

(論文題目)

スポーツ活動中に発生する
大腿部肉離れの疫学的・神経生理学的研究

15N0005 久保 慶東

Yoshiaki KUBO

(論文題目)

スポーツ活動中に発生する
大腿部肉離れの疫学的・神経生理学的研究

(英 訳)

A study of the epidemiology and neurophysiology of
thigh muscle strain injury in sports

2017 年 11 月
15N0005 久保 慶東
Yoshiaki KUBO

目 次

第1部	総合序論	1
第2部	スポーツ競技における大腿部肉離れの疫学調査	3
第1章	序論	3
	1-1 諸言	
	1-2 大腿部肉離れの発生機序	
	1-3 スポーツ競技における肉離れ	
	1-4 第1部の研究目的	
第2章	大学セパタクロー選手における大腿部肉離れ発生とその要因	9
	2-1 背景	
	2-2 方法	
	2-3 結果	
	2-4 考察	
	2-5 結論	

第3部 肉離れ既往が大腿直筋の区画的な神経筋活動に与える影響・・・・・・・・・・ 17

第1章 序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17

- 1-1 諸言
- 1-2 大腿直筋の解剖
- 1-3 大腿直筋の区画的な神経筋活動
- 1-4 大腿直筋肉離れ
- 1-5 肉離れにおける神経損傷について
- 1-6 第2部の研究目的

第2章 慢性の筋内腱肉離れが大腿直筋の区画的な神経筋活動に及ぼす
影響について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 33

- 2-1 背景
- 2-2 方法
- 2-3 結果
- 2-4 考察
- 2-5 結論

第3章 慢性の筋内腱肉離れが大腿直筋の疲労特性に及ぼす影響について・・・・ 48

- 3-1 背景
- 3-2 方法
- 3-3 結果
- 3-4 考察
- 3-5 結論

第4部 総合考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77

図 表

- 図 1. MRI 所見から推察した“肉離れ”の病態
- 図 2. セパタクロー競技の試合中の様子
- 図 3. 試合中のスパイクの様子
- 図 4. 大腿直筋の解剖について
- 図 5. カラーマップで示した筋力発揮中の大腿直筋の Root Mean Square 値
- 図 6. カラーマップで示した疲労試技中の大腿直筋の Median Frequency 値
- 図 7. Grade 1 の大腿直筋肉離れの T2 強調画像（冠状断面）
- 図 8. Grade 2 の大腿直筋肉離れの脂肪抑制 T2 強調画像（体軸断面）
- 図 9. Grade 3 の大腿直筋肉離れの脂肪抑制 T2 強調画像の矢状断面（A）と環状断面（B）
- 図 10. 大腿直筋肉離れの T1 強調画像（体軸断面）
- 図 11. 大腿直筋肉離れのプロトン密度強調像
- 図 12. 多チャンネル表面筋電図の電極の貼付位置
- 図 13. MRI の T1 強調体軸断画像の 1 例
- 図 14. MRI で近位部から中間部にかけて損傷を認めた大腿直筋離れの 1 例
- 図 15. コントロール群と損傷群の 3 部位の HF/KE
- 図 16. コントロール群と損傷群の各 Ch の HF/KE
- 図 17. 多チャンネル表面筋電図の電極の貼付位置
- 図 18. カラーマップで示した疲労試技中の大腿直筋の Median Frequency 値
- 図 19. コントロール群の疲労試技中の Median Frequency 値
- 図 20. 損傷群の疲労試技中の Median Frequency 値
- 図 21. 近位部における損傷群とコントロール群の疲労試技中の Median Frequency 値
- 図 22. 中間部・遠位部における損傷群とコントロール群の疲労試技中の
Median Frequency 値

表 1. 外傷・障害調査の結果

第1部 総合序論

本博士論文の構成は以下の通りである。

第1部 総合序論

第2部 スポーツ競技における大腿部肉離れの疫学調査

第3部 肉離れ既往が大腿直筋の区画的な神経筋活動に与える影響

第4部 総合考察

本博士論文は大腿部肉離れについて、疫学と神経生理学のそれぞれから検討をした。

肉離れはスポーツ競技においてパフォーマンスに影響を与えることから、予防すべき損傷の一つである。特に肉離れは大腿部に多く発生しており、ハムストリングスや大腿四頭筋を対象とした大腿部肉離れについての研究は多くみられる。しかし、依然として肉離れは様々な競技において一定の割合で発生しており、予防は可能になっていないのが現状である。

疫学調査によって、肉離れは陸上競技、サッカー、ラグビーといった様々な競技で発生していることが報告されている^{81,90}。しかし、詳細について検討されていない競技も散見される。肉離れの疫学を把握することは、危険因子を検討するために重要である。そのため、第2部の第2章は大腿部肉離れの疫学調査の一つとして、競技中に肉離れが生じるが、詳細は報告されていないセパタクローを対象に外傷・障害調査を行った。その目的として、セパタクローにおける大腿部肉離れの発生割合を明らかにすることとした。

肉離れは疫学調査だけでなく磁気共鳴画像装置や超音波を用いて、病態を把握する研究も行われている^{12,44,79}。さらに、肉離れは筋実質の損傷だけではなく、支配神経も損傷する可能性があるという報告が散見されるなど、神経機能についても着目され始めている^{39-41,48}。しかし、肉離れと神経機能について検討した報告はまだ少ないのが現状である。肉離れを神経生理学から検討することは、肉離れからの競技復帰に対するリハビリテーションの新たな知見が得られる可能性がある。そのため、第3部の第2章と第3章では、大腿部の中で大腿直筋を対象とし、肉離れ既往が神経筋活動に与える影響を明らかにすることを目的として検討をした。

本博士論文は、大腿部肉離れをマクロ的視点として疫学調査を行い、さらにミクロ的視

点として神経生理学から検討することで，大腿部肉離れにおける危険因子の検討や新たなリハビリテーションの知見を得るための基礎研究とすることを目的とした．

第2部 スポーツ競技における大腿部肉離れの疫学調査

第1章 序論

1-1 諸言

肉離れは、筋に遠心性収縮が加わることや、筋が引き伸ばされることにより発生する損傷である^{9, 37}。奥脇は、肉離れは受傷経験に基づいた通称名であり、スポーツ動作中に、急に筋肉が切れたように実感するとともに痛みを感じ、プレーの継続が困難となる状態と述べている⁷⁸。さらに、奥脇は磁気共鳴画像装置 (MRI) を用いて肉離れを3つのタイプに分類した。Ⅰ型は出血所見が特徴である軽症型である。Ⅱ型は肉離れの典型例であり、筋腱移行部、特に腱膜の損傷が特徴の中等症型である。Ⅲ型は腱性部の断裂や筋腱付着部での裂離損傷といった重症型である (図1)。それぞれのタイプでスポーツ復帰までの期間が異なり、Ⅰ型は2週間以内、Ⅱ型は約6週間、Ⅲ型は5ヶ月以上が目安となる。治療法は保存療法が中心となるが、Ⅲ型に関しては手術療法も考慮する必要がある^{79, 81}。肉離れは重症度が高い場合、競技の継続が困難になるだけでなく、競技復帰までに長期間のリハビリテーションが必要となる。長期間の競技中断はアスリートにとって競技力の低下に繋がると考えられる。

肉離れは上肢、下肢、体幹のどの部位でも発生するが、好発部位は大腿部である⁸⁰。そのため、大腿部肉離れを予防することが特にアスリートにとって重要であると考えられる。大腿部の中では前面に位置する大腿直筋や後面に位置するハムストリングス肉離れの研究が多く、危険因子についての報告も散見される^{20-22, 24, 95}。しかし、肉離れの発生割合について、2001年からプロサッカー選手を対象として、13シーズンのハムストリングス肉離れの発生率を調査した研究では、毎年4%増加していたという報告がある²⁰。肉離れについて、多くの研究が報告されているにも関わらず、大腿部肉離れはいまだに高い発生率であり、予防すべき損傷の一つであると考えられる。

1-2 大腿部肉離れの発生機序

肉離れは活動中の筋が引き伸ばされることにより発生する。筋活動を伴わない筋の伸張や伸張を伴わない筋活動では、筋損傷は生じない^{23, 26}。

大腿部前面に位置する大腿四頭筋は大腿直筋、中間広筋、外側広筋、内側広筋から構成される。その中で、特に大腿直筋に肉離れは好発する^{30, 33}。大腿直筋肉離れでは、ノンコンタクトとオーバーユースによる受傷が多く、発生機序に性差は関係しない¹⁷。大腿直筋は股関節屈曲と膝関節伸展に作用する二関節筋である。ボールを蹴る動作、方向転換動作、スプリント動作といった際に、大腿直筋に遠心性収縮が加わることで肉離れが発生する³⁷。また、過度のストレッチによっても発生する³⁷。

大腿部後面に位置するハムストリングスは、大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋から構成される。大腿二頭筋は大腿二頭筋長頭と大腿二頭筋短頭に分けられる。ハムストリングスの中では、大腿二頭筋に最も多く肉離れが発生する²⁸。Asklingらは走動作中に発生する肉離れを“high-speed running type”とし、ダンスなどのハムストリングスをストレッチしている際に発生する肉離れを“stretching type”と分類している^{8, 9}。短距離、跳躍種目のようにランニングやジャンプなどの動作時に筋に遠心性収縮が加わり生じる肉離れ⁹⁰は“high-speed running type”であると考えられる。一方、大相撲力士、フェンシング、エアロビクス、スキー、水上スキーといった競技では転倒した際に筋が強制牽引されたことによる肉離れ^{89, 90}が報告されており、これらは、“stretching type”であると考えられる。

つまり、大腿直筋、大腿二頭筋ともに肉離れの発生機序は、筋に遠心性収縮が加わる場合と筋がストレッチされた場合の大きく2つのパターンがある。

1-3 スポーツ競技における肉離れ

肉離れについて、2016年にリオデジャネイロで開催されたオリンピックの大会期間中に207ヶ国の11,274人を対象に調査した研究では、捻挫、打撲に次いで肉離れが多く発生していた。さらに、1週間以上の練習・試合に参加できなかった損傷は221件であり、その中で肉離れは65件と最も多かった⁵⁹。つまり、アスリートにおいて、肉離れはパフォーマンスに影響を与えることから、予防や競技復帰のためのリハビリテーションは重要であることが示唆される。

トップアスリートにおける肉離れについて、2001年10月から2008年7月の期間で国立スポーツ科学センターに肉離れで受診したのは、27競技322例であったと報告されている⁸²。さらに、2001年10月から2016年9月までの期間では45競技959件であった⁸¹。近年、肉離れの発生件数およびスポーツ活動中に肉離れが発生した競技は増加傾向である。2001年10月から2016年9月までの15年間に国立スポーツ科学センターで肉離れと診断された959件について、陸上競技が287件と最も多く、次いでサッカー119件、フェンシング90件、レスリング70件の順であった⁸¹。これらの特徴として、医療機関の特徴（地域、対象、医師の専門性など）が関係している^{78,81}が、肉離れは多くの競技で発生していると考えられる。さらに、損傷部については、ハムストリングスが42%で最も多く、次いで下腿三頭筋15%、大腿四頭筋11%の順であり、大腿部の肉離れは53%を占めた⁷⁸。また、19年間に整形外科で肉離れと診断された1,348例を対象とした疫学調査では、下肢が全症例の96.5%を占めた。さらに、ハムストリングスと大腿四頭筋を合わせた大腿部に生じた肉離れの発生割合は64.5%であった⁹⁰。競技別の内訳では、陸上競技、サッカー、野球、アメリカンフットボール、ラグビー、バスケットボールの順に多かった⁹⁰。特に、短距離のスプリントを主体とするボールゲームの特徴として、ハムストリングスと大腿四頭筋の損傷を合わせた大腿部肉離れの発生割合はソフトボール55.0%、ラグビー78.8%、アメリカンフットボール68.4%、野球66.1%、サッカー74.9%であり、平均68.6%であった⁹⁰。武田らの報告はトップアスリートのみを対象とした研究ではないが、奥脇の研究⁷⁸と同様に肉離れは大腿部に多く発生していたことから、損傷部は競技レベルに関係ないことが示唆される。しかし、これらの調査は医療機関を受診したアスリートの結果であり、受診していないアスリートの結果は含まれていない。肉離れは医療機関に受診しなくても治癒することが多いため、医療機関を訪れる機会が少ないと報告されている⁷⁷。そこで、山元らは、大腿部肉離れの実態を把握するために、大腿部肉離れの既往がある大学新入生

アスリートを対象とし、アンケート調査を行った。その結果、整形外科を受診した者は40.6%であり、競技種目は陸上競技 41.6%、サッカー18.1%、野球・ソフトボール 11.9%、ラグビー8.4%の順に多かったことを報告した⁹⁴。これらのことから、大腿部肉離れは陸上競技に最も多いと考えられるが、サッカー、野球、アメリカンフットボールといったボールを用いた競技で発生していることが示唆される。

大腿部肉離れが問題となる競技は多いことから、大腿部肉離れの損傷予防をすることが急務であると考えられる。しかし、全ての競技で大腿部肉離れの発生割合は明らかにされていない。肉離れに影響を与える要因の一つに競技特性があることから、競技によって、肉離れの発生部位や頻度は異なることが考えられる。そのため、外傷・障害調査を行い、各競技における大腿部肉離れの発生割合を把握することが損傷予防にとって重要である。

1-4 第2部の研究目的

肉離れで2001年10月から2008年7月までに国立スポーツ科学センターを受診したと報告がある競技種目27競技中26競技(サッカー¹⁹, 陸上競技⁷⁴, レスリング⁵², 体操¹⁸, フェンシング⁵³, 水泳⁷², ラグビー¹³, ウェイトリフティング¹, スキー⁸⁸, バドミントン⁹³, バレーボール⁶³, ソフトボール⁵⁸, ハンドボール⁹², 柔道⁴, 野球⁵⁵, テニス⁷⁶, ボブスレー⁶⁰, スケルトン⁶⁰, 卓球⁶¹, ホッケー⁴⁶, トライアスロン⁸⁴, カヌー⁸⁷, 近代五種³⁸, ソフトテニス⁹¹, バスケットボール⁸⁶, スピードスケート⁸⁵)における外傷・障害についての報告は散見される。しかし, 27競技中セパタクローのみ外傷・障害についての報告はみられない。セパタクローにおいて, 肉離れが発生しているにも関わらず, 肉離れの発生割合や損傷の多い部位はいまだに明らかにされていないことが現状である。セパタクローはバレーボールに似たネット型競技であるが, バレーボールと異なり, 選手はサッカーのようにボールを足でコントロールすることが大きな違いである。セパタクローはサッカー, バレーボール, 野球, バドミントンといった要素を含む競技である²。そのため, サッカーといった競技と同様に大腿部肉離れの発生割合が特に高いと推察される。しかし, セパタクローでは, 陸上競技やサッカーのように大腿部肉離れが問題となっているかは明らかにされていない。そのため, 肉離れを生じることが報告される競技の中で, いまだに外傷・障害の報告がみられないセパタクローにおいて, 大腿部肉離れの発生割合を明らかにすることは, 大腿部肉離れの疫学調査のために必要であると考えられる。また, 日本のセパタクローは2014年に韓国の仁川で開催された第17回アジア競技大会において, 男女ともに銅メダルを獲得しており, 競技力は高い。

そのため, 第2章では, ボールゲームの一つであるセパタクローの外傷・障害調査を行い, 大腿部肉離れの発生割合を明らかにすることを目的とした。

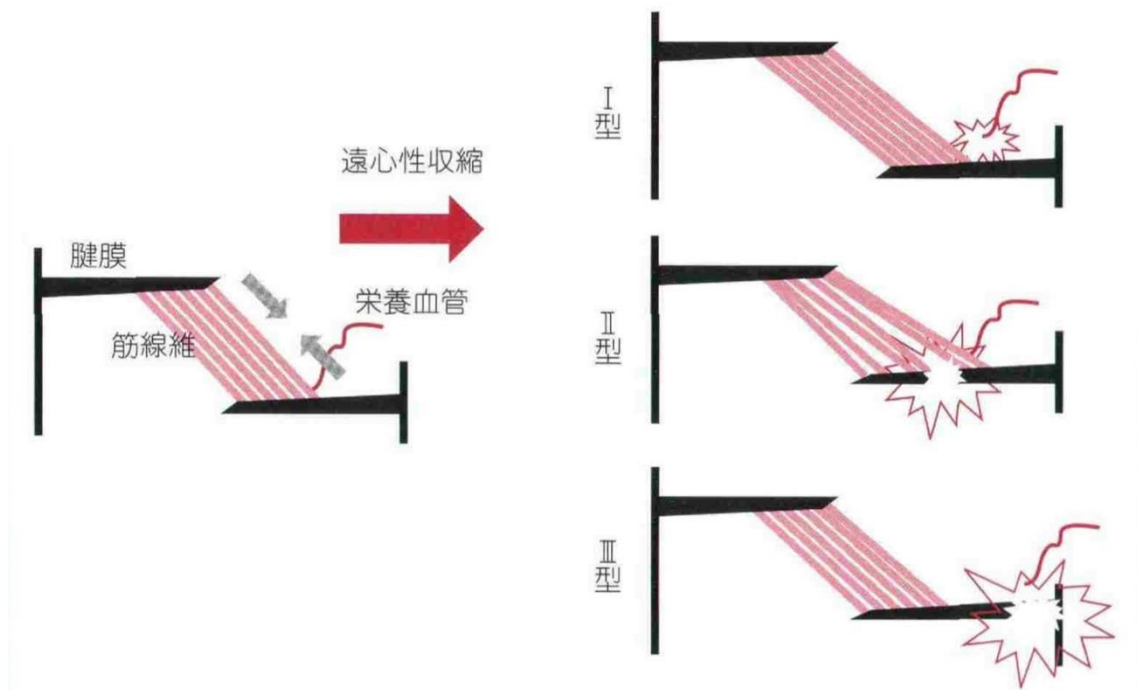


図 1. MRI 所見から推察した“肉離れ”の病態

I 型：筋腱移行部の血管損傷のみ.

II 型：筋腱移行部損傷，とくに腱膜の損傷.

III 型：腱性部（付着部）の完全断裂.

奥脇.著，手術後の再受傷・再損傷メカニズムの解明 肉離れ，P396 の図 1 より転載.

