

膝関節発音の推定に関する研究

屈伸摺動面性状形態人工モデル試験による検討

Diagnosis of Acoustic Emission form Within Knee Joint

Examination by Experiment Using Artificial Model of Sliding Surface of Knee Joint in Bending and Stretching

○ 長尾光雄（日本大学） 横田 理（日本大学） Kim Youngho（延世大学）

Mitsuo NAGAO, Nihon University  
Osamu YOKOTA, Nihon University  
Youngho KIM, Yonsei University

**Abstract:** Knee-joint-related diseases and disorders invite motor deterioration and reduce quality of life (QOL). Such diseases demand development of diagnostic techniques to maintain QOL and extend healthy life expectancy. Systems facilitating early diagnosis of knee osteoarthritis can support a society of active aging while maintaining motor function. Correlation between knee cartilage damage and mechanical signal emissions can help characterize knee cartilage damage. This study confirmed the possibility of identifying a mechanical signal using our developed Bone-Joint Acoustic Sensor (BJAS). Our model of a sliding surface was a plastic stick with a patterned indented surface and a sliding contact that made a reciprocating motion. The bumps on the uneven surface functioned as a vibrating system. We calculated the signal intensity and the signal emission location for comparison to the measured signal. Results suggest correlation between the uneven surface and signal emissions. An accelerometer (AM) was used as the control for the experiment.

**Key Words:** Knee Joint, Biomechanics Engineering, Sliding Surface Properties, Vibration Source, Wellbeing Science

1. 緒論

膝 OA 膝を始めとする膝関節に関わる疾病や障害は、運動機能や QOL の低下を招き、要支援のリスクも高くなる<sup>(1)</sup>。膝 OA は、軟骨摺動面の劣化、硬化、摩耗による剥離、下骨摩耗、歩行障害に進展する進行性疾患である。この過程において、早期からの診療は、運動機能や QOL の維持や回復になるなど予防医療につながるため、アクティブエイジング社会<sup>(2)</sup>にも貢献すると考えている。そこで、中高齢者のライフサポートの一助を目指した膝 OA 計測診断システム構築の研究を進めている<sup>(3)(4)</sup>。膝 OA 病期分類が軟骨の損傷度合に依存し、これがメカニカルな発音の強さと相関すると仮定すれば、この信号解析から軟骨の損傷度合が推定できる。開発した BJAS (Bone-Joint Acoustic Sensor)<sup>(3)</sup> によるメカニカルな発音の同定が可能なのか、人工的な凹凸表面で確認した。この表面には、樹脂製で凹凸が付いた試験片を用い、これに接触子を押し付けて往復運動させた。凹凸の段差を振動系と想定し、発音の強さと位置を算出して、計測した信号と比較した。その結果から、表面の凹凸と発音には相関の可能性が示唆された。BJAS の対照には AM (Accelerometer) も用いており、これまでに分かった事柄と課題等について報告する。

2. 背景

これまでの試験では、複数の BJAS を膝関節に貼り付けて、多数の被験者から自動および荷重屈伸の動作における時系列信号を取得している。その信号からは、時間周波数による特徴、強さの数値化にはしきい値を設けてイベント数で表現、屈伸繰り返しの同時性、個体差ならびに生活環境との相関、負荷頻度との相関などを調査している。測定や信号解析においも、サンプリング周波数、フレーム長や窓関数、周波数分析、および STFT 等について実施しながら、個体差や膝 OA 膝の診療効果等<sup>(4)(5)</sup>も調査している。その一例が Fig.1 である。ソフトボール現役投手の右膝脛

