

動作の完遂不能時のフィードフォワード制御修正の動態を 抽出する新手法を使って ACL 損傷発生機序を探る

防衛大学校 小西 優
(共同研究者) 国立病院機構甲府病院 吉井 諒

Assessment of Neural Mechanism of ACL Injury with Innovative Method by Using Analysis of Alternated Feedforward Control Due to Unaccomplished Locomotion of Athletes

by

Yu Konishi

*National Defense Academy of Japan,
Department of Physical Education*

Ryo Yoshii

National Hospital Organization Kofu National Hospital

ABSTRACT

There is no previous study which have examined how neural control abnormalities due to anterior cruciate ligament (ACL) injury affect muscle feed-forward (FF) control when an unpredictable event occurs in the landing. By using the prolonged vibration stimulation to the infrapatellar tendon, in the present study, the similar neural abnormalities occurred after ACL injury could be induced in healthy subjects. The study design using the neural abnormalities induced by prolonged vibration stimulation in healthy individuals enable to compare the effect before and after the occurrence of neurological abnormalities. It is difficult to extract direct effects of the neural abnormalities in experiments with actual patients with ACL injury since it is impossible to predict when and who would get injured. In the present study, furthermore, all subjects

were imposed unpredictable event which is called Surprised Landing task. The task was designed to impose unexpected landing task under the same conditions to subjects. The EMGs before and after the induction of neural control abnormalities were compared to identify changes in pre-landing muscle activity. The results of present study demonstrated that activation of vastus medialis and rectus femoris were significant increased in muscle activity of the first half part after passage of the false plate by the induction of neural control abnormalities ($p=0.014, 0.04$). There was no significant difference in all muscles in the latter half. Those results might suggest that the enhanced corticospinal pathways excitability induced by the ACL injury complement the declined activity in the spinal reflex pathway of some muscle in FF control of unpredictable events.

要 旨

前十字靭帯 (ACL) 損傷による神経制御異常が、着地動作における予測外事象発生時に筋のフィードフォワード (FF) 制御にどのような影響を与えるかは不明である。本研究では膝蓋腱部振動刺激にて ACL 損傷における神経制御異常モデルを健常被験者にて作成した。この異常モデルを用いることにより、実際の患者を用いた実験では実現することができない ACL 損傷による神経異常発生前後の変化を比較することができる。そして、FF 制御の再構築時の実験条件を均一化できる Surprise Landing 課題を被験者に課することにより、神経制御異常の誘発前後での着地前筋活動の変化を調査した。その結果、神経制御異常の誘発にて、偽板通過後における前半部分の筋活動で内側広筋、大腿直筋が有意に大きくなった ($p=0.014, 0.04$)。後半部分ではすべての筋で有意差は見られなかった。これらの結果から ACL 損傷で発生する皮質脊髄路興奮性変化によって、予測外事象の FF 制御では一部の筋の脊髄反射経路にて補完的に活動が高まると推測された。

緒 言

前十字靭帯 (ACL) 自体の力学的強度は、高強

度の運動に耐えられるほどのものではなく膝周囲筋が積極的に活動し、不足した力学的強度を補強することにより膝の安定性が保たれている¹⁾。この研究結果は、たとえ ACL の力学的強度を超えた負荷が動作時に膝に加わったとしても、動作が予定通りに遂行されたものあれば、不足する強度を筋活動で補強し膝を安定化できることを示唆している。そんな中、ACL 損傷患者を対象とした着地動作を用いた研究が多く行われている。これは、着地動作が、ランニング、ジャンプ動作等様々な動作に伴い起こり、陸上スポーツで最も頻繁におこる動作のひとつであり、実際のパフォーマンスを検証するのに適していると考えられているからである。

その一方、スポーツ動作中においては予測外の事象は多発し、予測通りの着地動作を遂行できない状況を強いられており、これは、様々なスポーツ外傷の原因となっている。さらに、ACL 損傷は着地後 40msec とかなり早期に生じることが報告されている²⁾。この極めて短い時間幅で起こる ACL 損傷を防ぐためには膝周囲筋の迅速な賦活が必須であり、フィードバックによる筋制御だけでは十分に対応できないとされている³⁾。迅速な応答を可能にする筋制御様式としてフィードフォワード (FF) 制御が重要な役割を果たしている

