

総 説 (2021年度横浜市立大学医学研究奨励賞受賞研究)

正確な上顎位置決めを実現する新たな顎矯正手術法の追求： プレベンドプレートとオステオトミーガイドを用いたアプローチ

今 井 治 樹

横浜市立大学附属市民総合医療センター 歯科・口腔外科・矯正歯科

要 旨：顔面骨格の形態異常や咀嚼・発音等の機能障害を伴う顎変形症患者において、上下顎骨の位置や形態を是正し、咬合を改善するために顎矯正手術が行われている。近年ではCTを用いた3Dシミュレーションにより手術計画が立案されているが、それを実際の手術でいかに正確に再現できるかが治療成功の鍵と言える。この際、下顎の位置は咬合関係から上顎の位置に依存するため、とくに上顎の位置決め（計画した新しい位置に顎骨を移動すること）が重要である。上顎の位置決め法として、かねてより上下の歯列間にスプリントを介在させ、下顎を基準とした相対的位置関係により位置決めを行うダブルスプリント法が広く用いられてきた。しかしながら同法はスプリント作製に伴う技工操作上のエラーに加え、基準とする下顎が術中に動いてしまうという原理的な問題を抱えており、シミュレーション通りの手術を行うことは困難であった。われわれは、通常術中に行うプレートベンディング操作を、シミュレーション後の骨片位置関係を示す実体模型上で事前に行い、このプレートのホール位置をCAD/CAMにて作製したオステオトミーガイドを介して術中に再現することで、下顎を基準としない新たな上顎位置決め法を考案した。本稿では近年の国内における顎矯正手術の動向を交えながら、当科における手術精度追求の取り組みについて報告する。

Key words: 顎矯正手術 (Orthognathic Surgery), Le Fort I 型骨切り術 (Le Fort I Osteotomy), CAD/CAM (Computer-Aided-Design/Computer-Aided Manufacturing), 3Dシミュレーション (3D simulation), 3Dプリンティング (3D printing)

はじめに

顎骨の発育異常で、顔面形態の異常や咀嚼・発音等の機能障害を伴うものを顎変形症と呼ぶ。その発生要因の詳細は明らかとなっていないものの、遺伝的な要素が強いとされており、思春期性の成長スパートに伴い症状が顕在化することが多い。代表的な顎変形症としては、下顎骨が突出した下顎前突症、逆に下顎骨が小さい下顎後退症、上顎骨が突出した上顎前突症、前歯が噛み合わない開咬症、あるいは下顎骨の側方偏位を呈する顔面非対称などがあり、それぞれに特有の咬合不正と顔面変形を伴うほか、心理面への影響も考慮が必要な疾患である。いずれの場合も矯正歯科治療単独での対応は困難であり、

機能および整容面の改善を得るためには、顎矯正手術による上下顎骨の移動と矯正歯科治療を併用した外科的矯正治療が必要となる。その流れとしては、矯正歯科医により顎変形症と診断された後、まず術前矯正治療により適切な歯軸と歯列形態の付与を行う。その上で顎矯正手術を行って骨格的不調和を改善し、術後矯正治療により咬合の仕上げを行うのが一般的である。

顎変形症治療に対する外科的矯正治療は1990年4月より保険適用となり、以来年々認知度が高まっている。日本顎変形症学会が国内163施設を対象に実施した2017年度実態調査¹⁾によると、手術件数は年間合計3405件に及び、その診断内訳は下顎前突症2243例 (69.3%)、下顎後退症542例 (16.7%)、上顎前突症446例 (13.8%)、上顎

