膝 OA 早期診断支援システムの開発に関する 膝可動時の発信をキャッチするセンサの開発と性能評価

（加速度計を対照としたインパクト加振試験と擬似凹凸の摺動試験）

長尾 光雄 [1)], 横田 理 [1)], （紺野 慎一 [2)], キム ヨンホ [3)] ）
[1)]日大工･機械, ([2)]福島医大･整形, [3)]延世大･ﾊﾞｲｵﾒｶ）

1. 緒論

変形性膝関節症(KOA と略記；Knee Osteoarthritis)とは進行性の疾患であるため，痛みを感じ始めた頃には症状が進行している．早期に KOA の診察ができれば, QOL の維持や健康寿命の延伸に役立つものと考えている．この KOA の進行と軟骨のすり減りや下骨摩滅の情報が診療に活かされている. そこで, どこでも簡単に膝関節表皮から非侵襲でこれらの情報が計測できる骨関節音響センサ(BJAS と略記；Bone-Joint Acoustic Sensor)[1)]を試作開発している．

これまで確認した性能試験は，硬軟から構成した伝達系のインパクト加振試験，また軟骨下骨の表面が摩滅して凹凸（おうとつ）状を想定した擬似試料より，位置情報の精度を調べた [2)]．これらの対照には加速度計(AM と略記；Accelerometer)を用いた．

ここでは，これまでに分かった BJAS の信号応答特性に関連した性能試験について報告する．

2. BJAS

BJAS の概要図と写真を Fig.1 に示す．信号の計測は接着面中央のプローブ先端が被験者の表皮に押し付けられ，その反対側にはユニモルフ型変換素子を配置した．Fig.1 は外径 26 mm，高さ 9.2 mm，質量 5.8 g の試作品である．

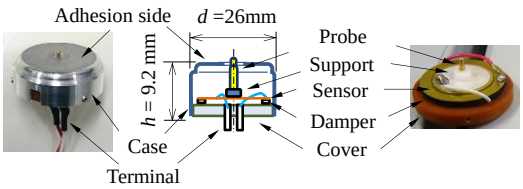


Fig.1 Outline of BJAS.

3. インパクト加振試験

3.1 概要 BJAS で計測した信号には，BJAS の周波数応答特性が深く関わるため，これの調査は重要である．この調査には Fig.2 に示す伝達系を構成したインパクト加振試験により実施した．Fig.3 には Fig.2 の伝達系構成要素と記号を表す．入力信号 $x(t)$ は硬質試験体 T_1 (SUS 系金属盤, □150×t10 mm)の定点にインパルスハンマにより与える加振力(記号; A)である．この入力信号は T_1 および軟質試験体 T_2 (豚足表皮, □35×t3~4 mm)を伝播して, 加速度計(1 軸型, 記号; B)と BJAS(記号; C)に伝播する．これを出力信号 $y(t)$ として計測する．

3.2 対照と応答関数 C の周波数応答特性は B を対照として，その類似度から検討する．伝達系の構成は Fig.3 から A-T_1 系と A-T_1-T_2 系であり，これらの入出力信号の特性はクロススペクトル密度関数 $P_{xy}(f)$，周波数応答関数 $H_{xy}(f)$，およびコヒーレンス関数 $\gamma_{xy}^2(f)$にて類似度を検討した．

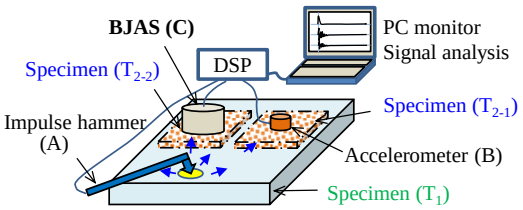


Fig.2 Impact vibration test of the BJAS.

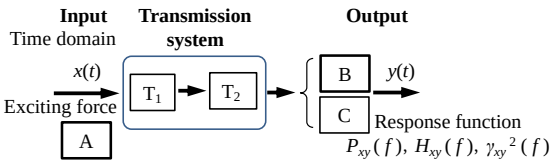


Fig.3 Components of the signal transmission and measuring system.

