

厚生労働科学研究費補助金

免疫アレルギー疾患等予防・治療研究事業

関節リウマチ上肢人工関節開発に関する研究

平成 19 年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 三浪 明男

平成 20 (2008) 年 3 月

## 目 次

I. 総括研究報告		
関節リウマチ上肢人工関節開発に関する研究		
三浪明男	-----	1
II. 分担研究報告		
1. 関節リウマチ上肢人工関節開発に関する研究		
－新しい人工手関節の開発－		
三浪明男	-----	9
2. 関節リウマチ肘における屈曲伸展運動の筋力特性		
および人工肘関節置換術の中期成績		
加藤博之	-----	17
3. “Dart Throw” 運動における手根骨運動の三次元回転角度計測		
砂川 融	-----	21
4. 3次元動態解析からみた RA 人工肘関節の問題点		
村瀬 剛	-----	24
5. リウマチ肩関節に対する新しい人工関節の開発に関する研究		
－三次元有限要素法を用いた応力解析－		
岩崎倫政	-----	29
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	33
IV. 研究成果の刊行物・別刷	-----	37

関節リウマチ上肢人工関節開発に関する研究

主任研究者 三浪明男 北海道大学大学院医学研究科 教授

研究要旨：関節リウマチ（RA）は全身の関節が罹患する。下肢関節、特に高度に罹患した股関節と膝関節においては耐久性に優れた人工関節が開発されつつあり良好な治療成績が報告されている。一方、肩関節、肘関節、手関節などの上肢関節が RA により高度に破壊された場合には切除関節形成術を含む滑膜切除術、手関節固定術などの従来の上肢機能再建術では十分な機能回復が期待できない。最近、上肢関節に対しても人工関節置換術が施行されることが多くはなっているが、耐久性という点で下肢人工関節に比べると多くの問題点を包含しており、日本人にフィットした上肢人工関節の開発が急務であり、それによって RA 患者の ADL および QOL の向上が図られ介護を必要とする割合が低下、および健康寿命が延伸することが期待される。今年度の開発研究においては①三次元有限要素法を用いた人工肩関節の開発、②非 RA 患者、RA 患者および人工肘関節置換術後患者における運動解析、③非拘束型人工肘関節の生体内三次元動態解析、④人工手関節開発のための成人正常手関節を用いた三次元運動解析、⑤dart throw motion をもたらす人工手関節の開発研究、⑥HDP（骨セメント）およびメタル製ステム表面と骨に対して生物学的活性（結合能、誘導能、骨形成能）を持つ分子の化学・糖鎖工学的的手法を用いた導入実験を実施した。

分担研究者

加藤博之  
信州大学医学部教授  
砂川 融  
広島大学大学院保健学研究科教授  
村瀬剛  
大阪大学大学院医学研究科助教  
岩崎 倫政  
北海道大学病院講師

研究協力者

馬場久敏  
福井大学医学部教授  
但野 茂  
北海道大学大学院工学研究科教授  
齋藤直人  
信州大学医学部保健学科教授  
関敦仁  
国立成育医療センター医長  
村上成道  
信州大学医学部講師  
彌山峰史  
福井大学医学部助教

石川 淳一

山の手通八木病院院長

正富 隆

行岡病院手の外科センター長

益子 竜弥

北海道大学病院助教

大泉 尚美

北海道大学病院

平田 裕子

ナカシマプロペラ株式会社

#### A. 研究目的

関節リウマチ (RA) 患者の RA 病期が進行した時に、骨、軟骨、靭帯、腱など全てに広範な変性・破壊および他の疾患に見られない重度の機能障害に陥る。下肢機能は移動するために必須な機能であるのに対して、上肢機能は食事動作、整容動作、トイレティンク動作など人間として最低限に保持すべき尊厳に関わる重要な機能であり、上肢に対する機能再建は生活の質 (Quality of life=QOL) を高める医療として最優先に推進されるべきものであると考える。

RA 患者に対する上肢機能再建手術治療は長年行われてきているが、関節としての要素 (無痛性、可動性、安定性、整合性、耐久性) を全て保ったままの関節機能再建は困難でこれらの要素のいずれかを犠牲にせざる得ないのが現状である。その意味でこれらの関節の重要な要素のうち耐久性以外のほぼ全てを満たしている適切な人工関節開発の必要性が求められている。膝関節や股関節などの下肢関節に対する人工関節はほぼ完成の域に達し、ほぼ半永久的な人工関節が完成しつつある。しかしながら、上肢人工関節の場合、肩関節では牽引力も加

わる力を腱板などで支える形、肘関節は牽引力も加わる蝶番運動を側副靭帯で支える形など、手関節では捻りも加わる蝶番関節を側副靭帯で支える形など、上肢人工関節の基本構造は下肢のものとは比べて根本的に異なるものである。

RA により破壊された上肢関節の各関節の自然経過例の解明、上肢関節の障害程度と ADL の関係は未解明で、また RA のように免疫機能亢進の状態ではどのような人工関節材料の材質が適切かについても未解明の状態である。加えて、上肢関節のように比較的小さな関節では RA により骨が脆く再手術が困難な関節置換に関する基本的対応も術者により考え方が異なり未解明な要因が極めて多い。今年度の研究においては肩関節、肘関節、手関節に対する人工関節の開発を行った。肩関節については三次元有限要素法を用いて開発、肘関節については動態解析を行った。手関節については dart thrower motion を simulation した新たな人工関節の開発を行っている。

また、ステム・セメント・界面、セメント・骨界面のルーズニングが人工関節置換術の長期成績に影響することは周知の事実である。私たちは糖鎖工学的手法を用いて、ステム表面あるいはセメントに生物学的活性を持つ糖鎖を結合することにより骨・セメント・ステム間の機械的結合ではなく生物学的結合を図る研究を行っている。

この研究開発により、上肢関節に強い機能障害を有する多くの RA 患者がより非侵襲的で安定した成績を望むことができる人工関節置換術の恩恵を享受できるようになり、介護を必要とする割合が低下すること、および健康寿命が延伸することが期待され

る。

## B. 研究方法

### 1. 人工肩関節（岩崎）

過去に我々が報告した広範囲断裂肩に人工肩関節を置換した有限要素モデルを用いて解析を行った。今回は、a) 従来の汎用コンポーネント（材質；UHMWPE）、b) 新コンポーネント type 1、c) 新コンポーネント type 2（type 2 よりフード部分が短く厚い形状）の3つのモデルを作成し、応力解析を行った。肩甲関節窩コンポーネントと骨の間には骨セメント層を挿入し、荷重条件としては、数値解析モデル（Oizumi, et al. J Shoulder Elbow Surg, 2006）により求めた三角筋の前部・中部・後部線維と肩甲下筋、小円筋の計5つの筋力値を各筋の停止点に負荷した。コンポーネントとセメント層における von Mises 相当応力を比較検討した。