骨上端部外側から取得した、自動伸展屈曲の時系列信号である。(a)は伸展域、(b)は屈曲域を表し、上部のカラーマップ表示は周波数 10 kHz まで表示した STFT、下部の左縦軸 S は  $f=3.0\text{ kHz}\pm 0.5\text{ kHz}$  の信号レベルを示し、これに茶色の線 -90 dB のしきい値を超えた信号 S の累積イベント数  $E_c$  が青色線の右縦軸である。図中の赤色丸点はしきい値を超えた発音を表している。この被験者は屈曲域のイベント数が伸展域の約 4 倍である。ここで注目したい点は、黄色矢印で代表されるように、短時間で高い周波数領域の発音を幾重にも捉えている点である。この発音の要因について仮説を立てた。膝関節の屈伸機能が正常に保持されていれば摺動面に働く抵抗力は極小であり、そこからの発音も小さく、発音があっても伝播過程で消失する。これに対して凹凸形態の表面では、既に正常な機能が失われた表面であるため、凹凸の擦れ抵抗力が発音の起源となり、このエネルギーが表面まで伝播すると仮定している。この発音では、表面形態、負荷の度合い、および可動状態に応じた発音が

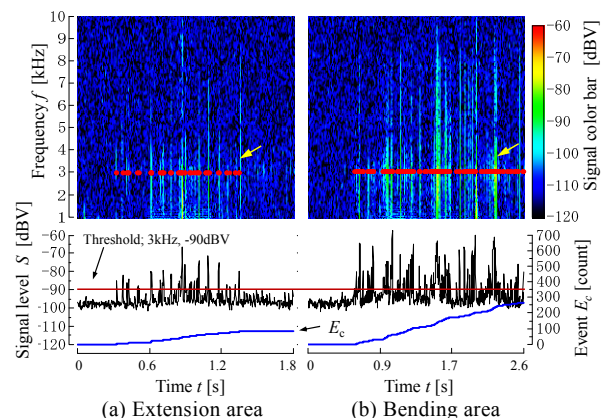


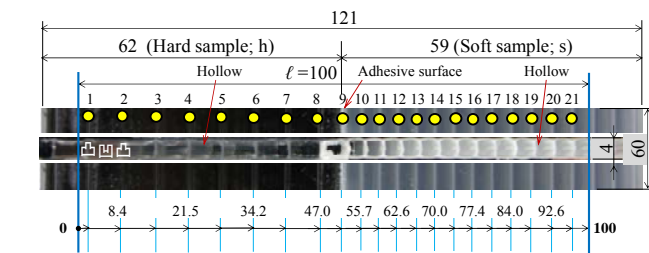
Fig.1 Right knee tibia outside no-load bending and stretching the measured signal in BJAS; Threshold 3 kHz, -90 dBV, Subject; softball pitcher, STFT.

存在していると考えている．この例の発信メカニズムも同様でないかと推定している．そこで，人工的な凹凸表面モデルによる発信メカニズムを検討することにした．

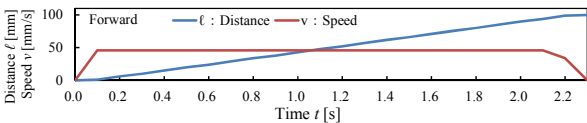
3. 試験

3.1 凹凸試験片

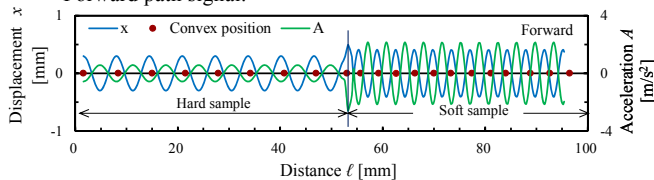
凹凸の試験片は Fig.2(a)に示すように，長さ 121mm，幅 60mm，および高さ 4mm の樹脂成型品である．高さ方向には四角形の空洞部分が並んでおり，硬質と軟質の2種類を接着したものである．凸部は空洞部を形成する高さ方向の縦柱，凹部は縦柱間の空洞部の上下の平面部分である．図中の  $\ell=100\text{mm}$  は接触子が往復運動する距離，番号 1 から 21 の連番は  $\ell=100\text{mm}$  内に現れる凸部の数が 21 箇所，9 番の凸部は両試験片の接着部である．下方の積算数字は接触子が左側始点として 100mm 移動したときに凸部が出現する距離を始点から加算した数値である．



(a) Photographs showing the position and shape of the irregularities, center thickness direction, vertically planar direction. Unevent test sample.



