

名古屋工業大学博士論文

強化磁器食器の衝撃試験時の
ひずみ挙動と破壊に関する研究

平成24年6月

林 亜希美

目次

第1章 緒言

1.1	はじめに	1
1.2	学校給食用食器の現状	2
1.3	磁器の強化方法	4
1.4	強化磁器の曲げ強度試験方法	5
1.5	強化磁器の衝撃試験に関する研究	8
1.6	強化磁器食器衝撃試験の測定方法の標準化	8
1.7	本研究の目的	19
1.8	本論文の構成	19
	参考文献	20

第2章 強化磁器食器の衝撃試験時のひずみ挙動

2.1	はじめに	22
2.2	実験方法	22
2.3	実験結果と考察	30
2.3.1	円周方向に各位置に発生するひずみ	30
2.3.2	測定条件と発生するひずみ	36
2.4	本章のまとめ	45
	参考文献	45

第3章 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

3.1	はじめに	46
-----	------	----

3.2	実験方法	46
3.3	実験結果と考察	48
3.4	まとめ	70

第4章 強化磁器食器の衝撃強さに及ぼすハンマー重量の影響

4.1	はじめに	71
4.2	実験方法	71
4.3	結果及び考察	73
4.3.1	各種強化磁器食器の衝撃強さ	73
4.3.2	衝撃時におけるひずみ波形の変化	80
4.4	本章のまとめ	93
	参考文献	93

第5章 総括

原著論文リスト	96
関連論文リスト	97

謝辞	98
----	----

第 1 章 緒言

1.1 はじめに

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、一般の磁器食器より 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た。一般に、強化磁器食器の強度の評価は、曲げ強度と衝撃強度によって行われる。しかし、曲げ強度に関する研究はこれまで多くの報告があるが²⁾⁻¹³⁾、強化磁器食器の衝撃強度に関する報告は少なく、これまで国内において標準化された試験方法はなかった。そこで、著者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¹⁴⁾。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 S2402「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¹⁵⁾。そして、衝撃強度は、食器を固定するために用いられる治具（バックストップ）、固定荷重、ハンマーモーメントなどの測定条件によって影響を受けることが付記された。しかし、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。

本論文では、以上の背景から強化磁器食器の衝撃試験における測定条件による影響を解明するため、ひずみゲージを用いて衝撃試験時における食器のひずみ変形挙動を測定し、各測定パラメーターと衝撃強度との関係について検討を行った。また、強化磁器を含めた陶磁器製品の製品強度としての衝撃試験に関するさまざまな実験を行うことにより、陶磁器製品の実際の使用時の扱いについて考察した。

1.2 学校給食用食器の現状

近年、強化磁器食器は学校・病院等の給食用やレストラン等の業務用で利用が進んでいる。学校給食においては金属製、あるいはポリカーボネートやメラミン食器などのプラスチック製の食器が使用されていたが、安全性や情操教育の点から陶磁器製食器（主に強化磁器）を導入する学校が次第に増え、平成18年における公立小・中学校の給食用食器のシェアは32.6%(文部科学省 学校給食実施状況等調査 学校給食における食堂・食器具使用状況調査(図1.2)に達している。この調査によれば、H3年度には金属製（アルマイト、ステンレス）食器は50%以上を占めているが、H18年には10%程度に減少している。

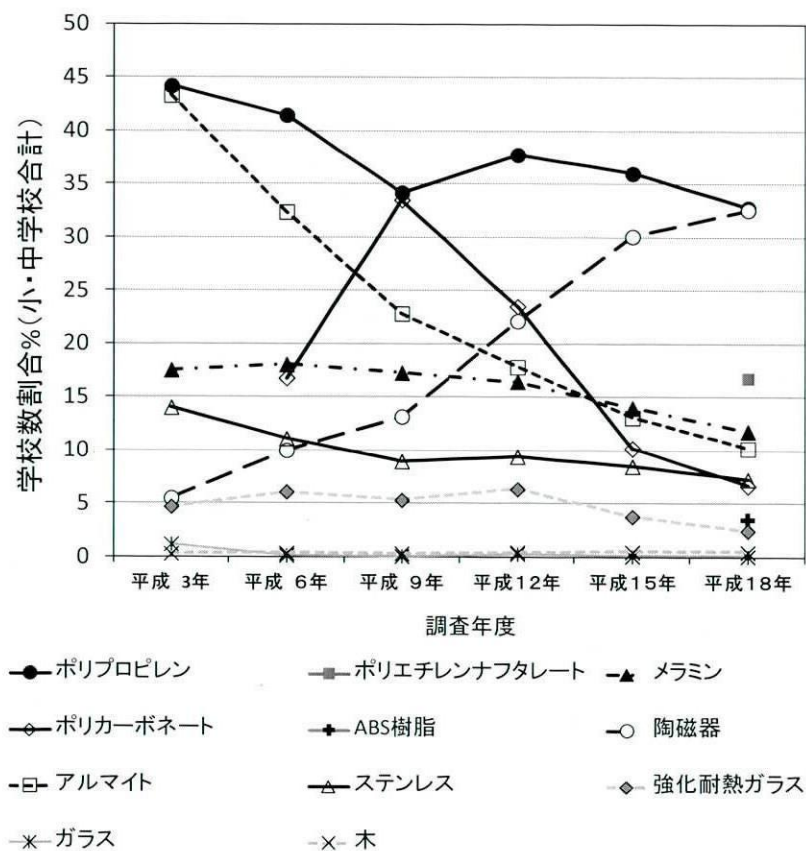


図1.2 全国公立小中学校給食用食器具使用割合(%)

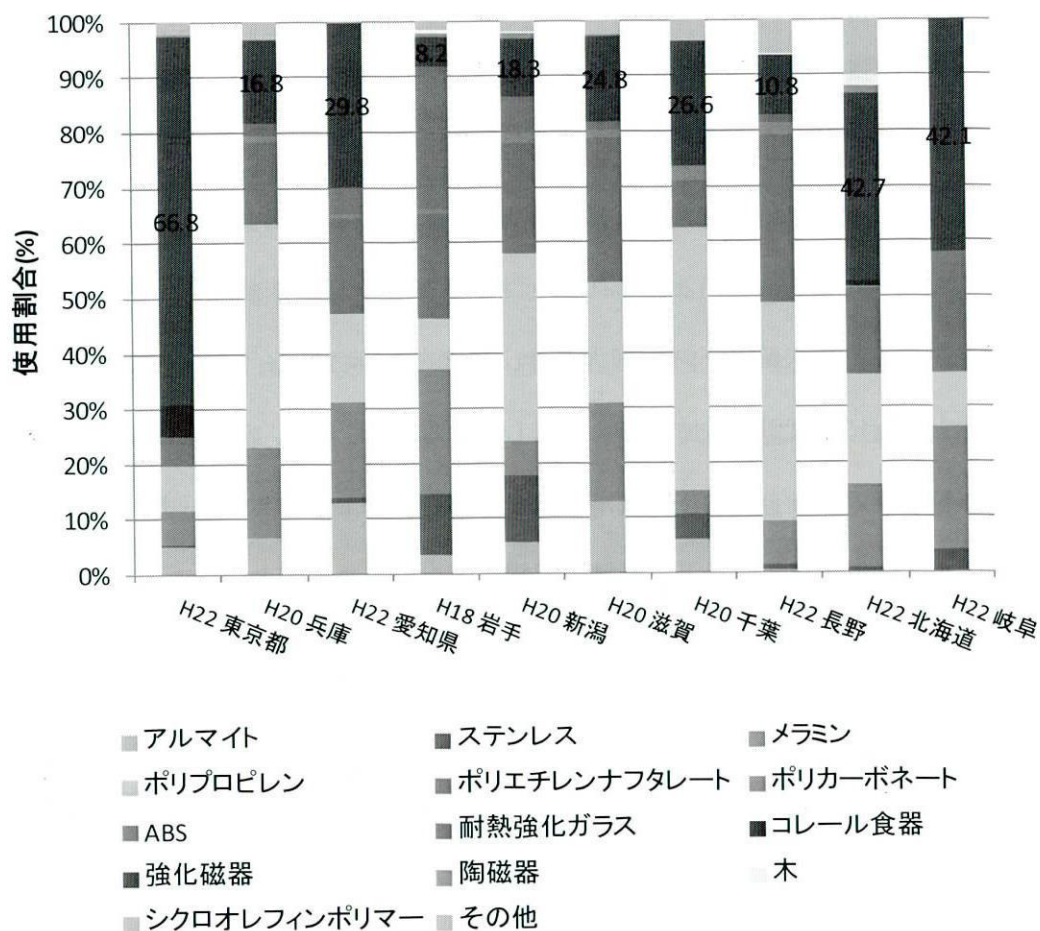


図 1.2 (都道府県) 給食用食器具使用割合(%)

図 1.2 は各県のホームページ等から入手した学校給食用食器具の使用割合を県別にまとめたものである。文部科学省の統計データの平成 18 年以降は発表されていないため全国的な最近の傾向を知ることは出来ていないが、プラスチックではポリプロピレン、メラミン、ポリエチレンナフタレートが主要な素材である。自治体によっては強化磁器が 50%を超えている県もあることがわかる。

1.3 磁器の強化方法

強化磁器は 1980 年代に陶磁器の高強度化の研究が行われ、小林らによって 1987 年には 240MPa 以上の強化磁器が開発された²⁾。強化磁器食器は現在、多くのメーカーから発売されており、多くがアルミナ添加による強化磁器である。

一般にセラミックス材料の強度 σ は均質材料中における欠陥寸法を C 、応力拡大係数を K_{Ic} とすれば、 $\sigma = K_{Ic}/(YC^{1/2})$ と表される。ここで Y は欠陥の形状因子である。粗大粒子は亀裂の発生によって欠陥サイズを増大させ、強度を低下させる。小林らは石英粒子の粒子径の減少とともに強度が増大する事を報告している¹⁾。さらに、水野らは長石、アルミナにおいても粒子径の減少とともに強度が増大する事を報告している¹³⁾。また、磁器中の石英粒子をアルミナで置換することで機械的性質が向上することが Austin により報告されて¹⁶⁾、それ以来アルミナの添加に関する研究が多く行われ、現在では主要な磁器の強化方法として用いられている。さらに釉層の熱膨張を素地よりも適切に小さくすることで釉層に圧縮応力がかかり、強度を向上させることができる。強化磁器では多くの場合無釉より施釉の状態のほうが強度が大きい。その他、また割れにくくするために市販されている強化磁器食器の多くは縁部分を厚くして、強度の向上を図っている。

1.4 強化磁器食器の曲げ試験方法

強化磁器食器の曲げ試験方法は日本セラミックス協会規格 JCRS203-1996[食器用強化時期の曲げ強さ試験]により行われている。この試験方法の概略を図 1.3 に示す。また岐阜県セラミックス研究所で行っている試験装置などを図 1.4～図 1.5 に示す。この規格では試験体の作製方法は鋳込み試験片と切り出し試験片の 2 つの方法が規定されている。鋳込み試験片は所定サイズの石膏型を用いて成形し、その後、素焼き、施釉、焼成を行い曲げ試験片を作製する。一方、切り出し試験片は製品から試料を作製する。食器底面部から図 1.4 のダイヤモンドソーを用いて、長方形に切り出す。切り出した試料を図 1.5 に示す精密切断機を用いて 10 mm 幅に切断する。その後、切断面を図 1.6 に示す研削機を用いて研磨する。この切断面の研磨は、切断面に傷や欠けが無いようにするためである。この研磨は #345 のダイヤモンドホイールで 900 μ m、#800 のダイヤモンドホイールで 100 μ m 行う。最終的な試験体寸法は約 8mm×40mm×底面厚さになる。曲げ強度は図 1.7 に示す万能試験機で試験を行っている。この時のスパンは 30 mm である。曲げ強度は図 1.3 中に示した式により算出する。

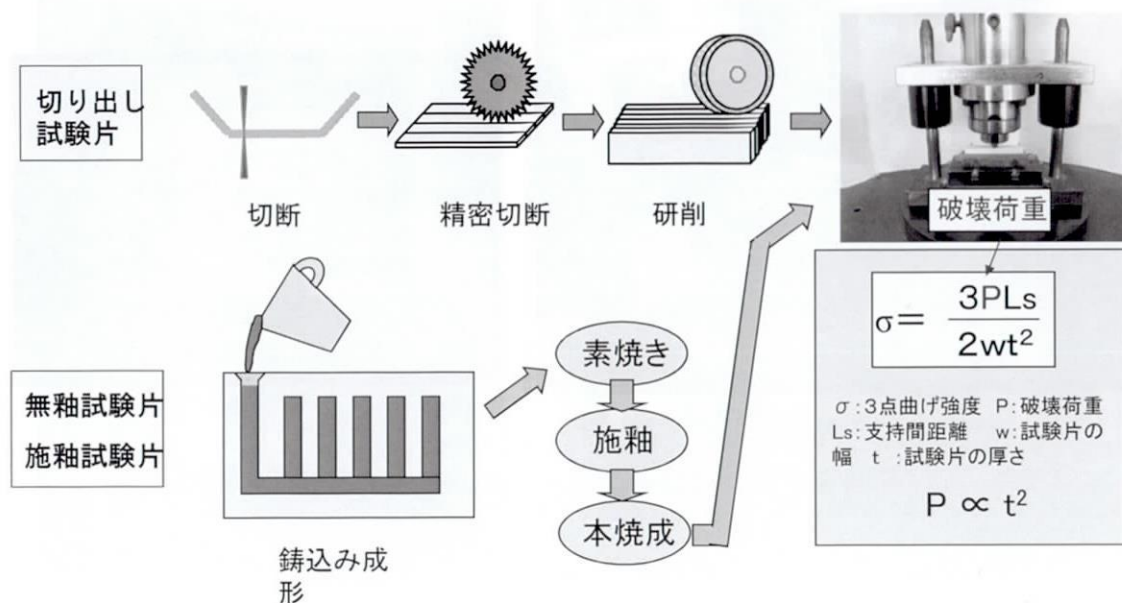


図 1.3 強化磁器食器曲げ試験方法概略

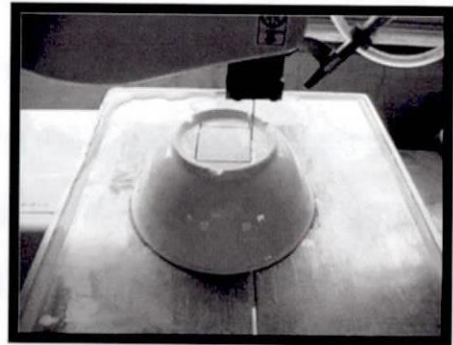
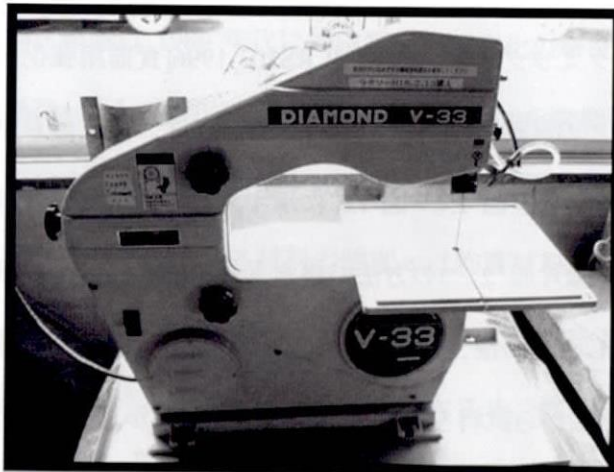


図 1.4 ダイヤモンドソーによる試料切り出し

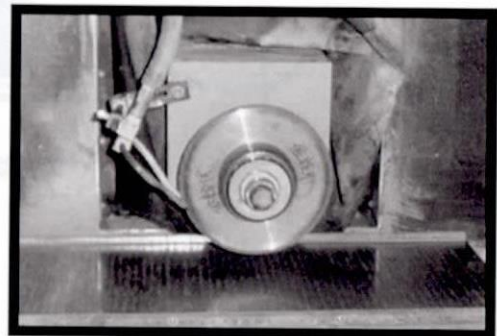


図 1.5 精密切断機による試料切断

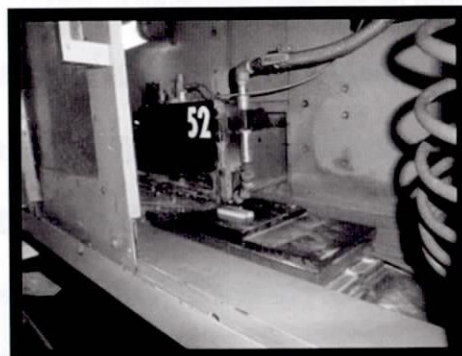


図 1.6 研削機による切断面研削

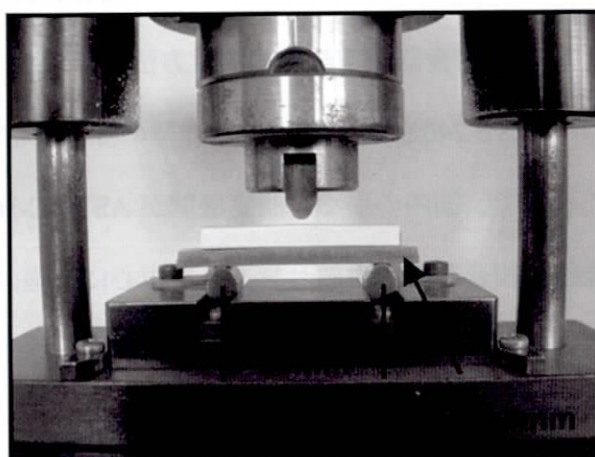


図 1.7 曲げ試験装置

1.5 強化磁器の衝撃試験に関する従来の研究

陶磁器の衝撃試験に関する研究は数が少ないが、藤井らによる 1948 年の報告による¹⁷⁾⁻¹⁸⁾と海外、国内とも様々な異なる衝撃試験機で製品の衝撃強度が測定されており、食器の衝撃強度が古くからの検討課題であったことがわかる。そして、最近になって、日本国内において強化磁器の製造が行われるようになったことにより、衝撃試験に関する関心が、メーカーやユーザーの間で高まった。そのため、次節で述べるように、ここ 10 年あまりにおいて、著者を含め公設試験研究機関の研究者による研究が行われるようになってきた¹⁹⁾⁻²⁹⁾。

例えば、蒲地らは、強化磁器食器の衝撃試験に対するデータが正規分布に従うことを示した¹⁹⁾。これは曲げ強度試験がワイブル分布に従うのとは異なる点である。また、強化磁器の衝撃試験方法がハンマー重量などの測定条件に影響を受ける事を示した¹⁹⁾。さらに、破面解析の観点から、衝撃試験時の破壊起点が打点内側であることを示した²¹⁾。また、秋月らによってもシミュレーションにより破壊起点が打点であることが示された²⁴⁾。

1.6 強化磁器食器衝撃試験の測定方法の標準化

1.6.1 JIS S 2402:2010 強化磁器食器の縁部衝撃試験方法

これまで、国内の多くの測定機関が ASTM C-368-88 に準拠して試験を行っていたが、産業技術総合研究所中部センターを中心に全国の主要な陶産地の公設試が集まり、強化磁器食器分科会において、種々の検討を行った。その結果、前述したように 2010 年に強化磁器食器の縁部衝撃試験方法が制定された。その経緯とそこでの実験結果などを以下に紹介する。

1.6.2 衝撃試験方法規格化に至る経緯

これまで、陶磁器食器の衝撃試験の多くは、（財）日本陶磁器検査協会（2006 年 7 月解散）が行っていた。10 年ほど前から徐々に公設試での衝撃試験機の導入が進み、共通の試験方法が必要とのことから、平成 14 年 10 月 30 日に、産総研と全国の鉱工業関連公設試などで構成される産業技術連携推進会議窯業部会の中に強化磁器食器分科会が設置された。この分科会は強化磁器食器の衝撃試験方法を確立することによって、信頼性の高い強化磁器食器の開発・普及を促進し、陶磁器産業を振興することを目的とした。実際の活動は翌年の平成 15 年度から平成 17 年度まで行われた、参画機関は表 1.1 に示す産総研中部センターと 14 の公設試である。この 3 カ年で実施された具体的な活動内容は、①学校給食用食器の破損状況の調査、②各機関における強度に関する依頼試験実施状況の調査、③共通試験体による衝撃試験、④分科会会議の開催、⑤報告会の開催などである。共通試験体でのいくつかの衝撃試験結果については後述する。平成 18 年度からは、産総研標準基盤研究「強化磁器食器の耐衝撃強度試験方法の規格化」として産総研中部センター、佐賀県窯業技術センター、長崎県窯業技術センター、滋賀県工業技術総合センター信楽窯業技術試験場、瑞浪市窯業技術研究所、岐阜県セラミックス研究所の 6 機関で継続して研究が行われた。

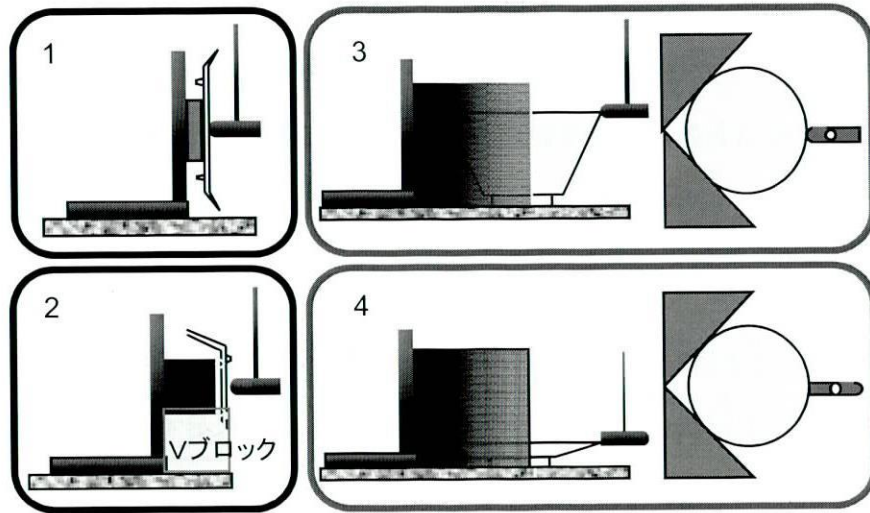
表 1.1 強化磁器食器分科会 参画機関

表1 強化磁器食器分科会 参画機関
産業技術総合研究所 中部センター
長崎県窯業技術センター
佐賀県窯業技術センター
島根県産業技術センター 浜田工業技術指導所
愛媛県窯業試験場
滋賀県工業技術総合センター 信楽窯業技術試験場
三重県科学技術振興センター 工業研究部 窯業研究室
石川県工業試験場 九谷焼技術センター
茨城県工業技術センター 窯業指導所
福島県ハイテクプラザ 会津若松技術支援センター
愛知県産業技術研究所 瀬戸窯業技術センター
多治見市陶磁器意匠研究所
土岐市立陶磁器試験場
瑞浪市窯業技術研究所
岐阜県セラミックス技術研究所
* 機関名は平成15年時点。 名称変更機関あり。

1.6.3 米国 ASTM-C368-88

強化磁器食器の衝撃試験方法を検討する際に参考となるものは、米国の ASTM C368-88 であった。ASTM International / 米国材料試験協会は世界の主要な標準作成機関の 1 つで、材料、製品、システム、サービスなどに関する、技術的な標準を作成している。陶磁器の衝撃試験方法は C368-88 ”Standard Test Method for Impact Resistance of Ceramic Tableware” で規定されており、図 1.8 に示すような 4 つの試験項目が記載されている。

1.浅型容器 (Flat ware) の中央での衝撃試験、2.深型容器(Hollow ware)の中央での衝撃試験、3.深型容器(Hollow ware)リム部への衝撃試験、4.浅型容器(Flat ware)チッピング試験である。試験装置は図 1.9 に示す構成になっており、ハンマーは頭部を二本のワイヤーで吊った形で固定されている。打撃は最初に打撃するハンマーエネルギーを 0.027J、次からは 1 回毎に 0.014J ずつハンマーエネルギーを増加させ、食器の破損が生じるまで行うとし、試験体の固定は Angle Clamp と positioning arm で行うと規定している。



- 1 Impact test of flatware at center
 2 Impact test of Hollow ware at center
 3 Impact test of Hollow ware at rim
 4 Chipping test of flatware

図 1.8 米国 ASTM C-366-88 で規定される「陶磁器製飲食器の耐衝撃性試験方法」

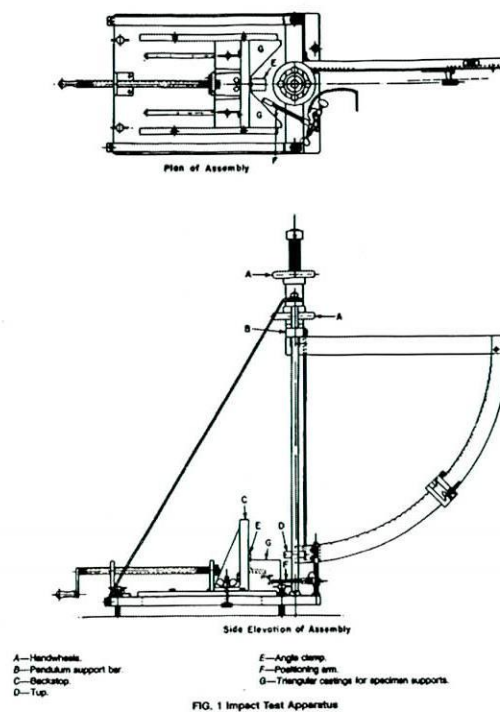


図 1.9 ASTM 装置の概略図 ²⁸⁾

1.6.4 強化磁器食器分科会における衝撃試験の検討【共通試験】

強化磁器食器分科会では、6つの研究機関が各自の試験機と測定方法を用いて、同一試験体（市販強化磁器食器）の衝撃試験を行った。市販強化磁器食器は重量約 150g、直径 128mm、高さ 54mm の碗を用い、各機関 30 回の試験を行った。表 1.2 に示すように衝撃試験機は、4 機関は同じメーカーの装置であり、2 機関はそれぞれ異なるメーカーの装置である。なお、機関 D を除く 5 機関では、1 本の円柱軸を有するハンマーが装着されている。その 1 例として X 社製衝撃試験機を図 1.10 に示す。試験条件は打撃位置を碗の縁とし、ハンマーは打撃部に対して柱面形状で接するものを使用した。打撃手順はハンマーの初期振り上げ位置を 0.136J となるようにし、1 打撃毎の増分を 0.014J とした。

一般に曲げ強さのばらつきはワイブルプロットにより処理されるが、衝撃強さは複雑形状の製品をそのまま試料にもちいているため多くの変動要因を受ける。衝撃強さのばらつきは正規分布に近似できる報告⁹⁾があることから、共通試験で得られた衝撃強さの結果を正規確率紙にプロットして評価した。その結果を図 1.11 に示す。X 社製装置の A 及び B 機関と Z 社製装置の D 機関はほぼ同じ破壊確率分布を示した。しかし X 社製の装置の E 及び F 機関はその分布が約 0.05J 高い側へシフトした。同一試験機である A 及び B 機関と E 及び F 機関での測定上の相違点は試験体の固定方法だけである。A 機関ではバネ加圧の専用治具、B 機関は人の手、E 及び F 機関はネジ式専用治具によって垂直方向から試験体高台内(中央付近)に荷重をかけて試験体を固定されている。このように、固定方法の違いが衝撃強さに影響を及ぼすことが示されたので、次にその原因についての検討が行われた。

表 1.2 共通試験を行った機関の装置及び固定方法

測定機関	装置メーカー	サンプル固定方法
A	X社	専用治具バネ式
B	X社	手
C	Y社	専用治具ねじ式 (試料の縁部で固定)
D	Z社	手
E	X社	専用治具ねじ式 (上方向から試料底部中央で固定)
F	X社	専用治具ねじ式 (上方向から試料底部中央で固定)