### 2. 人工肘関節

#### A. 非拘束型人工肘関節の生体内三次元動態解析（村瀬）

1998年10月から2006年9月までに大阪大学式人工肘関節置換術を施行した関節リウマチ12症例14肘を対象とした。本人工肘関節は非拘束型で、橈骨頭は全例切除・非置換である。手術時平均年齢は57.8歳、術後追跡期間は49.2ヶ月であった。X線透視装置を用いて肘関節屈曲動作側面像を連続的に撮影した肘屈伸X線透視動態画像からコンピューター上で人工関節の輪郭抽出を行い、CADデータとの形状マッチングする2D/3Dレジストレーション法を用いて、インプラントの連続的空間位置姿勢を計算

した。そして、上腕骨および尺骨コンポーネントの位置を6自由度座標軸上に表現することで、人工肘関節の生体内での3次元運動を可視化した。さらに、屈曲動作中のコンポーネント間の屈曲/伸展・内反/外反・内旋/外旋角の推移に関して定量的に解析した。本システムの位置計測の精度は、回転角1.2°未満、偏位0.2mm未満である。

#### B. 関節リウマチ肘の運動解析（加藤）

非RA女性右肘14肘（年齢50～74歳）を対照群とした。RA群は13肘で年齢は55～75歳で、Larsen分類はGradeIVであった。人工肘関節（TEA）群は5肘（60～69歳）であった。被検者を背もたれ付き椅子に座らせ、測定上肢の上腕を下垂し、回旋中間位で体幹に固定し、前腕回内外中間位で肘関節を自動的屈曲・伸展運動させた。Biceps brachii（以下BB）、Brachioradialis（以下BR）、Triceps medial head（以下TM）、Triceps lateral head（以下TL）の表面筋電図と、3軸加速度計AC101のアナログ信号を導出した。表面筋電信号の解析は、各筋の等尺性最大随意収縮時の筋放電積分値に対する屈曲運動時の積分値の比である%I-EMGを指標とした。3軸加速度計のY軸の波形すなわち肘内反方向および外反方向の波形の解析は、基線に対する+方向と-方向の面積積分値の合計を算出した。

### 3. 人工手関節

#### A. 成人正常手関節を用いた三次元運動計測（砂川）

健常成人男性7名の右手関節を対象とした。直径3cmの棒を握った状態で“dart-throw”運動を模倣して手関節最大橈背屈位と最大掌尺屈位の2肢位で前腕末

梢から指尖部までCT撮影(slice厚1.25mm, pitch 0.63mm)を行い、骨データを取得した。得られた骨データのスライス画像(各例約80枚)をパーソナルコンピュータ上で市販のソフトウェア(Image-J, Adobe Photoshop)を使用して各々の骨データを手動で分離し、MATLAB上で開発したオリジナルソフトウェア上で三次元骨表面モデルを自動的に作成した。次に同様に作成したソフトウェア上で2肢位の橈骨、尺骨を重ね合わせ、橈骨の骨軸をZ軸、橈骨末梢の尺骨切痕掌背側縁を通りZ軸と垂直な線をY軸、Y、Z両軸に垂直な線をX軸として三次元座標を構築した後に、各々の手根骨が重なり合うために3軸周りで必要となる回転角度を計測した。手根骨を重ね合わせる際には、まず各々の手根骨を剛体と考えて自動計測した重心を運動前後で座標上で移動させ重ね合わせた後に、Eular角を求める原理で3軸周りの回転角度を自動的に計測した。つまり計測した回転角度は、各々の骨の重心を中心とした回転角度である。また、X軸周りでは掌屈方向を+, Y軸周りでは尺屈方向を+, Z軸周りでは回外方向を+として表示した。

#### B. 新しい人工手関節の開発(三浪)

我々がデザインした新しい人工手関節は前回報告したように生体関節形状に近づけるため表面置換半拘束である。関節面の形状は舟状骨と月状骨およびそれらに対応する橈骨関節面との摺動面を有する。生理的な手関節運動である投げ矢面(dart thrower plane)での掌背屈運動をもたらすため関節面は橈骨ステム軸に対してaxial planeで10度の回旋をつけた。コンポーネントは橈骨・手根骨ステム・骨頭の3 parts

よりなり、手根骨側は第3中手骨基部まで届くステムを有し、橈骨側は橈骨骨髄にタイトにフィットさせるためのステム形状を持つ。高頻度に発生する手根骨側のゆるみに対応するため第2、第4中手骨へスクリューによる手根骨ステムの強固な固定を可能にした。2つの半橈円形摺動面をもつ初回モデル(半橈円形摺動面)でのX線検討では橈尺屈位で関節面に不適合性が生じたため、新たに摺動面形状を卵円形とした。月状骨側(尺側)の曲率を舟状骨側より小さくすることで、ある程度の回旋運動が許容される。さらに卵円形摺動面として橈尺屈にあそびを有する(橈屈5度、尺屈25度)もの(橈尺屈半拘束型)と橈尺屈を完全に拘束したもの(完全拘束型)の2つを作成した。屍体上肢(解剖用1体、新鮮凍結1体)を肘関節近位で切断し、肘関節90度屈曲位、回内外中間位で固定板にK鋼線で固定した。第3中手骨骨幹部に刺入した木棒2本を通して磁場センサーを固定した。橈側・尺側手根伸筋腱、橈側・尺側手根屈筋腱の4つに重錘をつけ、手関節掌背屈運動を再現した。解析方法として手関節橈尺方向をX軸、掌背方向をY軸、近位遠位方向をZ軸として3次元座標を決定し、全体としての手関節の運動方向、回転角度を測定した。人工手関節挿入前と先の摺動面の形状相違による3つの人工関節(半橈円形、卵円形[橈尺屈半拘束、完全拘束型])挿入後で比較検討した。

界面(骨・セメント間およびセメント・ステム間)でルーズニングが発生することより、セメントおよびメタル製ステム表面に骨に対し生物学的活性(結合能、誘導能、骨形成能)を持つ分子を化学・糖鎖工学的

手法を用いて導入する研究を行っている  
(岩崎)。  
(倫理面への配慮)

本研究は当初は開発研究であるために、動物実験において組織を回収する際には深麻酔により安楽死させ、苦痛を全く与えないようにして行う。正常人あるいは各関節に障害の持たない別の理由で受診した患者の上肢各関節の X 線写真などを用いての研究であるため、使用の許可については同意を得るなどの倫理面の配慮を行う。上肢人工関節が試作され、患者に応用されるということになると臨床研究となり、通常の治験以上にインフォームドコンセントや倫理面には最大限の配慮を行う。当該事項に関しては文部科学省・平成 10 年 10 月 3 日付け 15 国文科研振第 15 号通知を厳守して研究を遂行すると考える。また、それぞれの大学あるいは研究機関での倫理委員会の承認を得た上で研究を開始する。

## C. 研究結果

### 1. 人工肩関節

セメント層の最大応力は、モデル a) 5.60 MPa に対してモデル b) 3.56 MPa、c) 3.89 MPa と減少し、セメント層上部への応力集中は消失していた。コンポーネントの最大応力は、モデル a) 1.78MPa に対してモデル b) 3.91 MPa、c) 3.13 MPa とフード基部で増加しており、上方偏位する上腕骨頭による応力を同部で受けているためと考えられた。フード部分がより短く厚い type 2 でその応力は少なかった。

