原 著

動画対応 FPD 装置による X 線動画像を用いた
腰部後屈運動の動態解析島田康佑¹ 川嶋広貴² 吉岡克人³ 真田 茂⁴論文受付
2014 年 8 月 21 日論文受理
2015 年 10 月 19 日

Code No. 522

¹金沢大学大学院医薬保健学総合研究科保健学専攻
(現 JA 長野厚生連長野松代総合病院診療放射線部)²金沢大学附属病院放射線部³金沢大学附属病院整形外科⁴金沢大学医薬保健研究域保健学系

緒 言

臨床における腰椎疾患の画像診断には、単純 X 線撮影や computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI) が用いられている。単純 X 線撮影における腰椎運動に関しては、腰部側面機能撮影によって椎体のずれや可動域を計測することが一般的で

ある。これらは静止画像による動態情報の取得であり、運動の経時変化を観察したものではない。運動の経時変化に着目した検討は、Williams らが背面センサを使用しビデオカメラによる軌跡の追跡を行うことで、持ち上げ動作による腰椎弯曲の変化を報告している¹⁾。また原田らは、image intensifier (I. I.) の透視像

Motion Analysis of Lumbar Spine and Hip Joint on Sequential Radiographs Acquired with a Dynamic Flat-panel Detector (FPD) System

Kosuke Shimada,^{1*} Hiroki Kawashima,² Katsuhito Yoshioka,³ and Shigeru Sanada⁴¹ Department of Health Sciences Graduate School of Medical Sciences, Kanazawa University (Current address: Department of Radiology, Nagano Matsuhiro General Hospital)² Department of Radiology, Kanazawa University Hospital³ Department of Orthopaedic Surgery, Kanazawa University Hospital⁴ School of Health Sciences, College of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa UniversityReceived August 21, 2014; Revision accepted October 19, 2015
Code No. 522

Summary

Purpose: To design an evaluation method for lumbar spine and hip joint function using dynamic radiography using a flat-panel detector (FPD) system. **Method:** Sixteen healthy subjects (males; age range, 22–60 years; median, 27 years) and 9 patients (7 males and 2 females; age range, 67–85 years; median, 73 years) with L4 degenerative spondylolisthesis were examined using a dynamic FPD system (CANON Inc.). Sequential images were captured with the subjects in the standing position with maximal forward bending followed by backward bending for 10 s. The lateral lumbar radiographs were obtained at 2 frames/s (fps). The flexion-extension angles of L1 and S1 were measured on those images. **Results and discussion:** The range of motion (ROM) of the lumbar joints was significantly larger in the healthy group ($82.4 \pm 8.7^\circ$) than in the disease group ($50.4 \pm 8.5^\circ$; $p < 0.05$). The ROM of the pelvic region was significantly smaller in the healthy group ($26.9 \pm 17.1^\circ$) than in the disease group ($53.1 \pm 17.6^\circ$; $p < 0.05$). The healthy subjects exhibited a normal lumbar-pelvic rhythm. In the disease group, hip joint movements tended to be completed earlier compared with those in the healthy group. In the disease group, the loss of lumbar flexibility was compensated by an increase in hip joint motion due to the lumbar disease. **Conclusion:** The dynamic FPD system is a convenient imaging modality for the diagnosis of lumbar diseases through the assessment of locomotive function in the lumbar spine and hip joints.

Key words: flat-panel detector (FPD), motion analysis, lumbar spine, hip joint, lumbar-pelvic rhythm

*Proceeding author

Fig. 1 Setup of the FPD system. A volunteer stands in front of the detector. (a) Maximum flexion, (b) Intermediate position, (c) Maximum extension.

を解析することで、前屈時には上位の椎体から運動を開始し、後屈時には下位の椎体から運動を始めることを明らかにしている^{2~5)}。これらの手法は、特別な施設でのみ行えるものや、撮像可能視野などの装置による制限があることが問題点としてあげられる。

近年、広く臨床に普及している動画対応 flat-panel detector (FPD) 装置は、I. I. と比較して高解像度であり、大視野で歪みのない動画像を撮影することが可能である。この特長を活かした検討として、胸部の呼吸や血流情報の解析、四肢に関しては関節運動の評価などが報告されている^{6~10)}。

整形外科の分野において、股関節疾患によって腰椎負荷を増加し、腰椎へ影響を与える病態もしくは腰椎疾患が股関節へ影響を与える病態があり、この相互の関係は hip-spine syndrome として知られている¹¹⁾。このように、腰椎と股関節には相互に密接な関係があり、Rene らは前後屈運動時の特有な形式として「腰椎-骨盤リズム」を提唱している^{12, 13)}。しかし、腰椎と骨盤の運動の経時変化を同時に評価した報告は少なく、この関係を評価できれば診療や治療方針の決定に有効な情報を提供できる可能性がある。

