

## 〈2012年度大学院スポーツ健康科学研究科博士論文要約〉

Summaries of Doctor's Theses Completed in 2012

## 熱ストレス負荷による廃用性筋萎縮抑制メカニズムに関する研究

博士後期課程2年 吉原 利典  
論文指導教員 内藤 久士 教授

## 【背景】

不活動（廃用）によって生じる筋の萎縮は廃用性筋萎縮と呼ばれるが、このような萎縮は合成系シグナルの低下や分解系シグナルの亢進によって生じることが報告されている。

この筋萎縮に対して、熱ストレスによって発現増加する熱ショックタンパク質（HSP）が抑制効果をもたらすと考えられてきたが、近年では熱ストレスはタンパク質合成に関わる細胞内のシグナル伝達も活性化させ、これが萎縮に対して抑制的に働く可能性も示されている。これらのことから、熱ストレスによる萎縮抑制効果にはHSP以外の新たなメカニズムの存在が示唆されているが、必ずしも十分な研究がなされていない。また、ヒトではベッドレストなどに伴い、遅筋線維のみならず速筋線維においても著しい萎縮が生じるが、先行研究の多くは実験動物の遅筋線維優位な骨格筋（遅筋）を対象としているため、速筋線維優位な骨格筋（速筋）における萎縮に対する熱ストレスの効果については不明である。

## 【目的】

熱ストレス負荷が廃用性筋萎縮に与える抑制効果のメカニズムについて、速筋および遅筋における筋タンパク質合成・分解に関わる細胞内シグナル伝達経路の観点から明らかにすることとした。

## 【方法】

実験1：若齢のWistar系雄性ラットを、対照（CON, n=7）群または37, 38, 39, 40および41°C（n=7）の熱ストレス負荷群に分けた。一晩の絶食後、麻酔下でラットの下半身をそれぞれの温度の温水に浸漬させ、30分間の熱ストレスを負荷した。負荷後、ヒラメ筋と足底筋を摘出し生化学的な分析を行った。

実験2：若齢のWistar系雄性ラットを、対照（CT-Sed）群、尾部懸垂（TS-Sed）群、尾部懸垂（接地あり）+非熱ストレス負荷（TS+NHS）群、尾部懸垂（接地あり）+熱ストレス負荷（TS+HS）群に分けた（各n=10）。TS+HS群は尾部懸垂開始1日前から開始1, 3, 5日後に、無麻酔でラットの全身を暑熱環境（41-41.5°C, 30分）に曝露し

た。実験期間終了後、ヒラメ筋を摘出し生化学・組織学的な分析を行った。

実験3：若齢のWistar系雄性ラットを、対照（CT, n=9）群、熱ストレス負荷（HS, n=10）群、12時間の機械的人工換気（MV, n=10）群または熱ストレス負荷+機械的人工換気（HM, n=9）群に分けた。HS群は筋摘出の36時間前、HM群は12時間の機械的人工換気開始の24時間前に無麻酔で暑熱環境（40-41°C, 60分）に曝露した。実験終了後、横隔膜を摘出し生化学・組織学的な分析を行った。

## 【結果】

実験1：両筋の筋タンパク質合成系シグナルであるAktとp70S6Kのリン酸化は温度依存的に増加し、41°CではCON群と比較して有意に活性化した。一方、分解系シグナルであるLC3-II発現量は両筋において温度依存的に低下し、またヒラメ筋のCaspase-3発現量は41°Cで有意に低下した。

実験2：ヒラメ筋の相対筋重量および筋線維横断面積は尾部懸垂により31%および50%有意に低下したが、TS+HS群ではその低下が軽減された。さらに、TS+HS群では尾部懸垂に誘発されるCalpainの自己分解とタンパク質のユビキチン化、ならびに筋核のアポトーシスの生じた核数の有意な増加が抑制された。

実験3：12時間のMVは横隔膜の筋線維横断面積を12.5%有意に低下させたが、HM群ではその低下は抑制された。HSP72発現量はCTおよびMV群と比較してHSおよびHM群で有意に高値を示した。また、開裂型Caspase-3発現量はMV群でのみ有意な増加が見られ、HM群ではその増加が軽減された。

