平板の曲げの解を用いた光ディスク反り検査手法*

堀 口 隆 三^{*1}

Optical Disk Tilt Inspection by Using a Flat Plate Bending Solution

Ryuzo HORIGUCHI^{*2}^{*2} Kao Corporation, Processing Development Research Laboratories,
2606, Akabane, Ichikaimachi, Haga, Tochigi, 321-3497 Japan

Tilt inspection is getting more and more important in the replication process of optical disks such as CD-ROMs, DVDs, etc. to ensure high speed disk drives. In this work, a solution of the bending equation for a circular flat plate is applied to the conventional optical disk tilt inspection. The warped shape of an optical disk is expressed well in this solution. This makes the following new applications. (1) The disk shape is expressed in a simple expansion series. This enables to record the shape of every inspected disk by only using several coefficients. (2) Checking a series of coefficients of every disk enables to detect each disk's particular shape in a production lot. (3) Estimation of temperature distribution, axial acceleration and deflection is simple using only a few sensors in fixed radial positions. (4) Detection of imperfectly bonded spots of DVDs is possible, ... and so on.

Key Words: Production Management, Measurement, Residual Stress, Optical Disk, Tilt Inspection, Bending Equation, Tilt Angle, Axial Acceleration, Temperature, Imperfectly Bonded Spots

1. 緒言

光ディスクドライブの高速化に伴って DVD, CD-ROM 等の光ディスクの製造工程では、反りがより小さく平坦な製品の製造が求められている。本研究は光ディスクの反り角検査で、測定形状の数式近似を用いた力学的な分析により製造プロセス状態の分析、監視および記録に有用な情報を与えることを目標としている。

図1に典型的な CD-ROM 製造ラインにおける製造と全数検査工程の概要を示す。まず信号ピットを持つ基板が射出成形で作られ、ピット面にはスパッタリングにより反射膜が形成され、この上に保護膜が形成される。DVD-ROM の場合、さらに 0.6mm 厚さの単板 2 枚の

貼合わせが実施されて製品となる。次に読み出しエラーの原因となる数十～数百 μm の異物や欠陥が検出され、不合格品が排除される。さらに光ディスクドライブ中で光ピックアップのレーザ光がディテクタに正確に戻ることの保証等のために、反り角検査が行われる。検査では光ディスクに平行光を当てて反射光の戻り角の

Fig.1 Typical CD-ROM replication process

* 原稿受付 1999 年 11 月 1 日.

^{*1} 正員, 花王(株)加工・プロセス開発研究所 (〒329-3497 栃木県芳賀郡市貝町赤羽 2606).

E-mail: 303344@kastanet.kao.co.jp

ずれを測定する。この際の規格上の許容値は CD-ROM で 1.2° 、DVD では 0.6° と厳しい。この他にエラー率、信号の変調度、光ピックアップの加速度等に関する抜き取り検査が行なわれる。^{(3),(4),(5)} 反りの原因には、①射出成形、スパッタリング等で基板が熱負荷を受けた後の収縮、②保護膜の収縮や DVD の貼り合せ工程等による曲げ、③DVD 貼り合せディスクでの接着層の部分剥離等が考えられる。

主な記号

r : 半径位置, θ : 角度位置, z : 板厚方向 (軸方向) 座標, w : 板厚方向変位 (反り, Axial deflection), Δ : ラプラシアン, e_r, e_θ, e_z : 半径方向, 周方向, 板厚方向の単位ベクトル ($e_z = e_r \times e_\theta$),

$\beta_{rad} (= \alpha_{rad}/2)$, $\beta_{tan} (= \alpha_{tan}/2)$: 反り角の半径方向成分 (図 4 参照) および周方向成分, α_{rad} , α_{tan} : 反射光が正規位置からずれる角度の半径方向成分 (図 4 参照) および周方向成分, D : 曲げ剛性, E : ヤング率, ν : ポワソン比, h : 板厚, $\tilde{\rho}$: 基板の密度, $\tilde{g}$: 重力加速度, q : 単位面積あたりの分布荷重, q_0 : 自重による無次元分布荷重, $\tilde{L}_r$: 代表長さ, $\tilde{D}_r$: 代表曲げ剛性, r_e : ディスクを検査装置の回転スピンドルに固定する半径位置 (図 3(b) 参照), N : 打ち切り項数, N_r , N_θ : 半径方向および周方向の測定点数, t : 時刻, ω : ディスクの角速度, $\tilde{\alpha}$: 線膨張係数, $\tilde{\tau}$: 基板上下面の温度差 ((上面温度) - (下面温度)), [添え字]~ : 有次元量, ~なし : 無次元量, M : 測定値, i : 測定半径位置, j : 周方向の角度位置

