

原 著 橈骨遠位端骨折モデルにおける遠位2列
軟骨下骨支持固定法の力学的強度

¹⁾昭和大学医学部整形外科学講座

²⁾金沢大学理工学研究域機械工学系

中村 裕介*¹⁾ 川崎 恵吉¹⁾

稲垣 克記¹⁾ 山越 憲一^{1,2)}

抄録：超高齢社会化が急速に進行している現在，骨粗鬆症による橈骨遠位端骨折も増加している．近年，同骨折に対して掌側ロックプレート（以下，VLP）による固定が行われるようになった．骨折部を強固に固定するには，橈骨軟骨下骨をスクリューで支持する必要があるが，遠位1列の穴のみの固定では，骨粗鬆症により骨質が脆弱化していたり，骨の粉砕が強い場合に，十分な固定力が得られない．Orbayらは，VLPの遠位2列の穴から固定したスクリューで，関節面の2か所を支える遠位2列軟骨下骨支持固定（double-tiered subchondral support：DSS法）を提案し，一定角度で固定するプレート（dorsal volar radius（DVR）anatomic palte：Biomet社製）を開発した．その後，固定角度可変機構を有したプレート（固定角可変プレート polyaxial locking plate：PLP）が開発され，骨折型，骨形状の違いに関わらず適応しやすくなった．われわれはこれまで，PLPであるAPTUS2.5（Medartis社製）を用いたDSS法の臨床における良好な治療成績を報告してきた．しかし，現在，PLPを用いたDSS法の力学的強度評価に関する詳細な報告はない．そこで本研究では，人工骨と新鮮凍結屍体を用いて橈骨遠位端骨折モデルを作成し，力学的強度試験を行い，DSS法の有用性を検討した．Osadaらの報告に準じ，人工骨SYNBONEで，AO分類A型の擬似骨折を作り，APTUS2.5を用いて1．遠位1列目の穴を4本のスクリューで固定したモデル（0群：遠位2列目無固定），2．遠位2列目の穴を1列目と平行にスクリューで1本，2本，3本固定したモデル（P群），および，3．遠位2列目の穴に背側関節面から15度の角度で打ち上げて，スクリューを1本，2本，3本固定したモデル（D群）の3群の骨折モデルを作成した．これらのモデルに対し，橈骨遠位掌側から荷重負荷し1）橈骨軸方向静特性試験，2）橈骨軸方向繰返し荷重特性試験（1,000回，2,000回，3,000回），3）曲げ方向静特性負荷試験，4）曲げ方向繰返し荷重試験（3,000回）を行った．さらに，新鮮凍結屍体を用いて5）AO分類C-2型の骨折モデルを作成し，遠位1列目の穴のみをスクリュー固定したnonDSS群（NDS群）と，遠位1列目の穴の固定に加え，2列目の穴に背側関節面に15度の角度で打ち上げて，スクリューを2本固定したDSS群（DS群）との間で，静荷重負荷試験による力学的強度の比較検討を行った．1）と2）の軸方向の試験において，剛性とモーメントは，全ての固定群間に有意差はなかった．3）と4）の曲げ方向の試験において，曲げ剛性と曲げモーメントは，遠位2列目の穴を固定したスクリュー本数の増加とともに若干の増加傾向をみたが，有意差はなかった．全ての骨折モデルにおいて，対照のMonoaxial locking plate（以下MLP）固定とほぼ同様の力学的強度を認め，ロック機構のゆるみ，破損を認めなかった．5）破断強度試験におけるDS群の降伏点の平均値は490Nで，NDS群の降伏点の平均値の360Nに比べて有意に高値であった．人工骨では，APTUS2.5の力学的強度はMLPと同等であり，2列目の穴を固定したスクリューの本数や角度の違いでは，固定力に有意差は認めなかった．新鮮凍結屍体では，DS群の力学的強度がNDS群よりも高く，DSS法の有用性が認められた．

キーワード：橈骨遠位端骨折，DSS法，固定角可変プレート，力学的強度評価

*責任著者

超高齢社会化が急速に進行している現在、骨粗鬆症患者は益々増加している状況であり、それに伴い、骨粗鬆症による橈骨遠位端骨折も増加している。近年、同骨折に対して掌側ロックプレート (volar locking plate；以下 VLP) を用いた骨接合術が行われるようになってきた。

固定力を得るためには、橈骨軟骨下骨をスクリューで強固に固定する必要があるが、VLP の遠位 1 列目の穴のみの固定では、骨粗鬆症により骨質が脆弱化していたり、骨の粉砕が強い場合に、十分な固定力が得られない。Orbay らは、VLP の遠位 2 列目の穴もスクリューで固定し、2 か所の関節面を支える 2 段階軟骨下骨支持固定 (double-tiered subchondral support；以下 DSS) 法を提案し、一定角度で固定するプレート (monoaxial locking plate；以下 MLP) である遠位掌側橈骨固定プレート distal volar radius (以下 DVR) anatomic plate を開発¹⁾、米国 Biomet Inc. がこれを製品化した。

その後、固定角度可変機構を有したプレート (固定角可変プレート polyaxial locking plate；以下 PLP) が開発され、スクリューの固定方向を変える事が可能になり、骨折型、骨形状の違いに関わらず適用しやすくなった。川崎ら^{2,5)}、石井ら^{3,4)}はこの PLP を用いて、遠位 2 列目の穴から関節面橈骨遠位背側にスクリューを設置して、遠位 1 列目と 2 列目の穴から軟骨下骨を支持する DSS 法を行い、良好な臨床成績を報告してきた。一方、PLP のスクリューのロック機構については、その緩みが指摘されており、固定角度を変えることが出来る PLP より MLP の方が、固定力は安定しているという推測も報告されている⁶⁾。