## 【結論】

廃用性筋萎縮に対する熱ストレス負荷は、速筋においてはアポトーシス系を、遅筋においてはアポトーシス系に加えてカルパイン系、ユビキチン-プロテアソーム系のようなタンパク質の分解系の活性化を抑制または軽減させることで廃用性筋萎縮の抑制に貢献するが、速筋および遅筋ともにタンパク質の合成系であるAkt/mTOR系に与える影響は小さい。

## Unstable shoes着用時の歩行特性に関する研究

### Effect of energy expenditure and muscle tendon behavior during walking with unstable shoes

博士後期課程 小山 桂史  
論文指導教員 内藤 久士 教授

#### 【研究背景】

前後方向に湾曲したソール形状のシューズは Unstable shoes と呼ばれ、そのシューズの着用が歩行時のエネルギー消費量や筋活動量に及ぼす影響についてはある特定の速度で検討されてきた。しかしながら、その結果については先行研究で一致しておらず、速度と酸素摂取量、筋活動量との関係については検討されていない。また歩行時の力発揮については、これまで腓腹筋内側頭の筋線維と腱組織の長さ変化から、筋腱複合体の伸長短縮サイクルによって効率的に力を発揮していることが示されてきた。しかしながら、そのことは裸足もしくは通常のウォーキングシューズ (Stable shoes) での歩行で示されており、Unstable shoes の着用が筋腱複合体の動態に及ぼす影響については知られていない。

#### 【目的】

本研究は、Unstable shoes 着用時の歩行特性に及ぼす影響を以下の2つの研究 (研究1と研究2) に分けて明らかにすることを目的とした。研究1では、Unstable shoes の着用が様々な速度で歩行時のエネルギー消費量および筋活動量に及ぼす影響を検討し、研究2ではこれらの要因に及ぼす影響を筋腱複合体の動態の観点から検討した。

#### 【方法】

研究1では健常な成人男性14名が被験者として参加した。被験者は Unstable shoes と Stable shoes をそれぞれ着用して、トレッドミル上を歩行した。歩行速度を3.6 km/h から7.2 km/h まで0.9 km/h ずつ6分間ごとに漸増させ、各速度で歩行時の酸素摂取量と心拍数、主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE) を測定した。速度と酸素摂取量の関係から、酸素コストおよび至適速度を算出した。また3.0 km/h から7.0 km/h まで1.0 km ずつ漸増させ、各速度で歩行時の大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、

前脛骨筋、腓腹筋内側頭、ヒラメ筋の表面筋電図を記録し、1分間の筋電図積分値 (iEMG) を算出した。

研究2では、健常な成人男性7名が被験者として参加した。被験者は Unstable shoes と Stable shoes をそれぞれ着用して、トレッドミル上を3.6 km/h, 5.4 km/h, 7.2 km/h で歩行した。歩行動作をビデオカメラで撮影し、膝関節および足関節の角度を算出した。同時に、腓腹筋内側頭の筋腱複合体の動態を撮影し、筋線維および羽状角を算出した。筋腱複合体および腱組織の長さは、先行研究 (Grieve et al., 1978) の方程式を用いて推定した。

#### 【結果】

研究1では、Unstable shoes を着用した歩行では Stable shoes を着用した歩行と比較して、いずれの歩行速度においても心拍数は0.4%から2.9%、酸素摂取量および酸素コストは3.4%から4.9%の範囲で有意に高値を示した。さらに腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の iEMG はそれぞれ6%から16%、8%から23%の範囲で有意に高値を示した。しかしながら、RPE および至適速度はシューズ間に有意な差は認められなかった。

研究2では、Unstable shoes を着用した歩行では Stable shoes を着用した歩行と比較して、いずれの歩行速度においても接地中の膝関節および足関節の動作範囲が狭くなり、筋腱複合体および腱組織の長さ変化量がそれぞれ3.8 mm から4.2 mm, 2.9 mm から5.6 mm の範囲で有意に低値を示した。しかしながら、筋線維の長さの変化量はシューズ間に相違が認められなかった。

