



## 光ディスクにおける回折光解析

本宮 佳典

(株) 東芝総合研究所 〒210 川崎市幸区小向東芝町 1

(1990年11月29日受理)

### Diffraction Analysis of Optical Disk Readout Process

Yoshinori HONGUH

Toshiba Corp. R&D Center, 1, Komukai Toshiba-cho,  
Saiwai-ku, Kawasaki 210

#### 1. はじめに

光ディスクはビデオディスク、オーディオディスク、電子ファイルシステムなどを中心に発展してきたが、近年では計算機用の周辺記憶装置としても実用化され、多くの分野においてその応用が拓かれつつある。

光ディスク装置ではレーザー光を直径  $1\mu\text{m}$  程度のスポットに絞り込んで、ディスクの記録面上の情報にアクセスする<sup>1,2)</sup>。このレーザー光は、再生信号の検出、制御信号(トラッキング誤差信号、フォーカシング誤差信号など)の検出、そして情報の記録/消去のためのエネルギー供給手段としての機能を担っている。高性能のシステムを設計するためには、これらの各機能の基本的な過程を定量的に把握することが必要である。計算機を用いた回折光の解析は、そのための有力な手段である。

本稿では、再生信号解析についての概要を述べるとともに、回折のモデルに統計的な手法を導入して、ディスクノイズの原因である表面粗さやマークサイズの不均一性などの影響を扱う試みについて述べる。

#### 2. 光ディスクの回折理論

光ディスクの再生光学系を図1に模式的に示す。対物レンズで記録面上に絞り込まれた光ビームが、記録マークやグループ(トラック案内溝)によって散乱され、再び対物レンズを通過してビームスプリッターにより検出器へ導かれる。

光ディスクの信号再生過程にかかわる解析は、これまでも多くの報告がなされているが、厳密な解析が可能

なのはごく限られたモデルだけであり<sup>3)</sup>、目的に応じたなんらかの近似手法がとられる。精度の高い解析手法としては、モードカップリング理論でピットの3次元形状を扱う手法<sup>4,5)</sup>、境界要素法により積分方程式を解く手法<sup>6-8)</sup>などがある。光ディスクのシステム設計にあたり、精密な解析によって得られる解の重要性はいうまでもないが、それとともにより機動力の高い検討手法も重要である。すなわち光学系のパラメータや記録マーク、グループなどの形状および配置を表すパラメータなどについて変化させ、さまざまな場合の信号再生特性を検討することが必要である。

広い範囲の検討に用いられている方法としては、スカラ波のフラウンホーファ回折による計算がある。この手法については、Hopkins によるビデオディスクの再生信号解析<sup>9)</sup>がよく引用される文献となっている。この近似では回折後の場の分布がフーリエ変換によって求められるため、計算量も比較的少なくて済み、種々のモデルに柔軟に対応することが容易である。また、物理的描像が得やすく、見通しの良い現実的な手法として実際の系に適用され、多くの有用な成果が得られている<sup>9-14)</sup>。

フラウンホーファ回折による計算は、回折効果を扱う上では比較的計算の容易な近似に属するが、それでもフーリエ変換を繰り返し実行するにはかなりの計算時間が必要であり、FFT を使った高速化なども図られている<sup>10)</sup>。一方、光ディスクでは、マークやグループのない領域では反射率が一定であることや、マークやグループの配置を周期的と考えてモデル化できるという特徴がある。これらの特徴を積極的に利用することでフーリエ変

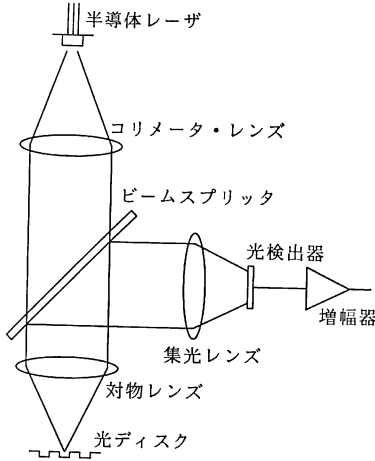


図 1 光ディスクの再生光学系

換の計算が簡略化され、効率的で見通しのよい計算が可能になる<sup>11,12)</sup>。次章以下ではこのモデルに基づいた計算と、雑音評価への応用について説明する。

