

ヒト下顎骨に作用する力の材料力学的解析
—内力と生体内吸収性骨接合システムおよび骨の強度の力学的均衡の観点
から形成した下顎骨骨折症例への臨床応用モデル—

**Analysis of external and internal forces of a human mandible invested by
strength of materials: Clinical application model for mandibular fracture
cases created from the viewpoint of dynamic balance between internal forces
and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone**

草野雅章, 瀧岡 渡, 山本一彦, 北山若紫, 吉田精司, 倉木美穂, 桐田忠昭

Masaaki KUSANO, Wataru TAKIOKA, Kazuhiko YAMAMOTO,
Wakashi KITAYAMA, Seiji YOSHIDA, Miho KURAKI, Tadaaki KIRITA

Abstract: We created clinical application model for mandibular angle, posterior and anterior fracture cases from the viewpoint of dynamic balance between internal forces and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone. In combination with analysis of external and internal forces of a human mandible invested by strength of materials, we performed clinical application for mandibular angle, body and symphysis fracture cases fixed with bio-absorbable osteosynthesis system. We analyzed kind, number, implanted region of the system, and necessity and duration of reinforcement of strength (RS) including maxillomandibular fixation (MMF) and splint(SPT). Obtained results were as follows.

1. According to theoretical analysis, postoperative RS during 1 to 2 weeks was necessary for following: (1) patient with angle fracture fixed with one 4-hole miniplate on the buccal shelf and the other 4-hole miniplate on mandibular lower boarder, (2) patient with multiple fractures fixed with one 4-hole miniplate on the buccal shelf and the other 6-hole miniplate on mandibular lower boarder at angle region, (3) patient with body fractures of premolar site fixed with one 6-hole miniplate on the supreme position and the other 6-hole miniplate on the inferior position.

2. According to theoretical analysis, postoperative RS during 2 to 3 weeks after fixation was necessary for following: (1) patient with simple angle fracture fixed with 4-hole miniplate fixation on buccal shelf, (2) patient with body fractures of premolar site fixed with one 4-hole miniplate on the supreme position and the other 6-hole miniplate on the inferior position, (3) patient with body fractures of premolar site fixed with one 4-hole miniplate on the supreme position and the other 4-hole miniplate on the inferior position, (4) patient with body fractures fixed with one 4-hole miniplate on the supreme position and the other 4-hole miniplate on the inferior position at mandibular anterior region.

3. According to theoretical analysis, postoperative RS during 1 to 2 weeks was necessary for a patient with simple angle fracture fixed with one 4-hole miniplate on the buccal shelf and the other 4-hole miniplate on mandibular lower boarder. With regard to the patient, MMF for 15 days and SPT combined with rubber for 15 days were performed, and two screws inserted on the medial part of the plate on the buccal shelf broke at the neck region at the 21st day when MMF and SPT had been released. This result suggest that inserting technique of the screws together with SR after fixation is an important factor to influence upon clinical result.

4. The clinical data showed good results without any complication when the patients were treated fundamentally under the theoretically established rules based on the analysis of external and internal forces of a human mandible invested by strength of materials.

Key words: Analysis of forces, a human mandible, strength of materials, creation of clinical application model for mandibular fracture cases, dynamic balance between internal forces and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone.

原稿受付日:2007年7月5日, 受理日:2007年12月26日

公立大学法人奈良県立医科大学医学部

口腔外科学講座

Department of Oral and Maxillofacial Surgery,

Medical School, Nara Medical University

1. 緒言

顎顔面領域の臨床において、下顎骨骨折に対する整復固定術施行の際、設置されたプレートやスクリューが受ける力の解析は重要であり、特に下

顎骨に作用する力の解析は必須である。しかし、下顎骨に作用する力に関する研究は少ない。下顎骨に作用する力に関する定性的・定量的特徴は、臨床を行う前提であり必須のものであるにもかかわらず正確に把握されていない。その原因は、下顎骨に作用する外力のうち、咀嚼筋力と顎関節反力を実測することができないことと、その実測データに基づく内力の定性的・定量的特徴が把握されていないことによる。著者らは、これまで未知であった下顎骨に作用する力を、材料力学を用いて解析した。その結果、下顎骨に作用する外力である咀嚼筋力、顎関節部における反力、咬合力によって下顎骨に発生する内力のうち曲げモーメント、ねじりモーメント、剪断力に関して材料力学的に解析する方法を開発し、曲げモーメント図、ねじりモーメント図、剪断力図を得た⁽¹⁾。

本報では、その結果を臨床に応用するために、内力と生体内吸収性骨接合システムとの力学的均衡の観点から、下顎骨の顎角部・臼歯部・前歯部骨折モデル形成した。それを用いて骨折部位、使用する生体内吸収性骨接合プレートとスクリューの種類・個数・設置部位、顎間固定(maxillomandibular fixation: MMF)、スプリント(splint: SPT)等の強度補強の必要性・期間等について解析し、臨床データとの比較を行った結果、興味ある知見が得られたので報告する。

2. 研究方法

(1) 解析

本報告では、ヒト下顎骨に作用する力に関して材料力学的解析を行った結果を用いた⁽¹⁾。解析を行った下顎骨のモデルを Fig. 1 に示す。下顎骨のモデルとしては頭蓋骨・脳・頸椎・腰椎複製モデルキット(京都科学標本株式会社製、京都)を用いた。Fig. 2 に内力の正負の規約を示す。本報告で用いた曲げモーメント図、ねじりモーメント図、剪断力図を Fig. 3 に示す⁽¹⁾。内力の種類毎に材料力学的解析結果を Table 1 に示す。

