

**高負荷スクワット運動が腰椎椎間板に及ぼす急性の影響
— 腰椎前弯角度, 体幹筋の筋量および下肢柔軟性との関連性 —**

上 武 大 学 柳 澤 修
(共同研究者) 早 稲 田 大 学 金 岡 恒 治
聖 学 院 大 学 松 永 直 人
早 稲 田 大 学 安 達 玄
同 押 川 智 貴

**Acute Effects of High-Load Barbell Back Squat Exercise on Lumbar
Intervertebral Discs: Relationship with Lumbar Lordosis Angle,
Trunk Muscle Size, and Lower Extremity Flexibility**

by

Osamu Yanagisawa

Faculty of Business Information Sciences, Jobu University

Koji Kaneoka, Tomoki Oshikawa,

Faculty of Sport Sciences, Waseda University

Naoto Matsunaga

General Education Core Curriculum Division,

Seigakuin University

Gen Adachi

Waseda Institute for Sport Sciences

ABSTRACT

This study aimed to evaluate mechanical stress placed on each lumbar intervertebral disk during high-load back squat exercise using magnetic resonance (MR) imaging and assess the relationship between degree of mechanical stress and individual intrinsic

physical factors such as lumbar lordosis angle, trunk muscle size, and lower extremity flexibility. Thirteen participants (11 males and two females) performed parallel back squat exercises (80% of one repetition maximum, eight repetitions, five sets) using a Smith machine. Sagittal MR diffusion-weighted images of the lumbar spine were obtained using a 1.5-Tesla MR system with a spine coil before and immediately after the exercise to calculate apparent diffusion coefficient (ADC; an index of water movement within tissues) values of all lumbar intervertebral disks. Additionally, lumbar lordosis angle and muscle cross-sectional area of each trunk muscle were evaluated using MR imaging before the exercise. Passive range of motions of hip flexion and ankle dorsiflexion were assessed using digital photos and an image processing software (Image J) before the exercise. ADC values of the L4/5 and L5/S1 intervertebral discs significantly decreased after squat exercise ($P < 0.01$). However, the changes were not significantly correlated with lumbar lordosis angle, cross-sectional areas of the trunk muscles, and passive range of motion of hip flexion and ankle dorsiflexion. The study findings suggest that lower lumbar intervertebral disks are subject to great mechanical stress during high-load parallel back squat exercises and that changes are not related to individual physical intrinsic factors such as lumbar lordosis angle, trunk muscle size, and lower extremity flexibility.

要 旨

本研究は、MRIを用いて高負荷スクワット運動が腰椎椎間板に与える力学的ストレスを評価するとともに、そのストレスの程度が個人の腰椎前弯角、体幹筋の横断面積および下肢柔軟性と関連を示すのかを検証することを目的とした。男女13名を対象に、スクワット（最大挙上重量の80%の重り、8回5セット）前後で、腰椎のMRI拡散強調像を取得し、各椎間板のapparent diffusion coefficient値（ADC；髄核内の水の動きを評価）を算出した。加えて、MRIを用いて腰椎前弯角と体幹筋の横断面積を算出するとともに、股関節屈曲と足関節背屈の関節可動域を計測した。スクワット運動後にL4/5ならびにL5/S1の椎間板は有意なADC値の低下を示したが、それらの変化は腰椎前弯角、体幹筋の横断面積および下肢柔軟性

と有意な相関を示さなかった。高負荷スクワット運動は下位の腰椎椎間板に力学的なストレスを与えやすいが、そのストレスは個人の腰椎前弯角、体幹筋の横断面積および下肢柔軟性と関連性をもたなかった。

緒 言

バーベルを用いたスクワット運動は、下肢の代表的なトレーニング種目であり、競技者だけでなく、一般人の間でも広く実施されている。その一方で、腰椎椎間板に作用する圧迫力はいける負荷に比例して高まることが報告されている^{1,2)}。したがって、高負荷を用いたスクワットトレーニングは下肢の筋肥大や筋力強化に有効であるが、腰椎椎間板に力学的なストレスを与えやすいと考えられる²⁻⁵⁾。実際、高負荷でのスクワット動作の繰り返しは、腰部障害を引き起こす可能性が高

