

牽引が拘縮改善のための手関節運動に与える影響のMRIによる検証

著者	立矢 宏, 折坂 康介, 土田 博貴, 真田 茂, 西村 誠次, 多田 薫, 川嶋 広貴, 堀江 翔, 大野 直樹
雑誌名	Transactions of the JSME = 日本機械学会論文集
巻	83
号	848
ページ	16-00265
発行年	2017-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/47905

doi: 10.1299/transjsme.16-00265

牽引が拘縮改善のための手関節運動に与える影響のMRIによる検証

立矢 宏^{*1}, 折坂 康介^{*2}, 土田 博貴^{*3}, 真田 茂^{*4}, 西村 誠次^{*4}
多田 薫^{*5}, 川嶋 広貴^{*4}, 堀江 翔^{*5}, 大野 直樹^{*4}

Verification of the influence of traction on wrist joint motion to improve the contracture by MRI

Hiroshi TACHIYA^{*1}, Kosuke ORISAKA^{*2}, Hiroki TUCHIDA^{*3}, Shigeru SANADA^{*4},
Seiji NISHIMURA^{*4}, Kaoru TADA^{*5}, Hiroki KAWASHIMA^{*4}, Sho HORIE^{*5} and Naoki OHNO^{*4}

^{*1} Kanazawa University, Institute of Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

^{*2, *3} Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

^{*4} Kanazawa University, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Faculty of Health Sciences
5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-0492, Japan

^{*5} Kanazawa University Hospital
13-1 Takara-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-8641, Japan

Received ?? ?? 2016

Abstract

Convalescence of distal radius bone fracture, which is major disease for elderly people, requires speedy improvement of the contracture for wrist joint angles. The contracture is the case that wrists stiffen up and the range of their motion tends to be restricted by fixing them for long time after bone fracture. Recently, traction of the wrist during flexing and extending the wrist joint is considered to be efficient as the rehabilitation procedure. Previously, we developed an equipment that can apply the constant traction force to the wrist during flexing and extending the wrist joint. By using the equipment, we observed the dynamic motion of carpals in the wrist by radiography and found that the ratio of displacement of radius - lunate joint (R-L joint) to that of wrist angle increases by the traction. However, as the obtained images by radiography were not so clear and 2 dimensional data by projecting the texture of carpal, the displacement and rotation of carpal couldn't be measured precisely. We have developed a new equipment that can hold a wrist joint being pulled at flexion or extension posture for MRI photography. MRI can take detail 3 dimensional images. By using the equipment, the study reveals that lunar, which constitutes R-L joint as a major carpal, rotates by traction of the wrist and its rotation extends the motion range of R-L joint to dorsiflexion side. Furthermore, the interosseous distance of capitate - lunate joint (C-L joint) tends to extend by the traction at neutral and dorsiflexion positions, and it may have influence on the extension of the motion range of R-L joint.

Key words : Wrist joint, Carpal, Ccontracture, Rehabilitation, MRI, Flexion and extension

1. 緒 言

転倒して手をついたときなどに手首付け根部で起こる橈骨遠位端骨折は、高齢者によくみられる骨折である(金谷, 2010). 同骨折を被った場合、ギプスなどで手関節を固定するため、同関節の拘縮が生じやすい。そこで、手関節拘縮の予防や治療のために、手関節を掌背屈させる手技がリハビリテーションとして行われる。

No.16-00265 [DOI:10.1299/transjsme.16-00265]

^{*1} 正員, 金沢大学理工研究域 機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 学生員, 金沢大学大学院 自然科学研究科

^{*3} 金沢大学大学院 自然科学研究科

^{*4} 金沢大学 医薬保健研究域 (〒920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80)

^{*5} 金沢大学附属病院 (〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1)

E-mail of corresponding author: tachiya@se.kanazawa-u.ac.jp

手関節の運動は、主に橈骨手根関節と手根中央関節の運動の和として生じ(有野, 根元, 2005), これら 2 つの関節それぞれの手関節全体の動きに対する運動の割合には特徴的な傾向が存在(有野, 根元, 2005)(今村, 1987)するため, リハビリテーションでは各関節の動きのみならず, その運動割合を正常にすることが重要である(梶迫他, 2003). そこで, これまでに, 手根中央関節を効果的に他動運動させる手技として, ダーツを投じるように手関節を橈背屈から掌尺屈へ運動させる, ダーツスロー運動が提案されている(Werner et al., 2004)(粕淵他, 2003). また, 徒手的に手首を手先方向へ牽引した状態で, 他動的に手関節を掌背屈運動させる徒手的他動掌背屈運動が注目され(野中他, 2010)(多田他, 2013), 実際に手関節拘縮に対し可動域を早期に回復させる効果が確認されており(野中他, 2010), 多田らは同手技が橈骨手根関節を効果的に運動させる可能性を示した(多田他, 2013). しかし, 施術中の牽引力や掌背屈角度は療法士の経験と感覚によって加減されるため, 施術中に牽引力を一定に保つことや, また, その大きさや方向を正確に調整したり, 大きな力で牽引したりすることは困難であり, 同手技の定量的な評価や適切な牽引力の検討は不十分であった(多田他, 2013).

そこで, 前報(立矢他, 2015)において, 牽引力および牽引方向を調整した徒手的他動掌背屈運動が実施可能な装置を開発し, 同装置を用いたリハビリテーションを実施して手関節骨部の動態を X 線動画像で撮影し, 解析を行った. その結果から, 徒手的他動掌背屈運動時には, 手関節全体の角度変化に対する橈骨手根関節の角度変化の割合が増加することを示した.

しかし, 同報での検討は, 手関節の牽引と関節角度変化割合との関係の評価のみにとどまっており, 牽引による手根骨の移動・回転などの詳細な調査や, 関節角度変化量が増加する要因の検証などが不十分であった. すなわち, X 線動画像から得られる手根骨の動態は, 測定時の各骨部の動きを平面に投影した結果であり, 各骨部の奥行き方向の位置関係が不明で, また, 各骨の輪郭も不鮮明であったことから, 関節角度の変化を精度良く測定することは難しい. よって, 前報では動画を利用した多数のデータから関節の運動変化傾向を求めて, 手関節の運動全体に対する各関節の運動割合のみを平均的に評価した. さらに, 各骨部が重なって投影されるため, 一部の手根骨の動きのみに注目せざるを得なかった.

また, 牽引が手関節に及ぼす影響としては, 手関節を構成する骨間距離の変化が測定されており(野中他, 2010)(Guntern et al., 2011)(Leventhal et al., 2010), 野中らは牽引による関節骨間の開大が骨折部への負荷を軽減しているのではないかと推測している(野中他, 2010). しかし, その詳細は明らかにされておらず, 前報の動画撮影結果からは, 骨間距離を測定し, 関節の運動との関係を測定するには至らなかった.

手首の関節は複数の手根骨からなり, それら個々の角度変化量の増減や, 各手根骨間の運動の関係を明らかにすることは, リハビリテーションにおける治療効果を検討するために重要であり, また, 牽引による角度変化量の増加の原因の解明は, 適切なリハビリテーションの手技を提案することに寄与し得る.

そこで本論文では, 牽引時の掌背屈で生じる手関節骨部の状態を詳細に解明するため, 3 次元的な骨部の観察が可能な核磁気共鳴画像法 MRI(magnetic resonance imaging)の使用を前提とし, MRI 撮影環境下において牽引力および牽引方向を一定に保持可能な装置を製作する. さらに, 同装置を用いて手関節に対する牽引力および屈曲状態を保持した状態で MRI 撮影実験を実施し, 得られた画像の解析を実施する. MRI 画像解析では, 手根骨の角度変化そのものに着目して, 牽引による効果を詳細に検討する. さらに, 骨間距離の測定は前述のように複数の報告がなされているが, 掌背屈中の骨間距離変化について検討した例は少ないため, 骨間距離変化と手根骨の回転の関係についても調査し, 牽引による手関節角度変化との相関の有無などを検討する.

また, 手根骨は近位手根列と, 遠位手根列を中心に構成されている(有野, 根元, 2005)が, これまで近位手根列の角度は, 一般的な方法にならい(多田他, 2013), 同列手根骨の一つである月状骨の角度で代表していた. しかし, 同じ近位手根列に含まれる舟状骨は, 月状骨とは異なる挙動を示し, 遠位手根列の動作を近位手根列へ伝達しているという報告がある(今村, 1987). そこで, 本論文では得られた MRI 画像を利用して舟状骨の動きを測定し, 骨間距離と同様に手関節角度変化に及ぼす影響を検討する.

