

令和 2 年度 博士論文

論文 題目	コーンビーム CT 画像を用いた 三次元歯軸および歯列の解析 に関する研究
----------	---

所属	新潟大学大学院自然科学研究科 材料生産システム専攻		
学籍番号	F18K005H	氏名	坂上 勇太
指導教員	田邊 裕治 教授		

## 目次

第1章	緒論 .....	1
1.1	歯の形態および構造 .....	1
1.2	歯軸 .....	3
1.3	従来の三次元歯軸の自動決定法に関する研究 .....	3
1.4	従来の歯列に関する研究 .....	6
1.5	本研究の目的および論文構成 .....	8
1.6	参考文献 .....	11
第2章	前歯部の三次元歯軸の決定法 .....	13
2.1	緒言 .....	13
2.2	対象および実験方法 .....	13
2.2.1	対象 .....	13
2.2.2	CBCT 撮影 .....	14
2.2.3	実験方法 .....	15
2.3	結果 .....	16
2.4	考察 .....	19
2.5	結言 .....	22
2.6	参考文献 .....	22
第3章	ワールド座標系を用いた前歯部の三次元歯軸および歯列決定法 ...	23
3.1	緒言 .....	23
3.2	対象および方法 .....	23
3.3	結果 .....	29
3.4	考察 .....	37

3.5	結言 .....	38
3.6	参考文献 .....	38
第4章	三次元歯列曲線の解析 .....	40
4.1	緒言 .....	40
4.2	対象および実験方法 .....	40
4.2.1	対象 .....	40
4.2.2	CBCT 撮影 .....	41
4.2.3	実験方法 .....	41
4.3	結果 .....	45
4.4	考察 .....	51
4.5	結言 .....	53
4.6	参考文献 .....	53
第5章	三次元歯軸の解析 .....	54
5.1	緒言 .....	54
5.2	対象および実験方法 .....	54
5.2.1	対象 .....	54
5.2.2	CBCT 撮影 .....	54
5.2.3	実験方法 .....	54
5.3	結果 .....	58
5.4	考察 .....	80
5.5	結言 .....	82
5.6	参考文献 .....	82
第6章	結論 .....	84
謝辞	.....	86

# 第 1 章 緒論

## 1.1 歯の形態および構造

図 1.1 にヒト永久歯 32 本の歯列と歯の種類を示す。ヒトの歯は、食物を切るシャベル状の切歯、先端が突出し切り裂くための犬歯、すり潰しに便利な臼状の臼歯がある。ヒトの歯は一生の間に一回生え変わることから二生歯性と呼ばれるが、切歯、犬歯、小臼歯は二生歯性であるが、大臼歯は一生歯性で新しく生え変わることはない。

図 1.2 に歯と歯周組織の断面図を示す。歯の上方は歯冠、境界部は歯頸、下方は歯根と呼ばれ、上顎骨と下顎骨に歯根が海綿骨中に歯根膜を介して埋まっている。上顎の歯根は下顎の歯根よりも数が多い傾向があり、これは歯を噛みしめた際の安定性で上顎が土台となることが関係していると考えられている。歯冠の表面を被っている組織はエナメル質と呼ばれ、ヒトの体の中で最も硬い組織である。歯の中央部には血管が侵入している歯髄があり、歯の主体は象牙質と呼ばれる組織から構成されている。歯周組織は、歯の周囲にある組織で歯肉、歯根膜、セメント質、歯槽骨の 4 つからなる。歯槽骨と歯のセメント質の間には、歯根膜という組織が存在し、これらがシャープリー線維と呼ばれる強靱な線維によって結ばれている。このシャープリー線維は、走行の異なる線維が歯と骨とを強く結合している。このように歯は堅固で弾力性を持つ結合により、歯で噛む際に歯に作用する力を分散させ、スムーズな咀嚼が行える構造体となっている。

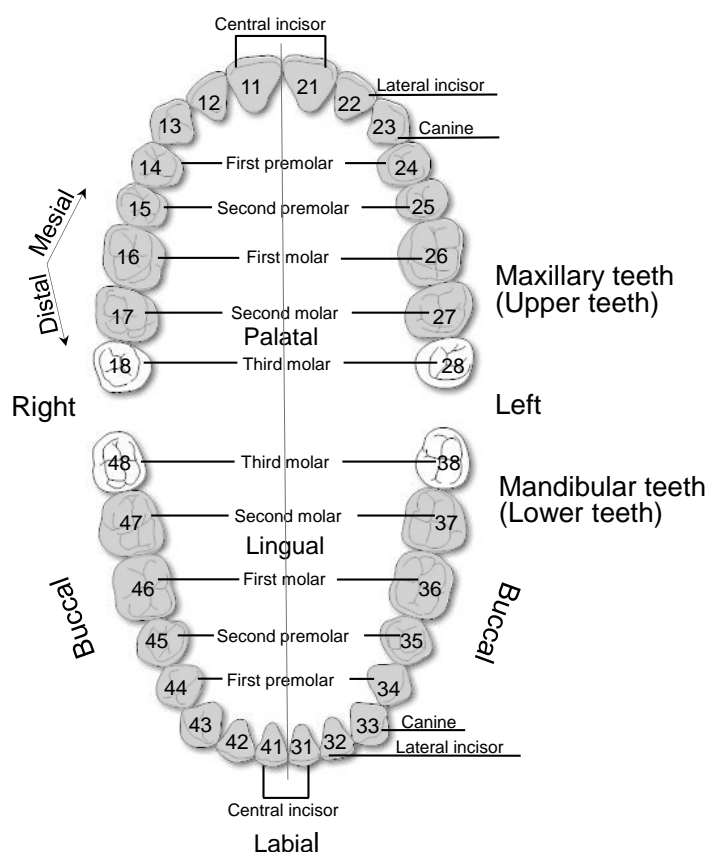


図 1.1 歯列 (ISO-3950 表示) と歯の種類.

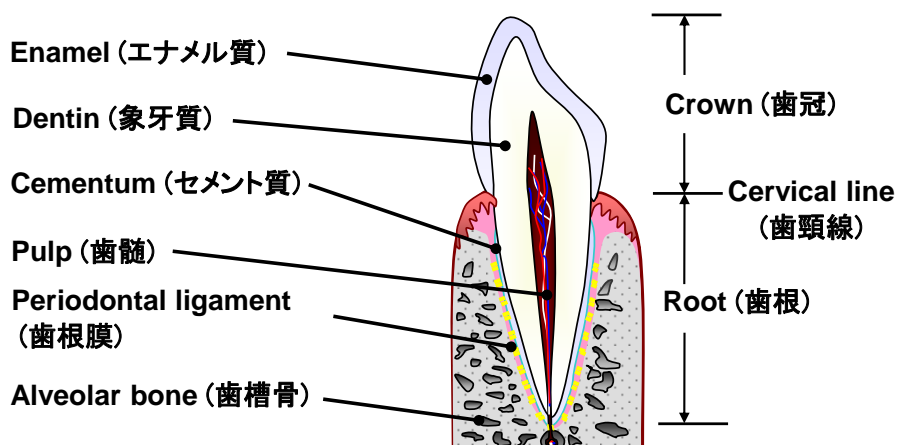


図 1.2 歯と歯周組織の断面図.

## 1.2 歯軸

歯の長軸を示す歯軸は、最も基本的な歯の形態的基準軸であり、橋義歯・部分床義歯における支台歯の軸面方向決定の指針、力学的観点からの咬合についての診断、支台歯形成時における歯髓腔形態の予測、矯正治療の診断等に利用されている。また、歯軸は今日までに解剖学的、補綴学的および矯正学的に検討されてきた。しかし、これまでの歯軸は二次元的歯軸が多く用いられている<sup>1),2)</sup>とともに、その定義も「歯頸部付近に重点を置き、歯の中央部を縦に通る直線を歯軸とするという概念<sup>3)</sup>」を参考に、歯科医師らにより図 1.3 で示すように目視で定める場合がほとんどである。したがって、三次元的歯軸が一義的に自動決定される手法が確立されれば、口腔解剖学や歯科臨床において有効な手段となると考えられる。

Tooth axis(歯軸)

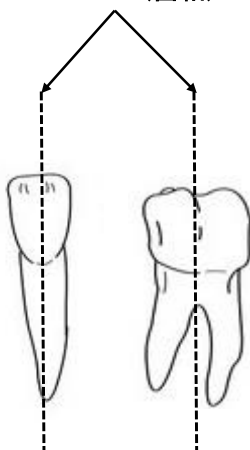


図 1.3 歯軸.

## 1.3 従来の三次元歯軸の自動決定法に関する研究

三次元歯軸の自動決定に関する研究は極めて少なく、非接触式レーザー形状測定器により上顎中切歯の抜去歯表面形状データから主成分分析法を用いて歯軸を求めた飯島ら<sup>4)</sup>の研究(図 1.4)と Kim ら<sup>5)</sup>による歯科用コーンビーム CT(以下, CBCT)を用いて、生体内のヒト歯 20 本について主成分分析法から歯軸を求めた研究(図 1.5)があげられる程度である。しかし、Kim ら<sup>5)</sup>による研究では、得られた歯軸の精度や異なる歯種間における歯軸の特徴については言及していない。

他方，歯科臨床では，被曝線量が少なく，小型画像診断機器である CBCT が広く用いられている．しかしながら，CBCT は医療用トンネル型 CT と比較して画像の解像度が低下することから，CBCT を使用した自動歯軸の精度低下が懸念される．坂本ら<sup>6)</sup>は，4 種類のヒト抜去歯を対象（図 1.6）に精度の高いマイクロ CT（以下， $\mu$ CT）および CBCT を用いて主成分分析法による三次元歯軸の自動決定を行い， $\mu$ CT を基準とした CBCT による三次元歯軸の精度を評価する（図 1.7）とともに，歯科医師 3 名による手動歯軸との比較（図 1.8）から，CBCT による自動歯軸決定法の特徴および有用性等について検討した．

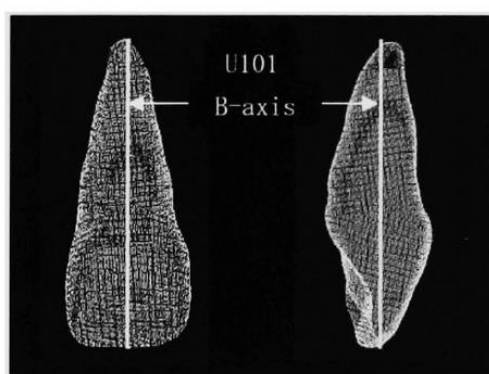


図 1.4 飯島ら<sup>4)</sup>による非接触式レーザー形状測定器から抜去歯表面形状データより主成分分析法を用いて歯軸を求めた上顎中切歯の例．



図 1.5 Kim ら<sup>5)</sup>による歯科用 CBCT を用いて主成分分析法から求めた白歯の歯軸



図 1.6  $\mu$ CT を基準とした CBCT による三次元歯軸の精度を評価するために用いた 4 個の球マーカーを貼付した抜去歯<sup>6)</sup>.

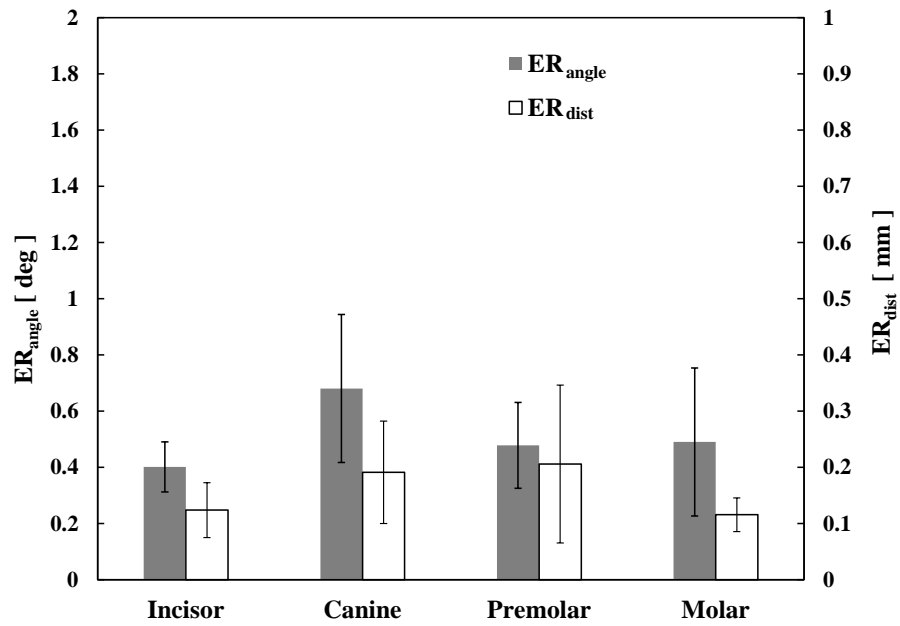


図 1.7 歯種ごとの  $\mu$ CT と CBCT の自動歯軸間の平均角度誤差  $ER_{angle}$  および平均重心距離誤差  $ER_{dist}$ <sup>6)</sup>.



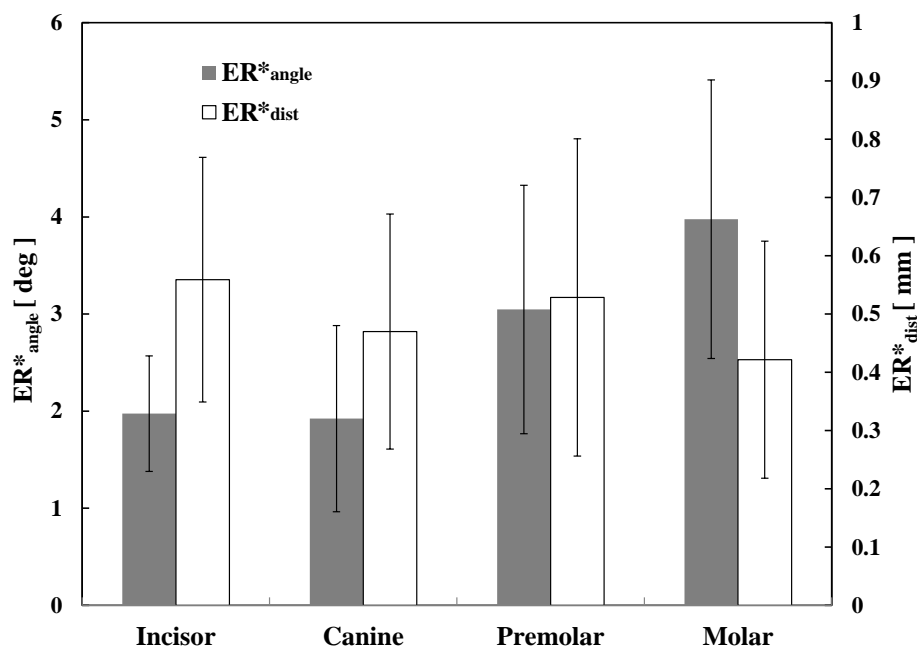


図 1.8 歯種ごとの自動歯軸 PC-A と手動歯軸 T-A との間の平均角度誤差  $ER^*_{angle}$  および平均重心距離誤差  $ER^*_{dist}$ <sup>6)</sup>.

#### 1.4 従来の歯列に関する研究

一般に、これまでの歯列の求め方は、初めに被検者の口腔内模型をキャストイングにより作成し、その後に三次元測定機のスタイラス（プローブ）にて歯の特徴点を接触して測定する方法<sup>7)</sup>（図 1.9）や三次元レーザー測定機による方法<sup>8),9)</sup>（図 1.10）、口腔内模型をデジタルノギス等で測定する方法<sup>10)</sup>、口腔内模型を写真画像に写してからデジタイジングする方法<sup>11)</sup>（図 1.11）、パノラマ X 線断層画像による擬似的三次元歯列測定法<sup>12)</sup>（図 1.12）等が挙げられる。

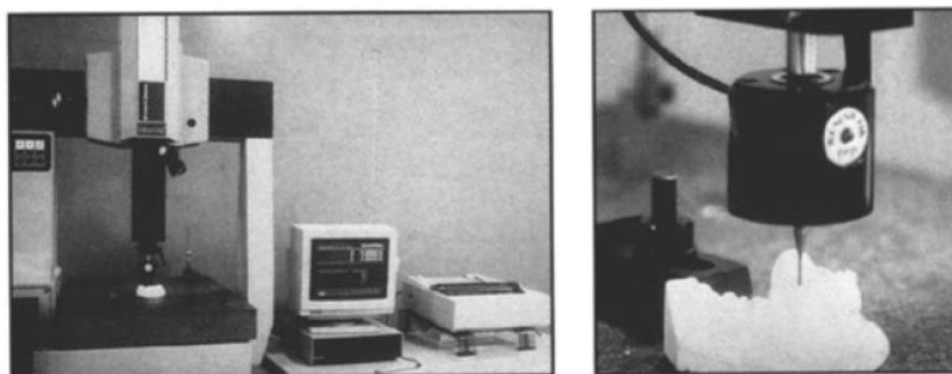


図 1.9 被検者の口腔内模型をキャストイングにより作成し、三次元測定機にて歯の特徴点を接触して歯列を測定する方法<sup>7)</sup>

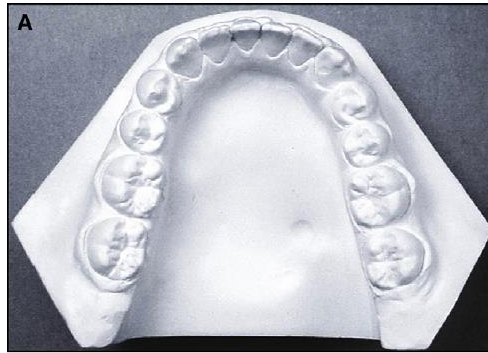


図 1.10 被検者の口腔内模型をキャストニングにより作成し，三次元レーザー測定機にて歯の特徴点を接触して歯列を測定する方法<sup>8)</sup>。

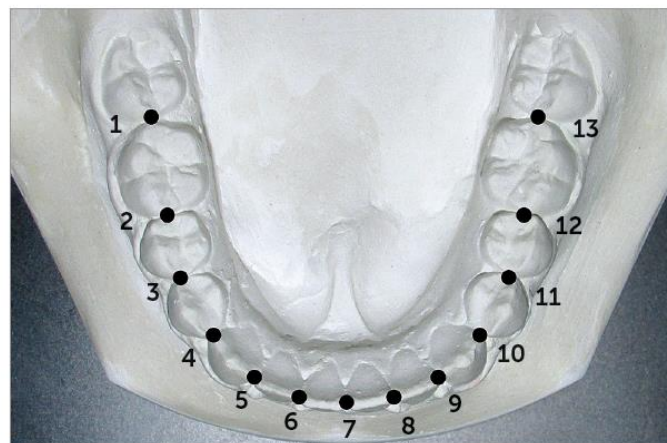


図 1.11 被検者の口腔内模型をキャストニングにより作成し，写真画像に写してからデジタイジングする方法<sup>11)</sup>。

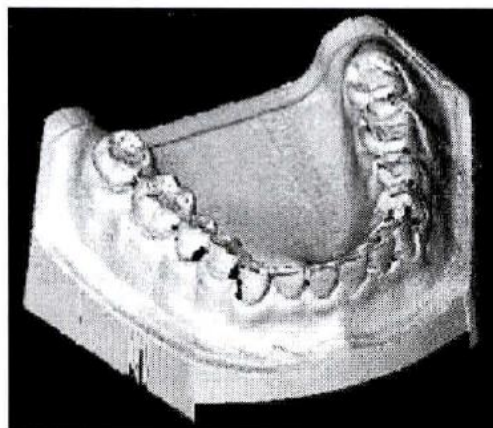


図 1.12 口腔内模型からパノラマ X 線断層画像によって擬似的三次元歯列を求める測定法<sup>12)</sup>。

## 1.5 本研究の目的および論文構成

1.2 節で示したように、これまでの自動歯軸に関する研究は、抜去歯を対象としたものであり、歯科臨床で用いられている CBCT による生体内画像の研究は、Kim ら<sup>5)</sup>による研究が挙げられるのみである。しかしながら、Kim ら<sup>5)</sup>の研究では、歯軸の精度や異なる歯種間における歯軸の特徴については述べられていない。そこで本研究では、初めにヒト歯の生体内における CBCT 画像を用いて、顎骨と前歯部（中切歯、側切歯、犬歯）を分離して三次元歯モデルを作成して自動的に歯軸を求めるとともに、検者 3 名による三次元歯モデルを用いた目視による手動歯軸との比較から、CBCT による三次元自動歯軸決定法の特徴および有用性等について検討した。

一方、従来の研究において歯軸を定める際には、対象者の上下歯から型取りした模型や 3D プリンターで作製した模型で歯軸の方向を目視で決定する場合<sup>1),5)</sup>や X 線や CT 画像を用いて二次元的な歯軸<sup>2),13),14)</sup>を得ている場合が多く、歯軸の決定法は必ずしも一義的でない<sup>4)</sup>。また、歯の配列を示す歯列は通常歯列弓といわれ、口腔横断面内において、切歯の切縁、犬歯の尖頭、そして臼歯の頬側咬頭の尖頭を通る平面内の曲線と定義されている。現在の歯列弓の求め方は、初めに研究対象者の口腔内模型をキャストニングにより作成し、歯の歯冠表面の特徴点を測定する方法やデジタルノギスによる測定等が用いられている。しかし、これらの方法では横断面内における歯列を二次元的に表現しており、横断面外に位置する歯軸の情報は含むことはできない。さらに、この種の測定法では検者間誤差が生じやすく、上下顎歯の位置関係を正確に知ることはできないという欠点がある。

そこで本論文では、CBCT 画像を用いて検者の撮像条件等に依存しない三次元歯軸や歯列を求める新たな手法を提案し、その適用例を示すことで本法の有用性について明らかにすることを主な目的とし、本章を含め図 1.13 で示されるように 6 章から構成されている。

第 1 章「緒論」では本研究の十分に考察するために必要な歯軸および歯列の基礎的な知識、背景、意義および目的を述べた。

第 2 章「前歯部の三次元歯軸の決定法」では、成人 5 名の生体内 CBCT 画像から得られた中切歯、側切歯、犬歯の合計 60 本の前歯部の歯を対象に、主成分分析

法を用いて三次元歯軸を自動決定した結果を示すとともに、検者 3 名による目視による手動歯軸との比較を行った。そして、三次元自動歯軸決定法の特徴および有用性等について明らかにした。

第 3 章「ワールド座標系を用いた前歯部の三次元歯軸および歯列決定法」では、生体内 CBCT 画像において明確に視認できる上下顎骨の特徴点からワールド座標系を構築し、上下顎前歯の歯軸と歯列の三次元絶対位置を自動的に求める新たな手法を提案した。

第 4 章「三次元歯列曲線の解析」では、生体内 CBCT 画像から三次元再構成した上下顎骨の特徴点に基づきワールド座標系を構築した。成人 8 名の歯髓腔を考慮しない三次元歯モデルより三次元形状重心を求め、歯の形状重心による三次元歯列を表現する手法を提案した。

第 5 章「三次元歯軸の解析」では、成人 10 名の生体内 CBCT 画像から第三大臼歯を除く 28 本の歯に対し主成分分析法で求めた三次元歯軸を歯列とともに示す表現手法について検討した。

第 6 章は本論文の結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

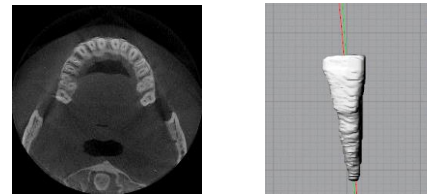
## 1章 緒論

- 従来の歯軸，歯列の求め方の背景と問題点
- CBCT画像による歯軸決定法・・・抜去歯による $\mu$ CTとCBCTによる歯軸決定手法



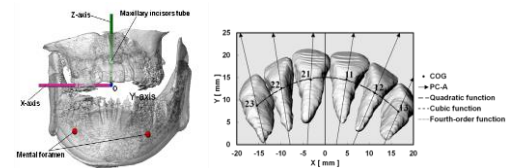
## 2章 前歯部の三次元歯軸の決定

- 抜去歯ではなく実際の生体から取得したCBCT画像を利用
- 主成分分析法を用いた歯軸と手動による歯軸との比較



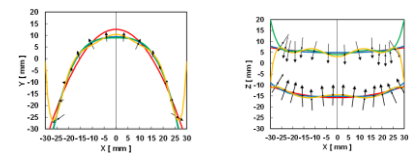
## 3章 ワールド座標系を用いた前歯部の三次元歯軸および歯列決定

- ワールド座標系を構築
- 適用例として前歯部の歯軸，歯列を求める



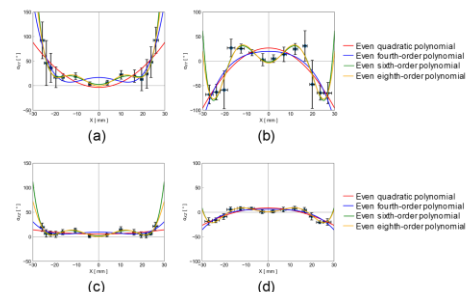
## 4章 三次元歯列曲線の解析

- ワールド座標系を用いて全歯の三次元歯列を3平面内に表示する
- 3平面内の歯列曲線の回帰式を求める



## 5章 三次元歯軸の解析

- ワールド座標系を用いて全歯の三次元歯軸を3平面内に表示する
- 3平面内の歯軸曲線の回帰式を求める



## 6章 結論

- 本研究で得られた結果の総括

図 1.13 本論文の構成.

## 1.6 参考文献

- 1) Nikolai RJ: Rigid-body kinematics and single-tooth displacements. Am J Orthod Dentofacial Orthop 110: 88-92, 1996.
- 2) Fuentes R, Flores T, et al.: Assessment of buccal bone thickness of aesthetic maxillary region: A cone-beam computed tomography study: J Periodontal Implant Sci 45: 162-168, 2015.
- 3) 藤田恒太郎：歯の解剖学，東京，金原出版，21-25，1967.
- 4) 飯島慎吾，笠原紳 他：上顎中切歯における歯軸に関する研究，定量的歯軸の決定．補綴誌 48: 74-83, 2004.
- 5) Kim G, Lee J, et al.: Automatic teeth axes calculation for well-aligned teeth using cost profile analysis along teeth center arch. IEEE Trans Biomed Eng 59: 1145-1154, 2012.
- 6) 坂本信，春日勇人 他：コーンビーム CT による三次元歯軸の自動決定．臨床バイオメカニクス 36: 119-125, 2015.
- 7) Braun S, Hnat WP, et al.: The form of the human dental arch. Angle Orthod 68: 29-36, 1998.
- 8) Arai K, Will LA: Subjective classification and objective analysis of the mandibular dental-arch form of orthodontic patients. Am J Orthod Dentofacial Orthop 139: e315-e321, 2011.
- 9) Park KH, Bayome M, et al.: New classification of lingual arch form in normal occlusion using three dimensional virtual models. Korean J Orthod 45: 74-81, 2015.
- 10) Lee SJ, Lee S et al.: Method to classify dental arch forms. Am J Orthod Dentofacial Orthop 140: 87-96, 2011.
- 11) Celebi AA, Keklik H, et al.: Comparison of arch forms between Turkish and North American. Dental Press J Orthod 21: 51-58, 2016.
- 12) 井村誠孝，黒田知宏 他：歯列パノラマ断層画像と表面形状情報の統合による擬似的三次元歯列形状情報の構成手法．生体医工学 48: 75-82, 2010.
- 13) Janson G, Rizzo M, et al.: Posterior tooth angulations in patients with anterior open bite and normal occlusion. Am J Orthod Dentofacial Orthop 150: 71-77, 2016.
- 14) Tong H, Kwon D, et al.: Mesiodistal angulation and faciolingual inclination of each whole tooth in 3-dimensional space in patients with near-normal occlusion. Am J

Orthod Dentofacial Orthop 14: 604-617, 2012.

