

て%I-EMG 値が有意に高い値を示した (図 3)。

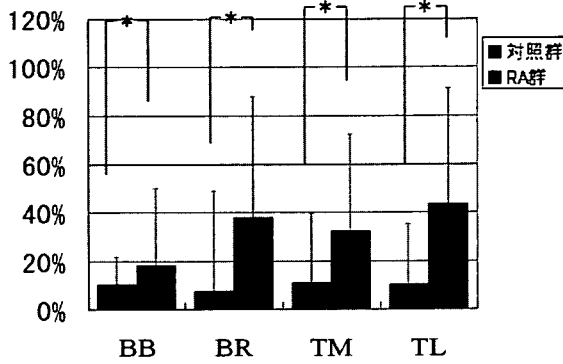


図 3 伸展運動時の%I-EMG * : $p < 0.05$

3) TEA 術前群と術後群の比較

測定した 4 筋の%I-EMG の間に屈曲運動時の%IMG において、TEA の術前群と術後群の間に有意差は認められなかった (図 4)。同様に伸展運動時においてもこれらの 4 筋の%EMG に有意差はなかった (図 5)。

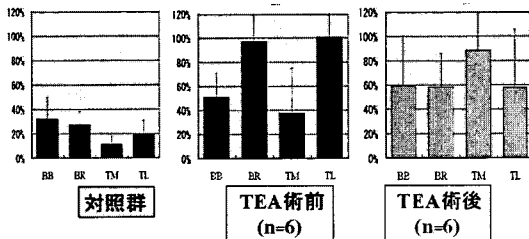


図 4 屈曲運動時の%I-EMG

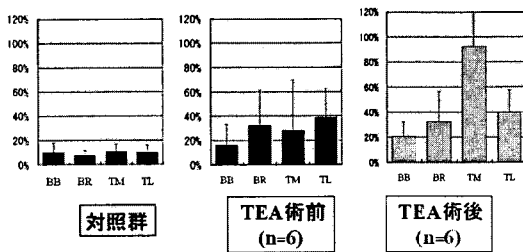


図 5 伸展運動時の%I-EMG

D. 考察

今回の結果では、肘屈曲運動、伸展運動の

いずれにおいても RA 群の%I-EMG が対照群の%-EMG よりも大きな値を示した。この理由としては、(1) 痛みのため最大随意収縮が行いにくい、(2) 廃用性萎縮により最大随意筋収縮時の筋活動量が減少した、(3) RA により肘の円滑な関節運動が困難で運動時にこれら 4 筋に大きな活動量を要した、などの可能性が考えられる。一方、TEA 前後の比較においては、各筋の%-EMG に違いはみられなかった。今回は TEA 術前後の症例が 6 例と少なく、今後症例数を増やして検討する必要がある。また、同一症例において TEA 前後で最大随意筋収縮時の筋放電積分値を比較する必要がある。

E. 結論

健常者と RA 肘患者の肘屈曲伸展運動時の主要な筋の%-EMG は屈曲時、伸展時ともに RA 群が対照群よりも有意に大きな値を示した。しかし TEA 前後の比較においては、各筋の%-EMG に違いはみられなかった。

II. 関節リウマチ肘に対する Kudo-5 人工肘関節置換術の成績：33 肘平均 7 年経過観察

A. 研究目的

TEA の代表的機種に Kudo type-5 (Kudo-5) がある。本機種 of の合併症、成績、生存率に関する報告は開発者の報告が多く、定まった見解はない。本研究では著者らの行ってきた Kudo-5 TEA の術後平均 7 年結果を報告する。

B. 対象および方法

1994-2004 年までに著者らが行った 29

例 35 肘の Kudo-5 TEA のうち、直接調査可能であった 27 例 33 肘を対象とした。TEA 時の年齢は 43-76 歳であった。TEA 時の Larsen grade は IV : 22 肘, grade V : 11 肘であった。TEA 施行時の Mayo elbow performance score (MEPS) は 10-85 点であった。調査項目は、1) 術中、術直後の合併症、2) 肘関節の屈曲、伸展、回内、回外の自動可動域 (ROM)、3) 肘関節の総合機能評価として MEPS、4) 経過観察時の単純 X 線像における clear zone と loosening の有無とした。その際、インプラント周囲の 2 mm 未満の透亮像を clear zone とし、インプラント全体に及ぶ 2 mm 以上の透亮像を loosening とした。さらに loosening あるいはインプラント抜去を endpoint としてインプラント生存率を Kaplan-Meier 法で算出した。

C. 結果ならびに考察

著者らの追跡調査は、経過観察率が全体の 94% で高率に追跡調査されている。

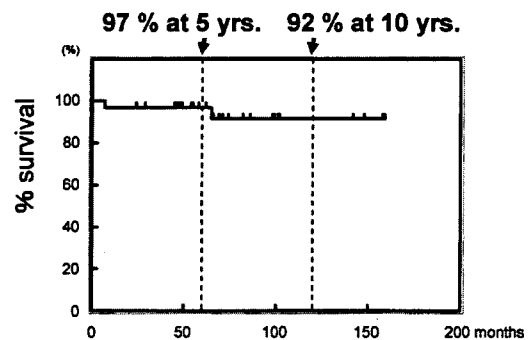
1) 術中の上腕骨内顆骨骨折が 1 肘、術直後の肘頭部の皮膚壊死が 1 肘に生じた。脱臼、感染、尺骨神経麻痺症状の悪化症例はなかった。

2) 肘屈曲角度は術前 112.3 ± 30.0 度で術後 133.5 ± 9.5 度であった。肘伸展は術前 35.1 ± 18.1 度で術後 36.8 ± 16.8 度であった。回内は術前 59.0 ± 21.0 度で術後 67.4 ± 19.9 度であった。回外は術前 60.1 ± 26.6 で術後 75.6 ± 15.9 度であった。伸展以外は術後に有意に可動域が増大した (paired t-test, $p < 0.05$)。3) MEPS は術前 41.0 ± 19.2 点、術後 84.4 ± 12.2 点で有意に改善していた ($p < 0.01$)。Poor と評価された例はなく良好な臨床成績であった。

4) 上腕骨コンポーネントに loosening あるいは clear zone を認めた例は 1 肘もなかった。尺骨コンポーネントの loosening は 2 肘に認めた。尺骨コンポーネント周囲の clear zone は 17 肘 (52%) に認めた。今後の経過観察中に尺骨コンポーネントの loosening あるいは肘頭骨折発生が危惧される。

5) インプラント生存率。5 年生存率は 97% で 10 年生存率は 92% であった (図 6)。

図 6. インプラント生存率 (Kaplan-Meier 法)



