

光弾性法に基づく接触圧分布計測装置の 小児神経発達評価への応用

中 川 博 文
日本医科大学 藤 田 武 久

In order to quantitatively evaluate the development of postural control, we analyzed the contact pressure distribution in the sitting position of infants. Eight subjects (including one child with Down syndrome) aged 2 to 8 years were selected for this study, and the position of the zero moment point (ZMP) on the basal supporting surface (BSS) was analyzed using a photoelastic apparatus to determine the leg position during knee flexion and extension.

The photoelastic apparatus was comprised of a 1,000 mm × 500 mm seat platform, an imaging system, and a loading device. Contact pressure on the loading device was visualized as a sharply defined circular ring. The size and the distribution of the photoelastic fringe changed according to any change in the sitting position. The longitudinal ratio of the ZMP to the distance from the hip to the ankle foot region during knee flexion was 33.2%, and this ratio shifted forward more than 22.3% during knee extension. The transverse ratio of the ZMP to the distance between the left and right direction on the seat surface during knee flexion and knee extension were 45.5% and 43.2% from the left, respectively, and when both knees were positioned on the left of the center line on the horizontal plane, both values gradually reached 50% with age.

In the case of Down syndrome, the method for locating the ZMP on the seated plane appeared to be different compared to that used for normal children although there was only one subject with Down syndrome tested.

Therefore we believe that the analysis of the ZMP location will be useful for quantitatively evaluating the neurological development in infants.

Key words: Photoelastic technique, contact pressure distribution, postural control, sitting position, neurological development

1. はじめに

直立2足歩行の能力の獲得は人類史上最も劇的であり、今日の繁栄につながる原動力になったとされている。2本足で立ったことで上肢は地面から解放され手は自由となり道具を作ったり使ったりできるようになった。出生後1年余りで直立2足歩行を獲得する小児の発達過程は人類進化を髣髴させる証しとして良く知られている。力学的な知見に基づく、立位姿勢で平衡を維持するには身体重心と地球の中心を結ぶ線（重心線）が狭い足の支持基底

面内に保持調整されていることが必要となる。生理学的には内耳の前庭・迷路感覚、筋、関節等の固有感覚および視覚等の複数の受容器からの感覚情報が脊髄、脳幹、小脳あるいは大脳皮質に及び、最終的には運動中枢から全身の姿勢維持に関連する骨格筋に指令が送られ、立位姿勢の維持が行われる。

このような姿勢制御機能の解析は、生体の複雑巧みな調節系の発達と障害の仕組みを洞察する上で大きな貢献をもたらすことが期待され、その仕組みの解明に向けて様々なアイデアによる研究がなされてきた。これまでの姿勢解析研究の歴史を顧みると、当初、姿勢は重力に抗する伸張反射の総和として位置付けられ、その反射に基づく単一の感覚・運動機構の一つとして扱われてきた¹⁾。その後、反射に基づく伝統的な神経機能モデルでは姿勢を十分説明できないと多くの研究者が考えるようになり、最近では重力の作用とともに知覚・運動系が機能し、数多くの多様な神経機構のプロセスを経て統合された一つの行為を姿勢と捉えるようになった。こうした姿勢研究の流れの中で、子どもの姿勢に関して、新生児や乳児期等は垂直方向に階層構造的に組織化された制御系の低いレベルの原始反射が最初に発現し、その後正常な発達過程を経て階層性トップの大脳皮質が成熟し低い部分を制御できるようになって平衡反応が発現することを多くの研究者が支持するまでに至った²⁾。しかし、環境変化や課題に対し戦略を複雑に変化させる姿勢制御の仕組みはなおも奥が深く未だ不明な点が多い。

姿勢研究は反射に基づいた神経生理学的研究が中心となって発展してきたため、非神経生理学的研究が少ない。神経学的欠陥を持つ子どもの中には筋骨格系に異常を来たす場合も少なくなく、その場合はバイオメカニカル（生体力学的）な説明が有用となる。しかし、現状は子どもの神経発達の評価・診断等に必要な身体機能測定にはアーチファクトが入りやすいことに加え、臨床に役立つパラメータが得にくいこと等に起因してか、この方面の研究が極めて少ない状況にある。

