

光ディスクの再生信号の解析

本 宮 佳 典

マルチメディア時代の情報媒体として、高記録密度の光ディスクであるDVDが本格的な普及期を迎えている。また、より洗練された装置の開発や将来に向けたより高性能なシステムの開発をめざして、今も種々の技術開発が進められている。こうした技術開発を的確に進めるための基盤となる技術のひとつに、計算機による再生信号の解析がある。

フラウンホーファー回折モデルに基づいた、再生信号の基本的な定式化はすでに1970年代に確立している¹⁾。しかしながら、デジタル記録の採用や記録密度の向上などにより、また計算機の性能向上やアルゴリズムの工夫などにより、計算の様相は一昔前と比べて少なからず変化してきた。装置設計のために提供できる情報が豊富になり、設計思想へさえも少なからぬ影響をおよぼすに至っている。本稿では、フラウンホーファー回折モデルに基づく再生信号の解析、および雑音の解析について概要を紹介する。

1. フラウンホーファー回折モデル

光ディスクを再生するには、図1のようにレーザー光を絞り込み、反射光を光検出器で検出する。こうして得られる信号には、情報を担う狭義の再生信号のほか、焦点誤差信号、トラッキング誤差信号、雑音などが含まれる。回折モデルでは、集光スポットが照射する記録面の状態によって決まる反射光の強度分布、あるいはその面積分値を計算する。したがって再生信号、トラッキング誤差信号、記録面の不規則要因による雑音などが対象となる。

回折モデルによる再生信号解析²⁾について、簡単に整理する。まず、座標を規格化(記録面の座標 (u,v) は λ/NA で規格化、開口面の座標 (x,y) は開口半径で規格化。ただし、 λ は波長、 NA は対物レンズの開口数)すると、記録面の光スポットの場合 $F(u,v)$ は、入射光の対物レンズ入射側開口位置の振幅分布 $f(x,y)$ のフーリエ変換として、

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

と表される。関数 $f(x,y)$ は開口に対応する領域(単位円)の外では値がゼロなので、積分範囲は単位円内になる。

次に、記録面により反射した直後の光の場合は、複素反射率 $R(u,v)$ を用いて $R(u,v)F(u,v)$ で与えられると仮定する。反射光の、対物レンズ通過後の開口位置での場合 $\alpha(x,y)$ は、そのフーリエ変換として、

$$\alpha(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(u,v) F(u,v) \times \exp\{-2\pi j(xu + yv)\} du dv \quad (2)$$

と表される。

この反射光のうち、対物レンズの開口内に入ってきたものが、レンズなどを介して光検出器に導かれる。光検出器は、焦点誤差やトラッキング誤差の検出などのために、通常、分割型のものが用いられる。分割された各エレメントには、対物レンズ開口内の所定の領域に入る光がそれぞれ導かれる。

光の強度分布は振幅 $\alpha(x,y)$ の絶対値の2乗に比例するので、再生信号 I は、

$$I = \iint_{\text{開口内}} |\alpha(x,y)|^2 g(x,y) dx dy \quad (3)$$

として与えられる。ここで、 $g(x,y)$ は検出系の感度分布とする。通常の場合については $g(x,y)=1$ とする。トラッキング誤差信号などでは分割型光検出器の各エレメントから

(株)東芝研究開発センター (〒210-8582 川崎市幸区小向東芝町1)
E-mail: honguh@isl.rdc.toshiba.co.jp

*平成7年度光学論文賞受賞記念解説は、慣例では「光学」第25巻第8号に掲載されることになっておりました。記事の掲載が大幅に遅れたことをお詫びいたします。(「光学」編集委員長 伊藤一良)

