

バイオメカニクスの観点からみたベアフット・ランニング の教材研究

岡本 敦*・金尾洋治*

1.はじめに

バイオメカニクスの基本動作として走運動（ランニング）は古くから多くの研究が行われている。近年、ベアフット・ランニングと呼ばれる裸足でのランニングが、着地衝撃が少ないとして注目を集め、市民ランナーの間でもブームとなっている。しかし、ベアフット・ランニングの着地衝撃については研究者間で意見が分かれ、その効果も定かではない。

Christopher McDougallはその著書Born to run³⁾の中で、裸足同然の靴で信じ難いほどの長距離を走るランナー種族（ララムリ）を紹介し、ベアフット・ランニングの火付け役となった。また、Harvard UniversityのD.E.Liebermanらは2010年にFoot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners.²⁾をNatureに発表した。そこでは、裸足で走る習慣のランナーは前足部接地が多く、着地衝撃も小さいことを報告した。最近では、ベアフット・ランニング用シューズも複数のメーカーから販売され、ベアフット・ランニングは世界的なブームとなっている。

本稿では、次の2つの検証実験によってベアフット・ランニングをバイオメカニクスの観点から検討し、バイオメカニクスの教材として、ベアフット・ランニングとシューズを履いたランニングの接地様式、着地衝撃の違いを明らかにし、スポーツ障害との関係について検討した。

検証実験 1

1-1.目的

シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの着地を運動力学的観点から検討し、LiebermanやMcDougallが述べるようなベアフット・ランニングの前足部接地が見られるのかどうかを検証した。

1-2.方法

被験者は5名の男子大学生と1名の女子大学生であった。被験者の身体的特徴を表1に示した。被験者には事前に実験の目的やリスクなどを説明し、実験への参加の同意を得た。被験者はベアフット・ランニングとランニング用シューズを履いたランニングの2条件で、それぞれ10回のジョギングを行った。その時の地面反力をKISTLER社製フォースプレート（9287C）によって測定した。また、その時の身体動作を10台のカメラで構成されたVICON社製モーションキャプチャーシステム（MX-T20）によって記録した。地面反力の鉛直成分は2峰性を示すが、最初のピーク値を着地衝撃とした。また、足部が完全に設置した時の踵からつま先までの長さに対する、設置時の踵から圧力中心までの長さの進行方向成分を相対値で示したものを接地位置とした。モーションキャプチャーで得られたつま先、踵、外果、内果、脛骨の外側顆と内側顆の座標より、足関節の底屈・背屈、外転・内転、外旋・内旋の関節角

*東海学園大学スポーツ健康科学部教授

度の経時的变化を求めた。

表1 被験者の身体的特徴

| Subj. | Age (yrs) | Height (m) | Weight (kg) | Sexuality |
|-------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 1 | 21 | 1.65 | 76.0 | male |
| 2 | 21 | 1.80 | 69.0 | male |
| 3 | 21 | 1.75 | 85.0 | male |
| 4 | 21 | 1.70 | 67.0 | male |
| 5 | 21 | 1.64 | 62.0 | male |
| 6 | 21 | 1.62 | 51.0 | female |
| Mean | 21 | 1.69 | 68.3 | |
| SD | 0 | 0.07 | 11.7 | |



写真1 ベアフットとシューズを履いた際のマーカー貼付例

1-3.結果と考察

被験者6名のシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの速度は、両群ともに平均で3.0m/sで両群間に有意な差は見られなかった。

被験者2のシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの各10試行の地面反力の鉛直成分を図1、図2に示した。

