日補綴会誌 Ann Jpn Prosthodont Soc 5 : 3-7, 2013

依 頼 論 文

◆特集：日本補綴歯科学会第 121 回学術大会／シンポジウム 3
「咬合面形態の機能的意義を考える」

咬合面とは：その機能と形態

佐々木　啓一

Function and Morphology of Occlusal Surface

Keiichi Sasaki, DDS, PhD

抄　録
人類学領域では，形態の系統発生学的な進化モデル，生体力学的な形態決定モデルとして歯や咬合面の研究が進んでいる．力学や機械加工学に立脚した新たな知見は，これまでの咬合の常識とは異なるところも多い．咬合面形態の機能的な意義を明らかにし，歯科臨床に活用するためには，革新的なセンシング技術を駆使した *in vivo*, *in vitro* での科学的なアプローチ，それらを補完する *in silico* 研究を推進し，咬合に関する理解を深化させることが，ドグマから脱却し，新たな咬合の学理ならびに咬合の修復・再建に必要とされる咬合理論を構築することにつながる．

和文キーワード
咬合面，咀嚼運動，咬合力，バイオメカニクス，人類学

Ⅰ．はじめに

「咬合」に関する学理は，依然としてドグマチックな非 EBM 的な体系に留まっている．その理由の一つは，歯科学における咬合：Occlusion の定義であり，意味付けである．咬合を論じるとき，私どもは歯の形態や対向関係のみならず，下顎位や下顎運動，咀嚼機能や顎口腔系の生体力学等，多様な因子を個々人がそれぞれの学術的背景から考えていた．その結果，「咬合」は混沌たるカオスとなってしまった．

「咬合面」という具体的対象から，咬合学の新たな方向性を探索しようとする本シンポジムの企画趣旨は，まさに慧眼であった．本稿では，まずヒトの咬合面形態を決定づけている生体力学的な要素について，比較人類学を交えて考察した．

Ⅱ．咬合面形態とその機能へのアプローチ

Occlusion とは閉鎖・閉塞であり，顎口腔系では上下顎歯を合わせて外界から体内への管腔を閉塞することが，本来の「咬合」の意味である．したがって咬合面とは，閉塞を成すために上下歯が緊密に相接する面である．閉塞時，すなわち閉口，噛みしめという機能下のバイオメカニクスから見たとき，咬合面は頭蓋と下顎の間に発揮される力を顎関節とともに支持する作用点である．これは上下の咬合面間に物体が介在する場合も同様である．咬合面の欠如は支持の欠如であり，また咬合面形態は作用点形態としてバイオメカニクスに影響する (図 1)．

また物体が食物となり，それを粉砕，混和し嚥下の準備をするとき，咬合面は咀嚼の場，すなわち咀嚼面として機能する．咀嚼面としての咬合面形態は，咀嚼能率という機械加工的な観点と咀嚼時の下顎運動との調和という機能的な観点から論じられる．すなわち咬合面形態は，咀嚼の効率化と下顎運動との調和のうえに成り立っている．これらについては，服部 [1]，加藤 [2] の総説で詳述されている．

一方，咬合面形態を考える場合に，これら自然科学的なアプローチとは別に，クロージャー・ストッパーとイ

東北大学大学院歯学研究科口腔システム補綴学分野
Division of Advanced Prosthetic Dentistry, Tohoku University Graduate School of Dentistry