#### 【結論】

Unstable shoes 着用時の歩行では、いずれの速度においてもエネルギー消費量および下腿後部の筋活動量が増大し、その要因の一つとしては腱組織の長さ変化量の低下が示唆された。

## ストレッチングが誘発する筋力の低下に関する研究

## Acute effects of stretching on maximal isometric force production

宮原 祐徹

指導教員 内藤久士 教授

【背景】近年、ストレッチングが筋力を低下させることが報告されているが、その多くは静的ストレッチングについて検討しており、他のストレッチングのタイプについて十分に検討しているとは言えない。また、多くの先行研究が用いているストレッチングの時間は極端に長いので、現場への応用を考慮すると、現実的なストレッチング時間での検討も必要であると思われる。さらに、運動前のストレッチングについて勘案すると、ストレッチングの主目的である柔軟性の向上を考慮した上で、筋パフォーマンスの低下について検討すべきであるが、この観点からの検討は不十分である。加えて、ストレッチングが誘発する筋力低下の要因の一部は、柔軟性の向上に関与するため、柔軟性と筋力における変化の程度の関係について検討することは、ストレッチング後の筋パフォーマンスの低下のメカニズムを探る上でも意義があると思われる。

【目的】本研究の目的は、ストレッチングが誘発する筋力の低下における課題を1)ストレッチングのタイプ、2)ストレッチングの時間の観点から検討し、さらに3)ストレッチングによる柔軟性向上と筋力低下の程度の関係についても検討することであった。

【方法】ストレッチングのタイプと筋力低下との関連について(課題1)検討するために、実験1と2を実施した。実験1においては、13名の健康な男子大学生を対象として、固有受容性神経筋促通法(proprioceptive neuromuscular facilitation: PNF)ストレッチング前後での股関節屈曲の可動域(range of motion: ROM)、PNF後の膝屈曲での最大随意収縮力(maximal voluntary contraction: MVC)、ストレッチング時とMVC時の積分筋電図(integrated electromyogram: iEMG)を測定し、ストレッチングなし(コントロール)条件、および静的ストレッチング(SS)条件と比較した。実験2においては、9名の健康な男子大

学生を対象として、バリスティックストレッチング(BS)前後での股関節屈曲のROM、膝屈曲でのMVC、iEMG、Premotor-time、および電気力学的遅延を測定し、SS条件と比較した。次に、ストレッチングの時間と筋力低下との関連について(課題2)検討するために、実験3を実施した。実験3は、10名の健康な男子大学生を対象として、ストレッチングなし、30秒、および60秒のSS前後で長座体前屈を測定し、各ストレッチング条件後に膝屈曲のMVCを測定した。さらに、ストレッチングによる柔軟性向上の程度と筋力低下の程度の関係について(課題3)検討するために、すべての実験において、ROMとMVCにおける変化の程度の関係について検討した。

【結果】課題1については、PNFおよびSSはMVCを低下させたが、その程度に違いはみられなかったことが示された(実験1)。また、BSおよびSSはMVCを低下させたが、BSにおけるMVCの低下は、SSよりも小さかったことが示された(実験2)。また、MVCの低下に伴うiEMGの低下は見られなかった(実験1, 2)。課題2については、60秒のSSはMVCを低下させたが、30秒のSSはMVCを低下させなかったことが示された(実験3)。課題3については、PNFはSSよりもROMを向上させたが、MVCの低下の程度においてはSSとの差はみられなかったことが示された(実験1)。また、BSはSSと同程度にROMを向上させたが、MVCの低下の程度はSSよりも小さかったことが示された(実験2)。さらに、30秒のSSは、60秒のSSと同程度にROMを向上させたが、MVCを低下させなかったことが示された(実験3)。

【結論】ストレッチングによる最大随意収縮力の低下の程度は、ストレッチングのタイプおよび時間によって異なるが、その筋力低下は、柔軟性の向上の程度によって一部説明することが可能である。