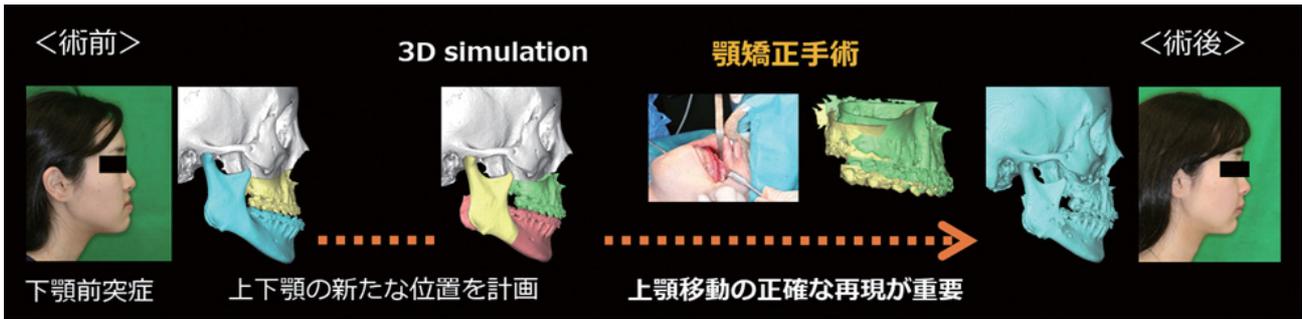


図1 顎矯正手術の流れと3Dシミュレーション

顎矯正手術により、3Dシミュレーションで計画した新たな位置へ上下顎骨を移動するが、上顎の正確な位置決めが重要である。

後退症574例(17.7%)、開咬症252例(7.8%)、顔面非対称528例(16.3%)となっている(臨床的に症状の複合を伴うため、複数回答可の結果)。術式に関しては延べ数で、上顎に対するLe Fort I型骨切り術が1829例(56.5%)に行われ、下顎に対しては、下顎枝矢状分割術(Sagittal split ramus osteotomy, 以下SSRO)が2768例(85.5%)、下顎枝垂直骨切り術が220例(6.8%)であった。また歯槽骨骨切り術(上下顎)が158例(4.9%)、オトガイ形成術が408例(12.6%)、骨延長術が45例(1.4%)と報告されている。

中でも上顎に対するLe Fort I型骨切り術は、顎矯正手術の基本術式ではあるものの、計画通りに正確な上顎の位置決め(目標とする新しい位置に顎骨を移動すること)を行うには高い技術が必要であり、積年の課題とされてきた。

これに対して当科では年間約140例(関連病院を含めると年間約200例)の顎矯正手術を実施しており、その約9割を上下顎移動術(Le Fort I型骨切り術+SSRO)が占めている。全国的に見ても上顎に対する手術施行の割合が高いことが特徴といえ、われわれは正確な上顎位置決めを実現するため様々な工夫を行ってきた。本稿では、当科における上顎位置決め法の変遷および3Dプリンティング技術を応用して考案した、プレバンドプレートとオステオトミーガイドを用いた新術式について紹介する。

顎矯正手術と3Dシミュレーション

顎矯正手術の最初のステップは手術計画の立案である。チェアサイドでの顔貌診査、セファロ分析結果、上下顎歯列模型を参考にしながら、機能的な咬合と顔貌の整容面での改善が得られるよう上下顎骨の位置を設定する。かつては2次元のセファロメトリックプレディクションが主流であったが、顔面非対称症例等では3次元的な顎骨移動の検討が必須であり、現在ではCTを用いた3Dシミュレーションの有用性が広く知られている。当科で

も専用ソフトウェアの国内導入当初より3Dシミュレーションを行っており、同ソフトウェアを用いることで、0.1mm単位での詳細なプランニングや予定移動量の把握、骨干渉部位の予測、3Dセファロ分析等の様々な評価が可能である。

上顎に対するLe Fort I型骨切り術

Le Fort I型骨切り術は1927年にWassmundによってはじめて報告され²⁾、その後Obwegeser³⁾やBell⁴⁾らにより改良され、現在のように顎矯正手術の術式として確立された。Le Fort I型の骨折線に準じて骨切り線を設定するためこのように名付けられており、その手術操作としては、①局所麻酔、②粘膜切開、③粘膜剥離、④骨切り線の印記と骨切り、⑤ダウンフラクチャー(翼突上顎縫合部の分離)、⑥上顎の位置決め、⑦骨片の固定、⑧縫合およびAlar base cinch suture(鼻翼の広がり防止目的)の順に行う。この中で本稿がテーマとしているのが、「上顎の位置決め」のステージである。下顎の位置は咬合関係から上顎の位置に依存するため、事前に計画したシミュレーションの上顎の位置を、実際の手術でいかに正確に再現できるかが、治療成功の鍵と言える(図1)。

