



手関節の運動動態に関する実験的研究

望 月 由

広島大学医学部整形外科学教室 (主任: 生田義和教授)

受付 平成2年11月10日

受理 平成2年12月27日

手関節障害の病態を解明すべく、正常手関節の運動動態を対象とした研究が過去数多くなされてきた。肢位を変えて撮影した単純レ線写真や連続動態撮影 (cineradiography) を用いた研究などである。しかし、手根骨は小さく複雑な形態をしているため、レ線写真上の角度測定で目印となる特徴的な所見に乏しく、測定できる手根骨も限られ、特に三角骨周囲の運動をレ線学的にとらえて解析することは極めて困難であった。また、レ線写真正面像で得られる所見は少なく、各手根骨間の角度測定を有効に行えるのは側面像であり、運動を1方向から解析しているにすぎなかった。しかも、手根骨は多軸性の回転運動を行っているため、測定値が手根骨の運動を正確に反映しておらず、撮影時のわずかなねじれにより測定値が大きく変動する欠点が指摘されてきた。そこで著者は、手根骨の3次元運動に対応できるように、ひずみ計を用いた測定装置を考案し、現在まで解析が極めて困難とされてきた三角骨周囲の運動動態を含めた手関節全般の運動動態を解析した。なお、実験には arterial embalming 方式で保存された屍体30体、36手関節を用いた。その結果、各運動方向で手関節の運動動態はおのおの異なり、現在までに発表された理論の1つで手関節のすべての運動動態を理解することは極めて難しいという結論に達した。すなわち、背屈運動では、背屈30度までは掌側の靭帯を介して舟状骨と三角骨は遠位手根骨列と密接に関連して背屈し、その背屈力は手根骨間靭帯を介して月状骨に伝達されるが、特に手関節尺側部分が橈側部分より密接に関連して運動し、背屈力は舟状骨よりも三角骨を介して月状骨に伝達される。それに加えて有頭骨が月状骨を背屈させるため、手根中央関節の中では有頭骨・月状骨間が最大の運動を示す。背屈30度以上では、橈骨遠位関節面の掌側への傾斜のために近位手根骨列の背屈が制限され、手関節の背屈は主に手根中央関節で行われる。掌屈運動では、背屈運動と異なり手根中央関節で密接に関連した運動は認められず、各手根骨の関節面の形態と摩擦力により掌屈力が遠位手根骨列から近位手根骨列に伝達されるが、手関節橈側部分が尺側部分より密接に関連して運動し、掌屈力は舟状骨を介して月状骨に伝達される。さらに、有頭骨からの掌屈力が舟状骨からの掌屈力に加わり月状骨から三角骨に伝達されるため、三角骨・有頭骨間に最大の運動が認められる。背屈運動と掌屈運動は同一平面上の運動ではあるが、力の伝達経路が異なると考えられた。橈屈運動では、有頭骨を中心として遠位手根骨列が橈側へ回転することにより、舟状骨が尺側へ移動しながら掌屈し、その力は月状骨から三角骨へと伝達される。三角骨周囲の運動は橈屈10度以上で増大する。尺屈運動では、有頭骨を中心として遠位手根骨列が尺側へ回転することにより三角骨が橈側へ移動しながら背屈し、その力は月状骨から舟状骨へ伝達される。同一平面上の運動ではあるが、尺屈運動では橈屈運動と異なり、各手根骨の運動が円滑に行われる。以上のごとく、運動方向により異なる動態を示す手関節運動の中で、円滑に行われていたのは掌屈および尺屈運動であり、橈骨遠位関節面の形態が手関節運動に大きな影響を与えると考えられた。さらに、手関節運動における橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合については以下のごとく結論した。すなわち、背屈運動では、背屈30度までは橈骨手根関節と手根中央関節は同じ割合で運動するが、背屈30度以上では手根中央関節での運動が主体である。掌屈運動では、掌屈40度までは橈骨手根関節と手根中央関節はほぼ等しい割合で動き、掌屈40度以上では橈骨手根関節の動きはわずかに認められるに過ぎず、手根中央関節の運動が主体である。橈屈運動では、橈骨手根関節と手根中央関節の両者にほぼ等しい運動が認められる。尺屈運動では、手根

中央関節の運動も認められるが、橈骨手根関節の運動が主体である。

著者が考案し作製した測定装置は、従来の方法では測定が極めて困難とされてきた手関節尺側部分、特に三角骨周囲の運動を含めた手関節全体の3次元運動を解析するのに有用であった。また、この測定装置は舟状骨骨折、Colles骨折、Kienböck病や手根不安定症などの実験モデルへの応用も可能と考えられ、これらの手関節障害の病態の解明に役立つものと推考する。

Key words: 手関節, 運動動態, 屍体標本, ひずみ計

ヒトは手を用いて様々な動作を行う。この動作が有効かつ円滑に行われるために、他の関節にはみられない、手関節に特有なベアリング機構が存在している。しかし、このベアリング機構は複雑で、一度破綻する

とその修復は困難なために、長い間手関節疾患の診断および治療体系の確立が遅れていた^{22, 67, 68, 72}。近年注目されてきた手根不安定症の病態^{15, 23, 26, 30, 36, 38, 50, 57, 59, 64, 65}や舟状骨骨折における dorsal intercalated

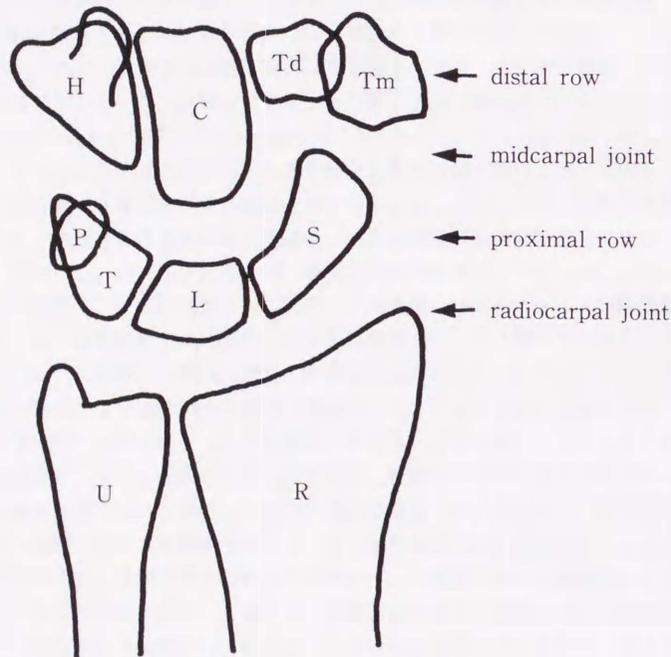


Fig. 1. Anatomy of wrist joints. (the original figure)

distal row (遠位手根骨列)

Tm : trapezium bone, 大菱形骨

Td : trapezoid bone, 小菱形骨

C : capitate bone, 有頭骨

H : hamate bone, 有鉤骨

proximal row (近位手根骨列)

S : scaphoid bone, 舟状骨

L : lunate bone, 月状骨

T : triquetral bone, 三角骨

P : pisiform bone, 豆状骨

R : radius, 橈骨

U : ulna, 尺骨

midcarpal joint : 手根中央関節

radiocarpal joint : 橈骨手根関節

segmental instability pattern の成因^{2, 4, 9, 16, 40, 43, 51, 53, 63, 73}などを明らかにする上で、正常手関節の運動動態を解明することはきわめて重要である。

さて手関節は、橈骨および8個の手根骨が橈骨手根関節、手根間関節と豆状三角骨関節を構成する複合関節である^{5, 27, 62, 66} (Fig. 1)。また、手根骨は一般的に近位手根骨列と遠位手根骨列に分けられ、前者には舟状骨 (scaphoid bone), 月状骨 (lunate bone), 三角骨 (triquetral bone) と豆状骨 (pisiform bone) が含まれ、後者には大菱形骨 (trapezium bone), 小菱形骨 (trapezoid bone), 有頭骨 (capitate bone) と有鉤骨 (hamate bone) が含まれる⁸ (Fig. 1)。二者のうちで能動的に動き得るのは、手関節運動の力源となる手根伸筋や手根屈筋が停止する中手骨と関節で連結する遠位手根骨列で、豆状骨以外の近位手根骨列の各手根骨は受動的に動くのみである。したがって、近位手根骨

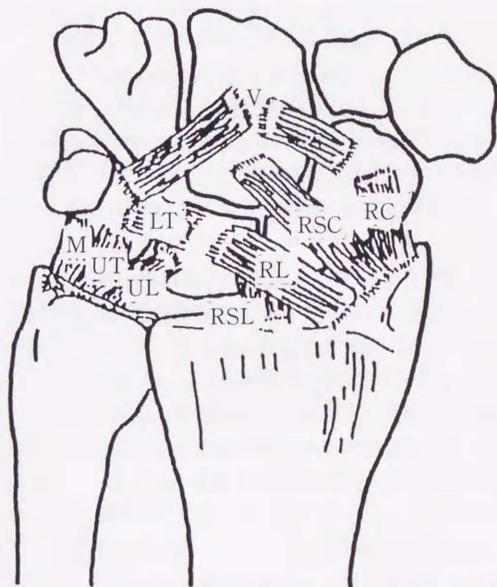


Fig. 2. Anatomy of volar carpal ligaments. (the original figure)

- V : V lig. (V 靭帯)
- RC : radial collateral lig. (橈側側副靭帯)
- RSC : radioscaphocapitate lig. (橈骨・舟状・有頭骨靭帯)
- RL : radiolunate lig. (橈骨・月状骨靭帯)
- RSL : radioscapholunate lig. (橈骨・舟状・月状骨靭帯)
- LT : lunotriquetral lig. (月状・三角骨靭帯)
- UL : ulnolunate lig. (尺骨・月状骨靭帯)
- UT : ulnotriquetral lig. (尺骨・三角骨靭帯)
- M : meniscus homologue. (関節円板)

列は手関節のベアリングとして働き、このベアリング機構が正常に働いてはじめて手関節の多様な動きが可能となっている^{1, 13, 17, 60, 66}。

また、手関節はその運動により軸圧をはじめとするさまざまな方向の圧力を受けるが、肢位に応じて近位手根骨列の運動を調整し調和させているのは各手根骨の複雑な形態と各手根骨を連結する靭帯である。これらの靭帯は、背側より掌側の靭帯が太く強靭である。掌側靭帯のうち、手根骨の遠位手根骨列と近位手根骨列を結ぶ主要な靭帯は、有頭骨から中樞へ扇状に広がる V 靭帯 (V ligament, 以下 ligament は lig. と略す) と呼ばれるものである^{57, 60} (Fig. 2)。また、橈骨と手根骨を結ぶ主な掌側靭帯は、橈骨・舟状・有頭骨靭帯 (radioscaphocapitate lig.), 橈骨・月状骨靭帯 (radiolunate lig.) と橈骨・舟状・月状骨靭帯 (radioscapholunate lig.) である^{57, 60} (Fig. 2)。一方、手関節背側の靭帯は掌側のそれに比し、菲薄で力学的意義が少ないとされているが^{58, 60}、これらの中で最も強靭なのが背側橈骨手根靭帯 (dorsal radiocarpal lig.) である^{58, 60} (Fig. 3)。また手関節尺側の靭帯性構造は分離しにくく、Palmer らが提唱する三角線維

