

〔原著〕

## 咀嚼運動における平均経路予測モデルの開発

林 一夫, 溝口 到

北海道医療大学歯学部口腔構造・機能発育学系歯科矯正学分野

## Development of a statistical predictive model for chewing cycles

Kazuo HAYASHI, Itaru MIZOGUCHI

Department of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido

## Abstract

The purpose of this study was to develop a new statistical model to predict mandibular kinematics, especially for chewing cycles. Two subjects without indicators or symptoms of temporomandibular disorders and with normal occlusion and anterior crossbite were selected. The chewing movement of the mouth was recorded by an opto-electric system (TRIMET system). Each curve was modeled as spline function with random coefficients. To determine the optimal number of knots, two criteria were used: DIC (deviance information criteria) and pD (effective number of parameters). The aim was to estimate a typical population curve. Self-modeling regression (SEMOR) was extended to three dimensions to model groups of three-dimensional curves. Each curve was modeled as a spline function using 25 knots, and a population average curve was created using SEMOR. The chewing cycles were modeled using a combination of spline function with random coefficients and SEMOR. These models provide a new tool for the analysis of mandibular kinematics to understand commonalities and difference among subjects.

**Key words** : Statistical model, chewing cycle, three-dimensional analysis

## 緒 言

顎運動の解析とその評価は、顎矯正手術の診断や治療方針の決定に不可欠である。近年、計測技術の進歩により下顎の運動を三次元的に記録可能なシステムが広く用いられている（友寄ら, 2002; Saitoh et al., 2007; Oguri et al., 2003; Leader et al., 2003）。これらの解析装置から得られる情報量は非常に多いにもかかわらず、実際はその一部の情報のみを用いてきた。二次元的な解析は臨床家にとって比較的理解しやすく、臨床的にもある程度対応できた。多くの顎運動解析は下顎に規定された単一の任意点に関する二次元的なものであった（中谷ら, 1997; Nagata et al., 2002）。しかしながら、顎運動は三次元的運動であり、生体力学的研究にも三次元的な解析が必要とされている。また複数回の咀嚼運動にお

ける下顎任意点の軌跡に関しても平均的な軌跡を二次元的にモデル化する場合はほとんどであり（志賀ら, 1990）、母集団の平均経路を三次元的に予測できる統計モデルの開発と顎運動解析への応用は、ほとんど行われていない。よって本研究では、スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルおよびSelf-Modeling Regression (SEMOR) モデルを三次元解析に拡張し、平均的な咀嚼経路の三次元的予測が可能な新しい統計モデルを開発するとともに、顎運動解析への応用を試みた。

## 対象および方法

対象は、骨格的にI級、正常な被蓋関係を有し顎関節に症状の無いボランティア1名（27歳：女性）および北海道医療大学歯科内科クリニック矯正歯科に来院した骨

受付：平成20年3月31日

格性の反対咬合を持つ患者1名(21歳:男性)をそれぞれ選択した。本研究の趣旨を説明し同意が得られた後,6自由度顎運動測定器(TRIMET:東京歯材社)を用い顎運動の測定を行った。計測は被験者の頭部を固定せず自然頭位となるようにリラックスさせた状態で行った。チューインガム1枚を自由に咀嚼させ十分軟化した後,右側,左側ごとに16咀嚼サイクルを記録した。咀嚼開始後4サイクルから13サイクルまでの10サイクルを解析対象とした。図1は,本研究で用いた顎運動測定器(TRIMET)と設定した座標系を示す。本研究では下顎中切歯近心隅角の中点(切歯点)の三次元的軌跡(曲線)を用いて新しい統計モデルの開発を行った。図2は,正常被蓋および反対咬合被験者において解析された左側咀嚼運動時の切歯点の全軌跡(10サイクル)を示す(各軌跡の三次元データをY-Z平面に投影し表示している)。本研究に用いられた被験者の左右咀嚼サイクル(切歯点)は正常被蓋および反対咬合被験者それぞれにおいてほぼ左右対称であり,以降の解析は左側咀嚼サイクルについてのみ行った。各サイクルの開口開始点はZ座標を基に志賀ら(1990)の方法に準じて決定した。

