

第74回日本大学歯学会特別講演寄稿

日本大学歯学部100年の歴史と歯科用小照射野高精細コーンビームCTの開発

新井嘉則

日本大学歯学部歯科放射線学講座

要旨: 日本大学歯学部は1916年に佐藤運雄先生によって創設された。そのわずか8年後の1924年に日本大学歯学部歯科放射線学講座が開設された。これは、レントゲン博士がX線を発見して29年目で、世界でも有数の歴史ある講座となった。とくに1984年には安藤先生と篠田先生が開発した超高感度テレビカメラを応用した、世界初のデジタル口内法撮影装置が稼働していた。また、西連寺先生が開発した世界で3番目となるパノラマ装置も現役で画像診断に使用され、さらには、フィンランド製のデジタル制御の多機能パノラマ装置も臨床応用されていた。これらの3つの機器は、のちの歯科用小照射野高精細コーンビームCT(歯科用CBCT)の開発の重要な基礎技術となった。また、筆者が研究に行き詰っていた1992年に、顎関節の研究をしていた本田和也先生から、“顎関節の3次元画像を観察したい”との要望をいただいた。私は、即座にそれは“不可能”とお答えしたが、必要であれば開発すべきだと考え、歯科用CBCTの開発に着手することになった。さらに、1995年に幸運にもパノラマ発祥の地であるTurku University(Finland)へ留学することができた。当時のErikki Tammissalo先生のご指導のもとに、歯科用CBCTの開発をスタートした。1995年の12月に顎関節の3次元的な画像の再構成に成功した。しかし、その画質は劣悪で実用化の道は遠いと考えられた。帰国後も研究を継続し、1997年12月には日本大学歯学部附属歯科病院で臨床研究をスタートさせた。3年間で3,500症例を重ねることができ、その有効性を証明することができた。また、安全性は岩井一男先生の精密な被曝線量測定実験で証明がなされた。2000年12月に“歯科・頭頸部用小照射野X線CT装置”として初の薬事認可を取得した。この技術は日本大学からモリタ製作所に技術移転を行い、得られたライセンス料は新校舎の建設にも寄与することとなった。以上のように、本学の先人たちの研究成果を基礎として、歯科用CBCTの開発がなされた。ここに、あらためて各位に深く御礼を申し上げたい。

キーワード: X線, コンピュータ断層, 歯科, コーンビームCT

The 100th anniversary of Nihon University School of Dentistry and
the development of limited volume and high-resolution X-ray cone-beam
computed tomography for dentistry

Yoshinori Arai

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Nihon University School of Dentistry

Abstract: The Nihon University School of Dentistry was founded in 1916 by Professor Kazuo Sato. Only eight years later, in 1924, the Department of Oral and Maxillofacial Radiology was established. This was the 29th year since Dr. Roentgen discovered X-rays, making it one of the world's leading departments. In 1984, when I joined the department as a graduate student, the world's first digital intraoral radiography system, which applied the Silicon Intensifier-image tube and television signal system developed by Professors Ando and Shinoda, was in operation. In addition, the world's third panoramic X-ray tomography developed by Dr. Sairenji was still in active use for image diagnosis, and a digitally controlled multifunctional panoramic X-ray tomography made in Finland was also in clinical use. These three devices became important basic technologies for the later development of limited volume and high-resolution X-ray cone-beam computed tomography for dentistry (dental CBCT). In 1992, when I got stuck in my research, I received a request from Professor Kazuya Honda, who was researching temporomandibular joints, to "be able to observe 3D images of temporomandibular joints." I immediately answered that it was "impossible", but thought that it

(受付: 令和4年8月24日)

責任著者連絡先: 新井嘉則

日本大学歯学部歯科放射線学講座

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台1-8-13

TEL: 03-3219-8104

FAX: 03-3219-8354

E-mail: arai.yoshinori@nihon-u.ac.jp

should be developed if necessary, and started developing a dental CBCT. In 1995, I was fortunate enough to study abroad at Turku University (Finland), the birthplace of panoramic X-ray tomography. In December 1995, I succeeded in reconstructing a three-dimensional image of the temporomandibular joint. However, the image quality was so poor that it was considered far from practical use. After returning to Japan, I continued this research, and in December 1997, started clinical research of dental CBCT at Nihon University Dental Hospital. 3,500 cases were taken in 3 years, and its effectiveness was proved. In addition, the safety was proved by Dr. Kazuo Iwai's precise exposure dose measurement experiments. In December 2000, I obtained the first pharmaceutical approval for a "limited volume and high-resolution cone-beam computed tomography for Dentistry". This technology was transferred from Nihon University to J. Morita MFG (Kyoto, Japan), and the licensing fees obtained contributed to the construction of the new dental school building in 2021. As described above, the dental CBCT was developed based on the research results of our predecessors. Once again, I would like to express my deep gratitude to all of you.

