

## Digital dentistry 時代における「顎運動」の必要性

—見えないものを「観る・診る」ために—

重本修伺<sup>a</sup>, 杉元敬弘<sup>b</sup>, 松本勝利<sup>c</sup>, 小川 匠<sup>a</sup>

In the age of digital dentistry, the need for a deeper understanding of jaw movement  
— To observe and diagnose the invisible —

Shuji Shigemoto, DDS, PhD<sup>a</sup>, Norihiro Sugimoto, DDS<sup>b</sup>, Katsutoshi Matsumoto, DDS, PhD<sup>c</sup>,  
and Takumi Ogawa, DDS, PhD<sup>a</sup>

### 抄 録

咬合器を使った間接法から CAD/CAM システムで補綴装置をつくることになりつつある。しかし、どのような補綴装置が機能的に優れているのか的確に答えることは難しい。実証するには、動的な咬合接触や下顎頭の動態など見えないものを「観る・診る」手段が必要であり、「顎運動」はその一つとなり得る。

顎運動と顎口腔の形態を収集・統合・解析することで「顎運動」をできるだけ具体化、標準化する必要がある。今回は、顎機能の検査・診断および補綴装置の設計・製作を可能とする「次世代歯科用 CAD/CAM システム」の現状を紹介し、Digital dentistry 時代における「顎運動」の必要性について解説する。

### キーワード

Digital dentistry, 顎運動, 次世代歯科用 CAD/CAM システム

### ABSTRACT

In recent years, the fabrication of prosthetic devices is rapidly changing from the traditional method using mechanical articulators to using CAD/CAM systems. However, it was still difficult to answer clearly even which occlusal surface morphology has superior functionality. To answer the above, it is necessary to have a means to “observe and diagnose” invisible things such as dynamic occlusal contact and condylar movement, and to integrate and analyze jaw movement data and morphological data of the oral and maxillofacial region to standardize as much of “occlusion and jaw movement” as possible. In this article, we will introduce our research activities on “next-generation dental CAD/CAM system” that enables the examination and diagnosis of jaw function and the design and fabrication of prosthetic devices and explain the necessity of deeper understanding for jaw movement in the age of digital dentistry.

### Key words:

Digital dentistry, Jaw movement, Next-generation dental CAD/CAM system

<sup>a</sup> 鶴見大学歯学部クラウンブリッジ補綴学

<sup>b</sup> スギモト歯科医院

<sup>c</sup> あらかい歯科

<sup>a</sup> Department of Fixed Prosthodontics, Tsurumi University School of Dental Medicine

<sup>b</sup> Sugimoto Dental Clinic

<sup>c</sup> Arakai Dental Clinic

## I. Digital dentistry 時代の今 なぜ顎運動なのか？

歯科治療，なかでも補綴治療の意義を評価するための評価項目や治療の目標を「形態と機能」の「回復と維持」とすることに間違いはないと思われる。しかし，その評価は科学 (Science) 的ではなく，患者の主観や歯科医師の経験に基づく知識や技術，すなわち匠 (Art) に依存している部分が多いのが現状である。

咀嚼，嚥下，発音などの顎機能は主として下顎に運動を行わせた結果として生まれ，この顎運動にともなって「咬合」という現象が起こる。咬合が変化すると本人の意思に拘わらず顎運動も変化すると報告もある<sup>1)</sup>。顎運動を正確に記録し可視化できれば，咬合・顎運動の標準化 (用語や基準の統一) につながり顎機能のより正確な観察と診断が可能となる。これによって歯科医療従事者は自分がおこなっている治療の確実な指標を得て，治療レベルが向上し国民に質の高い歯科治療を提供できる。一方，患者は歯科治療によって自分の咬合機能がどのように変化し改善したかを客観的に知ることができ歯科治療への高い満足度を得ることができる。

「顎運動」は，歯科診療の客観的な評価基準の確立の一助となり得ると期待できる。

## II. 見えないものを観る・診るために

咬合器を使った間接法から CAD/CAM システムで補綴装置をつくるのが一般的となる時代になりつつある。患者個々の機能に調和した安心・安全な補綴装置の客観的な設計・製作方法を確立する必要がある。しかし，咬合に関連する臨床術式は，歯科医師や歯科技工士の経験や技術に頼っている主観的な部分が多い。患者の形態的・機能的障害を，どのように診断し治療計画を立てるのか，またいつ最終補綴治療に移行するのか，補綴装置は何を指標に設計するのか，そのためには，どのような情報がいつ必要となるのか，など数多くの「問題」に答えなければならない。どのような補綴装置が機能的に優れているのかさえた確に答えることは現状では難しい。これらを実証するためには，咀嚼時など機能時の動的な咬合接触や下顎頭の動態など直接見えないものを「観る・診る」手段が必要であり，「顎運動」計測は有効な手段となり得ると考えている。