いことが指摘されている⁶⁾。しかしながら、高負荷スクワット運動後の腰椎椎間板のストレス反応に関しては十分に検証されていない。また、先行研究において、腰椎のアライメントが腰椎椎間板への力学的ストレスの分配に関係すること⁷⁻¹¹⁾や体幹筋のサイズの拡大が腰椎の安定性に寄与すること¹²⁾、そして下肢の柔軟性がスクワット時の腰椎の動きに影響すること^{13,14)}が報告されている。しかしながら、これらの要素が高負荷スクワット運動中の腰椎椎間板への力学的ストレスにどの程度関係するのかは明らかにされていない。

椎間板は脊椎に作用する力学的なストレスを緩衝する役割を有する^{1,15-17)}。椎間板は、中心部の髄核とそれを取り巻く線維輪で構成され、健全な髄核は70-80%の水分を含むとされている¹⁸⁾。髄核内の水の動きは、圧迫負荷を加えることで低下することが実証されている^{19,20)}。磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging: MRI) の拡散強調像は、みかけの拡散係数 (Apparent Diffusion Coefficient: ADC) を算出することで、組織内の水の動きを定量的に評価できる。それゆえ、MRIの拡散強調像を活用することで、高負荷スクワット運動が腰椎椎間板に与える力学的ストレスを非侵襲的に推定することが可能となる。

本研究は、MRIの拡散強調像を用いて高負荷スクワット運動が腰椎椎間板に与える力学的ストレスを検証することを目的とした。加えて、椎間板への力学的ストレスの程度が、個人の有する腰椎前弯角度、体幹筋の横断面積および下肢柔軟性と関連性を示すのかを検証することを目的とした。

1. 実験方法

1.1 被験者

本研究は、腰部や下肢に大きな受傷歴や手術歴のない健全な男女13名 (男性11名と女性2名; 年齢 23.3 ± 3.5 歳) を対象とした。なお、腰椎椎間板にヘルニアや変性の所見のある者は対象者か

ら除外された。また、すべての被験者が定期的なスポーツ活動 (競技スポーツ、レクリエーションスポーツ、体力トレーニングなど) を行っていないが、身体への影響を考慮して測定日の2日前からのスポーツ活動を禁止した。

本研究は所属機関の倫理委員会による承認を受け、測定は各被験者から実験内容に対するインフォームドコンセントを得た後に実施された。

1.2 スクワット

任意のウォームアップを行った後、各被験者はスミスマシン (Nautilus) を用いて、スクワット運動 (最大挙上重量の80%の負荷、8回×5セット、セット間休息90秒) を実施した。スクワットはハイバーポジションで、足幅を肩幅にし、両脚のつま先を 30° 外側に開いた状態で行った。スクワットの深度は、大腿部が床と平行になるまでとした (パラレルスクワット)。動作のリズムは、メトロノームで規定し、2秒かけて下降し、2秒かけて上昇するようにした。スクワット運動中にエクササイズベルトは使用しなかった。なお、スクワットの動作やリズムは検者によって注意深く観察され、規定からずれた場合には検者が口頭で改善を促した。

1.3 MRI測定

1.3.1 拡散強調像の撮像

1.5テスラのMR装置 (Signa HDxt, GE Healthcare UK Ltd) と脊椎用コイルを用いて、スクワット運動の前後で腰椎の拡散強調矢状断像 (繰り返し時間 = 6,000ms, エコー時間 = 76.4ms, マトリックス = 256×256 , 励起回数 = 4, スライス厚 = 10mm, b値 = 500 s/mm^2 , 撮像時間 = 1分42秒) を仰臥位で撮像した。MR装置に内蔵されたソフトウェア (FuncTool 2) を使用して、各腰椎椎間板 (髄核) のADC値を算出した。髄核のADC値の算出は、各椎間板で3回ずつ行い、そ

