チタン製ミニプレートによる骨接合の構造力学的評価

竹 島 浩

Assessment of structural mechanics of osteosynthesis
with titanium miniplates

Hiroshi TAKESHIMA

Abstract: This paper describes a method for determining the displacement of bone segments under application of a static load to evaluate the stability of the fractured mandible fixed with titanium miniplates.

1. In single miniplate fixation of linear-shaped acrylic resin models, fixation with a 4-hole long miniplate at either the upper or lower 1/3 area gave better resistance to displacement than fixation with a 4-hole regular miniplate.

2. In single miniplate fixation of linear-shaped acrylic resin models, fixation with a 4-hole regular miniplate at either the upper or lower 1/3 area had no effect on the displacement.

3. In single miniplate fixation of linear-shaped acrylic resin models, fixation with a 4-hole long miniplate at either the upper or lower 1/3 area also had no effect on the displacement.

4. Fixation with two miniplates yielded more resistance to displacement than fixation with one miniplate in both the linear-shaped and U-shaped acrylic resin models.

5. In simulatory osteosynthesis in the body region with one miniplate, the largest displacement was recorded by fixation at the upper 1/3 area with a 4-hole regular miniplate. However, large displacement was recorded by the other modes of single miniplate fixation.

6. In simulatory osteosynthesis at the median region with one miniplate, the displacement was smallest by fixation at the lower 1/3 area with a 4-hole regular miniplate. However, large displacement was recorded by the other modes of single miniplate fixation.

7. In simulatory osteosynthesis with two miniplates at either the body or the median region, the displacement was small and showed no difference by any mode of fixation. The displacement was smallest especially by fixation with two 4-hole regular miniplates.

8. In simulatory osteosynthesis at either the body or the median region, fixation with two miniplates resulted in smaller displacement, compared to fixation with one miniplate.

Key words: mandibular fracture (下顎骨骨折), titanium miniplate (チタン製ミニプレート), stability (接合・固定性)

緒 言

高純度チタンからなるチタン製ミニプレート（以下、チタンミニプレートと略記）は、組織親和性および顎骨の解剖学的形態に対する適合性に優れているために、生体内に長期間留置できるという利点を有している。そのために最近では、種々の顎顔面骨折や外科的矯正術における骨切り後の骨片固定に従来の Champy らのミニプレートに代わり、チタンミニプレートが使用される機会が増えてきている。しかし、チタンには弾性率が小さいという材料力学的特性があり、これを骨片固定に応用した場合、抗荷重性については懸念される。事実、チタンミニプレートを臨床に応用する際に、有用性を決定する上で重要な因子となるその monocortical osteosynthesis の固定材料としての接合・固定性については、構造力学的に十分評価されていない。

そこで、筆者は、この点をあきらかにする目的で本研究を企画した。実際には、チタンミニプレートを用いた骨接合・固定における接合固定性を静的荷重下での被接合・固定端の変位量を計測する方法により検討したところ、興味ある知見を得たので報告する。

材 料 と 方 法

実験は、チタンミニプレートによる接合・固定（以下、チタンミニプレート固定と略記）の変位量の比較である、ロングおよびレギュラーの2種類のチタンミニプレートを組み合わせた種々の固定法における変位量の比較の2段階に分けて行った（表1）。

1. 試験体の作製

実験に用いた試験体は、厚さ2mmのアクリリックレジンによって作製した直線型およびU字型の模型および乾燥ヒト無歯下顎骨（以下、ヒト下顎骨と略記）である。

試験には、直線型模型80個、U字型模型80個およびヒト下顎骨80側を用いた。なお、模型の作製にあたっては、ヒト下顎骨骨体部の高さ、頬舌の厚さおよび皮質骨の厚さを10体20側について計測し、その値に基づいて断面形態を直線型、U字型とも12×25mm、厚さ2mmと決定した。なおU字型模型においては外縁が直径8cm、内縁が直径6.8cmの円の曲率をもった形態とした。

また、模型の断面は一側皮質骨接合法を再現するため中空性閉断面とした。実験にあたっては、アクリリックレジンの場合は、模型を長軸と直角方向に切断して、直線型模型によって臼歯部骨体骨折を、U字型模型によって前歯部骨体骨折を想定し、またヒト下顎骨の場合は、正中部および大臼歯部で骨長軸と直角方向に切断して、骨体骨折の状況を作製し、これらをミニプレートで固定

表 1 材料および固定法

材 料：アクリリックレジン直線型模型（80個）	
アクリリックレジンU字型模型（80個）	
乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部（20体）	
乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部（20体）	
固定法：①チタンミニプレート4穴レギュラー上縁	
1/3固定（RU 固定）	
②チタンミニプレート4穴レギュラー下縁	
1/3固定（RL 固定）	
③チタンミニプレート4穴ロング上縁 1/3	
固定（LU 固定）	
④チタンミニプレート4穴ロング下縁 1/3	
固定（LL 固定）	
⑤チタンミニプレート4穴レギュラー2枚	
固定（RW 固定）	
⑥チタンミニプレート4穴ロング2枚固定	
（LW 固定）	
⑦チタンミニプレート4穴レギュラー上縁	
1/3、4穴ロング下縁1/3 2枚固定	
（RULL 固定）	
⑧チタンミニプレート4穴ロング上縁 1/3、	
4穴レギュラー下縁1/3 2枚固定	
（LURL 固定）

