

加速度ベクトルの方向と大きさによる階段昇降と平地歩行の識別

白水 陽久¹⁾, 白水 重憲¹⁾, 白水 鋭子²⁾, 片山 宗哲¹⁾, 吉田 亮一³⁾

要旨 加速度ベクトルの傾斜角と方位角という概念を、重力と人の動きの合力による加速度にまで拡張し、平地歩行、階段昇り、階段降りを3軸加速度センサーで測定した加速度ベクトルの傾斜角、方位角及び大きさで識別する事を試みた。平地歩行、階段昇り、階段降りのそれぞれにおいて、傾斜角、方位角及び大きさの時間変動のパターンに、これらの歩行の識別が可能な特徴的なパターンが存在した。平地歩行と比較して、階段昇りの場合には、傾斜角の変動範囲が小さな値の方に移行し、階段降りの場合にはベクトルの大きさが大きくなった。

キーワード : 加速度センサ、ベクトルの方向と大きさ、階段昇降、平地歩行、姿勢

1. 序論

我々は、開発した超小型心電・加速度・皮膚温度測定装置 (M-BIT)¹⁾による加速度波形を解析して装着者の歩行・走行時の速度・移動距離を求める方法を提案し²⁾、一般成人のウォーキング・ジョギングのトレーニング記録から関東大学連盟2部リーグに属する大学生サッカーチームの公式戦での各選手の移動速度分布の測定まで^{3,4)}、幅広い応用の可能性を示して来た。しかしながら、平坦地の歩行であるか、階段の昇降であるかの識別は、従来の加速度波形の解析のみでは困難であった。

平成23年3月11日の東北関東大震災による停電及びその後の計画停電により、高層タワーマンションの居住者を始めとして多くの日本人の日常生活の中に、長い階段昇り降りという事が入って来た⁵⁾。平地歩行と比較して、同じ歩数であっても、階段昇りは疲労度が大きく、階段降りは脚への負担が大きい。原子力発電所の全面停止という政治的判断の中、日本は今でも電力不足の危機に曝されており、身体活動トレーニングの中に階段昇降への対応を折り込む必要がある。これに対応する為に、M-BITのような加速度センサーを使用した身体活動測定

システムでも、平地歩行と階段昇降の識別が必要となった。

本研究では、元来、重力による加速度のみを対象とした加速度ベクトルの傾斜角と方位角という概念を^{6,7)}、重力と人の動きの合力による加速度にまで拡張し、平地歩行、階段昇り、階段降りをM-BITの3軸加速度センサーで測定した加速度ベクトルの傾斜角、方位角及び大きさで識別する事を試みた。

2. 測定と解析

2-1 M-BIT

M-BITの詳細に関しては既に報告した。本研究では加速度データのみを使用した。心電測定用の電極を使用して胸部に装着した。加速度のサンプリング周波数は128Hzであった。

2-2 被験者

表1に示すように、被験者は54歳男性(BMI=33.6、運動は苦手)及び都内某大学の体育学部の19歳或いは20歳の学生であった。関東大学連盟2部リーグに属するサッカー部⁴⁾に属するものが主流であり、その他、ラグビー部、バスケット部、バレー部、ボクシング部の所属のものがいた。皆、それぞれのクラブでの主力選手であり、その意味では、スポーツエリートに属する者たちであった。身体運動能力に関してトップクラスの集団と底辺に位置する者を対比する事で、万人に共通の特徴を得られるものと考えた。

1) NPO法人セルフケア総合研究所

2) 医療法人城野産婦人科

3) 浴風会病院

受付日: 2013年3月31日

採択日: 2013年4月20日

表1 歩行時の姿勢に関連したパラメータ (単位は度)