なお, 本研究は金沢大学医学倫理委員会から承認を得て行った.

2. 手関節の徒手的他動掌背屈運動

2・1 手関節の構造

右手の手関節に関して正面(甲側)および側面(拇指側)から見た様子を図 1 に示す。手関節は前腕の橈骨(Radius)と尺骨(Ulnar)、8 個の短骨で構成される手根骨、さらに中手骨(Metacarpal)から構成される。手根骨は手先側または前腕側によって 2 種類に分類され、手先側の 1:大菱形骨(Trapezium)、2:小菱形骨(Trapezoid)、3:有頭骨(Capitate)および 4:有鈎骨(Hamate)の 4 つを遠位手根列、前腕側の 5:舟状骨(Scaphoid)、6:月状骨(Lunate)、7:三角骨(Triquetrum)および 8:豆状骨(Pisiform)の 4 つを近位手根列と呼ぶ。

手関節には、橈骨・尺骨と近位手根列との間の橈骨手根関節、近位手根列と遠位手根列との間の手根中央関節、遠位手根列と中手骨との間の手根中手関節が存在する。ただし、手根中手関節には可動性がないと報告されている(梶迫他, 2003)。手関節の掌背屈運動は橈骨手根関節および手根中央関節の運動でなされており(有野, 根元, 2005)、一般に橈骨と 6:月状骨がなす RL 関節(Radiolunate joint)を橈骨手根関節の代表、6:月状骨と 3:有頭骨がなす CL 関節(Capitolunate joint)を手根中央関節の代表として測定することが多い。

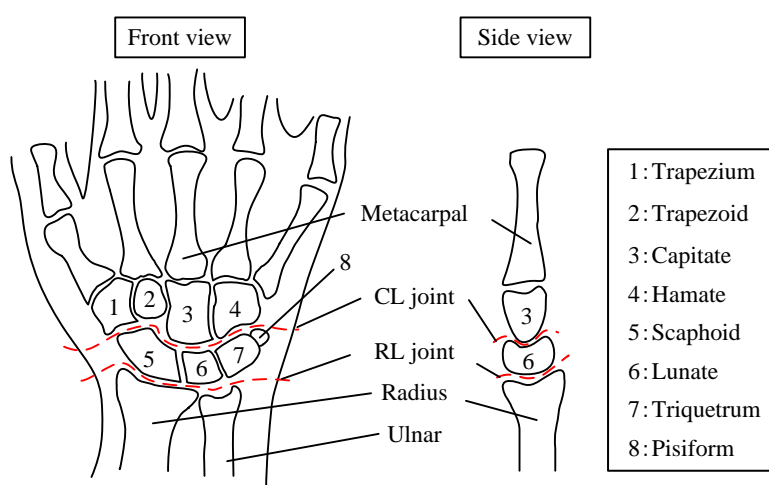


Fig. 1 Structure of wrist.

2・2 徒手的他動掌背屈運動とその効果

手関節の拘縮を防ぐ手技として図 2 に示すように手関節を連続的に掌屈(Flexion)、中間位(Neutral)、背屈(Extension)と他動運動を施すことが一般的である。なお、本論文では掌背屈運動時の手首の屈曲角変位を図 2 に示すように定義し、中間位を 0 deg として背屈側を正とする。

手関節全体の屈曲角変位に対する RL 関節および CL 関節それぞれの屈曲角変位の割合は寄与率と呼ばれ、健常者が掌背屈運動を行う場合、掌屈域では CL 関節の寄与率が高く、背屈域では RL 関節の寄与率が高くなると報告されている。例えば、掌屈域および背屈域での RL 関節の寄与率は、Sarrafian 等によれば、それぞれ 40% および 66.5%(Sarrafian et al., 1977)であり、梶迫等による測定結果からは、おおよそ 32% および 65% であることが読み取られる(梶迫他, 2003)。したがって、疾患により拘縮が生じた手関節に対しては、2つの関節の拘縮の度合いに応じて各関節を効果的に運動させ、正常な寄与率を回復することが重要となる。

RL 関節を効果的に他動運動させる手技として、図 3 に示すような徒手的他動掌背屈運動の応用が期待されている(野中他, 2010)(多田他, 2013)。徒手的他動掌背屈運動は、療法士が対象者の上腕もしくは前腕を固定し、さらに、その手掌および手背部を強く把持して牽引しながら、図 3 のように手関節を連続的に掌屈位、中間位、背屈位と他動運動を施すものである。しかし、療法士の徒手による牽引では一定力での牽引や牽引方向の調整および保持が困難であり、定量的な評価は不十分であった(多田他, 2013)。

そこで前報(立矢他, 2015)において、徒手的他動掌背屈運動の効果を定量的に評価するため、牽引力および牽引方向を調整した徒手的他動掌背屈運動が実施可能な装置を製作した。また、同装置を用いて健常な男性被験者

20名(20~30代, 平均年齢27.0歳, 標準偏差4.1歳)を対象に徒手的他動掌背屈運動を実施し, 手関節を牽引しない場合(非牽引時)および25Nで牽引した場合, それぞれで手関節骨部の動態をX線動画像として撮影した.

得られた画像から, 手関節の屈曲角度の中間位を0 deg, 背屈側を正として, CL関節およびRL関節それぞれの手関節全体の角度変化に対する各関節の角度変化の割合である寄与率を, 掌屈域(屈曲角度-40~0 deg)と背屈域(屈曲角度0~40 deg)それぞれで算出した. 同結果から, 手関節非牽引時と, 25Nで牽引した時との寄与率の差を, 有意確率 p を5%として t 検定した. その結果, 被験者20名の平均値では, 牽引によって掌屈域におけるRL関節寄与率が46.07%から56.41%へ有意に増加し, CL関節に比べてRL関節の寄与率が優位となった. また, 牽引によって背屈域におけるRL関節の寄与率も68.71%から72.02%へ増加したが, ただし, 有意差は確認されなかった. なお, 掌背屈全範囲(屈曲角度-40~40 deg)で牽引による変化を検討した場合は, RL関節の寄与率が56.67%から64.20%へ有意に増加することを確認した.

以上より, 掌屈時, 背屈時ともに牽引によってRL関節の寄与率が優位となるため, 徒手的他動掌背屈運動時はRL関節を選択的に動作させるリハビリテーションとして有効であることがわかった. しかし, 以上の検討は, 牽引の寄与率への影響を評価するのみにとどまっており, 牽引による手根骨の移動・回転などの詳細な測定や, 寄与率増加の原因などに関しては検証が不十分であった.

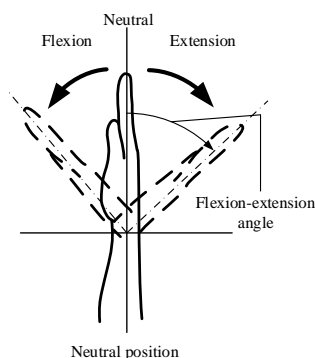


Fig. 2 Flexion and extension of wrist.

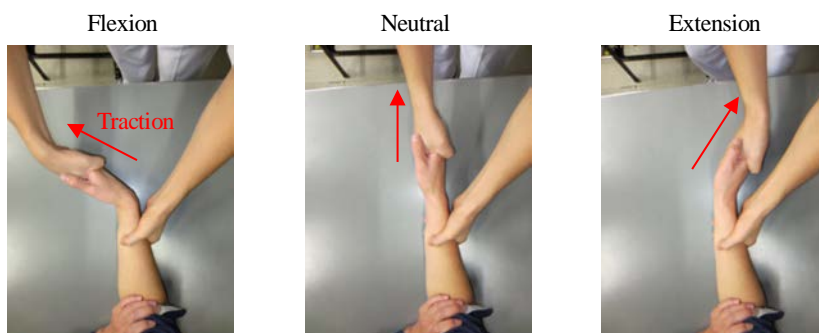


Fig. 3 Rehabilitation for wrist contracture. A therapist gives flexion and extension of the wrist joint with pulling the phalanx toward finger direction.