が、先行研究では、予定調和の運動でのFFの評価しかされていない⁴⁾。予測と異なる動作を強いられる状況が発生した時には、FF制御による筋収縮が実行不能と認識され、その瞬間からFFプログラムを再度構築し直すこととなる。このFFプログラムの再構築の遅延や賦活不足等は膝周囲筋による補強に影響を与え、損傷リスクを高める。特に、ACL損傷患者の神経筋制御異常^{5,6)}は、FFにも悪影響を与えている可能性が高い。彼らが持つFFの再構築の動態を評価すれば、将来的には、彼らの機能回復や予防の為の方策立案へと繋げることができる。しかしながら、予測外の動作を強いられた時のフィードフォワード制御の再構築という視点で行われた研究はこれまでにない。実際のスポーツ動作中、予測できないタイミングでの接地を余儀なくされることも多く、このような予測外のタイミングでおこる接地動作中であっても膝関節の安定性を確保できることが安全な競技復帰の実現には不可欠である。健常者の場合、そのような状況下であっても様々な神経生理学的戦略を用いて筋活動を制御していることがわかっている⁷⁾。ところが、膝関節周囲筋の制御メカニズムに異常があるACL損傷患者⁵⁾の予測外の接地に関する知見はこれまで得られていない。

その原因として、予測外の動作でのFFの再構築が起こる時の実験条件を均一化するのが困難な事が挙げられる。しかしながら、本研究では、予測外動作を同じ条件で再現できるように工夫し、FFのプログラム再構築の詳細を解析できる研究プロトコルをデザインした。

先行研究において、我々は予測外事象を安全に観察するための偽板を使用した着地動作課題である Surprise Landing (SL) というプロトコルを開発しACL損傷患者の着地直後の筋活動動態の解析を行った⁸⁾。そこで、本計画では、同プロトコルで偽の着地板の通過から実際の着地面までの間に15cmの高さがあり、予測外の事象発生から一

定の時間が生じるという特徴を利用する。偽の着地板が抜けた事を認識してからの膝周囲筋のPre-activationはFFの再プログラミングの動態を反映する。本来、ACL損傷患者の動態を明らかにするためには、既に病態を有する被験者を用いなければならない、被験者内での比較が困難でという課題がある。ところが、近年、筋への長時間振動刺激により惹起される筋機能変化がACL損傷患者の神経系変化と類似していると報告されている^{5,9)}。そこで、本研究では、実際のACL損傷患者における変化を推測するために以下の二点を明らかにすることを目指す。第一に、SLにおける着地前筋活動の特徴を同定すること、そして第二に、長時間振動刺激を用い健常者の大腿四頭筋にACL損傷患者に類似した神経筋機能変化を誘発し、SLにおけるFFの再構築の動態を明らかにすることで、実際のACL損傷患者における変化を推測することの二点である。

1. 研究方法

1.1 被験者

本研究では、運動習慣のある健常者20人(男性10人、女性10人)を被験者として用いた。本研究は防衛大学校倫理審査委員会の承認を受けた上で実施した。

1.2 実験手順

全ての被験者は(A)30cm通常着地、(B) Surprise Landing (SL)、(C) 振動刺激後SLの3種類の片脚着地課題を行う。(B)のSL課題は15cmの高さから通常着地を繰り返し行わせ、偽板(通過時に容易に外れるように接地した高剛性・軽量のハニカムコア材(ポリプロピレン)で作られた偽の着地板)を置いた30cmの高さからの着地を紛れ込ませることで行う。この時、筋電センサーを用いて被験者の内側広筋(VM)、外側広筋(VL)、大腿直筋(RF)、半腱様筋(ST)、大腿

