

C-10

## サッカー動作計測による第五中足骨骨折メカニズムの検討

内田 忠宏<sup>\*1</sup>, 宮崎 祐介<sup>\*1</sup>, 立石 智彦<sup>\*2</sup>, 結城 新<sup>\*3</sup>, 森安 健太<sup>\*4</sup>, 三浦 亜友<sup>\*4</sup>Investigation of fifth metatarsus fracture mechanism  
based on measurement of soccer movementsTadahiro UCHIDA<sup>\*1</sup>, Yusuke MIYAZAKI, Tomohiko TATEISHI,  
Arata YUKI, Kenta MORIYASU, Ayu MIURA<sup>\*1</sup> Tokyo Institute of Technology. Department of Mechanical and Environmental Infomatics  
Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

A fracture of fifth metatarsal bone caused by playing soccer has been widely reported. However, the fracture mechanism of the metatarsal bone has not been sufficiently clarified yet. The purpose of this study is to investigate influences of moves in playing soccer on the fifth metatarsal bone behavior by using motion capture and foot pressure measurement system. The experimental results showed that foot pressure under the fifth metatarsus bone of the pivot foot in a cross step motion and a cross kicking motion were higher than that in inside step motion. Foot width got narrowed in the cross step motion and kicking motion at proximal end of fifth metatarsus bone. On the other hand, foot width got widened at the distal end. It is expected that identification of the mechanical behaviors in cross step motion and the kicking motion on to the bone stress distribution provides useful information to clarify the metatarsal bone fracture mechanism.

**Key Words** : Sport engineering, Bone and cartilage, Medical engineering, Muscle and Skeleton, Impact biomechanics, Human Engineering, Biomechanics

## 1. 結 言

スポーツ傷害の一つとして、第五中足骨疲労骨折があり、サッカーにおいて多く発生することが報告されている(Shuen, et al. 2009). 本骨折は保存的療法で骨癒合しても再発が多く、手術してもなお骨癒合が悪い症例や再発例もあるため難治性と言われており、その適切な予防と治療が大きな問題となっている。この第五中足骨に発生する骨折の1形態が、1902年にJonesにより急性骨折として報告され(Jones骨折)、以来、様々な研究報告がなされている(Jones 1902). Raikinらは、Jones骨折の発生と後足部アライメントの関連について、21例(20人)のJones骨折既往患者を対象に、X線画像により後足部アライメントを評価し、18例で後足部内反アライメントを認めた(Raikin, et al. 2008). Yohoらは、Jones骨折の発生と前足部アライメントの関連について、30例のJones骨折既往患者と健康な30例を比較し、Jones骨折の既往がある患者では、中足骨が優位に内転していることを示した(Yoho, et al. 2012). これに対して、Hetsroniらは、10人の既往歴がある選手と10人の健康な選手の足部アライメントおよび足底圧測定を行い、足部のアライメントの影響は小さく、既往のある場合は第五中足骨圧が低いということを示している。このため、ハイアーチであるか否かなどの静的アライメントよりも足底圧測定が危険因子の評価や、予防策の検討材料として有用であると述べている(Hetsroni 2010). 葛島らは、Jones骨折の発生と足

<sup>\*1</sup> 東京工業大学大学院 情報理工学研究所 情報環境学専攻 (〒145-0062 東京都目黒区大岡山 2-12-1)<sup>\*2</sup> 同愛記念病院 整形外科 (〒130-8587 東京都墨田区横網 2-1-11)<sup>\*3</sup> 同愛記念病院 関節鏡・スポーツセンター (〒130-8587 東京都墨田区横網 2-1-11)<sup>\*4</sup> 株式会社アシックス スポーツ工学研究所 (〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚 6-2-1)

底圧の関連について、7例の Jones 骨折の既往歴がある選手と 27例の既往の無い選手の歩行時足底圧を測定し、比較して評価した。既往のある選手の第五中足骨圧、歩行軌跡角が大きく、外側優位の荷重であったことを理由に、足底圧測定が危険因子の定量的評価として有用であると述べている。また、テーピングによる後足部回内誘導が予防、再発防止に一定の効果があるのではないかと述べている (葛島他 2013)。また、第五中足骨骨折のみに着目した研究ではないが、Eils らは、サッカー動作の足底圧分布を測定し、カッティング動作において第五中足骨直下の足底圧が低く、シュート動作においては高くなったことを報告している (Eils, et al 2004)。