3. MRI 撮影実験

3・1 実験装置

本論文では, 徒手的他動掌背屈運動における手根骨の詳細な並進や回転変位をMRIにより3次的に撮影する. しかし, MRIでは前報(立矢他, 2015)のように動画を撮影することはできない. そこで, 本論文では, 被験者の右手関節の屈曲角度を保持した状態で, 一定牽引力を与えながら撮影を実施し, 牽引が手関節に及ぼす影響を手根骨の角度および距離の変化から確認する. そのために, 被験者が脱力した状態で, 屈曲角度の保持および一定力牽引が可能な図4に示す装置を製作した.

本装置は手先牽引部と前腕固定部により構成され, 回転軸によって連結されている. 手関節の牽引は, 図5に示すよう手先牽引部に設けられているねじ送り機構と圧縮ばねにより行う. 牽引力は, ねじ送り機構により移動壁を牽引方向へ移動させ, 移動壁と手先固定具間に設けられた圧縮ばねのたわみ量を調整することで, 0~60Nの間で変更できる.

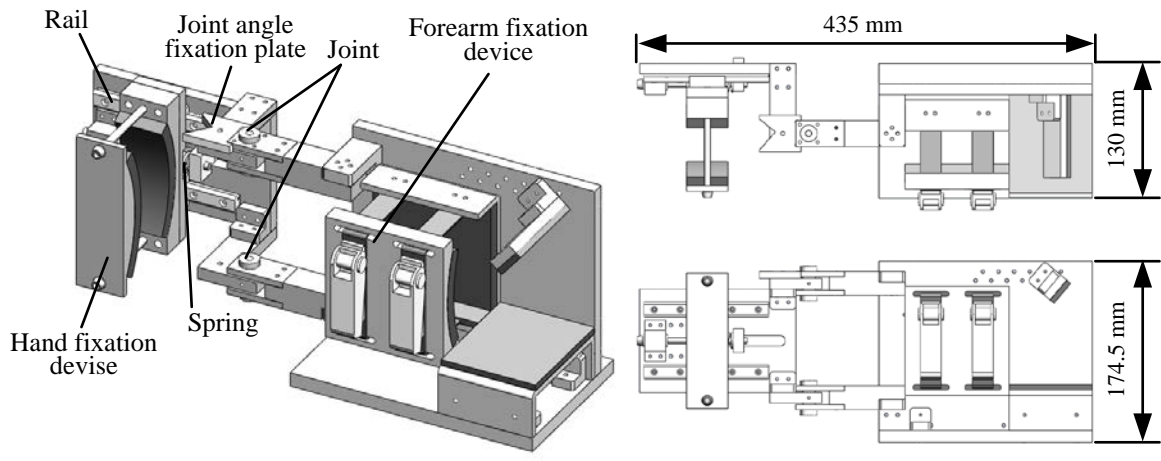


Fig. 4 Equipment for MRI photography. Hand is fixed by the hand fixation device at a specified posture and is simultaneously pulled by constant force with spring mechanism.

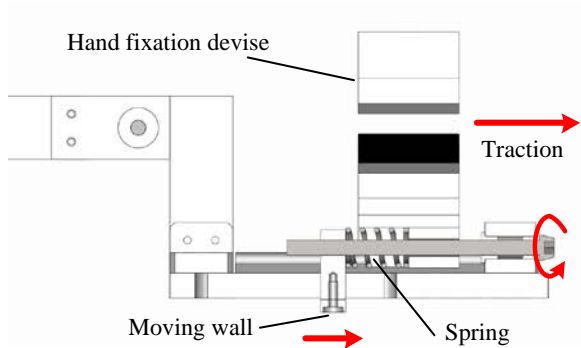
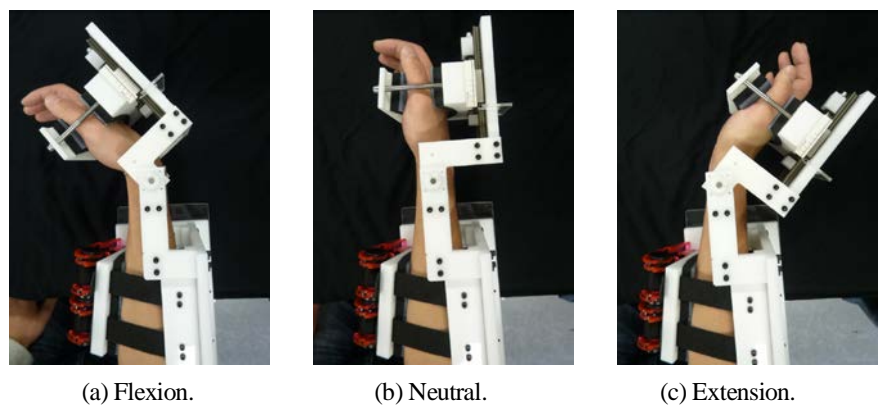


Fig. 5 Hand traction device. The device pulls wrist joint during MRI photography.

MRI 撮影では、撮影装置が強力な磁場を発生させることで画像を取得する。そのため、撮影室内部に鉄鋼などの磁性材料を持ち込むと撮影装置への吸着や、MRI 画像にアーチファクトと呼ばれる画像ぼけを生じる恐れがある。そこで、MRI 撮影に影響を及ぼさずに施術を行えるよう、本装置の構成部品に使用する材料はチタンおよび樹脂などの非磁性材料のみとした。また、1 回の撮影には数分の時間を要し、その間に撮影部位が動くと画像ぼけが生じる。そのため、角度固定板により被験者の手関節の屈曲角度が変化しないよう軸を固定し撮影を行う。装置を装着して手関節を掌屈位、中間位、背屈位とした状態の様子を図 6 に示す。



(a) Flexion. (b) Neutral. (c) Extension.

Fig. 6 Wrist fixation by the rehabilitation equipment for MRI photography.

3・2 実験方法

MRI 撮影装置には 0.4 T の永久磁石型オープン MRI 装置(日立メディコ APERTO Eterna)を使用した。撮影方法は RSSG(RF-spoiled steady state gradient echo)法による 3 次元 T1 強調撮像とし、繰り返し時間 25.0 ms, エコー時間 10.1 ms, フリップ角 40 度, スライス枚数 152 枚, スライス厚 1 mm, 撮影視野 $150 \times 150 \text{ mm}^2$, 撮像加算回数 1, 受信バンド幅 14.4 kHz, 撮像マトリクスサイズ $256 \times 256 \text{ pixels}$, 再構成マトリクスサイズ $512 \times 512 \text{ pixels}$ の条件で撮像し, DICOM(Digital Imaging and Communication in Medicine)形式で取得した。撮影画像の面内分解能は 0.586 mm となる。撮影断面は手関節側面を示す矢状断面とした。得られた MRI 画像の例を図 7 に示す。

被験者は健康な男性 10 名(20~30 代, 平均年齢 25.8 歳, 標準偏差 5.1 歳)を対象とする。撮影時, 被験者は腹臥位において手関節が頭上方向に位置するよう右肩関節を屈曲した姿勢をとり, 手関節は前述のリハビリテーション装置を装着した状態でコイル内に設置する。

まず, 非牽引状態で中間位(屈曲角度 0 deg 近傍), 背屈位(屈曲角度 40 deg 近傍)および掌屈位(屈曲角度 -40 deg 近傍)の各肢位で手関節を撮影した。その後, 牽引力を 40 N に設定し, 非牽引撮影時と同様に中間位, 背屈位および掌屈位の各肢位で撮影した。牽引力は前報(立矢他, 2015)の結果より, 25 N 以上であれば十分な効果が得られることがわかっているが, 長時間にわたる撮影中に, ばねの伸びなどによる除荷も生じ得るとして 40 N とした。なお, 一肢位あたりの平均撮影時間は約 5 分である。確認のため同装置を用いて, 測定前の準備時間も想定して含めた約 8 分間での除荷量を測定した。その結果, 除荷は約 0.8 N と十分小さく, 測定には影響しないと考えた。



Fig. 7 Example of MRI photograph.