上顎位置決め法の歴史的変遷と、当科における精度追求の試み

I. ダブルスプリント法:

モデルサージェリーとCAD/CAM スプリント

上顎の位置決め法として古くはフリーハンドでの操作が行われていたが、その後1990年にElisらによってダブルスプリント法が紹介されると⁵⁾、以来ゴールデンスタンダードとして広く用いられてきた。これはまず事前の技工操作により、特定の下顎位(通常は中心位:CR位)に対する上顎の位置を決定して位置決め用のスプリントを作製し(模型を用いたモデルサージェリー)、それを術中の上下歯列間に介在させることで、下顎を基準とした

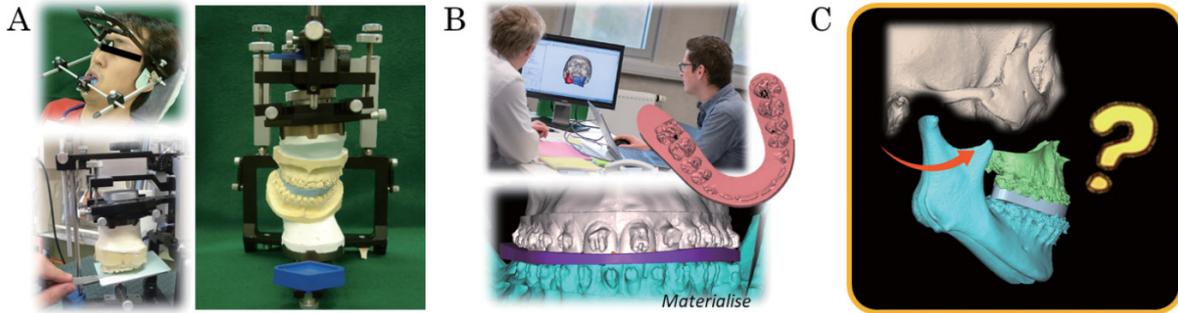


図2 ダブルスプリント法：モデルサージェリーとCAD/CAMスプリント

複雑な臨床および技工操作を経て作製されるモデルサージェリーによるスプリント (A) と、ソフトウェア上で設計され3Dプリンターにより作製されるCAD/CAMスプリント (B)。どちらもスプリント単独では上下顎の相対的な位置関係を示すに過ぎず、下顎は顎関節により可動性を有するため、頭蓋に対して上顎の位置が正しいかどうかの指標がない (C)。

上顎の位置決めを行う方法である。CR位のスプリントと位置決めスプリントの2種類のスプリントを用いるため、ダブルスプリント法と呼ばれる。

当科でもかつては、手術前日に上下顎印象採得、咬合採得、フェイスボウトランスファーを行い、専用の咬合器 (オルソグナティック・リレーター) を用いてスプリントを作製していた (図2A)。しかしながら、同法は煩雑な技工操作を要するため作製過程で多くの誤差を伴うことが知られており、技術的にもCTによる3Dシミュレーションと全く同じ上顎位を再現することは不可能であった。

このシミュレーションとスプリントの不一致を改善するために登場したのがComputer-Aided-Design/Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM) スプリントである。ソフトウェアや3Dスキャナーの進歩により、歯列の3Dデータを顎骨CTデータに統合することが可能となり、3Dシミュレーションを行ったソフトウェア内でそのままスプリントを設計し3Dプリンターで作製できるようになった⁶⁻⁸⁾。これにより、3Dシミュレーションが本当の意味で手術計画そのものとなり、顎骨の予定移動量や骨干渉部位予測、軟組織シミュレーションとの整合性が得られるようになった。当科でも2016年より国内に先駆けて導入を開始しており、とりわけ3Dシミュレーションと術後CTを重ね合わせるだけで容易に術後評価が可能となったことは、手術結果からフィードバックを得てより良い医療の提供を目指す上で大きなメリットとなっている (図2B)。

