

強化磁器食器の衝撃強さに及ぼすハンマー重量の影響

林亜希美[†]・柘植英明^{*}・倉知一正・水野正敏・安達信泰^{**}・太田敏孝^{**}

岐阜県セラミックス研究所, 〒507-0811 岐阜県多治見市星ヶ台 3-11

^{*}岐阜県機械材料研究所, 〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288

^{**}名古屋工業大学セラミックス基盤工学研究センター, 〒507-0071 岐阜県多治見市旭ヶ丘 10-6-29

Effect of hammer weight on the impact strength of strengthened porcelain

Akemi HAYASHI[†], Hideaki TSUGE^{*}, Kazumasa KURACHI, Masatoshi MIZUNO, Nobuyasu ADACHI^{**} and Toshitaka OTA^{**}

Gifu Prefectural Ceramics Research Institute, 3-11 Hoshigadai Tajimi Gifu 507-0811, Japan

^{*}Research Institute for Machinery and Materials Gifu Prefectural Government, 1288 Oze Seki Gifu 501-3265, Japan

^{**}Ceramic Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology, 10-6-29 Asahigaoka Tajimi Gifu 507-0071, Japan

The impact strength of ten kinds of strengthened porcelain bowls and plates was evaluated using hammers with three different weights based on JIS S 2402. A strain waveform developed upon impact was measured by a strain gauge adhered to the inside surface on the samples. The impact strength of the plate-type samples was higher than that of the bowl-type samples. The larger samples had higher impact strength. In the case of impact test for larger samples, the impact strength decreased with increasing in the weight of hammer. These behaviors were discussed on the basis of the variations of strain waveform.

©2012 The Ceramic Society of Japan. All rights reserved.

Key-words : Strengthened porcelain, Impact test, Strain behavior, Hammer weight, Strain gauge

[Received January 5, 2012; Accepted March 7, 2012]

1. 緒 言

強化磁器食器は原料の微粒子化やアルミナの添加によって製造され、一般の磁器より2倍から3倍の曲げ強度を有する¹⁾。この強化磁器食器は、プラスチック製食器からの化学物質溶出に関心が高まった事や、最近の食育教育に見られるような情操教育の観点から、学校給食において使用が増加し、その製品強度の評価手法の確立が求められている。一般に強化磁器食器の強度の評価は曲げ強度と衝撃強さによって行われる。しかし、強化磁器食器の衝撃強さに関する報告は少なく、これまで国内の標準化された測定方法はなかった²⁾⁻⁶⁾。そこで平成14年から平成19年にかけて著者らの所属する機関を含め15の陶磁器関連の国内公設試験研究機関が共同で参画し、強化磁器食器の衝撃試験測定方法について検討を行った⁷⁾⁻⁹⁾。その結果、ASTM C368-88に準じた振り子式衝撃試験装置を用いたJIS S 2402「強化磁器食器の縁部衝撃試験方法」が平成22年11月に制定された。ただし、衝撃強さはバックストップ開き角、ハンマー重量(ハンマーモーメント)、上部からの固定重量などの測定条件によって影響を受けることが示されたが、なぜ影響を受けるのかについての理由は不明のまま残された¹⁰⁾。また蒲地らもバックストップ開き角や固定重量により衝撃強度が異なり、皿と碗ではその傾向が異なることを示している¹¹⁾。