4. 関節角度および骨間距離の測定方法

4・1 関節角度の測定方法

得られた MRI 画像からの関節角度の測定は医用画像処理ソフト ImageJ により行う。本節では関節角度の測定方法について記す。2・1 で述べたように, 手関節を構成する橈骨手根関節および手根中央関節の角度は, 橈骨(Radius)と月状骨(Lunate)がなす RL 関節および有頭骨(Capitate)と月状骨がなす CL 関節の角度で代表させる。ただし, 図 8 に示す中手骨(Metacarpal)は有頭骨に対して可動性がなく, また, 形状が比較的単純で角度を測る基準線を設けやすい。そこで, 中手骨を有頭骨で代用することとし, 中手骨と月状骨がなす角度を CL 関節角度とする。

取得した MRI 画像において, 中手骨, 月状骨および橈骨に着目して各骨の角度を測定する。多田らは, 中手骨は右側側面に接する線分 $l-l'$, 月状骨は尖部を結んだ線の垂線 $m-m'$, 橈骨は右側側面に接する線分を基準線と設定している(多田他, 2013)。しかし, 本実験で取得した MRI 画像は撮像範囲が狭く, 橈骨は遠位付近のみの撮像となっているため, 橈骨の右側側面に接する線分を基準線とするのは困難である。そこで, 中手骨および月状骨の基準線は多田らと同様の位置に設定し, 橈骨の基準線は橈骨遠位の尖部 2 点を結ぶ線の垂線 $n-n'$ と設定する。図 8 に示すように, $l-l'$ と $n-n'$ の成す角度を手関節全体の屈曲角度, $m-m'$ と $n-n'$ の成す角度を RL 関節角度, $l-l'$ と $m-m'$ の成す角度を CL 関節角度とし, 画像解析により測定する。

さらに、予備実験の結果などから手関節の掌背屈運動において舟状骨(Scaphoid)の運動が遠位手根列と近位手根列との動作伝達に関与していると推測し、本論文では舟状骨の有頭骨(Capitate)に対する角度である CS 角度 (Capitoscaphoid angle)についても測定を行い、遠位手根列に対する舟状骨の角度も調査する。そこで、舟状骨左側面に接する線分 $k-k'$ を設定し、 $l-l'$ と $k-k'$ が成す角度を CS 角度として測定する。

なお、本実験では図 4 に示した装置を用いて手関節を中間位(屈曲角度 0 deg 近傍)、背屈位(屈曲角度 40 deg 近傍)および掌屈位(屈曲角度 -40 deg 近傍)で固定するが、固定時に手関節の屈曲角度を測定ながら厳密に設定することはできない。そのため、複数の被験者間において同じ屈曲角度で比較するために、固定した各肢位で測定を行った各関節角度より手関節の屈曲角度が 0 deg, 40 deg および -40 deg である時の各関節角度を求める必要がある。

多田らは掌背屈運動時の手根骨に対して X 線動画撮影を用いて運動解析を実施しており、手関節の屈曲角度に対する RL 関節と CL 関節の角度変化を掌側域と背側域でそれぞれ最小二乗法により線形近似し評価をしている。同報告において、線形近似の回帰係数は約 0.8 と十分に高く、線形近似の妥当性が示されている。(多田他, 2013)

そこで本論文でも、掌屈域および背屈域の各関節角度が線形に変化するとし、図 9 のように測定した手関節の屈曲角度、各関節角度から屈曲角度が 0 deg, 40 deg および -40 deg となる時の各関節角度を線形補間によって求める。中間位および背屈位の測定値を含む直線上で屈曲角度が 40 deg となる点を背屈 40 deg における各関節角度、中間位および掌屈位の測定値を含む直線上で屈曲角度が -40 deg となる点を掌屈 -40 deg における各関節角度とし、中間位は前述の 2 直線の縦軸切片を平均した値を中間位 0 deg における各関節角度とする。

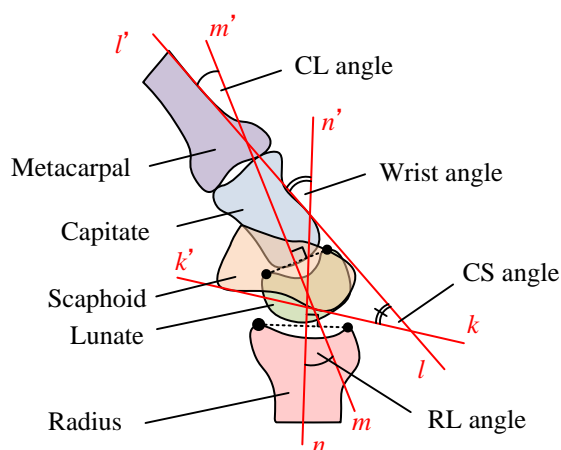


Fig. 8 Definitions of joint angles.

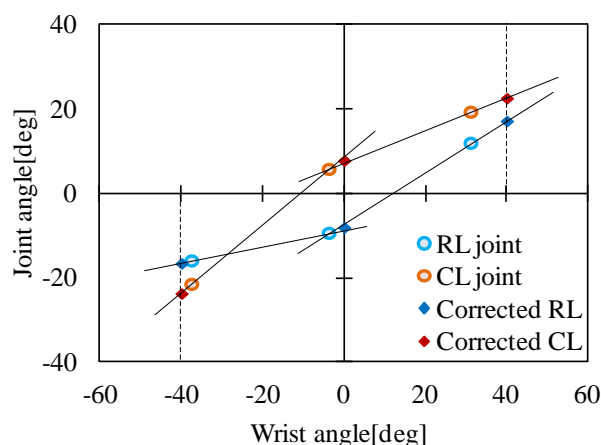
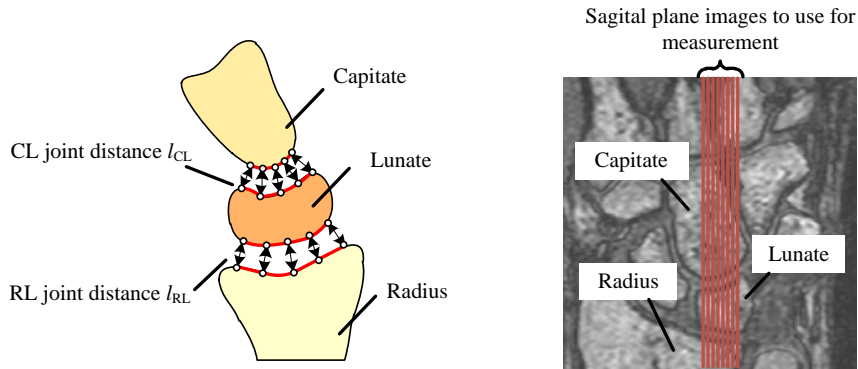


Fig. 9 Linear interpolation of joint angles.

4・2 骨間距離の測定方法

骨間距離は図 10(a)に示すように、RL 関節を構成する橈骨(Radius)-月状骨(Lunate)間の距離を l_{RL} 、CL 関節を構成する有頭骨(Capitate)-月状骨間の距離を l_{CL} として測定する。測定時に、同一被験者の全ての MRI 画像において、同じ箇所での骨間距離を測定することは困難であり、測定箇所のずれにより測定結果に誤差を生じ得る。そこで、本論文では各関節に対し複数箇所の測定を行い、その平均値について評価を行うことで、測定箇所のずれによる誤差の抑制を図る。

骨間距離の測定には医用画像解析ソフト 3DSlicer を使い、橈骨、月状骨および有頭骨が撮像され骨間距離の測定が可能な連続する 8 枚の矢状断面画像を測定対象とする。本論文では、図 10(a)に示すように、各骨端において、おおよそ等間隔となるように 5 点を選択し、各関節でこれらの点を結んだ 5 ヶ所の距離を測定する。同様の測定を図 10(b)に示すように連続する 8 枚の矢状断面に対して行うことで、計 40 ヶ所の測定結果を取得しこれらの平均値を l_{RL} および l_{CL} とし評価する。



(a) Measurement locations of joint distances. (b) Measured coronal plane of MRI photography.

Fig. 10 Measurement of joint distances. Joint distance is evaluated as an average of the distances at 40 locations.

5. 測定結果

5・1 寄与率の算出および確認

前報(立矢他, 2015)での検討は X 線動画撮影による運動中の手根骨の動態解析を用いたのに対し, 本論文では固定した手根骨に対する静止画像撮影を用いるため, 厳密には同一の状態が対象となっていない. そこで, まず, X 線動画撮影および MRI による静止画像撮影のいずれの状態においても, 手根骨に牽引が同様の効果をもたらしていることを確認するため, 前節の方法で算出した屈曲角度より掌屈時および背屈時の寄与率を算出し, 前報(立矢他, 2015)の結果と比較確認する.