得られる信号の和や差を生成するが、このような場合にも、対応する領域ごとに感度 $g(x,y)$ を正負に設定すれば、式 (3) の形で表現できる。

2. 光ディスクのモデル

計算は式 (1), (2) にしたがってもよいが、光ディスクの特徴を利用すると見通しがよく、高速高精度の計算が可能になる。まず、マーク等に周期性を仮定すると、有限な次数の回折光の重ね合わせとして反射光を表すことができる。また、マークの外側の反射率が一定であれば、複素反射率を ① その一定値を表す関数と、② その一定値からの差を表す関数とに分離でき、数値計算を精度よく実行しやすくなることが知られている^{1,3,4)}。また、クロストークなどの評価のためにトラックごとに周期を変えてマークを配置することも可能¹⁾である。

ここで、これらの仮定に基づいて式を整理してみる。積のフーリエ変換はフーリエ変換の畳み込みになるので、式 (2) は次のように変形される。

$$\alpha(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x'-x, y'-y) r(x', y') dx' dy' \quad (4)$$

ただし、 $r(x,y)$ は $R(u,v)$ のフーリエ変換である。すなわち、入射光の分布の空間反転 $f(-x, -y)$ と $r(x,y)$ の畳み込みとして表せる。

グループ、マーク等の形成されていない領域で複素反射率が一定値 r_0 であれば、複素反射率は

$$R(u,v) = r_0(1 + G_g(u) + G_{m1}(u,v) + G_{m2}(u,v) + \dots) \quad (5)$$

と表すことができる。ここで $G_g(u)$ はグループ領域のみ、 $G_{m1}(u,v)$ 以下はマーク領域のみで値をもつ関数である。フーリエ変換は括弧内の各項ごとに実行できる。第1項は数値計算を要せず $\delta(x,y)$ となる。また、第2項以下も積分範囲が限定されるので数値計算をしやすい。

関数 $G_g(u)$ あるいは $G_{m1}(u,v)$ などが周期関数である場合、計算はさらに容易になる。すなわち、周期関数のフーリエ変換は δ 関数が (x,y) 平面に離散的に分布する形となり、畳み込み積分は離散的な和に帰着する。また、式 (3) の積分範囲は有限範囲であり、これに寄与する項も有限個となる。ディスクの移動は、 δ 関数に乗ずる位相因子の変化として記述されるが、回折方向ごとに解析的に定まる因子なので計算は容易である。

このように周期モデルにしたがうと計算が見通しよく、容易になる。非周期的なマークパターンについて計算する場合も、スポットサイズに比べて十分大きい領域を周期の単位として周期的なモデルを設定することが有効である。

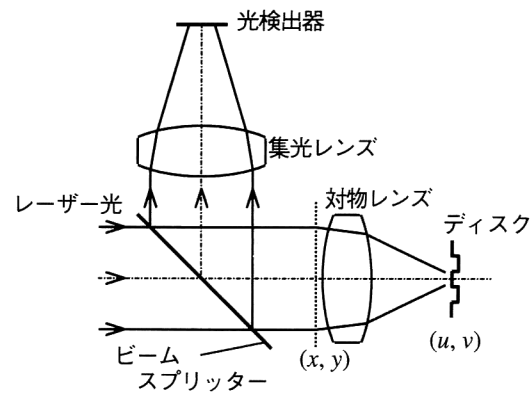


図1 光ディスクの再生光学系。

複素反射率は、再生専用光ディスクのようにピットと呼ばれる起伏が形成されている場合、起伏による往復の光路差に相当する位相因子としてモデル化できる。また、追記形や相変化形の場合は、記録層や保護層等の多層干渉効果を考慮して反射率を計算⁵⁾して用いることができる⁶⁾。また、光磁気ディスクでも、直交する2つの偏光成分に分解すればスカラーモデルが適用できる⁷⁾。このように、種々の記録方式への適用が可能である。