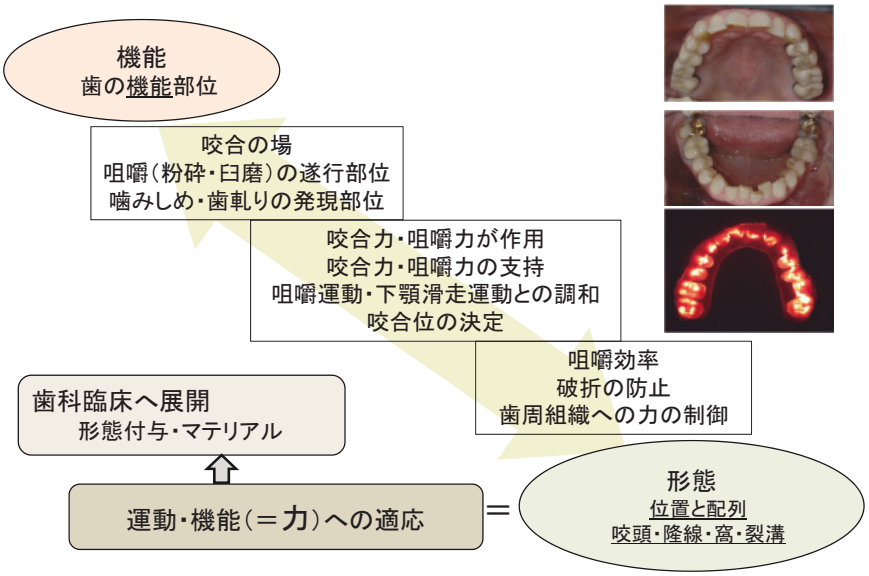

図1　咬合面の機能と形態

コライザーやABCコンタクト，あるいはイミディエートサイドシフトなど，咬合面のワックスアップなどの歯科補綴学的な咬合再建時に必要とされる一連の学理が存在する．そしてときとして，これらが前述の咀嚼能率や咀嚼運動などに基づく自然科学的な咬合面に対する考え方と混合され，混乱に拍車をかけてきた．

ここで理解しておかなければならないことは，ナソロジカルな咬合に関する考え方は，あくまでも咬合器上で製作される歯科補綴装置の咬合を形作るために生み出されてきた学理である，ということである．もちろん，これまでの歩みでヒトの生理学的な機能等の調和を学理に取り入れながら進歩してきたが，あくまでも人類学的な，あるは生理学的なアプローチから明らかにされた自然科学的な真理ではないのである．これらの点について，私どもはしっかりとした認識を持ち，今後の教育研究に臨まなければならない．

それでは，咬合面の形態，機能に関する理解はどの程度，進展したか．残念なことに歯科領域からの発信はほとんどない．一方で，理学的な人類学領域の知見が蓄積されてきている．彼らは形態の系統発生学的な進化モデルとして，また生体力学的な形態決定モデル，すなわちメカノバイオロジカル的な形態進化モデルとして「歯」，「咬合面」を捉えている．このような視点は，臨床歯学としてはなかなか持つことが難しいものではあるが，咬合力や咀嚼，そして咬耗と咬合面との関連を解き明かすなど，私どもの領域にも関連深いところである．そこで次項に，いくつかの彼らの研究を紹介し，今後の私どもの咬合研究展開の方向性を考えてみる．

Ⅲ．ヒトの咀嚼力の比較人類学的評価と咬合面

シドニーのサウスウェールズ大学の研究者らは，人類学的な見地から，現代人の歯，特に咬合面エナメル質の厚さと顎顔面形態の不一致に着目し，計算バイオメカニクス研究を行っている[3]．すなわち，現代人の顎顔面形態はほっそりし，脆弱であり，そのため咀嚼力は弱い，というのが歯学を含めての定説となっている．しかし一方で，ヒトの歯のエナメル質の厚みや歯根面積の大きさは，弱いと考えられる咀嚼力には不似合いであり，他の霊長類と比べても強大な咀嚼力を示唆するものである．そこで彼らは，これまでの各咀嚼筋の筋力を単一筋力とした単純化モデルとした2次元での有限要素解析（FEA）では不十分と考え，ヒト：Homo Sapiensを含む7種のヒト上科（チンパンジー・ゴリラ・オランウータン・シロテナガザル・化石人2種）の頭蓋下顎3次元FEAモデルを作成した．このときヒトのモデルを基準として，要素数を変えることなく基準点を対応させながら変形させて，各ヒト上科のモデルを作成した．各モデルへの筋力ベクトルは，筋の付着部に対応した広い範囲のFEM節点に多数のベクトルとして，入力した．筋力はこれまでの報告に基づき算出した値を用いている．結果では，片側咬みしめ時の咀嚼力と，頭蓋下顎への応力，ひずみを比較検討している．