本研究では、動画対応 FPD を用いて腰椎と骨盤の後屈運動を X 線動画像として取得し、腰椎と骨盤動態の経時変化を比較することで、健常者と腰椎疾患患者の運動の違いが評価可能であるかを検討した。

1. 方法

1-1 撮影対象

対象は、腰部と下肢に障害の既往がない健常群 16 名(年齢: 22~60 歳, 中央値: 27 歳, すべて男性)と、第 4/5 腰椎間に変性すべり症を持つ腰椎疾患群 9 名(年齢: 67~85 歳, 中央値: 73 歳, 男性: 7 名, 女性: 2 名)とした。また、本研究は金沢大学医学倫理

審査委員会の承認を得て、被検者には撮影に関する十分な説明を行い、書面による同意を得て行った。

1-2 動画像の取得

撮影には Canon 社の試作機である動画対応 FPD 搭載ポータブル X 線撮影装置を用いた。検出器は動画対応 FPD (CXDI-50RF; Canon, Tokyo, Japan), X 線管は ROTANODE (DRX-1414A 1.3/0.6, TOSHIBA, Tokyo, Japan) を使用した。撮影体位は立位側面とし、最大前屈位を運動開始とした。撮影開始の合図とともに 10 秒間で、最大後屈位までの後屈運動を行った (Fig. 1)。運動時の体幹のねじれを抑制するため、上肢は支持棒を持ち拳上させた。撮像視野は、運動中の各フレームにおいて第 1 腰椎から大腿骨頭までが視野内に収まるよう設定した。撮影条件は、管電圧: 90 kV, 管電流時間積 (mA second: mAs): 画像 1 枚当たり 4.0 mAs, 撮影距離: 100 cm, 撮影レート: 2 fps とした。X 線動画像のマトリクスサイズは 1100 × 1340, ピクセルサイズは 0.320 mm である。また、1 回撮影 (取得画像 20 枚) における被ばく線量は、約 9.8 mGy であった。これは、本学附属病院で行われている腰椎側面撮影 2 回分の線量 (約 10.8 mGy) とほぼ同等の線量である。取得した動画像の 1 例を Fig. 2 に示す。

1-3 腰椎と骨盤の角度変化の計測

計測には画像処理フリーソフト ImageJ (ver. 1.47v, National Institutes of Health, USA)¹⁴⁾ を使用し、3 回計測を行った値の平均値を用いた。第 1 仙椎 (S1) 上縁前端と、第 1 腰椎 (L1) 下縁後端を結ぶ線が、画像の縦軸と並行となるフレームを基準とし、この時点を中心位 (0°) と定義した (Fig. 3a)。各画像において、S1 上縁角度 (S_{angle}) と L1 下縁角度 (T_{angle}) の、中間位か

Fig. 2 Dynamic images of the lumbar spine and hip joint kinetics by FPD. (a) Maximum flexion, (b) Intermediate position, (c) Maximum extension.

Fig. 3 (a) Definition of intermediate position. Frame of the intermediate position is that the vertical axis is parallel to the line between L1's inferior posterior end and S1's superior anterior end. (b) Measured angle of lumbar spine and pelvis. Changes of L1's inferior edge (T_{angle}) and S1's superior edge (S_{angle}) were measured from the intermediate position. L_{angle} means the difference between T_{angle} and S_{angle} .

らの変化を計測した(Fig. 3b). 上方に角度が開いているとき(前屈)は正の値, 下方に角度が開いているとき(後屈)は負の値とした.

今回, 対象とした後屈運動は, 腰椎と骨盤(股関節)の運動によって成り立つ. 仙骨は骨盤と連動しているため, S_{angle} は骨盤の運動を表すと考えられる. 腰椎の運動は, 椎体の下縁を計測することで定義できるが, 計測した T_{angle} には, 下位の関節運動による角度変化も含まれている. そこで, 骨盤運動(S_{angle})を除くことによって, 腰椎の関節運動(L_{angle})を算出した($L_{angle} = T_{angle} - S_{angle}$).

1-4 腰椎と骨盤動態の解析方法

健常群と腰椎疾患群において以下の3項目で比較を行った.

疾患による可動域の変化をみるため, T_{angle} , S_{angle} , L_{angle} それぞれの, 最大前屈位から最大後屈位までの範囲の変化量を求めた. 統計処理は両側 t 検定を用い, 有意水準を $p < 0.05$ とした.

後屈運動における腰椎と骨盤の角度変化量の関係を観察するため, S_{angle} を横軸, L_{angle} を縦軸として関係をプロットし, 運動パターンを表示した. グラフの傾きが大きいほど腰椎が運動し, 傾きが小さいほど骨盤が運動する.