### 2. 人工肘関節

#### A. 非拘束型人工肘関節の生体内三次元動態

対象症例のコンポーネント間屈伸可動域の屈曲/伸展は  $131.6^{\circ} / -33.6^{\circ}$  で、屈曲角度はどの症例もほぼ最大屈曲位が得られていた。一方、伸展角度に関しては症例により偏りがみられた。またコンポーネント間の回旋・内外反も症例によって偏りが非常に大きく、50 度の外反・40 度の外旋を示す症例もみられた。一方、屈曲動作中の内外反・回旋角の偏移量は比較的小さかった。内外反角・内外旋角が中間位に近い状態で屈曲している症例では上腕骨コンポーネントとポリエチレンインサートの接触領域は広く保たれているが、外反が強くと外旋角も大きい症例ではポリエチレンインサートの接触領域は狭くなり、いわゆる線接触が生じていた。

#### B. 関節リウマチ肘の運動解析

表面筋電図. 肘屈曲運動と肘伸展運動において、全ての筋において RA 群が健常肘群よりも有意に高い値を示した (BB  $p=0.029$ , BR  $p=0.000$ , TM  $p=0.004$ , TL  $p=0.000$ ) (図 1, 2)。

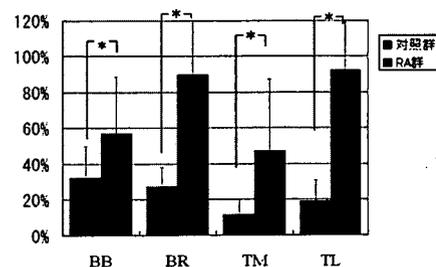


図 1 屈曲運動%I-EMG

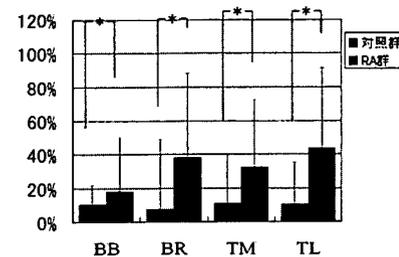


図 2 伸展運動時%I-EMG

一方、対照群と TEA 施行群との%I-EMG を各筋間で比較すると、BR 以外の筋は有意な差はなかった。即ち TEA 後に肘周囲筋の運動時の活動は健常に近くなる事実が示された。内反、外反方向の加速度分析の結果では、RA 群で波形の内反、外反方向への山の大きさが対照群に比較して大きい傾向が示された(図3)。加速度波形の内反、外反方向の大きさを定量するために面積積分値を両群間で比較してみると、RA 群では対照群に比べて高い傾向がみられたが、有意差はなかった。

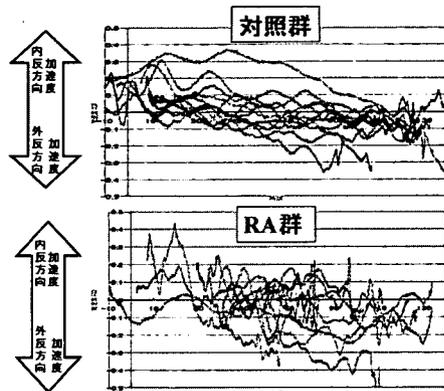


図3 肘内反外反方向の加速度

### 3. 人工手関節

#### A. 成人正常手関節を用いた三次元運動計測

“Dart-throw”運動での有頭骨の回転角度はX, Y, Z 軸周りに各々  $38.1^{\circ} \pm 10.0^{\circ}$ ,  $37.0^{\circ} \pm 12.5^{\circ}$ ,  $-0.4^{\circ} \pm 4.2^{\circ}$ , 舟状骨の回転角度は各々  $19.0^{\circ} \pm 7.0^{\circ}$ ,  $21.9^{\circ} \pm 14.1^{\circ}$ ,  $22.0^{\circ} \pm 14.2^{\circ}$ , 月状骨の回転角度は各々  $21.7^{\circ} \pm 15.3^{\circ}$ ,  $9.3^{\circ} \pm 9.2^{\circ}$ ,  $1.7^{\circ} \pm 6.1^{\circ}$  であった。

#### B. 新しい人工手関節の開発

掌背屈運動方向をXY平面でのX軸からの角度で表すと(-90, 90度はY軸に一致する背、掌屈運動を意味する)背屈は置換前;

-70.1度、半橢円形; -59.5度、卵円形(半拘束); -70.5度、卵円形(拘束); -65.8度であった。一方、掌屈は置換前; 102.3度、半橢円形; 96.0度、卵円形(半拘束); 104度、卵円形(拘束); 112.2度であった。いずれも dart thrower 面での運動であったが卵円形(半拘束型)で最も置換前と近似していた。背屈回転角度はそれぞれ置換前; 50度、半橢円形; 44度、卵円形(半拘束); 52度、卵円形(拘束); 48度、掌屈回転角度は置換前; 73度、半橢円形; 63度、卵円形(半拘束); 57度、卵円形(拘束); 48度であった。掌屈角度は置換後で低下したが背屈角度は維持されていた。回内外運動すなわちZ軸周囲の回転は置換前; 36度、半橢円形; 49度、卵円形(半拘束); 3.0度、卵円形(拘束); 3.5度であった。半橢円形では過大な回旋運動が occurring こと、また逆に卵円形では回旋運動は少なく、安定した dart thrower motion が得られていると考えられた。

化学・糖鎖工学的手法を用いた生物活性を有する分子の導入方法については理論的には実証済みなので、ターゲットとなる分子選択とステム表面への実際への導入、さらに動物体内(ウサギ、ラット)での活性の維持などに関する成果が得られており、最終的にはステム-骨間の骨形成の促進とそれに伴う結合能の向上を動物体内で実証する。

#### D. 考察およびE. 結論

##### 1. 人工肩関節

フード付き新コンポーネントはフード部分で上腕骨頭の上方向偏位を抑制して骨頭を安定化させることができ、その結果として

セメント層への偏った応力分布を改善することができた。すなわち、従来のコンポーネントと比べてコンポーネントのゆるみを減少させる可能性が示された。フード部分にかかる応力が大きすぎるとコンポーネント自体の磨耗、破損も危惧され、またフードが長すぎると肩関節挙上時に上腕骨大結節部と衝突（インピンジ）して可動域制限を生じる可能性があるが、今回フード形状を改良することでそれらの問題を少なくすることができた。今後はさらなる材質および強度の検討を行っていくと同時に糖鎖工学的手法を用い生理活性物質を人工関節素材に導入することによりゆるみを減少させ人工関節を長寿命化する実験を施行する予定である。

## 2. 人工肘関節

### A. 非拘束型人工肘関節の生体内三次元動態

我々が独自に開発した生体内3次元人工関節動態解析法は、従来機種動態を客観的・定量的に評価することで人工関節摺動面形状の改良に極めて有用であると考えられた。人工肘関節置換術後に応用した結果では、屈伸可動域に関しては従来の知見と一致した一方で、伸展可動域は症例によるばらつきが大きく、 $-50$ 度以下を示す症例もみられた。日常生活動作の制限を回避するには $-30$ 度以上の伸展角度が必要とされているが、本研究では半数の9肘に $-30$ 度以下の伸展制限認められた。また、コンポーネント間の回旋・内外反偏位は肘の肢位によって変化し、症例によって大きく異なった。過度の回旋・内外反偏位を示す症例では、摺動面の限られた部分に過重が集中する傾向が見られた。これは、ポリエチレンイン

