

体内発生振動による膝関節疾患の診断技術開発

A Simple Knee Injury Diagnosing Technique Using Sound Signals Generated by Knee Motion

○ 石濱正男(神奈川県立大学) 渡辺敏彦(ジャトコ(株))

Masao ISHIHAMA, Kanagawa Institute of Technology
Toshihiko WATANABE, Jatco Co., Ltd.

Abstract: This study explored the possibilities of using sound waves that are generated in human body as the signal for diagnosis. Sound signals collected by small microphone array attached to the knee with small air-gap were compared to the diagnoses made by medical doctors. The digitally processed sound signal showed characteristic waveform, power spectrum and wavelet information that correspond well with each different knee injury pattern. These result paved the way to proceed to the next stage of developing this technique.

Key Words: Diagnosis, Life Support, Welfare Engineering, Sound, Signal Processing

1. はじめに

高齢者人口の増大とともに、医療機関がかかわる膝疾患の件数が増大している。患者に適切な治療を施すためには、医師はコスト、時間と使用に要する技量が現実的な診断技術を必要としている。核磁気共鳴(NMR)は強力ではあるが、費用を考慮すると日常の診断を行う小規模医療機関には向かない。診療の初期にあつては、それが NMR などを必要とする疾患の状態なのかどうかという判断ができる、廉価で単純な診断システムが望まれる。

ここで、著者らは膝疾患の診断が多くの場合に触診で行われることに注目した。触診は上記の要求を満たす一方で、次のような問題も含んでいる。1) 医師が多くの経験を積む必要がある。2) 客観性のあるデータが記録・蓄積されない。3) 高周波振動は指では感じられない。従って、何らかのセンサーをもって、分析と記録システムが求められる。また、触診でもある程度はできる振動の発生部位を特定できることも求められる。

この研究では、膝関節疾患の診断を、膝の屈曲によって人体内部から発生する振動信号の計測と分析によって行う方法を開発し、実際の医療現場でテストをし、いろいろな疾患を見分ける能力の程度を確認することとした。

2. センシングシステムの開発

膝屈曲による弱い振動を検知するために、小さな圧力にも応答するマイクロホンを利用する方針をたてた。もちろん既存のマイクロホンは利用できないので、下記の必要機能を満たすマイクロホンを含んだシステムを目指した。

- 1) 小型軽量で自由な膝屈曲ができること。
- 2) 希望の位置に取り付けられること。
- 3) 膝内部の疾患により発生する振動が皮膚に伝わったときに、小さな範囲内の柔らかい皮膚の振動によって発生する音響振動を捉えて電気信号に変換できること。
- 4) 疾患発見に必要な周波数帯域で感度が高く、健全な膝の屈曲による信号周波数帯域で感度が低いこと。

上記の条件を満たすように、マイクロホンと皮膚とを結びつけるカプラーを設計した。(図1)このカプラーはマイク受圧膜面積よりも広い範囲を底面とする円錐形上の空洞を有している。こうすることにより、空洞には大きな体積速度振幅を受け入れることができる。そして、皮膚とその下の組織の音響インピーダンスに対して空洞のそれが無視で

きる程度に空洞の容積が増えると、皮膚振動はこのカプラーの装着の影響を受けなくなる。

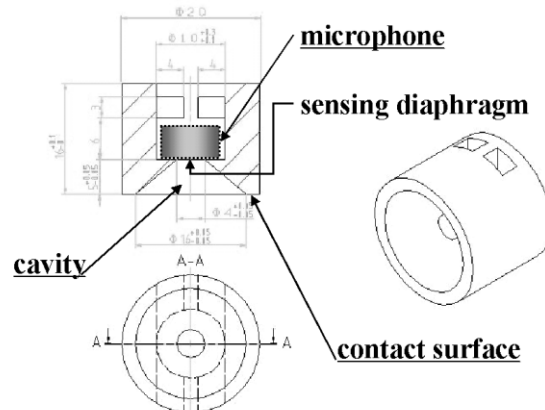


Fig.1 Vibro-acoustic coupler that contacts human body and holds a microphone.

