

2021年5月29日

インソールの評価実験結果報告書

東京電機大学 工学部機械工学科
准教授 井上淳

1. 実験内容

本実験は、IRERUDAKE 株式会社より依頼のあった足底三点支持式インソールの立位および歩行に与える影響を検討することを目的として行った。

インソールの有無の 2 条件を対象として、立位時の足底圧中心、平地歩行時の足底圧中心軌跡移動量・重心の左右動揺量・上腿部の内外転筋の活動量比を計測した。実験条件は以下のとおりである。

被験者は 20 代健常男性 8 名、20 代健常女性 2 名である。選定条件として、大学入学以降本格的なスポーツの経験のある者は除外した。また、下肢の障害や直近 3 年間の足部の重大な怪我、その他通常歩行に影響を及ぼすと考えられる病気があるものを除外した。

足底圧中心の計測にはニッタ社製の足底圧分布計である F-SCAN II を用いた。重心左右動揺量の計測には Natural Point 社製 三次元運動解析システム OPTITRACK を用い、骨盤中央後方につけたリジットボディベースの複数のマーカーを用いて、重心を計算した。筋活動量比の計測には追坂電子製の筋電位センサを用い、長内転筋と大腿二頭筋の 2 点をサンプリング周波数 100Hz で計測した。一歩行周期中の平均筋電位を整流し、その平均振幅 (V_{IN} 、 V_{OUT}) を計算した後、足の内外転筋の活動量比 ($R_{EMG} = V_{OUT}/V_{IN}$) を算出した。

2. 実験結果

2.1 立位時足底圧中心

立位時の足底圧中心を計測し、図 1 に示すような左右足の進行方向 (X 軸方向) の差を計算した。表 1 にその結果を示す。また、図 2 および図 3 にそれぞれ、被験者ごとのインソール使用による軽減地と軽減割合を示す。インソール有りの場合、インソール無しの場合と比較して、足底圧中心の左右足での X 軸方向の差が平均 71.2% 軽減したことから、一般的には左右でばらつきが出てしまう足底圧分布が、インソールを使用することで左右足が同様の足底圧分布に修正できることがわかった。

2.2 平地歩行時足底圧中心

歩行時の左右足の足底圧中心を計測し、立脚期中移動軌跡の X 軸方向移動量と Y 軸方向移動量を計算した。右足の結果を表 2 および図 4 に示すように、10 名中 7 名で X 方向移動量が増加した。また、表 3 および図 5 に示すように 10 名中全員が Y 方向移動量が減少

した。左足についても同様の傾向が見られた(表 4、表 5、図 6、図 7)。このことから、インソールを使用することで歩行時に踵からつま先までを使った歩行ができるようになることと、足底圧中心の横揺れが少なくなることにより横方向への転倒の可能性を減じ、安定した歩行が可能となることがわかった。

2.3 平地歩行時重心左右動揺量

頑健な計測を行う事を目的とし、複数マーカーから骨盤中心を計測することで、マーカー一つが隠れても連続的な骨盤位置の取得を行えるようにした。図 8 に示すように、歩行時の骨盤後部中央に取り付けたリジッドベース上の 3 つのマーカーの 3 次元座標位置を計測し、それらの値から骨盤中心を算出した。その後、一歩ごとの重心位置の移動量を計算した。表 6 および図 9 に示すように、開発中のインソールを用いることで、10 名中 9 名が重心の左右動揺量が減少した。

これは歩行中に重心が歩行の中心軸から離れないことを意味しており、歩行時足底圧中心の左右移動量が減少していることと関連していることから、バランスの良い歩行ができていることを裏付けている。

2.4 平地歩行時内側広筋・外側広筋活動量

歩行時の内側広筋と外側広筋の筋活動比率の変化を計測するため、内側広筋筋電位 (V_M) と外側広筋筋電位 (V_L) の計測を行った。その後、 $R = V_L / V_M$ をインソール無し条件 (R_{OFF}) とインソール有りの条件 (R_{ON}) で計算した結果と、その変化率 (R_{ON} / R_{OFF}) を表 7 および図 10 に示す。この結果、10 名中 7 名がインソールを使用することで、外側広筋が優位に活動するようになることが分かった。内反膝は一般的に内側広筋が優位に働いている状況であるため、インソールを用いることで外側広筋が優位に働くことは、内反膝の改善につながる可能性がある。

2.5 上り坂歩行時足底圧中心

上り坂歩行時の左右足の足底圧中心を計測し、立脚期中移動軌跡の X 軸方向移動量と Y 軸方向移動量を計算した。右足の結果を表 8 および図 11 に示すように、10 名中 2 名で X 方向移動量が増加した。それ以外の 8 名はほぼ変化なしであった。また、表 9 および図 12 に示すように 10 名中全員が Y 方向移動量が減少した。左足についても同様の傾向が見られた(表 10、表 11、図 13、図 14)。このことから、X 方向に関しては、上り坂ではつま先着地後に踏ん張る必要があることから、インソールの有無で差が生まれにくいことが考えられる。また、上り坂においても、足底圧中心の横揺れが少なくなることにより横方向への転倒の可能性を減じ、安定した歩行が可能となることがわかった。

2.6 下り坂歩行時足底圧中心

下り坂歩行時の左右足の足底圧中心を計測し、立脚期中移動軌跡のX軸方向移動量とY軸方向移動量を計算した。右足の結果を表12および図15に示すように、10名中2名でX方向移動量が増加した。それ以外の8名はほぼ変化なしであった。また、表13および図16に示すように10名中9名がY方向移動量が減少した。左足についても同様の傾向が見られた(表14、表15、図17、図18)。このことから、このことから、X方向に関しては、上り坂と同様につま先着地後に踏ん張る必要があることから、インソールの有無で差が生まれないことが考えられる。また、下り坂においても、足底圧中心の横揺れが少なくなることにより横方向への転倒の可能性を減じ、安定した歩行が可能となることがわかった。

2.7 上り坂歩行時重心左右動揺量

歩行時の骨盤後部中央に取り付けたリジッドベース上の3つのマーカーの3次元座標位置を計測し、それらの値から骨盤中心を算出した。その後、一步ごとの重心位置の移動量を計算した。表16および図19に示すように、開発中のインソールを用いることで、10名中7名が重心の左右動揺量が減少した。考察は下り坂の重心左右動揺量とともに記載する。

2.8 下り坂歩行時重心左右動揺量

歩行時の骨盤後部中央に取り付けたリジッドベース上の3つのマーカーの3次元座標位置を計測し、それらの値から骨盤中心を算出した。その後、一步ごとの重心位置の移動量を計算した。表17および図20に示すように、開発中のインソールを用いることで、10名中6名が重心の左右動揺量が減少した。

平地と比較して左右動揺量の減少する人数がやや少ない結果は、前述の上り坂歩行時とも共通する。これは上り坂や下り坂で歩行中の重心動揺を抑える方法に個人差が存在しているためだと考えられる。足首や膝、股関節等で動揺を吸収する場合はインソールの効果が薄れることを意味している。ただし、前述の足圧中心と併せて考えると、バランスの良い歩行ができていることは変わらない。

2.9 上り坂歩行時内側広筋・外側広筋活動量

上り坂歩行時の内側広筋と外側広筋の筋活動比率の変化を計測するため、内側広筋筋電位(V_M)と外側広筋筋電位(V_L)の計測を行った。その後、 $R = V_L / V_M$ をインソール無しの場合(R_{OFF})とインソール有りの場合(R_{ON})で計算した結果と、その変化率(R_{ON} / R_{OFF})を表18および図21に示す。この結果、10名中6名がインソールを使用することで、内側広筋が優位に活動するようになることが分かった。考察は下り坂歩行時内側広筋・外側広筋活動量とともに記載する。

