

3. 歩行フェーズ取得実験

3.1 実験装置

3.1.1 トレッドミルとハンドル

開発中の歩行支援機器を，現行の負荷制御方式のまま一定速度で移動させることは，2章に示した結果からも明らかなように，困難である．よって今回の実験では実機を用いず，トレッドミルを用いることにした．

実機の条件に近づけるためトレッドミルには実機と同様のハンドルを取り付けてある．ハンドルの根元には，力センサが取り付けられており，X，Y，Z，と各軸周りのトルクの，合計6軸の値を取得することができる．被検者はこのハンドルを握った状態で，トレッドミルの設定速度に従って歩行する (Fig.3.1)．

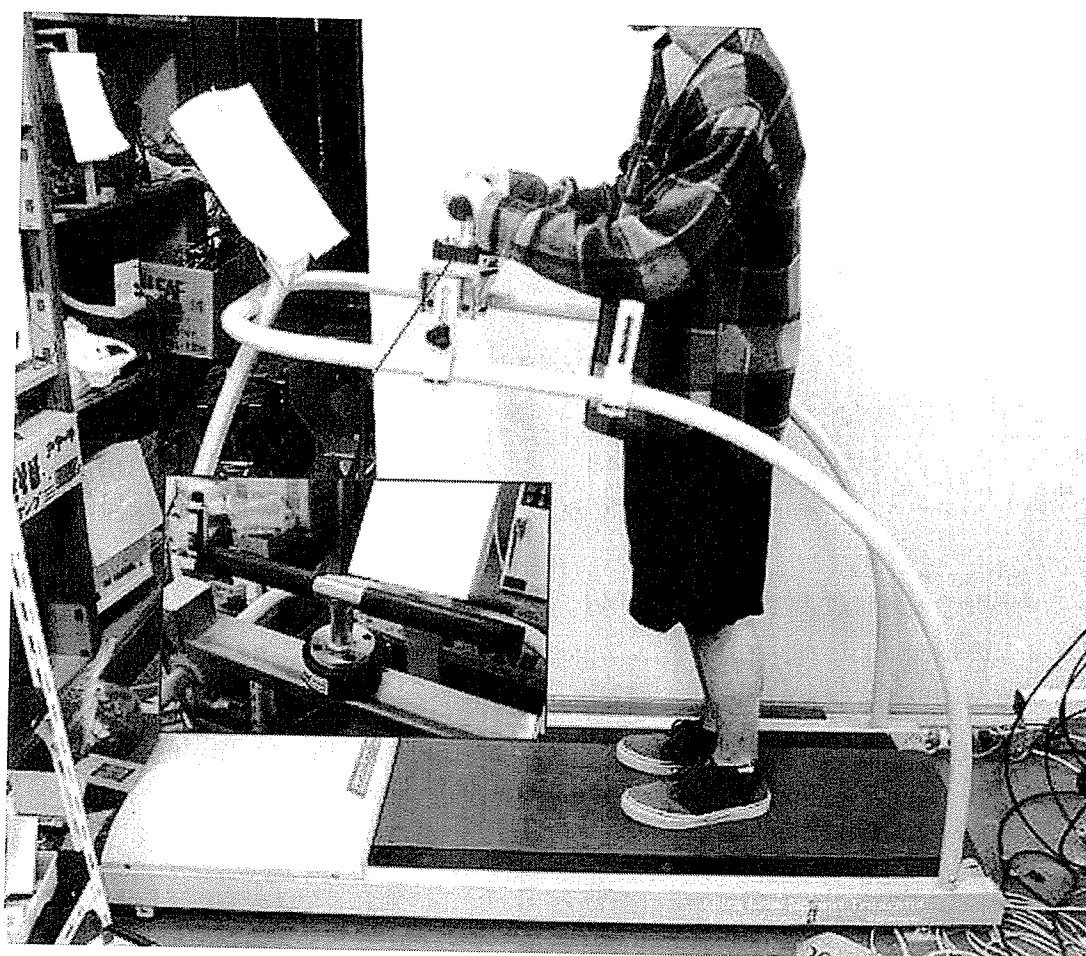


Fig.3.1 実験風景

トレッドミル : Senoh Ultra low speed treadmill

力センサ : NITTA IFS-100 M40A

3.1.2 フットスイッチ

被検者の足裏には、歩行フェーズ取得のための2つの感圧センサが取り付けられている。以下に、使用した感圧センサとアンプの写真を掲載する (Fig.3.2)。

今回の実験では、単純なオンオフ信号によって足裏の接地を決定する「フットスイッチ」として、感圧センサを使用したい。よってアンプの設定を5Vのデジタル出力モードにする。これにより、センサに加重がかかっている間のみ、アンプを介して一定値(5V)の出力信号をPCに出力することができる。

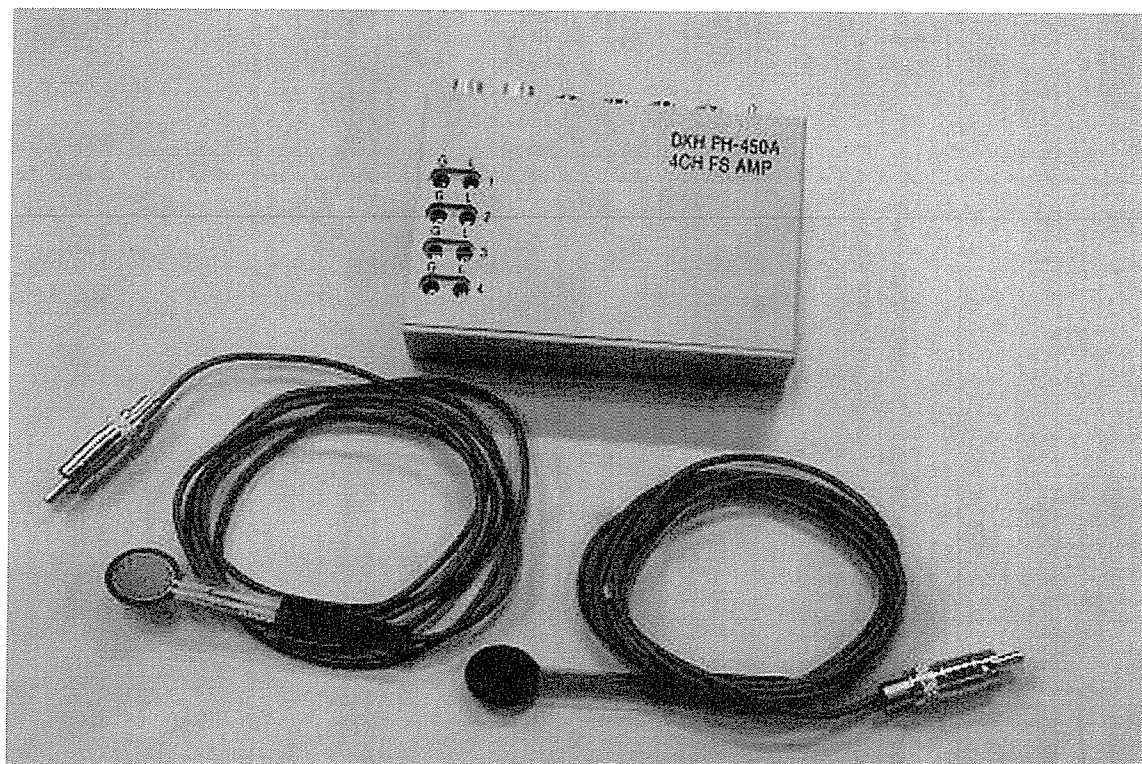


Fig.3.2 フットスイッチ用機材

感圧センサ：KK DKH FSR 感圧センサ S50

アンプ：KK DKH PH-450A FS アンプ

足裏のセンサ取り付け位置は、臨床歩行分析入門、85 ページ、図 4-51 (Fig.3.3) に記載されている、足底の床反力作用点軌跡を参考にした。これによって、通常歩行において最初に接地する踵の一点と、最後に離地するつま先の一点を選択し、靴下の上から感圧センサをサージカルテープによって固定している (Fig.3.4)。