写真1 チタンミニプレート

上段：4穴レギュラー、中段：4穴ロングチタンスクリュー、下段：7mm

したものを用いた試験体とした。

試験体の作製に使用したミニプレートは、Leibinger社製チタンミニプレート4穴レギュラーおよび4穴ロングである。また、プレートに使用したスクリューは、Leibinger社製チタンミニプレート用スクリュー（直径2mm、長さ7mm）を使用した。また、スクリューの締結にあたっては、チタンミニプレートの専用ドライバーを用い手動で行った（写真1）。

図 1 アクリックレジン直線型模型における固定法の種類

図 3 乾燥ヒト無歯下顎骨白歯部における固定法の種類

図 2 アクリックレジンU字型模型における固定法の種類

図 4 乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部における固定法の種類

2. 試験体について (図1～4)

本試験においては、それぞれの試験体におけるミニプレートの締結位置を模型の高さおよび下顎骨骨体の高さ上縁1/3、下縁1/3に設定し、次の組合わせて比較した。すなわち、① チタンミニプレート4穴レギュラー上縁1/3固定 (以下、RU 固定と略記) ② チタンミニプレート4穴レギュラー下縁1/3固定 (以下、RL 固定と略記) ③ チタンミニプレート4穴ロング上縁1/3固定 (以下、LU 固定と略記) ④ チタンミニプレート4穴ロング下縁1/3固定 (以下、LL 固定と略記) ⑤ チタンミニプレート4穴レギュラー2枚固定 (以下、RW 固定と略記) ⑥チタンミニプレート4穴ロング2枚固定 (以下、LW 固定と略記) ⑦ チタンミニプレート4穴レギュラー上縁1/3、4穴ロング下縁1/3、2枚固定 (以下、RULL 固定と略記) ⑧ チタンミニプレート4穴ロング上縁1/3、4穴レギュラー下縁1/3、2枚固定 (以下、LURL 固定と略記) の計8実験群とした。なおこの際略語を使用す

るにあたっては、R: レギュラー、U: 上縁、L: ロング、L: 下縁、W: 2枚と定義した。

3. 荷重負荷装置と荷重負荷方法 (写真2)

試験体への外力の発生は、万能試験器 S-500 (島津製作所製、以下、S-500 と略記) を使用して行った。実際には、S-500 の受圧盤上に試験体の一端を自作の専用固定装置およびベンチパイプで把持し、絶対静止系とし非把持端に外力を負荷する片持ちはり (片側、固定支持状態における遊離端部への荷重負荷) 実験系を作製した。実際には非把持側の遊離端部に、S-500 のクロスヘッド

写真2 変位量の測定は、DT-20D型変位変換器3個により、3軸方向について行った。

図5 変位量の計測方向軸

図6 変位量の計測方向軸

図7 チタン製ミニプレートのstabilityを計測するためのブロックチャート

に装着した専用ポンチにより、5 mm/min の速度で試験体の臨界荷重まで荷重を負荷した。また、荷重負荷部位は、試験体の支持端から、直線型模型では 10 cm、U字型模型では外縁と内縁の中央を通る円弧上の距離で 10 cm の所とし、垂直に行った。

4. 変位量の計測方法 (図5～7)

被試験体長軸と直交する水平方向の変位量をX軸方向、垂直方向の変位量をY軸方向、被試験体長軸に平行する水平方向の変位量をZ軸方向と定義した。

変位量の計測は、X、Y、Z軸方向の変位量をDT-20D型変位変換器(共和電業社製)3個により計測し

図8 X軸における荷重変位線図(アクリリックレジ直線型模型)

固定の種類 (Mean±SD(mm))	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
	0.097±0.014	0.028±0.009	0.043±0.012	0.040±0.002	0.182±0.012	0.190±0.017	0.250±0.013
①	*	*	*	*	N.S.	N.S.	*
②	*	*	*	*	*	*	
③	*	*	*	*	N.S.		
④	*	*	*	*			
⑤	*	N.S.	N.S.				
⑥	*	N.S.					
⑦	*						
⑧							

* : significant (P<0.05)
N.S. : not significant
Mann-Whitney U-test

図9 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の比較(アクリリックレジ直線型模型)

た。

結 果

1. アクリリックレジ直線型模型における各種チタンミニプレート固定の変位量の計測結果

1) X軸における荷重変位線図(図8)

⑤～⑧の2枚固定群では、変位量は荷重量の増加に伴い増大し、両者の関係は、ほぼ直線関係を示した。それに対して、①～④の1枚固定群では全体に変位量が大きく、また、最大荷重量も2枚固定群の約半分となっていた。

2) 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の比較(図9)

図 10 Y軸における荷重変位線図（アクリリックレジン直線型模型）

図 12 Z軸における荷重変位線図（アクリリックレジン直線型模型）

固定の種類 Mean±SD(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	0.098±0.008	0.095±0.015	0.127±0.014	0.087±0.010	0.313±0.029	0.278±0.016	0.729±0.063
⑦	*	*	*	*	*	*	N.S.
⑥	*	*	*	*	*	*	
⑤	*	*	*	*			
④	*	*	*				
③	*	*					
②							

図 11 400 gf 荷重時の Y 軸方向における変位量の比較（アクリリックレジン直線型模型）

1 枚固定群は、すべての 2 枚固定群に比較して有意な差異が認められ、変位量が大きいことを示している。1 枚固定群のなかでは、RL 固定②の変位量が大きく、他の 1 枚固定群との間に有意差を認めた。また、2 枚固定群の中では LURL 固定⑧の変位量が大きく他の 3 種の 2 枚固定群との間に有意差を認めた。