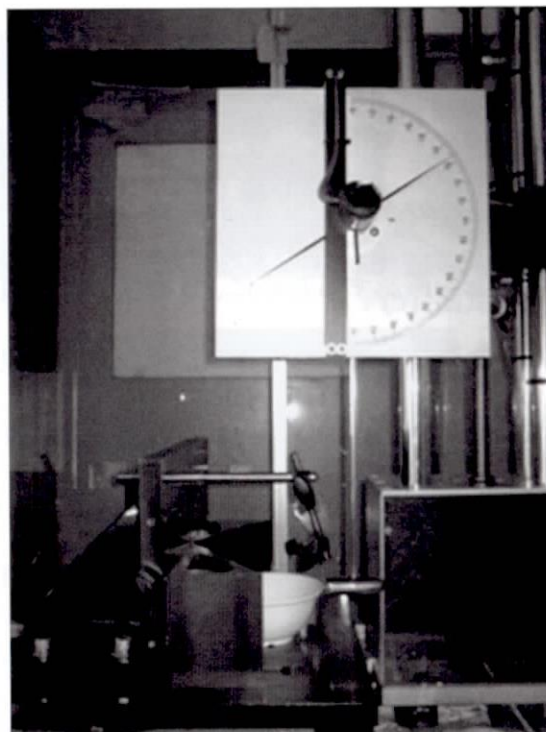


図 1.10 X 社製衝撃試験機

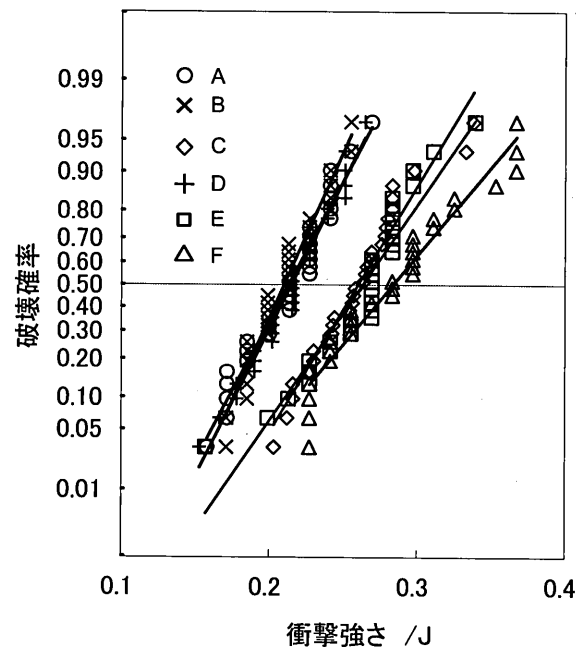


図 1.11 各試験研究機関における強化磁器食器の衝撃強さ
(碗: 重量約 150g, 直径 128mm, 高さ 54mm)

1.6.5 強化磁器食器分科会における衝撃試験の検討【固定方法】

試験体を固定する力の影響を確認するために、B 機関の試験機を用いて、試験体を手とネジ式クランプで固定した時の衝撃強さを測定した。その結果、前者は 0.21J、後者は 0.27J となり固定方法（押さえる力）の違いによって衝撃強さに差が生じることが確認された。そこで、おもりを用いて垂直方向の固定（押さえ）荷重を変化させた試験を行い、荷重と衝撃強さの関係について検討した。この試験に用いたおもり (a) とおもりの設置に用いた治具 (b)、碗におもりを載せた状態 (c) を図 1.12 に示す。また固定荷重が衝撃強さに及ぼす影響を図 1.13 に示す。試験には 2 種類の碗を用い試験を行っており、(図中 P, Q) いずれの試験体においても、固定荷重を増加させると衝撃強さも増加する傾向を示した。この傾向は衝撃強さが大きい試験体 P において顕著に表れている。蒲地らは固定荷重を変化させた同様な試験を行い、荷重が大きくなるに従い測定される衝撃強さが大きくなることを報告している²²⁾。この原因について、秋月らは試

験体中心部に荷重をかけた場合のシミュレーション結果から、荷重により試験体が変形し、それによって変形部位に圧縮や引張応力が生じるため、衝撃強さが変動すると考察している²⁶⁾。現時点ではこの固定荷重の影響についての明確な結論は得られていないが、衝撃試験方法の策定においては統一的な固定方法の明記が必要であることが示唆された。固定荷重を大きくすると本来の衝撃強さより強い結果が得られるため。現状では試験体にかかる荷重をできるかぎり大きくしないことが望ましく、単に打撃による食器のズレを防ぐ目的だけを考慮して、試験体を手で軽く押さえて固定する方法が最良であると考えられた。

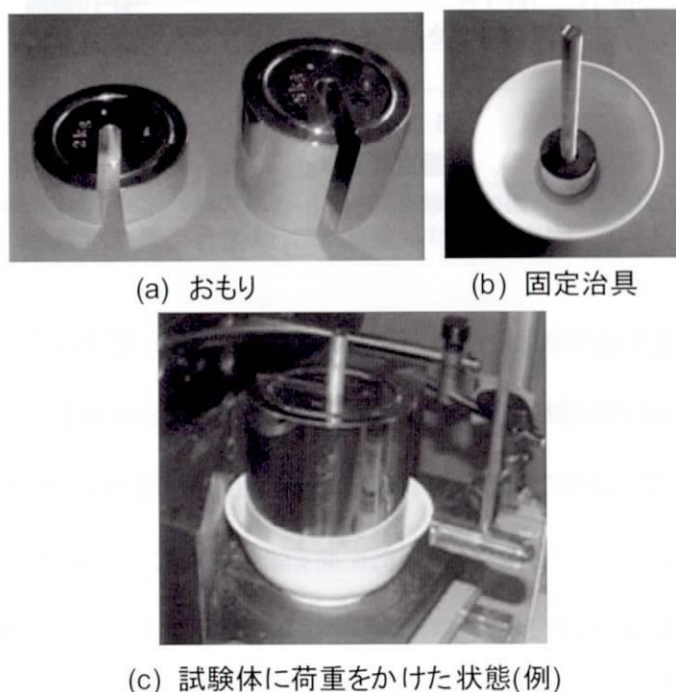


図 1.12 固定荷重試験に用いたおもりと試験体に荷重をかけた状態(例)

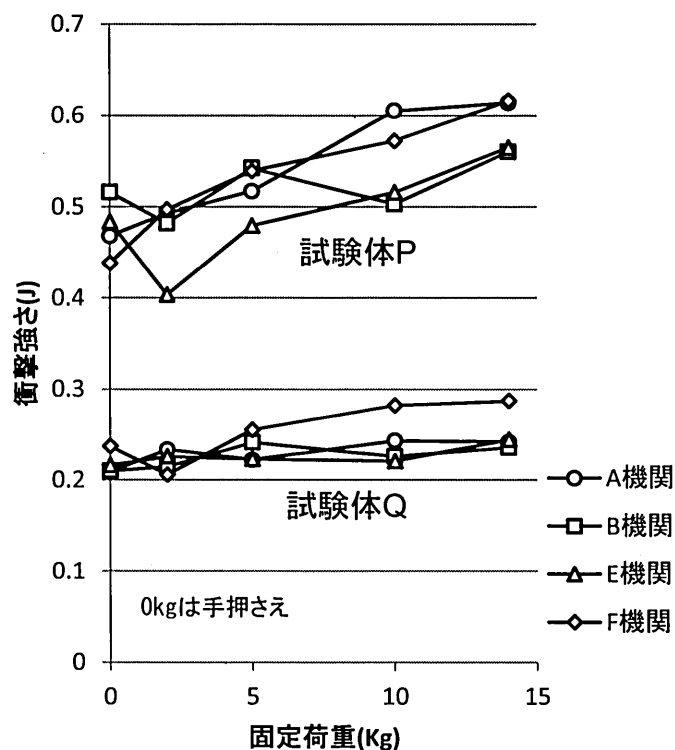


図 1.13 固定荷重が試験体の衝撃強さに及ぼす影響

1.6.6 強化磁器食器分科会における衝撃試験の検討【ハンマー重量】

強化磁器食器の衝撃試験において形状や重量など使用するハンマーの条件が異なる場合に、衝撃強さが異なることが蒲地らによって報告された¹⁹⁾。著者らも、ハンマーモーメントが0.576J及び1.241Jである2種類のハンマーを用いて、直径130mm, 高さ36mmの碗を用いて衝撃試験を行った。その結果を図 1.14 に示す。この試験においては、大きいハンマーモーメントもつハンマーを使用した方が、衝撃強さが大きくなるという結果が得られ、蒲地らの報告とは逆の結果となった。

これらの結果は、同じ食器であってもハンマーの種類が違えば異なる衝撃強さを示すとともに、食器の重量や形状等が違えばハンマーの大きさと衝撃強さの相関が異なる場

合があることを示唆している。従って、異なるハンマーで測定した衝撃強さを同列で比較することはできず、試験方法には使用したハンマー種類や条件を明示することが必要であることと結論づけられた。

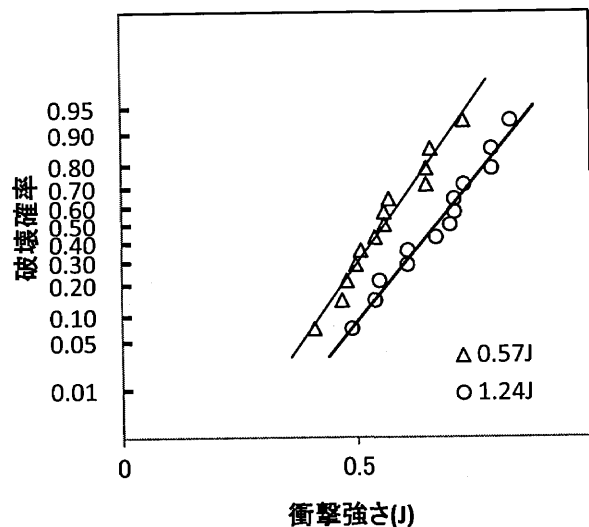


図 1.14 ハンマーモーメントが衝撃強さに与える影響

1.6.7 強化磁器食器分科会における衝撃試験の検討【後部固定治具】

強化磁器食器分科会において各公設試が保有する衝撃試験機の調査を行ったところ、食器を支持する後部治具の開き角が装置によって異なっていた。この後部支治具の開き角はASTMでは90°である。そのため後部支持具の影響についての共通試験を行った。この試験に参加したのは、X社製試験機をもつ4機関である。開き角が150°、120°、90°である3種類の後部支持具を用いて衝撃試験を行った結果を図1.15に示す。開き角が120°及び90°ではほぼ同じ破壊確率分布を示したが、150°ではその分布が120°、90°と比較して0.1J以上高い側にシフトした。ASTMでは後部支持具の開き角90°と規定しているが、今回の試験結果から120°でも衝撃強さにほとんど影響を及ぼさないことが示された。しかし開き角が150°になると衝撃強さに違いを生じることから、

ASTM 同様に後部支持具の角度を明らかにする必要があることが示唆された。

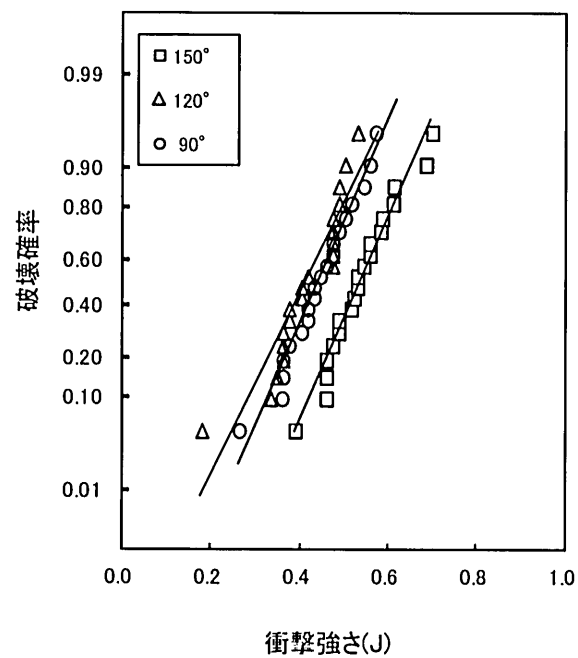


図 1.15 後部支持具の開き角度の違いが衝撃強さに与える影響

1.7 本研究の目的

以上に述べたように強化磁器食器分科会から標準基盤研究までの実験において強化磁器食器の衝撃試験方法に関する多くの現象を知ることができた。そして、強化磁器の衝撃強度に対して測定条件が様々に影響を及ぼしていることがわかってきた。しかし、いくつかの現象の原因については不明のまま残った。

そこで、本論文では、強化磁器食器の衝撃試験における測定条件による影響を解明することを目的として、歪みゲージを用いて衝撃試験時における食器の歪み変形挙動を測定し、各測定パラメーターと衝撃強度との関係について検討を行った。

1.8 本論文の構成

本論文は5章より構成される。

第1章で本研究の背景と目的、本論文の構成について述べる。

第2章でいくつかの形状の異なる市販強化磁器食器について衝撃試験時に発生するひずみ波形を測定し測定条件の違いによる影響について検討した。

第3章でひずみ波形にバックストップが大きく影響することが分かった。そのひずみ波形への影響を高速度カメラによる食器の変形観察結果に基づいて考察した。

第4章でハンマー重量の変化による、衝撃強度測定への影響について種々の大きさの食器を用いて、系統的に検討した。

第5章で本研究を総括する。

参考文献

- 1)小林雄一 水野正敏 耐火物 60 [12] 642-651 (2008)
- 2)小林雄一, 大平修, 大橋康夫, 加藤悦郎, J. Ceram. Soc. Japan, **95**, 887-892 (1987).
- 3)小林雄一, 大平修, 大橋康夫, 加藤悦郎, J. Ceram. Soc. Japan, **98**, 504-509 (1990).
- 4)小林雄一, 大平修, 大橋康男, 加藤悦郎, J. Ceram. Soc. Japan, **99**, 495-502 (1991).
- 5)小林雄一, 大平修, 大橋康男, 加藤悦郎, J. Ceram. Soc. Japan, **102**, 99-104 (1994).
- 6) 小林雄一, 大平修, 大橋康男, 佐藤知久, 加藤悦郎, J. Ceram. Soc. Japan, **102**, 383-387 (1994).
- 7) 小林雄一, 大平修, 加藤悦郎, 平井敏夫, 磯山博文 J. Ceram. Soc. Japan, **104**, 604-609 (1996).
- 8) 小林雄一, 大平修, 磯山博文 J. Ceram. Soc. Japan, **108**, 921-925 (2000).
- 9) 小林雄一, 大平修, 磯山博文 J. Ceram. Soc. Japan, **111**, 122-125 (2003)
- 10) 濱野健也, 中川善兵衛, 吳岳峰, 長谷川美憲, J. Ceram. Soc. Japan, **99**, 153-157 (1991).
- 11)濱野健也, 中川善兵衛, 長谷川美憲, J. Ceram. Soc. Japan, **100**, 1066-1069 (1992).
- 12) 濱野健也, 波多野敦, 岡田繁, J. Ceram. Soc. Japan, **101**, 1038-1043 (1993).
- 13)水野正敏, 加藤布久, 岩田芳幸, 岐阜県陶磁器試験場研究報告, 1-5 (1997).
- 14) 林亜希美, セラミックス, **44**, 12-16 (2009).
- 15) JIS S 2402:2010 強化磁器食器の縁部衝撃試験方法 解説
- 16)C.R.Austin, H.Z.Schofield and N.L.Haldy, J. Am. Ceram. Soc., 29(12) 341-54(1946)
- 17)藤井兼壽, 陶磁器試験所報告 第十三号 1-26 (昭和 10 年)
- 18)藤井兼壽, 陶磁器試験所報告 第二十六号 49-90 (昭和 23 年)
- 19)蒲地伸明, 寺崎信, 勝木宏昭, 小林雄一, J. Ceram. Soc. Japan, **112**, 229-233 (2004).
- 20)水野正敏, 倉知一正, 柘植英明, 林亜希美, 岐阜県セラミックス技術研究所研究報

告, 11-14 (2004).

21) N. Kamochi, H. Katsuki and T. Watari, J. Ceram. Soc. Japan, **117**, 724-728 (2009).

22) N.Kamochi, J.Ceram. Soc .Japan, 118, 167-169 (2010)

23) 柘植英明, 水野正敏, 倉知一正, 林亜希美, 岐阜県セラミックス技術研究所研究報告, 11-14 (2005).

24) 秋月俊彦, 矢野鉄也, 小林孝幸, 山口英次, 木須一正, 長崎県窯業技術センター研究報告, 47-50 (平成 15 年度).

25) 秋月俊彦, 矢野鉄也, 小林孝幸, 山口英次, 木須一正, 長崎県窯業技術センター研究報告, 15-20 (平成 16 年度).

26) 秋月俊彦, 長崎県窯業技術センター研究報告, 33-35 (平成 17 年度).

27) 蒲地伸明, 佐賀県窯業技術センター研究報告書, 51-55 (平成 15 年度).

28) 蒲地伸明, 佐賀県窯業技術センター研究報告書, 50-53 (平成 16 年度).

29) 蒲地伸明, 佐賀県窯業技術センター研究報告書, 15-17 (平成 17 年度).

30) ASTM C368-88.

第2章 強化磁器食器の衝撃試験時のひずみ挙動

2.1 はじめに

強化磁器食器は矩形の試験片と異なり、実際の市販食器であるために形状が複雑である。強化磁器食器の衝撃試験時の破壊の挙動を検討するためには、まず衝撃試験時にどこにどのような歪みが発生するかを把握する必要がある。このことは破壊起点の位置を知るためにも重要である。そこで本章では形状の大きく異なる市販強化磁器を選び食器の様々な位置で衝撃試験時に発生する歪みを測定した。さらに、測定条件を変えた場合のひずみ波形の変化を検討した。

2.2 実験方法

代表的な食器形状として4種類の強化磁器食器を選び、ひずみ測定を行った。選んだ形状は一般的に、ボール、及びプレートと言われるものでそれぞれ大小の2種類を選んだ。用いた試験体は岐阜県東濃地域（美濃焼）において強化磁器食器を製造しているメーカーから提供を受け測定に使用した。この強化磁器食器は同じ素地、釉薬を用いて作られており、基本的な特性は同じである。確認のため、種々の特性を測定した。蛍光X線分析（リガク製 ZSX100e）により測定した組成の結果を表2.1に示す。いずれの食器も、ほぼ同じ組成であった。表2.2に曲げ強度、弾性率、気孔率、かさ密度、直径、高さ、重量を示す。曲げ強度は第1章にて述べた、日本セラミックス協会規格（JCRS203-1996：食器用強化磁器食器の曲げ強さ試験方法）の切り出し試験片を用いて測定し、10本の平均を記載した。嵩密度、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。いずれの試料も10本の平均曲げ強度は244MPaから273MPaを示し、高い強度を示した。また見掛け気孔率からわかるように、気孔はほとんど無く良く焼き締まっており緻密質であった。見掛け比重、弾性率もほぼ同じ値を示

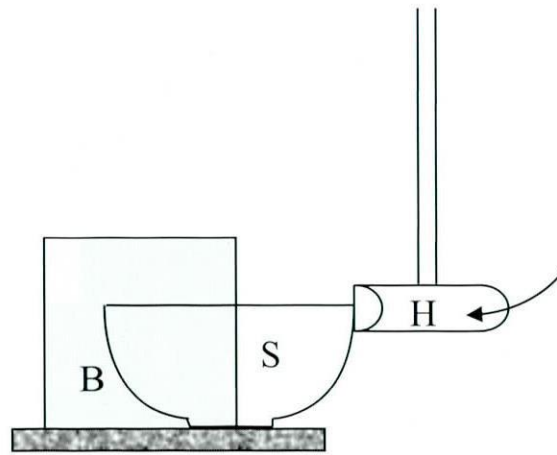
し、それぞれの試料の材料的な特性は同じである事が確認出来た。衝撃強度はリサーチアシスト社製衝撃試験機を用いて JIS S 2402 に準じて測定した。試験装置模式図を図 2.1 に示す。また図 2.2 に装置写真、図 2.3 に試料及びハンマーの写真を示す。図 2.1 中で B はバックストップ (3 角柱状の治具を 2 つ組み合わせた試料後部支持具)、H はハンマー、S は強化磁器食器試料、 α はバックストップの開き角を示す。衝撃強度の測定試験手順は次の様である。まず、バックストップの間に試料を設置し、1 回目の打撃を 0.04J で行った。試料に破損が見られなかった場合には、1 回ごとに 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った。破損したときの振り上げエネルギーが衝撃強度とである。バックストップの開き角は 120° として測定した。得られた衝撃強度はボール 1、プレート 1 では約 0.4J、ボール 2、プレート 2 では約 0.8J を示し、曲げ強度が同じであるにもかかわらず衝撃強度には大きな違いがある。

表 2-1 歪み測定に用いた市販強化磁器の組成

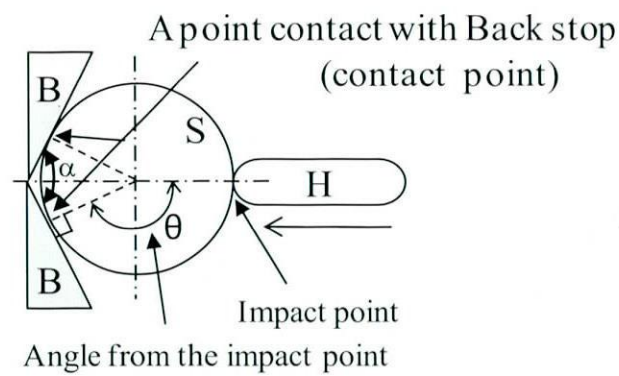
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Lg.Loss
Bowl 1	43.8	49.4	0.44	0.40	0.20	3.28	0.74	0.15
Bowl 2	41.7	50.6	0.45	0.30	0.19	3.15	0.73	0.09
Plate 1	41.5	49.9	0.43	0.39	0.16	3.30	0.82	0.11
Plate 2	41.8	48.5	0.43	0.32	0.18	3.27	0.74	0.08

表 2-2 歪み測定に用いた市販強化磁器の特性

	Diameter (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Flexural Strength (MPa)	Bulk Density (g/cm ³)	Porosity(%)	Young's Modulus (GPa)	Impact Strength(J)
Bowl 1 (small)	127	54	160	245	2.7	0.06	114	0.40
Bowl 2 (large)	175	73	359	273	2.8	0.05	120	0.78
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



(a) front view



(b) top view

図 2.1 衝撃試験模式図 (a) front view, (b) top view.

(S:Test specimen, B:back stop H : Hammer α :open angle)

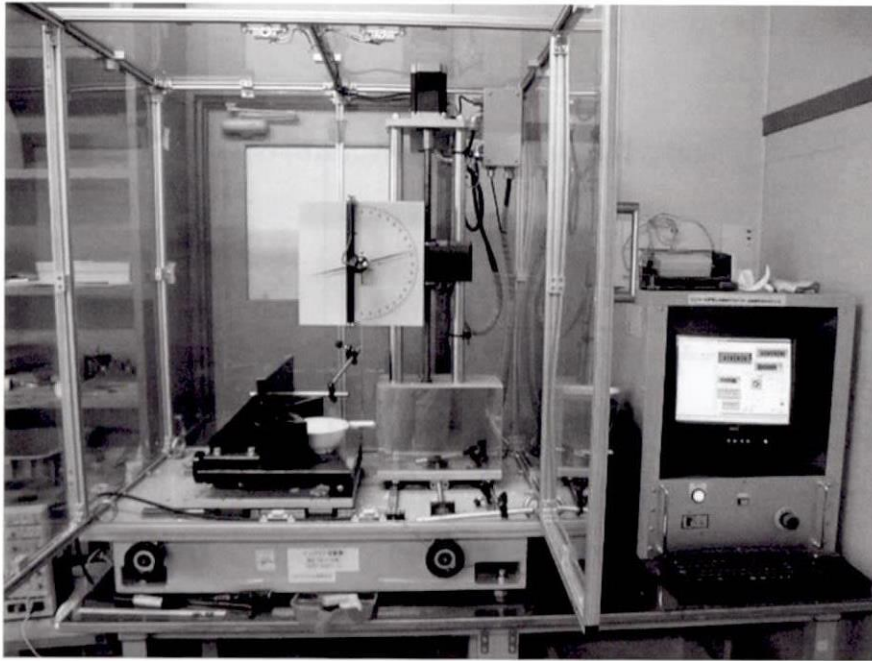


図 2.2 衝撃試験機写真



図 2.3 試料（強化磁器食器）とハンマー

ひずみゲージは図 2.4 に示すように試料縁部の横方向と縦方向に内側、外側それぞれに貼り付けた。ひずみは打点位置を 0° として、打点位置からの角度を θ とし、 15° おきに測定した。試料に発生するひずみ波形の測定はひずみゲージを動ひずみ計（共和電業製 DPM-713B）およびオシロスコープ（ReCroy 社製 WaveSurfer 422）につなぎ、計測した。ひずみは次に示す条件で測定を行った。測定レンジは $1\text{k}\cdot\mu\epsilon$ 、ローパスフィルターは 1k Hz で測定を行った。

図 2.5 は重量の異なるハンマーを用いた場合のひずみ波形測定に用いたハンマーを示す。それぞれ、ハンマーA：180g、ハンマーB：268g ハンマーC：371g である。

図 2.6 は試料固定荷重の影響の計測に使用したおもりを示すとその設置状況を示す。図 2.6(a)は試験に用いたおもりで 2Kg と 5Kg を示す。同様な形状のおもり 0.5Kg、1 Kg、2Kg、5Kg を組み合わせ、図 2.6(b)に示す治具の上に図 2.6(c)のように積み重ねることにより、0.5~14Kg までの荷重を食器底面中央部にかけ、ひずみ波形の測定を行った。

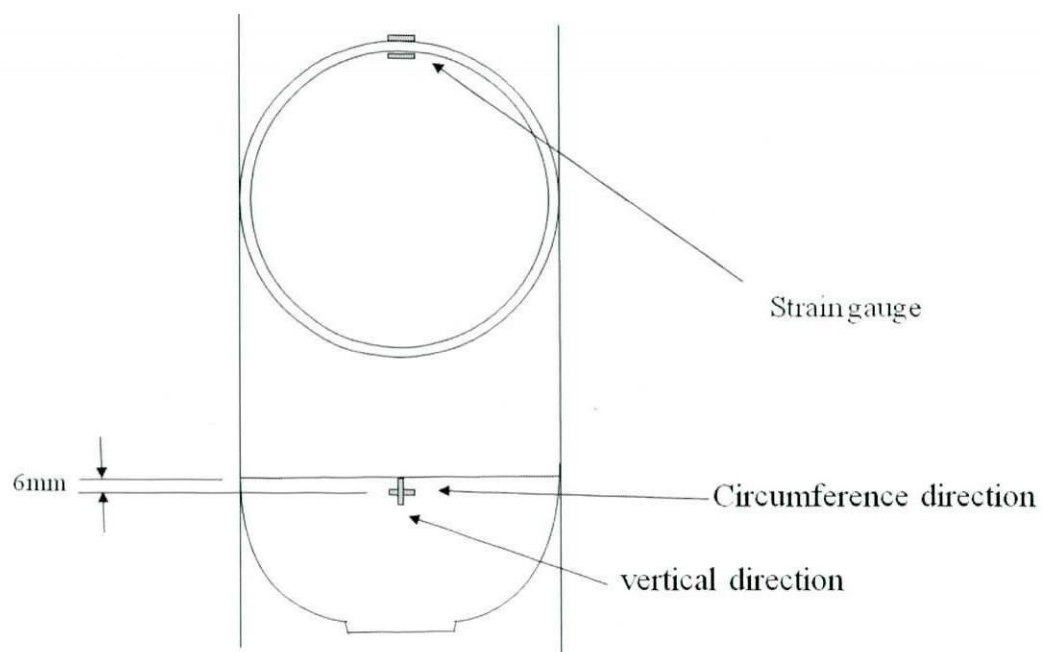
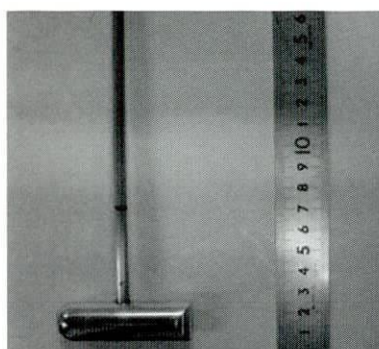
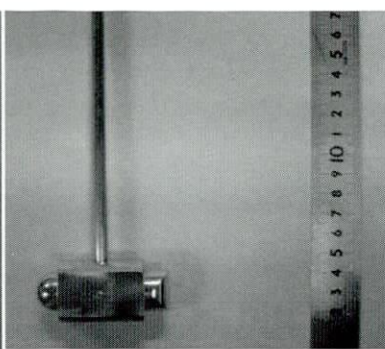


図 2.4 ひずみゲージ貼付位置

Hammer A 180g



Hammer B 268g



Hammer C 371g

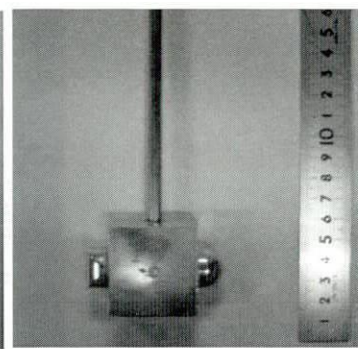
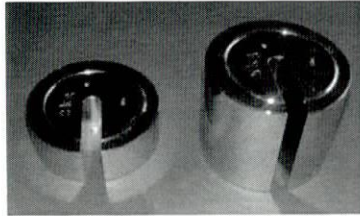
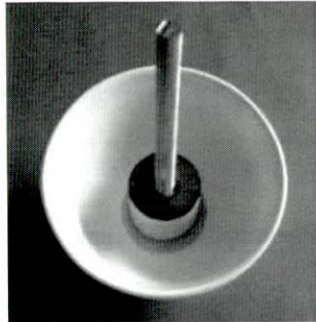


