

卒業論文

ナノインデンテーションによる
UFGおよび金属ガラス材の
表面力学特性の評価

平成 17 年 2 月

神戸大学工学部機械工学科

0164524T

川崎美生

要約

インデンテーション試験は、材料の種々の力学特性を非破壊で評価できる簡便な手法として広く用いられている。本研究では、金属材料の機械的特性において結晶粒が果たす役割を明らかにする基礎的研究として、UFG (Ultra-Fine Grain) 材ならびに金属ガラスへのマイクロインデンテーションを行った。ECAP法により作成された純銅(C1100)のUFG材、ならびに、 $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 合金のバルク金属ガラスそれぞれについて、平滑処理を施した後、最大押し込み力を100mN, 500mN, 1000mNと変化させて5点ずつインデンテーション試験を行った。UFG材については、引張り試験に供した試験片から、(a)処女材、(b)変形初期の均一変形部、(c)変形後期にせん断帯を生じた部分、(d)破断部近傍、のそれぞれから採取して押し込み試験を行った。金属ガラスについては処女材のみだが、100mN~400mNの間で20mN毎にさらに5点ずつインデンテーション試験を行った。押し込み力-深さ曲線は、UFGの場合(a)~(c)で大きな差はなかったが、(d)のみ最大押し込み深さが他に比べて大きくなり、また弾性回復量も著しく増加した。金属ガラスの試験では、500mN以上の押し込み力-深さ曲線はUFG材の破断部近傍のそれと類似した形状となった。一方、100mN以下では金属ガラスの押し込み力-深さ曲線が変化することが示された。100mN~400mNの間で多点行った試験から、100mN近傍で押し込み力-深さ曲線が変わることに再現性があることが示された。これらの押し込み力-深さ曲線から硬度と接触深さを算出し、硬度-接触深さ関係を調べた結果、UFG材の接触深さは1000mNで7~8 μ mとなるが、この接触深さでも硬度上昇領域にあることが示された。一方、金属ガラスは接触深さ1 μ m以下で硬度上昇が現れた。また、硬度は全体的に金属ガラスの方が高い値を示したが、これは純CuとZr-Al-Ni-Cuの構成元素の差が現れたものと考えられる。

目次

第1章 緒言	1
第2章 実験装置	3
2.1 ナノインデンテーション装置.....	3
2.2 原子間力顕微鏡.....	5
第3章 試験片ならびに試験方法	7
3.1 超微細粒結晶粒材料(Ultra Fine Grained Material).....	7
3.2 金属ガラス(Metallic Glasses).....	10
3.3 試験方法.....	12
3.4 硬度の算出法.....	12
3.5 弾性率の推定法.....	15
第4章 実験結果および考察	16
4.1 インデンテーション試験.....	16
4.2 硬度-接触深さ関係.....	21
第5章 結言	23
参考文献	24
付録 A 関連学術講演	25
謝辞	26

第 1 章

緒 言

硬度とは、小さな圧痕やスクラッチなどの、局所的な変形に対する材料の抵抗力の尺度であり、その値から種々の機械的特性が推定できる⁽¹⁾。例えば Tabor はダイヤモンド圧子押し込みによる硬度および加工硬化指数を用いて、冷間加工されたいくつかの材料に対する降伏応力は硬度の 1/3 に近似されることを示した⁽²⁾。硬さ試験は、引張り試験などに比べて試験形状の制限が少ないこと、試料の複雑な前処理が不必要なこと、破壊の度合が小さく製品の一部をそのまま試験できるなどの利点がある。また、押し込み荷重を小さくすると、圧痕は浅くなり、より表面近傍の特性が得られることになる。近年、高強度材料における結晶粒や介在物、あるいは半導体材料に置けるアルミ配線や薄膜などを対象とする構造の代表寸法が、数 μm 以下となっていることから、微細な領域における力学特性評価法の重要性が高まっている。このような理由により、極微小な領域を対象としたインデンテーション試験の工学的応用性が高まってきた。

カーボンコンポジットやセラミクスなど、新材料の台頭もめざましいが、主要構造部材としての金属材料の地位にはゆるぎはない。一般に、金属材料の機械的特性は内部に存在する結晶粒界に大きく影響される。圧延加工等で粒径を小さくすると降伏応力は平均粒径の - 1/2 乗に比例して上昇する(Hall-Petch の関係)。このため、高強度化を目的として結晶粒の微細化がなされ、鉄鋼材料では制御圧延・加速冷却などの技術によりフェライトの結晶を $5\mu\text{m}$ 程度まで微細化した材料が実用化されている⁽³⁾。最近では、より高強度な新材料を作製する目的で金属の結晶粒径を $1\mu\text{m}$ 以下に微細化した超微細結晶材料 (Ultra-Fine Grained Materials) の開発が盛んになされている。UFG 材は、ECAP(Equal Channel Angular Pressing)、ARB(Accumulative Roll Bonding)、多軸圧縮などの強加工法により作製される。これらの方法は従来の TMCP(Thermo-Mechanical Controlled Process)よりもは

るかに大きい歪み（真歪で 5 程度）を与え、連続的再結晶により結晶をサブマイクロンオーダーに微細化するものである。さらに、UFG 材は結晶粒がより微細になりナノメートルオーダーになると、サブマイクロンサイズの結晶粒では有しない磁気特性や超塑性現象、高耐食性などの特性が発現することが見出されている⁽⁴⁾。

一方、結晶構造を持たないアモルファス金属は、結晶粒の微細化を進めた極限ととらえることができる。従来のアモルファス金属は、溶解状態から急速に冷却することにより作製していたため、薄膜状態に限られていた。他方、比較的遅い冷却速度でも結晶化せず、バスクアモルファスを生成できる金属が発見され、金属ガラスとして注目されている。金属ガラスは、組織の均一性に優れることから機械強度、耐食性、表面平滑性、精密 casting などにおいて結晶化金属材料にはない優れた特性を示し、様々な分野への応用が期待されている⁽⁵⁾。

本研究では、金属材料の機械的特性において結晶粒が果たす役割を明らかにする研究の一環として、UFG 材ならびに金属ガラスへのマイクロインデンテーション試験を行った。

第 2 章

実験装置

押し込み試験装置には、島津製ダイナミック超微小硬度計 DUH-201 を使用した。また、試験前後の試験片表面の観察には JEOL 製原子力顕微鏡 JSPM-5200 を用いた。以下にこれらの詳細について説明する。

2.1 マイクロインデンテーション試験装置

島津製ダイナミック超微小硬度計 DUH-201 のシステム概要を図 2.1 に示す。ビッカース硬度やブリネル硬度などの従来の測定方法では、押し込み試験後に試料表面に残留する圧痕の面積を光学顕微鏡で直接測定することにより硬度を求めていた。一方、押し込み力が微小になるにつれ圧痕の面積を精度よく測定するのが困難となる。そこで、本装置は、試験中に得られる荷重-変位関係から、硬度や弾性率などの機械特性をダイナミックに測定する方式を採用している。圧子押し込み荷重は 0.1～1961mN、負荷および除荷速度は 0.0014～70.6mN/s、荷重保持時間は 1～99s の範囲で任意に設定できる。なお圧子には稜間隔 115 度の Berkovich 型三角錐ダイヤモンド圧子を用いる。その形状を図 2.2 に示す。

