

薄型基板における複屈折制御の検討

Study on control of birefringence for a thin disk replication

今井 哲也, 志田 宜義, 菅 圭二, 飯田 哲哉

Tetsuya Imai, Noriyoshi Shida, Keiji Suga, Tetsuya Iida

要 旨 高密度薄型基板の射出成形において,ディスク性能に影響を与える複屈折値の制御と低減が求められている。そこで,筆者らは成形技術の立場から複屈折の発生原因のひとつである熱応力に着目し,金型キャビティ表面の温度分布を変化させることによる複屈折の制御および複屈折値を最小とするための金型キャビティ表面温度分布を射出成形用CAE解析ソフトを用いて検証を行ったので報告する。

Summary On a high density thin disk replication process by an injection molding, it is necessary to control and decrease a birefringence value, which has an influence on the disk performance. Therefore we took aim at the thermal stress which was caused the birefringence. And then we studied the relation between the birefringence and the temperature distribution of the mold cavity surface by using the injection molding CAE.

キーワード: CAE, 射出成形, 高密度薄型基板, 複屈折制御, 流動残留応力, 熱応力, 表面温度分布, 成形中の金型キャビティ

1. はじめに

現在,光ディスクシステムとして,赤色レーザー(波長650nm付近)を使った4.7GBの容量を持つDVDディスクがある。筆者らは,青色半導体レーザー(波長400nm付近)を用い,さらに高密度な容量を持った次世代DVDディスクシステム実現のための検討を行っている。このような光ディスクの高密度化に伴い,射出成形において作られる薄型基板には以下の4つの課題がある。

1. 反りの制御と適正化
2. 複屈折の低減
3. 転写形状の向上
4. 面内の板厚みばらつきの低減

特に,レーザー波長が大幅に短波長化されることによって,ディスクの再生信号に影響を与える複屈折の制御と低減が重要な課題となってくる。

そこで,本稿では,射出成形用CAE解析ソフト

を用い,このCAE解析ソフトが光ディスク成形の複屈折解析に適合するのかを検討し,その後,複屈折の発生原因の一つである熱応力に着目し,成形中の金型キャビティ表面の温度分布を変化させることによる複屈折制御の可能性と複屈折を最小値とするための金型キャビティ表面温度分布を解析したので報告する。

2. ポリカーボネート基板の複屈折

ポリカーボネート(以下PCと略す)は光ディスク基板材料として広く用いられている。その理由は,光線透過率が高い,吸水による寸法変化が少ない,耐熱性があり,強度も高いなどの利点がある。しかし,その反面,PCは他の樹脂と比べて光弾性係数が高い(表1参照)ことから,わずかな応力がかかっても複屈折を生じやすいという欠点がある。

したがって、PCを光ディスク基板として用いる場合、複屈折低減が重要となってくる。

表1 樹脂の光弾性係数

樹脂	光弾性係数 ($\times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{Kgf}$)
ポリカーボネート	71
アクリル	-5.9
非晶質ポリオレフィン	6.4
光学ガラス(参考)	0.49

2.1 薄型基板に発生する複屈折要因

通常、光ディスク基板は射出成形あるいは射出圧縮成形によって作られる。それらの基板の複屈折は図1に示すように、流動残留応力による複屈折(図1(a))と熱応力による複屈折(図1(b))から

構成されており、これら両者がバランスして基板の複屈折を形成している^{(1),(2)}。また、複屈折とともに成形基板の課題として反りがあり、両者の発生メカニズムには図2に示すような関係がある。

図1,2に示す流動残留応力とは、射出充填・保圧から金型内での冷却時に発生し、ミクロには樹脂の高分子鎖の挙動と関わる。すなわち、流動応力によって引き伸ばされて配向した高分子鎖が流動停止後に絡み合い状態に戻る途中で固化すると、高分子鎖に生じていた引張り応力が緩和しきれずに凍結されて残留することになる。

一方、熱応力とは、基板冷却時の金型キャビティ表面の温度分布不均一から生じ、基板の反り・収縮変形挙動とトレードオフの関係にある。(図2参照)すなわち、固化した基板は金型や大気