図 2.5 ハンマー写真



(a) 試験に用いたおもり



(b) おもりの設置に用いた治具



(c) おもりと試験体に荷重をかけた状態(例)

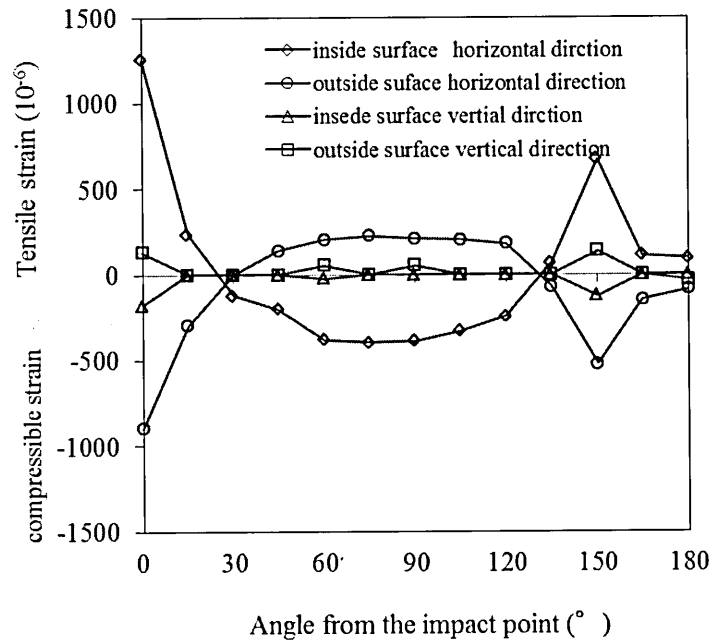
図 2.6 固定荷重の影響の測定に使用した(a) 試験に用いたおもり(b) おもりの設置に用いた治具(c) おもりと試験体に荷重をかけた状態(例)

2.3 実験結果と考察

2.3.1 試料中に発生するひずみ

図 2.7 に $\theta = 0 \sim 180^\circ$ まで 15° 毎に測定した、食器試料中（ボール 1、プレート 2）に発生したひずみの最大値を示す。試料内側表面では縦方向では圧縮ひずみが発生し、横方向には引っ張りひずみが発生した。試料外側表面では反対の現象が見られ、横方向で圧縮ひずみ、縦方向で引っ張りひずみが発生した。また、内側表面のすべての位置において縦方向よりも横方向の方が大きなひずみ量を示した。これは試料の衝撃打撃によって起こる変形は横方向の方が縦方向の変形よりも大きい事を示している。横方向の最大ひずみ量を極座標にプロットしたものが図 2.8 である。食器全体の変形をわかりやすくするために左右対象であるとして、 180° までの結果を用いて $195^\circ \sim 345^\circ$ をプロットした。特にひずみ量の大きな位置は打点($\theta = 0^\circ$)とバックストップと接している点($\theta = 150^\circ$)で現れ、その 2 点では局所的な変形が起きていると考えられる。また、試料には打点付近では引っ張りひずみが、 90° 付近では圧縮ひずみが生じており、全体のひずみの形から食器が円から楕円に変形していると考えられる。打点およびバックストップ接点で大きなひずみが現れることは蒲地らの破面解析による報告¹⁾や秋月らによる応力解析の報告²⁾とも一致している。

(a) Bowl 1



(b) Plate 2

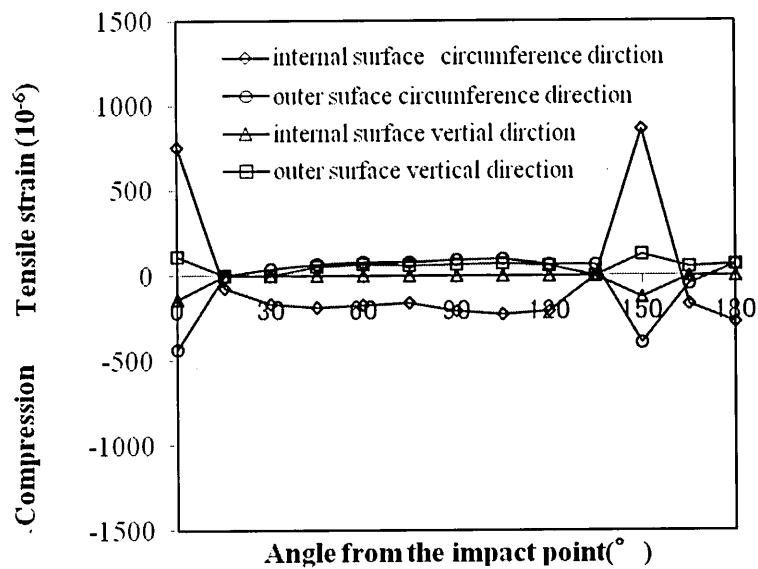
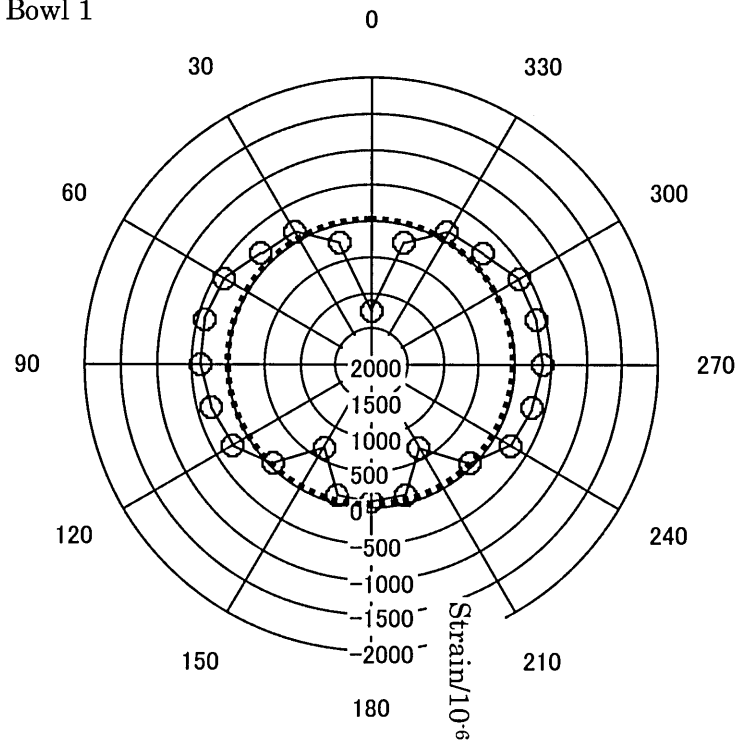


図 2.7 (a)ボール 1、(b)プレート 2 における、角度 (θ) に対する食器縁部のひずみ測定最大値：内側横方向、内側縦方向、外側横方向、外側縦方向

(a) Bowl 1



(b) Plate 2

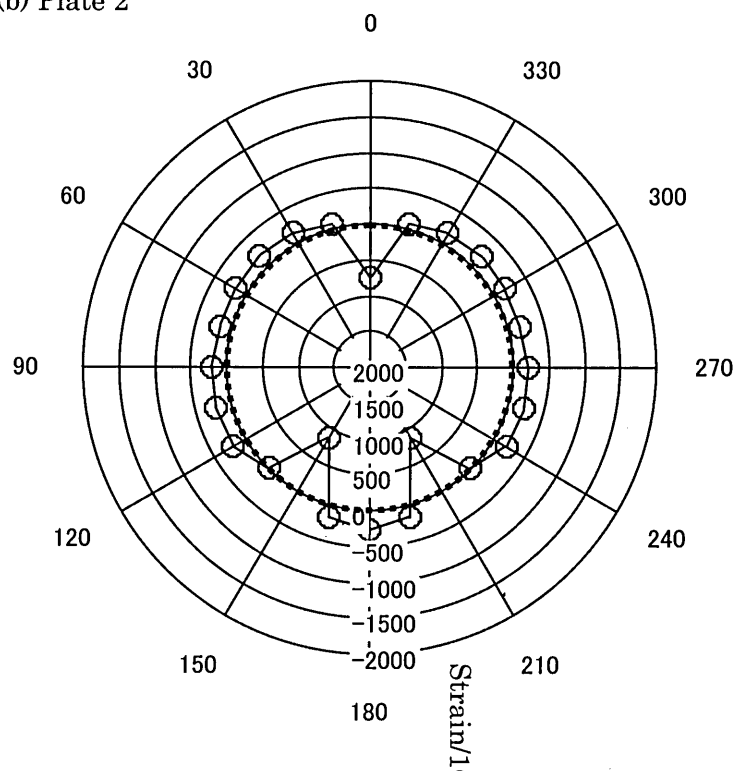


図 2.8(a)ボール 1、(b)プレート 2 における、角度 (θ) に対する食器縁部のひずみ測定最大値：内側横方向

図 2.8-2.9 に各試料について内側横方向について $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ (30° 毎) の位置で測定した時間に対するひずみをプロットしたひずみ波形を示す。図 2.8 にボール 1、ボール 2、図 2.9 にプレート 1、プレート 2 を示した。打点以外の場所においてもひずみが現れることは図 2.7、図 2.8 で示したがひずみは時間に対しても変化を示すことがわかる。ひずみ波形はどの試料においても 2msec 前後の間発生した。しかし、試料によって波形は大きく異なり、時間とともにひずみ量が複雑に変化した。ただし、どの試料についても $\theta = 0$ と 150° の位置で生じたひずみ波形は特徴的な 2 つのピークを示した。

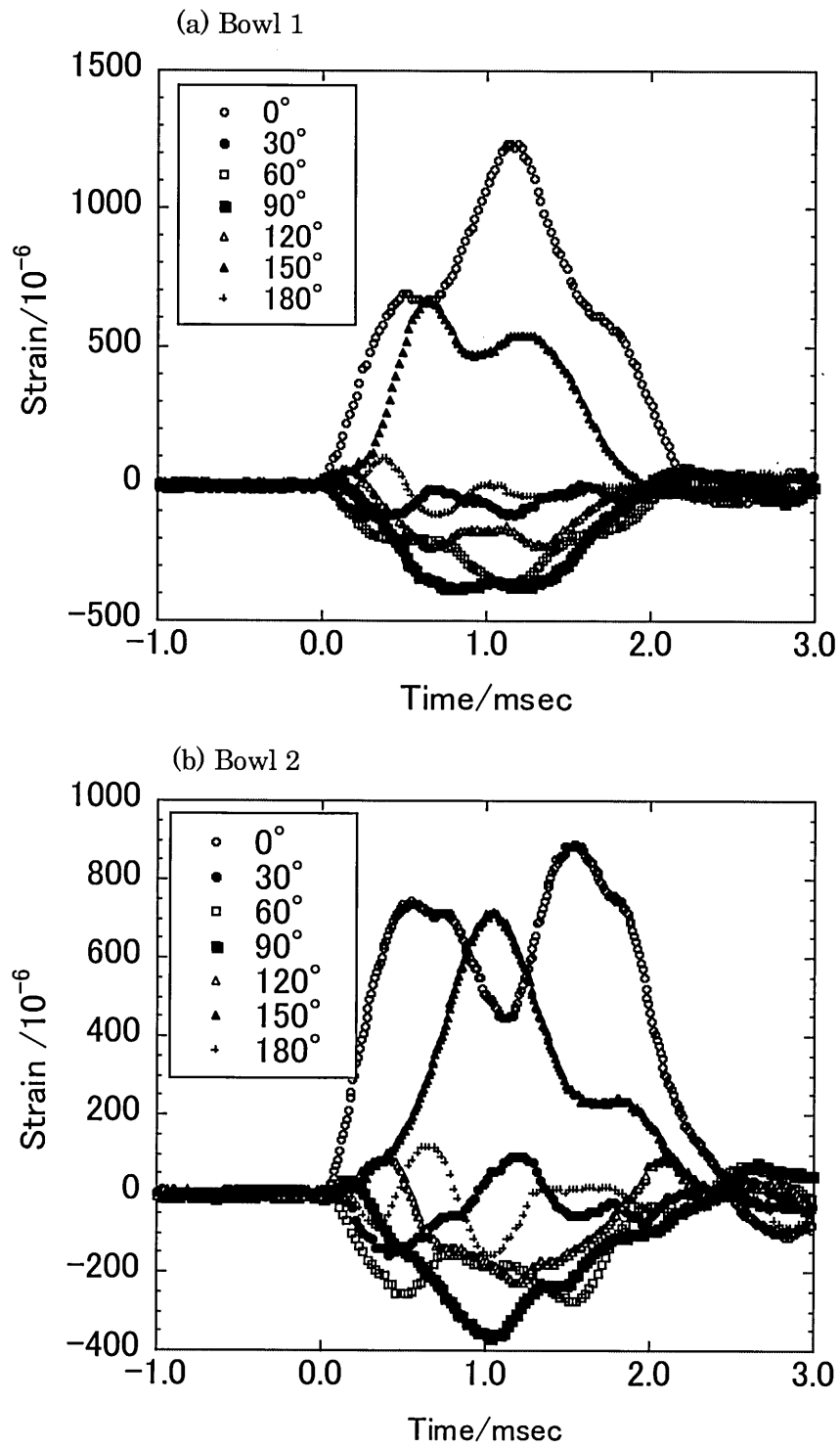


図 2.9 30° 毎の θ での時間に対するひずみ波形
内側横方向(a)ボール 1、(b)ボール 2

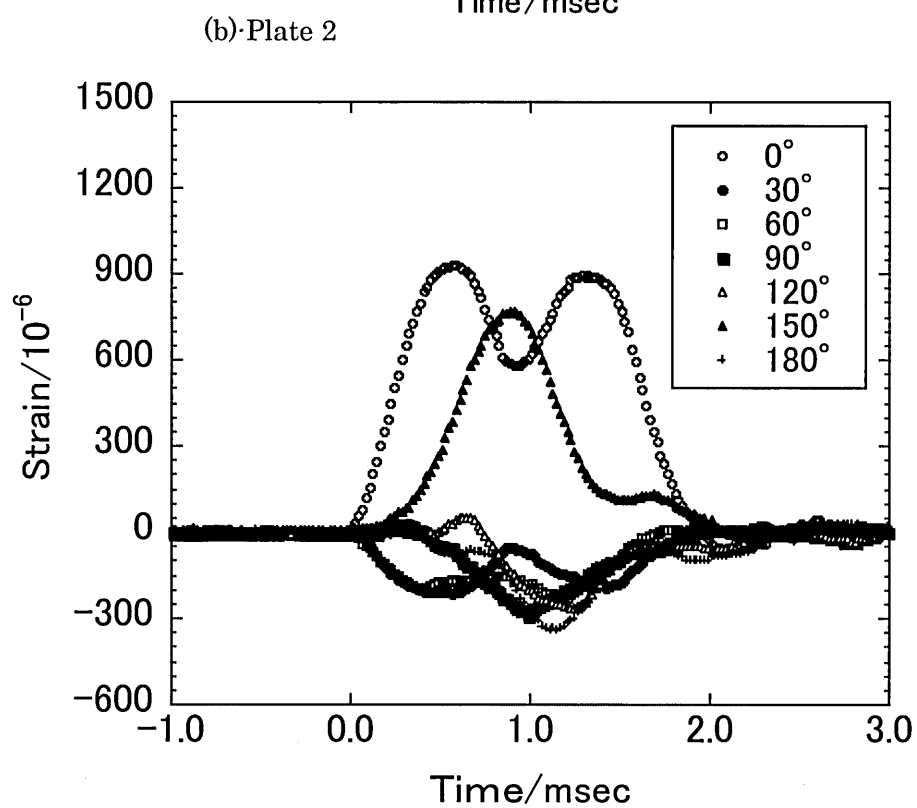
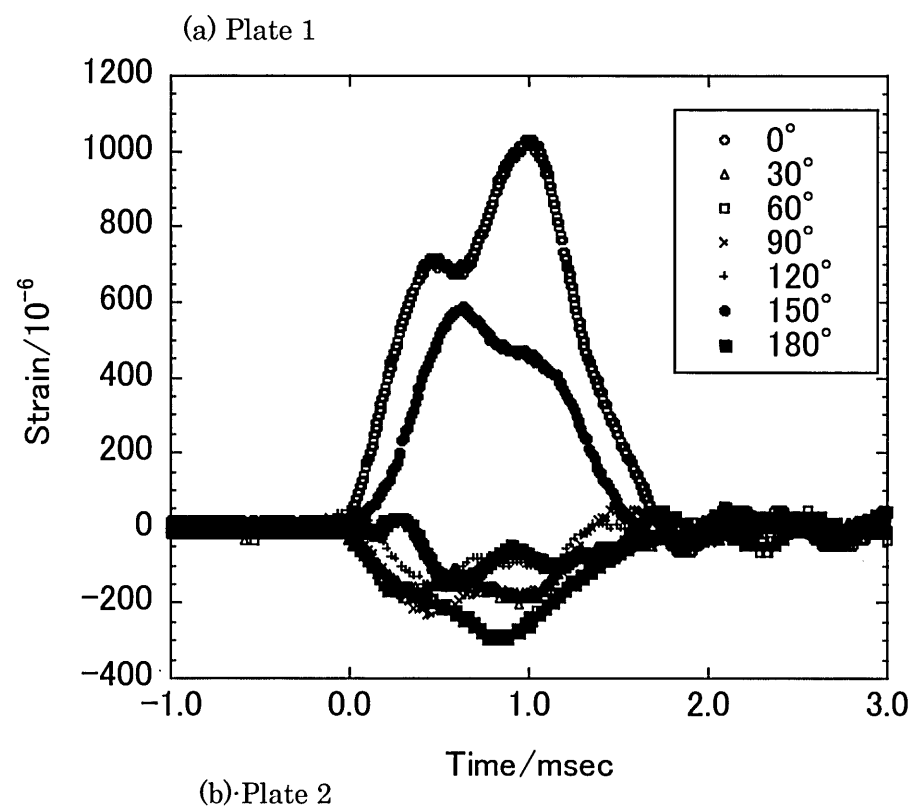


図 2.10 30° 毎の θ での時間に対するひずみ波形
内側横方向(a)プレート 1、(b)プレート 2

2.3.2 測定条件と発生するひずみ

図 2.11 に打点位置である $\theta = 0$ でのひずみ波形をボール 1、2 及びプレート 1,2 を比較して示す。どの試料も一つ目のピークはほぼ同じ時間に現れたが、2 つ目のピークは試料によって異なる時間に現れ、ひずみ量も大きく異なった。ひずみ波形はボール 1 とプレート 1 ではファーストピークよりセカンドピークが大きく、ボール 2 とプレート 2 では波形形状及びセカンドピークの現れる位置と大きさが類似していた。ボール 1 とプレート 1 の直径は 127mm と 139mm で、ボール 2 とプレート 2 の直径は 175mm と 169mm である。大きな直径の試料ほどセカンドピークが遅く、小さく現れる傾向を示した。これらについては第 3 章にて考察する。

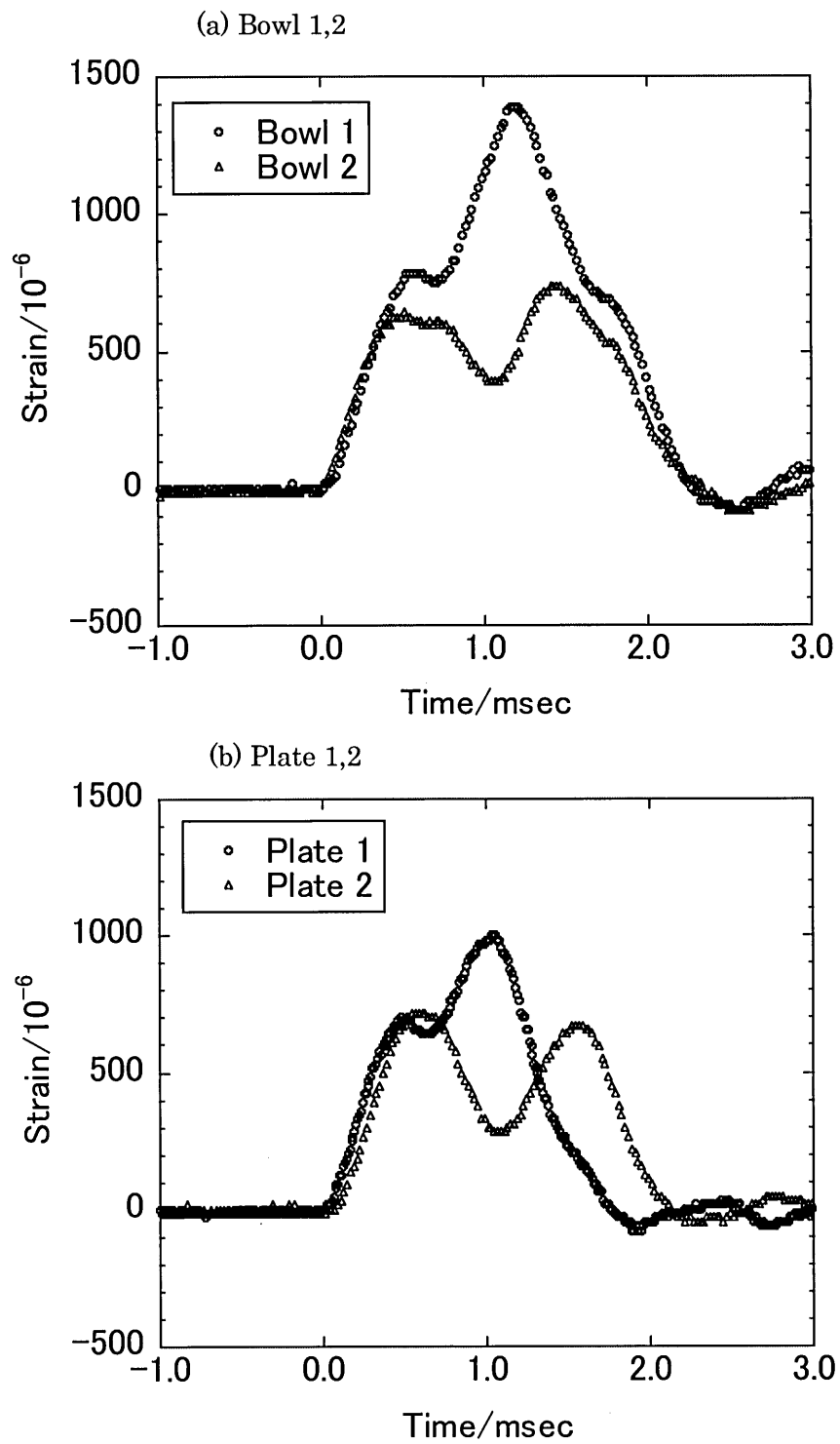


図 2.11 打点内側横方向のひずみ波形 (a)ボール 1,2
(b)プレート 1,2

図 2.12-2.13 は打撃エネルギーのひずみ波形への影響を示す。どの試料においても打撃エネルギーが増加してもひずみ量は大きくなったが、ピーク位置は変わらず、波形形状は変わらなかった。

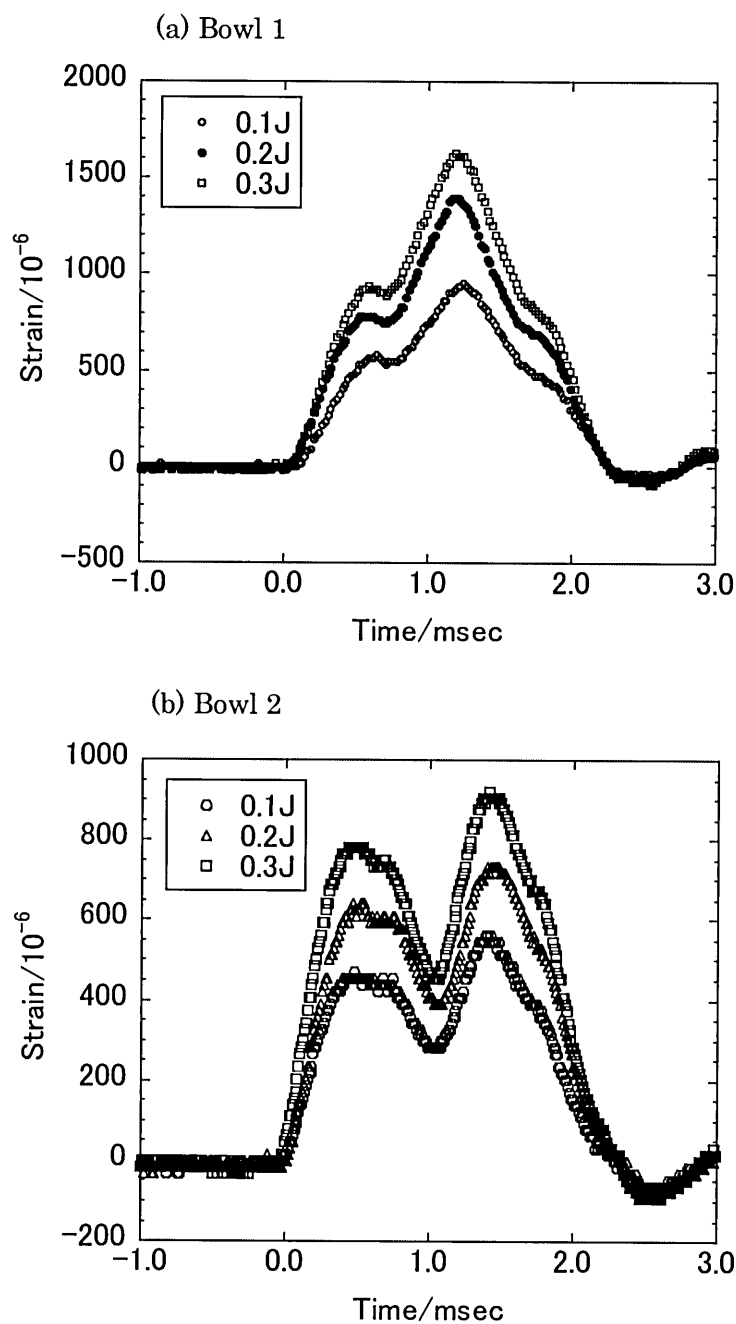
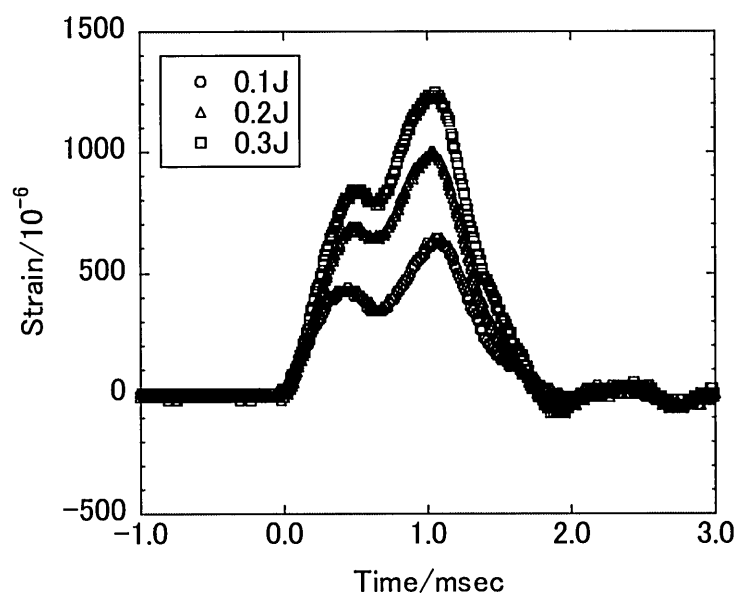


図 2.12 打撃エネルギーのひずみ波形への影響 (a)ボール 1 (b)ボール 2

(a) Plate 1



(b) Plate 2

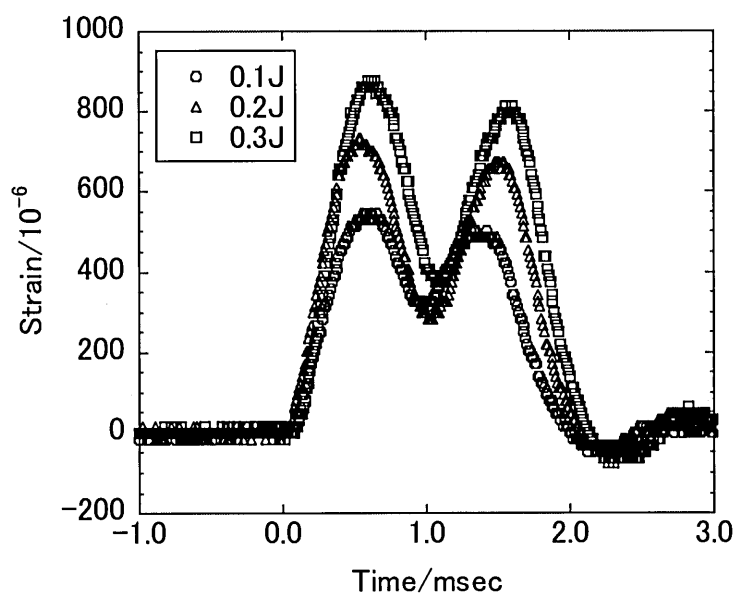


図 2.13 打撃エネルギーのひずみ波形への影響 (a)プレート 1 (b)プレート 2

図 2.13 はハンマー重量とひずみ波形の関係を示す。この測定はボール 1 に対して 0.2J の打撃エネルギーで測定した。ハンマー重量が増加するに従い、ひずみが生じる時間が長くなり、ひずみ波形の広がりが大きくなった。このハンマー重量の衝撃強度やひずみ波形への影響 については第 4 章にて詳しく検討を行う。