しかし、これまでにスクリューのロック機構を含め、DSS 法に関する詳細な力学的強度試験は行われていない。そこで本研究では、人工骨および新鮮凍結屍体を用いて橈骨遠位端骨折モデルを作成し、PLP の一つである APTUS2.5 (Medartis Inc., Switzerland；日本代理店；(株) エム イー システム) (Fig. 1) を用い、その固定条件を変えて、DSS 法の有用性を検討した。

研究方法

1. 人工骨骨折モデルを用いた力学的強度試験

1) 橈骨遠位端骨折の作成

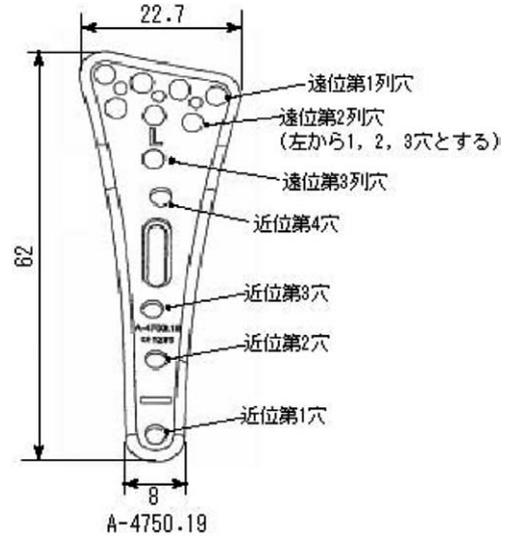


Fig. 1 Outline of polyaxial locking plate APTUS2.5

実験に供した人工骨は SYNBONE であり、掌側関節面から 6 mm 下方で、橈骨軸中央部に APTUS 2.5 を以下の 7 種類の方法でスクリュー固定した (Fig. 2)。なお、全ての試料モデルにおいて、遠位第 1 列 4 穴に固定スクリューを手関節面にほぼ平行に挿入し、近位第 1 穴と第 3 穴にはコーティカルスクリューを橈骨軸とほぼ直角に挿入して、プレートを固定した。

(1) 1 列群 (O 群)：遠位 2 列目の穴は固定なし (Fig. 2-A)。

(2) 平行群 (P 群)：遠位 2 列目の穴から 1 列目と平行に、スクリューで 1 本 (P1)、2 本 (P2)、3 本 (P3) 固定 (Fig. 2-B は P3 の写真を示す) する。

(3) DSS 群 (D 群)：遠位 2 列目の穴に背側関節面に 15 度の角度で打ち上げて、スクリューで 1 本 (D1)、2 本 (D2)、3 本 (D3) 固定 (Fig. 2-C は D3 の写真を示す) する。

以上のように作成した試料モデルを、橈骨骨端面から約 20 mm、および 27 mm の位置で切断し、疑似骨折モデル (Type A-2.1) として実験用試料とした (Fig. 3)。(1)～(3) の固定方法で作成した実験用試料は、それぞれ 3 個ずつ、合計 21 個を用意して、以下に示す力学的強度試験に供した。

なお、Fig. 3-A は O 群、Fig. 3-B は P1、Fig. 3-C は D2 の骨折モデル外観と X 線写真を示したものである、また対照として、APTUS2.5 と類似の MLP を用意し、一般的に推奨されている当該プレート固

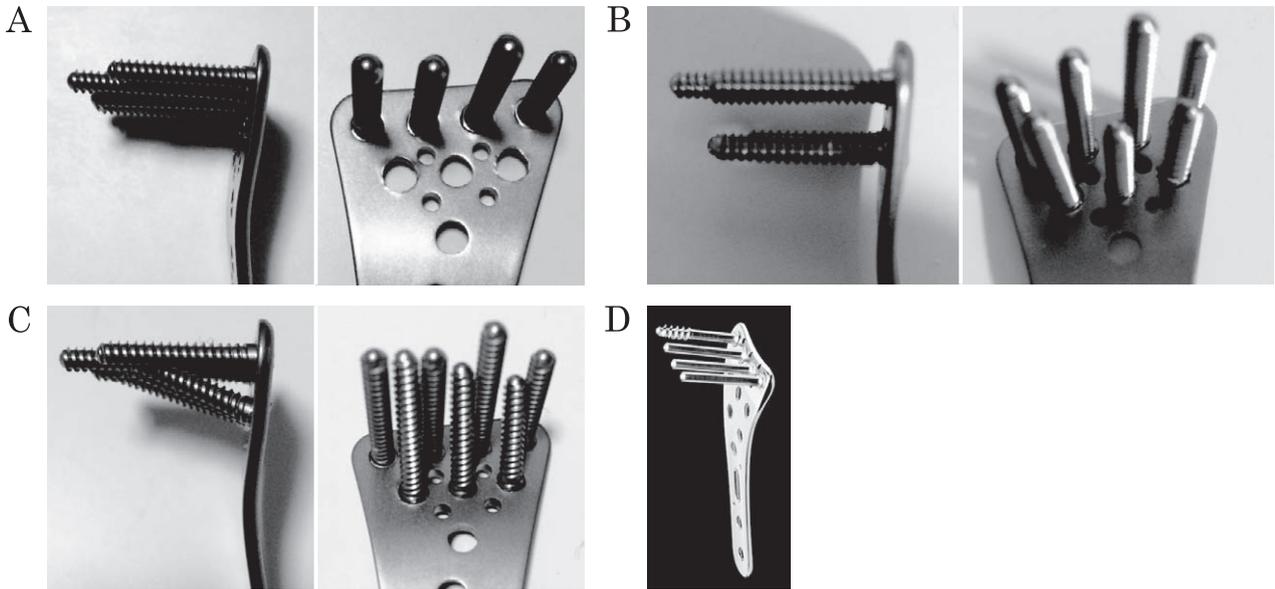


Fig. 2 Photographs of APTUS25 with screw insertion (A-C) and of a monoaxial locking plate (MLP) used as control group (D : S-group). A : screw insertion in the first distal row of APTUS25 (O-group), B : screw insertion in the second row parallel to the first row (P-group), C : screw insertion in the second row at an inclination angle of 15° so as to support the dorsal aspect of the subchondral bone (D-group).

