

## Digital Dentistry の現状と未来 — 補綴材料の選択, 補綴設計および最新技術について —

大谷恭史

Digital Dentistry Now and Future  
— Material Selection, Restoration Design, and New Technology —

Takafumi Otani DDS, MSD, PhD

### 抄 録

「Digital Dentistry」が広く普及した現代の歯科臨床において、CAD/CAMにより作製された補綴装置は、その機械的強度、加工精度、審美性、臨床予後等の面で多くの文献により臨床的価値を支持されてきた。現在は、様々なマテリアルの選択が可能となっているが、個々の症例に対する機械的・審美的特徴を考慮したマテリアルおよびフレームワークデザインの選択基準について文献をもとに考察する。

また、今後歯科用ロボティクスが新たに注目を浴びることが予想され、現在「自動歯牙形成ロボット」の開発を行っている。我々が行ったパイロットスタディを紹介し今後の展望についても述べたい。

### キーワード

Digital Dentistry, CAD/CAM, フレームワークデザイン, ロボティクス

CAD/CAMによる補綴装置のデザイン・作製、CT画像の3次元分析およびCAD/CAMにより作製したサージカルガイドを用いたインプラント手術支援、診断用ソフトウェアを用いた矯正3Dシミュレーション等の「Digital Dentistry」は広く一般臨床に普及し、今日の歯科臨床において必要不可欠な技術となりつつある。その中でも特にCAD/CAMにより作製された補綴装置は、その機械的強度、加工精度、審美性、臨床予後等の面で多くの文献により臨床的価値を支持されてきた。また、CAD/CAM技術の発展により補綴装置製作における自由度が広がるとともに、時間、コストの削減にもつながり、今後も広く応用される事が容易に想像される。現在は、ブロックのミリング方式による補綴装置の作製が主流となっており、ジルコニ

ア、リチウムジシリケート、金属、高密度ポリマーなどのさまざまな材料の選択が可能となっている。それぞれのマテリアルには特性があり、個々の症例に対して適切な選択をしなければならない。マテリアルの選択において、化学的特性、機械的特性、審美的特性を理解しておく事は非常に重要であり、そのような特性を踏まえた上で適切な選択をすることが安定した長期的予後を得るためには必要不可欠である。現在一般的に用いられているマテリアルから最新のものまで、その特性や応用方法について考察する。

イットリア安定化ジルコニアは、30年ほど前から整形外科において人工股関節に應用され始め、その後歯科補綴装置に應用されるようになった。2001年に人工股関節が短期間のうちに400本ほど失敗し、バ

医療法人緑士会 大谷歯科  
ワシントン大学補綴学講座  
大阪大学歯科補綴学第一教室  
北海道大学歯科保存学教室  
Otani Dental Office, Osaka Japan  
University of Washington Graduate Prosthodontics, Seattle WA  
Osaka University Department of Fixed Prosthodontics, Osaka Japan  
Hokkaido University Restorative Department, Sapporo Japan

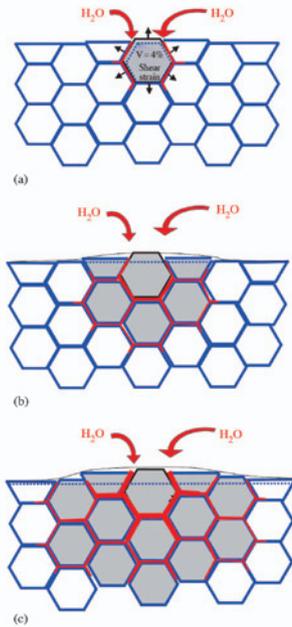


図1 ジルコニアの低温劣化のメカニズム  
(参考文献1より引用)

イオマテリアルとしてのジルコニアに対して疑問が生まれ始めた。その原因としてジルコニアの低温劣化の問題が議論となったが、それと同時期にCAD/CAM技術の進歩により歯科に応用され始め、その後歯科においてもジルコニアの低温劣化に対して様々な研究がなされてきた。Chevalierによれば、ジルコニアの低温劣化のメカニズムは、ジルコニア表層に加えられた物理的刺激により Tetragonal Phase が Monoclinic Phase へと Phase Transformation を起こし、その際に生じる3~5%の体積膨張が結晶構造に欠陥を生じさせ、その欠陥部に侵入した水などが原因で劣化が進むというものである(図1)<sup>1,2)</sup>。従来のイットリア安定化ジルコニアは、低温劣化の影響を考慮に入れてもなおその強度は歯科用セラミックスとしては臨床的に十分な機械的強度を持っており、多くの論文により長期的に良好な経過報告がされている<sup>3,4)</sup>。

