

多脚杖の力学特性に関する研究

山下 進^{*1}, 大川 貴裕^{*2}, 高谷 哲平^{*2}, 荒川 直輝^{*2}, 大森 良和^{*2},
那須 裕規^{*1}, 田中 繁^{*3}, 小林 勇也^{*3}, 菊地 義信^{*3}

A Study on Mechanical Properties of Walking Sticks with Three or More Legs

Susumu YAMASHITA, Takahiro OKAWA, Teppei KOHYA,
Naoki ARAKAWA, Yoshikazu OHMORI, Yuki NASU,
Shigeru TANAKA, Yuya KOBAYASHI, Yoshinobu KIKUCHI

In order to clarify the mechanical characteristics of the walking sticks with three or more legs, which is one of the assistive product for walking, actual use measurement and static load test using an arm robot is conducted. Specifically, we investigated how the axial force and bending moment change depending on the type of cane and the road surface. As a result, the mechanical properties according to the measurement conditions were clarified.

KEYWORDS : Walking Sticks with Three or More Legs, Strain Gage, Arm Robot

1. はじめに

歩行補助具の一つである多脚杖は、一点杖よりも安定性が高く、筋力が低下した高齢者にとって有効な福祉機器である^{1),2)}。しかし問題点も多く、3ないし4本の杖先がすべて床に着地していないと不安定になり、転倒してしまう危険性もあり、実際に転倒事故の報告もいくつかされている。現に例えば四脚杖の場合、4点を同時に着地させて使用することはほとんどない。図1に代表的な多脚杖の写真と、各部の名称を示す。

また多脚杖にはISO(国際標準化機構)³⁾の定める基準は存在するものの、JIS(日本工業規格)基準が存在しないため、製造メーカーは、ISO基準を参考にするか、独自基準に基づいて設計・製作を

行っているのが現状である。

このようなことから、高齢者が安心して使用できる安全性を保障するために、日本国内における共通の基準を策定することが必要となっている⁴⁾。

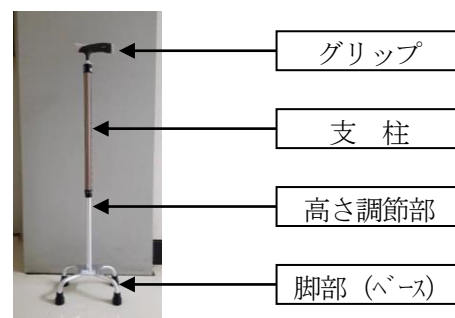


図1 多脚杖と各部の名称

*1 機械工学科(Dept. of Mechanical Engineering), E-mail: syama@oyama-ct.ac.jp

*2 機械工学科卒業生

*3 株式会社 福祉用具総合評価センター(Comprehensive Evaluation Center of Assistive Products, Inc.)

2. 研究の目的

多脚杖の安全性を保障するには、その力学特性（軸力、曲げモーメントなど）を明らかにしなくてはならない。本研究では、おもに学生を対象とした実使用計測とアームロボットを使用した静荷重試験を行い、計測結果から杖の種類や路面の状態が、力学特性に与える影響について考察することを目的としている。なお、本研究は株式会社福祉用具総合評価センターとの共同研究である。

3. 計測方法

3. 1 使用した機器類と多脚杖

計測に使用した機器類を以下に示す。

- ①ひずみゲージ 共和電業
KFGS-5-350-C1-23 L3 (図2-1)
- ②データロガー GRAPHTEC
midi LOGGER GL240 (図2-2)
- ③計測データ解析ソフト GRAPHTEC
GL100_240_840-APS
- ④アンプ 自作 (CECAP) (図2-3)
- ⑤天秤型荷重負荷装置 自作 (図2-4)
・高炭素鋼製自作 耐荷重 100kg
・自重 31kg
- ⑥アームロボット 安川電機
YR-UP50-A0 (図2-5)
- ⑦フォースゲージ イマダ
ZTA-5000N (図2-6)