収差についても、入射光の分布 $f(x,y)$ を複素数とすることで計算に取り入れることができる。すなわち、

$$f(x,y) = \tau(x,y) \exp\{2\pi j W(x,y)/\lambda\} \quad (6)$$

のように設定する。ただし、 $\tau(x,y)$ は光の振幅の絶対値、 $W(x,y)$ は波面の遅れを表す関数とする。ディスクの傾斜や基板の屈折率や厚さの誤差に起因する収差、あるいは収差とは呼ばれないがデフォーカスの影響などがこうして計算される。関数 $W(x,y)$ は、従来はしばしば開口数 (NA) で展開した最低次項で評価されていた⁸⁾。しかしながら、近年用いられる NA の大きな対物レンズでは誤差が大きくなるので、光線追跡などによる収差の計算が必要である⁹⁾。

3. アナログディスクとデジタルディスク

こうしたモデルを用いることで反射光の分布 $\alpha(x,y)$ は、

$$\alpha(x,y) = \sum_m A_m \exp(-j\omega_m t) f(x_m - x, y_m - y) \quad (7)$$

の形式で表現される。ただし、 A_m は m 番目の回折光の複素振幅、 (x_m, y_m) は回折方向、 $\exp(-j\omega_m t)$ はディスクの移動により付与される位相因子で ω_m は y_m に比例する。時間の関数としての再生信号 $I(t)$ はこれを式 (3) に代入して求められる。

Hopkins の定式¹⁾によれば、このときの再生信号は、

$$I(t) = \sum_m \sum_n A_m^* A_n \exp\{j(\omega_m - \omega_n)t\}$$

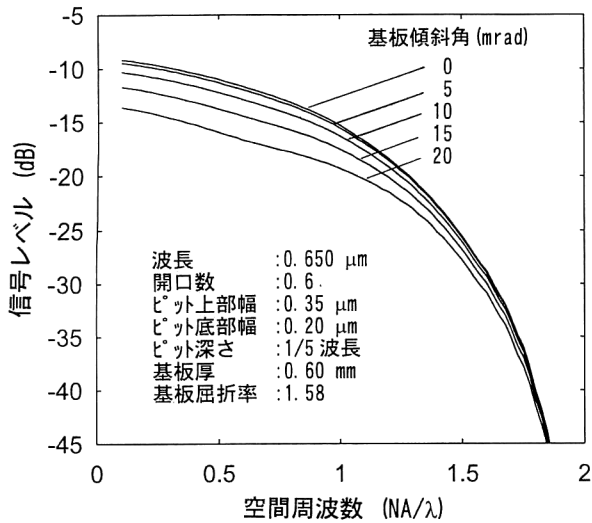


図2 周波数特性の計算例。

$$\times \iint_{\text{開口内}} f(x_m - x, y_m - y) * f(x_n - x, y_n - y) dx dy \quad (8)$$

のように、正弦波成分の和として表現する。各周波数成分の振幅を一度計算してしまえば、時間発展は正弦波の重ね合わせとして解析的に記述することができる。

Hopkinsの論文¹⁾で想定されているようなアナログビデオディスクでは、ビデオ信号で変調されたキャリア信号にしたがってピットが形成される。そのため、ほぼ一定の形状と周期でピットが記録される。このような場合、マークの配列が比較的単純で m や n が少数の範囲ですむため、式(8)を用いるのが有効である。基本的な信号再生特性は、信号強度の周波数特性によって記述される。図2に周波数特性の計算例を示す。周波数特性の諸パラメータ依存性、取差による劣化等の計算に加え、クロストーク、混変調歪み等の計算^{10,11)}などがシステムの設計の基礎となるデータを与える。

これに対してデジタル変調ではマーク形状や配置が多様になり、関与する回折次数が増加する。そのため式(8)では項数が増大して煩雑なときには、

$$I(t) = \iint_{\text{開口内}} \left| \sum_m A_m \exp(-j\omega_m t) f(x_m - x, y_m - y) \right|^2 dx dy \quad (9)$$

