

C-3-2-2-2 歩行のメカニズム

(1) 歩行サイクル

歩行サイクルは、片足が踵から着地し、つま先で蹴って床から足が離れるまでを 1 歩行周期とし、1 歩行周期は 5 段階(Phase)に分けられる。以下に各 Phase における歩行動作と足圧分布図を図 C-3-2-2-3 に示す。

- <Phase1> 足が地面に触れた瞬間で、床との接触は踵によってなされる。
- <Phase2> 両足接地の期間である。この状態は最初の床接地に始まり、もう一方の足が地面から離れるまで続く。
- <Phase3> 片足支持期間の前半である。色付きの足の膝・股関節が伸びている間に、もう一方の足が接地している足を越えて前進する。
- <Phase4> 片足支持期間の後半である。色付きの足の踵が浮くときに始まり、もう一方の足が地面に着くときまで続く。
- <Phase5> 歩行サイクルの最後の接地状態であり、2 度目の両足接地期間である。

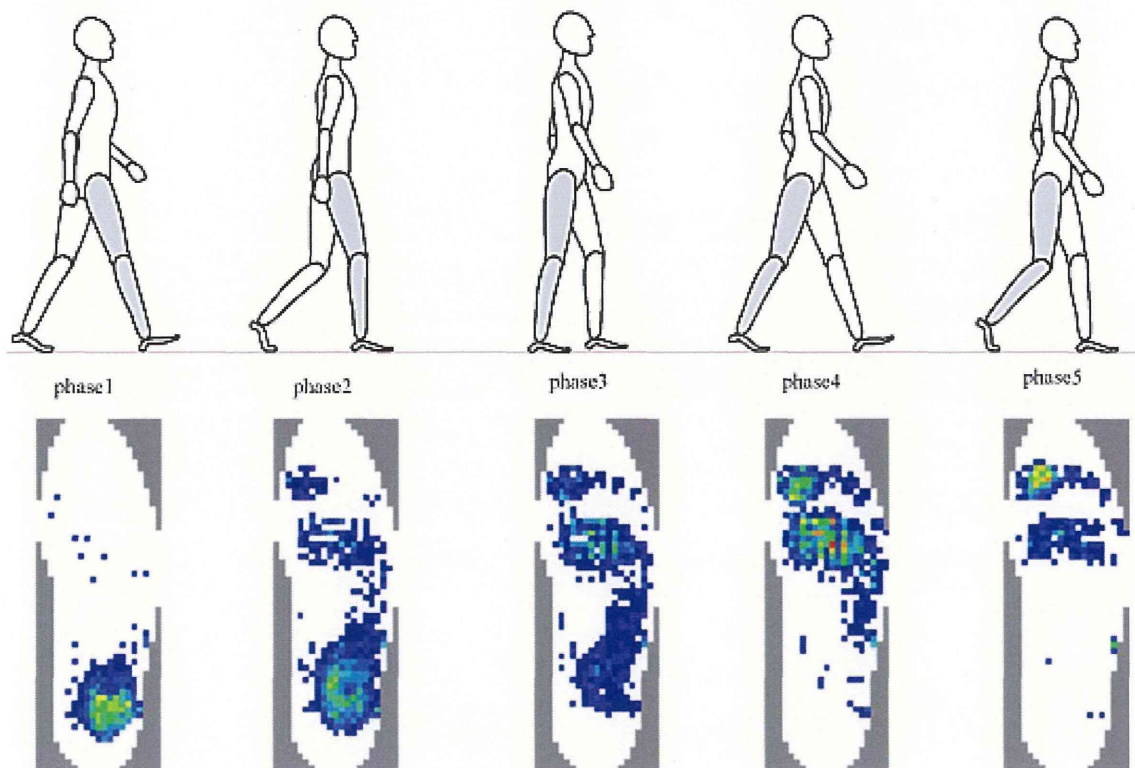


図 C-3-2-2-3 歩行サイクルと足圧分布図

(2) 歩行時の足底荷重の時間変化

安定して歩行できる平坦路において、足底が受ける荷重の1歩行周期中の時間変化の例を図 C-3-2-2-4 に示す。ここで、荷重は足底全体の足圧の合計から求められる。この図のようにM字型を示す。始めに現れるM字の左の山は Phase1 から Phase2 にかけて踵の着地時のインパクトを表し、谷は Phase3 においてもう片方の足が着地足を追い越している時で、右の山は Phase4 から Phase5 にかけてつま先が地面を蹴る状態に対応している。つまり、安定した歩行を行える平坦路では、荷重の時間変化がM字型をしており、理想的な荷重の移動ができている。

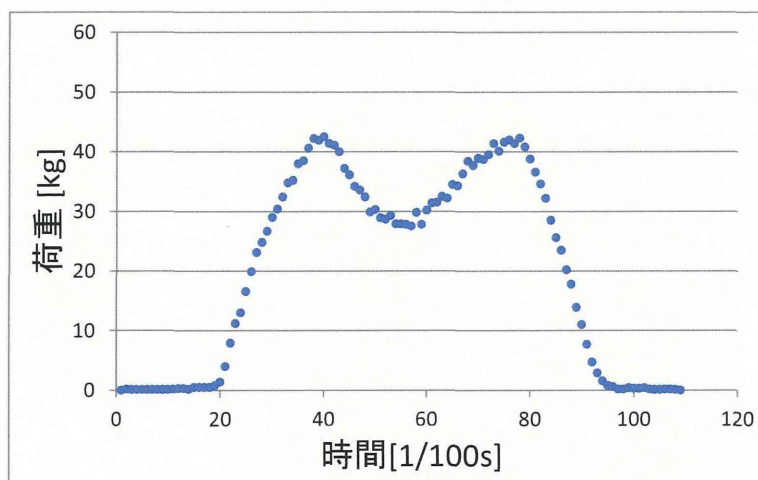


図 C-3-2-2-4 平坦路の歩行における荷重の時間変化

C-3-2-3 スラットコンベアのモックアップを用いた歩行の安全性評価

C-3-2-3-1 歩行実験の概要

前年度までの検討で、実際のコンベアでスラット間隔 150mm と 100mm について歩行実験を行い、スラット上の歩行路環境では、身体バランスが安定した歩行を保つには、スラット間隔と歩行角度が歩行路検討の重要な要素であることがわかった。ここでは、スラット間隔を 10mm 単位で調整できるようにボルトでスラットを固定したモックアップにおいて歩行実験を行った。図 C-3-2-3-1 にモックアップにおける歩行実験の概要を示す。歩行時の身体バランスに影響を及ぼすと考えられる歩行路環境の要因として、スラット間隔を 50mm から 150mm まで 10mm 間隔、歩行角度は 0 度、30 度、45 度、60 度、90 度を実験条件を設定して行った。安定した歩行が行える歩行路環境として平坦路についても行った。被験者には歩きやすい歩行方法(足運び)で歩いてもらい、歩きやすさの印象についてインタビューを行った。ここでは、被験者は、学生 3 名(X~Z)とした。

