

地下空間移動時の生体負担の計測に関する基礎的検討

—移動と心拍変動との関係について—

BASAL EXAMINATION ABOUT INSTRUMENTATION OF WORKLOAD IN CASE OF UNDERGROUND SPACE MOVEMENT - RELATIONS WITH MOVEMENT AND HEART RATE VARIABILITY -

本多 薫¹・門間 政亮²
Kaoru HONDA・Tadasuke MONMA

In this study, an experiment to walk in an underground pedestrian crossing was performed. In the experiment, an examinee entered at a ground entrance to underground and he went along crossover point in the basement and walked to ground exit and measured heart rate at the moment. And autonomic nerve activity (LF / HF) was extracted by power spectrum analysis of heart rate variability, and relations of movement action with heart rate variability were analyzed. In addition, power spectrum analysis with wavelet transformation was performed, and LF / HF was extracted on the second time scale. As a result, it was found that LF / HF increased in front and back where it would appear that the workload was heavier such as "a slope began to bend", "a bicycle came from front", and "stop", which showed that it could measure alteration of workload to alter from moment to moment.

Key Words : Underground space, Walk, Heart rate variability, Workload, Wavelet transform

1. はじめに

はじめて歩く地下街や地下鉄の乗り換えなどでは地上と比べて方向感覚を喪失してしまう可能性¹⁾があり, サインや地図などの案内を頼りにすることが多い. このような地下街などの地下空間における方向感覚の喪失は, 地上との位置関係がつかめない²⁾, 迷路性が高い^{2) 3)}, 外界情報の不足⁴⁾などが知覚喪失につながると考えられている. 地下空間の構造や安全性を考えると, 出入口のデザイン, 形状, 天井の高さ, 明るさ, サインなどの設計が重要であるとともに, 行動特性や知覚, 方向感覚の低下など心理生理学的な要素を取り入れた検討をする必要がある. また, 地下空間では歩行により移動することが一般的であり, 地下構造や環境因子と人間の歩行行動との関係を検討し, どのような地下構造や環境因子等が生体への負担が大きいかを計測して, より良い地下環境を提案する必要がある.

また, 人間工学や快適工学等の分野において, 心拍変動を解析し, 人間の生体負担や精神的負荷を評価する試みが行われている^{5) 6) 7)}. 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, 心拍の解析にはパワースペクトル解析が有効であると考えられている^{8) 9) 10)}. 従来のフーリエ変換を用いたパワースペクトル解析では時間的情報が失われるため, 心拍変動の時間的变化を解析することが難しかったが, 近年, 心拍変動の解析において効率的な時間一周波数解析を実現することでウェーブレット変換が注目されている¹¹⁾.

そこで本研究では, 心拍変動のスペクトル解析において, 効率的な時間一周波数解析を実現することで注目されているウェーブレット変換を取り上げ, 地下横断歩道の歩行時における心拍変動を解析し, 移動行動と心拍変動との関係を検討した.

キーワード: 地下空間, 歩行, 心拍変動, 生体負担, ウェーブレット変換

¹ 非会員 山形大学 人文学部 准教授

² 非会員 山形大学大学院 医学系研究科 博士課程

2. ウェーブレット変換による心拍変動の解析と実験方法

(1) ウェーブレット変換による心拍変動の解析

心拍の時系列データ (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。この欠点を補う手法にウェーブレット変換がある¹²⁾。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るため、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。

本研究における心拍変動の解析は、R-R間隔時間データに対してウェーブレット変換 (基底関数: ガボール) 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) と 0.20~0.40Hz 付近に中心周波数をもつ高周波数成分 (HF) 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^{8) 10) 13)}。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。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¹⁴⁾。また、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⁹⁾。R-R間隔時間を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、秒単位で LF/HF を抽出した。