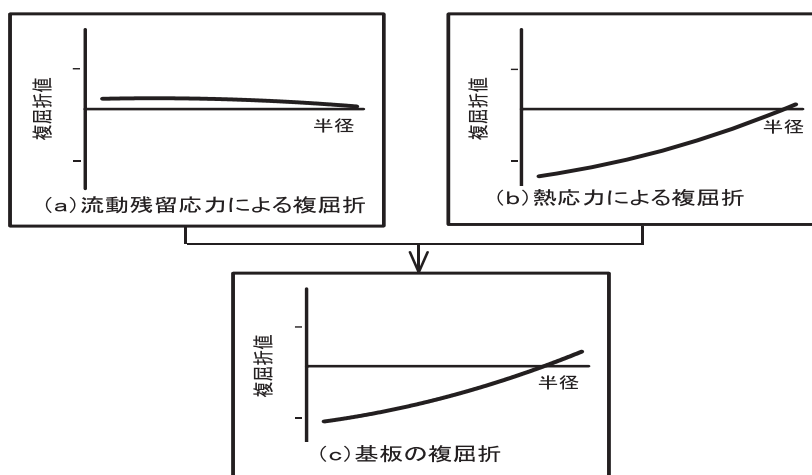


図1 薄型基板に発生する複屈折要因

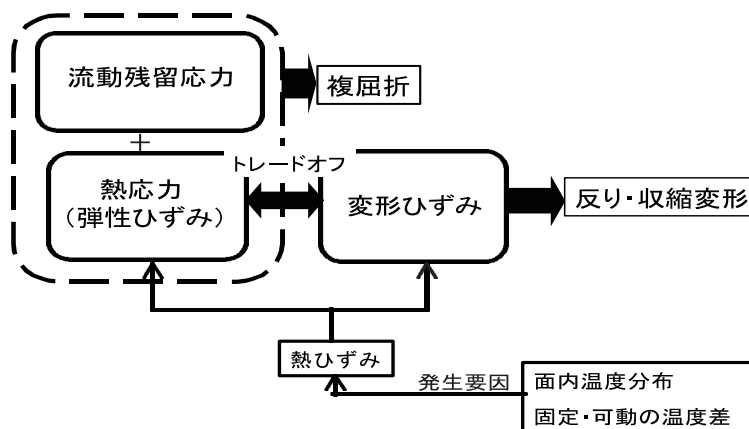


図2 成形基板の複屈折と反りの発生メカニズム

により、さらに冷却され、この冷却過程における温度変化に伴い熱収縮(熱ひずみが発生)する。この熱ひずみは、その一部が基板の反り・収縮変形として開放され、変形として解放されずに残った熱ひずみが熱応力として基板に残留することになる。(実際には、樹脂の粘弾性特性により熱ひずみの一部は、クリープひずみとして緩和される。)

したがって、冷却に伴い発生する熱ひずみに応じて自由に基板が変形した場合には、熱応力は残留しないことになる。しかし、実際にはスプルー冷却溝、キャビティ冷却溝、パンチ冷却溝の位置や温度、スタンパーの有無、エア層の存在などが大きく影響し、金型キャビティ表面の温度分布は不均一となる。これによって、基板は内周から外周の温度差、固定側と可動側の温度差、板厚方向の温度分布などが生じ、自由に変形できずに熱応力が残留することになる。

2.2 現状の薄型基板の複屈折

現状では、薄型基板は主に射出圧縮成形によって作られている。薄型基板の複屈折の一例を図3に示す。この図より、半径方向における複屈折分布の挙動は内周部でマイナスの値を最も大きく示し、外周に行くに従い減少し、最外周部付近ではプラスの値となることがわかる。

一般的にPCの複屈折は引張り応力に対してはプラスを、圧縮応力に対してはマイナスを示す⁽³⁾。したがって、射出圧縮成形において作られた薄型基板が図3のような複屈折を示すのは、内周部において大きな圧縮応力が残っており、外周部に行くに従い圧縮応力が減少し、最外周部付近では引張り応力が増加していることを示唆する。

薄型基板の成形では、溶融PCは中心部のゲートより半径方向に流れるラジアルフローの形態をとる。そのため、高分子鎖は半径方向に配向しやすくなる。さらに、基板の厚みが従来の1.2mmか

ら半分の0.6mmになったことによって、溶融PCは短時間で固化する。これらによって、大きな流動応力が半径方向に残留する。

また、PCの流動残留応力による光弾性係数と熱応力による光弾性係数を比較すると、表2に示すように前者の方が後者よりも2桁ほど大きな値となる。したがって、わずかな流動残留応力であっても複屈折が生じやすい。すなわち、複屈折への影響度は流動残留応力の方が大きいことを示している。