3.3 結果と類似度の検討

(1) A-T_1 伝達系の類似度 Fig.4 左縦軸は $x(t)$のパワースペクトル$P_{AA}(f)$, A-T_1-B 系と A-T_1-C 系の$H_{xy}(f)$, および右縦軸には各系の $\gamma_{xy}^2(f)$を現す. f_1=2148 Hz (矢印)は系の 1 次の共振周波数である．$H_{xy}(f)$の破線「0」より「プラス側」は出力信号が大きく,「マイナス側」は出力が小さいことを表している. $P_{AA}(f)$が減衰している(破線丸印)横軸 f に応じて $H_{xy}(f)$も減衰しており入出力の相関は強いが，A-T_1-C 系では f>7 kHz の減衰が大きい. また, A-T_1-C 系の $\gamma_{AC}^2(f)_{T1}$ では f<1.5 kHz (網掛け)と 11~12 kHz でも相関が悪い．

(2) A-T_2 伝達系の類似度 Fig.5 の両縦軸は先の Fig.4 と同じであり，豚表皮 T_2 が追加された A-T_1-T_2-B 系と A-T_1-T_2-C 系である．$H_{xy}(f)$は Fig.4 と

比べて「マイナス側」にシフトしており，特に A-T_1-T_2-C 系の $H_{AC}(f)_{T2\text{-}1}$ では f > 6kHz の応答感度が悪いため，$\gamma_{AC}^2(f)_{T2\text{-}1}$ も悪い．これらより BJAS の周波数応答特性は対照とした AM と比べて劣る．この伝達系 T_2 は，高周波数領域の信号振幅を減衰させることが分かる．

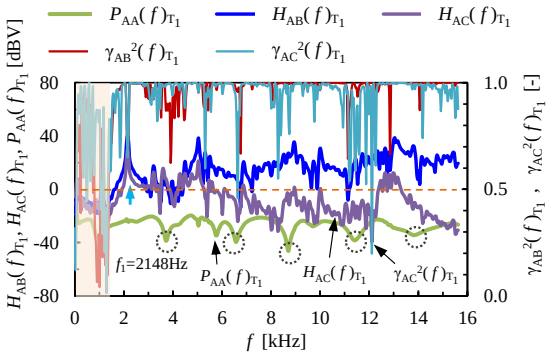


Fig.4 Similarity ratio of B and C in transduction system A→T_1.

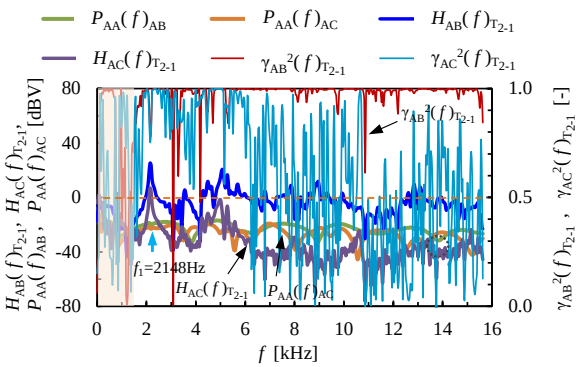


Fig.5 Similarity ratio of B and C in transduction system A→$T_{2\text{-}1}$.

4. 膝関節屈伸試験

4.1 概要　試験に同意を得た被験者 6 名の AM と BJAS の結果には大差がないため，その代表例を示す．被験者は年齢 22 歳，男性，身長 186 cm，体重 60 kg(BMI;17.0), 痩せ形で継続した運動歴はない．計測は右脛骨外側顆約 1 cm 下方辺りの比較的平らな所に B と C を接着し，さらに屈伸角度は大腿骨と脛骨側面にゴニオメーターを付けて計測した．Fig.6 は座位からの自動と荷重屈伸の写真である．屈伸角度はそれぞれ 90 deg と 103 deg，屈伸回数は 4 回，各動作間には約 2 秒の静止時間を設定した．ここでも対照は AM として BJAS の優位性を調べた．

