顎関節突起骨折に対する各種骨内固定法の生体力学的評価

三 森 康 弘・富 永 和 宏・カナル アミット

土 生 学・平 島 惣 一・福 田 仁 一

A biomechanical evaluation of bone stability with different types of rigid internal fixation techniques for subcondylar fractures

MIMORI Yasuhiro · TOMINAGA Kazuhiro · KHANAL Amit

HABU Manabu · HIRASHIMA Soichi · FUKUDA Jinichi

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the biomechanical stability of various rigid internal fixation systems for subcondylar fractures.

Fifteen identical synthetic polyurethane mandibles with a cancellous bone structure (Synbone[®], Switzerland) were used. The left condylar processes were cut with a band saw to mimic subcondylar fractures directed perpendicularly to the long axis of the ramus, and the right sides were cut to mimic oblique fractures to the ramus. The fixation systems used were a single 4-hole titanium mini-adaptation plate (Synthes), double fixation with the same plates, a single 5-hole titanium mini-dynamic compression plate (Synthes), an Eckelt lag screw[®] system (Martin), and a Wurzburg lag screw plate[®] system (Leibinger). Biomechanical testing was done as described by Haug et al. (1996). The bone models were held with a custom-made jig to keep the occlusal plane horizontal. The canine region was pressed with a cantilever beam design using a servohydraulic testing machine (Autograph, Shimadzu) at a rate of 1 mm/sec. The force-displacement curve, maximum load for breakage, and stiffness were measured.

In perpendicular fractures, double mini-plate fixation and Eckelt lag screw fixation provided the best stability. The maximum loads of the former and the latter were 46.7 ± 9.5 N and 44.7 ± 11.6 N, respectively. Their stiffness was 4.1 ± 1.1 N/mm and 4.7 ± 1.9 N/mm, respectively. Single mini-plate fixation was weakest, i.e., 13.2 ± 2.4 N maximum load and 1.3 ± 1.0 N/mm stiffness. In oblique fractures, double mini-plate fixation also had the best tolerance for load and stiffness, i.e., 55.1 ± 11.6 N and 5.2 ± 2.7 N/mm, respectively. The Eckelt lag screw, however, showed considerably less fixation strength than that for perpendicular fractures, i.e., 22.8 ± 11.3 N for load tolerance and 1.0 ± 0.2 N/mm for stiffness.

In this laboratory setting, double mini-plate fixation proved superior in both types of fractures with regard to resistance to movement and breakage strength. The Eckelt lag screw showed good stability for perpendicular fractures; however, stability was weak for oblique fractures. Not only single mini-plate fixation but also mini-dynamic compression plate fixation or a Wurzburg lag screw plate system may provide insufficient fixation strength for this type of fracture on early functional loading.

Key words: subcondylar fracture (関節突起基底部骨折), biomechanical evaluation (生体力学的評価), internal fixation method (骨内固定法), mini-plate (ミニプレート), lag screw (ラグスクリュー)

結 言

顎関節突起骨折の観血的治療の適応については古くから

九州歯科大学口腔外科学第1講座

(主任: 福田仁一教授)

First Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Kyushu Dental College (Chief: Prof. FUKUDA Jinichi)

受付日: 2004年3月5日

採択日: 2004年6月29日

議論されてきたが、多くの臨床的研究^{1~4)}により、最近では成人の関節突起頸部や基底部の骨折で、小骨片が大きく転位していたり、下顎窩から脱臼しているような症例は、観血的治療の適応であろうという見解が広く支持されるようになってきた^{5, 6)}。しかし、観血的に整復された骨片を固定する方法に関しての統一した見解はなく、また、近年、顎関節突起骨折のためのさまざまな骨内固定装置が開発されてきたこともあり、以前にも増してどのような固定法を

図1 実験に用いた各種固定装置

A: single adaptation plate, B: double adaptation plate, C: zygomatic DC plate,
D: Eckelt lag screw, E: Wurzburg lag screw plate

選択すべきかの判断が難しくなっている。また、広く使用されているチタン製の mini adaptation plate による固定を行って、プレートの破折やスクリューの緩みを経験することもあるのも事実で、そのような報告も多数なされている^{7, 8)}。