として計算するほうが容易な場合もある。式(9)では開口面上の光強度分布を計算しているので、分割型光検出器の各要素に対応する信号の評価も容易である。

デジタル変調のディスクの場合、検出窓幅に対する信号のエッジ(立ち上りおよび立ち下がり)位置の変動量が誤り率に直接関係する重要な性能指標である。したがって

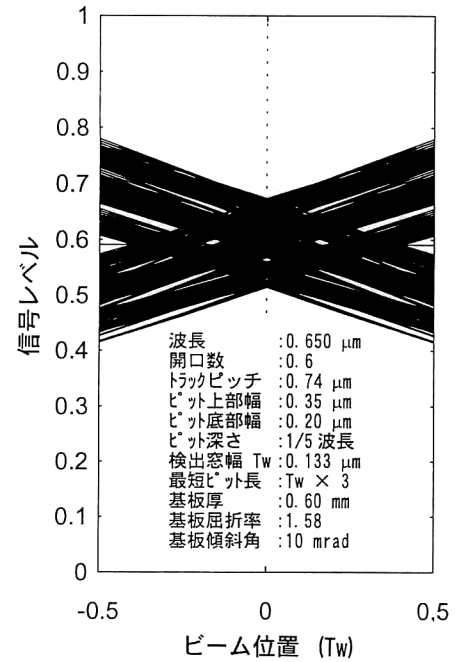


図3 アイパターンの計算例。

設計初期には周波数特性も参考にすが、最終的には信号波形をベースとした解析が重要となる。しかしながら、マークパターンが多様なため、検討に要する計算量は増大する。そのため、線形近似による計算が広く用いられている。すなわち、ステップ応答、またはインパルス応答を変調コードにしたがって線形重畳して再生信号を見積もろうとするものである。集束光スポットの線像強度分布がインパルス応答に相当するとして見積もる近似¹²⁾、あるいはマークエッジに対する応答やマークの最小領域に対する応答を回折モデルで計算し、これを線形重畳する方法¹³⁾などが典型的である。

しかしながら、より高密度の記録が実現されるにしたがい、こうした近似だけでは不十分になってきた。線記録密度が高く、線形重畳近似からのずれが無視できない場合には、具体的なマーク配置にしたがったモデルで回折計算をする必要がある。この際、変調符号についての知見も一定程度必要になってくる。通常よく用いられるRLL(run length limited)符号の場合、マークパターンの出現確率は、符号化効率がある程度以上高ければ具体的な変換規則にあまり依存しなくなる¹⁴⁾ので、そうした仮定にしたがってパターンを作成し、再生信号を計算することができる。種々のパターンに対する再生信号波形を、基準クロックに同期させて重ね描きしたパターンはアイパターンと呼ばれるが、アイパターンの計算からエッジの変動範囲¹⁵⁾や分散などを見積もることができる。図3にアイパターンのエッジ部分を、クロストークも考慮して計算した例を示す。また、

近年信号検出処理方式としてPRML (partial response maximum likelihood) が注目されているが、再生トラックと隣接トラックのパターンを含めた系統的な回折計算に基づいた処理特性の検討が報告¹⁶⁾されている。

光学系の設計パラメーターとシステム性能との関係を把握し、それに基づいてパラメーターを決定するのが光学設計と考えることができる。しかしながら、光学系の性能評価が単に分解能や周波数特性だけでは不十分となり、上に述べたようにクロストーク等の影響をはじめ、使用する符号から等化回路の特性まで考慮してはじめて得られるような量に基づく議論が志向されつつある。このように、回折計算に対しても最終的な電気信号の特性の記述にまで踏み込んだ情報提供が要求されるようになり、光設計にもますます広い技術的視野が要求されるようになってきたといえる。

4. ディスク雑音のモデル化

光ディスクの再生信号には、雑音が含まれる。光の流れにしたがって大まかに分類すると、光源の強度変動に起因するレーザー雑音、ディスクに起因するディスク雑音、光検出器以降で発生する電気系雑音に分けられる。このうち、ディスク雑音が光学的なモデル化の対象となる。光ディスクは形状的には図4に示すように記録面にグループやマークが形成されたものであり、透明基板を介して光で信号を検出する。ディスク雑音はこれらのどの構成要素に起因するかで分類できる。すなわち、①記録面の表面粗さ、②グループ形状の変動、③マーク形状の変動などが集光点にある要因であり、④基板表面のダスト、きず等が遠方にある要因である。したがって、①～③は回折モデルで、④は幾何光学的なモデルである程度議論できると期待される。