第2章 大学セパタクロー選手における大腿部肉離れ発生とその要因

2-1 背景

セパタクローは東南アジア発祥のスポーツ競技である³⁴。“セパ：Sepak”はマレー語で“蹴る”の意味を表し，“タクロー：Takraw”はタイ語で“ボール”の意味を表す。

セパタクローはバレーボールに似たネット型競技であるが、バレーボールと異なり、選手はボールを足でコントロールすることが大きな違いである。セパタクローのコートはバドミントンのコート（縦，13.4m；幅，6.1m）と同様の大きさである。ネットの高さについて、男子は1.52mであり、女子は1.42mである。セパタクローは3人で“レグ”と呼ぶチームを組む。ポジションはストライカー、フィダー、サーバーと選手のポジションはそれぞれ固定されており、バレーボールのようにローテーションはしない。

セパタクローはサッカー、バレーボール、野球、バドミントンといった要素を含む競技である² (図2)。

セパタクローのスパイクはアクロバティックである (図3)。スパイクは2種類あり、1つはシザーススパイクやサンバックスパイクと呼ばれる。シザーススパイクはサッカーのバイシクルキックに似たキックである。もう1つはローリングスパイクと呼ばれる。ローリングスパイクは後方宙返りをしながらボールを蹴るスパイクである。このようにダイナミックでアクロバティックなスパイクを行うため、セパタクローは外傷・障害が多いと考えられる。特に大腿部の肉離れであるハムストリングスの肉離れが多いと考えられる。しかし、セパタクローにおける外傷・障害調査は行われておらず、大腿部肉離れの発生割合は明らかにされていないのが現状である。そのため、本研究の目的は大学セパタクロー選手を対象とし、外傷・障害調査から大腿部肉離れの発生割合を明らかにすることとした。

2-2 方法

2-2-1 被験者

2つの大学セパタクローチームに所属する77名（男子選手43名；年齢， 19.9 ± 1.5 歳；身長， 171.4 ± 5.3 cm；体重， 62.3 ± 5.6 kg；競技歴， 1.7 ± 1.3 年；女子選手34名；年齢， 19.9 ± 1.1 歳；身長， 159.8 ± 5.2 cm；体重， 53.2 ± 5.8 kg；競技歴， 1.5 ± 1.0 年）を対象とした。なお，調査において対象者には事前に調査内容を十分に説明し，承諾を得た。本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認（第013-H44号）を得て実施した。

2-2-2 アンケート調査および聞き取り調査

アンケート調査により身体特性について回答を得た。聞き取り調査により外傷・障害についての回答を得た。全ての聞き取り調査はセパタクロー競技に精通し，医療資格を有する1名により行われた。

本研究における外傷・障害の既往は「過去1年以内にセパタクローの練習および試合中に発生した外傷・障害とし，1日以上練習および試合を休まなければならなかったもの」と定義した^{5,36}。本研究は後ろ向き調査であることから，外傷・障害調査の信頼性を維持するため，過去1年以内の外傷・障害を対象に調査をした²⁵。また，利き足はスパイクおよびサーブをする際にボールを蹴る足とした。

外傷・障害の部位および疾患の分類は，先行研究を参考とし，修正を加えて用いた^{31,32,35}。外傷・障害部位は，顔面，肩部，手部，背部，股関節および単径部，大腿部，膝部，下腿部，足部，足・趾の10部位に分類をした。外傷・障害の種類は，骨折，腱損傷／半月板損傷，捻挫，肉離れ，打撲，裂傷，その他とした。また外傷・障害の発生機序についても調査した。

2-3 結果

聞き取り調査の結果、48件の外傷・障害が報告された（表1）。外傷・障害の発生部位は、大腿部が最も多かった。外傷・障害の種類は、肉離れが最も多い結果であった。

外傷・障害の種類における“その他”の項目には、疲労骨折、神経痛、有痛性外脛骨などが含まれていた。

外傷・障害の発生機序では、スパイク動作が最も多かった。“その他”の項目は、ウォーミングアップ、ストレッチ、リフティング動作が含まれていた。

大腿部の肉離れは48件中16件（33.3%）であり、そのうち15件がハムストリングス肉離れで、1件が大腿直筋の肉離れであった。全ての外傷・障害の中で最も多くみられたのは、ハムストリングス肉離れであった。全てのハムストリングス肉離れは利き足に生じており、スパイク動作が受傷原因であった。

2-4 考察

本研究の結果では、セパタクローの競技中に発生する外傷・障害のうち、88%が下肢にみられた。特に損傷部位は大腿部が多く、外傷・障害としては肉離れが最も多いことが明らかになった。セパタクローは、サッカー、バレーボール、野球、バドミントンといった要素を含む競技である²。そのため、はじめにサッカーにおける外傷・障害の発生割合と比較し、検討をした。サッカーの外傷・障害を調査した研究では、肉離れ(37%)と捻挫(19%)が多かったと報告されている。また、下肢の損傷が87%であり、最も多くみられた損傷部位は大腿部であった³¹。そのため、セパタクローでみられる外傷・障害はサッカーと同様の傾向であると考えられる。セパタクローでの外傷・障害の発生機序はスパイク動作であったことから、脚でボールをコントロールするという競技特性が外傷・障害の発生割合に影響を与えると考える。

本研究では、大腿部肉離れの発生割合は33.3%であった。さらに15名(19.5%)の選手がハムストリングス肉離れの既往を認めた。サッカーの外傷・障害調査では、ハムストリングス肉離れの発生割合は約12%であった^{7,31}。また、オーストラリアンフットボールの外傷・障害調査では、ハムストリングス肉離れが最も多く発生していた²⁴。過去1年間でハムストリングス肉離れの発生割合は17%(99名中17名)であったという報告もみられる⁴⁹。さらに、20歳以下の選手でのハムストリングス肉離れの発生割合は7%(101名中7名)であった²⁴。従って、セパタクローにおけるハムストリングス肉離れの発生割合は他の競技と比較して高い傾向であることが示唆される。さらに、受傷原因はアクロバティックなスパイク動作であった。しかし、ラグビーでは、キック動作によるハムストリングス肉離れは少ないという報告¹³があり、キック動作でハムストリングス肉離れが生じるということはセパタクロー競技の特徴であると考えられる。

本研究の限界として、後ろ向き調査ということがあげられる。後ろ向き調査であるため、外傷・障害の重症度のデータを得られていない。そのため、今後は前向き調査を行う必要がある。また、本研究は日本人選手のみを対象としていることから、本研究の結果は日本人選手に限定されることが考えられる。しかし、日本の競技力は高いこと、また、本研究の被験者のうち、5名のナショナルレベルの選手が含まれていたことから、貴重なデータであると考えられる。

2-5 結論

本研究はセパタクローを対象とした初の外傷・障害調査である。その結果、セパタクローにおいて、大腿部の肉離れが最も多く発生しており、特にハムストリングス肉離れが最も多く発生していたことが明らかとなった。セパタクローは大腿部肉離れが多く、さらに、そのほとんどがハムストリングスであったことから、ハムストリングス肉離れの予防について検討していくことが重要であると示唆された。本研究の結果はセパタクローの外傷・障害予防を行っていくための貴重なデータであると考えられる。



図 2. セパタクロー競技の試合中の様子

手前の選手がスパイクを打っており，相手選手が足でブロックするためにジャンプしている場面である．



図 3. 試合中のスパイクの様子

シザーススパイクは空中で左右の足を入れ替えながらボールを蹴る（左）。ローリングスパイクは空中で一回転しながらボールを蹴る（右）。

表 1. 外傷・障害調査の結果

	Male	Female	Total
Injured body part			
Face	1 (3.8%)	0 (0.0%)	1 (2.1%)
Shoulder	1 (3.8%)	0 (0.0%)	1 (2.1%)
Wrist	2 (7.7%)	0 (0.0%)	2 (4.2%)
Lower back	2 (7.7%)	0 (0.0%)	2 (4.2%)
Hip and groin	1 (3.8%)	1 (4.5%)	2 (4.2%)
Thigh	9 (34.6%)	8 (36.4%)	17 (35.4%)
Knee	4 (15.4%)	3 (13.6%)	7 (14.6%)
Lower leg	1 (3.8%)	3 (13.6%)	4 (8.3%)
Ankle	1 (3.8%)	5 (22.7%)	6 (12.5%)
Foot	4 (15.4%)	2 (9.1%)	6 (12.5%)
Type of injury			
Fracture	2 (7.7%)	1 (4.5%)	3 (6.3%)
Tendon injury/meniscus lesion	4 (15.4%)	3 (13.6%)	7 (14.6%)
Sprain	6 (23.1%)	5 (22.7%)	11 (22.9%)
Strain	9 (34.6%)	7 (31.8%)	16 (33.3%)
Contusion	1 (3.8%)	1 (4.5%)	2 (4.2%)
Laceration	1 (3.8%)	1 (4.5%)	2 (4.2%)
Others	3 (11.5%)	4 (18.2%)	7 (14.6%)
Mechanism			
Spike	20 (76.9%)	13 (59.1%)	33 (68.8%)
Block	0 (0.0%)	1 (4.5%)	1 (2.1%)
Serve	1 (3.8%)	0 (0.0%)	1 (2.1%)
Reception	0 (0.0%)	1 (4.5%)	1 (2.1%)
Others	5 (19.2%)	7 (31.8%)	12 (25.0%)

第3部 肉離れ既往が大腿直筋の区画的な神経筋活動に与える影響

第1章 序論

1-1 諸言

肉離れはアスリートに多くみられる損傷である。特に大腿二頭筋や大腿直筋といった大腿部に多いことが報告されている⁹⁰。大腿部肉離れは特に陸上競技で多く発生するが、サッカー、アメリカンフットボール、野球といったボールゲームでも発生割合が高い⁸¹。サッカー、バレーボール、野球、バドミントンといった要素を含むセパタクロも、他のボールゲームと同様に大腿部肉離れが最も多かった。そのため、スポーツ競技の中でも特に陸上競技のみならずボールゲームは、大腿部肉離れの予防について検討することが重要であると考えられる。また、肉離れの疫学として、肉離れの既往歴が危険因子として報告されている。肉離れの既往歴が危険因子となることはハムストリングス、大腿四頭筋ともに報告されている^{21, 50, 51}。初回の肉離れによって損傷部に何かしらの変化が生じるため、既往歴が危険因子となると推察される。大腿直筋肉離れ既往のある献体を解剖した研究では、損傷部は、変性した線維組織と血管に富み、脂肪分を含む結合組織に被われていたことを明らかにした³⁰。肉離れにより、筋組織が正常に治癒しない場合もあることが推察される。さらに、近年、肉離れによる神経損傷の可能性についての報告も散見される^{39-41, 48}。これらのことから、肉離れは、筋組織のみならず神経機能にも影響を与えることが推察される。しかし、肉離れが筋活動に及ぼす影響については明らかにされていない。そのため、肉離れと筋活動についての関係を明らかにすることは、肉離れの再発予防やリハビリテーションの発展のための基礎研究になると考える。

健常者の神経筋活動について、多チャンネル表面筋電図 (SEMG) を用いた研究により、大腿二頭筋よりも大腿直筋で多くの研究が行われている⁶⁴⁻⁶⁹。肉離れはハムストリングスに最も多く発生する^{17, 81, 90}。しかし、大腿四頭筋も肉離れの発生割合は高く、ハムストリングスと大腿四頭筋が下肢で遭遇することが多い肉離れである^{17, 78, 90}。さらに、大腿四頭筋の中では大腿直筋が最も肉離れが多いと報告されている^{30, 33, 37}。そのため、本研究は神経筋活動が明らかにされており、肉離れの発生割合が高い大腿直筋を対象とした。

1-2 大腿直筋の解剖

大腿直筋は中間広筋，内側広筋，外側広筋とともに大腿四頭筋を構成する．大腿直筋は大腿四頭筋の中で唯一の二関節筋であり，股関節屈曲と膝関節伸展に作用する．

大腿直筋は起始が2つある二頭筋である．その起始は下前腸骨棘と臼蓋上縁である．下前腸骨棘からは **direct head** がおこる．**direct head** は幅広い腱膜となり，表層の近位 1/3 まで到達する．臼蓋上縁からは **indirect head** がおこり，**direct head** の深層を走行する．**indirect head** は近位部で捻じれながら筋内腱を形成し，遠位 1/3 まで到達する^{29,30}．停止腱は中間広筋，内側広筋，外側広筋と共同腱となり，脛骨粗面に停止する（図 4）．

筋線維について，**direct head** からの筋線維は半羽状構造であるのに対し，**indirect head** からの筋線維は羽状構造である．そして，大腿直筋の筋線維はタイプ II 線維を多く含む³³．このように，大腿直筋の近位部は複雑な構造を呈している．

大腿直筋の神経支配は大腿神経である．大腿直筋を支配する運動枝は大腿神経の本幹から鼠径靭帯の約 2 横指下で分岐する．さらに，運動枝が大腿直筋の内側縁に到達する前に 2 本の枝に分かれる．1 本目の枝は分岐後に大腿直筋の近位 1/3 付近で大腿直筋の背面から筋に入り込む．もう一方の枝は大腿直筋の内側縁を下方に進み筋に入り込む⁶²．つまり，大腿直筋の運動枝は 2 本あることが明らかにされている．

大腿直筋は同一筋内であっても筋線維の構造が部位により異なるだけでなく，2 本の神経枝によって支配されるという解剖学的に複雑な構造をしている筋である．

1-3 大腿直筋の区画的な神経筋活動

解剖学的に特異的な構造を有する大腿直筋は、その神経筋活動についても研究されている。Watanabeらは多チャンネルSEMGを用いて、大腿直筋は区画的な神経筋活動がみられることを報告した⁶⁴。大腿直筋の作用は股関節屈曲と膝関節伸展であるが、膝関節伸展では筋発揮の増加に伴い、大腿直筋の全部位で運動単位の動員や発火頻度が大きくなる。そのため、大腿直筋の全部位が筋発揮に貢献する。一方、股関節屈曲では、筋発揮の増加により、大腿直筋の近位部で運動単位の動員や発火頻度が大きくなる。そのため、大腿直筋の近位1/3が筋発揮に貢献する(図5)。大腿直筋は、膝関節伸展と股関節屈曲で同一筋内であっても部位により筋発揮に貢献する割合が異なるといった部位依存的な神経筋活動がみられる。また、股関節屈曲で近位部の貢献割合が大きくなるのは最大筋力の60%以上であることが報告されている^{64,96}(図5)。この区画的な神経筋活動は歩行やペダリング動作でも同様の傾向があることが確認されている^{66,67,69}。さらに、大腿直筋を対象とした疲労実験も行われており、大腿直筋の近位部は他部位と比較して、疲労しやすいという疲労特性があることが明らかにされた⁶⁵(図6)。

複雑な構造をしており、区画的な神経筋活動を有することが明らかとされた大腿直筋の近位部は、肉離れの好発部位である⁵⁴。そのため、大腿直筋肉離れが区画的な神経筋活動に影響を与える可能性があると考えられる。

1-4 大腿直筋の肉離れ

大腿直筋は大腿四頭筋の中で最も肉離れが多く発生する筋である^{30, 33, 37}。大腿直筋に発生率が高い要因の一つとして、大腿四頭筋の中で外側広筋、内側広筋、中間広筋は膝関節の運動のみに作用する単関節筋であるのに対し、大腿直筋は股関節と膝関節の運動に作用する二関節筋であることが影響していると考えられている⁵⁴。

大腿直筋肉離れの危険因子の内因として、大腿直筋肉離れの既往があること、身長が低いこと、利き足、柔軟性が低いことが報告されている^{19, 45, 51, 71}。肉離れの発生機序は、スプリント、急激な方向転換、ジャンプ、キック動作などにより、大腿直筋に遠心性収縮が加わった場合である^{15, 70}。また、過度のストレッチによっても発生する³⁷。肉離れが生じた際、選手は大腿部前面に鋭い痛みを感じるが、疼痛を感じても試合や練習を続けられる場合もある³⁷。

損傷部について、約60%が大腿直筋の近位1/3を含む損傷である。また、遠位1/3の損傷は10%であるが重症度が高い⁵⁴。臨床では、大腿直筋肉離れの患者は大腿部の筋腹に痛みを訴えることが多い。このことからHasselmannらは大腿直筋肉離れの既往を有する献体を解剖した結果、大腿直筋の筋内腱で肉離れが生じていることを明らかにした³⁰。さらに、損傷部の筋内腱を病理解剖した結果、円柱状の形をした線維組織が筋の長軸方向にみられ、筋内腱を覆っていた。この線維組織には中程度の数の慢性炎症細胞が存在していた。また、線維組織内は血管に富んだ緩く変性した結合組織であった。腱と筋組織の間に介在する線維組織は正常な筋線維だけでなく、変性した筋線維や再生した筋線維も付着していた³⁰。Hasselmannらの研究により、大腿直筋肉離れは遠位の筋腱移行部だけではなく、筋内腱の筋腱移行部でも生じることが明らかとなった。さらに、この研究により筋内腱の筋腱移行部は正常に治癒をしない場合もあることが明らかにされた。

筋内腱など的大腿直筋の筋内で生じる肉離れは正確な診断が難しく、正確な診断のためには磁気共鳴画像装置(MRI)を用いる。大腿直筋肉離れはGrade 1~3の3段階で評価する^{12, 44}。Grade 1は、大腿直筋に機能的な障害が生じない程度の微細な損傷である。MRIでは浮腫が観察される。間質内の出血や浮腫と一致する筋内腱の周囲に、信号変化が鳥の羽のようにみえる“feathery appearance”が観察される(図7)。Grade 2は、筋力低下や可動域の制限を伴う部分断裂である。MRIでは肉離れの範囲や経過により、筋腱移行部の部分断裂を確認することができる。急性期では、部分断裂した筋腱移行部を滲出液や血液が取り囲んでいることを確認できる。また、体軸断面のMRIで“Bull's eye sign”がみら

れる (図 8). Grade 3 は, 完全断裂であるが, 近位部で生じることは稀である. 筋発揮は不能となり, 可動域の大幅な減少を伴う. MRI では筋内腱の筋腱移行部で血腫の有無に関わらず完全断裂を確認することができる (図 9).

大腿直筋肉離れは慢性または治癒した場合であっても, MRI において, 筋内腱に嚢胞がみられる場合がある¹² (図 10). さらに, 大腿直筋肉離れは筋膜での損傷も報告されている⁴⁴. 筋膜での損傷の発生率は筋内腱の損傷より少なく, 超音波を用いた検査では偽陰性となることが多い. 筋膜の損傷は近位から中間部にかけて生じる. MRI では筋線維の断裂と筋膜に接する損傷部で浮腫がみられる⁴⁴ (図 11).

大腿直筋肉離れの治療は非観血的に行われることが多い. 肉離れの既往歴は再受傷のリスクを増加させるが, 症状が慢性的に残存することは少ない⁵¹. しかし, 筋内腱に生じた肉離れについて, Wittstein らは非観血的な治療を行ったが症状が改善せず, 観血的に治療を行った 5 症例について報告した. それらの症例では, 術中に大腿直筋の支配神経である大腿神経に電気刺激を加えて筋収縮させると, 損傷した筋内腱よりも遠位が膨隆し, 損傷部は陥凹したことが確認された. さらに, 筋内腱が嚢胞で覆われていたことも確認された. 手術により損傷部を除去することで, 症状は明らかに改善した. しかし, 高い競技レベルの選手は症状が改善し, 競技復帰ができて, 以前の競技レベルで競技することができない症例もあることを Wittstein らは報告した⁷⁰. 筋内腱で生じる大腿直筋肉離れは, 他の部位で生じる肉離れより重症化する可能性がある⁷⁰. しかし, 筋内腱の損傷が重症化する原因については明らかにされていない. さらに, 競技に復帰するためには, リハビリテーションが必要であるが, 大腿直筋肉離れでは, 競技復帰までのリハビリテーションは確立されていない^{15, 37}. 臨床的には, 膝関節の可動域の改善, 疼痛の消失, 筋力の回復, フィールドテスト等を行いながら競技復帰をさせる. 損傷部位と競技復帰までの期間について, 筋内腱で生じる肉離れは筋膜で生じる肉離れよりも競技復帰までの期間が長くなる傾向がある¹⁵. さらに, 筋内腱で生じる肉離れについて, 大腿直筋が縫工筋と接する位置で近位と遠位に分けて競技復帰までの期間を調査した研究では, 近位部の損傷は遠位部の損傷と比較し, 復帰までに期間を要することが明らかにされた. 近位部の損傷では, 損傷の長さが 4cm であった場合, 競技復帰までの期間は 45.1 日であり, 損傷が 1cm 長くなると復帰までの期間が 5.3 日長くなった. 遠位部の損傷では, 損傷の長さが 3.9cm であった場合, 競技復帰までの期間は 32.9 日であり, 損傷の長さが 1cm 長くなると競技復帰までの期間が 3.4 日長くなった. 近位と遠位を合わせた全症例で検討すると, 損傷の長さが

4.2cm であった場合、競技復帰までの期間は 39.1 日であり、損傷の長さが 1cm 長くなると 4.2 日長くなった¹⁰⁾。

大腿直筋肉離れにおいて、筋内腱や近位部の損傷は競技復帰までのリハビリテーションが長期化するが、その原因は明らかとされていない。その要因を明らかにすることは、リハビリテーションの構築のために重要であると考えられる。

1-5 肉離れにおける神経損傷について

近年、肉離れにおける神経損傷の可能性について注目されている。ラットを対象とした研究では、伸張性筋収縮により神経が損傷することが明らかにされている^{40,41}。ヒトを対象とした研究では、ハムストリングスである大腿二頭筋肉離れの既往を認めると、競技復帰をしていても膝関節屈曲筋力のピークトルクおよび筋力発揮時の SEMG 信号が低値を示すことが報告されている⁴⁸。さらに、Kouzaki らはハムストリングス肉離れの既往を認めるスポーツ選手を対象に、ハムストリングスの神経伝導速度を比較した。その結果、既往を認めた脚は、既往のないコントロールの脚より有意に低値を示したことを報告した³⁹。

また、大腿直筋肉離れの既往があり、陥凹を認めるアスリート 1 名を調査した研究では、患側と健側を比較し、等尺性膝関節伸展筋力において約 10% の差異を認め、等速性膝関節伸展筋力においても 5% 程度の差異を認めた。その際の SEMG 信号も患側と健側で異なる波形であったという報告がみられる⁷⁵。これらの研究より、肉離れによって筋実質の損傷だけでなく、神経も損傷をしていることが考えられ、さらに、肉離れから時間が経過して競技復帰をしていても神経筋機能は回復していないことが示唆される。

大腿部で肉離れの多い大腿二頭筋と大腿直筋はともに二関節筋であるが、神経筋機能が異なる。大腿二頭筋は股関節伸展と膝関節屈曲において、部位に関わらず同様に筋発揮に貢献する⁶⁸。一方、大腿直筋は膝関節伸展では大腿直筋の全部位が筋発揮に貢献し、股関節屈曲では近位部が他部位より筋発揮に貢献するという部位依存的な神経筋活動がみられ⁶⁴、大腿二頭筋より神経筋機能は複雑である。さらに、大腿直筋の近位部は肉離れの好発部位であることから、特に肉離れの影響を受ける可能性が高いと考えられる。つまり、重症化やリハビリテーションが長期化する理由として、神経筋機能が肉離れの影響を受ける可能性が考えられる。しかし、大腿直筋肉離れについて、区画的な神経筋活動を考慮した研究はみられない。そのため、大腿直筋肉離れが神経筋活動に与える影響を明らかにすることは、リハビリテーションの発展の一助となると考える。

1-6 第3部の研究目的

大腿直筋肉離れを対象とし、多チャンネル SEMG を用いて肉離れが区画的な神経筋活動に与える影響を調査し、リハビリテーションの提案に向けた新たな知見を得ることとした。

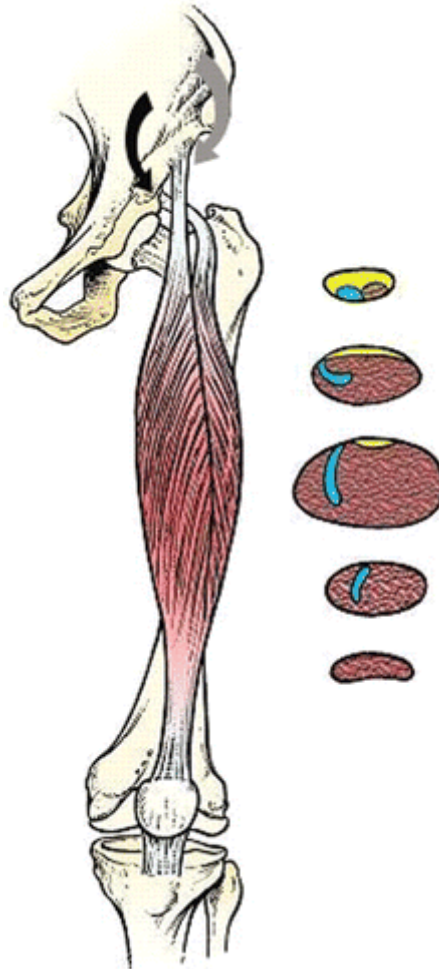


図 4. 大腿直筋の解剖について

下前腸骨棘（灰色の矢印）から起こる direct head は前面に広がる（黄色）. 白蓋上縁（黒の矢印）から起こる indirect head は筋腹に入り込む（水色）.

