

V2例であった。比較対照として健常女性5例、平均年齢25.2歳(21-27歳)を用いた。動作解析は日常生活上の利き手に対して2-angle goniometer:M110 (Penny&Giles)をもちいて行った。測定項目は flexion-extension motion (FEM)、radial-ulnar deviation (RUD)、日常生活動作として書字動作、瓶の開栓とし、各々の関節角度、角速度について検討した。Goniometer markerは第3中手骨基部および橈骨骨軸上に設置し<sup>7)</sup>、測定速度はメトロノーム音に合わせて60回/minとした。サンプリング周波数200Hzにて20回繰り返し測定し、測定データの6-15回を代表値として用いた。得られた測定値を2-ch analog-amp (AD Instruments Japan)にて増幅した後、Power lab 解析システムによりデータ解析を行った。

### (倫理面への配慮)

本研究を遂行するにあたり、研究対象者(RA患者)の人権擁護を最大限に配慮し、研究内容が苦痛を伴うものではなく、社会的不利益を蒙るものではなく、危険性を完全に排除し、個々の患者のQOL・ADL向上が目的であることを説明し同意を得ている。

### C. 研究結果

FEM時の関節角度は背屈(RA群12.2°、対照群50.6°)、橈屈(RA群0.3°、対照群9.4°)、尺屈(RA群4.1°、対照群16.2°)であり有意差をもって低下していた。角速度は橈尺屈方向で有意差があり、橈屈角速度(RA群16.7°/sec、対照群61.1°/sec)、尺屈角速度(RA群15.8°/sec、対照群76.4°/sec)であった(表1)。

RUDにおける関節角度は、橈屈(RA群9.5°、

対照群31.5°)、尺屈(RA群5.8°、対照群36.4°)において有意差を認めたが、角速度は全方向に低下傾向を認めたが有意差は認めなかった(表2)。

日常生活動作では、対照群において観察された手関節の円形運動は消失し、角度、角速度とも著明に制限されていた。書字動作では対照群において手関節を主に背屈位として円周運動が観察されたが、RA症例では手関節背屈が制限され、運動は直線状であった(図1)。また、瓶の開栓では、対照群で大きな手関節の協調運動がみられたのに対し、RA群では直線状の運動が観察された(図2)。

表1  
手関節 FEM 動作解析

A. normal subjects (n=5)				
	palmer flexion	dorsal flexion	radial deviation	ulnar deviation
ROM (mean ± SD)	62.6 ± 10.3	50.6 ± 5.4	9.4 ± 1.4	16.2 ± 2.0
Velocity (mean ± SD)	390.2 ± 93.2	399.3 ± 98.4	61.1 ± 13.6	76.4 ± 11.7
B. RA patients (n=22)				
	palmer flexion	dorsal flexion	radial deviation	ulnar deviation
ROM (mean ± SD)	12.6 ± 7.7	12.2 ± 9.7 *	0.3 ± 4.8 *	4.1 ± 5.8 *
Velocity (mean ± SD)	33.1 ± 29.9	35.0 ± 34.9	16.7 ± 8.1 *	15.8 ± 7.3 *

ROM: range of motion (degree)  
Velocity (degree/sec)  
\* p < 0.05, compared RA patients with normal individuals

表2  
手関節 RUD 動作解析

A. normal subjects (n=5)				
	palmer flexion	dorsal flexion	radial deviation	ulnar deviation
ROM (mean ± SD)	23.5 ± 2.7	28.7 ± 2.4	31.5 ± 3.1	36.4 ± 3.6
Velocity (mean ± SD)	128.9 ± 22.3	118.4 ± 26.3	117.1 ± 18.9	235.0 ± 37.0
B. RA patients (n=22)				
	palmer flexion	dorsal flexion	radial deviation	ulnar deviation
ROM (mean ± SD)	3.5 ± 10.4	8.4 ± 10.5	9.5 ± 8.7 *	5.8 ± 9.3 *
Velocity (mean ± SD)	21.3 ± 12.1	21.7 ± 10.2	23.5 ± 12.7	19.6 ± 8.8

ROM: range of motion (degree)  
Velocity (degree/sec)  
\* p < 0.05, compared RA patients with normal individuals

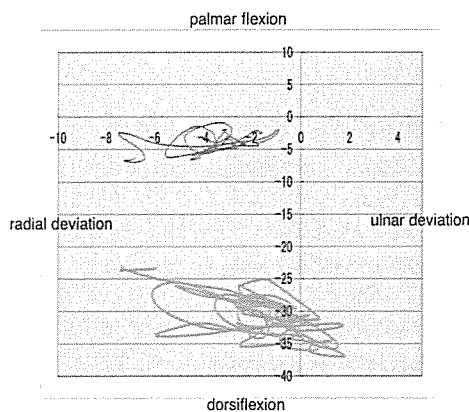


図1 書字動作の動作解析

(青：対照群，22歳，赤：Larsen grade IV，42歳)

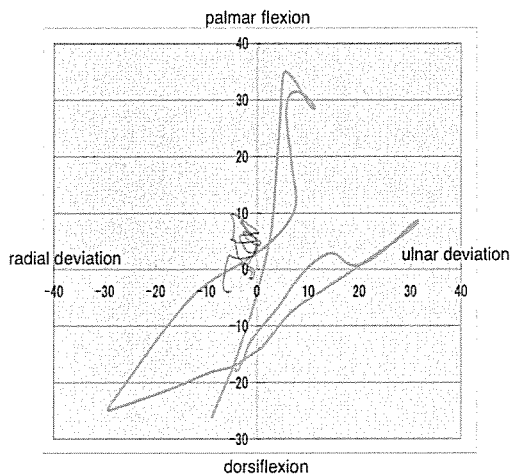


図2 瓶の開栓動作解析

(青：対照群，22歳，赤：Larsen grade IV，42歳)

#### D. 考察

RAにおける可動域障害は、関節内病変のみならず、周囲の軟部組織のバランスが崩れることが原因とされているが、本研究より手関節のFEM、RUDともにradial-ulnar方向の可動域障害はpalmar-dorsal方向と比較して強く出現することが示唆された。手関節の協調運動にはdorsiflexionとradial deviation、palmar flexionとulnar deviationからなるdart throw motion重要とされているが<sup>8,9)</sup>、radial-ulnar方向の運動が強く障害されることによってdart throw motionが制限されることは、RAにおいて手関節障害が早期から出現する要因の1つと考えられた。また関節角速度の低下は関節の速い運動の障害を示唆しており、このことは手関節運動の巧緻性に影響すると考えられた。

日常生活動作において、RA群では特に手関節の円周運動の制限が著明であった。RAの病勢が進行することによりdart throw motionが障害され、その結果、円周協調運動が制限されると手関節の動きは直線状となり、本来有する機能・巧緻性を低下させると考えられた<sup>10)</sup>。