こうした要因の影響を評価するアプローチとしては、乱数などを利用して不規則なモデルを構築し、それに対して計算を実行することが考えられる。実際、マーク形状変動に伴う雑音の計算がそうした手法で行われている例もある¹⁷⁾。しかしながら、雑音の特性をパワースペクトルのような統計的特性として導くためには、相当量の計算が必要になる。そこで、統計的な考えを光学的モデルに導入することで、ある程度の見積もりを見通しよく実際的な計算時間で実現する試みを進めてきた。内容はすでに本誌で解説した¹⁸⁾ので、以下ではなるべく重複を避け、補足的説明を試みる。

表面粗さに起因する雑音¹⁹⁾は、粗面にレーザー光が照射され、回折で遠方に形成されるパターンが対象となり、レーザー-speckleと類似した現象といえる。ただし、多く

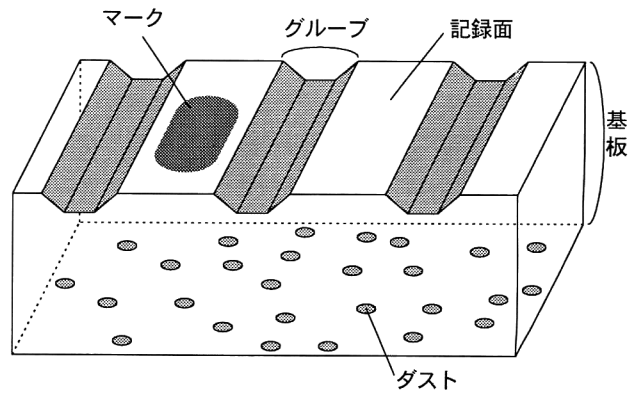


図4 光ディスクの構成要素。

のspeckle応用変位計測のように粗面の性質によらない条件ではなく、表面の性状を反映する条件に相当する。また、粗面だけでなくピットも形成されていること、2次元のspeckleパターンの性質を解析するのではなく、開口に相当する範囲で強度積分した値の時間的変動をパワースペクトラムとして特徴づけることなどが相違点といえる。

こうした現象の定式化にあたっては、3章で述べたのと同様に、複素反射率を基準の反射率とそこからのずれとに分ける考え方が有効である。すなわち、不規則な起伏のない場合の複素反射率とそこからのずれとに分け、信号の表式を微小な起伏量に対して冪展開したときの支配項（低次項）で雑音成分を表現することができる。不規則な起伏を2次元の空間周波数成分で展開し、異なる空間周波数成分間に相関がないなどの仮定をすると、最終的には起伏の自己相関関数、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ラムによる表現に移行する。微小な起伏による回折光とピットからの回折光との相互作用による雑音成分があるなど、雑音発生メカニズムに対してある程度ビジョンをもつことができる。

グループ形状の変動に起因する雑音²⁰⁾も、類似の描像で扱うことができる。すなわち、基準となるグループ形状を表わすパラメーターに対して、微小なパラメーターの変動があると仮定して、信号強度の表現をその変動量について冪展開し、支配項で雑音を評価することができる。グループ壁面のどの領域が雑音に大きく寄与するか、といったことが実際の興味の対象となるが、計算結果からは基準となるグループ形状に大きく依存することなどが推測される。

マーク形状の変動の場合、多少異なるアプローチ²¹⁾が便利である。これは、基準形状と実際の形状の差という概念が、マークの位置に強く依存するため、ランダムな微小量で展開するという処方が必ずしも自然でなくなるためである。あるいは、個々のマークの変動が、他のマークの変動