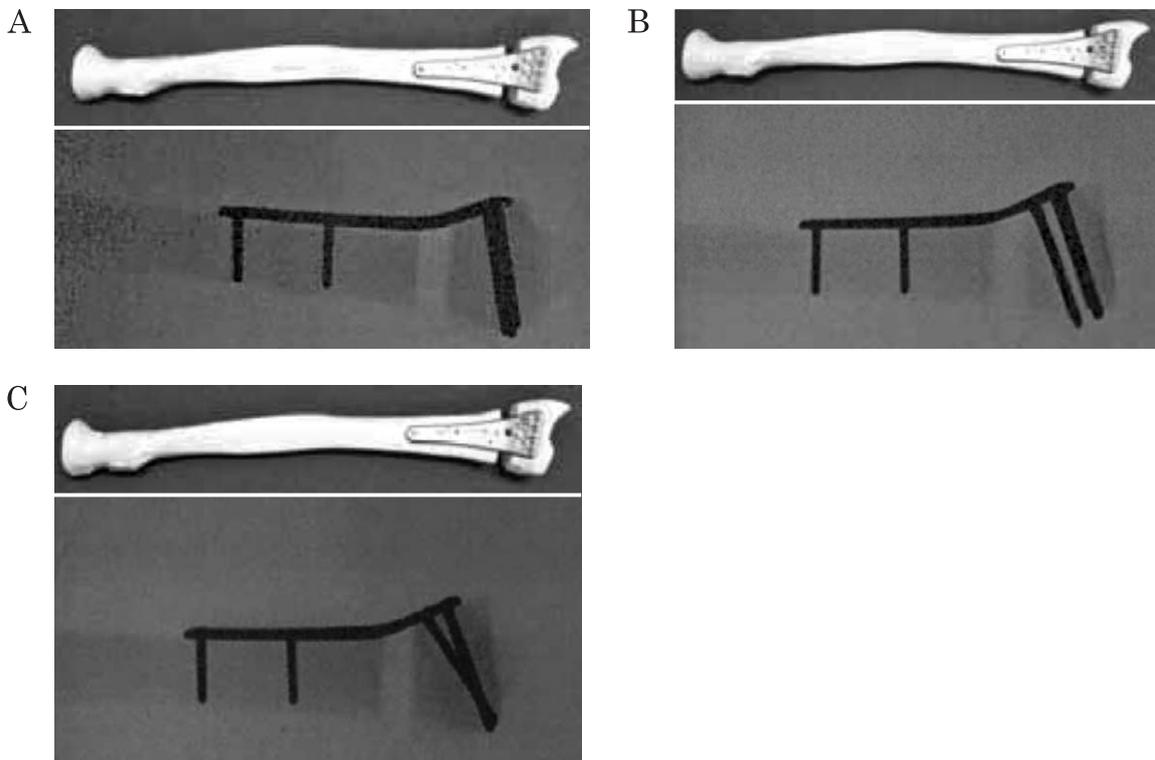


Fig. 3 Photographs of radius fracture models using artificial bones (upper part : A : O-group, B : P-group, C : D-group) and their X-ray pictures (lower part).

定法でスクリュー固定したものを、実験用疑似骨折試料として3個用意した (S群) (Fig. 2-D).

2) 荷重負荷試験方法

以上の各種スクリュー固定方法で作成された実験

用骨折モデルを荷重試験器（SOP-EG1, 日本計測システム（株））に取り付け、後述する荷重負荷試験を行った。なお、荷重センサ（HF-100, 日本計測システム（株））は、最大荷重 1,000 N、荷重分解能 0.1 N のものを用い、試験機に内蔵された変位計の最大測定長は 200 mm、最小分解能は 0.01 mm である。また、全ての荷重試験中、試料モデルを 3 方向（プレート固定橈骨正面、橈骨左右側面）からデジタルビデオカメラ（HDR-CX520V, ソニー（株））で撮影し、試料が破壊された場合の状況を観察した。

(1) 橈骨軸方向荷重静特性試験

実験試料を橈骨軸に対して垂直に荷重試験機に固定し、荷重点をほぼ舟状骨の尺骨側の中心に相当する位置とした。試料の試験機への取り付けは、モデルの全長が約 100 mm となるように橈骨を切断し、固定用バイスで垂直に固定した。なお、荷重負荷は荷重点にくぼみを加工し、外径が約 11 mm の剛球を介して 10 mm/min の速度で負荷した。このようにして得た荷重-変位データは、汎用パソコンに取り込み、荷重-変位特性曲線を求めた。また、試験はモデルが破壊されるまで行ったが、切断した骨端面が相互に接触したり、最大荷重 1,000 N 下でも試料が破壊されない場合は、その時点で試験を終了した。

(2) 橈骨軸方向繰り返し荷重負荷試験

(1) と同様に実験試料を試験器に固定し、以下の条件で負荷試験を行った。荷重点は (1) と同じく決定し、往復送り速度 $V_f = 2 \text{ mm/s}$ で繰り返し荷重負荷を行った。負荷回数 n_f は 1,000 回、2,000 回、3,000 回とした。荷重負荷は、荷重値をパソコンに取り込み、連続して記録した。また、各負荷回数の終了時に (1) と同様の荷重静特性試験を行い、荷重-変位曲線の直線部の勾配 (= 剛性 (E)) を求めて、繰り返し荷重試験の評価指標とした。なお、負荷回数が規定の回数に至る前に、疑似骨折モデルのプレート固定に緩み、あるいは破壊が発生した場合は、繰り返し荷重負荷を中止し、その時点での負荷回数を記録した。

