

## 顎・口蓋裂患者における咬合負荷に対する顎顔面複合体の 生体力学的反応：有限要素法による三次元解析

石 田 真 奈 美

Biomechanical responses of the maxillofacial complex to occlusal forces in patients  
with cleft jaw and palate: Three-dimensional analysis by finite element method

Manami Ishida

(平成9年1月10日受付)

### 緒 言

口唇裂口蓋裂患者の顎顔面骨格の形態的特徴および成長変化に関しては、頭部X線規格写真を用いた様々な検討がなされ、上顎部の三次元的な劣成長が明らかにされている<sup>1-8)</sup>。その原因としては、過度の外科的侵襲や手術時期、瘢痕組織および周囲組織の過緊張、上顎歯槽弓の狭窄による二次的劣成長、成長能力の個体変異などが挙げられている<sup>1,3,9-12)</sup>。一方、口唇裂口蓋裂患者の上顎部の成長は、種々の口腔内環境要因による影響を受けているものの、基本的には非破裂者の成長パターンと同様である<sup>7,13,14)</sup>との考えもみられる。

一般に咀嚼あるいは咬合により顎骨に加わる機械的負荷は、顎顔面頭蓋の形態、ならびに成長変化に対して影響を及ぼすことが報告されている<sup>15-19)</sup>。したがって、口唇裂口蓋裂患者では骨欠損が存在し、咬合時の応力伝播が非破裂者とは異なることから、その成長に何らかの影響を及ぼすことが考えられる。また、口唇裂口蓋裂患者に多くみられる上顎歯列弓の狭窄に伴う臼歯部交叉咬合などの不正咬合により、咀嚼機能や咬合時の応力分布が変化し、成長に対して何らかの影響を及ぼす可能性も考えられる。さらに近年、顎・口蓋裂患者に対して歯槽弓の連続性の回復と骨移植部への歯の萌出誘導を可能にし、歯科矯正治療後の咬合の安定性を向上させることを目的として顎裂部への骨移植が多く行われている<sup>20,21)</sup>が、骨移植も咬合

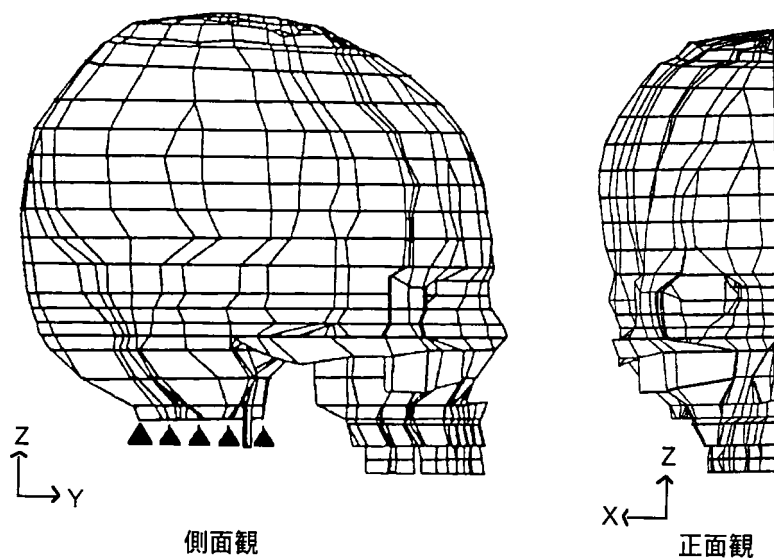
時の応力分布に変化を生じさせる可能性が考えられる。

そこで、本研究では顎・口蓋裂患者と非破裂者について、臼歯部交叉咬合の有無が咬合時の応力分布状態に与える影響を三次元的に明らかにするため、ヒト顎顔面複合体の三次元モデルを用い有限要素解析を行った。さらに、骨移植が咬合負荷作用時の顎顔面複合体の応力分布状態に与える影響を明らかにすることを目的として、骨移植を行った顎・口蓋裂患者に相当する三次元有限要素モデルを作製し解析を行った。

### 方 法

#### I. 解析モデル

本研究における一連の解析は、ヒト顎顔面複合体の三次元有限要素モデルを用いて行った(図1)。本解析モデルは、成長期(Hellmanの咬合発育段階、A)のヒト乾燥頭蓋を用いて作製され、2,918個の節点と1,502個の8節点六面体要素、274個の6節点くさび型要素の計1,776個の要素より構成されている(以下、これを非破裂者モデルとする)。なお、非破裂者モデルの作製方法とその有効性については既に報告されている<sup>22)</sup>。また、本解析モデルは正中矢状面に対する面対称モデルとして作製されている。さらに解剖学的所見を基に脳頭蓋を構成する冠状縫合、ラムダ縫合、鱗状縫合、後頭乳突縫合、頭頂乳突縫合、蝶鱗縫合、蝶頭頂縫合、蝶前頭縫合、蝶篩骨縫合、顔面頭蓋を構成する前頭上顎縫合、前頭鼻骨縫合、前頭頬骨縫合、蝶頬骨縫合、蝶上顎縫合、頬骨側頭縫合、鼻骨上顎縫合、頬骨上顎縫合、口蓋上顎縫合の計18縫合をこのモデル上に設定した。各縫合は同じ座標値を共有する2



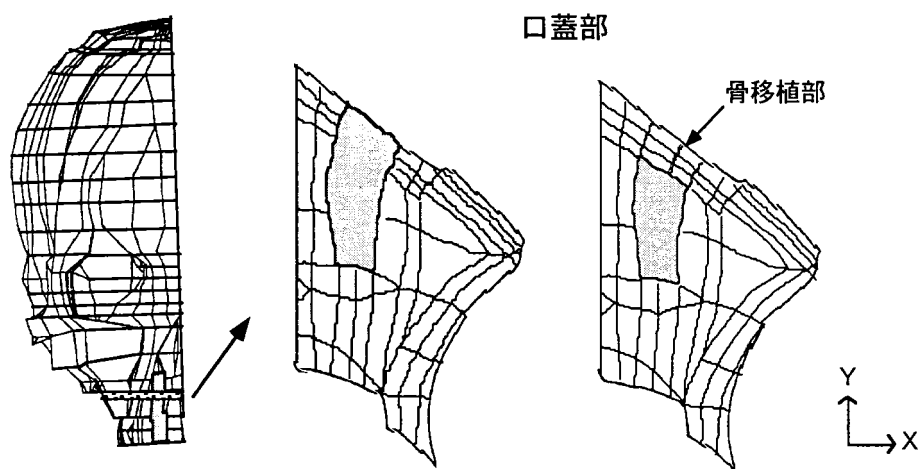
▲: 拘束部位

図1 三次元有限要素モデル (非破裂者モデル)。

つの要素面より構成されており、外力に対して隣接する骨がそれぞれ独立した挙動を示すように工夫されている<sup>23)</sup>。

一方、顎・口蓋裂者のモデル (以下、これを口蓋裂モデルとする) には非破裂者モデルから顎・口蓋裂による骨欠損を想定して、上顎側切歯、側切歯相当部歯

槽骨ならびに口蓋部に相当する13節点、18要素を除去したものをを用いた (図2)。また、骨移植モデルでは、口蓋裂モデルに顎裂部に相当する側切歯槽部の要素を追加し、口蓋部のみに骨欠損が存在した状態とし、非破裂者モデルから口蓋部に相当する2節点、6要素を除去した (図2)。



■ 骨欠損を想定して要素を除去した部位

口蓋裂モデル

骨移植モデル

図2 口蓋裂モデルと骨移植モデル。

II. 解析方法

各モデルを構成する全ての要素は弾性体とし、歯、皮質骨および海綿骨の物性定数は、従来の研究結果<sup>24,25)</sup>に基づいて、表1のように設定した。

解析に際しては、荷重によりモデル全体の滑走移動が生じないように大後頭孔外周部に位置する20節点の自由度を全て拘束した。解析は京都大学大型計算機センターの有限要素解析プログラム FEM5 を用いて Tss モードで行った。

表1 解析モデルの各構成要素の物性定数

	ヤング率 (kgf/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
歯	2.07×10 <sup>3</sup>	0.3
皮質骨	1.37×10 <sup>3</sup>	0.3
海綿骨	8.00×10 <sup>2</sup>	0.3

III. 骨欠損の有無、臼歯部咬合状態の影響についての検討

非破裂者モデルと口蓋裂モデルに対し、臼歯部の咬合状態の変化を想定して以下のような荷重条件を設定した(表2)。咬合接触点すなわち、負荷点を正被蓋の場合は上顎第一大臼歯咬合面の近心舌側、逆被蓋の場合は近心頬側部とした。咬合力の作用方向は、咬合時の大白歯の変位方向<sup>26)</sup>や咀嚼運動経路の記録<sup>27)</sup>を参考にして、正被蓋の場合は遠心舌側方向(遠心30度、舌側15度、以下、正被蓋とする)を、逆被蓋の場合は遠心方向(遠心30度、以下、逆被蓋Aとする)と遠心舌側方向(遠心30度、舌側15度、以下、逆被蓋Bとする)を設定した。負荷の大きさは、それぞれ日常咀嚼時に多くみられる咬合力を想定し、10 kgf の力を用いた。

鼻上顎複合体の応力分布と成長との関連性を検討す

表2 第一大臼歯への荷重条件

	正被蓋	逆被蓋	
		逆被蓋A	逆被蓋B
負荷点	近心舌側部	近心頬側部	
作用方向	遠心30度* 舌側15度**	遠心30度**	遠心30度* 舌側15度**
大きさ	10 kgf		

