

博士論文

連続動作遂行における先行動作の制御
—ドロップジャンプをモデルとして—

Control of the prior movement in sequential movements

- Studies on drop jump as an experimental model -

飯田祥明

目次

本論文で使用する用語・略語	6
用語	6
略語	8
第1章 諸言	9
1-1. 序	9
1-2. 研究小史	10
(i) 着地からのジャンプに関する研究の概要	10
(ii) 確定条件における着地からのジャンプ	12
(iii) 不確定条件におけるドロップジャンプ	14
本論文の目的と構成	15
本論文の構成	16
研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ	20
第2章 (実験1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性	21
2-1. はじめに	21
2-2. 方法	21
(i) 被験者	21
(ii) 実験の概要	22
(iii) キネマティック・キネティックおよび筋電図データの取得	22

(iv)	データ解析	24
(v)	統計処理	26
2-2.	結果	26
(i)	動作プロフィール	26
(ii)	跳躍高と測定変数との関係との関係	28
(iii)	衝撃指標と着地時の関節角度・筋活動との関係	29
(iv)	衝撃指標とジャンプ時パラメータの関係	29
2-3.	考察	30
2-4.	小括	35
第3章	(実験2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響	53
3-1.	はじめに	53
3-2.	方法	53
(i)	被験者	53
(ii)	実験の概要	54
(iii)	トレーニングプログラム	55
(iv)	統計処理	56
3-3.	結果	56
(i)	衝撃の変化	56
(ii)	跳躍高の変化	57
(iii)	所要時間・キネマティクスの変化	58

(iv) キネティクスの変化.....	58
3-4. 考察.....	59
3-5. 小括.....	62
研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ	72
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備.....	73
4-1. はじめに.....	73
4-2. 方法.....	73
(i) 被験者	73
(ii) 動作課題	74
(iii) データ取得	75
(iv) 分析	76
(v) 統計	77
4-3. 結果.....	77
(i) 動作の切り替えが無かった条件 (DJNS、LANDNS)	75
(ii) 動作の切り替えがあった条件 (DJS、LANDS)	77
4-4. 考察.....	80
4-5. 小括.....	83
第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと 接地前の運動準備との関係	97
5-1. はじめに.....	97

5-2.	方法	97
(i)	被験者	97
(ii)	データ取得・分析	98
(iii)	統計処理	98
5-3.	結果	98
(i)	動作の切り替えが無かった条件 (DJNS)	98
(ii)	動作の切り替えがあった条件 (DJS)	99
5-4.	考察	99
5-5.	小括	101
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンスおよび		
接地前の運動準備に及ぼす影響 -バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-.....		
6-1.	はじめに	107
6-2.	方法	107
(i)	被験者	107
(ii)	データ取得	108
(iii)	分析	109
(iv)	統計処理	109
6-3.	結果	109
(i)	音刺激への反応時間の競技間比較	109
(ii)	DJ 条件における競技間比較	109

(iii) DJNS 条件における競技間比較.....	110
(iv) DJS 条件における競技間比較	110
6-4. 考察.....	112
6-5. 小括.....	115
第7章 総括.....	127
7-1. 結果の要約.....	127
7-2. ジャンプの遂行条件に応じた先行する着地動作の制御.....	130
7-3. 運動の経験による適応.....	132
7-4. 想定される運動制御メカニズム	135
7-5. 研究の限界と今後の課題.....	139
7-6. 結論.....	140
引用文献.....	142
付録.....	156
謝辞.....	158

本論文で使用する用語・略語

用語

着地からのジャンプ：ある滞空状態から連続的に遂行されるジャンプ動作を意味する。

ドロップジャンプ：実験モデルやトレーニング手法として、台上から落下した後にジャンプを遂行する動作のこと指す。接地時間が短い Bounce Drop Jump および、接地時間が比較的長い Countermovement Drop Jump に分類される。

動作が確定した状況：これから遂行すべき動作が確定しており、動作の変更を要求される可能性の無い状況。

動作が不確定な状況：周辺状況が時々刻々と変化し、遂行しようとする動作の変更を要求される可能性がある状況。

確定条件：課題動作を遂行する際に指示されている動作を変更する可能性が無い実験条件。

不確定条件：課題動作を遂行する際に指示されている動作を変更する可能性が有る実験条件。本論文では特にドロップジャンプと着地動作のどちらを遂行するか不確定である条件を指す。

運動準備：ある連続する動作を遂行する際に、先行する動作をどのように準備しているかを意味する。本論文では特にドロップジャンプの接地前における姿勢および筋活動のことを指す。

パフォーマンス：ある動作の遂行による成果を指し、本論文では特にドロップジャンプによる跳躍高、接地時間およびドロップジャンプ指数（跳躍高／接地時間）のことを意味する。

衝撃：物体に対して瞬間的に加わる力。本論文における衝撃は、着地直後における床反力垂直成分のピーク値を意味する。

衝撃指標：本論文では体重あたりの衝撃の大きさを表す。

衝撃緩衝：着地時の衝撃を小さくすることを意味する。

下肢: 足部、下腿部、大腿部および殿部を含む身体セグメントの総称。

体幹: 肩峰から腸骨稜までの身体セグメントを指し、本論文では、体幹筋として、腰部脊柱起立筋、腹直筋および外腹斜筋を被験筋とした。

キネティクス: 身体運動の原因となる力について研究をおこなう動力学 (kinetics) のことを意味する。キネティクスに関するデータのことをキネティックデータと呼ぶ。

キネマティクス: 運動中の身体の形状やその変化について研究をおこなう運動学 (kinematics) のことを意味する。キネティクスに関するデータのことをキネティックデータと呼ぶ。

関節トルク: 関節周りの回転力を意味する。本論文では主働筋と拮抗筋の活動による回転力の合計 (正味のトルク) を取り扱う。

関節パワー: 関節トルクによる仕事率。関節角度と関節角速度の内積で算出される。

関節仕事: 関節トルクによる仕事の量。関節パワーを当該局面で積分することで算出される。

スティフネス: 曲げやねじりの力に対する、変形しづらさ (剛性) を意味する。本論文では特に身体全体の剛性を表す下肢スティフネスと各関節の剛性を表す関節スティフネスを用いる。

最大随意収縮: 随意的に発揮できる最大の筋収縮 (MVC: maximal voluntary contraction)。本論文では特に等尺性の最大随意収縮を意味する。

筋活動水準: 本論文では、分析する局面における筋放電量を等尺性最大随意収縮時における筋放電量で規格化した値 (%EMG_{MVC}) を意味する。

略語

DJ (drop jump) : ドロップジャンプ

LAND (landing) : 着地

SJ (squat jump) : スクワットジャンプ

DJNS (Drop Jump with No Sound) : 音刺激が無かった不確定条件のドロップジャンプ

DJS (Drop Jump with Sound) : 音刺激があった不確定条件のドロップジャンプ

LANDNS (Landing with No Sound) : 音刺激が無かった不確定条件の着地

LANDS (Landing with Sound) : 音刺激があった不確定条件の着地

JH (jump height) : 跳躍高

CD (contact duration) : 接地時間

DJI (drop jump index) : ドロップジャンプ指数

EMG(electromyogram): 筋電図

MVC (maximal voluntary contraction):最大随意収縮

RA (rectus abdominis): 腹直筋

EO (external oblique): 外腹斜筋

ES (erector spinae): 脊柱起立筋

Gmax (gluteus maximus): 大殿筋

RF (rectus femoris): 大腿直筋

BF (biceps femoris): 大腿二頭筋

VL (vastus lateralis): 外側広筋

MG (medial gastrocnemius): 腓腹筋内側頭

SOL (soleus): ヒラメ筋

TA (tibialis anterior): 前脛骨筋

Fz (Force of z axis): 床反力垂直成分

CoMz (center of mass of z axis): 身体重心高

BB (Basketball group) : バスケットボール群

TF (track & field group) : 陸上競技群

第1章 諸言

1-1. 序

人間や動物の身体運動は自身を取り巻く環境に適応的に調節され、柔軟に実行されている。柔軟に運動を遂行するためには、状況を把握さらには予測しながら、あらかじめ動作を適切に調節しておくことが重要である。

また、多くのスポーツ活動中には、非常に複雑な状況の中で身体の滞空を伴うダイナミックな運動が成し遂げられる。このような場面では、滞空状態から着地した後にジャンプに移行する動作が多くみられるが、ジャンプによる運動結果はそれに先行する着地の状態に影響を受けると考えられている。この点については、様々な着地からのジャンプ動作をモデルとして科学的実証がなされてきた (Arampatzis et al., 2001; Farley & Morgenroth, 1999; Hobara et al., 2011; Hoffren, Ishikawa, & Komi, 2007; Horita et al., 2002; Kawabata et al., 2008; Kuitunen, Ogiso, & Komi, 2011)。

先述したような周辺状況に応じたジャンプを遂行するため、人間は動作目的や次の動作に関する予測の可否に応じて先行する着地動作を変容させているものと推測される。このような臨機応変な運動を可能としている先行動作についての理解は、人間の周辺環境に適応的な運動制御のメカニズムの解明に寄与するものと考えられる。また、運動制御メカニズムの理解を深めるに留まらず、新たなスポーツトレーニング・リハビリテーション手法の開発、さらにはダイナミックな運動 (Niiyama & Kuniyoshi, 2010) や状況への臨機応変な適応 (畑田・宮本, 2002)が課題とされるロボット工学における応用など多方面への展開が期待される。

しかしながら着地からのジャンプに関する先行研究の大部分は、動作を変更する可能性の無い条件における素早いジャンプに関するものに集中している (Arampatzis et al., 2001; Farley & Morgenroth, 1999; Hobara et al., 2011; Hoffren et al., 2007; Horita et al., 2002; Kawabata et al., 2008; Kuitunen et al., 2011)。そのためこれまで得られてきた知見は、人間が実際のスポーツ中に成し遂げているような状況に応じた運動の一部分を解明するに留まっているのが現状である。この点を解決するためには、スポーツ中のジャンプを単純化した動作モデルを用い、ジャンプの目的や予測の可否を変更した際に生じる着地動作の変化について検討する必要がある。台上から着地した後に垂直跳を行う動作であるドロップジャンプは、動作目的の設定やパフォーマンス評価が容易であり、被験者間で落下高などの動作条件を揃えることが可能なため、今回の実験モデルに適していると考えられる。

そこで本論文では、遂行条件に応じたジャンプを可能としている先行する着地動作の制御について明らかにすることを目的とし、最大跳躍高達成を目的とした条件および動作が不確定な条件におけるドロップジャンプに関する研究をおこなった。

1-2. 研究小史

(i) 着地からのジャンプに関する研究の概要

着地からジャンプに移行する動作の研究においては、台上から着地し垂直跳びを行うドロップジャンプ、短い周期で垂直跳びを繰り返すホッピング、左右へのジャンプを繰り返すラテラルステップなど、様々な種類の動作が採用されてきた。

着地からのジャンプ動作に関する先行研究は、大きく分けて動作開始後に運動を変更する可能性の無い条件（確定条件）におけるものと、運動を変更する可能性の有る条件（不確定条件）におけるものに分類することができ、大部分は動作が確定した条件下で遂行されている（Arampatzis et al., 2001; Bobbert, Huijing, & van Ingen Schenau, 1987; Ferris & Farley, 1997; Hobara et al., 2010; H. Hobara et al., 2011; Ishikawa & Komi, 2004; Komi & Bosco, 1978; Kuitunen et al., 2011; Kyröläinen & Komi, 1995; Lees & Fahmi, 1994; Moritani, Oddsson, & Thorstensson, 1990; Walsh et al., 2004; Yoon, Tauchi, & Takamatsu, 2007; Zuur et al., 2010）。

また Bobbert et al. (1987) は、ドロップジャンプを接地時間が短く股・膝関節の運動範囲が小さい Bounce Drop Jump (BDJ) と、接地時間が長く股・膝関節の運動範囲が小さい大きい Countermovement Drop Jump (CDJ) とに分類している。そして、これまでの着地からのジャンプに関する研究の大多数は「速く高く跳ぶ」という指示のもと遂行される BDJ のような形式を課題動作として選定してきた。

さらに、ドロップジャンプやホッピングはトレーニング手段として用いた際の効果に関する研究も数多く見られ、跳躍高の増大や接地時間の減少を認める報告が多くなされている（Adams et al., 1992; Kotzamanidis, 2006; Malisoux et al., 2006; Markovic, 2007; Wilson, Murphy, & Giorgi, 1996; Wilson et al., 1993）。また、着地動作単独でのトレーニング実験も数例行われているが（McNair, Prapavessis, & Callender, 2000; Onate, Guskiewicz, & Sullivan, 2001; Prapavessis et al., 2003）、これらは衝撃緩衝技術に対する効果を検討した

ものであり、着地からのジャンプパフォーマンスに及ぼす影響についての検討はなされていない。

(ii) 確定条件における着地からのジャンプ

着地からのジャンプ動作は、ジャンプに先行して足関節や膝関節周りの筋腱複合体に伸張が起こる典型的な伸張 - 短縮サイクル (Stretch-shortening cycle: SSC) 運動である。先行研究においては、落下高や接地時間によって筋腱の伸長度・伸張速度を変化させ、反動効果の変化を検討することが主要なテーマとなった (Ishikawa & Komi, 2004; Komi, 1984a, 1984b; Komi & Bosco, 1978; Kyröläinen & Komi, 1995; Lees & Fahmi, 1994; Walshe & Wilson, 1997)。反動効果の要因としては、直列弾性要素に蓄積された弾性エネルギーの再利用、筋活動レベルおよび筋張力の立ち上がりに必要な時間の確保、伸張反射、伸張履歴による増強効果の4つが考えられており、なかでも直列弾性要素による弾性エネルギーの再利用の貢献が大きいと多くの研究において結論付けられている (Anderson & Pandy, 1993; Asmussen & Bonde-Petersen, 1974; Bosco, Komi, & Ito, 1981; Bosco, Luhtanen, & Komi, 1983; Bosco, Tarkka, & Komi, 1982; Cavagna, Dusman, & Margaria, 1968; Komi, 1984a, 1984b; Komi & Bosco, 1978; Thys, Cavagna, & Margaria, 1975)。また、足関節にはアキレス腱という長い直列弾性要素が付着しており (Arakawa et al., 2010)、大きな反動効果が期待できる (Bobbert, Huijing, & van Ingen Schenau, 1986; Fukashiro et al., 1995)。このように反動効果が学術的な注目を浴びたという背景から、先行研究の多くは短い接地時間内でジャンプを行う着地からのジャンプを採用してきた (Arampatzis et

al., 2001; Ishikawa & Komi, 2004; Komi, 1984a; Komi & Bosco, 1978; Kyröläinen & Komi, 1995; Lees & Fahmi, 1994; Walsh et al., 2004; Yoon et al., 2007)。

また、跳躍高、接地時間といったパフォーマンス指標と、着地時のバイオメカニクスの指標との関係に関する研究も行われている (Arampatzis et al., 2001; Hoffren et al., 2007; Horita et al., 2002; Kawabata et al., 2008)。例えば Hoffren et al. (2007) は接地前のヒラメ筋の筋活動量がドロップジャンプの離地速度と正の相関関係にあると報告している。また、Kawabata et al. (2008) は着地時の腹筋群の活動水準と接地時間との間に負の相関があることを示している。これらの先行研究は着地技術がその後のジャンプパフォーマンスに影響していることを示す実例であり、「速く高く」跳ぶためには接地前後の下肢や体幹の筋活動を増加させ、着地のスティフネスを高めるように着地動作を制御することが重要であることが明らかにされている。

その一方、実際のスポーツにおいては、バレーボールのブロック時のジャンプのように最高点に到達するために比較的時間をかけて遂行する着地からのジャンプも多く用いられる。それにもかかわらず、接地時間への制限を設けずに実施する着地からのジャンプを採用した例は、先述した Bobbert et al. (1987) および性別が指示による動作変容に及ぼす影響を検討した Walsh et al. (2004) など少数の研究に限られ、「できる限り高く」跳ぶのに適した着地動作の特性については明らかにされていない。

(iii) 不確定条件におけるドロップジャンプ

ジャンプを多用する対人スポーツであるバスケットボールやバレーボールなどのスポーツにおいては、相手選手の動きやボール位置に合わせた動作変更を要求されることが多い。このような状況下で着地からのジャンプ動作を行う際、人間は動作が確定された条件下と異なる着地の調節を行っていると考えられる。不確定条件下におけるドロップジャンプについての知見は、対人スポーツでみられるような臨機応変なジャンプ動作の制御やそのトレーニング方法の解明に寄与し、ロボット工学などの他分野への応用にもつながると考えられる。

動作が不確定な条件下における着地の制御を主眼とした研究は Leukel et al. (2012) に限られる。彼らは不確定条件におけるドロップジャンプではヒラメ筋の接地前筋活動が減少すると報告し、動作の不確実性の増加がジャンプに先行する着地の制御に影響を及ぼすことを初めて示した (図 1-2)。しかしながらこの研究では、確定条件と不確定条件における姿勢およびヒラメ筋以外の筋活動の差異、ならびにジャンプパフォーマンスに影響を及ぼすと推測される着地の準備状態や専門競技経験の違いについての検討はなされていない。したがって、不確定な状況下において優れたジャンプパフォーマンスを発揮するために重要な準備動作の制御や運動経験については明らかにされていないのが実状である。

本論文の目的と構成

着地からジャンプに移行する運動において、着地の状態はその後のジャンプパフォーマンスに影響を及ぼしており、ジャンプの目的や予測の可否によって適切な着地動作は異なると考えられる。人間がスポーツ中に成し遂げているような臨機応変なジャンプ動作の実態について理解を深めるためには、これまで行われてきた「速く高いジャンプ」だけでなく、時間的制約のない最大高到達を目的としたジャンプや動作が不確定なジャンプに適した着地動作について明らかにする必要がある。

そこで本論文は、遂行条件に応じたジャンプを成し遂げるための着地動作の制御を明らかにすることを目的とし、ドロップジャンプ動作を研究モデルとした2つの研究を行った。まず研究Ⅰにおいては最大高到達を目的としたドロップジャンプにおける着地動作（実験1）および着地トレーニングの効果（実験2）についての実験を、研究Ⅱにおいては動作が不確定な状況におけるドロップジャンプの着地準備（実験3）とパフォーマンスとの関係（実験4）ならびに専門競技経験の影響（実験5）に関する実験をおこなった。

本論文の構成

第1章 諸言

研究Ⅰ 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ

第2章 (実験1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

「できるだけ高く跳ぶ」ドロップジャンプにおける下肢・体幹筋群の活動水準、活動パターン、着地時の床反力などのパラメータと跳躍高との関係を分析することで、最大跳躍高に影響する着地の力学的特性を明らかにすることを目的とした。

第3章 (実験2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

着地衝撃緩衝トレーニング前後のドロップジャンプにおける跳躍高および動作の特徴を比較することで、着地トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

動作変更の音刺激が発生しない条件とランダムに発生する条件におけるドロップジャンプの接地前の筋活動、接地時の下肢関節角度を比較することで、不確定な条件における着地準備の特徴を明らかにすることを目的とした。

第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと

接地前の運動準備との関係

確定条件との相対的なジャンプパフォーマンスと、接地前の筋活動および接地時の姿勢

第1章 諸言

との関係を検討することで、不確定条件において「速くかつ高く」跳ぶための着地動作の特性を明らかにすることを目的とした。

第6章 (実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス

および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

バスケットボール選手と陸上競技選手のジャンプパフォーマンスおよび接地前の筋活動、接地時の姿勢を比較することで、ジャンプを多用する対人スポーツの経験が不確定条件におけるドロップジャンプに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

第7章 総括

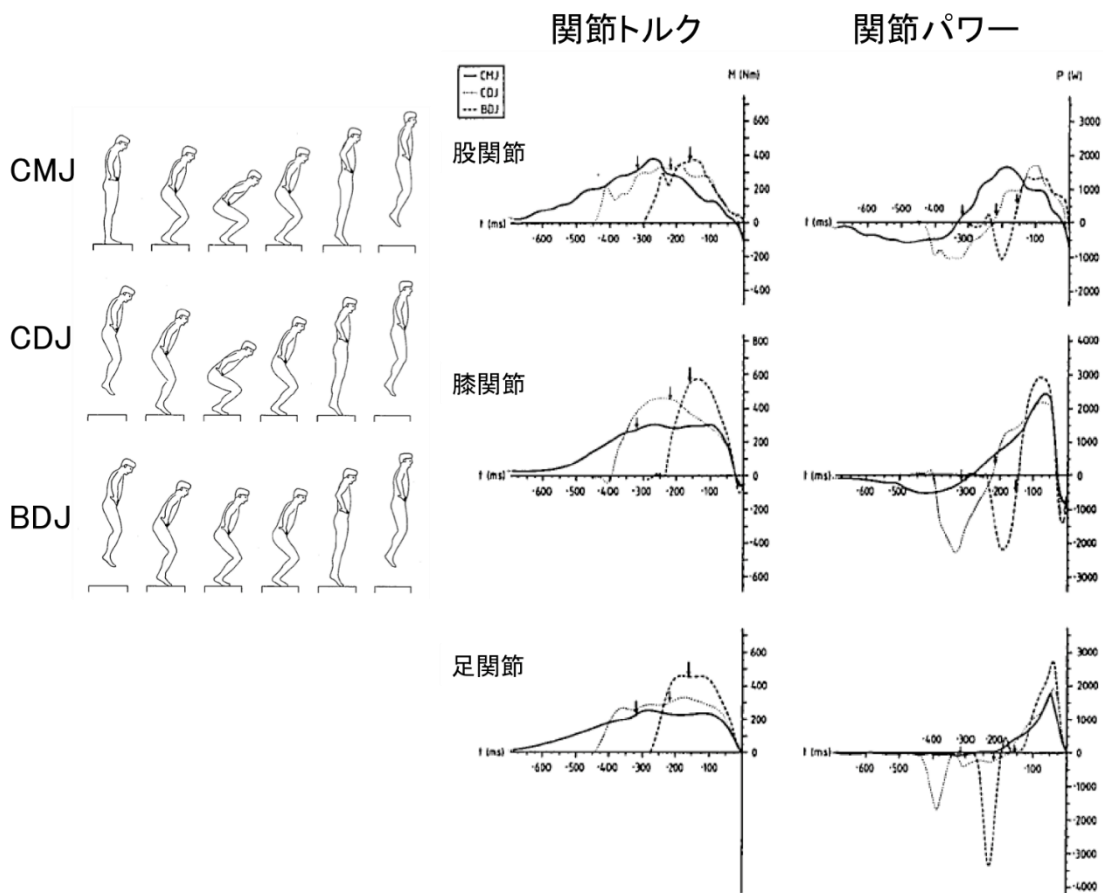


図 1-1 : Bobbert et al. 1987 の図を改変

Countermovement Jump (CMJ)、Countermovement Drop Jump (CDJ)、Bounce Drop Jump (BDJ)のキネティクスの比較が行われた。

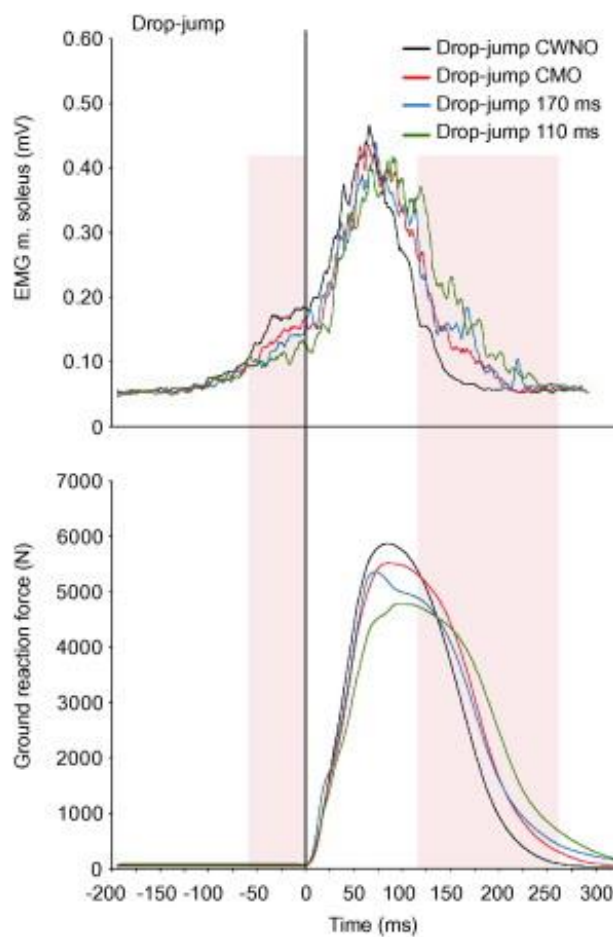


図 1-2： 不確定条件 (cue may occur :CMO)と確定条件 (cue may not occur :CMNO)の

ドロップジャンプ動作比較 (Leukel et al. (2012) Fig.2 を改変)

CMO 条件では接地前のヒラメ筋の活動が減少し、接地時間が増大する結果となった。

研究 I

落下後の運動が確定した条件での

ドロップジャンプ

第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

2-1. はじめに

着地からのジャンプに関する多くの先行研究では、「速く高く跳ぶ」ことを目的とし、膝・股関節の可動範囲を小さくした形式の動作が採用されてきた (Arampatzis et al., 2001; Bobbert et al., 1987; Ishikawa & Komi, 2004; Komi, 1984b; Komi & Bosco, 1978; Kyröläinen & Komi, 1995; Lees & Fahmi, 1994; Walsh et al., 2004; Yoon et al., 2007)。また、このような速く高いジャンプの達成のためには、接地直後から大きな床反力を得るために、下肢・体幹のスティフネスを高めるような着地を準備することが肝要であることが示唆されている (Arampatzis et al., 2001; Hoffren et al., 2007; Horita et al., 2002; Kawabata et al., 2008)。

一方で実際のスポーツ中には、最高点に到達するために比較的時間をかけて遂行する形式の着地からのジャンプも多く用いられる。しかしながら、これまでに「できるだけ高く跳ぶ」ための先行する着地動作については明らかにされていない。そこで実験 1 では、最大高到達を目的としたドロップジャンプを採用し、動作中の床反力、関節角度および筋活動パターンと跳躍高との関係を検討することにより、ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性を明らかにすることを目的とした。

2-2. 方法

(i) 被験者

健康な成人男性 17 名 (年齢: 25.2 ± 2.3 歳, 身長: 174.3 ± 6.5 cm, 体重: 70.5 ± 9.8 kg, 平均

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

値±標準偏差) が、被験者として本実験に参加した。実験の実施に先立ち、被験者には本実験の目的、実施内容、測定に伴う危険性について説明し、被験者から書面にて実験参加の同意を得た。本実験は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) 実験の概要

本実験では、床反力計の端からの距離 20cm に設置した高さ 35cm の台からのドロップジャンプ (Drop Jump: DJ) を被験者に課した。被験者は裸足で、手を腰に当て左足支持の状態から落下し、視線は常に前方のマーカに置くように指示を受けた。また「できる限り高くジャンプする」ことを課題実施の条件とし、試行間に十分な休息をはさみ、5 試行実施した。

(iii) キネマティック・キネティックおよび筋電図データの取得

課題動作の遂行中、3次元動作解析システム (Motion Analysis Corp., USA) を用いてキネマティックデータを、床反力計 (Kistler, Switzerland) によって床反力データを、さらに表面筋電計 (日本光電, 日本) によって、下肢および体幹の筋電図データを取得した。各データのサンプリング周波数は、キネマティックデータ 200Hz、床反力および筋電図データ 1000Hz に設定した。3次元動作解析システムによる計測では、頭頂部、前頭部、後頭部、右肩甲骨下、左右肩峰、左右肘頭、左右手茎状突起、左右大転子、左右膝関節中心、左右足関節中心、左右踵骨後部、左右第三中足骨遠位端の各箇所計 20 個の反射マーカを貼付した。なお課題動作中の関節角度は図 2-1 に示すように定義し、90 度 (deg) を直角とした。

筋電図は、腹直筋 (RA)、外腹斜筋 (EO)、脊柱起立筋 (ES)、大殿筋 (Gmax)、大腿二頭筋 (BF)、大腿直筋 (RF)、外側広筋 (VL)、腓腹筋内側頭 (MG)、ヒラメ筋 (SOL)、前脛骨筋 (TA) の各筋について計測し、身体右側より導出した。RA は臍の右側方約 2cm 付近、ES は第 3 腰椎部右側方約 2cm 付近とした。計測に先立ち、電極貼付部を除毛し、アルコール綿で払拭することで電極間抵抗を減少させた。電極は筋腹部に貼付 (電極間距離 20mm) し、アース電極は脛骨粗面に貼付した。

試行中の被験筋の筋放電量を規格化するために、課題試行の実施に先立ち、各筋の等尺性最大随意収縮 (MVC) 時の筋電図を得るための測定を以下の方法により実施した。その際、まず SOL および MG に関しては、両肩に垂直下方への負荷をかけ、カーフレイズの姿勢での MVC を被験者に課した。その他の筋に関しては、徒手筋力検査法 (Hislop & Montgomery, 2002) を参考に、被験筋の遠位端への徒手抵抗を与え、これに対抗する形で被験者に MVC を行わせた。その際の被験者の姿勢および各関節角度は次のように規定した。RA および EO については、股関節約 135° (解剖学的肢位: 180°)、膝関節約 90° (解剖学的肢位: 180°)、足関節約 135° (解剖学的肢位: 90°) での仰臥位股関節屈曲動作を、ES については、股関節約 200°、膝関節約 180°、足関節約 120°での腹臥位股関節伸展動作を実施した。Gmax および BF については、股関節約 200°、膝関節約 180°、足関節約 90°での立位股関節伸展動作を、RF については、股関節約 90°、膝関節約 90°、足関節約 90°での座位股関節屈曲動作を、VL に関しては、股関節屈曲約 120°、膝関節屈曲約 180°、足関節底屈約 90°での座位膝関節伸展動作を実施した。TA に関しては、股関節屈曲約 180°、膝関節屈曲約 180°、足関節底屈約 90°での立位足関節背屈動作を実

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

施した。MVC 試行は各筋 2 試行ずつ実施し、1 試行 3 秒間とした。2 試行の筋電図を全波整流した後、それぞれの試行について 1 秒間の筋放電量が最大となる区間を選別し、その区間における筋放電量の平均値を算出した。2 試行のなかで、より高値を示した試行の値を、MVC 時の筋放電量 (EMG_{MVC}) として採用した。

(iv) データ解析

本実験では、ジャンプ後の CoM 最高点から立位時の CoM の高さを減じることによって跳躍高を算出した (Baca, 1999)。3 次元動作解析システムによって得た身体各部位の座標データに対し、4 次の位相遅れなしバターワースローパスフィルタ (遮断周波数 8Hz) を用いて、マーカーの揺れによるノイズを軽減した後 (Hara et al., 2008; Winter, 2004)、身体重心高 ($CoMz$)、ならびに股関節、膝関節、足関節の各角度 (HIP_{angle} , $KNEE_{angle}$, $ANKLE_{angle}$) および角速度 (HIP_{angle_v} , $KNEE_{angle_v}$, $ANKLE_{angle_v}$) を算出した (Winter, 2004)。床反力データからは、床反力垂直成分 (Fz) を算出した。

本実験では、取得したキネマティックおよびキネティックデータに、逆ダイナミクス法を適用することで、股関節、膝関節および足関節の関節トルク (HIP_{torque} , $KNEE_{torque}$, $ANKLE_{torque}$) を算出した (阿江・藤井, 2002)。使用したモデルおよび運動方程式は付録に示す。また、関節トルクに関節角速度を乗じることで関節パワーを算出した (HIP_{power} , $KNEE_{power}$, $ANKLE_{power}$)。関節パワーに関しては局面毎に積分し仕事を算出した (阿江・藤井, 2002)。さらにスティフネスに関する指標として、下肢スティフネスと関節スティフネスを算出した。下肢スティフネスは Fz 最大値 (N) を接地から最下点までの $CoMz$ 変位量 (m) で除すことによって算出した (Butler, Crowell, & Davis, 2003)。関節スティフ

ネスについては各関節の下降局面の体重あたりの負の仕事量 (J/BW) を接地から最下点までの角度変位 (deg) で除すことによって算出した (Arampatzis, Bruggemann, & Metzler, 1999)。

各筋電図データは、4 次の位相遅れなしバターワースハイパスフィルタ (遮断周波数 20Hz) を用いて、電極およびリード線の揺れによるノイズを軽減し (Jacobs & van Ingen Schenau, 1992a; Kurokawa et al., 2003) 、全波整流を行った後に、各筋の EMG_{MVC} により規格化 (%EMG_{MVC}) した。

本実験では、取得したデータの分析に際し、先行研究 (Kellis, Arabatzi, & Papadopoulos, 2003; Kulas et al., 2006) にならい、動作を接地の 100ms 前から接地まで (PRE 局面) 、接地から 100ms 後まで (ABSORPTION 局面) 、接地 100ms 後から CoM が最下点に達するまで (BRAKING 局面) 、重心が上昇し始めて離地するまで (PROPULSION 局面) の 4 局面に分けた (図 2-2)。また、キネマティクス、キネティクス、筋電図の各時系列データから被験者全体の時系列パターンの特徴を抽出するため、局面毎に MATLAB (The MathWorks, USA) の補間関数 (interp1) により全被験者のデータ数を揃え、17 名分を平均処理した値により示した。

さらに、筋電図データから各局面の %EMG_{MVC} の平均値、筋放電がピークとなるタイミングならびに床反力データから衝撃指標を算出した。筋放電ピークタイミングは、各筋電図の全波整流後のデータを 4 次の位相遅れなしバターワースローパスフィルタ (遮断周波数 10Hz) で平滑化した後に算出した。

<筋放電ピークタイミング>

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

筋放電ピークタイミングは、先行研究 (Hirashima et al., 2002) を参考にし、セグメント間の筋活動のコーディネーションを検討する指標として算出した。ピークタイミングについては、ABSORPTION 局面から BRAKING 局面ならびに PROPUKSION 局面の所要時間をそれぞれ 100% とし、%EMG_{MVC} が何% の時点でピーク値を示したかを算出した。

< 衝撃指標 >

床反力データから、着地直後の衝撃の大きさを表す衝撃指標を算出した。衝撃指標は ABSORPTION 局面の Fz ピーク値 (N) を各被験者の体重 (N) で除すことで求めた (Decker et al., 2003; Zhang, Bates, & Dufek, 2000)。

(v) 統計処理

測定値の基本統計量は平均値±標準偏差 (S.D.) により表した。関節間の角速度ピーク、スティフネスおよび筋間の筋放電ピークタイミングにおける比較には、それぞれ反復測定による一元配置分散分析を用い、Tukey-Kramer 法による事後検定を行なった。跳躍高と着地時の測定変数との関係については、Pearson の相関係数 (r) を用いて検討した。なお相関関係の分析に際し、平均値±3S.D. 範囲外の測定変数は外れ値として除去し (出村, 2007)、分析の対象とした測定変数の個数 (n) は該当する図の中に示した。いずれの検定においても有意水準は 5% とした。

2-2. 結果

(i) 動作プロフィール

図 2-3 に床反力垂直成分 (Fz) および身体重心高 (CoMz) 時系列データ (17 名分平

均) を示す。全被験者において BRAKING 局面終了時までの F_z のピークは、
ABSORPTION 局面内で発生した。ABSORPTION 局面における F_z のピーク値は
1951.7±447.6N (体重の 2.82±0.55 倍) であった。また、PROPULSION 局面における F_z
のピーク値は 1558.8±258.7N (体重の 2.26±0.20 倍) であった。 F_z の力積は ABSORPTION
局面 44.1±13.9 N・s、BRAKING 局面 135.6±30.1 N・s、PROPULSION 局面 184.0±32.2 N・
s であった。DJ の BRAKING 局面の所要時間は 354.5±60.1ms (接地から重心最下点まで
の所要時間は 454.5±60.1ms)、PROPULSION 局面の所要時間は 318.6±52.8ms であり、
接地時間は 773.1±107.9ms であった。

関節角度時系列変化についてみると (図 2-4)、ABSORPTION 局面および BRAKING
局面では足関節から膝関節および股関節の順で屈曲 (足関節は背屈) が生じた。また、
接地後に角速度が負のピークを示すまでの所要時間は、股関節 113.7±14.9ms、膝関節
81.0±11.3ms、足関節 61.8±11.9ms であり、足関節では膝関節、股関節よりも、膝関節で
は股関節よりも有意 ($F = 129.3, P < 0.01$) に短かった。PROPULSION 局面においては、
股関節から膝関節、そして足関節の順で伸展 (足関節は底屈) が生じ、角速度が正のピ
ークを迎えて離地するまでの所要時間は、股関節 70.4±18.6ms、膝関節 54.0±12.1ms、足
関節 37.4±9.9ms であり、足関節から膝関節および股関節の順で有意に短かった ($F =$
53.1, $P < 0.01$)。