2.10 下り坂歩行時内側広筋・外側広筋活動量

下り坂歩行時の内側広筋と外側広筋の筋活動比率の変化を計測するため、内側広筋筋電位 (V_M) と外側広筋筋電位 (V_L) の計測を行った。その後、 $R = V_L / V_M$ をインソール無し
の条件(R_{OFF})とインソール有りの条件(R_{ON})で計算した結果と、その変化率(R_{ON}/R_{OFF})を表
19 および図 22 に示す。この結果、10 名中 8 名がインソールを使用することで、内側広筋
が優位に活動するようになることが分かった。(被験者 3 に関しては、実験中にセンサに
汗がつくなどの問題が起きて大幅に数値が上がったことが考えられる。図 23 に被験者 3
を除いた結果を載せる) 上り下りとも、平地歩行と異なり、インソールを入れると内側広
筋が優位に働くことが分かった。上り坂や下り坂では平地よりもバランスを保たなければ
ならないことから、片足立位時にバランスをとる役割を果たす内転筋の一つである内側広
筋がインソールを入れることで力を発揮しやすくなることによるものだと考えられる。

3. 考察

本項ではそれぞれの実験結果からインソールの効果を考察していく。

インソールを使用した際、立位時の左右の足圧中心が平行になることから、左右で癖の異
なる立ち方が改善されることが想定できる。これは、短期的には疲れの軽減などの効果を生
み、長期的には骨盤のゆがみや膝の変形の予防、改善といったことが期待できることを意味
している。今後、長期で使用した際の効果も実験で検討する必要がある。

平地、上り坂、下り坂歩行時の足底圧中心の移動量の変化からは、インソールを使用した
際に足圧中心が足の外側を通らなくなることがわかった。これは、エネルギーを進行方向へ
の移動に効果的に使えていることを意味し、また、歩行の安定性が増すことも意味している。
さらに、進行方向への移動量が伸びていることから、このインソールを使用した際に、踵か
ら入ってつま先で蹴り出すという、理想的な歩行に近づくことが期待できる。

平地、上り坂、下り坂とも重心左右動揺量が減少していることから、上記の歩行の安定
性が増していることを裏付けることができる。

内外側広筋の筋活動量計測の結果からは、平地歩行ではインソールを使うことで外転筋
優位になる傾向があることが分かった。今後内反膝の患者に協力してもらって実験を行う
事で、その改善が数値的に明らかにできることが期待できる。また、上り坂や下り坂では平
地よりもバランスを保たなければならないことから、片足立位時にバランスをとる役割を
果たす内転筋の一つである内側広筋がインソールを入れることで力を発揮しやすくなるこ
とがわかった。

4. まとめ

本研究では、開発中のインソールの効果を定量的に明らかにするために、インソールの有
無の条件で、立位時の足裏圧力中心と、歩行時の足裏圧力中心、重心の左右動揺量、大腿
部内側広筋・外側広筋筋電位を計測した。

その結果、開発中のインソールを用いることで、立位時の左右バランスが改善されることと、平地歩行、上り坂歩行、下り坂歩行中の重心左右動揺量が軽減し、安定した歩行が実現できることが示された。また、内反膝を改善する効果が示唆された。さらに、高齢になると衰えやすい内側広筋が、インソールを使用することで上り坂や下り坂など、安定した歩行を求められる場面で力を発揮しやすくなり、歩行の安全性にプラスに働く効果が示唆された。

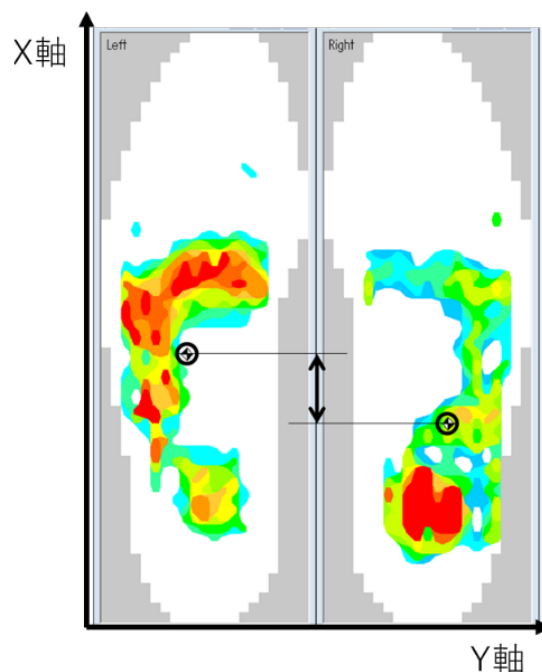


Fig.1 足底圧中心の左右差定義

Table1 足底圧中心の左右差と軽減率

被験者	インソール無 (cm)	インソール有 (cm)	軽減率 (%)
1	2.63	1.49	43.3
2	1.80	0.19	89.4
3	0.68	0.48	29.4
4	3.04	0.34	88.8
5	4.67	0.38	91.9
6	1.84	0.03	98.4
7	2.73	1.26	53.8
8	0.31	0.14	54.8
9	1.96	0.24	87.8
10	1.90	0.49	74.2