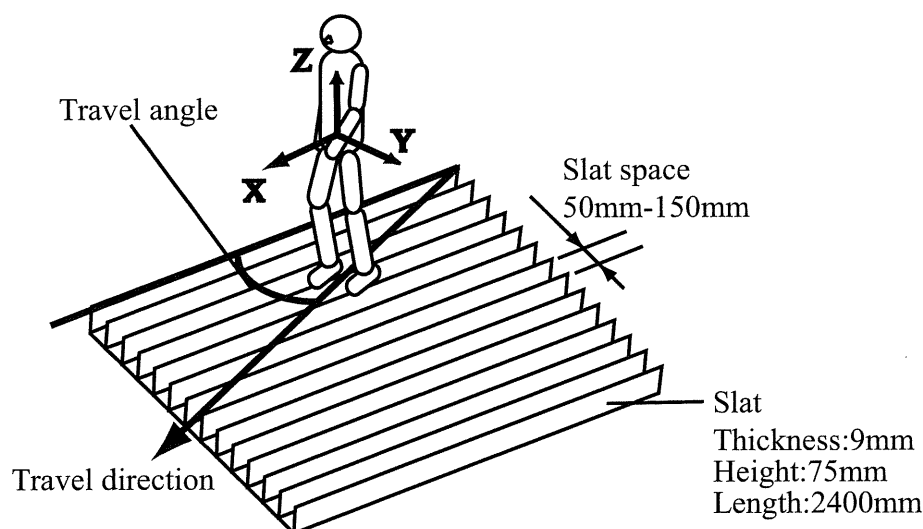


図 C-3-2-3-1 スラットコンベアのモックアップを用いた実験の概要

C-3-2-3-2 スラットコンベアにおける足運び

作業員へのアンケートによるとスラットコンベアを横断する時、作業員は歩行距離が短くなるように、スラットに対して浅い角度で歩くことが多い。しかし、浅い角度で歩くと靴底で支えるスラットの本数が減り、身体のバランスを崩しやすくなる。

実験から、スラット上での足運びは図 C-3-2-3-2 に示す 5 種類に分けられる。また、実験における足運びを歩行角度で整理した例を表 C-3-2-3-1 に示す。この表より、スラット間隔が広くなるにつれ、通常の足運びが難しくなり、また、歩行角度の浅い 0 度、30 度では通常の歩行が難しくなり、靴底を支えるスラットを踏める足運びを選んでいる。このことからスラットコンベア上での歩行角度は 45 度以上が歩きやすく、歩行の安全性を検討する上で歩行角度は重要な要素であることが分かる。

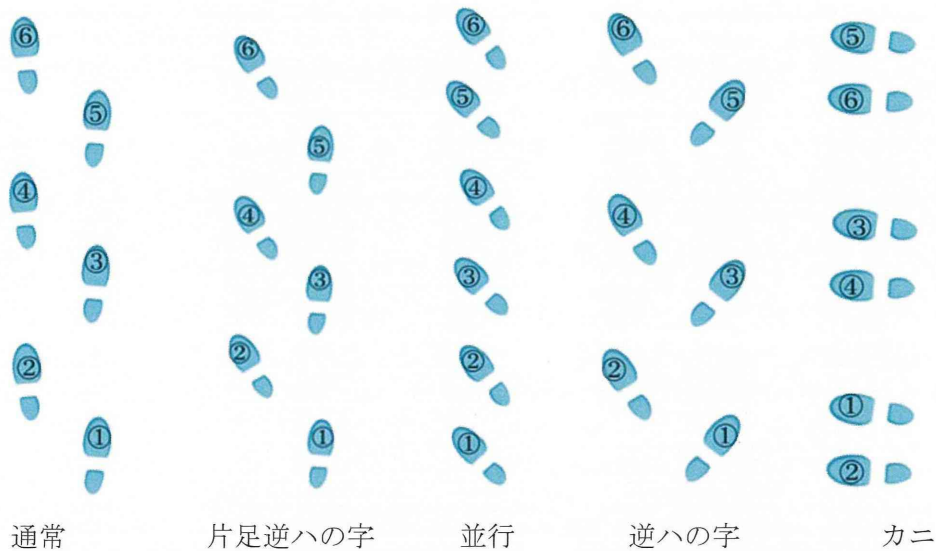


図 C-3-2-3-2 スラット上の足運びパターン

表 C-3-2-3-1 スラットコンベアにおける足運びの変化の例 (被験者 X)

スラット間隔	歩行角度				
	0°	30°	45°	60°	90°
50mm	通常	通常	通常	通常	通常
60mm	通常	通常	通常	通常	通常
70mm	逆ハ	通常	通常	通常	通常
80mm	逆ハ	通常	通常	通常	通常
90mm	並行	通常	通常	通常	通常
100mm	並行	並行	片足逆ハ	通常	通常
110mm	並行	並行	並行	通常	通常
120mm	並行	並行	並行	通常	通常
130mm	並行	並行	並行	通常	通常
140mm	並行	並行	並行	通常	通常
150mm	並行	並行	並行	通常	通常

C-3-2-3-3 スラットコンベア上の歩行の特徴

(1) 足底荷重の時間変化

C-3-2-2-2 で述べたように平坦路における歩行では理想的な荷重の移動ができるため、足底荷重の時間変化は図 C-3-2-2-4 のように M 字型になるが、スラットコンベア上ではつま先で地面を十分に蹴ることが難しくなり M 字の右のピークが現れず図 C-3-2-3-3 のようになる。

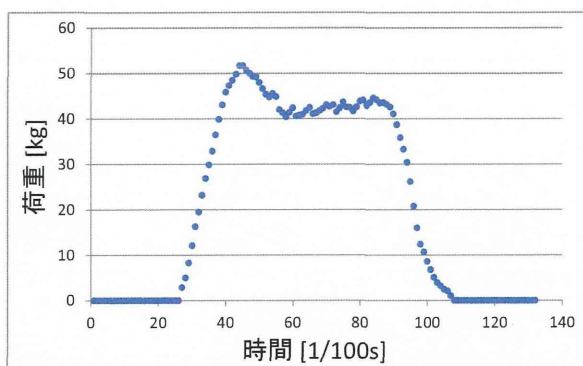
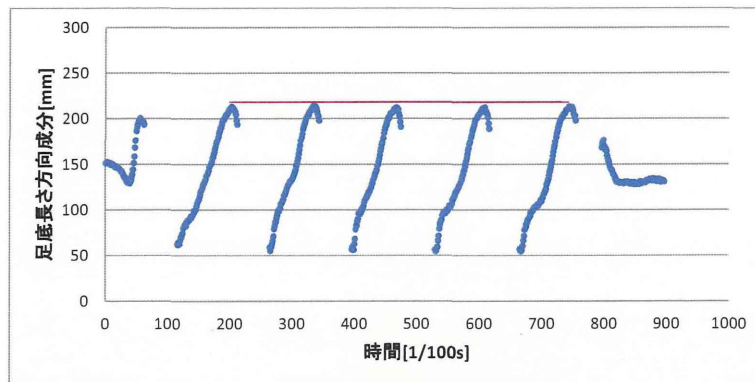