二頭筋 (BF) の筋活動を観察する。離地と着地はマットスイッチ、偽の着地板の通過時のタイミングは光電管を用いて測定する。筋電センサーと光電管、マットスイッチから得られる全データは、Micro 1401 (CED Ltd., Cambridge, UK) に取り込みアナログ変換し、分析ソフトウェア Signal 5.11 (CED Ltd., Cambridge, UK) 上で同期させる。そして、光電管とマットスイッチから得られるデータから離地から着地までのタイミングを認識できるようにする。これにより離地から着地までの間の筋放電の発火動態を観察し、解析できるようにする (図1)。データ解析法の詳細に関しては後に記す。また、(C) の課題は被験者に対し、医療用電動マッサージ器 (Kinesio Co., Tokyo, Japan) を用いて20分間の膝蓋腱部振動刺激を行うことで疑似ACL損傷神経筋機能異常モデルを作成し、その後 (B) と同様のSL課題を課し、その時の筋活動データを記録する。また (A) の通常着地としては、予め偽の板が抜けると告知した上での30cmの高さの着地を行わせ、その際の筋活動データを得ておく。また、全ての被験者は上記実験の前に最大筋活動を測定しておく。測定肢位としては、バックレストの付いた椅子に股関節・膝関節90°位で座り、体幹・大腿・下腿をそれぞれベル

トで固定する。被験者は等尺性に最大努力伸展・屈曲をそれぞれ5秒間2セットずつ行う。その際、各筋の筋活動を上記同様筋電センサーで記録し、2セットのうち筋活動がより高いデータを解析に使用する。

1. 3 データ解析

本研究では、マットスイッチから同定した着地のタイミングを用いて、着地直前の5筋からの筋電データを抽出できる。この抽出した筋電データを神経伝達速度や潜時などを基に四期に分けて解析を行った。足底の皮膚感覚が脊髄に到達するまで最低20msecを要すとされており⁷⁾、偽板通過直後20msecの期間は偽板通過を受けての筋活動ではないと考えられるため解析対象外とした。偽板通過後から着地の期間において、偽板通過直後20msecを除いた残りの期間を前後半に分けた際、感覚が脳皮質まで到達して戻ってくるまで60msec程度を要するため⁷⁾、概ね後半 (以下後半筋活動) の期間が皮質からの制御を受け得る。反対に前半部分 (以下前半筋活動) は主に脊髄反射による筋活動が含まれる期間となる。また、偽板接触前の筋活動として偽板接地直前20msecの期間 (以下直前筋活動) も解析対象とした。

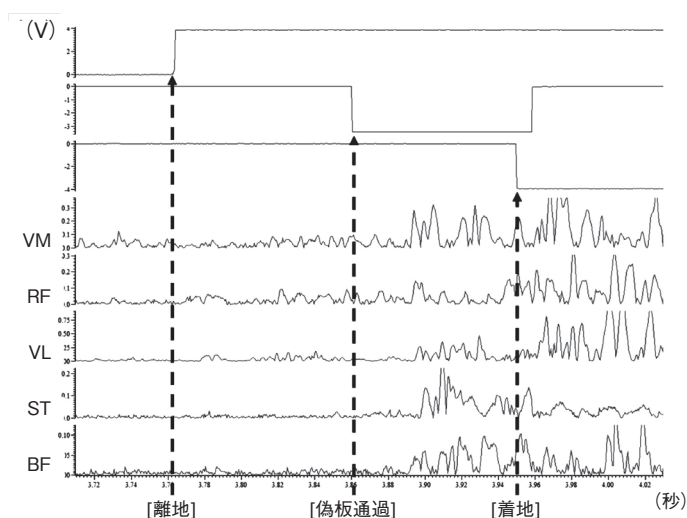


図1 離地から着地までの筋活動解析

一点目の目的の健常者におけるSL課題での着地前筋活動の特徴を同定するために、通常着地（偽板が抜けると告知した上での着地）とSL課題を比較する。二点目の目的の疑似ACL損傷患者として神経筋機能変化を誘発させた健常者の特徴を調べるために、SL課題（振動刺激前）と振動刺激後のSL課題を比較する。

データ抽出・解析はSignal5.11 (CED Ltd., Cambridge, UK)にて行い、内側広筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋のそれぞれにおいて筋活動（最大筋活動に対する比率, %）を算出する。

1. 4 統計解析

直前筋活動、前半筋活動、後半筋活動のそれぞれの期間における平均筋活動を、通常着地とSL、SLと振動刺激後のSL、でそれぞれ差をWilcoxonの符号付順位和検定にて比較する。解析は統計解析ソフトR (IBM Corporation, Armonk, USA)を使用し、有意水準は5%未満とした。