一方、これらの近似を用いても、変調記録された複雑なマーク列を再生して得られる信号波形を調べようとすると計算量は膨大になる。コンパクトディスクなどの信号再生系などでは、系のインパルス応答を光スポットの線像強度分布で表し、これと入力信号のコラボレーションで再生信号を表すなどの近似手段が有効である<sup>14)</sup>。

### 3. フラウンホーファ回折による解析

#### 3.1 光ディスクのモデル

フラウンホーファ回折は光ディスクの再生光学系の比較的良好な近似であり、しかも2次元フーリエ変換で表されることから見通しのよい計算ができる。入射光の対物レンズ開口位置での振幅分布を  $f(x, y)$  とすると、記録面に集束した光スポットの振幅分布  $F(u, v)$  は、

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \{-2\pi j(xu + yv)\} dx dy \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $x, y$  は開口半径  $a$  で規格化された対物レンズ開口面上の座標である。また、 $u, v$  は波長  $\lambda$  と対物レンズ開口数  $NA$  との比  $\lambda/NA$  で規格化された光ディスク記録面上の座標で、グループの方向を  $v$  軸とする。反射直後の光の振幅分布は記録面の複素振幅反射率  $R(u, v)$  を用いて  $F(u, v) R(u, v)$  のように表されると仮定する<sup>9)</sup>。位相ピットやグループがある場合は往復の光路差に相当する位相因子を含めて  $R(u, v)$  を定義する。反射光の対物レンズ開口位置での振幅分布  $\alpha(x, y)$  は、

$$\begin{aligned} \alpha(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) R(u, v) \\ &\quad \times \exp \{-2\pi j(xu + yv)\} dudv \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x' - x, y' - y) r(x', y') dx' dy' \end{aligned} \quad (2)$$

とかける。ただし

$$r(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(u, v) \exp \{-2\pi j(xu + yv)\} dudv \quad (3)$$

とする。反射光の強度分布は  $|\alpha(x, y)|^2$  で与えられ、検出器に至る光量はこれを開口内 ( $x^2 + y^2 < 1$ ) で積分して得られる。

ここで、光ディスクの特徴を活かすと効率よい計算ができる。まず、マークもグループもない領域の反射率を一定としてよい。一般性を失わないのでこれを1とおく。また、グループ形状は  $v$  によらないとする。このとき複素反射率  $R(u, v)$  は、

$$R(u, v) = 1 + G_g(u) + G_m(u, v) \quad (4)$$

とかける。ただし、 $G_g(u)$  および  $G_m(u, v)$  はそれぞれグループあるいはマークの外側の領域で0、内側の領域で  $R(u, v) - 1$  として定義した関数である。また、マークやグループは重なり合わないものとする。複素反射率のフーリエ変換は(4)式を項別にフーリエ変換すればよい。第1項は  $\delta(x, y)$  となり、他の項は積分領域がグループやマークの内側のみになるので数値積分する上で有利である。

つぎに、ほとんどの場合  $G_g(u)$  や  $G_m(u, v)$  は周期関数としてよい。周期関数のフーリエ変換は  $\delta$  関数列になり、

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_g(u) \exp \{-2\pi j(xu + yv)\} dudv \\ &= \delta(y) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - (m/P_t)) A_g(m) \quad (5) \\ &\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_m(u, v) \exp \{-2\pi j(xu + yv)\} dudv \\ &= \sum_{m, n=-\infty}^{\infty} \delta(x - (m/P_u)) \delta(y - (n/P_v)) A_m(m, n) \end{aligned} \quad (6)$$

のようにかける。ここで、 $G_g$  の  $u$  軸方向の周期 (トラックピッチ) を  $P_t$ 、 $G_m$  の  $u$  軸方向の周期を  $P_u$ 、 $v$  軸方向の周期を  $P_v$  とした (図 2)。マークとグループが重ならないよう  $P_u$  は  $P_t$  の整数倍にとる。また、 $A_g(m)$ 、 $A_m(m, n)$  は係数であり、

$$A_g(m) = (P_t)^{-1} \int_{-P_t/2}^{P_t/2} G_g(u) \exp \{-2\pi j(m/P_t)u\} du \quad (7)$$

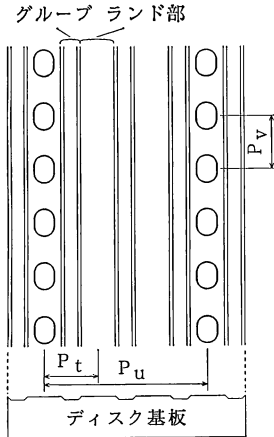


図2 グループ、記録マークの配置のモデル

$$A_m(m, n) = (P_u P_v)^{-1} \int_{-P_u/2}^{P_u/2} \int_{-P_v/2}^{P_v/2} G_m(u, v) \times \exp[-2\pi j \{ (m/P_u)u + (n/P_v)v \}] du dv \quad (8)$$