## 第2章 前歯部の三次元歯軸の決定法

### 2.1 緒言

第1章で述べたとおり，歯軸は最も基本的な歯の形態的基準軸であり，今日までに解剖学的，補綴学的小および矯正学的に検討されているが，二次元的歯軸が多く用いられている<sup>1),2)</sup>とともに，その定義も「歯頸部付近に重点を置き，歯の中央部を縦に通る直線を歯軸とするという概念<sup>3)</sup>」を参考に目視で定める場合がほとんどである．そこで本章においては，生体内におけるCBCT画像を用いて，顎骨と前歯部（中切歯，側切歯，犬歯）を分離して三次元歯モデルを作成して自動的に歯軸を求めるとともに，検者3名による三次元歯モデルを用いた目視による手動歯軸との比較から，CBCTによる三次元自動歯軸決定法の特徴および有用性等について検討した．

### 2.2 対象および実験方法

#### 2.2.1 対象

成人5名（男性3名，女性2名，平均年齢27歳）の歯全体を撮影した画像（図2.1）から，上下顎の中切歯（Central incisor，歯式: 11, 21, 31, 41）4本，側切歯（Lateral incisor，歯式: 12, 22, 32, 42）4本，犬歯（Canine，歯式: 13, 23, 33, 43）4本の3歯種，合計60本を解析対象とした（図2.2）．

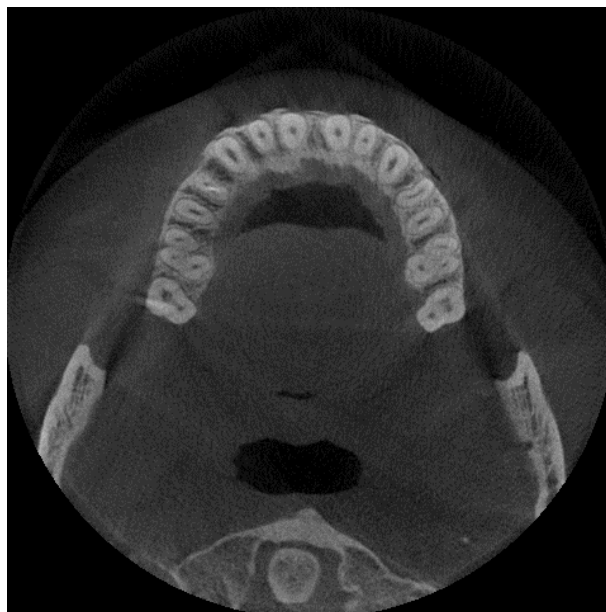


図 2.1 CBCT による横断面の典型画像．



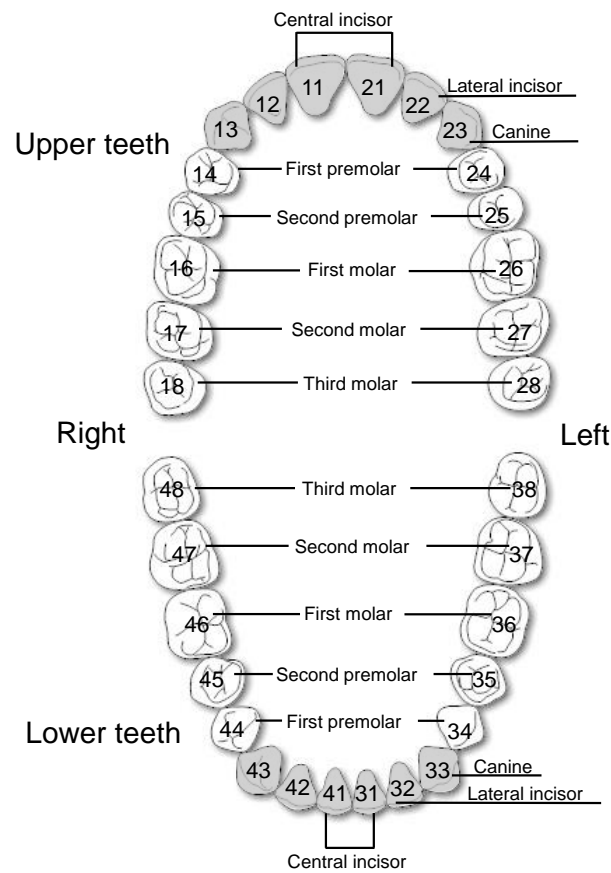


図 2.2 FDI 方式による成人歯の歯式. 灰色で示した歯が本章で用いた前歯 (中切歯, 側切歯, 犬歯).

### 2.2.2 CBCT 撮影

CBCT 撮影は, 図 2.3 に示すプラスチック製のバイトピース (噛み合わせ部分 厚さ: 2 mm) を噛む状態で行った. 歯科用 CBCT 装置 (KR-X SCAN, 近畿レントゲン工業) を用いて, tube voltage: 85 kV, tube current: 8 mA, voxel size:  $0.256 \times 0.256 \times 0.256$  mm, field of view:  $\phi 123 \times 123$  mm の条件下で撮影を行った.

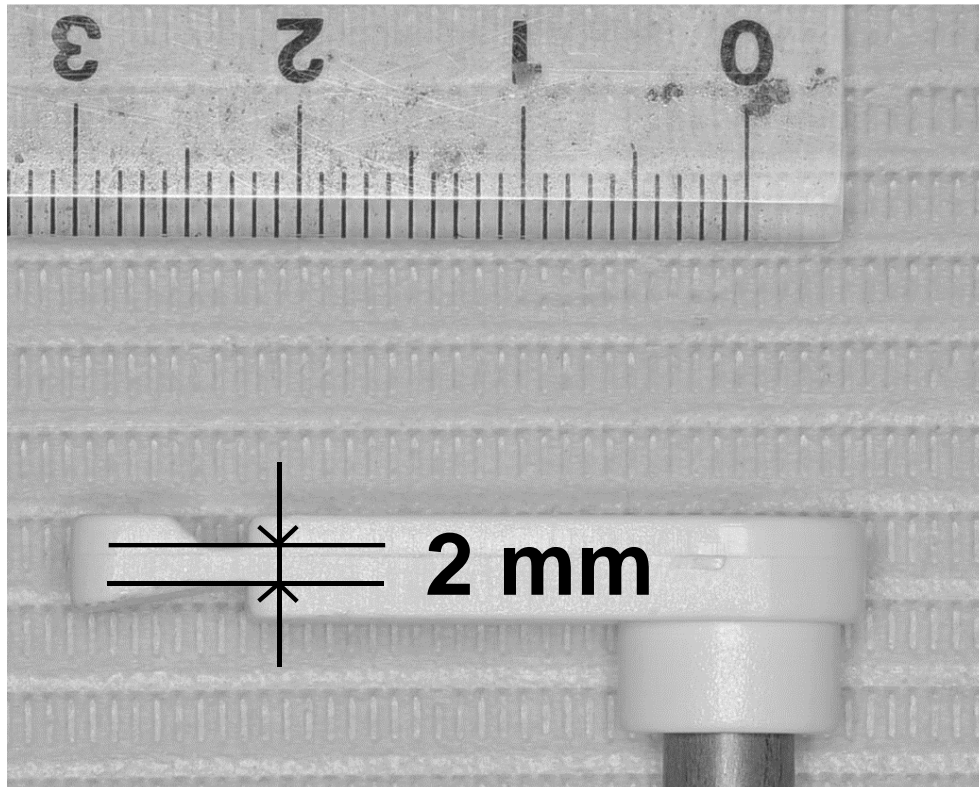


図 2.3 バイトピースの形状.

### 2.2.3 実験方法

撮影した CBCT 画像から，三次元医用画像構築ソフト（ZedView 9.3, LEXI）を使用して，歯根と顎骨を手動で分離して歯の三次元モデルを各々作成した後に，三次元主成分分析法により歯の長軸方向の主成分である三次元歯軸 PC-A および重心（Center Of Gravity: 以下，COG）をそれぞれ計算により求めた（図 2.4(a)）.

一方，これまで解剖学的歯軸の定義として一般的に用いられてきた「歯頸部付近に重点を置き，歯の中央部を縦に通る直線を歯軸とするという概念<sup>3)</sup>」を参考に，それぞれの三次元歯モデルに対して，三次元的歯軸 T-A を検者 3 名によって 1 名につき 1 回目視により手動で決定した（図 2.4(a)）.

上記の自動歯軸 PC-A および手動による歯軸 T-A は，それぞれ三次元ベクトルで表示されている．なお，各々の歯軸は歯 1 本について個別に設定されたローカル座標系での三次元ベクトルである．そして，ローカル座標系における PC-A を仮に真値とした場合の T-A との三次元空間内の角度差を相対角度誤差（ $ER_{\text{angle}}$ ）と定義して求めた（図 2.4(b)）．また，PC-A の COG から T-A との距離を重心距離誤差（ $ER_{\text{dist}}$ ）として定義して評価した（図 2.4(c)）.

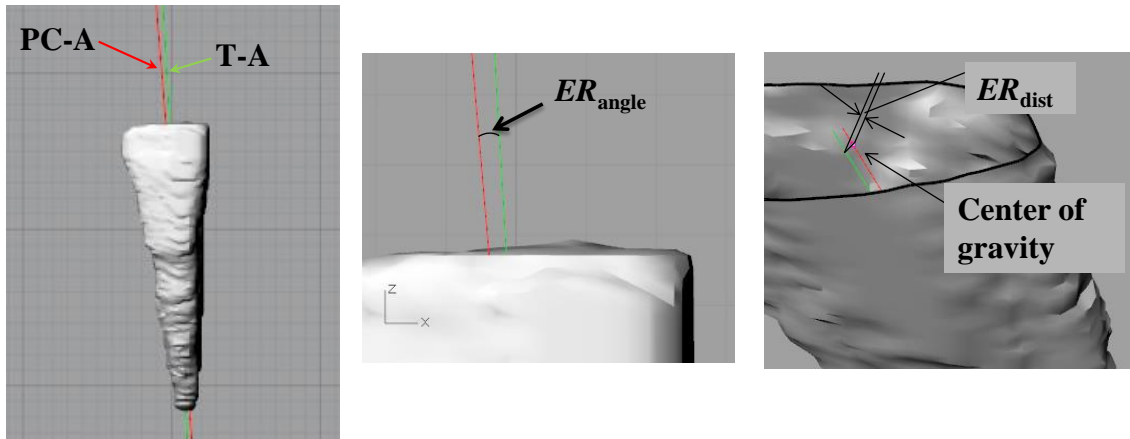


図 2.4 CBCT 画像より三次元再構築した歯のモデル. (a)自動歯軸 PC-A と手動歯軸 T-A をそれぞれ赤色と緑色の線で表した. (b)PC-A と T-A との角度差を相対角度誤差  $ER_{angle}$  と定義した. (c)PC-A と T-A との距離を重心距離誤差  $ER_{dist}$  と定義した.

## 2.3 結果

図 2.5～2.7 は、実験の対象とした成人 5 名の 60 本の前歯部の歯に対して、主成分分析で得られた歯軸 PC-A と検者 3 名によって手動で求めた歯軸 T-A との間の平均角度誤差  $ER_{angle}$  および平均重心距離誤差  $ER_{dist}$  について、中切歯、側切歯、犬歯の歯種ごとにそれぞれ示したものである.

図 2.5(a)より、中切歯の  $ER_{angle}$  は、下顎左側中切歯（歯式: 31）で  $2.3 \pm 0.9^\circ$  と最も小さく、上顎左側中切歯（歯式: 11）で最も大きくなり  $2.9 \pm 1.1^\circ$  であるが、大きな差異はみられない. また、図 2.5(b)から、中切歯の  $ER_{dist}$  は、上顎左側中切歯（歯式: 11）において最小で  $0.29 \pm 0.13 \text{ mm}$  であり、上顎右側中切歯（歯式: 21）で最大で  $0.49 \pm 0.22 \text{ mm}$  であるが、 $ER_{angle}$  と同様に、顕著な差異は認められない.

図 2.6 より、側切歯の平均角度誤差は、 $ER_{angle} = 1.3 \pm 0.7^\circ$ （歯式: 32）～  $1.8 \pm 1.1^\circ$ （歯式: 42）、平均重心距離誤差は、 $ER_{dist} = 0.42 \pm 0.19 \text{ mm}$ （歯式: 42）～  $0.50 \pm 0.34 \text{ mm}$ （歯式: 32）であった.

犬歯に対する図 2.7 の結果では、 $ER_{angle} = 1.6 \pm 0.8^\circ$ （歯式: 33）～  $2.7 \pm 1.4^\circ$ （歯式: 43）、 $ER_{dist} = 0.51 \pm 0.27 \text{ mm}$ （歯式: 23）～  $0.66 \pm 0.29 \text{ mm}$ （歯式: 13）であった.

図 2.8 に，以上の平均角度誤差  $ER_{\text{angle}}$  および平均重心距離誤差  $ER_{\text{dist}}$  についての結果を中切歯（Central incisor），側切歯（Lateral incisor），犬歯（Canine）別にまとめて示した．ここで，各誤差間の統計的な有意差検定には t 検定を用いた．平均角度誤差は，中切歯，側切歯，犬歯において，それぞれ  $2.6 \pm 1.2^\circ$ ， $1.6 \pm 0.9^\circ$ ， $2.2 \pm 1.3^\circ$  であり，平均重心距離誤差については，それぞれ  $0.40 \pm 0.20$  mm， $0.47 \pm 0.25$  mm， $0.59 \pm 0.32$  mm となり，平均角度誤差は側切歯と比較して中切歯や犬歯で大きく，平均重心距離誤差は犬歯で有意に最大となった．

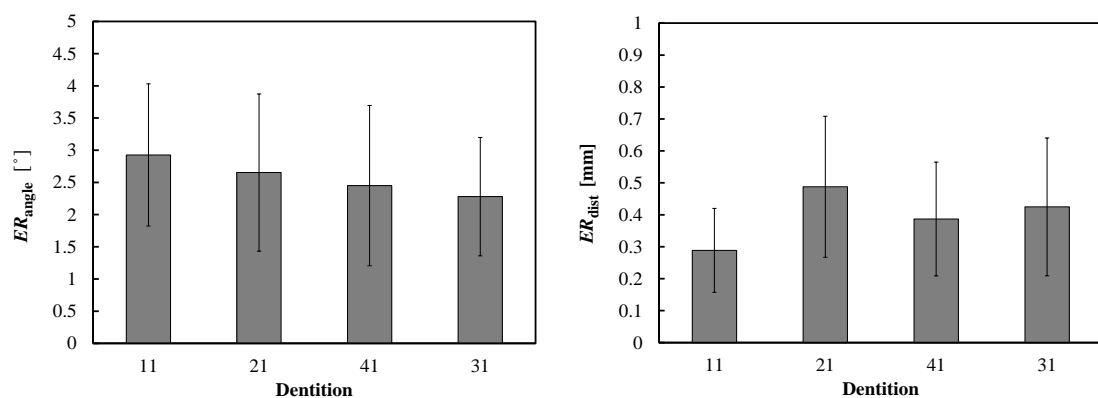


図 2.5 (a)中切歯についての PC-A と T-A との間の平均角度誤差  $ER_{\text{angle}}$ . 平均と標準偏差を示す. (b)中切歯についての PC-A と T-A との間の平均重心距離誤差  $ER_{\text{dist}}$ . 平均と標準偏差を示す.

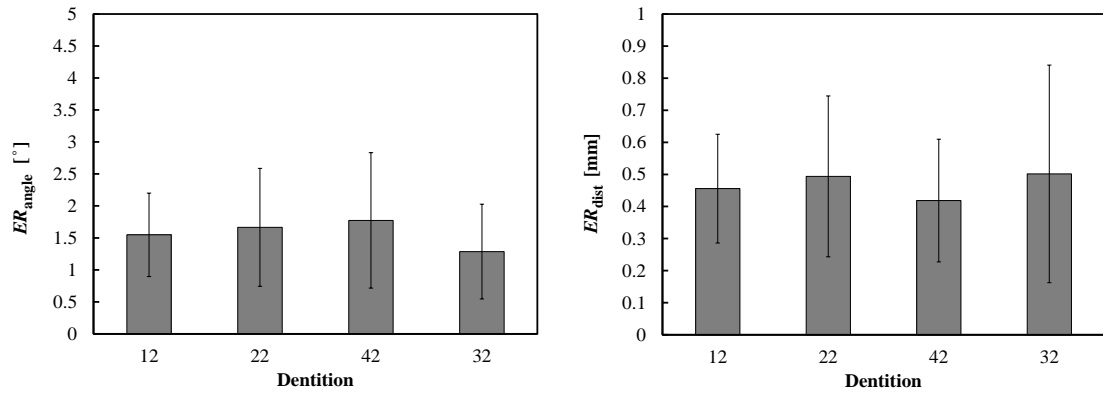


図 2.6 (a)側切歯についての PC-A と T-A との間の平均角度誤差  $ER_{angle}$ . 平均と標準偏差を示す. (b)側切歯についての PC-A と T-A との間の平均重心距離誤差  $ER_{dist}$ . 平均と標準偏差を示す.

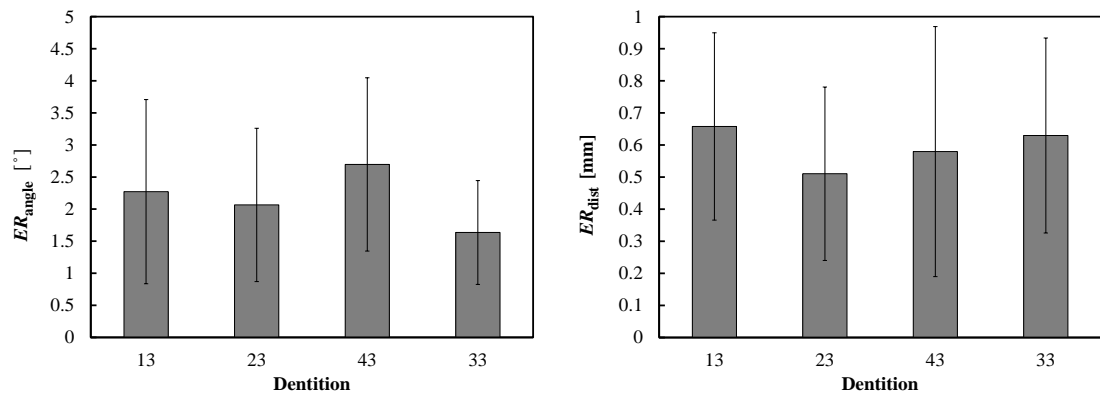


図 2.7 (a)犬歯についての PC-A と T-A との間の平均角度誤差  $ER_{angle}$ . 平均と標準偏差を示す. (b)犬歯についての PC-A と T-A との間の平均重心距離誤差  $ER_{dist}$ . 平均と標準偏差を示す.

## 2.4 考察

本章では、ヒト歯の生体内における CBCT 画像から、顎骨と前歯を手動により分離して三次元歯モデルを作成した後に、主成分分析法を用いて自動歯軸 PC-A を一義的に求めた。さらには、検者 3 名による目視による手動歯軸 T-A との比較から、CBCT による三次元自動歯軸決定法の特徴について検討した。図 2.8 の結果から、自動歯軸 PC-A と手動歯軸 T-A との差異に関しては、側切歯と比較して犬歯において角度および重心距離誤差が大きくなることがわかった。これは、犬歯の形状が、歯根では中切歯や側切歯よりも湾曲していることや歯冠が尖った形状を有している（図 2.9）ことから、目視では歯軸の見極めが困難であったものと推測される。

Kim ら<sup>4)</sup>は、CBCT 画像（ボクセルサイズ:  $0.2 \text{ mm}^3$ ）から 20 本の歯形状を取得し、主成分分析法を用いて自動歯軸を求めるとともに、検者 2 名の手動歯軸との比較を行っている。Kim ら<sup>4)</sup>が用いた歯種は不明であるが、自動歯軸と手動歯軸との相対角度誤差の平均は  $1.94 \pm 0.61^\circ$  であったと報告しており、本結果の相対角度誤差とほぼ同程度の値である。

以上のことより、CBCT 画像の歯の三次元形状から主成分分析により得られる歯軸自動計算法は、検者によらず一義的に歯軸を決定できる有効な手法であり、手動で歯軸を決定する際に検者間誤差が大きくなりやすい歯根が湾曲している形状の歯においては、特に自動歯軸は有用であることが示唆された。しかし、現段階の本手法では、歯根と顎骨を手動で分離しているために、歯 1 本の三次元形状を取得するために約 1 時間の労力が必要である。歯根の手動分離が自動歯軸に及ぼす影響はみられなかったが、今後は顎骨と歯根部の自動分離手法の導入を検討する必要がある。

一方、以前の坂本らの研究<sup>5)</sup>より、三次元歯形状から自動的に歯軸を求める場合には、欠損部が存在する歯や歯冠形状が複雑である小臼歯においては、自動歯軸が一般的な解剖学的歯軸から逸れることが確認されている。図 2.10 は、抜去歯の小臼歯を対象に CBCT 画像から三次元構築を行い、主成分分析法による自動歯軸 PC-A（図中の緑色の直線）と手動歯軸 T-A（図中の赤色の直線、各線は各 3 名の検者による平均歯軸）を調べた一例である<sup>5)</sup>。自動歯軸 PC-A と手動歯軸 T-A との間に相違が生じており、検者間による歯軸の相違よりも自動歯軸と手動歯軸と

の相違であることが確認できる。これは、小臼歯の歯冠部分の二つの咬頭が大きく突出していることから、PC-A が歯冠形状に影響を受けた結果であり、自動歯軸が一般的な解剖学的歯軸と一致しないことがあり、前歯部以外では自動歯軸計算のアルゴリズムの改良が必要である。

現段階では、自動歯軸は歯 1 本内におけるローカル座標系における三次元的な軸である。今後の臨床応用を考慮すれば、顎骨の解剖学的特徴点に座標原点を定めることによって口腔内全体を表す座標系、すなわち、ワールド座標系を導入することで、歯列の三次元評価や歯科矯正時の歯の三次元移動を示すことが可能であると考えている。

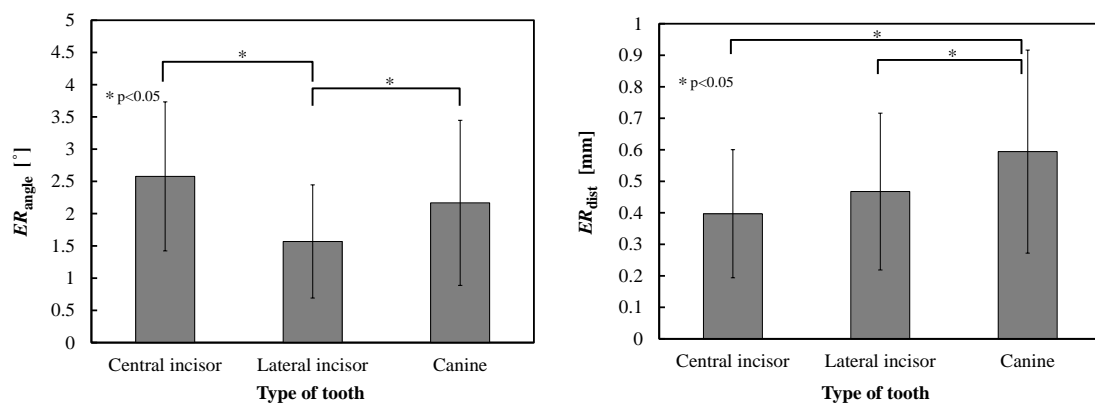


図 2.8 (a)中切歯，側切歯，および犬歯についての PC-A と T-A との間の平均角度誤差  $ER_{angle}$ . 平均と標準偏差を示す. (b)中切歯，側切歯，および犬歯についての PC-A と T-A との間の平均重心距離誤差  $ER_{dist}$ . 平均と標準偏差を示す.

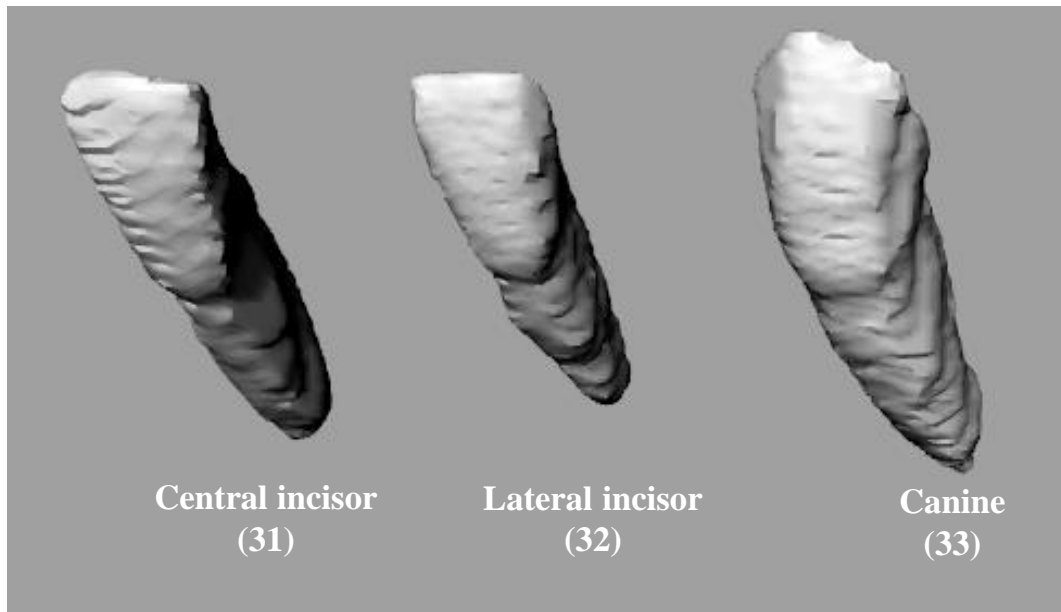


図 2.9 CBCT 画像より三次元再構築した中切歯，側切歯，および犬歯のモデル.

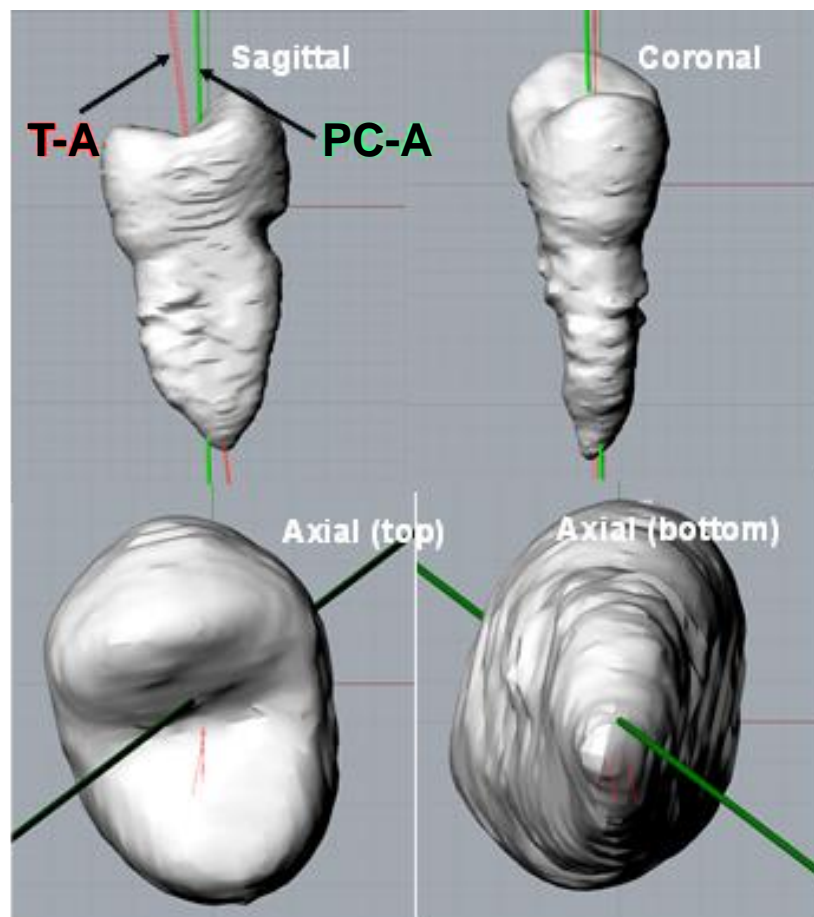


図 2.10 臼歯の PC-A と T-A<sup>5)</sup>. 緑色と 3 本の赤色の線はそれぞれ PC-A と T-A を表す.



## 2.5 結言

本章では，成人 5 名の生体内 CBCT から得られた中切歯，側切歯，犬歯の合計 60 本の前歯部の歯を対象に，主成分分析法を用いて三次元歯軸を自動決定した結果を示すとともに，検者 3 名による目視による手動歯軸との比較を行った．その結果，主成分分析法で求めた自動歯軸と手動歯軸間の相対角度誤差は，平均で中切歯において  $2.6 \pm 1.2^\circ$ ，側切歯で  $1.6 \pm 0.9^\circ$ ，犬歯で  $2.2 \pm 1.3^\circ$  であった．また，重心距離誤差は，中切歯，側切歯，犬歯において，それぞれ  $0.40 \pm 0.20$  mm， $0.47 \pm 0.25$  mm， $0.59 \pm 0.32$  mm であり，犬歯で有意に最大となった．これらより，手動で歯軸を決定する場合に，検者間誤差が大きくなりやすい歯根が彎曲し，尖った歯冠形状である犬歯のような形状の歯においては，自動歯軸は有用であることが示された．

## 2.6 参考文献

- 1) Nikolai RJ: Rigid-body kinematics and single-tooth displacements. Am J Orthod Dentofacial Orthop 110: 88-92, 1996.
- 2) Fuentes R, Flores T, et al.: Assessment of buccal bone thickness of aesthetic maxillary region: A cone-beam computed tomography study: J Periodontal Implant Sci 45: 162-168, 2015.
- 3) 藤田恒太郎：歯の解剖学，東京，金原出版，21-25, 1967.
- 4) Kim G, Lee J, et al.: Automatic teeth axes calculation for well-aligned teeth using cost profile analysis along teeth center arch. IEEE Trans Biomed Eng 59: 1145-1154, 2012.
- 5) 坂本信，春日勇人 他：コーンビーム CT による三次元歯軸の自動決定．臨床バイオメカニクス 36: 119-125, 2015.

## 第3章 ワールド座標系を用いた前歯部の三次元歯軸および歯列決定法

### 3.1 緒言

第2章では，生体内 CBCT から得られた前歯（中切歯，側切歯，犬歯）を対象に坂本ら<sup>1),2)</sup>の主成分分析法を用い三次元歯軸を自動決定した．さらには，自動歯軸を目視により定める手動歯軸との比較を行うことで自動歯軸の有用性を示した．しかしながら，この自動歯軸は，個別の歯ごとに対するローカル座標系における表現であり，自動歯軸の臨床応用等を考える際には，上下顎骨の解剖学的特徴点から口腔空間内に座標原点を定めることによって口腔内空間を基準として表す座標系，すなわち，口腔ワールド座標系を導入することが極めて重要である．これにより口腔内における歯列や歯軸の三次元絶対位置評価が可能となり，歯列の特徴評価，歯科矯正時の歯の三次元移動測定およびインプラントの手術前計画等に用いることができると考えられる．

一般に，これまでの歯列の求め方は，初めに被検者の口腔内模型をキャストニングにより作成し，その後に三次元測定機のスタイラス（プローブ）にて歯の特徴点を接触して測定する方法<sup>3)</sup>や三次元レーザー測定機による方法<sup>4),5)</sup>，口腔内模型をデジタルノギス等で測定する方法<sup>6)</sup>，口腔内模型を写真画像に写してからデジタルタイジングする方法<sup>7)</sup>，パノラマ X 線断層画像による擬似的三次元歯列測定法<sup>8)</sup>等が挙げられる．しかし，これらの方法等は歯頸上部の形状特長を用いているために，歯根部形状を含まない歯列測定である．さらに，従来の手法では，歯軸の情報は含まれていないとともに，検者間誤差が生じやすく，上下顎歯の位置関係を知ることはできない．

そこで本章では，生体内 CBCT 画像から三次元再構成した上下顎骨の特徴点からワールド座標系を構築し，上下顎前歯の歯軸と歯列の三次元絶対位置を自動的に求める新たな手法の提案を行う．

### 3.2 対象および方法

本章では，成人 6 名（男性 4 名，女性 2 名，平均年齢 29 歳）の歯全体を撮影した CBCT 画像（図 3.1）から，上下顎骨の中切歯（Central incisor, FDI 歯式: 11,

21, 31, 41), 側切歯 (Lateral incisor, FDI 歯式: 12, 22, 32, 42), 犬歯 (Canine, FDI 歯式: 13, 23, 33, 43) を対象とした (図 3.2). CBCT 撮影は, 図 3.3 に示すプラスチック製のバイトピース (噛み合わせ部分厚さ: 2 mm) を噛む状態で行った.

