

プリント基板内部の金属配線部の残留応力の非破壊測定

Nondestructive measurement of residual stress of internal metallic connection in print-circuit boards

実施課題番号 2003B0548-NI-np-TU

使用ビームライン BL46XU

実験期間 2003年12月13日から16日 (9シフト)

実験責任者所属機関及び氏名 名古屋大学 田中啓介 (Keisuke TANAKA)

共同実験者

大河内一貴 (Kazutaka OHKOUCHI) (株) デンソー

浅井 洋光 (Hiromitsu ASAI) (株) デンソー

宮川 進 (Susumu MIYAGAWA) (株) デンソー

伊藤登史政 (Toshimasa ITO) (株) デンソー

山下 博志 (Hiroshi YAMASHITA) (株) デンソー

秋庭 義明 (Yoshiaki AKINIWA) 名古屋大学工学研究科機械工学専攻

河合 雅典 (Masanori KAWAI) 名古屋大学工学研究科機械工学専攻

町屋修太郎 (Syutaro MACHIYA) 名古屋大学工学研究科機械工学専攻

森下 裕介 (Yuusuke MORISHITA) 名古屋大学工学研究科機械工学専攻

佐藤 真直 (Masugu SATO) JASRI

1. はじめに

電子製品の小型化に伴い、搭載部品の高密度化、半導体パッケージの小型化はますます加速されている。その小型パッケージの電極用のプリント基板として、プリント基板の層間を接続するための金属配線通電部を基板内部に設けた構造の高密度多層プリント基板が必要不可欠になってきている。この代表例は、PALAP (Patterned Prepreg Lay up Process) 基板である。これは、あらかじめ配線パターンを加工した熱可塑性の樹脂シートを一括プレスにより多層化を達成させる高密度多層プリント基板で、熱可塑性樹脂を採用することで、リサイクルを可能とし地球環境にも優しい。プリント基板は使用環境中の温度変化、起動時の自己発熱および電源のオン・オフによる繰返しの温度変化を受ける。そのため、線膨張係数の異なる材料から構成されるプリント基板の熱サイクルに対する信頼性が問題となる。特に金属配線部には応力が集中し、不具合の原因となるため、高密度多層プリント基板の開発においては金属配線部の残留応力および熱サイクルに対する強度信頼性の保証がキーファクターとなっている。

現在、PALAP 基板の金属配線部の熱サイクルに対する寿命を正確に予測するため、構成材料の疲労試験結果と、有限要素解析による応力解析を併用した評価進めているが、正確な寿命予測技術の確立のためには、基板製造後の金属配線部に発生する残留応力と熱サイクルで発生する応力ないしひずみの挙動の実測が不可欠である。しかし、従来の実験室におけるX線応力測定法では、X線の侵入が浅くまた回折強度も弱いため、プリント基板内部の微細な金属配線部に作用す

る応力を非破壊的に評価することは困難である。

そこで、本研究では SPring-8 の高エネルギーおよび高輝度放射光を利用して、高密度多層プリント基板内部の微細な金属配線部の残留応力ないしひずみを非破壊的に測定し、疲労損傷機構を明らかにすることを目的とする。配線部は銅薄膜の下方のモールド内部にあり、銅薄膜を通過する大きな侵入深さが必要であり、高エネルギー放射光の使用で初めて達成される。また、配線通電部の1ブロックの寸法は $100\mu\text{m}$ 程度と微小領域であるため高輝度X線が必要であり、この測定は SPring-8 以外では不可能である。応力の実測から、配線部の残留応力および熱サイクルによる疲労損傷の進行を的確に把握でき、有限要素法にフィードバックすることから最適構造設計の検討が可能となる。さらに、この種の技術の確立は、高密度多層プリント基板ばかりでなく広範囲の電子部品やパッケージなどの微小構造体中における内部の残留応力および熱応力測定への道を拓くことが期待できる。

2. 実験方法

2.1 実験材料

実験に使用したプリント基板は、図1に示す4種類のパターンである。パターンAは密集型で、パターンBは粗い配置である。パターンCは一列のみ、パターンDは単独孤立したビアがある。各ビアの下には、図2に示すように銅箔のビアしたに Ag 合金の配線が配置されている。図中には大体の寸法を示す。銅箔の厚さは $18\mu\text{m}$ である。

プリント基板のほか、Ag 合金単体およびCu 薄膜単体の試料を準備した。

2.2 X線測定装置および条件

実験には SPring-8 のビームライン BL46XU を使用した。図3には測定の状態、図4には試料台部を拡大して示す。試料台はセラミックスヒータを乗せることができ、 120°C に温度を上昇することができる。受光側にはダブルスリットを取り付けた。発散光側にもスリットを取り付けた。種々の検討を行った結果、エネルギーレベルは $E=22\text{keV}$ に設定した。

また、回折面として最終的に、Ag 合金では、211 回折（回折角 $2\theta=14.23\text{deg}$ ）と 012 回折（回折角 $2\theta=14.31\text{deg}$ ）を、また銅は 111 回折（回折角 $2\theta=15.52\text{deg}$ ）を応力測定に使用した。このときの発散側のスリットは、高さ 0.5mm と幅 0.5mm とした。また、ダブルスリットは高さ 0.6mm で幅 0.5mm にした。種々の検討を行ったが、最終的に信頼できる測定結果はパターンDの一つのビアを狙ってX線を照射した場合で、かつこの場合においては試験片を揺動することが必要であった。揺動条件として θ 軸をプラスマイナス1度の範囲で揺動させた。

熱サイクルを加える測定では、温度を変化させたときごとに半割を取り、そのときごとに位置合わせが必要である。

X線の照射位置を特定するためにはビデオマイクロスコープを使用した。このスコープは長焦点のレンズがついているため位置決め非常に役立った。また、保持台もゴニオ台に固定した。

2.3 測定計画

- (1) Ag 合金単体およびCu 単体の回折プロフィールを測定して応力測定に可能な候補の回折面をリストする.
- (2) プリント基板の残留応力を測定する. この測定から最適測定面の決定を行う.
- (3) 室温—120°C—室温の熱サイクルを加えた場合の, Ag 合金及びCu 箔の応力の挙動を測定する.
- (4) 熱サイクルを予め加えて損傷を受けたプリント基板の残留応力測定をして, 熱サイクル損傷が残留応力に及ぼす影響を明らかにする.