(b) Operation of the reciprocating sliding test apparatus; Forward path signal.



(c) Amplitude of the calculated displacement and acceleration.

Fig.2 Unevent test sample.

3.2 試験装置

Fig.3 の往復運動するスライダには，Fig.2(a)の試料片が固定され，センサ架台と一体の接触子が試験片に押し付けられる．接触子の形状は，先端が半径 1mm，高さ 2mm，長さ 40mm の樹脂製であり，センサ架台の一方は試験装置に固定されるが，上下方向の自由度は確保されている．固定台に付けた BJAS と AM からの信号は，DSP を介して PC で収録され，信号解析が行なわれる．PC は Table 1 の往復運動の条件でスライダが可動できるように，ステッピングモータも制御しており，Fig.2(b)には Table 1 の運転における往路分の距離  $\ell$  と速度  $v$  の信号を示す．計測機器について，AM は(株)小野測器製の NP-3211，AD 変換装置と解析ソフトも同じメーカーで DSP2000 と Oscope + Ochart を用いた．

3.3 接触子の運動特性

Fig.3 の接触子と一体のセンサ架台，および試験片とスライダを含む B 部の詳細を Fig.4 と Table 2 に示す．空洞部の平面は，接触子からの荷重を受けると弾性変形によるたわ

みでくぼみができる．これを凹部と呼んで，弾性定数  $\kappa$  はセンサ架台の質量  $W=4.0\text{N}$  押し込んだ変位  $x$  より与えた．凹凸の配置が等間隔であるためスライダの可動により，接触子は上下運動を繰返す振動系と仮定した．

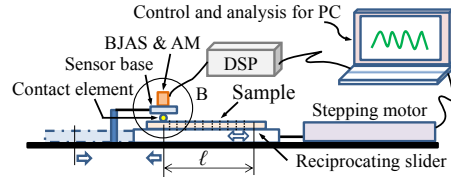


Fig.3 Overview of the reciprocating sliding test equipment.

Table 1 Round-trip operating conditions.

Slide condition	Value
Distance $\ell$ mm	100
Number of times $n$ c/min	10
Downtime $t_1$ s	1
Avg. speed $v$ mm/s	43.5

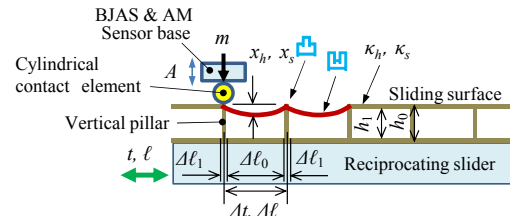


Fig.4 Symbol related to the vibration displacement of the modeled uneven surface. Part B in Fig.3.

Table 2 Uneven sample and dimensions, and elastic; symbols see Figure 4.

Sample	Hard	Soft
Convex number	8	12
Total convex number	21	
$\Delta\ell_0$ mm	6.0	4.0
$\Delta\ell_1$ mm	0.5	0.3
$h_0$ mm	4.0	
$h_1$ mm	3.0	3.4
$\kappa=W/x$ N/mm	13.3=4.0/0.30	9.8=4.0/0.41

ここで，質量  $m$  の物体の振幅を  $a$ ，位相  $\varphi$  とすれば，変位  $x$  と時間  $t$  の関係は  $x = a \cos(\omega t - \varphi)$  と表せる．これは弾性定数  $\kappa$  のばねにつるされた質量  $m$  の自由運動を表す． $m$  の変位を  $x$  とすれば，物体の運動方程式は復元力が  $-\kappa x$  であるから，加速度を  $A$  とすれば， $mA = -\kappa x$  ( $\kappa > 0$ ) と表せる．ここに， $\omega$  は角振動数であり， $\omega = (\kappa/m)^{1/2}$  と示せる．物体の上下運動特性を  $A$  で表すには，周期を  $T=2\pi/\omega$  で表せば， $A = -\omega^2 x = -(2\pi/T)^2 x$  と示せる．