F. 研究発表

1. 論文発表 なし
2. 学会発表
 - 1) 加藤博之、他：「関節リウマチ肘に対する Kudo-5 人工肘関節置換術の成績：33 肘平均 7 年経過観察」第 20 回日本肘関節学会 平成 20 年 2 月 2 日 於：東京都
 - 2) 中村順之、加藤博之他：「関節リウマチ肘 屈曲運動時の表面筋電図解析：関節リウマチ肘の運動解析 (第 2 報)」第 20 回日本肘関節学会 平成 20 年 2 月 2 日 於：東京都

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等予防・治療研究事業）
分担研究報告書

“Dart Throw” 運動における手根骨運動の三次元回転角度計測

分担研究者 砂川 融 広島大学大学院保健学研究科 教授

研究要旨：人工手関節の開発、特にデザインする上での補助データを獲得するために、独自に開発したシステムを使用し正常手関節の三次元運動計測を行い、生理的手関節運動である“Dart-throw”運動での橈骨に対する手根骨の運動の特徴を明らかにした。本運動中有頭骨と月状骨はほぼ二次元平面状を回転運動するのに対し、舟状骨は三次元的な回転運動を行っており、人工関節デザインにあたって安定性と可動性を獲得するためには舟状骨部分に相当する手関節橈側の工夫が必要なが判明した。

A. 研究目的

手関節運動に関する生体運動学的研究報告は複数認められるが、生理的手関節運動であるいわゆる“Dart-throw”運動（橈背屈から掌尺屈方向への運動）での解析報告は限られており、またその報告は各々の骨特有の回転軸（screw axis）を算出しその軸周りの回転角度を計測するものが主体で、従来の二次元的な掌背屈、等尺屈運動の解析報告と同様で視覚的にとらえやすい前腕骨（橈骨）を基準として座標軸を設定し解析した報告は認められない。そこで独自に開発した in vivo 関節運動三次元角度計測システムを使用し、生体での“Dart-throw”運動前後の手根骨（舟状骨、月状骨、有頭骨）の橈骨に対する三次元回転角度（Euler 角）を計測することでその回転運動の特徴を明らかにし、人工手関節デザインの補助データを得ることが本研究の目的である。

B. 研究方法

手関節疾患の既往がなく、調査時手関節に愁訴のない健常ボランティア成人男性 8 名の右手関節を対象とした。非験者には本研究の目的と結果の意義、および検査には放射線被爆を伴うために人体に何らかの影響がある可能性について十分に説明し、本研究への協力の承諾を得た。

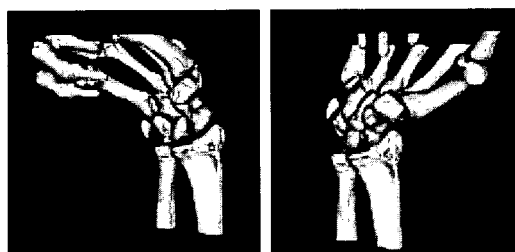


図 1. “Dart-throw” 運動. 手関節橈背屈(右)から掌尺屈(左)への運動

本研究で使用したのは 16 列マルチスライス CT (GE 社製) である。全身への放射線被爆を最小限とし、鮮明なデータを獲得するために非験者を CT 検査台上に腹臥位とし、

肩関節挙上位、前腕回内約 45° で放射線透過性の特性の台の上で手関節を CT 撮影装置の中央に固定し検査を開始した。直径 3cm の棒を握った状態で手関節橈背屈位と掌尺屈位の 2 肢位 (図 1) で前腕末梢から指尖部まで CT 撮影を行い、骨の volume データを取得した。0.63mm 厚の 2 次元画像とした後に DICOM 形式でパーソナルコンピュータ (Mac OSX) 上にデータを転送し、市販ソフト (Photoshop®) を使用して各々のスライス (約 90 枚) で橈骨、尺骨、舟状骨、月状骨、有頭骨の骨境界を分離した。次にこのデータを使用し、Matlab®ベースで作成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作成した。

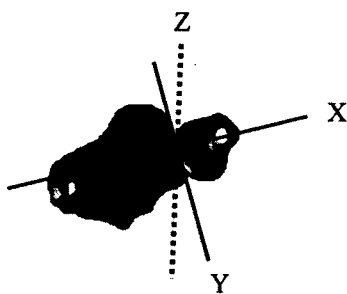


図 2. 三次元座標軸 (左: 橈骨、右: 尺骨)

最後に同様にして別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、橈骨長軸を Z 軸、この軸に垂直で橈骨の尺骨切痕の掌側および背側縁を通過する線を Y 軸 (橈骨の前後軸に近似)、両軸に垂直な線 (橈骨の横軸に近似) を X 軸とする三次元座標を設定 (図 2) した後に、各々の手根骨が重なり合うために設定した 3 軸周りで必要となる回転角度を計測した。計測にあたってはまず各々の手根骨の重心を一致させ、その重心周りに骨を回転させることで運動前後での骨表面データが最も重なる回

転角度をその骨の回転角度として算出した (図 3)。回転角度の計測には Euler 角の原理を使用した。

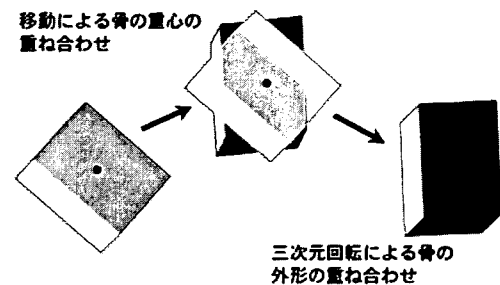


図 3. 骨の重ね合わせ

統計学的処理には分散分析を行い、5%未満を有意水準とした。

C. 研究結果

“Dart-throw” 運動中の有頭骨の回転角度は X、Y、Z 軸周りに各々 $37.1^\circ \pm 8.9^\circ$ 、 $38.6^\circ \pm 12.5^\circ$ 、 $1.1^\circ \pm 5.0^\circ$ 、月状骨の回転角度は各々 $22.5^\circ \pm 15.6^\circ$ 、 $11.9^\circ \pm 11.2^\circ$ 、 $-2.4^\circ \pm 6.0^\circ$ 、舟状骨の回転角度は各々 $19.2^\circ \pm 6.0^\circ$ 、 $18.5^\circ \pm 11.0^\circ$ 、 $10.2^\circ \pm 2.4^\circ$ で、Z 軸周りに明らかな回転運動を行っているのは舟状骨のみであった (図 4)。本来強固な靭帯で結合されている舟状骨と月状骨間は、X 軸および Y 軸周りの回転角度には統計学的有意差を認めなかったが、Z 軸周りでは回転角度に統計学的有意差 ($p < 0.05$) を認めた。靭帯性の直接の結合のない有頭骨と月状骨、有頭骨と舟状骨の回転角度を比較すると X 軸と Y 軸周りには統計学的有意差 ($p < 0.05$) を認めたが、Z 軸周りには統計学的有意差を認めなかった。

