

令和 7 年 6 月 12 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2024

課題番号：20K12696

研究課題名（和文）骨振動信号を用いた腰椎分離症診断補助システムの開発

研究課題名（英文）Development of detecting system for lumbar spondylolysis using vibration signal analysis.

研究代表者

渡邊 裕之（Watanabe, Hiroyuki）

北里大学・医療衛生学部・准教授

研究者番号：40348602

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,400,000円

研究成果の概要（和文）：試験的に作成した腰椎分離症を検出するためのハンマリングシステムの安全性と検出感度を向上するため、システムを新たに開発した。新しく開発した音振判定システムは、解析手法をWavelet時間周波数解析に変更して骨内を伝搬する信号のみを検出した。人工骨モデルによる評価では正常と比較して100%分離症例で有意なパワーの減少が観察された。さらに腰椎分離症を有する患者を対象に音振判定システムを適応させたところ、人工骨と同様の結果が認められた。本音振判定システムは生体に対しても十分な検出感度を有することが考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腰椎分離症はスポーツ傷害の一種であるが、主たる症状となる腰痛は初期においてスポーツ活動の高い運動量となる一瞬である。このため多くのスポーツ選手は、症状の増悪する進行期まで医療機関を受診することは少ない。腰椎分離症は進行に伴い、分離部の癒合の割合が減少するため、残存した腰椎分離症は成人期には腰痛が慢性化するだけでなく腰椎分離症へと進行し重度化する可能性がある。したがって、早期に腰椎分離症を発見し癒合を期待することができれば成人期に腰痛による社会的生産性を減弱することを抑制することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：To enhance the safety and detection sensitivity of an experimental hammering system developed for identifying lumbar spondylolysis, we redesigned and newly developed the system. The newly developed acoustic-vibration diagnostic system employs wavelet time-frequency analysis as its signal processing method, allowing for the detection of signals propagating exclusively within the bone. Evaluation using an artificial bone model demonstrated a significant reduction in signal power in spondylolysis cases compared to normal cases. Furthermore, when the system was applied to patients with lumbar spondylolysis, results consistent with those obtained from the artificial bone model were observed. These findings suggest that the acoustic-vibration diagnostic system possesses sufficient detection sensitivity for application to living subjects.

研究分野：スポーツ医学

キーワード：腰椎分離症 成長期 生体信号 ウェーブレット

1. 研究開始当初の背景

生体に様々な振動信号を与えて、組織の器質的变化の情報を探取する試みは古くから行われてきた。代表的な振動信号による判定方法は音叉 (Tuning fork) を用いた骨折の判別である。音叉を患部にあてて疼痛の有無による判定や、骨折部から離れた位置に振動させた音叉をあて、骨折による信号強度減衰から判定した。音叉による骨折の判定は感度が 75 ~ 92%、特異度が 18 ~ 94%、陽性尤度比が 1.1 ~ 16.5、陰性尤度比が 0.09 ~ 0.49 であった。感度は高いものの特異度が低く、偽陽性の可能性が否定できない。しかしながら、多くの骨折の所見は明らかな疼痛を有することが多く、音振判定システムに頼らざるとも医療機関への受診動機は十分に存在すると思われる。しかしながら、腰椎分離症の早期ではスポーツ活動の一部 (高強度活動) で腰痛の出現が認められるものの、日常生活では障害を与えるほどの腰痛に至ることは少ない。さらに腰椎疲労骨折は特徴的な身体所見が少ないとする報告もあるため、積極的に医療機関を勧めるタイミングの判断も困難である。このため医療機関を受診するタイミングが遅れ、増悪した状態での受診となることが散見される。