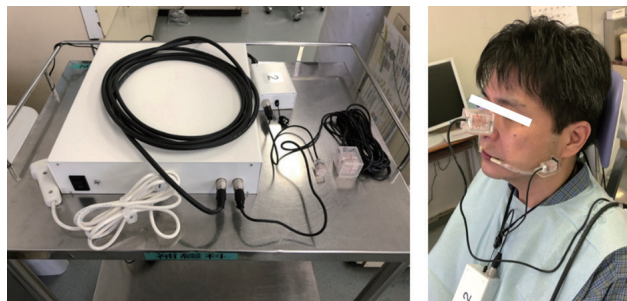


図 1 Electro-magnetic jaw tracking device  
磁気ベクトル空間方式顎運動測定器

## III. 次世代歯科用 CAD/CAM システムの開発

顎運動と顎口腔領域の形態を記録し，それらを統合・解析することで「咬合・顎運動」についてできるだけ多く具体化し，標準化が可能になると考えている。そこで，我々は顎運動の計測および解析技術の開発研究を中心に，顎機能の検査・診断および補綴装置の設計・製作を可能とする「次世代歯科用 CAD/CAM システム」の実用化研究を進めている。

### 1. 可視化システム

次世代 CAD/CAM システムに必須の技術として，「可視化」技術がある。これは，顎運動計測技術，形態計測技術および顎運動情報と形態情報の重ね合わせ技術で構成される。

生体が咬合面形態に要求する精度は  $20\ \mu\text{m}$  程度<sup>2-4)</sup>とされている。近年の CAD/CAM の普及にともない現在では，高い計測精度を有する歯科用の三次元形状計測器の入手が可能となった。補綴装置の設計・製作に顎運動を活用するためには，顎運動測定器にも同程度の測定精度が求められるが，日常臨床で咬合解析に必要な精度で簡便に記録できる顎運動測定器は存在しない。徳島大学と鶴見大学小川研究室で共同開発している磁気ベクトル空間方式顎運動測定器<sup>5)</sup> (図 1) は，上下顎に一对の小型三軸センサを装着するだけで，絶対精度 0.3% で，1 mm 移動時の最大誤差が 0.003 mm と高精度測定が可能であり咬合解析に必要な精度を実現している。

CT 撮影で得られた DICOM データは顎顔面頭蓋骨の関心領域についてセグメンテーション処理後，頭蓋骨および下顎骨の STL (Stereolithography) モデルを CT 座標系で製作する。歯列石膏模型を模型スキャナで計測し，歯列の STL モデルをスキャナ座標系で製作する。磁気ベクトル空間方式顎運動測定器を用い

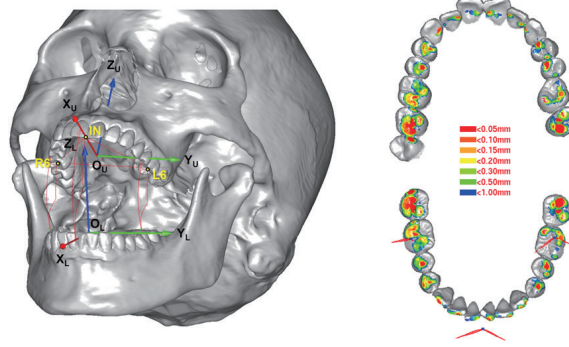


図2 Reference coordinate system and visualization of jaw movement  
顎運動座標系と顎運動の可視化

