並列光制御技術の開発とその応用に関する研究

2002年

小倉　裕介

並列光制御技術の開発とその応用に関する研究

2002年

小倉　裕介

目 次

緒論

インターネットの普及により，人びとは世界中のさまざまな情報を空間・時間を超えて共有し，また，自らも情報を発信することができるようになった．このことは，情報技術（IT: Information Technology）革命の原動力となり，地球上のさまざまな社会的活動の大変革が始まろうとしている．現代の情報社会を支えているのは，大規模集積回路（VLSI）を基礎とした電子プロセッサであり，将来的にもその役割，重要性は増大するであろう．今や製造プロセスにおける最小加工寸法は $0.1\mu m$ に迫り [1]，携帯電話などの情報システムそのものが単一の VLSI チップで実現されようとしている [2]．また，パーソナルコンピュータのクロック周波数は数ギガヘルツに達し，ネットワークの総伝送容量はテラヘルツを越えつつある [3]．しかし，電子プロセッサを中心とした逐次処理に基づく情報システムに限界があることも事実である．例えば，データベース検索や画像・動画データなどに対しては並列分散処理が有利である．多様化する情報に対応するためには，情報容量，処理能力，フレキシビリティなどあらゆる面で洗練された新たな概念に基づくシステム設計とその実現が期待される．

光は高速性，空間並列性，多次元性，非接触性など多くの特徴をもち，情報媒体としての能力に優れる．複数の属性を並列に制御できる多重性は光の本質的な特性であり，多くのシステムで有用であると考えられる．なぜなら，同時に取り扱うことのできる情報量が増加するため，システム全体としての処理速度が飛躍的に向上する，多重光を一括して扱うため，処理の自由度が増加する，システムをコンパクトにできる，などの利点が得られるからである．したがって，光がもつ複数の属性の制御を利用したシステムの有用性は高くなり，これらの属性を一括して扱う技術 — 並列光制御技術 — はますます重要になってくる．

自由度の高い光波制御を実現する光学デバイスとして，位相光学素子（DPE: Diffractive Phase Element）がある [4, 5]．DPE は空間的に拡がりをもつ光の位相を並列に変調することにより光波の制御を実現する．DPE を光学システムへ応用するためには，最適な位

相変調分布を得るための表面構造の設計が重要である．1972年にGerchbergらが発表した，遠視野像の強度パターンから位相分布を求める反復アルゴリズム [6] はDPE設計に有用である．その後，拘束条件を改良したAdaptive-additive アルゴリズムやAdaptive-multiplicative アルゴリズムが提案された [7]．これらのアルゴリズムは収束性が証明されており，比較的短時間で良好な結果を得られることから，今なおDPE設計の主流の方式である．このほか，1993年にGaleらにより2段階の最適化法 [8]，1996年にDreselによりIterative finite-element mesh adaption [9]，1997年にBengtssonによりOptimal-rotation-angle（ORA）法 [10]，ChenらによりNonlinear least-squares 法 [11] などが提案されているが，計算コストやフレキシビリティ，対象とするDPEの特性などにより，アルゴリズムの性能として一長一短がある．また，DPEの作製を容易にするための位相量子化アルゴリズムとしては，反復設計の中で位相の量子化を行う段階量子化法 [12] や，一旦得られた連続的な位相変調量分布から量子化条件を決定する位相シフト法 [11] などがある．DPEは，光インターコネクション [13]，疑似無回折ビーム生成 [14]，レーザービームのリレー [15]，はんだ付け [16] など幅広く応用されており，今日の光学システムを多方面から支えている．

DPEは，レンズやミラーに代表される屈折・反射型の光学素子では実現が困難であるような，複雑な機能を単一の素子として具現化できることに最大の特徴がある．一方，波長多重性は光のもつ優れた特性でありシステムの高性能化に有効であるが，システムとして広い波長範囲を精密かつ効率的に制御するためには，光学素子レベルでの工夫が不可欠となる．DPEの潜在能力は高く，複数の波長を含む光を一括して制御することにより，応用分野をさらに拡大することができる．例えば，DPEが屈折型素子とは逆の波長分散特性を示すことを利用し，レンズの色収差補正がなされている [17]．また，波長分散が大きいことから，CD・DVD互換2焦点ピックアップレンズ [18] にも適用されている．5波長の多重分離 [19] や，マイクロレンズとの組み合わせによる像の色分離 [20] などの実証例もある．設計アルゴリズムの面では，1994年にYangらが，自らがすでに提案していたYang-Guアルゴリズムを発展させ，複数の波長での利用を想定したDPEの設計手法として発表した [21]．また，1998年にBengtssonは，ORA法を改良して2波長で独立したスポットパターンを生成するDPEを設計することに成功し，その機能を実験的に検証した [22]．しかし，多波長に対して独立したパターンを生成するDPEの設計手法は確立されておらず，性能を系統的に解析した例や，機能を実験的に示した例も見あたらない．

得られた光波分布を何らかの物体や物質に作用させることにより，その物体や物質を制御することもできる．光と物体との相互作用により生じる光圧を利用した光マニピュレーション技術はその代表例である．Ashkin らは，1971 年には散乱力を利用した光浮揚 [23] を，1986 年には勾配力を利用したマイクロ・ナノ粒子の 3 次元光トラップ [24] を実験的に示し，トラップ状態でのイースト菌の細胞分裂などを確認している [25, 26]．光圧により生じる力の大きさはモーター分子が運動する力とほぼ等しくピコニュートン程度であり，Molloy らはミオシン分子 [27]，Kuo らはキネシン分子 [28] とアクチンフィラメントとの相互作用をそれぞれ測定し，これらの運動機構の解明が試みられている．Borowicz らは，集光ビームの光圧によるポリマーの会合 [29] について報告している．また，照射するレーザー光や物体の条件によっては回転力が発生し，高次レーザーモードビームを用いた粒子の回転 [30] や，複屈折物体の整列やスピン [31]，大小 2 つの粒子を接合した物体を利用したスピンマイクロモーター [32] などの例がある．これらを実現するために必要な光波分布制御は，ミラーを用いた高速走査 [33]，空間光変調器 [34]，計算機ホログラム [35] などにより行われているが，機能がハードウェア構成に依存する，外部デバイスが必要でありシステムの縮小化が困難，などの課題も残っている．

光波分布制御や光圧による物体制御においては，並列光制御の実現により機能性やフレキシビリティが増し，実機システムにおける有用性が高まる．今日では，実用的な並列光制御の実現に寄与しうる高性能なデバイスが多く開発されている．例えば，垂直共振器型面発光レーザー（VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）アレイを利用すれば，並列的な発光制御により，空間的に自由に光分布を生成できる．電子デバイスとの複合集積も容易であり，コンパクトなシステム構成に適する．光の波長よりも細かな構造をもつ DPE は，狭帯域波長フィルタ [36] や偏光ビームスプリッタ [37]，広帯域の $\lambda/4$ 板 [38] などに利用できる．また，波長オーダーの物体を規則的に整列したフォトニック結晶は，スーパープリズム現象 [39] や自己コリメーティング現象 [40] など特殊な光学特性を示し，これまでにない光制御素子としての期待が集まっている．これらのデバイスは並列光制御技術の具現化において，大きな力となる．

本研究の目的は，利用価値の高い光応用技術の実現に貢献する新しい並列光制御技術を開発し，並列光制御に基づく実用的な応用を通して，並列光制御技術の能力を示し，その有用性を明らかにすることである．そのため，波長多重光や空間多重光の並列制御に基づく光応用技術を提案し，その能力を実証する．具体的には，DPE によるレーザービーム

リソグラフィの高分解能化方法，波長多重光の並列制御を目的とした位相光学素子の開発とシャーシ間波長多重光インターコネクションへの応用，VCSEL アレイを利用した空間的な光分布の並列制御に基づく光マニピュレーション技術の開発と3次元物体操作への応用，並列光制御技術と分子計算技術の融合による情報処理手法，に関する研究を行う．

以下に本論文の構成と内容を示す．

第1章では，本研究の位置づけを明らかにするため，並列光制御技術について述べる．本研究の対象とした並列光制御技術を定義する．光波分布の制御方法や光圧を利用した物体制御方法について述べる．並列光制御技術の特徴をまとめ，その応用例を示し，本研究の位置づけを明らかにする．

第2章では，光学素子の作製や，光学システムの集積化の手法として頻繁に利用されるリソグラフィ技術の高分解能化について検討する．DPE を用いた集光スポットの変調とレジスト材料の非線形性を利用した，描画パターン高分解能化の原理を示す．DPE の設計方法について述べ，設計結果を示す．作製素子を用いたスポットパターン観察により，その機能を確認する．また，レーザービーム描画へ適用し，提案手法の有効性を示す．

第3章では，複数の波長に対して異なる機能を有する波長多重位相光学素子（WMDPE）の設計方法と性能について検討する．ORA 法を改良した設計方法について述べ，設計例からその正当性を示す．7波長に対する WMDPE を設計・作製し，その機能を確認する．数値計算により，さまざまなパラメータに対する WMDPE の性能を評価し，波長多重システムへの適用能力を示す．

第4章では，WMDPE を用いた応用の一例として，シャーシ間光インターコネクションを提案する．2種類の異なるインターコネクトパターンを実現する WMDPE を設計・作製する．光学実験により WMDPE の静的なパターンを観察し，提案手法の有効性を示す．

第5章では，発光分布の並列制御が可能な VCSEL アレイを利用した光マニピュレーション技術を考案し，その機能を確認する．VCSEL アレイを利用した光マニピュレーションの特徴を述べ，試作したシステムの構成と性能を示す．VCSEL アレイの利用により実現される，光マニピュレーションの特徴的な機能について実験的に確認する．

第6章では，複数のビームを用いた3次元微小物体操作法について検討する．複数ビーム照射により誘起される光圧による力を数値計算により求め，その特徴を示す．下方からの照射に基づくシステムを試作し，VCSEL アレイ光マニピュレーションの3次元物体操作能力を実証する．

第７章では，並列光制御技術の情報処理への応用について検討する．VCSEL アレイ光マニピュレーションを利用することにより，微小粒子の移動範囲が照射スポットパターンによって変化することを示す．並列光制御技術と分子計算技術を融合した，空間分割に基づく光分子コンピューティングを提案し，その能力について検討する．

最後に本研究の成果を総括し，今後の研究課題について述べる．

第 1 章

並列光制御技術

1.1 定義

光応用システムを構築する上で，効率的な光制御技術の開発は重要である．特に光波は，強度，位相，偏光，波長，波数ベクトルなど多くの属性を持つことから，それらに対する並列・一括制御の実現により，光応用技術の新たな展開が期待される．本論文では，このように複数の光属性を制御することにより，意図した機能や効果を得る技術を並列光制御技術と定義する．

光制御技術においては，その結果として得られる機能・効果が重要な意味をもつ．光波のある属性に関する空間的・時間的な分布が必要とされる場合には，その光分布の生成が重要である．また，光を他の物体や物質に作用させる系においては，制御した光を利用し，対象物に何らかの効果を誘起する．本論文では，特に，光波の並列制御により達成される効果・機能に注目し，その実現方法に関する研究を行う．具体的には，リソグラフィ加工における分解能制御方法，スポットアレイの生成パターン制御方法，微小物体の位置制御方法について検討する．

1.2 光波分布の制御方法

光波分布の制御方法は，光源の直接変調と，光学素子を用いる光源からの光の間接的な変調に基づく方式に分類できる．

1.2.1 光源の直接変調による制御

光源の直接変調に基づく光制御技術としては，半導体レーザーにおける駆動電流変調があげられる．半導体レーザーは，しきい値電流以上の駆動電流で発光し，電流量に応じて

発光強度が変化する．活性領域が小さいため，固体レーザーや気体レーザーなどとは異なり，ギガヘルツを超える高速変調が可能であることを特徴とする．小型であり，他の素子との組み合わせも容易である．

並列光制御の観点からは，基板と垂直に共振器を構成することで，高密度な2次元アレイ集積を実現した垂直共振器型面発光レーザー（VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）が重要である [41, 42]．VCSELは，低しきい値電流（現在では，最高水準で数 10μA），高速変調性（最高 12.5GHz），単一波長性などの優れた特徴をもつ．これらの特徴から，光通信や光情報処理，光インターコネクションなどへ積極的に応用されている [43–48]．

VCSELの発振波長は使用する材料により異なる．InP系では $1.3-1.5\mu$m，GaAs系では $0.8-1.3\mu$m，GaN系では $0.3-0.6\mu$m など，広い波長範囲に対応している．また，同一の材料を利用した場合でも，共振器の長さによって発振波長をある範囲内で変化させることができる．したがって，VCSELアレイにおいて，素子ごとに共振器長を精密に制御すれば，多波長の2次元レーザーアレイが実現できる [49]．また，マイクロマシン技術を利用し，反射鏡を電気的に制御することにより，波長可変VCSELも作製されている [50, 51]．現在，波長可変VCSELは，50nm以上の波長幅，メガヘルツオーダーの切り換え速度が達成されている．

1.2.2　光源の間接的変調による制御

光源の間接的変調に基づく光制御技術の代表例として，レンズ系による結像やフーリエ変換があげられる．レンズによる結像は，ある場所における光波の分布を，そこから離れた別の場所へ射影する光制御技術であると考えられる．また，レンズ系の配置によっては，光波の複素振幅分布のフーリエ変換が可能となる．

より自由度の高い光制御を実現する方法として，回折光学素子（DOE: Diffractive Optical Element）[4, 5] の利用があげられる．DOEは光の回折現象を利用した光制御素子であり，ホログラフィック光学素子（HOE: Holographic Optical Element）と位相光学素子（DPE: Diffractive Phase Element）に分類されている．HOEは，物体波と参照波を干渉させて干渉縞を記録し，参照波を照射して物体光を再生するホログラムの原理を，入射光に対する波面変換機能をもつ光制御素子として拡張したものである．HOEは基本的に光波の振幅変調に基づき機能を得ている．

一方，DPE は，ガラスなど基板の凹凸により，入射光の位相を変調する光制御素子であり，リソグラフィ技術を利用して作製できる [52]．DPE は，種々の光学システムの開発，あるいは，その機能向上や縮小化に貢献する有用な素子として，数 10 年来の注目をあびている．波面制御の自由度が高いため，他の光学素子では複雑な組み合わせを必要としたり，場合によっては実現不可能な光制御機能を単一の光学素子として具現化できる．また，光の利用効率が高く，薄型かつ軽量であるなどの特徴を有している．近年では，コンピュータの進歩や微細加工技術の発展など，DPE の設計や作製に必要な周辺環境が充実し，レンズ系の機能向上 [17, 18] や，ビーム形状の加工 [14–16, 53–59]，超微細構造による偏光ビームスプリッタ [37]，広帯域の $\lambda/4$ 板 [38] など，その応用範囲は著しく拡大されている．

間接的変調に基づき，特に空間的な光強度分布の制御を実現するための手法として，一本のビームを多数に分割する方法や走査する方法があげられる．ビームの分割は，ビームスプリッタなどを複雑に組み合わせても行えるが，簡便性を考慮すればDPE の利用が適している．スポットアレイジェネレータと称するこの種の DPE は，空間的に分散配置された光機能素子へ光信号を導く素子として，光インターコネクションや光コンピューティングで重要な役割を果たしている [53–55]．一方，ビーム走査に基づく手法では，ガルバノミラーや音響光学素子などの偏向器が利用できる．光を用いて何らかの効果を誘起する系においては，その反応速度を十分に上回る走査速度があれば，時間平均として等価的に任意の光強度分布を得ることができる．

1.3 光圧による物体制御方法

物体に光を照射すると，物体はピコニュートンオーダーの力を受ける [60]．これは，光圧と呼ばれ，光と物体の相互作用により誘起される．この力を制御することにより，自由に物体を操作することができる．光圧を利用した物体操作法を光マニピュレーションと言い，多くの分野で利用されている [24–32, 61]．なお，物体を 3 次元的にある領域に閉じこめて捕捉し，操作する場合は，特に，光トラップ（光ピンセット）と呼んでいる．

光トラップによる誘電体粒子の捕捉原理は，物体が波長よりも大きいとき，以下のように幾何光学的に説明できる．レンズでレーザービームを集光し，粒子に照射する系を考える．粒子の屈折率は，それを取り巻く媒質よりも大きいとする．ビームを照射したとき

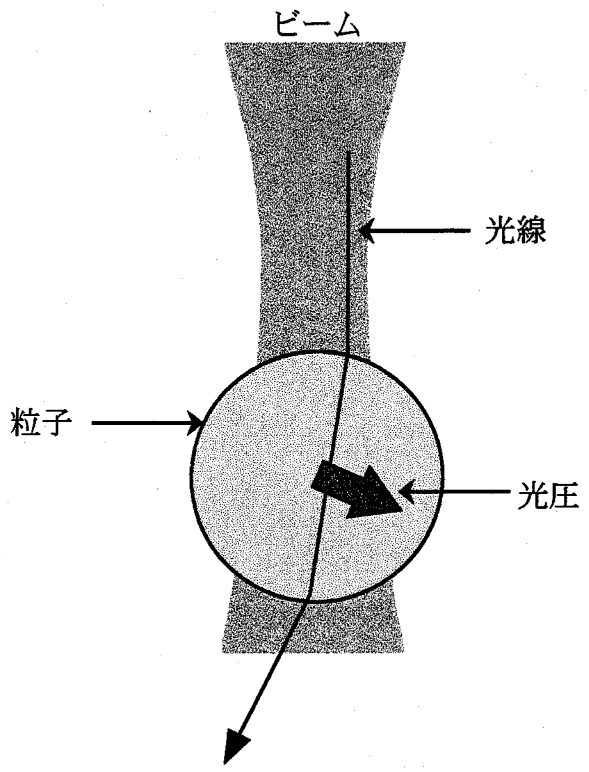


図 1.1　物体への光の照射と，フォトンから粒子が受ける光圧.

に，あるひとつの光子により粒子に誘起される光圧を図 1.1 に示す.

粒子は周囲の媒質とは異なる屈折率を持つため，入射光線の伝搬方向は，粒子表面での反射や屈折により変化する．これは，光子の運動量が変化することを意味している．このとき，光子と粒子の系における運動量保存則から，粒子には光子の運動量変化を打ち消すような力が与えられる．粒子を照射する光は，光子の集合と考えることができるため，粒子が受ける力は，各光子から受ける力の合力となる.

各光子から受ける力は，光散乱に起因する散乱力と，光の電場勾配に起因する勾配力に分けられる．散乱力はビームの伝搬方向へ粒子を押し出す力，勾配力はビーム伝搬とは逆の方向へ引き込む力となる．照射ビームが十分集光されている場合には，粒子の位置により，勾配力が散乱力を上回る領域が存在する．このため，鉛直上方から粒子を照射すると，粒子にかかる重力との平衡位置に粒子を捕捉できる．一方，照射ビームの集光が十分ではない場合は，勾配力はほとんど生じず，散乱力により，粒子を押す力が生じる．この

場合には，鉛直下方から物体を照射すれば，粒子の重力との平衡位置に粒子を浮揚できる．また，粒子が光軸とは垂直な方向に変位した場合には，粒子を光軸方向に押し戻す力が発生し，粒子は常にビームの中心位置に押し込められる．粒子を捕捉した状態で集光点を移動すれば，3 次元的に粒子を輸送することが可能である．

1971 年に，重力と釣り合う程度のレーザー光を鉛直下方から照射することにより，散乱力を利用した物体の浮揚が確認されている [23]．1986 年には，光の勾配力を用いた微小誘電体粒子の 3 次元捕捉が報告された [24]．これ以来，光圧や光マニピュレーションの応用範囲は，細胞の操作 [25, 26]，微小力測定 [28]，分子会合や相転移の制御 [29, 61]，マイクロマシン [32] などに及んでいる．レーザービームの変調を利用すれば，単なる物体捕捉以外の機能を実現でき，干渉縞を用いた粒子の整列 [62]，粒子の回転制御 [30, 31, 63]，低屈折率物体の操作 [64] などの報告がある．また，時間的な光変調を応用した例としては，集光ビームの高速走査により，直径 1μm 程度の粒子を任意の形状に配列した例 [33] や，液晶空間光変調器に表示したフレネルゾーンプレートによるノンメカニカルな物体操作 [34]，同じく計算機ホログラムパターンの切り換えによる多機能 3 次元物体操作 [35] などがある．

1.4 並列光制御技術の特徴

光波分布を制御する観点からは，並列光制御技術は以下の特徴を持つ．

1. 高速な制御が可能．
2. 並列・一括な制御が可能．
3. コンパクトにシステムを構成できる．

また，光の物体への作用を利用した制御技術として，物体の位置制御技術があげられる．この観点からは，以下の特徴を有する．

1. 非接触で制御が可能．
2. μm オーダーの対象物の制御が可能．
3. ノンメカニカルに制御可能．

4. 複数物体の並列・一括制御が可能.

これらの特徴を活かすことにより，新しい光応用システムの開発が期待される.

1.5 応用例

並列光制御技術の応用例として，波長分割多重通信があげられる [65]．数100波におよぶ異なる波長チャンネル信号の並列伝送により，超大容量の信号伝送が実現されている．ファイバーグレーティングによる狭帯域フィルタやアレイ導波路型合分波フィルタなどの開発が進められており [66, 67]，フォトニックネットワーク形成をめざした研究が進められている.

別の応用例として，並列自由空間光インターコネクションがある [44, 45]．VCSEL アレイや受光素子は，それぞれマイクロレンズアレイとモノリシックに集積可能である．このような実装技術を利用すれば，高密度な信号の高速伝送を，コンパクトなシステム構成で実現することができる．250μm ピッチ，1×12 アレイにより，1 チャンネルあたり 500Mb/sec の信号伝送速度が実証された報告 [68] などがある.

ただし，これらの例は，単純な波長チャンネルの重ね合わせや空間チャンネルの並列利用に基づいたものであり，光の多次元性を十分に利用したものではない．光応用技術の潜在能力は高く，システム構築の立場からは新しい並列光制御技術の開発とその応用が期待される.

1.6 本研究における研究項目

本研究では，新たな並列光制御技術の開発と並列光制御に基づく応用技術の検討を行い，実験的にそれらの有効性を確認する．具体的な研究項目は以下のとおりである．なお，本論文の構成を図 1.2 に示す.

1. DPE によるレーザービームリソグラフィの高分解能化法の検討（2 章）.

   レーザービームリソグラフィは，並列光制御に用いられる DPE などを作製するための有用な素子作製技術である．そこで，レーザービームリソグラフィの分解能を向上するための DPE を開発し，その性能を実験的に検証する.

2. 波長多重光の並列制御を目的とした DPE の開発とシャーシ間波長多重光インター

コネクションへの応用（3，4章）．

DPEはさまざまな光学システムにおいて有用と考えられるが，特に，波長多重システムへの適用は効果的なものと期待される．しかし，任意のパターンを出力する多波長DPEの実験的な機能検証やその特性に関する研究は行われていない．そこで，多波長DPEに適した設計方法を開発し，その機能を実験的に確認する．また，数値計算によりその特性を明らかにし，波長多重システムへの適用性を検討する．さらに，開発した波長多重DPEをシャーシ間光インターコネクションへ応用し，波長多重システムにおける有用性を確認する．

3. VCSELアレイを利用した空間的な光分布の並列制御に基づく光マニピュレーション技術の開発（5，6章）．

   光マニピュレーション技術においてビームの変調を用いることにより，その機能を向上できる．そこで，VCSELアレイデバイスの新しい応用分野として，その光分布生成に対する高い自由度を利用した光マニピュレーション技術に関する研究を行う．VCSELアレイ光マニピュレーションシステムを試作し，微小物体に対するさまざまな操作を実験的に検証する．また，複数のビームを利用した物体操作法の有用性について検討する．

4. 並列光制御技術を利用した情報処理手法の検討（7章）．

   光コンピュータ，分子コンピュータ，量子コンピュータなど，媒体の並列性を利用した情報処理システムの開発が進んでいるが，情報処理分野を革新するレベルには至っていない．そこで，並列光制御技術の新しい応用分野の開拓をめざし，並列情報処理への適用を提案する．VCSELアレイ光マニピュレーションによる並列物体操作や波長多重DPEによる光波分布制御などの並列光制御技術と，分子計算技術を融合した光分子コンピューティングについて検討する．

並列光制御技術とその応用に関する研究

並列光制御技術

第1章　並列光制御技術

並列光制御技術の定義，特徴，応用

位相光学素子による加工分解能制御

第2章　レーザービーム描画の高分解能化のための位相光学素子

レーザービームリソグラフィの高分解能化方法の検討

波長多重位相光学素子によるスポットアレイパターン制御

第3章　波長多重位相光学素子の開発

波長多重光に対する並列制御用デバイスの開発

第4章　波長多重位相光学素子のシャーシ間
光インターコネクションへの応用

波長多重位相光学素子の並列光インターコネクションへの応用

VCSELアレイ光マニピュレーションによる物体の位置制御

第5章　並列アレイ光源を利用した物体の光学的
位置制御

垂直共振器型面発光レーザーアレイの発光分布の並列制御
による光マニピュレーション技術の開発

第6章　複数ビームの同時照射による3次元微小物体操作

複数のビームの多重化による3次元物体操作技術の検討

光分子コンピューティングへの応用

第7章　分子計算技術との融合による情報処理への展望

並列光制御技術を利用した空間分割に基づく並列情報処理の検討

図 1.2　本論文の構成.

第 2 章

レーザービーム描画の高分解能化のための位相光学素子

2.1　緒言

位相光学素子（DPE: Diffractive Phase Element）は，従来の屈折型や反射型のデバイスと比較して，薄型・軽量である，集積化が容易，機能の自由度が高いなど多くの特徴を有しており，光学システムにおける光制御デバイスとして重要な役割を担っている [5]．DPE の潜在能力を十分に引き出し，実用システムで活用するためには，具現化の手段としての微細加工技術は欠かせない．特にリソグラフィ技術は，DPE を含む微小光学デバイスの作製や光学システムの構築・集積化など光学分野におけるさまざまな場面で多大な恩恵をもたらしている．

リソグラフィの加工分解能は，作製デバイスやシステムの性能に影響する．回折限界により制限される分解能を向上するため，露光光学系の高開口数（NA: Numerical Aperture）化や露光短波長化が進められてきた．しかし，回折限界を超える分解能を達成するためには，新たな機構や概念が要求される．例えば，半導体集積回路作製に利用されるマスク露光型のフォトリソグラフィにおいては，比較的周期性の高い直線パターンに適した位相シフトマスクによる超解像法が利用されている [69]．一方，光学素子作製には，非周期的パターンや円形など直線以外のパターン描画も必要とされるため，任意のパターンを自由に描画できる走査型レーザービームリソグラフィが広く利用される．レーザービームリソグラフィに対しては，分解能向上という目的に対し，スポットパターンの変調による方法が考えられる．結像システムにおける点像分布関数を制御する方法にアポダイゼーション技術がある [70–72]．フォーカスのずれによる像のぼけを抑制するため，点像のサイドローブのパワーをメインローブに集めるような瞳関数の変調が行われる．しかし反面，メインローブ径が拡がってしまうため，描画高分解能化への適用はできない．

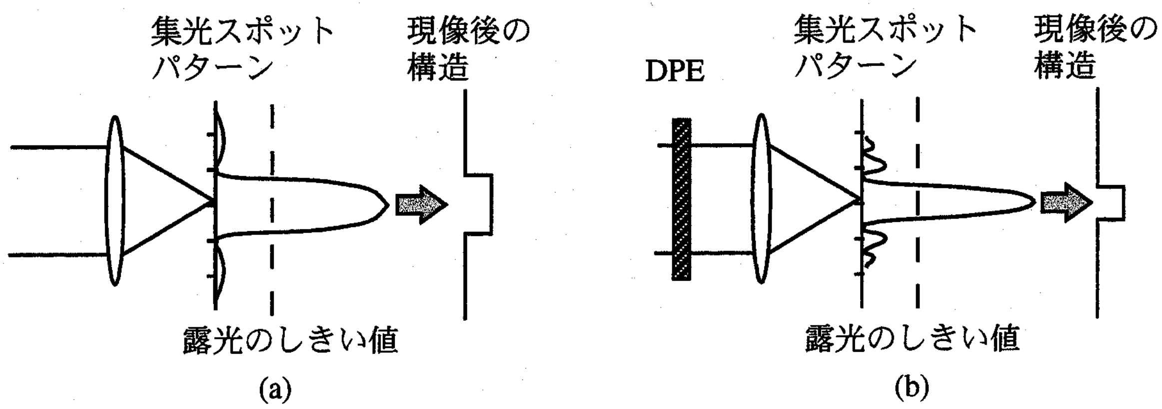


図 2.1　DPE を用いた描画高分解能化．(a) 従来の光学系，(b) 提案光学系．

本章では，レーザービームリソグラフィの分解能を向上させるための方法として，DPE の利用を提案する．DPE がもつ光制御に対する高い自由度を利用することにより，目的のスポットパターンを得ることが可能となる．2.2 節では，DPE を利用したレーザービームリソグラフィの描画高分解能化の原理について述べる．2.3 節では，DPE の設計手法である Gerchberg-Saxton アルゴリズムと段階量子化法について述べる．2.4 節では，低 NA の集光光学系を用いた検証実験により，提案手法の原理を確認する．2.5 節では，作製素子をレーザービームリソグラフィへ適用し，描画パターンから分解能を評価する．また，数値計算により，集光光学系の焦点深度を評価する．

2.2　高分解能化の原理

走査型レーザービームリソグラフィでは，対物レンズで集光したスポットの走査により目的のパターンを描画する．DPE を利用したスポットパターンの変調による描画高分解能化の原理を図 2.1 に示す．図 2.1(a) の従来法では，光の回折限界により描画分解能が決定されるのに対し，図 2.1(b) の提案手法では，現像後により微細な構造が得られることがわかる．本手法の特徴は，フォトレジスト感度の非線形性を利用することにある．集光スポット径を縮小するためには，メインローブのエネルギーを周囲に分散させる必要があり，サイドローブ強度の増加は避けられない．しかし，フォトレジスト材料の非線形性により，一定レベル以下のサイドローブ強度の増加は許容できる．そこで，これらの関係を

利用することで，回折限界よりも微細なパターンの描画が可能となる．

2.3 位相光学素子の設計法

DPEにより特定の機能を実現するためには，位相分布の最適化が重要な課題となる．シミュレーテッドアニーリング法 [73] とGerchberg-Saxton アルゴリズム（GSA）[6] は様々なDPEの設計方法として広く利用されている．シミュレーテッドアニーリング法は高い精度でDPEを設計することができるが，GSAと比べ高い計算コストが必要となる．一方，GSAは短い時間で最適近似解を見出すことが可能である．本研究では計算コストを重視し，GSAを採用した．ただし，GSAで収束性と高い精度を保証するためには，適当な拘束条件の設定が要求されるため，本章では，DPE用に特別な拘束条件を考案し，設計アルゴリズムに導入する．

DPEの設計は2段階で行う．第1段階はDPEの連続的な位相分布を計算するものであり，第2段階は計算した位相分布の量子化を行うためのものである．本章では，第1段階に新たな拘束条件を導入したGSAを，第2段階には，Wyrowskiによる段階量子化法（SQM: Stepwise-Quantization Method）[12] を適用する．

2.3.1 Gerchberg-Saxton アルゴリズム（GSA）

GSAは拘束条件を付加しながら反復的に最適解を導くDPEの設計法である．その概要を図2.2に示す．具体的な手順は以下のとおりである．ここで，l は反復回数であり，観察面は集光レンズの焦点面とする．

1. 観察面での波面の初期位相分布 ψ_0 をランダムに選択する．

2. DPE面での波面を観察面での波面 $\sqrt{I_l}e^{i\psi_l}$ の逆フーリエ変換により計算する．ここで，$\sqrt{I_l}$ は観察面での波面の目標振幅を表す．結果を $A_l e^{i\phi_l}\left(= F^{-1}\left[\sqrt{I_l}e^{i\psi_l}\right]\right)$ と表す．ここで，F^{-1} は逆フーリエ変換オペレータである．l 回目の反復における目標振幅 $\sqrt{I_l}$ については，2.4節および2.5節でそれぞれ詳述する．

3. DPE面での波面の振幅 A_l を照明光の振幅 W_0 で置き換える．これをDPE面における拘束条件と呼ぶ．位相 ϕ_l は更新しない．

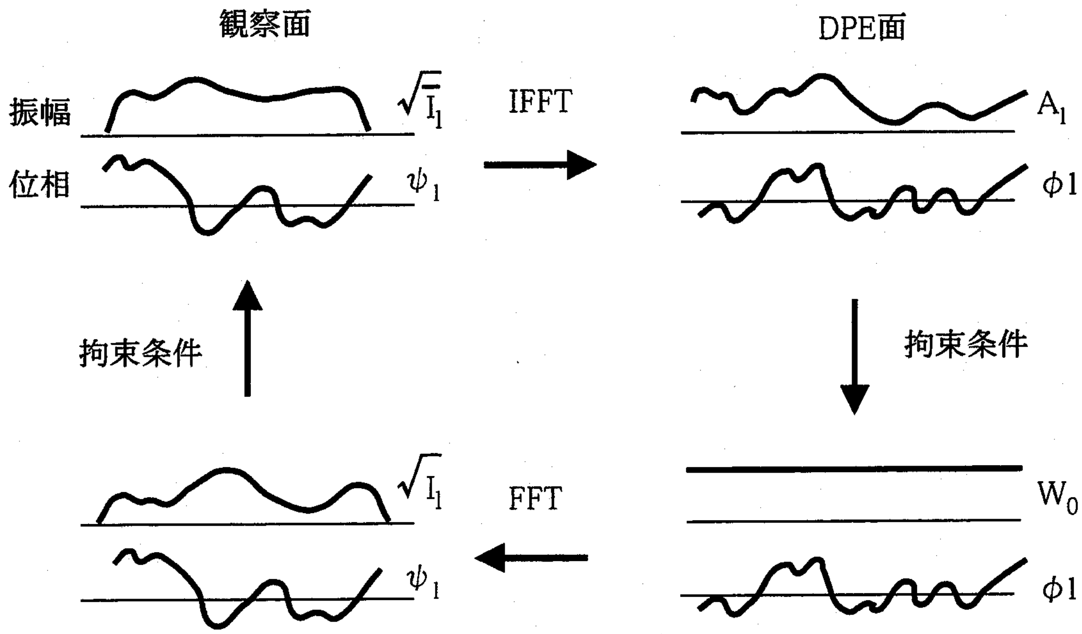


図 2.2　GSA による DPE 設計の概念図.

4. 観察面での波面を DPE 面での波面 $W_0e^{i\phi_l}$ のフーリエ変換により計算する. 結果を $\sqrt{I_l}e^{i\psi_l}$ $\left(= F\left[W_0e^{i\phi_l}\right]\right)$ で表す. ここで, F はフーリエ変換オペレータである.

5. 観察面での波面の振幅 $\sqrt{I_l}$ を次の反復の目標振幅 $\sqrt{I_{l+1}}$ で置き換える. これを観察面における拘束条件と呼ぶ. 位相 ψ_l は更新しない.

6. 反復回数があらかじめ設定した数に達するか, 条件 $I_{err} \leq I_{err'}$ が満たされれば, 反復を停止する. I_{err} は I_l と I_0 の平均自乗誤差であり, $\sqrt{\frac{\iint (I_0-I_l)^2\, dS}{\iint I_0^2\, dS}}$ で定義される. I_l と I_0 はそれぞれ反復で得られた強度分布と観察面の最終目標強度分布である. 本章では, $I_{err'}$ を十分小さく, 0.01 に設定した. もし, 条件が満たされなければ, 第2ステップへ戻る.

2.3.2　段階量子化法（SQM）

設計の第二段階として, 前項のアルゴリズムで得られた位相分布を SQM により量子化する. GSA との手順の違いは, 第3ステップの DPE 面における拘束条件に, 位相 ϕ_l の量子化処理が加わることである. SQM では, 全反復回数 J を P 個のサブサイクルに分割す

表 2.1 SQM におけるパラメータ.

Q	5	P	10
$\epsilon^{(1)}$	0.3	$\epsilon^{(2)}$	0.5
$\epsilon^{(3)}$	0.6	$\epsilon^{(4)}$	0.7
$\epsilon^{(5)}$	0.75	$\epsilon^{(6)}$	0.8
$\epsilon^{(7)}$	0.85	$\epsilon^{(8)}$	0.9
$\epsilon^{(9)}$	0.95	$\epsilon^{(10)}$	1.0

る．それぞれのサブサイクルでは Q 回の反復を行う $(J = PQ)$．第 p ステップにおいて，もし位相 ϕ が

$$\phi_z - 0.5\epsilon^{(p)}\Delta < \phi \leq \phi_z + 0.5\epsilon^{(p)}\Delta, \tag{2.1}$$

を満たせば，z 番目の量子化位相

$$\phi_z = z\Delta \qquad (z = 0, 1, 2, \ldots, N-1) \tag{2.2}$$

に変換し，それ以外は ϕ をそのままにしておく．N は位相レベル数を表し，$\Delta = 2\pi/N$ である．表 2.1 は SQM のパラメータであり，文献 [12] にならって設定した．

2.4 基本機能の確認実験

本節では，設計法の有用性と DPE による集光スポットパターン変調の原理を確認するために行った実験について説明する．

2.4.1 設計

2.3 節で述べたように，設計アルゴリズム中で拘束条件の設定は重要である．本節では，図 2.3 に示す規則を観察面での拘束条件として用いる．図 2.3 の左下に示す目標パターン $I_0(\xi,\eta)$ を考える．$I_0(\xi,\eta)$ の中央部分は，エアリーディスクパターンを半径方向に 1/2 に縮小したものであり，周辺部は一様な強度をもつ．エアリーディスクパターンは図 2.1(a) に示す集光システムに一様光が入射したときに焦点面に生成される．ここで C_{I_0} は定数である．ある反復の次の目標パターン $\bar{I}_{l+1}(\xi,\eta)$ は，その反復での出力パターン $I_l(\xi,\eta)$ に

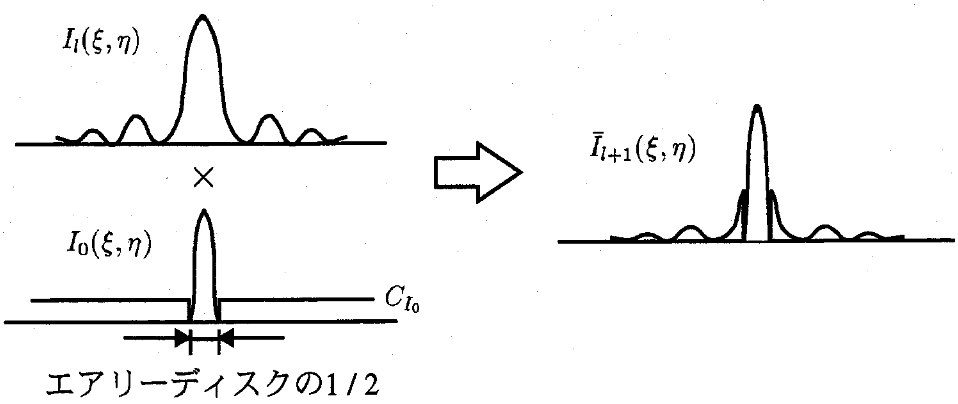


図 2.3 観察面での拘束条件.