それぞれの平均値が分析に使用された。

1. 3. 2 腰椎前弯角度の計測

上記のMR装置と脊椎用コイルを使用して、スクワット運動の前に腰椎のT2強調矢状断像（繰り返し時間 = 2,000ms, エコー時間 = 80ms, マトリックス = 256 × 128, 励起回数 = 1, スライス厚 = 10mm, 撮像時間 = 4分40秒）を仰臥位で撮像した。得られた画像を用いて、腰椎前弯角度を計測した（第1腰椎の上端に沿った線と第5腰椎の下端に沿った線がなす角度）（図1）^{21,22）}。

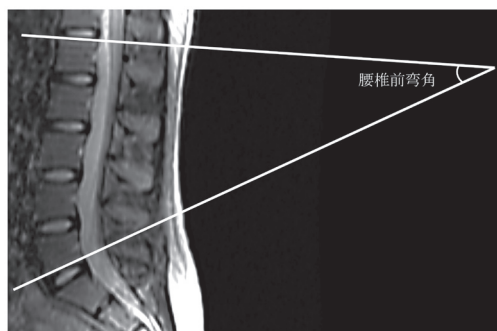


図1 MRIを用いた腰椎前弯角度の計測

1. 3. 3 体幹部の筋横断面積の計測

スクワット運動の前に、上記のMR装置と8チャンネルボディアレイコイルを使用して、体幹部のT1強調冠状断像（繰り返し時間 = 878ms, エコー時間 = 16ms, マトリックス = 192 × 256, 励起回数 = 1, スライス厚 = 10mm, 撮像時間 = 23秒）を仰臥位で撮像した。体幹部のMRI撮像は、呼吸によるモーションアーチファクトを回避するために吸気位での息止め撮像にて対応した。スライスの位置は、第4腰椎と第5腰椎の間とした。筋横断面積の分析対象は、腹直筋、外側腹筋群（外腹斜筋、内腹斜筋、腹横筋）、腰方形筋、大腰筋及び脊柱起立筋群であった（左右を計測）。各筋横断面積は、MR装置に内蔵されたソフトウェア（FuncTool 2, GE Healthcare UK Ltd）を用いて、それぞれの領域をトレースすることで算出した。その際、脂肪、骨、神経、および血管が分析対象

領域に含まれないように配慮した。各筋のトレースはそれぞれ3回行い、その平均値を各筋の横断面積値とした。

1. 4 下肢柔軟性の計測

スクワット運動前に、股関節の他動的屈曲角度と足関節の他動的背屈角度を計測した。検者が被験者の股関節を他動的に屈曲させた状態ならびに足関節を他動的に背屈させた状態をデジタルカメラで撮影した（左右を計測）。デジタル画像を画像処理ソフト（Image J, NIH）に取り込んで、股関節の他動的屈曲角度と足関節の他動的背屈角度を算出した。左右の平均値が分析に用いられた。

1. 5 統計処理

得られたデータは平均値と標準偏差で表した。スクワット運動前後における各椎間板のADC値の変化は、対応のあるT検定を用いて分析した。加えて、スクワット運動前後における椎間板のADC値の変化率と腰椎前弯角度、体幹筋の各横断面積および下肢柔軟性の相関関係（ピアソンの積率相関係数（r）を算出）を分析した。統計分析はSPSS Statistics（Version 23, IBM Corporation）を用いて行い、有意水準は5%未満とした。

2. 実験結果

2. 1 腰椎椎間板のADC値

スクワット運動後に、第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙骨間の椎間板は有意なADC値の低下を示した（図2）。それら以外の腰椎椎間板のADC値は有意な変化を示さなかった。なお、第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙骨間における椎間板のADC値の変化率は、それぞれ $-5.1 \pm 3.1\%$ と $-6.8 \pm 7.4\%$ であった。

