

# 運動学、運動力学データを用いた 跳躍力向上のための支援手法の検討

Consideration for development of the support system to  
enhance jumping ability with kinematic and kinetic data

江塚千洋<sup>1</sup> 中村ふみ子<sup>1</sup> 横山直幸<sup>1</sup>

Ezuka Chihiro<sup>1</sup>, Fumiko Nakamura<sup>1</sup>, and Naoyuki Yokoyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 沼津工業高等専門学校

<sup>1</sup> National Institute of Technology, Numazu College

**Abstract:** This study aimed to analyze the effects of shoulder muscle contraction and relaxation during jumping movements on jump performance. In particular, it sought to analyze how the way the shoulders are tense affects overall movement, with the goal of providing foundational insights for beginners to acquire proper jumping techniques. The subjects were six individuals with volleyball experience, and using inertial motion capture, jumping movements were compared in states of relaxed and tense shoulders. The results showed that compared to the tense state, the integral values of height fluctuations in the neck, right shoulder, lower back, and right ankle during the pre-peak phase of the jumping movement were significantly larger in the relaxed phase, suggesting an improvement in energy efficiency. This indicates that the way the shoulder muscles are tense also affects lower limb movements. Furthermore, a linear approximation of the relationship between hang time and maximum reach revealed different trends based on shoulder tense condition.

## 1. はじめに

跳躍力は多くのスポーツにおけるパフォーマンスの重要な要素であり、特にバレーボールやバスケットボール、陸上競技など鉛直方向の動作を伴う競技においては不可欠である。アスリートの跳躍力は競技の優劣に直結するため、バイオメカニクス分野におけるスポーツ動作の跳躍をテーマにした研究は多岐にわたる。これまでの研究では、跳躍に関連する体幹や下肢の筋活動がパフォーマンスに及ぼす影響について注目されてきた<sup>[1][2]</sup>。しかし、上肢の脱力、筋収縮に着目した研究は十分に行われていなかったため、本研究ではこれらが跳躍力に与える影響に着目した。

スポーツの未経験者に「肩の力を抜く」「肩に力を入れる」といった動作を言葉から感覚的に理解させることは難しい。とはいえ空中にいる選手の身体に直接接触して指導することはさらに困難がともない、適切な跳躍動作の習得を指導することは難しいものとなってしまっている。この課題を解決するために、跳躍動作時に特定の部位に刺激を与え、力を入れる

タイミングを意識させることで初心者が適切な動作を感覚的に習得できるデバイスの設計が求められる。

## 2. 研究背景

これまでに跳躍力の増進をテーマにした論文はいくつか見受けられるが、その中では踏み切り前の腕の振り上げ動作、つまり腕の角度など姿勢を実験条件として指定している場合がほとんどである<sup>[3][4]</sup>。一方、筋肉の力み具合などを意識させることを実験条件として指定しているものはほとんど見かけない。足底の離地直前の体の沈み込み時において、腕を振る動作はその反動で重心の位置を下げ床反力が増すことで跳躍距離を増加させるための重要なフェーズである。しかし、その過程における肩関節付近での筋力の働きと肩の関節角度、跳躍距離との間の因果関係は未だ解明されていない。本報においては、体の姿勢が跳躍力に与える影響を測定するのではなく、肩の力が抜けた状態と入った状態でどのような変化が生じるかを考察することで、未だ解明しきれていない跳躍力と筋力の関係を調査する。

しかし単純に「肩の力を入れて跳ぶ」動作を人に命じた場合、肩だけに力を入れる人と体幹全体に力を入れる人、踏み込み前から力を入れる人と入れない人、ピーク値を境に力を抜く人と抜かない人などそれぞれの様々な解釈が生まれる。「肩の力を抜いて跳ぶ」場合も同様である。これら個人差による解釈の差は、普段から跳躍動作を行っているかどうかによる部分が大きいと考えられる。熟練者は効率のよい力を入れ方を自然に理解している場合が多い。理想的な跳躍力の向上を促す支援システムには、熟練者と初級者の間にある違いを理解し、後者が前者を模倣することが最善の策であると考えている。そのために、時系列上での跳躍に関連するパラメータを詳細に調査することが求められる。

