

腕骨頭関節面下縁の高さにより grade 0 から III まで分類した(図4).

## 結 果

JOA スコアは術前平均 53.7 点 (33-69 点) が術後平均 89.1 点 (40-100 点) に改善した。優 15 肩, 良 7 肩, 可 1 肩, および不可 1 肩であり, 優と良をあわせると 91.7% であった。肩関節可動域は屈曲が術前平均 90.6 度 (30-135 度) から術後平均 154 度 (70-175 度), 外旋が術前平均 19.0 度 (30-45 度) から 41.8 度 (-10-70 度), 内旋が術前 3.1 点が術後 5.2 点 (JOA スコア使用) へと改善した。

MRI を用いた腱板修復状態は, Type I : 14 肩, type II : 4 肩, type III : 4 肩, type IV : 2 肩であった。再断裂像を示す type IV と V は 8.3% であった (図 2)。

OA は, 術前 15 例に認め, 全例 grade I であった。術後は grade 0 から grade I へ 4 例が進行した。Grade II 以上への進行例はなかった (図 3)。

骨頭上方化は, 術後 grade 0 から grade I へ 3 例, grade I から grade II へ 2 例が進行した。合計 5 例 (20.8%) で骨頭上方化の進行を認めた。一方, 術後 grade I から grade 0 へ 3 例 (12.5%) の進行が抑制され, 術前上方化が改善した (図 4)。

## 考 察

腱板断裂の手術療法には, 代表的な一次修復の方法に McLaughlin 法, single row 法<sup>10)</sup>, dual row 法<sup>11)</sup>があり, いずれも小・中断裂には良好な成績が報告されている。しかしながら, 大・広範囲断裂においては 30~90% と再断裂率が高く<sup>12,13,14)</sup> 確立された方法はない。広範囲断裂の一次修復術後の MRI 上の再断裂について, 特に Faribairn 等<sup>15)</sup> は広範囲腱板断裂の術後 2 か月で 33% に, 6 か月で 50% に, 12 か月で 55% に再断裂をきたすとしている。著者らは, 1996-2000 年まで直視下で Double layer anatomical repair technique を施行し, 近位の縫合部での断裂を含め 26.3% (19 肩中 5 肩) に再断裂を経験した。そのため, 2001 年より近位縫合部への応力集中・再断裂の問題を解決するための方法のひとつとして Surface-holding repair technique を考案し (図 1), 生体力学的に検討を行った。その結果では Dual-row 法とほぼ同等の初期固定力が得られ, 腱内の応力分散にも優れていることが証明されている<sup>16)</sup>。自験例では術後 1.5 年以上経過後の MRI で 8.3% (24 肩中 2 肩) の再断裂を認めていることより, 他方法と比較して良好な成績と考えられる (図 2)。

本術式の利点として, 1) 実験的に初期固定力が dual row 法と比較して同等であり腱板への応力の分散に優れていること, 2) 縫合糸の結節が腱板表面ではなく大結節下部へ設置されるためインピンジメントが起こらないことである。一方欠点としては, 1) アンカーを使用することによりコストがかかること, 2) 骨溝作成による軟骨損傷, 3) 骨質が悪い症例では pull-out した縫合糸が大結節をカットアウトし固定力が低下する危険性があることである。ただし, このような症例に対しては大結節部の骨孔を大きく深く作成することが重要である。

広範囲腱板断裂術後の OA の進行について, 広背筋移行術<sup>12,13)</sup> では 13-42%, debridement<sup>14)</sup> では 36%, Patch 法<sup>15)</sup> では 20%, 腱板を骨頭頂部に縫合した McLaughlin 法<sup>16)</sup> では 28% という報告がある。自験例では 4 例, 16.7% に進行を認めたが, grade III への

進行例は認めず, 比較的軽度であった。しかし, 経過観察期間が短い今後の長期の観察が必要である (図 3)。

また広範囲腱板断裂術後の骨頭上方化の進行について, 広背筋移行術<sup>12,13)</sup> では 25-50%, Patch 法<sup>14)</sup> では 20%, 腱板を骨頭頂部に縫合した McLaughlin 法<sup>15)</sup> では 24% という報告がある。自験例では 5 例, 20.8% 進行を認めているが, 比較的度は低く, 再断裂がなければ上方化の進行は抑制されていると考えられる (図 4)。

本研究の結果, Surface-holding repair technique を行った症例では安定した臨床成績が得られており, 他の縫合方法と比較して術後 X 線変化も同等もしくは少なかった。また, 8.3% の再断裂率, MRI 上の修復腱板の連続性は保たれ, X 線上の OA 進行・骨頭上方化の進行を認める例があり, 長期の経過観察が必要であるが非常に有用な方法と思われた。

## ま と め

腱板広範囲断裂に対して Surface-holding repair technique を施行した症例のうち術後 2 年以上経過し, 術後 1.5 年以上経過後に MRI を施行した 23 例 24 肩の術後成績・腱板修復状態を調査した。91.7% の患者で術後成績が良好であり, 再断裂は 8.3%, X 線所見では OA の進行を 16.7%, 骨頭上方化の進行を 20.8% に認めた。

## 文 献

- 1) Aoki M, et al: Transfer of latissimus dorsi for irreparable rotator-cuff tears. *J Bone Joint Surg*, 1996; 78B: 761-766.
- 2) Burkhart SS, et al: Partial repair of massive rotator cuff tears: the evolution of a concept. *Orthop Clin North Am*, 1997; 28: 125-132.
- 3) Fairbairn KJ, et al: Natural history of post-rotator cuff repair assessed with dynamic ultrasound at 2 months, 6 months and 12 months. Abstract book of 8th International congress on surgery of the shoulder, 2001, 137.
- 4) Galatz LM, et al: The outcome and repair integrity of completely arthroscopically repair of large and massive rotator cuff tears. *J Bone Joint Surg Am*, 2004; 86-A: 219-224.
- 5) Gerber C: Latissimus dorsi transfer for the treatment of irreparable tears of the rotator cuff. *Clin Orthop*, 1992; 275: 152-160.
- 6) Goutallier D, et al: Fatty muscle degeneration in cuff ruptures. *Clin Orthop*, 1994; 304: 78-83.
- 7) Harryman DT, et al: Repairs of rotator cuff Correlation of functional results with integrity of the cuff. *J Bone Joint Surg*, 1994; 73A: 982-989.
- 8) 堀田知伸ほか: 腱板一時修復後の再断裂とその原因に関する因子。肩関節, 2004; 28: 563-567.
- 9) Klepps S, et al: Prospective evaluation of the effect of rotator cuff integrity on the outcome of open rotator cuff repairs. *Am Sports Med*, 2004, 32; 1716-1722.
- 10) Melillo AS, et al: Massive rotator cuff tears: debridement versus repair. *Orthop Clin North Am*, 1997; 28: 117-124.
- 11) 仲川喜之ほか: 肩腱板広範囲断裂に対する広背筋移行術の治療成績。肩関節, 2000, 24: 479-483.
- 12) Oizumi N, et al: Massive rotator cuff tears repaired on top of

- humeral head by McLaughlin's procedure. *J Shoulder Elbow Surg.* 2007; 16:321-326.
- 13) Sciamberg SG, et al: Six-month magnetic resonance imaging follow-up of large and massive rotator cuff repairs reinforced with porcine small intestinal submucosa. *J Shoulder Elbow Surg.* 2004; 13:538-541.
- 14) 末永直樹ほか: 新しい直視下及び鏡視下腱板縫合法の開発. *肩関節.* 2007; 31: 601-604.
- 15) 菅谷啓之ほか: 単層固定法における鏡視下腱板修復術の成績. 術後1年のMRI所見と手術後成績. *肩関節.* 2003; 27: 233-236.
- 16) Sugaya H, et al: Repair integrity and functional outcome after arthroscopic double-row rotator cuff repair. A prospective study. *J Bone Joint Surg.* 2007; 89: 953-960.
- 17) 瀧内敏朗ほか: 肩腱板広範囲断裂に対する広背筋移行術とテフロンパッチ法の手術成績の比較. *肩関節.* 2001; 25: 309-313.

## 修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症に対する 人工骨頭置換術と筋腱移行術の成績

北海道大学医学部整形外科

山根 慎太郎・大泉 尚美

三浪 明男

北海道大学 人工関節・再生医学講座

末永 直樹

琉球大学医学部整形外科

山口 浩

## A Shoulder Hemiarthroplasty with a Tendon Muscle Transfer for Glenohumeral Arthritis associated with Severe Rotator Cuff Deficiency

by

YAMANE Shintaro, OIZUMI Naomi, MINAMI Akio

Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine

SUENAGA Naoki

Department of Joint Replacement and Tissue engineering,

Hokkaido University School of Medicine

YAMAGUCHI Hiroshi

Department of Orthopaedic Surgery, Ryuky University School of Medicine

Patients who had pain and dysfunction from glenohumeral arthritis accompanied with irreparable rotator cuff tear had few treatment options. Recently, reverse shoulder prosthesis was reported in the management of this problem. However, the high complication rate was one of the problems in this procedure. The purpose of this study was to investigate the clinical results after hemiarthroplasty with a tendon muscle transfer in patients with glenohumeral arthritis accompanied with severe rotator cuff deficiency. We investigated 13 consecutive patients (mean age: 65 years old) who were followed-up for more than 1 year postoperatively. There were 7 patients with rheumatoid arthritis. Pectoralis major transfer was performed in 6 cases, latissimus dorsi transfer was performed in 6 cases, and combined transfer of both tendons was performed in 1 case in addition to hemiarthroplasty of the humerus. The post operative mean JOA scores were 63.3, 74.7, and 87.5 in the pectoralis major transfer, latissimus dorsi transfer, and combined tendon transfer group, respectively. The mean flexions of the shoulder were 62.5°, 116.7°, and 150°, respectively. There were no cases of infection, nerve injury, or dislocation. A hemiarthroplasty with a latissimus dorsi transfer could provide satisfactory results in patients with glenohumeral arthritis with irreparable rotator cuff tear. Although a hemiarthroplasty with a pectoralis major transfer could provide good pain relief, flexions of the shoulder were limited and unsatisfactory. Weaknesses of muscle strength associated with rheumatoid arthritis and anterosuperior instability during flexion are considered as reasons for poor results.