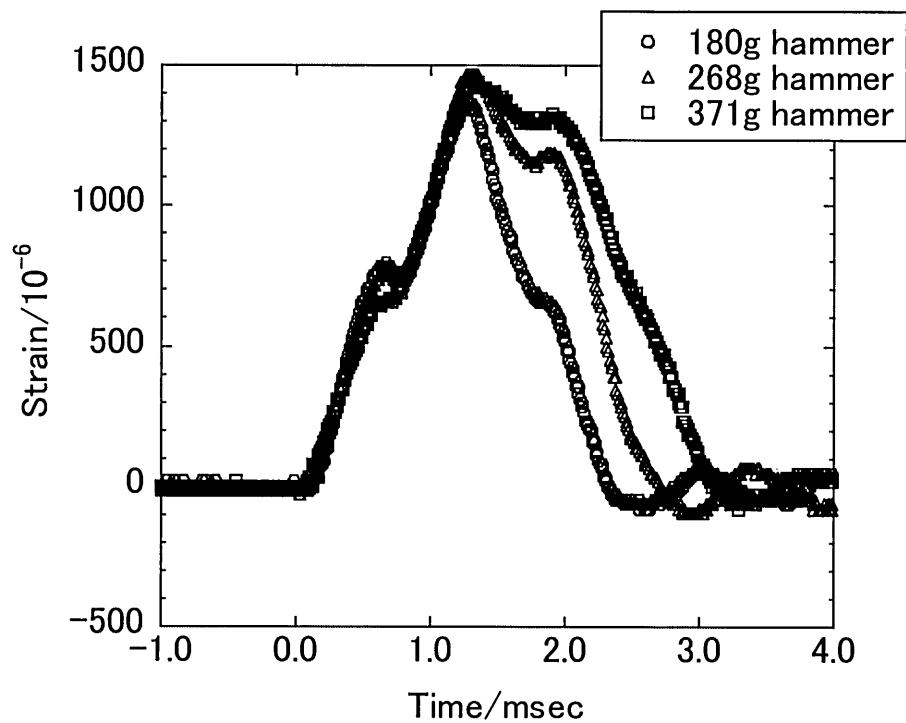


図 2.14 ハンマー重量のひずみ波形への影響 (ボール 1)

図 2.15-図 2.16 は試料中央の固定荷重のひずみ波形への影響を示す。図 2.15 にボール 1, 2、図 2.16 にプレート 1,2 を示す。どの試料においても固定荷重が増加するに従い、ファーストピークのひずみ量の増加とセカンドピークのひずみ量の減少が見られた。これは、固定荷重によって試料全体の変形が抑えられるため、打撃エネルギーが局所的に打点に集中しファーストピークは増大し、一方、セカンドピークは後の議論でわかるように、全体の変形からの復元力によって現れるものであり変形が小さくなれば減少すると考えられた。第 1 章で述べたように、強化磁器食器分科会の結果では衝撃強度は固定荷重が増加するに従い衝撃強度が増加する傾向が示されており³⁾、セカンドピークのひずみ量の低下が衝撃強度が高くなった原因であると考えられる。

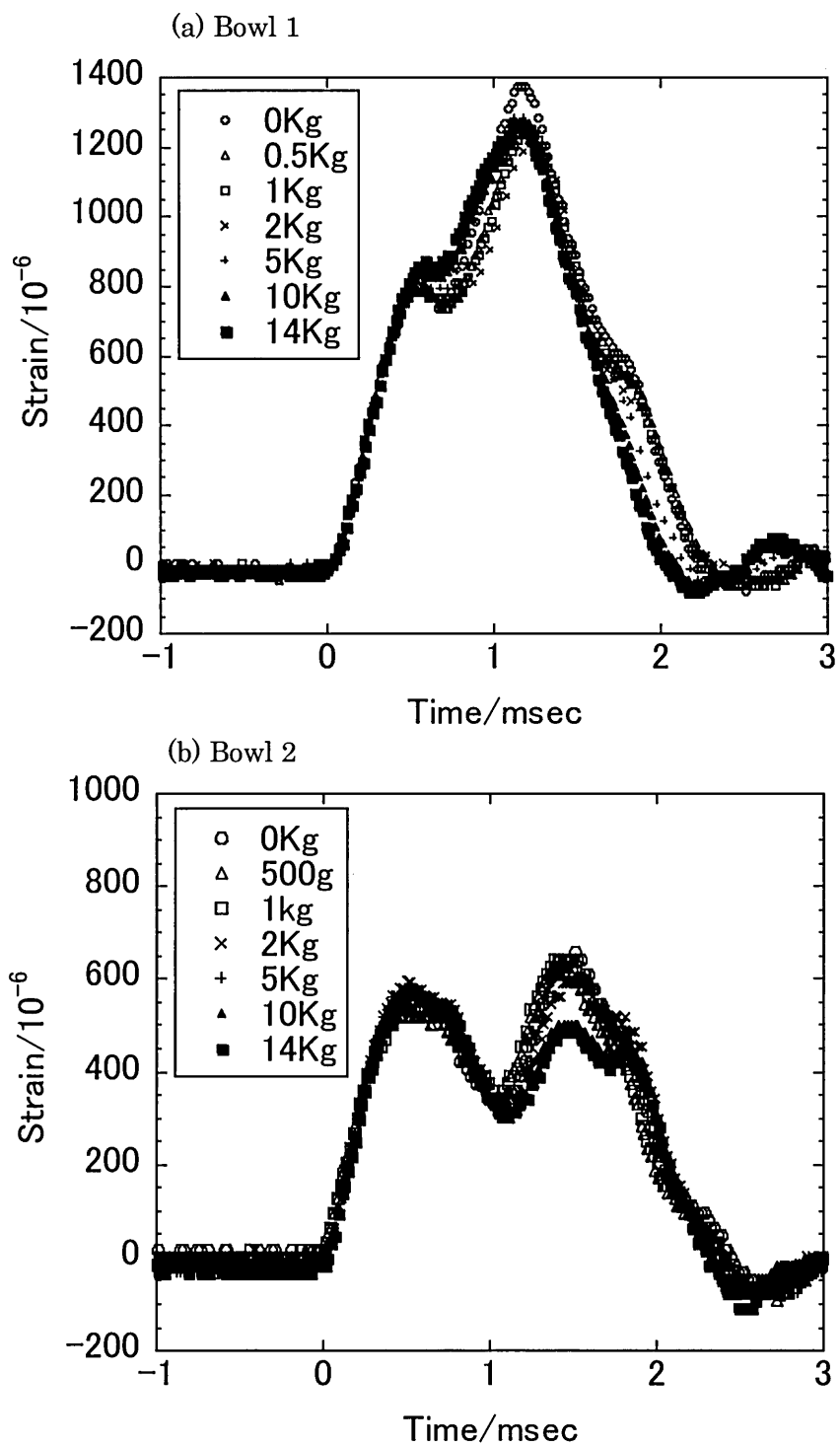


図 2.15 固定荷重のひずみ波形への影響(a)ボール 1 (b)ボール 2

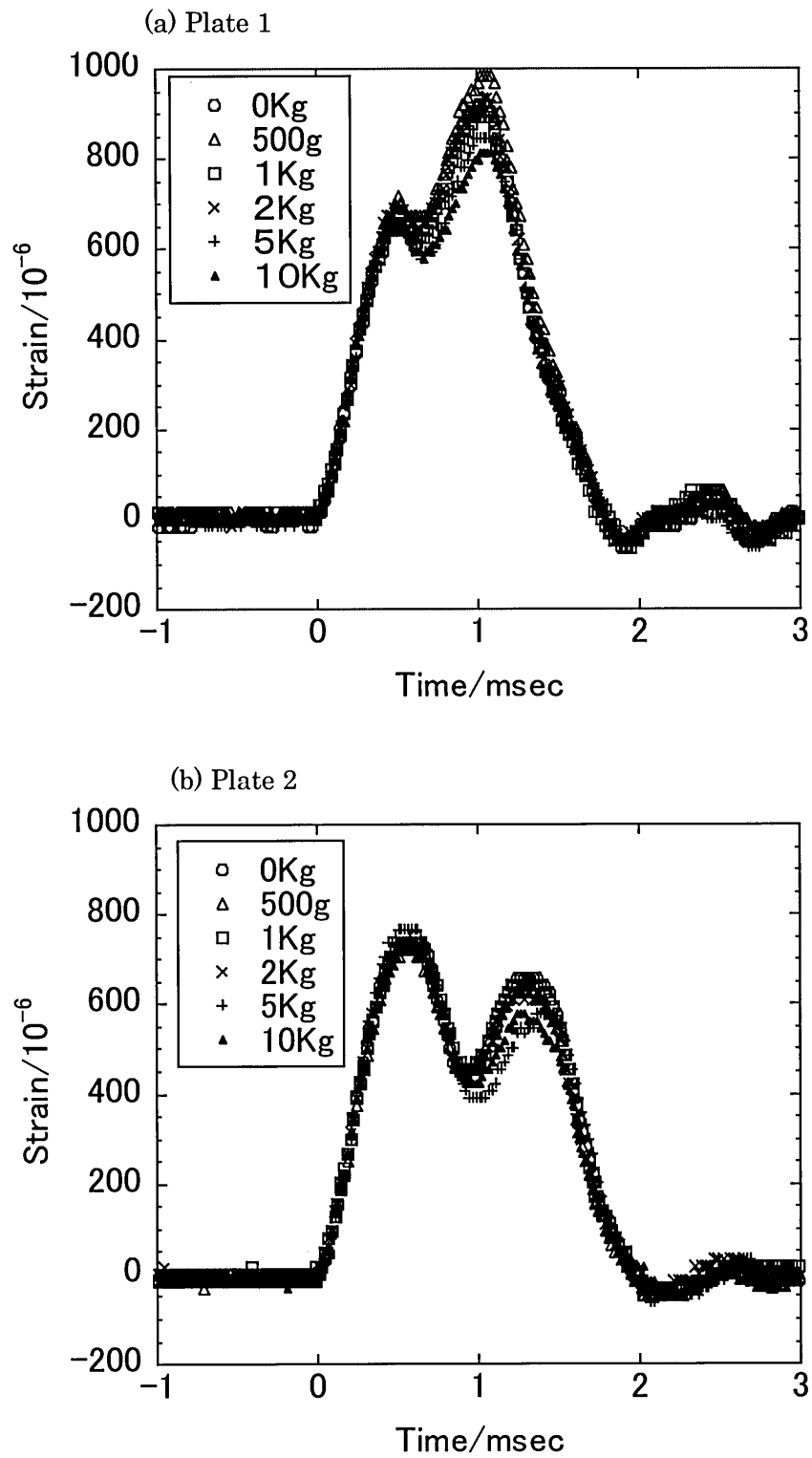


図 2.16 固定荷重のひずみ波形への影響(a)プレート 1 (b)プレート 2

図 2.17 はボール 1 でのバックストップ開き角に対するひずみ波形の変化を示す。バックストップの開き角が大きくなるに従い、セカンドピークの時間が遅れ、ひずみ量が減少する傾向にあった。これについては第 3 章にて詳細に検討する。

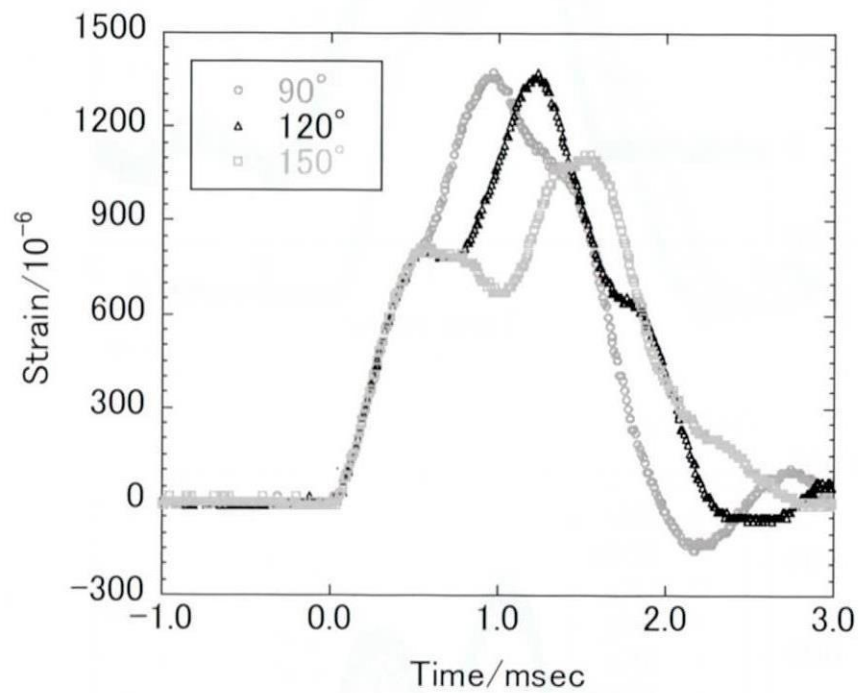


図 2.17 バックストップ開き角のひずみ波形への影響 (ボール 1)

2.4 まとめ

強化磁器食器に衝撃試験を行った場合に食器に生じるひずみを食器各位置、各方向にて測定を行った。また、種々の測定条件を変えた場合にひずみ波形がどのように変化するかを測定した結果、次のようなことが明らかになった。

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歪み、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する。この4カ所では内側横方向が一番大きな応力を示す。試料打点内側横方向には引張ひずみが計測され、90度では圧縮ひずみが計測され、食器縁部は衝撃打撃時に円から楕円に変形していることが分かった

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長的な2つのピークを示した。

さらに、ひずみ波形は直径の影響を大きく受け複雑に変化した。また、衝撃試験測定条件として、打撃エネルギー、ハンマー重量、固定荷重、バックストップ開き角に関して検討を行った結果、特にハンマー重量とバックストップ開き角の変化によってひずみ波形が大きく影響を受けることが分かった。これらの影響については次章以降で詳細に検討する。

参考文献

- 1) N. Kamochi, H. Katsuki and T. Watari, J. Ceram. Soc. Japan, **117**, 724-728 (2009).
- 2) 秋月俊彦 セラミックス **44** [1]22-24(2009)
- 3) 林亜希美 セラミックス **44**[2] 12-16 (2009)

第3章 ひずみ波形に対するバックストップの影響

3.1 はじめに

前章で示したように、打撃によって打点及びバックストップ接点において、大きなひずみが現れ、そのひずみ波形が2つの特徴的なピークを有していた。本章では、この2つのピークがなぜ現れるかについて解明するため、ひずみ測定のほか、高速度カメラによる試料の変形及びハンマーの位置の観察を行った。特に、ひずみ波形が食器の大きさおよびバックストップ開き角によって大きく変化した点に着目して検討した。

3.2 実験方法

用いた試料は第2章で用いた試料と同じ大きさの異なる4つの市販強化磁器食器である。それらは同じ材質、同じ焼成条件で作られ、サイズのみが異なる（表 1.1、表 1.2）。

衝撃試験時のバックストップとひずみ波形の関係を検討するために、バックストップの開き角（ α ）を 90° 、 120° 、 150° と変え測定を行った。ハンマーの重量は 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表 1.2 に示した各試料の衝撃強度よりも十分小さい値で、ひずみ測定中に食器は全く破損しなかった。

ひずみゲージは試料の打点とバックストップとの接点の内側横方向に貼り付けた。これらの2点は第2章で示したように縁部円周で最も大きなひずみが発生する場所である。

また、本章では衝撃試験の間に起こる食器の変形とハンマー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 (10000 フレーム/1 秒) とした。この設定により 0.1msec 毎の撮影が出来る。図 3.1 は撮影した範囲を示す。



A field of view by high speed camera

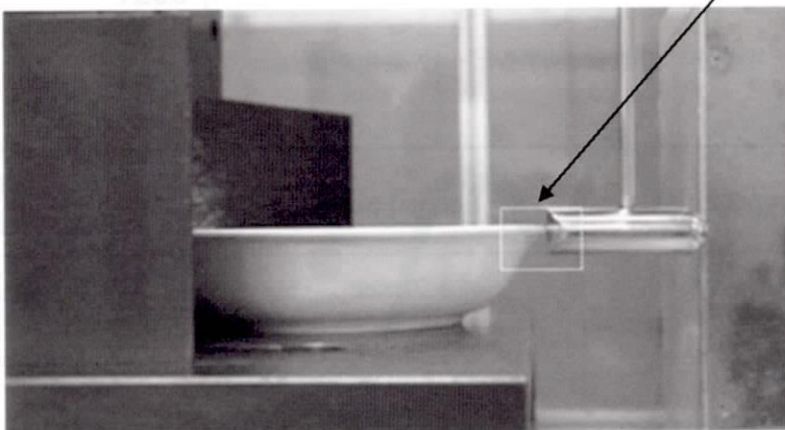


図 3.1 試料及びハンマーの写真、四角で囲んだ部分は高速度カメラで撮影したエリア

3.3 結果及び考察

図 3.2 及び図 3.3 に打点位置でのボール 1、ボール 2、プレート 1、プレート 2 それぞれのひずみ波形を示す。第 2 章でも述べたように、どの試料でも 2 つのピークを示すが、セカンドピークのひずみ量はボール 1 の方が ボール 2 よりも大きく、プレート 1 の方が プレート 2 よりも大きかった。波形の形状はボール 1, 2 の比較、プレート 1, 2 の比較では大きく異なり、直径の近いボール 1 とプレート 1、ボール 2 とプレート 2 が同じような波形を示す。

以下の議論では 2 つの特徴的なピークについて述べる。矢印で示したファーストピークは食器のサイズにかかわらず 0.5msec 付近にほぼ同じ値でみられたが、セカンドピークは食器のサイズに依存して異なる時間、大きさで現れた。表 3.1 に打点におけるファーストピークとセカンドピークの発生時間とその時間差を示す。その時間はボール 1:1.2msec、ボール 2:1.5msec、プレート 1:1.0msec、プレート 2:1.3msec であった。ファーストピークとセカンドピークの時間差はボール 1 では約 0.7msec、ボール 2 では約 1.0msec、プレートでの時間差はプレート 1 では約 0.5msec、プレート 2 では約 0.8msec である。

表 3.1 打点におけるピーク発生時間

	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

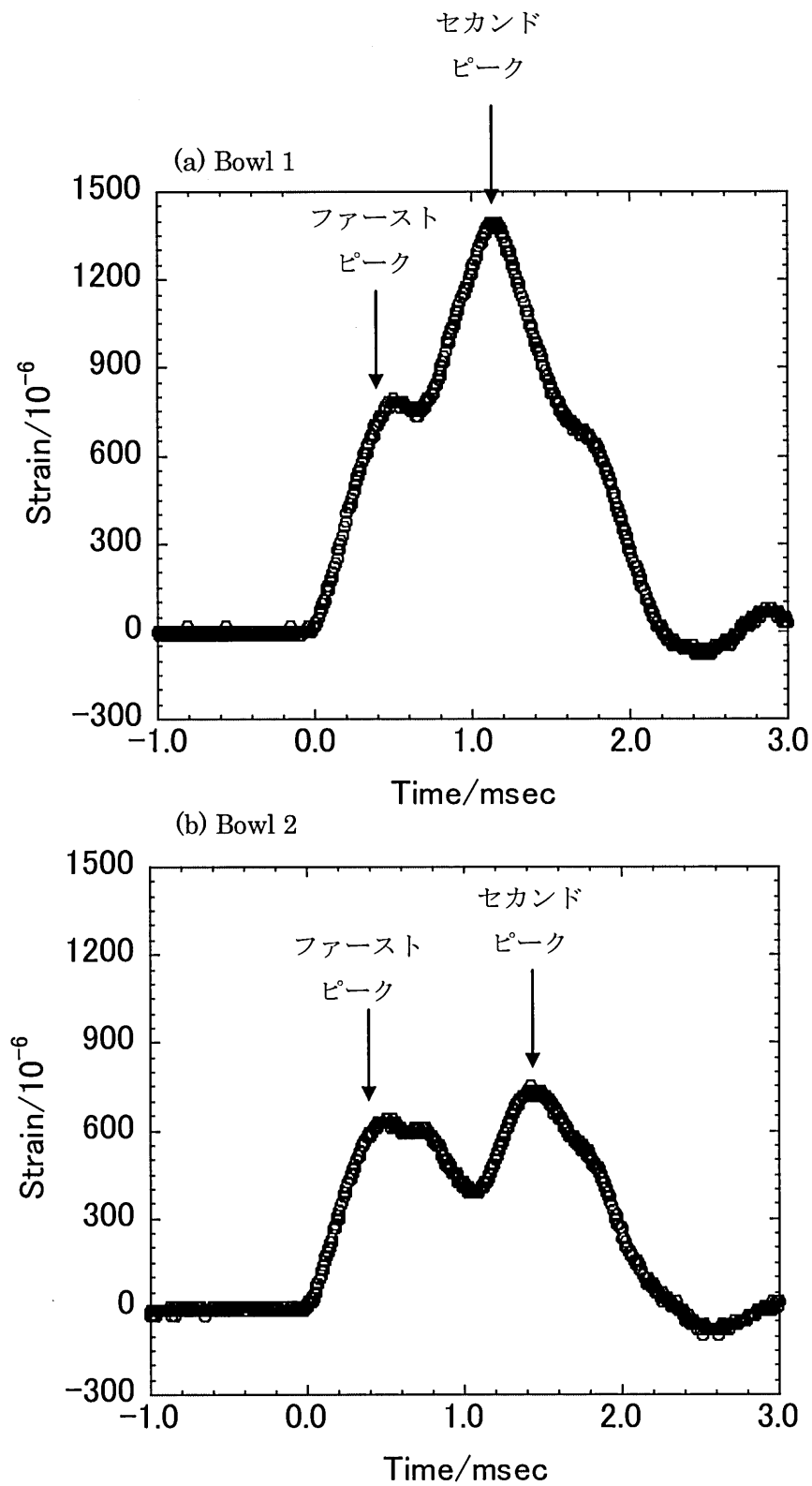


図 3.2 打点でのバックストップがある場合のひずみ波形
(a) Bowl 1 、 (b) Bowl 2

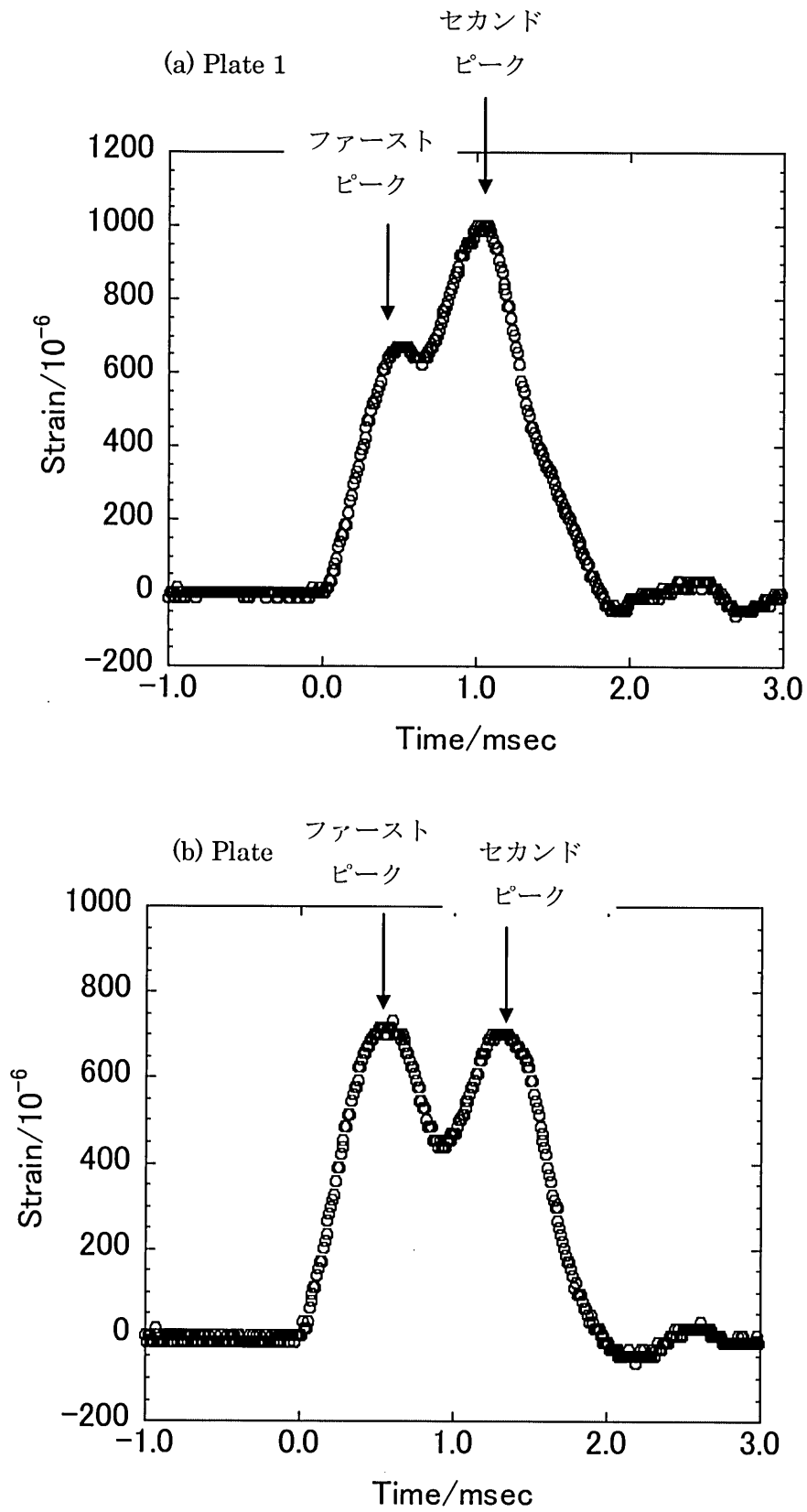


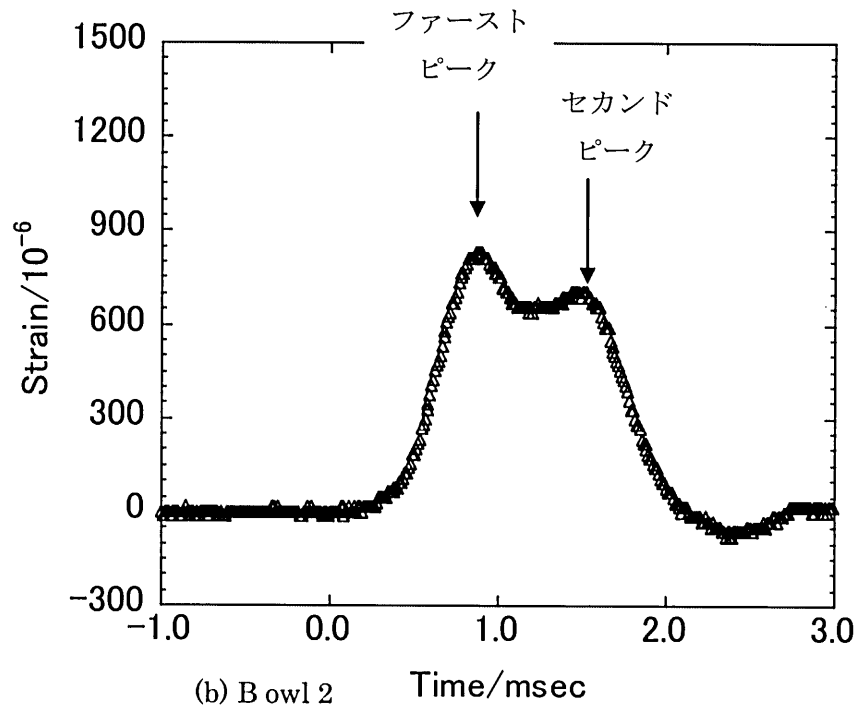
図 3.3 打点でのバックストップがある場合のひずみ波形
(a)Plate 1 、 (b) Plate 2

図 3.4-3.5 はバックストップ接点に現れたひずみ波形を示す。打点と同様に 2 つのピークを示した。表 3.2 はそのピークの発生時間と打点でのピーク位置からの遅延時間、ファーストピークとセカンドピークの時間差を示す。ファーストピークとセカンドピークの時間はボール 1 で 0.85msec と 1.55msec、ボール 2 で 1msec と 2msec、プレート 1 で 0.7msec と 1.25msec、プレート 2 では 0.9msec と 1.7msec に現れた。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た。その遅れはボール 1 で 0.35msec、ボール 2 で 0.5msec、プレート 1 で 0.25msec、プレート 2 で 0.4msec で、ちょうど打点及び接点でのファーストピークとセカンドピークの時間差の半分であった。即ち、ハンマーに打撃された試料がバックストップに押しつけられてひずみが現れるまでの時間がそれぞれ遅延時間となって現れている。