(2) 解析と臨床データとの比較の対象

本報告では、生体内吸収性骨接合システムを適用した顎角部の単純骨折3例(症例番号1, 4, 7)、顎角部と関節突起の多発骨折(本ケースはラグスクリュー併用1例: 症例番号3)、顎角部と骨体部(骨折部は小白歯部)の多発骨折1例(症例番号5)、骨体部(骨折部は両側小白歯部)の多発骨折1例(症例番号2)、骨体部(骨折部は正中部)と関節突起の多発骨折(本ケースはラグスクリュー併用)1例(症例番号6)の合計7例について、骨折部位、生体内吸収性骨接合システムの種類・個数・設置部位、MMF等強度補強の必要性・期間等

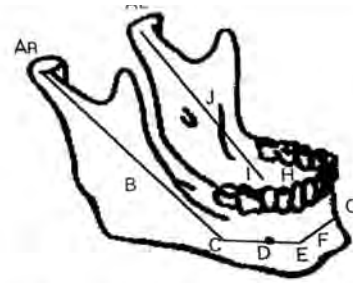


Fig.1 Analysis model of a human mandible. AR: Right condyle region. B: Middle point of right ramus. C: Lower right second molar region. D: Lower right premolar region. E: Lower right canine region. F: Central incisor region. G: Lower left canine region. H: Lower left premolar region. I: Lower left second molar region. J: Middle point of left ramus. A1: Left condyle region.

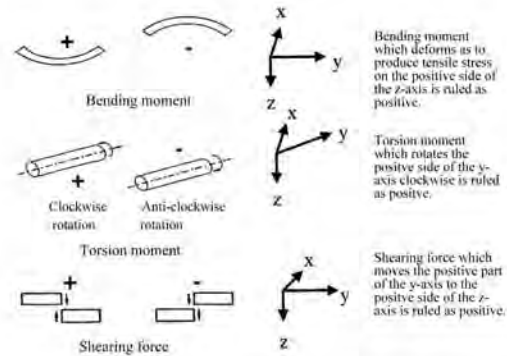


Fig.2 Sign of direction of internal force.

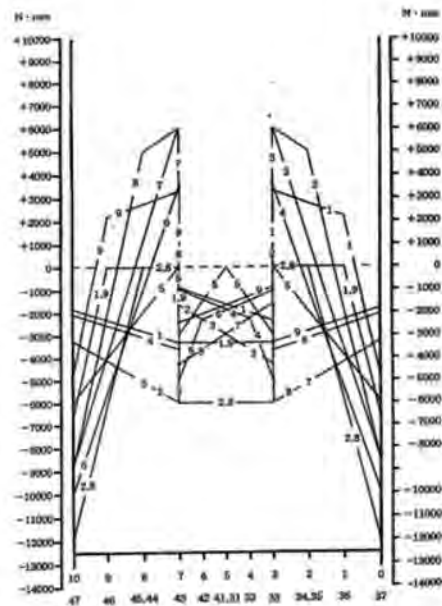


Fig.3 Internal forces⁽¹⁾. (a) Bending moment.

について解析を行った。そして、生体内吸収性骨接合システム適用例 7 例について、解析結果と臨床データとの比較検討を行い、成功例と合併症発生例についてその原因の検討を行った。臨床症例の術後予後経過観察期間の平均は 1 年 7 か月であった。

(3) 臨床応用モデル

(a) 顎角部骨折モデル

顎角部骨折モデルを Fig. 4 に示す。顎角部に作用する内力は曲げモーメント、ねじりモーメント、剪断力であり、これに対しては、頬棚上と下顎下縁上の骨接合システム（以下システムと呼ぶ）で対応させる。第一に、曲げモーメントは下顎骨の下端を支点として上に凸であるので、頬棚上の骨接合システムで対応させる。負荷の方向は y 軸方向である。

曲げモーメントと骨接合システムが受ける力との間の関係式は以下のようにして導いた。

プレートは頬棚上に一枚設置する。プレートには引張荷重が作用する。下顎骨下端の回りのモーメントの釣り合いの方程式を立てると

$$F_1 = M$$

作用反作用の法則より

$$F_1 = F_2$$

ここで M：曲げモーメント、 F_1 、 F_2 ：頬棚上に設置のスクリーによる引張力、 l ：下顎骨下端から、頬棚上に設置のスクリーまでの垂直距離

第二に、ねじりモーメントは y 軸の回りに作用するので、頬棚上と下縁のシステムで対応させる。頬棚上のシステムは x 軸方向の、下縁のシステムは z 軸方向の負荷を受ける。第三に、剪断力は上下方向であるので、頬棚上および下縁のシステムで対応させ、いずれも z 軸方向の負荷をうける。本モデルは、頬棚上・下縁のプレート 2 枚設置の場合と、頬棚上のプレート 1 枚設置の場合に共用できる。

(b) 下顎骨の臼歯部骨折モデル

下顎骨の臼歯部骨折モデルを Fig. 5 に示す。臼歯部に作用する内力は、曲げモーメント、ねじりモーメント、剪断力である。これらに対しては、上位・下位のシステムで対応させる。第一に、下顎骨の臼歯部には、下端を支点とする、上に凸の曲げモーメントが作用する。したがって上位のシステムは y 軸方向の負荷を受ける。曲げモーメントと骨接合システムが受ける力との間の関係式は以下のようにして導いた。

下顎骨の上位にはプレート一枚設置する。上位プレートには引張荷重が作用する。下顎骨下端の回りのモーメントの釣り合いの方程式を立てると

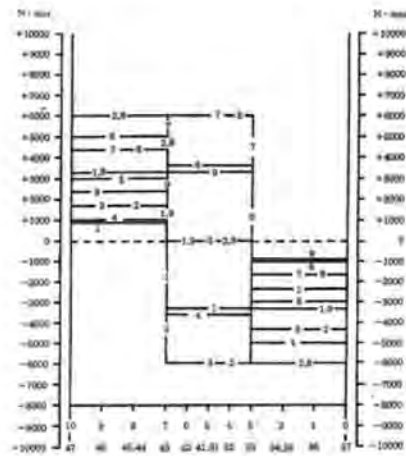


Fig.3 Internal forces⁽¹⁾, (b) Torsion moment.