年齢 (歳)	性別	運動能力	平地歩行		仰角平均の差		平地歩行		方位角幅の差	
			仰角平均	仰角平均	階段昇	階段降	方位角幅	方位角幅	階段昇	階段降
1	54	M	運動は苦手	112.1	-8.7	4.0	19.1	0.2	-1.2	
2	19	M	スポーツ選手	76.4	-12.9	-4.0	23.9	-5.0	7.6	
3	19	M	スポーツ選手	92.3	-8.8	-1.5	27.0	-3.7	10.6	
4	19	F	スポーツ選手	97.1	-6.5	3.8	30.8	-10.3	-5.7	
5	19	M	スポーツ選手	97.0	-14.0	-1.7	21.6	-3.2	1.8	
6	19	M	スポーツ選手	97.4	-14.2	3.4	22.7	-0.1	-0.3	
7	19	M	スポーツ選手	98.3	-13.4	-1.5	20.3	-1.7	12.0	
8	20	M	スポーツ選手	92.5	-10.5	6.7	21.6	0.9	0.0	
9	20	M	スポーツ選手	100.5	-12.3	4.0	16.0	2.9	0.5	
10	20	M	スポーツ選手	84.7	-13.8	3.4	22.0	-2.4	0.5	
11	20	M	スポーツ選手	89.7	-10.4	4.2	21.4	-2.3	-2.9	
12	20	M	スポーツ選手	76.5	-6.5	0.0	27.1	-2.2	6.5	
13	20	M	スポーツ選手	70.6	-13.2	4.2	21.8	4.1	7.0	
14	20	F	スポーツ選手	96.0	-9.5	3.9	20.3	-3.1	-0.9	

2-3 平地歩行と階段昇降

両端に階段が設置された鉄筋コンクリート4階建ての校舎を使用した。階段間の距離は50m程度であった。M-BITを装着後、1階から4階まで階段を昇り、コンクリートの廊下を歩行し、1階まで階段を降り、コンクリートの廊下を歩行して出発点に戻るといったコースを3周した。普通に、リラックスした状態で歩行した。

2-4 加速度ベクトルの方向と大きさ

M-BITの垂直方向(垂直方向の加速度検出軸の方向)が鉛直方向と同じ平面(垂直平面)内にある場合に、M-BITの垂直方向と左右方向が成す面(M-BIT面=装着部位の面)が水平面となす角度を傾斜角とした。

次に、傾斜角が90度の場合、つまり、M-BIT面が水平面と直交している場合に、M-BITのM-BIT面内の回転によりM-BIT垂直軸が鉛直方向となす角度を左右角とした。3つの方向の加速度の測定値をベクトルとして、傾斜角と左右角を求めた。更に、3つ目のパラメータとしてベクトルの大きさを使用した。加速度の大きさの単位としては、生活に密

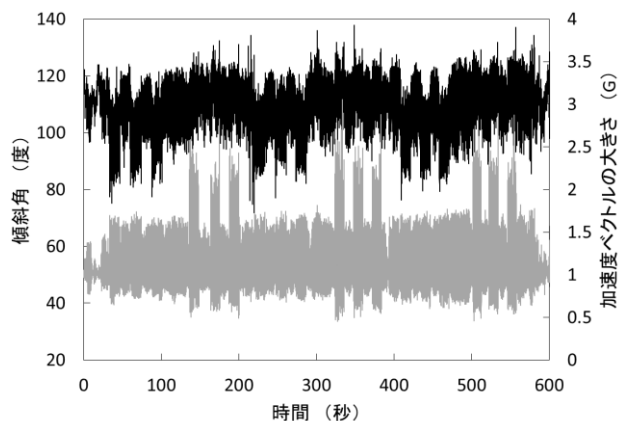


図1 階建の校舎を“階段昇り、廊下歩行、階段降り”3周した場合の傾斜角と加速度ベクトルの大きさの時間変動の例(被験者1)、黒色実線：傾斜角、灰色実線：加速度ベクトルの大きさ

着したG(重力加速度を1とする単位系)を使用した。

3. 結果と考察

3-1 階段昇降と平地歩行

図1に校舎3週を行った場合の加速度ベクトルの傾斜角、方位角、大きさの時間変化を示した。平地歩行の場合に比較して、階段昇りの場合は傾斜角の変動範囲が小さい方に移動し変動範囲が広がる事で識別でき、階段降りの場合はベクトルの大きさの増加で識別できる事が判った。

図2に平地歩行の時の傾斜角と方位角の時間変動を示した。一步の周期で、傾斜角は100度から120度の範囲で変動している事が判った。肥満した被験者の盛り上がった胸部に装着している為に90度より大きな値の領域で変動しているものと思われる。傾斜角が下向きのピークを示している時点が、前へ蹴り出したスイング脚が体の前に接地した瞬間と考えられた。

一方、人は片方を支持脚、片方をスイング脚として歩行する為に、一步毎に体重は左右に移動し、方位角は2歩を周期とする変動を、0度を中心として行う筈のものであるが、ここでは0度から20度の