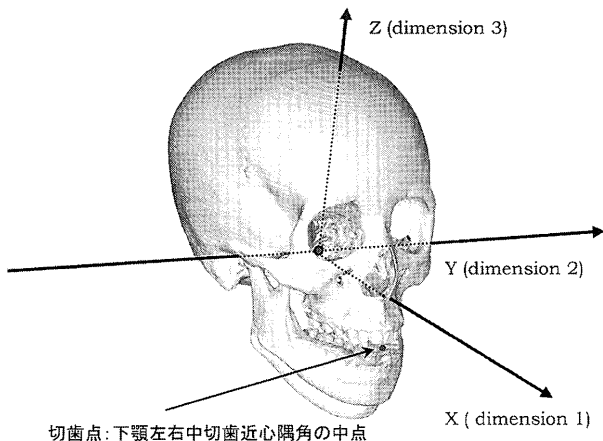
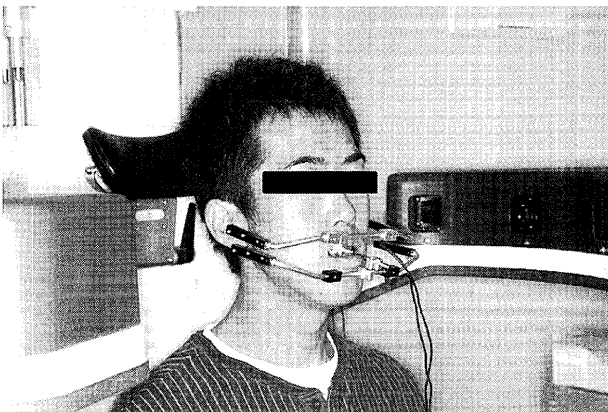


図1:本研究で用いた顎運動測定器(TRIMET)と設定した座標系。X, Y, Z方向をそれぞれdimension 1, 2, 3とした。今回は切歯点の軌跡を解析対象とした。

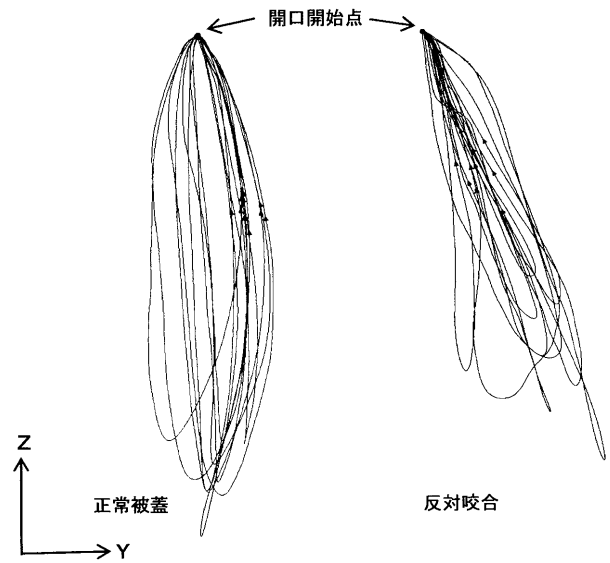


図2:今回計測された左側咀嚼運動時の切歯点の全軌跡(10サイクル)を示す(各軌跡の三次元データをY-Z平面に投影し表示している)。

DIC (Deviance Information Criteria) および pD (effective number of parameters) による最適な接点数の決定



決定された接点数でスプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルによる各咀嚼サイクルのモデル化



三次元に拡張されたSEMOR (Self-modeling regression)による代表的な咀嚼経路(曲線)の予測

図3:本研究において用いられた三次元平均経路予測モデルの解析フローチャート。

### 平均経路予測モデルの開発

図3は本研究において新しく開発された三次元的平均経路予測モデルのフローチャートを示す。この予測モデルの特徴としては,スプライン関数を応用したノンパラメトリック回帰モデルと,三次元解析に拡張されたSelf-Modeling Regression (SEMOR) モデルを統合的に用いたことである。

#### 1) 最適な接点数の決定

先ず初めに,スプライン関数を適用する場合,最適な

接点数を決定する必要がある。本研究ではDeviance Information Criteria (DIC) とeffective number of parameters (pD) を最適な接点数決定の基準とした (Spiegelhalter et al., 2002)。基本的にDICが小さいほど効果的なモデルであり、pDが小さいほど単純なモデルであると考えられる。

2) 各サイクルのモデル化

最適な接点数の決定後、スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルで各サイクルをそれぞれモデル化した。次に、本研究で用いられたノンパラメトリック回帰モデルの正当性を検証する目的で、実測値とモデル曲線の重ね合わせを行った。