2. 2 腰椎前弯角度

スクワット運動前の腰椎前弯角度は $34.0 \pm 8.6^\circ$

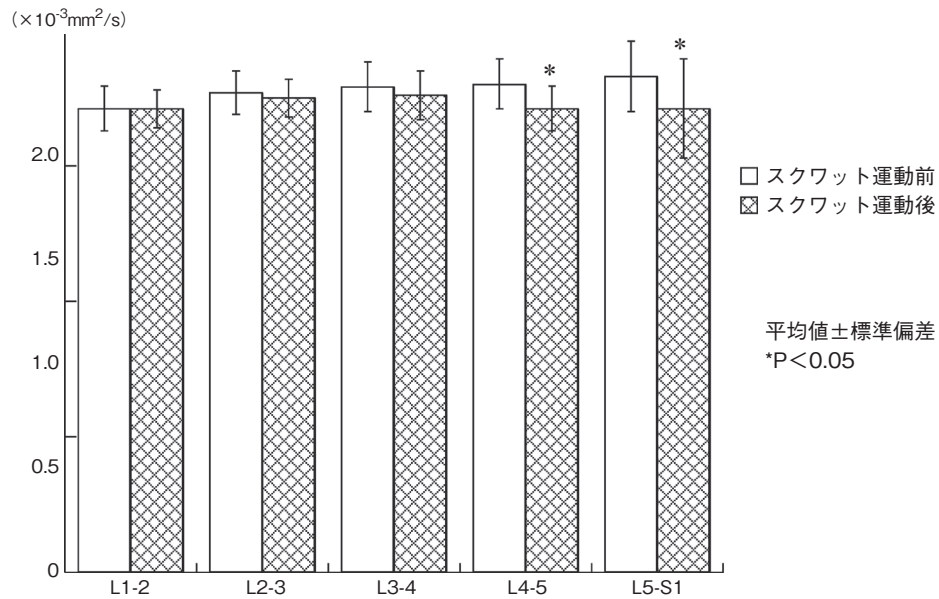


図2 スクワット運動前後における腰椎椎間板(髄核)のADC値の変化

であり、第4-5腰椎間 (P = 0.675, r = -0.13) ならびに第5腰椎-仙骨間 (P = 0.301, r = -0.33) の椎間板のADC変化率と有意な相関関係を示さなかった。

2. 3 体幹筋の各横断面積

体幹部における各筋の横断面積と椎間板のADC変化率との相関関係を図3に示す。各筋の

横断面積 (左右の合計) ならびに体幹筋の総横断面積は、第4-5腰椎間 (腹直筋: P = 0.121, r = -0.45, 外側腹筋群: P = 0.924, r = 0.03, 腰方形筋: P = 0.380, r = -0.27, 脊柱起立筋群: P = 0.910, r = 0.04, 大腰筋: P = 0.430, r = -0.24, 全筋: P = 0.665, r = -0.13) ならびに第5腰椎-仙骨間 (腹直筋: P = 0.358, r = -0.29, 外側腹筋群: P = 0.660, r = -0.14, 腰方形筋: P = 0.405, r = -0.27, 脊柱起

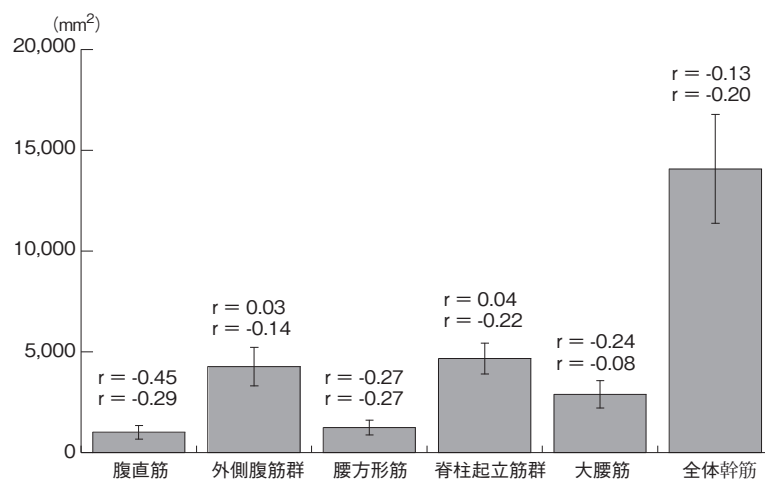


図3 体幹筋の横断面積と腰椎椎間板のADC変化率(L4-5間, L5-S1間)との相関関係
体幹筋の各横断面積の値は左右の合計値(平均値±標準偏差)を示す。ピアソンの積率相関係数は、上段がL4-5間椎間板のADC変化率との、そして下段がL5-S1間椎間板のADC変化率との関係を示す。

