



札幌医科大学学術機関リポジトリ *ikor*

SAPPORO MEDICAL UNIVERSITY INFORMATION AND KNOWLEDGE REPOSITORY

| | |
|------------------------|---|
| Title | 新たな小動物用重心動揺計の試作とその機器特性に関する検討 - 剛体および生体を用いた評価 - |
| Author(s) | 佐々木, 健史;小塚, 直樹;長峯, 隆;松山, 清治 |
| Citation | 札幌保健科学雑誌,第 2 号:45-55 |
| Issue Date | 2013 年 3 月 |
| DOI | 10.15114/sjhs.2.45 |
| Doc URL | http://ir.cc.sapmed.ac.jp/dspace/handle/123456789/5558 |
| Type | Journal Article |
| Additional Information | |
| File Information | n2186621X245.pdf |

- コンテンツの著作権は、執筆者、出版社等が有します。
- 利用については、著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲内で行ってください。
- 著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲を越える利用を行う場合には、著作権者の許諾を得てください。

原 著

新たな小動物用重心動揺計の試作とその機器特性に関する検討 — 剛体および生体を用いた評価 —

佐々木健史^{1,4)}、小塚直樹¹⁾、長峯 隆²⁾、松山清治^{3,4)}

¹⁾ 札幌医科大学保健医療学部理学療法学科

²⁾ 札幌医科大学医学部神経科学講座

³⁾ 札幌医科大学保健医療学部作業療法学科

⁴⁾ 札幌医科大学大学院保健医療学研究科 理学療法学・作業療法学専攻 (博士課程後期)

動物の動的姿勢調節能力の特徴を明らかにするには、姿勢反応時の重心変動を正確に捉える必要がある。我々は小動物の動的姿勢調節能力を精度よく評価するため、異なる角速度で床面 (以下、プレート) を傾斜させて姿勢外乱を与える新たな重心動揺計を試作した。本研究ではこの重心動揺計の機器特性 (測定精度、再現性) の評価を目的とした。初めに、重量の異なる3種の金属製おもり (200, 300, 400g) を用いてプレートを傾斜させた際の重心変動を比較した。更に400gのおもりをプレート上の異なる位置に載せ、各々の位置での重心変動を比較した。この結果、安定した重心測定を得るには300g以上の重量でプレート中央部に配置して測定することが必要であった。またラットを用いたところ、プレートの傾斜に際しておもりと異なる特有の重心変動パターンが観察された。これは姿勢外乱に対する生体の動的姿勢反応と推測された。以上より、本重心動揺計は小動物の動的姿勢調節の評価に有用であると考えられた。

キーワード : 重心動揺計、ラット、姿勢調節、姿勢外乱

Trial of Novel Posturography Technique for Small Animals Including Rats and Examination of Its Instrumental Properties

Takeshi SASAKI^{1,4)}, Naoki KOZUKA¹⁾, Takashi NAGAMINE²⁾, Kiyoji MATSUYAMA^{3,4)}

¹⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences, Sapporo Medical University

²⁾ Department of Systems Neuroscience, School of Medicine, Sapporo Medical University

³⁾ Department of Occupational Therapy, Faculty of Health Sciences, Sapporo Medical University

⁴⁾ Graduate School of Health Sciences, Sapporo Medical University

In order to clarify the characteristics of dynamic postural control in animals, it is important to precisely measure the changes in their center of pressure (COP) in response to postural disturbances. We developed a novel posturography technique to measure changes in the COP of small animals, including rats, during inclination (0-30 degrees) of a floor surface (table plate) at angular velocities of 5, 10, and 15 degrees per second. This study aimed to examine the instrumental properties of this posturography technique, including its measurement accuracy and reproducibility for COP measurements in small animals. First, The COP changes of 3 metal weights (200, 300, and 400 g) were compared during inclination of the table plate at 3 different velocities. The COP changes at 200 g were dissimilar to those at the others. Then, the COP changes were compared when the 400-g weight was placed at various positions on the table plate. Stable measurements were obtained when the weight was placed within 10 cm from the center of the table plate. Lastly, the COP changes in a rat (male; weight, 400 g, SD) were measured during inclination of the table plate. These changes differed from those observed for the metal weights, and the rat showed a unique pattern of COP changes, suggesting dynamic postural responses. These results indicate that this posturography technique is a useful approach for measuring dynamic postural adjustment in small animals.

Key words : Posturography, Rat, Postural control, Postural disturbance

Sapporo J. Health Sci. 2:45-55(2013)

I. はじめに

姿勢とは一般的に頭部、体幹、四肢などの身体の相対的位置を指す。姿勢の調節には空間内で身体位置を制御するために姿勢を定位し、且つ安定させるという目的が含まれる¹⁾。また身体の安定性を維持するためには、随意的な動作時にみられる予測的な制御や不意の外乱に対する反動的な制御などが求められる²⁾。このような姿勢調節は運動実行に常に伴うことから³⁾、脳卒中などの脳損傷で重篤な運動機能障害を来した場合、運動機能の向上を目指す上で姿勢調節能力の向上も獲得することが必要不可欠である。したがって、脳損傷後の運動機能回復を目指す運動療法を主体とした治療的介入において、上肢の運動や歩行の獲得には早期から安定した姿勢調節能力の獲得が重要となる。

臨床において中枢神経損傷患者に対する運動機能回復を評価する上で、姿勢調節の特徴を的確に捉える客観的な評価が求められる。Horakら⁴⁾は、姿勢調節障害のタイプ分類に役立つシステマチックで且つ客観的な評価方法の必要性を指摘している。Garlandら⁵⁾も未だ脳損傷部位や障害の程度による影響を明確に示す有用な評価方法が未確立であると述べている。脳損傷後の姿勢調節障害に対する治療的介入の有効性を科学的に検証するためには、介入群と非介入群（対照群）の比較が必要となるが、このような比較は実際の臨床現場では倫理的に極めて困難である。このため中枢神経損傷患者に対するリハビリテーション（以下、リハビリ）介入後、リハビリ効果を正確に評価し、さらに姿勢調節能力の回復に関わる中枢メカニズムを解明するためには、動物モデルを用いた実験的手法を用いることが求められる。Cenciら⁶⁾は神経学的な動物病態モデルを用いた評価の重要性を指摘し、様々な中枢神経損傷の機能的評価や治療的介入効果のモニタリングに役立つ効果的なモデルとして、ラットなどの小動物を使用することの有用性を述べている。さらに、ラットを用いて安定した動物病態モデルの確立および適切な評価を使用することで、中枢神経損傷がもたらす機能障害やそれらに対するリハビリなどを含めた治療的介入による回復程度の定量的な評価が可能になると述べている。

動物を用いた姿勢調節に関する研究として、Deliaginaら⁷⁾は健常ラットを用いた床面傾斜時の姿勢調節反応について、側方傾斜時の頭部、体幹などの反応動態を運動学的に分析している。動物の病態モデルを用いた姿勢調節障害の評価において、Clarkら⁸⁾は外乱刺激に対する姿勢調節反応の新たな評価方法として、ラットのパーキンソン病モデルでの傾斜反応時の行動解析を行った。Hutchisonら⁹⁾はマウスのパーキンソン病モデルに対する身体動揺の定量的分析として重心動揺計を使用した。この評価方法は容易に測定が可能で、且つ感度の高い測定ツールとしてその有用性が指摘されている。その他の病態モデルを用いた研究として