3) Y 軸における荷重変位線図 (図10)

8 実験群の中では、X 軸方向の場合と同じく 2 枚固定群の変位量が小さい結果を示しており、1 枚固定群では、各固定法間で大きな差がみられた。特に、①、②のレギュラー 1 枚固定では、曲線の傾斜が急峻であった。

4) 400 gf 荷重時の Y 軸方向における変位量の比較 (図11)

1 枚固定群は、いずれも変位量が大きく、すべての 2

固定の種類 Mean±SD(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	-0.010±0.003	0.001±0.003	-0.034±0.002	-0.022±0.002	0.009±0.001	-0.033±0.002	-0.014±0.002
⑦	***	*	***	***	***	N.S.	***
⑥	**	***	***	***	***		
⑤	***	*	***	***	***		
④	***		*	*			
③	***						
②							

図 13 400 gf 荷重時の Z 軸方向における変位量の比較（アクリリックレジン直線型模型）

枚固定群と比較して有意な差異が認められた。また、1 枚固定群の中では、レギュラープレートを使用したものが、ロングプレート固定群よりも変位量が大きく有意差を認め、2 枚固定群においては LW 固定⑥の変位量が最大で他の 3 群との間に差を認めた。

5) Z 軸における荷重変位線図 (図12)

8 実験群とも変位量は、小さくなっており、荷重量の増加に伴う変位量の増加はみられなかった。

6) 400 gf 荷重時の Z 軸方向における変位量の比較 (図13)

RULL 固定⑦の変位量が最も小さい値を示し、RU 固定①の変位量が最も大きな値を示した。また 1 枚固定群の変位量が大きく、2 枚固定群と比較して有意な差異が認められた。

図 14 X軸における荷重変位線図 (アクリリック
レジンU字型模型)

固定の種類 Mean ± SD(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	0.302 ± 0.139						
⑦	0.206 ± 0.066						
⑥	0.356 ± 0.086						
⑤	0.298 ± 0.045						
④	0.420 ± 0.071						
③	0.308 ± 0.022						
②	0.413 ± 0.168						
①	0.394 ± 0.182	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
②	0.443 ± 0.168	N.S.	*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
③	0.308 ± 0.022	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.		
④	0.420 ± 0.071	N.S.	*	N.S.	N.S.		
⑤	0.298 ± 0.045	N.S.	N.S.	N.S.			
⑥	0.356 ± 0.086	N.S.	N.S.				
⑦	0.206 ± 0.066	N.S.					

* : significant (P<0.05)
N.S. : not significant
Mann-Whitney U-test

図 15 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の
比較 (アクリリックレジンU字型模型)

2. アクリリックレジンU字型模型における各種チャ ンミニプレート固定の変位量の計測結果

1) X軸における荷重変位線図 (図14)

8 実験群のいずれも曲線の傾きは、アクリリックレジ
ン直線型模型におけるよりも急峻であり、変位量も大き
くなっていった。1枚固定群と2枚固定群との比較では変
位量に著明な差は認められず、その最大荷重量は1枚固
定群において 600 gf で、2枚固定群の約1/3であった。

2) 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の比較 (図15)

総覧的にみた場合、1枚固定群と2枚固定群との間に
有意な差異は認められなかったが、RULL 固定⑦の変

図 16 Y軸における荷重変位線図 (アクリリック
レジンU字型模型)

固定の種類 Mean ± SD(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	1.355 ± 0.320						
⑦	1.285 ± 0.136						
⑥	1.781 ± 0.188						
⑤	0.889 ± 0.030						
④	3.398 ± 0.683						
③	3.896 ± 0.270						
②	3.473 ± 0.671						
①	4.528 ± 0.591	*	*	*	*	N.S.	N.S.
②	3.473 ± 0.671	*	*	*	*	N.S.	N.S.
③	3.896 ± 0.270	*	*	*	*	N.S.	
④	3.398 ± 0.683	*	*	*			
⑤	0.889 ± 0.030	N.S.	*	*			
⑥	1.781 ± 0.188	N.S.	*				
⑦	1.285 ± 0.136	N.S.					

* : significant (P<0.05)
N.S. : not significant
Mann-Whitney U-test

図 17 400 gf 荷重時のY軸方向における変位量の
比較 (アクリリックレジンU字型模型)

位量が最も小さな値を示し、比較的大きな値を示した
RL 固定②と LL 固定④、すなわち下縁 1/3、1枚固定
との間に有意差を認めた。

3) Y軸における荷重変位線図 (図16)

1枚固定群、2枚固定群とも変位量の絶対値は、直線
型模型のX軸およびY軸方向ならびにU字型模型のX軸
方向におけるよりも大きくなっていった。また、いずれの
固定群においても荷重量に比例して変位が大きくなり、
荷重変位線図は、ほぼ直線状を示していたが、①～④の
1枚固定群の曲線の傾斜が急であり、⑤の RW 固定群
において傾斜は最もゆるやかであった。

4) 400 gf 荷重時のY軸方向における変位量の比較 (図17)