2.4 応力解析法

応力解析には $\sin^2\psi$ 法を使用した. 基礎式は図5に示すような応力状態に対して, 試料面法線方向から ψ だけ傾いた方向の垂直ひずみは次式で与えられる.

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1+\nu_D}{E_D}(\sigma_x - \sigma_z)\sin^2\psi - \frac{\nu_D}{E_D}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{\sigma_z}{E_D} \quad (1)$$

これを回折角で表すと次式となる.

$$2\theta_{\psi} = -\frac{2(1+\nu_D)}{E_D}\tan\theta_0(\sigma_x - \sigma_z)\sin^2\psi + \frac{2\nu_0}{E_D}\tan\theta_0(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{2\sigma_z}{E_D}\tan\theta_0 + 2\theta_0 \quad (2)$$

ここで, $\sin^2\psi$ 法線図の傾き M に応力定数を掛けた値は次の応力である.

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_z &= SM \\ S &= -\frac{E_D}{2(1+\nu_D)}\cot\theta_0 \\ M &= \frac{\partial(2\theta_{\psi})}{\partial(\sin^2\psi)} \end{aligned} \quad (3)$$

上式で, E_0 および ν_0 は回折弾性定数である. ここで, 通常の管球を使用した X 線法と異なり, σ_z は無視できない.

3 実験結果および考察

3.1 応力測定のための回折面と測定条件の決定

Ag 合金のプロフィールを図6に示す. 図において 012+211 回折 (回折角 $2\theta = 14$ deg) および 032+231 回折 (回折角 $2\theta = 24$ deg) は強度が強い. また, RIETAN のシミュレーションによるとこの回折はCu の回折とは重ならない. 一方, 銅に関して, 642 回折 (回折角 $2\theta = 71$ deg) および 111 回折 (回折角 $2\theta = 15.5$ deg) が候補となった.

高角の回折の方が測定精度が高いことが予想されるため, 最初の実験では, Ag 合金は 032+231 回折, Cu 箔は 642 回折を使用して測定した.

実験ではまずパターン A を使用して, X 線測定をした. このとき, 傾斜角によってサンプリン

グするビアが異なるため充分の精度が得られなかった。

そのため、ビデオスコープを導入し、パターン D を用いて一つのビアをめがけて測定した。また、照射領域を絞るため、発散側のスリットは高さ 0.5mm と幅 0.5mm とした。また、ダブルスリットは高さ 0.6mm で幅 0.5mm にした。この条件での測定では、 ψ を傾けていくと充分の強度が得られない場合があった。そのため、低角でも強度が強い Ag 合金では 012+211 回折を、また Cu 箔では 111 回折を使用することに変更した。

プリント基板パターン D を使用して、1 ビアをめがけて照射した場合、照射域中に充分の結晶粒数が存在しないためプロファイルが乱れる。この状態で $\sin^2\psi$ 線図を取っても精度は得られない。これを検証するために測定したロッキングカーブを図 7 に示す。いずれの場合にもきらきらと各結晶が光っており粗大粒の効果が認められる。このため揺動条件として θ 軸をプラスマイナス 1 度揺動させた。以下の測定結果は、この最終条件で測定を行った。

熱サイクルを加える測定では、温度を変化させたとき熱膨張のため位置が変化する。このため、温度変化ごとに半割を取り、そのときごとに位置合わせが必要であった。

3.2 応力測定結果

パターン D を使用して室温から 120°C また室温と変化させたときの Ag 合金の回折プロファイルを図 8 に示す。二つのピークからなっている。この二つをピーク分離して半価幅法でピーク位置を決定した。図 9 が $\sin^2\psi$ 線図である。いずれの場合も直線近似が可能で、室温では右下がりであるが、それが 120°C では水平に近い。また、211 回折の回折の方が 012 回折より精度が高い。

図 10 が同時に測定した Cu のプロファイルで、図 11 が $\sin^2\psi$ 線図である。この場合も直線近似を行う。

式(3)より求めた応力値を表 1 に示す。弾性定数として、Ag 合金については、機械的弾性定数 $E = 45\text{GPa}$, $\nu = 0.3$ を使用した。一方、Cu については、単結晶の弾性定数から Kroner モデルで求めた $E = 159\text{GPa}$, $\nu = 0.307$ を使用した。ここで求めた応力は、照射域の平均の応力であり、かつ $\sigma_x - \sigma_z$ の値である。Ag 合金では 211 面と 012 面ともに同様な挙動をしている。Cu の場合 120°C での測定値は $\sin^2\psi$ 線図のばらつきが大きく、測定精度がやや欠ける。

熱膨張係数は、プラスチックが 200×10^{-6} でもっとも大きい。図 2 のビアの断面を見ると、Ag 合金の結果は垂直方向の応力 σ_z の挙動を大きく反映しているようである。

4 まとめと今後の検討課題

ビームライン BL46XU で、エネルギーレベル $E = 22\text{keV}$ を使用して、プリント基板の内部の Ag 合金および表面の Cu 箔の残留応力、温度サイクル中の熱応力のその場測定をトライアルユースで行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) マシンタイムの大部分は、プリント基板における金属配線部の測定条件の決定に費やされた。その結果、パターン D において、一つのビアを対象として、材料内部の金属配線部の応力を測定すること可能であり、その測定条件はほぼ確立できた。測定時の試料揺動は不可欠である。