は、ラット末梢神経損傷モデル¹⁰⁾を用いた床反力計による歩行分析やラット脊髄損傷モデル^{11, 12)}を用いた荷重分布の測定などの報告も散見されるが、歩行運動と密接に関係する動的な姿勢調節能力についての評価に関する報告は極めて少ない。これは、小動物を用いて動的姿勢調節能力を安定して測定するために動物の行動を一定範囲に留める必要がある。しかし、これは困難であることから、姿勢反応の有無や行動観察といった定性的な評価が主になされてきたためである。

我々は中枢損傷患者の姿勢調節能力の回復に関わる中枢メカニズムを理解するため、中枢損傷を加えたラットモデルを用いて動的姿勢調節能力の客観的な評価方法の確立を目指している。ラットの動的姿勢調節能力を定量的に評価するために、重心の移動を精度良く測定できる小動物用重心動揺計が必要となる。今回、我々は小動物用重心動揺計を新たに作製したので、この重心動揺計の測定精度や再現性などの機器特性について剛体（おもり）を用いて評価し、さらに生体（ラット）を用いて小動物の測定に本重心動揺計が適するものであるかについても評価した。

II. 小動物用重心動揺計のシステム構成

今回、我々が小動物用重心動揺計を作製する上で次の4点に留意した。①体重が数100グラム程度の小動物でも、姿勢調節時の荷重の変化や移動を鋭敏且つ高精度に検出できること、②動的姿勢調節能力を評価するため床面（テーブルプレート）を傾斜して外乱刺激を加えられること、③テーブルプレートの傾斜速度は自由に設定でき、且つ傾斜角度の変化を正確に測定できること、④ラットの測定位置をテーブルプレート上の一定範囲に留めておくことができること。

図1 Aには上述した基本設計に従って株式会社共和電業と共同開発した小動物用重心動揺計（TKG-1108A、共和電業）の側面図を示す。可変速モーター（レバーシプルモータ SS21M-SSSD および速度コントロールパック、Orientalmotor; 回転数 90~1400rpm、起動トルク 140mN・m、制動時間 約 0.5sec）の回転軸上に傾斜台を固定し、その上に荷重量を測定する3台のビーム型ロードセル（LUB-5KB、共和電業、図1 AおよびB）を設置した。ロードセルの上には測定対象物が乗るテーブルプレート（35cm×35cm、厚さ 2mm、重さ 2.7kg、ステンレス製、図1 B）を載せた。傾斜台は0~30°の角度範囲を一定方向に5~15°/secの角速度で傾斜する。これによりテーブルプレート上に載せた測定対象物に外乱刺激として傾斜刺激を与えることが可能になる。尚、傾斜台上には傾斜角度を検出するための加速度計（小型低容量加速度変換器 AS2-GB、共和電業）を設置した。

本測定器に設置したビーム型ロードセルには、ラットなどの小動物の微細な重心の動揺を検出するため高精度の荷重検出器を使用した（定格容量 50N、ヒステリシス±0.03

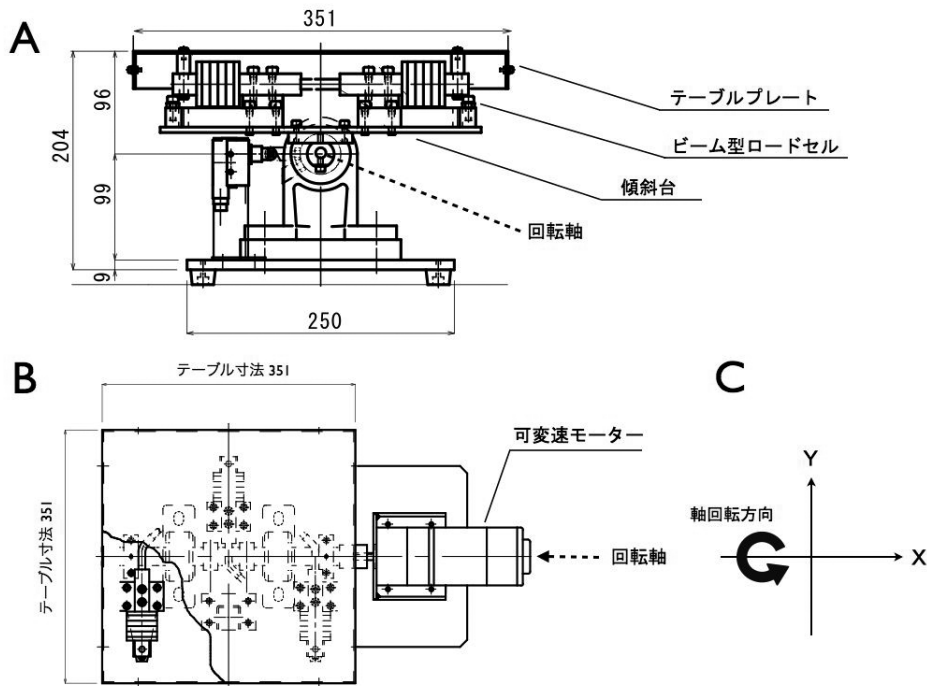


図1 小動物用重心動揺計の設計図（単位は全てmmで表記）

A；側面図、B；上面図、C；テーブルプレートの座標系、X軸（モーター回転軸）を中心に矢印方向に回転する。

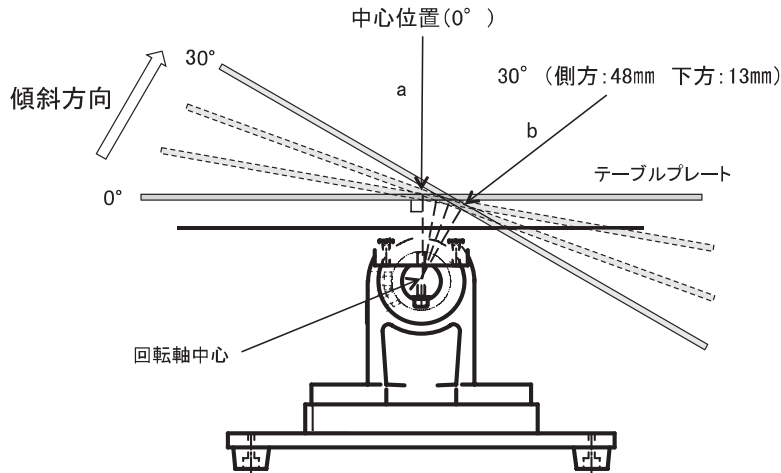


図2 テーブルプレートの傾斜と中心位置の移動

テーブルプレートはモーター回転軸（時計回り）を中心として0～30°まで傾斜する。矢印aは0°の時の中心位置、矢印bは30°傾斜の際の中心位置を示す。回転軸中心からテーブルプレートの中心位置まで96mm偏心している。このため30°の傾斜ではテーブルプレートの中心位置は側方48mm、下方13mm、距離として50mm移動する。（本文参照）