図2-1 ひずみゲージ



図2-2 データロガー



図2-3 アンプ



図2-4 荷重負荷装置



図2-5 アームロボット

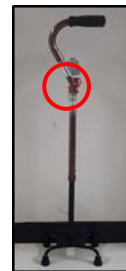


図2-6 フォースゲージ

また計測に使用した多脚杖は形やベース部分の大きさによって分類し、図3に示すような5種類を選定した。



| | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| T 型 base 大 [TL] | T 型 base 小 [TS] | S 型 base 大 [SL] |
|--------------------|--------------------|--------------------|



S 型
base 小 [SS]



二段型
[DG]

図3 選定した多脚杖と識別記号

3. 2 計測方法

ひずみゲージを支柱部に接着した杖を図4のようにアンプに接続する。アンプと杖を接続するコネクタの台座は3DCADでオリジナル品を設計し、3Dプリンタで製作した。アンプからは杖のひずみと比例した電圧が出力され、その電圧はデータロガーで計測、記録する。図5に測定システムの概略を示す。計測に先立ち、この出力電圧と実際に杖に作用している軸力と曲げモーメントとの関係を調べておく校正作業が必要となる¹⁾。図6

は曲げモーメントの校正の様子，図7は軸力の校正の様子である．本研究においては，X軸・Y軸の曲げモーメント，および軸力の3チャンネルの計測を行うこととする．なお，計測場所は図3の○印で示した場所とした．ここで図8に示すように，被験者が右手に杖を持った際に，進行方向と平行な方向の曲げモーメントをX軸，進行方向と垂直な方向をY軸と定義した．X軸は進行方向と同じ方向を正，Y軸は被験者側ではない方向，すなわち被験者から見て右方向を正とした．軸力に関しては，杖を使用する際に作用する軸力が常に圧縮方向であるから，圧縮を正と定義した．以降，軸力と曲げモーメントの数値は以上の定義に基づいて符号を付することとする．

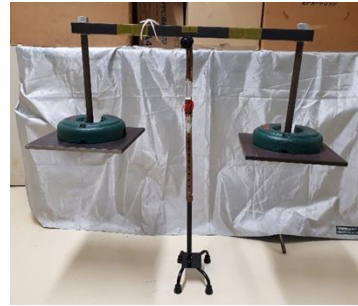


図7 軸力の校正



図4 計測用杖とアンプの接続

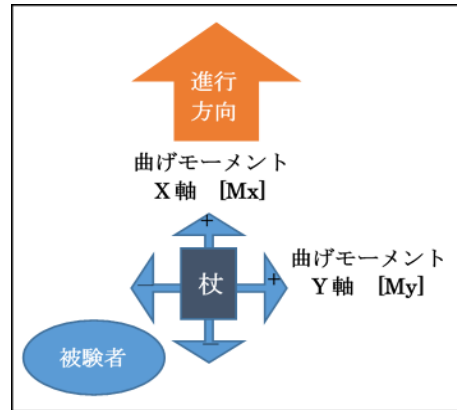


図8 曲げモーメントの定義

校正作業によって得られた，アンプ出力電圧と軸力・曲げモーメントの換算式を表1に示す．T型は支柱部が共通なため，ベースの大小に関わらず同じ換算式を用いる．表中の係数は，軸力[N]および曲げモーメント[Nm]が，アンプ出力電圧[V]の係数倍であることを示している．

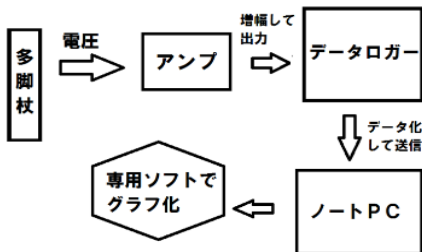


図5 測定システム図



図6 曲げモーメントの校正

表1 軸力・曲げモーメントの校正

| 杖種別 | 軸力 係数 | 曲げモーメント | |
|------------|----------|---------|--------|
| | | 軸 | 係数 |
| T型 | 1693.8 | X | 62.521 |
| | | Y | 64.328 |
| S型 ベース小 | 2016.4 | X | 68.545 |
| | | Y | 73.216 |
| S型 ベース大 | 1767.8 | X | 70.855 |
| | | Y | 72.627 |
| 二段型 | 1813.2 | X | 35.906 |
| | | Y | 36.006 |