西良らによると腰椎分離症の発症率は男性で 7.9%、女性で 3.9% である。一方、競技別ではサッカーが最も頻度が高く、中学サッカークラブチームのメディカルチェックの結果では実に 70.6% に腰椎椎弓根部の高輝度変化が観察された報告がある。椎弓根部の輝度変化については経過観察により輝度の可逆的な消退も観察され、必ずしも疲労骨折へと発展するとは限らないが予備軍としての可能性を有している。また、腰椎分離症の癒合割合は初期では約 3 ヶ月で 90% 以上の癒合割合であるが、進行期例では約 6 ヶ月を必要とし、かつ癒合割合も約 60% に低下する。したがって、腰椎分離症は早期に発見し、速やかに癒合のための治療を開始することが重要である。

そこで我々は腰椎棘突起を硬質ゴムハンマーで叩打し、ハンマーに設置した加速度センサーにより脊椎内を反射した振動信号を受波する音振判定システムを開発した (図 1)。受波された振動信号は FFT による周波数解析が行われ、平均パワー周波数の低下や周波数帯域の減衰から椎弓部の損傷は周波数特性として低周波シフトすることが考えられた。しかしながら、硬質ゴムによる叩打は疼痛を伴い、周波数帯域の変動をリアルタイムに捉えることが困難なため、さらなる改善が必要であった。今回、株式会社エルメックとの共同開発により、叩打装置の刺激強度の低下と周波数解析を時間帯で解析可能な Wavelet 時間周波数解析を導入するに至った。

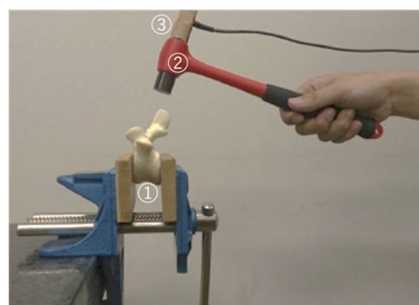


図 1 硬質ゴムハンマーを利用した叩打システム
①人工骨、②硬質ゴムハンマー
③加速度センサー

2. 研究の目的

1) 第 1 実験：人工骨を用いた腰椎分離症モデルの作成

本研究の目的は新たな周波数解析手法である Wavelet 時間周波数解析を用いて人工骨による腰椎分離症モデルに対する判別精度を検証すること。

2) 第 2 実験：腰椎分離症 (生体) を用いて音振判定システムの検証

腰椎分離症 (生体) を用いて音振判定システムによる判別精度を検証すること。

3. 研究の方法

1) Wavelet 時間周波数解析を用いた音振判定システムの開発

骨折に対する音信判定システムは画像診断装置の発展・普及した現状では有用性は低いと考えられる。しかしながら、早期腰椎分離症では自覚症状に依存して医療機関への受診を期待することが困難である。そこで我々は腰椎分離症を早期に検出するための音振判定システムを株式会社エルメックと共同開発した(図2)。音振判定システムは医療機関に設置されている画像診断装置に比べて小型軽量であるため、成長期アスリートがスポーツを行なうスポーツ施設内で実施することが可能である。機器の構成は叩打機器、アンプ、PCのみである。叩打装置を腰椎棘突起にあて、叩打を行うと脊椎内を反射した振動信号を叩打装置内のコンデンサマイクロフォンが受波し、AD変換装置、アンプを介して信号を増幅しPC内に取り込まれる(図3)。デジタル化された振動信号に対してWavelet時間周波数解析を行い、時間あたりの周波数特性を算出した。

