

## 強化磁器食器の衝撃試験におけるバックストップの影響 —皿形状試料について—

林 亜希美<sup>\*\*\*</sup>・柘植英明<sup>\*\*\*</sup>・倉知一正<sup>\*\*</sup>・水野正敏<sup>\*\*</sup>・安達信泰<sup>\*</sup>・太田敏孝<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>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

<sup>\*\*</sup>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

<sup>\*\*\*</sup>岐阜県機械材料研究所

〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288

## Effect of Backstop for Strain and Deformation Behavior on Strengthened Porcelain Plate upon Impact Test

Akemi Hayashi<sup>\*\*\*</sup>, Hideaki Tsuge<sup>\*\*\*</sup>, Kazumasa Kurachi<sup>\*\*</sup>, Masatoshi Mizuno<sup>\*\*</sup>,

Nobuyasu Adachi<sup>\*</sup>, Toshitaka Ota<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Ceramic Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology

10-6-29, Asahigaoka, Tajimi, Gifu, 507-0071 JAPAN

<sup>\*\*</sup>Gifu prefectural Ceramics Research Institute

3-11 Hoshigadai Tajimi Gifu, 507-0811 JAPAN

<sup>\*\*\*</sup>Research Institute for Machinery and Materials Gifu Prefectural Government

1288, Oze, Seki, Gifu, 501-3265 JAPAN

### Abstract

The impact strengths of strengthened porcelain plates were evaluated using an impact examination machine based on JIS S 2402. A strain waveform developed upon impact was measured by a strain gauge adhered to the inside surface on the porcelain plate. The deformation of the porcelain plates was observed by high-speed camera. The strain waveforms showed two noteworthy peaks. The first peak was found to be caused by the initial impact, and the second peak was found to be caused by the restorative force generated by the deformation of plate, which acted as a backstop. The high-speed camera also revealed that the plate re-collided with the hammer or pushed the hammer again as the plate returned to its original shape and position, resulting in the second peak. The variation of the strain waveform was found to be related to the size of plate and the open angle of the backstop.

### 1. 緒言

強化磁器食器は一般の磁器食器よりも2倍から3倍の強度をもつ食器として現在市販されており、学校給食やレストランなどでの使用が増えている。この強化磁器は原料粒子の微粒子化やアルミナの添加によって曲げ強度の向上が行われている。市販されている強化磁器のうち学校給食で使われているものでは200MPa～300MPaの強度を示す<sup>1)</sup>。また一般の磁器は70MPa～100MPaを示すことが多い。文部科学省の調査では学校給食においては平成3年ころまではアルマイトやステンレスなどの金属製の食器が50%以上を占め、残りがメラミン、ポリプロピレンなどのプラスチック製で、強化磁器を含

む陶磁器製の食器はほとんど使われていなかった。しかし、情操教育の観点やプラスチック製食器での環境ホルモンの溶出の可能性が指摘されたことから強化磁器食器の使用率は徐々に増加し、平成18年度の調査では33%を占めるようになってきている。強化磁器はまた衝撃強度を高めるという点でリム部(食器縁部)に丸みを持たせている製品も多い。

一般的に食器の強度は曲げ強度と衝撃強度で評価される。強化磁器の強度に関する研究はこれまで曲げ強度で多く行われてきた<sup>2)6)</sup>。しかし衝撃強度に関する研究は少なかった。

実際の食器は落下や食器洗浄機中、運搬などでの衝撃

的な力を受けることによって破損が生じる。そのため衝撃試験は食器の製品強度を考える上で重要である。近年では、先ほど述べたように給食用食器などに強化磁器食器の導入が増加したことで、食器の衝撃強度に関する試験依頼が各地の試験機関で増加した。そこで陶磁器に関する研究を行う公設試験機関と共同して強化磁器の衝撃試験方法の規格化に取り組んだ<sup>7)</sup>。

蒲地ら<sup>8)</sup>は強化磁器の衝撃試験結果について統計的な検討を行い、その分布が正規分布に従う事などを示した。また蒲地<sup>9)</sup>らは破面解析を行った結果から衝撃試験時の破壊が打点位置における引っ張り応力が起点となっていることを示している。秋月らは応力解析を用いて、打点内側が破壊起点であることを示した。<sup>10)</sup>