(2) 実験方法

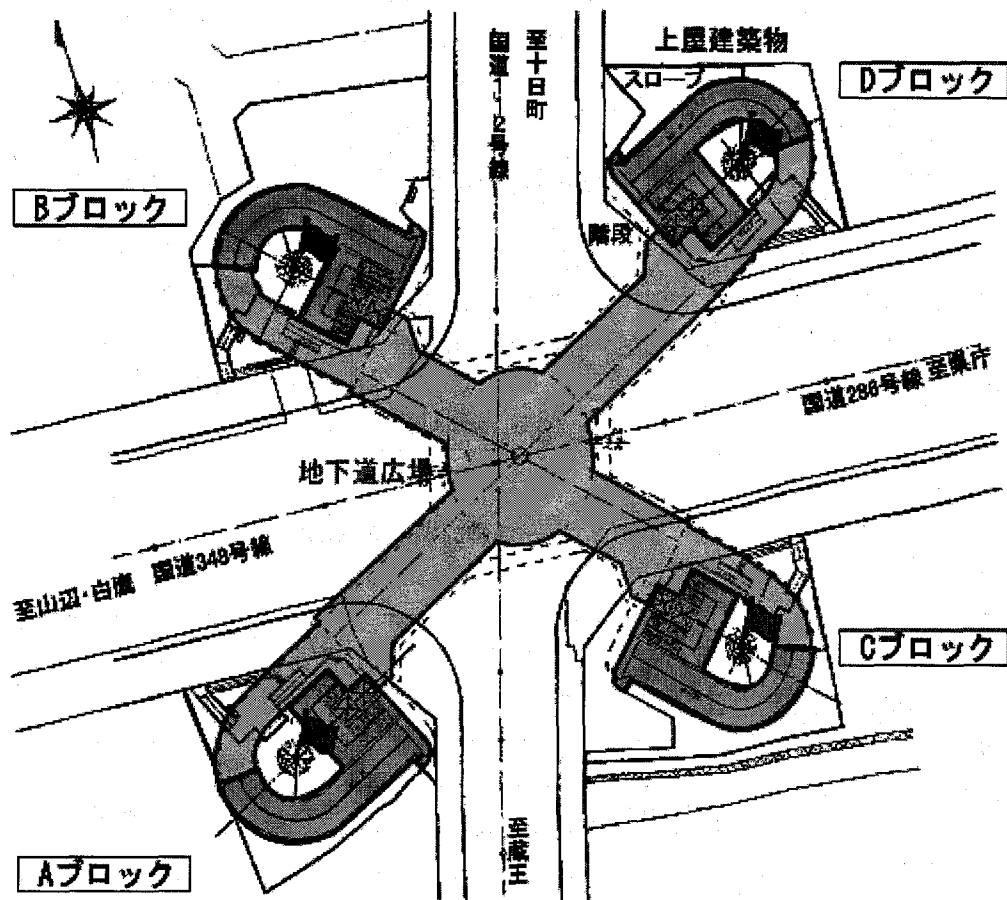
被験者は、男子学生 7 人 (18~22 歳) とし、心電図検査等で不整脈などの指摘を受けたことがない者を選定した。被験者のうち、地下横断歩道の未経験者は 1 人であった。実験は地下横断歩道にて行った (図 1)。D ブロックの地上入り口からスタートし、スロープ (図 2) を下り、図 3 に示す地下道広場 (中央ホール) を通り、再びスロープを上り道路を挟んだ別の地上入り口 (C ブロック) に到着するまでを歩行する実験とした。被験者にはスタート地点に到着するまでアイマスクを装着させ、交差点周囲の地上の情報を与えないようにした。スタート地点において、被験者を昇降式のカウンター椅子 (安静時と歩行時の心臓の高さを同じにした) に座らせ、実験の説明をした。実験では、移動に階段、エレベーターを使用せず、スロープのみを使用するよう指示した。また、簡易的な交差点の地図を提示し、C ブロック (図 1) の地上入り口に向かうよう指示した。説明の後、5 分間の安静を取らせた。スタートの合図により歩行を開始させた。C ブロックの地上入り口にたどり着いたかどうかを問わず、地上に到着した時点で実験を終了し、アンケートに回答させた。被験者に心拍計 (竹井機器工業 T.K.K. 1876a) を装着し、実験中の心拍変動 (R-R間隔時間) を測定した。実験中は後方から被験者を追跡し、被験者の行動をデジタルビデオカメラ (SONY DCR-HC90) で撮影した。

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

代表例として、実験で利用した地下横断歩道をはじめて利用した被験者 A と、利用経験はあるが指定した地上出口に到着できなかった被験者 B の結果を取り上げることとする。また、ビデオ解析から得られた歩行行動は移行動作を開始した時点を図に示した。図 4 に地下横断歩道をはじめて利用した被験者 A の心拍の R-R 間隔、歩行行動と LF/HF との関係を示す。安静時 (-50 秒から 0 秒) の R-R 間隔は、75 sec/100 前後であるが、歩行を開始すると急激に低下し、45 sec/100 前後になる。歩行中は、50 sec/100~72 sec/100 の範囲内で変動している。次に R-R 間隔を心拍変動のスペクトル解析 (LF/HF) した結果を示す。歩行を開始した時点 (0 秒) から、LF/HF 値が 5 前後まで増加している。その後、「スロープが曲がり始める」、「前方から自転車」、「歩き出す」などの歩行行動が見られた直後に、LF/HF 値が増加する傾向が見られる。また、「立ち止まる」の行動が見られる 10 秒程前に LF/HF 値のピークが見られる。歩行開始後 130 sec/100 前後で、スロープを登り始めると LF/HF 値が急激に増加していることがわかる。アンケート調査から、「地下通路を歩行中、特に迷った箇所を挙げてください。」との質問では、「下りながら回るので自分の位置の把握が悩む」