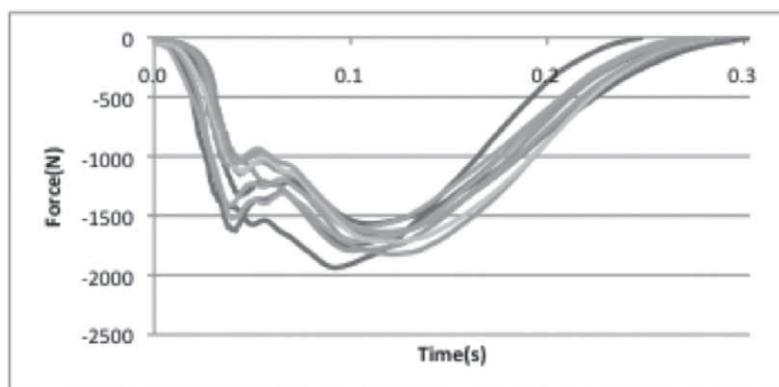


図1 被験者2のシューズを履いたランニングの地面反力（10試行分）

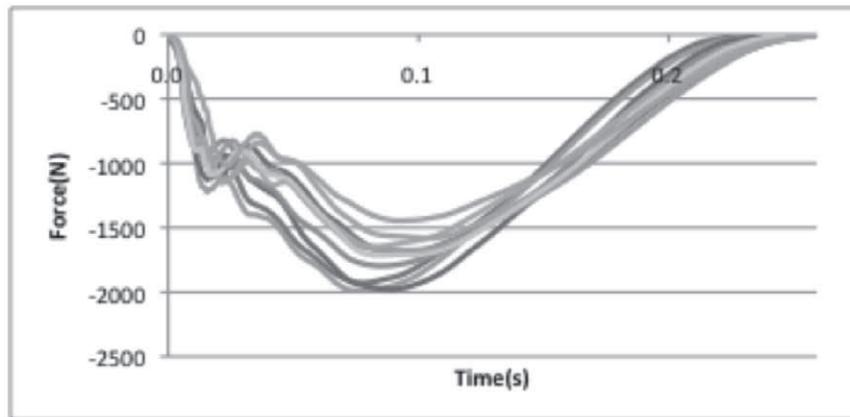


図2 被験者2のベアフット・ランニングの地面反力 (10試行分)

図1、2のように着地時の地面反力は2峰性を示し、シューズを履いたランニング、ベアフット・ランニング、それぞれの10回の試行がおよそ同様な変化傾向を示しており、シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングでそれぞれ特徴的な地面反力のパターンを示していることが分かる。

図3、図4に図1、図2の被験者2のシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの圧力中心 (COP) の軌跡の1例をそれぞれ示した。

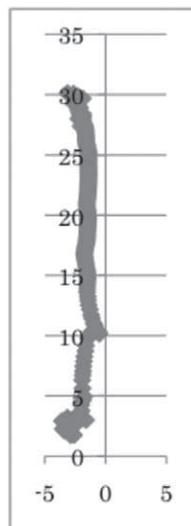


図3 シューズを履いたランニングのCOPの軌跡 (cm)

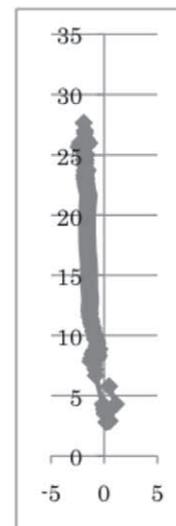


図4 ベアフット・ランニングのCOPの軌跡 (cm)

これらの図では足裏の全面が接地した時の踵のマーカを原点として、フォースプレートの圧力中心 (COP) の軌跡を示したものである。図3、図4より、シューズを履いたランニングに比べてベアフット・ランニングの方が、接地位置が前方へ移動し、離地位置は原点に近くなっていることが分かる。これはシューズを履くことによって踵部分の接地が早くなり、接地中の足部のローリング (足裏を転がすような接地の仕方) が大きくなったことによって、つま先部分まで接地していたことを示している。接地時の圧力中心の位置 (前後方向) はシューズを履いたランニングが3.7cmであったのに対して、ベアフット・ランニングでは5.8cmと、2cm程度原点から遠い位置で接地していた。