手関節の再建を考慮するにあたりRA手関節では橈尺方向の運動制限が強く出現するため、橈尺方向の運動に対する制御が重要と考えられる。手関節の回旋運動を考慮すると人工関節はnon-constrained typeが望ましいが、ある程度の運動を制限するsemi-constrained typeや、internal ligament機構を有するmodelなどが有用と考えられる。正常手関節における掌背屈方向の可動性は、日常生活動作においてjoint angleは書字動作で平均25度(-15-40度)、

瓶の開栓で平均 35 度 (20-15 度) であり、掌背屈運動の再建では最大可動域は必要ではなく、掌背屈それぞれ 30 度の可動域獲得と stability の獲得が有用と考えた。

本研究では、RA 症例の手関節を全体として評価しているため、RA 症例の進行に伴う特徴に関しては捉えることができなかった。しかし、手関節の破壊性病変に応じた治療を考える上で、RA 病変の進行と手関節動態の変化との相関を観察することは非常に重要であり、今後検討を重ねていく予定である。

#### E. 結論

手関節の 3 次元的動作において、RA 罹患患者においては橈尺屈運動の障害による機能制限が著明であり、人工関節開発において橈尺屈運動の制御は 1 つの重要な因子と考えられた。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

1. Yayama T, Kobayashi S, Kokubo Y, Inukai T, Mizukami Y, Kubota M, Ishikawa J, Baba H, Minami A: Motion analysis of the wrist joints in patients with rheumatoid arthritis. Mod Rheumatol (in submission) .

##### 2. 学会発表

1. 彌山峰史、小林 茂、小久保安朗、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動作の特徴。第35回北陸リウマチ関節研究会,平成18年7月,金沢.

2. 彌山峰史、馬場久敏、小林 茂、犬飼智雄、水上保孝、久保田雅史、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。第34回日本リウマチ関節外科学会,平成18年11月,新潟

#### G. 知的財産権の出願・登録状況 なし

## 引用文献

1. Ishikawa H, Murasawa A, Nakazono K. Long-term follow-up study of radiocarpal arthrodesis for the rheumatoid wrist. *J Hand Surg (Am)* 2005; 30: 658-66.
2. Nakamura H, Tanaka H, Yoshino S. Long-term results of multiple synovectomy for patients with refractory rheumatoid arthritis. Effects on disease activity and radiological progression. *Clin Exp Rheumatol* 2004; 22: 151-7.
3. Cobb TK, Beckenbaugh RD. Biaxial total-wrist arthroplasty. *J Hand Surg (Am)* 1996; 21: 1011-21.
4. Takwale VJ, Nuttall D, Trail IA, Stanley JK. Biaxial total wrist replacement in patients with rheumatoid arthritis. *J Bone Joint Surg (Br)* 2002; 84: 692-9.
5. Oki H, Ando M, Omori H, Okumura Y, Negoro K, Uchida K, Baba H. ; Relation between vertical orientation and stability of acetabular component in the dysplastic hip simulated by nonlinear three-dimensional finite element method. *Artif Organ* 2004; 28: 1050-4.
6. Hashimoto N, Ando M, Negoro K, Yayama T, Baba H: Dynamic analysis of the resultant force acting on the hip joint during level walking. *Artif Organ* 2005; 29: 387-92.
7. Ojima H, Miyake S, Kumashiro M, Togami H, Suzuki K. Dynamic analysis of wrist circumduction: a new application of the biaxial flexible electrogoniometer. *Clin Biomech* 1991; 6: 221-9.
8. Ishikawa J, Cooney WP, Niebur G, An KN, Minami A, Kaneda K. The effects of wrist distraction on carpal kinematics. *J Hand Surg (Am)* 1999; 24: 113-20.
9. Youm Y, McMurthy RY, Flatt AE, Gillespie TE. Kinematics of the wrist. An experimental study of radial-ulnar deviation and flexion-extension. *J Bone Joint Surg (Am)* 1978; 60: 423-31.
10. Li ZM, Kuxhaus L, Fisk JA, Christophel TH. Coupling between wrist flexion-extension and radial-ulnar deviation. *Clin Biomech* 2005; 20: 177-83.

関節リウマチ肘の運動解析

分担研究者 加藤 博之 信州大学医学部運動機能学講座教授

研究協力者 村上 成道 信州大学医学部附属病院整形外科助手  
齋藤 直人 信州大学医学部保健学科応用理学療学教授

研究要旨：関節リウマチ(RA)9肘と健常11肘における肘屈曲運動における in vivo movement study を行い両群を比較した。Biceps、Brachioradialis、Triceps medial head、Triceps lateral head の表面筋電図を測定し、%I-EMG を算出した。3軸加速度計にて肘屈曲運動時の肘内反・外反方向加速度の生波形、積分値を解析した。%I-EMG はRA群で対照群より高い値を示した。各筋間の比較では、BrachioradialisとTriceps lateral headにおいて、RA群で有意に高い値を示した。各群における筋別の比較では、RA群でBrachioradialisがTriceps medial headより、またTriceps lateral headがTriceps medial headより有意に高い値を示した。加速度の生波形解析において、対照群では屈曲早期に内反方向に加速度が生じ、屈曲後期に外反方向に向かう傾向を示す例が8例、逆に屈曲早期に外反方向に加速度が生じ、屈曲後期に内反方向に向かう傾向を示す例が3例であった。RA群の加速度生波形には一定の傾向がなかった。加速度積分値解析では、両群に有意な差は認めなかった。今回用いた肘関節の計測・解析方法はRA患者の筋活動特性や関節の不安定性を定量的に評価するうえで有用な方法と考えられる。

A. 研究目的

関節リウマチ(以下RA)肘の障害特性を簡便かつ定量的に解析することを目的として健常者とRA肘患者の肘屈曲運動における運動解析を行った。

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11例11肘(平均61歳)を対照群とした。RA群は、9例9肘(平均69歳、全例Larsen分類

GradeIV)であった。全例が肘屈曲伸展運動で運動時痛を訴えていた。

計測に先立って被検者を背もたれ付き椅子に座らせ、上腕をバスタバンドで固定した。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旋中間位での肘関節の自動的屈曲伸展運動とし、屈曲に1秒、伸展に1秒それぞれかけて屈伸運動を行った。計測は10試行の練習の後の10試行とし、肘関節屈曲動作時の表面筋電図と3軸加速度計そして電気角度計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。

### b. 表面筋電図

Biceps、Brachioradialis、Triceps medial head、Triceps lateral head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。

### c. 3軸加速度計 (図1)

3軸加速度計AC101((株)セプロテック、静岡)を橈骨手根関節面から近位3cmの橈骨の橈側に装着した。加速度の軸は、手掌方向を肘内反、手背方向を肘外反とした。

### d. 電気角度計 (図1)

電気角度計SG110(バイオメトリクス社、英国)を肘関節内側に設置した。

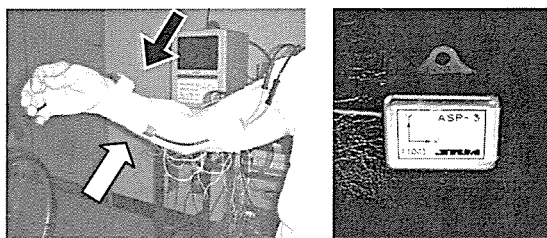


図1 左：電気角度計(白矢印)、加速度計(黒矢印)の設置 右：3軸加速度計

### e. 解析

データ解析は多用途生体情報解析プログラムBIMUTAS<sup>®</sup> II(株)キッセイコムテック社、長野、日本)を用いて行い、6試行目から8試行目までの随意的屈曲運動時の筋電信号と3軸加速度波計の積分値を算出した。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、全ての被検者の最小データ点数で正規化した。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。統計処理は両群間の筋放電積分値と加速度