との回答であった。図5に指定した地上出口に到着できなかった被験者Bの心拍のR-R間隔、歩行行動とLF/HFとの関係を示す。安静時（-50秒から0秒）のR-R間隔は、80 sec/100前後であるが、歩行を開始すると急激に低下し、50 sec/100前後になる。歩行中は、50 sec/100～75 sec/100の範囲内で変動している。次にR-R間隔を心拍変動のスペクトル解析（LF/HF）した結果を示す。安静時（-50秒から0秒）は、1前後であるが、歩行を開始した時点（0秒）から、3前後まで増加している。その後、「自転車のブレーキ音」、「前方から通行人が近づく」、「スロープが曲がり始める」などの歩行行動が見られた直後に、LF/HF値が増加する傾向が見られる。また、「立ち止まる」の行動が見られる12秒程前にLF/HF値のピークが見られる。また、アンケート調査から、「地下通路を歩行中、特に迷った箇所を挙げてください。」との質問では、「この地下道は、廻っているので方向がつかみにくかった」との回答であった。



（国土交通省東北地方整備局山形河川国道事務所ホームページより転載）

図-1 実験で用いた地下横断歩道

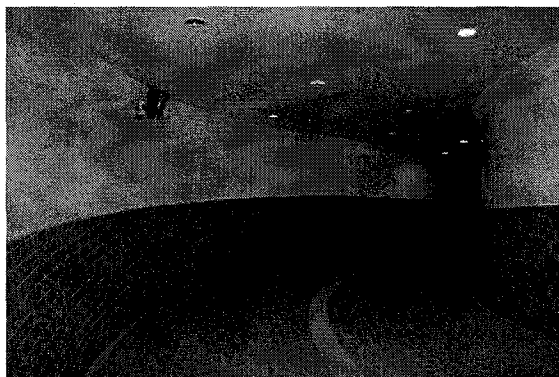
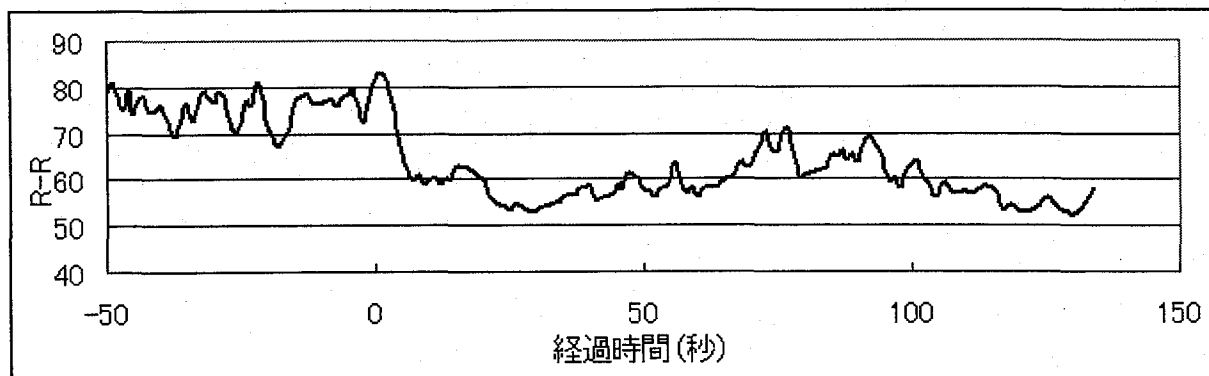


