

膝関節の運動解析 ～三次元動作解析装置と角速度計による解析～

竹下 和良¹⁾, 川上 雄大¹⁾, 松本 渉²⁾, 垣村 将典²⁾,
富田 健一³⁾, 木村 篤史³⁾, 松本 和久³⁾, 山崎 立実³⁾

¹⁾ 明治国際医療大学 保健医療学部

²⁾ 明治国際医療大学附属病院 リハビリテーションセンター

³⁾ 明治国際医療大学 臨床柔道整復学Ⅲユニット

要旨：

【はじめに】

一般的に膝関節は屈曲・伸展の運動のみ有する1軸の運動軸を有する関節とされているが、実際には3軸の運動軸を有する関節であり、様々な関節機構により可動性と支持性を両立させている。しかし、在宅でのリハビリテーションを必要とする対象者の多くは、これらの正常な関節運動を保つための骨の形状、靭帯・関節包の緊張および筋力などに異常を来している場合が多く、疼痛や関節機能異常の原因となっていることから、膝関節の自由度の測定は膝関節機能の維持・改善のためには必要不可欠な評価であると考えられる。

近年、膝関節の3軸の運動はAndriacchiらが考案したPoint Cluster法（PC法）を用いることにより明らかにされているが、貼付する反射マーカ―は25個と多く、解析プログラムは未だ一般化されていない。

本研究の目的は、6個という少ない数の反射マーカ―と一般的な解析プログラミングソフトウェアを用いて、膝関節の三次元運動を解析する方法を開発するとともに、安価な計測機器である角速度計を用いた測定結果とを照合することで、より簡易な膝関節の三次元運動解析を試みることである。

【対象】

対象は、自作した3軸を有する膝関節モデル（膝関節モデル）、骨標本モデルの左膝関節（骨標本）、健康成人11名（男5名、女6名、平均年齢23.0±2.0歳）の左膝関節とした。

【方法】

膝関節モデルに6つの反射マーカ―を貼付した後、規定した他動伸展運動を行い、この運動を三次元動作解析装置により計測し、以下の解析プログラムを用いて算出した関節角度（解析角度）と、規定した運動の関節角度（規定角度）を照合した。同様の方法にて、骨標本（他動伸展運動による）及び健康成人の膝関節（自動伸展運動による）を対象に計測した。また、脛骨粗面に角速度計を貼付して前述と同様の方法を施行し、解析角度と運動方向を照合した。

（解析プログラム）

```
CKNE=(LKNE+MKNE)/2
OUTPUT(CKNE)
ULEG=[THI,LKNE-MKNE,THI-CKNE,xyz]
CANK=(LANK+MANK)/2
OUTPUT(CANK)
LLEG=[CANK,LANK-MANK,PTLA-CANK,xyz]
LLEGangle=<ULEG,LLEG,xyz>
OUTPUT(LLEGangle)
```

【結果】

膝関節モデル、骨標本、健康者における規定角度と解析角度はほぼ一致した。また、角速度計による運動方向は、膝関節モデルと骨標本での他動運動の解析角度とは一致したが、健康者での自動運動では一致しない部分を認めた。

【考察】

規定角度と解析角度はほぼ一致したことから、6つの反射マーカ―と前述の解析プログラムにより、3軸の膝関節の運動を解析することが可能であることが証明できた。しかし、角速度計では解析角度と一致しない部分があり、今後さらに研究を重ねる必要があると考えられた。

【はじめに】

一般的に膝関節は屈曲・伸張の運動のみ有する1軸の運動軸を有する関節とされているが、実際には膝関節の屈曲・伸張運動と必然的かつ不随意的に生じる自動的に生じる軸回旋と他動的な軸回旋、および関節における適度な“あそび”による左右の側方運動を有しており、内旋・外旋と内転・外転を加えた3軸の運動軸を有する関節である。膝関節の軸回旋や側方運動は顆間結節を軸回旋中心として、凸面をなす脛骨外側関節面と凹面をなす脛骨内側関節面の形状により生じる。また、内・外側副靭帯と大腿四頭筋の収縮、および内側では縫工筋・半腱様筋・薄筋、外側では大腿筋膜張筋の収縮がこの可動性が過剰にならないように制限し、膝関節の可動性と支持性を両立させている¹⁾。

