

咀嚼・嚥下における舌圧の意味と可能性

小野高裕^a，堀 一浩^a，藤原茂弘^a，皆木祥伴^b

What tongue pressure means in mastication and swallowing

Takahiro Ono, DDS, PhD^a, Kazuhiro Hori, DDS, PhD^a, Shigehiro Fujiwara, DDS, PhD^a
and Yoshitomo Minagi, DDS, PhD^b

抄 録

舌は，咀嚼から嚥下にかけての過程において，巧緻な運動を行って食塊の形成と搬送に中心的な役割を果たしている。その運動性を評価する上で，舌と口蓋が接触することによって生じる舌圧は，有効な指標となる。健常者において一定のパターンを示す嚥下時の舌圧発現様相の崩れは，嚥下障害の出現と関連している。また，咀嚼の進行に伴う嚥下前の口腔から中咽頭への食塊の輸送には，咀嚼サイクル毎の舌圧発現の増加が関与している。舌圧や咀嚼能率を用いることによって，咀嚼・嚥下障害の程度を客観的に把握し，治療やリハビリテーションの合理化・能率化をはかることは，超高齢社会における歯科補綴治療のイノベーションに寄与すると思われる。

キーワード

咀嚼，嚥下，舌，舌圧，機能検査

I. はじめに

わが国の歯科補綴学の特徴は，補綴治療の技術体系を日進月歩更新しているだけでなく，多方向の学際的な研究フィールドを有していることであろう。それらのいくつかは専門学会を形成し，ある時は垂直的，ある時は水平的に歯科補綴学と連携することによって，互いに発展・深化し合う関係が築かれている。そうした学際的な研究フィールドは，当然ながら他の専門領域とも繋がっている訳であり，時として歯学領域の枠を越えたイノベーションの胚子を宿す可能性を持っている。

顎口腔機能学も歯科補綴学に隣接した学際的な研究フィールドの一つであり，その源流は咬合学，口腔生理学，人間工学などに求めることができる。近年においては，生体機能のセンシングやバイオメカニクスといった手法を用いて，咀嚼・嚥下機能をより定量的に解析し可視化する試みがさかんに行われてきた。その

成果のいくつかはすでに実用化され，あるいは実用化段階に入り，歯科補綴のみならず，高齢者歯科や摂食嚥下リハビリテーションの臨床現場で咀嚼・嚥下機能をモニタし診断するツールとして期待されている¹⁾。

筆者らも，歯科補綴治療の中で感じた「舌は機能時にどのように口蓋と接触しているのだろうか？」という臨床疑問が端緒となって，今日まで咀嚼・嚥下時舌圧の研究を続けてきた。その間，こうした学際的な研究フィールドの橋渡しによってさまざまな分野とのコラボレーションが実現し，それが研究の継続に繋がったと考えている。今回，日本補綴歯科学会で企画された「口腔機能の客観的評価としての舌圧測定：その意義・開発から展望まで」というテーマのもとに，筆者らが取り組んできた咀嚼・嚥下時舌圧測定法について紹介する機会を得たので，あわせてそこから始まる臨床イノベーションの可能性について論じたい。

^a 新潟大学大学院医歯学総合研究科包括歯科補綴学分野

^b 大阪大学大学院歯学研究科有床義歯学・高齢者歯科学分野

^a Division of Comprehensive Prosthodontics, Niigata University Graduate School of medical and Dental Sciences

^b Department of Removable prosthodontics, Gerodontology and Oral Rehabilitation, Osaka University Graduate School of Dentistry