### 3. 研究目的

本研究の最終的な目標は、跳躍動作時に特定の部位に刺激を与え、力を入れるタイミングを意識させることで、初心者が適切な動作を感覚的に習得できるデバイスを開発することである。本年度は、その基礎的な知見を得るために、肩の筋肉の収縮および脱力が跳躍動作に与える影響を解析することを目的とした。本報の中では、筋の脱力を「肩の力を抜く」と表現し、収縮を「肩の力を入れる」と表現する。

### 4. 研究方法

#### 4.1. 対象者

本研究の対象は、本校のバレーボール部に所属する過去5年以上の競技経験を有する健全な男子学生6名とした。対象者には実験前に研究の目的および方法を説明し、書面による同意を得た。また、本研究は沼津工業高等専門学校の一ヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認(承認番号:2024-S12)を受け実施した。以下の表1に対象者の、年齢、身長、体重といった対象者属性値を示す。

表1：対象者属性値

ID	年齢	身長(cm)	体重(kg)
1	16	175.0	69.6
2	18	178.9	67.4
3	18	172.7	62.3
4	18	180.5	71.0
5	17	175.0	61.5
6	17	181.5	64.0
平均±SD	17.33±0.82	177.27±3.42	65.97±3.83

### 4.2. 実験方法

全ての対象者は、実験前に十分なウォーミングアップを行い、筋肉の柔軟性を高め、実験中の疲労や怪我によるリスクを低減できるように努めた。次に、対象者に慣性式モーションキャプチャを装着させた。その後、対象者は同時計測のための床反力計の上で、肩の力を抜いた状態と肩に力を入れた状態の2条件で、それぞれ5回ずつ、両足が同時に離地、着地するバックスイングもしくはハーフスイング（跳躍前の沈み込み動作の直前に腕を後方に腕を振り上げる動作）をとまなう垂直跳びを実施させた。

### 4.3. 実験機器

#### モーションキャプチャ

被験者の跳躍動作を解析するために、慣性式モーションキャプチャ(Perception Neuron 3 Pro, Noitom)を使用した。サンプリングレートは60Hzとした。全身の17か所にセンサを取り付け、計測結果は体の動作をとらえることのできる3D上の骨格データとして形成され、フレーム毎の角度、位置データが出力される。そのデータをもとに、必要な間接角度や位置情報を取得した。

### 5. データ解析

#### 5.1. 跳躍高による分析

首、右肩、腰、右の足関節の高さデータに対して、跳躍前の沈み込み時期からピークに達するまでの期間を中央で別け、その前半をPhase1、後半をPhase2とし、両フェーズにおける位置データを時間積分した。沈み込み時期とは、3D上の骨格の中の腰の関節部分が最下点に到達したフェーズを意味する(図1)。

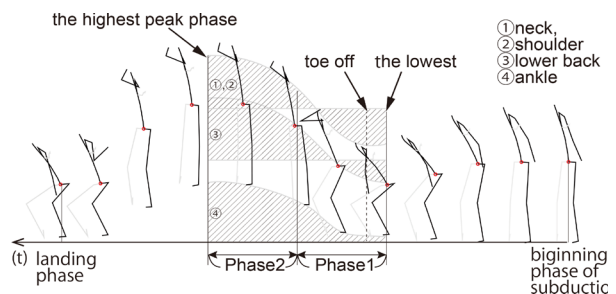


図1：跳躍時の矢状面図

図1の矢状面図は、対象者の中の1人の1回分の跳躍を横方向からとらえたものである。図1の視線は、撮影開始から終了時のラインを真横からとらえた方向となっている。黒色が右側、灰色が左側の骨格になるが、左側の骨格データの取得に失敗したため、本報は右の骨格のみでの分析結果を報告する。また、慣性センサ式計測装置の欠点でもある時間経過にともなうズレ（ドリフト）や位置データの正確さの欠如から、沈み込み時からつま先離地は若干宙に浮いていることが図1からも確認できる。従って、このようなセンサの誤差を含んだデータ解析であることは前以て言及しておく。

分析には直立姿勢におけるそれぞれの部位の高さを起点とし、その地点からの高さの変位を時系列にて積分し、その値を分析対象とした。肩の力を抜いた跳躍と肩の力を入れた跳躍の2条件間での差異を確認するために、各部位の積分値に対して片側のt検定を行った。

## 5.2. 跳躍高と滞空時間からの分析

次に、モーションキャプチャから得られた首の位置データ（高さ）と滞空時間の関係を調査した。各ジャンプにおいて、首の高さの最高点であるピーク値から身長を引いた値（以下、相対首高と呼ぶ）を分析対象とし、滞空時間との関係を調査した。肩の力を抜いた跳躍と肩の力を入れた跳躍の2条件において、首の高さと滞空時間の関係を線形近似し、跳躍動作における特徴を分析した。