今回、われわれは、この部の骨折の適切な固定方法について明らかにするために、現時点で顎関節突起骨折に対して使用可能なさまざまな骨内固定装置を下顎骨モデルに用いて、生体力学的に評価した。

材料ならびに方法

実験には海綿骨様構造を備えたポリウレタン製の下顎骨モデルである Synbone[®] (Synbone 社製) を用いた。左の関節突起には骨モデルを後方から見て下顎枝の長軸に対して垂直方向に骨折した横骨折モデルを、右の関節突起には臨床的に遭遇することが比較的多い下顎枝に対して斜めに骨折した斜骨折モデルを作製した。斜骨折は下顎枝を後方から見て 45° 下外側に傾斜した骨折とした。骨モデルの関節突起基底部をダイヤモンドソートリマー (MC-130D, Maruto 社製) にて規格化されたステントを用いて切断した。

固定には 1) 4 穴のチタン製 mini adaptation plate ; マンディブルミニプレート 2.0[®] (Synthes 社製, 厚さ 1.0mm) 1 枚を 2.0mm セルフタッピングスクリュー[®] (Synthes 社製, 長さ 6mm) で固定する方法と, 2) 同プレートを 2 枚使用する方法, 3) 5 穴の mini dynamic compression plate (以下, DCP) ; ジゴマティック DCP プレート 2.0[®] (Synthes 社製, 厚さ 0.8mm) 1 枚を 2.0mm セルフタッピングスクリュー[®] で固定する方法, 4) Eckelt lag screw[®] (Martin 社製, 直径 2.0mm, 長さ 60mm) による固定, ならびに 5) Wurzburg lag screw plate[®] (Leibinger 社製, column screw ; 直径 2.0mm, 長さ 21mm 使用) による固定の 5 種類を用いた (図 1)。横骨折, 斜骨折のそれぞれに対し, 各固定法を 3 例ずつ行った。なお, 必要最低限の屈曲で最適なプレート屈曲ができるようにプレートはモデルを切断する前に予め屈曲適合させたものを使用した。

強度の測定には自動制御式水圧圧縮・曲げ試験装置 Autograph (AGS-5k NG, Shimadzu 社製) を用いた。荷重のかけ方は Haug ら⁹⁾ が下顎角部骨折に対するプレート固定法の生体力学的評価に際して用いた方法に従い, 咬合平面を床面と平行にした状態で, 顎関節部を特製のジグに固定し, 犬歯部にプッシュロッドを当て, 片持ち梁式に下

表1 横骨折時の最大荷重とスティッフネス

fixation system	maximum load	calibrated load in the condyle *	stiffness	calibrated stiffness in the condyle **
single adaptation plate	13.2± 2.4	63.4±11.6	1.3±1.0	29.8±22.0
double adaptation plate	46.7± 9.5	224.0±45.5	4.1±1.1	94.5±25.3
zygomatic DC plate	24.2± 8.9	116.3±42.7	1.7±0.2	39.0± 5.2
Eckelt lag screw	44.7±11.6	214.3±55.9	4.7±1.9	109.0±43.4
Wurzburg lag screw plate	18.1± 6.4	87.0±30.8	1.2±0.2	27.7± 3.5

* : For the calibration 4.8 is multiplied (see Fig. 6). ** : For the calibration 4.8² is multiplied (see Fig. 6).

図2 横骨折時の各種固定装置の最大荷重

方に向かって 1.0mm/sec の割合で荷重をかけていき、その際の荷重 — 変位曲線を記録した。この方法で下方に圧迫していくと骨体部が外側に偏位していく傾向にあったため、今回は押し始めから 20mm 下方に変位した時点までの荷重 — 変位曲線から最大荷重点とスティッフネス（剛性）を算出した。最大荷重点は材料が永久変形を起こす荷重であり、荷重 — 変位曲線の頂点にあたる部分の荷重値とした。スティッフネスは材料の堅さを示す指標で、荷重 — 変位曲線の傾きの中で最も高い値を採用した。

横骨折群、斜骨折群内における違いは一元配置分散分析を、おのおのの固定法間の違いは *t* 検定を用い、有意水準 5 % 以下を有意差ありと判定した。

結 果

横骨折群の結果をみると、比較的良好な強度を示したのは mini adaptation plate 2 枚による固定と Eckelt lag screw 固定で、最大荷重はそれぞれ 46.7 ± 9.5N, 44.7 ± 11.6N で