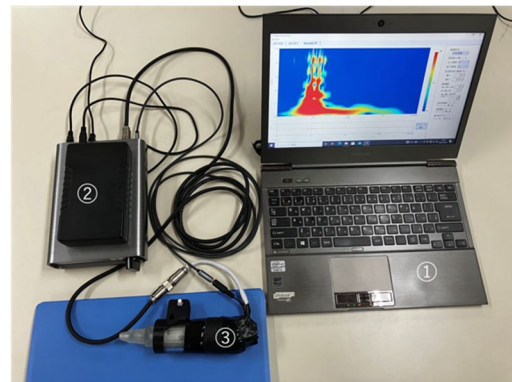


図2 音振判定システムの構成
①PC、②アンプ・AD変換装置、③叩打治具

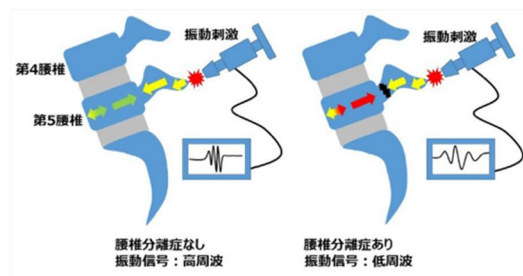


図3 腰椎分離症診断補助システムの原理

本研究は北里大学医療衛生学部研究倫理審査委員会の承認を得て実施した(承認番号 2016-036)

2) 第1実験: 人工骨を用いた腰椎分離症モデルの作成

試験実験において人工骨(SAW1352-10: SAWBONES USA)による腰椎分離症モデルを作成し、人工骨正常腰椎との比較を行った(図4)。人工骨は生体内環境を再現するため、ポリエチレンケースの底面にシリコンゴムを充填し、各脊椎を椎対が下面を向くように配置させ、フォーム剤を充填することで脊椎を安定させた。フォーム剤の硬化後に棘突起表面を厚さ5mmのシリコンゴムシートで覆うようにして皮膚組織を形成した(図5)。

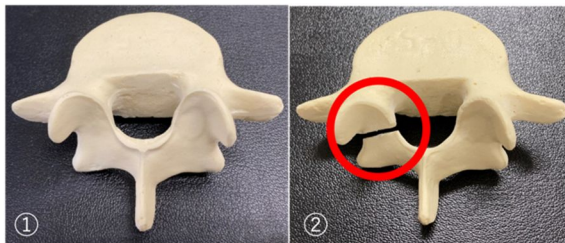


図4 人工骨を用いた腰椎分離症モデルの作成
①正常腰椎、②左腰椎関節突起間を完全分離

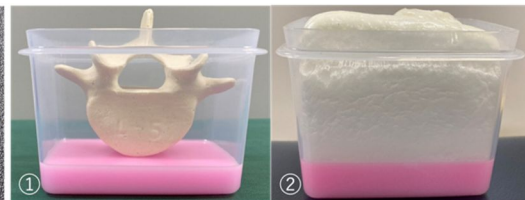


図5 人工骨による腰椎分離症モデルの作成
人工骨にスリットを入れた腰椎分離症モデル
①をフォーム剤で包埋②し、生体内環境を模倣した。

3) 第2実験: 腰椎分離症(生体)に対する音振判定システムの検証

症例供覧

症例は男性23歳で14歳頃に腰痛を認め近医を受診したところ、第5腰椎の腰椎分離症(両側分離)と診断された。その後経過観察していたが、現在まで腰痛を繰り返していた。

対象に対して新たに CR 画像を撮像し、第 5 腰椎の斜位像から第 5 腰椎左関節突起間部分離症（陳旧例）と診断された（図 6）。対象者の脊椎への叩打の際は腹臥位から両上肢下肢を屈曲位のうずくまる肢位を維持させた。第 5 腰椎棘突起を触知し、位置を確認した後に音振判定システムから 5 回叩打をおこなった。