さらに、公設試験機関と共同で行った共通試験の中で、衝撃試験では衝撃強度がハンマーモーメントや後部支持具、食器形状、固定重量などの測定条件の影響を受ける事が示されたが、なぜ影響を受けるのかについては不明のまま残された。<sup>7)-8)</sup>

これまで我々は衝撃試験時に強化磁器食器に発生するひずみについてひずみゲージを用いて様々な測定を行ってきた。その結果、打点の内側外側、縦方向、横方向を比較すると、内側横方向に引っ張りひずみ、外側横方向に圧縮ひずみ、内側縦方向に圧縮ひずみ、外側縦方向

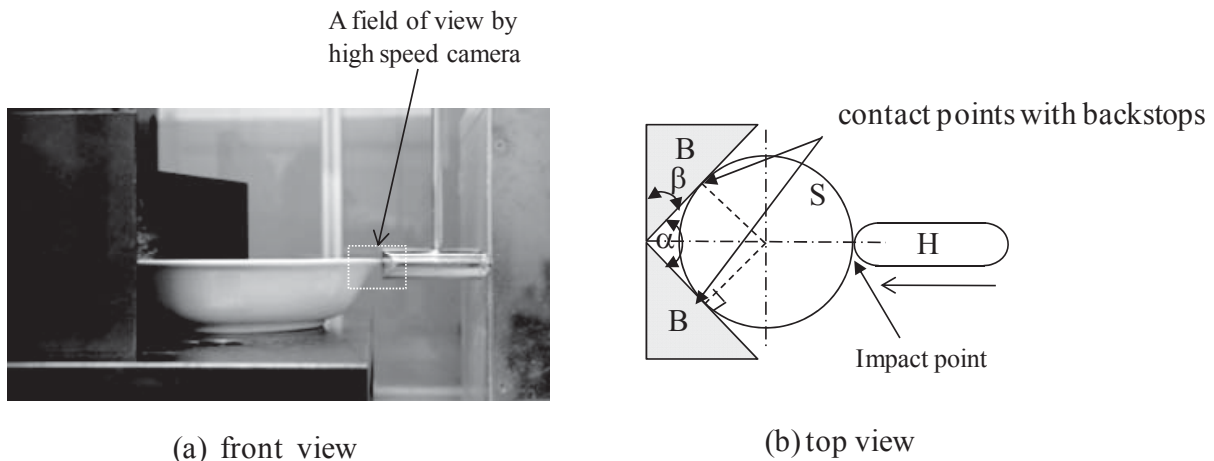
に引っ張りひずみが発生した。この4カ所では内側横方向が一番大きな応力を示した<sup>11)</sup>。また、食器縁部円周方向では大きな引っ張りひずみが打点とバックストップ接点で発生する。打点でのひずみ波形は食器形状によって異なり特徴的な2つのピークを示す<sup>11)</sup>。そしてボール形状試料について衝撃試験時に発生するひずみ波形について詳細に検討した結果、ファーストピークは食器とハンマーの衝突により打点付近で局所的に発生し、セカンドピークは変形した試験体全体からの復元力が固定されたバックストップの存在のために反作用の力としてはね返る時、ハンマーに再衝突するために生じることを明らかにした<sup>12)</sup>。また、蒲地らもバックストップの開き角の影響がボールと皿で異なることを報告している<sup>13)</sup>。そこで本報告では皿形状試料について衝撃試験時に発生するひずみ波形について詳細に検討した。

## 2. 実験方法

大きさの異なる2つの市販強化磁器食器の皿を試料として用いた。この2つの皿のうち直径139mmの試料を皿1、直径169mmの試料を皿2と表記することとする。用いた試料は同じ材質、同じ焼成条件で作られ、サイズのみが異なる市販品である。Table1に試料の特性を示す。曲げ強度は日本セラミックス協会規格

**Table 1** Features and properties of the strengthened porcelain

	Diameter (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Flexural Strength (MPa)	Bulk density(g/cm <sup>3</sup> )	Porosity(%)	Young's modulus (GPa)	Impact Strength(J)
plate 1 (small)	139	31	130	244	2.8	0.05	122	0.41
plate 2 (large)	169	39	233	257	2.8	0.04	123	0.79



**Fig. 1** Schematic illustration of impact test.:(a) front view (b) top view ( S:Test specimen, B:back stop ,H: hammer ,  $\alpha$ : open angle,  $\beta$ : apex angle)