で求められる。このようにして  $r(x, y)$  は  $\delta$  関数列になる。

さらに光ディスクの回折光解析で特徴的なこととして、光ディスクの位置を少しずつ変えて計算する場合は多いということがある。上述のようにモデル化すれば、光ディスクが  $u$  方向に  $\Delta u$ 、 $v$  方向に  $\Delta v$  だけ動いたときの複素反射率のフーリエ変換は、 $A_g(m)$  に位相因子  $\exp\{-2\pi j(\Delta u/P_t)m\}$ 、 $A_m(m, n)$  に位相因子  $\exp[-2\pi j\{(\Delta u/P_u)m + (\Delta v/P_v)n\}]$  を乗ずることで得られる。したがって(7)、(8)式を繰り返し評価する必要はない。 $\alpha(x, y)$  の表式は次のようになる。

$$\alpha(x, y) = f(-x, -y) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\{-2\pi j(\Delta u/P_t)m\} \times A_g(m) f((m/P_t) - x, -y) + \sum_{m, n=-\infty}^{\infty} \exp[-2\pi j\{(\Delta u/P_u)m + (\Delta v/P_v)n\}] \times A_m(m, n) f((m/P_u) - x, (n/P_v) - y) \quad (9)$$

とくに時間とともにディスクが動く場合は  $\Delta v$  が時間  $t$  に比例するものとすればよい。(9)式は回折光の重ねの形式であり、 $m, n$  が回折次数を表す。

### 3.2 再生信号の計算

以上のようにモデルを定めた後、検出される光量を求める手続きはおもに2通り考えられる。一つはHopkinsの解析<sup>9)</sup>のように光強度分布の表式を展開し、項別に積分して検出光量を表すものである。これは次数の異なる回折光同士の干渉項の和となる。各項の時間依

存性が周期  $P_v$  に対応する周波数あるいはその整数倍の周波数の正弦波になるので、いったんそれらの振幅を定めれば時間発展は容易に得られる。ビデオディスクのようにグループもなく、短い周期で単純にマークが繰り返されるようなパターンではこの方法が有利である。

もうひとつは(9)式により反射光の振幅分布を求め、絶対値の2乗を対物レンズ開口内で積分する方法である。ディスクが動く場合の時間発展は上記  $\Delta v$  を少しずつ変えて計算を繰り返す。複数種のマークを含むなどモデルが複雑になると先の方法より有利になる。たとえば図3のような2種類のマークを含むパターンについて解析する場合、マークを一つおきにとって2グループに分けることができる。このとき、(4)式の代りに、

$$R(u, v) = 1 + G_g(u) + G_{m1}(u, v) + G_{m2}(u, v) \quad (10)$$

のように分割すると、 $G_{m1}(u, v)$ 、 $G_{m2}(u, v)$  のそれぞれは単純なマーク列として計算できる。周期的でないパターンについても、注目する領域の長さ以上の周期を導入し、複数の周期パターンの組合せとして計算できる。モデルが複雑なほどパターンが多く、また周期も長くなり、算入すべき回折光の数が増大する。このような場合、正弦波で展開して振幅を定めようとすると回折光の