3. 2. 1 実使用計測

実使用計測では、本校敷地内の4路面で実際に被験者が杖を使用し、計測を行った。同条件の試行回数はP,Dは3回、RU,RD,SU,SDは5回とした。計測に際して設定した条件を表2に示す。また、各計測路面の概観を図9に示す。

表2 実使用計測の計測条件

| | | | |
|---------|--------------|----|----------------------------|
| 被験者身長 | 173cm | | |
| 被験者体重 | 71kg | | |
| 被験者年齢 | 20歳 | | |
| サンプリグ周期 | 20Hz | | |
| 計測有効数字 | 小数点以下3桁 | | |
| 歩行距離 | 10m (階段は10段) | | |
| 計測路面 | 路面 | 略号 | 場所 |
| | 平地 | P | 機械科棟3階廊下 |
| | 悪路 | D | テニスコート西砂利敷 |
| | 斜路上り | RU | バイク駐輪場南斜面 |
| | 斜路下り | RD | |
| | 階段上り | SU | 機械科棟階段 2階上踊り場から 3階まで |
| | 階段下り | SD | |



図9 計測路面の概観

本研究の実使用計測では、実際の杖の使用例と似た環境で計測を行うため、

- (1) 先に2本の脚で路面を突く
- (2) 残り2本の脚が接地し4本の脚で路面を突く
- (3) 先に路面を突いた2本の脚が離れ、2本の脚の

みが接地するという3つの段階を踏むように杖を突いて計測を行った。図10は実使用計測の様子を示している。

計測の際、各杖はISOの試験方法を参考に、調整可能な最大の長さに設定して計測を行った。また図10のように、被験者が杖を突き、補助者が後ろから測定機器(アンプ、データロガー)を持って随行するという形式をとった。

階段における計測の際、SLの杖に関しては脚部面積の大きさから階段の段に脚が収まりきらないということがあった。計測を行うには脚を踏み外すなどの危険も予想されたことから、階段におけるSLの杖の計測は行わなかった。



図10 実使用計測の様子

3. 2. 2 アームロボットによる計測

アームロボットを使用した静的荷重試験について述べる。ISOの規格には、 $3.0 \pm 0.2^\circ$ 傾けた杖に $1000N \pm 2\%$ の荷重を負荷し、その結果使用者に危害がないこと、割れなどが無いこと、という規定がある。しかし、鉛直下向きから傾いた荷重を作り出すには特別な装置を必要とし、試験の難化を招きかねない。試験が難化すれば、多脚杖を開発するメーカーは簡単に試験を行うことができず、開発が滞ってしまう。

そこで、より簡単に正確な試験を行えるよう、鉛直下向きの荷重で同様の力学的効果が得られる方法を検討した。本研究においては、

- (1) 水平面に置いた杖に鉛直から 3° 傾いた荷重を負荷する
- (2) 3° 傾いた台の上に置いた杖に鉛直下向きの荷重を負荷する

という2通りの試験方法を試行し、両者が力学的に同じ効果を示すかどうかを確認した。

図11は、本研究で使用することを目的に製作した角度可変式傾斜台である。板にはA5052アル

ミニウム合金を使用し、1000Nの荷重にも耐える強度を有しながら持ち運びができる軽さを実現した。

また並行して、荷重点の位置による力学特性への影響も検討した。具体的には、支柱の延長線上(以下、「軸上」と呼称する)に荷重をかけるのと、グリップの端部に荷重をかけるのとでは、どのような違いが出るのかという点である。