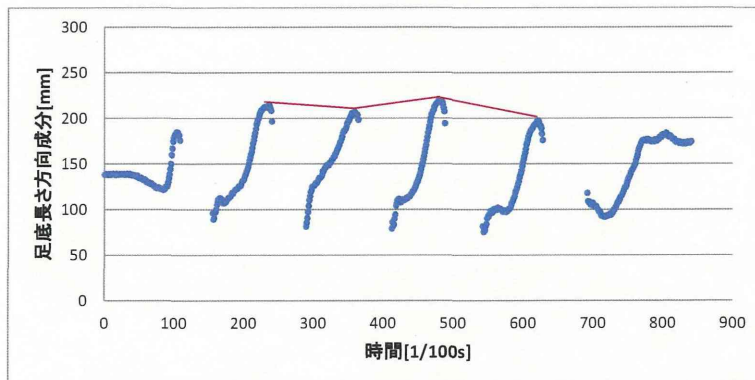
図 C-3-2-3-3 スラットコンベア上での歩行における荷重の時間変化

(2) 荷重中心移動の時間変化

平坦路における歩行では足底の圧力分布は図 C-3-2-2-3 のように荷重は踵からつま先の方へ移動する。ここでは、圧力分布の代表値として圧力分布の重心（荷重中心）の位置の時系列変化を比較した。例を図 C-3-2-3-4 に示す。この図において、赤線で結ばれたピークは歩行サイクルの Phase5 におけるつま先が地面から離れる位置を表している。この位置に注目すると平坦路ではほぼ一定であるのに対して、スラットコンベア上ではゆらぎが見られる。



(a) 平坦路の歩行



(b) スラットコンベア上の歩行 (スラット間隔 150mm, 歩行角度 90°)

図 C-3-2-3-4 荷重中心の時間変化 (足底長さ方向成分)

C-3-2-3-4 荷重中心のピークのゆらぎによる安全性評価の検討

ここでは、歩行路環境とつま先の荷重中心のゆらぎを比較した。荷重中心のゆらぎは、ピークの位置の標準偏差を用いた。

(1) スラット間隔による比較

始めに、実際のスラットコンベアについて、間隔 150mm と 100mm における歩行を比較した例を図 C-3-2-3-5 に示す。左右の足で小さい方の偏差で比べる。150mm に比べて 100mm の偏差が小さくなっており、被験者の印象と一致している。

次に、モックアップ実験においてスラット間隔を 150mm から 50mm まで 10mm 間隔で段階的に狭めて比較した例を図 C-3-2-3-6 に示す。これより、偏差は、いずれの歩行角度でも、スラット間隔が狭くなるにつれて小さくなっている。また、100mm から 90mm の間で大きい偏差の減少がみられる。これらも被験者の印象と一致している。

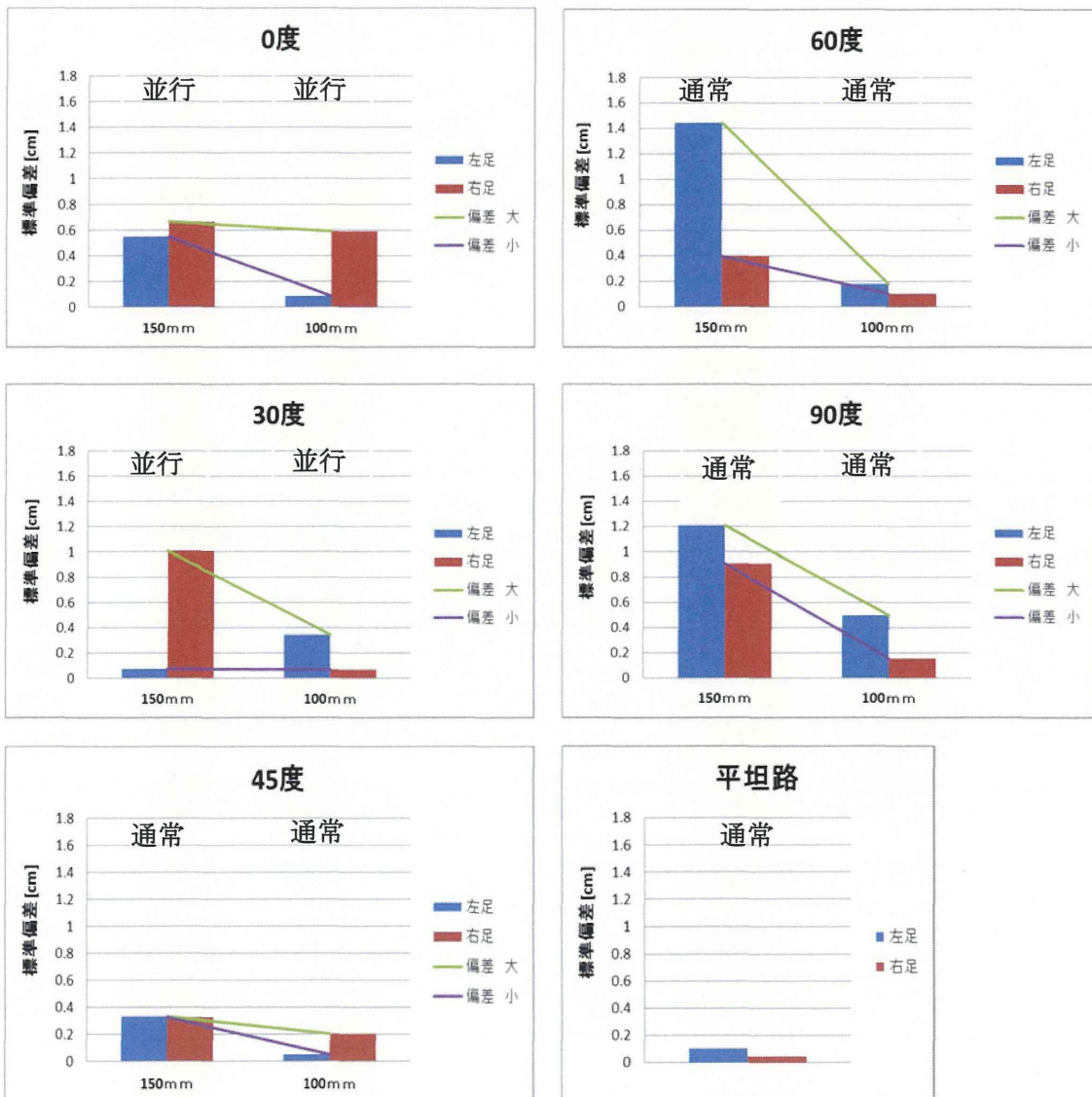


図 C-3-2-3-5 実際のスラットコンベアにおけるスラット間隔による比較 (被験者 A)