\*: 正中矢状面に平行な平面に投影した角度

\*\* : FH 平面に平行な平面に投影した角度

るために、応力の評価部位は、鼻上顎複合体の成長に関与すると考えられる頬骨上顎縫合、前頭上顎縫合、蝶上顎縫合と鼻中隔とした(図3)。また、上顎歯槽基底部を通る平面において、歯槽部は中切歯、犬歯、臼歯部、口蓋部は裂部周囲について評価を行った(図4)。

応力は、評価部位の各要素の重心における応力値とし、エネルギーパラメータの一つとして、応力状態の変化を容易に比較検討するのに適している相当応力を用いた。

IV. 骨移植の影響についての検討

骨移植後の咬合時の応力分布状態を検討するため、口蓋裂モデル、骨移植モデル、非破裂者モデルに対し、表3に示す荷重条件を負荷した。骨移植は臼歯部の咬合状態を改善後施術されるため、正被蓋を想定して、咬合負荷は第一大臼歯の近心舌側部に遠心舌側方向に作用させた。さらに、顎裂に隣接した部位に咬合負荷を作用させた場合の骨移植の影響を検討するため、犬歯の近心舌側部に近心10度の咬合負荷を作用させ、負荷の大きさはともに10 kgf とした。

応力の評価部位は、前項での検討と同様、上顎骨周囲の縫合部、鼻中隔、ならびに歯槽部、口蓋部とし

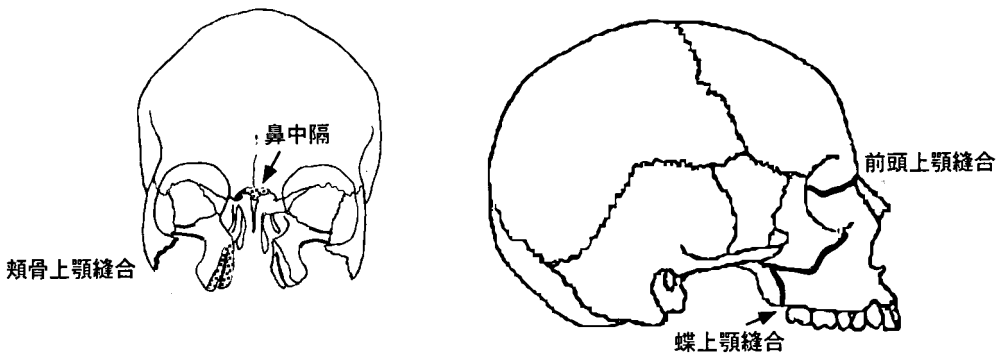


図3 鼻上顎複合体における応力の評価部位.

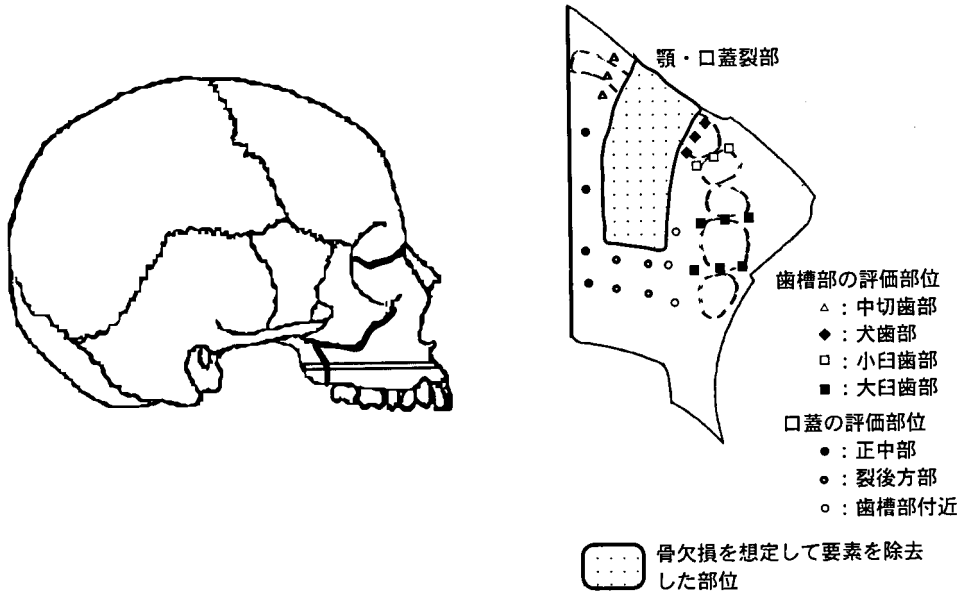


図4 歯槽部、口蓋部における応力の評価部位。

表3 骨移植の影響を検討するための荷重条件

	第一大臼歯	犬歯
負荷点	近心舌側部	近心舌側部
作用方向	遠心30度 舌側15度	近心10度
大きさ	10 kgf	

た。また、応力分布に加え、大臼歯に咬合負荷を作用させた場合の歯槽部、口蓋部の変位様相も評価した。

結 果

I. 咬合力負荷時の第一大臼歯の変位量

非破裂者モデルへ荷重を負荷した場合について、負荷点である第一大臼歯咬頭部の変位量を表4に示す。正被蓋の場合は遠心舌側方向への、逆被蓋の場合は遠心頬側方向への変位を示した。また、逆被蓋の場合

表4 非破裂者モデルに各荷重条件の咬合負荷を作用させた場合の第一大臼歯の変位量

		負荷点	頬舌 (X) 方向	近遠心 (Y) 方向	垂直 (Z) 方向
荷重条件	正被蓋	近心舌側部	-25.9	-10.3	67.6
	逆被蓋A	近心頬側部	19.9	-5.7	72.2
	逆被蓋B	近心頬側部	5.0	-3.2	66.8

( $\mu\text{m}$ )

は、負荷の作用方向により頬側への変位の大きさが異なることから、第一大臼歯の変位の方向と大きさは負荷点、作用方向の影響を大きく受けていた。

II. 骨欠損の有無、臼歯部咬合状態の影響

1. 縫合部、鼻中隔における応力分布 (図5)

蝶上顎縫合、頬骨上顎縫合では、荷重条件により応力値に差がみられたが、骨欠損の有無による応力値の差を示す部位はほとんど認められなかった。

前頭上顎縫合では、いずれの場合にも応力値は小さく、荷重条件、骨欠損による差異はほとんど認められなかった。また、鼻中隔では、前方部と後方で応力値の大きさに差が認められたが、荷重条件、骨欠損による差異はほとんど認められなかった。

2. 歯槽部、口蓋部における応力分布

歯槽部、口蓋部では骨欠損、荷重条件による応力分布の違いが認められた。中切歯部では、正被蓋と逆被蓋Bでは口蓋裂モデルより非破裂者モデルの方が大き

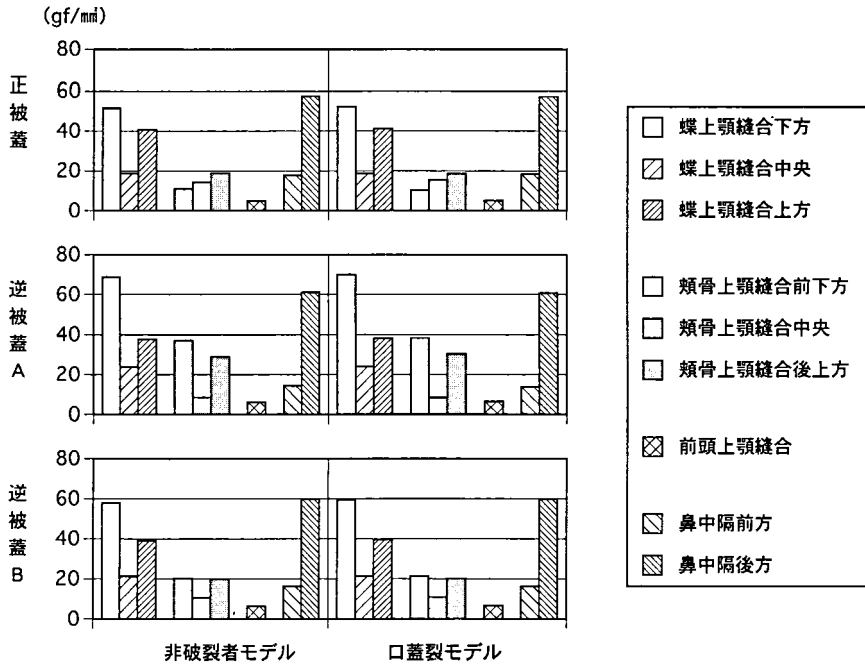


図5 縫合部、鼻中隔における応力分布.

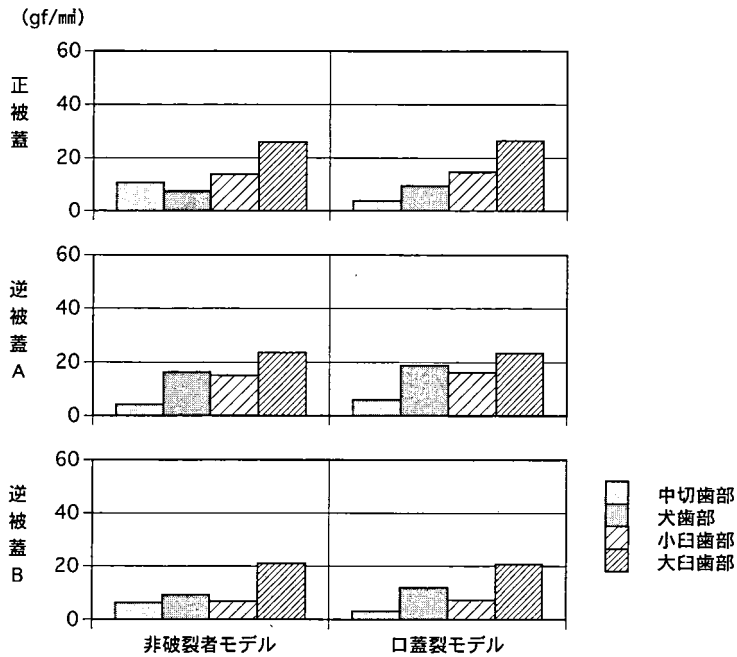


図6 歯槽部における応力分布.