著者らは、これまでに衝撃試験時に発生するひずみ波形に

ついて検討し、以下の点を明らかにした¹²⁾⁻¹³⁾。(1)打点及び試験体とバックストップとの接点において、食器内側横方向に最大引っ張り応力が発生する。(2)打点でのひずみ波形は特長的な2つのピークを示す。(3)1つ目のピークはハンマーと試験体との衝突によりその部分で局所的に発生する。(4)2つ目のピークは変形した試験体全体からの復元力が固定されたバックストップの存在のために反作用の力としてはね返る時、ハンマーに再衝突するために生じる。したがって、小さい食器のように打点とバックストップとの接点に近い場合には跳ね返るのが早いために、ハンマーと再衝突しやすく、そのひずみが1つ目のひずみピークに重なり、より大きな2つ目のひずみピークを生じ、結果として衝撃強さが小さくなる。(5)同じ180gのハンマーを用いた場合、負荷エネルギーを変えてもひずみ波形は変化しない^{12),13)}。またハンマー重量の衝撃強さへの影響については、蒲地らはハンマーが重いほど衝撃強さが小さくなることを示し、ハンマー重量を統一する必要性を示唆した⁷⁾。一方、著者らはハンマーが重いほど衝撃強さが大きくなる結果も得ており¹⁰⁾、不明な点も多かった。そこで本報告では大きさや形の異なる強化磁器食器に対して、重量の異なるハンマーを用いて衝撃強さを測定しその時のひずみ波形とハンマー重量の影響について詳細に検討を行った。

2. 実験方法

前述のJIS S 2402「強化磁器の縁部衝撃試験方法」を用いて、表1に示す10種類の大きさの皿形状及びボール形状の

[†] Corresponding author: A. Hayashi; E-mail: hayashi-akemi@pref.gifu.lg.jp

市販強化磁器を試料とし、それぞれ 10 回の衝撃強さの測定を行った。各試料は同じ原料から製造され、前報で報告したように、その組成 (SiO_2 : 42%, Al_2O_3 : 50%, Fe_2O_3 : 0.45%, CaO : 0.3%, MgO : 0.2%, K_2O : 3.2%, Na_2O : 0.7%, Ig. Loss: 0.2%), 曲げ強度 (250MPa), 弾性率 (117GPa), かさ比重 ($2.8\text{g}/\text{cm}^3$), 吸水率 (0.06%) などはほぼ同じである¹³⁾。衝

撃試験にはリサーチアシスト社製 RA-112 を用い、図 1 に示すように、試料 (S) を 2 つの三角柱の形状をしたバックストップ (B) に接触させ、重量の異なる 3 つのハンマー (A: 180g, B: 268g, C: 371g) により、それぞれ初期値 0.04J から始め、1 回ごとの増分 0.02J として打点 (impact point) に打撃を加えた。

打撃時のひずみ波形は、前報¹³⁾と同様に、試料の打点位置の内側横方向に歪みゲージ (KFG-3-120 共和電業株式会社) を貼付し、動歪み計 (共和電業株式会社) とデジタルオシロスコープ (LeCroy Japan WaveSurfer 422) で計測した。動歪み計のレンジは $1\text{k}\mu\text{e}$, ローパスフィルターは 1kHz で測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 各種強化磁器食器の衝撃強さ

図 2 は皿形状及びボール形状の試料について、3 種類のハンマーを用いて測定した衝撃強さに対する破壊確率を示す。

Table 1. Features of specimen

Specimen	Diameter/mm	Height/mm	Weight/g	Type
a	97	28	73	Plate
b	105	49	114	Bowl
c	115	47	122	Bowl
d	125	26	115	Plate
e	128	54	154	Bowl
f	130	36	131	Plate
g	145	59	200	Bowl
h	157	39	197	Plate
i	160	65	301	Bowl
j	168	37	228	Plate

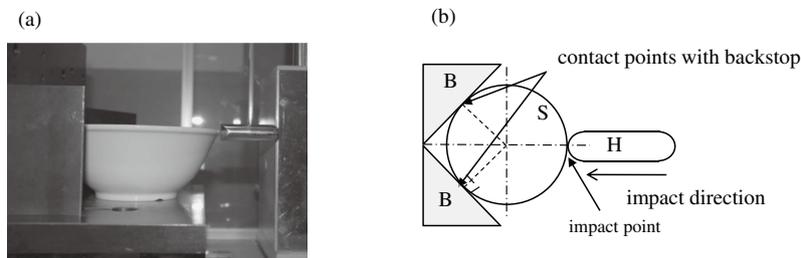


Fig. 1. Schematic illustration of impact test: (a) front view, (b) top view. (S: test specimen, B: backstop, H: hammer)