表3に、本試験における計測条件をまとめた。なお同条件の試行回数は3回とした。

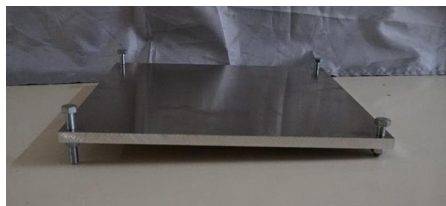


図1.1 角度可変式傾斜台

表3 静的荷重試験の計測条件

| 計測面 | 水平面上 | | 傾斜台上 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 荷重点 | 軸上 | グリップ端 | 軸上 | グリップ端 |
| 荷重 | 1000N | 500N | 1000N | 500N |

軸上での設定荷重である1000Nは、ISOに準拠するものである。当初計画ではグリップ端にも軸上と同様に1000Nの荷重を負荷する予定であったが、予備実験を行った結果、グリップ部に1000Nの荷重を負荷すると、グリップ部が大きく変形し、杖が破壊される危険があったため、実験器具である杖の保護のために破壊には至らない荷重の500Nを負荷するという設定とした。

図1.2に静的荷重試験の様子を示す。本試験では、アームロボットの腕部分にフォースゲージを取り付けた。荷重値をモニタリングしながら所定の荷重になるようにアームロボットを操作し、試験を行った。

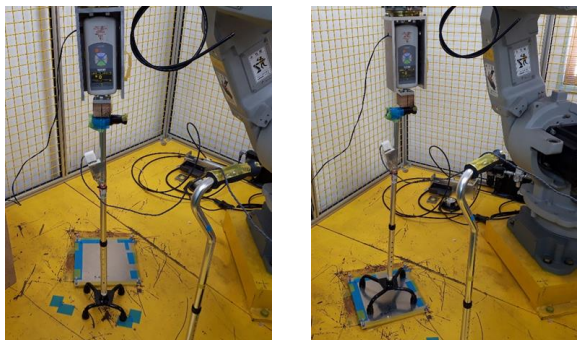


図1.2 静的荷重試験の様子

4. 計測結果と考察

4.1 実使用計測

実使用計測結果の一例を示す。図1.3、図1.4はそれぞれ平地における杖[TL]を使用したときの曲げモーメント、軸力の時間的変化を示したグラフである。多少のばらつきはあるが、ほぼ一定の周期で変化していることがわかる。

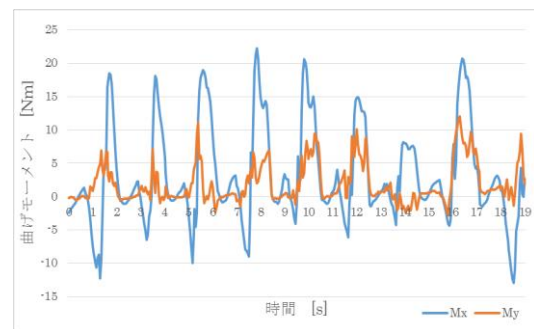


図1.3 平地・TL・曲げモーメントの時間的変化

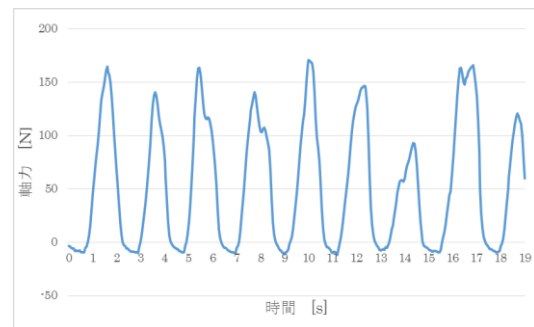


図1.4 平地・TL・軸力の時間的変化

本研究では、曲げモーメントと軸力の杖別・路面別の力学特性の特徴の評価をするために、波形のピーク値の平均を算出して比較することとした。各杖、各路面における波形のピーク値平均をまとめたものを表4に示す。なお平均を算出する際には、X軸の曲げモーメント[Mx]と、軸力[F]について算出を行った。X軸の曲げモーメントに関しては、プラスのピーク値[Mx(+)]とマイナスのピーク値[Mx(-)]のそれぞれについて平均を求めた。Y軸の曲げモーメントに関しては、杖別・路面別の違いがあまりよく現れなかったため割愛した。

