

# 高密度ポリエチレンと単結晶シリコンの複合成形による 超薄型赤外線レンズの高精度加工

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科  
教授 閻 紀旺

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016016)

キーワード：樹脂，シリコン，赤外線レンズ，プレス成形

## 1. 研究の目的と背景

従来、赤外線光学分野において単結晶シリコン (Si) や単結晶ゲルマニウム (Ge) を基板としたレンズが使用されてきた。これらの材料は赤外線領域で屈折率が高く、屈折率の波長分散が少ないためレンズ材料として適しているが、フレネルレンズやマイクロレンズアレイなどの薄型の複雑形状への加工が非常に困難である。超精密旋盤による切削加工が必要であり、非常に長い加工時間を要する。そして材料の硬度が高いため、工具摩耗が非常に激しく、生産コストも増加する。特にフレネルレンズのような回折形状の切削加工は、先端の非常に尖った特殊なダイヤモンド工具を使用するため、工具摩耗が特に大きな問題となる。

近年、より切削加工しやすい赤外線透過材料例えば ZnSe や ZnS などを使用されているが、有害物質に該当するため、レンズ加工においては防護措置が必要不可欠であり、生産コストや安全性の問題が残されている。一方、モールドプレス成形が可能なカルコゲナイドガラスが開発され、ZnS や Si をレンズ基材として、その表面に回折面や非球面を形成したカルコゲナイドガラスを薄肉レンズ層として一体化させた赤外線複合レンズも提案されている<sup>1-3)</sup>。しかし、カルコゲナイドガラスを成形するには 400°C 以上の高温が必要なため、超合金製の金型が必要になり、金型の加工コストが高い。また、高温プレスによって金型の使用寿命が短い問題もある。

上記課題を解決するために、本研究では、半導体基板として使用されている単結晶 Si ウエハの片面あるいは両面に、赤外線透過樹脂 (高密度ポリエチレン, HDPE)<sup>4)</sup> からなる薄肉レンズ層をプレス成形によって結合させた超薄型 (厚さ<1mm) 赤外線複合レンズを提案する。単結晶 Si ウエハは比較的安価に入手できる。また、HDPE 樹脂を用いたフレネルレンズ、マイクロレンズアレイなどの薄肉レンズ層は低温 (200°C 以下) で容易に成形することができるため、銅やアルミ、ニッケルメッキなどの金属金型が使用可能になり、金型の使用寿命も長い。これにより、レンズの生産コストの大幅な低減が可能である。さらに、薄肉の HDPE 樹脂層が単結晶 Si 基板を内包するレンズ設計によって、レンズ全体の結合強度が向上し、外部からの衝撃を緩和できるメリットもある。また、単結晶 Si 基板の高剛性により、HDPE 単体のレンズに比べてレンズ変形が生じにくく、精度の保証が容易になる。

## 2. 実験方法

### 2・1 レンズ設計

図 1 に本研究で成形する複合レンズの構造を示す。図 1 (a) のようにプレス成形によって単結晶 Si ウエハを HDPE で包み、図 1 (b) のように HDPE の表面にレンズ形状を転写することで赤外線複合レンズを成形する。

### 2・2 使用材料

表 1 に従来の HDPE (樹脂 A) と新たに開発された樹脂 (樹脂 B) の両者の材料特性を示す。図 2 は樹脂 A と樹脂 B の赤外線透過率の比較をしたものである。樹脂 B は接着促進剤を含有していないため樹脂 A に比べて波長 9~10 μm (人体感知領域) 付近の透過率が高いことがわかる。