1枚固定群の変位量はすべて大きく2枚固定群と比較

図 18 Z軸における荷重変位線図（アクリリックレジンU字型模型）

固定の種類 (Mean ± SD mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	-0.268 ± 0.062	-0.350 ± 0.029	-0.436 ± 0.059	-0.327 ± 0.025	-0.431 ± 0.048	-0.906 ± 0.069	-0.512 ± 0.086
⑦	***	***	***	***	***	*	**
⑥	***	***	*	***	N.S.	***	
⑤	***	***	***	***	***		
④	***	***	***	***	***		
③	***	***	***	***	***		
②	***	***	***	***	***		
①	***	***	***	***	***		

* : significant (P<0.05)
 ** : significant (P<0.01)
 *** : significant (P<0.001)
 N.S. : not significant
 Mann-Whitney U-test

図 19 400 gf 荷重時のZ軸方向における変位量の比較（アクリリックレジンU字型模型）

して、有意な差異が認められた。1枚固定相互間では、有意差は認められなかった。2枚固定群では LURL 固定⑧の変位量が最小で、RULL⑦と LW 固定⑥群との間に有意差が認められた。

5) Z軸における荷重変位線図（図18）

8実験群とも直線型模型における場合と異なり、荷重量に比例して変位量は、増加しておりその絶対値も大きくなっていった。また、1枚固定群の方が変位量が大きい結果となった。

6) 400 gf 荷重時のZ軸方向における変位量の比較（図19）

1枚固定群の変位量が大きく、いずれも2枚固定群と比較して有意な差異が認められた。1枚固定群においては、下縁 1/3 固定の RL ②、LL 固定④の2種が上縁

図 20 X軸における荷重変位線図（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

固定の種類 (Mean ± SD mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
⑧	0.352 ± 0.022	0.114 ± 0.062	0.151 ± 0.019	0.180 ± 0.010	0.081 ± 0.046	0.373 ± 0.056	0.326 ± 0.038
⑦	*	*	*	*	*	*	*
⑥	N.S.	*	*	*	*	N.S.	
⑤	N.S.	*	*	*	*		
④	*	N.S.	N.S.	*			
③	*	*	N.S.				
②	*	N.S.					
①	*						

* : significant (P<0.05)
 N.S. : not significant
 Mann-Whitney U-test

図 21 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の比較（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

1/3固定の RU ①、LU 固定③の2種よりも、変位量が大きく、両者間で有意差を認めた。2枚固定群においては、LW ⑥、RULL 固定⑦の2種、すなわち下縁にロングプレートを用いた固定群において、変位量が大きくなった。

3. ヒト下顎骨臼歯部における各種チタンミニプレート固定の変位量の計測結果

1) X軸における荷重変位線図（図20）

8実験群とも、レジン直線型模型に比較して、曲線の傾きは急峻であり、1枚固定群の傾きが2枚固定群の傾きより大きくなっていった。また変位量は、荷重量に比例して増加していたが、曲線はゆるやかな彎曲を描いていた。

2) 400 gf 荷重時のX軸方向における変位量の比較

図 22 Y軸における荷重変位線図（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

固定の種類 (Mean ± SD)(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
① 1.084 ± 0.435	*	*	*	**	*	*	*
② 0.581 ± 0.006	*	*	*	*	*	*	
③ 0.262 ± 0.098	*	*	N.S.	**	N.S.		
④ 0.391 ± 0.086	*	*	*	*			
⑤ 0.002 ± 0.009	*	*	**				
⑥ 0.150 ± 0.019	*	*					
⑦ 0.051 ± 0.007	*						

* : significant (P<0.05)
 ** : significant (P<0.01)
 N.S. : not significant
 Mann-Whitney U-test

図 23 400 gf 荷重時のY軸方向における変位量の比較（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

(図21)

1枚固定群においては、LL 固定④の変位量が最も小さな値を示し、他の1枚固定群との間に有意差を認め、また RU 固定①の変位量が最も大きな値を示した。2枚固定群においては、LURL 固定⑧の変位量が最大で、他の2枚固定群との間に有意差を認めた。

3) Y軸における荷重変位線図 (図22)

8実験群の中では、①～④の1枚固定群と⑤～⑧の2枚固定群との間で、曲線の傾きに大きな差が認められた。1枚固定群においては、X軸と同じく RW 固定⑤の変位量が最小で、RU 固定①の変位量が最大であった。また2枚固定群では、RW 固定⑤の傾きが特に小さな値を示した。

図 24 Z軸における荷重変位線図（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

固定の種類 (Mean ± SD)(mm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
① -0.122 ± 0.082	*	***	*	*	*	*	***
② 0.021 ± 0.004	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	*	*	
③ 0.232 ± 0.032	*	*	*	*	N.S.		
④ 0.129 ± 0.073	*	*	*	*			
⑤ 0.011 ± 0.008	N.S.	N.S.	*				
⑥ 0.014 ± 0.012	N.S.	N.S.					
⑦ -0.004 ± 0.005	N.S.						