と互いに相関はないと考えられるので、むしろ個別の変動に対する応答に注目するほうが定式化しやすい。具体的には、単一のマークの形状がわずかに変化した場合の再生信号波形の差を計算し、その周波数成分を求める形で定式化できる。こうしたモデルで、高精細ビデオディスクの雑音要因が、ピットエッジの変動によりよく説明できることがわかった²¹⁾。また、これとは異なるシステムだが、de Kockらの雑音測定とも矛盾のない結果²²⁾となっている。また、光磁気記録でもマークエッジ変動を仮定した計算が、実験結果をよく説明できることが報告されている²³⁾。

雑音要因となるエッジ位置の変動は、例えば2~5 nm程度の大きさが問題になっている。これは、数百 nm~数 μ mのマーク長と比較して非常に小さい変動である。こうした検討に際しては、マークのエッジ位置が解析的なパラメータとして導入されるモデルでないことと計算精度の確保は難しい。複素反射率を式(5)のように分解する定式を用いるとマークの位置や長さを解析的に導入できる¹⁾ので、こうした計算には適している。

基板表面の汚れにはダスト、きず、指紋など多様な要因が考えられ、これらも雑音の原因となる。基板表面は記録面からの距離が波長と比べて十分長いので、最初の近似としては幾何光学的描像にしたがってよいと考えられる^{24,25)}。比較の見通しのよいケースとして、記録面を鏡面と仮定し、同一サイズの不透明な円形ダストが基板表面にランダムに分布している、といったモデルでは雑音パワースペクトラムを導くことが可能²⁶⁾である。比較的単純なモデルではあるが、雑音成分の分析やダストのサイズ、密度等への依存性などをある程度説明することができ、基板の薄型化の影響などもある程度議論できる。

以上、雑音の諸要因に対する雑音パワースペクトラムのモデル化に関する概要を紹介した。雑音は記録密度の限界を規定する本質的要因のひとつである。そのため、光磁気ディスク、相変化ディスクなどの実際の装置における雑音の要因分析²⁷⁾などの方面からも精力的な研究が進められている。記録面上の形状変動に由来するディスク雑音は光源の短波長化に伴って増加するので、今後より詳細な検討が必要になると予想される。従来、形状測定の難しい領域であったが、プローブ型顕微鏡などの測定手段の発達により、今後の研究の進展が期待される。

以上、スカラ波のフラウンホーファー回折モデルを主とした再生信号やディスク雑音の解析について概要を紹介した。近年の技術の動向は、高 NA 化、グループやピットの壁面角度の急峻化、グループ深さの増大など、スカラ

波回折理論によるモデル化が必ずしも妥当でなくなる方向にある。しかしながら、フーリエ変換という見通しのよい処方定式化され、完結したモデルに基づいて諸量を比較的容易に計算できることは、今後もディスクやドライブの設計に有用である。すなわち、一定の物理的イメージをもって技術的な議論をする基礎となり、あるいは精度は劣っても系統的、網羅的な計算が可能なることから、システムの大局的な特性を把握する上で有用である。

今回は触れなかったが、物理的により妥当なベクトル波回折モデルによる解析も近年発展してきている。両者を活用し、いわば低精度の大局的地図と高精度の局所的地図を手にして最適設計ポイントを探るような、相補的な関係で能率的かつ効率的な設計技術が確立されてゆくことが期待される。