4.2 屈伸の信号　Fig.7 には自動屈伸(Fig.6 (a)) 4 回繰返した時間軸の AM と BJAS の信号振幅 Y と角度 θ (右縦軸上部)を表す．初めの網掛け部分は静止時を強調するために付した．AM の 2 本の破線は静止時で 15 nm/s^2，可動時ではこれが 2 倍の 30 nm/s^2 になった線である．BJAS では静止時の信号は確認できないが可動時の発信は明瞭に表れている．

これらの短時間フーリエ変換(STFT)したスペクトログラムを Fig.8 に示す．横軸は時間 t，左縦軸には周波数 f で 0~14 kHz，その下方には屈伸角度 θ，右縦軸の $P(f)$は信号強度を表すカラーバーである．Fig.7 と合わせて見れば, AM の信号振幅は f<0.5 kHz が主であるのに対して，BJAS では伸展時に大きな振幅が繰返されておりこれが図中矢印で示す屈曲動作の所で表れ，12 kHz まで到達している．図中の 10 kHz は外部からのノイズ信号である．

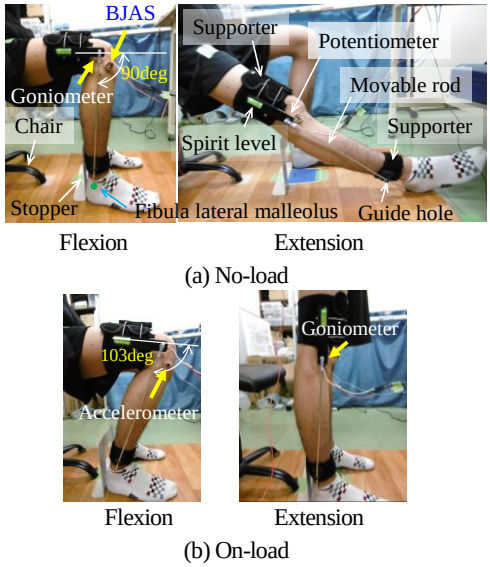


Fig.6 Flexion-extension motion of right knee from the sitting positon.

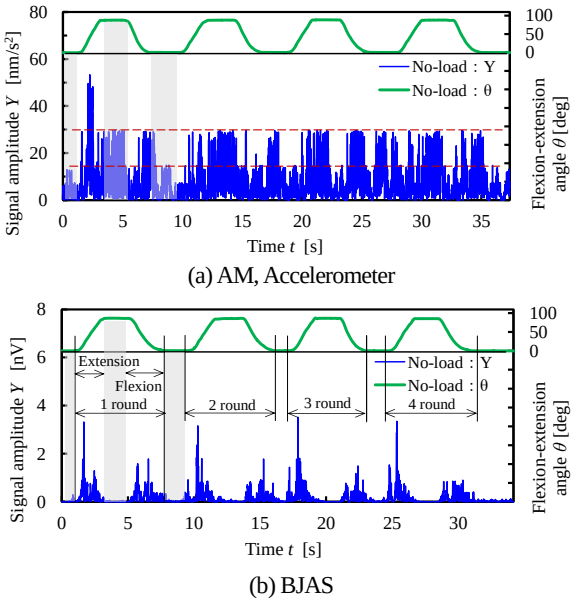
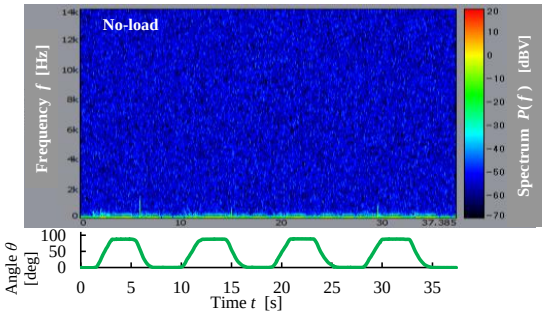


Fig.7 No-load at 4 times the signal amplitude.