* : significant (P<0.05)
 *** : significant (P<0.001)
 N.S. : not significant
 Mann-Whitney U-test

図 25 400 gf 荷重時のZ軸方向における変位量の比較（乾燥ヒト無歯下顎骨臼歯部）

4) 400 gf 荷重時のY軸方向における変位量の比較 (図23)

1枚固定群では、レギュラープレート固定群、すなわち RU 固定①と RL 固定②において変位量が大きく、ロングプレート固定群との間に有意差を認めた。2枚固定群においては、いずれの固定法相互間に有意差が認められ、特に RW 固定⑤の変位量が最小であった。

5) Z軸における荷重変位線図 (図24)

1枚固定群の中では、RL 固定②のみが、変位量は小さく、他の固定法では荷重量の増加に応じて変位量が大きな値を示した。また、RU 固定①においては、両接合断端部で捻れが生じ、遊離端側の下縁は試験体を固定支持している側の下縁とすれちがうような変位状態を示し

図 26 X軸における荷重変位線図（乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部）

た。2枚固定群では、RULL 固定⑦の変位量が大きく、他の固定法では荷重量が増加しても変位量の著明な増加は認められなかった。

6) 400 gf 荷重時の Z 軸方向における変位量の比較 (図25)

1枚固定群においてはロングプレート使用の LU 固定③と LL 固定④で変位量が大きく、レギュラープレート固定との間に有意差を認めた。また RL 固定②は、2枚固定群と比較して有意な差異は認められなかったが、他の1枚固定の変位量は大きな値を示し、2枚固定群と比較して有意な差異が認められた。2枚固定群においては、LURL 固定 ⑧の変位量が最大で、各固定法間で著明な有意差は認められなかった。

4. ヒト下顎骨前歯部における各種チタンミニプレート固定の変位量の計測結果

1) X軸における荷重変位線図 (図26)

2枚固定群は、荷重量に比例して変位がゆるやかに増大しており、1枚固定群においては、低荷重でも変位量の増大が急激であった。

2) 400 gf 荷重時の X 軸方向における変位量の比較 (図27)

1枚固定群では上縁 1/3 固定すなわち RU 固定 ①と LU 固定③の変位量が大きく、下縁 1/3 固定群との間に有意差を認めた。また、RL 固定②は変位量が小さく他

図 27 400 gf 荷重時の X 軸方向における変位量の比較（乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部）

図 28 Y 軸における荷重変位線図（乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部）

の2枚固定群との間に有意差は認められなかった。しかし、他の1枚固定群では、変位量は大きく2枚固定群との間に有意な差異が認められた。2枚固定群においては、RW 固定⑤の変位量が最小であった。

3) Y軸における荷重変位線図 (図28)

1枚固定群では、それぞれの固定法における荷重変位線図の立ち上がりには差はみられず、また2枚固定群も1枚固定群と同様に2枚固定群間では荷重変位線図の立ち上がりには差はなかった。変位量に差はみられず荷重量

固定の種類 (Mean±SDmm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
	0.591±0.039	0.590±0.019	0.864±0.021	0.630±0.017	2.796±0.200	2.750±0.487	2.333±0.517
①	*	*	*	*	N.S.	N.S.	N.S.
②	*	*	*	*	N.S.	N.S.	
③	*	*	*	*	N.S.		
④	*	*	*	*			
⑤	N.S.	N.S.	*				
⑥	*	*					
⑦	N.S.						

* : significant (P<0.05)
N.S. : not significant
Mann-Whitney U-test

図 29 400 gf 荷重時の Y 軸方向における変位量の比較 (乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部)

図 30 Z 軸における荷重変位線図 (乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部)

に比例して変位が大きかった。しかし、変位量の大きさは、U 字型模型における実験と同じく臼歯部を用いた実験より大きな値を示した。

4) 400 gf 荷重時の Y 軸方向における変位量の比較 (図29)

1 枚固定群の変位量は大きく、いずれの 2 枚固定群と比較しても有意な差異が認められた。2 枚固定群では RULL 固定 ⑦の変位量が最も小さな値を示し、1 枚固定群では RU 固定 ①の変位量が最も大きな値を示したが、各 1 枚固定群の間で有意差は認められなかった。

5) Z 軸における荷重変位線図 (図30)

総覧的には、両接合断端における捻れが生じ、遊離端

固定の種類 (Mean±SDmm)	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②
	-0.128±0.009	-0.033±0.006	-0.196±0.024	-0.125±0.023	-0.648±0.056	-1.045±0.349	-0.398±0.114
①	***	***	***	***	***	**	***
②	***	***	***	***	**	***	
③	***	***	***	***	***		
④	***	***	***	***			
⑤	N.S.	***	**				
⑥	***	***					
⑦	***						

** : significant (P<0.01)
*** : significant (P<0.001)
N.S. : not significant
Mann-Whitney U-test

図 31 400 gf 荷重時の Z 軸方向における変位量の比較 (乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部)

図 32 400 gf 荷重時の変位量 (アクリリックレジソ直線型模型)

側の下縁は試験体を固定支持している側の下縁とすれちがうような変位状態を示した。1 枚固定群では、RU 固定 ①の変位量が大きく、各固定法間で荷重変位線図の傾斜に差が認められた。また 2 枚固定群では、変位量に差はなかった。

6) 400 gf 荷重時の Z 軸方向における変位量の比較 (図31)

2 枚固定群では RULL 固定 ⑦の変位量が小さな値を示し、1 枚固定群では RU 固定 ①と LU 固定 ③の上縁 1/3 固定群が大きな変位量を示していた。1 枚固定群の変位量は大きく、いずれの 2 枚固定群に比較しても有意な差異が認められた。

5. X, Y, Z 3 軸方向の変位量の合計による接合・固定性の評価

以上各実験における X, Y, Z 各軸方向別の変位量の比較を中心として述べてきたが、実際に下顎骨折の骨片固定に応用した場合は、正確な咬合関係の維持、回復を計るという目的から、いずれの方向における骨片の変

図 33 400 gf 荷重時の変位量 (アクリリックレジ U 字型模型)

図 34 400 gf 荷重時の変位量 (乾燥ヒト無歯下顎骨白歯部)