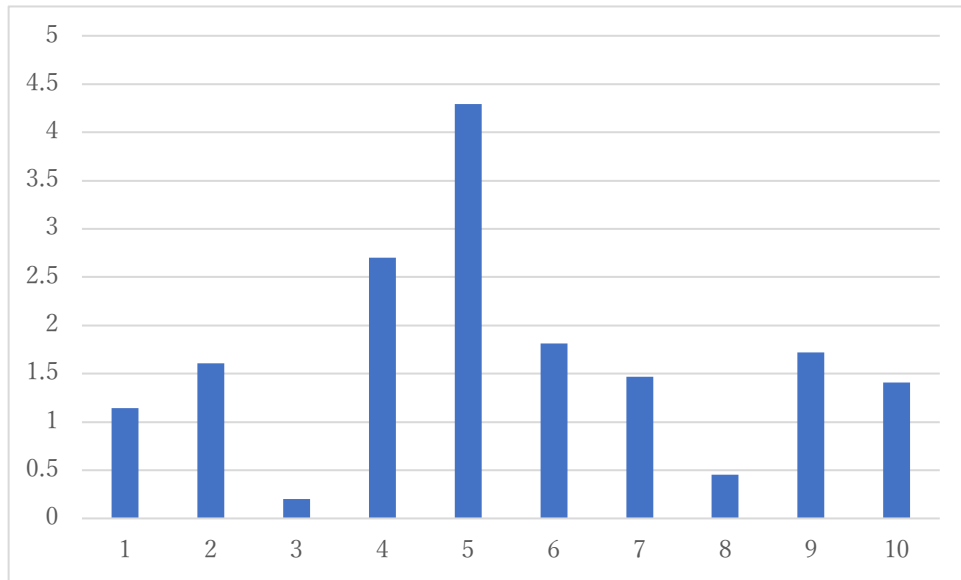


Fig.2 インソールによる立位時左右足重心位置ずれ量の軽減値

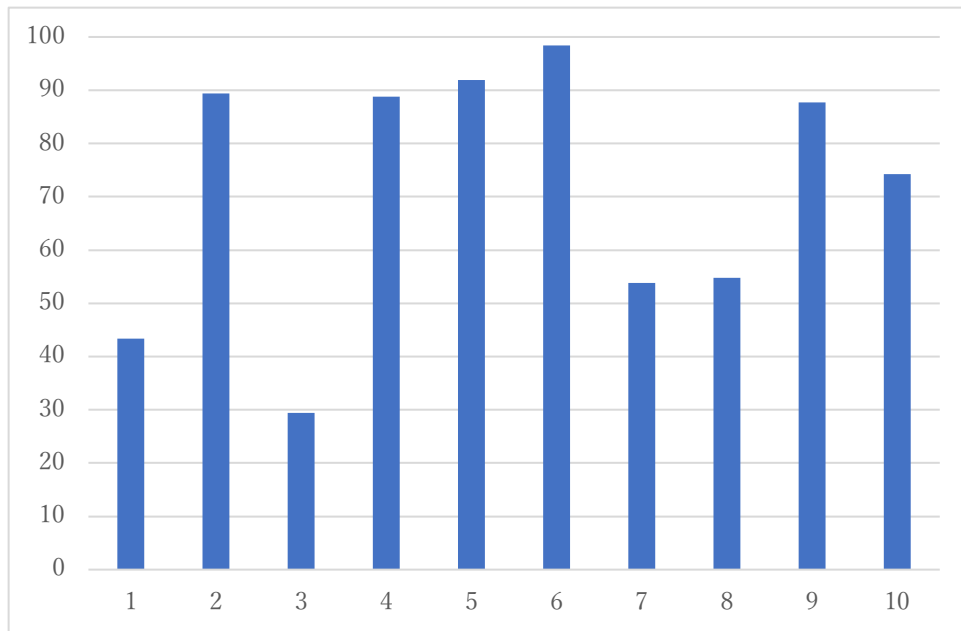


Fig.3 インソールによる立位時左右足重心位置ずれ量の軽減割合

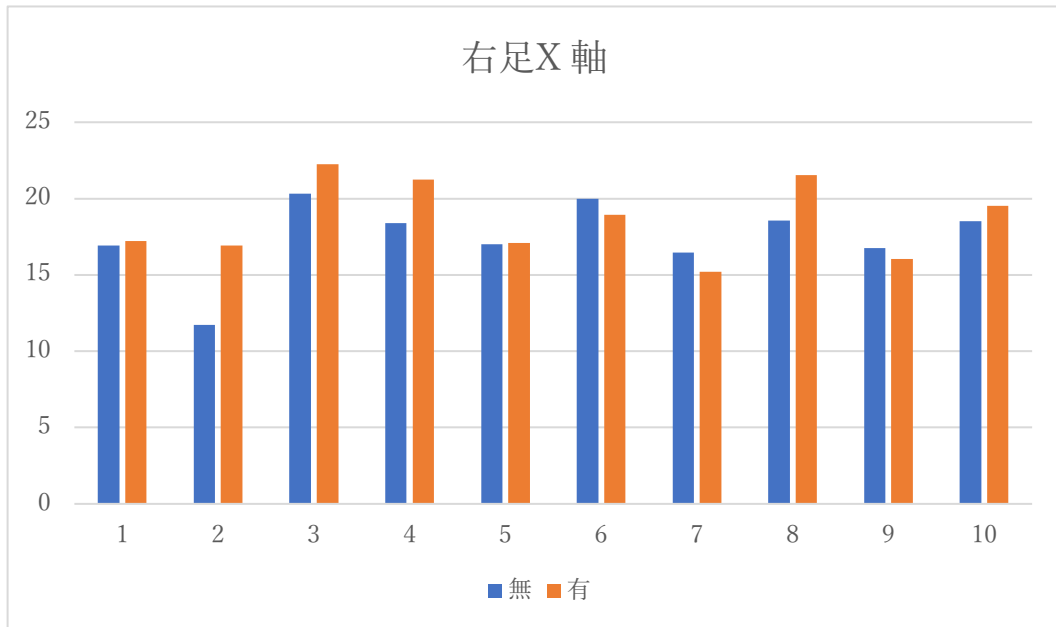


Fig.4 平地步行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

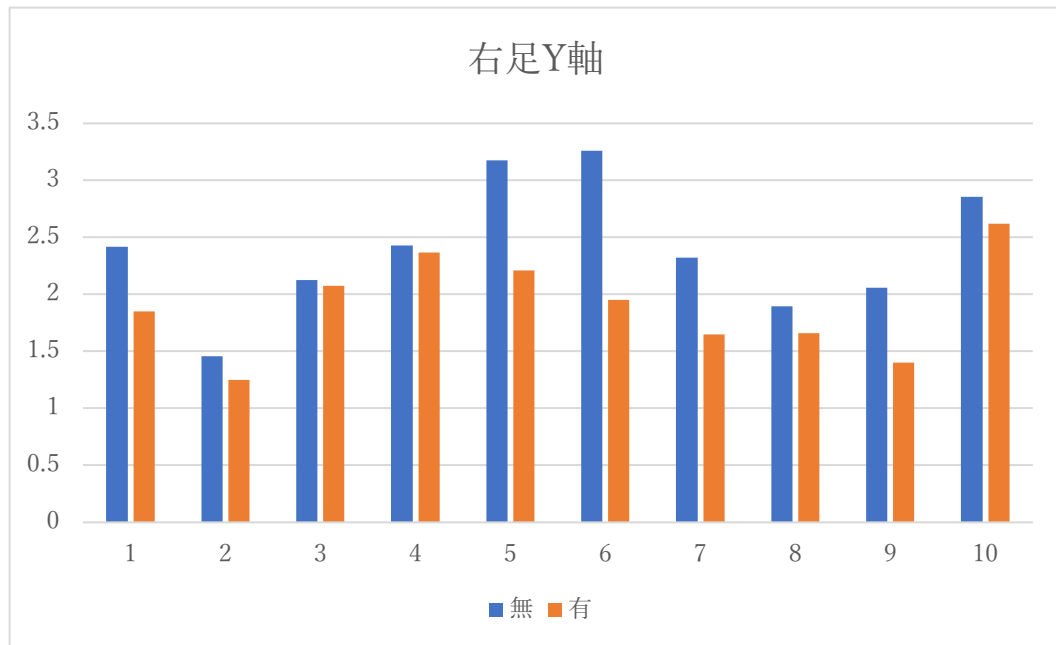


Fig.5 平地步行時Y軸足底圧中心移動量 (右足)