な応力値を示し、逆被蓋Aでは、口蓋裂モデルの方が大きな応力値を示した。また、犬歯部においては正被蓋、逆被蓋の場合とも、非破裂者モデルより口蓋裂モ

デルの方がやや大きな応力値を示したことから、骨欠損に隣接する前方歯槽部における応力分布に対して骨欠損、荷重条件の影響が認められた。一方、小白歯、

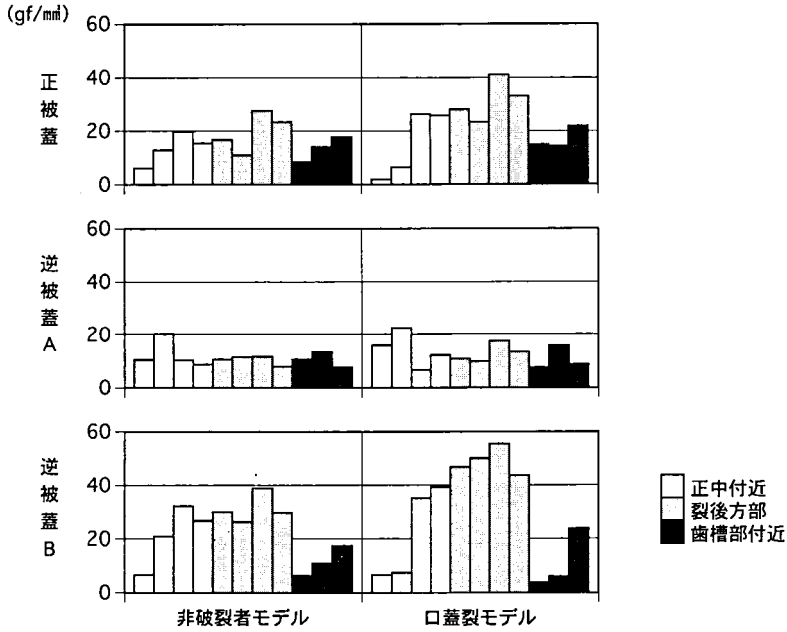


図7 口蓋部における応力分布.

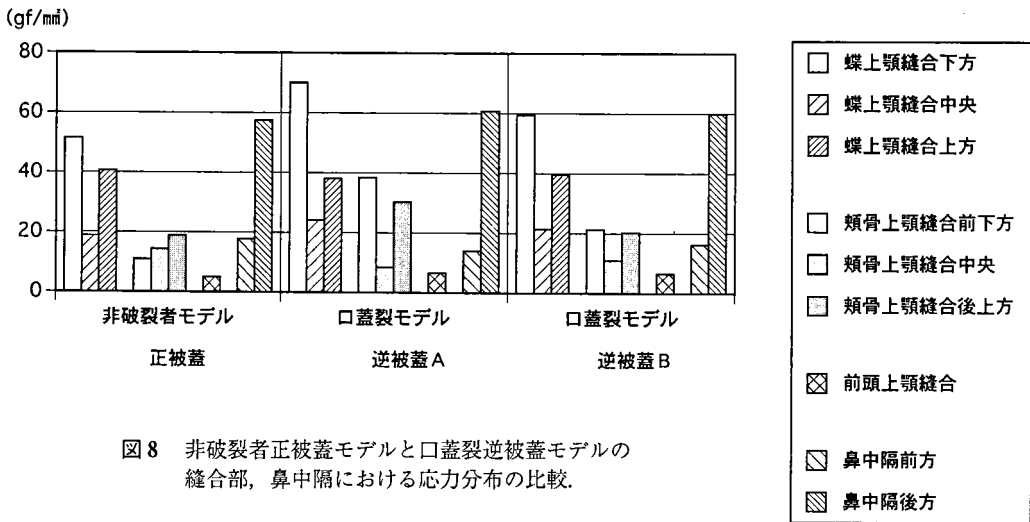


図8 非破裂者正被蓋モデルと口蓋裂逆被蓋モデルの縫合部、鼻中隔における応力分布の比較.

大臼歯部では、骨欠損による応力値の差はほとんど認められなかったが、荷重条件によりわずかな応力値の差が認められた (図6)。

口蓋部においては、正被蓋と逆被蓋Bでは、非破裂者モデルより口蓋裂モデルの方が大きな応力値を示し、特に逆被蓋Bでその差は大きかったが、逆被蓋Aではほとんど差が認められなかった (図7)。このように、被蓋関係により応力値の差が認められたが、口蓋の部位による応力値の変化は、各被蓋関係ともほぼ

同様の傾向を示した。

以上の結果から、上顎骨の成長発育に関連すると考えられる縫合の中でも咬合負荷の作用部位に近接した蝶上顎縫合、頬骨上顎縫合や、歯槽部、口蓋部の咬合時の応力分布については、荷重条件による影響が認められた。このことから、臼歯部の咬合異常によって生じる咬合時の応力伝播の変化が顎顔面骨格や歯列の成長に影響を及ぼす可能性のあることが示唆された。

また、前方歯槽部、口蓋部では、応力分布に咬合負

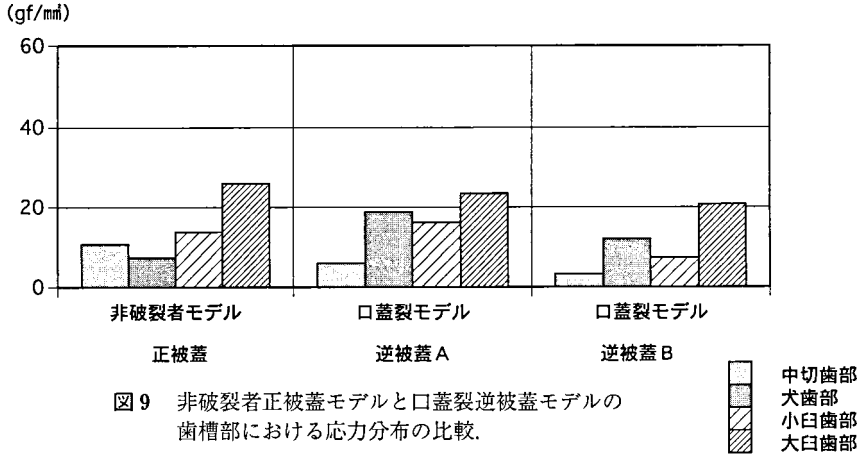


図9 非破裂者正被蓋モデルと口蓋裂逆被蓋モデルの歯槽部における応力分布の比較。

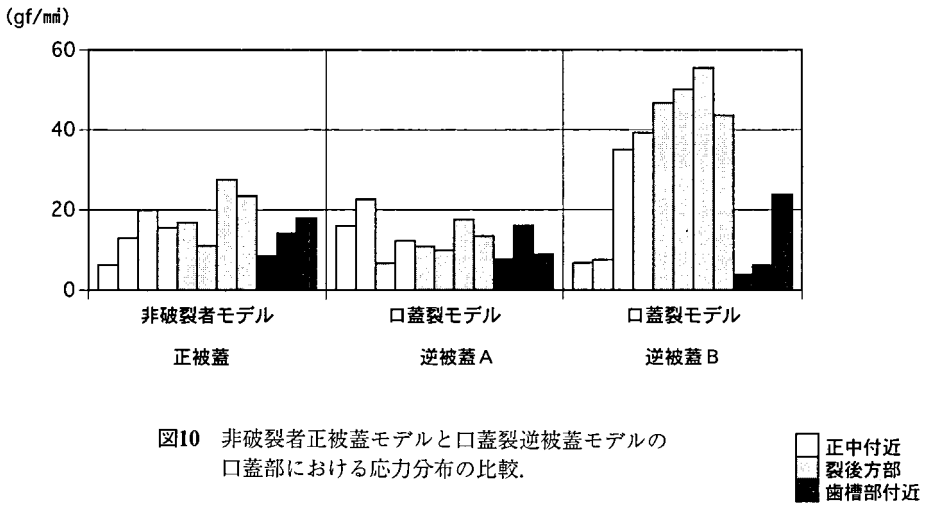


図10 非破裂者正被蓋モデルと口蓋裂逆被蓋モデルの口蓋部における応力分布の比較。

荷の影響ばかりでなく骨欠損の影響も強く発現したことから、骨欠損がこの部の歯列の成長や形態形成に関与することが示唆された。

さらに、図8, 9, 10に示すように、非破裂者モデルの正被蓋と口蓋裂モデルの逆被蓋の場合を比較すると、縫合部、歯槽部、口蓋部のいずれの応力分布にも明確な差異がみられ、特に口蓋部においては大きな差がみられた。すなわち、骨欠損、荷重条件のうち、一つの条件のみを変化させた場合と比較すると、応力値の差はより顕著になっていた。