表4から同じ形状の杖、すなわちT型同士、S型同士を比較してみると、ほぼすべての条件下においてベースが大きいもののほうが曲げモーメン

トが大きいという結果が得られた。ベースが大きいとその分モーメントの腕の長さが大きくなるため、曲げモーメントが大きくなったと考えられる。

同表より軸力の大きさを比較してみると、各路面で一番大きな軸力を示したのは階段下りを除き、二段型の杖であるという点、平地・悪路・階段上りの各路面では SL の杖の軸力が一番小さいという点が特徴として挙げられる。

今回の実使用計測では、前述の通り各杖が一番長い状態で計測を行った。通常、杖は使用者の身長に合わせて伸縮させるが、本研究ではそのようなフィッティング作業は一切行わず計測を行った。計測の際の被験者の使用感として、SL の杖は長すぎて使いづらく、思うように体重を預けられない、というものがあつた。軸力の大きさについては、杖と使用者との相性が大きな要因となっている可能性が考えられる。

同じ杖について路面を替えて曲げモーメントについて比較してみると、斜路上りは極端にプラス側に、斜路下りはマイナス側に荷重が傾いている傾向にある。その各路面の曲げモーメントの絶対値を比較してみると、斜路下りのほうが大きい値を示していた。軸力については、杖によって上りのほうが大きかったり、下りのほうが大きかったりしている。

斜路は平地と比べて歩行時の安定感に欠ける。それ故に体重を杖にかけがちになり、その結果前述のような結果が得られたと考えられる。また、上りよりも下りの方が使用者は不安感を覚え、体重を杖にかけようになる。下りの方が曲げモーメントの絶対値が大きかったことは、このような原因があると考えられる。軸力については目立った傾向が得られなかったことに関しては、路面が傾斜しているため、かけられた体重がおもに杖を曲げる方向に作用しているためだと考えられる。

また、全体的に軸力の値を見てみると、概ね 100~350N の範囲内にあることがわかる。被験者の体重が表 2 から 71kg であることから計算をすると、体重の約 15~50% が杖にかけられていることがわかる。

本研究における実使用計測では、目立った傾向が得られた部分が多々あつたが、反して目立った傾向が得られなかった箇所も存在した。これは今回の計測の被験者が健常者の若い男性であり、杖を日常的に使用していないことから来していることも考えられる。より正確な力学特性の傾向を得るのであれば、杖を日常的に使用しているユーザを被験者とし、より多数の被験者の実験結果を比較

してみる必要があると考えられる。また杖を日常的に使用しているユーザによる計測を行うと、今回の計測結果とは異なる結果が出現する可能性も十分にある。

今回使用した杖は、同じメーカー製の T 型の 2 つの杖を除いて共通部品を有する杖ではない、異なるメーカーによるものであつた。形状による力学特性の変化についてより正確な比較を行うには、例えば S 型なら脚部のみを付け替えることで計測が可能であるなど、分離する上部と下部のどちらか

表 4 実使用計測の計測結果 (ピーク値平均)