$I_0(\xi,\eta)$ を乗することによって求める．この拘束条件により，サイドローブの強度を抑制しながら，メインローブ径を目標値に近づけることができる．

本拘束条件を設計アルゴリズムに導入し，2レベルのDPEを設計した．ピクセル数は512×512，反復回数は150回（GSA100回，SQM50回），DPEは直径32ピクセルの円形パターン，入射光は単位振幅平面波とした．また，C_{I_0} はいくつか値を変えて設計し，最終的には，最も収束性の良い1/2.2に設定した．設計結果を図2.4に示す．(a)が設計DPEの位相分布，(b)が集光光学系で得られる集光スポットパターンである．DPEの利用により，スポットパターンの中心から第一零点までの幅が約70%に縮小されており，目的の機能が得られていることがわかる．ただし，最大サイドローブ強度は，1.6%から15.6%に増加する．

2.4.2 集光スポットの観察

設計したDPEをレーザービームリソグラフィ[74, 75]と反応性イオンエッチング(Elionix Inc. 製，EIS-200ER)により作製した．フォトレジストにはAZ1500 (Hoechst Industry Limited 製)を使用した．

作製したDPEの性能を，低NAの集光光学系を用いて測定した．実験光学系を図2.5に示す．光源にはHe-Neレーザー（波長633nm）を，集光用には $f = 200$mm のレンズを用いた．また，遮光物体を用いて集光光学系のNAを0.0125に制限した．得られた集光スポットパターンとその中心プロファイルを図2.6に示す．(a)がDPEを利用しない場

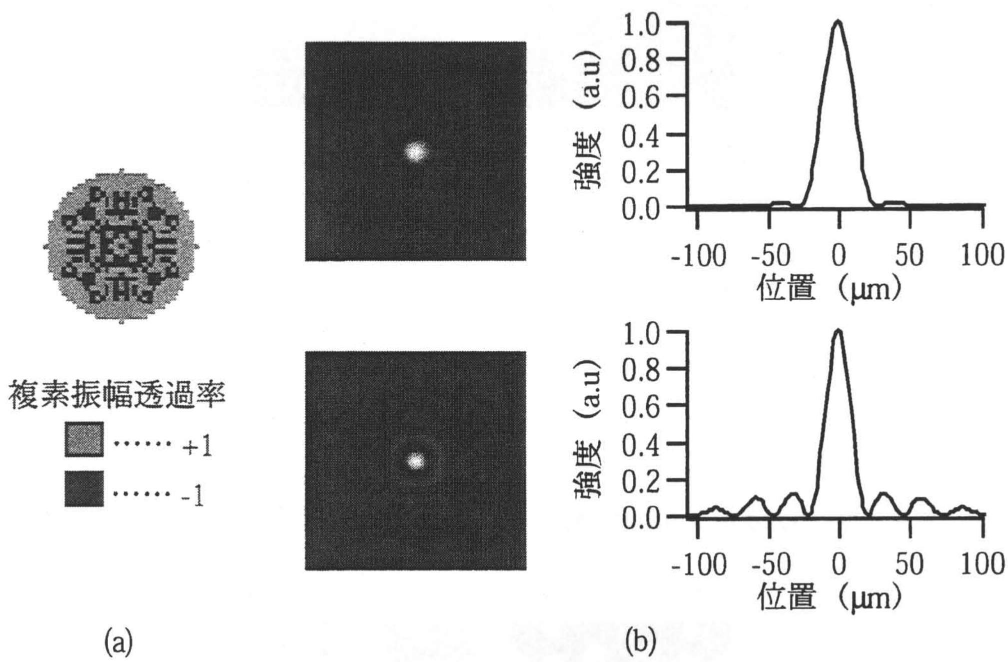


図 2.4 DPE の設計結果. (a) DPE の位相分布, (b) DPE を用いない（上）場合と DPE を用いる（下）場合のスポットパターンとプロファイル.

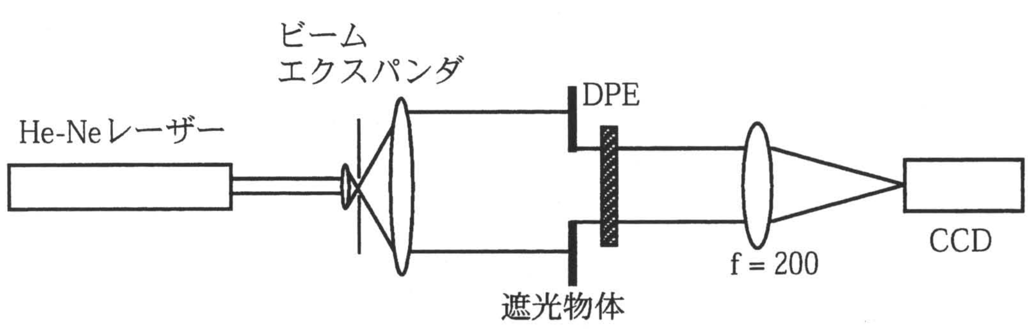


図 2.5 集光スポットパターン観察用光学系.

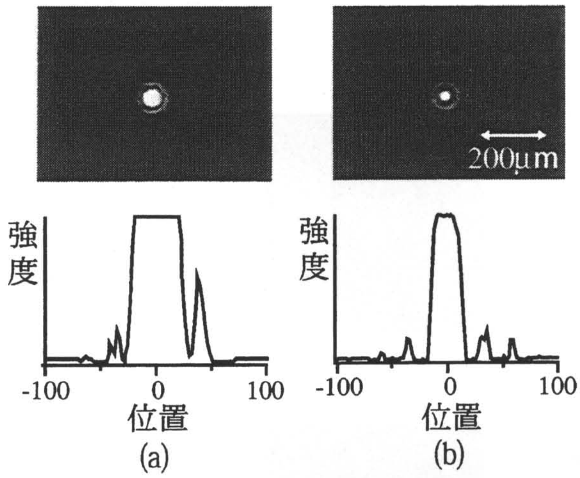


図 2.6　集光スポットパターンの観察結果．(a) DPE を用いない場合，(b) DPE を用いた場合．

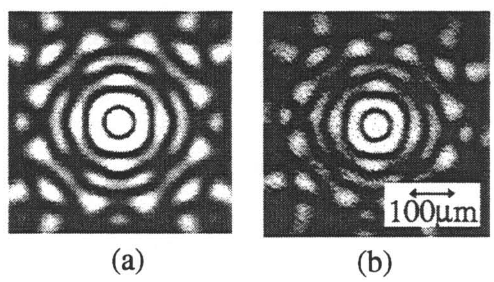


図 2.7　(a) 数値計算と (b) 光学実験でのスポットパターンの比較．

合，(b) が DPE を利用した場合である．また，図 2.7 は，サイドローブパターンの詳細を観察するために強度を調整して得られたパターンの (a) 計算結果と (b) 実験結果を比較した図である．メインローブ径は，DPE により 64μm から 48μm まで 75%に縮小されている．数値計算では 61.8μm から 43.2μm に縮小されると求められるため，多少の誤差を含んでいるが，サイドローブのパターンは数値計算と実験でほぼ一致している．これらのことから，設計手法の有効性，および，DPE による集光スポット径縮小の原理が実験的に確認できた．

2.5 レーザービーム描画への応用

本節では，DPE をレーザービームリソグラフィシステムに適用し，パターン描画への有効性の検証を行う．入射光と集光スポットは両者とも光軸に対して回転対称なため，回転対称なパターンによる DPE を用いる．

回転対称の DPE を設計するためには，2 次元フーリエ変換の代わりに 1 次元ハンケル変換を用いるのが便利である．集光スポットパターンの複素振幅分布 $T_s(\rho)$ は DPE の透過率分布 $t_s(r)$ のハンケル変換として以下のように表せる．

$$T_s(\rho) = \frac{2\pi}{\lambda f}\int_0^{\infty} t_s(r) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda f}\rho r\right) r\, dr, \tag{2.3}$$

ここで，λ は波長，f は集光レンズの焦点距離，r と ρ はそれぞれ DPE 面とスポットパターン面における半径，J_0 は第一種零次ベッセル関数である．逆ハンケル変換は式 (2.3) と同一の数式で表記できる．本研究では，離散ハンケル変換の計算に，Quasifast Hankel transform algorithm [76] を用いた．

2.5.1 設計

設計のための準備実験として，DPE に入射するビームの形状を測定した．レーザービームの強度分布 $I_{\mathrm{inc}}(r)$ を，パラメータ w_s を用いて以下のガウス分布で表す．

$$I_{\mathrm{inc}}(r) \propto \exp\left(-\frac{r^2}{w_s^2}\right). \tag{2.4}$$

使用したリソグラフィシステムでは，パラメータ w_s の測定値は 1.47mm であったので，設計手順の第 3 ステップにおける入射光振幅 W_0 を $\sqrt{\exp\left(-r^2/1.47^2\right)}$ と設定した．

観察面での拘束条件として，Adaptive-additive アルゴリズム [77, 78] を改良し，式 (2.5) に示す規則を適用した．

$$\bar{I}_{l+1}(\rho) = \begin{cases} I_0(\rho) & (\rho < \frac{1}{2}\rho_{1/e^2}) \\ \alpha I_0(\rho) + (1-\alpha) I_l(\rho) & (\rho \geq \frac{1}{2}\rho_{1/e^2}) \end{cases}, \tag{2.5}$$

ここで，ρ_{1/e^2} は従来の集光光学系で得られるスポットの，強度が中心の $1/e^2$ となる半径を表す．目標パターン $I_0(\rho)$ と式 (2.5) 中のパラメータ α は以下のように設定した．

$$I_0(\rho) = \begin{cases} 1 & (\rho < \frac{1}{2}\rho_{1/e^2}) \\ 0.003 & (\rho \geq \frac{1}{2}\rho_{1/e^2}) \end{cases}, \tag{2.6}$$

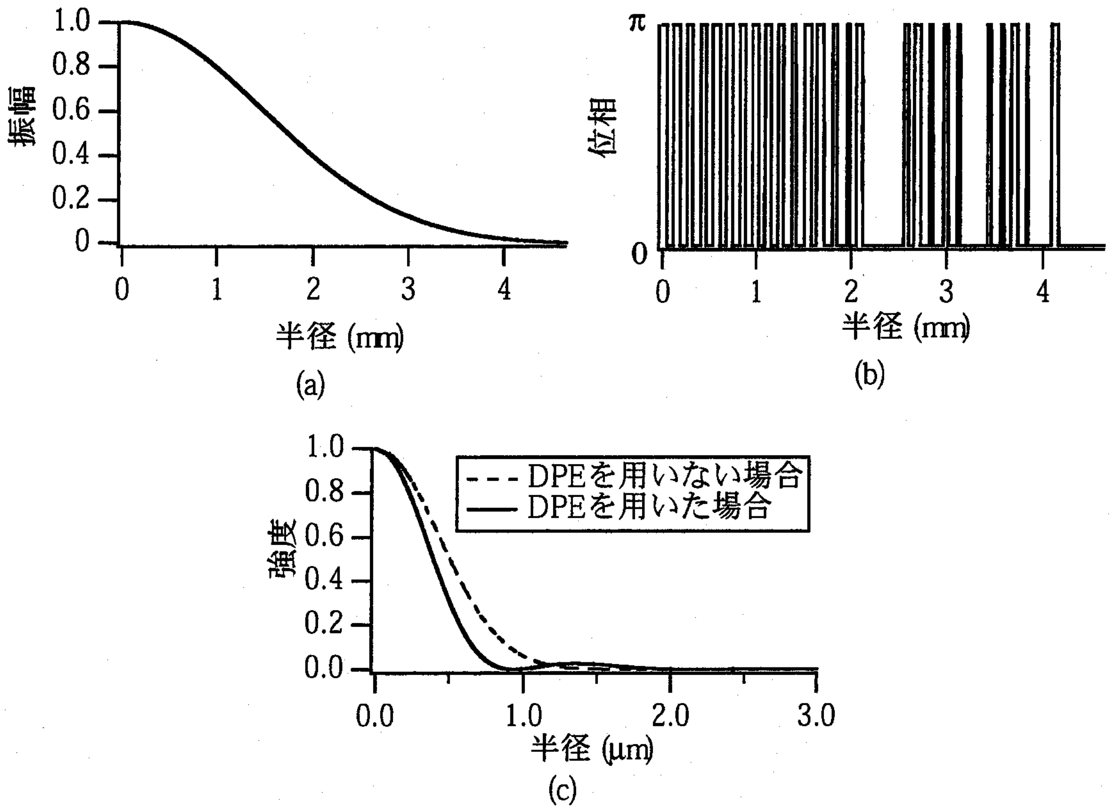


図 2.8　DPE の設計結果. (a) 入射ビームの振幅, (b) DPE の位相, (c) 生成されるスポットパターン.

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (l \leq 50) \\ 0.02 \times l & (51 \leq l \leq 100) \\ 2 & (101 \leq l \leq 150) \end{cases} . \tag{2.7}$$

ここで，l は反復回数である．総反復回数は GSA が 100 回であり，SQM が 50 回である．サンプリング点数は，DPE とスポット画面とも 4096，DPE の位相レベル数は 2 とした．

図 2.8(a) は入射ビームの振幅プロファイル，(b) は設計 DPE の位相分布，(c) は DPE を用いて得られるスポットパターンの計算結果である．ここで，スポット径を，図 2.9 に示すように，強度が中心値の $1/e^2$ となる最大の半径 ρ の 2 倍（直径）として定義する．スポット径は DPE により 1.70μm から 1.26μm に縮小されていることがわかる．一方，最大のサイドローブ強度は中心強度の 2.7%まで増加する．

サイドローブの許容強度を見積もるため，フォトレジスト AZ1500 の露光感度を測定した．図 2.10 は露光量と現像後の残存膜厚の関係を示したものである．本フォトレジスト

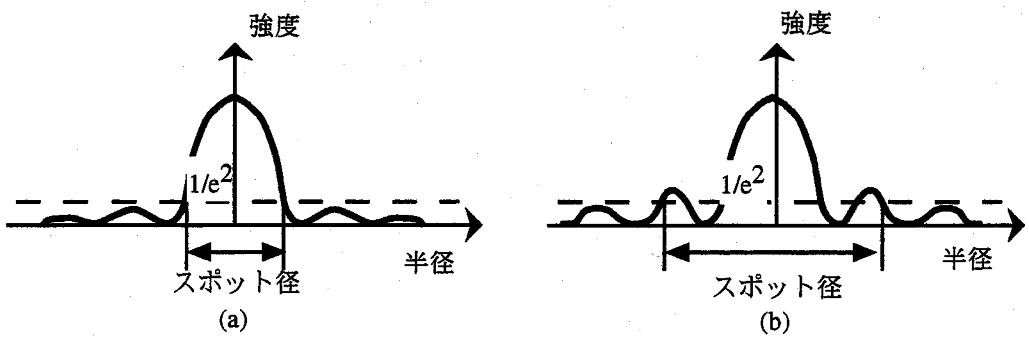


図 2.9 スポット径の定義．サイドローブ強度が (a) $1/e^2$ 以下，(b) $1/e^2$ 以上の場合．

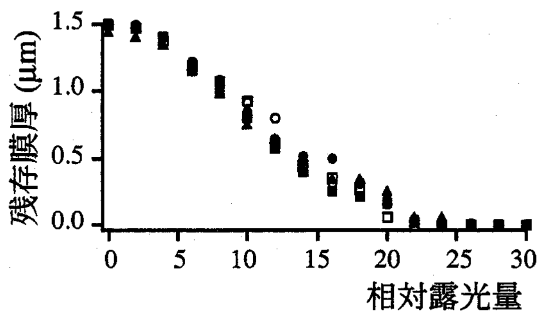


図 2.10 露光量とフォトレジスト残存膜厚の関係．各マーカーは異なる測定結果を表す．

は，中心強度の 5%以下ではほとんど感度がないことがわかる．したがって，設計 DPE により生成されるサイドローブの強度は許容範囲内であり，レーザービームリソグラフィに適用できることがわかる．

2.5.2 集光光学系の焦点深度評価

一般に，レーザービームリソグラフィでは，フォトレジストをガラス基板上にサブミクロンから数ミクロンの厚さで塗布する．したがって，描画分解能向上のためには，集光スポット径の縮小と同様に焦点深度も重要な要因となる．本項では，集光光学系の焦点深度を評価する．

図 2.1(b) の集光光学系を考える．距離 δd だけフォーカスのずれが生じた場合のスポッ

トの強度パターン $I_\delta(\rho)$ は,

$$I_\delta(\rho) \propto \left| \int t_s(r) \exp\left(ik\omega_{20}r^2\right) J_0\left(\frac{k}{f}\rho r\right) r\,dr \right|^2, \tag{2.8}$$

と書ける [70, 72]．ここで，$k = 2\pi/\lambda$ であり，また,

$$\omega_{20} = \frac{\delta d}{8\mathrm{F}^{\sharp 2}}, \tag{2.9}$$

である．$\mathrm{F}^\sharp$ は集光レンズの F 値である．下に示す三つの集光光学系の焦点深度を評価した．なお，使用するリソグラフィシステムの NA は 0.46 である.

(i) NA=0.46 の対物レンズを単独で使用した光学系.

(ii) NA=0.46 の対物レンズに前項で設計した DPE を組み合わせた光学系.

(iii) NA=0.58 の対物レンズを単独で使用した光学系.

光学系 (iii) の NA は，得られるスポット径が光学系 (ii) と同じ大きさになるように選択した．式 (2.9) の δd をデフォーカス距離と呼ぶ.

様々なデフォーカス距離におけるスポット径と最大サイドローブ強度を式 (2.8) から算出した．結果を図 2.11 に示す．図 2.11(a) から，集光位置（$\delta d = 0$）においては，光学系 (ii) と (iii) で最小の同じスポット径が得られる．しかし，デフォーカス距離が $\pm 3\mu$m の範囲内では，光学系 (ii) は (iii) よりも良い性能を示している．これは，本 DPE が焦点深度の向上に有効であることを示している．光学系 (ii) におけるスポット径の急激な増加は，最大サイドローブ強度が $1/e^2$ を超えたことによるものである.

ここで，フォトレジストの厚さが 1.5μm の場合を考える．この厚さは，本研究で利用する上限値である．この場合，厚さの影響で最大 1.5μm のフォーカスずれが生じる．1.5μm のデフォーカス距離に対する光学系 (ii) と (iii) のスポット径は，それぞれ焦点位置のスポット径の 1.1 倍および 1.5 倍である．一方，フォーカスずれのために光学系 (ii) では中心強度の 4.6%の強度をもつサイドローブが生じるが，光学系 (iii) ではサイドローブが生じない．しかし，サイドローブの強度は許容範囲内であり，フォトレジスト材料の非線形感度特性によりパターン描画には影響しないと考えられる.

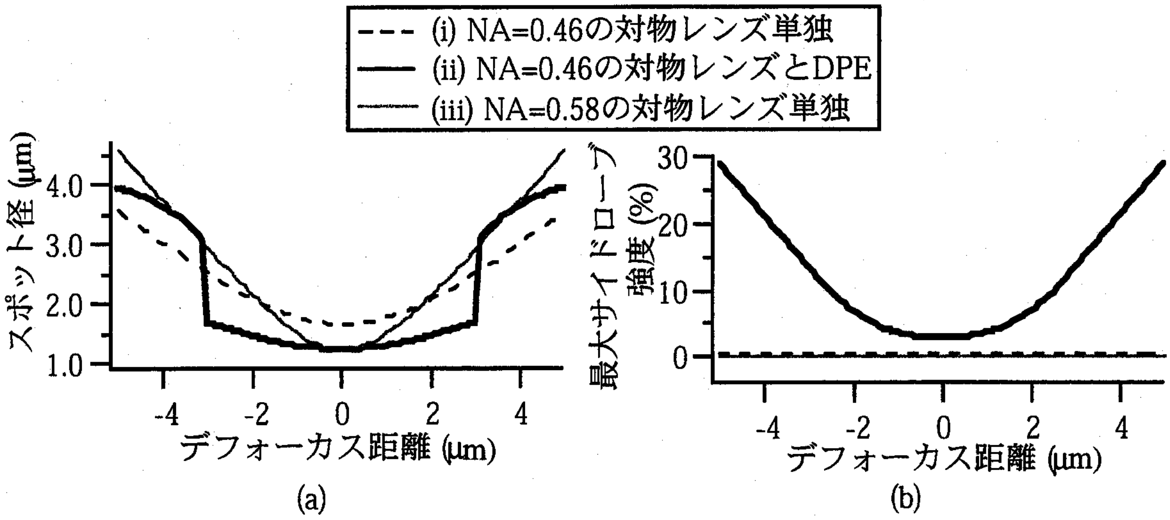


図 2.11 (a) スポット径と (b) 最大サイドローブ強度のデフォーカス距離依存性.

2.5.3 性能評価実験

設計したDPEを作製し，性能評価を行った．図2.12は作製DPEの顕微鏡写真である．リングのパターンは，同心円パターンの半径を0.5μm間隔で増加させながら描画した．作製DPEをレーザービームリソグラフィ装置に導入し，得られるスポット径を測定した．また，直線パターンをフォトレジスト上に描画し，描画分解能を評価した．

スポット径は，走査型ナイフエッジ法により測定した．ナイフエッジはXYステージにより0.1μm間隔で，デフォーカス距離はピエゾアクチュエータにより0.5μm間隔で走査した．ナイフエッジ法で得られる出力信号は，ナイフエッジにより遮光されない部分に到達する光強度の積分値となる．測定誤差を低減するため，得られるデータをSavitzky-Golayフィルタ [79] でフィルタリング処理し，スポットパターンを得るために空間微分を行った．パターンは2次元ガウス分布でフィッティングし，スポット径を算出した．デフォーカス距離$\pm 5\mu$mの範囲内のスポット径の測定結果を図2.13に示す．焦点位置は測定データからは正確には決定することができないが，最小スポット径がDPEにより1.6μmから1.3μmに変化していることが確認できる．また，DPEを利用した場合のスポット径は，デフォーカス距離が-4μmから2μmの範囲ではほとんど変化せず，その範囲を超えると徐々に増加している．この変化は，図2.11(a)の数値計算結果とほぼ一致している．

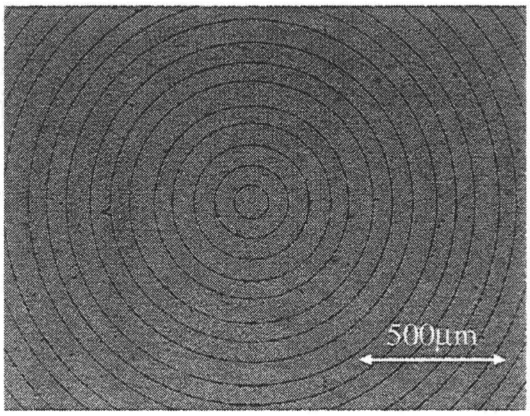


図 2.12 作製 DPE の光学顕微鏡写真.

次に，実際に直線パターンを描画し，得られた線幅から描画分解能を評価した．隣接する直線パターンの間隔は 3μm とした．描画パターンの走査型電子顕微鏡写真を図 2.14 に示す．描画線幅が DPE により，1.2μm から 1.0μm に縮小されていることが確認できる．この結果は，本手法がレーザービームリソグラフィに適用可能であることを実証するものである．また，隣り合った直線を描画するとき，スポットのサイドローブはお互いに重なり合う条件になっており，露光のしきい値をこえて，ゴーストパターンが現れてしまうことが考えられる．しかし，描画直線の周辺にはそのようなパターンは認められない．したがって，作製した DPE により，描画パターンに依存することなく，描画分解能を向上することが可能である．

2.6 考察

実験で得られた描画線幅の縮小率は約 83%にとどまった．数値計算結果から，74%程度の縮小率が得られると期待されることから，10%程度の誤差が認められる．フォトレジストの感度特性に起因するスポット径の違い，DPE の作製誤差，光学系のアライメント誤差などが原因として考えられる．数値計算では，しきい値を中心強度の $1/e^2$ としてスポット径を算出した．しかし，フォトレジストの感度特性を考慮すると，描画分解能が必ずしもこのスポット径と一致するとは限らない．描画分解能の向上を正確に予測するためには，感度特性を十分把握した上で，DPE の設計・作製を行う必要がある．また，エッチ

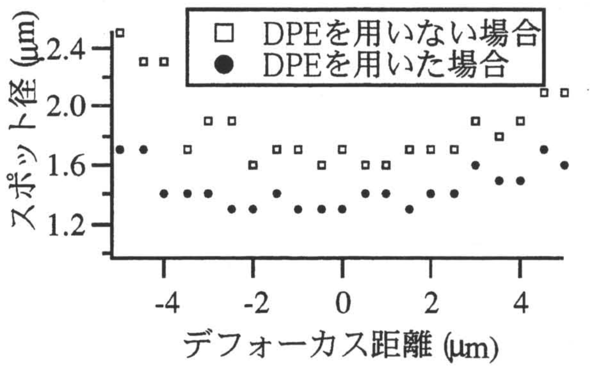


図 2.13　スポット径の測定結果.

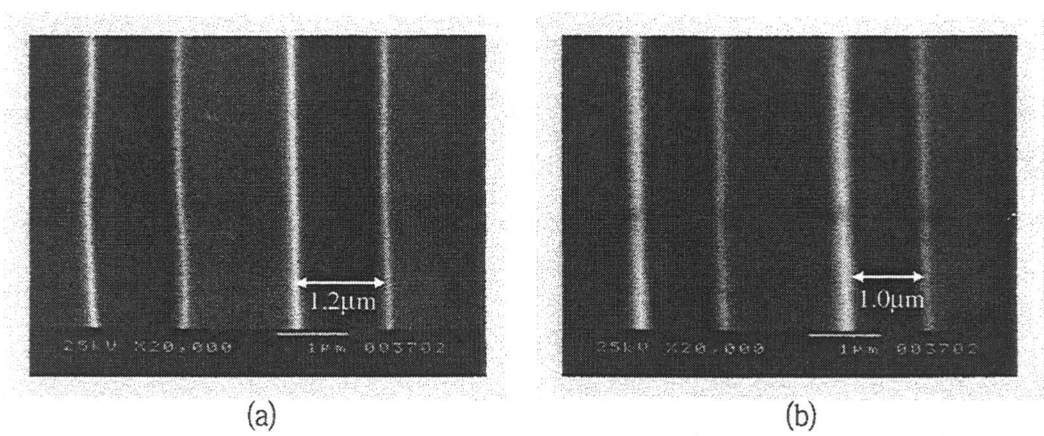


図 2.14　描画直線パターンの走査型電子顕微鏡写真．(a) DPE を用いない場合，(b) DPE を用いた場合.

ング深さの誤差は，2レベルのDPEの場合，0次光の増加という形で影響が現れてくることが知られている．本DPEでは，0次光の増加はスポット径の増加に対応しており，性能に直接的に影響するパラメータであるので，エッチングの高精度な制御はひとつの重要な課題となる．

以上のような改善点は残るものの，設計したDPEにより描画分解能が向上できることが確認できた．使用したレーザービームリソグラフィ装置の集光レンズのNAが0.46と高くないため，実験で得られた線幅は1.0μmにとどまっているが，本手法は，より高いNAの集光レンズをもつシステムにも適用できる．また，非線形性の高いフォトレジスト材料を利用すれば，サイドローブへより多くのエネルギーを分散させることが可能となり，描画線幅の縮小率は改善できる．本手法の概念は，レーザービームリソグラフィに限らず，高密度メモリシステムやレーザービームプリンタなど，集光機構を有する他の装置への適用が可能であり，幅広い応用が期待できる．

2.7　結言

本章では，集光スポット径を縮小するためのDPEを提案した．本DPEとフォトレジスト材料の非線形感度を利用することにより，走査型レーザービームリソグラフィにおける分解能を向上できる．考案した拘束条件をGSAに組み込むことにより2種類のDPEを設計し，レーザービームリソグラフィにより作製した．第一のDPEにより本手法の原理が確認された．第二のDPEをレーザービームリソグラフィ装置自体に組み込むことにより，描画最小線幅を1.2μmから1.0μmに改良することができた．また，同じ大きさの集光スポット径を生成する場合，DPEを用いる方が従来法よりも深い焦点深度が得られることを示した．

第 3 章

波長多重位相光学素子の開発

3.1 緒言

波長多重性は光のもつ優れた特徴の一つである．波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）通信に代表されるように，情報技術分野を中心としてその特性の有効な活用方法が模索されている．波長多重システムでは，複数の波長で表現された多重情報を並列的に制御・処理することが求められる．WDM 分野では，高密度な波長多重通信に対応した光制御デバイスとして，ファイバーグレーティングによる狭帯域フィルタやアレイ導波路型合分波フィルタなどの開発が進められている [66, 67]．

DPE はフレキシブルな光制御が可能であるため，複雑な光学機能を単一の光学素子として実現できる．実装性，安定性の面でも優れており，マイクロレンズアレイ，スポットアレイジェネレータ，ビーム成形素子，モード変換素子などさまざまな形で応用されている [53, 56, 59, 80]．しかし，DPE は，その表面構造の凹凸により光波の位相を変調することで機能を得ることから，レンズなどの屈折型のデバイスと比べて波長分散が非常に大きく，設計波長以外の波長で利用した場合には，性能が著しく低下する．このことから，波長多重システムへの適用は，一見困難であるように思われるが，その潜在能力は魅力的であり，複数波長の並列制御機能をもつ DPE の開発が期待される．

DPE の波長分散特性を利用した例として，レンズ系へ適用した収差補正 [81] や，グレーティングとマイクロレンズアレイの組み合わせによる色分離 [20] などがあげられる．また，入射波長によって異なる位置に単一の 1 次元集光スポットを形成する DPE [82] や，1 次回折光の出力位置を波長により分離する計算機ホログラム [19] も提案されている．しかし，多波長に対して 2 次元的に自由にパターンを生成する DPE の設計方法は確立されておらず，また実験的な検証もない．

本章では，波長多重光の並列制御デバイスとして，複数の波長に対して異なるスポットアレイパターンを出力する波長多重位相光学素子（WMDPE: Wavelength-Multiplexing Diffractive Phase Element）を開発し，設計方法や特性について検討する．波長多重光の並列制御用 DPE を実用化するための重要課題のひとつは，効果的な設計手法の開発である．Yang-Gu アルゴリズム [21, 83, 84] はそのひとつであるが，異なる波長に対する性能の均一性や，計算コストなど課題も多い．本研究では，Bengtsson により 2 波長 WMDPE の設計方法として提案された Optimal Rotation Angle（ORA）法をベースとした反復設計法 [10, 22] を，多波長の WMDPE 設計用に改良を加えることにより設計を行う．この手法では，伝搬関数を考えることにより，波長や出力面など条件の異なる光を総合的に取り扱うことを可能にし，それらすべての条件に適応する DPE 設計へ拡張できる．また，スポットアレイに機能を限定することにより，設計コストも低い．3.2 節では，WMDPE の概念および特徴について述べる．3.3 節では，設計手順を述べ，改良 ORA 法による WMDPE の設計例を示す．3.4 節では，7 波長 9 レベルの WMDPE を作製し，その機能を確認する．3.5 節では，さまざまな設計パラメータに対する WMDPE の性能変化を数値計算により評価する．

3.2　波長多重位相光学素子

波長多重位相光学素子（WMDPE）は，図 3.1 に示すように，入射光の波長にしたがって異なるスポットアレイパターンを生成する回折型の光制御デバイスである．生成パターンの分離は，入射光がデバイスを透過することにより受ける位相変調と，デバイス直後から出力面までの光の伝搬特性の波長依存性の利用により可能となる．これら 2 つの現象を考慮に入れることにより，複数の波長それぞれに対して独立なパターンを生成する WMDPE を設計できる．

同等の機能をもつデバイスのひとつに体積ホログラムがある．体積ホログラムは 3 次元的な情報記録に基づくため角度選択性や波長選択性に優れており，立体像のカラー再生が可能であるほか，大容量メモリデバイスへの利用が検討されている [85]．しかし，設計や作製など利用に至るプロセスに煩雑な手順が必要となる．これに対し，WMDPE はリソグラフィ手法で作製できるので，現在までの DPE 作製技術をそのまま活用できる．また，各波長に対して任意のスポットパターンを設定でき，自由度が高く，薄型かつ軽量で

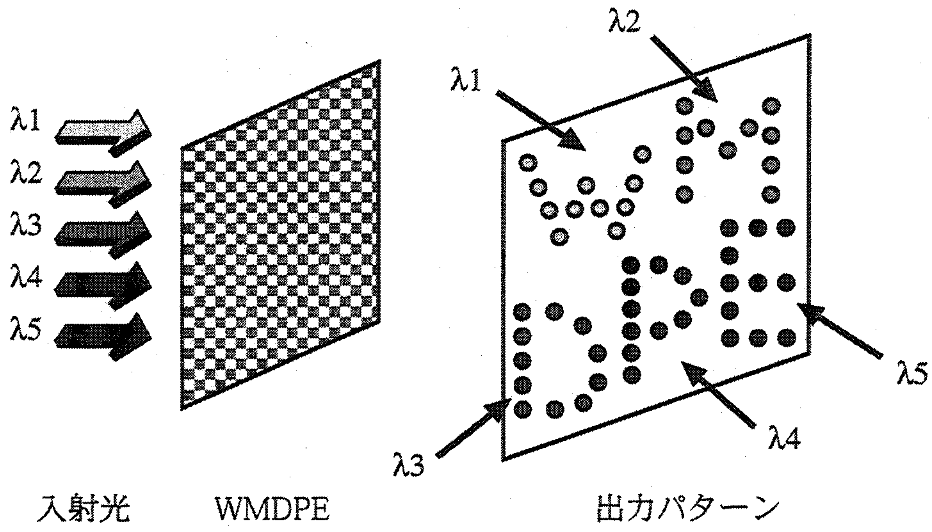


図 3.1 WMDPE によるスポットパターン生成.

あるなど，単波長用 DPE の優れた特性をそのまま継承している．光制御デバイスとしての観点からは，複数波長に対する並列処理能力を有しており，特に波長多重システムへの適用が期待できる．

3.3 設計手法

3.3.1 改良 Optimal Rotation Angle 法

設計のモデルを図 3.2 に示す．WMDPE 面を矩形のピクセルに分割する．WMDPE 面の 1 つのピクセル l 内では，位相変調量及び入射光強度は一定であるとし，中心座標 $(x_l, y_l, 0)$ をそのピクセルの代表点とする．スポット m は出力面の任意の位置 (u_m, v_m, D_L) に設定できる．図 3.2 中の $\boldsymbol{k}$ は WMDPE 直後の光波の波数ベクトル ($|\,\boldsymbol{k}\,| \equiv k = 2\pi/\lambda$: λ は波長)，$D_L(L = a, b, \ldots)$ は WMDPE 面から出力面までの距離 (以後，出力面距離) である．図では，出力面は一面となっているが，複数面を設定することもできる．以後特に記述がない限り，“ピクセル” と表記すれば，WMDPE 面のピクセルを表すものとする．また，波長・出力面距離の組 $\{\lambda_X, D_L\}$ に対して設定したスポットの集合を $M_{X,L}$ で表す．

ピクセル l から出射する光波のスポット m における複素振幅 U_{lm} は，WMDPE に入射

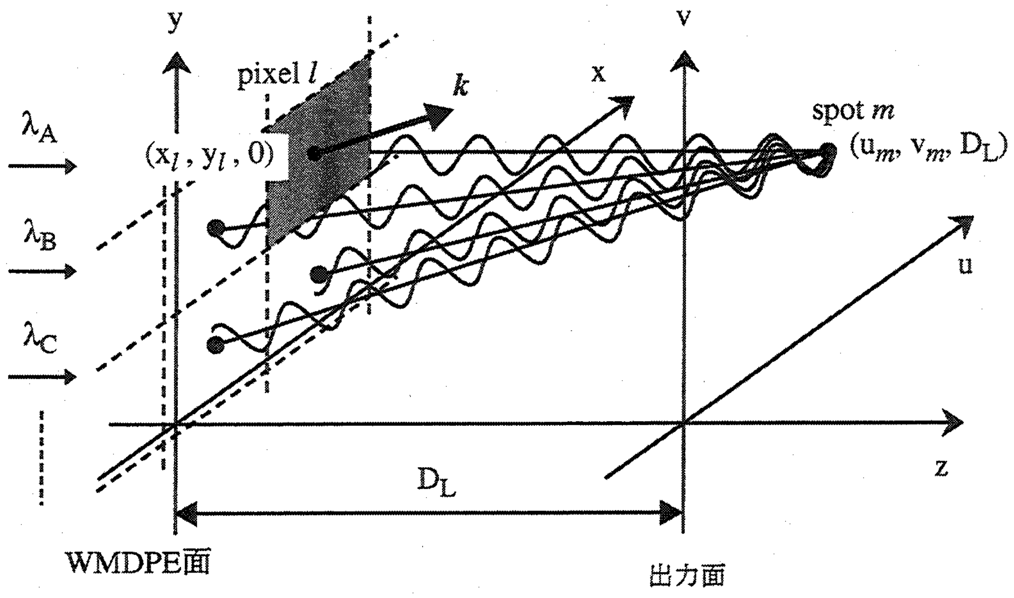


図 3.2　改良 ORA 法による WMDPE 設計のモデル.

する光の複素振幅を $U_{\mathrm{inc}\_l}(\equiv A_{\mathrm{inc}\_l}\exp(j\varphi_{\mathrm{inc}\_l}))$ として次式で表される.

$$U_{lm} = U_{\mathrm{inc}\_l}\exp(j\Delta\varphi_l)A_{lm}\exp(j\varphi_{lm}). \tag{3.1}$$

ここで，$\Delta\varphi_l$ はピクセル l の位相変調量，$A_{lm}\exp(j\varphi_{lm})$ はピクセル l からスポット m へ伝搬する光波の複素振幅の変化量を表し，本論文ではこれを伝搬関数と呼ぶ．伝搬関数は，Fresnel 近似に基づき次式により計算する.

$$A_{lm}\exp(j\varphi_{lm}) = \frac{1}{\lambda D_L}\exp\left\{\frac{jk}{2D_L}\left[(u_m - x_l)^2 + (v_m - y_l)^2\right]\right\}. \tag{3.2}$$

各ピクセルの位相変調量の最適化は，2 波長 WMDPE の設計方法として提案された Optimal Rotation Angle（ORA）法 [10, 22] に基づき，これを多波長 WMDPE へ拡張することにより行う．以下にその手順を示す.