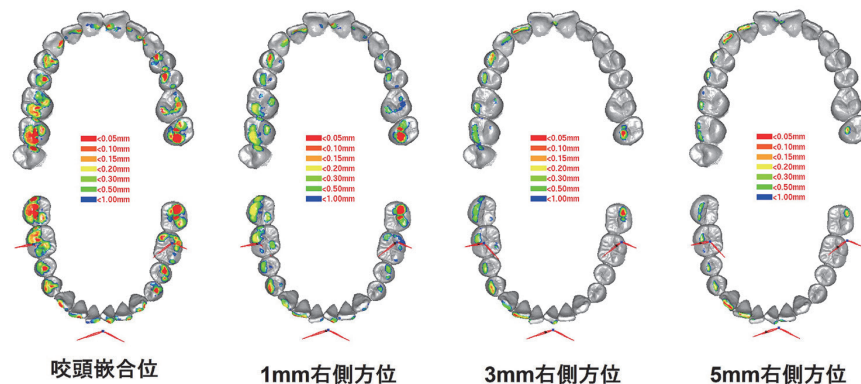


図3 Visualization of dynamic occlusion during the right lateral excursion  
動的咬合接触の可視化

て顎運動測定を行う（サンプリング周波：100Hz）。顎運動座標系は図2に示す上顎歯列上の3標点（切歯点IN，左右第一大臼歯中心窩L6，R6）をとる上顎咬合平面座標系（ $O_U-X_UY_UZ_U$ ）で前方，左方，上方を正とする右手座標系である。上顎咬合平面座標系と下顎咬合平面座標系（ $O_L-X_LY_LZ_L$ ）は咬頭嵌合位で一致するように設定している。形態と顎運動の座標系を顎運動座標系に統一することで，直接観察できない機能運動時の咬合接触状態や関節窩に対する下顎頭の位置を仮想空間上で可視化することができる（図2）。咬合の可視化では，上下歯列間距離が50  $\mu\text{m}$ 以下（赤色領域）を咬合接触と判定する。

歯科臨床における咬合の診査法としては，その簡便性から咬合紙が用いられていることが多い。最近では感圧フィルムを用いて定量的に評価できるようになった。しかし，これらの診査法では上下歯列間に咬合紙や専用のシートなどを介在させる必要がある。機能時の「動的な」咬合接触関係を判定するためには可視化システムが必須である。図3に左右側方滑走運動時の可視化結果を示す。咬頭嵌合位から右側方滑走運動に伴って上下歯列の咬合接触部位およびクリアランス

量が変化していることが分かる。咬合面間に何も介在させずに，動的な咬合接触像とクリアランス量を客観的および定量的に観察することが可能である。

#### IV. 次世代歯科用CAD/CAMシステムの現状

可視化技術はヒトの形態と機能を仮想空間上で再現できることから歯科用CAD/CAMシステムに有効な技術であるが，顎機能情報をCAD/CAMにいかに関与するかが課題である。解剖学的だけでなく機能的にも意義のある基準点，基準軸，基準面を設定する必要がある。我々は機能的な基準軸として全運動軸と最小運動軸を採用し顎機能評価ならびに補綴装置の設計に応用している。

##### 1. 全運動軸と最小運動軸

全運動軸（Kinematic Axis：KA）<sup>6)</sup>は河野によって発見された回転軸で，下顎頭内に位置していて，下顎がどのような矢状面内運動をしても，その運動経路は上下幅が0.5～0.7mmのごく狭い帯状の顎路となり，この顎路内を前後的に移動しながら回転する軸であ

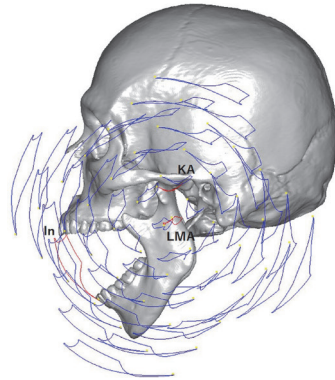


図4 Jaw movement trajectories at various points of the mandible during sagittal border jaw movement (IN: upper incisor point, KA: Kinematic axis, LMA: Least motion axis).  
矢状面内限界運動の多点運動軌跡 (In: 切歯, KA: 全運動軸, LMA: 最小運動軸)