ここでは子どもの姿勢動作のバイオメカニカルな研究として、皮膚表面と床面との接触面の圧分布情報より姿勢を解析しようとする研究を取り上げてみたい。新生児や乳児の発達診断や治療評価は、すでに述べたように、もっぱら子どもに外乱刺激を加え、これに対する身体支持と反応性の入出力神経機構を何等かの数値に変換し行われてきた。最近では反射に基づいた伝統的評価法の妥当性が疑問視されるようになり³⁾、姿勢制御機能は環境変化や環境特性に応じてあらゆる知覚系の情報を用いて発達するとするアクションシステムの考え方が定着しつつある⁴⁾。このような趨勢で、小西ら(1991)⁵⁾は子どもの自発的な動作をビデオカメラで撮影記録し、その動作分析から発達評価を試みようとした。しかし、この方法は観察者の主観が入りやすいことに加え定量化に難点があった。これに対して、前川⁶⁾や桐生ら⁷⁾は乳児の背臥位や腹臥位姿勢の定量評価を目的として、ロードセルを組み込んだガラス板で作製したピドスコープ上に被験児を置き重心移動を電気信号に変換し記録する装置を用いて、その重心移動軌跡から正常と異常の違いを判別する試みを初めて行った。この方法は複雑な生体情報を重心という1点に集約し単純化して抽出している。複雑な情報を単純化することは解析処理等で扱いやすい反面、重力に抗して乳児の体表接触面が力の配分をどのように行い、あるいは圧中心位置をどのように設定しているか等の詳細な情報を得ることは困難である。

そこで、筆者らは小児神経発達の定量評価に対する姿勢解析の臨床的意義を検討するための必要な基礎資料を得る目的で、光弾性手法を用いた接触圧力分布解析装置を開発し体表面と床面の接触圧分布解析を行ってきた。当初は子どもの立位姿勢の力学的側面を解明するために、足底と床面の接触圧分布解析を行った。特に、生来から筋緊張低下の症状があることで知られているDown症候群（以下DSと略）児と健常児の比較研究を行い、立ち上がったばかりの健常児の足圧中心が踵の30%前方位置にあるのに対し、DS児は最初から足底中央の50%位置に設定されていることが判明した⁸⁾。この20%の差は生物学的にすでに決定されているものなのか、それとも立ち上がり動作獲得に至るまでの学習過程で決定されるものなのかを把握するために、新生児期の背臥位および腹臥位の接触圧分布解析を行った。その結果、この段階ですでに両者間の圧中心位置および四肢の抗重力機能に根本的な違いがあることが見いだされた^{9) 10)}。また、中枢神経系に障害を伴う脳性麻痺児や髄膜炎児等の個別症例についても同様な解析を行ったが、圧中心はそれぞれ異なる位置に設定されることが判明した¹¹⁾。

以上のような研究結果を踏まえて、今回は立位姿勢獲得の基盤となる座位姿勢に着目し、光弾性法による座圧分布解析装置の研究開発とともに、得られた乳幼児期の座圧分布データの有用性等について検討した。座位姿勢は出生後7から8カ月程経過した頃より獲得されるが、その力学的側面は未だ良くわかっていない。安定した座位姿勢保持が困難な子どもは正確に手を伸ばすことや、あるいは頭を回転させて目の前の動く対象を正確に追跡することができない。健常児は独りで座位がとれなくとも、何等かの方法で座位を固定してやると、ものに向かって手を伸ばす等の動作を行うことができるようになるので、運動機能の発達促進にとっても安定した姿勢保持能力の獲得は重要となる。

本研究は光弾性装置により乳幼児期の座位姿勢における座圧分布解析を実施した結果、幾つかの興味深い知見を得ることができたので若干の考察を加え報告する。

2. 研究方法

2-1 対象

年齢が2歳から7歳の健常児7名と、21番目の染色体が1本過剰に存在することで、生来的に筋緊張低下や言語発達の遅れとともに立位姿勢ならびに歩行動作の発達遅滞等があることで知られている8歳のDS児1名を対象とした（Table 1）。DSは染色体異常を示す中では最も出生率が高く早期に診断が可能である。

DS児は年齢が8歳で、本来は幼児期の対象から除外されるが、今回は参考事例として特別に加えた。本研究は被験児のすべての保護者より文書にて同意を得て実施したものである。

Table 1 Comparison of subjects with and without Down syndrome

Classification	Age (M ± SD) year-old	Number
Normal	1.2-7.0 (4.1 ± 1.9)	7
Down syndrome	8	1