- (2) 測定条件決定後には、パターン D の 1 ビアについて 1 熱サイクルについて測定した。Ag 合金については、室温では圧縮で、120℃では大きく低減され、また室温にもどすと大きな圧縮に戻る。この結果は定性的には予測される結果であった。
- (3) 一方、Cu 箔については 120℃での測定は誤差が大きかった。また、室温での残留応力についても引張が測定されている理由が不明である。

これらの結果に基づいて今後課題・計画として次の項目がある。

- (4) 今回の測定結果と、有限要素法 FEM の計算結果との比較を行う。
- (5) Cu に関しては、ラボの X 線で表面応力測定を行う。
- (6) Spring-8 での測定に関して、再度同様の測定を行うとともに、測定精度の向上を検討することが必要である。
- (7) Ag 合金については、X 線的弾性定数の実測を行い測定値の精度を上げる。
- (8) 今後はパターン D について断面での測定を行うことも考える。
- (9) 今回の測定では、測定条件の決定のため当初予定していた、熱サイクル損傷を受けた基板の測定はできなかった。これについては今後測定する計画を立てる。

Four types of specimens

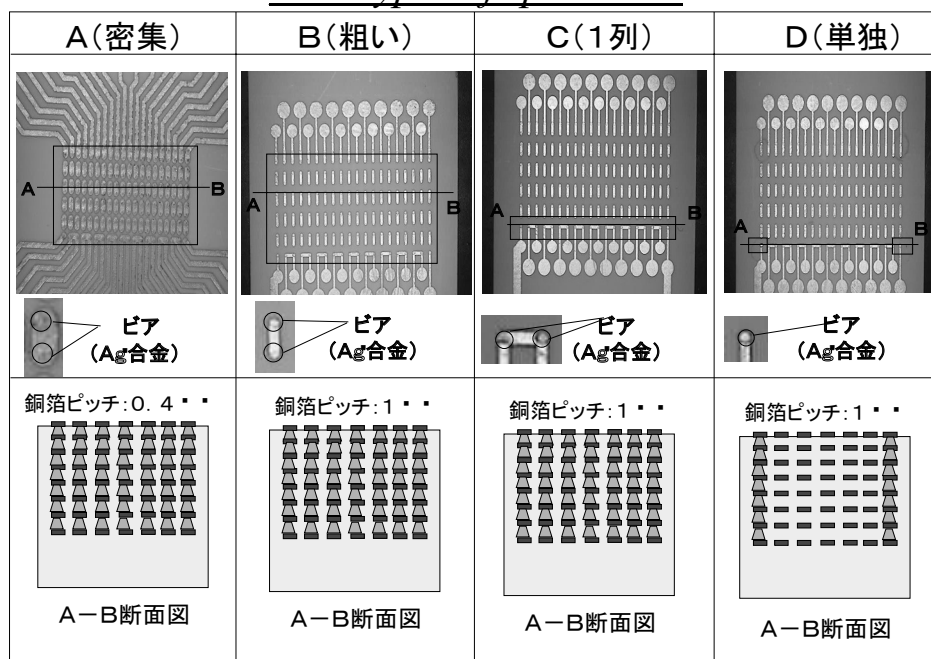


図1 応力測定用に準備した4種類のプリント基板

放射光測定サンプルの寸法

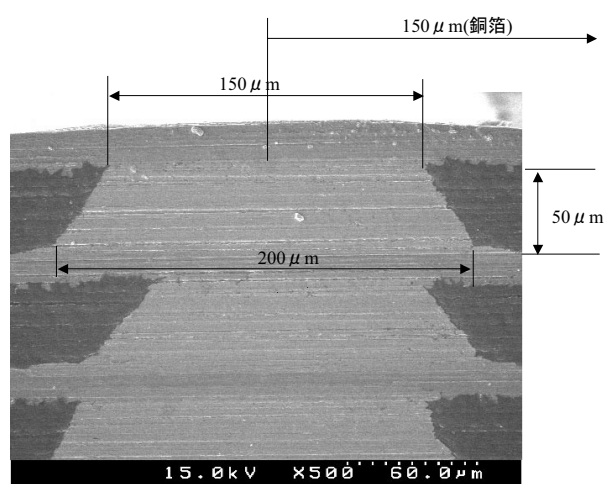


図2 放射光サンプルの一つのビアの断面

BL46XU

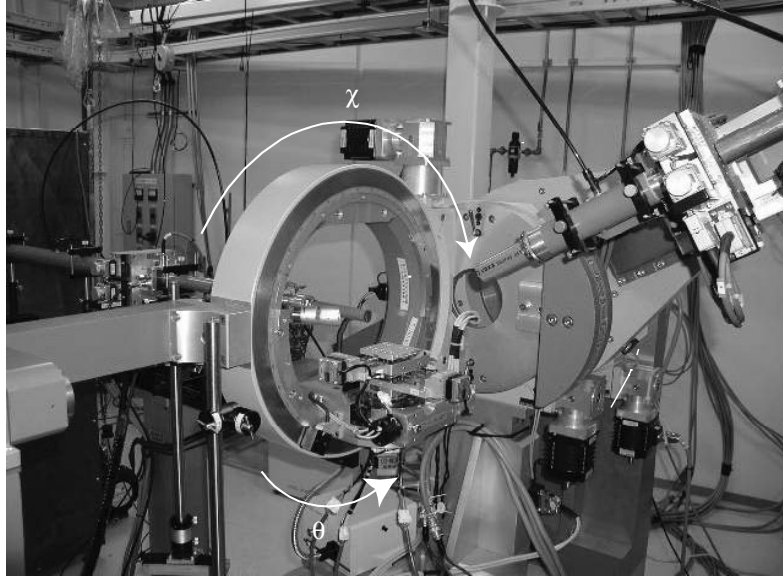


図3 ビームライン BL46XU の概観

Specimen stage in BL46XU

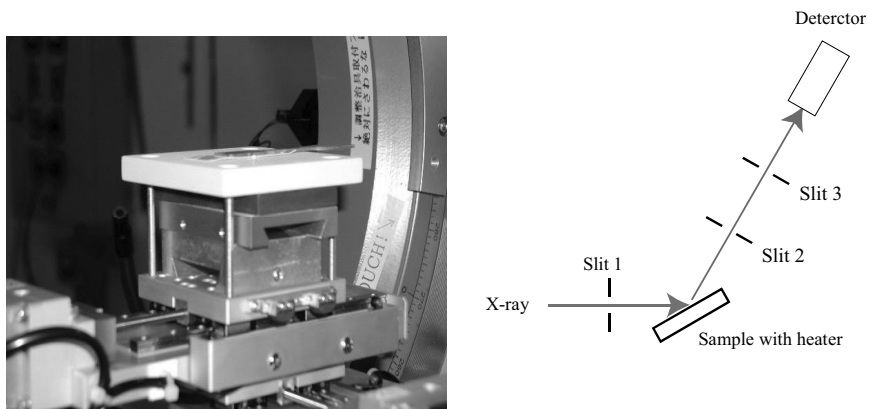


図4 試料台部(加熱装置付き)

Stress calculation

The $\sin^2\psi$ method

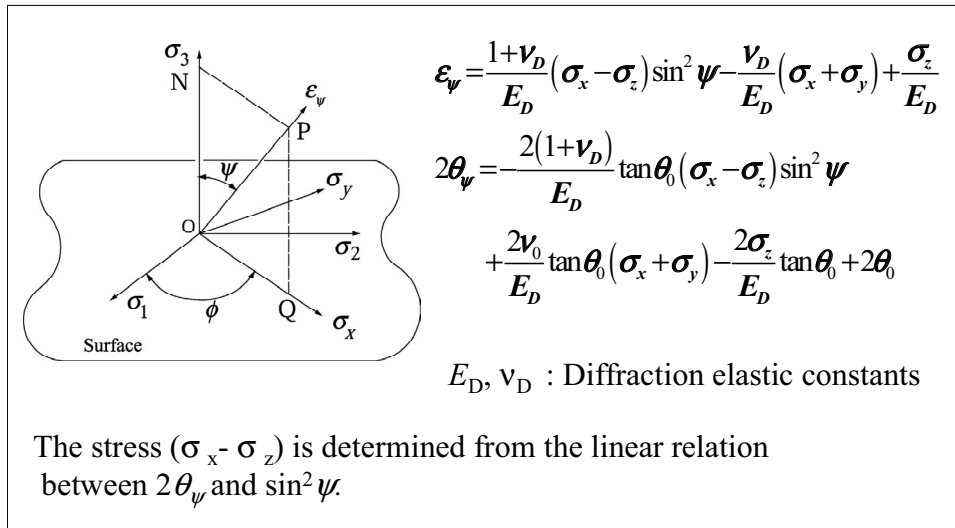
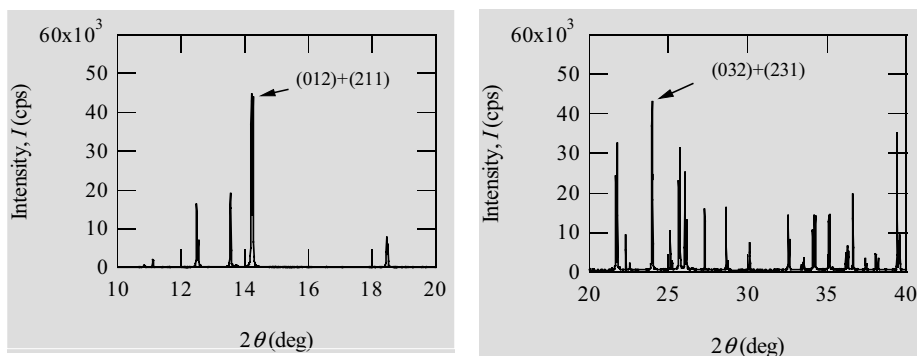