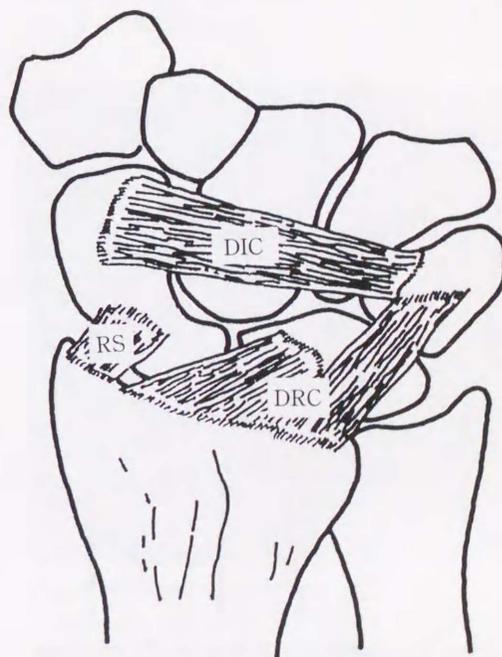


Fig. 3. Anatomy of dorsal carpal ligaments. (the original figure)

- DRC : dorsal radiocarpal lig. (背側橈骨手根靭帯)
- DIC : dorsal intercarpal lig. (背側手根間靭帯)

軟骨複合体 (triangular fibrocartilage complex ; TFCC) としてとらえられることが多い⁴⁶⁾ (Fig. 4)。本複合体は、発生学的に可動域獲得のため尺骨茎状突起が三角骨と直接関節を形成しなくなっていく過程で生じたものとされている⁵⁸⁾。そして、おのおの手根骨を結ぶ手根骨間靭帯 (intercarpal lig.) は遠位手根骨列と近位手根骨列で多少異なり、遠位手根骨列の各手根骨間靭帯は強靭でかつ緻密であるため、遠位手根骨列はほぼ一塊として動く。これに対し、近位手根骨列の各手根骨間靭帯は、手根骨相互間のある程度の掌背側方向への回旋を許し、互に関連性を持ちながらもある程度の独立した動きを可能にしている^{57, 58, 60, 66)}。

さて、手関節の運動動態を対象として過去多くの研究がなされてきた。Destot³⁾, Fisk⁶⁾, Kapandji⁷⁾, Kuhlman¹⁹⁾, Lang²⁰⁾, 中村^{41, 42, 45)}, Ruby⁴⁷⁾ や Sarrafian⁴⁹⁾ は肢位を変えて撮影した単純レ線写真に基づいて、橈骨手根関節と手根中央関節の手関節運動における関与の割合について報告し、Arkless¹⁾, Youm⁷⁵⁾, 平野^{11, 12)} や今村^{13, 14, 74)} は連続動態撮影 (cineradiography) を用いて手関節運動における各手

根骨相互間の運動動態についての研究を行った。これらの単純レ線写真や連続動態撮影による従来の解析方法はその正面像および側面像における各手根骨間の角度を測定し検討する方法である^{1, 3, 6, 11-14, 17, 19, 20, 41, 42, 45, 47, 49, 74, 75)}。これらの報告では、橈骨と月状骨の間の角度の変化を橈骨手根関節の運動の指標とし、有頭骨と月状骨の間の角度の変化を手根中央関節の運動の指標として、橈骨手根関節と手根中央関節の手関節運動における関与の割合について報告している^{1, 3, 6, 11-14, 17, 19, 20, 41, 42, 45, 47, 49, 74, 75)}。いずれの報告でも実際に角度を測定しているのは側面像で測定可能な橈骨・月状骨間、橈骨・舟状骨間、有頭骨・月状骨間、有頭骨・舟状骨間と舟状骨・月状骨間であり、三角骨周囲の運動動態は測定が極めて困難としている^{24, 29, 31, 39)}。また、正面像では橈屈・尺屈運動において橈骨・月状骨間と月状骨・有頭骨間の角度を測定した今村らの報告があるにすぎない^{13, 14, 74)}。この従来の解析方法で明らかにされたのは、舟状骨が掌屈・背屈運動および橈屈・尺屈運動で最大の可動域を示すことである^{1, 6, 12, 14, 19, 20, 45, 74)}。そして、この所見を根拠として殆どの報告が後述する Taleisnik の Columnar theory を支持した^{3, 11, 13, 17, 41, 42, 47, 49, 75)}。しかし、従来の解析方法では手関節尺側の運動、特に三角骨周囲の運動は解析が極めて困難とされており^{10, 52, 69, 70)}、2方向の撮影を行ったとしても正面像では手根骨の運動の概観をとらえるのみで、実際に角度測定を行なうのは側面像である場合が殆どであり、運動を1方向から解析しているにすぎなかった^{1, 3, 6, 11, 14, 19, 20, 42, 45, 74, 75)}。また、手根骨は小さく複雑な形態をしており、その運動は主に回転運動であるため、レ線写真上の角度測定で目印となる特徴的な所見に乏しく、測定できる手根骨も限られていた^{3, 11, 12, 14, 17, 19, 42)}。しかも、手根骨は固定された軸を有しない多軸性の回転運動を行なっているため、測定値が手根骨の運動を必ずしも正確に反映しておらず、さらに撮影時のわずかなねじれにより測定値が大きく変動する欠点が指摘されてきた^{1, 6, 12, 17, 42, 49, 74, 75)}。したがって、手関節の運動動態に関してより詳細に検討を加えるためには、多軸性の回転運動を示す手根骨の3次元運動に相応できる測定方法を用いる必要性が強調されてきた^{25, 35, 61)}。そこで著者は、機械や構造物の強度測定に用いられるひずみ計に着目し、これを手関節の運動解析に用いることとした。ひずみ計は、外観上発見することのできない建築物の亀裂の検出や、材料の強度試験などに用いられ、現在その精度はきわめて高いとされている^{7, 33, 48)}。また、医学の分野においては、肘関節構成組織にひずみ計を直接貼布して行った肘関節の

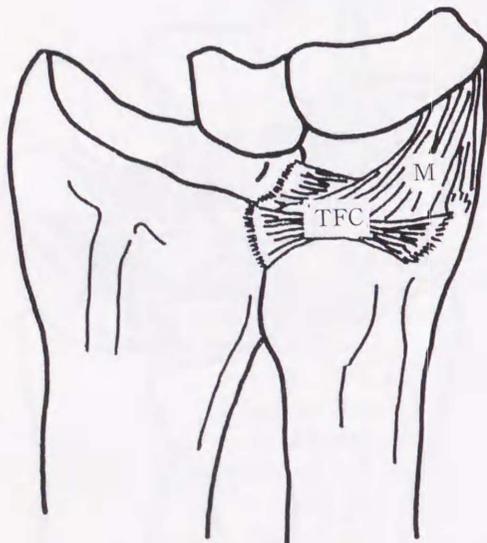


Fig. 4. Anatomy of triangular fibrocartilage complex.

(the original figure)

M : meniscus homologue (関節円板)

TFCC : triangular fibrocartilage

(三角線維軟骨)

運動解析の実験の報告^{7,48)}もあるが、実験中にひずみ計が剥脱あるいは破損してしまう問題が指摘された。そこで著者は、測定装置の両端を螺子と接着剤で固定することにより測定装置が手根骨と密着して運動し、手根骨が多軸性の回転運動を行っても、その運動に相応したひずみ量が測定できるように中央部を直径5 mmの太鼓橋状に加工した測定装置を考案した。そして、この測定装置を用いて、これまでその解析がきわめて困難とされてきた三角骨周囲の運動を含めた手関節全般の運動動態を解析し、以下の点を明らかにした。

1. 手関節掌・背屈運動、橈・尺屈運動における各手根骨（特に舟状骨、月状骨、有頭骨、三角骨）相互間の運動動態。

2. 手関節掌・背屈運動および橈・尺屈運動における橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合。

材料と方法

1. 使用屍体標本

Arterial embalming方式で保存され、手関節に外傷の既往のない屍体30体、36手関節を用いた。内訳は男性14体、女性16体、右手関節19関節、左手関節17関節で、死亡時年齢は36歳から76歳、平均65.7歳であった。

Arterial embalming方式とは、特殊注入用ポンプにより屍体の血管内凝血を除去し、ついで血管内に固定液を注入して防腐処置を施した後、低温室（摂氏5度）に保存する方式である⁴⁸⁾。本方式で処置された屍体標本は、従来のホルマリンのみによる防腐処置に比べ軟部組織の弾力性が良好に保たれる特徴があり、ヒト生体手関節とほぼ同等の関節可動域を有している（Table 1）。

2. 測定装置

測定装置は、20×6×1 mm大のポリエチレン製の板の中央部を直径5 mmの太鼓橋状とし、頂上部と側面部に直径4 mm、2軸性のひずみ計（共和電業製）を接着して作製した（Fig. 5）。2カ所にひずみ

Table 1. Range of motion of embalmed cadaveric wrist joints and normal human wrist joints.

DIRECTION	RANGE OF MOTION	
	embalmed cadaver	normal human
extention	71.3°±4.5°	70.0°
flexion	81.5°±3.3°	90.0°
radial flexion	20.3°±2.5°	25.0°
ulnar flexion	45.4°±2.2°	55.0°

計を接着した目的は、接着部位により測定されるひずみ量が異なる可能性を検討するためである。なお、ひずみ計はそのゲージがポリエチレン製の板の長軸中央線線上にあるように接着した。

この測定装置は、後述するように両端を螺子と接着剤で固定することにより手根骨と密着して運動し、手根骨が多軸性の回転運動を行ってもその運動に相応したひずみ量が測定できるように、中央部を直径5 mmの太鼓橋状に加工してある。これにより手根骨の3次元運動を反映した測定が可能であり、従来の方法では解析が極めて困難とされていた手関節尺側、特に三角骨周囲の運動の解析も可能である。

3. 弾性体のひずみと応力の関係

ひずみ計で測定されるひずみ量の意義について述べる。

物体が広義の弾性体、たとえば金属、木材、骨やゴムなどの場合は、物体に加わった外力が小さい時は、物体の長さの変化（ δL ）は元の長さ（ L ）と加えられた単位面積あたりの外力（ F/A ）に比例することが知られている^{33,55)}。

$$\delta L = (1/E) L (F/A)$$

F；外力，A；面積，E；ヤング率

L；元の長さ， δL ；長さの変化

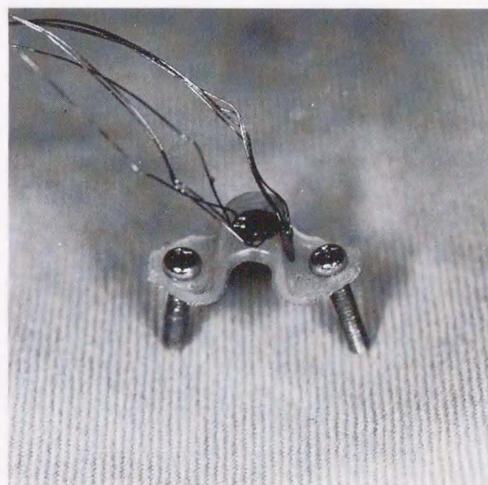


Fig. 5. Measuring apparatus.

Measuring apparatus consisted with strain gauge and polyethylene bar (20×6×1mm) whose central portion was dome-shaped.

Strain gauge was attached at central and lateral portion of dome-shaped polyethylene bar.

Measuring apparatus was fixed to each carpal bone by screw.