2-2 接触圧分布計測装置

子どもを対象とする測定は大人と違って多くの厳しい制約が付きまとう。安全性の確保は勿論のことであるが、非侵襲的であること、使用する装置は簡便性、操作性に優れ、しかも短時間に信頼性の高いデータが得られることや、視覚的に捉え易いこと等の諸条件を満たしていることが望ましい。

これらすべてを完全に兼ね備えた方法の構築は極めて難しいが、以上の点を深く考慮し、より再現性の高いデータを得るようにしていくことが重要となる。

そこで、今回、測定に使用した装置をFig.1に示した。子どもは台上に長座位で自由に座るだけである。この装置は台上に敷き詰められた光弾性材料（高分子ポリマー）の複屈折現象を利用して座面部接触圧力分布を可視化するために開発したものである。この手法の基本原理はM. Arcanら（1976）により提案され¹²⁾、筆者らはこの装置の臨床への応用と得られたデータの臨床的意義等についてこれまで検討を行ってきた¹³⁾。

装置は主として、偏光板を縦1000mm×横600mmで厚さ6mmの亚克力板でサンドイッチにした台上に、表面に反射塗料を塗ったエポキシラバ平板を重ね、その上に鋼球を等ピッチ碁盤目状に配列し、さらに透明なビニールシートを重ね接着固定した受圧部と、傾斜角45°の反射鏡を通して白色光をエポキシラバ板内部に透過する光学系で構成される。

被験児の体表面がビニールシートに接し鋼球を介してエポキシラバ板に外力を加えると、エポキシラバ板内部に応力が発生し、ここに偏光を透過させると複屈折効果により円形状の等色線縞が出現する（Fig.2）。エポキシラバ板の光弾性感度を α とし、その板厚を t とすると、縞次数 N とエポキシラバ板内の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ との間には下の（1）式の関係が成り立つ。

$$N = (\sigma_1 - \sigma_2) \alpha t \quad \dots\dots\dots (1)$$

当初、立位時の足底部接触圧分布測定用として開発したこの装置は⁸⁾、体重が軽く、皮膚表面が弾力性に富む乳幼児にその仕様をそのまま適用することが困難であった。すなわち、鋼球一個に加わる荷重 f_i が小さく感度不足となり、低荷重に対して効率よく縞を発生させることができなかった。光弾性縞を低荷重でも発生するようにするためには（1）式より、 α および t

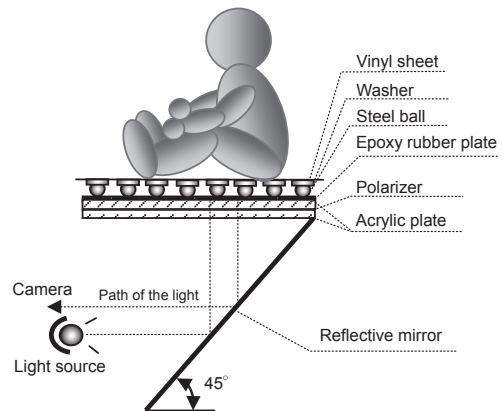


Fig. 1 Photoelastic apparatus for measuring the pressure points when seated

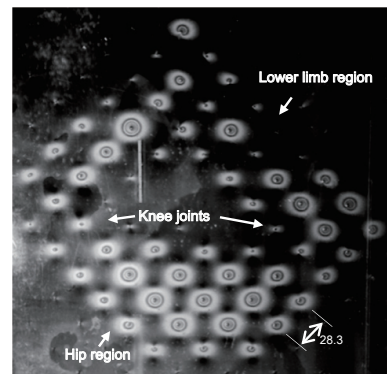


Fig. 2 Photoelastic fringe image on the contact plane

値を大きくする必要がある。αは厚さ1mmの板に9.8×10²paの(σ₁−σ₂)値を作用させたときに現れる等色線次数に相当し、この値が高い材料ほど縞が出やすい。しかし、αの高い材料を用いると縞は発生しやすくなる一方、荷重除去後のひずみ回復のヒステリシスが悪くなる。また、板厚tを増やすことで縞は発生しやすくなるが、今度は縞のコントラストの低下を招くことになり、一次縞の正確な判読が難しくなる。以上の点を考慮しαおよびt値を選定した結果、鋼球一個に加わる荷重が0.2N程度の弱い荷重でも測定可能な一次縞を発生させることができた。ところが、骨の突出部では集中荷重を受けるため大きな縞が発生する。これが周辺の縞と干渉を起こし縞が歪むため正確な測定に支障を来すこととなった。縞同士の干渉を防ぐには鋼球のピッチを大きくする必要がある。ピッチ拡大は面としての連続性を失うことにつながり、これにも限度がある。