図5 $\sin^2 \psi$ 法における応力計算式

X-ray profiles of Ag alloy

Diffraction from the bulk sample



$$E = 22\text{keV}$$

図6 金属配線部材料の銀合金回折プロフィール

Rocking curve of Ag alloy

211+012 diffraction angle $2\theta = 14.2\text{deg}$

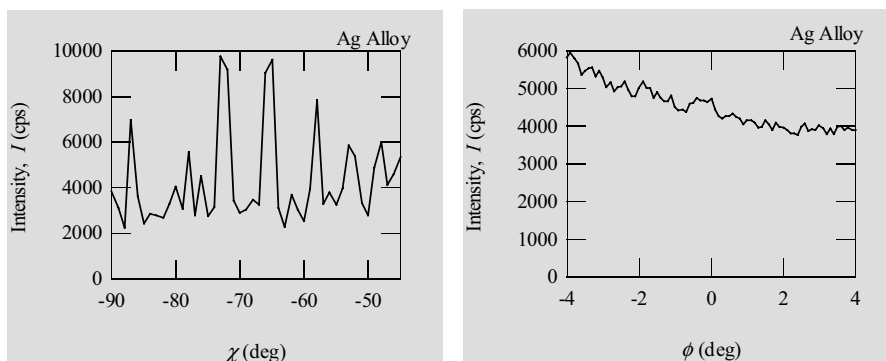
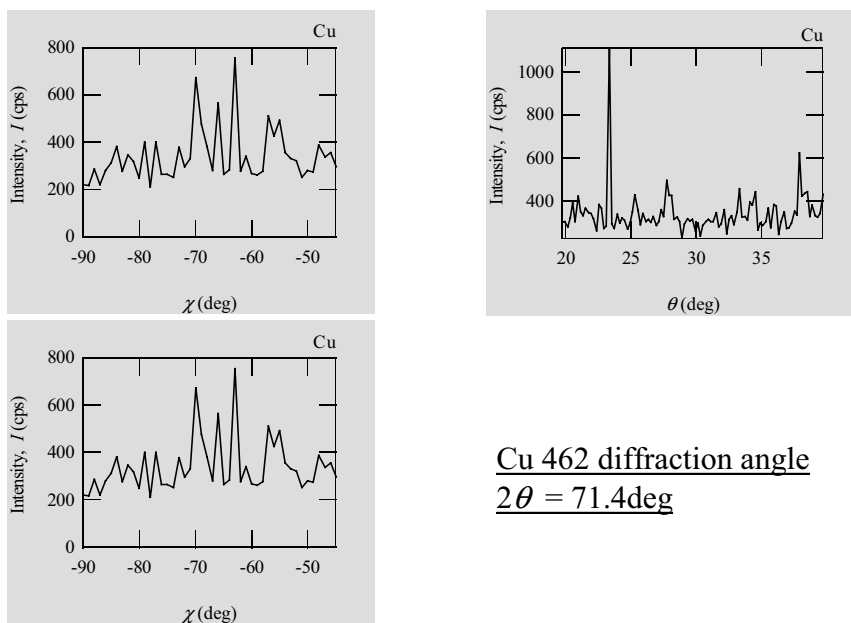