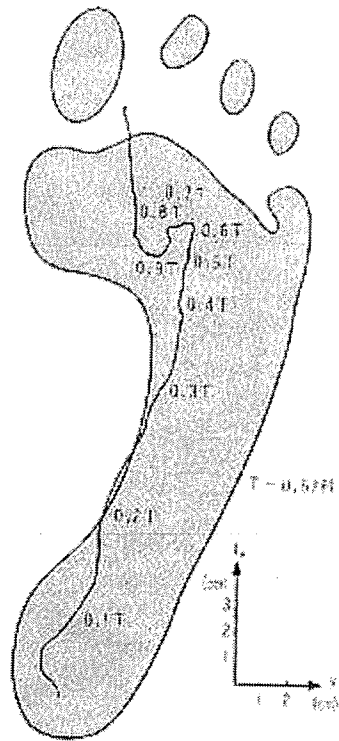


Fig.3.3 足跡図に作用点軌跡を重ねた例

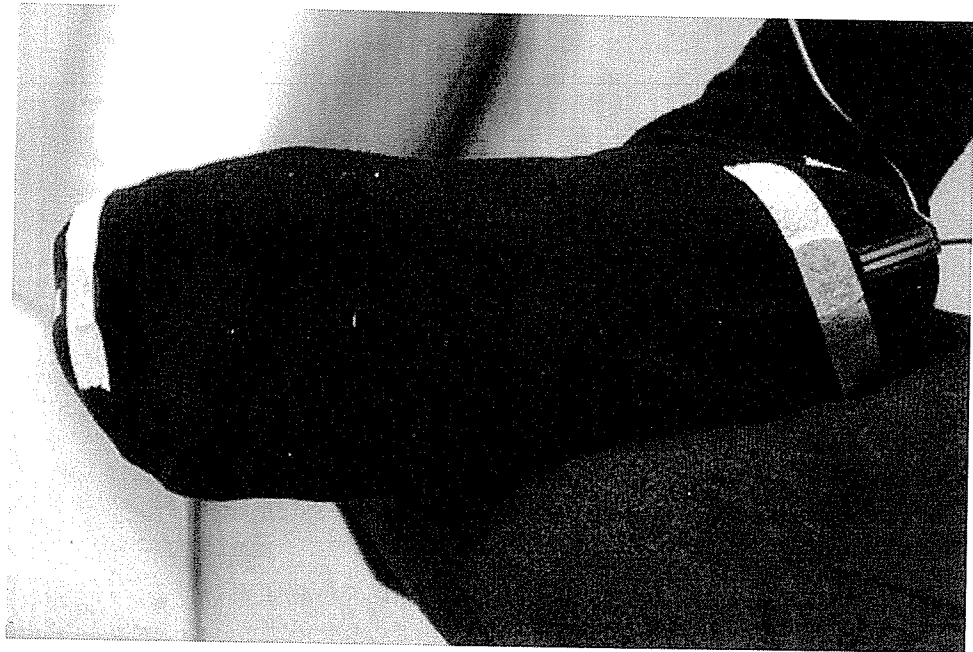


Fig.3.4 実際のセンサ貼り付け例

3.1.3 実験系

以下に、各実験装置と被検者との関係を示した実験系を記す。尚、アンプは被検者の腰にズボンのベルトによって固定されているものとし、圧力センサの電圧は、アンプ通過後に A/D コンバータへ出力されるものとする。

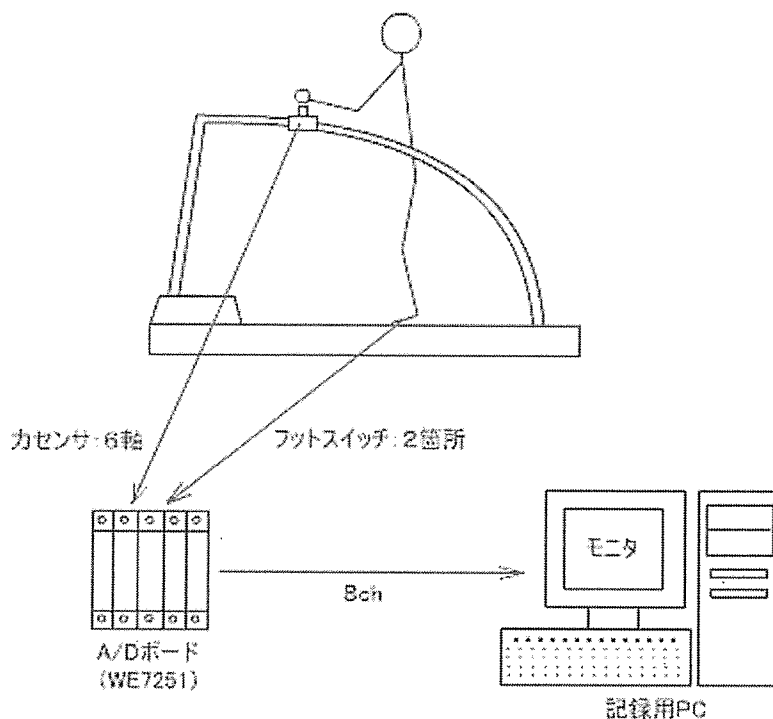


Fig.3.5 実験系

カセンサ（6チャンネル）と感圧センサ（2チャンネル）の出力電圧は全て、A/D コンバータ（YOKOGAWA WE7251）を用いて 100[Hz]でサンプリングを行った。

カセンサの各軸の方向は、被検者がトレッドミルに乗りハンドルを正面に構えたとき、左右方向が X 軸（右向き正）、前後方向が Y 軸（前向き正）、上下方向が Z 軸（上向き正）をそれぞれ表している。

フットスイッチの出力が正しいかどうか、トレッドミル上で数分間、2[km/h]の設定速度で歩行してテストを行なう。出力は、PCのモニタ上から目視で確認することができる。出力が正常であれば実験を開始する。

3.2 被検者

被検者は健常成人男性 6 名。各被検者の身体データは下表に記されたとおりである。

Table.3.1 被検者の身体データ

被検者	年齢	身長	体重
A	28	178	83
B	25	176	72
C	22	169	64
D	23	170	63
E	24	171	64
F	22	170	62

年齢：23.8±1.9，身長：172.3±3.9，体重：67.2±7.9

全ての被検者には、今回の実験について事前に趣旨の説明をし、実験参加の承諾を得た。各被検者は各自で十分に履きならしたスニーカーを着用し、運動に適した服装に着替えて実験に臨んでいる。

3.3 実験方法

各種実験装置の取り付けを終えた被検者は、前述にあった数分間の歩行テストを終えた後、ハンドルを握り実験を開始するが、被検者によって、以下のように内容が異なる。

(1) 被検者 A～C

フットスイッチは片足の踵の 1 箇所のみを取得した。

フットスイッチを、右足取り付け時、左足取り付け時の 2 パターンに分け、各試行とも 1 試行ずつ、10 分間歩行した。

トレッドミルの設定速度は 2[km/h]に固定し、各試行の間には 5 分間の休憩を入れた。

(2) 被検者 D～F

フットスイッチは前述の Fig.3.4 と同様に、踵とつま先の 2 箇所を取得した。

トレッドミルの設定速度を 1[km/h]と 2[km/h]の 2 パターンに分け、各試行とも 1 試行ずつ、10 分間歩行した。

フットスイッチは常に右足に取り付けるものとし、各試行の間には 5 分間の休憩を入れた。

3.4 解析方法

3.4.1 ソフトウェアによる歩行周期の正規化

取得された各軸の電圧値は、1歩行周期ごとに分割して処理を行なう。1歩行周期は、踵に取り付けたフットスイッチを基準にし、踵の接地から次の踵の接地までとした。以下に踵のフットスイッチの電圧変化と、歩行周期の関係を表す (Fig.3.6)。

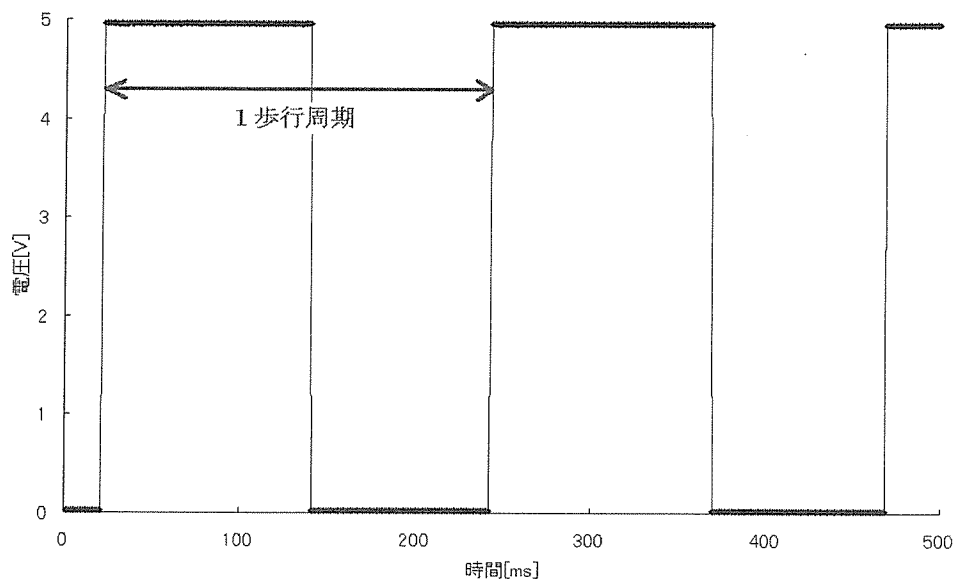


Fig.3.6 フットスイッチの電圧と歩行周期

一歩行周期に要する時間は、実験中、同一被検者であっても、常に一定にはならない。そこで、全ての歩行周期において、力センサからの6軸の出力波形を比較するため、床反力解析手法と同様に1歩行周期を100分割し、[周期%]を単位として時間軸を正規化する。

また正規化された力センサの値は電圧値[V]であり、これを力[N]、またはトルク[Nm]に変換するためには、力センサの仕様書にある更正マトリクスを積算しなくてはならない。以下にそのマトリクスを表記する。

$$\begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \\ Mx \\ My \\ Mz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120.19 & 1.7 & 1.13 & 3.84 & -4.73 & -5.37 \\ 3.14 & 110.33 & 3.16 & -2.29 & -1.29 & -4.79 \\ -1.66 & -6.84 & 254.85 & 1.9 & 8 & 1.76 \\ 0.03 & 0.25 & 0.19 & 13.52 & 1.35 & 0.14 \\ 0.29 & -0.06 & 0.04 & -1.87 & 13.55 & 0.77 \\ 0.17 & -0.29 & -0.07 & 0.02 & -0.28 & 13.88 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ fz \\ mx \\ my \\ mz \end{bmatrix}$$

※ $Fx \sim Fy$: 各軸の力[N]の値, $Mx \sim Mz$: 各軸周りのトルク[Nm]の値

※ $Fx \sim fz$: 各軸の力を示す電圧値[V], $mx \sim mz$: 各軸周りのトルクを示す電圧値[V]

1歩行周期ごとの分割, 1歩行周期の100分割(正規化処理), 更正マトリクスの積算の3つの作業は, 全てVBによる自作の解析ソフトを用いて行った(ソースは付録に後述する).