しかしながらその一方で、CAD/CAMスプリントを用いだけでシミュレーション通りの手術が行えるようになったかという点、答えは否である。スプリントを用いた手術手技自体に以前からの変化はなく、正確な上顎の位置決めは依然として大きな課題であった。なぜならスプリントは下顎に対する上顎の相対的な位置を示すに過ぎず、位置決めのためにはスプリント作製時と同じ下顎位を術中に再現する必要があるが、基準とする下顎には

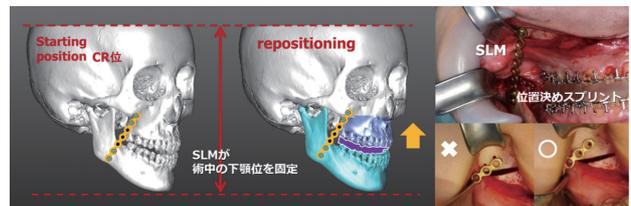


図3 SLMテクニック

左右2本の骨接合用プレートを用いて下顎骨を3次的に固定することで下顎位を再現し、位置決めスプリントによる上顎位置決め精度向上を図る方法。上顎の移動が不十分でプレートと穴が一致しない状態と、骨干渉が除去されSLMが復位された状態 (右下)。

顎関節があり術中に動いてしまうという原理的な問題を抱えているからである (図2C)。このためスプリント単独による上顎の位置決め誤差は、複数の文献において平均1.5~2.0mm程度と報告されており⁹⁻¹¹⁾、顎矯正手術の詳細な移動計画を再現するためには不十分であった。

II. SLM テクニック

そこで正確な上顎の位置決めの実現を目指し、当科では2012年頃よりStraight Locking Mini-plate (SLM) テクニックを考案し臨床応用してきた¹²⁾。本法は左右2本の骨接合用プレートを用いて頭蓋に対して下顎骨を固定し、スプリント作製時の下顎位 (CR位) を3次的に再現する方法である。術前の準備は不要であり、術中操作のみで完了する。まずCRスプリント装着状態にて顎間固定を行い、頬骨弓部と下顎の骨切り線後方部にそれぞれ穴開けを行ってSLMを固定する。位置決めスプリントを装着した際に上顎が正しく移動されていればSLMが正しく復位されるが、もし移動が不十分であれば骨面の穴とプレートが一致せず復位を行うことはできない。誤差を伴う計測を必要とすることなく、上顎の位置づけを正しい方向に導く支援ツールとなるため、ダブルスプリント法の欠点を補い、手術の信頼性の向上に大きな成果をもたらす方法と言える。(図3)