波形の面積積分値の平均値の差をMann-Whitneyのu-testを用いて検定した。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。

### (倫理面への配慮)

本研究は信州大学医学部内の倫理審査規定にのっとって実施された。

## C. 結果

### a. 表面筋電図

健常対照群とRA群の筋別の%I-EMGの比較を示す(図2)。RA群は対照群よりも相対的に筋活動量が大きくBiceps、Brachioradialisにおいて100%を超える筋があった。

次に各筋において、%I-EMGを健常対照群とRA群で比較した、BrachioradialisとTriceps lateral headにおいてRA群が対照群よりも有意に高い値を示した(図3)。

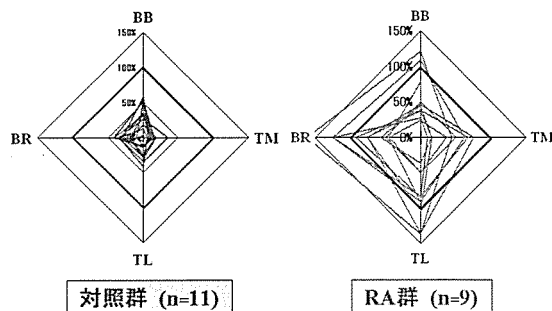


図2 %I-EMG レーダーチャート

左側:対照群、右:RA群.それぞれ上がBiceps (BB)、左がBrachioradialis (BR)、右がTriceps medial head (TM)、下がTriceps lateral head (TL)を示す。RA群で相対的に大きい筋活動量を示した。

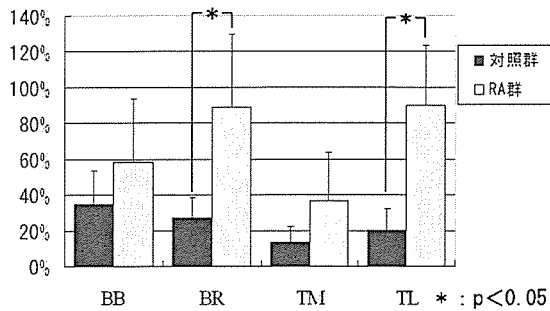


図3 %I-EMG 両群間の比較 Brachioradialis (BR) と Triceps lateral head (TL) において RA 群が対照群よりも有意に高い値を示した。

さらに健常対照群と RA 群における筋別の %I-EMG を比較した。対照群の中では Biceps が高い値を示し Biceps と Triceps Medial の間に有意差を認めた。一方 RA 群の中では Brachioradialis と Triceps lateral head が高い値を示し、Brachioradialis と Triceps medial head、また Triceps lateral head と Triceps medial head の間にそれぞれ有意差が認められた(図4)。

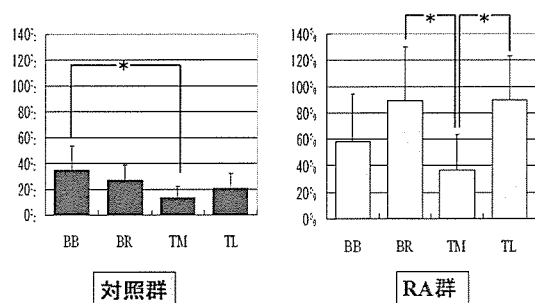


図4 %I-EMG 各群筋別での比較 対照群では Biceps (BB) で、RA 群では Brachioradialis (BR)、Triceps lateral head (TL) で有意に高値を示した。(p < 0.05)

#### b. 加速度

Y 軸方向の加速度波形の解析結果を示す。図5は最大伸展位から最大屈曲位までの加速度波形を示し(+)方向は肘内反方向、(-)

方向は肘外反方向を示している。対照群のうち、図5-a に示す8例は屈曲開始後に内反方向加速度が生じ、その後外反方向加速度を生じる傾向を示した。図5-bの3例は屈曲開始後に外反方向加速度が生じ、その後内反方向加速度を生じる傾向を示した。一方、図5-cに示すようにRA群での加速度波形は健常者群に比べ、被検者によって傾向が大きく異なり一定の傾向は認められなかった。

また加速度波形の面積積分値を両群間で比較したところ有意差は認められなかった。

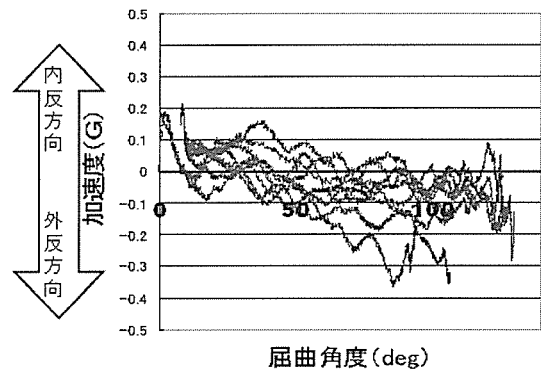


図5-a 加速度生波形 対照群中8例 内反方向から外反方向へ移行する。

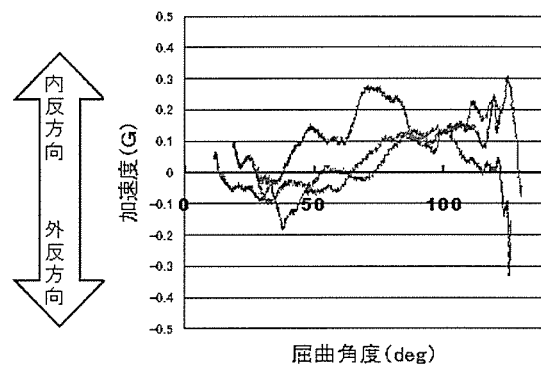


図5-b 加速度生波形 対照群中3例 外反方向から内反方向へ移行する。

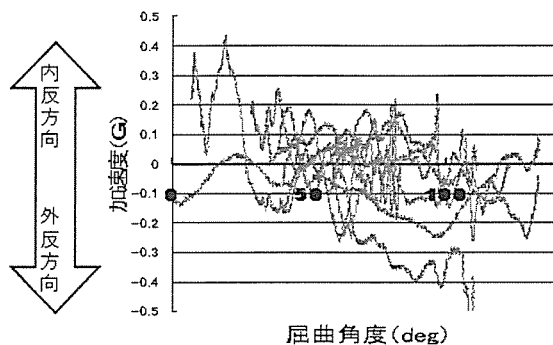


図5-c 加速度生波形 RA 群  
多様な傾向を示す。

#### D. 考察

%I-EMG について RA 群が対照群よりも Biceps、Triceps lateral head で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。また内反・外反方向の加速度波形について RA 群で一定の傾向を示さなかったことは、RA 肘の関節破壊の程度により加速度波形の傾向が異なっていた可能性がある。加速度波形の積分値は両群間で有意差がみとめられなかったが、計測数が少ないことが一因と考えられる。今後計測例を増やして更なる検討を行う必要がある。