しかし、在宅でのリハビリテーションを必要とする対象者の多くは、これらの正常な関節運動を保つための骨の形状、靭帯・関節包の緊張および筋力などに異常を来している場合が多く、それにより運動の自由度が増加することで、疼痛や関節機能異常が発生すると考えられる。したがって、膝関節の三次元運動の解析は膝関節機能の維持・改善のためのリハビリテーションには必要不可欠な評価であると考えられる。

近年、膝関節の3軸の運動はAndriacchiらが考案したPoint Cluster法(PC法)を用いることにより明らかにされているが¹⁾、貼付する反射マーカ―は25個と多く、解析プログラムは未だ一般化されていない。

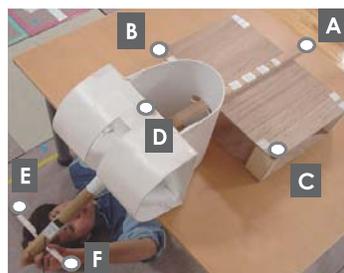
本研究の目的は、6個という少ない数の反射マーカ―と一般的な解析プログラミングソフトウェアを用いて、膝関節の三次元運動を解析する方法を開発することである。また、その結果と安価な計測機器である3軸角速度計を用いた測定結果とを照合することで、より簡易な膝関節の三次元運動の解析を試みることである。

【方法】

研究1.

自作した3軸の運動軸を有する左膝関節モデル(膝関節モデル)に6つの反射マーカ―を貼付した。反射マーカ―の貼付箇所は、膝関節モデルの大腿上部、大腿骨内側上顆、大腿骨外側上顆、膝蓋骨、内果、外果に相当する部位とした(図1)。膝関節モデルに対して、規定した他動運動を実験者の手動にて行った。規定した運動角度は、内・外旋

0°位から外旋100°位までの外旋運動を伴う屈曲65°位から屈曲20°位までの伸張運動とした。運動速度は実験者の任意の手動速度とした。この際の反射マーカ―の座標位置を、三次元動作解析装置(Oxfordmetrics社製 Vicon512)にて測定し、解析用プログラミングソフトウェア(Oxfordmetrics社製 Bodybuilder 3.6)に以下の計算式を用いて、膝関節モデルの伸張角度と外旋角度を算出し(以下、解析角度とする)、規定した運動角度と比較した。



A: 大腿上部
B: 大腿骨内側上顆
C: 大腿骨外側上顆
D: 膝蓋骨
E: 内果
F: 外果

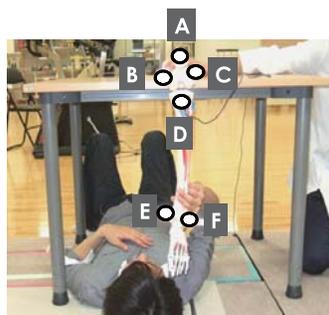
図1 膝関節モデルの反射マーカ―の貼付位置

計算式:

$$\begin{aligned} CKNE &= (LKNE + MKNE) / 2 \\ & \text{OUTPUT}(CKNE) \\ ULEG &= [THI, LKNE - MKNE, THI - CKNE, xyz] \\ CANK &= (LANK + MANK) / 2 \\ & \text{OUTPUT}(CANK) \\ LLEG &= [CANK, LANK - MANK, PTLA - CANK, xyz] \\ LLEGangle &= \langle ULEG, LLEG, xyz \rangle \\ & \text{OUTPUT}(LLEGangle) \end{aligned}$$

研究2.