サートの摩耗の要因となり、早期のインプラントゆるみを引き起こす可能性がある。原因としては、インプラント設置不良、不均一な軟部組織バランス、術前から存在する変形、インプラントデザインなどが考えられた。今後、術前後のCTから3次元でのインプラント設置角・位置、骨アライメントを解析すること、および異なるインプラントデザイン・術式間での生体内3次元動態の違いを検討することが必要である。現行の非拘束型人工肘関節ではコンポーネントの回旋・内外反偏位は症例間で大きく異なり、新しい人工肘関節の摺動面デザインを考えるにあたり考慮すべき問題である。

### B. 関節リウマチ肘の運動解析

%I-EMGについてRA群が対照群よりも高値を示したことは(1)痛みのため最大随意収縮が行いにくい、(2)廃用性萎縮により筋量が減少した、(3)破壊された肘の安定化のために肘関節周囲筋群が過剰に収縮した、などの可能性が考えられる。また、TEA後に筋放電量の傾向が対照群に近くなることは、肘の運動時の努力量が軽減されたことを示唆している。内反・外反方向の加速度波形について加速度面積積分値、周波数解析では有意な差は得られなかったが、対照群に比べてRA肘では、加速度の内反、外反方向へのばらつきが大きい傾向がみられた。

## 3. 人工手関節

### A. 成人正常手関節を用いた三次元運動計測

本計測結果から“dart-throw”運動で、有頭骨と月状骨ではZ軸周りの回転はほとんど認めず、この両骨は二次元平面上をほぼon planeの動きをするのに対し、舟状骨はZ軸周りの著明な回転を認め二次元平面

から外れた out of plane の動きをすることが判明した。この結果は従来の研究で報告されている単純な掌背屈運動と同様に、手関節の“dart-throw”運動においても舟状骨が key bone であることを示唆するものである。手関節は手根中央関節、橈骨手根関節の2関節を有し、掌背屈、橈尺屈さらに回内外の複雑な運動様式であるため1関節の人工関節で置換することの困難さが“dart-throw”運動でも存在することが判明した。

正常な関節運動を1関節で得るためには out of plane の動きを許容した非拘束型のデザインが必要となるが、それでは関節面の不適合性が大きく、破損・ゆるみの原因になると考えられ、橈側では可動性がありかつ尺側では安定性を得られるような摺動面を有する半拘束型の人工関節をデザインする必要性があると考えられた。

#### B. 新しい人工手関節の開発

手関節は手根中央関節、橈骨手根関節の2関節を有し、掌背屈、橈尺屈さらに回内外の複雑な運動様式であるため1関節の人工関節で置換することの困難がある。今回いずれの人工手関節でも dart thrower motion が再現されていた。楕円形の摺動面では橈尺屈、回旋方向への制動が少なく関節面の不適合性が大きく、破損・ゆるみの原因になると思われた。卵円形（半拘束型）では置換前と近似した dart thrower motion が得られており、最も理想的な摺動面であると考えられた。

#### F. 健康危険情報

なし

#### G. 研究発表

分担研究報告書に個々に記載

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

分担研究報告書に個々に記載

厚生労働科学研究費補助金（免疫アレルギー疾患等予防・治療研究事業）  
分担研究報告書

関節リウマチ上肢人工関節開発に関する研究  
－新しい人工手関節の開発－

主任研究者 三浪 明男 北海道大学大学院医学研究科 教授  
研究協力者 石川 淳一 山の手通八木病院 院長  
研究協力者 平田 裕子 ナカシマプロペラ株式会社

研究要旨：関節リウマチ（RA）により高度に破壊された手関節に対して本邦で使用可能な人工関節はこれまで存在しない。1970年代より欧米で開発された人工手関節においても長期にわたり良好な成績が得られているものは存在しない。欧米での人工関節のうち4年以上経過観察された成績を文献上で検討した結果、大きな問題点は遠位側のゆるみによるコンポーネントの破損と周囲軟部組織の拘縮による手関節の掌尺屈変形および掌側への脱臼であることが明らかとなった。我々は生理的な手関節運動であり、周囲軟部組織に加わる緊張が少ない投げ矢面での運動（dart thrower motion）を誘導する人工手関節が以上の問題を解決する理想的なものであると考え、正常手関節CTモデルより新たな人工手関節を開発した。投げ矢運動を誘導するため表面置換、半拘束型とし、摺動面は橈骨ステムに対して長軸で10度の回旋を設けた。さらに摺動面の形態として楕円形、卵円形（橈尺屈半拘束型）、卵円形（橈尺屈完全拘束型）の3種類を作成した。屍体手関節にこれら3種類の摺動面の異なる人工手関節を挿入し、X線学および3次元運動解析を行った。いずれの摺動面においても目的としたdart thrower motionが再現されたが、楕円形では橈尺および回旋（回内外）での拘束が小さく、摺動面での不適合性が大きかった。一方、卵円形では回旋、橈尺屈での不適合は少なく、安定したdart thrower motionが得られた。今回開発したdart thrower motionを誘導する新たな人工手関節はRAにより破壊された手関節に対し、除痛と生理的な運動を獲得できる有用なものであると考える。

A. 研究目的

1967年にSwansonが関節リウマチ（RA）手関節に対してシリコン人工手関節を応用したが、シリコン滑膜炎やインプラント破損など大きな問題点があった。1970年代後半より人工手関節として様々な機種が主に

欧米にて開発、使用されている。しかし、1-2年の短期成績は良好であるものの中期にわたり良好な成績が得られているものは未だ存在しない。本邦では現在までのところ臨床で使用可能な人工手関節は存在せず、人工手関節置換術が適応となるRA手関

節に対しては部分あるいは全手関節固定術が選択されてきた。除痛は得られるものの固定術による可動域消失はADLに多大な障害をもたらすため、本邦においても人工手関節の開発は急務である。

これまで我々は正常手関節の運動解析にて投げ矢運動 (dart thrower motion)、すなわち橈背屈から掌尺屈への運動方向が手関節の運動として生理的であり周囲軟部組織に加わる緊張が少ないことを報告してきた。より生理的な運動を示す人工手関節が長期使用に耐えうるものになると考える。

本研究では、まずこれまでの欧米での人工手関節の長期成績を検討し、その問題点を明らかにした上でdart thrower motionを誘導する新たな人工手関節を正常手関節3次元CTモデルよりデザイン、作成した。これを屍体手関節に挿入し、X線解析、3次元運動解析を行い、その有用性を検討した。

## B. 研究方法

### 1. 人工手関節の長期成績の問題点についての文献検討

これまで欧米にて報告された種々の人工手関節の成績報告のうち、4年以上の経過観察を行っている7機種を対象とした。各機種におけるfailure rateとその原因、コンポーネントのゆるみの部位とその頻度、その他の合併症について検討した。