**Table. 2** Peak time and time lag on impact point

	First peak	Second peak	Time lag between first peak and second peak
Bowl 1	0.5msec	1.2msec	0.7msec
Bowl 2	0.5msec	1.5msec	1.0msec
Plate 1	0.5msec	1.0msec	0.5msec
Plate 2	0.5msec	1.3msec	0.8msec

(JCRS203-1996：食器用強化磁器食器の曲げ強さ試験方法)により切り出し試験片を用いて行った。高密度、気孔率はアルキメデス法で弾性率は超音波パルス法を用いて測定した。Table1に示した様に用いた食器は高密度、気孔率曲げ強度、弾性率はほぼ同じであるが、衝撃強度が大きく異なっている。Table1に示した衝撃強度はリサーチアシスト社製の衝撃試験機(RA-112)を用いてJIS S 2402に基づいて行った。衝撃試験方法の模式図をFig.1に示す。試験手順を示す。まず、バックストップの間に試料を設置する。次に1回目の打撃を0.04Jまで振り上げ行う。試料に破損が見られなかった場合には、1回ごとに0.02J振り上げエネルギーを増加させ破損するまで打撃を行う。破損したときの振り上げエネルギーを衝撃強度とする。バックストップの開き角は120°とした。さらにバックストップの開き角を90°、120°、150°と変え測定を行った。Fig.1の $\beta$ の角度を15°、30°、45°とすることで開き角 $\alpha$ を変えた。ハンマーは重量180gのものを使用した。ひずみ測定時の振り上げエネルギーは0.2Jとした。このエネルギー値はTable1に示したようにどちらの皿でも破損するエネルギーよりも十分小さい値である。ひずみ測定中に食器は破損を起こさない。

試料に発生するひずみはひずみゲージ(共和電業製

KFG-3-120)、動ひずみ計(共和電業製DPM713B)、オシロスコープ(LeCroy社製, WaveSurfer 422)を用いて測定した。ひずみは次に示す条件で測定を行った。測定レンジは1k- $\mu\epsilon$ 、ローパスフィルターは1k Hzとした。ひずみゲージは試料の打点(impact point)とバックストップとの接点(contact point)の内側横方向に貼り付けた。この2点は緑部円周で最も大きなひずみが発生する場所である。<sup>11)</sup>

衝撃試験の間にかかる食器の変形とハンマーの動きを観察するために高速度カメラ(photron FASTCAM SA MRPG Model 120k-3M)を用いて撮影を行った。撮影速度は10,000 fpsとした。

### 3. 結果及び考察

Fig.2に打点での皿1、皿2それぞれのひずみ波形を示す。2つの特徴的なピークがひずみ波形に計測されている。ファーストピークは皿のサイズにかかわらず0.5msec付近にはほぼ同じ値でみられるが、セカンドピークは皿のサイズに依存して異なる時間(皿1:1.0msec, 皿2:1.3msec)、大きさで現れた。

ファーストピークとセカンドピークの時間差は皿1では約0.5msec、皿2では約0.8msecである。セカンドピークのひずみ量は皿1の方が皿2よりも大きい。上記の

**Table. 3** Peak time and time lag on contact point.

	First peak	(Delay time from impact point)	Second peak	(Delay time from impact point)	Time lag between first peak and second peak
Bowl 1	0.85msec	(0.35msec)	1.55msec	(0.35msec)	0.7msec
Bowl 2	1.0msec	(0.50msec)	2.0msec	(0.50msec)	1.0msec
Plate 1	0.75msec	(0.25msec)	1.25msec	(0.25msec)	0.5msec
Plate 2	0.9msec	(0.40msec)	1.7msec	(0.40msec)	0.8msec