立筋群:P=0.489, r=-0.22, 大腰筋:P=0.804, r=-0.08, 全筋:P=0.529, r=-0.20)における椎間板のADC変化率と有意な相関関係を示さなかった。

2. 4 下肢柔軟性

股関節の他動的屈曲可動域は、 $135.2 \pm 8.2^\circ$ であり、足関節の他動的背屈可動域は、 $24.1 \pm 8.4^\circ$ であった。これらの値は、第4-5腰椎間(股関節屈曲:P=0.495, r=-0.21, 足関節背屈:P=0.106, r=-0.47)ならびに第5腰椎-仙骨間(股関節屈曲:P=0.878, r=-0.05, 足関節背屈:P=0.176, r=-0.42)の椎間板のADC変化率と有意な相関関係をもたなかった。

3. 考 察

高負荷スクワット運動後に、第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙骨間の椎間板は、有意なADC値の低下を示した。椎間板髄核内の水の動きは、圧迫負荷を加えることで低下することが実証されている^{19,20)}。それゆえ、本研究の結果から、高負荷スクワット運動は下位の腰椎椎間板へ顕著な力学的ストレスを与えたと推察できる。Cappozzoら²⁾は、体重の0.8-1.6倍の重量を用いたハーフスクワット中の第3-4腰椎間への圧迫力を検証し、体重の6-10倍程度の圧迫力がかかることを報告した。本研究のスクワット運動の負荷は、被験者の体重の平均0.9倍に相当した。このことを踏まえると、本研究のスクワット運動中には体重の6倍を超える圧迫力が、第3-4腰椎間の椎間板に作用していた可能性がある。しかしながら、本研究において第3-4腰椎間の椎間板は有意なADC値の低下を示さなかった。加えて、本研究で用いたパラレルスクワットは、Cappozzoら²⁾が採用したハーフスクワットよりも腰椎へのストレスが大きいと考えられる^{23,24)}。したがって、本研究のスクワット運動中は、第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙骨

間の椎間板に、より大きな圧迫力が加わっていた可能性がある。さらに、圧迫力だけでなく、下位腰椎への前方剪断力も本研究の結果に影響しているかもしれない^{2,25)}。また、自体重を用いた比較的低強度の体幹運動(体幹の屈曲、伸展、回旋)によって、すべての腰椎椎間板の水分量が減少したことが報告されている^{15,16)}。それゆえ、本研究においても第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙骨間の椎間板の水分量がスクワット運動によって一時的に減少し、それが有意なADC値の低下に繋がった可能性はあるだろう。

体幹筋の各横断面積ならびに総横断面積は、腰椎椎間板のADC値の変化率と有意な関係を示さなかった。体幹部の筋群は腰椎の安定をもたらす、動作中に腰椎へ加わるストレスの軽減に貢献すると考えられる^{12,26-29)}。それゆえ、腰椎の障害予防の観点から、体幹部のトレーニングを通じて、体幹筋のサイズの拡大を図ることが多い¹²⁾。しかしながら、本研究において体幹筋群の肥大がスクワット動作中の腰椎椎間板へのストレス軽減に繋がることを示唆する結果は得られなかった。体幹筋群は腰椎の前後方向ならびに左右方向への安定性には貢献するものの、高負荷スクワット運動中に生じる椎間板への軸圧(圧迫力)の軽減には大きく貢献しない可能性がある²⁹⁾。また、腰椎の分節的安定性には、腹横筋や多裂筋などの深層筋が重要であるという報告もある^{26,27)}。それゆえ、動作中の腰椎の安定性を評価するには、腹直筋や脊柱起立筋のような浅層筋よりも深層筋に着目する必要があるかもしれない(本研究では、画像解像度の点から腹横筋の横断面積を単独で計測することができなかった)。