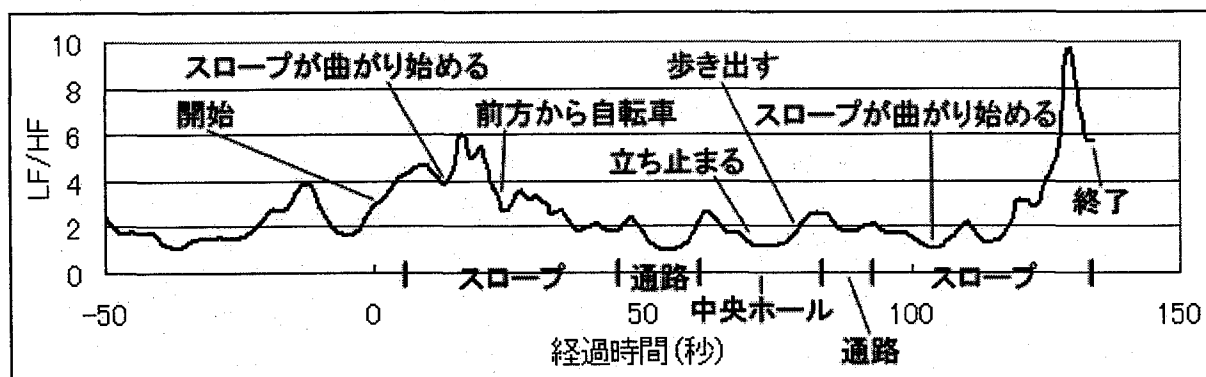
図-2 地下横断歩道のスロープ（下り）



図-3 地下横断歩道の地下部（通路と地下道広場）

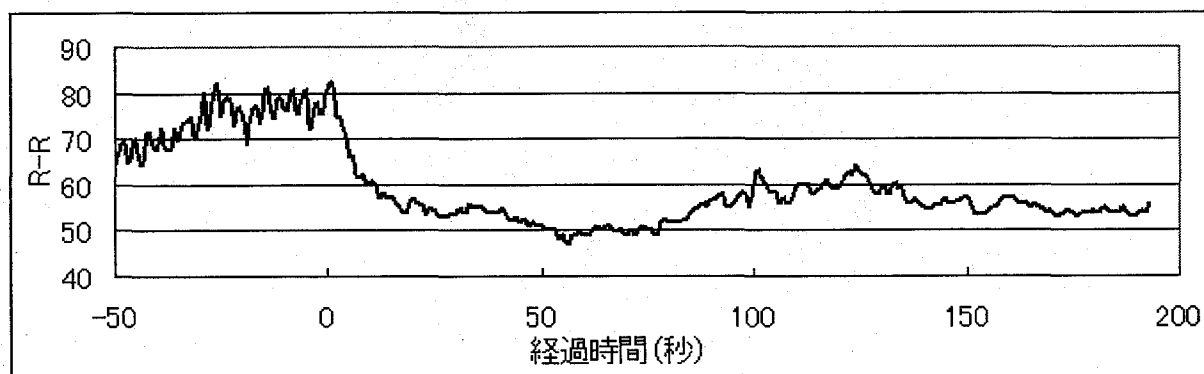


心拍のR-R間隔

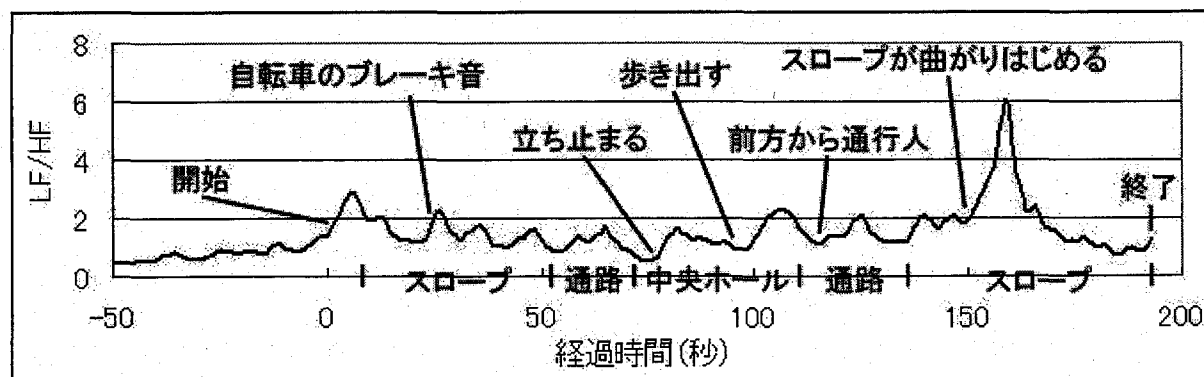


LF/HF

図4 歩行行動と心拍変動の実験 (被験者A)



心拍のR-R間隔



LF/HF

図5 歩行行動と心拍変動の実験 (被験者B)

(2) 考察

心拍変動に関する先行研究では、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^{14) 15)}。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¹⁴⁾。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¹⁶⁾、LF/HF の増加は交感神経の緊張が増大していることである¹⁷⁾と言われている。これらのことから、LF/HF の増加は交感神経活動が活発になり、生体負担が増加したものと考えられる。