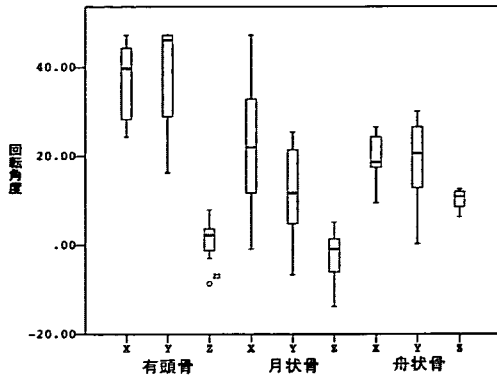


図4. 各手根骨の三次元回転角度

D. 考察

これまで開発され臨床応用されている人工手関節は、解剖学的解析結果ならびに生理的手関節運動ではない掌背屈あるいは橈尺屈運動の解析から得られた結果を基盤として橈骨側を受け皿、手根骨側を単純な球状あるいはドーム状としてデザインされており、短期的には関節としての安定性が、そして長期的にはインプラントと挿入した骨との弛みの問題があり広く普及するにはいたっていない。そこで以上のような問題を解決する人工手関節をデザイン、開発するために、生理的手関節運動である“Dart-throw”運動に着目しその運動中の手根骨、特に手関節運動に重要な役割を果たしている有頭骨、舟状骨、月状骨の回転運動について、視覚的にとらえやすく、中枢側インプラント固定部位となる橈骨を基準として三次元的に計測した。

本計測結果から“Dart-throw”運動中、有頭骨と月状骨のZ軸周りの回転はほとんど認めず、この両骨はon plane（二次元）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out of plane（三次元）の動きをすることが判明した。また本来強固な靭帯性結合を有する舟状骨と隣接する

月状骨はZ軸周りでは統計学的に有意に大きさの異なった運動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、生理的手関節運動である“Dart-throw”運動においても、手関節の可動性、安定性には舟状骨の特異な運動が重要な役割を果たしていることを示唆するものである。

今回使用した関節運動計測システムの信頼性については、生体を使用した研究であるために正確な検証が不可能であるが、外表から計測できる手関節の運動角度と今回の計測で得られた手関節の角度を規定する有頭骨の動きが近似しているために、計測結果に大きな誤差はないものと考えられる。

E. 結論

人工手関節をデザインする上で有効な可動域と安定性を得るためには、橈側のインプラントのデザインの工夫が必要である。

F. 研究発表

1. 論文発表：なし

2. 学会発表

1) Development of in vivo three-dimensional measurement system of carpal bone movement during “dart-throw” motion. 53rd Annual Meeting of Orthopedic Research Society. 2.14-16, 2007. San Diego, USA.

2) 三次元関節運動計測システムの開発. 第50回日本手の外科学会. 4.19-20, 2007. 山形市.

G. 知的財産権の出願・登録状況

特記事項なし

3次元動態解析からみたRA人工肘関節の問題点

分担研究者 村瀬剛 大阪大学大学院医学系研究科 助教

分担協力者 正富隆 行岡病院手の外科センター長

分担協力者 関敦仁 国立成育医療センター 医長

研究要旨：関節リウマチ人工肘関節の最適な摺動面形状を決定することを目的に、2D/3Dレジストレーション法による生体内3次元人工肘関節動態解析をおこなった。大阪大学式人工肘関節置換術を施行した関節リウマチ15症例18肘に対して肘関節屈曲動作側面像を連続的に撮影したX線動態画像を撮影し、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人工肘関節の生体内での3次元運動をコンピューター上で再現した。屈曲・伸展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屈曲/伸展・内反/外反・内旋/外旋角度を定量的に解析した。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。外反が強く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。

A. 研究目的

人工肘関節は関節リウマチに伴う肘関節破壊の治療の一端を担うようになり中長期成績の良好な報告も多く報告されるようになった。しかし、ゆるみや不安定性、術中術後骨折など合併症の率は依然高い。95%以上の10年生存率が報告されている人工膝関節や人工股関節と比較し、人工肘関節の10年生存率は60-90%と未だ低いのが現状である。関節リウマチに対して、より優れた人工肘関節を開発するために、昨年度まではリウマチ患者において理想的な髓腔適合性を目指した新たなステムデザインを主眼として研究を行った。今年度以降は最適な摺動面形状のデザインを行うため

に、まず従来型TEAがどのような動態を実際に示しているか正確に評価することを目標として研究を行う。従来機種が生体内3次元動態を解析してその問題点を把握できれば、新しい人工肘関節摺動面デザインに寄与すると期待できるからである。そこで今年度は、実際の透視X線画像に2D/3Dレジストレーション法を応用することで人工関節の生体内での動きを正確に解析するシステムを独自に開発し、3次元動態からみた従来の人工肘関節の問題の究明を試みた。

B. 方法

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 15 症例 18 肘(男性 1 例、女性 14 例、Larsen grade III 5 肘、IV 8 肘、V 2 肘)を対象とした。本人工肘関節は非拘束表面置換型で、橈骨頭は全例切除・非置換である。手術時平均年齢は 59.3 歳、術後追跡期間は 49.2 ヶ月であった。まず、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。画像の歪み補正の後、コンピュータ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(図 1)。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 次元運動をコンピュータ上で再現し、可視化した。さらに得られたデジタルデータから、屈曲・伸展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、昨年度の本研究における実験により回転角 1.2° 未満、偏位 0.2mm 未満であることがわかっている。

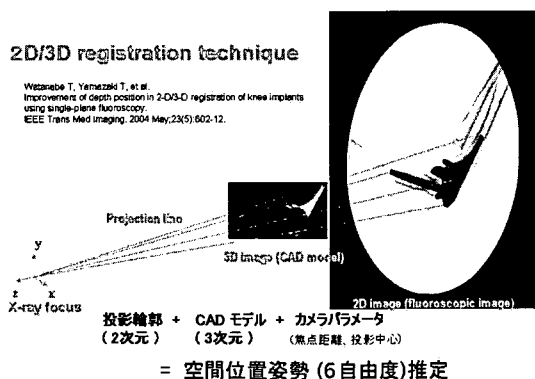


図1. 2D/3D レジストレーション法による人工肘関節の生体内動態解析

C. 結果

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° / -33.6° で、屈曲角度はどの症例もほぼ最大屈曲位を得られていた。一方、伸展角度に関しては症例により偏りがみられた。

内外反角の推移は症例によりばらつきが大きく、屈曲肘の平均外反角は 11.1°、最大伸展時の外反角は平均 9.8°、最大外反角は平均 17.3° であった(図 2)。回内外角の推移も同様にばらつきが大きく、最大回内角の平均は 10.3°、回旋角の偏移量の平均は 14.9° であった(図 3)。