その一方でCAD/CAMスプリントの導入以降可能と

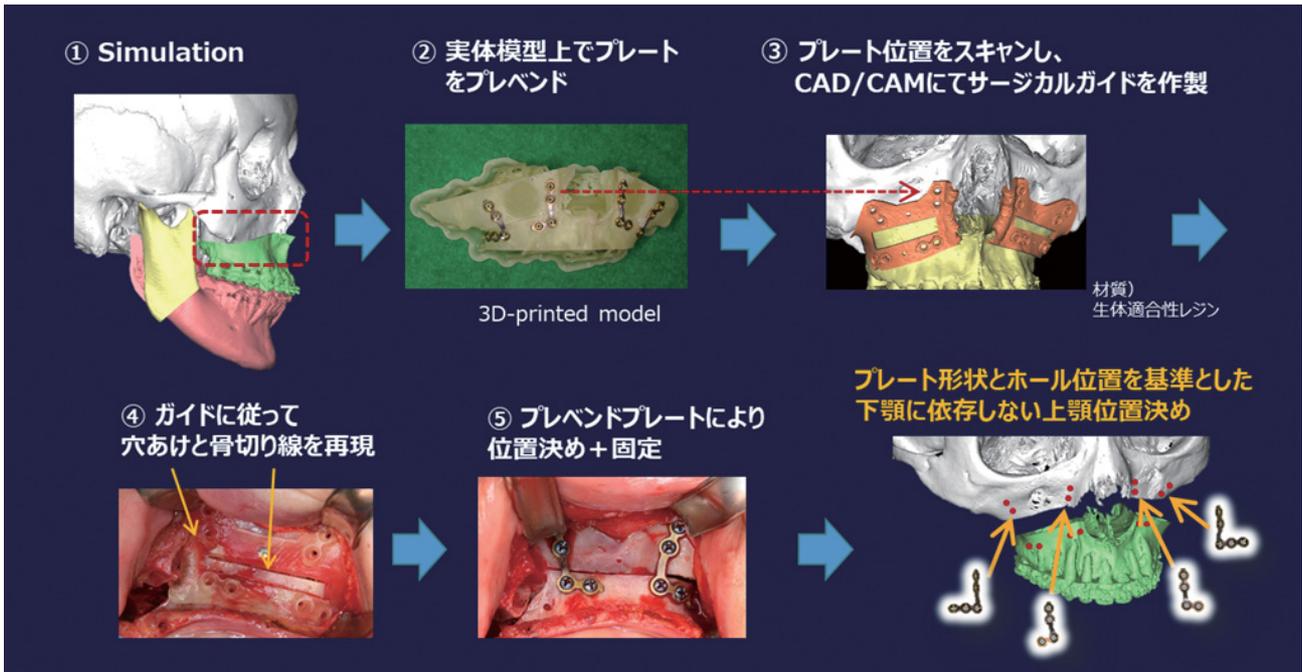


図4 プレバンドプレートとCAD/CAMオステオトミーガイドを用いた上顎位置決め

プレバンドしたプレートのホール位置やシミュレーションの骨切り線を、CAD/CAMにて作製したオステオトミーガイドを介して術中に再現することで、可動性のない頭蓋を基準とした正確な上顎の位置決めが可能となった。

なった術後評価により、位置決め精度の実際が明らかになると、SLMテクニックの限界も明らかとなるようになった。SLMはその構造上、垂直方向へは上顎移動の再現性が高い一方、前後・左右方向へはプレートのたわみ強度の問題から位置決め誤差を生じやすい。下顎を完全に固定することは事実上不可能であり、根本的解決策として、下顎に依存しない上顎位置決め法が求められるようになった。

Ⅲ. 下顎に依存しないプリントレスメソッド：

プレバンドプレート、オステオトミーガイドを用いた上顎位置決め法

これに対して海外ではすでに下顎に依存しない術式が主流となりつつあり、位置決めと固定を兼ねたオーダーメイドのインプラント (Patient Specific Implant : PSI)¹³⁻¹⁶⁾ やナビゲーションシステム¹⁷⁾、CAD/CAM製ガイド¹⁸⁾ や拡張現実¹⁹⁾ を用いる方法など様々な手法が報告されている。なかでもPSIはこの数年、欧米を中心に急速な広がりを見せている。

しかしながら、顎矯正手術に保険が適応されている国内では、認可やコスト等の制約から導入は困難であり、現在もその用途は立っていない。国内外で医療水準に格差が生じかねないこの現状を打開したいとの思いから、われわれは既存の固定用プレートを応用することで、国内でも実現可能な下顎に依存しない上顎位置決め法を考案した。

その手順としては、手術シミュレーション後の骨片位置関係を示す上顎実体模型を3Dプリンターにて出力し、通常術中に行うプレートベンディング操作を、同模型上で術前に行う (プレバンド)。このプレートのホール位置やシミュレーションの骨切り線を、CAD/CAMにて作製したオステオトミーガイドを介して術中に再現することで、プレバンドしたプレートを可動性のない頭蓋を基準としたリポジショニングガイドとして機能させることが可能である。すなわち術中操作では、顎骨の分割前にオステオトミーガイドに従ってプレート固定用の穴開けを行い、骨切り線を決定する。その後、移動の障害となる骨干渉を除去した上で、準備したプレートの形状が骨面に適合し、且つプレートホールが骨上の穴開け位置に一致したところで上顎を固定する (図4)。