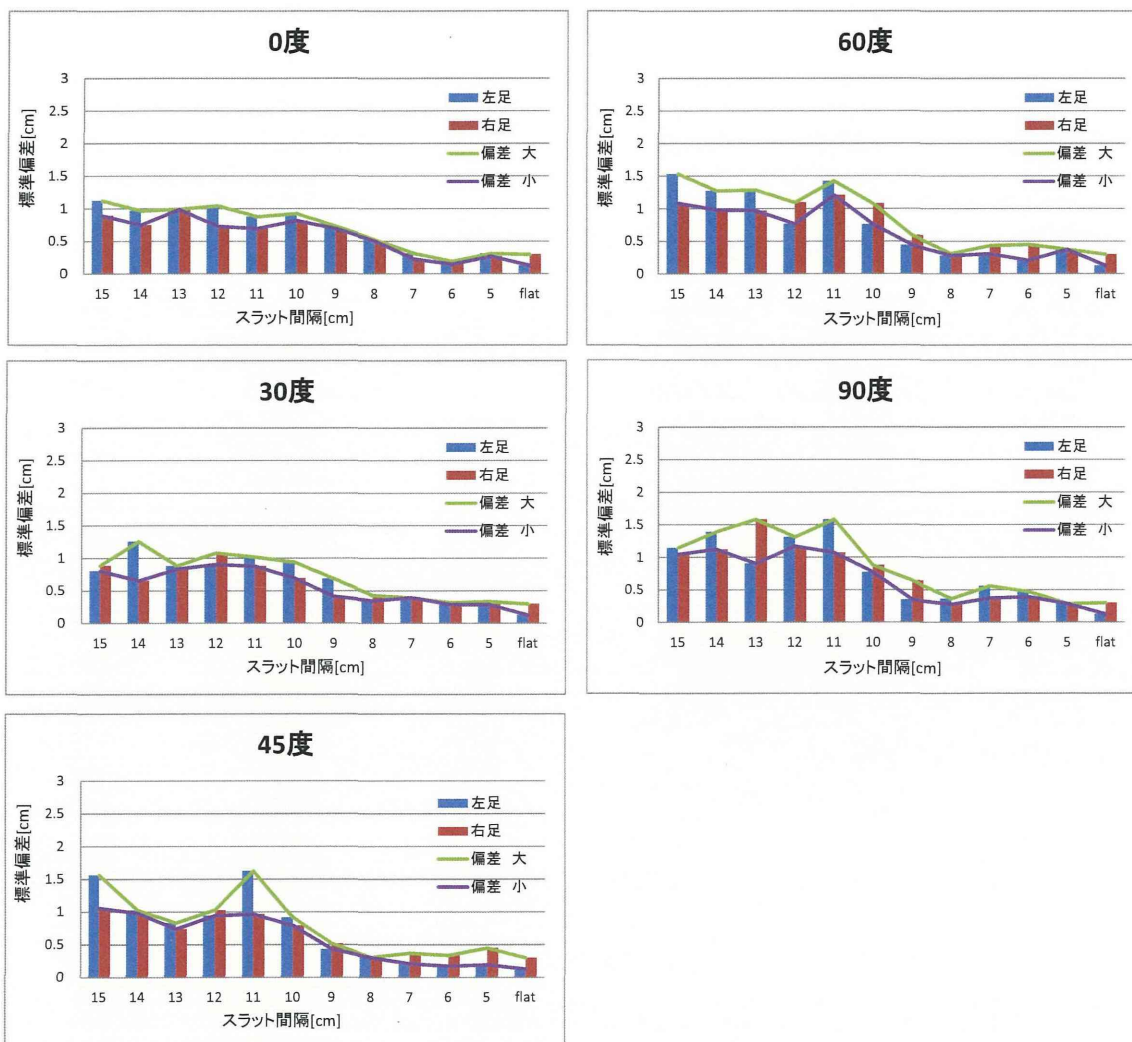
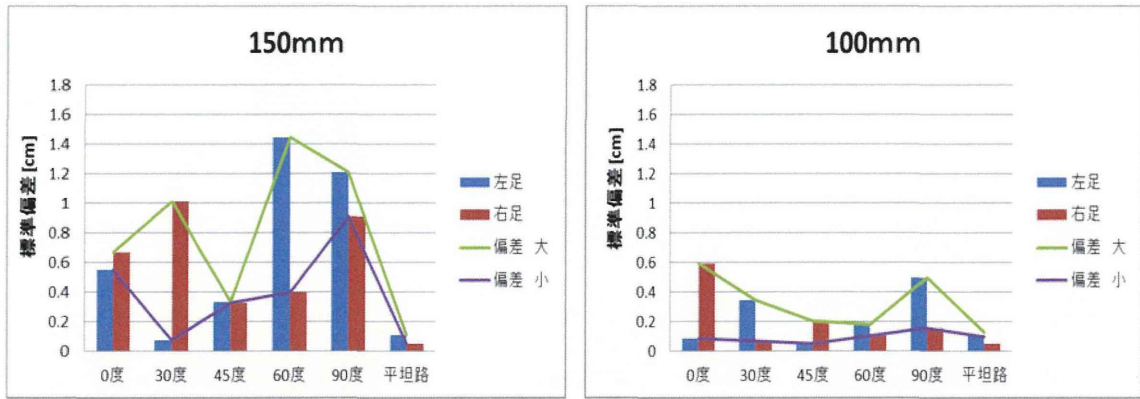


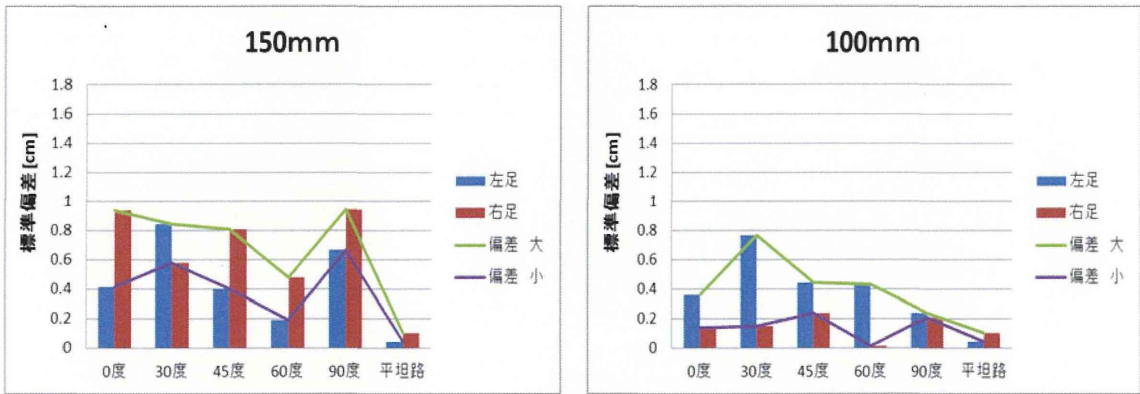
図 C-3-2-3-6 モックアップにおけるスラット間隔による比較 (被験者 X)