Fig. 4 Range of motion (t test, * : $p < 0.05$).

Fig. 5 Characteristic curve of pelvis and lumbar. (a) Normal group. (b) Patient group with spondylolisthesis.

腰椎運動と骨盤運動の経時変化を観察するため、 T_{angle} , S_{angle} , L_{angle} それぞれの最大前屈位からの変化を表示した。

2. 結果

2-1 関節可動域

関節可動域の結果を Fig. 4 に示す。グラフの縦軸は T_{angle} , S_{angle} , L_{angle} それぞれの角度変化量である。健常群の可動域の平均と標準偏差は、 T_{angle} : $109.3 \pm 16.2^\circ$, S_{angle} : $26.9 \pm 17.1^\circ$, L_{angle} : $82.4 \pm 8.7^\circ$ であり、 S_{angle} と L_{angle} を比較すると、 L_{angle} の角度変化量が大きく有意差があった。一方、腰椎疾患群では、 T_{angle} : $103.6 \pm 13.8^\circ$, S_{angle} : $53.1 \pm 17.6^\circ$, L_{angle} : $50.4 \pm 8.5^\circ$ であり、 S_{angle} と L_{angle} 間に有意差はみられなかった。

また、健常群と腰椎疾患群の間で検定を行ったところ、 T_{angle} は両群に有意差はなく、腰椎疾患群では S_{angle} の、健常群では L_{angle} の角度変化量が大きく、有意差があった。

2-2 腰椎と骨盤の角度変化量の関係

S_{angle} を横軸に、 L_{angle} を縦軸にプロットしたグラフを Fig. 5 に示す。Fig. 5a は健常群、Fig. 5b は腰椎疾患群の結果である。また、健常群と腰椎疾患群それぞれの平均および標準偏差のグラフを Fig. 6 に示す。運動を開始する最大前屈位から中間位までの範囲の運動パターンに注目すると、健常群では、運動開始時において L_{angle} の角度変化量と比較して S_{angle} の角度変化量が優位であり、その後は L_{angle} の角度変化量が大き

くなっていた。そのため、グラフの傾きが徐々に大きくなる傾向が観察された。

一方、腰椎疾患群では、運動開始から中間位にかけて L_{angle} の角度変化量が小さく、 S_{angle} のみの角度変化となるため、グラフは水平に分布する傾向を示した。

2-3 腰椎運動と骨盤運動の経時変化

経過時間を横軸に、 T_{angle} , S_{angle} , L_{angle} それぞれの最大前屈位からの変化量を縦軸にプロットしたグラフを Fig. 7 に示す。Fig. 7a は健常群、Fig. 7b は腰椎疾患群の結果である。健常群と比較して腰椎疾患群では、 S_{angle} が早期に大きく変化し、後屈運動を完了する傾向があった。

Fig. 6 The average of characteristic curve of pelvis and lumbar.

3. 考 察

本研究では、動画対応 FPD 装置を用い、後屈運動時の腰椎運動と骨盤運動の関係について解析を行った。

健常群の関節可動域は、腰椎の可動域が骨盤の可動域に比べ有意に大きくなった。また、運動中の腰椎と骨盤の角度変化量の関係は腰椎が大きくなり、経時的には骨盤運動に始まり徐々に腰椎運動に移行する傾向を示した。これは、Rene らが報告している腰椎-骨盤リズム^{12, 13)}と同様の傾向を示し、本法においてもこれらの動作を評価することが十分に可能であったことを示している。

次に、腰椎疾患群では、動作全体の可動域を示す T_{angle} を比較すると、健常群と大差はないが、腰椎の可動域を示す値である L_{angle} の割合が減少し、骨盤の可動域を示す値である S_{angle} の割合が増える傾向があった。経時変化に着目すると、運動の初期から骨盤運動が顕著に大きく、腰椎運動に比べ骨盤運動が早期に完了する傾向がみられた。これより、腰椎疾患群では健常群と同様に運動初期で骨盤運動が始まるが、すべり症による腰痛などの症状を抑えるために腰椎運動への移行が正常に行われず、代わりに骨盤運動を増加させることによって補っていると考えられる。それによって運動における腰椎と骨盤の角度変化量の割合が変化し、健常群で確認された腰椎-骨盤リズムが崩れてしまったものとする。これは、健常時の動作を維持するための補償機構がはたらいっていることを示唆しており、疾患群では股関節の負荷が増加するといえる。本結果は、hip-spine syndrome の機序にも当てはまるものであった。

これまでに報告されている I. I. を用いた経時的な腰

Fig. 7 Time course of joint angle. (a) Normal group. (b) Patient group with spondylolisthesis.