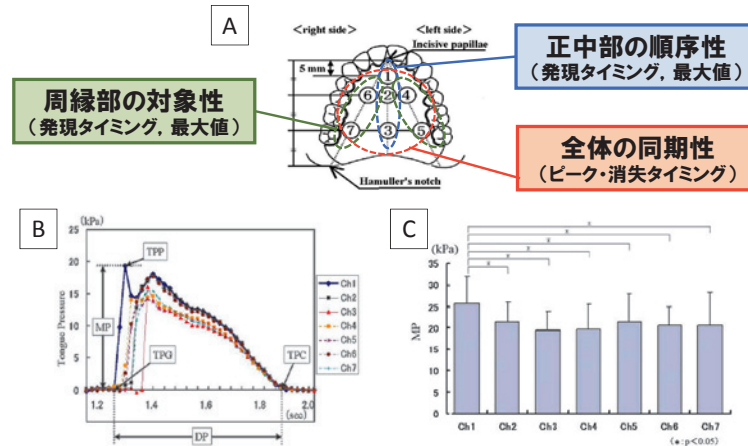


図1 A:健康者における水嚥下時の舌圧発現パターンの要約(数字は計測部位[Ch]を表す), B:15 ml水嚥下時の硬口蓋各部位における舌圧波形(TPG:発現時, TPP:ピーク時, TPC:消失時, MP:最大値), C:硬口蓋各部位における舌圧最大値の比較.

II. 嚥下時の舌圧

1. 嚥下時舌圧の基本パターン

舌は口腔内におけるきわめて巧緻な運動器であり鋭敏な感覚器でもある。主要な口腔機能である、構音、咀嚼、嚥下において、舌の果たす役割はいずれも必要不可欠なものであり、その効果は歯列、歯肉、口蓋といった固有口腔を形成する周囲組織との調和の上に成り立っている。上記の3種類の機能の中で、嚥下において舌は最も強く長時間にわたって口蓋と接触し、食塊を口腔から咽頭へ送り込む最大の動力源となっている²⁾。また、舌は口蓋と適当な接触関係を持つことによって、食塊を封鎖し、嚥下する食塊量を調整している³⁾。北米ではこの嚥下時の舌と口蓋との接触によって発現する嚥下時舌圧の測定がプローブ型の圧測定器を用いて行われていたが⁴⁾、日本では1990年代後半より口蓋床や義歯口蓋部に組み込んだ圧力センサによる測定が試みられるようになった⁵⁾。

筆者らは、先行研究を参考に7個の圧力センサを埋入した実験用口蓋床を用いて硬口蓋各部の舌圧波形を記録し、各部位における舌圧の発現タイミング、持続時間、大きさ、消失タイミングなどから水嚥下時における舌圧発現の基本パターンを明らかにした⁶⁾(図1)。水15 mlを嚥下する際の舌圧は、正中部では、Ch.1 → Ch.2 → Ch.3と前方から後方に向かって発現し、周縁部は左右対称のタイミングで発現する。また、各部位の舌圧は発現して即座にピークに達した後、徐々に低下してほぼ同時に消失するが、他のすべての部位と比較して、Ch.1における舌圧発現時間は長く最大値も大きいことが判明した。

2. 舌圧と咽頭圧の協調性

その後筆者らは、口蓋に貼付して簡便に使用でき、しかも馴化期間を要さない舌圧測定装置として、5箇所の感圧点を有する極薄型(0.1 mm)の舌圧センサシートを開発し^{7,8)}、記録したデータを専用解析ソフトウェアで解析するスワロースキャンシステムとして、今日まで幅広く研究を展開してきた⁹⁾。最近では、リハビリテーション医学領域との共同研究による咽頭内圧測定(マノメトリー)との同時測定で、唾液嚥下時の舌圧と咽頭圧生成の時間的協調性について報告した¹⁰⁾(図2)。すなわち、舌圧がピークに達するタイミングで咽頭圧が発現し、口蓋正中後方部(TCh.3)を除く舌圧は、中咽頭と下咽頭の圧が消失するまで、減少しながらも持続することにより「嚥下圧」を確保していることが示された。

また、独自に開発した喉頭運動センサ¹¹⁾と舌圧の同時測定を行い、水嚥下時における舌圧発現は、舌骨の挙上開始と同期しており、舌骨の最上方位付近で舌圧がピークに達し、舌骨が最前上方位を保っている間は舌圧は減少しながらも維持されていることを報告した¹²⁾(図3)。すなわち、舌圧は単に食塊を口腔から送り込むだけでなく、咽頭の収縮圧と協調しながら、舌骨・喉頭が挙上して食塊が最も安全に咽頭を通過する位置をとっている間は持続することによって、食道も含めた圧勾配を維持していると言えることができる。このように、口腔内における舌圧を測定し、舌骨・喉頭の動きを体表上から記録することにより、嚥下の口腔期と咽頭期を包括的かつ非侵襲的に評価し得る可能性が示された。