あり、スティッフネスはそれぞれ 4.1 ± 1.1N/mm, 4.7 ± 1.9N/mm であった（表 1, 図 2, 3）。最も強度が低かったのは mini adaptation plate 1 枚による固定で、最大荷重 13.2 ± 2.4N, スティッフネス 1.3 ± 1.0N/mm であった。DCP, Wurzburg lag screw plate はその中間であった。

斜骨折群においても mini adaptation plate 2 枚による固定が最も高い強度を示し、最大荷重 55.1 ± 11.6N, スティッフネス 5.2 ± 2.7N/mm であった（表 2, 図 4, 5）。一方、横骨折で良好な固定力を示していた Eckelt lag screw は著しく強度を落とし、DCP とほぼ同程度の最大荷重ならびにスティッフネスしか示さなかった。なお、Wurzburg lag screw plate は下顎枝の外側から 10° にオフセットされた collum screw で下外方にラグスクリュー効果を発揮させるものであるが、今回の設定のような斜骨折においては骨片のすべりを生じ、固定力を発揮できず、結果に大きなばらつきが出たため、斜骨折における Wurzburg lag screw plate の評価は行えなかった。

図3 横骨折時の各種固定装置のスティッフネス

表2 斜骨折時の最大荷重とスティッフネス

fixation system	maximum load	calibrated load in the condyle *	stiffness	calibrated stiffness in the condyle **
single adaptation plate	9.4± 1.8	45.2± 8.8	0.8±0.5	18.1±10.8
double adaptation plate	55.1±11.6	264.7±55.8	5.2±2.7	120.0±61.4
zygomatic DC plate	20.0±10.2	96.0±49.1	0.9±0.1	21.5± 1.6
Eckelt lag screw	22.8±11.3	109.3±54.4	1.0±0.2	22.4± 4.9
Wurzburg lag screw plate	NA***		NA***	

* : For the calibration 4.8 is multiplied (see Fig. 6). ** : For the calibration 4.8² is multiplied (see Fig. 6).

*** : Not appreciable (see text)

考 察

顎関節突起骨折に対する固定装置の *in vitro* における強度評価を行った研究は比較的少ない。われわれと類似の合成樹脂製の下顎骨を用いた Ziccardi ら¹⁰⁾ は Wurzburg lag screw plate と mini adaptation plate を比較しており、Haug ら¹¹⁾ は4種類のプレートの強度をわれわれと同じ Synbone[®]を用いて比較している。また、Choi ら¹²⁾ はヒトの下顎骨を用い、3種類のプレートと mini adaptation plate 2枚による固定との比較をしている。われわれが用いた下顎骨モデルである Synbone[®]は実際のヒト下顎骨の印象を採得し、それを基に規格化して作製されたもので、形状はヒトの骨そのものである。また、本モデルは周囲の皮質骨様部と内部の海綿骨様部からなっており、性状もヒトの骨と類似であることが確認されている¹³⁾。このように形態、性状ともにヒト顎骨と類似の規格化されたモデルの使用は、このような実験系には最も適したもので、年齢、

性別、生前の顎骨の状態などがさまざまで、大きさも画一化できないヒトの骨で行う実験より再現性が高いと考えられる。

Ziccardi ら¹⁰⁾ は咬合力を想定し、骨体部を固定した状態で顎関節部に荷重を加え、その際の組織内固定装置の強度を検討している。一方、Haug ら¹¹⁾ は顎関節部に、外側から内側、内側から外側、さらに後方から前方といった荷重を加え、その際の固定装置の許容荷重とスティッフネスを測定した。これは顎関節にはさまざまな方向からの荷重が加わるため、Ziccardi ら¹⁰⁾ が行ったような一方向からだけの荷重では不十分であるとの考えから行われたものであるが、ヒトの下顎骨と同様の形態をもつ骨モデルを用いる実験の利点は、咀嚼や咬合などで骨の各部に生じる応力をモデル上でシミュレートできることであり、単なる内方から外方、外方から内方といった荷重のかけ方ならば、板状のケミカルウッド[®]のような素材で検討しても足りるものと考えられる。したがって、われわれは Ziccardi ら¹⁰⁾ と同様