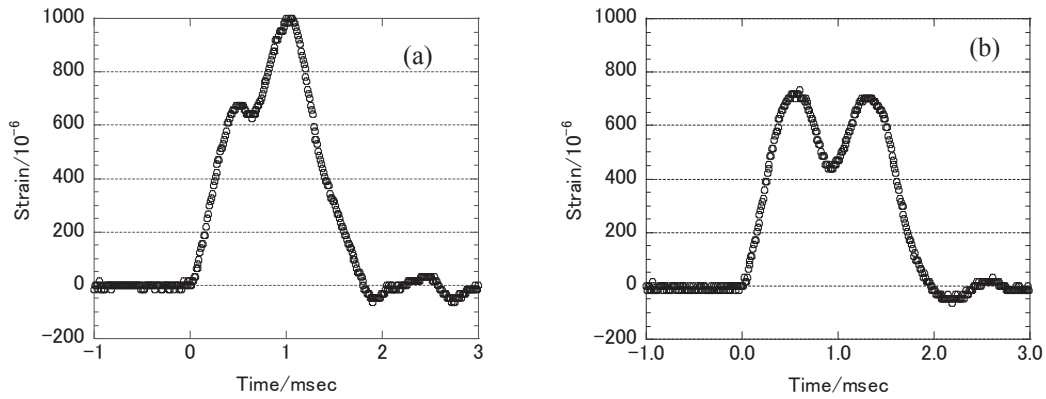


Fig. 2 Strain waveforms at impact point for (a) plate 1 small and (b) plate 2 large with backstops

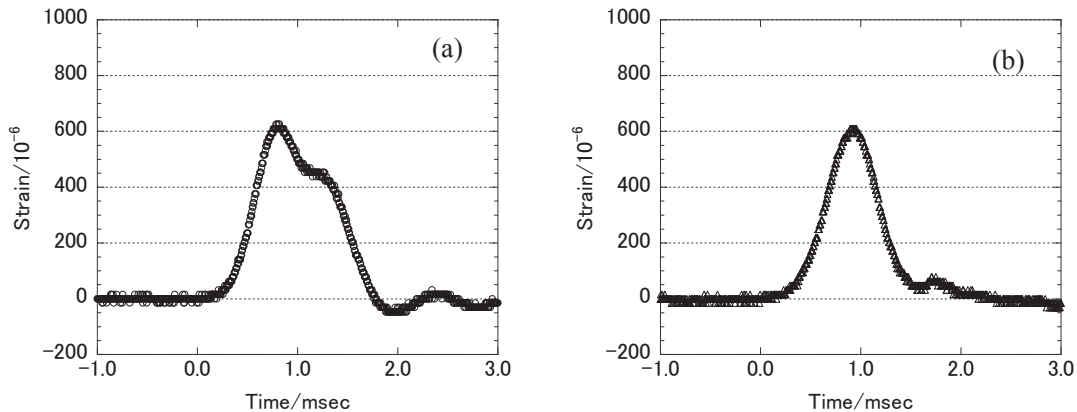


Fig. 3 Strain waveforms at the contact point with backstops for (a) plate 1 small and (b) plate 2 large.

ようにセカンドピークは直径の小さい方が早く現れる。この現象はボールでも同様であった。ボール<sup>12)</sup>での結果と比較を Table 2 に示す。

Fig.3 にバックストップ接点に現れるひずみ波形を示す。皿 1 では 2 つのピークが見られ、それぞれ 0.75 msec と 1.25 msec である。皿 2 では 0.9 msec と 1.7 msec である。これらの接点でのひずみ波形においては、ひずみ波形のピークの現れる時間は打点でのピークが現れる時間から遅れが生じて現れている。その遅れは皿 1 で 0.25 msec、皿 2 で 0.4 msec である。バックストップ接点でのひずみ波形もボールでの波形と同様の挙動を示すことが分かった。ボール<sup>12)</sup>及び皿でのピーク時間を Table 3 に示す。

次に衝撃時における食器の変形及びハンマーの動きを調べるため、高速度カメラを用いて観察した結果を Fig.4 に示す。(a)、(a') は試料とハンマーが接触を始めた瞬間の写真で、この時点衝撃試験の 0 msec とし、この位置をハンマー位置のゼロ点とした。ハンマーによって試料が押されることによって (a)~(d) 及び (a')~(d') の間はハンマー及び試料の縁は左方向に動いた。その後、ハンマーは (d)~(h)、及び (d')~(h') に見られるように跳ね返って右方向に動いた。試料は皿 2 (d') に見られるようにハンマーにより、左方向に変位し、その後元の位置に戻るよう右方向に変位した。この場合接触

していた試料とハンマーは一旦離れる状態が起きた。その後、皿 2 (e') において示されるように、Fig.4 (e') に示すようにハンマーと試料が再び衝突していた