Key words: 肩関節症 (glenohumeral arthritis), 筋腱移行術 (tendon muscle transfer), 人工骨頭置換術 (hemiarthroplasty)

## はじめに

関節リウマチ (RA), 透折肩または cuff tear arthropathy などで修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症は、関節面の破壊、骨頭の上化、断裂腱の変性、筋脂肪変性など様々な問題があり、疼痛の除去と良好な機能回復を確実に獲得できる治療法は未だない。近年、欧米では reversed shoulder arthroplasty が第一選択で行われているものの、本邦では認可されておらず、また高率の合併症や成績不良も報告されている<sup>8)</sup>。2002年より著者らは関節症に対しては人工骨頭で対応し、その際小さな上腕骨頭径と短いネック長の人工骨頭を用いて肩関節容量を少なくすることで腱板の一次修復を容易になるようにしてきた。しかしながら、この方法をもってしても腱板が縫合不能な場合、前上方の欠損には大胸筋移行を、後上方の欠損には広背筋移行術を併用し、腱板を再建してきた。

本研究の目的は修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症に対し、小さな骨頭径と短いネック長の人工骨頭を用いた人工骨頭置換術を行っても腱板が修復不能で筋腱移行術を余儀なくされた症例のうち1年以上経過した症例の成績を評価することである。

## 対象と方法

修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症症例に対し、人工骨頭置換術と筋腱移行術を行い、1年以上経過観察可能であった13例を対象とした。手術時年齢は42-81歳(平均65歳)であった。RAを伴っていたのが7例であった。人工骨頭置換術に追加した筋腱移行術は広背筋移行術(以下、LD群と略す)を6例(内1例は、Paavoleinen法施行後の再手術例)で、大胸筋移行術(以下、PM群と略す)を6例(1例には肩峰骨折を伴っていた)、さらに両者を同時に行ったもの(以下、LD+PM例と略す)が1例であった。PM群は全例RA合併症例であった。これらの症例の日本整形外科学会肩関節疾患治療成績判定基準(以下、JOAスコア)、可動域および合併症の有無について調査した。術後経過観察期間は12-60か月(平均22.2か月)であった。

統計学的検討は、各群ごとに術前・後でMann-Whitney's U Test

を用いて行い、危険率5%未満を有意とした。

## 手術手技

体位はビーチチェアアポジションとし、肩関節伸展位をとれるよう上体を患側に寄せ、肩を手術台の外に位置させる。皮切は肩峰前外側から皮線に沿って加え、三角筋前方線維-中部線維間を分け肩峰下腔を展開する。(上方アプローチ)この際、三角筋中部線維は1cmほど骨膜下に肩峰から剥離するが、烏口肩峰靭帯は切離せず温存する。広範囲腱板断裂を伴った症例では、骨頭が広く削出され、骨頭軟骨の変性・消失を確認後、上腕骨頭を切除する。さらに、上腕骨頭上方化の改善のため、人工骨頭設置位置を下げる。そのため上腕骨頭中心が術前の計測で上方化している分だけ上腕骨頭部を短縮する。Impaction bone graftingを併用し、上腕骨ステム挿入後、人工骨頭を装着するが骨頭は最小径のものを用いる(約40mm、ネック長15mm)。ついで肩関節包および烏口上腕靭帯の切離、腱板の mobilization を行い、margin convergence 手技により腱板の一次修復を目指して腱板修復を行う。しかし、腱板欠損が残存し、修復不能場合は筋腱移行術を追加する。後上方に欠損が残る例では腋窩ジグザグ切開から広背筋の



図1b 症例4術前MRI T2強調像矢状断



図1a 症例4術前X線



図1c 症例4術後5年

上腕骨付着部を同定・切離し, 大きなエクスカッション獲得のため, 肩甲骨下角, 大円筋や皮下組織から十分剥離し, 後方から肩峰下腔に引き出し, 残存する肩甲下筋腱, 棘上筋腱, 大結節部に縫着する。前上方に腱板欠損が残る場合は, 皮切を前下方に延長し, 三角筋-大胸筋間から大胸筋胸骨枝の上腕骨付着部を削出し, その上方1/2~2/3を切離し腱板欠損部を覆うように残存腱板に縫着する。

#### 後療法

術後は外転杖を6-8週間装着する。他動可動域訓練は術後2週から開始し, 仰臥位での自動運動訓練は4週から行っている。

## 結 果

JOAスコアの術前・後の比較では, LD群では平均34点が76.7点(p=0.004)に, PM群では平均35.5点が63.3点(p=0.010)に, LD+PM例では13点が87.5点にそれぞれ改善した。疼痛点での改善が大きく, 術前・後の比較でそれぞれ平均5.0点が20.8点(p=0.004), 平均6.7点が19.2点(p=0.037), 10点が30点と改善していた。屈曲可動域は, LD群では術前平均55°(10~110°)が術後平均116.7°(70~160°)に改善した(p=0.031)。1例において術後屈曲可動域が減少したが, 広範囲腱板断裂に対しPaavoleinen法施行後の腱板再断裂, 肩関節症症例であった。PM群では術前平均37.5°(10~90°)から術後平均62.5°(30~115°)に変化した統計学的有意差はなく(p=0.145), その改善は不十分であった。LD+PM例では屈曲可動域は20°から150°に改善した。外旋可動域も, いずれの群においても術後有意に改善した(表1.2)。感染, 神経損傷および人工骨頭の脱臼などの合併症はなかった。

表1 症例データ1

症例	年齢	性別	RA合併の有無	腫瘍移行および追加処置	経過観察(月)	術前JOA	術後JOA
1	81	F	(-)	LD	13	43	81.5
2	64	F	(-)	LD	23	16	68.5
3	71	M	(+) Paavoleinen法施行後	LD	13	43	71
4	67	F	(+)	LD	60	40	77
5	72	F	(-)	LD	18	33	84
6	69	M	(-)	LD	15	29	66
平均	70.7				23.7	34.0	74.7*
7	42	F	(+)	PM	30	27	80
8	70	F	(+)	PM	28	47	60
9	50	F	(+)	PM	28	47	76.5
10	57	F	(+)二分肩峰	PM, 肩峰骨接合	12	27	52
11	75	F	(+)	PM	16	33	46
12	65	M	(+)	PM	15	32	65
平均	59.8				21.5	35.5	63.3*
13	58	F	(-)	PM+LD	19	13	87.5

LD:広背筋移行術, PM:大胸筋移行術

\*p<0.05, \*\*p<0.01

表2 症例データ2

症例	術前屈曲(°)	術後屈曲(°)	術前外旋(°)	術後外旋(°)	術前内旋	術後内旋	術前疼痛点(30)	術後疼痛点(30)
1	90	160	-30	0	臀部	Th12	10	25
2	20	155	-10	0	臀部	L1	0	15
3	110	70	0	10	大転子部	臀部	5	15
4	60	110	-10	10	臀部	Th12	5	20
5	40	135	-20	0	臀部	L3	5	25
6	10	70	-30	10	L4	L3	5	25
平均	55.0	116.7*	-16.7	5.0**			5.0	20.8**
7	15	115	0	35	大転子部	L5	5	30
8	70	70	15	10	L5	L1	10	20
9	90	100	20	40	大転子部	L5	10	25
10	10	30	10	0	大転子部	大転子部	5	5
11	10	30	40	50	Th8	L1	5	10
12	30	30	30	40	S1	L5	5	25
平均	37.5	62.5	19.2	29.2			6.7	19.2*
13	20	150	-20	40	臀部	L1	10	30

\*p<0.05, \*\*p<0.01

## 考 察

修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症に対しては様々な治療法が試みられている。腱板断裂のデブリドマンと肩峰形成のみ行う方法<sup>8</sup>, 関節固定術<sup>9</sup>, 種々の人工骨頭置換術<sup>7,10</sup>, 人工関節全置換術<sup>11</sup>などがある。従来, 人工骨頭置換術に腱板の部分修復のみ加える方法が比較的良好な成績が得られるとして多く報告されてきた<sup>7,10</sup>。しかし, これらの報告では疼痛は軽減するものの可動域の改善は不十分であった。近年欧米ではこのような症例に対しreversed shoulder arthroplastyが主に行われている<sup>12</sup>。しかしながら, 本邦では認可されておらず使用できない。さらに, 脱臼, 再手術例, 高い感染率, 回旋可動域の回復は少ないことなど様々な問題点が残されている<sup>13</sup>。回旋可動域の改善の為, Gerberらはreversed shoulder prosthesisに広背筋移行術を加え報告<sup>14</sup>している。

今回我々が行った治療は, 骨頭関節軟骨の変性, 消失に対して人工骨頭置換術を行ない, この際腱板の一次修復を容易にするため, 骨頭は最小径のものを用い, また上方に偏位した上腕骨頭中心の引き下げのため, 上腕骨頭部の短縮骨切りも行った。この処置だけで通常の腱板修復のみでは一次融合不可能な症例であっても, 前後からmargin convergenceを行うことにより, 骨頭の被覆, 腱板融合が可能となる例も多い。それでも融合不能な症例が, 今回の対象症例である。腱板修復に関しては, 腱板欠損を放置した場合, 上腕骨頭の求心性が得られず不安定性による機能不全や肩峰への応力集中による肩峰骨折の発生などが危惧され, 筋腱移行術を行って修復することが望ましいと考える。関節窩側の処置に関しては, 今回の対象症例全例で, 関節窩側の軟骨変性も認められたが, 腱板機能の完全な再建がなされない場合は骨頭の不安定性からrocking horse glenoid phenomenon<sup>15</sup>により, 早期の関節窩compartmentのゆるみ<sup>16</sup>が予想され, 今回報告した筋腱移行術を要する症例には, 全人工肩関節置換術ではなく人工骨頭置換術のみで対応してきた。関節窩を置換せずとも, 術後疼痛は改善しており, ある程度満足できる結果と考えられる。しかしながら, 機能回復に関してLD群では1例を除き術前より改善し比較的満足

できるが、PM群ではその改善は不十分であった。大胸筋移行術の目的は、欠損部の被覆のほかに、挙上運動時の上腕骨頭前上方偏位の防止、上腕骨頭上方化の防止などがあげられるが、その効果はいずれも不十分と考えられた。またPM群は全例がRA例であり、基盤にある腱板の変性・菲薄化、筋力の弱さなども問題と考えられた。今後このような症例に関しては、腱板機能再建のため大胸筋移行術に広背筋移行術を追加することで肩関節の挙上が獲得可能か検討が必要と考えている。今回の成績不良例に関しては、LD群では広範囲腱板断裂に対しPaavoleinen法施行後の再手術例で術後可動域が低下した。初回手術時に、肩峰形成・烏口肩峰靭帯切除術が行われており、骨頭の前上方への偏位を抑えられないことが原因の一つと考えられた。