本研究では2峰性を示したこの地面反力の第1のピークを着地衝撃とした。この着地衝撃の大きさを比較したのが表2である。

表2 シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの着地衝撃の比較

| 被験者 | シューズ(N) | | ベアフット(N) | |
|------|---------|-------|----------|-------|
| | 平均 | 標準偏差 | 平均 | 標準偏差 |
| 1 | -1664.7 | 177.0 | -1357.5 | 173.8 |
| 2 | -1294.6 | 216.3 | -1084.3 | 82.0 |
| 3 | -1655.0 | 151.7 | -2037.4 | 180.8 |
| 4 | -1479.7 | 62.3 | -1261.4 | 151.0 |
| 5 | -851.0 | 79.5 | -717.0 | 107.3 |
| 6 | -1036.2 | 91.4 | -1017.7 | 136.8 |
| 平均 | -1330.2 | | -1245.9 | |
| 標準偏差 | 333.8 | | 446.6 | |
| | P>0.05 | | | |

表3 シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの接地位置の比較

| 被験者 | シューズ(%) | | ベアフット(%) | |
|------|---------|------|----------|------|
| | 平均 | 標準偏差 | 平均 | 標準偏差 |
| 1 | 2.2 | 4.2 | 10.7 | 4.5 |
| 2 | 8.5 | 3.7 | 26.0 | 13.6 |
| 3 | 9.4 | 6.2 | 30.8 | 20.1 |
| 4 | 9.4 | 2.8 | 10.9 | 3.9 |
| 5 | 5.1 | 6.8 | 13.9 | 2.8 |
| 6 | 1.9 | 2.8 | 9.5 | 3.7 |
| 平均 | 6.1 | | 17.0 | |
| 標準偏差 | 3.5 | | 9.1 | |
| | P<0.05 | | | |

シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの着地衝撃は、シューズを履いたランニングの平均が-1330.2N、ベアフット・ランニングの平均が-1245.9Nとベアフット・ランニングの着地衝撃の方が小さかったが、両群間に統計的に有意な差は見られなかった。これは被験者3の1名がベアフット・ランニングの着地衝撃が大きかったため、統計的に有意な差は得られなかったが、全体としてベアフット・ランニングの着地衝撃が小さいという傾向は見られた。

表3にシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの接地位置の比較を示した。

表3よりシューズを履いたランニングの接地位置は平均で6.1%であったのに対して、ベアフット・ランニングの接地位置は17.0%と、ベアフット・ランニングの接地位置が、5%水準で有意に前方へ移動した。

男子大学生（年齢21歳、身長1.65m、体重55kg）のシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの接地時の骨格モデルを図5、図6に示した。



図5 シューズを履いたランニングの接地時の骨格モデル

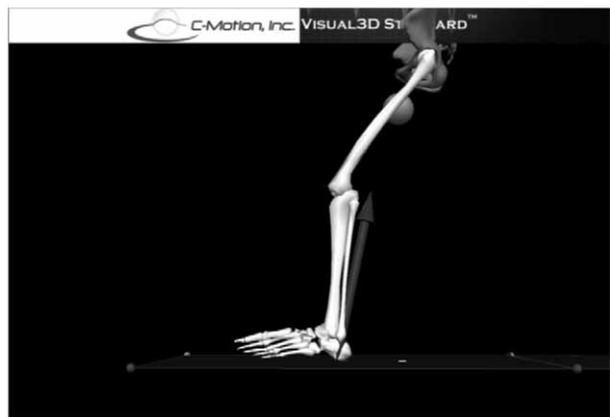


図6 ベアフット・ランニングの接地時の骨格モデル

図5、図6より、ベアフット・ランニングでは踵部分から接地しているのに対して、シューズを履いたランニングでは、骨格モデルの踵部分より後方下部でシューズのソールが接地していることが分かる。この時の、足関節の関節角度の経時的变化を図7、図8に示した。