Fig.2 から Fig.4 に示した結果から皿 2 ではボールで検討したような<sup>12)</sup> Fig.5 の模式図に示す変形がおきていると考えられる。Fig.5 (a) は衝撃開始の瞬間で、ハンマーが試料に接触を始め、それより前の時間では食器にはひずみは発生していない。ハンマーが皿を打撃した直後には、打撃点において局所的にひずみが生じる (Fig.5 (b))。続いて Fig.5 (c) の様に打撃点のひずみは局所的、及び全体の変形に伴い、増加し、ファーストピークの最大値まで増加する。変形がバックストップまで伝わり、Fig.5 (d) の様に皿の形状は円から楕円に変わる。そのときに試料はバックストップに衝突しバックストップ接点に Fig.3 に見られる大きなひずみが発生する。一方ハンマーは、反対の方向に皿との衝突の跳ね返りで戻り始める。

皿 1 の場合には、皿がハンマーと接触したまま残っているのが高速度カメラで観察されているが、食器がもともどろうする力は働いていると考えられる。皿に局所的に発生するひずみによりおこる動きが、打撃点でのひずみ波形でのセカンドピークを起こしていると考えられる。この場合、セカンドピークは、皿 2 よりも早く、大きく現れる。皿 1 では皿 2 よりもバックストップ接点と打点 (ハンマー接触位置) との距離が近く、反作用