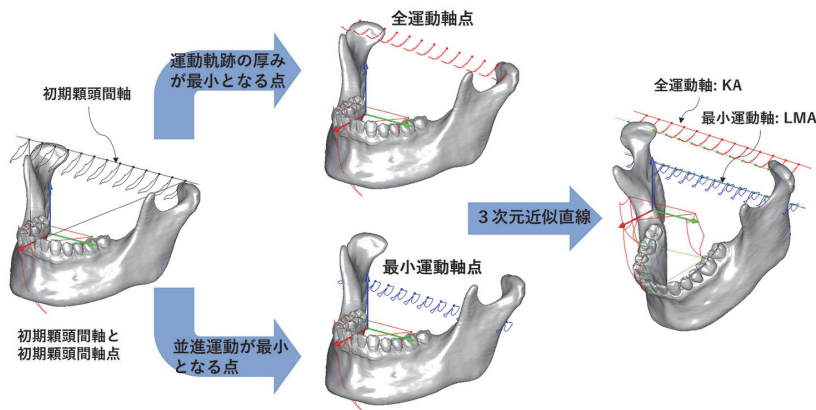


図5 Determination of KA and LMA  
全運動軸と最小運動軸の推定方法

る。この軸によって初めて下顎頭の運動が回転と並進とに分離できるようになった。

最小運動軸 (Least Motion Axis : LMA) は、我々が発見した新しい顎運動の回転軸である。下顎が運動できる下顎限界運動野は、切歯点では Posselt Figure として、下顎頭の付近では最も収斂した KA としてよく知られている。矢状面内限界運動時の多点運動軌跡は同心円状を呈しており、回転中心あるいは並進運動範囲が最小となる点が存在すると考えられた。その点が軸状に分布することを発見し、これを LMA とした (図 4)。

KA, LMA ともに矢状面内運動から推定できるが、我々は主として矢状面内限界運動を被験運動としている。Shigemoto らの方法<sup>7)</sup> に準じて Bonwill 三角の一辺を 100 mm, Balkwill 角を 20° としたときの三角形の底辺を初期顎頭間軸とする。この顎頭間軸上に 10 mm 間隔で初期顎頭間軸点 13 点を設定する。それぞれの初期顎頭間軸点をとる各矢状面上の運動軌

跡の厚みが最小となる点 (全運動軸点 : KAP) を算出し、得られた 13 点の全運動軸点の 3 次元近似直線を求め KA とした。同様にそれぞれの基準点をとる各矢状面上の並進運動が最小となる点 (最小運動軸点 : LMAP) を算出し、得られた 13 点の最小運動軸点の 3 次元近似直線を求め LMA とした (図 5)。

## 2. 全運動軸と最小運動軸でなにが分かるのか？

KA と LMA を算出、解析することで顎機能評価や補綴装置の設計に必要な情報を得ることができる。ここでは、いくつかの具体例について解説する。

### 1) 最終補綴開始時期の客観的指標

我々は先に述べたように 13 点の KAP あるいは LMAP の 3 次元近似直線をそれぞれ、KA, LMA としている。顎機能健常者 (図 6-a) では、すべての KAP の顎路は下に凸の曲線状に収斂し運動論的な左右差は認めない。また、すべての KAP は KA の近傍に分布している。顎機能健常者では、各軸に運動論的

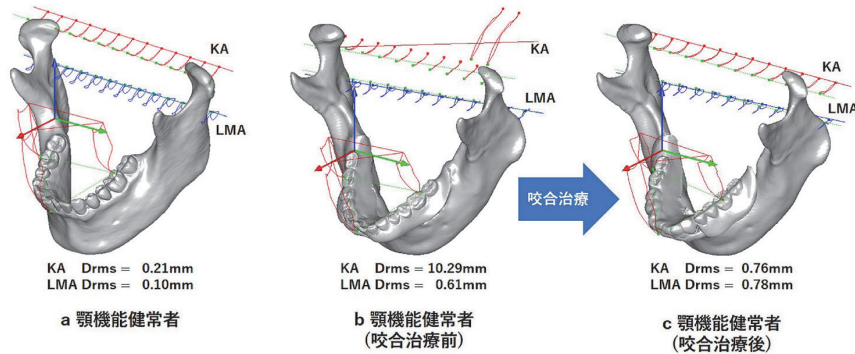


図6 Kinematic axis and Least motion axis of an asymptomatic volunteer and a patient with limitation of movement of left temporomandibular joint  
顎機能健常者と顎機能異常者の全運動軸と最小運動軸