III. 骨移植の影響

1. 縫合部、鼻中隔における応力分布

第一大臼歯負荷の場合には、各モデルの縫合部、鼻中隔における応力分布はきわめて近似していた(図11)。これに対し、犬歯に咬合力を負荷した場合には、

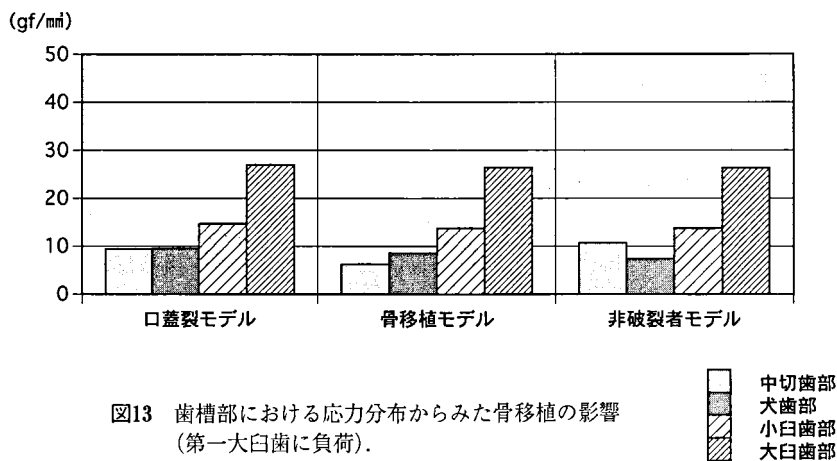
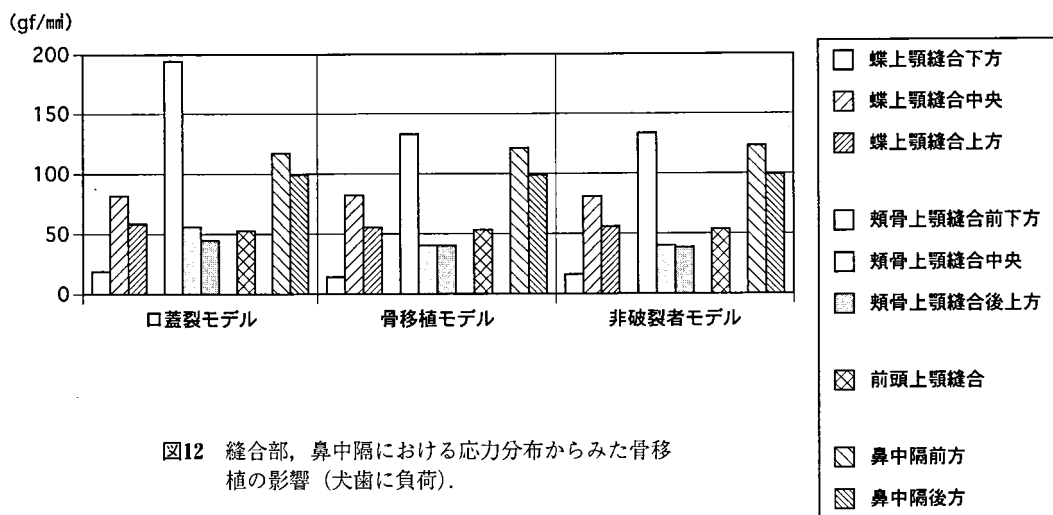
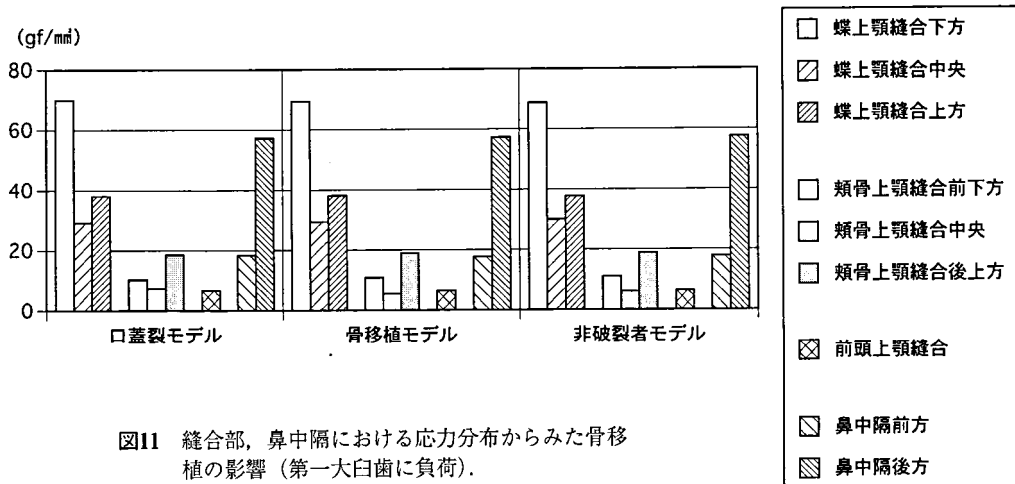
口蓋裂モデルと骨移植モデル、非破裂者モデルとの間で頬骨上顎縫合における応力分布に差がみられたが、他の縫合部、鼻中隔ではほとんど差がみられなかった(図12)。

また、咬合力を第一大臼歯と犬歯に負荷した場合の応力値を比較すると、各部位における応力分布パターンが異なり、犬歯の方が大きな応力値を示していた(図11, 12)。

2. 歯槽部、口蓋部における応力分布

第一大臼歯に咬合力を負荷した場合には、3つのモデルの歯槽部、口蓋部における応力値に差が認められ、とりわけ裂後方部で差が大きかった。また、非破裂者モデルと骨移植モデルの差異と比較して、口蓋裂モデルと骨移植モデルではより大きな差がみられた(図13, 14)。

犬歯に咬合力を負荷させた場合にも、歯槽部、口蓋





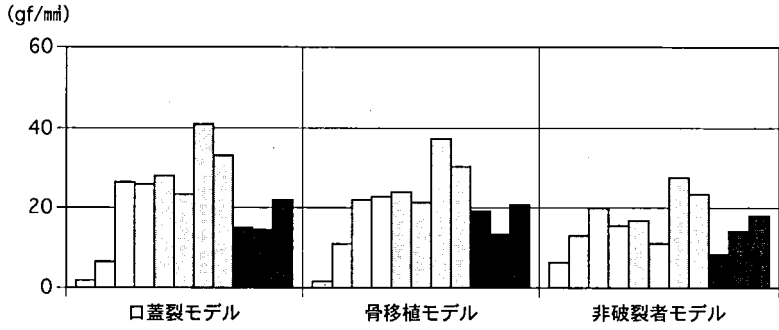


図14 口蓋部における応力分布からみた骨移植の影響 (第一大白歯に負荷).

正中付近  
 裂後方部  
 歯槽部付近

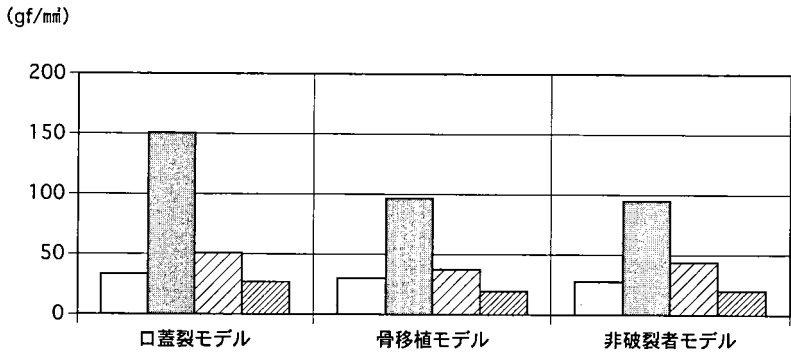


図15 歯槽部における応力分布からみた骨移植の影響 (犬歯に負荷).

中切歯部  
 犬歯部  
 小臼歯部  
 大白歯部

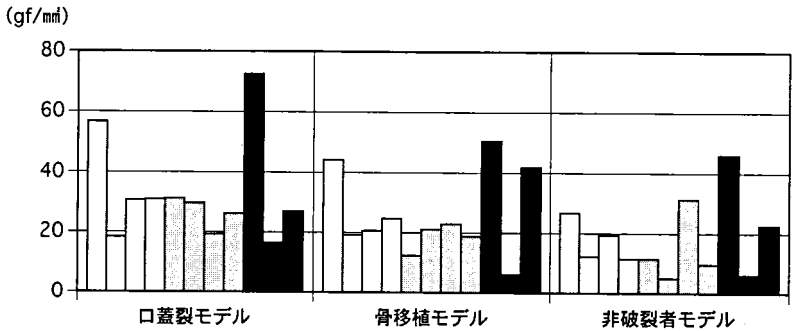


図16 口蓋部における応力分布からみた骨移植の影響 (犬歯に負荷).

正中付近  
 歯槽部付近

部では、各モデルの応力値に差が認められ、顎裂部に隣接する犬歯相当部では、各モデル間の応力値に大きな差がみられた。また、非破裂者モデルと骨移植モデル

の差に比較し、口蓋裂モデルと骨移植モデルで大きな差がみられた (図15, 16)。

また、咬合力を第一大白歯と犬歯に負荷した場合の

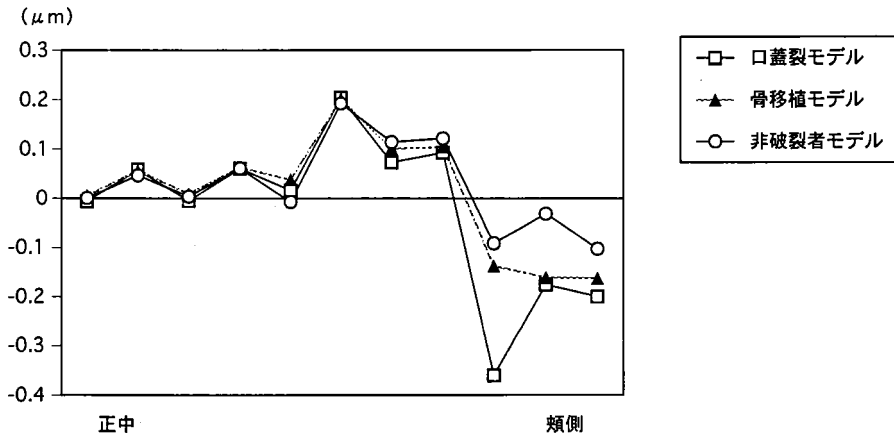


図17 歯槽部の頬（唇）舌方向への変位量.