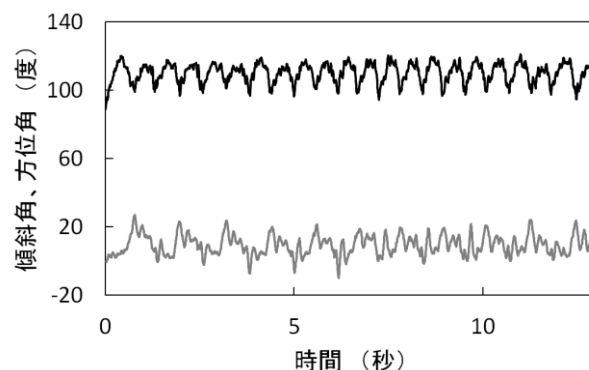


図2 平地歩行の時の傾斜角と方位角の時間変動の例(被験者1) 黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

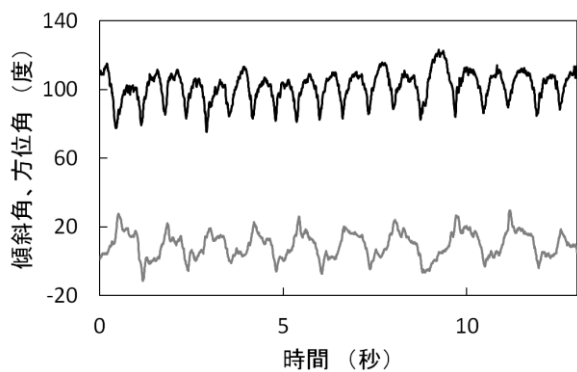


図3 階段を昇る時の傾斜角と方位角の時間変動の例（被験者1） 黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

範囲で変動している。変動中心のずれは、装着時のずれ、姿勢のゆがみ或いは歩行時のくせ等によりずれたものと思われる。基本周期は2歩に対応するが、その変動は滑らかな単調で明確なものでなく、接地の瞬間のピーク以外にも、周期内にピークが存在した。周期全体に亘った体の動きによるものと思われる。

図3に階段を昇る時の傾斜角と方位角の時間変動を示した。階段を昇る時には、平地歩行と比較して、傾斜角の変動範囲の上限は低下し、変動幅は増加した。平地歩行の場合と比較して、体重の分担が左右の脚のどちらか一方になる割合が多くなる為に、方位角の変動は箱型に近くなり、周期は明瞭に2歩に対応するものと考えられた。更に、脚を前に上げる時や体全体を持ち上げる時に体が左右に動いてしまう場合もあり、その変動が大きくなったものと考えられた。

図4に階段を降りる時の傾斜角と方位角の依存性を示した。傾斜角の変動範囲は、平地歩行の場合の大きい方と同様のレベルに集まり、一步の周期での鋭い下向きのピークが主になった。これに対応して、方位角は、2歩に対応した周期のステップ状の変動になっており、安定した変化幅を示しているものと考えられた。

図5に平地方向、階段を昇る、階段を降りる時の加速度の大きさの時間変動の詳細を比較した。平地

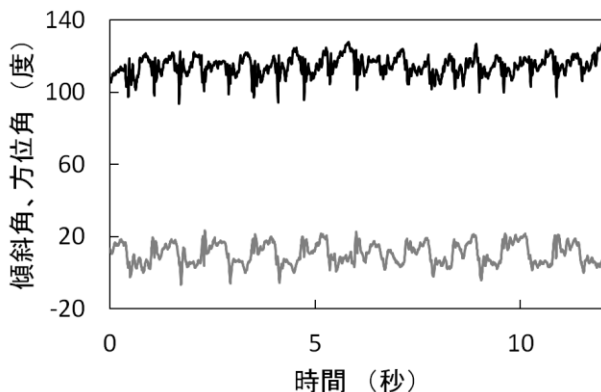


図4 階段を降りる時の傾斜角と方位角の時間変動の例（被験者1） 黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