以上の理由により、PCを用いて作られた薄型基板の複屈折は、流動残留応力が支配的であると考えられてきた。

しかし、前項で示したように、流動残留応力は高分子鎖に生じていた引張り応力が緩和しきれずに凍結されたものであり、圧縮応力が生じることはない(ただし、最外周部では、外周リングがあるために樹脂の跳ね返り現象や流動が周方向となるために圧縮応力が生じることがある)。したがって、流動残留応力による複屈折が支配的であるとすると、実際の複屈折の傾向と相反することになる。

一方、熱応力は冷却過程における温度変化に伴う熱収縮が発生の要因となっている。そのため、反り・収縮変形の拘束のされ方によって、圧縮応力または引張り応力のどちらかが生じる。すなわ

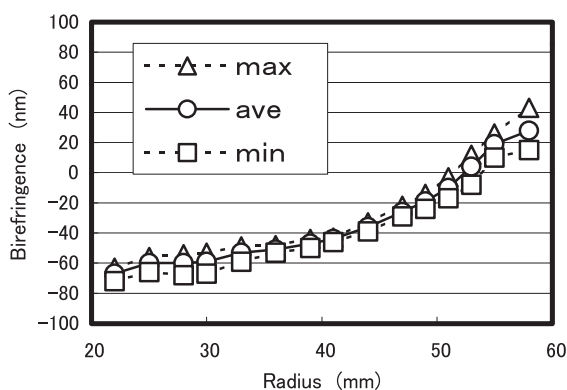


図3 薄型基板の複屈折例

表2 光弾性係数の比較

樹脂	光弾性係数 (cm ² /Kgf)	
	流動残留応力起因	熱応力起因
ポリカーボネート	3.62 × 10 ⁻⁴	8.25 × 10 ⁻⁶

ち，熱応力による複屈折は，プラスおよびマイナスの両方の符号を持つことになる。

また，上記に示したように薄型基板の成形ではラジアルフローの形態をとるため，基板は内周部の温度が高く，外周に行くに従って温度が低くなる。したがって，熱収縮量は内周部が最も大きく，外周に行くに従って減少する。この現象は，実際の複屈折の傾向とも一致する。

以上のことから，射出圧縮成形によって作られる薄型基板の複屈折は，熱応力による複屈折が支配的であると推測される。

3. 複屈折解析結果

3.1 CAEによる複屈折の求め方

解析には，現在市販されているプラメディアリサーチの射出成形用CAEソフト，プラネッツ97を用いて行った。なお，薄型基板成形における複屈折および反りを精度良く解析するためにソフト改造，使用する樹脂物性データなどの検討を行った。

今回使用したCAEは，充填開始から離型までの金型内の溶融樹脂の挙動を解析後，流動残留応力解析と反り（熱応力）解析を行うことができる。そこで，以下の方法で薄型基板の複屈折を求めた。初めに，解析条件を変更し，金型内の溶融樹脂の挙動を解析後，流動残留応力解析および反り解析から基板に生じる各々の残留応力分布を求めた。次に，得られた残留応力分布から主応力差を求め，式(1)に示す応力光学則より各々の複屈折値を求め，式(2)より薄型基板に発生するトータルの複屈折値を算出した。

$$n=C(\sigma_1-\sigma_2)t \quad \dots\dots (1)$$

n : 複屈折値

C : 光弾性係数(応力光学係数)

σ_1 : 半径方向に生じる応力

σ_2 : σ_1 に垂直な方向に生じる応力

t : 光路長(基板の板厚)

$$n_t = n_F + n_{TH} \quad \dots\dots (2)$$

n_t : トータルの複屈折値

n_F : 流動残留応力による複屈折値

n_{TH} : 熱応力による複屈折値

3.2 実験結果とのマッチング

表3に主な実験条件を示す。この条件を基に，金型温度を変更し，直径120mm，厚み0.6mmのディスクを成形した。また，成形中の金型キャビティ表面温度を測定するために，熱電対を金型キャビティ内に埋め込み，測定結果をCAE解析に用いた。図4に複屈折の測定結果を，図5に解析結果を示す。両図より，金型温度が高くなると半径方向における複屈折値はゼロに近づくことがわかる。また，内周から外周への複屈折の変化量が少なくなることがわかる。この傾向は実験結果と解析結果で一致している。

以上の結果より，前記射出成形用CAEが光ディスク成形の複屈折解析に適することが確認できた。

表3 実験条件

Polymer	Polycarbonate
Melting temperature	385 °C
Cooling off time	5.0 sec
Mold clamping force (max)	26.8 t