4セットのカプラー(マイクロホン付)を膝部分の皮膚に優しく押し当て、ゴムバンドで保持する。(図2)膝の屈曲角度は、光ファイバー中の光の減衰量を利用した曲げセンサーの両端を腿と脛に固定して計測する。

このように配置すると、膝の骨や軟骨部分の疾患が相互に擦れたり衝突したりすることによって発生する振動音響信号は、それよりも柔軟な皮下組織を伝わり、皮膚振動として体表面に現れる。そして、空洞内の音圧変動としてマイクロホンに検知される。この現象を数理モデル(図3)に示す。

カプラー設計の要点は、下記のようなになる。

- 1) 自由な皮膚振動を許す。
- 2) 自由振動をしている皮膚の周囲を軽く押さえて気密な空洞を形成する。
- 3) カプラー自体は皮膚とは振動的にできるだけ絶縁されて空間に浮いている状態とする。
- 4) マイクロホンの感度で拾える音圧になるような空洞容積を選ぶ。

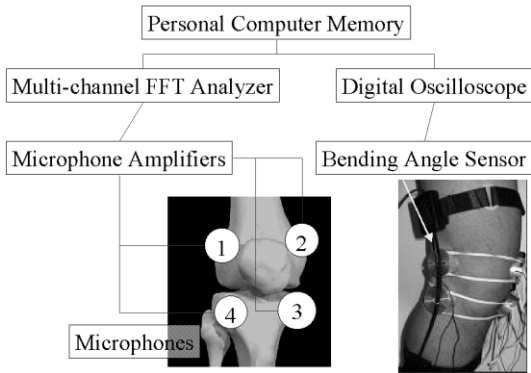


Fig.2 Sensor arrangement

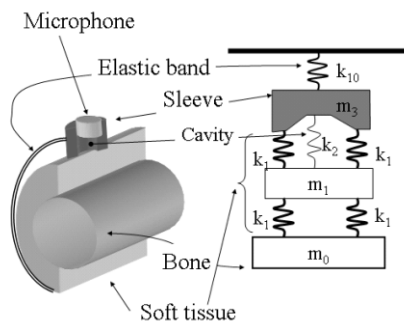


Fig.3 Mass-spring model of the knee-sensor system dynamics

3 センシングシステムの周波数応答特性

膝内部の骨からマイクまでの伝達関数を直接計測するには、外科的処置をして骨に振動センサーを取り付ける必要がある。しかし、これを実行するには膝部分の切開を許して下さる方と医療機関の協力が不可欠であるのであきらめ、シミュレーションによって推定することとした。それには実験的に得られている皮下組織と骨の材料特性(表1,2,3)の有限要素モデルのモード解析を使った。

計算で推定した主な固有振動数を表4に示す。センシングシステムの空洞内音圧に影響を及ぼす可能性のある振動モードは、カップラーの柔軟な皮膚上でのピッチ、ロール、バウンス運動である。バウンスモードを図5に示す。図には空洞内空気変位の皮膚表面に垂直な成分だけを図示している。このようなモードにより空洞の空気は圧縮膨張をするが、皮膚に平行な動きの成分は空気の圧縮膨張を起こさない。その結果、これら3モードよりも高い固有振動であって空洞内空気の圧縮膨張を伴うものは100Hz以上に存在する。このような高周波振動は、皮下組織の複雑な変形を伴い、上記の3モードとは根本的に性質が異なる。

このような固有振動数の分布によって、カップラーは骨の振動とは5Hz以上、つまり固有振動数のルート2倍以上、では絶縁されている。従って、骨振動からカップラー内の音圧変動への伝達関数は5Hz以上で平坦になるはずである。

Table 1 Material properties used in the FEM analysis

Material property	Units	Bone	Soft tissue	Coupler (Aluminum)	Cavity (Air)
Young's modulus	Pa	2.5+E10	2.0+E10	6.9+E09	1.4+E05
Poisson's		0.4	0.45	0.33	
Density	kg/m	688	946	2.7+E03	1.29

Table 2 Component size of the FEM model

Size	Bone	Soft tissue	Sleeve
Radius, mm	25	75	8
Length, mm	370	370	16

Table 3 Elements used in the analysis

Element type	No. of elements	No. of nodes
Tetrahedral solid	3021	6415

Table 4 Natural modes of the sensor-tissue-bone system

Mode	Frequency,	Mode shape
1st	2.650	Pitch of the sleeve
2nd	2.651	Roll of the sleeve
3rd	3.171	Bounce of the sleeve
4th and	>100Hz	Tissue elastic modes