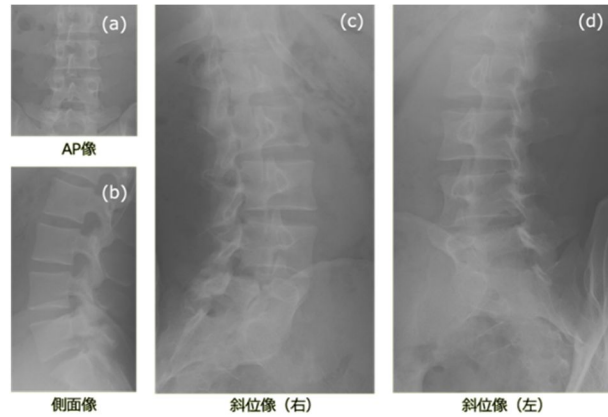


図 6 本症例の単純 X 線像
(a)AP 像、(b)側面像、(c)斜位像（右）、(d)斜位像（左）

4. 研究成果

1) 第 1 実験：人工骨を用いた腰椎分離症モデルの作成

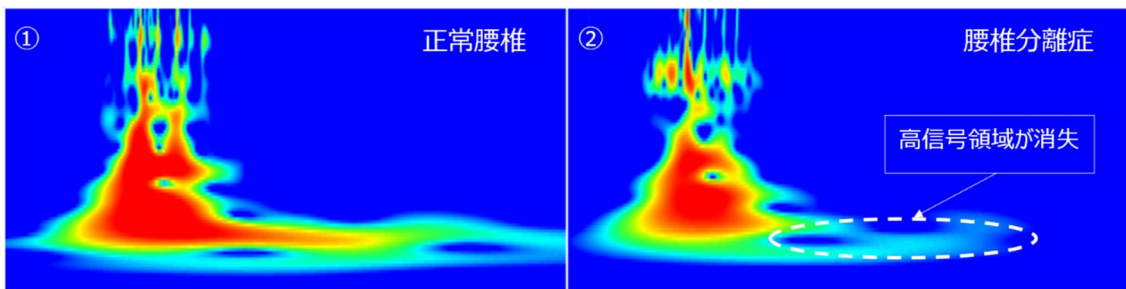


図 7 人工骨モデルによる音振判定システムの検査結果（Wavelet 解析）
正常腰椎 腰椎分離症モデルでは高信号領域が消失している

人工骨による正常腰椎では叩打後 40～75msec の 100Hz 付近に高信号を描出するのに対して椎弓根部にスリット入れた腰椎分離症モデルでは同周波数帯域付近に高信号が観察されなかった（図 7, 8）。椎弓の分離による振動信号の伝達に障害が発生し、周波数特性の変化が生じたと考えられた。つまり振動信号の椎弓通過の際に生じる骨の振動特性に変化が生じ、受波した周波数スペクトルに対しても変化を与えたと考えられた。

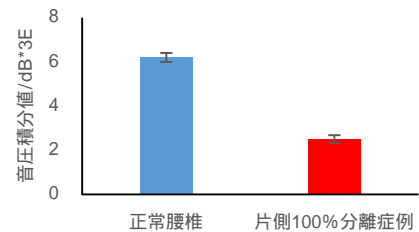


図 8 Wavelet 解析結果の 100Hz 付近の信号強度
正常腰椎では高い音圧信号が示されたのに対して腰椎分離症モデル（片側 100%分離）では減弱が示された。

また、人工骨による叩打実験を基盤として以下のパラメータを作成した。

・境界周波数

人工骨による腰椎分離症モデルを基盤に叩打後 80～100msec に観察される高信号領域の周波数帯域を境界周波数として設定した。

・境界周波数消失時間

境界周波数帯域における高信号領域の出現から消失するまでの時間を観察した。具体的には叩打後から消失までの時経過間とした。

2) 第 2 実験：腰椎分離症（生体）に対する音振判定システムの検証

腰椎分離症を有する生体への叩打後に脊椎内を反射受波した振動信号に対して時間周波数解析 (Wavelet 解析) を行い、周波数帯域の特性についてヒートマップを用いて示した。第 3~5 腰椎まで解析を行い、第 5 腰椎だけが腰椎分離症である。X 軸は時間、Y 軸は周波数、ヒートマップによる色調変化を信号強度とした。