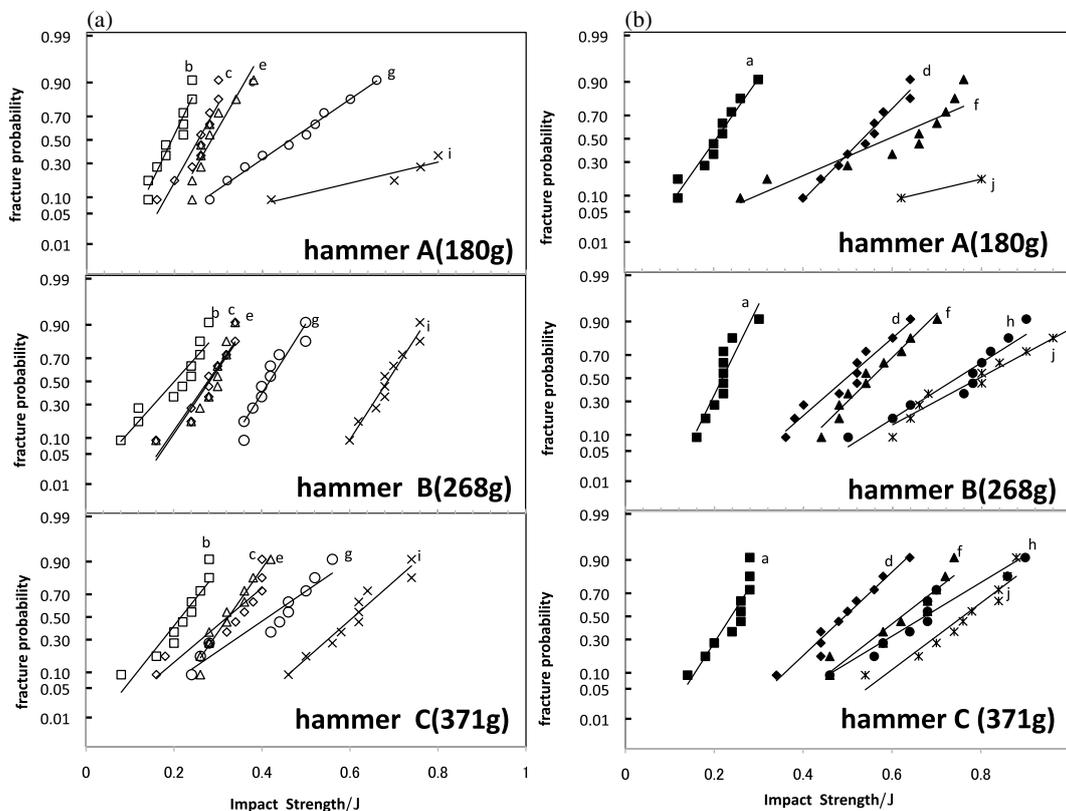


Fig. 2. Fracture probability of impact strength for (a) bowl-type porcelains and (b) plate-type porcelains.

試料 h, i 及び j については、一番軽いハンマー A による試験において、いくつかの試験体でハンマーの振り上げ限界が 0.8J でも割れない場合があった。図中各試料に対するプロットは皿形状及びボール形状試料両者とも、大きな試料の方が、高い破壊エネルギー側にシフトした。表 2 は、図 2 から求めた衝撃強さの平均値とその標準偏差を示す。ここで 0.8J