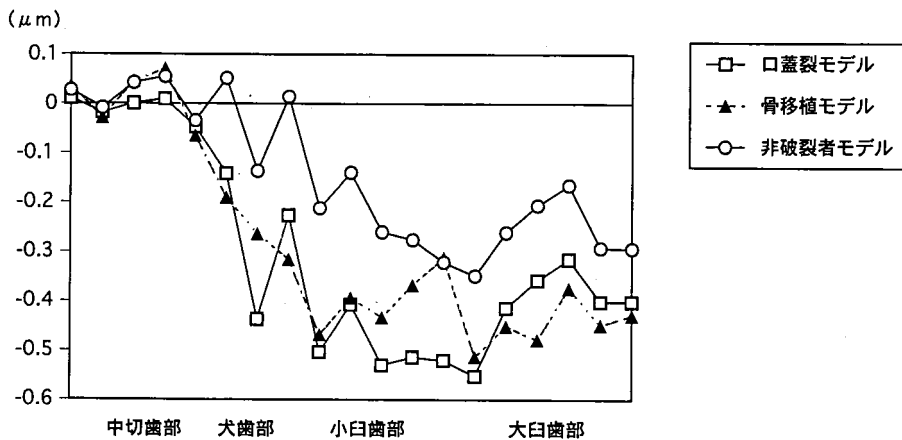


図18 口蓋部の頬（唇）舌方向への変位量.

応力値を比較すると、歯槽部では犬歯に咬合力を作用させた場合の方が応力値は大きく、口蓋部では大臼歯に咬合力を作用させた場合の方が応力値は大きかった。

### 3. 変位の大きさ

図17, 18に歯槽部、口蓋部の変位量を示す。中切歯歯槽部では、3つのモデルの変位量にほとんど差は認められなかったが、犬歯・大臼歯部では、3つのモデルとも頬舌方向では、舌側方向に変位し、口蓋裂モデルの変位量が最も大きかった。また、骨移植モデルにおける変位パターンは、非破裂者モデルに近似する傾向を示す部分が多く認められた。

口蓋部については評価部位により変位方向は異なっていたが、変位パターン自体は歯槽部と同様、骨移植モデルが非破裂者モデルに近似する傾向が示された。

以上のように応力分布、変位パターンともに骨移植

モデルが非破裂者モデルに近似する傾向が示された。

## 考 察

### I. 解析モデルと解析方法について

骨形態を力学的観点から評価する目的で、頭蓋骨に関しては、これまでに歪みゲージ法<sup>15-17,28-31)</sup>やホログラフィー法<sup>31-33)</sup>、光弾性法<sup>34-36)</sup>などを用いて、咀嚼力や顎矯正力によって発生する歪み分布に関する種々の研究が行われてきた。しかし、これらの方法による応力解析は、物体の表面のみの解析にとどまり、複雑な形状を示す鼻上顎複合体などでは、その内部にわたる応力は詳細に解析することは不可能とされてきた。

これに対し、有限要素法は、外力に対し無限の自由度をもつ連続体を有限の自由度をもつ要素と称する小部分の集合体として近似し、この集合体に対して成立

する力学的平衡式から連続体の変位や応力を求める数値解析法の一手法である。本法は、もともと工学分野に導入された方法であるが、最近では生体を対象とした医学、歯学の分野にも数多く応用されている。有限要素法の利点としては、①対象となる物体の外部および内部の変位、歪み、応力の定量的な解析が可能である。また、②加える荷重の方向や大きさなど荷重条件の自由度が大きいこと、などが挙げられる<sup>37,38)</sup>。

有限要素法では解析モデルと生体との等価性をいかに高めるかという点が最も重要となる。本研究に用いた非破裂者モデルの有効性については、宮阪らによってすでに実証されている<sup>22)</sup>。そこで、非破裂者モデルの有効性を変化させないためには、新たな要素を追加することなく、必要な要素を取り除くことであると考え、側切歯とその周囲の歯槽部、口蓋の一部に相当する要素の除去を行い、口蓋裂モデル、骨移植モデルを作製した。本解析モデルの縫合部では、隣接する骨がそれぞれ独立した動きをとれるように工夫されている。下顎骨、ならびに全身の長管骨が骨端部における軟骨性成長を呈するのに対し、鼻上顎複合体は骨表面と縫合部における骨改造による成長を示す。したがって、上顎部の主要な成長部位である縫合部における応力分布を明らかにすることは、成長に対する咬合荷の影響を検討する上で、きわめて重要である。さらに、硬組織のみにより構成されたモデルであるため、口唇裂口蓋裂患者に特有の癒痕組織形成が成長に及ぼす影響を排除し、骨欠損の有無、ならびに咬合荷の変化による応力分布状態と成長との関連を検討することが可能である。

口蓋裂モデルは、正中部や口蓋部の縫合の拘束部位を避けて要素を除去することにより骨欠損を再現したため、顎裂および不完全口蓋裂を有する患者を想定したものである。口唇裂口蓋裂患者は、胎生期から鼻中隔の弯曲を生じるなど、鼻上顎複合体の非対称性が存在し、顎・口蓋裂の裂型や骨欠損の程度により、さまざまな顎顔面形態を呈することが報告されている<sup>2,6,8)</sup>。本解析モデルはコンピュータ能力と解析効率を第一義に考えて対称モデルとして構築したため、口蓋裂モデル、骨移植モデルについては、実際の口唇裂口蓋裂患者の顎顔面形態と等価でない部分が存在することを完全に否定することはできないであろう。近年、顎顔面部の有限要素モデルの作製法としてX線CTを用いた方法が報告されている<sup>39-41)</sup>。しかし、鼻上顎複合体のように、多数の骨から構成される複雑な構造体の細部にわたる情報を得るには、広範かつ細密な撮像が必要であり、被験者に対し大きな被曝量を強いることになる。今後これらの問題が解決されれば、より等価なモデルの作製が可能となるものと期待される。

ば、より等価なモデルの作製が可能となるものと期待される。

本モデルは、下顎骨を除く頭蓋骨のモデルである。咀嚼運動時に大きな機能力を発揮する筋には、頬骨弓に付着する咬筋と側頭骨に付着する側頭筋がある。有限要素法では、骨に付着する筋により発揮される筋力をそれぞれの筋付着部位からのベクトルとして作用させることにより荷重条件の設定がなされるが、本解析では、咬筋と側頭筋の機能力を歯に作用する咬合荷として再現し、その作用方向を変えることにより咬合時の応力分布を検討した。

## II. 荷重条件の設定について

当科における口唇裂口蓋裂患者の統計によると、ほぼ80~85%の患者に白歯部の交叉咬合を認めた<sup>42)</sup>。そこで、顎裂や口蓋裂を有する患者の代表的な咬合異常の一つとして、白歯部逆被蓋の状態を設定した。その際モデル自体の歯列弓形態は変化させず、咬合接触点を変えることにした。すなわち、咬合荷の作用点を変えることにより白歯部交叉咬合を再現するために、正常咬合では上顎第一大臼歯咬合面の近心舌側部、逆被蓋の場合は近心頬側部をそれぞれ負荷点とした。

咬合力は、顎運動、咬合面傾斜角、咬合接触状態などにより様々な方向へ作用することが考えられる。咀嚼により歯は、種々の方向への変位を示すが、正常被蓋を有する場合、上顎第一大臼歯は咬合終末段階では遠心舌側方向へと変位すると報告されている<sup>26)</sup>。その角度については詳細な報告がみられないため、典型的な症例の咀嚼運動経路<sup>27)</sup>を参考とし、遠心方向に10度から5度間隔で咬合荷を与え、その際の第一大臼歯近心舌側咬頭の変位方向を検討した。その結果、遠心方向に30度の方向で遠心変位を認めたため、遠心方向に30度の負荷を設定し、舌側方向には同様に15度の負荷を設定した。

口唇裂口蓋裂患者の白歯に加わる咀嚼力の方向を総合的に検討した報告はみられないが、口唇裂口蓋裂に多くみられる交叉咬合の研究では、交叉咬合における機能時の前頭面での下顎運動経路の記録から、正常パターンと比較して垂直的な方向から中心咬合位へ向うパターンが多く観察されている<sup>27)</sup>。すなわち、白歯部の交叉咬合では咀嚼運動経路に現れる異常として咬合相付近で垂直的な閉口経路が特徴的に現れることから、口蓋裂モデルにおける負荷の作用方向を、逆被蓋では0度と15度に設定した。

咬合力の大きさは年齢や男女差により変化することが知られている<sup>43,44)</sup>。小西<sup>43)</sup>は、第一大臼歯での最大咬合力として8~15歳の男子で27.0 kgf、女子で