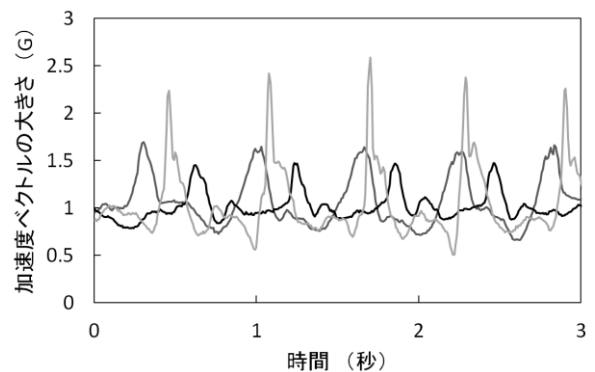


図5 平地歩行、階段を昇る、階段を降りる時の加速度の大きさの時間変動の詳細（被験者1） 黒色実線：平地歩行、濃い灰色実線：階段を昇る、薄い灰色実線：階段を降りる

歩行では一步の間の加速度の増加量とその増加している時間は短かった。階段を昇る時は加速度の増加量は大きくなり、増加している時間も長くなった。この相違が平地歩行に比して、階段を昇る時の肉体疲労が大きい所以であると考えられた。一方、階段を降りる時には、ベクトルの大きさは一端かなり減少した後鋭く増加して大きなピークを示した。平地歩行と同様の加速度の変動に、下に降ろした脚が降りている間の加速度の減少と着地した瞬間に発生した大きな鋭い加速度が重畳したものと考えられた。この為に、疲労感は少ないのに体に発生した加速度のレベルは大きいものと考えられた。

3-2 パターン識別の数値化

以上示してきた識別のポイントとなる特徴を、数値化する為のパラメータを検討した。求めるパラメータは歩行の周期性を考慮する必要があり、解析エポックの長さはFFTによる周波数解析に対応する必要があった。加速度のサンプリング周波数は128Hzであり、被験者が日常生活速度で校舎1階分の階段を昇るのに要する時間は15秒程度であったので、解析エポック長は8秒、データ点数1024点とした。

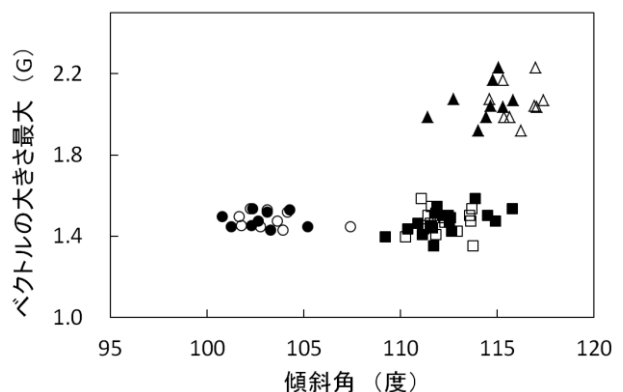


図6 傾斜角平均或いは傾斜角最大と大きさ最大による平地歩行、階段昇り、階段降りの識別（被験者1）
傾斜角平均 □：平地歩行、○：階段昇り、△：階段降り
傾斜角最大 ■：平地歩行、●：階段昇り、▲：階段降り

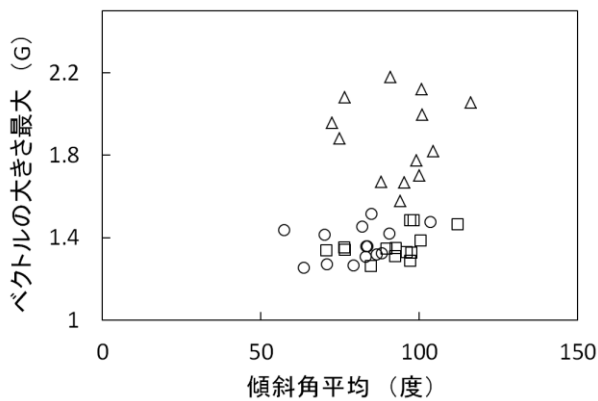


図7 傾斜角平均と大きさ最大による平地歩行、階段昇り、階段降りの識別の試み (全14被験者)
□：平地歩行、○：階段昇り、△：階段降り

傾斜角の時系列データをFFT解析し、平均周期のデータ数を求め、更に、解析エポックの中の歩数を求めた。そして、傾斜角と方位角の、平均周期のデータ数と歩数の積の数のデータの平均を、傾斜角平均と方位角平均とした。また、周期毎に傾斜角、方位角、ベクトルの大きさの最大値と最小値を求め、“歩数”個のこれらの値の平均値として、傾斜角最大、傾斜角最少、方位角最大、方位角最少、大きさ最大、大きさ最少を求めた。これら8つのパラメータで数値的に識別する事を検討した。図6に示した様に、傾斜角最大或いは傾斜角平均と大きさ最大の組み合わせで識別できる可能性があった。

