

中高年齢者の歩行におけるリズムと ゆらぎ現象に関する研究

東 京 大 学
生 産 技 術 研 究 所
(共同研究者) 東 京 医 科 歯 科 大 学
文 部 科 学 省
統 計 数 理 研 究 所

鶴 岡 政 子
水 口 俊 介
鶴 岡 百 合 子

Study of Rhythm and Fluctuation in Walking by Middle and Elderly Subjects

by

Masako Tsuruoka
Institute of Industrial Science
University of Tokyo
Shunsuke Minakuchi
Department of Geriatric Dentistry,
School of Dentistry,
Tokyo Medical and Dental University
Yuriko Tsuruoka
The Institute of Statistical Mathematics

ABSTRACT

Our useful walking analyzer system is composed of two sub-systems. One acquires time series data of body movements using developed measurement systems of gyro sensor and two accelerometers. Another is a system of analyzing person's walking stability. It utilizes spectral analysis by Auto Regressive modeling. The impulse response of movement factors enables analysis of their dynamic relations. The biofeedback control analysis of walking stability of the middle and elderly suggests new potential for the evaluation of medical recovery in rehabilitation and physical fitness in daily movement.

要 旨

本研究で開発された運動解析システムは、計測システムと解析システムの2つから構成される。Gyroセンサーと2つの加速度センサーによる身体計測システムと、歩行の安定性を解析するシステムを用いて、Auto Regressiveモデルによるスペクトル解析と動きの動的な関係を明らかにするインパルス応答解析を行う。中高年齢者の歩行の安定性を求めるバイオフィードバック運動解析は、日常の運動のリハビリテーションや、フィジカルフィットネスの評価に有効な情報を提供する。

緒 言

健康で、運動障害のない中高年齢の生活は、人々の願いである。生体は心臓の鼓動のように時間と共に周期性のあるリズムを持っている。歩行や、姿勢制御にも運動のリズムがあり、刻々ゆらぎ現象が観察される。バランスのよい安定した歩行を行うには、歩行特性を理解する必要がある。画像による歩行の身体計測は、カメラが追えない部位があり、必要な情報が得られないことがある¹⁾。本研究では、携帯用Gyroセンサーと加速度センサーの計測システムを用いて中高年齢者の歩行の身体計測を行い、連続したデータから、身体のフィードバック運動に注目したスペクトル解析を行った。

1. 研究方法

被験者は、50歳代から80歳代の中高年齢の男女で、健常者、腰痛患者、無歯顎患者を選び、歩行、立位バランスにおける身体の計測を行った。開発した携帯用Gyroセンサーと2つの加速度センサー計測システムは、被験者に負担が少なく、自由歩行が可能である。

1. 1 携帯用Gyroセンサー計測システム

Gyro (Max Cube 日本航空電子工業社製) センサー用電源にはリチウム充電電池を用い、腕時計型のWearable PC (WPC, Rupiter, SHI製) にデータを取り込む計測システム (図1) を開発した。振動型GyroセンサーはWPCの操作で動き、3軸方向の姿勢角度 (roll, pitch, yaw) と加速度を30 Hzで自動経時計測する。WPCは、計測終了時をアラームで知らせ、液晶Displayには計測結果をグラフ表示するので、計測の確認が可能である。被験者はウエストポーチに電池を入れ、WPCを腕につけ、腰後方中央部 (体重心に近い) のベルトにGyroセンサーを装着して歩行する。(図2)