Sun らによれば、1 mmの厚みのフルカントゥアジルコニアクラウンは同じ厚みのメタルセラミッククラウンに匹敵すると報告されている<sup>5)</sup>。

フルカントゥアジルコニアクラウンの適切な厚みは、従来のポーセレンジャケットクラウンやリチウムジシリケートクラウンよりも少ない補綴スペースに対応できるものの、低温劣化の影響を考慮するとある程度の厚みを確保する必要があるのではないだろうか。また、Flinnらの報告によれば、各メーカーにより低

温劣化の程度は異なり<sup>6,7)</sup>、現在は Monoclinic Phase への Phase Transformation を起こしにくく、低温劣化の少ないジルコニアが研究開発されており、近い将来に臨床応用される予定である。このような低温劣化の少ないジルコニアは、補綴スペースの少ない症例や、厚みの薄くなりやすいインプラントアバットメントなどへの応用が期待される。さらに、Haradaらによれば、現在開発中の高光透過性ジルコニアブロックはリチウムジシリケートには劣るものの、これまでのジルコニアブロックに比べ光透過性が向上し、さらに適応範囲が広がるのではないかと期待される<sup>8)</sup>。しかし、光透過性の向上に伴う機械的強度の低下を避けることは難しく、さらに低温劣化の影響等も考慮すると応用の範囲は前歯部等の審美領域で、咬合力負担の少ない部位に限定するべきであると筆者は考えるが、今後の長期的な臨床報告を待ちたい。もう一つの問題として、対合歯の摩耗についても今日まで議論されてきたが、適切に研磨されたジルコニアクラウンは他のセラミック材料と比較しても、対合歯への影響が少ないと報告されている<sup>9-11)</sup>。また、グレイジングポーセレンの対合歯への影響が他に比べて大きいことから、フルカントゥアジルコニアクラウンの咬合面は最終的に研磨のみで仕上げ、グレイズを行わない方が対合歯への影響が少なくなり長期的に信頼できるのではないだろうか。特に上顎臼歯部の咬合面等は、審美的に考えてもステイニング等をする必要性が薄く、機械的な研磨だけで十分対応できるのではないかと筆者は考えている。

最近では、高密度ポリマーブロックの開発が進み、その機械的特性から様々な応用方法が提案され注目されている。Nguyenらによると、従来のコンポジットレジン<sup>12)</sup>を180°C、250 MPaの条件下にて重合することにより、従来のCAD/CAM用コンポジットレジンブロックと同等かそれ以上の曲げ強度を得ることが可能である<sup>12)</sup>。つまり、ポリマー材料を工業レベルの高温高压条件下で重合することにより、これまで以上の機械的強度を得ることが可能であり、CAD/CAMの技術の進歩によりポリマー材料は今後大きな可能性を秘めている。現在、利用可能なポリマーブロックはPMMA系レジンやセラミック強化型コンポジットレジン、ファイバー強化型コンポジットレジンなどと多岐にわたる。特に最近発売されたファイバー強化型のCAD/CAM用ポリマーブロックはリチウムジシリケートと同等の曲げ強度を持つと言われ、インプラント上部構造としてのロングスパンフレームワークなど今後様々な補綴装置に応用されることが期待され

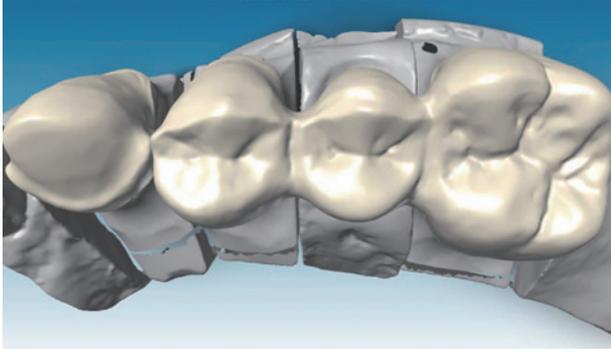


図2 CADによる3種類のフレームワークデザイン；  
Bilayered, Hybrid, Monolithic(参考文献16より引用)