RA 症例における筋の組織学的評価、画像所見、VAS など他の臨床所見との関連については、今後症例を重ねた上で、検討を要する。

#### E. 結論

健常者と RA 肘患者を対象に、肘屈曲運動時の運動解析を表面筋電図と加速度波形を指標として行った。その結果、%I-EMG は RA 群が対照群よりも大きな値を示し、その傾向は Brachioradialis と Triceps lateral head において

顕著であった。加速度波形の積分値は両群間で有意差がみとめられなかった。今回用いた肘関節の計測・解析方法は RA 患者の筋活動特性や関節の不安定性を簡便かつ定量的に評価するうえで有用な方法と考えられる。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

1. Takahashi J, Shono Y, Nakamura I, Hirabayashi H, Kamimura M, Ebara S, Kato H: Computer-assisted screw insertion for cervical disorders in rheumatoid arthritis. Eur Spine J 6, 2006 (in press)
2. Yamazaki H, Kato H, Nakatsuchi Y, Murakami N, Hata Y: Closed rupture of the flexor tendons of the little finger secondary to non-union of fractures of the hook of the hamate. J Hand Surg [Br] 31; 337-341, 2006
3. 加藤博之, 山崎宏, 中村恒一, 伊坪敏郎, 畑幸彦: 関節リウマチ指ボタン穴変形に対する Ohshio 変法の手術手技と成績. 日手会誌 23; S142, 2006
4. 中村恒一, 政田和洋, 橋本英雄, 鈴木克侍, 石川淳一: 関節リウマチ指における Ball in socket 型人工指 MP 関節の短期成績 多施設研究. 日手会誌 23; S146, 2006
5. 加藤博之, 山崎宏, 中村恒一, 岩崎倫政, 三浪明男: リウマチ上肢の手術治療. 日整会誌 80; S436, 2006
6. 中村順之, 木村貞治, 加藤博之, 齋藤直人, 村上成道, 畑幸彦: RA 肘の屈曲伸展動作解析. 日本肘学会雑誌 13; S50, 2006



## 2. 学会発表

1. 中村順之、加藤博之、村上成道、畑 幸彦、木村貞治、斎藤直人：関節リウマチ肘の運動解析.第 18 回日本肘学会 平成 18 年 2 月 19 日.於:名古屋市
2. 中村順之、加藤博之、村上成道、畑 幸彦、木村貞治、斎藤直人：関節リウマチ肘の運動解析第 21 回日本整形外科学会基礎学術集会 平成 18 年 10 月 19 日.於:長崎市

## G. 知的財産権の出願・登録状況

なし

厚生労働科学研究費補助金（免疫アレルギー疾患予防・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と屍体を用いた置換後の3次元運動解析—

分担研究者 岩崎 倫政 北海道大学病院 講師

研究協力者 石川 淳一 山の手通八木病院院長  
平田 裕子 ナカシマプロペラ株式会社

研究要旨：生理的な手関節運動である投げ矢運動（dart thrower motion）を誘導する人工手関節のコンセプトに基づき摺動面の異なる3種類（楕円、卵円形橈尺屈半拘束、卵円形橈尺屈拘束）の人工手関節を開発し、3次元運動解析を屍体手関節を用いて行った。どの機種においても投げ矢運動を再現できていたが卵円形摺動面でより安定した投げ矢運動が誘導された。回旋運動は楕円形で49度と置換前の36度に比し、大きかったが卵円形で半拘束3.0度、拘束3.5度と強く拘束されていた。楕円形では摺動面での不適合が生じていることが予想され、脱臼や摺動面での磨耗のリスクが大きいと考えられた。卵円形で橈尺屈にあそびを有する半拘束型が最適と考えられた。

#### A. 研究目的

これまで我々はより生理的な手関節運動（dart thrower motion、投げ矢運動、手関節背橈屈から掌尺屈への運動）をもたらす人工手関節がゆるみの発生を抑え、長期間使用に耐えうるものになると考え、新たな人工手関節の開発を進めてきた。今回そのデザインコンセプトに基づいて作成した摺動面の異なる3種類の人工手関節を屍体手関節に挿入し、magnetic tracking device（モーションスター）による3次元運動解析を行った。本研究の目的は人工手関節置換後の手関節運動がdart thrower motionを獲得できているか、また3種類の摺動面での運動を正常手関節運動と比較し、最適な摺動面の形態を検討することである。

#### B. 研究方法

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、さらに骨切除量を少なくするため表面置換半拘束型である。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と考えられる投げ矢面（dart thrower pl-ane）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、橈骨側は橈骨髄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中手骨ヘスクリューによ

る手根骨ステムの強固な固定を可能にした。前回報告した初回モデル（楕円形摺動面）でのX線検討では橈尺屈位で関節面の不適合が生じたため、新たに摺動面形状を正常の橈骨月状骨、橈骨舟状骨関節面の形態に合わせ卵円形とした。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1）。屍体上肢（新鮮凍結1体、解剖用1体）を肘関節近位で切断し、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2）。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]）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。

### C. 研究結果

投げ矢面での運動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投げ矢面での運動が再現されていた（図3、4）。置換前と比較すると楕円形（Implant No.1）では掌背屈時の橈尺屈が大きく、卵円形では半拘束型（Implant No.2）、完全拘束型（Implant No.3）とも掌屈での尺屈要素が大きく、逆に背屈での橈屈要素が少なかった。掌背屈運動方向のX軸からの角度 $\beta$ は中間位から背屈で置換前が-70度、Implant No.1が-60度、No.2が-70度、No.3が-66度であり、No.2が置換前と同じであった。中間位から掌屈では置換前が96度、Implant No.1が102度、No.2が110度、No.3が112度であった。卵円形で掌屈時の尺屈要素が大きかった。

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予想より強く回旋運動が拘束されていることを意味していた。