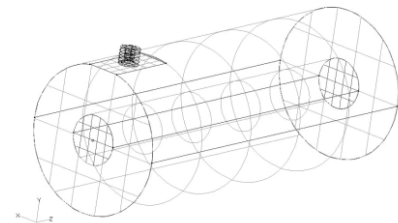


Fig.4 Finite element model of the knee-sensor system

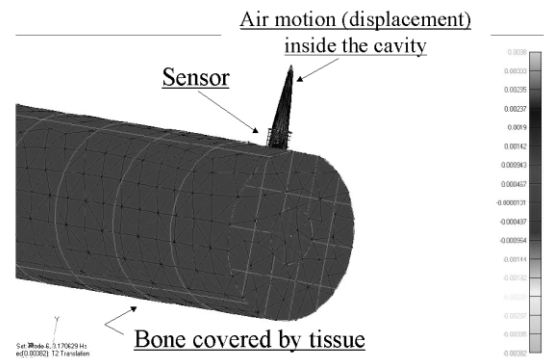


Fig. 5 Vibration mode of the knee-sensor system

4 計測された信号波形と患者の医師による診断の関係

図6から図10に上記センシングシステムにより計測された典型的な信号波形を示す。

図6の信号を発した患者は膝関節変形症と診断されている。医師は、膝を曲げていく過程で聞こえる低~中程度の周波数のクリッという音で、この診断をしていた。グラフのゼロ秒付近で観察される衝撃的な波形がこの音に対応す

る。医師は、問題の変形が生じている位置を、音の発生する膝の曲げ角度で推定できることがある。

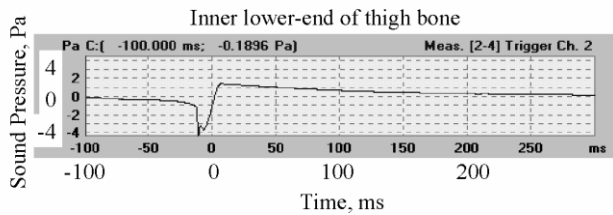


Fig. 6 Sound waveform measured at the left knee of a client with gonarthrosis.

習慣性膝蓋骨亜脱臼症候群の患者は図7の信号を発生していた。これは他の症状の患者とは全く異なる波形である。医師は、低周波のごろごろと言う音、またはそれと同時に指に感じる振動感でこの診断をしていた。この音や振動の振幅は人間が感じることができるぎりぎりの値であるが、今回開発したセンシングシステムではきれいにこのような小振幅信号を測定できている。

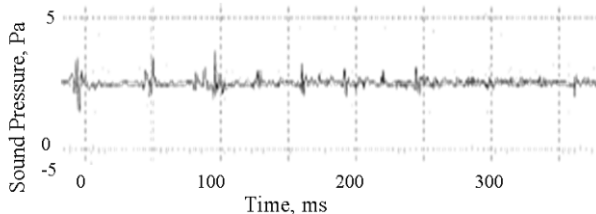


Fig. 7 Sound waveform measured at the right knee of a client with habitual dislocation.

患者のH氏は、この研究での計測を行うまでは、明確には膝疾患があるとは診断されていなかった。しかし、計測結果(図8)を見ると、大腿骨外側下端で衝撃的な振動波形が観察された。これは図6の変形性膝関節症に似ている。その後の精密検査の結果、そのとおりの疾患と部位であり、さらに弱い側副靭帯損傷も伴っていた。この結果は、今回開発したセンシングシステムが、ベテランの医師でも触診だけでは見逃す膝疾患を、逃さずに位置まで含めて検知する能力の可能性を示唆している。

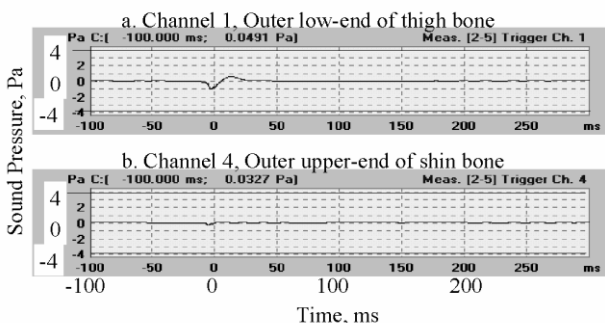


Fig. 8 Sound measured at the right knee of client H. (Not explicitly diagnosed as ill by a medical doctor.)

患者M氏はラグビーの選手を長く続けていて、ゲーム中の事故で膝関節前十字靭帯損傷を患っている。医師は触診

により、非常に低い周波数で継続する、しかしとぎれとぎれの振動を見つけなければならない。この振動振幅は非常に小さいので、触診で診断を下すには患者と一緒に長い経験が必要とする。M氏の膝屈伸中に本センシングシステムで計測された信号を図9,10に示す。微弱ではあるが、継続した途切れ途切れの波形が特徴をとらえている。