加速度の大きさは，周期の二乗に反比例し変位に比例する．そこで，振幅  $a$  は接触子の上下の変位  $x$ ，周期  $T$  は凸部の間隔から分かるので，加速度は算出できる．Table 1 と Table 2 の条件から往路運動の変位  $x$  と加速度  $A$  を求めて，Fig.1(c)に示す．復路は，Fig.1 の往路を右側に対称すれば得られる．

上記の算出に対して試験では，Fig.4 を参照しながら接触子の先端部分が凹凸を移動する際には，水平面に対して凹部では接触子の部分が沈み込み，次に凸部では上に跳ね上げられ，その後，再度凹部に落下する運動が動き出しから

動き終わりまで，凹凸の数だけ繰返し現れるものと推定する。

4. 試験結果と考察

凹凸の寸法と柔軟さが異なる試験片を用いて，これに接触子を押し当てて往復運動させた信号から，凹凸の位置や信号の強さが同定可能か確かめた。測定には BIAS とその対照に AM を用いた。

4.1 凹凸試料の信号

Fig.5 には，Fig.2(a)の凹凸位置を現す試験片断面を(a)に示し，これに凸部の位置合わせた BIAS と AM の結果を(b)と(c)に示す。

(a)の凸部には丸印を付し，その数を 1～21 で示す。No.9 はつなぎ合わせた接着部のため段差は大きい。

(b)の BIAS は，横軸が移動距離  $\ell$ ，左縦軸の信号  $S$  は距離に換算した時系列信号，右縦軸には計算した変位振幅  $x$  を距離に換算して表し，図中の丸印は(a)とおなじ凸部の位置を現す。BIAS の凹凸信号  $S$  は変位振幅  $x$  と類似しており，21 個の凸部の数が明瞭に分かる。凸部のピッチが 6.5mm の硬質材では，変位振幅のピークより先に信号のピークが表れている。これについては，凹部で沈み込んだ接触子先端が，凸部縦柱の厚さ  $\Delta\ell_1=0.5\text{mm}$ ，先端半径 1mm の幅，および凹部の厚さ  $(h_0-h_1)/2=0.5\text{mm}$  があるため，凸部位置より先に到達していたためである。接触子の動きは，先行して凸部により押し上げられて正の信号が発生し，その後凹部に押し下げられて負の信号となり，No.1 から No.9 までこれの繰返し信号が確認できる。No.9 は接着部の段差であるため到達が速まっている。ここから No.21 までは凸部のピッチが 4.3mm の軟質材である。ピッチが狭くなったことで，凹部で接触子先端が沈み込む量は少なくなり，凸部との当たりが強くなって正の振幅を増大させたと推定する。これが，計算で求めた正の変位振幅と異なった理由である。復路でも同じ発信であった。

(c)の AM は，横軸が移動距離  $\ell$ ，左縦軸の加速度 AM は距離に換算した時系列信号，右縦軸には計算加速度振幅  $A$  を距離に換算して表し，図中の丸印は(a)と同じ凸部の位置を現す。

AM の凹凸の加速度振幅 AM は，計算した加速度振幅  $A$

の No.1 から No.9 までは不明瞭なため位置の特定が困難でとの類似性が認められるのは軟質材領域であるが，硬質材ある。BIAS はこの領域の凸部信号を測定していた。No.9 の段差部分では，接触子先端が当たる強さが大きいため加速度も上昇しており，この勢いが No.11 まで続いていた。その後は BIAS の場合と同様に，ピッチが狭くなり凹部で接触子先端が沈み込む以上に凸部との当たりが強くなり，加速度が増大され硬質材のピッチ領域とは異なった信号であったと推定する。なお，硬質材の No.1 から No.9 および軟質材の No.12 以降の加速度は計算値と近似する。復路でも同じ信号であり，往復運動が繰返しても同じ発信が繰返して現れていた。

