

ウェアラブルセンサーを用いた バスケットボール競技中の膝関節衝撃負荷の解明

	東北福祉大学	横山 寛子
(共同研究者)	弘前大学医学部 附属病院	逸見 瑠生
	同	千々松 雅人
	弘前大学	津田 英一

Evaluation of Knee Impact Loads During Basketball Using Wearable Sensors

by

Hiroko Yokoyama

Tohoku Fukushi University

Rui Henmi, Masato Chijimatsu

Hirosaki University Hospital

Eiichi Tsuda

Hirosaki University

ABSTRACT

The purpose of this study was to quantitatively evaluate knee impact loads during basketball practice using wearable inertial sensors and to investigate differences between the dominant and non-dominant limbs in high school female basketball players.

Eight female players (15 ± 0 years) from the same team participated. During 3-on-3 or 4-on-4 practice sessions, inertial sensors (BlueTrident IMU, VICON) were affixed bilaterally over the tibial tuberosity to record acceleration. Composite acceleration exceeding 20G was defined as a high-impact movement. The total count and frequency per minute of high impact were calculated for both limbs. Simultaneously, video

recordings were used to categorize high-impact events into stops, sprints, decelerations, side-steps, and other movements. Statistical comparisons between dominant and non-dominant limbs were performed using the Wilcoxon signed-rank test ($p < 0.05$).

The median frequency of high-impact events per minute was 14.0 (0.0–41.3) for the dominant limb and 18.2 (0.0–40.2) for the non-dominant limb, with no significant differences. Among movement categories, stops, sprints, and decelerations accounted for the highest frequencies of high-impact movements on both limbs. These findings suggest that rapid acceleration and deceleration typical of basketball induce substantial knee impact loads, yet no clear limb dominance was evident in high-impact frequency. Future research should examine the relationship between high-impact thresholds and anterior cruciate ligament injury risk.

キーワード

慣性センサー, 膝関節衝撃, 加速度, バスケットボール, 膝前十字靭帯損傷

Keyword

IMUs, knee impact, acceleration, basketball, ACL injury

要 旨

本研究の目的は、高校生女子バスケットボール選手を対象に、ウェアラブル慣性センサーを用いて競技中に膝関節に生じる衝撃を定量的に評価し、利き脚と非利き脚における特徴を明らかにすることである。対象は高校生女子バスケットボール選手8名とし、3対3または4対4の練習中に両側脛骨粗面部に慣性センサーを装着して加速度を測定した。合成加速度が20Gを超える動作を高衝撃動作と定義し、その発生回数およびプレータイム1分あたり頻度を算出した。統計学的解析として高衝撃動作をストップ、スプリント、減速などに分類し、その頻度を利き脚・非利き脚で比較した。利き脚と非利き脚で高衝撃動作の頻度に有意差はなく、両側ともストップ、スプリント、減速に高衝撃動作が多くみられた。本研究によりバスケットボール中の高衝撃動作について、利き脚および非利き脚における片側優位性は認められな

かったが、バスケットボール特有の急激な加速・減速動作において膝関節衝撃を増大させることが示唆された。

諸 言

膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament; 以下, ACL) 損傷は代表的なスポーツ外傷の一つである。バスケットボール競技ではストップ、着地動作、方向転換動作、踏み込み動作といった急激な加速・減速を伴う動作において高頻度に非接触型損傷が発生することが報告されている^{1,2)}。ACL損傷のメカニズムとしては大腿脛骨関節外側コンパートメントに圧迫力が生じることで脛骨の内旋と前方移動が起り、ACLの断裂へ至ること³⁾が報告されている。着地動作時における脛骨近位への長軸方向の圧迫力は垂直床反力と相関があることから⁴⁾、ストップ動作や着地動作時に加わる膝関節への大きな衝撃力はACL損傷のリスクと考えられる。

近年、慣性センサーの小型化や高機能化が進み、身体各部位に装着してもスポーツ動作を妨げない形状のさまざまなウェアラブルセンサーが開発されている。体幹や四肢に装着したセンサーで加速度を測定することで、競技中の身体各部位にかかる衝撃力や外的負荷を定量的に評価し、選手の練習量・練習内容の調整やスポーツ外傷予防に活用されている⁵⁻⁷⁾。衝撃力は質量と加速度の積で表されるため、動作中の加速度が大きいほど衝撃力も大きいと考えられる。慣性センサーで測定された着地動作やカッティング動作時の脛骨近位部加速度は床反力⁸⁾や膝関節外反モーメント⁹⁾と関連するため、慣性センサーを用いた脛骨近位部加速度測定はバスケットボール競技中に膝関節へ加わる衝撃の評価に有用と考えられる。