本法による上顎位置決め正確度は概ね0.5mm以下であり²⁰⁾、2019年より開始した前向き観察研究では34名のデータを収集し、その上顎位置決め誤差は中央値にて、前後方向0.54mm、左右方向0.16mm、上下方向0.29mmであった。これは前述のダブルスプリント法による誤差を大きく上回る精度であり、先行研究のPSIによる方法の誤差0.39mm¹⁶⁾と比較しても良好な結果が得られている。

さらに手術精度向上に加えて次のような臨床的利点が挙げられる。従来法では、術中に正しく位置決めが行われているかを明確に判断する術がなかったが、本法ではプレート形状とホールの位置関係により上顎の位置が正しいかどうかの指標を得ることができるため、術者は安

心して手術を進めることができるようになった。またプレートベンディング操作を事前に行うことでオペ時間の短縮が期待できるほか、スクリューによる歯根や神経の損傷を事前に回避できるため安全面の向上が得られる。さらに本法は導入にあたって特別な設備やソフトウェアを必要としないため、低コストで費用対効果に優れた方法といえる（PSIの10分の一以下）。現在では本術式の適応を上顎だけでなく下顎にも拡大しており、従来法では困難であった下顎近位骨片の位置づけを含めた3Dシミュレーションの再現にも取り組んでいる。

おわりに

近年のデジタル技術の進歩や3Dプリンターの普及により、顎矯正手術の技術は大きく向上しパラダイムシフトを迎えつつある。当科では上顎位置決め精度の追求を通じてより良い医療の提供を目指してきたが、上記手法によりシミュレーションを反映した効率的な手術が実現可能となった。これにより患者・術者双方の負担が軽減されるほか、正確な手術を確実にこなせることで新たな治療戦略や難症例への対応が可能となるものと期待される。

謝 辞

本研究の遂行にご協力を賜りました当科共同研究者の先生方（廣田誠先生、高須曜先生、藤田紘一先生、山下陽介先生）に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 片桐 渉, 小林正治, 佐々木 朗, 他: 本邦における外科的矯正治療の実態調査—2017年度日本顎変形症学会実態調査の結果より—。日顎変形誌, **30**(3): 213-225, 2020.
- 2) Wassmund M: Frakturen and Luxationen des Gesichtsschädels unter Berücksichtigung der Komplikationen des Hirnschädels. In Klinik and Therapie. Praktische Lehrbuch, **20**: 384, 1927.
- 3) Obwegeser, HL: Surgical correction of small or retrodisplaced maxilla. Plastic & Reconstr Surg, **43**: 351, 1969.
- 4) Bell WH et al.: Surgical correction of the atrophic alveolar ridge. Oral Surg, **43**: 485, 1977.
- 5) Ellis E 3rd.: Accuracy of model surgery; evaluation of an old technique and introduction of a new one. J Oral Maxillofac Surg, **48**: 1161-1167, 1990.
- 6) Choi JY, Song KG, Baek SH: Virtual model surgery and wafer fabrication for orthognathic surgery. Int J Oral Maxillofac Surg, **38**: 1306-1310, 2009.
- 7) Lauren M, McIntyre F: A new computer-assisted method for design and fabrication of occlusal splints. Am J Orthod Dentofacial Orthop, **133**: S130-S135, 2008.
- 8) Dahan S, Le Gall M, Julié D, Salvadori A: New protocols for the manufacture of surgical splints in surgical-orthodontic treatment. Int Orthod, **9**: 42-62, 2011.
- 9) Kwon TG, Choi JW, Kyung HM, Park HS: Accuracy of maxillary repositioning in two-jaw surgery with conventional articulator model surgery versus virtual model surgery. Int J Oral Maxillofac Surg, **43**: 732-738, 2014.
- 10) Dreiseidler T, Lentzen M.P, Zirk M, Safi A.F, Joachim E. Zoeller JE, Kreppel M: Systematic three-dimensional analysis of wafer-based maxillary repositioning procedures in orthognathic surgery. J Craniomaxillofac Surg, **45**: 1828-1834, 2017.
- 11) Lin X, Li B, Wang X, Shen SGF: Accuracy of maxillary repositioning by computer-aided orthognathic surgery in patients with normal temporomandibular joints. Br J Oral Maxillofac Surg, **55**: 504-509, 2017.
- 12) Omura S, Kimizuka S, Iwai T, Tohna I: An accurate maxillary superior repositioning technique without intraoperative measurement in bimaxillary orthognathic surgery. Int J Oral Maxillofac Surg, **41**: 949-951, 2012.
- 13) Polley JW, Figureueroa AA: Orthognathic positioning system: intraoperative system to transfer virtual surgical plan to operating field during orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg, **71**: 911-920, 2013.
- 14) Mazzoni S, Bianchi A, Schiariti G, Badiali G, Marchetti C: Computer-aided design and computer-aided manufacturing cutting guides and customized titanium plates are useful in upper maxilla waferless repositioning. J Oral Maxillofac Surg, **73**: 701-707, 2015.
- 15) Gander T, Bredell M, Eliades T, Rucker M, Essig H: Splintless orthognathic surgery: a novel technique using patient-specific implants (PSI). J Craniomaxillofac Surg, **43**: 319-322, 2015.
- 16) Heufelder M, Wilde F, Pietzka S, Mascha F, Winter K, Schramm A, Rana M: Clinical accuracy of waferless maxillary positioning using customized surgical guides and patient specific osteosynthesis in bimaxillary orthognathic surgery. J Craniomaxillofac Surg, **45**: 1578-1585, 2017.
- 17) Berger M, Nova I, Kallus S, Ristow O, Freudlsperger C, Eisenmann U, Dickhaus H, Engel M, Hoffmann J, Seeberger R: Can electromagnetic-navigated maxillary positioning replace occlusional splints in orthognathic