4.2 凸部位置と信号振幅

Fig.6 には Fig.2 の凸部位置寸法と Fig.5 の BIAS と AM の正のピーク値との位置差  $\Delta\ell$  を示す。Fig.5(c)の AM の硬質材の凸部位置信号は不明瞭であったが，軟質材では振幅波形のピーク値から求めた。BIAS でも動き始めの直後に位置する No.1 の凸部信号は確認できていない。硬質材と軟質材における  $\Delta\ell$  には差異があることが分かる。その平均値を比べると，BIAS では  $-2.26\text{mm}$  と  $0.04\text{mm}$ ，AM の軟質材からは  $-0.41\text{mm}$  である。BIAS の硬質材の発信について，接触圧子は凸部位置より Fig.5(b)で示したように，最大で約 2mm 先行して信号が表れるため，単純に差し引くと  $-0.26\text{mm}$  の位置ずれに相当している。信号の計測条件を把握して補正すれば，凹凸試験片の凸部の数と位置は，計測した時系列信号から同定可能なことが分かる。そのためには，スライダ運動時の動き出しと終わりのトリガー機能，これに要した時間と距離が予め分かっている必要がある。

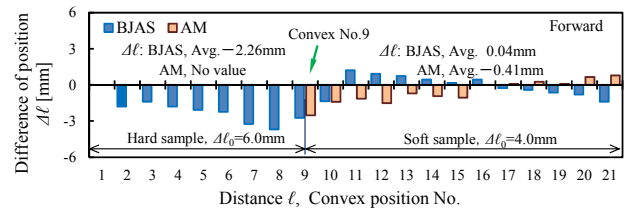


Fig.6 Difference between the convex position and signal; Comparison of BIAS and AM.

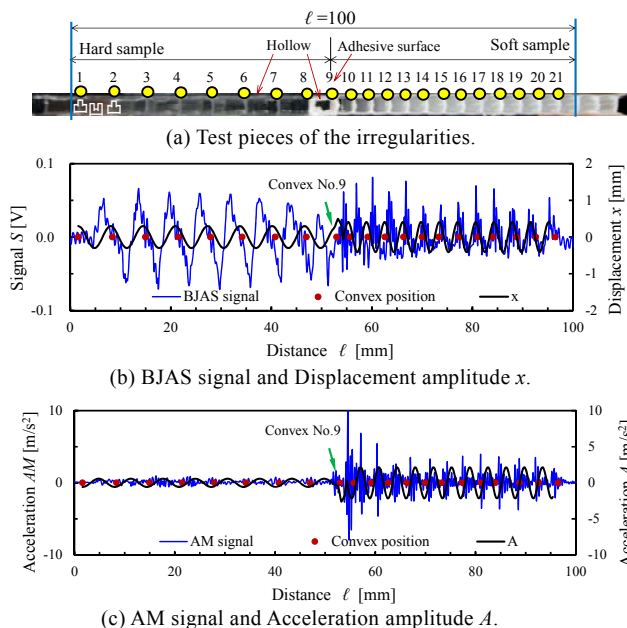


Fig.5 Comparison of the forward path of the test results.

4.3 膝関節の信号

Fig.1 に示す時系列信号  $S$  の発信メカニズムについて，この試験から推定する。瞬発的で 10kHz までの高い周波域まで発信が連続している。この発信は，硬質で鋭角な凸部を有する表面が押し付けられて摺動した際に，凸部が相互に弾かれたまたは損傷を受けた際に見られる発信であるため，Fig.1 信号からは鋭い凹凸が連続して分布していたと推定している。Fig.7 と Fig.8 は Fig.5(b)を Fig.1 と同じカラーバーにて，1 往復に相当する信号を表している。Fig.7 の横軸は時間軸であり，往路，休止，および復路，ならびに凹凸試験片の硬質と軟質および段差 No.9 を表す。左縦軸は周波数 0～10kHz である。Fig.8 は，Fig.7 の信号波形を示し，試験片の凸部も示している。これらより，Fig.1 の発信形態を推定すれば，凸部のピッチ間隔が狭くなり，接触子先端も鋭角になり，これらの突起が摺動運動により衝突が起きて発信は誘発されていた。この摺動条件が異なれば発信形態も異なるものと推測した。これを確かめるためには，試験対象した表面性状を観察した情報を用いた再現試験片で試験する必要がある。膝関節で計測する場合には，屈伸動作と同期させた信号計測により，発信位置の特定や信号の強



さが推定可能になる. なお, 筋電計の信号は BIAS と AM とは異なっていた.