バスケットボール選手を含めスポーツ選手には利き手・利き脚などの片側優位性が存在し¹⁰⁾、ジャンプ、方向転換、スプリントなどの各パフォーマンステストにおいて非対称のある選手は傷害発生率が高いことが報告されている¹¹⁾。また、利き脚と非利き脚間には着地時の膝関節外反角度、膝関節外反モーメント、着地衝撃の非対称があり^{12,13)}、特に女性は男性と比べて片側優位性が強いとの報告もある¹⁴⁾。これらの報告は動作課題ごとの報告であるが、実際の競技中においても膝関節に加わる衝撃やその頻度に片側優位性があれば、より衝撃を受けやすい側の膝関節でACL損傷リスクが増大するのではないかと推察される。永野ら⁵⁾の報告では上背部に装着した慣性センサーで測定した体幹加速度を用いて、バスケットボール競技中の身体衝撃の特徴について検討し、ACL損傷好発動作である減速、方向転換、ストップ、着地において高衝撃動作が高頻度にみられた。これはあくまで体幹部が受ける衝撃力を反映したものと考えられ、実際の競技場面において大きな衝撃を膝関節が受ける頻度や、利き脚および非利き脚の特徴については明らかになっていない。

本研究の目的は高校生女子バスケットボール選手を対象に、実際の競技中に膝関節に加わる衝撃をウェアラブル慣性センサーで定量評価し、衝撃の大きい動作やその頻度、および利き脚・非利き脚の特徴を明らかにすることである。

1. 研究方法

1.1 対象

本研究では同一チームに所属する高校生女子バスケットボール選手8名(年齢 15 ± 0 歳, 身長 160.5 ± 4.9 cm, 体重 52.8 ± 5.7 kg)を対象とした。過去に半月板損傷や靭帯損傷などの重篤な膝関節外傷の既往、または下肢手術歴のある選手は除外した。対象者および保護者には研究目的・方法について書面を用いて説明し、署名による同意を得た。本研究は弘前大学大学院医学研究科倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号: 2023-154)。

1.2 膝関節衝撃評価方法

膝関節衝撃評価にはウェアラブル9軸慣性センサー(BlueTrident IMUセンサー, VICON社製)を用い、脛骨近位部の加速度を測定した(サンプリング周波数1600 Hz, 測定範囲 ± 200 G)。両側脛骨粗面上に伸縮性のあるテーピングテープでセンサーを固定し(図1)、その上から膝用サポーター(ザムスト Bodymate ヒザ, 日本シグマックス社製)を装着して、センサーと皮膚とのずれを



図1 センサーの固定位置

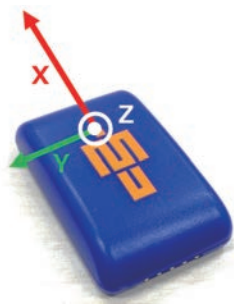


図2 センサーの軸方向

抑制した。x軸を上下方向（重力方向）、y軸を内外側方向、z軸を前後方向と設定した（図2）。

対象選手が競技中に行った動作を同定できるように、iPad mini（第6世代、Apple社製）のカメラを用いて対象選手を追跡しながら動画を撮影した（フレームレート24fps）。加えて、対象選手がコート上で他選手により隠れた場合に備え、コート全体が見通せる体育館2階からもビデオカメラ（GoPro HERO12, GoPro社製）で撮影した（フレームレート100fps）。測定開始時には対象選手がその場でジャンプ着地動作を行った様子をiPad miniで撮影し、その着地動作を基準に加速度データと動画データを測定後に同期させた。

1. 3 測定課題

対象選手は脛骨近位部にセンサーを装着し、体育館で行われたチームの通常練習に参加し加速度を記録した。解析対象の測定課題は実践的な練習である3対3もしくは4対4とした。これらの練習ではバスケットボールコート全面を使用し、攻撃と守備を各1回行い、休憩を挟みながら3～5回繰り返された。8名の測定はそれぞれ別日の練習において実施した。