- surgery? A clinical pilot study. *J Craniomaxillofac Surg*, **45**: 1593-1599, 2017.
- 18) Zhang N, Liu S, Hu Z, Hu J, Zhu S, Li Y: Accuracy of virtual surgical planning in two-jaw orthognathic surgery: comparison of planned and actual results. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*, **122**: 143-15, 2016.
- 19) Zinser MJ, Mischkowski RA, Dreiseidler T, Thamm OC, Rothamel D, Zöller JE: Computer-assisted orthognathic surgery: waferless maxillary positioning, versatility, and accuracy of an image-guided visualisation display. *Br J Oral Maxillofac Surg*, **51**: 827-833, 2013.
- 20) Imai H, Fujita K, Yamashita Y, Yajima Y, Takasu H, Takeda A, Honda K, Iwai T, Mitsudo K, Ono T, Omura S: Accuracy of mandible-independent maxillary repositioning using pre-bent locking plates: a pilot study. *Int J Oral Maxillofac Surg*, **49**: 901-907. 2020.

Abstract

DEVELOPMENT OF MANDIBLE-INDEPENDENT MAXILLARY REPOSITIONING
USING PRE-BENT PLATES AND CAD/CAM OSTEOTOMY GUIDES

Haruki IMAI, Yosuke YAMASHITA, Hikaru TAKASU, Koichi FUJITA, Makoto HIROTA

*Department of Oral and Maxillofacial Surgery/Orthodontics,
Yokohama City University Medical Center*

The surgical accuracy of maxillary repositioning is key to the success of ideal esthetic facial proportions and occlusion in orthognathic surgery. Traditionally, the double-splint method is considered the gold standard for maxillary repositioning, but the procedure is lengthy and prone to error. Recent splintless methods, such as patient-specific implants, show high repositioning accuracy; however, their high costs and technical demands make them inaccessible to all patients. Overcoming these restrictions, we proposed a new cost-effective method of mandible-independent maxillary repositioning using pre-bent locking plates. Plates were bent on 3D-printed maxillary models in the planned position prior to surgery. The locations of the plate holes were replicated in surgery using CAD/CAM osteotomy guides. Pre-bent plates were subsequently fit onto the maxilla, and plate holes were properly set to reposition the maxilla. Our recent research showed that the present method provides highly accurate (median maxillary repositioning deviations under 0.5 mm) and reliable mandible-independent maxillary repositioning. In this paper, our efforts to pursue the surgical accuracy of maxillary repositioning in our department are reported, while recent trends in orthognathic surgery in Japan are discussed.