3.4.2 周波数解析

正規化をすると時間軸がなくなってしまうので, 正規化前の波形についても検証する. 実験開始直後から1分間のデータを, それぞれフーリエ変換し, 周波数成分を抽出した.

4. 実験結果

4.1 フットスイッチの出力

4.1.1 歩行フェーズの取得

被検者 A~C の右足, 左足の各踵におけるフットスイッチの出力結果を以下 (Fig.4.1) に示す. 但し, 横軸は歩行周期[%], 縦軸はフットスイッチの電圧値[V]を示している.

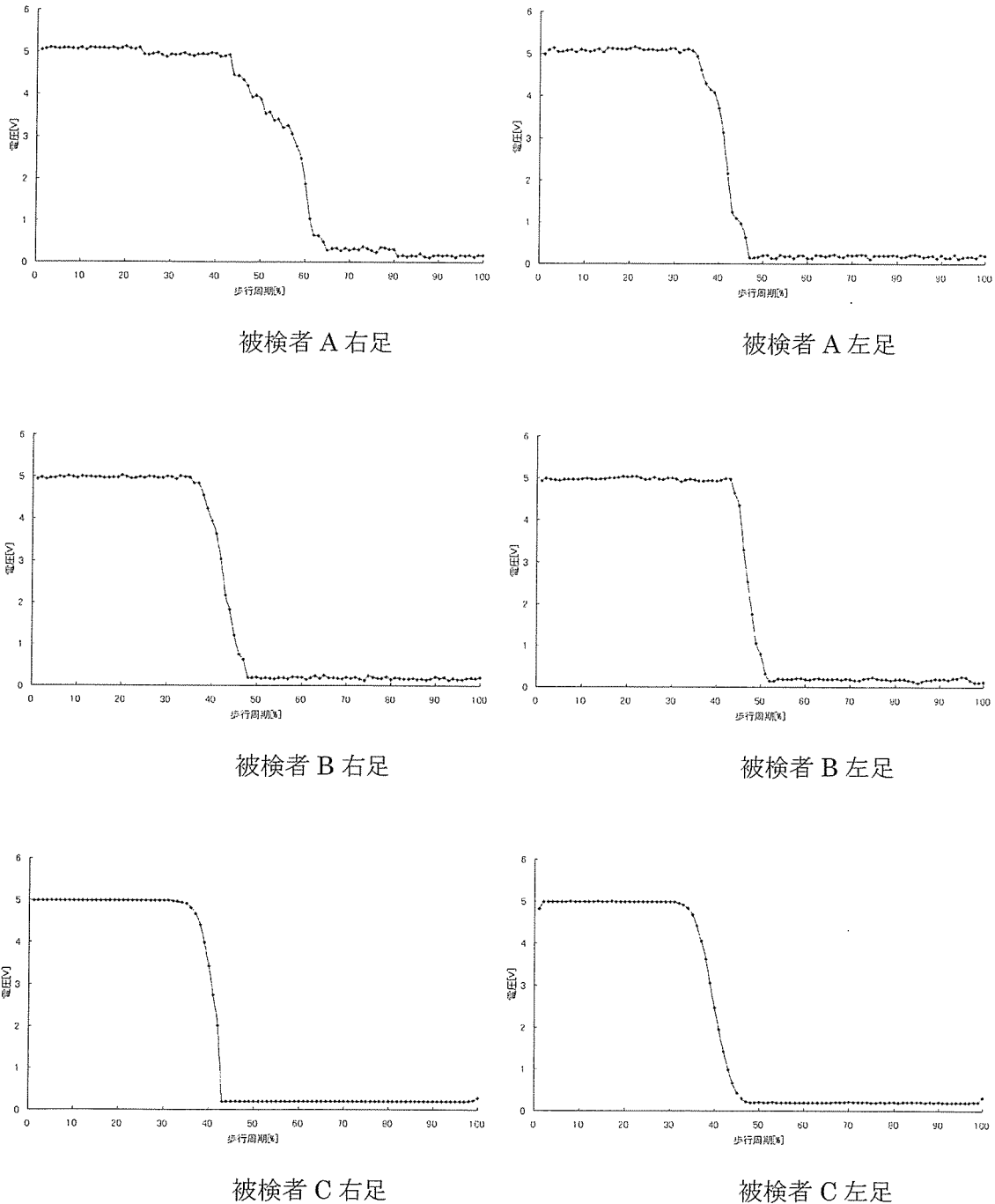
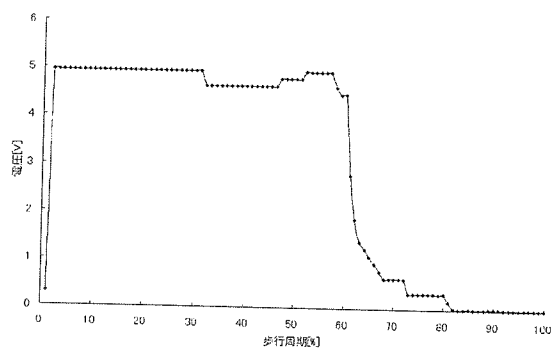
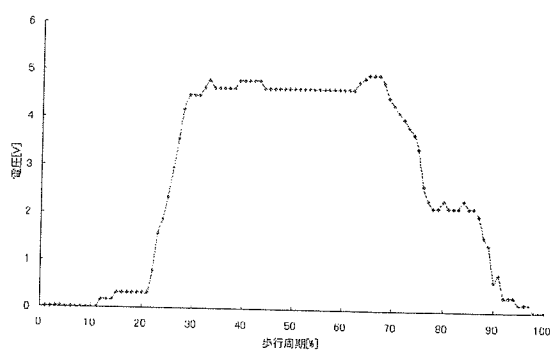


Fig.4.1 左右のフットスイッチ

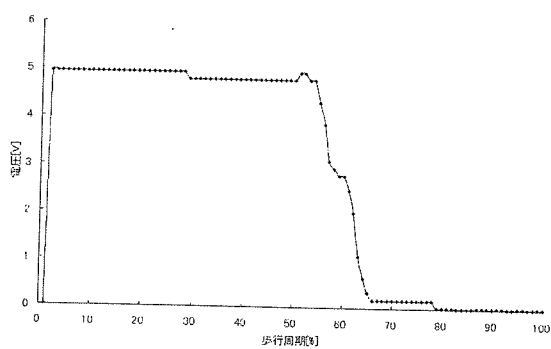
次に、被検者 D~F 各人の、踵とつま先におけるフットスイッチの出力結果を以下に示す。



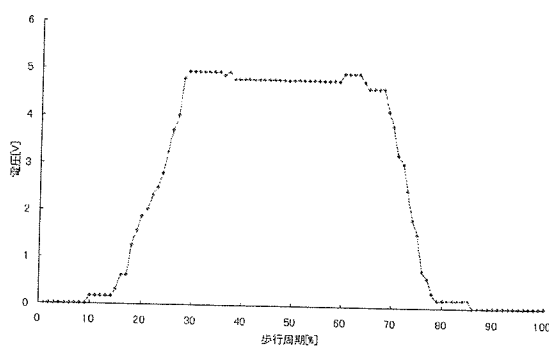
被検者 D 踵



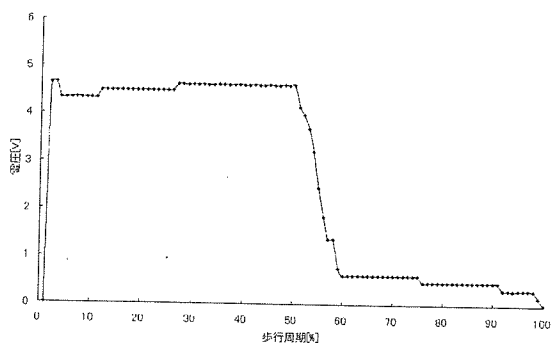
被検者 D つま先



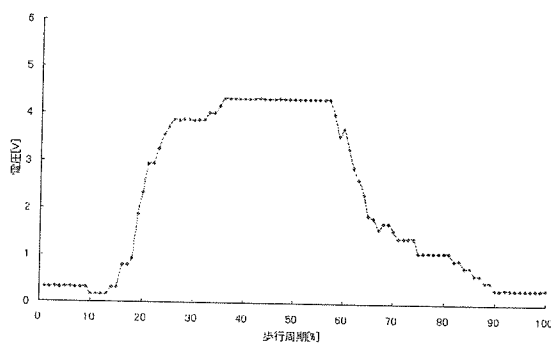
被検者 E 踵



被検者 E つま先



被検者 F 踵



被検者 F つま先

Fig.4.2 踵とつま先

全てのグラフは1分間およそ30歩行周期を加算平均した結果である(以下結果のグラフも同様)。A~Cの踵で左右の比較をすると、どちらの足も40~50[%]近傍で離地を開始していることが分かる。D~Fについても踵は50[%]近傍で離地し、つま先は20[%]近傍で接地を開始している。いずれの例も臨床歩行入門⁵⁾に記された先行研究の内容に一致する。

4.1.2 速度間での比較

被検者 D~F 各人の, 1[km/h], 2[km/h]それぞれにおける 2つのフットスイッチの出力を以下に示す.