#### ま と め

- 1) 修復不能な腱板断裂を伴う肩関節症に対し、人工骨頭置換術および筋腱移行術を施行した症例の術後成績を調査した。
- 2) 人工骨頭置換術に加え広背筋移行術をおこなった例では、疼痛の軽減、可動域ともに比較的満足できる成績であった。
- 3) 大胸筋移行術を加えた例では疼痛は軽減するものの屈曲可動域の獲得は悪く、今回の対象症例に関しては基盤にあるRAによる筋力低下や、大胸筋移行では挙上時の上腕骨頭の前上方不安定性を安定化できないことなどが原因として考えられた。

#### 文 献

- 1) Anglin C, et al: Mechanical testing of shoulder prostheses and recommendations for glenoid design. *J Shoulder Elbow Surg.* 31.
- 2) Arntz CT, et al: Surgical management of complex irreparable rotator cuff deficiency. *J Arthroplasty.* 1991; 6: 363-370.
- 3) Franklin JL, et al: Glenoid loosening in total shoulder arthroplasty. Association with rotator cuff deficiency. *J Arthroplasty.* 1988; 31: 39-46.
- 4) Gerber C, et al: Reverse Delta-III total shoulder replacement combined with latissimus dorsi transfer. *J Bone Joint Surg Am.* 2007; 89: 940-947.
- 5) Neer CS II, et al: Recent experience in total shoulder replacement. *J Bone Joint Surg Am.* 1982; 64: 319-337.
- 6) Rockwood CA, et al: Debridement of degenerative irreparable lesions of the rotator cuff. *J Bone Joint Surg Am.* 1995; 77: 857-866.
- 7) Sanchez-Sotelo J, et al: Shoulder hemiarthroplasty for glenohumeral arthritis associated with severe rotator cuff deficiency. *J Bone Joint Surg Am.* 2001; 83: 1814-1822.
- 8) Werner CML, et al: Treatment of painful pseudoparesis due to irreparable rotator cuff dysfunction with the Delta III reverse-ball-and-socket total shoulder prosthesis. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87: 1476-1486.
- 9) 山根慎太郎ほか: Cuff-tear arthropathy に対し bipolar 型人工骨頭置換術を施行した 2 例. *肩関節.* 2002; 26: 621-624.
- 10) Zuckerman JD, et al: Hemiarthroplasty for cuff tear arthropathy. *J Shoulder Elbow Surg.* 2000; 9: 169-172.

## 肩関節外転運動時における三次元筋力数値解析

大泉 尚美<sup>1</sup>, 末永 直樹<sup>1</sup>, 岩崎 倫政<sup>1</sup>  
三浪 明男<sup>1</sup>, 但野 茂<sup>2</sup>, 成田 陽一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院医学研究科 機能再生医学講座 整形外科学分野

<sup>2</sup>北海道大学大学院工学研究科 バイオ・ロボティクス講座 バイオメカニカルデザイン研究室

## はじめに

肩関節周囲筋の活動性を評価する目的で、これまで筋電位測定が広く用いられてきた<sup>1,2,10,16,21</sup>。しかし、筋電位測定は侵襲性があること、筋によっては適切な位置に針を刺入するのが難しいこと、各筋力を定量化することができないこと、などの欠点がある。屍体肩を用いた様々な肩関節運動解析も報告されている<sup>11</sup>が、標本をデバイスに固定しなければならないため肩甲骨と上腕骨の生体内での三次元的運動を忠実に再現するのは困難であり、肩甲上腕関節のみの解析に限定されることが多い。これらの理由から、コンピューターシミュレーションは肩関節における筋力解析の有用な手法の一つとなってきた<sup>3,5,13,21</sup>。肩関節は人体の関節の中で最も自由度が大きく、その運動は肩甲上腕関節、肩鎖関節、胸鎖関節、および肩甲胸郭間での複合運動となる特徴をもつ。また、肩関節周囲の筋は形態が多様であり、運動に際し20以上の筋が複雑に協調運動を行っている。他関節に比較して肩甲上腕関節を安定化させる上での骨性要素の関与は小さく、靭帯、関節包、筋などの軟部組織が非常に重要な役割を果たしているため、肩関節運動時に筋は力源としてだけではなく安定化要素としても働いていると考えられる。このような解剖学的特徴により、肩の筋力数値解析を高精度に行うには筋の走行状態や骨格形態を詳細にモデリングすることが重要となる。その際特に、三角筋、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋などいくつかの肩関節周囲筋は広範囲な起始をもつ形状のため、筋ベクトルのモデリングに際して考慮が必要である。本研究の目的は、三次元肩関節CTデータより数値解

析モデルを作成し、広範囲な起始をもつ筋をモデリングする新しい手法を提案すること、そのモデルを用いて肩関節外転運動時の筋力解析を行うこと、また、解析結果の妥当性を評価するため筋電位測定と比較、検討することである。

## 方法

## 1. 骨格モデルの作成

肩関節の三次元骨格モデルを作成するため、肩の外傷や既往のない健康ボランティア(23歳、男性;体重65kg、上肢長55cm)の肩関節CTデータを撮影した。撮影にはヘリカルCT(CT Highspeed Advantage, GE社製)を用い、肩関節内転位、回旋中間位、肘関節伸展位にて肩甲骨、上腕骨、前腕骨近位部を撮影した。CTデータより三次元画像解析ソフトAnalyze3.0(Bio-medical Imaging Resource, Rochester, MN)を用いてコンピューター上に三次元骨格モデルを構築した。

## 2. 解析運動

肩甲上腕関節の回旋中心を原点とし、外転運動は肩甲平面(z軸回りに30°回転させたyz面)上で行うものとしてFig. 1のごとく三次元座標系を設定した。鉛直方向をz軸、運動面の水平方向をx軸、運動面の法線方向をy軸とした。本モデルでは肩甲上腕関節のみならず肩甲胸郭間運動も行うこととし、外転時の肩甲骨の動態は過去のin vivo study<sup>11</sup>を参考にして決定した。

## 3. 広範囲な起始をもつ筋ベクトルの決定

筋ベクトルは原則として停止点(遠位点)から起始点(近位点)へ向かう直線ベクトルとした。ソフトウエアAnalyze3.0を用いて同一被検者の肩関節MRIデー

*Numerical Analysis of Cooperative Abduction Muscle Forces In a Human Shoulder Joint*

Naomi Ozumi<sup>1</sup>, Naoki Suenaga<sup>1</sup>, Norimasa Iwasaki<sup>1</sup>, Akio Minami<sup>1</sup>, Shigeru Tadano<sup>2</sup>, Youichi Narita<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University Graduate School of Medicine

<sup>2</sup> Division of Human Mechanical Systems and Design, Hokkaido University Graduate School of Engineering

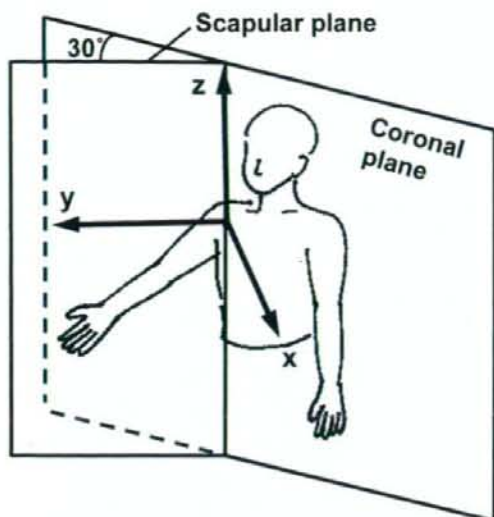


Figure 1 : 解析モデルの三次元座標系  
 原点；肩甲上腕関節の回旋中心，x-axis；運動面の法線方向，y-axis；運動面の水平方向，z-axis；鉛直方向。

タを参考に、筋の起始、停止の三次元座標を骨格モデル上で決定した。対象とした筋は、肩甲骨に起始し上腕あるいは前腕に停止する11筋、すなわち、 $F_1$ ：三角筋前部線維（Anterior fiber of deltoid）、 $F_2$ ：三角筋中部線維（Middle fiber of deltoid）、 $F_3$ ：三角筋後部線維（Posterior fiber of deltoid）、 $F_4$ ：棘上筋（Supraspinatus）、 $F_5$ ：棘下筋（Infraspinatus）、 $F_6$ ：肩甲下筋（Subscapularis）、 $F_7$ ：小円筋（Teres minor）、 $F_8$ ：大円筋（Teres major）、 $F_9$ ：上腕二頭筋長頭（Long head of biceps）、 $F_{10}$ ：上腕二頭筋短頭（Short head of biceps）、 $F_{11}$ ：上腕三頭筋（Triceps）である。この中で起始領域が広範囲にわたる三角筋各線維、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋では、運動中にすべての筋線維が均等に力を伝達するとは考えにくい、このような筋を全外転角度にわたって固定された一本の直線ベクトルで表わすことは無理があり、解析結果に大きな誤差が生じると予想される。そこで、外転角度によって主に働く筋線維の起始点移動すると仮定し、以下のように直線筋ベクトルを決定した。筋の起始領域の最も停止点より遠い端を起始直線と設定し、停止点を頂点とし起始直線を底辺とする三角形に筋をモデル化した（Fig.2）。起始直線の長さに応じて三角筋各線維と棘上筋は3点、棘下筋と肩甲下筋は5点の起始点を起始直線上に均等に設定した。後述する最適化手法を用いて、起始点の中から各外転角度における至適起始点を選択し筋

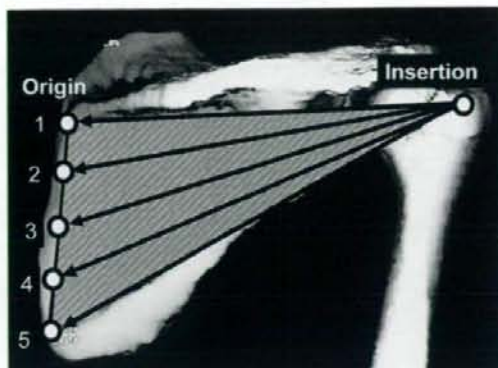


Figure 2 : 広範な起始を持つ筋モデル（例；棘下筋）  
 停止点を頂点とし起始直線を底辺とする三角形の筋モデル。起始直線上に5点の起始点を均等に設定し、外転角度ごとにその中から至適起始点を選択する。