これらの研究報告において、静的アライメントによる統計的な危険因子の解明、第五中足骨直下の足底圧力測定による危険動作の検討は行われているが、高い足底圧がどのように第五中足骨骨折を引き起こしているかについて、足部挙動計測等を用いた検討がなされていない。そのため、第五中足骨骨折の発生メカニズム解明のためには、サッカー動作によって高い足底圧が引き起こすシューズ内での足部変形、第五中足骨挙動について検討する必要がある。

そこで本研究では、シューズを履いた状態でサッカー動作を再現し、足底圧分布計測だけではなく、モーションキャプチャシステムによる足部挙動計測を行い、サッカー動作が第五中足骨に及ぼす影響の検討を行った。

## 2. 第五中足骨疲労骨折の概要

### 2・1 第五中足骨疲労骨折の発生位置

第五中足骨疲労骨折の発生位置について、同愛記念病院で治療を行った 10例の X 線画像 (表 1) を基に検討した。図 1 に示すように、第五中足骨近位端から骨折線開始位置までの長さを、第五中足骨の長さを 100%とした百分率で求めた。表 1 に示すように骨折線開始位置は平均 36%、標準偏差 3.85%であり、10例のうち多くの骨折が同箇所付近から生じていることがわかる。従って、サッカーにおける特異な動作によって、本箇所付近に応力集中が発生する可能性が高いと考えられる。本研究においてはこの位置に発生する疲労骨折を研究対象としている。

Table 1 X-ray study cases

Case No.	Age	Sports	Fracture side	Position of Fracture [%]
1	21	Soccer	R	35
2	17	Soccer	R	34
3	21	Soccer	R	28
4	-	Futsal	L	35
5	16	Soccer	R	37
6	17	Soccer	R	43
7	19	Soccer	L	37
8	15	Soccer	L	39
9	18	Soccer	R	39
10	-	Soccer	L	33

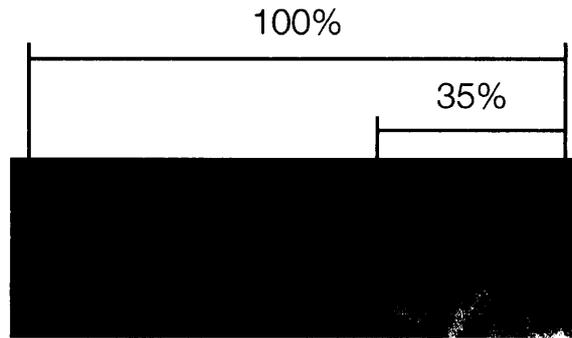


Fig. 1 Measurement method of fracture positions

## 2・2 第五中足骨疲労骨折の原因となり得る動作

研究対象の骨折は疲労骨折であり、急性骨折と異なり骨折時の動作が原因ではなく、サッカーの練習で日常的に第五中足骨に負荷を与えている動作が原因であると考えられる。そこで、第五中足骨骨折の原因となっている動作を推定し、計測実験で再現するため、本疲労骨折の既往歴がある大学生サッカー選手3名を対象にインタビューを実施した。内容は、第五中足骨が痛む動作を口頭で質問し、それを再現させ撮影したものである。結果、2名は、地面に着いた足の方向に方向転換するステップの際、着いた足の第五中足骨が痛むと述べ（図2上）、1名は軸足付近のボールを体をひねるように蹴る動作の際、軸足の第五中足骨が痛むと述べた（図2下）。いずれの動作も、支持足のみの接地となった際に外側優位の荷重となり、第五中足骨に高い負荷がかかることが想定される。また、前者は支持足方向に方向転換が迫られた際、後者はサイドからクロスを上げるようなキックの際に必要な動作であり、サッカーにおいて登場する頻度も高い動作だと考えられる。以上の結果を参考に、サッカー動作計測実験における再現動作を決定した。



Fig. 2 Moves with the pain; upper and lower images are corresponding to the step motion and the kick motion, respectively.