以上のような条件を勘案し、入念に予備実験を行い決定した仕様は、α=4.2mm/N、t=6mm、鋼球径5mm、ワッシャー径8mmで、碁盤目状の鋼球ピッチは28.3mmである¹⁴⁾。Fig.2はこの仕様で作製した装置を用いて撮影を行った2歳健常男児の膝屈曲時における座面部光弾性縞写真である。この写真の上部は下肢先端部で下部は臀部に位置し、座圧分布状態の全視野での観察が可能である。

座面上に発生した円形状の光弾性縞より荷重を求めるために、縞画像を等倍大にした後、一次縞径D_iをスケールにより1/10mm精度で正確に読み取った。一次縞径D_iと鋼球一個に加わる荷重f_iの間にはFig.3の関係が得られた。縞画像の数値化処理はパソコンを使用して行うため、D_iからf_i値を求める数式を導いた。(2)式は得られた近似式である。この式と実際のデータとの適合度を知るために決定係数R²値を計算した結果、0.999と極めて1に近い数値が得られ、実際のデータとのあてはまりは良いと判断した。

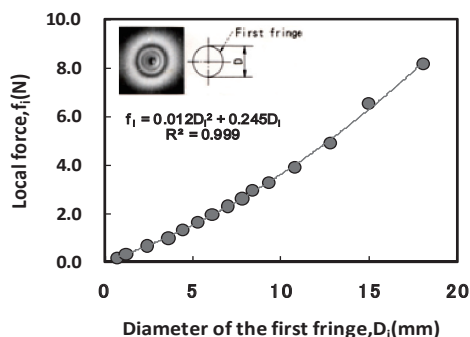


Fig. 3 Calibration curve between the local force and the diameter of the first fringe

$$f_i = 0.012D_i^2 + 0.245D_i(N) \dots\dots\dots (2)$$

この(2)式で求めたf_i値をもとに、座圧中心座標を決定した。その方法は座圧分布のx-y平面上の任意の位置に原点(0, 0)を設定し、鋼球とエポキシラバ板との接点座標を(x₁, y₁)とすると、圧中心座標(x, y)は以下の(3)式で求めることができる。

$$x = \sum_{i=1}^n f_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^n f_i, \quad y = \sum_{i=1}^n f_i \cdot y_i / \sum_{i=1}^n f_i \dots\dots\dots (3)$$

(2)式は2次式であり、D_iの読み取り誤差に計算誤差が加わると、最終的な誤差は大きくなることが予想される。これが(3)式の圧中心座標決定にどの程度の影響を及ぼすかが重要で、これに含まれる誤差を予め正確に把握しておくことが必要となる。そこで、この(1)

式から計算された値をもとに、実際に圧中心座標の決定にどの程度の誤差が含まれるかを調べてみた。均一な150mm角の鉄板を水平に置いて、検証のために接点数25個で圧中心座標の測定精度を求めると、誤差が±1mm程度であり、実用上は差し支えないものと判断した。

そこで、本研究はFig.4に示すように膝の伸展および屈曲時の座位姿勢を測定肢位とし、母親に付き添ってもらいながら安定した状態で光弾性縞撮影を行った。その際、上肢は床面から離れていることを条件とした。各被験児は膝関節屈曲位と伸展位それぞれ数秒間隔で3枚ずつ写真撮影を行い、それぞれの縞画像処理により得られた平均データを以って代表値とした。体重心 (Center of mass; COM) と地球の中心を結ぶ線が、臀部と下肢部で囲む支持基底面 (Basal supporting surface; BSS) と交差する位置をゼロモーメントポイント (Zero moment point; ZMP) とし、BSS上でZMPの前後・左右方向の位置設定のメカニズムを解明するために数値解析を行った。Fig.5は上の(2)(3)式をパソコンにプログラミングし数値化処理を行ったDS児の膝屈曲(左)と膝伸展時のデータを表示したものである。荷重が負荷されている位置とその大きさおよびZMP位置が表示されている。