コンポーネント間の回旋・内外反は 50 度の外反・40 度の外旋を示す症例もみられた(図 4, 5)。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。

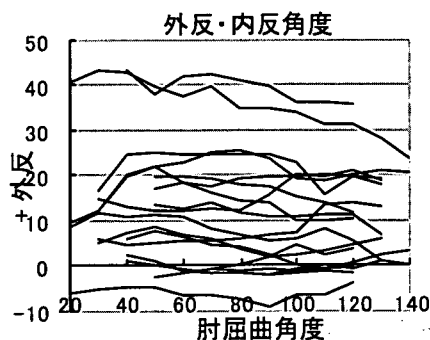


図2. 屈曲動作中の上腕骨コンポーネントに対する尺骨コンポーネントの内外反角の推移

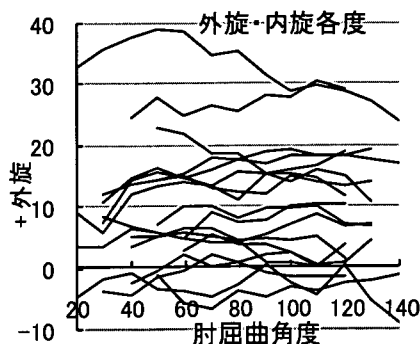


図3. 屈曲動作中の上腕骨コンポーネントに対する尺骨コンポーネントの内外旋角の推移

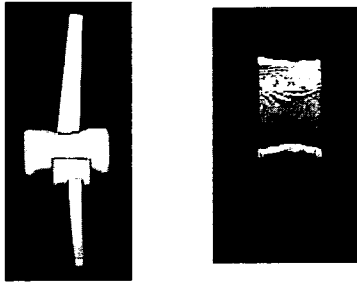


図2. 良好な適合性を保ちながら屈伸している症例では、均等な接触領域を示している。

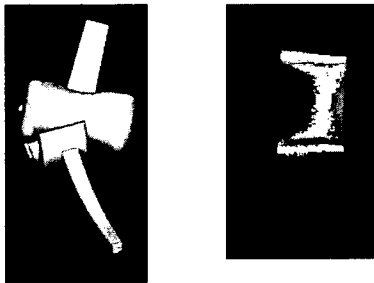


図2. 外反、外旋の強い症例ではインサートの接触領域は狭く、線接触を示している。

上腕骨コンポーネントと尺骨コンポーネントの摺動面近接距離から疑似接触領域を推定して可視化すると、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のに対して（図4）、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おり（図5）、摺動面への荷重ストレスが偏在していることが観察された。

D. 考察

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。

E. 結論

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。

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Arimitsu S, Sugamoto K, Hashimoto J, Murase T, Yoshikawa H, Moritomo H. Analysis of radiocarpal and midcarpal motion in stable and unstable rheumatoid wrists using 3-dimensional computed tomography. J Hand Surg [Am]. 2008; 33:189-97.
- 2) Temporin K, Tanaka H, Kuroda Y, Okada K, Yachi K, Moritomo H, Murase T, Yoshikawa H. IL-1beta promotes neurite outgrowth by deactivating RhoA via p38 MAPK pathway. Biochem Biophys Res Commun. 2008; 365: 375-80.
- 3) Moritomo H, Murase T, Arimitsu S, Oka K, Yoshikawa H, Sugamoto K. The in vivo isometric point of the lateral ligament of the elbow. J Bone Joint Surg Am. 2007 Sep; 89: 2011-7.
- 4) Akita S, Murase T, Yonenobu K, Shimada K, Masada K, Yoshikawa H. Long-term results of surgery for forearm deformities in patients with multiple cartilaginous exostoses. J Bone Joint Surg Am. 2007; 89: 1993-9.
- 5) Arimitsu S, Murase T, Hashimoto J, Oka K, Sugamoto K, Yoshikawa H, Moritomo H. A three-dimensional quantitative analysis of carpal deformity in rheumatoid wrists. J Bone Joint Surg Br. 2007; 89:490-4.
- 6) Kitamura T, Hashimoto J, Murase T, Tomita T, Hattori T, Yoshikawa H,

Sugamoto K. Radiographic study of joint destruction patterns in the rheumatoid elbow. Clin Rheumatol. 2007; 26: 515-9.

2. 学会発表

- 1) 二井 数馬、富田哲也、山崎隆治、村瀬剛、吉川 秀樹、菅本 一臣. 人工肘関節の生体内三次動態解析. 第 20 回日本肘関節学会. 平成 20 年 2 月, 東京.
- 2) 有光小百合、森友 寿夫、岡 久仁洋、竹安 西佳倫、村瀬剛. リウマチ手関節部分固定術後の臨床成績とエックス線学的検討. 第 25 回中部日本手の外科研究会. 平成 20 年 1 月, 徳島.
- 3) S Arimitus, H Moritomo, T Murase, H Yoshikawa, K Sugamoto. Kinematics of the midcarpal joint in rheumatoid wrists: a three-dimensional motion analysis. 5th SICOT/SIROT annual international conference. Sept, 2007, Marrakech.
- 4) T Murase, S K Oka, S Arimitus, K Sugamoto, H Yoshikawa. Computer-simulation-based three-dimensional corrective osteotomy using a premodeled hydroxyapatite implant. 5th SICOT/SIROT annual international conference. Sept, 2007, Marrakech.
- 5) Murase T, Oka K, Arimitsu S, Goto A, Tanaka H, Moritomo H. Corrective osteotomy of malunited fractures of the upper extremity using a custom-made osteotomy guide. 62nd ASSH, Sept, 2007, Seattle.