3) SEMORによる平均経路の予測

一般的にSEMORは次の式で表わされる。

$$y_{i,j} = f [\beta_i, g\{m(t_{i,j}, \beta)\}] + error_{i,j} \quad (1).$$

$\beta_i$ は変換パラメーターのベクトル、 $m$ と $f$ は一変量パラメトリック関数、 $g$ は非特定の形状関数であり、通常ノンパラメトリック的に評価される。本研究では、SEMORを三次元解析に拡張し、母集団 (10サイクル) の平均的な経路を予測した。

結 果

スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルの最適な接点数を決定するためにDICとpDが計算された。表1はその計算結果を示す。接点数を5~30に設定しそれぞれ計算を行った。接点数25においてDICが-7367となり最小の値を示した。pDは1368であった。よって本研究において用いられた被験者における切歯点の軌跡の解析には25の接点数が最適であると決定した。次に本研究で用いられたモデルの正当性を検証する目的で、正常被蓋被験者の1つの実測値と算出されたモデル曲線の重ね合わせを行った。図4はその結果を示す。X, Y, Zの各次元をそれぞれDim 1, Dim 2, Dim 3とした。モデル曲線と実測値は全dimensionでほぼ同一で

表1 最適な接点数の決定に用いられた基準と計算結果

接点数	DIC	pD
5	4883	315
10	-3625	634
15	-5102	850
20	-7325	1170
25*	-7367	1368
30	-6956	1593

\* 最適な接点数

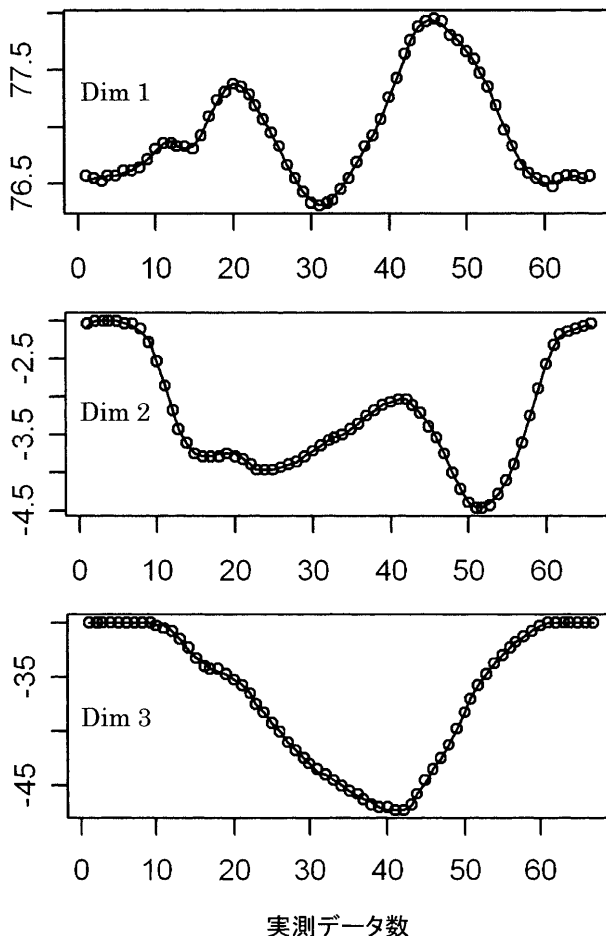


図4: スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルの正当性を確認する目的で行われた実測値とモデル曲線の重ね合わせ。各点(丸)が実測値を示し、実線がモデル化された曲線を示す。縦軸は各dimensionの座標値、横軸は測定数を示す。モデル化された曲線と実測値は全dimensionでほぼ同一であり、モデルの正当性が確認できた。

あった。この結果は、計測誤差および計算誤差が非常に小さいことを示し、本研究で用いた回帰モデルの正当性が確認された。次に、三次元に拡張されたSEMORを用いて10サイクルの平均的な経路を予測した。本研究で用いられたSEMORは精度よく各dimensionの平均経路を予測できた。図5は、正常被蓋被験者における各dimensionにおける全モデル曲線と算出された平均経路の重ね合わせを示す。平均経路の算出自体は三次元データをそのまま用いたが、理解しやすいようdimension毎に表示した。図6は、反対咬合被験者における各dimensionにおける全モデル曲線と算出された平均経路の重ね合わせを示す。