Gyftopoulos S et al.著, Normal Anatomy and Strains of the Deep Musculotendinous Junction of the Proximal Rectus Femoris: MRI Features, W183 の Fig. 1 より転載.

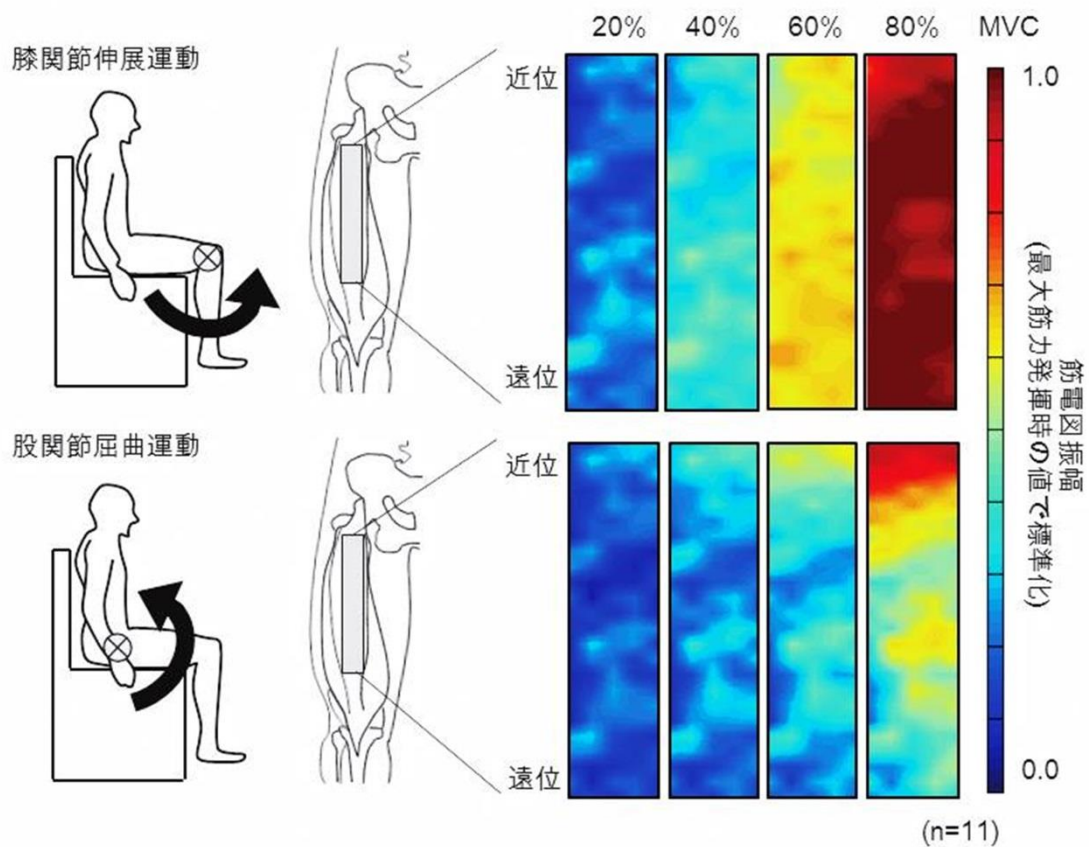


図 5. カラーマップで示した筋力発揮中の大腿直筋の Root Mean Square 値

等尺性膝関節伸展（上）と股関節屈曲（下）の筋力発揮時の Root Mean Square 値をカラーマップで示した。膝関節伸展では、筋発揮が大きくなるにつれ、大腿直筋の全部位の筋活動が大きくなるのに対し、股関節屈曲では、筋発揮が大きくなると近位の筋活動が特に大きくなっている。

渡邊航平著，大腿直筋における区画的な神経筋活動，P4 の図 2 より転載。

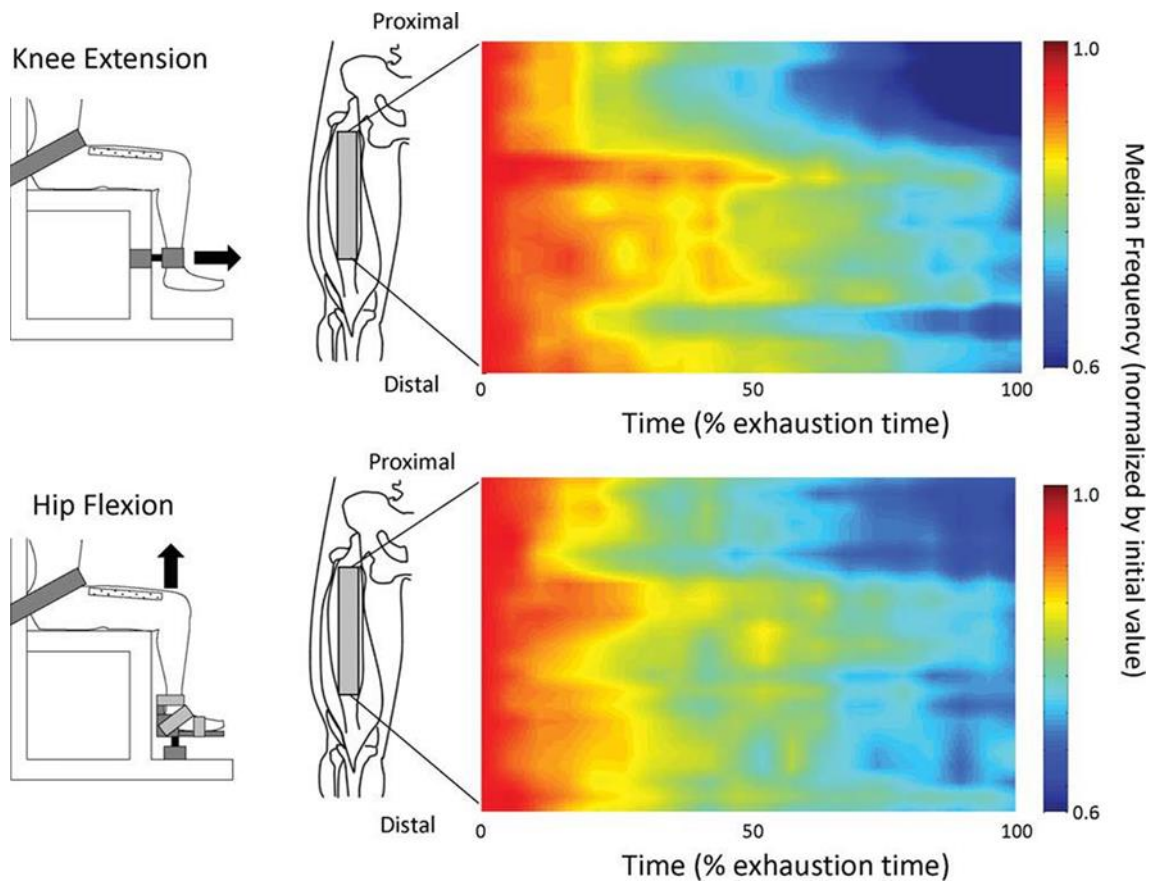


図 6. カラーマップで示した疲労試技中の大腿直筋の Median Frequency 値
 等尺性膝関節伸展（上）と股関節屈曲（下）を最大筋力の 50%でそれぞれ筋発揮をさせた
 際の大腿直筋の筋疲労の様子をカラーマップで示した．時間の経過により近位部の
 Median Frequency 値の低下がみられる．

Watanabe et al.著, Region-specific myoelectric manifestations of fatigue in human
 rectus femoris muscle, P229 の Fig. 3 より転載.



図 7. Grade 1 の大腿直筋肉離れの T2 強調画像 (冠状断面)

筋内腱周囲にみられる信号変化は鳥の羽のように見えることから“feathery appearance”と呼ばれる。

M Bordalo-Rodrigues et al. 著, MR Imaging of the Proximal Rectus Femoris Musculotendinous Unit, P722 の Fig. 9 より転載.

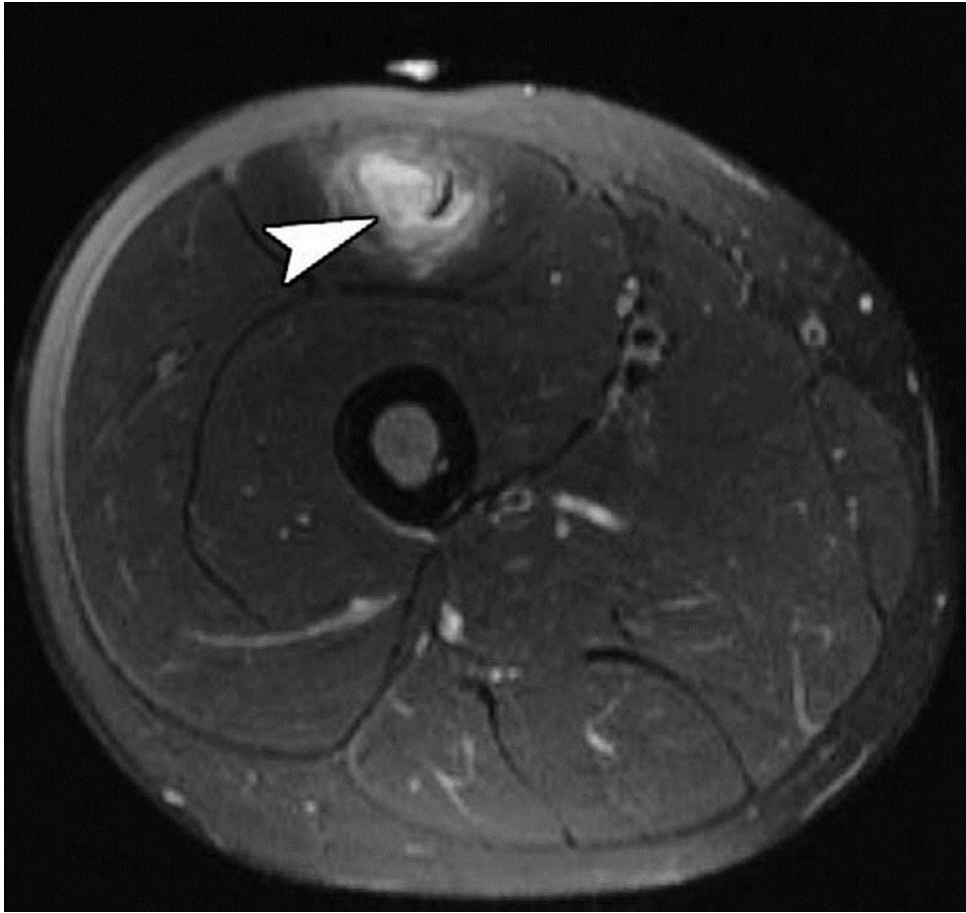


図 8. Grade 2 の大腿直筋肉離れの脂肪抑制 T2 強調画像（体軸断面）

筋内腱周囲に浮腫を観察することができる（矢印）.

M Bordalo-Rodrigues et al. 著, MR Imaging of the Proximal Rectus Femoris Musculotendinous Unit, P722 の Fig. 10 より転載.

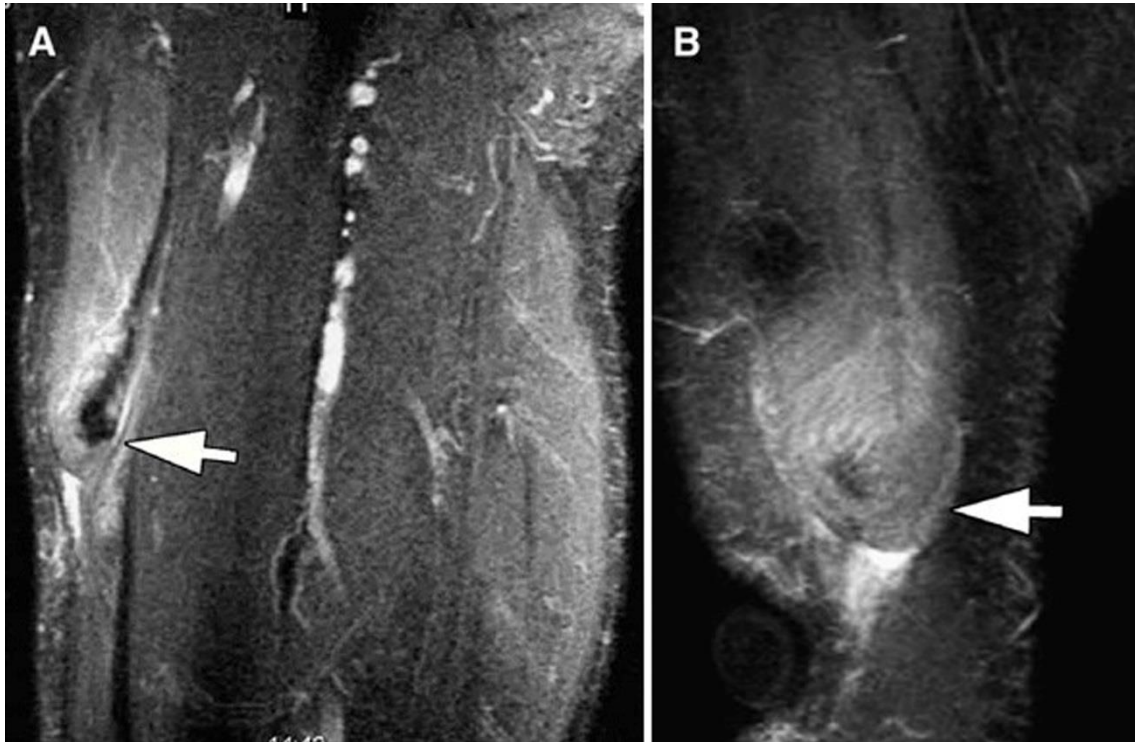


図 9. Grade 3 の大腿直筋肉離れの脂肪抑制 T2 強調画像の矢状断面 (A) と環状断面 (B) 筋腱移行部の完全断裂であり，断裂部は陥没している (矢印).

M Bordalo-Rodrigues et al. 著，MR Imaging of the Proximal Rectus Femoris Musculotendinous Unit, P722 の Fig. 11 より転載.

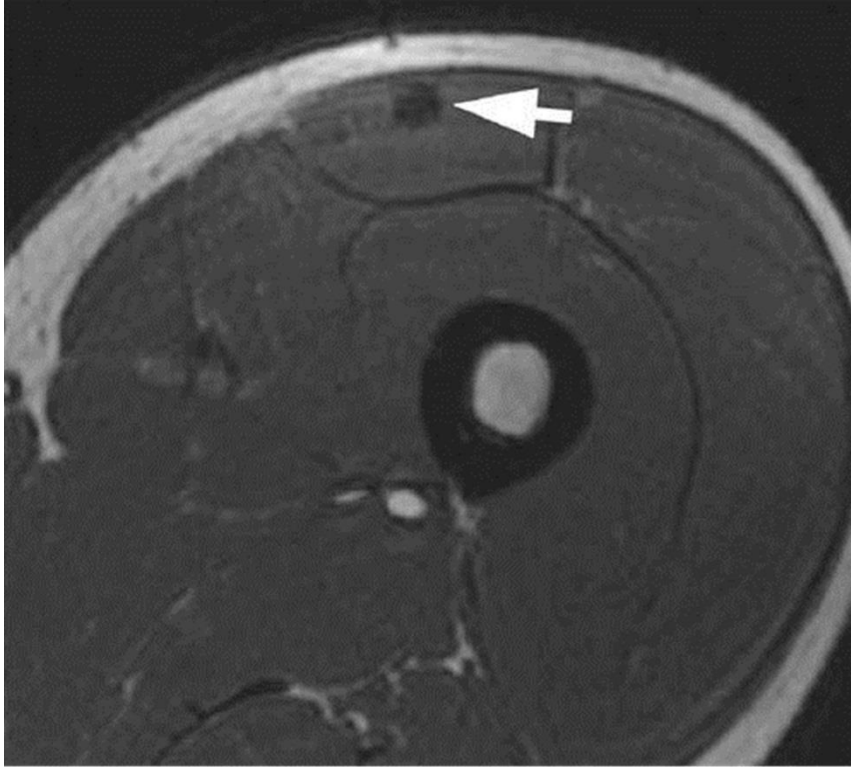


図 10. 大腿直筋肉離れの T1 強調画像 (体軸断面)

大腿直筋肉離れにより，筋内腱に嚢胞が形成されているのを確認できる (矢印).

M Bordalo-Rodrigues et al. 著，MR Imaging of the Proximal Rectus Femoris Musculotendinous Unit, P722 の Fig. 12 より転載.

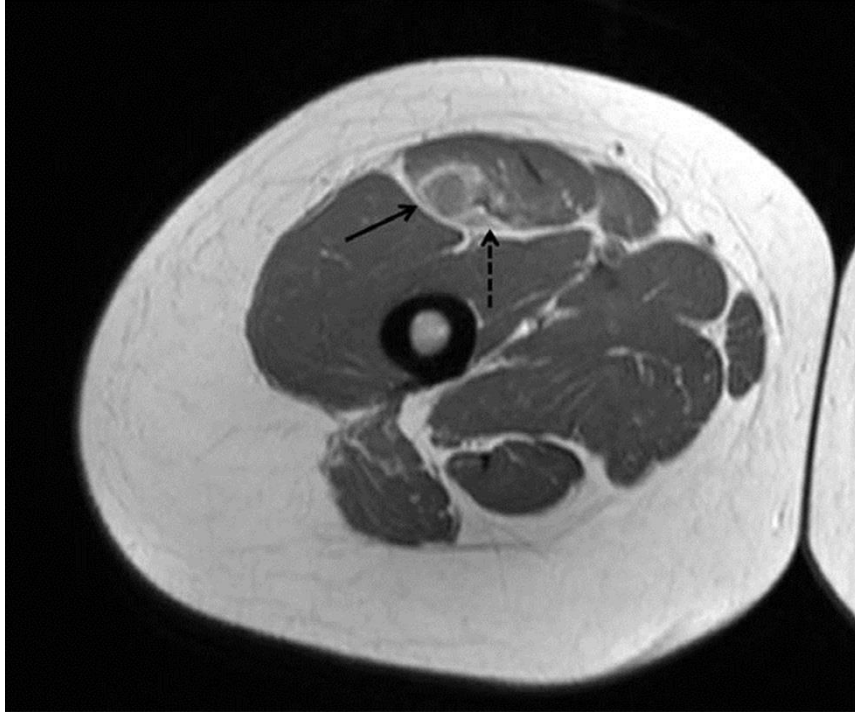


図 11. 大腿直筋肉離れのプロトン密度強調像

大腿直筋の後外側の筋膜に血腫（実線の矢印）および筋膜の損傷がみられる（点線の矢印）.