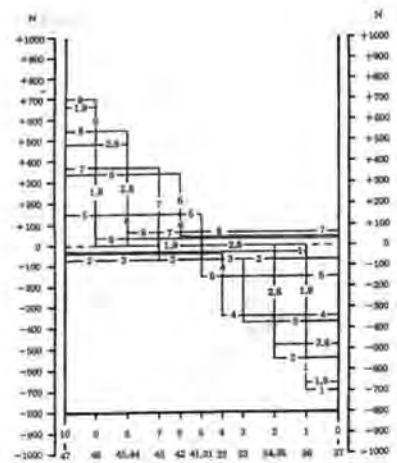


Fig.3 Internal forces⁽¹⁾, (c) Shearing force.

Table 1 Summary of internal forces of a human mandible analyzed by strength of materials⁽¹⁾.

Kind	Region	Internal force
Bending moment	Anterior	-6000 N•mm
	Molar	-12000 N•mm
Torsion moment	Anterior	+6000 N•mm
	Premolar	+6000 N•mm
Shearing force	Anterior	+340 N
	Premolar	+550 N
	Molar	+700 N

$$\ell F_1 = M$$

作用反作用の法則より

$$F_1 = F_2$$

ここで M : 曲げモーメント、 F_1 、 F_2 : 上位設置のスクリューによる引張力、 ℓ : 下顎骨下端から、上位設置スクリューまでの垂直距離。

第二に、 y 軸の回りのねじりモーメントが作用する。これに対しては、上下のシステムで対応させる。いずれも z 軸方向の負荷を受ける。第三に、 z 軸方向の剪断力が作用する。これに対しては、上下のシステムで対応させる。いずれも z 軸方向の負荷を受ける。

(c) 下顎骨の前歯部骨折モデル

下顎骨の前歯部骨折モデルを Fig. 6 に示す。前歯部に作用する内力は、曲げモーメント、ねじりモーメント、剪断力である。これらに対しては、上位・下位のシステムで対応させる。第一に、下顎骨の前歯部には、上端を支点とする、下に凸の曲げモーメントが作用する。したがって下位のシステムは y 軸方向の負荷を受ける。

曲げモーメントと骨接合システムが受ける力との関係式は以下のようにして導いた。プレートは下顎骨の上位と下位に一枚ずつ合計二枚設置する。上位のプレートには圧縮荷重が、下位のプレートには引張荷重が作用する。スクリューには、中心軸に垂直な方向に剪断荷重が作用する。下顎骨断面の図心 G の回りにモーメントの釣り合いの方程式を立てると

$$dF_1 + d'F_2 = M'$$

y 軸方向の力の釣り合いより

$$F_1 = F_2$$

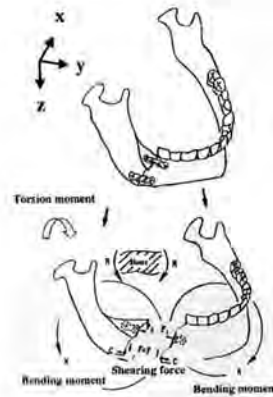
ここで M' : 曲げモーメント、 F_1 : 上位設置スクリューによる圧縮力、 F_2 : 下位設置スクリューによる引張力、 d : 図心から上位設置スクリューまでの垂直距離、 d' : 図心から下位設置スクリューまでの垂直距離。

第二に、 y 軸の回りのねじりモーメントが作用する。これに対しては、上下のシステムで対応させる。いずれも z 軸方向の負荷を受ける。第三に、 z 軸方向の剪断力が作用する。これに対しては、上下のシステムで対応させる。いずれも z 軸方向の負荷を受ける。

(4) 生体内吸収性骨接合システムの力学的強度

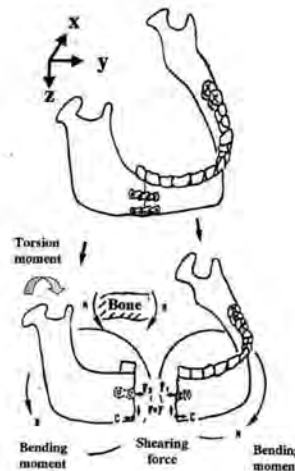
生体内吸収性骨接合システムとして口腔外科用吸収性骨片接合材 **FIXSORB[®]-MX** (タキロン社、大阪、日本) を使用した。その力学的強度を Table 2 に示す。初期剪断強度は 80 から 90MPa である⁽²⁾。4 週経過までは曲げ強度残存率はほぼ 100 パーセントを維持している^(3,4)。

(5) 骨折の強度回復、治癒期間



Kind of internal force	Osteosynthesis system on the buccal shelf	Osteosynthesis system on the mandibular lower border	Mark	Loading direction
Bending moment	○	-	☆	x-axis direction
Torsion moment	☆	▽	○	y-axis direction
Shearing force	▽	▽	▽	z-axis direction

Fig.4 Mandibular angle fracture model. In angle region, bending moment M , shearing force F , tensile force F_1 and F_2 by screws and compressive force C acted upon larger bone fragment. Denoting vertical distance between buccal shelf and mandibular lower boarder by ℓ , equation of equilibrium of moment around mandibular lower boarder was $\ell F_1 = M$. According to law of action and reaction, we find $F_1 = F_2$.