以上でも割れなかった試料があった場合には衝撃強さ平均値が算出出来ないため《-》と表記した。図 3 はこの平均衝撃強さを試料の直径に対してプロットした図である。皿形状及びボール形状試料の両者とも、大まかにはハンマーの種類にかかわらず直径が大きいほど衝撃強さが高くなることが明らかであった。また、ボール形状試料 (b, c, e, g, i) よりも皿形状試料 (a, d, f, h, j) の方が衝撃強さが高い傾向が見られた。これはボール形状試料では皿形状試料に比べて高さがあるために、バックストップから打点までの距離が長くなり、たわみやすくひずみが大きく生じ、より割れやすくなったと考えられる。

ハンマーの種類による違いに関しては、図 4 に示すようにハンマー重量による影響は試料により異なった。皿形状及びボール形状試料の両者とも、直径が 97~115mm の試料 a, b, c ではハンマー重量の増加とともに衝撃強さがやや増加する傾向を示した。一方、直径が 145~168mm の試料 g, h, i, j ではハンマー重量の増加とともに衝撃強さが減少する傾向を示した。直径がおおよそ中間の 125~128mm の試料 d, e, f ではそれぞれの試料ごとに傾向が異なる。試料 d ではハンマー重量の増加とともに衝撃強さが減少する傾向を示した。試料 e ではハンマー重量が 180g から 268g に増加したときは衝撃強度は変わらず、268g から 371g に増加したときは増加した。また試料 f ではハンマー重量が 180g から 268g に増加した

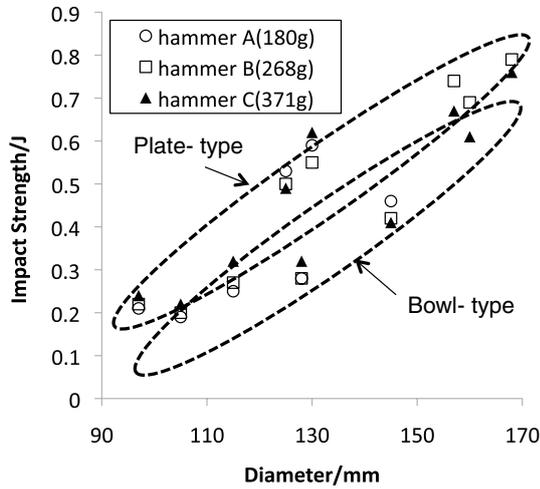


Fig. 3. Variation of impact strength with size of porcelain

Table 2. Impact strength and its standard deviation measured by hammers with three different weights

Hammer	A (180g)		B (268g)		C (371g)	
	Impact Strength/J	Standard Deviation	Impact Strength/J	Standard Deviation	Impact Strength/J	Standard Deviation
a	0.21	0.06	0.22	0.04	0.24	0.05
b	0.19	0.04	0.20	0.07	0.22	0.06
c	0.25	0.04	0.27	0.05	0.32	0.09
d	0.53	0.08	0.50	0.09	0.49	0.09
e	0.28	0.05	0.28	0.05	0.32	0.05
f	0.59	0.17	0.55	0.08	0.62	0.10
g	0.46	0.12	0.42	0.05	0.41	0.11
h	>0.80	-	0.74	0.12	0.67	0.12
i	>0.80	-	0.69	0.05	0.61	0.09
j	>0.80	-	0.79	0.14	0.76	0.10