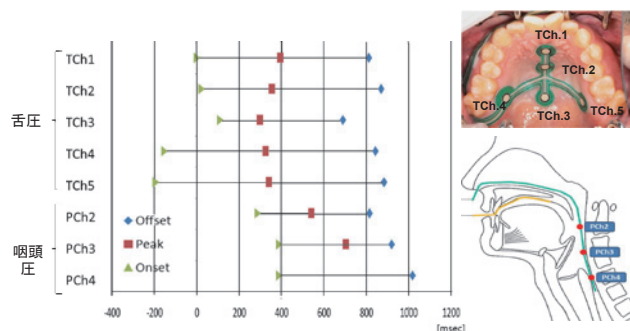


図2 唾液嚥下時における舌圧と咽頭圧の時間的協調性。
(PCh.2: 中咽頭圧, PCh.3: 下咽頭圧, PCh.4: 食道入口部圧)

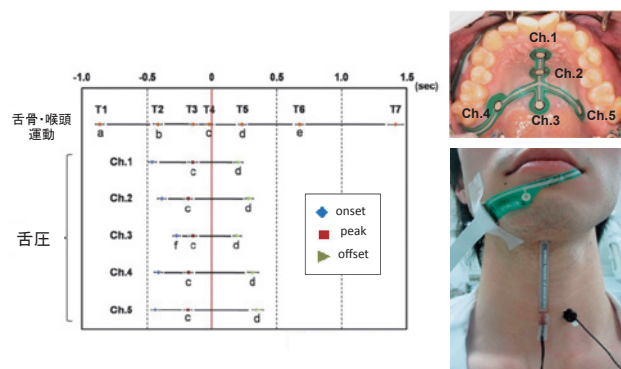


図3 水嚥下時の舌圧と舌骨・喉頭運動との協調性 (T1: 舌骨のゆるやかな動き出し, T2: 急速な挙上開始, T3: 挙上から前方移動への転換, T4: 最前上方位への到達, T5: 復位の開始, T6: 復位ほぼ終了, T7: 完全な復位)。

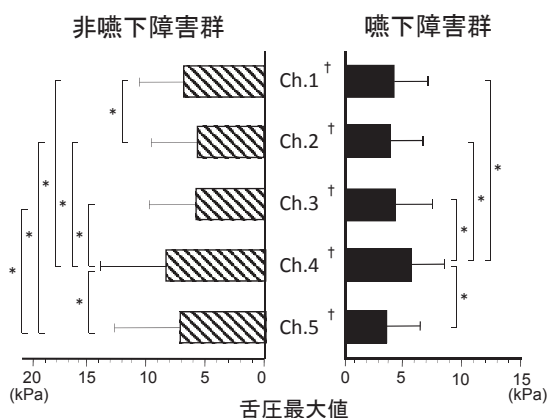


図4 脳卒中急性期患者の非嚥下障害群と嚥下障害群の舌圧最大値の比較 (Chの位置は図3を参照, †: 非嚥下障害群の舌圧が嚥下障害群より有意に大きい)。

3. 舌圧測定による嚥下障害の診断

正常な嚥下における舌圧の発現パターンがいくつかのパラメータで説明できることがわかったことから、次は舌圧パターンの崩れと嚥下障害との関連を探ることによって舌圧測定の診断的価値を検討することになる。従来、最大押し付け舌圧の低下と嚥下障害との関係はいくつかの報告がなされてきたのに対して、嚥下時舌圧については、測定の困難さから非常に報告が少なかった。