ヒトの咀嚼力は，他の種と比べると絶対値は若干小さいが，筋力を種間で標準化し比較すると，大咀嚼力を発揮しうることがわかった．すなわち，咀嚼力発揮に効率

的な頭蓋下顎形態をヒトは有しており，小さい筋力で，他のヒト上科と同等の咀嚼力を発揮可能となっている．ヒトの歯の形態はこれに適応しているわけである．ヒトは，体の大きさを考慮すると，咀嚼にとって大変に効率の良い形態を有している．

一方，咀嚼時のヒト頭蓋全体の平均ストレスは，筋力の割に比較的大きい．また下顎骨全体の平均ストレスも，他種に比べて大である．しかし応力集中は，他種と比較し少ない．すなわち，ヒト頭蓋下顎では，咀嚼時の平均ストレスは多種に比べて大であるが，ピーク値は小さくなっている．これは，咀嚼力，特に一過性の大きな咀嚼力への適応が進化したものと思われる．ヒトの歯も厚いエナメル質，頑丈な歯根を有し，このような咀嚼力へ抵抗する形態となっている．同様の傾向は，厚いエナメル質を持つシロテナガザルでも同様に認められた．

咬合面を考える際に，このような生体力学的特徴を過小評価してきたのではないかと思われる．ヒトの顎顔面形態は，短い下顔面高に由来し，顎関節と咬合点（咬合平面）との間のレバーアームが短く，弱い筋力で強大な咀嚼力を発揮するに適している．かつストレス集中が少ない頭蓋下顎骨を有し，歯の形態とともに，硬い食物を粉砕するに適した形態となっているのである．

Ⅳ．咀嚼時の咬合接触と歯・歯周組織のストレス分布

ウィーン大学とフランクフルトの人類学研究者らは，米国の工学者との共同研究として咬合面への荷重条件と歯・歯周組織のストレス分布に関する研究を進めている．その 1 つの論文では，咬耗の進行がストレス分布に及ぼす影響について検討している[4]．その背景には，彼らが「咬耗は歯が語る咀嚼力の負荷状況である」とみなしていることがあり，咬耗面を参考により現実的な歯への荷重条件を設定することを試みたのである．そのため，3 次元の下顎第 1 大臼歯の FEA モデルには，咬耗からうかがえる咬合接触情報を導入し，荷重条件の対照として中心窩への歯軸方向の点荷重・面荷重を付加し，比較検討している．

モデルでは下顎骨下面を拘束した有歯顎頭蓋下顎骨格を作製し，軽度咬耗（stage 2）の右側第 1 大臼歯．咬耗の進んだ（stage 3–4）左側第 1 大臼歯を Micro-CT で撮像し，第 1 大臼歯ならびにその歯周組織を構築した対合歯咬合面は表面のみモデル化した．

咀嚼運動時の咬合接触は，閉口し上下顎歯が接触し咬頭嵌合位まで接触滑走する phase I，咬頭嵌合位，咬頭嵌合位から下顎頬側内斜面と上顎舌側咬頭内斜面が接触滑走し開口に至る phase II の 3 つの相で，Occlusal Fingerprint Analysis（OFA）と呼ぶ方法により同定し，再現されている．荷重条件の設定は，それぞれの相で設定され，phase I, II では合計 75 N, 咬頭嵌合位では 150 N の歯軸方向への力となるよう，接触面に存在する FEA メッシュの節点に分割して与えられている．このとき咬頭嵌合位では，Hattori ら[5]の方法に従って，各咬合接触面に垂直方向に付与されるが，接触滑走する phase I，II では，咬合接触面に垂直に付加された力と，この力により各節点で生じる接触滑走に伴う摩擦力との合力を求め，付加する力をより現実に近いものとしている．咬合面中央への荷重は，歯軸方向へ 150 N とした．

