歯科用模型歯牙の試作とその切削性評価

中村雅彦・田中浩國

京都工芸繊維大学工学部物質工学科, 606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

Fabrication of Artificial Dental Model Teeth and Evaluation of Its Machinability

Masahiko NAKAMURA and Hirokuni TANAKA

Kyoto Institute of Technology, Faculty of Engineering and Design, Department of Chemistry and Materials Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi 606

A possibility of artificial fabrication of ceramic model tooth which has a machinability similar to natural human tooth was experimentally discussed. Comparison among many physical properties and the machinability of ceramic model tooth with the natural human tooth showed that such a model tooth can be made artificially. Then important factors were pointed out, i. e., (1) proper combination and blending of raw materials for ceramic commercial porcelain, and (2) proper controlling of firing temperature for densification.

[Received February 5, 1997; Accepted May 9, 1997]

Key-words : Ceramics model tooth, Machinability, Enamel, Knoop hardness, Sinterability

1. 緒 言

歯科医療教育機関の歯科医養成課程で医療技術の主項目である「切削」技術の修得実習には、供給数に制限のある天然歯牙に替えて人工製造した模型歯牙が多く用いられている。模型歯牙の基材は有機樹脂系¹⁾と無機セラミックス系に大別されるが、実際の天然歯牙の切削感を持つ合成歯牙の製造は未だ達成されていない²⁾。

切削感は「硬さ感」や「粘り感」などの微妙な感触の違いが、エナメル質や象牙質などの歯牙部位の違いによって現れ、歯科医師や技工士の個人的感覚による良否の判断に負うところが大きい。したがって、切削特性に再現性のある人工歯牙模型を作るには、材料科学的観点からの天然歯牙切削性の評価と材料物性との関連性の把握が必要である。本実験では安価な数種の汎用陶磁器原料を用いて、実際に物理的諸特性が異なるセラミックス模型歯牙を試作した。一般工業材料の摩耗特性評価試験法に準拠して独自に開発した装置を用いて、これら試作歯牙と天然歯牙との切削性を比較検討することを目的とした。

2. 実 験

2.1 試 料

試料作製には市販の一般陶磁器用原料である長石、ケイ石及びカオリン粘土を用いた。各原料粉体の特性の一部を表1に示す。図1に示す配合で自動乳鉢にて30 min よくかくはん混合後、湿潤基準で5 mass%の水分を粉体に添加し、更に30 min 混練した合計5種類の組成の異なる成形用素地を準備した。

模型歯牙は水分混練素地を98 MPaで単純一軸加圧して矩形(8×10×50 mm)に成形し、105℃で24h乾燥後各種温度で焼成した。焼成条件は昇温速度5℃/min及び最高温度で30 min保持することとして、試作歯牙の焼き締まりの程度を変化させるために焼成温度を(A) 1100℃及び(B) 1200℃の2種とした。したがって、以後は試作歯牙試料名は図1中の配合名数字(①～⑤)に続けて焼成記号(A及びB)を後付けして表現した。歯牙特性の基準となる天然歯牙には成人抜歯牙(NT)を用いた。

2.2 特性評価法

セラミックス試作歯牙(①A～⑤B)及び天然歯牙(NT)

の切削性に関連する諸特性因子として、かさ密度、吸水率、気孔率、細孔径分布、スラブ硬度及び切削特性を対象とした。かさ密度、吸水率及び気孔率の測定はセラミックスに対して通常的に用いられている手法に準拠して行った。細孔径分布の測定は水銀圧入装置(Carlo Erba製, Type-1500)を用い直径 $10^{-2}\mu\text{m}$ ～ $15\mu\text{m}$ の範囲を測定対象とした。スラブ硬度の測定には微小硬度測定装置(島津製作所製, HMV-2000型)を用いた。

Table 1. Physical Properties of Raw Materials Used

Material	Density (g/cm ³)	Ig.loss (%)	Mean particle diam. (μm)
Feldspar	2.54	0.78	6.0
Quartz	2.65	0.10	11.65
Kaolin	2.59	6.35	5.9

Fig. 1. Composition diagram of raw materials for samples.

Fig. 2. Apparatus for testing of machinability of samples.