## 3. サッカー動作計測実験

### 3・1 実験概要

被験者は2名、サッカーシューズを着用し、人工芝環境でサッカー動作を再現する実験を行った。4種類の動作を計測した。各動作は6回繰り返して行い、うち5回はモーションキャプチャシステムによる計測、1回はモーションキャプチャシステムによる計測およびハイスピードカメラによる計測を行った。6回の試技全てにおいて足底圧測定および床反力測定を実施し、計48回の動作計測を行った。

### 3・2 被験者

男性サッカー選手2名を対象とした。被験者Aは身長176 cm、体重69 kg、シューズのサイズは26.5 cm、サッカー歴12年、利き足右、被験者Bは身長171 cm、体重60 kg、シューズのサイズは25.5 cm、サッカー歴14年、利き足右である。いずれも本骨折の既往歴は無い。

### 3・3 実験室環境

本実験は東京工業大学モーションキャプチャルーム（図3）で実施した。本システムは、10台のモーションキャプチャカメラと16枚の床反力計からなる。床反力計は横600mm、縦900mmが図3のように測定領域に敷き詰められている。本実験においては、図4のように、横600mm、縦900mmの人工芝を床反力計の上に6枚施工した。また、被験者が人工芝を逸脱する可能性を考慮し、安全のため逸脱しうる領域にEVAフォームシートを敷設した。

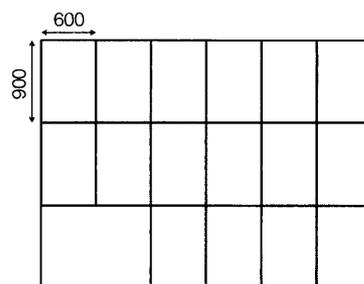


Fig. 3 Overview of motion capture room

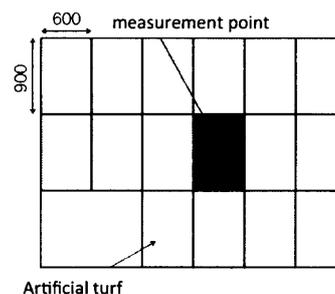
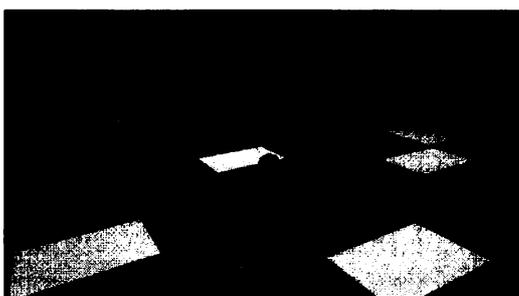


Fig. 4 Artificial turf arrangement on the force plates

### 3・4 実験で再現した動作

サッカーシューズを着用し、人工芝の上で4種類の動作の計測を行った。支持足は全て左足であり、接地中の挙動を計測した。

左足を接地後、左に方向転換するステップ（動作A、クロスステップ）、左足を接地後、右に方向転換するステップ（動作B、インサイドステップ）、左後方30度付近から助走し、左方向へクロスを上げることを想定したキック動作（動作C）、実際にボールを用いての助走の進行方向から90度の方向へのキック（動作D）を計測した。動作Dのキック動作は最大努力で実施するように指示した。

動作A、Cに関しては、2.2節で述べたインタビューにおいて痛みがあるとされた2動作を基に決定しており、比較的第五中足骨負荷が大きくなると考えられる。

### 3・5 計測方法

裸足実験では、10台のモーションキャプチャカメラによる動作計測、床反力計による床反力計測を行い、サッカーシューズ-人工芝実験ではこれらに加えてPedarインソールセンサによる足底圧計測を行った。

モーションキャプチャカメラは、赤外線を照射し、反射材でできたマーカの3次元位置を計測する。本実験においてはマーカを内果、外果、母趾の遠位端上部、母指MP関節の内側部、小趾の遠位端上部、第五中足骨遠位端の外側部、第五中足骨骨幹部の外側部に2点、第五中足骨近位端の外側部、踵骨後側部の計10点に貼付した。母指MP関節の内側部、第五中足骨外側部の4点の計5点のマーカについては、シューズをくり抜くことにより直接皮膚に貼付した。母趾の遠位端上部、小趾の遠位端上部、踵骨後側部の3点のマーカはシューズ上の対応

する位置に貼付し、内果、外果のマーカは皮膚上に貼付した。マーカの変位計測のフレームレートは 250 Hz に設定した。

床反力は、アナログ波として出力される床反力中心の平面位置 (2次元座標)、床反力 (3次元ベクトル)、自由モーメントを計測し、サンプリング周波数 1 kHz で取得した。

足底圧測定には Pedar インソールセンサを用いた。本インソールセンサにて、足部を 99 エリア (図 6) に分割し、サンプリング周波数 100Hz, 分解能 2.5 kPa にて計測した。