図 7(a) Ag 合金のロッキングカーブ

Rocking curve of Cu film



Cu 462 diffraction angle
 $2\theta = 71.4\text{deg}$

図 7(b) Cu 箔のロッキングカーブ

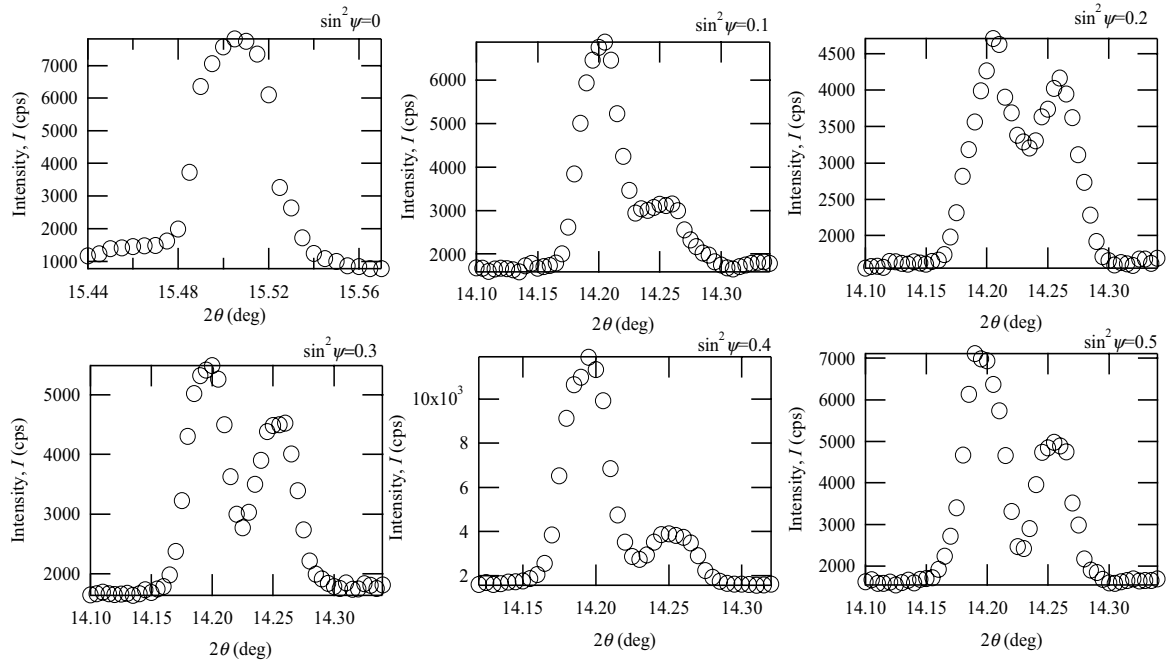


図 8(a) プリント基板 (タイプ D) の加熱前室温での Ag 合金のプロファイル

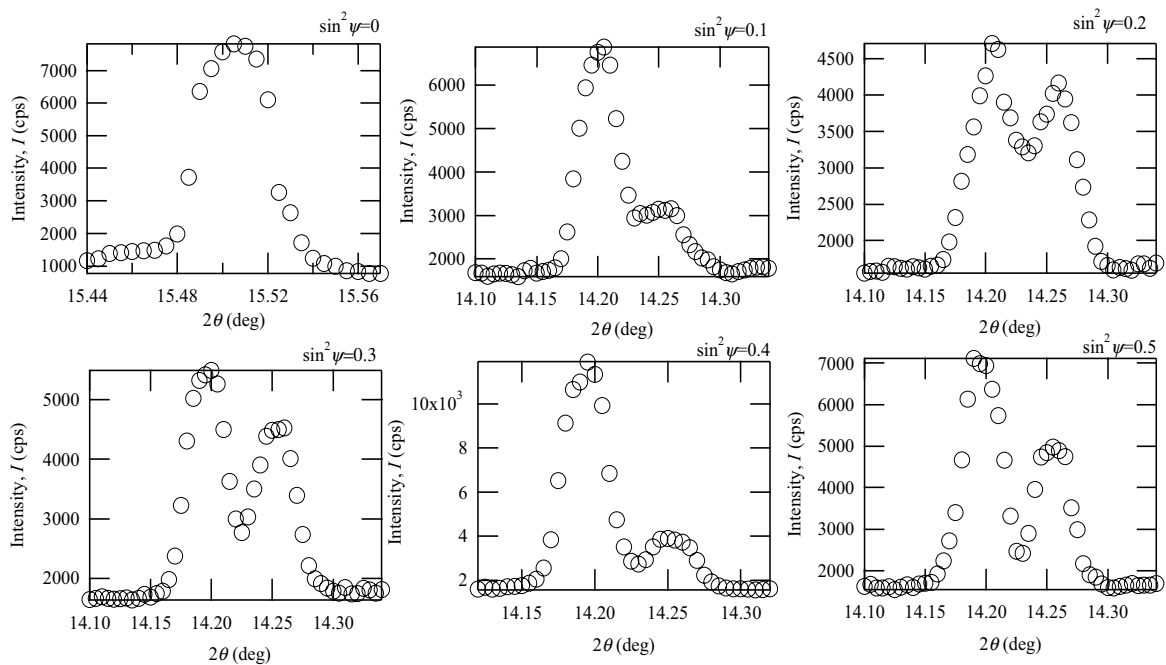


図 8(b) プリント基板 (タイプ D) の 120°C 加熱時の Ag 合金のプロファイル

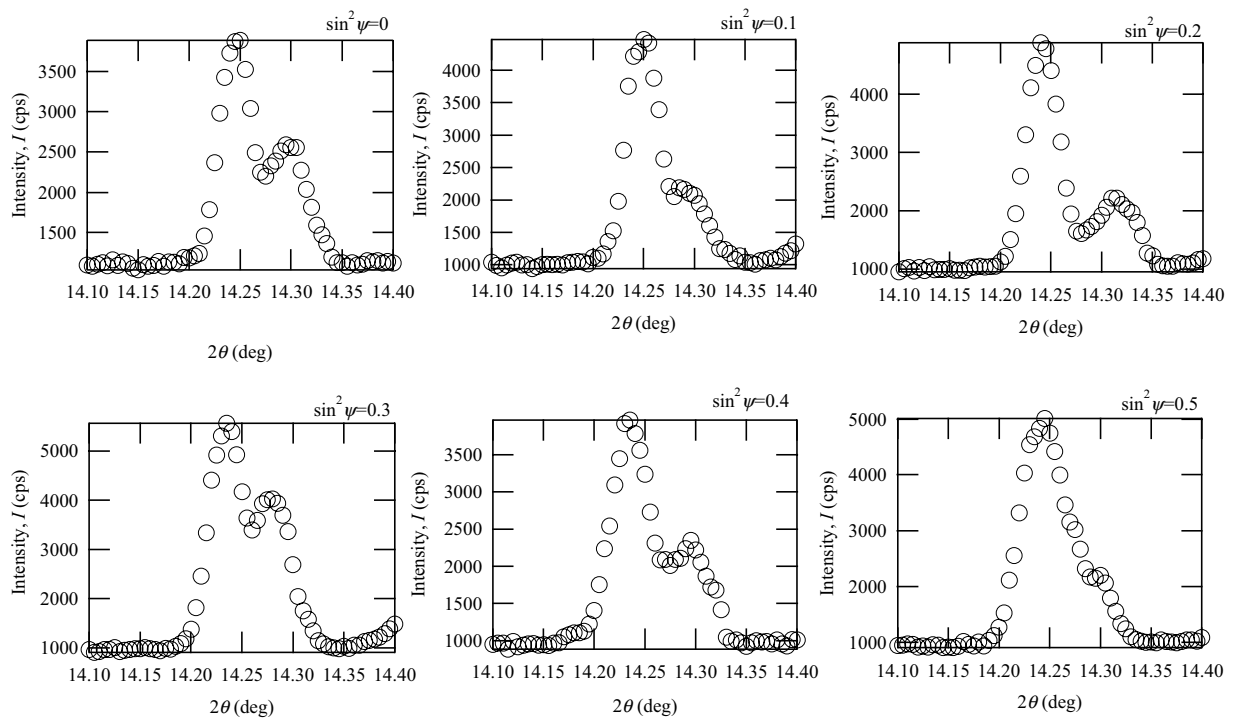


図 8(c) プリント基板 (タイプ D) の加熱後室温での Ag 合金のプロファイル

$2\theta - \sin^2\psi$ diagrams of Ag alloy

211diffraction $2\theta = 14.23$ deg

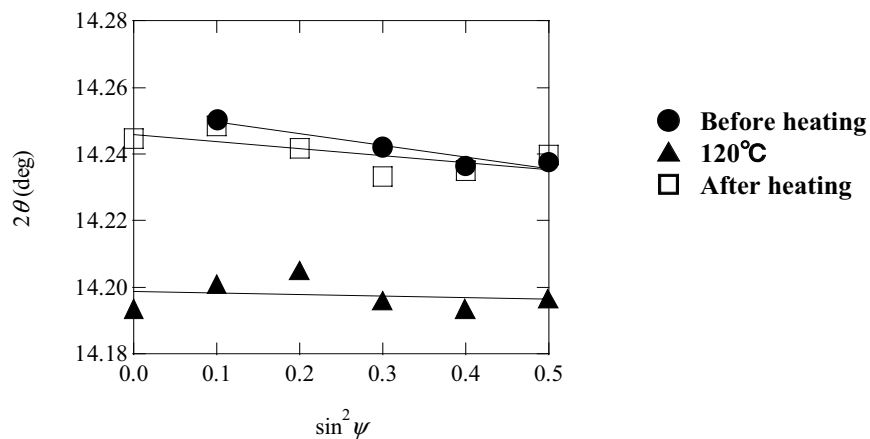


図 9(a) Ag 合金の $\sin^2\psi$ 線図 (211 回折)