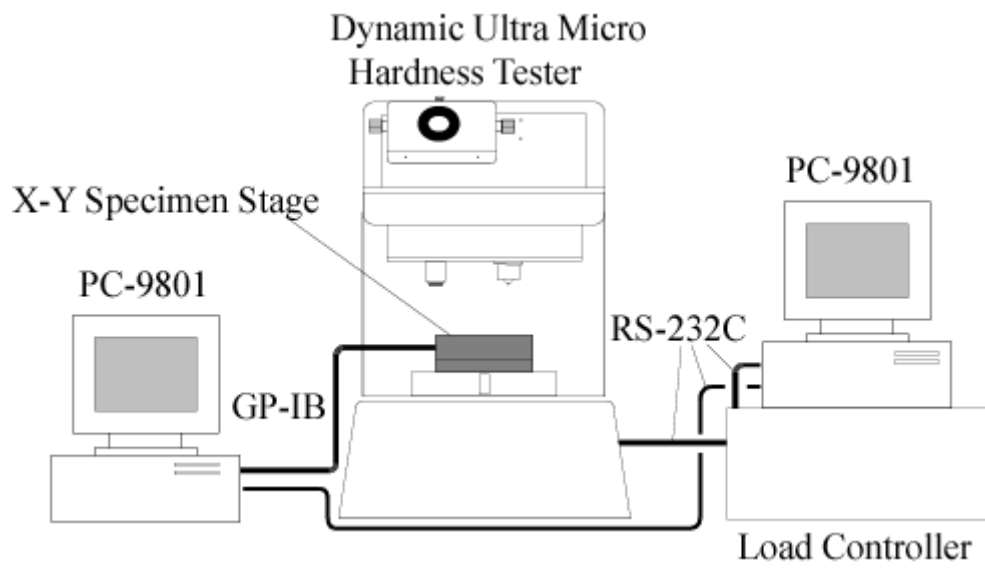


Fig.2.1 マイクロインデンテーション試験装置

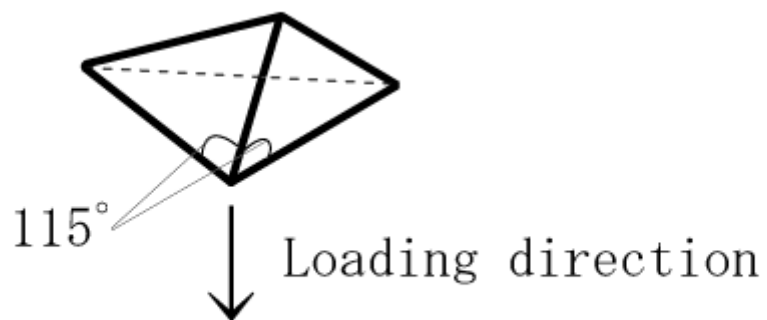


Fig.2.2 Berkovich 型三角錐ダイヤモンド圧子

2.2 原子間力顕微鏡

図 2.3 に試料表面のプローブ観察に用いた原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope : AFM)のヘッド付近の画像を示す. 図に示したように, (a)光学顕微鏡, (b)SPM ヘッド, (c)SPM ベース, (d)除震台, から構成される. 本 AFM の走査領域は最大で $24.8\mu\text{m} \times 24.8\mu\text{m}$, 分解能は面内方向 0.024nm , 垂直方向 0.01nm である. 図 2.4 にカンチレバー先端のプローブ部の SEM 像を示す. 探針には MIKRO MASCH 社製 AFM 用ウルトラシャープシリコンカンチレバーを使用した. 探針のカンチレバーはマイクロマシニング加工により作成され, 円錐型, 長さ $10\mu\text{m}$, 先端の曲率半径 10nm , ばね定数 0.05 N/m の Si_3N_4 チップである.

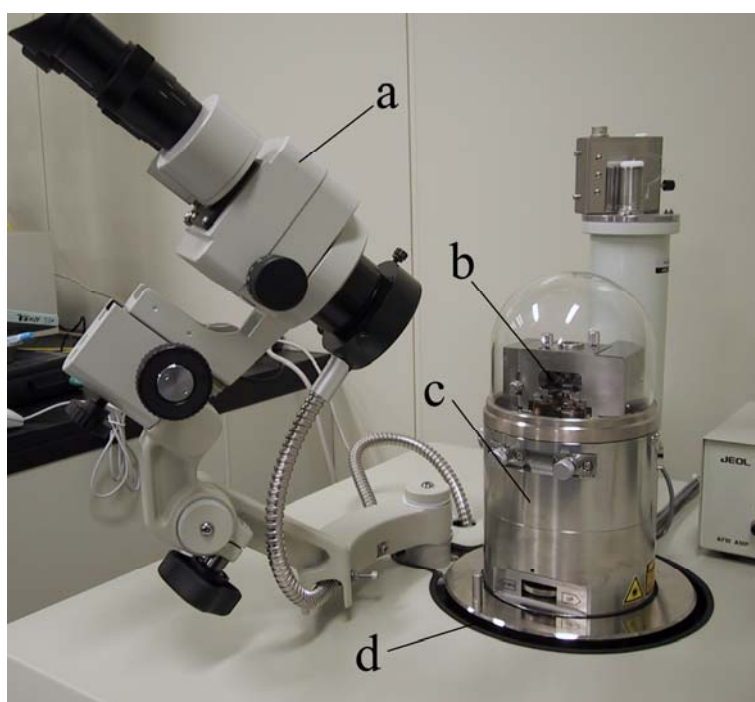
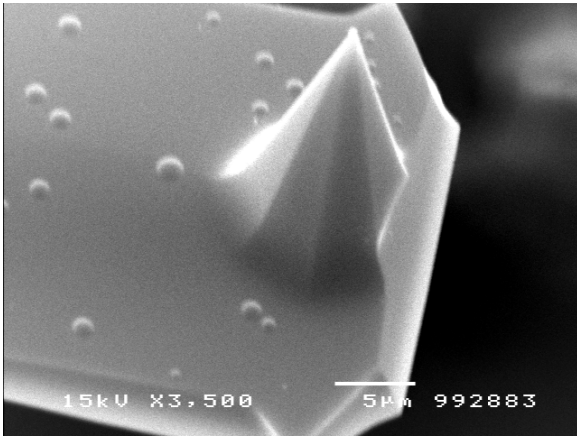
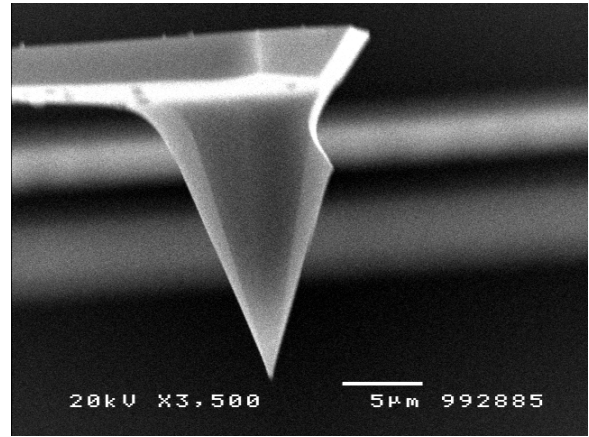


Fig. 2.3 SPM ヘッド近傍写真



(a)



(b)

Fig. 2.4 AFM 探針の SEM 画像

第 3 章

試験片ならびに試験方法

3.1 超微細結晶粒材料(Ultra Fine Grained Material)