%以内)。モーターおよびテーブルプレートなどを含めた傾斜装置全体の下にロードセルを設置した場合、装置全体の重量（約10kg）やモーターの駆動および振動などが計測に影響すると考えられる。このため本測定器ではモーター回転軸上に固定した傾斜台にロードセルを設置した。また、モーター回転軸中心とテーブルプレートとの間には96mmの距離がある。このためテーブルプレートの傾斜はテーブルプレートの中心を軸とした回転ではなく、モーター回転軸が中心軸となる。したがって本測定器における傾斜刺激

はテーブルプレートの回転に加え、最大傾斜角度30°で傾斜側へ側方に48mm、下方に13mm、距離として50mmの移動も伴う（図2）。

3台のロードセルおよび加速度計から得られたデータは、ひずみゲージ用4ch入力型センサーインターフェース（PCD-300B、共和電業）にてAD変換され、解析用PCに取り込まれる（図3 A）。データのAD変換は10～1000Hzのサンプリング周波数で行われる。データは解析用PCにインストールされている重心計測ソフト（ラット挙動計測ソフト TKG1108S、

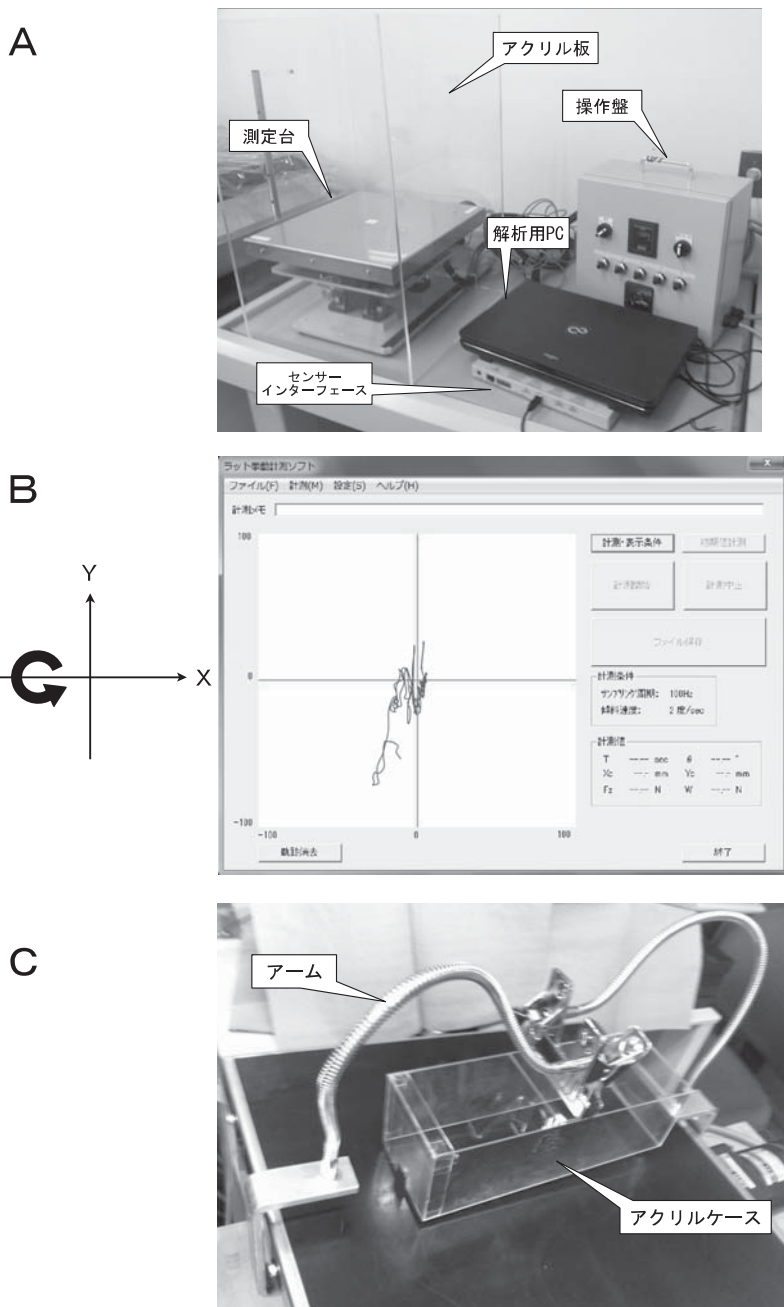


図3 小動物用重心動揺計の概要

A：機器構成の全体像、B：重心計測ソフトの表示画面、画面上の曲線は重心移動の軌跡を示し、横・縦軸は欄外のX・Y軸に対応する。
 C：ラット用アクリルケースとアーム（本文参照）

共和電業)により、サンプリング時間、傾斜角度(°)、重力方向荷重(N)、重心位置(X・Y座標値、mm)の各データがCSV形式で保存され、同時に重心移動軌跡がディスプレイにリアルタイムで表示される(図3B)。尚、重心位置および傾斜速度の値は以下の校正係数および物理量の計算式により演算される。

①校正係数

$$\text{校正係数} = \text{定格容量} / (2000.0 \times \text{定格出力})$$

②傾斜角度の物理量

$$\text{物理量} = (\text{AD値} - \text{初期値}) \times \text{校正係数} \times (\text{レンジ} / \text{ADフ}$$

ルスケール)

$$\text{傾斜角度} = \sin^{-1}(\text{角度の物理量} / \text{重力加速度}) \times 180.0 / \pi$$

③鉛直反力の物理量

$$\text{物理量} = (\text{AD値} - \text{初期値}) \times \text{校正係数} \times \text{レンジ} / \text{ADフルスケール}$$

$$\text{鉛直反力(N)} = \text{センサー1物理量} + \text{センサー2物理量} + \text{センサー3物理量}$$

④重心位置

$$\text{重心位置X座標値(mm)} = \sum \text{センサーの物理量} \times \text{センサー位置X} / \text{鉛直反力}$$

重心位置 Y 座標値 (mm) = Σ センサーの物理量 \times センサー位置 Y / 鉛直反力

⑤重力方向荷重

重力方向荷重 (N) = 鉛直反力 / \cos (傾斜角度 $\times \pi / 180.0$)

校正係数：ひずみを荷重あるいは角度に変換する係数、定格容量：ひずみの測定範囲、定格出力：一定荷重におけるひずみ感度の大きさ、AD値：アナログからデジタルに変換した値、初期値：無荷重で計測を行った際のオリジナル値、レンジ：ひずみの測定範囲、ADフルスケール：レンジに対するAD分解能。重力加速度は 9.8m/s^2 、円周率 (π) は 3.141593 として計算する。

Ⅲ. 剛体を用いた小動物用重心動揺計の精度および機器特性の検討

小動物用重心動揺計を用いて測定する際の測定対象物の重量、測定開始位置の違い、テーブルプレートの傾斜速度の違いの3点における重心位置 (X・Y座標値) の変動について剛体 (重量の異なる3種のおもり) を用いて測定した。測定は以下の方法で実施した。