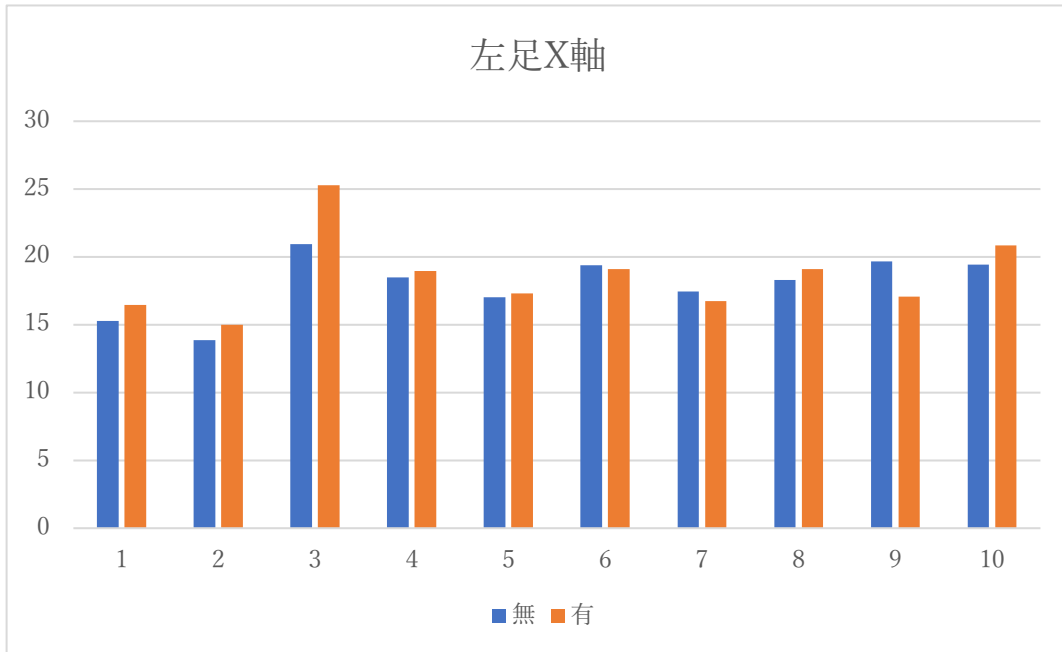


Fig.6 平地步行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

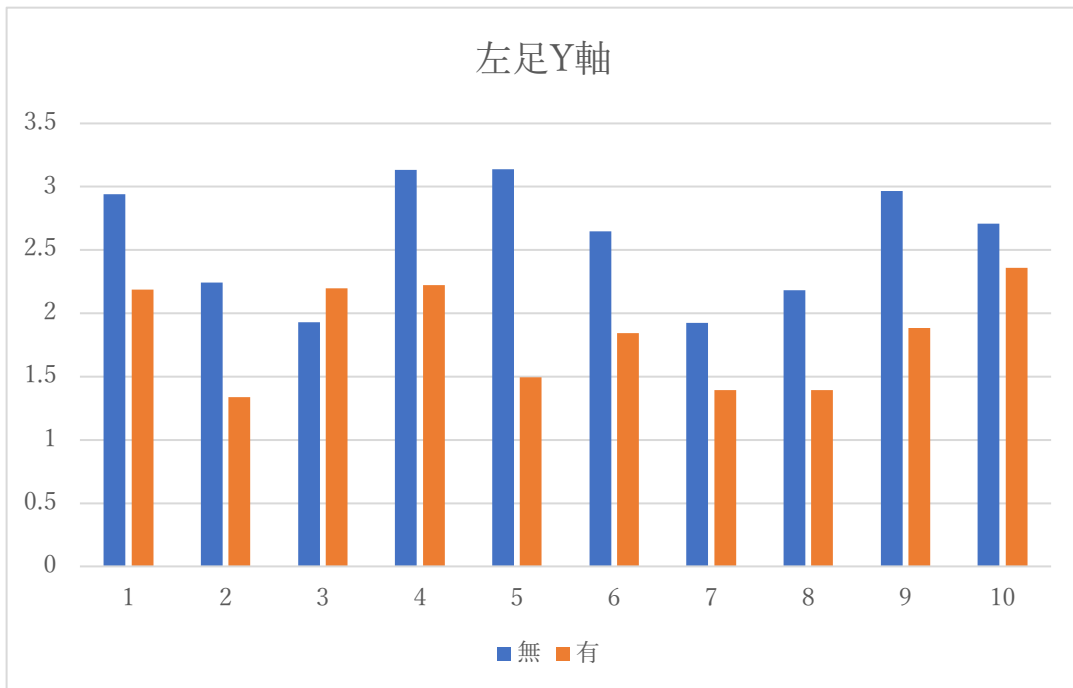


Fig.7 平地步行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

Table2 平地歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	16.9	17.2	0.3
2	11.7	16.9	5.2
3	20.3	22.3	2.0
4	18.4	21.2	2.8
5	17.0	17.1	0.1
6	20.0	18.9	-1.1
7	16.4	15.1	-1.3
8	18.6	21.5	2.9
9	16.8	16.0	-0.8
10	18.5	19.5	1.0

Table3 平地歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	2.42	1.85	-0.57
2	1.46	1.25	-0.21
3	2.13	2.08	-0.05
4	2.43	2.37	-0.06
5	3.18	2.21	-0.97
6	3.26	1.95	-1.31
7	2.32	1.65	-0.67
8	1.89	1.66	-0.23
9	2.05	1.40	-0.65
10	2.85	2.62	-0.23

Table4 平地歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	15.3	16.5	1.2
2	13.9	15	1.1
3	20.9	25.3	4.4
4	18.5	18.9	0.4
5	17	17.3	0.3
6	19.4	19.1	-0.3
7	17.5	16.7	-0.8
8	18.3	19.1	0.8
9	19.7	17.1	-2.6
10	19.4	20.9	1.5

Table5 平地歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	2.9	2.2	-0.7
2	2.2	1.3	-0.9
3	1.9	2.2	0.3
4	3.1	2.2	-0.9
5	3.1	1.5	-1.6
6	2.6	1.8	-0.8
7	1.9	1.4	-0.5
8	2.2	1.4	-0.8
9	3	1.9	-1.1
10	2.7	2.4	-0.3

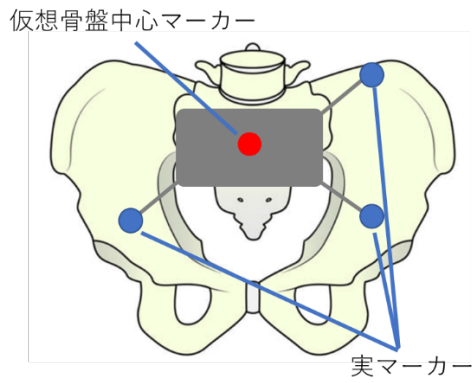


Fig.8 モーションキャプチャによる骨盤中心の計測マーカー位置

Table6 一歩中の骨盤中心左右動揺量

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	動揺量変化 (cm)
1	3.68	3.20	-0.48
2	3.04	2.77	-0.27
3	4.17	2.88	-1.29
4	6.92	4.04	-2.88
5	6.91	5.03	-1.88
6	5.08	3.37	-1.71
7	6.13	3.36	-2.77
8	7.73	8.87	1.14
9	4.99	4.67	-0.32
10	3.85	3.72	-0.13

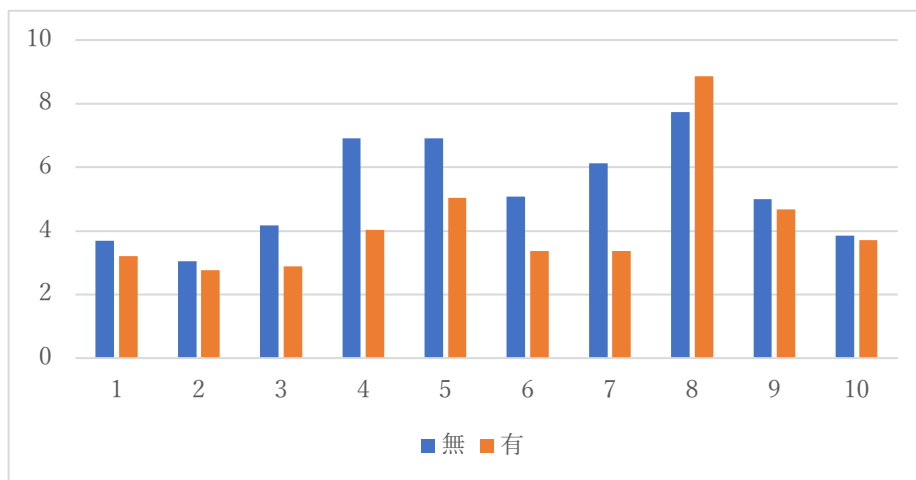


Fig.9 一歩中の骨盤中心左右動揺量の比較

Table7 内外転筋活動量の比率とインソール有無による変化率（外転筋/内転筋）

被験者	インソール 無 (R _{OFF})	インソール 有 (R _{ON})	変化率 (R _{ON} /R _{OFF})
1	0.52	0.57	1.10
2	0.49	0.75	1.53
3	0.14	0.19	1.36
4	0.17	0.22	1.29
5	1.05	0.35	0.33
6	1.10	0.72	0.65
7	1.20	1.45	1.21
8	0.73	0.63	0.86
9	0.13	0.34	2.61
10	3.99	8.44	2.11