Keywords: X-ray, computed tomography, dental, cone beam CT

はじめに

歯科用小照射野高精細コーンビーム CT(以下、歯科用 CBCT)は低被曝で高解像力の歯及び顎骨の画像診断を提供し、現在は本邦において年間 73 万件以上の撮影(令和 3 年 社会医療診療行為別統計 令和 3 年 6 月審査分)が行われている。本学附属歯科病院においても年間 3,500 件前後の撮影が実施され、埋伏歯の抜歯、根管治療およびインプラントの埋入などの歯科臨床に不可欠となっている。しかしながら、1990 年代初頭までは、歯科に特化した小照射野の歯科用 CBCT の実現は、理論的に開発が不可能と考えられていた。これに対し、新井は独自の理論によって、小照射野の歯科用 CBCT に開発に成功した¹⁾。

歯科用 CBCT 開発の背景

Computed Tomography(CT)の数学的な理論は 1917 年に Radon²⁾が提唱した。この理論は、“無限遠からのすべての方向からの投影データを逆投影することによって、正確な断層画像が再構成できる”というものであった。このためには、大型の X 線装置や回転機構および膨大な計算が必要とされることから、長らく実用化されなかった。

高橋ら³⁾は 1950 年代に回転断層撮影装置の開発を行った。これは 2 つのターンテーブルと水平スリットによる X 線ビームを使用した。1 つ目のターンテーブルにフィルムを水平において、患者を 2 つ目のターンテーブルに立たせた。この 2 つのターンテーブルを同期させて撮影する方法であった。胸部の軸位断の撮影に成功している。

同時期に、フィンランドの Paatero⁴⁾はターンテーブルの上にフィルムを垂直に立てて、馬蹄形に湾曲させておいて、患者を同期して回転させ、垂直の X 線スリットビームでスキャンすることで顎骨のパノラマ像を得ることに成功している。西連寺ら⁵⁾も同様の装置の開発に成功し、

実用化している。

一方、1972 年にイギリスの Hounsfield⁶⁾はフィルムではなく、X 線センサーと電子計算機を応用した世界で初めて医科用の CT の開発に成功した。当初は頭部専用のものであった。ペンシル型の細い X 線ビームを使用してスキャンすることから長時間の撮影が必要とされた。しかし、脳出血の 3 次元的な画像診断を可能とし、医学の発展に大きく貢献した。

コーンビーム CT の最初のアイデアは 1974 年の Robb ら⁷⁾による。コーン状の X 線ビームと被写体を回転させるターンテーブルと画像増倍管とコンピュータから構成された。3 次元的な画像を一括して得ることができるものであった。このコーンビームはちょうどパノラマの垂直スリットビームと、高橋らの回転断層撮影装置の水平スリットビームを掛け合わせた形態と考えられた。

このコーンビーム CT の数学的な理論は 1984 年に Feldkamp⁸⁾によった。コーンビームによって斜めから 2 次元のスクリーンに投影される像に関して、その詳細を理論化した。1986 年には豊福ら⁹⁾はコーンビームとターンテーブルと画像増倍管およびコンピュータを使用して顎骨の 3 次元画像の再構成に成功している。ここでは、歯列弓に沿って画像を再構築することで、顎骨の展開像の再構成にも成功し、コーンビーム CT の歯科応用の有効性が示された。

1998 年にはイタリアの Mozzo ら¹⁰⁾によって、頭部領域に特化したコーンビーム CT の発表が行われた。患者は仰臥し、頭部をガントリーに入れて撮影する方式であった。顎骨全体の撮影が可能で、骨折やインプラント治療に応用された。しかしながら、口内法 X 線撮影に比較して解像力が低い問題点があった。