CBCT 装置 (KR-X SCAN, 近畿レントゲン工業) を用いて撮影された画像 (tube voltage: 85 kV, tube current: 8 mA, voxel size:  $0.256 \times 0.256 \times 0.256$  mm, field of view:  $\phi 123 \times 123$  mm) から, 三次元医用画像構築ソフト (ZedView 9.3, LEXI) を使用して, 歯および上下顎骨の三次元モデルを作成した. 各歯の三次元モデルは歯髓腔を考慮せずに作成した. また, 作成した各歯の三次元モデルに対し, 三次元主成分分析法<sup>1),9)</sup>により歯の長軸方向の主成分である歯軸 (Principal Component analysis-Axis: 以下, PC-A) および三次元物体形状重心 (Center Of Gravity: 以下, COG) を計算により求めた (図 3.4). PC-A は, 三次元ベクトルで表示されており, 各歯軸は対応した歯について個別に設定されたローカル座標系で表された三次元ベクトルとして計算された.

前歯の口腔内絶対位置の評価を行うために, 座標原点および座標軸を定め三次元空間を表すワールド座標系  $\Sigma_w \equiv O\text{-}XYZ$  を以下の順序で構築した.

まず, 左側オトガイ孔から右側オトガイ孔へのベクトルを仮 X 軸と定義した (図 3.5(a)). 次に両側のオトガイ孔の midpoint から上顎切歯管を通るベクトルを Z 軸として定義し, オトガイ孔 midpoint から 2/3 の位置を原点 O として定義した (図 3.5(b)). Y 軸は Z 軸と仮 X 軸との外積として定義し (図 3.5(c)), X 軸は Y 軸と Z 軸との外積から決定することで三次元直交座標系  $\Sigma_w$  とした (図 3.5(d)). 構築された三次元座標系原点は, 両頬側から見てほぼ中心にあることがわかる (図 3.5(e)). 求めたワールド三次元座標系において, 歯軸 PC-A および三次元物体形状重心 COG を示すことで, PC-A と COG が空間内で固定されたベクトルおよび三次元座標値としてそれぞれ表現することができる.

本章では, 同一モデル内における検者間の三次元座標系構築精度を評価した. 検者は 3 名とし, 計測時には各 3 箇所の特徴点について三次元モデルの表面, かっ孔の中心と考えられる点をデジタイジングして, これらから求まる三次元座標原点の空間誤差を検者間誤差とした.



図 3.1 CBCT による冠状面の典型画像.

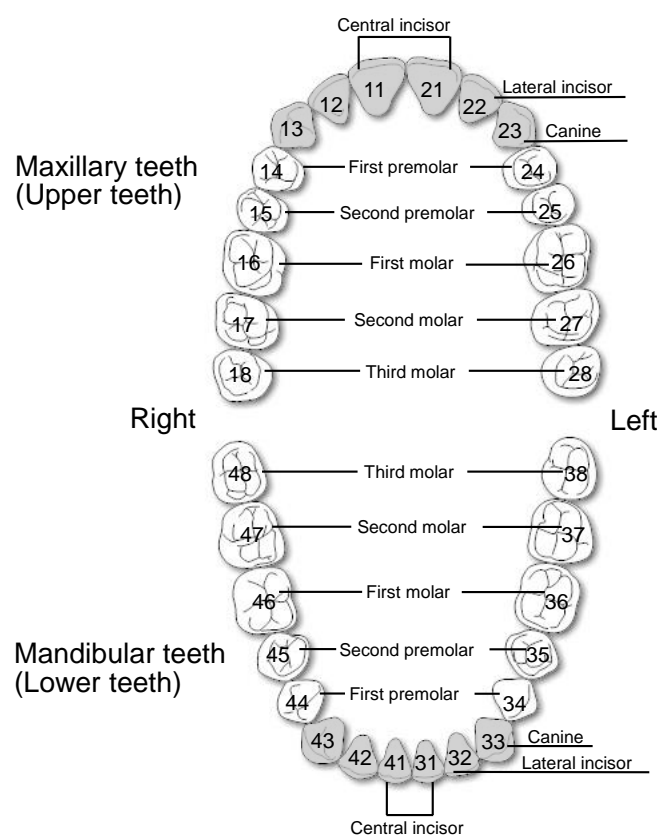


図 3.2 FDI 方式による成人歯の歯式. 灰色で示した歯が本章で用いた前歯 (中切歯, 側切歯, 犬歯).

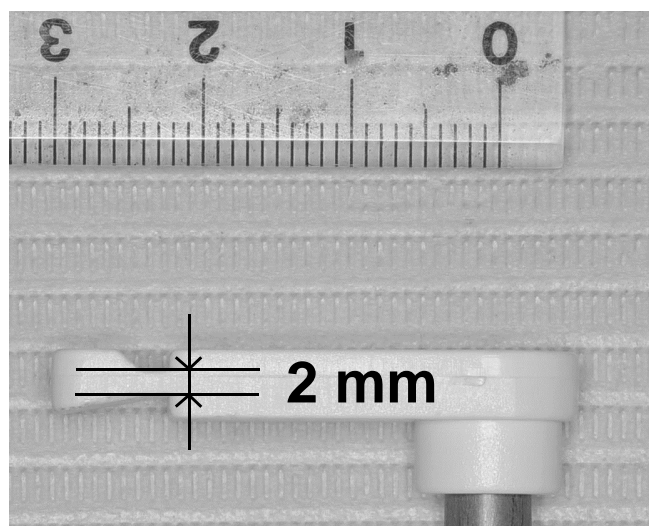


図 3.3 バイトピースの形状

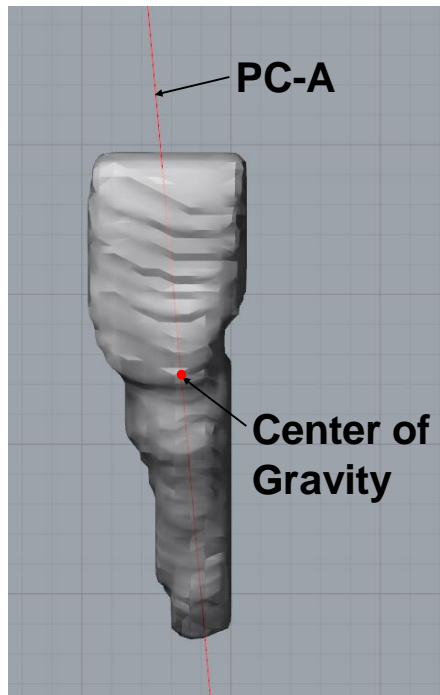


図 3.4 CBCT 画像より三次元再構築した歯のモデル．赤線が主成分分析から求めた歯軸 PC-A (#3, 中切歯 41)．

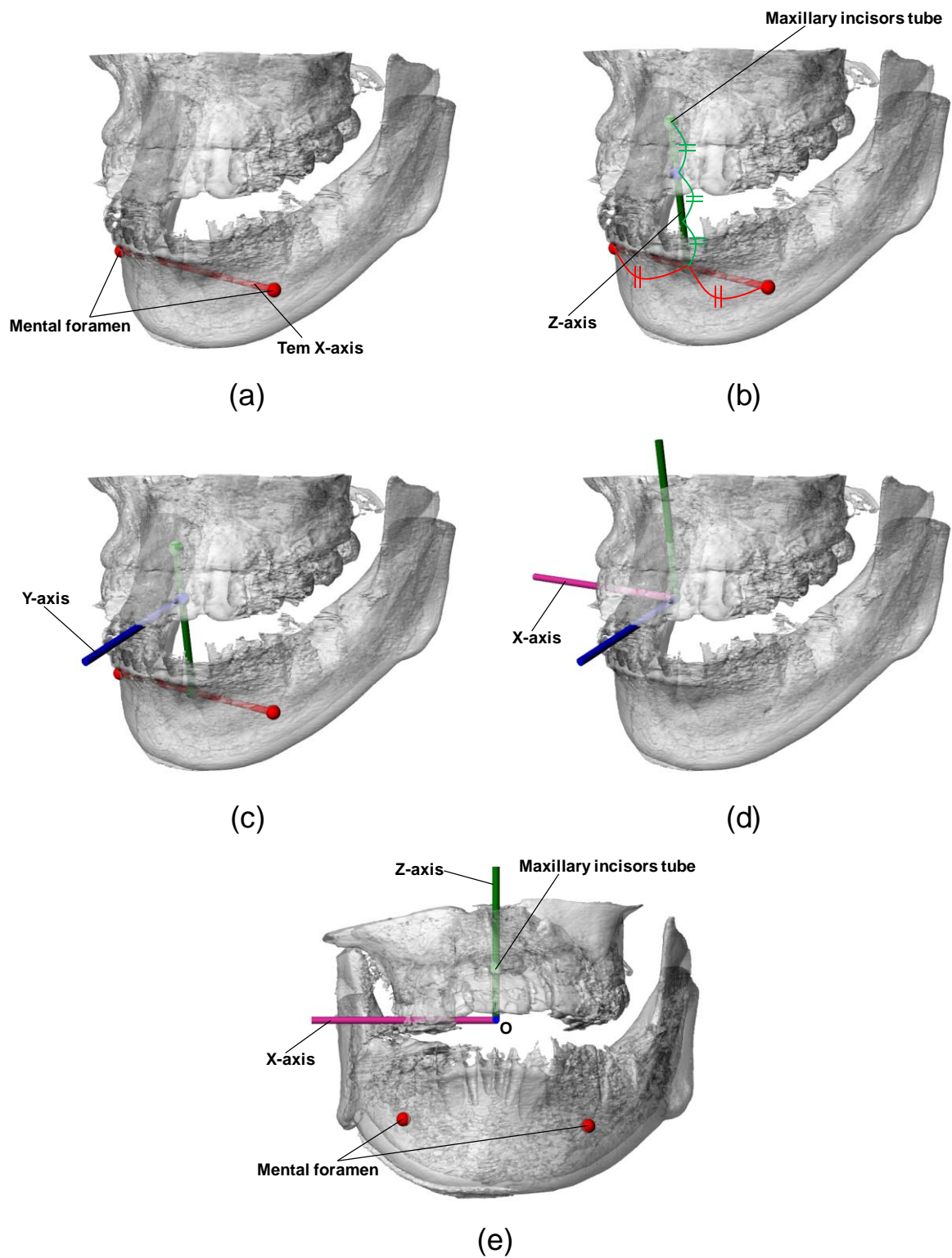


図 3.5 口腔内に構築した三次元ワールド座標系. (a) 仮 X 軸の決定 (Tem X-axis). (b) Z 軸の決定. (c) Y 軸の決定. (d) X 軸の決定. (e) 顎前面からみた口腔内ワールド座標系.

### 3.3 結果

初めに、同一モデル内における検者間の座標系構築精度を評価するために、検者 3 名による座標原点から平均値を求め、その平均値と各検者の原点との三次元的距離を算出した。本法で解析対象とした 6 名のモデルに対して行い、原点の平均誤差は  $0.45 \pm 0.20 \text{ mm}$  であり、最大誤差で  $0.94 \text{ mm}$  であった。また、三次元直交座標系を作成する際に、Y 軸と Z 軸との外積から最終的に X 軸を決定しているが、この 3 名の検者による左右のオトガイ孔を通る仮 X 軸と X 軸との相対角度差は、X-Z 平面内の原点周りにおいて平均誤差  $2.7 \pm 0.7^\circ$  であった。

図 3.6(a)～(d)は、被検者 1 名 (#3) における各歯の PC-A および COG を X-Y 平面、X-Z 平面にそれぞれ投影し、平面内の COG 座標値を用いて COG を 2～4 次曲線で回帰して表したグラフに対し、歯三次元モデルを重ね合わせた典型例である。なお、本章では歯根側から歯冠側に向かう方向を歯軸の正の方向とし、その向きを図中において矢印で表現した。歯モデルとその歯軸や歯列との関係が、視覚的に理解しやすいことがわかる。

さらに、図 3.7(a)～(d)は、図 3.6 から歯三次元モデルの図を除いたものである。歯列の 2 次および 3 次回帰曲線に大きな相違はみられないが、4 次による歯列曲線は 2, 3 次曲線とは異なることがわかる。

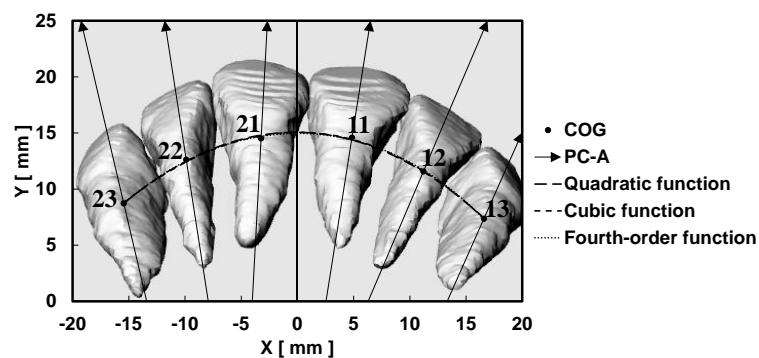
表 3.2(a)～(f)は被検者 6 名 (#1～#6) に対する前歯列を  $n$  次曲線で回帰した際の係数と相関係数  $r$  について、それぞれ示した。相関係数は 2 次式では  $r = 0.79 \sim 0.99$ 、3 次式で  $r = 0.89 \sim 0.99$ 、4 次式で  $r = 0.94 \sim 1.00$  となり、増加傾向が見られた。

図 3.8(a)に示すように X-Y 平面に三次元歯軸を投影し、Y 軸とのなす角度を  $\alpha_{XY}$  と定義した。同様に、図 3.8(b)で示すように X-Z 平面に三次元歯軸を投影し、Z 軸とのなす角度を  $\alpha_{XZ}$  と定義した。原点 O を通る正中面 (Y-Z 平面) に対して、上下顎歯の右側前歯の歯軸方向 (歯根側から歯冠側への歯軸の方向) は、右頬側を向く方向の角度を正とし、左側前歯の歯軸方向は、左頬側を向く方向の角度を正とした。

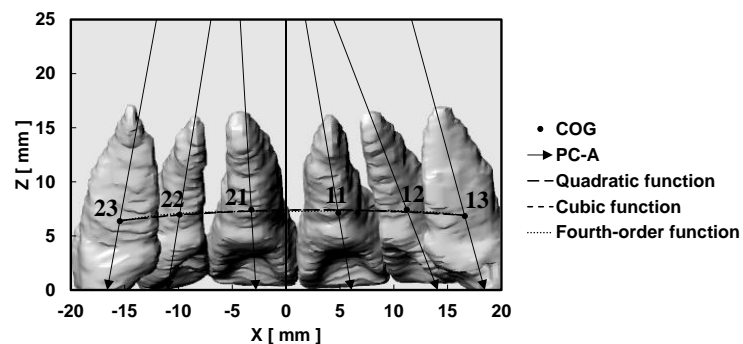
図 3.9(a)～(b)は、被検者 6 名の上下顎前歯の角度  $\alpha_{XY}$  について示したものであり、図 3.9(c)～(d)は、同様に上下顎前歯の角度  $\alpha_{XZ}$  について示したものである。右側上下前歯 (中切歯 : 11, 41, 側切歯 : 12, 42, 犬歯 : 13, 43) は多くの被検者



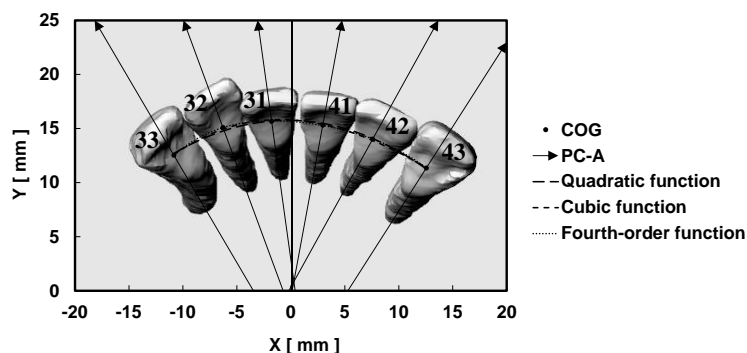
で右頬側方向を向き，左側上下前歯（中切歯：21，31，側切歯：22，32，犬歯：23，33）では，大よそ左頬側方向を向いているが，被検者#2 の上顎歯（11,12,13）のように右側前歯において左頬側方向を向く場合もあり，個人差が認められる．



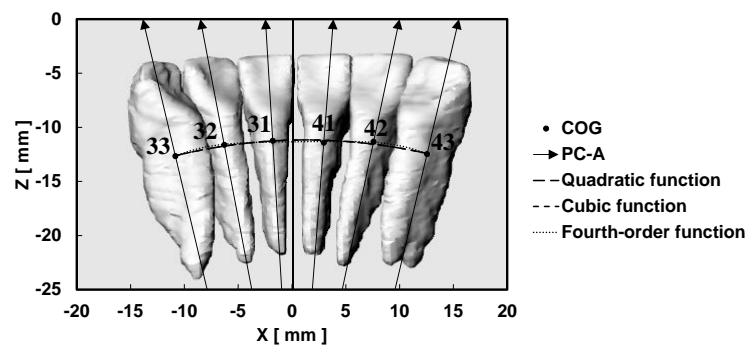
(a)



(b)

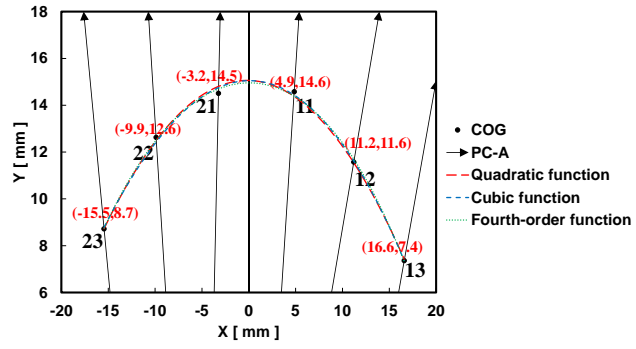


(c)

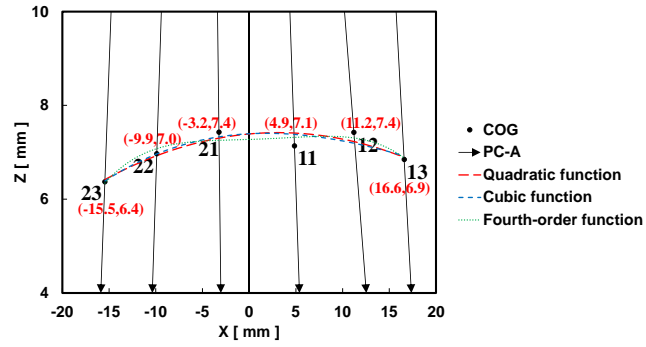


(d)

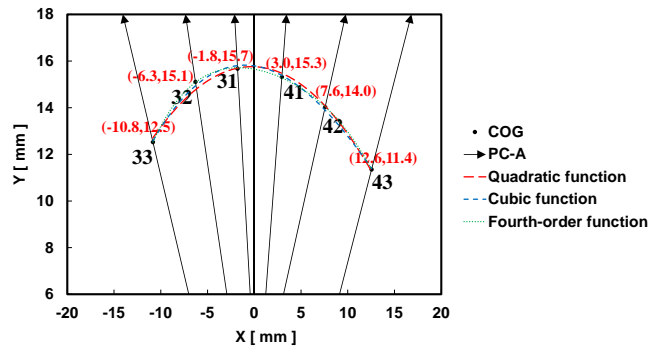
図 3.6 平面に投影した前歯の再構築モデルと歯軸および歯列の被検者 1 名 (#3) の典型例. (a) X-Y 平面内の上顎歯. (b) X-Z 平面内の上顎歯. (c) X-Y 平面内の下顎歯. (d) X-Z 平面内の下顎歯.



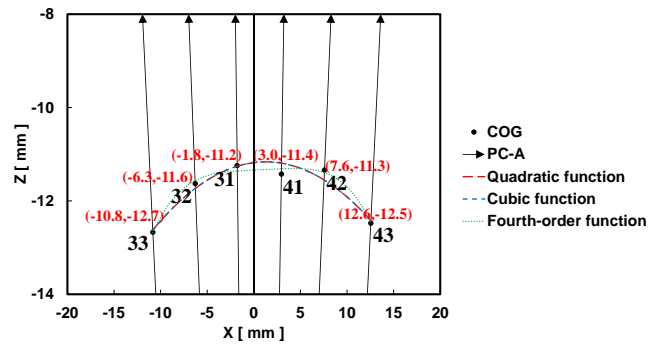
(a)



(b)

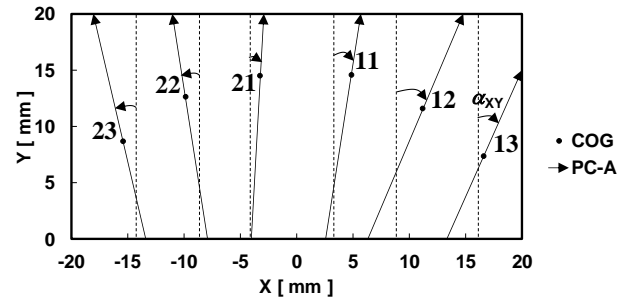


(c)

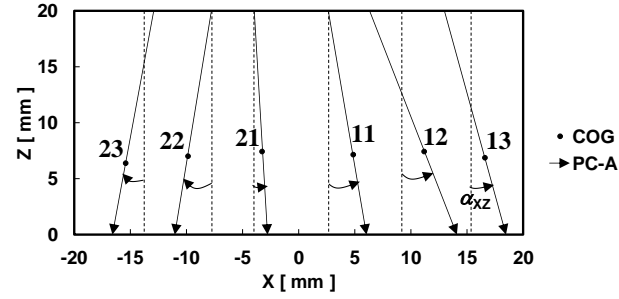


(d)

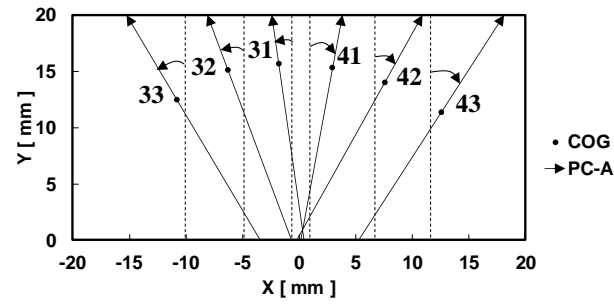
図 3.7 平面内で表現した COG 座標値および歯列回帰曲線の被検者 1 名 (#3) の典型例. (a) X-Y 平面内の上顎歯. (b) X-Z 平面内の上顎歯



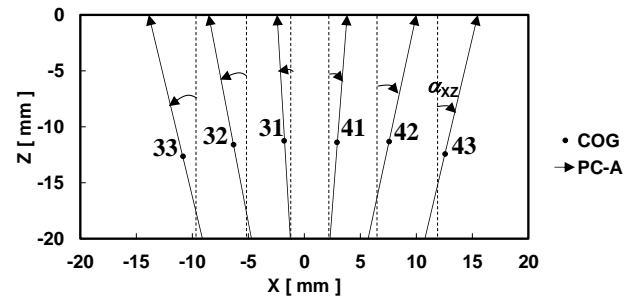
(a)



(b)

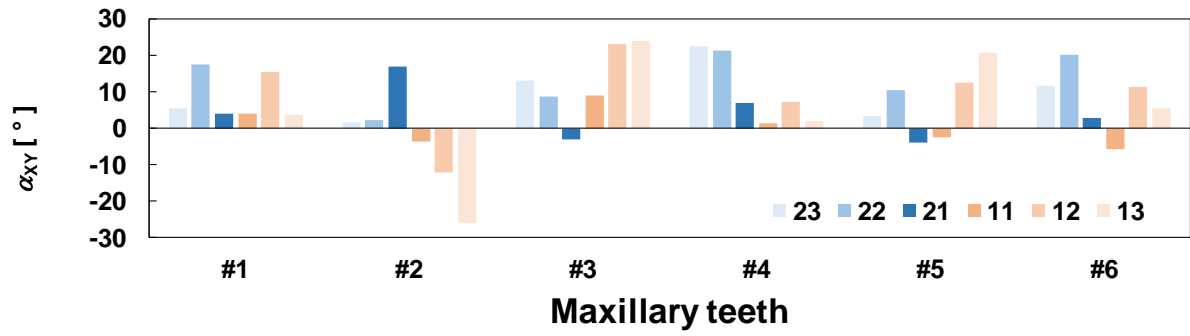


(c)

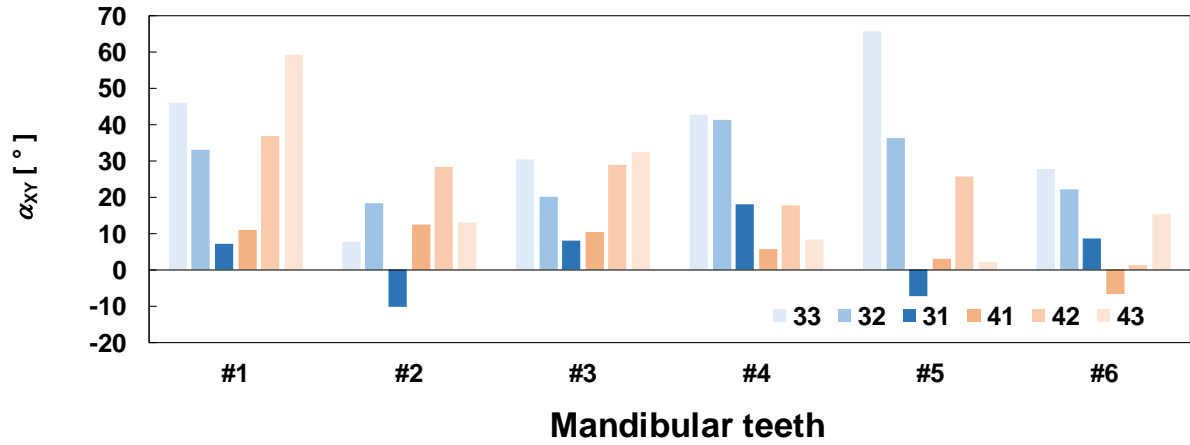


(d)

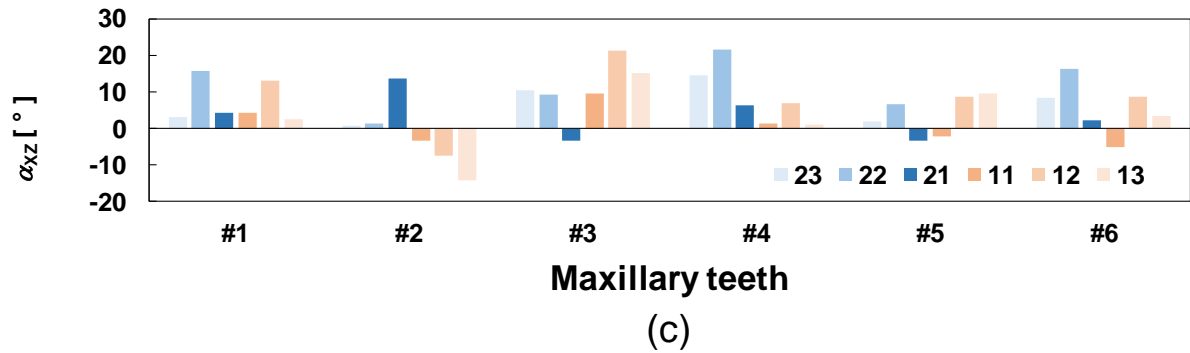
図 3.8 上下顎歯の三次元歯軸を平面に投影した軸と X 軸および Y 軸とのなす角度の定義 (矢印の方向が正). (a) X-Y 平面に上顎歯の歯軸を投影した軸と Y 軸とのなす角度  $\alpha_{XY}$ . (b) X-Y 平面に下顎歯の歯軸を投影した軸と Y 軸とのなす角度  $\alpha_{XY}$ . (c) X-Z 平面に上顎歯の歯軸を投影した軸と Y 軸とのなす角度  $\alpha_{XZ}$ . (d) X-Z 平面に下顎歯の歯軸を投影した軸と Y 軸とのなす角度  $\alpha_{XZ}$ .



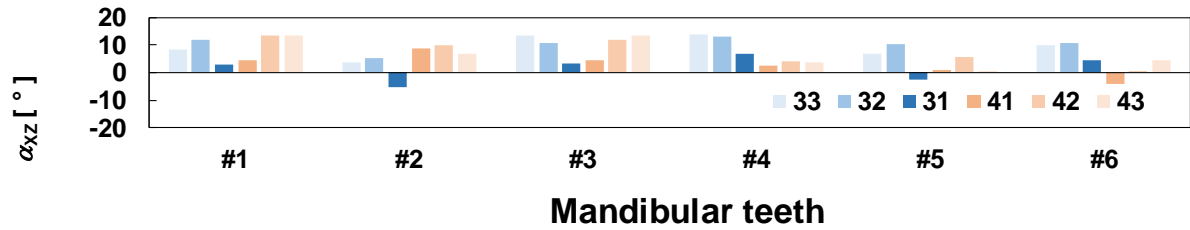
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.9 上下顎歯の角度 $\alpha_{XY}$ および $\alpha_{XZ}$ . (a) 上顎歯の $\alpha_{XY}$ . (b) 下顎歯の $\alpha_{XY}$ . (c) 上顎歯の $\alpha_{XZ}$ . (d) 下顎歯の $\alpha_{XZ}$ .