Fig. 5 Marker positions



Fig. 6 Measurement area of insole sensor

### 3・6 評価方法

本研究において、シューズ内足部変形、第五中足骨挙動を考察するために、点間距離の変化を求めた。

マーカ時刻歴を、5次、カットオフ周波数 20Hz のバターワース型ローパスフィルタで処理したのちに、母趾 MP 関節内側部マーカ (図 7 マーカ 1) - 第五中足骨遠位端外側部マーカ (図 7 マーカ 2) のマーカ間距離 (遠位端足幅)、母趾 MP 関節内側部マーカ - 第五中足骨近位端外側部マーカのマーカ (図 7 マーカ 3) 間距離 (近位端足幅) を求め、接地前と接地後の差の接地中時刻歴を求めた。床反力計において 20.1 N 以上の力が検出された範囲を接地期とみなした。

また、第五中足骨直下の足底圧を、図 6 におけるエリア 68,61,54 の平均を第五中足骨遠位側圧力、エリア 47,40 の平均を第五中足骨近位側圧力として求めた。

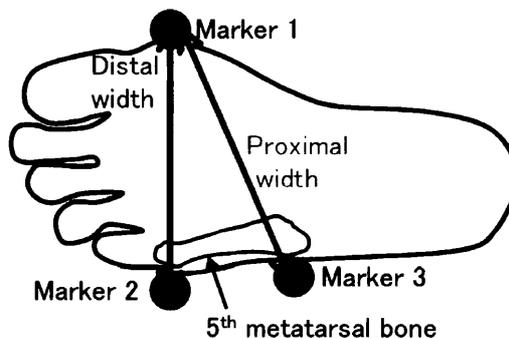


Fig. 7 Calculate method of foot width

## 4. 実験の結果と考察

### 4.1 各動作の足幅変化および第五中足骨圧

3.6節で述べた評価手法により、考察を行った。被験者 A の各動作の平均足幅変化（接地中の足幅の平均値から、接地前の足幅を引いたもの）の繰り返した動作間での平均を図 8 に示す。また、第五中足骨下の圧力の平均の繰り返した動作間での平均を図 9 に示す。被験者 B についても同様に図 10, 図 11 に示す。グラフに示すエラーバーは標準誤差に基づいており、両側 t 検定を行い、有意差を検討した。

両被験者の第五中足骨圧力に関して、遠位側圧力、近位側圧力共に、動作 A, C と動作 B の間には有意差が見られ、動作 B に比較して、少なくとも第五中足骨圧を用いた判断では、危険な動作と判断できる。これは、2.2 節で述べたインタビューで痛むとされた動作であり、インタビューと一致した結果となった。また、両被験者の動作 A, C と動作 B の間には、第五中足骨近位端の足幅変化にも有意差が見られ、インタビュー、第五中足骨直下の足底圧で共に危険とされた動作 A, C においては、近位端足幅の減少（あるいは増減なし）が見られた。この足幅の減少は、足底あるいはシューズのアップーから力を受けた足部が変形したためであると考えられ、第五中足骨圧やインタビューで痛むとされた動作において生じていることから、第五中足骨骨折の発生メカニズムとの関連を検討する必要がある。

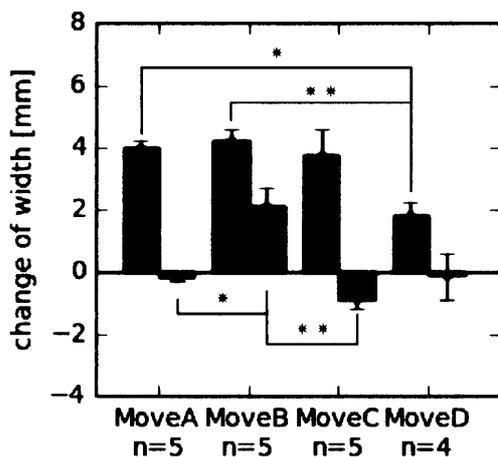


Fig. 8 Average width change during contact phase in subject A; Bar denotes mean value among repeated operations. Error bar indicates S.E. . Blue and red bars show the value of distal end and proximal end, respectively.