### 2. 新たな人工手関節のモデル作成とX線学的検討

正常ボランティアの単純X線および3次元CT写真のデータに基づき、新たな人工手関節設計を行った。我々がデザインした新しい人工手関節は生体関節面形状に近づけるため表面置換半拘束型とし、関節面の

形状は舟状骨と月状骨およびそれらに対応する橈骨関節面との摺動面を再現した。手関節周囲軟部組織に加わる緊張が少なく、生理的な手関節運動である投げ矢運動 (dart thrower motion) をもたすため関節面は橈骨ステム軸に対してaxial planeで10°の回旋を設けた。コンポーネントは橈骨・手根骨ステム・骨頭の3 partsよりなり、橈骨コンポーネントは関節面での耐磨耗性を考慮し、超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)、手根骨ステムは生体適合性を考慮しチタン合金(Ti-6Al-4V合金)製、骨頭はポリエチレンとの磨耗量減少を目的としコバルトクロム合金(Co-Cr-Mo合金)とした。人工手関節が適応となるRAでは骨破壊・吸収が強いので初期固定ならびに長期の固定力保持のため人工関節はセメント固定とした。手根骨側は第3中手骨基部まで届くステムを有し、橈骨側は髓腔に適合するステム形状を持つ。高頻度に発生する手根骨側のゆるみに対応するため第2、第4中手骨へスクリューによる手根骨ステムの強固な固定を可能にした。関節脱臼を防止するため橈骨コンポーネント関節面を深くし、掌尺側縁を堤防状に高くした。生理的な有頭骨軸と橈骨軸のアライメントを再現するため橈骨ステム部に正面で5mm、側面で2mmのオフセットを設置した。初期のモデルとして摺動面を楕円形とし、dart thrower motionでの運動を再現するため中央に凹凸を設け橈尺屈方向への転位を防止した(図1)。実際のモデルを解剖用屍体4手関節に挿入し、最大手関節掌背屈、最大橈尺屈位にてX線撮影を行い、獲得可動域と摺動面の適合性を評価した。

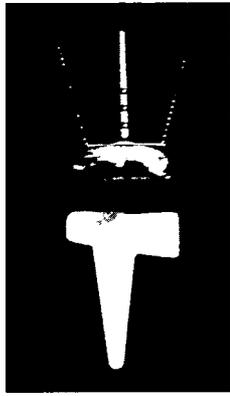


図1 楕円形摺動面を有する新しい人工手関節

### 3. 摺動面の形態と3次元運動解析

摺動面の相違による手関節運動の相違を検討するため、初期の楕円形摺動面に加えて新たに卵円形摺動面を作成した。正常の橈骨月状骨、橈骨舟状骨関節面の形態に合わせて卵円形とし、月状骨側（尺側）の曲率を舟状骨側（橈側）より小さくすることで掌背屈運動にともない生理的な回旋（回内外）運動が生じることを期待した。さらに卵円形摺動面として橈尺屈にあそびを有する（橈尺屈5度、尺屈25度）もの（橈尺屈半拘束型）と橈尺屈を完全に拘束したもの（橈尺屈完全拘束型）の2つを作成した（図2）。屍体上肢（新鮮凍結1体、解剖用1体）を肘関節90度屈曲位、前腕回内外中間位で固定板にK鋼線で固定した。第3中手骨骨幹部に刺入した木棒2本を通して磁場センサーを固定した。橈側・尺側手根伸筋腱、橈側・尺側手根屈筋腱の4つに重錘を下げ、手関節掌背屈運動を再現した。解析方法として手関節橈尺方向をX軸、掌背方向をY軸、近位、遠位方向をZ軸として3次元座標を決定し、手関節掌背屈運動時の3次元運動方向および回転角度を測定した（図3）。人工手関節挿入前と先に述べた摺動面の形状

相違による3種類の人工手関節（楕円形、卵円形[橈尺屈半拘束、完全拘束型]）挿入後で比較した。目的とする投げ矢面での運動が獲得できているかどうか、さらにそれぞれの摺動面での手関節運動の相違について検討した。

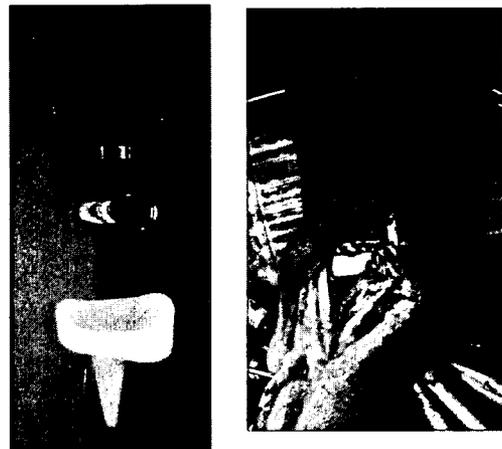


図2 卵円形摺動面を有する人工手関節と新鮮屍体への置換後

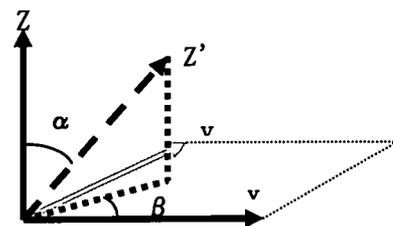
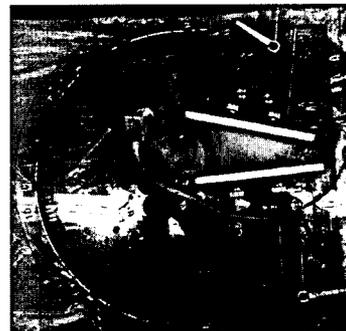


図3 3次元運動解析と座標軸

## C. 研究結果

### 1. 人工手関節の長期成績の文献検討

全体のfailure rateは380例中41例であった。原因として手根骨側でのゆるみが29例、53%と圧倒的に多かった。コンポーネントのゆるみは手根骨側で高率に発生しており、橈骨側では極めて少なかった。軟部組織のimbalanceによって掌尺屈変形をきたした頻度は6.8%であった。さらに掌側への脱臼は4%に認められた。

## 2. 新たな人工手関節の置換とX線検討

屍体手関節4手関節全例において術中の骨折、インプラントの破損などの問題はなく安全に人工手関節の置換が可能であった。置換前の平均可動域は背屈：40°、掌屈：57°、尺屈：32°、橈屈9°に対して、置換後の平均獲得可動域は背屈47°、掌屈：42°、尺屈21°、橈屈9°であった。掌背屈可動域は設計上で予想された角度(背屈50°、掌屈50°)とほぼ同様であった(図4)が、橈尺屈可動域、とくに尺屈は設計上の角度より大きく、また橈尺屈において関節面の不適合性が生じた(図5)。すなわち橈屈では関節面尺側に、尺屈では橈側に間隙を生じた。手根骨の高さを示すcarpal height ratioは置換前が0.501に対して置換後は0.500であり、正常な手根骨高が維持されていた。