(3) 曲げ方向静特性負荷試験

橈骨関節面より約 100 mm で切断した近位端に、幅約 40 mm のファイバークラスキャストリングテープ [キャストライト・ α : アルケア (株)] を巻き付けて、その部位をバイスで強固に固定し、片

持ち梁試験モデルを作成した。印加荷重点は、プレート遠位端面を避けてバイス固定端から $L = 73 \text{ mm}$ の位置とした。したがって、骨折モデルに作用する曲げモーメント $M \text{ (N} \cdot \text{mm)}$ は、印加荷重点を $F \text{ (N)}$ とすると、 $M = F \cdot L = 73F$ となる。また、印加荷重点に伴う荷重点のたわみ（荷重点からの変位: Δd ）を試験機により計測し、 M - Δd 曲線を求め、その直線部分の傾きを実効的な曲げ剛性として求めた。なお、曲げ荷重点の印加速度は 10 mm/min とした。曲げ試験は試料が破壊されるまで行い、その時点のモーメント（破壊曲げモーメント）と破壊荷重点で、試料の曲げ強度を評価した。

(4) 曲げ方向繰り返し荷重負荷試験

試験片への繰り返し荷重点は、曲げモーメント値は 0 ~ 2,000 (-2,500 以内) $\text{N} \cdot \text{mm}$ 、繰り返し速度は 480 mm/min で行った。各試験片の曲げ剛性は、各試験片の曲げ剛性繰り返し荷重点前に、曲げ方向静特性負荷試験と同様の方法で求めた。次に、3,000 回の繰り返し負荷後の曲げ剛性を求めて、動荷重点に伴う曲げ強度変化を評価した。

2. 新鮮凍結屍体を用いた力学的強度試験

1) 検体と橈骨骨折モデルの作成方法

新鮮凍結屍体の前腕から手部に至る 14 肢を実験に用いた。検体の平均年齢は 85.8 歳 (71 ~ 98 歳)、男性 10 肢、女性 4 肢であった。この 14 肢を、APTUS2.5 プレートの遠位 1 列目の穴のみスクリュー固定した nonDSS 群 (NDS 群: 男性 5 肢、女性 2 肢、平均年齢 87.8 歳 (81 ~ 98 歳)) と、遠位 1 列目と 2 列目の穴をスクリュー固定した DSS 群 (DS 群: 男性 5 肢、女性 2 肢、平均年齢 83.3 歳 (71 ~ 88 歳)) の 2 群に分けた。

母指から小指は基節骨中央で切断し、関節包および靭帯、前腕骨間膜以外の軟部組織をすべて除去した。Osada ら⁷⁾の方法に準じて、橈骨関節面から近位に 20 mm と 30 mm の位置で橈骨を切断し、10 mm の骨欠損を作成した。さらに、遠位骨片を中央で関節面から縦に骨切りし、不安定型橈骨遠位端骨折モデル (AO 分類 C2 型モデル) を作成した。

今回用いたすべての APTUS2.5 プレートの遠位 1 列目の 4 つの穴はスクリューで固定した。遠位 2 列目の穴は、NDS 群ではスクリューを固定せず、DS 群は橈側と尺側の穴からスクリューを関節面に対して、15 度傾斜して 1 本ずつ固定した。また、近位

の3穴は、楕円ホールはロッキングスクリューで固定し、その他の2穴はコーティカルスクリューで固定した。なお、すべての固定スクリューの締め込みは、緩みが無いように強固に固定した（この時の締め付けトルクは、トルクレンチドライバーにより計測し、ほぼ0.8 N・mに設定した）。また、X線装置でプレートやスクリュー位置を確認しながら骨折モデルを作成した。

2) 静荷重試験方法

荷重面は中手骨中央で切断し、手関節を過伸展した状態で負荷荷重面が平坦となるように骨セメント (stron II, (株) ジーシー) で固定した。また、橈尺骨近位部も骨セメントで固定し、荷重試験機 (オートグラフ, (株) 島津製作所) に固定して静荷重試験を行った。荷重は、骨折モデルが破壊されるか、切除骨端部が接触するまで行った。尺骨や手根骨、関節包を温存したまま手関節を最大背屈させてセメント固定をした。試験は20 mm/minの速度で負荷した (Fig. 4)。骨欠損部はデジタルビデオカメラ (GZ-HM450, (株) JVC ケンウッド) で撮影し、オートグラフで得られた荷重-変位曲線で、荷重が急激に減少した点を降伏点として、強度評価の指標とした。

結 果

1. 人工骨骨折モデルを用いた力学試験結果

1) 橈骨軸方向荷重静特性試験

すべてのモデルサンプルで、多くの材料試験で見られる典型的な飽和曲線が観察され、荷重-変位曲線が直線部分 (弾性領域) と非直線部分 (塑性領域) を示した。また、同じく全てのサンプルで、荷重負荷に伴いプレートの対側骨折間隙が狭くなり、約5 mmの変位位置で骨折端面が接触し、この時点で荷重負荷を中止した。

このような静特性曲線から、弾性領域における傾き (剛性: E (N/mm)), 弾性領域から塑性領域に入る降伏荷重 (F_y (N)), プレートに対する曲げモーメント (M_y (Nm)), および当該サンプルにおける極限の強さ (最大荷重 F_u (N); 最大曲げモーメント M_u (Nm)) を求めた。これらの力学的パラメータを、APTUS2.5の各種固定方法、S群のプレートごとに整理した (Fig. 5)。O群、P群、D群の全てにおいて、スクリューの固定法や本数に関係なく、各種パラメータはほぼ同等な値を示し、



Fig. 4 Experimental setup used for the application of continuous cyclic loading on the cadaveric radius fracture models. Proximal side of the radius molded with poly-methyl methacrylate resin was vertically anchored in a loading machine and the axial load was applied to the distal end of the specimen via a uniform flat surface of poly-methyl methacrylate resin.