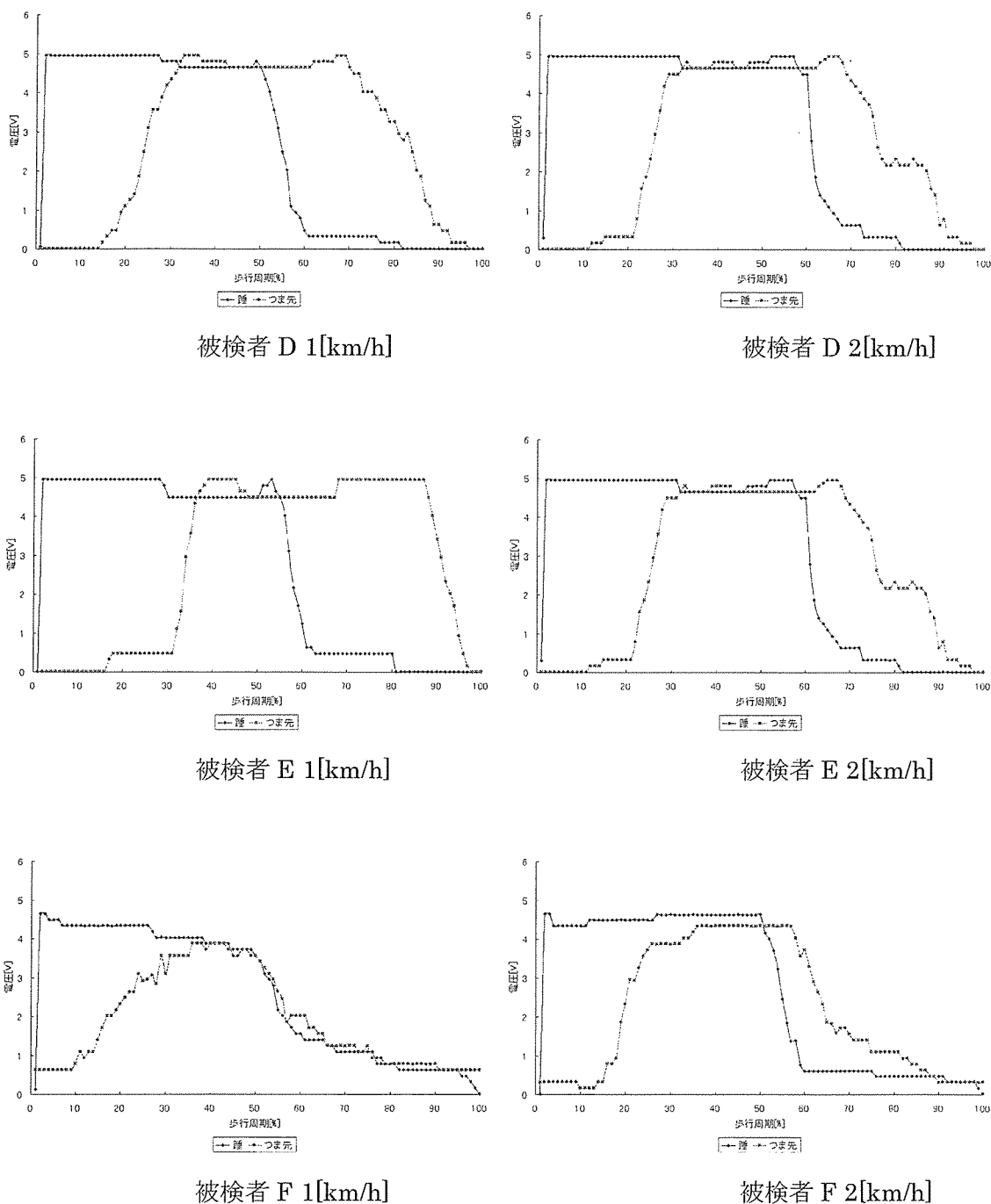


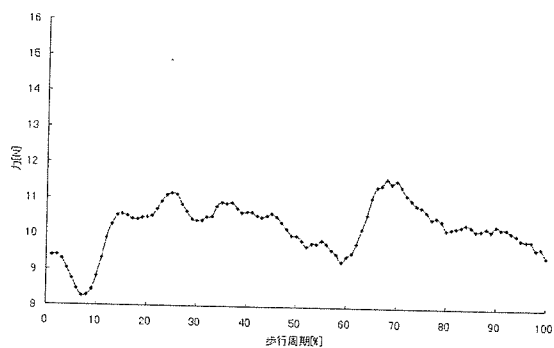
Fig.4.3 速度間の比較

被検者 F では, 1[km/h]において, 明らかなパターンの変化が現れているが, その他の踵とつま先の接地, 離地のタイミングは, 速度によらず先行研究のパターンにほぼ一致する.

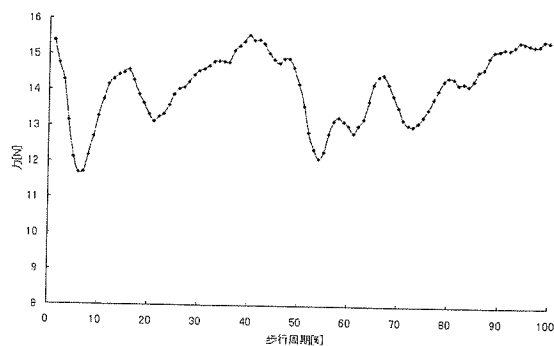
4.2 カセンサの出力

4.2.1 X軸の出力結果

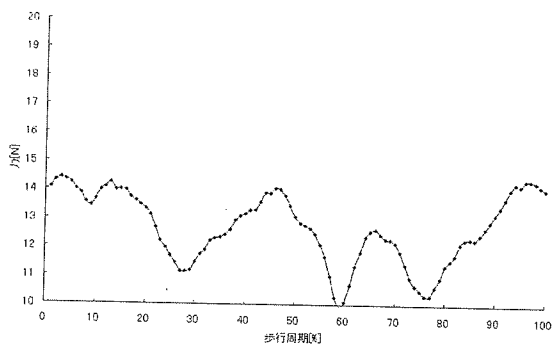
被検者 A~C, フットスイッチ取り付け, 右足, 左足それぞれのときの出力結果を以下 (Fig.4.4) に示す.