Kind of internal force	Upper osteosynthesis system	Lower osteosynthesis system	Mark	Loading direction
Bending moment	○	-	☆	x-axis direction
Torsion moment	▽	▽	○	y-axis direction
Shearing force	▽	▽	▽	z-axis direction

Fig.5 Mandibular posterior fracture model. In the posterior region, bending moment M , shearing force F , tensile force F_1 and F_2 by screws and compressive force C acted upon bone fragment. Denoting vertical distance between the superior plate position and mandibular lower boarder by ℓ , equation of equilibrium of moment around mandibular lower boarder was $\ell F_1 = M$. According to law of action and reaction, we find $F_1 = F_2$.

森⁽⁵⁾と喜田⁽⁶⁾によると、骨折固定術施行後から4週間に骨骨折は強度的には100パーセント回復するとされている。

3. 研究結果

(1) 解析

(a) 顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の場合の解析

顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の場合の曲げモーメントと骨接合システムとの力学的均衡を Fig.7(a)に示す。

横座標は時間経過で単位は週、縦座標は曲げモーメントで単位は N・mm である。

曲げモーメントは 12,000 N・mm である。スクリーの有効径は 1.80 mm、谷径は 1.60 mm であるので平均値は 1.70 mm である。したがって平均半径は 0.85 mm である。そこで、骨接合システムの強度は、曲げモーメントに換算して、

(3.14×0.85²)(mm²)×2×70(MPa)×25(mm) ≃ 7,900 (N・mm)である。4週後の骨の強度は、下顎骨の最上層の皮質骨が対応するとして、曲げモーメントに換算して、10(mm²)×80(MPa)×25(mm) = 19,600 (N・mm)となる。

Fig. 7(a)において、顎角部に作用する曲げモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標はほぼ1週である。

Fig. 7(b)は、ねじりモーメントと骨接合システムとの力学的均衡を示す。横座標は時間経過で単位は週、縦座標はねじりモーメントで単位は N・mm である。

ねじりモーメントは 6,000 N・mm である。骨接合システムの強度は、ねじりモーメントに換算して、(3.14×0.85²)(mm²)×2×70(MPa)×22.5/2(mm)+(3.14×0.85²)(mm²)×2×70 (MPa)×10/2(mm) ≃ 5,160(N・mm)である。4週後の骨の強度は、下顎骨の周囲の皮質骨が対応するとして、ねじりモーメントに換算して、皮質骨の断面積に骨の剪断強度と回転半径を乗じて 6,050(N・mm)となる。

Fig. 7(b)において、顎角部に作用するねじりモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週未満である。

Fig. 7(c)は、剪断力と骨接合システムとの力学的均衡を示す。横座標は時間経過で単位は週、縦座標は剪断力で単位は N である。

剪断力は 700N である。骨接合システムの強度は、剪断力に換算して、頬棚上のスクリー2本の引き抜き強度と下顎下縁のスクリー2本で対応するとすれば

15×9.8(N)×2+(3.14×0.85²)(mm²)×2×70(MPa) ≃ 590(N)である。4週後の骨の強度は、下顎骨の皮質骨が対応するとして、剪断力に換算して、皮質骨

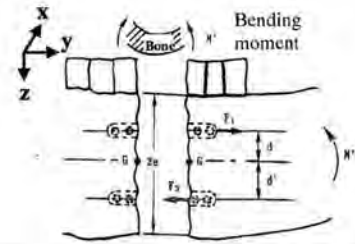


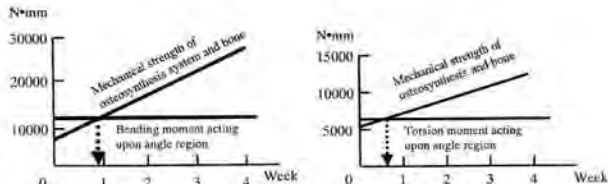
Table with 5 columns: Kind of internal force, Upper osteosynthesis system, Lower osteosynthesis system, Mark, Loading direction. Rows include Bending moment, Torsion moment, and Shearing force.

Fig.6 Mandibular anterior fracture model. Taking equation of equilibrium of moment around centroid G, we find d F1+ d' F2=M'. Taking into consideration dynamic balance of y-axis direction, we find F1=F2 where G:Centroid, 2e:Vertical distance between mandibular superior edge and inferior edge, d:Vertical distance between centroid and the superior screw, d':Vertical distance between centroid and the inferior screw, F1:Compressive force in the right bone fragment caused by the supreme screws, F2:Tensile force in the right bone fragment caused by the inferior screws.

Table 2 Mechanical strength of bio-absorbable osteosynthesis system FIXSORB®-MX. Source: Catalogue of FIXSORB®-MX bioabsorbable bone fixation devices made from poly(L-lactide) published by TAKIRON.

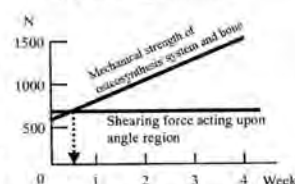
Table with 2 columns: Item, Property. Items include Bending strength, Modulus of bending elasticity, Tensile strength, Young's modulus, Compressive strength, Shearing strength, and Poisson's ratio.

*Bending strength maintains almost 100% till 4 weeks.



(a) Bending moment.

(b) Torsion moment.



(c) Shearing force.

Diagram (a) shows dynamic balance between bending moment as internal force and force of bioabsorbable osteosynthesis system and bone; diagram (b), torsion moment; diagram (c), shearing force, respectively. Cross point of the two lines in each diagram shows the dynamic balance.

Fig.7 Dynamic balance in case of mandibular angle fracture fixed with one 4-hole miniplate on the buccal shelf and the other 4-hole miniplate on the mandibular lower boarder.