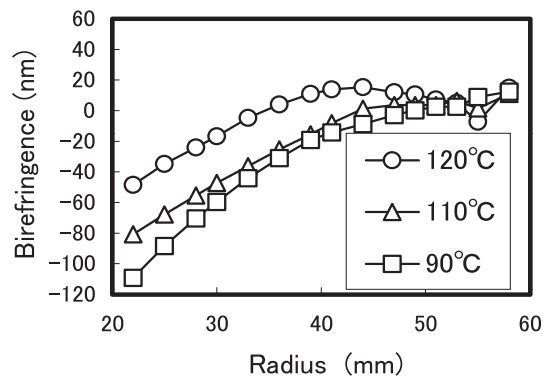


図4 実験結果

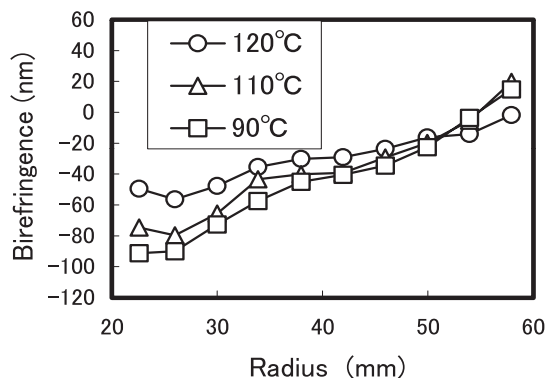


図5 解析結果

3.3 流動残留応力と熱応力の割合

2.2項で薄型基板の複屈折は、熱応力が支配的であると推測した。そこで、薄型基板に流動残留応力と熱応力による複屈折がどの程度生じるのかをCAE解析で求めた。なお、解析は表3の条件を用い、金型温度は110℃設定のときの実測値を用いた。

図6に流動残留応力による複屈折を、図7に熱応力による複屈折を示す。両図より、熱応力による複屈折の方が流動残留応力による複屈折よりも2桁以上大きな値となっていることがわかる。また、熱応力による複屈折の傾向は、基板の複屈折の傾向と一致することがわかる。

以上より、薄型基板に発生する複屈折は、熱応力による複屈折が支配的であることが確認できた。したがって、この熱応力による複屈折を制御すれば、薄型基板の複屈折も制御が可能であることがわかる。すなわち、薄型基板の複屈折を制御するには、熱応力の発生要因である成形中の金型キャビティ表面の温度分布を制御しなければならない。

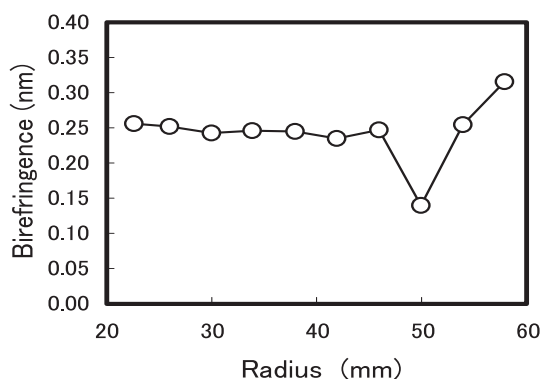


図6 流動残留応力による複屈折

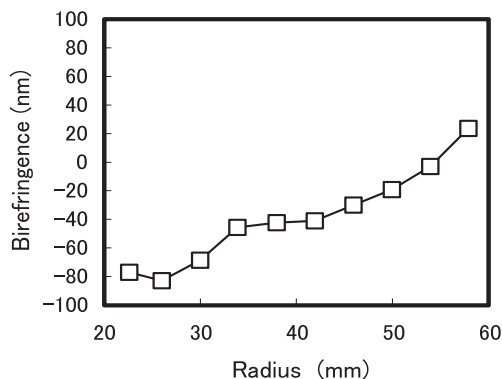


図7 熱応力による複屈折

そこで、今回の解析では熱応力の発生に影響度が高いと考えられる以下に示す4つの温度分布に着目し、複屈折の挙動を求めた。

1. 半径方向に温度分布がある場合
2. 内周部にのみ温度変化がある場合
3. 外周部にのみ温度変化がある場合

3.4 半径方向に温度分布がある場合

複屈折解析に用いた金型キャビティ表面の半径方向の温度分布を図8に示す。なお、周方向は各径で同じ温度とした。また、これらの温度分布は、固定側と可動側で同じ分布になっている。その他の条件は、表3の条件を用いた。