20.0 kgf と報告している。一方、当教室で行った終日筋電図による咀嚼筋機能の研究から、最大噛みしめ時の大きな筋活動の占める割合と比較し、安静時の弱い持続的な筋活動の占める割合が大きいことが明らかになった<sup>45)</sup>。したがって、咬合機能と顎顔面形態との関連を明らかにするためには、比較的小さな咬合力について解析し、検討する必要があると考えられた。しかし、顎骨に対する咬合負荷の作用時間はきわめて短く、瞬間的である場合がほとんどであるため、一回毎の咬合負荷と骨の歪みは弾性域にあると考えられる。弾性解析では、応力や歪みが荷重値に対して線形に変化し、その比率は変わらないことから、咀嚼時の咬合力は最大咬合力の1/2~1/4程度であるという報告<sup>46)</sup>を基に10 kgfの値を用いた。

これらの荷重条件での上顎第一大臼歯の変位様相は、これまでの生体での測定実験結果<sup>26,47)</sup>と同様の傾向を示したことから、本研究におけるモデルに対する荷重条件の設定は妥当なものと考えられた。

### Ⅲ. 解析結果の評価方法について

一般的に力学的因子である歪みや応力が骨改造に関与することは、多くの研究により明らかである<sup>48-51)</sup>。骨組織は、外力によって生じた応力に応じて形態や内部構造の変化を呈しながら、力学的に優れた形態に適応していくと考えられている。骨形態は、多くの場合遺伝的要因により決定されると考えられるが、歯科矯正臨床における顎骨の成長コントロールにみられるように外部環境に適応した骨の形態変化も生じていると予想される。歯科矯正学分野では、矯正力や顎整形力を負荷した場合の歯周組織や顎骨の生体力学的変化が検討され<sup>52-56)</sup>、骨の吸収、添加には主応力が関係し、その大きさには閾値が存在することが明らかとなった。さらに、歪みや応力の大きさが過度になると病的な骨吸収や破折が生じるため、骨改造に適した応力、すなわち至適応力の存在が強く示唆されている。また、骨形態と外力との関連性を明らかにする目的で、顎顔面領域でも咀嚼筋活動と下顎骨の形態の関連性が検討されている<sup>19)</sup>。そこで、これらの研究結果を参照しながら、口唇裂口蓋裂患者における骨欠損、ならびに臼歯部交叉咬合が咬合時の応力分布に及ぼす影響を検討するために本研究に着手した。

従来の研究では、応力と骨改造の関連性を検討するに際して、多くの場合、主応力が用いられている<sup>57,58)</sup>。しかし、三次元空間における3主応力の方向を明確にすることは難しく、縫合部のような複雑な形態をした部位では、性状の異なる応力が同時に生じることがあり、評価は困難であった。本研究では骨欠

損、あるいは咀嚼機能の変化によって生じた応力分布の変化と、骨の改造現象、すなわち成長との関連性を明らかにすることを目的としたため、応力の方向性よりむしろ応力の絶対的大きさに主眼を置き、歪みエネルギーのパラメータとして、応力分布状態の変化を単純に比較するのに適している相当応力<sup>59)</sup>を検討の対象とした。

### Ⅳ. 顎骨における応力と形態との関連性について

口唇裂口蓋裂患者の頭蓋顔面骨格の成長・発育の中で特に上顎部に関しては数多くの研究が行われてきた。その経年的変化について林<sup>5)</sup>は、上顎部前後径、高径とも全年齢において、対照群よりも小さな値であり、劣成長は増齢的に著明となると述べ、縫合性の成長や上顎結節部の骨添加の低下、鼻中隔変形、またRoss<sup>11)</sup>の述べている maxillary ankylosis (上顎骨癒着)をその原因として挙げている。また、長谷川<sup>6)</sup>は、口唇裂口蓋裂患者は上・中顔面は前後径が小さく、幅径が大きいため扁平化を示し、年齢とともにその傾向は増強し、非破裂者と比較して成長方向が異なることを報告している。

一般的に上顎骨、鼻腔を含む鼻上顎複合体の成長・発育では、それぞれの構成骨自体が大きく成長するばかりでなく、縫合部での成長<sup>60)</sup>、骨表面での添加成長<sup>61,62)</sup>、軟骨部での成長<sup>63,64)</sup>が関わっていることが明らかである。このような硬組織中心の説に対してMoss<sup>65)</sup>は、常に顎顔面骨格の軟組織が骨格の成長変化に強く関わるとした functional matrix 説を提唱した。この点からも、骨格の正常な成長は、環境因子である正常な機能による適切な機械的負荷が不可欠であると考えられている。

本研究では、正常な顎顔面骨格に対して、正常な咬合機能が作用した場合には、その顎顔面形態にとって適切な応力分布を示すと仮定し、上顎骨周囲の縫合部、鼻中隔軟骨ならびに口蓋部、歯槽部について、骨欠損、咬合状態の変化による咬合時の応力分布を解析し、成長への影響を検討した。

鼻上顎複合体の縫合部での成長に関して、前頭上顎縫合および前頭頰骨縫合での垂直方向への成長は顔面の高径を増大させる。頬骨上顎縫合では、眼の成長に伴って側方へ成長し、顔面の幅径を増大させる。これらの縫合部での成長は、ほぼ10歳頃までに完了し、鼻上顎複合体は主として下方、やや前方に変位する。縫合部での成長によって大きさを増大し、相対的な位置を変えた各顔面骨には、その変化に対応した骨の骨膜面および骨内膜面での骨の添加・吸収機転(骨改造)が生じ、形態および内部構造の調整が行われる。縫合

部での主な成長が10歳頃には完了するのに対して、骨改造は、その後も長期間続き、鼻上顎複合体の成長に関与する。本研究の結果から、上顎骨周囲の縫合部や鼻中隔では骨欠損による咬合時の応力分布への影響はほとんど認められず、口唇裂口蓋裂に伴う骨欠損自体は、咬合時の顎顔面部の応力分布に大きな影響を及ぼさないと考えられた。この結果は、口蓋裂未手術患者には、わずかな咬合異常は認めるものの、上顎部の劣成長を認めないという報告<sup>66-68)</sup>を裏付けるものである。一方、上顎骨周囲の縫合部や鼻中隔は咬合負荷の作用方向により、比較的強い影響を受けていた。特に側方への成長に関与する頬骨上顎縫合や、前後の成長に関与する蝶上顎縫合で応力分布に明らかな差異がみられたことは、咬合負荷の作用方向の変化が縫合部での前後方向、並びに側方への成長に影響を及ぼし、さらに縫合部での成長終了後も、鼻上顎複合体全体の骨の吸収・添加に影響を及ぼすことを示唆するものであり、長谷川<sup>6)</sup>が述べているような非破裂者との成長方向の変化をもたらす原因の一つと考えられる。

口蓋の成長に関しては、長径の増大は上顎結節後面での骨添加と横口蓋縫合と口蓋上顎縫合でのわずかな成長とによる。また、口蓋の幅径は、正中口蓋縫合での成長と上顎骨歯槽隆線外側面での骨添加によって増大する。正中口蓋縫合での成長は、1~2歳の間にほぼ完了するが、その後も骨性癒着せず、成人期まで線維性結合として存続する。

口蓋や歯槽部に対する口蓋形成術の影響について、Ross<sup>11)</sup>は、口蓋前方部から口蓋骨および蝶形骨鈎状突起にわたる癒痕組織がこれらの部位の成長・発育を阻害すると述べている。通常口蓋形成術では、口蓋前方部と歯槽骨部に術直後骨の露出を来とし、このことがこの部位の癒痕治療を生じさせ、交叉咬合を惹起する要因となると考えられる。また、手術による歯槽骨の内側転位は交叉咬合発現の主因子となることも示唆されている。

口唇裂口蓋裂形成手術は顎顔面部の解剖学的形態を修復・改善することにより、顔貌の不調和や口腔機能を改善する。しかし、手術侵襲を可及的に少なくして顎顔面部の形態が改善されたとしても、形成手術後の成長・発育に伴う二次的形態変化はさらに複雑となり、顎骨や顔面の形態変化を生じる。このように口蓋形成術による歯槽部の位置変化や、術後の癒痕収縮によって生じる形態変化に起因する機能的異常が顎顔面部の変形をさらに助長するものと推測されている。今回の結果からも歯槽部、口蓋部の咬合時の応力分布に骨欠損による影響が認められたが、このことは口蓋形成術後の歯槽部の位置変化をさらに増悪させる可能性

を有している。その結果、咬合負荷の作用方向の変化が生じ、上顎骨周囲や歯槽部、口蓋部の応力分布状態にさらに大きな影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、上顎歯列弓狭窄に伴う臼歯部の交叉咬合による咀嚼運動の変化が、その後の口唇裂口蓋裂患者の顎顔面部の成長に影響を及ぼす可能性が強く推測された。

さらに、骨欠損と臼歯部交叉咬合を同時に再現した条件下での応力分布を検討するために、非破裂者モデルの正被蓋と、口蓋裂モデルの逆被蓋の場合を比較した結果、縫合部、歯槽部、口蓋部のいずれの部位の応力分布にも大きな差がみられた。このことから、骨欠損と咬合負荷の変化が相まって咬合時の応力分布に大きな変化を生じ、顎顔面骨格や歯列の成長に大きな影響を及ぼすことが、口唇裂口蓋裂患者の成長方向を変化させる原因の一つであると推測された。一方、口唇裂口蓋裂患者の治療による早期の咬合機能の改善は、その後の成長に対する阻害因子を排除し、正常な成長パターンへの追いつき成長をもたらすものと考えられた。

## V. 顎骨における応力分布からみた骨移植の効果

骨移植モデルでは、骨欠損の有無によって咬合時の応力分布が変化しなかったと同様に、縫合部の応力分布にも著明な差は認められなかった。これに対して、歯槽部、口蓋部の応力分布は口蓋裂モデルや非破裂者モデルとの差が大きかった。特に、咬合力を犬歯に負荷した場合、犬歯歯槽部付近での差は大きく、骨移植モデルの応力は非破裂者モデルの値に近似する傾向がみられた。