る。Edelhoffらによれば、酸蝕症や高度の歯の磨耗を伴う咬合再構築症例などに対して、このようなCAD/CAM用ポリマーを用いた咬合面ベニアは1～2年の長期的なプロビジョナルレストレーションとして応用可能であると報告されている<sup>13)</sup>。また、Magneらの報告でも、非常に薄い咬合面ベニアとしてセラミックスよりもコンポジットレジンの方が破折を起こしにくいというが報告されており<sup>14)</sup>、今後CAD/CAM用ポリマー材料のさらなる進歩により、高度な歯の磨耗に対する新たな治療のスタンダードとして確立されていくのではないだろうか。

また、CAD/CAMにより補綴装置を作製する場合、安定した長期予後や審美的な治療結果を得るために、状況に応じた補綴装置の設計・デザインを考慮する事は非常に重要な要素である。オールセラミックスクラウンにおいてもメタルセラミックスクラウンと同様に、フレームワークデザインが破折強度と破折様式に与える影響は大きい<sup>15)</sup>。すなわち、コーピングを作製しその上にポーセレンを築盛するBi-layered Designにするのか、単一材料のみで補綴装置の概形全てを作製するMonolithic Designにするのか、またはその中間的なHybrid Designにするのかといったような判断が必要である(図2)。もちろん、天然歯の多層構造を考えれば、CAD/CAMによりコーピングのみを作成し、その上にポーセレンを築盛するBi-layered Designが最も審美的であることは言うまでもないが、補綴部位やパラファンクションの有無、咬合力、咬合様式、補綴スペース、その他様々な要因により機械的強度を優先すべき症例では、築盛ポーセレンの破折等のリスクを伴うため単一材料のみで歯冠外形全てを作成し、築盛材料とコア材料とのウィークリンクを無くすことでリスクを低下させることが可能であり、審美

的に必要であればステイニングなどにより仕上げる事が望ましい。しかし、前述のような理由で機械的強度を優先させる必要があるが、審美性も同時に獲得しなければいけない様な症例では、機能面のみをコア材料にし、唇面にのみ築盛材料を用いる中間的なHybrid Designにすることで、破折のリスクを比較的抑えながら患者の審美的な要求にも答えることが可能である<sup>16)</sup>。このような補綴装置のデザインおよび作製は、CAD/CAMの発達により以前よりも容易になったため、口腔内の状況を把握している歯科医師が歯科技工士と密なコミュニケーションをとり適切なデザインを指示することで、機能的にも審美的にも考慮された補綴装置の作製が可能になり、長期的な補綴装置の成功につながると考える。

前述のように「Digital Dentistry」はますます日常臨床に浸透していくことが予想されるが、今後新たに注目されるであろう「Digital Dentistry」の一つがデンタルロボティクスである。医科においては既にロボティクスサージェリーが多くの分野に応用されており、従来の手術と比べより正確で高い再現性を持ち、治癒期間の短縮や術後合併症の少なさも報告されている。また、術者にとっても術中に無理な体勢をとる必要もなく、肉体的な負担が大きく改善されるのも大きな利点のひとつである<sup>17,18)</sup>。このようなロボティクスの特徴は、歯科領域においても特に正確性が重視されるような処置には極めて有用であり、現在ロボティクスを用いた「自動歯牙形成装置」の開発を進めている。審美的かつ良好な長期的予後を得るためには適切な補綴材料のためのスペースを確保し、滑らかで明瞭なフィニッシュラインを形成することが重要であるが、ロボット技術の導入により人為的ミスを無くすことで、常に安定した質の高い歯科治療を実現することが可能である。その中でも特にラミネートベニアの支台歯形成は限られたエナメル質の厚み等の理由から、技術的に熟練を要しロボットの正確性が有用な場面である。今回のパイロットスタディでは、レジン歯にラミネートベニアの支台歯形成をロボットアームにて自動的に行い、その正確性および繰り返し精度を術者によるフリーハンドでの支台歯形成と比較を行ったので報告する<sup>19)</sup>。

