

地下空間移動における生体負担に関する研究
—地下鉄駅での移動方法の違いについて—
STUDY ON WORKLOAD IN UNDERGROUND MOVEMENT
- ABOUT THE DIFFERENCE IN METHOD OF MOVEMENT IN SUBWAY STATION -

本多 薫¹・西 淳二²・西田 幸夫³・市原 茂⁴
Kaoru HONDA・Junji NISHI・Yukio NISHIDA・Shigeru ICHIHARA

In this study, we made an experiment on the hypothesis that elevators and escalators are not able to use in underground movement and stairs are used instead. In the experiment, elevators, escalators and stairs were used as method of movement from the platform of subway station to the ground exit. At that time, heart rate was measured. Then, autonomic nerve activity was extracted from power spectrum of heart rate variability, and examined the difference of workload due to different method of movement. As a result, the sympathetic and parasympathetic nerve activities changed remarkably during movement using the stairs in comparison to elevators and escalators and showed that workload is big.

Key Words: underground, subway station, movement, workload, heart rate variability

1. はじめに

地上と地下空間との上下の移動方法には、エレベータ、エスカレータおよび階段が使われる。地下鉄などの公共交通機関では、楽により効率的に移動できるようにエレベータやエスカレータが設置されている。しかし、地下火災などの非常事態が発生した場合には、人々は階段を使用して移動することが予想される。これまでの研究によれば、高層ビル（20階）の非常階段による移動は、心拍数が130～200近くまで上昇する「きつい運動」に相当することから、上がり続けることは困難であると報告されている¹⁾が、地下空間移動においても同様な生体負担を生じることが考えられる。人間工学などの分野においては、このような時の生体負担を把握するために心拍変動（心拍のR-R間隔の変動）から自律神経活動を測定する試みが行われている^{2) 3)}。心拍変動には、異なる周波数を持つ複数の成分を含んでおり、パワースペクトル解析が有効であると考えられている⁴⁾。パワースペクトル解析では、フーリエ変換や自己回帰モデルが用いられてきたが、時間的情報が失われるため、時々刻々と変化する自律神経活動を捉えることが難しかった。近年ではパワースペクトル解析において効率的な時間一周波数解析ができるウェーブレット変換が注目されており、心拍変動のパワースペクトル解析にも用いられてきている⁵⁾。そこで本研究では、地下空間（地下鉄駅）移動時に、エレベータやエスカレータが使えず階段で移動した場合を想定し、エレベータ、エスカレータ、階段による移動時の心拍変動をパワースペクトル解析を行い、移動方法の違いによる生体負担の差を検討した。

2. 歩行と心拍変動

キーワード：地下空間、地下鉄駅、移動、生体負担、心拍変動

¹ 非会員 山形大学 人文学部 助教授

² 正会員 NPO 法人ジオテクチャーフォーラム 代表

³ 正会員 東京理科大学 総合研究所 COE 技術者

⁴ 正会員 首都大学東京 都市教養学部 教授

(1) ウェーブレット変換による心拍変動解析

心拍のR-R間隔は非定常な信号であり、これまでのフーリエ変換を用いた解析では、時間軸に沿ったある対象区間の平均としてのスペクトルが得られるため、時間的情報が失われる。そのため、短時間フーリエ変換などが提案されているが、周波数分解能の低下などの問題点が指摘されている⁶⁾。この欠点を補う手法にウェーブレット変換がある。

ウェーブレット変換による時系列データの解析は、フーリエ変換を用いる解析に比べると周波数特性が時間の関数として与えられることになり、時間軸、周波数軸、パワー強度の3次元情報として得られる利点があり、非定常な生体信号の時間的変化を解析するのに有効な手法であると考えられる。短時間フーリエ変換とウェーブレット変換の比較については、多くの著書⁶⁾や論文⁷⁾が見られるので、ここでは本研究でのウェーブレット変換の処理について述べることにする。ウェーブレット変換は、局在化する波を表す様々な窓関数の総称であり、マザーウェーブレット（アナライジングウェーブレット）と呼ばれる。基本ウェーブレットを $\psi(t)$ 、これをフーリエ変換したものを $\hat{\psi}(t)$ とすると、 $\psi(t)$ はアドミッシブル条件(2.1)式を満たす。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(t)|^2}{|t|} dt < \infty \cdots (2.1)$$

