高負荷での運動に転移すると想定するのは適切ではないと思われるからである。他の研究者たちは、ゴブレットスクワット中に健側下肢を上げておくことを提示したが、これはポスティングテクニックを行なったスクワットに負荷をかける初期段階として、より高重量もしくはその他バリエーションを用いる前の方法といえるかもしれない(49)。

スクワット中に下肢の対称性が改善しているかをモニタリングするためにはデュアルフォースプレートが必要であるが、すべての集団で利用できるわけではない。そこで、伝統的なスタジオメータを改良したり、Wiiバランスボードを利用したりする場合があります(20)、これらはスクワット中の下肢にかかる負荷の正確な分析に代わる、費用対効果の高い方法である。ピーク関節角度は必ずしも関節モーメントと相関関係があるとはいえないため、運動学が対称であることが運動力学においても対称であると保証することはできず(74)、これを踏まえてスクワットの代償運動パターンに関する観察を行なうべきである。代償運動、すなわち膝関節をかばう動作には、患側から遠位への体幹の側方傾斜(下肢間の代償)、股関節伸展筋群への依存を高めるための体幹の前傾増大、非対称な骨盤位(水平面および/または前額面における股関節の下

降)、および両側性または患側膝関節の屈曲減少(下肢内の代償)が含まれる。さらに、ACLR後のアスリートは、患側股関節の屈曲を制限する可能性があるため(73)、少なくとも90°の十分な膝関節屈曲を確実に観察することが必要である。大腿四頭筋の相対的な筋活動は膝関節の屈曲に伴い増加するからである(12)。

多関節および単関節のエクササイズ処方

ACLR後にオープンキネティックチェーン(OKC)であるニーエクステンションエクササイズを用いることに関しては相当大きな議論がある。伝統的に、移植組織に過度なストレスを与えると考えられるOKCのニーエクステンションとは反対に、移植組織に適度な負荷を与えると考えられる、スクワットのようなクローズドキネティックチェーン(CKC)エクササイズが好まれてきた(37)。CKCエクササイズが好まれるのは、主として生体力学的な根拠による。すなわち、CKCエクササイズは脛骨前方変位を抑えるため、脛骨の剪断力が減少することにより、ACL移植組織への負荷を低下させるからである(27,83)。さらに、ACLへの負荷を減らすと考えられる脛骨-大腿骨の圧縮力を増大させ、また、ハムストリングスと腓腹筋の筋活動増大により、さらにACLの負荷を低減し、競技動作や日常生活活動をより確実に模擬できると考えられる(29)。確かに、CKCエクササイズと比較すると、ニーエクステンション中は、より大きな脛骨前方変位とACLの歪みが観察されている(8,83,91)。研究によると、膝関節屈曲角度15°での等尺性ニーエクステンションでは、ACLにおける4.4%高い歪みが明らかとなったものの、OKCおよびCKCエクササイズ間の有意差は裏づけられなかった(69)。ただし、これらの結果の解釈には注意が必要である。両エクササイズ中の負荷は、通常のスレングストレーニングプログラム中に経験する負荷を反映せず、OKCおよびCKCの両エクササイズ間には、増加した負荷に伴う歪みに異なる特徴がある可能性があると思われる。ニーエクステンション中においてはACLの歪みが増大することが示されているが、CKCエクササイズでは増大しない。これはおそらく圧縮負荷の保護効果のためであろうといわれている(29)。ACLのリハビリテーション中にどの程度の歪みを許容できるかは明らかではないが、最近のエビデンスによると、歩行中のACLの歪みはかかと接地時に13%まで高まるため、ニーエクステンションを除外することを疑問視する研究者もいる(25)。ACLのリハビリテーションでは早期に体重負荷をかけることは通常要素であるため、歩行中に、移植組織がニーエクステンションなどの早期リハビリテーションエクササイズで受けるよりも大きな負荷に曝される可能性は否定できない。