関節トルクおよびパワーの時系列変化についてみると (図 2-5)、BRAKING 局面と
PROPULSION 局面において、股関節の発揮する伸展トルクおよびパワーが膝関節・足
関節より顕著に高値を示した。また、体重あたりの下肢スティフネス (N/BW/m) は 6.87

±1.76 であり、各関節のスティフネス (J/BW/deg) は股関節 0.20 ± 0.07 、膝関節 0.21 ± 0.08 、足関節 0.19 ± 0.04 であった。関節スティフネスに関して、有意な関節間差は認められなかった ($F = 0.33, P > 0.05$)。

図 2-6 に下肢および体幹の筋活動時系列パターン、図 2-7 および図 2-8 に全被験筋の筋放電ピークのタイミングを示した。ABSORPTION 局面から BRAKING 局面においては、平均値として局面全体の約 35~60%の部分で全ての筋のピークが生じており、筋活動ピークに順序づいたパターンは観察されなかった (図 2-7a)。単関節の伸展 (足関節は底屈) 筋に着目すると、Gmax と ES においてのみ有意な差が認められた (図 2-7b, $P < 0.01$)。これに対し、PROPULSION 局面においては、TA が局面の約 30%時点でピークを示し、その後 ES から順に股関節と膝関節の伸展、足関節の底屈に関与する筋群が順にピークを迎え、最後に体幹屈曲筋である RA と EO が 80%付近でピークを示すという順序だった放電が観察された (図 2-8a)。単関節の伸展 (足関節は底屈) 筋に着目すると、ES と SOL, Gmax と SOL および VL と SOL との間に有意な差が検出され (全て $P < 0.01$)、近位-遠位の順で筋放電が出現するパターンが認められた。

(ii) 跳躍高と測定変数との関係との関係

本実験では跳躍高と着地時の測定変数との関係を明らかにするため、接地から最下点までの局面におけるキネティクスおよびキネマティクスに関する測定変数と跳躍高との相関関係を検討した。その結果、跳躍高は衝撃指標 (ABSORPTION 局面における Fz ピーク値/体重)、最小足関節角度、BRAKING 局面における膝関節平均パワーおよび仕事量と有意な負の相関関係 (衝撃指標: $r = -0.589, P < 0.05$, 図 2-8a; 最小足関節角度: r

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

= -0.629, $P < 0.05$, 図 2-9b; BRAKING 局面膝関節平均パワー: $r = -0.604$, $P < 0.05$, 図 2-9c; BRAKING 局面膝関節仕事: $r = -0.665$, $P < 0.05$, 図 2-9d) を示した。

(iii) 衝撃指標と着地時の関節角度・筋活動との関係

本実験では、衝撃の要因となる接地姿勢・筋活動動態を探るため、接地時の股関節、膝関節、足関節角度、各筋の PRE 局面および ABSORPTION 局面の %EMG_{MVC} と衝撃指標との相関関係を検討した。その結果、衝撃指標は、PRE 局面における SOL (図 2-10) と ABSORPTION 局面における SOL および RA (図 2-11) の各 %EMG_{MVC} と有意な正の相関関係を示した (PRE 局面: SOL, $r = 0.595$ $P < 0.05$)、(ABSORPTION 局面: SOL, $r = 0.566$; RA, $r = 0.566$ いずれも $P < 0.05$)。

(iv) 衝撃指標とジャンプ時パラメータの関係

先行研究 (Leukel et al., 2008; Walshe & Wilson, 1997)において、落下高増加に伴う着地時の衝撃の増大が、ドロップジャンプにおける筋活動および下肢関節の振る舞いに影響することが示唆されている。そこで本実験では、BRAKING 局面から PROPULSION 局面に至る一連の動作における筋活動および関節運動に、着地時の衝撃が影響を及ぼしたと考え、各筋の BRAKING および PROPULSION の各局面における %EMG_{MVC} および各関節最小角度と衝撃指標との相関関係を検討した。その結果、衝撃指標は PROPULSION 局面における SOL の %EMG_{MVC} と有意な正の相関関係を示した ($r = 0.540$, $P < 0.05$, 図 2-12)。

また、衝撃の大きさが筋活動ピークタイミングに及ぼす影響を検討するため、被験者 17 名を衝撃指標で並び替え、衝撃大群 8 名と衝撃小群 8 名に分けて群間比較をおこな

った (中間位の 9 番目の被験者は分析から除いた)。図 2-13 に各群の ABSORPTION から BRAKING 局面における単関節伸展筋群活動ピークタイミングを示す。両群ともに筋間の有意な差は認められなかった。各筋のピークタイミングを群間で比較したところ、衝撃小群の Gmax が衝撃大群におけるものよりも有意に大きな値を示した ($P < 0.05$)。図 2-14 に各群の PROPULSION 局面における単関節伸展筋群活動ピークタイミングを示す。衝撃小群は ES と SOL および VL との間に有意な差が検出され (全て $P < 0.05$) 被験者全体で算出した場合と同様に、近位-遠位筋活動パターンが認められた。一方で、衝撃大群においては全ての筋間でピークタイミングに有意な差は認められなかった。また、各筋のピークタイミングを群間で比較したところ、衝撃小群の ES が衝撃大群におけるものよりも有意に小さな値を示した。さらに本実験では、各被験者の局面内の相対タイミングだけでなく接地からの絶対時刻による筋活動動態の違いを検討するため、接地 20ms の範囲で平均した接地前後 (接地前 100 ms ~ 接地後 200ms) の筋活動水準を衝撃の大小群間で比較した (図 2-15, 16, 17)。その結果、大腿直筋の接地前 80-60 ms ($P < 0.05$)、大腿二頭筋の接地後 180-200 ms ($P < 0.05$)、大殿筋の接地後 80-100 ms ($P < 0.05$) およびヒラメ筋の接地前 100-80 ms ($P < 0.01$)の範囲においてが有意な群間差が認められた。

2-3. 考察

DJ の接地時間の平均値は 677.4 ± 113.4 ms、最小関節角度の平均値は股関節 $61.3 \pm 11.4^\circ$ 、膝関節 $73.1 \pm 8.9^\circ$ 、足関節 $63.8 \pm 4.6^\circ$ であった。BDJ と CDJ の比較をなした Bobbert,

Huijing et al. (1987) によると、接地時間は BDJ が約 300ms、CDJ が約 450ms であり、最小関節角度は BDJ が股関節約 130°、膝関節約 110°、足関節約 70°、CDJ が股関節約 100°、膝関節約 85°、足関節約 70°であると報告されている。このような先行知見に比較して、本実験の DJ は CDJ よりもさらに接地時間が長く、関節可動域が大きい動作であったといえる。また、本実験においては体重あたりの下肢スティフネスが 6.87 ± 1.76 (N/m/BW) であり、関節スティフネスは関節間に有意な差を認めなかった。全力でのホッピングを用いた先行研究では、下肢スティフネスが約 55 (同単位に変換した場合) であり、膝関節スティフネスは足関節の約 3 倍、股関節の約 2 倍となると報告されている (Hobara et al., 2009)。これらの知見を考慮すると、本実験のドロップジャンプは「速く高く跳ぶ」ジャンプ動作と比較して、下肢全体のスティフネスが非常に低く、特に膝関節のスティフネスが相対的に低いドロップジャンプであったと言える。

ABSORPTION 局面および BRAKING 局面では、足関節、膝関節、股関節の順で屈曲 (足関節は背屈) が生じた (図 2-4)。このような関節角度の変化は衝撃緩衝を目的とした着地動作で観察されたもの (Iida et al., 2011) と類似しており、衝撃を受け止める時間を長くし、接地に伴う衝撃を緩衝するために起きたと考えられる。また、PRE 局面および ABSORPTION 局面までの筋電図パターン (図 2-6) についても Iida et al. (2011) におけるものと類似しており、本実験の DJ における着地動作は衝撃緩衝に適したものであったと推測される。

PROPULSION 局面では、股関節、膝関節、足関節の順で伸展 (足関節は底屈) が生じた (図 2-4)。さらに、%EMG_{MVC} は ES、Gmax、VL、SOL の順でピークを迎え、近位-

遠位筋活動パターンが認められた (図 2-8b)。ジャンプ動作を用いた先行研究 (Bobbert & van Ingen Schenau, 1988; Eloranta, 1996, 1997; Pandy & Zajac, 1991; Pandy et al., 1990)において観察されたジャンプ時の近位-遠位筋活動パターンは、下肢の筋群に限定されており、本実験における体幹の伸展筋がジャンプ時の近位-遠位筋活動パターンに含まれるという本実験の結果は、これまで報告されていない新しい知見である。Bobbert & van Ingen Schnau (1988)、Pandy & Zajac (1991)、および Anderson & Pandy (1993) は、この近位-遠位筋活動パターンによって、近位から遠位関節への力伝達が行われ、セグメント間の力伝達に貢献すると述べており、本実験の DJ における近位から遠位への関節運動および筋活動も同様の作用があったと推察される。そして、RA および EO は PROPULSION 局面の約 80% 時点でピークを示した (図 2-8a)。先行研究によると、膝関節屈曲筋群の離地直前の活動はジャンプ時の膝関節過伸展を防ぐ役割を果たしていると報告されている (van Ingen Schenau, Bobbert, & Rozendal, 1987)。また、跳躍の方向を制御するためには体幹の角度を垂直に保つ必要があるとされている (Bobbert & van Ingen Schenau, 1988; Nagano, Komura, & Fukashiro, 2007; Pandy & Zajac, 1991)。これらのことを考え合わせると、RA および EO が PROPULSION 局面終盤でピークタイミングを迎える筋活動パターンには、離地直前に体幹の過後傾を防ぎ跳躍方向を垂直に制御する働きがあったものと推測される。

本実験において、跳躍高は衝撃指標 (ABSORPTION局面におけるFzピーク/体重)、足関節最小角度、BRAKING局面における体重あたりの膝関節平均パワーおよび仕事量との間に有意な負の相関関係を示した (図2-9)。跳躍高が足関節最小角度と負の相関関

係を持ったという結果は、より足関節を背屈した被験者が高い跳躍高を達成できる傾向を示すものである。これは、足関節の最大背屈角度の減少がドロップジャンプの跳躍高の低下に関連すると報告した先行研究と矛盾しない (Papaiakovou, 2013)。また、BRAKING局面における膝関節のパワーと仕事が跳躍高と有意な負の相関関係を持ったという結果は、膝関節による着地時の負の仕事が大きいほど、跳躍高が大きくなる傾向を示唆している。Horita et al. (2002) は、ドロップジャンプの離地速度は膝関節の最下点における伸展トルクと正の相関関係にあると報告している。以上のような本実験と Horitaらの知見は共通して、ドロップジャンプの下降局面における膝関節による力発揮動態が跳躍高に影響することを示すものである。

衝撃指標 (ABSORPTION 局面における F_z ピーク値/体重) は、跳躍高と有意な負の相関関係を示した (図 2-9a)。この結果は、本実験の DJ の場合、着地時の衝撃が小さいほどジャンプに移行した際の跳躍高が高くなることを示唆するが、ドロップジャンプの跳躍高が高い群の衝撃が、跳躍高が低い群のものと比較して大きいという Hoffrén et al. (2007) の報告とは異なる。その原因の 1 つに課題動作の違いがあると考えられる。Hoffrén et al. (2007) が採用した課題動作は、Bobbert et al. (1987) の分類にしたがえば BDJ に相当するものであり、着地後の動作の切り返しが速く接地時間が短い。この動作形式において、着地時の垂直床反力のピークは重心最下点時付近に発生するため、着地時の大きな床反力が跳躍高の増大に貢献すると考えられる。それに対し本実験で遂行された DJ は、先に述べたように接地時間が長く、着地時に股関節、膝関節および足関節の大きな屈曲 (足関節は背屈) によって衝撃を緩衝した後、ジャンプに移行する動作形

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

式であった。この動作形式において着地時の床反力垂直成分は、PROPULSION 局面より以前の ABSORPTION 局面においてピークを示しているため (図 2-3)、着地時の大きな床反力は跳躍高の増大に貢献しないと推察される。

本実験では、大きな衝撃がドロップジャンプ動作に及ぼす影響を明らかにするため、衝撃の大きな群と小さな群の筋活動パターンの比較を行った。その結果、衝撃が大きかった群では下降局面 (ABSORPTION~BRAKING 局面) における G_{max} のピークタイミングが有意に早かった (図 2-13)。また、局面による時間規格をしない比較の結果、接地後 80-100ms の範囲で衝撃大群の活動水準が有意に大きな値を示した (図 2-16)。さらに、衝撃指標と PROPULSION 局面 SOL の $\%EMG_{MVC}$ との間に有意な正の相関関係が認められ (図 2-12)、衝撃が大きかった被験者群では PROPULSION 局面における近位-遠位筋活動パターンが認められなかった (図 2-14)。本実験の結果だけで衝撃指標と跳躍高の間にある因果関係の全容を明らかにすることは難しいが、大きな衝撃によって跳躍高獲得に有利な筋活動パターンが変容し、足関節中心のジャンプ動作になったことが跳躍高の低下につながったものと推測される。

DJ における衝撃指標は、PRE 局面での SOL (図 2-10) および ABSORPTION 局面での SOL、RA (図 2-11) の各 $\%EMG_{MVC}$ と正の相関関係を示した。このような結果は、DJ において接地時の衝撃を緩衝できる者ほど高い跳躍高を達成でき、その制御に PRE 局面での SOL および ABSORPTION 局面での SOL、RA の各筋活動水準が関与していることを示唆するものといえる。これまで、着地における衝撃の大きさは、下肢スティフネスと関連することが多く報告されてきた (Arampatzis et al., 2001; Devita & Skelly, 1992;

Santello, 2005)。Hoffrén et al. (2007) は、ドロップジャンプの着地において、MG および SOL の活動水準と足関節スティフネスとの間に、正の相関関係が認められたと報告している。さらに Kawabata et al. (2008) は着地時の腹筋群の活動水準と接地時間との間に負の相関があることを報告し、腹筋群の活動が着地時の体幹部のスティフネスに影響していると考察している。これらの知見を考え合わせると、PRE 局面における SOL および ABSORPTION 局面における SOL、RA の過度の活動は、それぞれ足関節、股関節および体幹のスティフネスを増加させ、接地時の衝撃を増加させたものと推察される。

2-4. 小括

本実験は最大高到達を目的としたドロップジャンプの跳躍高に影響を及ぼす着地の力学的特性を明らかにするため、動作中の床反力、関節角度および筋活動パターンと跳躍高との関係を検討した。その結果、衝撃指標 (ABSORPTION 局面における Fz ピーク値/体重) が、跳躍高との間に有意な負の相関関係を示し、着地時の衝撃が小さいほどジャンプに移行した際の跳躍高が大きくなることが示唆された。また、衝撃指標は PRE 局面での SOL および ABSORPTION 局面での SOL、RA の各%EMG_{MVC} と正の相関関係を示し、過度な筋活動によるスティフネスの増大を抑制した状態で着地することが衝撃の緩衝に重要であると推測された。さらに、衝撃指標の大きさに被験者を 2 群に分け筋活動パターンを比較したところ、衝撃指標が小さい群にのみ PROPULSION 局面において近位 - 遠位の順でピークが発生するパターンが観察された。この結果から、着地衝撃の大きい被験者の跳躍高が小さくなる傾向の一因として、大きな衝撃によって跳躍高獲得に有利な筋活動順序パターンが消失したことが挙げられた。

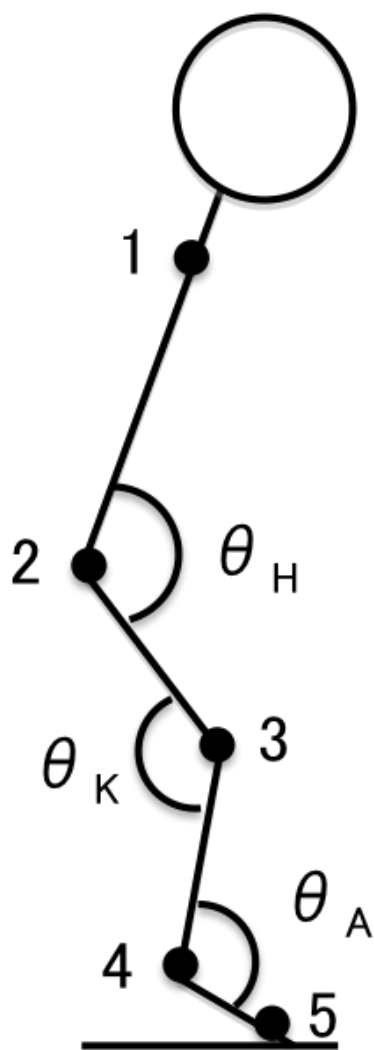


図 2-1 : 関節角度の定義 (直角を 90 度とし、deg で表記する)

1 : 肩峰、2 : 大転子、3 : 膝関節中心、4 : 足関節中心、5 : 第 3 中足骨遠位端

θ_H : 股関節角度、 θ_K : 膝関節角度、 θ_A : 足関節角度

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

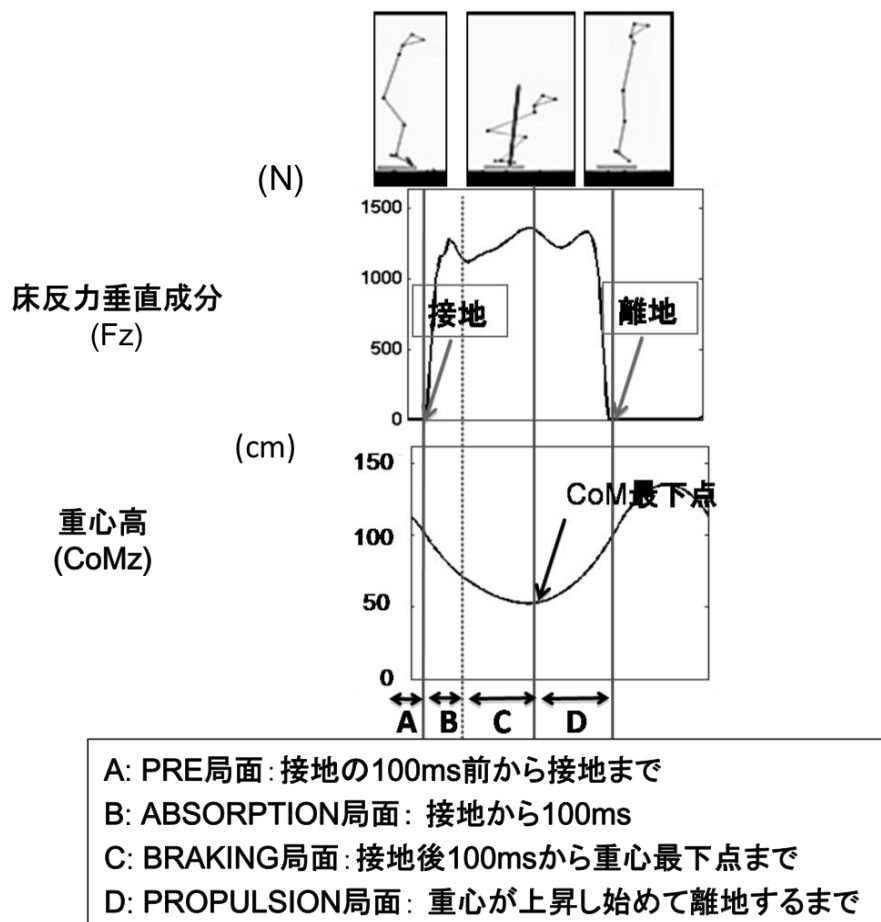


図 2-2 : 分析局面

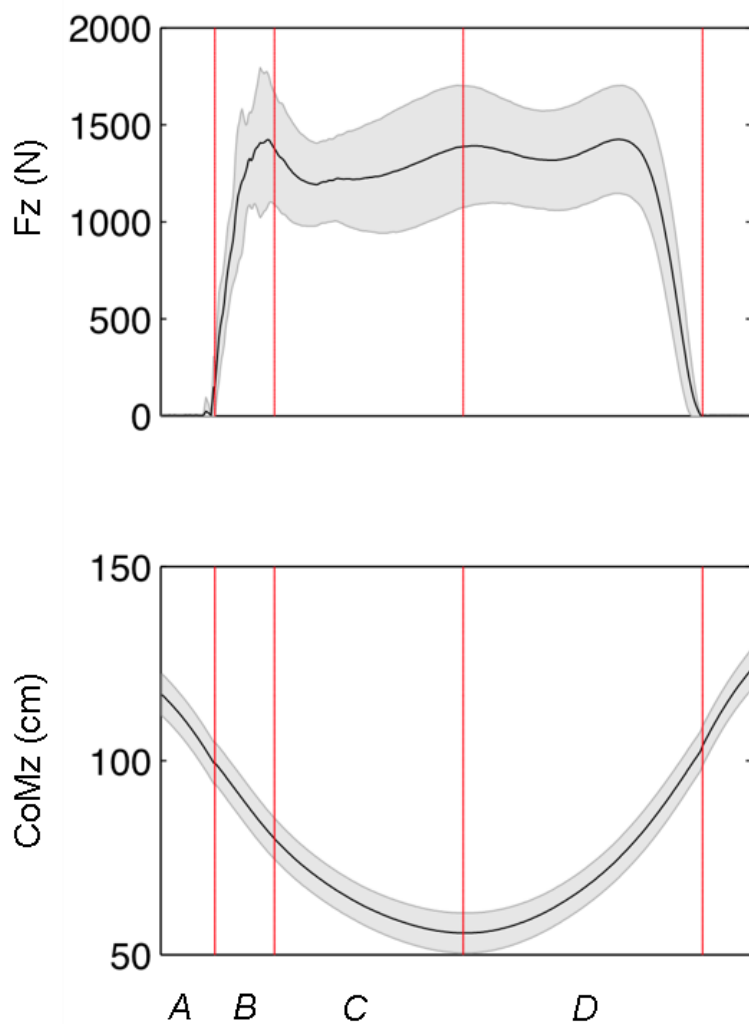


図 2-3 : 時系列平均データ (垂直床反力・身体重心高)

赤線が局面の区切り、黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。

局面の長さは各被験者の平均比率で規格化している。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

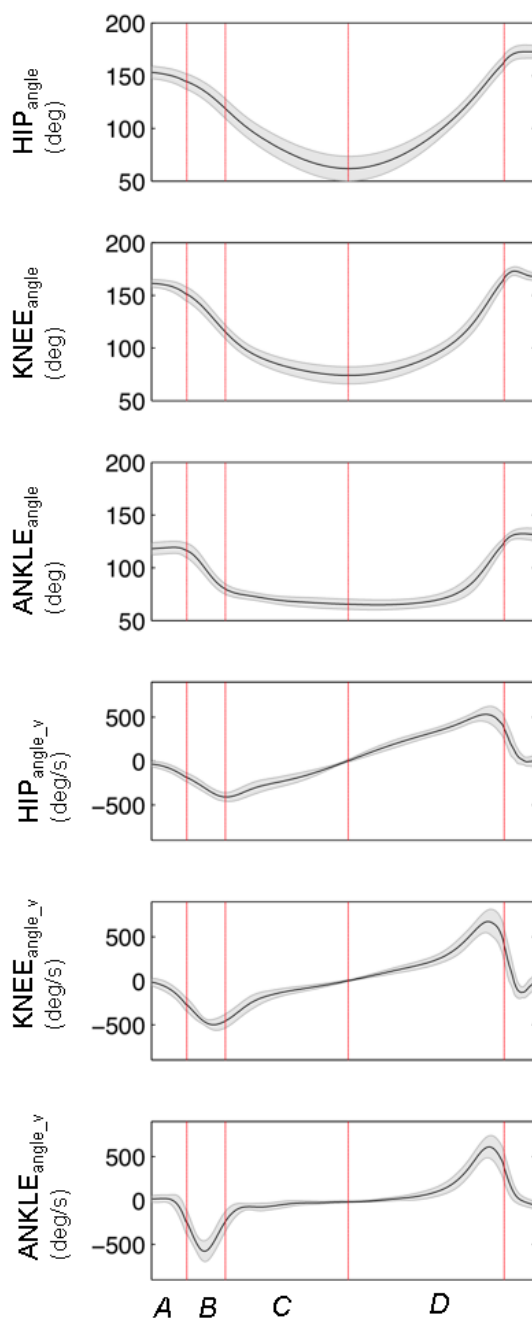


図 2-4 : 時系列平均データ (キネマティクス)

赤線が局面の区切り、黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。

局面の長さは各被験者の平均比率で規格化している。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

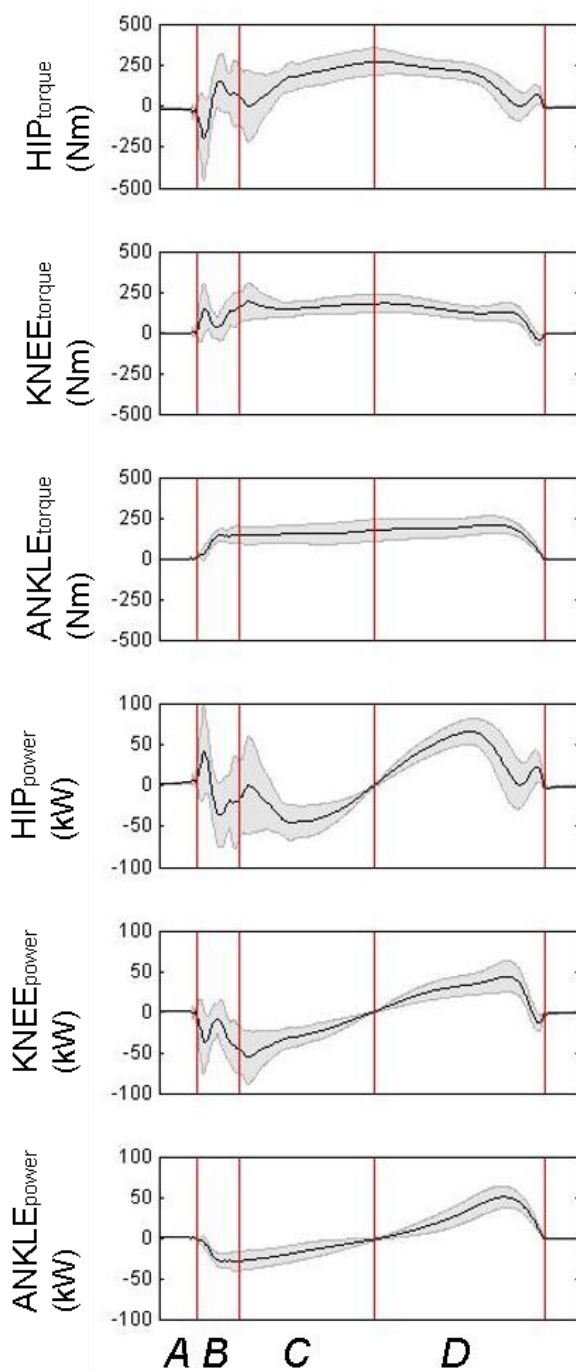


図 2-5 : 時系列平均データ (トルク・パワー)

赤線が局面の区切り、黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。

局面の長さは各被験者の平均比率で規格化している。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

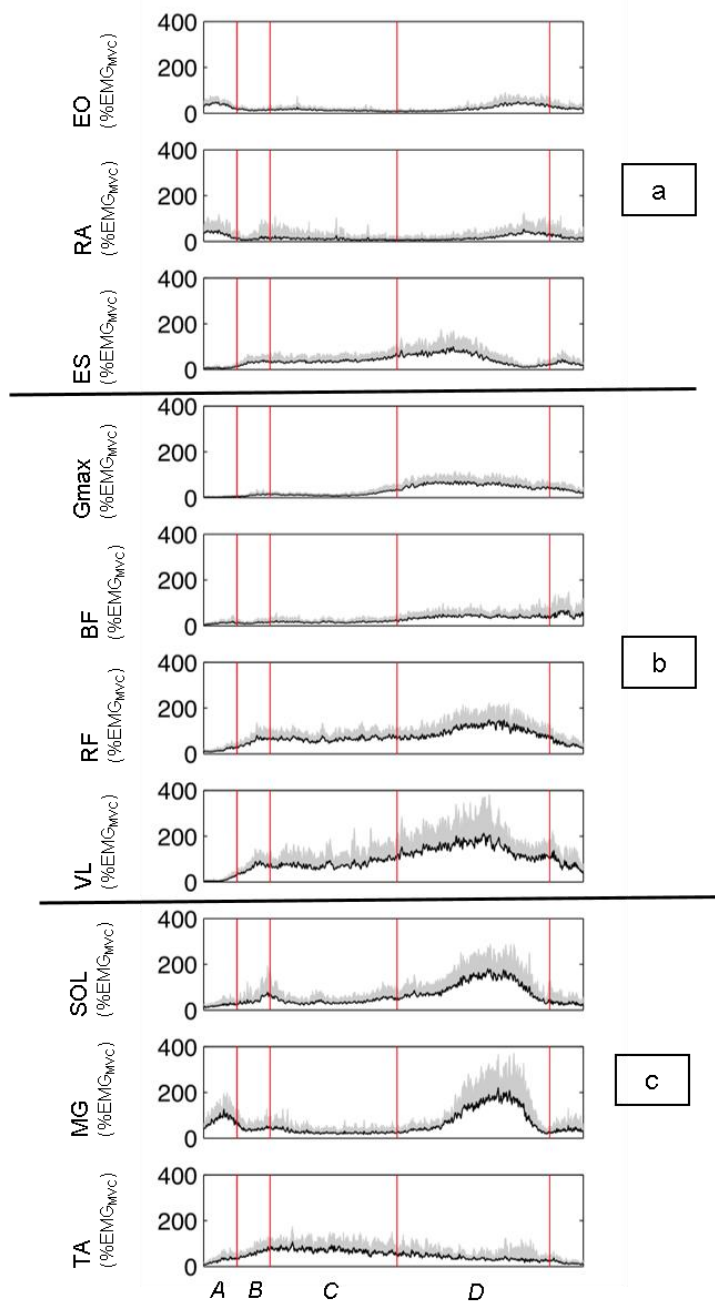


図 2-6 : 時系列平均データ (筋電図)

赤線が局面の区切り、黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。

局面の長さは各被験者の平均比率で規格化している。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

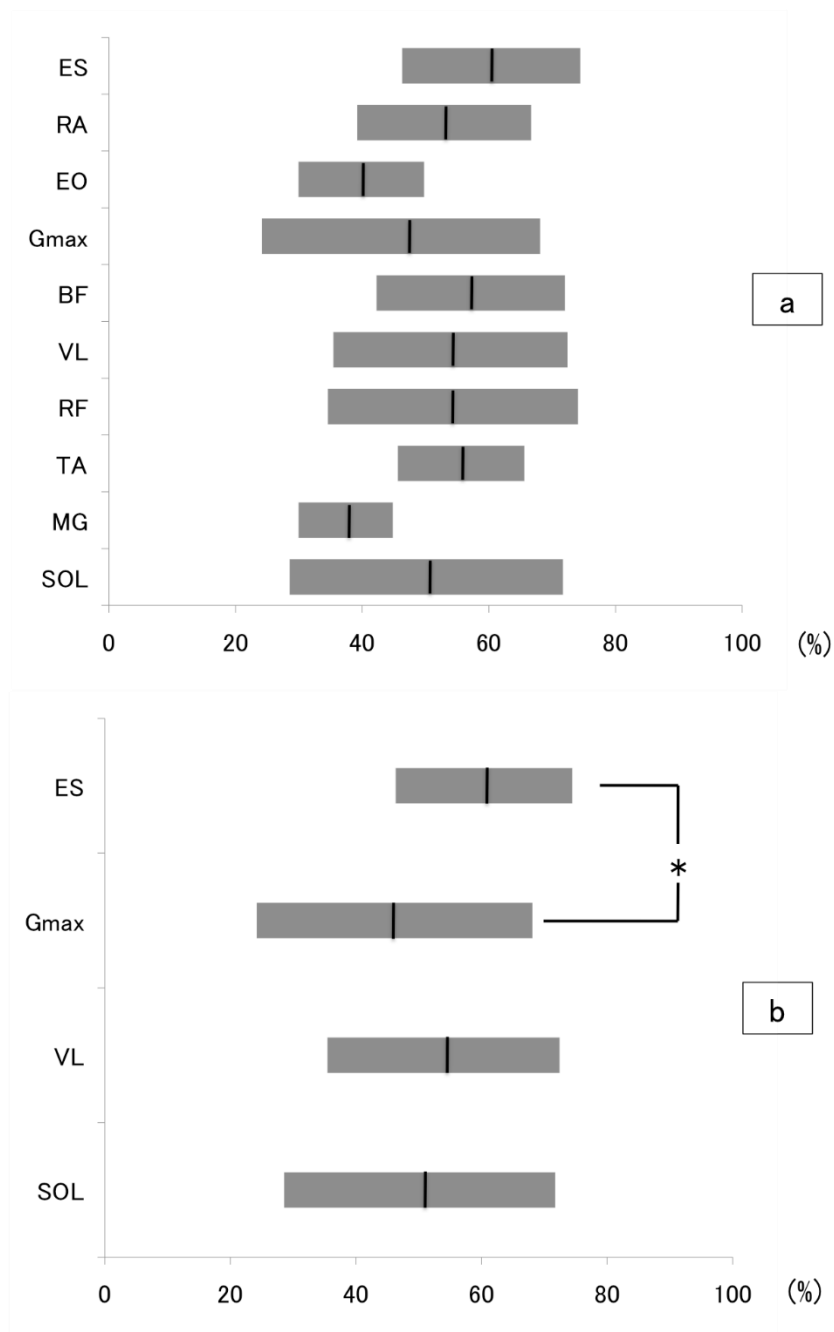


図 2-7: ABSORPTION 局面から BRAKING 局面における筋放電ピークタイミング

黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。有意差の表記は b のみ (*: $P < 0.05$)。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

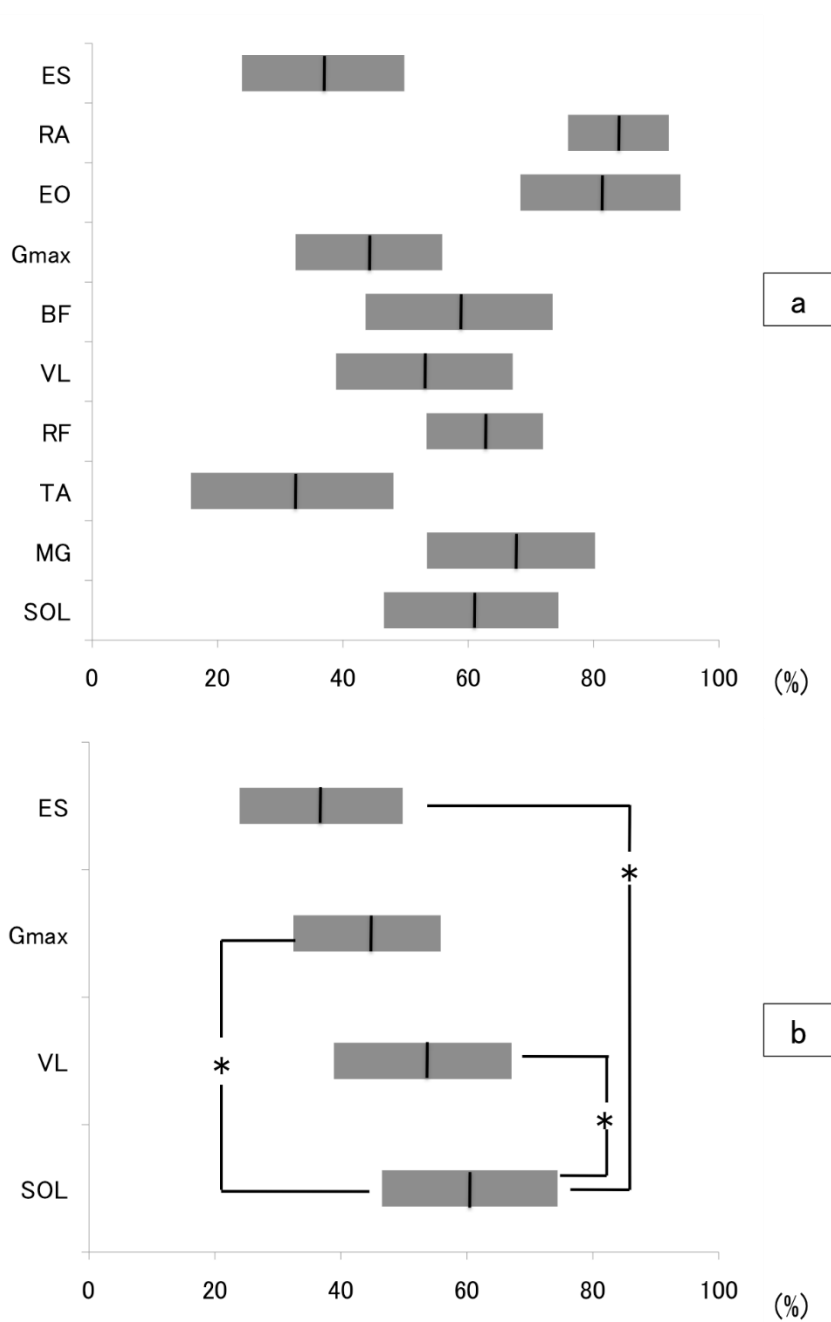


図 2-8: PROPULSION 局面における筋放電ピークタイミング

黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す。有意差の検定は b のみ (*: $P < 0.05$)。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