- 6) Noda K, Moritomo H, Goto K, Oka K, Murase T. Isometric component of the interosseous membrane of the forearm during forearm rotation. 62nd ASSH, Sept, 2007, Seattle.
- 7) Moritomo H, Shimada K, Murase T, Tanaka H, Denno K, Horiki M. Partial capitae shortening for Kienbock's disease. 62nd ASSH, Sept, 2007, Seattle.
- 8) Moritomo H, Murase T, Tnaka H, Arimitsh S, Oka K, Noda K, Goto A, Sugamoto K. In-vivo 3-dimensional kinematics of scaphoid nonunion. 6th International Hand and Wrist Biomechanics Symposium. June, 2007, Tainan.
- 9) Murase T, Moritomo H, Oka K, Goto A, Arimitsh S, Noda K, Tnaka H, Sugamoto K, Yoshikawa H. Three dimensional corrective osteotomy for malunited forearm fractures using a custom-designed osteotomy template based on preoperative simulation. 6th International Hand and Wrist Biomechanics Symposium. June, 2007, Tainan.
- 10) 坪井秀規, 橋本淳, 原田善史, 平尾眞, 村瀬剛, 東由明, 吉川秀樹. マルチスライス CT 撮影と三次元画像処理を用いた手関節の体積骨密度測定ソフトの開発とその臨床的有用性 関節リウマチ(RA)での検討. 第 51 回日本リウマチ学会学術集会, 平成 19 年, 横浜.
- 11) 有光小百合, 森友 寿夫, 村瀬剛, 橋本淳, 菅本 一臣. リウマチ手関節 X 線分類と手根中央関節可動域との関連. 第 50 回日本手の外科学会, 平成 19 年 4 月, 山形.
- 12) 後藤 晃, 森友 寿夫, 有光小百合, 村瀬剛. 手関節運動時における生体 3 次元靭帯計測: 橈骨舟状有頭骨靭帯. 第 50 回日本手の外科学会, 平成 19 年 4 月, 山形.
- 13) 森友 寿夫, 村瀬剛, 岡 久仁洋, 有光小百合. 手根運動における尺骨手根靭帯の生体 3 次元靭帯距離変化. 第 50 回日本手の外科学会, 平成 19 年 4 月, 山形.
- 14) 野田和王, 森友 寿夫, 岡 久仁洋, 有光小百合, 村瀬剛. 前腕回旋安定性に重要な骨間膜の解剖学的部位についての基礎的研究. 第 50 回日本手の外科学会, 平成 19 年 4 月, 山形.

G. 知的財産権の出願・登録状況
特になし

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)
分担報告書

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—

分担研究者 岩崎倫政 北海道大学病院 講師
研究協力者 益子竜弥 北海道大学病院 助教
研究協力者 大泉尚美 北海道大学医学研究科 臨床客員助手

研究要旨：関節リウマチ肩では、肩甲上腕関節の骨破壊に加えて、肩関節の重要な安定化機構の一つである回旋筋腱版の修復不能な広範囲断裂を伴うことが多い。人工肩関節置換術を行う際に修復不能な腱板広範囲断裂が存在すると、骨頭を肩甲関節窩コンポーネントに対して安定化させることができないため、肩関節機能、関節可動域は著しく障害される。また、関節の不適合性のために肩甲関節窩コンポーネントに異常なストレスが加わり、高率にルースニング（ゆるみ）が発生し再手術を余儀なくされることも多い。従って、骨頭の上方を防止して安定化させる新しい人工肩関節の開発が長年の課題である。今回我々は、骨頭の上方を防止する機能をもった新しい肩甲関節窩コンポーネントを開発し、三次元有限要素法を用いた応力解析でその形状の検討を行った。

A. 研究目的

関節リウマチ肩では、肩関節の安定化機構と運動時の力源として不可欠である回旋筋腱版の修復不能な広範囲断裂を伴う例が多い。腱板の広範囲断裂を生じると、骨頭が不安定となり上方偏位することによって、三角筋のレバーアームが減少し筋力が効果的に作用せず、術後の機能は著しく制限される。現在本邦において使用可能な人工肩関節では、骨頭を安定化させることができないため、除痛は得られても満足できる機能を獲得することは難しい。また、関節の不安定性、不適合性により肩甲関節窩コンポーネント周辺のルースニング（ゆるみ）や脱臼・亜脱臼が高率に生じるという問題もあり、腱板機能不全の肩関節に人工肩関

節置換術を行うことは禁忌とさえ考えられている。

このような腱板修復不能例に対する人工肩関節として、上腕骨頭の上方向偏位を抑制して求心位を保持することが可能な形状を開発することが本研究の最終目標である。今回我々は、新しくデザインした肩甲関節窩コンポーネントを挿入した人工肩関節の三次元有限要素モデルを作成し、肩甲関節窩コンポーネントおよびセメント層の応力解析を行った。その際、広範囲腱板断裂肩の荷重条件を導入し、現在汎用されているコンポーネントと新形状コンポーネント2種類の計3種類のモデルにおける応力を比較した。

B. 研究方法

三次元 CAD ソフト Mechanical Desktop (Autodesk, Inc., San Rafael, CA)を用いて人工肩関節をデザインし、有限要素解析ソフト ANSYS (Ansys, Inc., Canonsburg, PA)上で、肩甲骨と上腕骨の骨形状モデルにインプラントを置換したモデルを作成した(図1)。肩甲関節窩コンポーネントと骨の間には骨セメント層(厚さ1 mm)を作成した。肩甲関節窩コンポーネントは、現在汎用されている keel 型コンポー

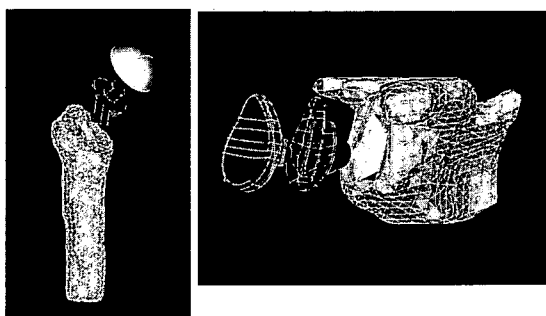


図1； 上腕骨、肩甲骨の有限要素モデル

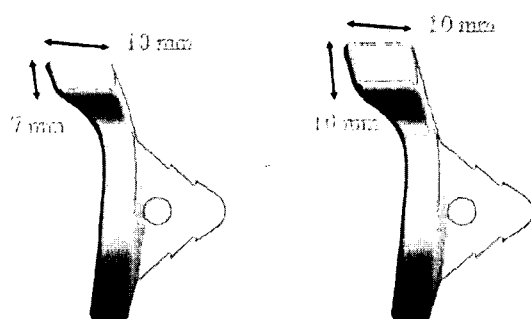


図2； 新コンポーネント type 1 (フード厚 7mm) (左)、新コンポーネント type 2 (フード厚 10mm) (右)

表1； 物性値

	ヤング率(MPa)	ポアソン比
皮質骨	8000	0.35
海綿骨	400	0.21
骨セメント	2000	0.23
UHMWPE	500	0.40
アルミナセラミック	380000	0.23
チタン合金	112000	0.33

ネント(汎用コンポーネント)と、コンポーネント上部に骨頭の上方化を抑えるためのフードをつけた新形状コンポーネント(新コンポーネント)を作成した(図2)。新コンポーネントはフード部分の厚さを7 mmと10 mmの2種類とした。皮質骨、海綿骨、チタン合金(骨頭、ステム)、UHMWPE(肩甲関節窩コンポーネント)、骨セメントの各物性値は過去の文献値を参考に表1のごとく設定した。解析条件は、肩甲骨の内側端を拘束し、関節面には接触要素を定義した。荷重条件は、広範囲腱板断裂(棘上筋・棘下筋腱断裂)をシミュレーションするため三角筋の前部・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。これらの筋力値は、我々が以前に報告した筋力数値解析モデル(Oizumi, Minami et al., 2006)により、広範囲腱板断裂肩をシミュレーションした値を用いた(表2)。モデルの要素数は約25000、節点数は約6000であった。