ACLR後のOKCエクササイズに反対する力学的な観点での

議論があるとはいえ、膝関節の弛緩性や移植組織断裂の増加が、ニーエクステンションを用いたことによる避けられない結果であるとみなすべきではない。安全性(移植組織の断裂と膝関節の弛緩性)と有効性を比較するデータは、概ね両種のエクササイズを含めることを支持している(69)。ニーエクステンションを用いる介入を手術後2~4週間という早期で開始した場合、脛骨前方移動に差はなく、術後6週間(58)および17ヵ月(30)の時点で検出された弛緩性にも差は認められなかったことが示されている。早期のOKC膝関節伸展筋群トレーニングにおける相対的な安全性は確立されており、Fukudaら(30)は、限定された関節可動域でのニーエクステンションエクササイズ(膝関節屈曲90~45°)の導入は大腿四頭筋の筋力向上率を高め、手術後17ヵ月で測定したところ、ニーエクステンションの遅い導入(術後12週間に開始)も、早期介入と同等レベルに筋力を回復させたことを明らかにした。Mikkelsenら(54)は、ニーエクステンションの導入を手術後6週目まで遅らせて、ニーエクステンションを追加するプログラムとCKCのみのプログラムとを比較した。このランダム化試験では、ニーエクステンションが膝関節の弛緩性に悪影響を及ぼすことはなく、追加プログラムを完了した被験者は、術後6ヵ月における大腿四頭筋の筋力がより大きいことが示された。さらに、OKC群の被験者は競技への復帰がより早く、両群における膝関節の機能レベルの評価は同程度であったにもかかわらず、負傷前のレベルで競技に参加していることを報告したアスリートの人数は、OKC追加群のほうが多かった。OKC対CKCの比較において、Tagessonら(82)は、等速性ニーエクステンションでは、OKC群がより大きく向上したにもかかわらず、脛骨前方移動にも、またスクワットや片脚垂直跳び、幅跳びのパフォーマンスにも、群間の違いによる効果は認められなかったことを明らかにした。他方、Bynumら(14)によると、CKCエクササイズだけに特化してトレーニングを行なった被験者は、脛骨前方移動が少ないことが明らかになったが、その差の臨床的有意性は最小限であった。しかし、CKC群は、Mikkelsenらの観察とは異なり、より大きな満足度と活動の早期再開を報告した(54)。

健康な集団の中で、多関節のCKCエクササイズプログラムを作成することは、大腿四頭筋の筋力向上を促進するのに十分であると思われる。しかし、ACLdまたはACLRを受けた患者においては、患側の膝関節をかばうことにより、大腿四頭筋に効果的な目標を定めるための多関節エクササイズの影響を制限する可能性がある。あるエクササイズが他のエクササイズよりも大腿四頭筋をより活性化させることが確実である場合は、それらのエクササイズはACLR後のアスリートにおけるリハビリテーション過程にとってより重要であろう。スクワットのようなCKCエクササイズとニーエクステンシ

ンの間における大腿四頭筋のEMG活動を比較したデータは、結果が一様ではない。健康な集団においては、スクワットのようなCKCエクササイズとの比較において、ニーエクステンションは膝関節の伸展に伴って大腿四頭筋のEMG活動が高まることが示されている(2,23,35)。反対に、高める(23,78)か同程度(35,38)か、どちらかを示した研究もある。CKCエクササイズ中のEMG活動は、大腿四頭筋のどの部分を評価したかに依存している上、これらの議論は、負荷を再検討することによりさらに混乱が深まるだろう。ニーエクステンションは大腿四頭筋活性化の促進を示さないかもしれないが、それでもなお、プログラムに取り入れることは必要である。アスリートはエクササイズ中、患側の関節をかばうために大腿四頭筋の動員を減少させる代償運動パターンを表しうるが、OKCエクササイズはその代償運動を制限するからである。全体として、これらのデータは、下肢間の非対称性と大腿四頭筋の筋力低下に対処する最適な解決法は、多様なエクササイズを頼りにすべきである。すなわち、ニーエクステンションのような単関節エクササイズと多関節エクササイズの両方を考慮することが必要である。

エクササイズ処方におけるスタンスの位置の変更

ニーエクステンションを用いることは大腿四頭筋の強化に寄与すると思われるが、異なるスタンスの位置(スプリットスクワットとランジ)の多関節エクササイズも、スクワットに比べれば、大腿四頭筋の好ましい活性化をもたらし、アスリートがACLr後に代償運動パターンを用いる傾向を制限すると思われる。残念なことに、健康な集団におけるこれらのエクササイズの比較は、研究が自重のみ(40,41,57)、固定負荷(89)、または同等の相対負荷(エクササイズに特異的な%1RMまたはRM)(3,23,50,52)などを用いることを選択しているために、あるいはスプリットスタンスのエクササイズの準一側性という特性を相殺するための相対負荷が異なるために(21,24)、研究間の負荷を比較するための定量化を複雑にしている(表)。研究が1種目のエクササイズバリエーションをバックスクワットと比較することはよく行なわれる。しかし複数のスプリットまたはシングルレッグエクササイズが1件の研究に含まれていることは減多にないため、複数の文献にまたがる間接的な比較が必要となる。

自重負荷を考える際、スクワットとランジの間で、同程度のEMG活動が内側広筋、外側広筋および大腿直筋で検出された(40)。スクワットとランジを20kgの絶対負荷を用いて比較すると、ランジ中は、内側広筋と大腿直筋でより大きなEMG活動が検出されたが、外側広筋では統計学的な有意差は検出されなかった(89)。後ろ足を上げて行なうリアフットエレベイトッドスプリットスクワット(RFESS)においては、(シ