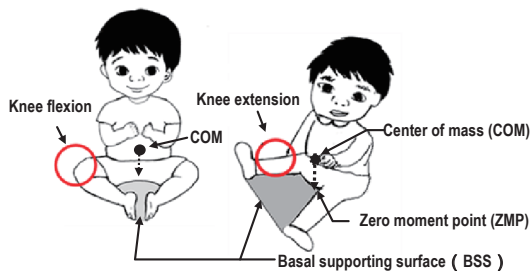


Fig. 4 ZMP located on the basal supporting surface in both knee flexion and extension when seated

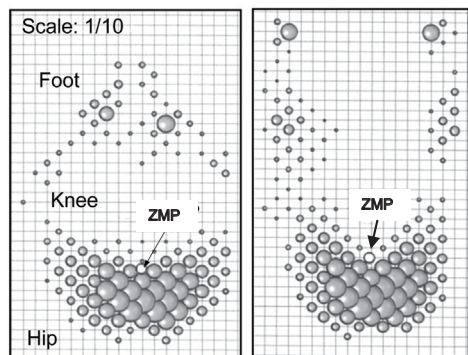


Fig. 5 Diagram of the seating force located on the steel balls analyzed by personal computer in an infant with Down syndrome when the knees were flexed (left) and extended (right). The load corresponds to 18.9N when the diameter of the circle figure is 5mm

2-3 数値解析方法およびパラメータ

座位姿勢を維持するにはZMPが臀部および下肢部で囲まれるBSS内にあることが必要であり、本研究は膝関節の屈曲および伸展や年齢等の違いによりZMPが臀部先端から前方または左端から右方への位置をどのように設定しているかに注目した。実際に被験児を装置の台上に座らせると、被験児ごとにBSSの形状や大きさならびにZMP位置が異なった。また姿勢の安定にはBSS上のZMP位置ばかりでなく、ZMPからCOMまでの高さも関与することになる。すでに、健常新生児および乳児の背臥位の接触圧分布解析により体幹部圧中心位置を求めた結果、月齢とともに体幹上部にあった圧中心は臀部方向に下降し、姿勢が力学的に安定する方向に向かおうとする現象を認めた⁹⁾。今回の被験児はその位置を測定していないが、今後、さらに詳しい評価を行うためにはそのデータも必要になると考えている。

今回、座面部に発生した光弾性縞を実際に撮影してみると、下肢サイズや膝関節ならびに股関節屈曲角等が被験児ごとに異なることから縞パターンは大きくばらついており、信頼性のあるデータが得られるかどうか疑問が湧いてきた。X線やMRI等の画像撮影では患者を動かないようにベルト等で固定するポジショニングが必要とされるが、今回のような測定に非協力的な乳幼児にこれを適用するのは困難であるとともに、たとえこの目的を達成できたとしても自発的な姿勢動作とはかけ離れた状態になってしまう恐れが出てくる。

そこで、本研究では被験児を強制的に固定するようなことはせず、あくまでも自由に座らせた状態での光弾性縞撮影と数値解析を行うことにした。撮影した光弾性縞画像はパソコンで処理した後、ZMPがBSS上の前後・左右に占める割合を λ および η と定義し、膝関節の屈曲・伸展の違いによる影響や年齢との関係等について調べた。

Fig.6はその λ および η を求める方法を図示したものである。臀部および下肢部先端の接地面を楕円形状とみなし、臀部先端から下肢部先端までの縦方向の長さの最大値を L_1 とし、臀部先端からZMPまでを L_2 と定義した。また、左端から右端の横方向の長さの最大値を T_1 とし、左端からZMPまでを T_2 と定義した。ZMPの臀部から前方に占める割合（縦比率）を $\lambda = (L_2/L_1 \times 100) \%$ とし、左端からの占める割合（横比率）を $\eta = (T_2/T_1 \times 100) \%$ とした。