APTUS2.5を固定した骨折モデルの力学的強度に問題は無いと考えられた。なお、本試験を通じて、全てのAPTUS2.5およびMLPを固定したモデルは、最大荷重点に至っても、スクリューやロッキング機構の緩み、破損を認めなかった。

2) 繰り返し荷重負荷試験結果

繰り返し荷重回数1,000回、2,000回、および3,000回後の荷重-変位曲線から、剛性値 E_e を求めた (Fig. 6)。 E_e 値は、P群、D群ともに2列目の穴を固定したスクリューの本数が多いほど高値を示したが、O群、S群と比べて有意差はなかった。また、繰り返し負荷回数による変化も認めなかった。なお、繰り返し荷重試験を通し、すべてのAPTUS2.5骨折モデルに、荷重負荷によるスクリューやロッキング機構の緩み、破壊は生じなかった。

3) 曲げ試験結果

Fig. 7に曲げ方向静特性負荷試験の結果を示す。APTUS2.5骨折モデルにおいて、実効曲げ剛性および破壊曲げモーメント値は、固定したスクリューの本数と相関はなかった。また、S群の破壊曲げモーメントは、APTUS2.5骨折モデルと比べ特徴的な差を認めなかった。S群の実効曲げ剛性は、P群、D群

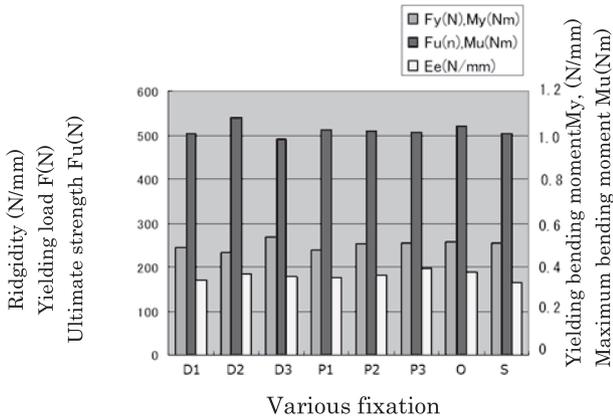


Fig. 5 Biomechanical parameters of radius fracture models using artificial bones with various screw fixation methods. See text for explanation and symbols.

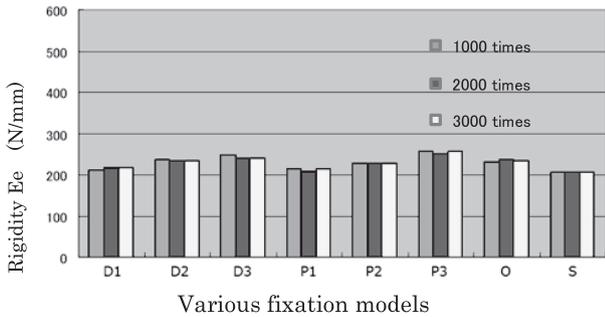


Fig. 6 Rigidity values (Ee) after axial cyclic loadings of 1000, 2000 and 3000 times using artificial bone fracture models with various screw fixation methods.

のそれより若干低値を示したが、有意差はなかった。

4) 繰り返し曲げ試験結果

Fig. 8に、各群の3,000回の曲げ荷重負荷前後の実効曲げ剛性を示す。実効曲げ剛性を求める際の接線の引き方による誤差、あるいは骨折モデルの作成精度の差によると思われるが、P3群のモデルの曲げ剛性は他と比べ高値を示し、O群およびS群モデルのそれは若干低値を示した。しかし、曲げ剛性のこれらの差異は必ずしもプレート自体の強度差によるものではないと思われる。なお、すべての試験片に、3,000回の繰り返し曲げ荷重負荷による破壊や固定スクリューの緩みは認めなかった。

2. 新鮮屍体橈骨骨折モデルを用いた力学試験結果

荷重-変位曲線から求めた降伏点の平均値(±標準偏差(SD))は、NDS群では325(±70.7)N、

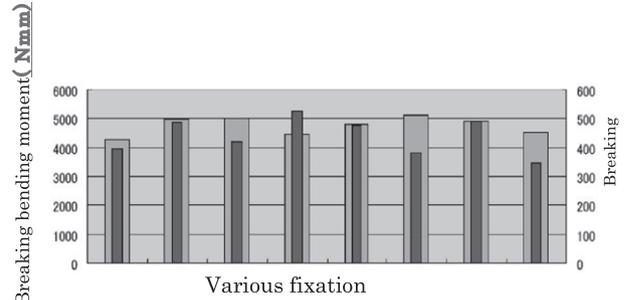


Fig. 7 Values of breaking load and breaking bending moment of artificial bone fracture models with various screw fixation methods.

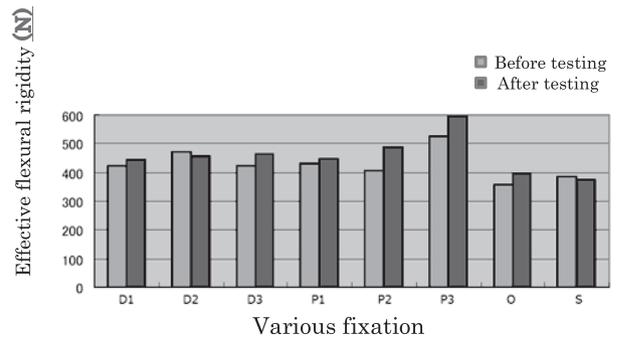


Fig. 8 Values of effective flexural rigidity of artificial bone fracture models with various screw fixation methods before and after 3000 times of cyclic bending load.