設計波長をそれぞれ $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \ldots$ とおく．伝搬関数を式 (3.2) を用いて各波長に対して求める．λ_A に対する WMDPE の位相変調量 $\Delta\varphi_l^{(A)}$ を独立変数として考える．この時，それ以外の波長 λ_X（$X = B, C, \cdots$）に対する位相変調量 $\Delta\varphi_l^{(X)}$ は以下の式で表せる.

$$\Delta\varphi_l^{(X)} = \frac{\lambda_A}{\lambda_X}\Delta\varphi_l^{(A)}. \tag{3.3}$$

λ_A に対するあるスポット m での光の複素振幅 U_m は，全てのピクセルから伝搬する光波の重ね合わせで表される．

$$
\begin{aligned}
U_m &\equiv A_m \exp(j\varphi_m) \\
&= \sum_l U_{lm} = \sum_l A_{\mathrm{inc}\_l} A_{lm} \exp(j\varphi_{lm}) \exp[j(\varphi_{\mathrm{inc}\_l} + \Delta\varphi_l^{(A)})].
\end{aligned} \tag{3.4}
$$

ここで，$\Delta\varphi_l^{(A)}$ を $\delta\varphi_l^{(A)}$ だけ変化させた時の $|U_m|$ の変化量に注目し，その大きさを Δl で表わす．ピクセル数が十分多ければ，$|U_m| \gg |U_{lm}|$ と考えられるので，

$$
\Delta l = A_{lm} \cos(\phi_{lm} - \delta\varphi_l^{(A)}) - A_{lm} \cos\phi_{lm}, \tag{3.5}
$$

と書ける．ただし，

$$
\phi_{lm} = \varphi_m - (\varphi_{lm} + \varphi_{\mathrm{inc}} + \Delta\varphi_l^{(A)}), \tag{3.6}
$$

である．この変化はそれぞれの設計波長に対するすべてのスポットで生じる．

そこで全スポットに対する Δl の総和を考える．ただし，その中に次の 2 つの重みを導入する．ひとつは，波長・出力面の組ごとに出力されるスポット間の強度比を一様化するための重み（w_m で表す）であり，もうひとつは各波長・出力面で出力されるスポットの合計パワーの比を一様化するための重み（$W_{X,L}$ で表す）である．これらは，強度が他に比べて大きいスポットの強度を減少させ，小さいスポットの強度を増加させる作用をもつ．Δl の重み付き合計 $f(\delta\varphi_l^{(A)})$ は，次のように書ける．

$$
f(\delta\varphi_l^{(A)}) = \sum_L \sum_X W_{X,L} S_{X,L} \cos\left[\frac{\lambda_A}{\lambda_X}\delta\varphi_l^{(A)} - \alpha_l^{(X,L)}\right] + \mathrm{const.}, \tag{3.7}
$$

$$
\left\{
\begin{array}{l}
S_{X,L} = \mathrm{sgn}(S_{1X,L})(S_{1X,L}^2 + S_{2X,L}^2)^{\frac{1}{2}}, \\
S_{1X,L} = \sum_{m \in M_{X,L}} w_m A_{lm} \cos\phi_{lm}, \\
S_{2X,L} = \sum_{m \in M_{X,L}} w_m A_{lm} \sin\phi_{lm}, \\
\alpha_l^{(X,L)} = \arctan\left(\frac{S_{2X,L}}{S_{1X,L}}\right).
\end{array}
\right. \tag{3.8}
$$

ここで，$\mathrm{sgn}(x)$ は x の符号関数である．式 (3.7) の値が最大となる $\delta\varphi_l^{(A)}$ を求め，$\Delta\varphi_l^{(A)}$ を $\Delta\varphi_l^{(A)} + \delta\varphi_l^{(A)}$ に更新することにより，スポット間の一様性を向上しつつ全スポットの合計パワーを増加させることができる．

この操作を各ピクセルに対して順次行う．すべてのピクセルに対して，この操作が終了した後に，得られた各ピクセルの位相変調量を式 (3.4) に代入し，U_m を算出する．得られた結果に基づき，w_m，$W_{X,L}$ を次式によって更新する．

$$\begin{aligned} w_m &= w_m^{\mathrm{old}} \left(\frac{I_{X,L}^{\mathrm{ave}}}{I_m} \right)^p, \\ W_A &= 1, \\ W_{X,L} &= W_{X,L}^{\mathrm{old}} \left(\frac{\beta_{X,L} I_{A,a}^{\mathrm{ave}}}{I_{X,L}^{\mathrm{ave}}} \right)^q. \end{aligned} \tag{3.9}$$

ここで，$w_m^{\mathrm{old}}, W_{X,L}^{\mathrm{old}}$ は直前の反復におけそれぞれの重み，I_m はスポット m での強度 ($|U_m|^2$)，$I_{X,L}^{\mathrm{ave}}$ は波長・出力面の組 $\{\lambda_X, D_L\}$ に対するすべてのスポットの平均強度である．p，q は文献 [22] にならって，0.2 に設定した．$\beta_{X,L}$ は光の回折を考慮した場合，波長・出力面の組 $\{\lambda_A, D_a\}$ を基準としたときの別の組 $\{\lambda_X, D_L\}$ に対するスポットの理想的なピーク強度比であり，$\beta_{X,L} = (\lambda_A D_a / \lambda_X D_X)^2$ と書ける．$\beta_{X,L}$ の導入により，各波長・出力面に対するスポット内のパワーを近似的に等しくすることができる．初期値には，以下の値を用いる．

$$\begin{cases} \Delta\varphi_l^{(A)} \ : \ \text{ランダム}, \\ w_m = 1, \\ W_{X,L} = 1. \end{cases} \tag{3.10}$$

設計アルゴリズムのフローチャートを図 3.3 に示す．最終的には，すべての波長・出力面に対して設定したスポットアレイパターンを出力する WMDPE の位相変調分布が得られる．本研究で行う条件範囲内で，素子のピクセル数，生成するスポット数，波長多重数などを変化させながらいくつかの設計を行った結果，反復回数が 30 回を超えるとアルゴリズムがほぼ収束することがわかったので，本研究では反復回数を 40 回とした．また，入射光は平面波を仮定した．

3.3.2　性能評価関数

設計した WMDPE の性能は，一様性誤差，光利用効率，コントラストの 3 つの項目を用いて評価する．以下にそれぞれの性能評価関数を定義する．

一様性誤差

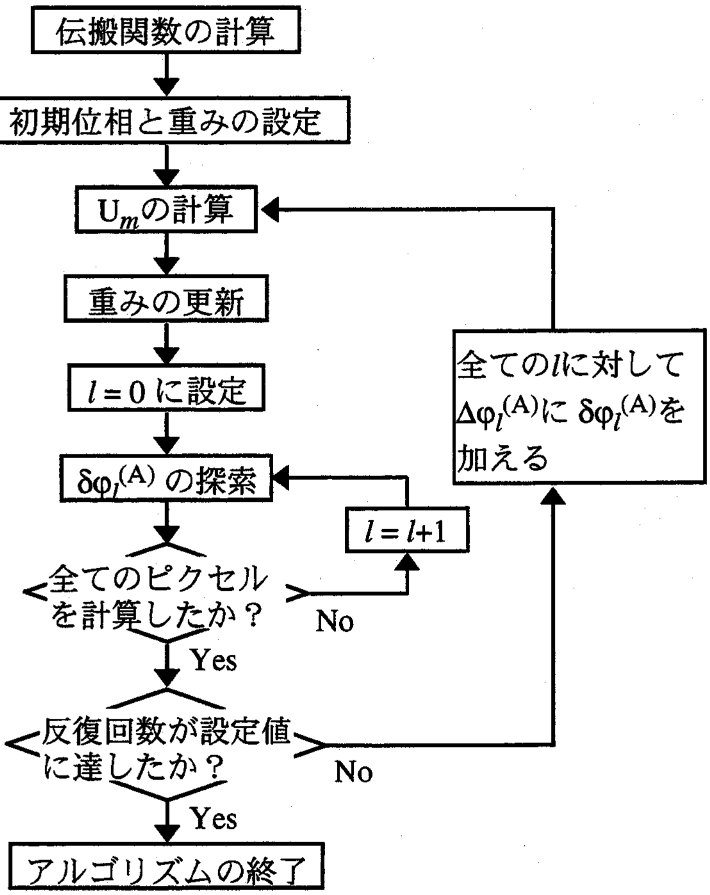


図 3.3　設計フローチャート.

波長・出力面の組 $\{\lambda_X, D_L\}$ に対する各スポットの強度の一様性を評価する関数として，一様性誤差を式 (3.11) で定義する．この値が小さいほど，その波長に対するスポット強度のばらつきは小さくなる．

$$\text{一様性誤差} = \frac{\max\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\mathrm{spot}}\right) - \min\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\mathrm{spot}}\right)}{\max\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\mathrm{spot}}\right) + \min\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\mathrm{spot}}\right)}. \tag{3.11}$$

ただし，$\max\limits_{\lambda_X, D_L}(I_m^{\mathrm{spot}})$，$\min\limits_{\lambda_X, D_L}(I_m^{\mathrm{spot}})$ はそれぞれ，スポット $\{m|m \in M_{X,L}\}$ の強度の最大値，最小値を表す．

光利用効率

光の利用効率を評価する関数として，光利用効率を以下のように定義する．

$$\text{光利用効率} = \frac{\text{各スポット内のパワーの合計}}{\text{入射光の全パワー}}. \tag{3.12}$$

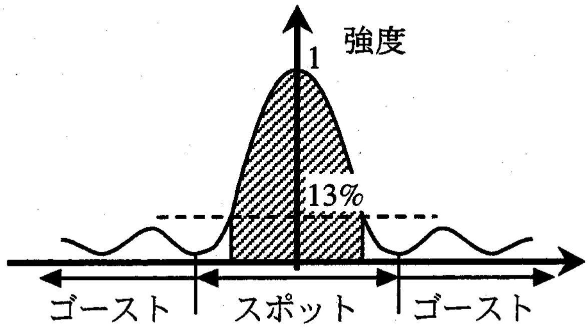


図 3.4　スポットとゴーストの定義.

ただし，各スポットのピーク強度の 13% ($\simeq 1/e^2$) 以上の範囲内の強度の積分値をスポット内パワーとする（図 3.4 斜線部）.

コントラスト

出力パターンの信号対雑音比を評価する関数として，コントラストを次式のように定義する.

$$\text{コントラスト} = \frac{\min\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{spot}}\right) - \max\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{ghost}}\right)}{\min\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{spot}}\right) + \max\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{ghost}}\right)}. \tag{3.13}$$

ただし，$\min\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{spot}}\right)$, $\max\limits_{\lambda_X, D_L}\left(I_m^{\text{ghost}}\right)$ はそれぞれ，スポット $\{m|m \in M_{X,L}\}$ のピーク強度の最小値，ゴースト強度の最大値を表す．ゴーストは，図 3.4 に示すようにスポットの極小値を境界とし，その外側の領域に生じるパターンとして定義する.

3.3.3　設計例

多数の波長多重性能を示すために 9 波長（400nm，431nm，467nm，509nm，560nm，622nm，700nm，800nm，933nm）の WMDPE を設計した．設計波長は，次式の条件を満たすように決定した.

$$\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_A} = \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_B} = \cdots. \tag{3.14}$$

ここで，$\lambda_A > \lambda_B > \cdots$. 出力面距離はすべての波長に対して 10cm，ピクセルは一辺 10μm の正方形，ピクセル数は 256 × 256，最大位相変調量は波長 933nm に対して 4π で

ある．また，各波長に対して文字列 “OSAKA UNIV” 中の一字を割り当て，出力パターンとした．各文字は出力面上で 0.4mm×0.6mm の長方形内におさまるようにした．

設計した WMDPE の位相変調量分布と出力パターンの計算結果を図 3.5 に示す．出力パターンは，全波長に対するスポットの最大強度で規格化している．ほとんどゴーストパターンがなく目的のパターンが得られた．

ここで，出力面距離 D_L は一定であるため，$\beta_{X,L}$ を単に β_X で表す．各波長に対する最大強度のスポットに対して，ピーク強度とスポット面積の β_X 依存性を図 3.6 に示す．基準波長 λ_A は最大波長の 933nm とした．また，ピーク強度とスポット面積は波長 400nm と 933nm の値でそれぞれ規格化した．これらの結果から，ピーク強度は β_X に反比例し，スポット面積は β_X に比例しており，光の回折現象を考慮した時に予想される結果と一致する．このことは，全波長に対するスポット内のパワーが式 (3.7) 中の重み $W_{X,L}$ により一様化され，すべての設計波長に対して同等の性能が得られたことを示している．

設計 WMDPE の一様性誤差は 1.22%，光利用効率は 15.6%，コントラストは 0.784 であった．ただし，これらの値は，各波長の平均値である．0.8 程度の高いコントラストを示していることから，設計 WMDPE は 9 波長に対して出力パターンを分離する能力を有していることがわかる．光量効率は 20%以下であるが，3.5 節で述べるように WMDPE の最大位相変調量を増加させたり，他の条件を変更することにより改良できる．一様性誤差は十分許容できる値が得られている．以上の結果から，波長間での性能のばらつきが少ない多波長の WMDPE が提案アルゴリズムにより設計できることが確認された．

3.4 検証実験

3.4.1 7 波長 9 レベル波長多重位相光学素子の設計

本節では，WMDPE の機能検証実験の結果を示す．設計・作製したのは 7 波長の WMDPE である．設計パラメータは以下のとおりである．WMDPE のピクセル数 700×700，ピクセルは一辺 10μm の矩形，波長数は 7（325nm，442nm，544nm，633nm，670nm，780nm，850nm），最大位相変調量は波長 850nm に対して 2π である．7 波長に対する出力パターンは “イロハニホヘト” の 7 文字中のそれぞれの文字パターンであり，それぞれは 12 個のスポットで構成する．出力面距離は 10cm，位相レベル数は 9 とした．位相の量子化には，2 章ですでに述べた段階量子化法を用いた．ただし，WMDPE では複数の波長を考慮す

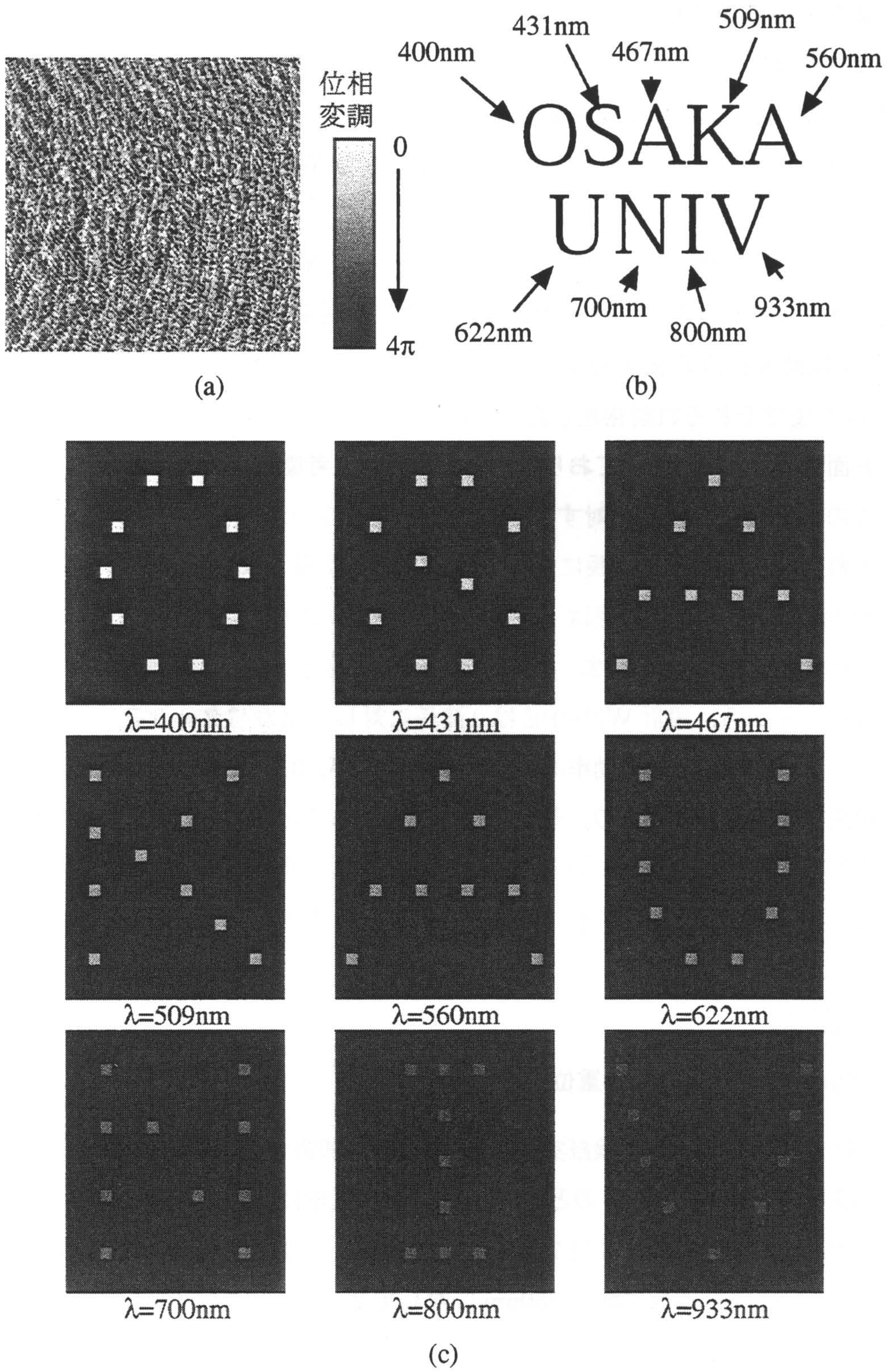


図 3.5　9 波長 WMDPE の設計結果．(a) 位相変調量分布，(b) 出力パターンの配置，(c) 各波長に対する出力パターンの計算結果．

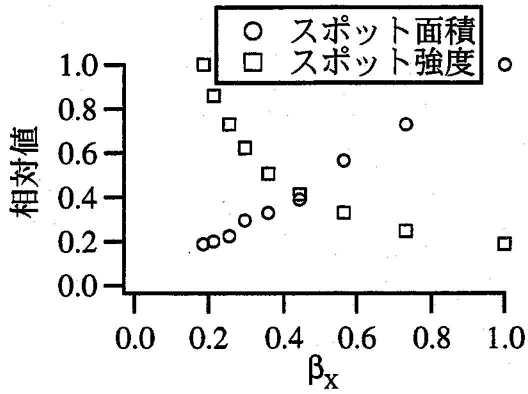


図 3.6 ピーク強度とスポット面積の β_X 依存性.

る必要があるため，基準波長に対する位相変調量 0 と 2π を別の値として扱う必要がある．したがって，式 (2.2) において $\Delta = 2\pi/(N-1)$ と変更する．N は位相レベル数である．

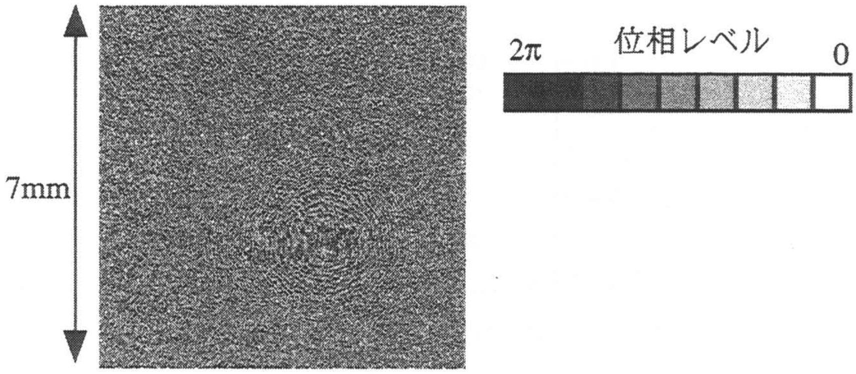
設計結果を図 3.7 に示す．短波長側で高次光が現れているが，設定した出力パターンが得られていることがわかる．これより，位相量子化された WMDPE に対する設計アルゴリズムの有効性が示された．

3.4.2 波長多重位相光学素子の作製

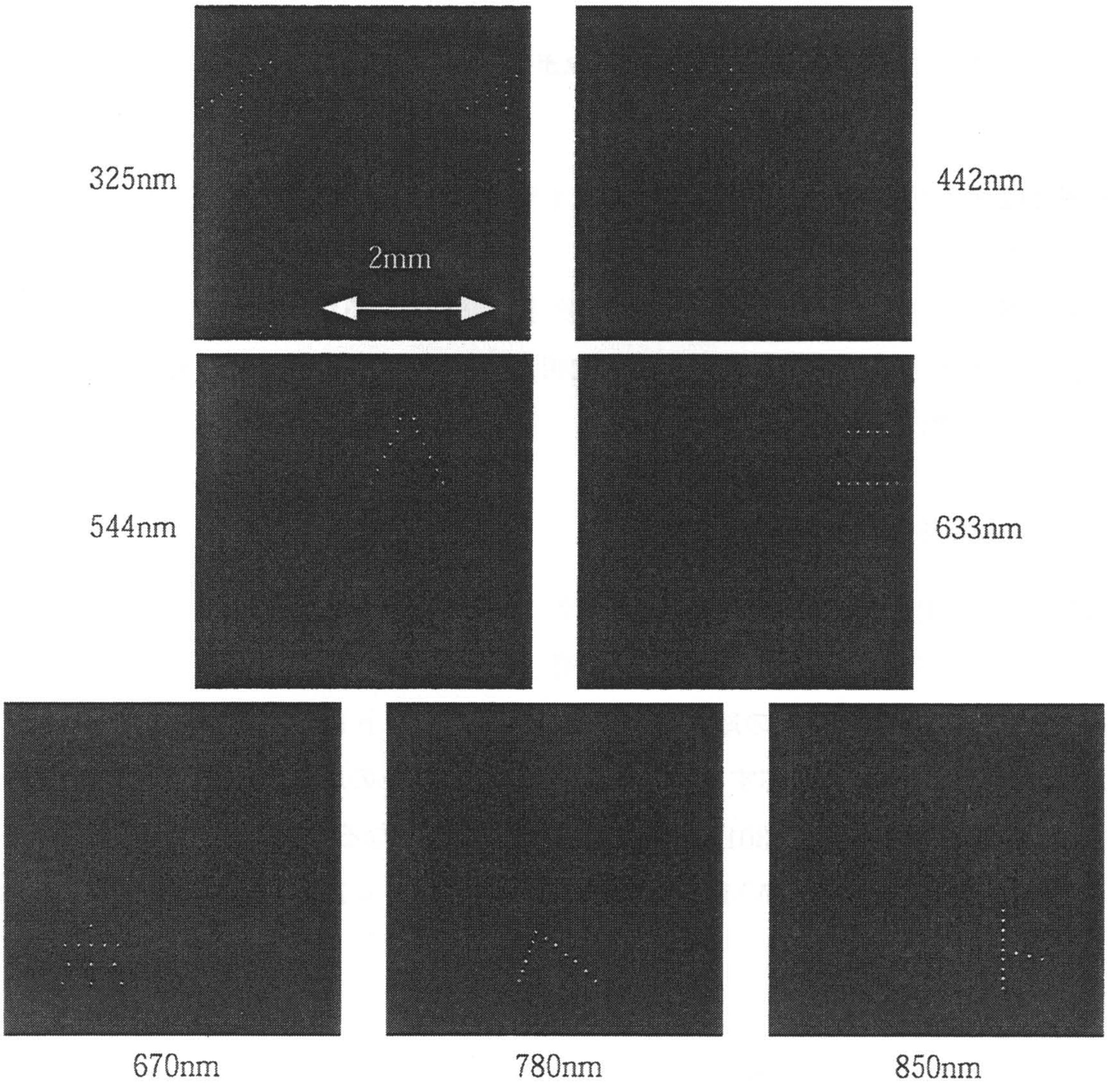
設計した WMDPE を電子ビームリソグラフィ装置（JEOL Ltd. 製，JBX-5000SI）により作製した．位相変調量はガラス基板上の電子ビームフォトレジスト (Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd. 製，OEBR-1000) の厚さにより制御した．フォトレジストの屈折率は 1.49 であるため，各位相レベルに対応する理想的なフォトレジストの厚さは 0nm，217nm，434nm，651nm，867nm，1084nm，1301nm，1517nm，1735nm となる．図 3.8 に作製した WMDPE の光学顕微鏡写真を示す．WMDPE の全体の大きさは $7 \times 7\text{mm}^2$ である．

3.4.3 機能の確認

WMDPE の性能を光学実験により評価した．各設計波長に対応する 7 つのレーザー光源（325nm，442nm: He-Cd レーザー，544nm，633nm: He-Ne レーザー，670nm，780nm: 半導体レーザー，850nm: 垂直共振器型面発光レーザー）により得られたコリメートビー



(a)



(b)

図 3.7 7 波長 WMDPE の設計結果. (a) 位相変調量分布, (b) 出力パターンの計算結果.

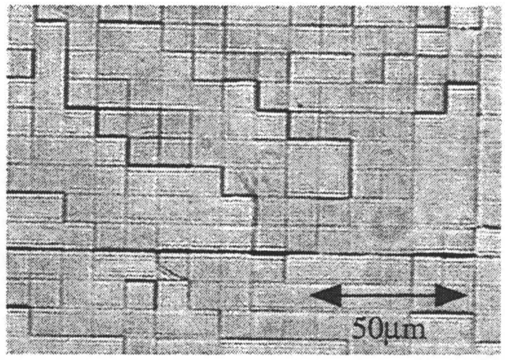


図 3.8　作製 WMDPE の光学顕微鏡写真.

ムを順次 WMDPE に入射し，生成されるパターンを CCD により観察した．得られた出力パターンを図 3.9 に示す．短波長側でバックグラウンド光と高次の回折パターンが生じているものの，各設計波長に対して設定したパターンが生成されていることがわかる．

バックグラウンド光が増加する原因のひとつとして，位相変調量誤差が考えられる．フォトレジストの厚さ誤差に対する感度は波長が短いほど高いので，バックグラウンド光は短波長側で強くなる．一方，強い高次パターンはピクセルサイズが十分に小さくないために生じる．一般に回折角は波長が短いほど小さくなる．しかし，WMDPE 作製上の限界から短い波長に対しては一部で回折条件を満たすことができなかった．ピクセルサイズを小さくすることにより，この種のパターンは減少させることができる．

今回の実験では異なる波長の光を個々に入射させたが，これらを同時に入射させた場合には，相互非干渉性から，すべての波長に対する並列制御が可能である．以上の結果から，性能改善への課題は残るものの，わずか 9 つの位相レベルで多波長 WMDPE の機能を得られることが実験的に確認できた．

3.5　数値計算による性能評価

WMDPE の性能は，種々の設計パラメータに依存する．このため，その性能を十分把握した上でシステムへ WMDPE を適用する必要がある．しかし，本研究で開発した多波長 WMDPE を始めとして，複数の波長に対して正しく機能する DPE に関する性能評価を系統的に行った例は見あたらない．そこで本節では，実用システム適用への指針を得る

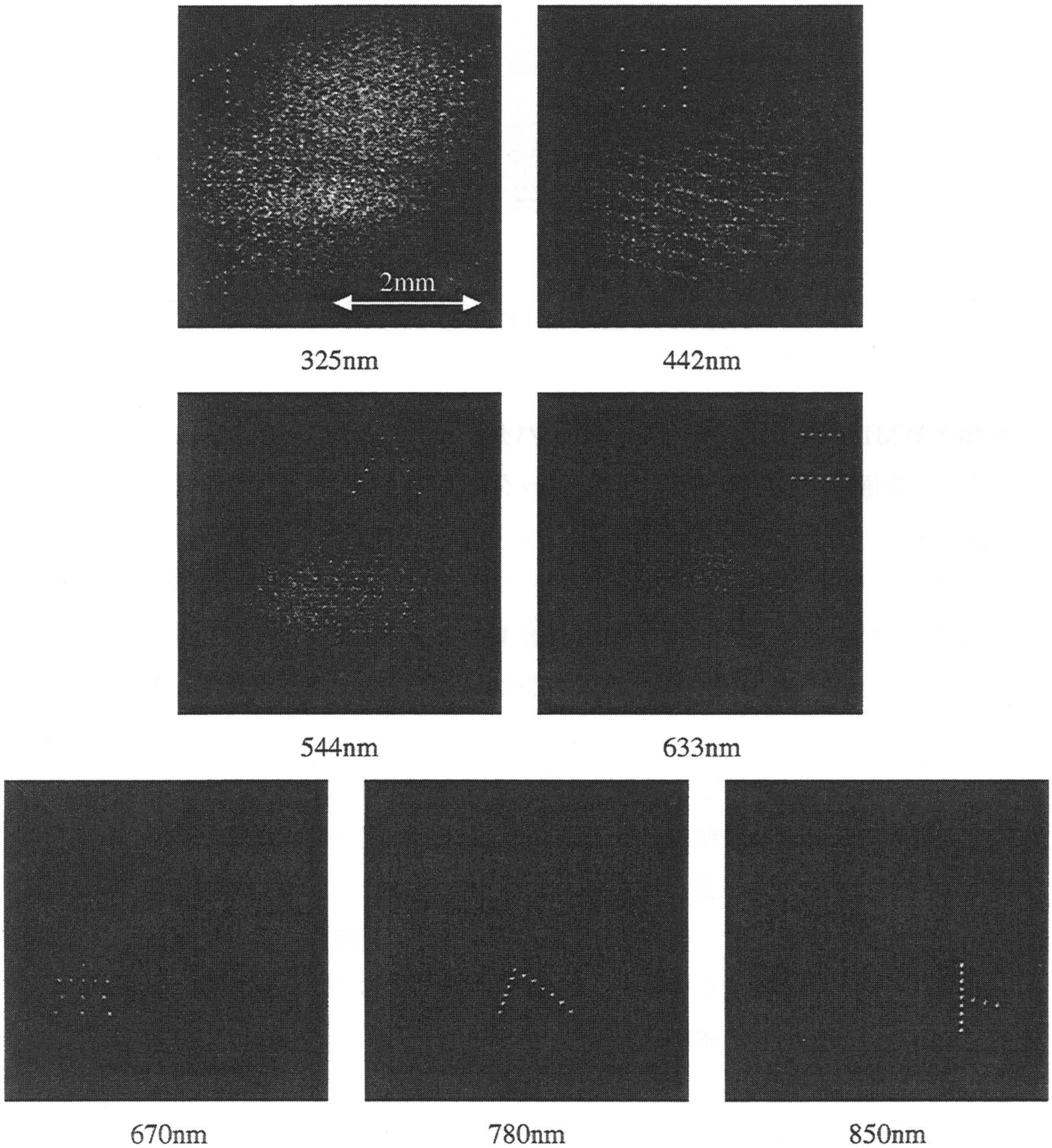


図 3.9　7 波長 WMDPE により得られた出力パターン.

表 3.1 性能評価における設計パラメータ.

パラメータ	評価する条件 (a) スポット数	(b) 波長多重数	(c) 出力面距離
出力面距離 (cm)	10	20	5 – 30
ピクセル数	256 × 256	256 × 256	256 × 256
ピクセルサイズ (μm)	10	10	10
波長 (nm)	500, 571 667, 800	400, 431, 467 509, 560, 622 700, 800	500, 571 667, 800
最大位相変調量	2π (800nm に対し)	4π (800nm に対し)	2π (800nm に対し)

パラメータ	評価する条件 (d) 最大位相変調量	(e) 波長分解能	(f) 位相量子化
出力面距離 (cm)	20	10	10
ピクセル数	256 × 256	256 × 256	256 × 256
ピクセルサイズ (μm)	10	10	10
波長 (nm)	500, 571 667, 800	$600, 600 - \Delta\lambda$	500, 571 667, 800
最大位相変調量	$2\pi - 14\pi$ (800nm に対し)	4π (600nm に対し)	2π (800nm に対し)

ため，数値計算により，WMDPE の性能のパラメータ依存性を評価する．なお，出力面は各波長とも同一面に設定した．図 3.10 から図 3.14 において，各マーカーは個々の波長における性能評価関数値を表し，それらの平均値を折れ線で表示している．

3.5.1 スポット数依存性

設計パラメータを表 3.1(a) に示す．4 波長それぞれに対して出力スポット数が 16，25，36，49，64 個（全体では，64，100，144，196，256 個）の場合について WMDPE を設計し，その性能を評価した．出力スポットは，正方形状に配列する．

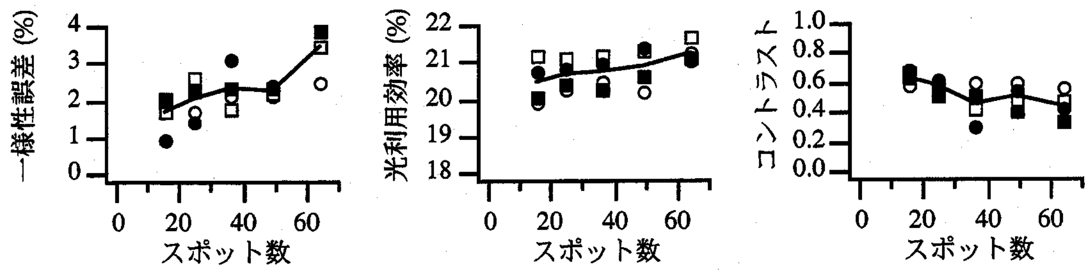


図 3.10　性能評価関数のスポット数依存性.

性能評価関数のスポット数依存性を図 3.10 に示す．これより，光利用効率はスポット数に依存せず，ほぼ一定の値をとることがわかる．また，コントラストはスポット数が増えるにしたがって低下する．入力光はそれぞれのスポットに分散するため，スポット数が増えるにしたがい各スポットの絶対的なピーク強度が低くなる．一方，ゴーストパターンも他の波長に対して設定したスポット付近に分散し，最大のゴースト強度は低下するが，スポットの場合よりも低下率はゆるやかである．その結果，スポットのゴーストとの相対的な強度比が低下するのがその理由である．

一様性は，全体的にはスポット数の増加に伴い低下している．これはコントラストの場合と同様，各スポットの絶対的な強度が低くなることに加え，設計アルゴリズム中で，スポットそれぞれが式 (3.7) で示される総和に寄与する割合が小さくなり，各スポットの強度のばらつきを補正する能力が低下するからである．これは，波長ごとのスポット数ではなく，全体のスポット数に影響を受ける．一様性誤差に関しては，以後に示す各条件に対する評価においても，多少のばらつきが見られることがあった．ただし，数値的には高々数 % と小さく，特別に一様性が要求される場合を除き，実用上一様性誤差が問題となることはほとんどないと思われる．

3.5.2　波長数依存性

設計パラメータを表 3.1(b) に示す．すべての波長に対して正方形の 4 つの頂点位置にスポットを出力する WMDPE を設計した．設計波長は，表 3.1(b) の短波長側から順に波長多重数だけ選択した．

性能評価関数の波長多重数依存性を図 3.11 に示す．波長多重数が増加するにつれて各

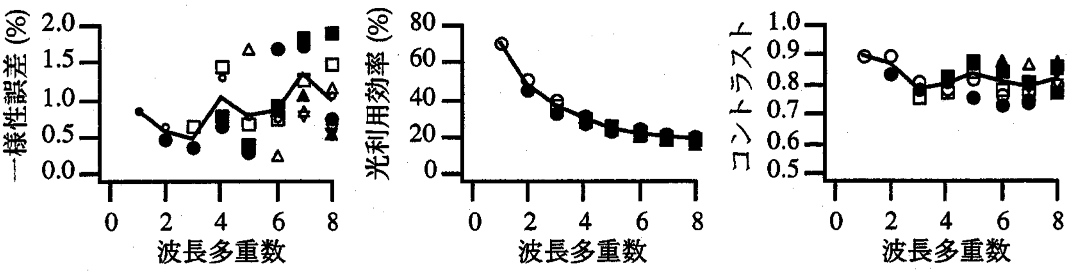


図 3.11 性能評価関数の波長多重数依存性.

評価関数の値が低下することがわかる．これの理由は以下のように考えられる．設計波長を複数にすると，WMDPE 上にはそれぞれの波長に対する情報が位相分布として書き込まれる．このため，ある一つの波長の光が入射した場合，その波長に対応したスポット位置以外に，他の設計波長に対しての出力が期待されるスポット位置付近へ一部の光が伝搬する．波長多重数が増加すると情報が分散するため，この割合は増加する．したがって，その波長に対して出力が望まれるスポット位置へ伝搬する光は相対的に減少し，コントラスト，光利用効率が低下する．ただしこれらの値は，WMDPE のピクセル数や最大位相変調量を増加させたり，出力面距離を小さくすることにより向上させることができる．

3.5.3 出力面距離依存性

設計パラメータを表 3.1(c) に示す．全設計波長に対して正三角形の 3 つの頂点位置にスポットを出力する WMDPE を設計した．この条件下で出力面距離を 5cm から 30cm まで 5cm ごとに変化させた．

WMDPE の出力面距離と性能評価関数の関係を図 3.12 に示す．コントラストは，出力面距離が大きくなるにつれ低下していることがわかる．これは，出力面距離が大きくなるにしたがい，式 (3.1) 中の伝搬関数項の波長依存性が小さくなるため，他の波長に対して設定したスポット中心への光の伝搬が増えることによる．一方，光利用効率はほぼ一定の値をとっていることがわかる．これらより，出力面距離が大きくなると，回折効果によりスポットが拡がるためピーク強度は小さくなるものの，スポット内に集まる光のパワーはほぼ一定に保たれていると説明できる．

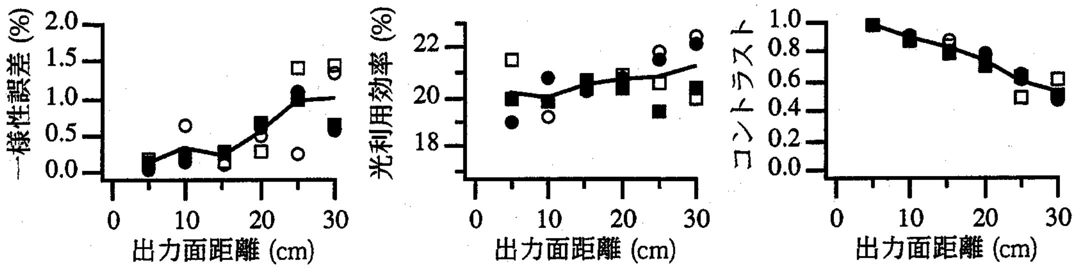


図 3.12　性能評価関数の出力面距離依存性.