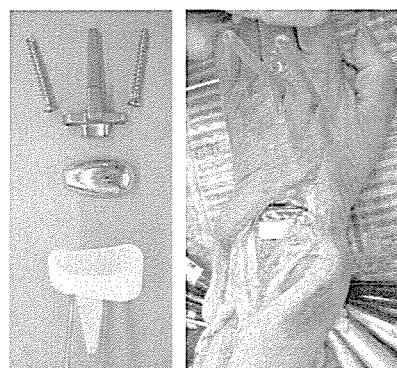


図1 卵円形摺動面と置換後

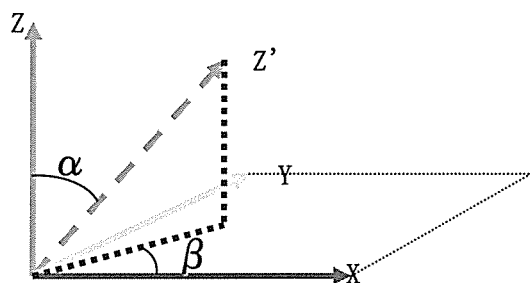
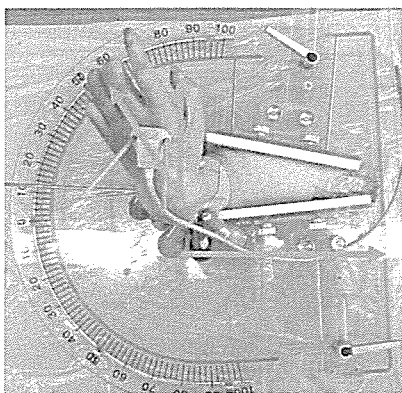


図2 3次元運動解析と座標軸

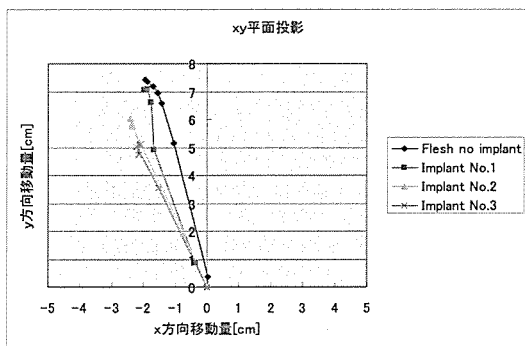


図3 中間位から掌屈でのXY平面での運動方向

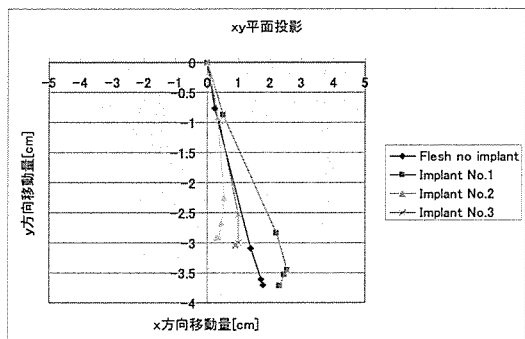


図4 中間位から背屈でのXY平面での運動方向

#### D. 考察

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をもつため1関節の人工関節で置換することに困難が生じる。今回いずれの人工手関節でも投げ矢面での掌背屈運動 (dart thrower motion) が再現されていた。しかし楕円形摺動面で回旋運動が大きかったことは掌背屈運動にともない摺動面での大きな不適合性が生じていることを示唆した。一方、卵円形摺動面では掌屈時の尺屈が大きく誘導されていたが背屈時の橈屈は置換前とほぼ同様であった。また回旋運動は3-3.5度と拘束されており、楕円形に比し、より安定した手関節運動が誘導されていると考えられた。

#### E. 結論

考案した新しい人工手関節では生理的かつ実用的な運動である投げ矢面での掌背屈運動 (dart thrower motion) が再現されていることが屍体手関節による3次元運動解析にて証明された。摺動面の形態として楕円形より卵円形が回旋方向への不適合性が少なく、より安定していると考えられた。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

1. Ishikawa J et al.: Tumor location affects the results of simple excision for multiple osteochondromas in the forearm. J Bone Joint Surg [Am] in press, 2007

#### G. 知的財産権の出願・登録状況

なし

人工肘関節の解剖学的髓腔ステムの検討と

摺動面最適形状決定のための生体内人工関節三次元動態解析

分担研究者 村瀬 剛 大阪大学大学院医学系研究科器官制御外科学(整形外科) 助手

分担協力者 関敦 仁 国立相模原病院整形外科医長

研究要旨:①上腕骨解剖学的髓腔データを考慮した新たな上腕骨ステム形状を作成した。このステムの上腕骨へのインプラント設置シミュレーションを行い、骨髄腔に占めるインプラントステムの占拠率を求め、従来機種と比較した。面積占拠率、前後径占拠率、横径占拠率は、従来機種でそれぞれ 31%、44%、49%、新型が 56%、82%、72%であり大幅に髓腔占拠率が改善し、各断面での新ステム断面形状は解剖学的髓腔形状と良好に適合していた。

②最適な摺動面形状を決定するための生体内 3 次元人工肘関節動態解析法を開発することを目的に、2D/3D レジストレーション法の人工肘関節へ応用を試みた。測定精度を計測するとともに、人工肘関節置換術後症例を対象に 3 次元生体内動態解析を行った。最大計測誤差は回転角 1.2°未満、偏位 2 mm未満と十分な精度であった。対象症例のコンポーネント間の回旋・内外反は症例によって大きく偏っていたが、回旋は伸展で、内外反は屈曲で 0°に収束する傾向を認めた。

A. 研究目的

肘関節は関節リウマチ(RA)に罹患されることが多い関節の一つであり、肘の疼痛、可動域減少は RA 患者の食事、着衣、洗顔などの日常生活動作を著しく制限する。膝、股関節などの下肢の人工関節が良好な成績をおさめて RA 治療に大きく貢献したのに比べて、人工肘関節は未だ発展途上であり、改善すべき点が多い。我々は過去 2 年間の研究において従来の人工肘関節の問題点を検討した結果、骨欠損が大きく、軟部組織不安定性が存在する高度な関節破壊を伴った RA 肘関節に対しても安定した成績を得るためには、非拘束型人工肘関節の髓腔ステムおよび摺動面の形状

の改良が必要と判断した。本研究の目的は、①解剖学的髓腔形状を考慮して試験的に設計したステムの髓腔適合性を検討すること、および ②最適な摺動面形状を決定するための生体内 3 次元人工肘関節動態解析法を開発することである。

B. 方法

①前年度の研究成果により得られた上腕骨解剖学的髓腔データを参考に、トライアルとして新たな上腕骨ステム形状を 3D CAD ソフトウェアを用いて作成した。コンピュータ上で平均的上腕骨モデルへのインプラント設置シミュレーションを行い、肘頭窩より近位 1 cm 毎の横