D群では514(±133.0145)Nであり、DS群が有意に高値を示した(Fig. 9)。なお、荷重負荷試験後にプレートとスクリューの破損状態やロッキング機構の緩みについて目視観察したところ、全例においてプレートとスクリューの破損は認めなかった。緩みに関しては、主に遠位2列目の穴を固定したスクリューに、DS群で10本、NDS群で9本にわずかな緩みを認めたが、力学的強度に影響を与える程度のもではなかった。

考 察

近年、橈骨遠位端骨折に対してVLPが開発され、治療の主流となっており、プレートの固定性についての生体力学的研究も報告されている^{7-9, 11-18)}。亀井らやOsadaらは、250Nで3,000回繰り返し荷重負荷試験する実験方法を報告しており^{7,9)}、われわれも、これに準拠して繰り返し荷重試験を実施した。VLPにはMLPとPLPとがあり、前者の利点は、高い固定力が安定して得られ、手術時間やX線透

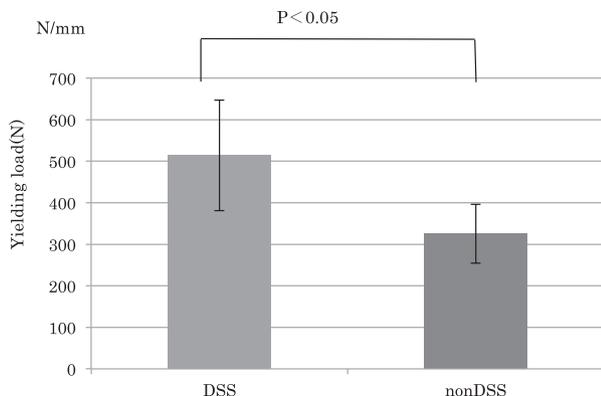


Fig. 9 Yielding load values obtained from cadaveric radius fracture models in DS- and NDS-group. See text for further explanation.

視時間も短いことである。一方、後者の利点は、スクリュー刺入方向の自由度が高い点である。両者の臨床成績の比較では、一部にPLPのスクリューのロッキング機構に問題があるという報告⁶⁾もあるが、概して両者共に良好であると報告されている^{2-4, 10)}。

APTUS2.5は、その特殊なトリロックシステムというロッキング機構により、スクリューの挿入角度を±15度の範囲で選択可能であり、比較的薄く(1.6 mm)、橈側の傾斜に沿った形状に設計されている。本研究では、人工骨および新鮮屍体を用い、APTUS2.5に各種固定法を適用した橈骨遠位端骨折モデルを作成し、骨折部の固定性について力学的評価を行い、MLPを用いた骨折モデルとも比較した。

PLPとMLPの比較実験として、まず人工骨による橈骨遠位端骨折モデルの軸荷重方向と曲げ方向の静特性および繰り返し荷重負荷試験を行った。人工骨を用いたPLP (APTUS2.5)と既存のMLPとの力学的強度試験結果の比較では、両者はほぼ同等の力学的評価値を示した。過去のPLPとMLPの比較報告では、人工骨において、Drobotzらは、AO-C2型モデルでPLPであるVariAx plate (Stryker Corp., USA)を用いて、橈骨軸方向繰り返し荷重負荷試験を行い、PLPとMLPでは力学的強度の有意差はなかったと報告している^{11, 12)}。Martineauらは、AO-A型骨折モデルに、VariAx plateを用いて橈骨軸方向荷重静特性試験と曲げ方向静特性荷重試験を行い、PLPとMLPとの間に有意差はなかったと報告している¹³⁾。Hartらは、AO-C3型モデルの人工骨にPLPを用いて、最遠位尺側のスクリュー

挿入位置を可能な限り尺側に設置した群、3 mm 橈側に設置した群、3 mm 近位側に設置した群、3 mm 近位側、3 mm 橈側に設置した群の骨折モデルを作成し、MLPで作成したモデルと比較したところ、橈骨軸方向荷重負荷試験では、有意差を認めなかったと報告している¹⁴⁾。一方、新鮮屍体を用いた実験では、Rauschらが、AO分類C2型の骨折モデルを作成して、MLP (2.4 mm LCP Volar Distal Radius Plate, DePuy Synthes Inc., USA)とPLP (2.4 mm Variable-Angle LCP Two Column Volar Distal Radius Plate, DePuy Synthes Inc., USA)を使用し、繰り返し荷重負荷試験を行ったところ、PLPはMLPに比較して力学的強度は有意に高く、矯正損失もPLPが有意に少なかったと報告している¹⁵⁾。亀井らは、屍体手関節で作成したAO C3型モデルを用いて、4種類のMLPとPLPであるMatrix plateを繰り返し荷重負荷試験で比較したが、有意差はなかったと報告している⁹⁾。われわれの結果も、対照のMLPであるS群とほぼ同等、あるいはそれ以上の評価値を得たことにより、APTUS2.5は骨接合に要する力学的強度を十分に有していると考えられた。

次に、人工骨を用いたDSS法とnonDSS法の比較実験では、遠位2列目の穴を固定したスクリューの本数や刺入角度の違いで固定力に有意差はなかった。過去の人工骨における両法の比較報告では、Sobkyらは、AO A型骨折モデルを作成して、MLPであるDVR-A (Hand innovations, Miami, FL)をSCS/V (Avanta San Diego, CA), Volar radius stainless locking plate (Synthes West Chester, PA)と比較し、繰り返し荷重負荷試験において、DSS法の降伏点が最も高値であったと述べ、早期の運動療法の開始は問題ないと報告している¹⁶⁾。

今回の実験、および前述の人工骨モデルを用いた既報告において、DSS法とnonDSS法の間で有意差がなかった理由としては、人工骨自体(硬質プラスチック材)が固いことや、遠位スクリューが背側骨皮質側に貫通していることなど、臨床とは固定材料、固定法が異なっていることが挙げられる。

これらは人工骨による実験の限界であるため、今回われわれは、新鮮屍体を用いてAO分類C2型の骨折モデルを作成し、DSS法とnonDSS法の比較実験を行った。その結果、DSS法がnonDSS法と