解析は、1) 汎用コンポーネント、2) 新コンポーネント type 1 (フード厚 7 mm)、3) 新コンポーネント type 2 (フード厚 10 mm)の3種類のモデルで行った。いずれも、肩甲関節窩コンポーネントおよびセメント層における von Mises 相当応力を比較検討した。

表 2 ; 荷重条件に用いた筋力値

	筋力値 (N)
三角筋前部線維	84.0
三角筋中部線維	207.5
三角筋後部線維	39.2
肩甲下筋	0.0
小円筋	36.0

C. 研究結果

肩甲骨コンポーネントの応力分布 (図 3); モデル 2)、3)ともフード基部に高応力を認めた。最大応力値は 1) 1.78 MPa、2) 6.08 MPa、3) 3.13 MPa であり、新コンポーネントはフードが厚い方が応力は低くなっていた。

セメント層の応力分布 (図 4); モデル 1) ではセメント層の上部に最大 5.60 MPa の応力の集中を認めたが、モデル 2)、3) ではともに上部への応力集中は消失し、最大値も 3.56 MPa、3.89 MPa と低下していた。

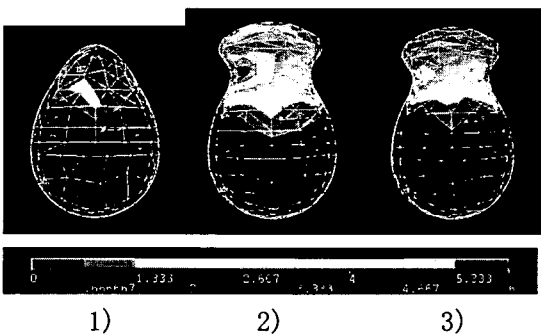


図 3 ; コンポーネントの応力分布

1) 汎用コンポーネント、2) 新コンポーネント type 1、3) 新コンポーネント type 2

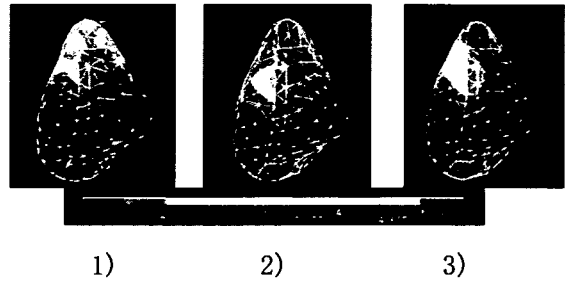


図 3 ; コンポーネントの応力分布

1)、2)、3) 同上

D. 考察 および E. 結論

本研究では、筋力数値解析を用いて広範囲腱板断裂時の筋力値をシミュレーションし、また肩関節周囲筋の筋力を個別に負荷することにより、実際の生体内条件に近い状態での解析を行うことができた。今後、腱板断裂肩における有限要素解析を行っていく上で、重要な知見が得られたと考えている。今回提案した新コンポーネントではセメント層への過度の応力集中を軽減させることができ、ルースニングの危険性を減少させる効果が期待できた。また、フード基部に高応力を認めたことは、本コンポーネントのコンセプトどおりに同部で骨頭の上方向偏位による応力を吸収し、セメント層への応力は減少させていることが確認できた。長年にわたる応力の集中によりコンポーネントの破損・磨耗の可能性はあるが、解析上はフードを厚くすることにより応力を減少させることができた。また、今後は糖鎖工学的手法を用いて生理活性物質を導入した人工関節素材の開発も同時に行なっていく予定である。

F. 研究発表

1. 論文発表

1) Naomi Oizumi, Shigeru Tadano,

Keiko Abe, Naoki Suenaga, Norimasa Iwasaki, Akio Minami: Numerical analysis of cooperative abduction muscle forces in a human shoulder joint. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 15(3):331-8, 2006.

2) Naomi Oizumi, Naoki Suenaga, Kimitaka Fukuda, Akio Minami: Massive Rotator Cuff Tears Repaired on Top of Humeral Head by McLaughlin's Procedure. Journal of Shoulder and Elbow Surgery 16(3): 321-6, 2007.

2. 学会発表

1) Oizumi N, Suenaga N, Tadano S, Abe K, Iwasaki N, Minami A: Three-dimensional Finite Element Analysis of Total Shoulder Arthroplasty in a Rotator Cuff Tear Shoulder. 53rd Orthopaedic Research Society, Feb 11-14, 2007, San Diego, CA, USA.

2) 大泉尚美, 但野茂、阿部圭子、末永直樹, 岩崎倫政, 三浪明男: 「有限要素法を用いた広範囲腱板断裂肩における人工肩関節置換モデルの応力解析」 第36回日本人工関節学会 2006年2月3日~4日 於: 京都市

3) Oizumi N, Suenaga N, Tadano S, Abe K, Iwasaki N, Minami A: Three-dimensional Finite Element Analysis of Total Shoulder Arthroplasty in a Rotator Cuff Tear Shoulder. 10th International Conference on Surgery of the Shoulder, Sep 16-20, 2007, Salvador, Brazil.

G. 知的財産権の出願・登録状況 なし

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
三浪明男	上肢でみられる症状：肘関節 Panner病	松井宣夫、龍順之助、勝呂徹	症例に学ぶ骨・関節疾患の画像診断 鑑別診断と治療のポイント	メヂカルビュー社	東京	2007	30-33
三浪明男、石川淳一	上肢機能再建術	越智隆弘、糸満盛憲、越智光夫、高岸憲二、戸山芳昭、中村利孝、三浪明男、吉川秀樹	関節リウマチと類縁疾患 19 最新整形外科体系	中山書店	東京	2007	203-210

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
山口浩、末永直樹、 <u>三浪明男</u>	羊腱板由来細胞に対するTGF- β 1投与が各種遺伝子発現に与える影響	肩関節	31	225-228	2007
大泉尚美、末永直樹、久田幸由、 <u>三浪明男</u> 、福田公孝	腱板断裂術後MRIにおける修復腱の経時的変化	肩関節	31	261-264	2007
大泉尚美、末永直樹、久田幸由、 <u>三浪明男</u>	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
松本大、末永直樹、大泉尚美、久田幸由、 <u>三浪明男</u>	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
松橋徳弥、末永直樹、大泉尚美、山根慎太郎、久田幸由、 <u>三浪明男</u> 、笠島俊彦	修復不能な広範囲腱板断裂に対するPaavolainen法の中期待治療成績	肩関節	31	569-573	2007
久田幸由、末永直樹、大泉尚美、永井正弘、 <u>三浪明男</u>	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
末永直樹、船越忠直、大泉尚美、久田幸由、 <u>三浪明男</u> 、佐野博高、福田公孝	新しい直視下腱板合法の開発	肩関節	31	601-604	2007