寄与率の算出では, 手関節全体の屈曲角度が 0 deg と -40 deg であるときの RL 関節角度をそれぞれ求め, その差の絶対値を手関節屈曲角度の差である 40 deg で除し, 掌屈域における RL 関節寄与率とする. 同様に, 手関節屈曲角度が 0 deg と 40 deg で RL 関節角度の差の絶対値を 40 deg で除した値を背屈域における RL 関節寄与率とする. また, CL 関節に関しても同様に, 手関節屈曲角度が 0 deg と -40 deg および 40 deg と 0 deg の間での CL 関節角度の差の絶対値をそれぞれ 40 deg で除し, 掌屈域および背屈域における CL 関節寄与率とする.

被験者 10 名に対する測定より, 前述の方法で得られた掌屈域および背屈域における各関節寄与率の平均値を図 11(a)および(b)に示す. さらに, 牽引による RL 関節および CL 関節角度の寄与率の変化に関して有意確率 p を 5% として t 検定を行った結果を図 11 中に示す. なお, 本論文では以降, 同一の標本間で測定値の差を比較することから, t 検定には一対の標本による平均の検定を用いる. また, グラフではエラーバーで標準偏差を示す.

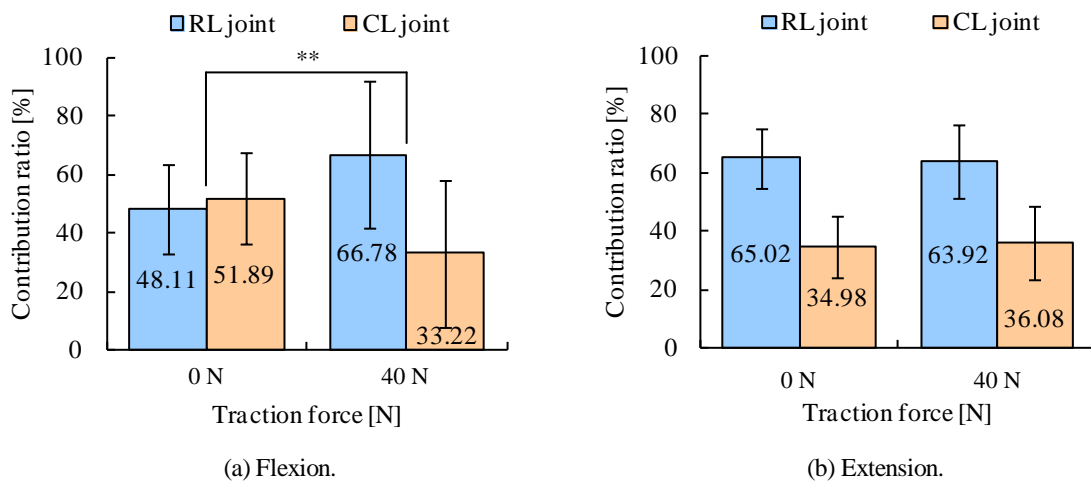


Fig. 11 Contribution ratio of each joint with traction force: 0, 40 N [$**p < 0.05$].

非牽引状態では図 11(a)より掌屈域でCL関節の寄与率が高く, 図 11(b)より背屈域ではRL関節の寄与率が高い. また, 図 11(a)に示すように牽引を加えることで掌屈域のRL関節の寄与率が約 19%有意に増加している. 対して, 図 11(b)に示すように背屈域のRL関節寄与率には, 牽引および非牽引の場合での有意な差はみられなかった.

以上の測定結果において, 非牽引時のRL関節寄与率は, 2・2で述べた従来の結果(Sarrafian et al., 1977) (梶迫他, 2003)と同様な傾向である. また, 前報(立矢他, 2015)で, 非牽引時のRL関節寄与率が掌屈および背屈において, それぞれ 46.07%および 68.71%であったことに対し, 今回も 48.11%および 65.02%とほぼ同程度である. よって, 本論文で対象とする手根骨の状態および関節角の定義は, 前報(立矢他, 2015)と同様とみなす.

5・2 関節角度の測定結果

MRI画像より4・1に記した方法で算出した被験者10名の, 屈曲角度0, 40, -40 degにおける非牽引および牽引時の各関節角度変化の平均値を図12に示す. また, 以上の結果について統計的に評価するために, 牽引による角度変化について有意確率 p を5%としてt検定を行った結果を図12中に示す.

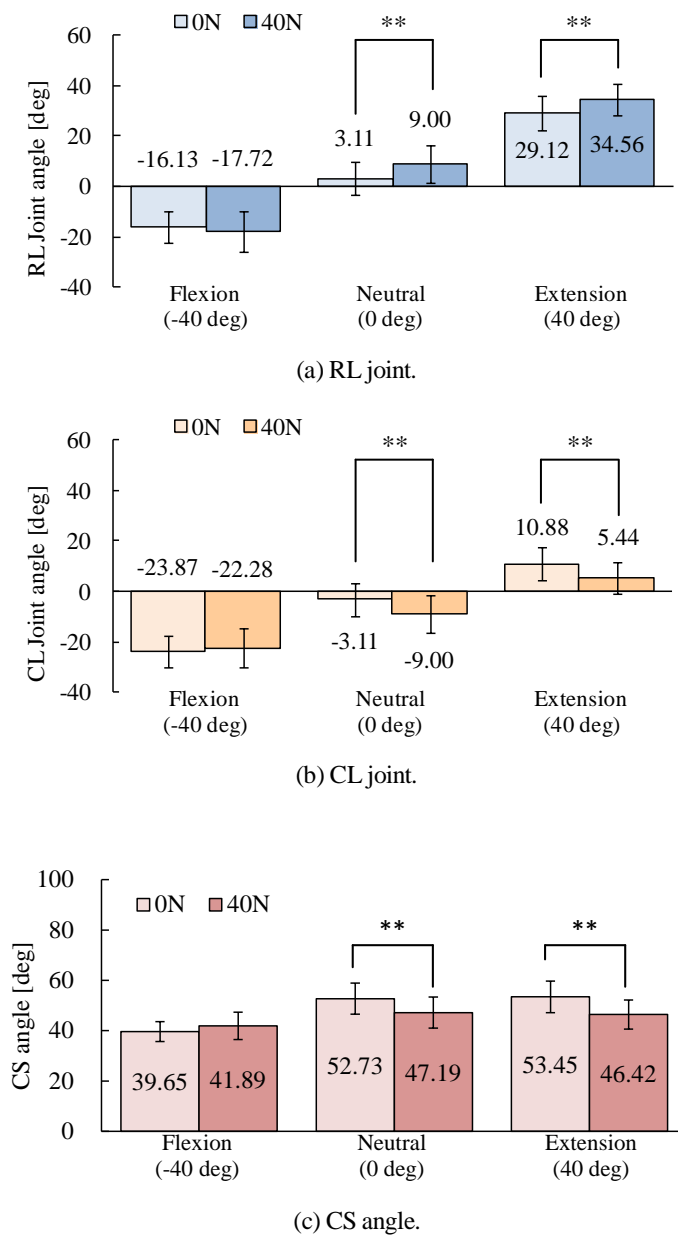


Fig. 12 Joint angle displacements with traction force: 0, 40 N [$**p < 0.05$].

図 12(a)より RL 関節角度は牽引によって、中間位では背屈方向へ約 6 deg, 背屈位では背屈方向へ約 5 deg 有意に増加している。一方、掌屈位では掌屈方向へ約 2 deg 増加しているが有意差は確認されない。また、CL 関節角度に関しては、RL 関節角度との和が手関節全体の屈曲角度となることから、図 12(b)に示すように RL 関節と逆の傾向となる。

以上より、手関節を牽引することで中間位および背屈位において月状骨が背屈方向へ回転し、RL 関節角度の変化量が増加する。特に、背屈位では非牽引時よりも月状骨の最終的な到達回転角度が大きく増加しており、この効果は RL 関節の可動域回復を目的としたリハビリテーションにおいて有効である。

次に、舟状骨の有頭骨に対する角度である CS 角度をまず非牽引状態で肢位ごとに比較する。図 12(c)に示すように、掌屈位と中間位との差は約 13 deg であるのに対し、中間位と背屈位との差は約 1 deg と非常に小さい。すなわち、手関節を中間位から背屈位に変化させた場合の、有頭骨に対する舟状骨の運動は微小である。すなわち、舟状骨は近位手根列の一つであるが、背屈時では遠位手根列である有頭骨に近い運動を示すことがわかる。

牽引状態では、CS 角度の変化は掌屈位と中間位の間で約 5.3 deg, 中間位と背屈位で約 0.8 deg である。すなわち、牽引により各肢位間での CS 角度の差は減少し、舟状骨は背屈時のみでなく掌背屈全体において遠位手根列に近い運動を示す。