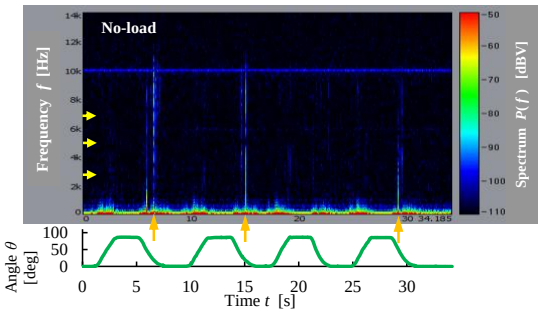
4.3 信号の数値化　Fig.4 と Fig.5 を参照して AM と BJAS の優位性を確かめるために，次の数値化を試みた．f を 0.5，1.5，3.5，および 8.0 kHz 近傍の信号振幅(図(b)の左縦軸矢印)が，定常的(これを閾値として)な振幅より大きい信号の数をカウントして，これらの数の大小で判別した．その結果が Fig.9 であ

る．AM の f が 0.5 kHz 近傍においてカウント数 25 であるがそれ以外は大きな信号がなく，BJAS では f ごとの数が多い．ここでは示していないが荷重屈伸では，Fig.7~Fig.9 の信号振幅は約 2 倍以上にはなるが，AM のカウント数は自動と同程度であるのに対して BJAS の数は 2~7 倍に増加していた．荷重屈伸でも AM より BJAS は優位である．

ここで AM と BJAS の信号伝播機構について，Fig.7~Fig.9 から検討する．これらは表皮に接触する形態の違いと推測する．AM はその平面部を接着するため表皮の振動とは相関が高く，静止時でも膝関節の微動に反応するが，内部から伝播する信号には反応していない．これに対して BJAS は尖った先端を表皮に押込む機構のため，内部からの信号には AM より応答感度が優れていると考える．



(a) Accelerometer, AM



(b) BJAS

Fig.8　Spectrogram of the STFS for Fig.7.

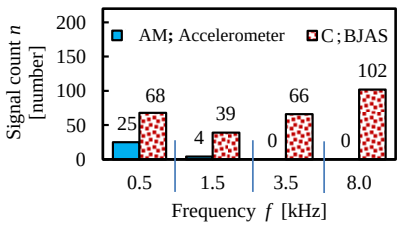


Fig.9　Comparison of the number of the signal counts in Fig.8.

5. 凹凸信号の精度

5.1　試料の概要

Fig.9 でカウントした数が大腿脛骨関節の摺動面の摩滅により凹凸が発生し，その段差の大きさが関与すると推定した．Fig.10 はこれを模擬的に現した試料である．これは，四角型の空洞が付いた厚さ 4 mm のプラスチック製の板(62 mm と 59 mm)を長手方向に貼り合わせた全長 121 mm である．中央が板の厚さ方向の断面(上下の支えが縦柱)，上下には板の平面方向からの写真である．摺動する面の移動距離を ℓ=100 mm として，その範囲に入る凸面として扱う縦柱の数は，左側から番号(図中○印)を付して 1~22 存在する．縦柱の間を凹面として，この面の弾性定数が「A (13 N/mm) > B (10 N/mm)」のため，凹面を押付けた際の段差は「A<B」となる．試験では，凸部間隔の寸法精度，段差の大小と信号強度との関係性について，AM を対照に調べた．

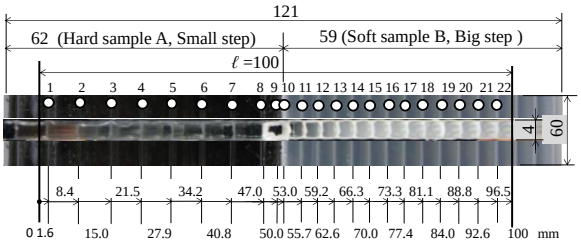


Fig.10　Irregularity of the sample, and its position, photograph.