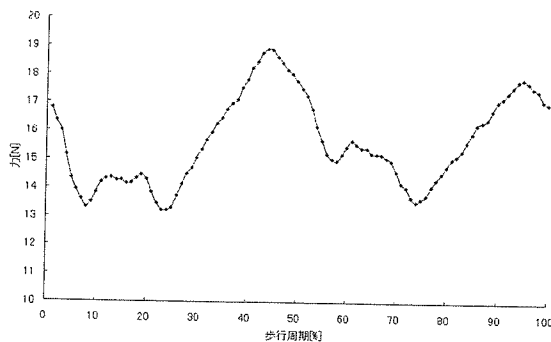
被検者 A 右足



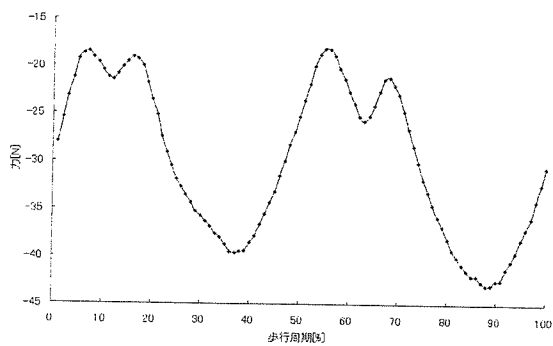
被検者 A 左足



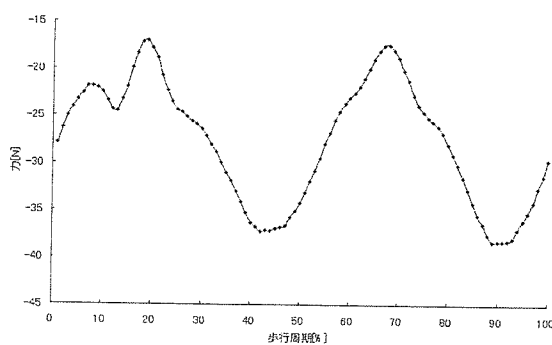
被検者 B 右足



被検者 B 左足



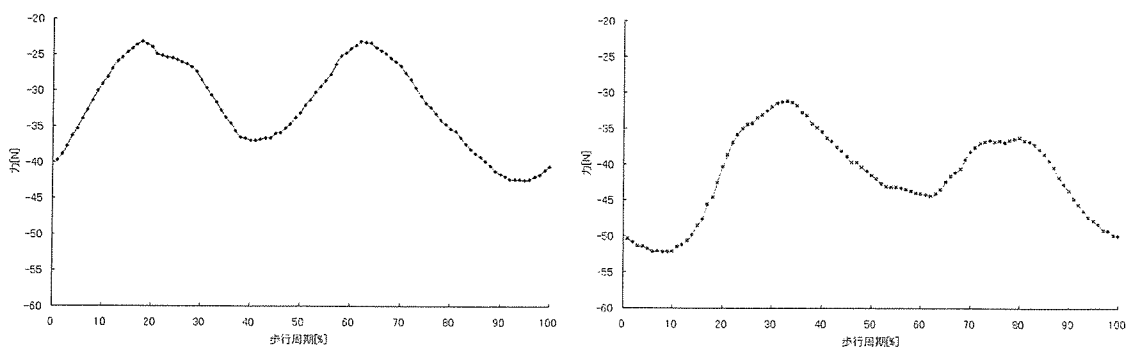
被検者 C 右足



被検者 C 左足

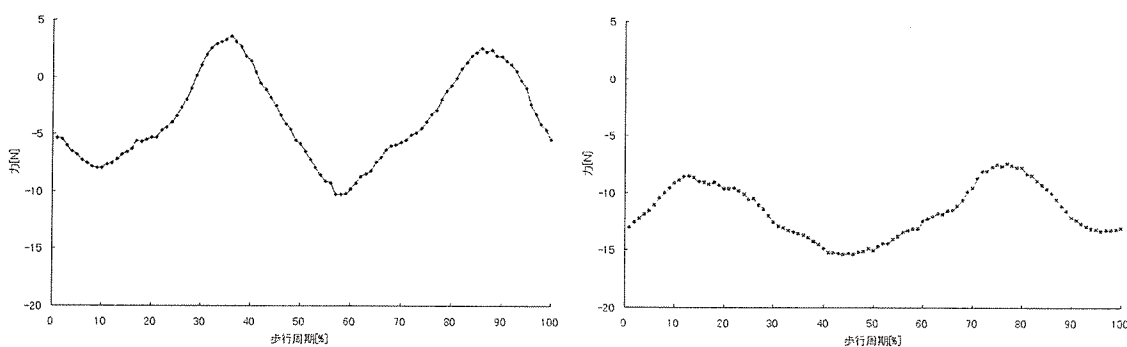
Fig.4.4 X軸左右の比較

次に被検者 D~F の結果を示し，速度間の比較を行う。



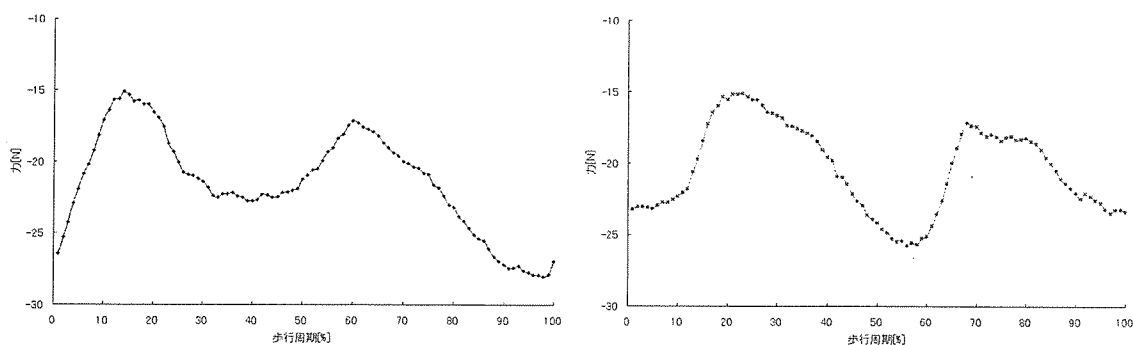
被検者 D 1[km/h]

被検者 D 2[km/h]



被検者 E 1[km/h]

被検者 E 2[km/h]



被検者 F 1[km/h]

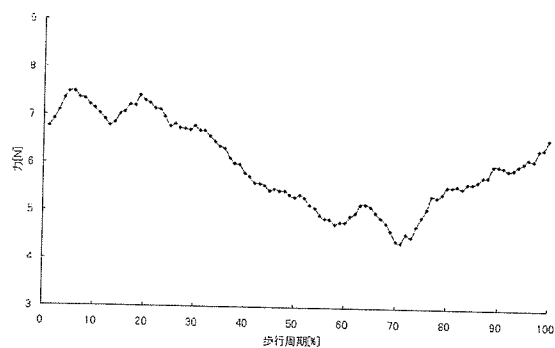
被検者 F 2[km/h]

Fig.4.5 X 軸速度間の比較

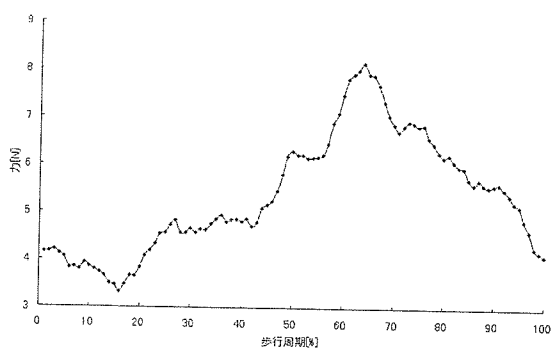
被検者 D~F では1周期につき2つのピークが発生するパターンが見受けられるが，A~C では波形パターンは安定しない。また，ハンドル部の出力なので，これらは位相を50%ずらして同じ運動が2試行であると取れる。以下のY軸，Z軸も同様である。

4.2.2 Y軸の出力結果

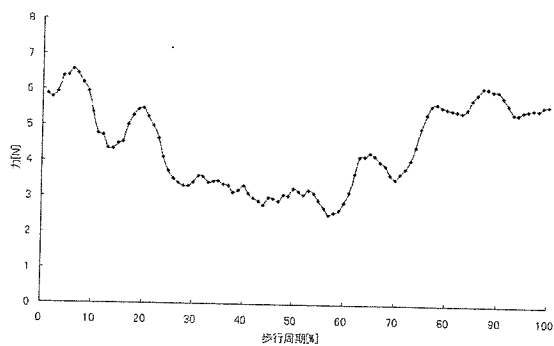
被検者 A~C, フットスイッチ取り付け, 右足, 左足それぞれのときの出力結果を以下 (Fig.4.6) に示す.



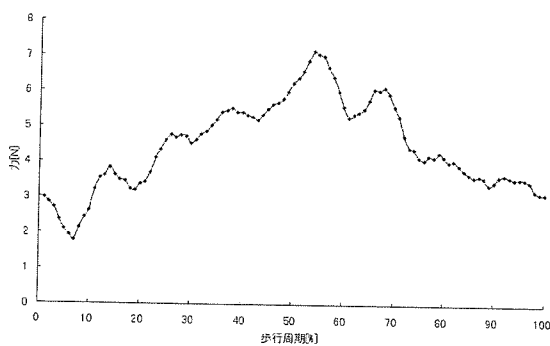
被検者 A 右足



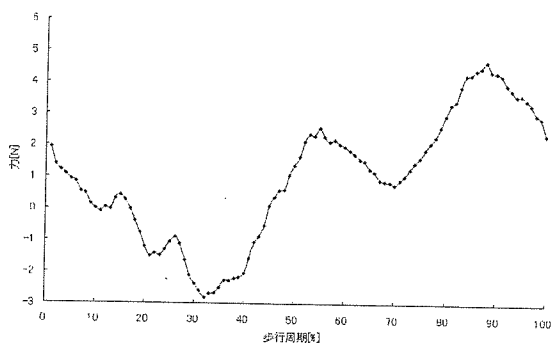
被検者 A 左足



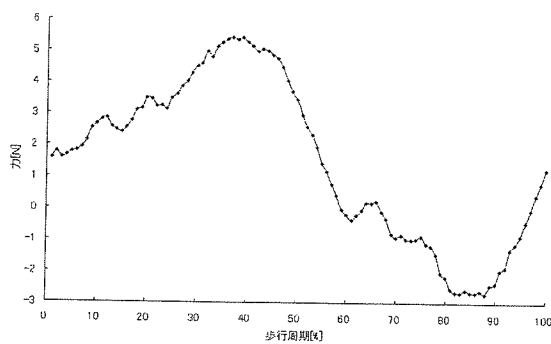
被検者 B 右足



被検者 B 左足



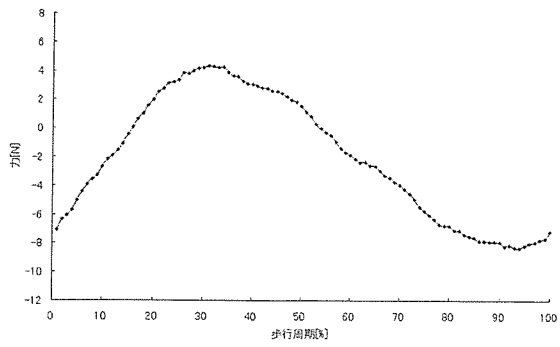
被検者 C 右足



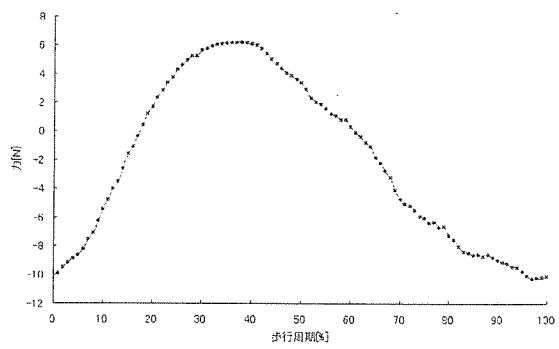
被検者 C 左足

Fig.4.6 Y軸左右の比較

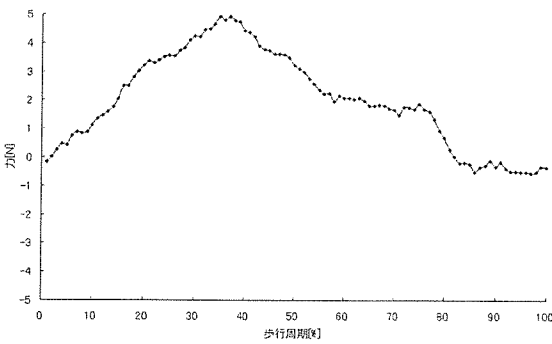
次に被検者 D~F の結果を示し、速度間の比較を行う。



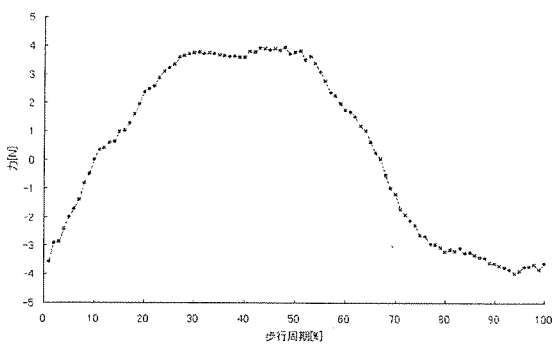
被検者 D 1[km/h]