| 路面 | 杖 | Mx(+) [Nm] | Mx(-) [Nm] | F [N] |
|----------------|----|---------------|---------------|----------|
| 平地 P | TL | 16.274 | -7.628 | 145 |
| | TS | 10.562 | -10.596 | 148 |
| | SL | 20.580 | -18.476 | 130 |
| | SS | 18.749 | -6.964 | 192 |
| | DG | 14.945 | -10.729 | 345 |
| 悪路 D | TL | 14.794 | -10.768 | 154 |
| | TS | 7.716 | -11.338 | 162 |
| | SL | 8.220 | -20.540 | 125 |
| | SS | 2.012 | -18.072 | 219 |
| | DG | 9.505 | -9.824 | 326 |
| 斜路 上り RU | TL | 16.912 | -7.284 | 175 |
| | TS | 11.022 | -9.173 | 175 |
| | SL | 26.702 | -9.596 | 143 |
| | SS | 15.583 | -6.729 | 175 |
| | DG | 14.029 | -11.028 | 343 |
| 斜路 下り RD | TL | 9.110 | -26.562 | 209 |
| | TS | 2.868 | -16.388 | 152 |
| | SL | 2.787 | -38.651 | 172 |
| | SS | 1.302 | -33.816 | 142 |
| | DG | 4.416 | -19.964 | 266 |
| 階段 上り SU | TL | 5.627 | -13.292 | 211 |
| | TS | 3.751 | -8.340 | 193 |
| | SL | N/A | N/A | N/A |
| | SS | 2.673 | -21.660 | 211 |
| | DG | 1.817 | -4.424 | 267 |
| 階段 下り SD | TL | 1.863 | -21.870 | 160 |
| | TS | 1.763 | -14.130 | 173 |
| | SL | N/A | N/A | N/A |
| | SS | 0.932 | -16.135 | 113 |
| | DG | 0.969 | -11.993 | 79 |

のみを変化させることで比較実験ができるような杖の選定を行うべきであると考えた。しかし現状、このような選定を行うほどの商品が市場に存在しないのも事実であり、より活発な多脚杖の研究開発が待たれる。

4. 2 アームロボットによる計測

表5は、アームロボットを使用して行った静的荷重試験の結果を示している。

表5 静的荷重試験結果

| 杖 | 計測面 | 荷重点 | Mx [Nm] | My [Nm] | F [N] |
|----|------|-------|---------|---------|-------|
| TL | 傾斜面上 | 軸上 | -15.464 | 3.409 | 1069 |
| | | グリップ端 | -46.474 | -3.967 | 544 |
| | 水平面上 | 軸上 | -16.714 | 2.423 | 986 |
| | | グリップ端 | -47.412 | -3.945 | 522 |
| TS | 傾斜面上 | 軸上 | -3.084 | 5.875 | 1012 |
| | | グリップ端 | -45.036 | -0.493 | 555 |
| | 水平面上 | 軸上 | -12.963 | 3.238 | 1057 |
| | | グリップ端 | -47.620 | -2.444 | 579 |
| SL | 傾斜面上 | 軸上 | 2.976 | -0.847 | 1001 |
| | | グリップ端 | -47.237 | -5.471 | 551 |
| | 水平面上 | 軸上 | 4.676 | -1.767 | 992 |
| | | グリップ端 | -51.086 | -6.101 | 570 |
| SS | 傾斜面上 | 軸上 | 1.188 | -0.342 | 1114 |
| | | グリップ端 | -50.746 | -0.464 | 458 |
| | 水平面上 | 軸上 | -0.960 | 3.319 | 1073 |
| | | グリップ端 | -51.500 | 1.416 | 448 |
| DG | 傾斜面上 | 軸上 | -6.367 | 1.224 | 1206 |
| | | グリップ端 | -14.674 | -0.684 | 453 |
| | 水平面上 | 軸上 | -6.702 | 2.796 | 1198 |
| | | グリップ端 | -13.788 | 0.480 | 445 |

表5を見るとわかるように、多少の誤差はあるものの、2通りの試験(杖の置き方)においてほぼ同じ力学的効果を示すことが検証できた。また、負荷した荷重の値とアンプ出力電圧から算出した軸力の値がほぼ同じ値を示すことも確認できた。

当初の予想通り、「水平面に置いた杖に鉛直から3°傾いた荷重を負荷する」という特別な装置を必要とする試験ではなく、「3°傾いた台の上に置いた杖に鉛直下向きの荷重を負荷する」という簡単な台のみを用意すればよい試験でも、十分ISOに準拠する試験が行えることが確認できた。

4. 3 計測中に発生した問題点等について

本研究において使用したアンプは、計測の途中で出力電圧の基準点、すなわち±0.000Vの点がずれてしまうことが多々あり、その都度基準点調整を行っていた。検証の結果、この基準点のずれはアンプから伸びているコードの先端のコネクタと、杖に取り付けられているコネクタが動くことと出現することがわかった。このコネクタの微小な接触抵抗の変化が、基準点のずれを発生させていると考えられる。この問題を解決するには、何らかの方法でコネクタを強固に固定し、接触抵抗の変化を生じさせないようにすることが必要であると考えられる。