文 献

- 1) H. H. Hopkins: "Diffraction theory of read-out systems for optical video discs," J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 4-24.
- 2) 本宮佳典: "光ディスクにおける回折光解析", 光学, **20** (1991) 210-215.
- 3) A. B. Marchant: "Optical disk readout: A model for coherent scanning," Appl. Opt., **21** (1982) 2085-2088.
- 4) J. Braat: "Optics of recording and read-out in optical disk systems," Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3 (1989) 103-108.
- 5) M. Mansuripur, G. A. N. Connell and J. W. Goodman: "Laser-induced local heating of multilayers," Appl. Opt., **21** (1982) 1106-1114.
- 6) 小林 忠, 森下直樹, 中村直正, 鈴木克己, 田口豊喜, 志村啓, 長谷川裕, 小堀博道, 本宮佳典, 佐藤裕治, 菅谷寿鴻: "相変化光ディスクの赤色 LD 光ヘッドによる高密度記録特性", 電子情報通信学会技術研究報告, **MR92-72**, CPM92-149 (1992) 43-48.
- 7) T. D. Milster and T. S. Gardner: "Modeling of a magneto-optic read path," Proc. SPIE, **899** (1988) 61-68.
- 8) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. S. Immink: *Principles of Optical Disc Systems* (Adam Hilger Ltd., Bristol, 1985) pp. 43-44.
- 9) 本宮佳典: "信号再生のシミュレーション", 光学連合シンポジウム浜松'94 講演予稿集 (1994) pp. 303-304.
- 10) 佐藤裕治, 池田賢市, 木下良夫, 尾高敏則, 佐々木修: "高精細ビデオディスクの信号伝達特性", テレビジョン学会誌, **44** (1990) 1376-1382.
- 11) 佐藤裕治: "短波長半導体レーザーを用いた高密度光ディスク", 応用物理, **61** (1992) 52-55.
- 12) S. Kubota: "Aplanatic condition required to reproduce jitter-free signals in an optical digital disk system," Appl. Opt., **26** (1987) 3961-3973.
- 13) R. T. Lynch, Jr.: "Modeling the performance of optical recording read channels," Appl. Opt., **27** (1988) 723-727.
- 14) 本宮佳典, 村上照夫: "光ディスクにおける RLL 多値変調符号", 電子情報通信学会論文誌 A, **J76-A** (1993) 1234-1241.
- 15) 本宮佳典: "光ディスクの回折光解析", 光設計研究グループ機関誌 (AP952220), No.7 (1995) 35-40.
- 16) Y. Kashihara, Y. Sakai, Y. Okamoto and H. Kobori: "A

- partial response maximum likelihood simulator to evaluate the effects of various deterioration factors in optical disks," Jpn. J. Appl. Phys., **37**, Part 1, No. 4B (1998) 2217-2225.
- 17) S.-J. Oh, S. Jo and S.-G. Kim: "An analysis of noise power spectrum due to mark variations of an optical disk system," Jpn. J. Appl. Phys., **37**, Part 1, No. 4B (1998) 2210-2213.
- 18) 本宮佳典: "光ディスクに起因する雑音の解析", 光学, **23** (1994) 364-370.
- 19) Y. Honguh: "Analysis of retrieval signal deterioration caused by disk surface roughness," Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3 (1989) 115-119.
- 20) Y. Honguh: "Diffraction analysis of groove noise in optical disk readout signal," Proc. SPIE, **2514** (1995) 258-266.
- 21) Y. Honguh: "Diffraction analysis of optical-disk readout signal deterioration caused by mark-profile fluctuation," Appl. Opt., **33** (1994) 857-862.
- 22) J. P. de Kock, S. Kobayashi and H. Yamatsu: "Disk noise measurement system for optical disks," Opt. Rev., **2** (1995) 424-433.
- 23) M. R. Madison: "A model of write noise in magneto-optical media," J. Appl. Phys., **73** (1993) 5782-5784.
- 24) A. B. Marchant: "Cover sheets for dust protection," *Technical Digest of 1984 Topical Meeting on Optical Data Storage* (1984) FC-A4-1-4.
- 25) K. Seo, T. Kawashima, T. Yamagami and T. Watanabe: "Error propagation due to dust on a thin substrate disk," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 659-661.
- 26) Y. Honguh: "Analysis of optical disk readout signal deterioration caused by dust on the substrate," Opt. Rev., **2** (1995) 14-19.
- 27) C. Peng and M. Mansuripur: "Sources of noise in erasable optical disk data storage," Appl. Opt., **37** (1998) 921-928.

(1998年7月2日受理)