表 3.1 平面内における前歯の歯列回帰曲線と相関係数. (a)X-Y 平面における歯列の 2 次回帰曲線. (b) X-Y 平面における歯列の 3 次回帰曲線. (c) X-Y 平面における歯列の 4 次回帰曲線. (d) X-Z 平面における歯列の 2 次回帰曲線. (e) X-Z 平面における歯列の 3 次回帰曲線. (f) X-Z 平面における歯列の 4 次回帰曲線.

$$\text{Quadratic function : } y = cx^2 + dx + e \quad \text{Correlation coefficient: } r$$

		$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	-0.0286	-0.0082	11.284	1.00
	Mandibular teeth	-0.0333	0.0448	15.903	1.00
#2	Maxillary teeth	-0.035	0.0211	10.493	0.99
	Mandibular teeth	-0.0377	0.0311	15.344	0.89
#3	Maxillary teeth	-0.0272	-0.0095	15.06	1.00
	Mandibular teeth	-0.0273	-0.0147	15.757	0.99
#4	Maxillary teeth	-0.039	-0.0225	14.647	0.99
	Mandibular teeth	-0.0378	0.0457	16.885	0.99
#5	Maxillary teeth	-0.03	0.0365	11.575	1.00
	Mandibular teeth	-0.0265	0.0402	13.442	1.00
#6	Maxillary teeth	-0.0325	-0.0286	15.41	1.00
	Mandibular teeth	-0.0291	-0.1002	17.888	1.00

(a)

$$\text{Cubic function : } y = bx^3 + cx^2 + dx + e \quad \text{Correlation coefficient: } r$$

		$b$	$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	-0.0001	-0.0286	0.0191	11.281	1.00
	Mandibular teeth	-0.0001	-0.0329	0.0617	15.883	1.00
#2	Maxillary teeth	-0.00003	-0.0349	0.0279	10.491	0.99
	Mandibular teeth	-0.0005	-0.0378	0.0796	15.336	0.90
#3	Maxillary teeth	-0.00007	-0.027	0.0052	15.05	1.00
	Mandibular teeth	0.0004	-0.0284	-0.0587	15.793	1.00
#4	Maxillary teeth	-0.0003	-0.0393	0.0323	14.666	0.99
	Mandibular teeth	0.0006	-0.0391	-0.0152	16.93	0.99
#5	Maxillary teeth	0.0001	-0.0301	0.0071	11.579	1.00
	Mandibular teeth	0.0002	-0.0269	0.0149	13.46	1.00
#6	Maxillary teeth	0.0003	-0.0322	-0.0967	15.388	1.00
	Mandibular teeth	0.0003	-0.0275	-0.1354	17.813	1.00

(b)

$$\text{Fourth-order function : } y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad \text{Correlation coefficient: } r$$

		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	0.000006	-0.0001	-0.0308	0.0198	11.378	1.00
	Mandibular teeth	0.00002	-0.0002	-0.0369	0.073	15.953	1.00
#2	Maxillary teeth	0.00008	-0.00009	-0.0622	0.0373	11.575	1.00
	Mandibular teeth	0.0008	-0.0004	-0.1409	0.0853	16.635	0.98
#3	Maxillary teeth	-0.00001	-0.00005	-0.0243	0.0019	14.956	1.00
	Mandibular teeth	-0.00006	0.0006	-0.0196	-0.0725	15.651	1.00
#4	Maxillary teeth	0.00009	-0.0002	-0.0626	0.0218	15.449	1.00
	Mandibular teeth	0.0002	0.0001	-0.0626	0.0117	17.291	1.00
#5	Maxillary teeth	-0.00001	0.0001	-0.027	0.0068	11.459	1.00
	Mandibular teeth	0.00005	0.00005	-0.0366	0.0254	13.655	1.00
#6	Maxillary teeth	-0.000004	0.0003	-0.0309	-0.0954	15.335	1.00
	Mandibular teeth	0.00001	0.0004	-0.0297	-0.1452	17.857	1.00

(c)

Quadratic function :  $z = cx^2 + dx + e$  Correlation coefficient:  $r$

		$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	-0.0002	0.0001	11.957	0.79
	Mandibular teeth	-0.0156	0.0234	-8.1464	0.99
#2	Maxillary teeth	0.0013	-0.089	10.851	0.97
	Mandibular teeth	-0.0421	-0.0752	-9.7355	0.97
#3	Maxillary teeth	-0.0029	0.0181	7.3902	0.91
	Mandibular teeth	-0.0099	0.0257	-11.18	0.97
#4	Maxillary teeth	0.0026	-0.0736	9.7214	0.91
	Mandibular teeth	-0.0279	0.041	-10.174	1.00
#5	Maxillary teeth	0.0017	-0.0453	10.713	0.99
	Mandibular teeth	-0.0097	-0.0912	-10.766	0.97
#6	Maxillary teeth	0.0037	0.0316	8.2431	0.96
	Mandibular teeth	-0.0172	-0.0373	-8.8971	0.99

(d)

Cubic function :  $z = bx^3 + cx^2 + dx + e$  Correlation coefficient:  $r$

		$b$	$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	-0.00008	-0.0001	0.0215	11.954	0.89
	Mandibular teeth	-0.0002	-0.0149	0.0532	-8.1827	1.00
#2	Maxillary teeth	-0.00008	0.0013	-0.0696	10.848	0.98
	Mandibular teeth	0.0003	-0.0421	-0.0998	-9.7315	0.97
#3	Maxillary teeth	0.00004	-0.003	0.0106	7.3949	0.92
	Mandibular teeth	0.000005	-0.0099	0.0251	-11.179	0.97
#4	Maxillary teeth	-0.0002	0.0023	-0.03	9.7367	0.93
	Mandibular teeth	0.00006	-0.028	0.0347	-10.169	1.00
#5	Maxillary teeth	0.00004	0.0016	-0.0533	10.714	0.99
	Mandibular teeth	0.0003	-0.0105	-0.1362	-10.734	0.98
#6	Maxillary teeth	-0.00004	0.0036	0.0401	8.2458	0.97
	Mandibular teeth	0.0001	-0.0165	-0.0543	-8.9336	0.99

(e)

Fourth-order function :  $z = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$  Correlation coefficient:  $r$

		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$r$
#1	Maxillary teeth	-0.000008	-0.00008	0.0028	0.0206	11.83	1.00
	Mandibular teeth	-0.00001	-0.0002	-0.013	0.0479	-8.2164	1.00
#2	Maxillary teeth	0.00002	-0.0001	-0.0056	-0.0672	11.125	0.99
	Mandibular teeth	-0.0004	0.0002	0.0086	-0.1026	-10.37	0.99
#3	Maxillary teeth	-0.00001	0.00007	0.0005	0.0064	7.2739	0.94
	Mandibular teeth	-0.00007	0.0002	-0.00003	0.0096	-11.34	0.99
#4	Maxillary teeth	0.00003	-0.0002	-0.005	-0.0334	9.9847	0.95
	Mandibular teeth	-0.00002	0.0001	-0.0258	0.0321	-10.203	1.00
#5	Maxillary teeth	-0.00001	0.00004	0.0046	-0.0536	10.595	1.00
	Mandibular teeth	-0.00004	0.0004	-0.0036	-0.1437	-10.873	0.99
#6	Maxillary teeth	-0.00002	-0.00007	0.0093	0.0459	8.0158	1.00
	Mandibular teeth	-0.00005	-0.0002	-0.0086	-0.0187	-9.0932	1.00

(f)

### 3.4 考察

被検者 6 名の同一モデル内における検者間の座標系構築精度は、検者 3 名による原点の平均誤差が  $0.45 \pm 0.20 \text{ mm}$  であった。また、両側のオトガイ孔を通る仮 X 軸と X 軸との三次元空間内相対角度差が平均誤差  $2.7 \pm 0.7^\circ$  であった。これらのことから、左右のオトガイ孔と上顎切歯管の 3 点による特徴点を用いた本三次元座標構築法は、任意の検者による座標構築の再現性は十分であり、臨床上問題のない範囲であると考えられる。本手法で用いた三次元座標系を作成するための 3 点の特徴点（左右のオトガイ孔 2 点，上顎切歯管 1 点）が、顎骨の解剖学的特徴点として明確であることが、安定した座標系構築につながったものと思われる。

表 3.1 のように、本手法では歯全体の三次元形状からの COG を用いて歯列 2～4 次回帰曲線で表現したが、4 次曲線の相関が最も高い結果となった。葉山ら<sup>10)</sup>は 81 名の正常咬合者に対して、口腔模型とレーザーと 2 台の CCD カメラによる非接触式三次元形状測定装置を用いて上下顎歯列弓形態について調べ、歯列を 4 次曲線で表現することが適切であると述べている。本章の歯列の定義と葉山ら<sup>10)</sup>の歯列の定義は異なるとともに、本章では前歯（中切歯，側切歯，犬歯）のみの歯列評価であるために、直接的な比較はできないが、以前の研究<sup>10)</sup>等を参考に歯列の回帰式について今後検討を進める必要がある。特に歯列の表現法で注意を払う点として、歯列の回帰曲線の次数を上げることで相関は上昇することは明らかではあるが、回帰曲線の次数を上げることにより曲線には変曲点が生じる。本章のように、歯軸と歯列との同時評価の場合には、高次の回帰曲線は歯軸の表現にはあまり適せず、図 3.7 からわかるように、低次の 2 次曲線で示すことが理解しやすいことがわかった。したがって、歯列の表現は、どのような目的で歯列を使用するかによって、その回帰曲線の種類を選択する必要がある。

一方、従来の歯列は歯冠表面上の特徴点から求めていることから、やや曖昧な対象点を用いているのに対し、本手法では三次元歯形状の重心から歯列を求めているので、歯独自の三次元形状から一義的に定まる対象点を使用していることも利点の一つとして挙げられる。

本章では、左右のオトガイ孔 2 点，上顎切歯管 1 点による 3 点の特徴点を用い、口腔内ワールド座標系の導入を行った。さらに、CBCT 画像より再構成した三次



元歯モデルから計算的に求まる三次元歯軸と上下顎歯列を口腔内ワールド座標系で表した．本法による歯列測定は検者の技量に依存しにくく，上下顎歯の位置関係を同時に獲得できる有効な手段であると考えている．

今後は歯根部と顎骨の自動分離手法の導入を検討するとともに，全歯における歯軸と歯列弓の適用を行う予定である．

### 3.5 結言

本章では成人 6 名の生体内 CBCT 画像を用いて，上下顎骨および上下顎それぞれの前歯（中切歯，側切歯，犬歯）の三次元モデルを作成し，三次元主成分分析法により歯の長軸方向の主成分である歯軸 PC-A を求めた．さらに，歯列を評価するために，下顎の両側オトガイ孔前方と上顎の切歯管の 3 点を特徴点として用いた三次元ワールド座標系を定め，歯の形状重心 COG による三次元歯列を示し，歯軸と歯列の口腔内における三次元絶対位置を同時に自動的に求める新たな手法を提案した．

### 3.6 参考文献

- 1) 坂本信，春日勇人 他：マイクロ CT を用いた三次元歯軸の評価．臨床バイオメカニクス 35: 99-104, 2014.
- 2) 坂本信，春日勇人 他：コーンビーム CT による三次元歯軸の自動決定．臨床バイオメカニクス 36: 119-125, 2015.
- 3) Braun S, Hnat WP, et al.: The form of the human dental arch. Angle Orthod 68: 29-36, 1998.
- 4) Arai K, Will LA: Subjective classification and objective analysis of the mandibular dental-arch form of orthodontic patients. Am J Orthod Dentofacial Orthop 139: e315-e321, 2011.
- 5) Park KH, Bayome M, et al.: New classification of lingual arch form in normal occlusion using three dimensional virtual models. Korean J Orthod 45: 74-81, 2015.
- 6) Lee SJ, Lee S et al.: Method to classify dental arch forms. Am J Orthod Dentofacial Orthop 140: 87-96, 2011.
- 7) Celebi AA, Keklik H, et al.: Comparison of arch forms between Turkish and North

American. Dental Press J Orthod 21: 51-58, 2016.

- 8) 井村誠孝, 黒田知宏 他: 歯列パノラマ断層画像と表面形状情報の統合による擬似的三次元歯列形状情報の構成手法. 生体医工学 48: 75-82, 2010.
- 9) Duntleman GH: Principal components analysis, California, US, Sage Publications, 15-42, 1989.
- 10) 葉山佳一, 新井一仁 他: 四次多項式の適合による正常咬合者の上下顎歯列弓形態の相関. 日本矯正歯科学会雑誌 59: 303-311, 2000.

## 第4章 三次元歯列曲線の解析

### 4.1 緒言

歯列弓は歯の配列を示し、口腔横断面内において、切歯の切縁、犬歯の尖頭、そして臼歯の頬側咬頭の尖頭を通る平面内の曲線と定義されている。現在の歯列の求め方は、初めに研究対象者の口腔内模型をキャストニングにより作成し、その後レーザースキャナを用いて歯の歯冠表面の特徴点を測定する方法<sup>1)</sup>やデジタルノギスによる測定<sup>2)</sup>等が一般的である。しかし、これらの方法では横断面内における歯列を二次元的に表現しているのみで、横断面外に位置する歯軸の情報は含まない。さらに、この種の測定法では検者間誤差が生じやすく、上下顎歯の位置関係を正確に知ることはできないという欠点がある。

第3章では、成人6名の生体内CBCT画像を対象に、前歯（中切歯、側切歯、犬歯）の三次元モデルを作成した。三次元歯モデルに対し主成分分析を行い、歯の長軸方向の主成分である歯軸PC-Aを求めた。さらに、前歯部の歯列を評価するために、下顎の両側オトガイ孔前方と上顎の切歯管の3点を特徴点として用いた三次元ワールド座標系を定めた。ワールド座標系におけるX-Y、X-Z平面内で歯の形状重心COGによる三次元歯列を示し、歯軸と歯列の口腔内における三次元絶対位置を同時に自動的に求める新たな手法の提案を行った。

本章では、個人の歯や顎骨の個体差を認め、各個人にとって最善の咬合状態となっていることを示す個性正常咬合を有する成人8名を対象に三次元ワールド座標系<sup>3)</sup>を導入し、歯のCOGから求めた三次元歯列を三次元的に表示する数学的手法を提案するとともに、歯の三次元形状から主成分分析法で求めたPC-Aを歯列と同時に示した。さらに、その歯列を表現するための適切な回帰曲線について検討を行った。

### 4.2 対象および実験方法

#### 4.2.1 対象

本章では、個性正常咬合者である成人研究対象者8名（#1: 26歳女性、#2: 39歳男性、#3: 46歳男性、#4: 49歳男性、#5: 27歳女性、#6: 33歳男性、#7: 42歳女性、#8: 20歳女性、平均年齢  $35.3 \pm 9.7$  歳）の上下顎骨全体を撮影したCBCT画像を用

いた.

#### 4.2.2 CBCT 撮影

CBCT 撮影には CBCT 装置 (KR-X SCAN, 近畿レントゲン工業) を用い, tube voltage: 85 kV, tube current: 8 mA, voxel size:  $0.256 \times 0.256 \times 0.256$  mm, field of view:  $\phi 123 \times 123$  mm の条件下で撮影を行った. 撮影は上下顎歯の重なりを防ぐため, 研究対象者に噛み合わせ部分厚さが 2 mm のプラスチック製バイトピースを噛む状態で行った. なお, 本章で用いた CBCT 画像は研究目的で取得したのではなく, 臨床において取得したものからの 2 次利用であり, 新潟大学倫理委員会の承認を受けて行った (承認番号 2018-0100).

#### 4.2.3 実験方法

CBCT 画像から三次元医用画像構築ソフトウェア (ZedView 9.3, LEXI) を使用し, 上下顎骨および上下顎の中切歯 (Central incisor, FDI 歯式: 11, 21, 31, 41), 側切歯 (Lateral incisor, FDI 歯式: 12, 22, 32, 42), 犬歯 (Canine, FDI 歯式: 13, 23, 33, 43), 第一小臼歯 (First premolar, FDI 歯式: 14, 24, 34, 44), 第二小臼歯 (Second premolar, FDI 歯式: 15, 25, 35, 45), 第一大臼歯 (First molar, FDI 歯式: 16, 26, 36, 46), 第二大臼歯 (Second molar, FDI 歯式: 17, 27, 37, 47) の三次元モデルを作成した. ここで, 第三大臼歯 (Third molar, FDI 歯式: 18, 28, 38, 48) は先天性欠如が見られることや歯槽骨内に埋伏して口腔内に萌出しない場合が多いために解析から除外した (図 4.1). 三次元歯モデルの構築は, 歯の CT 値が周辺組織より高いため, しきい値より高い CT 値を持つボクセルをソフトウェア上で自動選択することにより作成した. また, 歯根部においては歯根膜との自動分離が困難であることから, 抽出を行った後に検者が目視で修正を行った.

三次元ワールド座標系において, 歯と歯軸の絶対位置および方向を規定するために, 著者が開発した顎骨において明確に視認できる下顎の両側オトガイ孔 2 点と上顎切歯管 1 点の特徴点から構築する口腔内ワールド座標系を導入した. 初めに, 左側オトガイ孔から右側オトガイ孔へのベクトルを仮 X 軸と定義する (図 4.2(a)). 次に両側のオトガイ孔の midpoint から上顎切歯管を通るベクトルを Z 軸として定義し, オトガイ孔 midpoint から  $2/3$  の位置を原点 O として定義する (図 4.2(b)).

Y 軸は Z 軸と仮 X 軸との外積として定義し (図 4.2(c)), X 軸は Y 軸と Z 軸との外積から決定することで三次元口腔内直交座標系  $\Sigma_w \equiv O\text{-}XYZ$  とした (図 4.2(d)). これにより, 口腔内における各歯の三次元的絶対位置が決定できる. 続いて, 各歯モデルに対し主成分分析法から得られる第一主成分を歯の長軸方向を示す PC-A として定めるとともに, 表面形状重心 COG を求め (図 4.3), これらを座標系  $\Sigma_w$  において表現した.

空間内の歯列, すなわち, 各歯の COG を三次元曲線に直接回帰することは煩雑かつ理解しづらいために, 本章では, 口腔内座標系  $\Sigma_w$  における X-Y 平面 (横断面), X-Z 平面 (冠状面) および Y-Z 平面 (矢状面) に COG と PC-A をそれぞれ投影し, 各平面上で歯列を数式表現するとともに, 歯軸を併せて示した. 口腔内座標系  $\Sigma_w$  における Y-Z 面が正中面とみなしてよい (図 4.2(e)) こと, および以前の研究<sup>4)</sup>から X-Y 平面内での歯列を懸垂曲線式と奇数次数項を除いた 2, 4 次の偶関数多項式 (Y 軸に関して対称な関数) の 3 種類の関数で回帰した結果, 4 次偶多項式が歯列を表現する手法の一つとして有用であることが明らかとなっていることから, 三平面内での上下顎歯列の数式表現は以下の 3 条件を満たすように考えた.

(a) いずれの平面の歯列回帰曲線は理解しやすいように  $n$  次多項式とし, その次数は可能な限り少なくする ( $n = 2 \sim 8$ ). (b) 個性正常咬合者の歯列であることから, X-Y, X-Z 平面内の回帰曲線は, 縦軸に対して対称 (偶関数,  $n = 2, 4, 6, 8$ ) とする. (c) Y-Z 平面内の歯列には対称性は存在しないため, 左右の歯列を別々に表現する. そして, 上下顎歯の X-Y, X-Z 平面の回帰曲線の点群から Y-Z 平面内に合成した曲線を参考に左右歯列の  $n$  次回帰曲線 ( $n = 2 \sim 4$ ) を決定する. したがって, X-Y, X-Z 平面内の歯列回帰曲線は式(1), (2)を用いて, Y-Z 平面内の回帰曲線は式(3)をそれぞれ用いた.

$$y = ax^8 + bx^6 + cx^4 + dx^2 + e \quad (1)$$

$$z = fx^8 + gx^6 + hx^4 + ix^2 + j \quad (2)$$

$$z = \alpha y^n + \beta y^{n-1} + \dots + \delta \quad (3)$$

ここで,  $a, b, \dots, j$  および  $\alpha, \beta, \dots, \delta$  は定数である. また, 歯列回帰曲線の COG への適合度を検討するために, 残差平方和 (Residual Sum of Squares: 以下, RSS) を求めた.

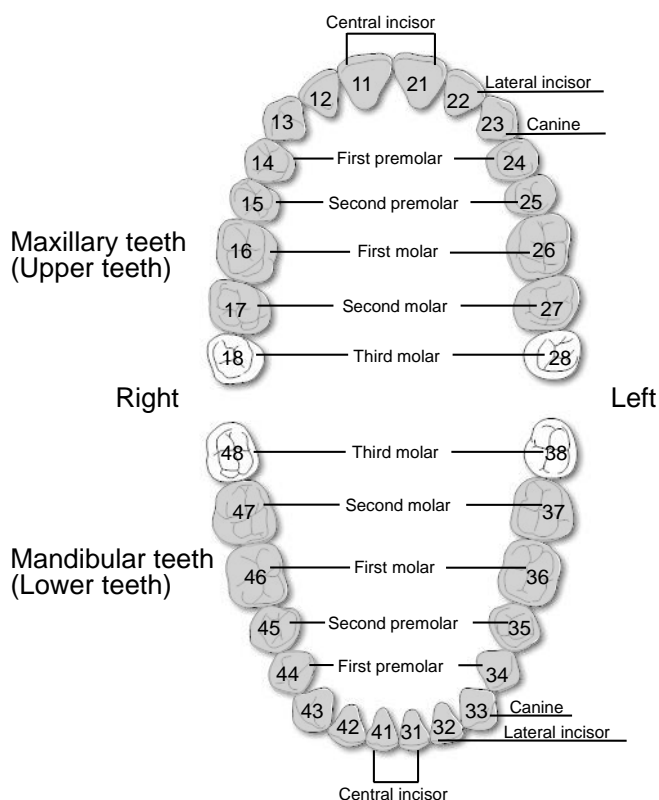


図 4.1 FDI 方式による成人歯の歯式. 灰色で示した歯が本章で用いた歯 (中切歯, 側切歯, 犬歯, 第一小臼歯, 第二小臼歯, 第一大臼歯, 第二大臼歯).

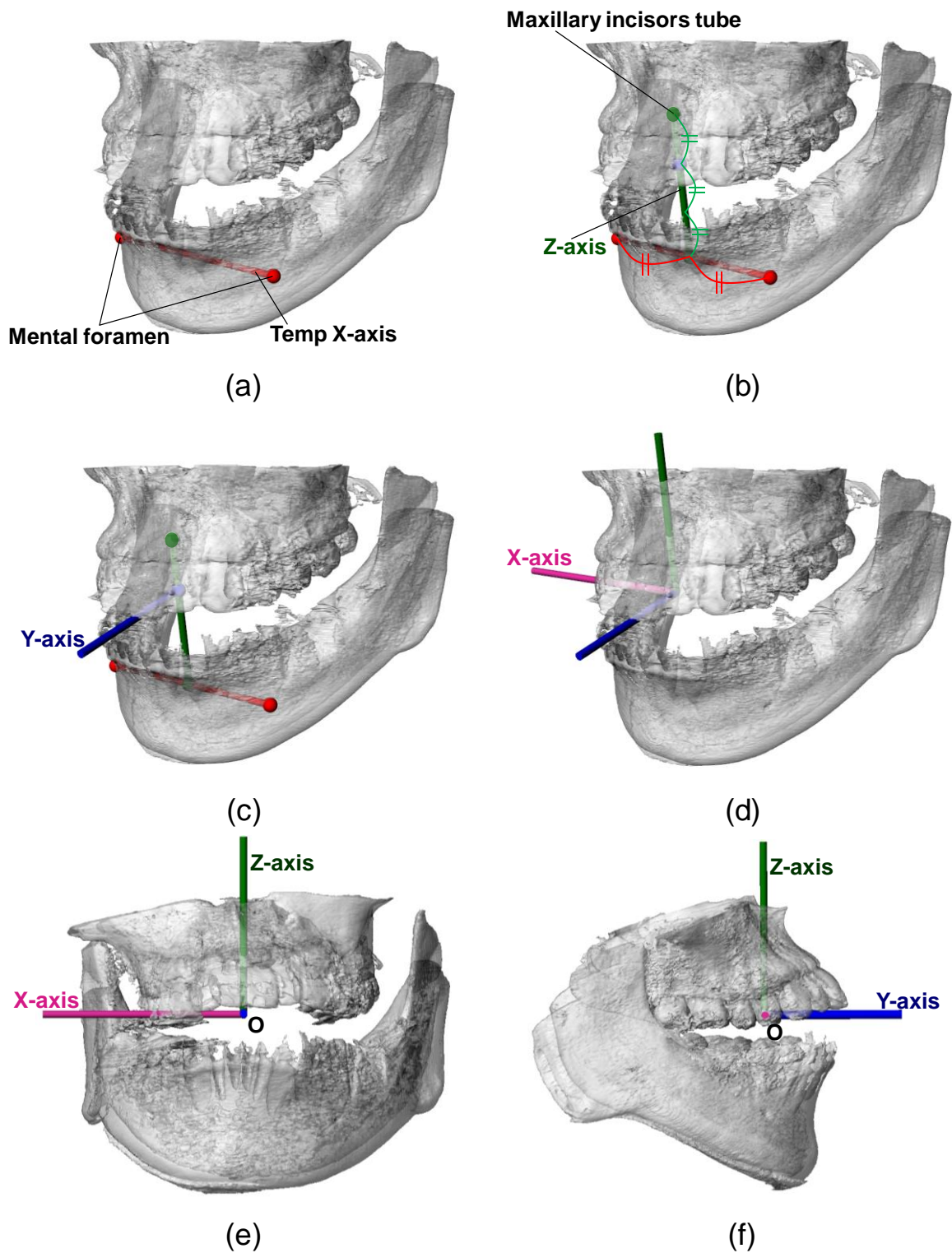


図 4.2 三次元口腔内ワールド座標系. (a) 仮 X 軸の決定 (Temp X-axis). (b) Z 軸の決定. (c) Y 軸の決定. (d) X 軸の決定. (e) 顎前面からみた口腔内ワールド座標系. (f) 顎右頬面からみた口腔内ワールド座標系.

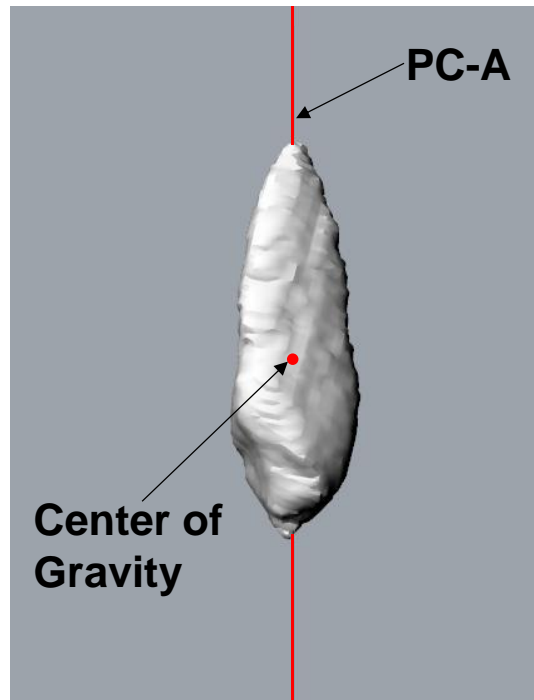


図 4.3 CBCT 画像から構築した三次元歯モデル．赤線が主成分分析から求めた歯軸 PC-A (#6, 犬歯 13).