転強ディスクを回す。反り角の測定は 1 回転の間に 200-300 回、すなわち 200-300 点の角度刻みで行う。通常、光源と PSD の組は 2 または 3 個所の半径位置に配置される。なお、図 2 の角度位置 θ は反時計まわりを正方向とするが、測定の際に光源と PSD の組を θ の正方向に回転するかわりにこれらを固定し、“Rotation”のようにディスクを時計方向に回転させている。

Fig.2 Optical disk and coordinate system

Fig.3 Tilt inspection system

2. 反り検査装置の概要と反り角の定義

図 2 に光ディスクと座標系、図 3 に検査装置の概要を示す。典型的な検査装置では LED 光源からの平行光線をディスクに当て、反射光が正規位置からずれた角度 α の半径方向成分 α_{rad} と周方向成分 α_{tan} を図 3 (a) の Position sensing device (以下 PSD と略記) で測定する。この際に図 3 (b) のチャック装置を用いてディスクの内周に重りまたは吸着による保持力 F_z を 1 周にわたり加えてディスクを検査装置の回転スピンドルに固定し、1 回

図 4 は図 3 の検査装置で測定される半径方向反り角の定義である。回転軸の方向 e_z と直交する基準面 (Reference plain) の法線 PN_1 に対し角度 ϕ で入射した検査光 IP は平坦なディスクの場合、 rz 面内で PR_1 方向に反射される。一方、反射膜の法線が rz 面内で PN_2 となるディスクでは検査光は PR_2 方向に反射される。検査装置では PN_1 と PN_2 のなす角 α_{rad} が PSD で測定される。 α_{rad} は反った反射膜が基準面となす角 β_{rad} の 2 倍である。周方向の反り角成分に対しても同様に基準面に対する成分 β_{tan} と法線方向の変化を表す成分 $\alpha_{tan} (= 2\beta_{tan})$ が定義される。規格上

は α 角が規定されるが、以下ではディスクの変位との関係を保つため、 β_{rad} および β_{tan} を反り角の定義とする。

$$\angle IPN_1 = \angle N_1PR_1 = \phi, \quad \angle N_1PN_2 = \beta_{rad}$$

$$\angle IPR_2 = 2\phi + 2\beta_{rad}, \quad \angle R_1PR_2 = \alpha_{rad} = 2\beta_{rad}$$

Fig. 4 Definition of radial tilt

3. 円板の曲げの解による形状近似

3・1 形状の表現 光ディスク反り形状を円板の曲げの式⁽¹⁾(1)の解で近似し、反り角を式(2)と式(3)で表すことにより測定データを表すことを考える。

(板の曲げの方程式)

$$\Delta \Delta w = \frac{q}{D} \quad (1)$$

(反り角)

$$\beta_{rad} = \frac{\partial w}{\partial r} \quad (\text{半径方向}) \quad (2)$$

$$\beta_{tan} = \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (\text{周方向}) \quad (3)$$

ここで、

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (4)$$

$$D = Eh^3/[12(1-\nu^2)] \quad (5)$$

以下では級数の収束性の検討のために式(1) - (3)を無次元化された表現とみなす。無次元化の代表量は

$\tilde{L}_r$: 代表長さ、 $\tilde{D}_r$: 代表曲げ剛性の2つとし、それぞれを光ディスクの外半径および有次元曲げ剛性とした。後者は仕事と同じ次元を持つ。自重による無次元分布荷重を $-q_0$ とするととき q_0 は次式で表わせる。

$$q_0 = \tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{L}_r^4 h / \tilde{D}_r \quad (6)$$