今回の実験結果では、「スロープが曲がり始める」、「前方から自転車」、「自転車のブレーキ音」などの歩行行動が見られた直後に、LF/HF 値が増加する傾向が見られた。このことは、スロープが曲がっている見通しの悪い場所や自転車が近づくなど、生体が緊張する場面では、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ために LF/HF が増加したのではないかと考えられる。また、「立ち止まる」の行動が見られる 10~12 秒程前に LF/HF 値のピークが見られた。このことは、立ち止まる前の歩行速度が遅くなったり、周囲を見回すなどの迷ったと思われる「悩む」の行動が見られる時点で LF/HF 値が最も高くなるのではないかと推察される。なお、ビデオ画像の解析から、どの時点で「立ち止まった」と判断したらよいのか難しいという課題もあった。

また、アンケート結果でも指摘があったが、実験で使用した地下横断歩道は、地上入り口から地下通路までの経路で姿勢が 180 度回転するスロープになっているため、方向感覚を失う可能性が高いと思われる。

4. まとめ

本研究では、心拍変動のスペクトル解析において、効率的な時間一周波数解析を実現することで注目されているウェーブレット変換を取り上げ、地下横断歩道の歩行時における心拍変動を解析し、移動行動と心拍変動との関係を検討した。その結果、秒単位の LF 成分（交感・副交感神経活動）と HF 成分（副交感神経活動）を抽出し、LF/HF 値を算出することにより、スロープが曲がり始める、前方から自転車、立ち止まるなどの生体負担が大きいと思われる前後において、LF/HF 値が増加することが認められ、時々刻々と変化する生体負担の変化が計測可能であることを示した。

今後も、実験データの蓄積を図り、地下空間歩行時において、どのような地下構造や環境因子等が生体への負担が大きいのかを心拍変動により計測し、より良い地下環境の提案に役立てたいと考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご協力いただきました国土交通省東北地方整備局に感謝申し上げます。また、被験者としてご協力いただいた方々に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) レイモン・L・スターリング, ジョン・C・カーモディ: 地下空間のデザイン, 山海堂, 1995.
- 2) 岡田光正: 建築人間工学 空間デザインの原点, 理工学社, 1993.
- 3) 土木学会編: 地下空間と人間 4 地下空間のデザイン, 丸善, 1995.
- 4) 武藤浩, 宇治川正人, 安岡正人, 平手小太郎, 山川昭次, 土田義郎: 窓の心理的効果とその代替可能性 —地下オフィスの環境改善に関する実証的研究 その2—, 日本建築学会計画系論文集, 474, pp. 57-63, 1995.
- 5) 村田厚生: 心拍変動性指標によるメンタルワークロードの測定, 人間工学, Vol. 28 No. 2, pp. 91-98, 1992.
- 6) 水野康文, 横山清子, 茂吉雅典, 高田和之, 岡田暁宜, 早野順一郎: 心電図 R-R 間隔時系列解析による二輪車運転時生体負担度の評価, 医用電子と生体工学, Vol. 34 No. 4, pp. 291-297, 1996.
- 7) 本多薫: ランダム発生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, pp. 203-206, 1998.
- 8) Pomerantz, B. et al.: Assessment of autonomic function in human by heart rate spectral analysis, American Journal of Physiology, Vol. 17, pp. H151-H153, 1985.
- 9) Pagani M. 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, pp. 178-193, 1986.
- 10) 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, pp. 334-343, 1988.
 - 11) 横山清子: 心拍変動時系列のウェーブレット変換による車輻運転時生体負担度評価, *電気学会論文誌 C*, Vol. 122-C, No. 1, pp. 36-41, 2002.
 - 12) ヘルナンデス・ワイズ: ウェーブレット変換, 科学技術出版, 2000.
 - 13) Sayers, B. McA.: Analysis of heart rate variability. *Ergonomics*, Vol. 16 No. 1, pp. 17-32, 1973.
 - 14) 安藤真一, 竹下彰: 心拍数のパワースペクトル, *総合臨床*, Vol. 39 No. 9, pp. 2222-2225, 1990.
 - 15) 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, pp. 29-32, 2003.
 - 16) 大島秀武, 志賀利一他: 運動時におけるリアルタイムでの心拍変動解析に基づく至適運動強度の決定, *体力科学*, 第 52 巻, pp. 295-304, 2003.
 - 17) 小原繁, 吉田隼人, 北岡和義, 荒木秀夫: 静的運動時の心拍変動からみた交感神経緊張度と筋電図との関係, *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2001-46, pp. 85-90, 2001.