ベクトル方向を決定した。

#### 4. 骨を貫く直線要素を持つ筋ベクトルの決定

上腕二頭筋長頭と三角筋中部線維においては、その走行が直線ではなく骨の表面に沿って湾曲するため、起始と停止を結んだ直線要素が上腕骨を貫くこととなり、モデリングに際しては考慮が必要である。上腕二頭筋長頭腱については、上腕骨近位の結節間溝の上端に接点をおき、停止から接点へ向かう直線を筋ベクトル方向と決定した。三角筋中部線維は外転角度が小さい場合は上腕骨頭に接して曲線形状となり、外転角度が大きくなるに従って骨から離れ直線形状となる。すなわち、前者では停止から起始へ向かう直線ベクトルは上腕骨を貫くこととなる。よって、筋が骨から離れる外転角度と、上腕骨大結節上の筋との接点を求めるために以下の補助実験を行った。

健常ボランティア10例（男性8例、女性2例、平均24.8歳（24～39歳））のMRIデータを用いた。MRIはSiemens社製0.2T Magnetom Openを用い、肩関節外転30°、60°、90°、120°、150°にて斜位冠状面T2強調画像を撮影した（GE法、TR；304.0ms、TE；25.9ms、flip angle；60deg.、FOV；220mm、matrix；192×256、slice thickness；5mm）。得られた画像よりソフトウェアAnalyze3.0を用いて三角筋中部線維の起始、停止を結ぶ直線と上腕骨頭が接する角度の上限を調べた。その結果、10例中8例において肩関節外転60°までは三角筋中部線維は上腕骨頭に接することがわかった（Fig.3-a, b）。よって、三角筋中部線維の筋ベクトルは肩関節外転60°までは停止と上腕骨頭上の接点を結ぶ直線、60°をこえると停止と起始を結ぶ直線上にあることとした。



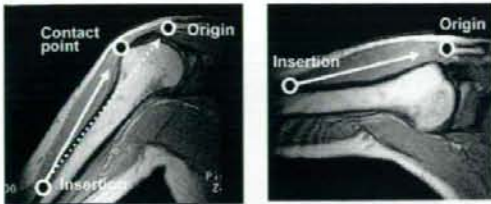


Figure 3 a, b: 三角筋中部線維の筋モデル  
 a: 外転60°までは停止から起始に向かう直線ベクトル(点線矢印)は骨を貫くため、筋ベクトルは停止から接点に向かう直線(実線矢印)を用いる。  
 b: 外転60°を超えると停止から起始に向かう直線ベクトルは骨から離れる。

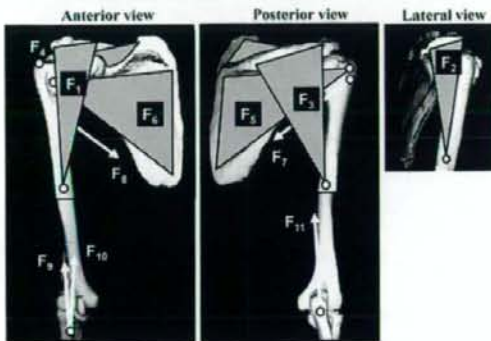


Figure 4: 筋骨格モデル  
 広範な起始を持つ筋は三角形状で表されている(F1-F6)。F1: 三角筋前部線維, F2: 三角筋中部線維, F3: 三角筋後部線維, F4: 棘上筋, F5: 棘下筋, F6: 肩甲下筋, F7: 小円筋, F8: 大円筋, F9: 上腕二頭筋長頭, F10: 上腕二頭筋短頭, F11: 上腕三頭筋長頭。

以上の過程より得られた筋骨格モデルをFig.4に示す。三角形で表わしたのが広範な起始領域を持つ筋である。

5. 肩関節外転運動時のつりあい方程式

肩関節運動を定式化するためにFig.5のごとく肩関節回旋中心Oを原点とする三次元剛体モデルを設定した。Wは上肢の自重,  $F_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 11$ )は各筋力, Rは関節反力である。肘関節は伸展位, 手関節は中間位で固定として上肢全体を一つの剛体とみなし, 外力は上肢の自重のみが上肢重心位置(中央点)にかかるものとした。上肢自重は体重の5.2%として計算した。関節における摩擦はないものと仮定した。本解析では, 靭帯や関節包など求める未知数は筋力 $F_{1-11}$ と関節反力 $R_x, R_y, R_z$ の計14個となる。 $u_i$ を各筋の単位方向ベクトル,  $w$ を各筋の重力ベクトル,  $r_i$ を各筋の筋力ベクトルの作用点位置ベクトル,  $r_w$ を上肢の重量ベクトルの作用点位置ベクトルとすると, 力および

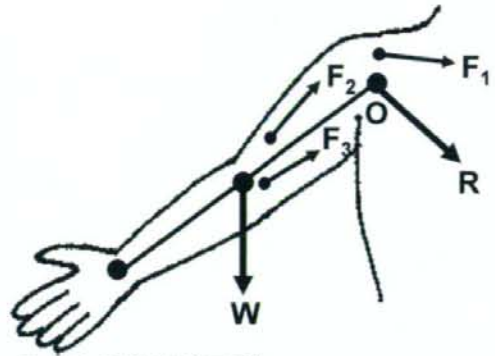


Figure 5: 三次元剛体モデル  
 $F_i$  ( $i = 1-11$ ):各筋力, R: 関節反力, W: 上肢の自重

モーメントのつりあい方程式は式(1)(2)で表わされる。

$$\sum_{i=1}^{11} F_i u_i + W u_w + R = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sum_{i=1}^{11} (r_i \times F_i u_i) + r_w \times W u_w = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

各筋には収縮力のみが生じるという生理学的特性を持つため, その筋力値は常に正の値とした。よって, 式(3)が成り立つ。

$$F_i \geq 0 (i = 1-11) \quad \dots\dots\dots(3)$$

肩関節運動には多数の筋が作用しているため, 条件式よりも未知数のほうが多くなる。そのためつりあい方程式だけでは解は得られず不静定構造となり, 最適化が必要となる。本研究では筋力解析における最適化手法として, 非線形計画問題に対して有効な方法の一つと考えられているSQP法を提案した<sup>19)</sup>。これまで著者らは, 最適化の目的関数として筋力の二乗和を用いて他関節運動の解析を行い, 良好な結果を得てきた<sup>18, 20, 21)</sup>。しかし, 肩関節周囲筋はその大きさに差があるため, 本解析では筋応力(筋力/生理学的筋断面積(Physiological cross sectional area; PCSA))の二乗和を最小にするという評価を用い, 筋の大きさによる目的関数への影響の補正を試みた。これを次式に示す。

$$f = \sum_{i=1}^{11} (F_i / PCSA_i)^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

各筋のPCSAは文献値<sup>19)</sup>を用いた。実際の計算では, 式(1)(2)を等式制約条件, 式(3)を不等式制約条件として用いた。解析は肩関節外転0°~150°の範囲で5°ごとの静解析を行った。

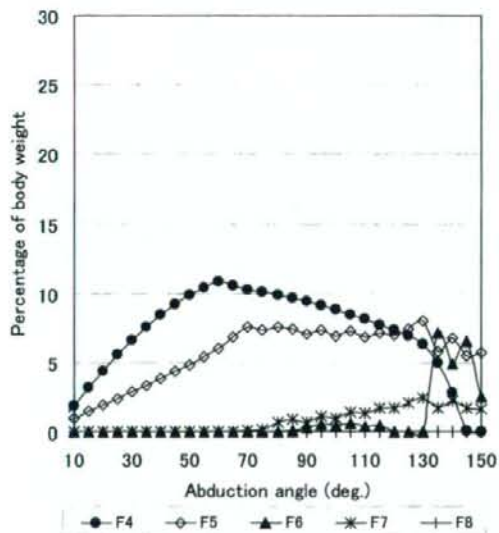
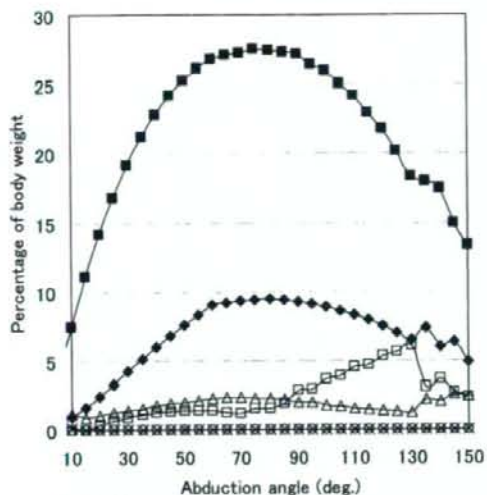


Figure 6-a, 6-b: 筋力解析結果

### 6. 肩関節外転運動時の筋電位測定

解析結果の妥当性を評価するために、健康ボランティア(23歳、男性)の筋電位測定を行った。測定には6チャンネルの筋電位測定装置ポリグラフ360SYSTEM(NECメディカルシステムズ社製)を用い、三角筋各線維、上腕二頭筋、上腕三頭筋は表面電極、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋、小円筋、大円筋は0.05mm径の白金針電極で測定した。電位の記録にはBiocorder(キッセイコムソフト社)、解析にはBIMUTAS II(キッセイコムソフト社)のソフトをそれぞれ使用した。被験者には外力を負荷しない状態で肩甲平面上で肩外

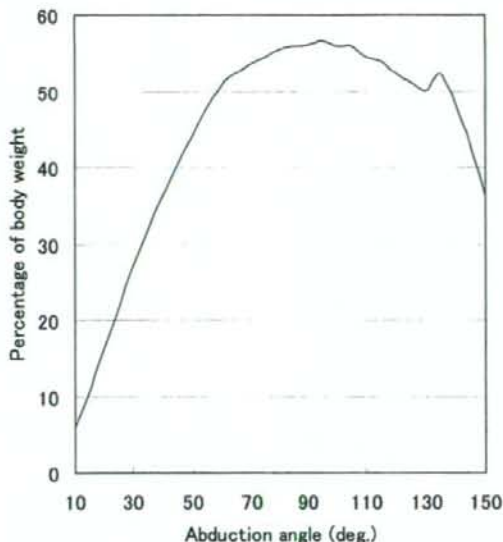


Figure 7: 関節反力解析結果

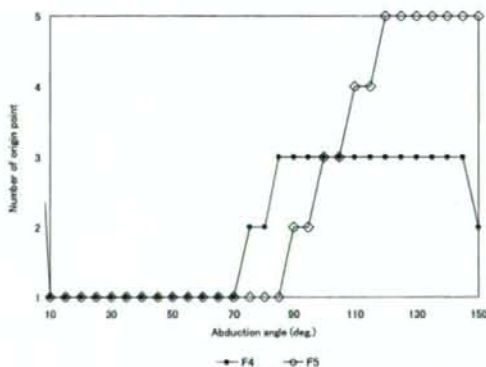


Figure 8: 外転角度にともなう至適起始点の変化棘上筋と棘下筋を例として示す。

転位を5秒間保持してもらい、その間の積分筋電位を算出した。測定は0°~150°まで10°ごとに行った。同一肢位での測定は1分間の休憩をはさんで3回行い、その平均値を採用した。筋解析結果と筋電位測定結果の統計学的検討には単回帰分析を用い、回帰関数はP値が0.05以下を有意とした。