### 4.3 結果

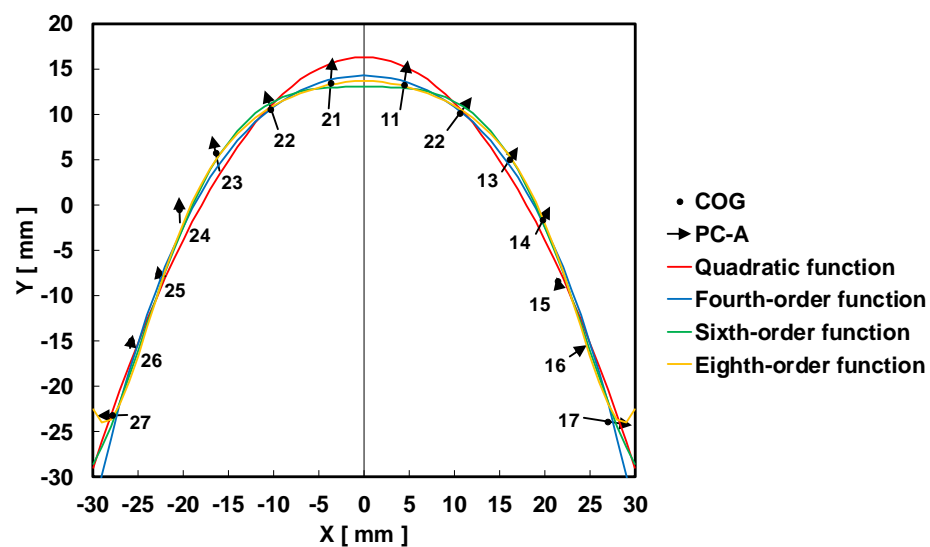
図 4.4 に研究対象者の典型例 2 名 ((a) #3, (b) #6) の上顎歯の COG および PC-A を X-Y 平面（横断面）に投影し，投影後における COG 座標値を  $n$  次多項式 ( $n = 2, 4, 6, 8$ ) に回帰した歯列曲線と PC-A を示した．ここで，PC-A は歯根側から歯冠側の方向を正方向として示した．同様に，下顎歯の結果を図 4.5 に示した．

図 4.6 は同じく典型例 2 名の X-Z 平面（冠状面）での上下顎歯列回帰曲線，COG および歯軸を示したものである．

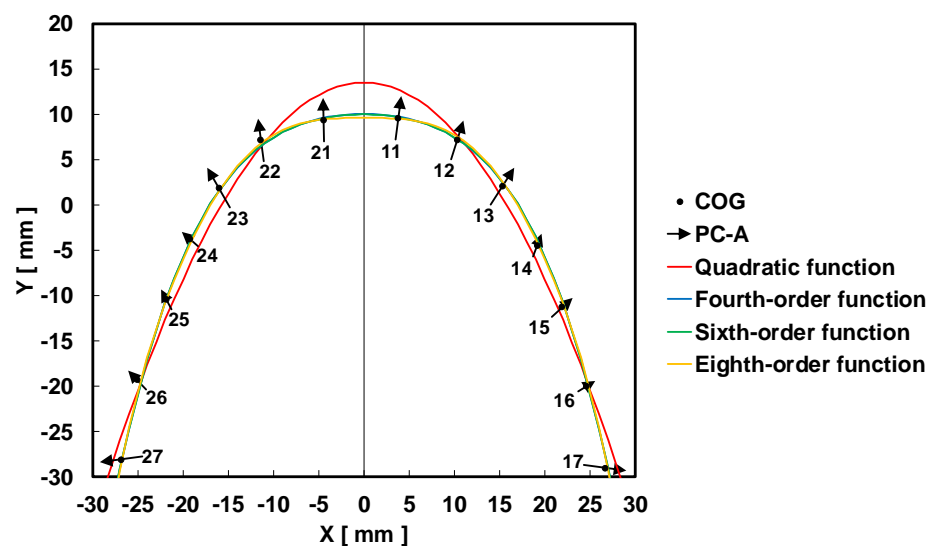
図 4.7 に，X-Y, X-Z 平面の回帰曲線の点群から Y-Z 平面（冠状面）内に合成した曲線（図中の赤い曲線）と 3 次回帰曲線と COG, 歯軸をそれぞれ示した．なお，Y-Z 平面の上下顎歯列回帰曲線は，左右の歯列で異なる数式で表した．

3 平面の回帰関数と COG との適合度を定量的に示すために，研究対象者 8 名の上下顎歯の各回帰曲線と COG との残差平方和 RSS を表 4.1 にそれぞれ示した．RSS の値が小さいほど，回帰曲線が COG に一致していることを示す．



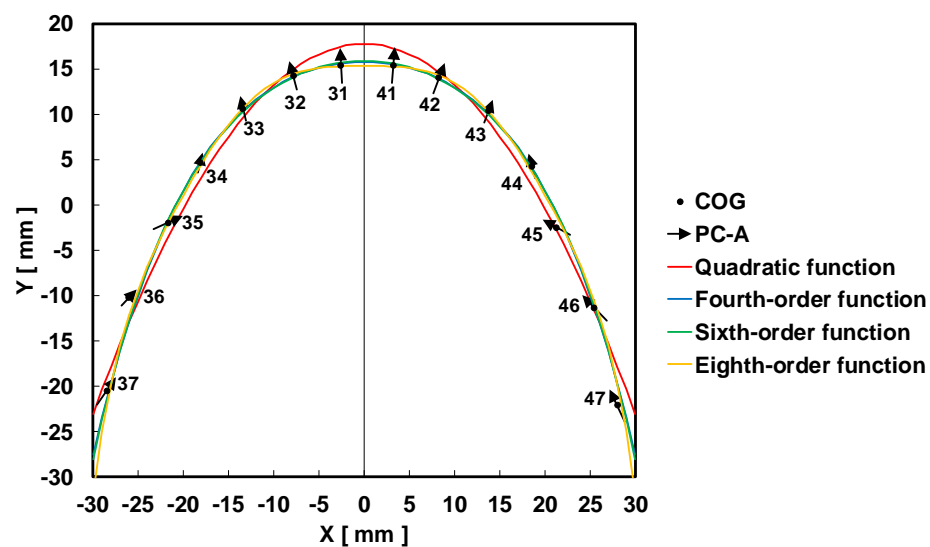


(a)

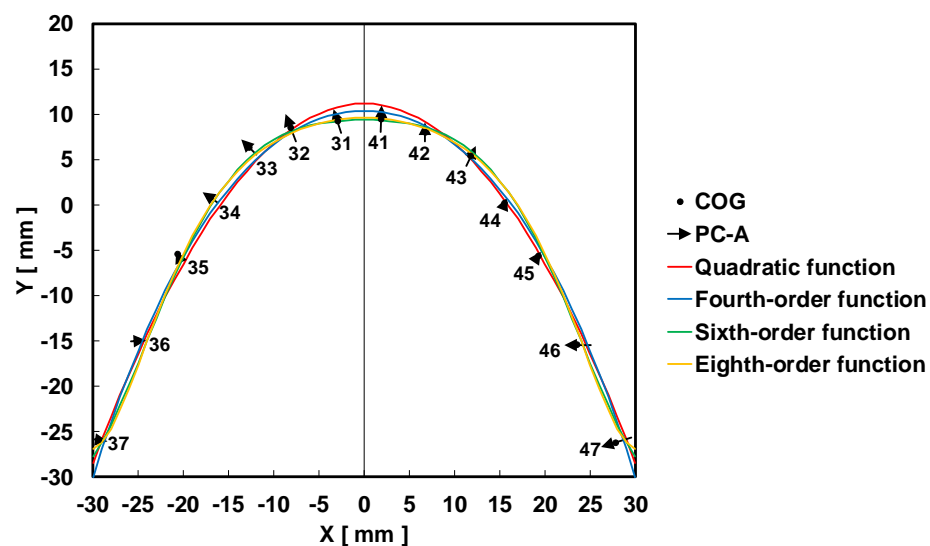


(b)

図 4.4 X-Y 平面（横断面）内における上顎歯の COG, PC-A および歯列回帰曲線. (a) #3. (b) #6.

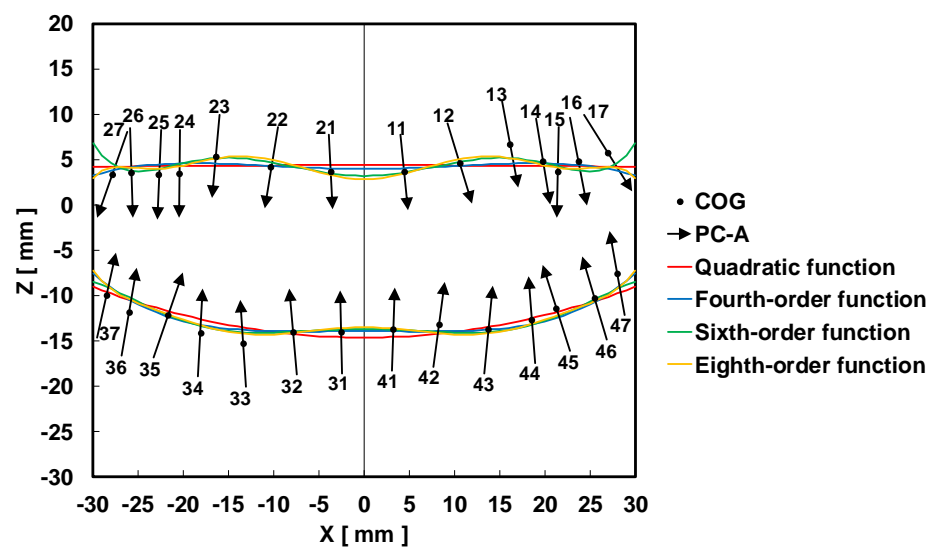


(a)

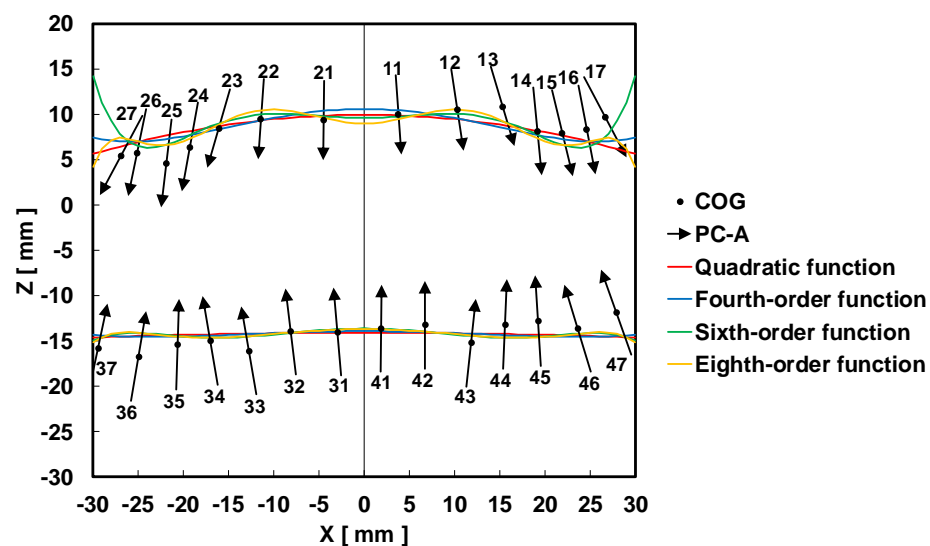


(b)

図 4.5 X-Y 平面（横断面）内における下顎歯の COG, PC-A および歯列回帰曲線. (a) #3. (b) #6.



(a)



(b)

図 4.6 X-Z 平面（冠状面）内における COG, PC-A および歯列回帰曲線. (a) #3. (b) #6.

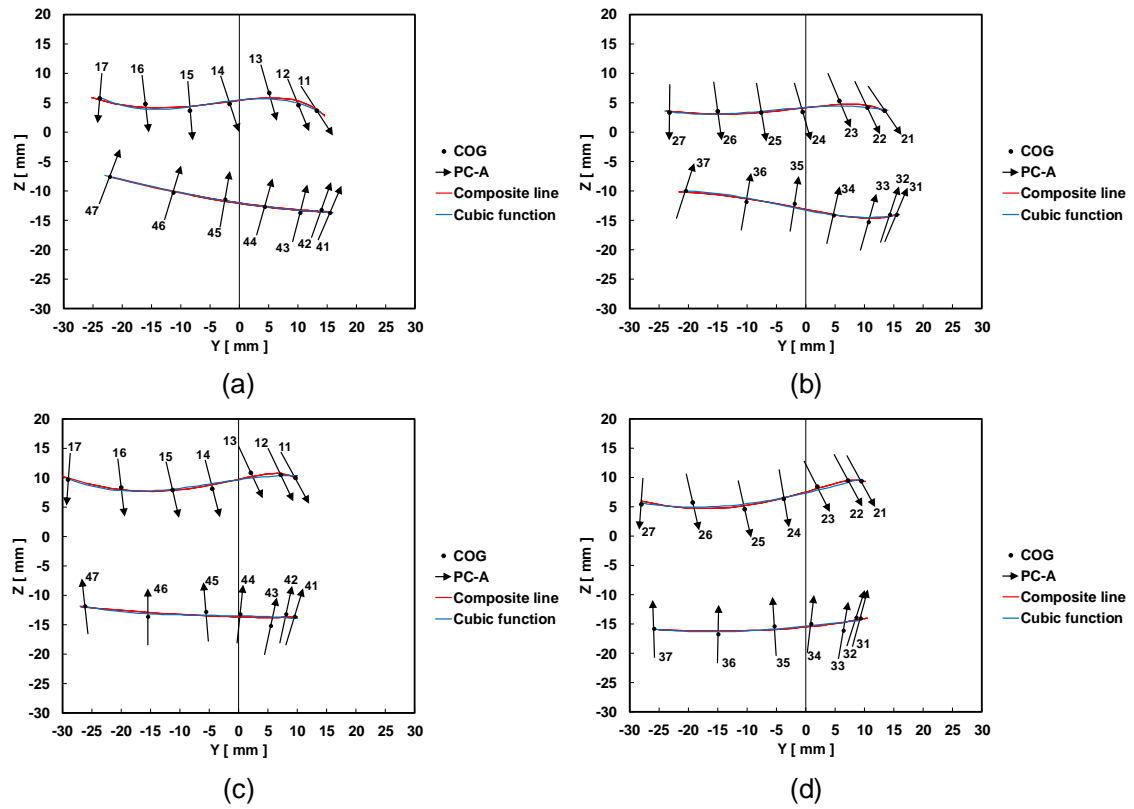


図 4.7 Y-Z 平面（矢状面）内における COG, PC-A および歯列回帰曲線. (a) #3 右側. (b) #3 左側. (c) #6 右側. (d) #6 左側.

表 4.1 歯列回帰曲線の残差平方和 RSS. (a) X-Y 平面の上顎歯列. (b) X-Y 平面の下顎歯列. (c) X-Z 平面の上顎歯列. (d) X-Z 平面の下顎歯列. (e) Y-Z 平面の右側上顎歯列. (f) Y-Z 平面の左側上顎歯列. (g) Y-Z 平面の右側下顎歯列. (h) Y-Z 平面の左側下顎歯列.

(a)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Quadratic function	263.75	184.82	81.71	101.18	237.53	69.06	77.08	155.97
Fourth-order function	179.07	83.09	56.83	40.67	46.79	7.95	16.36	54.31
Sixth-order function	136.34	70.84	49.38	39.27	39.21	7.94	10.93	51.91
Eighth-order function	84.60	28.74	47.54	29.13	38.88	7.34	1.72	47.48
(b)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Quadratic function	99.79	243.48	50.10	26.47	72.01	40.67	69.68	129.70
Fourth-order function	23.04	151.33	17.44	24.43	26.90	35.00	40.06	110.26
Sixth-order function	17.90	151.32	17.28	13.36	26.90	25.22	26.89	98.30
Eighth-order function	15.76	150.16	14.85	11.52	26.53	24.45	23.74	93.62
(c)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Quadratic function	8.27	19.75	13.83	28.84	21.90	32.19	12.07	28.13
Fourth-order function	6.94	19.61	12.93	28.69	14.74	30.18	11.07	20.79
Sixth-order function	5.27	4.71	9.89	23.72	6.36	25.56	2.68	16.51
Eighth-order function	5.25	3.69	9.17	19.19	6.22	24.00	2.44	16.19
(d)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Quadratic function	10.57	10.64	14.93	19.05	15.28	25.49	5.37	33.33
Fourth-order function	10.56	6.75	11.10	15.01	5.19	25.23	4.07	19.44
Sixth-order function	10.41	6.68	10.60	9.80	5.15	24.37	4.05	19.44
Eighth-order function	9.98	6.62	10.30	9.78	3.60	24.33	3.24	18.97
(e)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Right: Quadratic function	1.58	6.38	6.88	9.08	3.57	3.38	4.60	3.33
Right: Cubic function	1.36	2.40	2.69	4.45	3.49	2.15	1.44	3.33
Right: Fourth-order function	0.15	1.04	1.29	0.86	0.27	0.76	0.60	0.45
(f)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Left: Quadratic function	0.65	5.78	2.35	4.92	4.16	2.30	2.92	4.25
Left: Cubic function	0.59	2.35	1.69	2.36	4.05	2.23	0.66	4.11
Left: Fourth-order function	0.12	1.10	0.75	0.57	0.19	0.08	0.34	1.06
(g)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Right: Quadratic function	1.98	2.20	0.49	2.10	0.99	3.75	1.10	0.52
Right: Cubic function	1.11	2.17	0.49	1.88	0.80	3.65	0.89	0.51
Right: Fourth-order function	0.31	1.99	0.29	0.62	0.26	1.57	0.29	0.48
(h)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Left: Quadratic function	0.99	2.57	2.41	3.15	1.97	2.74	1.34	1.13
Left: Cubic function	0.88	0.99	1.68	2.58	1.96	2.71	0.83	1.12
Left: Fourth-order function	0.04	0.77	0.29	0.65	0.69	1.15	0.23	1.07

#### 4.4 考察

図 4.4 および図 4.5 の X-Y 平面（横断面）にける歯列回帰曲線の結果から、2 次曲線では、各歯の COG と曲線との差が大きいが、4 次以上の曲線では、ほぼ X-Y 平面内の歯列を表現できていることが確認できる。6 次曲線では、原点位置で変曲点を持ち、曲線が窪んだ形状になる例もみられたことから 4 次偶多項式が歯列の回帰曲線として適切であると考えた。また、表 4.1(a), (b)からも 4 次と 6 次曲線の RSS に大きな相違はみられないことから、4 次偶多項式で上下歯列を表現して十分であることがわかる。

図 4.6 の X-Z 平面（冠状面）での上下顎歯列回帰曲線の結果と表 4.1(c), (d)の RSS 値から、回帰曲線の次数を上げることで、COG とのフィッティングが良好になることは明らかである一方で、項数が多くなると数式は煩雑となる。また、6 次と 8 次偶関数では回帰曲線に大きな特徴の違いや RSS の違いもみられず、5 個の変曲点を有する 6 次偶多項式で、上下顎歯列を十分に表現できている。

図 4.7 に示した Y-Z 平面（冠状面）における歯列回帰曲線の結果と表 4.1(e)～(h)の RSS の結果から、左右の歯列で異なる数式で表した 3 次多項式で十分に歯列の特徴を表していることが示唆された。

表 4.2 に、研究対象者 8 名の X-Y, X-Z, Y-Z 平面での式(1)～(3)に対応した 4, 6 次偶多項式および 3 次多項式の係数をまとめて示した。これら各研究対象者の定数が個人特有の歯列を表現する重要なパラメータであり、咬合状態の評価に応用できると予想しているが、研究対象者数が少ないために更なる検討が必要である。さらに、歯列と歯軸との関係も重要であり、歯列関数と歯軸とのなす角度について検討を行う予定である。従来から歯列については、主に横断面 (X-Y 平面) 内における歯列を二次元的に表現したもので歯列弓と呼ばれており、この曲線を多項式、ベーター関数、エルミート曲線、懸垂曲線、楕円曲線および円錐曲線等で表現する研究<sup>1),5),6)</sup>が行われてきたが、これらは二次元ローカル座標系での表示であり、その発展性は少ないものと思われる。これに対して、本手法の三次元口腔内ワールド座標系に基づいた歯列および歯軸の数学的標記は、今後の歯科領域への CBCT の世界的普及に伴い三次元口腔情報が多用されることから、インプラントの手術計画や歯科矯正等で利用価値があるものと考えている。

表 4.2 齒列回帰曲線の残差平方和 RSS. (a) X-Y 平面の上顎歯列. (b) X-Y 平面の下顎歯列. (c) X-Z 平面の上顎歯列. (d) X-Z 平面の下顎歯列. (e) Y-Z 平面の右側上顎歯列. (f) Y-Z 平面の左側上顎歯列. (g) Y-Z 平面の右側下顎歯列. (h) Y-Z 平面の左側下顎歯列.

(a)

Fourth-order function $y = cx^4 + dx^2 + e$			
	c	d	e
#1	$-7.40 \times 10^{-5}$	$-1.84 \times 10^{-2}$	15.54
#2	$-5.59 \times 10^{-5}$	$-1.69 \times 10^{-2}$	15.12
#3	$-2.47 \times 10^{-5}$	$-3.16 \times 10^{-2}$	14.24
#4	$-5.43 \times 10^{-5}$	$-1.84 \times 10^{-2}$	9.47
#5	$-8.92 \times 10^{-5}$	$9.40 \times 10^{-3}$	14.12
#6	$-4.40 \times 10^{-5}$	$-2.17 \times 10^{-2}$	10.04
#7	$-5.19 \times 10^{-5}$	$-2.44 \times 10^{-2}$	13.45
#8	$-6.71 \times 10^{-5}$	$-9.68 \times 10^{-3}$	12.23

(b)

Fourth-order function $y = cx^4 + dx^2 + e$			
	c	d	e
#1	$-8.34 \times 10^{-5}$	$-2.16 \times 10^{-2}$	15.95
#2	$-5.82 \times 10^{-5}$	$-1.63 \times 10^{-2}$	17.57
#3	$-2.53 \times 10^{-5}$	$-2.53 \times 10^{-2}$	15.75
#4	$-6.34 \times 10^{-6}$	$-3.94 \times 10^{-2}$	11.54
#5	$-2.97 \times 10^{-5}$	$-2.12 \times 10^{-2}$	15.73
#6	$-9.58 \times 10^{-6}$	$-3.63 \times 10^{-2}$	10.38
#7	$-2.76 \times 10^{-5}$	$-3.37 \times 10^{-2}$	16.65
#8	$-2.55 \times 10^{-5}$	$-3.56 \times 10^{-2}$	16.69

(c)

Sixth-order function $z = gx^6 + hx^4 + ix^2 + j$				
	g	h	i	j
#1	$6.10 \times 10^{-8}$	$-6.85 \times 10^{-5}$	$9.48 \times 10^{-3}$	7.08
#2	$1.12 \times 10^{-7}$	$-1.33 \times 10^{-4}$	$3.38 \times 10^{-2}$	7.28
#3	$4.69 \times 10^{-8}$	$-6.00 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-2}$	3.20
#4	$8.82 \times 10^{-8}$	$-8.65 \times 10^{-5}$	$2.40 \times 10^{-2}$	3.98
#5	$1.14 \times 10^{-7}$	$-1.03 \times 10^{-4}$	$2.58 \times 10^{-2}$	2.84
#6	$6.80 \times 10^{-8}$	$-6.71 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-2}$	9.58
#7	$1.19 \times 10^{-7}$	$-1.15 \times 10^{-4}$	$2.56 \times 10^{-2}$	5.61
#8	$8.11 \times 10^{-8}$	$-6.56 \times 10^{-5}$	$9.34 \times 10^{-3}$	7.45

(d)

Sixth-order function $z = gx^6 + hx^4 + ix^2 + j$				
	g	h	i	j
#1	$2.88 \times 10^{-8}$	$-2.27 \times 10^{-5}$	$-2.55 \times 10^{-3}$	-11.41
#2	$-8.97 \times 10^{-9}$	$2.14 \times 10^{-5}$	$-1.55 \times 10^{-2}$	-9.06
#3	$-1.63 \times 10^{-8}$	$2.82 \times 10^{-5}$	$-6.44 \times 10^{-3}$	-13.71
#4	$-4.65 \times 10^{-8}$	$6.50 \times 10^{-5}$	$-1.76 \times 10^{-2}$	-14.44
#5	$4.29 \times 10^{-9}$	$8.83 \times 10^{-6}$	$-3.46 \times 10^{-3}$	-16.24
#6	$-1.71 \times 10^{-8}$	$2.35 \times 10^{-5}$	$-8.81 \times 10^{-3}$	-13.64
#7	$3.62 \times 10^{-9}$	$1.72 \times 10^{-6}$	$-4.14 \times 10^{-3}$	-11.67
#8	$-6.28 \times 10^{-10}$	$2.22 \times 10^{-5}$	$-1.46 \times 10^{-2}$	-10.06

(e)

Right: Cubic function $z = \alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + \delta$				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
#1	$-1.32 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-1}$	4.82
#2	$-4.79 \times 10^{-4}$	$-5.05 \times 10^{-3}$	$2.47 \times 10^{-1}$	7.58
#3	$-6.13 \times 10^{-4}$	$-9.62 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-1}$	5.46
#4	$-8.24 \times 10^{-4}$	$-1.47 \times 10^{-2}$	$9.46 \times 10^{-2}$	5.54
#5	$-8.22 \times 10^{-5}$	$3.84 \times 10^{-3}$	$-6.48 \times 10^{-2}$	4.20
#6	$-3.00 \times 10^{-4}$	$-3.83 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-1}$	9.63
#7	$-5.31 \times 10^{-4}$	$-4.21 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-1}$	6.09
#8	$2.31 \times 10^{-6}$	$8.94 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-1}$	5.23

(f)

Left: Cubic function $z = \alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + \delta$				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
#1	$-8.94 \times 10^{-5}$	$4.22 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-1}$	3.45
#2	$-4.38 \times 10^{-4}$	$-3.40 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-1}$	6.49
#3	$-2.52 \times 10^{-4}$	$-4.12 \times 10^{-3}$	$7.14 \times 10^{-2}$	4.19
#4	$-5.75 \times 10^{-4}$	$-9.70 \times 10^{-3}$	$-6.22 \times 10^{-3}$	6.13
#5	$-1.09 \times 10^{-4}$	$4.20 \times 10^{-3}$	$-4.76 \times 10^{-2}$	4.20
#6	$-7.62 \times 10^{-5}$	$3.86 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-1}$	7.33
#7	$-4.66 \times 10^{-4}$	$-3.93 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-1}$	5.72
#8	$-1.05 \times 10^{-4}$	$4.77 \times 10^{-3}$	$6.86 \times 10^{-2}$	6.69

(g)

Right: Cubic function $z = \alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + \delta$				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
#1	$-3.21 \times 10^{-4}$	$9.85 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-1}$	-13.11
#2	$5.15 \times 10^{-5}$	$4.38 \times 10^{-3}$	$4.90 \times 10^{-2}$	-11.96
#3	$1.72 \times 10^{-5}$	$2.81 \times 10^{-3}$	$-1.49 \times 10^{-1}$	-12.07
#4	$1.99 \times 10^{-4}$	$8.54 \times 10^{-3}$	$-7.55 \times 10^{-2}$	-15.33
#5	$-1.36 \times 10^{-4}$	$3.36 \times 10^{-3}$	$-8.75 \times 10^{-2}$	-15.36
#6	$-1.13 \times 10^{-4}$	$-1.42 \times 10^{-3}$	$-1.90 \times 10^{-2}$	-13.50
#7	$1.34 \times 10^{-4}$	$4.16 \times 10^{-3}$	$-9.86 \times 10^{-3}$	-13.26
#8	$4.19 \times 10^{-5}$	$1.26 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-2}$	-14.10

(h)

Left: Cubic function $z = \alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + \delta$				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
#1	$-1.44 \times 10^{-4}$	$1.93 \times 10^{-3}$	$1.81 \times 10^{-1}$	-14.36
#2	$3.43 \times 10^{-4}$	$8.10 \times 10^{-3}$	$-1.19 \times 10^{-2}$	-13.51
#3	$2.96 \times 10^{-4}$	$4.37 \times 10^{-3}$	$-1.93 \times 10^{-1}$	-13.31
#4	$3.10 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-2}$	$-1.48 \times 10^{-1}$	-14.98
#5	$3.70 \times 10^{-5}$	$5.38 \times 10^{-3}$	$-1.38 \times 10^{-1}$	-15.81
#6	$-6.29 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-1}$	-15.38
#7	$-1.95 \times 10^{-4}$	$2.59 \times 10^{-4}$	$9.50 \times 10^{-2}$	-12.44
#8	$2.23 \times 10^{-5}$	$7.41 \times 10^{-3}$	$-2.62 \times 10^{-2}$	-11.75

#### 4.5 結言

本章では個性正常咬合者を対象に，新しく考案した三次元口腔内ワールド座標系に基づき，歯の形状重心から求めた三次元歯列を表示する数学的手法を提案するとともに，歯の三次元形状から主成分分析法で求めた三次元歯軸を歯列弓と同時に示した．その結果，上下顎歯列に対して，横断面では4次偶多項式，冠状面では6次偶多項式，矢状面は3次多項式でそれぞれの面内の歯列を数学的に表現できることを示した．

#### 4.6 参考文献

- 1) Mina M, Borzabadi-Farahani A et al.: Mathematical beta function formulation for maxillary arch form prediction in normal occlusion population. *Odontology* 105: 229-236, 2017.
- 2) Lee SJ, Lee S et al.: Method to classify dental arch forms. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 140: 87-96, 2011.
- 3) 坂本信, 坂上勇太 他: コーンビーム CT による前歯部の三次元自動歯軸および歯列決定法. *臨床バイオメカニクス* 39: 207-216, 2018.
- 4) 坂上勇太, 坂本信 他: コーンビーム CT を用いた新たな三次元歯列弓の定義. *臨床バイオメカニクス* 40: 281-288, 2019.
- 5) AlHarbi S, Alkofide EA et al.: Mathematical analyses of dental arch curvature in normal occlusion. *Angle Orthod* 78: 281-287, 2008.
- 6) Braun S, Hnat WP et al.: The form of the human dental arch. *Angle Orthod* 68: 29-36, 1998.



## 第5章 三次元歯軸の解析

### 5.1 緒言

第4章までにおいて，上下顎骨の特徴箇所から三次元口腔内ワールド座標系を構築することで，CT 機器や撮像条件に依存せずに各歯の位置関係を知ることが可能とした<sup>1)</sup>．そして，その解析例として前歯（中切歯，側切歯，犬歯）を対象とした PC-A と歯の三次元形状から定まる形状重心 (Center Of Gravity: 以下, COG) を求め，PC-A と COG による歯列を同時に表示し<sup>1)</sup>，この手法を全歯に適用して歯列曲線を表現する回帰式を導出した<sup>2)</sup>．

本章では，個性正常咬合を有する成人 10 名を対象に新たに考案した三次元口腔内座標系を利用して，CBCT から得られた歯の形状から主成分分析法で求めた PC-A を歯列とともに表した．また，全歯の PC-A 角度を三次元的かつ定量的に表すとともに，歯の位置関係と併せて示す表現方法について検討を行った．

### 5.2 対象および実験方法

#### 5.2.1 対象

解析では，個性正常咬合である成人 10 名（男性 4 名，女性 6 名，平均年齢 35.1 ± 8.4 歳）の上下顎骨を撮影した CBCT 画像を用いた．

#### 5.2.2 CBCT 撮影

CT 撮影には CBCT 装置 (KR-X SCAN, 近畿レントゲン工業) を用い，tube voltage: 85 kV, tube current: 8 mA, voxel size: 0.256 × 0.256 × 0.256 mm, field of view:  $\phi 123 \times 123$  mm の条件下で撮影を行った．撮影は対象者に厚さ 2 mm のプラスチック製バイトピースを噛む状態で行い，上下顎歯の重なりを防止してある．ここで使用した CBCT 画像は本章の目的で取得したものではなく，臨床で取得した二次利用であり，新潟大学倫理委員会の承認を受けた（承認番号 2018-0100）．

#### 5.2.3 実験方法

三次元医用画像構築ソフトウェア (ZedView 9.3, LEXI) を利用して，CBCT 画像から上下顎骨および上下顎の中切歯 (FDI 歯式: 11, 21, 31, 41)，側切歯 (FDI 歯式: 12, 22, 32, 42)，犬歯 (FDI 歯式: 13, 23, 33, 43)，第一小臼歯 (FDI 歯

式: 14, 24, 34, 44), 第二小臼歯 (FDI 歯式: 15, 25, 35, 45), 第一大臼歯 (FDI 歯式: 16, 26, 36, 46), 第二大臼歯 (FDI 歯式: 17, 27, 37, 47) の三次元モデルを作成した. 第三大臼歯 (FDI 歯式: 18, 28, 38, 48) については, 対象者によって先天性欠如がある場合や抜歯を行った場合があることから, 解析対象から除外した (図 5.1). CBCT 画像の歯冠部の CT 値は周辺組織と比して高いため, しきい値より高い CT 値を持つボクセルをソフトウェア上で自動抽出することにより歯モデルを作成した. また, 顎骨内にある歯根部は, しきい値による歯根と歯根膜との分離が困難であることから, 自動抽出を行った後に 1 名の検者が目視で修正を行った. そして, 作成した各歯モデルの幾何学的重心である COG を求めるとともに, 主成分分析法から決定される第一主成分である歯の長軸方向を示す PC-A を算出した<sup>3)</sup> (図 5.2).