1. 4 高衝撃動作の分類

本研究ではレイアップシュートが得意な手を利き手と定義し、利き手と同側の脚を利き脚、反対側を非利き脚と定義した。測定した脛骨近位部の

デサントスポーツ科学 Vol. 47

加速度データは解析前に1000 Hzにリサンプリングした。その後、各軸方向の成分加速度（x: x軸加速度、y: y軸加速度、z: z軸加速度）から合成加速度を下記の式で算出した。

$$\text{合成加速度} = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

合成加速度が20 Gを超える動作場面を「高衝撃動作」と定義し^{6,7)}、3対3もしくは4対4中の高衝撃動作の発生回数を利き脚・非利き脚でそれぞれカウントした。同期された動画を参照し、先行研究⁵⁾を参考に作成した動作分類に従い、高衝撃動作を分類した（表1）。1回の着地やストップ、ステップを1動作と換算した。動作分類は1名の検者が行った。

表1 バスケットボール競技中の動作の分類

動作の種類		
減速	踏み込み	加速
ストップ	スプリント	ドライブ
着地	サイドステップ	身体接触
テイクオフ	バックステップ	その他
方向転換	その他ステップ	不明

1. 5 Impact Loadおよび高衝撃動作頻度

ボールの保持に関わらず、対象選手がコート内でプレーしている時間を「プレータイム」として測定中の動画から計測した。プレー中の膝関節への累積衝撃負荷としてCatapult社のPlayer LoadTM計算式^{15, 16)}を参考にImpact Load (arbitrary unit : AU) を次項の式で算出した。Player LoadTMは胸背部に装着したセンサーの加速度データから算出する値である。

Impact Load

$$= \sum_{i=0}^n \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{100}$$

x_i, y_i, z_i : 時間*i*における各成分加速度 (G)

n : サンプリング回数

Impact Loadはプレータイムで正規化し、1分あたりのImpact Loadを算出した。また、利き脚・非利き脚それぞれにおける高衝撃動作の発生回数(回)と、プレータイム1分あたりの高衝撃動作発生頻度(回/分)を算出した。

1. 6 統計学的解析

統計学的解析にはRコマンダー 4.4.2 (Windows版)を用いた。プレータイム1分あたりのImpact Load、プレータイム1分あたりの高衝撃動作の頻度(回/分)、動作別のプレータイム1分あたりの高衝撃動作頻度(回/分)について、Wilcoxonの符号付順位和検定を用いて利き脚・非利き脚間で比較した。有意水準は5%とした。

2. 研究結果

対象選手3名は3対3における脛骨近位部加速度を、5名は4対4における脛骨近位部加速度を解析に用いた。

2. 1 プレータイムおよびImpact Load

各選手のプレータイムおよびImpact Loadを表2に示す。Impact Loadにおいて利き脚・非利き脚間に有意差は認められなかった($p < 0.05$)。

2. 2 高衝撃動作の発生回数および頻度

対象者8名中7名から合成加速度が20Gを超える高衝撃動作が抽出された。全選手の高衝撃動作の合計回数および動作別の合計回数と、1分あたりの高衝撃動作の発生頻度を表3に示す。1分あたりの高衝撃動作の動作別発生頻度については図

3に示す。利き脚と非利き脚の間にいずれの項目においても有意差は認められなかった($p < 0.05$)。

3. 考 察

3. 1 膝関節高衝撃動作の特徴について

合成加速度20Gを超えた高衝撃動作のうち、特に高頻度に抽出された上位3つの動作は「ストップ」、「スプリント」、「減速」であった。バスケットボールは急加速や急減速による速い展開が魅力的な競技である。永野ら⁵⁾はバスケットボール競技中の体幹加速度データから4G以上の高衝撃動作を抽出し、「減速」、「方向転換」、「ストップ」、「着地」が高頻度に発生する高衝撃動作として報告している。本研究においてもACL損傷の好発動作である「ストップ」と「減速」^{1,2)}が膝関節高衝撃動作として高頻度で抽出され、バスケットボールにおける急減速が特に膝関節への衝撃を増大させると考える。