比較して平均約 1.58 倍の力学的強度（降伏点）があり、DSS 法が十分な強度を有していることが判った。さらに、破断実験においても、プレート、スクリューの破損は認めなかった。Moss ら¹⁷⁾は新鮮屍体を用いた AO C2 型の骨折モデルを作成し、MLP を用いて、スクリュー 4 本の NDS 群と 7 本の DS 群の力学的強度試験を行い、降伏点の平均値は DSS 法が 139 N、nonDSS 法が 108 N と DSS 法がやや高値を示していたが、両者間に有意差はなかったと報告しており、われわれの結果と異なっていた。その理由は、PLP はスクリューの挿入角度を変更できるため、関節面の 2 か所を支える DSS 法を正確に行えるが、MLP では挿入角度が固定されるため、検体によっては正確に DSS 法で固定できない場合があること、次に、臨床では、遠位に挿入するスクリューは背側皮質を貫かないが、Moss らは貫いており、これにより固定力が増大している可能性があること、また、われわれは、受傷時の状況に近似した、手関節背屈位で荷重しているが、Moss らは、橈骨関節面に直接荷重していること、さらには、繰り返しと単回の荷重負荷試験の違いがあることなどが考えられる。一方、Mehling らは、新鮮屍体を用いた AO A3 型の骨折モデルを作成し、APTUS2.5 の橈骨軸方向荷重静特性試験を行い、遠位骨片に 7 本のスクリューを挿入した群が、スクリューを 3 本あるいは 4 本挿入した群に比べて強度が高いと報告した¹⁸⁾。nonDSS 法ではあったものの、われわれの C2 型モデルのデータと同様の結果である。

川崎ら¹⁹⁻²¹⁾は APTUS2.5、上野ら²³⁾は VariAx を臨床に使用して、DSS 法と nonDSS 法の矯正損失を比較し、前者が有意に損失が少なかったと述べている。森田ら²²⁾も DSS 法の有用性を報告し、C3 型に対して有用な手技の一つと述べている。一方で石井らは、MLP の DSS 法、および PLP の DSS 法と nonDSS 法の矯正損失を比較した結果、いずれも有意差はなかったと報告している³⁾。Neuhanus ら²⁴⁾は、MLP である DVR plate (DePuy International Ltd., UK) を使用して、遠位 1 列目の穴のみを固定した NDS 群と 2 列目の穴も固定した DS 群を比較した結果、矯正損失等の結果に有意差はないと報告している。そのため彼らは、単純な AO-A 型には、1 列目の穴のみの固定で問題ないとしているが、粉碎の強い症例には DSS 法が有用である可能性も

示唆している²⁴⁾。

以上より、PLP における DSS 法は、従来から使用されている MLP による固定、さらに PLP による nonDSS 法の固定法に比べて、同等もしくはそれ以上の強固な固定効果があると考えられる。特に、粉碎型橈骨遠位端骨折に代表される不安定な骨折型に対する手術手技として、PLP を使用した DSS 法は、有用と考えられる。

一方、PLP は合併症が MLP よりも多く、特にロッキング機構の緩みや、プレート自体の固定力の弱さなどが指摘されていた⁶⁾。森田らは、APTUS2.5 を使用した症例 787 手について、合併症を起こしたのは 10.8% と報告している²²⁾。太田らは、APTUS2.5 におけるロッキング機構の強度の不安から、DSS 法を併用する事が望ましいと報告している²⁵⁾。若林らは、nonDSS 法において APTUS2.5 と VA-TCP (DePuy Synthes Inc., USA) のロッキング機構の安定性の比較検討を行い、VA-TCP の方が優れているが、臨床成績は両者とも良好であったと報告している²⁶⁾。今回の実験でも、APTUS2.5 の繰り返し実験において、スクリューに僅かな緩みを生じていたが、DS 群と NDS 群ともに力学的強度に影響を与える程度のもではなかった。

以上のように、PLP 使用による DSS 法の有用性については、いまだ意見の一致をみていない。本実験は、新鮮屍体橈骨骨折モデルを用いた橈骨軸方向荷重静特性試験であり、今後は繰り返し荷重負荷試験を行うことで、DSS 法の有用性をさらに検討する必要があると思われる。

謝辞 本研究において御協力いただきました内山英一先生、青木光広先生、また、新鮮凍結屍体を御提供いただきました札幌医科大学解剖学教室 藤宮峯子先生及び、関係者各位に感謝申し上げます。

利益相反

本研究に関し開示すべき利益相反はない。

文 献

- 1) Orbey JL, Touhami A. Current concepts in volar fixed-angle fixation of unstable distal radius fractures. *Clin Orthop Relat Res.* 2006;445:58-67.
- 2) 川崎恵吉, 稲垣克記, 富田一誠, ほか. Polyaxial locking plate の強度は青壮年男性の橈骨遠位端骨折に耐え得るか? 骨折. 2014;36:461-464.