また、変位量は、骨欠損により顎裂部付近の自由度が高い口蓋裂モデルが非破裂者モデルと比較し大きな変位量を示していた。口蓋部の要素のみを除去した骨移植モデルでは、口蓋裂モデルより大きな変位量を示す部位も一部認められたが、全体的には口蓋裂モデルより小さな変位量を示し、非破裂者モデルに近似する傾向が認められた。

このように骨移植により歯槽部、口蓋部における咬合時の変位様相や応力分布状態が非破裂者モデルに近似することから、咀嚼機能の変化を抑制し、さらに骨移植後の顎顔面部の成長に対して良好な効果をもたらすことが考えられる。つまり、骨移植は歯槽部、口蓋部の成長ばかりでなく顎顔面骨格全体の成長にも良好な影響を与えることが示唆され、さらには、歯科矯正治療後の歯列弓形態の安定、保持を高める効果が期待される。

口唇裂口蓋裂患者の治療後の安定性は、主に上顎歯列弓の拡大後の後戻りが強く関わっていると報告され

ている<sup>69)</sup>。また、顎裂部の欠損歯に対する補綴処置に関する報告から、これら患者は、非破裂者と比較し、支台歯数を多く必要とするといわれている<sup>70,71)</sup>。本研究で、骨移植を行うことにより、非破裂者における変位様相に近似する傾向を示すことは、骨移植が保定後の歯列弓形態の安定、保持効果を高めるとともに、補綴処置の上でも良好な結果をもたらすことが期待される。一方、口蓋裂モデルより大きな変位量を示す部位が認められたことは、骨移植モデルは口蓋部の骨欠損だけで歯槽部の連続性は保たれているため、口蓋裂モデルと歪みの方向、大きさが異なることに起因するものと思われた。

以上のことを総括して、骨移植を行い骨架橋が十分に獲得されれば、骨移植術はこれまで報告されているように、多くの利点を持つ有用な治療法であることが再確認された。

## 結 論

口唇裂口蓋裂における骨欠損や臼歯部咬合状態、また顎裂部へ骨移植を行った場合の影響について、咬合時の顎顔面複合体の応力分布状態を有限要素法を用いて解析し、咬合負荷に対する生体力学的反応と顎顔面形態および成長変化との関連性を検討した結果、以下のような結論を得た。

1. 咬合負荷の作用方向の違いは、口唇裂口蓋裂患者の縫合部における応力分布状態に影響を及ぼしていたが、その分布パターンは非破裂者モデルとほぼ同様の傾向を示した。

2. 口蓋裂モデルと非破裂者モデルで、歯槽部、口蓋部における応力分布状態の違いがみられ、特に、骨欠損を呈する顎裂部に隣接する歯槽部、口蓋部中央および後方部では応力値に大きな差が認められ、骨欠損の影響が主として歯槽部、口蓋部に発現することが明らかとなった。

3. 顎裂部への骨移植を行った場合でも、縫合部の応力値に大きな差は認められなかったが、口蓋裂モデルと比較し骨移植モデルにおける歯槽部、口蓋部の応力分布は非破裂者モデルに近似する傾向がみられた。

以上のことから、咬合負荷の作用方向の影響は、顎顔面全体に及び、骨欠損ならびに骨移植の影響は、主として歯槽部、口蓋部に発現することが明らかとなった。また、骨移植により歯槽部、口蓋部の応力分布が非破裂者モデルに近似した所見を示したことから、顎裂部への骨移植は歯列の成長や形態保持に良好な結果をもたらす可能性のあることが強く示唆された。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、御懇篤なる御指導、御校閲を賜りました広島大学歯学部歯科矯正学講座丹根一夫教授に深甚なる謝意を表します。また、本論文作成に際し、終始御教示、御指導頂きました本学口腔外科学第二講座石川武憲教授、歯科放射線学講座谷本啓二教授に深謝いたします。

また、本研究遂行上、終始御指導、御助言を頂いた本学歯科矯正学講座の井藤一江講師、奈良医科大学口腔外科の松原 進博士に心より感謝の意を表します。最後に研究を遂行する上で多大なる御協力を頂きました本学歯科矯正学講座の皆様方に感謝致します。

## 文 献

- 1) A Graber, T.M.: A cephalometric analysis of the developmental pattern and facial morphology in cleft palate. *Am. J. Orthod.*, **19**, 91-100, 1949.
- 2) 石川富士郎, 遠藤 孝, 亀谷哲也, 国武和春: 唇一顎一口蓋裂患者の矯正学的観察 特に顎顔面部の形態について. *日矯歯誌*, **29**, 54-60, 1970.
- 3) 石川富士郎, 遠藤 孝, 亀谷哲也, 国武和春: 唇一顎一口蓋裂患者の矯正学的観察—とくに破裂部位ならびに手術時期が顎, 顔面形態に及ぼす影響—. *日矯歯誌*, **29**, 149-158, 1970.
- 4) 柴崎好伸: 頭部X線規格写真法による片側性唇顎口蓋裂患者の顎顔面頭蓋の形態に関する研究: Adolescent growth spurt 以後について. *口病誌*, **40**, 476-497, 1973.
- 5) 林 勲: 片側性完全唇・顎・口蓋裂者の顎・顔面頭蓋の成長—頭部X線規格写真法による研究—. *日矯歯誌*, **34**, 33-65, 1975.
- 6) 長谷川正文: 片側性完全唇顎口蓋裂者の顎顔面頭蓋の形態と成長に関する研究, 一頭部X線規格写真による3次元解析—. *日矯歯誌*, **37**, 37-55, 1978.
- 7) 作田 守: 口蓋裂の基礎と臨床—顔面の成長を中心—. *日矯歯誌*, **37**, 139-160, 1978.
- 8) 林勝之助, 亀田 晃, 比佐進吉: 反対咬合を呈する片側性唇顎口蓋裂者の顎顔面頭蓋の形態について—頭部X線規格正貌写真による検討—. *日矯歯誌*, **44**, 31-49, 1985.
- 9) Coccoaro, P.J. and Pruzansky, S.: Longitudinal study of skeletal and soft tissue profile in children with unilateral cleft and palate, *Cleft Palate J.*, **2**, 1-12, 1965.
- 10) Kremenak, C.R., Searls, J., Barrett, R., Collins, C., Karlsson, U., Morris, J., Olin, W.H., Pratt, S. and Allen, T.: Inhibition of palatal postsurgical wound contraction. Effects of pharmacologic agents. *J. Dent. Res.*, **55**, B57, 1976.