(2) 歩行角度の検討

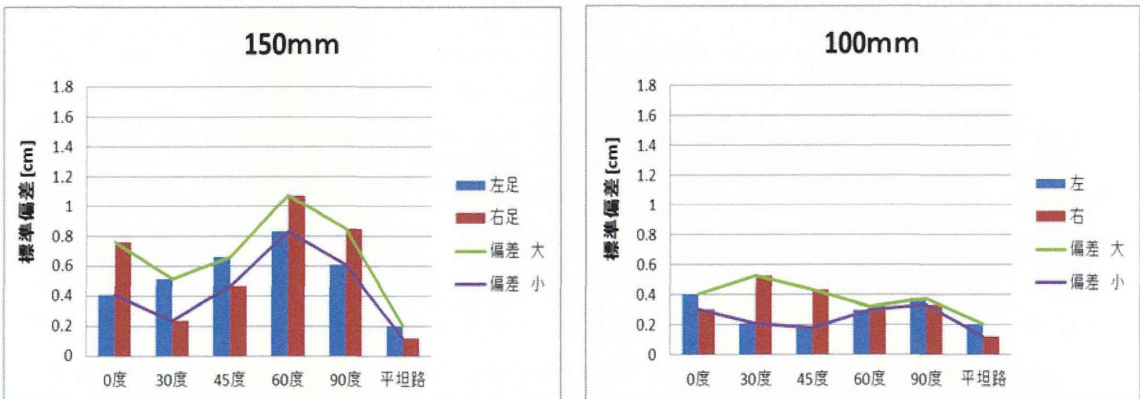
これまでの研究で行った実際のスラットコンベアでの間隔 150mm と 100mm での実験をスラット間隔別に比較した例を図 C-3-2-3-7 に示す。この図より、概ね 45 度と 60 度で極小を示す。これは、インタビュー調査によると表 C-3-2-3-2 に示すように、45 度、60 度方向によく歩き、歩きやすいと感じている結果と一致する。よって、スラットコンベア上での歩行角度は 45 度以上が望ましく、特に 45 度、60 度で安定した歩行がしやすいことが分かる。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 E

図 C-3-2-3-7 実際のスラットコンベアにおける歩行角度による比較

表 C-3-2-3-2 被験者がよく歩く角度

スラット間隔 150mm		歩行角度				
		0度	30度	45度	60度	90度
被験者	A			○	○	
	B					○
	C				○	
	D			○		
	E				○	
	F	○	○			

スラット間隔 100mm		歩行角度				
		0度	30度	45度	60度	90度
被験者	A		○			
	B				○	
	C		○		○	
	D			○		
	E		○	○		
	F			○		

C-3-2-4 管、スティフナへの足掛け動作の安全性評価

C-3-2-4-1 実験の目的

反転艀装ブロックでは、作業が進むにつれて管が多く走る状態となり、作業者はブロック内の移動の際、管上やスティフナ上を伝って歩いたり、管上に立って作業することが多い。管に足を掛けた場合、転倒、転落が危惧される。実際に、過去の災害事例では艀装ブロック現場における管の踏み外しによる墜落・転落が多く報告されており、前述の災害ポテンシャルによる検討においても管上での作業や移動に不安全が危惧されることが分かった。ここでは、管とスティフナへの足掛け動作実験を行い、管とスティフナの歩行路環境の安全性について検討した。ここではモックアップを作成し、実験を行った。

C-3-2-4-2 実験の方法とその条件

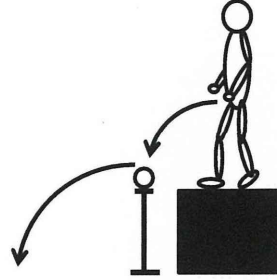
作成したモックアップを図 C-3-2-4-1 に示す。この写真ではスティフナの上に管が取り付けられた状態であるが、管を取り外すことでスティフナとしても実験が行える。管は内径 100mm、厚さ 6mm、スティフナの幅は 150mm である。また、スティフナの高さは 705mm ある。実験では、図 C-3-2-4-2 に示す次の 3 つの動作で行った。1)モックアップ上での静止状態、2)台上から足を掛けて地上に降りる動作、3)地上からモックアップに足を掛けて反対側へ乗り越える動作。被験者は艀装ブロックにおける作業員 4 名(A~D)とし、歩きやすい方法で歩いてもらった。



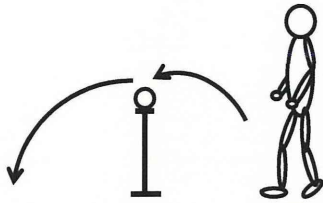
図 C-3-2-4-1 管（スティフナ）のモックアップの概観



動作(1) 管（スティフナ）上で静止



動作(2) 台上から足を掛けて降りる



動作(3) 地上から足を掛けて乗り越える

図 C-3-2-4-2 管（スティフナ）のモックアップで検討した動作

C-3-2-4-3 管（スティフナ）における足運び

実験によると、動作(2)、(3)では、表 C-3-2-4-1 に示すように、足運びは2種類あった。管（またはスティフナ）に片足のみを掛けての動作と、片足ずつ両足を乗せて一度管上（またはスティフナ上）に立つ動作するである。動作(2)では片足のみを使う場合が多いが、動作(3)では両足を使う場合が多い。両足を使った動作はモックアップ上で一度止まっているため、ここでは片足のみの足運びで比較した。

表 C-3-2-4-1 管（スティフナ）における足運び

(a) 動作(2)

動作②	回数	管	スティフナ
被験者A	1回目	片足	両足
	2回目	片足	両足
	3回目	片足	両足
被験者B	1回目	両足	片足
	2回目	片足	片足
	3回目	片足	片足
被験者C	1回目	両足	片足
	2回目	両足	片足
	3回目	両足	両足
被験者D	1回目	片足	片足
	2回目	片足	片足
	3回目	片足	片足

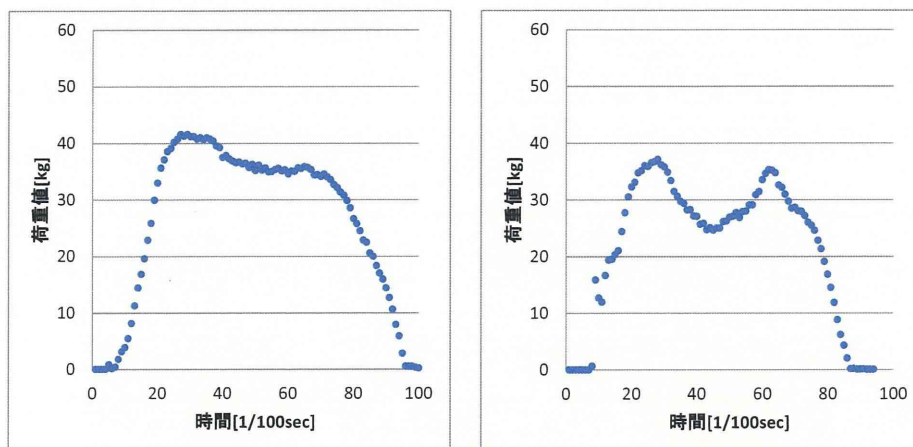
(b) 動作(3)