C.A. Mariluis et al.著, Muscle injuries of the rectus femoris muscle. MR update, P187
の Fig.9 より転載.

第2章 慢性の筋内腱肉離れが大腿直筋の区画的な神経筋活動に及ぼす影響について

2-1 背景

大腿直筋の起始は2つあり、一つは下前腸骨棘から **direct head** が起始をする。もう一つは寛骨臼から **indirect head** が起始をする。**Direct head** は幅広い起始腱膜となり、大腿直筋表面の近位 1/3 まで達する。一方、**indirect head** は起始腱膜の下を捻じれながら走行し、筋内腱となり、遠位 1/3 まで到達する³⁰。このように大腿直筋の近位部は解剖学的に複雑な構造であり、筋腱移行部が起始から遠位 1/3 まで存在する。この複雑な構造が近位の腱に肉離れが多く生じる一因として考えられている³⁰。

さらに、大腿直筋は解剖学的に複雑な構造をしているだけでなく、神経筋機能についても特異的である。大腿直筋は膝関節伸展と股関節屈曲に作用する二関節筋であり、膝関節伸展では、大腿直筋の全部位が筋発揮に貢献するが、股関節屈曲では近位 1/3 が筋発揮に貢献するという部位依存的な神経筋活動がみられる⁶⁴。そのため、大腿直筋の近位部は解剖学的にも神経生理学的にも複雑であると言える。そして、大腿直筋の近位部は大腿直筋肉離れの好発部位である¹⁵。

大腿直筋の肉離れは、筋膜や **indirect head** から生じる筋内腱の筋腱移行部で生じる¹²。特に、筋内腱で生じる肉離れについての報告は散見される^{10, 15, 30, 33, 70}。筋内腱の肉離れは、リハビリテーションの長期化や重症化することが報告されており、重症化すると手術をしても元の競技レベルまで回復しない場合がある⁷⁰。しかし、筋内腱の肉離れがリハビリテーションに長期間を要すことや重症化する原因は明らかとされていないのが現状である。近年、肉離れにより神経が損傷する可能性が報告されている^{39-41, 48}。そのため、リハビリテーションの長期化や重症化の原因として、神経筋機能が関係している可能性が考えられる。筋実質のみならず大腿直筋の区画的な神経筋活動が影響を受けることで、回復まで時間がかかると考える。肉離れから競技復帰をしても、神経伝導速度は回復していないという報告³⁹があり、肉離れのリハビリテーションを考える上で神経も考慮する必要があると考える。そこで、本研究の目的として、損傷部を筋内腱に統一して、肉離れが区画的な神経筋活動に影響を与えるかを明らかにすることとした。本研究の仮説として、筋内腱に生じる肉離れは神経筋機能に与える影響は大きく、区画的な神経筋活動は乱れるとした。大腿直筋肉離れのリハビリテーションはいまだにコンセンサスが得られていないため³⁷、筋内腱肉離れが神経筋活動に与える影響を明らかにすることは、大腿直筋肉離れのリハビ

リテーションの構築の一助になると考える.

2-2 方法

2-2-1 被験者

被験者はN 体育大学男子サッカー部に所属し、大腿直筋肉離れの既往を認める7名とした。7名の平均年齢は 19.3 ± 1.4 歳、平均身長は 170.3 ± 4.1 cm、平均体重は 62.6 ± 3.8 kg、競技歴は 12.4 ± 1.9 年であった。利き足は全選手右足であった。利き足はボールを蹴る足と定義した。また、股関節および膝関節に損傷の既往がない健常男子大学生4名をコントロールとした。4名の平均年齢は 20.3 ± 1.3 歳、平均身長は 166.8 ± 2.2 cm、平均体重は 63.5 ± 2.6 kgであった。

なお、本研究において対象者には事前に調査内容を十分に説明し、承諾を得た。本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認（第015-H83号）を得て実施した。

2-2-2 アンケート調査およびMRI

アンケート調査により身体特性、大腿直筋肉離れの発生機序、受傷時期、現在の症状および損傷側についての回答を求めた。

慢性化または治癒した大腿直筋肉離れであっても、磁気共鳴画像装置（MRI）において、筋内腱に嚢胞が確認される場合がある¹²。そのため、嚢胞が残存しているかを評価するために、0.3TのMR装置（日立メディコ、AIRIS II）を用い、T1強調体軸断面像（Thickness：10mm、Matrix：256×256、Field Of View：32cm）にて、大腿部を撮像した。被験者の肢位は背臥位となり、股関節および膝関節伸展0度とした。1名の整形外科医が得られた画像より損傷の残存の有無を判断した。

2-2-3 実験デザイン

本研究はWatanabeらの先行研究を参考とした^{64,65}。等尺性の股関節屈曲および膝関節伸展の最大筋力を測定し、最大筋力発揮中に大腿直筋の神経筋活動を多チャンネル表面筋電図（SEMG）を用いて記録した。

等尺性の股関節屈曲および膝関節伸展の最大筋力はBiodex system III（Biodex社製）を用いて左右両側を測定した。測定肢位は股関節屈曲および膝関節屈曲90度とし、体幹は専用のベルトでBiodex system IIIに固定した。最大筋力の測定前に十分なウォーミングアップおよび練習を行った。筋発揮は最大筋力まで徐々に2-3秒の時間をかけて行い、最大筋力を2秒間維持するように指示をした。被験者が筋発揮を最大努力で行うために、検

者は測定中に時間のカウントおよび口頭指示を行った。各試技の間に 2 分以上の休息をいれて、測定は各試技 2 回行った。発揮筋力の高い方を最大筋力として採用した。また、股関節屈曲と膝関節伸展の測定および左右の順番はランダムとした。得られた最大筋力は体重で正規化した (Nm/kg)。

2-2-4 多チャンネル SEMG

最大筋力発揮中の大腿直筋の神経筋活動を記録するために多チャンネル SEMG (OT Bioelettronica 社製) を用いた。大腿直筋の長軸に 16 個の電極が 1 列に配列された専用のシートを 2 枚貼付し、近位から 24 個までの電極の神経筋活動を測定した (図 12)。電極の大きさは 1mm であり、各電極の間は 10mm 間隔であった。Watanabe らの研究では、部位依存的な神経筋活動は大腿直筋の長軸方向で観察できることが報告されている^{64,65}。そのため、本研究では大腿直筋の筋活動を 1 列で記録した。また、先行研究による大腿直筋の筋活動の記録は 24 個であったため、本研究も同様に近位から 24 個の電極を解析の対象とした。電極の貼付前に、被験者は皮膚を剃毛し、アルコールで消毒をした。電極の貼付部位について、大腿直筋と同定するために超音波画像装置 (SSD-3500, Aloka 社製) を用いて、大腿直筋を描出した。大腿直筋と隣接する筋である大腿筋膜張筋、縫工筋、内側広筋および外側広筋の境界をウォータープルーフペンでマークをした。電極の貼付位置は大腿長軸の近位 1/3 が 6 番目の電極と 7 番目の電極の間となるように合わせた。大腿長軸は上前腸骨棘と膝蓋骨底を結んだ線とした^{62,73}。基準電極は腓骨頭とした。

単極誘導による SEMG 信号は 12bit A/D 変換器 (EMG-USB 2, OT Bioelettronica 社製) を通して、ゲインを 1000, サンプリング周波数を 2048Hz, バンドパスフィルターを 10-500Hz としてデータで取り込んだ。データとして取り込まれた単極誘導による 24 個の SEMG 信号は解析ソフト (OT BioLab, OT Bioelettronica 社製) で双極誘導の SEMG 信号に変換された。双極誘導の SEMG 信号は、24 個の単極誘導の SEMG 信号から、それぞれ隣接する SEMG 信号より算出された。そのため、23 個の双極誘導の SEMG 信号を得た。近位の SEMG 信号からチャンネル (Ch) 1 と定義した。解析の対象は最大筋力発揮中の 1 秒以上とし、得られた 23 個の双極誘導の SEMG 信号からそれぞれ root mean square (RMS) 値を算出した。

大腿直筋の部位依存的な神経筋活動を調査するため、被験者ごとに股関節屈曲時 (HF) のそれぞれの RMS 値は膝関節伸展時 (KE) の同高位のチャンネルの RMS 値で正規化を行

い、健側と患側それぞれの正規化された股関節屈曲の RMS 値を得た。本研究では、正規化された股関節屈曲の RMS 値を HF/KE と定義した。得られた 23 個の HF/KE は近位部、中間部、遠位部に 3 等分した。

2-2-5 統計処理

データは全て平均値 \pm 標準偏差で表した。コントロール群と損傷群における最大筋力、HF/KE の比較はマンホイットニーの U 検定を用いた。コントロール群での 3 部位の HF/KE の比較、損傷群での 3 部位の HF/KE の比較はボンフェローニ補正をしたマンホイットニーの U 検定を行った。なお、有意水準は 5%未満とした。統計は全て IBM SPSS Statistics 23 で行った。

2-3 結果

2-3-1 アンケート調査およびMRI

アンケート調査の結果より、7名14足のうち、11足に大腿直筋肉離れの既往を認めた。MRIの結果より、11足中8足は筋内腱に明らかな嚢胞が認められ、3足は筋膜に明らかな嚢胞が認められた(図13)。そのため、本研究では筋内腱に明らかな嚢胞を認めた8足を損傷群とした。また、肉離れの既往を認めなかった3足はコントロール群に含めた。そのため、コントロール群は4名の8足と合わせた11足とした。

損傷群の発生機序は、3例がキック動作、4例がスプリント、1例が急激な方向転換であった。損傷群は損傷から平均で43.1ヵ月(20-64ヵ月)経過していた。MRIの結果より、損傷群は大腿直筋の長軸方向に平均で10cm(5-17cm)の低信号領域を認めた(図14)。さらに、低信号領域を認めた部位について、近位部に認めたのは1例であり、中間部に認めたのは2例であり、近位部から中間部にまたがり認めたのは4例であり、中間部から遠位部にまたがり認めたのは1例であった。全選手、競技復帰していたが、2名は大腿直筋にタイトネスを訴えた。

2-3-2 筋力および多チャンネルSEMG

股関節屈曲筋力について、コントロール群は $2.8 \pm 0.2\text{Nm/kg}$ であり、損傷群は $2.5 \pm 0.3\text{Nm/kg}$ であった。コントロール群と損傷群の間に有意差は認めなかった($p = 0.075$)。膝関節伸展筋力について、コントロール群は $4.0 \pm 0.6\text{Nm/kg}$ であり、損傷群は $3.8 \pm 0.6\text{Nm/kg}$ であった。コントロール群と損傷群の間に有意差は認めなかった($p = 0.600$)。

HF/KEについて、コントロール群の結果は図15(A)に示した。近位部(1.08 ± 0.20)は中間部(0.79 ± 0.21)と遠位部(0.57 ± 0.12)より有意に高値(近位部 vs 中間部, $p = 0.015$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.001$)であった。また、中間部は遠位部より有意に高値であった($p = 0.048$)。損傷群の結果は図15(B)に示した。近位部(0.91 ± 0.15)が遠位部(0.66 ± 0.18)より有意に高値であった($p = 0.045$)。近位部と中間部(0.72 ± 0.18)の間に有意差は認めなかった($p = 0.150$)。近位部について、コントロール群は損傷群より高値である傾向がみられた($p = 0.062$)。

各ChのHF/KEを図16に示した。コントロール群のCh1(1.44 ± 0.35)とCh2(1.42 ± 0.35)は損傷群のCh1(1.03 ± 0.26)とCh2(0.93 ± 0.28)より有意に高値であった(Ch1, $p = 0.012$; Ch2, $p = 0.004$)。

2-4 考察

本研究は筋内腱の肉離れが区画的な神経筋活動に影響を与えるかを調査した。筋内腱の肉離れはリハビリテーションが長期化することや、重症化する場合があるため、特に区画的な神経筋活動に影響を与えると考えられるため、筋内腱の肉離れを対象とした。その結果、筋内腱の肉離れにより部位依存的な神経筋活動が乱れることが明らかとなった。

2-4-1 アンケート調査および MRI

アンケート調査および MRI の結果より、8 例に明らかな嚢胞が確認された。嚢胞が確認されたことから、重症度は Grade 2 以上であったと推察される¹²。Hasselmann らは、肉離れによって生じる筋内腱の線維性の嚢胞には緩い結合組織や炎症細胞が残存し、筋線維が筋内腱に正常に付着していないことを明らかにした³⁰。MRI によって嚢胞が確認されたことから、8 例の大腿直筋は正常に治癒していないと考えられる。このことから、損傷群の HF/KE の結果は筋内腱の肉離れの影響を受けている可能性が示唆される。

2-4-2 多チャンネル SEMG

本研究では、コントロール群と損傷群の HF/KE は異なる傾向を示した (図 15)。はじめに、股関節屈曲時の SEMG 信号を膝関節伸展時の SEMG 信号で正規化した理由は、部位依存的な神経筋活動を観察するためである。健常者において、股関節屈曲では大腿直筋の近位部が主に筋発揮に貢献し、中間部や遠位部の貢献割合は低いことが明らかとされている⁶⁴。股関節屈曲時の SEMG 信号を膝関節伸展時の SEMG 信号で正規化することで、よりこの傾向が明らかとなるため、この方法を用いた。

コントロール群の HF/KE は近位部、中間部、遠位部の順に有意に高値であり、部位依存的な神経筋活動が観察された (図 15 (A))。部位依存的な神経筋活動は最大筋力の 60% 以上で観察される⁶⁴。本研究は最大筋力で行っていることや、被験者がアスリートであるといった点が先行研究⁶⁴ と異なるが、結果は先行研究と同様の傾向を示したことから、測定方法は妥当であることが確認された。

一方、損傷群の HF/KE では、近位部と遠位部のみ有意差が認められ、近位部と中間部の間および中間部と遠位部の間に有意な差は認められず、明らかな部位依存的な神経筋活動は確認されなかった (図 15 (B))。さらに、近位部の HF/KE ではコントロール群と損傷群の間に有意差は認めないが、損傷群は低値である傾向がみられた。各 Ch でコントロー

ル群と損傷群を比較すると、近位部に位置する Ch1 および Ch2 において、損傷群がコントロール群よりも有意に低値であった (図 16)。筋内腱の肉離れでは、大腿直筋の近位部の中でも、さらに近位に位置する部位の筋活動が抑制されると考えられる。股関節屈曲において、筋発揮を大きくすると、大腿直筋の最も筋発揮に貢献する部位はより近位に移動することが報告されている⁶⁴。そのため、損傷群の筋発揮が抑制されていた部位は、最も筋発揮に貢献する部位であると推察される。また、肉離れにより筋発揮が抑制される可能性について、ハムストリングスである大腿二頭筋において報告されている^{47, 48}。Opar らは、大腿二頭筋の肉離れ既往がある患側は既往を認めない健側と比較し、180deg/sec の遠心性収縮時の神経筋活動が低下することを明らかにした。神経筋活動の低下は運動単位の動員数の減少や発火頻度の低下によるものとし、損傷部が損傷前の負荷に耐えられないため、抑制されていたと Opar らは示唆をした^{47, 48}。本研究の筋内腱の損傷は近位部に多く生じていたことも近位部が抑制された要因の一つであると示唆される。

筋内腱は indirect head からなる。大腿直筋の起始と股関節屈曲について、direct head は股関節屈曲の開始に作用し、indirect head は股関節屈曲中の筋発揮に主に貢献するという報告がある¹²。さらに、Hasselmann らは筋内腱の肉離れについて仮説を立てている。筋内腱の肉離れによって筋内腱に嚢胞がある場合、筋線維は緩い結合組織が筋腱移行部に存在するため、正常に筋内腱に付着していないことが献体の解剖により明らかになっている。一方、損傷していない direct head には正常に筋線維が付着している。そのため、direct head からの筋線維は筋収縮により、近位に移動するのに対し、indirect head からの筋線維は筋内腱での筋腱移行部が正常に付着していないため、遠位に移動する。つまり、direct head と indirect head が独立して動くのではないかと推察している^{30, 33}。この仮説では、筋内腱の肉離れがあると、股関節屈曲の筋発揮で indirect head が筋発揮に貢献できなくなると示唆される。本研究では、筋内腱の肉離れ既往を認めると、股関節屈曲時に最も貢献する近位部の筋活動が低下しており、大腿直筋の区画的な神経筋活動はみられなかった。そのため、本研究の結果は Hasselmann らの仮説を支持する結果であると考えられる。

本研究の被験者は、肉離れの発生から長時間経過していたにも関わらず、股関節屈曲時の近位部の筋活動は抑制されていた。大腿直筋肉離れの損傷後のリハビリテーションについて、ガイドラインやコンセンサスは得られていないのが現状である^{15, 37}。大腿直筋肉離れでは、膝関節伸展機能の回復を中心に考えられている。本研究の結果より筋内腱の肉離れにおいて、リハビリテーションが長期化することや、重症化する原因として、適切なり

ハビリテーションが行われていない可能性があると考えられる。筋内腱の肉離れでは、股関節屈曲時に影響を受ける可能性があるため、膝関節伸展機能だけでなく、股関節屈曲機能にも注目して行う必要があると考える。しかしながら、部位依存的な神経筋活動の乱れがパフォーマンスに与える影響について明らかにするためには、さらなる調査が必要である。本研究の結果は、大腿直筋の筋内腱に生じる肉離れのリハビリテーションに対し、新たな知見となる可能性がある。

2-4-3 本研究の限界

本研究の限界について、大腿直筋の SEMG 信号を記録する際、隣接する大腿筋膜張筋や縫工筋、内側広筋、外側広筋からクロストークの影響がある^{11,14}。そのため、本研究は Watanabe らの先行研究の方法を参考にした^{64,65}。超音波を用いて、大腿直筋と隣接する筋の境界を明らかにし、大腿直筋を描出した。描出された大腿直筋に電極を貼付することで、隣接する筋からのクロストークの影響を小さくした。ゆえに、本研究で得られた大腿直筋の SEMG 信号は、隣接する筋からのクロストークの影響を受けている可能性はあるが、本研究の結果に大きな影響は与えていないと考える。

次に、被験者の数が少ないという点が挙げられる。しかしながら、本研究の損傷群は全て、筋内腱に明らかな嚢胞を MRI で確認しており、重症度も Grade 2 以上と推察される大腿直筋に統一した。そのため、本研究の HF/KE の結果は筋内腱の肉離れの影響であると考えられる。

2-5 結論

本研究では、筋肉の肉離れ既往が区画的な神経筋活動に影響を与えるかを調査した。その結果、筋肉の肉離れは部位依存的な神経筋活動を乱すことを明らかにした。特に、大腿直筋の近位部の筋活動が低下していた。さらなる調査が必要ではあるが、筋肉の肉離れにおいて、リハビリテーションが長期化することや重症化する原因として、区画的な神経筋活動が乱れることが関係している可能性が示唆された。

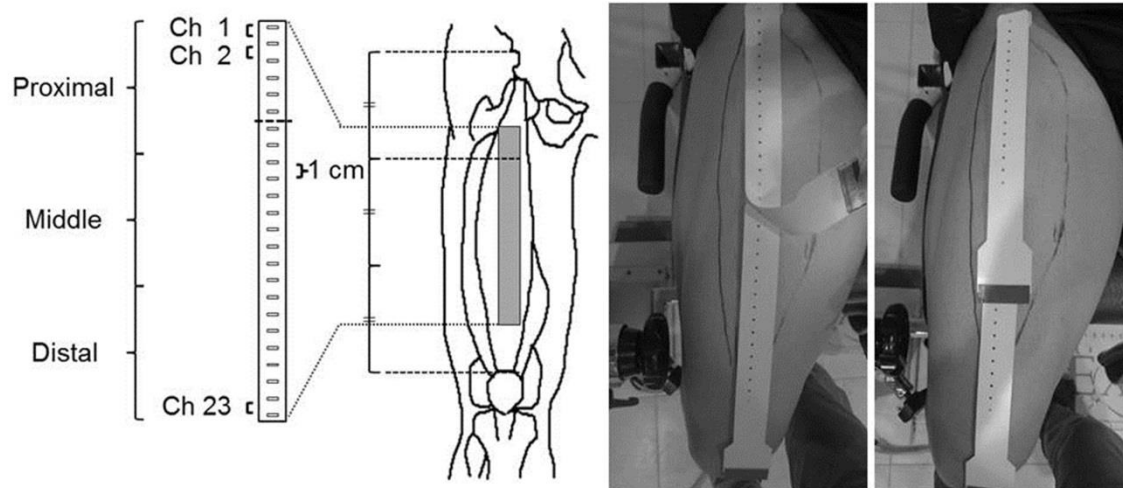


図 12. 多チャンネル表面筋電図の電極の貼付位置

大腿直筋に貼付した 24 個の電極位置を示した。24 個の単極誘導の表面筋電図信号はそれぞれ隣接する上下の電極から 23 個の双極誘導の表面筋電図信号を計算した。近位の表面筋電図信号からチャンネル (Ch) 1 と定義した。23Ch は 3 等分した。

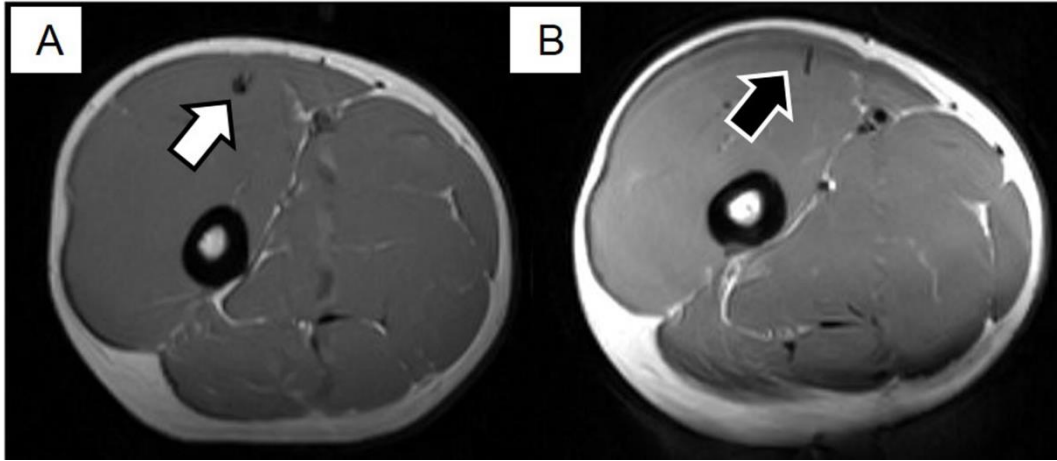


図 13. MRI の T1 強調体軸断画像の 1 例

MRI の T1 強調体軸断画像において, 大腿直筋筋内腱に低信号領域を認めた 1 例を示した.