(\*  $t < 0.05$ , \*\*  $t < 0.01$ )

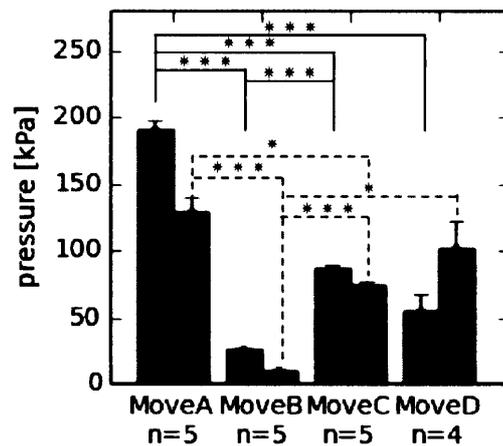
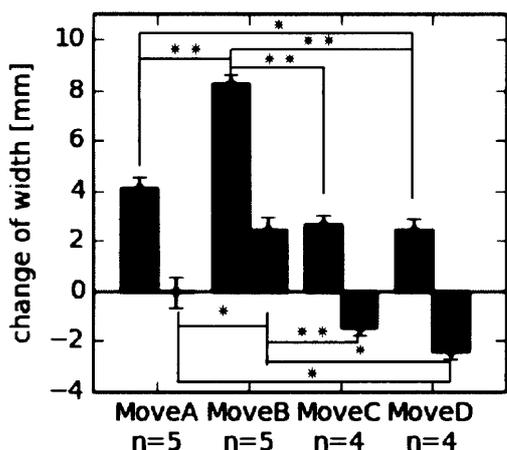
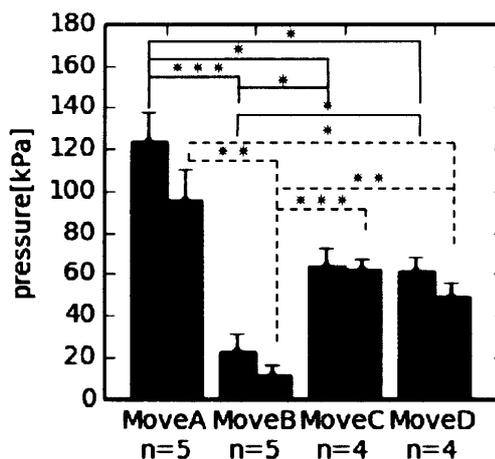


Fig. 9 Average foot pressure under 5<sup>th</sup> metatarsal during contact phase in subject A; Bar denotes mean value among repeated operations. Error bar indicates S.E. . Blue and red bars show the value of distal end and proximal end, respectively.

(\*  $t < 0.05$ , \*\*\*  $t < 0.001$ )



**Fig. 10** Average width change during contact phase in subject B; Bar denotes mean value among repeated operations. Error bar indicates S.E. . Blue and red bars show the value of distal end and proximal end, respectively.  
 (\*  $t < 0.05$ , \*\* $t < 0.01$ )



**Fig. 11** Average foot pressure under 5<sup>th</sup> metatarsal during contact phase in subject B; Bar denotes mean value among repeated operations. Error bar indicates S.E. . Blue and red bars show the value of distal end and proximal end, respectively.  
 (\*  $t < 0.05$ , \*\* $t < 0.01$ , \*\*\*  $t < 0.001$ )

**4・2 支持足接地時の足部挙動**

前節で示したように、動作 A、C において、接地時に近位端足幅は変化しない、もしくは狭まるにも関わらず、遠位端足幅は広がるという現象が見られた。この現象について、被験者 A の動作 A のハイスピードカメラを用いた測定を例に挙げ、足部挙動を考察した。

ハイスピードカメラによれば、足部の接地後の挙動に二つのフェーズが確認できた。おおよそ 0.2 s 以前の接地してから踵部が浮くまでの、着地の衝撃を受け止める着地フェーズ (図 12(a)) とおおよそ 0.2 s 以降の踵部が浮き、前足部で地面を蹴り左に進み始める蹴りだしフェーズ (図 12(b)) である。

図 13 に示すように、着地フェーズにおいて遠位端足幅が拡大するのに対し、近位端足幅の拡大は小さく、蹴りだしフェーズにおいて遠位端足幅の縮小が見られるのと同時に、近位端足幅も狭まり、接地前よりも狭くなっていることが確認できる。図 14 に示した第五中足骨直下の足底圧は、着地時に遠位側圧力、近位側圧力ともに 100 kPa 前後まで急峻に上昇し、その後近位側圧力は安定するのに対し、遠位側圧力は 250.8 kPa までの上昇が見られた。

このような足幅条件で、足底圧等の負荷がかかることによって、2.1 節に示した位置にまげやねじりの応力集中が生じ、骨折の原因となっている可能性が考えられ、これらの検討には、有限要素シミュレーションモデルにより第五中足骨の変形、応力状態を求める必要があると考えられる。