図8の金型キャビティ表面の温度分布より求めた半径22mm～59mmの複屈折の解析結果を図9に示す。この図から、半径方向の表面温度分布によって、複屈折の傾向が変化することがわかる。また、内周から外周への複屈折の挙動は表面温度分布とは逆の傾きになることがわかる。

さらに、図8のNo.1と図9のNo.1の関係から

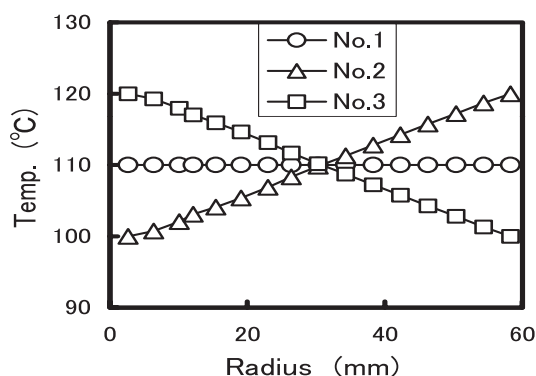


図8 キャビティ表面温度分布

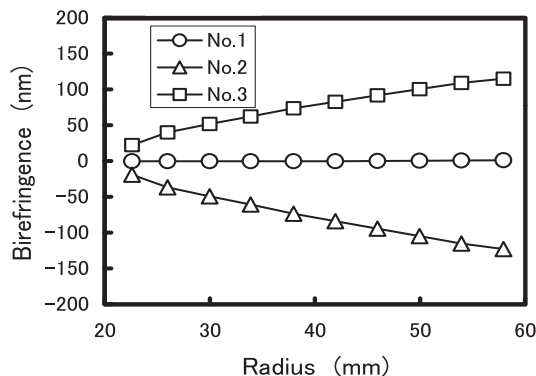


図9 複屈折解析結果

金型キャビティ表面をすべて同じ温度にすれば、複屈折が最小値になることがわかる。

3.5 内周部のみに温度変化がある場合

実際の基板成形では、中心部のスプルーとパンチの設定温度は60と低くなっている。また、成形基板の特性を向上させるためにスプルーの温度を変更することがある。そこで、内周部の温度変化が複屈折の挙動にどのような影響があるかを解析した。

解析に用いた固定側(スプルーを有する)の半径方向の温度分布を図10に示す。なお、可動側の半径方向の温度分布は図10に示すNo.2のまま変更しなかった。その他の解析条件は前項と同じである。

図10に示す金型キャビティ表面の内周部のみに温度変化がある場合の複屈折の挙動を図11に示す。これらの図より、金型キャビティ表面の内周部の温度によって、半径方向の複屈折は変化することがわかる。また、金型キャビティ表面の内周部の温度変化は、内周部の複屈折のみに影響す

るのではなく、内周から外周までの全ての半径方向の複屈折に影響することがわかった。

3.6 外周部のみに温度変化がある場合

金型キャビティ表面の外周部は、固定側鏡面板と可動側鏡面板の形状の違いや別パーツとなっている外周リングがあるために、他の部分とは温度が異なっていると考えられる。そこで、外周部のみに温度変化がある場合の複屈折の挙動を解析した。

図12に解析に用いた可動側の半径方向の温度分布を示す。なお、固定側の半径方向の温度分布は、110一定とした。その他の解析条件は前項と同じである。

複屈折の解析結果を図13に示す。これらの図より、金型キャビティ表面の外周部の温度が高くなると、複屈折値はマイナスに大きくなり、温度が低くなるとプラスに大きくなることわかる。また、外周部の温度変化は、外周部の複屈折のみに影響を及ぼすことがわかる。