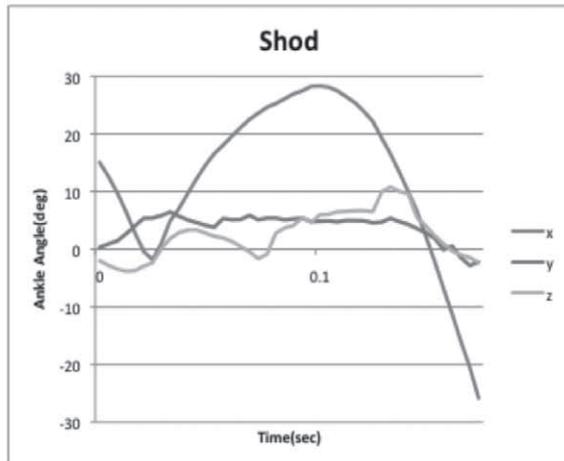


図7 シューズを履いたランニングの接地時の足関節の関節角度の経時変化
(x軸：+背屈 -底屈 Y軸：+外がえし (外反) -内がえし (内反)
z軸：+外転 -内転)

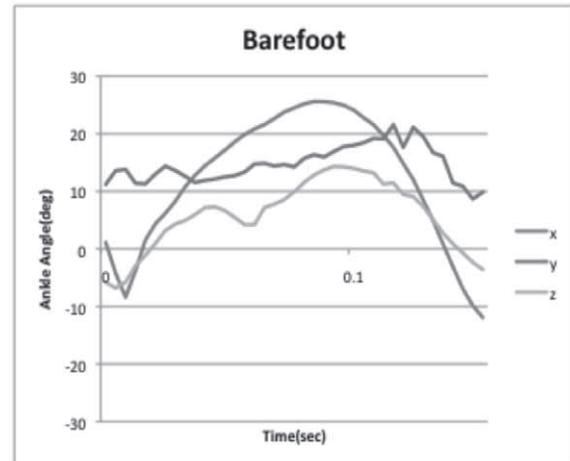


図8 ベアフット・ランニングの接地時の足関節の関節角度の経時変化
(x軸：+背屈 -底屈 Y軸：+外がえし (外反) -内がえし (内反)
z軸：+外転 -内転)

図7、図8より、シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングではY軸、Z軸ではシューズを履いたランニングの方が関節角度の変化が小さくより直線的で安定したランニングをしていたと考えられる。X軸に関しては、全体として足関節の動きは変わっておらず、シューズを履いたランニングの接地のタイミングが早くなるために足背屈が大きな状態で接地していた。また、離地時もシューズを履いたランニングの方が離地が遅くなるので、足関節はより底屈した状態で離地していた。このことから、シューズを履いたことによって、接地時の足部の動きが大きくなったと言えるであろう。しかし、LiebermanやMcDougallが言っているような、前足部で接地をする被験者は見られなかった。本研究の被験者の中で、ベアフット・ランニングで接地位置が最も前方にあった被験者3でも、その値は30.8%と足長の1/3に達してないので、中足部接地とは言えないであろう。

D.E.Lieberman²⁾らは、いつも裸足で走る持続的ランナーは、たいてい踵が接地する前に前足部で接地する。一部のランナーはフラットに(中足部)接地し、稀にしか踵で接地しない。対照的に、常にシューズを履くランナーは、ほとんどが踵接地で、厚いクッションの入った踵の現代のシューズに助長されていると述べている。また、N.J.Hanson¹⁾らはシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの酸素摂取量を比較し、シューズを履いたランニングはベアフット・ランニングに比較して有意に酸素摂取量が大きいことを報告した。

本研究の結果より、シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングを比べると、ベアフット・ランニングの着地衝撃は小さくなる傾向が見られた。また、接地位置は足長の10%程度前方へ移動した。しかし、この接地位置の変化は、シューズの踵部分の形状とベアフット時の足裏の形状の違いによる接地位置の変化の影響が大きく、足部の動きに大きな変化は見られなかった。したがって、近年ブームとなっているベアフット・ランニングも、シューズを履いたランニングが習慣化したランナーがベアフット・ランニングをしても、すぐさま前足部接地になるとは考えられなかった。つまり、踵接地(後足部接地)が習慣化したランナーが前足部接地になるためには、意識して動作の変容を図ることが必要であると考えられた。

近年、ベアフット・ランニングがブームとなり、ベアフット・ランニングの効果を謳ったベアフット・ランニングシューズも販売されているが、本研究の結果では、ベアフットになったからと言って、それほど単純に接地様態が変化するとは考えられない。しかし、本研究の結果は、短時間でシューズを履いたランニングとベアフット・ランニングを比較した結果である。したがって、今後は長時間のベ