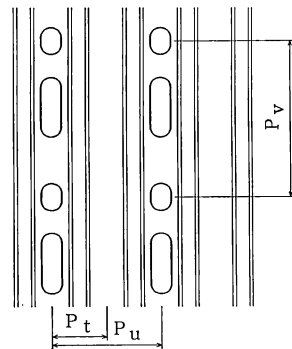


図3 異種のマークを含むマーク列

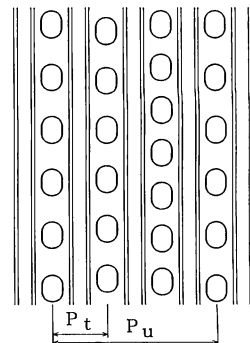


図4 トラックごとに周期の異なるマーク列

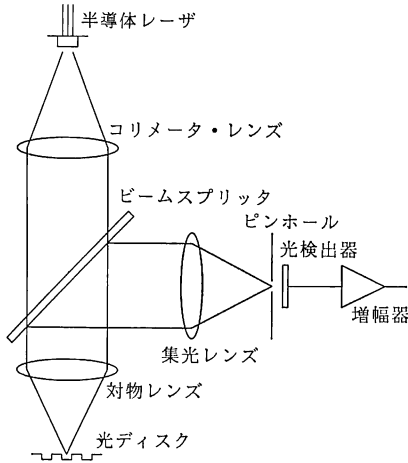


図 5 共焦点型の再生光学系

組合せは急激に増大する。

もう一つの例として異なる周期のマーク列を含む場合がある (図 4)。この場合も (10) 式と同様に、それぞれの周期のマーク列をグループ分けして計算できるが、正弦波の振幅を定める方法では回折光の組合せの計算がしだいに複雑で膨大になる。一方、反射光の振幅分布を求める方法は計算手順が単純であり、複雑なさまざまなパターンに適用することを考えた場合プログラムの開発時間の面で有利である。また、反射光の強度分布を常に把握できることも一つの特徴である。

以上の解析は図 1 の一般的な再生光学系についてのものであるが、図 5 のような共焦点系の光学系も提案されている。反射光を再び結像させ、中心部の光強度をピンホールなどを使って検出する。感度や量産性の面で不利なことから現在のところ一般的ではないが、デフォーカス<sup>12)</sup>や球面収差<sup>15)</sup>に対して検出特性の劣化が少ないことなどが報告されている。このような系についての解析が表式上 Hopkins の解析<sup>9)</sup>と同じ形式でできることが示されている<sup>12)</sup>。

#### 4. 不規則な現象の導入

光ディスクの再生信号には種々の雑音が含まれるが、光ディスクに起因するものの影響を見積もることは回折光解析のひとつの課題である。不規則な形状の物体による光散乱の取扱いは一般には複雑で困難であるが、不規則性の統計的性質を単純にモデル化できる場合には取扱いが簡単になる<sup>16)</sup>。本章ではそのような例としてビデオディスクにおける表面粗さ<sup>17)</sup>、およびマークサイズの不均一性の影響<sup>18)</sup>についての解析手法を紹介する。

#### 4.1 表面粗さの影響

ビデオディスクのように位相ビットにより記録されている場合、複素振幅反射率  $R(u, v)$  は、深さを表す関数  $h(u, v)$  を用いて

$$R(u, v) = \exp(2\pi j 2h(u, v) - V_i n / \lambda) \quad (11)$$

のように与えられる。ただし  $V$  は規格化された速度、 $n$  は基板の屈折率、 $\lambda$  は波長とする。このとき深さ  $h(u, v)$  について次のようないくつかの仮定を設ける。まず、記録ビットの深さ  $h_p(u, v)$  と不規則な成分  $h_n(u, v)$  の和として、

$$h(u, v) = h_p(u, v) + h_n(u, v) \quad (12)$$

のように表せるとする。ここで、 $h_p(u, v)$  は  $u, v$  それぞれの方向に周期  $P_u, P_v$  を有する単純なビット列を表す。 $h_n(u, v)$  は便宜上  $u, v$  方向に十分長い周期  $q_u, q_v$  を有するものとして、

$$h_n(u, v) = \sum_{m, n=-\infty}^{\infty} C_{m, n} \times \exp[2\pi j \{ (m/q_u)u + (n/q_v)v \}] \quad (13)$$

のように展開する。このとき起伏に関する仮定を次のようにおく、

$$h_n(u, v) \ll \lambda/n \quad (14)$$

$$\langle C_{m, n} \rangle = 0 \quad (15)$$

$$\langle C_{m, n}^* C_{m', n'} \rangle = \delta_{m, m'} \delta_{n, n'} \langle |C_{m, n}|^2 \rangle \quad (16)$$

ただし、かぎ括弧は統計平均とする。また、より高次の相関はないものとする。表面粗さは通常その自己相関関数、

$$\phi(\xi, \eta) = \langle h(u + \xi, v + \eta) h(u, v) \rangle \quad (17)$$

あるいはそのフーリエ変換である 2 次元パワースペクトル  $H(k_u, k_v)$  で特徴づけられる。係数  $C_{m, n}$  は 2 次元パワースペクトルと、

$$\langle |C_{m, n}|^2 \rangle \sim H(m/q_u, n/q_v) / (q_u q_v) \quad (18)$$

の関係にある。以下、式を追うと緊雑になるので省略するが、(13) 式を用いて検出される光量の表式を導く。その際、 $C_{m, n}$  についてべき展開して高次の項を無視する。また、(15)、(16) 式を用いて統計平均をとると検出される光量の表式は大幅に簡略化される。このように、起伏の統計的性質から雑音パワースペクトルを見積もることができる。