断像を得た。骨髓腔に占めるインプラントステムの断面積、前後径、横径の割合(面積占拠率、前後径占拠率、横径占拠率)を求め、従来機種と比較した(図1)。

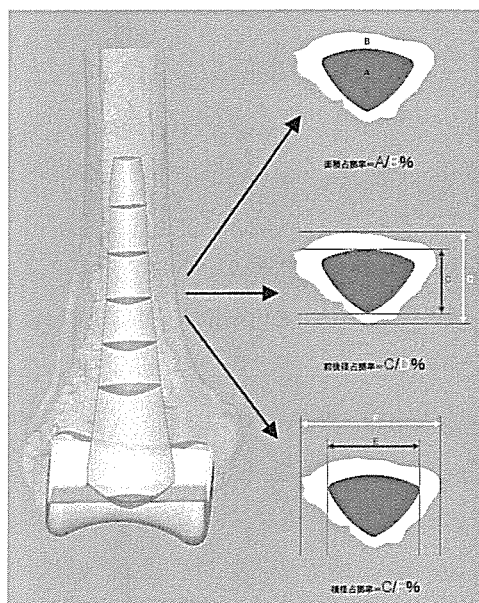


図1. 髓腔形状を考慮した上腕骨ステムデザインと髓腔占拠率の計算

②独自に開発した 2D/3D レジストレーション法を人工肘関節へ応用した。大阪大学式人工肘関節置換術後の RA 患者 6 症例 8 肘、平均 59.9 歳を対象とし、肘屈伸X線透視動態画像からコンピューター上で人工肘関節の輪郭抽出を行い、CAD データと形状マッチングすることでインプラントの連続的空間位置姿勢を計算した(図2)。誤差検定とともに対象症例の動態評価を試みた。誤差検定は既知の形状のインプラントに同法を用いることで回転角誤差、偏位距離誤差を求めた。

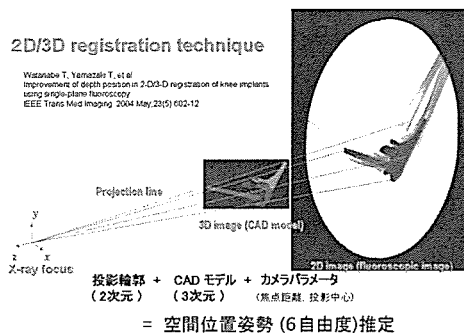


図2. 2D/3Dレジストレーション法による人工肘関節の生体内動態解析

(倫理面への配慮)

CT および透視撮影に際して、その目的、利益、不利益に関して事前に口頭・文書で説明し検査を施行した。得られた個人データは匿名化により保護されている。

### C. 結果

#### ①髓腔形状を考慮した上腕骨ステムデザインと髓腔占拠率

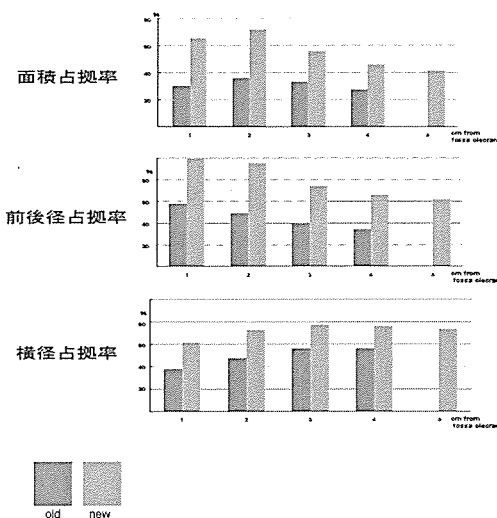


図3. トライアル上腕骨ステムの髓腔占拠率シミュレーション (従来機種との比較)

上腕骨ステムの面積占拠率、前後径占拠率、横径占拠率の平均値は、従来機種でそ

れぞれ 31%、44%、49%、新型が 56%、82%、72%であり大幅に髓腔占拠率が改善した(図 3)。

一方、各断面での新ステム断面形状は従来ステム形状に比較して解剖学的髓腔形状と良好に適合していた(図 4)。

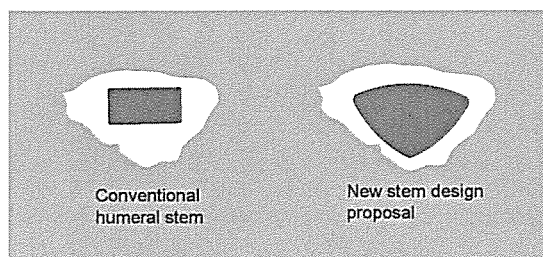


図 4. 肘頭窩上 3 cm レベルでの従来型上腕骨ステムの横断像(左)と新設計ステム横断像(右)。

②コンピューターシミュレーションによる位置計測の精度検定での平均誤差は、回転誤差が X 軸周り 1.12°、Y 軸周り 0.47°、Z 軸周り 0.10°、偏位誤差が X 軸方向に 0.14 mm、Y 軸方向に 0.18 mm、Z 軸方向に 1.59 mm であり、最大誤差も回転角 1.2°未満、偏位 2 mm未満と臨床計測上十分な精度であった。対象症例のコンポーネント間屈伸可動域の屈曲/伸展が 133.4°/-42.2°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。コンポーネント間の回旋・内外反は症例によって大きく偏っていた。屈伸運動中、比較的安定した動態を示す症例もある一方で、屈曲位で尺骨コンポーネントが外旋するあるいは、伸展位で尺骨コンポーネントが外反する症例が見られた(図 5)。これらの症例も回旋は伸展で、内外反は屈曲で 0°に収束する傾向を認めた(図 6)。

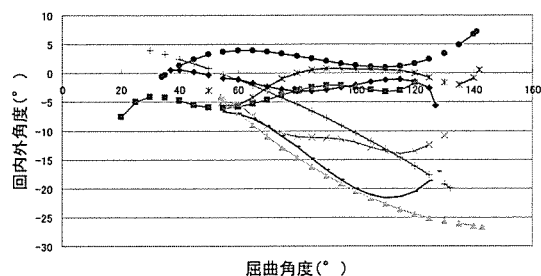


図 5. 屈曲動作中の上腕骨コンポーネントに対する尺骨コンポーネントの回内外角の推移

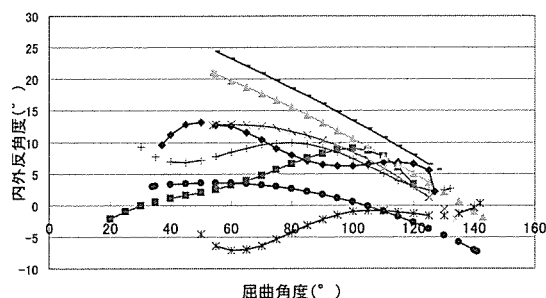


図 6. 屈曲動作中の上腕骨コンポーネントに対する尺骨コンポーネントの内外反角の推移

#### D. 考察

関節破壊が進行したRA肘関節に対する人工関節置換術では、骨欠損が大きい上腕骨顆部で固定性を得ることが難しい。そのために髓腔ステムでの初期固定性が重要となるが、従来のインプラントは十分に上腕骨髓腔の解剖学的特徴を考慮しているとは言い難い。我々の過去の研究により上腕骨髓腔は肘頭窩の付近では前方を底面とする平らな二等辺三角形形状で、肘頭窩より 3-4cm 近位レベルで正三角形形状となり、それより近位では徐々に正円形に近づくこと、また髓腔は緩やかに前方へ彎曲していることがわかったが、その知見から新しい上腕骨ステムの設計を試みた。本研究の結果から、新ステム形状により髓腔占拠率や形状適合性を大きく改善できることがわかり、ステムによる初期固定性の向上に寄与すると考えられた。ステム挿入時の上腕骨顆