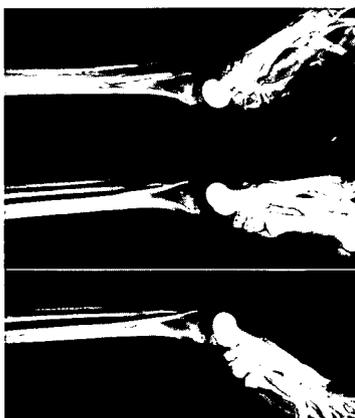


図4 置換後の手関節掌背屈運動

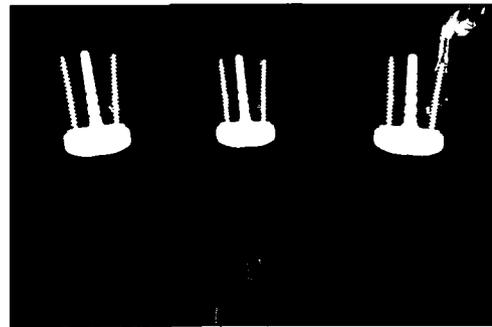


図5 置換後の手関節橈尺屈運動

## 3. 摺動面の形態と3次元運動解析

Dart thrower motionが再現されているかどうかを検討するため掌背屈運動方向をXY平面で検討すると、いずれの摺動面でも置換前と同様のdart thrower motionが再現されていた(図6, 7)。楕円形

(Implant No.1)では掌背屈時のXY平面での運動方向が一定せず橈尺屈の拘束が少ないためと考えられた。一方、卵円形では半拘束型(Implant No.2)、完全拘束型(Implant No.3)とも運動方向は一定し、安定していた。掌背屈回転角度(角度 $\alpha$ )は背屈が置換前：50度、implant No.1：44度、No.2：52度、No.3：48度とほぼ同角度であった。掌屈は置換前：73度、implant No.1：63度、No.2：57度、No.3：48度であり、置換後はいずれの摺動面でも掌屈が低下していた。

回内外運動すなわちZ軸周囲の回転は置換前：36度、implant No.1：49度、No.2：3.0度、No.3：3.5度であった。楕円形では過大な回旋運動がおこっていること、また逆に卵円形では回旋運動がほぼ完全に拘束されていた。

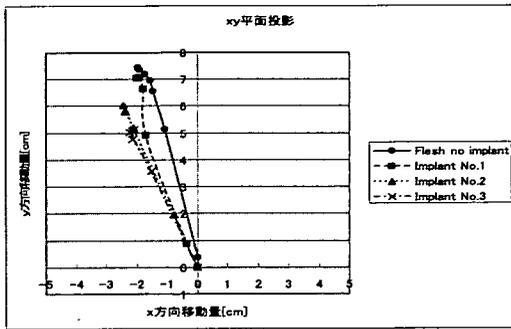


図6 中間位から掌屈でのXY平面での運動方向

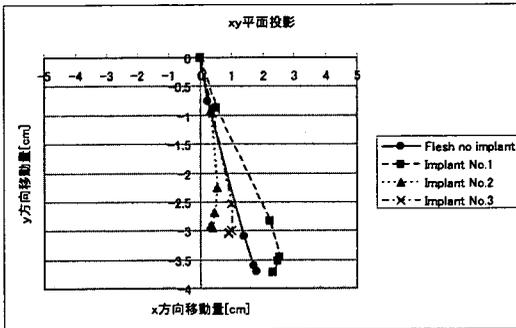


図7 中間位から背屈でのXY平面での運動方向

#### D. 考察

これまで欧米で使用されてきた人工手関節では長期のfailure rateは高く、手根骨側のコンポーネントのゆるみと周囲軟部組織の拘縮および手関節伸筋腱の作用低下による掌尺屈変形および掌側脱臼が原因であった。手根骨側でのゆるみや破損が高頻度である原因として人工関節によってもたらされる手関節運動方向が非生理的であり、手根骨インプラントと骨の間に異常なストレスが働くためと考えられる。正常手関節の運動解析において矢状面での伸展、屈曲よりdart thrower(投げ矢)面での伸展、屈曲運動(dart thrower motion)がより生理的であり、手関節周囲軟部組織に加わるストレスが少ない。我々が開発したdart thrower motionを誘導する半拘束型人工手関節はこれまでの欧米での人工手関節成績で明らかとなった諸問題を解決する可能性が考えられる。正常では橈骨手根関節と手

根中央関節の2関節により複雑な手関節運動がもたらされており、これを1関節として置換し、さらに生理的なdart thrower motionを摺動面の形態によって誘導するためには、この面での回転中心を一定にする必要があり、橈尺屈はある程度犠牲にしなければならない。

今回、摺動面の異なる3つの人工手関節を作成し、X線および運動解析を行ったが、いずれも投げ矢面での掌背屈運動(dart thrower motion)が再現されていた。しかし初期の楕円形摺動面の中央に凹凸を設けて橈尺方向への転位を拘束したタイプでは橈尺屈、回旋の拘束が少なく、摺動面の不適合が生じ、脱臼や材質の磨耗、破損の観点からも大きな問題であると考えられた。一方、卵円形摺動面では安定したdart thrower motionが再現されており、回旋に対する安定性も得られていた。橈尺屈半拘束と完全拘束では掌屈角度以外に相違は見られず、橈尺屈に多少のあそびを有する卵円形(橈尺屈半拘束型)がゆるみの観点からも最適と考えられた。耐久試験、勘合試験においても臨床的に有用であった。今後は本人工手関節を用いた臨床成績の検討が必要と考える。

#### E. 結論

生理的なdart thrower motionを誘導する表面置換、半拘束型人工手関節を開発した。屍体手関節を用いたX線、3次元運動解析にてその有用性が証明された。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

1) 山口浩、末永直樹、三浪明男：羊腱由来細胞に対するTGF- $\beta$ 1投与が各種遺伝子発現に与える影響、肩関節 31、225-

228、2007

2)大泉尚美、末永直樹、久田幸由、三浪明男、福田公孝：腱板断裂術後MRIにおける経時的変化、肩関節 31、261-264、2007

3)大泉尚美、末永直樹、久田幸由、三浪明男：肩関節モビライザーと挙上位自動運動を用いた腱板断裂術後早期後療法の有用性、肩関節 31、369-372、2007

4)松本大、末永直樹、大泉尚美、久田幸由、三浪明男：新しい肩甲上神経ブロックの開発—屍体肩を用いた検討—、肩関節 31、425-428、2007

5)松橋徳弥、末永直樹、大泉尚美、山根慎太郎、久田幸由、三浪明男、笠島俊彦：修復不能な広範囲腱板断裂に対するPaavolainen法の中期治療成績、肩関節 31、569-573、2007

6)久田幸由、末永直樹、大泉尚美、永井正弘、三浪明男：腱板断裂肩における手術後の肩甲関節窩面の応力分布、肩関節 31、597-600、2007

7)末永直樹、船越忠直、大泉尚美、久田幸由、三浪明男、佐野博高、福田公孝：新しい直視下腱板法合法の開発、肩関節 31、601-604、2007

8)Yamane, S., Iwasaki, N., Kasahara, Y., Harada, K., Majima, T., Monde, K., Nishimura, S. I., and Minami, A. : Effect of pore size on in vitro cartilage formation using chitosan-based hyaluronic acid hybrid polymer fibers. *J Biomed Mater Res A* 81: 586-593, 2007