ECAP(Equal Channel Angular Pressing)法により作製された純銅(C1100)の UFG 材を使用した。ECAP 法とは金型の中で交差する断面形状の同じ穴の中に試料を高圧力で押し出し、曲がり角で素材に著しく大きいせん断変形を与えるものである⁽⁶⁾。この方法で得られる UFG 材は(1)延性が比較的大きい、(2)高密度な粒界転位を有し、(3)非平衡な結晶粒界を形成する、(4)拡散性が高い、などの特徴がある。図 3.1 に、ケラー液(フッ酸：硝酸：蒸留水：塩酸=10：25：50：15)で 20 秒間エッチングした UFG 材の表面を示す。数 μm の微細な結晶粒が確認できる。

図 3.2 に示したように、引張試験を行った UFG 材について、(a)引張試験前、(b)負荷中のくびれが生じる前、(c)くびれが生じた後、(d)試験後(破断したもの)それぞれから採取してインデンテーション試験に供した。試料は中央の引張力を受ける部分((d)については破断部周辺)から採取した。インデンテーション試験は、それぞれの試料に数点、ランダムに平滑な面を選んで行う。試験に際し、試料表面を平滑加工するため、それぞれの試料にバフ研磨の後、電解研磨を施した。バフ研磨は SiC 湿式研磨ペーパー粒度 320, 600, 1000, 1200, 2400, 4000(FEPA-規格)を使用し、その後、電解研磨(電解質：硫酸, 4.5~5.0v, 15~30 分間)を行い、超音波洗浄器で 15 分間洗浄した⁽⁷⁾。

試験前の試料表面を AFM 観察した例を図 3.3 に示す。また、図 3.3(a)中の A-A' に沿った断面形状を図 3.3(b)に示す。大域的には表面粗さは残るが局所的には数 mm の凹凸となっている。押し込み試験では表面粗さが測定長さの 2.5%以下であれば表面凹凸が試験結果に及ぼす影響は無視できる。本試験では、最も微小な押し込み力でも押し込み深さは 1.0 μm 程度となるので、十分平滑な面が得られている。