5・3 骨間距離の測定結果

被験者 10 名に対して 4・2 に示す方法により測定した、RL 関節を構成する橈骨-月状骨間距離 l_{RL} および CL 関節を構成する有頭骨-月状骨間距離 l_{CL} の平均値を図 13(a)および(b)に示す。また、牽引による骨間距離の変化量に関し、有意確率 p を 5% として t 検定を行い、結果を同図中に示した。

図 13(a)より、 l_{RL} は牽引により中間位において 0.10 mm, 背屈位において 0.10 mm 有意な増加がみられる。ただし、掌屈位では変化が小さく有意差はみられない。図 13(b)より、 l_{CL} はいずれの肢位においても牽引により増加しており、中間位では 0.16 mm, 背屈位では 0.25 mm, 掌屈位では 0.07 mm 増加している。ただし、t 検定の結果においては、中間位と背屈位でのみ有意差が確認された。また、以上の結果からわかるように、いずれの肢位においても CL 関節の方が RL 関節に比べて牽引による骨間距離の増加量が多い。なお、参考として、10 名の被験者それぞれにおいて、牽引前後における骨間距離最大変化量の平均値と分散を求め表 1 に示す。骨間距離の変化量の最大値は 1.0 mm 程度であり、 l_{CL} において最も大きく、関節の運動に何らかの影響を及ぼす可能性がある。ただし、牽引による骨間距離の変化量は測定箇所によって異なり、また、4・2 で述べたように、牽引前後における測定箇所は必ずしも同一でない。そこで、本論文では、図 13 のように各被験者 40 箇所の平均値を用いた。

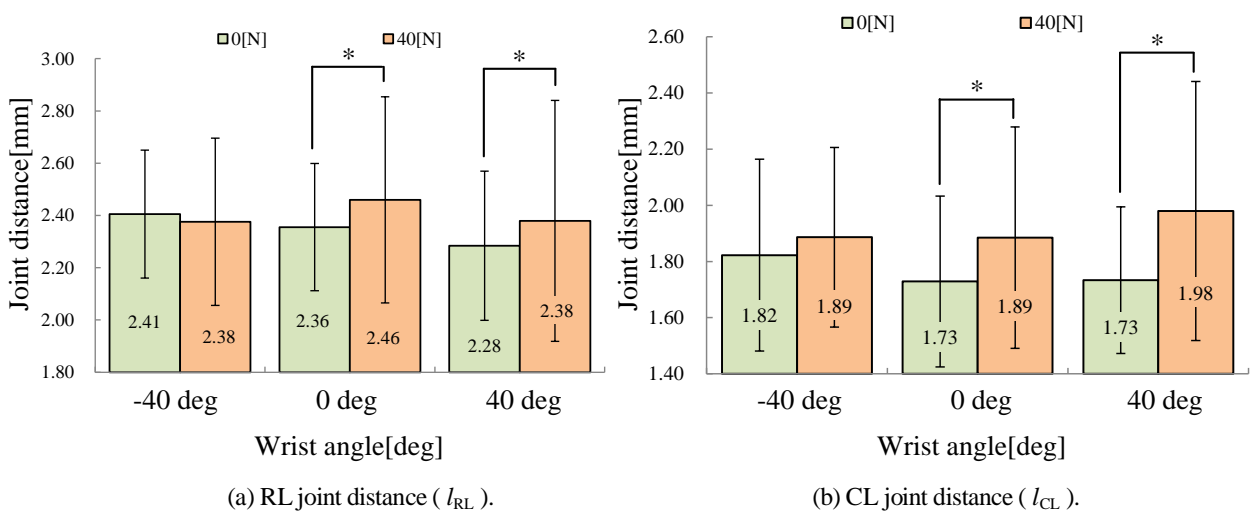


Fig. 13 Change in joint distances with traction force: 0, 40 N [* $p < 0.05$].

Table 1 Maximum variation of the joint distances after/before the traction [mm].

Posture	RL joint distance (l_{RL})			CL joint distance (l_{CL})		
	Flexion (-40 deg)	Neutral (0 deg)	Extension (40 deg)	Flexion (-40 deg)	Neutral (0 deg)	Extension (40 deg)
Average	0.79	0.95	0.87	0.76	0.73	1.05
Deviation	0.23	0.37	0.33	0.17	0.33	0.44

6. 考 察

6・1 牽引が関節角度に及ぼす影響

5・2に示す測定結果より、本論文で注目する RL 関節角度の変化に牽引が及ぼす影響を考察する。そのため、図 12 の結果を基に、牽引および非牽引下での月状骨の状態を模式的に図 14 に示す。図 14 において一点鎖線 $n-n'$ は図 8 に示すとおり関節角度を測定するために橈骨に設定した基準線である。実線および破線は、図 8 において月状骨に設定した直線 $m-m'$ に相当し、実線は牽引時、破線は非牽引時の状態を概略的に示している。また、緑色、黒色、赤色の線はそれぞれ、掌屈位、中間位、背屈位時の結果を表している。よって、一点鎖線と、実線または破線のなす角は、牽引または非牽引時の RL 関節角度に相当する。

図 14 示すように、手関節を牽引することで、中間位および背屈位において月状骨に設定した基準線が背屈方向に傾いており、月状骨が右回りに回転することがわかる。ただし、掌屈位では、牽引および非牽引時において、月状骨の姿勢はほぼ変わらない。

前報(立矢他, 2015)および 5・1 に示した関節角度変位の割合である寄与率による評価方法では、非牽引時と牽引時のそれぞれで手関節の屈曲角度が 0 deg となる中間位を基準として掌屈側および背屈側それぞれの範囲で RL 関節の角度変化量を月状骨の角度変化量で代表して検討した。しかし、以上の測定結果から、牽引時と非牽引時では図 14 に示すように中間位における月状骨の状態が異なっていることがわかる。その結果、掌屈域の月状骨の角度変化量は、牽引および非牽引状態で、それぞれ緑色および黒色で示した実線と破線に挟まれる範囲となる。よって、掌屈側における RL 関節の角度変化範囲は牽引により広がり、手関節の屈曲角変位に対する RL 関節の寄与率は増加する。一方、背屈域では、牽引状態と非牽引状態での角度変化量の差はわずかであり、手関節全体の屈曲角度変化における RL 関節の寄与率の変化は少ない。しかし、月状骨そのものは牽引によって右回りに回転し、掌屈側より背屈側において可動域が拡大している。

すなわち、従来の寄与率による評価方法では、牽引および非牽引時、それぞれにおいて中間位を基準とするため、掌屈側において牽引により RL 関節の寄与率が増加する結果となったが、MRI より明らかにされた手根骨の状態からは、RL 関節の角度変化範囲そのものは背屈側に拡大していることがわかった。よって、寄与率による評価のみでは、各肢位における手根骨の状態を正確に把握できない場合があり、手根骨の角度を合わせて検討することが望ましい。また、本論文の結果より、手関節の牽引による効果は、中間位から背屈側でより顕著である。

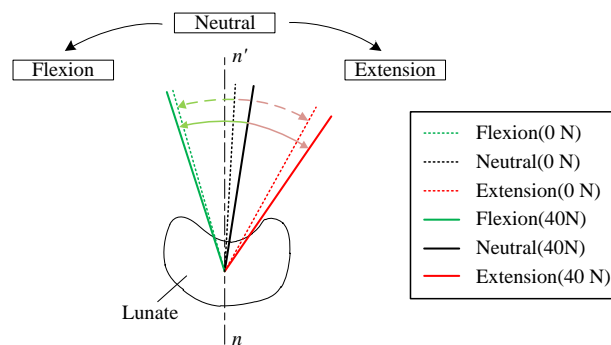


Fig. 14 Outline of RL joint angle at each position with traction force 0, 40 N.