著者が考案した下顎の両側オトガイ孔 2 点と上顎切歯管 1 点の解剖学的特徴箇所から得られる三次元口腔内ワールド座標系構築法<sup>1)</sup>から, 各対象者の口腔内に座標系を次のように設定した (図 5.3). 初めに, 左側オトガイ孔から右側オトガイ孔へのベクトルを仮 X 軸とし, 次に, 両側のオトガイ孔の midpoint から上顎切歯管を通るベクトルを Z 軸とする. そして, オトガイ孔 midpoint から 2/3 の位置を原点 O とする. Y 軸は Z 軸と仮 X 軸との外積とし, X 軸は Y 軸と Z 軸との外積から決定することで口腔内直交座標系が定まる. この座標系を用いれば, CBCT の機器や撮影時における対象者の姿勢に依存しない歯の三次元 COG 位置および PC-A 角度が表現でき, 口腔内に X-Y 平面 (横断面), X-Z 平面 (冠状面) および Y-Z 平面 (矢状面) が対象者ごとに定まる.

三次元歯軸や歯列を空間内で表現するのは理解しづらいため, COG 位置から求める歯列および PC-A は, 口腔内座標系における 3 平面に投影して, 各平面内で歯列曲線と歯軸角度をそれぞれ示した. また, 歯軸角度の表記は次のように定めた. X-Y 平面に上下顎歯の三次元 PC-A を投影して Y 軸とのなす角度を  $\alpha_{xy}$  とし, 正の向きは頬側と定義した. 同様に, X-Z 平面に上下顎歯の PC-A を投影し, Z 軸とのなす角度を  $\alpha_{xz}$  とし, 頬側を正と定めた. また, PC-A を Y-Z 平面に投影して Z 軸との角度を  $\alpha_{yz}$  と表し, 近心方向を正と定義した.

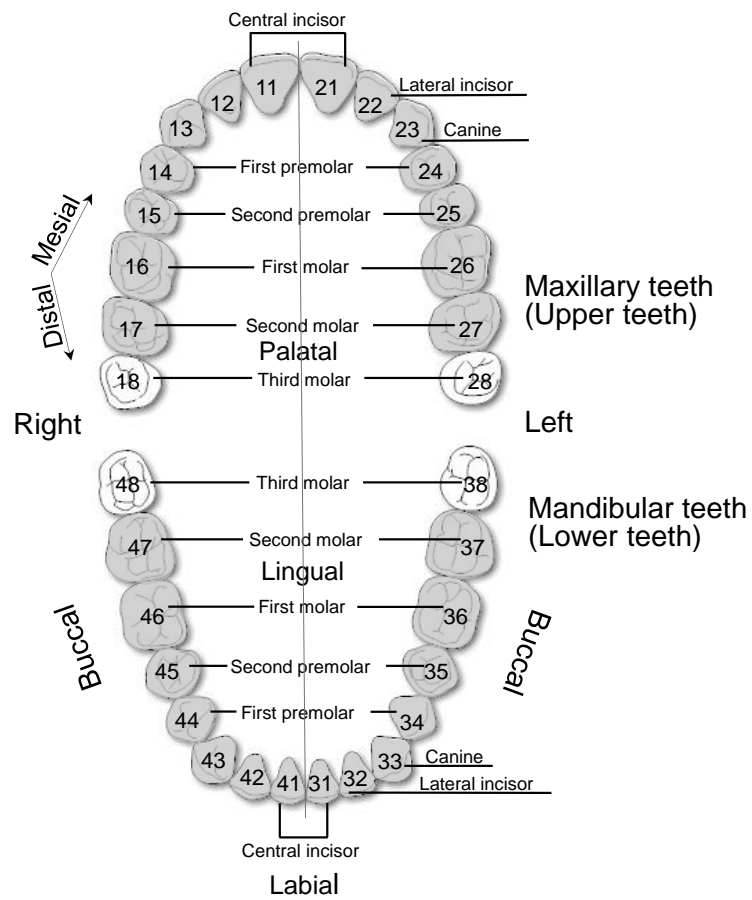


図 5.1 成人歯の FDI 方式による歯式. 灰色で示した歯が本章で用いた歯 (中切歯, 側切歯, 犬歯, 第一小臼歯, 第二小臼歯, 第一大臼歯, 第二大臼歯).

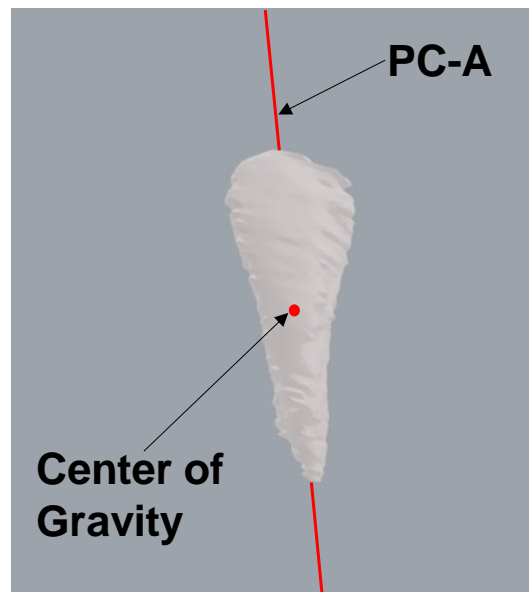


図 5.2 CBCT 画像から三次元再構築した犬歯．歯の三次元モデルから幾何学的重心 COG と主成分分析法から歯軸 PC-A が求められる（#7，犬歯 33）．

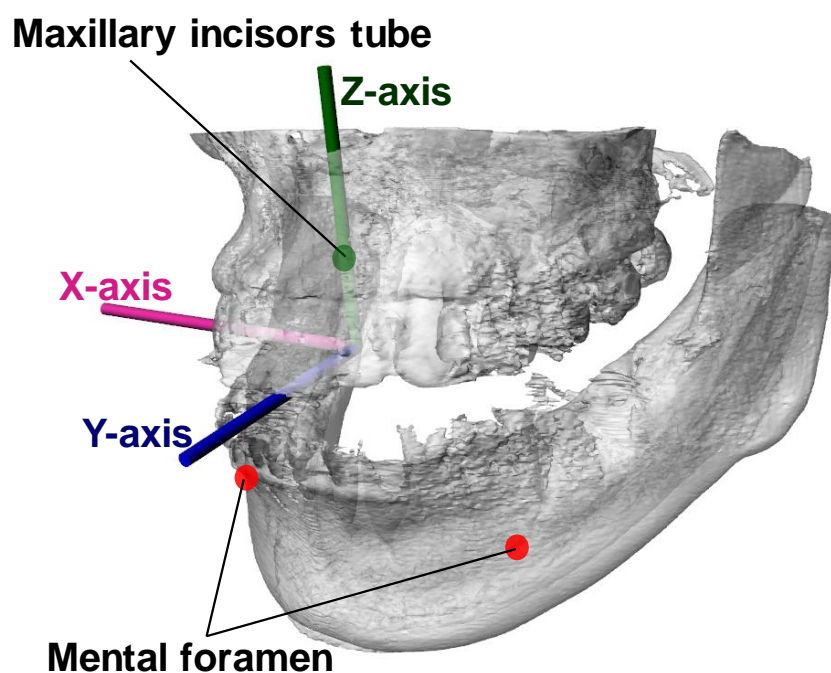


図 5.3 上下顎骨の 3 点の解剖学的特徴箇所から構築した三次元口腔内ワールド座標系．

### 5.3 結果

研究対象者の上下顎歯の COG のおよび PC-A を X-Y 平面（横断面）、X-Z 平面（冠状面）、Y-Z 平面（矢状面）に投影した結果を図 5.4.1～図 5.4.10 に示した．ここで、PC-A は歯根側から歯冠側の方向を正方向として示した．それぞれの図において、COG を X-Y 平面では 4 次偶多項式、X-Z 平面では 6 次偶多項式、Y-Z 平面では 3 次多項式で表した歯列回帰曲線を表した．また、Y-Z 平面においては、右頬側からと左頬側から表したもので、左右の歯列で異なる多項式で表した．

図 5.5.1～図 5.5.10 は、PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ 、 $\alpha_{XZ}$ 、 $\alpha_{YZ}$  を歯ごとに示したものである．

図 5.6 は、歯の COG 位置と PC-A 角度との関係について、対象者 10 名で平均して表示したもので、X-Y 平面および X-Z 平面では縦軸  $\alpha_{XY}$  および  $\alpha_{XZ}$  と横軸 X との関係を表現する回帰曲線を偶関数の 2, 4, 6, 8 次多項式で表した結果を図中に示した．Y-Z 平面では左右頬側で分け、 $\alpha_{YZ}$  と Y 軸との関係について示してあり、左右の歯列で異なる 2～4 次の多項式で回帰した場合を示した．

表 5.1 には、図 5.6 でそれぞれ示した 3 平面における歯の平均 COG 位置と平均 PC-A 角度との関係を回帰した多項式と COG との適合度を定量的に表すために、回帰曲線と COG との残差平方和 RSS を表 5.1 に示した．RSS の値が小さいほど、回帰曲線が COG に一致していることを示す．

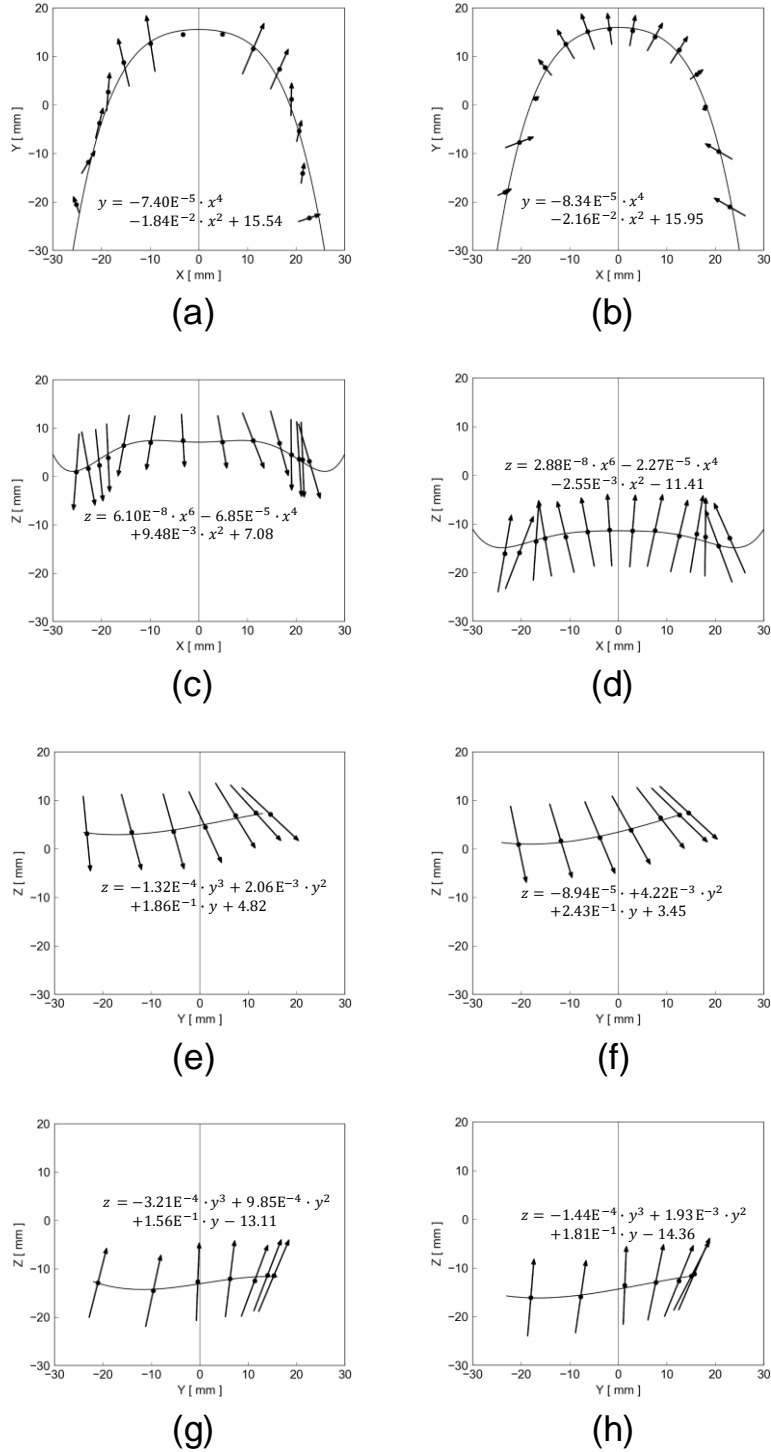


図 5.4.1 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#1). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

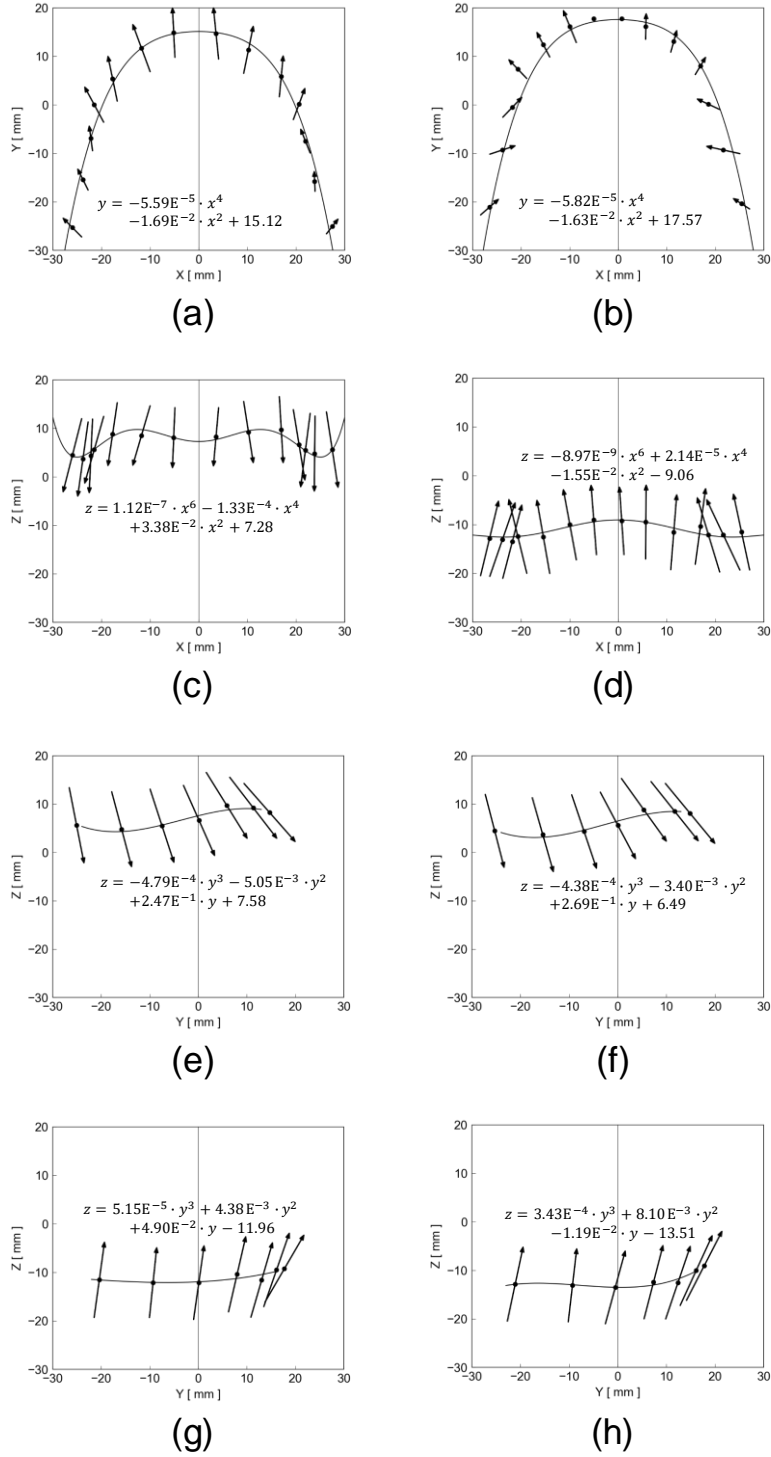
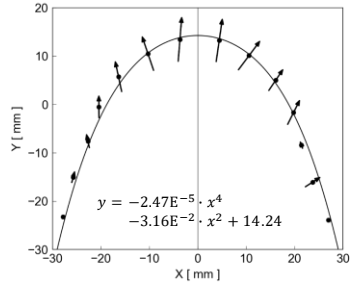
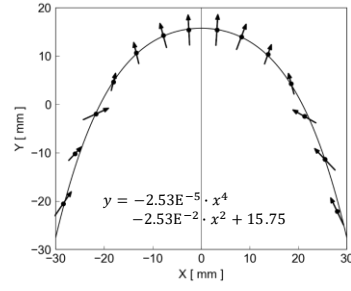


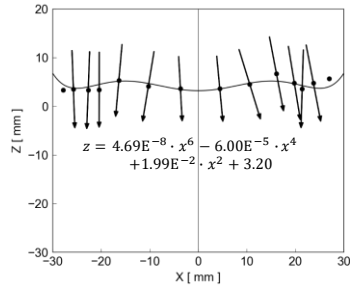
図 5.4.2 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#2). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.



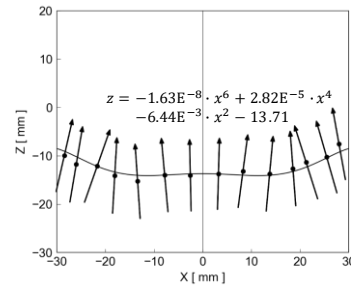
(a)



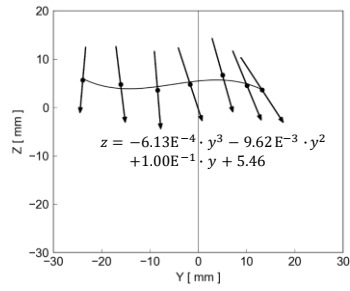
(b)



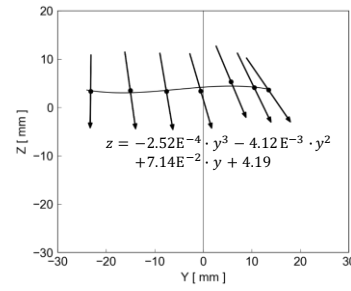
(c)



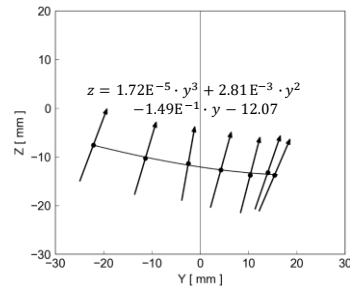
(d)



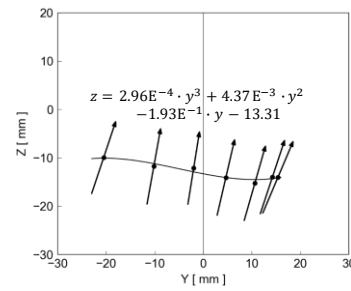
(e)



(f)



(g)



(h)

図 5.4.3 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#3). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.



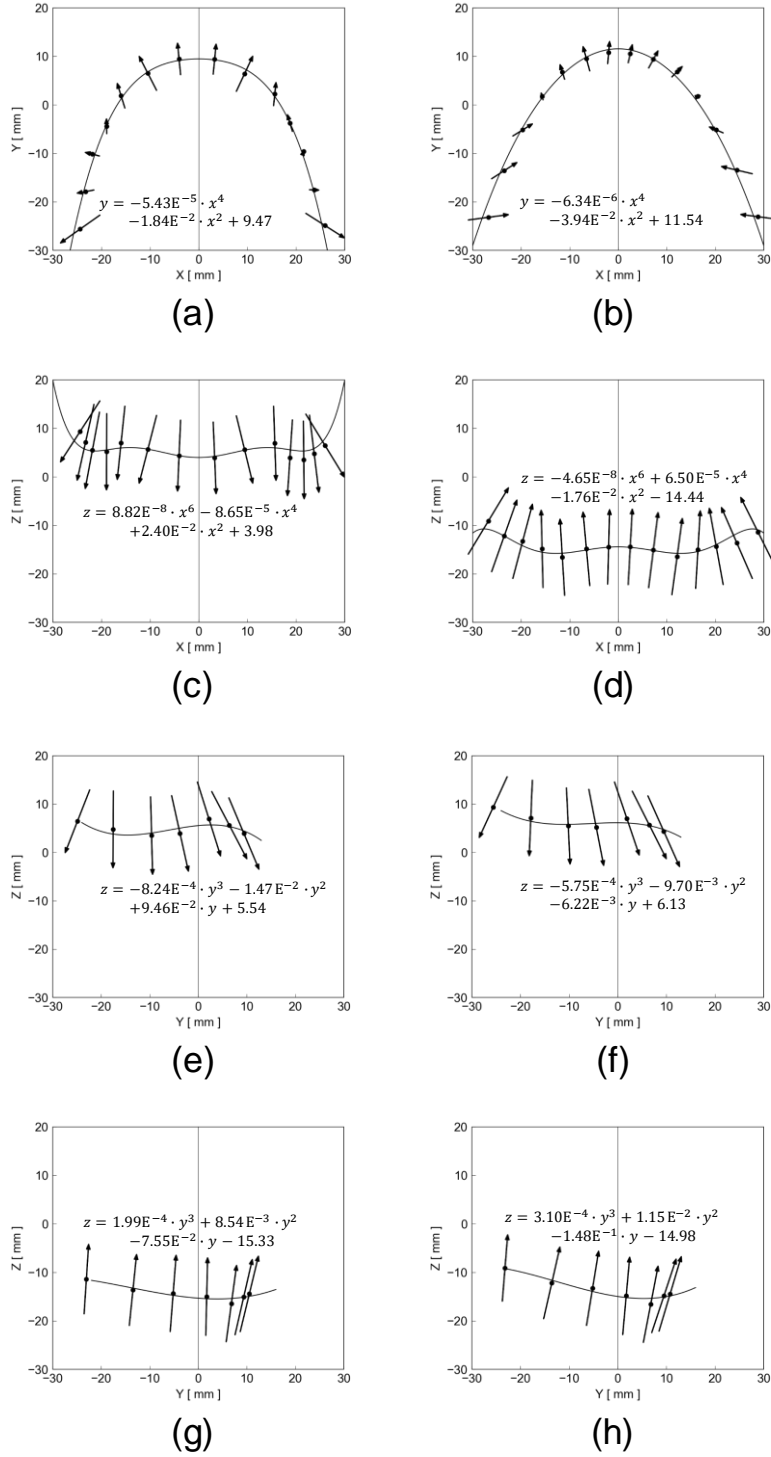


図 5.4.4 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#4). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

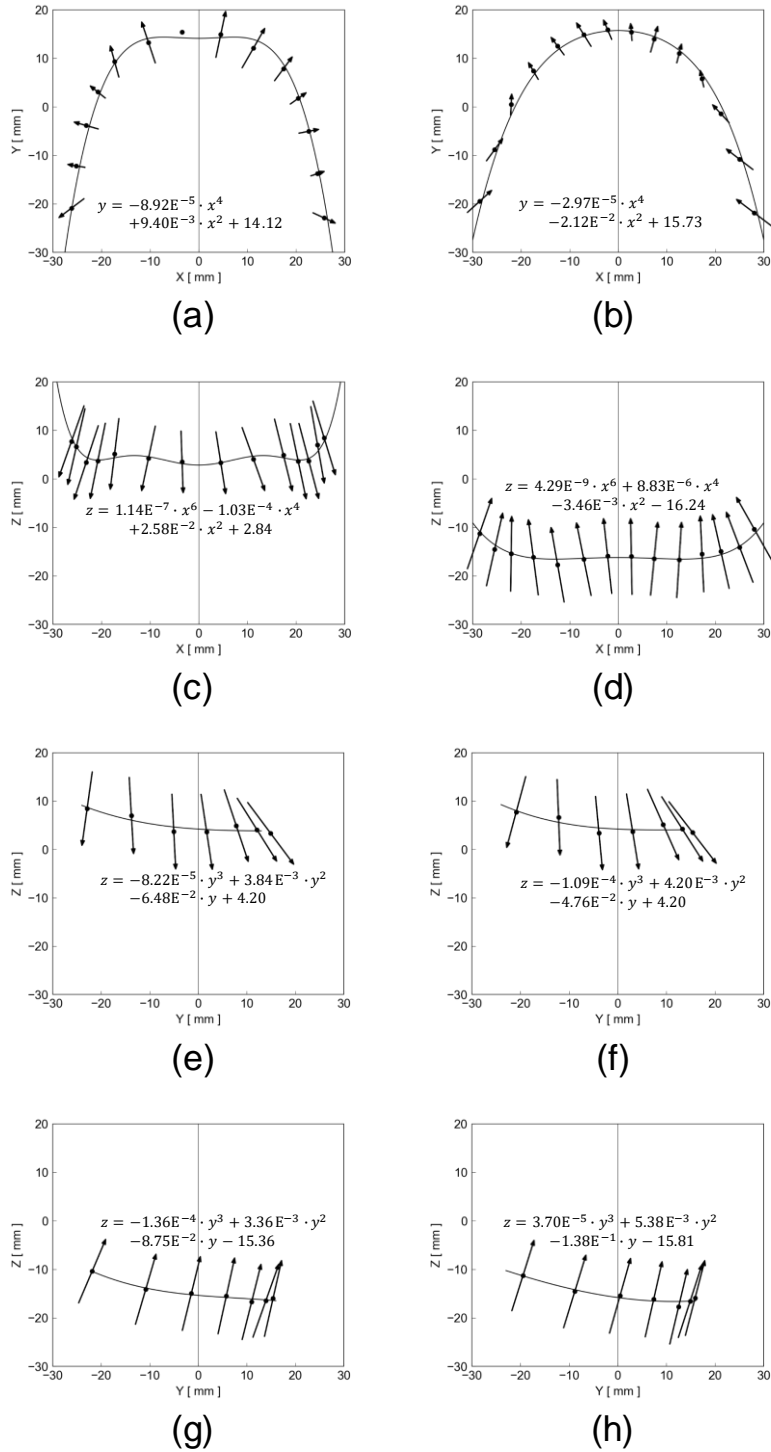
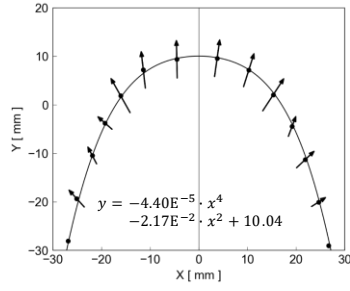
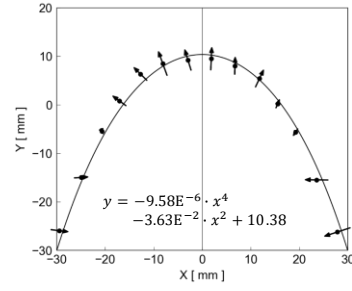


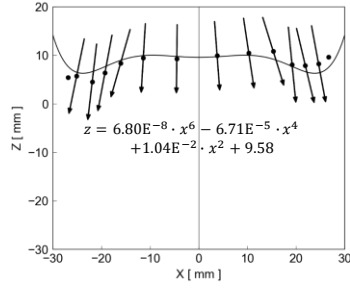
図 5.4.5 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#5). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.