図 6 は高精細ビデオディスクをモデルとして表面粗さによる雑音のパワースペクトルを計算した例である。表面粗さのみで生ずる成分と、ビットからの回折光との相互作用で生ずる成分があり、後者はビット形状などにも依存する。

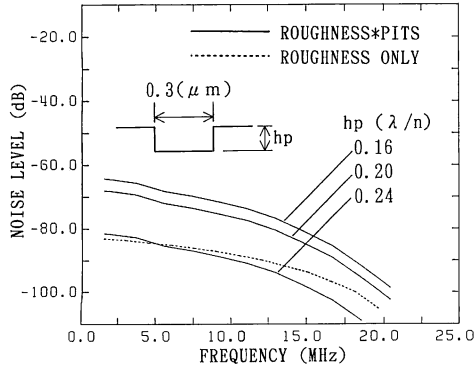


図6 表面粗さによる雑音パワースペクトル

4.2 マークサイズの不均一性の影響

ピットの形状が不規則に変動している場合、これは雑音の要因となる。変動が単純にモデル化できる場合、この変動量と雑音パワースペクトルの関係は回折計算を元に求めることができる。

ビデオディスクのように、同一形状のマークが周期的に並んでいるものとする。それぞれのマークの変動は単一自由度の確率変数  $X$  で記述されるものとする。図7の例ではマークの幅の変動を  $X$  としたが、エッジのシフト量、ピット深さなどマークの変動を示す他のパラメータでもよい。このモデルのマーク例において、 $m$  番目のマークの変動を  $X_m (m = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty)$  で表し、 $X_m$  について次のような統計的性質を仮定する。

$$\langle X_m \rangle = 0 \tag{19}$$

$$\langle X_m X_n \rangle = \delta_{m,n} \langle X^2 \rangle \tag{20}$$

ここで  $\langle X^2 \rangle$  は確率変数  $X$  の分散である。すなわち各  $X_m$  の間に相関はなく、それぞれの分散が  $m$  に依存しないと仮定する。さらに、再生信号の変動量（マークの変動がある場合の再生信号とない場合の再生信号の差）は各確率変数  $X_m$  に対して線形と仮定する。これは変動量が小さいことから多くの場合妥当である。これらの仮定のもとで、再生信号の変動量  $s(t)$  は、

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(t - mP) X_m \tag{21}$$

と書くことができる。ここで、 $P$  は変動を除いた再生信号の周期、関数  $g(t)$  は0番目のマークのみに変動があ

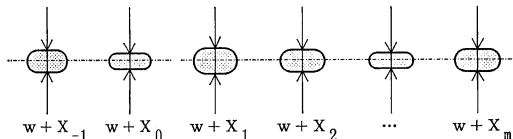


図7 マークサイズに変動のあるマーク列

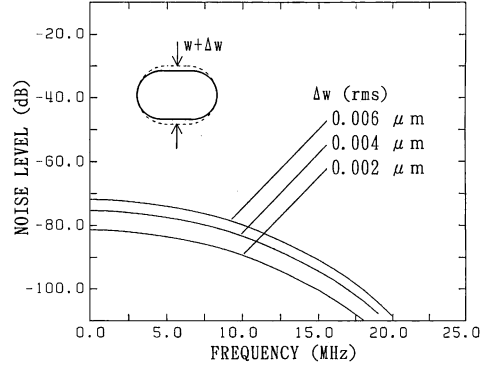


図8 ピット幅変動による雑音パワースペクトル

る場合の単位変動量あたりの再生信号変動量で、

$$g(t) = \lim_{x \rightarrow 0} s_x(t)/x \tag{22}$$

として定義する。ここで  $s_x(t)$  は0番目のマークのみに  $x$  なる変動がある場合の再生信号変動量である。

以上のモデルにしたがうと  $s(t)$  の自己相関関数  $\phi(\tau)$  は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \phi(\tau) &= \langle s(t)s(t+\tau) \rangle_{\text{time}} \\ &= \langle X^2 \rangle (1/P) \int_{-\infty}^{\infty} g(t)g(t+\tau) dt \end{aligned} \tag{23}$$