軸回旋と屈曲・伸張運動の可動性を有したまま連結された、左下肢の大腿骨と下腿骨の骨標本(骨標本)に対して、研究1.に相当する部位に6つの反射マーカ―を貼付した(図2)。骨標本に対して、規定した他動運動を実験者の手動にて



A: 大腿上部
B: 大腿骨内側上顆
C: 大腿骨外側上顆
D: 脛骨粗面
E: 内果
F: 外果

図2 骨標本の反射マーカ―の貼付位置

行った。規定した運動角度は、外旋10°位から外旋45°位までの外旋運動を伴う屈曲80°位から屈曲20°位までの伸展運動とした。運動速度は実験者の任意の手動速度とした。この際の解析角度を研究1.と同様の方法で求め、規定した運動角度と比較した。

研究3.

対象を膝関節に疾患を有さない健常成人男女11名(男性5名,女性6名,平均年齢23.0±2.0歳)として,対象の左下肢に研究1.と研究2.と同様に6つの反射マーカ―を貼付した(図3)。高さ79cmの台に端座位をとらせ,両下肢下垂位の開始肢位から左膝関節の自動伸展運動を行わせた。自動伸展運動中の大腿部の回旋を抑制するようにベルトにて大腿部を固定した。また,骨盤の傾斜を抑制するために,バックレストに仙骨部を密着させ骨盤を固定した状態で自動伸展運動を行わせた。自動伸展運動の運動速度は被験者の任意とした。この際の解析角度を研究1.と同様の方法で求めた。

なお,被験者に対して,本研究の主旨を説明し,研究中のいかなるときでも被験者の意思で本研究から辞退をすることができるということを説明し,同意を得た上で本研究を実施した。

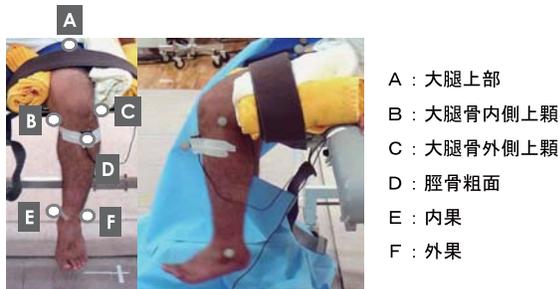


図3 健常被験者の反射マーカ―の貼付位置



図4 3軸角速度計の貼付位置

研究4.

研究1. 研究2. 研究3. の計測に際して3軸角速度を計測し,解析角度と角速度の運動方向を照合した。3軸角速度の計測には3軸角速度計(Micro Stone社製 MP-G0-01)を用い,それぞれの脛骨粗面部分に両面テープでX軸を屈曲-伸展運動, Y軸を内旋-外旋運動, Z軸を内転-外転運動となるように貼付した(図4)。3軸角速度の測定意義は,膝関節における実際の運動軸の数を計測するためであり,仮に3軸角速度のうち1つの軸にしか変位が見られなければ1軸の運動軸を有していると考えられ,3軸すべてに変位が見られれば,3軸の運動軸を有していると考えられる。また,その運動方向が解析角度と一致すれば,より簡易な運動解析が可能になると考えられる。

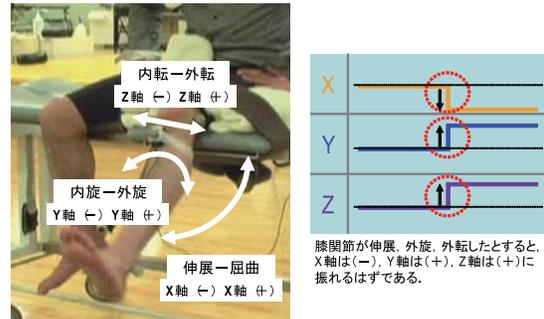


図5 3軸角速度計の変位

【結果】

研究1.

解析角度は,内・外旋0°位から外旋100°位までの外旋運動を伴う屈曲65°位から屈曲20°位までの伸展運動で,規定した運動角度と一致した(図6)。

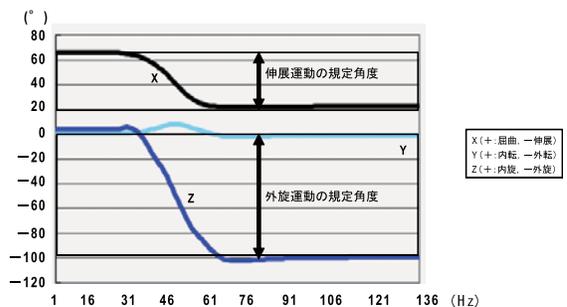


図6 研究①(膝関節モデルの解析角度)の結果

研究2.