動作③	回数	管	スティフナ
被験者A	1回目	両足	両足
	2回目	両足	両足
	3回目	両足	両足
被験者B	1回目	両足	両足
	2回目	両足	両足
	3回目	両足	両足
被験者C	1回目	両足	片足
	2回目	両足	片足
	3回目	両足	片足
被験者D	1回目	片足	片足
	2回目	片足	片足
	3回目	片足	片足

C-3-2-4-4 管・スティフナ上での身体バランスの特徴

(1)足底荷重の時間変化

管に足をかけた時の荷重の時間変化の例を図 C-3-2-4-3 に示す。ここでは管，スティフナに足が接地してから離れるまでの荷重の時間変化を示す。スティフナでは平坦路と同様に M 字型になるが，管上では踏み面が狭いため，つま先で蹴り出す動作が難しくなり，右の山が崩れて着地の際の左のピークのみが現れる。



(a) 管

(b) スティフナ

図 C-3-2-4-3 管・スティフナにおける足底荷重の時間変化

(2)管上における静止時の身体バランス

動作(1)における荷重分布と荷重中心位置の例を図 C-3-2-4-4 に示す。この図では，荷重中心は□で示す。足底長さ方向の土踏まずあたりに足圧が集中しており，荷重中心もほぼ同じ場所に位置する。管上のように踏み面が十分に確保できない足下では，土踏まずあたりを荷重中心を置いて立つ傾向があることが分かった。

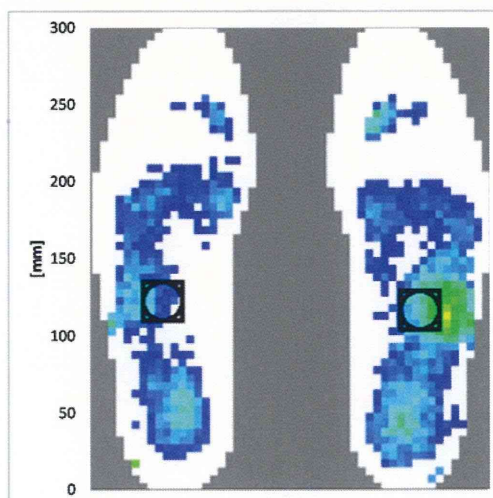


図 C-3-2-4-4 管上での荷重分布と荷重中心位置

(3) 荷重中心の移動軌跡

管のように足裏の接地面が十分に確保できない場合、足裏に荷重をかけられる範囲が狭くなる。動作(2)について、足が管に着地してから離れるまでの荷重中心位置の軌跡を比較した例を図 C-3-2-4-5 に示す。スティフナでは平坦路と同様に、踵で着地し、つま先で離れるという理想的な荷重の移動が出来ている。一方、管では、踵からではなく土踏まずのあたりで着地を行っている。また、この位置は、図 C-3-2-4-4 で示した荷重中心の位置に近い。さらに、荷重中心の移動軌跡はスティフナに比べると短く、平坦路の約半分以下である。これより、管では足裏を十分に使った動作が難しい。

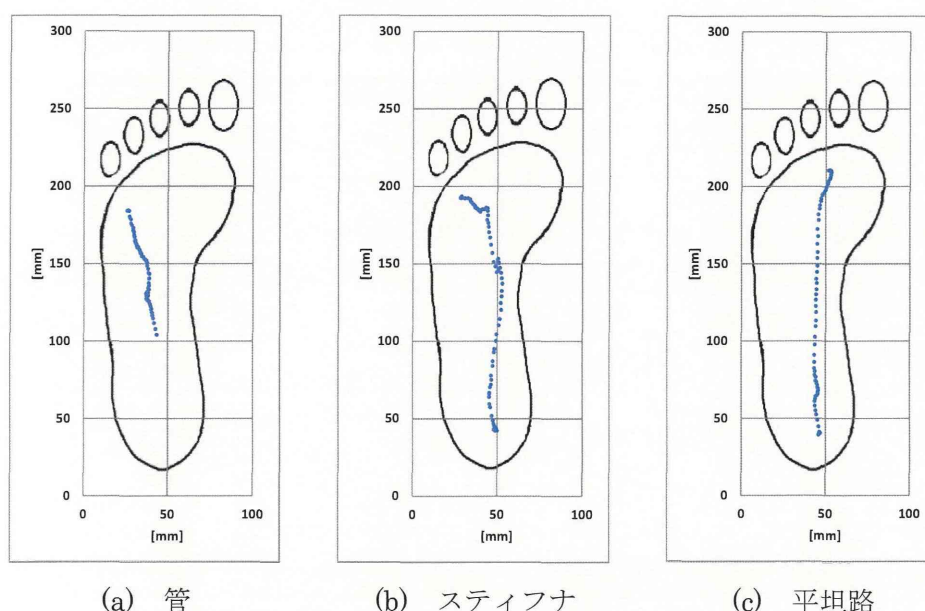
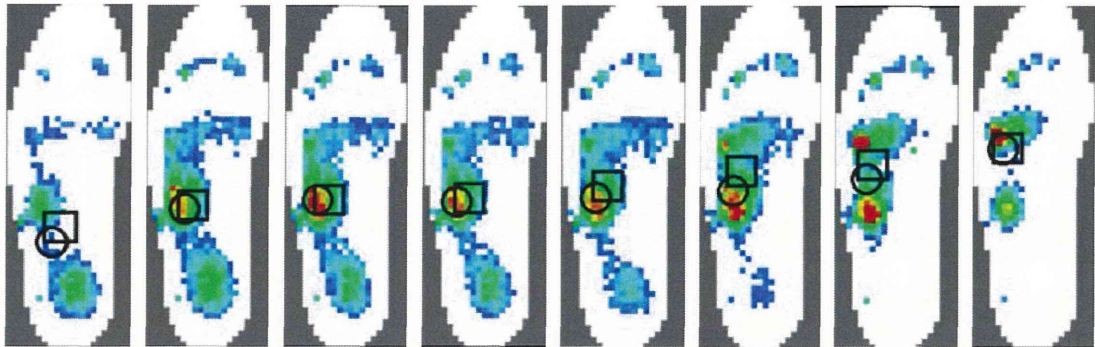