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

Yayama, T., Kobayashi, S., Kokubo, Y., Inukai, T., Mizukami, Y., Kubota, M., Ishikawa, J., Baba, H., and <u>Minami, A.</u>	Motion analysis of the wrist joints in patients with rheumatoid arthritis	Mod Rheumatol	17	322-326	2007
Iwasaki, N., Kato, H., Kamishima, T., Suenaga, N., and <u>Minami, A.</u>	Donor site evaluation after autologous osteochondral mosaicplasty for cartilaginous lesions of the elbow joint	Am J Sports Med	27	2096-100	2007
Majima, T., Irie, T., Sawaguchi, N., Funakoshi, T., Iwasaki, N., Harada, K., <u>Minami, A.</u> , and Nishimura, SI. J	Chitosan-based hyaluronan hybrid polymer fibre scaffold for ligament and tendon tissue engineering	Engineering in Med	221	537-546	2007
Kasahara, Y., Iwasaki, N., Yamane, S., Igarashi, T., Majima, T./ Nonaka, S., Harada, K., Nishimura, S.I., and <u>Minami, A.</u>	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
Sasaki, T., Iwasaki, N., Kohno, K., Kishimoto, M., Majima, T., Nishimura, SI., and <u>Minami, A.</u>	Magnetic nanoparticles for improving cell invasion in tissue engineering	J Biomed Mater Res A		In press	2007
Nishida, K., Horiuchi, M., Noda, N.N., Takahasi, K., Sasaki, Iwasaki, N., <u>Minami, A.</u> , 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
Matsuhashi, T., Iwasaki, N., Nakagawa, H., Hato, M., Kurogochi, M., <u>Minami, A.</u> , and Nishimura, SI.	Alteration of N- glycans related to articular cartilage deterioration after anterior cruciate ligament transection in rabbits	Osteoarthrit is Cartilage		In press	2008

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	Clin Rheumatol	26	515-9	2007
Arimitsu S, <u>Murase T</u> , Hashimoto J, Oka K, Sugamoto K, Yoshikawa H, Moritomo H.	A three-dimensional quantitative analysis of carpal deformity in rheumatoid wrists	J Bone Joint Surg Br.	89	490-4	2007
Akita S, <u>Murase T</u> , Yonenobu K, Shimada K, Masada K, Yoshikawa H.	Long-term results of surgery for forearm deformities in patients with multiple cartilaginous exostoses	J Bone Joint Surg Am	89	1993-9	2007
Moritomo H, <u>Murase T</u> , Arimitsu S, Oka K, Yoshikawa H, Sugamoto K.	The in vivo isometric point of the lateral ligament of the elbow	J Bone Joint Surg Am	89	2011-7	2007
Temporin K, Tanaka H, Kuroda Y, Okada K, Yachi K, Moritomo H, <u>Murase T</u> , Yoshikawa H.	IL-1beta promotes neurite outgrowth by deactivating RhoA via p38 MAPK pathway	Biochem Biophys Res Commun	365	375-80	2008
Arimitsu S, Sugamoto K, Hashimoto J, <u>Murase T</u> , Yoshikawa H, Moritomo H.	Analysis of radiocarpal and midcarpal motion in stable and unstable rheumatoid wrists using 3-dimensional computed tomography	J Hand Surg [Am]	33	189-97	2008
Naomi Oizumi, Shigeru Tadano, Keiko Abe, Naoki Suenaga, <u>Norimasa Iwasaki</u> , Akio Minami	Numerical analysis of cooperative abduction muscle forces in a human shoulder joint	Journal of Shoulder and Elbow Surgery	15	331-8	2006
Naomi Oizumi, Naoki Suenaga, Kimitaka Fukuda, Akio Minami	Massive Rotator Cuff Tears Repaired on Top of Humeral Head by McLaughlin's Procedure	Journal of Shoulder and Elbow Surgery	16	321-6	2007

4章 関節リウマチ

手術的治療

上肢機能再建術

関節リウマチ (rheumatoid arthritis : RA) では広範で高度な関節および関節周囲組織の破壊が生じ、上肢の障害は長期的にみれば廃用となり、介助が必要になる例が高齢化とともに増加している。適当な時期に手術的治療を行うことにより機能回復が可能であり、介護の度数を抑えうる可能性がある。

上肢に RA 病巣が及んだ場合、免疫機能亢進の病態として、骨、軟骨、靭帯、腱などすべてに広範な変性、破壊が及び、重度の機能障害に陥る。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もかか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。RA 上肢で多関節が罹患している場合、その再建順位は個々の症例で異なるが、一般的には巧緻・把持機能として手関節、母指、手指の再建を第一に考え、その後、リーチ機能の再建として肩関節、肘関節の再建へと進む (図 1)。

本項では、肩関節、肘関節、手関節、手指において現在行われている RA に対する機能再建術について、部位別に述べることにする。

肩関節

A. 人工骨頭置換術、人工関節置換術

RA 肩関節に対する機能再建術としては、人工骨頭置換術、人工関節置換術、関節固定術、切除関節形成術などがある。近年では肩関節に対してもいろいろな機種的人工関節が開発され、良好な臨床成績が報告されており適応症例は増加していると考えられる。

しかし、人工関節置換術、人工骨頭置換術を行うに際しては2つの問題点がある。第一に、RA 肩では肩甲骨側つまり関節窩において骨破壊、欠損を認めることが多いためコンポーネントの固定性が不良となりルーズニング (弛み) が発生する確率が高いこと、第二の問題点は、肩関節の安定化機構として

重要な腱板が広範囲に断裂し、修復不能な場合があることである。腱板の広範囲断裂があると骨頭が上方に移動して三角筋のレバーアームが減少して筋力が効果的に作用せず、術後の機能は著しく制限される。さらに求心性が保てず、関節窩コンポーネント辺縁に強い負荷が繰り返し加わることで、高率に弛みや破壊、脱転をきたすことになる (rocking horse phenomenon)。

RA 肩に人工骨頭置換術か人工関節置換術のどちらを行うかについては、いまだに結論がでていない¹⁾。人工骨頭のみでも良好な成績が報告されている反面、RA 肩に対する人工骨頭では、経過とともに肩甲関節窩が内方に侵食され疼痛や可動域制限の原因となることが指摘されている。先に述べた腱板の機能が完全に消失している例では、肩甲骨関節窩側は置換せず人工骨頭のみが適応になると考えられる。再建可能な腱板は縫合あるいは大胸筋、広背筋による筋腱移行を行う。関節窩がパンヌスにより侵食され骨欠損をきたし関節適合性が悪い例では、可能であれば人工関節を選択する。その際、骨移植により関節窩を再形成した後、置換する。