(a) Landing phase



(b) Kick out phase

**Fig. 12** High-Speed Camera images

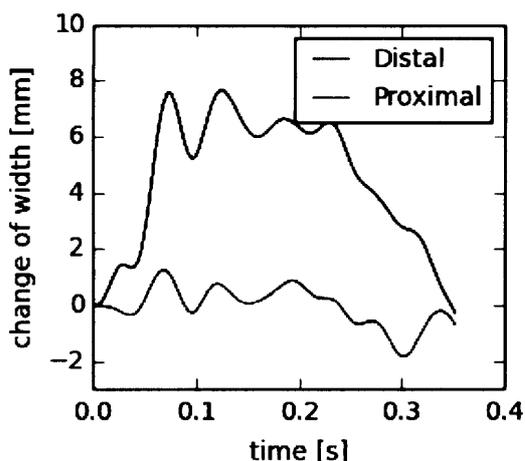


Fig. 13 Width changes example in subject A during move A

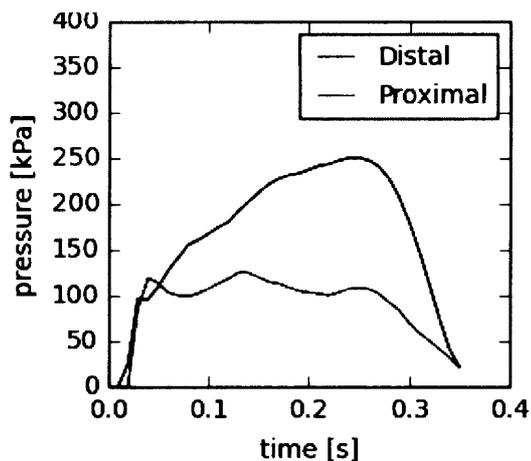


Fig. 14 Pressure histories under 5<sup>th</sup> metatarsal bone in subject A during move A

## 5. 結言

本研究の成果は以下の3点である。

- ・ 第五中足骨疲労骨折の発生位置を検討した。
- ・ 支持足方向に方向転換するステップ、支持足付近のボールをクロスを上げるように蹴るキックについて、痛みが出る動作についてのインタビューおよび実験で再現した際の第五中足骨直下の足底圧により、第五中足骨疲労骨折の原因である可能性を示唆した。
- ・ 上記の危険動作における、支持足着地時に、第五中足骨近位端における足幅が変化しない、もしくは狭まる現象が見られたことから、足幅変化と、第五中足骨疲労骨折の発生メカニズムとの関連を検討する必要があることを示した。

上記の足幅変化や、第五中足骨圧がどのように第五中足骨に負荷を与えているのかが未知である点は今後の課題であり、有限要素シミュレーションモデルの構築により、第五中足骨負荷を求めることを検討している。

## 文 献

- Eric Eils, Markus Strey, Stefan Linnenbecker, Lothar Thorwesten, Klaus Völker, and Dieter Rosenbaum Characteristic Plantar Pressure Distribution Patterns During Soccer-Specific Movements, *The American Journal of Sports Medicine*, Vol.32, No.1(2004), pp.140-145
- Iftach Hetsroni, Meir Nyska., David Ben-Sira, Gideo Mann, MD; Ofer Segal, Guy Maoz, MD, Moshe Ayalon PhD Analysis of foot structure in athletes sustaining proximal fifth metatarsal stress fracture, *Foot & Ankle International*, Vol.31, No.3 (2010) pp.203-211
- 葛島元基 野田将史 土屋明弘 骨折の既往を有するサッカー選手の足底圧分析と後足部テーピング誘導の効果について *臨床バイオメカニクス*, Vol.34 (2013), pp.319-323
- Steven M. Raikin, Nicholas Slenker and Brian Ratigan The Association of a Varus Hindfoot and Fracture of the Fifth Metatarsal Metaphyseal-Diaphyseal, *The American Journal of Sports Medicine*, Vol.36, No.7 (2008), pp.1367-1372
- R.Jones. Fracture of the base of the fifth metatarsal bone by indirect violence, *Annals of Surgery*, Vol.35 (1902) , pp.697-702
- Shuen WM, Boulton C, Batt ME, and Moran C., Metatarsal fractures and sports, *Surgeon*, Vol.7, No.2 (2009) pp.86-88
- Yoho RM, Carrington S, Dix B, and Vardaxis V. The association of metatarsus adductus to the proximal fifth metatarsal Jones fracture. *Journal of Foot and Ankle Surgery*, Vol.51, No.6 (2012) pp.739-742