歯科用 CBCT の開発の系譜

口内法 X 線撮影では通常は直径 6 cm 程度の照射野が使用される。それに対して西山¹¹⁾は 1977 年に小照射野

で撮影することで、画質の向上と低被曝化が可能であることを報告した。ここでは、照射野を直径 2 cm に限定し、照射面積を通常法に比較して 1/9 にした。これによって、散乱線の発生を抑えてコントラストが上昇することを示した。さらに、下顎臼歯部の根尖に発生した病巣に対して、小照射野が診断能を向上させることを示した。この成果はのちの小照射野の歯科用 CBCT の開発の基本理論の一つとなった。また、安藤ら¹²⁾は 1978 年に SIT (Silicon Intensifier Tube) を応用した超高感度テレビカメラシステムを使用して、テレビ画像による口内法 X 線撮影装置の開発に成功している。ここでも、小照射野の X 線発生装置が応用された。篠田ら¹³⁾はそれらを発展させて、フレームメモリーによる画像加算器を使用して画質を飛躍的に向上させた。この超高感度テレビカメラシステムとフレームメモリーも歯科用 CBCT の基本的な構成要素の一つとなった。

McDavid ら¹⁴⁾は、多機能 X 線パノラマ撮影装置 Zonarc をベースとして、フィルムの回転速度を制御することで、断層面の位置を自由に可変することに成功した。1988 年には、この Zonarc に安藤らが使用した超高感度テレビカメラシステムと篠田ら¹⁵⁾が使用したフレームメモリーを応用して、デジタルパノラマ装置の開発を行った。ここでは、ビデオ画像を加算するときに、その位置をシフトさせることで、デジタルパノラマ断層像を合成した。加算時にシフト量を変化させることで、自由に断層面の位置を変化させることが可能となった。これによって、1 回の撮影で多断層の画像を再構成することが可能となった。

その後、1994 年には veraview (モリタ製作所、京都) に搭載されたデジタルパノラマ装置が開発された¹⁶⁾。しかしながら、当時の X 線センサーとコンピュータの能力不足から、従来のフィルム法に比較して、被曝線量が大きく、画質も悪いことから実用化されることはなかった。

そのころ、本田は顎関節腔に穿刺し関節円板を造影する研究を行っていた。しかし、従来の断層撮影法では 3 次元的な形態が即座に得られないことから、顎関節腔造影の成功率は低かった。また、穿刺する方向や深さが盲目的に実施されていたため、穿刺に対する安全性にも問題があった¹⁷⁾。

本田は新井が開発にとん挫したデジタルパノラマ装置を視て、“この装置を発展させることで、顎関節が 3 次元で観察できないか”と提案をした。その時、新井は即座に開発不可能と返事をした。しかしながら、その装置の開発の重要性を理解して、可能性の検討を開始した。これが、歯科用 CBCT 開発の大きなきっかけとなった。

1995 年に新井は日本大学海外学術研究員として Turku University (Finland) に留学する機会を得て、歯科用 CBCT の基礎研究を行った。基礎研究には、Paatero が

パノラマの基礎実験で使用したターンテーブルが使用された。その後、多機能断層撮影装置 Scanora¹⁸⁾に超高感度テレビカメラシステムを搭載して撮影実験を行った。

ここでは、被曝線量の低減と散乱性の低減を考えて、コーンビームを小照射野にして実験を行った。Radon²⁾による CT の数学理論では、被写体全体を X 線で照射する必要がある。したがって、小照射野では CT 画像を得ることは不可能とされていた。この理論に反して、小照射野での実験を行った。その結果、各点の絶対的な X 線吸収率を求めることはできないが、相対的な X 線吸収率の差を求めることは可能であることを示すことに成功した。

その後、画質の改善と計算速度の改善が実施された。最適化された専用の 2 次元センサーを開発した。計算速度の改善のために開発言語は C が採用された。1997 年に Intel から Pentium II 400 MHz が供給された。これによって、パーソナルコンピュータで、撮影後 10 分以下で 3 次元画像を得ることができるようになった¹⁹⁾。当時は 3 次元画像にはミニコンと呼ばれた専用の計算が使用されていたが、汎用品のパーソナルコンピュータで可能としたことは大きな成果であった。