6・2 関節角度と骨間距離との関係

5・2より、RL関節角度、CL関節角度およびCS角度のいずれも牽引を加えることで各肢位における角度が変化する場合があることを確認した。また、5・3では、牽引によってRL関節およびCL関節を構成する骨間が開大し、CL関節に関して開大量がより大きな結果となった。牽引が手関節におよぼす影響の研究としてはGunternらの報告がある。Gunternらは、健常者12名に対し中間位において30Nの牽引を実施し、MR arthrographyを用いて橈骨-月状骨間距離 l_{RL} 、有頭骨-月状骨間距離 l_{CL} の開大について評価し、 l_{RL} が0.18 mm、 l_{CL} が0.45 mm有意に開大することを明らかにしている(Guntern et al., 2011)。本論文においても中間位では、両関節がいずれも優位に増加し、その値は l_{CL} の方が顕著であり、Gunternらの報告と同様の傾向を確認している。開大距離の値は異なっているが、これはGunternらによる骨間距離の測定が非牽引状態で骨間が最も接近している1ヶ所のみ注目したのに対し、本論文では図10に示すように複数箇所の平均値を利用しているためと考えられる。

以上より、手関節の牽引によって、中間位および背屈位では橈骨-月状骨間と有頭骨-月状骨間に開大が生じるが、掌屈位では開大せず、また、橈骨-月状骨間より有頭骨-月状骨間の方が開大しやすいことを確認した。

以上の結果において有意差が確認されたのはいずれも中間位および背屈位であることから、月状骨および舟状骨の角度変化にCL関節の骨間の開大が関係している可能性が推測される。そこで、確認のため、RL関節角度およびCS角度の牽引による変化量とCL関節の骨間距離 l_{CL} の牽引による変化量との相関関係を検討する。

各肢位での牽引による l_{CL} の変化量に対するRL関節角度およびCS角度の変化量をそれぞれ図15および16に示す。同図の横軸は牽引による l_{CL} の変化量、縦軸が牽引によるRL関節角度およびCS角度の変化量である。図15に示す結果から、肢位ごとにRL関節角度と l_{CL} の変化量との相関係数を算出したところ、掌屈位では0.10、中間位では-0.10となり、掌屈位および中間位においては相関が低い結果となった。これに対し、背屈位における相関係数は0.66とやや高い正の相関が確認された。以上の相関係数についてt検定を行ったところ、背屈時のみ5%水準での有意性が確認できた。

また、図16に示す結果から、肢位ごとにCS角度と l_{CL} の変化量との相関係数を算出したところ、掌屈位では-0.08、中間位では-0.32となり、相関は低いことが確認された。しかし、背屈位では約-0.93と負の強い相関がみられた。また、以上の相関係数についてt検定を行ったところ、背屈位のみ1%水準での有意性が確認された。

以上より、RL関節角度およびCS角度のいずれも l_{CL} の変化量に対して、背屈位のみ相関がみられ、中間位および掌屈位では相関関係は確認できない。さらに、前節で述べたように、牽引によるRL関節角度変化の拡大は背屈側において顕著である。すなわち、背屈位で生じる牽引による関節角度の拡大は、牽引によるCL関節の開大が寄与する可能性があり、特に舟状骨において関係性が強くみられる。

以上のCL関節の骨間距離の開大に対する関節角度との関係に対して、本論文では手関節の靭帯に着目し、次のように推測した。手関節には多くの外在靭帯と内在靭帯が存在するが、近位手根列の代表とする月状骨と遠位手根列とを直接接続する靭帯は存在しない。よって、月状骨は他の近位手根列に付随して動作する。ここで、月状骨-舟状骨間に着目すると、SL靭帯と呼ばれる強固な内在靭帯が存在し、このSL靭帯が月状骨-舟状骨間の安定にもっとも寄与しているといわれている(Woon, 2004)。また、舟状骨は遠位手根列と靭帯で接続されていて、掌側方向に長い形状であるため、CL関節を構成する骨間が開大すると靭帯の影響で背屈方向へ回転が生じやすいと考えられる。このような舟状骨の回転が、SL靭帯により月状骨に伝達されることが推測される。

しかし、背屈位同様に牽引により開大が確認された中間位では相関関係がみられないことから、牽引による各角度の変化の要因はCL関節の開大のみではなく、他の要因も寄与していると考えられる。これらに関しては、本論文で得られた結果を基に、今後、手関節を構成する複数の靭帯の影響も考慮して考察を進めたい。

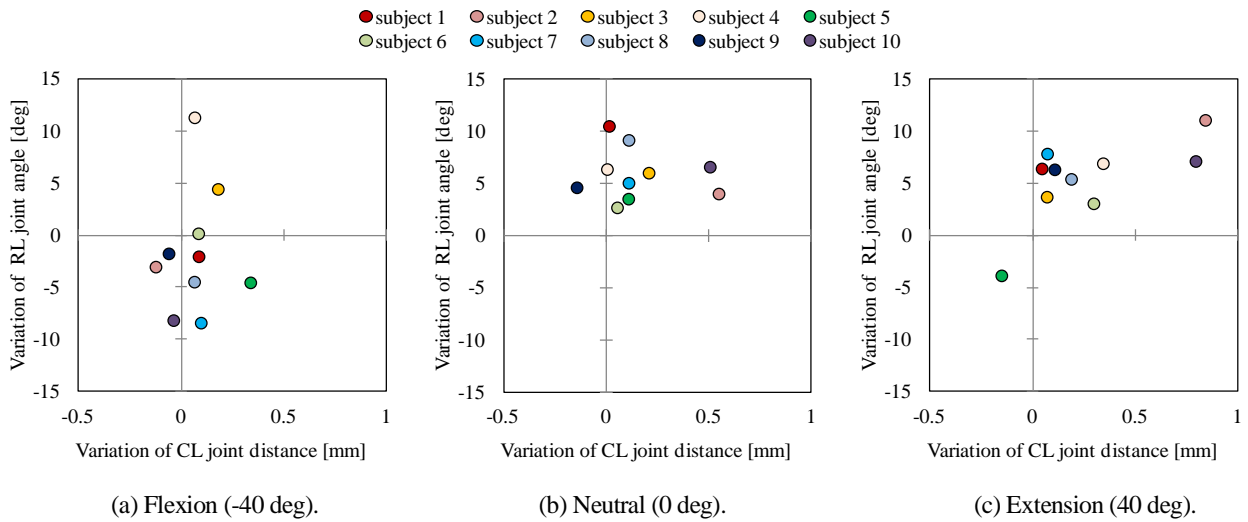


Fig. 15 Relation between RL joint angle and CL joint distance.

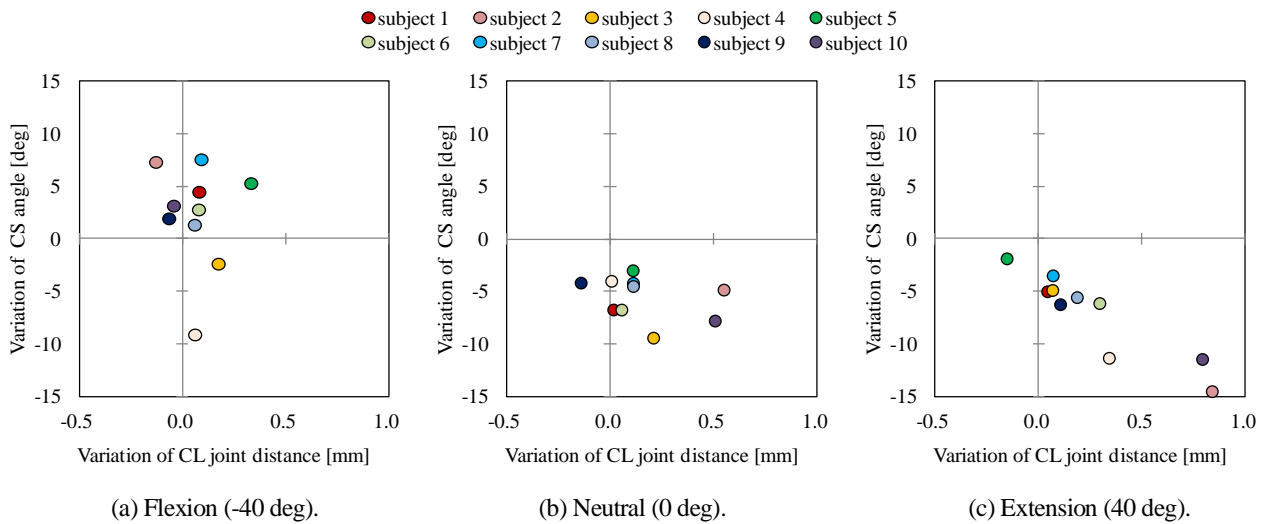


Fig. 16 Relation between CS angle and CL joint distance.