1. 2 携帯用マルチ加速度センサー計測システム

1. 1のGyroセンサーを数個同期させるのは、困難なため、加速度センサー (ADXL 202 ANLOG DEVICE社) を2つ同期させた携帯用マ

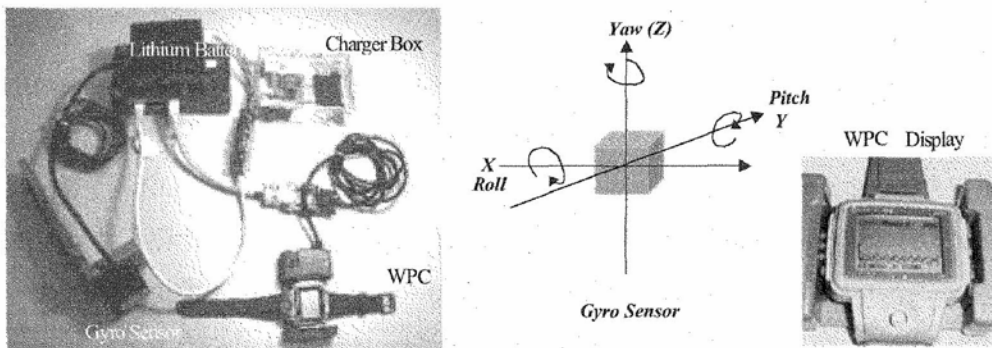


図1 携帯用Gyroセンサー計測システム

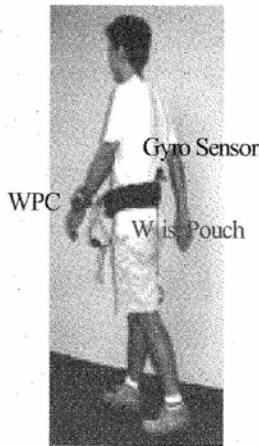


図2 携帯用Gyroセンサー計測システムによる歩行計測

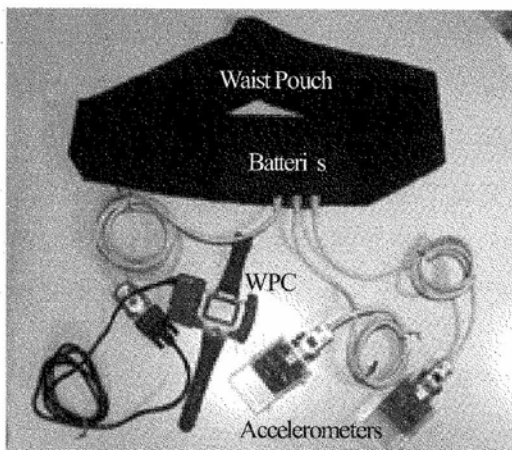


図3 携帯用マルチ加速度センサー計測システム

マルチセンサー計測システムを開発した(図3)。セラミック製の時計(Ceralock 村田製作所製)を用いて同期をとり、WPC操作で計測は同時にスタートする。左右の膝、腰に装着し、2部位の加速度を15 Hzで計測できる(図4)。



Denture

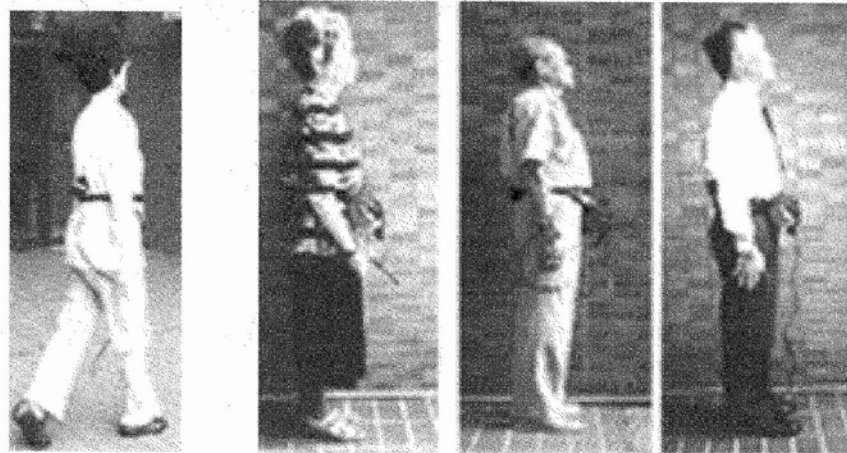


図4 Gyroセンサー計測システムによる中高齢者の歩行計測(無歯顎患者)

1. 3 Auto Regressive モデルによるスペクトル解析

運動のバイオメカニクス研究^{3),4)}が盛んであるがフィードバック運動にまで言及していない。歩行中、左右の膝の動きは、時間と共に周期性を持ち、タイムラグを持って、自分自身の過去から現在へまた、左膝から右膝へ、右膝から左膝へと連続したコントロールが働き、フィードバック運動を行っている。Auto Regressive モデルを用いたスペクトル解析は、フィードバックシステム時系列の特徴を簡潔に表現できる有効な方法^{5),6)}であり、歩行中の身体部位のパワースペクトルとインパルス応答を求めた。