筆者らは、国立循環器病研究センター脳血管内科との共同研究を行って、脳卒中急性期患者64名を対象に嚥下時舌圧測定を行い、嚥下障害と舌圧発現様相の異常との関連について検討した^{13,14)}。まず、健常者に見られる正常な舌圧パターンとは異なる異常波形として、舌圧の発現と消失のタイミングが各部位で異なる「非同期性パターン」と、通常一峰性か二峰性に生じる舌圧のピークがそれ以上に生じる「多峰性パターン」に注目し、この2種類の異常パターンの出現率を臨床

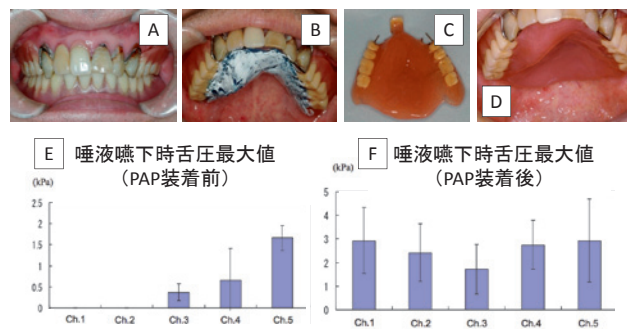


図5 A: 中咽頭癌症例(上顎部分床義歯, 下顎全部床義歯装着), B: 上顎全部床義歯の口蓋部にワックスを添加して舌接触補助床(PAP)に改造, C: 完成した PAP, D: PAP 装着時, E: PAP 装着前の唾液嚥下時舌圧最大値, F: PAP 装着後の唾液嚥下時舌圧最大値 (Chの位置は図3を参照)。

的に経口摂取不可と診断された嚥下障害群 (n=33) と非嚥下障害群 (n=31) との間で比較した¹³⁾。嚥下障害を予測する敏感度は前者では 63%, 後者では 87% で、特異度は前者では 91%, 後者では 71% であった。

また、各感圧部位における舌圧最大値を両群間で比較したところ、嚥下障害群はすべての部位において非嚥下障害群と比べて舌圧が小さく、特に後方周縁部の麻痺側 (Ch.5) において低下し、非麻痺側 (Ch.4) との差が著しいことがわかった¹⁴⁾ (図4)。そして、敏感度・特異度曲線による解析の結果、麻痺側の最大舌圧が 4.6 kPa より低下すると敏感度 71%, 特異度 72% で嚥下障害が予測できることが明らかとなった。興味深いことは、脳卒中急性期においては、非嚥下障害群においても正常パターンである正中舌圧の前後の順序性や後方周縁部舌圧の対称性が損なわれており、嚥下時舌運動の異常が疑われることであった。こうした結果から、診断精度としてはまだ十分とは言えないものの、脳卒中中の嚥下障害の病態の一つとしての

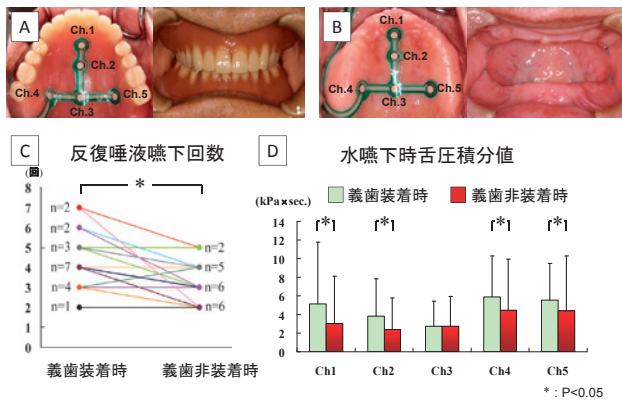


図6 A: 無歯顎者の義歯に舌圧センサシートを貼付したところ, B: 口蓋粘膜に直接センサシートを貼付したところ, C: 義歯装着時・非装着時の反復唾液嚥下回数 (30 秒間), D: 義歯装着時・非装着時の水嚥下時舌圧積分値。