### 結 果

各筋の解析結果をFig. 6に示す。グラフの横軸は肩関節外転角度、縦軸は筋力を体重に対するパーセンテージ(%BW)で表示した値である。三角筋中部線維(F2)が外転75°付近をピークとして最も大きな筋力値(27.5%BW)を示した。次いで棘上筋(F4)

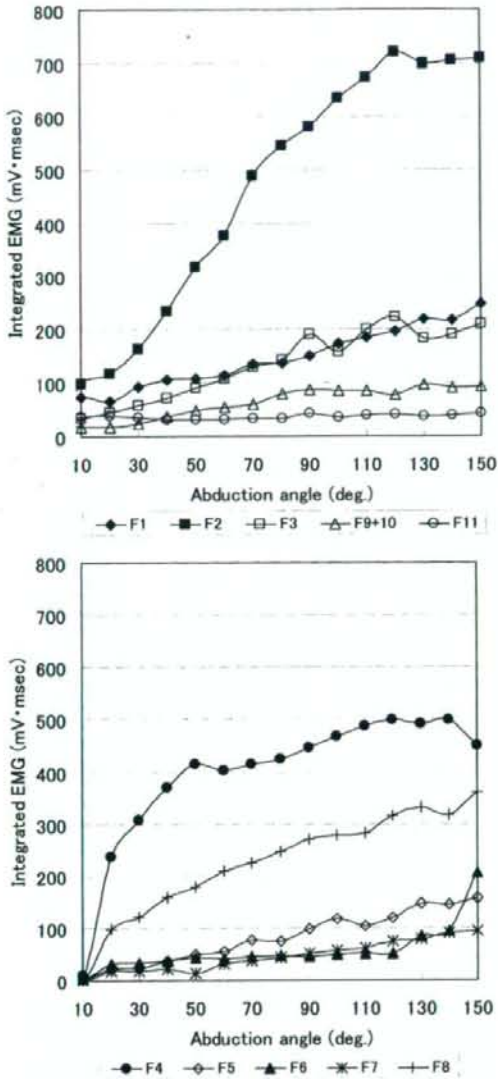


Figure 9-a, 9-b: 筋電位測定結果

(10.9%BW), 三角筋前部線維 (F1) (9.5%BW), 棘下筋 (F5) (8.0%BW) が大きな値を示した。これらの筋は外転運動の全期間を通して持続的に作用していた。これに対して、三角筋後部線維 (F3) と小円筋 (F7) は外転後期に筋力が増加しており、肩甲下筋 (F6) は外転終期にのみ作用していた。関節反力は外転95°で56.5%BWの最大値を認めた (Fig.7)。至適起始点を選択した筋 (F1-F6) の例として棘上筋 (F4) と棘下筋 (F5) の起始点の移動をFig.8に示す。外転角度に伴って起始点移動していることがわかる。

次にFig.9-a,bに筋電位測定結果を示す。三角筋中部線維は最大筋電位を示し、次いで棘上筋, 三角筋前部線維, 棘下筋であった。肩甲下筋は解析結果と同様に外転後期にのみ筋電位の増加を認めた。解析結果と筋電位測定結果の回帰関数をTable 1に示す。解析筋力値が0であった上腕三頭筋, 大円筋を除く全ての筋において、有意な相関が認められた。

## 考 察

筋力数値解析において筋のモデリングには直線ベクトル, 中心軌跡を表す直線, 骨輪郭に沿った曲線などが用いられてきた<sup>1,6,7,9,13,20,21</sup>。しかし, 広範な起始を持つ筋では筋の作用方向が関節肢位によって大きく変化するため, 固定された1本の直線ベクトルで表すことは適切ではないと考えられる。そのため, Hogfors<sup>6</sup>は広範な起始を持つ筋を複数の作用線に分けて表すことを提案した。Karlsson<sup>9</sup>は分割されたベクトルを用いて肩関節筋力解析を行い, 解析結果の妥当性には筋によってばらつきがあったと報告している。Van der Helm<sup>20</sup>は広範な筋の筋力を表すために適切な筋ベクトルの本数を選択することが重要であると報告しているが, その決定方法については未だ議論のあるところである。著者らは, 広範な起始を持つ筋のモデリングにおいて, あらかじめ固定された起始点を設定するのではなく, 関節肢位によって最適な起始点を選択するという新しい手法を提案した。本研究で広範な筋の至適起始点を外転角度に伴って変化していたという結果は, 全運動期間中同一の筋ベクトルを用いることは適切ではないことを示唆していると考えられた。今後は, 起始だけではなく停止も広範囲にわたる筋 (前鋸筋など) については, さらに筋の分割などの方法も取り入れることを考慮する必要がある。また, 今回のモデルでは至適起始点はあらかじめ起始線上に設定した複数の点から選択したが, 将来的には任意の三次元平面から至適起始点を選択できるモデルが望ましいと考えている。

上腕骨頭の上を取り巻くように走る三角筋中部線維の走行は, これまでの報告<sup>1,6,9</sup>では, 外転角度に関わらず一様な走行として表されることが多かった。しかし, 実際には外転初期では上腕骨に沿って大きく湾曲し, その後上腕骨から離れて直線状の形態をとる。つまりその走行ベクトルは外転前期では停止位置と上腕骨頭上の接点を結ぶ直線で表され, 上腕骨に対する角度は一定である。一方外転後期では停止位置と肩峰上の起始を結ぶ直線となり, 外転に伴いベクトルの方向

Table 1. 解析筋力値と積分筋電位との回帰関数

Muscle	Regression function	P value	R
F1 ; Anterior fiber of deltoid	$y=57.94 \times +73.49$	0.037	0.523
F2 ; Middle fiber of deltoid	$y=84.79 \times +117.26$	0.047	0.503
F3 ; Posterior fiber of deltoid	$y=159.38 \times +58.57$	0.000	0.848
F4 ; Supraspinatus	$y=111.72 \times +231.86$	0.037	0.525
F5 ; Infraspinatus	$y=85.99 \times -9.96$	0.000	0.805
F6 ; Subscapularis	$y=110.60 \times +44.22$	0.010	0.624
F7 ; Teres minor	$y=158.65 \times +21.52$	0.000	0.930
F8 ; Teres major	unanalyzable		
F9 + F10 ; Biceps	$y=142.58 \times +14.02$	0.048	0.500
F11 ; Triceps	unanalyzable		

と上腕骨に対する角度は変化する。本研究では、正常肩のMRI解析データを用いて、外転角度に伴う三角筋ベクトルの変化を数値解析に導入することができた。

これまで解析結果の妥当性を評価するためには主に筋電位測定が用いられてきた<sup>1,30</sup>が、筋電位の振幅は筋の長さ依存するため<sup>21</sup>異なる筋の電位を直接比較することはできず、また最大上角度近くでは高電位となる傾向があるとされている。本研究でも、筋力解析では外転に伴って増加した後に再び減少するパターンを示したのに対して、筋電位は最後まで漸増するパターンを示す筋が存在した。しかしながら、現在のところ筋電位以外に生体データを用いて解析筋力値の妥当性を評価する方法は確立されておらず、少なくとも各筋ごとの活動パターンを筋電位と比較することは有用であると考えている。

本解析では、外転95°で体重の56.5%の最大関節反力が生じていた。過去の研究<sup>9,11,15</sup>では外転運動時の最大関節反力は外転90°前後で体重の44~92%と報告されており、実験方法や条件が異なる研究との比較ではあるが同等の結果が得られていた。本研究の限界としては、肩甲骨から起始する筋のみをモデル化しているため、今後様々な肩の運動を解析するためには胸郭も含めた筋骨格系のモデルが必要であること、力とモーメントのつりあいのみを考えた静解析であるため筋の剛性や疲労については考慮されていないこと、肩甲上腕関節を安定化している関節包や靭帯を含めた軟部組織をモデル化していないことなどがあげられる。

本研究の筋電位測定結果からもわかるように、肩関節外転運動においては三角筋中部線維、棘上筋が主動作筋であるが、他にも多数の筋が協調運動を行っている。本解析では筋のモデリングに際して新しい手法を

取り入れることにより、11筋の協調運動を同時に解析することが可能となり、生体内における実際の筋活動をよく表している結果が得られた。本解析モデルは、CTから得られる解剖学的データを導入することにより個々の症例の肩関節筋力解析を行うことが可能である。今後は筋・腱断裂や麻痺による筋力バランスの変化、筋・腱移行術後の筋力変化などのシミュレーションに臨床応用ができると考えている。

## 結 論

1. 三次元CTおよびMRIデータを用いて、肩甲上腕関節の外転運動における筋力数値解析のための三次元筋骨格形状モデルを作成した。
2. 広範な起始を持つ筋のモデル化において、関節肢位の変化に伴い最適な起始点を選択する新しい手法を提案した。
3. 得られた三次元モデルから最適化手法を用いて筋力解析を行い、筋電位測定結果と相関する良好な結果が得られた。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、ご指導ご協力を賜りました北海道大学大学院医学研究科整形外科学分野の諸先生方、ならびに北海道大学工学研究科バイオメカニカルデザイン研究室大学院生の方々に深謝いたします。

## 文 献

- 1) Crowninshield RD, Brand R. A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion. J Biomech 1981; 11: 793-801.
- 2) Crowninshield, R. D., Use of optimization techniques