欧米では 1990 年代前半から、関節窩側を骨頭様のコンポーネントで置換し、上腕骨側が骨頭を受けようなりパース型的人工関節が使用されている。

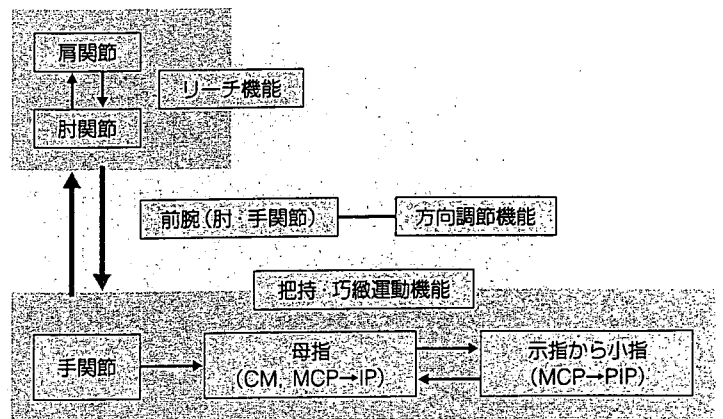


図1 RA 上肢手術の優先順位

CM : 手根中手関節, MCP : 中手指節関節, IP : 指節間関節, PIP : 近位指節間関節。

(石川 肇. 厚生労働省. 関節リウマチの診療マニュアル (改訂版)―診断のマニュアルとEBMに基づく治療ガイドライン. 2004. より)

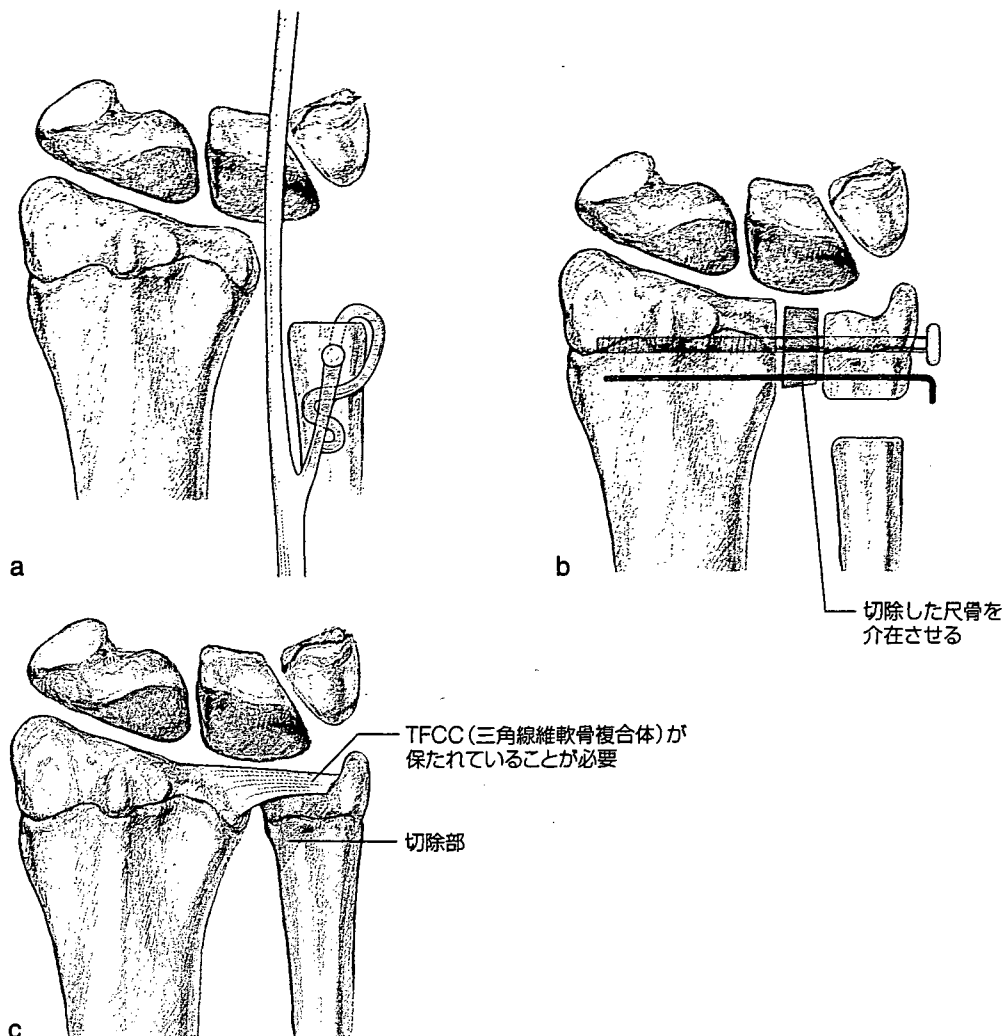


図2 種々の手関節形成術

- a: Darrach 法. 半切した尺側手根伸筋腱を用いて尺骨切除端の安定化を図る.
 b: Sauvé-Kapandji 法. 尺側支持性を確保するために人工的遠位橈尺関節癒合を作成し, その尺骨近位に人工的偽関節を作成する.
 c: hemiresection interposition arthroplasty (Bowers 法). TFCC 機能が存在する場合は適応であり橈骨 S 状切痕に合わせて尺骨頭を半載するものである.

腱板の機能が消失している例でも求心性が維持され, 三角筋のレバーアームの増加により肩挙上が可能となる. 日本ではまだ未承認である²⁾.

り手関節尺側部痛をきたすことがあるため, 術前に手関節の状態を十分に検討しておく必要がある.

肘関節

A. 関節形成術

関節形成術は, 関節破壊が著明ではない Larsen Grade I, II が適応となる³⁾. 滑膜切除と同時に腕橈関節の破壊による回内外時痛が著明であれば橈骨頭の切除を行い, 肘頭や鉤状突起先端に生じた骨棘を切除する. 骨破壊・吸収が著明な動揺肘や強直肘に対する適応はない.

橈骨頭切除後は尺骨プラスバリアンスの進行によ

B. 人工関節置換術⁴⁾

人工関節としては非拘束型, 半拘束型が一般に用いられている. Larsen Grade IV, V が適応となる. 骨が比較的温存されている例では非拘束型を用い, 骨破壊が著明な動揺肘や脱臼位を呈する例では半拘束型を使用する.

肘関節は軟部組織に乏しく, とくに RA では軟部組織の脆弱性があるため術後の皮膚壊死や, 後方からアプローチして展開するため上腕三頭筋腱の断裂に注意を要する.