

氏名(本籍)	伊澤幸甫(東京都)
学位の種類	博士(獣医学)
学位記番号	甲第169号
学位授与年月日	令和3年9月30日
学位授与の要件	学位規則第3条第2項該当
学位論文題名	四肢荷重分散測定装置を用いた犬の重心(Center of Mass: CoM)および後肢機能評価の定量化に関する研究
論文審査委員	(主査)折戸謙介 (副査)村上賢 藤田幸弘

## 論文内容の要旨

### 【背景】

フォースプレート (Force Plate; FP) は、一般的に犬の整形外科疾患に対する歩行分析を目的に使用される。歩行中の最大垂直床反力や力積の垂直成分は、薬物治療または整形外科手術後の回復を評価するために使用される動的パラメータである。これらの動的パラメータは四肢の状態の定量化には有用であるが、歩行様式や速度により分析の変動性をもたらす可能性がある。そこで、静的姿勢において荷重分散から計算される重心 (Center of Mass; CoM) や左右の体重バランスが、安定した肢障害評価の定量化パラメータになると仮説を立てた。

本研究では、CoM と肢障害との関連性に焦点を当て、犬の CoM 評価の有用性を検討し、臨床応用のための定量化を目的とした。第一章では、四肢荷重分散測定装置での犬の静的姿勢の CoM 測定方法を確立し、前肢および後肢感覚刺激による CoM の変化を評価した。第二章では、後肢重負荷時および後肢落下時の後肢バランスを定量化し、これらの後肢感覚刺激による変化を観察した。第三章では、犬の橈骨尺骨骨折および前十字靭帯断裂症例において、橈骨尺骨骨折症例に対しては CoM を、前十字靭帯断裂症例に対しては CoM と後肢バランスをそれぞれ経時的に測定した。これらの結果より CoM ならびに後肢バランスの静的パラメータが、小動物臨床における機能評価系としての有用性を示す可能性について考察した。

### 第一章 静的姿勢の CoM 測定法の確立と前肢および後肢感覚刺激による CoM 変化

#### 【材料および方法】

健常ビーグル犬雄 6 頭を使用した。またテストフロア上に 4 つの FP を設置し、各肢に 1 つずつ対応するように四肢荷重分散測定装置を作成した。

犬が各 FP 上で自然起立位を維持している状態をオリジナルポジションと定義した。試験者は 1 肢ずつ挙げ、オリジナルポジション、右前肢 (RF) 挙上、左前肢 (LF) 挙上、右後肢 (RH) 挙上、左後肢 (LH) 挙上の 5 つの静的姿勢からデータを得た。右前肢および左後肢にそれぞれ可逆性感覚刺激を与え、同様に 5 つの静的姿勢からデータを得た。右前肢および左後肢に対する可逆性感覚刺激による 5 つの静的姿勢に関する CoM の X および Y 軸成分の変化は、Bonferroni の多重比較検定にて解析し、有意水準は 5% とした。

### 【結果と考察】

全ての犬において、各静的姿勢での CoM 測定が可能であった。オリジナルポジションの CoM は、体の中心より前方にあり、左右のバランスは均等であることを示した。RF または LF 挙上時には、CoM はそれぞれ左後方または右後方に移動した。RH または LH 挙上時には、CoM はそれぞれ左前方または右前方に移動した。RF 感覚刺激では、オリジナルポジションおよび各肢挙上時の CoM 変化が大きく認められた。しかし、LH 感覚刺激ではオリジナルポジションおよび各肢挙上時の CoM 変化は認められるものの、小さかった。

過去の報告では、前肢への体重負荷が跛行や疼痛の顕在化に関与していることが考えられており、静的姿勢による CoM 測定は前肢への疼痛評価において特に有用であると結論づけた。

## 第二章 後肢負荷時および後肢落下時の後肢バランスの後肢感覚刺激による変化

### 【背景】

第一章において、前肢への感覚刺激はオリジナルポジションおよび各肢挙上で明らかな CoM 変化が認められたが、後肢への感覚刺激による CoM 変化はわずかであった。そこで我々は、後肢感覚刺激の影響を顕在化可能な試験方法の確立を目指し、健常ビーグル犬雄 6 頭および既存の装置を使用して以下の 2 つの実験を実施した。