考 察

顎運動解析は、計測機器の発達により三次元的な解析が可能となってきた。しかしながら、三次元データ解析には数学的に高度な知識が必要とされ、また高度な統計

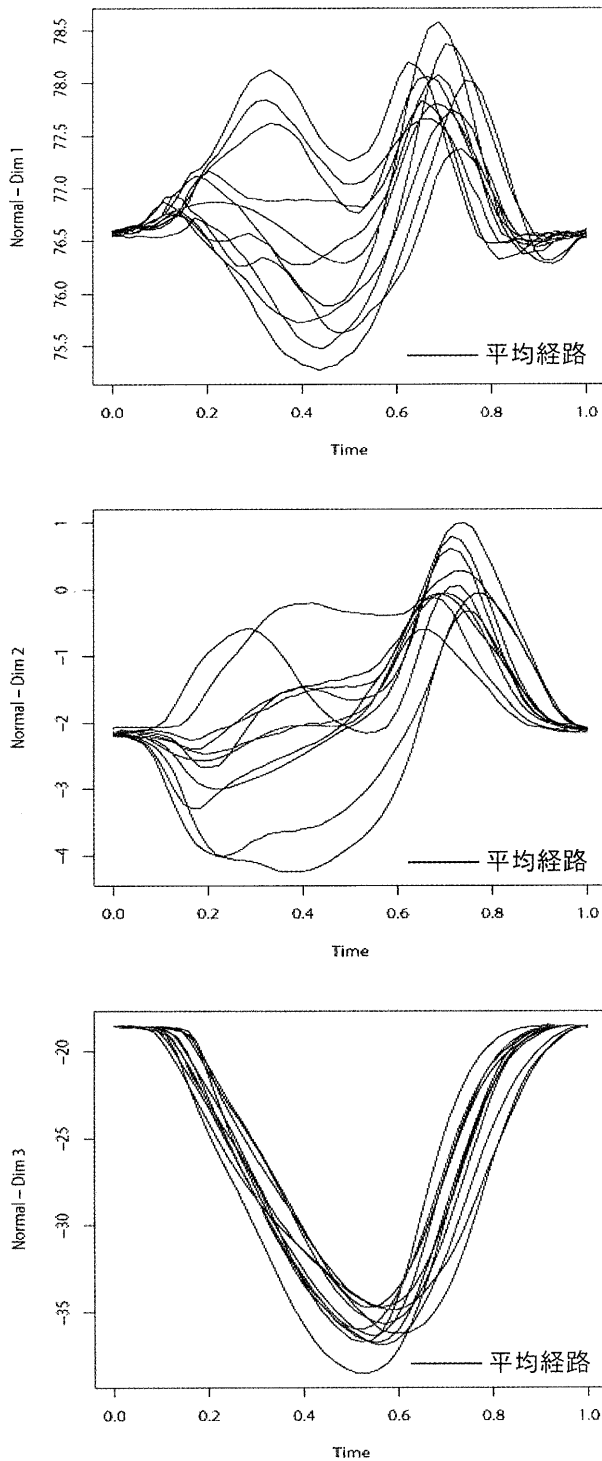


図5：正常被蓋被験者における左側咀嚼サイクルでの各dimensionにおける全咀嚼サイクルと予測された平均経路を示す。黒実線が各咀嚼サイクルを、赤実線が予測された平均経路を示す。縦軸には各座標値、横軸にはサイクルの継続時間を示す（0＝開口開始時、1＝終了時）。

処理も生体の機能的な動きを解析する手段としての存在意義が大きくなってきている。近年、曲線などの集合体から得られた抽出点の形状を解析するノンパラメトリック解析への関心が高まっており、興味の対象としてその曲線自体に焦点を当てた手法は、functional data analysisとして知られている（Ramsay and Silverman, 1997）。変