## 日本人プロサッカー選手のキャリアトランジションに関する研究

上代圭子

論文指導教員 野川春夫

【背景】 2010年7月に文部科学省から発表された「スポーツ立国戦略」においても、セカンドキャリア対策が盛り込まれるなど、スポーツ選手のキャリアトランジションへの関心は国家レベルでも高まっていると言える。

中でも、日本人プロサッカー選手は若くして引退する（プロ野球：約29歳，大相撲：約32歳，Jリーグ；約26歳）にも拘わらず、引退時にも何の保証もないため、他の日本のプロスポーツ選手と比較して、引退後は厳しい状況におかれると考えられる。また、10年前と比べ引退後の受け皿は増加し、進路は多様になっていると考えられる。

だが従来の研究は、「トップアスリート」「一流選手」を対象としつつ、アマチュアとプロフェッショナルが混在し、職業的な観点をあまり重要視していない研究が多く、また、縦断的・時系列的に行った実証研究は極めて少ない。

【目的】 本研究の目的は、日本人プロサッカー選手のキャリアトランジションのモデルを構築することである。そこで、本目的を達成するため、下記2点の副目的を設定する。

① プロサッカー選手のキャリアトランジションに関する研究を進めていくための視点として、プロサッカー選手を中心に、スポーツ選手のキャリアトランジションに関する研究の動向を検討する。

② キャリアトランジションに関するモデルの1つである Role-Exit Model (Drahota & Eitzen, 1998) の有用性を吟味し、日本人プロサッカー選手のキャリアトランジションのモデルを構築する。

【方法】 調査対象：日本人元プロサッカー選手（1999年の上代と重野の研究と同一の被験者36名中24名）

調査方法：「Interview Guide」を用いた半構造化直接面接法（平均1時間程度）

調査期間：2010年10月～2011年12月

分析方法：質的内容分析

【結果】 社会老年学説や死亡学説を援用した研究から始ま

り、1980年代よりスポーツ選手の引退を対象とした研究は急激に増えた。その後、スポーツ選手の引退は人生の変遷過程の単なる一部に過ぎないという理由から、近年は社会学説や心理学説などの変遷（Transitional）モデルを用いる傾向にあるが、縦断的・時系列的に追跡して行った研究はない。また、対象はアマチュアスポーツ選手が多く、プロスポーツ選手を対象とした研究は少ない。

Jリーグ創成期の日本人元サッカー選手は、非自立的にキャリアトランジションを行い、「元」サッカー選手としての役割残余が長く続く。つまり、完全には卒業せず将来の計画をたてず、引退後も役割残余を長い期間持つ。そしてこれを可能にしている点は日本の特徴である。

そして、日本人元サッカー選手のキャリアトランジションにおける特徴を踏まえて、下記のモデルを構築した（図1参照）。

【結論】 欧米では代替キャリアを模索（stage2）してから転換期（stage3）を迎えるが、日本のプロサッカー選手は転換期（stage3）を経験してから代替キャリアを模索（stage2）するという逆転現象がみられる。

したがって、Stage2とStage3を入れ替えるモデルへの修正が必要である。

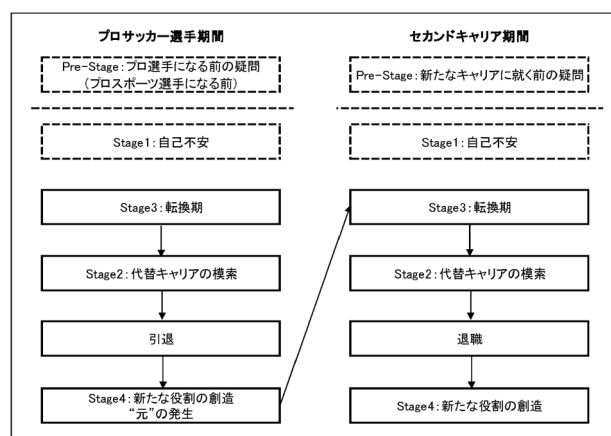


図1 日本人プロサッカー選手のキャリアプロセスモデル (Semi-Role Exit Model)