舌運動障害を描出する上で舌圧測定が有効な手段であることが示唆された。

4. 補綴装置による舌圧と嚥下障害の回復

舌の実質欠損ならびに運動制限による構音, 咀嚼, 嚥下に対するリハビリテーションにおいて, 舌接触補助床 (palatal augmentation prosthesis=PAP) が用いられている¹⁵⁻¹⁷⁾。PAP は口蓋床あるいは上顎義歯の口蓋部に厚みを持たせることによって機能時の舌の体積と可動範囲の不足を代償し, 舌機能を賦活化することを目的とした装置であり, 対象疾患には舌癌術後だけでなく, 脳卒中や神経筋疾患も含まれる¹⁸⁾。

PAP 装着の直接的効果は, 舌と口蓋部との接触状況の改善である。例えば, 中咽頭癌術後で舌根部の可動性が悪い症例において, 上顎義歯に舌圧センサシートを貼付して舌圧を測定してみると, 舌と口蓋との接触がほとんど認められなかった¹⁹⁾ (図5)。そこで, 上顎義歯の口蓋部にソフトワックスを添加して舌との接触が得られる形態を付与し, PAP として装着したところ, 健常者と類似した舌圧パターンが得られた。ただし, 長期間経口摂取を停止していたことによる筋力低下から舌圧の絶対値は非常に小さく, 舌の筋力強化訓練が必要であることがわかる。

一方, 全部床義歯を装着している嚥下障害のない患者 19 名 (平均年齢 76.2 ± 7.2 歳) において, 義歯装着時と非装着時の嚥下障害のスクリーニング検査を行ったところ, 非装着時では反復唾液嚥下テストの成績が有意に低下した²⁰⁾ (図6)。同様に嚥下時舌圧を比較したところ, 舌圧持続時間は変わらなかったものの, 舌圧最大値と積分値が有意に高い値を示し, 明らかに

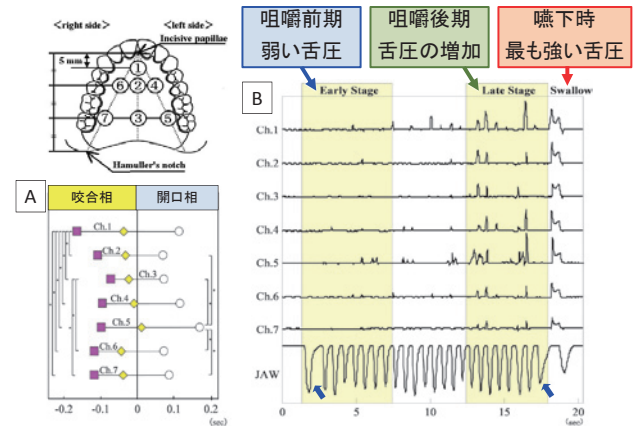


図7 A: グミゼリーの咀嚼ストロークにおける下顎運動と舌圧発現の協調性, B: グミゼリーを咀嚼して嚥下する際の舌圧 (Ch.1-7) (□発現時, ◇ピーク時, ○消失時) と下顎運動垂直成分 (JAW)。

義歯装着時の方が舌圧発現様相が良いという結果が得られた。このことは, 義歯による固有口腔形態と上下顎間の咬合支持の回復が嚥下時舌運動の安定化に寄与していることを示すものである。したがって, 高齢者の摂食嚥下リハビリテーションや介護の現場においては, たとえ固形食品を摂取していなくても, 義歯の装着は嚥下を円滑に行う上で必要と言うことができる。

III. 咀嚼時の舌圧

嚥下時の舌圧測定に用いたのと同じ圧力センサを埋入した実験用口蓋床と下顎運動測定装置を用いて, グミゼリー咀嚼時における舌圧と下顎運動の同時計測を行った²¹⁾。その結果, 硬口蓋各部位における舌圧は, 各咀嚼サイクルの咬合相で発生し, 咬合相末期から開口相初期にかけてピークとなり, 開口相において消失することが明らかとなった (図7)。この協調パターンは, 咀嚼の閉口相において咬断されたグミゼリーを咬合相においてすくい上げ, 開口相で再び咬合面に載せるという, 従来定性的に観察されてきた咀嚼における舌のはたらきと整合するものである。また, 周縁部咀嚼側における舌圧は非咀嚼側と比較して消失のタイミングが遅くなる傾向が見られ, 舌が随意的な片側咀嚼において咀嚼側への回旋を伴う複雑な運動を行っていることが示唆された。