解析結果としては，軽度の咬耗のサンプルでは，いずれの相においても咬合面裂溝，歯頸部近傍の歯冠部ならびに根分岐部に引張り応力が生じ phase では歯根舌側中央部にも発現した．一方，同歯で咬合面中央への荷重した際には，咬合面中央周囲ならびに歯頸部近傍の歯冠部へ多大なストレスの発現が認められた．すなわち咬耗部に咀嚼力が発現する場合には，中央部への荷重時と比べ，歯冠部でのストレス分散が認められた．

咬耗の進んだサンプルでは，明らかに咬合接触面積は拡大し，解析結果としては，軽度の咬耗と比べて咬合面，特に咬合面裂溝の引張応力が減少し，一方，歯冠側面の引張り応力は増大した．Phase II では歯根舌側の引張応力の分布範囲が拡大していた．咬合面中央部への荷重では，軽度の咬耗サンプルと同様の傾向が観察された．

この研究グループでは，咀嚼時の下顎第 1 大臼歯周囲組織のストレス分布と咬合接触との関連を知ること目的として，咬耗の進んだサンプルに，先の方向と同様に咬頭嵌合位での咬合接触面へ 150 N 荷重した条件，中心窩への 150 N の点荷重を付加した条件でのストレス分布を比較検討している[6]．

その解析結果は，咬頭嵌合位での咬合接触では，引張応力が遠心舌側上部 1/3 の歯槽骨に集中して発現し，圧縮応力は近心頬側，遠心下部，舌側上部の歯槽骨に強く発現し，その理由として舌側皮質骨が薄いことが影響しているものと推察している．

一方，中央部への点荷重の場合，引張応力が特に歯槽骨の遠心上縁に，圧縮応力は頬側，舌側歯槽骨中央部に発現する様子が観察されているが，咬頭嵌合位での結果と比較し全体的に応力は小さい．これは拘束部位の設定の影響が大きく，荷重が直接，拘束部位である下顎骨底部へ逃げるからであるものと推察している．

これらの研究では，方法的にいろいろと課題は多いものと思われる．特に咀嚼時に咬耗面が接触滑走するか，という点については議論があるところである．著者らも

表1　咬合面形態の機能的意義の追求

●	**ヒトの咬合力・咀嚼力の理解**
	筋・神経生理学的
	頭蓋下顎の形態学的・生体力学的
	咀嚼力（特に一過性の大きな咀嚼力）への適応が進化
	顎顔面形態・歯の形態：硬い食物を粉砕するに適した形態
●	**咬合面形態，咀嚼力・咬合力発現様相，歯・歯周組織ストレス，咀嚼効率との関連の理解**
	生体内での咀嚼力・咬合力発現様相のデータ：わずか
	咬合接触の面積・咬合力方向を加味した分析の必要性
	咬合面中央部への点荷重・面荷重：歯に大きなストレス
	Facet による咬合接触面積の拡大＝咀嚼効率の向上
●	**咬合理論の再構築の必要性**
	従来の理論：補綴装置の製作上の便宜的な手法
	調整の容易さ・意図しない干渉による過大な力を回避

述べているように，咀嚼時に歯にどのように荷重が加わっているのかという点については，現在までのところ明らかにするような実験もない．また今後，どのような手法で可能なのかも，現時点では不明である．

しかし咬合の様式が，歯ならびに歯周組織の応力分布に影響を及ぼしていることは明らかであり，面荷重と点荷重との違いも大きいことが理解された．従って，私どもが歯への荷重とストレスを考える際には，Hattoriら[5]が指摘しているように，咬合接触面積と方向を考慮しなければならないと，彼らは述べている．歯科医学に身を置く私どもは，真摯に受け止めらければならない．