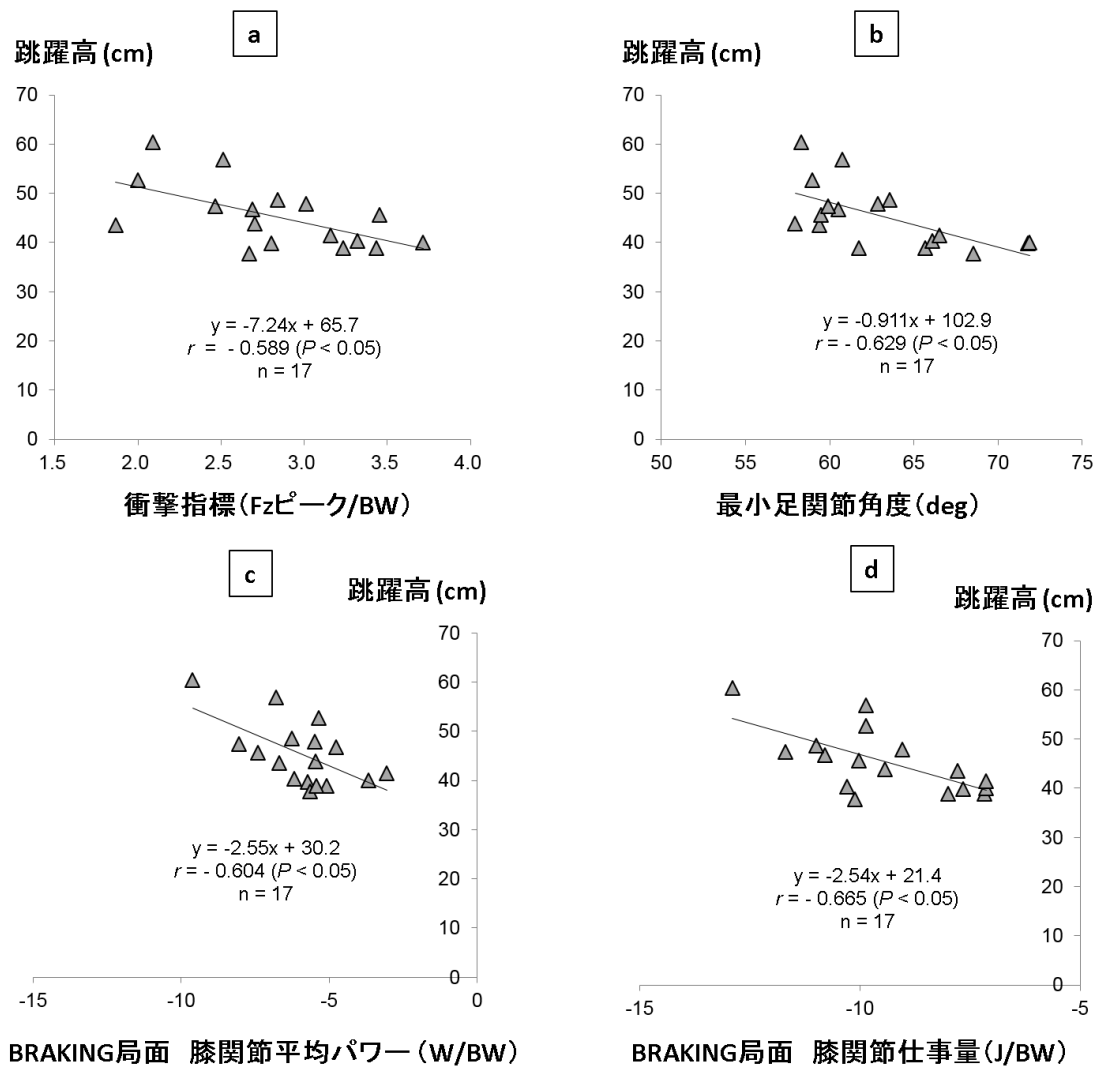


図 2-9 : 跳躍高と着地パラメータの相関関係 (n は被験者数)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

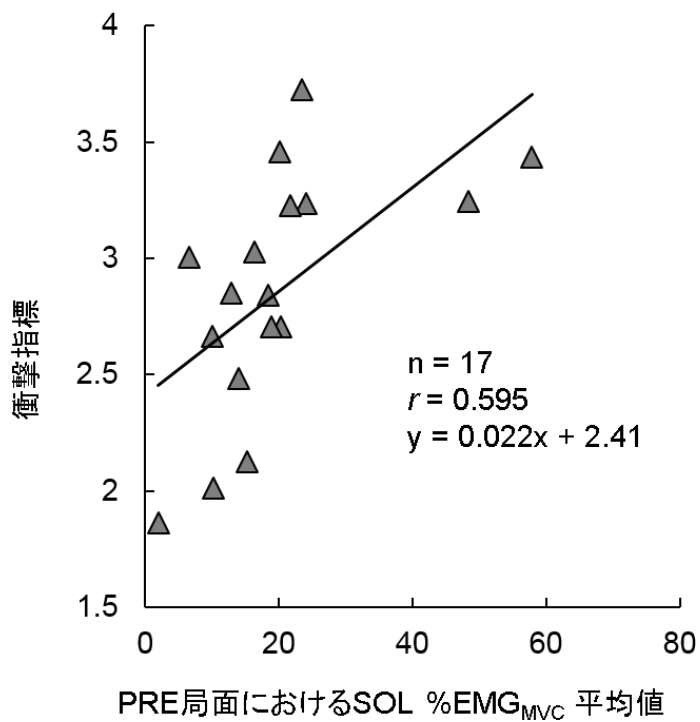


図 2-10 : 衝撃指標と PRE 局面の筋活動水準との相関関係 (n は被験者数)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

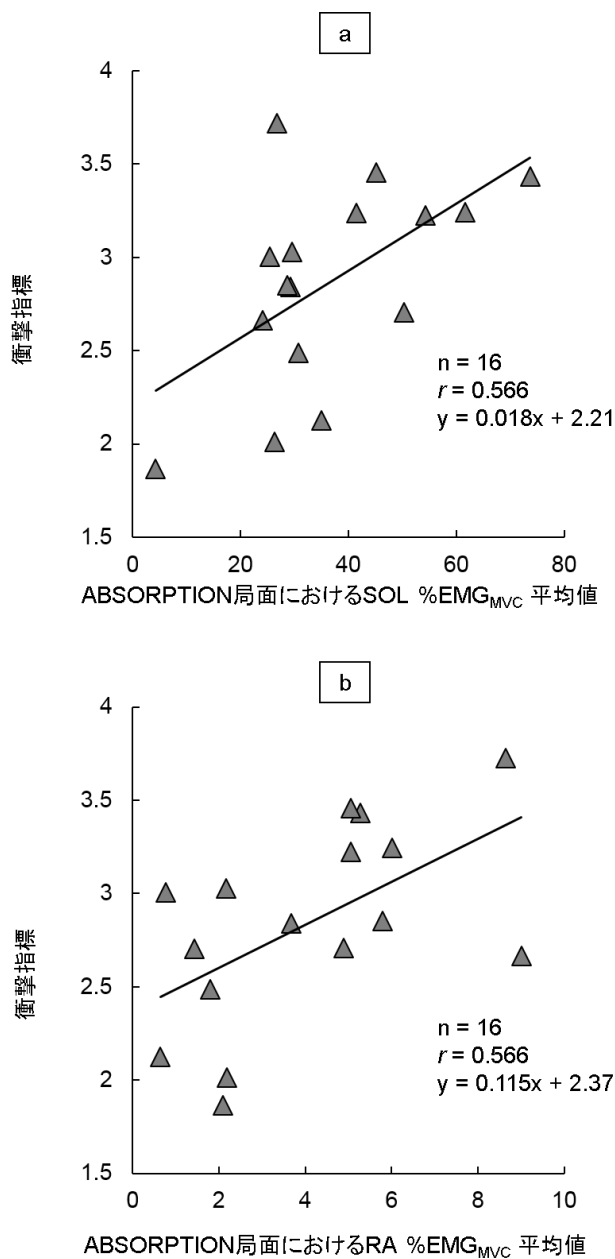


図 2-11 : 衝撃指標と ABSORPTION 局面の筋活動水準との関係 (n は被験者数)

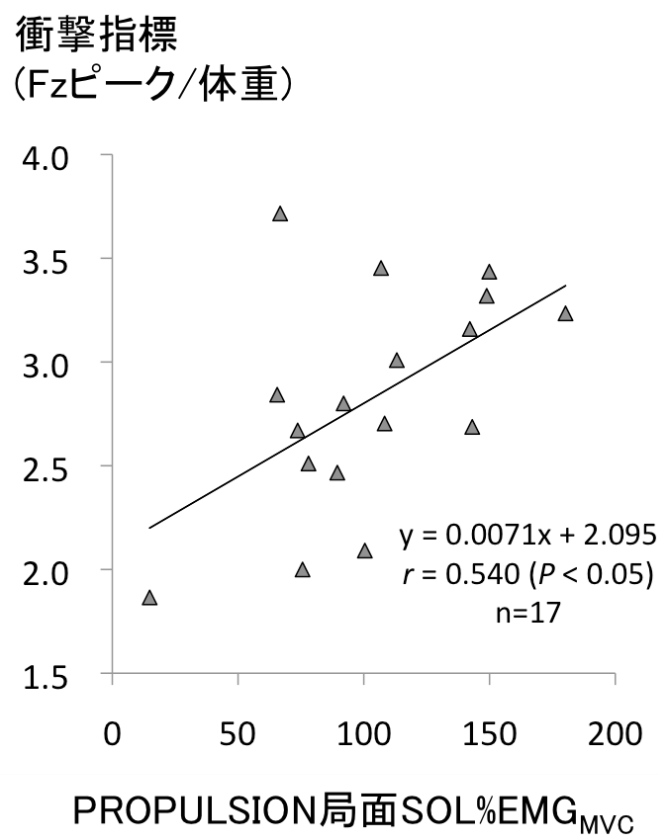


図 2-12: 衝撃指標と PROPULSION 局面の測定変数との関係 (n は被験者数)

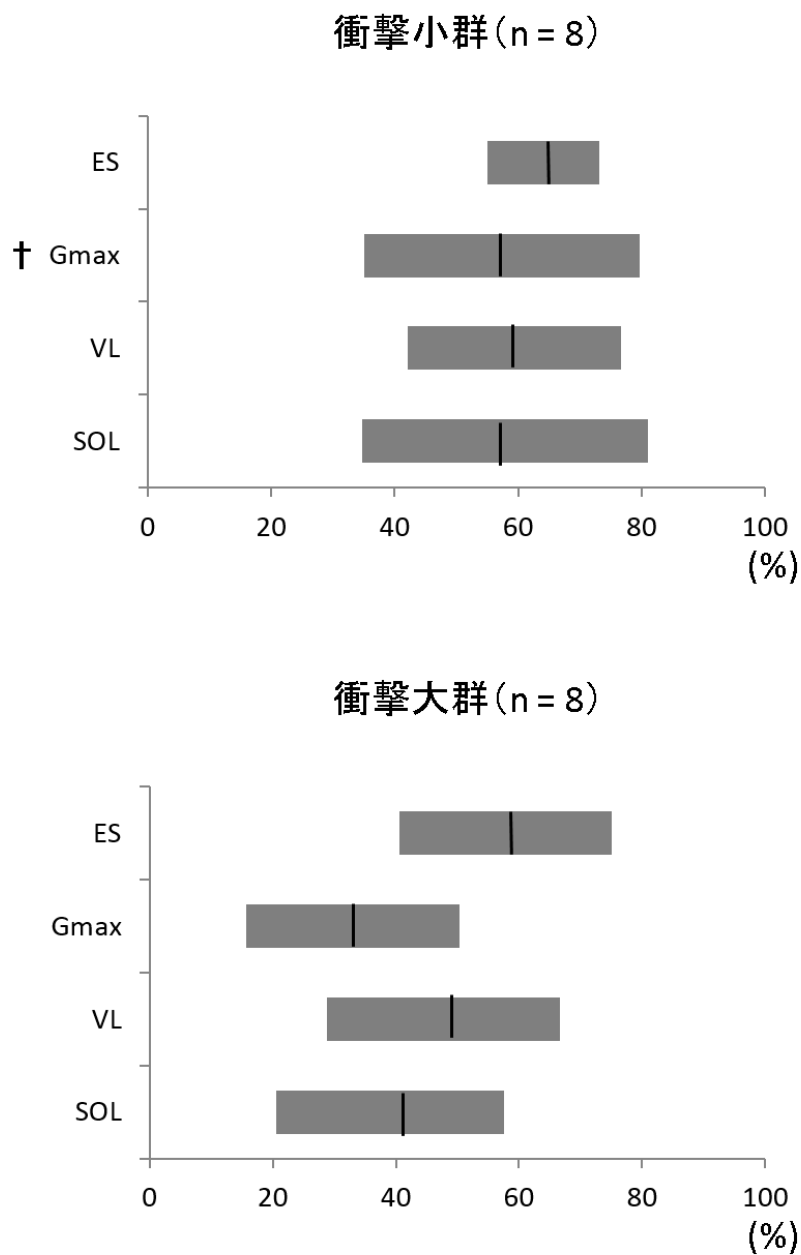


図 2-13 : 衝撃の大小群における ABSORPTION~BRAKING 局面の筋活動ピークタイミング

黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す (†は群間の有意差を表す、 $P < 0.05$)。

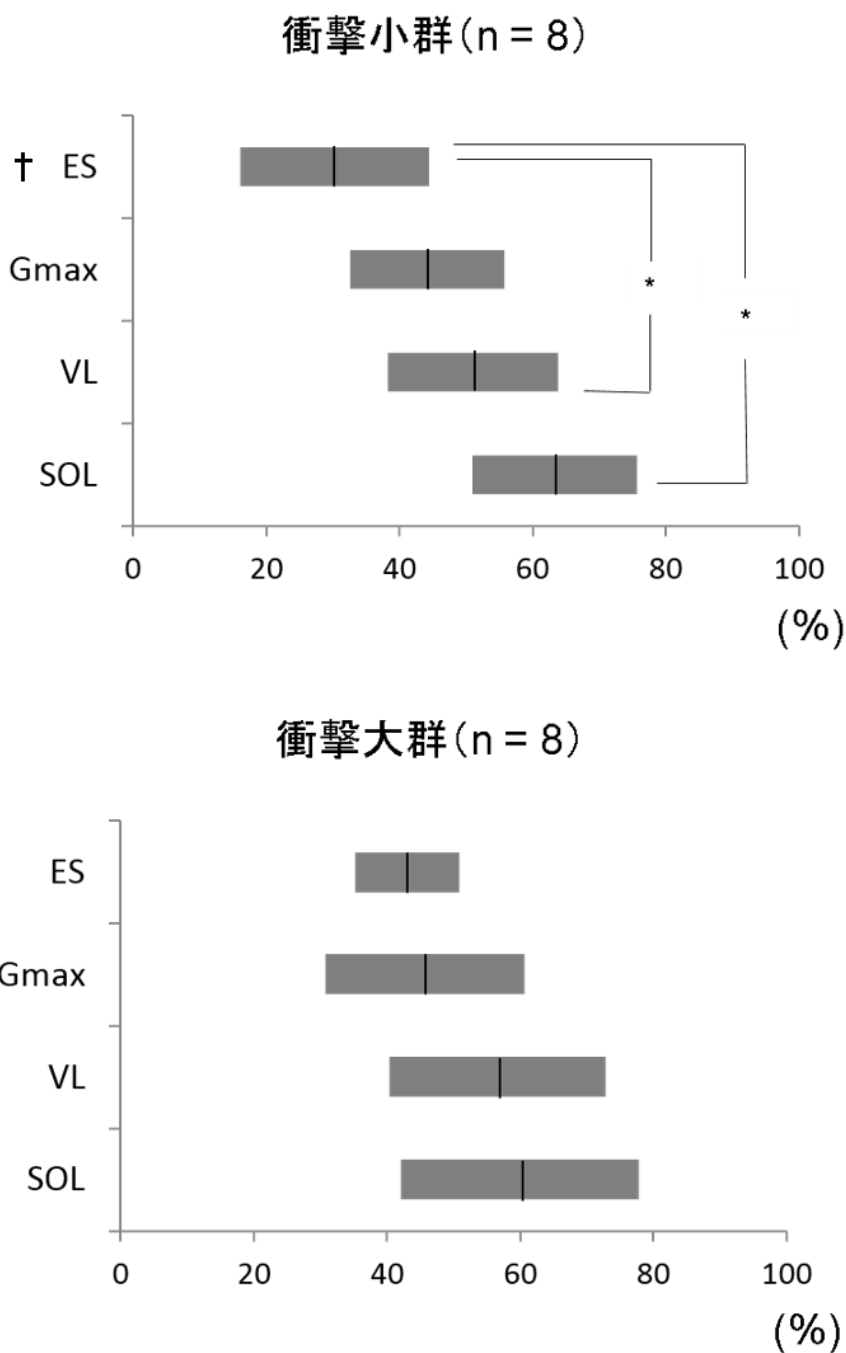


図 2-14 : 衝撃の大小群における PROPULSION 局面の筋活動ピークタイミング

黒線が平均値、灰色範囲が標準偏差を表す (* は筋間、† は群間の有意差を表す、 $P < 0.05$)。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

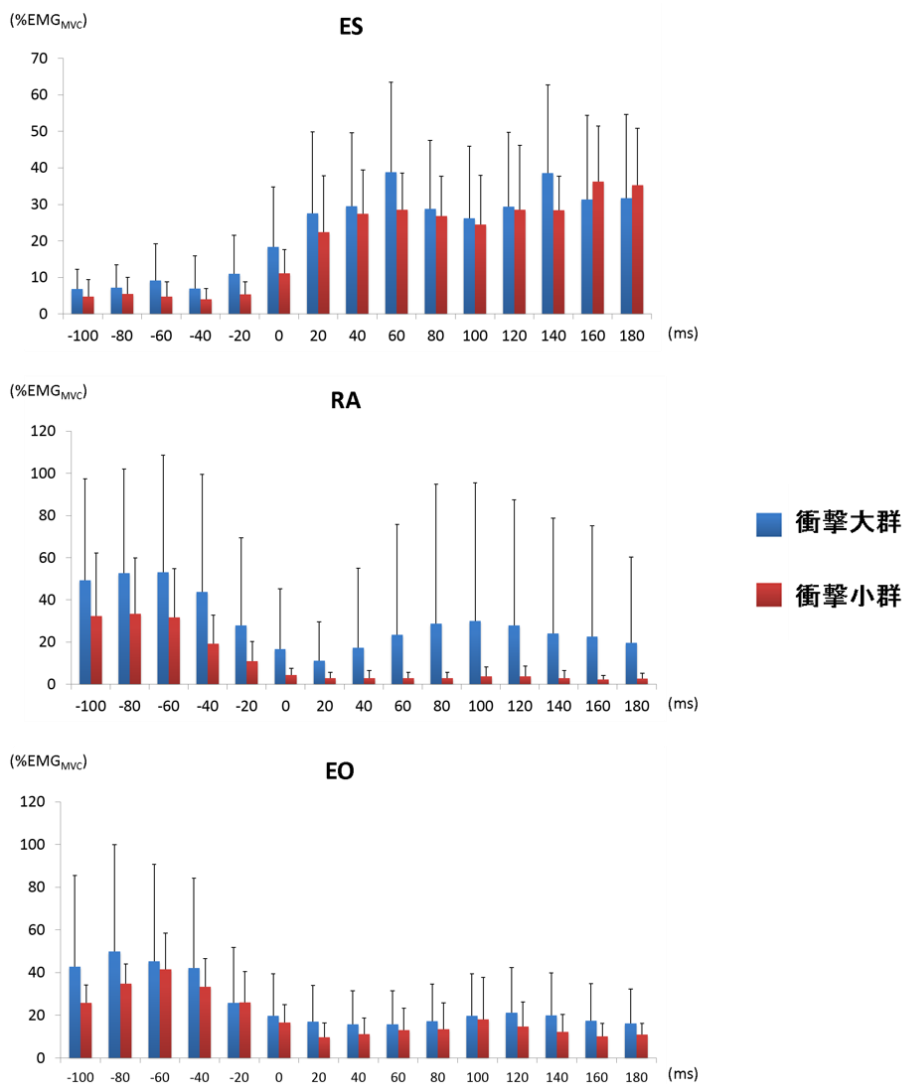


図 2-15 : 衝撃の大小群における接地前後の筋活動水準 (体幹部)

接地を 0ms とし、20ms 毎に平均

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

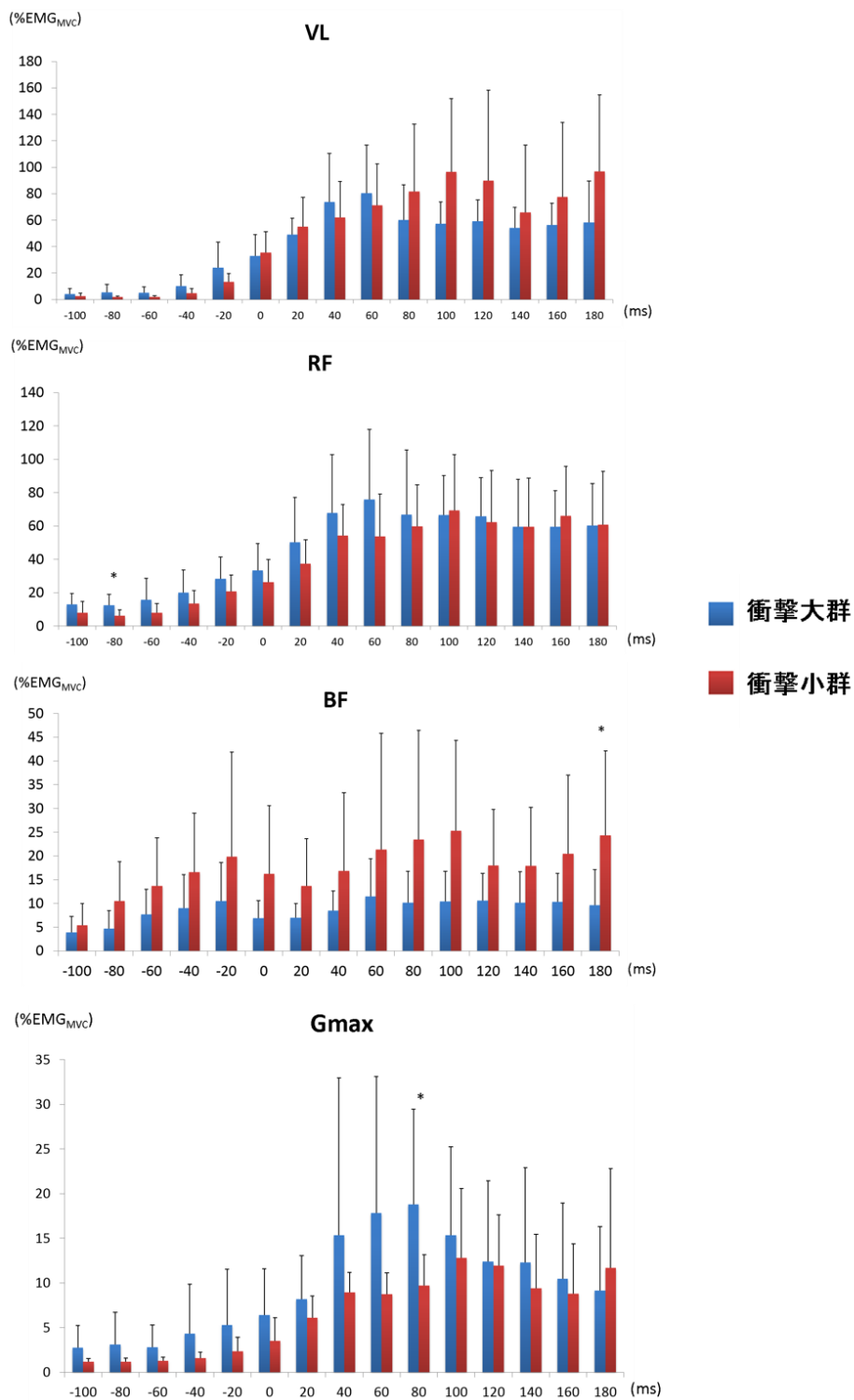


図 2-16 : 衝撃の大小群における接地前後の筋活動水準 (大腿・殿部)

接地を 0ms とし、20ms 毎に平均 (*は群間の有意差を表す、 $P < 0.05$)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 2 章 (実験 1) ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

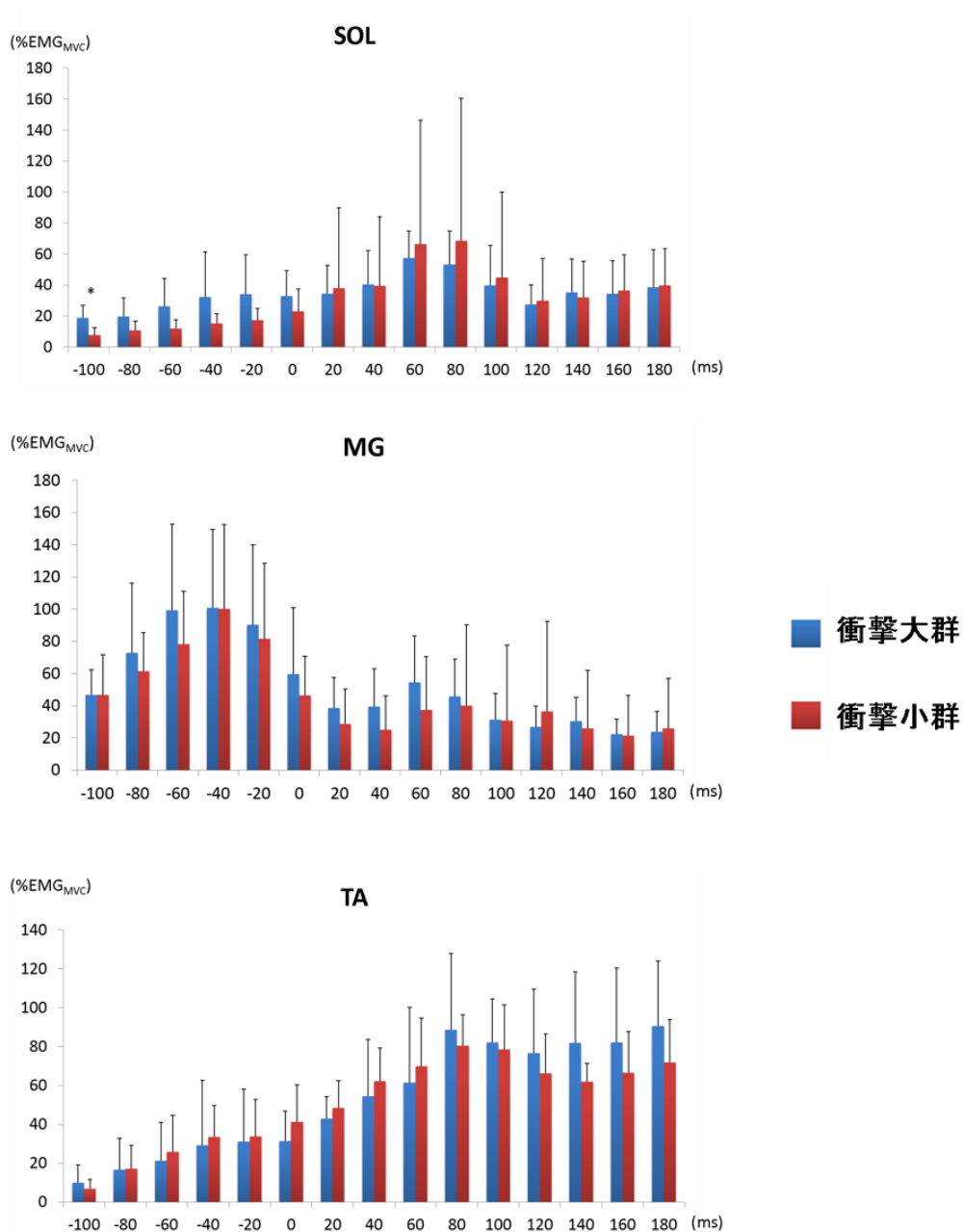


図 2-17 : 衝撃の大小群における接地前後の筋活動水準 (下腿部)

接地を 0ms とし、20ms 毎に平均 (*は群間の有意差を表す、 $P < 0.05$)

第3章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

3-1. はじめに

実験 1 において、ドロップジャンプの跳躍高は衝撃指標と負の相関関係を持ち、衝撃緩衝の程度が着地からのジャンプのパフォーマンスに関係する要素の一つである可能性が示された。この結果から、着地時の衝撃を緩衝する能力の向上は、ジャンプに移行した際のパフォーマンスおよび動作に影響を及ぼすことが予想される。しかし、着地トレーニングに関する先行研究は衝撃緩衝能力に及ぼす影響を検討しているに留まっております (McNair et al., 2000; Onate et al., 2005; Prapavessis et al., 2003)、着地からジャンプに移行した際の跳躍高および動作への効果については明らかにされていない。そこで実験 2 では、着地のみトレーニングが、ドロップジャンプの跳躍高および動作の特徴に与える影響について検証することを目的とした。本実験の実施に当たり、着地のみトレーニングによってドロップジャンプの跳躍高が増大するという仮説を設定した。

3-2. 方法

(i) 被験者

健常な成人男性 20 名が実験に参加した。被験者を着地トレーニング群 10 名 (年齢: 25.3 ± 2.5 歳, 身長: 174.6 ± 5.7 cm, 体重: 67.9 ± 9.9 kg, 平均値 \pm 標準偏差) およびコントロール群 10 名 (年齢: 25.0 ± 2.9 歳, 身長: 173.4 ± 7.3 cm, 体重: 68.2 ± 10.7 kg) の 2 つのグループに分けた。トレーニング前の年齢、身長および体重に、被験者群間で有意な差は認められなかった。実験の実施に先立ち、被験者には本研究の目的、実施内容、測定に伴う危

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

険性について説明し、被験者から書面にて実験参加の同意を得た。本研究は東京大学大学院総合文化研究科教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) 実験の概要

トレーニング群は週 3 日の頻度で、2 週間の着地のみによるトレーニングを実施した。トレーニング群およびコントロール群ともに、トレーニング開始前 (Pre 測定) およびトレーニング期間終了後 (Post 測定) の 2 回にわたり、着地、着地からのジャンプおよび反動無しジャンプ (スクワットジャンプ) に関する測定を実施した。なお、トレーニング群の Post 測定は、トレーニング実施最終日から 1~3 日後に実施した。

Pre 測定および Post 測定において、高さ 35cm 台上からの着地 (LAND)、実験 1 で実施した高さ 35cm 台上からのドロップジャンプ (DJ)、ならびにスクワットジャンプ (SJ) の 3 種類の試行を被験者に課した。LAND および DJ 試行において、被験者には、裸足で手を腰に当て左足支持の状態から落下し、視線は常に前方のマーカーに置くように指示した。また、LAND および DJ の実施の条件はそれぞれ実験 1、2 と同一とし、試行間に十分な休息をはさみ、各 10 試行実施した。SJ においても、被験者には裸足で手を腰に当て、各被験者が最適とした屈曲姿勢から、反動を用いずに「できる限り高く跳ぶ」よう指示した。LAND および DJ のキネマティック、キネティックデータの取得および分析は、それぞれ実験 1 と同じプロトコルによって行った。SJ については、キネマティックデータから跳躍高を算出した。また、LAND については衝撃指標を、DJ および SJ については跳躍高をそれぞれ基準とし、最上位および最下位の 2 試行を除き、

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

計 6 試行分のデータについて解析した。

本実験では、実験 1 と同様に取得したキネマティックおよびキネティクスデータに、逆ダイナミクス法を適用することで、足関節、膝関節および股関節の関節トルクを算出した (阿江・藤井, 2002)。使用したモデルおよび運動方程式は付録に示す。さらに、関節トルクに関節角速度を乗じることで関節パワーを算出した。関節パワーに関しては局面毎に積分し仕事を算出した (阿江・藤井, 2002)。さらにスティフネスに関する指標としては、下肢スティフネスと関節スティフネスを算出した。下肢スティフネスは F_z 最大値 (N) を接地から最下点までの CoMz 変位量 (m) で除すことによって算出した (Butler et al., 2003)。関節スティフネスについては各関節の下降局面の体重あたりの負の仕事量 (J/BW) を接地から最下点までの角度変位 (deg) で除すことによって算出した (Arampatzis et al., 1999)。

(iii) トレーニングプログラム

着地トレーニングで用いた動作は、床反力計の端からの距離 20cm に設置した高さ 35cm の台上からの両足着地とし、週 3 日の頻度で 2 週間 (計 6 日) にわたって実施した。1 日あたり 1 セット 10 試行を 3 セット (計 30 試行) 実施し、試行間に 30 秒、セット間に 2 分間の休息を設けた。また、「できる限り衝撃を緩衝する」ことをトレーニング実施の条件とし、試行毎に被験者に対し F_z のピーク値をフィードバックした。これまでの着地に関するフィードバックの効果を検討した先行研究では、下肢関節の角度、床反力の大きさを表す音声 (McNair et al., 2000; Prapavessis et al., 2003) およびビデオの映像 (Onate et al., 2005) といった情報を被験者にフィードバックし、また動作に関するアドバ

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

イスを与えている。しかし、これらのフィードバックには、着地動作に対する検者の主観が混入し、また、被験者のフィードバックに対する理解にも個人差が生じると考えられる。したがって、本実験では、トレーニング実施中の床反力を計測するとともに、Fz のピーク値を被験者にフィードバックし、動作に関するアドバイスは行わなかった。

(iv) 統計処理

測定値の基本統計量は群別の平均値±標準偏差により表し、Pre 測定の数およびトレーニングに伴う変化率の両群間の比較には、対応のない *t* 検定を用いた。また、着地トレーニングの有無による測定値の変化の有意性については、被験者群 (トレーニング群, コントロール群) およびトレーニング前後 (Pre 測定, Post 測定) を要因とする反復測定の二元配置分散分析を実施した。被験者群×トレーニング前後の交互作用が認められた場合、各群においてトレーニング前後で対応のある *t* 検定を行った。いずれの検定においても有意水準は 5% とした。

3-3. 結果

(i) 衝撃の変化

着地トレーニングに伴う衝撃指標の経日変化を図 3-1 に示した。LAND の衝撃指標は、トレーニング群の全被験者が Post 測定において Pre 測定より低値を示した。また、Pre 測定における衝撃指標は、トレーニング後の変化率と有意な負の相関関係を示した ($r = -0.715, P < 0.05$)。

Pre 測定における LAND の衝撃指標は、トレーニング群 2.87 ± 0.44 、コントロール群 2.93 ± 0.62 であり (図 3-2)、群間に有意な差は認められなかった。二元配置分散分析の

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

結果、交互作用 (被験者群×トレーニング前後) が認められた ($F = 13.292, P < 0.01$)。

Post 測定におけるトレーニング群の衝撃指標は、Pre 測定におけるものと比較して有意に ($P < 0.05$) 小さく、コントロール群の衝撃指標に有意な変化は認められなかった。

LAND における衝撃指標の変化率は、トレーニング群 $-18.2 \pm 14.9\%$ 、コントロール群 $3.0 \pm 9.4\%$ であり、有意な群間差が認められた ($P < 0.05$)。

Pre 測定における DJ の衝撃指標は、トレーニング群 3.04 ± 0.74 、コントロール群 3.16 ± 0.60 であり (図 3-2)、群間に有意な差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、交互作用 (被験者群×トレーニング前後) が認められた ($F = 4.902, P < 0.05$)。

Post 測定におけるトレーニング群の衝撃指標は、Pre 測定におけるものと比較して有意に ($P < 0.05$) 小さく、コントロール群の衝撃指標に有意な変化は認められなかった。

DJ における衝撃指標の変化率は、トレーニング群 $-19.9 \pm 14.5\%$ 、コントロール群 $-1.4 \pm 14.5\%$ であり、有意な群間差が認められた ($P < 0.05$)。