時系列 $x_i(s)$ を過去の観測値 $x_j(s-m)$ と白色雑音 $u_i(s)$ の線形和で表現すると(1)式のARモデルとなる。

$$x_i(s) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) x_j(s-m) + u_i(s) \dots \dots (1)$$

$a_{ij}(m)$ はAR係数、 $u_i(s)$ は平均0、分散 σ^2 の正規分布に従い、 $x_j(s-m)$ と独立である。Yule-Walker法を用い、周波数を f とすると、パワースペクトルは、インパルス応答関数のフーリエ変換から(2)式で与えられる。

$$p(f) = \frac{\sigma^2(M)}{|1 - \sum_{m=1}^M a(m)e^{-i2\pi fm}|^2} \dots \dots \dots (2)$$

プリズムで白色光を周波数ごとのスペクトルに区分できるように、生体信号を周波数ごとに区分し、信号の強さを求めることから、パワースペクトルと呼ぶ。ある変数のインパルス変動曲線は、全てインパルスの波となりフィードバック制御の相手の変数に順次応答し続ける。インパルス応答は、系により特色を持つことを身体の動きの系に応用し、特性を探る。

2. 研究結果と考察

2. 1 中高年齢者歩行のバイオメカニクス解析

2. 1. 1 義歯装着による歩行バランスへの影響

上下顎の歯のかみ合わせは、咀嚼だけでなく身体全体の動きのバランスに影響を与えることは、経験的に知られている。携帯用 Gyro センサー計測システムを使用し、大学病院高齢者歯科外来

で、60 歳代から 80 歳代の無歯顎患者男女 20 名を選び、事前に了解を得て、院内に 10m の計測路を確保し、全部床義歯の装着、非装着による歩行中の体重心の計測を行った。歩行時、左右の足を交互に前方へ送り出すことから、体重心は、特有な周期のリズムとゆらぎ現象が観察された。義歯非装着 (図 5 左) と装着 (図 5 右) を比較すると、非装着による歩行では、左右のゆれ roll 方向とねじれのゆれ yaw 方向のリズムとゆらぎに乱れが大きかったが、装着した歩行では、体重心左右のゆれ roll 方向、前後のゆれ pitch 方向、ねじれのゆれ yaw 歩行の 3 姿勢角度変位は共にリズムカルになり、ゆらぎ現象にも安定がみられるようになった。

義歯装着による立位バランスへの影響を見るため、立位で体重心を計測した。左右のゆれと前後のゆれを同一平面で表したグラフから、非装着 (図 6 左) 時は、身体の中央よりも左側にゆらぎ