これは、 $\psi(t)$ が振動的であり、その正負の面積が等しく、無限遠域において0に収束することを意味する。アドミッシブル条件が満たされるとき、その連続ウェーブレット変換は(2.2)式のように定義される。

$$(W_{\psi} f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \cdots (2.2)$$

スケール係数 a を操作することにより窓幅を変化させ、時系列データ $f(t)$ の周波数に対応し、シフト係数 b を操作することにより $\psi(t)$ を時間軸に対し平行移動させ、時間情報を得られる。

本研究では、Gaborウェーブレット(2.3)式を取り上げ、マザーウェーブレットを用いた。Gabor関数を用いたウェーブレットは最も効率の良い時間-周波数解析を実現する窓関数であり、時間軸上で動的に変化する信号を解析するのに適していると言われている⁸⁾。そのため、心拍変動解析に有効な窓関数であると考えられる。また、本研究で開発したウェーブレット変換による心拍変動解析システムは、プログラム言語はJAVA (JDK) を使用した。

$$\psi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{-it} \cdots (2.3)$$

心拍変動解析は、R-R間隔の時間データに対して上記のウェーブレット変換によるパワースペクトル解析を行い、0.05~0.15Hz付近に中心周波数をもつ低周波数成分(LF成分)と0.20~0.40Hz付近に中心周波数をもつ高周波数成分(HF成分)を抽出した。0.1Hzの周期を含むLF成分は血圧変動に関連したものであり、交感・副交感神経活動の反映を示し、0.25Hzの周期を含むHF成分は呼吸変動に関連したもので、副交感神経活動を反映していると言われている^{2) 9)}。よって、0.05Hz以下を除く0.05Hz~0.15Hzのパワーの総和をLF成分、0.15Hz以上~0.475Hzのパワーの総和をHF成分とした。また、交感神経と副交感神経の活動は常に拮抗して生体の状態は一定に保たれている。しかし、生体に精神的または身体的な負荷がかかると、交感神経活動が活発になり、副交感神経活動が抑制されることは多くの研究から明らかとなっている¹⁰⁾。そのため、心拍変動の解析では、LF成分とHF成分の比率から交感神経活動と副交感神経活動のバランスを分析することが一般的である。LF/HFの増加は交感神経活動と副交感神経活動とのバランスが交感神経側に傾いていることを示し、LF/HFの低下はその逆を示すと考えられている⁹⁾。よって、本研究においても交感神経活動と副交感神経活動とのバランスの変化を検討するため、式(2.4)により、PSBを算出した。

$$PSB = \frac{LF_2 / HF_2}{LF_1 / HF_1} \cdots (2.4)$$

LF_1, HF_1 : 移動(歩行)開始前 LF_2, HF_2 : 移動(歩行)時

(2) 歩行時の心拍変動

平坦の建物内の廊下を歩行させた場合のR-R間隔時間と心拍変動(LF成分、HF成分)の変化の一例を図1に示す。

被験者は男子大学生（20 歳）である。安静時（-10 秒～0 秒）から歩行時（1 秒～90 秒）の R-R 間隔の変化である。安静時には R-R 間隔が 70～80 sec/100 であるが、歩行開始後 13 秒で 50 sec/100 前後まで急激に短くなることが確認できる。その後は、歩行中は R-R 間隔は 50 秒前後で推移し変動は小さい。次にウェーブレット変換した後の LF 成分と HF 成分の結果を図 2 に示す。ここでは、歩行動作開始時のパワースペクトルの変化に着目するため、0 秒（安静時）～40 秒（歩行時）の LF 成分と HF 成分を示す。歩行動作を開始すると HF 成分が減少し 9 秒で最も低くなる。また、LF 成分は歩行動作開始後から 24 秒前後まで緩やかに低下している。また、歩行動作を開始すると PSB が増加し、歩行動作開始後 9 秒で最も大きくなり、その後、PSB は減少する。他 4 名の被験者についても、PSB は歩行を開始すると 8 秒前後で最大となり、その後に減少することを確認した。