1. 方法および測定条件

重心の高さが同一となるように特注した 200g ($38 \times 37 \times 19\text{mm}$)、 300g ($57 \times 36 \times 19\text{mm}$)、 400g ($57 \times 48 \times 19\text{mm}$) の3種の金属製 (ステンレス, SUS-304) のおもりをテーブルプレート上に載せ、次の2項目の測定を行った。尚、おもりの設置方向は長方形の長辺を Y 軸方向に、短辺を X 軸方向に合わせた。(1) 3種の重量のおもりを用いて 5° 、 10° 、 $15^\circ/\text{sec}$ の速度でテーブルプレートを傾斜させた際の重心位置を測定した。測定位置はテーブルプレートの中心部とした。(2) テーブルプレートの中心部から前後・左右に 5cm および 10cm 離れた8カ所 (図1および6参照) を測定開始位置として 5° 、 10° 、 $15^\circ/\text{sec}$ でテーブルプレートを傾斜させた際の重心位置を測定した。測定には 400g のおもりを使用した。重心位置の座標系は、傾斜の回転軸方向を X 軸方向とし、その X 軸と直交する方向 (傾斜方向) を Y 軸方向と定義した (図1 B)。サンプリング周波数は 100Hz 、測定回数は各々3回ずつとし、得られた測定値を次の3つの条件において比較・検討した。1) 重量の違い (重量条件)、2) 傾斜速度の違い (速度条件)、3) 測定開始位置の違い (位置条件)。

2. データ処理および統計学的解析

重量の異なるおもりを用いて得られた重心位置 (X、Y座標値) を基に X・Y 軸方向の移動範囲 (mm) を算出し、各条件における平均値を求めた。その際、傾斜開始前3sec間の重心位置の平均値を測定開始の位置 (X 0, Y 0) とした。また、傾斜角度および重心位置の経時的変化のデー

タ処理にはモーター駆動の微細な振動によるノイズ除去のため、 $5 \times 5 \times 11$ 回の移動平均法により平滑化を行った¹³⁾。取得したデータ値の演算には表計算ソフトエクセル2011 (Microsoft社) を使用した。統計学的処理にはSPSS ver.21を使用し、重量条件および位置条件において回帰分析を行った。尚、有意水準は両側検定で5%未満とした。

Ⅳ. 生体 (健康ラット) を用いた重心動揺の測定

小動物用重心動揺計を用いて、健康ラットに対して前後・左右方向の傾斜および異なる傾斜速度の外乱刺激を与えた際の重心位置 (X・Y座標値) の変動を測定した。これより、本重心動揺計が小動物の姿勢調節能力の評価に適するものであるかについて剛体を用いた測定と比較・検討した。

1. 方法および測定条件

実験動物として、Sprague-Dawley pupsラット (オス、11週齢、体重 400g 、 $n=1$) を用いた。測定時にラットがテーブルプレートから逃避するのを防ぐため、重心動揺計の四方周囲を透明なアクリル板 (厚さ 5mm 、幅 45cm 、高さ 40cm) で囲んだ (図3 A)。尚、ラットがテーブルプレートの中央部で静止するよう、ラットの周囲を透明なアクリルケース (70g) で囲んだ。またアクリルケースを傾斜台に固定したアーム (1台 380g) によりテーブルプレートから浮かせた状態で吊り下げた (図3 C)。

ラットをテーブルプレートに載せ、装置上の環境に十分に慣れ、行動が静止してから以下の測定を実施した。 5° 、 10° 、 $15^\circ/\text{sec}$ の異なる傾斜速度において前後・左右にテーブルプレートを傾斜させた際のラットの重心位置 (X・Y座標値) を測定した。測定時間は傾斜開始前の 5sec (水平位) から最大傾斜角度 (30°) までとし、サンプリング周波数は 100Hz 、測定は各条件で5回ずつ実施した。

2. データ処理および倫理的配慮

データの処理は、剛体を用いた測定と同じく傾斜開始前3sec間の重心位置の平均値を測定開始の位置 (X 0, Y 0) とし、 $5 \times 5 \times 11$ 回の移動平均法を用いて平滑化した。取得したデータの演算には表計算ソフトエクセル2011 (Microsoft社) を使用した。尚、本実験計画は札幌医科大学動物実験委員会の承認を得てから実施した (承認番号 第12-012号)。

Ⅴ. 結 果

1. 剛体を用いた測定結果

1-1. 重量条件について

図4に 200g 、 300g 、 400g の3種のおもりを用いた際の傾斜速度 $10^\circ/\text{sec}$ 時の重心位置の時系列データを示した。図の表示範囲は傾斜開始1sec前から傾斜角度 30° までである。

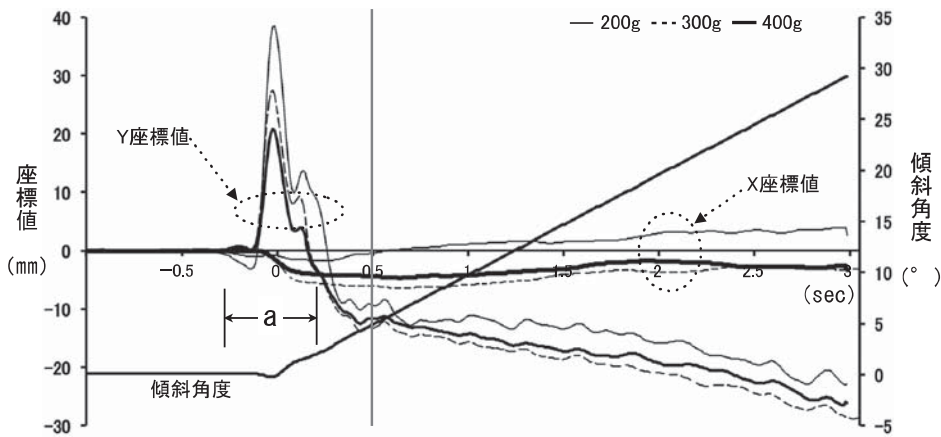


図4 おもりを用いた重心動揺計の測定例

200、300、400gのおもりを用いて傾斜速度 $10^{\circ}/\text{sec}$ で $0\sim 30^{\circ}$ までテーブルプレートを傾斜させた。図中には傾斜速度とX・Y座標値の経時的変化を重ねて示した。尚、aはモーターの駆動が定常状態となる制動時間の範囲を示す。(詳細は本文参照)