次に, 咀嚼前期 (最初の 8 ストローク) と咀嚼後期 (嚥下前の 8 ストローク) における舌圧発現様相を比較したところ, 下顎運動との協調パターンは両 stage に共通していたものの, 舌圧発現時間においては 2.0 ~ 7.8 倍, 舌圧最大値においては 2.8 ~ 6.9 倍, 咀嚼後期において高い値が認められた²¹⁾ (図7)。以上の結果

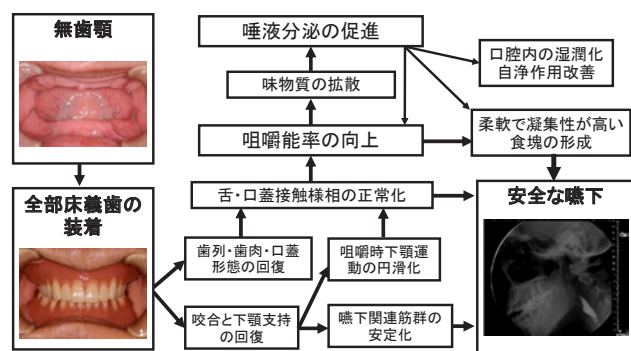


図8 無歯顎者に対する全部床義歯装着の効果。

より、舌はグミゼリーの咀嚼において、下顎運動と協調して運動しているだけでなく、咀嚼の進行に伴って硬口蓋との接触時間と強さを調節することによって、Process modelにおけるStage II transport (咽頭期嚥下に先立つ口腔から咽頭への食塊の搬送)²²⁾を実現していることが示唆された。このような舌による能動的輸送によって嚥下前に食塊が中咽頭へ移動することの機能的な意味はまだ明らかではない。しかし、これまで顎運動に重点が置かれていた咀嚼機能を、食塊形成にともなう舌運動の変調や咽頭期とのつながりといった幅広い視点からとらえる必要があると筆者らは考える。

IX. 咀嚼・嚥下機能評価による臨床イノベーション

筆者らは、舌圧測定と喉頭運動記録を組み合わせた包括的な嚥下機能定量解析システムによるイノベーションの可能性として、「咀嚼・嚥下障害診断の精密化」、「咀嚼・嚥下障害リハビリテーションの合理化・効率化」、「咀嚼・嚥下困難者用食品の開発支援」という3つの方向性を想定し、研究を行っている。この中で、咀嚼・嚥下障害診断とリハビリテーションは、歯科医療が直接関わる領域であり、特に補綴歯科に対しては、義歯やPAPを用いた貢献が期待されている。舌圧測定から得られる情報は、嚥下障害の回復を目的としたPAPの適用診断や効果の判定において有用なものとなるであろう。

ただし、咀嚼障害の診断と治療効果の判定においては、舌圧測定のような機能レベルの評価法だけでは不十分である。治療のゴールが単なる経口摂取ではなく、最終的に咀嚼して食べる楽しみを回復するというのであれば、歯科医師は少なくとも能力レベルの評価尺度をもつ必要がある。義歯による口腔形態の回復

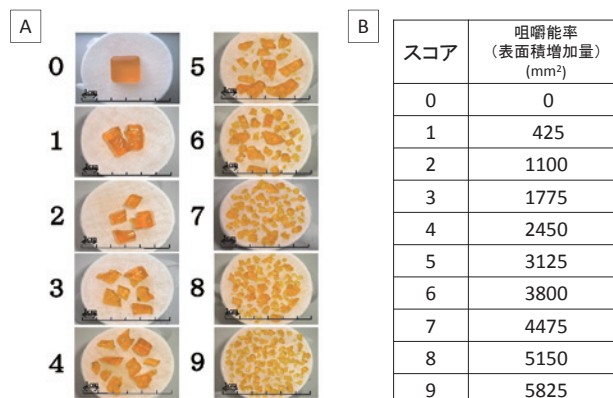


図9 A: グミゼリーを用いた咀嚼能力評価法 (スコア法) におけるスコア判定用写真チャート, B: スコアと咀嚼能率との対比表。

は、食品の粉碎効率を向上させ、嚥下しやすい食塊の形成をうながす。一方で、義歯による下顎の支持は嚥下関連筋群が活動しやすい状況を作り出し、これらの相乗効果によって最終的に安定した嚥下が達成される(図8)。