歩行などの筋的運動では、まず上位脳である運動中枢の興奮や間脳における精神的興奮が脊髄の心臓中枢を刺激することによって、心臓の動きを促進する。よって歩行を開始すると交感神経活動が活発になり副交感神経（迷走神経）活動が抑制されるために心拍数が増加する^{11) 12)}。しかし、歩行による負荷量に対する一定の心拍数に達すると副交感神経活動が働くとともに交感神経活動が抑制され、心拍数を定常状態に保持すると言われている¹²⁾。安静から歩行動作を開始すると R-R 間隔は急激に短くなる。その後、歩行中は R-R 間隔は一定の値で推移する傾向が見られた。このことは、歩行を開始すると、交感神経活動が活発になり副交感神経活動が抑制されることにより、R-R 間隔が短くなる。しかし、平坦な廊下を一定速度で歩行した場合には、歩行による負荷量が短時間で一定となり、交感神経と副交感神経が拮抗し、R-R 間隔の変動が小さくなったと推察される。また、ウェーブレット変換により 1 秒単位で LF 成分と HF 成分を抽出した。その結果、歩行を開始すると HF 成分は減少する。しかし、LF 成分は HF 成分と比較して緩やかに減少する傾向が見られた。LF 成分は、交感神経活動と副交感神経活動の両方の支配を受けているため、LF 成分は HF 成分と比較し変動が小さいと考えられる。歩行動作を開始すると PSB は急激に増加し、歩行動作開始後 8～9 秒前後で最大となり、その後、PSB は減少する。また、歩行中は PSB の変動は小さくなる傾向が認められた。上述したが歩行開始後、負荷量が一定となり交感神経と副交感神経が拮抗し、PSB の変動は小さくなったと推察される。

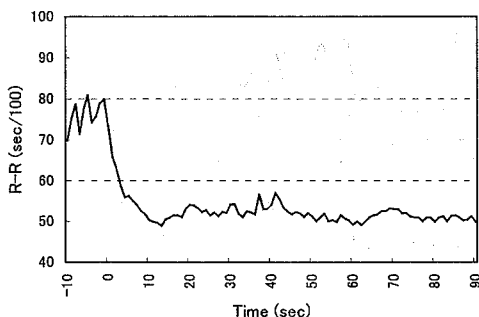


図-1 歩行開始前後の R-R 間隔の変化

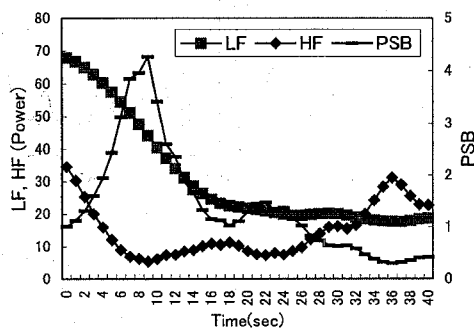


図-2 歩行開始時の心拍変動

3. 地下鉄駅での移動実験の内容

(1) 方法

実験は、地下鉄大江戸線六本木駅と青山一丁目駅で実施した。被験者は 30 名とし、エレベータ群とエスカレータ群、階段群の 3 群に分けた。このグループ群より各 1 名（計 3 名、22～28 歳の男性）をランダムに選定し、心拍計を装着した。選定した被験者に対しては、過去および現在に不整脈などがなく循環器機能が正常であることを口頭にて確認した。各グループ群ともに六本木駅と青山一丁目駅のホームから改札口を通り、地上出口まで移動する実験を行った。エレベータ群は、ホームから地上出口まで、エレベータを使って移動した。なお、エレベータが利用できない場所では、エスカレータを使った。エスカレータ群は、全行程をエスカレータで移動した。階段群は、全行程を階段を利用して歩行にて移動した。被験者 30 名を対象としたアンケート調査の結果、心拍数の変化については既に報告している¹³⁾。地下鉄