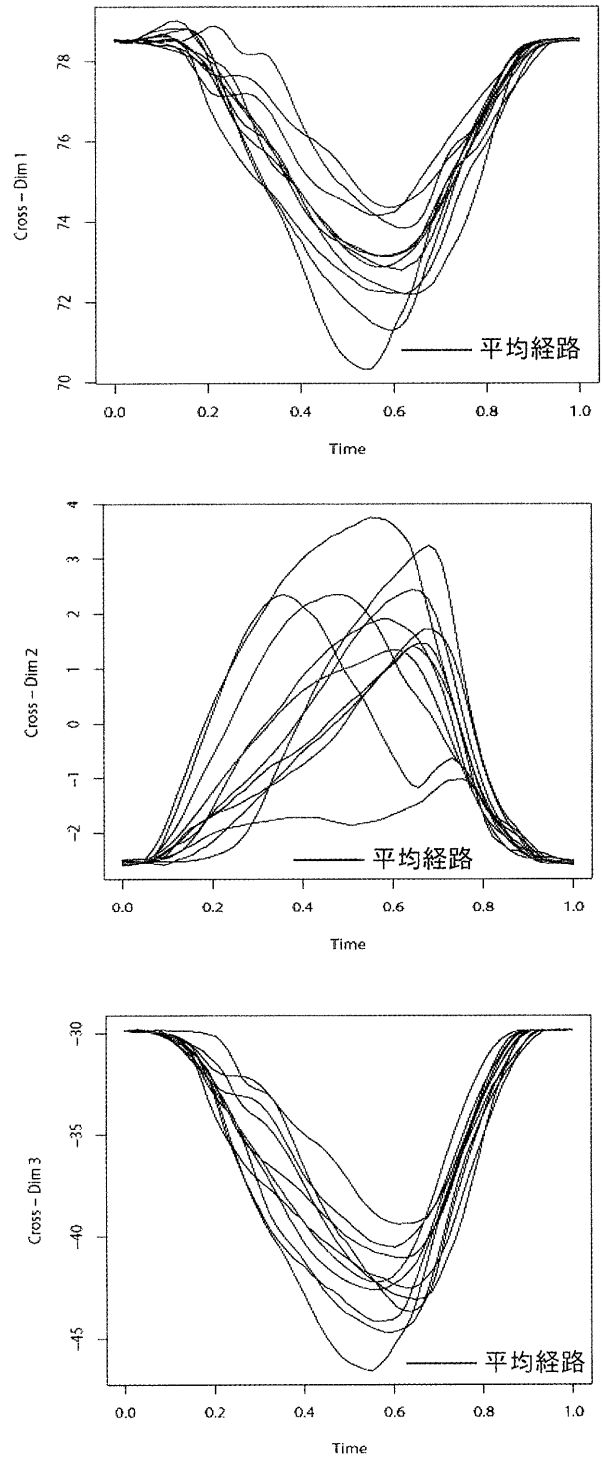


図6：反対咬合被験者における左側咀嚼サイクルでの各dimensionにおける全咀嚼サイクルと予測された平均経路を示す。黒実線が各咀嚼サイクルを、赤実線が予測された平均経路を示す。縦軸には各座標値、横軸にはサイクルの継続時間を示す（0＝開口開始時、1＝終了時）。

量係数を用いたスプライン関数などのモデル化の手法は、個々の曲線が不規則にサンプリングされた点群で構成される場合に効果的である（Rice and Wu, 2001）。切歯点や顎頭点など顎運動解析に用いられてきた様々な運動の軌跡も不規則にサンプリングされたデータがほとんどである。志賀ら（1990）は二次元の咀嚼経路データを

もとに中心咬合位から開口位までを10分割し、不規則な点データを規則的な点データに変換し解析を行った。この手法はデータの補間を線形的な計算により求めているため実際の値からのずれが生じると考えられる。比較的単純な形状を示す軌跡の解析においてはあまり問題にならないと思われるが、複雑な形状解析に応用することは難しい。本研究では、スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルを用いることによって不規則データを直接解析でき、より精度よく各サイクルをモデル化することができた。また、本研究ではSEMORを用いて複数の軌跡を代表する平均経路を算出することができた。一次元のSEMORについては幾つか報告されているが (Guardabasso et al., 1998; Lindstrom, 1995)、二次元解析への応用はほとんど報告されていない (Ladd and Lindstrom, 2000)。今回我々は、SEMORをさらに三次元解析まで拡張させ顎運動解析に応用した。この結果は更なる拡張が可能であることを示している。顎運動は多次元の運動である。時間軸やその他のパラメーターを含めた形での多次元解析が、本研究による手法を用いることによって可能になると考えられる。Buschangら (2000) は、咀嚼サイクルの定量化においてその代表的な曲線を得るためにmultiple objective criteriaを基にした新しい手法をすでに開発している。本研究との大きな違いはスプライン関数を用いたかどうかである。スプライン関数は曲線のフィッティングにおいて最適な方法であると認識されており (Lindstrom, 1995)、より効果的に曲線の近似が行える。

