

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K11935

研究課題名(和文) ジェネレーティブデザインを応用した顎偏位形態予測と顎偏位軽減治療システムの確立

研究課題名(英文) Establishing the preventive therapy of jaw deviation using prediction by the generative design method

研究代表者

齋藤 功 (Saito, Isao)

新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号：90205633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、顎変形症例(顔面非対称・顎偏位併発)に対し、コンピュータの大規模計算によって構造力学上最も適した形態を模索するジェネレーティブデザイン法という手法を顎偏位形態の再現に応用し、顎偏位を引き起こす不均衡な咀嚼筋作用を同定することで、顎偏位が惹起される力学的な背景を解明する。その結果、顎偏位のパターンが7つに分類され、これまで定量的な分析が不可能であった顎偏位に対して、その把握に不可欠な観点が明らかとなった。その一方で、大規模解析であるジェネレーティブデザイン法は、顎顔面形態の形態変化を予測するために用いることは難しく、さらなるICTの高度化が待たれることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまで複雑で無数の形状が考えられるとされていた顎偏位を定量的に分析し、かつパターン化できたことは、今後の顎偏位を伴う顎変形症例に対する外科的矯正治療へ大きく寄与する。これらの顎偏位パターンを臨床で特に成長期での症例に適用し、後ろ向き研究として顎偏位の成立と増悪に関与する因子を特定できる可能性が示唆され、偏位の軽減あるいは増悪の抑制を図るための最適な治療法を科学的根拠に基づいて決定できるシステムの構築が可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to reproduce jaw morphology by a method called a generative design method that seeks the most suitable morphology in structural mechanics by large-scale computer calculation for jaw deformity cases (face asymmetry/jaw deviation). By applying it and identifying the unbalanced masticatory muscle action that causes the jaw deviation, we clarify the mechanical background that causes the jaw deviation. As a result, the patterns of jaw displacement were classified into seven patterns, and it became clear that the jaw displacement, which had been impossible to quantitatively analyze up to now, was essential for understanding the displacement. On the other hand, it was revealed that the generative design method, which is a large-scale analysis, is difficult to use for predicting the morphological change of the maxillofacial morphology, and further advancement of ICT is awaited.

研究分野：歯科矯正学

キーワード：顎変形症 顔面非対称 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景 (図1)

近年、矯正臨床において、顔面非対称・顎偏位を伴う顎変形症患者の増加を実感する。新潟大学医歯学総合病院においても、顎変形症と診断し、顎矯正手術を併用する外科的矯正治療適応症患者のうち、顎偏位を呈する患者が全体の約5割を占めるに至っている。

偏位が生じる原因として、「恒常的に加わる負荷-咀嚼による応力の左右非対称」に起因した下顎骨成長の左右不均衡が考えられてきた(Mongini F. et al.)。すなわち、片側に過剰な負荷がかかることにより、成長が抑制または促進されるという説である。これまで我々は、頭蓋骨全体の応力分布とそれによる骨の変形過程を明らかにするため、反応拡散系のプログラミングが組み込まれた骨リモデリングシミュレーションソフト iBONE(Tezuka K. et al.)を用いて、下顎骨の偏位増悪過程および頭蓋骨を用いた応力解析とシミュレーションを試み、咀嚼筋の不均衡、習慣性咀嚼によるメカニカルストレスと上下顎骨のひずみとの間には関連性のあることを明らかにしてきた。さらに、最も偏位が増悪すると考えられる成長期における咀嚼筋の作用による顎骨内応力分布についても3次元有限要素解析を行い、メカニカルストレスのアンバランスと顎偏位増悪の関連についても検討を行ってきた。