2. 研究結果

通常着地とSLの比較では、直前筋活動の期

間においてすべての筋で有意にSLが大きかった ($p < 0.01$)。前半筋活動ではRFのみSLが有意に大きく ($p = 0.04$)、VM, VL, ST, BFでは有意な差は見られなかった ($p = 0.41, 0.48, 1, 0.67$)。後半筋活動においては、VM, RF, VL, ST, BFと、すべての筋で有意差は見られなかった ($p = 0.52, 0.41, 0.73, 0.57, 0.78$) (表1)。

SLと振動刺激後のSLの比較では、直前筋活動においては、VM, RF, VL, ST, BFと、すべての筋で有意差は見られなかった ($p = 0.41, 0.37, 0.48, 0.62, 0.87$)。前半筋活動ではVM, RFで振動後SLが有意に大きく ($p = 0.014, 0.04$)、VL, ST, BFでは有意な差は見られなかった ($p = 0.57, 0.65, 0.41$)。後半筋活動においてはVM, RF, VL, ST, BFと、すべての筋で有意差は見られなかった ($p = 0.17, 0.59, 0.37, 0.45, 0.55$) (表2)。

3. 考察

関節損傷により生じるArthrogenous muscle inhibition (AMI)と呼ばれる神経筋制御異常を伴う筋機能不全の状態は、スポーツ選手にとって大きな障害となり得る大きな問題であり、複数の要素が複雑に影響し合っているとされている^{6, 10}。

表1 通常着地とSLの比較

	直前筋活動			前半筋活動			後半筋活動		
	通常着地	SL	p	通常着地	SL	p	通常着地	SL	p
VM	22.7(63.7)	149.9(139.8)	<0.01**	68.7(61.8)	77.9(35.4)	0.41	87.0(45.6)	104.7(64.8)	0.52
RF	23.8(25.2)	65.8(84.4)	<0.01**	41.7(40.2)	59.4(27.4)	0.04*	53.0(35.0)	66.3(40.4)	0.41
VL	20.3(19.7)	98.1(57.1)	<0.01**	48.2(49.4)	56.8(37.6)	1	82.6(38.4)	74.6(43.2)	0.73
ST	21.3(32.1)	58.0(89.6)	<0.01**	20.2(36.1)	16.5(18.1)	0.48	32.5(29.2)	36.5(37.4)	0.57
BF	14.7(32.5)	51.2(60.0)	<0.01**	22.1(26.3)	23.7(15.3)	0.67	28.0(21.7)	26.4(20.4)	0.78

最大筋活動に対する比率(%), median (Interquartile range), *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

表2 SLと振動SLの比較

	直前筋活動			前半筋活動			後半筋活動		
	SL	振動SL	p	SL	振動SL	p	SL	振動SL	p
VM	149.9(139.8)	117.2(63.0)	0.41	77.9(35.4)	93.4(63.9)	0.014*	104.7(64.8)	93.2(64.9)	0.17
RF	65.8(84.4)	100.9(64.8)	0.37	59.4(27.4)	73.9(38.1)	0.04*	66.3(40.4)	69.6(41.9)	0.59
VL	98.1(57.1)	102.5(61.5)	0.48	56.8(37.6)	64.0(46.4)	0.57	74.6(43.2)	70.6(30.5)	0.37
ST	58.0(89.6)	73.5(73.8)	0.62	16.5(18.1)	19.4(19.7)	0.65	36.5(37.4)	33.9(29.0)	0.45
BF	51.2(60.0)	46.0(60.7)	0.87	23.7(15.3)	19.8(17.3)	0.41	26.4(20.4)	31.4(22.5)	0.55

最大筋活動に対する比率(%), median (Interquartile range), *: $p < 0.05$

11, 12, 13). ACL 損傷者においても、特に大腿四頭筋でその AMI が生じていることが判明しており⁵⁾、実際に大腿四頭筋に特異的な筋萎縮が頻繁に観察される¹⁴⁾。その AMI の複雑な機序の中でも ACL 損傷において重要視されているのが ACL の機能の一つである感覚受容器機能が低下することで引き起こされるとされているガンマループ機能不全である^{5, 9, 15)}。このガンマループシステムは筋活動において重要な役割を果たすが、健常者において膝蓋腱部への持続的な振動刺激を与えることで再現可能とされており、このモデルを使用して多くの研究が行われている^{5, 16, 17)}。