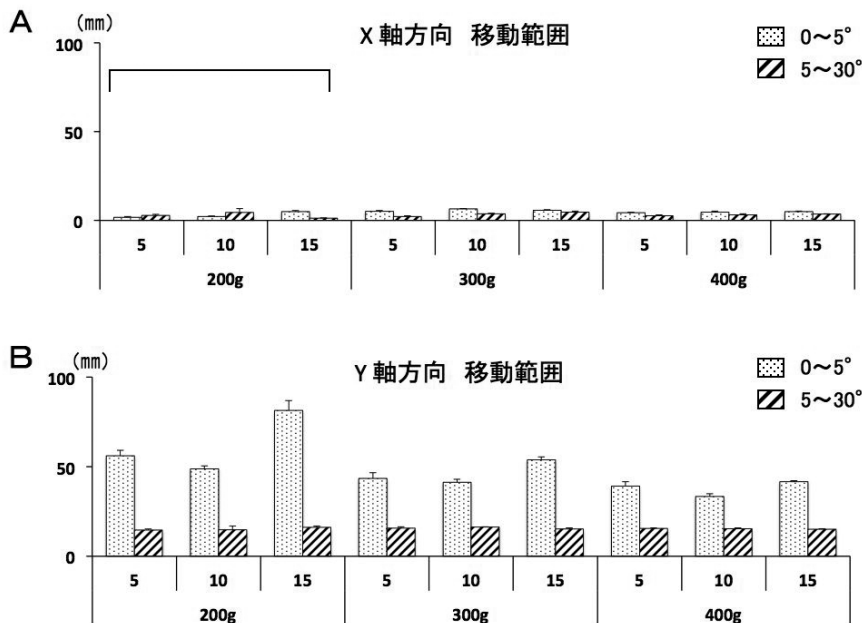


図5 3種のおもりの重心位置の移動範囲

傾斜角度 $0\sim 5^{\circ}$ および $5\sim 30^{\circ}$ までのX軸方向 (A)とY軸方向 (B)の移動範囲を示す。それぞれの値は傾斜速度 5° 、 10° 、 $15^{\circ}/\text{sec}$ で3回施行した平均値と標準偏差を示す。(詳細は本文参照)

X、Y座標値とも重量の違いによる影響がみられた。特にX座標値において300gと400gのおもりは同方向 (X軸-方向)の類似した変動を示したが、200gでは逆方向 (X軸+方向)の変動を示した。一方、Y座標値は傾斜開始から 5° までの傾斜角度の範囲において大きな変動を示した。傾斜角度 5° 以上では傾斜角度の増加に伴い、比較的線形で緩やかな変動を示した。 5° 以上のY座標値はX座標値と同様に、200gのおもりでは300gや400gの値よりも大きなずれを生じていた。

図5には $0\sim 5^{\circ}$ と $5\sim 30^{\circ}$ の傾斜角度におけるX・Y軸方向の移動範囲を示した。 $0\sim 5^{\circ}$ の傾斜角度におけるY軸方向の移動範囲について見ると、400gと300gのおもりののは30

$\sim 40\text{mm}$ 程度であるのに対して、200gのおもりではそれらより大きな50mm以上の値を示した。一方、 $5\sim 30^{\circ}$ の範囲ではおもりの違いによる差はみられず15mm程度であった。これより、 $0\sim 5^{\circ}$ の範囲内では測定対象の重量が軽くなるにつれて重心位置の変動が大きくなる傾向を示すと考えられた。以上より、安定した測定結果を得るためには、テーブルプレートの傾斜が一定の等角速度状態となる $5\sim 30^{\circ}$ の傾斜角度を分析の範囲にすることが妥当と考えられた。

傾斜開始時点から終了 (傾斜角度 30°)までのX・Y座標値の経時的変化について、傾斜速度ごとに400gと300gおよび200gのおもりとの単回帰分析を行った。Y座標値における偏回帰係数 (β)は各々高値 ($0.96\sim 0.99$)を示し、決

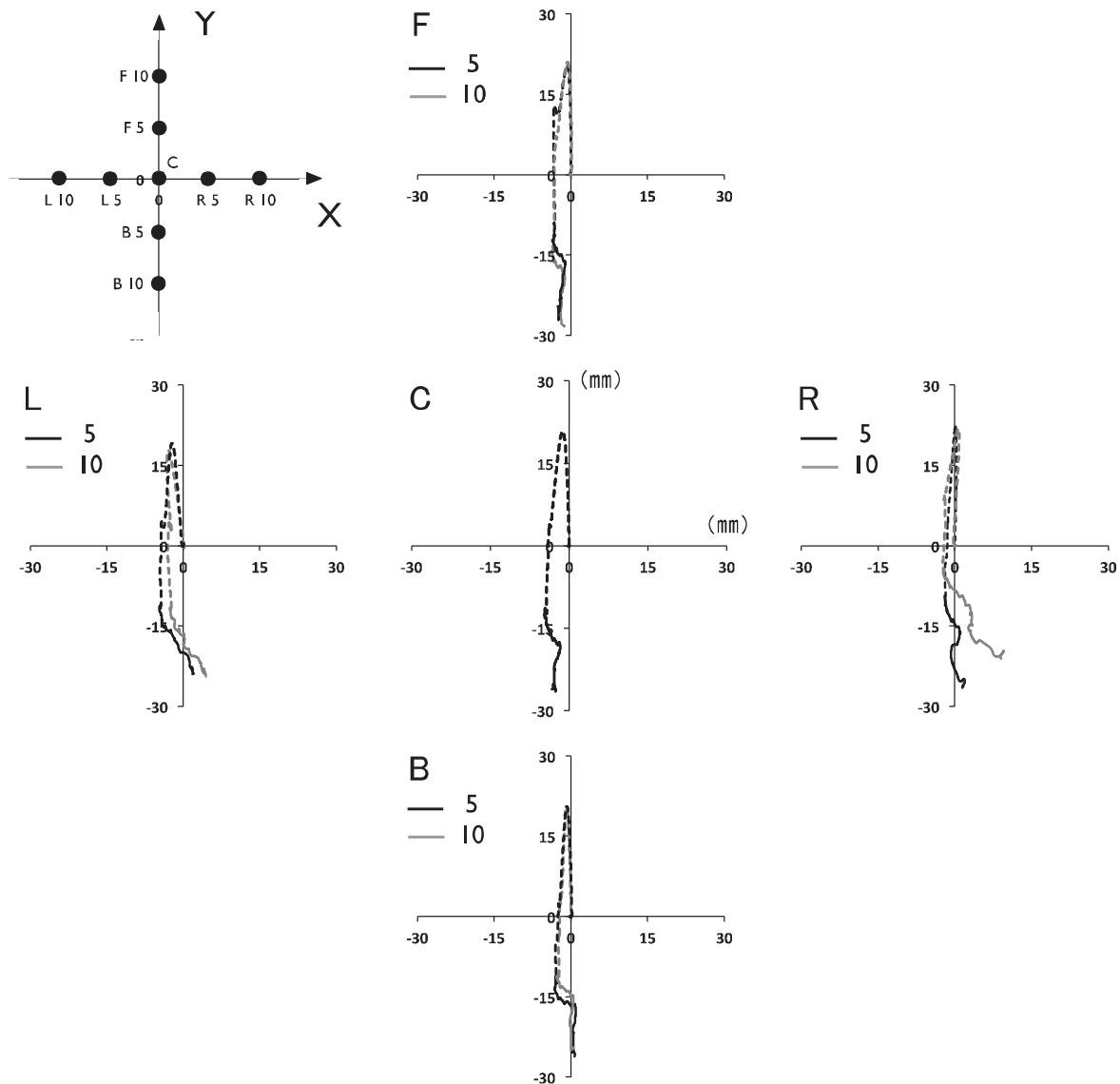


図6 測定開始位置の違いと重心移動の軌跡（傾斜速度10°/sec時）

テーブルプレート上の9点の測定開始位置を左上図に示す。図中のC、R、L、F、Bの座標系に示した重心移動の軌跡は、左上図の開始位置で測定されたものに対応する。尚、左上図の5、10で示した数字は中心より5cm、10cm離れた位置を意味する。破線は傾斜角度0~5°、実線は傾斜角度5~30°までの重心移動の軌跡である。