これらの研究結果によって、習慣性咀嚼により生じる負荷の偏在によって顎偏位および顔面非対称が惹起される可能性について力学的な裏付けが得られたものの、その結果引き起こされる顎偏位の形態については、未だ予測が困難との現状がある。これは、顎偏位症例では長期にわたる外力によって形状が変化し、力学的に最適化された顎骨や骨梁構造を有していると考えられ、従来の顎骨内応力によるひずみを積算して形状を得る有限要素解析では、形態予測として不十分であるためと推察される。そこで、我々は力学的に最適化された構造を求めるために、近年、デザイン工学の分野で注目されている「ジェネレーティブデザイン」を顎偏位の予測に応用できないかと考えた。ジェネレーティブデザインとは、コンピュータに形状データとともに複数の条件を与えて計算させることで、形状の自動生成と構造計算のシミュレーションによる改良のフィードバックを膨大な回数繰り返し、与えた条件に適合した無数のパターンの中から構造力学上、最も理想的な形状を模索する手法である。この手法を用いることで、顎骨に不均衡な咀嚼力が作用した場合の外力に拮抗するのに最適な顎骨形態、すなわち顎偏位形態が再現することが可能となる。この顎偏位再現モデルと実際の症例を比較・照合し、顎偏位を惹起する筋機能バランスを同定することで、顎偏位の原因を早期に把握し、軽減・予防する治療システムの構築を試みる。

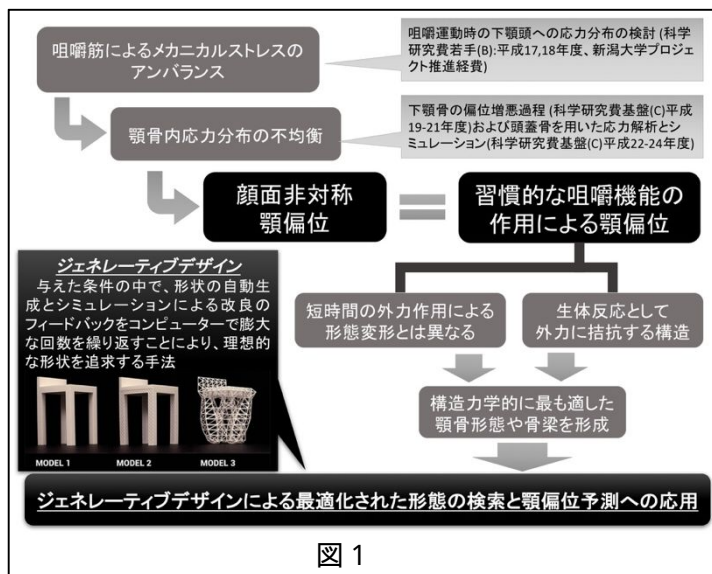


図1

参考文献:

1. Mongini F. et al. Craniomandibular and TMJ Orthopedics
2. Tezuka K. et al. Computer-simulated bone architecture in a simple bone-remodeling model based on a reaction-diffusion system. J. Bone Miner. Metabol. 23, 1-7, 2005.
3. 齋藤 功,他 : (総説)顔面非対称と顎・咬合の偏位、新潟歯学会雑誌 40 (2): 111-123, 2010.

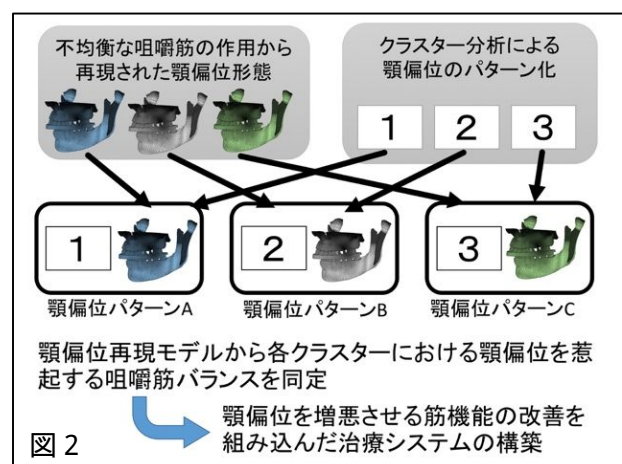
4. Saito, I, Watanabe, N: Class III facial asymmetry and surgical orthodontic treatment.
In: Peter Ngan, et al. eds. Class III eBook. Bentham Science Publishers, 2014, 250-280.