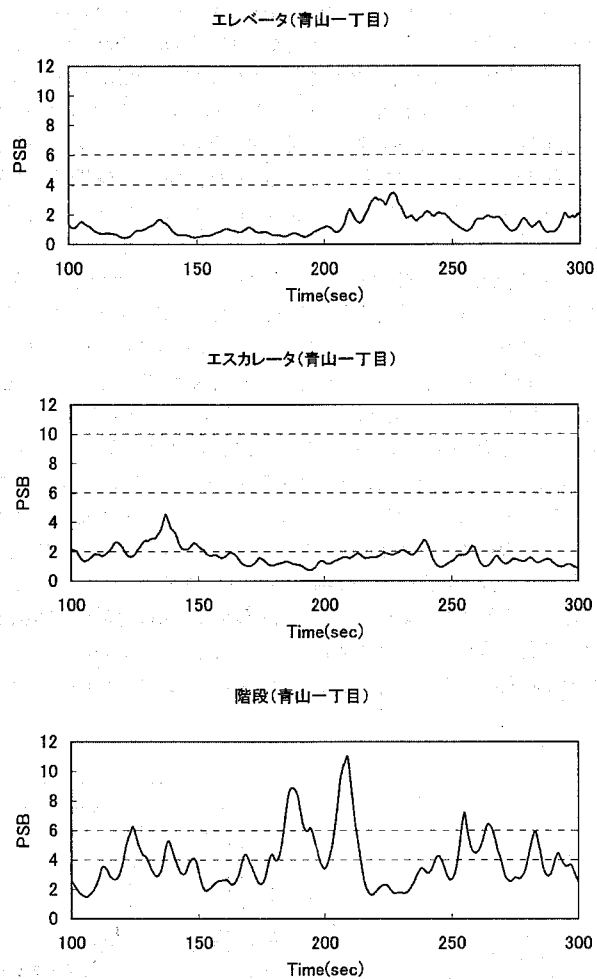


図3 PSBの経時的变化 (青山一丁目駅)