### 【材料および方法】

#### 1. 後肢負荷試験による後肢バランスの評価

オリジナルポジションにて試験者は犬の両前肢を持ち、後肢の負荷が体重の 60% を超えるまで 10 秒かけて持ち上げ、持ち上げ前後の後肢荷重を測定した。

#### 2. 後肢落下試験による後肢バランスの評価

オリジナルポジションにて、試験者は犬の腰を持ち、両後肢を約 10cm の高さに持ち上げ、FP に垂直に落下させ、落下前後の後肢荷重を測定した。

両試験において、LH における可逆性感覚刺激による後肢荷重の X 軸および Y 軸成分の差は、Mann-Whitney の U 検定を用いて分析し、有意水準は 5%とした。

### 【結果と考察】

後肢負荷試験においてコントロールでは、両前肢持ち上げ前後の X 軸成分の変化は認められなかった。LH 感覚刺激では、体重の 60%の負荷が後肢に加わった時点で X 軸成分の変化が認められ、後肢の体重は RH に向かって有意に偏っていた。

後肢落下試験においてコントロールでは、落下前後の X 軸成分の変化は認められなかった。LH 感覚刺激では、落下直後に LH を踏み直す動作が認められ、踏み直り後の X 軸成分はコントロールと比較して有意に RH に向かって偏っていた。踏み直す動作は、後肢バランスを安定化させるための適応反応の一種であると推察された。

これらの後肢負荷試験と後肢落下試験は、静的姿勢では評価することが困難な後肢異常の検出および後肢機能の定量化が可能であった。後肢の異常時には、静的姿勢による CoM 評価に加えて後肢負荷試験および後肢落下試験を組み合わせることで後肢バランスの定量化が可能となると結論づけた。

## 第三章 犬の橈骨尺骨骨折および前十字靭帯断裂症例における CoM・後肢バランスの時間的推移

### 【背景】

第一章および第二章で実施した前肢感覚刺激および後肢感覚刺激による CoM 変化が、臨床症例に応用可能かを検討した。前肢の感覚刺激に対して、小型犬において一般的な前肢の整形外科疾患である橈骨尺骨骨折を対象にした。また、後肢の感覚刺激に対しては、後肢において一般的な疾患である前十字靭帯断裂を対象とした。右側橈骨尺骨骨折症例に対して、オリジナルポジションによる CoM 測定を手術前から手術後に一定期間実施した。左側前十字靭帯断裂症例に対しては、上記に加えて後肢負荷試験および後肢落下試験による測定を追加し、評価・解析した。

### 【材料および方法】

#### 1. 橈骨尺骨骨折症例

2020 年 4 月から 2020 年 10 月に DVMs どうぶつ医療センター横浜 整形外科（神奈川県）に紹介受診した症例のうち右側橈骨尺骨骨折と診断し、Locking Compression Plate (LCP) にて整復固定を実施し、手術後 8 週間の診察終了まで経過観察が可能であった 5kg 以下の症例 16 例を対象とした。対象症例は、右側橈骨尺骨骨折以外の罹患はなく、その他の整形外科領域に関する既往歴はない犬とした。オリジナルポジションの測定は、既存の装置を用いて、手術前、手術後 2, 4, 8 週の時点で実施し、それぞれのデータを比較・検討した。

## 2. 前十字靭帯断裂症例

上記期間・同施設にて、左側前十字靭帯断裂と診断し、Tibial Plateau Leveling Osteotomy (TPLO法)にて制動術を実施し、手術後8週の診察終了まで経過観察が可能であった15kg以下の症例13例を対象とした。なお症例は、左前十字靭帯断裂以外の罹患はなく、その他の整形外科領域に関する既往歴はない犬を使用した。オリジナルポジションの測定ならびに後肢負荷試験および後肢落下試験は、既存の装置を用いて、手術前、手術後2, 4, 8週の時点で実施し、それぞれのデータを比較・検討した。

手術前、手術後2, 4, 8週間の時点において、右橈骨尺骨骨折症例および左前十字靭帯断裂症例に対するCoMのX軸およびY軸成分の差は、Bonferroniの多重比較検定を用いて分析し、有意水準は5%とした。