ングルレッグスクワットで用いられる一層典型的なテクニクとみなされる)体幹の前傾増加により、内側広筋、外側広筋および大腿直筋のEMGは低下したが、一方、大殿筋のEMGは上昇した(41)。Monajatiraら(57)は、ボックス上に片足を載せたシングルレッグスクワットは自重スクワットに比べ、大腿二頭筋、半腱様筋、内側広筋および外側広筋のEMG活動を増加させたことを明らかにした。これらの知見は、自重または軽い絶対負荷において、シングルレッグスクワットが大腿四頭筋のEMG活動の強化をもたらす可能性があるのに対して、スクワットとランジが大腿四頭筋の大部分において同程度のEMG活動をもたらすことを示唆している。ただし、この結果は、片脚運動では自重負荷がより高強度となるためである可能性が高い。

2件の研究では、両脚バックスクワットをRFESSと比較する際(21)、およびシングルレッグスクワットでサポートのない脚部を身体の前と後ろにおいた場合を比較する際(24)に、調整済みの負荷を用いた。DeForestら(21)は、スクワットでは85%1RMの負荷を用い、その負荷の50%をRFESSとスプリットスクワットに用いた。両脚スクワットとRFESSの間にvGRFの差は認められなかったが、それでも両エクササイズのvGRFはスプリットスクワットよりも大きかった。EMG活動は、スプリットスクワットに対し、両脚スクワットとRFESSのほうが相対的に大きかったが、それでも、スクワットとRFESSで増加した大腿四頭筋のEMG活動は、スプリットスクワットと比較して統計的有意差は認められなかった。Eliassenら(24)は、4RM負荷のスクワットを負荷調整済み(自重[BW]+4RM/2-BW)のシングルレッグスクワットと比較した。ピークvGRFは足の位置にかかわらずシングルレッグスクワットでより大きく、一方、大腿直筋、外側広筋、内側広筋の平均EMG活動は、スクワットでより増加したことが示された。著者らは、両脚種目において、大腿四頭筋のEMG活動は負荷の増加に伴い上昇することはすでに明らかであり(84,89)、それは片脚バリエーションにまで及ぶため、片脚種目はシングルレッグエクササイズの1RMより低い割合の負荷で完遂された可能性が高く、それがEMGの結果に影響を与えた可能性があると認めている。

Mausehundら(50)は、RFESSとボックス上でのシングルレッグスクワット、およびスプリットスクワットを6~8RMで実施して比較した結果、中殿筋のEMG活動はシングルレッグスクワットで最も高く、また大腿二頭筋の活動はRFESSおよびスプリットスクワットで最も高く、外側広筋のEMGはエクササイズの種類を問わず同等であった。McCurdyら(52)は、スクワットとRFESSをそれぞれの85%1RM負荷で比較し、スクワットで大腿四頭筋のEMGの振幅が増大したこと、RFESSではハムストリングスのEMGの振幅が増大し