加えて、腰椎前弯角度は腰椎椎間板のADC値の変化率と有意な関係を示さなかった。個人の有する腰椎前弯角度は安静時ならびに動作時における腰椎への圧迫力や剪断力(前後方向)の分布に影響することが実証されている⁷⁻¹¹⁾。スクワット

時の腰椎前弯角度の維持は、腰椎に作用する剪断力に抵抗すること²⁵⁾や腰椎椎間板の前方領域に過剰な圧迫力が加わることを防ぐこと⁷⁾に貢献している。この腰椎の前弯角度は、体重の50%程度の軸圧をかけても変化しないことが報告されている³⁰⁾。その一方で、McKeanら⁵⁾は、体重の約50%に相当する重量を担いだけで、腰椎は屈曲側に傾くことを報告している。本研究では体重と同程度の負荷を使用したため、スクワット時に腰椎のアライメントが屈曲側に变化した可能性はある。しかしながら、そのことに関しては不明である。本研究では、個人の有する腰椎前弯角度とスクワット運動による腰椎椎間板への力学的ストレスとの間に関連性を認めなかったが、今後はスクワット動作中の腰椎前弯角度の変化の観点から両者の関連性を検討する必要があるだろう。

さらに、下肢柔軟性も腰椎椎間板のADC値の変化率と有意な関係を示さなかった。スクワットは多関節動作のため、腰椎の挙動は、股関節や膝関節、足関節の動きと連動性を有することが報告されている^{2, 4, 5, 13, 14, 23, 31-34)}。股関節屈曲の柔軟性が乏しいと、スクワットのボトムポジションで骨盤の後傾が目立ちやすいことが示唆されている^{5, 14)}。骨盤の後傾は腰椎の屈曲を引き起こし、それが椎間板へのストレスを高めることが報告されている^{2, 9, 31, 35)}。しかしながら、本研究において股関節の屈曲可動域はスクワット運動における腰椎椎間板への力学的ストレスと負の関連性を示さなかった。一つの仮説として、両者の関連性は、パラレルスクワットよりもスクワットの深度を高めたフルスクワットで明確になるかもしれない。

多くの指導現場では、パラレルスクワットは下肢の筋肥大や筋力強化に効果的であると考えられている。その一方で、パラレルスクワットは下位腰椎の椎間板に力学的ストレスを与えやすいことを念頭に置くべきである。とりわけ、第4-5腰椎間ならびに第5腰椎-仙椎間の椎間板は変性や

ヘルニアを起こしやすい^{36, 37)}ことから、高重量を用いたパラレルスクワットの繰り返しは下位腰椎椎間板の障害発現リスクを高めるかもしれない。それゆえ、高重量を用いたパラレルスクワットは、適切なフォームで実施することはもとより、個人のコンディションを十分に配慮した上で実施することが求められるだろう。

4. 結 論

高負荷スクワット運動は、下位の腰椎椎間板に力学的なストレスを与えやすいことが明らかになった。その一方で、その力学的ストレスは、個人の有する腰椎前弯角度、体幹筋サイズ、そして下肢の柔軟性と関連性を有さないと考えられる。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Kuo C.S., Hu H.T., Lin R.M., Huang K.Y., Lin P.C., Zhong Z.C., et al. Biomechanical analysis of the lumbar spine on facet joint force and intradiscal pressure - a finite element study., *BMC musculoskeletal disorders.*, 11:151 (2010)
- 2) Cappozzo A., Felici F., Figura F., Gazzani F., Lumbar spine loading during half-squat exercises., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17 (5) :613-20(1985)
- 3) Oshikawa T., Morimoto Y., Kaneoka K., Lumbar lordosis angle and trunk and lower-limb electromyographic activity comparison in hip neutral position and external rotation during back squats., *J. Phys. Ther. Sci.*, 30 (3) :434-8(2018)
- 4) Hebling Campos M., Furtado Alaman L.I., Seffrin-Neto A.A., Vieira C.A., Costa de Paula M., Barbosa de Lira C.A., The geometric curvature of the lumbar spine during restricted and unrestricted squats., *J. Sports Med. Phys. Fitness.*, 57 (6) :773-81(2017)
- 5) McKean M.R., Dunn P.K., Burkett B.J., The lumbar and sacrum movement pattern during the back squat exercise., *J. Strength Cond. Res.*, 24 (10) :2731-41