(A) 筋内腱に嚢胞を示す低信号領域を認めた (白矢印). (B) 筋内腱に明らかな低信号領域は認めない (黒矢印).

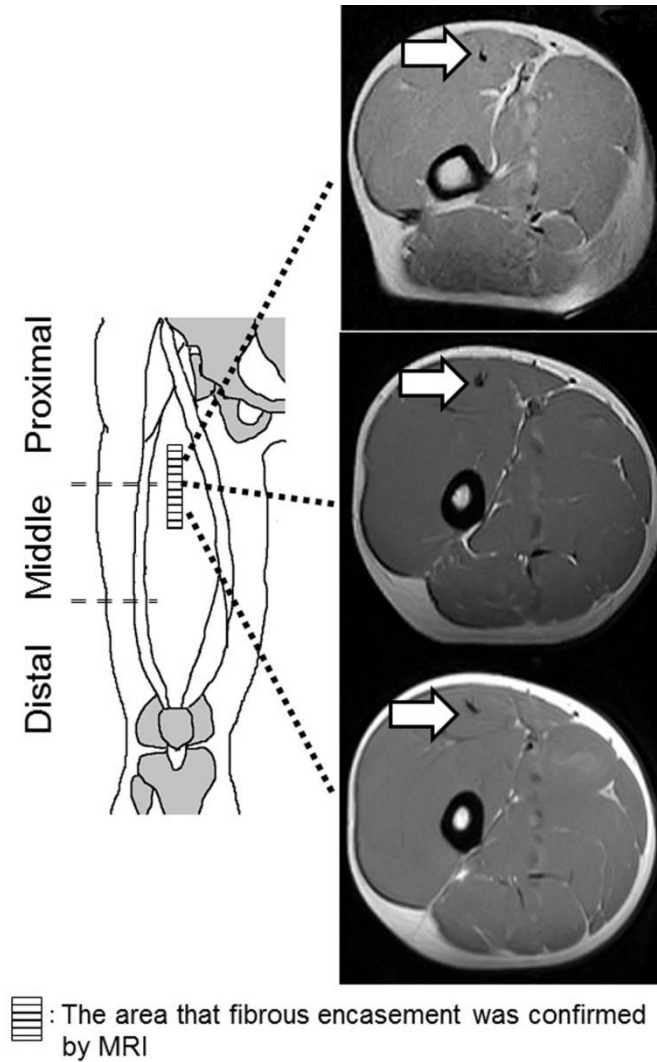


図 14. MRI で近位部から中間部にかけて損傷を認めた大腿直筋離れの 1 例
 大腿直筋の長軸方向に近位部から中間部にかけて損傷を認めた 1 例を示した。
 それぞれの MRI にて、筋内腱に嚢胞を示す低信号領域が認められた。

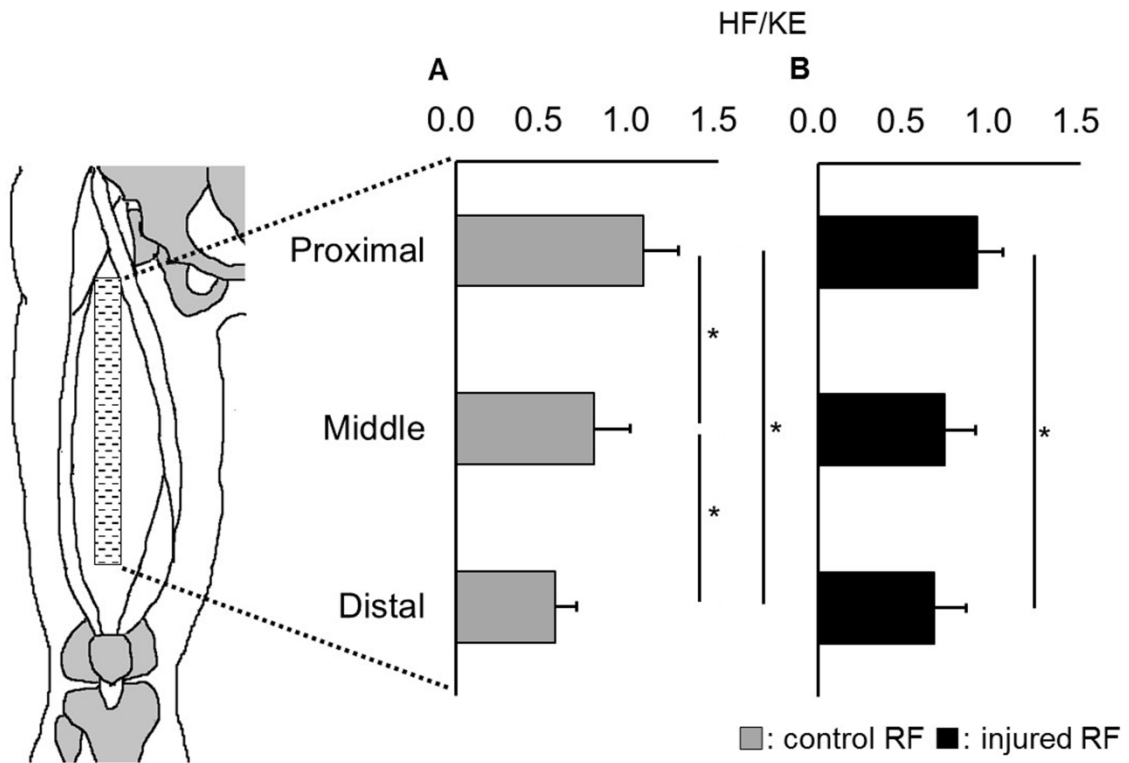


図 15. コントロール群と損傷群の 3 部位の HF/KE

コントロール群 (A) と損傷群 (B) における各部位の HF / KE を示した. 股関節屈曲時 (HF) の RMS 値を膝関節伸展時 (KE) の RMS 値で正規化して HF / KE を算出した. RMS, root mean square. * P < 0.05.

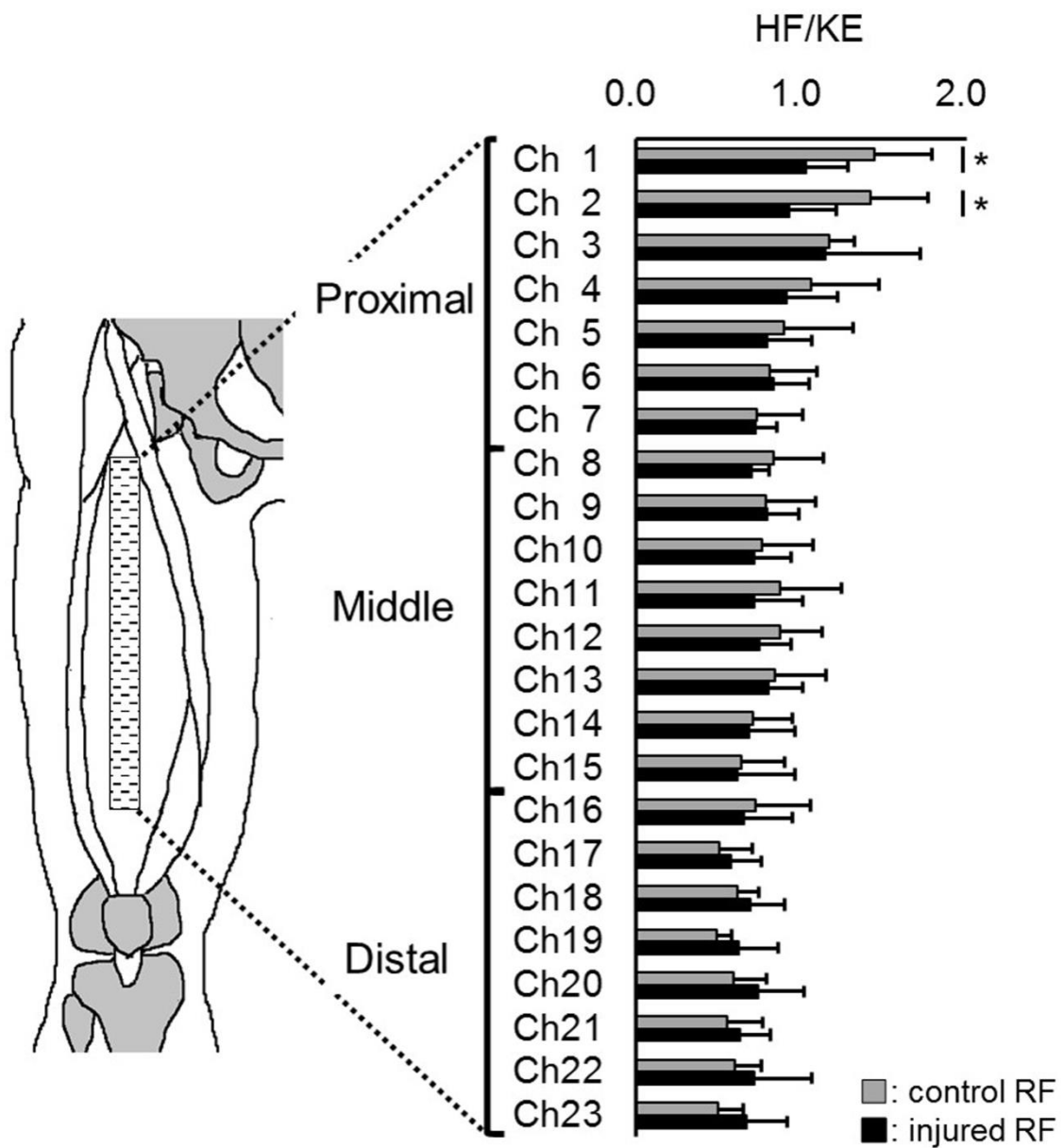


図 16. コントロール群と損傷群の各 Ch の HF/KE

各 Ch における各部位の HF / KE を示した. 股関節屈曲時 (HF) の RMS 値を膝関節伸展時 (KE) の RMS 値で正規化して HF / KE を算出した. Ch, channel. RMS, root mean square. * P < 0.05.

第3章 慢性の筋内腱肉離れが大腿直筋の疲労特性に及ぼす影響について

3-1 背景

大腿直筋の起始は **direct head** と **indirect head** からなる二頭筋である。 **Direct head** は大腿直筋の表層の近位 1/3 までの幅広い起始腱膜となる。 **Indirect head** は **direct head** の下を通り、筋内腱となり、遠位 1/3 まで達する。大腿直筋の神経筋活動について、膝関節伸展時は、大腿直筋の全部位が筋発揮に貢献するのに対し、股関節屈曲時は大腿直筋の近位部が中間部や遠位部よりも筋発揮に貢献するという部位依存的な神経筋活動がある⁶⁴。大腿直筋の近位部は解剖学的にも神経筋機能としても複雑な構造をしている。そして、この大腿直筋の近位部は肉離れ損傷の 60%が発生する部位である⁵⁴。また、大腿直筋の筋内腱はリハビリテーションの長期化や重症化することが報告されている⁷⁰。そのため、2部の第2章では、大腿直筋の筋内腱肉離れにより部位依存的な神経筋活動が乱れるかを調査した。その結果、筋内腱の肉離れでは、近位部の神経筋活動が抑制されていたことを明らかにした。肉離れによって、部位依存的な神経筋活動は乱れることは明らかにされたが、パフォーマンスに与える影響は明らかとされていない。大腿直筋は筋発揮だけではなく、筋疲労においても生理学的な特徴があり、大腿直筋の近位部は中間部、遠位部と比較して疲労しやすいことが報告されている⁶⁵。また、筋疲労は肉離れの危険因子の一つである⁴³。そのため、スポーツ活動によって大腿直筋の近位部が疲労することで、肉離れが発生すると推察される。さらに、大腿直筋肉離れの既往があると近位部に易疲労感を訴えるという報告がある⁷⁵。しかし、大腿直筋肉離れと筋疲労の関係を調査した研究はみられない。大腿直筋の肉離れは筋疲労に影響を与える可能性があり、その影響を明らかにすることは、再発予防やリハビリテーションの構築において、重要であると考えられる。特に、筋内腱肉離れは部位依存的な神経筋活動に与える影響が大きいことから、疲労特性に影響を与える可能性があるかと推察される。そのため、本研究の目的は大腿直筋の筋内腱の肉離れ既往が大腿直筋の疲労特性に与える影響を明らかにすることとした。本研究の仮説として、筋内腱の肉離れ既往により、筋が疲労するまでの時間が短くなる。また、筋内腱の肉離れ既往により近位部の神経筋活動が抑制されることから、中間部や遠位部が代償することにより近位部以外が疲労しやすくなるかと考える。

3-2 方法

3-2-1 被験者

被験者はN 体育大学男子サッカー部に所属をし、大腿直筋肉離れの既往を認める6名および大腿直筋肉離れの既往がなく、さらに股関節および膝関節に損傷の既往がない9名の計15名とした。6名の平均年齢は 20.5 ± 0.5 歳、平均身長は 174.7 ± 3.2 cm、平均体重は 67.5 ± 6.1 kg、競技歴は 13.2 ± 1.5 年であった。また、股関節および膝関節に損傷の既往がない9名をコントロールとした。9名の平均年齢は 20.3 ± 0.7 歳、平均身長は 170.7 ± 3.4 cm、平均体重は 66.4 ± 3.9 kg、競技歴は 13.4 ± 2.1 歳であった。利き足はボールを蹴る足と定義し、全選手右足であった。

なお、本研究において対象者には事前に調査内容を十分に説明し、承諾を得た。本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認(016-H76号)を得て実施した。

3-2-2 アンケート調査およびMRI

アンケート調査により身体特性、大腿直筋肉離れの発生機序、受傷時期、現在の症状および損傷側についての回答を求めた。

慢性化または治癒した大腿直筋肉離れであっても、磁気共鳴画像装置(MRI)において、筋内腱に嚢胞が確認される場合がある¹²。そのため、嚢胞が残存しているかを評価するために、0.3TのMR装置(日立メディコ、AIRIS II)を用い、T1強調体軸断面像(Thickness: 10mm, Matrix: 256×256, Field Of View: 32cm)にて、大腿部を撮像した。被験者の肢位は背臥位となり、股関節および膝関節伸展0度とした。1名の整形外科医が得られた画像より筋内腱損傷の有無を判断した。筋内腱の損傷を認めた大腿直筋を損傷群とした。

3-2-3 実験デザイン

疲労試技はWatanabeらの方法を参考とした⁶⁵。はじめに、等尺性膝関節最大伸展筋力の測定を行った。最大筋力はBiodex system III(Biodex社製)を用いて左右両側を測定した。測定肢位は股関節屈曲および膝関節屈曲90度とし、体幹は専用のベルトでBiodex system IIIに固定した。最大筋力の測定前に十分なウォーミングアップおよび練習を行った。被験者に最大筋力まで徐々に2-3秒の時間をかけて筋発揮を行い、最大筋力で2秒間維持するように指示をした。被験者が筋発揮を最大努力で行うために、検者は測定中に時

間のカウントおよび口頭指示を行った。最大筋力の測定は2回行い、発揮筋力の高い方を最大筋力として採用した。なお、試技の間に2分以上の休息をいれた。最大筋力の測定から10分以上の休憩の後に疲労試技として、最大筋力の測定と同様の肢位で最大筋力の50%を目標値とし、目標値の95%を維持できなくなるまで筋発揮を行わせた。また、目標値の上下5%を許容範囲とした。疲労試技中の大腿直筋の筋活動を多チャンネル表面筋電図(SEMG)を用いて記録した。

疲労試技は、1回目の影響を与えないように2日以上の間隔を空けて、2回実施した。目標値の許容範囲内で筋発揮ができて、疲労までの時間が長かった試技を解析の対象とした。

3-2-4 多チャンネル SEMG

疲労試技中の大腿直筋の神経筋活動の記録は多チャンネル SEMG (OT Bioelettronica 社製) を用いた。大腿直筋の長軸に16個の電極が1列に配列された専用のシートを2枚貼付し、近位から24個までの電極の神経筋活動を測定した(図17)。電極の大きさは1mmであり、各電極の間は10mm間隔であった。本研究では大腿直筋の筋活動を1列で記録した。電極の貼付前に、被験者は皮膚を剃毛し、アルコールで消毒をした。電極の貼付部位について、大腿直筋と同定するために超音波画像装置(SSD-3500, Aloka 社製)を用いて、大腿直筋を描出した。大腿直筋と隣接する筋である大腿筋膜張筋、縫工筋、内側広筋および外側広筋の境界を水性ペンでマークをした。電極の貼付位置は大腿長軸の近位1/3が6番目の電極と7番目の電極の間となるように合わせた。大腿長軸は上前腸骨棘と膝蓋骨底を結んだ線とした^{62,73}。基準電極は腓骨頭とした。

単極誘導による SEMG 信号は12bit A/D 変換器 (EMG-USB 2, OT Bioelettronica 社製) を通して、ゲインを1000、サンプリング周波数を2048Hz、バンドパスフィルターを10-500Hzとしてデータで取り込んだ。データとして取り込まれた単極誘導による24個の SEMG 信号は解析ソフト (OT BioLab, OT Bioelettronica 社製) で双極誘導の SEMG 信号に変換された。双極誘導の SEMG 信号は、24個の単極誘導の SEMG 信号から、それぞれ隣接する SEMG 信号より算出された。そのため、23個の双極誘導の SEMG 信号を得た。近位の SEMG 信号からチャンネル (Ch) 1と定義した。

疲労試技の解析は、目標値である最大筋力の50%で筋発揮をした時点から発揮筋力が目標値の95%を下回るまでを対象とした。試技開始から終了までの疲労時間を5%ごとに区

切り, その前後 1 秒の計 2 秒の SEMG 信号より Median Frequency (MF) 値を算出した. MF 値は筋疲労の指標として先行研究で用いられるため, 本研究でも筋疲労の指標として採用した⁶⁵. 各時間の MF 値は疲労時間の 5% の値で正規化を行った. また, 23Ch は近位部, 中間部, 遠位部に 3 等分した.