図4 斜骨折時の各種固定装置の最大荷重

図5 斜骨折時の各種固定装置のスティッフネス

のコンセプトで、咬合力による応力を三次元数学モデルで解析した Koolstra ら¹⁴⁾ の報告に従い、咬合力を想定した荷重を一方向から加え、関節突起部に生じる応力に対する固定装置の強度を観察した。なお、われわれが用いた荷重の加え方は下顎角骨折の固定装置の強度を検討する際に用いられることが多い方法であるが、関節突起部に荷重を加えていた Ziccardi ら¹⁰⁾ の方法と基本的に差異はなく、後述の方法により顎関節部に加わる荷重に換算できると考えている。

Talwar ら¹⁵⁾ は両側の顎関節突起骨折患者の治療後の咬合力の変化を検討している。それによると対照として検討された健常者の咬合力が右の臼歯部で $430.2 \pm 126.4\text{N}$ 、左の臼歯部で $440.2 \pm 155.8\text{N}$ であったのに対し、患者群では治療後6週の時点で、右が $161.7 \pm 84.3\text{N}$ 、左が $169.5 \pm 75.7\text{N}$ であったとされる。顎骨に加わる力を数学モデルで

解析した Koolstra ら¹⁴⁾ によると、臼歯部での噛みしめ時に生じる顎関節部の応力は噛みしめ力の65%に及ぶとされている。それらを考慮すると健常者の顎関節には300N程度の荷重が加わる可能性があり、両側性の顎関節突起骨折の患者の場合、術後6週以内ではおよそ100Nの力が及ぶことが考えられる。

Throckmorton と Dechow¹⁶⁾ は *in vitro* の系でヒトの下顎骨を用いて咬合力に相当する荷重を加えた場合、関節突起の前方と外側に牽引力がかかり、下顎枝の後面に圧縮力がかかることを明らかにしている。今回の実験でも荷重を加えていくにしたがい、骨折線の下顎枝後縁部を中心に骨体部が下方に回転していき、関節突起の前縁が開大していく所見が認められた。このため、われわれや Ziccardi ら¹⁰⁾ の力学系は図6に示すような比較的単純な軸運動として捉えることもできると考えられる。これを基にして今回の実

図6 われわれの荷重方法①と Ziccardi ら¹⁰⁾の荷重方法②

荷重初期には◎部を中心として軸運動するため、①における荷重は72/15、すなわち4.8を乗ずることで②部に加わると予想される荷重に換算できる。同様にスティッフネスの換算には4.8²を乗ずる。

験による最大荷重を顎関節部に加わる荷重に換算し直してみると、mini adaptation plate 1枚固定の平均値は63.4N、2枚固定は224.2N、DCPは116.2N、Eckelt lag screwは214.6N、Wurzburg lag screw plateは86.9Nということになる(表1)。

以上のような点を考慮して、今回の横骨折群の結果をみていくと、顎関節部の荷重として換算し直された最大荷重が100Nを超えていたのは、mini adaptation plate 2枚による固定とEckelt lag screw、ならびにDCPによる固定で、mini adaptation plate 1枚による固定とWurzburg lag screw plateは十分な固定力をもっているとはいえないようであった。Ziccardi ら¹⁰⁾の実験ではmini adaptation plateとWurzburg lag screw plateの許容荷重はそれぞれ39.2N、49.0Nであった。彼らが使用した下顎骨モデルの形状はわれわれが使用したモデルとは異なるため、完全な一致は当然望めないが、Wurzburg lag screw plateがmini adaptation plate 1枚に比べてやや強いものの、どちらも十分な強度をもっていないという点で一致していた。

DCPに関しては、われわれの結果を顎関節部の荷重に換算すると平均値がぎりぎり100Nを超えてはいるが、術後早期に顎関節を機能させるにはやはり十分な強度をもつとはいえないと考える。Haug ら¹¹⁾はmini adaptation plateやzygomatic DCPの他に1.0mm厚のmini dynamic compression plate; DCPプレートミニ2.0[®](Synthes社製)とCompact lock 2.0システム[®](Synthes社製)をSynbone[®]