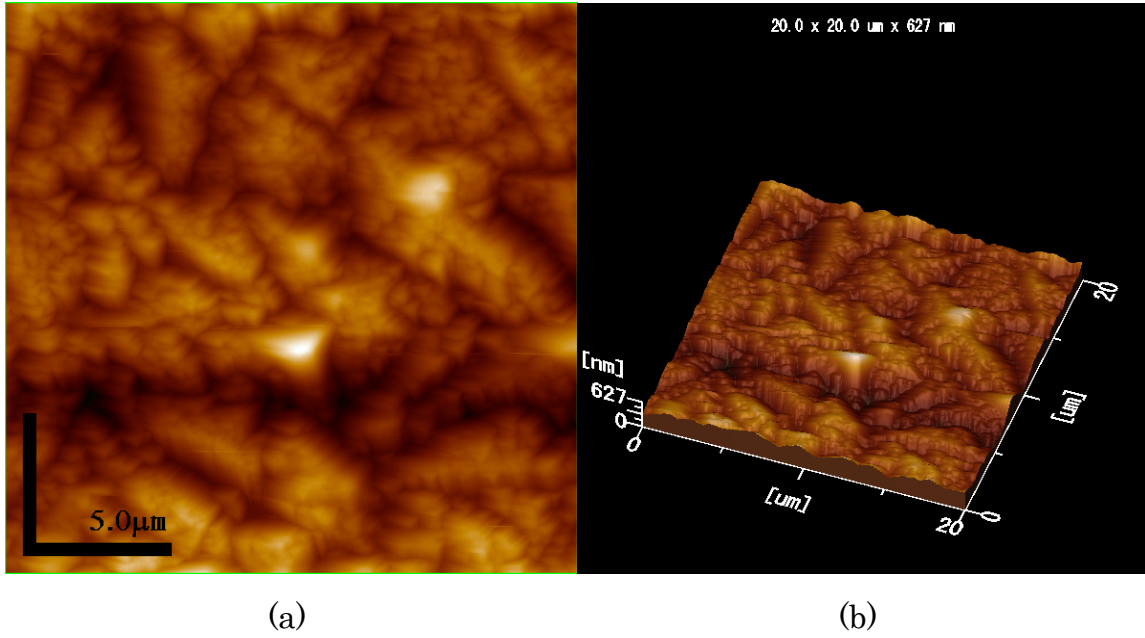


Fig.3.1 (a)UFG 材の結晶粒界 AFM 画像(20μm×20μm)と(b)三次元立体図

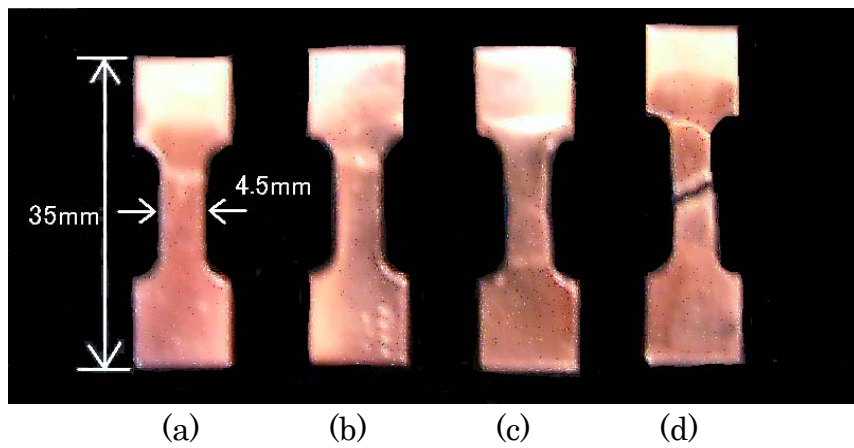


Fig.3.2 UFG 材試験片

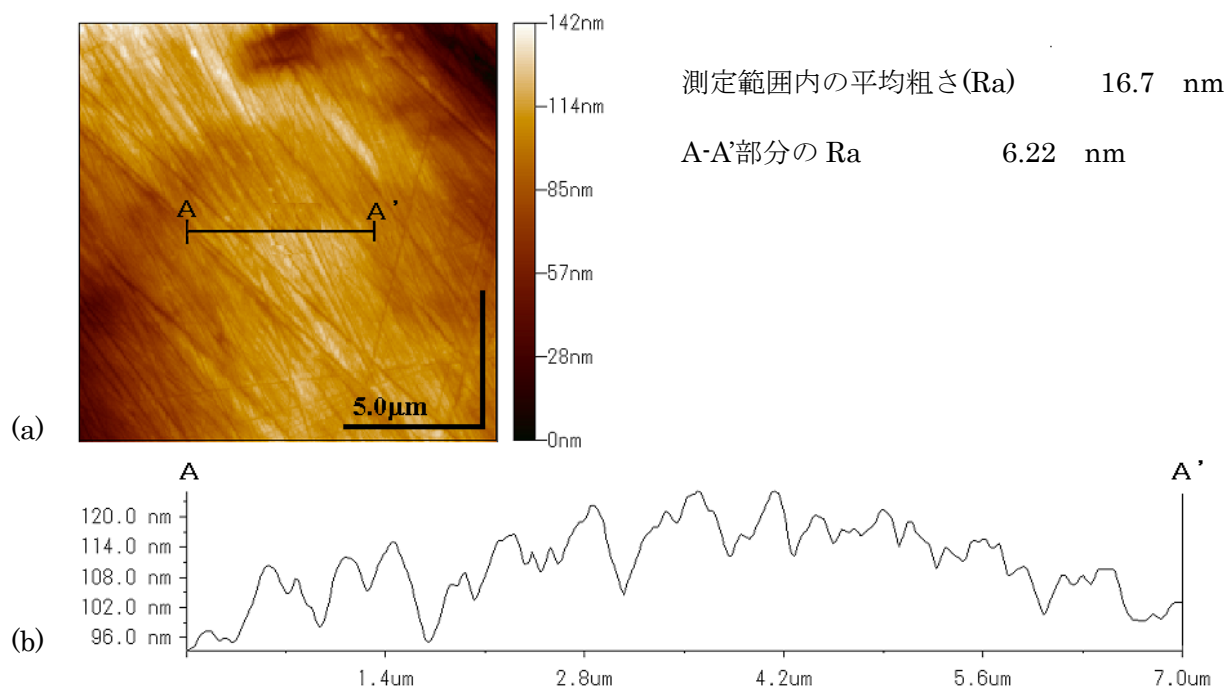


Fig.3.3 UFG 材の(a)試料表面の AFM 観察像 (15 μ m \times 15 μ m) と
(b)高さプロファイル

3.2 金属ガラス(Metallic Glass)

バルク金属ガラスとして $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 合金を用いた。試料は(1)到達真空度 $4 \times 10^{-6} \text{Torr}$ のチャンバー内を Ar ガスで置換して Ti ゲッタを溶解, (2)ガス抜きした Zr, Al, Ni, Cu をアーク溶解によって合金化, さらに, (3)チャンバー内を到達真空度 $3 \times 10^{-5} \text{Torr}$ にした後, Ar ガスで置換して, Ti ゲッタを溶解, (4)アーク溶解電流値 400A で約 3 分 10 秒間溶解し, これを約 0.23 秒で型締め鑄造装置でプレス成型というプロセスで作製されている。

試料の寸法を図 3.3 に示す。先の UFG と同様, SiC 湿式研磨ペーパー粒度 320, 600, 1000, 1200, 2400, 4000(FEPA-規格)を使用しバフ研磨を施した。その後さらに, $1\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$ 粒度のダイヤモンドスプレーを用いて精密研磨した。試験前の試料表面を図 3.5 に示す。図 3.5(a)の A-A'断面形状を表したのが図 3.5(b)である。本研究では最も微小な押し込み力でも押し込み深さは $0.8\mu\text{m}$ 程度であるので, UGF 材と同様, 表面凹凸が試験結果に及ぼす影響は無視できる。

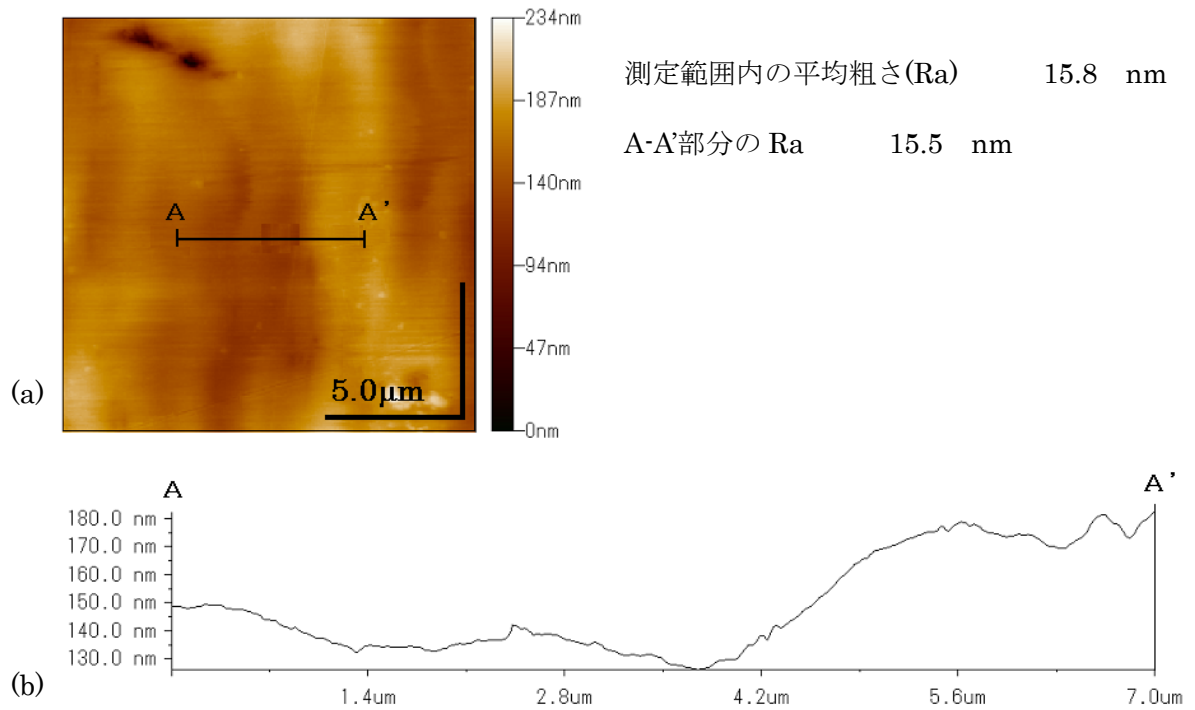


Fig.3.5 金属ガラス材の(a)試料表面の AFM 観察像 (15 μm × 15 μm) と (b)高さプロファイル

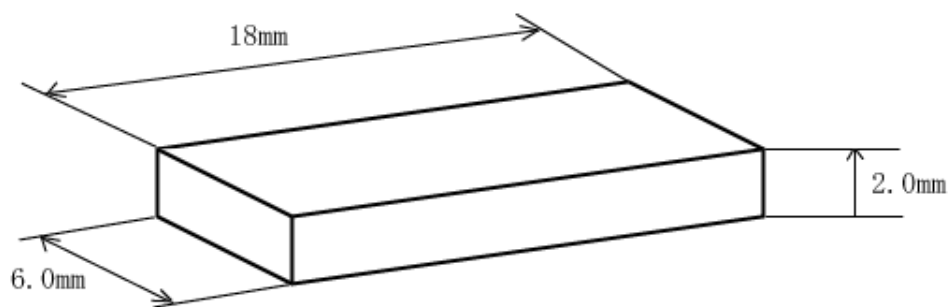


Fig.3.4 金属ガラス試料寸法

3.3 試験方法

一定速度で負荷—最大荷重点で 5 秒保持—負荷速度と同じ速度で除荷，を 1 サイクルとするインデンテーション試験を行った．最大荷重は UFG 材試料(a)～(d)には 100mN，500mN，1000mN と最大負荷荷重を設定し，各荷重毎に 5 点ずつ試験を行った．金属ガラス試料については，上記試験に加えて最大負荷荷重 100mN～400mN の間に 20mN 毎に試験を行った．負荷除荷速度は最大負荷荷重 100mN～400mN では 13.2mN/s，としたが，500mN，1000mN の場合のみ 14.12mN/s とした．

3.4 硬度の算出法

ビッカース硬さやブリネル硬度のように押し込みに荷重が大きな硬さ試験では，除荷後に残った永久くぼみの表面積を測定することにより硬度を求める．しかしながら，本試験のように微小荷重を使用する場合，圧痕の表面積は非常に小さくなり測定は非常に手間がかかる．そのため，簡便に硬度測定を行うには最大荷重点における試験片の圧子との接触面積を直接観察による測定以外の方法で見積もる必要がある．そこで，本研究では，最大荷重点における接触面積を圧子形状に依存する関数で見積もるため，最大荷重点における接触深さを Oliver らの提案した方法を用いて決定する⁽⁸⁾．