- 11) Ross, R.B.: The clinical implication of facial growth in cleft lip and palate subjects. *Cleft Palate J.*, **7**, 37-47, 1970.
- 12) Harvold, E.P.: Cleft lip and palate, Morphologic studies of the facial skeleton. *Am. J. Orthod.*, **40**, 493-506, 1954.
- 13) Mazaheri, M., Nanda, S. and Sassouni, V.: Comparison of midfacial development of children with clefts with their siblings. *Cleft Palate J.*, **4**, 334-341, 1967.
- 14) Moss, M.: Malformations of the skull base associated with cleft palate deformity. *Plast. Reconstr. Surg.*, **17**, 226-234, 1956.
- 15) 鹿島隆雄: 咀嚼によって顔面頭蓋に生ずる応力分布から見た, 人顔面頭蓋の形態学的研究, 第一報: 顔面頭蓋に生ずる応力の特色, 及び主応力方向と Spalt-line との関連性について. 歯科学報, **71**, 44-91, 1966.
- 16) 宮地建夫: 咬合圧によって生ずる歪分布からみた動物顔面頭蓋の構造力学的研究, 歯科学報, **71**, 44-91, 1970.
- 17) 石田 晃: 咬合力・咀嚼力および矯正力に対する頭蓋の力学的反応機構に関する実験的研究. 歯基礎誌, **14**, 323-341, 1972.
- 18) 伊藤学而, 黒江和斗, 安田秀雄, 井上直彦, 亀谷哲也: 顎骨の退化に関する実験的研究. 日矯歯誌, **41**, 708-715, 1982.
- 19) 石田哲也: 最適形状決定法による咀嚼筋筋力と下顎骨形状との関連性に関する研究. 口病誌, **51**, 103-123, 1984.
- 20) Boyne, P.J. and Sands, N.R.: Secondary bone grafting of residual alveolar and palatal clefts. *J. Oral Surg.*, **30**, 87-92, 1972.
- 21) 幸地省子, 猪狩俊郎, 飯野光喜, 松井桂子, 高橋 哲, 福田雅幸, 千葉雅俊, 伊藤まゆみ, 斉藤哲夫, 松田耕策, 山口 泰, 越後成志, 手島貞一: 顎裂への新鮮自家腸骨海綿骨細片移植. 日口蓋誌, **20**, 59-74, 1995.
- 22) 宮阪順子, 丹根一夫, 堤 定美, 作田 守: 顎矯正力による顔面頭蓋の生力学的変化—顔面頭蓋の三次元有限要素モデルの作成—. 阪大歯誌, **31**, 393-402, 1986.
- 23) Tanne, K., Miyasaka, J., Yamagata, Y., Sachdeva, R., Tsutsumi, S. and Sakuda, M.: Three-dimensional model of the human craniofacial skeleton: method and preliminary results using finite element analysis. *J. Biomed. Eng.*, **10**, 246-252, 1988.
- 24) Carter, D.R. and Hayes, W.C.: The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *J. Bone Joint Surg.*, **59A**, 954-962, 1977.
- 25) Orr, T.E. and Carter, D.R.: Stress analysis of joint arthroplasty in the proximal humerus. *J. Orthop. Res.*, **3**, 361-371, 1985.
- 26) 三浦宏之: 機能下にある歯牙の水平面内における変位に関する研究. 補綴誌, **29**, 735-754, 1985.
- 27) 宮内修平, 中南匡史, 西尾公一, 丸山剛郎: 臼歯部交叉咬合における咀嚼運動のパターンに関する研究—前頭面における咀嚼運動パターンの分類について—. 補綴誌, **33**, 938-951, 1989.
- 28) Nakanishi, Y.: Effects of headgear traction on the human facial skeleton: A study with strain gauges. *J. Osaka Den. Univ.*, **7**, 7-30, 1973.
- 29) 鈴木敏正: 顎整形力加重時の上顎複合体の変形様相に関する研究—三軸ストレインゲージによる歪み測定—. 歯科学報, **82**, 469-502, 1982.
- 30) 丹根一夫, 宮阪順子, 山形嘉明, 作田 守, Burstone, C.J.: 急速拡大装置による頭蓋顔面骨格の生力学的変化について. 阪大歯誌, **30**, 345-356, 1985.
- 31) 飯島政一: ホログラフィー干渉法ならびにストレインゲージ法による上顎複合体への Orthopedic force の作用機序に関する研究. 日矯歯誌, **47**, 127-144, 1988.
- 32) 新井治成: ホログラフィ干渉法による上顎顎外装置の作用機序に関する研究. 日矯歯誌, **44**, 288-301, 1985.
- 33) 小林和英, 神原 章, 清村 寛: ホログラフィー干渉法による矯正力の伝達機構に関する研究, 上顎顎外固定装置を用いて. 日矯歯誌, **35**, 161-168, 1976.
- 34) Chaconas, S.J., Caputo A.A. and Davis J.C.: The effects of orthodontic force on craniofacial complex utilizing cervical and headgear appliance. *Am. J. Orthod.*, **69**, 527-539, 1976.
- 35) Krägt, G. and Duterloo, H.S.: The initial effects of orthodontic force: a study of alteration in the craniofacial skull owing to high-pull headgear traction. *Am. J. Orthod.*, **81**, 57-64, 1982.
- 36) 廣瀬武尚, 川越 仁, 久保田教志, 渡辺猛士, 伊東隆三, 松本光生: Reversed headgear タイプの上顎前方牽引装置による顎顔面頭蓋の変形様相—光弾性法による研究—. 日矯歯誌, **44**, 660-668, 1985.
- 37) Smith, G. N.: An introduction to matrix and finite element method in civil engineering. Applied Science Publisher Ltd., London, 1971.
- 38) 堤 定美: 有限要素法の基礎—応用範囲の広い数値解析法—. 国際歯科ジャーナル, **5**, 231-242, 1977.
- 39) 槇宏太郎, 柴崎好伸, 福原達郎, 伊能教夫: 3D-QCT 法と 3D 有限要素法を用いた顎骨骨密度変化の解析. 日骨形態誌, **1**, 75-81, 1991.
- 40) 伊能教夫, 藤原 宏, 槇宏太郎: 顎骨の咬合応力の三次元有限要素解析. 日本機械学会論文集 (A編), **58**, 40-45, 1992.
- 41) 槇宏太郎: コンピュータ・シミュレーション, 現在の状況と今後の展望. *Quintessence*, **14**, 197-207, 1995.

- 42) 坪倉志乃, 井藤一江, 岩谷有子, 小澤 奏, 横山智世子, 木村浩司, 切通正智, 山内和夫: 広島大学歯学部附属病院矯正科における口唇口蓋裂患者の統計的観察—開設以来21年間について—。日口蓋誌, **15**, 132-143, 1990.
- 43) 小西繁一: 人歯牙の健全歯および諸種疾患ならびに補綴に於ける咬合力に関する研究。日口腔会誌, **8**, 427-458, 1959.
- 44) 高見沢忠: 健康永久歯の相対咬合力および個歯咬合力に関する研究。補綴誌, **9**, 217-236, 1965.
- 45) Miyamoto, K., Yamada, K., Ishizuka Y., Morimoto, N. and Tanne, K.: Masseter muscle activity during the whole day in young adults. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, **110**, 394-398, 1996.
- 46) 三浦不二夫, 角田正明: 咬合圧 (咀嚼圧) に関する研究。日歯医師会誌, **7**, 293-298, 1954.
- 47) 宮本圭介: 歯の微小変位に関する研究—咬合力負担能力と歯の変位との関連性—。広大歯誌, **22**, 101-124, 1990.
- 48) 梅谷陽二, 平井成興: 成長変形法による構造物最適形状の決定。日本機械学会論文集, **42**, 3754-3761, 1976.
- 49) 梅谷陽二: 骨の形態と成長変形法。日本機械誌, **79**, 749-754, 1976.
- 50) Cowin, S.C.: Mechanical modeling of the stress adaptation process in bone. *Calcif. Tissue Int.*, **36**, S98-S103, 1984.
- 51) Tanne, K., Nagataki, T., Matsubara, S., Kato, T., Terada, Y., Shibaguchi, T., Tanaka, E. and Sakuda, M.: Association between mechanical stress and bone remodeling. *J. Osaka Univ. Dent. Sch.*, **30**, 64-71, 1990.
- 52) Droschl, H.: The effects of heavy orthodontic force on the maxilla in the growing saimiri sciureus. *Am. J. Orthod.*, **63**, 449-461, 1973.
- 53) Droschl, H.: The effects of heavy orthodontic force on the sutures of the facial bones. *Angle Orthod.*, **45**, 26-33, 1975.
- 54) Yamamoto, J.: Effects of extraoral force in the dentofacial complex of the macaca irus. *J. Jpn. Orthod. Soc.*, **34**, 173-197, 1975.
- 55) Elder, J.R. and Tuenge, R.H.: Cephalometric and histologic changes produced by extraoral high-pull traction to the maxilla in macaca mulatta. *Am. J. Orthod.*, **66**, 599-617, 1974.
- 56) Meldrum, R.J.: Alterations in the upper facial growth of macaca mulatta resulting from high-pull headgear. *Am. J. Orthod.*, **67**, 393-411, 1975.
- 57) Tanne, K., Hiraga, J. and Sakuda, M.: Effect of directions of maxillary protraction force on biomechanical change in craniofacial complex. *Eur. J. Orthod.*, **11**, 382-391, 1989.
- 58) 平賀順子: 上顎前方牽引による頭蓋顔面複合体の生体力学的反応に関する研究。日矯正誌, **50**, 33-47, 1991.
- 59) 益田森治, 室田忠雄: 改訂 工業塑性力学。養賢堂, 東京, 77-105, 1988.
- 60) Weinmann, J.P. and Sicher, H.: Bone and bones. 2nd ed., C.V. Mosby, St. Louis, 1955.
- 61) Enlow, D.H. and Bang, S.: Growth and remodeling of the human maxilla. *Am. J. Orthod.*, **51**, 446-464, 1965.
- 62) Enlow, D.H.: Facial growth. 3rd ed., W.B. Saunders, Philadelphia, 1990.
- 63) Sarnat, B.G. and Wexler, M.R.: Postnatal growth of the nose and face after resection of septal cartilage in the rabbit. *Oral Surg. Oral Med. & Oral Pathol.*, **26**, 712-727, 1968.
- 64) Scott, J.H.: Dento-facial development and growth. Pergamon Press, Oxford, 1967.
- 65) Moss, M.L.: The functional matrix; functional cranial components. in *Vistas in Orthodontics* (Karus, B.A. and Reidel, R. editors), Lea & Febiger, Philadelphia, 1962.
- 66) Bishara, S.E., Krause, C.J., Olin, W.H., Weston, D., Van Ness, J. and Felling, C.: Facial and dental relationship of individuals with unoperated clefts of the lip and/or palate. *Cleft Palate J.*, **13**, 238-252, 1976.
- 67) 中川幹夫, 伊東隆三, 川越 仁, 藤田信義, 秦俊二, 木山恭一, 松本光生, 伊東隆利: 成人まで口蓋裂未手術で経過した唇顎口蓋裂についての歯科矯正学的検討。日口蓋誌, **8**, 99-104, 1983.
- 68) 作田 守, 垣内康弘, 土屋雅文, 吉田建美, 北村 隆, 足立 敏, 中川浩一, 保田好秀, 和田健, 杉村正仁, 堀坂 孝, 前田早智子, 鳥田純治: 片側性完全唇・顎・口蓋裂の成人未手術例 1. 術前の咬合状態・頭蓋・顔面の形態的ならびに口腔の機能的所見。日口蓋誌, **8**, 105-115, 1983.
- 69) 大坪弘人, 石川博之, 徳田佳世美, 楊 慧瑛, 大熊信行, 塚田隆一, 安藤藤介, 大内英樹, 三崎浩一, 中西 亮, 森谷 聡, 原口直子, 平賀順子, 山村雅彦, 土佐博之, 工藤章修, 中村進治: 片側性唇顎口蓋裂患者における上顎歯列拡大後の後戻りに関する研究。北海矯正誌, **18**, 35-42, 1990.
- 70) 大山喬史: 唇顎口蓋裂と歯科補綴, 日本歯科評論, **400**, 29-36, 1976.
- 71) 鈴木るり: 片側性唇顎口蓋裂患者の補綴処置に関する研究—連結範囲が咬合力負担能力に及ぼす影響について—。口病誌, **56**, 121-140, 1989.