部の骨切除量を最小限にするための形状の工夫などが今後の課題となる。

また、独自に開発した生体内 3 次元人工肘関節動態解析法は、従来機種 of 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、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、変化量は症例によって大きく異なった。原因としては、インプラント設置不良、軟部組織バランス、術前の変形、インプラントデザインなどが考えられた。良好な術後動態を獲得するための摺動面形状の決定と術式の選択には、異なるインプラントデザイン・術式間での動態の変化をさらに検討する必要がある。

#### E. 結論

本研究で得られた基礎データは、日本人の上腕骨、尺骨骨髓腔に適合した人工関節ステムや関節摺動面の設計に寄与すると考えられる。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

1. Moritomo H, Murase T, Goto A, Oka K, Sugamoto K, Yoshikawa H. In vivo three-dimensional kinematics of the mid carpal joint of the wrist. J Bone Joint Surg ; 88: 611-621, 2006.
2. Kitamura T, Hashimoto J, Murase T, Tomita T, Hattori T, Yoshikawa H, Sugamoto K. Radiographic study of joint destruction patterns in the rheumatoid elbow. Clinical Rheumatology: E-pub,

2006.

3. Namba J, Shimada K, Saito M, Murase T, Yamada H, Yoshikawa H. Modulation of peritendinous adhesion formation by alginate solution in a rabbit flexor tendon model. Journal of Biomedical Material Research Part B, Applied Biomaterial: E-pub, 2006.
4. 後藤 晃、村瀬 剛、岡 久仁洋、森友寿夫:3D-CT を用いたリウマチ患者での上腕骨・尺骨、骨髓腔の 3 次元計測. 日本肘関節学会雑誌、掲載予定.

##### 2. 学会発表

1. 北村卓司、菅本 一臣、橋本 淳、村瀬 剛、服部貴子高子、吉川 秀樹:リウマチ肘における関節破壊の X 線学的検討. 第 50 回日本リウマチ学会学術集会. 平成 18 年 4 月, 長崎.
2. 有光小百合、森友 寿夫、村瀬 剛、岡久仁洋、橋本 淳、吉川 秀樹、菅本 一臣:リウマチ手関節の手根配列異常に対する 3 次元的、定量的解析. 第 50 回日本リウマチ学会学術集会. 平成 18 年 4 月, 長崎.
3. 有光小百合、森友 寿夫、村瀬 剛、岡久仁洋、吉川秀樹:リウマチ手関節の手根配列以上に対する 3 次元的、定量解析. 第 49 回日本手の外科学会. 平成 18 年 4 月, 浜松.
4. 野田和王、森友 寿夫、岡 久仁洋、村瀬 剛:遠位橈尺関節不安定症に対する生体 3 次元動態解析. 第 49 回日本手の外科学会. 平成 18 年 4 月, 浜松.
5. 岡 久仁洋、森友 寿夫、村瀬 剛、面川庄平、柿木良介:3D-CT を用いた橈骨



- 頭前方脱臼の前腕同定解析とその病態. 第 49 回日本手の外科学会. 平成 18 年 4 月, 浜松.
6. 向井 克容、藤井隆太郎、坂浦 博伸、村瀬 剛、岩崎幹季、細野 昇、吉川 秀樹:術前の 3D-CT データより作成したカスタムメイドガイドによる Magerl 法. 第 35 回日本脊椎脊髄病学会. 平成 18 年 4 月, 東京.
  7. 岡 久仁洋、村瀬 剛、名井陽、森友 寿夫、海渡 貴司、玉井 宣行、吉川 秀樹:術前シミュレーションに基づき切削加工した IPCHA を用いた 3 次元矯正骨切術. 第 2 回連通多孔体セラミックス研究会学術集会. 平成 18 年 5 月, 横浜.
  8. 森友 寿夫、村瀬 剛、岡 久仁洋、田中啓之、後藤晃:生体関節運動中の靭帯距離三次元計測法の開発. 第 21 回日本整形外科学会基礎学術集会. 平成 18 年 10 月, 長崎.
  9. 有光小百合、森友 寿夫、村瀬 剛、岡久仁洋、菅本 一臣、吉川 秀樹:リウマチ手関節の手根配列異常に対する三次元的、定量的解析. 第 21 回日本整形外科学会基礎学術集会. 平成 18 年 10 月, 長崎.
  10. 岡 久仁洋、村瀬 剛、森友 寿夫、柿木良介、菅本 一臣、吉川 秀樹:三次元動作解析法を用いた橈骨頭前方脱臼の機能的形態評価法. 第 21 回日本整形外科学会基礎学術集会. 平成 18 年 10 月, 長崎.
  11. 有光小百合、森友 寿夫、村瀬剛、橋本淳、菅本 一臣、吉川 秀樹:リウマチ手関節における手根中央関節の 3 次元動的評価. 第 107 回中部日本整形外科
  - 災害外科学会. 平成 18 年 10 月, 神戸.
  12. Kuriyama K, Hashimoto J, Fujii M, Murase T, Tsuboi H, Myoui A, Yoshikawa, H. New treatment for juxta-articular intraosseous cystic lesion with interconnected porous calcium hydroxyapatite ceramic. 14<sup>th</sup> European Rheumatoid Arthritis Surgical Society. May 2006, Pfaffikon, Switzerland.
  13. Murase T, Moritomo H, Oka K, Goto A, Sugamoto K, Yoshikawa H. 3D computer simulation for deformity correction and its application in upper extremity. 79<sup>th</sup> JOA Annual Meeting . May 2006 , Yokohama.
  14. Moritomo H, Murase T, Oka K, Moritomo H. A three-dimensional and quantitative analysis of patterns of carpal deformity in rheumatoid wrists. 61<sup>th</sup> annual meeting of ASSH. Sept 2006, Washington DC.
  15. Arimitsu S, Murase T, Goto A, Oka K. A three-dimensional and quantitative analysis of patterns of carpal deformity in rheumatoid wrists. 61<sup>th</sup> annual meeting of ASSH. Sept 2006, Washington DC.
- G. 知的財産権の出願・登録状況  
特になし