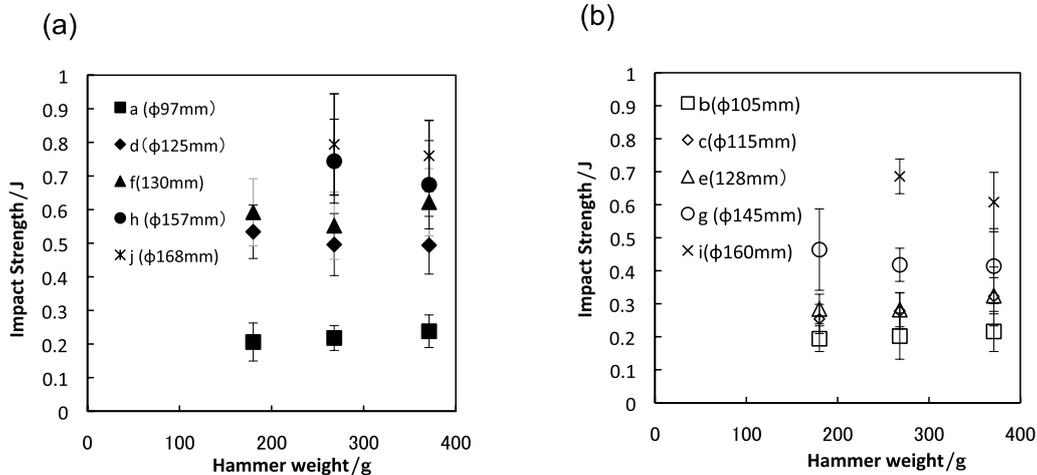


Fig. 4. Variation of impact strength of (a) bowl-type porcelains and (b) plate-type porcelains with weight of hammer.

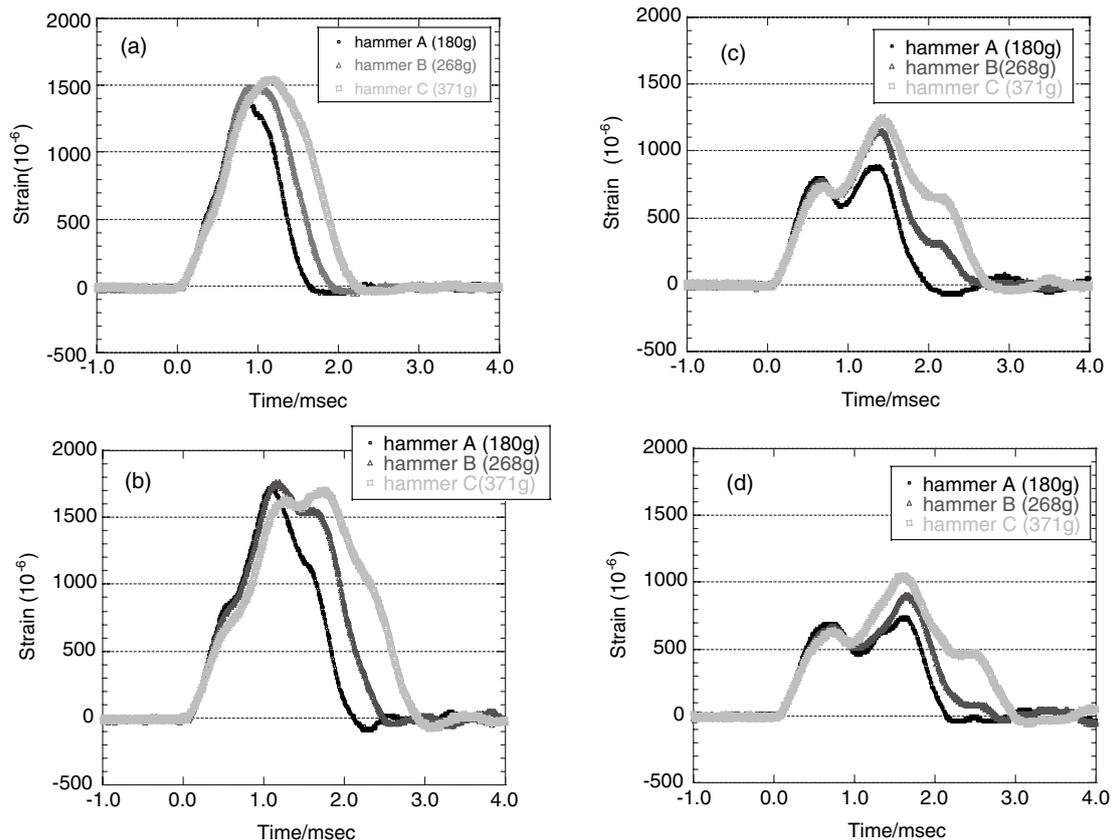


Fig. 5. Strain waveforms on impact point for (a) specimen a, (b) specimen c, (c) specimen h and (d) specimen i.