### 2・3 実験装置

プレス成形過程を図 3 に示す。高精度プレス成形装置 GMP-211 ((株) 東芝機械製) を使用し、加熱温度とプレス圧力を変化させて実験を行った。

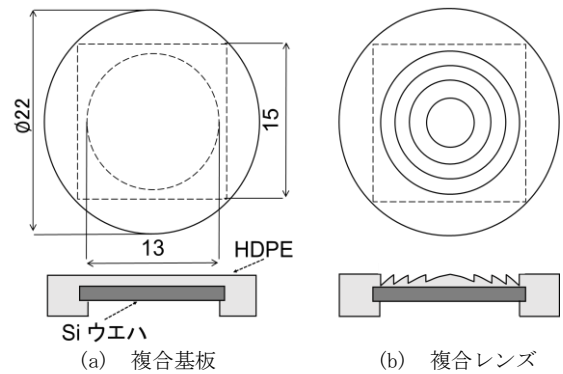


図 1 Si-HDPE 複合基板と複合レンズ

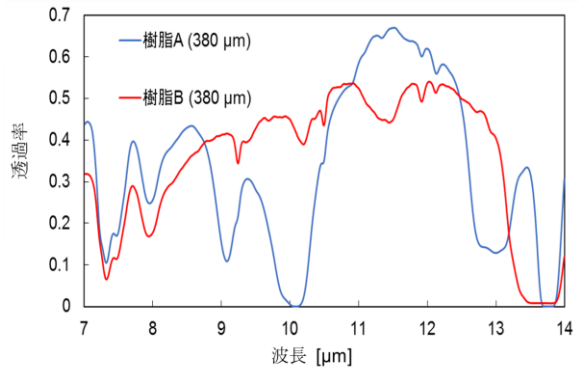


図 2 樹脂 A と樹脂 B の赤外線透過率比較

表1 樹脂Aと樹脂Bの材料特性

	樹脂A	樹脂B
融点 [°C]	129.5	132.5
形状	粒	シート
サイズ [mm]	φ3×3.5	15×15×0.5
接着促進剤	内部混合	含有しない

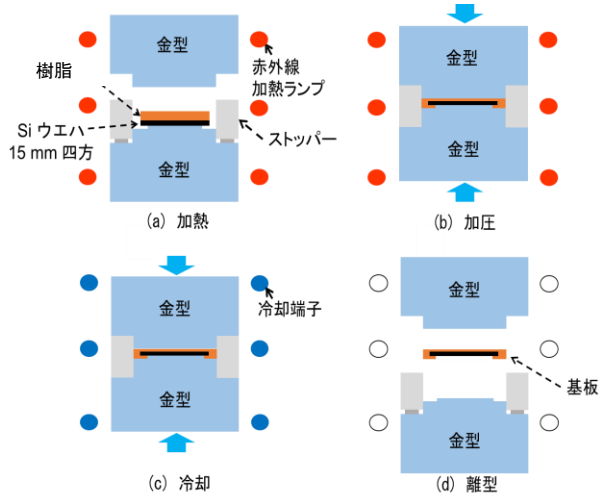


図3 プレス実験過程

表2 加熱温度を変化させる実験条件

加熱温度 [°C]	160, 180, 200, 220, 240
プレス圧力 [kN]	0.3
冷却温度 [°C]	90
プレス時間 [分]	5

表3 プレス圧力を変化させる実験条件

加熱温度 [°C]	180
プレス圧力 [kN]	0.5, 1.0, 1.5
冷却温度 [°C]	90
プレス時間 [分]	5

また、接着促進剤を使用せずに、単結晶Siウエハと樹脂の接着状況を確認した。表2および3に実験条件を示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 マイクロレンズアレイの成形

図4にマイクロレンズアレイ形状を樹脂Aに転写した結果を示す。Siと樹脂の複合構造において、マイクロレンズアレイ形状を樹脂に転写できていることがわかる。図5に転写された形状を三次元で測定した結果を示す。転写面が平滑であることが確認できる。図6に、プレス圧力を変えて転写した場合のレンズ高さの比較を示す。図6より、レンズ高さは46μmであることがわかる。冷却収縮を考慮して金型には高さ49μmをあらかじめ加工したことで、目標値とほぼ同等の46μmの高さを得ることができた。