図7に各被験者における傾斜角平均と大きさ最大の平均値を示した。同じ年齢の運動選手の集団であっても、傾斜角平均の被験者間のばらつきは、個々の被験者の平地歩行と階段昇りの間の相違よりも大きく、絶対値での分離は出来なかった。また、平地歩行と階段降りの間で大きさ最大の分布は分離したが、階段降り時の大きさ最大の被験者間のばらつきも結構大きかった。この為に、傾斜角平均、大きさ最大の双方を平地歩行時との相違の形で検討する事にし、この両者の関係を図8に示した。階段昇りは、傾斜角平均の差、階段降りは大きさ最大

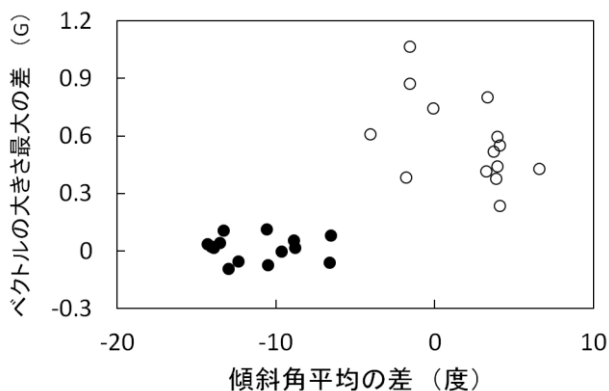


図8 平地歩行を基準とした傾斜角平均の差と大きさ最大の差による平地歩行、階段昇り、階段降りの識別の試み (全14被験者)、●：階段昇り、○：階段降り

の差として検出できる事が判った。

3-3 歩行時の姿勢

平地歩行時の傾斜角平均の被験者間の大きなばらつきは、逆に体幹の形状(胸部)或いは歩行時の姿勢の尺度として使用できる可能性を示した。表1に平地歩行の時の傾斜角の大きさを示した。54歳男性被験者では112.1度であるが、大学生被験者の過半数は90度~100度の範囲にあった。大学生の胸部はフラットに近い形状であるのに対し、BMIの大きな54歳男性の場合は盛り上がっている為と考えられた。一方、大学生被験者の中には、傾斜角平均が80度以下であったものが4名いた。本研究では、平地歩行と階段昇降の相違の検出のみを目指した為に行っていないが、今後、立位での“気を付け”や“休め”の姿勢での測定や、その際の傾斜角を他の方法で測定し比較する事で、歩行時の姿勢の評価法を確立し、歩行訓練等にも使用できるものと思われる。

図8に示した様に、階段昇りの際の傾斜角の低下は、年齢、体格、運動能力全てが対照的な被験者の双方で見られ一般的なものである事が示唆された。一方、階段降りの場合、傾斜角平均は変化しないか若干増加する傾向にあった。

方位角の絶対値を静的な姿勢のパラメータとして使用する為には、装着時にM-BITの加速度軸の方向に関する注意が必要であった^{6,7)}。一方、歩行時の姿勢を議論する際には、そのような注意を払わずに装着して、本研究で求めた方位角最大と方位角最小の差として、“方位角幅”を求める事で体の左右への動揺の度合いを評価できる事が判った。平地歩行の場合には、多くの被験者では20度前後であったが、30度前後と大きな被験者も3名存在した。階段昇りの場合、方位角幅20度前後の被験者では変化が小さく、方位角が大きめの被験者では減少する傾向にあった。昇る為に努力が必要である為に、余計な左右への動きが小さくなったものと思われる。図7で階段降り時の大きさ最大にばらつきが大きい事を示したが、表1に示した方位角幅の差もばらつきが多く、大きく増加するものが5名、減少するものが1名、変化しないものが8名であった。

3-4 大学生被験者の詳細挙動例

平地歩行と階段昇降を識別する為の特徴を探するための議論では54歳男性被験者の詳細挙動を検討した。比較の為に、図7において階段を下りる時の大きさ最大が一番小さかった被験者での詳細を検討した。階段を下りる時の大きさ最大が小さいという事は、下に降ろした脚の設置の際の衝撃が大きくならないように上手くコントロールした動作をしているものと考えられた。