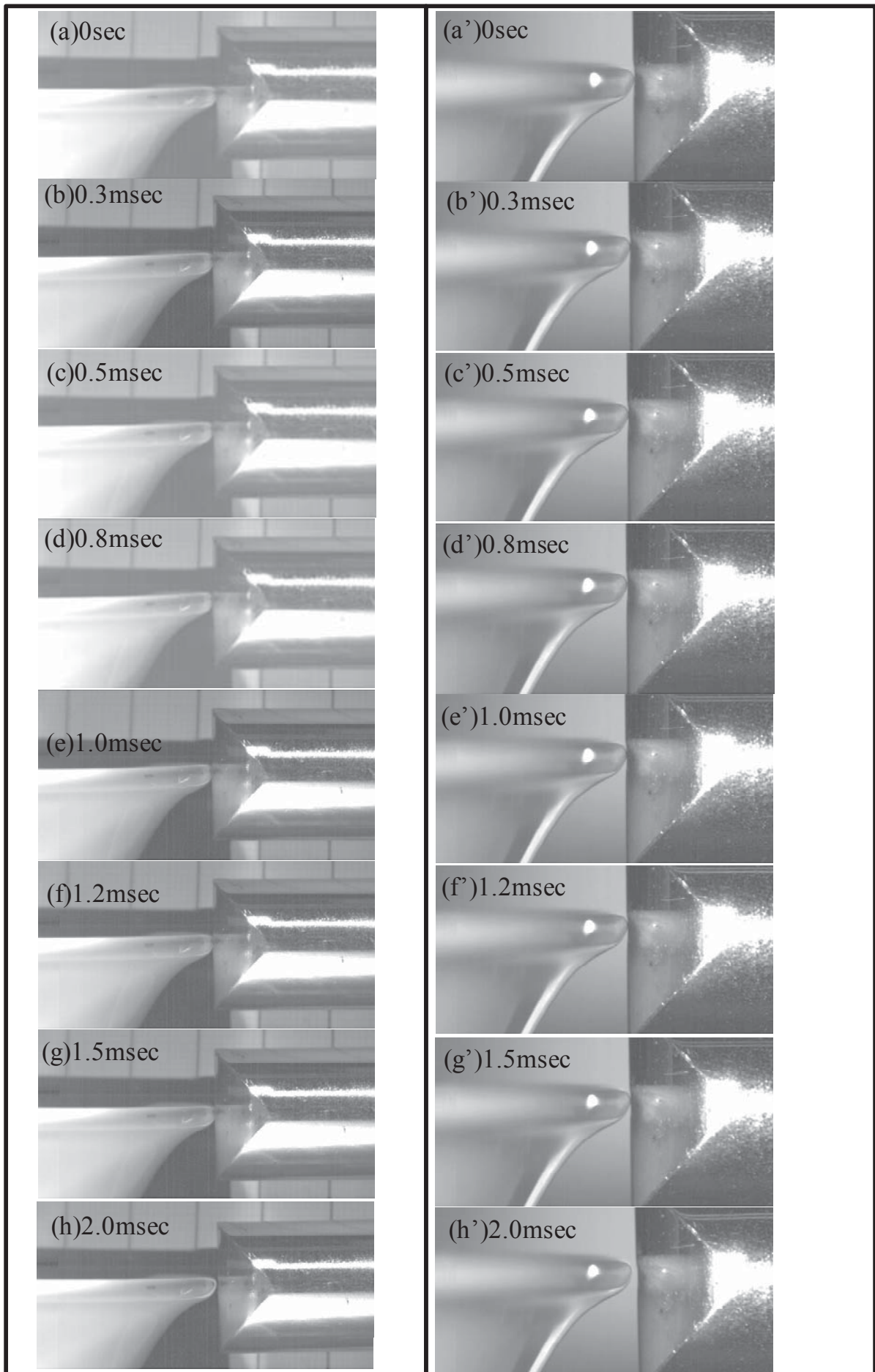


Fig. 4 Photo images of bowl and hammer an impact point by high speed camera(a) to (h)plate 1 small, (a') to (h') plate 2 large.

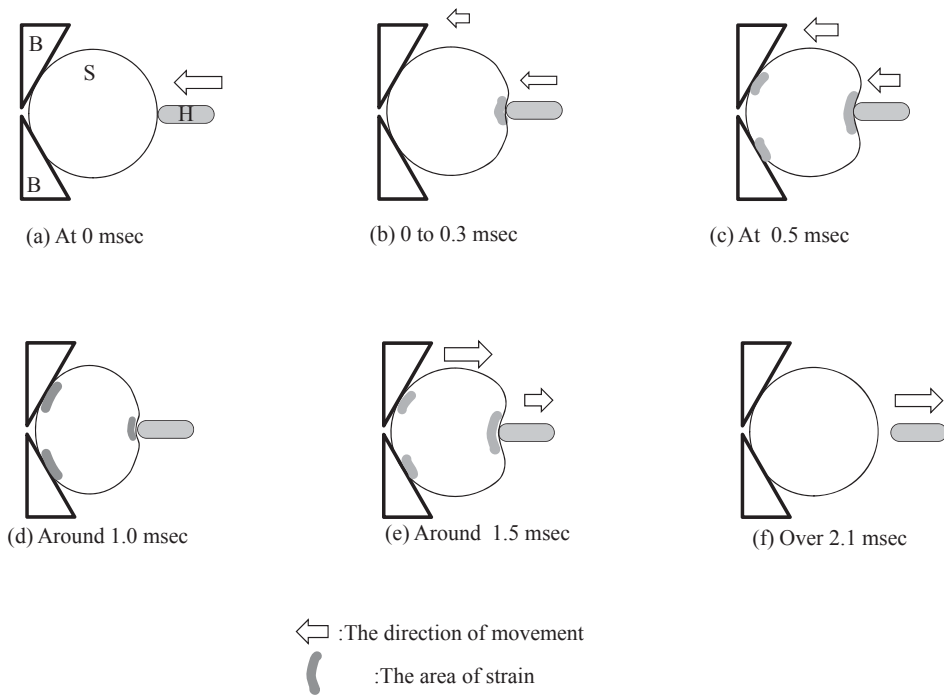


Fig. 5 Exaggerated illustrations for the deformation of the plate 2 large on impact.<sup>12)</sup>

の力が早くハンマーに伝わる。そのためまだ打点に現れているファーストピークと反作用によるひずみが重なり大きなピークが現れる。

ここまでの考察では、ひずみ波形に現れるセカンドピークは皿がバックストップによって支えられていることによっておこると結論づけた。このことをさらに Fig.6 の結果によって示す。Fig.6 はバックストップなしでひずみ波形を測定した結果である。セカンドピークが現れないことが注目すべき点である。Fig.6 のひずみ波形は Fig.2 のファーストピークとおおよそ一致しており、言い換えると、ファーストピークは最初の打撃による局所的なひずみ波形であり、セカンドピークはバックストップによる衝突と変形のためである。

Fig.3 に示したように最初の打撃によって打撃点に起きる応力はバックストップ接点にひずみ波形を起こす。さらにバックストップとの接点に生じる新しい応力は打撃点に次の応力を発生させると考えられる。バックストップによって生じるひずみ（ハンマーと皿の再衝突時のひずみ） Fig.3 のひずみ波形と同じであると仮定すると、ひずみはある時間遅れて計測されると考えられる。先に Fig.2、Fig.3 で述べた様に遅れの時間は皿 1 で、0.25msec、皿 2 で 0.4msec である。そのため、バックストップから戻ってきたひずみ波形はバックストップ接点で見られるひずみと同じ時間遅れるはずである。