### 【結果と考察】

橈骨尺骨骨折症例に関するCoM変化は、手術後から時間経過に伴い、X成分は正中に向かって回復し、Y成分は手術後4週間以降に変化しない過程が認められた。このCoM変化は、橈骨尺骨骨折の治療の経過に密接に関連していることを示唆している。橈骨尺骨骨折に関する本検討では、CoM変化のみに着目しており、骨癒合過程の段階変化や体重に対する固定器具の大きさなどは考慮されていない。骨癒合過程の段階とCoM変化が相関性を示すことは臨床上重要であり、治療効果判定を行う上で有用であるといえる。

前十字靭帯断裂症例に関するCoM変化は、橈骨尺骨骨折の結果と異なり、時間経過に伴うX成分・Y成分の変化はともにわずかであった。このCoM変化は、後肢のCoMのみでの治療判定が前肢と比較してより困難であることを示しており、第一章での結果を裏付けることとなった。また手術後8週の時点では、CoMのX成分はほぼ中心に位置しているにも関わらず、後肢負荷試験および後肢落下試験において明確な左右バランスの差が認められた。これらの結果の相違は、後肢の治療過程がCoMに大きな変化を与えないが、後肢機能には明確な影響が生じていることを示唆している。本検討では、膝関節の疾患のみに着目しており、股関節や足根関節などの後肢の疾患あるいはその併発に関しては検討しておらず、本章の結果とは異なる変化をする可能性がある。また、手術前および手術後の前十字靭帯断裂に伴う骨関節炎の程度は評価・検討していない。これらの病態が後肢負荷試験および後肢落下試験の結果に影響を与える可能性も少なくないと推察される。

### 【総括】

本研究では、静的姿勢のCoMは前肢に障害を有する症例において、後肢バランスは後肢障害症例において機能評価に有用な定量的パラメータとなりうることを示唆された。本知見が犬種間あるいは疾患ごとにも一貫したデータ取得が可能であるかどうかは今後検証していく必要がある。CoMの測定および後肢負荷および落下試験に関して、臨床現場にて継続して実施していく予定である。

## 論文審査の結果の要旨

### 1. 論文内容

本研究では、実験犬（ビーグル）において、四肢起立時の重心や後肢左右バランスを計測・評価することで、小動物獣医整形外科における疼痛の定量化ができるか検討し、さらに実際の整形外科症例において、同計測・評価の有用性について検討している。

第一章では、ビーグルの健常状態および一肢に可逆的なわずかな痛みを与えた状態において、四肢起立時の重心と各一肢を挙上させた三肢での重心が、特に前肢疼痛評価に有用であることを見出した。第二章では、ビーグルの両前肢を実験者が持ち上げて後肢への負重を増加させた時、ならびに腰を把持して持ち上げ、後肢を落下させた時の後肢左右バランスにより、後肢の疼痛評価が可能であることを見出した。第三章では、右側橈骨尺骨骨折症例（前肢疼痛）および左側前十字靭帯断裂症例（後肢疼痛）に対して、術前・術後回復時に第一章、第二章で確立した評価方法を実施した。その結果、右側橈骨尺骨骨折症例では四肢起立時の重心が、左側前十字靭帯断裂症例では後肢負重増加時と後肢落下時の後肢左右バランスが疼痛の評価に有用であることを明らかにした。

本研究で疼痛評価の有用性を明らかにした、静的状態での四肢・三肢重心評価および後肢左右バランス評価は、整形外科疾患の病態だけでなく、手術の回復や薬効評価の客観的指標として応用可能であり、今後の小動物臨床整形外科領域の発展に貢献する有用なツールとなりうる。

### 2. 論文審査

#### 1) テーマの立て方

申請者は、整形外科を専門とする小動物臨床獣医師である。日常の診察、手術、術後回復の疼痛評価に主観的な部分が多く、また評価の精度の保証が難しいことから、より客観的で高精度の評価方法を模索していた。本研究ではこの課題を解決する目的で、明確なテーマが設定されている。