9)Shimode, K., Iwasaki, N., Majima, T., Funakoshi, T., Sawaguchi, N., Onodera, T., and Minami, A. : Bone marrow

stromal cells act as feeder cells for tendon fibroblasts through soluble factors. *Tissue Eng* 13: 333-341, 2007

10)Mori, N., Majima, T., Iwasaki, N., Kon, S., Miyakawa, K., Kimura, C., Tanaka, K., Denhardt, D.T., Rittling, S., Minami, A., and Uede, T. : The role of osteopontin in tendon tissue remodeling after denervation-induced mechanical stress deprivation. *Matrix Biol* 26: 42-53, 2007

11)Onodera, S., Ohshima, S., Tohyama, H., Yasuda, K., Nishihira, J., Iwakura, Y., Matsuda, I., Minami, A., and Koyama, Y. : A novel DNA vaccine targeting macrophage migration inhibitory factor protects joints from inflammation and destruction in murine models of arthritis. *Arthritis & Rheumatism* 56:521-530, 2007

12)Nakagawa, H., Hato, M., Takegawa, Y., Deguchi, K., Ito, H., Takahata, M., Iwasaki, N., Minami, A., and Nishimura, S.I. : Detection of altered N-glycan profiles in shole serum from rheumatoid arthritis patients. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.* 853: 133-137, 2007

13)Takahata, M., Iwasaki, N., Nakagawa, H., Abe, Y., Watanabe, T., Ito, M., Majima, T., and Minami, A. : Sialylation of cell surface glycoconjugates is essential for osteoclastogenesis. *Bone* 41: 77-86, 2007

14)Yayama, T., Kobayashi, S., Kokubo, Y., Inukai, T., Mizukami, Y., Kubota,

- M., Ishikawa, J., Baba, H., and Minami, A. : Motion analysis of the wrist joints in patients with rheumatoid arthritis. *Mod Rheumatol* 17: 322-326, 2007
- 15) Iwasaki, N., Kato, H., Kamishima, T., Suenaga, N., and Minami, A. : Donor site evaluation after autologous osteochondral mosaicplasty for cartilaginous lesions of the elbow joint. *Am J Sports Med* 27: 2096-100, 2007
- 16) Majima, T., Irie, T., Sawaguchi, N., Funakoshi, T., Iwasaki, N., Harada, K., Minami, A., and Nishimura, S.I. : Chitosan-based hyaluronan hybrid polymer fibre scaffold for ligament and tendon tissue engineering. *J Engineering in Med* 221: 537-546, 2007
- 17) Kasahara, Y., Iwasaki, N., Yamane, S., Igarashi, T., Majima, T., Nonaka, S., Harada, K., Nishimura, S.I., and Minami, A. : Development of mature cartilage constructs using novel three-dimensional porous scaffolds for enhanced repair of osteochondral defects. *J Biomed Mater Res A* ? (in press) 2007
- 18) Sasaki, T., Iwasaki, N., Kohno, K., Kishimoto, M., Majima, T., Nishimura, S.I., and Minami, A. : Magnetic nanoparticles for improving cell invasion in tissue engineering. *J Biomed Mater Res A* ? (in press) 2007
- 19) Nishida, K., Horiuchi, M., Noda, N.N., Takahashi, K., Sasaki, Iwasaki, N., Minami, A., and Inagaki, F. : Crystallization and preliminary crystallographic analysis of the Tob-hCaf1 complex. *Acta Crystallogr Sect F Struct Biol Cryst Commun* 63: 1061-1063, 2007
- 20) Matsushashi, T., Iwasaki, N., Nakagawa, H., Hato, M., Kurogochi, M., Minami, A., and Nishimura, S.I. : Alteration of N-glycans related to articular cartilage deterioration after anterior cruciate ligament transection in rabbits. *Osteoarthritis Cartilage* ? (in press) 2008
2. 学会発表
- 1) 第2回山梨リウマチ研究会 平成19年1月20日 於：甲府市 三浪明男：「RA上肢の手術—適応と限界—」
- 2) 第24回中部日本手の外科研究会ランチョンセミナー 平成19年2月9日 於：神戸市 三浪明男：「リウマチ手関節に対する手術治療」
- 3) 第80回日本整形外科学会学術総会 平成19年5月24～27日 於：神戸市 益子竜弥、岩崎倫政、久田幸由、大泉尚美、石川淳一、末永直樹、三浪明男：「関節リウマチ手関節病変に対する橈骨月状骨間固定術の有用性」
- 4) 第80回日本整形外科学会学術総会 平成19年5月24～27日 於：神戸市 彌山峰史、小林茂、犬飼智雄、水上保孝、久保田雅史、馬場久敏、三浪明男：「関節リウマチにおける手関節の動作解析学的特徴とQOL評価」
- 5) 第80回日本整形外科学会学術総会 平成19年5月24～27日 於：神戸市 久田幸由、末永直樹、大泉尚美、永井正弘、岩崎倫政、益子竜弥、三浪明男：

「腱板断裂肩における術前後の肩甲関節窩面の応力分布」

6) 10th International Congress of Shoulder and Elbow Surgery, 16th to 19th September of 2007, Sao Paulo(Brazil)

Naoki Suenaga, DH Sonnabend, Akio Minami: “Messenger - RNA expression of the cells derived from sheep infraspinatus tendon cultured on 3D scaffold after cyclical tensile stress”

7) 10th International Congress of Shoulder and Elbow Surgery, 16th to 19th September of 2007, Sao Paulo(Brazil)

Naomi Oizumi, Naoki Suenaga, Shigeru Tadano, Keiko Abe, Norimasa Iwasaki, Akio Minami: “Three-dimensional finite element analysis of total shoulder arthroplasty in a rotator cuff tear shoulder”

8) 10th International Congress of Shoulder and Elbow Surgery, 16th to 19th September of 2007, Sao Paulo(Brazil)

Naomi Oizumi, Yuki Yoshi Hisada, Naoki Suenaga, Norimasa Iwasaki, Akio Minami: “The long-term stress distribution at the glenoid cavity after the rotator cuff reconstruction using CT osteoabsorptiometry”

9) 10th International Congress of Shoulder and Elbow Surgery, 16th to 19th September of 2007, Sao Paulo(Brazil)

Naomi Oizumi, Naoki Suenaga, Yoshiyuki Hisada, Akio Minami: “New postoperative rehabilitation program for rotator cuff tears using the shoulder mobilizer and early active exercises over 90° flexion