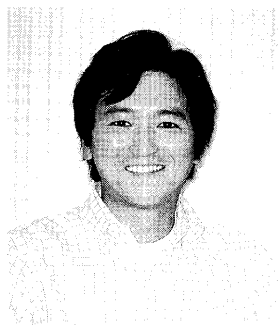
本研究による手法を用いて平均的な曲線 (経路) を異なった母集団で求めることにより、より詳細で精度のよい比較評価が行えると考えられる。算出された平均経路間における違いは、いくつかの評価パラメーターで解析することができる。スプライン関数の最適な接点数の決定に用いられたDICやpDもそのパラメーターとして用いることができる。また、接点毎の95%区間を設定し、その値がゼロ点を含むかどうかなどでも評価が可能である。本研究では、開口初期と閉口終末期以外の咀嚼経路において正常被蓋被験者と反対咬合被験者間に統計学的に有意な違いが認められた。しかしながら本研究のサンプル数は各1名であり、今後、大きな母集団での評価が必要である。

本研究では、スプライン関数を用いたノンパラメトリック回帰モデルと三次元へと拡張されたSelf-Modeling Regression (SEMOR) モデルを複合的に用いることによって顎運動基準点の平均的な経路を予測する新しい統計モデルの開発を行い、その臨床応用の可能性を検討し

た。本研究における方法は、顎運動解析の新たな評価基準を提供し、より詳細で定量的な評価法を提供することができると考えられる。

## 文 献

- Buschang PH, Hayasaki H and Throckmorton. Quantification of human chewing-cycle kinematics. Arch Oral Biol 45 : 461-474, 2000.
- Guardabasso V, Munson PJ and Rodbard D. A versatile method for simultaneous analysis of families of curves. FASEB J2 : 209-215, 1988.
- Ladd WM, Lindstrom MJ. Self-modeling for two-dimensional response curves. Biometrics 56 : 89-97, 2000.
- Leader JK, Boston JR, Debski RE and Rudy TE. Mandibular kinematics represented by a non-orthogonal flating axis joint coordinate system. J Biomech 36 : 275-281, 2003.
- Lindstrom MJ. Self-modeling with random shift and scale parameters and a free knot spline shape function. Statistic in Medicine 14 : 2009-2021, 1995.
- Nagata M, Yamasaki Y, Hayasaki H and Nakata M. Incisal and condylar paths during habitual mouth opening movement of children with anterior reverse bite in the primary dentition. J Oral Rehabil 29 : 64-71, 2002.
- 中谷 豊, 中村俊弘, 石川晴夫. 骨格性反対咬合者の咀嚼リズム. 日矯歯誌56 : 170-170, 1997.
- Oguri Y, Yamada K, Fukui T, Hanada K and Kohno S. Mandibular movement and frontal craniofacial morphology in orthognathic surgery patients with mandibular deviation and protrusion. J Oral Rehabil 30 : 392-400, 2003.
- Ramsay J, Silverman B. Functional data analysis. New York ; Springer 1997.
- Rice JA, Wu CO. Nonparametric mixed effects models for unequally sampled noisy curves. Biometrics 57 : 253-259, 2001.
- Saitoh I, Tokumori J, Hayasaki H, Iwase Y, Raoquig H, Yamasaki Y and Nonaka K. Correlations between incisor and condylar movements during lateral excursion in children with primary dentition. J Oral Rehabil 34 : 800-806, 2007.
- 志賀 博, 小林義則. 咀嚼運動の分析による咀嚼機能の客観的評価に関する研究. 補綴誌 34 : 1112-1126, 1990.
- Spiegelhalter DJ, Best NG, Carlin B and Van der Linde A. Bayesian Measures of Model Complexity and Fit. J R Stat Soc, Ser B 64 : 583-616, 2002.
- 友寄裕子, 萬代弘毅, 菅原準二, 三谷英夫. 下顎非対称を伴う骨格性下顎前突症の咀嚼運動経路の特徴 —顎顔面・顎関節形態および咬合状態との関連性—. Orthodontic Waves 61 : 367-391, 2002.



林 一夫

北海道医療大学歯学部口腔構造・機能発育学系歯科矯正学分野

略歴

平成7年3月 北海道医療大学歯学部卒業

平成11年3月 北海道医療大学大学院歯学研究科歯学専攻博士課程修了・学位取得

平成11年4月 北海道医療大学歯学部矯正歯科学講座 助手

平成15年10月 ミネソタ大学歯学部口腔科学科 客員研究員（平成17年9月まで）

平成18年1月 北海道医療大学歯学部矯正歯科学講座 講師（現在に至る）

所属学会

日本矯正歯科学会・認定医・指導医

日本顎関節学会