#### 3.2 複合フレネルレンズの成形

図7にフレネルレンズ成形用金型、図8にプレス圧力による転写精度の変化、図9にプレス圧力による加工深さの

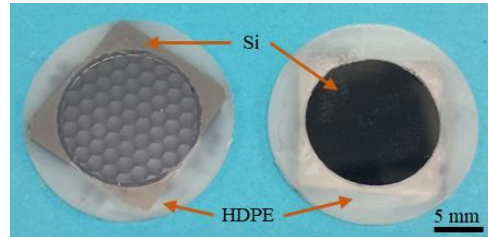


図4 成形した赤外線複合マイクロレンズアレイ

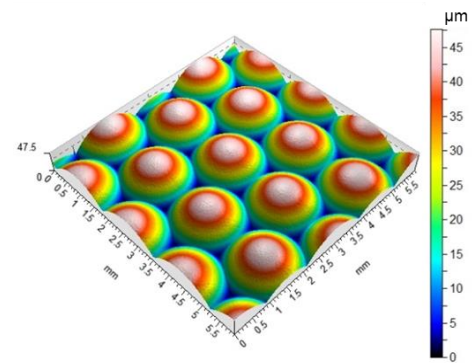


図5 転写したマイクロレンズアレイの3次元測定結果

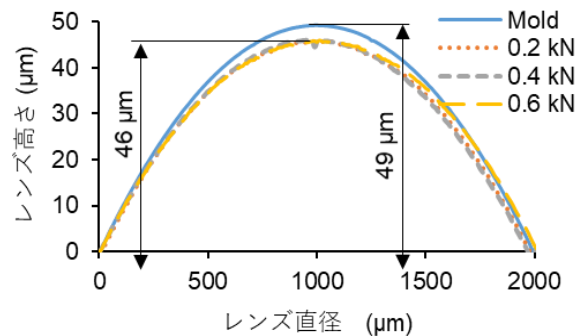


図6 プレス圧力によるマイクロレンズ高さの違い



図7 フレネルレンズ用金型

影響を示す。さらに、図10にフレネルレンズ形状を樹脂に転写した結果一例を示す。図11に、金型形状と転写形状の断面プロファイルを示す。成形条件の適正化を行った後に転写した結果、金型と同等な形状を得ることができた。