#### 2) 研究の背景

犬の小動物臨床整形外科領域では、手術後の回復や薬物の効果について、レントゲンや触診、飼主への問診などにより評価している。これらの評価法はいずれも主観的であり、数値として定量化することは難しい。解決策の1つとして、犬の歩様解析が行われている。プラットホームに設置されたフォースプレートにかかる荷重を数値化する方法であるが、フォースプレートを正確に踏むようにしたり、歩行速度を調節したりする必要がある。また緊張などで歩かない犬では測定自体が困難である。このようにフォースプレートを用いた歩様解析で得られる荷重の推移は、病態や術後回復、薬効の客観的な指標として有用であるものの、設備の大きさや計測に要する時間に課題がある。そこで申請者は、簡便で短時間に測定できる、起立時の各肢の荷重に着目し、その評価の有用性を実験犬を用いて検討し、さらに実際の小動物整形外科症例を用いて検討した。

### 3) 研究の方法

第一章では、荷重計を 4 つ配備したボードを作成し、その上にビーグルを起立させ静止状態で四肢の荷重を測定した。荷重計 4 つの値より重心を算出した。さらに一肢を実験者が把持して挙上し、三肢起立時の重心を算出した。この時に三肢の荷重の合計が体重と一致していること、即ち挙上する際に、実験者が体重を支えていないことを常に確認した。次に右前肢あるいは左後肢に可逆的疼痛を与え、その時の重心変化を算出した。

第二章では同じボードを使用し、後肢の荷重左右バランスに着目して実験を行った。ビーグルの起立時の両前肢を持ち上げて後肢の負重を増加させた時の後肢左右バランスを数値化した。また腰を持ち上げて落下させた時の後肢左右バランスも数値化した。

第三章では、小動物整形外科において、前肢疾患である右側橈骨尺骨骨折症例、後肢疾患である前十字靭帯断裂症例の手術前後に第一章、第二章で確立した静止状態の荷重評価法を実施した。

### 4) 研究の結果

第一章では、ビーグルがボード上に静止状態で起立した時に、重心が四肢の中心より前方にあること、各一肢を挙上させた三肢の状態では、重心が前後・左右共に挙上肢の反対側に移動することを、XY 軸の数値として表すことができた。また右前肢に可逆的な疼痛を与えた場合、重心が後方、左側に移動することを数値として表すことができた。

第二章では、左後肢に可逆的な疼痛を与えたビーグルにおいて、後肢の負重を増加させると後肢バランスが右方に移動すること、腰を持ち上げて落下させた際に踏み直りが観察され、その際の後肢バランスが右方に移動することを数値として表すことができた。

第三章では、右側橈骨尺骨骨折症例において重心が、後方、左側に確認され、術後の時間経過とともに前方、左右中心、即ち正常犬の重心に近づくことを XY 軸の数値として確認できた。また左前十字靭帯断裂症例において、後肢左右バランスは、後肢負重を増加させると右側に移動し、手術後の回復時期には左右中心に移動することを確認できた。踏み直り後の後肢左右バランスも同様であった。

適切な n 数で研究を実施し、適切に統計処理している。

### 5) 考察と結論

本研究では、犬の静止四肢起立時の重心および各一肢挙上三肢起立時の重心により、特に前肢の疼痛を定量化できることを明らかにした。また後肢疼痛は、両後肢への負重増加や踏み直り後の後肢左右バランスに着目することで、定量化できることを明らかにした。ビーグルを用いたこれらの成果をもとに、右側橈骨尺骨骨折症例および左側前十字靭帯断裂症例にて検討したところ、それぞれ四肢起立時の重心と左右後肢バランスにより、術前病態及び術後回復の評価が可能であった。

本研究で着目した静止時の重心および後肢左右バランスは、犬の自発的な行動や試験者によるリードを必要とせずに、安定して迅速に測定できること、また病態を正確に反映する指標として有用であ

ることが示唆された。今後の小動物整形外科領域における病態や手術回復、薬効の客観的指標として応用することで、本領域の発展に大きく寄与すると考えられる。

本論文では、過去の基礎・臨床研究をもとに、本研究の成果の有用性と **Limitation** を的確に評価している。

#### 6) 参考論文

本論文では、研究の背景や結果の考察、展望等について適切な内容の参考文献が適切に引用されている。

### 3. 審査結果

本論文の内容や専門的分野および外国語の学力と発表会での質疑応答に対する適切な対応を考慮すると、申請者は博士としての専門知識を十分に有することが認められ、本研究は獣医学上、また小動物臨床上意義ある業績として高く評価できることから、博士（獣医学）の学位を授与するのに相応しいと判定した。