に適応し、*in vitro*の実験を行っている。その結果として、これらのプレート類の中では1.0mm厚のDCPが比較的高い強度を示したが、1枚のプレート固定ではいずれのプレートも臨床的に必要な強度は満たしていない可能性があるとして述べている。

Choi ら¹²⁾はヒトの下顎骨を用いて関節突起骨折モデルを作製し、mini adaptation plate, DCP, 2.4mmプレート各1枚固定と2枚のmini adaptation plate固定の生体力学的評価を行い、2枚のmini adaptation plate固定がこの部の固定に最も適していると記している。合成樹脂モデルとヒトの顎骨という素材の違いだけでなく、実験方法も異なるので、彼らのデータとの直接的比較は困難であるが、注目すべきことは彼らの結果では、mini adaptation plate 1枚に対して、2枚使用した場合は4倍強の強度に達していたことである。われわれの結果でも最大荷重が3倍以上になっており、スティッフネスも3倍以上に増加していた。これは先述したように咬合時には関節突起の前方に牽引力が加わり、後方では圧縮力が加わることから考えると、それに抗するように配置されたプレートが強度を大幅に増加させた結果であろうと推測された。

Eckelt lag screwについて、このような*in vitro*の系で検討を加えた報告は渉猟した限りみられない。Sugiura ら¹⁷⁾はEckelt lag screwで固定された症例とmini adaptation plate固定ならびにキルシュナー鋼線固定の症例の術後6か月とさらに長期(7から106か月後; 平均18.4か月後)の臨床的ならびにX線学的評価を行い、Eckelt lag screw固定を行った症例が最も良好な結果を示したことを報告している。今回の結果でも横骨折時のEckelt lag screwはmini adaptation plate 2枚による固定と同等かそれ以上の最大荷重とスティッフネスを備えていることが明らかになり、彼らの臨床的結果を裏付けるものとなった。

顎関節突起骨折において下顎枝の長軸に対して斜めに骨折線が入る、いわゆる斜骨折はしばしば臨床で遭遇する⁷⁾。しかし、そのような骨折に対して行った骨内固定法の生体力学的強度を検討した報告は過去にはなされておらず、他との比較検討はできないが、今回の結果には大変興味深いものが含まれていると考えている。すなわち、プレート類は斜骨折時も横骨折時とほぼ同様の結果であったのに対し、Eckelt lag screwによる固定は最大荷重が横骨折時の半分となり、スティッフネスは4分の1以下となっていたことである。Spiessl¹⁸⁾は斜骨折に対して骨の長軸方向に圧迫骨接合の力を働かせると骨折面で剪断力が生じ、これが骨片間の圧迫を失わせるだけでなく、断層作用を起こすと述べている。また、45°の斜骨折では長軸方向の圧迫力の30%が剪断力に変換されるとも述べており、Eckelt lag screwの固定力の低下はこのような現象により生じたもの

と考えられた。実際の臨床で遭遇する斜骨折は全体としては斜めに折れているものの、今回の設定のような平滑な断面形状ではなく、骨折断端は鋸歯状を呈しており、骨片の整復後には interdigitation 効果が期待できるため、実際にはこれほど著しい固定力の低下が起こるとは考えられない。しかし、今回の結果はこのような骨折に対する lag screw 法の適用に注意を促す結果ではあると考えている。

以上の結果を総合的に判断すると、関節突起基底部分骨折に対する骨内固定法として、どのような骨折様態においても早期の機能負荷に十分耐えられる強度が得られる固定法は、2枚の mini adaptation plate による固定であると考えられた。なお、このような固定法を確実に行うためには、下顎枝部の広い術野の展開が必要となるが、われわれは下顎枝後方アプローチ¹⁹⁾を用いることで、mini adaptation plate 2枚による固定を行っており、このアプローチ法がこの固定法には最も適すると考えている。

結 語

顎関節突起基底部分骨折に対する骨内固定法の生体力学的評価を行い、以下の結果を得た。

1. 後方から見て下顎枝に対して垂直な骨折（横骨折）の場合、チタン製 mini adaptation plate 2枚による固定と Eckelt lag screw による固定が良好な結果を示した。