表 下肢の各種エクササイズ間における大腿四頭筋のEMGまたはvGRFの関連比較
 負荷の種類(相対負荷、絶対負荷、自重、調整相対負荷)により体系化

研究	負荷	エクササイズ	測定値	要約
McCurdy ら (52)	85%3RM	BBバックスクワット BB RFESS	EMG	BBバックスクワット中の大腿四頭筋におけるピークEMGの振幅がより大きい。 RFESS中のハムストリングスと中殿筋のピークEMGの振幅がより大きい。
Ebben ら (23)	6RM	BBバックスクワット DBフォワードランジ DBステップアップ BBデッドリフト レッグエクステンション	EMG	レッグエクステンションにおける大腿直筋のピークEMG活動が最大で、スクワット、ランジ、およびステップアップがそれに続く。 ランジとステップアップにおける外側広筋のピークEMG活動が最大で、スクワットとレッグエクステンションがそれに続く。 デッドリフトにおける外側広筋と大腿直筋のピークEMG活動が最も低い。
Andersen ら (2)	6RM	BBバックスクワット BB RFESS	EMG	BBバックスクワット中の大腿直筋におけるEMG活動がより大きい。BBバックスクワットとRFESS中の内側広筋と外側広筋のEMG活動は同等である。
Mausehund ら (50)	6~8RM	BB RFESS BB シングルレッグスクワット on ボックス BB スプリットスクワット	EMG	すべてのエクササイズにわたり外側広筋のEMG活動は同等である。
Khayat ら (40)	BW	スクワット フォワードランジ	EMG	外側広筋、内側広筋および大腿直筋のEMG活動はエクササイズ間で同等である。
Knoll ら (41)	BW	スプリットスクワット 修正シングルレッグスクワット	EMG	スプリットスクワットにおけるピークEMG活動は、内側広筋、外側広筋、および大腿直筋に関して、修正シングルレッグスクワットよりも高い。
Monajati ら (57)	BW	スクワット スクワット on BOSU シングルレッグスクワット from ボックス	EMG	シングルレッグスクワット from ボックスにおける上昇局面の外側広筋と上昇・下降局面の内側広筋のEMG活動は、BWスクワットに比べ大きい。
Wu ら (89)	絶対負荷(20kg) およびBW	ランジ スクワット	EMG	BWランジにおける内側広筋のEMG活動は、BWスクワットに比べ大きい。 BBランジ中の内側広筋と大腿直筋のEMG活動およびDBと負荷ベストを用いたランジの内側広筋におけるEMG活動はより大きい。
Eliassen ら (24)	4RM (スクワット)(BW+4RM) /2 (シングルレッグスクワット)	BBバックスクワット BB シングルレッグスクワット(前脚を挙上) BB シングルレッグスクワット(後脚を挙上)	EMG vGRF	片脚スクワットのピークvGRFはバックスクワットと比べどちらの脚部もより大きい。 BBバックスクワットに関して、下降曲面の内側広筋および外側広筋のEMG活動および上昇局面の大腿直筋と外側広筋のEMG活動がより大きい。
DeForest ら (21)	85%1RM(バックスクワット) バックスクワットの負荷の50%(スプリットスクワットとRFESS)	BBバックスクワット BB RFESS BB スプリットスクワット	vGRF EMG	BBバックスクワットおよびRFESSのvGRFはスプリットスクワットに比べ大きい。 すべてのエクササイズにわたり、短縮性および伸張性の両局面における外側広筋と内側広筋のEMG活動は同等である。

BB=バーベル、BW=自重、DB=ダンベル、EMG=筋電図、MVC=随意最大収縮、MVIC=随意最大等尺性収縮、RFESS=リアフトエレベィティッドスプリットスクワット、RM=最大反復回数、vGRF=鉛直方向の地面反力

たことを見出した。Andersenら(3)は、6RMで実施したバーベルバックスクワットとバーベルRFESSを比較し、バーベル

RFESSにおいて大腿直筋のEMG活動増加と、内側広筋および外側広筋の同程度の活動を明らかにした。Ebbenら(23)は、

6RMの負荷において、ランジとステップアップではスクワットに比べ、大腿直筋では同等の、しかし外側広筋ではより高いピークEMGが観察された。したがって、健康な集団においては、同程度の相対負荷でトレーニングする際、スクワットとスプリットスタンスのバリエーション間で、広筋群における類似の活性化が起こる。これに対して、より大きな大腿直筋の活性化は対称的なスタンスのスクワットで起こり、ハムストリングスと中殿筋は、非対称的なスタンスのバリエーションでより大きな活性化が起こるように思われる。

ACLR後の患者を対象に、対称的なスタンスとスプリットスクワットやランジなどのバリエーションを調査した研究は少ない。Alkjaerraは(1)、ピークvGRFsは手術後10カ月の患者と健康なコントロール群との間で同程度であったのに対し、ACLd患者はランジの遂行中に患側のvGRFsが低かったと明らかにしており、この結果には膝関節伸展モーメントの減少が伴っていた。Ernstら(26)は同様の結果を観察し、類似のシングルレッグステップ中、患側下肢と健側下肢との間で、下肢の総モーメントが同程度であることを示したが、運動の完遂のために股関節への依存が高まることを示した。残念ながらどちらの研究も、大腿四頭筋のEMG活動に関するデータは収集していなかった。それでも、類似のシングルレッグの運動は、ACLR後のアスリートにおいて、下肢内の代償運動パターンはまだ存在する可能性はあるものの、下肢間の代償運動パターンを制限すると思われる。S&C専門職は、膝関節伸展モーメントを減少させ、股関節伸展モーメントを増大させる代償運動を常に意識している必要があり、そのためには、これらのエクササイズを遂行中に、股関節伸展筋群による代償を示唆していると思われる体幹の傾斜角度を評価しなければならない(7,41)。ゴブレットスクワットやフロントラックポジションなど、負荷の位置によるバリエーションが垂直な体幹姿勢を促すと思われ、ランジやスプリットスクワットおよびPFESSなどのエクササイズにおいて、股関節伸展筋群による代償が、シングルレッグスクワットや両脚スクワットよりも比較的低い程度で生じると思われる。

おわりに

ACLR後に持続する非対称運動パターンは、アスリートのスポーツへの復帰を減少させパフォーマンスを低下させると思われる。S&C専門職は、プログラムの作成や実施においてその点を明確に意識しなければならない。ACLR後の患者のための効果的なS&Cの実践は、再受傷のリスクを最小化し、競技に復帰する際にパフォーマンスを最大化するために、機能障害を是正しなければならない。そのためには、多関節および単関節の各種エクササイズ(ニーエクステンションや下肢のトリプルエクステンションを強調したエクササイズを含