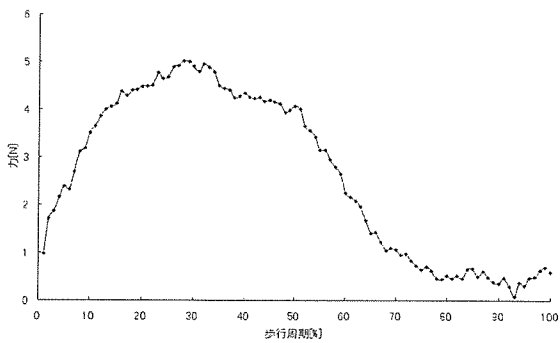
被検者 D 2[km/h]



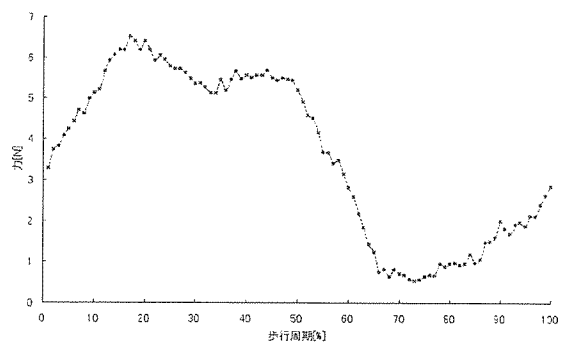
被検者 E 1[km/h]



被検者 E 2[km/h]



被検者 F 1[km/h]



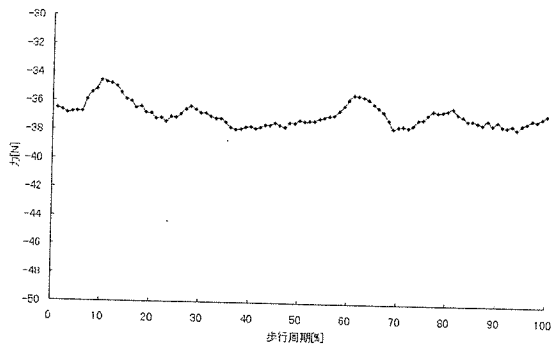
被検者 F 2[km/h]

Fig.4.7 Y 軸速度間の比較

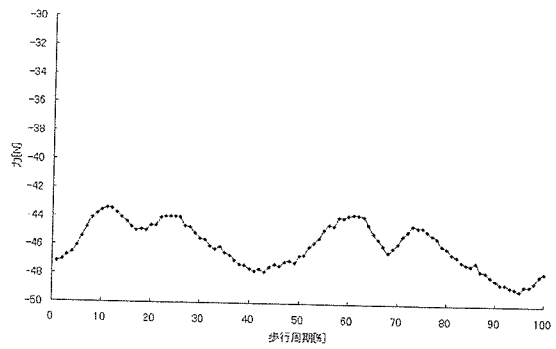
Y 軸の出力には全被検者で、1 歩行周期に対して1つの顕著なピークが見られる。このパターンは速度間で比較しても同様である。また左右を比較すると、およそ 50[%]位相がずれたところにピークが発生していることが分かる。

4.2.3 Z 軸の出力結果

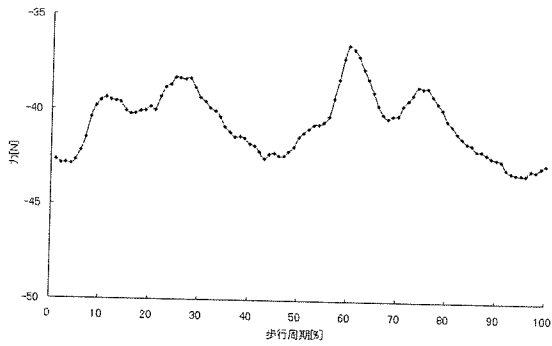
被検者 A~C, フットスイッチ取り付け, 右足, 左足それぞれのときの出力結果を以下 (Fig.4.8) に示す.