位も少ないものが望ましい。すなわち、X、Y、Z 3 軸方向の変位量の平均値の合計により変位量の評価をする必要があると考えられる。そこで、以下にその結果を示す。

1) アクリリックレジ直線型模型による 400 gf 荷重時の変位量 (図 32)

8 実験群では、RU 固定①と RL 固定②の変位量が大きく、2 枚固定群では、変位量は小さく接合固定があり、LU 固定③と LL 固定④の変位量が、その中間型を示した。

2) アクリリックレジ U 字型模型による 400 gf 荷重時の変位量 (図 33)

8 実験群では、1 枚固定群の変位量が大きく、4 種類の固定法はともに、ほぼ同程度の変位量であった。また 2 枚固定群においては、RW 固定⑤の変位量が最も小さいが、他の固定法においても、1 枚固定群より、かなり変位量は小さかった。

また、いずれの試験体においても Y 軸方向の変位が主体となっていたが、U 字型模型においては Z 軸方向の変位量の割合も大きかった。

3) ヒト下顎骨白歯部による 400 gf 荷重時の変位量 (図 34)

8 実験群では、RU 固定①が、最も変位量が大きく、他の 1 枚固定群より、かなり大きく変位していた。また 2 枚固定群においては、4 種類の固定法ともかなり変位

図 35 400 gf 荷重時の変位量 (乾燥ヒト無歯下顎骨前歯部)

量は小さな値を示した。

4) ヒト下顎骨前歯部による 400 gf 荷重時の変位量 (図 35)

8 実験群において、2 枚固定群は、1 枚固定群に比較して変位量は、かなり小さくなっていった。また、変位の方の主体は Y 軸で、1 枚固定群においては Z 軸方向の変位の割合が増えていた。

考 察

種々の顎顔面骨折の金属プレートによる接合術は、1928年に Wassmund により three hole plate が発表されたのが最初である¹⁾。その後 1958 年に整形外科領域において Müller を中心として 15 人の外科医と整形外科医の研究グループである A-O (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese fragen) がスイスに結成され、従来使用されてきた骨接合用の手術器具に改良を加えプレートとスクリューを用いて強固な内固定により外固定が不要で術後早期に機能を再建できる A-O 法が開発された^{2,3)}。さらに、それは 1968 年 Luhr⁴⁾、1971 年 Spiessl ら⁵⁾によって顎顔面領域へ導入された。しかしこの圧迫骨接合術では、強固な固定が骨萎縮を生じさせるという報告もなされ、そのため 1973 年 Michelet ら⁶⁾はバイタリウム製の小プレートによる外側皮質骨に固定源を用いた、いわゆる一側皮質骨接合法なる固定法を考案し、十分な固定が得られ、顎間固定を短縮もしくは省略できると報告した。次いで 1978 年 Champy らはこの方法を改良し、実験的成果および臨床例についての報告⁷⁻⁹⁾を行い、以来この Champy ミニプレートは、顎骨骨折の治療において広く用いられるところとなった。本邦においても 1982 年池村ら¹⁰⁾がその有用性を報告している。この Champy ミニプレートは、3 次元的屈曲が可能ため複雑な部位にも適合状態が良好であり、またプレートが小さく厚みも薄いため、違和感が少ない、など種々の利点を有している^{10,11)}。しかし、一方で固定に使用したプレートは除去する必要がある、再度入院、手術の加療を要するとい

う欠点も持っている。その点を解消したのが、Reutherにより開発されたチタンミニプレートである。

チタンは、組織親和性、生体適合性に優れているというのが第1の特徴で、組織および体液によってほとんど影響を受けず、逆にチタンも組織に対して為害作用を及ぼさないという利点を有している。以上のことがらは、近年、臨床において用いられている Brånemark の osseointegrated implant によっても十分証明されていることではあるが、それ以外にも骨接合に応用したチタンミニプレートの周囲において、骨の添加がみられることは、臨床上しばしば経験されることである。しかしチタンミニプレートを臨床応用する場合、その有用性を決定する上で重要な因子となる荷重負荷時の力学的挙動、とくにその一側皮質骨接合法としての外力に対する安定性については、十分に検討されていないのが現状である。したがって、今回筆者はこのことを明白にする目的で、本実験を実行し、考察することにした。

1. 試験体ならびに試験方法について

今回、筆者らが実験に使用した試験体は、中空性のアクリリックレジン直線型模型とU字形模型およびヒト下顎骨である。

下顎骨の解剖学的形態は、厚さ2～3 mmの皮質骨とその内部を満たす海綿骨質からなることは周知の事実であり、その形態を人工材料によって正確に再現することには無理があると考えられる。しかし Champy プレート、およびチタンミニプレートの両者とも、臨床においては一側皮質骨接合法として使用されており、実際に手術直後は、スクリューは皮質骨部分との間で固定力を発揮し、海綿骨で生じる固定力は、ほとんど無視しうる。したがって、本実験で用いたような中空性の材料によって、一側皮質骨接合法に近い状態が再現されと考えられ、試験体を作製した。そこで、ヒト下顎骨の下顎骨骨体の高さ、骨体の幅および頬舌側の皮質骨の厚さを計測し、試験体作製上の参考とした。一方、ヒト下顎骨については、推定年齢約60歳の印欧系無歯下顎骨を試験体として使用した。これは中空性アクリリックレジン模型による模型構造試験も必要であるが、より臨床における状況に近似させる意味で、ヒト下顎骨を用いた実物構造試験を行い解析することが不可欠であると考えられたからである。プレートの種類は、臨床において、最も使用頻度が高く、かつ基本的形態であるチタンミニプレート4穴レギュラーおよび4穴ロングの2種類を用いた。