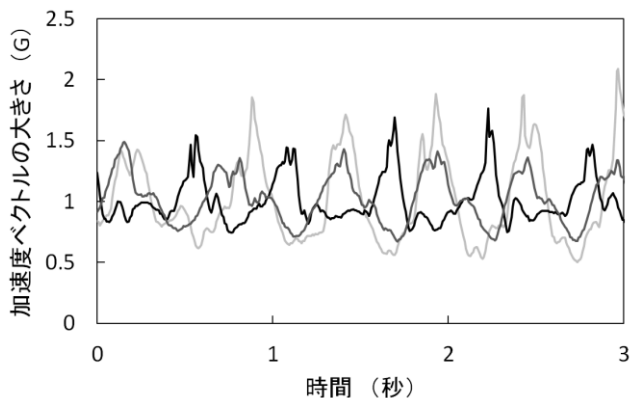


図9 平地歩行、階段を昇る、階段を降りる時の加速度の大きさの時間変動の詳細（被験者11） 黒色実線：平地歩行、濃い灰色実線：階段を昇る、薄い灰色実線：階段を降りる

図9に、この被験者（被験者11）の平地方向、階段を昇る、階段を降りる時の加速度の大きさの時間変動を示した。階段を降りる時の加速度パターンは、図5の被験者11のものとは大きく異なり、接地した瞬間の大きなピークが存在しない。また、被験者1の場合、階段を昇る時と降りる時の加速度が大きくなる時間は平地方向と同様に局在していたが、被験者11では平地方向と異なり、一步の周期全体に広がっていた。

図10に階段を降りる時の傾斜角と方位角の時間変動を示した。こちらも、図4に示した被験者1のものとは大きく異なった。傾斜角の時間変動には、接地の時の大きなピークが存在せず、多数のピーク状の変動が存在し、傾斜角変動のみからは一步の周期は判別できなかった。方位角変動も図4とは大きく異なった。左右の脚に対応したステップ状のものではなく、傾斜角変動のピークと同じタイミングでピークが重畳しているが、基本的には左右に徐々に変化する変動を示していた。

単純に交互に前に脚を下して体重移動し、接地の時に大きな衝撃を受けてしまう被験者1の階段降りの方と異なり、被験者11は体の動きを上手くコントロールして、左右に滑らかに体重移動し、か

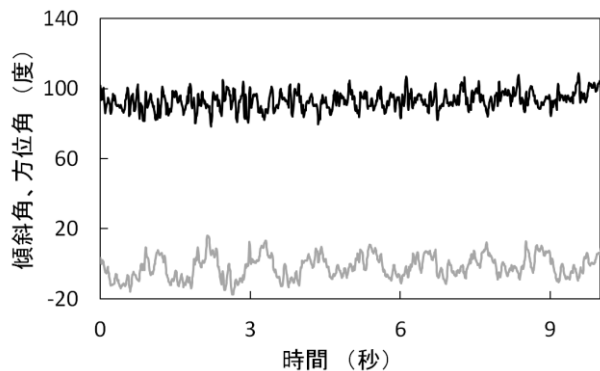


図10 階段を降りる時の傾斜角と方位角の時間変動の例（被験者11） 黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

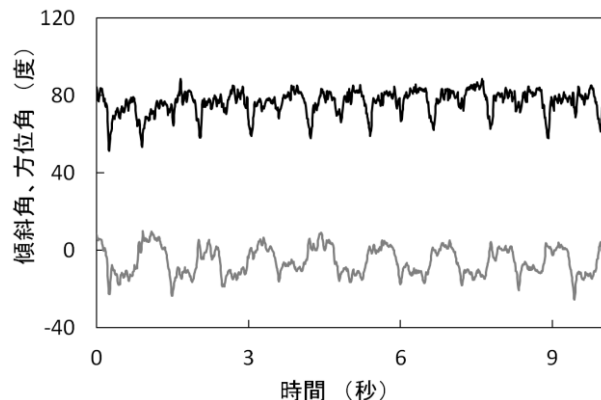


図11 階段を昇る時の傾斜角と方位角の時間変動の例（被験者11）、黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

つ接地の時に大きな衝撃を受けないようにしているものと思われた。高齢者の歩行を考える場合、階段を降りる時の衝撃の低減は、重要なポイントである。ここで、解析方法とその低減に関する糸口が得られたので、今後、検討したい。