の断面積に骨の剪断強度 150MPa を乗じて 915(N) となる。

Fig. 7(c)において、顎角部に作用する剪断力を示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週未満である。

片側下顎頭をメタル・ラグ・スクリューで固定した場合は、不安定要因が増加すると思われるが、メタルは力学的強度が大きいので安全度を考慮し、咀嚼筋力のコントロール期間を増加させることで対応させた。

この結果、MMFなどの強度補強期間は、下限は交点の横座標を切り上げた値である1週と、上限は安全度をみて、交点の横座標を切り上げた値に1を加算した値である2週とし、1から2週間となった。強度補強期間の決め方に関しては、以下の解析では同様の決め方を採用した。

(b) 顎角部の骨折で頬棚上は4ホール・プレート一枚、下縁は6ホール・プレート一枚の合計二枚固定の場合の解析

3.(1)(a)と同様の解析を行い、MMFなどの強度補強期間は、安全度をみて1から2週間となった。

(c) 顎角部の骨折で頬棚上の4ホール・プレート一枚固定の場合の解析

顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート一枚固定の場合の解析を Fig. 8 に示す。Fig. 7 の場合と同様の解析を行った。Fig. 8 (a)において、顎角部に作用する曲げモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標はほぼ1週である。Fig. 8(b)において、顎角部に作用するねじりモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週より大きく2週未満である。

Fig. 8(c)において、顎角部に作用する剪断力を示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週より大きく2週未満である。

この結果、MMFなどの強度補強期間は、安全度をみて2から3週間とした。

(d) 下顎骨の小白歯部骨折の場合で4ホール・プレートによる上位と6ホール・プレートによる下位の二枚固定の場合の解析

下顎骨の小白歯部骨折で4ホール・プレートによる上位と6ホール・プレートによる下位の二枚固定の場合の解析を Fig. 9 に示す。Fig. 7 の場合と同様の解析を行った。

Fig. 9(a)において、小白歯部に作用する曲げモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週未満である。Fig. 9(b)において、小白歯部に作用するねじりモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週より大きく2週未

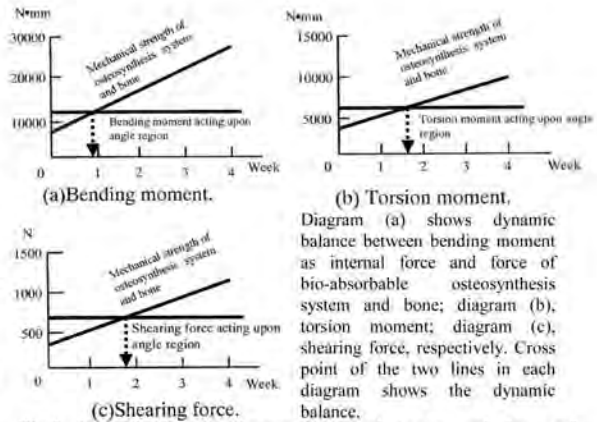


Fig.8 Dynamic balance between internal forces and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone in case of mandibular angle fracture fixed with one 4-hole miniplate on the buccal shelf.

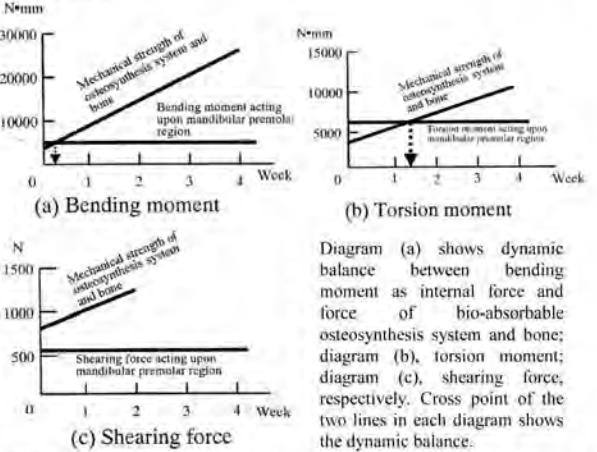


Fig.9 Dynamic balance between internal forces and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone in case of mandibular posterior fracture fixed with one 4-hole miniplate on the superior plate position and the other 6-hole miniplate on the mandibular lower boarder.

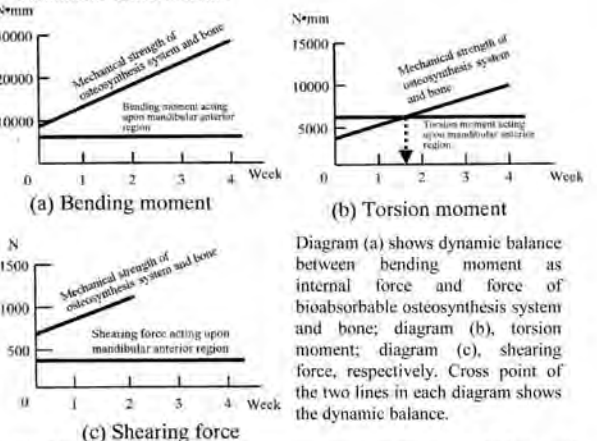


Fig.10 Dynamic balance between internal forces and force of bio-absorbable osteosynthesis system and bone in case of mandibular anterior fracture fixed with one 4-hole miniplate on the superior plate position and the other 4-hole miniplate on the mandibular lower boarder.