3-2-5 統計処理

データは全て平均値 ± 標準偏差で示した. コントロール群と損傷群の比較はマンホイットニーの U 検定を用いた.

コントロール群と損傷群それぞれで, 疲労時間の 25%, 50%, 75%, 95% における近位部, 中間部および遠位部の 3 部位の比較はフリードマン検定をそれぞれ行った ($p < 0.05$). 部位差を認めた場合は, さらに部位ごとにウィルコクソンの符号順位検定を行い, さらにボンフェローニの調整を行った. なお, 有意水準は 5% 未満とした. 統計は全て IBM SPSS Statistics 23 で行った.

3-3 結果

3-3-1 アンケート調査および MRI

アンケート調査の結果より、6名12足のうち、10足に大腿直筋肉離れの既往を認めた。6名全員の利き足において、肉離れ既往を認め、4名は非利き足においても肉離れ既往を認めた。さらにMRIの結果より、10足中5足は筋内腱に低信号領域を認め、2足は筋内腱に高信号領域を認め、1足は筋膜に低信号領域を認め、2足は明らかな異常所見を認めなかった。そのため、本研究では筋内腱に異常所見を認めた7足を損傷群とした。また、コントロール群は9名の18足とした。

損傷群の発生機序は、3例がキック動作、3例がスプリント、1例が急激な方向転換であった。損傷群は損傷から平均で41.2ヵ月(3-64ヵ月)経過していた。MRIの結果より、異常所見を認めた範囲は大腿直筋の長軸方向に平均で9.6cm(2-17cm)であった。さらに、異常所見を認めた部位について、近位部に認めたのは1例であり、中間部に認めたのは1例であり、近位部から中間部にかけて認めたのは3例であり、中間部から遠位部にかけて認めたのは2例であった。全選手、競技復帰していたが、1名は大腿直筋にタイトネスを訴えた。

3-3-2 多チャンネル SEMG

2回の疲労試技において、損傷群の1名は非利き足で目標値の許容範囲内で筋発揮ができなかったため、SEMGの解析から除外した。そのため、損傷群は利き足の6足とした。

疲労試技によるコントロール群の筋疲労までの時間は 74.2 ± 18.8 秒であり、損傷群は 77.1 ± 11.4 秒であった。筋疲労までの時間において、コントロール群と損傷群の間に有意な差は認めなかった($p = 0.860$)。

コントロール群の疲労試技中のMF値をカラーマップに示した(図18(A))。また、各時間における各部位のMF値を図19に示した。

疲労時間25%のMF値について、近位部は 0.91 ± 0.03 であり、中間部は 0.93 ± 0.04 であり、遠位部は 0.94 ± 0.05 であった。

疲労時間50%のMF値について、近位部は 0.85 ± 0.05 であり、中間部は 0.88 ± 0.05 であり、遠位部は 0.90 ± 0.05 であった。

疲労時間75%のMF値について、近位部は 0.81 ± 0.07 であり、中間部は 0.84 ± 0.07 であり、遠位部は 0.85 ± 0.06 であった。

疲労時間 95%の MF 値について、近位部は 0.75 ± 0.07 であり、中間部は 0.79 ± 0.07 であり、遠位部は 0.82 ± 0.08 であった。

疲労時間 25%の MF 値におけるフリードマン検定の結果、有意差を認めた ($p = 0.001$)。そのため、ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、近位部は中間部と遠位部より有意に低値であった (近位部 vs 中間部, $p = 0.015$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.001$)。中間部と遠位部に有意差は認めなかった ($p = 0.243$)。

疲労時間 50%の MF 値におけるフリードマン検定の結果、有意差を認めた ($p = 0.003$)。そのため、ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、近位部は中間部と遠位部より有意に低値であった (近位部 vs 中間部, $p = 0.015$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.009$)。中間部と遠位部に有意差は認めなかった ($p = 0.321$)。

疲労時間 75%の MF 値におけるフリードマン検定の結果、有意差を認めた ($p = 0.003$)。そのため、ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、近位部は中間部と遠位部より有意に低値であった (近位部 vs 中間部, $p = 0.009$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.006$)。中間部と遠位部に有意差は認めなかった ($p = 1.00$)。

疲労時間 95%の MF 値におけるフリードマン検定の結果、有意差を認めた ($p = 0.006$)。そのため、ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、近位部は中間部と遠位部より有意に低値であった (近位部 vs 中間部, $p = 0.036$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.009$)。中間部と遠位部に有意差は認めなかった ($p = 0.117$)。

損傷群における疲労試技中の MF 値をカラーマップに示した (図 18 (B))。また、各時間における各部位の MF 値を図 20 に示した。

疲労時間 25%の MF 値について、近位部は 0.94 ± 0.05 であり、中間部は 0.95 ± 0.06 であり、遠位部は 0.97 ± 0.07 であった。

疲労時間 50%の MF 値について、近位部は 0.91 ± 0.07 であり、中間部は 0.95 ± 0.06 であり、遠位部は 0.93 ± 0.04 であった。

疲労時間 75%の MF 値について、近位部は 0.86 ± 0.07 であり、中間部は 0.88 ± 0.04 であり、遠位部は 0.90 ± 0.04 であった。

疲労時間 95%の MF 値について、近位部は 0.79 ± 0.08 であり、中間部は 0.86 ± 0.07 であり、遠位部は 0.88 ± 0.07 であった。

フリードマン検定の結果、疲労時間 25%、50%、75%において、それぞれ有意差は認めなかった (疲労時間 25%, $p = 0.405$; 疲労時間 50%, $p = 0.084$; 疲労時間 75%, $p = 0.244$)。

疲労時間 95%の MF 値におけるフリードマン検定の結果、群間に有意差を認めた ($p = 0.011$)。ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、3 部位に有意差は認めなかったが、近位部が他部位より低値である傾向がみられた (近位部 vs 中間部, $p = 0.084$; 近位部 vs 遠位部, $p = 0.081$; 中間部 vs 遠位部, $p = 1.00$)。

近位部の損傷群とコントロール群の MF 値を図 21 に示した。疲労時間 25%の MF 値では損傷群がコントロール群より有意に高値を示した ($p = 0.018$)。疲労時間 50%は損傷群がコントロール群より高値である傾向がみられたが、有意差は認めなかった ($p = 0.066$)。疲労時間 75%, 95%では損傷群とコントロール群の間に有意な差は認めなかった (疲労時間 75%, $p = 0.090$; 疲労時間 95%, $p = 0.199$)。

コントロール群の中間部と遠位部の疲労試技中の MF 値は有意差を認めなかった (図 19)。そのため、中間部と遠位部を合わせて中間部・遠位部とし、損傷群とコントロール群を比較した (図 22)。コントロール群と損傷群の間で、疲労時間 25%の MF 値では有意な差は認めなかった ($p = 0.143$)。疲労時間の 50%, 75%, 95%の MF 値において、損傷群がコントロール群より有意に高値を示した (疲労時間 50%, $p = 0.002$; 疲労時間 75%, $p = 0.017$; 疲労時間 95%, $p = 0.007$)。

3-4 考察

大腿直筋は近位部が中間部や遠位部と比較し、疲労しやすいという特徴がある。また、膝関節伸展時にその特徴は顕著に観察された⁶⁵。そして、近位部は肉離れが多く発生する部位であることから、本研究は大腿直筋肉離れが筋疲労特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。さらに、大腿直筋肉離れでは特に筋内腱の肉離れがリハビリテーションの長期化や重症化する可能性が高く、また、部位依存的な神経筋活動に与える影響が大きい。そのため、本研究では、筋内腱の肉離れを対象とした。

3-4-1 アンケート調査およびMRI

アンケート調査およびMRIのT1強調画像の結果より7足に筋内腱肉離れの既往を認めた。7足中5足は、筋内腱に明らかな低信号領域を認めた。慢性化また治癒した大腿直筋肉離れであっても、MRIにおいて、筋内腱に嚢胞が確認される場合がある¹²。また、嚢胞が確認されたことから、Grade 2以上であったと推察される。2足は筋内腱に高信号領域を認めた。MRIのT1強調画像における高信号は脂肪組織などが考えられる。Hasselmanらは慢性化した大腿直筋肉離れの損傷部の組織を病理解剖した結果、筋内腱に脂肪が沈着していたと報告した³⁰。2足に認めた筋内腱の高信号領域は、損傷部が脂肪を含む組織に変性治癒した結果であると考えられる。また、嚢胞を形成していないため、Grade 2よりも軽度であったと推察される。

7足は筋内腱の損傷であり、変性治癒しているため、疲労特性に影響を及ぼす要因であると考えられる。

3-4-2 多チャンネルSEMG

筋疲労に伴い、SEMGではMF値が低下することから、MF値は筋疲労の評価に用いられる⁶⁵。筋疲労により神経伝導速度は低下する⁶。MF値の低下は神経伝導速度の低下に起因すると考えられている⁴²。神経伝導速度の低下は、持続的な筋収縮により血流が阻害され、乳酸が蓄積することで生じるpHの低下に起因する^{16,42}。

本研究では、コントロール群と損傷群ともに各部位で時間の経過とともにMF値は低下したが、異なる傾向を示した。

コントロール群のMF値では各疲労時間において、近位部が中間部と遠位部より有意に低値を示した。また、各疲労時間で中間部と遠位部で有意な差は認めなかった。そのため、

近位部が最も疲労しやすく、中間部、遠位部と異なる疲労特性であった。本研究の結果は、健常者を対象に大腿直筋の疲労特性を調査した Watanabe らの先行研究と同様の傾向を示した⁶⁵。そのため、本研究の測定方法は妥当であることが示された。

大腿直筋の近位部が中間部と遠位部より疲労しやすいことについて、Watanabe らは大腿直筋の近位部とその他の部位で神経支配が異なることから、近位部とその他の部位で筋線維の収縮や機械的ストレスが異なる可能性があるとし、筋収縮中の近位部の筋内圧が高くなっているのではないかと推察した⁶⁵。

一方、損傷群の MF 値では各疲労時間で有意な差は認めなかった。そのため、損傷群は各部位が同様に疲労していたと考えられる。近位部は Watanabe らの先行研究やコントロール群の結果より、中間部と遠位部より疲労しやすいと考えられる。しかし、筋内腱の肉離れ既往を認めると、その疲労特性は変化する可能性が示唆される。最も疲労しやすい近位部を中間部・遠位部が代償することにより、部位差が消失し、同様に疲労した可能性がある。同一筋内での代償について、大腿二頭筋の肉離れ後（5・23 ヶ月後）では、損傷の多い大腿二頭筋長頭は萎縮していたが、短頭が代償性肥大していたという報告がある⁵⁷。さらに、大腿二頭筋長頭の支配神経は、坐骨神経の枝である脛骨神経であり、一方、大腿二頭筋短頭は坐骨神経の枝である総腓骨神経であり、同一筋内であっても神経支配が異なる。本研究では、4 例が大腿直筋の近位部を損傷していた。また、大腿直筋を支配する大腿神経は 2 本の神経枝となり、近位部と遠位部にそれぞれ入り込む⁶²。つまり、損傷した大腿直筋の近位部と他部位は神経支配が異なることから、大腿二頭筋と同様に近位部を中間部・遠位部が代償した可能性がある。損傷群は近位部を中間部・遠位部が代償することにより、筋発揮を維持したため、損傷群とコントロール群で疲労時間に有意差を認めなかったと推察される。また、大腿四頭筋である中間広筋、内側広筋、外側広筋といった膝関節伸展の共同筋による代償も考えられるため、さらなる調査が必要である。

損傷群とコントロール群の MF 値を比較した近位部の結果について、疲労時間の前半では、損傷群はコントロール群より疲労していなかったが、中盤から後半は、損傷群もコントロール群と同程度の疲労をした。中間部・遠位部について、疲労時間の中盤から後半では、損傷群がコントロール群より疲労していなかった。そのため、中間部・遠位部は疲労に耐性ができていると考えられる。大腿直筋は type II 線維が多く含まれる²⁷。type II 線維は活動刺激の増減によりタイプ移行が起こると報告されている⁵⁶。ラットの腓腹筋を対象とした実験において、持久的トレーニングや伸張性収縮により、type I、type II a 線維が

増加し、筋横断面積上の分布域が拡大をするという報告がある⁸³。本研究の被験者は損傷から長い期間が経過しており、競技に復帰をしているため、中間部や遠位部の筋線維タイプが移行している可能性がある。

大腿直筋の筋内腱肉離れは、重症度が高くなりやすいことやリハビリテーションが長期化することが報告されている⁷⁰。本研究の結果から、筋内腱肉離れにより損傷部は変性治癒となり、大腿直筋の疲労特性は変化していた。一つの可能性として、推察ではあるが、損傷部が変性治癒した後、疲労特性が変化することで、損傷前と同等の筋発揮が可能となっていたと推察される。近位部を中間部・遠位部で代償できるまでに時間が必要であるため、筋内腱肉離れは競技復帰までの期間が長期化している可能性がある。また、重症化するのには、損傷した近位部を中間部、遠位部やその他の膝関節伸筋群で代償がうまくできていない場合であると推察される。これらは推論であるため、明らかにするためには、さらなる調査が必要である。

3-4-3 本研究の限界

本研究の限界について、大腿直筋の SEMG 信号を記録する際、隣接する大腿筋膜張筋や縫工筋、内側広筋、外側広筋からクロストークの影響がある^{11,14}。そのため、本研究は Watanabe らの先行研究の方法を参考にした^{64,65}。超音波を用いて、大腿直筋と隣接する筋の境界を明らかにし、大腿直筋を描出した。描出された大腿直筋に電極を貼付することで、隣接する筋からのクロストークの影響を小さくした。ゆえに、本研究で得られた大腿直筋の SEMG 信号は、隣接する筋からのクロストークの影響を受けている可能性はあるが、本研究の結果に大きな影響は与えていないと考える。

次に、損傷群が少ないことである。しかし、損傷群は全て、MRI にて筋内腱に明らかな信号を確認した大腿直筋を対象としていることから、本研究の結果は筋内腱肉離れの影響であると考えられる。今後は、被験者数を増やすことで、より肉離れの影響を明らかにすることが可能であると考ええる。

3-5 結論

本研究では、筋内腱の肉離れ既往が大腿直筋の疲労特性に与える影響を調査した。損傷の既往がないコントロール群は近位部が最も疲労する。一方、筋内腱の肉離れ既往を認めると近位部、中間部、遠位部が同程度疲労するため、大腿直筋の疲労特性が変化する可能性があることが明らかとなった。損傷群は、損傷が多く発生する近位部を中間部と遠位部で代償することで、筋発揮を持続していることが推察された。

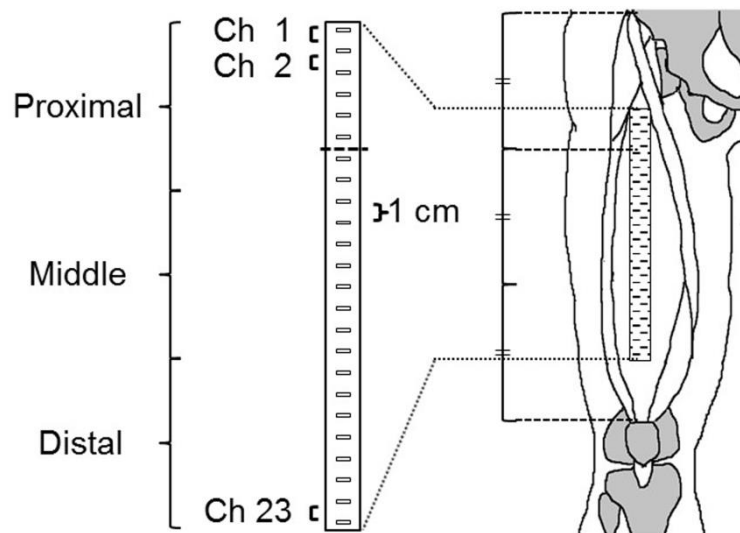


図 17. 多チャンネル表面筋電図の電極の貼付位置

大腿直筋に貼付した 24 個の電極位置を示した。24 個の単極誘導の表面筋電図信号はそれぞれ隣接する上下の電極から 23 個の双極誘導の表面筋電図信号を計算した。近位の表面筋電図信号からチャンネル (Ch) 1 と定義した。23Ch は 3 等分した。

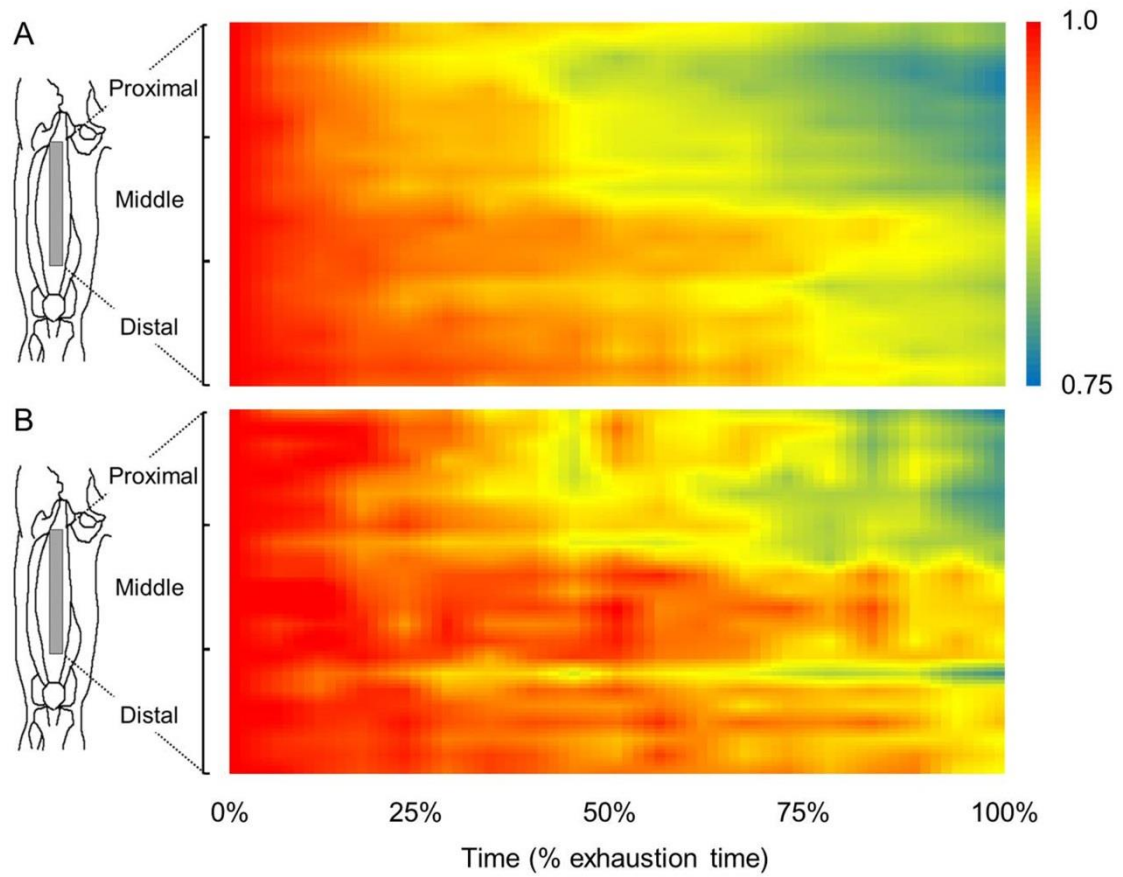


図 18. カラーマップで示した疲労試技中の大腿直筋の Median Frequency 値
 膝関節伸展を最大筋力の 50%で発揮をさせて、目標値から 95%を下回るまでのコントロ
 ール群 (A) と損傷群 (B) の Median Frequency 値をカラーマップで示した.