アフット・ランニングの効果や、習慣化した時の接地様態の変化を検討することが必要であると考えられた。

1-4.まとめ

男子5名、女子1名の大学生を被験者として、シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの足部の接地を運動力学的観点から検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 本研究では、シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの着地衝撃に有意な差は見られなかったが、ベアフット・ランニングの方がシューズを履いたランニングよりも着地衝撃が小さい傾向が見られた。

2) シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの接地位置を比較したところ、ベアフット・ランニングの接地位置がシューズを履いたランニングに比べて、足長の10%程度前方であることが明らかとなった。

3) シューズを履いたランニングとベアフット・ランニングの接地を比べたところ、シューズを履いたランニングの接地位置は、平均で踵から足長の6.1%、ベアフット・ランニングは平均で踵から足長の17.0%であった。つまり、本研究の結果では、シューズを履いたランニング、ベアフット・ランニングとも踵（後足部）接地であった。

検証実験2

2-1.目的

今日、ランニングは健康増進において最も重要な運動の一つと考えられている。しかし、時としてランニングは慢性的な障害の誘因となる。何故ならば高度な機械的ストレスがステップによって生じるからである。現在までベアフット・ランニングについては、多くの著者が研究したが、着地衝撃については相反する結果が報告されている。そこで本研究の目的は、ベアフットとシューズを履いたランニングで足が地面に接地する際の衝突による衝撃を検討することである。

2-2.実験条件

健康な女性の中・長距離走者10名を被験者とした。被験者の身体的特徴を表4に示した。各被験者の身体に貼付した49個のマーカーを3次元座標解析するために10台のカメラからなるモーションキャプチャーシステム（VICON社製 250fps）を用いた。被験者はベアフットとシューズを履いた条件で通常の接地の仕方でもフォースプレート上を毎秒3.3m/s±10%で走るように指示された。そして着地衝撃は膝関節の近くの下腿に加速度計を貼付することによって測定した（図9）。

Table 4. Physical characteristics of the subjects.

| No. | Age (yrs) | Height (m) | Weight (kg) | Contact Type |
|------|-----------|------------|-------------|----------------|
| 1 | 21 | 1.588 | 53.25 | Front foot |
| 2 | 21 | 1.583 | 48.05 | Front foot |
| 3 | 19 | 1.677 | 48.30 | Rear foot |
| 4 | 19 | 1.614 | 42.95 | Rear foot |
| 5 | 20 | 1.624 | 52.30 | Rear foot |
| 6 | 18 | 1.487 | 49.60 | Rear foot |
| 7 | 19 | 1.574 | 53.50 | Rear foot |
| 8 | 19 | 1.602 | 47.50 | Rear foot </td |
| 9 | 19 | 1.612 | 54.05 | Rear foot |
| 10 | 20 | 1.596 | 53.95 | Rear foot |
| Mean | 19.5 | 1.596 | 50.35 | |
| SD | 0.9 | 0.045 | 3.49 | |

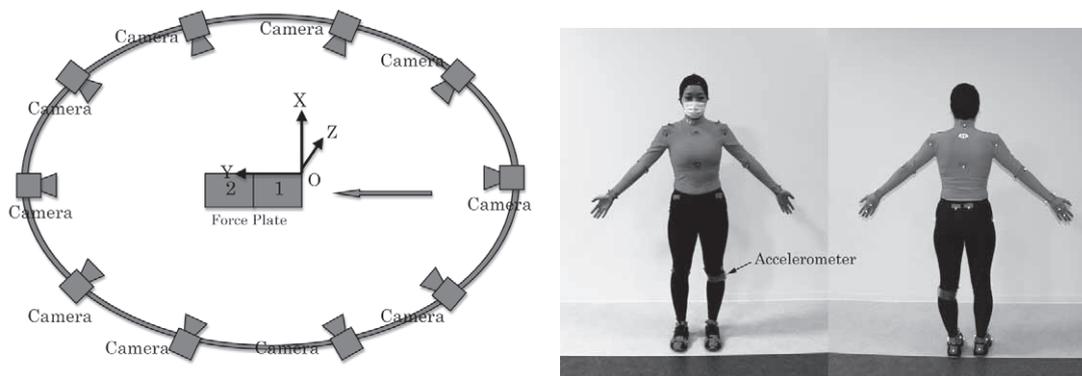


Figure 9. Experimental setup and accelerometer setup.