咀嚼能力の客観的評価法として、筆者らはグミゼリーを用いた咀嚼能力測定法を用いている²³⁾。本法は、30回自由咀嚼後の咬断片を回収し、その細分化の程度を溶出成分の測定²⁴⁾あるいは目視によるスコア判定²⁵⁾によって評価するものである。前者では咬断片表面積の増加量が咀嚼能率として算出されるが、後者のスコア判定を行った場合も咀嚼能率との互換性が担保されている(図9)。このように咀嚼能力を可視化することは、咀嚼障害の程度を客観的に把握して治療計画を立てるだけでなく、歯科医師と患者が治療目標を共有し、その結果について理解する上で有効である。そして、定量的データの蓄積は、より良い治療体系を確立するために必要なエビデンスを構築するという意味で、臨床イノベーションの原動力となり得るのである。

V. おわりに

超高齢社会における歯科補綴の重要性は今更言を俟たないが、補綴治療のニーズに対して対応できていない現実が指摘されてからも久しい。従来、咬合・咀嚼・審美的回復を主目的として長い歴史の中で蓄積されてきた歯科補綴学の体系は、教科書的には「補綴装置による治療体系」であり、そこで記述されているのは、あくまで健常者を対象にし、設備の整った診療室における治療システムであった。しかし、現在の治療ニーズに対応するには、摂食嚥下障害や栄養障害の改善を目的に加え、要介護高齢者も対象とし、診療環境において病棟、介護施設、在宅などの状況を考慮に入

れた「病態による治療体系」を付加する必要があるのではないだろうか。この歯科補綴学のリコンストラクションにおいて、客観的な咀嚼・嚥下機能（能力）検査は、きわめて重要な基盤として位置付けられるものである。