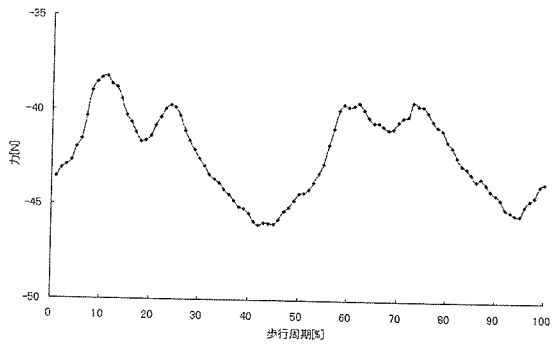
被検者 A 右足



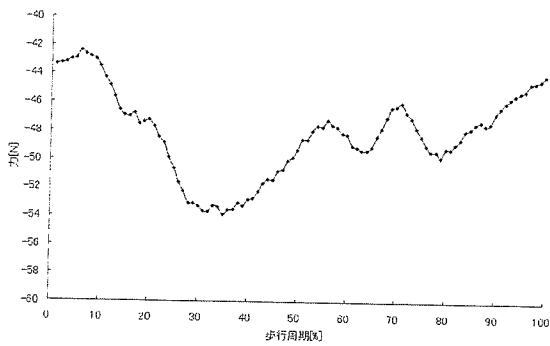
被検者 A 左足



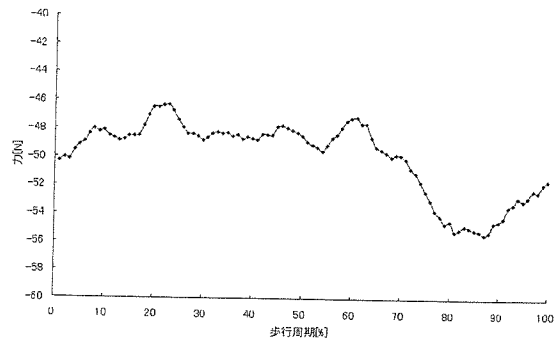
被検者 B 右足



被検者 B 左足



被検者 C 右足



被検者 C 左足

Fig.4.8 Z 軸左右の比較

次に被検者 D~F の結果を示し、速度間の比較を行う。

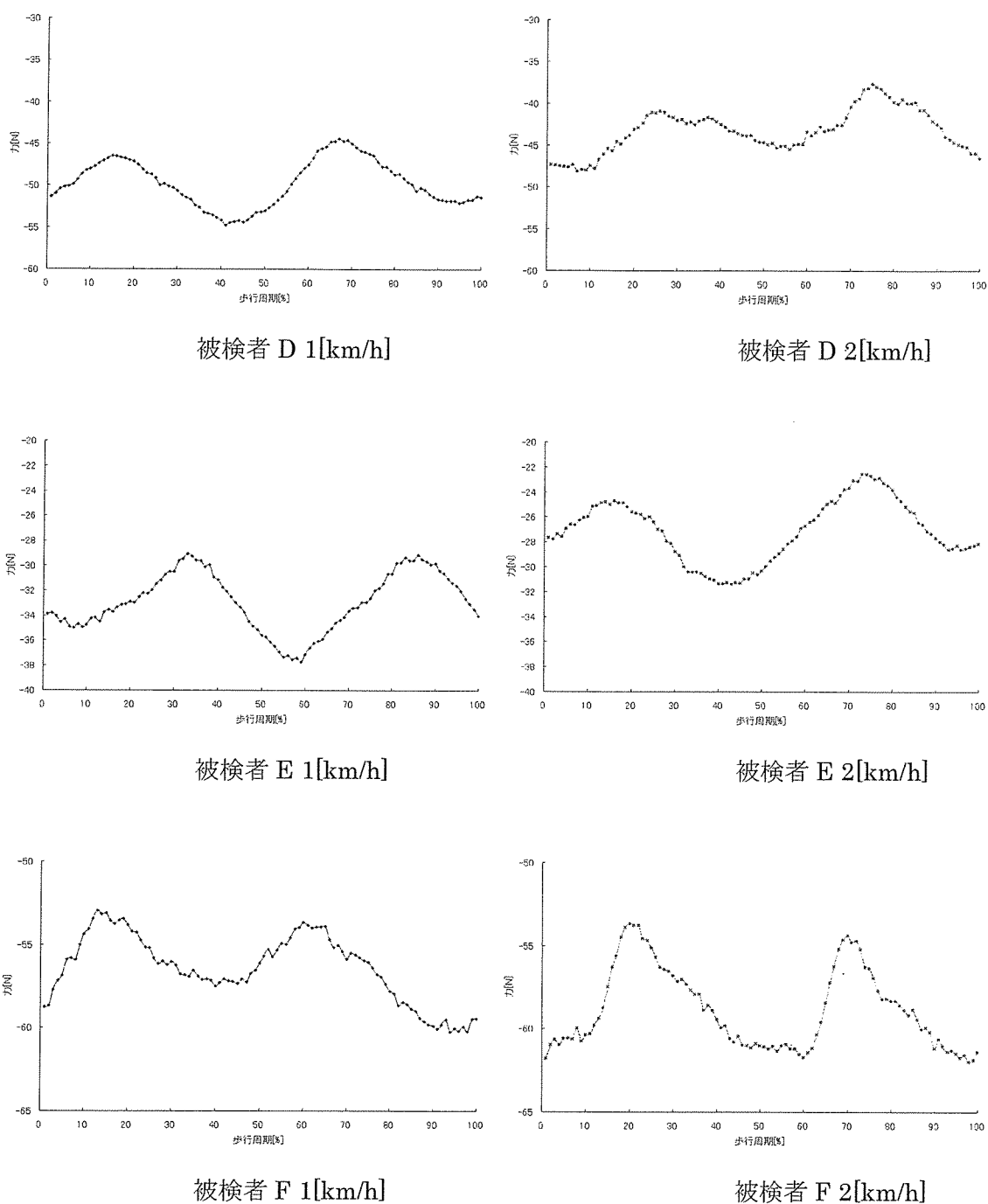
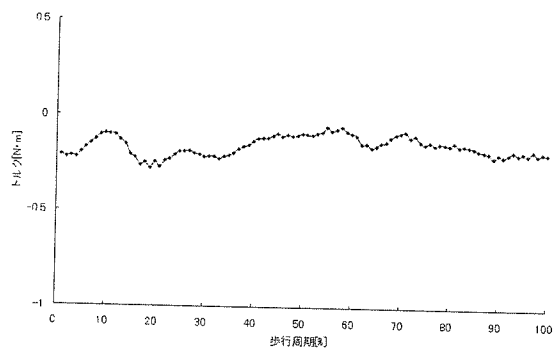


Fig.4.9 Z 軸速度間の比較

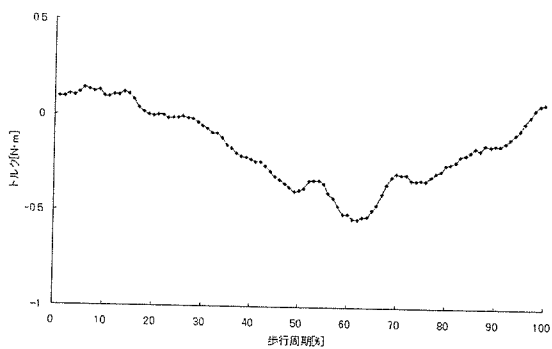
Z 軸の出力には全被検者で、1 歩行周期に対して2つの顕著なピークが見られる。このパターンは速度間で比較すると、被検者によって多少の位相のずれが発生するものの、被検者 C を除き、ほぼ同様である。

4.2.4 軸周りトルク出力結果

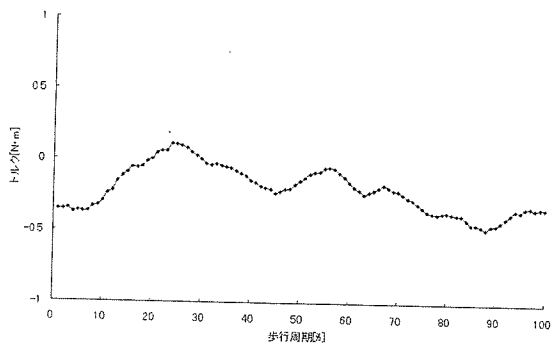
(1) X 軸周りのトルク



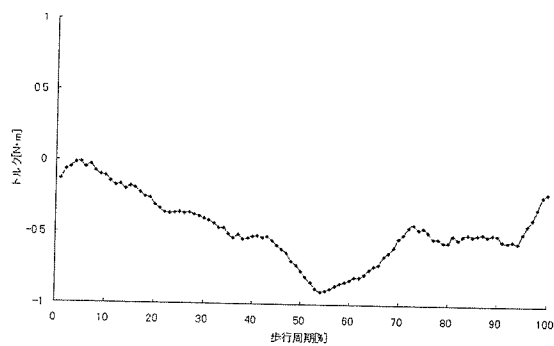
被検者 A 右



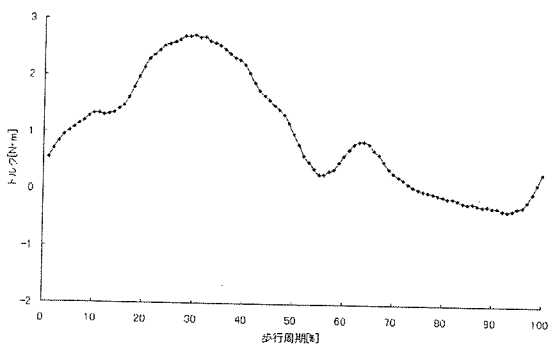
被検者 A 左



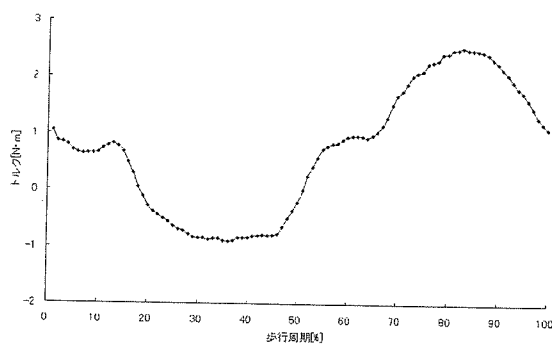
被検者 B 右



被検者 B 左

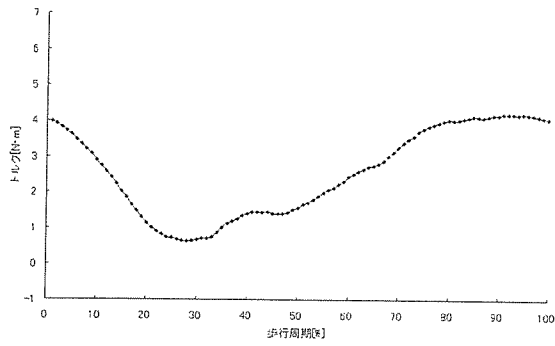


被検者 C 右

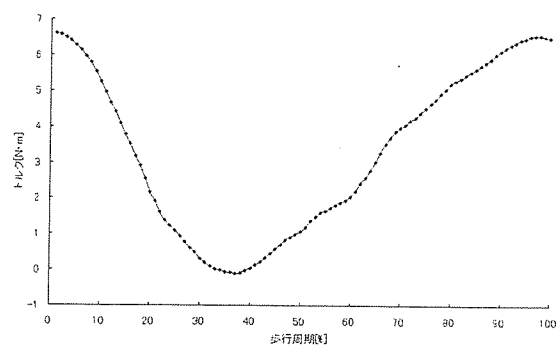


被検者 C 左

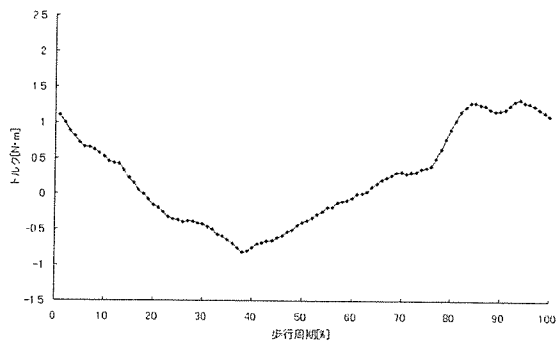
Fig.4.10 X 軸周りのトルク左右の比較



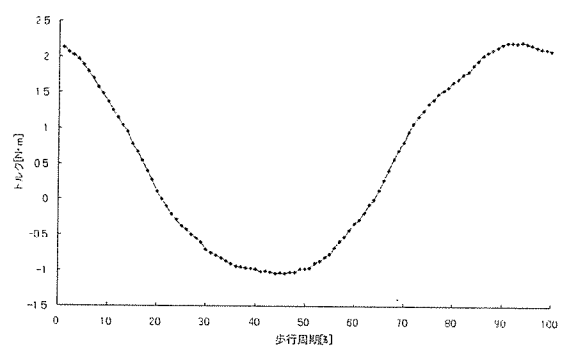
被検者 D 1[km/h]



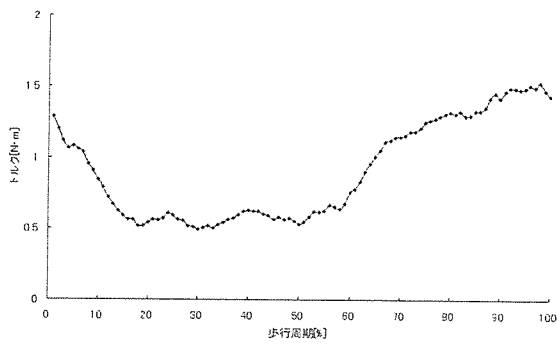
被検者 D 2[km/h]