2. 研究の目的

本研究の目的は、顎変形症例（顔面非対称・顎偏位併発）に対し、工学的手法を用いて顎偏位形態の予測を試みるとともに、その結果から顎偏位の予測と軽減を目的とした効果的、効率的な治療システムを構築することである。すなわち、コンピュータの大規模計算によって構造力学上最も適した形態を模索するジェネレーティブデザイン法という手法を顎偏位形態の再現に応用し、顎偏位を引き起こす不均衡な咀嚼筋作用を同定することで、顎偏位が惹起される力学的な背景を解明する。さらに、得られた結果をもとに、顎偏位を増悪させると考えられる筋機能メカニズムから顎偏位の形態変化を予測し、早期から顎偏位の増悪を防ぐための効果的な治療を選択できる診断システムの確立を目指す。

3. 研究の方法（図2）

本研究では、ジェネレーティブデザイン法を用いて、アンバランスな咀嚼筋作用によって形成される顎偏位形態の再現を試みる。さらに、実際の顎偏位症例の3次元形態計測のデータをもとにクラスター分析を用いて顎偏位パターンのグループ化を行い、特徴の抽出を行う。顎偏位再現モデルと各クラスターの特徴を比較することで、顎偏位が引き起こされる力学的バランスを同定した上で、咀嚼筋機能から顎骨形態の予測を行い、顎偏位を抑制または軽減化する治療システムを確立する。実際には、下記の3ステップで検討を行った。



【顎偏位再現モデルの作成】

顎偏位を伴わない症例のCT画像から3次元顎骨モデルを作成し、モデリングソフトウェア Simpleware (Simpleware Inc., UK) を用いて3次元ソリッドモデル(上下顎骨、関節円板、歯、歯根膜)を作成する。完成したソリッドモデルはNURBS形式データとして、ジェネレーティブデザインアプリケーション Autodesk Withinへインポートする。片側250Nfの最大筋力を想定し、各咀嚼筋の断面積の比率に応じて分配し、咀嚼筋による顎骨への荷重を設定する。この荷重条件を、各咀嚼筋の左右で50%ずつ変化させ、1つの咀嚼筋につき3つの荷重パターンを想定し、それぞれの筋での荷重変化を行い、計81パターンの顎偏位再現モデルを作成する。

【顎偏位症例のグループ化】

新潟大学医歯学総合病院矯正歯科にて骨格性下顎前突症と診断された患者100名（男性35名、女性65名、平均年齢22歳5か月）とし、初診時の三次元CT画像を用いて下顎骨形態計測を行なった。下顎骨形態と下顎頭の付着位置にて各々ward法によるクラスター分析を行い、それらの結果を統合させ対象を分類し、各群の特徴を明らかにするためSteel-Dwass検定により多群比較を行った。また、Spearmanの順位相関係数を用いて正面セファログラムにおけるMeの水平偏位量と各計測項目との相関について検討した。

【顎偏位を引き起こす咀嚼筋機能とバランスの同定と治療システムの確立】

顎偏位再現モデルと各クラスターの特徴を比較・照合し、顎偏位を引き起こす咀嚼筋機能とバランスを同定する。さらに、3で得られた顎偏位を増悪させる筋機能バランスの改善を組み込んだ、顎偏位の予測および顎偏位軽減を目的とした治療システムの確立を検討した。