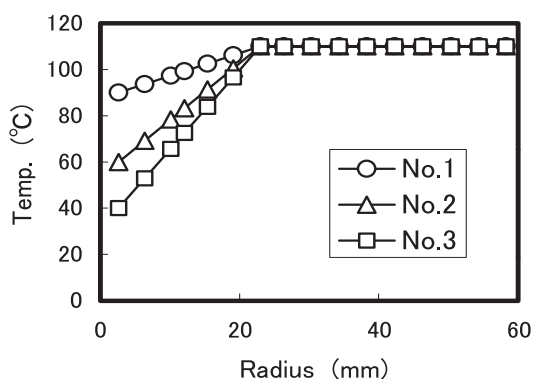


図10 キャビティ表面温度分布

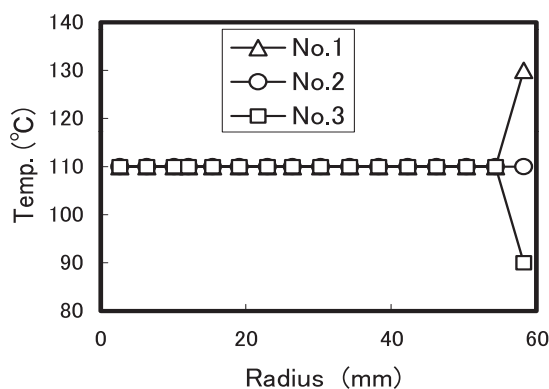


図12 キャビティ表面温度分布

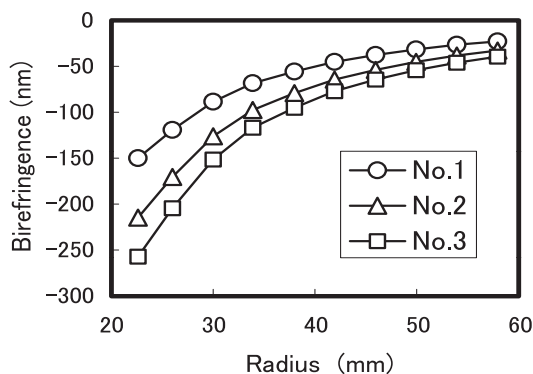


図11 複屈折解析結果

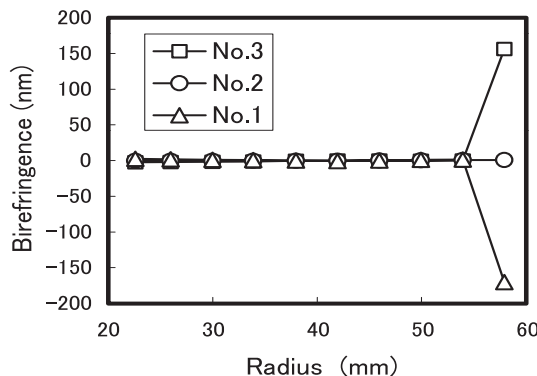


図13 複屈折解析結果

4. まとめ

今回、射出成形用CAE解析ソフトを用い、複屈折の発生原因のひとつである熱応力に着目し、解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

1. 射出成形用CAEが光ディスク成形の複屈折解析に適する。
2. 薄型基板に発生する複屈折は、熱応力による複屈折が支配的である。
3. 成形中の金型キャビティ表面の温度分布を変化させることにより複屈折は制御可能である。
4. 成形中の金型キャビティ表面の温度分布を全面均一にすれば、複屈折が最小値になる。
5. 金型キャビティ表面の内周部または外周部のみに温度変化があると、半径方向の複屈折挙動に影響を及ぼし、その影響度は、内周部のみに温度変化があると大きい。

参考文献

- (1) 柴田, 金井, 小島:「塑性と加工」第32巻(1991-12)
- (2) (株)プラメディアリサーチ:「プラネットマニュアル」
- (3) 井出:「オプトエレクトロニクスと高分子材料」P17 ~ 25, P122 ~ 130

筆者

今井 哲也(いまい てつや)

- a. 研究開発本部・総合研究所・ディスクシステム研究部
- b. 1991年4月
- c. 光ディスク基板生産技術および開発、次世代光ディスクレプリケーション技術の研究に従事

志田 宜義(しだ のりよし)

- a. 研究開発本部・総合研究所・ディスクシステム研究部
- b. 1993年4月
- c. オーディオ回路設計、次世代光ディスクレプリケーション技術の研究に従事

菅 圭二(すが けいじ)

- a. 研究開発本部・総合研究所・ディスクシステム研究部
- b. 1986年4月
- c. 光ディスク基板生産技術および開発、次世代光ディスクレプリケーション技術の研究に従事
- d. 薄型基板成形技術として役に立つ技術報告書だと思えます。

飯田 哲哉(いいだ てつや)

- a. 研究開発本部・総合研究所・ディスクシステム研究部
- b. 1981年4月
- c. ポリマーグラファイト振動板の開発、コンパクトディスクの開発、相変化光ディスクの開発、マスタリングプロセスおよび光ディスク成形技術に従事
- d. 得意分野: 光ディスクプロセス、光ディスク材料全般