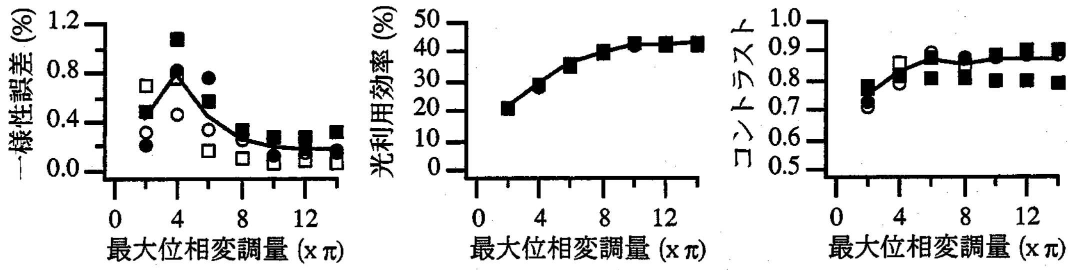


図 3.13　性能評価関数の最大位相変調量依存性.

3.5.4　最大位相変調量依存性

最大位相変調量の増加が WMDPE の性能にもたらす効果について述べる．出力パターンは，出力面距離依存性の評価と同じものとした．設計パラメータを表 3.1(d) に示す．これらのパラメータを固定し，最大位相変調量を 800nm の波長に対して 2π から 14π まで 2π ごとに増加させた．

最大位相変調量と性能評価関数の関係を図 3.13 に示す．最大位相変調量を大きくすると，光利用効率，コントラスト共に向上することがわかる．単波長で用いる DPE は，最大位相変調量を 2π 以上としても性能は変化しない．しかし，WMDPE では，最大位相変調量を大きくとることで各波長間の位相変調量差を大きくとることができ波長分離が容易になることから，性能を向上させることができたと考えられる．しかし両評価関数共に，最大位相変調量が 10π 以上になると，ほぼ一定の値に落ち着く．これは，各隣接波長間の位相変調量差が 2π を超えたためである．つまり，最大位相変調量を大きくすること

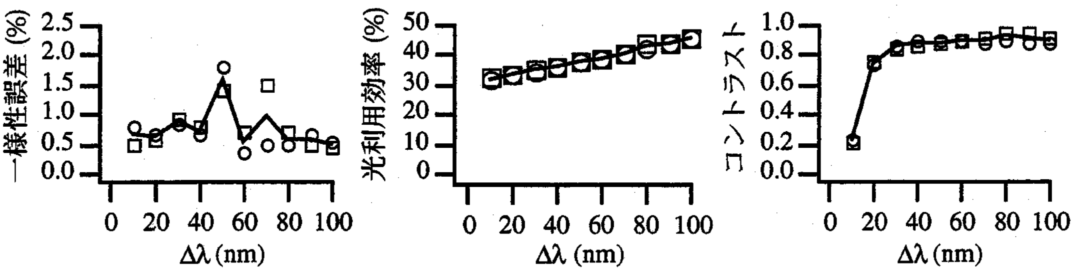


図 3.14 評価関数の波長間隔依存性.

でWMDPEの性能は向上するが，それには限界があり，一定以上の性能向上は望めないといえる．一様性誤差はばらつきが見られるが，すべて1.0%以下と非常に小さく，問題はない．

3.5.5 波長分解能

2波長のWMDPEを設計し，その設計波長の間隔 $\Delta\lambda$ とWMDPEの性能変化から，波長分解能を評価した．設計パラメータを表3.1(e)に示す．一方の波長を600nmに固定し，他方の波長を500nmから10nmずつ増加させた．また，出力スポットパターンは，600nmに対しては“6”，他方の波長に対しては“5”の文字とし，それぞれ20個のスポットで構成した．$\Delta\lambda$ と性能評価関数の関係を図3.14に示す．$\Delta\lambda$ が小さくなるにしたがい，光利用効率，コントラストが低下することがわかる．特にコントラストは，ある値を境にして急激に変化している．この変化は，どのようなパラメータを用いた場合にも共通して見られた．

次に，最大位相変調量，出力面距離，ピクセル数の変化に対する分解能を評価する．三つの性能評価関数の中でコントラストに注目し，その値がある基準値 α 以上の値をとる最小の $\Delta\lambda$ をWMDPEの分解能 R_α として定義した．α には，0.5，0.8，0.9の三つの値を用いた．表3.1(e)の値を基本的なパラメータとし，最大位相変調量を 2π から 10π まで，出力面距離を5cmから30cmまで，あるいはピクセル数を32×32から1024×1024まで変化させた．

得られた波長分解能を図3.15に示す．最大位相変調量依存性についてみると，$\alpha = 0.8$，あるいは0.5の場合は波長分解能は 20μm から 30μm で一定である．しかし，0.9という高

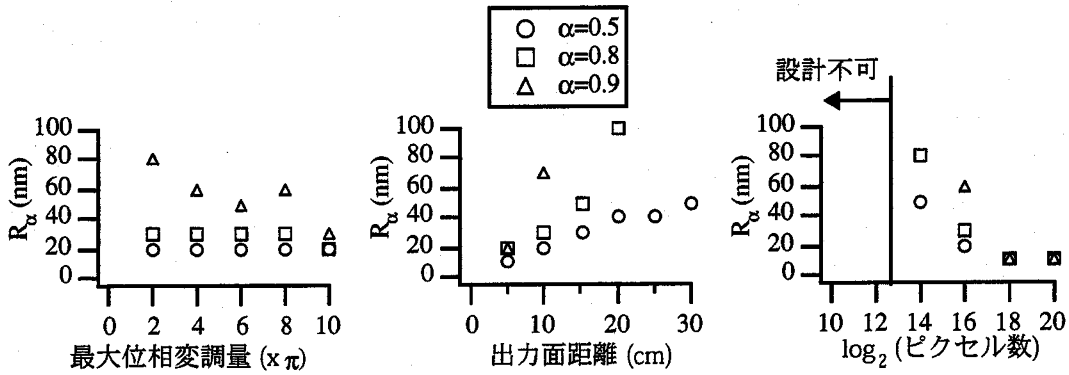


図 3.15　波長分解能のパラメータ依存性.

いコントラストで数 10μm 間隔の波長を分解するためには，大きな最大位相変調量を必要とすることがわかる．これに対して，出力面距離に対しては，どの α の場合にもそれが大きくなるにつれて波長分解能が悪化する．波長間隔を 100μm とした場合でも，出力面距離が 25cm 以上の場合にはコントラスト 0.8 以上，出力面距離が 15cm 以上の場合にはコントラスト 0.9 以上を得るのは困難であるという結果が得られた．

ピクセル数の増加は，分解能の飛躍的な向上をもたらす．特に 512×512 以上のピクセルの WMDPE では，$\Delta\lambda = 10$nm のときでも 0.93 以上の非常に高いコントラストが得られた．また，ピクセル数が 64×64 以下では，設定位置にスポットを出力することができなかった．WMDPE の分解能はパラメータを総合的に判断する必要があるが，WMDPE のおよその最小波長間隔は数 μm から数 10μm であると結論される．

3.5.6　量子化位相数

WMDPE の性能は位相量子化の影響を受ける．4 波長 WMDPE を 5，9，17，および連続の位相数で設計し，2 種類の量子化法について影響を評価した．一方は段階量子化法，他方は連続位相を量子化位相に一括して変換する単純な量子化法である．設計パラメータを表 3.1(f) に示す．各波長に対して正方形の 4 つの頂点位置にスポットを出力した．

計算結果を図 3.16 に示す．○印は単純な量子化法での値，△印は段階量子化法の値，実線は連続位相の場合の値である．光利用効率は位相レベル数の減少にしたがって低下するのに対し，コントラストは位相レベル数にほとんど依存しないことがわかる．これは，位

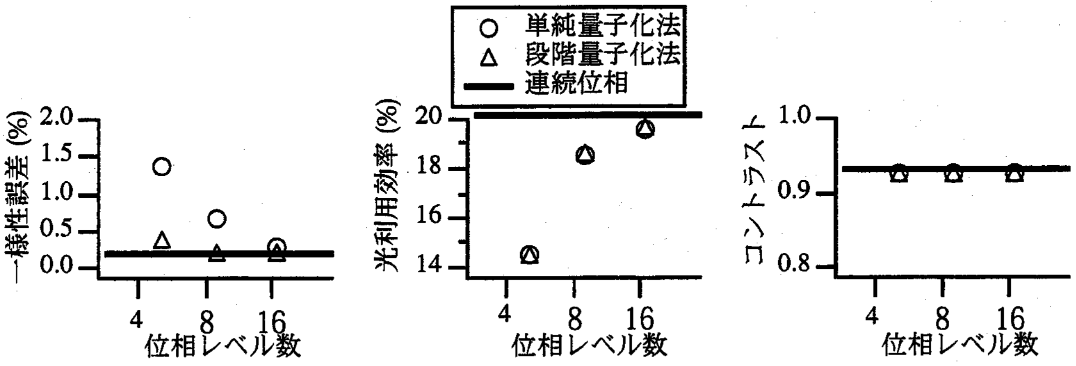


図 3.16　性能評価関数の量子化位相数依存性.

相量子化が主に0次光（バックグラウンド光）に影響することを示している．また，連続位相の場合と同等の性能を得るためには，16程度の位相レベル数が必要であることがわかる．量子化法による性能の違いは，特に一様性誤差に見られる．この結果から，段階量子化法がWMDPE設計に対しても有効であることがわかる．

3.6　考察

WMDPEを含めてDPEを作製する場合，周期が波長に対してかなり大きい場合を除くと，描画分解能や精度の制限から連続的な位相分布を実現することは困難である．このため，位相の量子化が必要とされるが，量子化の影響を十分に考慮しなければ，DPEの性能劣化を招く．ここでは，WMDPEにおける量子化位相の選択方法について検討する．

WMDPEの位相分布が量子化されている場合，実効的な位相レベル数は波長によって違ってくる．波長400nmと800nmの2波長WMDPEを5レベルで設計する場合を考える．最大位相変調量を波長800nmに対して2πとし，等間隔で位相を量子化するとする．この時，波長800nmに対する位相変調量は各位相レベルで$\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi\}$となるのに対し，波長400nmでは$\{0, \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi\}$となる．位相の組$\{0, 2\pi, 4\pi\}$と$\{\pi, 3\pi\}$はそれぞれ等価であるから，波長800nmでは，実効的に4つの位相レベルとなるのに対し，波長400nmでは位相レベルは2となる．このことは，400nmに対する量子化誤差が大きくなることを示唆しており，WMDPEの総合的な性能低下を生じる．

このような状況を避けるためには，使用する量子化位相の選択が重要になる．例えば，波

長800nmに対する量子化位相を$\{0, 2\pi/5, 4\pi/5, 6\pi/5, 8\pi/5\}$の5レベルとすれば，400nmに対しては$\{0, 4\pi/5, 8\pi/5, 12\pi/5, 16\pi/5\}$となり，実効的な位相レベル数は両波長とも5となる．ただし素子作製時には，隣接位相レベルの間隔が小さいため，より精度の高い制御が必要となる．波長数が多くなるほど，最適な位相レベルの選択が難しくなると考えられるが，より高性能なWMDPEを実現するため，効率の良い位相レベル選択法に関する検討が必要であると考えられる．

3.7　結言

本章では，複数の波長に対して並列的な光制御を実行し，独立したスポットアレイパターンを生成するWMDPEを開発し，その設計方法，および，機能について検討した．改良ORA法により，少なくとも9波長のWMDPEが設計可能であることを示した．光学実験により，わずか9位相レベルでWMDPEの機能を実現できることを確認した．位相の量子化はDPE作製の多くの場面で必要とされるため，少ない量子化位相数でWMDPEの機能が実証されたことは，実用システムへの応用の観点から大きな意義をもつ．また，数値計算から，WMDPEのさまざまな性質が明らかとなった．使用目的に応じた詳細なパラメータ検討に基づく設計が不可欠であるが，設計の指針となる特性を示すことができた．本章で明らかになったWMDPEの性能・特性は，波長多重光インターコネクションや波長多重通信など，種々の波長多重システムへの適応能力を示すものであり，これらのシステムの大容量化，高速化，高機能化への貢献が十分に期待できる．

第 4 章

波長多重位相光学素子のシャーシ間光インターコネクションへの応用

4.1 緒言

VLSI（Very Large Scale Integration）の微細化により，チップ内処理速度は上昇を続けている．また，電子プロセッサの機能は向上し，消費エネルギーは減少した．しかし一方で，微細化の進展にともない，電子技術の限界が指摘されている．例えば，CPU やメモリ間の配線遅延が顕著化し，電気接続による物理的な限界から I/O ボトルネックが生じている．また，並列コンピュータなどの高性能なマルチチップシステムにおいては，超大容量の信号接続が必要とされるが，伝送帯域や接続密度，接続距離などの観点から，電気接続では実現が非常に困難であると考えられている [86]．

光を用いて信号の接続を行う光インターコネクションは，従来の電気接続で問題となっているこれらの問題を解決する有効な手法として期待されている．光インターコネクションの階層は，接続対象に応じ，チップ内，チップ間，ボード間，シャーシ間，システム間などに分類されている．光インターコネクション自体は，光ファイバや自由空間光学系などにより実現される．光ファイバによるインターコネクションは，容易に接続距離を長くすることができる．しかし，接続パターンの自由度は小さく，接続密度も物理的に制限されるなどの難点がある．一方，自由空間光インターコネクションは，物理的な接続を必要とせず，高密度かつ高速に信号の接続が可能である．また，接続パターンに対する自由度も大きい．

DPE は任意の接続パターンを実現できるため，自由空間光インターコネクションに有用なデバイスである [55]．3 章では，波長多重光を並列に制御できる WMDPE を開発し，その能力を示した．波長多重性は，信号伝送容量の向上や，新たな機能を付加する上で，

光インターコネクションにおいても有用である．

通信ネットワークの交換機などでは，大規模な並列コンピュータが利用されるが，通信容量がテラビットに達しつつある現在，並列コンピュータにおけるシャーシ間，システム間の情報伝送にも大容量化が要求される．これらの階層における光インターコネクションは，通常光ファイバが用いられるが，接続密度や接続自由度などの点で課題もある．これらの課題に対し，WMDPE の能力やフレキシビリティを有効に活用できると考えた．光ファイバと WMDPE の融合により，それぞれの特徴を活かした光インターコネクションが実行できる．

そこで，本章では，WMDPE をシャーシ間の波長多重光インターコネクションに応用し，その有用性を実証するとともに，WMDPE の具体的なシステムにおける性能を示す．シャーシ間の光ファイバによる信号伝送と，シャーシ内における自由空間光インターコネクションにより，受信側シャーシ内のすべてのボードとの並列接続を実現する．通信波長の切り換えにより，受信側シャーシ内の接続ボードや接続パターンを選択できるため，高速かつフレキシブルな通信を実行できる．

4.2 節では，提案する波長多重光インターコネクションの概念を述べ，その特徴をまとめる．4.3 節では，異なる信号接続パターンを想定し，2 種類の WMDPE を設計する．また，受光効率や受光素子の変位に対する受光効率を数値計算により評価する．4.4 節では，提案する光インターコネクションの基本原理の確認実験結果を示す．

4.2　波長多重位相光学素子を用いたシャーシ間光インターコネクション

WMDPE は，異なる波長に対して独立したスポットアレイパターンを生成する薄型の光制御デバイスである．生成するスポット位置を任意に設定できることは 3 章で確認している．WMDPE の利用により，複数ボードで構成されるシャーシ間の波長多重光インターコネクションを簡便なシステム構成で実現できる．

図 4.1 に提案する波長多重光インターコネクションの基本概念を示す．システムは複数のシャーシから構成されており，各シャーシは複数のボードを含んでいる．ここで，シャーシ番号を A，B，... で，シャーシ内のボード番号を#a，#b，... で表す．同じシャーシに属するボードは平行に配置されている．各ボードは，発光素子アレイと受光素子（PD）アレイをもつ．また，光の伝搬が妨げられるのを防ぐため，ボードの一部には貫通窓が開

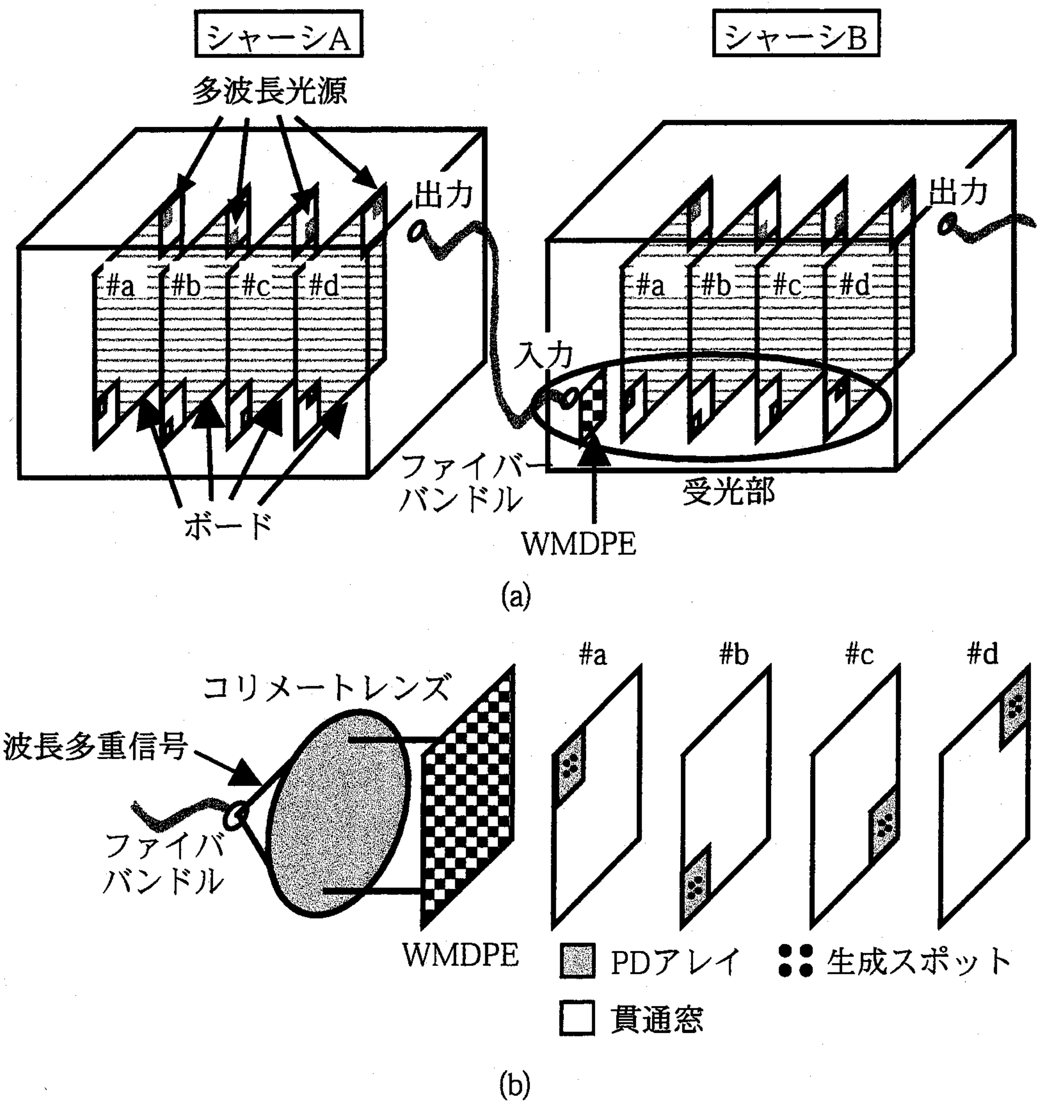


図 4.1 WMDPE を利用した波長多重光インターコネクションの基本概念. (a) システムのブロック図, (b) 受光部分の拡大図.

けられている．シャーシ間通信には光ファイバを用いる．

ここで，シャーシAからBへの信号伝送を考える．シャーシAから送信され，光ファイバ内を伝送してきた波長多重信号は，コリメートレンズを介してWMDPEに入射する．WMDPEは，シャーシBの各ボード上に，信号光の波長にしたがって独立したスポットアレイパターンを生成する（図4.1(b)）．スポットアレイパターンは信号の接続パターンに対応する．ファンアウトされた信号をPDアレイで受信し，信号伝送は完了する．

通信波長と接続パターンの関係は自由に設定できる．例えば，通信波長と受信ボードを一対一に対応させれば，送信側での通信波長制御により，信号伝送先のボードを選択できる．この場合，WMDPEが自動的に信号の受信ボードへの振り分け操作を行うことになるため，通信情報にヘッダとして行き先情報を挿入する必要はない．通信チャンネルごとに異なる波長を用いれば，複数のボードとの同時通信が可能となる．受信側シャーシ内のすべてのボードとの通信も可能であり，両シャーシ間の完全結合を実現できる．また，必要な信号接続パターン数が限定されている場合には，それぞれに波長を対応させることにより，波長切り換えで接続パターンを選択することができる．

本システム構成による波長多重光インターコネクションにおけるWMDPEの役割は，波長多重信号の分離，ファンアウトと集光である．マルチプロセッサシステムでは，プロセッサ間の協調処理のために相互通信が不可欠である．プロセッサが多くのボードに分散している場合，信号接続が隣接ボードに限定されるとシステム全体の性能低下を招くため，多くのボードと自由に通信できることが理想的である．提案する光インターコネクションでは，集光位置を3次元的に自由に設定できるWMDPEの特徴を活かし，複数ボードへの並列通信を可能にしている．また，WMDPEは受動デバイスであるため，その挿入による信号遅延は生じない．

複数のボードを接続する方法として，これまでに，偏光ビームスプリッタを利用した光インターコネクションが提案されている [87]．この方法では，偏光を利用して受信ボードを選択する．基本的には，自由空間光インターコネクションに基づいており，シャーシ内における複数ボードの接続を目的としている．また，波長多重光インターコネクションを実現するためには，有用な波長多重光源が要求されるが，垂直共振器型面発光レーザーアレイの多波長化や波長可変機能の付加が進められている [49, 50]．実用化も近いと考えられ，本節で考案した光インターコネクションは，このような波長多重光源の利用を想定した．

4.3 波長多重位相光学素子の設計

本節では，異なる信号接続パターンを実現する2種類のWMDPE（ID#1および#2）を設計し，数値計算によりその性能を評価する．

4.3.1 設計結果

2つのWMDPEの各波長・出力面距離に対する出力パターンを図4.2のように設定する．図4.2(b)中に点線で示す四角形は，出力面におけるWMDPEの投影像を表す．WMDPEのピクセル数は1400×1400，各ピクセルは一辺2.5μmの矩形，波長数は4（544nm，633nm，670nm，854nm），最大位相変調量は波長854nmに対して2π，位相レベル数は9，出力面距離は7cm，10cm，13cm，16cmとする．

WMDPE#1では，出力面距離を入射波長と一対一に対応させ，各波長に対して異なる出力面に正方形状に配列した4×4個のスポットを出力させるようにした．このときのスポットの間隔は250μmである．出力面に応じてこれらのスポット位置は変化させる（図4.2(b)）．この接続パターンを利用すれば，通信波長により受信ボードの選択が可能となる．

WMDPE#2では，各出力面距離における全波長の出力パターンの配列をすべて同一に設定する．ただし，WMDPE#1と同様に，出力面距離ごとに出力位置を変化させる．出力面でのパターンは，各波長に対して2×2，全体で4×4のスポットで構成されている．スポットの間隔はWMDPE#1と同じく250μmとした．この接続パターンを利用すれば，受信側シャーシ内のすべてのボードへの同時送信（ブロードキャスト）が可能となる．

WMDPEの設計は，3章で述べた手法に基づいて行った．WMDPE#1，#2に対する設計結果をそれぞれ図4.3，図4.4に示す．ただし，出力パターンはいくつかの波長と出力面のものを選択して示している．両方のWMDPEで，各波長・出力面距離に対して設定した正しい出力パターンが得られた．これらの結果は，3章の設計手法により，波長と出力面距離を自由に設定したWMDPEを作製できることを示している．

4.3.2 特性評価

波長多重光インターコネクションにおいては，多重化した信号間のクロストークが重要な問題となる．また，システムへの実装を考える場合には，アライメント誤差に対する許

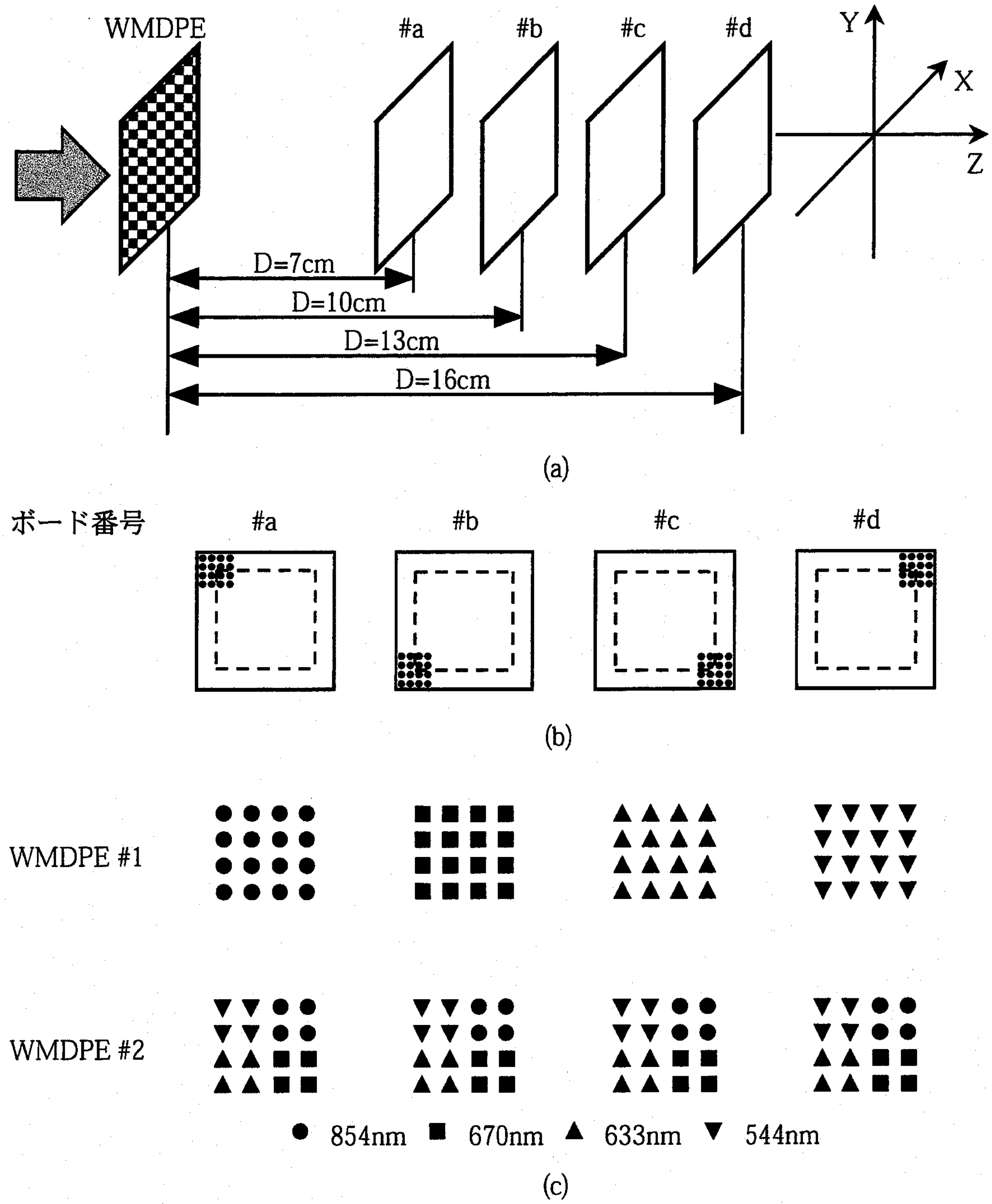


図 4.2　各 WMDPE に対して設定した出力パターン．(a) 出力面の配置，(b) 全波長に対するスポット生成位置（4 × 4 スポット），(c) 各出力面距離における 4 × 4 スポットアレイパターンの波長の割り当て．

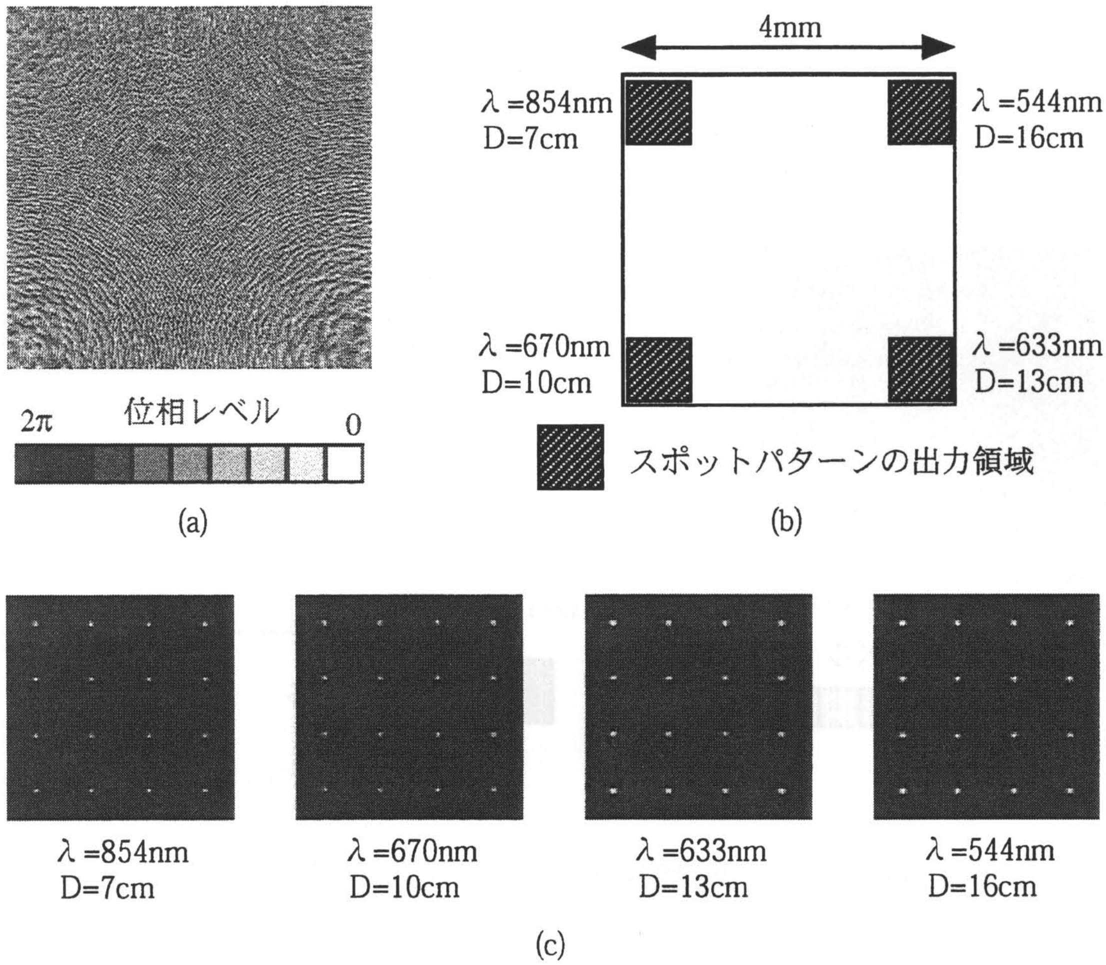


図 4.3 WMDPE#1 の設計結果. (a) 位相変調量分布, (b) 各波長と出力面距離に対する出力位置, (c) 出力パターン.

容性も必要となる．そこで，PD アレイへの受光効率を数値計算により算出し，多重信号に対する受光レベルの一様性やアライメント誤差の影響などについて検討した．

設計した 2 種類の WMDPE に対応させて，図 4.2(b) に示すスポット位置に一致するように配置した PD アレイを対象として考える．PD アレイの間隔は 250μm である．波長と出力面を変化させたときに WMDPE により生成されるパターンを求め，受光効率を算出した．受光効率は以下のように定義した．

$$\text{受光効率} = \frac{\text{PD の開口内に入射するある波長のパワー}}{\text{WMDPE に入射する光の 1 波長あたりのパワー}}. \tag{4.1}$$

PD の開口を一辺 100μm または 50μm の正方形としたときに，各 WMDPE に対応した

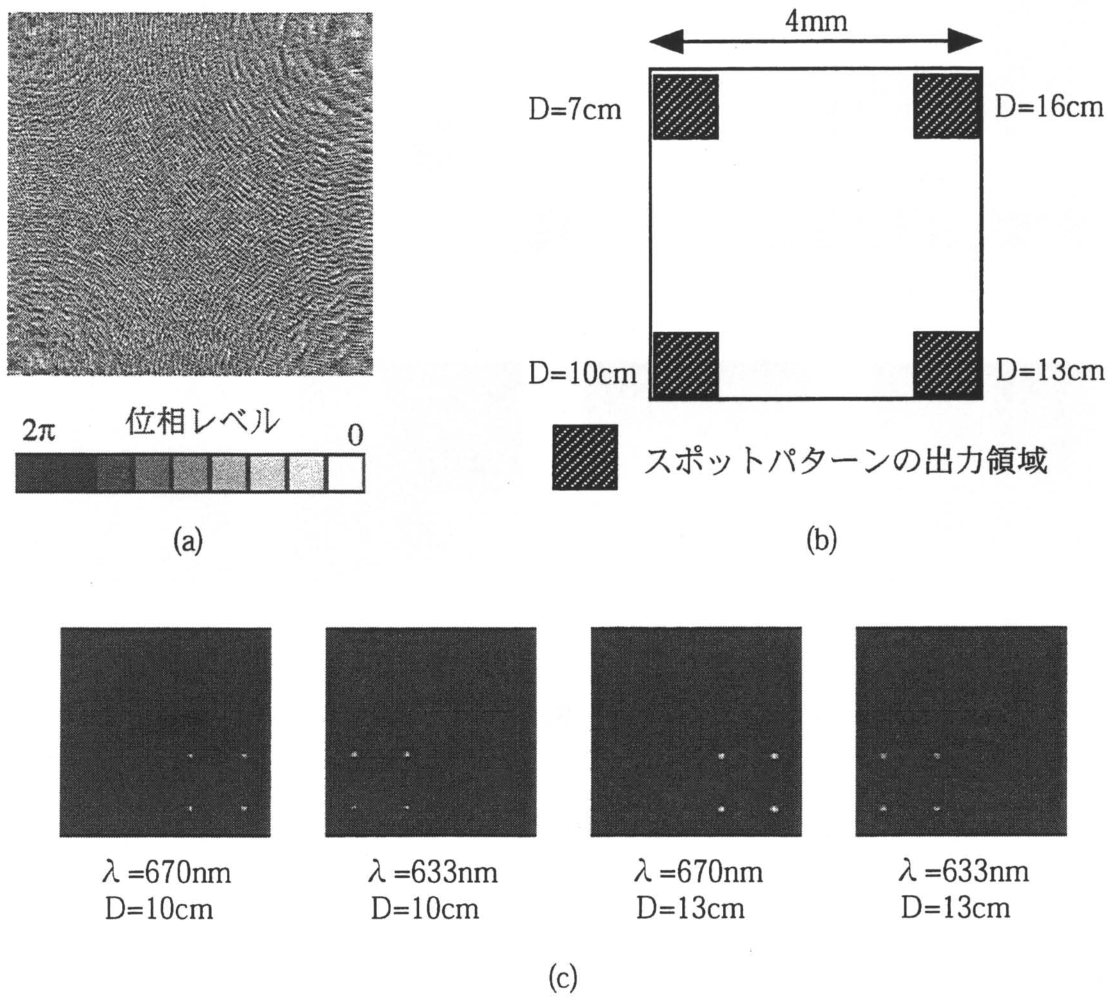


図 4.4 WMDPE#2 の設計結果. (a) 位相変調量分布, (b) 各波長と出力面距離に対する出力位置, (c) 出力パターン.

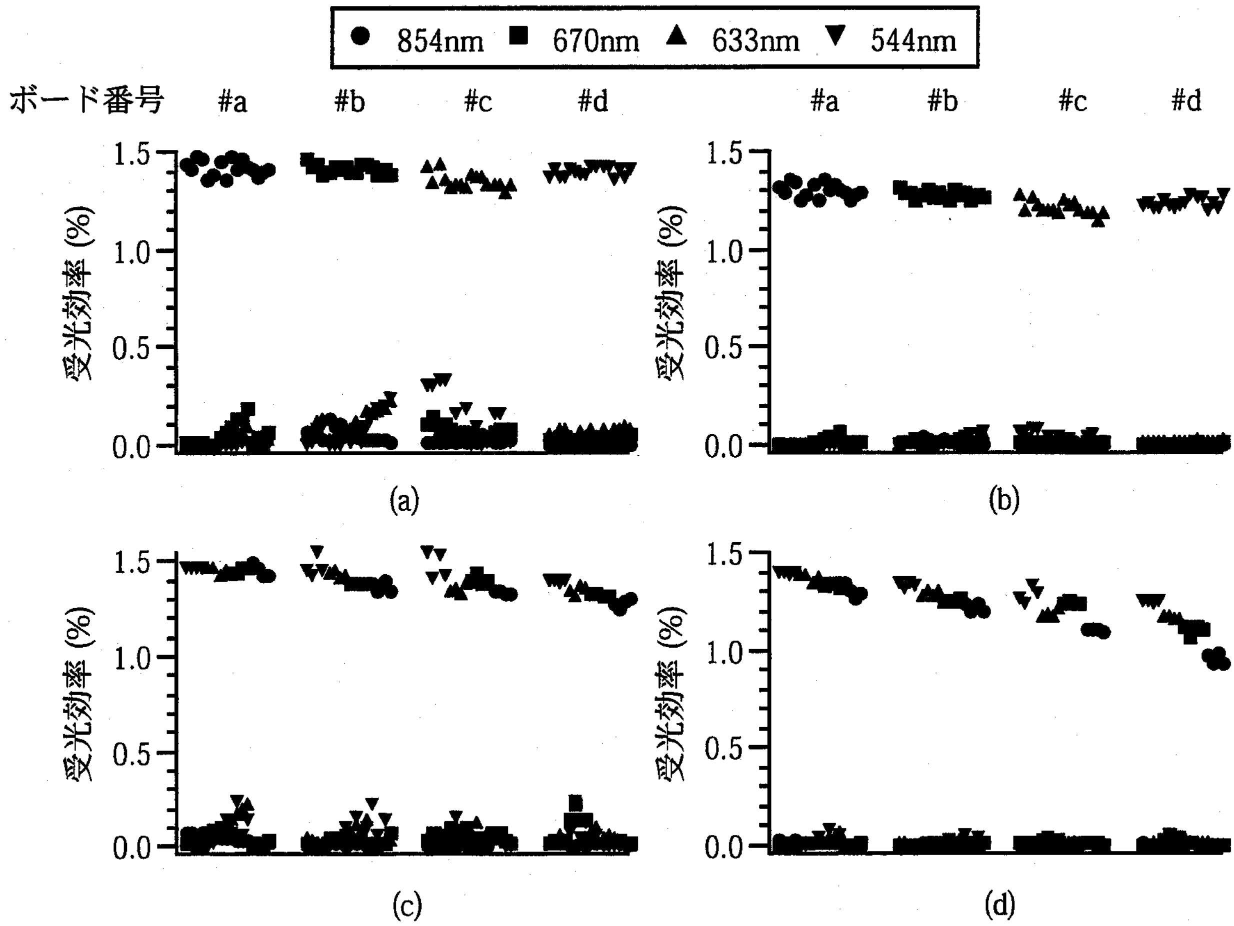


図 4.5 PD アレイの受光効率. (a) WMDPE#1, 開口 100μm × 100μm, (b) WMDPE#1, 開口 50μm × 50μm, (c) WMDPE#2, 開口 100μm × 100μm, (d) WMDPE#2, 開口 50μm × 50μm.