表 3.2 バックストップ接点におけるピーク発生時間

	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

(a) Bowl 1



(b) Bowl 2

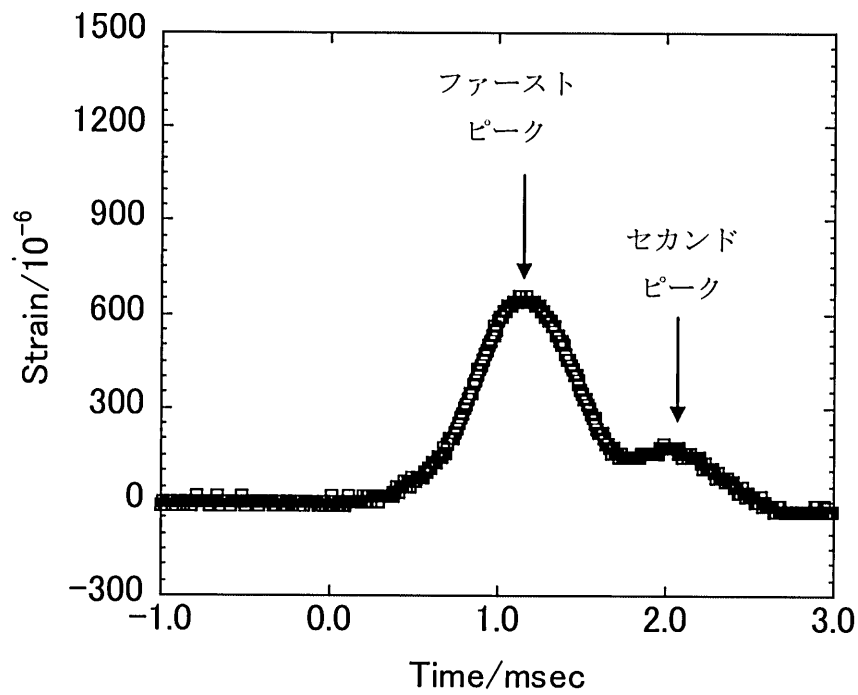


図 3.4 バックストップ接点でのひずみ波形

(a) Bowl 1 、 (b) Bowl 2

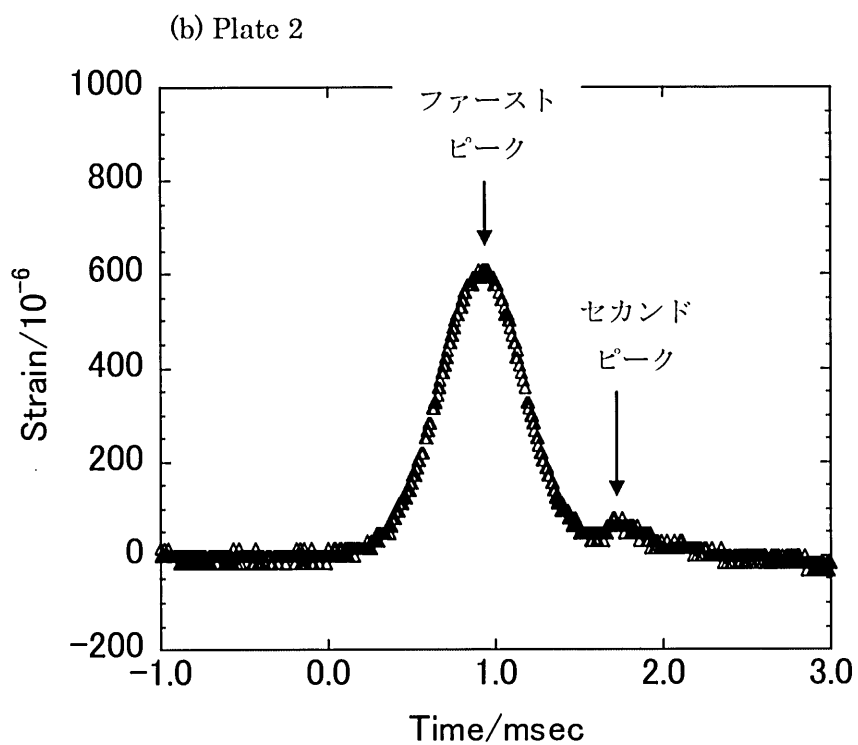
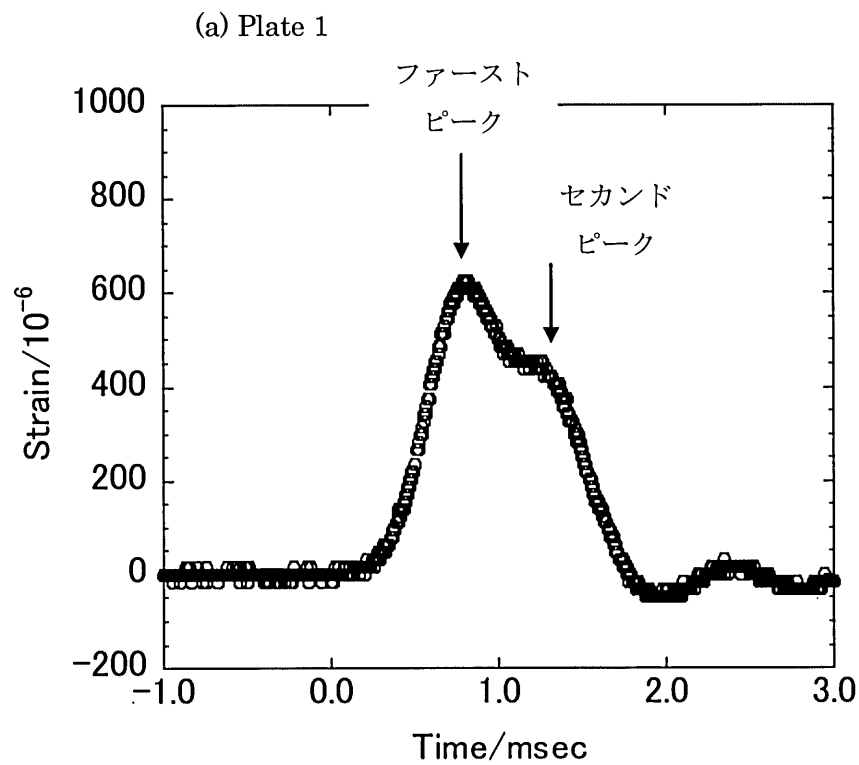


図 3.5 バックストップ接点でのひずみ波形
(a) Plate 1 、(b) Plate 2

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。またハンマーの位置と食器縁部の変位を図 3.6 及び図 3.7 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、この時点を衝撃試験の 0msec 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。試料はプレート 2(d')やボール 2(d')及び(e')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、ボール 2(f')及びプレート 2(e')において示されるように、それぞれ図 3.6(f)、図 3.7(e')に示すようにハンマーと試料が再び衝突していた。図 3.8は図 3.6から算出したハンマーと食器の位置関係を示す。縦軸を時間、横軸を変位とし、左側への動きをマイナスとし、右側への動きをプラスとした。ボール 2 では 0.9msec から 1.1msec の間ハンマーと食器との位置が異なったが、ボール 1 ではそれらの位置に変化はなかった。ただし、接触している状態でそれらの間には相互に力が働いていることは考えられる。

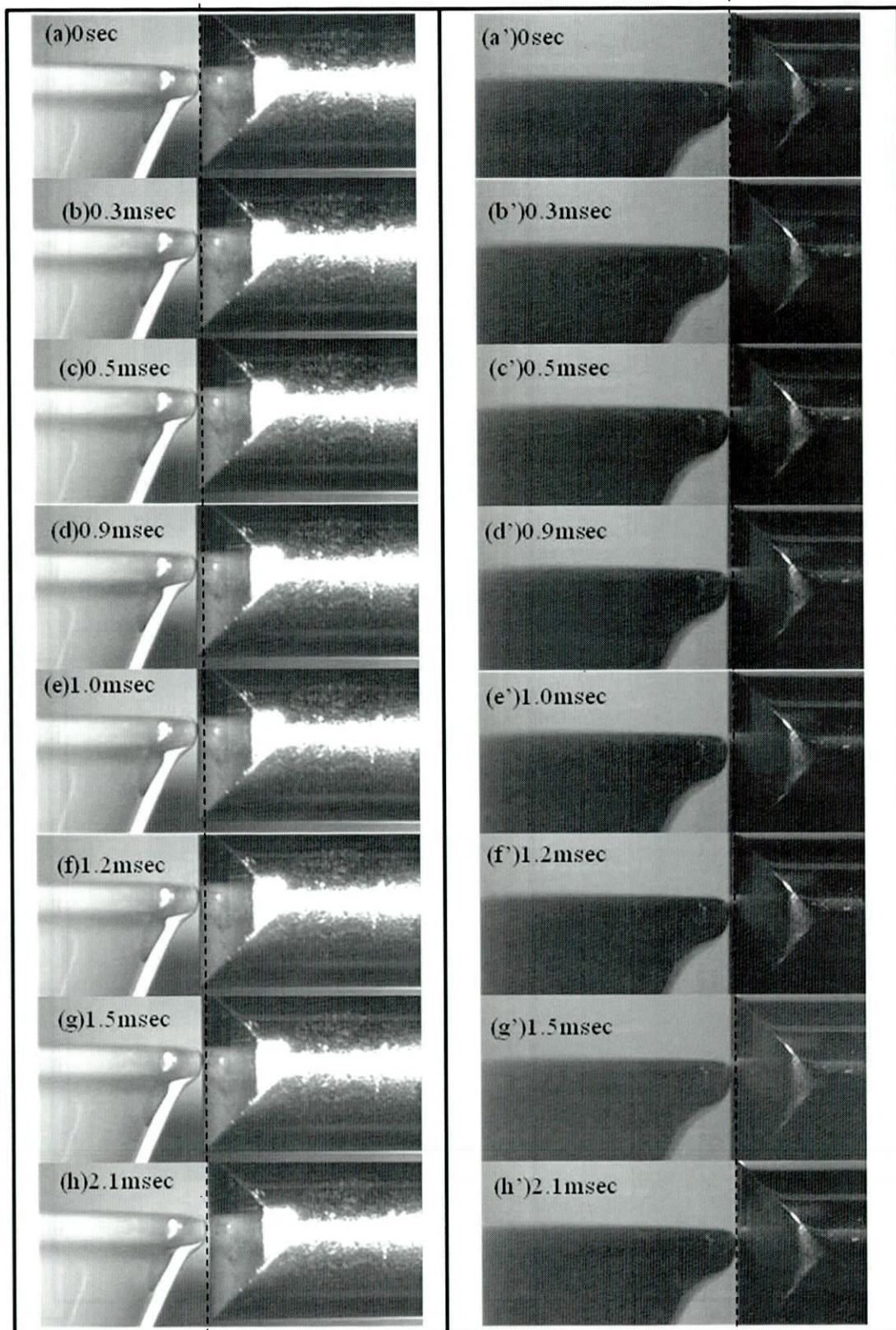


図 3.6 高速度カメラを用いた、打点におけるボールとハンマーの写真 (a) ~ (h) B Bowl 1, (a') ~ (h') Bowl 2.

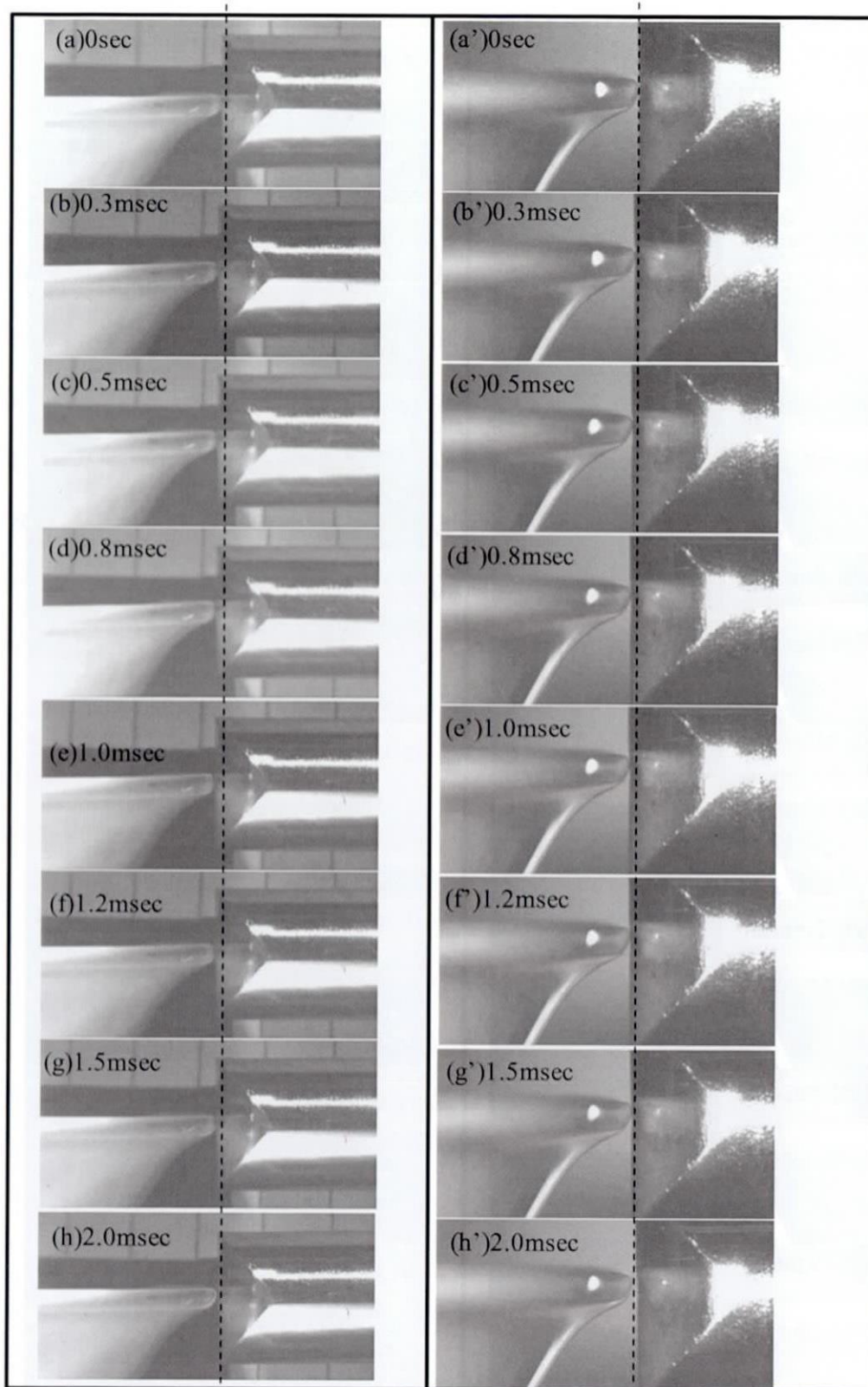
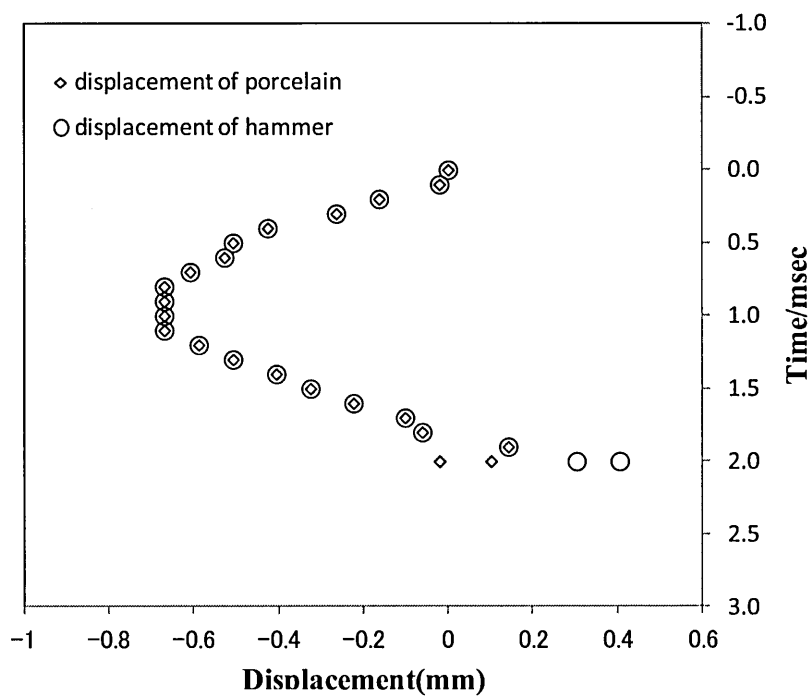


図 3.7 高速度カメラを用いた、打点におけるプレートとハンマーの写真 (a) ~ (h) Plate1, (a') ~ (h') Plate 2.

(a) Bowl 1



(a) Bowl 2

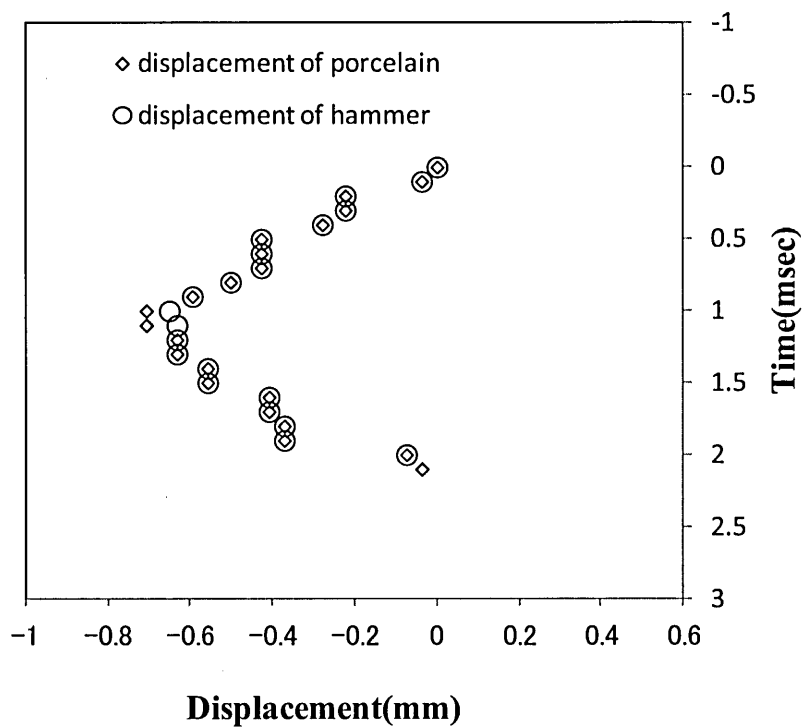


図 3.8 ハンマーと食器の位置関係

(a) Bowl 1 、 (b) Bowl 2

また、図 3.9 は図 2.8 からひずみ量が時間とともにどのように変化するかをプロットした図である。0sec ではひずみが発生せず、円形状である。0.3msec になると打点では引っ張りひずみが現れ、 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ にかけて圧縮ひずみが現れる。0.5msec では圧縮ひずみが 120° 付近まで現れ、バックストップ接点に引っ張りひずみが現れ始める。1msec ではバックストップ接点での引っ張りひずみが最も大きくなり、 90° 付近での圧縮ひずみが最も大きくなる。このとき試料全体としては $0^{\circ} - 180^{\circ}$ の方向に短径、 $90^{\circ} - 270^{\circ}$ の方向に長径の楕円に変形していると考えられる。1.5msec になると圧縮ひずみが小さくなり、バックストップ接点のひずみも小さくなり、楕円から円に戻り始めていると考えられる。最後に 2.5msec になるともとの状態に戻る。これを模式的に表したのが図 3.10 である。図 3.10(a)はハンマーと試料の打撃の瞬間を示し、それより前は試料中にひずみは発生していない。打撃直後にハンマーが試料を圧縮し、打撃点において局所的にひずみが生じ始め、(図 3.11(b))、続いて図 3.10(c)に示す様にひずみは増加して最大値をとる(図 3.2、図 3.3)。試料全体は衝撃により、変形し、図 3.10(d)のに示す様に極端に言えば試料の形状が円から楕円に変わり、バックストップを圧縮していく。それによりバックストップ接点ではひずみが生じ(d)で最大となる。ハンマーは試料との衝突の跳ね返りで反対の方向に戻り始め、結果として試料とハンマーが離れ、打撃点でのひずみは減少する。試料の変形は(d)の後、復元力によって元の状態にもどりはじめ、バックストップからの反作用によって反対方向つまり右方向に押し返される。ここで、試料はハンマーと再衝突し、再び打撃点のひずみが増加する(図 3.10(e))。これが、図 3.2 及び図 3.3 のセカンドピークである。さらに、この再衝突が再び試料の再変形をもたらし、最初の衝突時と同様な効果によりバックストップへと戻り、バックストップ接点でのひずみ波形における 2 つ目のピークの原因となると考えられる。

なお、ボール 1、及びプレート 1 の場合には、高速度カメラによって試料とハンマーが離れていることは観察されなかった。しかし、食器とハンマーの間には、接触したままの状態でも、右方向あるいは左方向に圧縮する力は働いていると考えられるので、図 3.10 の状況は同じように起きたと考えられる。ボール 1、プレート 1 ではボール 2、プレート 2 よりもバックストップ接点と打撃点との距離が

近く、試料の変形が早く起き、その復元力によって、早くハンマーに再衝突すると考えられる。従って、まだ打撃点に現れている最初のひずみが緩和される前にバックストップからの反作用によるひずみが重なりより大きなピークが現れると考えられる。

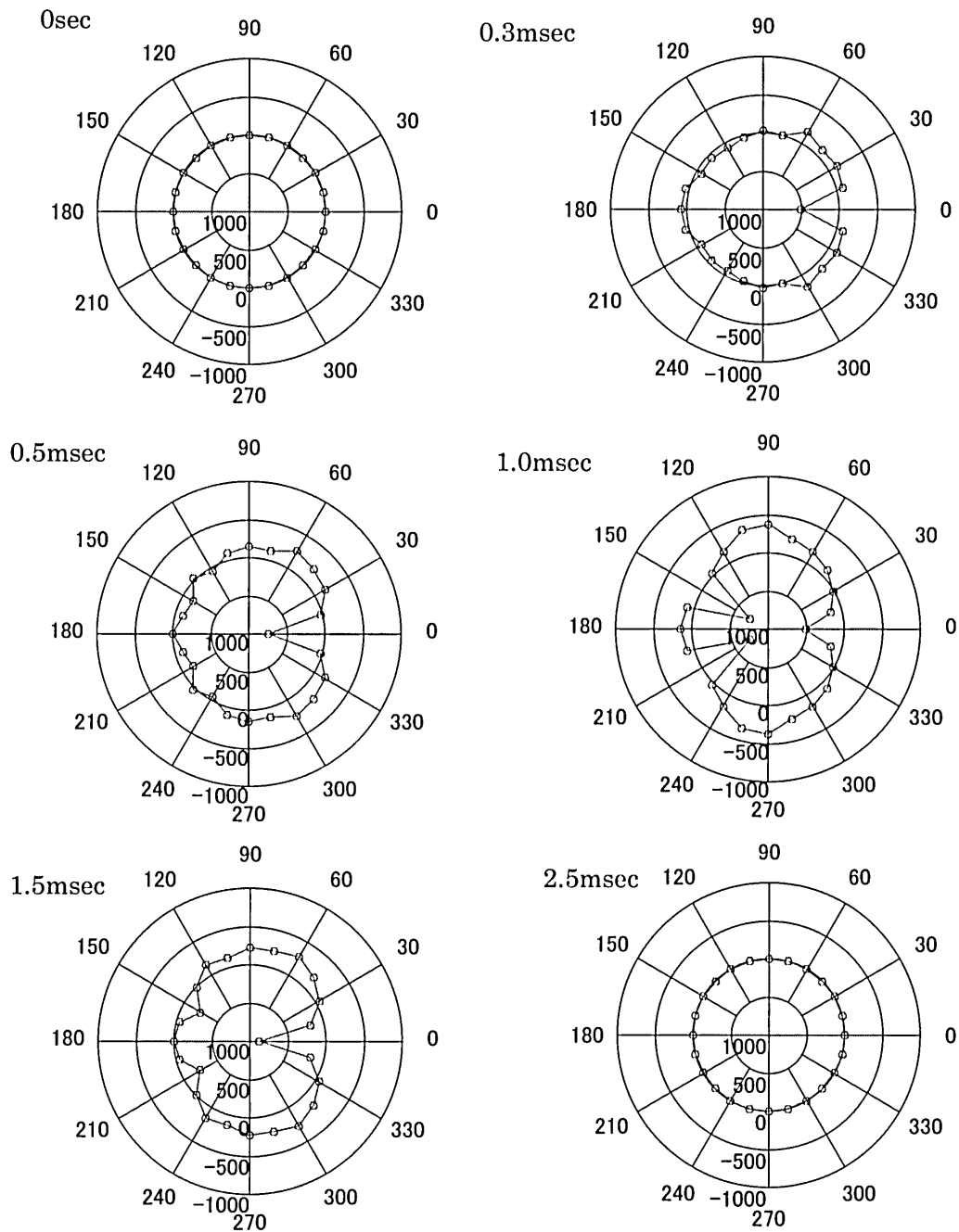


図 3.9 ボール 2 において 15° 毎に測定したひずみ波形結果から、各時間でのひずみ量。打点： 0° 、バックストップ接点： 150° 210°

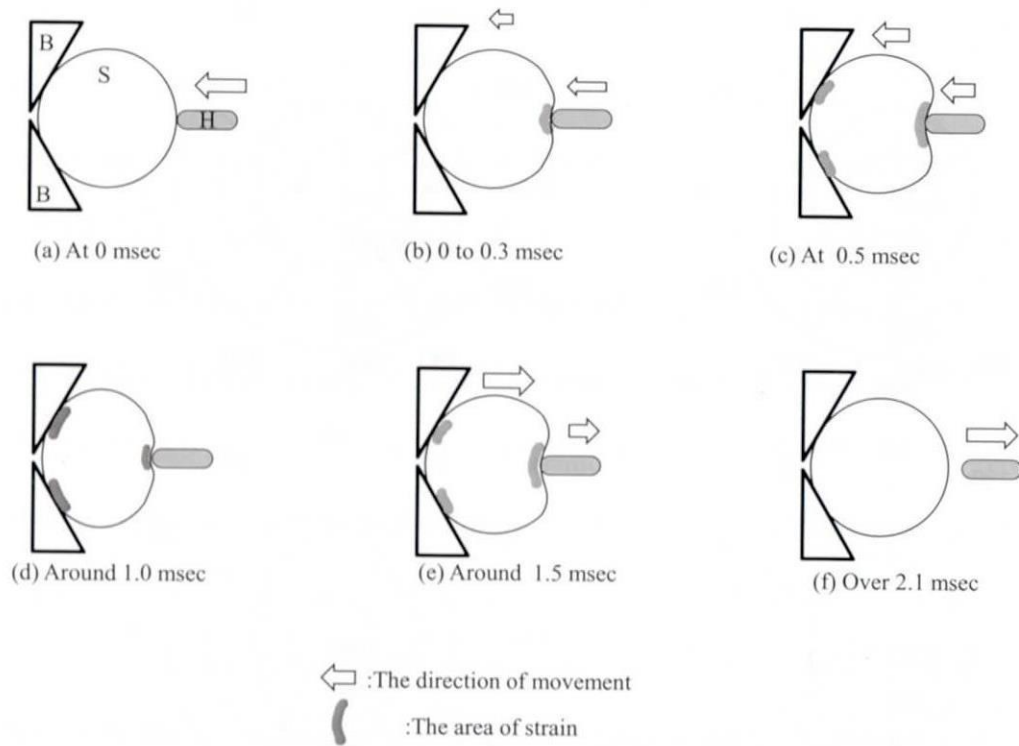


図 3.10 打撃時のボール 2、プレート 2 に起きていると考えられる変形やひずみ、ハンマーの動きを強調した図。

以上の考察で、ひずみ波形に現れるセカンドピークは試料がバックストップによって支えられていることが原因であると結論づけた。そこで、バックストップなしで衝撃を与えた場合の打撃点のひずみ波形を測定した。その結果を図 3.11 及び図 3.12 に示す。バックストップを用いた図 3.2、図 3.3 と比べて、セカンドピークは現れなかった。ここで、図 3.11、図 3.12 のひずみピークは図 3.2、図 3.3 のファーストピークとほとんど一致した。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との衝突によって戻ってきた試料がハンマーと再衝突によって起きることが証明された。