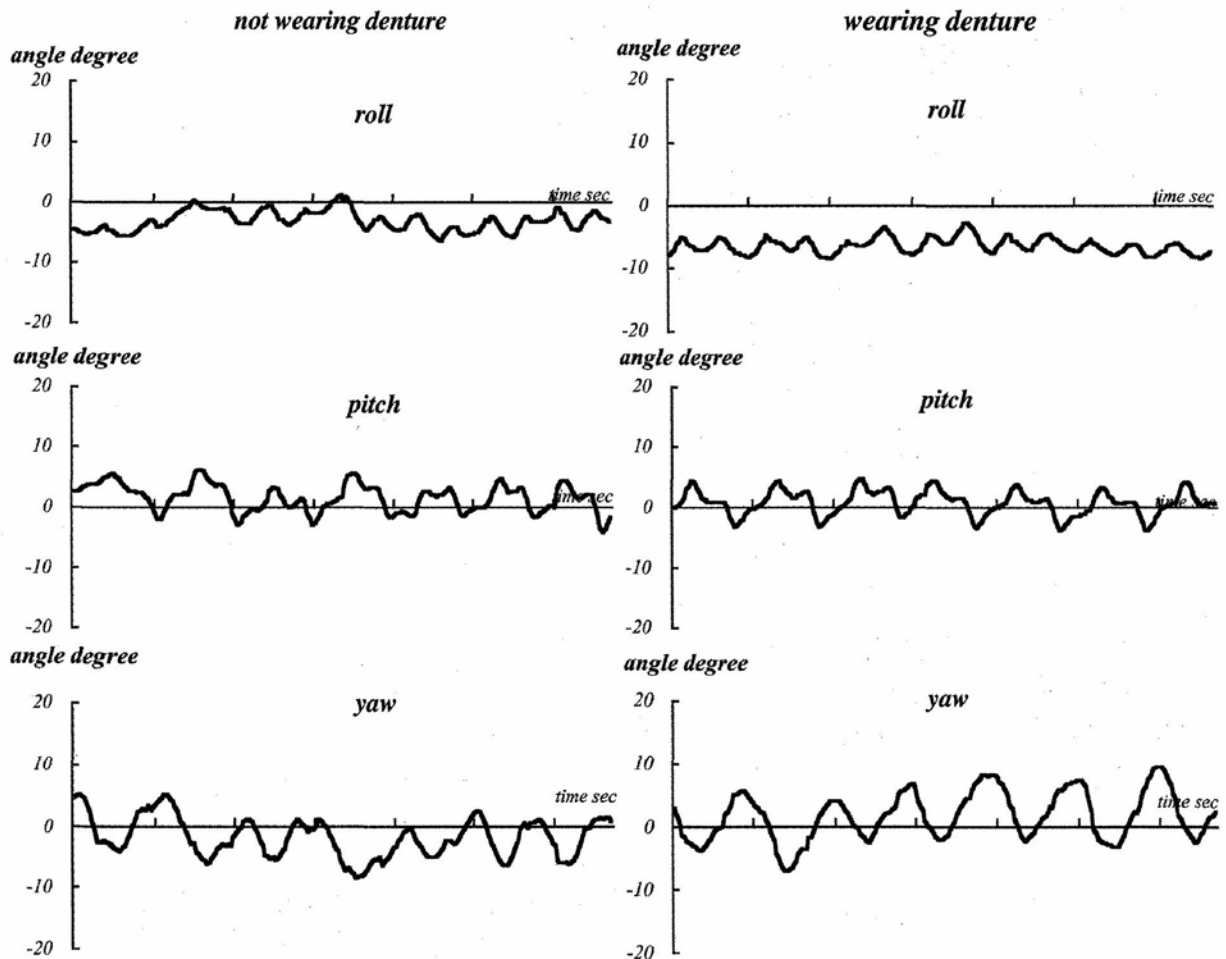


図 5 歩行時における体重心の姿勢角変位 (無歯顎患者 左: 総義歯非装着 右: 装着)