PD アレイの受光効率を図 4.5 に示す. グラフの横軸は PD の ID 番号に対応する. 開口 100μm × 100μm の場合には, いずれの WMDPE においても, すべての PD・信号波長に対して 1.4%程度のほぼ一様な受光効率が得られている. また, PD の開口を 50μm × 50μm と小さくした場合には, 信号パワーは全体的にわずかずつ減少し, 一部の PD では 20%以上の低下が見られる. 一方でクロストークの原因となる信号波長以外の受光に対しては, かなりの抑制効果が得られることがわかる. 出力面距離が大きいほど, また, 波長が長いほど信号波長の受光効率が低下する傾向が見られるのは, 回折現象によるスポットの拡がりに起因するものと考えられる.

ここで, 信号波長以外の光入射による PD の受光信号を雑音とし, 同一ボード内 (同じ

表 4.1　各ボードにおける SNR の計算結果.

WMDPE	開口	ボード番号			
		#a	#b	#c	#d
#1	50μm	15.73	30.17	21.33	17.10
	100μm	5.46	8.96	6.00	6.22
#2	50μm	49.88	14.37	17.12	20.72
	100μm	13.81	3.87	5.87	7.04

出力面距離）の全 PD を対象として，以下のように信号対雑音比（SNR）を定義する.

$$\mathrm{SNR} = \frac{\text{ボード内の PD の最小信号パワー}}{\text{ボード内の PD の最大雑音パワー}}. \tag{4.2}$$

SNR が高いほど，クロストークが生じる可能性は低い．各ボードにおける SNR を表 4.1 にまとめる．開口が小さい（50μm × 50μm）場合，受光効率は減少するものの，雑音パワーの抑制効果により，SNR が大幅に改善されていることがわかる．開口 100μm × 100μm の場合でも SNR は最低 4 程度であり，多重信号のクロストークは，通信プロトコルや受信回路の工夫などにより十分回避できると考えられる．ボードにより SNR に大きな差が見られるのは，信号波長以外のパターンが出力面距離により大きく異なるためである.

次に，アライメント誤差の影響を調べるため，PD アレイが理想位置から X あるいは Y 方向に変位したときの受光効率を算出した．XY 各方向に ±30μm 以下の変位が生じたときの受光効率の変化を図 4.6 に示す．ここで，受光効率はボード内で最低値を示す PD による値を表示している．変位がない場合をほぼピークとして，変位量が増加するにつれ受光効率がなだらかに減少している．受光効率の変化が変位の方向により異なるのは，生成されるスポットの位置自体に若干の誤差があることやスポット形状の非対称性によるものであると考えられる．今回設計した WMDPE に関しては，PD の変位量が 20μm 以内であれば，変位がない場合に対して最大約 3%（#1）と 10%（#2）の効率低下にとどまっている．このことから，±20μm 程度のアライメント誤差は十分に許容できる.

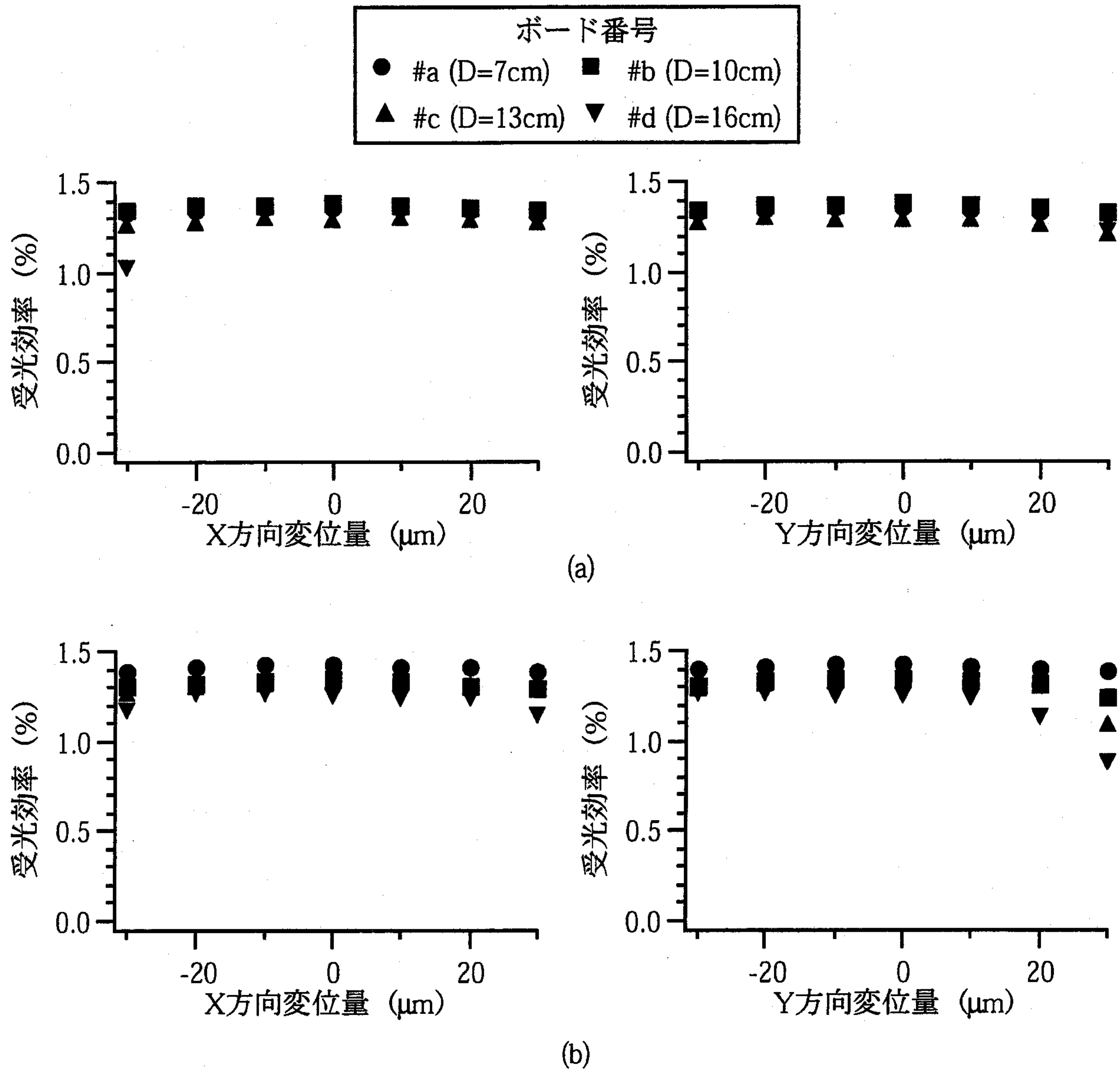


図 4.6 PD の変位に対する受光効率の変化. (a) WMDPE#1, (b) WMDPE#2.

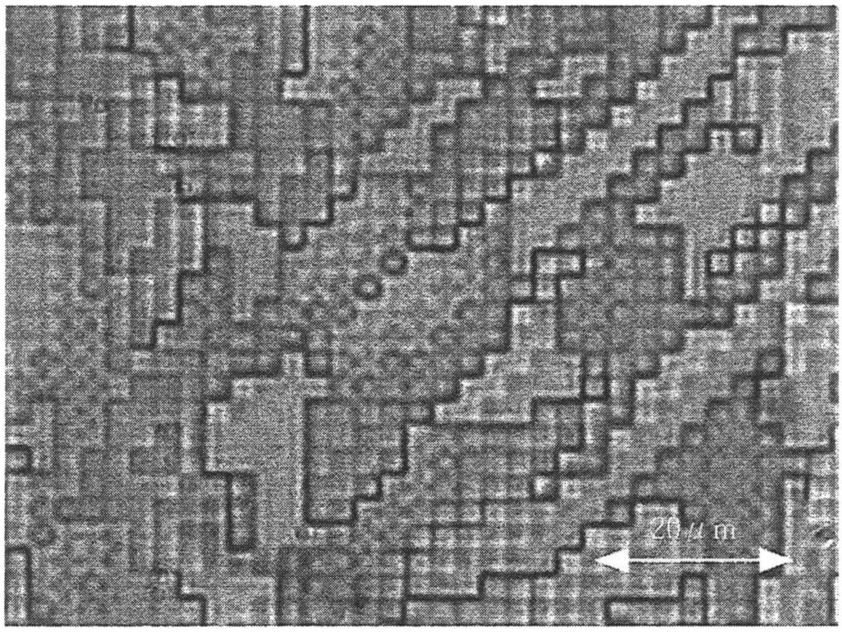


図 4.7　作製 WMDPE（#2）の光学顕微鏡写真.

4.4　原理確認実験

設計した 2 種類の WMDPE を電子ビームリソグラフィにより作製した．作製 WMDPE（#2）の光学顕微鏡写真を図 4.7 に示す．位相レベル数は 9，全体のサイズは 3.5mm×3.5mm である．

作製した WMDPE を用いて生成される静的な出力パターンを観察し，提案するシステム構成による波長多重光インターコネクションの原理を確認した．実験光学系を図 4.8 に示す．設計 4 波長のレーザー光（544nm，633nm: He-Ne レーザー，670nm: レーザーダイオード，854nm: VCSEL）を重ね合わせて同軸ビームとし，マルチモード光ファイバ（Wave Optics, Inc. 製）に導入する．ファイバ長は 1m である．ファイバからの出力光を空間フィルタリングにより整形し，平行平面波として WMDPE に入射する．CCD を光軸に沿って移動させることにより各出力面で生成されるパターンを観察した．

得られた出力パターンを図 4.9（WMDPE#1）と図 4.10（WMDPE#2）に示す．ただし，いくつかの波長，出力面距離の出力パターンを選択して表示している．図中の正方形は，一辺 100μm の PD の開口部を表す．各 WMDPE のすべての条件で意図した出力パ

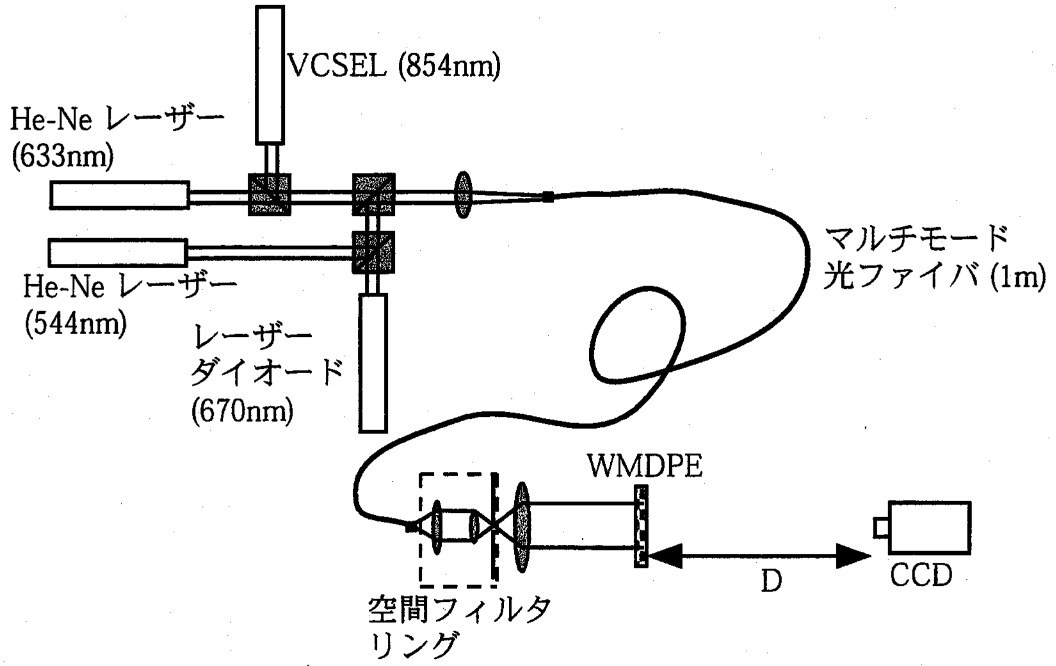
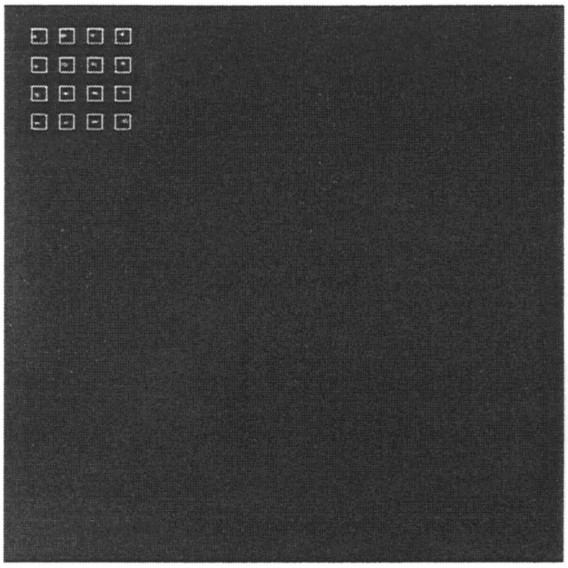


図 4.8 出力パターン観察のための実験光学系.

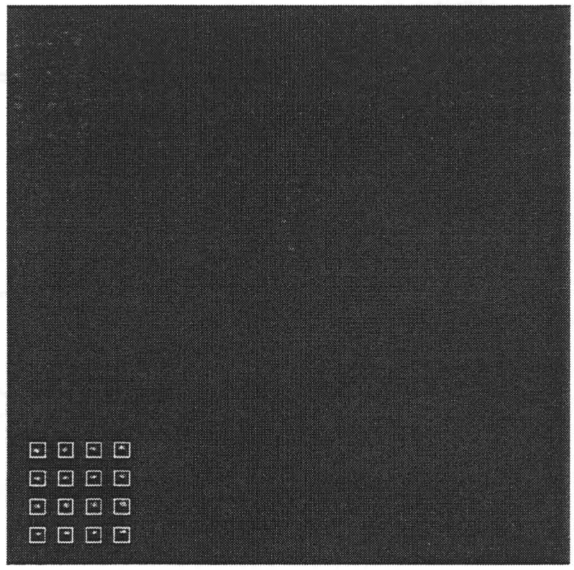
ターンが得られた．この結果，WMDPE#1においては通信波長による受信ボードの選択が，#2においては異なる出力面への同時ファンアウトにより，複数ボードへの並列通信が可能となることが確認された．本光学系で得られたスポットの大きさは，想定したPDの開口よりも十分に小さく，スポットのほぼすべてのパワーを受光できると思われる．また，4波長すべてが入射した場合には，各波長のパターンの重ね合わせとなることも確認した．以上の結果から，WMDPEを用いた波長多重光の並列制御による光インターコネクションの基本原理が実証された．

4.5 考察

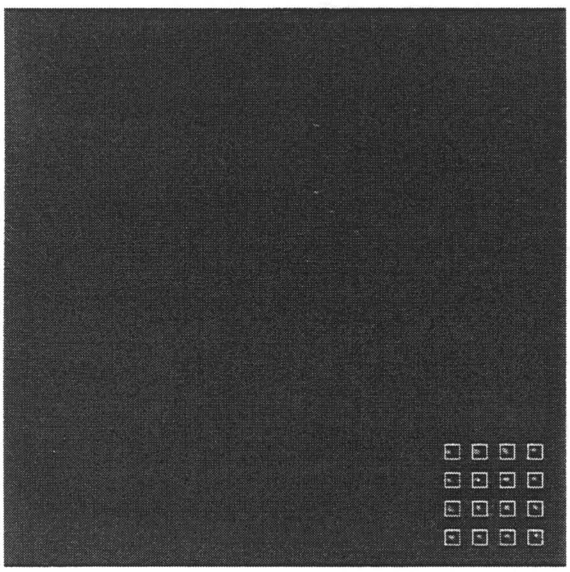
実験では，光量効率が低く，光量不足のため，PDによる受光を確認することができなかった．光量損失の原因として，ファイバのモード分散による損失，WMDPE入射前の空間フィルタリングによる損失，WMDPE照射ビームの不均一性などがあげられる．これらの損失は，主にマルチモードファイバに起因するものであると考えられる．本研究では，入手できる光源の制限により，使用波長領域が約300nmと広くなり，広い波長域で



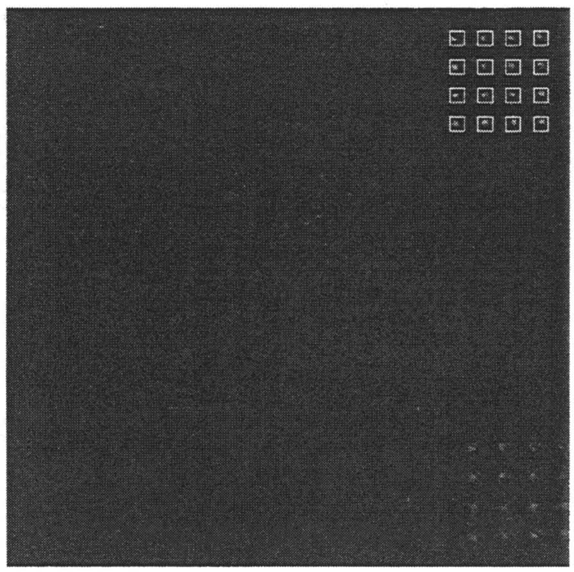
λ =854nm, D=7cm



λ =670nm, D=10cm

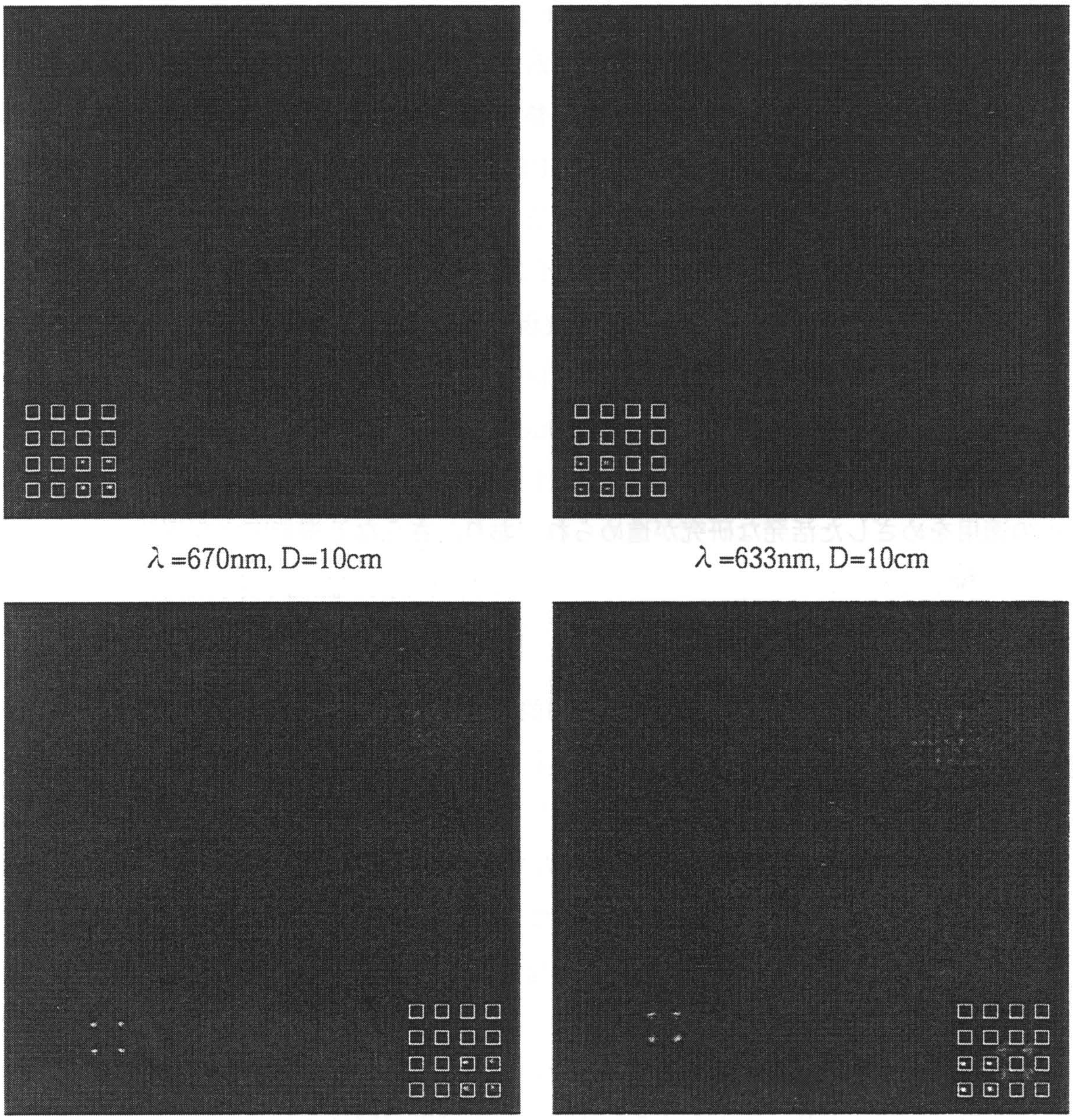


λ =633nm, D=13cm



λ =544nm, D=16cm

図 4.9　実験により得られた出力パターン（WMDPE#1）.



λ =670nm, D=10cm　λ =633nm, D=10cm

λ =670nm, D=13cm　λ =633nm, D=13cm

図 4.10　実験により得られた出力パターン（WMDPE#2）.

光の伝搬が可能なマルチモードファイバを利用した．この結果，導波ビームが多くの高次モードに分散し，さらに空間フィルタリングが必要となった．もし，光源の波長範囲を100nm程度に制限すれば，シングルモードファイバで全波長域にわたる光伝送が可能である．このとき，ファイバからの出射ビームはほぼ理想的なガウスモードとなることが期待され，空間フィルタリングによるビーム整形が不要となる．したがって光量効率は大幅に改善される．可能な波長多重数はWMDPEの波長分解能に依存するが，WMDPE単体では間隔10nm以下の波長分離能力をもつことが3章の結果から示されており，この波長域でも，少なくとも10波長程度の並列光インターコネクションが実現できる．

本章の光インターコネクション技術を実現するためには，光源の開発が不可欠となる．光源としては，波長選択可能なVCSELアレイが有望である．MEMS（MicroElectro Mechanical System）技術を利用し，波長幅50nm，波長変調レート1MHzを実現したVCSELなどの報告例がある[50, 51]．現時点では十分な性能とはいえないが，特に波長多重通信への適用をめざした活発な研究が進められており，さらなる機能向上が期待される．

4.6　結言

本章では，WMDPEによる波長多重光の並列制御技術を波長多重光インターコネクションに応用し，その能力について検討した．本手法では，光ファイバおよび自由空間光インターコネクションの併用により，複数ボードで構成されるシャーシ間での完全結合通信を実現する．提案手法の検証のため，2種類のWMDPEを用いた．PDの開口を考慮した受光効率評価から，すべてのPDでほぼ一様な受光効率が得られることを示した．また，アライメント誤差に対する許容性能に関する知見が得られた．検証実験では，静的な出力パターンを観察し，提案するシステム構成による波長多重光インターコネクションの原理を実証した．本章で示した波長多重光インターコネクションは，WMDPEの実用システムへの応用の一例であり，他の多くのシステムへも適用が期待される．

第 5 章

並列アレイ光源を利用した物体の光学的位置制御

5.1 緒言

光制御技術の目的は，これまでに述べてきたような光波分布の生成にとどまらない．光を物体や物質に作用させて得られる効果をもって機能を達成することもできる．例えば，1986 年に Ashkin らが，強く集光したレーザービームを用いて微小誘電体粒子を 3 次元的に捕捉できることを示した [24]．それ以来，光マニピュレーション技術は，生体内物質の操作，微小力測定，生体分子の運動測定，マイクロマシンなど，さまざまな分野に応用されている [25–32, 88, 89]．また，レーザービームの変調により機能の拡張が可能であり，非接触の微小物体操作法として，その有用性は疑う余地がない [62–64, 90]．

従来の光マニピュレーションシステムでは，単一のレーザー光源を用いることが多く，ビーム変調用の種々の光制御デバイスが導入される．例えば，計算機ホログラム，偏光デバイスなどを用いて，モード変換，偏光制御などが行われる [31, 64]．書き換え可能な空間光変調器などを利用すれば，フレキシブルな制御も可能であるが [34]，その能力はハードウェア構成によるところが大きい．

光マニピュレーション技術は，その有用性ゆえ，化学反応過程をチップ上で実現するラボ・オン・チップや μ-TAS（Micro Total Analysis System）[91–93]，あるいはオンチップコンピュータ [94] など微小システムへも応用が期待される．この場合には，システムの微小性や高度な物体操作に対する要求を満たす能力が必要となる．

本研究では，さまざまな特徴を備えた物体操作法として，並列アレイ光源を用いた光マニピュレーション技術を考案する．本章では，特に，その能力を活かした物体の 2 次元面内における物体位置制御法について検討する．光マニピュレーションシステムを試作し，考案手法の機能を実験的に検証する．光源には，通信や光コンピューティング用のデバ

イスとして開発が進められてきた垂直共振器型面発光レーザー（VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）アレイを利用する．VCSELアレイを利用するのは，共振器を基板に対して垂直に構成することで，数10μmから数100μm間隔で高密度にレーザー光源をアレイ集積可能という，他に類を見ない特徴を有するからである．しかも各VCSEL素子は独立に制御できる．アレイ上の各VCSEL素子を並列に制御すれば，コンパクトなハードウェア構成かつ簡便な制御ソフトウェアで，自由度の高い物体操作を実現できる．これらの特徴は，光マニピュレーション技術を新たな応用分野へ展開する上で，きわめて有用であると考えられる．

5.2節では，VCSELアレイを利用した光マニピュレーションの概念について述べ，その特徴をまとめる．5.3節では，試作システムの構成，およびその性能について述べる．5.4節では，微小物体位置制御の実行例として，複数物体の一括輸送，アレイ上の発光VCSEL素子の時間的制御に基づく物体輸送，ビーム間隔以下の精密な物体の位置制御，および，2×2のビームを用いた物体輸送の実験結果を示す．

5.2　垂直共振器型面発光レーザーアレイ光マニピュレーション

光を利用して物体を操作するとき，その駆動力となるのは，光と物体の相互作用によって誘起される光圧である．したがって，操作を実行する際には，相互作用を制御する必要があり，いかにして適切な光波を作り出すかが重要な課題となる．この課題に対する解決策として，並列アレイ光源を利用する方法を新しく考案した．各光源から生成されるビームの並列制御により自由に光パターンを形成でき，それらの時間的な変調により適切な操作を選択できるなどの特徴を有する．

本研究では，並列アレイ光源としてVCSELアレイを用いる．ここでは，アレイ上の各VCSEL素子をピクセルと呼ぶ．VCSELアレイを用いた光マニピュレーション技術（VCSELアレイ光マニピュレーション）の概念を図5.1に示す．VCSELアレイは面発光型の半導体レーザーであり，各ピクセルが高密度に配置されている．個々のピクセルの発光強度は，電気信号により独立に制御できるため，任意の発光パターンが得られる．最大の発光強度は，一般に数mW程度である．1GHzを超える高速な変調が可能であり，走査速度の観点からは，光マニピュレーションで頻繁に利用されるガルバノミラーや音響光学素子を用いる走査方法よりも高速である．これらの特徴から，光マニピュレーションの機能を拡

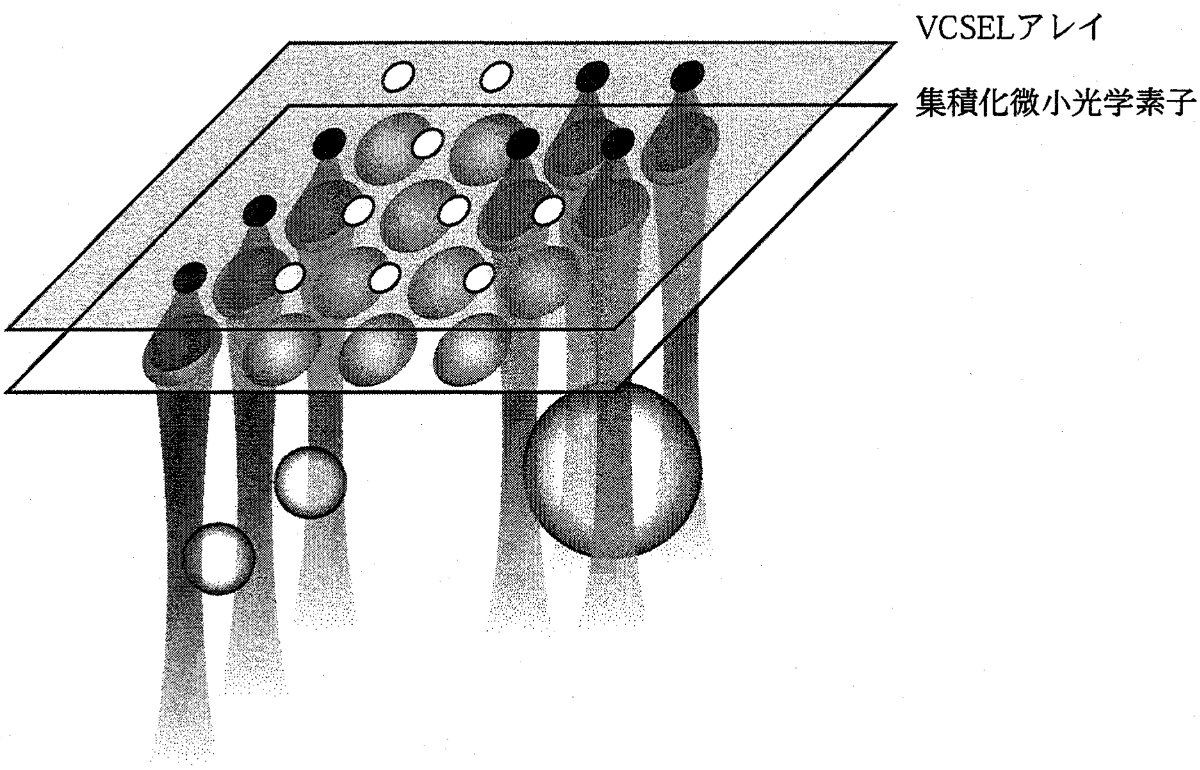


図 5.1　VCSEL アレイ光マニピュレーションの概念図.

張し，自由度の高い操作が実現されると期待できる．アレイ光源の並列制御性は，複数の物体に対する並列操作への適応性を示している．VCSEL アレイ光マニピュレーションにより実現可能な機能としては，複数物体の並列操作，物体の回転，あるいは複雑な形状の物体に対する操作などが考えられる．

さらに，外部のリレー光学系を挿入せず，VCSEL アレイとマイクロレンズアレイのみでボード間光インターコネクションが実現できる [68, 95] など，VCSEL アレイは微小光学素子と容易に融合できる．これは，VCSEL アレイ光マニピュレーションが，ハードウェア構成の簡単化に適した方式であることを示しており，コンパクトなハードウェアに基づくシステムの実現が期待できる．また，発光するピクセルの切り換えのみで生成する光パターンを制御できるため，光波制御用の付加的なデバイスを削減でき，その代わりに，一つのシステムに多くの機能を付加することができる．VCSEL アレイ光マニピュレーションは，このように多くの利点を有しており，光マニピュレーション技術の新たな応用分野

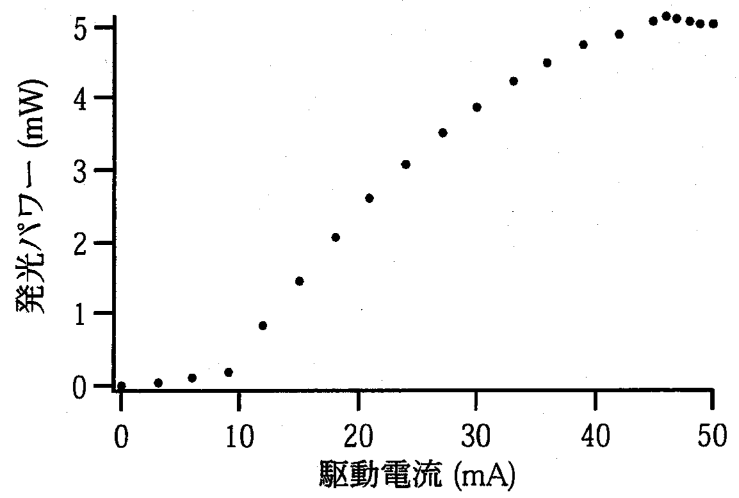


図 5.2　VCSEL の発光特性.

の開拓への礎となることが期待できる.

なお，VCSEL アレイを光源とした光マニピュレーションは，Esener らのグループによっても本研究とは独立して報告されている [96]．彼らは，VCSEL tweezers と称し，ポリスチレン粒子や生体細胞の輸送などを行っている.

5.3　試作システム

5.3.1　垂直共振器型面発光レーザーアレイの発光特性

光源には 8 × 8 ピクセルの VCSEL アレイ（NTT フォトニクス研究所製，波長 854nm，最大出力 3mW 以上，開口径 15μmϕ，ピッチ 250μm）を用いた．VCSEL アレイは電流駆動であり，その発光強度分布は，電圧 – 電流変換回路により制御する．また，回路への入力電圧は，D/A コンバータを介してコンピュータにより制御した.

500Hz の矩形波電圧を制御回路に入力し，駆動電流に対する VCSEL の発光パワーを測定した．VCSEL の発光特性を図 5.2 に示す．発光パワーは，VCSEL 直後でのパワーメータによる測定値である．しきい値電流は約 10mA であり，46mA の駆動電流で約 5.1mW の発光パワーが得られた．また，8 つのピクセルの発光強度を比較したところ，ばらつきは ±3% 程度と小さく，本章における実験では問題はなかった.

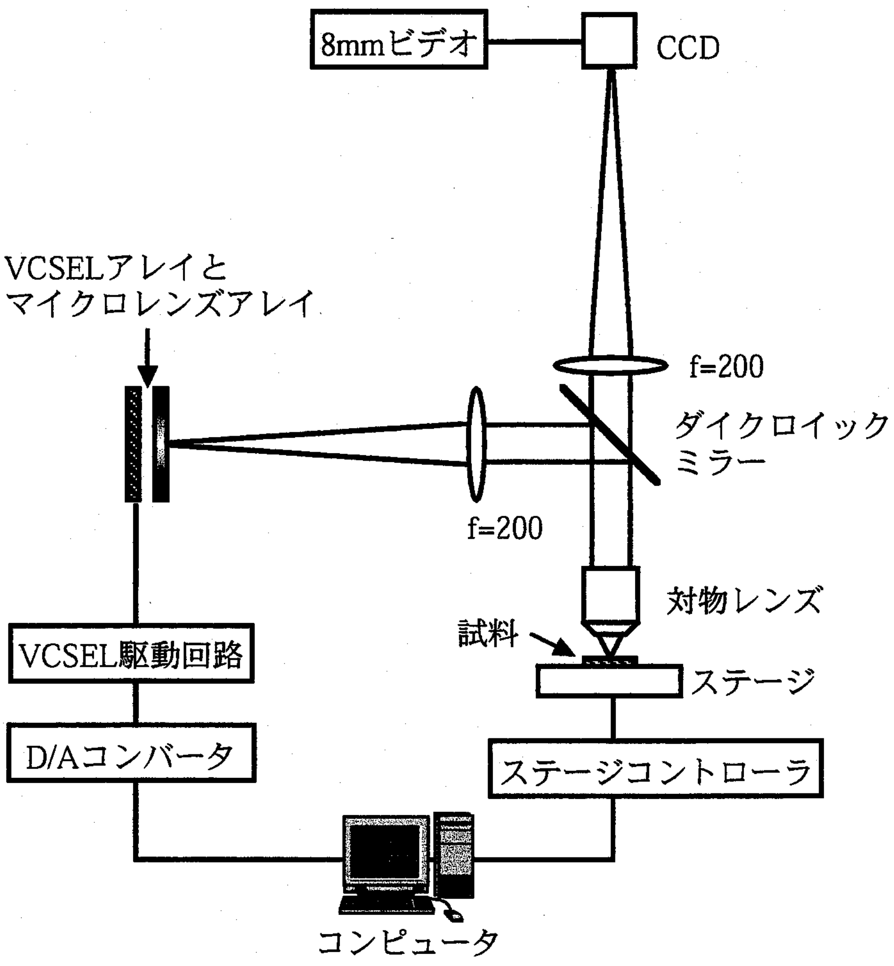


図 5.3 VCSEL アレイ光マニピュレーションシステムの構成.