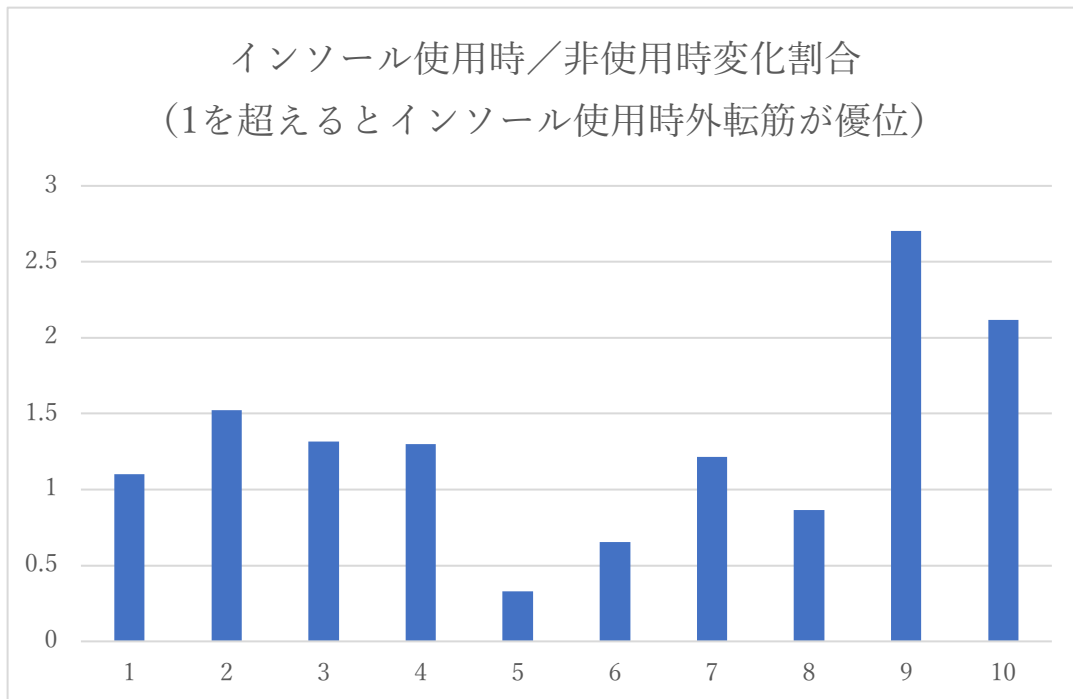


Fig.10 インソール有無による平地歩行時内外転筋活動量比率の変化割合

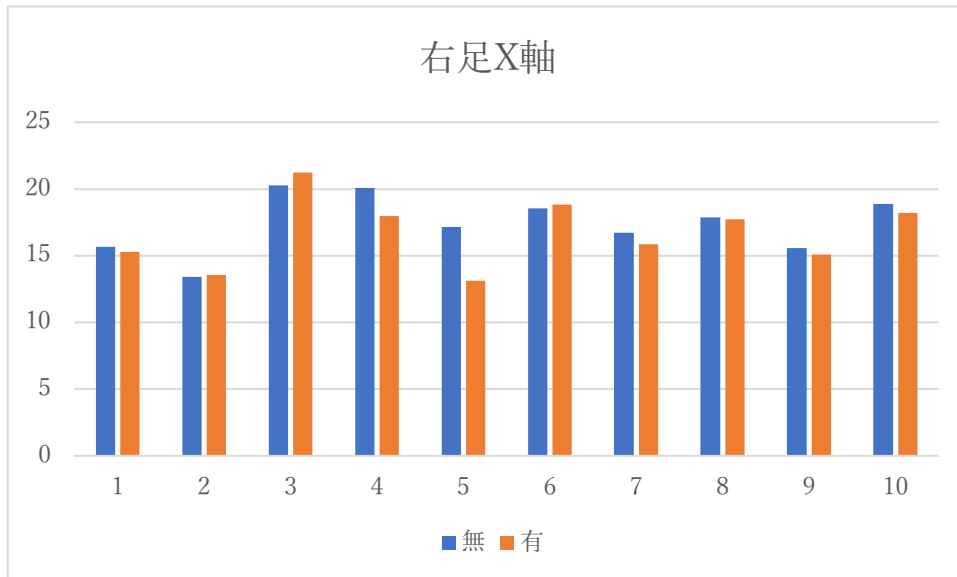


Fig.11 上り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

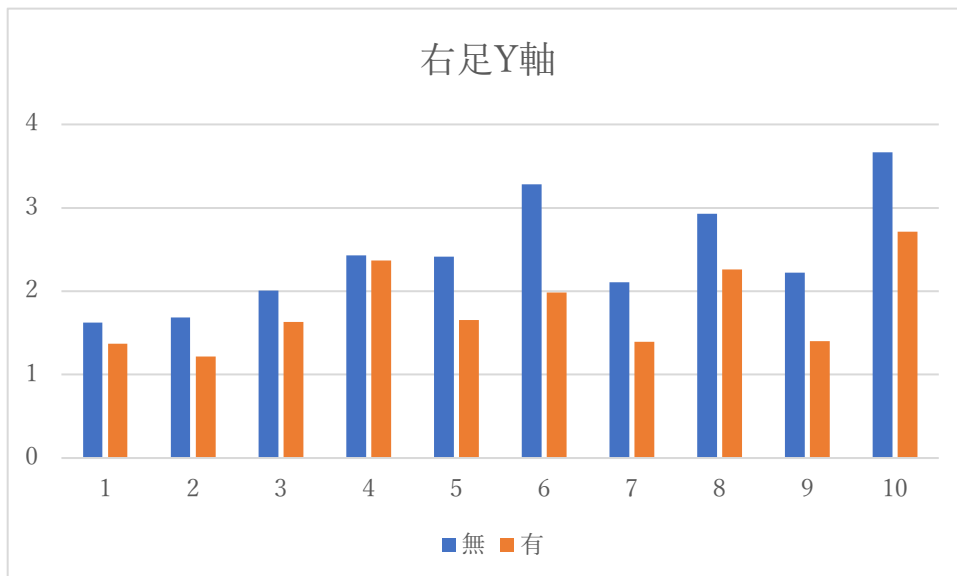


Fig.12 上り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (右足)

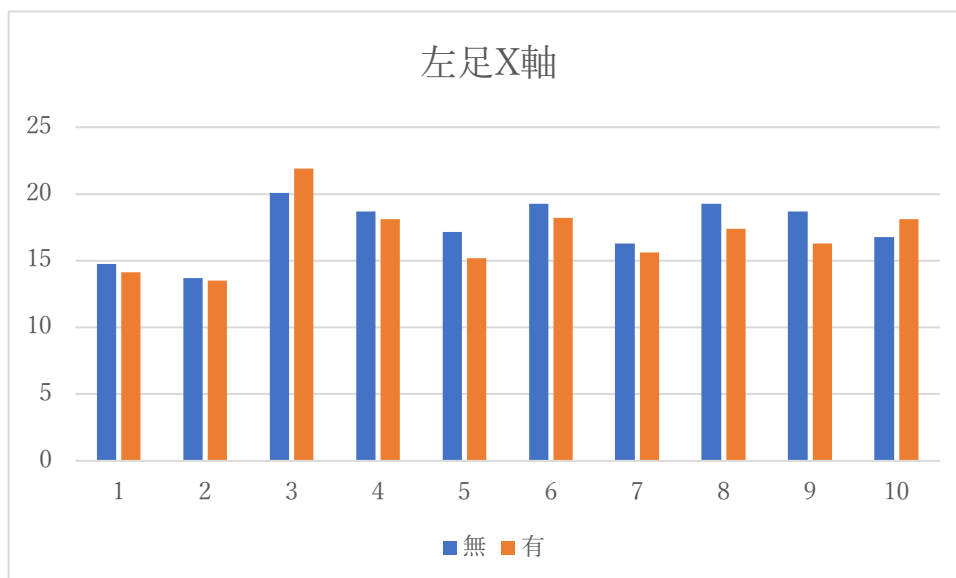


Fig.13 上り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

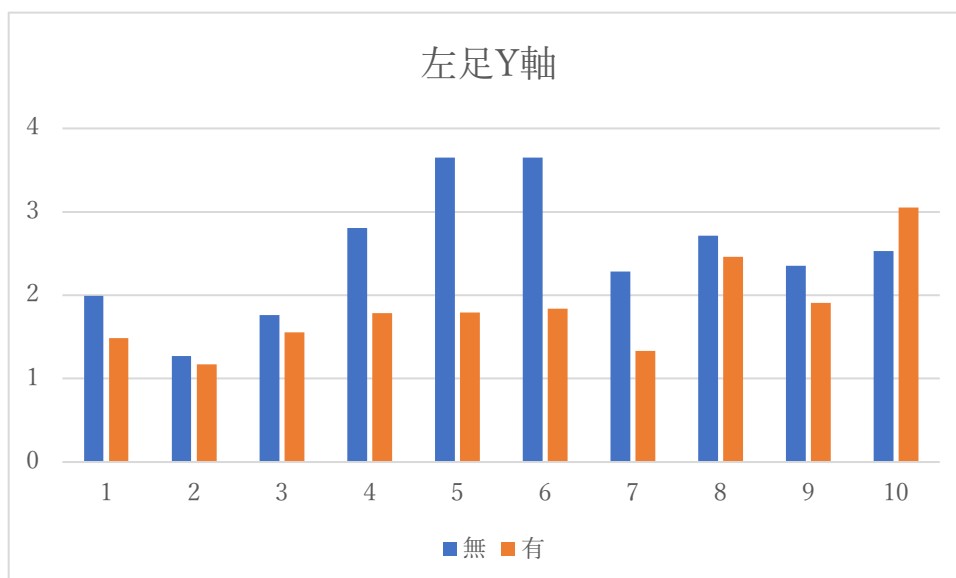


Fig.14 上り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (左足)