他の量の無次元化は以下の通りである。

$$w = \tilde{w} / \tilde{L}_r \quad (7)$$

$$r = \tilde{r} / \tilde{L}_r \quad (8)$$

$$h = \tilde{h} / \tilde{L}_r \quad (9)$$

$$D = 1 \quad (\text{無次元曲げ剛性}) \quad (10)$$

$$0 < r \leq 1 \quad (11)$$

3・2 反り形状の近似式 方程式(1)で q を $-q_0$ とした場合を満たす変位 w を以下の式を用いて近似する。

$$w = B_0(r^2 - r_c^2) + C_0 \ell_n \frac{r}{r_c} - \frac{1}{64} \frac{q_0}{D} (r^4 - r_c^4) \\ + \sum_{k=1}^N (A_k^* r^k + B_k^* r^{-k}) \cos k\theta \\ + \sum_{k=1}^N (A_k r^k + B_k r^{-k}) \sin k\theta \quad (12)$$

式(12)の右辺の第1項から第3項は非同時方程式(1)の特解、 Σ の付く項は調和方程式の解であり、重調和方程式の一般解⁽¹⁾の一部である。式(12)の項は簡単な式で測定データを表すように経験的に選定した。なお、式(12)ではチャック部($r=r_c$)の変位 w が厳密に0にはならないが、この近傍での変位が微小なため実用上の問題はない。

3・3 反り角の表現と係数の決定 式(2)、(3)および式(12)から反り角は以下の式で表わせる。

$$\beta_{rad} = 2B_0 r + \frac{C_0}{r} - \frac{1}{16} \frac{q_0}{D} r^3 \\ + \sum_{k=1}^N k (A_k^* r^{k-1} - B_k^* r^{-k-1}) \cos k\theta \\ + \sum_{k=1}^N k (A_k r^{k-1} - B_k r^{-k-1}) \sin k\theta \quad (13)$$

$$\beta_{tan} = -\sum_{k=1}^N k (A_k^* r^{k-1} + B_k^* r^{-k-1}) \sin k\theta \\ + \sum_{k=1}^N k (A_k r^{k-1} + B_k r^{-k-1}) \cos k\theta \quad (14)$$

係数 $B_0, C_0, A_k, B_k, A_k^*, B_k^*$ は検査装置による測定データをもとに残差の2乗和 S_0 および S を最小とするよう決定した。

$$S_0 = \sum_{i=1}^{N_R} \left[2B_0 r_i + \frac{C_0}{r_i} - \frac{1}{16} \frac{q_0}{D} r_i^3 - (\overline{\beta_{rad}^M})_i \right]^2 \quad (15)$$

$$S = P \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_{i,j} - (\beta_{rad}^M)_{i,j} \right]^2 + Q \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{i,j} - (\beta_{tan}^M)_{i,j} \right]^2 \quad (16)$$

ここで、

$$(\overline{\beta_{rad}^M})_i = \frac{1}{N_\theta} \sum_{j=1}^{N_\theta} (\beta_{rad}^M)_{i,j} \quad (17)$$

(半径方向反り角の一周平均値)

P, Q : 半径方向および周方向反り角の残差の2乗和に関する重み(半径方向と周方向の反り角の測定値とともに使う場合には $P=Q=1$)

式(12)の係数 B_0 と C_0 は以下のようにになる。

$$B_0 = \frac{S_1 R_2 - N_R S_2}{2(R_1 S_1 - N_R^2)} \quad (18)$$

$$C_0 = \frac{-N_R R_2 + R_1 S_2}{2(R_1 S_1 - N_R^2)} \quad (19)$$

ここで

$$R_1 = \sum_{i=1}^{N_R} r_i^2, \quad S_1 = \sum_{i=1}^{N_R} \frac{1}{r_i^2}$$

$$R_2 = \sum_{i=1}^{N_R} (\overline{\beta_{rad}^M})_i r_i, \quad S_2 = \sum_{i=1}^{N_R} (\overline{\beta_{rad}^M})_i \frac{1}{r_i}$$

$$(\overline{\beta_{rad}^M})_i = (\beta_{rad}^M)_i + \frac{1}{16} \frac{q_0}{D} r_i^3 \quad (20)$$