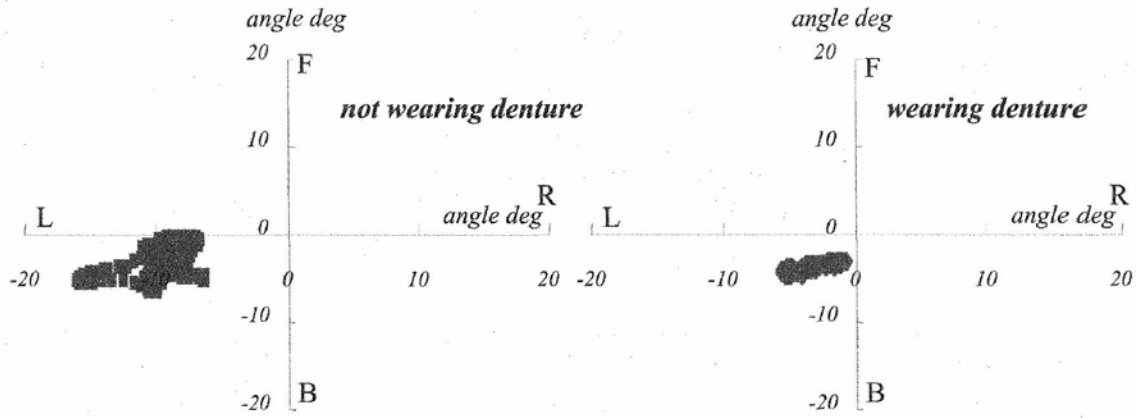


図6 立位時における体重心のゆらぎ（無歯顎患者 左：総義歯非装着 右：装着）

は偏り、ゆらぎ面積に広がりがある。しかし、装着（図6右）すると、身体の中央部に近づき、ゆらぎ面積も小さくなり、安定が見られるようになった。

2. 1. 2 腰痛患者の歩行とリハビリテーション効果

中高年齢になると、下肢の筋肉、骨格の加齢化現象が進み、腰部に負担がかかる姿勢となり、腰痛を訴える人が多くなる。歩行の左右のバランスに乱れを生じ、症状を悪化させてしまう。身体全体の動きのバランスを改善する目的で、左右のシューインソールに貼るパッドの形と場所を決め、踵のしっかりとしたウォーキングシューズに挿入し、日常の歩行で、自然に動きと痛みの改善を図るダイナミックシューインソール療法⁷⁾（図7）が効果を上げている。運動療法⁸⁾をプラスし、リハビリテーション治療前と一ヶ月後に、携帯用マルチ加速度センサー計測システムを使用して、加速度センサーを左右の膝に装着し歩行計測を行った。歩行中の膝の加速度計測の代表的な例（図8）を見ると、治療前は、左腰痛患者の左右の膝は共に、加速度周期のリズムもゆらぎも乱れていたが、リハビリテーション1ヶ月後には、周期性のあるリズムとゆらぎにも安定性が見られるようになった。

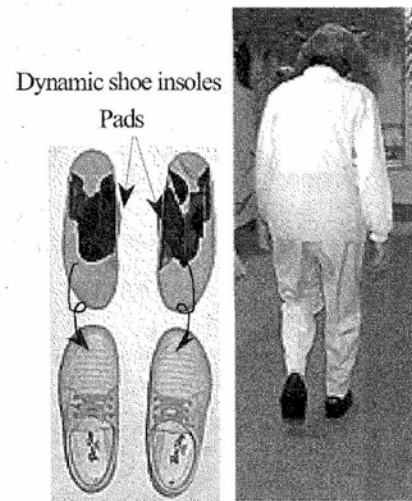


図7 ダイナミックシューインソール療法中の腰痛患者の歩行

2. 2 中高年齢者の歩行のスペクトル解析

2. 2. 1 義歯装着による歩行のバランスへの影響

義歯非装着（図9点線）では、体重心のゆらぎのパワースペクトル分布は、規則性が見られず、不安定であったが、装着歩行（図9実線）では、roll, pitch, yaw 方向の体重心ゆらぎのパワースペクトルは全て、生体の安定時に見られる $1/f^\alpha$ ゆらぎに近づき、 $\alpha = 3$ が得られた。

2. 2. 2 腰痛者歩行のリハビリテーション効果

左腰痛患者の歩行のリハビリテーション効果を探るため、歩行中、左右の膝の動きにインパルスを与え、それぞれ反対側の膝の動きの応答を調べた（図10）。左（右）膝の加速度ゆらぎの標準偏