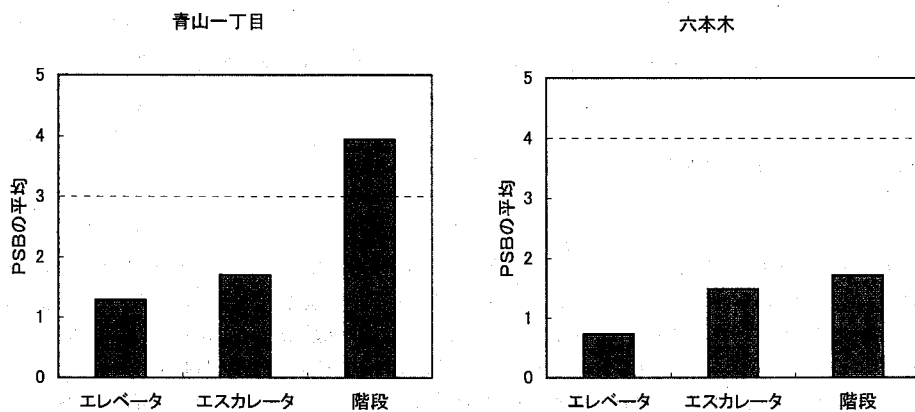


図4 PSBの平均値

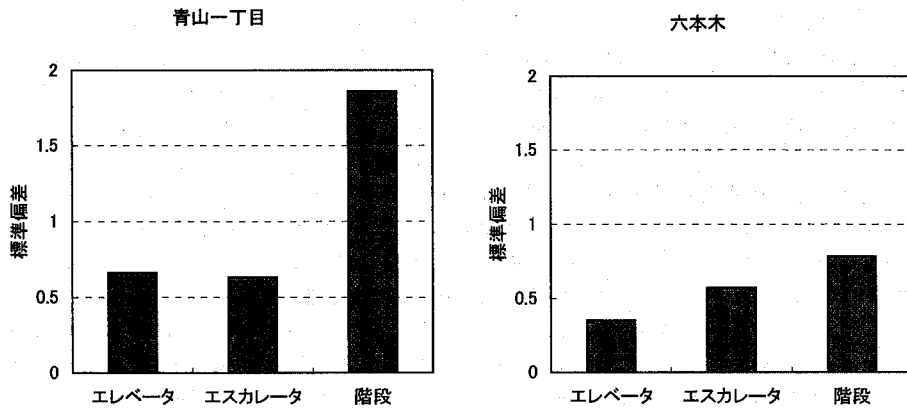


図5 PSBの標準偏差

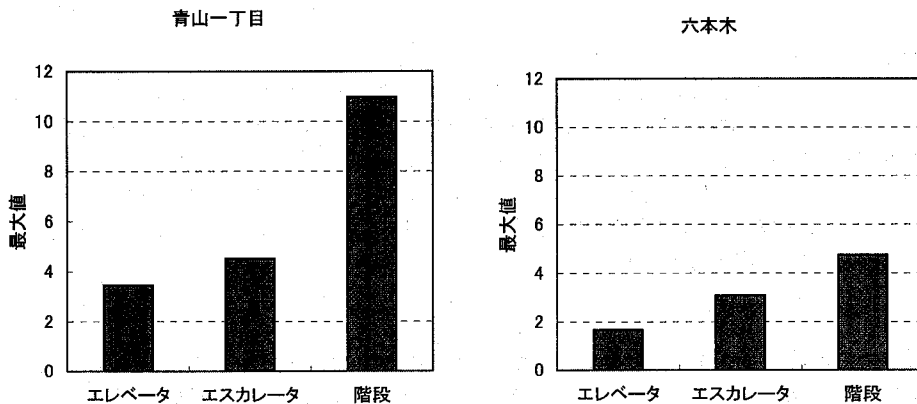


図6 PSBの最大値

のホームから地上出口までの深度は、青山一丁目駅が27.0m、六本木駅が42.3mであった。

(2) 結果

エレベータ、エスカレータ、階段ともに地下鉄のホームを出発地点とした。そのため、エレベータ、エスカレータ、階段の設置されている場所まで歩行による移動が必要であった。また、出発地点と地上出口までの移動距離にも差違が見られた。そのため、移動開始後100秒から300秒までの心拍変動を比較対象にすることとした。図3に青山一丁目駅での各移動方法によるPSBの経時的変化を示す。図3より、エレベータおよびエスカレータによる移動時はPSBの変化は小さいが、階段による移動時のPSBが大きく変動する傾向が見られる。図4に各移動方法による青山一丁目駅および六本木駅でのPSBの平均値（移動開始100秒から300秒の平均）を示す。図4より、エレベータ、エスカレータ、階段の順にPSBの値が大きくなっている。次に図5に各移動方法による青山一丁目駅および六本木駅でのPSBの標準偏差（移動開始100秒から300秒）を示す。図5より、青山一丁目駅および六本木駅ともに、エレベータとエスカレータによる移動時と比較して、階段による移動時のPSBの標準偏差が大きい。また、図6に各移動方法による青山一丁目駅および六本木駅でのPSBの最大値（移動開始100秒から300秒）を示す。図6より、青山一丁目駅ではエレベータとエスカレータによる移動時と比較して、階段による移動時のPSBの最大値が2倍以上である。また、六本木駅においても、エレベータとエスカレータによる移動時と比較して、階段による移動時のPSBの最大値が1.5倍以上である。

(3) 考察

心拍変動に関するの先行研究では、LF 成分は血圧変動に関連したものであり、交感・副交感神経活動の反映を示し、HF 成分は呼吸変動に関連したもので、副交感神経活動を反映していると言われている^{2) 9)}。また、LF 成分だけでは交感神経活動の変化を表さないが、LF/HF は交感神経活動を表すとの指摘がある⁹⁾。また、PSB の増加は交感神経と副交感神経とのバランスが交感神経側に傾いていることを示すと言われている¹⁴⁾が、歩行を開始すると交感神経活動が活発になり副交感神経（迷走神経）活動が抑制されるために PSB が増加する。しかし、歩行による負荷量に対する一定の心拍数に達すると副交感神経活動が働くとともに交感神経活動が抑制され、PSB の変動が小さくなる。