ここで、 (F/A) は単位面積あたりの力で応力 (σ) と呼ばれ、物体の長さの変化率 $\delta L/L$ はひずみ (ϵ) と呼ばれる。

$$\sigma = F/A, \quad \epsilon = \delta L/L$$

すなわち、応力が小さい時は応力とひずみは相互に正比例するとされており、これは Hooke の法則と呼ばれている。

$$\epsilon = (1/E) \sigma$$

この法則が適用される応力-ひずみ領域は弾性域と呼ばれ、その物体を弾性体と呼ぶ^{33,55}。

さて、骨は弾性体であり靭帯および関節包も弾性体であるため、骨と靭帯および関節包を含めた物体は広義の弾性体とみなすことができる。したがって、各手根骨間を測定装置で架橋して測定する場合、測定されるひずみ量の大小は、各手根骨間の相対変位もしくは運動の大小を意味することになる^{33,55}。

4. 予備実験

本実験に用いた測定装置の特性を調べるために、 $10 \times 10 \times 5$ mm 大のコルク 2 個を測定装置で架橋し屈伸および側屈、回旋運動を行い、ひずみ量の測定を行った。屈伸運動では、屈曲運動の際のひずみ量が伸展運動の際の約 2 倍の値を示したが、屈曲および伸展運動の角度の増加にともないひずみ量が増加し直線的な変化を示した (Fig. 6-a, b)。側屈運動でも回旋運動でも、その運動方向による差は認められず、屈伸運動

と同様に運動角度の増加にともないひずみ量が増加し直線的な変化を示した (Fig. 7-a, b, Fig. 8-a, b)。また、各運動において頂上部と側面部の 2 カ所のひずみ計で測定されたひずみ量は、両者とも直線的な変化を示し、通常のひずみ計による測定可能範囲と同等の 10000×10^{-6} 以下であった。したがって、この測定装置により 2 個の弾性体を架橋してひずみ量を測定することは可能とみなした。また、頂上部のひずみ計による測定値が側面部の測定値よりも大きな値を示し、より鋭敏に反応することが判明したため頂上部の測定値を採用することにした。

また、この測定装置が測定対象に非生理的運動を強制するのであれば予備実験で測定されたひずみ量は直線的な変化を示さないはずであるが、屈伸・側屈・回旋運動全てにおいて直線的なひずみ量の変化を示したことより、本測定装置は測定対象に非生理的運動を強制しないと判断した。さらに、屍体標本手関節に測定装置を装着して調べた可動域は、測定装置を装着せずに調べた可動域と同等であったので、測定装置を装着することにより手関節の生理的な運動が障害され、非生理的な運動が強制されることはないと判断した。

5. 測定部位

まず、手関節運動中の各手根骨相互間の運動動態を明らかにするために 4 個の手根骨、すなわち有頭骨、舟状骨、月状骨および三角骨を選定した (Fig. 9)。

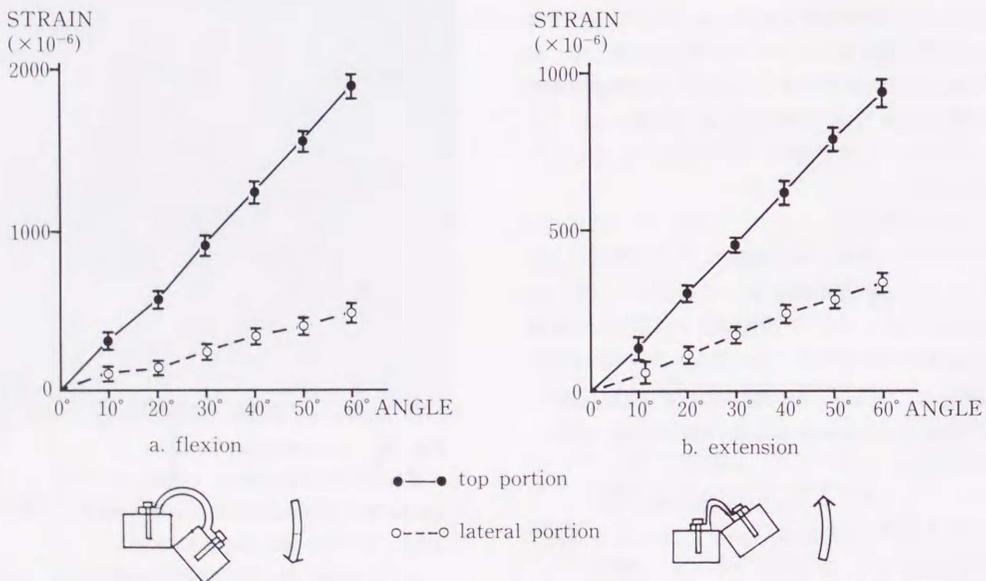


Fig. 6-a, b. Preliminary study for investigating the character of measuring apparatus during flexion and extension motion (a. flexion, b. extension).

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements.

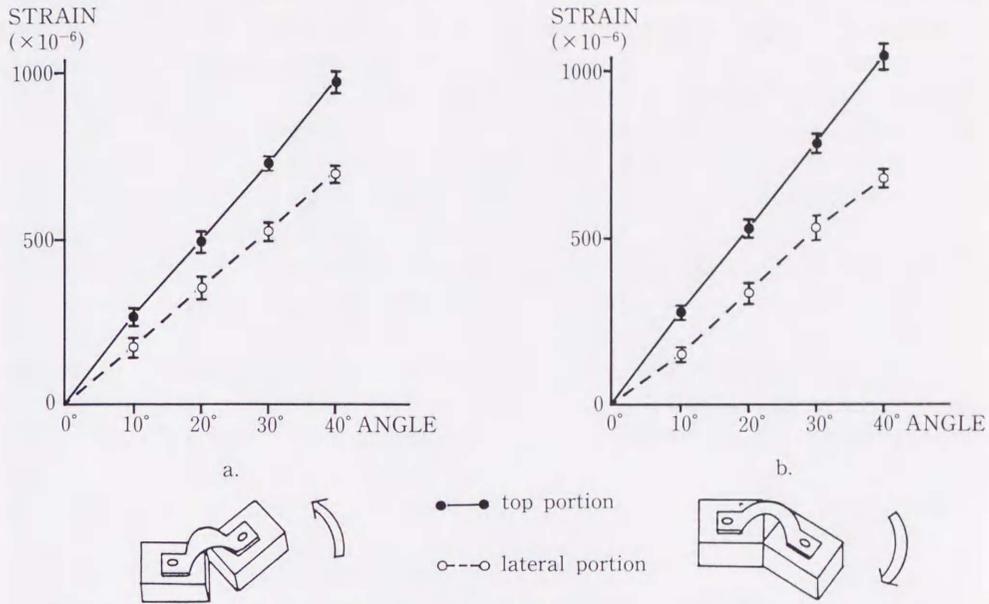


Fig. 7-a, b. Preliminary study for investigating the character of measuring apparatus during lateral flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements.

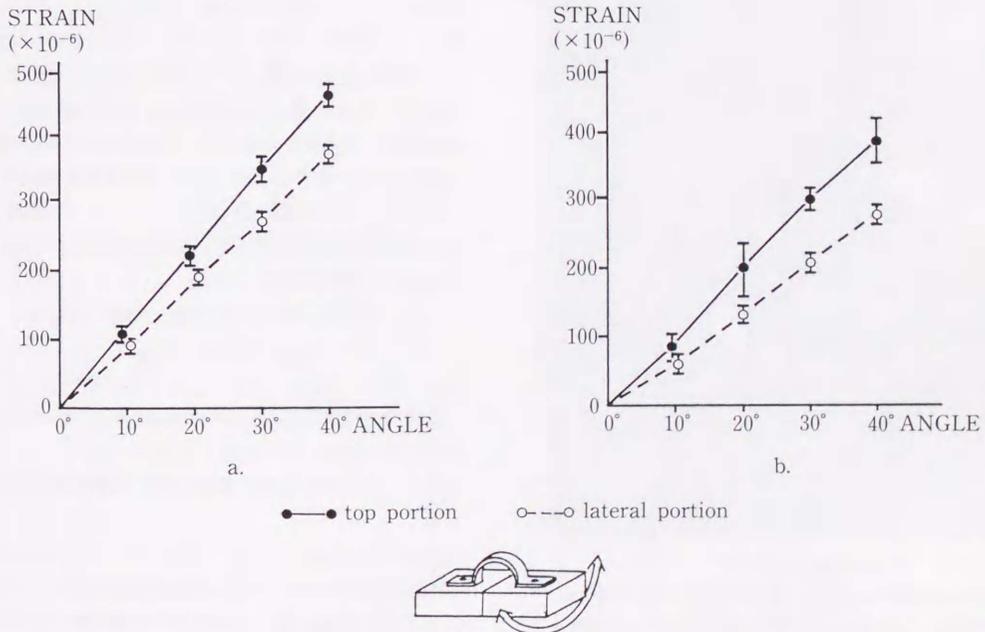


Fig. 8-a, b. Preliminary study for investigating the character of measuring apparatus during rotation motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements.

有頭骨は、前述したごとく手根骨間靭帯で強固に連結され、ほぼ一体となって運動する遠位手根骨列の中央に位置し、手関節運動の中心とされている^{29,66)}。

また、舟状骨、月状骨と三角骨は近位手根骨列を形成し、遠位手根骨列と同様に手根骨間靭帯で連結されるが、互いに関連性を持ちながらもある程度の独立した動きが可能で、手関節のベアリング機構を司るとされている^{29,66)}。

次に、橈骨手根関節と手根中央関節の手関節運動における関与の割合を明らかにするために、Arkless¹⁾、今村¹⁴⁾、中村⁴¹⁾、Sarrafiian⁴⁹⁾や Youm⁷⁵⁾らが用いているごとく橈骨手根関節の運動の指標として橈骨の Lister 結節部と月状骨の間の測定値を用い、手根中央関節の運動の指標として有頭骨と月状骨の間の測定値を用いた (Fig. 9)。

6. 実験手技

まず、生理的状态に破綻をきたさない様に、屍体標

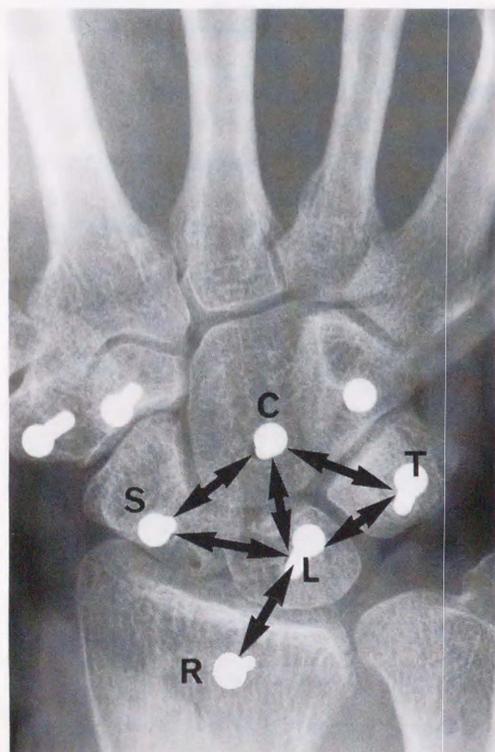


Fig. 9. The measuring sites.

The relative motions between two selected carpal bones or between the lunate and the radius during wrist motion were studied.