また、AMI のメカニズムは徐々に明らかになってきているものの、それを検証した研究のほとんどが座位での単純な膝屈伸動作における筋力測定により評価されており、スポーツ選手において重要な実践的な動作における AMI の関わり方についての検証は十分になされていない。実際のスポーツ場面においては予測外事象が多発し、瞬時にそれに対応するよう筋活動における戦略を絶えず再プログラミングし修正している。我々は予測外事象を安全に観察するために偽板を使用した着地動作課題である SL プロトコルを開発し、ACL 損傷患者の着地直後の筋活動動態の解析を行った⁸⁾。このプロトコルは McDonagh らの研究を基にしているが、その先行研究では健常者における両脚着地、高さ 50 ~ 70cm で SL の着地後に焦点を当てている⁷⁾。それに対して本研究は ACL 患者の予測外事象における筋制御動態を安全に、また的確に観察するために 30cm の片脚着地にて行い、着地前に焦点を当てているところが大きく異なる。

本研究では、まず本課題の特徴を検証するために通常着地と SL の違いを検証しており、SL は通常着地と異なり偽板通過前にすべての筋で筋活動が高まり着地に備えていることが伺えた。また、偽板通過後はほとんどの筋で通常着地レベルまで筋活動が落ち着き、即座に再調整を行っていると

考えられた。ただし RF のみ通常着地より前半筋活動期間で活動が高く、下肢を空中に保持するための挙上筋という特徴を反映していると推測される。これらの結果は先行研究と同様の結果であり、患者を見据えて安全性を重視させた本研究の条件であっても、SL は妥当な課題となっていると言える。

疑似 ACL 損傷神経筋機能異常モデルの特徴を調査する目的で SL と振動刺激後 SL の違い検証し、VM と RF の前半筋活動において、振動刺激後に筋活動が増加していることが明らかになった。経頭蓋磁器刺激や H 反射などを使用した先行研究において、運動における主な神経ルートである皮質脊髓路と脊髓反射路の興奮性は一方の機能不全を互いに補完し合っている可能性が指摘されている^{18, 19, 20)}。前半筋活動期間では皮質からの制御が間に合わず皮質脊髓路の興奮性は含まれないと考えられるため、主に脊髓反射興奮性を反映していると言える。つまり振動刺激によって皮質脊髓路を含めたガンマループに機能不全が生じ、それを補完するように脊髓反射が一部の筋で高まった可能性がある。上記同様 RF は挙上筋であり空中で下肢を安定させる機能があり、VM に関しては、着地において解剖学的にも、また実際の着地動作においても膝の安定性に大きく寄与するとされている^{21, 22)}。つまり、これらの筋は他筋よりも本課題に対する役割が大きく、より影響を受けやすかった可能性が考えられる。

これらの結果より、本研究の SL 課題は予測外事象に対する FF プログラムの再構築を抽出できる妥当な課題と言える。また ACL 損傷者では筋機能の神経系変化によって、予測外事象の FF 制御では一部の筋で補完的に活動が高まると推測された。本研究は実践的な動作における AMI の関わりについて調査した数少ない研究として、AMI 研究に新たな知見を追加した。この結果は、今後 ACL 損傷者を対象とした検証を行っていく上で、

機能不全や発生機序解明の礎となると考える。

4. 結 論

スポーツ場面にて多発する予測外事象を安全に、また的確に筋活動様式を観察するために開発したSL課題は、FFプログラムの再構築を抽出できる妥当な課題と考えられた。また、振動刺激による疑似ACL損傷モデルを使用することで、ACL損傷における筋機能の神経系変化によって、予測外事象のFF制御では一部の筋で補完的に活動が高まると推測された。本研究の結果はACL損傷者の機能不全や発生機序における解釈の一助となると考える。

謝 辞

本研究に対してご助成賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また本研究を実施するにあたり、実験にご協力いただいた国立病院機構甲府病院の萩野哲男院長並びに落合聡司特命副院長に御礼申し上げます。