む)の使用を含む多面的な取り組みが必要である(49)。また、多関節運動中の運動学や運動力学を考慮し、膝関節をかばう代償運動を減少させること、必要な場合には再建後の下肢への対称的負荷を保証するために負荷の適切な漸減を提供すること(ポスティング)、RFESSやランジなど、スプリットスタンスのエクササイズバリエーションを提供することなどを確実に実行することが求められる。◆

REFERENCES

1. Alkjær T, Smale KB, Flaxman TE, et al. Forward lunge before and after anterior cruciate ligament reconstruction: Faster movement but unchanged knee joint biomechanics. *PLoS One* 15: e0228071, 2020.
2. Andersen LL, Magnusson SP, Nielsen M, Haleem J, Poulsen K, Aagaard P. Neuromuscular activation in conventional therapeutic exercises and heavy resistance exercises: Implications for rehabilitation. *Phys Ther* 86: 683-697, 2006.
3. Andersen V, Fimland MS, Brennstet O, et al. Muscle activation and strength in squat and Bulgarian squat on stable and unstable surface. *Int J Sports Med* 35: 1196-1202, 2014.
4. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, et al. Consensus statement on return to sport from the first World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sport Med* 50: 853-864, 2016.
5. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: An updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sport Med* 48: 1543-1552, 2014.
6. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: A systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sport Med* 45: 596-606, 2011.
7. Bell DR, Kulow SM, Stiffler MR, Smith MD. Squatting mechanics in people with and without anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 42: 2979-2987, 2014.
8. Beynon BD, Johnson RJ, Fleming BC, Stankewich CJ, Renström PA, Nichols CE. The strain behavior of the anterior cruciate ligament during squatting and active flexion-extension. *Am J Sports Med* 25: 823-829, 1997.
9. Bishop C, Turner A, Read P. Effects of inter-limb asymmetries on physical and sports performance: A systematic review. *J Sport Sci* 36: 1-10, 2017.
10. Boo ME, Garrison JC, Hannon JP, et al. Energy absorption contribution and strength in female athletes at return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *Orthop J Sports Med* 6: 2325967118759522, 2018.
11. Brunt D, Greenberg B, Wankadia S, Trimble MA, Shechtman O. The effect of foot placement on sit to stand in healthy young subjects and patients with hemiplegia. *Arch Phys Med Rehabil* 83: 924-929, 2002.
12. Bryanton MA, Kennedy MD, Carey JP, Chiu LZ. Effect of squat depth and barbell load on relative muscular effort in squatting. *J Strength Cond Res* 26: 2820-2828, 2012.
13. Button K, Roos PE, van Deursen RW. Activity progression for anterior cruciate ligament injured individuals. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 29: 206-212, 2014.
14. Bynum EB, Barrack RL, Alexander AH. Open versus closed chain kinetic exercises after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 23: 401-406, 1995.
15. Castanharo R, da Luz BS, Bitar AC, D'Elia CO, Castropil W, Duarte M. Males still have limb asymmetries in multijoint movement tasks more than 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sci* 16: 531-535, 2011.
16. Chan MS, Sigward SM. Loading behaviors do not match loading abilities postanterior cruciate ligament reconstruction. *Med Sci Sports Exerc* 51: 1626-1634, 2019.
17. Chaudhari AMW, Briant PL, Bevil SL, Koo S, Andriacchi TP. Knee kinematics, cartilage morphology, and osteoarthritis after ACL injury. *Med Sci Sport Exerc* 40: 215-222, 2008.