式(20)の最終式は半径方向反り角測定値の1周平均と自重による反り角の差である。

式(16)の重み P と Q がともに1のとき、変位(反り)に関する式(12)の他の係数は以下の式で与えられる。

$$A_k^* = - \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} r_i^{k-1} [P(T_n)_{i,j} \cos k\theta_j + Q(\beta_{tan}^M)_{i,j} \sin k\theta_j]}{N_\theta k \sum_{i=1}^{N_R} r_i^{2(k-1)}} \quad (21)$$

$$B_k^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} r_i^{k-1} [P(T_n)_{i,j} \cos k\theta_j - Q(\beta_{tan}^M)_{i,j} \sin k\theta_j]}{N_\theta k \sum_{i=1}^{N_R} r_i^{-2(k+1)}} \quad (22)$$

$$A_k = - \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} r_i^{k-1} [P(T_n)_{i,j} \sin k\theta_j - Q(\beta_{tan}^M)_{i,j} \cos k\theta_j]}{N_\theta k \sum_{i=1}^{N_R} r_i^{2(k-1)}} \quad (23)$$

$$B_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_\theta} r_i^{k-1} [P(T_n)_{i,j} \sin k\theta_j + Q(\beta_{tan}^M)_{i,j} \cos k\theta_j]}{N_\theta k \sum_{i=1}^{N_R} r_i^{-2(k+1)}} \quad (24)$$

ここで、

$$(T_n)_{i,j} = 2B_0 r_i + \frac{C_0}{r_i} - \frac{1}{16} \frac{q_0}{D} r_i^3 - (\beta_{rad}^M)_{i,j} \quad (25)$$

なお、旧式の検査装置には半径方向反り角成分だけを測定するものがある。この場合、簡単には式(21)と式(23)で $P=2, Q=0$ とし、 B_k および B_k^* を0とすればよい。これは $P \neq Q$ の場合に式(16)を最小にする条件から得られる連立1次方程式の係数行列が対角成分以外を持ち、 B_k と B_k^* を求めると式が複雑なためである。この処理により旧式の検査装置でも周方向反り角成分の情報の入手が可能となった。なお、式(21)-(24)の導出には

$$\sum_{j=1}^{N_\theta} \sin m\theta_j \sin n\theta_j \cong \frac{N_\theta}{2} \delta_{mn} \quad (26)$$

($m, n=1, 2, \dots, \delta_{mn}$: クロネッカーのデルタ)

等の近似的な直交関係式を用いた。

4. 実験結果

4.1 反り角と光ディスク形状 図5は反り角検査装置によるCD-ROMの測定データを式(13)と式(14)に適用した結果を生データと比較したものである。図5でCD-ROMの反り角分布は円板の曲げの解で良く表せている。反り角測定は55, 40, 25, 32.5mmの半径位置で行ったが、式(18)-(24)の係数の計算に半径位置32.5mmのデータを用いていない。しかし、図5の(b)のように係数の計算に使われない半径位置でも式(13)と式(14)が測定結

果を良く表すことから、式(12)～(14)は全体形状の補間式とみなせる。反り形状が位置によらない係数(式(18)～(24))を用いて表現できることから、CD-ROMは様な曲げ剛性の一枚板であり、角度位置 θ とともに変化する分布荷重は作用していないと言える。

図6は図5のサンプルに関する式(12)による反り量であり、光ピックアップの変位の測定値と一致する。形状の数式表現を使わずに反り角測定データから反り量 w を求める場合、測定半径位置を多くとり $\int \beta_{rsd} dr$ を刻み幅の細かい数値積分で求める必要がある。一方、式(12)の表現はわずか2,3個所の半径位置での反り角測定から数値積分なしに反り量の分布を与えることができる。

(a) R=55mm

(Measured data are used in determination of coefficients in the solution.)

(b) R=32.5mm

(Measured data are not used in determination of coefficients in the solution.)

Fig.5 Tilt angle (CD-ROM, N=15)

(Coefficients in the solution are determined by measurement at R=55, 40 and 25mm.)