椎動態の解析²⁻⁵⁾は、腰椎のみを解析の対象としていることから、坐位での検討が多くみられる。坐位での撮影は骨盤運動が制限されるため、本法で解析対象としている仙骨上縁を計測しても、十分な骨盤運動を反映できない。そこでわれわれは動画対応 FPD を用い、広視野で解像度の高い動画像を取得することによって、立位における動態を評価した。これによって腰椎と骨盤運動の関係を把握することができ、より簡便なスクリーニング検査として病態の早期発見が期待できる。また、術前後における動態の比較や、術後のリハビリテーション効果を評価する場合においても、有用な情報を提供できると考えている。

本検討では、立位の後屈運動を解析対象とした。これは運動開始時での最大前屈位の姿勢が安定したためであり、前屈動作の場合には運動開始の姿勢が最大後屈位となり被検者にふらつき傾向がみられたためである。また、撮影時には下肢や腰部の固定具を使用せずに運動を行い、自然な後屈動作を解析対象とした。そのため、運動方法の個人でのばらつきや後屈動作以外

の下肢の運動が影響している可能性があった。更に、われわれが対象とした健常群と疾患群の年齢の差が大きく、解析結果の差が疾患によるものか、加齢によるものか判別が困難であった。今後、最適な撮影方法の検討および腰椎や股関節疾患の既往のない高齢者を対象とした解析を行うことで、これらを明確にする必要がある。

4. 結 語

動画対応 FPD 装置を用いた腰部側面 X 線動画像において、後屈時の動態を解析した。腰椎疾患群では、腰椎運動の減少だけでなく、骨盤運動の増加や腰椎-骨盤リズムの変化が生じており、股関節の負荷が増加していることが示唆された。本撮影法は、腰椎および股関節の動態異常を早期に評価可能であることから、簡便なスクリーニング検査となり得る。

なお、本研究の要旨は第 70 回日本放射線技術学会総会学術大会(2014 年、横浜)にて発表した。

参考文献

- 1) Williams JM, Haq I, Lee RY. Dynamic measurement of lumbar curvature using fibre-optic sensors. *Med Eng Phys* 2010; 32(9): 1043-1049.
- 2) 原田雅仁, 鎧 邦芳, 伊東 学, 他. シネラジオグラフィによる不安定腰椎の連続的動態解析. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 1996; 17: 139-142.
- 3) Takayanagi K, Takahashi K, Yamagata M, et al. Using cine-radiography for continuous dynamic-motion analysis of the lumbar spine. *Spine* 2001; 26(17): 1858-1865.
- 4) 原田雅仁, 伊東 学, 鎧 邦芳, 他. 不安定腰椎の連続的動態解析—分離すべり症, 変性すべり症における動態特性—. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 1998; 19: 15-18.
- 5) 高柳建志, 山縣正庸, 高橋和久, 他. 座位における腰椎の動態解析. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 1997; 18: 177-183.
- 6) 川嶋広貴, 田中利恵, 真田 茂. 胸部 X 線動態撮影の再現性の検証—ピクセル値の呼吸性変化—. *日放技学誌* 2009; 65(6): 738-744.
- 7) Sakuta K, Sanada S, Tanaka R, et al. Functional radiography for shoulder joint motion using a dynamic flat-panel detector. *Eur Soc of Radiol* 2013; C-0519: 1-15.
- 8) 梶迫正明, 真田 茂, 池田和夫, 他. 手関節側面 X 線動画像の解析: 掌背屈運動における関節動態. *信学技報* 2003; 103(409): 29-34.
- 9) 森岡茂晃, 真田 茂, 北岡克彦, 他. 動画対応フラットパネルディテクタ装置を用いた新しい膝関節動態解析法. *医画情学誌* 2004; 21(1): 116-121.
- 10) 大谷友梨子, 真田 茂, 上木耕一郎, 他. フラットパネルディテクタ装置による頭部軸位動態画像を対象とした顎関節動態撮影法. *医画情学誌* 2005; 22(1): 73-78.
- 11) Offierski CM, MacNab I. Hip-spine syndrome. *Spine* 1983; 8 (3): 316-321.
- 12) Cailliet R. 4 Dynamic lumbar and sacral spine. *Low Back Pain Syndrome Edition 4*. F. A. Davis Company. USA. 1991: 45-62.
- 13) Cailliet R. 2 脊柱の機能解剖. 図説運動器の機能解剖. 医歯薬出版. 東京. 2000: 29-68.
- 14) National Institutes of Health, USA. <http://imagej.nih.gov/ij/>

問合先

〒 381-1231 長野市松代町松代 183

JA 長野厚生連長野松代総合病院診療放射線部 島田康佑