最大荷重を 100mN にしたときの荷重-押し込み曲線の一例を図 3.5 に示す．図 3.6 に示すように，除荷後の圧痕の深さ方向における弾性回復および押し込み深さ h は，接触深さ h_c と圧子周辺の表面の変位 h_s の和で表され

$$h = h_c + h_s \quad (3.1)$$

となる． h_c は以下のように定義する．

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (3.2)$$

ただし， h_{\max} は最大荷重点における押し込み深さ， P_{\max} は最大押し込み荷重， S は実験データから得られた負荷曲線の除荷初期過程における剛性で， $S = \frac{dP_{\max}}{dh}$ で表され， ε は圧子形状に依存する定数である．

また、 ε は Sneddon により示された押し込み荷重 P と深さ h の次式の関係式の指数 m に依存している。

$$P = \alpha h^m \quad (3.3)$$

ただし、 P は押し込み荷重、 α は定数である。Oliver らは三角錐圧子を放物面の回転体モデルに近似できるとして、 $m = \frac{3}{2}$ とする式(3.3)より、

$$\begin{aligned} S &= \frac{dP}{dh} = \frac{m}{h} P \\ \therefore h &= m \frac{P}{S} \end{aligned} \quad (3.4)$$

したがって、圧子と表面の接触境界における表面の深さ h_s は Sneddon の解より、

$$\begin{aligned} h_s &= \frac{1}{2}(h - h_f) \\ &= \frac{1}{2} m \frac{P_{\max}}{S} \\ &= \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \end{aligned} \quad (3.5)$$

となり、 $\varepsilon = \frac{3}{4} = 0.75$ と求められる。

次に、式(3.2)で決定した接触深さから硬度を求める。本試験で用いた超微小硬度試験機は Berkovich 型三角錐ダイヤモンド圧子を用いており、稜間隔 115 度であることから、接触深さ h_c のとき、圧痕の投影面積を A とすると、幾何学関係から

$$A = 23.89 h_c^2 \quad (3.6)$$

と表される。ビッカース硬度などの硬度と同様に、最大押し込み荷重 P_{\max} を式(3.6)の投影面積 A で除し単位面積当たりの圧力としての硬度を次式のように定義する。

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (3.7)$$

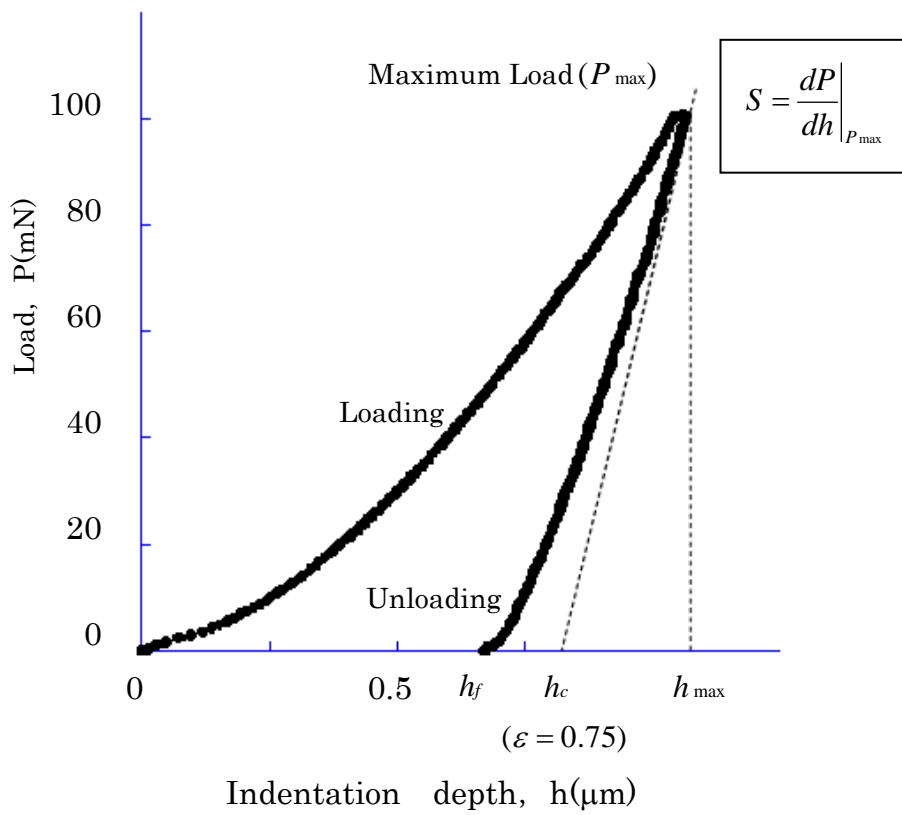


Fig.3.5 荷重-押し込み深さ線図(UFG, $P_{\max} = 100\text{mN}$)

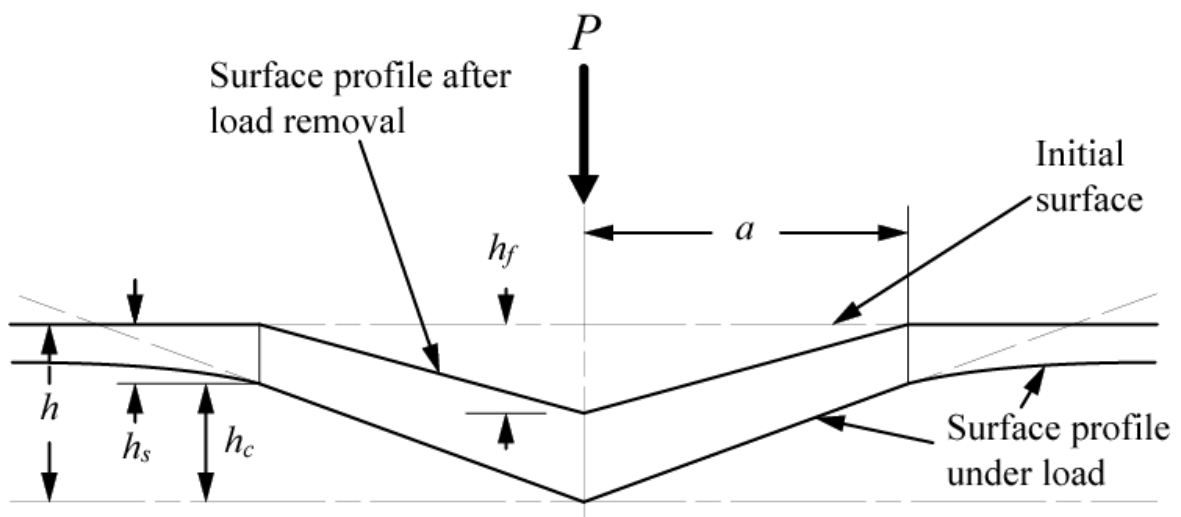


Fig.3.6 押し込み断面の概略

3.5 弾性率の推定法

Hertz の弾性接触理論から圧子と試料との合成弾性率 E_r を以下のように定義する.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_{spe}^2}{E_{spe}} + \frac{1-\nu_{in}^2}{E_{in}} \quad (3.8)$$

ここで, E_{spe} と ν_{spe} は試料の弾性率とポアソン比, E_{in} と ν_{in} はダイヤモンド圧子の弾性率とポアソン比で, それぞれ $E_{in}=1050\text{GPa}$, $\nu_{in}=0.2$ である. また, 剛性 S と合成弾性率 E_r の関係は, 次式のように仮定する.