図 3.4、図 3.5 に示したように、最初の打撃によって打撃点に起きた応力は試料を変形させ、バックストップに伝わって接点に応力を与え、ひずみを生じさせた。さらにバックストップとの接点に生じた新しい応力は、試料を再変形させ、打撃点に戻ってハンマーとの間で次の応力を発生させ、新たなひずみを生じさせる。この新たなひずみが、図 3.4-3.5 のひずみ波形のファーストピークと同じであると仮定し、バックストップから打撃点に戻る時間を加えて、バックストップがない場合の図 3.11、図 3.12 のファーストピークに重ね合わせると図 3.13 及び図 3.14 に示すようにバックストップが存在するときのひずみ波形(図 3.2 及び図 3.3)にほぼ一致した。なお、戻りための遅れの時間はボール 1 で 0.35msec、ボール 2 で 0.5msec、プレート 1 で、0.25msec、プレート 2 で 0.4msec である。以上の様に打撃点においては、直接の打撃によるひずみ変形にバックストップに起因するひずみ波形加わって現れることが証明された。

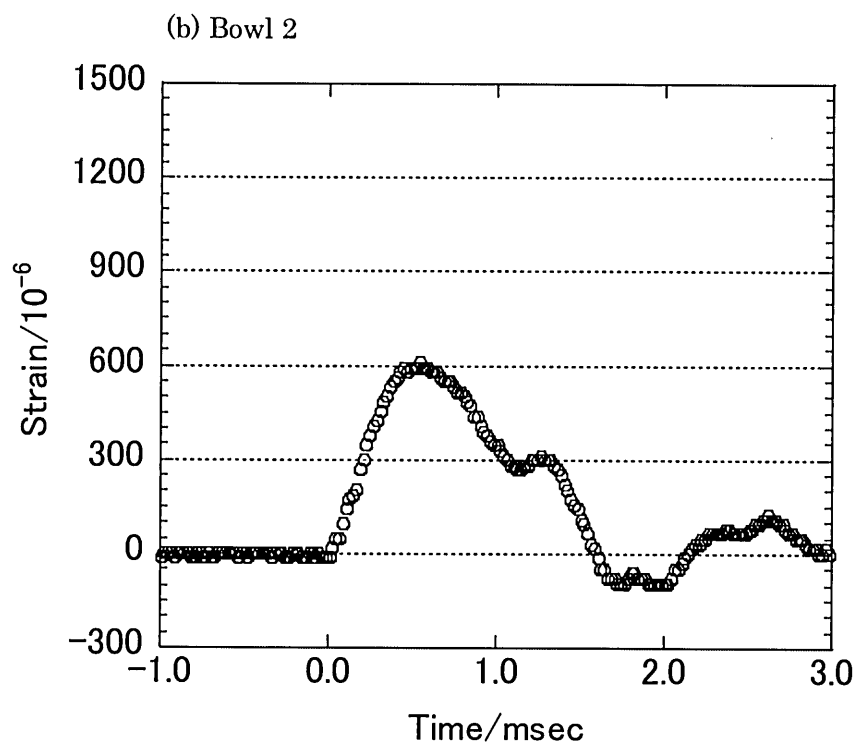
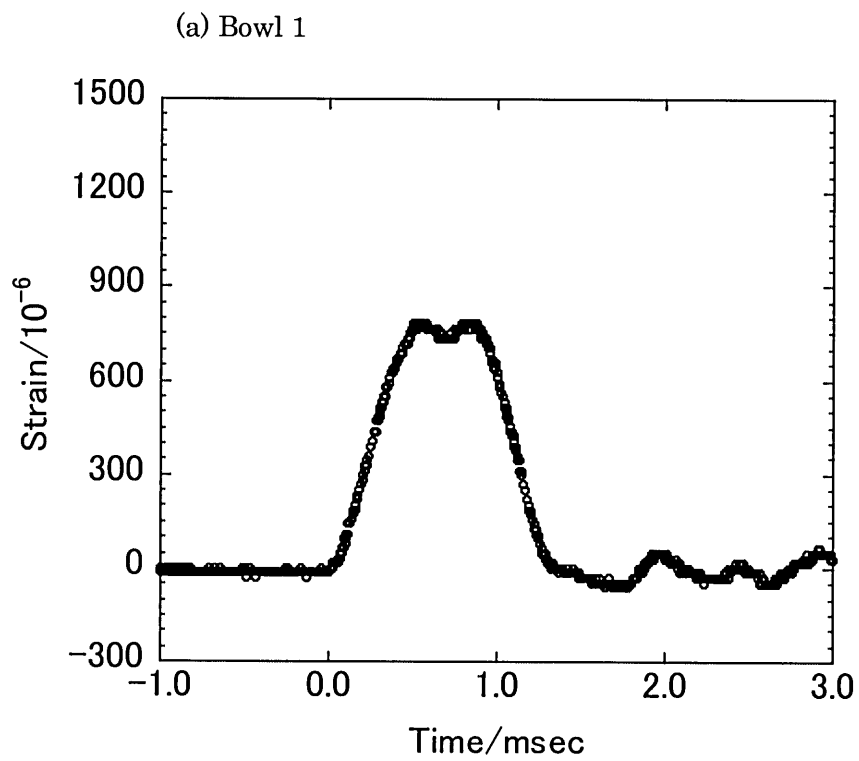


図 3.11 バックストップなしで測定した打点のひずみ波形 (a) Bowl 1 、 (b) Bowl 2.

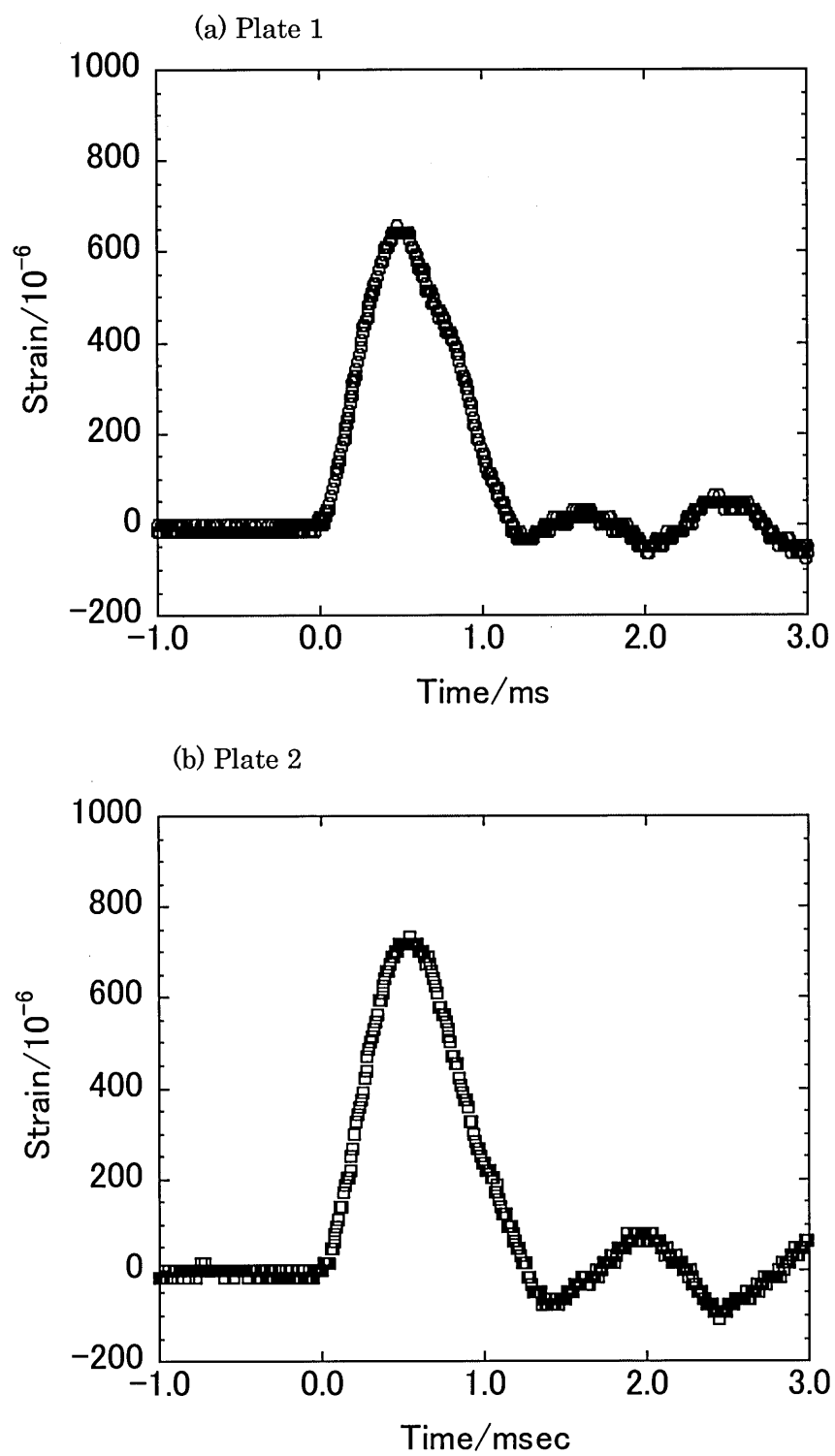


図 3.12 バックストップなしで測定した打点のひずみ波形 (a) Plate 1 、 (b) Plate 2.

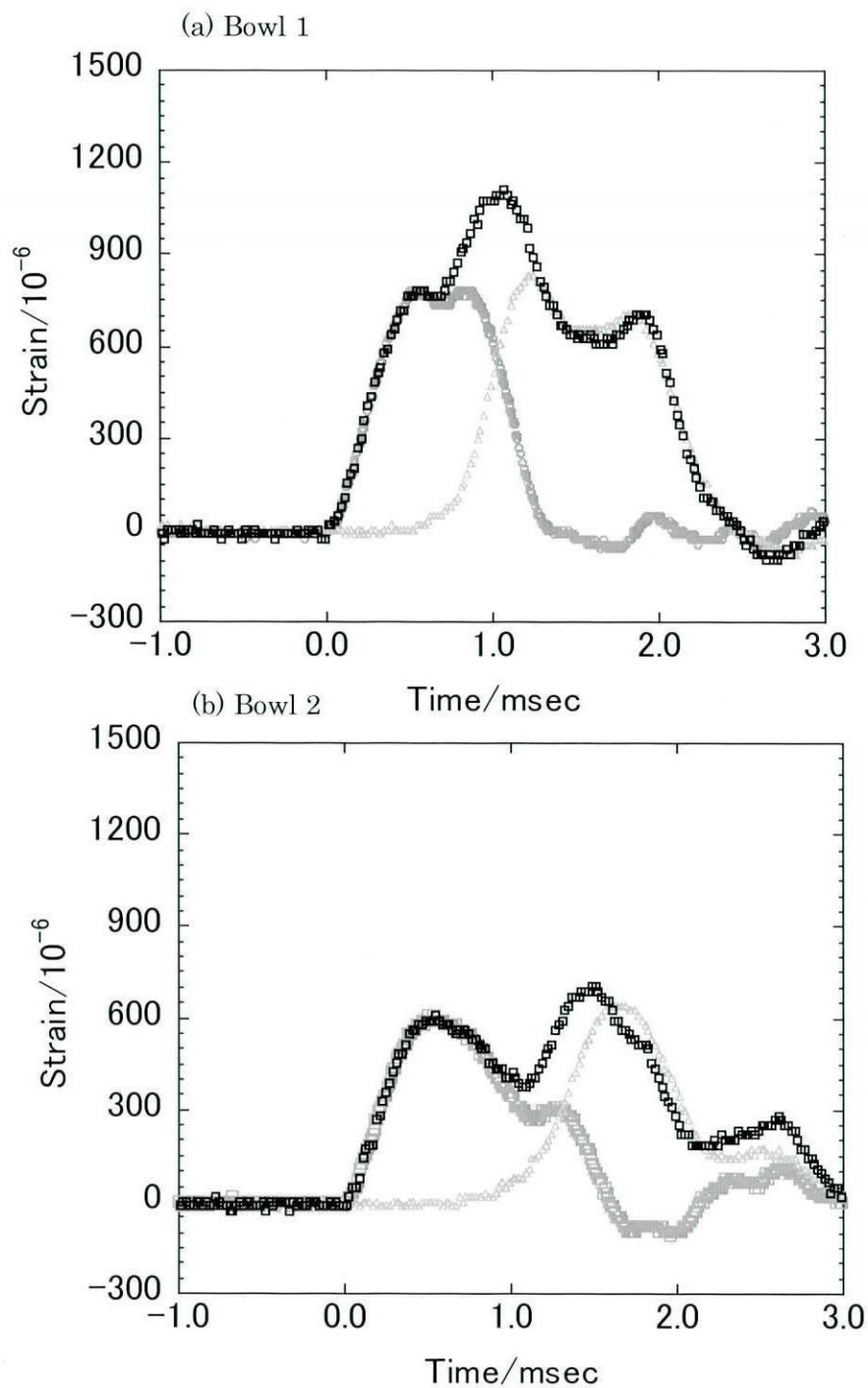


図 3.13 : (a) Bowl 1 (b) Bowl 2.

○ : 図 2.11 に示したひずみ波形と同一な最初の打撃によるひずみ波形

△ : バックストップから戻ってきたひずみ波形 (図 2. 6 のひずみ波形を bowl 1 で 0.35msec、bowl 2 で 0.5msec ずらした波形)

□ : ○ と △ の合成から推定されるひずみ波形。

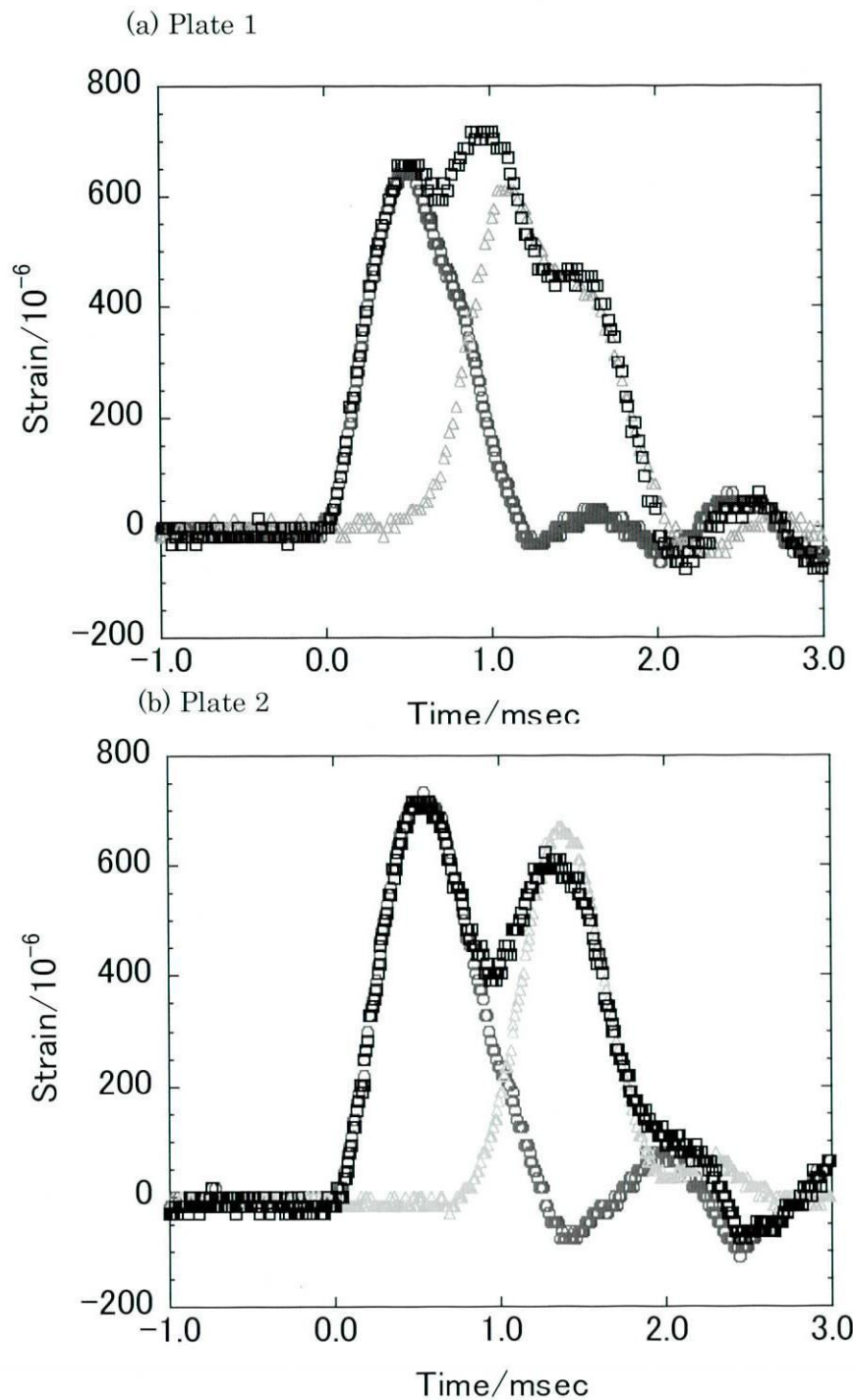


図 3.14 : (a)Plate 1; (b)Plate 2.

- : 図 2.12 に示したひずみ波形と同一な最初の打撃によるひずみ波形
- △ : バックストップから戻ってきたひずみ波形 (図 2. 7 のひずみ波形を bowl 1 で 0.25msec、bowl 2 で 0.4msec ずらした波形)
- : ○ と △ の合成から推定されるひずみ波形.

次に、バックストップ開き角の影響について検討した。図 3.15 及び図 3.16 にボール、及びプレートについて開き角を変えた場合のひずみ波形を示す。どの試料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た。一方、セカンドピークは開き角が大きくなるに従い、現れる時間は遅くなり、ひずみ量は小さくなった。セカンドピークはバックストップの存在により生じるので、開き角が小さく、打点とバックストップ接点が近い場合にはバックストップからの応力が打撃点に早く現れるためファーストピークとの重なりが大きくなりセカンドピークは大きくなると考えられる。加えて、小さな試料においては打点とバックストップ接点が近い場合、ボール1, プレート 1 はボール 2、プレート 2 に比べてセカンドピークが早く現れ、ひずみ量が大きくなったと考えられる。

以上の結果から次のようなことが示唆される。破壊はひずみが破壊強度をこえた場合に起きる。衝撃試験におけるひずみは2つのピークを示すことが判明し、それらのピークで破壊が起こるはずである。プレート2の場合、ファーストピークがセカンドピークよりも大きい、あるいは同等であるのでファーストピークが破壊強度を超えた場合に破壊し、一方ボール1やプレート1のように試料が小さい場合ファーストピークよりセカンドピークが大きいので衝撃試験で加えられた応力によって発生するファーストピークのひずみが破壊強度を超えていなくてもセカンドピークが破壊強度を超える場合、破壊することになる。従って、同じ大きさのファーストピークを与える衝撃力を加えた場合、小さな試料ではより大きなセカンドピークを生じるため、早く破壊することになり、衝撃強度は低く測定される結果となる。図 3.17 はそのような場合の衝撃破壊をしめす。

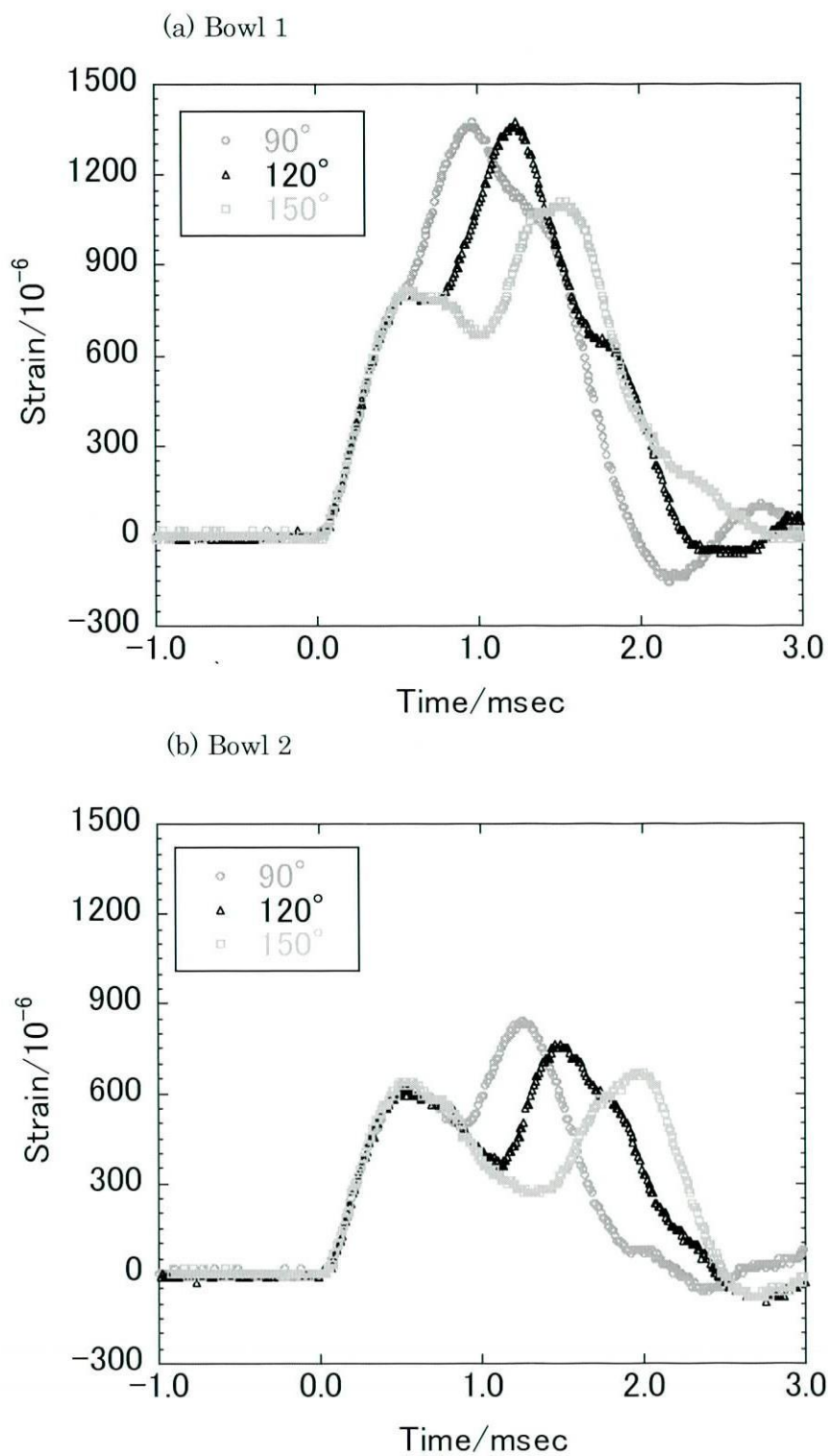


図 3.15. バックストップ開き角を変えた場合の打点でのひずみ波形
(a) Bowl 1 、 (b) Bowl 2 .

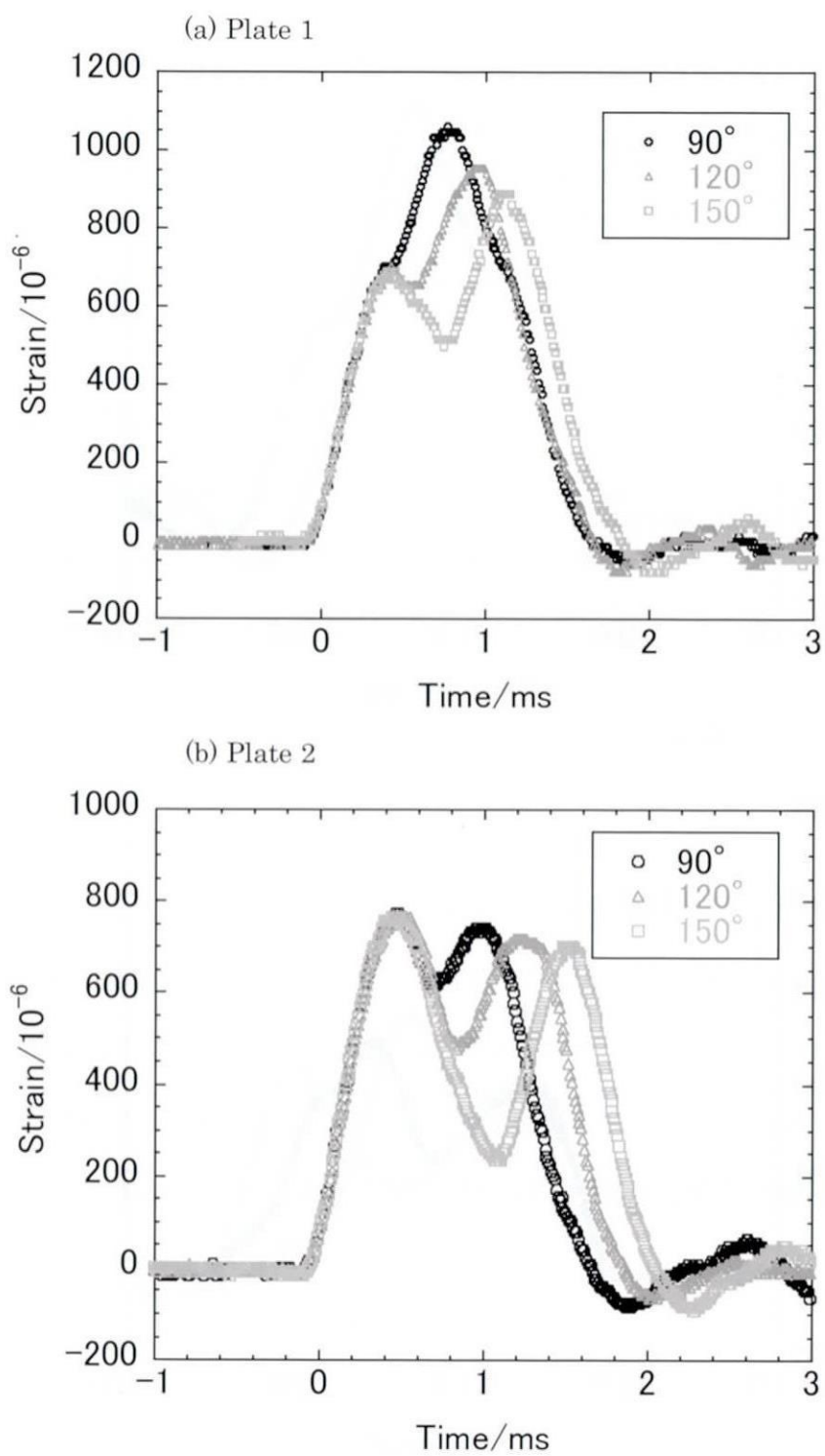
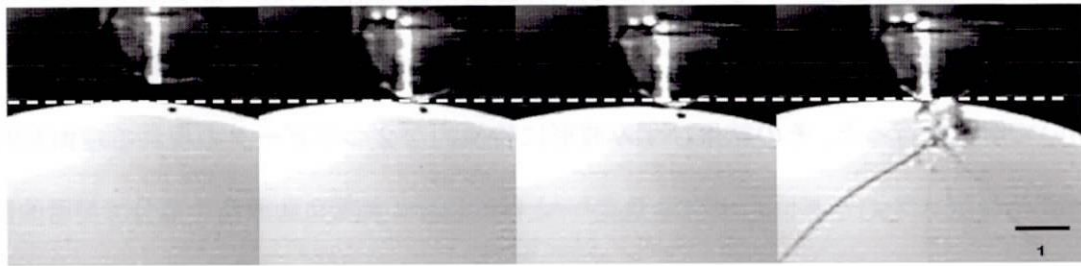


図 3.16 バックストップ開き角を変えた場合の打点でのひずみ波形
(a) Plate 1 、 (b) Plate 2 .



1.3×10⁻³ 秒前 ハンマー衝突の瞬間 1.3×10⁻³ 秒後 1.6×10⁻³ 秒後

図 3.17 高速度カメラによる破壊挙動の観察¹⁾

3.4 まとめ

強化磁器食器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。その結果ひずみ波形に特徴的な2つのピークの現れる理由が明らかになった。ファースト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。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からの反作用のために跳ね返り、ハンマーと再衝突し、新たなひずみが発生することで現れることがわかった。この場合、小さい食器の方が打点とバックストップとの接点が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、そのひずみがファーストピークに重なり、より大きなセカンドピークを生じる。結果として衝撃強さが小さくなる。

このように、衝撃試験においてバックストップで支えているためにセカンドピークが試料サイズや測定条件によって変化するために同じ曲げ強度をもっているにもかかわらず衝撃強度が異なって測定されることが判明した。従って、バックストップ開き角や食器のサイズによってひずみ波形が影響される事を念頭に置き衝撃試験によって測定される強度の値を扱っていく必要がある。

参考文献

- 1) 柘植英明, 水野正敏, 倉知一正, 林亜希美, 岐阜県セラミックス技術研究所研究報告, 11-14 (2005).