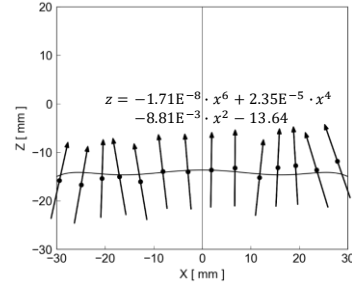
(a)



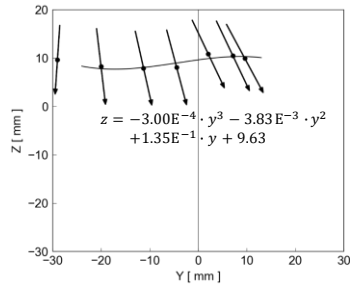
(b)



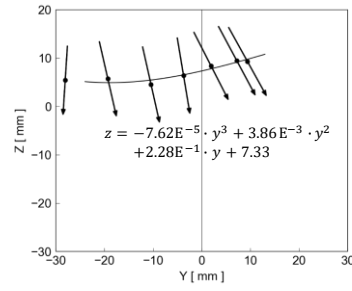
(c)



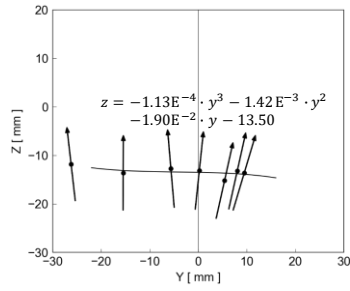
(d)



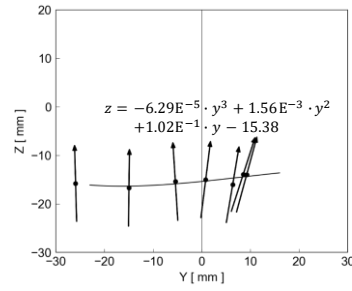
(e)



(f)



(g)



(h)

図 5.4.6 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#6). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

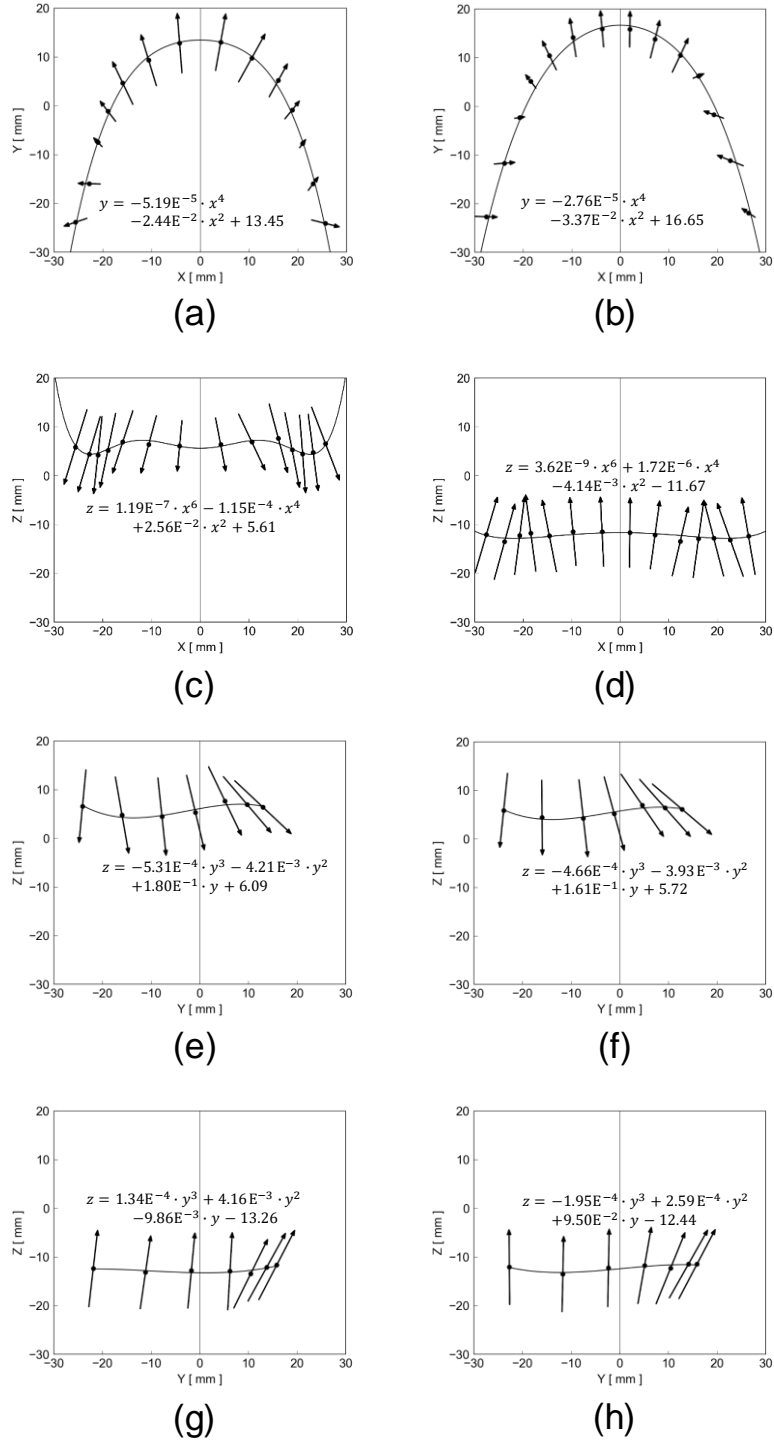


図 5.4.7 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#7). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

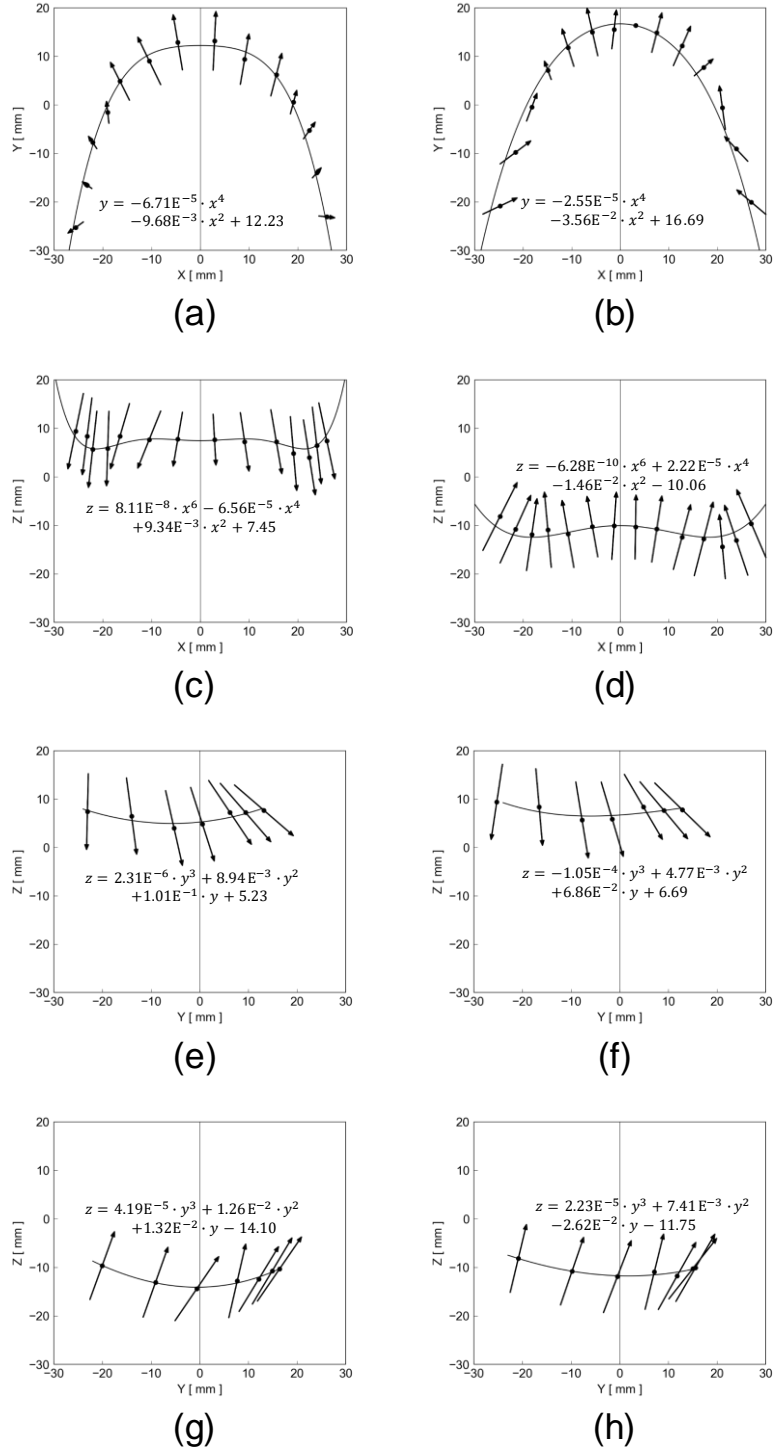


図 5.4.8 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#8). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

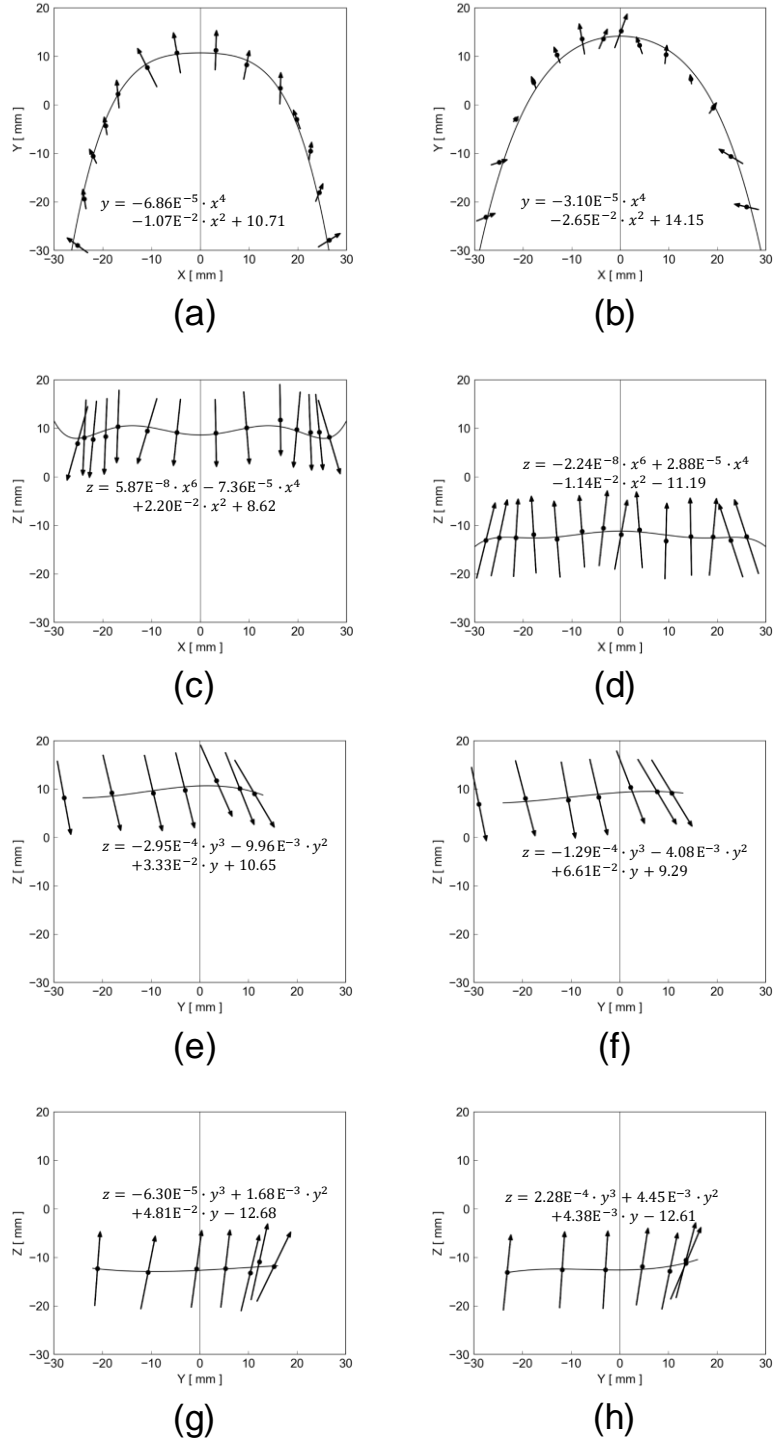


図 5.4.9 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#9). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

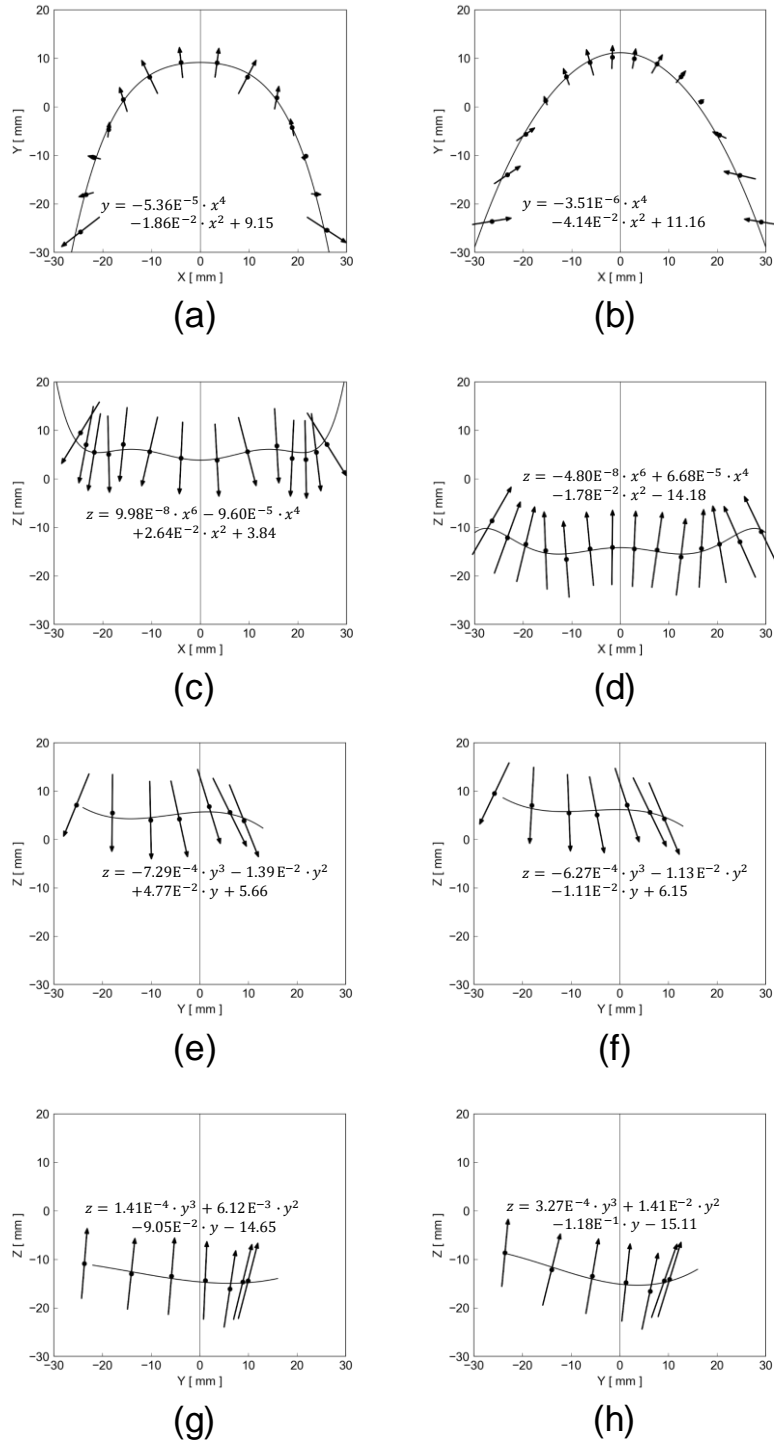


図 5.4.10 COG および PC-A を平面上に投影して示した COG による歯列と PC-A の例 (#10). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

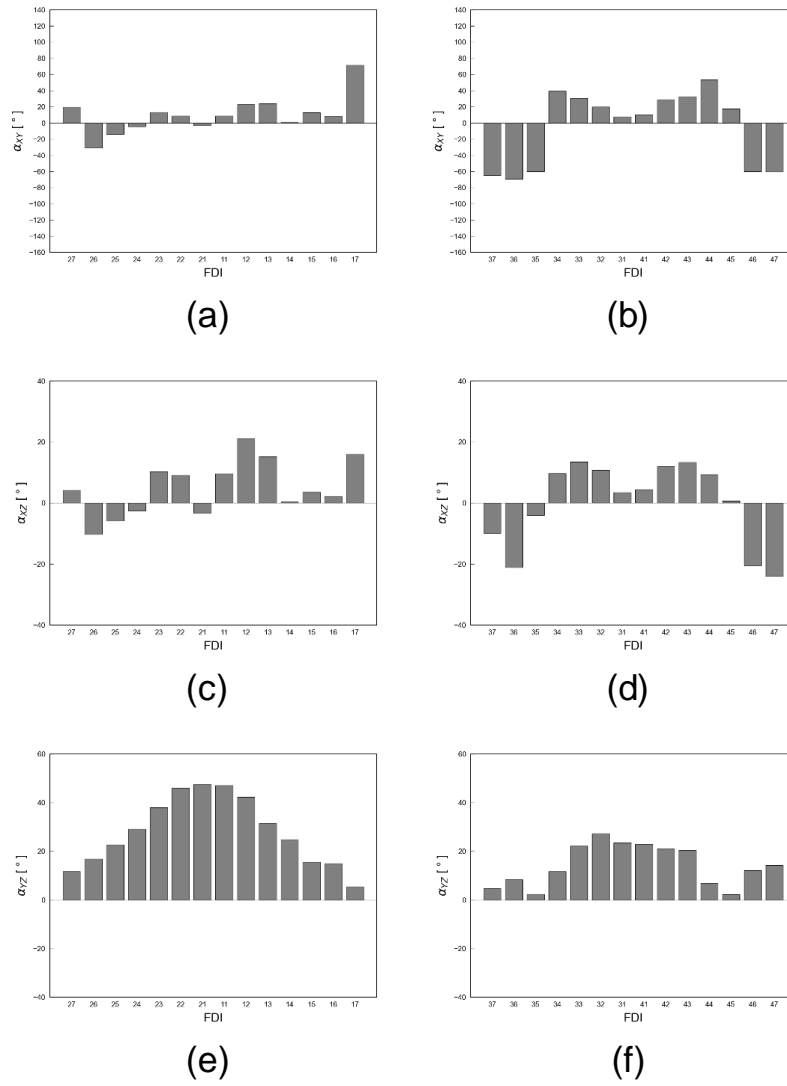


図 5.5.1 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#1). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.



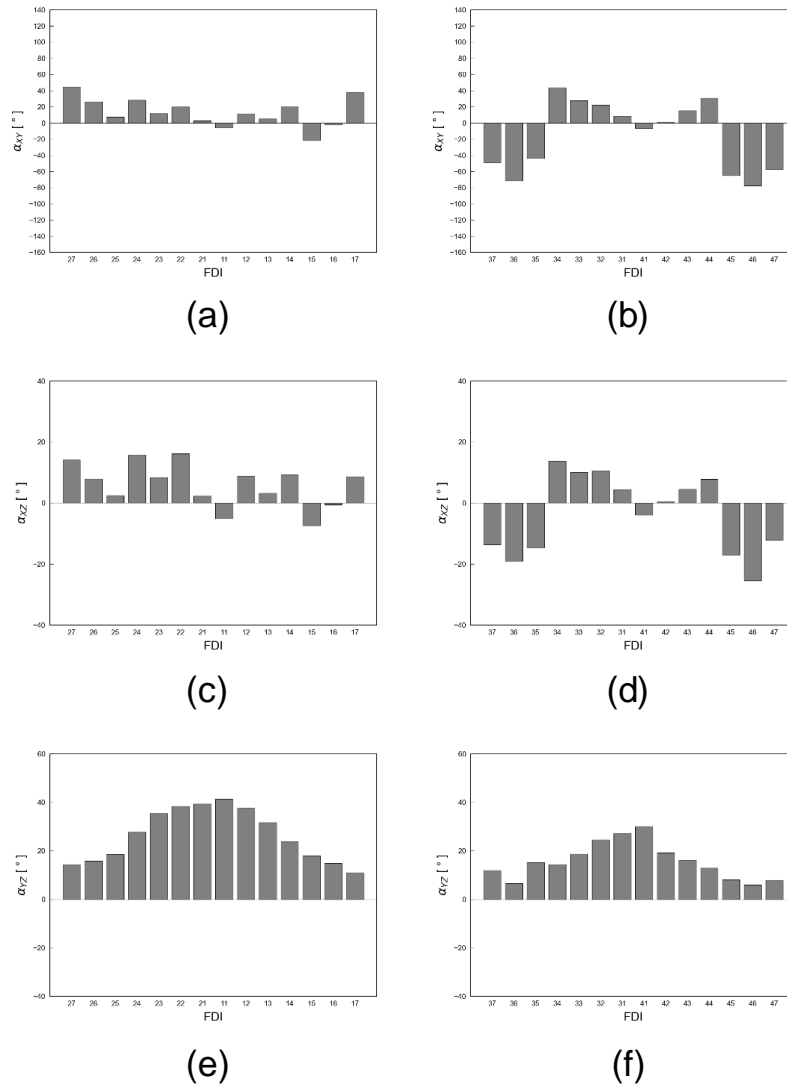


図 5.5.2 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#2). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X -Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

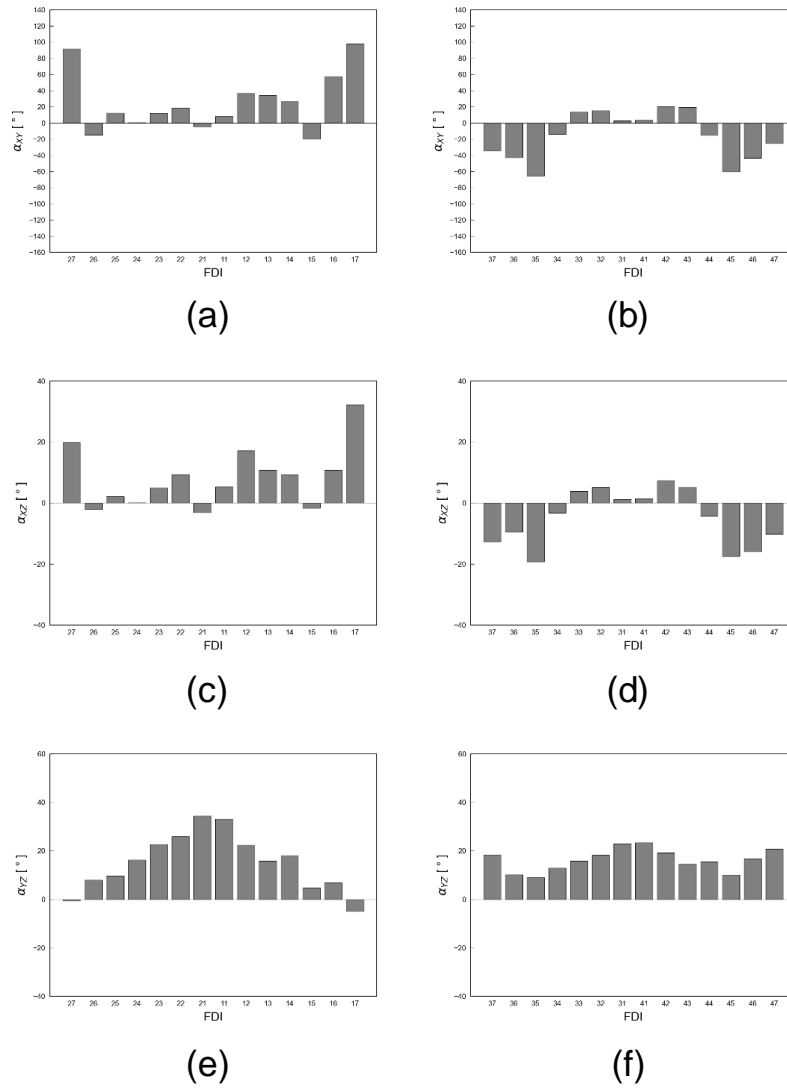


図 5.5.3 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#3). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

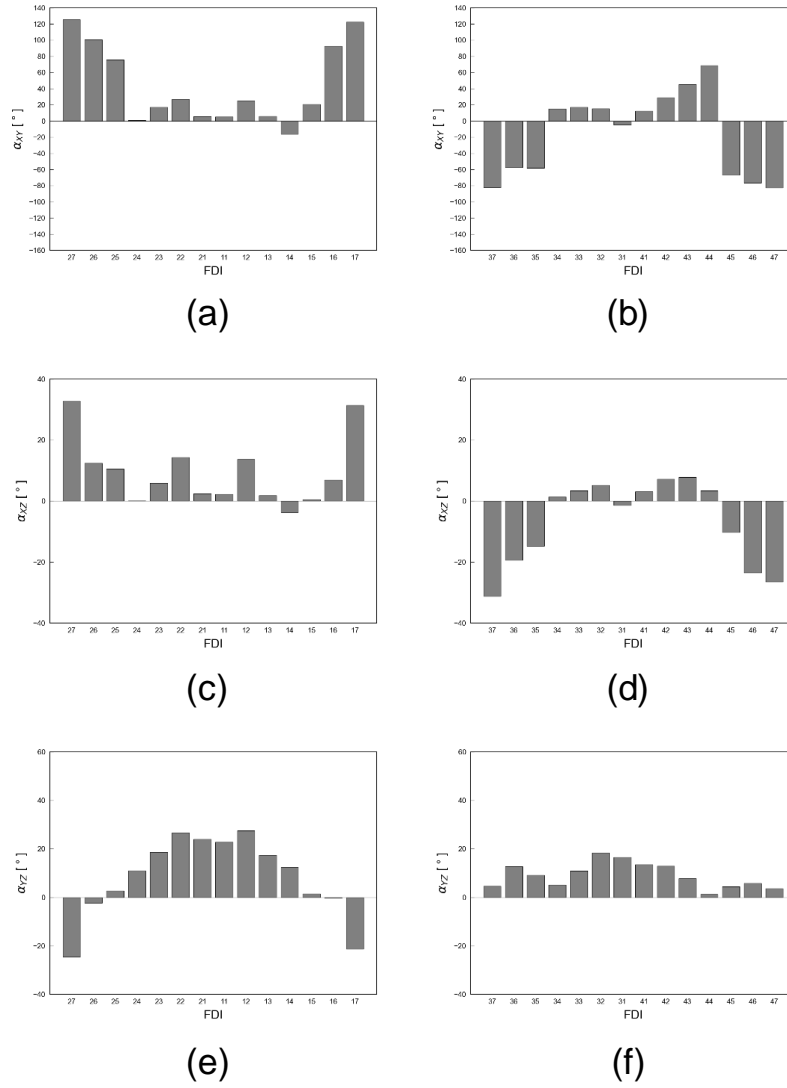


図 5.5.4 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#4). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X -Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

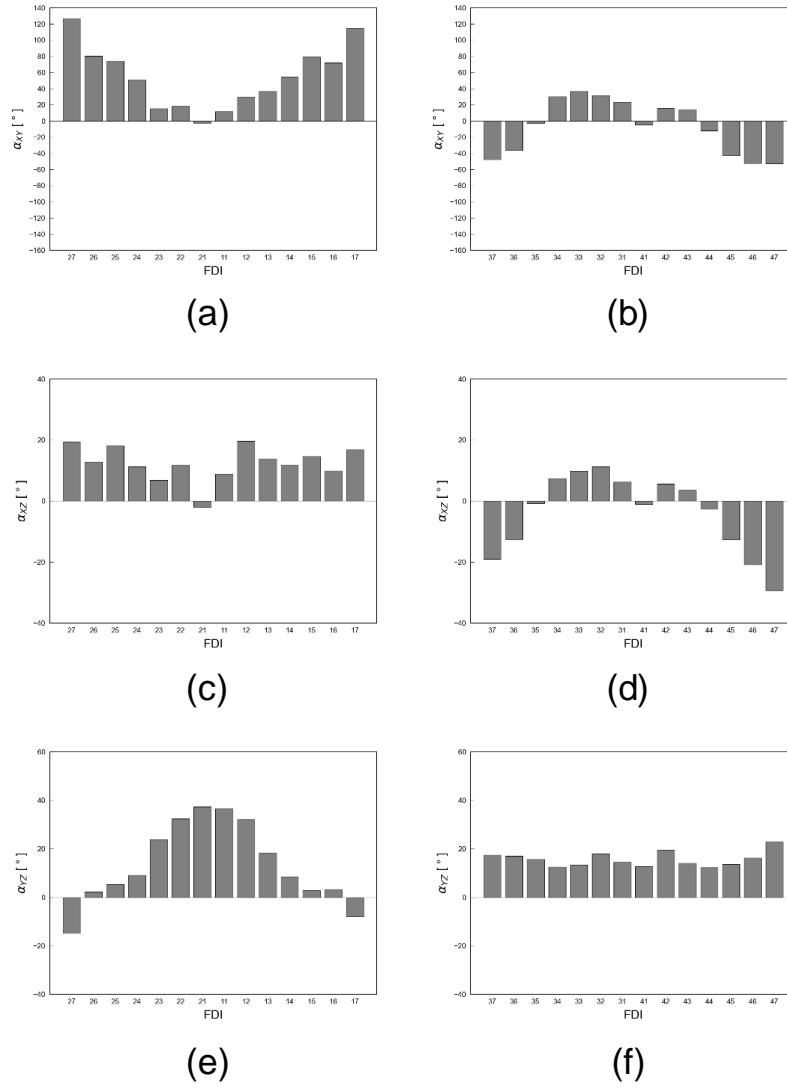


図 5.5.5 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#5). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

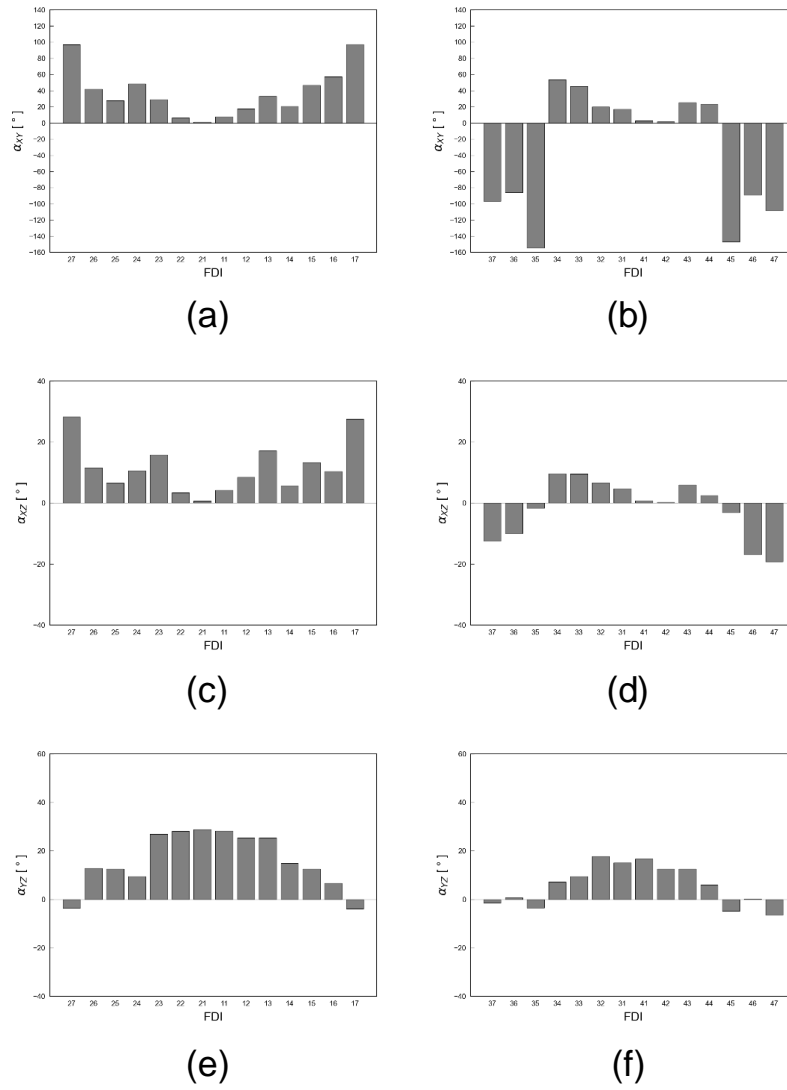


図 5.5.6 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#6). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