18. Chmielewski TL. Asymmetrical lower extremity loading after ACL reconstruction: More than meets the eye. *J Orthop Sport Phys* 41: 374–376, 2011.
19. Chmielewski TL, Wilk KE, Snyder-Mackler L. Changes in weight-bearing following injury or surgical reconstruction of the ACL: Relationship to quadriceps strength and function. *Gait Posture* 16: 87–95, 2002.
20. Clark RA, Howells B, Feller J, Whitehead T, Webster KE. Clinic-based assessment of weight-bearing asymmetry during squatting in people with anterior cruciate ligament reconstruction using Nintendo Wii Balance Boards. *Arch Phys Med Rehabil* 95: 1156–1161, 2014.
21. DeForest BA, Cantrell GS, Schilling BK. Muscle activity in single- vs. double-leg squats. *Int J Exerc Sci* 7: 302–310, 2014.
22. Delahunt E, Sweeney L, Chawke M, et al. Lower limb kinematic alterations during drop vertical jumps in female athletes who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthopaed Res* 30: 72–78, 2011.
23. Ebben WP, Feldmann CR, Dayne A, Mitsche D, Alexander P, Knetzger KJ. Muscle activation during lower body resistance training. *Int J Sports Med* 30: 1–8, 2008.
24. Eliassen W, Saeterbakken AH, van den Tillaar R. Comparison of bilateral and unilateral squat exercises on barbell kinematics and muscle activation. *Int J Sports Phys Ther* 13: 871–881, 2018.
25. Englander ZA, Garrett WE, Spritzer CE, DeFrate LE. In vivo attachment site to attachment site length and strain of the ACL and its bundles during the full gait cycle measured by MRI and high-speed biplanar radiography. *J Biomech* 98: 109443, 2019.
26. Ernst GP, Saliba E, Diduch DR, Hurwitz SR, Ball DW. Lower extremity compensations following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther* 80: 251–260, 2000.
27. Escamilla RF, Fleisig GS, Zheng N, Barrantine SW, Wilk KE, Andrews JR. Biomechanics of the knee during closed kinetic chain and open kinetic chain exercises. *Med Amp Sci Sports Amp Exerc* 30: 556–569, 1998.
28. Flanagan SP, Salem GJ. Bilateral differences in the net joint torques during the squat exercise. *J Strength Cond Res* 21: 1220–1226, 2007.
29. Fleming BC, Oksendahl H, Beynon BD. Open- or closed-kinetic chain exercises after anterior cruciate ligament reconstruction? *Exerc Sport Sci R* 33: 134–140, 2005.
30. Fukuda TY, Fingerhut D, Moreira VC, et al. Open kinetic chain exercises in a restricted range of motion after anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized controlled clinical trial. *Am J Sports Med* 41: 788–794, 2013.
31. Garrison JC, Hannon J, Goto S, et al. Knee loading after ACL-R is related to quadriceps strength and knee extension differences across the continuum of care. *Orthop J Sports Med* 7: 2325967119870155, 2019.
32. Glogovac G, Schumaier AP, Grawe BM. Return to sport following revision anterior cruciate ligament reconstruction in athletes: A systematic review. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 35: 2222–2230, 2019.
33. Gokeler A, Bisschop M, Benjaminse A, Myer GD, Eppinga P, Otten E. Quadriceps function following ACL reconstruction and rehabilitation: Implications for optimisation of current practices. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22: 1163–1174, 2013.
34. Grassi A, Zaffagnini S, Muccioli GMM, Neri MP, Villa SD, Marcacci M. After revision anterior cruciate ligament reconstruction, who returns to sport? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 49: 1295–1304, 2015.
35. Gryzlo SM, Patek RM, Pink M, Perry J. Electromyographic analysis of knee rehabilitation exercises. *J Orthop Sports Phys Ther* 20: 36–43, 1994.
36. Hart JM, Ko J-WK, Konold T, Pietrosimone B, Pietrosimone B. Sagittal plane knee joint moments following anterior cruciate ligament injury and reconstruction: A systematic review. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 25: 277–283, 2010.
37. Henning CE, Lynch MA, Glick KR. An in vivo strain gage study of elongation of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 13: 22–26, 1985.
38. Irish SE, Millward AJ, Wride J, Haas BM, Shum GL. The effect of closed-kinetic chain exercises and open-kinetic chain exercise on the muscle activity of vastus medialis oblique and vastus lateralis. *J Strength Cond Res* 24: 1256–1262, 2010.