試作歯牙の切削性試験は図2に示す装置を独自に試作して実施した。切削用試作歯牙の試片は断面積(5×5 mm)一定として耐水性研磨紙(#600)で表面を平滑化して試験に供した。予備的に試作歯牙の切削時間、砥石の回転数や切削特性の再現性を検討して、本実験では切削用砥石にはセラミックス切削用ピトリファイド軸付き砥石(6 mmφ, 構成砥粒: ダイヤモンド粒88 μm, FSK社製, MDY170R V-W)を用いた。

切削条件についても上述のように適正砥石の選定の場合と同様に、砥石軸の回転速度と接触荷重(W)を変化させて砥石の跳ね飛びや歯牙の破断などを回避して、できるかぎり再現性の高い結果を得られる条件を予備的に探った。その結果、図2中の試作歯牙面と砥石との接触荷重(W)は400 gとし回転数3000 r. p. m. の一定条件を切削試験条件とした。切削開始時から歯牙試片面への砥石面の切削深さ(L)を差動トランス(LVDT)にてリアルタイムにパソコンに自動的に取り込みデータ処理に供した。

データ処理のための切削深さ(L)と切削時間(t)との依存性の検定は以下の手順で求めた。切削砥石の一定設定数での回転条件で所定時間切削した後、切削最先端部と切削開始面との間の距離を顕微鏡にて計測して、切削変位の連続記録チャートを基に切削終了時点から一定回転数に達するまでの時間(1 s)までの時間帯の切削深さ(L)を読みとった。

砥石面の切削深さ(L)の切削時間(t)依存性を同種試作歯牙の数回の切削試験結果を平均して表示した。結果の表示は(L)対(t)を両対数プロットすると直線関係が認められたので、最小二乗法によりベストフィットで得られた直線式の勾配は、単位時間当たりの切削深さに相当し切削指数(MIDX)として数値化した。厳密には砥石の直径は切削の進行とともに極微量ではあるが磨耗減少するので、本実験では試料ごとに未使用の新品砥石を用いることにより、砥石の磨耗の差異が切削性に及ぼす影響は除いた。

試作歯牙の焼成後の結晶同定は通法の粉末X線回折分析によった。切削指数と試作歯牙の物理的諸特性因子との相関分析は、京都大学大型計算機センター提供の汎用統計パッケージシステムSAS(SAS Incorp. USA 6.08版)によった。

3. 結果と考察

セラミックス試作歯牙及び天然歯牙(エナメル質部)の物理的諸特性をまとめて表2に示す。本実験では天然歯牙(NT)は内層部に比べて硬度や機械的強度の高いために、切削しにくい外層部エナメル質(アパタイト結晶構成層)を対象に切削性評価を行った。表2で明らかなように焼成温度の100°Cの相違

Table 2. Physical Properties of the Model Ceramic Teeth

Sample name	Bulk. dens. (g/cm ³)	Water absor. (mass%)	Appar. poros. (vol%)	Knoop hard. (-)	Sp. pore volume (cm ³ /g)
1A	1.93	27.5	14.3	101	0.032
2A	1.86	29.3	16.0	—	0.039
3A	2.00	23.4	11.7	—	0.027
4A	2.12	18.0	8.5	224	0.021
5A	2.00	22.4	11.2	197	0.026
1B	2.20	10.1	4.6	285	0.009
2B	2.20	13.0	5.9	358	0.014
3B	2.35	6.1	2.6	446	0.003
4B	2.43	1.4	0.6	520	0.005
5B	2.33	4.7	2.0	473	0.003
NT	3.1	~0	~0	315	~0

により同一配合組成系でも吸水率(開口気孔率に対応する特性因子に相当)、気孔率共に大きく変化することが分かる。原料に用いた長石、粘土、ケイ石のいずれの鉱物成分も配合系を高温焼成した場合には溶化してガラス相を構成する役割を持つが、アルカリ及びアルカリ土類成分を含む長石と粘土は焼結温度を低下させる鉱化剤として作用する。したがって、主に長石の配合比率が高い系ほど焼結密度は向上し気孔率や吸水率は低下する。

本実験の配合条件では、図1中の④組成系は長石及びカオリン粘土の配合が他に比べて多いために1200°Cで焼成した場合に最も焼き締まりが良く硬度も最大値を示している。しかし、①組成系はカオリン粘土配合率が55 mass%で④組成系よりも多いが、長石の配合率が少ないために溶化が不十分で吸水率は高く硬度も低い。④組成系の1100°C及び1200°Cの各焼成体の粉末X線回折分析結果の比較図(図3)から以下のような差異が見られる。すなわち、(1)α-Quartz(Q印)のピーク強度は1200°C焼成体(④B)の方が1100°C焼成体(④A)よりも低下する。(2)1200°C焼成体(④B)での長石及びカオリン粘土成分由来の複数ピーク(F&K印)の大幅な低下。これらの各ピークの低下あるいは消失結果から、100°Cの焼成温度の上昇により各原料鉱物成分のガラス溶化が高度に進んだこ

Fig. 3. XRD charts of the differently fired samples.