2層構造のレジン歯をロボット用と補綴専門医の術者(著者)用に10本ずつ用意し、事前にレーザーキャナーにて3Dスキャンを行った。ロボット用のレジン歯には唇面に三点のキャリブレーション用の凹みを形成した(図3)。スキャンされた3D画像上で、図のようなラミネートベニアの形成のデザインを定量

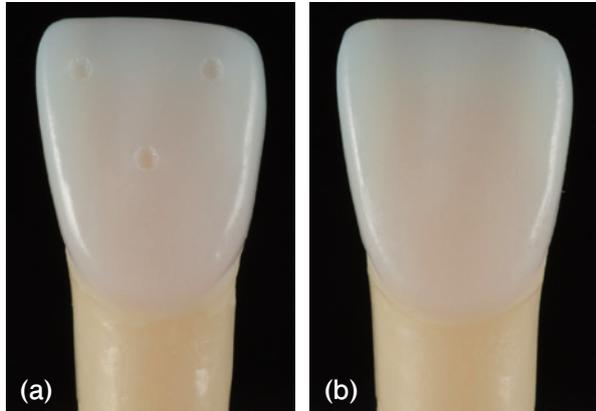


図3 術前レジン歯

(a) ロボット用；キャリブレーション用に唇面に3点の凹みを形成 (b) 術者用

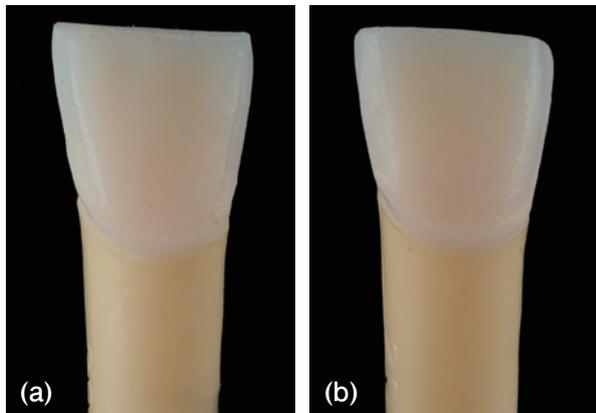


図5 (a) ロボットと (b) 術者による支台歯形成

的に行い (図4), ロボットにはデザイン通りに形成を行うようデータ転送し, 自動的に支台歯形成を行うようプログラムした. 術者はそのデザインに従うようフリーハンドにて従来通りガイドグループを形成しながら支台歯形成を行った (図5a, 5b). 支台歯形成を行ったそれぞれ10本のレジン歯を再度3Dスキャンした後に, 支台歯形成前後の3Dデータを重ね合わせ (図6), 術前のデザインに対するロボットおよび術者の形成の正確性および繰り返し精度を唇面9点, フィニッシュライン6点, 切縁3点においてそれぞれのグループで測定した (図7). 全体的な正確性に関しては, グループ間に有意差はなく, フィニッシュラインでの正確性はロボットが有意に高く, 切縁での正確性は術者の方が有意に高い結果となった. また, 全体的な繰り返し精度については術者の方が有意



図4 CADソフトによるラミネートベニア支台歯形成デザイン  
切縁；1.5 mm Butt Jointにて形成  
唇面；歯茎部三分の一のみ0.3mm, それ以外の部位は0.5mm形成  
フィニッシュライン；歯肉縁上1 mmに0.3ミリ幅のシャンファー形成