満である。

Fig. 9(c)において、小白歯部に作用する剪断力を示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線とは交点を有しない。この結果、MMFなどの強度補強期間は、安全度をみて2から3週間とした。
(e) 上位は6ホール・プレート、下位は6ホール・プレートで固定した小白歯部骨折の解析

3.(1)(d)と同様の解析を行い、症例2の右側小白歯部骨折は、上位は6ホール・プレート、下位は6ホール・プレートで固定したが、同様に解析し、強度補強期間は1週から2週とした。

(f) 上位・下位、共に4ホール・プレートによって固定した小白歯部骨折の解析

上位・下位、共に4ホール・プレートによって固定した小白歯部骨折の場合は、3.(1)(d)と同様の解析を行い、強度補強期間は、2から3週間とした。

(g) 4ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定の下顎骨の前歯部骨折の場合の解析

下顎骨の前歯部骨折の場合の解析をFig. 10に示す。Fig. 7の場合と同様の解析を行った。Fig. 10(a)において、前歯部に作用する曲げモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線とは交点を有しない。Fig. 10(b)において、前歯部に作用するねじりモーメントを示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線との交点の横座標は1週より大きく2週未満である。

Fig. 10(c)において、前歯部に作用する剪断力を示す直線と骨接合システム+骨の強度を示す直線とは交点を有しない。

片側下顎頭をメタル・ラグ・スクリューで固定した場合は、不安定要因が増加すると思われるが、メタルは力学的強度が大きいので安全度を考慮し、咀嚼筋力のコントロール期間を増加させることで対応させた。

この結果、MMFなどの強度補強期間は、安全度をみて2から3週間とした。

(2) 解析と臨床症例データとの比較 (Table 3)

(a) 顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の顎角部骨折症例データとの比較

顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の場合は、3.(1)(a)の解析では、固定術施行後、安全性を考慮して、少なくとも1から2週間(すなわち7から14日間)MMF等の強度補強を行う必要があった。一方、臨床データにおいては、固定術施行後17日間のMMFと42日間のSPTを施行した症例(症例番号3)と固定術施行後20日間のMMFと35日間のSPTを施行した症例(症例番号1)では合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。しかし固定術施行後15日間の

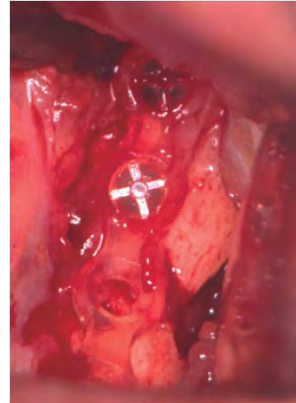


Fig.11 Three weeks postoperative photograph showing spontaneous exposure of the plate after fracture of the 2 anterior screws in a patient with a complication for mandibular angle fracture (Pt. No.7). With regard to this patient, MMF for 15 days and SPT combined with rubber for 15 days were performed, and two screws inserted on the medial part of the plate on the buccal shelf broke at the neck region at the 21st day when MMF and SPT had been released.

MMFと15日間のSPTを施行した症例(症例番号7)においては、MMF解除後、術後3週目(21日目)に頬棚上に設置したスクリューが破折した。破折部位は、頬棚上に設置した4本のスクリューの内、近心の2本のスクリューのヘッド部である。Fig. 11は頬棚上と下縁に設置した4ホール・プレート二枚で骨折部を固定し、頬棚上の近心の2本のスクリューが破折したときに撮影したときの口腔内写真である。

(b) 顎角部の骨折で頬棚上の4ホール・プレート一枚固定の場合の顎角部骨折症例データとの比較

3.(1)(c)の解析より、顎角部の骨折で頬棚上の4ホール・プレート一枚固定の場合の解析では、MMFなどの強度補強期間は、安全度をみて2から3週間となった。臨床データ(症例番号4)では、固定術施行後7日間のMMFと7日間のSPTを行ったのみであるが、その後、合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。

(c) 骨体部(部位は両側小白歯部)の多発骨折の場合で、両側共4ホールまたは6ホール・プレートによる上位と6ホール・プレートによる下位の二枚固定の場合の臨床症例データとの比較

上位は4ホール・プレート、下位は6ホール・プレートによる二枚固定の場合は、3.(1)(d)の解析より、固定術施行後少なくとも2から3週間(14から21日間)MMF等の強度補強を行う必要があった。上位・下位共に、6ホール・プレートによる二枚固定の場合は、3.(1)(e)の解析より、固定術施行後少なくとも1から2週間(7から14日間)MMF等の強度補強を行う必要があった。

骨体部(部位は両側小白歯部)の多発骨折の場合

合で、左側は上位は4ホール・プレート、下位は6ホール・プレートによる二枚固定、右側は、上位・下位共に、6ホール・プレートによる二枚固定を行い、固定術施行後12日間のMMFと33日間のSPT（シーネ固定）を施行した症例(症例番号2)では、合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。

(d) 顎角部と骨体部の多発骨折で、顎角部は、棚棚上は4ホール・プレート一枚で固定し、下縁は6ホール・プレート一枚で固定し、骨体部(小白歯部)は4ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定の臨床症例データとの比較

解析では、顎角部の骨折に対する解析3.(1)(b)と小白歯部の骨折に対する解析3.(1)(f)を合わせて、固定術施行後、安全性を考慮して、少なくとも2から3週間(14から21日間)MMF等の強度補強を行う必要があった。症例番号5の臨床データでは、固定術施行後7日間のMMFと43日間のSPT（シーネ固定）を施行した症例では、合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。

(e) 骨体部(部位は正中部)と関節突起の多発骨折で、骨体部は4ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定、関節突起骨折は金属製のラグ・スクリューによる固定の臨床症例データとの比較

3.(1)(g)の解析では、固定術施行後MMF等強度補強によって、安全性を考慮して、少なくとも2から3週間(14から21日間)強度の補強を行う必要があった。症例番号6の臨床データでは、固定術施行後MMFを施行せず15日間のSPT（シーネ固定）を施行した症例では、合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。

(3) モデルを用いた解析と臨床データとの比較の

まとめ

モデルを用いた解析と臨床データとの比較を表3に示す。下顎骨の顎角部、小白歯部、前歯部の骨折においては、安全性を考慮して1から3週間の顎間固定またはスプリントの使用による強度補強が必要である。解析と臨床データがよく一致していることを示す