また、プレートの締結位置については、試験体高径の上縁1/3、下縁1/3、1枚固定および上縁1/3と下縁1/3の2枚固定を採用した。

このうち、1枚固定において Champy ら⁷⁾は、咬合面方向からの荷重実験すなわち咬合力を模倣した実験によって、骨体の上方には引っ張り力が、下方には圧縮力が生じるところから、歯根を損傷しない範囲でできるだけ

上方に固定することを推奨している。しかし、臨床において骨折患者にこれに応用しようとした場合、骨体の高さと歯根との関係から、骨体の中央よりもやや下方にネジ止めをせざるを得ないことが多い。これらのことにより、上縁1/3、下縁1/3、1枚固定の両固定法間における stability について評価を行うために採用した。また2枚固定においては、Champy ら⁷⁾は主に曲げモーメントが主体となる骨体部骨折よりも、むしろ曲げモーメントに捻れが加わる下顎前歯部骨折の場合に、より重要であり、したがって、前歯部においては、捻れのモーメントに拮抗するため、4～5 mm 程度の間隔で2枚固定が必要であると述べている。このことにより、2枚固定の接合・固定性についても評価した。

また固定に使用したスクリューの種類は、一側皮質骨接合法に使用される、直径2 mm、全長7 mmの buttress-thread に類似したネジ山によるチタン製セルフタッピングスクリューを用いたが、これも、臨床における使用頻度がきわめて高いためである。

2. 実験結果について

アクリリックレジンを試験体とした実験結果および下顎骨を試験体とした実験結果を比較したところ、X、Y、Zの3軸方向の変位量の合計の平均値の順位の組み合わせでは、アクリリックレジン直線型模型とヒト下顎骨臼歯部では、ほぼ同様の傾向を得た（順位相関係数： $r_s=0.95$, $P<0.005$ ）。また、アクリリックレジンU字型模型とヒト下顎骨前歯部においても、ほぼ同様の傾向が得られた（順位相関係数： $r_s=0.95$, $P<0.01$ ）。このことにより、アクリリックレジン模型による構造力学的試験によっても、ヒト下顎骨による実物構造試験を両者の材料力学的強度差を考慮すれば再現できることが示唆された。また、一側皮質骨接合法という構造体がよく再現されていることを示しているものと考えられた。

アクリリックレジンU字型模型とヒト下顎骨前歯部および、アクリリックレジン直線型模型とヒト下顎骨臼歯部では、アクリリックレジンU字型模型とヒト下顎骨前歯部の方で変位量が多く、この場合、Z軸方向の変位量も多くなっており、ミニプレート自体の伸びやスクリューの引き抜きが生じている可能性が考えられた。このことは、プレートの断面が扁平でリミットデザインされた形態をしているため、許容応力度を超えた場合、ミニプレートに大きな変形が急激に生じやすいことも一因となっていると考えられた。すなわち、部材のもつ断面2次モーメントの理論からもあきらかなように、長方形断面を有する梁材は、その長径の方向には曲げにくいが短径の方向には曲がりやすく、この曲げによる応力変化がまた伸びのような引っ張り力の集中を発生させる。実際には、ミニプレートのうちスクリューを把持する部位に応力集中による変形を生じやすく、固定性を低下させる方向、すなわち、1枚のみの固定では応力を分散させるこ

とが難しく大きな変位を計測したと考えられる。したがって、これに拮抗するために前歯部においては、2枚固定が必須と思われた。また、この場合プレートが捻れに抵抗しやすいように、ロングプレートを使用するよりもネジ穴間の距離の短いチタンミニプレート4穴レギュラー2枚固定を採用した方が他の固定法に比較して変位量は小さく、Y軸方向のみでなくX、Z軸方向への変位をも最小限にすることができると考えられ、前歯部骨折には、レギュラー2枚固定を行うべきであると考えられた。

アクリリックレジン直線型模型とヒト下顎骨臼歯部では、やはり2枚固定の変位量が少なくチタンミニプレート4穴レギュラー2枚固定とチタンミニプレート4穴レギュラー上縁1/3、4穴ロング下縁1/3、2枚固定が他の固定法より良いと考えられた。したがって、下顎骨骨体の高さが十分にあり、かつオトガイ神経や下歯槽神経、歯根などを損傷しない範囲内で、2枚の固定を用いることが可能な症例では、2枚固定を採用すべきであると思われた。しかし、1枚固定の変位量の絶対値は、前歯部における2枚固定と同程度であり、臨床において、1枚固定でも十分に目的を果たしていることを考慮すると、Champy^らのいう通り、臼歯部骨体骨折にはチタンミニプレート1枚固定も有用性があると考えられた。この場合、下縁1/3に止めた方がやや変位量が少なく、この部位は、下顎骨骨体の高さの1/3にあたり、下顎骨の断面の重心軸より、大きな隔たりがないためと考えられた。このことは、臨床においては、歯根が存在し、上縁にプレートをネジ止めできないことを考慮すると有意義な結果と思われた。さらに、1枚固定を行う場合はロングプレートの使用により変位量を小さくすることができるという結果が得られており、ロングプレートを使用した方が臨床に有利と考えられた。