(ii) 跳躍高の変化

Pre 測定における DJ の跳躍高は、トレーニング群 $47.2 \pm 5.6\text{cm}$ 、コントロール群 $45.5 \pm 7.3\text{cm}$ であり (図 3-3)、群間に有意な差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められた ($F = 7.180, P < 0.05$)。Post 測定におけるトレーニング群の跳躍高は、Pre 測定の値よりも有意に高く、コントロール群では Pre 測定と Post 測定との間に有意な差は認められなかった。DJ における跳躍高の変化率は、トレーニング群 $2.0 \pm 1.4\%$ 、コントロール群 $-0.7 \pm 3.1\%$ であり、トレーニング群が有意に高かった ($P < 0.05$)。一方、トレーニング群における DJ 跳躍高の変化率と衝撃指標の変化

率との間には、有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.358$, n.s.)。

SJ の跳躍高は、Pre 測定においてトレーニング群 45.1 ± 5.8 cm、コントロール群 42.9 ± 6.7 cm であり (図 3-3)、群間に有意な差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、トレーニング前後による主効果および交互作用は認められず、トレーニング前後においても両群ともに有意な変化を示さなかった。

(iii) 所要時間・キネマティクスの変化

トレーニング前後における所要時間および各群の接地時関節角度ならびに最小関節角度データを表 3-1 に示す。Pre 測定における測定値は、全項目において、群間に有意な差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、接地時の股関節角度 ($F = 8.325$, $P < 0.01$) および膝関節角度 ($F = 6.182$, $P < 0.05$)、最小股関節角度 ($F = 5.351$, $P < 0.05$) および最小膝関節角度 ($F = 9.503$, $P < 0.01$) に有意な交互作用が認められた。接地時の股関節角度および膝関節角度は、トレーニング群の場合、Post 測定において Pre 測定より有意に小さく (それぞれ $P < 0.01$)、コントロール群ではトレーニング前後で有意な差は認められなかった。最小股関節角度および最少膝関節角度も、トレーニング群では Post 測定において Pre 測定より有意に小さく ($P < 0.01$)、コントロール群はトレーニング前後で有意な変化を示さなかった。

(iv) キネティクスの変化

Pre 測定および Post 測定における各群のトルク、パワー、仕事およびスティフネスに関するデータを表 3-2、表 3-3、表 3-4 および表 3-5 に示す。二元配置分散分析の結果、ABSORPTION 局面および PROPULSION 局面における股関節のトルク、パワーおよび

仕事に、有意な交互作用が認められた。ABSORPTION 局面と PROPULSION 局面における股関節トルクは、トレーニング群では Post 測定において有意に Pre 測定より大きく ($P < 0.01$)、コントロール群はトレーニング前後で有意な差は認められなかった。トレーニング群の股関節による仕事は ABSORPTION 局面において、Post 測定において有意に Pre 測定より小さく ($P < 0.01$)、PROPULSION 局面においては Post 測定において有意に Pre 測定より大きかった ($P < 0.01$)。一方、コントロール群はトレーニング前後で有意な差は認められなかった。スティフネスに関しては、体重あたりの下肢スティフネスにのみ有意な交互作用が認められた ($F = 4.91, P < 0.05$)。下肢スティフネスは、トレーニング群では Post 測定において有意に Pre 測定より小さく ($P < 0.05$)、コントロール群はトレーニング前後で有意な差は認められなかった。

3-4. 考察

トレーニング群において LAND における着地時の衝撃指標は有意に減少した (図 3-1、図 3-2)。この結果は、下肢関節の角度、床反力の大きさを表す音声およびビデオの映像をフィードバックすることにより、着地時の衝撃が減少すると報告した先行研究の結果 (McNair et al., 2000; Onate et al., 2005; Prapavessis et al., 2003) と一致する。その変化率はコントロール群より有意に低く、2 週間という短い期間であっても、着地トレーニングによって衝撃緩衝能力は向上するといえる。一方、トレーニング群の衝撃指標の変化率は Pre 測定における LAND の衝撃指標と有意な負の相関関係を示した。したがって、着地トレーニングは、衝撃の緩衝能力を向上させるが、その効果は衝撃の初期値が高い被験者ほど顕著であることが示された。また、トレーニング群の DJ の衝撃指標について

も Post 測定において有意に減少した (図 3-2)。さらに、LAND と L-J における衝撃指標の変化率の間には、有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.523, P < 0.05$)。これらの結果は、着地トレーニングによる衝撃緩衝能力の改善が、着地からのジャンプにおける衝撃緩衝能力の向上に対しても影響を与えていることを示唆するものといえる。

着地トレーニングに伴った下降局面のキネマティクスの変化についてみると、接地時の股関節および膝関節角度に有意な交互作用が認められ、トレーニング群における値は有意に減少した (表 3-1)。また、膝関節の最小角度にも有意な交互作用があり、トレーニング群の膝関節最小角度は有意に減少した。先行研究において、接地時の膝関節 (Derrick, 2004) および股関節 (Blackburn & Padua, 2009) の関節角度の減少は着地直後の衝撃の減少につながるということが報告されている。さらに Devita & Skelly (1992) は、Soft landing (最小膝関節角度: 63°) においては Stiff landing (最小膝関節角度: 103°) と比較して着地衝撃が小さくなると報告している。これらの先行知見から、本実験において生じたトレーニング後のキネマティクスの変化は、衝撃の減少に寄与したものと推測される。

下降局面のキネマティクスの変化については、ABSORPTION 局面における股関節伸展トルク、パワー、仕事に有意な交互作用が認められ、トレーニング群における値は POST 測定において有意に増大した (表 3-2, 3, 4)。Devita & Skelly (1992) は接地時の股関節角度の減少は、下降する際の股関節伸展トルクの増大を導くことを示している。また先述したように本実験のトレーニングによって股関節接地角度が減少した。したがって、衝撃緩衝トレーニングによって生じた接地時の股関節角度の減少によって、

ABSORPTION 局面の股関節伸展筋群による力発揮増大が生じたものと考察される。

着地トレーニングによって、DJ の跳躍高は有意に向上した (図 3-3)。この結果は、着地のみによるトレーニングであっても、ドロップジャンプによる跳躍高の改善が期待できることを示唆し、本実験の仮説を支持するものである。これまで、ドロップジャンプによるトレーニングによって、同動作時の跳躍高が増大することを認める研究は多い (Gehri et al., 1998; Schmidtbleicher, Gollhofer, & Frick, 1988; Tricoli et al., 2005; Wilson et al., 1996; Wilson et al., 1993)。しかし、着地のみトレーニングによって、ドロップジャンプの跳躍高が向上することを報告した例はない。

着地トレーニングによって DJ の跳躍高が増加した場合、当初、想定されたその要因は緩衝能力の向上であった。しかし緩衝能力向上に関して、DJ の衝撃指標の変化率と跳躍高の変化率との間には有意な相関関係は認められず、衝撃緩衝能力の向上自体が跳躍高の増加に貢献したとはいえない。一方、着地トレーニングにより伸張性収縮によるトレーニングの効果として、下肢の伸展・底屈筋群の筋力が増大し、着地を伴わないジャンプ自体のパフォーマンスが向上したことも考えられる。しかしながら、着地を伴わないジャンプである SJ の跳躍高に有意な変化は認められず (図 3-3)、その可能性は否定される。

DJ の跳躍高増大の要因として、股関節による力発揮増大が考えられる。まず、トレーニング群において最小股関節角度が減少したという結果 (表 3-1) は、トレーニング群の DJ が、PROPULSION 局面に先行して、股関節を大きく屈曲する動作に変化したことを意味する。さらに、トレーニング群では、PROPULSION 局面における股関節のト

ルク (表 3-2)、パワー (表 3-3) および仕事が増加した (図 3-4)。この結果は、スクワットジャンプ時の体幹の傾き増加によって股関節によるパワーが増加したとする

Vanrenterghem et al. (2008) の結果と一致する。また、Vanrenterghem et al. (2008) は、股関節、膝関節および足関節の正のパワーピーク値のうち、股関節のみがスクワットジャンプの跳躍高と有意な正の相関関係を持つことを報告し、ジャンプパフォーマンスにおける股関節による力発揮の重要性を示唆している。これらの先行知見と本実験の結果を考え合わせると、着地トレーニングは、重心最下点時の股関節屈曲を増大させることで、BRAKING 局面および PROPULSION 局面における股関節による力発揮増大を促し、その結果として DJ の跳躍高が向上したと予測される。

3-5. 小括

本実験は、着地のみによるトレーニングによって、ドロップジャンプの跳躍高が増大するという仮説のもと、トレーニング前後のキネマティクス、キネティクスおよび筋電図データの変化について検討した。その結果、着地トレーニングによって、着地およびドロップジャンプにおける衝撃指標は有意に減少した。ドロップジャンプの跳躍高はトレーニング群においてのみ増加し、スクワットジャンプの跳躍高に有意な変化は認められなかった。さらに、トレーニング群における股関節最小角度は減少し、PROPULSION 局面における股関節の伸展トルク、パワーおよび仕事が増大した。これらの結果から着地衝撃緩衝のトレーニングの効果はドロップジャンプにも転移し、股関節の力発揮増大

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

による跳躍高増大を導いたものと推察された。

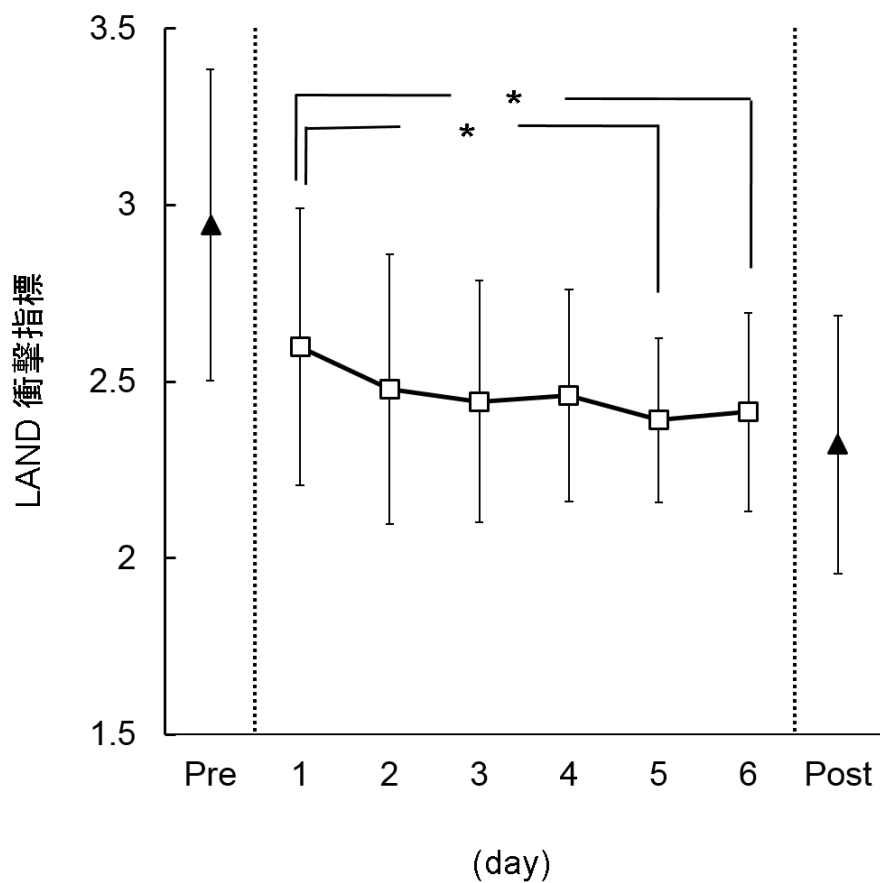
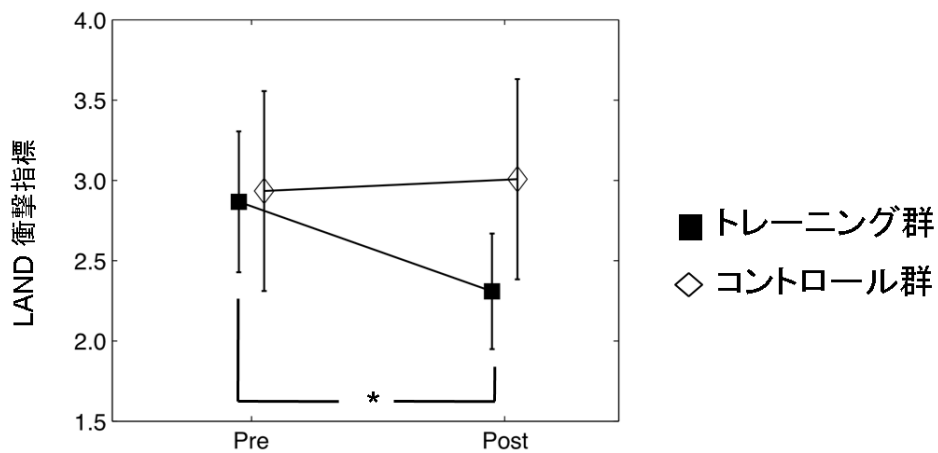


図 3-1 : トレーニング群における LAND の衝撃指標の経日変化

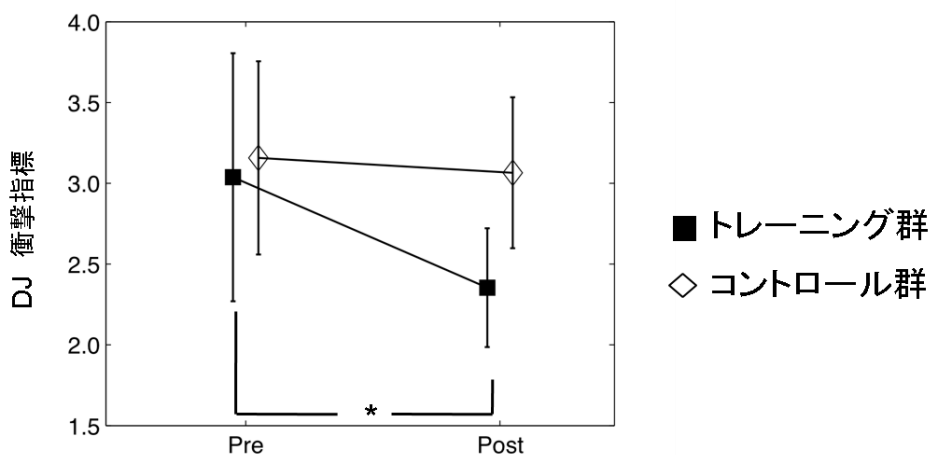
Pre と Post 測定は試行数が大きく異なるため統計処理から除いた (*: $P < 0.05$)。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響



a: LANDの衝撃指標の変化

主効果(測定) および交互作用 (測定 × 群) あり

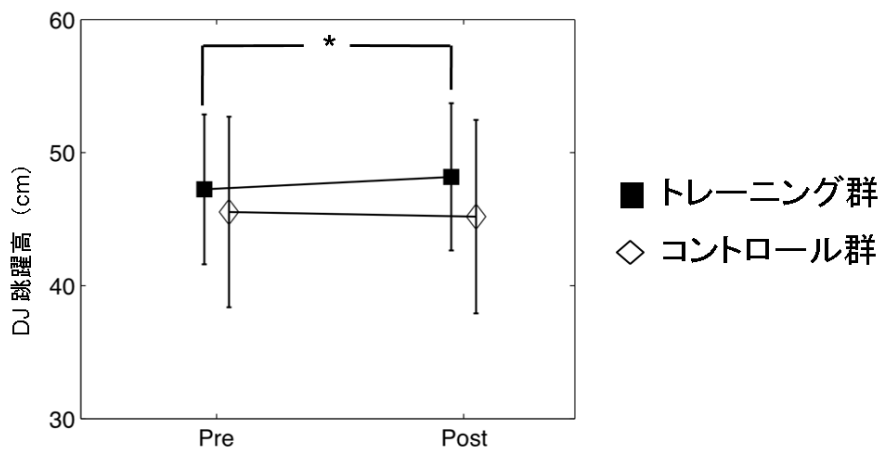


b: DJの衝撃指標の変化

主効果(測定) および交互作用 (測定 × 群) あり

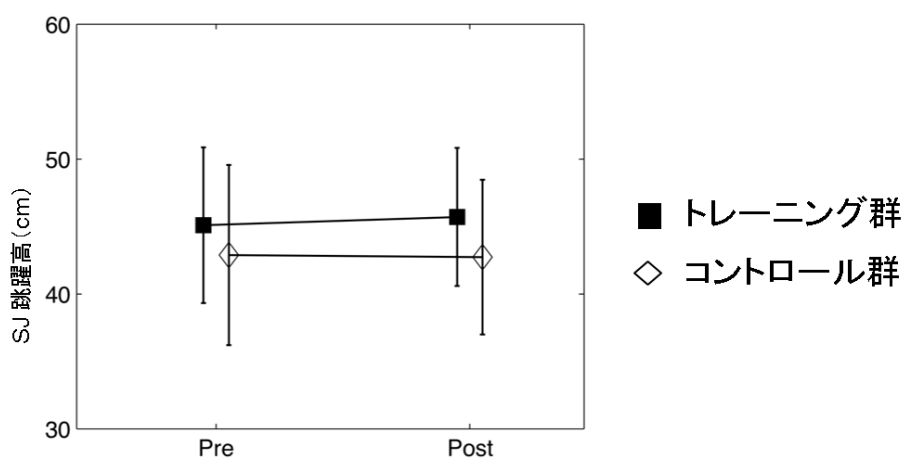
図 3-2 : 着地トレーニングによる衝撃指標の変化 (* : $P < 0.05$)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響



a: DJの跳躍高の変化

交互作用あり (測定 × 群)



b: SJの跳躍高の変化

主効果(測定) および交互作用 (測定 × 群) なし

図 3-3 : 着地トレーニングによる跳躍高の変化 (* : $P < 0.05$)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

表 3-1 : 所要時間・キネマティクスの変化

(* : Pre と Post に有意差あり、† : 被験者群×トレーニング前後の交互作用あり)

	トレーニング群		コントロール群	
	Pre	Post	Pre	Post
< 所要時間 (ms) >				
ABSORPTION 局面	100 (-)	100 (-)	100 (-)	100 (-)
BRAKING 局面	260.1 (85.0)	248.7 (56.4)	241.2 (68.8)	236.2 (53.2)
PROPULSION 局面	315.8 (55.6)	313.9 (39.7)	294.2 (42.0)	289.9 (19.3)
接地時間	676.3 (136.9)	662.6 (86.7)	635.3 (106.1)	626.1 (71.6)
< 接地角度(deg) >				
股関節†	148.2 (5.9)	139.4 (8.8) *	145.7 (6.4)	145.4 (6.5)
膝関節†	152.1 (4.8)	147.2 (4.8) *	151.5 (6.0)	151.9 (5.8)
足関節	116.1 (5.6)	118.4 (4.2)	118.4 (7.4)	117.6 (7.0)
< 最小角度(deg) >				
股関節	64.2 (14.0)	56.1 (11.3) *	68.0 (9.3)	67.1 (12.0)
膝関節†	77.6 (8.6)	67.9 (9.9) *	74.1 (9.9)	74.0 (9.8)
足関節	65.2 (4.7)	67.0 (3.1)	65.9 (7.4)	66.1 (8.5)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

表 3-2 : トルクの変化

(* : Pre と Post に有意差あり、† : 被験者群×トレーニング前後の交互作用あり、
 # : 群間に有意差あり)

平均関節トルク (Nm/BW)	トレーニング群		コントロール群	
	Pre	Post	Pre	Post
< ABSORPTION 局面 >				
股関節 †	-0.18 (0.06)	-0.12 (0.05) *	-0.01 (0.17) #	-0.04 (0.13)
膝関節	0.29 (0.06)	0.26 (0.06)	0.17 (0.08) #	0.18 (0.08) #
足関節	0.15 (0.03)	0.15 (0.02)	0.16 (0.04)	0.16 (0.03)
< BRAKING 局面 >				
股関節	0.23 (0.08)	0.29 (0.09) *	0.31 (0.10)	0.31 (0.08)
膝関節	0.27 (0.07)	0.28 (0.06)	0.23 (0.05)	0.24 (0.05)
足関節	0.19 (0.03)	0.22 (0.04) *	0.22 (0.07) #	0.22 (0.05)
< PROPULSION 局面 >				
股関節 †	0.21 (0.05)	0.27 (0.04) *	0.28 (0.03) #	0.29 (0.03)
膝関節	0.23 (0.07)	0.21 (0.05)	0.19 (0.05)	0.19 (0.03)
足関節	0.24 (0.03)	0.24 (0.02)	0.24 (0.04)	0.26 (0.04)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

表 3-3 : パワーの変化

(* : Pre と Post に有意差あり、† : 被験者群×トレーニング前後の交互作用あり、
 # : 群間に有意差あり)

平均関節パワー(W/BW)	トレーニング群		コントロール群	
	Pre	Post	Pre	Post
< ABSORPTION 局面 >				
股関節†	1.06 (0.50)	0.64 (0.51) *	0.01 (0.92) #	0.17 (0.75)
膝関節	-2.20 (0.51)	-1.96 (0.47)	-1.37 (0.64) #	-1.43 (0.59) #
足関節	-1.06 (0.26)	-0.99 (0.19)	-1.11 (0.33)	-1.09 (0.28)
< BRAKING 局面 >				
股関節	-0.56 (0.33)	-0.77 (0.30) *	-0.86 (0.40) #	-0.85 (0.40)
膝関節	-0.63 (0.17)	-0.75 (0.22) *	-0.58 (0.20)	-0.63 (0.19)
足関節	-0.14 (0.05)	-0.17 (0.06)	-0.17 (0.10)	-0.18 (0.09)
< PROPULSION 局面 >				
股関節†	0.60 (0.25)	0.92 (0.20) *	1.03 (0.17) #	1.06 (0.22)
膝関節	0.86 (0.27)	0.83 (0.21)	0.68 (0.25)	0.69 (0.22)
足関節	0.54 (0.11)	0.49 (0.07)	0.58 (0.15)	0.57 (0.14)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

表 3-4 : 仕事の変化

(* : Pre と Post に有意差あり、† : 被験者群×トレーニング前後の交互作用あり、

: 群間に有意差あり)

仕事(J/BW)	トレーニング群		コントロール群	
	Pre	Post	Pre	Post
< ABSORPTION 局面 >				
股関節†	0.66 (0.32)	0.40 (0.32) *	0.01 (0.58) #	0.11 (0.47)
膝関節	-1.39 (0.32)	-1.23 (0.29)	-0.86 (0.40) #	-0.90 (0.37) #
足関節	-0.67 (0.16)	-0.62 (0.13)	-0.70 (0.21)	-0.68 (0.18)
< BRAKING 局面 >				
股関節	-0.77 (0.27)	-1.08 (0.33) *	-1.12 (0.38) #	-1.13 (0.42)
膝関節	-0.93 (0.26)	-1.10 (0.38)	-0.84 (0.34)	-0.89 (0.26)
足関節	-0.20 (0.05)	-0.23 (0.06) *	-0.23 (0.11)	-0.25 (0.11)
< PROPULSION 局面 >				
股関節†	1.16 (0.52)	1.75 (0.41) *	1.82 (0.28) #	1.87 (0.35)
膝関節	1.61 (0.39)	1.58 (0.40)	1.20 (0.44)	1.22 (0.38)
足関節	1.02 (0.12)	0.93 (0.13)	1.04 (0.28)	1.02 (0.24)

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ
 第 3 章 (実験 2) 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

表 3-5 : スティフネスの変化

(* : Pre と Post に有意差あり、† : 被験者群×トレーニング前後の交互作用あり、
 # : 群間に有意差あり)

	Training Group		Control Group	
	Pre	Post	Pre	Post
Leg Stiffness (N/m/BW) †	7.25 (2.44)	5.23 (1.16)*	7.62 (2.23)	7.31 (1.19)#
Joint Stiffness (J/deg/BW)				
Hip	0.14 (0.04)	0.15 (0.04)	0.21 (0.08)#	0.19 (0.04)#
Knee	0.31 (0.06)	0.29 (0.05)*	0.22 (0.06)#	0.23 (0.07)#
Ankle	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.05)	0.18 (0.03)

研究Ⅱ

落下後の運動が不確定な条件での ドロップジャンプ

第4章（実験3）不確定条件における接地前の運動準備

4-1. はじめに

着地からのジャンプに関する先行研究は、動作開始時に指示されていた動作を変更する可能性が無い条件下で遂行されたものが大多数を占め、不確定条件におけるジャンプを可能にしている着地動作の制御を主眼とした研究は Leukel et al. (2012) に限られる。彼らはドロップジャンプ台からフォースプレートに落下するまでの滞空中にランダムに音刺激を発生させるシステムを用い、不確定条件におけるドロップジャンプの運動制御について検討している。しかし、彼らの研究において接地前の運動準備に関わるパラメータとして取得されたのはヒラメ筋の EMG のみであり、動作の不確定性がジャンプに先行する着地に及ぼす影響の全体像を捉えているとは言い難い。そこで実験3では、ドロップジャンプにおける接地時の下肢関節角度ならびに接地前の下肢および体幹の筋活動量を確定条件と不確定条件で比較することにより、不確定な状況における接地前の運動準備について明らかにすることを目的とした。

4-2. 方法

(i) 被験者

T大学およびJ大学バスケットボール部およびT大学陸上部に所属する選手15名（身長: 174.9 ± 7.1 cm、体重: 67.8 ± 6.3 kg、年齢: 20.8 ± 0.9 歳）が被験者として実験に参加した。実験の実施に先立ち、被験者には本研究の目的、実施内容、測定に伴う危険性について説明し、被験者から書面にて実験参加の同意を得た。本研究は東京大学大学院総合文化

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章（実験3）不確定条件における接地前の運動準備

研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) 動作課題

確定条件では、高さ 45 cm の台上からのドロップジャンプ (DJ) および着地動作 (LAND) 各 10 試行を被験者に課した。片足支持の状態です手を腰に当てたまま落下し、両足でドロップ台から 15cm 前方にあるフォースプレートの中心付近に着地させた。DJ については「着地後できる限り早く高く跳ぶ」、LAND については「自然に着地する」ように指示した。

不確定条件においても確定条件と同様の高さ 45 cm の台上からのドロップジャンプおよび着地動作を用いたが、不確定性を加える方法として、着地およびドロップジャンプを音刺激によって切り替えるシステム (Leukel et al., 2012) を採用した (図 4-1)。本研究においてはドロップ台上に設置したマットスイッチと自作プログラム (labview : National Instruments) を使用して音刺激から接地までの時間を変化させた。動作を切り替える可能性があるドロップジャンプおよび着地は、各 20 試行を被験者に課した。また音刺激 (周波数 2kHz、長さ 100ms のビーブ音) に関しては、被験者にタイミングを予測されないよう接地直前 (50~260ms 前) にランダムに発生させ、音刺激を与える割合は 40% (20 試行中の 8 試行) に設定した。被験者には「音がなったら即座に動作を切り替える (ジャンプから着地、着地からジャンプ)」よう指示した。不確定条件でドロップジャンプを行った試行のうち、音刺激がなく動作を切り替えずにドロップジャン

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

プを遂行した試行を DJNS (Drop Jump with No Sound)、音刺激があり着地からドロップジャンプに切り替えた試行を DJS (Drop Jump with Sound) と表記する。着地動作に関しても同様に、音刺激がなく動作を切り替えずに着地を遂行した試行を LANDNS (LANDing with No Sound)、音刺激がありドロップジャンプから着地に切り替えた試行を LANDS (LANDing with Sound) と表記する。

(iii) データ取得

上記の動作遂行中、フォースプレート (Kistler, 9281B) によって床反力データ、表面筋電計 (Bagnoli™ Desktop EMG : delsys) により筋電図データ、3次元動作解析システム (Flex3: optitrack) により各身体部位の座標データをそれぞれ測定した。データサンプリング周波数に関しては、床反力および筋電図データは 1000Hz、座標データは 100Hz とした。

3次元動作解析システムによる計測では、頭頂部、右肩峰、右大転子、右膝関節中心、右足関節中心、右第三中足骨遠位端の各箇所計6個の反射マーカを貼付した。なお課題動作中の関節角度は、実験1、2と同様に定義した (図 2-1)。

筋電図は、腹直筋 (RA)、脊柱起立筋 (ES)、大殿筋 (Gmax)、大腿二頭筋 (BF)、外側広筋 (VL)、腓腹筋内側頭 (MG)、ヒラメ筋 (SOL)、前脛骨筋 (TA) の各筋について計測し、身体右側より導出した。RA は臍の右側方約 2cm 付近、ES は第3腰椎部右側方約 2cm 付近とした。計測に先立ち、電極貼付部を除毛し、アルコール綿で払拭することで電極間抵抗を減少させた。電極は筋腹部に貼付し、アース電極は膝蓋骨面に貼付した。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

(iv) 分析

3次元動作解析システムによって得た身体各部位の座標データに対し、4次の位相遅れなしバターワースローパスフィルタ (遮断周波数 8Hz) を用いて、マーカの揺れによるノイズを軽減した後 (Hara et al., 2008; Winter, 2004)、股関節、膝関節、足関節の各角度 (HIP_{angle} , $KNEE_{angle}$, $ANKLE_{angle}$) を算出した (Winter, 2004)。なお課題動作中の関節角度は研究Ⅰ同様、図 2-1 に示すように定義し、90度 (deg) を直角とした。床反力データからは、床反力垂直成分 (F_z) を算出した。各筋電図データは、4次の位相遅れなしバターワースハイパスフィルタ (遮断周波数 20Hz) を用いて、電極およびリード線の揺れによるノイズを軽減し (Jacobs & van Ingen Schenau, 1992b; Kurokawa et al., 2003)、全波整流を行おこなった。

ドロップジャンプのパフォーマンス指標に関しては、床反力データからジャンプの接地時間 (CD: Contact Duration) と滞空時間を算出し、滞空時間から跳躍高 (JH: Jump Height) を算出した ($JH = 1/8 \cdot g \cdot t^2$, g : 重力加速度 = $9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$, t : 滞空時間(s))。さらに JH (m) を CD (s) で除すことにより、DJI (Drop Jump index) を算出した。

接地前の運動準備に関する指標に関しては、接地前 100ms から接地までの放電量の平均値 (preEMG) を算出し、股関節、膝関節、足関節角度に関しては接地時の角度 ($HIP_{contact}$, $KNEE_{contact}$, $ANKLE_{contact}$) を算出した。

DJ 試行および LAND 試行に関しては各パラメータを全 10 試行で平均し、「指標名_DJ」、「指標名_LAND」と表記した。DJNS 試行および LANDNS 試行においては、全試行の平

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

均値を算出し（「指標名_DJNS」）「指標名_LANDNS」）、DJ条件の確定条件における値で除して規格化した値をパフォーマンス指標とした（relative 指標名_DJNS、relative 指標名_LANDNS と表記）。DJS 試行および LANDS 試行に関しては、音刺激の発生したタイミングが試行によって異なるため平均化はしなかった。各試行の値を DJ 条件における平均値で除することで規格化し（relative 指標名_DJS、relative 指標名_LANDS と表記）、横軸を音刺激のタイミング、縦軸をパラメータとする散布図にプロットした。

(v) 統計

測定値の基本統計量は平均値±標準偏差（S.D.）により表した。各条件間（DJ 条件、DJNS 条件、LAND 条件、LANDNS 条件）のパラメータの比較には、反復測定による一元配置分散分析を用い、Tukey-Kramer 法による事後検定を行なった。DJS、LANDS 条件における音刺激から接地までの時間（Time_SC : Time of Sound to Contact）と測定パラメータとの関係は、Pearson の相関係数 (r) を用いて検討した。また、本実験においてはデータの取得および動作の遂行ができなかった試行を分析から除外し、分析の対象としたデータの被験者数または試行数 (n) は該当する図の中に示した。いずれの検定においても有意水準は 5% とした。

4-3. 結果

(i) 動作の切り替えが無かった条件（DJNS、LANDNS）

時系列パターン

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章（実験3）不確定条件における接地前の運動準備

図 4-2 に DJ、DJNS、LAND、LANDNS 条件における Fz の平均化した時系列パターンを示す。すべての条件において接地後の Fz は 1 包性のパターンを示した。DJ と DJNS ならびに LAND と LANDNS 条件間に顕著なパターンの違いは観察されなかった。

図 4-3 に各条件における股関節、膝関節および足関節角度の平均化した時系列パターンを示す。股関節および膝関節角度については接地時角度および最小角度ともに着地とドロップジャンプで大きく異なったが、足関節に関しては顕著な差はみられなかった。DJ と DJNS 条件においては接地前および接地後 100ms 頃までは異なる角度で推移しているものの、接地後 100ms を過ぎてからはほぼ一致するパターンを示した。

図 4-4、図 4-5 および図 4-6 に下肢・体幹筋群の筋電図を平均化した時系列データを示す。DJ と DJNS 条件の間ならびに LAND と LANDNS 条件の間には、振幅の違いはみられるものの顕著なパターンの違いは観察されなかった。

ジャンプパフォーマンスの条件間比較

表 4-1 に DJ 条件および DJNS 条件における DJI、CD、JH を示す。全てのパフォーマンス指標に関して有意な差は認められなかった (DJI: $P = 0.054$; CD: $P = 0.17$; JH: $P = 0.056$)。

関節角度の条件間比較

図 4-7 に DJ、DJNS、LAND、LANDNS 条件における接地時の股関節、膝関節および足関節角度に関する結果を示す。接地時の足関節角度に対して一元配置分散分析をおこなった結果、条件による有意な主効果が認められた ($F = 3.43, P < 0.05$)。事後検定の結果、DJ 条件と DJNS 条件間に有意な差が認められた。接地時の膝関節角度に対して一

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

元配置分散分析をおこなった結果、条件による有意な主効果が認められた ($F = 25.16$, $P < 0.01$)。事後検定の結果、DJ 条件と DJNS 条件間を除く全ての条件間に有意な差が認められた。接地時の股関節角度に関しても、条件による有意な主効果が認められた ($F = 32.67$, $P < 0.01$)。事後検定の結果、すべての条件間に有意な差が認められた。

接地前の筋活動の条件間比較

図 4-8 に接地前の筋活動に関する結果を示す。一元配置分散分析の結果、条件の主効果が認められたのは、VL、BF、ES の 3 筋であった。VL に関しては DJ と LAND 間に、BF に関しては DJ と DJNS ならびに LANDNS 間に、ES に関しては DJ と LANDNS ならびに LAND 間に有意な差が認められた。

(ii) 動作の切り替えがあった条件 (DJS、LANDS)

動作切り替え失敗率

本実験における DJS の動作失敗率は全被験者 120 試行中 14 試行で 11.7%であり、失敗した試行の Time_SC は接地の 114.2 ± 37.9 ms であった。LANDS については 120 試行中 27 試行で 22.5%であり、Time_SC は 133.4 ± 39.4 ms であった。

パフォーマンス

図 4-9 に横軸を Time_SC、縦軸をそれぞれ relativeDJI_{DJS}、relativeCD_{DJS}、relativeJH_{DJS} とする散布図を示す。変数間の関係について検討した結果、Time_SC は relativeDJI_{DJS} との間には有意な負の相関関係を、relativeCD_{DJS} との間には有意な正の相関関係を、relativeJH_{DJS} との間には有意な負の相関関係をそれぞれ示した。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

接地時関節角度

DJS 条件および LANDS 条件における Time_SC と relativeHIPcontact、KNEEcontact および ANKLEcontact の関係を検討した。その結果、relativeHIPcontact_LANDS および relativeKNEEcontact_LANDS が Time_SC との間に有意な負の相関関係を示した (図 4-10)。

接地前の筋活動

DJS 条件および LANDS 条件における Time_SC と 8 筋の relative preEMG の関係を検討した。その結果、BF および Gmax の relative preEMG_DJS が Time_SC との間に有意な負の相関関係を示した (図 4-11)。

4-4. 考察

動作を切り替えなかった条件 (DJ、DJNS、LAND、LANDNS)

DJ、DJNS、LAND および LANDNS の Fz は 1 包性で接地から 100ms 以内にピークが発生するパターンを示し、そのピーク値は DJ および DJNS では体重の約 4.5 倍、LAND および LANDNS では体重の約 3.8 倍であった (図 4-2)。実験 1 の最大跳躍高を目的としたドロップジャンプにおける Fz ピーク値が体重の 2.8 倍であったことを考慮すると、本実験では接地直後に比較的大きな床反力を得るような着地が遂行されたといえる。

DJ と DJNS における Fz、関節角度、筋電図の時系列パターンを比較すると、接地前や接地直後の関節角度および筋活動量に差はみられるものの接地後 100ms 以降に関してはほぼ一致するパターンが観察された (図 4-3~4-6)。また、ジャンプパフォーマンスの指標である DJI、CD、JH に関しても、DJ と DJNS 間に有意な差は認められなかった (表 4-1)。一方、Leukel et al. (2012) の実験においては、不確定条件のドロップジャ

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

ンプにおいて床反力のピーク値が約 300N 減少し (図 1-2)、接地時間が有意に増大している。これらの実験結果の相違は、本実験では不確定性が増した条件においても比較的確定条件に近いドロップジャンプ動作が遂行され、パフォーマンスが維持されたものと解釈できる。