一方で、本研究ではACL損傷受傷機転としては少ない「スプリント」で膝関節高衝撃動作の頻度が高かった。ランニングでは走行速度が上がるにつれて脛骨加速度が増大する¹⁷⁾。今回の測定課題がトランジションを求められる3対3および4対4の練習であり、攻守が切り替わった際には反対側のコートへ素早く走る必要がある。このような練習では「スプリント」そのものが高頻度で発生し、結果的に高衝撃動作として「スプリント」が高頻度に抽出されたと考えられる。

ACL損傷好発動作である「着地」の頻度については、本研究では脛骨近位部加速度が20Gを超える着地頻度は0.3 - 0.8回/分であった。一方で

表2 プレータイムとImpact Load:中央値(最小値-最大値)

プレータイム (分)	Impact Load (AU)		プレータイム1分あたりの Impact Load (AU)	
	非利き脚	利き脚	非利き脚	利き脚
2.142 (1.817-3.067)	247.8 (69.1-327.2)	253.2 (61.2-327.0)	102.6 (27.6-154.9)	101.8 (24.5-153.1)

表3 高衝撃動作の全選手の合計回数と頻度:中央値(最小値-最大値)

	高衝撃動作の合計回数(回)		1分あたりの高衝撃動作の頻度 (回/分)	
	非利き脚	利き脚	非利き脚	利き脚
高衝撃動作すべて	267	275	18.2 (0.0-40.2)	14.0 (0.0-41.3)
ストップ	57	43	3.6 (0.0-8.8)	3.3 (0.0-7.2)
スプリント	65	58	2.8 (0.0-11.6)	3.0 (0.0-9.9)
減速	32	29	1.7 (0.0-6.1)	1.9 (0.0-4.4)
サイドステップ	24	26	1.1 (0.0-5.5)	1.1 (0.0-6.6)
その他ステップ	15	27	1.1 (0.0-2.2)	0.8 (0.0-7.7)
方向転換	20	16	0.8 (0.0-4.4)	1.1 (0.0-2.8)
加速	18	21	0.8 (0.0-3.9)	0.8 (0.0-4.4)
着地	13	9	0.8 (0.0-2.2)	0.3 (0.0-2.2)
踏み込み	9	6	0.3 (0.0-2.8)	0.3 (0.0-1.1)
ドライブ	9	8	0.0 (0.0-2.8)	0.3 (0.0-2.8)
バックステップ	7	7	0.3 (0.0-2.2)	0.0 (0.0-1.7)
テイクオフ	5	3	0.3 (0.0-1.1)	0.0 (0.0-0.6)
身体接触	4	3	0.3 (0.0-0.6)	0.0 (0.0-1.1)
その他	5	3	0.0 (0.0-1.1)	0.0 (0.0-0.6)