- to predict muscle forces, *Trans. ASME, Biomech. Eng.*, 100 (1978), 88-92.
- 3) Fujisawa H, Suenaga N, Minami A. Electromyographic study during isometric exercise of the shoulder in head-out water immersion. *J Shoulder Elbow Surg* 1998; 7: 491-4.
  - 4) 長谷和徳, 山崎信寿, 汎用3次元筋骨格モデルの開発, 機論, 61-591, C (1995), 4417-22.
  - 5) Heckathorne CW, Childress DS. Relationships of the surface electromyogram to the force, length, velocity, and contraction rate of the cineplastic human biceps. *Am J Phys Med* 1981; 60: 1-19.
  - 6) Hogfors C, Sigholm G, Herberts P. Biomechanical model of the human shoulder - I. Elements. *J Biomech* 1987; 20: 157-66.
  - 7) Hogfors C, Karlsson D, Peterson B. Structure and internal consistency of a shoulder model. *J Biomech* 1995; 28: 767-77.
  - 8) Inman VT, Saunders JB deCM, Abbott LC. Observations on the function of the shoulder joint. *J Bone Joint Surg* 1944; XXVI: 1-30.
  - 9) Karlsson D, Peterson B. Towards a model for force predictions in the human shoulder. *J Biomech* 1992; 25: 189-99.
  - 10) Kronberg M, Nemeth G, Brostrom LA. Muscle activity and coordination in the normal shoulder. An electromyographic study. *Clin Orthop* 1990; 257: 76-85.
  - 11) McClure PW, Michener LA, Sennett BJ, Karduna AR. Direct 3-dimensional measurement of scapular kinematics during dynamic movements in vivo. *J Shoulder Elbow Surg* 2001; 10: 269-77.
  - 12) Meek SG, Wood JE, Jacobsen SC. Model-based, multi-muscle EMG control of upper-extremity prostheses. *Multiple Muscle Systems*. Springer-Verlag; 1990. p.360-76.
  - 13) Niemi J, Nieminen H, Takala EP, Viikari-Juntura E. A static shoulder model based on a time-dependent criterion for load sharing between synergistic muscles. *J Biomech* 1996; 29: 451-60.
  - 14) Parsons IM, Apreleva M, Fu FH, Woo SL. The effect of rotator cuff tears on reaction forces at the glenohumeral joint. *J Orthop Research* 2002; 20: 439-46.
  - 15) Poppen NK, Walker PS. Forces at the glenohumeral joint in abduction. *Clin Orthop* 1978; 135: 165-70.
  - 16) Sigholm G, Herberts P, Almstrom C, Kadefors R. Electromyographic analysis of shoulder muscle load. *J Orthop Research* 1984; 1: 379-86.
  - 17) Suenaga N, Minami A, Fujisawa H. Electromyographic analysis of internal rotational motion of the shoulder in various arm positions. *J Shoulder Elbow Surg* 2003; 12: 501-5.
  - 18) 但野茂, 吉成哲, 木村寛仁, 鶴飼隆好, 肘関節屈曲運動時に作用する筋力の数値解析, 機論, 62-604, A (1996), 2846-2852.
  - 19) 但野茂, 深田和岐, 示指運動時に作用する筋力と関節反力の数値解析, 機論, 67-653, A (2001), 168-174.
  - 20) Van Der Helm FCT, Veenbaas R. Modelling the mechanical effect of muscles with large attachment sites: application to the shoulder mechanism. *J Biomech* 1991; 24: 1151-63.
  - 21) Van Der Helm FCT. Analysis of the kinematic and dynamic behavior of the shoulder mechanism. *J Biomech* 1994; 27: 527-50.
  - 22) Wood, J. E., Meek, S. G., and Jacobsen, S. C., Quantitation of human shoulder anatomy for prosthetic arm control-I. Surface modelling, *J. Biomech.*, 22 (1989), 273-292.
  - 23) 吉成哲, 但野茂, 鶴飼隆好, 前腕関節回旋運動時に作用する筋力の数値解析, 機論, 63-607, C (1997), 700-706.
  - 24) 吉成哲, 但野茂, 鶴飼隆好, 肩関節屈曲運動時に作用する筋力の数値解析, 64-621, A (1998), 1422-1428.

## 肩外側後面の感覚障害は肩甲上神経麻痺の所見として有用か?

北海道大学 人工関節・再生医学講座

末永直樹

北海道大学 整形外科

大泉尚美・三浪明男

琉球大学 整形外科

山口浩

### Sensory Disaturbance of Posterior Aspect of the Shoulder - One of the Indicators of Suprascapular Nerve Palsy with Rotator Cuff Tear -

by

SUENAGA Naoki

Department of Joint Replacement and Tissue Engineering, Hokkaido University School of Medicine

OIZUMI Naomi, MIMAMI Akio

Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine

YAMAGUCHI Hiroshi

Department of Orthopaedic Surgery, Ryukyu University School of Medicine

Several causes were reported on suprascapular nerve(SSN) palsy. To diagnose SSN palsy, usually these findings were useful as follows: atrophy of the supraspinatus and infraspinatus muscle, muscle weakness of ABD & ER, no or small rotator cuff tear, and abnormal findings on EMG. However, it was difficult to diagnose SSN palsy in patients with massive rotator cuff tear. The objectives of this study were to investigate the effectiveness of a sensory disturbance on the posterior shoulder in diagnosing SSN palsy in patients with rotator cuff tear. 16 shoulders in 16 cases were involved in this study. They had sensory disturbance of the posterior aspect of the shoulder and received arthroscopic release of the suprascapular ligament. The average age was 65 years old. 10 males and 6 females were included. The size of rotator cuff tear showed incomplete tear in 3 shoulders, small tear in three, medium tear in 2, large tear in 1 and massive tear in 7. Preoperative sensory disturbance, the results of EMG analysis, occupation ratio of supraspinatus/infraspinatus muscle in MRI, and outcomes of sensory disturbance were evaluated. Sensory disturbance in the posterior aspect of the shoulder was observed in all cases. In EMG examinations, there was no difference compared with the normal side except 2 shoulders. The occupation ratio was averaged 46.7% in supraspinatus muscle and 68.5% in infraspinatus muscle. Sensory disturbance disappeared in 14 shoulders within approximately 2 weeks. The remaining 2 shoulders showed improvement of range and VAS scale. We performed arthroscopic release of SSN in 16 shoulders with the sensory disturbance at posterior aspect of the shoulder. All cases were improved after the surgery. The sensory disturbance at posterior aspect of the shoulder is useful in diagnosis of SSN palsy, especially in a case with massive rotator cuff tear.

Key words : 腱板断裂 (Rotator cuff tear), 肩甲上神経麻痺 (Suprascapular nerve palsy)  
感覚障害 (Sensory disturbance)

## はじめに

肩甲上神経麻痺はまれな疾患ではなく、腱板断裂に伴うことが注目されている<sup>1)</sup>。しかし、腱板断裂例では棘上筋・棘下筋の筋萎縮や筋力低下を伴うことが多く、電気生理学的検査で異常を証明できない場合、その診断は非常に困難で難渋することが多い。従来、肩甲上神経は感覚枝をもたず攣性神経障害がある場合においてもその感覚障害はないとされてきたものの、近年、肩甲上神経麻痺例において感覚障害が生じているとの報告<sup>2,3)</sup>が散見されるようになり、腱板断裂手術例で詳細に感覚障害の有無を検討したところ肩後面に感覚障害を有する症例が比較的多いことが判明した。

本研究の目的は腱板断裂に伴う肩後面に感覚障害を有する症例に対して行った鏡視下上肩甲横韧带切離術の効果を調査し、その有用性、また感覚障害の範囲や特徴的術前所見があるかを検討することである。

## 対象と方法

対象は2006年10月より腱板断裂症例で1週間以上間隔をあけ、2回以上、2人以上で触覚・痛覚の感覚検査を施行し、肩後面に明らかに異常が認められ、腱板断裂に対する手術と同時に鏡視下上肩甲横韧带切離術を行った16例16肩を対象とした。年齢は平均64.5歳(47歳～75歳)、性別は男10例、女6例であった。5例にC4/5頸椎症が存在した。腱板断裂の程度は不全断裂3肩、1cm以内の小断裂3肩、1～3cmの中断裂2肩、3～5cmの大断裂1肩、および5cm以上、2腱以上の広範囲断裂7肩であった。棘上筋および棘下筋の筋萎縮を11肩に認めた。合併手術として不全断裂の3肩中2肩はアブリドマンのみとし、残りの14肩には腱板縫合術を行った。また2肩に人工骨頭置換術、1肩に人工関

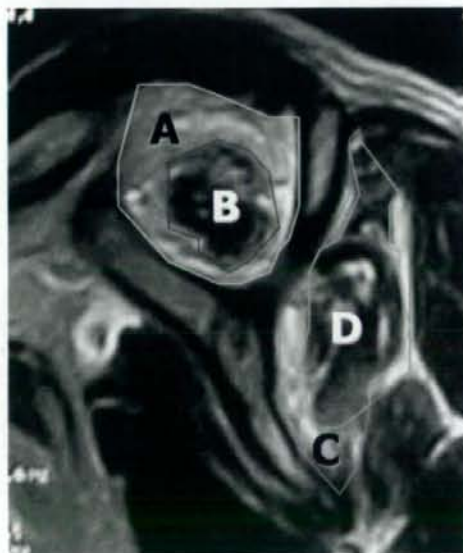


図1 棘上筋・棘下筋の Occupation ratio. MRI の T1 強調画像の The Y-shaped view から画像解析ソフト Image J (National Institutes of Health, USA) を用いて棘上筋は B と A の比を、棘下筋は D と C の比を Occupation ratio とした。

節置換術を併用した。

これらの症例に対し、感覚検査は、まず用手的に両肩周辺を同時に触ることで明らかな触覚の低下を訴えた場合に、痛覚低下領域から痛く感じる部位へ放射状にルーレットを用いて、その範囲を記録した。電気生理学的検査として Erb 点からの棘上筋、棘下筋までの運動神経終末潜時を健側と比較した。さらに、術前の棘上筋・棘下筋の筋萎縮を定量的に計測するために、MRI における occupation ratio を計測した。MRI における棘上筋・棘下筋の occupation ratio は Schaefer ら<sup>4)</sup>の報告に準じ、MRI の T1 強調画像の The Y-shaped view から画像解析ソフト Image J (National Institutes of Health, USA) を用いて棘上筋は B (僧帽筋と肩甲骨の Y shape 像で形成された面積) と A (棘上筋と思われる low intensity の面積) の比を、棘下筋は D (肩甲骨、小円筋および三角筋後部線維の間の面積) と C (棘下筋と思われる low intensity の面積) の比を計算し 100 倍し % 表示とした (図 1)。さらに感覚障害の経過について術後 2 週で創を露出可能になってから経時的に調査した。