解析角度は,外旋10°位から外旋45°位までの外旋運動を伴う屈曲80°位から屈曲20°位までの伸展運動で,規定した運動角度と一致した(図7)。

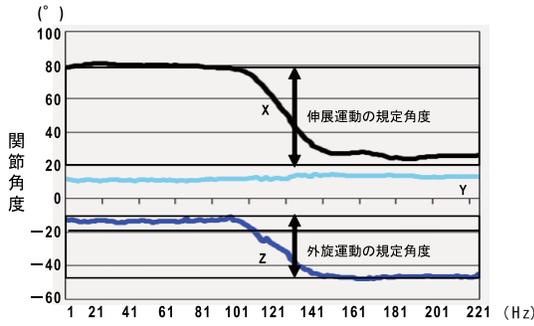


図7 研究②(骨標本の解析角度)の結果

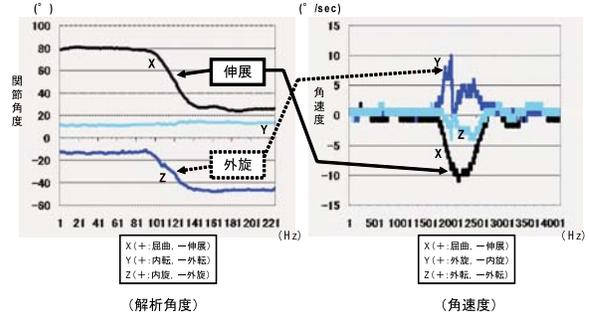


図10 骨標本の解析角度と角速度の結果

研究3.

対象の膝関節自動伸展運動には、約5°の内転運動を伴うとともに、伸展初期には4.5°の内旋運動と伸展後期には6.0°の外旋運動を伴っていた(図8).

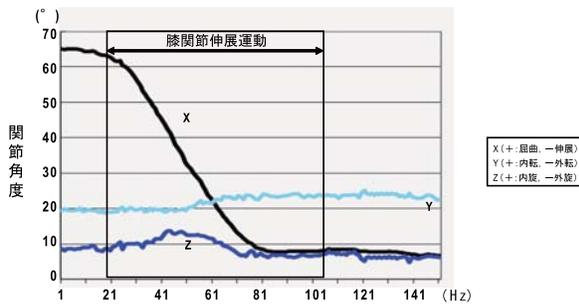


図8 研究③(健康被験者膝関節運動の解析角度)の結果

研究4.

膝関節モデルの3軸角速度は3軸に変位を認め、解析角度と角速度の運動方向は一致した(図9). 骨標本の3軸角速度は3軸に変位を認め、解析角度と角速度の運動方向は一致した(図10).

研究3. の対象の3軸角速度は3軸に変位を認め、解析角度と角速度の運動方向は伸展運動と内転運動において一致したが、回旋運動の運動方向の一部に不一致を認めた(図11).