2-3.結果と考察

被験者の中の典型的な地面反力と加速度の経時変化を図10と図11に示した。全ての被験者の走速度と加速度を表5に示した。ベアフットとシューズを履いた条件で被験者の走速度はほとんど同じであった。しかしながら、ベアフット条件の加速度は $12.5 \pm 4.2G$ であったのに対して、シューズを履いた条件での加速度は $9.7 \pm 2.4G$ とベアフットの条件が有意に大きかった ($p < 0.01$ 図12)。このことは膝関節の慢性的な障害のリスクを増加させると考えられた。特に、踵接地のランナーのベアフット・ランニングでは、 $13.5 \pm 3.9G$ に対して、シューズを履いた条件では $10.4 \pm 2.1G$ とベアフット・ランニングが1%水準で有意に大きかった ($p < 0.01$)。ところがつま先接地のランナーでは、ベアフットとシューズを履いた条件で有意な差は見られなかった(図13)。これらの結果から、踵着地が習慣となっている持続的なランナーは、接地パターンをつま先着地に変えずにベアフット・ランニングを行うと膝関節の障害のリスクが増大されると考えられた。

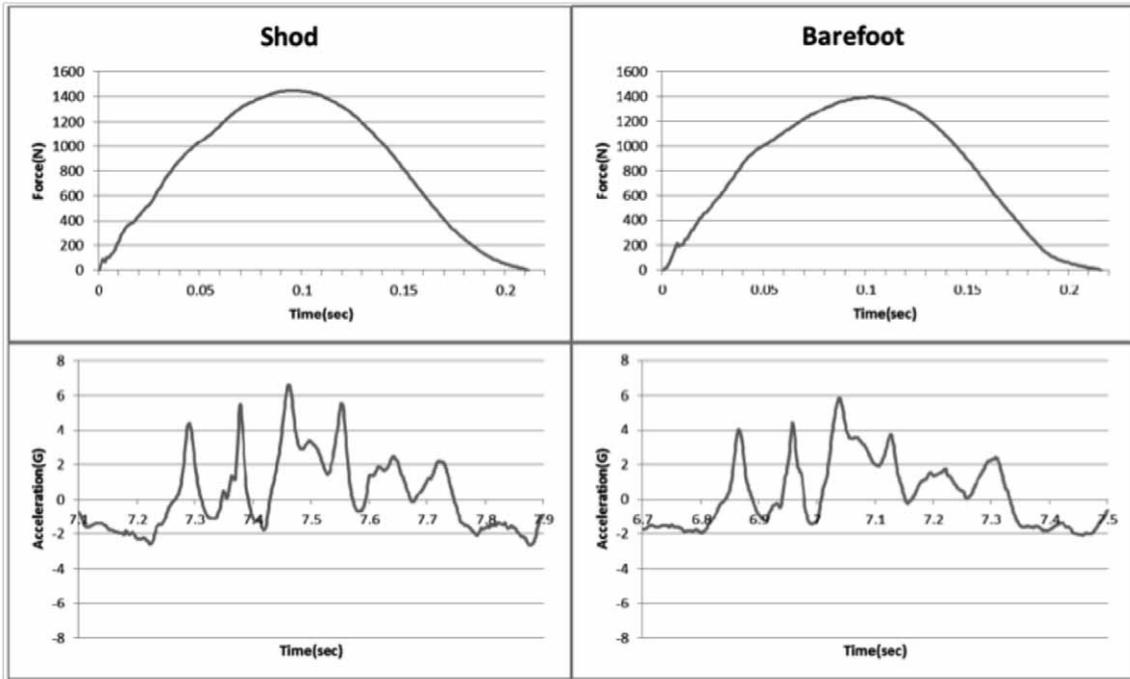


Figure 10. Typical changes of the ground reaction force and acceleration (Subj. 1: fore foot strike) .