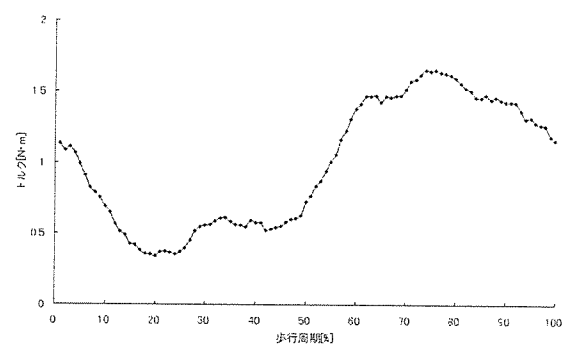
被検者 E 1[km/h]



被検者 E 2[km/h]



被検者 F 1[km/h]

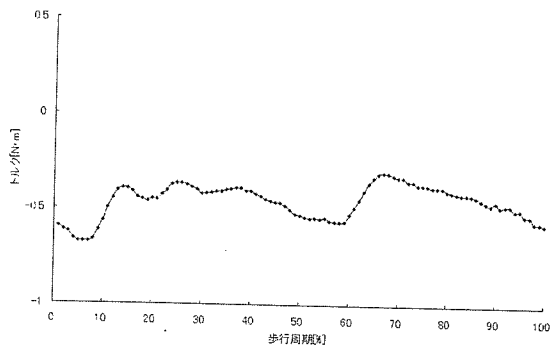


被検者 F 2[km/h]

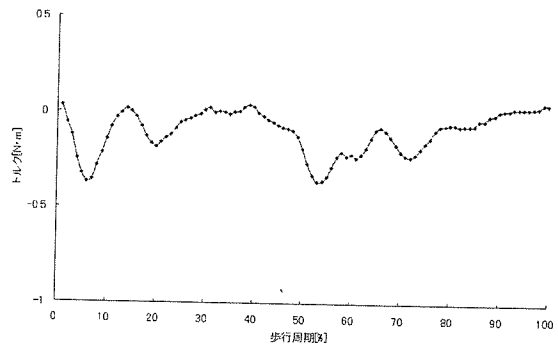
Fig.4.11 X 軸周りのトルク速度間の比較

左右比較（同一被検者試行間比較）でも、速度間比較でも、1歩行周期につき1つの大きなピークが見られる。つまりY軸出力の時と、波形のパターンがほぼ一致するといえる。

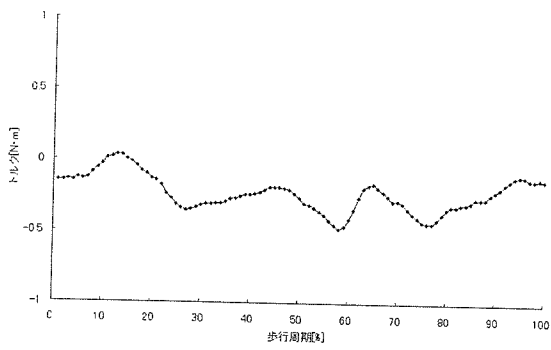
(2) Y 軸周りのトルク



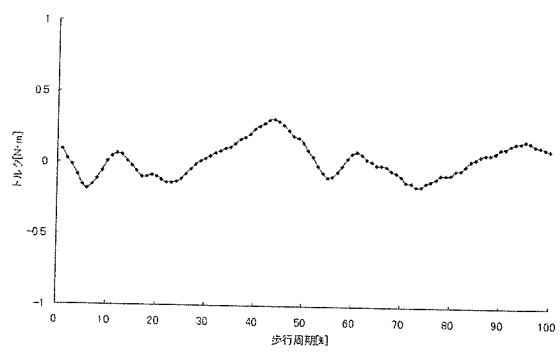
被検者 A 右足



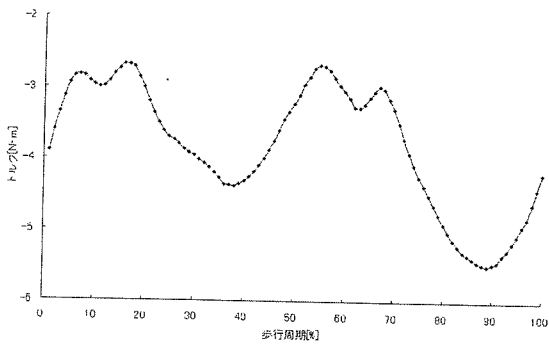
被検者 A 左足



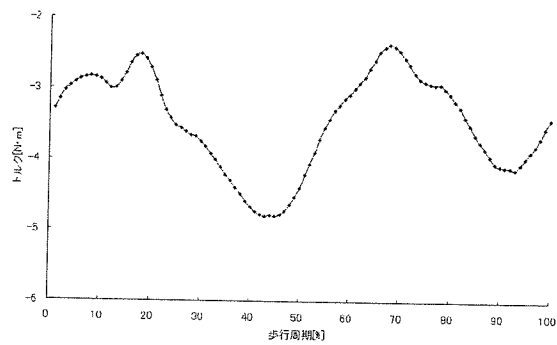
被検者 B 右足



被検者 B 左足

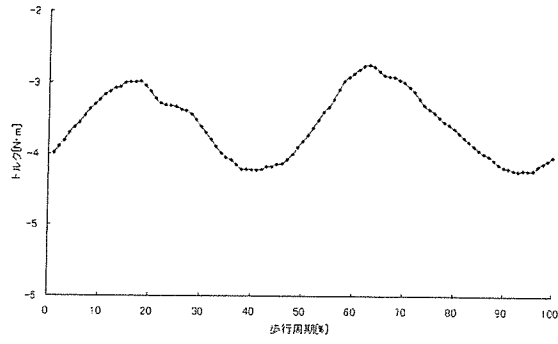


被検者 C 右足

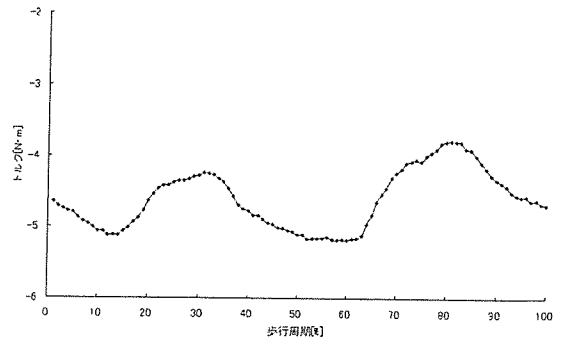


被検者 C 左足

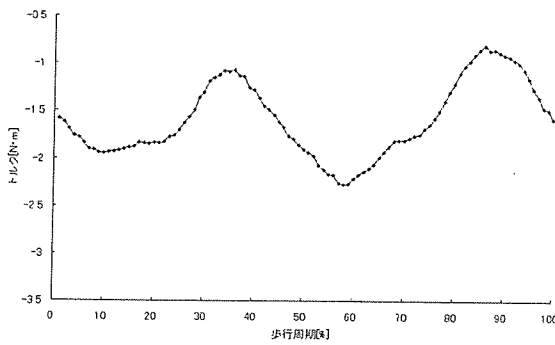
Fig.4.12 Y 軸周りのトルク左右の比較



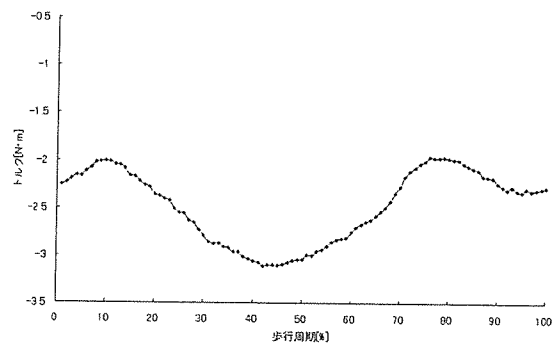
被検者 D 1[km/h]



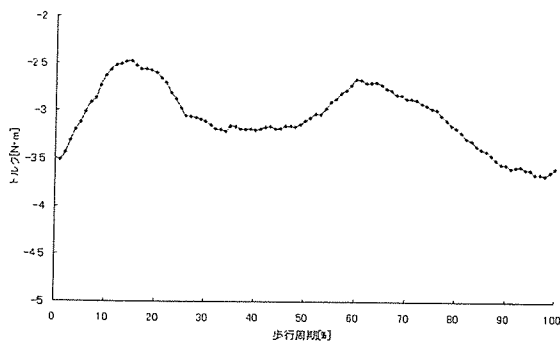
被検者 D 2[km/h]



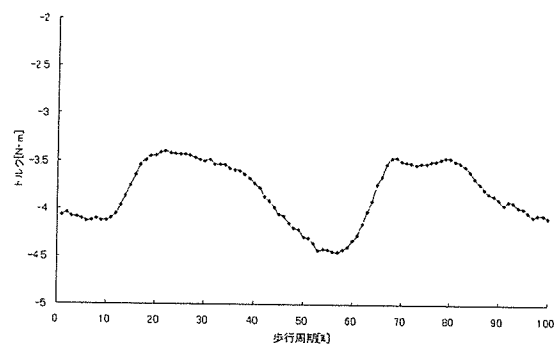
被検者 E 1[km/h]



被検者 E 2[km/h]



被検者 F 1[km/h]



被検者 F 2[km/h]

Fig.4.13 Y 軸周りのトルク速度間の比較

こちらは一歩行周期につき2つのピークが見られる。これはZ軸の出力波形のパターンとほぼ同様であると考えられる。