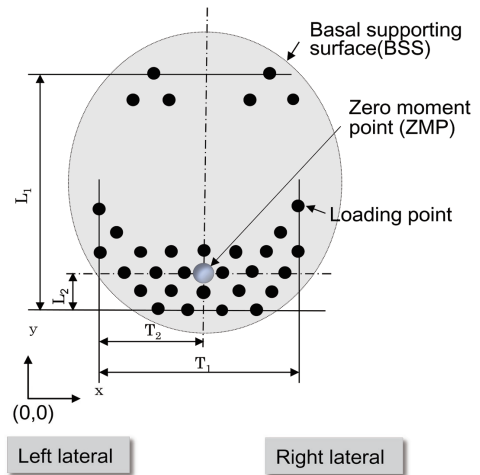


Fig. 6 Geometrical method for deciding the ZMP position along both the antero-posterior and medio-lateral directions on the basal support surface

3. 結果および考察

はじめに、膝関節の屈曲および伸展による λ 値と η 値の関係をFig.7に示した。また、DS児1例のデータも一緒にプロットした。横軸には λ 値を、縦軸には η 値を表示した。健常児の膝屈曲時の λ 値は平均 $\lambda_m = 33.2 \pm 2.6\%$ で、膝伸展時は $\lambda_m = 22.3 \pm 3.6\%$ であり、その差は10.9%と両者間には統計学的有意な差が認められた ($P < 0.0001$)。また、同様に膝屈曲時の η 値の平均は $\eta_m = 45.5 \pm 7.7\%$ で、膝伸展時は $\eta_m = 43.2 \pm 4.4\%$ と、その差は2.3%で λ 値に比べ少なく両者間には統計学的有意な差

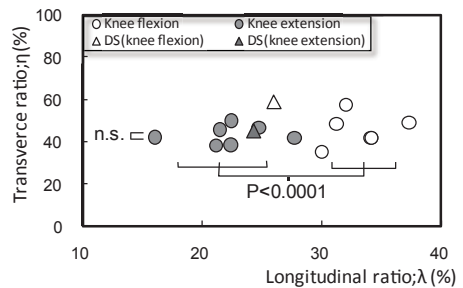


Fig. 7 Relationship between the λ values and the η values in both knee flexion and extension.

は認められなかった。λ値は膝関節の屈曲・伸展により変化するものの、η値はその影響を大きく受けないことが判明した。DS児の場合は膝屈曲時λ = 26.0%で、膝伸展時24.3%であり、その差は1.7%と健常児に比べ少なくなっていた。また、膝屈曲時η = 58.6%で、膝伸展時は44.8%であり、その差は13.8%で健常児に比べ大きかった。

DS児の姿勢に関する研究は少ないが、Davisら(1982)の筋緊張の異常に関する研究¹⁵⁾や、Shumway-Cookら(1985)の負荷応答に関する研究がある¹⁶⁾。特に、DS児の姿勢調節異常は応答に要する潜在時間が同じ年齢の健常児に比べ長いことから、外乱によってより大きな身体動揺を引き起こしてしまうことを指摘した点は興味深い。

筆者の一人も過去にDS児の立位時における重心動揺速度の解析を行った経験がある¹⁴⁾。その結果は、同年齢の健常児に比べ動揺速度が増加していることを確認した。DS児は筋緊張の異常に加え筋の応答遅れ等が重なって不安定な姿勢調節を強いられているものと思われた。冒頭にも述べたが、DS児は立位可能となった段階で足圧中心がすでに踵の前方50%位置に設定されていたのも、平衡機能低下によってもたらされた結果であると解釈した。なお、閉眼状態も50%位置のままであり、成人してもこれは変わらなかった¹⁷⁾。健常者では70歳の高齢者が立位姿勢を行った時の足圧中心が踵の前方50%位置となる。DS児は初めて立った状態の圧中心位置をその後も維持し続けているのは、もともと筋緊張低下が特徴として見られることから、これがスイッチとなってこのような状態をもたらしているかもしれない。今回の座位姿勢解析でλ値が膝関節の屈曲・伸展で健常児のような差が無かったのも同様な機序によるものではないかと考えている。DSの症例数が一例と少ないので、これ以上の議論は困難であり、今後、症例数を増やした上でこの点については改めて論じたい。