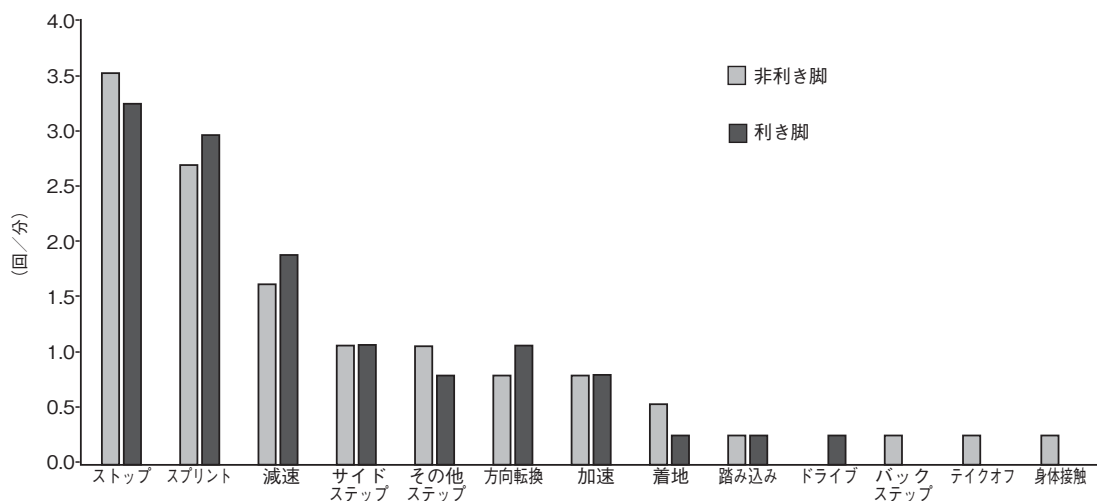


図3 1分あたりの高衝撃動作の頻度

永野ら⁵⁾は、体幹加速度が4G以上の着地頻度は1.5回/分と報告しており、頻度に違いがみられた。慣性センサー装着部位が異なることや、高衝撃動

作の基準が異なることなど、「着地」における高衝撃動作のカウント方法の違いに加え、対象の競技カテゴリーや測定した練習形式、選手のプレー

スタイルの違いが影響している可能性がある。

本研究では膝関節高衝撃動作における合成加速度の閾値として先行研究^{6,7)}を参考に20Gを用いたが、この閾値を超える動作の頻度とACL損傷発生との関係は明らかではない。しかしながら、着地動作時の床反力や膝関節外反モーメントの増大はACL損傷を予測すること¹⁸⁾から、膝関節へより大きな衝撃が繰り返し加わることは、ACL損傷リスクを高めるものと考えられる。今後は高衝撃動作の閾値の妥当性やACL損傷発生との関係について検討する必要がある。

3. 2 Impact Loadと高衝撃動作の頻度

本研究においてはImpact Loadの大きさおよび、高衝撃動作の頻度に関して、利き脚と非利き脚の間に有意な差は認められなかった。男子プロバスケットボール選手を対象とした研究では、練習や試合において歩数や荷重負荷に左右差がないことが報告されている¹⁹⁾。本研究の測定課題である3対3や4対4のように、より実際の試合に近い形式の練習の場合では、選手の得意・不得意による動作の選択ではなく、次々に展開されるシチュエーションに応じて動作が選択される。そのため動作に極端な偏りが生じず、膝関節へ加わる衝撃も利き脚もしくは非利き脚の一方に集中することなく、Impact Loadや高衝撃動作の発生頻度に非対称を認めなかったと考えた。ジャンプ、着地、方向転換、スプリントなどの各課題動作においてはパフォーマンスや下肢の運動学・運動力学において左右非対称があるとされる^{12,13)}が、必ずしも実際の競技場面では各動作の頻度や累積衝撃負荷に差があるとは限らないことが示された。今後は実際の競技中の観察された動作ごとに、膝関節への衝撃の大きさを利き脚と非利き脚で検討する必要があると考えられる。

3. 3 本研究の限界と今後の課題

本研究ではいくつかの限界がある。1つ目は対象選手の測定を同日の同じ測定課題にて行うことができなかったことである。2つ目に3対3および4対4の練習形式に限定して膝関節衝撃の特徴を評価しており、実際の試合状況とは異なる状況でのデータ測定であったことである。3つ目に対象は高校生女子選手に限られており、性別や他年代における特性を考慮できていないため、競技特性全体を網羅しているとは言い難い。今後は対象範囲を拡大しポジションごとの動作特性や、ACL損傷既往歴のある選手との比較など、様々な条件での膝関節衝撃特性の検討が必要である。

4. 結 論

ウェアラブル慣性センサーを用いて高校生女子バスケットボール選手の競技中の膝関節衝撃を評価した。合成加速度が20 Gを超える高衝撃動作は「ストップ」、「スプリント」、「減速」などバスケットボール競技特性を反映する動作に高頻度でみられた。また、プレータイム1分あたりのImpact Loadおよび高衝撃動作の頻度には利き脚と非利き脚の間に有意差はなく、片側の優位性は認められなかった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、研究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) Heder Ternell K., Tosarelli F., Buckthorpe M., Samuelsson K., Hamrin Senorski E., Della Villa F., A Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Female Basketball Players., *Am. J. Sports Med.*, 53 (6): 1368-80 (2025)
- 2) Petway A.J., Jordan M.J., Epsley S., Anloague P., Rimer E., Mechanisms of Anterior Cruciate