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (3.9)$$

ただし, A は圧痕接触部の投影面積である. 式(3.9)から,

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (3.10)$$

となり, 式(3.8)に代入して試料の弾性率 E_{spe} を得る.

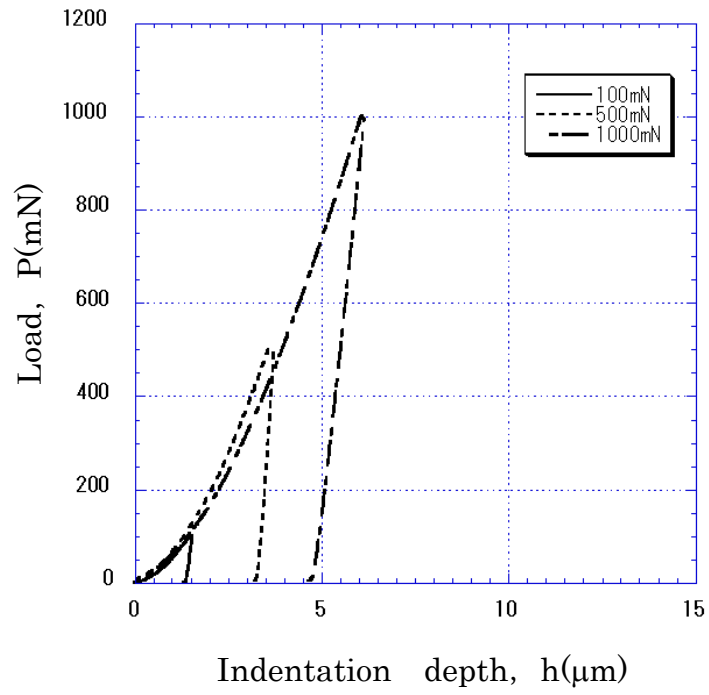
第4章

実験結果および考察

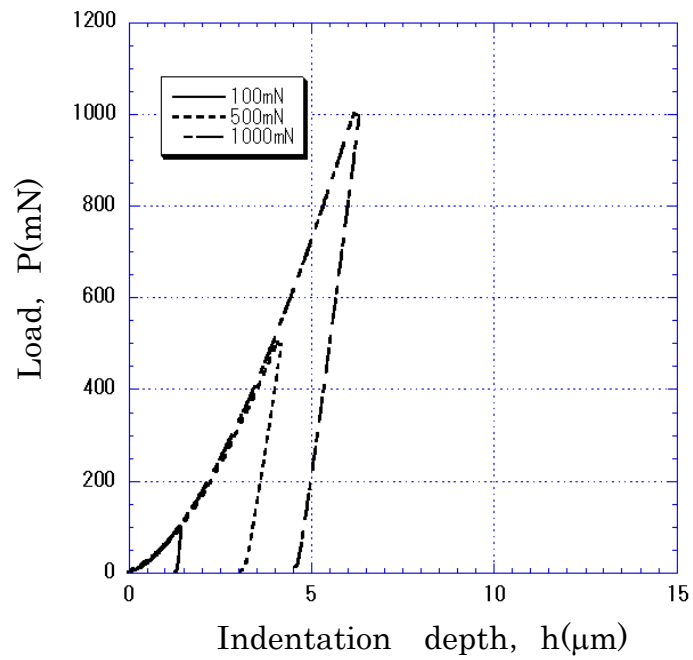
4.1 インデンテーション試験

図 4.1, および図 4.2 は UFG 試料(a)~(d)のインデンテーション試験における荷重-押し込み深さ線図である。いずれも押し込み時は二次曲線状になる。なお, 十分な押し込み力では同一試料で最大押し込み力を変えると曲線は相似になると予想されるが, 図(a)および(d)ではずれが認められる。これは押し込み力を微小にしたことによるばらつきと考えられる。(b), (c)のグラフは押し込み力を変化させても相似な曲線をしており, 押し込みを行う箇所のばらつきが少なかったものと考えられる。破断後の(d)は最大押し込み深さが, 他に比べて顕著に変化している。また, 弾性回復量も他に比べ大きい。処女材の(a)および均一変形下の(b)とくびれを生じた部分の(c)を 1000mN の押し込み力で比較すると最大押し込み深さは(a) < (b) < (c)となり, 除荷曲線の傾きは延性変形が進むにつれてやや緩やかに, すなわち弾性回復量が多くなっている。

図 4.3, は金属ガラスのインデンテーション試験の荷重-押し込み深さ線図である。最大押し込み力を増加に伴って, 曲線は相似になっており, ばらつきも見られない。UFG 試料(a)と比べて, 金属ガラス材の方が押し込み深さが少なく, 硬度が高いことが予測される。弾性回復率も金属ガラスの方が高いことがグラフから確認できる。図 4.4 および図 4.5 に, 100mN~200mN と 300mN~400mN を 20mN 間隔で試験をした時の荷重-押し込み深さ線図を示す。100mN 近傍と 500mN 近傍で試験の再現性が示されている。

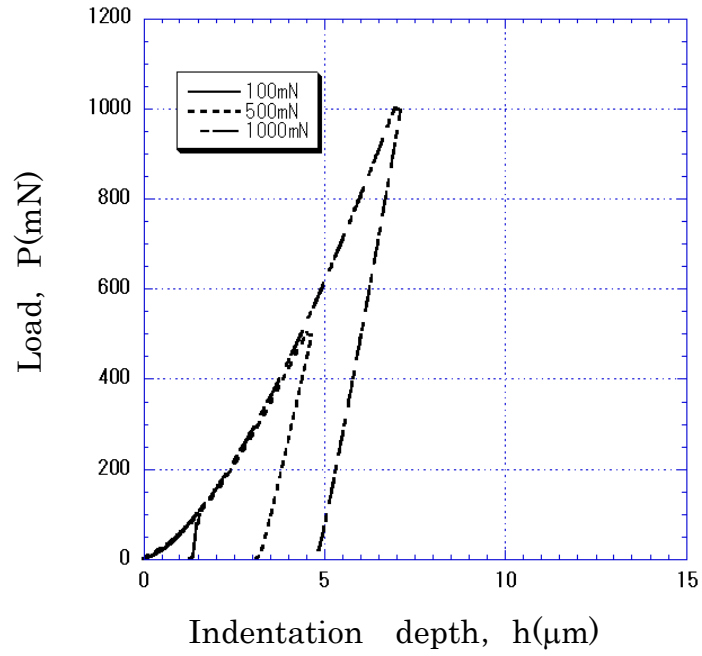


(a)