Fig.6 Axial deflection by using Eq. (12)

4・2 z 軸方向加速度 光ディスクドライブではサーボ系の応答により、ピックアップがディスクの反り形状に追従する。この際のz軸方向加速度は変位に関する式(12)と以下の式(27)から推定できる。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \omega^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \quad (27)$$

図7には複数サンプルの半径位置40mmにおけるz軸方向加速度について、ピックアップによる実測値と式(27)および式(12)による推定値との間の相関を示す。図7では1周測定中の最大加速度(>0)と最小加速度(<0)がプロットされている。ピックアップによる実測値は小野測器製の機械特性評価装置LM1200で測定した。図7で反り角データから推定された加速度は実測値とほぼ一致している。なお、実測値と推定値の間の若干の違いは反り角検査装置とLM1200の拘束条件の違いによるものと考えられる。ところで、式(12)の和 Σ がN項で打切られることから式(27)で扱える周波数の上限 f_{max} は以下の式で与えられる。

$$f_{max} = N\omega / (2\pi) \quad (28)$$

r : correlation coefficient

Measurement : Axial acceleration of an optical pickup in a disk drive measured by a mechanical tester

Estimation : Estimated axial acceleration by using Eqs.(12) and (27)

Fig.7 Axial acceleration

4・3 DVD 接着状態の分析への応用 CD-ROMでは図5のように反り角分布の位相がそろそろ。すなわち、図5(a)の半径位置で角度位置 θ にある分布のピークが図5(b)でも同じ角度位置に見られる。一方、DVD貼合せディスクでは図8の太線のように反り角分布の位相が半径位置によって異なる場合がある。このとき、図8の"Global"のように式(18)～(24)

の係数をディスク全体に適用しても、測定データを正確に表現できない。そこで、式(21)~(24)の各式の分母と分子にある i に関する和 Σ を取り去った係数(以後、局所係数と略記)を用いて図 8 の細線“Local”のように半径位置ごとに式(13), (14), (21)~(24)を適用すると、測定データを正確に表現できる。以後、このような半径位置ごとの式(21)~(24)の適用を局所補間と呼ぶことにする。DVD 貼合せディスクで反り角分布の位相が半径位置ごとに異なる原因として、(a)接着層の厚み分布や部分剥離による曲げ剛性の不均一、(b)周方向に変化する分布荷重と等価な作用、等が考えられる。ところで貼合せ前の単板では CD-ROM と同様に反り角分布の位相がそろっていることから、貼合せディスクでの半径位置ごとの位相ずれは貼合せ工程に起因すると言える。

(a)R58mm

(b)R24mm

Local : Using eqs.(21) - (24) for each local radius r_i
 (without summation with respect to i)

Global : Applying eqs.(21) - (24) for the entire disk area

Fig.8 Radial tilt of a DVD bonded disk whose bonding condition is not optimized

5. 射出成形直後の周方向温度分布の推定

5・1 温度差の推定 射出成形で作られた光ディスク基板は成形直後には平坦だが、この時点で基板上に温度分布があると熱収縮後に反りが生じる。光ディスクの反りをすべて上記の熱収縮によると仮定した場合、この様子は以下のように簡単にモデル化できる⁽²⁾。

$$\Delta \Delta w = \tilde{\alpha}(1+\nu)\Delta \tilde{\tau} \quad (29)$$

なお、わかりやすさのために線膨張係数と温度差を有次元量とし、添え字 $\sim$ を付けた。方程式(29)の右辺は板の曲げに関する方程式(1)の分布荷重と等価な作用を及ぼし、この項の周方向変化が大きいと、4・3節と同様に半径位置によって反り形状の位相がずれる。いま、簡単のために基板上下面の温度差が角度位置 θ だけの関数の場合を考える。ディスク外周端が自由端で、この位置で半径方向曲げモーメントが0であることを考慮すれば温度差は以下の式で簡単に表せる。

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} &= \frac{h}{\tilde{\alpha}(1+\nu)} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right]_{r=1} \\ &= \frac{h}{\tilde{\alpha}(1+\nu)} \left[\frac{\partial \beta_{rad}}{\partial r} + \nu \left(\frac{\beta_{rad}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \beta_{tan}}{\partial \theta} \right) \right]_{r=1} \quad \dots\dots (30) \end{aligned}$$