(C:capitate, L:lunate, R:radius, S:scaphoid, T:triquetrum)

本の手関節背側部のみを展開し、しかも手関節背側の靭帯および関節包を温存して、2方向のレ線撮影を行い螺子の刺入部位を決定した。螺子の刺入部位および刺入方向は以下のごとくであり、螺子は全て背側より刺入した。有頭骨には、Youm⁷⁵⁾が述べる回転中心に掌側に向けて垂直に、舟状骨には背側隆起部中央に掌側に向けて垂直に、三角骨にはレ線正面像における中心に掌側に向けて垂直に、月状骨には背側頂部より5度中枢掌側に傾斜させて、橈骨には Lister 結節部に掌側に向けて垂直に刺入した (Fig. 10-a, b)。

これらの螺子の刺入部位および刺入方向を再度2方向のレ線撮影を行い確認した後に、各手根骨へ直径1mmの螺子で測定装置を固定した (Fig. 11)。なお、螺子による固定で固定性が良好でない場合は接着剤により固定を確実なものとした。

測定に際しては、支持装置を装着し前腕を回内・回外中間位として固定した (Fig. 12)。そして、掌・背屈運動および橈・尺屈運動中の各測定部位のひずみ量を測定した。

また、運動方向については以下に示す定義とした。すなわち掌屈運動は、手根骨の手掌方向への運動であり、背屈運動は、掌屈運動とは逆に手根骨の手背方向への運動と定義した。また橈屈運動は、手根骨の橈側すなわち母指側への運動とし、尺屈運動は、手根骨の尺側すなわち小指側への運動と定義した。これらの運動は、手関節掌・背屈および橈・尺屈0度を中間位とし、中間位より各方向へ、1秒間に10度の割合で手動的に行った。また掌・背屈運動では0度から70度まで、橈屈運動では0度から20度まで、尺屈運動では0度から40度まで、おのおの10度ごとにひずみ量を測定した。

測定は、各測定部位ごとに1方向について5回行った。測定値は絶対値をとり、5回の測定値の平均値をさらに36手関節で平均した。

なお、統計解析には回帰分析法を用いた。

結 果

まず測定結果および回帰分析の結果について運動方向別に述べる。

なお、以下の測定値の表示は平均値±標準偏差値とする。

1. 背屈運動について

背屈運動時のひずみ量の変化は、測定部位により異なっていた (Fig. 13)。有頭骨・月状骨間のひずみ量は背屈運動において最大であり、背屈70度で $451.3 \pm 12.1 \times 10^{-6}$ であった。舟状骨・月状骨間のひずみ量は背屈50度までは有頭骨・月状骨間に次いで大きな値を

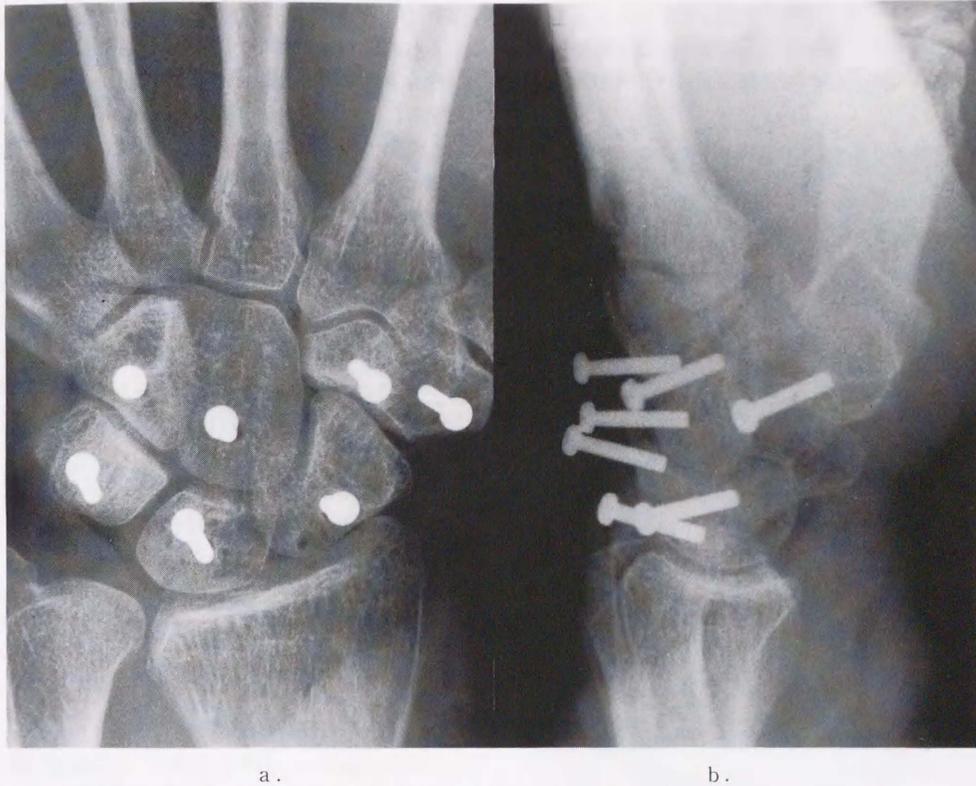


Fig. 10-a, b. Roentgenogram after sting each screw to each carpal bone.
(a. anterior-posterior view, b. lateral view)

示し、特に背屈20度まではひずみ量の増加が著明であった。背屈30度以上では増加の割合は少なく、背屈70度で $299.7 \pm 13.2 \times 10^{-6}$ であった。三角骨・月状骨間のひずみ量の変化は、舟状骨・月状骨間のひずみ量の変化と近似しており、背屈20度までは増加したが背屈30度以上では増加の割合は少なく、背屈70度で $198.6 \pm 15.6 \times 10^{-6}$ であった。舟状骨・有頭骨間は背屈40度よりひずみ量が急激に増加し、背屈70度で $353.2 \pm 9.9 \times 10^{-6}$ であった。三角骨・有頭骨間も舟状骨・有頭骨間と同様に背屈40度よりひずみ量が急激に増加し、背屈70度で $330.7 \pm 10.5 \times 10^{-6}$ であった。以上の各測定部位のひずみ量の変化を回帰分析法で検定したところ、各測定部位間に危険率5%で有意差が認められた。

2. 掌屈運動について

掌屈運動では、背屈運動と異なり運動中にひずみ量が急激に増加する測定部位は認められず、掌屈運動では、三角骨・有頭骨間、有頭骨・月状骨間、舟状骨・有頭骨間、三角骨・月状骨間、舟状骨・月状骨間の順にひずみ量が増加していた。そして、掌屈70度でおのの $593.1 \pm 12.2 \times 10^{-6}$ 、 $521.2 \pm 10.1 \times 10^{-6}$ 、 $311.7 \pm$

9.9×10^{-6} 、 $287.1 \pm 9.9 \times 10^{-6}$ 、 $171.3 \pm 12.3 \times 10^{-6}$ の値を示した (Fig. 14)。また、回帰分析法で検定したところ、各測定部位間に危険率5%で有意差が認められた。

3. 橈屈運動について

橈屈運動では舟状骨・有頭骨間、有頭骨・月状骨間、舟状骨・月状骨間のひずみ量がほぼ直線的に増加し、橈屈20度でおのの $95.8 \pm 6.1 \times 10^{-6}$ 、 $61.6 \pm 4.9 \times 10^{-6}$ 、 $15.8 \pm 5.1 \times 10^{-6}$ であった。三角骨・月状骨間と三角骨・有頭骨間は橈屈10度から20度の間でひずみ量が大きく増加し、橈屈20度でおのの $94.7 \pm 6.6 \times 10^{-6}$ と $92.8 \pm 5.8 \times 10^{-6}$ であった (Fig. 15)。また、回帰分析法で検定したところ、各測定部位間に危険率5%で有意差が認められた。

4. 尺屈運動について

尺屈運動では、三角骨・有頭骨間、有頭骨・月状骨間、舟状骨・有頭骨間、舟状骨・月状骨間、三角骨・月状骨間の順にひずみ量が増加しており、尺屈40度でおのの $221.3 \pm 9.2 \times 10^{-6}$ 、 $126.3 \pm 9.8 \times 10^{-6}$ 、 $89.7 \pm 7.7 \times 10^{-6}$ 、 $86.9 \pm 8.0 \times 10^{-6}$ 、 $29.8 \pm 6.1 \times 10^{-6}$ であ

った (Fig. 16)。また回帰分析法で検定したところ、舟状骨・有頭骨間と舟状骨・月状骨間には有意差は認められなかったが、他の測定部位間には5%の危険率

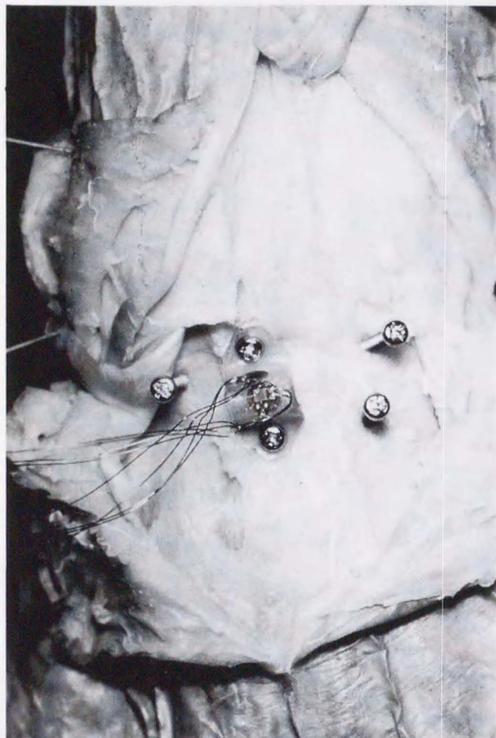


Fig. 11. The procedure of measurements.

The measuring apparatus was fixed to two selected carpal bones or to the lunate and the radius.

で有意差が認められた。

5. 橈骨・月状骨間のひずみ量の変化について
橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合を明らかにするために、橈骨手根関節の運動の指標として測定した橈骨・月状骨間のひずみ量の変化について運動方向別に述べる。

まず背屈運動では、背屈30度で $286.7 \pm 10.8 \times 10^{-6}$ のひずみ量を示すまで増加したが、背屈30度以上ではあまり増加せず背屈70度で $302.3 \pm 12.4 \times 10^{-6}$ であった (Fig. 17)。掌屈運動では、背屈運動と同様の变化を示し、掌屈40度で $266.7 \pm 11.3 \times 10^{-6}$ のひずみ量を示すまで増加したが、掌屈40度以上では増加の割合は少なく、掌屈70度で $334.6 \pm 11.7 \times 10^{-6}$ であった (Fig. 17)。

橈屈運動では、ほぼ直線的にひずみ量が増加したが、その値は小さく橈屈20度で $66.6 \pm 7.4 \times 10^{-6}$ であった (Fig. 18)。

尺屈運動でもほぼ直線的にひずみ量が増加し、尺屈40度で $291.7 \pm 8.8 \times 10^{-6}$ であった (Fig. 18)。

考 察

I. 手根骨の運動動態に関する考察

手関節の運動は、基本的には掌・背屈運動と橈・尺屈運動の組合せである。この運動の運動単位として、Navarro は⁴⁾ 1921年に columnar theory を唱え、手根骨を central, medial および lateral の3つの column に分類した (Fig. 19)。Central column には月状骨、有頭骨および有鉤骨が含まれ手関節の掌・背屈運動の要となり、lateral column には舟状骨、大菱形骨および小菱形骨が含まれ、動きが大きいため

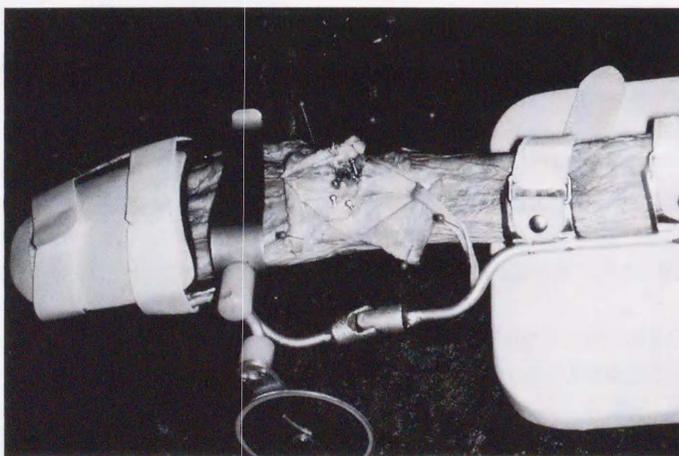


Fig. 12. The holding device.