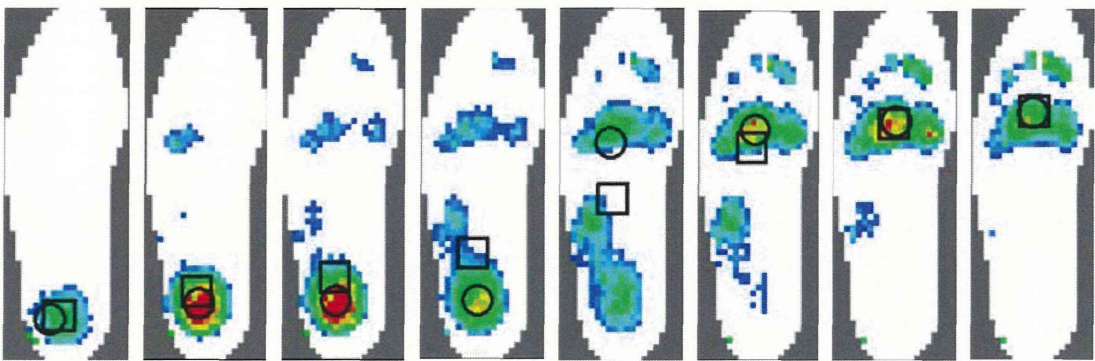
図 C-3-2-4-5 荷重中心の移動軌跡の比較

C-3-2-4-5 支持位置と荷重中心の位置関係による安全性評価

図 C-3-2-2-3 で示したように、歩行サイクルで Phase が進むにつれ、荷重が強くなる位置は踵側からつま先方向へ移動していく。ここでは、圧力が集中している位置を支持位置と呼び、荷重中心との位置を比較した。足が着地してから離れるまでの間の 0.1 秒毎の荷重分布を用いた。例を図 C-3-2-4-6 に示す。平坦路では足裏を十分に接地することができるため、支持位置と荷重中心位置が十分に離れる状態がある。一方、管では 2 点が常に近くに位置している。これは、管上では接地点のみで荷重を支えていることを表しており、支持位置周りの荷重のモーメントが小さくなり、外乱などに弱く、墜落・転落、転倒が危惧される。



(a) 管



(b) 平坦路

図 C-3-2-4-6 足の着地間の足圧分布の比較 (○：支持位置，□：荷重中心)

次に、支持位置と荷重中心位置の間の距離を比較した。ここでは、位置の足裏の長さ方向成分の差について、足の着地から離れるまでの平均値を用いた。図 C-3-2-4-7 に示すように、管では、スチフナ、平坦路に比べて距離が短い。

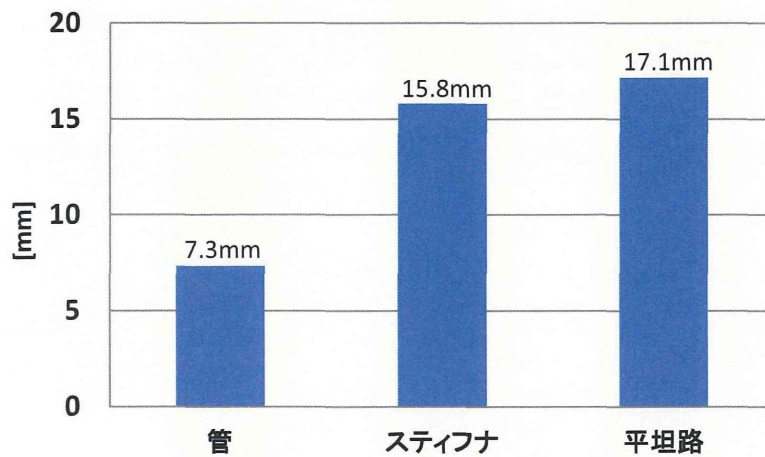


図 C-3-2-4-7 支持位置と荷重中心位置の距離の比較

C-3-2-5 階段の昇降動作の安全性評価

C-3-2-5-1 実験の目的

切断工場の運搬作業者は、スラットコンベアと鋼板置き場の間を移動するため階段の使用頻度が高い。また、反転機装ブロックの現場でも、受け台に設置されたブロックと地上の移動に仮設階段が使われる。階段では転倒・躓きが危惧される。ここでは、傾斜が調節できる仮設階段を用いて歩行実験を行い、階段の昇降動作の安全性について検討した。

C-3-2-5-2 実験の方法とその条件

実験に用いた仮設階段は各段の段鼻間距離が一定に保たれたまま傾斜が調節できる機構を持つ。仮設階段の外観と実験の様子を図 C-3-2-5-1 に示す。実験では、傾斜角度 30 度、37.5 度、45 度、52.5 度、56 度と段階的に変化させ、それぞれについて上りと下りを計測した。また、手すりは使用しない。被験者は、学生 2 名、教員 1 名(A~C)とした。



図 C-3-2-5-1 仮設階段の概観と歩行実験の様子

C-3-2-5-3 上り動作の安全性評価

(1) 上り動作での姿勢

図 C-3-2-5-2 に示すように上り動作時の姿勢を比較した。平坦路では、背中が直立状態だが、階段では前傾し、傾斜が急になるにつれてその角度は大きくなり、平坦路と比べて身体の重心は前方に移動する。