Fig.7 にバックストップ無しで測定したひずみ波形 (○)、バックストップ接点でのひずみを同じ遅れ時間ずらした波形 (△)、およびその 2 つの波形を合成した波形 (□) を示す。

この様に合成した波形は Fig.2 で示した打点で計測された波形とおおよそ同じである。

またバックストップ開き角はまたひずみ波形に影響を与えることを既報において示した。<sup>11)</sup> Fig.8 に開き角  $\alpha$  を変えた場合のひずみ波形を皿 1、皿 2 について示す。

どちらの皿においてもファーストピークは開き角にかかわらず、同じ時間同じ大きさで現れる。一方、開き角に依存して、異なる時間、異なる大きさで現れる。開き角が大きくなるに従い、セカンドピークが現れる時間は遅くなり、ひずみ量が小さくなる。この傾向もボールと同じである。<sup>12)</sup>

セカンドピークはバックストップがあることにより生じるので、開き角が小さく、打点とバックストップ接点に近い場合にはセカンドピークは大きくなる。加えて、打点とバックストップ接点に近い皿 1 は皿 2 と比較するとセカンドピークは早く、ひずみ量が大きく現れる。

#### 4. 結論

強化磁器食器皿の衝撃試験時のひずみと変形の挙動をひずみゲージと高速度カメラを用いて解析を行った。

衝撃試験では皿は円から楕円に変形し、もとの円の状態にもどる時にバックストップからの反作用によってハンマーと衝突し、再度ひずみが発生し、セカンドピークが現れる小さい皿ではセカンドピークが早く、大きくなる。小さい皿では大きい皿に比べて、バックストップとハンマーの衝突する打点の距離が短く、跳ね返りによる力が早くハンマーに伝わる。セカンドピークのひずみ量はファーストピークのひずみ量を超える場合があり、小

さな皿では2倍程度になる。更に、バックストップ開き角が小さくなり、打点とバックストップ接点が近くなるとセカンドピークひずみ量が大きくなる。これらの結果はボール形状で得られた傾向と同じである。皿とボールという高さの違いがあってもバックストップの食器に対する影響は同じであることが示された。

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).

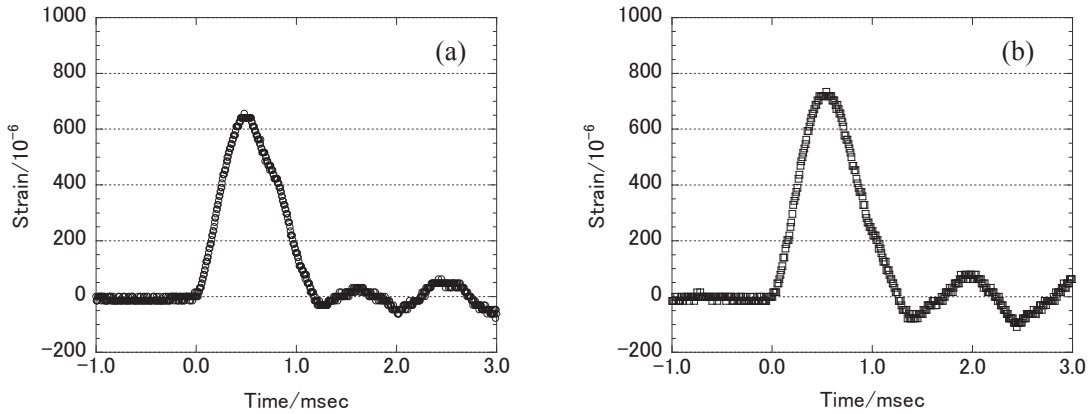


Fig. 6 Strain waveforms at impact point for (a) plate 1 small and (b) plate 2 large without backstop.