# 6. 結果

## 6.1. 跳躍高による分析結果

図2に跳躍動作における各部位の運動量の積分値比較を示す。首に関しては、Phase1において肩の力

を抜いた状態の方が有意に大きいことが確認された ( $p = 0.0057$ )。Phase2においても同様に、肩の力を抜いた状態の方が有意に大きい ( $p = 0.011$ ) ことがわかった。右肩についても、Phase1では肩の力を抜いた状態の方が有意に大きい ( $p = 0.034$ ) が確認され、Phase2においても肩の力を抜いた状態の方が有意に大きい ( $p = 0.014$ ) ことがわかった。腰に関しては、Phase1では有意な差は認められなかった ( $p = 0.053$ ) が、Phase2では肩の力を抜いた状態の方が有意に大きい ( $p = 0.031$ ) が確認された。右足関節については、Phase1では有意な差は認められなかった ( $p = 0.16$ ) が、Phase2では肩の力を抜いた状態の方が有意に大きい ( $p = 0.060$ ) が確認された。

## 6.2. 跳躍高と滞空時間からの分析結果

図3に相対首高と滞空時間の相関関係をグラフにて示す。

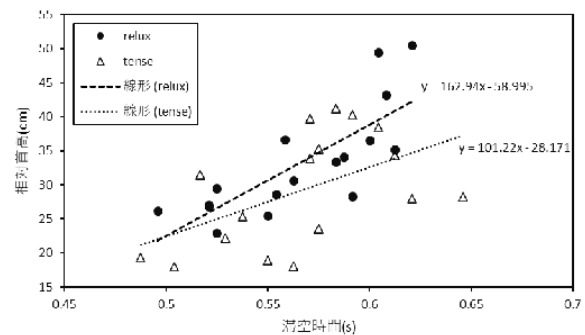


図3: 相対首高と滞空時間の相関関係

首の位置データの最高到達点と滞空時間の関係を散布図として示し、それぞれの条件について線形近似を行った結果、以下の線形近似式を得た。

肩の力を抜いた相対首高 :  $y = 162.94x - 59.00$

肩の力を入れた相対首高 :  $y = 101.22x - 28.17$

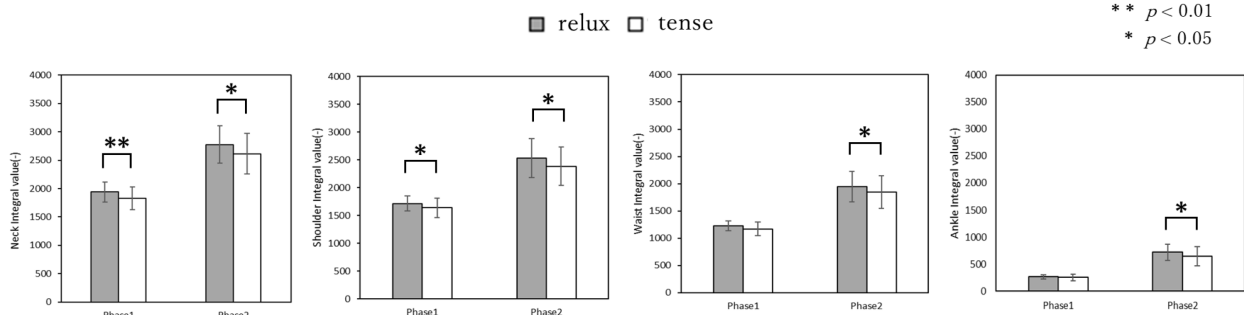


図2: 跳躍動作における各部位の運動量の積分値比較

## 7. 考察

### 7.1. 跳躍高による分析の考察

肩の力を抜いた状態と入れた状態の比較において、肩の高さの積分値に有意な差が見られたことから 2 条件の動作に与える影響に違いがあることが示唆された。特に、肩の力の入れ方が各部位の運動に及ぼす影響を定量的に評価できる可能性を示めしていると考えられる。