- Ligament Tears in Professional National Basketball Association Players: A Video Analysis., *J. Appl. Biomech.*, **39** (3) : 143-50 (2023)
- 3) Koga H., Nakamae A., Shima Y., Iwasa J., Myklebust G., Engebretsen L., Bahr R., Krosshaug T., Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball., *Am. J. Sports Med.*, (11) : 2218-25 (2010)
 - 4) Shimokochi Y., Ambegaonkar J.P., Meyer E.G., Changing Sagittal-Plane Landing Styles to Modulate Impact and Tibiofemoral Force Magnitude and Directions Relative to the Tibia., *J. Athl. Train.*, **51** (9) : 669-81 (2016)
 - 5) 永野康治, 笹木正悟, 市川浩 : バスケットボール競技中における前十字靭帯損傷好発動作の抽出. *JOSKAS*, **45**: 655-59 (2020)
 - 6) Burland J.P., Outerleys J.B., Lattermann C., Davis I.S., Reliability of wearable sensors to assess impact metrics during sport-specific tasks., *J. Sports Sci.*, **39** (4) : 406-11 (2021)
 - 7) Keogh J.A.J., Ruder M.C., Masood Z., Kobsar D., The Ecological Validity of Countermovement Jump to On-Court Asymmetry in Basketball., *Sports Med. Int. Open.*, **6** (2) : E53-E59 (2022)
 - 8) Elvin N.G., Elvin A.A., Arnoczky S.P., Correlation between ground reaction force and tibial acceleration in vertical jumping., *J. Appl. Biomech.*, **23** (3) : 180-9 (2007)
 - 9) Ekdahl M., Ulman S., Butler L., Relationship of Knee Abduction Moment to Trunk and Lower Extremity Segment Acceleration during Sport-Specific Movements., *Sensors (Basel.)*, **24** (5) : 1454 (2024)
 - 10) Arboix-Alió J., Buscà B., Peralta-Geis M., Montalvo A.M., Fort-Vanmeerhaeghe A. The Relationship between Change-of-Direction Performance Indicators and Inter-Limb Asymmetries in Elite Youth Female Basketball Players., *J. Hum. Kinet.*, **96** (Spec Issue) : 235-46 (2025)
 - 11) Fort-Vanmeerhaeghe A., Milà-Villarroel R., Pujol-Marzo M., Arboix-Alió J., Bishop C., Higher Vertical Jumping Asymmetries and Lower Physical Performance are Indicators of Increased Injury Incidence in Youth Team-Sport Athletes., *J. Strength. Cond. Res.*, **36** (8) : 2204-2211 (2022)
 - 12) Morishige Y., Harato K., Kobayashi S., Niki Y., Matsumoto M., Nakamura M., Nagura T., Difference in leg asymmetry between female collegiate athletes and recreational athletes during drop vertical jump., *J. Orthop. Surg. Res.*, **14** (1) : 424 (2019)
 - 13) Aizawa J., Hirohata K., Ohji S., Ohmi T., Yagishita K., Limb-dominance and gender differences in the ground reaction force during single-leg lateral jump-landings., *J. Phys. Ther. Sci.*, **30** (3) : 387-92 (2018)
 - 14) Hewett T.E., Ford K.R., Hoogenboom B.J., Myer G.D., Understanding and preventing acl injuries: current biomechanical and epidemiologic considerations - update 2010., *N. Am. J. Sports Phys. Ther.*, **5** (4) : 234-51 (2010)
 - 15) Julien C., "What' s PLAYER LOAD?" Catapult 社 <https://support.catapultsports.com/hc/en-us/articles/360000510795-What-is-Player-Load> (閲覧日: 2025年6月4日)
 - 16) Nicoletta D.P., Torres-Ronda L., Saylor K.J., Schelling X., Validity and reliability of an accelerometer-based player tracking device., *PLoS One*, **13** (2) : e0191823 (2018)
 - 17) Sheerin K.R., Besier T.F., Reid D., The influence of running velocity on resultant tibial acceleration in runners., *Sports Biomech.*, **19** (6) : 750-60 (2020)
 - 18) Hewett T.E., Myer G.D., Ford K.R., Heidt R.S. Jr., Colosimo A.J., McLean S.G., van den Bogert A.J., Paterno M.V., Succop P., Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study., *Am. J. Sports Med.*, **33** (4) : 492-501 (2005)
 - 19) Ibáñez S.J., Pablo L.S., Víctor H.B., Sebastián F., "Is Basketball a Symmetrical Sport?" *Symmetry*, **15** (7) : 1336 (2023)