4. 研究成果

【顎偏位再現モデルの作成】

撮影した CT 画像を DICOM 形式に変換し、モデリングソフトウェア Simpleware™ (ver.2017.06-SP2, Synopsys, US) にインポートし、三次元モデルを作成した。DICOM データから、CT 値をもとに MPR 画像上でマスク機能と呼ばれる領域選択機能を利用して硬組織領域の抽出を行い、上顎骨、下顎骨、上顎歯列、下顎歯列の各 4 つの部位のモデリングを行なった (図 3)。三次元モデルは、上方は眼窩下縁を含み、後方は大後頭孔前縁部、左右側および下方は全ての構造物が含まれる領域とした。歯根膜は、1 pixel (0.43mm) の厚みを持つ均一な領域として設定し、さらにその周囲に 2 pixel 分の皮質骨領域を構築して歯根膜が全て硬組織に裏打ちされるように作成した。関節円板は下顎頭部と下顎窩に挟まれる領域として抽出し、円盤状の構造物として作成した (図 4)。

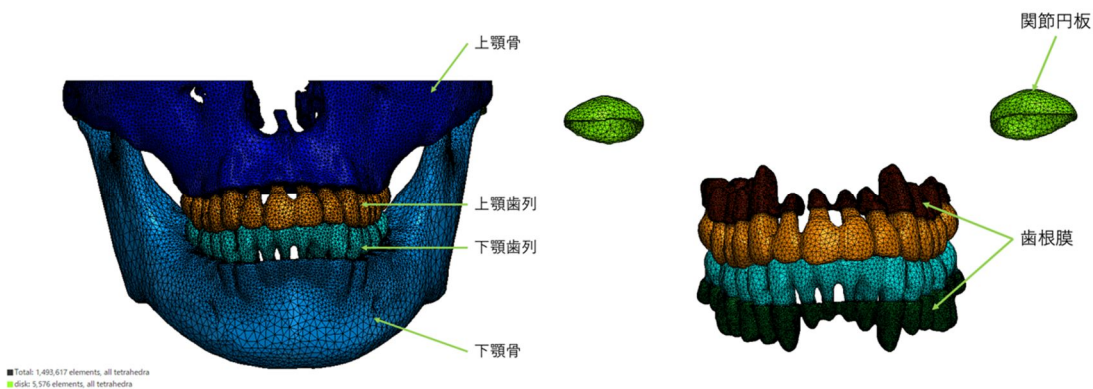


図 3 作成した 3 次元モデル (硬組織部分)

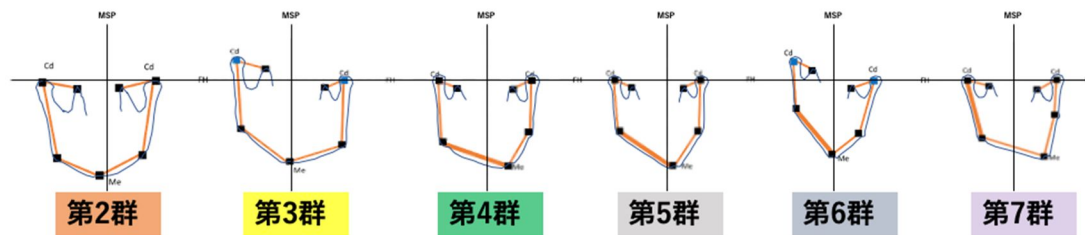
図 4 作成した 3 次元モデル (軟組織部分)

完成したソリッドモデルを NURBS 形式データとして、ジェネレーティブデザインアプリケーション Autodesk Within にインポートすることとしていた。しかしながら、顎顔面形態のような複雑な形状を NURBS モデルへ変換することで、既存のワークステーションで解析を行うには極めて困難なほど、データサイズが大きくなり、81 パターンの解析を完遂するには至らなかった。特に、歯根膜構造は顎顔面骨格に比して極めて微細な構造となっており、サイズ比が著しく異なる形状が共存するモデルとなっていたことが原因と考えられた。実際の症例をモデル化してジェネレーティブデザイン法を用いる場合には、極めて高いマシンスペックが要求されると考えられ、今後の ICT の高度化により解決が望まれる。