これを受けて、1997 年 12 月から日本大学歯学部付属歯科病院で、直径 4 cm 高さ 3 cm の撮影範囲を持った歯科用 CBCT の臨床応用が開催された。2000 年までに 3,500 症例が実施され、有効性が証明された^{20,21)}。その間に、1 例の問題も発生しなかった。また、安全性に対しては、被曝線量の精密実験を行った。岩井によって低被曝が示され、安全性が立証された²²⁾。その後、日本大学産官学連携知財センター (NUBIC) からモリタ製作所に技術移転がなされた。モリタ製作所で“3DX multi image micro CT”が開発され、以上の多数の論文による報告から“歯科・頭頸部用小照射野 X 線 CT 装置”の薬事項目が新設され、第一号の認証を得た (図 1)²³⁾。

その後、パノラマと歯科用 CBCT の複合機が開発され、広く普及するようになった (図 2)²⁴⁾。2012 年には保険にも導入され、ガイドラインも制定され歯内療法や智歯の抜歯およびインプラントの埋入計画などに幅広く利用されている²⁵⁾。

最後に

X 線は 1895 年にレントゲンによって発見された。本学は 1916 年に佐藤運雄先生に創設された。その 8 年後に歯科放射線学講座が開設され、まもなく開設 100 年を迎えようとしている。その中で、本学の先人たちが行ったパノラマ装置の開発⁵⁾、小照射野の有効性の証明¹¹⁾、超高感度テレビシステムの開発^{12,13)}、顎関節腔造影の研究¹⁷⁾の系譜があって、はじめて歯科用 CBCT の開発¹⁹⁾が行われた。

プロトタイプの歯科用 CBCT は Orth-CT の愛称で使用された²⁰⁾。1997 年に臨床研究がスタートして 25 年の節目を迎えることができた。特に、薬事承認を受けるときは工藤逸郎先生、佐藤 宏先生、大木秀郎先生、本田雅彦先生、清水 治先生、田中孝佳先生、斎藤 毅先生、目澤修二先生、小木曾文内先生、伊藤公一先生、中島一郎先生、萩原芳幸先生、鶴町 保先生、佐藤秀一先生、清水典佳先生、田村隆彦先生、吉沼直人先生、月村直樹先生、大山哲生先生(順不同)をはじめ多数の先生方の温かいご協力によって、その有効性を証明することができた^{21,25)}。また、安全性は岩井一男先生の精密な被曝線量測定実験で証明がなされた²²⁾。モリタ製作所に技術移転を行い、得られたライセンス料は新校舎の建設にも寄与することとなった²⁶⁾。

以上のように、本学の先人たちの研究成果を基礎として、歯科用 CBCT の開発がなされた。ここに、あらためて各位に深く御礼を申し上げたい。

本論文に関して、開示すべき利益相反は特許料および受託研究においてモリタ製作所(京都)にある。

文献

- 1) Arai Y (2021) Local cone beam CT: how did it all start?. Dentomaxillofac Radiol 50, 20210276.
- 2) Radon J (1917) On the determination of Functions from their integral values along certain manifolds. Berichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaft 69, 262-277. (in Deutsch)
- 3) Takahashi S, Imaoka M, Shinozaki T (1951) Rotatory cossgraphy. Tohoku J Exp Med 54, 59-66.
- 4) Paatero YV (1949) A new tomographical method for radiographing curved outer surfaces. Acta Radiol 32, 177-184.
- 5) 西連寺永康(1971)パノラマ X 線撮影とその読像上の問題点. 歯界展望 38, 395- 398 .
- 6) Hounsfield G (1973) Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1 Description of system. Brit J Radiol 46, 1016-1022.
- 7) Robb RA, Greenleaf JF, Ritman EL, Johnson SA, Sjostrand JD, Herman GT, Wood EH (1974) Three-dimensional visualization of the intact thorax and contents: A technique for cross-section reconstruction from multiplanar X-ray views. Comput Biomed Res 7, 395-419.
- 8) Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984) Practical cone-beam algorithm. J Opt Soc Am A 6, 612-619.
- 9) Toyofuku F, Konishi K, Kanda S (1986) Fluoroscopic computed tomography: An attempt at 3-D imaging of teeth and jaw bones. Oral Radiol 2, 9-13.
- 10) Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA (1998) A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: Preliminary results. Eur Radiol 8, 1558-1564.
- 11) Nishiyama S (1977) Effect of narrow collimation on the image representability of periapical bone defects. Dent Radiol 17, 18-31. (in Japanese)
- 12) Ando S, Shinoda K, Noikura T, Inaba K, Ohki T, Kimura K, Hashimoto K, Suzuki M, Iwai K, Urushizaki M (1978) Real time radiological survey by intraoral fluoroscopic TV system to minimize radiation dose. Dent Radiol 18, 123-129. (in Japanese)
- 13) 篠田宏司, 橋本光二, 大木 亨, 新井嘉則, 外川圭一, 川島祥史, 大亀泰久, 本城谷 孝(1987)顎骨病変の歯科用 X 線 TV システムによる定量的診断法の開発. 歯科放射線 27, 346-354.
- 14) McDavid WD, Tronje G, Welander U (1989) Image layers in the Zonarc. Dentomaxillofac Radiol 18, 1-10.