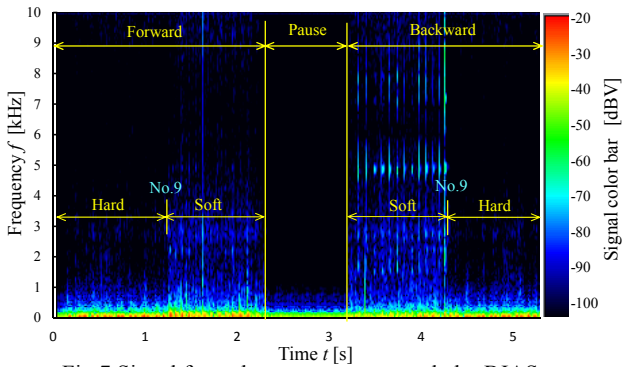


Fig.7 Signal from the uneven test sample by BIAS; Reciprocating motion, 0~10kHz. STFT.

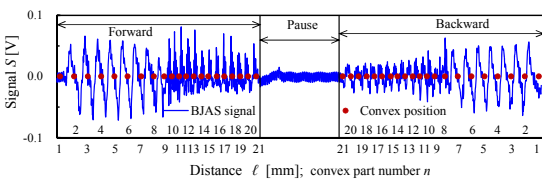


Fig.8 Signal from the uneven test sample by BIAS; Reciprocating motion, Position of the convex.

### 5. 結論

BIASの信号応答特性<sup>(5)</sup>について, AMを対照としながら, これまで周波数応答関数とコヒーレンス関数に関わる試験, ならびに屈伸した膝関節の信号も計測しており, 膝関節の計測ではAMと同等以上の成績を確認している. 人工的な凹凸を付した表面と接触子の摺動による発信強さがBIASで同定可能なのか確認した. これまでの結果を以下に要約する.

- (1) BIASでは, 凹凸の硬軟の違い, 凸部の位置, および凸部からの発信強さの同定がAMより優位である.
- (2) 同定の可能性について, 変位振幅と加速度振幅から探ったところ変位振幅が有効である. 凸部の間隔が近いと凸部が接触子に当たって発信する同定も考えられる.
- (3) 膝関節の幾重にも連続した発信のメカニズムについては, 上記で示した同定法から推定すれば, ピッチが小さな凹凸が連続して分布していた.
- (4) 往復繰り返し運動による発信は, 凹凸のピッチ, 高低差, および硬軟が一定あれば, 同じ発信が繰り返された.
- (5) 膝関節可動域にゴニオメータを用いることは, 上記の往復繰り返し運動と同じ条件になる.
- (6) 被験者の生活環境条件等により, 多数の発信パターンが存在している. その因果関係や発信メカニズムの解明が待たれる. 本試験はその解明の緒についてのものである.

### 参考文献

- (1) 厚生科学審議会地域保健健康増進栄養部会, 次期国民健康づくり運動プラン策定専門委員会「健康日本21(第2次)の推進に関する参考資料, ③高齢者の健康, pp.75-83, 2012.
- (2) 日本版CCRC構想有識者会議, 日本版CCRC構想(素案), 財務省, 2015.
- (3) 長尾光雄, 再公表特許, WO2011/096419, 2011.
- (4) 長尾光雄, 横田 理, 変形性膝関節症の早期予防を目指した診断支援システム用センサの開発, 地域ケアリング, Vol.17, No.11, pp.50-54, 2015.
- (5) Nagao M., et al., Frequency response in bone joint acoustic sensor development, Tech. & H., C., 2015, DOI:10.3233/THC-151024.