2θ - $\sin^2\psi$ diagrams of Ag alloy

012 diffraction $2\theta=14.306\text{deg}$

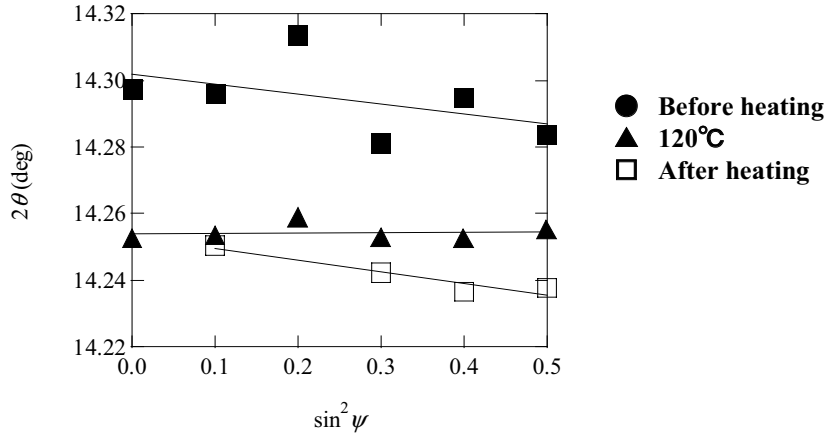


図 9(b) Ag 合金の $\sin^2\psi$ 線図 (012 回折)