Each specimen was rigidly mounted in a holding device.

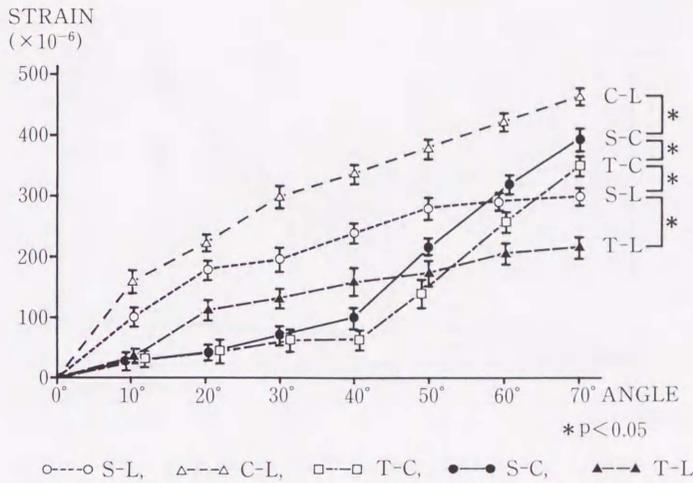


Fig. 13. The relative motions between two selected carpal bones during wrist extension motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

(C:capitate, L:lunate, S:scaphoid, T:triquetrum)

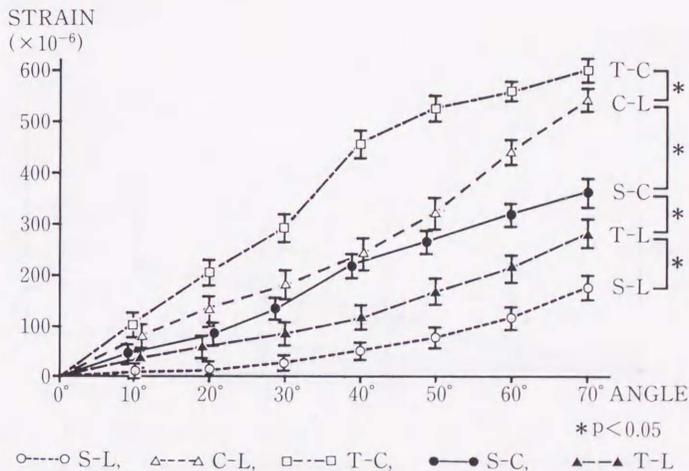


Fig. 14. The relative motions between two selected carpal bones during wrist flexion motion.

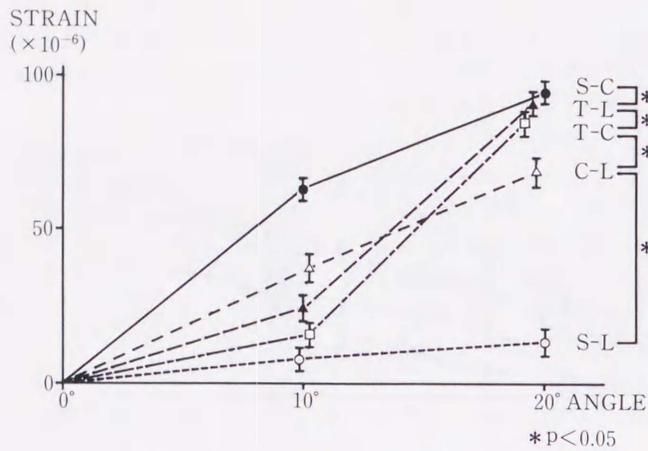
Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

(C:capitate, L:lunate, S:scaphoid, T:triquetrum)

mobile column と呼んだ。また, medial column には三角骨と豆状骨が含まれ, 主に回旋の動きを司るとした。

さらに, Taleisnik は^{56,57,59,60} 1976年に Navarro の概念を多少変更し, central column に月状骨とす

べての遠位手根骨列を含めて flexion-extension column とし, lateral column は舟状骨のみとし, 遠位手根骨列と近位手根骨列を連結して動かすところから mobile column と呼んだ。また, medial column は三角骨のみで構成され, 回内・回外運動の際に主に働

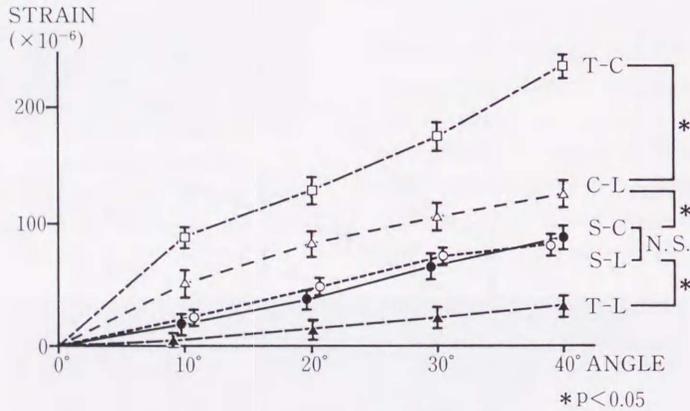


○---○ S-L, △---△ C-L, □---□ T-C, ●---● S-C, ▲---▲ T-L

Fig. 15. The relative motions between two selected carpal bones during wrist radial flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirtysix wrist joints.

(C:capitate, L:lunate, S:scaphoid, T:triquetrum)



○---○ S-L, △---△ C-L, □---□ T-C, ●---● S-C, ▲---▲ T-L

Fig. 16. The relative motions between two selected carpal bones during wrist ulnar flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirtysix wrist joints.

(C:capitate, L:lunate, S:scaphoid, T:triquetrum)

くので rotation column とした (Fig. 20)。

一方, Lichtman は²¹⁾ 1981年に手根骨を7つの骨よりなる ring と考え ring theory を提唱した。正常の動きのコントロールは連結が比較的ゆるい大菱形骨・舟状骨間の radial link と有鉤骨・三角骨間の ulnar

link によって行われ, radial link から掌屈力が加わり, ulnar link から背屈力が加わるとした。そして, 3つの手根骨相互間で動きがみられる近位手根骨列で, 掌・背屈力が相殺され安定化すると述べた (Fig. 21)。

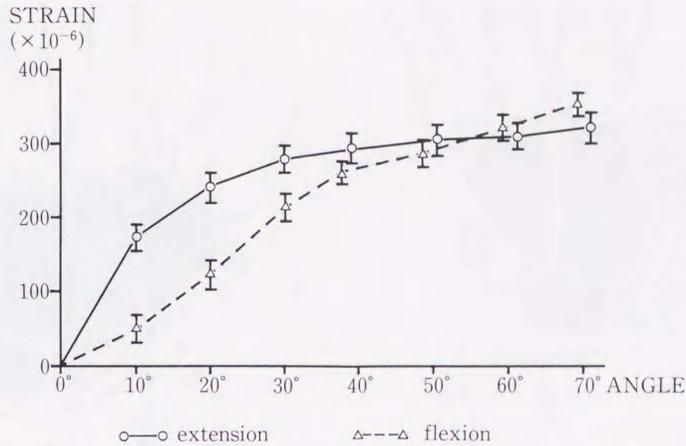


Fig. 17. The relative motions between the lunate and the radius during wrist extension and flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

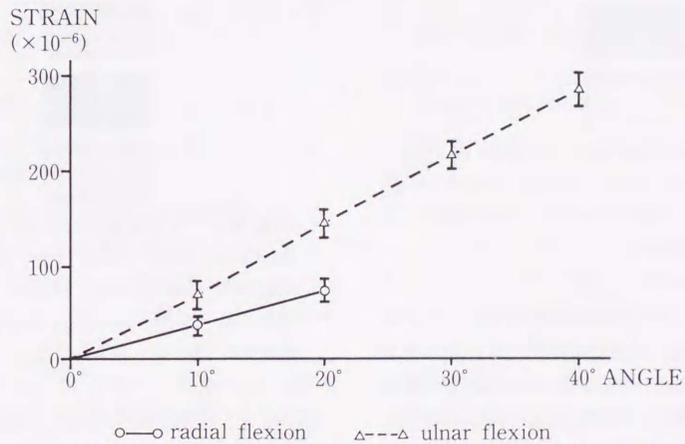


Fig. 18. The relative motions between the lunate and the radius during wrist radial flexion and ulnar flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

これらの理論は手関節の運動動態を概念的にとらえたものであり、実際に定量的なデータに基づいているわけではない。はたしてこれらの理論通りに手関節は動いているのか、あるいは異なった運動動態を示すのか、手関節の運動動態に関して著者の実験結果をもとに、運動方向別に検討を加えるとともに現在までの理論の妥当性を考察する。

検討を加えるにあたり、測定対象間の運動が小さいということは他の測定部位に比べて密接に関連しながら動くものと仮定した。また、各測定部位のひずみ量の変化の間に回帰分析法による検定で有意差が認められた場合は、その測定部位間の運動動態は異なると仮定した。

1. 背屈運動について

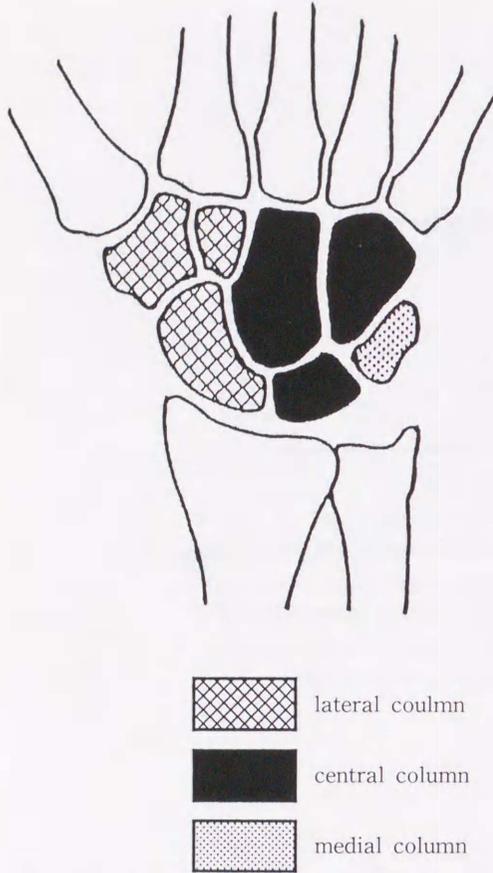


Fig. 19. Navarro's concept of columns of wrist consisted of central column, mobile lateral column and rotatory medial column. (the original figure)

背屈運動時の各手根骨間の運動動態はそれぞれ異なり、手根中央関節で最大の運動が認められたのは有頭骨・月状骨間であった。一方、舟状骨・有頭骨間と三角骨・有頭骨間の運動は、背屈40度まではひずみ量が小さく密接に関連して運動するが、背屈40度以上では運動が急激に増大し、背屈70度で背屈40度のひずみ量の約4倍の値を示した。また、近位手根骨列間は背屈30度以上では運動の増大が少なかった (Fig. 13)。

以上より、背屈運動の運動動態は以下のごとく考えられる。

遠位手根骨列に加わった背屈力は、手根中央関節を介して近位手根骨列に伝達される。手関節掌側の靭帯は背側の靭帯より強靭であるため、遠位手根骨列が背屈すると掌側の靭帯が緊張し、近位手根骨列は背屈していく。なかでも、遠位手根骨列と靭帯性の連結を有する舟状骨と三角骨は遠位手根骨列と密接に関連して