5.3.2 システム構成

試作した VCSEL アレイ光マニピュレーションシステムの構成を図 5.3 に示す．ここでは，原理確認を主な目的とするため，バルク型の光学素子を用いて光学系を構成した．VCSEL アレイの発光強度とステージはコンピュータ（PentiumIII Processor，クロック周波数 800MHz）により制御する．本システムでは，自作の VCSEL 駆動回路を用いており，全 64 個の VCSEL を完全に独立に制御できる．ただし，VCSEL を直流駆動すると素子を破損するため，500Hz の矩形波で駆動した．

使用した VCSEL は，開口からの放射角が約 15 度と大きい．光量効率の低下を防ぐため，VCSEL アレイの直後に焦点距離 720μm，ピッチ 250μm のマイクロレンズアレイ（Micro-

Opt製，PML-FW0250S0096S-NC）を配置した．集光用のレンズには水浸長作動距離対物レンズ（OLYMPUS製，LUMPlan Fl 60× W/IR，NA 0.90）を用いた．光学系により，マイクロレンズアレイを試料面上で約1/67倍で縮小結像させ，試料面でピッチ3.75μmのスポットアレイを生成した．各スポットの半径（ピーク強度の$1/e^2$）は約1.3μm，試料面における1ピクセルあたりの最大光パワーは約1.1mWであった．試料面の様子は観察用光学系を用い，ビデオ記録した．

5.4　微小物体操作実験

ポリスチレン粒子は，微小力の測定やマイクロモーターなどに利用されている．また，DNAなどのフィラメント分子に接合することにより，その分子の形状を制御できるなど広く応用できる．そこで本章では，直径6μmと10μmのポリスチレン球（Polysciences, Inc.製，Polybead Polystyrene Microspheres，屈折率 1.60，密度 1.05g/ml）を水に分散し，スライドガラスとカバーガラスにはさみこんで，試料として用いた．

5.4.1　複数物体の一括輸送

複数の物体を一括して位置制御する方法には，複数のスポットを生成する方法と，スポットの高速走査による方法がある．前者としては，空間光変調器にフレネルレンズの重ね合わせパターンを表示し，パターンの変化により一括操作を実現した例がある [35]．3次元的に任意のスポットパターンを生成できるが，表示パターンの計算が必要であり，生成されるスポットの強度比については考慮されていない．また，スポットの走査に基づく方法では，生成パターンの高速繰り返しにより任意の形状に微小粒子を配置した例がある [33]．

一方，VCSELアレイ光マニピュレーションでは，VCSELアレイの発光ピクセルの組み合わせにより，任意のスポットパターンを生成することができる．異なるピクセルを個々の物体に割り当てることにより，複数の物体を同時に捕捉・輸送することが可能となる．本手法と上に示した方法との大きな違いは，光のパターンを生成するための外部の光制御素子が不要であり，光源の直接変調でパターンを生成できることである．

実験では，アレイ上の2つのピクセルを使用し，2種類の粒子の同時輸送を試みた．試料面上において2つの粒子を捕捉した状態で，ステージを移動させることで，粒子を相対

的に輸送した.

実験結果を図 5.4 に示す．図では，10 秒間隔でサンプリングした 6 枚のビデオ画像を示している．対象物体は直径 6μm（右下）と 10μm（左上）のポリスチレン粒子であり，円で囲んで表示している．● 印はステージの原点を表す．ステージは最初左方向へ，次に上方向へ移動させた．観察領域が固定されているので，捕捉されていない粒子はステージと共に移動している．一方，捕捉された粒子は，ステージ移動中も同一箇所にとどまっていることがわかる．これは，捕捉した 2 つの粒子のみが，他の粒子に対して相対的に輸送されたことを意味しており，複数の物体の同時操作が行われたことがわかる．本実験における粒子の平均輸送速度は 0.48μm/sec であった．なお，本章の実験においては，3 次元的な光トラップを実現することはできなかった.

5.4.2 発光ピクセルの時間的制御に基づく物体輸送

光圧により物体を捕捉した状態でスポットを走査すれば，物体を輸送できる．このため，ミラーの回転や空間光変調器の動的なパターン切り換えによるビーム走査が利用されてきたが，VCSEL アレイ光マニピュレーションでは，発光点があらかじめアレイ状に配置された状態になっており，発光ピクセルの切り換えにより物体を輸送できる．この手法では，機械的な動作はまったく必要ない.

実験では，L 字型に配列した 7 つのピクセルを使用した．各ピクセルは，図 5.5 に示すように，L 字の右下から左上の方向に順番に点灯させた．実験結果を図 5.6 に示す．図では，10 秒間隔でサンプリングした 6 枚のビデオ画像を示している．対象物体は直径 6μm のポリスチレン粒子であり，円で囲んで表示している．● 印は物体の初期位置である．対象物体が，VCSEL アレイの発光ピクセルにしたがい，スライドガラス上を移動していることがわかる．本実験における粒子の平均輸送速度は 0.45μm/sec であった．本手法により，発光ピクセルの切り換え操作により，任意の方向に物体を輸送できることが確認できた.

5.4.3 スポット間隔以下の精密位置制御

複数のビームが物体に照射される系においては，それらのビームによって誘起される光圧の和が均衡する位置に物体が捕捉される．このことを利用し，スポット間隔より細かい

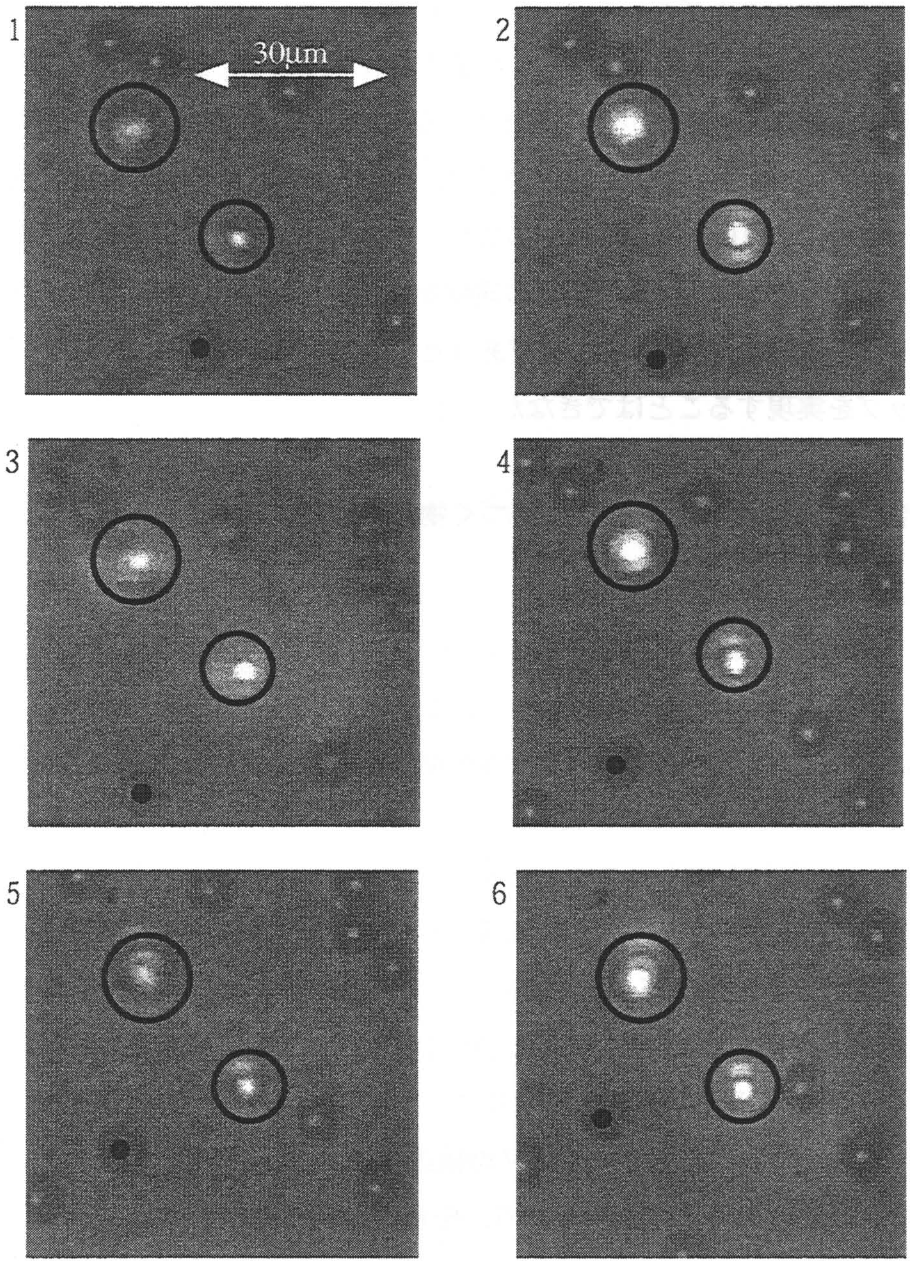


図 5.4　2 粒子の一括輸送の実験結果．円内が対象粒子，• 印はステージの原点．

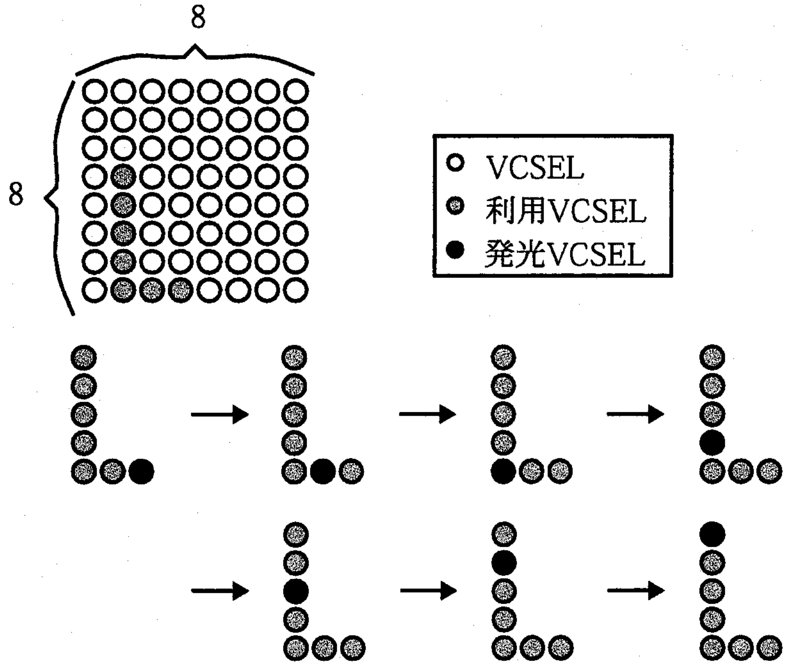


図 5.5 発光ピクセルの時間的制御に基づく物体輸送におけるピクセルの発光シーケンス.

精度で物体の位置を制御できる．本手法の原理を図 5.7 に示す．ここでは，物体を 2 本のビームで照射する場合を想定している．単一のピクセルが発光している場合には，対象物体はそのスポット位置に捕捉される（図 5.7 (a)，(c)）．一方，VCSEL アレイの 2 つのピクセルが等しい強度で発光しているときには，スポットが粒子を引き込む力が等しいため，粒子はスポットの中間位置に静止する（図 5.7 (b)）．これらのピクセルの強度を変化させれば，その強度比にしたがって粒子の静止位置を制御することができる.

直径 10μm のポリスチレン球を隣り合った 2 つのピクセルで操作し，本手法の検証を行った．図 5.8 に，各スポットの強度（実線および点線）を段階的に変化させたときの対象粒子の位置（•）の時間応答特性を示す．粒子は VCSEL アレイの発光パターンの変化に反応し，移動している．また，2 つのスポットの強度比に依存し，粒子の静止位置が変化していることがわかる．この結果より，物体位置を，試料面でのスポット間隔（3.75μm）よりも小さい 1μm 以下の精度で制御できることが確認された.

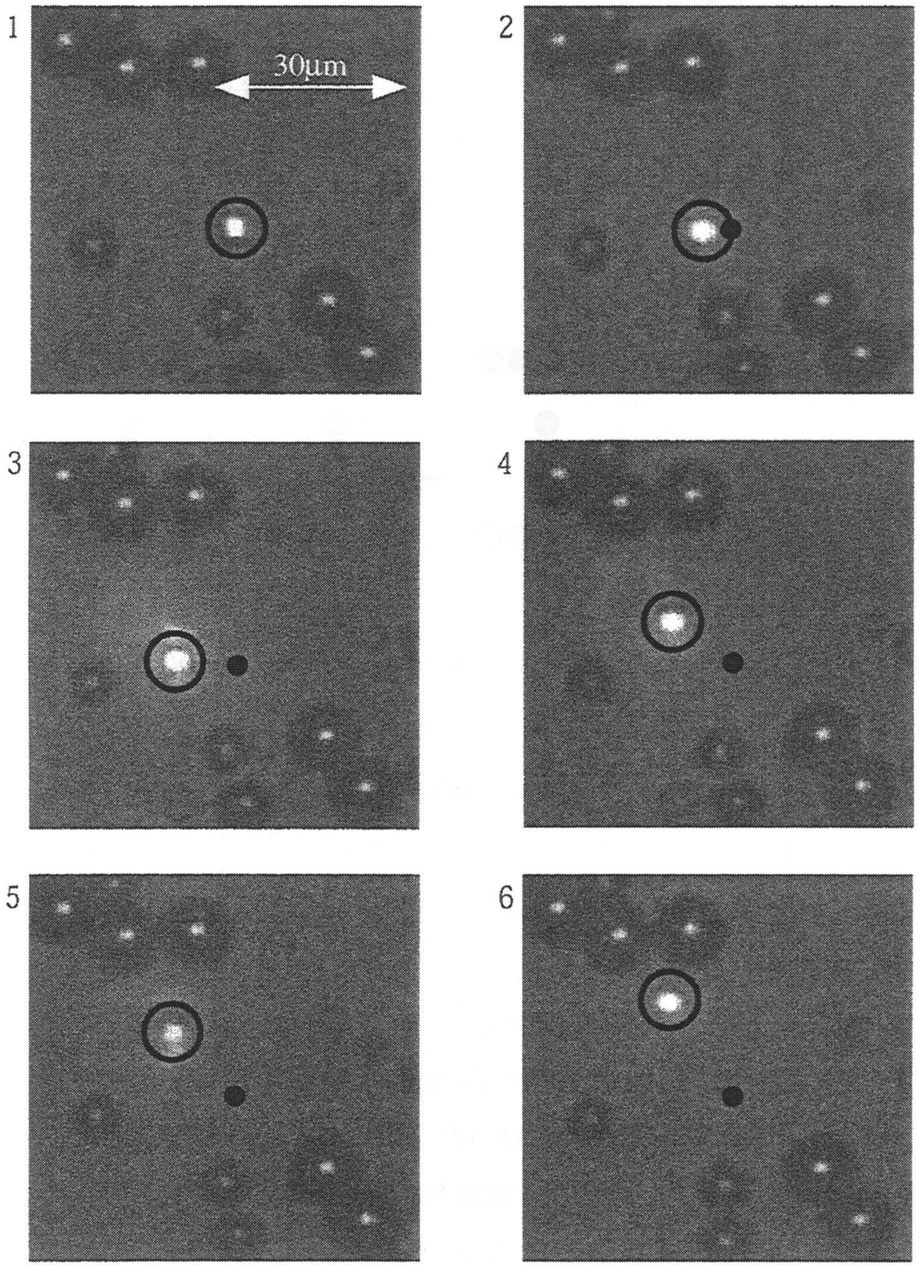


図 5.6 発光ピクセルの時間的制御に基づく物体輸送の実験結果．円内が対象粒子，● 印は粒子の初期位置．

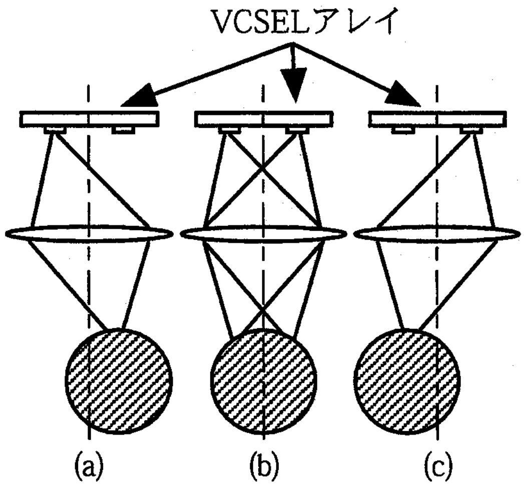


図 5.7 物体位置制御の原理. (a) ; 左側のピクセルを発光, (b) ; 左右のピクセルを発光, (c) ; 右側のピクセルを発光.

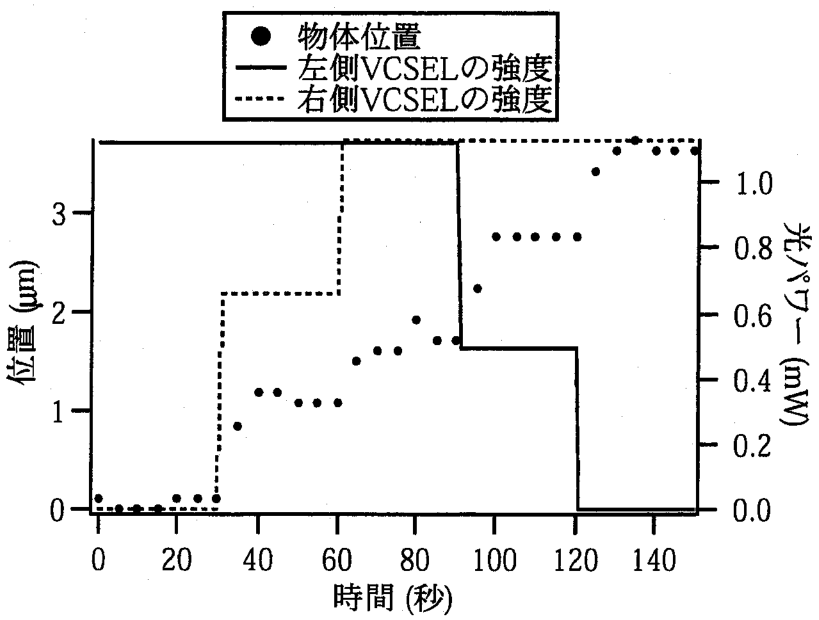


図 5.8 発光パターン変化に対する粒子位置の時間応答特性.

5.4.4　2×2 のビームによる物体輸送

複数のビームを同時に物体に照射すれば，光パワーの総計が増加するため，輸送速度の向上が期待できる．そこで，2×2 のビームを物体に照射して物体輸送を行い，単一ビーム照射との速度比較を行った．対象物体は直径 10μm のポリスチレン球である．また，試料面におけるスポット間隔を縮小するため，この実験のみ，集光レンズとして 100 倍の水浸長作動距離対物レンズ（OLYMPUS 製，LUMPlan Fl 100 ×W，NA 1.00）を用いた．生成されるスポット間隔は 2.25μm となる．また，各スポットの半径（ピーク強度の $1/e^2$）は 1.1μm であった．照射ビームのパワーの総計は，単一ビームの場合が約 0.7mW，2×2 ビームの場合は約 2.3mW であった．粒子を捕捉した状態でステージを一定速度で移動し，捕捉状態を崩すことなく輸送できる最大の速度を，輸送速度として求めた．測定結果は，単一ビームの場合が 0.50μm/sec，2×2 ビームの場合が 1.05μm/sec となり，約 2 倍に速度が向上した．実験結果から，複数ビームの同時照射により，輸送速度が向上できることが確認された．

5.5　考察

従来の光マニピュレーションシステムでは，強い光圧を得るため，数 100mW から 1W 以上の高パワーレーザーが利用されてきた．これに対し，通信用のデバイスとして開発されてきた背景から，現段階での VCSEL の最大発光パワーは 10mW に満たない．しかし，本章の結果から，単一の VCSEL で，数 μm から 10μm の大きさの物体を捕捉し，物体の位置を制御できることが示された．単一の VCSEL で物体操作を行える光圧が得られることは，本手法による自由度の高い物体操作性を示唆するものとして重要な意味をもつ．

粒子に与える光圧は光強度ではなく，平均的な光エネルギーに比例する．このため，単一の高パワーレーザーを用いた場合でも，その高速走査により時間平均エネルギーを確保すれば，複数の物体を同時に操作できる．これに対し，VCSEL アレイ光マニピュレーションでは，複数のビームを並列に照射するため，ビームを走査する必要がなく，操作対象となるすべての粒子に対して常に光圧を与え続けることができる．したがって，個々の物体に対する操作自由度が，走査速度に制限されることはない．このことから，VCSEL アレイ光マニピュレーションは，複数の物体の操作に対して特に有効であると考えられる．

試作システムでは，試料面における光パワーが低く，輸送速度の面では，従来システム

に匹敵する性能を達成できなかった．輸送速度を向上するためのひとつの方法は，5.4 節でも示したように，複数のビームを同時照射することである．粒子を N 個のビームで照射すれば，マニピュレーション用ビームのパワーの合計は単一ビームの場合の N 倍となるため，与える光圧が増加し，輸送速度が向上する．ただし，光圧は照射するスポットパターンに依存する．詳細については，6 章で評価する．

複数ビームの照射は物体の位置制御に対しても有効である．物体へ与える力が増加するため，制御精度を改善できる．また，5.4.3 項では，1 次元のみの位置制御を行ったが，例えば 2×2 のビームを照射することにより，2 次元面内での位置制御が可能となる．このとき，発光ピクセルの時間的制御に基づく物体輸送手法を組み合わせれば，広範囲にわたる位置制御も実行できる．

5.6 結言

本章では，VCSEL アレイ光源の各ピクセルの並列制御に基づく光マニピュレーション技術を考案し，その位置制御能力について検討した．VCSEL アレイの時間的・空間的な発光分布制御特性により，さまざまな物体操作が可能となる．試作システムを用いた実験により，複数物体の一括輸送，発光ピクセルの切り換えによる物体輸送，スポット間隔以下の精密な物体位置制御を確認し，輸送速度として約 0.5μm/sec，位置精度として 1μm 以下が得られた．さらに，複数のビーム照射が輸送速度向上に有効であることを確認した．ただし，本章の実験では，光軸方向への物体操作は実現することができず，課題として残った．

第 6 章

複数ビームの同時照射による3次元微小物体操作

6.1　緒言

5章では，光波の空間並列制御に基づくVCSELアレイ光マニピュレーションを考案し，特徴的な機能について検証した．その結果，光マニピュレーション技術を，これまでに適用されることのなかった分野に応用できる可能性が示唆された．しかし，光源の発光パワーが低いことや，ビームが多モードであり集光特性が悪いことなどが原因で，光軸（鉛直）方向における物体の操作を行うことができず，光軸に垂直な2次元面（水平面）内での操作に限定された．

一般に，光軸方向に得られる光圧は，光軸に垂直な方向に得られる光圧よりも小さい [97]．また，鉛直方向には，粒子にかかる重力や，熱運動を上回る力が必要である．実際のシステムでは，光軸方向を鉛直方向に一致させることが多く，水平方向と同等の制御を実現するためには，より大きな物体照射パワーが要求される．光マニピュレーション技術の応用範囲が，3次元的な物体操作により拡大されるのは明らかである．例えば，両端にビーズを接合したフィラメント分子に対し，光マニピュレーションによる3次元操作を利用して結び目を作り，その切断強度の測定がなされている [88]．

本章では，個々の物体に対して複数のビームを利用する，VCSELアレイ光マニピュレーションの3次元物体操作への応用について検討する．光圧による力の数値解析に関しては，レーザー基本モードであるガウスビームや高次モードを利用した場合について多数の報告がある [98, 99]．しかし，複数のビームを利用した場合については報告例が見あたらない．本研究では，複数ビーム照射時に得られる力を数値計算により求め，その特徴について検討する．また，鉛直下方からの複数ビーム照射により物体を浮揚・輸送し，3次元的な物体輸送を実現できることを示す．

6.2 節では，複数のビームを同時に照射したときに誘起される光圧による力を，幾何光学に基づく数値計算手法により求める．VCSEL アレイの発光分布制御により得られる照射パターンを仮定し，得られる力との関係を示す．6.3 節では，複数のビームを用いた微小粒子の浮揚および輸送実験結果を示す．照射パターンのビーム間隔と物体の浮揚に必要な照射パワーとの関係や，鉛直方向の物体位置の照射パワー依存性を測定した結果を示し，本手法の能力や特徴について検討する．

6.2　光圧による力の数値解析

6.2.1　モデル

本章では，大きさが数 μm から 10μm 程度の物体を解析の対象とする．したがって，物体の大きさが光源の波長（854nm）よりもかなり大きいと考えられるため，幾何光学に基づき光圧による力を求める．計算は Gauthier により提案された手法 [100] を，複数ビーム照射へ拡張することにより行った．

光圧による力の計算に用いたモデルと座標系を図 6.1 に示す．物体は誘電体の球体とし，複数のビームを鉛直下方から上方に（$+z$ 方向に）照射する．重力は $-z$ 方向にはたらくものとする．入射光は，物体表面で屈折または反射を繰り返して進行し，物体による光の吸収は考慮しない．屈折と反射はそれぞれ Snell の法則，反射の法則に従うものとする．

フォトンは，物体表面での反射または屈折により，運動量を変化させる．このとき，運動量保存則から，物体にはその変化を打ち消す運動量変化が与えられる．単一のフォトンの運動量変化を $\Delta\mathbf{P}$，入射光の強度分布を $I_{\mathrm{inc}}(x,y,z)$ とすると，物体が受ける力 $\mathbf{F}$ は，

$$\mathbf{F} = \int \frac{-I_{\mathrm{inc}}}{\Delta E}\Delta\mathbf{P}dS, \tag{6.1}$$

と書ける．S は物体の下半球表面全体，ΔE は単一フォトンのエネルギーを表しており，

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda_0}, \tag{6.2}$$

である．ここで，h はプランク定数，λ_0，c は真空中での波長と光速である．$\mathbf{F}$ を x，y，z 方向成分に分離して $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ と表したとき，$(0,0,F_z)$，$(F_x,F_y,0)$ をそれぞれ光軸方向の力，動径方向の力と呼ぶ．$\Delta\mathbf{P}$ の計算方法については，付録 A にまとめる．

ビームウェストの中心座標が $(X_c, Y_c, 0)$ であるガウスビームの強度分布 $I_{\mathrm{gauss}\{\mathrm{X_c,Y_c}\}}(x,y,z)$

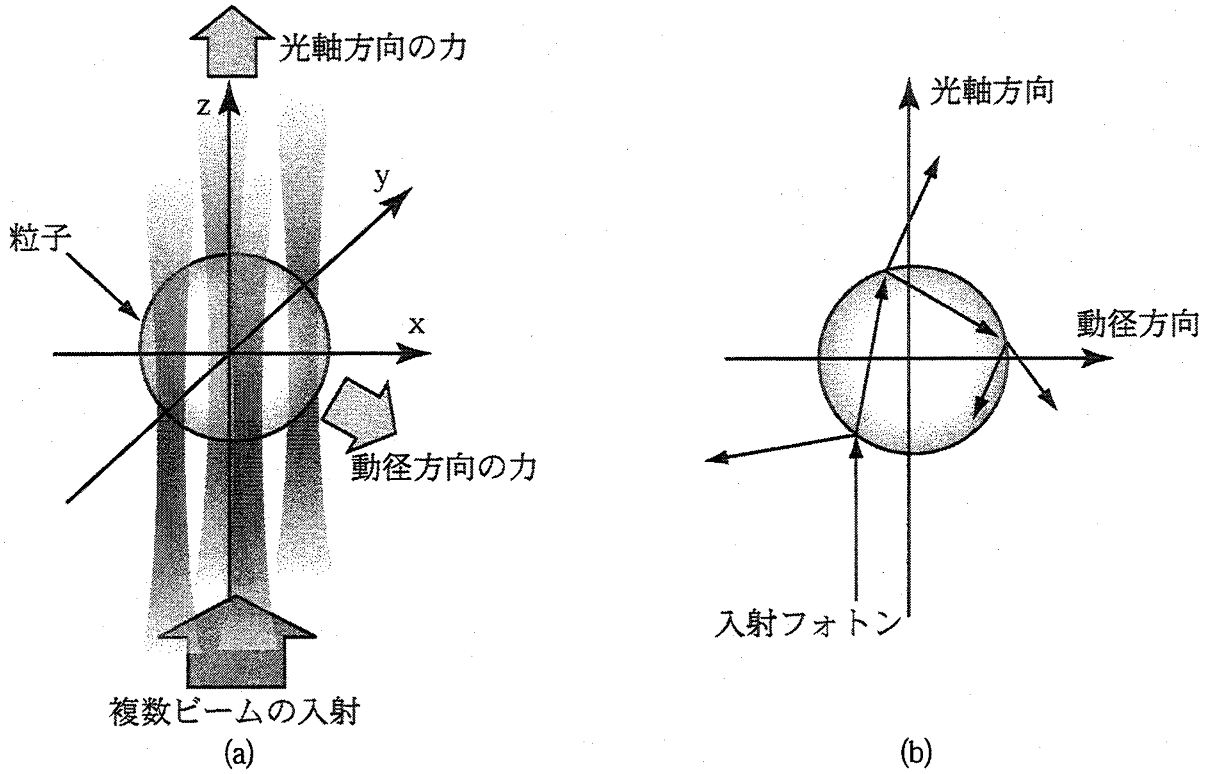


図 6.1 光圧による力の計算に用いたモデルと座標系. (a) 入射ビームと, (b) フォトンの伝搬.

は, 以下の式で表すことができる.

$$I_{\mathrm{gauss}\{X_c,Y_c\}}(x,y,z) = \frac{2P_{\mathrm{gauss}}}{\pi W_z^2}\exp\left[\frac{-2\{(x-X_c)^2+(y-Y_c)^2\}}{W_z^2}\right]. \tag{6.3}$$

ただし,

$$z_0 = \frac{\pi W_0^2}{\lambda_0}, \tag{6.4}$$

$$W_z = W_0\sqrt{1+\frac{z^2}{z_0^2}}, \tag{6.5}$$

である. ここで, P_{gauss} はビームのパワー, W_0 はビームウェスト径, z はビームウェスト位置からの光軸方向距離である. 本章における計算では, 物体へ照射するそれぞれのビームをガウスビームと仮定する. ビームウェストの中心座標が $(X_{c1},Y_{c1},0),(X_{c2},Y_{c2},0),\ldots,(X_{cN},Y_{cN},0)$

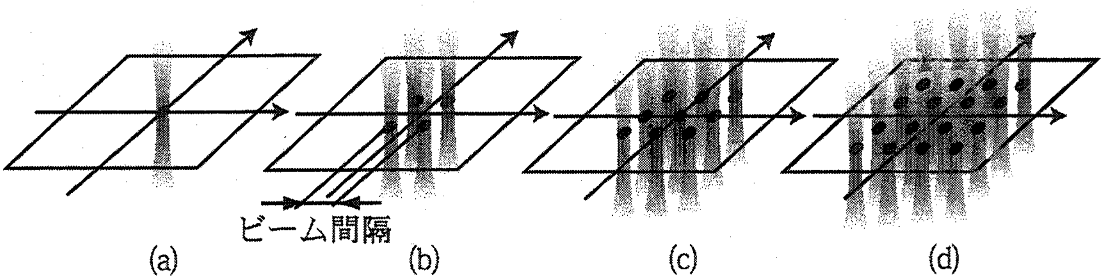


図 6.2　数値計算において想定した照射ビームパターン．(a) 1 ビーム，(b) 2×2 ビーム，(c) 3×3 ビーム，(d) 4×4 ビーム．

である N 本のビームにより生成される光強度分布 $I_{\mathrm{multi}}(x, y, z)$ は,

$$I_{\mathrm{multi}}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} I_{\mathrm{gauss}\{X_{ci}, Y_{ci}\}}(x, y, z), \tag{6.6}$$

と書ける．ここで，各ビームはインコヒーレントであると仮定している．入射光強度分布 I_{inc} に I_{multi} を代入することにより，式 (6.1) を用いて光圧による力を求められる．

6.2.2　計算結果

VCSEL アレイ光マニピュレーションでは，さまざまな発光パターンを利用した物体操作を実行できる．ここでは，複数ビームの照射により誘起される力の数値計算例を示す．想定した照射ビームパターンを図 6.2 に示す．同時に発光させるピクセル数は (a) 1，(b) 2×2，(c) 3×3，(d) 4×4 とした．計算においては，対象物体を半径 r_s の誘電体球，波長 λ_0 を 850nm，照射パワーを 1mW/pixel，粒子と周囲の媒質（水）の屈折率をそれぞれ 1.60，1.333 とした．ビームウェスト W_0 とビーム間隔は r_s で，粒子の鉛直位置 z は z_0（式 (6.4)）でそれぞれ規格化して表す．本節では，特にことわらない限り，$W_0 = 0.26\, r_s$，ビーム間隔を $0.75\, r_s$（実験システムの設計値）として計算している．

粒子位置と光軸方向の力の関係を図 6.3 に示す．力の大きさを，それぞれの照射ビームパターンに対する最大値で規格化し，256 階調の画像で表示している．z は 0（図 6.3 第 1 列），$1.25\, z_0$（第 2 列），$2.50\, z_0$（第 3 列），$5.00\, z_0$（第 4 列）と変化させた．また，図では，粒子が第一象限にあるときに受ける力のみを示した．粒子が他の象限に存在するときの力は，照射光の対称性より，原点を中心に 90 度ずつ回転することにより得られる．力

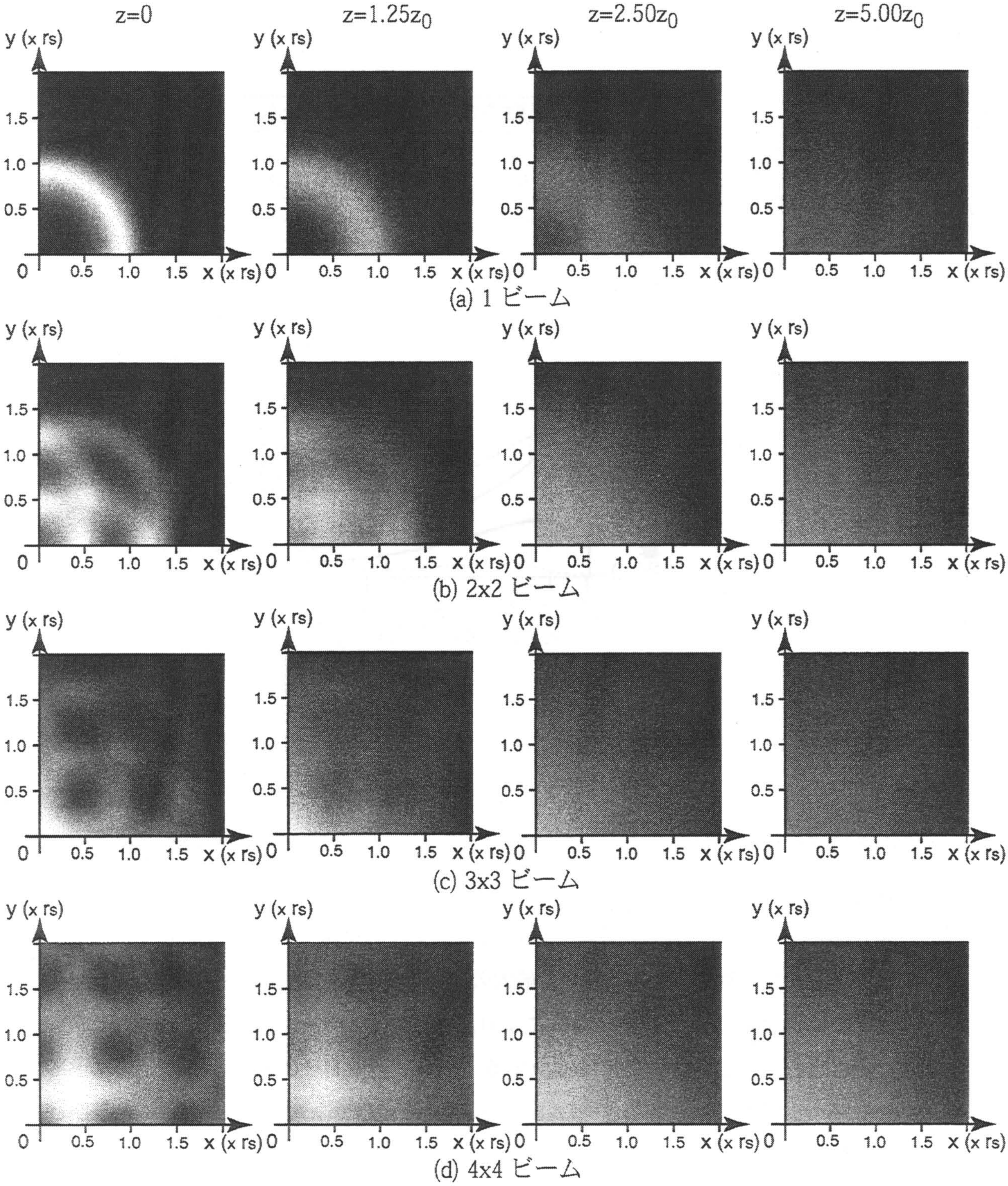


図 6.3　粒子位置に対する光軸方向の力の数値計算結果．粒子位置は粒子半径 r_s で規格化．(a) 1 ビーム，(b) 2×2 ビーム，(c) 3×3 ビーム，(d) 4×4 ビーム．

表 6.1　各条件に対する光軸方向の力の最大値.

ビーム数	光軸方向の力の最大値 (pN)			
	z ($\times z_0$)			
	0	1.25	2.50	5.00
1	0.688	0.493	0.331	0.244
2×2	1.503	1.258	1.093	0.916
3×3	3.482	3.195	2.491	1.749
4×4	3.483	3.219	2.820	2.391

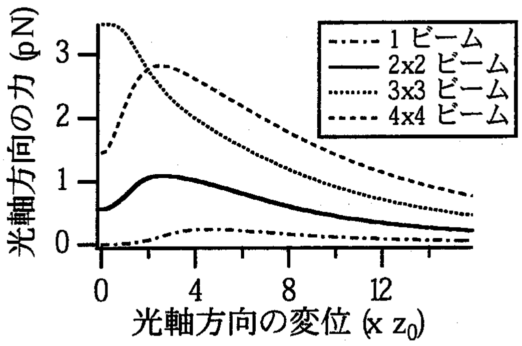


図 6.4　物体が z 軸に沿って移動するときの光軸方向の力.

の向きは常に $+z$ 方向である．それぞれの条件に対して得られる力の最大値を表 6.1 にまとめる．

図 6.3 から，$z = 0$ のとき，光軸方向の力は粒子位置によって複雑に変動し，粒子が原点から少し離れた位置に存在するとき，最大の力が得られることがわかる．一方，$z = 5.00\,z_0$ のときには，ビームのデフォーカスにより，粒子が原点にあるときに最大の力が得られ，原点から離れるにしたがって力は減少する．また，力はビーム数の増加にともなって大きくなるが，z が増加すると小さくなる（表 6.1）．粒子が z 軸に沿って移動するときに受ける光軸方向の力の変化を図 6.4 に示す．ある特定の z で光軸方向の力が最大となり，それより大きな z に対しては減少している．最大の力が得られる z は照射パターンにより異なる．注目すべきは，$z \leq 2.56\,z_0$ のとき，3×3 ビーム照射時に得られる光軸方向の力が 4×4 ビームで得られる力を上回っていることである．これは，同時照射するビーム数が

表 6.2 各条件に対する動径方向の力の最大値.