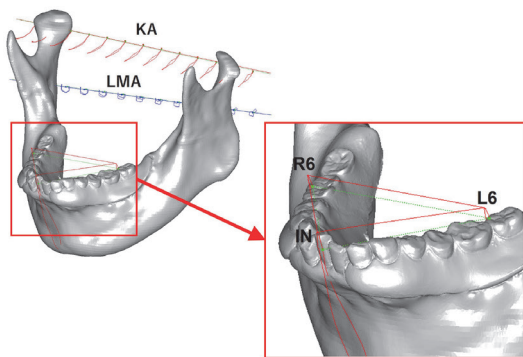


図7 Evaluation of the range of the mandibular condyle's mainly rotational movement during mouth closing  
下顎頭回転運動範囲の評価

左右差はなく、LMAはKAに対しほぼ平行で、前下方(前方約5mm, 下方約30mm)に存在する<sup>8)</sup>。一方、顎機能異常者(図6-b)では、KA(P)は下顎頭から離れた位置に算出される<sup>10)</sup> 場合があることは驚くことにあまり知られていない。術前にKAが算出できなかった症例で、治療後にKAが算出可能となると顎機能が改善したと判定できる(図6-c)。これは、最終補綴開始時期の客観的指標になり得る。

健常者群45名と補綴治療を必要とする患者群45名から算出したKAPと推定したKAの距離の二乗平均平方根(Drms)を求めた結果から、現時点ではDrms<3.0mmの場合を軸として算出可とする客観的基準としている<sup>11)</sup>。同様にLMAPとLMAの距離のDrmsを求めた結果、健常者群45名、患者群45名のすべての被験者で算出可能であった。2022年1月9日現在、延べ165名の顎運動測定を実施しているが、すべての測定で顎機能異常の有無にかかわらずLMAは求められた。ただし、治療に伴いDrmsの数値や軸の位置や姿勢が変化するなど顎機能の質の判定が可能になる。

## 2) 咬合高径および治療顎位の妥当性の判定

石原ら<sup>12)</sup>は、新たな咬頭嵌合位を作る下顎位の第1の決定基準は下顎頭が安定位(顎頭安定位)にあることであるとしている。咬頭嵌合位に至る習慣性閉口運動時に下顎頭が顎頭安定位で回転している範囲(下顎頭回転運動範囲)で咬合高径(咬合挙上量)を変化させ得るとしている。KAを下顎頭の回転軸とすると、図7に示す症例では、閉口運動時に咬頭嵌合位より切歯点(IN)で約5mm開口時にKAは咬頭嵌合位付近(約0.5mm)に復位している。このことからこの症例はこの範囲内で咬合高径(咬合挙上量)を機能的に決定することができる。また付与した治療顎位が下顎頭回転運動範囲にあることを確認することで治療顎位の妥当性を評価できる。

## 3) 咬合平面の決定

下顎の並進運動量は下歯槽神経血管束の走行から過度な伸展を避けるために下顎孔付近で最小になる<sup>13)</sup>との報告がある。我々は、最小運動軸は下顎孔開口部の後上方に求められる<sup>9)</sup>ことを明らかにした。Fernandesらは、矢状面において下顎孔上方は咬合平面の延長線上に位置すると報告している<sup>14)</sup>。また、Ogawaら<sup>15)</sup>は、矢状面において咀嚼閉口路の切歯点における咬合平面に対する入射角は90°であるとしている。

以上のことより、矢状面において下顎の回転中心は下顎頭付近ではなく咬合平面付近にあるべきとの仮説をたて、顎機能健常者45名の上顎咬合平面(顎運動の基準座標系)と上顎切歯点(IN)とLMAを含む平面(IN-LMA平面)に対する閉口路入射角について検討した。その結果、それぞれの平面に対する閉口路入射角は切歯点、第一大臼歯において共に平面間に有意な差を認めず、強い正の相関を認めたことからLMA

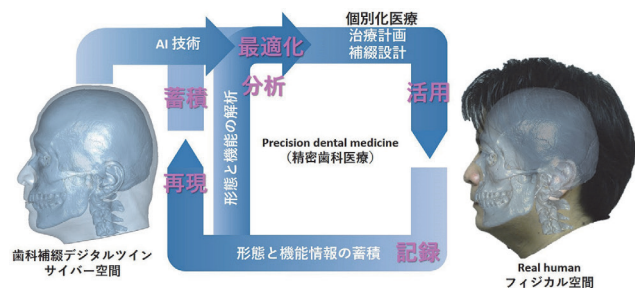


図 8 Digital twin in prosthodontics  
歯科補綴デジタルツイン

は、咬合平面を定量的に決定できる機能的指標となり得る<sup>16)</sup>。

## V. まとめ

KA, LMA を解析することは、治療顎位の妥当性、治療効果の判定、最終補綴の開始時期決定などの客観的な指標になり得る。LMA は、KA が得られない症例の機能的基準軸や、咬合平面決定の機能的指標となり得る。