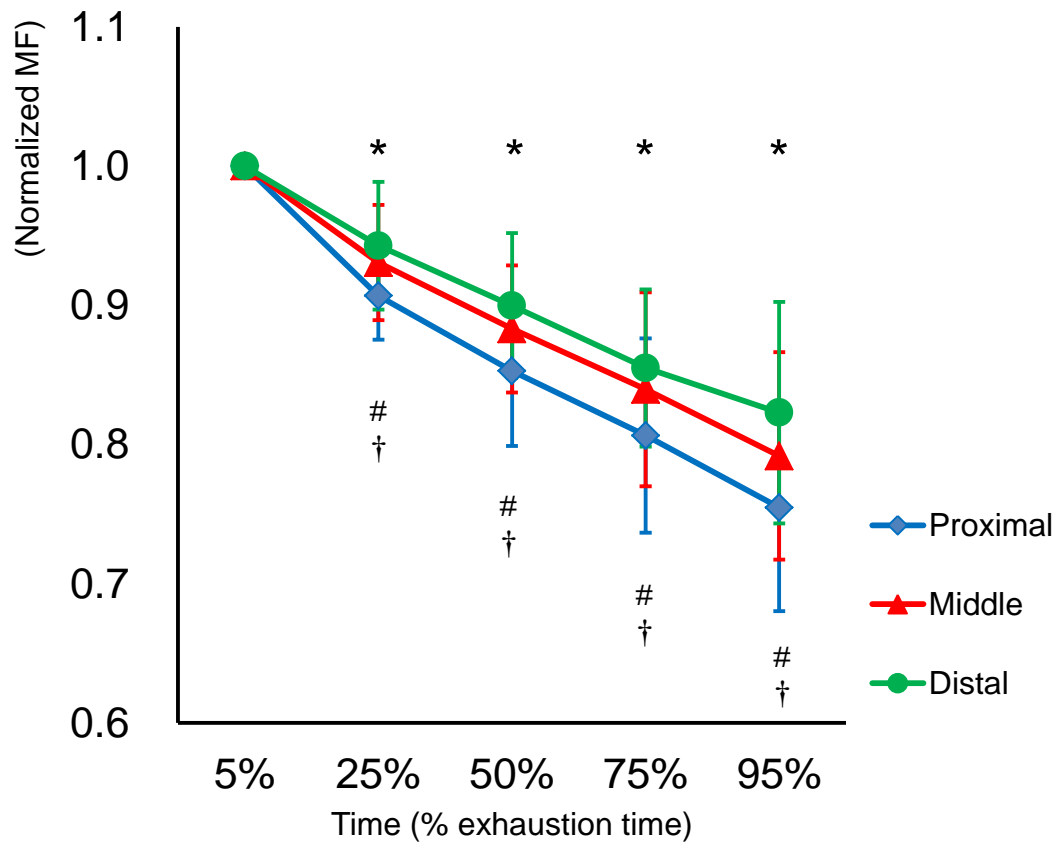


図 19. コントロール群の疲労試技中の Median Frequency 値

膝関節伸展を最大筋力の 50%で発揮をさせて、目標値から 95%を下回るまでの近位部、中間部、遠位部の Median Frequency 値をそれぞれ示した。* $p < 0.05$, フリードマン検定の結果, 3 部位で有意差を認めた。# $p < 0.05$, ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定の結果, 近位部 vs 中間部で有意差を認めた。† $p < 0.05$, ボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定の結果, 近位部と遠位部で有意差を認めた。

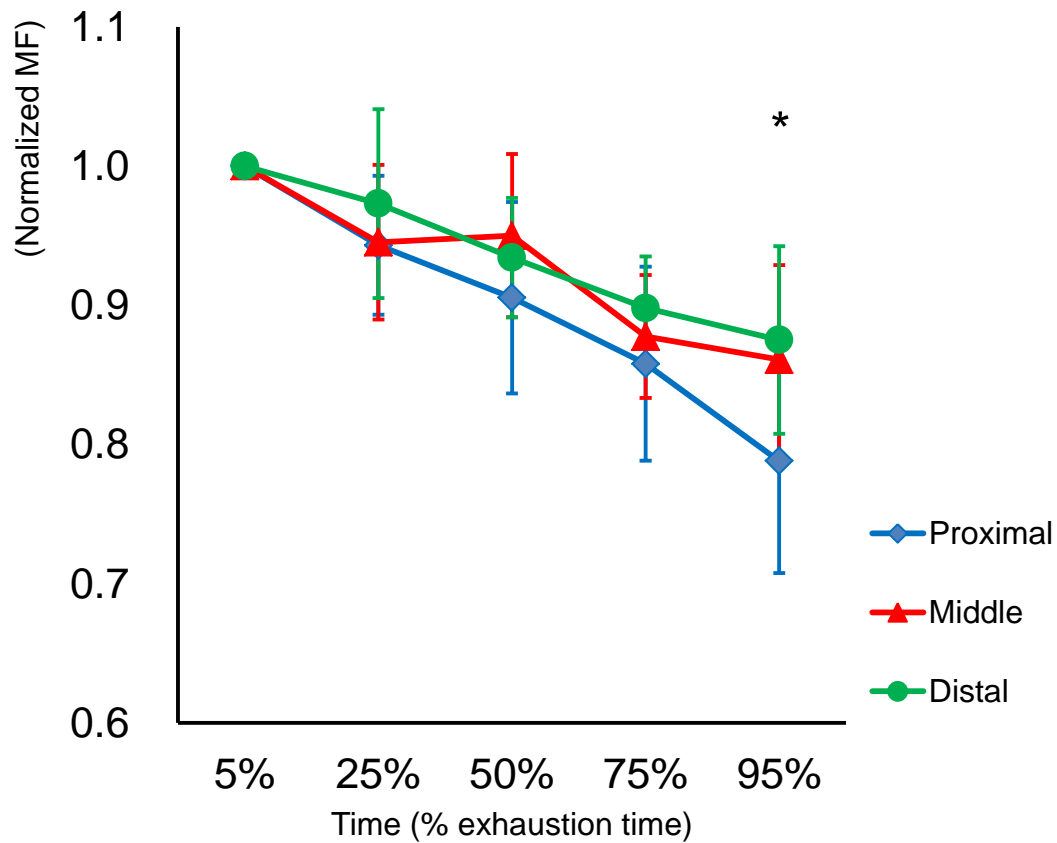


図 20. 損傷群の疲労試技中の Median Frequency 値

膝関節伸展を最大筋力の 50%で発揮をさせて、目標値から 95%を下回るまでの近位部、中間部、遠位部の Median Frequency 値をそれぞれ示した。* $p < 0.05$, フリードマン検定の結果, 3 部位で有意差を認めた。事後検定として行ったボンフェローニ調整をしたウィルコクソンの符号順位検定では, 各群に有意な差は認めなかった。

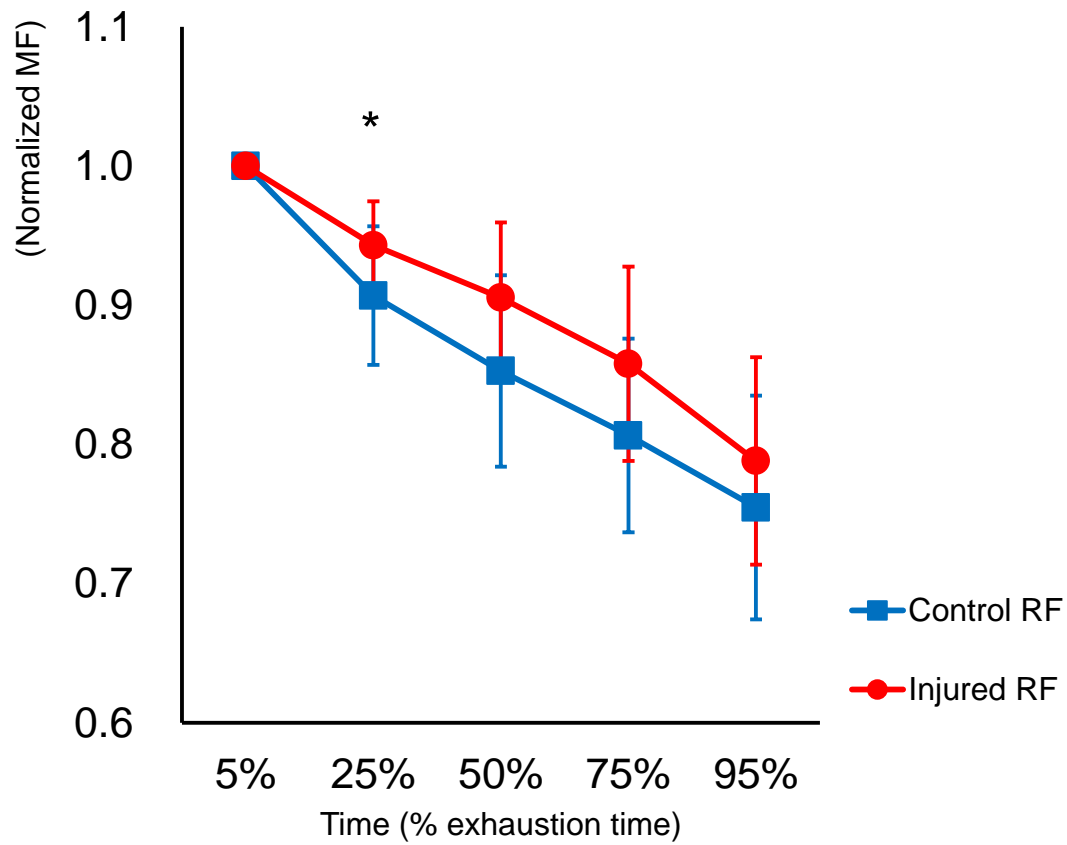


図 21. 近位部における損傷群とコントロール群の疲労試技中の Median Frequency 値
 膝関節伸展を最大筋力の 50%で発揮をさせて、目標値から 95%を下回るまでのコントロール群と損傷群の近位部の Median Frequency 値を示した。* $p < 0.05$.

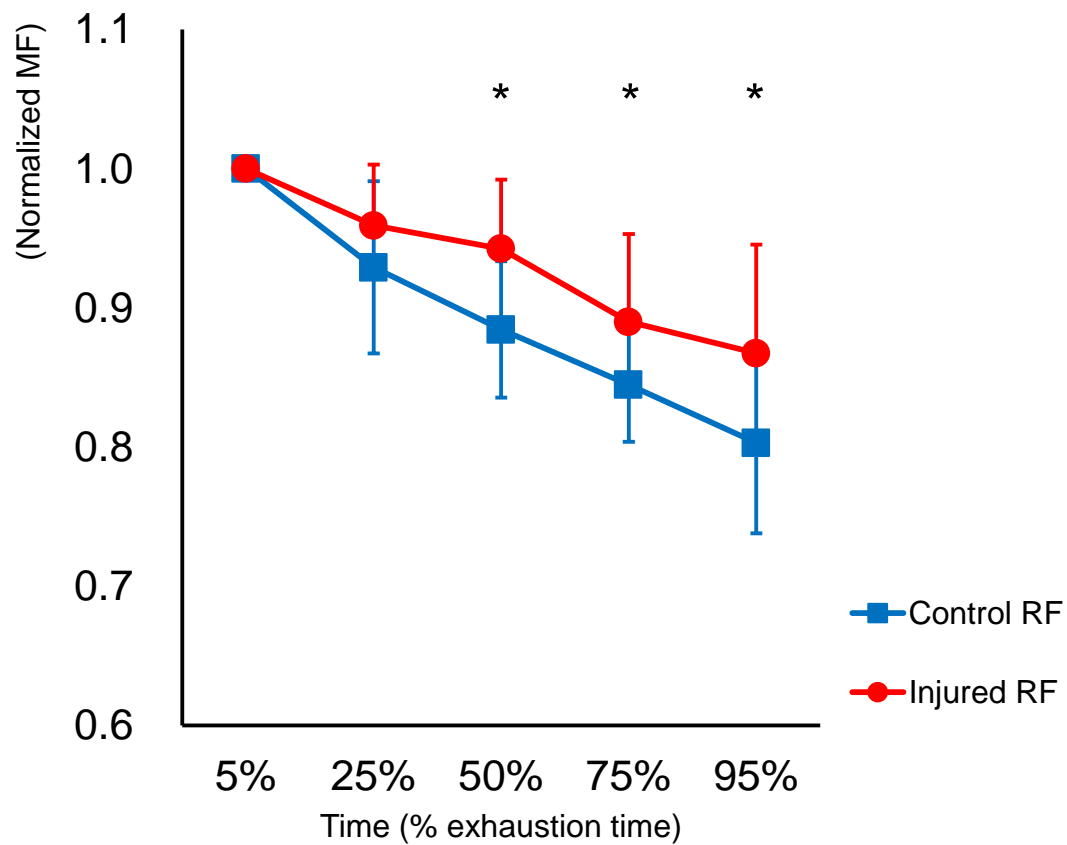


図 22. 中間部・遠位部における損傷群とコントロール群の疲労試技中の Median Frequency 値

膝関節伸展を最大筋力の 50%で発揮をさせて、目標値から 95%を下回るまでのコントロール群と損傷群の中間部・遠位部の Median Frequency 値を示した。* $p < 0.05$.

第4部 総合考察

本博士論文は4部構成とした。第2部はマクロ的視点から、スポーツ競技に生じる大腿部肉離れの疫学調査の一つとして、セパタクロを対象とし外傷・障害調査を行った。第3部はミクロ的視点として、肉離れ既往が神経筋活動に与える影響について多チャンネル表面筋電図 (SEMG) を用いて研究を行った。本博士論文は、大腿部肉離れにおける危険因子の検討や新たなリハビリテーションの知見を得るための基礎研究とすることを目的とした。

第2部はスポーツにおける大腿部肉離れの疫学調査とした。肉離れは、パフォーマンスに影響を与えることから予防すべき外傷である。各競技で肉離れは大腿部に多く発生することが報告されている。特にサッカーや野球、ラグビーといったボールゲームは大腿部肉離れが最も多く発生しており、大腿部肉離れが多いことはボールゲームの特徴である^{78, 90}。

多くのトップアスリートを扱う国立スポーツ科学センターの肉離れの受診状況は2001年10月から2008年7月の期間では27競技322例であり、2016年10月まででは45競技959件であった。肉離れが発生する競技の報告が増えていると考えられるが、2008年7月の時点で肉離れが生じるとされた27競技の中で26競技は外傷・障害についての報告はあるが、セパタクロのみ外傷・障害についての報告はみられない。セパタクロはサッカー、バレーボール、野球、バドミントンといった要素を含む競技である²。そのため、サッカーなどのボールゲームと同様に大腿部肉離れの発生割合が高い可能性があるが、その発生割合は明らかにされていないのが現状である。そこで、大腿部肉離れの疫学調査として、第2部の第2章において、セパタクロにおける大腿部肉離れの発生割合を明らかにするため、大学セパタクロ選手を対象として、外傷・障害調査を行った。その結果、大腿部肉離れの発生割合は48件中16件(33.3%)であり、最も多かった。セパタクロも他のボールゲームと同様に大腿部肉離れが最も多かったため、スポーツ競技の中でも陸上競技のみならずボールゲームは、大腿部肉離れの予防について検討することが重要であると示唆された。

第2部では陸上競技やボールゲームにおいて、大腿部肉離れが多いことを述べた。そのため、セパタクロやサッカーといった競技は大腿部肉離れの予防や競技復帰のリハビリテーションの研究は重要である。大腿部であるハムストリングスや大腿四頭筋の肉離れに

についての研究は散見される 3, 9, 10, 12, 15, 20, 22, 24, 26, 47, 51, 71 が, いまだ発生割合は高い. また, 近年, 肉離れによる神経損傷の可能性が報告されている 39-41, 47, 48 が, 肉離れが神経筋活動に与える影響は明らかにされてはいない. 肉離れによる神経筋活動に与える影響を明らかにすることは再発予防やリハビリテーションの発展に貢献すると考えられる.

第 3 部では大腿部の中で大腿直筋を対象とし, 多チャンネル SEMG を用いて, 大腿直筋の区画的な神経筋活動に与える影響について研究を行った. 多チャンネル SEMG は双極の SEMG と異なり, 筋全体の筋活動を把握することが可能である. 多チャンネル SEMG を用いた研究によって, 健常者の大腿直筋の筋活動は等尺性運動のみならず, 歩行やペダリングでも部位依存的な神経筋活動があることが確認されている 64, 66, 68, 69. さらに, 大腿直筋の疲労特性まで明らかにされている 65. そのため, 第 3 部は, はじめに既に方法論が確立されている大腿直筋を対象とした. 第 3 部の第 2 章では, 慢性の筋内腱肉離れが大腿直筋の区画的な神経筋活動に及ぼす影響について調査した. 筋内腱の肉離れ既往を認める選手を対象とし, 多チャンネル SEMG を用いて等尺性股関節屈曲筋力発揮中の大腿直筋の筋活動を記録し, 検討した. その結果, 筋内腱の肉離れ既往を認める選手と既往を認めない選手の股関節屈曲中の大腿直筋の筋活動は異なる筋活動パターンを示した. 肉離れの既往を認めない選手は先行研究 64 と同様に大腿直筋の近位部が中間部, 遠位部よりも筋活動が大きかった. しかし, 筋内腱の肉離れ既往を認めると, 近位部と中間部の差が消失していた. さらに, 第 3 章は慢性の筋内腱の肉離れ既往が筋疲労に及ぼす影響について調査した. 筋内腱の肉離れ既往を認める選手を対象とし, 等尺性膝関節伸展を最大筋力の 50% で維持できなくなるまで筋発揮をさせ, その際の大腿直筋の筋活動を多チャンネル SEMG で記録し, 検討した. その結果, 筋内腱の肉離れ既往を認める選手の大腿直筋は, 認めない選手と異なる疲労パターンを示した. 肉離れの既往を認めない選手の大腿直筋は, 先行研究 65 と同様に近位部が中間部と遠位部と比較し疲労しやすかった. しかし, 筋内腱の肉離れ既往を認める選手の大腿直筋は, 近位部が疲労しやすいという特性を認めず, 3 部位が同様に疲労していた.

第 3 部の第 2 章と第 3 章の結果より, 大腿直筋の筋内腱の肉離れ既往は大腿直筋の神経筋活動に影響を与えていたことから, 肉離れは筋実質の損傷のみならず, 神経筋活動にも影響を及ぼすことが示唆された. また, 競技復帰していても神経筋活動は健常者と異なる応答をしていた. つまり, 筋力が回復をしても, 神経筋活動は損傷前と同様ではないと考えられる. このことは, 肉離れの再発率の高さやリハビリテーションが長期化する理由と

関係すると推察される。

本研究の結果から、肉離れは MRI による筋損傷の程度で判断するだけでなく、神経筋機能の評価も必要である可能性がある。肉離れのリハビリテーションや予防について、神経筋機能からのアプローチを検討することで、競技復帰までの期間の短縮や再発率の低下に寄与する可能性がある。本研究はそのための基礎研究になると考える。

今後の展望として、セパタクローはサッカーなどの他のボールゲームに大腿部肉離れが多いという結果であったが、後ろ向き調査の結果であったことから、今後は前向き調査により、1000 時間あたりの肉離れ発生率などを明らかにする必要がある。また、肉離れに影響を与える要因の一つに競技特性があり、ランニングやジャンプといった主体となる動作、キック、タックルといった特有な動作などが含まれる⁸¹。競技によって報告されている危険因子は異なるが、大腿部肉離れの危険因子について、メタ解析を行うなど、肉離れの危険因子を包括的に検討することで、予防プログラムの作成に繋がると考える。

本研究では、大腿直筋において、肉離れは神経筋活動に影響を及ぼす可能性が示唆された。損傷の多くみられる大腿直筋の近位部は股関節屈曲の筋発揮への貢献割合が高い⁶⁴。肉離れにより、区画的な神経筋活動が乱れることが、リハビリテーションの長期化に繋がっている可能性がある。そのため、今後は股関節屈曲を積極的に取り入れたプログラムや、コーディネーショントレーニングを取り入れたリハビリテーションにより、競技復帰までの期間が短縮するかを検討するといった介入調査をする必要がある。

また、本研究は健常者において、神経筋活動が明らかとなっている大腿直筋を対象としたため、肉離れの最も多い大腿二頭筋についても大腿直筋のように肉離れの影響があるかを検討する必要がある。今後は肉離れと神経損傷について、その関係を明らかにしていくことで、大腿部肉離れの予防に貢献できる可能性があると考えられる。

参考文献

1. Aasa U, Svartholm I, Andersson F, Berglund L. Injuries among weightlifters and powerlifters : a systematic review. *Br J Sports Med.* 2017 ; 51 (4) : 211-219.
2. Adam NM. Experimental analysis of mechanical properties of selected takraw balls in Malaysia. *Movement, Health & Exercise.* 2014 ; 3.
3. Ahmad CS, Dick RW, Snell E, et al. Major and Minor League Baseball Hamstring Injuries : Epidemiologic Findings From the Major League Baseball Injury Surveillance System. *Am J Sports Med.* 2014 ; 42 (6) : 1464-1470.
4. Akoto R, Lambert C, Balke M, Bouillon B, Frosch KH, Hoher J. Epidemiology of injuries in judo : a cross-sectional survey of severe injuries based on time loss and reduction in sporting level. *Br J Sports Med.* 2017.
5. Alonso JM, Jacobsson J, Timpka T, et al. Preparticipation injury complaint is a risk factor for injury : a prospective study of the Moscow 2013 IAAF Championships. *Br J Sports Med.* 2015 ; 49 (17) : 1118-1124.
6. Arendt-Nielsen L, Mills KR, Forster A. Changes in muscle fiber conduction velocity, mean power frequency, and mean EMG voltage during prolonged submaximal contractions. *Muscle Nerve.* 1989 ; 12 (6) : 493-497.
7. Arnason A, Sigurdsson SB, Gudmundsson A, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Risk factors for injuries in football. *Am J Sports Med.* 2004 ; 32 (1 Suppl) : 5S-16S.
8. Askling CM, Malliaropoulos N, Karlsson J. High-speed running type or stretching-type of hamstring injuries makes a difference to treatment and prognosis. *Br J Sports Med.* 2012 ; 46 (2) : 86-87.
9. Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Proximal hamstring strains of stretching type in different sports : injury situations, clinical and magnetic resonance imaging characteristics, and return to sport. *Am J Sports Med.* 2008 ; 36 (9) : 1799-1804.