定係数 (R^2) も高い値を示した (0.93~0.99)。しかし、X座標値の偏相関係数は有意な値を示したが (200g; $\beta = 0.36 \sim 0.70$, 300g; $\beta = 0.43 \sim 0.93$)、200gのおもりの決定係数は全ての傾斜速度で低値 ($R^2 = 0.13 \sim 0.49$) を示し、適合性は低かった。

1-2. 速度条件について

重量条件と同じく、図5に各傾斜速度におけるX・Y軸方向の移動範囲を示す。それぞれのおもりにおいて、Y軸方向の移動範囲は15mm前後と傾斜速度の違いによる差がみられなかった。一方、X軸方向の移動範囲は300gと400gのおもりで傾斜速度に依存して移動範囲が増加する傾向を示した。しかし、200gのおもりではその傾向はみられず、

傾斜速度ごとに著明なばらつきがみられた。

1-3. 位置条件について

図6はテーブルプレートの中心部より前後・左右5cm、10cm離れた位置におもりを載せた際の傾斜速度 10°/sec時の重心移動の軌跡を示す。中心部から前・後方向に離れた位置 (F、B) では、おもりを中心部に置いた際の重心移動と類似した軌跡が描かれた。しかし、左・右方向に大きく離れた位置 (R10、L10) の重心移動は、傾斜角度の増加に伴いX軸方向で大きな移動を示した。図7は傾斜角度5~30°までの各測定開始位置におけるX・Y軸方向の移動範囲を示す。前後方向に離れた位置で計測した際のX・Y軸方向の移動範囲に比べ、左右方向に離れた位置にお

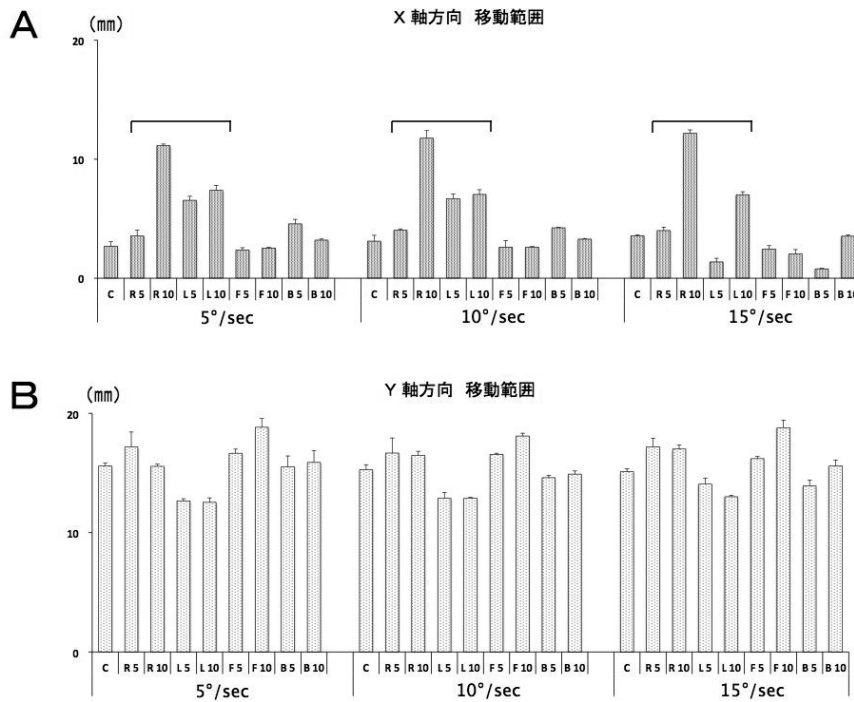


図7 測定開始位置（図6に同じ）の違いと重心位置の移動範囲

傾斜角度5~30°までのX軸方向（A）とY軸方向（B）の移動範囲を示す。それぞれの値は傾斜速度5°、10°、15°/secで3回施行した平均値と標準偏差を示す。（詳細は本文参照）

るX・Y軸方向の移動範囲でばらつきがみられ、測定位置の違いによる影響が示された。

傾斜開始時点から終了（傾斜角度30°）までのX・Y座標値の経時的変化について、テーブルプレートの中心部（C）と他の位置との単回帰分析を行った。10°/secの傾斜速度時のX座標値において、左右方向に離れた位置（R10、L10）での偏回帰係数は有意であったが（ $\beta=0.71$ 、 0.64 ）、決定係数は低かった（ $R^2=0.50$ 、 0.41 ）。また、Y座標値では5°/sec時の前方向（F10）とで決定係数が低く（ $R^2=0.46$ 、 $\beta=0.68$ ）、中心部との低い関係を示した。

2. 健常ラットを用いた測定結果

図8は健常ラットを用いた各傾斜方向および各傾斜速度における重心移動の軌跡を示す。傾斜開始時の重心位置の変動は、おもりに（剛体）を用いた測定した結果（図6）に比べて小さく、いずれの傾斜速度においても同じ傾向を示した。ラットの右方向への傾斜刺激となるように体軸をX軸方向（回転軸）に合わせ、ラットが安定した状態からテーブルプレートを傾斜させた（図8 A）。その結果、傾斜速度の違いによるY軸方向の移動距離に変化はみられなかったが、X軸方向においては傾斜角度の増加に伴い重心が後肢側へ移動する傾向がみられ、いずれも15~20°の傾斜角度内で起きていた。さらにラットを180°反転させてテーブルプレートを左方向へ傾斜させた（図8 B）。重心はX軸方向では右方向への傾斜と同じく後肢側への移動を示した。

一方、ラットの体軸をY軸方向に合わせ前方向へ傾斜さ

せた（図8 C）。重心は傾斜角度の増加に伴いY軸方向は傾斜方向へ移動したが、X軸方向では右側へ移動し、傾斜速度の増加に伴い早く出現する傾向を示した。さらにラットを180°反転させて後方向へ傾斜させたところ（図8 D）、前方向への傾斜に比べてY軸方向の値は大きくなり、X軸方向（ラットの左右方向）への重心移動はむしろ小さかった。傾斜速度の増加に伴いX・Y軸方向の移動範囲も次第に小さくなった。図9にはラットを前後・左右に傾斜させた際の0~5°と5~30°の傾斜角度におけるX・Y軸方向の移動範囲を示す。X軸方向の移動範囲は0~5°の範囲において変動はみられず、5~30°ではそれぞれの傾斜方向の違いによる影響がみられた。Y軸方向の移動範囲は0~5°および5~30°の傾斜角度において、ともに25mm程度であった。