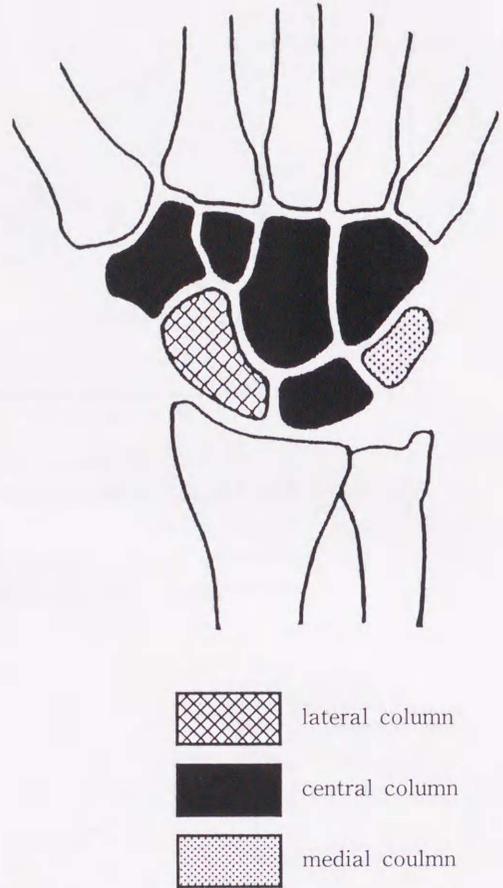


Fig. 20. Taleisnik's concept of central column involves entire distal row and lunate, with scaphoid constituting lateral column and triquetrum being rotatory medial column. (the original figure)

背屈する。一方、遠位手根骨列と靭帯性の連結を有しない月状骨は、背屈する舟状骨と三角骨から手根骨間靭帯を介して背屈力が伝達されるとともに、有頭骨が月状骨の背側極を押し込むことにより背屈するため、手根中央関節のなかでは有頭骨・月状骨間が最大の運動を示す。しかし、背屈30度以上では有頭骨・月状骨間の運動の増大の割合は小さく、これは橈骨遠位関節面が掌側に傾斜しているため、月状骨自身の背屈が背屈30度で制限されるためと考えられた。そして、手根骨間靭帯を介して舟状骨と三角骨の背屈も制限されるため、背屈30度以上では近位手根骨列間の運動の増大は少ない。一方、近位手根骨列間の背屈が制限されるにもかかわらず、遠位手根骨列はさらに背屈し続ける

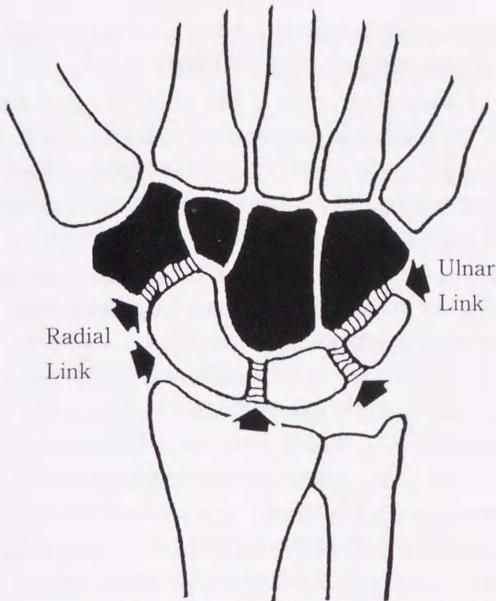


Fig. 21. Lichtman's concept of ring theory.

Carpal structures can be thought of as ring with radial and ulnar mobile links. (the original figure)

ので、それまで密接に関連して運動していた舟状骨・有頭骨間と三角骨・有頭骨間の運動が急激に大きくなる。

また、手根骨の橈側と尺側の運動を比較すると、手根中央関節では三角骨・有頭骨間よりも舟状骨・有頭骨間のひずみ量の変化が大きく有意差が認められた。近位手根骨列間では、舟状骨・月状骨間のひずみ量は背屈70度で三角骨・月状骨間の1.5倍のひずみ量を示し、両者の間に有意差が認められた。すなわち、背屈運動では手根中央関節でも近位手根骨列間でも手関節尺側部分が橈側部分より密接に関連して運動し、背屈力は舟状骨よりも三角骨を介して月状骨に伝達されたと考えられた。

2. 掌屈運動について

掌屈運動時の各手根骨間の運動動態は、背屈運動時と同様にそれぞれ異なっていた。また、手根中央関節の運動は近位手根骨列間の運動よりも絶えず大きく、三角骨・有頭骨間、有頭骨・月状骨間、舟状骨・有頭骨間、三角骨・月状骨間、舟状骨・月状骨間の順であった (Fig. 14)。

以上より、掌屈運動時の運動動態は以下のごとく考えられる。

遠位手根骨列に加わった掌屈力は、手根中央関節を介して近位手根骨列に伝達される。手関節背側の靭帯は掌側の靭帯ほど強靭でなく、力学的意義が少ない。それゆえ、手根中央関節では背屈運動と異なり、密接に関連した運動は認められず、掌屈角度の増加とともにその運動は増大する。すなわち、手根中央関節での掌屈力の伝達は各手根骨の関節面の形態と摩擦力によると考えられた。ここで、手根骨の橈側と尺側の運動を比較すると、三角骨・有頭骨間は舟状骨・有頭骨間の約2倍のひずみ量を示し、三角骨・月状骨間も舟状骨・月状骨間の約2倍のひずみ量の変化を示した。この結果より、掌屈運動では手根中央関節でも近位手根骨列間でも手関節橈側部分が尺側部分より密接に関連して運動すると考えられた。したがって、手根中央関節の橈側部分である大菱形骨・舟状骨間の関節面の形態および摩擦力により舟状骨は掌屈し、この掌屈力は手根骨間靭帯を介して月状骨に伝達される。一方、背屈運動と同様に有頭骨が月状骨の掌側極を押し込むことにより月状骨は掌屈する。この両者の伝達経路の存在により、有頭骨・月状骨間は舟状骨・有頭骨間よりも大きな運動が認められる。さらに、月状骨から三角骨へ手根骨間靭帯を介してこの掌屈力が伝達されるとともに遠位手根骨列からの掌屈力も加わり、三角骨・有頭骨間は手根中央関節で最大の運動を示すと考えられた。

これまでの報告では手関節尺側部分の運動動態が解析できなかったため、同一平面上の運動では同じ運動動態が逆方向に見られると考えられていた^{11,14)}。しかし、手関節尺側部分の運動動態を解析した著者の実験結果からは、背屈運動と掌屈運動は同一平面上の運動ではあるが、その運動動態は異なると考えられた。

さらに、背屈運動時には背屈40度以上で舟状骨・有頭骨間と三角骨・有頭骨間の運動が急激に増大したが、掌屈運動時には同部位に急激な運動の変化は認められず、掌屈運動は背屈運動よりも円滑に行われると理解した。

3. 橈屈運動について

橈屈運動時の各手根骨間の運動動態は、掌・背屈運動時と同様に、それぞれ異なっていた。手根中央関節で最大の運動が認められたのは舟状骨・有頭骨間であり、有頭骨・月状骨間では舟状骨・有頭骨間の約3分の2の運動が認められた。一方、三角骨・有頭骨間は橈屈10度までは舟状骨・有頭骨間の約4分の1の運動しか認められないが、橈屈10度から橈屈20度の間でその運動は急激に増大した。また、近位手根骨列間の運動は、舟状骨・月状骨間と三角骨・月状骨間で異なっ

ていた。舟状骨・月状骨間は測定部位中最小のひずみ量の変化を示し、橈屈運動時には舟状骨と月状骨は密接に関連して運動すると考えられた。三角骨・月状骨間は、三角骨・有頭骨間と同様に、橈屈10度以上で急激にその運動が増大していた (Fig. 15)。

以上より、橈屈運動の運動動態は以下のごとく考えられた。

遠位手根骨列に加わった橈屈力が、有頭骨を中心として遠位手根骨列を橈側へ回転させるように作用する。そして、この運動により大菱形骨が橈骨茎状突起に接近し、舟状骨は大菱形骨と橈骨遠位関節面の間に挟まれる。この際、各関節面の形状により舟状骨は尺側へ移動しながら掌屈する。一方、舟状骨と月状骨は密接に関連して運動し、月状骨から手根骨間靭帯を介して三角骨へ橈掌屈力が伝達される。この様にして、三角骨周囲の運動は橈屈10度以上で大きくなると考えられた。

4. 尺屈運動について

尺屈運動では、舟状骨・有頭骨間と舟状骨・月状骨間以外の各手根骨間の運動動態は異なっていた。また、橈屈10度以上で三角骨周囲の運動が増大する橈屈運動と異なり、尺屈運動では各測定部位ともほぼ直線的にひずみ量が増加しており、同一平面上の運動ではあるが橈屈運動と尺屈運動ではその運動動態が異なると考えられた。

手根中央関節の運動は近位手根骨列間の運動よりも大きい傾向が認められた。手根中央関節で最大の運動を示したのは三角骨・有頭骨間であり、有頭骨・月状骨間は三角骨・有頭骨間の約3分の2の運動を示し、舟状骨・有頭骨間は三角骨・有頭骨間の約2分の1の運動が認められた。近位手根骨列間では舟状骨・月状骨間が三角骨・月状骨間の約2倍の運動を示した。三角骨・月状骨間は測定部位中最小のひずみ量の変化を示し、尺屈運動時に三角骨と月状骨は密接に関連して運動すると考えられた (Fig. 16)。

以上より、尺屈運動の運動動態は以下のごとく考えられる。

遠位手根骨列に加わった尺屈力は、有頭骨を中心として遠位手根骨列を尺側へ回転させるように作用する。この運動により有鈎骨が尺骨遠位端に接近し、三角骨は有鈎骨と尺骨遠位端の間に挟みこまれる。しかし、各関節面の形状により三角骨は橈側へ移動しながら背屈する。一方、三角骨と月状骨は密接に関連しながら運動し、月状骨から手根骨間靭帯を介して舟状骨へ尺背屈力が伝達される。しかし、橈屈運動と異なり、ある測定部位の運動が急激に大きくなることはなく、

尺屈運動は橈屈運動よりも円滑に行われると考えられた。

以上の運動方向別の解析の結果をまとめると、手根骨の運動動態については以下の結論に達した。

Columnar theory では、central column に月状骨が含まれ月状骨が遠位手根骨列と一体となって動くとされている^{44,56,60}。ところが、著者の実験結果では手関節の各運動において有頭骨・月状骨間には他の測定部位と同等もしくはより大きな運動が認められた。したがって、columnar theory のように手根中央関節を無視して手関節の運動を縦列の組合せで考える理論は適切でない結論した。

一方、ring theory では、columnar theory と異なり手根中央関節の運動が重視され、遠位および近位手根骨列が radial link と ulnar link で連結されて運動し、同一平面上の運動すなわち背屈運動と掌屈運動、橈屈運動と尺屈運動は同じ運動動態を示すとしている²¹。ところが、著者の実験結果では同一平面上の運動といえども手関節の各運動方向によりその運動動態は異なっており、ring theory も不適切であるという結論に達した。

さて、これらの手関節運動に関する理論はレ線写真や連続動態撮影の所見をもとにした理論であり、著者のように角度ごとの各手根骨間の運動動態を定量的に解析したわけではない。しかも、レ線写真や連続動態撮影では手関節尺側、すなわち三角骨周囲の運動の解析はきわめて困難であるため、手関節全般の運動を定量的に解析して打ち立てられた理論ではない。