ここで、時間平均が統計平均と等しいことを仮定した。雑音パワースペクトルはウィーナー・ヒンチンの関係から  $\phi(\tau)$  のフーリエ変換として求められる。関数  $g(t)$  は3章の手法で計算できるので、 $X$  の分散から雑音パワースペクトルを評価することができる。図8は高精度ビデオディスクをモデルとしてピット幅の変動による雑音のパワースペクトルを計算した例である。周波数依存性はどのパラメータを  $X$  とするかで決まり、 $X$  の分散が絶対値を定める。

5. おわりに

以上スカラ波のフラウンホーファ回折モデルによる再生信号解析について、一般的な場合と統計的な不規則性のある場合について述べた。後者については実際のディスクをどうモデル化するかについての検討が今後必要であろう。すなわち表面粗さやマーク形状の変動は非常に小さく、統計的性質を特徴づけるには精密かつ系統的な測定が必要である。これについては STM などの測定手段の発達により可能になりつつある。

一方、記録の高密度化を図るため、光源の短波長化が近年盛んに進められている。表面粗さやマーク形状の変動要因の一部はディスクの製造プロセスなどで規定されるので、再生信号への影響は短波長化とともに増大する

と予想される。したがって今後この面からの考察もますます重要になると考えられる。また、記録密度が光学系の分解能の限界に近くなり、設計時のマージン管理も精密になって、回折の偏光依存性なども無視できなくなってきた。このため光をベクトル場として扱う計算も今後重要になると考えられる。

### 文 献

- 1) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. Rosmalen and K. Immink: *Principles of Optical Disk Systems* (Adam Hilger, Bristol, 1985) pp. 7-87.
- 2) 小倉碧夫: "光ディスクの光学", 日本物理学会誌, **44** (1989) 173-179.
- 3) P. Sheng: "Theoretical consideration of optical diffraction from RCA videodisc signals," *RCA Rev.*, **39** (1978) 512-555.
- 4) Z. Zhou and Y. Ruan: "Optimization of information pit shape and read-out system in read-only and write-once optical storage systems," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 728-731.
- 5) 大木裕史: "光ディスクの回折計算法", *光学*, **17** (1988) 467-471.
- 6) 田中孝明, 宮崎保光: "境界要素法を用いた光ディスク上のピットによるビーム波の散乱特性の解析", 電子通信学会誌論文誌 (C), **J 69-C** (1986) 740-746.
- 7) 真鍋克也, 宮崎保光, 田中孝明: "境界要素法を用いた一般形状の光ディスクピットによるビーム波の近傍散乱界および誘起電流の解析", 電子情報通信学会誌論文誌 (C-I), **J 72-C-I** (1989) 86-92.
- 8) 小嶋敏孝, 井戸 純: "追記形光ディスクモデルによる光ビーム散乱と和および差信号特性の境界要素法解析", 電子情報通信学会誌論文誌 (C-I), **J 73-C-I** (1990) 551-558.
- 9) H. H. Hopkins: "Diffraction theory of read-out systems for optical video discs," *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 4-24.
- 10) V. B. Jipson and C. C. Williams: "Two-dimensional modeling of an optical disk readout," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2202-2209.
- 11) A. B. Marchant: "Optical disk readout: a model for coherent scanning," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 2085-2088.
- 12) J. Braat: "Optics of recording and read-out in optical disk systems," *Proceedings of the Int. Symp. on Optical Memory*, Kobe (1989), *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, Suppl. 28-3 (1989) pp. 103-108.
- 13) 村上昭夫: "回折光解析による光ディスク上の案内溝形状の検討", 電子情報通信学会誌論文誌 (C), **J 67-C** (1984) 219-226.
- 14) S. Kubota: "Aplanatic condition required to reproduce jitter-free signals in an optical digital disk system," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 3961-3973.
- 15) 武井 清, 小島良明, 岡本総太, 竹間清文, 當摩照夫: 共焦点光学系ピックアップの読出し応答における収差の影響, 第 51 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 29 p-N-9 (1990) p. 980.
- 16) 本宮佳典: "光ディスクを支える基礎技術", 光メモリンポジウム '90 論文集 (1990) pp. 25-26.
- 17) Y. Honguh: "Analysis of retrieval signal deterioration caused by disk surface roughness," *Proceedings of the Int. Symp. on Optical Memory*, Kobe (1989), *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, Suppl. 28-3 (1989) pp. 115-119.
- 18) 本宮佳典: "光ディスクの再生信号におけるマークサイズ変動の影響", 第 37 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 29p-G-15 (1990) p. 928.