Table8 上り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	15.6	15.3	0.3
2	13.4	13.6	-0.2
3	20.3	21.2	-0.9
4	20.1	18	2.1
5	17.2	13.1	4.1
6	18.5	18.8	-0.3
7	16.7	15.9	0.8
8	17.9	17.7	0.2
9	15.6	15.1	0.5
10	18.9	18.2	0.7

Table9 上り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	1.6	1.4	0.2
2	1.7	1.2	0.5
3	2	1.6	0.4
4	2.4	2.4	0
5	2.4	1.7	0.7
6	3.3	2	1.3
7	2.1	1.4	0.7
8	2.9	2.3	0.6
9	2.2	1.4	0.8
10	3.7	2.7	1

Table10 上り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	14.7	14.1	0.6
2	13.7	13.5	0.2
3	20.1	21.9	-1.8
4	18.7	18.1	0.6
5	17.2	15.2	2
6	19.2	18.2	1
7	16.3	15.6	0.7
8	19.2	17.4	1.8
9	18.7	16.3	2.4
10	16.8	18.1	-1.3

Table11 上り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	2	1.5	0.5
2	1.3	1.2	0.1
3	1.8	1.6	0.2
4	2.8	1.8	1
5	3.7	1.8	1.9
6	3.7	1.8	1.9
7	2.3	1.3	1
8	2.7	2.5	0.2
9	2.4	1.9	0.5
10	2.5	3.1	-0.6

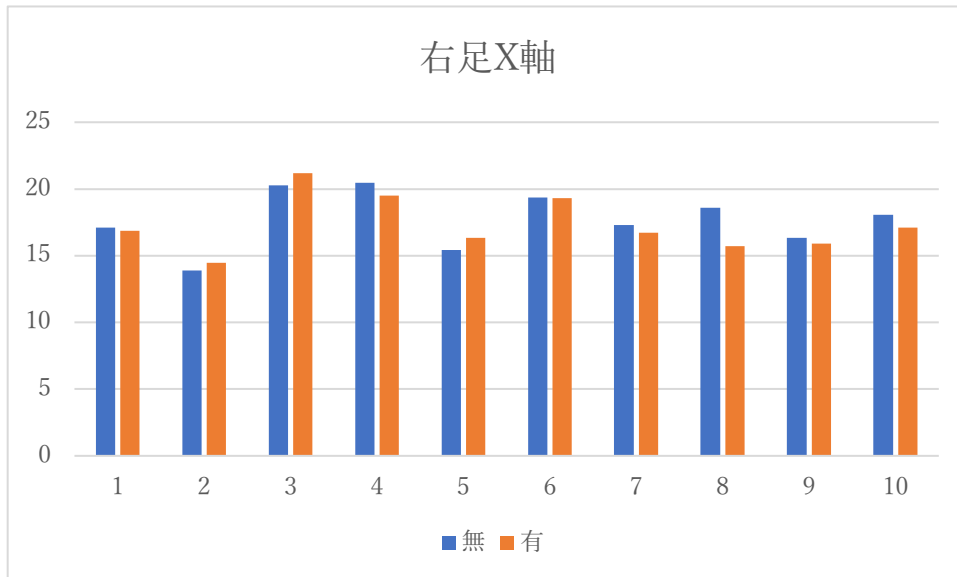


Fig.15 下り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

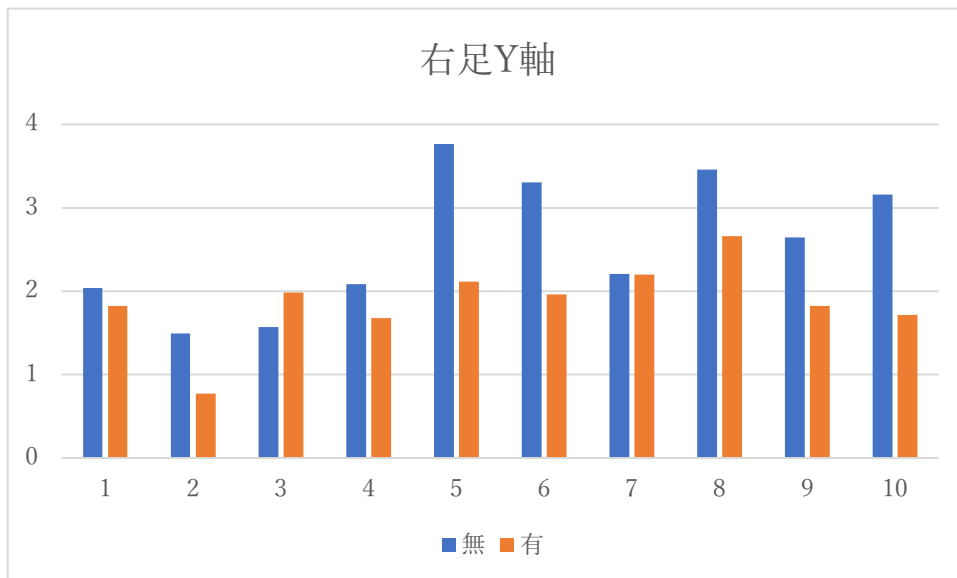


Fig.16 下り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (右足)

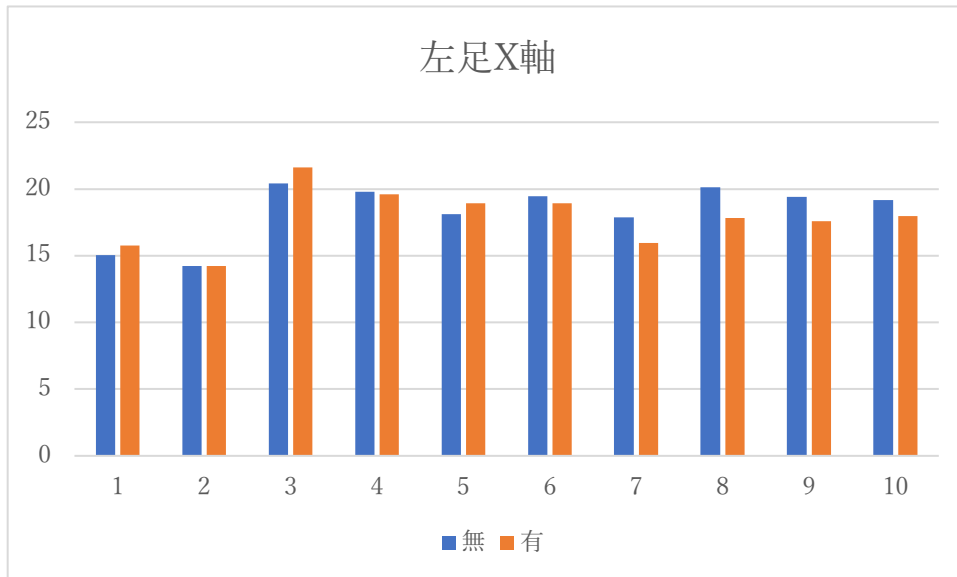


Fig.17 下り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

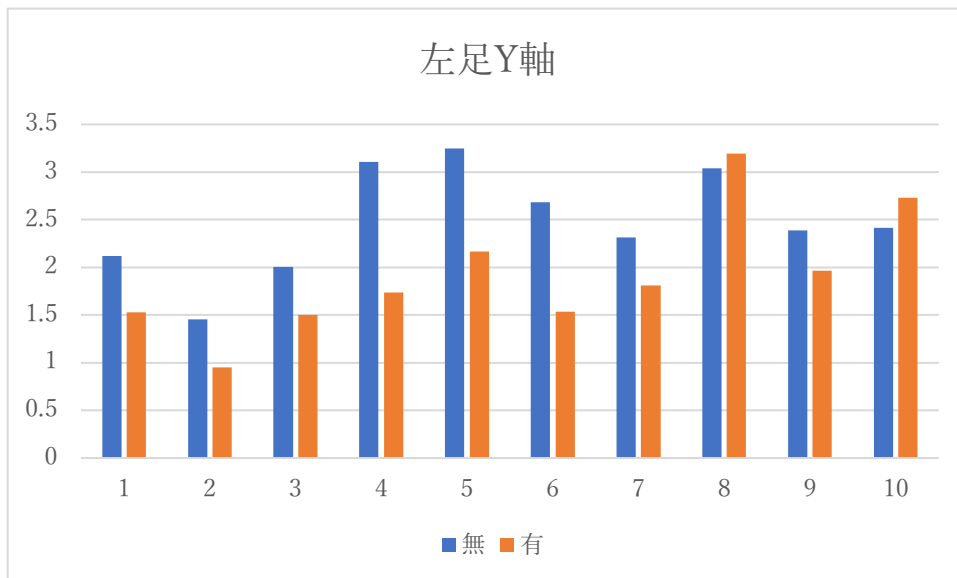


Fig.18 下り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (左足)