5.2　試験装置の概要

Fig.10 の試料上面を往復摺動する装置が Fig.11 である．これの A 部詳細が Fig.12，可動条件を Table1 に示す．試料に乗せて摺動させる凸部分の材料は POM，その寸法は半径 1 mm の円弧上で幅が 40 mm，質量 W は約 3.6 N，AM と BJAS はその上部に接着，摺動部の位置決め精度は 0.01 mm，往復回数は Fig.7 と同じ 4 往復である．

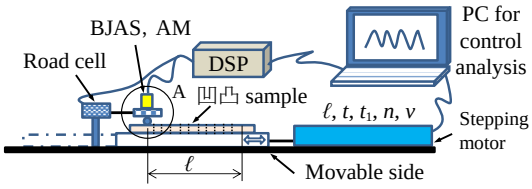


Fig.11　Component of the to-and-fro slide test equipment.

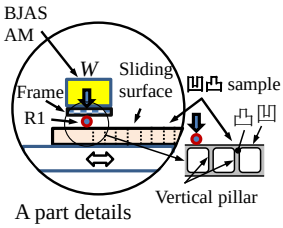


Table1
To-and-fro movable condition.

Slide condition			Value
Distance	ℓ	mm	100
Times	n	c/min	14
Downtime	t_1	s	2

Fig.12　Details of the slide part and samples.

5.3　結果と検討

往復回数 4 往復の移動距離，速度，および荷重の計測値が Fig.13 である．解析例は図中網掛けした 2 往復目の往路を対象として，AM と BJAS の精度算出方法を具体的に示す．Fig.14 と Fig.15 は ℓ=100 mm を移動する時間 t=0~2.28 s を切り取った STFT のスペクトログラムである．上部は計測した時系列信号振幅，下部は Fig.10 の断面写真を配置する．発信は試料の凸(縦柱)ごと(白色丸印)

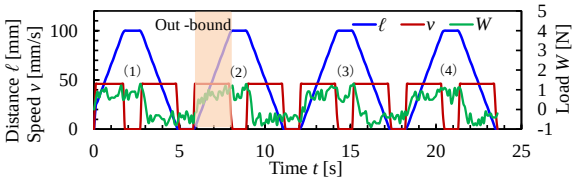


Fig.13　Record of the test operation. (Data of 4 to-and-fro)

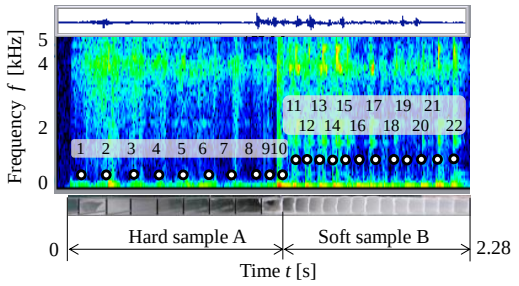


Fig.14　STFT-spectrogram of the AM out-bound.

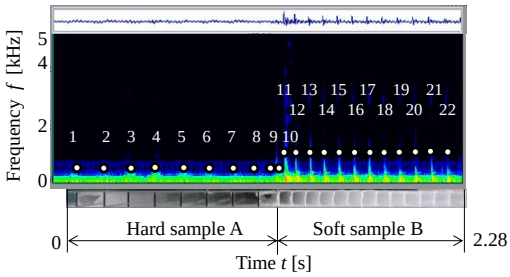


Fig.15　STFT-spectrogram of the BJAS out-bound.

に強く，その数も 1~22 まで数えられる．凹凸段差の大小 A<B と信号強度の大小 A<B は相関することも確認できる．発信時間 t_0 の読み取りの明瞭さは BJAS が優位である．