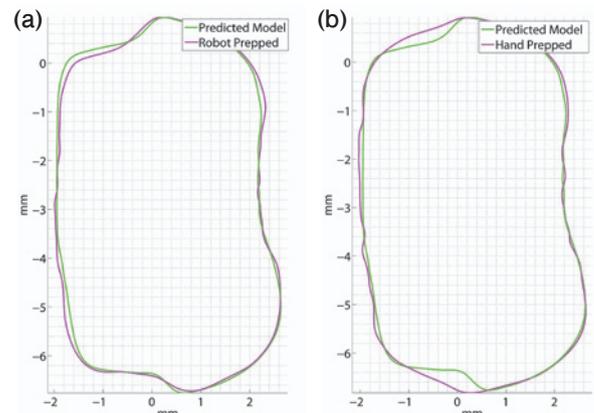


図6 支台歯形成前後の3Dデータの重ね合わせクロスセクション図

(a) ロボット (b) 術者

に高く, フィニッシュラインではロボットが, そして唇面では術者が有意に高い結果となった (図8). 今回のパイロットスタディにおいては, ロボットアームに力のフィードバック機構を設けておらず, 形成量が多く形成中に力のかかりやすい切縁において, 過度の力が加わることでレジン歯を若干移動させてしまい, 正確性または繰り返し精度が低くなってしまった. この結果, 全体的な精度, 繰り返し精度を下げることとなり術者の繰り返し精度が有意に高くなった. しかし, ラミネートベニアの形成においてもっとも重要かつ難易度の高い部位はエナメル厚みの薄いフィニッシュラインであり, その部分においては正確性, 繰り返し精度の両方においてロボットが上回る結果となった. パイロットデータのため結論づけることは難しいが, 自動歯牙形成ロボットの今後の臨床応用の可能性が期

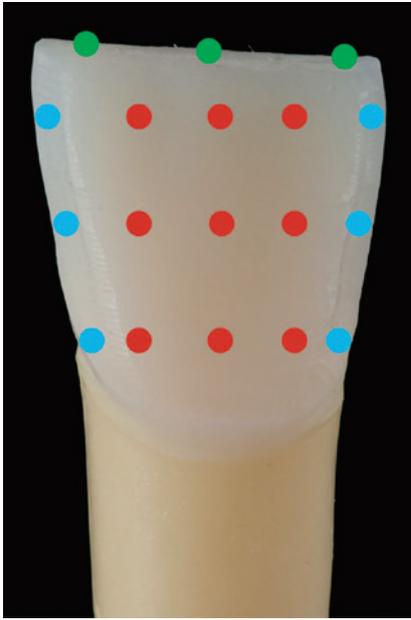


図7 切縁3点，唇面9点，フィニッシュライン6点にて形成の誤差を計測

待できる結果であった。また，もう一つの歯科特有のロボティックスのメリットは，支台歯形成の前に最終補綴装置またはプロビジョナルレストレーションの作製がCAD/CAM技術との連携により可能な点である。特に，口腔内でダイレクトボンディングを行うラミネートベニアのプロビジョナルの作製は，長いチェアタイムを要しフィニッシュラインにおける精度を得ることが困難なため，歯肉に炎症を起してしまう恐れがある。術前にデザインした通りにロボットにより形成することが可能であれば，精度の高いプロビジョナルレストレーションを事前に作製することが可能であり，時間の短縮だけでなく歯肉への侵襲も少なく理想的な補綴装置の装着を行うことが可能になる。

現在，“Digital Dentistry”はDigital Planning, CAD/CAM, Digital Impressionで構成されているが，ロボティックスはDigital Dentistryを完成させる最後のピースであると著者は考えている。ロボティックスが加わることで完成されたDigital Dentistryが今後さらに進歩，普及することで，歯科医療は次のステージへとさらに発展し，患者により質の高い歯科医療サービスを安定して供給することが可能になる。しかしながら，そういった新しい技術そのものが全ての問題を解決するわけではなく，あくまでもそれを操作する歯科医師・歯科技工士の正しい知識，技術があってこそそのDigital Dentistryであることを忘れてはならない。

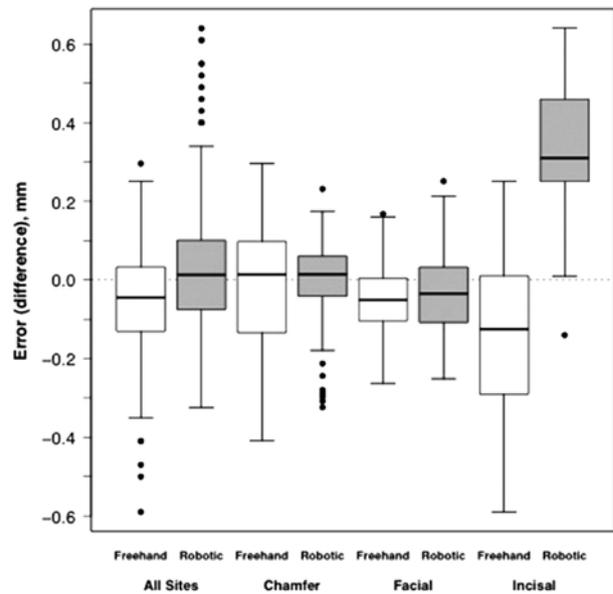


図8 ボックスプロット図(ロボットと術者による支台歯形成の全体と各計測部位における正確性と繰り返し精度の比較)