ときは衝撃強度は減少し、268gから371gに増加したときは増加した。したがって、試料d,e及びfのようなハンマー重量によって衝撃強度が増加から減少に変化する境界付近の大きさにおいては、高さ等の直径以外の形状因子が影響していることも考えられさらなる実験が必要と考えられる。緒言で述べた様に、蒲地らはハンマーが重いほど、衝撃強さが小さくなることを示し、一方著者らはハンマーが重いほど衝撃強さがいくらか大きくなる場合があることを示し、一致しなかった。この理由として、前者は直径141mmの試料に対する結果であり⁷⁾、後者は直径130mmのボール形状¹⁰⁾の結果であり、試料の大きさが異なっていたためと考えられる。

3.2 衝撃時におけるひずみ波形の変化

図5はA,B,Cそれぞれのハンマーを用いて、衝撃エネルギーを与えたときの打点におけるひずみ波形の代表的な変化を示す。ひずみ測定時に与えたエネルギーは図5(a)試料aでは0.1J、それ以外の試料では0.2Jである。なお試料を打撃する瞬間のそれぞれのハンマースピードは、0.1Jの場合A:1.2m/s,B:0.9m/s,C:0.8m/s 0.2Jの場合A:1.7m/s,B:1.3m/s,C:1.1m/sである。打点でのひずみ波形は前報で示した様に¹³⁾、1つ目のひずみピークはハンマーと試験体との衝突により局所的に発生したひずみであり、2つ目のひずみピークは試験体がバックストップから跳ね返り、ハンマーに再衝突するために生じるひずみである¹³⁾。ただし、再衝突の意味は、ハンマーが試験体を打撃したときに一旦離れて、再度衝突する場合だけでなく、試験体の変形に追従してハンマーが

接触したまま、食器に対して再度力が加わる場合も含む。

1つ目のひずみピークについてはすべての試料で、約0.5msec付近に現れた。重いハンマーCに比べ、軽いハンマーAによるひずみ量は $50\sim 100 \times 10^{-6}$ strain大きく現れた。

次に2つ目のひずみピークについては、試料h($\phi 157$)およびi($\phi 160$)に対する衝撃試験では、図5(c)及び(d)に示すように1つ目のひずみピークに比べて2つ目のひずみピークがハンマー重量の増加とともに大きくなった。この理由としては、同じ衝撃エネルギーでは、重いハンマーは軽いハンマーに比べてハンマースピードが遅いため打点位置にとどまっている時間が長く、跳ね返ってくる試験体からのハンマーへの衝撃力が大きいためと考えられる。ここでは、実験に用いた試料はいずれも同じ原料、条件で製造された素地であるので試験体とハンマーの衝突による反発係数も試料による差はないと仮定できる。したがって、それぞれのハンマーの衝突前の速度と衝突後に反対方向に戻っていく速度の比は同じと考えられるので、衝突後においても軽いハンマーはやはり早い速度で戻り、重いハンマーは遅く戻ることが予想される。したがって、ハンマーが重いほど衝突位置付近に止まっている時間は長くなり再衝突の可能性が高くなると考えられる。極端な例を挙げれば、重いハンマーでは、まだハンマーが図1(b)において左方向に動いている状態で試料からの復元力が加わり、大きなひずみを生じ、反対に軽いハンマーでは、すでにハンマーが右方向に戻っていく状態で試料に再衝突することとなり、その力は相殺されて小さくなり、現れるひずみも小さいと考えられる。さらに、重いハンマーでは3

つ目のひずみピークも大きくなっており、これもハンマーが打点位置付近に小さいハンマーよりも長くとどまっているために、再々衝突が起きているためと考えられる。したがって重いハンマーを用いた方がひずみが大きくなり割れやすく、衝撃強さが低かった結果と一致する。