4. 考察

本研究は、ヒト下顎骨に作用する力の材料力学的解析結果を臨床に応用する可能性を示す。咀嚼機能を維持しながら骨折を治癒させるために、下顎骨の内部に発生する力、すなわち内力と骨接合システムおよび骨の強度の力学的均衡の観点からモデルを形成した。本モデルを用いることによって、適応症例、使用するプレートの個数、MMFを術前に検討することが可能であるので、特に、生体内吸収性骨接合プレートとスクリューを用いた臨床への応用の可能性を示唆する。MMFは患者にとっては苦痛ではあるが、再度の手術を受ける苦痛と較べると小さい。

顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の症例において、固定術施行後15日間のMMFと15日間のSPTを施行した場合(症例番号7)、MMF解除後、術後3週目(21日目)に頬棚上に設置した4本のスクリューの内、近心の2本のスクリューのヘッド部が破折した。破折したスクリューの外観は剪断荷重を受けた様相であった。破折の原因としては、破折したのが頬棚上の骨接合システムのうち前方のスクリューであったことからスクリューの挿入時の挿入トルクによりマイクロ・クラックが発生し、それが内力(曲げ

Table 3 Comparison of analysis with clinical data.

Pt No.	Age (yrs)	Gender	Fracture region	Analysis				Clinical data				Comparison ◎ Coincident ○ Fairly coincident	Clinical course	Remarks
				Plate	Screw	Postope IMF (day)	SPT (day)	Plate	Screw	IMF (day)	SPT (day)			
1	19	M	Rt angle	4×2	8	7~14	4S×2	8	20	35	◎	Good	BS;LB	
2	17	M	Body Rt4	6×1	6	14~21	6L×1	6	12	33	◎	Good	Upper	
				6×1	6		6L×1	6					Lower	
			Body Lt5	4×1	4		4S×1	4					Upper	
3	21	M	Body Lt5	6×1	6		6S×1	6				Lower		
			Lt angle	4×2	8	7~14	4L×2	8	17	42	◎	Good	BS;LB	
			Rt condylar head	-	1		-	1					Lag screw	
4	26	M	Lt angle	4×1	4	14~21	4S×1	4	7	7	○	Good	BS	
5	23	M	Lt angle	4×1	4	14~21	4S×1	4	7	43	◎	Good	BS	
				6×1	6		6L×1	6				LB		
			Body Rt4S	4×2	8		4S×2	8				Upper		
6	21	M	Symphysis	4×2	8	14~21	4S×2	8	0	15	◎	Good	Upper; Lower	
			Rt condylar head	-	1		-	1				Lag screw		
7	33	M	Lt angle	4×1	4	7~14	4S×1	4	15	15	◎	Complication	BS	
				4×1	4		4S×1	4				LB		

Abbreviation: SPT, splint; BS: buccal shelf; LB, lower border

モーメント、ねじりモーメント、剪断力)の同時作用により成長・伝播し破折に至った可能性もある。スクリューの破折はMMF解除後に発生した。顎角部の骨折におけるMMFの目的は、咀嚼筋の動きを制約することによって骨折部の動きを制約し、骨折の治癒回復を促進することである。MMF解除によって、咀嚼と嚥下時の咬合力が顎角部における固定領域の複雑な動きを誘導した可能性がある⁷⁾と思われる。本症例では、仮に挿入時のマイクロ・クラックが存在したとしても、強度補強期間を延長すれば、そのマイクロ・クラックの成長・伝播を抑えた可能性がある。したがって正確な整復固定と強度補強は共に骨折治癒にとって重要であるといえよう。

一般的には、正中部の骨折には2個のプレートが必要であり、顎角部や骨体部に対しては1個のプレートで充分であるとされている^(8,9)。本研究では顎角部骨折のほとんどに2個のプレートが使用されたが、予後の良かった顎角部骨折の1症例においては骨傷治癒にとって1個のプレートで充分であった。この結果は顎角部骨折においてはMMF施行下において1個の生体内吸収性骨接合プレートで充分である可能性を示唆する。しかし陳旧性、粉碎、感染または重度変位の伴った顎角部骨折に対しては、金属製プレートと同様、2個のプレートが必要であろう⁽¹⁰⁾。解析では、下顎骨の小白歯部骨折においては、6ホール・プレートの上位・下位二枚打ちの場合は1から2週間、上位4ホール・プレート下位6ホール・プレートの二枚打ちの場合および4ホール・プレートの上位・下位二枚打ちの場合は2から3週間、前歯部の骨折においては、安全性を考慮して2から3週間の顎間固定またはスプリントの使用が必要であった。原則としてこのルールに従っている症例の場合、臨床経過は良好であった。解析と臨床データがよく一致していることを示す。

本研究の臨床例としてもスクリューが破折したこと、著者らが検索した文献でもスクリューの破折が報告されている⁽¹¹⁾ことから、スクリューの力学的強度がモデル形成の中核であると考えられる。

骨接合システムのうちプレートの長軸方向の引張強度、幅方向の剪断強度等に関するデータがあれば、新たな解析が可能である。

下顎骨は表層の皮質骨・緻密骨と内部の海綿骨から成っているが、本解析では、表層の皮質骨が内力に対応するものとした。皮質骨とくらべると海綿骨の強度は極めて小さく、解析結果に大きな影響を与えないと思う。

本報告の解析方法は著者らが独自に開発したも

のである。本研究では、内力と生体内吸収性骨接合システムおよび骨の強度の力学的均衡の観点から、ヒト下顎骨に作用する力の材料力学的解析結果を臨床応用するための下顎骨骨折モデルを形成し、特に、生体内吸収性骨接合システムで固定した下顎骨骨折症例の臨床に応用した。しかし、形成したモデルは一般性を有するので生体内吸収性骨接合システムだけではなく、金属製の骨接合システムによる臨床にも応用可能である。さらに、本研究で形成したモデルは個体差のある症例すべてに一律にあてはまるものではなく、一つの臨床応用モデルを示したものであるが、解析対象となる個人のデータが確定すればどのようなモデルも解析可能である。