## 文 献

- 1) Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial? *Biomaterials* 2006; 27: 535-543.
- 2) Lugh V, Sergio V. Low temperature degradation -aging- of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry. *Dent Mater* 2010; 26: 807-820.
- 3) Raigrodski AJ, Hillstead MB, Meng GK, Chung K-H. Survival and complications of zirconia-based fixed dental prostheses: a systematic review. *J Prosthet Dent* 2012; 107: 170-177.
- 4) Beuer F, Stimmelmayer M, Gernet W, Edelhoff D, Guth J, Naumann M. Prospective study of zirconia-based restorations: 3-year clinical results. *Quintessence Int* 2010; 41: 631-637.
- 5) Sun T, Zhou S, Lai R, Liu R, Ma S, Zhou Z et al. Load-bearing capacity and the recommended thickness of dental monolithic zirconia single crowns. *J Mech Behav Biomed Mater* 2014; 35: 93-101.
- 6) Flinn BD, deGroot DA, Mancl LA, Raigrodski AJ. Accelerated aging characteristics of three yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline dental materials. *J Prosthet Dent* 2012; 108: 223-230.
- 7) Flinn BD, Raigrodski AJ, Singh A, Mancl LA. Effect of hydrothermal degradation on three types of zirconias for dental application. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 1377-1384.
- 8) Harada K, Raigrodski A, Chung KH, Flinn B, Dogan S, Mancl L. A comparative evaluation of the translucency of zirconias and lithium disilicate for monolithic restorations. *J Prosthet Dent* 2016; 116: 257-263.

- 9) Rosentritt M, Preis V, Behr M, Hahnel S, Handel G, Kolbeck C. Two-body wear of dental porcelain and substructure oxide ceramics. *Clin Oral Investig* 2012; 16: 935-943.
- 10) Sridhar J, Nathaniel L, Deniz C, Lance CR, John OB. The wear of polished and glazed zirconia against enamel. *J Prosthet Dent* 2013; 109: 22-29.
- 11) Sripetchdanond J, Leevailoj C. Wear of human enamel opposing monolithic zirconia, glass ceramic, and composite resin: An in vitro study. *J Prosthet Dent* 2014; 26: 1-10.
- 12) Nguyen J-F, Migonney V, Ruse ND, Sadoun M. Resin composite blocks via high-pressure high-temperature polymerization. *Dent Mater* 2012; 28: 529-534.
- 13) Edelhoff D, Beuer F, Schweiger J, Brix O, Stimmelmayr M, GÜTH J-F. CAD/CAM-generated high-density polymer restorations for the pretreatment of complex report. *Quintessence Int* 2012; 43: 457-467.
- 14) Schlichting LH, Maia HP, Baratieri LN, Magne P. Novel-design ultra-thin CAD/ CAM composite resin and ceramic occlusal veneers for the treatment of severe dental erosion. *J Prosthet Dent* 2011; 105: 217-226.
- 15) Ferrari M, Giovannetti A, Carrabba M, Bonadeo G, Rengo C, Monticelli F et al. Fracture resistance of three porcelain-layered CAD/CAM zirconia frame designs *Dent Mater*; 2014; 30: 163-168.
- 16) Raigrodski JA, Ariel J. Managing prosthetic challenges with a CAD/CAM zirconia restoration. *Journal of Cosmetic Dentistry* 2014; 5: 41-52.
- 17) Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng H* 2006; 9: 129-140.
- 18) Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, Okamura AM, Whitcomb LL, Taylor RH. Surgical and interventional robotics - Core Concepts, Technology, and Design [Tutorial]. *IEEE Robot Automat Mag* 2008; 15: 122-130.
- 19) Otani T, Kanuma I, Rosen J, Raigrodski A. In vitro pilot evaluation of accuracy and precision of automated robotic tooth preparation system for porcelain laminate veneers. *J Prosthet Dent* 2015; 114: 229-235.

---

著者連絡先：大谷 恭史  
〒562-0035 大阪府箕面市船場東3-1-6  
COM2号館3F  
Tel: 072-729-0031  
Fax: 072-727-4148  
E-mail: drtotani@gmail.com