次に、本研究で求めた座圧分布評価パラメータのλおよびη値が発達とどのような関係を示すか明らかにするために、年齢との関連性を調べた。Fig.8は横軸に年齢を、縦軸にはλ値をとり、両者の関係を示したものである。膝関節の屈曲および伸展による差はすでにFig.7で示したように、関節の屈曲・伸展に伴いBSS形状や大きさの変化に対し、決められた最適場所にZMPの位置決めを行った結果であると考えた。次に、年齢の増加に伴うλ値の減少は、BSS上におけるZMPの後方臀部側への移動を表したものである。これは脊柱後方に付着し縦に走行しながら体幹部をクレーンのように引っ張り維持する脊柱起立筋が腸腰筋や腹筋等の股関節屈曲筋とのバランスのうえで筋量および筋力が促進され、3次元空間での直座位姿勢の定位を反映したものであると考えた。年齢を指標として変化するλ値は発達の評価指標として利用できるかもしれない。

筆者が過去に行った健常児の静止立位時における足圧分布解析の研究経験から、2本足で立ちができたばかりの子どもでは開眼時の足圧中心が踵の前方30%に位置していたが、その後は年

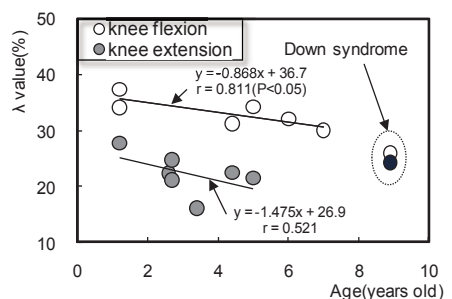


Fig. 8 Relationship between the age and the λ value in both knee flexion and extension

齢を追うごとに徐々に前方移動し、高齢者は50%位置に達した。また視覚情報が得られない閉眼状態では、どの年齢層でも足の支持基底面中央の50%位置に向かって移動した（ただし、パーキンソン病患者や高齢者では逆転後方移動がみられる）^{18) 19) 20)}。閉眼では平衡維持・調整に重要な視覚情報が得られないため姿勢の不安定性が強まり、足圧中心の前方移動はより安定した状態に近づこうとする防御反応と思われた。座位姿勢の解析では圧中心が年齢とともに後方移動しており、立位の前方移動とは異なる様相を示した。このような座位姿勢と立位姿勢の発達過程で圧中心の移動パターンに違いがあることは興味深いのが、それがどのような戦略に基づいて行われているかは不明で、この点は今後改めて明かにして行きたいと考える。

次に、BSS上の左端から左右方向にZMPの占める割合 η 値と年齢との関係をFig.9に示した。 η 値は年齢との間で相関は認められなかったが、データの大半は膝関節の屈曲および伸展の違いに関わらず、BSS上の中心軸（左端から50%位置）より左側に分布しており、荷重を左半身で多く負担する傾向にあることが判明した。このことは、立位姿勢の左と右足荷重を計測し比較した結果、左足荷重が右足に比べ多かった事実を踏まえ、左足には軸足として身体支持に優先される性質があることを提唱した平沢ら²¹⁾の研究報告と一致する興味深い結果となった。

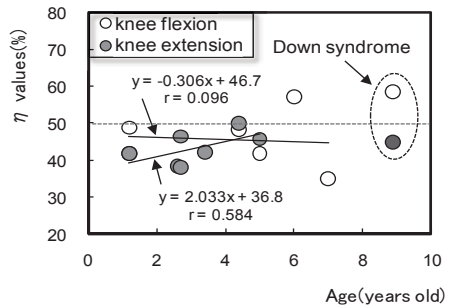


Fig. 9 Relationship between age and the η values in both knee flexion and extension

4. まとめ

本研究はバイオメカニカルな視点から小児神経発達の定量評価に役立つ資料を得るために、光弾性法を用いた座位時の接触圧分布解析装置を開発し臨床応用の可能性を検討した。被験児数が少ない点是否めないが、乳幼児期の座位姿勢の接触圧分布を λ および η 値を指標に分析評価を行った結果、子どもの座位姿勢発達の力学的一断面を明らかにすることができた。その成果は以下のとおりである。

- 1) 膝関節の屈曲時の λ 値が伸展時に比べ大きかった。
- 2) λ 値は年齢変化に応じて減少した。
- 3) η 値は大半が50%を下回り、左側部への荷重負担が多かった (Laterality)。
- 4) DS児の λ および η 値は健常児と異なる様相を呈した。

参考文献

- 1) Wyke B. The neurological basis of movement: a developmental review. In K. S. Holt (Ed.) Movement and Child development, Philadelphia Lippincott, 19-33 (1975)
- 2) Gilfoyle E. M., Grady A. P., Moore K. C., Children Adapt. NJ, Charles Slack (1986)
- 3) Cambell S. K., Wilhelm I. J., Development from birth to 3 years of age of 15 children at