- (2010)
- 6) Moradi V., Memari A.H., ShayestehFar M., Kordi R., Low back pain in athletes is associated with general and sport specific risk factors: A comprehensive review of longitudinal studies., *Rehabil. Res. Pract.*, 2015:850184(2015)
 - 7) Keller T.S., Colloca C.J., Harrison D.E., Harrison D.D., Janik T.J., Influence of spine morphology on intervertebral disc loads and stresses in asymptomatic adults: implications for the ideal spine., *Spine. J.*, 5 (3) :297-309(2005)
 - 8) Hebling Campos M., Furtado Alaman L.I., Seffrin-Neto A.A., Vieira C.A., Costa de Paula M., Barbosa de Lira C.A., The geometric curvature of the lumbar spine during restricted and unrestricted squats., *J. Sports Med. Phys. Fitness.*, 57 (6) :773-81(2017)
 - 9) Adams M.A., Hutton W.C., The effect of posture on the lumbar spine., *J. Bone Joint Surg. Br.*, 67 (4) :625-9(1985)
 - 10) Bae T.S., Mun M., Effect of lumbar lordotic angle on lumbosacral joint during isokinetic exercise: a simulation study., *Clin. Biomech.*, 25 (7) :628-35(2010)
 - 11) Shirazi-Adl A., Parnianpour M., Effect of changes in lordosis on mechanics of the lumbar spine-lumbar curvature in lifting., *J. Spinal. Disord.*, 12 (5) :436-47(1999)
 - 12) Shahtahmassebi B., Hebert J.J., Stomski N.J., Hecimovich M., Fairchild T.J., The effect of exercise training on lower trunk muscle morphology., *Sports Med.*, 44 (10) :1439-58(2014)
 - 13) Fuglsang E.I., Telling A.S., Sorensen H., Effect of ankle mobility and segment ratios on trunk lean in the barbell back squat., *J. Strength Cond. Res.*, 31 (11) :3024-33(2017)
 - 14) Mata A.J., Hayashi H., Moreno P.A., Dudley R.I., Sorenson E.A., Hip flexion angles during supine range of motion and bodyweight squats., *Int. J. Exerc. Sci.*, 14 (1) :912-8(2021)
 - 15) Yamabe D., Murakami H., Chokan K., Endo H., Oikawa R., Sawamura S., et al., Evaluation of water content in lumbar intervertebral discs and facet joints before and after physiological loading using T2 mapping MRI., *Spine.*, 42 (24) :E1423-E8(2017)
 - 16) Chokan K., Murakami H., Endo H., Mimata Y., Yamabe D., Tsukimura I., et al., Evaluation of water retention in lumbar intervertebral disks before and after exercise stress with T2 mapping., *Spine.*, 41 (7) :E430-6(2016)
 - 17) Ludescher B., Effelsberg J., Martirosian P., Steidle G., Markert B., Claussen C., et al., T2- and diffusion-maps reveal diurnal changes of intervertebral disc composition: an in vivo MRI study at 1.5 Tesla., *J. Magn. Reson. Imaging.*, 28 (1) :252-7(2008)
 - 18) Eyre D.R., Biochemistry of the intervertebral disc., *Int. Rev. Connect. Tissue. Res.*, 8:227-91(1979)
 - 19) Alkalay R.N., Burstein D., Westin C.F., Meier D., Hackney D.B., MR diffusion is sensitive to mechanical loading in human intervertebral disks ex vivo., *J. Magn. Reson. Imaging.*, 41:654-64(2015)
 - 20) Drew S.C., Silva P., Crozier S., Percy M.J., A diffusion and T2 relaxation MRI study of the ovine lumbar intervertebral disc under compression in vitro., *Phys. Med. Biol.*, 49 (16) :3585-92(2004)
 - 21) Wang N., Wang D., Wang F., Tan B., Yuan Z., Evaluation of degenerative lumbar scoliosis after short segment decompression and fusion., *Medicine (Baltimore)*, 94 (47) :e1824(2015)
 - 22) Kocyigit B.F., Berk E., Comparison of lumbosacral alignment in geriatric and non-geriatric patients suffering low back pain., *Pak. J. Med. Sci.*, 34 (2) :282-7(2018)
 - 23) Hartmann H., Wirth K., Klusemann M., Analysis of the load on the knee joint and vertebral column with changes in squatting depth and weight load., *Sports Med.*, 43 (10) :993-1008(2013)
 - 24) Clark D.R., Lambert M.I., Hunter A.M., Muscle activation in the loaded free barbell squat: a brief review., *J. Strength Cond. Res.*, 26 (4) :1169-78(2012)
 - 25) Potvin J.R., Norman R.W., McGill S.M., Reduction in anterior shear forces on the L4/L5 disc by the lumbar musculature., *Clin. Biomech.*, 6 (2) :88-96(1991)
 - 26) Hodges P., Richardson C., Jull G., Evaluation of the relationship between laboratory and clinical tests of transversus abdominis function., *Physiother. Res. Int.*, 1 (1) :30-40(1996)
 - 27) Imai A., Kaneoka K., Okubo Y., Shiina I., Tatsumura M., Izumi S., et al., Trunk muscle activity during lumbar stabilization exercises on both a stable and unstable surface., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 40