接地時の股関節、膝関節、足関節角度については、すべての関節で有意な条件の効果が認められた (図 4-7)。股関節および足関節に関しては DJ と DJNS 間に、股関節と膝関節に関しては LAND と LANDNS 間に有意な差が認められた。先行研究において不確定条件のドロップジャンプおよび着地における下肢関節角度の変化について検討した例はなく、不確定性が接地時の姿勢を変化させたという本実験の結果はこれまでに明らかにされていなかった知見である。さらに、DJ と LAND 間に有意な差があった股関節と膝関節角度に着目してみると、DJNS および LANDNS 条件では DJ と LAND の中間範囲の接地角度を準備していた。さらに、接地前の筋活動において条件間差がみとめられた VL、BF および ES においても、DJNS および LANDNS 条件の筋活動は DJ および LAND 両条件の値から有意に逸脱するものではなかった (図 4-8)。動作選択肢が 2 つ存在する場合に中間的な運動準備がなされることはリーチングや力調節課題において報告され、default motor preparation と呼ばれている (Forgaard et al., 2011; Haith, Huberdeau, & Krakauer, 2015)。本実験の結果は、動作が不確定な条件においては、着地やドロップジャンプのようなダイナミックな全身運動でも default motor preparation が採用されている可能性を示唆している。

動作を切り替えた条件 (DJS、LANDS)

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

Time_SC は relativeDJI_{DJS} および relativeJH_{DJS} との間に負の有意な相関関係を、relativeCD_{DJS} との間に正の有意な相関関係を示した (図 4-9)。Leukel et al. (2012) では、接地の 170ms 前と 110ms 前の異なるタイミングで音刺激を与えているものの、刺激タイミングがパフォーマンスに及ぼす影響については検討されていない。本実験の結果は、音刺激の呈示タイミングの遅延によって、着地からドロップジャンプに切り替えた際のパフォーマンスが低下することを示している。また、いくつかの試行では、確定条件よりも高いパフォーマンスが発揮されている。これは規格化する基準値が DJ 条件の 10 試行を平均した値であり、各被験者の最高のパフォーマンスを意味するものではないことに起因すると考えられ、異常値ではないと推測される。

DJS 条件における PRE 局面の BF および Gmax の relativepreEMG (図 4-11)、ならびに LANDS 条件における relativeHIPcontact および relativeKNEEcontact (図 4-10) は Time_SC との間に有意な負の相関関係を示した。これらの結果は、滞空中にドロップジャンプと着地の動作切り替えが指示された場合、接地後からでなく滞空中からすでに動作の修正が行われていることを示している。さらに、DJS 条件においては BF および Gmax の relativepreEMG は刺激タイミングが早くなるほど 1 に近づく傾向を、LANDS 条件においては relativeHIPcontact および relativeKNEEcontact は刺激タイミングが遅くなるほど 1 に近づく傾向にあった。つまり、DJS 条件においては修正のための時間的余裕が大きいほど着地準備が DJ 条件に近付き、LANDS 条件においては時間的余裕がなくなるほど着地準備が DJ 条件に近づいていた。これらの結果から、DJS および LANDS

条件における接地前の姿勢や筋活動レベルは、確定した条件における水準へと近づくよう修正されていたと推察される。

4-5. 小括

本実験は、ドロップジャンプにおける接地時の下肢関節角度ならびに接地前の下肢および体幹の筋活動量を確定条件と不確定条件で比較することにより、不確定条件における接地前の運動準備について検討した。

動作を切り替えなかった不確定条件 (DJNS および LANDNS 条件)

DJNS および LANDNS 条件における接地時の股関節及び膝関節は、DJ と LAND の中間範囲の姿位で準備されていた。さらに VL、BF および ES に関しても、DJNS および LANDNS 条件の接地前の筋活動は DJ および LAND 両条件の範囲から有意に逸脱するものではなかった。これらの結果から、ジャンプと着地を遂行する際に動作を変更する可能性がある場合、接地前に2つの動作の中間的な運動準備がなされているものと推察された。

動作を切り替えた不確定条件 (DJS および LANDS 条件)

動作切り替えの音刺激呈示タイミングを示す $Time_{SC}$ は、 $relativeDJI_{DJS}$ および $relativeJH_{DJS}$ との間に負の有意な相関関係を、 $relativeCD_{DJS}$ との間に正の有意な相関関係を示し、音刺激の呈示タイミングの遅延によって着地からドロップジャンプに切り替えた際のパフォーマンスが低下することが明らかになった。

また、DJS 条件における BF および Gmax の $relativepreEMG$ 、ならびに LANDS 条件

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

における `relativeHIPcontact` および `relativeKNEEcontact` は `Time_SC` との間に有意な負の相関関係を持ち、ドロップジャンプと着地の動作切り替えが指示された場合、接地後からでなく滞空中からすでに動作の修正が行われていることが示された。さらにこれらのパラメータは `Time_SC` が小さいほど 1 に近づく傾向を示し、接地前の姿勢や筋活動レベルが確定した条件における水準へと近づくよう修正されていたと推察された。

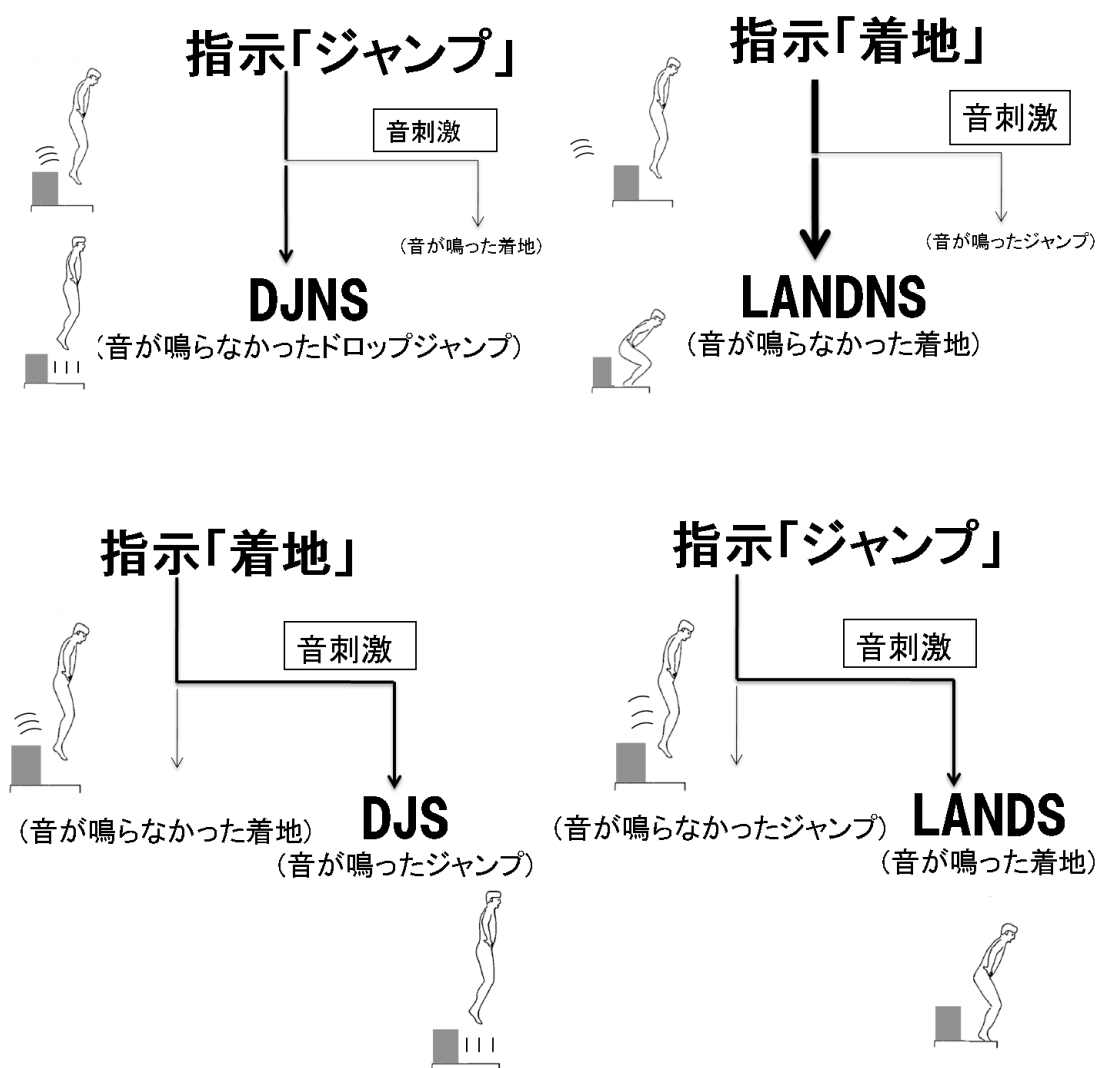


図 4-1 : 研究Ⅱにおける4つの不確定条件

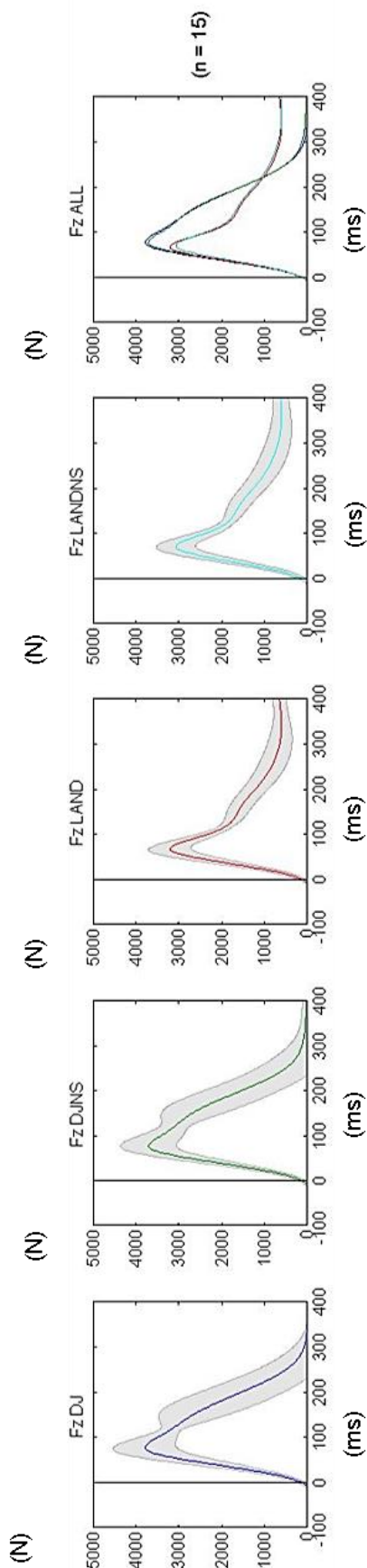


図 4-2：時系列平均データ (床反力垂直成分)

灰色の範囲が標準偏差を表す (接地を 0 ms とする)

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
 第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

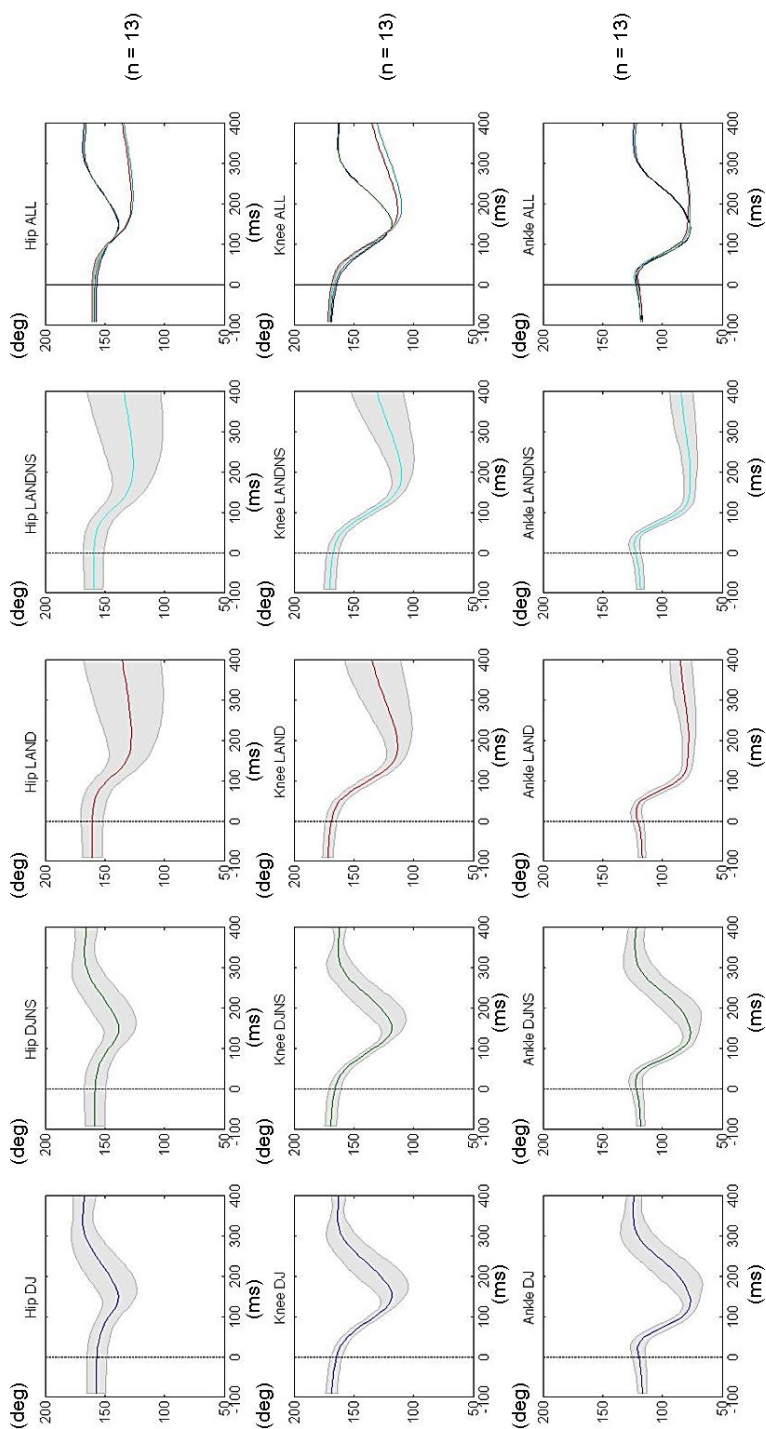


図 4-3 : 時系列平均データ (関節角度)

灰色の範囲が標準偏差を表す (接地を 0 ms とする)

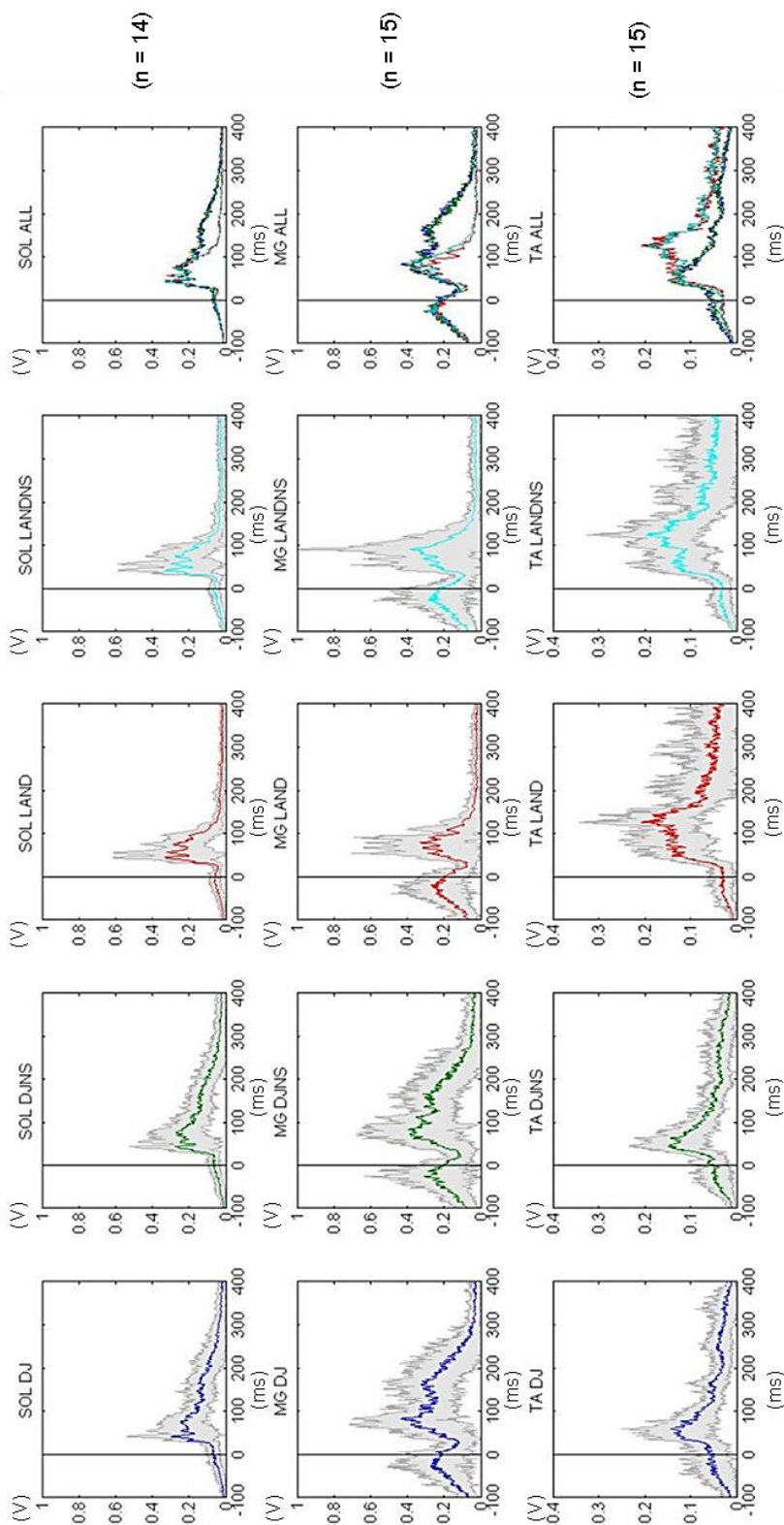


図 4-4：時系列平均データ（下腿部 EMG）

灰色の範囲が標準偏差を表す（接地を 0 ms とする）

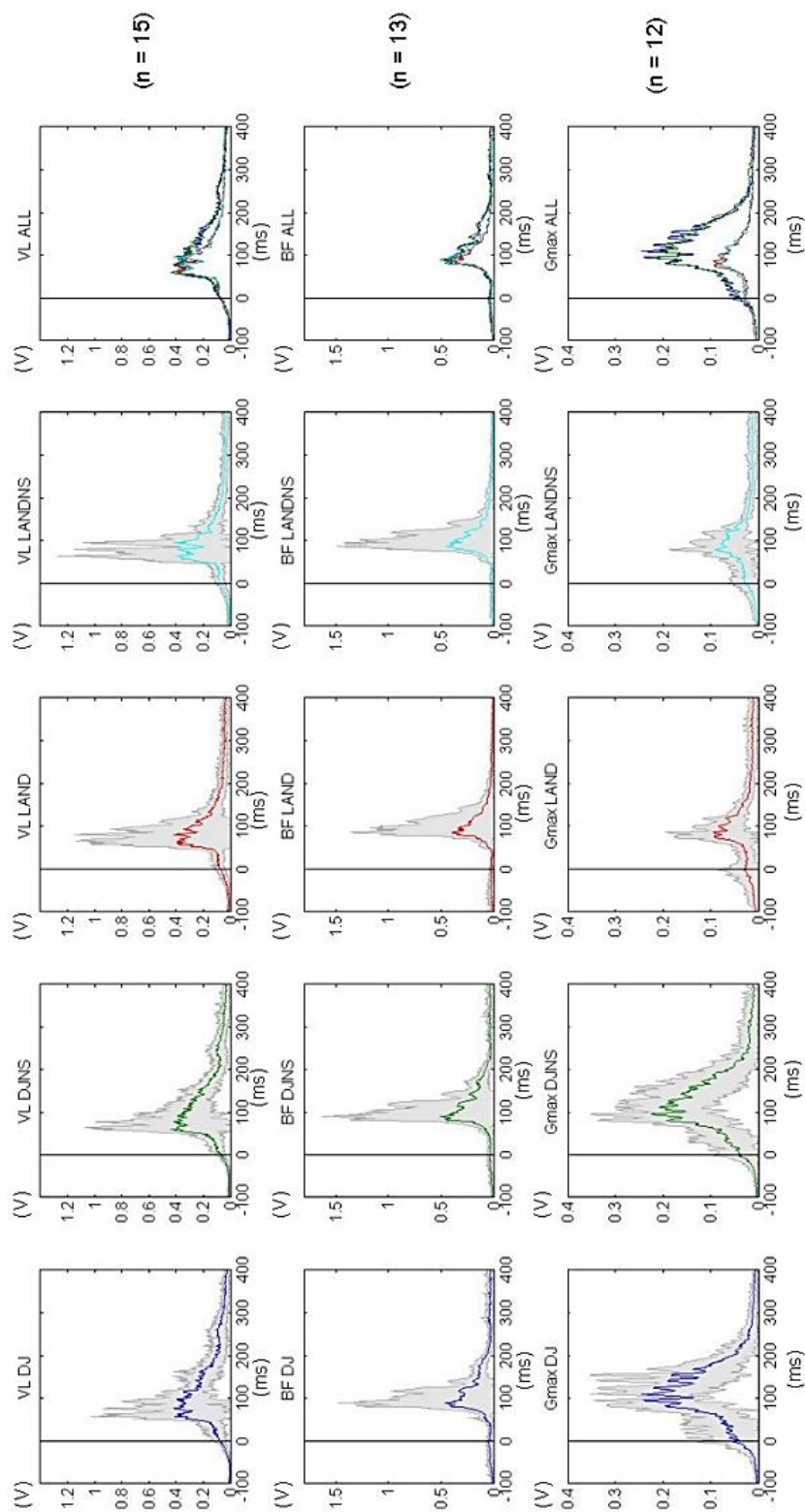


図 4-5：時系列平均データ (大腿・殿部 EMG)

灰色の範囲が標準偏差を表す (接地を 0 ms とする)

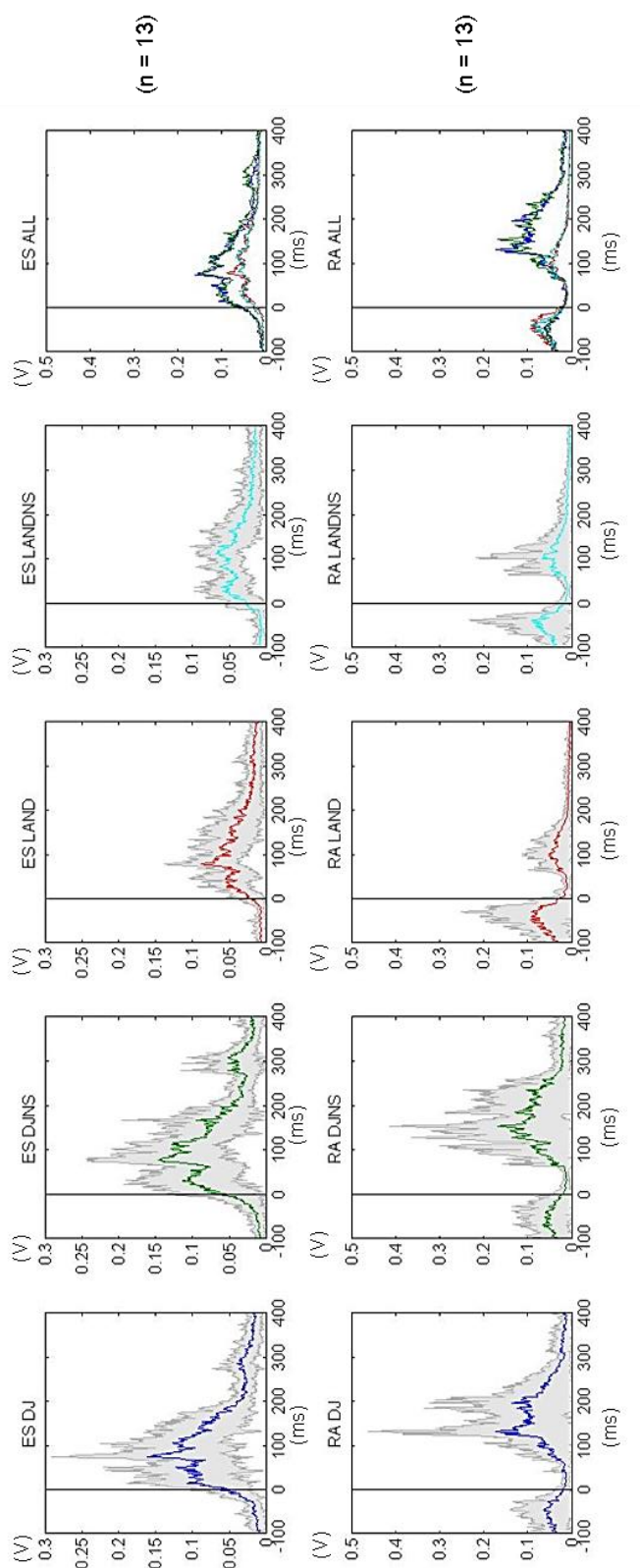


図 4-6 : 時系列平均データ (体幹部 EMG)

灰色の範囲が標準偏差を表す (接地を 0 ms とする)

表 4-1 : DJ 条件と DJNS 条件のジャンプパフォーマンス比較

(いずれも DJ-DJNS 間に有意な条件間差無し)

	DJ	DJNS
DJI (n = 15)		
Mean	0.92	0.86
S.D.	0.27	0.24
CD (s) (n = 15)		
Mean	0.25	0.26
S.D.	0.04	0.04
JH (m) (n = 15)		
Mean	0.23	0.22
S.D.	0.06	0.06

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

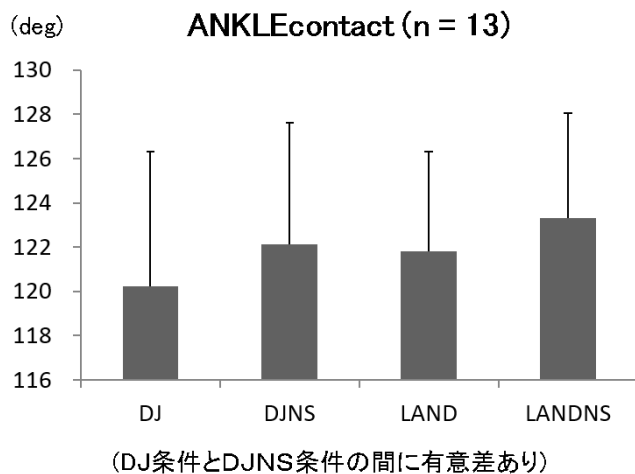
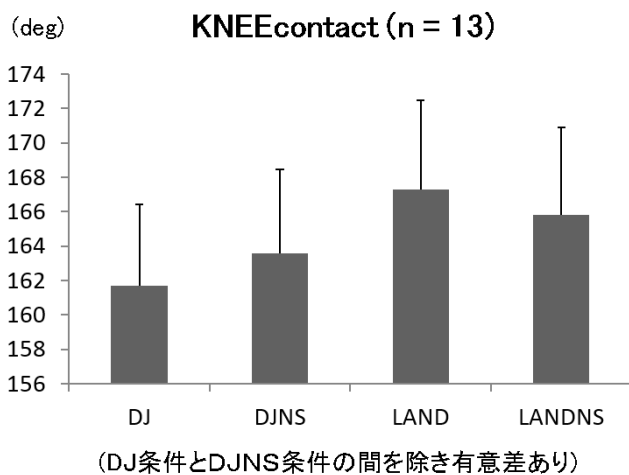
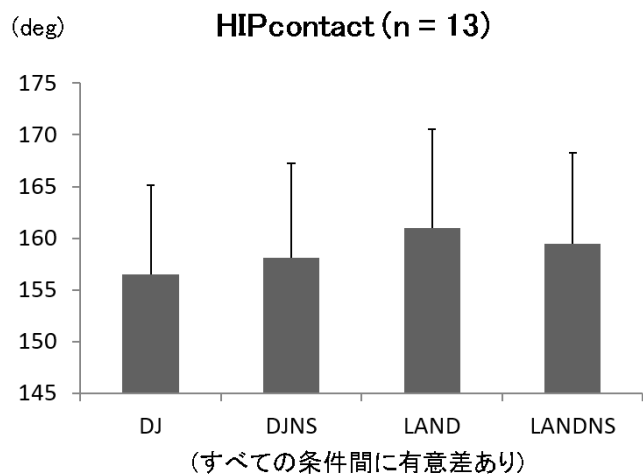


図 4-7 : 動作を切り替えなかった条件の比較 (接地時関節角度)

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

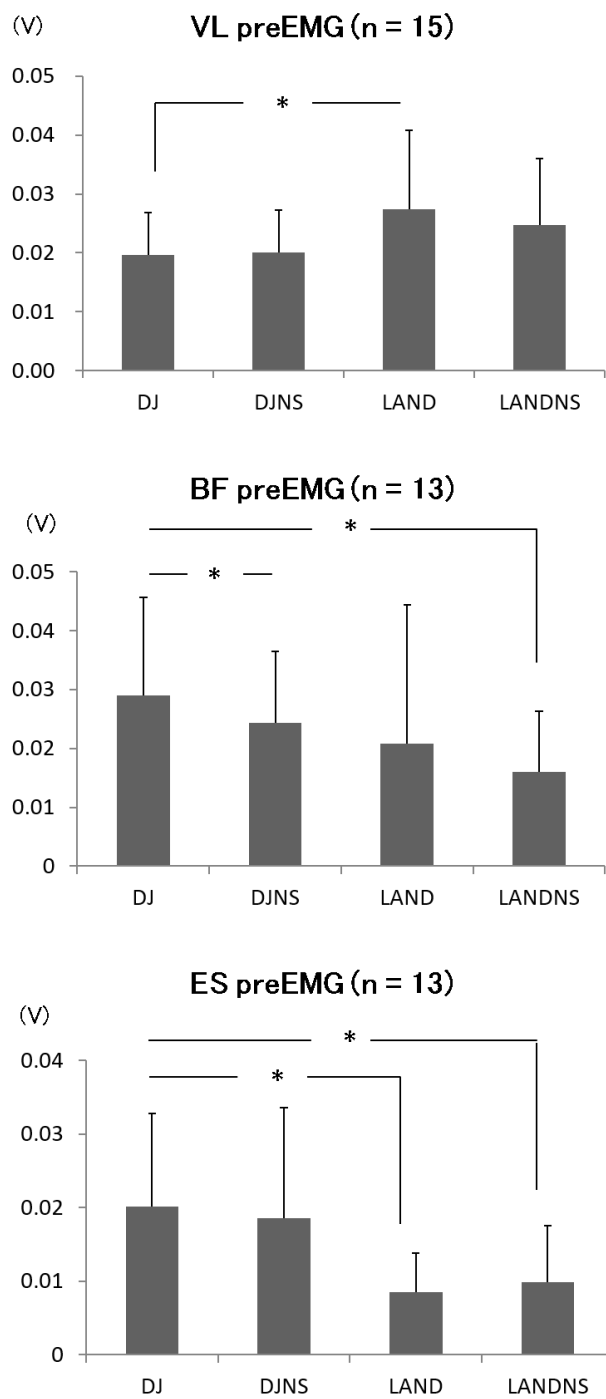


図 4-8 : 動作を切り替えなかった条件の比較 (接地前筋活動)

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

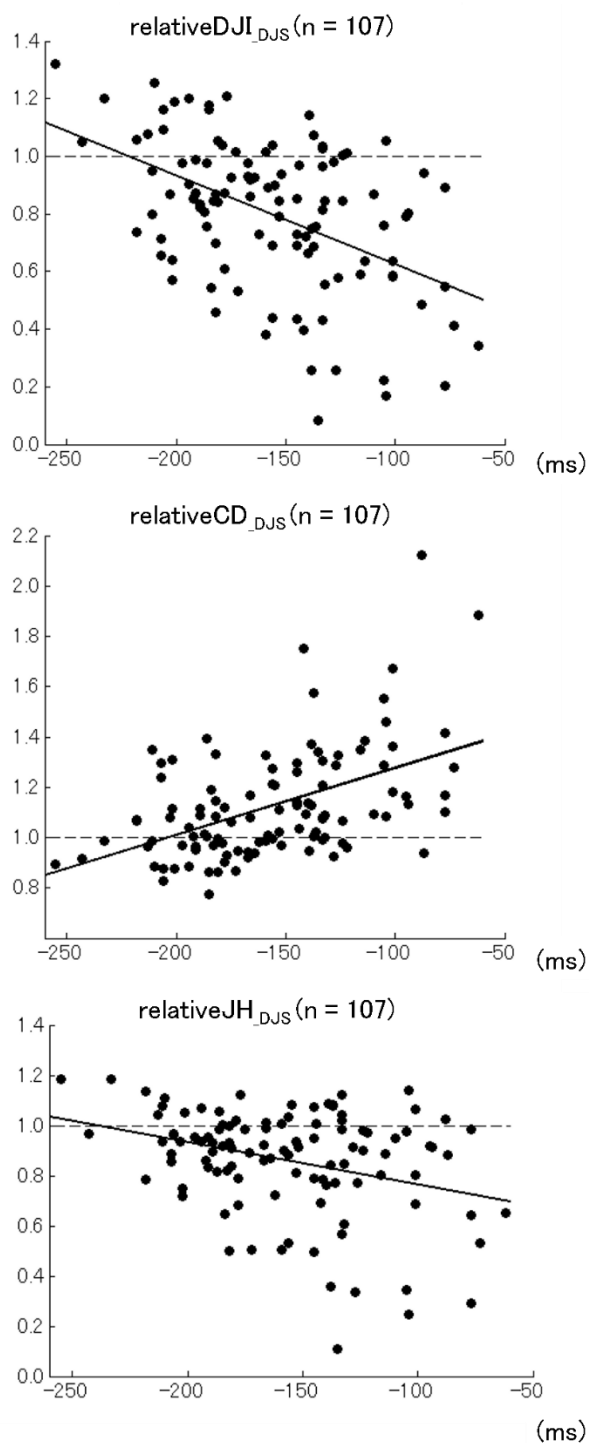


図 4-9 : DJS 条件における音刺激タイミングとパラメータの関係 (パフォーマンス)

縦軸が DJ 条件との相対値、横軸が Time_SC を表す

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

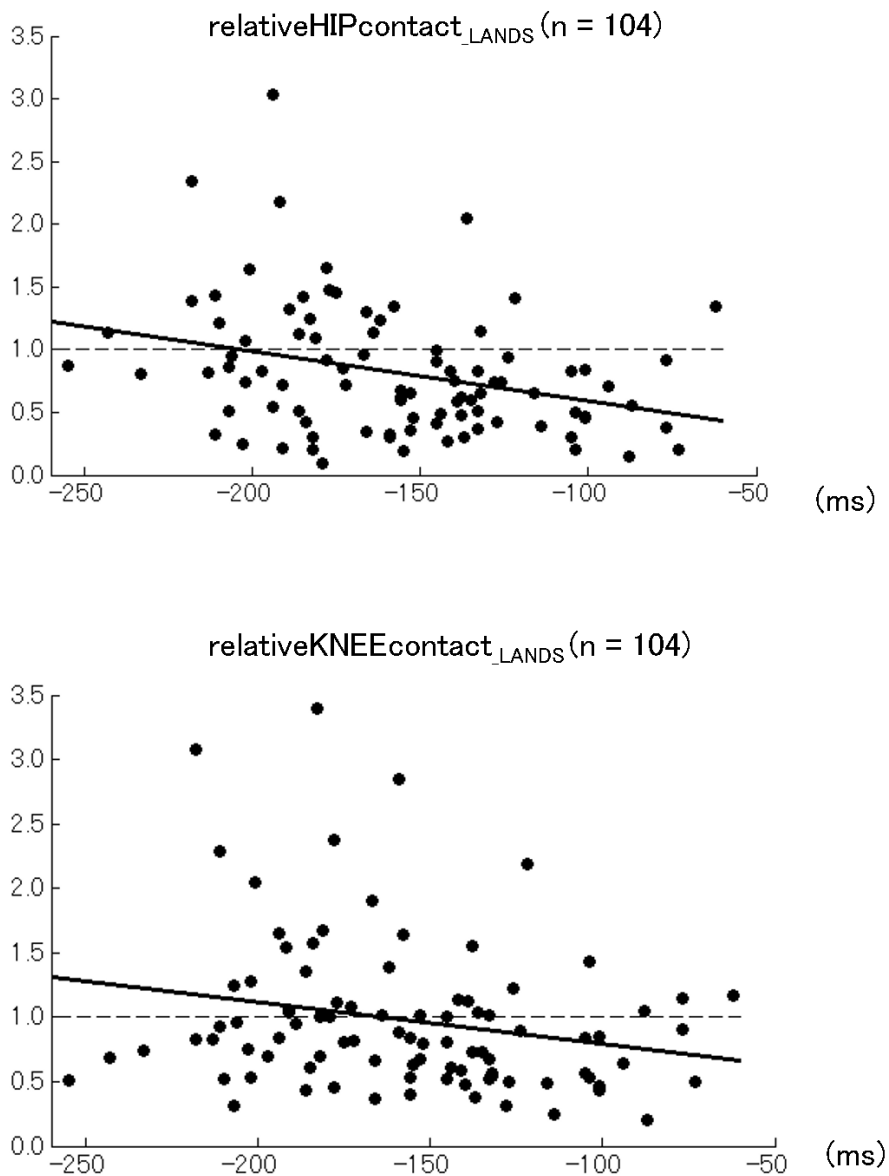


図 4-10 : LANDS 条件における音刺激タイミングとパラメータの関係

(relativeHIPcontact_LANDS および relativeKNEEcontact_LANDS)