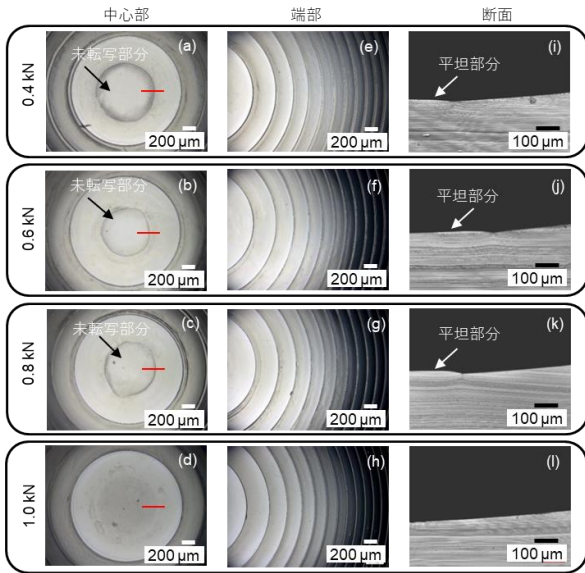


図8 プレス圧力による転写精度の影響

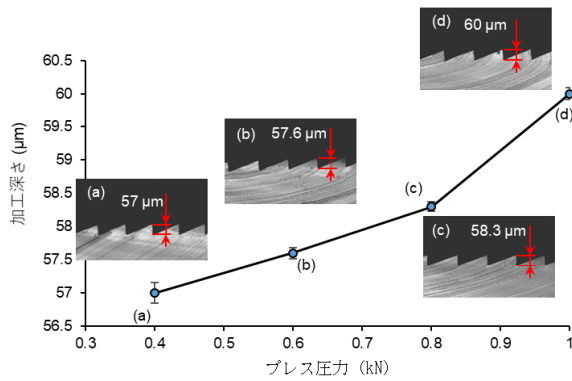


図9 プレス圧力による加工深さの影響

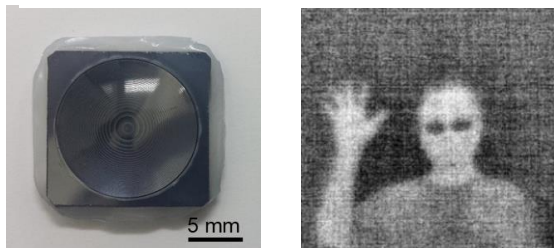


図10 試作した複合フレネルレンズとそれによる暗視画像

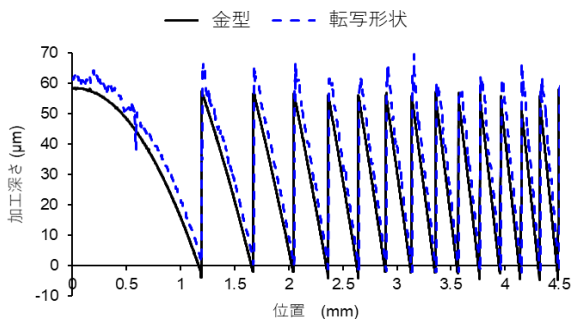


図11 金型形状と転写形状の断面プロファイル

### 3・3 樹脂種類の影響

樹脂Aを用いた複合レンズは波長10 μm付近において透過率が低いという問題があった。そこで、透過率改善を目

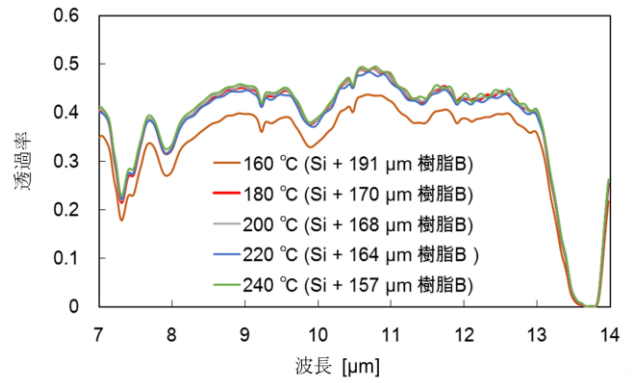


図12 赤外線透過率への加熱温度の影響

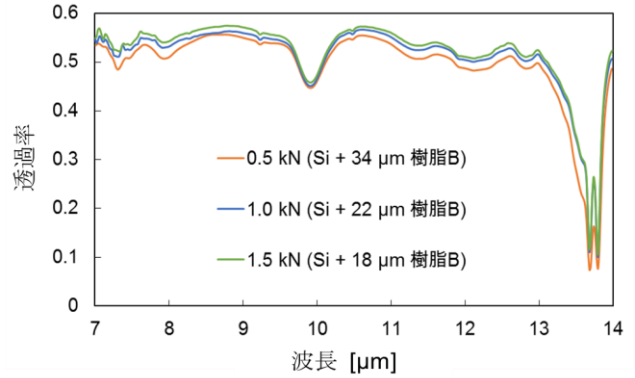


図13 赤外線透過率へのプレス圧力の影響

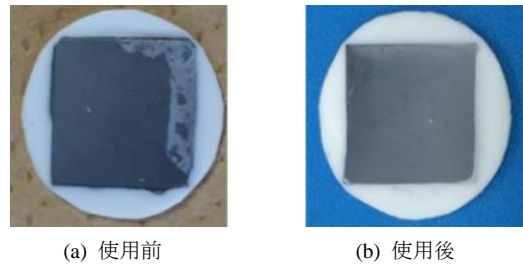


図14 接着促進剤の使用による接着向上

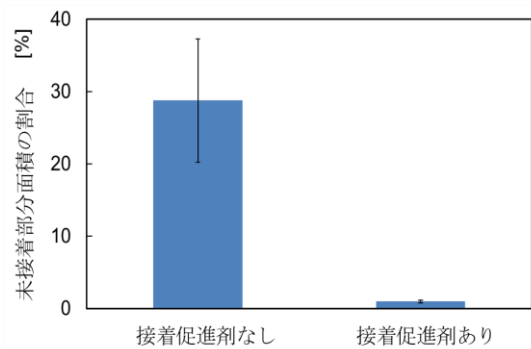


図15 赤外線透過率へのプレス圧力の影響

的として新たな樹脂Bを用いて成形実験を行い、樹脂Aとの透過率の比較を行った。複合基板の赤外線透過率への加熱温度の影響を図12に、プレス圧力の影響を図13に示す。グラフの縦軸は透過率、横軸は波長を表している。波長の測定範囲は赤外線カメラに一般的に用いられる7~14 μmとした。