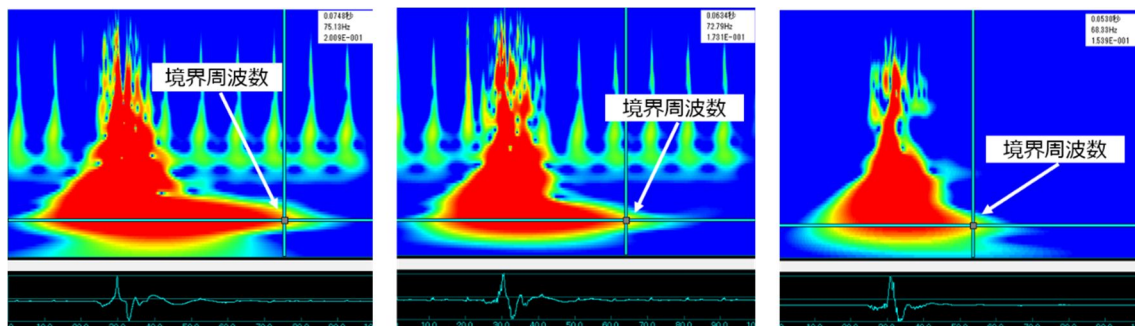


図 9 生体に対する音振判定システムの適応結果

叩打後に脊椎内を反射受波した振動信号に対して時間周波数解析 (Wavelet 解析) を行い、周波数帯域の特性をヒートマップを用いて示した。X 軸は時間、Y 軸は周波数、ヒートマップによる色調変化を信号強度とした。

L3 周波数解析結果：叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出されている。

L4 周波数解析結果：叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出されている。

L5 周波数解析結果：叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出されていない。

第 3 腰椎では周波数解析結果、叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出された。第 4 腰椎では周波数解析結果、叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出された。第 5 腰椎では周波数解析結果、叩打後 80 ~ 100msec 付近に高信号が検出されなかった (図 9)。

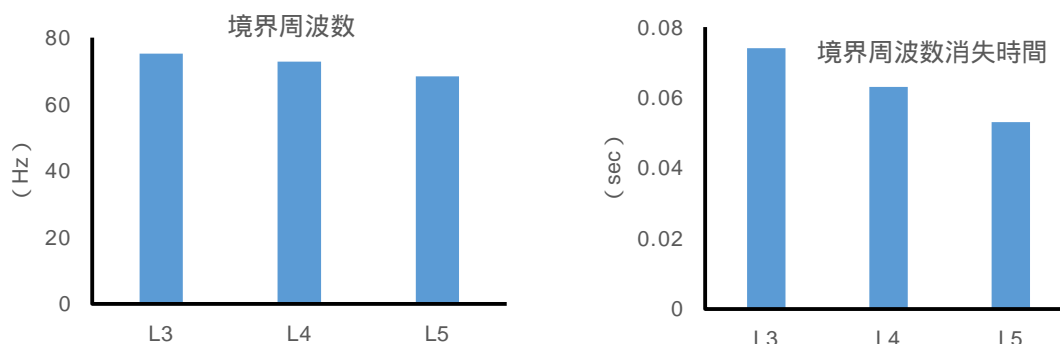


図 10 境界周波数の周波数帯域と消失までの時間

境界周波数：L3 ~ L5 まで 60 ~ 70Hz に集中していた。

境界周波数消失時間：L5 は L3、L4 に比較して低値を示した。

音振判定システム (Wavelet 解析) 適応後のヒートマップにおいて、十字線交叉部が分離所見を示す関心領域の境界周波数である。境界周波数は人工骨による分離モデルでは短期間に高信号領域の消失に伴って短縮し、正常モデルでは叩打後 0.08 ~ 0.1 秒前後まで検出された (図 10)。周波数帯域としては近似した値を示したことから、叩打後の後半に受波した信号は椎弓部の振動特性を表しているものと考えられる。