縦軸が DJ 条件との相対値、横軸が刺激呈示時間を表す

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第4章 (実験3) 不確定条件における接地前の運動準備

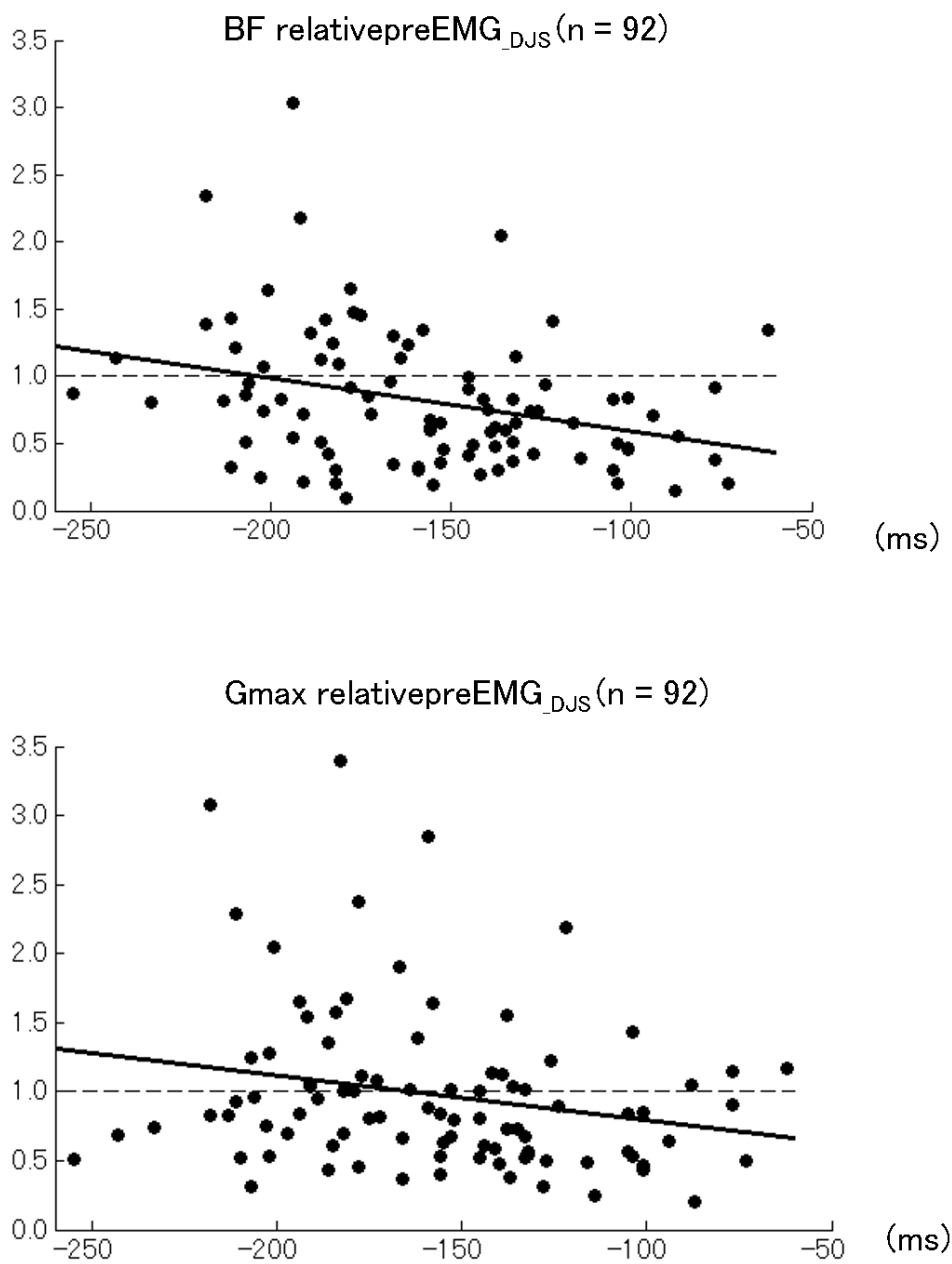


図 4-11 : DJS 条件における音刺激タイミングとパラメータの関係 (接地前筋活動)

縦軸が DJ 条件との相対値、横軸が刺激呈示時間を表す

第5章（実験4）不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと 接地前の運動準備との関係

5-1. はじめに

一般的に、不確実性が増した条件下では運動パフォーマンスが低下することが知られており、ジャンプに関しても接地時間の増大 (Leukel et al., 2012) や、着地から切り替えた際のジャンプパフォーマンスの低下 (実験3) が確認されている。また、ジャンプパフォーマンスは接地前の運動準備状態に影響を受けることが報告されている (Arampatzis et al., 2001; Hoffren et al., 2007; Horita et al., 2002; Kawabata et al., 2008)。求められる動作が不確定な状況下で、確定した状況に匹敵するジャンプパフォーマンスを発揮できる運動準備状態を明らかにすることは、球技をはじめとする多くのスポーツの競技力向上つながると思われる。そこで本実験は、不確定な状況において優れたジャンプパフォーマンスを発揮することに適した準備状態を明らかにすることを目的とし、不確定条件における接地前の筋活動レベルおよび接地時の下肢関節角度とジャンプパフォーマンスの関係について検討した。

5-2. 方法

(i) 被験者

本実験の被験者は、実験3参加者と同一であった。実験の実施に先立ち、被験者には本研究の目的、実施内容、測定に伴う危険性について説明し、被験者から書面にて実験参

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章（実験4）不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

加の同意を得た。本研究は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) データ取得・分析

データ取得方法および分析項目は実験3と同一である。

(iii) 統計処理

パフォーマンス指標とその他の測定結果との関係については、Pearsonの相関係数 (r) を用いて検討した。また、本実験においてはデータの取得および動作の遂行ができなかった試行を分析から除外し、分析の対象としたデータの被験者数または試行数 (n) は該当する図の中に示した。いずれの検定においても有意水準は5%とした。

5-3. 結果

(i) 動作の切り替えが無かった条件 (DJNS)

DJNS 条件における DJI と接地時の関節角度との相関関係を検討した結果、 $relativeDJI_{DJNS}$ と $relativeKNEEcontact_{DJNS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJNS}$ の間に有意な負の相関関係が認められた (図 5-1)。 $relativeKNEEcontact_{DJNS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJNS}$ ともに多数の被験者が1より高値を示し、1に近づくほどパフォーマンスが高くなる傾向がみられた。

DJNS 条件における DJI と接地前の筋活動との相関関係を検討した結果、

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章（実験4）不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

relativeDJI_{DJNS} と MG の relativepreEMG_{DJNS} の間に有意な負の相関関係が認められた（図 5-2）。MG の relativepreEMG_{DJNS} が 1 に近づくほどパフォーマンスが高くなる傾向が観察された。

(ii) 動作の切り替えがあった条件（DJS）

DJS 条件における DJI と接地時の関節角度との相関関係を検討した結果、relativeDJI_{DJS} と relativeHIPcontact_{DJS}、relativeKNEEcontact_{DJS} および relativeANKLEcontact_{DJS} の間に有意な負の相関関係が認められた（図 5-3）。3 関節ともに DJ 条件との相対値が 1 を超える試行が多く、値が大きくなるほど relativeDJI_{DJS} が低下する傾向にあった。

DJS 条件における DJI と接地前の筋活動との相関関係を検討した結果、relativeDJI_{DJS} は SOL の relativepreEMG との間に有意な負の相関関係を、TA および BF の relativepreEMG との間に有意な正の相関関係を示した（図 5-4）。SOL に関しては値が小さくなるほど、TA および BF に関しては値が大きくなるほど relativeDJI_{DJS} が増大する傾向となった。

5-4. 考察

本実験では、relativeDJI と接地時の関節角度および接地前の筋活動量との関係について検討をおこなった。relativeDJI は、動作を変更する可能性の無い DJ 条件におけるジャンプを基準とした相対的なパフォーマンス指標であり、「どれだけ確定条件に近いジャンプパフォーマンスを発揮できたか」を示している。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章（実験4）不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

DJNS 条件では、 $relativeKNEEcontact_{DJNS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJNS}$ が $relativeDJI_{DJNS}$ との間に有意な相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど $relativeDJI_{DJNS}$ が高くなる傾向がみられた（図 5-1）。この結果は、膝関節および足関節の屈曲（背屈）を保ち確定条件と同程度の姿勢で接地できた被験者ほど、不確実性の増加に伴うパフォーマンスの低下を軽減できたことを示している。さらに、MG の $relativepreEMG_{DJNS}$ は $relativeDJI_{DJNS}$ との間に有意な負の相関関係を示し、値が 1 に近づくほど $relativeDJI_{DJNS}$ が高くなる傾向が観察された（図 5-2）。この結果は、接地前の MG の活動を確定条件に近い水準に抑えた被験者が不確実性の増加に伴うパフォーマンスの低下を軽減できたことを示している。これらの結果を考え合わせると、MG の接地前の活動量を抑えた被験者は比較的確定条件に近い足関節角度で接地でき、不確実な条件でもパフォーマンスを維持できたものと推察できる。

ドロップジャンプにおける先行研究においては、接地前の下肢および体幹の筋活動の増加は着地時のスティフネスを増加させると考察されている（Arampatzis et al., 2001; Hoffren et al., 2007; Kawabata et al., 2008）。しかし、この解釈のみでは MG の活動量を抑えることができた被験者ほど、高いスティフネスが必要とされる「速く高く跳ぶ」ドロップジャンプのパフォーマンスが高くなったという本実験の結果を説明できない。すなわち、本実験の MG の $relativepreEMG_{DJNS}$ と $relativeDJI_{DJNS}$ の有意な負の相関関係は、接地前の筋活動はスティフネスの制御だけでなく着地姿勢の調整にも関与していることを示唆している。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

第5章（実験4）不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと 接地前の運動準備との関係

DJS 条件では、 $relativeHIPcontact_{DJS}$ 、 $relativeKNEEcontact_{DJS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJS}$ が $relativeDJI_{DJS}$ との間に有意な相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向がみられた（図 5-3）。これらは股関節、膝関節および足関節の屈曲（背屈）を保ち確定条件と同程度の姿勢で接地できた試行ほど、滞空中の動作変更によるパフォーマンスの低下を軽減できたことを示す結果である。さらに、 $relativeDJI_{DJS}$ は SOL の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な負の相関関係 TA および BF の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な正の相関関係を示し、値が 1 に近づくほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向が観察された（図 5-4）。SOL は足関節の底屈、TA は足関節の背屈、BF は膝関節の屈曲に作用する筋であることを考慮すると、着地姿勢を DJ 条件におけるものに近付けるように接地前の筋活動を調節できた試行においてパフォーマンスが維持できたものと解釈できる。これは DJNS 条件におけるものと共通する解釈であり、不確定条件では動作切り替えの有無にかかわらず、接地時の姿勢を確定条件に近付けるような着地準備がジャンプパフォーマンスの向上に重要であると推察される。

5-5. 小括

本実験は動作が不確定な状況において高いジャンプパフォーマンスを発揮するための運動準備について明らかにするため、ドロップジャンプの確定条件との相対値である $relativeDJI$ と接地時の下肢関節角度ならびに接地前の下肢および体幹の筋活動量との関係を検討した。

動作を切り替えなかった不確定条件（DJNS 条件）

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

DJNS 条件では、 $relativeKNEEcontact_{DJNS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJNS}$ が $relativeDJI_{DJNS}$ との間に有意な相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど $relativeDJI_{DJNS}$ が高くなる傾向がみられた。この結果から、膝関節および足関節の屈曲（背屈）を保ち確定条件と同程度の姿勢で接地できた被験者ほど、不確実性の増加に伴うパフォーマンスの低下を軽減できたことが示唆された。さらに、MG の $relativepreEMG_{DJNS}$ は $relativeDJI_{DJNS}$ との間に有意な負の相関関係を示し、値が 1 に近づくほど $relativeDJI_{DJNS}$ が高くなる傾向が観察された。これらの結果から、MG の接地前の活動量を抑え比較的確定条件に近い足関節角度で接地できた被験者は、不確実な条件でもパフォーマンスを維持できたものと推察された。

動作を切り替えた不確定条件 (DJS 条件)

$relativeHIPcontact_{DJS}$ 、 $relativeKNEEcontact_{DJS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJS}$ が $relativeDJI_{DJS}$ との間に有意な相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向がみられた。さらに、 $relativeDJI_{DJS}$ は SOL の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な負の相関関係 TA および BF の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な正の相関関係を示し、値が 1 に近づくほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向が観察された。これらの結果から、着地姿勢を DJ 条件におけるものに近付けるように接地前の筋活動レベルを修正できた試行では、確定条件に近いジャンプパフォーマンスが維持できたものと推察された。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
 第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
 接地前の運動準備との関係

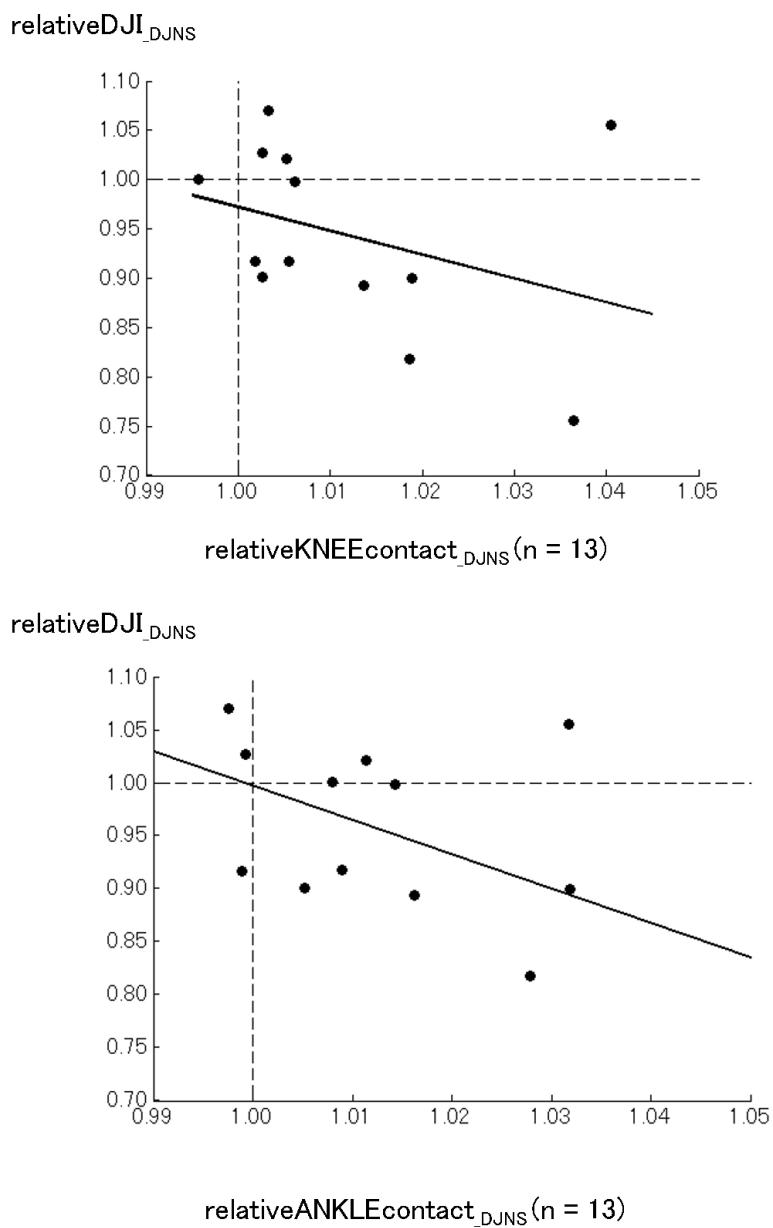


図 5-1 : DJNS 条件における relativeDJI と接地時の関節角度の関係

縦軸が relativeDJI_{DJNS}、横軸が接地時角度 (DJ 条件との相対値) を表す

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

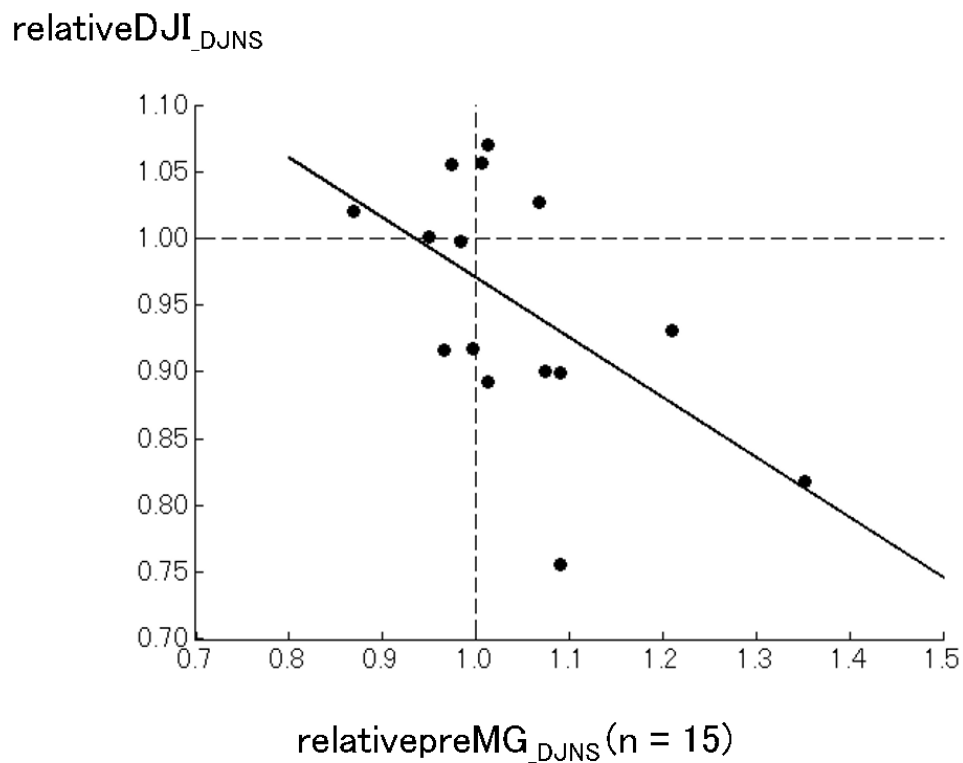


図 5-2 : DJNS 条件における relativeDJI と接地前の筋活動の関係

縦軸が relativeDJI_{DJNS}、横軸が MG の筋放電量 (DJ 条件との相対値) を表す

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
 第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
 接地前の運動準備との関係

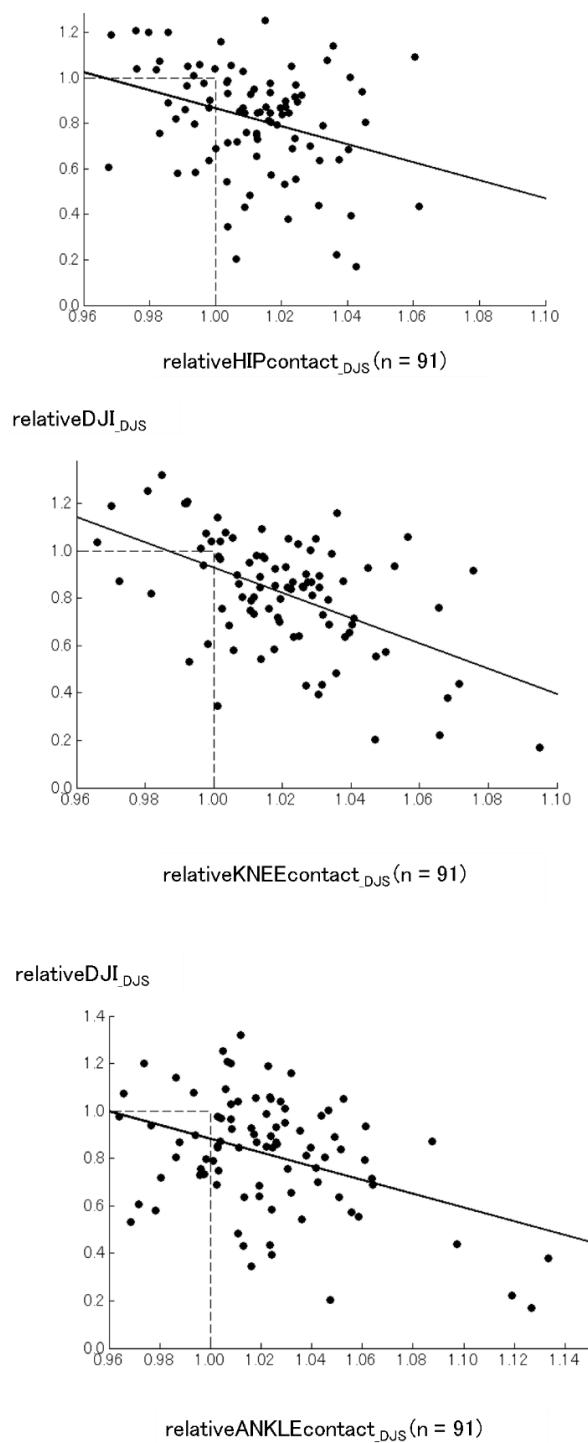


図 5-3 : DJS 条件における relativeDJI と接地時の関節角度の関係

縦軸が relativeDJI_DJS、横軸が接地時角度 (DJ 条件との相対値) を表す

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第5章 (実験4) 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと
接地前の運動準備との関係

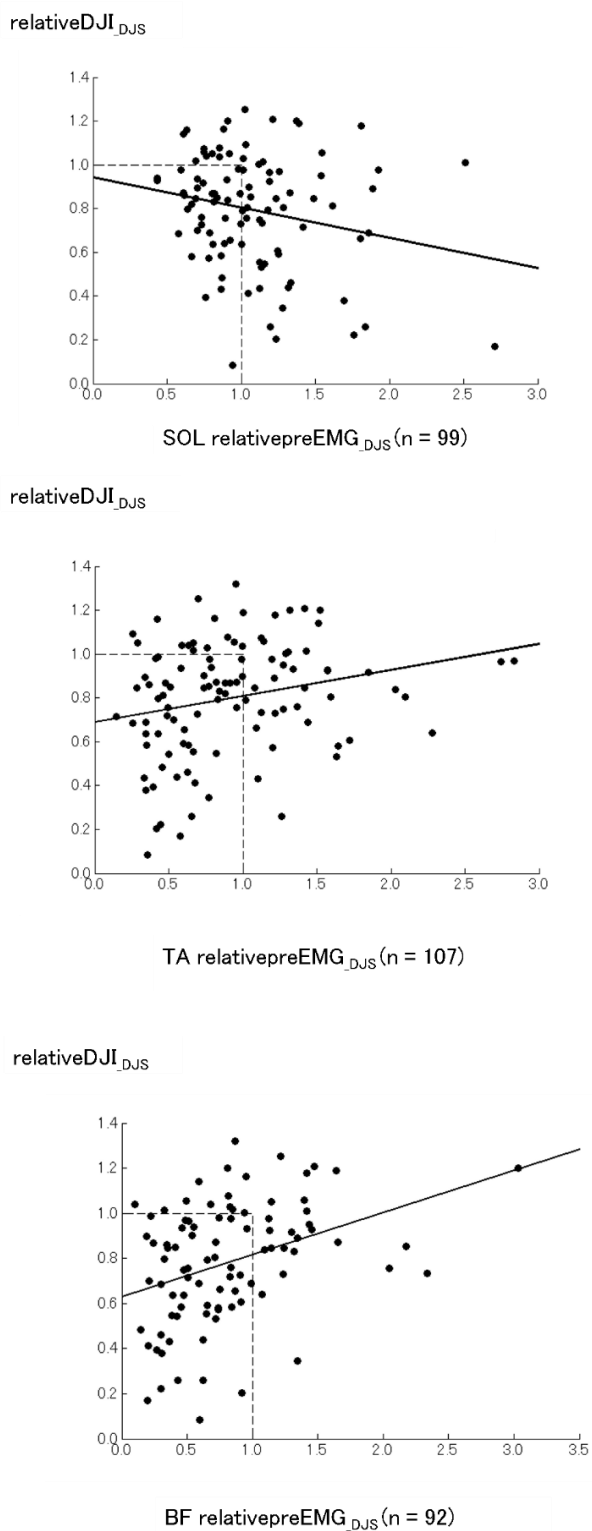


図 5-4 : DJS 条件における relativeDJI と接地前の筋活動の関係

縦軸が DJI (DJ 条件との相対値)、横軸が接地前筋放電量 (DJ 条件との相対値) を表す

第6章（実験5）専門競技経験が不確定条件の

ドロップジャンプパフォーマンスおよび接地前の運動準備に及ぼす影響

-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

6-1. はじめに

バスケットボールやバレーボールのようなスポーツにおいては、時々刻々と変化する周辺選手やボールの状況に応じて即座にジャンプ動作を遂行しなければならない。また先行研究によると、着地やジャンプ動作は競技特異的な適応を示すと報告されている (Cowley et al., 2006; Munro, Herrington, & Comfort, 2012)。これらの事を考え合わせると、上記のスポーツ選手が不確定条件に適応した着地・ジャンプ動作を身に付けていると推測される。

そこで本実験は、不確定条件におけるドロップジャンプをバスケットボール選手と陸上競技選手とで比較し、専門競技経験が不確定な状況におけるジャンプパフォーマンスおよび運動の準備に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本実験の実施に当たり、バスケットボール選手は確定条件下でのジャンプを遂行することが多い陸上競技選手と比較して、不確定条件下において高いドロップジャンプパフォーマンスを発揮できるという仮説を設定した。

6-2. 方法

(i) 被験者

被験者は実験 3、4 と同一の T 大学および J 大学バスケットボール部に所属する選手 8 名 (BB 群) および T 大学陸上部に所属する選手 7 名 (TF 群) とした。BB 群は全員が関東大学バスケットボールリーグ 4 部のチームに所属しており、バスケットボールの経験年数は 7.4 ± 1.5 (平均値 \pm 標準偏差) 年であった。TF 群は跳躍種目もしくは短距離種目を専門とし、陸上競技の経験年数は 7.3 ± 1.5 年であった。各群の年齢は BB 群 20.3 ± 0.5 才および TF 群 19.9 ± 0.7 才であり、有意な差はなかった。身長は BB 群が 179.4 ± 5.3 cm、TF 群が 169.8 ± 5.2 cm、体重は BB 群が 71.9 ± 4.8 kg、TF 群が 63.1 ± 4.2 kg であり、ともに BB 群の方が有意に大きかった。実験の実施に先立ち、被験者には本研究の目的、実施内容、測定に伴う危険性について説明し、被験者から書面にて実験参加の同意を得た。本研究は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) データ取得

ドロップジャンプに関するデータ取得については実験 3、4 と同一とした。本実験では、各競技群における単純反応時間を比較するため、ボタン押し課題による音刺激に対する反応時間測定をおこなった。用いた音刺激は不確定条件において用いたものと同じとし、「音刺激が聞こえたらできる限り早くボタンを押す」よう指示した。反応時間課題は各被験者 50 試行ずつおこない、測定結果を昇順で並び替えた 11 から 40 番目の平均値を各被験者の反応時間とした。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章 (実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響—バスケットボール選手と陸上競技選手の比較—

(iii) 分析

ドロップジャンプに関する分析項目は実験3および4と同一である。

(iv) 統計処理

測定値の基本統計量は平均値±標準偏差 (S.D.) により表した。BB群とTF群の反応時間、DJ条件およびDJNS条件間の比較には対応の無いt検定を用いた。DJS条件間の比較に関しては、横軸をTime_SC、縦軸をパフォーマンス指標 (relativeJH_{DJS}, relativeCD_{DJS}, relativeDJI_{DJS}) とする散布図を作成し、両群の直線回帰式における傾きの差の検定を行うことでパフォーマンスの違いの有無を検討した。また、本実験においてはデータの取得および動作の遂行ができなかった試行を分析から除外し、分析の対象としたデータの被験者数または試行数 (n) は該当する図の中に示した。いずれの検定においても有意水準は5%以下とした。

6-3. 結果

(i) 音刺激への反応時間の競技間比較

音刺激による反応課題における所要時間は、BB群において 172.7 ± 18.4 (ms)、TF群において 169.3 ± 25.1 (ms) であり、有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

(ii) DJ条件における競技間比較

JH_{DJ}、CD_{DJ} および DJI_{DJ} の結果を図6-1に示す。各群のJH_{DJ}はBB群において 0.23 ± 0.05 (m)、TF群において 0.23 ± 0.08 (m) であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。各群のCD_{DJ}はBB群において 0.27 ± 0.03 (s)、TF群において 0.23 ± 0.05 (s) で

あり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。各群の DJI_{DJ} は BB 群において 0.86 ± 0.15 、TF 群において 1.00 ± 0.35 であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

(iii) DJNS 条件における競技間比較

図 6-2 に DJI_{DJNS} に関する結果を示した。 DJI_{DJNS} に関しては BB 群において 0.83 ± 0.17 、TF 群において 0.92 ± 0.31 (s) であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。各被験者の DJI_{DJ} で規格化した $relativeDJI_{DJNS}$ は BB 群において 0.97 ± 0.07 、TF 群において 0.90 ± 0.09 であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

図 6-3 に CD_{DJNS} に関する結果を示した。 CD_{DJNS} に関しては BB 群において 0.27 ± 0.03 (s)、TF 群において 0.24 ± 0.06 (s) であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。各被験者の CD_{DJ} で規格化した $relativeCD_{DJNS}$ は BB 群において 1.02 ± 0.04 、TF 群において 1.03 ± 0.08 であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

図 6-4 に JH_{DJNS} に関する結果を示した。 JH_{DJNS} に関しては BB 群において 0.23 ± 0.05 (m)、TF 群において 0.21 ± 0.07 (m) であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。各被験者の JH_{DJ} で規格化した $relativeJH_{DJNS}$ は BB 群において 0.98 ± 0.05 、TF 群において 0.94 ± 0.09 であり、群間で有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

(iv) DJS 条件における競技間比較

図 6-5 に x 軸を $Time_{SC}$ 、y 軸を $relativeDJI_{DJS}$ とする全データの散布図を示す。両群ともに $relativeDJI_{DJS}$ は $Time_{SC}$ との間に有意な負の相関を示した (BB 群 $r = 0.32$, TF

群 $r = 0.62$, いずれも $P < 0.05$)。各群の回帰式は BB 群において $y = -0.0016x + 0.612$ 、TF 群において $y = -0.0045x + 0.039$ であり、両群の傾きには有意な差が認められた ($P < 0.05$)。また、BB 群と TF 群の $relativeDJI_{DJS}$ に差が生じる $Time_SC$ の範囲を明らかにするため、分析する区間を 100ms で区切り、10ms ずつ範囲をずらしていった際の $relativeDJI_{DJS}$ について対応のない t 検定を用いて群間差を検討した (図 6-6)。その結果、 $Time_SC$ が 110~210ms までは有意な群間差は検出されなかったが、さらに $Time_SC$ が小さくなると TF 群の $relativeDJI_{DJS}$ が有意に低い値を示した (全て $P < 0.05$)。

図 6-7 に x 軸を $Time_SC$ 、y 軸を $relativeCD_{DJS}$ とする全データの散布図を示す。両群ともに $relativeCD_{DJS}$ は $Time_SC$ との間に有意な負の相関を示した (BB 群 $r = 0.43$, TF 群 $r = 0.53$, いずれも $P < 0.05$)。各群の回帰式は BB 群において $y = 0.002x + 1.418$ 、TF 群において $y = 0.0033x + 1.669$ であり、両群の傾きには有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

図 6-8 に x 軸を $Time_SC$ 、y 軸を $relativeJH_{DJS}$ とする全データの散布図を示す。TF 群においては $relativeJH_{DJS}$ が $Time_SC$ との間に有意な負の相関を示したが ($r = 0.47$, $P < 0.05$ $y = -0.0029x + 0.344$)、BB 群においては有意な相関は認められなかった ($r = 0.11$, $P > 0.05$)。

さらに本実験においては、DJS 条件におけるパフォーマンスの群間差の要因について明らかにするため、実験 4 において $relativeDJI_{DJS}$ と相関関係にあった $relativeHIPcontact_{DJS}$ 、 $relativeKNEEcontact_{DJS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJS}$ の群間差についても検討をおこなった。その結果、 $relativeKNEEcontact$ に関して群間で違いが認

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

められた(図6-9)。TF群においては $relativeKNEEcontact_DJS$ は $Time_SC$ との間に有意な負の相関を示したが ($P < 0.05$)、BB群においては有意な相関は認められなかった。

6-4. 考察

DJ条件およびDJNS条件

BB群とTF群の JH_{DJ} 、 CD_{DJ} および DJI_{DJ} に有意な差は認められなかった(図6-1)。

この結果は、本研究で採用されたバスケットボール選手と陸上競技選手においては、動作が確定している状況でのドロップジャンプ能力に顕著な違いが無かったことを示している。

JH_{DJNS} 、 CD_{DJNS} 、 DJI_{DJNS} においてもBB群とTF群の間に有意な差は認められなかった(図6-2、図6-3および図6-4)。さらに、動作が確定している状況でのドロップジャンプ能力で規格化した $relativeJH_{DJNS}$ 、 $relativeCD_{DJNS}$ 、 $relativeDJI_{DJNS}$ に関しても有意な群間差は認められなかった。これらの結果は動作が不確定な状況であっても動作を切り替えない場合は、本実験のバスケットボール選手と陸上競技選手のドロップジャンプ能力に違いは認められなかったことを示している。これまでのドロップジャンプ研究において不確定状況におけるジャンプパフォーマンスの競技間差について検討した例はなく、これらの結果は本実験から得られた重要な知見の一つである。

DJS条件

DJS 条件に関しては、第一にジャンプパフォーマンスを早さと高さの両面から評価できる DJI について考察する。relativeDJI_{DJS} は両群において Time_SC との間に有意な負の相関関係を示した（図 6-5）。そして、回帰式の傾きを群間で比較した結果、TF 群の負の傾きが有意に大きかった。この結果は、音刺激のタイミングが接地に近づくにつれ DJI は確定した条件のものに比べ低下していく傾向にあるが、BB 群においてはその影響が小さかったものと解釈できる。つまり、バスケットボール選手が陸上選手よりも動作直前にジャンプ動作を要求された場合のジャンプパフォーマンス能力に長けていることを示しており、本実験において設定した仮説は支持された。さらに Time_SC を 100 ms で区切って呈示タイミングごとに群間比較をおこなった結果、100-200ms 以前の範囲において有意な群間差が認められた（図 6-6）。本実験では刺激タイミングを被験者間、被験者内で統一できなかつたため群間差が生じる呈示タイミングの特定は難しいが、少なくとも接地前の 200ms 前より遅いタイミングで動作の変更を指示された場合、群間にパフォーマンスの差が生じるという可能性が示唆された。また、回帰の傾き比較によって、音刺激のタイミングが接地から離れるほど TF 群のパフォーマンスが高まる傾向が示されている。しかしながら、本研究の音刺激は接地の 50~260ms 前に限定されており、音刺激のタイミングを漸進的に早めていった場合、両群とも確定条件と同等の値に収束していくと推測され、音刺激のタイミングが早いほど TF 群のパフォーマンスが高くなるとは考えにくい。

次に relativeDJI_{DJS} の群間差の要因について検討するため、relativeCD_{DJS} と relativeJH_{DJS} について考察をすすめる。relativeCD_{DJS} に関しては、両群ともに Time_SC