今後、形態と機能データを蓄積、解析することで、我々が開発している「次世代 CAD/CAM システム」を発展させ「歯科補綴デジタルツイン」(図 8) を構築することを目指している。「デジタルツイン」は製造業などの他の産業分野に比較して歯科領域では、なじみの薄い技術であるが、「デジタル化」をさらに発展させた技術で、仮想空間に現実空間(形態と機能)を正確に再現することで患者の仮想モデルを構築することである。この仮想モデルを AI 技術などにより分析することで、有用性の高い治療方法の決定や予後予測を可能にするなど臨床において大変意義のある技術である。「デジタルツイン」は、従来の CAD/CAM システムによる補綴装置の製作だけではなく、検査から始まり診断、治療、経過にいたる治療サイクルのほとんどをデジタル化、ビッグデータとして活用するプラットフォームを構築することで、より良い歯科医療を提供する技術のことである。これにより精密歯科補綴(Precision dental prosthodontics)による個別化補綴医療を実現したいと考えている。これは「補綴の根幹」の再認識とその維持・発展に貢献できるものと期待している。

## 文 献

- 1) 西川啓介. 顎運動と咀嚼筋活動に及ぼす咬合接触の影響. 補綴誌 1989; 33: 822-35.
- 2) Hasegawa S et al. Occlusion of full cast crown at the intercuspal position. Bull Tokyo Med Dent Univ 1981; 28: 53-60.
- 3) 池田隆志ほか. 強い咬合接触が顎口腔系に及ぼす影響—症状および歯の移動, 咬合接触状態の変化について—. 顎機能誌 1987; 6: 81-6.
- 4) Lundqvist S et al. Occlusal perception of thickness in patients with bridges on osseointegrated oral implants. Eur J Oral Sci 1984; 92: 88-92.
- 5) 重本修何ほか. 顎口腔機能情報を活用する次世代歯科用 CAD/CAM システムの構築—顎運動測定器の開発と応用—. 顎機能誌 2018; 25: 44-5.
- 6) 河野正司. 下顎の矢状面内運動に対応する顎頭運動の研究 第二報マルチフラッシュ装置による矢状面運動軸の解析. 補綴誌 1968; 12: 350-80.
- 7) Shigemoto S et al. Effect of an exclusion range of jaw movement data from the intercuspal position on the estimation of the kinematic axis point. Medical Engineering and Physics 2014; 36: 1162-7.
- 8) 伊藤崇弘ほか. 下顎運動情報を用いた運動論的基準軸の空間的特徴の検討. 顎機能誌 2017; 23: 132-3.
- 9) Hirai S et al. Relationship between the mandibular movements and deformation of the coronoid process and the condyle. The journal of Japan Association of Oral Rehabilitation 2016; 29: 35-40.
- 10) 長谷川成男ほか. 6 自由度顎運動測定器のこと. 補綴誌 1998; 42: 928-31.
- 11) 伊藤崇弘ほか. 顎機能異常者における運動論的基準軸の検討. 顎機能誌 2019; 25: 108-9.
- 12) 石原寿郎ほか. オーラル・リハビリテーションの 1 症例における下顎位の診断. 補綴誌 1969; 13: 204-11.
- 13) Smith RJ. Functions of condylar translation in human mandibular movement. Am J Orthod 1985; 88: 191-202.
- 14) Fernandes A C S et al. Mandibular foramen location and lingula height in dentate dry mandibles, and its relationship with cephalic index. Int J Morphol 2015; 33: 1038-44.
- 15) Ogawa T et al. Correlation between inclination of occlusal plane and masticatory movement. J Dent 1998; 26: 105-12.
- 16) Ito T et al. Proposal of functional landmark for determining occlusal plane. J Jpn Soc Stomatognath Funct 2019; 26: 1-7.

著者連絡先: 重本 修何

〒230-8501 神奈川県横浜市鶴見区鶴見 2-1-3  
Tel: 045-580-8416  
Fax: 045-573-9599  
E-mail: shigemoto-s@tsurumi-u.ac.jp