図 1 歯科・頭頸部用小照射野 X 線装置
日本大学から技術移転しモリタ製作所で 3DX multi image micro CT が開発され、“歯科・頭頸部用小照射野 X 線 CT 装置”の薬事項目が新設されて第一号の認証を得た。



図 2 複合機
パノラマと歯科用 CBCT の複合機が開発され、広く普及するようになった。

- 15) Arai Y (1988) An improvement digital panoramic tomography system. *Dent Radiol* 28, 302-311. (in Japanese)
- 16) Arai Y, Sairenji E, Shinoda K, Hashimoto K (1994) The elimination of ghost images in the development of digital rotational panoramic radiography. *Dent Radiol* 34, 194-201. (in Japanese)
- 17) 本田和也, 橋本光二, 島田英治, 上野正博, 澤田久仁彦, 川嶋祥史, 荒木正夫, 岩井一男, 篠田宏司(1996)顎関節円板の穿孔に関する X 線学的研究—日本人献体下顎窩の形態変化について. *歯科放射線* 36, 153-160.
- 18) Tammisalo E, Hallikainen D, Kanerva H, Tammisalo T (1992) Comprehensive oral X-ray diagnosis: Scanora multimodal radiography. A preliminary description. *Dentomaxillofac Radiol* 21, 9-15.
- 19) Arai Y, Tammisalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K (1999) Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 28, 245-248.
- 20) 新井嘉則, 橋本光二, 江島堅一郎, 本田和也, 岩井一男, 篠田宏司(2000)歯科用小型 X 線 CT(Ortho-CT)の臨床例 1000 例の統計的分析. *日歯医学会誌* 19, 54-63.
- 21) 新井嘉則(2000)歯科医療に最適化された小照射野 X 線 CT (Ortho-CT). *日本歯科医師会雑誌* 53, 831-840.
- 22) 岩井一男, 新井嘉則, 橋本光二, 西澤かな枝(2000)小照射野コーンビーム CT 撮影における実効線量. *歯科放射線* 40, 251-259.
- 23) 新井嘉則, 橋本光二, 岩井一男, 篠田宏司(2000)小照射野 X 線 CT の実用機“3DX Multi Image Micro CT”の基本性能. *歯科放射線* 40, 145-154.
- 24) Rottke D, Dreger J, Sawada K, Honda K, Schulze D, (2019) Comparison of manual and dose reduction modes of a MORITA R100 CBCT. *Dentomaxillofac Radiol* 48, doi: 10.1259/dmfr.20180009.
- 25) Hayashi T, Arai Y, Chikui T, Hayashi-Sakai S, Honda K, Indo H, Kawai T, Kobayashi K, Murakami S, Nagasawa M, Naitoh M, Nakayama E, Nikkuni Y, Nishiyama H, Shoji N, Suenaga S, Tanaka R(2018)Clinical guidelines for dental cone-beam computed tomography. *Oral Radiol* 34 ,89-104.
- 26) 日本大学産官学連携知財センター. NUBIC NEWS. https://www.nubic.jp/05guideline/nubic_news_bn/NUBICnews_201903.pdf(2022 年 8 月 20 日アクセス)