10. Balius R, Maestro A, Pedret C, et al. Central aponeurosis tears of the rectus femoris : practical sonographic prognosis. *Br J Sports Med.* 2009 ; 43 (11) : 818-824.
11. Barr KM, Miller AL, Chapin KB. Surface electromyography does not accurately reflect rectus femoris activity during gait : impact of speed and crouch on vasti-to-rectus crosstalk. *Gait Posture.* 2010 ; 32 (3) : 363-368.
12. Bordalo-Rodrigues M, Rosenberg ZS. MR imaging of the proximal rectus femoris musculotendinous unit. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* 2005 ; 13 (4) : 717-725.
13. Brooks JH, Fuller CW, Kemp SP, Reddin DB. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am J Sports Med.* 2006 ; 34 (8) : 1297-1306.
14. Byrne CA, Lyons GM, Donnelly AE, O'Keeffe DT, Hermens H, Nene A. Rectus femoris surface myoelectric signal cross-talk during static contractions. *J Electromyogr Kinesiol.* 2005 ; 15 (6) : 564-575.
15. Cross TM, Gibbs N, Houang MT, Cameron M. Acute quadriceps muscle strains : magnetic resonance imaging features and prognosis. *Am J Sports Med.* 2004 ; 32 (3) : 710-719.
16. De Luca CJ. Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans. *Crit Rev Biomed Eng.* 1984 ; 11 (4) : 251-279.
17. Eckard TG, Kerr ZY, Padua DA, Djoko A, Dompier TP. Epidemiology of Quadriceps Strains in National Collegiate Athletic Association Athletes, 2009-2010 Through 2014-2015. *J Athl Train.* 2017 ; 52 (5) : 474-481.
18. Edouard P, Steffen K, Junge A, Leglise M, Soligard T, Engebretsen L. Gymnastics injury incidence during the 2008, 2012 and 2016 Olympic Games : analysis of prospectively collected surveillance data from 963 registered gymnasts during Olympic Games. *Br J Sports Med.* 2017.
19. Ekstrand J, Hagglund M, Walden M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am J Sports Med.* 2011 ; 39 (6) : 1226-1232.

20. Ekstrand J, Walden M, Hagglund M. Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001 : a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br J Sports Med.* 2016 ; 50 (12) : 731-737.
21. Engebretsen AH, Myklebust G, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Intrinsic risk factors for hamstring injuries among male soccer players : a prospective cohort study. *Am J Sports Med.* 2010 ; 38 (6) : 1147-1153.
22. Freckleton G, Pizzari T. Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport : a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2013 ; 47 (6) : 351-358.
23. Friden J, Lieber RL. Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiol Scand.* 2001 ; 171 (3) : 321-326.
24. Gabbe BJ, Bennell KL, Finch CF. Why are older Australian football players at greater risk of hamstring injury? *J Sci Med Sport.* 2006 ; 9 (4) : 327-333.
25. Gabbe BJ, Finch CF, Bennell KL, Wajswelner H. How valid is a self reported 12 month sports injury history? *Br J Sports Med.* 2003 ; 37 (6) : 545-547.
26. Garrett WE, Jr. Muscle strain injuries. *Am J Sports Med.* 1996 ; 24 (6 Suppl) : S2-8.
27. Garrett WE, Jr., Califf JC, Bassett FH, 3rd. Histochemical correlates of hamstring injuries. *Am J Sports Med.* 1984 ; 12 (2) : 98-103.
28. Gibbs NJ, Cross TM, Cameron M, Houang MT. The accuracy of MRI in predicting recovery and recurrence of acute grade one hamstring muscle strains within the same season in Australian Rules football players. *J Sci Med Sport.* 2004 ; 7 (2) : 248-258.
29. Gyftopoulos S, Rosenberg ZS, Schweitzer ME, Bordalo-Rodrigues M. Normal anatomy and strains of the deep musculotendinous junction of the proximal rectus femoris : MRI features. *AJR Am J Roentgenol.* 2008 ; 190 (3) : W182-186.

30. Hasselman CT, Best TM, Hughes Ct, Martinez S, Garrett WE, Jr. An explanation for various rectus femoris strain injuries using previously undescribed muscle architecture. *Am J Sports Med.* 1995 ; 23 (4) : 493-499.
31. Hawkins RD, Hulse MA, Wilkinson C, Hodson A, Gibson M. The association football medical research programme : an audit of injuries in professional football. *Br J Sports Med.* 2001 ; 35 (1) : 43-47.
32. Herrero H, Salinero JJ, Del Coso J. Injuries among Spanish male amateur soccer players : a retrospective population study. *Am J Sports Med.* 2014 ; 42 (1) : 78-85.
33. Hughes Ct, Hasselman CT, Best TM, Martinez S, Garrett WE, Jr. Incomplete, intrasubstance strain injuries of the rectus femoris muscle. *Am J Sports Med.* 1995 ; 23 (4) : 500-506.
34. Jawis MN, Singh R, Singh HJ, Yassin MN. Anthropometric and physiological profiles of sepak takraw players. *Br J Sports Med.* 2005 ; 39 (11) : 825-829 ; discussion 825-829.
35. Junge A, Dvorak J, Graf-Baumann T. Football injuries during the World Cup 2002. *Am J Sports Med.* 2004 ; 32 (1 Suppl) : 23S-27S.
36. Junge A, Engebretsen L, Alonso JM, et al. Injury surveillance in multi-sport events : the International Olympic Committee approach. *Br J Sports Med.* 2008 ; 42 (6) : 413-421.
37. Kary JM. Diagnosis and management of quadriceps strains and contusions. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2010 ; 3 (1-4) : 26-31.
38. Kelm J, Ahlhelm F, Pitsch W, et al. Sports injuries, sports damages and diseases of world class athletes practicing modern pentathlon. *Sportverletz Sportschaden.* 2003 ; 17 (1) : 32-38.
39. Kouzaki K, Nakazato K, Mizuno M, et al. Sciatic Nerve Conductivity is Impaired by Hamstring Strain Injuries. *Int J Sports Med.* 2017.
40. Kouzaki K, Nosaka K, Ochi E, Nakazato K. Increases in M-wave latency of biceps brachii after elbow flexor eccentric contractions in women. *Eur J Appl Physiol.* 2016 ; 116 (5) : 939-946.

41. Lee K, Kouzaki K, Ochi E, et al. Eccentric contractions of gastrocnemius muscle-induced nerve damage in rats. *Muscle Nerve*. 2014 ; 50 (1) : 87-94.
42. Lindstrom L, Magnusson R, Petersen I. Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency analysis of EMG signals. *Electromyography*. 1970 ; 10 (4) : 341-356.
43. Mair SD, Seaber AV, Glisson RR, Garrett WE, Jr. The role of fatigue in susceptibility to acute muscle strain injury. *Am J Sports Med*. 1996 ; 24 (2) : 137-143.
44. Mariluis CA, Cupito J, Mamone F. Muscle injuries of the rectus femoris muscle. MR update. *Revista Argentina de Radiología*. 2015 ; 79 (4) : 182-191.
45. Mendiguchia J, Alentorn-Geli E, Idoate F, Myer GD. Rectus femoris muscle injuries in football : a clinically relevant review of mechanisms of injury, risk factors and preventive strategies. *Br J Sports Med*. 2013 ; 47 (6) : 359-366.
46. Murtaugh K. Field hockey injuries. *Current sports medicine reports*. 2009 ; 8 (5) : 267-272.
47. Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring strain injuries : factors that lead to injury and re-injury. *Sports Med*. 2012 ; 42 (3) : 209-226.
48. Opar DA, Williams MD, Timmins RG, Dear NM, Shield AJ. Knee flexor strength and bicep femoris electromyographical activity is lower in previously strained hamstrings. *J Electromyogr Kinesiol*. 2013 ; 23 (3) : 696-703.
49. Opar DA, Williams MD, Timmins RG, Hickey J, Duhig SJ, Shield AJ. The effect of previous hamstring strain injuries on the change in eccentric hamstring strength during preseason training in elite Australian footballers. *Am J Sports Med*. 2015 ; 43 (2) : 377-384.
50. Orchard J, Marsden J, Lord S, Garlick D. Preseason hamstring muscle weakness associated with hamstring muscle injury in Australian footballers. *Am J Sports Med*. 1997 ; 25 (1) : 81-85.
51. Orchard JW. Intrinsic and extrinsic risk factors for muscle strains in Australian football. *Am J Sports Med*. 2001 ; 29 (3) : 300-303.

52. Otero JE, Graves CM, Bollier MJ. Injuries in Collegiate Wrestlers at an Elite Division I NCAA Wrestling Program : An Epidemiological Study. *Iowa Orthop J.* 2017 ; 37 : 65-70.
53. Park KJ, Brian Byung S. Injuries in elite Korean fencers : an epidemiological study. *Br J Sports Med.* 2017 ; 51 (4) : 220-225.
54. Pasta G, Nanni G, Molini L, Bianchi S. Sonography of the quadriceps muscle : Examination technique, normal anatomy, and traumatic lesions. *J Ultrasound.* 2010 ; 13 (2) : 76-84.
55. Posner M, Cameron KL, Wolf JM, Belmont PJ, Jr. , Owens BD. Epidemiology of Major League Baseball injuries. *Am J Sports Med.* 2011 ; 39 (8) : 1676-1680.
56. Putman CT, Sultan KR, Wassmer T, Bamford JA, Skorjanc D, Pette D. Fiber-type transitions and satellite cell activation in low-frequency-stimulated muscles of young and aging rats. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2001 ; 56 (12) : B510-519.
57. Silder A, Heiderscheit BC, Thelen DG, Enright T, Tuite MJ. MR observations of long-term musculotendon remodeling following a hamstring strain injury. *Skeletal Radiol.* 2008 ; 37 (12) : 1101-1109.
58. Smith MV, Davis R, Brophy RH, Prather H, Garbutt J, Wright RW. Prospective Player-Reported Injuries in Female Youth Fast-Pitch Softball Players. *Sports Health.* 2015 ; 7 (6) : 497-503.
59. Soligard T, Steffen K, Palmer D, et al. Sports injury and illness incidence in the Rio de Janeiro 2016 Olympic Summer Games : A prospective study of 11274 athletes from 207 countries. *Br J Sports Med.* 2017 ; 51 (17) : 1265-1271.
60. Stuart CA, Richards D, Cripton PA. Injuries at the Whistler Sliding Center : a 4-year retrospective study. *Br J Sports Med.* 2016 ; 50 (1) : 62-70.
61. Sun W, Zhang Y. Present situation investigation and prevention strategy analysis of the college table tennis players' sport injury. *BioTechnology : An Indian Journal.* 2014 ; 10 (9) : 3704-3710.

62. Sung DH, Jung JY, Kim HD, Ha BJ, Ko YJ. Motor branch of the rectus femoris : anatomic location for selective motor branch block in stiff-legged gait. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003 ; 84 (7) : 1028-1031.
63. Verhagen EA, Van der Beek AJ, Bouter LM, Bahr RM, Van Mechelen W. A one season prospective cohort study of volleyball injuries. *Br J Sports Med.* 2004 ; 38 (4) : 477-481.
64. Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Task-dependent spatial distribution of neural activation pattern in human rectus femoris muscle. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012 ; 22 (2) : 251-258.
65. Watanabe K , Kouzaki M , Moritani T . Region-specific myoelectric manifestations of fatigue in human rectus femoris muscle. *Muscle Nerve.* 2013 ; 48 (2) : 226-234.
66. Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Regional neuromuscular regulation within human rectus femoris muscle during gait. *J Biomech.* 2014 ; 47 (14) : 3502-3508.
67. Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Heterogeneous neuromuscular activation within human rectus femoris muscle during pedaling. *Muscle Nerve.* 2015 ; 52 (3) : 404-411.
68. Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Effect of Electrode Location on Task-Dependent Electromyography Responses Within the Human Biceps Femoris Muscle. *J Appl Biomech.* 2016 ; 32 (1) : 97-100.
69. Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Regional neuromuscular regulation within human rectus femoris muscle during gait in young and elderly men. *J Biomech.* 2016 ; 49 (1) : 19-25.
70. Wittstein J, Klein S, Garrett WE. Chronic tears of the reflected head of the rectus femoris : results of operative treatment. *Am J Sports Med.* 2011 ; 39 (9) : 1942-1947.
71. Witvrouw E, Danneels L, Asselman P, D'Have T, Cambier D. Muscle flexibility as a risk factor for developing muscle injuries in male professional soccer players. A prospective study. *Am J Sports Med.* 2003 ; 31 (1) : 41-46.

72. Wolf BR, Ebinger AE, Lawler MP, Britton CL. Injury patterns in Division I collegiate swimming. *Am J Sports Med.* 2009 ; 37 (10) : 2037-2042.
73. Yang D, Morris SF. Neurovascular anatomy of the rectus femoris muscle related to functioning muscle transfer. *Plast Reconstr Surg.* 1999 ; 104 (1) : 102-106.
74. Zemper ED. Track and field injuries. *Med Sport Sci.* 2005 ; 48 : 138-151.
75. 稲見 崇孝, 宮川 博文, 井上 雅之, et al. 筋の形態学および機能的考察を行った陳旧性大腿直筋肉ばなれの一症例. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2012 ; 20 (2) : 364-369.
76. 岩本 紗由美, 倉持 梨恵子, 福林 徹. 大学、高校テニス選手の外傷・障害発生および練習状況の現状. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2011 ; 19 (1) : 36-42.
77. 奥脇 透. 【肉離れの鍼灸治療】 いわゆる肉離れとは? その診断と治療. *医道の日本.* 2006 ; 65 (8) : 38-43.
78. 奥脇 透. トップアスリートにおける肉離れの実態. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2009 ; 17 (3) : 497-505.
79. 奥脇 透. 【手術後の再受傷・再損傷予防の取り組み そのメカニズムとリハビリテーションの実際】 手術後の再受傷・再損傷メカニズムの解明 肉離れ. *臨床スポーツ医学.* 2011 ; 28 (4) : 395-401.
80. 奥脇 透. 【運動連鎖からみた下肢スポーツ障害】 スポーツ外傷と下肢運動連鎖 肉離れと下肢運動連鎖. *臨床スポーツ医学.* 2013 ; 30 (3) : 229-234.
81. 奥脇 透. 【アスリートの肉離れ-今、何が問題なのか-】 総論 肉離れの現状. *臨床スポーツ医学.* 2017 ; 34 (8) : 744-749.
82. 奥脇 透, 白木 仁, 中嶋 耕, et al. 平成 20 年度 日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 肉離れに関する最新の指針. *日本体育協会スポーツ科学研究報告集.* 2009 ; 2008 年度 : 1-29.
83. 春日 規克, 石道 峰典, 鈴木 英樹, 幸篤 武. タイプ移行した筋線維の特性. *愛知教育大学研究報告.* 2010 ; 59 : 35-41.
84. 門田 聡, 藤井 浩. 【持久系スポーツによる運動器障害 II-治療と予防-】 トライアスロン障害 総論. *臨床スポーツ医学.* 2017 ; 34 (7) : 716-719.

85. 北川 七也. スピードスケート競技におけるスポーツ障害とくに腰部障害と身体特性について. *東邦医学会雑誌*. 1996 ; 42 (5) : 544-555.
86. 葛原 憲治, 井口 順太, 井上 鎮子, 間瀬 泰克. bj リーグにおけるプロバスケットボールチームの傷害分析 3 年間の前向き研究. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2013 ; 21 (1) : 187-193.
87. 古賀 寿記, 北村 宏規, 岡 光徳, et al. カヌー競技における腰痛の発生機序に対する一考察. *柳川リハビリテーション学院・福岡国際医療福祉学院紀要*. 2005 ; 1 : 1-4.
88. 坂本 優子, 桜庭 景植, 大林 治, 川北 剛, 井上 毅. スノーボード・スキーボード外傷の近年の動向 スキー外傷との比較検討を含めて. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2006 ; 14 (2) : 218-227.
89. 清水 禎則, 立石 智彦, 長瀬 寅, 中川 照彦, 土屋 正光. 大相撲力士の大腿部肉離れ. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2010 ; 18 (3) : 416-421.
90. 武田 寧, 内山 英司, 岩噌 弘志, et al. スポーツ損傷としての肉離れの疫学的検討. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2001 ; 9 (1) : 82-89.
91. 永野 康治, 福林 徹. 大学ソフトテニス選手における外傷・障害とその影響因子. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2011 ; 19 (1) : 4-9.
92. 眞下 苑子, 藁科 侑希, 白木 仁, 宮川 俊平. 大学女子ハンドボールチームにおける外傷・障害および疼痛発生の実態. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2016 ; 24 (2) : 244-253.
93. 三宅 英司, 八並 光信, 倉林 準, 照屋 浩司. バドミントンの傷害に関する疫学的調査. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2017 ; 25 (2) : 223-231.
94. 山元 勇樹, 加藤 基, 福田 崇, 大垣 亮, 宮川 俊平. 大学新入生アスリートの大腿部肉離れ既往における整形外科受診の有無. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2016 ; 24 (2) : 289-299.
95. 若松 健太, 越智 英輔, 廣瀬 立朗, 桜庭 景植, 中里 浩一, 平沼 憲治. 大学女子サッカー選手におけるハムストリング肉ばなれの発生要因に関する研究. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2010 ; 18 (2) : 314-319.
96. 渡邊 航平. 筋メカニクス研究の最前線 大腿直筋における区画的な神経筋活動. *日本基礎理学療法学雑誌*. 2016 ; 19 (2) : 2-7.

謝 辞

博士論文の執筆を終えるにあたり、日本体育大学大学院博士後期課程に入学してから今日に至るまで、公私に渡り多大なる御指導を賜りました日本体育大学大学院体育科学研究科健康科学・スポーツ医科学系 平沼 憲治 教授に深甚なる謝意と尊敬の意を表します。また、日本体育大学大学院体育科学研究科健康科学・スポーツ医科学系 中里 浩一 教授には研究・論文の貴重な御助言、御指導を賜り深く感謝しております。

本研究を遂行するにあたりまして、数多くの御指導を賜りました東京有明医療大学 小山 浩司 准教授、中京大学 渡邊 航平 准教授に心より深く感謝致します。

本研究に多大な御協力を賜りました日本体育大学セパタクロー部顧問 本多 洋実 准教授、亜細亜大学セパタクロー部部長 三澤 勝 様、日本体育大学 学友会 サッカー部監督 鈴木 政一 教授に心より深く感謝致します。

本研究の測定に快く御協力して下さいました日本体育大学セパタクロー部、亜細亜大学セパタクロー部、日本体育大学 学友会 サッカー部の皆様および本研究を補助して頂いた院生の皆様に心より深く感謝致します。

日本体育大学大学院における研究を理解し、その遂行に向け協力して下さいました勤務先である東京有明医療大学の教職員の皆様に心より深く感謝致します。

最後に、日本体育大学大学院博士後期課程への進学を心より快諾して下さいました学校法人花田学園 櫻井 康司 理事長に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。