鏡視下上肩甲横韧带切離術は前外側または後外側ポータルより鏡視し、肩甲骨上角と肩峰前外側角を結ぶ線の中点 (以下、Suprascapular Nerve ポータル: SN ポータル) をレトラクターポータルもしくはワーキングポータルとし、さらに鎖骨と鳥口突起でできた soft spot (以下、Coracoid Clavicle ポータル: CC ポータル) をワーキングポータルとして上肩甲横韧带を切離、または、その周囲の軟部組織の切除に使用した (図 2)。まず SN ポータルから尾側に向け鈍棒を挿入し、棘上窩に接触後やや前方に向け鈍棒の先端を進めながら肩甲切痕を探索した。その鈍棒を目指して直径 4 mm の硬性内視鏡を挿入し、上肩甲横韧带直上の上肩甲動脈をメルクマールとして見つけた後、CC ポータルよりパンチ・シェーバーなどにより上肩甲動脈周囲の脂肪組織を切除した。上肩甲横韧带を鏡視しながら切除し、sling 状態にある肩甲上神経周囲を剥離し十分に浮き上がるようになることを確認して終了した (図 3)。

経過観察期間は 2 か月～1 年 (平均 8.4 か月) であった。

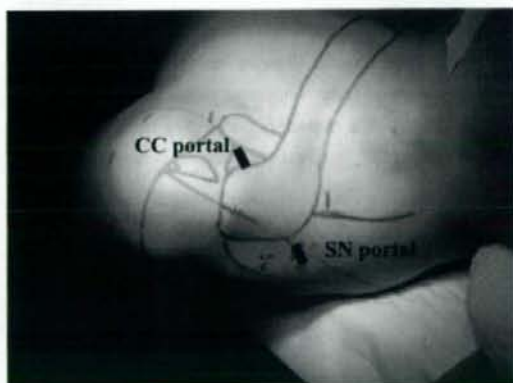


図2 鏡視下上肩甲横韧带切離術のポータル。鏡視ポータル (SN ポータル): 前外側または後外側ポータル、レトラクターポータルもしくはワーキングポータル (CC ポータル): 肩甲骨上角と肩峰前外側角を結ぶ線の的中点および鎖骨と鳥口突起でできた Soft spot

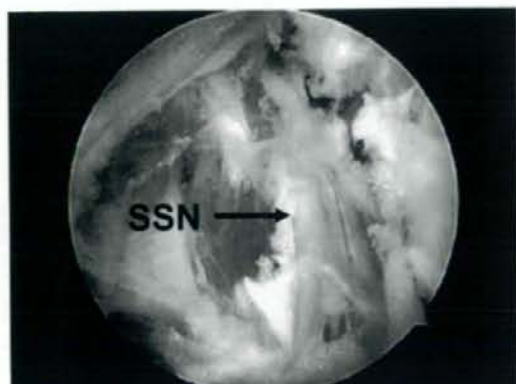


図3 肩甲上神経の鏡視所見.十分に浮き上がるまで剥離された肩甲上神経

### 結 果

手術前の感覚障害は15例で感覚低下があり,1肩は感覚過敏の状態であった.その範囲は図4の如く.肩峰後角部を中心に肩外



図4 感覚障害の範囲8例の感覚障害の範囲を示す.数値は健側を100%とした患側のVisual analog scaleによる感覚低下の程度を示す.

側から後面にかけて広がっていた.健側を100%とし,痛覚のvisual analog scaleを調査すると20~120% (平均65.3%)であった.

肩甲上神経の終末潜時の計測は10例に行い,2例で健・患側差が認められた.終末潜時の差がなかった症例での伝導速度の波形にもあきらかな差はなかった.棘上筋・棘下筋の萎縮は全例に認められ,occupation ratioは棘上筋で27~83% (平均46.7%)で75%以上が2肩,50-75%が4肩,25-50%が10肩であった.棘下筋のoccupation ratioは36~98% (平均68.5%)で75%以上が4肩,50-75%が6肩,25-50%以下が6肩であった.

感覚障害の経過は14例で2週以内に消失し,最終調査時も感覚障害はなかった.残りの2例は感覚障害範囲の縮小が認められた.

### 考 察

近年,従来純粋な運動神経のみと考えられていた肩甲上神経にも皮膚の感覚支配があるとの報告<sup>2,3)</sup>が散見される.また池上<sup>4)</sup>らはガングリオンを伴う肩甲上神経麻痺6例中5例に詳細な感覚検査をしたところ,腋窩部後方から肩甲骨外側部にかけ感覚障害が存在したことを報告している.本症例の感覚障害の範囲も肩峰後角を中心とした棘上窩の中央付近から肩後面にかけてであり,鏡視下の上肩甲横韧带切離術で感覚が改善したことは肩甲切痕部で肩甲上神経麻痺が生じると感覚障害を来たす可能性があることをはじめて証明したこととなる.

肩甲上神経麻痺の原因には肩甲切痕(上肩甲横韧带)での絞扼,ガングリオンなどの占拠性病変,棘窩切痕での絞扼,圧迫などがあり,その診断は棘上筋・棘下筋の萎縮,外転・外旋筋力の低下,腱板断裂がないこと,腱板断裂が小さいにもかかわらずMRI上,棘上筋・棘下筋の萎縮が高度であること,および筋電図での異常所見などにより行われる.しかし,腱板断裂例ではしばしば棘上筋・棘下筋の萎縮,外転・外旋筋力の低下があり,また棘上筋・棘下筋の筋電図検査は困難なことが多い.一方,広範囲腱板断裂例では棘上筋または棘下筋が退縮し肩甲上神経の走行が変化したり,修復時に過度の筋前進を行うことで肩甲上神経の緊張が増加するため肩甲上神経麻痺が生じることが報告<sup>5)</sup>されている.本研究において肩後面の感覚障害が鏡視下の上肩甲横韧带切離術で全例改善したことは,肩甲切痕部での肩甲上神経麻痺による感覚障害であったことを示している.つまり肩甲上神経麻痺と鑑別しにくい症状を呈している腱板断裂例における肩甲上神経麻痺の合併を示唆する所見として,肩峰後角を中心とした棘上窩の中央付近から肩後面にかけての感覚障害は非常に有用と考えられた.また変形性頸椎症合併例や電気生理学的検査正常例,棘上筋・棘下筋萎縮軽度例でも鏡視下上肩甲横韧带切離により感覚障害は改善しており,感覚障害は軽度の肩甲上神経麻痺の診断に有効な可能性があると思われた.

鏡視下上肩甲横韧带切離術の報告は少なく,その方法も若干異なる.ワーキングポータルとしてBhatia<sup>6)</sup>は肩峰内側縁から2cm内側を,Laffosse<sup>7)</sup>は肩峰外側から7cm内側を,われわれはSNポータルとして肩甲骨上角と肩峰前外側角を結ぶ線の中点を使用してきた.関節鏡と異なり内視鏡では関節腔がなく,軟部組織の中から上肩甲動脈をいかに的確に見つけるかが,短時間で手術を施行するために非常に重要であり,どのポータルが有用か



今後の検討が必要と考えている。

本研究の問題点として腱板断裂に対する処置も加えており、腱板断裂を修復することにより肩甲上神経麻痺が改善した可能性もある。今後、肩後面の感覚障害を持つ症例において腱板断裂のみを処置した場合、または上肩甲横靭帯の切離のみ行った例における感覚障害の変化についての検討が必要かもしれない。また解剖学的研究では感覚枝を含め、肩甲上神経の皮枝が全例にあるのか未だ不明であり、感覚障害がなければ肩甲上神経麻痺を否定できる根拠とはならず、そのような場合には他の診断に有用な所見が必要となる。今後の研究として特徴的臨床所見はあるのか、詳細な筋電図学的検査で異常を判別可能か、MRIにおける筋萎縮の形態があるか、神経性筋萎縮では高輝度になりやすいと報告されているMRIのSTIR画像は有用かの検討が必要と考えている。

### ま と め

16例16肩の肩後面に感覚障害を認める症例に対し鏡視下上肩甲横靭帯切離術を行い、全例に感覚障害の改善を認めた。術前の検査では感覚障害以外に神経障害の特徴的所見を示さないことも多く、腱板断裂例での肩後面の感覚障害は肩甲上神経麻痺を示唆する所見として有用な可能性がある。

### 文 献

- 1) Ajimani ML: The cutaneous branch of the human suprascapular nerve. *J Anat*, 1994; 185: 439-442.
- 2) Bhatia DN, et al: Arthroscopic suprascapular nerve decompression at the suprascapular notch. *Arthroscopy*, 2006; 22: 1009-1013.
- 3) Harbaugh KS, et al: Shoulder numbness in a patient with suprascapular nerve entrapment syndrome: cutaneous branch of the suprascapular nerve: case report. *Neurosurgery*, 2000; 47: 1452-1455.
- 4) Horiguchi M: The cutaneous branch of some human suprascapular nerve. *J Anat*, 1980; 130:191-195.
- 5) 池上博泰ほか: 肩甲上神経麻痺に対する感覚検査。肩関節, 2006; 31: 429-432.
- 6) Lafosse L, et al: Arthroscopic release of suprascapular nerve entrapment at the suprascapular notch: technique and preliminary results. *Arthroscopy*, 2007; 23: 34-42.
- 7) Mallon WJ, et al: The association of suprascapular neuropathy with massive rotator cuff tears: a preliminary report. *J Shoulder Elbow Surg*, 2006; 15: 395-398.
- 8) Schaefer O, et al: Magnetic resonance imaging for supraspinatus muscle atrophy after cuff repair. *Clin Orthop Relat Res*, 2002; 403: 93-99.