ビーム数	動径方向の力の最大値 (pN)			
	z ($\times z_0$)			
	0	1.25	2.50	5.00
1	1.781	1.387	0.930	0.365
2×2	3.323	2.749	2.077	1.062
3×3	3.367	2.767	2.430	1.518
4×4	3.372	2.766	2.482	1.700

多いにもかかわらず，得られる力が小さくなる場合があることを示している．

一方，粒子位置と動径方向の力の関係を図 6.5 に示す．図 6.3 と同様の様式に基づき，256 階調の画像で表示している．ただし，力の方向を表すため，矢印を加えた．それぞれの条件に対して得られる力の最大値を表 6.2 にまとめる．また，数値的な変化を明確に示すため，粒子が (a) x 軸，または，(b) 直線 $y=x, z=0$ に沿って移動するときの動径方向の力の変化を図 6.6 に示す．

動径方向の力も光軸方向と同様，粒子位置により複雑に変化する．これは，各ビームで誘起される力がさまざまな方向にはたらくためである．その結果，複数のビームを用いた場合でも，ビーム数に比例した力は得られない．実際，検討した複数ビームの照射パターンに対しては，$z=0$ のとき，力の最大値は単一のビームを用いた場合の 2 倍程度にとどまっている（表 6.2）．また，図 6.5 より，4×4 ビームを利用したとき，原点付近に存在する粒子には，中心から外側に向かう力がはたらいている．この場合，粒子は照射パターンの中心から少し離れた位置に捕捉される．

ここで，物体を $+x$ 方向に輸送するときに得られる動径方向の力の最大値と z の関係を図 6.7 に示す．z が大きくなるほど，動径方向の力が減少している．Stokes の法則によれば，輸送速度 v は動径方向の力 F_{trans} と

$$F_{\mathrm{trans}} = 6\pi\eta r_s v, \tag{6.7}$$

なる関係がある．ここで r_s は粒子の半径，η は媒質の粘度である．したがって，z が大きいほど粒子の輸送速度は低下する．

次に，照射パターンのビーム間隔と光圧による力の関係について検討した．図 6.8 は，

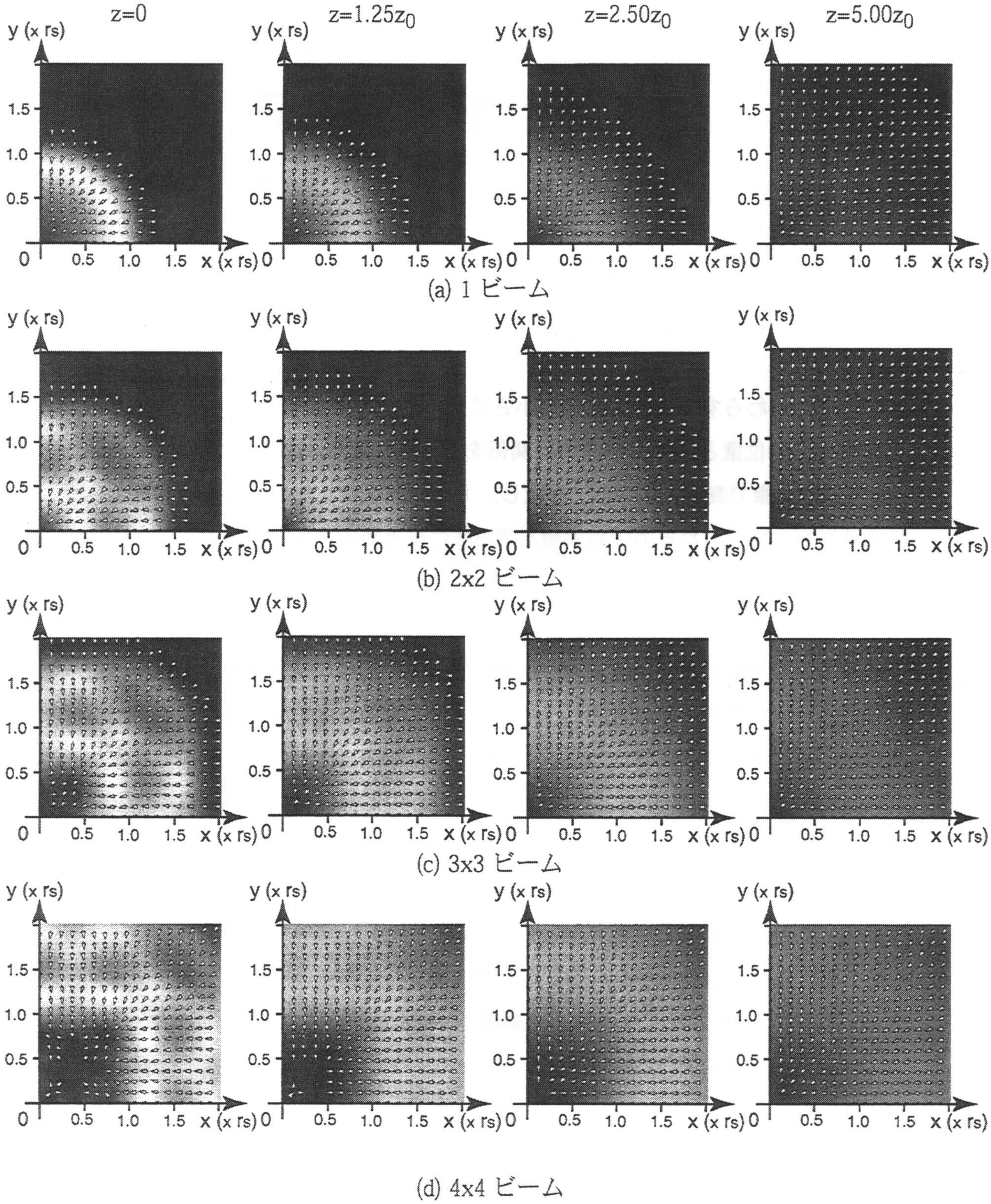


図 6.5　粒子位置に対する動径方向の力の数値計算結果．粒子位置は粒子半径 r_s で規格化．(a) 1 ビーム，(b) 2×2 ビーム，(c) 3×3 ビーム，(d) 4×4 ビーム．

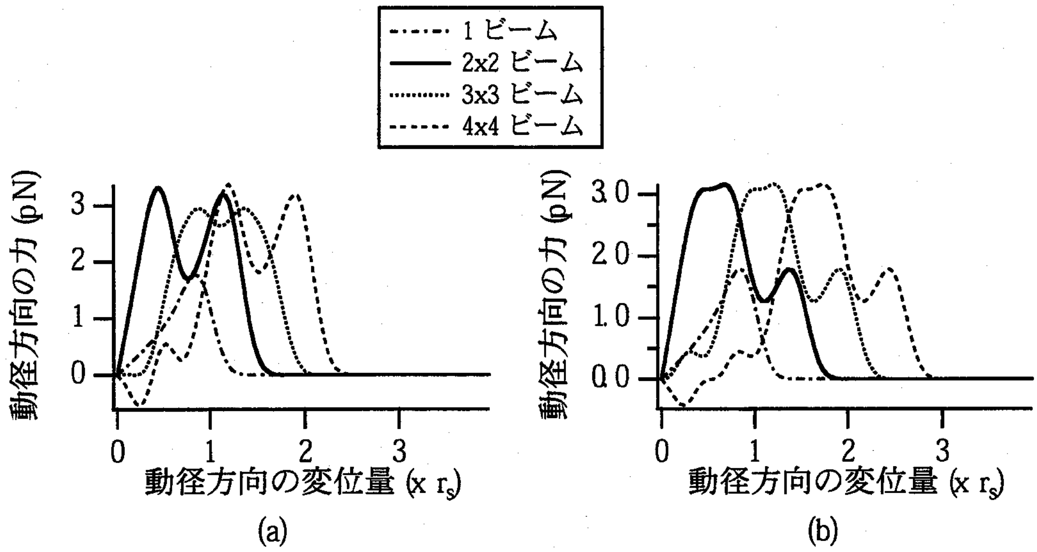


図 6.6 粒子が (a) x 軸，または，(b) 直線 $y = x$，$z = 0$ に沿って移動するときの動径方向の力.

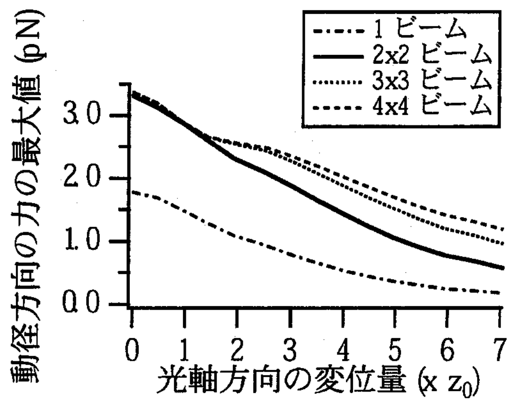


図 6.7 $+x$ 方向の力の z 依存性.

得られる力の最大値のビーム間隔依存性を示す．(a) は粒子が x 軸に沿って移動するときに得られる動径方向の力の最大値，(b) は粒子が z 軸に沿って移動するときに得られる光軸方向の力の最大値である．ビーム間隔は $0.02\,r_s$ ごとに 0 から $1.60\,r_s$ まで変化させた．

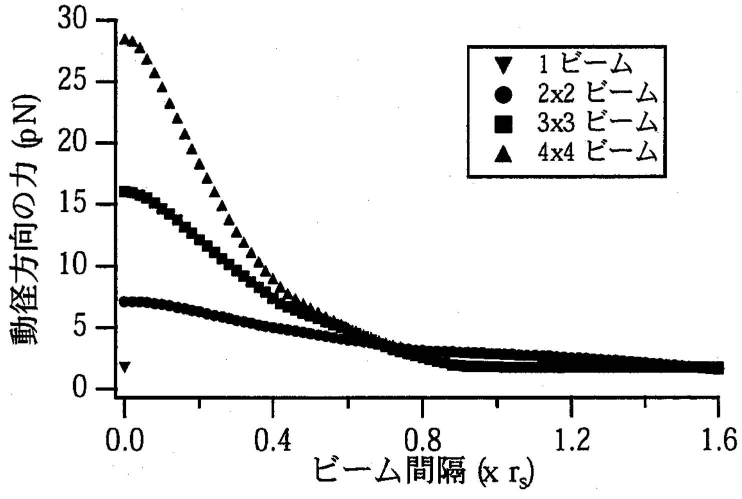
動径方向の力は，ビーム間隔の増加にともなって，ほぼ単調に減少する．これは，ビーム間隔が大きくなると，それぞれのビームにより誘起される力が反対方向にはたらき，力が相殺されるからである．照射パワーの和が大きくなるため，等しいビーム間隔では，一般には照射ビーム数が多くなるほど得られる力が増加する．同時照射するビーム数が，2×2 または 4×4 の場合はビーム間隔が $1.44\,r_s$ 以下，3×3 の場合はビーム間隔が $1.08\,r_s$ 以下であれば，単一のビームを用いるよりも大きな力が得られている．流体中で物体輸送に要求される力は，ほぼその速度に比例する（式 (6.7)）ことから，複数ビームの照射により，力に比例した輸送速度の向上が期待できる．ただし，ビーム間隔が $0.70\,r_s$ から $1.54\,r_s$ の場合には，合計の照射光パワーが小さいにもかかわらず，2×2 のビームで照射した場合の力が，3×3 のビームで照射した場合の力をわずかではあるが上回っている．

一方，光軸方向に関しては，すべての照射パターンにおいて，あるビーム間隔で最大値をとる．各照射パターンにおける最も外側のビームが粒子の境界付近に存在するとき，最大値が得られている．これは，粒子の境界付近に入射した光の物体との相互作用（屈折と反射）が，中心付近に入射した光よりも大きく，大きな運動量変化が生じるためと説明できる．照射パターンに依存して力が最大となるビーム間隔が存在することは，複数のビームを利用する光マニピュレーション技術の興味深い特徴である．以上の結果から，より大きな力を得るためには，単にビーム数を増加させるだけではなく，ビーム間隔が重要であると結論付けられる．

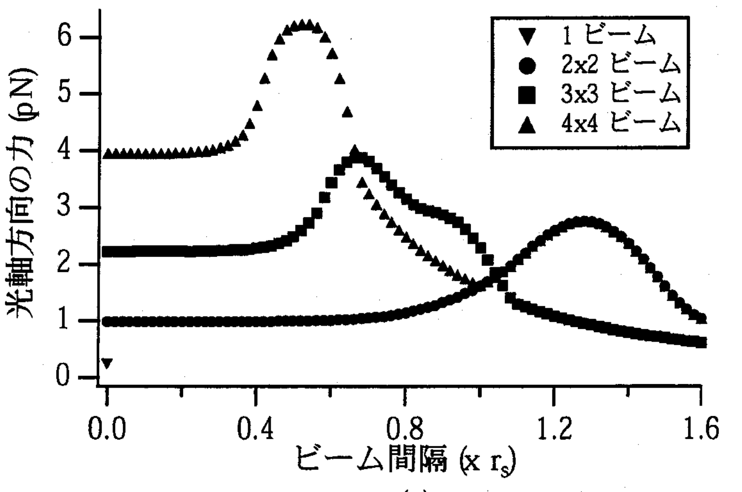
6.3　実験

6.3.1　システム構成

実験システムの構成を図 6.9 に示す．5 章の実験では，物体を 2 次元面上に常に接触させて水平方向の物体位置制御能力を検証するため，ビームを鉛直上方から照射したのに対して，本章の実験では，鉛直下方からビームを照射した．システムは，試料ステージより下側のマニピュレーション系と，上側の観察系よりなる．マニピュレーション系のビーム照射用対物レンズには，目的に応じて 60 倍と 100 倍の水浸長作動距離対物レンズを使い分



(a)



(b)

図 6.8　光圧による力のビーム間隔依存性. (a) 動径方向, (b) 光軸方向.

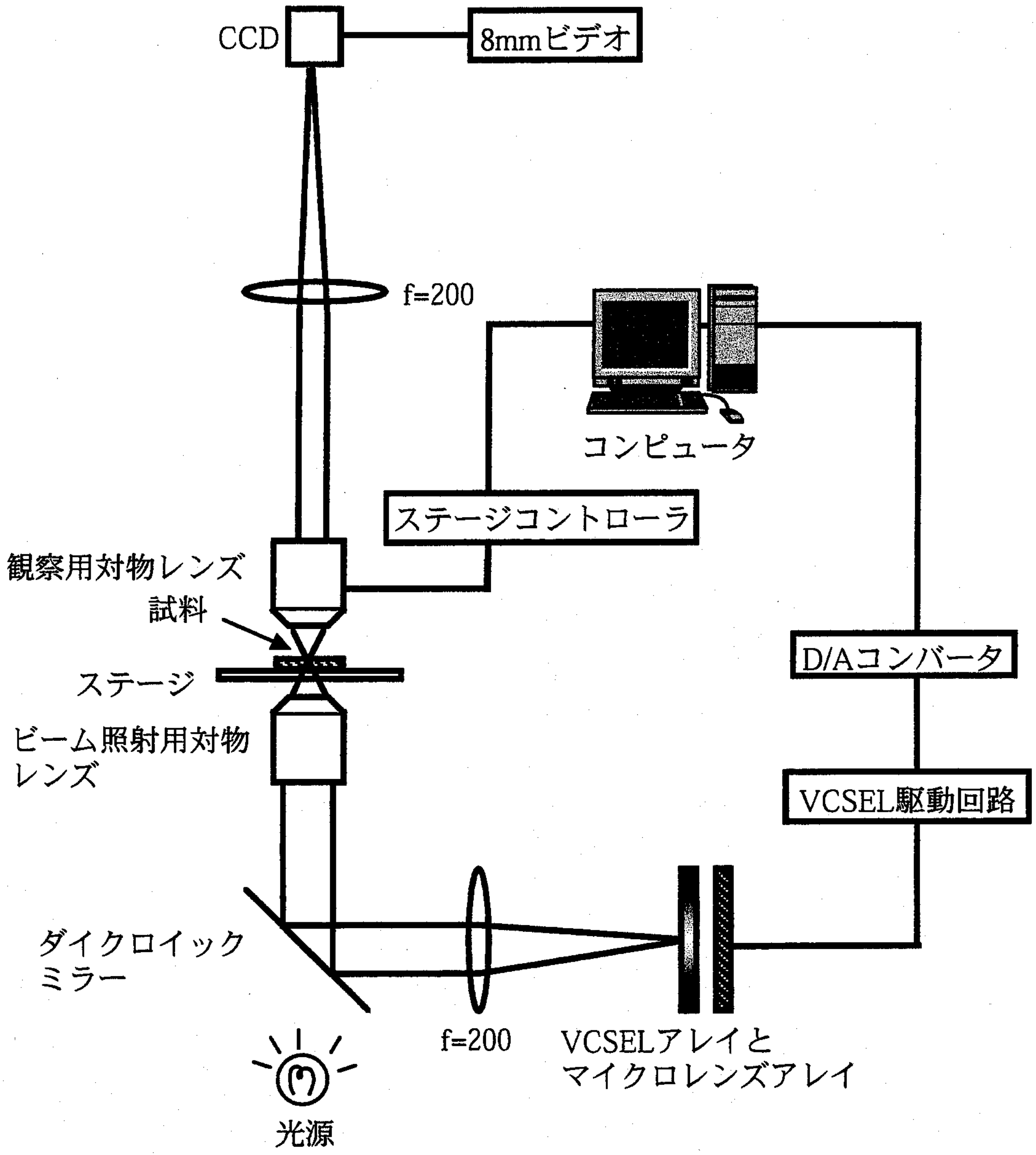


図 6.9　実験システムの構成.

けた．観察用対物レンズは40倍（OLYMPUS製，LUMPlan Fl 40×W，NA 0.8）であり，自動ステージを用いて焦点位置を制御できる．試料ステージの移動は手動で行った．試料面におけるスポット径の測定値，ビーム間隔，パワーは，60倍のレンズ利用時がそれぞれ1.3μm，3.75μm，約1.1mW/pixel，100倍のレンズ利用時がそれぞれ1.1μm，2.25μm，約0.7mW/pixelであった．

6.3.2 3次元物体輸送

VCSELアレイ光マニピュレーションにより光浮揚および浮揚状態での輸送実験を行った．この実験では，60倍の対物レンズを用いた．対象物体は，直径10μmのポリスチレン粒子である．単一のピクセルを用いた場合には物体の浮揚が確認できなかったため，VCSELアレイ上の2×2のピクセルを利用して粒子を浮揚し，発光ピクセルの切り換えにより浮揚状態での輸送を行った．輸送に利用したのはVCSELアレイの16個のピクセルであり，図6.10に示す順序でそれらを発光させた．

粒子の浮揚および輸送の実験結果を図6.11に示す．操作対象の粒子とその初期位置を円およびドットでそれぞれ示している．操作中，異なる面を観察するため，観察系における対物レンズを随時鉛直方向に移動させた．操作手順は以下のとおりである．

1. 初期段階では，すべての物体にピントが合っている（図6.11(a)）．
2. 2×2のピクセルを発光し，対象粒子を浮揚する．このとき，浮揚した粒子のみが焦点からはずれた状態で観測される（図6.11(b)）．
3. 観察用対物レンズ（上側の対物レンズ）を鉛直方向に走査し，対象粒子にフォーカスを合わせる．他の粒子は，フォーカスからはずれた状態となる（図6.11(c)）．
4. 発光ピクセルの切り換えにより，粒子を向かって下へ移動させる（図6.11(d)）．
5. 同じく，粒子を向かって右へ移動させる．輸送が完了したとき，対象粒子は浮揚状態を維持している（図6.11(e)）．
6. すべてのピクセルを消灯すると，対象粒子が降下し，フォーカスからはずれる．(図6.11(f))．
7. 観察用対物レンズを鉛直方向に走査し，スライドガラスの表面へフォーカスを合わせる．以上の操作の結果，1と比較して対象粒子の位置が変化している（図6.11(g)）．

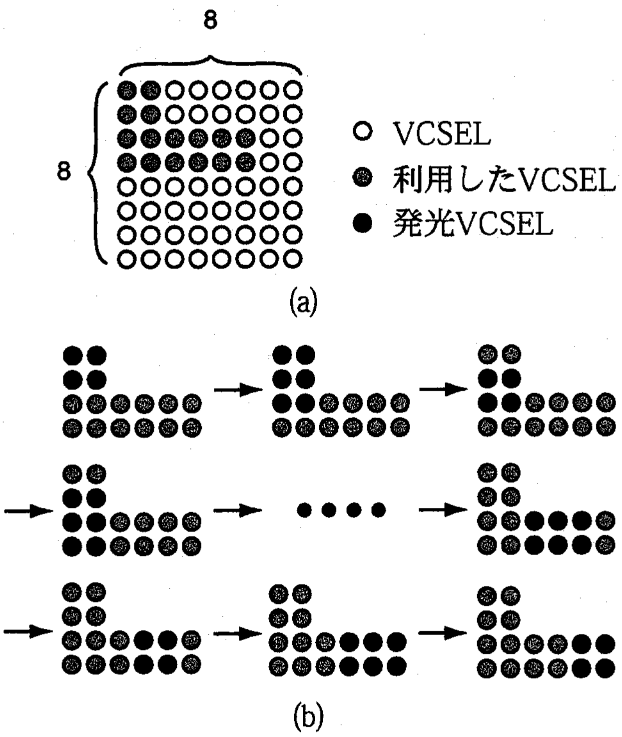


図 6.10　光浮揚および輸送実験における (a) 利用ピクセルと (b) 発光シーケンス.

輸送により対象粒子が移動した距離は約 26 μm であった．他の粒子もブラウン運動により移動しているが，その距離は 10 μm 以下である．このことから，VCSEL アレイ光マニピュレーションにより粒子を浮揚し，また，浮揚を維持した状態で粒子を輸送できることを確認できた．なお，本手順による粒子の輸送には，機械的な動作は一切含まれていない．

6.3.3　浮揚のために必要なパワーの測定

利用する照射ビームの特性により，単位パワー当たりに誘起される力の大きさは変化する．これまでに，レーザービームのモードに対する依存性や，実験的な測定方法の提案など，単一ビームを物体に照射する系に関してはその検討がなされている．例えば，ラゲール・ガウスモードのビームを用いると，ガウスビームよりも誘起される力が大きい [101]．本章では，物体に複数のビームを照射する系について検討しており，力が照射パターンに依存することは前節の解析により明らかになったが，実験的に測定した例は見あたらない．そこで本項では，粒子の浮揚に必要な光パワーを測定し，その照射パターン依存性に

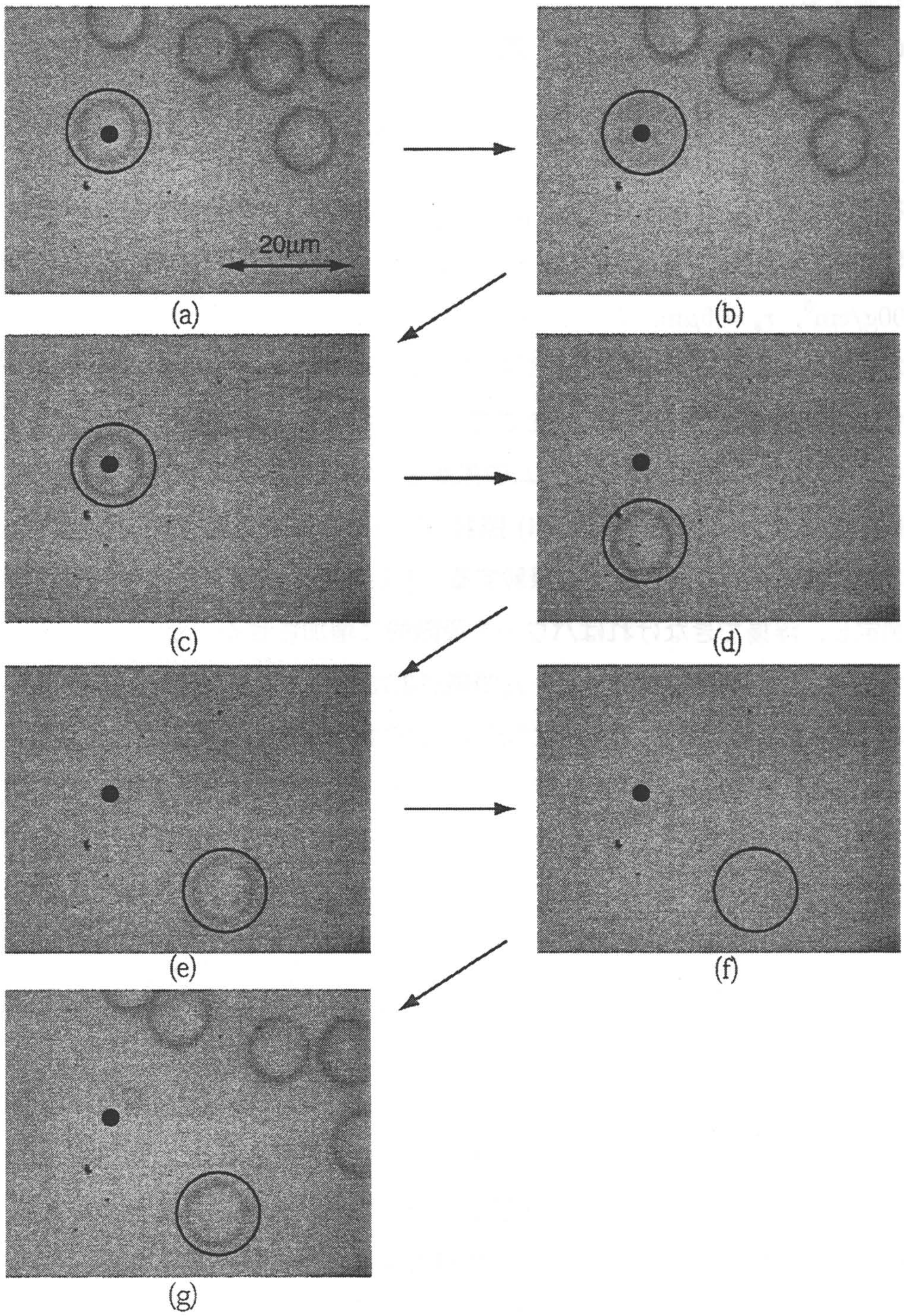


図 6.11　3 次元物体輸送の実験結果．(a) 対象物体の捕捉，(b) 捕捉物体の浮揚，(c) 対象物体へのフォーカス，(d) 下への輸送，(e) 右への輸送，(f) 物体の降下，(f) スライドガラスの表面へのフォーカス．

ついて評価する．

物体の浮揚に必要な力 F_{required} は，重力，浮力，熱運動を考慮すると，

$$F_{\text{required}} = \frac{4}{3}\pi r_s^3(\rho_s - \rho_0)g + \frac{k_B T}{r_s}, \tag{6.8}$$

と書ける．ここで，ρ_s は物体の密度，ρ_0 は媒体の密度，r_s は物体の半径，g は重力加速度，k_B はボルツマン定数，T は温度である．実験条件でのパラメータ値，$\rho_s = 1.05\text{g/cm}^3$，$\rho_0 = 1.00\text{g/cm}^3$，$r_s = 5\mu\text{m}$，$T = 300\text{K}$ を代入すると，$F_{\text{required}} = 0.256\text{pN}$ となる．

浮揚に必要な力を得るための照射パワーは，粒子が照射ビームの焦点位置にあるときに必ずしも最小となるわけではない．そこで，以下に示す2つの条件でパワーを測定した．(i) スライドガラスの表面に照射ビームの焦点を合わせ，対象粒子が浮揚するまでパワーを増加し，そのパワーを測定する．(ii) 照射パワーをある値に設定し，ビームの焦点位置を光軸方向に移動させながら粒子を照射する．もし粒子を浮揚することができればそのパワーを測定し，浮揚できなければパワーを段階的に増加させる．

60倍対物レンズの利用時は隣接ビーム間隔が3.75μm，100倍対物レンズの利用時は隣接ビーム間隔が2.25μmである．ビーム間隔はこの倍数として生成できる．そこで，2.25μm，3.75μm，4.50μm，6.75μm，7.50μmのビーム間隔を用いて測定を行った．対象物体は直径10μmのポリスチレン粒子である．測定結果を図6.12に示す．曲線は数値計算結果，マーカーは測定値である．エラーバーは5回の測定の標準偏差を表す．数値計算ならびに実験の結果から，浮揚に必要な光パワーがビーム間隔に依存して変化することがわかる．残念ながら計算結果と実験結果は一致性が乏しいが，ビーム間隔に対する力の変化の傾向は見られる．

粒子は，浮揚前の段階ではガラス基板に接している．したがって表面から粒子を浮揚するためには，式(6.8)の F_{required} に付着力を加えた力が必要となる．例えば，10 mM硝酸カリウム（KNO_3）溶液中において，直径0.8 μmのポリスチレン粒子とガラス基板の付着力は0.2 pNと測定されている [102]．付着力は反応系に依存するため，今回用いた系における正確な値は不明であり，数値計算においては考慮しなかった．測定値と計算値の差はこの付着力に起因することが考えられる．また，照射するビームが数値計算で仮定したガウスビームと異なることや，パワーが小さいときの水平方向の力の低下による物体の位置の不安定性，なども誤差の原因として考えられる．

物体が照射パターンの焦点位置にある場合（条件(i)）には浮揚が不可能であったが，焦

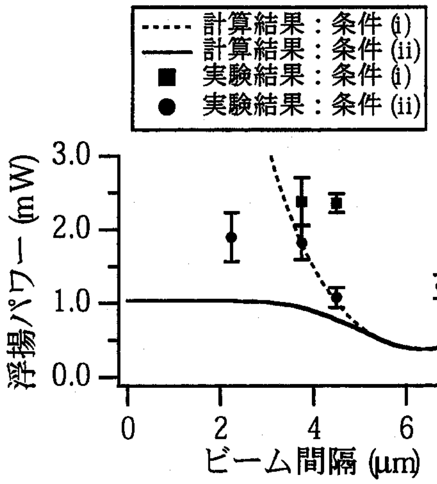


図 6.12　粒子の浮揚に必要な光パワーのビーム間隔依存性．実線は条件 (i)，点線は条件 (ii) における計算結果．●，■ はそれぞれに対する実験結果．

点を鉛直方向に移動すること（条件 (ii)）により，浮揚を達成できることがあった．ビーム間隔が 2.25μm の場合は，計算結果が示すように，浮揚に必要な光パワーが大きく，実験システムで可能な照射パワーの最大値を超えるためである．一方，ビーム間隔が 6.75μm と 7.50μm の場合は，ビーム間隔が広く，物体が特定のビームに捕捉される傾向にあり，全ビームによる安定した捕捉状態が得られないことによる．焦点を移動した場合には，デフォーカスによりそれぞれのビームが拡がるため，このような問題を避けることができ，物体を浮揚できる．ただし，得られる力は減少する．

6.3.4　鉛直方向の位置制御

物体を鉛直下方から照射すると，式 (6.8) で示す力との釣り合い位置まで物体は浮揚する．鉛直方向における位置は，ビーム集光位置の走査，あるいは，照射パワーなどで制御できる．後者の方法は，浮揚高さによって動径方向の力が変化するが，VCSEL の発光制御に基づき操作を実行できる点で，VCSEL アレイ光マニピュレーションの特徴を活かした方法といえる．そこで，照射パワーの変化に対する物体の浮揚位置を測定した．本実験では，60 倍の対物レンズを用いた．対象物体は直径 10μm のポリスチレン粒子である．

ビーム間隔 3.75 μm の 2×2 ビームで照射したときの照射パワーと物体位置の関係の測

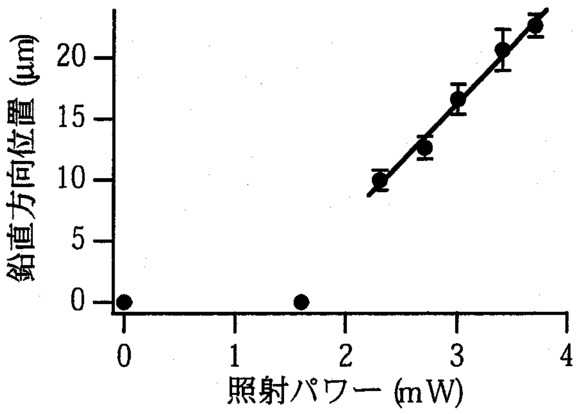


図 6.13　物体位置の照射パワー依存性の測定結果.

定結果を図 6.13 に示す．エラーバーは 3 回の測定における標準偏差を表す．位置の測定は，目視で対象物体に焦点が合うよう自動ステージを用いて観察用対物レンズを調整し，その位置を読み取ることにより行った．照射パワーに依存して，物体位置が変化していることがわかる．制御できる位置範囲は，照射パワーの最大値で制限される．実験システムでは，物体位置を鉛直方向に 20μm 程度の範囲で制御可能であることが確認できた．このとき，実験で得られた位置の測定値の最小間隔や標準偏差が約 2 μm であることから，少なくとも 2 μm 以下の位置制御精度が得られるものと思われる．

6.4　考察

4×4 のビームで粒子を照射した場合，照射パワーの和は，単一のビームを利用するときの 16 倍となる．ビーム間隔が 0 の場合には，すべてのビームが重なりあった状態に対応し，力は 16 倍に増加する．しかし，数値計算結果（図 6.8）から，ビーム間隔が $0.52\,r_s$ のときに得られる光軸方向の力の最大値は，単一ビーム利用時の約 25 倍となっており，16 倍をはるかに超えている．これは，照射パワーの和が等しいとき，単一ビームを利用した場合よりも大きな力が得られることを示している．この特徴は，生体細胞など，レーザー光照射による損傷を避けなければならない場合などに有用であると考えられる．

計算および実験結果から，試料面におけるビーム間隔が本手法の性能を決定する重要なパラメータであることがわかった．ビーム間隔に対する光軸方向および動径方向の力の

変化は異なるため，対象物体や実際の応用に対して適切なビーム間隔を選択する必要がある．光学システムの分解能は一般に 1μm 程度である．このとき，さまざまな照射パターンを生成する観点からは，最も有効なビーム間隔はサンプリング定理より 0.5μm と求められる．これを実現するための最も単純な方法は，ピッチの小さなアレイ光源を利用することである．また，オフアクシス型のマイクロレンズアレイの利用が考えられる．オフアクシス型のレンズは，集光作用の他に偏向作用をもち，その偏向角によりスポット間隔を制御できる．回折型レンズとして作製が可能であり，コンパクトなハードウェアを実現する上でも有用である．

上記の条件を満たすことにより，複雑な光分布を生成することができる．しかし，操作可能領域はビーム数に制限される．ピクセル数が 8×8 のアレイ光源を用い，試料面のビーム間隔を 0.5μm とした場合，粒子の操作領域は $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ となる．より広範囲にわたって物体を制御するためには，光源のピクセル数を増やす必要がある．例えば，$50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の領域内で物体操作を実行するためには，100×100 個のピクセルが必要となる．ピクセル数の面では，発光パワーは約 1mW と低いものの，128×128 ピクセル，125μm ピッチの VCSEL アレイ（eMCORE 社製）が開発されている．今後，アレイピッチ，ピクセル数，発光パワーなどの面で十分な性能をもつ VCSEL アレイの開発が期待される．

操作できる物体のサイズもビーム間隔と密接に関係する．ビーム間隔が物体サイズよりも大きければ，個々のビームで誘起される力が協調的に作用せず，物体の捕捉や輸送を行うことができない．VCSEL のビームウェスト径や発光パワーを考慮すると，現段階で本手法を適用できる物体サイズは 1μm から 10μm の範囲であると考えられる．ただし，この範囲外の物体を取り扱うシステムに本手法を適用できないわけではない．ナノメートルオーダーの物体であっても間接的に操作することができる．例えば，DNA を粒子に接合すれば，DNA を制御することも可能である [88]．

VCSEL アレイ光マニピュレーションはシステムの微小化に適した方式であると考えられ，ラボ・オン・チップ [91–93] などへも応用が期待される．光学系の集積化には，プレーナー光学系 [103] やブロック光学系 [104] などの利用が考えられる．受・発光素子を複合集積した光電子融合型のデバイスであるスマートピクセルアレイは，チップ間光インターコネクションなどに利用されており [105]，VCSEL アレイ光マニピュレーションシステムのハードウェアのコンパクト化に加え，制御の簡単化にも有用である．将来的には，これらの技術とデバイスを利用することにより，サブ μm オーダーの精度で数 100 個の粒子

を並列に制御できるVCSELアレイ光マニピュレーションシステムの開発が期待される．

6.5 結言

本章では，VCSELアレイの複数のピクセルを利用した3次元微小物体操作法について，数値計算と実験の両面から検討を行った．数値計算により，誘起される力の照射パターン依存性を明らかにした．特に，複数のビームを利用したとき，光軸方向の力は照射パターンにしたがい，あるビーム間隔で最大となることがわかった．さらに，照射パワーが等しいとき，単一のビームを利用するときよりも大きな力が得られる．鉛直下方からの照射による物体輸送実験により，VCSELアレイ光マニピュレーションが3次元物体操作の能力を有することを実証した．粒子を浮揚するために必要な光パワーのビーム間隔依存性や鉛直方向位置の照射パワー依存性を測定した．これらの結果は，VCSELアレイ光マニピュレーションに基づく複数ビームの同時照射による物体操作法の有用性を示すとともに，実用的な応用をめざす際に，システム設計の指針として活用できる．

第 7 章

分子計算技術との融合による情報処理への展望

7.1 緒言

VCSEL アレイ光マニピュレーションが有する並列物体制御能力や，操作のフレキシビリティは，光マニピュレーション技術の情報処理への応用に道を拓くものである．また，WMDPE の波長多重光に対する自由度の高い制御能力は，光情報処理の進展への大きな力となる．しかし，光の分解能は一般に，μm オーダーからサブ μm 程度であり，より高度かつ大容量の情報処理を実現するためには，この限界を補いうる新たなアイデアが必要とされる．

媒体の並列性を利用した情報処理手法のひとつとして，分子計算がある [106]．分子計算は，DNA などの生体分子を情報媒体として分子反応を進めることにより，さまざまな情報処理を実行するものである．分子反応の超並列性から，大規模な全数探索が要求される問題などに有効である [107, 108]．また，分子自体の微小性から，超大容量メモリへの応用も検討されている [109]．分子のこのような特徴に注目した．並列光制御の高い自由度と分子の微小性・超並列性を融合し，相補的に作用させることにより，これらの利点を兼ね備えた情報処理が可能となる．

本章では，並列光制御技術の応用として，分子計算技術との融合による並列情報処理について検討する．7.2 節では，VCSEL アレイにより生成されるスポットよりも小さな物体を対象とし，その空間分割制御について実験的に検証する．照射パターンに対する物体の軌跡を観測し，物体の移動範囲について検討する．7.3 節では，VCSEL アレイ光マニピュレーションを利用した，空間分割に基づく並列情報処理の概念を示す．また，並列光制御技術と分子計算技術を融合した光分子コンピューティングへの展望について述べる．

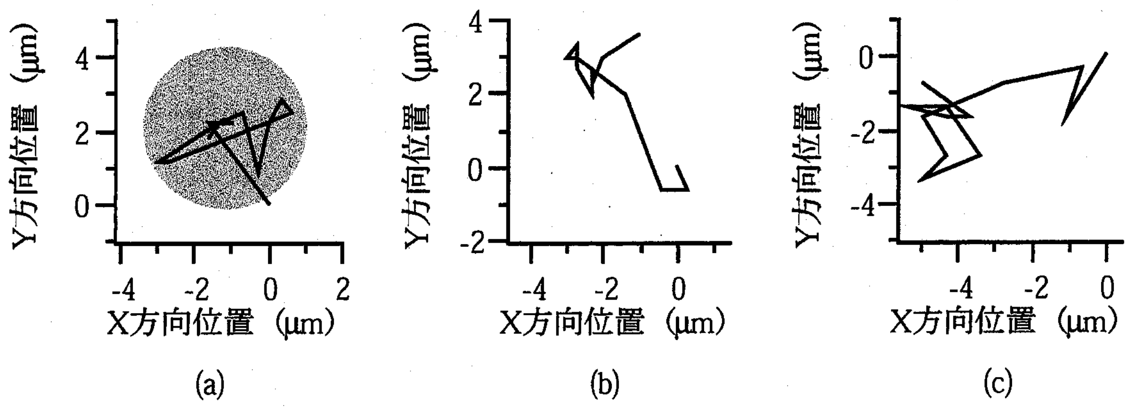


図 7.1　単一ピクセル発光時の粒子の軌跡．(a) 捕捉した粒子と，(b)，(c) スポット外部の 2 粒子に対する測定結果．

7.2　粒子の移動範囲制御実験

5，6 章では，マニピュレーション用のビームが試料面に生成するスポット径よりも大きな粒子の操作を行った．本章では，スポット径よりも小さな，直径 1μm のポリスチレン粒子（Polysciences, Inc. 製，Polybead Polystyrene Microspheres，屈折率 1.60，密度 1.05g/ml）を対象物体として扱う．スポットの内部と外部それぞれに存在する粒子の位置の時間変化を測定し，粒子の移動範囲について検討した．実験は，図 5.3 の試作システムにより行った．

まず，単一のピクセルを発光して内部に 1 つの粒子を捕捉し，その粒子とスポット外部に存在する 2 つの粒子，合計 3 粒子の軌跡を観測した．捕捉後の 15 秒間における粒子の軌跡を図 7.1 に示す．(a) は捕捉した粒子，(b) および (c) はスポット外部に存在する粒子に対する結果である．位置は 1 秒ごとに測定した．また，測定開始時における各粒子の位置を原点にとった．グレーの円は，照射スポットの領域を表す．

スポット外部に存在する粒子は，ブラウン運動のため激しく移動している．これに対し，スポット内部の粒子は，位置を変化させながらも，スポット内での移動に制限されていることがわかる．ただし，何度か実験した中には，スポット内部から粒子が脱出することがあった．これは，粒子のブラウン運動が時間平均よりも一時的に激しくなった場合に，照射パワーが完全に粒子を閉じこめられるだけの値に達していないことが原因であると考

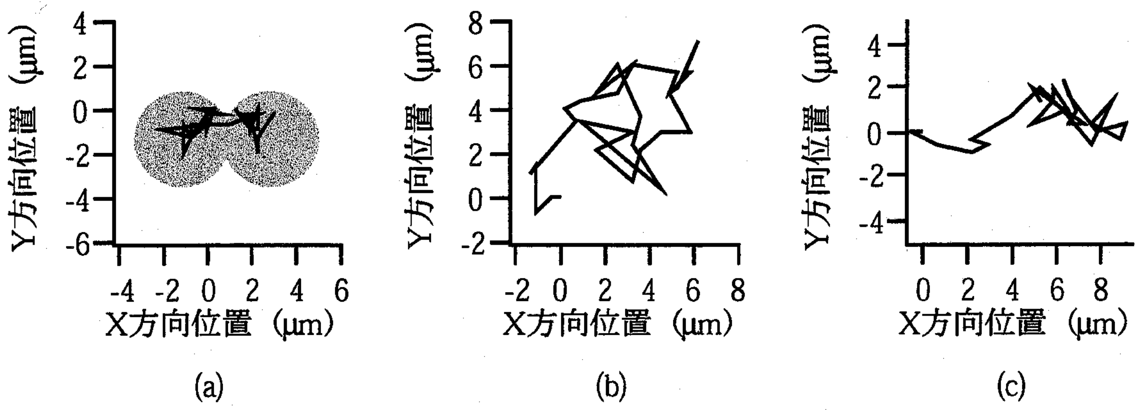


図 7.2 隣接 2 ピクセル発光時の粒子の軌跡. (a) 捕捉した粒子と, (b), (c) スポット外部の 2 粒子に対する測定結果.