とが分かる。④系試料の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察像 (図 4) で比較すると、ガラスマトリックスの形成が 1100°C 焼成体 (④A) では極めて不十分で未分解の粘土あるいは長石粒子が独立的に残留している。他方、1200°C (④B) 焼成体では粘土及び長石の分解と石英成分とのガラス化が高度に進展しよく緻密化していることが分かる。図 4 (c) 天然人歯 (NT) エナメル質部分の破断面の組織と比較すると、試料④B は試料 NT と類似した組織であることが分かる。

表 2 の結果から判断すると、原料鋳物粉の調合と焼成条件の選定により表中の各特性範囲内の希望する硬度や焼結度を持ったセラミックス歯牙が作製できることが分かる。切削性の試験結果を焼成温度別に図 5 に比較して示す。

実験の項で述べた時間依存性 (L) の計測手順から分かるように、砥石の回転数が所定の値に達するまでのラグタイム (1

s) 間の変化は図 5 には示していないが、ラグタイム以後の時間依存性 (L) は図 5 に示されるように両対数表現で直線関係が成立する。実際の人歯牙の治療や実習時の切削操作はエナメル質部分が大幅に切削される長時間にわたって行われる。模型歯の切削特性の評価に対してもエナメル質の大半が切削される長時間で解析すべきである。したがって、切削当初の極短時間 (1 s) 内での切削特性は無視し、図 5 に示すような $\log(L)$ と $\log(t)$ との間に直線性が現れる時間領域にわたって、試作歯牙の切削特性を天然歯牙 (NT) と相互比較して検討した。厳密には、本実験装置及び試料形態等の条件から判断すると、円筒面を持つ砥石面が平面の試料に食い込んで行く過程で切削が進むので砥石と試料とに接触面積は刻々と変化し、単位接触面当たりの接触荷重が変化する。しかし、同一切削条件で比較する限り、図 5 のような両対数プロットで表すと 1 s のラグタイム以後の時間依存性 (L) は見掛け上直線的に変化することが分かった。ここで吸水率値に幅広い変化が現れる 1100°C 焼成条件において、最も緻密化の進んだ試料④A の切削深さ (L) の時間依存は天然歯牙 (NT) に比較して大きくしかも (L) の変化幅も広い (図 5 (a) 参照)。図 5 において (L) の大きさの順位は吸水率、すなわち、開口気孔率におおむね比例するこ

(a) Sample No.④A fired at 1100°C.

(b) Sample No.④B fired at 1200°C.

(c) Sample of natural human tooth.

10 μ m

Fig. 4. SEM photos showing differently sintered sample of No. ④.

Fig. 5. Comparison of relations between the cut depth (L) and the machining duration of time (t) of all teeth listed in Table 2. The gradient of each line indicates the machinability index (MIDX).

とが分かる。

焼成温度が1200℃と高温になると図5(b)に示すように(L)の値は低温(1100℃)焼成に比べて全試料とも減少し天然歯牙(NT)の切削特性に近づくことが分かる。図5の結果を表2の高温焼成試料群(①B~⑤B)の特性因子と対比して見ると、吸水率や見掛け気孔率が共に大きく、硬度が低い試料①Bと②Bの切削特性は良く緻密化した試料③B、④B及び⑤Bと相違し天然歯牙(NT)の切削特性に類似することが分かる。しかし厳密には、表2の物理特性表で示した天然歯牙のエナメル質部を構成するアパタイト結晶組織は極めて微細で、かつ少量の空隙を有し水分を保有するといわれている。したがって、吸水率や見掛け気孔率は完全にゼロではなく、かさ密度も化学合成アパタイト結晶の値よりも幾分小さい。すなわち、本実験でのセラミックス試作歯牙の内部構成はサブミクロン領域での極微細組織においては相違がある。