## 北海道における人工関節置換術の現状と課題

## ハイブリッド型人工股関節の開発

伊藤 浩<sup>1)</sup>, 松野 丈夫<sup>1)</sup>, 谷野 弘昌<sup>1)</sup>, 山中 康裕<sup>1)</sup>, 佐藤 達也<sup>1)</sup>, 大水 信幸<sup>1)</sup>,  
中村 聡喜<sup>1)</sup>, 三浪 明男<sup>2)</sup>, 西村 生哉<sup>3)</sup>, 比嘉 昌<sup>4)</sup>

- 1) 旭川医科大学整形外科
- 2) 北海道大学大学院医学研究科整形外科
- 3) 北海道大学大学院工学研究科
- 4) 兵庫県立大学工学部大学院工学研究科

## 要 旨

日本人の脱臼性および亜脱臼性股関節症患者73関節に対して大腿骨全長5mm間隔でCT撮影を施行し、パーソナルコンピューター上にて皮質骨の外形、内形の輪郭を抽出した。3次元CADであるPro ENGINEER (Parametric Technology)にて大腿骨の各種計測を行った。症例の中には大腿骨頸部前捻が強く、骨髓腔がかなり狭い例が含まれており、ステムを細くストレートにし、オフセットを確保した製品が必要であることが明らかになった。3次元有限要素法によりデザインの妥当性を検討し、ステムサイズ(1~7号)を決定した。この製品はハイブリッド型THA 4-U Hip Systemとして、ナカシマメディカルより販売されている。当科および関連病院にて、約550関節の初回THA手術が終了しているが、ほぼテンプレートをを用いた術前計画通り手術が行われ、短期成績は良好である。

## はじめに

近年、人工股関節置換術 (total hip arthroplasty: THA) 生存率が飛躍的に向上した主な理由として、セメント使用THAにおけるセメンティング技術の改良、セメントレス非使用THAにおける適切な表面ポラス加工の開発、摺動面の改良による摩耗粉発生の減少が挙げられる。インプラントの材料および材質は

重要であるが、インプラントの形状も患者の体型に合っていることが望ましく、これらがTHAの耐用年数に影響する。

日本では先天股脱臼、亜脱臼、臼蓋形成不全によるいわゆる脱臼性および亜脱臼性股関節症が最も多く、全股関節症の約80%を占めている。日本人の脱臼性および亜脱臼性股関節症患者の大腿骨頸部は、外反位で前捻が強く、大腿骨骨髓腔が狭い傾向があるといわれており、原因疾患を持たない一次性股関節症が多く体格が大きい欧米人の骨格形態とは異なっている。単純X線像とステムのテンプレートをを用いたTHA術前計画において、大腿骨骨髓腔が狭く大腿骨近位がストレートであるため、外国製品の通常サイズのステムでは適合しないことがある。すなわち、術前計画においてステムのカラー下オフセットが大きすぎ、ステムが太すぎて、挿入困難であることがしばしば予想される(図1)。著者らは、日本人の脱臼性および亜脱臼性股関節症患者に対してCT撮影を行い、3次元的に骨格形態を計測して、そのデータを基に日本人の体型に適合したインプラントを設計開発し、改良を重ねてきた<sup>1)~3)</sup>。現在までの開発状況の概要を簡単に報告する。

## CT撮影および計測

旭川医科大学病院ならびに北海道大学病院を受診し

## Development of hybrid total hip arthroplasty

Hiroshi ITO<sup>1)</sup>, Takeo MATSUNO<sup>1)</sup>, Hiromasa TANINO<sup>1)</sup>, Yasuhiro YAMANAKA<sup>1)</sup>, Tatsuya SATO<sup>1)</sup>, Nobuyuki OOMIZU<sup>1)</sup>, Toshiki NAKANURA<sup>1)</sup>, Akio MINAMI<sup>2)</sup>, Ikuya NISHIMURA<sup>2)</sup>, Masaru HIGA<sup>1)</sup>

- 1) Department of Orthopaedic Surgery, Asahikawa Medical College
- 2) Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University Graduate School of Medicine
- 3) Graduate School of Engineering, Hokkaido University
- 4) Graduate School of Engineering, University of Hyogo

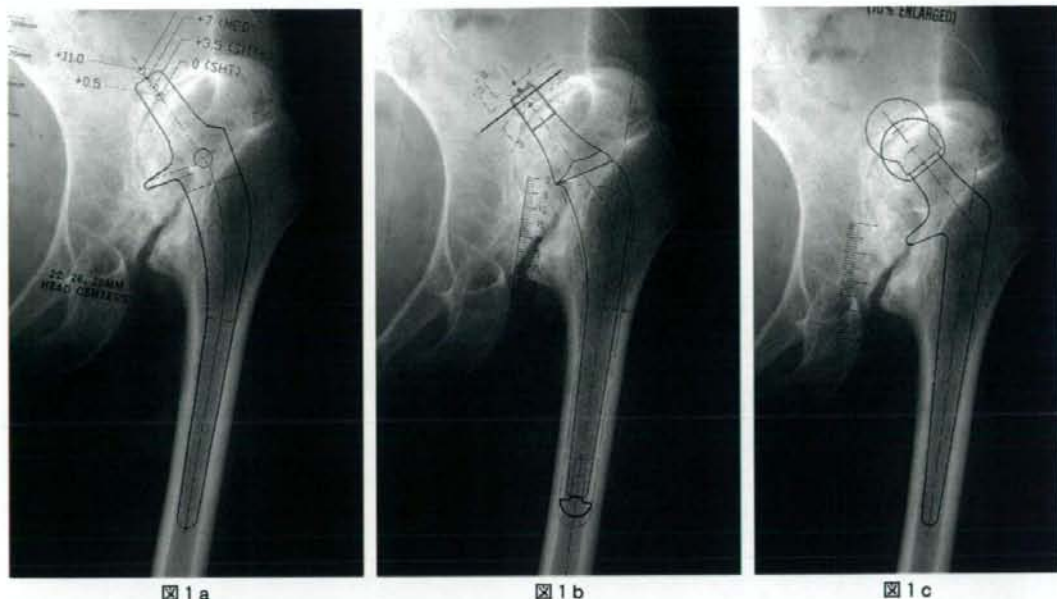


図1 63才、女性、左脱臼性股関節症。術前のテンプレティングでは、Harris precoat plusのsmall stem (図1 a), Elite plusのNo. 1stem (図1 b) では、大腿骨髄腔が狭すぎてステム近位部が大腿骨近位内側部と適合せず、挿入が困難であることが予想される。形状がストレートな細いCDH precoat stem (ジンマー社) を用いても、セメントマントルを考慮すると、ステムが太すぎて挿入が困難であることが危惧される (図1 c)。



図2 15才、女性、右大腿骨全長を5mm間隔でCT撮影した。全画像からの抜粋で、左上が近位、右下が遠位である。大腿骨頸部の前捻が強く、股関節は内旋位をとっている。頸部軸と大腿骨遠位頸部から前捻角を計測すると、87.2度と強い前捻を示していた。

た、脱臼性および亜脱臼性股関節症患者73関節に対して大腿骨全長5mm間隔でCT撮影を施行し(図2)、CTデータをDICOMフォーマットで保存した。このデータをパーソナルコンピュータ上にて、画像解析ソフトであるMed Vision (IMNET/Evergreen Technology) を利用し、皮質骨の外形、内形の輪郭を抽出した。画像解析ソフトを経て、3次元CADであるPro ENGINEER (Parametric Technology) にて大腿骨形態の各種

計測を行った。計測項目は、

- (1) 内外・前後長 小転子近位20mm, 小転子部, 小転子遠位20mm, 缺部の、各4つの髓腔断面における、内外・前後長の計測
- (2) 缺部位置 小転子頂部から缺部までの距離の計測
- (3) 各断面における最大長さ 各4つの髓腔断面における、最も長い部位の距離の計測
- (4) 捻れ角度 各4つの髓腔断面における、最大長の直線が、内外側方向の直線に対してなす角度の計測

などとした。

### 計測結果

表1に主要な計測結果を示す。前捻角、缺部位置、前後幅とも大きなバラツキが認められた。脱臼性・亜脱臼性股関節症患者では、大腿骨頸部の前捻が強く、骨髄腔が狭い症例があるため、ステムを細くストレートにし、オフセットを確保した製品が必要であることが明らかになった。

### 3次元有限要素法による検討

ステム軸から骨頭中心までの距離であるオフセット

表1 73関節の計測結果

	平均	最大値	最小値	標準偏差
前捻角 (degree)	39.8	87.2	5.6	15.4
峡部位置 (mm)	112.7	165.0	71.1	17.3
前後幅 (mm)	12.3	19.0	5.0	2.3



図3 aコントロール bカラー下断面中心を、外側に5mm水平移動したCal 5 cカラー下断面中心を、外側に10mm水平移動したCal10

を確保しないと、脱臼しやすいなど生体力学的に不利な条件になる。オフセットを確保した場合、ステムを細くストレートにすると、結果としてステム頸部が長いステム形状となる。ステムをストレートにしてかつオフセットを確保したステムをデザインする場合、生体力学的にセメント内と界面に強い応力集中を生じない範囲のデザインである必要がある。そこで3次元有限要素法を用い、ステムのデザインと応力との関係を解析した。Harris precoat medium stemをコントロールとし、オフセット、骨頭中心、ネック角を一定にして、カラー下断面中心を、外側にそれぞれ5mm、10mm水平移動したCal 5、Cal 10をモデルとして作製し、ステム近位部を徐々にストレートな形状に近づけた。(図3)。ステム-セメント界面はbond (表面Ra=2.0 $\mu$ m程度)とdebond (表面smooth)の2つのパターンを想定した。debondの摩擦係数は0.3とし、荷重はsingle stance phaseを想定した。荷重条件として、体重70kg相当の荷重を骨頭中心にかけた。また過去の報告を参考に、大転子に外転筋力を考慮した。骨の弾性率

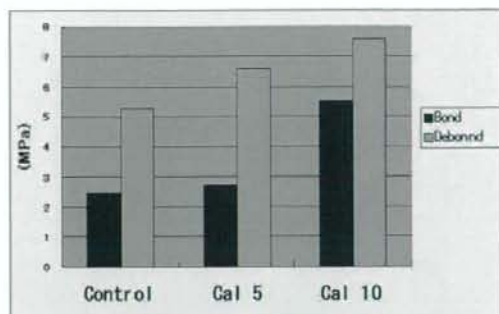


図4 セメントの最大主応力の最大値



図5 最大主応力の分布

はCT値より求め、要素毎に設定した。大腿骨遠位端部を拘束した。

セメントの引っ張り応力を示す最大主応力の最大値は、どのタイプでもbondよりdebondが高い傾向にあった(図4)。ストレートな形状になるにつれ、最大主応力の最大値は増加する傾向を認めた。コントロールと比較した場合、特にCal 10ではbondで129%、debondで43%の増加を認めたが、bondのCal 5では12%の増加であった。最大主応力の分布を検討したところ、bond前面では比較的低い応力値で、近位内側と、外側部、遠位部に集中していたが、debond前面ではbondより最大主応力が大きい傾向にあり、ステム遠位端部に集中していた(図5)。ステムがストレートな形状になるに従い、応力が高い部分が拡大する傾向を認めた。ステム-セメント界面の内側、外側の剪断力を検討すると、bondは各モデル間で類似していたが、debondではストレートな形状になるにつれ遠位部で内、外側ともに増加し、bondと比べ高い値になった。最大値はdebondのCal 10遠位外側部で3.9Mpaであった。セメント-骨界面の内側、外側の剪断力を検討すると、bond,debondとも類似しており、最大値はCal 10の外側遠位部で1.7Mpaであった。結果をまとめると、セメントストレスはbondよりdebondが大きく、Cal 10ではbond,debondとも高くなり、剪断力はdebondではストレートな形状に近づくにつれ、遠位部で増加