- high risk for central nervous system dysfunction, *Physical Therapy*, 65, 463-69 (1985)
- 4) Reed E. S. An outline of a theory of action systems. *Journal of Motor Behavior*, 14, 98-134 (1982)
 - 5) 小西行郎, 小西 薫, 竹内恵子. 神経学的診断法 (自発運動), *小児科診療*62 (11), 1769-74 (1999)
 - 6) 前川喜平. 小児の起立, 歩行の重心力学的考察, 脳と発達, 20, 91-102 (1988)
 - 7) 桐生武夫, 平沢彌一郎, 白井永男. 新生児の姿勢制御に関する基礎的研究, 第5回姿勢シンポジウム一般演題抄録集, 67-68 (1983)
 - 8) 中川博文, 飯沼和三, 高橋 賞. 筋緊張低下症患者における光弾性手法に基づく足圧分布特徴の解析, 非破壊検査, 40 (8), 536-41 (1991)
 - 9) M. Fujimatsu, T. Fujita, K. Hashimoto et al. Contact pressure distribution in the supine position in low-birth weight infants analyzed by a photoelastic method, *Pediatrics International*,43, 2976-35 (2001)
 - 10) Y. Nishizawa, T. Fujita, K. Matsuoka et al. Contact pressure distribution features in Down syndrome infants in supine and prone positions, analyzed by photoelastic methods, *Pediatrics International*, 48, 484-8 (2006)
 - 11) 中川博文, 飯沼和三, 高橋 賞他2名. 光弾性を用いた接触圧分布測定法による乳児の寝姿勢解析, 非破壊検査, 41 (8), 467-72 (1992)
 - 12) Arcan M., Brull MA. A fundamental characteristic of the human body and foot, *J. Biomech*, 9,453-7 (1976)
 - 13) 中川博文, 高橋 賞. 光弾性を用いた足圧分布測定法 (第1報), *日本機械学会論文集*, 52, 480 (A) 2109-16 (1986)
 - 14) 中川博文, 飯沼和三, 高橋 賞. 重心動揺計を利用したDown症候群の姿勢制御機能の発達に関する研究, *姿勢研究*, 10 (2) 105-12 (1990)
 - 15) Davis W, Kelso J. S, Analysis of invariant characteristics in the motor control of Down syndrome and normal subjects, *Journal of Motor Behavior* ,14 (3),194-212 (1982)
 - 16) Shumway-Cook A., Woollacott M. Dynamics of postural control in the child with Down syndrome, *Physical Therapy*, 91315-22 (1985)
 - 17) 中川博文, 清水和彦, 金井 章他4名. 光弾性手法による成人期ダウン症候群の立位バランス評価, 第39回応力ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, (東京) 169-74 (2007)
 - 18) J. Kitamura, H. Nakagawa, K. Iinuma, et al. Visual influence on center of contact pressure in advanced Parkinson' s disease, *Arch Phys Med Rehabil*, 74, 1107-12 (1993)
 - 19) 中川博文, 清水和彦, 神田 直. 高齢者立位姿勢の加齢変化に視覚の及ぼす影響. *リハビリテーション医学会誌*, 45 (2), 123 (2008)
 - 20) H. Nakagawa, K. Shimizu, T. Kanda, et al. Standing posture studies in elderly people using photoelastic method and force platform analyzing system. *Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007, JSME-MMD*, 200 (2007)
 - 21) 平沢彌一郎. 直立歩行を支える左足, *サイエンス*, 11 (6), 32-44 (1981)

おわりに

稿を終えるにあたり, 本研究の遂行にご指導・ご助言を賜りました愛児クリニック院長の飯沼和三先生, 湘南東部総合病院リハビリテーションセンターの北村純一先生ならびに元日本医科大学小児科教授の橋本 清先生, 日本医科大学病院長 (小児科主任教授) の福永慶隆先生に深謝しますとともに, この論文をまとめるにあたり温かいご指導を頂戴した豊橋創造大学保健医療学部教授の宮原英夫先生に, この紙面をお借りし謝意を表します。なお, 光弾性縞画像の数値化処理には豊橋創造大学サポートセンターの桐木道彦氏のお力添えを頂きました。心より御礼申し上げます。