本研究における実使用計測において、日中に計測を行った際に、基準点のずれが修正しきれないほど発生したことがあった。この問題について検証を行った結果、この現象は杖が日光に当たる環境下で発生するということがわかった。太陽の熱による微小な杖の不同膨張により、杖にひずみが生じ、それにより基準点のずれが発生し続けたのではないかと考えられる。

4. 4 高齢者を対象とした計測

多脚杖の利用者は、多くが高齢者である。日常生活の中で多脚杖を使用している高齢者14名に協力をしていただき、計測を行った。

この計測では、図15に示すように、ひずみゲージを杖の支柱部分とベース部分4か所(#1~#4)に貼り付け、平坦な床を6m歩いていただいた。図16は計測の様子を示している。

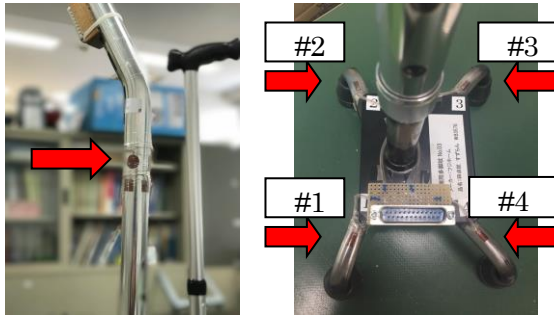


図 15 ひずみゲージの貼り付け部



図 16 計測の様子

図 17 は、身長 150cm、体重 38kg の女性の結果を示している。

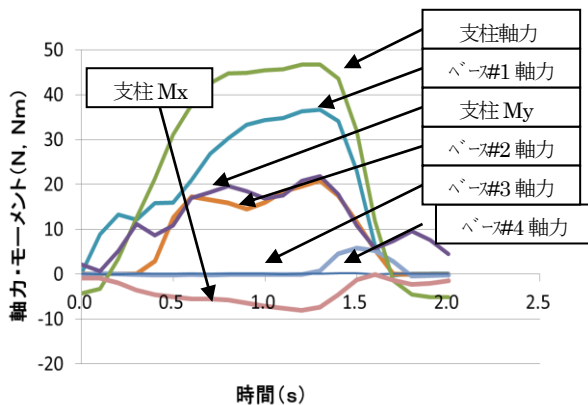


図 17 一突きしたときの計測結果

この結果から、4点同時に床に接地していないことが明らかである。また当然のことながら、支柱の軸力が最も大きい。さらにベース部の脚#4には、ほとんど荷重が作用していないことがわかる。杖の使い方は人それぞれであるので、必ずしもこの結果がすべてではないが、モーメントや軸力の定性的な傾向は把握できると考える。

5. おわりに

本研究を通して、すでに市販されている多脚杖の力学特性に加え、実際に杖を使用する際に杖に作用する軸力と曲げモーメントを計測することができた。ユーザが安全に多脚杖を使用できる必要十分な数値を検討する材料ができたものとする。なお、本研究は平成 29 年度および平成 30 年度卒業研究の内容を一部編集、加筆したものである。

参考文献

- 1) 高谷哲平：多脚杖の力学特性に関する研究，平成 30 年度小山高専卒業論文 (2019)。
- 2) 大川貴裕：多脚杖の安全性に関する研究，平成 29 年度小山高専卒業論文 (2018)。
- 3) ISO 11334-4 : Walking aids manipulated by one arm- Requirements and test methods- Part4: Walking sticks with three or more legs, International Organization for Standardization (1999)。
- 4) 株式会社福祉用具総合評価センター：「多脚つえ (多点つえ) の JIS 規格作成のための調査及び試験方法の開発検証」2017 年度 報告書 (2017)。

【受理年月日 2019 年 9 月 13 日】