VI. 考 察

1. 剛体を用いた測定

本研究では、我々が開発した小動物用重心動揺計について測定精度などの機器特性を評価するため、測定対象物の重量や測定開始位置、さらに傾斜速度の違いが重心位置X・Y座標値に与える影響について重量の異なるおもりに用いて比較・検討した。重量条件では全てのおもりにおいて傾斜角度5°までのY座標値に大きな変動がみられた。これは傾斜開始から角速度が定常状態となる間に、テーブルプレートからロードセルが受ける加速度の方向の違いによる影響が考えられる。つまり、テーブルプレートが上昇する側に

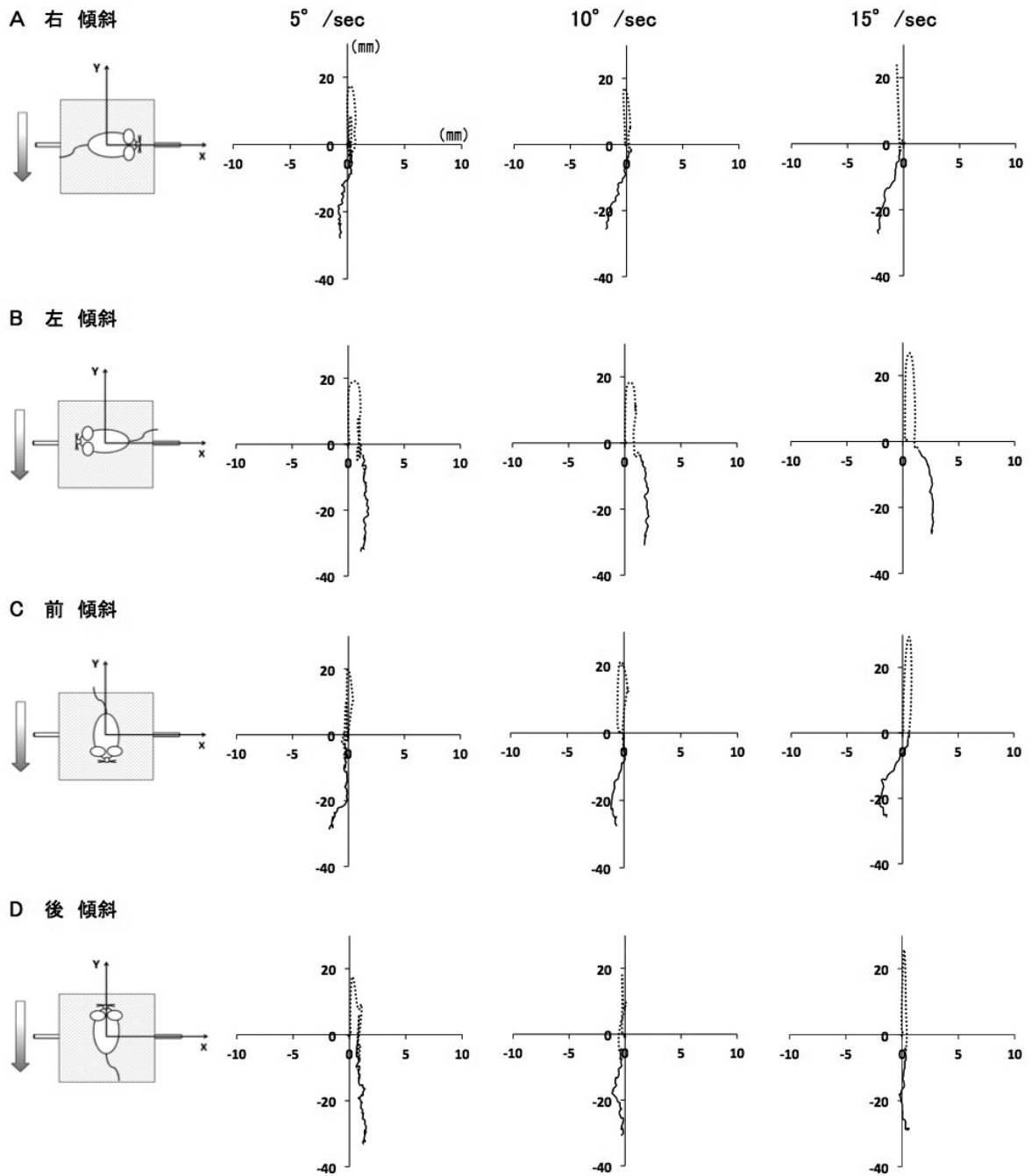


図8 ラットを用いた際の重心移動の軌跡

A～Dの左図は傾斜方向（太矢印）に対するラットの位置を示す。5°、10°、15°/secで傾斜させた際のラットの重心移動の軌跡（5回施行の平均）を示す。尚、破線は傾斜角度0～5°、実線は傾斜角度5～30°までの重心移動の軌跡である。

設置したロードセルは下方向の加速度を受けるため荷重値が増加し、その反対に下降する側のロードセルは上方向の加速度を受け荷重値が減少する。この相対的な作用により、Y座標値はプラス方向の大きな値として検出されたと考えられる。また、おもりの重量の増加によりこの作用が減少しY座標値の変動は小さくなるが、これらを完全に制御することは本測定機器の限界として考えられる。したがって、重心動揺計を用いて安定した信頼性のある測定値を得るためには、テーブルプレートの傾斜が一定の等角速度状態と

なる5～30°の傾斜角度を分析の範囲にすることが妥当と考えられた。

速度条件におけるX・Y軸方向の移動範囲では200gのおもりで傾斜速度の違いによるばらつきが顕著にみられた。これはテーブルプレートの傾斜速度を挙げるためモーターの回転速度が増加したことで、モーター駆動による反動をより速く受けたため、変動がさらに大きくなったと考えられる。300g以上のおもりではそのような変動がみられないことから、測定の際には体重が300g以上の動物を対象とす

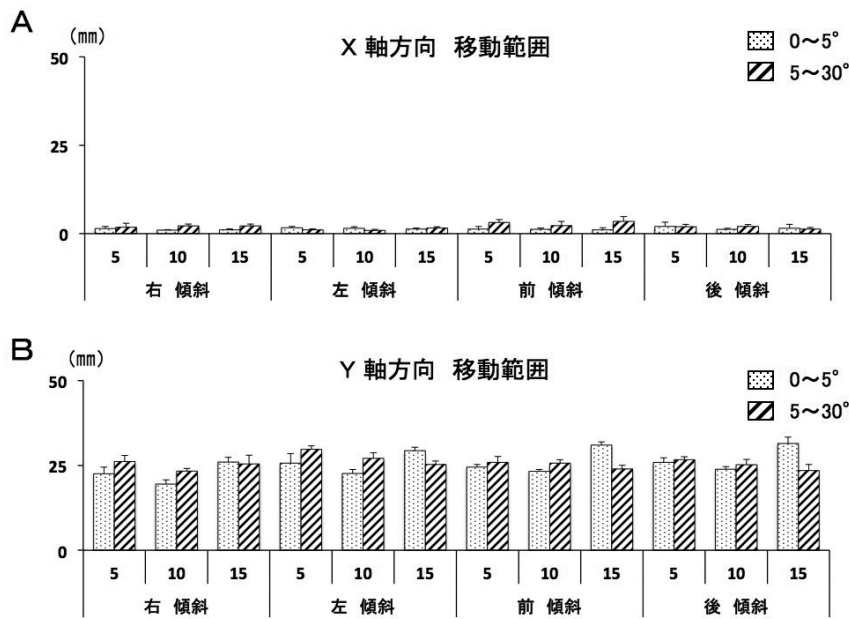


図9 ラットを用いた測定での重心位置の移動範囲

傾斜角度0~5°および5~30°までのX軸方向(A)とY軸方向(B)の移動範囲を示す。それぞれの値は傾斜速度5°、10°、15°/secで5回施行した平均値と標準偏差を示す。(詳細は本文参照)