以上、筆者はチタンミニプレートと他の2種のミニプレート、すなわちChampyミニプレートおよびA-Oミニプレートとの比較や、同一ミニプレートにおいてもplatingの部位や枚数による接合断端の固定性などの比較検定を行ったが、その結果、臨床における使用にあたっての若干の示唆を得た。そこで、筆者は本研究で得られたこれらの示唆を、今後の顎骨骨折の手術に還元し、科学的な治療法の確立に資したいと考えている。

結 論

チタンミニプレートを臨床に応用する際の有用性を決定する上で重要な因子となる一側皮質骨接合法としての接合・固定性の評価を、静的荷重下での変位量を計測する方法により行った。その結果、以下の結論を得た。

1. アクリリックレジン直線型模型を用いた接合模型におけるチタンミニプレート1枚による固定では、上縁

1/3、下縁1/3における固定とも4穴ロングプレートによる固定群が、4穴レギュラープレートによる固定群より変位量は小さかった。

2. アクリリックレジン直線型模型を用いた接合模型におけるチタンミニプレート4穴レギュラー上縁1/3固定と、チタンミニプレート4穴レギュラー下縁1/3固定の比較では有意差は認められなかった。

3. アクリリックレジン直線型模型を用いた接合模型におけるチタンミニプレート4穴ロング上縁1/3固定と、チタンミニプレート4穴ロング下縁1/3固定の比較においても有意差は認められなかった。

4. アクリリックレジン直線型模型およびU字型模型を用いた接合模型においては、ともに2枚固定群が1枚固定群よりも変位量は小さかった。

5. ヒト下顎骨骨体部骨折を想定した一側皮質骨接合法において1枚固定群間の比較では、4穴レギュラー上縁1/3固定の変位量が最も大きかったが、他の1枚固定群との比較では、有意差は認められなかった。

6. ヒト下顎骨正中中部骨折を想定した一側皮質骨接合法において1枚固定群間の比較では、4穴レギュラー下縁1/3固定の変位量が最も小さかったが、他の1枚固定群において、変位量は大きかった。

7. ヒト下顎骨骨体部骨折、正中中部骨折を想定した一側皮質骨接合法においても2枚固定群間の比較では、すべての固定法において変位量は、有意差は認められず、小さい値を示していた。その中でも4穴レギュラー2枚固定の変位量が最も小さい値を示していた。

8. ヒト下顎骨骨体部骨折および正中中部骨折を想定した一側皮質骨接合法ともに、2枚固定群が1枚固定群よりも変位量は小さかった。

稿を終るに臨み、終始ご懇切なるご指導とご校閲を賜りました山本美朗教授に深甚なる感謝の意を表します。また種々のご懇切なるご教示とご校閲を賜りました本学歯科補綴学第1講座主任の柳生嘉博教授ならびに本学口腔外科学第2講座主任の藤田訓也教授にも厚くお礼申し上げます。さらに本研究を行うにあたり、ご教示、ご協力を頂いた本学口腔外科学第1講座の嶋田 淳助教授、阪本栄一非常勤講師ならびに教室の先生方にも、心より御礼申し上げます。

本論文の要旨の一部は第42回日本口腔科学会総会(1988年6月、札幌)、第35回日本口腔外科学会総会(1990年10月、岡山)において発表した。

引 用 文 献

- 1) Pape, H.D.: Maxillo-facial Osteosynthesis by Small Plates acc. to Prof. Champy. Martin, Tuttlingen, 1976, p 4.
- 2) Müller, M.E., Allgöwer, M., et al.: Technik

- der Operativen Frakturbehandlung. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1963, p 1-326.
- 3) Müller, M.E., Allgöwer, M., et al.: Manual der Osteosynthese. AO-Technik. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1977, P 3-392.
 - 4) Luhr, H.G.: Zur stabilen Osteosynthese bei Unterkieferfrakturen. (Rigid osteosynthesis in mandibular fractures.) Dtsch zahnärztl Z 23: 754 1968.
 - 5) Spiessl, B., Schargus, G., et al.: Diestabile Osteosynthese bei Frakturen des unbezahnnten Unterkiefers. Schweiz Mschr Zahnheilk 81: 39 1971.
 - 6) Michelet, F.X., Deymes, J., et al.: Osteosynthesis with miniaturized screwed plates in maxillofacial surgery. J max-fac Surg 1: 79-84 1973.
 - 7) Champy, M., Lodde, J.P., et al.: Mandibular osteosynthesis by miniature screwed plates via a buccal approach. J max-fac Surg 6: 14-21 1978.
 - 8) Champy, M., Lodde, J.P., et al.: Plattenosteosynthesen bei Mittelgesichtsfrakturen und Osteotomien. Dtsch Z Mund-Kiefer-Gesichts-Chir 2: 26-29 1978.
 - 9) Gerlach, K.L. and Pape, H.D.: Prinzip und Indikation der Miniplattenosteosynthese. Dtsch Zahnärztl Z 35: 346-348 1980.
 - 10) 池村邦男, 三宅正輝, 他: ミニプレートによる下顎骨骨折の治療. 日口外誌 28: 111-121 1982.
 - 11) 藤本久夫, 岩坪玲子, 他: Champy plate による顎顔面骨接合術. 日口外誌 33: 345-346 1978.
 - 12) 草道秀武, 村上陽太郎, 他: 一般工業分野におけるチタンの新用途開発の動向; 金属チタンとその応用. 「金属チタンとその応用」編集委員会編, 日刊工業新聞社, 東京, 1987, 229頁.
-