【顎偏位症例のグループ化】

顎偏位のグループ化については、クラスター分析の結果から以下の特徴を示す 7 群に分類された。第 1 群 (39 例): 形態、付着位置はほぼ対称、第 2 群 (3 例): 形態はほぼ対称、付着位置は側方に偏位、第 3 群 (16 例): 形態はほぼ対称、付着位置は垂直に偏位、第 4 群 (25 例): 下顎枝の左右差が中等度、下顎骨体長の左右差が大きい、付着位置はほぼ対称、第 5 群 (3 例): 下顎枝の左右差が中等度、下顎骨体長の左右差が大きい、付着位置は側方に偏

位、第6群(6例)下顎枝の左右差が中等度、下顎骨体長の左右差が大きい、付着位置は垂直に偏位、第7群(6例): 下顎枝、筋突起の左右差が大きい、付着位置はほぼ対称、であった。対象のうち2例は、統計学的に分類困難であった。Meの水平偏位量4.0mm以上の39例は、第1群に8例、第2群に0例、第3群に4例、第4群に17例、第5群に2例、第6群に3例、第7群に5例が分類され、各群内における割合は、第1群20.5%、第2群0%、第3群25%、第4群68%、第5群66.7%、第6群50%、第7群83.3%であり、非対称群でもMe偏位が少ない群を認めた。また、Meの水平偏位量は下顎骨形態と有意な相関関係を認めたものの、相関係数は低かった。



	第2群 (3名)	第3群 (16名)	第4群 (25名)	第5群 (3名)	第6群 (6名)	第7群 (6名)
下顎枝長の左右差	—	—	中等度	中等度	中等度	大きい
下顎骨体長の左右差	—	—	大きい	大きい	大きい	—
筋突起の左右差	—	—	—	—	—	大きい
下顎頭の位置	側方に偏位	垂直に偏位	ほぼ対称	側方に偏位	垂直に偏位	ほぼ対称