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Oizumi N, Tadano S, Narita Y, Suenaga N, Iwasaki N, and <u>Minami A</u>	Numerical analysis of cooperative abduction muscle forces in a human shoulder joint	J Shoulder Elbow Surg	15	331-338	2006
Sawaguchi N, Majima T, Iwasaki N, Funakoshi T, Shimode K, Onodera T, and <u>Minami A</u>	Extracellular matrix modulates expression of cell-surface proteoglycan genes in fibroblasts	Connective Tissue Research	47	141-148	2006
<u>Minami A</u> , Iwasaki N, Ishikawa J, Suenaga N, and Kato H	Stabilization of the proximal ulnar stump in the Sauve-Kapandji procedure by using the extensor carpi ulnaris tendon' long-term follow-up studies	J Hand Surg	31A	440-444	2006
Funakoshi T, Majima T, Suenaga N, Iwasaki N, Yamane S, and <u>Minami A</u>	Rotator cuff regeneration using chitin fabric as an acellular matrix	J Shoulder Elbow Surg	15	112-118	2006
Yayama T, Baba H, Kobayashi S, Kokubo Y, Inukai T, Mizukami Y, Kubota M, Ishikawa J, <u>Minami A</u>	Kinematic investigations of the wrist joints in pateints with rheumatoid arthritis	J Orthop Surg			in press
Yayama T, Kobayashi S, Kokubo Y, Inukai T, Mizukami Y, Kubota M, Ishikawa J, <u>Baba H</u> , <u>Minami A</u>	Motion analysis of the wrist joints in patients with rheumatoid arthritis.	Mod Rheumatol			In submission
中村順之、木村貞治、 <u>加藤博之</u> 、齋藤直人、村上成道、畑幸彦	RA 肘の屈曲伸展動作解析	日本肘学会雑誌	13	S50	2006

加藤博之, 山崎宏, 中村恒一, 岩崎倫政, 三浪明男	リウマチ上肢の手術治療	日整会誌	80	S436	2006
加藤博之, 山崎宏, 中村恒一, 伊坪敏郎, 畑幸彦	関節リウマチ指ボタン穴変形 に対する Ohshio 変法の手術 手技と成績	日手会誌	23	S142	2006
Yamazaki H, <u>Kato H</u> , Nakatsuchi Y, Murakami N, Hata Y.	Closed rupture of the flexor tendons of the little finger secondary to non-union of fractures of the hook of the hamate.	J Hand Surg [Br].	31	337-341	2006
Takahashi J, Shono Y, Nakamura I, Hirabayashi H, Kamimura M, Ebara S, <u>Kato H</u>	Computer-assisted screw insertion for cervical disorders in rheumatoid arthritis	Eur Spine J	6	In press	2006
Ishikawa J	Tumor location affects the results of simple excision for multiple osteochondromas in the forearm.	J Bone Joint Surg		in press	2007
Moritomo H, <u>Murase T</u> , Goto A, Oka K, Sugamoto K, Yoshikawa H.	In vivo three-dimensional kinematics of the midcarpal joint of the wrist.	J Bone Joint Surg	88A	611-621	2006
Namba J, Shimada K, Saito M, <u>Murase T</u> , Yamada H, Yoshikawa H.	Modulation of peritendinous adhesion formation by alginate solution in a rabbit flexor tendon model.	Journal of Biomedical Material Research Part B, Applied Biomaterial	80	273-279	2007
Kitamura T, Hashimoto J, <u>Murase T</u> , Tomita T, Hattori T, Yoshikawa H, Sugamoto K.	Radiographic study of joint destruction patterns in the rheumatoid elbow.	Clinical Rheumatology	Epub ahead of print		2006

# Numerical analysis of cooperative abduction muscle forces in a human shoulder joint

Naomi Oizumi, MD,<sup>a</sup> Shigeru Tadano, PhD,<sup>b</sup> Youichi Narita, ME,<sup>b</sup> Naaki Suenaga, MD,<sup>a</sup> Norimasa Iwasaki, MD,<sup>a</sup> and Akio Minami, MD,<sup>a</sup> Sapporo, Japan

*Because some shoulder muscles originate from a wide area, the modeling of such muscles has been a significant problem in a computer simulation. We demonstrated a new method of determining a vector for each of the muscles originating from a wide area. A 3-dimensional musculoskeletal model of a human shoulder was constructed from computed tomography data of a normal volunteer. Numerical analysis of 11 muscle forces and the joint reaction force during shoulder abduction from 10° to 150° was performed from the static equilibrium equations. An optimal origin point for the vector of the muscle with a wide origin area was determined in every analyzed position. Electromyography was carried out to validate the results of the simulation, and a significant correlation with the analyzed force was obtained in each muscle. The anatomic biomechanical model with the new muscle modeling method led to the results reflecting the actual muscle activities in a living body. (J Shoulder Elbow Surg 2006;15:331-338.)*

To evaluate activities of muscles surrounding a shoulder joint, electromyography (EMG) has been widely used for a long period.<sup>2,8,14,15</sup> However, EMG has several disadvantages: it is invasive, it is difficult to insert a needle into the proper position in some muscles, and most importantly, it is unable to quantify individual muscle forces. Cadaveric models have also been used to simulate joint motions in various conditions.<sup>12</sup> However, it is difficult to reproduce 3-dimensional motions of the scapula and humerus because they have to be fixed on a device. Therefore, the experimental analyses are often limited to the gleno-

humeral joint, and muscles originating from the thorax are excluded from the examination. For these reasons, computer simulation has come to be a valuable method in the analysis of shoulder muscle forces.<sup>5,7,11,17</sup>

The combined motion of 3 joints (glenohumeral, acromioclavicular, and sternoclavicular joints) allows the shoulder joint to have the widest range of motion among all joints in the human body. Bony stability of the glenohumeral joint is minimal so that soft tissues, including ligaments, capsule, and muscles, that surround the joint play an important role in stabilization. Unlike other joints that have more bony stability, such as the hip joint, shoulder joint muscles act during any shoulder motion not only as a source of force but also as a stabilizer. In fact, more than 20 muscles (and their separate parts) act cooperatively during shoulder motion. Because of these anatomic features, it is important to build an anatomically accurate geometric model for a precise computer simulation of shoulder muscles. Some of the shoulder muscles, such as the deltoid, supraspinatus, infraspinatus, subscapularis, and so on, originate from a wide area, and modeling should be taken into consideration especially for these muscles. Modeling of muscles with a wide area of origin has been a significant subject of discussion, and various procedures were proposed in previous muscle force analyses.<sup>4,16</sup> In this study, we introduce a new modeling method for muscles with a wide origin area using computed tomography (CT) data of a shoulder joint in a normal volunteer. We created a 3-dimensional biomechanical model for analyzing muscle forces and validated the analyzed forces by comparing them with the EMG values.

## MATERIALS AND METHODS

### *Biomechanical model*

CT data of a shoulder in a normal volunteer (23-year-old man; body weight, 65 kg; length between shoulder and wrist joint, 55 cm) were prepared to create a 3-dimensional musculoskeletal model. The volunteer had neither a history of trauma nor any symptoms in his shoulder. Informed consent for participating in this study was obtained from the volunteer. Axial CT images of the shoulder, elbow, and forearm were scanned by a high-resolution helical scanner (CT Highspeed Advantage; GE Medical System, Milwau-

From the <sup>a</sup>Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine, and <sup>b</sup>Division of Mechanical Science, Graduate School of Engineering, Hokkaido University.

Reprint requests: Naomi Oizumi, MD, Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine, North 15, West 7 Kita-ku, Sapporo 060-8638, Japan (E-mail: nao9877@aol.com).

Copyright © 2006 by Journal of Shoulder and Elbow Surgery Board of Trustees.

1058-2746/2006/\$32.00

doi:10.1016/j.jse.2005.08.012