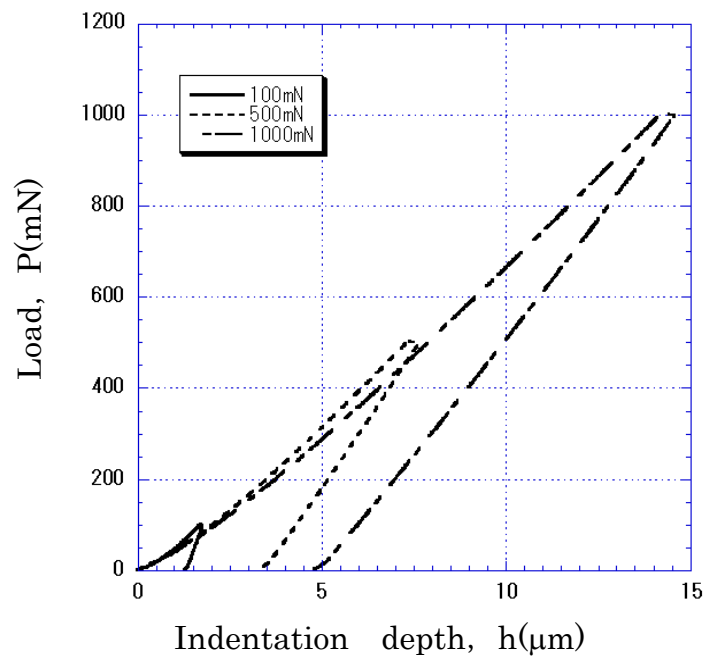


(b)

Fig.4.1 UFG 材の荷重-押し込み深さ線図(a),(b)



(c)



(d)

Fig.4.2 UFG 材の荷重-押し込み深さ線図(c),(d)

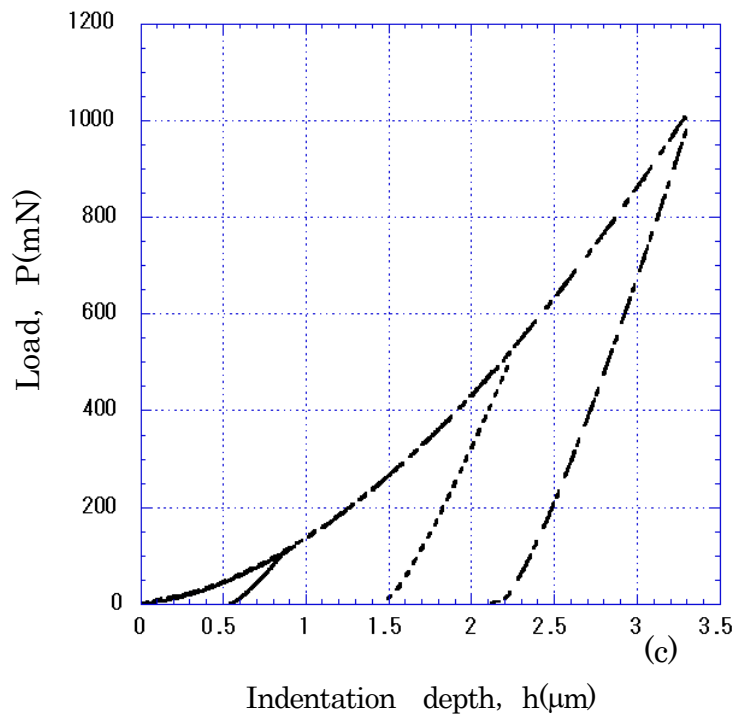
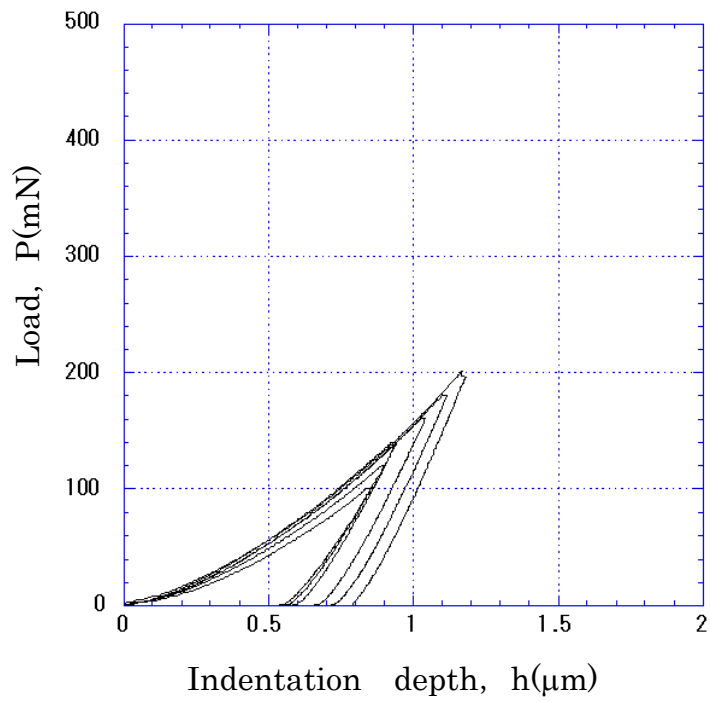
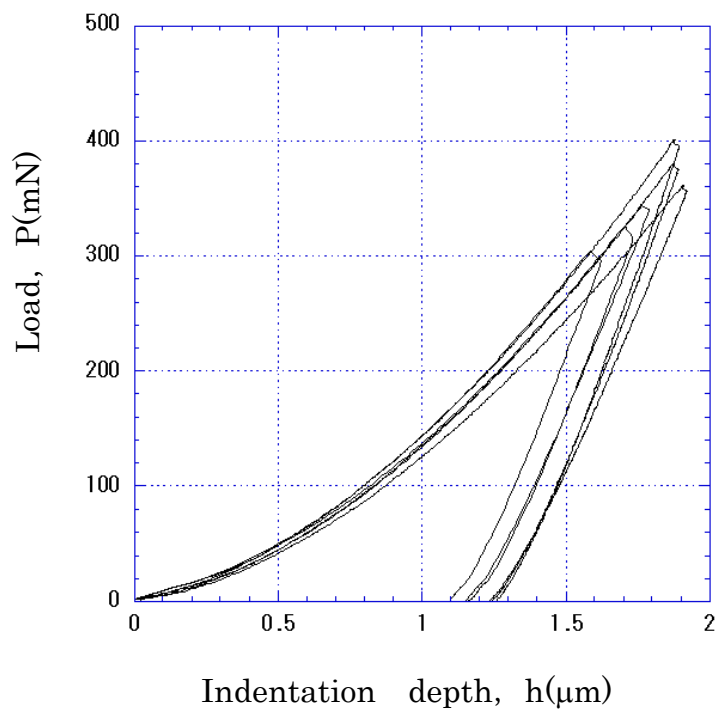


Fig.4.3 金属ガラスの荷重-押し込み深さ線図



(a)最大負荷荷重 100~200(mN)



(b)最大負荷荷重 300~400(mN)

Fig.4.4 金属ガラスの荷重-押し込み深さ線図

4.2 硬度-接触深さ関係

3.4 節に示した手順に基づき，接触深さ h_c ならびに硬度を算出した．図 4.5 は UFG 材，図 4.6 には金属ガラスの硬度-接触深さ関係である．図中のエラーバーは標準偏差を示す．

UFG 材では，負荷荷重 100mN で(a)～(d)を比較すると接触深さにあまり差は見られないが，引張試験における延性破壊が進むにつれて硬度は低下し，負荷荷重の増加に伴って，接触深さにも差が生じている．特に，破断すると硬度が著しく低下することがわかる．また 1000mN でも，押し込み深力を微小にしていた時に現れる硬度上昇領域であったことがわかる．

一方，金属ガラスでは追加実験として試料(a)に最大荷重 1200mN，1500mN，1900mN の試験を行ったところ，300mN 以上の力で硬度が 7GPa 近傍に収束していることが確認できた．接触深さ 1 μ m から硬度上昇するが，100mN 近傍では再び硬度が上昇した．ただし，ばらつきが大きくなっていることから，チップ先端形状の影響も考えられる．UFG 材では今回の条件では，バルクの硬度を測定できなかったが，全体的には金属ガラスの方が高い硬度を示した．これは，結晶粒よりもむしろ銅と Zr-Al-Ni-Cu の元素の違いが現れたものと考えられる．