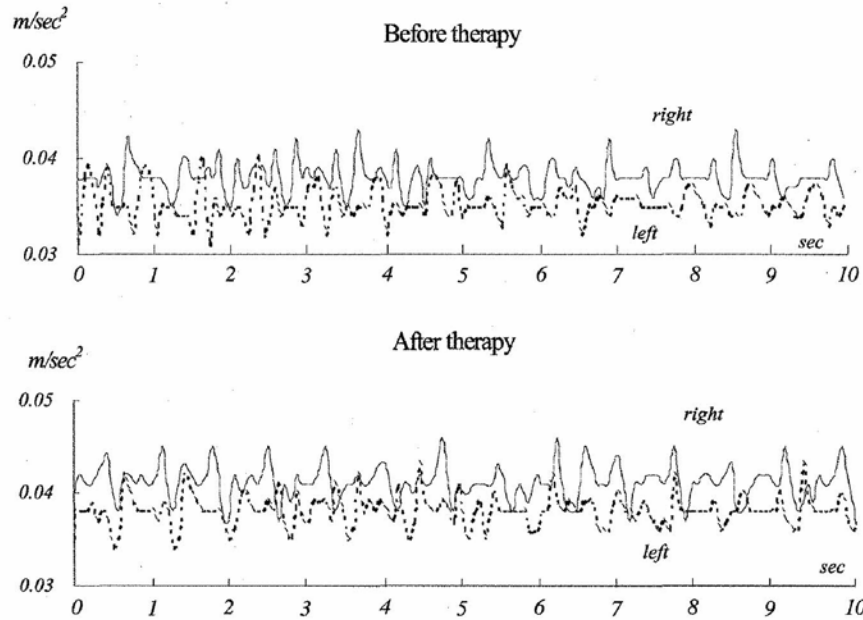


図8 歩行時における左右膝の加速度変位 (腰痛患者 上:リハビリテーション療法前 下:1ヶ月後)

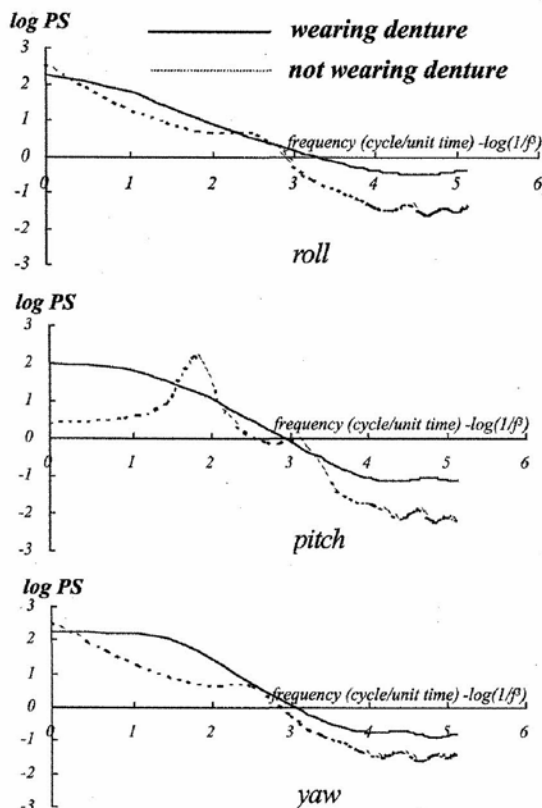


図9 歩行時における体重心ゆらぎのパワースペクトル (無歯顎患者 総義歯非装着と装着)

差値の2倍をインパルスとして与えれば、応答シミュレーションが右(左)膝に現れる(図11)。リハビリテーション治療前は、ゆらぎのanteroposterior前後方向の右膝応答が大きく、波を打ち、vertical上下方向の応答も小さいが、同

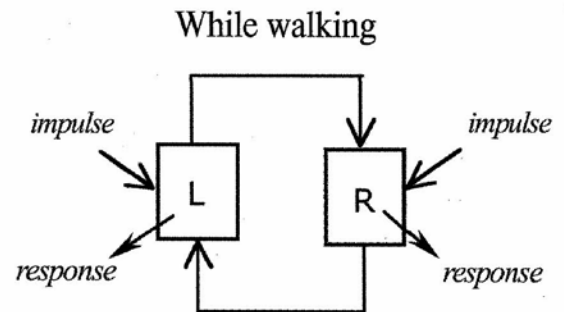


図10 歩行時における左膝Lと右膝Rのインパルス応答
じ傾向が見られた。1ヶ月治療後になると、左右膝のインパルス応答の値は近づき、安定傾向が見られた。

3. まとめ

非侵襲による計測と解析が中高年齢者に負担が少ない本計測システムを用いて計測の生データ解析にとどまらず、歩行と立位の身体動きのスペクトルを調べ、生体のゆらぎ現象とインパルス応答解析を行った。歩行の特性を知り、安定性への評価へと可能性が広がった。