また、肩の力の影響はその局所部位だけでなく、首にも強く反映したと考えられる。これは、肩と首が構造的に近接しているため、肩の動作が首の動きに直接影響を与える可能性を示している。一方で、腰や足関節といった肩から離れた部位においても、Phase 2 の積分値に有意差が認められたことから、肩の力の入れ方が跳躍時の下半身の動作にも影響を与えていることが示唆された。このことによって「肩の力を抜く・入れる」という主観的な指示による動作は、首や肩に影響を与えるだけでなく、Phase 2 では下半身の運動に波及していたと予想できる。

さらに、Phase 2 では、肩の力を抜いた状態で積分値が有意に大きくなる傾向が見られた。これは、肩の力を抜くことで、跳躍期間中にエネルギー効率が向上する可能性があること示していると予想できる。跳躍動作の効率は下肢の筋活動や姿勢制御によって影響を受けるといくつかの文献にて報告されている<sup>5)6)</sup>。本研究においても上半身の力の入れ方も重要な要因となることが示唆された。

### 7.2. 跳躍高と滞空時間からの分析の考察

肩の力を抜いた跳躍と入れた跳躍での直立姿勢を基準とした首の高さの変動量を滞空時間と比較し、線形近似を行った結果、両条件で異なる線形近似式が得られた。特に、肩の力を抜いた場合の傾きが大きくなった。一般的に、滞空時間  $T$  から跳躍高  $h$  を求める際には、重力加速度  $g$  を用いた近似式  $h=gT^2/8$ <sup>7)</sup> が用いられる。しかし、本研究の結果では、滞空時間と首の高さの変動量の関係が線形的な相関がある可能性が示唆された<sup>8)</sup>。これは、肩の力の入れ方が跳躍時の姿勢制御に影響を及ぼし、跳躍動作のエネルギー効率が変化すると予想している。その結果、跳躍高は変動するものと予想される。

### 7.3. 上級者の踏み込み動作の考察

最後に跳躍を得意とする対象者の「力を抜いた」「力を入れた」跳躍を指示された場合の踏み込み姿勢の違いから跳躍の高さを考察する (図 4)。以下の図の左が力を抜いた跳躍を指示された場合であるが、踏み込み姿勢から肩に力が入っておらずハーフスイング (腕と体幹の角度が比較的小さい) になる回数が多かった。それに対し、力を入れるよう指示された場合は、右のようにバックスイング (腕と体幹の角度が比較的大きい) になる回数が多かった。ハーフスイングは腕の振り幅が小さいことから次の動作に移りやすいという利点があるだけでなく、跳躍が高くなりやすくなるメカニズムにも関連がある可能性もある。この踏み込み前の姿勢と肩の力の入れ方と跳躍の高さの関係は引き続き調査していく予定である。

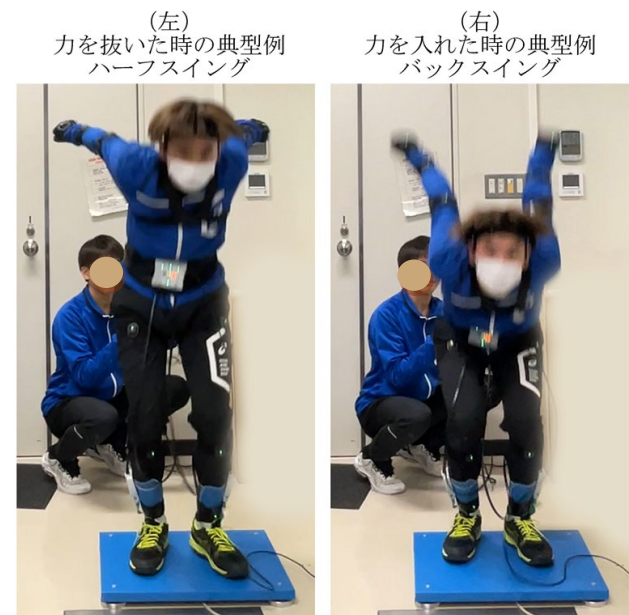


図 4: 跳躍が得意な対象者の踏み込み姿勢

## 8. むすび

本報では跳躍力を高めるための支援システムの開発の第一段階として、実験被験者に「肩の力を抜いて跳躍する」「肩の力を入れて跳躍する」といった 2 パターンの指示を出し、三次元動作から踏み切り前の沈み込み動作から跳躍の高さが最も高くなるピーク時までの首、肩、腰、足関節の高さの時系列における変位の積分値を求めた。これらを詳細に調査するために、足底の離地からピーク時までを前半と後