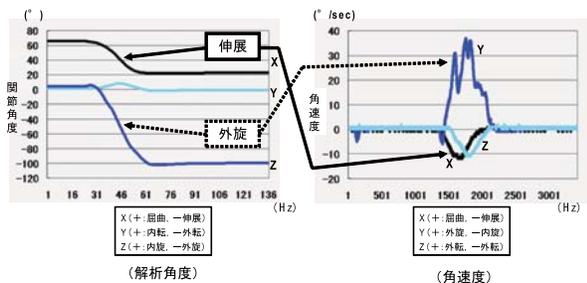


図9 膝関節モデルの解析角度と角速度の結果

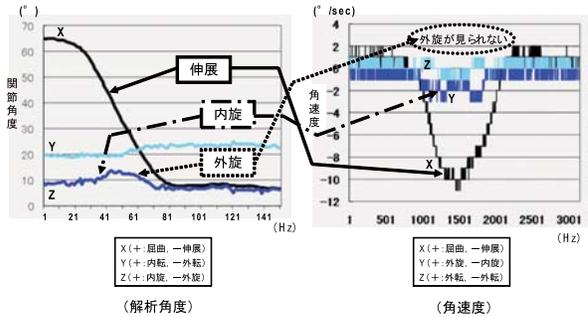


図11 健康被験者膝関節運動の解析角度と角速度の結果

【考察】

平成21年4月の介護保険事業状況報告によると、平成12年に218万人であった要介護者数は平成20年では455万人に増加している。そして平成19年国民生活基礎調査によると要介護状態となる原因疾患の第4位に関節疾患があり、在宅でのリハビリテーションを必要とする対象者の多くが、正常な関節運動を保つための骨の形状、靭帯・関節包の緊張などに異常を来していることが多いことがわかる。中でも、荷重関節である膝関節の変形性関節症が多く、在宅でのリハビリテーションを行う上で膝関節の関節機能を周知することが重要であると考えられる。

膝関節は1軸の運動軸を有する関節として、屈曲と伸展の運動のみ有するとされているが、実際には内旋・外旋と内転・外転を加えた3軸の運動軸を有し、様々な関節機構により可動性と支持性を両立させている。この関節機構の異常は運動の自由度の増加につながり、疼痛や関節機能異常の原因となるため、膝関節の三次元運動の解析は膝関節機能の維持・改善のためには必要不可欠な評価であると考えられる。近年、膝関節の3軸の運動はAndriacchiらが考案したPoint Cluster法(PC法)を用いることにより明らかにされているが²⁾、貼付する反射マーカは25個と多く、解析プログラムは未だ一般化されていない。そこで、本研究

では6個という少ない数の反射マーカ―と一般的な解析プログラミングソフトウェアを用いて、膝関節の三次元運動を解析する方法を考案するとともに、安価な計測機器である角速度計を用いたより簡易な膝関節の三次元運動解析を試みた。

その結果、研究1、研究2、より規定した運動角度と解析角度が一致したことから、Andriacchiらが考案した25個の反射マーカ―を用いたPC法を用いなくても、6個という少ない数の反射マーカ―と一般的な解析プログラミングソフトウェアでも膝関節の三次元運動を解析できることが証明できた。また、研究3、より膝関節の運動には、自動伸展運動に伴って内転運動と内外旋運動も生じていることが確認でき、膝関節は3軸の運動軸を有することが証明できた。膝関節の伸展運動には、屈曲位から伸展する際の最終伸展約30°の範囲で見られる下腿の外旋運動であるScrew-Home Movementが生じることが知られており、近年の三次元動作解析手法によるScrew-Home Movementの解析では、外旋運動だけでなく、内旋運動も生じることが報告されている²⁾。このことは今回の我々の研究結果と合致し、今回の我々の簡便な手法によって生体の膝関節運動の解析が可能であることが明らかとなった。

一方、研究4、では、膝関節モデルと骨標本において3軸角速度は3軸に変位を認め、解析角度と角速度の運動方向は一致した。これらの研究は規定した2軸の他動運動を実験者の手動にて行ったが、誤差として生じた内・外転運動をも計測していた。しかし研究3、の対象に対しては、回旋運動の一部に解析角度と角速度の運動方向に不一致を認めた。その原因として、角速度計は速度変化が大きい動きには反応するが、速度変化が小さい緩やかな動きには反応しにくいことから、滑らかな関節運動を有する健常者では、その動きを捉えることができなかったものと考えられた。これらのことから、安価な計測機器である角速度計を用いても、膝関節の三次元運動の運動解析を行うことができる可能性はあるが、そのためには、膝関節運動に異常を来した被験者を対象とした研究が必要であると考えられた。

【参考・引用文献】

- 1) I.A.Kapandji, 荻島秀男監訳：カパンディ関節の生理学 下肢. 66-149.1996.
- 2) 石井慎一郎, 山本澄子：非荷重時の膝関節自動伸展運動におけるスクリューホームムーブメントの動態解析. 理学療法科学, 23: 11-16, 2008.