Table12 下り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	17.1	16.9	0.2
2	13.9	14.4	-0.5
3	20.3	21.2	-0.9
4	20.5	19.5	1
5	15.4	16.3	-0.9
6	19.4	19.3	0.1
7	17.3	16.7	0.6
8	18.6	15.7	2.9
9	16.3	15.9	0.4
10	18.1	17.1	1

Table13 下り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (右足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	2	1.8	0.2
2	1.5	0.8	0.7
3	1.6	2	-0.4
4	2.1	1.7	0.4
5	3.8	2.1	1.7
6	3.3	2	1.3
7	2.2	2.2	0
8	3.5	2.7	0.8
9	2.6	1.8	0.8
10	3.2	1.7	1.5

Table14 下り坂歩行時 X 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	15.1	15.7	-0.6
2	14.2	14.2	0
3	20.4	21.6	-1.2
4	19.8	19.6	0.2
5	18.1	18.9	-0.8
6	19.4	18.9	0.5
7	17.9	16	1.9
8	20.1	17.8	2.3
9	19.4	17.6	1.8
10	19.2	18	1.2

Table15 下り坂歩行時 Y 軸足底圧中心移動量 (左足)

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	移動量変化 (cm)
1	2.1	1.5	0.6
2	1.5	1	0.5
3	2	1.5	0.5
4	3.1	1.7	1.4
5	3.2	2.2	1
6	2.7	1.5	1.2
7	2.3	1.8	0.5
8	3	3.2	-0.2
9	2.4	2	0.4
10	2.4	2.7	-0.3

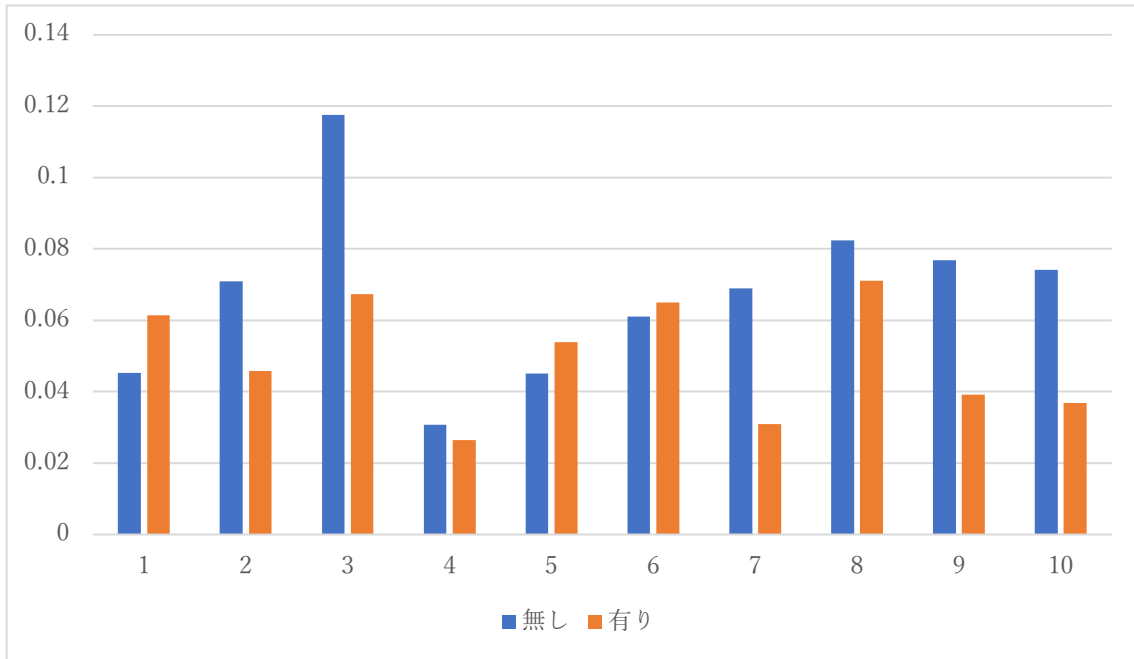


Fig.19 上り坂一歩中の骨盤中心左右動揺量の比較

Table8 上り坂一歩中の骨盤中心左右動揺量

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	動揺量変化 (cm)
1	4.54	6.14	-1.60
2	7.10	4.59	2.51
3	11.76	6.73	5.03
4	3.08	2.64	0.44
5	4.52	5.39	-0.87
6	6.10	6.50	-0.40
7	6.89	3.10	3.79
8	8.24	7.12	1.12
9	7.68	3.92	3.76
10	7.42	3.69	3.73

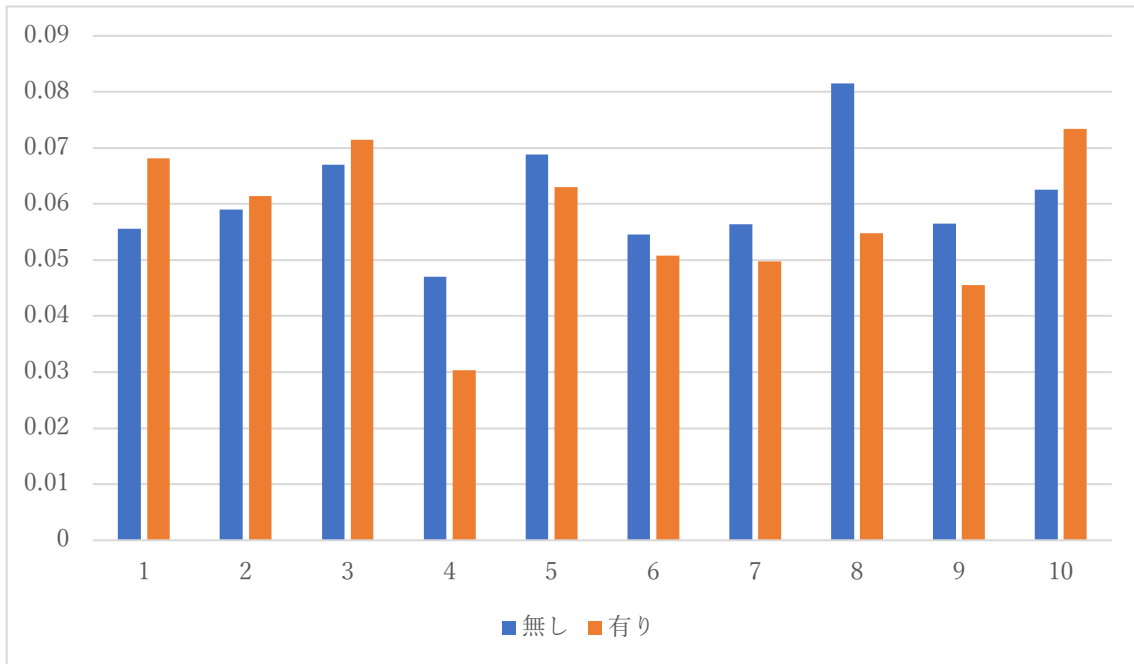


Fig.20 下り坂一步中の骨盤中心左右動揺量の比較

Table9 下り坂一步中の骨盤中心左右動揺量

被験者	インソール 無(cm)	インソール 有(cm)	動揺量変化 (cm)
1	5.56	6.81	-1.25
2	5.91	6.14	-0.23
3	6.7	7.14	-0.44
4	4.7	3.04	1.66
5	6.88	6.31	0.57
6	5.45	5.08	0.37
7	5.64	4.98	0.66
8	8.15	5.48	2.67
9	5.65	4.56	1.09
10	6.26	7.34	-1.08