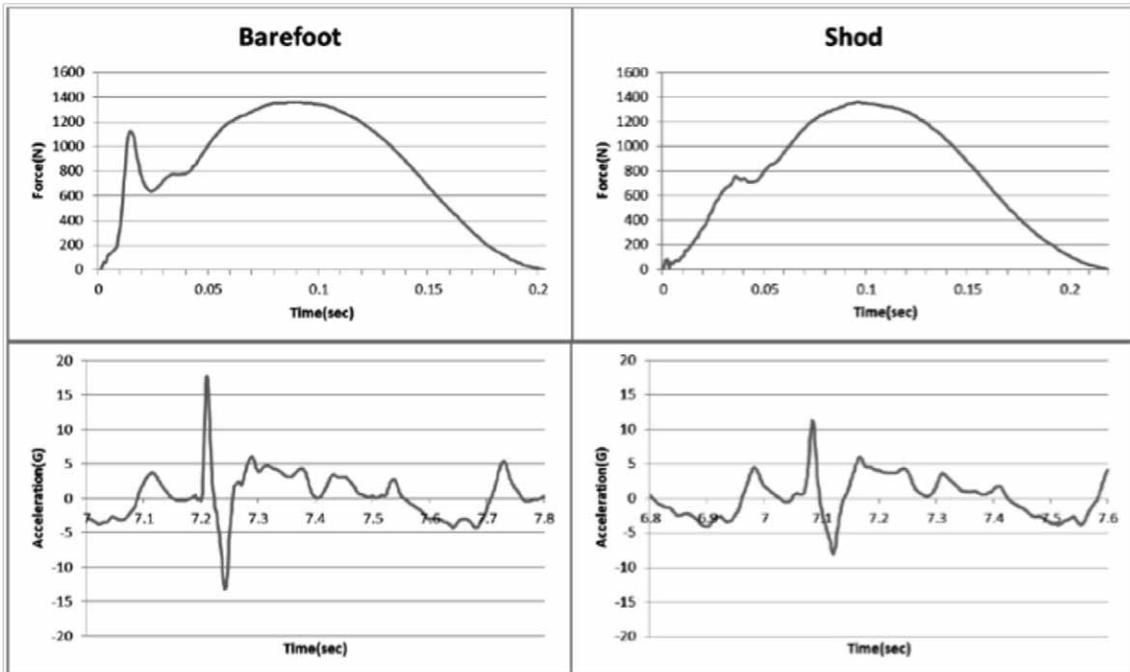


Figure 11. Typical changes of the ground reaction force and acceleration (Subj. 10: rear foot strike) .

Table 5. Running velocity and acceleration of ten subjects.

| Subj. | Velocity (m/s) | | Acceleration (G) | | Contact Type |
|-------|----------------|------|------------------|-------|--------------|
| | Barefoot | Shod | Barefoot | Shod | |
| 1 | 3.48 | 3.50 | 6.62 | 5.86 | Toe |
| 2 | 3.52 | 3.52 | 10.07 | 7.89 | Toe |
| 3 | 3.29 | 3.07 | 9.86 | 10.77 | Heel |
| 4 | 3.46 | 3.39 | 13.09 | 10.20 | Heel |
| 5 | 3.44 | 3.63 | 8.46 | 7.55 | Heel |
| 6 | 3.44 | 3.59 | 8.54 | 6.88 | Heel |
| 7 | 3.63 | 3.67 | 13.93 | 10.52 | Heel |
| 8 | 3.53 | 3.58 | 17.64 | 13.26 | Heel |
| 9 | 3.63 | 3.42 | 18.55 | 12.69 | Heel |
| 10 | 3.68 | 3.53 | 17.77 | 11.28 | Heel |
| Mean | 3.51 | 3.49 | 12.45 | 9.69 | |
| SD | 0.11 | 0.16 | 4.15 | 2.38 | |