7. 結 言

本論文では、手関節を牽引しながら掌屈位、背屈位などとした状態で、同関節を構成する手根骨をMRIで撮影可能とする装置を製作した。また、同装置を用いて手根骨の状態を実際にMRIで撮影し、関節拘縮改善のリハビリテーションとして注目されている徒手的他動掌背屈運動において牽引が及ぼす効果を検証した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 手関節が中間位および背屈位である状態では、橈骨手根関節の動きを代表する月状骨が牽引により背屈方向へ回転し、また、背屈側への最終的な到達角度も増加する。また、舟状骨は、近位手根列の一つであるが、他動掌背屈運動において遠位手根列と同様な運動傾向を示す。
- (2) 従来用いられてきた、手首屈曲角度に対する橈骨手根関節の運動の割合である寄与率では、牽引により掌屈側において寄与率が増加すると評価されるが、関節角度の観点からは背屈側において変位量は増加し、牽引の効果がより顕著に現れる。これは、月状骨が中間位において牽引により背屈側へ傾くことが原因である。
- (3) 骨間距離の測定より、中間位および背屈位において牽引により橈骨手根関節および手根中央関節を構成する骨間に開大が生じ、掌屈位では開大しないこと、また、橈骨手根関節より手根中央関節の方が開大しやすいことを確認した。また、月状骨および舟状骨の角度変化量と手根中央関節の開大量には背屈側において相関がみられ、このことが牽引による橈骨手根関節の背屈位における角度変化の拡大に影響している可能性があることを述べた。

謝 辞

本装置の開発に、ご尽力いただいた金沢大学理工研究域技術職員 吉田博一氏に深く感謝いたします。

文 献

- 有野浩司, 根元孝一, 手関節・手ーリハビリテーションの現場で役立つバイオメカニクスー, *Journal of Clinical Rehabilitation*, Vol.14, No.10(2005), pp. 958–961.
- Guntern, D., Becce, F., Richarm, D., Palhais, N., Meuli, R. and Theumann N., Direct magnetic resonance arthrography of the wrist with axial traction: A feasibility study to assess joint cartilage, *Journal of Magnetic Response Imaging* Vol. 34 (2011), pp. 239–244.
- 今村宏太郎, *Cineradiography* による手関節運動の解析, *日整会誌*, Vol.61, No.5 (1987), pp.45-56.
- 梶迫正明, 真田茂, 池田和夫, 林則夫, 手関節側面 X 線動画像の解析ー掌背屈運動における関節動態ー, *通学技報 M12003-51*(2003), pp.29–34.
- 金谷文則, 高齢者橈骨遠位端骨折の治療 早期 ADL 回復をめざして(2010), pp.2-7, メジカルビュー社.
- 粕淵賢志, 福本貴彦, 土肥義告, 藤田浩之, 今北英高, 橈骨遠位端骨折後症例のダーツスロー・モーション面 ROM と DASH スコアの関係, *理学療法学*, Vol.40, No.3 (2003), pp.169–175.
- Leventhal, E., Moore, D., Akelman, E., Wolf, S. and Crisco, J., Conformational changes in the carpus during finger trap distraction, *The Journal of Hand Surgery*, Vol.35, Issue 2(2010), pp.237–244.
- 医療法人隆仁会山王病院, 高齢者の代表的な骨折,
available from <<http://www.sannoh-hospital.or.jp/fracture.htm>>, (参照日 2016 年 11 月 2 日).
- 野中信宏, 田崎和幸, 山田玄太, 坂本竜弥, 油井栄樹, 貝田英二, 宮崎洋一, 杉野美里, 大川尊規, 橈骨遠位端骨折例に対する手関節可動域早期獲得への徒手的他動掌背屈運動, *日本ハンドセラピィ学会誌*, Vol.3(2010), pp.27–36.
- Sarrafian, S. K., Melamed, J. L., Short, W. H. and Goshgarian, G. M., Study of wrist motion in flexion and extension, *Clinical Orthopaedics & Related Research*, Vol.126 (1977), pp.153–159.
- 立矢宏, 田中啓道, 池上弘樹, 土田博貴, 真田茂, 西村誠次, 多田薫, 川嶋広貴, 堀江翔, 手根骨動態解析による関節拘縮改善リハビリテーション効果の検証, *日本機械学会論文集*, Vol. 81, No. 824 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00543.
- 多田薫, 土屋弘行, 川嶋広貴, 堀江翔, 西村誠次, 真田茂, 手関節の牽引が橈骨手根関節と手根中央関節の運動に与える影響について, *日本手外科学会誌*, Vol.30, No.3(2013), pp. 282–286.
- Werner, F. W., Green, J. K., Short, W. H. and Masaoka, S., Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion, *The Journal of Hand Surgery*, Vol.29, Issue3(2004), pp.418–422.
- Woon, C., *Wrist Ligaments & Biomechanics* (2004),
available from <<http://www.orthobullets.com/hand/6005/wrist-ligaments-and-biomechanics>>, (参照日 2015 年 1 月 15 日).

References

- Arino, K. and Nemoto, K., Wrist and hand -Biomechanics for actual rehabilitations -, *Journal of Clinical Rehabilitation*, Vol.14, No. 10 (2005), pp.958–961(in Japanese).
- Guntern, D., Becce, F., Richarm, D., Palhais, N., Meuli, R. and Theumann, N., Direct magnetic resonance arthrography of the wrist with axial traction: A feasibility study to assess joint cartilage, *Journal of Magnetic Response Imaging*, Vol. 34 (2011), pp. 239–244.
- Imamura, K., *Cineradiographic study of the wrist motion*, *The Journal of Japanese orthopaedic surgical society*, Vol.61, No.5 (1987), pp.45-56(in Japanese).
- Kajisako, M., Sanada, S., Ikeda, K. and Hayashi, N., Kinematic analysis of the wrist with the X-ray lateral images -Joint movement in flexion and extension-, *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Technical Report of IEICE M12003-51(2003), pp.29–34 (in Japanese).

- Kanaya, F., Treatment of geriatric distal radius fractures (2010), pp.2-7, Medical view co., ltd. (in Japanese).
- Kasubuchi, K., Fukumoto, T., Dohi, Y., Fujita, H. and Imagita, H., A relationship between dart-throwing motion plane rom and the dash score after distal radius fracture, *Journal of the Japanese physical therapy association*, Vol.40, No.3(2003) , pp.169–175 (in Japanese).
- Leventhal, E., Moore D., Akelman, E., Wolf, S. and Crisco, J., Conformational changes in the carpus during finger trap distraction, *The Journal of Hand Surgery*, Vol.35, Issue 2(2010), pp.237–244.
- Medical corporation Ryujinkai Sannoh hospital, Typical a bone fracture of the elderly people, available from <<http://www.sannoh-hospital.or.jp/fracture.htm>> , (accessed on 2 November, 2016) , (in Japanese).
- Nonaka, N., Tasaki, K., Yamada, G., Sakamoto, R., Yui, H., Kaida, E., Miyazaki, Y., Sugino, M. and Ooi, T., Extension and flexion motions by hand to early renew the movable range of wrist in case of distal radius bone fracture, *The Journal of Japan Hand Therapy Society*, Vol.3(2010), pp.27–36 (in Japanese).
- Sarafian, S. K., Melamed, J. L., Short, W. H. and Goshgarian, G. M., Study of wrist motion in flexion and extension, *Clinical Orthopaedics & Related Research*, Vol.126 (1977), pp.153–159.
- Tachiya, H., Tanaka, H., Ikegami, H., Tsuchida, H., Sanada, S., Nishimura, S., Tada, K., Kawashima, H. and Horie, S., Verification of the rehabilitation effect for wrist contracture by dynamic analysis of carpals, *Transactions of the JSME* (in Japanese), Vol. 81, No. 824 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00543.
- Tada, K., Tsuchiya, H., Kawashima, H., Horie, S., Nishimura, S. and Sanada, S., Effect of traction force of wrist angle on motion of radiocarpal joint and midcarpal joint, *The Journal of Japan Society for Surgery of the Hand*, Vol.30, No.3(2013), pp. 282–286 (in Japanese).
- Werner, F. W., Green, J. K., Short, W. H. and Masaoka, S., Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion, *The Journal of Hand Surgery*, Vol.29, Issue3(2004), pp.418–422.
- Woon, C., *Wrist Ligaments & Biomechanics* (2004), available from <<http://www.orthobullets.com/hand/6005/wrist-ligaments-and-biomechanics>>, (accessed on 15 January, 2015).