39. Jean LMY, Chiu L. Elevating the noninvolved limb reduces knee extensor asymmetry during squat exercise in persons with reconstructed anterior cruciate ligament. *J Strength Cond Res*, 2020. Available at: https://journals.lww.com/nsca-jscr/Abstract/9000/Elevating_the_Noninvolved_Limb_Reduces_Knee.94351.aspx. Accessed: June 15, 2020.
40. Khaiyat OA, Norris J. Electromyographic activity of selected trunk, core, and thigh muscles in commonly used exercises for ACL rehabilitation. *J Phys Ther Sci* 30: 642–648, 2018.
41. Knoll MG, Davidge M, Wrspir C, Korak JA. Comparisons of single leg squat variations on lower limb muscle activation and center of pressure alterations. *Int J Exerc Sci* 12: 950–959, 2019.
42. Kraemer W, Denegar C, Flanagan S. Recovery from injury in sport: Considerations in the transition from medical care to performance care. *Sports Health* 1: 392–395, 2009.
43. Lai CCH, Ardern CL, Feller JA, Webster KE. Eighty-three per cent of elite athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br J Sports Med* 52: 128, 2018.
44. Lake JP, Lauder MA, Smith NA. Does side dominance affect the symmetry of barbell end kinematics during lower-body resistance exercise? *J Strength Cond Res* 25: 872–878, 2011.
45. Lefevre N, Klouche S, Mirouse G, Herman S, Gerometta A, Bohu Y. Return to sport after primary and revision anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective comparative study of 552 patients from the FAST cohort. *Am J Sports Med* 45: 34–41, 2016.
46. Lepley AS, Kuenze CM. Hip and knee kinematics and kinetics during landing tasks after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *J Athl Train* 53: 144–159, 2018.
47. Lepley LK. Deficits in quadriceps strength and patient-oriented outcomes at return to activity after ACL reconstruction. *Sports Health* 7: 231–238, 2015.
48. Lisee C, Slater L, Hertel J, Hart JM. Effect of sex and level of activity on lower-extremity strength, functional performance, and limb symmetry. *J Sport Rehabil* 28: 413–420, 2019.
49. Lorenz D. Facilitating power development in the recovering athlete: Triple extension in rehabilitation. *Strength Cond J* 38: 48–50, 2016.
50. Mausehund L, Skard AE, Krosshaug T. Muscle activation in unilateral barbell exercises: Implications for strength training and rehabilitation. *J Strength Cond Res* 33 (Suppl 1): S85–S94, 2019.
51. McCullough KA, Phelps KD, Spindler KP, et al. Return to high school- and college-level football after anterior cruciate ligament reconstruction: A multicenter orthopaedic outcomes network (MOON) cohort study. *Am J Sports Med* 40: 2523–2529, 2012.
52. McCurdy K, O'Kelley E, Kutz M, Langford G, Ernest J, Torres M. Comparison of lower extremity EMG between the 2-leg squat and modified single-leg squat in female athletes. *J Sport Rehabil* 19: 57–70, 2010.
53. van Melick N, van Cingel RE, Brooijmans F, et al. Evidence-based clinical practice update: Practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med* 50: 1506–1515, 2016.
54. Mikkelsen C, Werner S, Eriksson E. Closed kinetic chain alone compared to combined open and closed kinetic chain exercises for quadriceps strengthening after anterior cruciate ligament reconstruction with respect to return to sports: A prospective matched follow-up study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 8: 337–342, 2000.
55. de Mille P, Osmak J. Performance: Bridging the gap after ACL surgery. *Curr Rev Musculoskelet Med* 10: 297–306, 2017.
56. Mohtadi NG, Chan DS. Return to sport-specific performance after primary anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. *Am J Sports Med* 46: 3307–3316, 2017.
57. Monajati A, Larumbe-Zabala E, Goss-Sampson M, Naclerio F. Surface electromyography analysis of three squat exercises. *J Hum Kinet* 67: 73–83, 2019.
58. Morrissey MC, Hudson ZL, Drechsler WI, Coutts FJ, Knight PR, King JB. Effects of open versus closed kinetic chain training on knee laxity in the early period after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 8: 343–348,