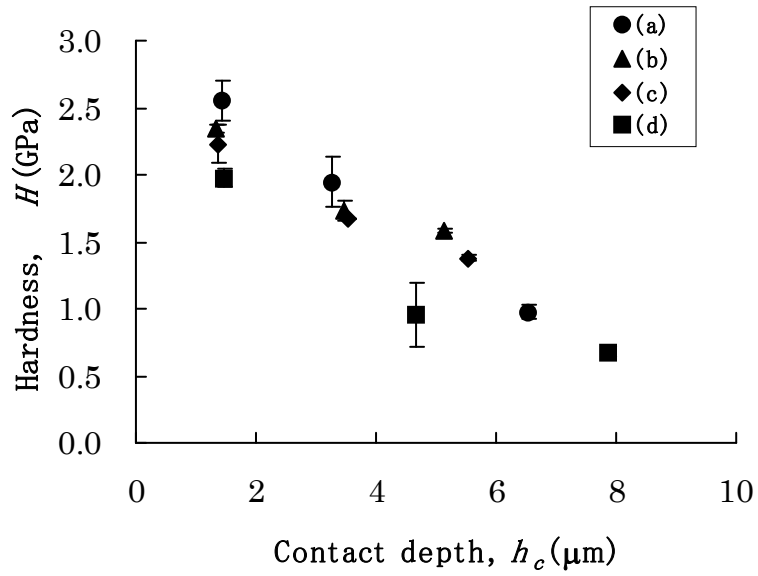


Fig.4.5 UFG 材の硬度-接触深さ関係

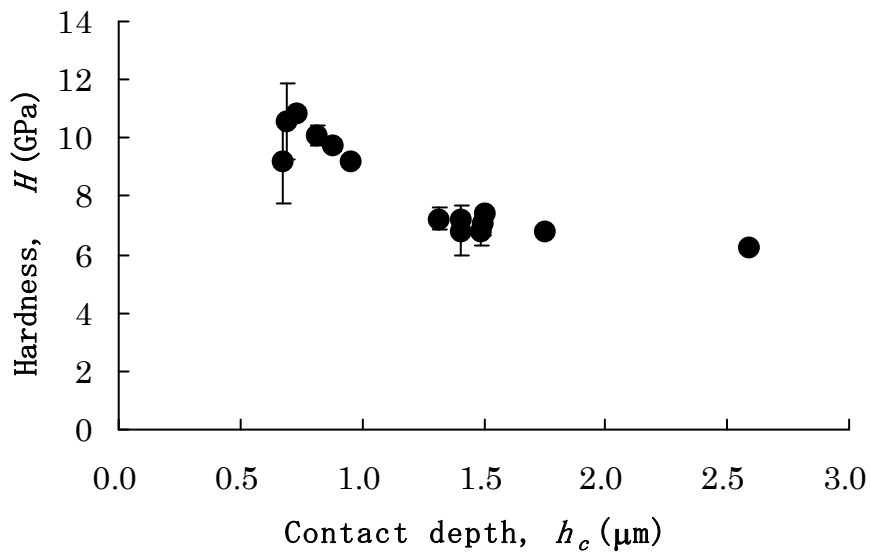


Fig.4.6 金属ガラスの硬度-押し込み深さ関係

第5章

結 言

本研究では、金属材料の機械的特性において結晶粒が果たす役割を明らかにする基礎的研究として、UFG (Ultra-Fine Grain) 材ならびに金属ガラスへのマイクロインデンテーションを行った。ECAP 法により作成された純銅(C1100)の UFG 材、ならびに、 $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 合金のバルク金属ガラスそれぞれについて、平滑処理を施した後、最大押し込み力を 100mN, 500mN, 1000mN と変化させて 5 点ずつインデンテーション試験を行った。UFG 材については、引張り試験に供した試験片から、(a)処女材、(b)変形初期の均一変形部、(c)変形後期にせん断帯を生じた部分、(d)破断部近傍、のそれぞれから採取して押し込み試験を行った。金属ガラスについては処女材のみだが、100mN~400mN の間で 20mN 毎にさらに 5 点ずつインデンテーション試験を行った。荷重-押し込み深さ曲線は、UFG の場合(a)~(c)で大きな差はなかったが、(d)のみ最大押し込み深さが他に比べて大きくなり、また弾性回復量も著しく増加した。金属ガラスの試験では、500mN 以上の押し込み力-深さ曲線は UFG 材の破断部近傍のそれと類似した形状となった。一方、100 mN 以下では金属ガラスの押し込み荷重-深さ曲線が変化することが示された。100mN~400mN の間で多点行った試験から、100mN 近傍で荷重-押し込み深さ曲線が変わることに再現性があることが示された。これらの荷重-押し込み深さ曲線から硬度と接触深さを算出し、硬度-接触深さ関係を調べた結果、UFG 材の接触深さは 1000mN で 7~8 μ m となるが、この接触深さでも硬度上昇領域にあることが示された。一方、金属ガラスは接触深さ 1 μ m 以下で硬度上昇が現れた。また、硬度は全体的に金属ガラスの方が高い値を示したが、これは純 Cu と Zr-Al-Ni-Cu の構成元素の差が現れたものと考えられる。

参考文献

- (1) 機械材料学, 日本材料学会, (1991)
- (2) D. Tabor, *J. Inst-Metals*, **79**, (1951), 1
- (3) I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka and C. Ouchi, *Thermomechanical Processing of High-Strength Low-Alloy Steels*, (1998), Butterworths
- (4) 梅本実, 強加工によるナノ結晶鉄鋼材料の開発, (2003),
<http://martens.tutpse.tut.ac.jp/research/description01.html>
(「超強加工による鉄鋼材料のナノ結晶化」 解説文)
- (5) 井上明久編, ナノメタルの最新技術と応用開発, (2003), CMC 出版
- (6) R.Z.Valiev, N.A.Krasilnikov and N.K.Tsenev, *Master.Sci.Eng.*, A137(1991), 35
- (7) 内田裕久, 内田晴久訳 (Günter Petzouw 原著), 組織学とエッチングマニュアル, (1997), 日刊工業新聞
- (8) W.C.Oliver, G.M.Pharr, *J.Master.Res.*, **7-6**(1992), 1564-1538

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始、懇切丁寧な御指導を賜りました富田佳宏教授に最大限の敬意と感謝の意を表します。

本研究の遂行に対し、直接の御指導と貴重な御助言を賜りました、屋代如月助教授に深く感謝致します。また、有益な議論を賜りました長谷部忠司助教授に感謝致します。さらに、本研究の実験が終始円滑に進行するように御尽力して頂きました、古宇田由夫技術職員に感謝致します。

神戸大学大学院自然科学研究科マルチスケール固体力学研究室の諸先輩方には、数々の御支援と暖かい激励を頂きました。ここに感謝の意を表します。

日々の生活において、時として互いに刺激し合い、励ましあった、同輩の東圭佑氏、金井泰寛氏、仙波愛弓氏、中島裕介氏、西村正臣氏、藤野佑一氏、山中晃徳氏に感謝します。

最後に、4年間の大学生活に対してさしのべられた、父母の多大なる支援と理解に感謝と敬意の意を表してここに記します。

2005年2月 川崎美生