第4章 強化磁器食器の衝撃強度に及ぼすハンマー重量の影響

4.1 はじめに

第2章において、衝撃強度測定の際、ハンマー重量を変化させるとひずみ波形が大きく異なることが明らかにされた。ハンマー重量の衝撃強さへの影響については、蒲地らによってハンマーが重いほど衝撃強さが小さくなることが示され、衝撃強度測定においてはハンマー重量を統一する必要性が示唆された¹⁾。しかし、筆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²⁾、不明な点が多かった。そこで本報告では大きさや形の異なる種々の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。

4.2 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、表 4.1 に示す 10 種類の大きさの皿形状及びボール形状の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、第2章、表 2.1 で示したように、その組成、曲げ強度、弾性率、かさ比重、吸水率などはほぼ同じである。衝撃試験にはリサーチアシスト社製 RA-112 を用い、第2章で示した方法により測定した。図 2.5 に示す、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 として打点に打撃を加えた。

打撃時のひずみ波形は、前章までと同様に、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 WaveSurfer422）で計測した。

表 4.1 試料の特性

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

4.3 結果及び考察

4.3.1 各種強化磁器食器の衝撃強さ

図 4.1 及び図 4.2 はボール形状試料及びプレートの試料について、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。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 4.2 は、図 4.2 及び図 4.3 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。

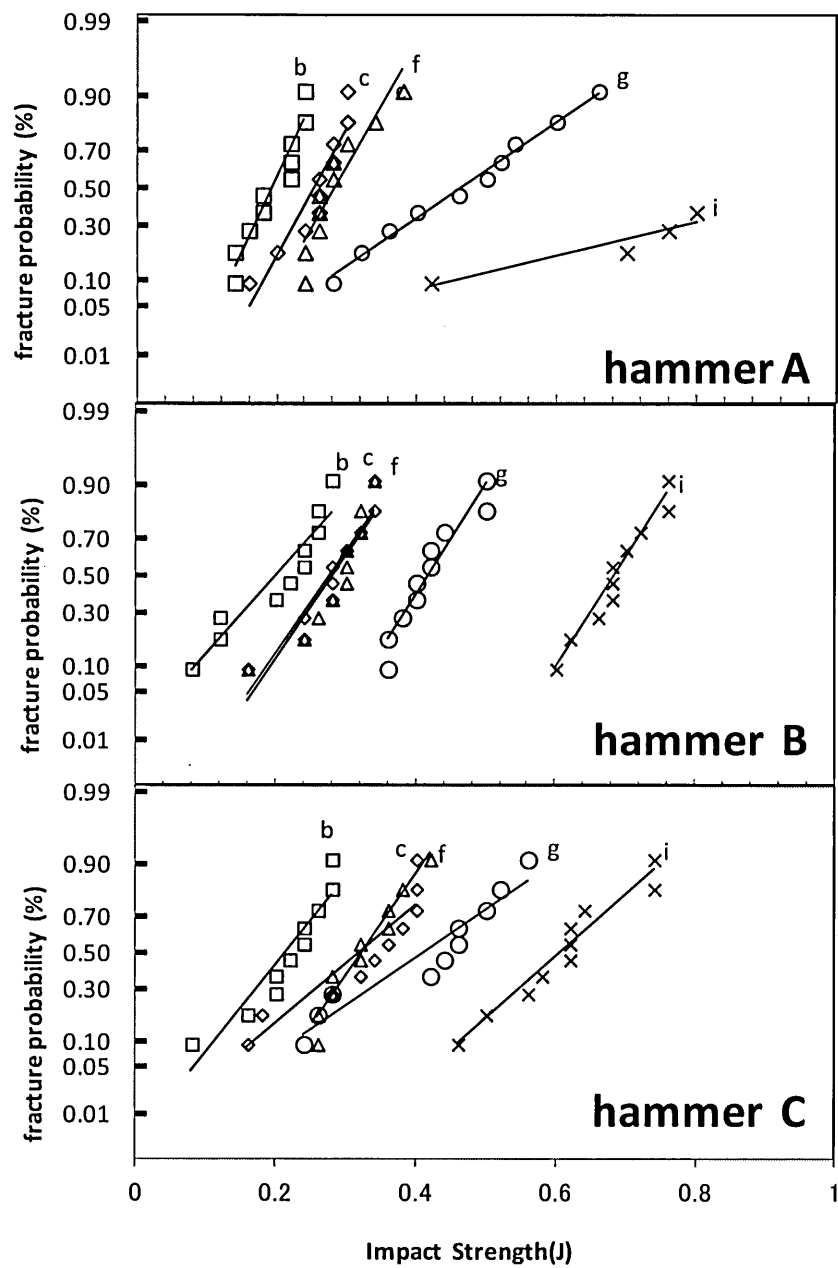


図. 4.1 衝撃強度の破壊確率 ボール

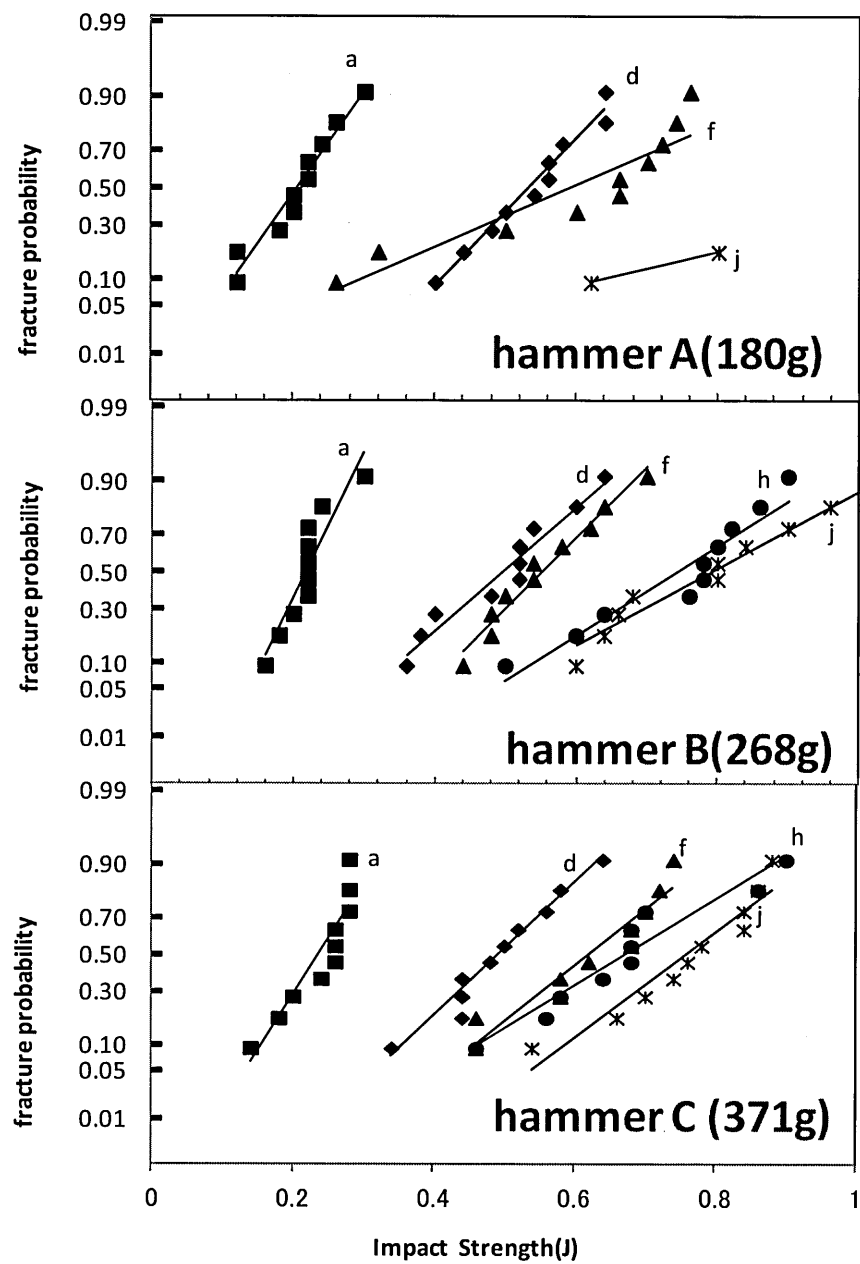


図 4.2 衝撃強度に対する破壊確率 皿

表 4.2 3 種類のハンマーで測定した衝撃強度と標準偏差

Hammer	A(180g)		B(268g)		C(371g)	
Specimen	Impact Strength/J	Standard Deviation/J	Impact Strength/J	Standard Deviation/J	Impact Strength/J	Standard Deviation/J
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

図 4.3 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。この理由は前章で述べた通りである。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、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ためと考えられる。

ハンマーの種類による違いに関しては、図 4.4 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 97-128mm の小さい試料 a,b,c,e 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 125-168mm の大きい試料 d,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。なお、直径がおよそ中間の 128mm の試料 e ではハンマー重量が 180g から 168g に増加した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 及び e 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る。はじめに述べた様に、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 のボールに対する結果であり ¹⁾、後者は直径 130mm の ²⁾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。

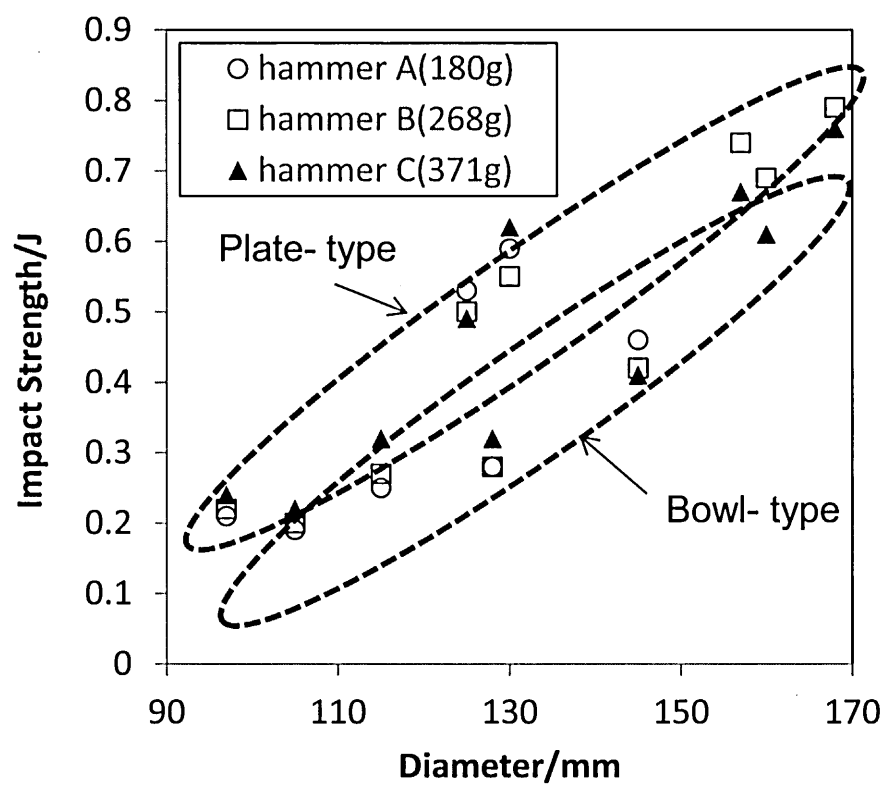


図. 4.3 食器直径に対する衝撃強度

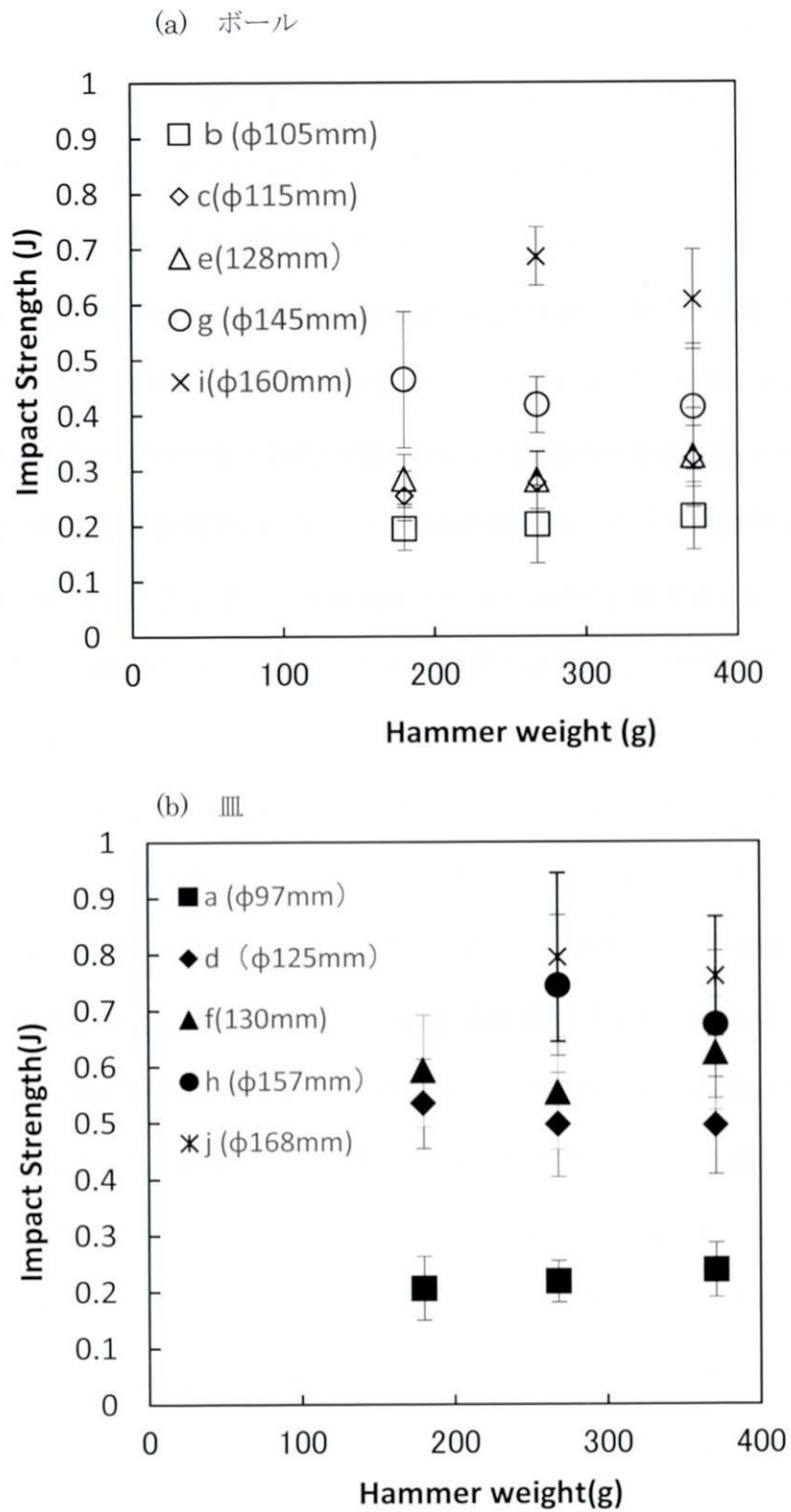


図. 4.4 .重量に対する衝撃強度：(a)ボール(b)皿形

4.3.2 衝撃時におけるひずみ波形の変化

図 4.5-a～図 4.5j 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ひずみ波形の変化を示す。衝撃時に与えたエネルギーは試料 a では 0.1J、それ以外の試料では 0.2J であった。なおハンマーを打撃する瞬間のそれぞれのハンマースピードは、計算から 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 であった。打点でのひずみ波形は前章までで示した様に、ファースト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、セカンド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。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。

ファーストピークについては前章までに述べたのと同様すべての試料で、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 $50\sim100\times 10^{-6}\text{strain}$ 大きく現れた。この理由としては、同じ衝撃エネルギーで比較した場合、軽いハンマーはより早いスピードで試験体に衝突するため局所的により大きなひずみが生じるためと考えられる。従ってファーストピークで破壊する場合は軽いハンマー早く破壊し衝撃強度は重いハンマーで測定した場合より低く測定される。本実験では試料 h から j に対してハンマーA を用いた時にファーストピークの方がセカンドピークより大きいのでファーストピークで破壊すると予測されるが、より重いハンマーB,C では同じ衝撃力を与えた時セカンドピークが大きくなるので強度が極端に低下し、h から i の実験においてハンマーA で衝撃強度が測定出来なかった原因とも考えられる。

図 4.5-a のひずみ波形ではファーストピークとセカンドピークが重なり、ファーストピークが隠れて見えていないが、約 0.5msec 付近に肩として現れており、約 1msec 付近のピークはセカンドピークである。

次にセカンドピークについては、試料 h($\phi 157$) および i($\phi 160$)のような大きな試料に対する衝撃試験では、図 4.5-h 及び i に示すようにファーストピークに比べてセカンド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による再衝突時のハンマーへの衝撃力が大きいと考えられる。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、まだハンマーが試料に向かって左方向に動いている状態の時に試料からの復元力が加わり、より大きなひずみを生じる場合や、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が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くなると考えられる。したがって大きい試料では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。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。一方、小さい試料では図 4.5-a から f に示すように、セカンド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、そのピークの現れる時間は大きい試料では約 1.5msec 付近であるのに対し、小さい試料では約 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、そのひずみがファーストピークと重なって、大きなピークとなったと考えられる。

重いハンマーを用いた場合にはいずれの試料においても、大きなサードピークが現れた。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。そして図 4.5-a~c のように、より小さな試料では衝突が何度も繰り返され、それら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。ここで、大きな試料ではサードピークはセカンドピークを越える程大きな値を示さず、そのひずみ量はハンマー重量が重い程大きくなり $A < B < C$ の順であった。一方、小さい試料ではサードピークがセカンドピークを超える場合もあった。(a~c)。このような場合は、最大のひずみ量は、ハンマー重量の順にはならず、試料 c 及び e では $C < A < B$ 、試料 d、f では $A \leq C < B$ のようになった。このように試料の大きさとハンマー重量の 2 つの要因によって発生するひずみ量が変わるため試料によってはハンマー重量の増加によって蒲地の報告のように衝撃強度が小さくなったり、筆者らのように大きくなったりしたと考えられる。

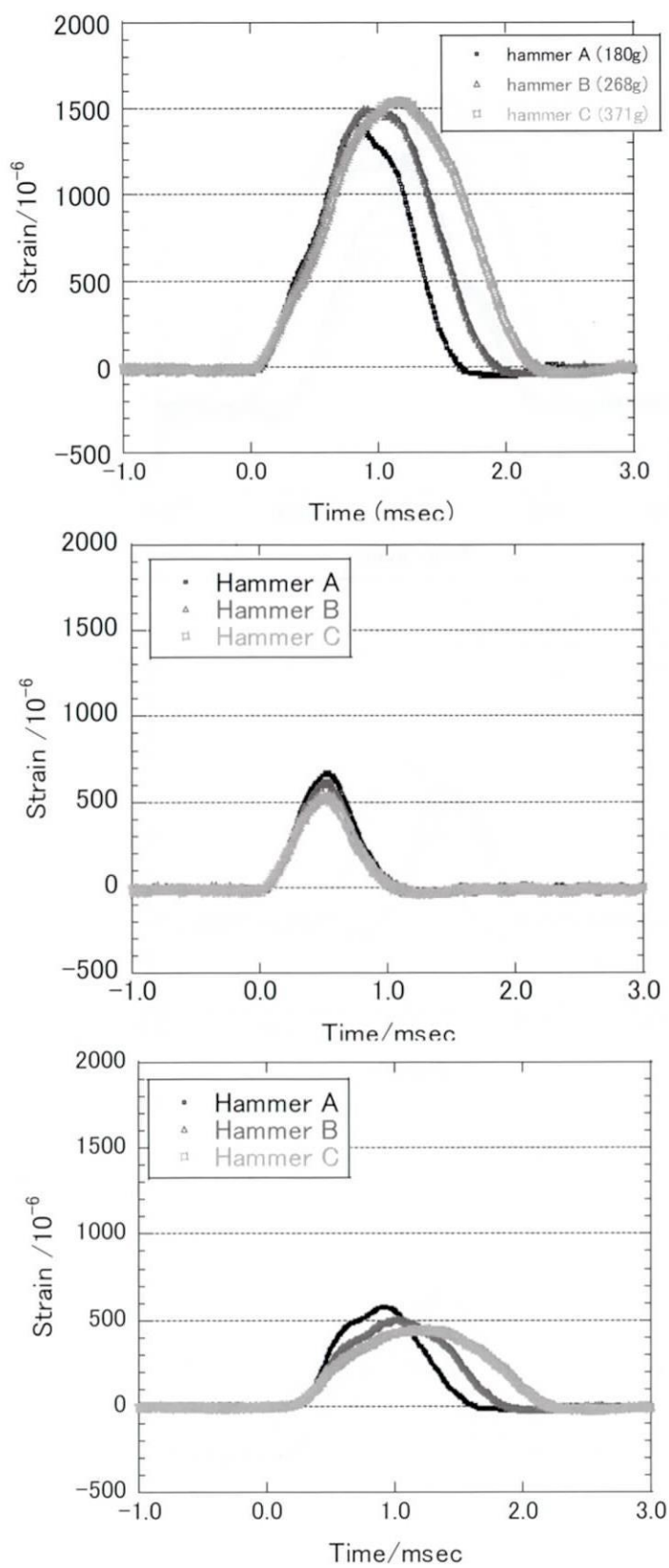


図 4.5-a 試料 a のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

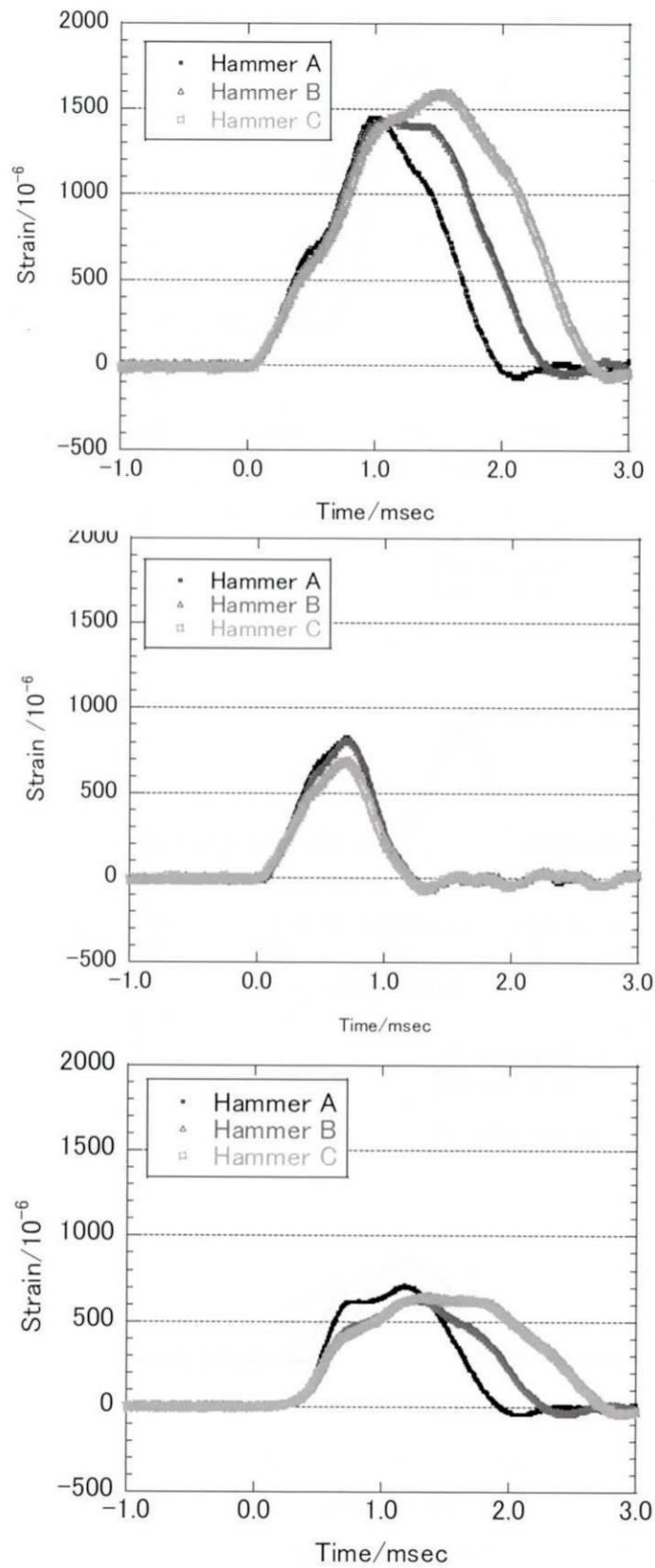


図 4.5-b 試料 b のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり (b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

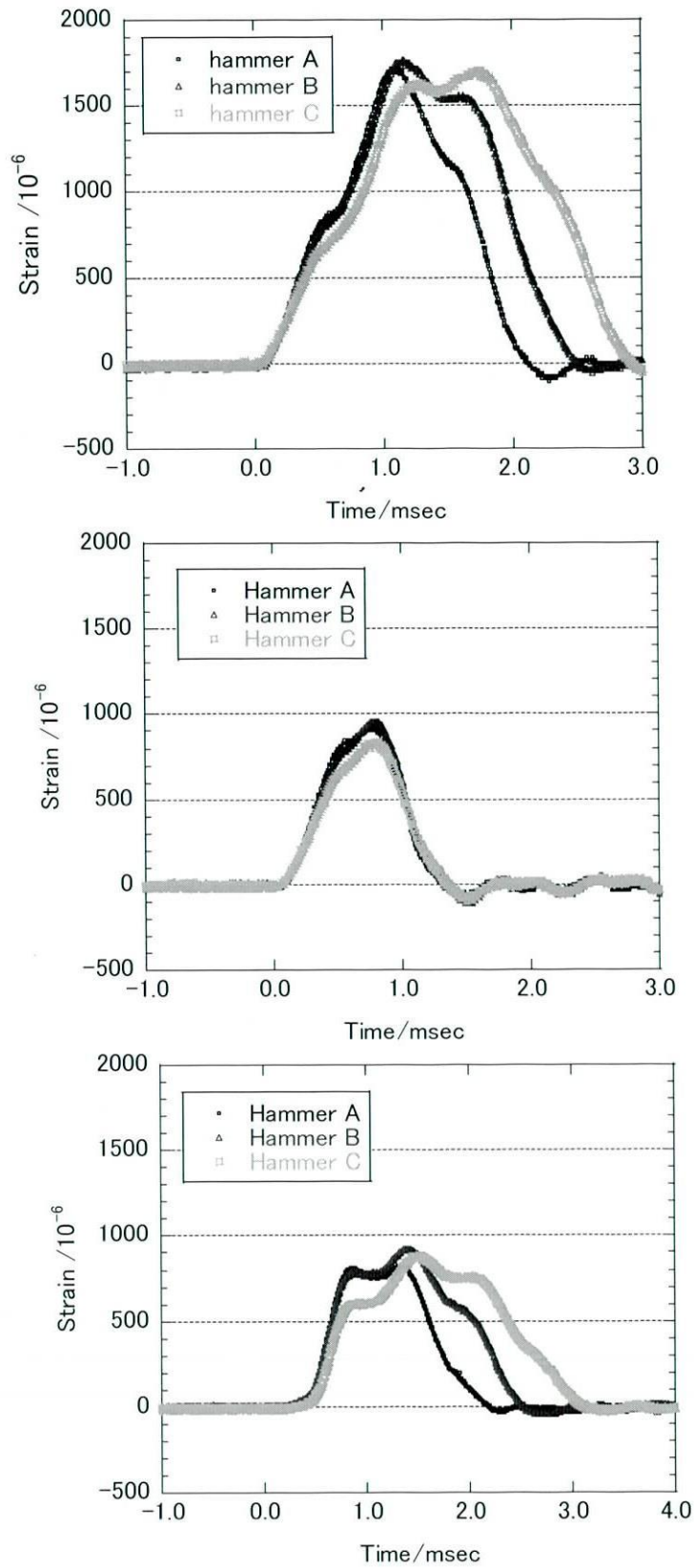


図 4.5-c 試料 c のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

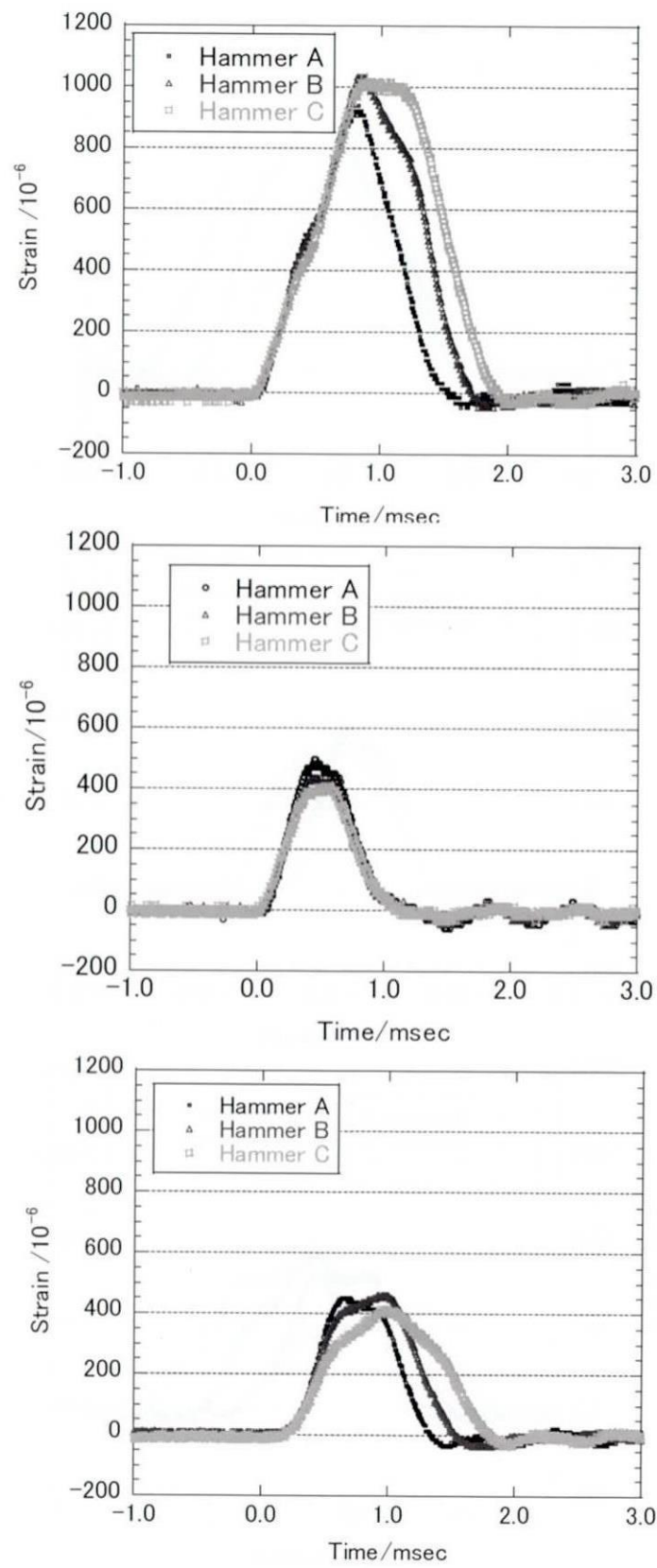


図 4.5-d 試料 d のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり (b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