図5 同定された顎偏位パターン

【顎偏位を引き起こす咀嚼筋機能とバランスの同定と治療システムの確立】

上記の2つのステップより、顎偏位を引き起こす筋機能の同定を試みる予定であったが、顎偏位のパターン化に関連づけることはできなかった。しかしながら、これまで複雑で無数の形状が考えられるとされていた顎偏位を定量的に分析し、かつパターン化できたことは、今後の顎偏位を伴う顎変形症例に対する外科的矯正治療へ大きく寄与すると考えられる。これらの顎偏位パターンを臨床で特に成長期での症例に適用し、後ろ向き研究として顎偏位の成立と増悪に関与する因子を特定できる可能性が示唆され、偏位の軽減あるいは増悪の抑制を図るための最適な治療法を科学的根拠に基づいて決定できるシステムの構築が可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asai Yusuke, Hasebe Daichi, Saito Isao, Kobayashi Tadaharu	4. 巻 30
2. 論文標題 Changes of nasal and oronasopharyngeal airway morphologies and nasal respiratory function following orthognathic surgery	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology	6. 最初と最後の頁 313~318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ajoms.2017.11.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 本多綾子, 高橋功次朗, 丹原 惇, 高木律男, 小林正治, 齋藤 功	4. 巻 48
2. 論文標題 クラスター分析による骨格性下顎前突症例における正貌パターンの分類	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 新潟歯学会雑誌	6. 最初と最後の頁 75-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 坂上 馨, 栗原加奈子, 深町直哉, 阿部 遼, 堀 一浩, 小野高裕, 齋藤 功	4. 巻 29
2. 論文標題 骨格性下顎前突症患者の顎矯正手術後における嚙下時舌圧発現様相の解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日顎変形誌	6. 最初と最後の頁 42-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高橋 功次朗, 丹原 惇, 森田 修一, 小林 正治, 池田 順行, 林 孝文, 齋藤 功	4. 巻 27
2. 論文標題 骨格性下顎前突症例における下顎単独後退術の下顎後退量の左右差と正中部移動量との関係	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本顎変形症学会雑誌	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5927/jjcd.27.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Susami Takafumi, Fukawa Toshihiko, Miyazaki Haruyo, Sakamoto Teruo, Morishita Tadashi, Sato Yoshiaki, Kinno Yoshiaki, Kurata Kazuyuki, Watanabe Keiichiro, Asahito Toshikazu, Saito Isao	4. 巻 55
2. 論文標題 A Survey of Orthodontic Treatment in Team Care for Patients With Syndromic Craniosynostosis in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Cleft Palate-Craniofacial Journal	6. 最初と最後の頁 479 ~ 486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1055665617747703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Osawa K, Nihara J, Nishiyama H, Takahashi K, Honda A, Atarashi C, Takagi R, Kobayashi T, Saito I
2. 発表標題 Classification of 3-dimensional mandibular deviation using cluster analysis in patients with mandibular prognathism
3. 学会等名 58th Annual Meeting of Korean Association of Maxillofacial, Plastic and Reconstructive Surgery (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤知朗, 丹原 惇, 西山秀昌, 高橋功次郎, 本多綾子, 新ちひろ, 高木律男, 小林正治, 齋藤 功
2. 発表標題 クラスター分析を用いた骨格性下顎前突症患者における下顎孤島偏位様相の検討
3. 学会等名 第78回日本矯正歯科学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 功
2. 発表標題 「外科的矯正治療における形態と機能を考察する - 治療例と臨床研究をもとに - 」
3. 学会等名 第28回特定非営利活動法人日本顎変形症学会総会・学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤 功
2. 発表標題 エッジワイズ法の基本を知り,未来を語ろう - 管理指導医の立場から
3. 学会等名 第77回日本矯正歯科学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤 功
2. 発表標題 「矯正歯科治療の特徴と効果 - 実際の治療例を交え - 」
3. 学会等名 第77回日本矯正歯科学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Murakami T, Fukui T, Nishiyama H, Saito I
2. 発表標題 An investigation into the relationship between mandibular fossa and mandibular morphology in mandibular prognathism with facial asymmetry.
3. 学会等名 The 93rd Congress of the European Orthodontic Society (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大澤知朗, 丹原 惇, 新島綾子, 高橋功次朗, 高木律男, 小林正治, 齋藤 功
2. 発表標題 側面頭部エックス線規格写真を用いた骨格性下顎前突症患者における下顎骨形態のクラスター分析
3. 学会等名 第27回特定非営利活動法人日本顎変形症学会総会・学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤田 瑛, 丹原 惇, 池真樹子, 齋藤 功
2. 発表標題 有限要素を用いた顎偏位を伴う骨格性下顎前突症例の顎骨内応力解析
3. 学会等名 第76回日本矯正歯科学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新島綾子, 森田修一, 工藤武久, 高橋功次朗, 丹原惇, 高木律男, 小林正治, 齋藤 功
2. 発表標題 クラスター分析による骨格性下顎前突症例の正貌パターンにおける臨床統計調査
3. 学会等名 第76回日本矯正歯科学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福井忠雄, 坂上 馨, 篠倉千恵, 齋藤 功
2. 発表標題 骨格性下顎前突症患者における術前後の嚥下機能変化
3. 学会等名 第27回特定非営利活動法人日本顎変形症学会総会・学術大会(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 齋藤 功	4. 発行年 2019年
2. 出版社 医歯薬出版	5. 総ページ数 456
3. 書名 歯科矯正学 第6版	

1. 著者名 齋藤 功	4. 発行年 2017年
2. 出版社 医歯薬出版	5. 総ページ数 282
3. 書名 歯界展望 2017年特別号	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	丹原 惇 (Nihara Jun) (10636228)	新潟大学・医歯学系・助教 (13101)	
研究分担者	高橋 功次郎 (Takahashi Kojiro) (40736625)	新潟大学・医歯学総合病院・助教 (13101)	