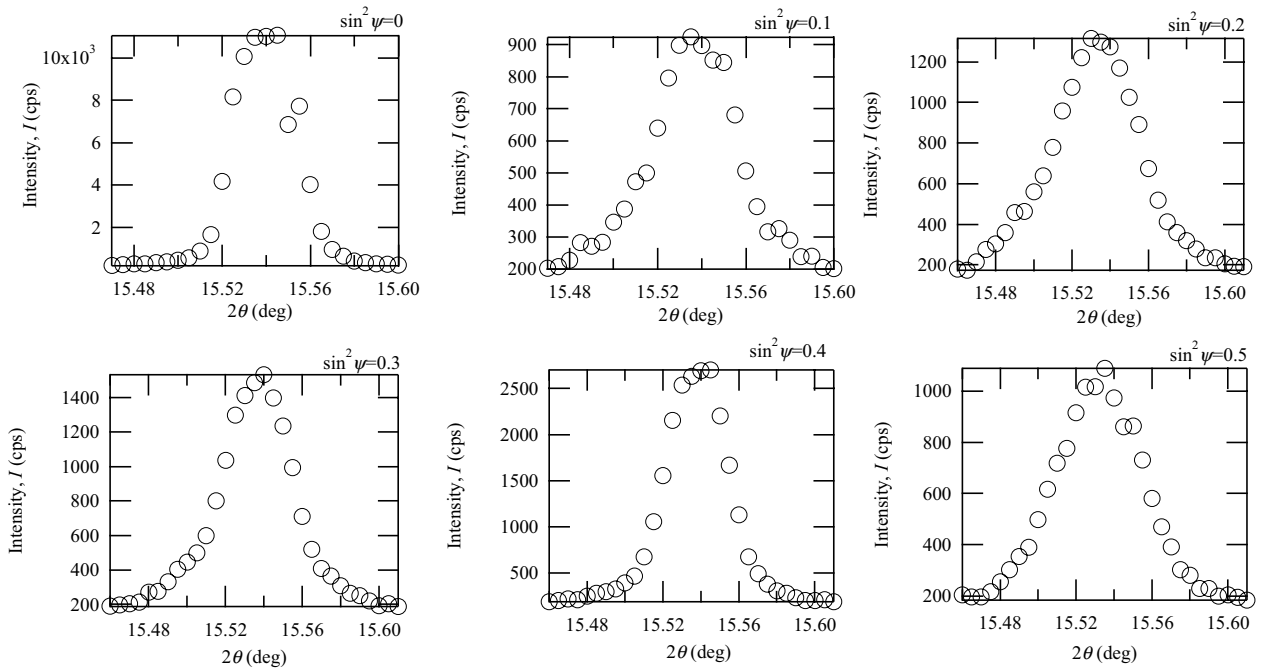


図 10(a) プリント基板 (タイプ D) の加熱前室温での Cu のプロフィール

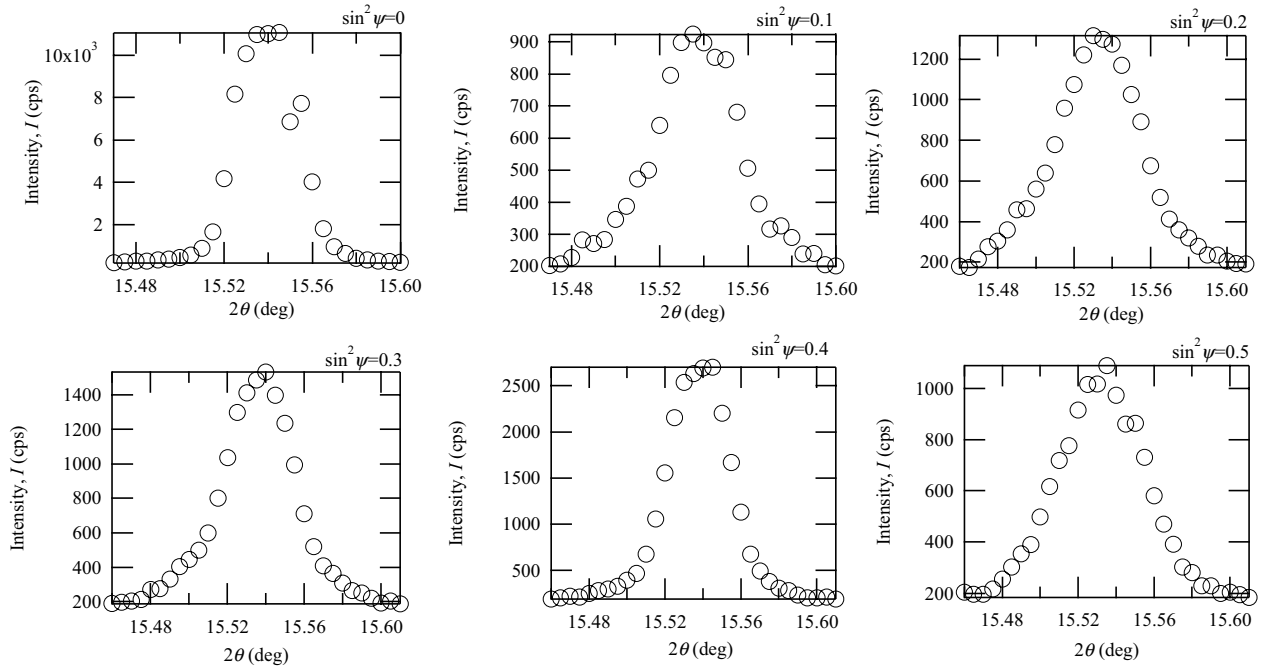


図 10(a) プリント基板 (タイプ D) の 120°C 加熱中の Cu のプロフィール

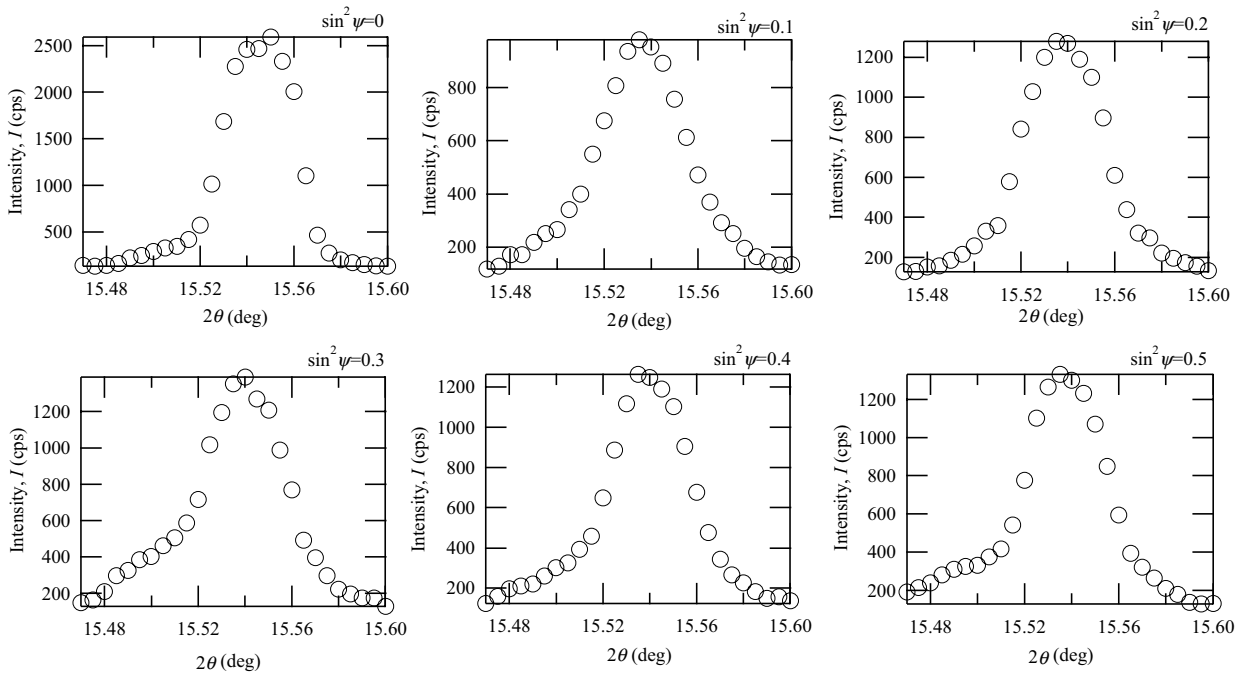


図 10(a) プリント基板 (タイプ D) の加熱後室温での Cu のプロフィール

$2\theta - \sin^2 \psi$ diagrams of Cu film

Cu 111 diffraction $2\theta = 15.52$ deg