次に，移動距離 ℓ=100 mm を時間 t=2.28 s で摺動するため，凸部 22 ヶ所の発信時間 t_0 が分かる．Fig.16 と Fig.17 は，ℓ を関節角度 θ=90 deg に相当させて，発信位置相当角度 θ (左縦軸), 横軸は t_0 である．θ_1 (図中○印)は算出値，実測値 θ_2 (図中◇印)はスペクトログラムから求め，その回帰直線も示す．これの差 $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$ (右縦軸，図中△印)とこれの回帰直線，および平均値 $\Delta\theta_{ave.}$ も示す．AM と BJAS の $\Delta\theta_{ave.}$ は，-2.7 deg と-1.0 deg であった．この差は，ステッピングモーターの動き始めと終わりに外部へ出力する信号の応答時間が 0.07 秒実働より早く送信していたことが分かり，これを補正した後の差 $\Delta\theta'=\theta_1'-\theta_2'$ (図中□印)とこれの回帰直線，および平均値 $\Delta\theta'_{ave.}$ も示す．その結果から，AM は-2.7 deg から 0.5 deg，BJAS では-1.0 deg から 1.7 deg になった．この中には，Fig.14 と Fig.15 に示す発信時間 t_0 の目視精度も含まれている．Fig.13 の 2~4 往復すべての $\Delta\theta_{ave.}$ と $\Delta\theta'_{ave.}$ の絶対値の平均値は，AM は 3.1 deg と 2.3 deg，BJAS では 2.3 deg と 1.4 deg であった．

なお，AM の Fig.8(a)屈伸では Fig.14 で見られる摺動信号は計測されていない．これらより BJAS の感度と周波数特性は AM と比べて優位である．

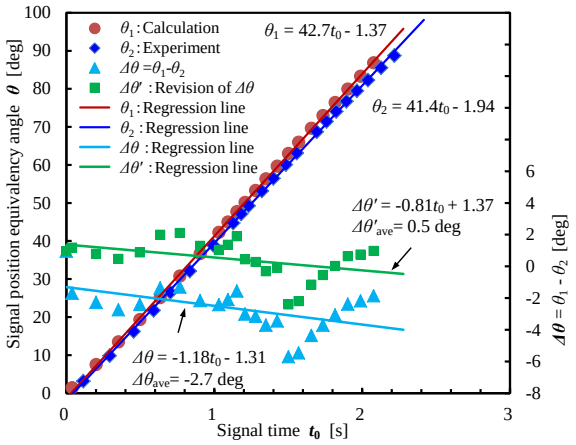


Fig.16　Signal position equivalency angle of AM.

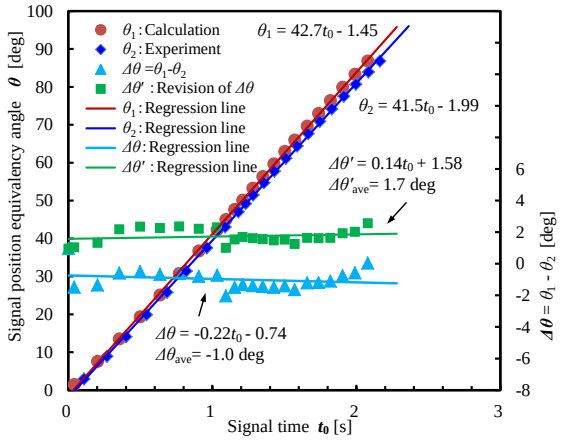


Fig.17　Signal position equivalency angle of BJAS.

6. 結論

BJAS の信号応答特性について AM を対照とした試験から次の点が示される．

(1) 膝関節屈伸時において，AM は 0.5 kHz 以下の信号のため不安定さの計測には優位である．BJAS では 1.0~12.0 kHz の計測が優位なため，双方の特長が活かせる計測方法を提案する．

(2) 摺動面の擬似凹凸分布から発信位置相当角度の精度は，AM で±2.3 deg，BJAS では±1.4 deg である．段差の大小による信号強度の大小には正の相関を認めた．

(3) BJAS で計測した膝関節からの信号について，発信源の特定とメカニズムについて解明する．

文献

1) 日本大学：生体用音響センサ及び生体音響センサを用いた診断システム，WO2011/096419.
2) 長尾，横田，他 2 名：骨関節音響センサ開発の基礎研究，日本機械学会東北支部第 50 期総会・講演会，（2015）No.2015-1，pp.165/166.
3) Nagao, Yokota et al., Frequency Response in Bone Joint Acoustic Sensor Development, Int. Jour. Tech. & Health Care, (2015 掲載予定)