人工骨による腰椎分離症モデルで示された棘突起への叩打信号の解析結果と第 5 腰椎に分離症を有する生体の腰椎への叩打信号の解析結果は近似した値を示した。脊椎棘突起に与える骨叩打信号に対する時間周波数解析 (Wavelet 解析) を用いた腰椎分離症の判別は、生体にも適応できる可能性を有していると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawabata Masashi, Kumazawa Yusuke, Takagi Kazuya, Okada Hirokazu, Miyatake Kazuma, Kobayashi Takumi, Nanri Yuta, Kenmoku Tomonori, Watanabe Hiroyuki, Takahira Naonobu	4. 巻 13
2. 論文標題 Reliability and validity of ultrasonographic automated length measurement system for assessing talofibular anterior instability in acute lateral ankle sprain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3098 ~ 3098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-30079-z	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakata Jun, Ishikawa Hiroaki, Inoue Ryota, Urata Daigo, Ohinata Jun, Kimoto Takayuki, Nakamura Emi, Miyazaki Tetsuya, Matsui Tomoyuki, Watanabe Hiroyuki, Muraki Takayuki, Morimoto Mitsutoshi, Egawa Takuya, Kurokawa Daisuke, Furushima Kozo, Morihara Toru, Yamazaki Tetsuya, Yamamoto Noriaki	4. 巻 6
2. 論文標題 Physical functions, to be or not to be a risk factor for osteochondritis dissecans of the humeral capitellum?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JSES International	6. 最初と最後の頁 1072 ~ 1077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseint.2022.07.001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masuma Hiroyoshi, Kenmoku Tomonori, Saito Kazuo, Kawabata Masashi, Watanabe Hiroyuki, Miida Kazumasa, Onuma Kenji, Sukegawa Koji, Tazawa Ryo, Otake Yuya, Takaso Masashi	4. 巻 7
2. 論文標題 Evaluation of flexor digitorum superficialis function in adolescent baseball players	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSES International	6. 最初と最後の頁 143 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseint.2022.09.009	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 渡邊裕之、河端将司、高平尚伸	4. 巻 31
2. 論文標題 インターバルトレーニング中に 排出される飛沫・エアロゾル濃度の粒子径に よる違い	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本臨床スポーツ医学会誌	6. 最初と最後の頁 39 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Hiroyuki, Masuma Hiroyoshi, Kenmoku Tomonori, Kudo Hiroshi, Saito Kazuo, Nagami Tomoyuki, Sekita Junya, Matsunaga Atsuhiko	4. 巻 5
2. 論文標題 Increased medial laxity of the elbow in preadolescent baseball players with or without medial elbow apophysitis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JSES international	6. 最初と最後の頁 1119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseint.2021.07.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡邊裕之、河端将司、高平尚伸
2. 発表標題 振動信号を用いた腰椎分離症診断補助システムの開発 -生体への応用: シングルケーススタディ-
3. 学会等名 第35回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平岡龍大, 對比地優介, 河端将司, 内田悠登, 大井望咲, 加藤雄大, 茂木古遥, 渡邊勇人, 石井大輔, 見目智紀, 渡邊裕之, 高平尚伸
2. 発表標題 大腿近位部へのフロッシング介入が連続投球時のパフォーマンスに及ぼす効果 ~無作為化クロスオーバー比較試験~
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤雄大, 渡邊裕之, 河端将司, 高平尚伸, 内田悠登, 大井美咲, 對比地優介, 平岡龍大, 茂木古遥, 渡邊勇人
2. 発表標題 Wavelet時間周波数解析を用いた骨振動刺激信号の解析による 腰椎分離症診断補助機器の開発
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中尾健, 河端将司, 渡邊裕之, 津田 幸保, 岩間徹
2. 発表標題 スポーツリズムトレーニングは即時的に跳躍パフォーマンスを向上させる
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊裕之
2. 発表標題 成長期サッカー選手における片脚バランス能力と発育との関係
3. 学会等名 第33回日本成長学会学術集会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 石川 朗、木村雅彦、小林麻衣、玉木彰、安齋紗保理、海老名葵、小野玲、上出直人、神谷健太郎、河野裕治、柴喜嵩、堀田一樹、本橋隆子、渡邊裕之	4. 発行年 2022年
2. 出版社 中山書店	5. 総ページ数 192
3. 書名 予防理学療法学	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 股関節用サポーター	発明者 渡邊裕之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、第7205900	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------