## 2012年度 スポーツ科学領域 博士論文要約

## Oxygen uptake, heart rate, perceived exertion, and integrated electromyogram of lower and upper extremities during level and Nordic walking on a treadmill

順天堂大学協力研究員 杉山 康司  
(静岡大学教育学部保健体育講座)  
論文指導教員 教授 形本 静夫

ノルディックウォーキング(本文にはNWと記載)は、近年、世界中で愛好者が急増している。しかしながら、それらの歩行特性は必ずしも十分に解明されていない。そこで、本研究はトレッドミルを用いてノルディックウォーキングおよび通常ウォーキング(本文にはLWと記載)の呼吸循環パラメータ(心拍数、酸素摂取量および換気量)、主動筋(上腕三頭筋、外側広筋、大腿二頭筋、腓腹筋外側および前脛骨筋)の筋電図活動並びに主観的運動強度(OMNIスケール)について測定し、ノルディックウォーキングの生理学的特性について解明することを目的とした。

定期的に運動を行っている健康な成人10名(男性4名および女性6名)を被験者とした。彼らは国際ノルディック協会公認のマスターインストラクターからノルディックウォーキングテクニックを学び、正確にノルディックウォーキングが行える者であった。被験者は、トレッドミル上で、ノルディックウォーキングおよび通常ウォーキングでの最大下歩行テストを行った。実験のプロトコルは、トレッドミル勾配0%、初期速度60m/分で3分間歩いた後、2分毎に10m/分ずつ120m/分までスピードを漸増するものであった。運動中、心拍数、酸素摂取量、換気量を連続的に測定し、各負荷の最後15秒間に主観的強度としてOMNIscaleを記録した。OMNIscaleは上肢、下肢および全身に分けて記録した。また、運動中、上腕三頭筋、外側広筋、大腿二頭筋、腓腹筋および前脛骨筋の5箇所において筋電図を記録し、スピード毎に単位時間あたりのiEMGを求めた。

実験の結果、ノルディックウォーキングの酸素摂取量は70m/分を除く全てのスピードにおいて通常ウォーキングのそれよりも有意( $P < 0.05$ )に高い値を示し、平均心拍

数においても、ノルディックウォーキングの方が通常ウォーキングよりすべてのスピードで2~7拍/分、有意( $P < 0.05$ )に高い値を示した。同様に換気量もまたすべてのスピードでノルディックウォーキングが有意( $P < 0.05$ )に高い値を示した。上肢におけるOMNIscaleは、通常ウォーキングでは60~120m/分の間ほとんど変化がなかったのに対し、ノルディックウォーキングでは60m/分で $1.5 \pm 0.73$ 、120m/分時に $5.1 \pm 2.2$ まで上昇し、全てのスピードにおいて有意( $P < 0.05$ )な差が認められた。相対値で示した平均筋放電量は、外側広筋においては全てのスピードにおいてノルディックウォーキングが有意( $P < 0.05$ )に低い値を示した。大腿二頭筋では平地90m/分間まで通常ウォーキングとノルディックウォーキングはほぼ同等であったが、100m/分と120m/分にノルディックウォーキングが有意に低い値( $P < 0.001$ )を示した。また、腓腹筋も、70および90から120m/minにおいてノルディックウォーキングが有意に低い( $P < 0.05$ )値を示した。

以上の結果から、ノルディックウォーキングは、通常歩行に比べて、歩行スピードの増加とともに運動強度をより高め、上肢および呼吸筋のエネルギー消費を増大させることが分かった。また、その一方で、立脚期に用いられる下肢筋放電量を低下させることができることも示され、下肢への負担軽減効果が筋活動様相から確かめられた。さらに、酸素摂取量と下肢筋放電量との関係が $Y = aX + b$ の直線関係にあることも確認され、上肢および下肢のエネルギー消費量の割合を算出したところ、上肢および呼吸筋に関わるエネルギー消費の割合は全体の18~30%の範囲であることが示唆された。

なお、本論文はJournal of Physiological Anthropology. 2013, 32: 2に掲載されたものである。