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

との間に有意な正の相関を示したが、両群の回帰式の傾きに有意な差は認められなかった(図6-7)。この結果は、音刺激のタイミングが接地に近づくほどドロップジャンプを遂行するための所要時間が伸びる傾向にあるが、その傾向に群間差は無いことを示している。relativeJH_{DJS}に関しては、TF群においてはTime_SCとの間に有意な負の相関を示したが、BB群においては有意な相関は認められなかった(図6-8)。これらの結果は、TF群においては音刺激のタイミングが接地に近づくると跳躍高が低下する傾向にあるが、BB群ではその傾向が見られないことを示唆している。relativeDJI_{DJS}、relativeCD_{DJS}およびrelativeJH_{DJS}の結果を考え合わせると、BB群が音刺激のタイミングが接地に近くなっても比較的高いDJIを保てる傾向にあったのは、音刺激のタイミングの遅延に伴う跳躍高の低下を抑制できていたためであると推測される。

さらに接地時の関節角度について群間比較をおこなった結果、TF群においてのみrelativeKNEEcontact_{DJS}はTime_SCとの間に有意な負の相関が認められた(図6-9)。この結果は、TF群においては音刺激のタイミングが接地に近づくると接地時の膝関節角度が増大する傾向にあるが、BB群においてはその傾向が見られないことを示している。

図6-10に同一被験者において比較的音刺激の呈示時刻が近く、接地前の膝関節角度変化に顕著な違いがある2試行(DJS)の時系列データを示す。緑線で示したDJS6試行目においては接地前の局面に大きな膝関節角度変化が生じていないのに対し、青線で示したDJS3試行目においては接地前から大きく膝関節が屈曲しているのが観察できる。そして、JHとCDは3試行目において0.32mおよび252ms、6試行目において0.30mおよび264msであり、3試行目の方が両要素に関して高いジャンプパフォーマンスを発

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

揮している。Horita et al. (2002) は、速く高く跳ぶ形式のドロップジャンプにおいて、接地前に膝関節を屈曲する(角度を小さくする)着地が筋腱複合体の効果的な伸張を引き起こし、跳躍高の増大につながると結論付けている。これらの知見を考え合わせると、接地前の局面で姿勢の修正を行い着地からジャンプに動作を切り替えた際の接地時の膝関節角度の増大を抑えたことが、BB群がDJS条件において跳躍高の減少を軽減できた要因の一つであると推察される。

6-5. 小括

本実験は、専門競技経験が不確定な状況におけるジャンプパフォーマンスおよび運動準備に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、不確定条件におけるドロップジャンプをバスケットボール選手と陸上競技選手とで比較した。

DJ条件およびDJNS条件におけるDJI、CD、JHに関するパフォーマンス指標は絶対値および相対値ともに群間で有意な差は認められなかった。

一方で、DJS条件においては、relativeDJI_{DJS}が両群においてTime_SCとの間に有意な負の相関関係を示したが、回帰式の傾きはTF群において有意に大きかった。この結果はバスケットボール選手が陸上選手よりも動作直前にジャンプへの動作を要求された場合のジャンプ能力に長けていることを示唆するものである。また、relativeJH_{DJS}とrelativeKNEEcontact_{DJS}に関しては、TF群においてはTime_SCとの間に有意な負の相関を示したが、BB群においては有意な相関は認められなかった。これらの結果から、着地からジャンプに動作を切り替えた際の接地時の膝関節角度の増大を抑えたことが、BB群がDJS

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

条件において JH および DJI の減少を軽減できた要因の一つであると推察された。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

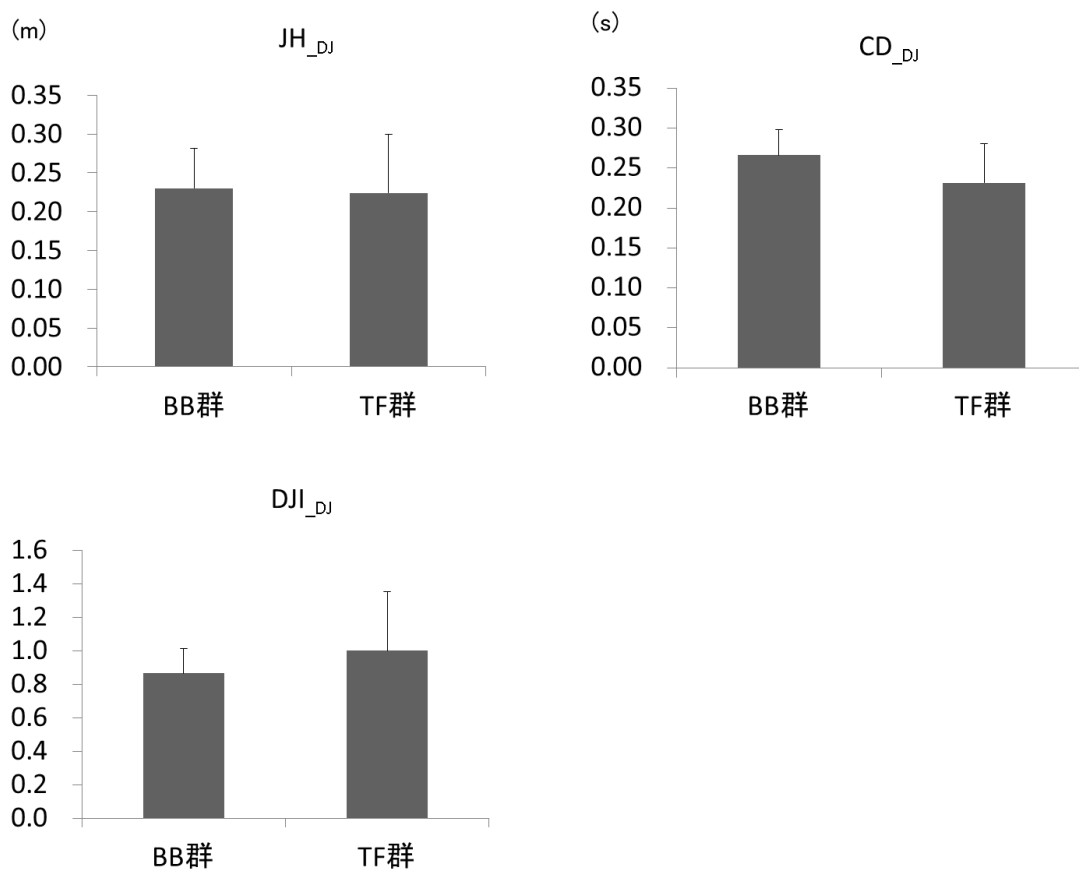


図 6-1 : DJ 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較

いずれのパフォーマンス指標も有意な群間差無し

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

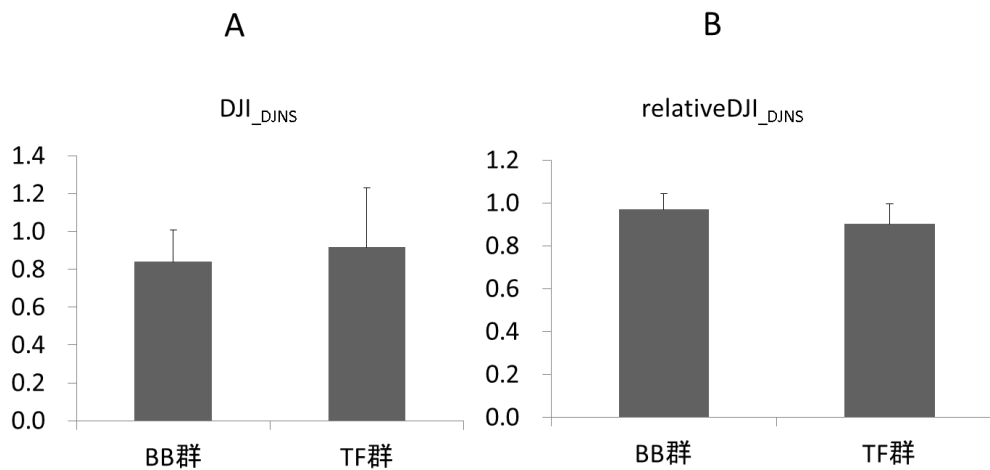


図 6-2 : DJNS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (DJI)

いずれのパフォーマンス指標も有意な群間差無し

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

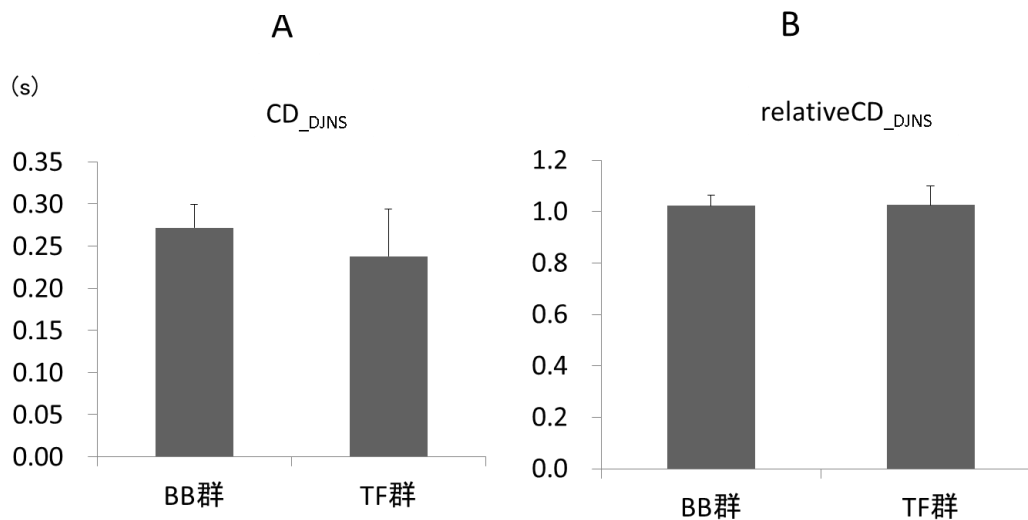


図 6-3 : DJNS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (CD)

いずれのパフォーマンス指標も有意な群間差無し

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

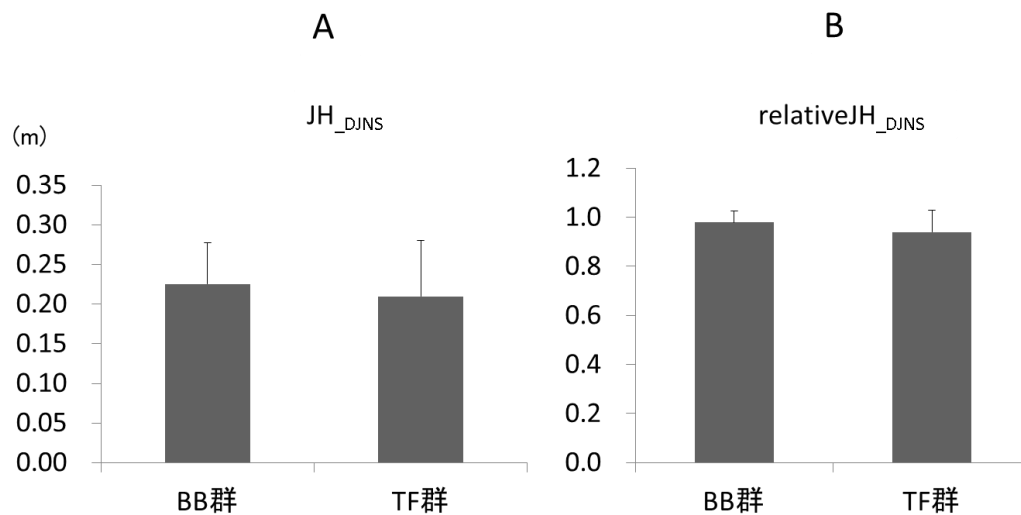


図 6-4 : DJNS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (JH)

いずれのパフォーマンス指標も有意な群間差無し

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

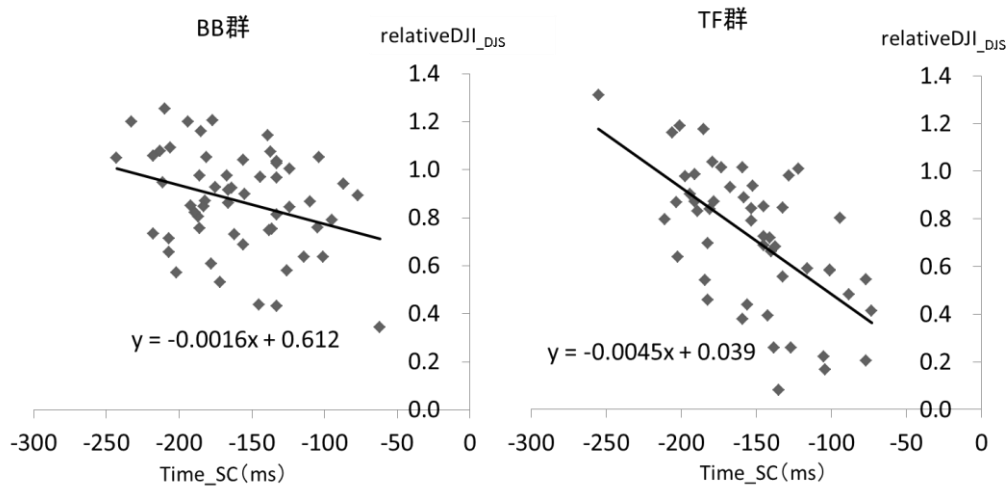


図 6-5 : DJS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (DJI)

回帰直線の傾きに有意な群間差あり

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
 第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
 および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

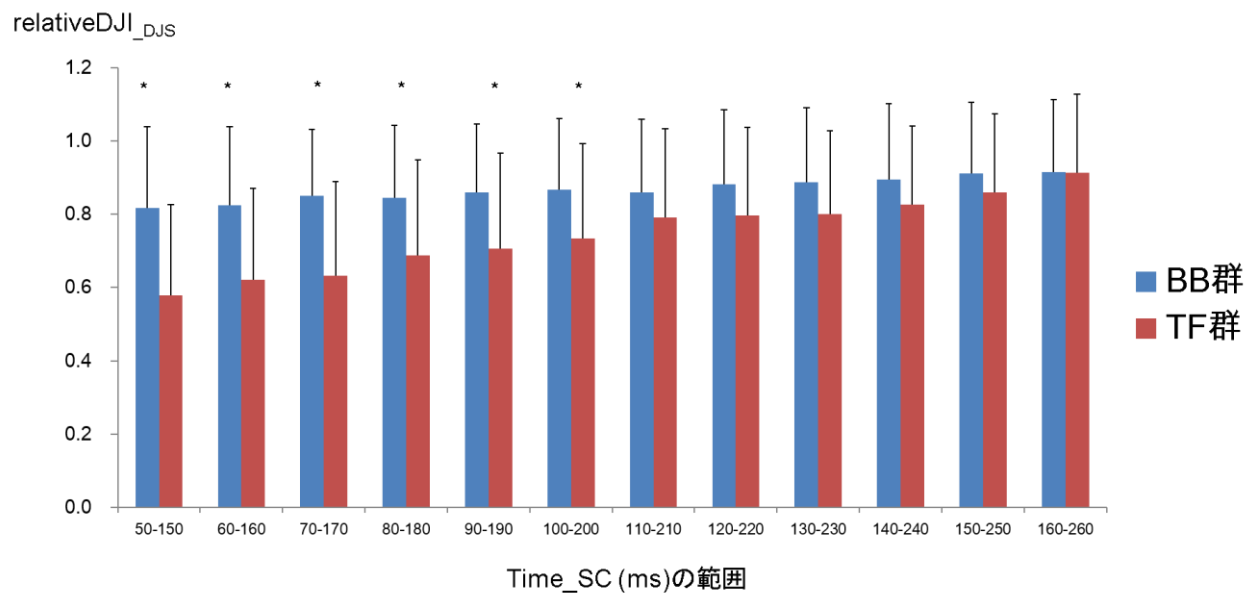


図 6-6 : 音刺激呈示タイミング範囲毎の DJI 群間比較

(* : $P < 0.05$)

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

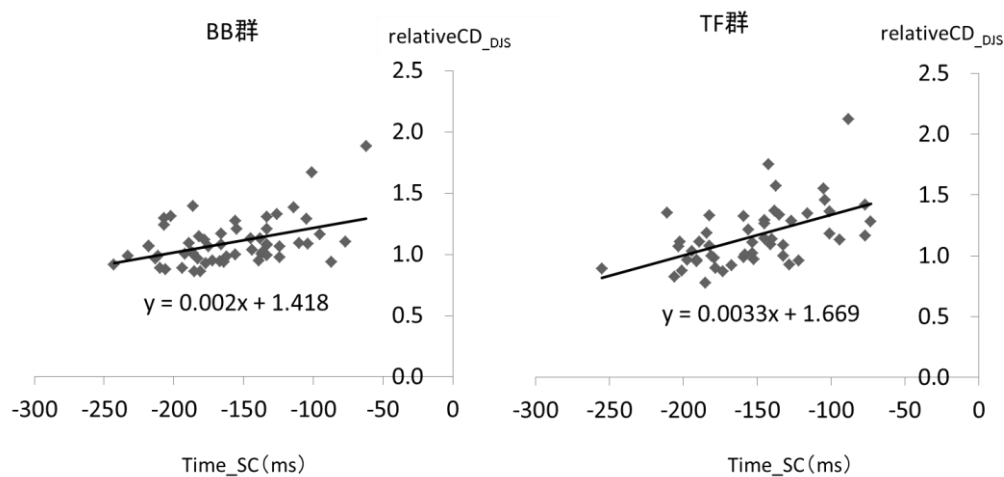


図 6-7 : DJS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (CD)

回帰直線の傾きに有意な群間差なし

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

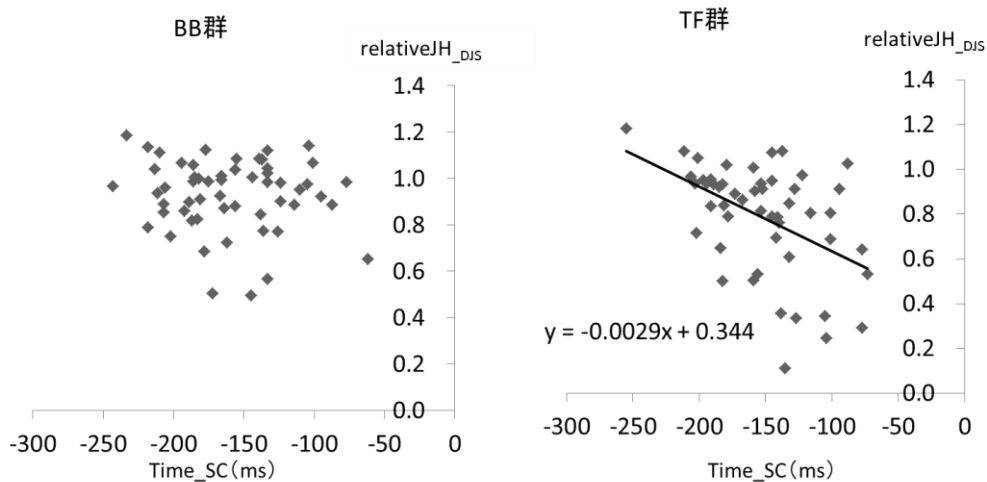


図 6-8 : DJS 条件におけるジャンプパフォーマンスの競技間比較 (JH)

TF 群においてのみ回帰の有意性あり

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ
第6章(実験5) 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス
および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

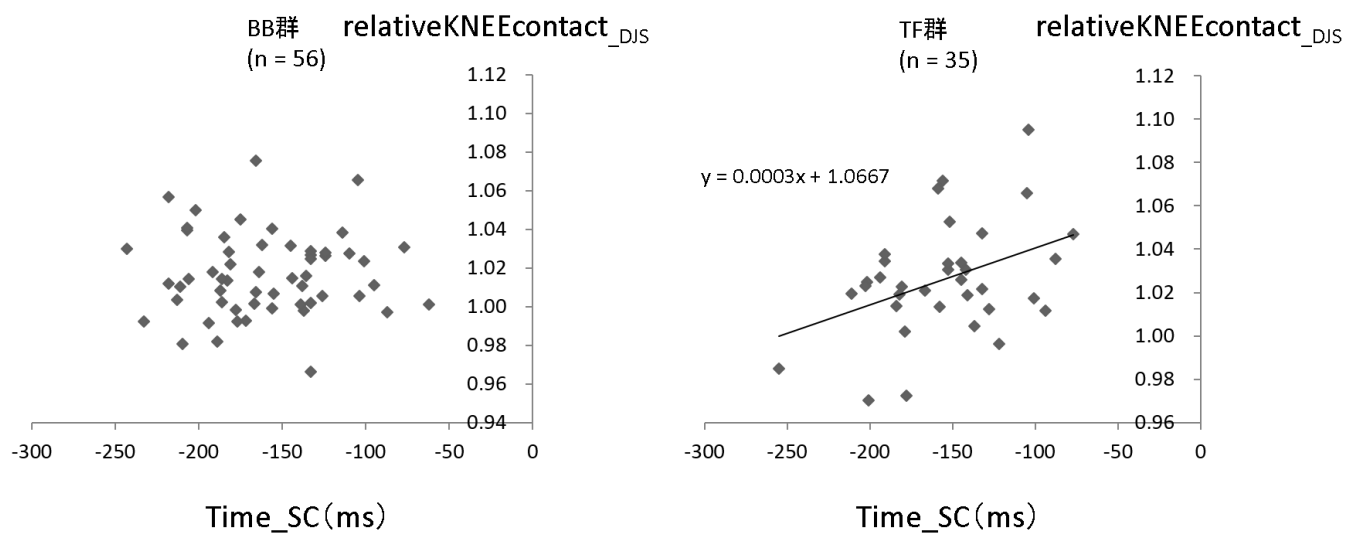


図 6-9 : DJS 条件における接地時膝関節角度の競技間比較

TF 群においてのみ回帰の有意性あり

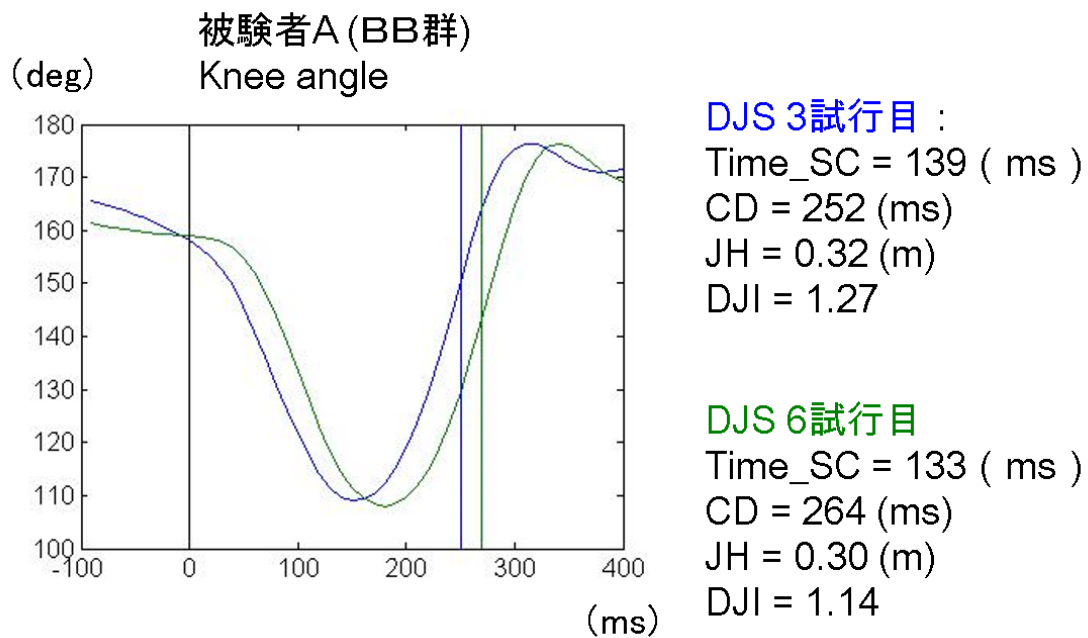


図 6-10 : 被験者 A の接地前の膝関節角度変化例

第7章 総括

7-1. 結果の要約

本論文では、遂行条件に応じたジャンプを可能とする先行する着地動作の制御を明らかにすることを目的とし、ドロップジャンプを研究モデルとした5つの実験を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

研究 I 落下後の運動が確定した条件でのドロップジャンプ

実験 1 ドロップジャンプの最大跳躍高に影響する着地の力学的特性

最大高到達を目的としたドロップジャンプにおいては、衝撃指標 (ABSORPTION 局面における Fz ピーク値/体重) が跳躍高との間に有意な負の相関関係を示した (図 2-9a)。また、衝撃指標は PRE 局面での SOL および ABSORPTION 局面での SOL、RA の各%EMG_{MVC} と正の相関関係を示した (図 2-10、図 2-11)。さらに、衝撃指標の大きさを被験者を 2 群に分け筋活動パターンを比較したところ、衝撃指標が小さい群にのみ PROPULSION 局面において近位 - 遠位の順でピークが発生するパターンが観察された (図 2-13)。

実験 2 着地衝撃緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響

2 週間の着地衝撃緩衝トレーニングによって、ドロップジャンプにおける衝撃指標は有意に減少した (図 3-2b)。また、ドロップジャンプの跳躍高はトレーニング群においてのみ増大し、スクワットジャンプの跳躍高には有意な変化を認めなかった (図 3-3)。さらに、トレーニング群には股関節最小角度の減少、PROPULSION 局面にお

第7章 総括

ける股関節伸展トルク、パワーおよび仕事の増大が生じた（表 3-2、表 3-3、表 3-4）。

研究Ⅱ 落下後の運動が不確定な条件でのドロップジャンプ

実験3 不確定条件における接地前の運動準備

DJNS および LANDNS 条件における接地時の股関節及び膝関節角度は、DJ と LAND の中間範囲の値で準備されていた（図 4-7）。さらに VL、BF および ES の接地前の筋活動に関しても、DJNS および LANDNS 条件の値は DJ および LAND 両条件の範囲から有意に逸脱するものではなかった（図 4-8）。

動作切り替えの音刺激呈示タイミングを示す Time_SC は、relativeDJI_{DJS} および relativeJH_{DJS} との間に負の有意な相関関係を、relativeCD_{DJS} との間に正の有意な相関関係を示した（図 4-9）。また、DJS 条件における BF および Gmax の relativepreEMG、ならびに LANDS 条件における relativeHIPcontact および relativeKNEEcontact は Time_SC との間に有意な負の相関関係を示し、これらのパラメータは Time_SC が小さいほど 1 に近づく傾向を示した（図 4-10、図 4-11）。

実験4 不確定条件におけるドロップジャンプパフォーマンスと接地前の運動準備との関係

DJNS 条件では、relativeKNEEcontact_{DJNS} および relativeANKLEcontact_{DJNS} が relativeDJI_{DJNS} との間に有意な負の相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど relativeDJI_{DJNS} が高くなる傾向がみられた（図 5-1）。また、MG の relativepreEMG_{DJNS} も relativeDJI_{DJNS} との間に有意な負の相関関係を示し、値が 1

第7章 総括

に近づくほど $relativeDJI_{DJNS}$ が高くなる傾向が観察された (図 5-2)。

DJS 条件においては、 $relativeHIPcontact_{DJS}$ 、 $relativeKNEEcontact_{DJS}$ および $relativeANKLEcontact_{DJS}$ が $relativeDJI_{DJS}$ との間に有意な相関関係を示し、両値が 1、つまり DJ 条件に近いほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向がみられた (図 5-3)。さらに、 $relativeDJI_{DJS}$ は SOL の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な負の相関関係を、TA および BF の $relativepreEMG_{DJS}$ との間に有意な正の相関関係を示し、値が 1 に近づくほど $relativeDJI_{DJS}$ が高くなる傾向が観察された (図 5-4)。

実験5 専門競技経験が不確定条件のドロップジャンプパフォーマンス

および接地前の運動準備に及ぼす影響-バスケットボール選手と陸上競技選手の比較-

DJ 条件および DJNS 条件における DJI、CD、JH に関するパフォーマンス指標は絶対値および相対値ともに群間で有意な差は認められなかった (図 6-1、図 6-2、図 6-3、図 6-4)。

一方で、DJS 条件においては、 $relativeDJI_{DJS}$ が両群において $Time_{SC}$ との間に有意な負の相関関係を示したが、回帰式の傾きは TF 群において有意に大きかった (図 6-5)。また、 $relativeJH_{DJS}$ と $relativeKNEEcontact_{DJS}$ に関しては、TF 群においてのみ $Time_{SC}$ との間に有意な負の相関関係を示した (図 6-8、図 6-9)。

ここからはこれらの結果に基づき、ジャンプの遂行条件に応じた先行する着地動作の制御 (7-2)、運動による適応 (7-3)、想定される運動制御メカニズム (7-4) および研究

第7章 総括

の限界と今後の課題（7-5）に関する更なる考察を進める。

7-2. ジャンプの遂行条件に応じた先行する着地動作の制御

人間は日常的に、周辺の環境に応じた連続的な身体運動を遂行している。球技のようなスポーツでは周辺状況の複雑さはさらに高まり、そのような状況の中で身体の滞空を伴うようなダイナミックで連続的な運動を成功させることを求められる。このような場面では、滞空状態から着地した後にジャンプに移行する動作が多くみられるが、動作目的の達成のためにはジャンプ自体だけでなく先行する着地のコントロールが重要である。そして、人間は周辺状況に適したジャンプ動作を遂行するために、動作目的や次の動作に関する予測の可否に応じて先行する着地動作を変容させているものと推測される。

これまでの着地からのジャンプ動作に関する先行研究では、短い接地時間で高く跳ぶために着地動作がどのように制御されているのかについて検討がなされ、多くの知見が得られてきた。例えば Arampatitz et al. (2002)は、着地中の下肢関節角度変化を小さくし身体のスチフネスを高めることで、跳躍高増大や接地時間短縮が生じると報告している。Horita et al. (2002) は、接地直前に膝関節を屈曲することで接地後の筋腱複合体の伸長を促すことにつながり、ジャンプパフォーマンスが高まると結論付けている。さらに、Hoffren et al. (2007) は、着地時の足関節スチフネスが高い被験者ほどドロップジャンプの跳躍高が高くなり、この足関節のスチフネスは接地前のヒラメ筋の筋活動量と正の相関を示すと報告している。また深代 (2000)は、連続的なジャンプ動作におい

第7章 総括

て、滞空中の足関節底屈筋の活動により着地時における筋腱複合体のバネ的特性が高まり、ジャンプ時に弾性エネルギーを効率的に再利用していると述べている。このような知見の蓄積によって、速くかつ高く跳ぶことを目的としてジャンプをおこなうためには、接地前の予備筋活動の増加や下肢関節角度変化の減少によって、筋腱のスティフネスを高め身体のバネ的振る舞いを利用できるように先行動作である着地を制御していると明らかにされてきた。

できる限り速くかつ高くジャンプするための先行動作が、スポーツ中において重要であることを疑う余地はない。しかし、球技をはじめとする対人スポーツにおいては、ボールや相手選手といった周辺状況に応じたジャンプを遂行しなければならず、短い動作時間で行うジャンプだけでは対応が難しい場面も多い。また、時々刻々と変化する周辺状況に合わせて即時的に運動を遂行しなければならず、ジャンプを行うこと自体が不確定な場面も多い。そこで本論文では、ドロップジャンプを研究モデルとし、ジャンプ動作の目的や予測の可否が変化した際に着地がどのように制御されているかについて検討をおこなった。

まず研究 I では、接地時間への制限を設けず、できる限り高く跳ぶドロップジャンプを用いた実験を行った。最大高到達を目的としたドロップジャンプでは、着地時に下肢関節が遠位 - 近位の順で大きく屈曲（背屈）するパターンが観察され、これは身体のスィフネスを減少させていたものと推察された。また、各被験者の衝撃指標は着地の後の跳躍高と負の相関を示し、衝撃の緩衝が上手く遂行できた被験者ほど跳躍高が高い傾向にあることが示された。さらに、衝撃指標は接地前のヒラメ筋および接地直後のヒラ

第7章 総括

ム筋と腹直筋の筋活動レベルとの間にそれぞれ正の相関を示し、着地時の過度な筋活動による下肢・体幹のスティフネス増大が衝撃を大きくする要因の一つとして考えられた。これらの知見から、最大高への到達を要求されたジャンプにおいては、過度の筋活動を抑制し下肢・体幹のスティフネスを減少させることで衝撃緩衝に適した状態へと先行する着地が制御されていることが示唆された。

研究Ⅱでは、不確定条件（接地前の音刺激により着地とジャンプを切り替える条件）において速く高く跳ぶことを要求されるドロップジャンプを用いた実験を行った。まず実験3において、不確定条件では接地前の筋活動や接地時の下肢関節角度を2つの動作選択肢の中間範囲に調節していることが示された。ただし、確定条件に近いジャンプパフォーマンスを維持するには、接地前の筋活動や姿勢を確定条件のドロップジャンプに近い水準で準備しておく必要があると示唆された（実験4）。また、動作の切り替えを求められた場合、滞空中からすでに着地動作の修正が行われ、ジャンプパフォーマンスの維持のためには接地までに確定条件に近い水準まで姿勢や筋活動を修正する必要があると示された。これらの知見から、動作が不確定な状況において優れたジャンプパフォーマンスを発揮するためには、確定した状況に近い準備状態で接地することが必要であると示唆された。

7-3. 運動の経験による適応

次に、研究Ⅰの実験2および研究Ⅱの実験5から得られた結果をもとに、トレーニングや専門競技経験によって生じる着地動作の適応について考察する。

第7章 総括

ドロップジャンプのトレーニングとしての有効性について調査した研究は数多く存在し、跳躍高の増大や接地時間の減少を認める報告が多くなされている(Adams et al., 1992; Kotzamanidis, 2006; Malisoux et al., 2006; Markovic, 2007; Wilson et al., 1996; Wilson et al., 1993)。また、着地動作によるトレーニング実験も数例行われており(McNair et al., 2000; Onate et al., 2005; Prapavessis et al., 2003)、衝撃緩衝技術の向上が報告されている。

これに対し、本論文の実験2では、着地衝撃の緩衝トレーニングがドロップジャンプに及ぼす影響を検討し、着地のみトレーニングであってもドロップジャンプにおける衝撃緩衝および跳躍高を改善することが明らかになった。この知見は着地トレーニングによって起きた衝撃緩衝における適応がドロップジャンプにも転移し、ジャンプパフォーマンスの向上につながったことを示唆している。

また、専門競技経験がジャンプや着地動作のパフォーマンスおよび動作特性に影響していることは複数の研究で報告されている(Cowley et al., 2006; Kollias, Panoutsakopoulos, & Papaiakovou, 2004; Munro et al., 2012)。本論文の実験5では、複数の動作選択肢がある状況でのジャンプを多用するバスケットボール選手において、不確定条件でのドロップジャンプに有利な適応が起こっているかについて検証をおこなった。その結果、バスケットボール選手は接地直前に動作の変更を求められた際にも陸上競技選手より比較的高いジャンプパフォーマンスを維持できた。さらにバスケットボール選手と陸上選手の動作について比較すると、動作を切り替えた条件における接地時の膝関節角度の修正に差異がみられた。これらの結果から、バスケットボール選手には専門競技経験によって滞空中における着地動作の修正反応に適応が起きており、着地から切り

第7章 総括

替えた後のジャンプパフォーマンスの低下を軽減できたものと考えられる。

競技スポーツの現場では、競技中のジャンプパフォーマンス向上を目的とし、ドロップジャンプを含むプライオメトリックトレーニングが広く実施されている。このプライオメトリックトレーニングの手法に関して、本論文で得られた知見からいくつかの示唆と展望が提供できると考えられる。

ドロップジャンプをはじめとする急激な伸張 - 短縮サイクルを含む動作によるトレーニングは、爆発的な力発揮のトレーニングとして有益である一方、筋腱への過度なストレスによる傷害が起こる可能性を有している。実験2で得られた知見は、筋腱へのストレスが比較的小さいと考えられる着地トレーニングにも着地からのジャンプによるパフォーマンスを改善する効果があることを示唆するものである。ただし、実験2ではドロップジャンプトレーニングを行う群を設定していなかったため、着地トレーニングによる効果を通常行われているドロップジャンプと正確に比較することはできない。実験2の着地トレーニングはドロップジャンプの跳躍高改善率が2.0%であり、トレーニング期間や被験者の対象が異なる実験系の中での比較ではあるが先行研究のレビューで報告されているプライオメトリックトレーニングによる効果 (Markovic, 2007)と比較して高いとはいえない。これらの知見を考慮すると、着地による衝撃緩衝技術のトレーニングは単独でジャンプパフォーマンスを改善する手法というより、プライオメトリックトレーニングに不慣れな選手や、傷害から復帰する選手が安全にトレーニングを開始するための導入手法として使用することが推奨される。