したがって、著者の解析によれば、1つの理論で手関節のすべての運動を解析することはきわめて難しく、各運動方向で手根骨の運動動態はおのおの異なると結論した。

また、運動方向により異なる運動動態を示す手関節運動の中で、円滑にその運動が行われていたのは掌屈運動と尺屈運動であった。この掌屈運動と尺屈運動はSteindler⁵⁴ が提唱する生理的運動軸の方向に一致していた。さらに、この2方向は橈骨遠位関節面の形態と関係づけることができる。すなわち、橈骨遠位関節面は正常では掌側に約10度、尺側に約15度傾斜しており、傾斜している方向の手関節運動は他の運動方向よりも円滑に運動が行われていた。元来、手根骨は中手骨に伝達された外力により橈骨遠位関節面上を受動的に運動し、一種のベアリング機構として働くと考えられている^{29,66}。それゆえ、運動の基盤となる橈骨遠位関節面の形態は手関節運動に影響を与える重要な因子と考えられる。実際、日常診療において、手関節周辺の骨

折後の遺残変形として橈骨遠位関節面の傾斜が変わると、手関節の可動域が制限され日常生活に支障をきたす症例を経験することが多い。したがって、橈骨遠位関節面の形態は手関節運動に大きな影響を与えたと考えられた。

II. 手関節運動における運動量に関する考察

手関節運動における橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合については、現在までに多くの報告がある^{3, 6, 17, 19, 20, 41, 42, 45, 47, 49}。しかし、いずれの報告も橈骨手根関節あるいは手根中央関節が各運動中に全体の何%あるいは何度関与するかという報告であり、各運動の運動角度との具体的な関係を述べた報告は皆無である。そこで著者は、各運動方向別に行った解析の結果をこれまでの報告と比較検討し、以下考察を行う。

検討を加えるにあたり、Arkless¹⁾、今村¹⁴⁾、中村⁴¹⁾、Sarrafian⁴⁹⁾や Youn⁷⁵⁾らが用いているごとく橈骨と月状骨の間のひずみ量の変化を橈骨手根関節の運動の指標とし、有頭骨と月状骨の間のひずみ量の変化を手根中央関節の運動の指標とした。

1. 背屈運動について

背屈運動時の橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合について、Kapandji¹⁷⁾は橈骨手根関節で35度(41.2%)、手根中央関節で50度(58.8%)動くとし、Kaplan¹⁸⁾は橈骨手根関節で15%から25%、手根中央関節で75%から85%動き、手根中央関節の関与が大きいと報告した⁵⁾。

一方、Fisk⁶⁾は橈骨手根関節で66.6%、手根中央関節で33.4%が動くとして、Sarrafian⁴⁹⁾も橈骨手根関節で66.5%、手根中央関節で33.5%が動くとし、橈骨手根関節の関与が大きいと報告した。

著者の実験結果では、背屈30度までは橈骨手根関節と手根中央関節は同じ割合で運動し、背屈30度以上では主に手根中央関節で運動し、橈骨手根関節の運動はほとんど認められなかった (Fig. 22)。

2. 掌屈運動について

掌屈運動時の橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合について、Kapandji¹⁷⁾は橈骨手根関節で50度(58.8%)、手根中央関節で35度(41.2%)動くとし、Kaplan¹⁸⁾は橈骨手根関節で65%から75%、手根中央関節で25%から35%動き、橈骨手根関節の関与が大きいと報告した。

また、Fisk⁶⁾は橈骨手根関節で50%、手根中央関節で50%動くとして、両者の関与は均等であると述べた。

一方、Sarrafian⁴⁹⁾は橈骨手根関節で40%、手根中央関節で60%が動き、手根中央関節の関与が大きいと報告した。

著者の実験結果では、掌屈40度までは橈骨手根関節と手根中央関節はほぼ等しい割合で運動し、掌屈40度以上では主に手根中央関節で運動し、橈骨手根関節の運動はわずかであった (Fig. 23)。

3. 橈屈運動について

橈屈運動時の橈骨手根関節と手根中央関節の関与の

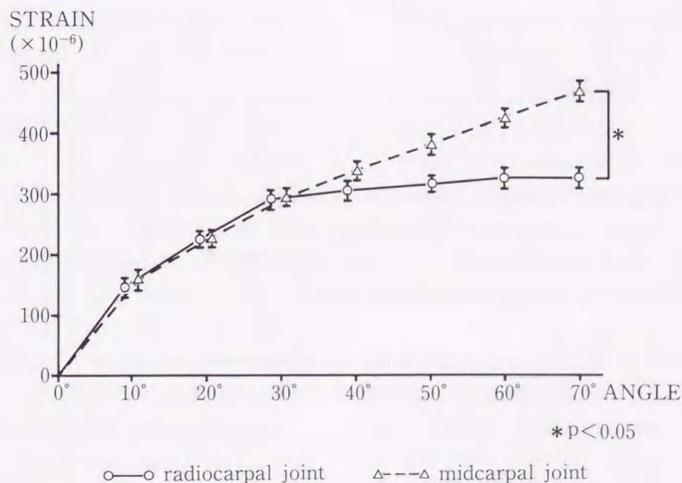


Fig. 22. Comparison between radiocarpal joint movement and midcarpal joint movement during wrist extension motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

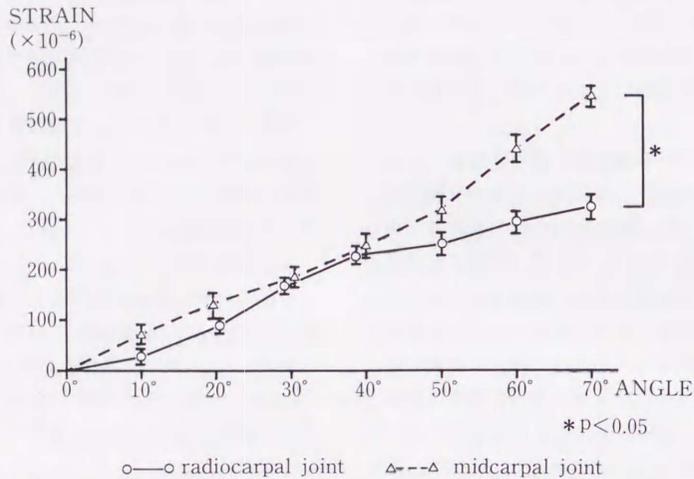


Fig. 23. Comparison between radiocarpal joint movement and midcarpal joint movement during wrist flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

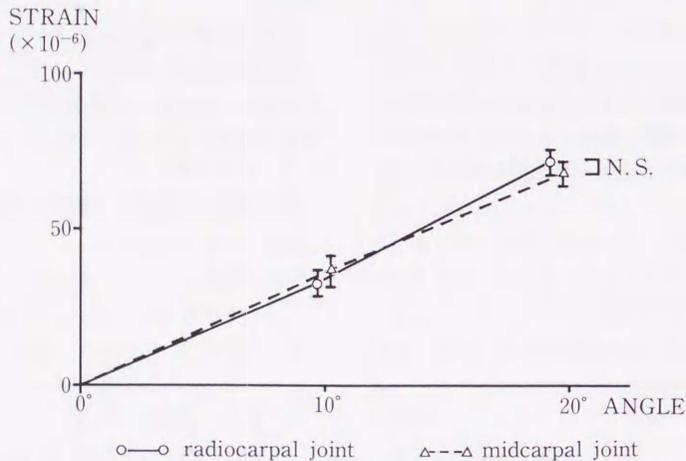


Fig. 24. Comparison between radiocarpal joint movement and midcarpal joint movement during wrist radial flexion motion.

Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirty-six wrist joints.

割合について、Youm⁷⁵⁾は橈屈運動では近位手根骨列での動きはほとんどなく手根中央関節のみで動き、さらに近位手根骨列を構成する舟状骨と月状骨、三角骨相互の動きも無視できると述べている。

一方、Volz⁷¹⁾は橈屈時には近位手根骨列は尺側へ、遠位手根骨列は橈側へ動くこと述べた。

著者の実験結果では、これまでの報告と異なり、橈骨手根関節と手根中央関節の両者にほぼ等しい運動を

認めた (Fig. 24)。

4. 尺屈運動について

尺屈運動時の橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合について、Youm⁷⁵⁾は橈骨手根関節と手根中央関節の両方で動くこと述べており、Volz⁷¹⁾は近位手根骨列が橈側へ、遠位手根骨列が尺側へ動くこと述べた。

著者の実験結果では、これまでの報告と異なり、手根中央関節の運動も認められるが、橈骨手根関節の運

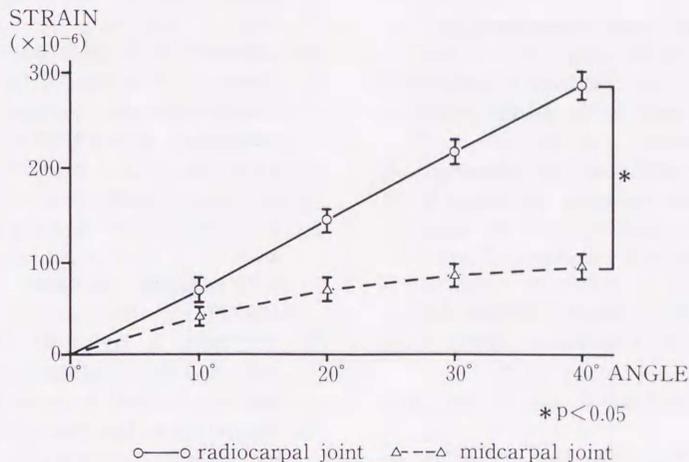


Fig. 25. Comparison between radiocarpal joint movement and midcarpal joint movement during wrist ulnar flexion motion. Each point is the mean \pm standard deviation of the mean for five measurements of thirtysix wrist joints.

動が主体であった (Fig. 25)。

以上の手関節運動における手根骨の運動動態および橈骨手根関節と手根中央関節の関与の割合に関する解析の結果、以下のごとく結論した。

各運動方向で手関節の運動動態はおおの異なる、現在までに発表された理論の1つで手関節のすべての運動動態を理解することは極めて難しい。また、運動方向により異なる運動動態を示す手関節運動の中で、円滑にその運動が行われていたのは掌屈運動と尺屈運動であり、橈骨遠位関節面の形態が手関節運動に大きな影響を与える。さらに、掌・背屈運動では、背屈30度および掌屈40度までは橈骨手根関節と手根中央関節は同じ割合で運動するが、背屈30度以上および掌屈40度以上では手根中央関節での運動が主体である。橈屈運動では、橈骨手根関節と手根中央関節の両者にほぼ等しい運動が認められ、橈屈10度以上で三角骨周囲の運動が大きくなる。尺屈運動では、手根中央関節の運動も認められるが、橈骨手根関節の運動が主体である。

著者が考案した測定装置は、従来の方法では測定が極めて困難とされてきた手関節尺側部分、特に三角骨周囲の運動を含めた手関節全体の3次元運動を解析するのに有用であった。しかし、今回測定した部位よりも離れた部位の測定を行うには、測定装置中央部の太鼓橋状の部分の直径を変える必要があり、その場合には同一測定部位でも測定値に差が生じる可能性がある。したがって、本測定装置で架橋する距離には限界

があり、この点は今後改善の余地があると考えた。また、本測定装置は舟状骨骨折、Colles 骨折、Kienböck 病や手根不安定症などの実験モデルへの応用も可能と考えられ、これらの手関節障害の病態の解明に役立つものと推考する。

謝 辞

稿を終えるにあたり、懇切なる御指導、御校閲を賜りました恩師生田義和教授に深甚なる謝意を表します。また、終始御助言、御支援をいただきました川崎医科大学解剖学教室池田章教授、広島大学工学部建設構造工学教室藤谷義信教授、ならびに整形外科学教室村上恒二講師、越智光夫講師に深謝するとともに、多大な御支援、御助言をいただいた整形外科学教室の各位に感謝いたします。