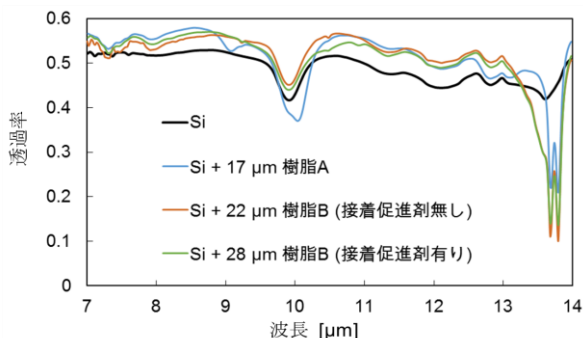


図 16 樹脂種類と接着促進剤有無による影響

図 12 の結果より、加熱温度が 160~180 °C では赤外線透過率の向上が見られる。これは加熱温度が高いほど樹脂の粘性が下がり、樹脂の厚さが薄くなっているためである。しかし、180 °C 以上では薄くなっても透過率は向上していない。これ以上加熱する場合は樹脂の分子が切れることによる劣化が考えられるため、できるだけ低い温度が好ましいと考えられる。したがって、透過率の向上に適正な加熱温度は 180°C 付近であると言える。次に、加熱温度を 180°C に固定し、プレス圧力を変化させた。図 13 の結果より、0.5~1.0 kN まで透過率は上昇しているものの 1.0~1.5 kN では樹脂の厚さはあまり薄くならず、透過率に大きな変化はない。また、1.5 kN で成形した複合基板には亀裂が生じ、圧力が強すぎると判明した。したがって、本研究の条件において、単結晶 Si ウエハと樹脂の結合を確保しつつ赤外線透過率の向上に適正なプレス圧力は、1.0 kN 付近であると言える。

しかし、図 14 (a) からわかるように、成形された複合基板には、単結晶 Si ウエハと樹脂 B の間に未接着部分がある。これは、有機物である樹脂は有機物同士しか反応せず、無機物である単結晶 Si ウエハとは接着の相性が優れないために生じたものであると考えられる。そこで接着の改善策として、有機物と無機物の界面に接着促進剤であるシランカップリング剤<sup>5,6)</sup>を導入して成形した。成形した複合基板を図 11 (b) に示す。接着促進剤の有無で、全面積に対する未接着部分の面積割合を比較したものを図 15 に示す。未接着部の解消に成功し、単結晶 Si ウエハと樹脂 B の全面接着の基板が得られた。

上記において求めた 2 つの成形条件で、接着促進剤を使用した場合としない場合での樹脂 B を用いた複合基板と、樹脂 A を用いた複合基板でそれぞれの赤外線透過率の比較を図 16 に示す。接着促進剤を用いた場合でも樹脂 B を用いた複合基板では、樹脂 A を用いた複合基板と比べて波長 10 μm 付近で透過率が向上している。また、波長 13 μm 以上の波長域での透過率が低いが、この波長域で放射強度が強く、主に検知されるのは -50 °C 前後の物体であるため、人体検知機能には影響ないと考えられる。

したがって、樹脂 B を用いた複合基板は赤外線複合レンズとして応用されるのに十分な赤外線透過率を持ち、単結晶 Si のみで製造された赤外線レンズと同等な画質を得る

可能性があると考えられる。

#### 4. 結論

単結晶 Si と高密度ポリエチレン樹脂 (HDPE) を結合させた赤外線光学用複合構造体をプレス成形により製作を試みた結果、以下の結論を得た。

- (1) 樹脂表面にマイクロレンズアレイおよびフレネルレンズの微細形状を高精度に転写することができる。
- (2) 接着促進剤を含有しない赤外線透過樹脂を用いて複合基板を成形した場合、透過率が向上するような成形条件は加熱温度 180°C、プレス圧力 1.0 kN である。
- (3) 接着促進剤を単結晶 Si ウエハと樹脂の界面のみに用いることで、複合基板の波長 10 μm 付近の透過率が改善され、従来の赤外線 Si レンズ同等以上の透過性を得ることができる。

#### 謝 辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団平成 28 年度一般研究開発助成を受けて行われたものである。ここに記して、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) R. A. Soref, S. J. Emelett and W. R. Buchwald, Silicon waveguided components for the long-wave infrared region, *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 8, (2006) 840-848.
- 2) T. Grulois, G. Druart, N. Guérineau, A. Crastes, H. Sauer, and P. Chavel, Extra-thin infrared camera for low-cost surveillance applications, *Opt. Letters*, 39, 11, (2014) 3169-3172.
- 3) L. Shen, N. Healy, C. J. Mitchell, J. S. Penades, M. Nedeljkovic, G. Z. Mashanovich, and A. C. Peacock, Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides, *Opt. Letters*, 40, 2, (2015) 268-271.
- 4) N. E. Claytor, R. N. Claytor, "Polymer Imaging Optics for the Thermal Infrared," *Proceeding of SPIE*, Vol. 5406, pp. 107-113, 2004.
- 5) Y. Xie, C. A. S. Hill, Z. Xiao, H. Militz and C. Mai, Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites, *Com., A*, 41, (2010) 806-819.
- 6) M. Hashizume, S. Fukagawa, S. Mishima, T. Osuga and K. Iijima, Hot-Press-Assisted Adhesions between Polyimide Films and Titanium Plates Utilizing Coating Layers of Silane Coupling Agents, *Langmuir*, 32, 47, (2016) 12344-12351.