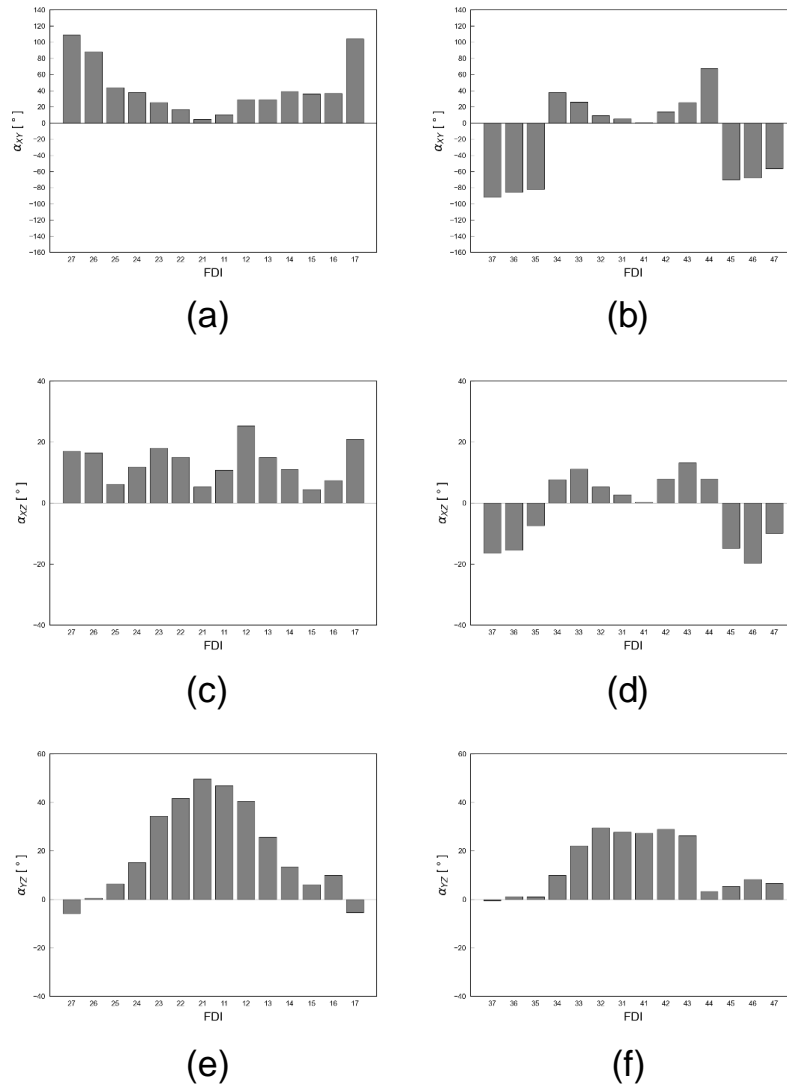


図 5.5.7 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#7). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

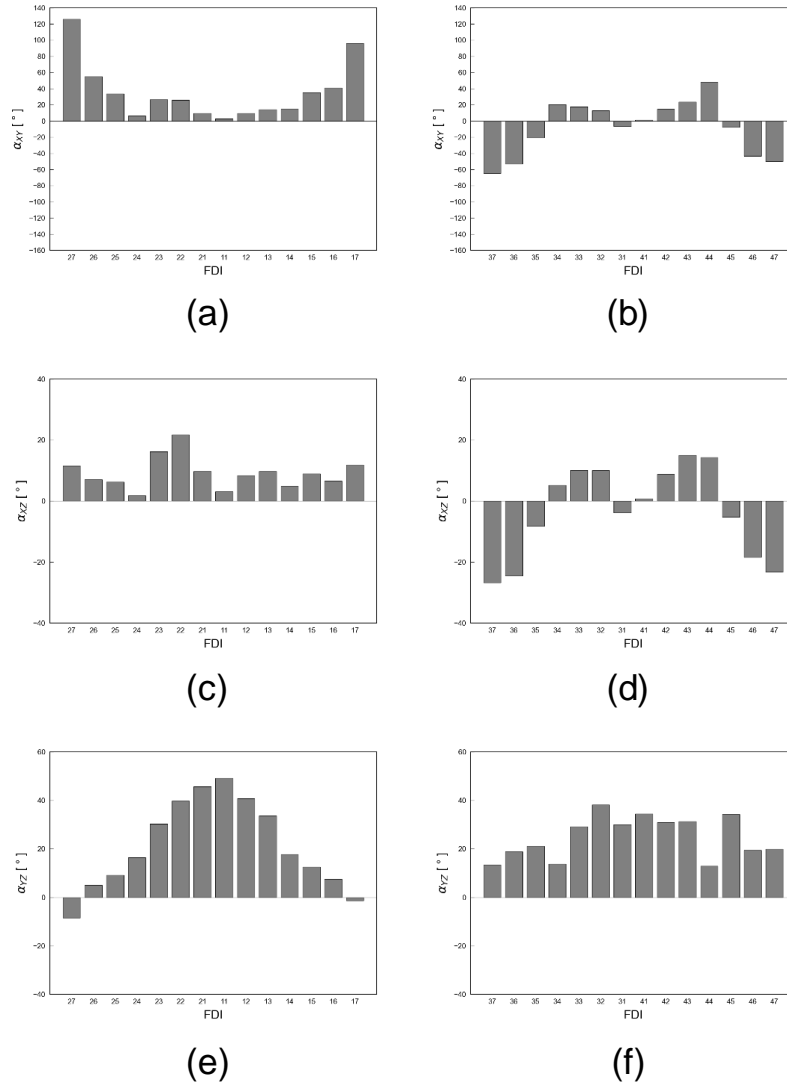


図 5.5.8 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#8). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X -Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

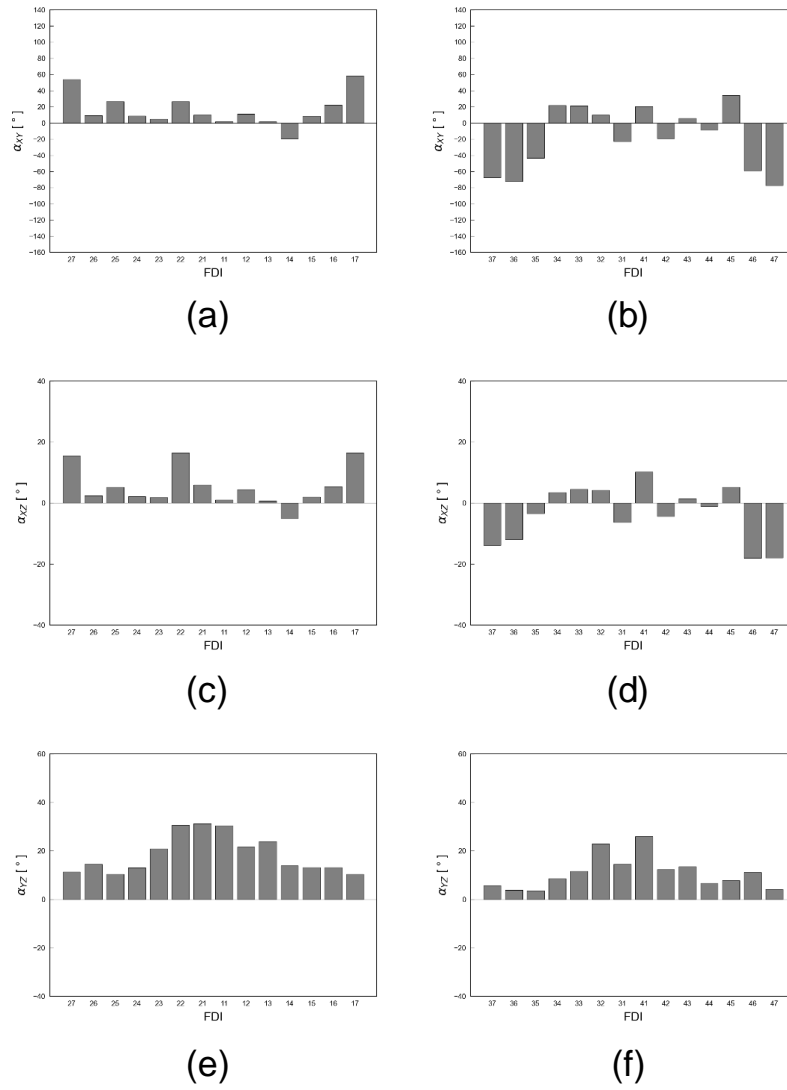


図 5.5.9 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#9). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X -Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.



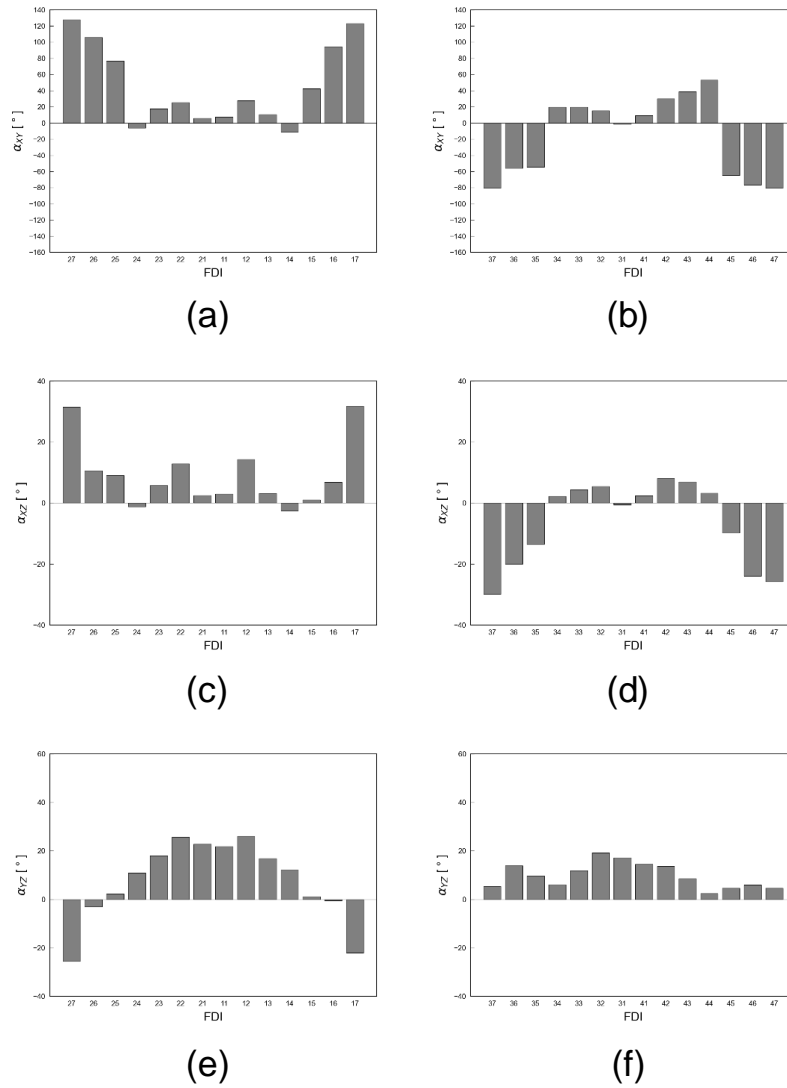


図 5.5.10 PC-A の各平面内角度  $\alpha_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\alpha_{YZ}$  の例 (#10). (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e) Y-Z 平面における上顎歯. (f) Y-Z 平面における下顎歯.

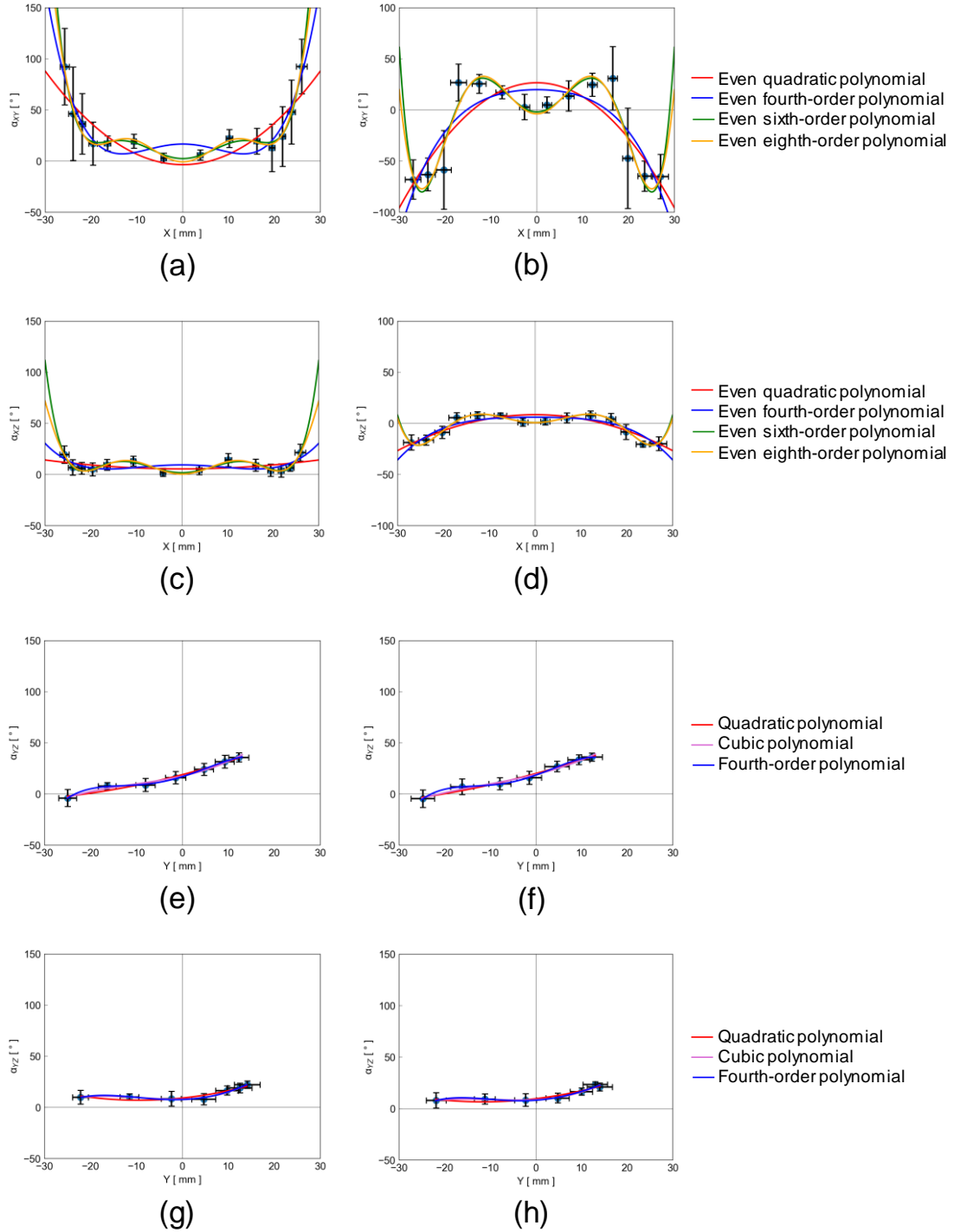


図 5.6 対象者 10 名の 3 平面における歯の平均 COG 位置と平均 PC-A 角度との関係と回帰式. (a)X-Y 平面における上顎歯. (b) X-Y 平面における下顎歯. (c)X-Z 平面における上顎歯. (d)X-Z 平面における下顎歯. (e)Y-Z 平面における上顎右側歯. (f) Y-Z 平面における上顎左側歯. (g) Y-Z 平面における下顎右側歯. (h) Y-Z 平面における下顎左側歯.

表 5.1 3 平面における歯の平均 COG 位置と平均 PC-A 角度の回帰曲線と各点との残差平方和 RSS. (a) X-Y, X-Z 平面の上顎歯. (b) X-Y, X-Z 平面の下顎歯. (c) Y-Z 平面の上顎歯. (d) Y-Z 平面の下顎歯.

(a)			(b)		
Maxillary	X-Y	X-Z	Mandibular	X-Y	X-Z
Even quadratic polynomial	3470.47	395.10	Even quadratic polynomial	6829.25	332.92
Even fourth-order polynomial	1173.20	308.53	Even fourth-order polynomial	6414.13	278.01
Even sixth-order polynomial	196.00	24.96	Even sixth-order polynomial	2199.39	33.78
Even eighth-order polynomial	155.01	17.02	Even eighth-order polynomial	2169.99	33.63

(c)			(d)		
Maxillary	Right: Y-Z	Left: Y-Z	Mandibular	Right: Y-Z	Left: Y-Z
Quadratic polynomial	27.87	25.46	Quadratic polynomial	28.24	24.35
Cubic polynomial	14.29	19.76	Cubic polynomial	6.74	10.34
Fourth-order polynomial	1.70	0.58	Fourth-order polynomial	6.28	9.13

## 5.4 考察

図 5.4.1～図 5.4.10 の X-Y 平面（横断面）における上下顎の歯列回帰曲線は、以前の研究より縦軸に関して対称な 4 次偶多項式で適切に表現できることが確認されている<sup>2)</sup>。また、X-Z 平面（冠状面）での上下顎歯列回帰曲線は、5 個の変曲点を有する 6 次偶多項式で、上下顎歯列を十分に表現できている。さらに、Y-Z 平面（矢状面）における歯列回帰曲線は、左右の歯列で異なる式の 3 次多項式で十分に歯列の特徴を表していることがわかる。

図 5.5(a), (b) の X-Y 平面の  $\alpha_{XY}$  の結果より、上顎歯の  $\alpha_{XY}$  は前歯から後歯になるにつれて大きくなるが常に正の値、すなわち、頬側に向いていることがわかる。これに対して、下顎歯の  $\alpha_{XY}$  は、中切歯 (31, 41)、側切歯 (32, 42)、犬歯 (33, 43)、第一小臼歯 (34, 44) までは正であるが、第二小臼歯 (35, 45)、第一大臼歯 (36, 46)、第二大臼歯 (37, 47) は負の値となり、舌側方向であることがわかる。

図 5.5(c), (d) の X-Z 平面の  $\alpha_{XZ}$  の結果から、上顎歯の  $\alpha_{XZ}$  は常に正であり、その角度は大きくはないが、頬側に歯が傾いていることがわかる。下顎歯の  $\alpha_{XZ}$  は、中切歯、側切歯、犬歯、第一小臼歯までは正であり頬側に向いているが、第二小臼歯、第一大臼歯、第二大臼歯は負であり舌側方向である。

図 5.5(e), (f) の Y-Z 平面の  $\alpha_{YZ}$  の結果より、上顎歯の  $\alpha_{YZ}$  については、第二臼歯以外は常に正であり、前歯ほど  $\alpha_{YZ}$  の値は大きく近心に向いている。また、最も後

歯の第二大臼歯だけは $\alpha_{YZ}$ は負であり遠心に傾いている。下顎歯の $\alpha_{YZ}$ は常に正であり、全ての歯は近心に傾いている。

対象者 10 名の 3 平面における歯の平均位置と平均歯軸角度との関係を表した図 5.6 より、上下顎歯の $\alpha_{XY}$ 、 $\alpha_{XZ}$ および $\alpha_{YZ}$ の平均値の傾向は、図 5.5.1～図 5.5.10 で示した歯軸角度の傾向と同じであった。

本結果から得られた $\alpha_{XZ}$ と $\alpha_{YZ}$ の上下顎歯角度の傾向は、Dempster ら<sup>4)</sup>の 11 死体の頭蓋骨を用いて歯根から歯冠までを考慮して歯軸方向を求めた先駆的研究の $\alpha_{XZ}$ および $\alpha_{YZ}$ の傾向と完全に一致している。Dempster ら<sup>4)</sup>は複数根を有する臼歯では歯根ごとにその方向を表しているが、主成分分析の計算を用いた三次元歯軸 PC-A でも彼ら<sup>4)</sup>の研究結果と同様であることから、PC-A が臨床に使用できることが示されたと考えている。一方、 $\alpha_{XY}$ の値を本手法以外で求めることは困難であると予想されることから、 $\alpha_{XY}$ を定量的に求められることが、本解析法の利点の一つである。

一方、図 5.6 の平均した COG 位置と角度の関係を回帰した曲線と各歯の点との残差平方和 RSS を示した表 5.1 より、 $\alpha_{XY}$ および $\alpha_{XZ}$ に関する上下顎の変数  $x$  との回帰曲線は、変曲点が 5 個の縦軸に関して対称の 6 次偶多項式（表 5.2）で表して十分である。また、左右側歯で分けて表現した変数  $y$  による $\alpha_{YZ}$ の回帰曲線は、3 次多項式（表 5.2）で表してよいことがわかる。回帰曲線は次数を増すほど曲線と各点との適合が良好になることは明らかであるが、その反面、項数が多くなると数式は煩雑となることから、本解析では、できる限り次数が少ない多項式を選択し、6 次偶多項式および 3 次多項式が適切と考えた。図 5.6 の結果は、歯列と歯軸の両因子を含んだものであり、図の解釈には検討すべき点が残されているが、歯全体のアライメントを示す表現法の一つと考えている。

表 5.2 3 平面における COG と PC-A 角度との回帰曲線. (a)  $\alpha_{XY}$  および  $\alpha_{XZ}$  に関する上下顎の変数  $x$  による 6 次偶多項式. (b)  $\alpha_{YZ}$  に関する上下顎の変数  $y$  による 3 次多項式.

(a)

Even sixth-order polynomial		$\alpha_{XY}, \alpha_{XZ} = ax^6 + bx^4 + cx^2 + d$			
		a	b	c	d
Maxillary	$\alpha_{XY}$	$1.22 \times 10^{-6}$	$-9.58 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^1$	2.49
Mandibular	$\alpha_{XY}$	$1.91 \times 10^{-6}$	$-2.21 \times 10^{-3}$	$5.07 \times 10^1$	-1.87
Maxillary	$\alpha_{XZ}$	$6.56 \times 10^{-7}$	$-6.24 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^1$	1.79
Mandibular	$\alpha_{XZ}$	$4.60 \times 10^{-7}$	$-5.44 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^1$	0.86

(b)

Cubic polynomial		$\alpha_{YZ} = ey^3 + fy^2 + gy + h$			
		e	f	g	h
Right: Maxillary	$\alpha_{YZ}$	$1.10 \times 10^{-3}$	$3.36 \times 10^{-2}$	$9.94 \times 10^1$	17.54
Left: Maxillary	$\alpha_{YZ}$	$7.27 \times 10^{-4}$	$2.44 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^0$	19.15
Right: Mandibular	$\alpha_{YZ}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$4.31 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^1$	8.10
Left: Mandibular	$\alpha_{YZ}$	$1.31 \times 10^{-3}$	$3.76 \times 10^{-2}$	$2.32 \times 10^{-1}$	8.78

## 5.5 結言

本章では、個性正常咬合者である成人 10 名の CBCT 画像から、新たに考案した三次元口腔内ワールド座標系を用いて、歯の三次元形状から主成分分析法で求めた三次元歯軸と歯の幾何学的重心から求めた三次元歯列を同時に明らかにした。また、三次元歯軸を横断面、冠状面および矢状面上にそれぞれ投影して、各平面での歯軸角度を定量的に示すとともに、歯の位置と歯軸との関係を表す関係式を単純な多項式で与えることを可能とした。

## 5.6 参考文献

- 1) 坂本信, 坂上勇太 他: コーンビーム CT による前歯部の三次元自動歯軸および歯列決定法. 臨床バイオメカニクス 39: 207-216, 2018.
- 2) 坂上勇太, 坂本信 他: 正常咬合者における三次元歯列曲線と歯軸の数学的解析. 臨床バイオメカニクス 41: 385-392, 2020.
- 3) 坂本信, 春日勇人 他: マイクロ CT を用いた三次元歯軸の評価. 臨床バイオ

- メカニクス 35: 99-104, 2014.
- 4) Dempster WT, Adams WJ, et al.: Arrangement in the jaws of the roots of the teeth. J Am Dent Assoc 67: 779-797, 1963.
  - 5) 坂本信, 春日勇人 他: コーンビーム CT による三次元歯軸の自動決定. 臨床バイオメカニクス 36: 119-125, 2015.

## 第 6 章 結論

本研究において得られた結果を以下に総括して本論文の結論とする．

第 1 章「緒論」では，本研究の背景，意義および目的を述べた．

第 2 章「前歯部の三次元歯軸の決定法」では，成人 5 名の CBCT から得られた中切歯，側切歯，犬歯の合計 60 本の前歯部の歯を対象に，主成分分析法を用いて三次元歯軸を自動決定した結果を示すとともに，検者 3 名による目視による手動歯軸との比較を行った．主成分分析法で求めた自動歯軸と手動歯軸間の相対角度誤差は，平均で中切歯において  $2.6 \pm 1.2^\circ$ ，側切歯で  $1.6 \pm 0.9^\circ$ ，犬歯で  $2.2 \pm 1.3^\circ$  であった．また，重心距離誤差は，中切歯，側切歯，犬歯において，それぞれ  $0.40 \pm 0.20 \text{ mm}$ ， $0.47 \pm 0.25 \text{ mm}$ ， $0.59 \pm 0.32 \text{ mm}$  であり，犬歯で有意に最大となった．これらより，手動で歯軸を決定する場合に，検者間誤差が大きくなりやすい歯根が弯曲し，尖った歯冠形状である犬歯のような形状の歯においては，自動歯軸は有用であることが示された．

第 3 章「ワールド座標系を用いた前歯部の三次元歯軸および歯列決定法」では，歯列を評価するために，CBCT 画像において明確に視認できる下顎の両側オトガイ孔前方と上顎の切歯管の 3 点を特徴点として用いた三次元ワールド座標系を定め，歯の形状重心 COG による三次元歯列を示し，歯軸と歯列の口腔内における三次元絶対位置を同時に自動的に求める新たな手法を提案した．

第 4 章「三次元歯列曲線の解析」では，個性正常咬合者を対象に，三次元口腔内ワールド座標系に基づき，歯の形状重心から求めた三次元歯列を表示する数学的手法を提案するとともに，歯の三次元形状から主成分分析法で求めた三次元歯軸を歯列弓と同時に示した．その結果，上下顎歯列に対して，横断面では 4 次偶多項式，冠状面では 6 次偶多項式，矢状面は 3 次多項式でそれぞれの面内の歯列を数学的に表現できることを示した．

第 5 章「三次元歯軸の解析」では，成人 10 名の上下顎骨を撮影したコーンビーム CT 画像から骨モデルを三次元再構成し，解剖学的特徴箇所である下顎両側オトガイ孔 2 点および上顎切歯管 1 点を利用して口腔内に三次元ワールド座標系を構築し，全ての歯の三次元モデルを作成した．各歯の幾何学的重心（COG）と主

成分分析法で計算した歯軸 (PC-A) を求め、空間内の COG と PC-A を横断面、冠状面および矢状面上に投影して、各平面内での PC-A 角度と COG による歯列を示した。その結果、冠状面では、上顎歯は全て頬側に歯が傾き、下顎歯は、中切歯、側切歯、犬歯、第一小臼歯は頬側に向いているが、第二小臼歯、第一、第二大臼歯は舌側を向く。矢状面では、上顎歯は第二大臼歯だけが遠心側に傾いているのに対し、下顎歯は全て近心側に傾くという一般的な個性正常咬合者の特徴を定量的に明らかにした。さらに、3 平面内における COG 位置と PC-A 角度との関係を表す回帰曲線は、簡潔な多項式で表現できることを示した。

本研究では、主に新たな口腔内ワールド座標系に基づいた三次元歯軸や歯列に関する研究について述べたが、この手法は CBCT 画像取得の際の患者の姿勢や撮像機器に依存しない優れた評価法といえる。本手法を拡張して三次元顎運動解析の研究を現在取り組んでおり、歯のバイオメカニクスの基礎となる考え方を確立したものと考えている。



## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始丁寧なご指導賜りました新潟大学医学部保健学科の坂本信教授に深く敬意を表し，心から感謝を申し上げます．

歯科 CBCT 撮影および診療画像提供等に多大なるご支援を頂きました日本歯科大学新潟生命歯学部 of 亀田剛先生，新潟大学医歯学総合病院歯科放射線科の坂井幸子先生，開志専門職大学の森清友亮先生に深く御礼を申し上げます．

また，衝撃工学・バイオメカニクス研究室での日々の研究生活をご支援して頂いた研究室の皆様には多大なるご助言，ご協力を賜りましたことに深くお礼を申し上げます．

さらに，本論文の作成にあたり，大変貴重なご意見やご指導を頂きました，副指導教官の新田勇教授，平元和彦教授，審査委員の小林公一教授に深く感謝を申し上げます．

最後に研究を遂行するにあたり，研究に対する考え方に的確な指針をいただきました新潟大学自然科学研究科の田邊裕治教授に心より感謝し，厚く御礼申し上げます．