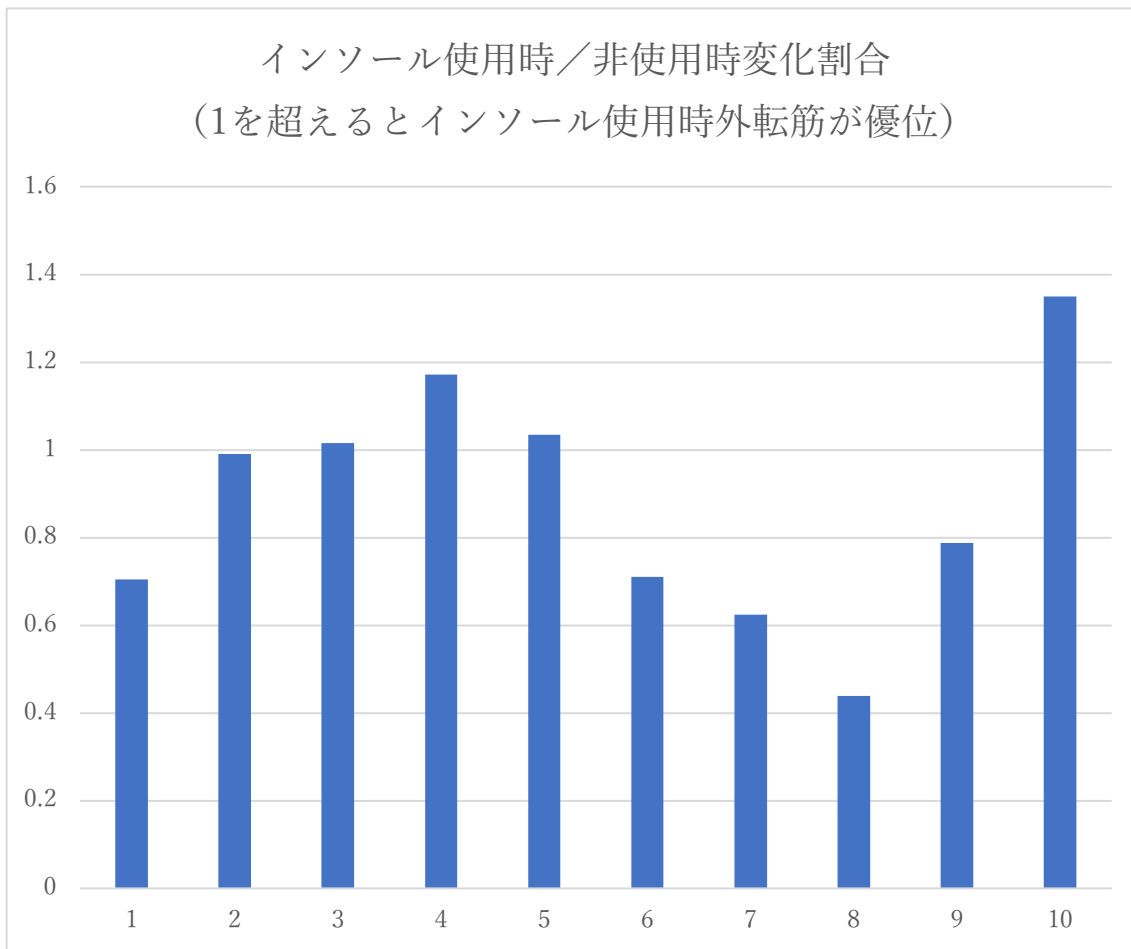


Fig.21 インソール有無による上り坂歩行時内外転筋活動量比率の変化割合

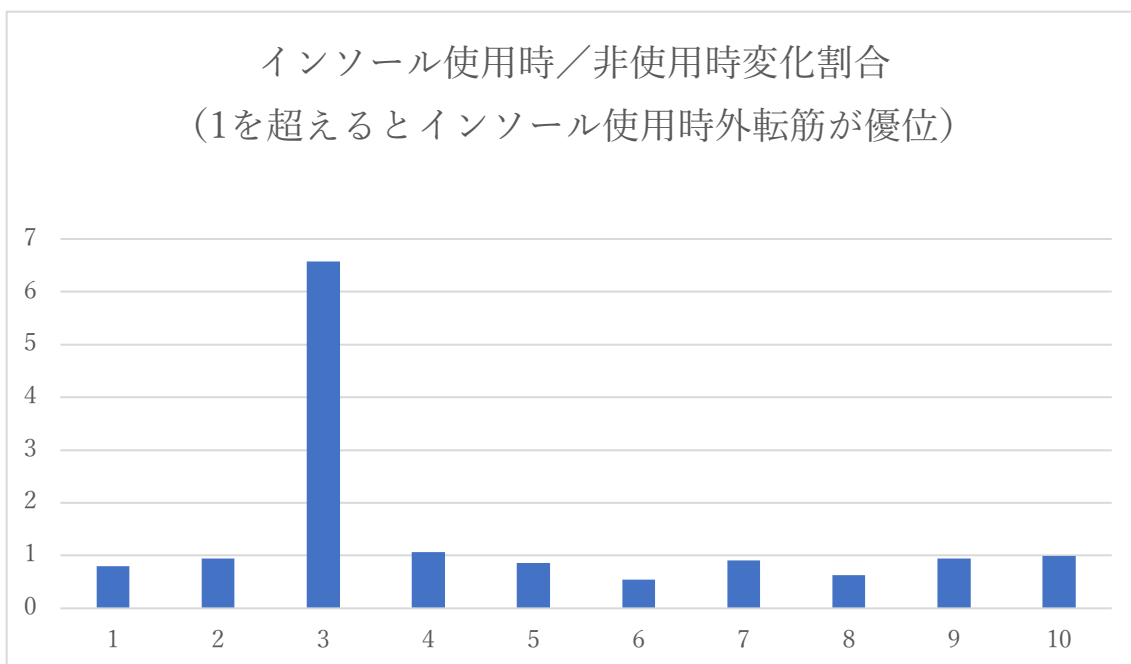


Fig.22 インソール有無による下り坂歩行時内外転筋活動量比率の変化割合

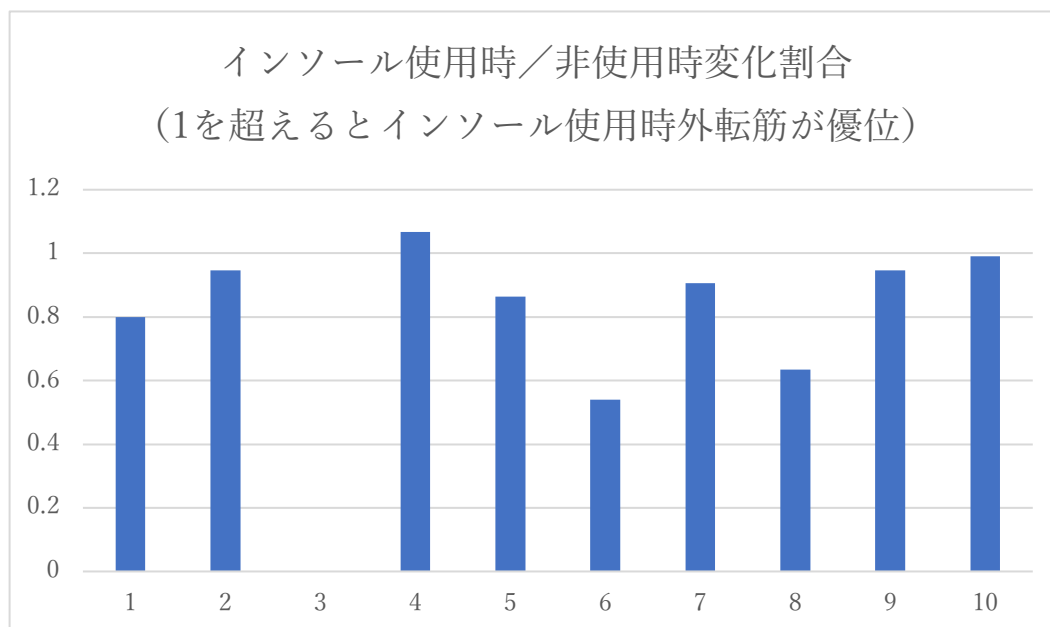


Fig.22 インソール有無による下り坂歩行時内外転筋活動量比率の変化割合
(被験者3を除いたもの)