本報にて報告した吸収性骨接合プレートとスクリューを用いた1症例においてスクリューが破折するという合併症が発生したが、残りの6症例においては良好な結果が得られた。このことから臨床では生体内吸収性骨接合システムの力学的強度を向上させるとともに、それを補強するための治療方針を確立することにより、臨床応用が可能であると思われる。

5. 結論

下顎骨に作用する外力である咀嚼筋力、顎関節部における反力、咬合力によって下顎骨に発生する内力のうち剪断力、曲げモーメント、ねじりモーメントに関して材料力学的に解析した結果を、今回新たに形成した下顎骨の顎角部、白歯部、前歯部骨折モデルに応用して骨折部位、生体内吸収性骨接合システムの種類・個数・設置部位、顎間固定(maxillomandibular fixation: MMF)等の必要性・期間等について解析し、臨床データとの比較を行った結果、次の結論が得られた。

1. 以下の場合には固定術施行後、1から2週間MMF等の強度補強を行う必要があると解析された。
 - (1) 顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の場合、
 - (2) 顎角部の骨折で、頬棚上は4ホール・プレート一枚で固定し、下縁は6ホール・プレート一枚で固定する場合、
 - (3) 小白歯部の骨折で、6ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定の場合、
2. 以下の場合には固定術施行後、2から3週間MMF等の強度補強を行う必要があると解析された。
 - (1) 顎角部の単純骨折で頬棚上の4ホール・プレート一枚固定の場合、
 - (2) 小白歯部の骨折で、4ホール・プレートによる上位と6ホール・プレートによる下位の二枚固定の場合、

- (3) 小白歯部骨折で4ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定の場合、
- (4) 前歯部の骨折で4ホール・プレートによる上位と下位の二枚固定の場合。
3. 顎角部の骨折で頬棚上と下縁の4ホール・プレート二枚固定の場合は、固定術施行後、1から2週間MMF等の強度補強を行う必要があると解析された。固定術施行後15日間のMMFと15日間のSPTを施行した、症例番号7では、MMF解除後、術後3週目に頬棚上に設置した4本のスクリューの内、近心の2本のスクリューのヘッド部が破折した。この結果は、固定術施行後の強度補強とともに、スクリューの挿入操作も、予後に影響を与える重要なファクターであることを示唆する。
4. 解析したとおりの期間、MMFを施行した臨床症例では、1例を除き、合併症は発生せず骨折治癒は良好であった。解析と臨床データがよく一致していることを示す。
5. 本研究で形成した下顎骨の顎角部・臼歯部・前歯部骨折モデルは下顎骨の骨折症例において、生体内吸収性骨接合プレートとスクリューの種類・個数・設置部位、顎間固定等強度補強の必要性・期間等の決定を行う上で有用であることを示唆する。
6. ヒト下顎骨に作用する力の材料力学的解析は、下顎骨の骨折症例に臨床応用可能である。

本論文の要旨は、平成18年度秋期第48回日本歯科理工学会学術講演会(2006年10月28日・29日、愛知学院大学歯学部、名古屋市)、第14回顎顔面バイオメカニクス学会大会(2006年11月18日・19日、東京工業大学大岡山キャンパス、東京都目黒区)および第52回日本口腔外科学会総会・学術大会(2007年9月29日・30日、名古屋市)にて発表した。

参考文献

- 1) 草野雅章、瀧岡 渡、池田悦子、熨斗利光、村上和宏、山本一彦、杉村正仁. 人下顎骨に作用する力の材料力学的解析. *顎顔面バイオメカニクス学会誌*, 7(1)、48-57、2001.
- 2) タキロン株式会社からの情報.
- 3) Bessho K, Iizuka T, Murakami K-I. A bioabsorbable poly-L-lactide miniplate and screw system for osteosynthesis in oral and maxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 1997;55: 941-945.
- 4) Matsusue Y, Yamamuro T, Yoshii S, Oka M, Ikada Y, Hyon H, Shikinami Y. Biodegradable screw fixation of rabbit tibia proximal osteotomies. *J Appl Biomater* 1991;2:1-12.
- 5) 森 健. 顎骨骨折治癒経過の機能的観察に関する研究. *日口外誌*, 21、(6)、711-722、1975.
- 6) 喜田正孝. 振動利用コヒーレンス関数解析による下顎骨骨折の治癒判定に関する研究. *日口外誌*, 35、(3)、569-588、1989.
- 7) Tams J, Otten B, van Loon JP, Bos RRM. A computer study of fracture mobility and strain on biodegradable plates used for fixation of mandibular fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 1999;57: 973-981.
- 8) Champy M, Loddé JP, Schmitt R, Jaeger JH, Muster D. Mandibular osteosynthesis by miniature screwed plates via a buccal approach. *J Maxillofac Surg* 1978;6:14-21.
- 9) Kroon FHM, Mathisson M, Cordey JR, Rahn BA. The use of miniplates in mandibular fractures. *J Cranio Maxillofac Surg* 1991;19:199-204.
- 10) Shierle HP, Schmelzeisen R, Rahn B, Pytlik C. One- or two-plate fixation of mandibular angle fractures? *J Cranio Maxillofac Surg* 1997;25:162-168.
- 11) 小淵匡清、堀内 薫、古田治彦、野村太作、北郷明成、篠田 豊、松本和浩、虫本浩三、森田章介: 生体内吸収性骨接合システムの改良. *日顎変形誌*, 15: 21-27、2005.