第7章 総括

また、ドロップジャンプはジャンプ能力の評価方法やトレーニング種目としてスポーツ現場で広く活用されているが、その多くは動作が確定した状況で実施されるものである。実験5で得られた結果は限られた競技レベルの選手におけるものではあるものの、バスケットボール選手が不確定な状況、特に動作の切り替えた場合のドロップジャンプ能力に優れていることを示唆している。したがって、不確定条件でのドロップジャンプテストは、不確定状況におけるジャンプ能力を推定できる評価方法としても有用であると推測される。さらに、競技特異的な予測因子を含まない実験環境下でバスケットボール選手の着地からジャンプへの動作切り替え能力が高かったという結果は、動作直前に切り替えを要求するプライオメトリックトレーニングが不確定状況での運動パフォーマンスを効果的に改善する可能性を示している。

7-4. 想定される運動制御メカニズム

衝撃がドロップジャンプ動作の制御に及ぼす影響

研究Iでは、実験1において衝撃指標がドロップジャンプ跳躍高との負の相関を示し、実験2においては衝撃緩衝トレーニングによってドロップジャンプ跳躍高が増大した。これらの結果は、着地時の大きな衝撃がドロップジャンプの跳躍高に負の影響を及ぼしていることを示唆している。また、衝撃大小群の筋活動順序パターンには差異があり、大きな衝撃によってその後の筋活動のコーディネーションが変化した可能性も示された。

これらの結果の背景にあると想定されるメカニズムの1つが着地時に生じる伸張反射である。本論文では、接地後 80-100 ms の範囲で衝撃大群の大殿筋筋活動水準が衝撃小群よ

第7章 総括

りも有意に大きな値を示した（実験1）。着地の接地直後において、ヒラメ筋および腓腹筋の伸張反射は40ms付近で生じるとされている（Duncan & McDonagh, 2000）。実験1のドロップジャンプにおいては股関節の屈曲速度のピークが足関節より50msほど遅れて生じている事を考慮すると、80-100msの範囲で衝撃大群の大殿筋に生じた活動の増加には伸張反射の成分が含まれていたものと考えられる。また実験2では、着地トレーニング後の衝撃減少に伴い股関節の下降局面における屈曲角度変化が増大し伸展トルク・パワーおよび仕事が有意に増加した。これらの結果は、着地時に股関節を大きく屈曲することが上昇局面での股関節による力発揮の増大につながることを示唆している。これらの知見を考え合わせると、衝撃が大きかった被験者には股関節伸展筋である大殿筋の不随意の伸張反射が生じ、股関節を大きく屈曲するための筋活動のコーディネーションが乱れたものと推測される。

一方で、着地・ジャンプ時の筋活動パターンは接地時間に強く依存することが報告されており（Funase et al., 2001）、接地時間を統一していない実験1の結果だけでは衝撃の大きさが筋活動パターンに影響を及ぼしたとは結論付けることは難しい。また、Leukel et al. (2008) はドロップジャンプの落下高の変化にともなってH反射が変化することを明らかにしており、脊髄上位からのシナプス前抑制も着地時の伸張反射の振幅に関与していることを示唆している。したがって、今後の研究では姿勢や接地時間を統一する実験設定を確立し、衝撃の大きさによる神経応答の差異を検討することで、より詳細な着地衝撃に応じたジャンプ動作の制御メカニズムを明らかにできると期待される。

第7章 総括

不確定条件下でのジャンプ動作準備のメカニズム

これまでに不確定条件下でのドロップジャンプにおける接地前の運動準備について研究した例は Leukel et al. (2012) のものに限られる。この研究では、不確定条件下でのドロップジャンプにおける接地前のヒラメ筋筋活動量が不確定条件下におけるものと比較して低かった。Leukel らはこの結果に基づき、筋腱複合体のスティフネスを低く調節しておくことが不確定条件下でのジャンプ遂行に適した運動制御戦略であると結論付けている。

本論文の実験3では、「ジャンプ動作を遂行するかが不確定」な条件において接地前にもどのような姿勢や筋活動レベルを準備しているのかについて検討した。その結果、接地前の筋放電量のうち DJ 条件と DJNS 条件に有意な差が認められたのは MG、BF および ES の3筋であった。また、MG に関しては DJNS 条件の方が有意に高い値を示しており、Leukel らが言及した不確定性の付加に対してスティフネスを下げるという制御戦略によって、実験3の結果を説明することは難しい。

本論文の結果からは、不確定性の付加に対するドロップジャンプ動作制御戦略として中間的運動準備 "default motor preparation" が想定される。この中間的運動準備は、リーチング課題や力発揮課題といった単関節での運動において確認されている動作選択肢に対しあらかじめ中間的な肢位や力発揮を準備しておく運動戦略であり (Forgaard et al., 2011; Haith et al., 2015)、本論文の結果は、着地やドロップジャンプという滞空を伴う全身運動においても接地前の姿勢や筋活動に関して同様な中間的運動準備がなされている可能性を示唆している。

ただし、本論文で設定した不確定条件はジャンプ動作を行うか行わないかを刺激によっ

第7章 総括

て選択する Go-NoGo 課題であり、球技中に存在している不確定な状況の一部をモデル化したに過ぎない。今後の研究では、跳躍の高さ、タイミング、方向などを不確定にした場合の運動準備を明らかにすることで、中間的制御が不確定条件に対して普遍的な制御方策であるかについて検討していく必要がある。

動作切り替え時のジャンプパフォーマンスの競技差の要因

実験5のDJS条件(着地からジャンプに切り替えた条件)において、DJIのTime_SCの変化に対する変化率がBB群において低く、さらにTF群にのみTime_SCとJHの有意な相関関係が認められた。この動作切り替え時にみられるジャンプパフォーマンスの差異の要因としてまず考えられるのが、音刺激に対する反応時間の違いである。しかしながら、実験5で行われた本試行と同じ音刺激を用いたボタン押し反応課題の結果には有意な競技間差は認められず、反応時間そのものが競技間のパフォーマンス差の主要因であったとは考え難い。

本論文の結果からは、滞空中の姿勢修正反応が関与しているものと考えられた。まず、実験4におけるジャンプパフォーマンスと接地姿勢の関係から、できるだけ確定条件に近い姿勢で接地することが不確定条件において高いジャンプパフォーマンスを発揮するうえで必要な要素であると示された。また、DJS条件における接地時の相対的な関節角度の競技間比較からは、BB群が接地直前に音刺激を受けた際にも確定条件に近い膝関節角度で接地していることが示された。これらはBB群では音刺激のタイミングが遅い試行であっても確定条件に近い接地時の膝関節肢位を達成できたことを意味している。同一被験者内の事

第7章 総括

例的な結果ではあるが、DJS 条件においてジャンプパフォーマンスの低下が抑えられた試行において接地前の膝関節屈曲が観察され、これは接地前の膝関節角度修正反応であると推測された。Horita et al. (2002) は、ドロップジャンプの接地直前から能動的に膝関節屈曲を行うことで接地直後の膝伸展に関与する筋腱複合体の伸長が促され、結果として SSC による跳躍高増加につながると述べている。以上の知見から、本論文において示された動作切り替え時のジャンプパフォーマンスの競技間差には、①確定条件に類似した着地姿勢達成によるジャンプパフォーマンス低下の抑制、②接地前の能動的な膝関節屈曲による SSC 効果増強のどちらか、もしくは両者が関与していたものと推察される。

7-5. 研究の限界と今後の課題

本論文においては実験条件が増えて被験者への負担が大きくなるのを防ぐことを目的とし、一般的にドロップジャンプに適しているとされる範囲の落下高に固定して実験を行った（研究Ⅰ：35cm；研究Ⅱ：45cm）。先行研究では落下高によって着地やドロップジャンプの動作特性 (Ishikawa & Komi, 2004; Lees & Fahmi, 1994; Walsh et al., 2004; Yeow, Lee, & Goh, 2009) や神経系の興奮性 (Leukel et al., 2008; Taube et al., 2011) が変化することが報告されている。また、被験者の対象が限られていることも本論文の限界の一つである。性別 (Brown, Palmieri-Smith, & McLean, 2009; Jacobs et al., 2007; Komi & Bosco, 1978)、年齢 (Hoffren et al., 2007; Piirainen et al., 2012)、競技レベル (Gissis et al., 2006) といった被験者の特徴が着地やドロップジャンプ動作のパフォーマンスおよび動作特性に影響を及ぼすことが報告されている。したがって本研究で得られた知見をより一般化して

第7章 総括

解釈するためには、今後の研究で様々な落下高で動作を遂行した際や、被験者の性別、年齢、競技レベルといった特徴を変化した際の結果についても検討する必要がある。

研究Ⅱでは先行研究 (Leukel et al., 2012) との結果の比較を容易にするため、そして視線の違いによる動作の変容を避ける目的で、動作の変更を指示する方法として音刺激を採用した。ただし、球技などのスポーツでは聴覚情報よりもむしろ視覚情報に応じて動作を変更することが多いため、競技間差を明らかにするためには視覚情報による刺激が適していた可能性が有る。また、動作変更の刺激の種類がジャンプ動作の競技間差に及ぼす影響を明らかにすることはスポーツ選手の外部に応じた運動の適応メカニズムの更なる解明につながると期待される。

さらに研究Ⅱではドロップボックス上のマットスイッチを用いて音刺激のタイミングを制御したため、Time_SC (音刺激から接地までの時間) を被験者間および被験者内で統一することが困難であった。この問題点に関しては、赤外線式の通過センサーを用いることによって Time_SC をほぼ同タイミングに統一することができると考えられる。今後の研究において被験者間、被験者内で刺激タイミングを統一することができれば、競技群のパフォーマンスの差が生じる刺激タイミングの閾値といったより詳細なデータの分析も可能となると推測される。

7-6. 結論

本論文は遂行条件に応じたジャンプを成し遂げるための先行する着地動作の制御について明らかにすることを目的とし、最大高到達を目的としたドロップジャンプ (研究Ⅰ)、動

第7章 総括

作が不確定な状況におけるドロップジャンプ（研究Ⅱ）についての研究をおこなった。その結果、最大高到達を目的とした場合はスティフネスが低く衝撃緩衝に適した動作へ、接地後の動作が不確定な状況では姿勢や筋活動を動作変更の可能性が無い場合のものに近づけるよう着地動作を制御することで高いジャンプパフォーマンスの発揮が可能になることを示した。さらに、衝撃緩衝のトレーニングによるドロップジャンプのパフォーマンス改善効果、不確定条件でのジャンプにおける専門競技経験による能力差についても明らかにした。以上、本論文全体の結果から、先行する着地動作を滞空局面から条件に応じて制御しておくことが、主動作であるジャンプを状況適応的に遂行するために重要であり、そのような能力はトレーニングによって向上することが示された。これらの成果は周辺環境に適応的な運動制御機構の解明に寄与し、トレーニング・リハビリテーション手法の改良、さらにはロボット工学における応用など多方面への展開が期待される。

引用文献

引用文献

- Adams, K., Oshea, J. P., Oshea, K. L., & Climstein, M. (1992). The effect of six weeks of squat, plyometric and squat-plyometric training on power production. *Journal of Applied Sport Science Research*, 6, 36-41.
- Anderson, F. C., & Pandy, M. G. (1993). Storage and utilization of elastic strain energy during jumping. *Journal of Biomechanics*, 26, 1413-1427.
- Arakawa, H., Nagano, A., Yoshioka, S., & Fukashiro, S. (2010). Interaction between elastic energy utilization and active state development within the work enhancing mechanism during countermovement. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20, 340-347.
- Arampatzis, A., Bruggemann, G. P., & Metzler, V. (1999). The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running. *Journal of Biomechanics*, 32, 1349-1353.
- Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M., & Brüggemann, G. P. (2001). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, 355-364.
- Asmussen, E., & Bonde-Petersen, F. (1974). Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 91, 385-392.
- Baca, A. (1999). A comparison of methods for analyzing drop jump performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 437-442.

引用文献

- Blackburn, J. T., & Padua, D. A. (2009). Sagittal-plane trunk position, landing forces, and quadriceps electromyographic activity. *Journal of Athletic Training, 44*, 174-179.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J. (1986). An estimation of power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex in jumping. *Journal of Biomechanics, 19*, 899-906.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J. (1987). Drop jumping. I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 19*, 332-338.
- Bobbert, M. F., & van Ingen Schenau, G. J. (1988). Coordination in vertical jumping. *Journal of Biomechanics, 21*, 249-262.
- Bosco, C., Komi, P. V., & Ito, A. (1981). Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta Physiologica Scandinavica, 111*, 135-140.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 50*, 273-282.
- Bosco, C., Tarkka, I., & Komi, P. V. (1982). Effect of elastic energy and myoelectrical potentiation of triceps surae during stretch-shortening cycle

引用文献

- exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 3, 137-140.
- Brown, T. N., Palmieri-Smith, R. M., & McLean, S. G. (2009). Differences between Sexes and Limbs in Hip and Knee Kinematics and Kinetics during Anticipated and Unanticipated Jump Landings: Implications for ACL injury. *British Journal of Sports Medicine*. 43, 1049-1056.
- Butler, R. J., Crowell, H. P., & Davis, I. M. (2003). Lower extremity stiffness: implications for performance and injury. *Clinical Biomechanics*, 18, 511-517.
- Cavagna, G. A., Dusman, B., & Margaria, R. (1968). Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24, 21-32.
- Cowley, H. R., Ford, K. R., Myer, G. D., Kernozek, T. W., & Hewett, T. E. (2006). Differences in neuromuscular strategies between landing and cutting tasks in female basketball and soccer athletes. *Journal of Athletic Training*, 41, 67-73.
- Decker, M. J., Torry, M. R., Wyland, D. J., Sterett, W. I., & Richard Steadman, J. (2003). Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clinical Biomechanics*, 18, 662-669.
- Derrick, T. R. (2004). The effects of knee contact angle on impact forces and accelerations. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36, 832-837.

引用文献

- Devita, P., & Skelly, W. A. (1992). Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 24*, 108-115.
- Duncan, A., & McDonagh, M. J. (2000). Stretch reflex distinguished from pre-programmed muscle activations following landing impacts in man. *Journal of Physiology, 526*, 457-468.
- Eloranta, V. (1996). Effect of postural and load variation on the coordination of the leg muscles in concentric jumping movement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 36*, 59-64.
- Eloranta, V. (1997). Effect of postural and load variation on the coordination of the leg muscles in rebound jumping movement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 37*, 79-88.
- Farley, C. T., & Morgenroth, D. C. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics, 32*, 267-273.
- Ferris, D. P., & Farley, C. T. (1997). Interaction of leg stiffness and surface stiffness during human hopping. *Journal of Applied Physiology, 82*, 15-22.
- Forgaard, C. J., Maslovat, D., Carlsen, A. N., & Franks, I. M. (2011). Default motor preparation under conditions of response uncertainty. *Experimental Brain Research, 215*, 235-245.

引用文献

- Fukashiro, S., Komi, P. V., Järvinen, M., & Miyashita, M. (1995). In vivo Achilles tendon loading during jumping in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *71*, 453-458.
- Funase, K., Higashi, T., Sakakibara, A., Imanaka, K., Nishihira, Y., & Miles, T. S. (2001). Patterns of muscle activation in human hopping. *European Journal of Applied Physiology*, *84*, 503-509.
- Gehri, D. J., Ricard, M. D., Kleiner, D. M., & Kirkendall, D. T. (1998). A comparison of plyometric training techniques for improving vertical jump ability and energy production. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *12*, 85-89.
- Gissis, I., Papadopoulos, C., Kalapotharakos, V. I., Sotiropoulos, A., Komsis, G., & Manolopoulos, E. (2006). Strength and speed characteristics of elite, subelite, and recreational young soccer players. *Research in Sports Medicine*, *14*, 205-214.
- Haith, A. M., Huberdeau, D. M., & Krakauer, J. W. (2015). Hedging your bets: intermediate movements as optimal behavior in the context of an incomplete decision. *PLoS Computational Biology*, *11*, e1004171.
- Hara, M., Shibayama, A., Takeshita, D., Hay, D. C., & Fukashiro, S. (2008). A comparison of the mechanical effect of arm swing and countermovement on the lower extremities in vertical jumping. *Human Movement Science*,

引用文献

27, 636-648.

Hirashima, M., Kadota, H., Sakurai, S., Kudo, K., & Ohtsuki, T. (2002).

Sequential muscle activity and its functional role in the upper extremity and trunk during overarm throwing. *Journal of Sports Science*, 20, 301-310.

Hislop, H., & Montgomery, J. (2002). *Muscle testing, techniques of manual examination, 7th Edition*: WB Saunders, Memphis.

Hobara, H., Inoue, K., Muraoka, T., Omuro, K., Sakamoto, M., & Kanosue, K. (2010). Leg stiffness adjustment for a range of hopping frequencies in humans. *Journal of Biomechanics*, 43, 506-511.

Hobara, H., Inoue, K., Omuro, K., Muraoka, T., & Kanosue, K. (2011). Determinant of leg stiffness during hopping is frequency-dependent. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2195-2201.

Hobara, H., Muraoka, T., Omuro, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Inoue, K., & Kanosue, K. (2009). Knee stiffness is a major determinant of leg stiffness during maximal hopping. *Journal of biomechanics*, 42, 1768-1771.

Hoffren, M., Ishikawa, M., & Komi, P. V. (2007). Age-related neuromuscular function during drop jumps. *Journal of Applied Physiology*, 103, 1276-1283.

Horita, T., Komi, P. V., Nicol, C., & Kyrolainen, H. (2002). Interaction between

引用文献

- pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *European Journal of Applied Physiology*, 88, 76-84.
- Iida, Y., Kanehisa, H., Inaba, Y., & Nakazawa, K. (2011). Activity modulations of trunk and lower limb muscles during impact-absorbing landing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 21, 602-609
- Ishikawa, M., & Komi, P. V. (2004). Effects of different dropping intensities on fascicle and tendinous tissue behavior during stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 96, 848-852.
- Jacobs, C. A., Uhl, T. L., Mattacola, C. G., Shapiro, R., & Rayens, W. S. (2007). Hip abductor function and lower extremity landing kinematics: sex differences. *Journal of Athletic Training*, 42, 76-83.
- Jacobs, R., & van Ingen Schenau, G. J. (1992a). Control of an external force in leg extensions in humans. *Journal of Physiology*, 457, 611-626.
- Jacobs, R., & van Ingen Schenau, G. J. (1992b). Intermuscular coordination in a sprint push-off. *Journal of Biomechanics*, 25, 953-965.
- Kawabata, M., Kagaya, Y., Shima, N., & Nishizono, H. (2008). Changes in intra-abdominal pressure and trunk activation during drop jump. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 57, 225-234.
- Kellis, E., Arabatzi, F., & Papadopoulos, C. (2003). Muscle co-activation around

引用文献

- the knee in drop jumping using the co-contraction index. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13, 229-238.
- Kollias, I., Panoutsakopoulos, V., & Papaiakevou, G. (2004). Comparing jumping ability among athletes of various sports: Vertical drop jumping from 60 centimeters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18, 546-550.
- Komi, P. V. (1984a). Biomechanics and neuromuscular performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 16, 26-28.
- Komi, P. V. (1984b). Physiological and biomechanical correlates of muscle function: effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 12, 81-121.
- Komi, P. V., & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Sports Medicine and Science in Sports and Exercise*, 10, 261-265.
- Kotzamanidis, C. (2006). Effect of plyometric training on running performance and vertical jumping in prepubertal boys. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20, 441-445.
- Kuitunen, S., Ogiso, K., & Komi, P. V. (2011). Leg and joint stiffness in human hopping. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21, 159-167.

引用文献

- Kulas, A. S., Schmitz, R. J., Shultz, S. J., Henning, J. M., & Perrin, D. H. (2006). Sex-specific abdominal activation strategies during landing. *Journal of Athletic Training, 41*, 381-386.
- Kurokawa, S., Fukunaga, T., Nagano, A., & Fukashiro, S. (2003). Interaction between fascicles and tendinous structures during counter movement jumping investigated in vivo. *Journal of Applied Physiology, 95*, 2306-2314.
- Kyröläinen, H., & Komi, P. V. (1995). Differences in mechanical efficiency between power- and endurance-trained athletes while jumping. *Eur J European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 70*, 36-44.
- Lees, A., & Fahmi, E. (1994). Optimal drop heights for plyometric training. *Ergonomics, 37*, 141-148.
- Leukel, C., Gollhofer, A., Keller, M., & Taube, W. (2008). Phase- and task-specific modulation of soleus H-reflexes during drop-jumps and landings. *Experimental Brain Research, 190*, 71-79.
- Leukel, C., Taube, W., Lorch, M., & Gollhofer, A. (2012). Changes in predictive motor control in drop-jumps based on uncertainties in task execution. *Human Movement Science, 31*, 152-160.
- Malisoux, L., Francaux, M., Nielens, H., & Theisen, D. (2006). Stretch-shortening

引用文献

- cycle exercises: an effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers. *Journal of Applied Physiology*, 100, 771-779.
- Markovic, G. (2007). Does plyometric training improve vertical jump height? A meta-analytical review. *British Journal of Sports Medicine*, 41, 349-355.
- McNair, P. J., Prapavessis, H., & Callender, K. (2000). Decreasing landing forces: effect of instruction. *British Journal of Sports Medicine*, 34, 293-296.
- Moritani, T., Oddsson, L., & Thorstensson, A. (1990). Differences in Modulation of the Gastrocnemius and Soleus H-Reflexes during Hopping in Man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 138, 575-576.
- Munro, A., Herrington, L., & Comfort, P. (2012). Comparison of landing knee valgus angle between female basketball and football athletes: Possible implications for anterior cruciate ligament and patellofemoral joint injury rates. *Physical Therapy in Sport*, 13, 259-264.
- Nagano, A., Komura, T., & Fukashiro, S. (2007). Optimal coordination of maximal-effort horizontal and vertical jump motions -a computer simulation study. *BioMedical Engineering OnLine*, 6, 20.
- Niiyama, R., & Kuniyoshi, Y. (2010). Design principle based on maximum output force profile for a musculoskeletal robot. *Industrial Robot: An International*

引用文献

- Journal*, 37, 250-255.
- Oate, J. A., Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Giuliani, C., Yu, B., & Garrett, W. E. (2005). Instruction of jump-landing technique using videotape feedback: altering lower extremity motion patterns. *American Journal of Sports Medicine*, 33, 831-842.
- Oate, J. A., Guskiewicz, K. M., & Sullivan, R. J. (2001). Augmented feedback reduces jump landing forces. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 31, 511-517.
- Pandy, M. G., & Zajac, F. E. (1991). Optimal muscular coordination strategies for jumping. *Journal of Biomechanics*, 24, 1-10.
- Pandy, M. G., Zajac, F. E., Sim, E., & Levine, W. S. (1990). An optimal control model for maximum-height human jumping. *Journal of Biomechanics*, 23, 1185-1198.
- Papaiakovou, G. (2013). Kinematic and kinetic differences in the execution of vertical jumps between people with good and poor ankle joint dorsiflexion. *Journal of sports sciences*, 31, 1789-1796.
- Piirainen, J. M., Linnamo, V., Sippola, N., & Avela, J. (2012). Neuromuscular function during drop jumps in young and elderly males. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 22, 852-858.
- Prapavessis, H., McNair, P. J., Anderson, K., & Hohepa, M. (2003). Decreasing

引用文献

- landing forces in children: the effect of instructions. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 33, 204-207.
- Santello, M. (2005). Review of motor control mechanisms underlying impact absorption from falls. *Gait and Posture*, 21, 85-94.
- Schmidtbleicher, D., Gollhofer, A., & Frick, U. (1988). Effects of a stretch-shortening typed training on the performance capability and innervation characteristics of leg extensor muscles. *Biomechanics XI-A*, 7, 185-189.
- Taube, W., Leukel, C., Lauber, B., & Gollhofer, A. (2011). The drop height determines neuromuscular adaptations and changes in jump performance in stretch - shortening cycle training. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 22, 671-683.
- Thys, H., Cavagna, G. A., & Margaria, R. (1975). The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. *European Journal of Physiology*, 354, 281-286.
- Tricoli, V., Lamas, L., Carnevale, R., & Ugrinowitsch, C. (2005). Short-term effects on lower-body functional power development: weightlifting vs. vertical jump training programs. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19, 433-437.
- van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., & Rozendal, R. H. (1987). The unique

引用文献

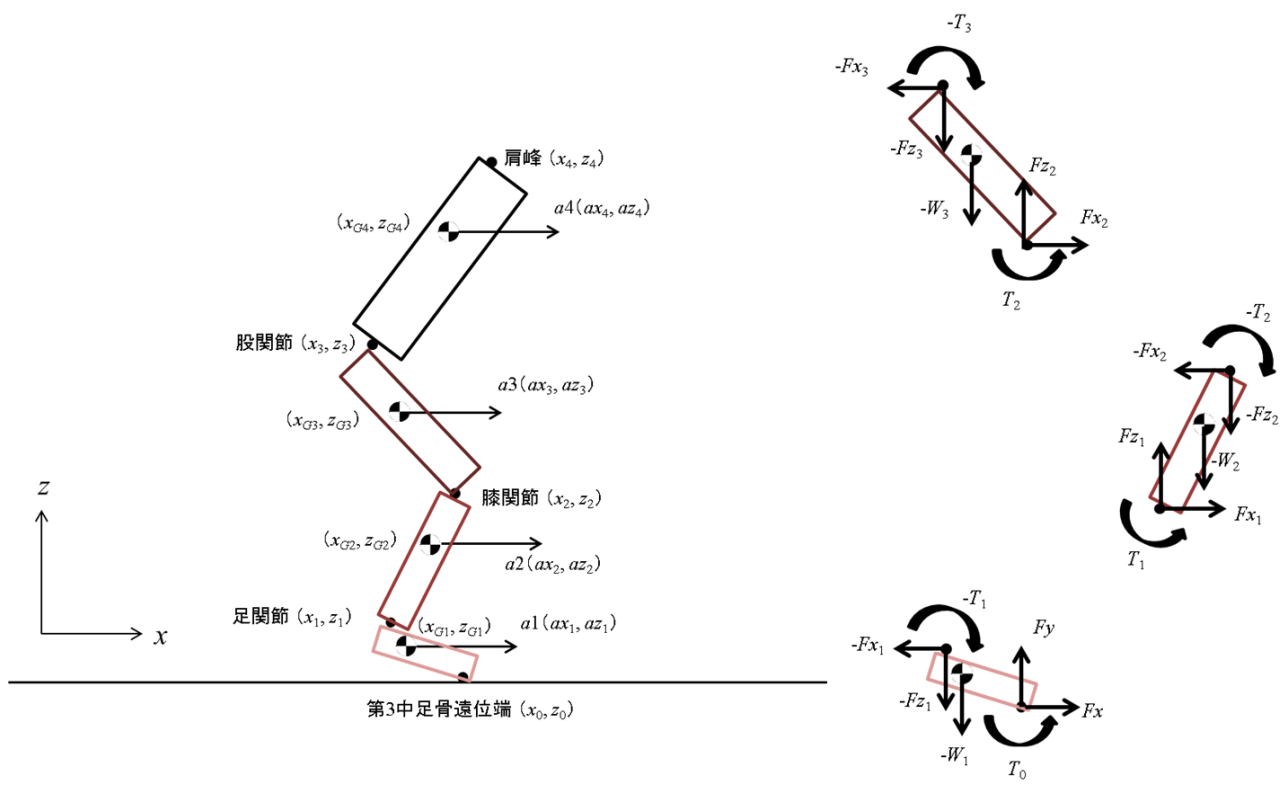
- action of bi-articular muscles in complex movements. *Journal of Anatomy*, 155, 1-5.
- Vanrenterghem, J., Lees, A., & Clercq, D. D. (2008). Effect of forward trunk inclination on joint power output in vertical jumping. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 708-714.
- Walsh, M., Arampatzis, A., Schade, F., & Brüggemann, G. P. (2004). The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of force. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18, 561-566.
- Walshe, A. D., & Wilson, G. J. (1997). The influence of musculotendinous stiffness on drop jump performance. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 22, 117-132.
- Wilson, G. J., Murphy, A. J., & Giorgi, A. (1996). Weight and plyometric training: effects on eccentric and concentric force production. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21, 301-315.
- Wilson, G. J., Newton, R. U., Murphy, A. J., & Humphries, B. J. (1993). The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25, 1279-1286.
- Winter, D. (2004). *Biomechanics and motor control of human movement, third ed.* New York: Wiley.

引用文献

- Yeow, C. H., Lee, P. V., & Goh, J. C. (2009). Effect of landing height on frontal plane kinematics, kinetics and energy dissipation at lower extremity joints. *Journal of Biomechanics*, *42*, 1967-1973.
- Yoon, S., Tauchi, K., & Takamatsu, K. (2007). Effect of ankle joint stiffness during eccentric phase in rebound jumps on ankle joint torque at midpoint. *International Journal of Sports Medicine*, *28*, 66-71.
- Zhang, S. N., Bates, B. T., & Dufek, J. S. (2000). Contributions of lower extremity joints to energy dissipation during landings. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *32*, 812-819.
- Zuur, A. T., Lundbye-Jensen, J., Leukel, C., Taube, W., Grey, M. J., Gollhofer, A., Gruber, M. (2010). Contribution of afferent feedback and descending drive to human hopping. *Journal of Physiology-London*, *588*, 799-807.
- 阿江 通良, 藤井 範久. (2002). *スポーツバイオメカニクス 20 講*. 朝倉書店.
- 出村 慎一. (2007). *健康・スポーツ科学のための研究方法: 研究計画の立て方とデータ処理方法*. 杏林書院.
- 深代 千之. (2000). 反動動作のバイオメカニクス : 伸張-短縮サイクルにおける筋-腱複合体の動態. *体育学研究*, *45*, 457-471.
- 畑田 芳朗, 宮本 弘之. (2002). 失敗から学ぶ卓球ロボット. *電子情報通信学会技術研究報告*, *102*, 31-35.

研究 I で使用した剛体リンクセグメントモデルと運動方程式

研究 I のドロップジャンプ動作は左右対称と見なせると仮定し、矢状面における 2 次元の HAT (頭部、腕部、体幹部)、大腿部、下腿部および足部の 4 体節とする剛体リンクセグメントモデルを構成した。各部位の座標は、実験により得られた左右のマーカークの平均値とした。



付録

足部の運動方程式(足関節トルクの算出)

$$F_x - F_{x_1} = m_1 a_{x_1} \quad (1)$$

$$F_z - F_{z_1} - W_1 = m_1 a_{z_1} \quad (2)$$

$$\begin{vmatrix} x_0 - x_{G1} & z_0 - z_{G1} \\ F_x & F_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_1 - x_{G1} & z_1 - z_{G1} \\ -F_{x_1} & -F_{z_1} \end{vmatrix} + T_0 - T_1 = I_1 \dot{\omega}_1 \quad (3)$$

$T_0 = 0$ において変形すると

$$(x_0 - x_{G1}) F_z - (z_0 - z_{G1}) F_x - (x_1 - x_{G1}) F_{z_1} + (z_1 - z_{G1}) F_{x_1} - T_1 = I_1 \dot{\omega}_1 \quad (3')$$

式(1)、(2)、(3')より F_{x_1} 、 F_{z_1} 、 T_1 を求めると、

$$F_{x_1} = F_x - m_1 a_{x_1}$$

$$F_{z_1} = F_z - m_1 a_{z_1} - W_1$$

$$T_1 = (x_0 - x_{G1}) F_z - (z_0 - z_{G1}) F_x - (x_1 - x_{G1}) F_{z_1} + (z_1 - z_{G1}) F_{x_1} - I_1 \dot{\omega}_1$$

下腿部の運動方程式(膝関節トルクの算出)

$$F_{x_1} - F_{x_2} = m_2 a_{x_2} \quad (4)$$

$$F_{z_1} - F_{z_2} - W_2 = m_2 a_{z_2} \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} x_1 - x_{G2} & z_1 - z_{G2} \\ F_{x_1} & F_{z_1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_2 - x_{G2} & z_2 - z_{G2} \\ -F_{x_2} & -F_{z_2} \end{vmatrix} + T_1 - T_2 = I_2 \dot{\omega}_2 \quad (6)$$

式(6)を変形すると

$$(x_1 - x_{G2}) F_{z_1} - (z_1 - z_{G2}) F_{x_1} - (x_2 - x_{G2}) F_{z_2} + (z_2 - z_{G2}) F_{x_2} + T_1 - T_2 = I_2 \dot{\omega}_2 \quad (6')$$

式(4)、(5)、(6')より F_{x_2} 、 F_{z_2} 、 T_2 を求めると、

$$F_{x_2} = F_{x_1} - m_2 a_{x_2}$$

$$F_{z_2} = F_{z_1} - m_2 a_{z_2} - W_2$$

$$T_2 = T_1 + (x_1 - x_{G2}) F_{z_1} - (z_1 - z_{G2}) F_{x_1} - (x_2 - x_{G2}) F_{z_2} + (z_2 - z_{G2}) F_{x_2} - I_2 \dot{\omega}_2$$

大腿部の運動方程式(股関節トルクの算出)

$$F_{x_2} - F_{x_3} = m_3 a_{x_3} \quad (7)$$

$$F_{z_2} - F_{z_3} - W_3 = m_3 a_{z_3} \quad (8)$$

$$\begin{vmatrix} x_2 - x_{G3} & z_2 - z_{G3} \\ F_{x_2} & F_{z_2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_3 - x_{G3} & z_3 - z_{G3} \\ -F_{x_3} & -F_{z_3} \end{vmatrix} + T_2 - T_3 = I_3 \dot{\omega}_3 \quad (9)$$

式(9)を変形すると

$$(x_2 - x_{G3}) F_{z_2} - (z_2 - z_{G3}) F_{x_2} - (x_3 - x_{G3}) F_{z_3} + (z_3 - z_{G3}) F_{x_3} + T_2 - T_3 = I_3 \dot{\omega}_3 \quad (9')$$

式(7)、(8)、(9')より F_{x_3} 、 F_{z_3} 、 T_3 を求めると、

$$F_{x_3} = F_{x_2} - m_3 a_{x_3}$$

$$F_{z_3} = F_{z_2} - m_3 a_{z_3} - W_3$$

$$T_3 = T_2 + (x_2 - x_{G3}) F_{z_2} - (z_2 - z_{G3}) F_{x_2} - (x_3 - x_{G3}) F_{z_3} + (z_3 - z_{G3}) F_{x_3} - I_3 \dot{\omega}_3$$

謝辞

本論文を作成するにあたり、ご支援をくださった全ての皆様に心から感謝申し上げます。

中澤公孝先生には博士課程在籍中から論文の執筆に至るまで多大なご支援を賜りました。非常に長い時間がかかってしまったにもかかわらず、辛抱強くご指導いただき誠に有難うございました。ご指南いただいた研究者としての姿勢を実践できるようこれからも精進してまいります。今後ともよろしく願いいたします。

金久博昭先生には修士課程から博士課程在籍中まで、熱いご指導をいただきました。研究のきっかけとなる着想は金久先生からのアドバイスから生まれました。心より感謝しております。ここがスタートラインだと考え、今後も地道な努力を続けたいと思います。

深代千之先生、工藤和俊先生、吉岡伸輔先生、笹川俊先生には論文の審査や研究内容への助言のみならず、実験の遂行にも多大なご支援を賜りました。私の不手際からご迷惑をかけてしまったこともありましたが、先生方からのご指摘によって多くの大事なことに気付くことができました。心より感謝申し上げます。

博士論文の審査をご担当いただいた彼末一之先生、福井尚志先生、久保啓太郎先生からは多視点から貴重なご指摘・ご提案をいただきました。誠に有難うございました。

禰屋光男先生、小幡博基先生、進矢正宏先生からは、研究以外の私生活の面でも大変お世話になりました。ご相談に乗っていただいたこと、様々なご支援をいただいたことに対し、この場を借りて御礼申し上げます。

吉江さん、大庭さん、八重嶋さん、三浦さん、久保さんをはじめとする金久研究室・中澤研究室在籍時にお世話になった皆様に感謝申し上げます。皆様のおかげでハードな院生生活も楽しく過ごすことができました。深代研究室、工藤研究室をはじめとする身体運動科学研究室内の皆様にも大変お世話になりました。有難うございました。

大学院同期の皆にも感謝します。お互いに語りあい励ましあえた仲間の存在はとても貴重でした。これからも公私問わずよろしくお願い致します。共同研究者である稲葉さんには実験の遂行から分析に至るまで、多大な協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

勤務先である上智大学の皆様にも大変お世話になりました。男女バスケットボール部の皆様からは、実験に協力いただいただけでなく、現場に関わる中で研究のアイデアをいただきました。本当に有難うございました。

また本論文で実施された研究は、科研費（11J04646 および 15K16463）の助成を受けたものです。ご支援有難うございました。

最後に、私を支えてくれた家族に感謝の気持ちを伝えます。両親には多くの苦労と心配をかけましたが、いつも励まし続けてくれたことで諦めずに研究を続けることができました。所沢のお義父さん・お義母さんも毎日のようにやんちゃな息子たちの面倒をみていただきました。そして、色々な面で支えてくれた妻の美樹、本当にありがとう。時折送られてくる息子達の写真は最高のエネルギーになりました。これからも宜しく願い致します。