半に別け、それぞれにおける高さの積分値を力積としてとらえ、t検定により分析した。その結果、首や肩の高さから力を抜いた方が有意に高く跳躍できることが示唆された。

ただし、「力を抜く」「力を入れる」といった言葉の意味を被験者の熟練度などの差によりとらえ方はまちまちであった。肩だけでもしくは体幹全体に力を入れるかどうか、また沈み込み動作から着地までの一連の動作の中でいつ力を入れるか、両パターンそれぞれで個人差が生じた。

また、本実験での跳躍を得意とする上級者にとって、肩に力を入れた方がハーフスイングよりバックスイングになりやすく、その場合力を抜いた時よりも高さが伸びにくかった。

これらの姿勢の条件が統一されていない跳躍においても、跳躍前の沈み込み時からピーク時の後半においては有意に跳躍が高くなるといった結果が得られた。その原因として考えられることは、後半に至るまでの沈み込み動作から離地に至るまでに床反力が「力を抜く」指示を出した場合に大きく働き、滞空時間のピーク時までをさらに半分に別けた前半では効果が小さいものの後半の跳躍の高さには大きく影響を与えたことが予想される。また首や肩などの身体の上部においてピーク時までの後半で高さの積分値の有意差が大きくなったのは、肩の力が抜けている方が床に大きな力を与え、その反動で床反力が重心を強く押し上げたことが原因していると考えられる。今後は床反力の始点である COP から重心までの方向を示すベクトルの時系列変化を解析することで、筋力が跳躍力に与えるメカニズムを解明する予定である。

本研究では跳躍動作の開始からピークまでを Phase 1 と Phase 2 に分けて解析を行ったが、さらなる詳細なフェーズ分けを行うことで、より精密な運動パターンの違いを検討することができると考えられる。また、跳躍中の筋活動をより詳細に評価するために、表面筋電図 (EMG) 解析を追加することが重要である。本研究では、肩の力が入り方が跳躍のエネルギー効率に影響を与えることを調査したが、そのメカニズムを解明するためには、肩の筋活動を記録・解析し、力を抜く、入れるタイミングが跳躍に影響するのかを検討する必要がある。

今後は、跳躍動作時の筋活動をより詳細に評価し、跳躍効率を向上させるために有効な刺激の種類とタイミングを検討する。これにより、初心者が適切な跳躍動作を習得しやすくする装置の開発につなげたい。

## 謝辞

本研究の実験にあたり、ご協力いただきました沼津工業高等専門学校バレー部の皆様、考察する際の参考意見をいただいた制御情報工学科 4 年生の皆様には厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 田鍋拓也, 山本浩由, 有吉雄司: 素早い垂直跳びでの体幹及び下肢の筋活動のタイミング, 理学療法科学, 第 27 巻 4 号, pp. 417-420, (2012)
- [2] 甲斐 義浩, 村田伸, 相馬正之: 垂直跳びにおける下肢筋力の貢献度一男女の特性比較一, Japanese Journal of Health Promotion and Physical Therapy, Vol. 3, No. 3, pp. 109-112, (2013)
- [3] 高梨泰彦: 助走の方法がバレーボールのスパイク跳躍高に与える影響, 京都産業大学論集 自然科学系列, 45 号, pp. 171-184, (2018)
- [4] Mikiko Hara, Akira Shibayama, Hiroshi Arakawa, Senshi Fukushima: Effect of arm swing direction on forward and backward jump performance, Journal of Biomechanics, Vol. 41, Issue 13, pp. 2806-2815, (2008)
- [5] 深代 千之: スポーツ動作の科学: バイオメカニクスで読み解く, 一般財団法人 東京大学出版会, Lecture9-3 目指せジャンプ王!, pp. 168-169, (2010)
- [6] 佐久間淳, 河合一武, 玉木啓一: 跳躍運動における動作負荷の大きさが反動動作の効果に及ぼす影響, 武蔵丘短期大学紀要, Vol. 22, pp. 17-20, (2015)
- [7] 阿江通良, 藤井範久: スポーツバイオメカニクス 20 講, 朝倉書店, (2002)
- [8] 伊藤浩充, 村上英貴子, 沖田祐介: バレーボールジャンプの跳躍高と踏切時の下肢の関節角度および筋活動との関係, 甲南女子大学研究紀要第 4 号看護学・リハビリテーション学編, pp. 7-13, (2010)