2. 後方から見て下顎枝に対して斜めに骨折している場合（斜骨折）にも2枚の mini adaptation plate による固定は十分な強度を示したが、Eckelt lag screw による固定強度は横骨折時に比べて大きく低下していた。

3. 1枚だけの mini adaptation plate や DCP による固定、もしくは Wurzburg lag screw plate による固定は、術後早期の機能負荷がかかる状況においては固定強度が不十分である可能性が窺われた。

稿を終えるにあたり、今回の実験において多大なるご協力をいただきましたグンゼ株式会社研究開発部メディカル材料センターの皆様に深謝いたします。

本論文の要旨は第5回日本口腔顎顔面外傷学会（平成15年6月、徳島市）にて発表した。

引 用 文 献

- 1) Hayward, J.R. and Scott, R.F.: Fractures of the mandibular condyle. J Oral Maxillofac Surg 51: 57-61 1993.
- 2) 富永和宏, 喜久田弘利, 他: 顎関節突起骨折に対する観血的療法の治療成績. 日口外誌 33: 2230-2238 1987.
- 3) Kikuta, T., Yasumitsu, C., et al.: Surgical treatment

for condylar fractures of the mandible-Questionnaire study-. Asian J Oral Maxillofac Surg 3: 137-144 1991.

- 4) Hyde, N., Manisali, M., et al.: The role of open reduction and internal fixation in unilateral fractures of the mandibular condyle: a prospective study. Br J Oral Maxillofac Surg 40: 19-22 2002.
- 5) Baker, A.W., McMahon, J., et al.: Current consensus on the management of fractures of the mandibular condyle. Int J Oral Maxillofac Surg 27: 258-266 1998.
- 6) Bos, R.R.M., Booth, R.P.W., et al.: Mandibular condyle fractures: a consensus. Br J Oral Maxillofac Surg 37: 87-89 1999.
- 7) Ellis, E. and Dean, J.: Rigid fixation of mandibular condyle fractures. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol 76: 6-15 1993.
- 8) Hammer, B., Schier, J., et al.: Osteosynthesis of condylar neck fractures: a review of 30 patients. Br J Oral Maxillofac Surg 35: 288-291 1997.
- 9) Haug, R.H., Barber, J.E., et al.: A comparison of mandibular angle fracture plating techniques. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 82: 257-263 1996.
- 10) Ziccardi, V.B., Schneider, R.E., et al.: Wurzburg lag screw plate versus four-hole miniplate for the treatment of condylar process fractures. J Oral Maxillofac Surg 55: 602-607 1997.
- 11) Haug, R.H., Peterson, G.P., et al.: A biomechanical evaluation of mandibular condyle fracture plating techniques. J Oral Maxillofac Surg 60: 73-80 2002.
- 12) Choi, B.H., Kim, K.N., et al.: Evaluation of condylar neck fracture plating techniques. J Craniomaxillofac Surg 27: 109-112 1999.
- 13) Bredbenner, T.L. and Haug, R.H.: Substitutes for human cadaveric bone in maxillofacial rigid fixation research. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 90: 574-580 2000.
- 14) Koolstra, J., van Eijden, J., et al.: A three dimensional mathematical model of the human masticatory system predicting maximum possible bite forces. J Biomech 21: 563-576 1988.
- 15) Talwar, R.M., Ellis, E., et al.: Adaptations of the masticatory system after bilateral fractures of the mandibular condylar process. J Oral Maxillofac Surg 56: 430-439 1998.
- 16) Throckmorton, G.S. and Dechow, P.C.: In vitro strain measurements in the condylar process of the human mandible. Archs Oral Biol 39: 853-867 1994.
- 17) Sugiura, T., Yamamoto, K., et al.: A comparative evaluation of osteosynthesis with lag screws, miniplates, or Kirschner wires for mandibular condylar process fractures. J Oral Maxillofac Surg 59: 1161-1168 2001.
- 18) Spiessl, B.: Osteosynthese des Unterkiefers. 1st Ed, Springer-Verlag, Berlin, 1988, p45-51.
- 19) 福田雅幸, 高橋 哲, 他: 下顎枝後方切開による下顎骨関節突起骨折の治療経験. 日口外誌 46: 69-74 2000.