一方、小さい試料では図5(a)および(b)に示すように、2つ目のひずみピークは多少の違いはあるもののハンマー重量にかかわらず同程度に大きかった。また、大きい試料の場合はピークは約1.5msec付近に現れるのに対し、小さい試料の場合は約1msec付近に現れ、跳ね返りによる再衝突の時間が早い事を示している、すなわち、軽いハンマーを用いた場合においては、ハンマーの戻るスピードは速くなるが、それ以上に試料の跳ね返りの方が早いため、本実験条件の範囲内では、ハンマースピードの大小、即ちハンマー重量の大小にかかわらず、ハンマーに再衝突するため、そのひずみが1つ目のピークと重なって、大きなピークとなったと考えられる。さらに図5(b)のように3つ目、4つ目のピークも大きく、これは短時間に試験体とハンマーとの衝突が何度も繰り返されたために生じたと考えられる。そして図5(a)のように、より小さな試料では衝突毎のひずみが重なって、よりブロードな波形が計測されたと考えられる。したがって、大きな試料に比べて小さな試料においてはハンマー重量の大小による2つ目のひずみピークの違いはそれほど小さくなく、衝撃強さに大きな影響を与えなかったと考えられる。

4. 結 論

種々のサイズの強化磁器食器について、重量の異なるハンマーを用いて衝撃試験を行った。その結果、試料の大きさにより衝撃強さが変化し、素地の曲げ強度が同じであっても、直径が大きい試料の方が衝撃強さが高くなることがわかっ

た。また同じ大きさの試料においては、ボール形状に比べて皿形状の方が高い衝撃強さを示した。さらに、試料の直径が大きい場合には、ハンマーが重いほど衝撃強さが低くなる傾向があった。これは同じ衝撃エネルギーを与えて測定する場合、重いハンマーの方が衝突時及び反発時の速度が遅く、バックストップに由来する試験体とハンマーとの再衝突の頻度が高いためにそれらの衝突によるひずみが重なって大きくなるため割れやすくなり、衝撃強さが低くなると考えられた。

References

- 1) Y. Kobayashi and M. Mizuno, *Taikabutu*, **60**, 642–651 (2008).
- 2) Y. Kobayashi, O. Ohira, Y. Ohashi and E. Kato, *J. Ceram. Soc. Japan*, **99**, 495–502 (1991).
- 3) Y. Kobayashi, O. Ohira, Y. Ohashi, and E. Kato, *J. Ceram. Soc. Japan*, **102**, 99–104 (1994).
- 4) K. Hamano, Z. Nakagawa and M. Hasegawa, *J. Ceram. Soc. Japan*, **100**, 1066–1069 (1992).
- 5) K. Fujii, *Report of Imperial Ceramic Experimental Institute*, **26**, 49–90 (1948).
- 6) G. W. Wray and C. M. Brand, *J. Am. Ceram. Soc.*, **12**, 716–724 (1929).
- 7) N. Kamochi, M. Terasaki, H. Katsuki and Y. Kobayashi, *J. Ceram. Soc. Japan*, **112**, 229–233 (2004).
- 8) N. Kamochi, H. Katsuki and T. Watari, *J. Ceram. Soc. Japan*, **117**, 724–728 (2009).
- 9) T. Akizuki, *CERAMICS JAPAN*, **44**, 22–24 (2009).
- 10) A. Hayashi, *CERAMICS JAPAN*, **44**, 12–16 (2009).
- 11) N. Kamochi, *J. Ceram. Soc. Japan*, **118**, 167–169 (2010).
- 12) A. Hayashi, K. Kurachi, M. Mizuno and T. Ota, *Mater. Sci. Eng.*, **18**, 222021 (2011).
- 13) A. Hayashi, H. Tsuge, K. Kurachi, M. Mizuno and T. Ota, *J. Ceram. Soc. Japan* (in press).