天然歯牙の切削特性との類似性を評価する場合の適切な表現方法を図5の結果から判断すると、(L)の時間依存性を決定付ける直線勾配と(L)軸切片である。しかし、厳密な意味での切削開始時点での(L)値は本実験では求めていないので切削ラグタイム(約1s)経過時の(L)値を切削開始時点での(L)値として用いて以下の解析を行う。図5(a)及び(b)の各直線勾配(MIDX), $t=1$ sでのL値(ITCP)及び今回試作した全陶歯試料の諸特性値との相関係数の解析結果を表3にマトリックス形式で示す。

表3中で各枠内の上段の数値は直線(1次関数)当てはめによる相関係数値であり、下段は放物線(2次関数)当てはめによる

によるものである。切削直線勾配(MIDX)は試料の緻密性に関係する諸因子(かさ密度(BLKD), 吸水率(WABS), 見掛け気孔率(APRS)及び比細孔容積(SFPV))とは極めて高い相関を示す。切削直線勾配(MIDX)は $t=1$ sでのL値(ITCP)とは直線(1次関数)当てはめによる相関係数は0.681とあまり相関性は高くないが、放物線(2次関数)当てはめになると表中下線で示すように相関係数は0.935と著しく高くなる。(ITCP)と上述の緻密性に関係する特性因子群との相関係数の比較で明らかなように、表中の下線で示すように、(ITCP)はこれら諸特性因子とは直線(1次関数)関係ではなく放物線(2次関数)的に相関することが分かる。すなわち、試料の緻密性の低下とともに放物線的に初期切削量が増加することを意味している。

したがって、切削直線の勾配(MIDX)も組織の緻密性の低下とともに放物線的に増大することが分かる。試料の緻密性に直接関係する諸因子(かさ密度(BLKD), 吸水率(WABS), 見掛け気孔率(APRS)及び比細孔容積(SFPV))間の相関係数はいずれも極めて高い相関係数を示していることから各試料の測定値の信頼性の高さが分かる。ヌープ硬度も試料組織の緻密性に密接に関連すると同時に(ITCP)とは1次関数的よりも2次関数的に相関することが分かる。(MIDX)と(ITCP)との相関性が1次関数的よりも2次関数的に相関が著しく向上する点が極めて興味ある結果といえる。

4. 総 括

天然の成人歯牙と類似の切削特性を持った歯科医療実習用のセラミックス模型歯牙の試作の可能性を検討した。一般工業材料の磨耗特性評価と同形式の切削試験装置を試作して用い以下の結論を得た。

(1) 市販の陶磁器用原料(長石, 石英, カオリン粘土)の配合及び焼成条件を調節することによって、天然歯牙(エナメル質部)と同様の硬度(Knoop)及び切削特性を持ったセラミックス歯牙を作製できることが分かった。

(2) 本実験での比較的低速回転の切削条件においては、試作セラミックス歯牙の切削特性は気孔を減らし焼結性や硬度を高めた試作歯牙が、アパタイト結晶で構成される天然歯牙(エナメル質部)と類似した特性を示すことが判明した。

文 献

- 1) 鈴木司郎, 迎 和彦, 芝 燦彦, *J. Dent. Tech. & Prosth.*, 18, 62-65 (1993).
- 2) 新谷英章, *J. Dent. Engin.*, 82, 30-34 (1987).

Table 3. Correlation Matrix among the Machinability Factors (MIDX and ITCP) and Other Physical Properties of Samples

	ITCP	BLKD	WTAB	APRS	KNHD	SFPV
MIDX	0.681 <i>0.935</i>	0.763 <i>0.764</i>	0.857 <i>0.870</i>	0.863 <i>0.886</i>	0.779 <i>0.792</i>	0.874 <i>0.898</i>
ITCP		0.477 <i>0.761</i>	0.646 <i>0.837</i>	0.697 <i>0.896</i>	0.625 <i>0.820</i>	0.726 <i>0.952</i>
BLKD			0.850 <i>0.990</i>	0.829 <i>0.995</i>	0.570 <i>0.957</i>	0.792 <i>0.986</i>
WTAB				0.997 <i>1.000</i>	0.897 <i>0.907</i>	0.981 <i>0.991</i>
APRS					0.904 <i>0.905</i>	0.989 <i>0.991</i>
KNHD						0.900 <i>0.947</i>

MIDX: Machinability (gradient of each line in Fig.5),
ITCP: Cut depth at 1sec from the beginning of machining,
BLKD: Bulk density, WTAB: Water absorption,
APRS: Apparent porosity, KNHD: Knoop hardness,
SFPV: Specific pore volume.