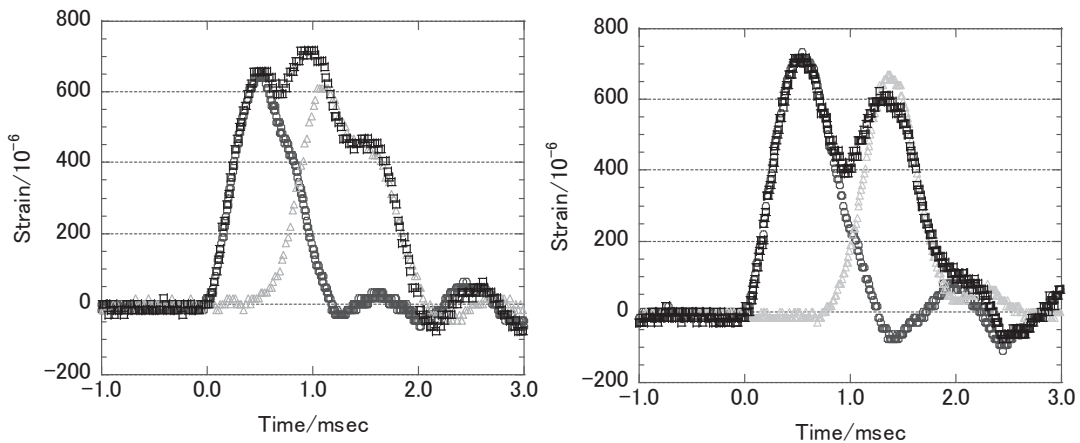


Fig. 7 Mechanism of two maximum peaks appeared in the strain waveform: (a) plate 1 small; (b) plate 2 large. : strain waveforms by the initial impact itself, which are identical with the strain waveforms in Fig. 6. : strain waveforms returned from the backstop, which are equivalent to the strain waveforms in Fig. 3 after a delay of 0.25 msec for the plate 1 small and 0.4 msec for plate 2 large. □ : strain waveforms estimated by the combination of ○ and △

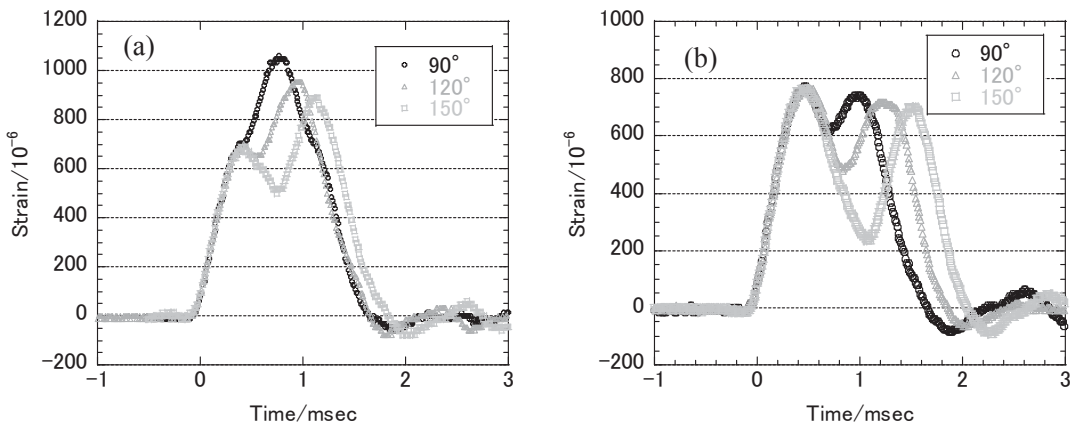


Figure.8 Variation of the strain waveforms at the impact point with the open angle of backstop ( $\alpha$ ): (a) plate 1 small and (b) plate 2 large.

- 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, No. 26, 49-90 (1948).
- 6) G. W. Wray and C. M. Brand, J. Am. Ceram. Soc., **12**, 716-724 (1929).
- 7) A. Hayashi, CERAMICS JAPAN, **44**, 12-16 (2009).
- 8) N. Kamochi, M. Terasaki, H. Katsuki and Y. Kobayashi, J. Ceram. Soc. Japan, **112** 229-223 (2004).
- 9) N. Kamochi, H. Katsuki and T. Watari, J. Ceram. Soc. Japan, **117**, 724-728 (2009).
- 10) T. Akizuki, CERAMICS JAPAN, **44**, 22-24 (2009).
- 11) A. Hayashi, K. Kurachi, M. Mizuno and T. Ota, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume **18**, 2011 (proceedings of 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)).
- 12) Akemi HAYASHI, Hideaki TSUGE, Kazumasa KURACHI, Masatoshi MIZUNO and Toshitaka OTA, Journal of the Ceramic Society of Japan, **120** [3] 1-7 2012
- 13) N. Kamochi, J. Ceram. Soc. Japan, **118**, 167-169 (2010)