図11に被験者11の階段を昇る時の傾斜角と方位角の時間変動を示した。傾斜角には接地の時の下向きのピークが存在したが、その大きさは小さかった。方位角の時間変動は、左右の脚に対応したステップ状のものであり、変動幅は安定していた。階段を昇るという事は被験者1には負担が大きく、体が前後左右に動いてしまうが、被験者11には負担が小さく不必要な動きが発生しないものと考えられた。

図12に、被験者11の平地歩行の時の傾斜角と方位角の時間変動を示した。図2に示した被験者1の場合と大きく異なり、傾斜角、方位角の大きな変化は前に出した脚の接地の時のピーク状のもののみであり、上半身の姿勢は安定していたものと考えられた。

4. 終わりに

胸部に装着したM-BITで測定した3軸の加速度から算出した加速度ベクトルの傾斜角、方位角及び大きさの時間変動には、平地歩行、階段昇り、階段降りの方に、これらが識別できるパターンが出現した。

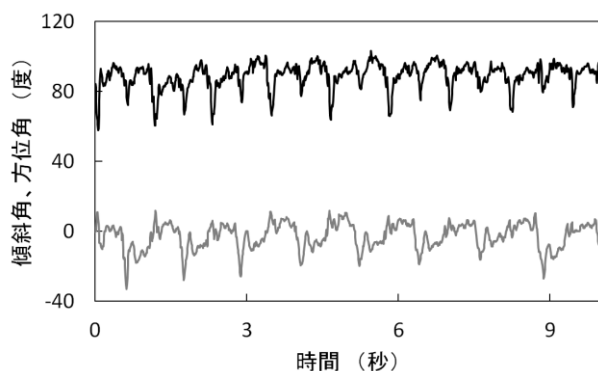


図12 平地歩行の時の傾斜角と方位角の時間変動の例（被験者11）、黒色実線：傾斜角、灰色実線：方位角

平地歩行に比して、階段昇りの時には傾斜角の変動範囲が小さな値の方に移動し、階段降り時には、ベクトルの大きさが大きくなった。

解析エポックは8秒とし、FFTにより平均周期データ数と歩数を求めた。傾斜角からは、このエポックの中の最初から平均周期データ数と歩数の積のデータまでの平均値である、“傾斜角平均”をパラメータとした。加速度ベクトルの大きさからは各周期毎に、“歩数”個の最大値を求め、その平均値である“大きさ最大”をパラメータとした。

傾斜角平均は、被験者間の変動が、被験者内の平地歩行と階段昇りの相違より大きかった為、傾斜角平均の値そのものでは、平地歩行と階段昇りが分離できなかつた。平地歩行を基準としての、“傾斜角平均の差”、と“大きさ最大の差”を求めると、平地歩行、階段昇り、階段降りが区別位できた。

傾斜角平均には、体格の特徴と歩行時の姿勢のパラメータになる可能性がある事が示された。

平地歩行、階段昇り、階段降り時の傾斜角、方位角及び加速度ベクトルの大きさの時間変動を詳細に検討する事で、動きの特徴や姿勢の安定性、被験者にとっての負担の度合い、階段を降りる時に受ける衝撃を評価できる事が判った。更に、階段を降りる時の衝撃を、軽減する降り方の特徴も得られた。

参考文献

- [1] 白水重憲、片山宗哲、正木健雄：幼稚園児の自律神経活動の24時間モニタリング。全面発達の展開 **1**: 32-41, 2011。
- [2] 白水重憲、白水陽久：ウォーキングとジョギングのお供に。全面発達の展開 **1**: 117-124, 2011。
- [3] 白水重憲、片山宗哲、正木健雄：高齢者サッカーにおける競技中の移動速度・移動距離及び心拍数評価。全面発達の展開 **2**: 91-99, 2013。
- [4] 白水陽久、片山宗哲、白水重憲：大学生サッカー選手の試合中における移動速度。全面発達の展開 **3**: 39-44, 2013。
- [5] 菅野久信、白水重憲、片山宗哲：2011年東北地方太平洋沖地震及びその後の停電等に伴う混乱時のストレス及び身体的負荷の測定例。全面発達の展開 **1**: 1-8, 2011。
- [6] 山村昌代、茂木伸之、白水重憲他：座位作業時における姿勢変化に関する研究—加速度センサを用いた姿勢の評価について。産業人間工学研究 **12**: 22-27 (2011)。
- [7] 山村昌代、白水重憲、片山宗哲：補助具使用による座位作業の姿勢変化に関する研究。産業人間工学研究 **13**: 17-23 (2012)。