- (6) :369-75(2010)
- 28) Cholewicki J., Panjabi M.M., Khachatryan A., Stabilizing function of trunk flexor-extensor muscles around a neutral spine posture., *Spine.*, **22** (19) :2207-12(1997)
- 29) Gardner-Morse M.G., Stokes I.A., The effects of abdominal muscle coactivation on lumbar spine stability., *Spine.*, **23** (1) :86-91; discussion 91-2 (1998)
- 30) Kimura S., Steinbach G.C., Watenpaugh D.E., Hargens A.R., Lumbar spine disc height and curvature responses to an axial load generated by a compression device compatible with magnetic resonance imaging., *Spine.*, **26** (23) :2596-600 (2001)
- 31) Schoenfeld B.J., Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance., *J. Strength Cond. Res.*, **24** (12) :3497-506(2010)
- 32) Yavuz H.U., Erdag D., Kinematic and electromyographic activity changes during back squat with submaximal and maximal loading., *Appl. Bionics. Biomech.*, 2017:9084725(2017)
- 33) Zawadka M., Smolka J., Skublewska-Paszowska M., Lukaszik E., Gawda P., How are squat timing and kinematics in the sagittal plane related to squat depth?, *J. Sports Sci. Med.*, **19** (3) :500-7(2020)
- 34) Sung P.S., A compensation of angular displacements of the hip joints and lumbosacral spine between subjects with and without idiopathic low back pain during squatting., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **23** (3) :741-5(2013)
- 35) McGill S.M., Hughson R.L., Parks K., Changes in lumbar lordosis modify the role of the extensor muscles., *Clin. Biomech.*, **15** (10) :777-80(2000)
- 36) Hangai M., Kaneoka K., Hinotsu S., Shimizu K., Okubo Y., Miyakawa S., et al., Lumbar intervertebral disk degeneration in athletes., *Am. J. Sports Med.*, **37** (1) :149-55(2009)
- 37) Suthar P., Patel R., Mehta C., Patel N., MRI evaluation of lumbar disc degenerative disease., *J. Clin. Diagn. Res.*, **9** (4) :TC04-9(2015)