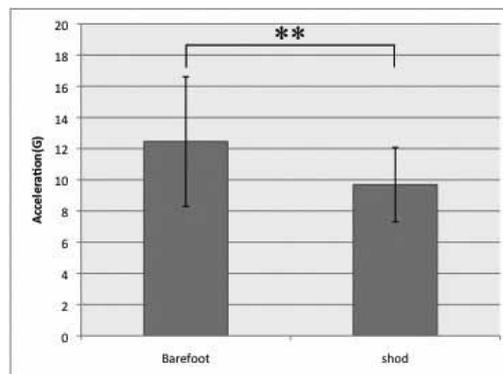


Figure 12. Amplitude of acceleration of all subjects with barefoot and shod conditions. **p<0.01

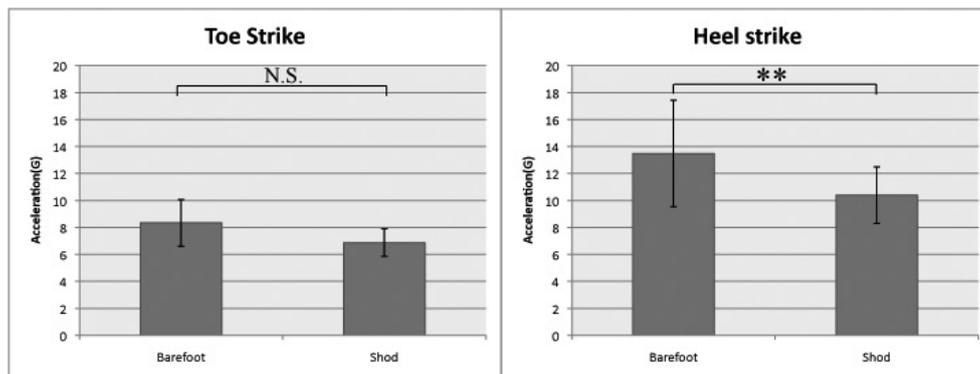


Figure 13. Amplitude of acceleration with barefoot and shod conditions.

(Left : fore foot strike, right : rear foot strike) **p<0.01

2-4.まとめ

本研究では、10名の中・長距離の女性ランナーを被験者として、ベアフットとシューズを履いた条件でランニング時に引き起こされる足と地面の衝突による衝撃を比較検討した。その結果、ベアフット・ランニングの接地時の加速度は $12.5 \pm 4.2\text{G}$ とシューズを履いた条件の $9.7 \pm 2.4\text{G}$ よりも有意に大きかった。特に、踵着地のランナーのベアフット・ランニングでは $13.5 \pm 3.9\text{G}$ とシューズを履いた条件の $10.4 \pm 2.1\text{G}$ よりも有意に大きかった。しかし、つま先着地のランナーでは、ベアフットとシューズを履いた条件で有意な差は見られなかった。これらの結果は、習慣的に踵着地を行っている持続的なランナーが

接地パターンを変えずにベアフット・ランニングを行うと、膝関節の障害のリスクが増加する可能性を示唆した。

3.おわりに

本稿では、2つの検証実験によってベアフット・ランニングをバイオメカニクスの観点から検討し、バイオメカニクスの教材として、ベアフット・ランニングとシューズを履いたランニングの接地様式、着地衝撃の違いを明らかにした。その結果、日常的にシューズを履いてランニングをする踵接地 (Heel strike) のランナーが、ベアフット・ランニングを行うと、着地時の接地位置が若干、前方へ移動するものの、前足部接地 (Forefoot strike) や中足部接地 (Midfoot strike) に変容することはなかった。そして、踵接地 (Heel strike) のランナーがベアフット・ランニングを行うと、着地衝撃が増大し膝関節の障害のリスクが高まることが示唆された。

4.文献

- (1) Hanson N.J., K. Berg, J.R., P. Deka, et al. 2011. Oxygen cost of running barefoot vs. running shod. *Int J Sports Med.* 32 (6), 401-406.
- (2) Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, et al. 2010. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature.* 463, 531-535.
- (3) McDougall Christopher, 2009. *Born to run.* Knopf Doubleday Publishing Group, New York: Broadway.