ることで安定したデータが得られると考えられた。また、位置条件においてテーブルプレートの中心部よりX軸方向(回転軸)で10cm離れた位置で測定した際の重心移動は、中心部よりも大きなずれがみられた。これより、測定の際には対象を中心部から10cm以内の範囲に留めておくことで、安定した測定結果が得られると考えられた。

以上の剛体を用いた測定より、本重心動揺計は外乱刺激を再現性良く繰り返し与えることができ、傾斜速度の違いによる重心位置の変化を安定して測定できる機器であると考えられた。但し、この重心動揺計では体重300g以上の小動物を対象とし、その動物の重心をテーブルプレートの中心部に留めながら測定することが重要である。このため、200g以下のマウスなどの小動物を測定する場合や傾斜初動時に安定した測定値を得るには、測定機器全体のシステム構成に改良を加える必要がある。

2. 生体を用いた測定

ラットの測定では、上記の機器特性に留意して体重400gのラットを用い、テーブルプレートの中心部に留めて測定を行うことで重量および測定開始位置による影響が抑えられた。これより、ラットでは剛体とは異なり、傾斜角度の増加に伴い後肢側への重心移動や傾斜方向および傾斜速度の違いによる特有の反応など、動的姿勢調節の存在を示唆する興味深い記録が得られた。Brookhartら¹⁴⁾は四足動物であるイヌの重心動揺を測定し、重心位置が身体の中心部よりやや前方(前肢側に体重の60%が荷重)にあると報告している。本研究のラットは、姿勢外乱に対して重心位置を身体中心部より後方に移動させる特徴がみられた。以上

より、本重心動揺計はラットなどの小動物の動的姿勢調節反応を評価するための有用な測定機器であることが示された。5~30°までの傾斜外乱では剛体と生体の両者ともに持続性の一定方向の重心移動がみられた。一方、傾斜開始から5°までの傾斜外乱ではY軸方向で一過性の大きな振れがみられた。400gのおもりでは一過性の振れ幅(Y軸方向の移動範囲)は40mm程度であるのに対して、体重400gのラットでは25mm程度であった。これは剛体とは異なり、ラットでは急激な0~5°までの傾斜外乱に対して反射性の姿勢調節が起こっていると推測される。

動的姿勢調節には種々の感覚入力による反射性の代償的な姿勢調節と、随意運動に先行あるいは随伴する予測的な姿勢調節がある^{15, 16)}。したがって、本重心動揺計を用いることで0~5°の傾斜範囲では前者の代償的姿勢調節、5~30°では後者の予測的姿勢調節など、それぞれ異なる姿勢調節のメカニズムを対象とした測定も可能であることを示唆する。今後、本重心動揺計を用いて様々な中枢部位に損傷を加えた動物モデルの動的姿勢調節を観察・測定することで、それぞれの中枢損傷モデルに特有な姿勢調節の特徴を抽出できるものと期待される。

謝 辞

本研究は科学研究費助成事業(平成23年度挑戦的萌芽研究 課題番号23650330)の支援を受けて実施した。本測定機器および計測ソフトの開発にあたり、ご協力を頂いた(株)共和電業スタッフの皆様へ深謝致します。

参考文献

- 1) Shumway-Cook A., Woolacott M. H.: Motor Control : Translating Research into Clinical Practice (3rded). USA. Lippincott Williams & Wilkins, 2006, p185
- 2) 内山靖 : 理学療法からみた姿勢調節. 奈良勲, 内山靖 編. 姿勢調節障害の理学療法 第2版. 東京, 医歯薬出版, 2012, p2-7
- 3) Sherrington C. : Hughlings Jackson Lecture on QUANTITATIVE MANAGEMENT OF CONTRACTION FOR "LOWEST-LEVEL" CO-ORDINATION. Br Med J. 1 : 207-211, 1931
- 4) Horak F.B., Wrisley D.M., Frank J.: The Balance Evaluation Systems Test (BESTest) to differentiate balance deficits. Phys Ther. 89 : 484-498, 2009
- 5) Garland S.J., Gray V.L., Knorr S.: Muscle activation patterns and postural control following stroke. Motor Control. 13 : 387-411, 2009
- 6) Cenci M.A., Whishaw I.Q., Schallert T.: Animal models of neurological deficits : how relevant is the rat? Nat Rev Neurosci. 3 : 574-579, 2002
- 7) Deliagina T., Beloozerova I.N., Popova L.B., et al.: Role of different sensory inputs for maintenance of body posture in sitting rat and rabbit. Motor Control. 4 : 439-452, 2000
- 8) Clark C., Sacrey L.: Righting elicited by novel or familiar auditory or vestibular stimulation in the haloperidol-treated rat : Rat posturography as a model to study anticipatory motor control. J Neurosci Methods. 182 : 266-271, 2009
- 9) Hutchinson D., Ho V., Dodd M., et al.: Quantitative measurement of postural sway in mouse models of human neurodegenerative disease. Neuroscience. 148 : 825-832, 2007
- 10) Howard C. S., Blakeney D. C., Medige J., et al.: Functional assessment in the rat by ground reaction forces. J Biomech. 33 : 751-757, 2000
- 11) Giszter S.F., Davies M.R., Graziani V.: Coordination strategies for limb forces during weight-bearing locomotion in normal rats, and in rats spinalized as neonates. Exp Brain Res. 190 : 53-69, 2008
- 12) Mulligan S.J., Knapp E., Thompson B., et al.: A method for assessing balance control in rodents. Biomed Sci Instrum. 38 : 77-82, 2002
- 13) 馬田俊雄: 移動平均法によるノイズ除去と波形変化の關係の具体的考察. 九州大学応用力学研究所技術レポート. 7 : 110-113, 2006
- 14) Brookhart J. M., Permezziani P. L., Petersen W. A., et al.: Postural stability in the dog. Ame J Physiol. 208 : 1047-1057, 1965
- 15) Cordo, P. J., Nashner, L. M.: Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. J Neurophysiol. 47 : 287-302, 1982
- 16) Deliagina T. G., Zelenin P.V., Beloozerova I. N., et al.: Nervous mechanisms controlling body posture. Physiol Behav. 92 : 148-154, 2007