文 献

- 1) Kuo C. Y., Louie J. K., Mote Jr C. D., Field measurements in snow skiing injury research., *J. Biomech.*, **16**, 609–624 (1983)
- 2) Koga H. et al., Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball., *Am. J. Sports Med.*, **38**, 2218–2225 (2010)
- 3) Koga H., Muneta T., ACL injury mechanisms. in *ACL injury and its treatment*, 113–125 (Springer, 2016)
- 4) Bryant A. L., Newton R. U., Steele J., Successful feed-forward strategies following ACL injury and reconstruction., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **19**, 988–997 (2009)
- 5) Konishi Y., Fukubayashi T., Takeshita D., Possible mechanism of quadriceps femoris weakness in patients with ruptured anterior cruciate ligament.,

Med. Sci. Sports Exerc., **34**, 1414–1418 (2002)

- 6) Rice D. A., McNair P. J., Quadriceps Arthrogenic Muscle Inhibition: Neural Mechanisms and Treatment Perspectives., *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, **40** 250–266 (2010)
- 7) McDonagh M. J. N., Duncan A., Interaction of pre-programmed control and natural stretch reflexes in human landing movements., *J. Physiol.*, **544**, 985–994 (2002)
- 8) Konishi Y., McNair P. J., Rice D. A., Ochiai S., Hagino T., Stretch reflex changes in ACL-deficient individuals and healthy controls during normal and surprise landings., *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, **30**, 2342–2351 (2020)
- 9) Konishi Y., Aihara Y., Sakai M., Ogawa G., Fukubayashi T., Gamma loop dysfunction in the quadriceps femoris of patients who underwent anterior cruciate ligament reconstruction remains bilaterally., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **17**, 393–399 (2007)
- 10) Hart J. M., Pietrosimone B., Hertel J., Ingersoll C. D., Quadriceps activation following knee injuries: a systematic review. *J. Athl. Train.* **45**, 87–97 (2010)
- 11) Hopkins J. T., Ingersoll C. D., Arthrogenic muscle inhibition: a limiting factor in joint rehabilitation., *J. Sport Rehabil.*, **9**, 135–159 (2000)
- 12) Meier W. et al., Total knee arthroplasty: muscle impairments, functional limitations, and recommended rehabilitation approaches., *J. Orthop. Sport. Phys. Ther.*, **38**, 246–256 (2008)
- 13) Palmieri-Smith R. M., Thomas A. C., Wojtys E. M., Maximizing quadriceps strength after ACL reconstruction., *Clin. Sports Med.*, **27**, 405–424 (2008)
- 14) Yoshii R. et al., Effect of Subcutaneous Tissue on Changes in Thigh Circumference Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction., *Int. J. Sports Med.*, **40**, 544–550 (2019)
- 15) Konishi Y., Fukubayashi T., Takeshita D., Mechanism of quadriceps femoris muscle weakness in patients with anterior cruciate ligament reconstruction., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **12**, 371–375 (2002)
- 16) Kouzaki M., Shinohara M., Fukunaga T., Decrease in maximal voluntary contraction by tonic vibration applied to a single synergist muscle in humans., *J. Appl. Physiol.*, **89**, 1420–1424 (2000)

- 17) Roll J. P., Vedel J. P., Ribot E., Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study., *Exp. brain Res.*, **76**, 213–222 (1989)
- 18) Rice D. A., McNair P. J., Lewis G. N., Dalbeth N., Quadriceps arthrogenic muscle inhibition: the effects of experimental knee joint effusion on motor cortex excitability., *Arthritis Res. Ther.*, **16**, 1–7 (2014)
- 19) Lepley A. S. et al., Quadriceps neural alterations in anterior cruciate ligament reconstructed patients: A 6-month longitudinal investigation., *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, **25**, 828–839 (2015)
- 20) Rush J. L., Glaviano N. R., Norte G. E., Assessment of Quadriceps Corticomotor and Spinal-Reflexive Excitability in Individuals with a History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis., *Sport. Med.*, **51**, 961–990 (2021)
- 21) Toumi H. et al., New insights into the function of the vastus medialis with clinical implications., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **39**, 1153–1159 (2007)
- 22) Palmieri-Smith R. M., Wojtys E. M., Ashton-Miller J. A., Association between preparatory muscle activation and peak valgus knee angle., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **18**, 973–979 (2008)