今回の実験結果では、各移動方法による青山一丁目駅および六本木駅での PSB の平均値は、エレベータ、エスカレータ、階段の順に PSB の値が大きくなり、標準偏差も大きくなった。特に階段による移動中の PSB の変動は、エレベータとエスカレータと比較して大きい。歩行による負荷量に対する一定の心拍数に達すると副交感神経活動が働くとともに交感神経活動が抑制され、PSB の変動が小さくなる。しかし、階段での移動中は、自律神経機能の活動が活発になり、常に交感神経と副交感神経のバランスを調整する必要がある、生体負担が大きいと考えられる。自律神経機能の調整がうまくできず、自律神経系の失調を来すと、急激な血圧低下やめまい等を引き起こす。高齢者では、自律神経機能（交感神経と副交感神経のバランス）の調整が難しくなると言われている¹⁵⁾が、階段による移動は交感神経と副交感神経の活動が著しく変動し、生体に対して大きな負担となると推察される。

4. まとめ

本研究では、地下空間（地下鉄駅）移動時に、エレベータやエスカレータが使えず階段で移動した場合を想定し、エレベータ、エスカレータ、階段による移動時の心拍変動をパワースペクトル解析を行い、移動方法の違いによる生体負担の差を検討した。その結果、エレベータとエスカレータと比較して階段による移動中は、交感神経活動と副交感神経活動の変動が大きく、生体負担が大きいことを示した。しかし、深度と生体負担との関係は明らかにできなかった。

今後の課題として、被験者数を増やしデータの蓄積を図るとともに、地下構造や深度などと移動方法の違いによる生体負担を検討する必要があると考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご協力いただきました東京都交通局の北川知正様、同交通局建設工務部の鹿間貞夫様、日建設計シビル設計部の三田武様、(株)オオバ都市再生事業本部の富田剛久様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 萩原一郎, 北後昭彦: 地下空間からの非難計画一階段における連続昇降実験一, 日本建築学会学術講演梗概集, 1327-1328, 1992.
- 2) 長谷川貴之, 横山清子: 心拍変動による温泡バスの快適性・生体負担度の評価, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE2002-136, 29-32, 2003.
- 3) 早野順一郎: 心拍変動の自己回帰スペクトル分析による自律神経機能の評価, 自律神経, Vol. 25 No. 3, 334-343, 1988.
- 4) 大谷和則, 木竜徹, 斉藤義明: 時間周波数解析による周期運動時心拍変動の自律神経系成分の抽出, 電子情報通信学会論文誌, D-II, J81-D-2(2), 429-436, 1998.
- 5) 島津幹夫: 自律神経機能評価のためのウェーブレット変換による心拍変動の時間周波数解析, 第13回生体・生理工学シンポジウム論文集, 311-314, 1998.
- 6) 柿原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 東京, 1995.
- 7) 野呂国栄, 木竜徹, 斉藤義明: 複合活動電位波形の分離における各種展開法の比較, 信学技報, MBE94-2, 9-16, 1994.
- 8) ヘルナンデス・ワイズ: ウェーブレットの基礎, 科学技術出版, 東京, 2000.
- 9) 安藤真一, 竹下彰: 心拍数のパワースペクトル, 総合臨牀, 第39巻第9号, 2222-2226, 1990.
- 10) Pagani M., Lombardi F., Guzzetti S., et al.: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a maker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog, Circulation Research, Vol. 59 No. 2, 178-193, 1986.
- 11) 辰濃尚, 猪飼哲夫他: 健康者における運動負荷と身体活動量, 心拍数, 心拍変動, 血圧の変化, リハビリテーション医学, 第35巻11号, 823-824, 1998.

- 12) 山地啓司：心臓とスポーツ，共立出版，東京，1982.
- 13) 市原茂，本多薫，西田幸夫：地下鉄駅での移動が心理的・生理的疲労度(に与える影響)について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第11巻，143-150，2006.
- 14) 本多薫：ランダム発声音の暴露による負担に関する実験的検討，人間工学，Vol.34 No.4，203-206，1998.
- 15) 日本自律神経学会編：自律神経機能検査（第3版），文光堂，東京，2000.