(a) 平坦路

(b) 傾斜 30 度

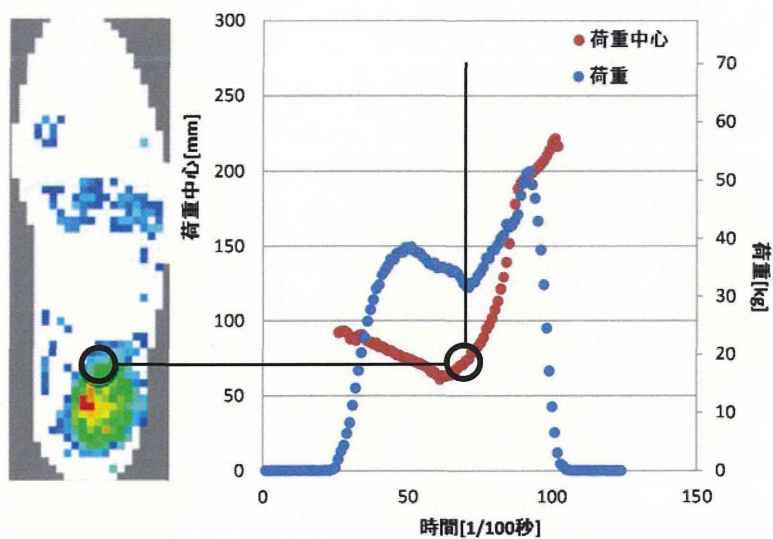
(c) 傾斜 45 度

(d) 傾斜 56 度

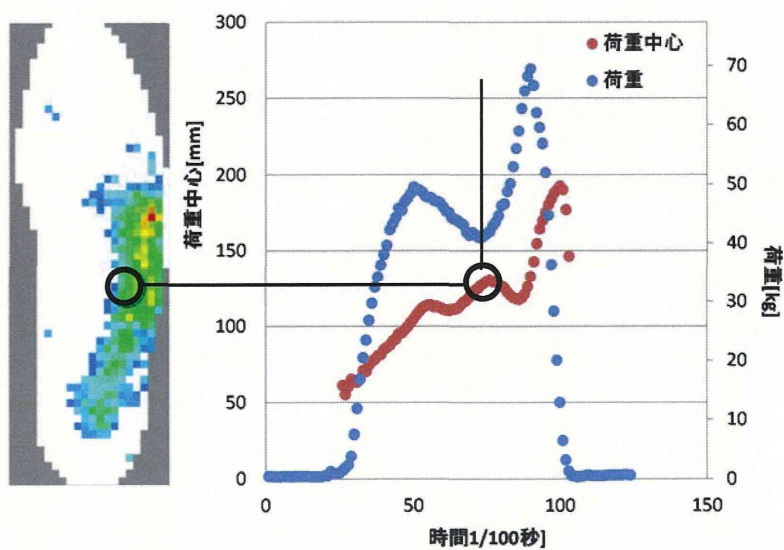
図 C-3-2-5-2 階段の上り動作における姿勢の変化

(2) ミッドスタンス (Phase3) における荷重中心位置による安全性評価

ここでは、階段の傾斜に伴う姿勢の変化による影響について、歩行サイクルの Phase3 に相当する片足のみで体を支えているミッドスタンス時の身体バランスを比較した。例として、傾斜 30 度と 56 度における荷重中心位置を図 C-3-2-5-3 に示す。荷重の時間変化においてミッドスタンスは M 字の谷に相当する。30 度では荷重中心は踵の少し前に位置しているが、56 度ではそれがつま先側方向へ移動している。



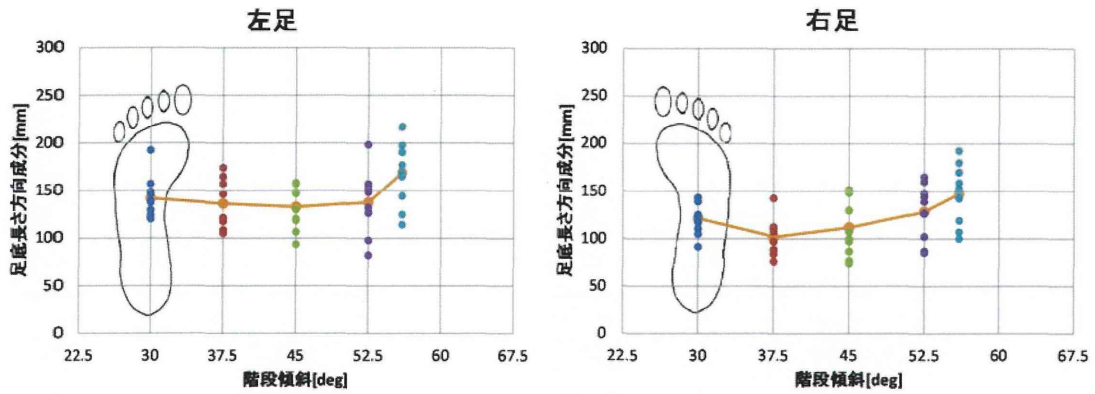
(a) 傾斜 30 度



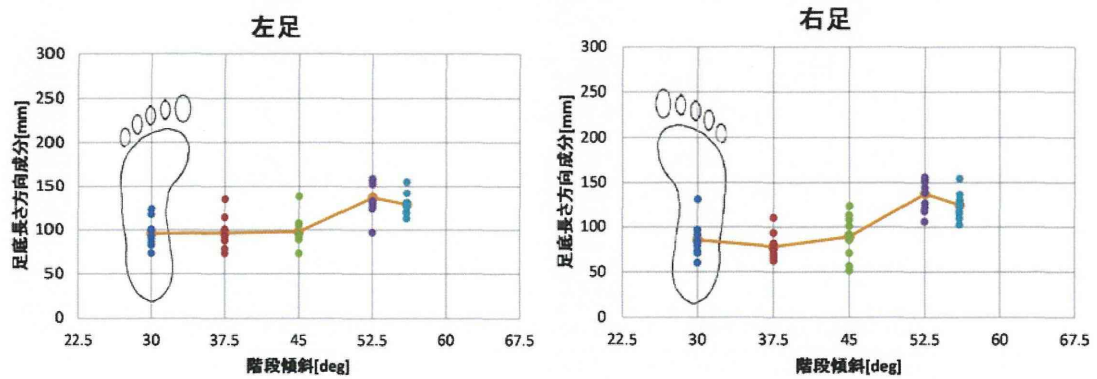
(b) 傾斜 56 度

図 C-3-2-5-3 ミッドスタンスの荷重中心位置の階段の傾斜角度による比較

次に、ミッドスタンスにおける荷重中心位置を傾斜角度について比較したものを図 C-3-2-5-4 に示す。傾斜 45 度辺りを境に荷重中心がつま先方向へ移動しており、この辺りで身体バランスが変わると考えられる。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B

図 C-3-2-5-4 ミッドスタンスにおける荷重中心位置の階段の傾斜角度による比較

(3) 支持位置と荷重中心の位置関係による安全性評価

C-3-2-4-5と同様に、図C-3-2-5-5に示すように、支持位置と荷重中心の位置の距離を傾斜角度で比較した。左足では、45度を境に大きく減少しており、ここでも、このあたりに身体バランスが変化する境界があると考えられる。

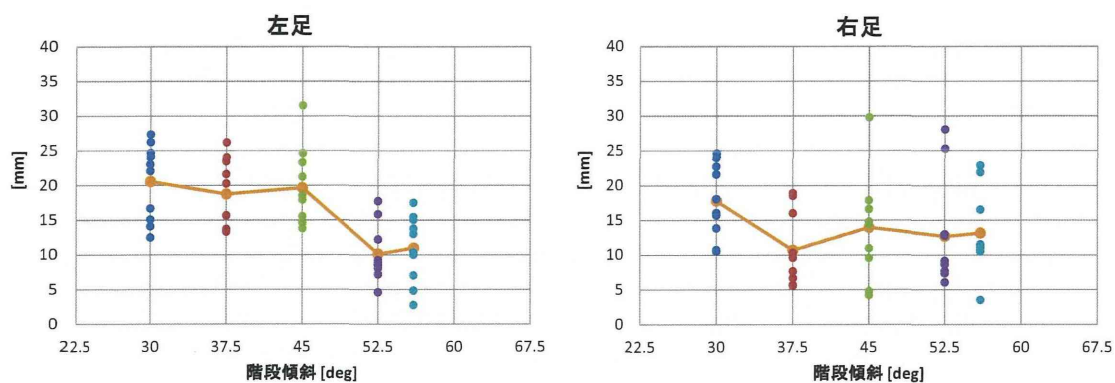


図 C-3-2-5-5 支持位置と荷重中心位置の距離の階段の傾斜角度による比較（上り）