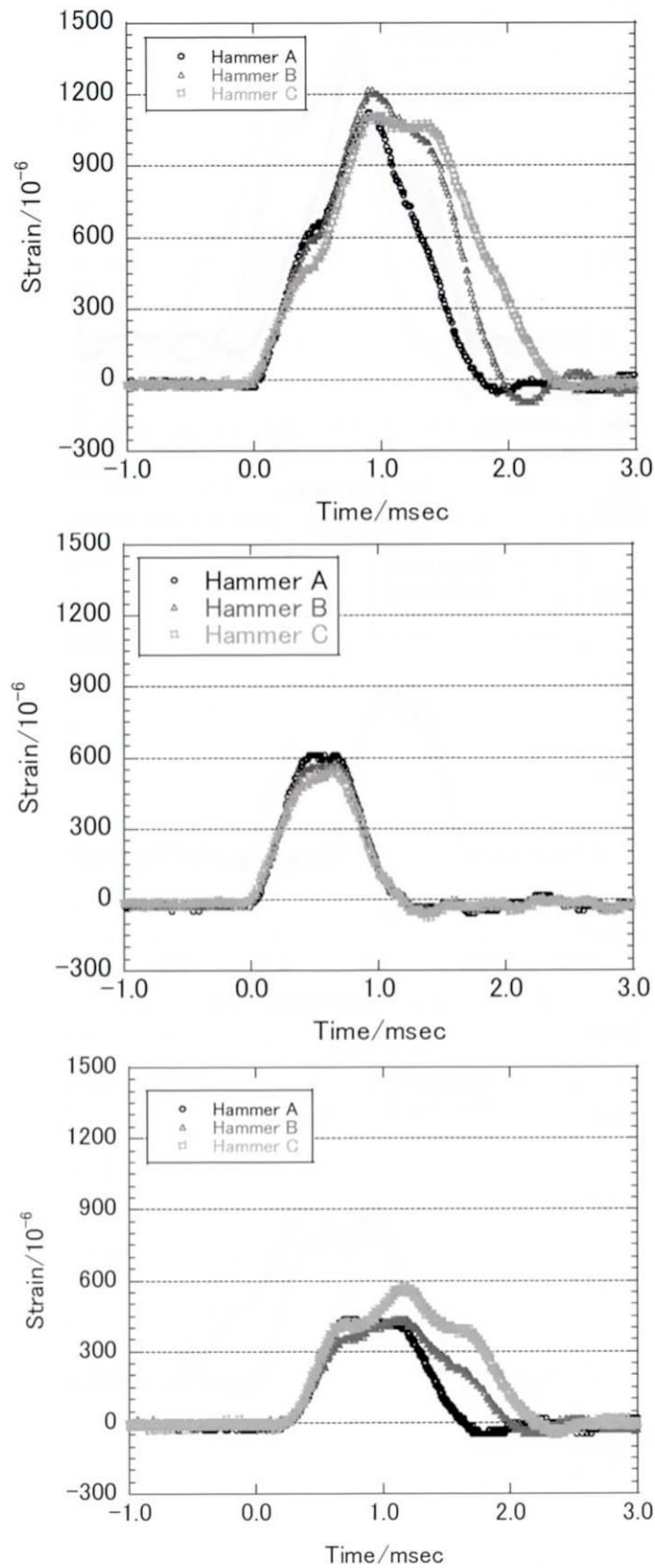


図 4.5-e 試料 e のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり (b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

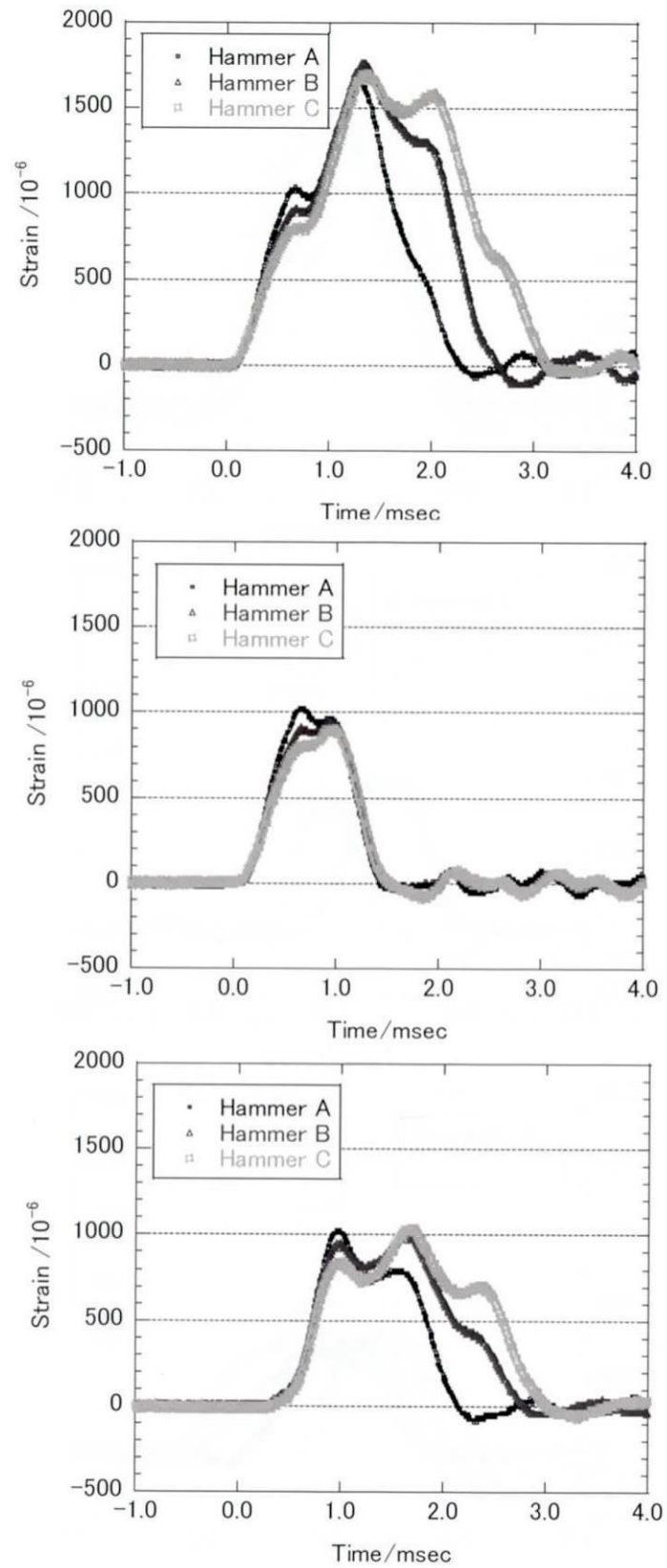


図 4.5-f 試料 f のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり (b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

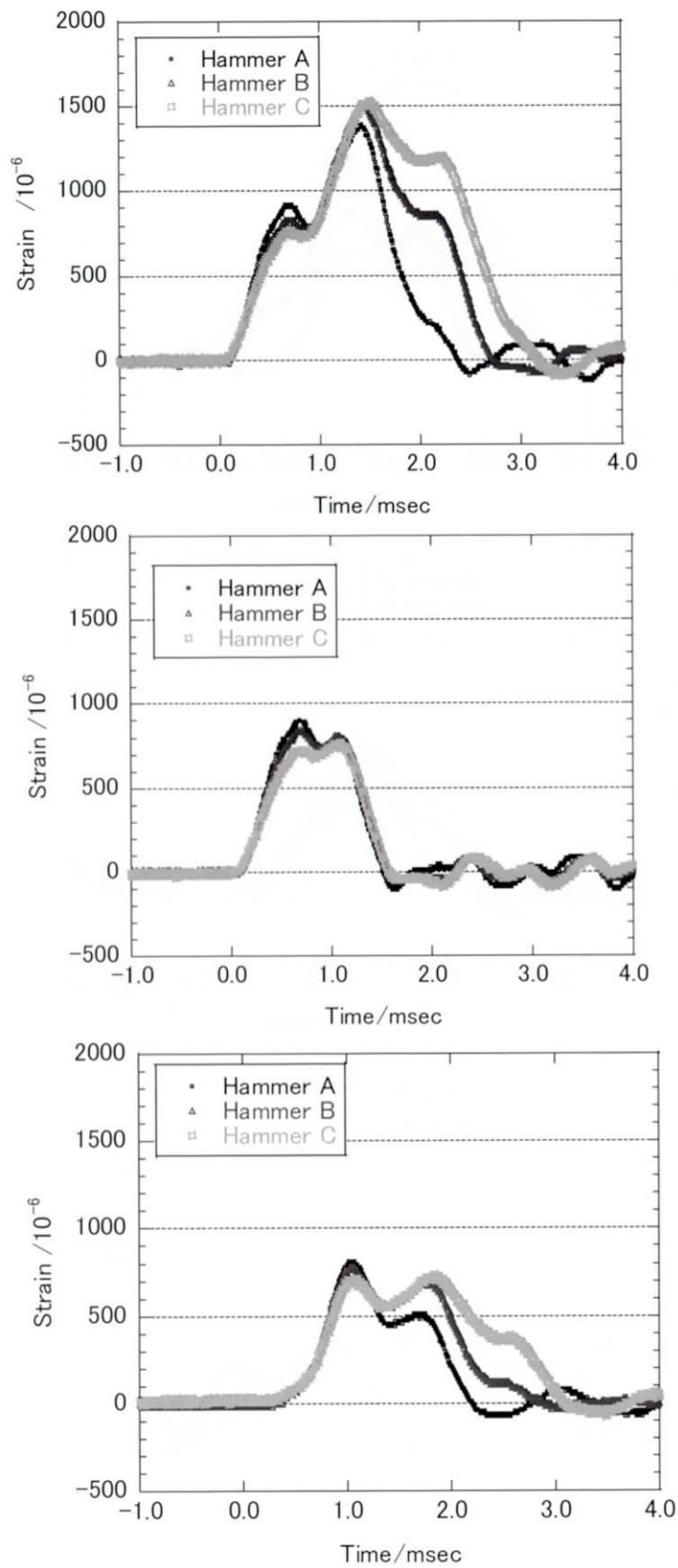


図 4.5-g 試料 g のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

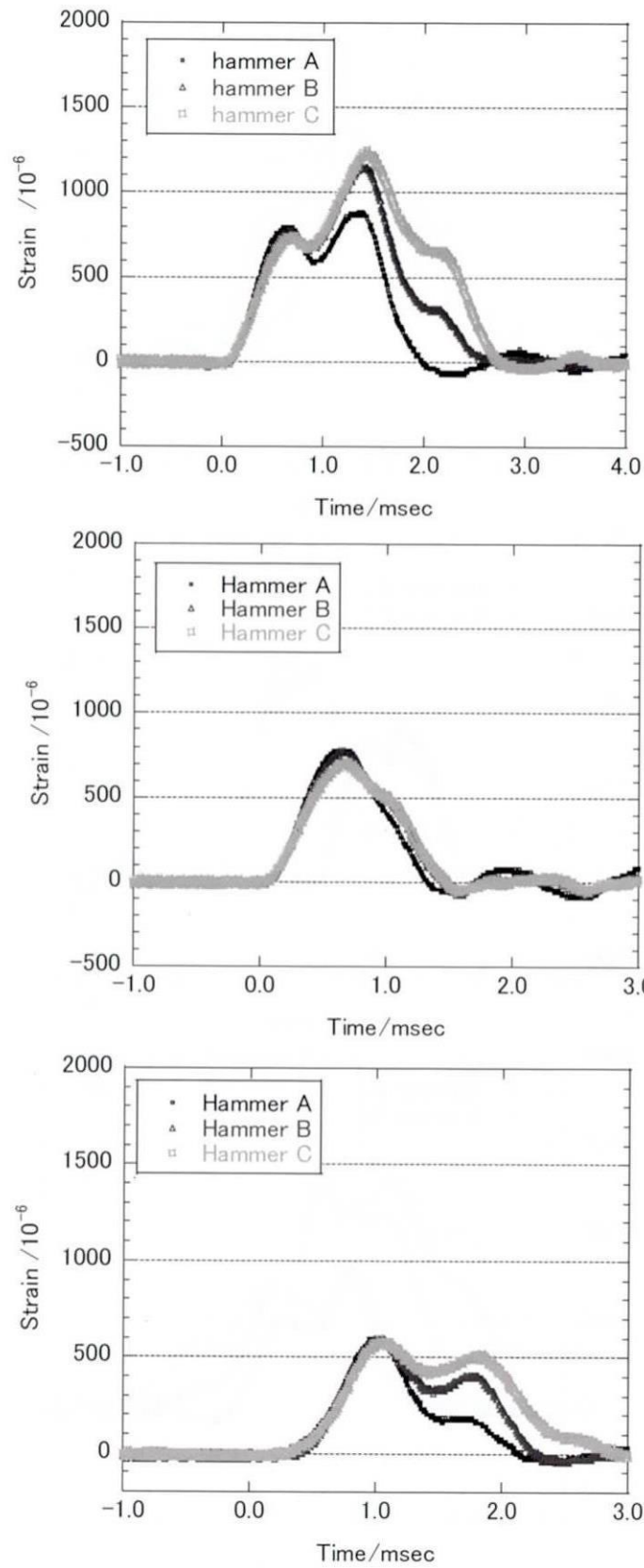


図 4.5-h 試料 h のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

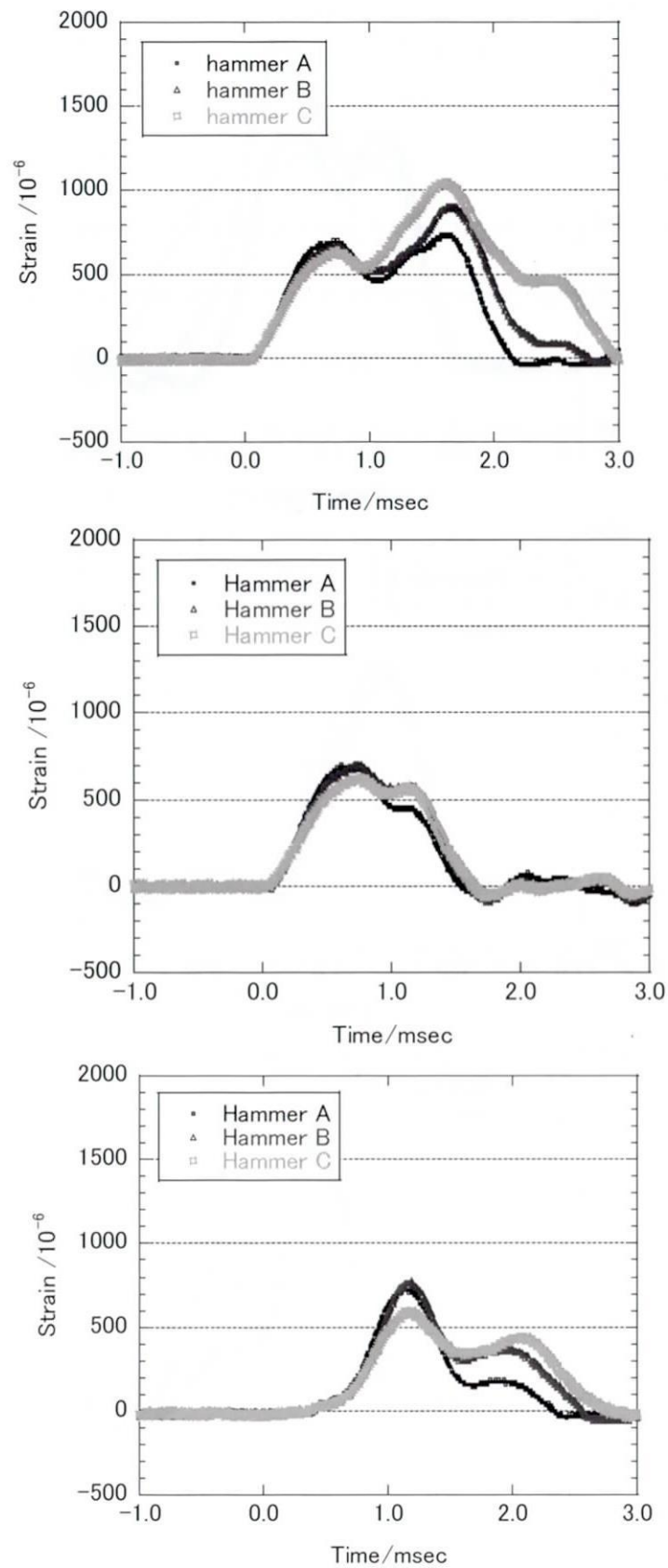


図 4.5-i 試料 i のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

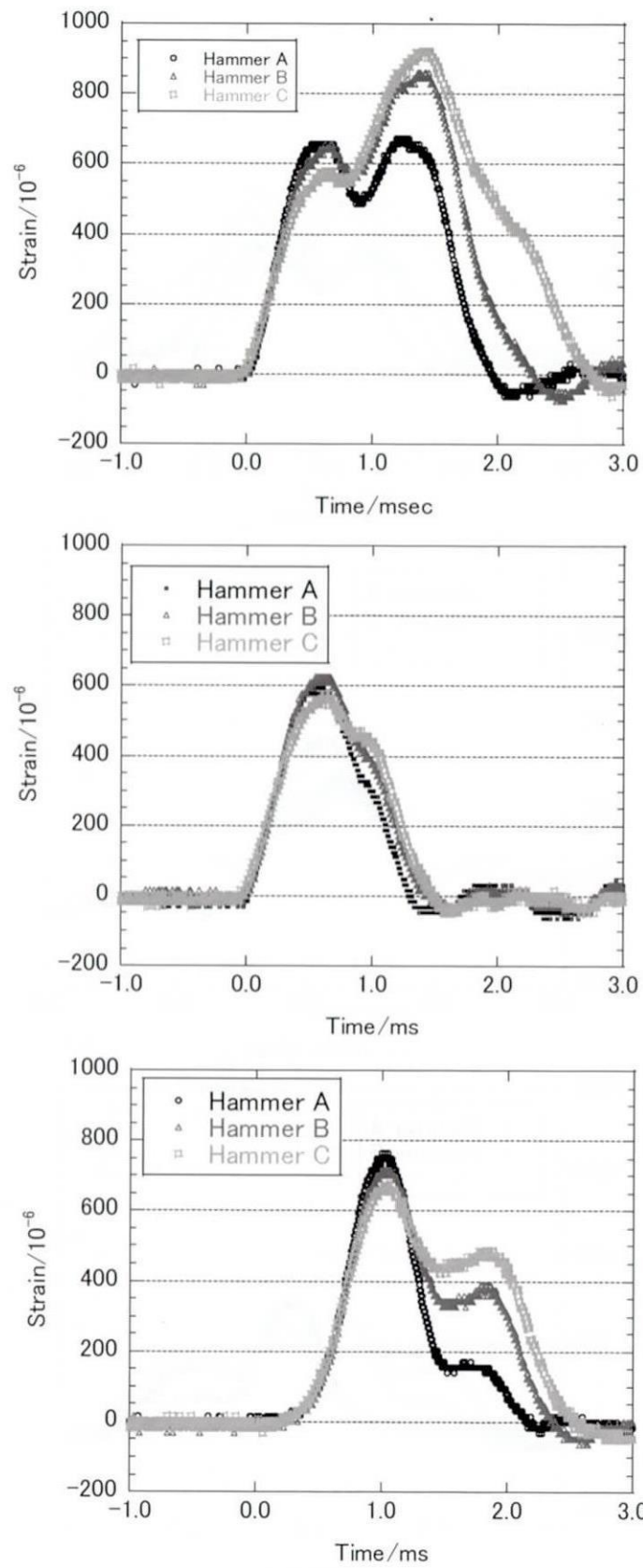


図 4.5-j 試料 j のひずみ波形 (a)打撃点バックストップあり
(b)打撃点バックストップ無 (c)バックストップ接点

4.4 まとめ

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大き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それらの衝突によるひずみが重なってセカンドピークが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。小さな試料においてはハンマー重量の大小によるセカンドピークの違いはそれほど小さくなく、それによって起きると考えられる衝撃強さに大きな影響を与えなかったと考えられる。

参考文献

- 1) N. Kamochi, M. Terasaki, H. Katsuki and Y. Kobayashi, J. Ceram. Soc. Japan, **112** 229-223 (2004)
- 2) A. Hayashi, CERAMICS JAPAN, **44**, 12-16 (2009).

第5章 総括

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、一般の磁器食器より2倍から3倍の曲げ強度を有する。この強化磁器食器は、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た。申請者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。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 S2402「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、衝撃強度は、食器を固定するために用いられる治具（バックストップ）、固定荷重、ハンマーモーメントなどの測定条件によって影響を受けることが示された。しかし、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。本論文では、この強化磁器食器の衝撃試験における測定条件による影響を解明するため、歪みゲージを用いて衝撃試験時における食器の歪み変形挙動を測定し、各測定パラメータと衝撃強度との関係について検討を行ったものである。

第1章では、学校給食における食器の現状、強化磁器食器の強化方法や特性、食器の曲げ試験、衝撃試験などについて概説した。また、強化磁器食器の衝撃試験方法JIS化に向けて行った共通試験の結果などについて説明し、食器の衝撃破壊挙動解明の必要性について述べた。

第2章では、4種類の形状（ボール2種及びプレート2種）の強化磁器食器を用いて、衝撃試験時に発生する歪みを食器の様々な位置で測定し、検討した結果について述べた。歪み波形は、食器の大きさ及び形状、測定条件（衝撃エネルギーの大きさ、固定荷重、ハンマー重量、バックストップ開き角等）によって変化し、明瞭な2つのピークを持つ複雑な波形を示すこと、その波形は特に食器の直径によって変化することなどを明らかにした。

第3章では、破壊源となる打撃点において、歪み波形が2つのピークを持つ原因の解明を行った結果を述べた。バックストップ接点での歪み波形測定や高速度カメラを用いた打撃時のハンマーと食器の変形の観察により、ファーストピークは食器が最初に打撃を受けた時に打撃点において局所的に起こる変形に起因するものであること、セカンドピークはバックストップからの反作用によって跳ね返った食器が再びハンマーと衝突することにより起こる変形に起因するものであること、そして、セカンドピークのひずみ波形がファーストピークひずみ波形に重なることにより、歪みピークが増大し、破壊に至る場合があることを明らかにした。

第4章では、ハンマー重量と衝撃強度及び歪み波形の関係について検討を行った結果を述べた。比較的大きな食器では重いハンマーを用いた場合に、衝撃強度が低く測定される傾向にあることを説明した。比較的小さい食器ではサードピークが大きく現れ、ハンマー重量と試料サイズにより衝撃強度は変化することがわかった。

本研究結果が、食器の運搬や洗浄中に生じる様々な場面（落下、ケースあるいは食器同士の衝突、洗浄機中での負荷）で想定される食器の衝撃破壊に対して、その安全対策上においても有用な知見を与え、活用されることを期待したい。強化磁器食器が今後も学校給食などで安心して使用され、さらに普及が進むためには、衝撃試験は必要である。試験方法の改善を行い、試験の信頼性を高めていきたい。

原著論文リスト

[1] "Effect of porcelain shape for strain behavior of strengthened porcelain in impact test", Akemi Hayashi, Kazumasa Kurachi, Masatoshi Mizuno and Toshitaka Ota, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **18** (2011) 222021

(第2章関連)

[2] "Variation of the strain waveform developed in strengthened porcelain upon impact" Akemi HAYASHI, Hideaki TSUGE, Kazumasa KURACHI, Masatoshi MIZUNO and Toshitaka OTA, Journal of the Ceramic Society of Japan, **120** [3] 1-7 2012 (in press)

(第3章関連)

[3] 「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
Journal of the Ceramic Society of Japan (審査結果 minor revisions、訂正後、再再投稿中)

(第4章関連)

関連論文リスト

[1] 「強化磁器食器の衝撃強さ測定の標準化に関する取り組み」(総説)

林亜希美、セラミックス、**44** 12-16 (2009)

(第 1 章関連)

[2] JIS S 2402:2010 強化磁器食器の縁部衝撃試験方法 解説

(第 1 章関連)

[3] 「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」

林亜希美、柘植英明、倉知一正、水野正敏、安達信泰、太田敏孝
名工大セラ研年報、Vol. 11 (2011) (印刷中)

(第 3 章関連)

[4] “Comparison of strengthened porcelain stain behavior on impact test and static load test”,
Akemi Hayashi, Hideaki Tsuge, Kazumasa Kurachi, Masatoshi Mizuno, Nobuyasu Adachi and
Toshitaka Ota (in preparation)

[5] 「強化磁器食器の加飾による強度低下防止技術に関する研究」

林亜希美、横山久範、高橋良夫、岐阜県セラミックス研究所報告 2010、18-19

[6] “Impact Strength of Aluminium Titanate with Low Elasticity”, Akemi Hayashi, Nobuyasu
Adachi, Toshitaka Ota, Yasuhisa Sekiya, Guillaume Sauget, Marc Huger, Proceedings of
UNITECR 2011 (The Unified International Technical Conference on Refractories) (A4 版 4 頁
分の論文、2011 年 11 月発行)

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験や論文執筆が遅れがちな私を優しく支えてくださり、終始変わらぬご指導を賜りました名古屋工業大学教授、太田敏孝先生に厚く感謝の意を表します。また多大なご助言、ご助力いただきました名古屋工業大学准教授安達信泰先生に厚く感謝いたします。

本研究のきっかけとなりました、産業技術連携推進会議窯業部会強化磁器食器分科会のメンバーの皆様、産業技術総合研究所標準基盤研究で共同研究を行いました、産業技術総合研究所杉山豊彦博士、阪口修司博士、渡村信治博士、佐賀県窯業技術センター蒲地伸明博士、長崎県窯業技術センター秋月俊彦氏、信楽窯業技術試験場川澄一司氏、瑞浪市窯業技術研究所安斎久嗣氏に感謝の意を表します。また JIS 原案作成委員会などでお世話になりました多くの皆様に感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、有益な助言をいただきました愛知工業大学、応用化学科教授小林雄一先生、名古屋工業大学教授小澤正邦先生に厚く御礼申し上げます。

岐阜県セラミックス研究所において、ともに強化磁器食器の研究を行いさまざまな実験、議論を共に行いました水野正敏氏、倉知一正氏、柘植英明氏（現岐阜県機械材料研究所）に深く感謝いたします。特に柘植氏にはひずみゲージを用いた測定を陶磁器に用いることについてご教示いただき感謝申し上げます。

試料提供にご協力いただきました、山津製陶株式会社高橋良夫氏に感謝申し上げます。

また、本研究をすすめるにあたり数々のご配慮とご助言をいただきました岐阜県セラミックス研究所、服部清所長（現岐阜県産業技術センター）水野正敏所長、横山久範研究開発部長、倉知一正主任専門研究員、尾畑成造専門研究員（現岐阜県研究開発課）、立石賢司主任研究員をはじめとして研究所の職員一同にこころより感謝いたします。