(添え字) $r=1$: ディスク外周端

式(30)に半径方向反り角の式(13)を適用すれば、温度差を角度位置 θ の関数の形で推定できる。この要点は以下の(a), (b)の通りである。(a)外周端に最も近い測定半径位置に関する局所係数を式(13), (14)に適用し、 $r=1$ (無次元外半径)とする。(b) $\partial \beta_{rad} / \partial r$ を2つ以上の測定半径位置での局所補間値の差分近似として求める。

5・2 数値実験による温度差の検証 温度差の検証には射出成形金型が開いた直後の光ディスク両面の温度分布と冷却後の反り角分布を測定すればよいが、現実には温度測定が困難である。そこで代替案として有限要素法ソフト ABAQUS による以下の(A)から(C)のような数値実験を実施した。(A)図 9(a)の細線のような折れ線状の温度差分布を ABAQUS の初期条件として熱収縮解析を実施する。なお、半径方向温度勾配は0とする。(B)ABAQUSの結果から図 9(b)のような反り角分布を半径位置 24mm と 60mm(無次元半径位置 $r=1$)について求める。(C)式(30)から温度差を求める。この際に $\partial \beta_{rad} / \partial r$ は半径位置 24mm と 60mm での半径方向反り角の局所補間を用いて差分近似する。以上の結果、図 9(a)のように式(30)による温度差が ABAQUS の初期温度差を再現していることから、本手法はディスクの初期温度分布の推定に使えると考

えられる。

TD : Temperature difference by using Eq.(30)
ABAQUS : Initial condition for ABAQUS

(a) Temperature difference

(b) Tilt angle by using ABAQUS

Fig. 9 Numerical test of the temperature difference

5・3 CD-ROM の温度差 図 10 は実際の反り角検査装置の測定値をもとに求めた CD-ROM の射出成形直後の温度差である。図は成形後の時間の経過とともに温度差の推定結果が変化する様子を示している。図 10 の結果では温度差の周方向変化は 0.5℃程度と比較的小さい。このことは多くの CD-ROM の反り形状が図 5 のように自重以外の分布荷重が作用しない曲げ形状で表現されることから納得できる。なお、保護膜の吸湿による反りの増加等によって成形から 50 分後には見かけ上の温度差推定値は増加するが、14 日後にもとの値に戻っている。図から成形後の日数が経過したディスクでも初期の温度分布の影響が残っていると言える。なお、データを比較する際の角度位置合せは、1 つの半径位置の周方向反り角分布に関する 2 組のデータ間の相互相関関数が最大となるように一方の角度位置を数値的にシフトさせることによって実施した。

6. 結言

現在、生産現場で使われている光学的手法による光ディスク反り検査装置の出力に簡単な計算処理を行うことで、データの保存やプロセス状態の分析を補助する方

法について検討した。本手法の生産への応用としては以下の項目が挙げられる。①式(18)～(24)の係数(式(21)～(24)ではディスク全体および局所補間)をハードディスクに保存することによる全ディスクの検査データの小容量での保存、②ドライブ中での光ピックアップの軸方向加速度の推定、③半径位置による位相ずれを利用した貼合せディスクの接着状態の分析、④温度差の推定による成形時の温度むらの分析。この他、相互相関関数を用いて任意の 2 組のディスク形状を簡単に比較できることから大ロット生産中のロット内での形状変化の分析等にも有用と考えられる。なお、本手法の計算は簡単のため、既存の検査装置にわずかなソフトを追加するだけで機能を大幅に向上できると考えられる。

Fig. 10 Estimated temperature difference of a CD-ROM

文献

- (1) チモシェンコ, ヴォアノフスキーリーガー共著, 長谷川 節 訳, 板とシェルの理論 (第 1 版 6 刷), (1983), 265-268, ブレイン図書出版.
- (2) 竹内 洋一郎 著, 野田 直剛 増補, 熱応力 (第 4 版), (1989), 247-251, 日新出版.
- (3) 中島平太郎, 小川博司, 図解コンパクトディスク読本 (改訂 2 版), (1993), 83-99, 150-155, 200-216, オーム社.
- (4) 憐オプトロニクス社編, 続・わかりやすい光ディスク (第 1 版 第 1 刷), (1990), 168-182, オプトロニクス社.
- (5) 藤原洋 監修, マルチメディア通信研究会 編, オープンネットワーク講座 DVD とビデオ CD, (1996), 210-221, アスキー出版局.