- 3) 石井英樹, 浅見昭彦, 角田憲治, ほか. Polyaxial locking plate と Monoaxial lock plate による AO 分類 C 型橈骨遠位端骨折に対する治療成績. 日手外科会誌. 2014;30:479-482.
- 4) 石井英樹, 浅見昭彦, 園畑素樹, ほか. Fixed angle locking plate を使用した橈骨遠位端骨折治療における DSS 法の CT 評価. 日手外科会誌. 2013;29:720-723.
- 5) 川崎恵吉, 稲垣克記, 瀧川宗一郎, ほか. 橈骨遠位端骨折に対する Double-tiered subchondral support 法の治療成績 APTUS2.5 と VariAx plate との比較. 日手外科会誌. 2012;28:465-469.
- 6) 川崎恵吉, 稲垣克記, 瀧川宗一郎, ほか. 橈骨遠位端骨折に対するインプラント破損例の検討各メーカーへの破損例のアンケートによる集計. 骨折. 2012;34:731-735.
- 7) 長田伝重, 早乙女絢一, Steven FV, *et al.* 橈骨遠位端骨折に対する各種プレートの固定性生体力学的研究. 日手の外科会誌. 2002;19:1-5.
- 8) Iba K, Ozasa Y, Wada T, *et al.* Efficacy of radial styloid targeting screws in volar plate fixation of intra-articular distal radial fractures: a biomechanical study in a cadaver fracture model. *J Orthop Surg Res.* 2010;5:90.
- 9) 亀井秀造, 長田伝重, 亀田正裕, ほか. 橈骨遠位端関節内骨折に対する掌側ロッキングプレートの固定性 屍体手関節モデルによる研究. 日臨バイオメカ会誌. 2008;29:229-233.
- 10) 川崎恵吉, 稲垣克記, 瀧川宗一郎, ほか. Monoaxial Locking plate ; Stella plate と Polyaxial locking plate APTUS2.5 による橈骨遠位端骨折の治療成績の比較. 日手の外科会誌. 2010;26:23-26.
- 11) Drobetz H, Schueller M, Tschegg EK, *et al.* Influence of screw diameter and number on reduction loss after plating of distal radius fractures. *ANZ J Surg.* 2011;81:46-51.
- 12) Drobetz H, Weninger P, Grant C, *et al.* More is not necessarily better. A biomechanical study on distal screw number in volar locking distal radius plates. *Injury.* 2013;44:535-539.
- 13) Martineau D, Shorez J, Beran C, *et al.* Biomechanical performance of variable and fixed angle locked volar plates for the dorsally comminuted distal radius. *Iowa Orthop J.* 2014;34:123-128.
- 14) Hart A, Collins M, Chhatwal D, *et al.* Can the use of variable-angle volar locking plates compensate for suboptimal plate positioning in unstable distal radius fracture? A Biomechanical Study. *J Orthop Trauma.* 2015;29:e1-e6.
- 15) Rausch S, Klos K, Stephan H, *et al.* Evaluation of a polyaxial angle-stable volar plate in a distal radius C-fracture model—a biomechanical study. *Injury.* 2011;42:1248-1252.
- 16) Sobky K, Baldini T, Thomas K, *et al.* Biomechanical comparison of different volar fracture fixation plates for distal radius fractures. *Hand (NY).* 2008;3:96-101.
- 17) Moss DP, Means KR Jr, Parks BG, *et al.* A biomechanical comparison of volar locked plating of intra-articular distal radius fractures: use of 4 versus 7 screws for distal fixation. *J Hand Surg Am.* 2011;36:1907-1911.
- 18) Mehling I, Muller LP, Delinsky K, *et al.* Number and locations of screw fixation for volar fixed-angle plating of distal radius fractures: biomechanical study. *J Hand Surg Am.* 2010;35:885-891.
- 19) 川崎恵吉, 稲垣克記, 富田一誠, ほか. 橈骨遠位端骨折に対する新戦略 Polyaxial locking plate がもたらすメリット・デメリット. 日手外科会誌. 2013;29:708-711.
- 20) 川崎恵吉, 稲垣克記, 瀧川宗一郎, ほか. 高齢女性の背側転位型橈骨遠位端骨折に対する Double-tiered subchondral support 法の治療成績. 骨折. 2011;33:12-17.
- 21) 川崎恵吉, 稲垣克記, 富田一誠, ほか. AO 分類 C3 型橈骨遠位端骨折に Double-tiered Subchondral Support 法は有用か? 日手外科会誌. 2010;27:234-238.
- 22) 森田晃造, 堀内行雄. Polyaxial Locking Plate を用いた橈骨遠位端骨折治療例に橈骨骨片へのスクリュー固定本数の違いにおける固定性の検討 2nd row の意義. 日手外科会誌. 2015;31:604-607.
- 23) 上野幸夫, 川崎恵吉, 稲垣克記, ほか. AO 分類 C3 型橈骨遠位端骨折における VariAx を用いた Double-tiered subchondral support 法の有用性について. 日手外科会誌. 2015;31:790-794.
- 24) Neuhaus V, Badri O, Ferree S, *et al.* Radiographic alignment of unstable distal radius fractures fixed with 1 or 2 row of screws in volar locking plates. *J Hand Surg Am.* 2013;38:297-301.
- 25) 太田 剛, 菅田祐美, 鎗木秀俊, ほか. 掌側ロッキング機構の破損 ロッキングスクリューは本当にロックされているのか? 日手外科会誌. 2012;29:106-108.
- 26) 若林良明, 二村昭元, 藤田浩二, ほか. 橈骨遠位端骨折用 Polyaxial locking plate 2 種の locking 機構の安定性の比較検討. 日手外科会誌. 2014;31:201-204.

BIOMECHANICAL EVALUATION OF DOUBLE-TIERED SUBCONDRAI SUPPORT PROCEDURE FOR DISTAL RADIUS FRACTURE MODEL

Yusuke NAKAMURA¹⁾, Keikiti KAWASAKI¹⁾,
Katsunori INAGAKI¹⁾ and Keniti YAMAKOSI^{1, 2)}

¹⁾Department of Orthopaedic Surgery, Showa University School of Medicine

²⁾School of Mechanical Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University

Abstract — We examined the utility of the double-tiered subchondral support technique (DSS) as a treatment for distal fractures of the radius. A fracture model was created using model bone and fresh frozen cadavers. Mechanical strength was tested in each model. The polyaxial locking plate (PLP) were found to offer mechanical strength comparable to the monoaxial locking plate fixation. In fresh frozen cadavers, DSS-treated fractures with PLP had a higher breaking strength than the non-DSS-treated fractures. The DSS technique with PLP is considered to be a superior technique in terms of fixation for unstable distal radius fractures.

Key words: distal radius fracture, double-tiered sub-chondral support, variable plate, mechanical strength evaluation

[受付：1月14日，受理：2月5日，2016]