V．咬合面形態の機能的意義の追求へ向けて

咬合面形態の機能的な意義を明らかにし，歯科臨床に活用するためには，革新的なセンシング技術を駆使した *in vivo*, *in vitro* での科学的なアプローチによる理解の深化が必要である（表1）．またそれらを補完するうえでは，ここで紹介したような *in silico* での研究も強化しなければならない．これらの遂行のためには，はもはや歯学領域のなかにとどまるものではなく，各学問領域で今広く求められている異分野融合研究が不可欠となろう．これらの延長には，CAD/CAM 等による歯科補綴装置咬合面の形成が期待される．*In silico* で上下顎歯列を咬合させ，咀嚼運動を入力して形状最適化のアルゴリズムを3回走らせることで，固有の咬合面形態が再現できるとの報告も，生体医工学分野から既に報告されている[7]．

また，これまで咬合に関して私どもが常識としていた事項を再検討することも必要である．咬耗に伴う咬合接触面積の拡大は，これまで歯への荷重負担を増加させ，また咀嚼効率を低下させるものと認識され，人工的に修復を行う際には，咬合接触面積をなるべく小さくした点接触が推奨されてきた．しかし前述したように咀嚼力による歯冠，歯根部のストレス発現は必ずしも常識に合致するものではなく，咬合接触面積と咀嚼能率の関連に関しても，咬耗による接触面積が大きくなると咀嚼効率の向上が認められるとする報告もある[8]．それぞれ力学的な観点，機械加工的な観点から考えると当然の帰結であると考えられる．

これまでの常識に囚われない，このような知見が蓄積されてきている現在，本来の自然科学に立脚した咬合の学理を構築することが求められている．従来の咬合理論には，歯科補綴装置に咬合を付与するうえでの便宜的な手法，すなわち調整の容易さや，意図しない咬合干渉による過大な力の回避のための理論等が混在しており，その結果として咬合の真理が見失われている．これらのドグマから脱却し，新たに咬合の学理ならびに咬合の修復・再建に必要とされる咬合理論の構築へ向けて歩むべき時期である．

文　献

1) 服部佳功．咬合の形態と口腔機能の調和．日補綴会誌 2012; 5: 14–18.
2) 加藤　均．主機能部位と臼歯部咬合面形態の機能的意義．日補綴会誌 2012; 5: 8–13.
3) Wroe S, Ferrara TL, McHenry CR, Curnoe D, Chamoli U. The craniomandibular mechanics of being human. Proc R Soc B 2010; 277: 3579–3586.

4) Benazzi S, Kullmer O, Grosse IR, Weber GW. Using occlusal wear information and finite element analysis to investigate stress distributions in human molars. J Anat 2011; 219: 259–272.
5) Hattori Y, Satoh C, Kunieda T, Endoh R, Hisamatsu H, Watanabe M. Bite forces and their resultants during forceful intercuspation clenching in humans. J Biomech 2009; 42: 1533–1538.
6) Benazzi S, Kullmer O, Grosse IR, Weber GW. Brief communication: Comparing loading scenarios in lower first molar supporting bone structure using 3D finite element analysis. Am J Phys Anthropol 2012; 147: 128–134.
7) Saini H, Wadell JN, Pullan AJ, Röhrle O. Automatically generating subject-specific functional tooth surfaces using virtual mastication. Ann Biomed Eng 2009; 37: 1646–1653.
8) Bourdiola P, Miocheb L. Correlations between functional and occlusal tooth-surface areas and food texture during natural chewing sequences in humans. Arch Oral Biol 2000; 45: 691–699.

著者連絡先：佐々木　啓一
〒980-8575　宮城県仙台市青葉区星陵町 4-1
Tel: 022-717-8369
Fax: 022-717-8371
E-mail: keii@dent.tohoku.ac.jp