#### G. 知的財産権の出願・登録状況

○「ハイブリット繊維及び膜並びにそれらの製造方法」

特許登録番号：特開 2002-128958

出願人：三浪 明男 ほか

○「線維芽細胞培養方法および靭帯・腱組織再生基材」

特許登録番号：出願番号特願 2002-190674

出願人：三浪 明男 ほか

○「腱・靭帯の劣化予防・治療剤」

特許登録番号：出願番号 PCT/JP2004/17168

出願人：三浪 明男 ほか

○「共有結合によるグリコサミノグリカンと細胞増殖因子との結合化合物およびその製造方法」

特許登録番号：出願番号 2004-291389

出願人：三浪 明男 ほか

○「オステオポンチンまたはそのフラグメントペプチド部分に対する抗体を有効成分とする腱・靭帯の劣化予防剤」

特許登録番号：出願番号特願 2003-389543

出願人：三浪 明男 ほか

1. 実用新案登録

なし

2. その他

なし

厚生労働科学研究費補助金（免疫アレルギー疾患等予防・治療研究事業）  
分担研究報告書

関節リウマチ肘における屈曲伸展運動の筋力特性  
および人工肘関節置換術の中期成績

分担研究者 加藤 博之 信州大学医学部 教授  
研究協力者 齋藤 直人 信州大学医学部保健学科 教授  
研究協力者 村上 成道 信州大学医学部 講師

研究要旨：1) 肘筋力特性の研究：健常成人の14肘、関節リウマチ (RA) 患者の13肘、人工肘関節置換術 (TEA) 施行患者の6肘における肘屈曲・伸展運動における Biceps brachii (BB)、Brachioradialis (BR)、Triceps medial head (TM)、Triceps lateral head (TL) の表面筋電図を測定し、%I-EMG を算出した。屈曲運動時の %I-EMG は健常対照群で BB 32.3±17.5%、BR 27.3±10.6%、TM 11.5±8.5%、TL 19.4±11.4%、RA 群で BB 57.0±32.0%、BR 89.9±50.0%、TM 47.3±40.0%、TL 92.4±48.0% であった (mean ±SD)。伸展運動時では対照群 BB 10.4±7.7%、BR 7.7±3.9%、TM 11.0±5.9%、TL 10.4±5.5%、RA 群 BB 18.3±11.3%、BR 38.1±41.1%、TM 32.5±28.8%、TL 43.6±24.9% であった。屈曲と伸展のいずれの運動においても、測定した筋のいずれにおいても RA 群の値が対照群の値に比べて有意に大きな値であった。TEA 肘群では、TEA 術前と術後と比較して各筋の %I-EMG に有意差は見られなかった。

2) TEA の中期成績：Kudo-5 TEA 施行 27 例 33 肘の術後 2 年-13 年 3 ヶ月 (平均 7 年) の臨床成績と X 線像に関する後ろ向き調査を行った。術中、術直後の合併症は 2 肘 (6%) と少なく、インプラントの生存率は 5 年で 97%、10 年で 92% であった。上腕骨コンポーネントの loosening は 1 肘もなかったが尺骨コンポーネントに loosening が 2 肘 (6%) にみられた。また clear zone が 17 肘 (52%) にみられた。

I. 関節リウマチ (RA) 肘の筋力特性研究 に解析するために以下の研究を行った。

A. 研究目的

肘関節の運動特性は、関節可動域と不安定性で表されてきた。しかし関節リウマチ (RA) 肘あるいは人工肘関節置換術 (Total Elbow Arthroplasty: TEA) 後の状態を評価するには、これらの指標では不十分である。研究者らは RA 肘関節の筋力特性を定量的

B. 研究方法

a. 対象

肘関節に愁訴、外傷の既往が無く、徒手的に肘関節の不安定性が無いボランティア女性 14 例の右肘 14 肘 (年齢 50~74 歳、平均 59.9 歳) を対照群とした。RA 群は、13 例 13 肘で年齢は 55~75 (平均 63.6) 歳であ

った。Larsen 分類は全肘が GradeIVであった。左右別は右 11 肘、左 2 肘であった。TEA 施行群は 6 肘 (年齢は 56-69 歳、平均 63.8 歳、術後経過観察期間 4-20 か月、平均 9.8 か月) であった。測定に際しては本学医学部の臨床研究に関する倫理審査委員会の承認を得た。

#### b. 測定条件

被検者を背もたれ付き椅子に座らせ、上腕をバストバンドで固定した。運動課題は電子メトロノームの音声信号と LED の光にあわせた前腕回内外中間位での肘関節の自動的屈曲伸展運動で、屈曲に 1 秒、伸展に 1 秒とした (図 1 a, b)。肘関節屈曲・伸展運動時の表面筋電図そして肘内側に貼付した電気角度計 (SG110、バイオメトリクス社、英国) を肘関節内側のアナログ信号を導出した。測定は全例、同一検者が行った。

#### c. 表面筋電図

計測は Biceps brahcia (BB)、Brachioradialis (BR)、Triceps medial head(TM)、Triceps lateral head(TL) の 4 筋を対象とし、銀塩化銀皿型電極を中心電極間距離 2cm で筋線維の走行と平行に筋腹中央に貼付した。

#### d. データ集積

BIMUTAS® II (株式会社キッセイコムテック社、長野) を用いて行った。表面筋電信号の解析は、各筋の等尺性最大随意収縮時の筋放電積分値に対する屈曲運動時の積分値の比である %I-EMG を指標とした。統計処理は両群間の筋放電積分値 %I-EMG を Mann-Whitney の u-test を用いて検定し、危険率 5% 未満を有意差ありとした。また各群における筋群

間の %I-EMG の平均値の差を一元配置分散分析を用いて検定し、事後検定には Tukey を用いた。解析ソフトは SPSS 11.5J for Windows (SPSS, Chicago, IL, USA) を使用した。

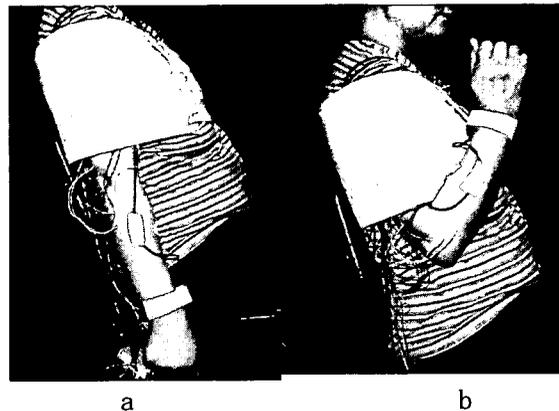


図 1 筋力特性解析 a:肘伸展、b:肘屈曲運動

### C. 研究結果

#### 1) 屈曲運動の %I-EMG

RA 群は対照群よりも %I-EMG の値が大きく、同値が 100% を超える肘が 6 肘 (46%) あった。各筋の %I-EMG を両群間で比較した結果 (図 1)、全ての筋において RA 群が健常対照群よりも有意に高い値を示した。

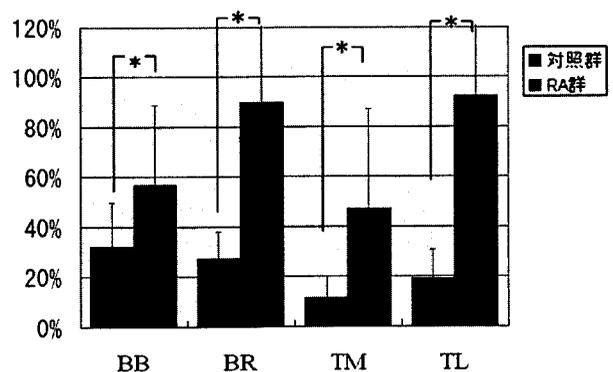


図 2 肘屈曲運動の %I-EMG \* : p < 0.05

#### 2) 伸展運動時 %I-EMG

RA 群は健常対照群よりすべての筋におい