なお本論文の要旨は第4回日本整形外科学会基礎学術集会(1989, 東京)において発表した。

参 考 文 献

1. Arkless, R. 1966. Cineradiography in normal and abnormal wrists. *Am. J. Roentgenology* 96: 837-844.
2. Cooney, W. P. 1980. Fractures of the scaphoid: a rational approach to management. *Clin. Orthop.* 149: 90-97.
3. Destot, E. 1926. A radiologic study, p. 24-34. *In* F. R. B. Atkinson (ed.), *Injuries of*

- the wrist. Chares C Thomas, Publisher, Springfield.
4. **Dobyns, J. H. and Linscheid, R. L.** 1975. Traumatic instability of the wrist, p. 182-199. *In* American academy of orthopadic surgeons instructional course lectures, vol 24. St Louis, C. V. Mosby.
 5. **Fick, R.** 1911. *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der Bewegenden Muskeln*, 3rd ed. Spezielle Gelenk und Muskel Mechanik., Jena, G. Fischer.
 6. **Fisk, G. R.** 1970. Carpal instability and the fractured scaphoid. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.* 46 : 63-76.
 7. 二見俊郎 1987. 橈骨短縮術について. 整・災外 30 : 749-754.
 8. **Gilford, W. W.** 1943. The mechanism of the wrist joint special reference to fractures of the scaphoid. *Guys. Hosp. Rep.* 92 : 52-59.
 9. **Gilula, L. A. and Weeks, P. M.** 1978. Post-traumatic ligamentous instabilities of the wrist. *Radiology* 129 : 641-651.
 10. 群家則之 1987. 規則的と不規則的追跡動作による手関節運動の動的解析. 日手会誌 4 : 361-364.
 11. 長谷芳文 1987. Cineradiography による手関節橈尺屈運動の解析. 日手会誌 4 : 347-351.
 12. 平野英二 1985. 手関節のシネラジオグラフィ. 整・災外 28 : 1495-1503.
 13. 今村宏太郎 1985. Cineradiography による手関節掌背屈運動の解析. 日手会誌 2 : 58-62.
 14. 今村宏太郎 1987. Cineradiography による手関節運動の解析. 日整会誌 61 : 499-510.
 15. 石突正文 1986. 手関節不安定症の診断と治療. 手術 40 : 45-51.
 16. **Johnson, R. P.** 1980. The acutely injured wrist and its residuals. *Clin. Orthop.* 149 : 33-44.
 17. **Kapandji, A.** 1970. *The physiology of the joints*. 1st ed, Williams and Wilkins, Baltimore.
 18. **Kaplan, E. B.** 1965. *Functional and surgical anatomy of the hand*, 1st ed. J. B. Lippincot Co., New York.
 19. **Kuhlman, J. N.** 1982. Experimentelle Untersuchungen zur Stabilität und Instabilität des Karpus, p. 185-201. *In* H. Nigst (ed.), *Frakturen, Luxationen und Dissociationen der Karpalknochen*. Stuttgart, Hippokrates.
 20. **Lange, A. and Huiskes, R.** 1985. Kinematic behavior of the human wrist joint: A roentgen-stereophoto-grammetric analysis. *J. Orthop. Research.* 3 : 56-64.
 21. **Lichtman, D. M.** 1981. Ulnar midcarpal instability-clinic and laboratory analysis. *J. Hand Surg.* 6 : 515-523.
 22. **Linschid, R. L. and Dobyns, J. H.** 1972. Traumatic instability of the wrist: diagnosis, classification and pathomechanics. *J. Bone Joint Surg.* 54-A : 1612-1613.
 23. **Linschid, R. L.** 1983. Instability patterns of the wrist. *J. Hand Surg.* 8 : 682-686.
 24. **MacConaill, M. A.** 1941. The mechanical anatomy of the carpus and its bearings on some surgical problems. *J. Anat.* 75 : 166-175.
 25. **Mayfield, J. K.** 1980. Carpal dislocations: pathomechanics and progressive perilunar instability. *J. Hand Surg.* 5 : 226-241.
 26. **Mayfield, J. K.** 1980. Mechanism of carpal injuries. *Clin. Orthop.* 149 : 45-54.
 27. **Mayfield, J. K.** 1982. The ligaments of the human wrist and their functional significance. *Anat. Rec.* 186 : 417-428.
 28. **Mazet, R. and Hohl, M.** 1963. Fractures of the carpal navicular. *J. Bone Joint Surg.* 45-A : 82-89.
 29. **McMurty, R. Y. and Youm, Y.** 1978. Kinematics of the wrist. *J. Bone Joint Surg.* 60-A : 955-961.
 30. 三浪明男 1985. 月状骨単独および周囲脱臼整復後の臨床成績と carpal instability. 日手会誌 2 : 787-791.
 31. 光本光一 1984. 手関節7方向レ線撮影による手関節運動の検討. 日手会誌 1 : 39-42.
 32. 水関隆也 1988. 手関節尺側支持機構の解剖. 日手会誌 5 : 465-468.
 33. 森本正治 1988. 歪ゲージを応用した超軽量・小型フレキシブル関節角度計の開発. 人間工学 24 : 182-183.
 34. 森脇正之 1981. 手関節尺側の靭帯構造. 整・外 32 : 1511-1513.
 35. 中村正徳 1982. Radial midcarpal instability の一例と carpal instability についての考察. 整・外 33 : 1734-1748.
 36. 中村正徳 1984. 手関節弛緩性の診断, 分類に対する一考察. 日手会誌 1 : 50-54.
 37. 中村正徳 1985. 手関節の機能解剖. 整・災外 28 : 1473-1480.
 38. 中村正徳 1985. Midcarpal instability の診断と治療. 整・災外 28 : 1505-1511.
 39. 中村正徳 1987. Instability としては把握しきれない手関節靭帯損傷について. 日手会誌 4 : 484-488.
 40. 中村蓼吾 1982. Wrist instability の2.3の検討. 整・外 33 : 1745-1748.
 41. 中村蓼吾 1983. 手関節機能撮影における撮影支

- 持装置と手根不安定症. 整・外 34 : 1505-1507.
42. 中村 蓼吾 1987. 手根部の骨折・脱臼, 靭帯損傷の取り扱い. 日手会誌 3 : 923-927.
43. 中村 蓼吾 1990. 手根不安定症のメカニズムと臨床. 関節外科 9 : 673-680.
44. Navarro, A. 1921. Luxaciones del carpo. Anales de la Facultad de Medicina 6 : 113-141.
45. 西川 卓也 1987. 手関節の機能撮影における手根骨間角度, 距離の正常値. 中部整災誌 30 : 1119-1130.
46. Palmer, A. K. 1981. The triangular fibrocartilage complex of the wrist. J. Hand Surg. 6 : 153-162.
47. Ruby, L. K. 1988. Relative motion of selected carpal bones: a kinematic analysis of normal wrist. J. Hand Surg. 13-A : 1-10.
48. 阪田 泰二 1988. 舟状骨骨折に対する Russe 法の検討. 骨折 10 : 450-456.
49. Sarrafian, S. K. 1977. Study of wrist motion in flexion and extension. Clin. Orthop. 126 : 153-159.
50. Schernberg, F. 1990. Roentgenographic examination of the wrist: a systemic study of the normal, lax and injured wrist. J. Hand Surg. 15-B : 210-219.
51. Schernberg, F. 1990. Roentgenographic examination of the wrist: stress view. J. Hand Surg. 15-B : 220-228.
52. Simmons, B. P. 1985. Symptomatic carpal coalition. J. Hand Surg. 10-A : 190-193.
53. Smith, D. K. 1989. The effects of simulated unstable scaphoid fractures on carpal motion. J. Hand Surg. 14-A : 283-291.
54. Steindler, A. 1950. Postgraduate lectures in orthopedics, diagnosis and indications. Chales C Thomas, Springfield, IL.
55. 菅野 昭, 高橋 賞, 吉野 利男 1989. 応力ひずみ解析. 朝倉書店, 東京.
56. Taleisnik, J. 1980. Post-traumatic carpal instability. Clin. Orthop. 149 : 73-82.
57. Taleisnik, J. 1984. Midcarpal instability caused by malunited fractures of the distal radius. J. Hand Surg. 9-A : 350-357.
58. Taleisnik, J. 1984. The extensor retinaculum of the wrist. J. Hand Surg. 9-A : 495-501.
59. Taleisnik, J. 1985. Carpal instability. In: Tubiana, The Hand, vol. 2. Philadelphia, W. B. Saunders, 986-1000.
60. Taleisnik, J. 1985. The wrist, p. 6-47. New York, Churchill Livingstone.
61. Trumble, T. and Glisson, R. R. 1987. Forearm force transmission after surgical treatment of distal radioulnar joint disorders. J. Hand Surg. 12-A : 196-202.
62. 津下 健哉 1986. 関節と靭帯構造, p. 19-22. 手の外科の実際. 南光堂, 東京.
63. 上羽 康夫 1982. 手根不安定症の診断と治療. 整・災外 28 : 1901-1906.
64. 上羽 康夫 1985. 手根不安定症の治療について. 整・災外 28 : 1513-1519.
65. 上羽 康夫 1987. 手根不安定症に対する手術. 臨整外 22 : 77-89.
66. 上羽 康夫 1986. 手—その機能と解剖. 金芳堂, 東京.
67. Viegas, S. F. 1987. Attritional lesions of the wrist joint. J. Hand Surg. 12-A : 1025-1029.
68. Viegas, S. F. 1987. Load transfer characteristics of the wrist. part 1 : the normal joint. J. Hand Surg. 12-A : 971-978.
69. Viegas, S. F. 1987. Load transfer characteristics of the wrist. part 2 : perilunate instability. J. Hand Surg. 12-A : 978-982.
70. Viegas, S. F. 1990. Ulnar-sided perilunate instability: an anatomic and biomechanic study. J. Hand Surg. 15-A : 268-278.
71. Volz, R. G. 1980. Biomechanics of the wrist. Clin. Orthop. 149 : 112-117.
72. Wagner, C. J. 1956. Perilunar dissociations. J. Bone Joint Surg. 38-A : 1198-1206.
73. Webber, E. R. 1980. Biomechanical implications of scaphoid waist fractures. Clin. Orthop. 149 : 83-89.
74. 山田 純司 1987. Cineradiography による手関節の運動解析. 日手会誌 4 : 342-346.
75. Youm, Y. 1978. Kinematics of the wrist. J. Bone Joint Surg. 60-A : 423-431.

Experimental Study on the Kinematics of the Wrist Joint

Yu MOCHIZUKI

Department of Orthopaedic Surgery,
Hiroshima University School of Medicine
(Director: Prof. Yoshikazu IKUTA)

Although many experimental and clinical studies have been reported in the past, the kinematics of the wrist joint is still controversial. And wrist motion is notoriously difficult to measure on radiographs. Consequently, we measured the carpal motion directly by means of strain gauge attached to measuring apparatus. The relative motions between two selected carpal bones or between the lunate and the radius during wrist motion were studied using thirty cadaver specimens.

In summary, the following conclusions are drawn:

1. Extension is about equally divided between radiocarpal and midcarpal joints below 30°angle. Over 30°angle, extension takes place mainly at the midcarpal joint.
2. Flexion is about equally divided between radiocarpal and midcarpal joints below 40°angle. Over 40°angle, flexion takes place mainly at the midcarpal joint. There is a greater contribution by the midcarpal joints to flexion than extension.
3. Radial flexion is about equally divided between radiocarpal and midcarpal joints.
4. Ulnar flexion takes place more at the radiocarpal than the midcarpal joint, although both contribute.
5. The measuring apparatus is very useful to analyse the three dimensional movements of wrist joints. This study offers fundamental data which may contribute to elucidate the pathogenesis of wrist joint disorders.