謝辞

本研究に助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に、深く感謝申し上げます。

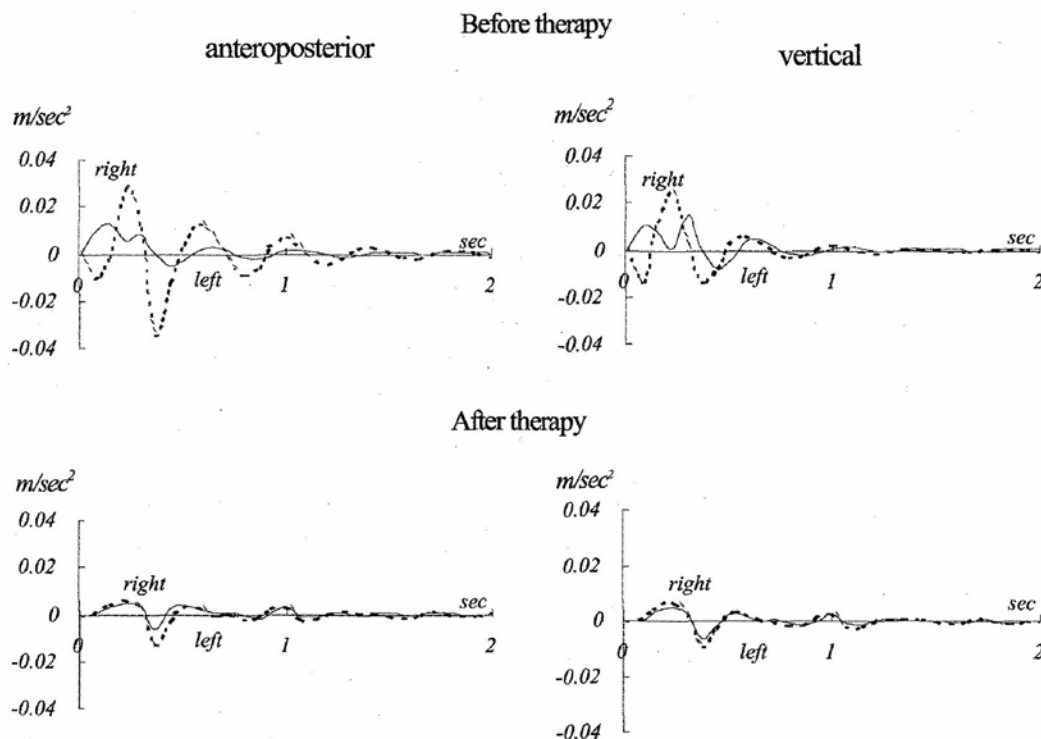


図11 歩行時における左膝と右膝のインパルス応答 (腰痛患者 上：リハビリテーション治療前，下：1ヶ月後)

げます。歩行計測に快くご協力頂いた中高年齢の被験者の皆様に厚く御礼申し上げます。惜しみないご指導を注いで下さいました東京大学宇宙空間情報科学研究センター柴崎亮介教授，東京大学生産技術研究所安岡善文教授，同村井俊治名誉教授（写真測量学会会長），足と歩きの研究所入谷誠所長には，心より感謝申し上げますと共に，進んで協力応援して下さいました安岡・柴崎研究室の皆様にご感謝致します。

文 献

- 1) Tsuruoka M., Shibasaki R., Murai S., Wada T.; Spectral Analysis of a Human Walking Sequence using Medical Stereo Images. Archives of 18th ISPRS Congress, Vienna, 566-571 (1996)
- 2) Tsuruoka M., Shibasaki R., Murai S., Wada T.; Bio-

feedback Control Analysis of Postural Stability using CCD Video Cameras and a Force-Plate Sensor Synchronized System, Archives of IEEE International Conference on SMC, San Diego, 3200-3205 (1998)

- 3) Hulmuzzu Y., Basdogan C.; On the measurement of Dynamic Stability of Human Locomotion, *IEEE J. BME*, 116, 58-67 (1994)
- 4) Prieto E, Myklebust M.; Characterization and Modeling of Postural Steadiness in the Elderly, *IEEE BME*, 1 (1), 26-34 (1993)
- 5) Akaike H., Nakagawa T.; Statistical Analysis and Control of Dynamic System, Scientific Publishers (1988)
- 6) Kitagawa G., Gersch W.; Smoothness Priors Analysis of Time Series, Lecture Notes in Statistics 116, Springer-Verlag Inc. (1996)
- 7) 入谷誠，内田俊彦，黒木良克；下肢障害の理学療法，*運動生理*，7 (1)，47-54 (1992)
- 8) 森英二，千野直一；肩凝りと腰痛のリハビリテーション，*内科学*，71 (3)，492-495 (1993)