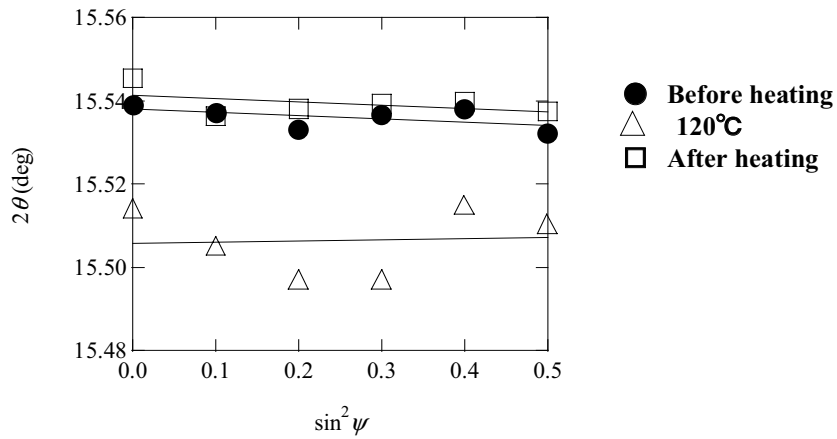


図 11 Cu の $\sin^2 \psi$ 線図 (111 回折)

表 1 放射光により測定した応力値

Measured stress values

$$\sigma_x - \sigma_z$$

Material	Stress (MPa)		
	Before heating	At 120°C	After heating
Ag alloy 211 diffraction	84.7	11.1	50.9
Ag alloy 012 diffraction	81.9	-3.1	71.4
Cu film 111 diffraction	61.4	-24.9	63.1