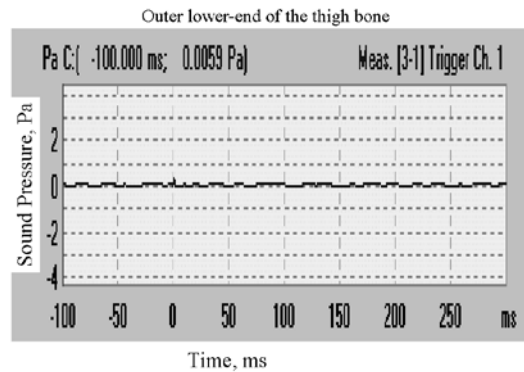


Fig. 9 Sound measured at the knee of the client M who has damaged cords

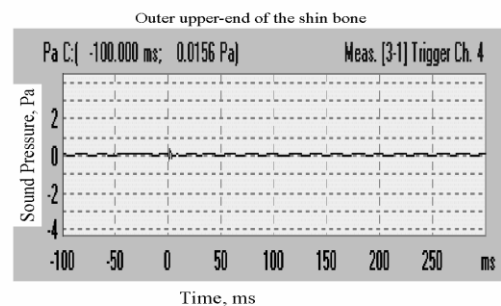


Fig. 10 Sound measured at the knee of the client M who has damaged cords

5 ウェーブレット変換用グラフィックインタフェース開発

開発したセンシングシステムの出力の時間波形は有益な情報を提供してくれるが、症状以外の通常屈曲運動に伴う信号も混入して読み取りにくい。そこで、屈曲運動のどの時点で信号が急変したのかを読み取りやすい離散ウェーブレット変換を行い、臨床診断中に医師が自身で扱いやすいグラフィックインタフェースを開発した。(図11)

ここでは、離散ウェーブレット変換により、周波数に相当する複数の成分に信号を分解する。そしてそれぞれの成分を、医師の選択により足し合わせて信号を再構成していく。この過程の中で、高周波ノイズの除去や、疾患特有の信号特定ができる。さらに、再構成信号を音響波形として出力する機能も持たせているので、医師はそれを耳で聞きながら、膝屈伸中のタイミングとも合わせた情報をもてる。つまり、聴覚というすぐれた感覚を指に加えて医師がつかいやすくなる利点がある。

千葉大学医学部附属病院の医師からは、触診だけの場合と比較し、「有益」という主観的評価をいただいた。

6 結論

膝近傍の皮膚表面に接触させる振動音響変換センシングシステムを開発した。

このシステムは膝屈伸に関する疾患が体内で発生する

振動信号を、皮膚表面から発生する音響信号として検出できる特性を持つことを、有限要素法シミュレーションで確認した。

開発したセンシングシステムを使うと、いくつかの種類の疾患に特有の信号波形を計測、記録できることを臨床実験で確認した。

従来の触診では見逃す可能性のある疾患の発見に、本システムが有用である事例があった

離散ウェーブレット変換を応用したグラフィックユーザインターフェイスにより、このシステムを臨床実験で医師が楽に使うことができるようにした。さらに、分解した信号の再構成波形を耳で聴き分ける機能を持たせた。

このシステムは臨床実験に立ち会った医師から良い評価を得ることができた。

このシステムは NMR などに比べて安価、小型であるので、大掛かりな診断前に、数多くの小規模医療機関で使える可能性がある。

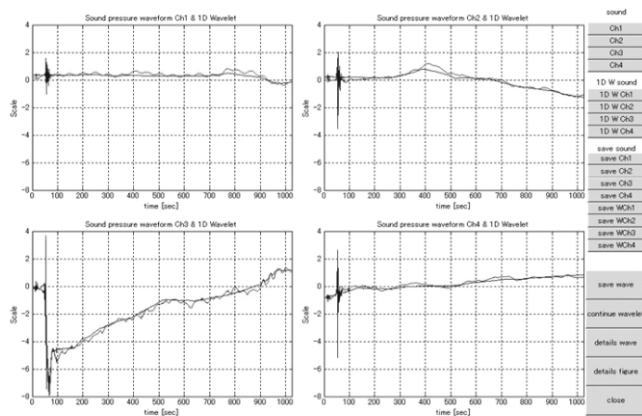


Fig.11 An example of the graphic user interface that controls wavelet analysis. The two waveforms in each level are of the raw acoustic signals and of the reduced noise signals.

参考文献

- (1) Ohashi, M., Diagnosis by jaw joint sound, Diagnostic Technology by Acoustical and Mechanical Method, Acoustical Society of Japan, pp 162-166 Tokyo, 2000
- (2) Baggeroer, A.B., Sonar Signal Processing, Applications of Digital Signal Processing, Prentice-Hall, pp331-437, 1978.

謝辞

本研究には、独立行政法人放射線医学総合研究所の池平博夫教授（現在（独）国立病院機構 千葉東病院）に計測機器を借用させていただき、さらに研究テーマについてご指導をいただいた。また、千葉大学医学部附属病院整形外科で渡辺淳也医師（現在帝京大学）に臨床実験をご指導いただいた。ここに深甚なる謝意を表します。