文 献

- 1) Ono T, Hori K, Masuda Y, Hayashi T. Recent advancement in sensing oropharyngeal swallowing function in Japan. *Sensors* 2010; 10: 176-202.
- 2) Shaker R, Cook IJ, Dodds WJ, Hogan WJ. Pressure-flow dynamics of the oral phase of swallowing. *Dysphagia* 1988; 3: 79-84.
- 3) Kahrilas PJ, Lin S, Logemann JA, Ergun GA, Facchini F. Deglutitive tongue action - volume accommodation and bolus propulsion. *Gastroenterology* 1993; 104: 152-162.
- 4) Robbins J, Levine R, Wood J, Roecker EB, Luschei E. Age effects on lingual pressure generation as a risk factor for dysphagia. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1995; 50: M257-M262.
- 5) Ono T, Hori K, Tamine K, Maeda Y. Evaluation of tongue motor biomechanics during swallowing / from oral feeding models to quantitative sensing methods. *Jpn Dent Sci Rev* 2009; 45: 65-74.
- 6) Ono T, Hori K, Nokubi T. Pattern of tongue pressure on hard palate during swallowing. *Dysphagia* 2004; 19: 259-264.
- 7) Hori K, Ono T, Tamine K, Kondoh J, Hamanaka S, Maeda Y et al. A newly developed sensor sheet for measuring tongue pressure in swallowing. *J Prosthodont Res* 2009; 53: 28-32.
- 8) Tamine K, Ono T, Hori K, Kondoh J, Hamanaka S, Maeda Y. Age-related changes in tongue pressure during swallowing. *J Dent Res* 2010; 89:1097-1101.
- 9) 小野高裕, 堀 一浩, 藤原茂弘. 舌圧検査：新しい評価ツールへの期待. *嚥下医学* 2015 ; 4 : 178-181.
- 10) Yano J, Aoyagi Y, Ono T, Hori K, Yamaguchi W, Fujiwara S et al. Sequential coordination between lingual and pharyngeal pressures produced during dry swallowing. *Biomed Res Int* 2014; Article ID 691352.
- 11) Li Q, Hori K, Minagi Y, Ono T, Chen YJ, Kondo J et al. Development of a system to monitor laryngeal movement during swallowing using a bend sensor. *PLoS One* 2013; 8:e70850 doi:10.1371/journal.pone.0070850.
- 12) Li Q, Minagi Y, Hori K, Kondoh J, Fujiwara S, Tamine K et al. Coordination in oro-pharyngeal biomechanics during human swallowing. *Physiol Behav* 2015; 147: 300-305.
- 13) Konaka K, Kondo J, Hirota N, Tamine K, Hori K, Ono T et al. Relationship between tongue pressure production and dysphagia in stroke patients. *Eur Neurol* 2010; 64: 101-107.
- 14) Hirota N, Konaka K, Ono T, Tamine K, Kondo J, Hori K et al. Reduced tongue pressure against the hard palate on the paralyzed side during swallowing predicts dysphagia in acute stroke patients. *Stroke* 2010; 41: 2982-2984.
- 15) 日本補綴歯科学会, 日本老年歯科医学会編. 摂食・嚥下障害, 構音障害に対する舌接触補助床のガイドライン. (MINDS掲載) <<http://minds.jcqhc.or.jp/n/med/4/med0099/G0000340/0001>>; 2011
- 16) 小野高裕, 堀 一浩, 中島純子. 舌接触補助床 (PAP) を用いた口腔機能リハビリテーション. *日歯医師会誌* 2013 ; 66 : 6-15.
- 17) 前田芳信, 阪井丘芳, 小野高裕, 野原幹司, 小谷泰子, 堀 一浩ほか. 開業医のための摂食・嚥下機能改善と装置の作り方 超入門. 東京, クインテッセンス出版 ; 2013.
- 18) 小野高裕. 舌接触補助床 (PAP) は, 脳卒中・神経疾患による嚥下障害・構音障害に有効か? (MINDSトピックス) <<http://minds.jcqhc.or.jp/n/med/8/med0099/T0010729>>; 2013
- 19) Ono T, Hori K, Tamine K, Shiroshita N, Kondoh J, Maeda Y. Application of tongue pressure measurement to rehabilitation of dysphagic patients with prosthesis. *Prosthodont Res Pract* 2008; 7: 240-242.
- 20) Kondoh J, Ono T, Tamine K, Fujiwara S, Minagi Y, Hori K et al. Effect of complete denture wearing on tongue motor biomechanics during swallowing in edentulous elderly. *Geriatr Gerontol Int* 2015; 15: 565-571.
- 21) Hori K, Ono T, Nokubi T. Coordination of tongue pressure and jaw movement in mastication. *J Dent Res* 2006; 85:187-191.
- 22) Palmer JB. Integration of oral and pharyngeal bolus propulsion: A new model for the physiology of swallowing. *Jpn J Dysphag Rehabil* 1997; 1: 15-30.
- 23) 小野高裕, 安井 栄, 野首孝祠. グミゼリーを用いた咀嚼能力評価システムの展開－目で見てわかるスコア法から高精度の全自動法まで－. *FFIジャーナル* 2013 ; 218 : 234-240.
- 24) Nokubi T, Yasui S, Yoshimuta Y, Kida M, Kusunoki C, Ono T et al. Fully automatic measuring system for assessing masticatory performance using β -carotene-containing gummy jelly. *J Oral Rehabil* 2013; 40: 99-105.
- 25) Nokubi T, Yoshimuta Y, Nokubi F, Yasui S, Kusunoki C, Ono T et al. Validity and reliability of a visual scoring method for masticatory ability using gummy jelly. *Gerodontology* 2013; 30: 76-82.

著者連絡先：小野 高裕

〒951-8514 新潟市中央区学校町通2番町
5274 新潟大学大学院医歯学総合研究科包
括歯科補綴学分野
Tel: 025-227-2891
Fax: 025-229-3454
E-mail: ono@dent.niigata-u.ac.jp