- 2000.
59. Netzel JA, Kernozek TW, Davies GJ. Loading response following anterior cruciate ligament reconstruction during the parallel squat exercise. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 17: 551-554, 2002.
 60. Newton RU, Gerber A, Nimphius S, et al. Determination of functional strength imbalance of the lower extremities. *J Strength Cond Res* 20: 971-977, 2006.
 61. Ortiz A, Olson S, Libby CL, et al. Landing mechanics between noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction during 2 jump tasks. *Am J Sports Med* 36: 149-157, 2008.
 62. Palmieri-Smith RM, Lepley LK. Quadriceps strength asymmetry after anterior cruciate ligament reconstruction alters knee joint biomechanics and functional performance at time of return to activity. *Am J Sports Med* 43: 1662-1669, 2015.
 63. Palmieri-Smith RM, Thomas AC, Wojtys EM. Maximizing quadriceps strength after ACL reconstruction. *Clin Sports Med* 27: 405-424, 2008.
 64. Pamukoff DN, Montgomery MM, Choe KH, Moffit TJ, Garcia SA, Vakula MN. Bilateral alterations in running mechanics and quadriceps function following unilateral anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sport Phys* 48: 960-967, 2018.
 65. Panariello RA, Stump TJ, Maddalone D. Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *Oper Techn Sport Med* 24: 35-44, 2016.
 66. Paterno MV, Ford KR, Myer GD, Heyl R, Hewett TE. Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin J Sport Med* 17: 258-262, 2007.
 67. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med* 42: 1567-1573, 2014.
 68. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med* 38: 1968-1978, 2010.
 69. Perriman A, Leahy E, Semciw AI. The effect of open vs closed kinetic chain exercises on anterior tibial laxity, strength, and function following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 48: 1-52, 2018.
 70. Petersen W, Taheri P, Forkel P, Zantop T. Return to play following ACL reconstruction: A systematic review about strength deficits. *Arch Orthop Traum Surg* 134: 1417-1428, 2014.
 71. Renner KE, Franck CT, Miller TK, Queen RM. Limb asymmetry during recovery from anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Res* 36: 1887-1893, 2018.
 72. Roewer BD, Stasi SL, Snyder-Mackler L. Quadriceps strength and weight acceptance strategies continue to improve two years after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Biomech* 44: 1948-1953, 2011.
 73. Roos PE, Button K, van Deursen RWM. Motor control strategies during double leg squat following anterior cruciate ligament rupture and reconstruction: An observational study. *J Neuroeng Rehabil* 11: 19, 2014.
 74. Salem GJ, Salinas R, Harding FV. Bilateral kinematic and kinetic analysis of the squat exercise after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arch Phys Med Rehabil* 84: 1211-1216, 2003.
 75. Sanford BA, Williams JL, Zucker-Levin A, Mihalko WM. Asymmetric ground reaction forces and knee kinematics during squat after anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. *Knee* 23: 820-825, 2016.
 76. Schmitt LC, Paterno MV, Hewett TE. The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sport Phys* 42: 750-759, 2012.
 77. Schoenfeld BJ. Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *J Strength Cond Res* 24: 3497-3506, 2010.
 78. Signorile JF, Weber B, Roll B, Caruso JF, Lowensteyn I, Perry AC. An electromyographical comparison of the squat and knee extension exercises. *J Strength Cond Res* 8: 178-183, 1994.
 79. Sigward SM, Chan M-SM, Lin PE, Almansouri SY, Pratt KA. Compensatory strategies that reduce knee extensor demand during a bilateral squat change from 3 to 5 months following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sport Phys* 48: 713-718, 2018.
 80. Sole G, Tengman E, Grip H, Häger CK. Knee kinematics during stair descent 20 years following anterior cruciate ligament rupture with and without reconstruction. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 32: 180-186, 2016.
 81. Suter LG, Smith SR, Katz JN, et al. Projecting lifetime risk of symptomatic knee osteoarthritis and total knee replacement in individuals sustaining a complete anterior cruciate ligament tear in early adulthood: ACL tears and risk of knee OA and TKR. *Arthritis Care Res* 29: 201-208, 2016.
 82. Tagesson S, Öberg B, Good L, Kvist J. A comprehensive rehabilitation program with quadriceps strengthening in closed versus open kinetic chain exercise in patients with anterior cruciate ligament deficiency. *Am J Sports Med* 36: 298-307, 2008.
 83. Tagesson S, Öberg B, Kvist J. Tibial translation and muscle activation during rehabilitation exercises 5 weeks after anterior cruciate ligament reconstruction. *Scand J Med Sci Spor* 20: 154-164, 2010.
 84. van den Tillaar R, Andersen V, Saeterbakken AH. Comparison of muscle activation and kinematics during free-weight back squats with different loads. *PLoS One* 14: e0217044, 2019.
 85. Urbach D, Awiszus F. Impaired ability of voluntary quadriceps activation bilaterally interferes with function testing after knee injuries. A twitch interpolation study. *Int J Sports Med* 23: 231-236, 2002.
 86. Webster KE, Austin DC, Feller JA, Clark RA, McClelland JA. Symmetry of squatting and the effect of fatigue following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23: 3208-3213, 2015.
 87. Williams GN, Buchanan TS, Barrance PJ, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Quadriceps weakness, atrophy, and activation failure in predicted noncopers after anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 33: 402-407, 2005.
 88. Williams GN, Snyder-Mackler L, Barrance PJ, Buchanan TS. Quadriceps femoris muscle morphology and function after ACL injury: A differential response in copers versus non-copers. *J Biomech* 38: 685-693, 2005.
 89. Wu HW, Tsai CF, Liang KH, Chang YW. Effect of loading devices on muscle activation in squat and lunge. *J Sport Rehabil* 29: 1-6, 2019.
 90. Xergia SA, Pappas E, Zampeli F, Georgiou S, Georgoulis AD. Asymmetries in functional hop tests, lower extremity kinematics, and isokinetic strength persist 6 to 9 months following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 43: 154-162, 2013.
 91. Yack HJ, Collins CE, Whieldon TJ. Comparison of closed and open kinetic chain exercise in the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med* 21: 49-54, 1993.
 92. Yamazaki J, Muneta T, Ju YJ, Koga H, Morito T, Sekiya I. The kinematic analysis of female subjects after double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction during single-leg squatting. *J Orthop Sci* 18: 284-289, 2013.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 43, Number 4, pages 105-114.

著者紹介



Dan Ogborn :
Pan Am Clinic Foundation の理学療法士で研究員を務め、the University of Manitoba の理学療法学科における助教でもある。