えられる.

次に，隣接する 2 つのピクセルを発光して内部に 1 つの粒子を捕捉し，単一ピクセルの場合と同様に軌跡を観測した．捕捉後の 30 秒間における粒子の軌跡を図 7.2 に示す．(a) は捕捉した粒子，(b) および (c) はスポット外部に存在する粒子に対する結果である．位置は 1 秒ごとに測定した．また，測定開始時における各粒子の位置を原点にとった．グレーの円は，照射スポットの領域を表す．隣接する 2 つのスポットは，それらの境界付近で，部分的に重なっている．

スポット内部に存在する粒子は，単一ピクセルを利用した場合と比較して，移動範囲が X 方向に広がっていることがわかる．ただし，いずれかのスポット領域内にとどまっている．これは，粒子が，2 つのスポットの照射領域を行き来しつつも，その移動範囲を制限されていることを意味する．

以上の結果から，スポットよりも小さな粒子を，光の照射領域中に閉じこめられることが確認された．粒子は，重なりをもつスポット間を移動することができる．このため，発光するピクセルの組み合わせにより，粒子の移動可能範囲の拡大や縮小が可能となる．

7.3　空間分割に基づく並列情報処理

前節の実験において，粒子に何らかの情報をもたせることができれば，光マニピュレーションによる物体操作を一種の情報処理とみなすことができる．ここで，複数のビームにより，並列に粒子を捕捉することを考える．これは，図7.3に示すように，2次元平面を多数の領域に分割し，そこにさまざまな情報を配置することに対応する．最小の分割領域単位（クラスタ）を指定するのがそれぞれのビームである．また，ビームの発光制御による粒子の移動は情報の流れと考えることができ，異なるクラスタ間での通信や情報の融合，分割に対応する．これらの考えに基づけば，VCSELアレイ光マニピュレーションを利用した並列情報処理が可能である．

空間分割に基づく情報処理は，光の自由度や空間並列性を利用した光論理演算 [110, 111] などの光情報処理手法との整合性が高い．発光，蛍光，光変調特性などを利用して各クラスタの情報をパターンとして提示することにより，それらを並列・一括して処理することができるからである．このとき，異なる属性の光を組み合わせて利用することも可能である．情報の入力，処理，読み出しにこれらの技術と並列光制御技術を融合して利用することにより，処理効率の高い情報処理を実現できる．また，VCSELアレイの発光パターンを制御することにより，クラスタの生成や合成，消滅を自由に行うことができる．このことはシステム自体の構成を変化させることに対応し，高性能コンピューティングへの潜在能力を示している．

これらの特徴を有効に活用した情報処理を実行するためには，クラスタごとに独立した処理内容を指定し，それらを包括的に扱うための手法が必要となる．また，クラスタの大きさは光の分解能に制限されるため，各クラスタにおける大容量情報の保持やその処理を実行するためには，光よりも高い分解能を有する別の情報媒体の導入が望まれる．このとき，その媒体に対して，光により何らかの反応や効果を誘起したり，熱により反応を制御することができれば，その媒体に特有の機能や反応と組み合わせることで，より高度な処理を実現できると考えられる．特定位置の複数のクラスタに対する局所的な処理を実行するためには，光波の空間的な分布を効率的に制御することが必要であり，並列光制御技術を有効に利用できる．特にWMDPEは，異なる波長を一括して扱うことができるため，同一のクラスタ内で異なる効果を得ることが考えられ，その協調により新たな機能を得ることもできると考えられる．また，WMDPEにより生成されたスポットアレイは，

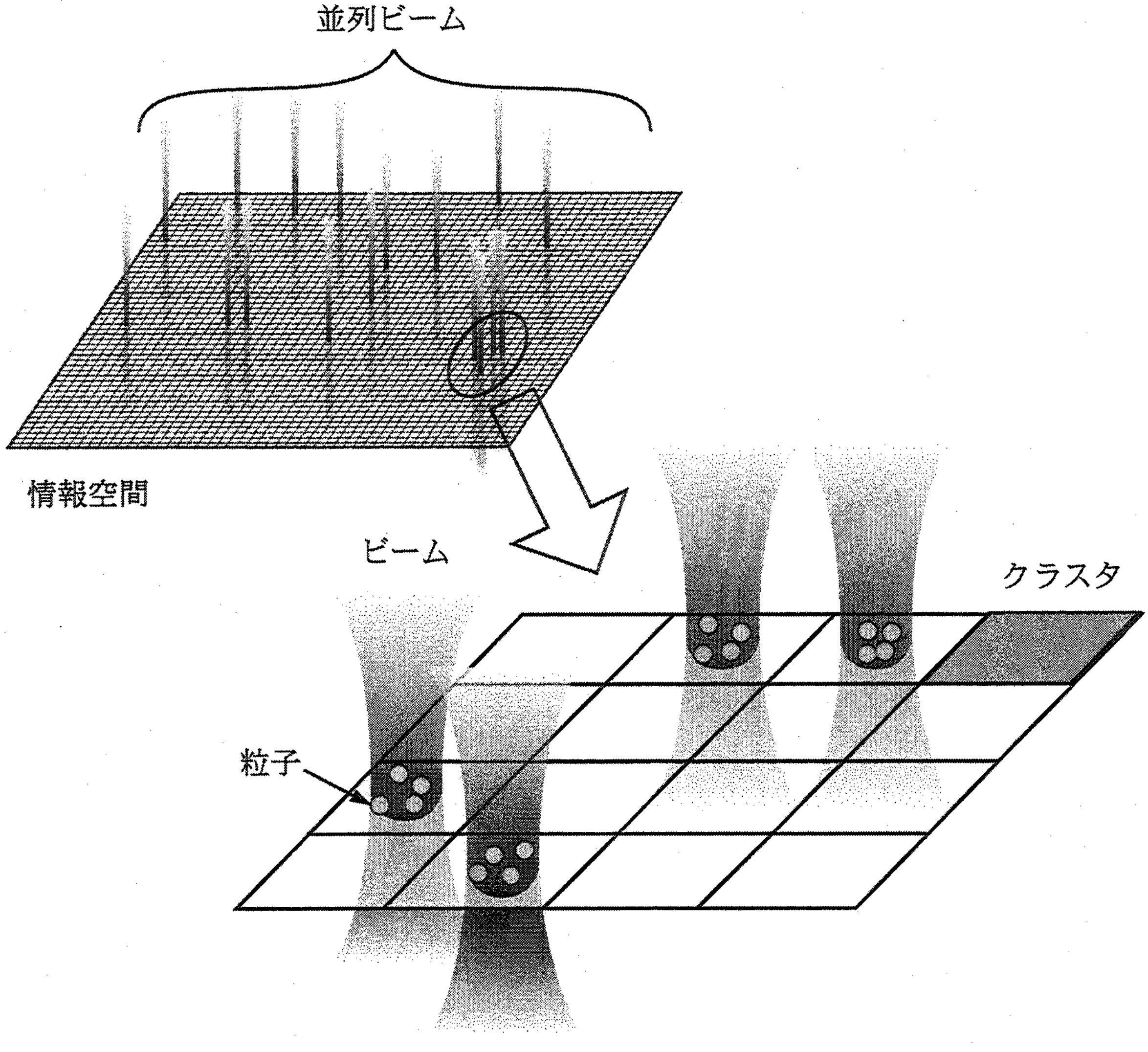


図 7.3 空間分割に基づく情報処理.

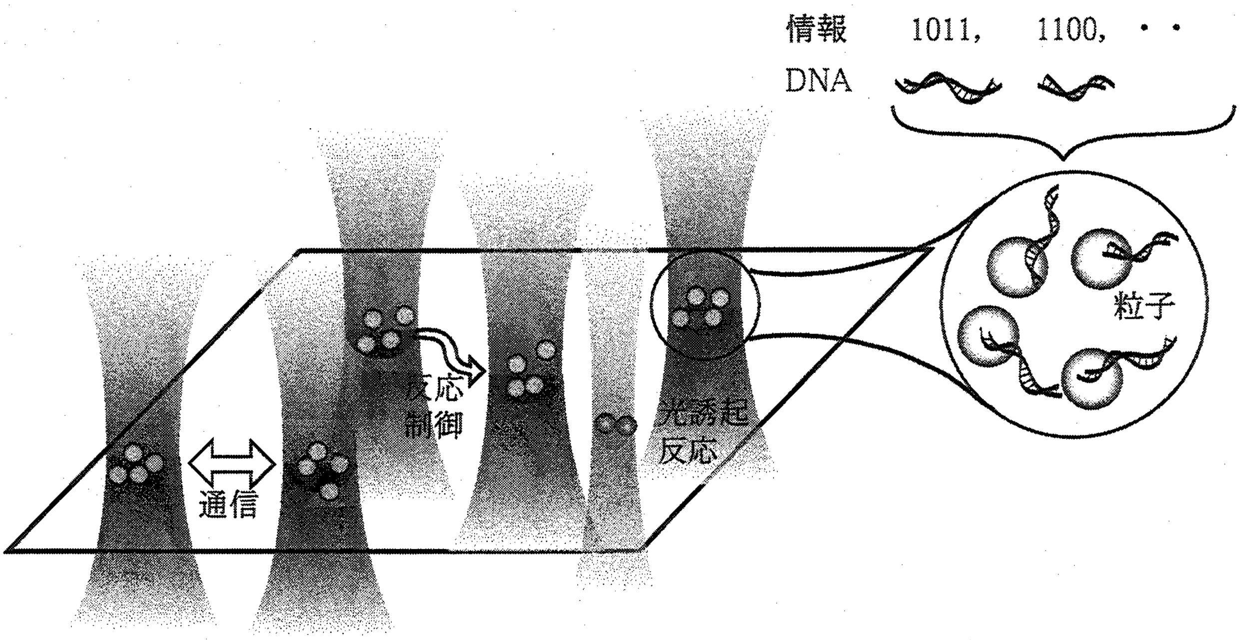


図 7.4　並列光制御技術と分子計算技術を融合した光分子コンピューティング.

第2，第3のマニピュレーション用ビームとしても利用できる．このように，クラスタ内の局所的な処理と多数のクラスタに対する大域的処理により，フレキシブルかつ大容量の情報処理の実現が期待できる．

クラスタ内で用いる情報媒体には，クラスタ内における大容量情報保持を実現し，それらを並列処理できることが求められる．ここでは，空間分割に基づく情報処理の例として，DNA 分子を利用した光分子コンピューティングを考案し，その概念について述べる．なお，DNA をはじめとした分子の情報処理媒体としての能力は，1994 年に Adleman により実証されている．試験管内で進行する個々の分子反応を演算ととらえ，情報を DNA 配列として符号化することにより，有向ハミルトン経路問題を解くことができる [106]．今日では，分子計算手法としてその概念が確立され，数学的問題や遺伝情報処理などへの応用が多数報告されている [94, 107–109, 112–114]．

VCSEL アレイ光マニピュレーションを核とした並列光制御技術と分子計算技術を融合した光分子コンピューティングの概要を図 7.4 に示す．情報を符号化し，DNA を媒体としてそれを表現する．DNA 分子は，化学結合により粒子への接合が可能である．各クラスタへ情報を配置するため，DNA を接合した複数の粒子を個々のビームで捕捉する．ク

ラスタ内では各DNA分子に対して並列に反応が進められる．クラスタ間での通信や情報の融合，分割などが必要なときには，VCSELの発光パターンを制御して粒子を移動させることにより行う．

並列光制御技術は，各クラスタにおける分子反応の制御に利用できる．例えば，他の分子や物質を用いてクラスタ内のDNA反応を制御する場合には，反応制御用の分子や物質を粒子に接合し，VCSELアレイ光マニピュレーションにより粒子を並列に制御する．それぞれの粒子を目的のクラスタに配置した時点で，粒子に接合させておいた分子や物質をクラスタ内のDNAと反応させれば，クラスタごとに独立した処理を行うことができる．また，クラスタ内での光誘起反応を利用すれば，生体分子反応と組み合わせることで，より高度な処理を実行できる．光による化学反応の誘起や補助，熱誘起反応，分子反応の制御などが考えられる．DNAの検出には蛍光観察が利用されることが多く，光情報処理手法により蛍光パターンを並列・包括的に扱うこともできる．

本手法の特徴は，DNAと光を複合的に情報媒体として利用し，並列光マニピュレーション技術を利用して作成したクラスタ内の分子に対する局所的処理と光情報処理に基づく大域的処理の融合により，分子の超並列性を活かしつつ自由度の高い処理を実現することにある．VCSELアレイ光マニピュレーションやWMDPEを利用した光波制御はシステムの集積化・微小化に有効な方式である．また，DNA分子を情報媒体としており，DNA情報との整合性が高いと考えられる．以上のことから，本手法の応用として，オンチップのシステムによるゲノム解析などが考えられる．現時点では，局所的なDNA分子反応制御方法や情報の入出力方法など実現へ向けた検討課題は多い．しかし，並列光制御技術の新たな応用として魅力的な分野であり，光分子コンピューティングパラダイムの構築へ向けた進展が期待される．

7.4 考察

光により捕捉された粒子の移動が，光の照射領域内に制限されることを示した．このことは，VCSELアレイの発光分布制御により，粒子の移動方向を制御できることを意味する．スポットは粒子が進行するための道であり，それらを任意に接続することにより，粒子を目的の位置へ導くことができる．この特徴から，本手法による物体の制御技術は，情報処理以外へも応用が可能であると考えられる．

ラボ・オン・チップ [91, 92] では，チップ上にあらかじめ微小な流路やチャンバーを作製し，それらの組み合わせによって，さまざまな反応を制御する．ここで，反応の対象となる物質を粒子に接合するなど，本手法による制御が可能な状態にしておけば，照射パターンの切り換えにより物質の振り分けが実行できる．これは，動的な流路の切り換えに対応すると考えることができ，対象物質のその時点での状態に適応した操作や，チップの多機能化などの利点をもたらすと考えられる．

組み合わせ最適化問題を分子計算手法により解く場合，あらかじめ考え得るすべての解候補（符号化したDNA配列の組み合わせ）を生成し，消去法的に解を求めるのが一般的である．しかし，扱う問題が大きくなると，最初の段階ですべての解候補を生成することが不可能となる．本章で示した並列情報処理手法は，このようなスケール問題解決のための糸口を与える．クラスタ自体がひとつのプロセッサであると考えれば，問題が大きい場合にそれを分割し，各クラスタに割り当てることにより，並列処理が可能であるからである．各クラスタの処理により解候補を絞り込めば，同時に生成すべき解候補を大幅に削減できる．

ここで，生成する解候補数について検討する．代表的な組み合わせ最適化問題のひとつである，最大クリーク問題を考える．クリークとはグラフに含まれる部分グラフのうち，完全グラフであるものをいう．最大クリーク問題とは，グラフに含まれるクリークの中で最大のものの大きさと，それを実現する完全部分グラフを特定する問題である．

ある部分グラフがクリークでなければ，それを含むすべてのグラフはクリークにはなりえない．この性質を利用すれば，与えられたグラフをいくつかの部分グラフに分割したとき，分割した各部分グラフでクリークではない解候補を消去できる．その結果，最終的に生成すべき解候補数は減少する．

あらかじめすべての解候補を生成する場合は，その数はグラフのノード数のみに依存し，リンク数によらない（手法 (i)）．これに対し，提案する並列情報処理における解候補数は，グラフ中のリンク数とその分布に依存する．ここでは，生成する解候補数が最も多くなるようなリンク分布の場合（手法 (ii)-(a)）と，グラフ中にリンクが一様に存在する（グラフ中のある2点を取ったとき，それらがリンクされている確率が一定）場合（手法 (ii)-(b)）について解候補数を求めた．ノード数が100のグラフの最大クリーク問題に対して，生成すべき解候補数のリンク数依存性を図 7.5 に示す．▲は手法 (i)，●は手法 (ii)-(a)，■は手法 (ii)-(b) である．例えば，問題グラフ中のリンク数が2000のとき，生成すべき解

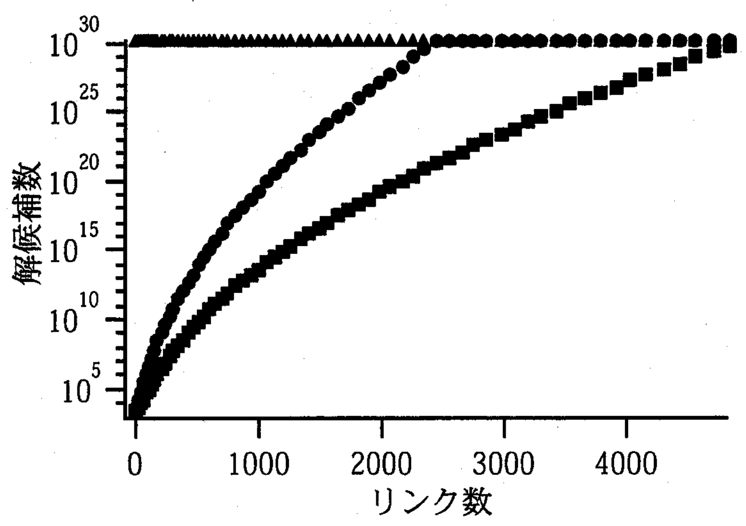


図 7.5　最大クリーク問題における生成解候補数のリンク数依存性．▲: 手法 (i)，●: 手法 (ii)-(a)，■: 手法 (ii)-(b)．

候補数は，手法 (i) と比較して，手法 (ii)-(a) では 10^{-3}，手法 (ii)-(b) では 10^{-11} 程度となる．この結果は，空間分割に基づく並列情報処理のひとつの利点であるといえる．

7.5　結言

本章では，並列光制御技術の情報処理への応用について検討した．スポットよりも小さな粒子の移動範囲を，スポット内に制限できることを確認した．このとき，隣接するスポットを照射すれば，粒子はそれら内部を自由に移動することができる．この技術を基礎とした，情報空間の分割による並列情報処理手法について述べた．また，並列光制御技術と分子計算技術との融合による，光分子コンピューティングの概念を示した．

総括

本研究では，光の複数の属性を利用した応用システムにおいて，その中核をなす並列光制御技術を開発し，実験からその有効性を確認した．また，並列光制御技術を実用的な応用へ展開し，その性能を評価した．以下，本研究において得られた成果を各章ごとに総括し，今後の検討課題を述べる．

第 1 章では，光のもつ複数の属性を利用したシステムにおいて，基礎的な役割を果たす並列光制御技術について述べた．並列光制御技術を定義し，実用システムにおける重要性を示した．光波分布の制御方法や，光圧を用いた物体制御方法について述べた．また，並列光制御技術の特徴をまとめ，応用例を示した．

第 2 章では，DPE を利用したレーザービームリソグラフィの高分解能化法を提案した．反復的な設計手法である GSA に新しく考案した拘束条件を組み込み，2 種類の DPE を設計した．低 NA の集光光学系を用いて集光スポットパターンを観察し，数値計算結果とほぼ一致する性能が得られることを確認した．また，作製した DPE をレーザービーム描画装置へ組み込み，描画パターンから描画分解能を評価した結果，最小線幅を 1.2μm から 1.0μm に向上できることを確認した．数値計算により，本手法では，従来の集光用レンズの NA を大きくする場合と比較して，深い焦点深度が得られることを明らかにした．

第 3 章では，波長多重システムへの応用をめざし，異なる波長に対して独立したスポットアレイパターンを生成する波長多重位相光学素子（WMDPE）を開発し，その性能を評価した．反復設計法である ORA 法を，多波長の WMDPE が設計できるよう改良した．9 波長 WMDPE を設計し，本設計手法の正当性を示した．7 波長 9 レベルの WMDPE を作製し，各波長に対する出力パターンを観察した結果，すべての波長で正しいパターンが得られた．数値計算により WMDPE の性能のさまざまなパラメータに対する依存性を評価した．パラメータを適切に設定することにより，少なくとも数 nm 間隔の波長に対し，出力パターンの分離が可能であることを示した．また，WMDPE の特性に関する多くの知見が得られ，システムへの適用をめざす際の設計指針を示すことができた．

第4章では，WMDPEをシャーシ間波長多重光インターコネクションへ応用し，波長多重システムにおけるWMDPEの有用性を示した．信号接続パターンの異なる2種類のWMDPEを設計し，波長と同様に，出力面距離に関するパターンの分離も可能であることを示した．受信側の受光素子アレイの配置を考慮し，受光効率を数値計算により求めたところ，すべての受光素子で一様な受光効率が得られることが示された．また，位置誤差に対する許容性能も明らかになった．設計したWMDPEを作製し，光ファイバを用いた光学系により出力パターンを観察した．その結果，すべての波長，出力面で設定した受光素子位置に正しくスポットが生成されることを示した．

第5章では，発光強度の独立制御が可能なVCSELアレイ光源を利用した光マニピュレーション技術を考案し，その機能を実証した．VCSELアレイ光マニピュレーションの概念とその特徴を示した．VCSELアレイ光マニピュレーションシステムを試作し，その基本性能を測定した．VCSELアレイを利用することにより実現される物体操作として，複数物体の一括輸送，発光ピクセルの切り換えによる物体輸送，ビーム間隔以下の精密な物体位置制御が実現できることを実証した．また，2×2のビームの照射により，物体の輸送速度が向上することを示した．

第6章では，VCSELアレイから生成される複数のビームの同時照射による3次元的な操作物体法について，数値計算および実験から検討した．幾何光学モデルに基づく数値計算により，物体に誘起される光圧による力が，光の照射パターンに依存して大きく変化することがわかった．2×2のビームを鉛直下方から物体に照射することにより，3次元の物体操作が可能であることを示した．粒子の浮揚に必要な光パワーと照射パターンのビーム間隔との関係を実験的に明らかにし，照射パワーにより粒子の浮揚位置を制御できることを示した．

第7章では，並列光制御技術の情報処理への展望について検討した．VCSELアレイの発光パターンにより，微小粒子の移動範囲を制御できることを示した．空間分割に基づいた，並列光制御技術と分子計算技術の融合による光分子コンピューティングを提案し，その特徴について検討した．

本研究における，今後の検討課題は以下のとおりである．

レーザービームリソグラフィの高分解能化に関し，DPEを利用して得られた最小線幅1.0μmという数値は現在の最高水準を上回るものではない．最高性能を達成するためには，より高いNAの対物レンズをもつシステムにDPEを組み込む必要がある．原理的に

は，高 NA のシステムに対しても，同じように適用できる．

性能の高い WMDPE を設計するためには，適切な量子化位相の選択は不可欠であり，設計波長により最適な位相レベルを求めるアルゴリズムの開発が必要である．また，WMDPE の作製においても，位相の誤差は性能の低下をもたらすため，精度の高い制御が必要である．例えば，有効屈折率法 [115] を利用すれば，2 レベルでマルチレベルと等価な位相レベルを表現できるため，有効であると考えられる．

波長多重光インターコネクションにおいて，システムとしての有効性を示すためには，受光素子を用いた動的な特性を測定し，大容量信号伝送能力の実証が必要である．そのためには，現在の光学系では光量不足であり，光ファイバを含めた光学系の改良が要求される．最終的には，波長多重 VCSEL を光源としたスマートピクセルによる集積化を視野に入れた検討が必要である．

VCSEL アレイ光マニピュレーションでは，応用分野に応じてビーム間隔を最適化する必要がある．また，高性能化には，光量効率の向上が必須であり，DPE を含めた微小光学デバイスに基づくシステムの集積化が望まれる．

光分子コンピューティングでは，実際に分子を情報媒体として提案手法の原理を検証し，能力を実証する必要がある．その際，局所的な反応制御や，情報の入出力方法に関する検討が必須である．また，本手法に適した並列処理アルゴリズムに関する検討が必要である．

謝辞

本研究は，大阪大学大学院工学研究科物質・生命工学専攻，および，同大学院情報科学研究科情報数理学専攻において，本学大学院工学研究科伊東一良教授，ならびに，本学大学院情報科学研究科谷田純教授のご指導の下に行ったものである．本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧なるご指導とご鞭撻を賜りました伊東教授，谷田教授に深く感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます．

本学大学院工学研究科増原宏教授には，本論文作成にあたり細部にわたりご検討頂き，貴重なご教示を頂きました．ここに深く感謝致します．

本学大学院工学研究科一岡芳樹名誉教授（現奈良工業高等専門学校校長）には，物質・生命工学専攻在任中に懇切丁寧なるご指導，ご激励を賜りました．ここに深く御礼申し上げます．

本学大学院工学研究科小西毅助手，渡辺歴助手には，親切なご指導，ご意見を頂きました．深く御礼申し上げます．

産業技術総合研究所松岡克典博士，李野由明博士には，第2章の研究において，常に親身にご指導，ご助言を頂きました．厚く御礼申し上げます．

第3，4章の研究は，大阪府地域結集型共同研究事業テラ光情報基盤技術開発の協力の下で行われました．また，第5，6，7章で用いたVCSELアレイは，光電子融合システム推進コンソーシアムを通じ，NTTフォトニクス研究所からご提供頂いたものです．これらのプロジェクトおよびコンソーシアムの関係者の皆様に深く御礼申し上げます．

本学卒業生の香川景一郎博士（現奈良先端科学技術大学院大学助手），佐々木亨博士（現キャノン（株））には，在学中より率直なご意見と貴重なご教示を頂きました．厚く御礼申し上げます．

大阪科学技術センター先端光ファクトリー研究員の余万吉博士，豊田宏博士，元研究員の山田憲嗣博士（現科学技術振興事業団研究員），高原高滋氏（ミノルタ（株）），浜本哲也氏（大日本スクリーン製造（株））には，WMDPEの作製において多大なるご協力を頂

きました．心から感謝致します．

本学博士後期課程の尾下善紀氏には，貴重なご意見をいただくとともに，常に親身にWMDPEの作製にご協力頂きました．深く御礼申し上げます．

白井伸弘氏（現シャープ（株））には，本学在学中，本研究全般にわたり有益なご討論，ご協力を頂きました．深く感謝致します．

最後に，終始，激励およびご協力を頂いた谷田研究グループ，伊東研究グループの皆様に深く感謝致します．

参考文献

[1] 長広恭明："2003年に100〜90nmで実用化始まるArF露光70〜65nmまで延命目指す", 日経マイクロデバイス, No. 202, 日経BP社, pp. 108–109 (2002).

[2] 三宅常之："デジタル化と1チップ化が携帯電話とAV機器を猛襲", 日経エレクトロニクス, No. 818, 日経BP社, pp. 122–127 (2002).

[3] 江村克己："10Tbit/sを越えたWDM光伝送の大容量化", O Plus E, **23**, pp. 1039–1045 (2001).

[4] H. P. Herzig Ed.: "MICRO-OPTICS", Taylor & Francis Ltd (1997).

[5] 小野雄三（編）："回折光学素子入門", オプトロニクス社 (1997).

[6] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures", OPTIK, **35**, pp. 237–246 (1972).

[7] V. Soifer, V. Kotlyar and L. Doskolovich: "Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation", chapter 1, Taylor & Francis (1997).

[8] D. Prongué, H. P. Herzig, R. Dändliker and M. T. Gale: "Optimized kinorom structures for highly efficient fan-out elements", Appl. Opt., **31**, pp. 5706–5711 (1992).

[9] T. Dresel, M. Beyerlein and J. Schwider: "Design of computer-generated beam-shaping holograms by iterative finite-element mesh adaption", Appl. Opt., **35**, pp. 6865–6874 (1996).

[10] J.Bengtsson: "Design of fan-out kinoforms in the entire scalar diffraction regime with an optimal-rotation-angle method", Appl. Opt., **36**, pp. 8435–8444 (1997).

[11] C. Chen and A. A. Sawchuk: "Nonlinear least-squares and phase-shifting quantization methods for diffractive optical element design", Appl. Opt., **36**, pp. 7297–7306 (1997).

[12] F. Wyrowski: "Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized blazed

phase structures", J. Opt. Soc. Am. A, **7**, pp. 961 – 969 (1990).

[13] K. S. Uruhart, P. Marchand, Y. Fainman and S. H. Lee: "Diffractive optics applied to free-space optical interconnects", Appl. Opt., **33**, pp. 3670–3682 (1994).

[14] R. Liu, B. Dong and B. Gu: "Implementation of pseudo-nondiffracting beams by use of diffracitve phase elements", Appl. Opt., **37**, pp. 8219–8223 (1998).

[15] S. Makki, Z. Wang and J. R. Leger: "Laser beam relaying with phase-conjugate diffractive optical elements", Appl. Opt., **36**, pp. 4749–4755 (1997).

[16] 尼子淳, 梅津一成："計算機ホログラムのレーザーはんだ付けへの応用", 光学, **30**, pp. 181–182 (2001).

[17] T. Stone and N. George: "Hybrid deffractive-refractive lenses and achromats", Appl. Opt., **27**, pp. 2960–2971 (1988).

[18] Y. Komma, S. Nishino and S. Mizuno: "Dual focus optical head for 0.6mm and 1.2mm disks", Opt. Rev., **1**, pp. 27–29 (1994).

[19] M. Kato and K. Sakuda: "Computer-generated holograms: application to intensity vriable and wavelength demultiplexing holograms", Appl. Opt., **31**, pp. 630–635 (1992).

[20] M. W. Farn, M. B. Stern, W. B. Veidkamp and S. S. Medeiros: "Color separation by use of binary optics", Opt. Lett., **18**, pp. 1214–1216 (1993).

[21] G. Yang, B. Gu, X. Tan, M. P. Chang, B. Dong and O. K. Ersoy: "Iterative optimization approach for the design of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions", J. Opt. Soc. Am. A, **11**, pp. 1632–1640 (1994).

[22] J.Bengtsson: "Kinoforms designed to produce different fan-out patterns for two wavelengths", Appl. Opt., **37**, pp. 2011–2020 (1998).

[23] A. Ashkin and J. M. Dziedzic: "Optical levitation by radiation pressure", Appl. Phys. Lett., **19**, pp. 283–285 (1971).

[24] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu: "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", Opt. Lett., **11**, pp. 288–290 (1986).

[25] A. Ashkin and J. M. Dziedzic: "Optical trapping and manipulation of viruses and

bacteria", Science, **235**, pp. 1517–1520 (1987).

[26] A. Ashkin, J. M. Dziedzic and T. Yamane: "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams", Nature, **330**, pp. 769–771 (1987).

[27] J. E. Molloy, J. E. Burns, J. Kendrick-Jones, R. T. Tregear and D. C. S. White: "Movement and force produced by a single myosin head", Nature, **378**, pp. 209–212 (1995).

[28] S. C. Kuo and M. P. Sheetz: "Force of single kinesin molecules measured with optical tweezers", Science, **260**, pp. 232–234 (1993).

[29] P. Borowicz, J. Hotta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Laser-controlled association of poly(n-vinylcarbazole) in organic solvents; radiation pressure effect of a focused near-infrared laser beam", J. Phys. Chem. B, **101**, pp. 5900–5904 (1997).

[30] L. Paterson, M. P. MacDonald, J. Arlt., W. Sibbett, P. E. Bryant and K. Dholakia: "Controlled rotation of optically trapped microscopic particles", Science, **292**, pp. 912–914 (2001).

[31] M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg and H. Rubinsztein-Dunlop: "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles", Nature, **394**, pp. 348–350 (1998).

[32] Z. P. Luo, Y. L. Sun and K. N. An: "An optical spin micromotor", Appl. Phys. Lett., **76**, pp. 1779–1781 (2000).

[33] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura and H. Masuhara: "Laser-scanning micromanipulation and spatial patterning of fine particles", Jpn. J. Appl. Phys., **30**, pp. L907–L909 (1991).

[34] Y. Hayasaki, M. Itoh, T. Yatagai and N. Nishida: "Nonmechanical optical manipulation of microparticle using spatial light modulator", Opt. Rev., **6**, pp. 24–27 (1999).

[35] J. Liesener, M. Reicherter, T. Haist and H. J. Tiziani: "Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms", Opt. Commun., **185**, pp. 77–82 (2000).

[36] 中島公徳, 水谷彰夫, 菊田久雄, 岩田耕一："斜め入射の共振モード格子フィルタ", 第46回応用物理学関係連合講演会, p. 1039 (1999).

[37] F. Xu, R.-C. Tyan, P.-C. Sun and Y. Fainman: "Form-birefrignent computer-generated holograms", Opt. Lett., **21**, pp. 1513–1515 (1996).

[38] H. Kikuta, Y. Ohira and K. Iwata: "Achromatic quarter-wave plates using the dispersion of form birefringence", Appl. Opt., **36**, pp. 1566–1572 (1997).

[39] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. tamamura, T. Sato and S. Kawakami: "Superprizmphenomena in photonic crystals", Phys. Rev. B, **58**, pp. R10096–R10099 (1998).

[40] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. tamamura, T. Sato and S. Kawakami: "Self-collimating phenomena in photonic crystals", Appl. Phys. Lett., **74**, pp. 1212–1214 (1999).

[41] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu: "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers", Jpn. J. Appl. Phys., **18**, pp. 2329–2330 (1979).

[42] 伊賀健一, 小山二三夫（編）："面発光レーザーの基礎と応用", 共立出版株式会社 (1999).

[43] N. Hatori, A. Mizutani, N. Nishiyama, A. Matsutani, T. Sakaguchi, F. Motomura, F. Koyama and K. Iga: "An over 10Gbits/s transmission experiment using p-type delta-doped ingaas/gaas quantum-well vertical cavity surface emitting laser", IEEE Photon. Technol. Lett., **10**, pp. 194–196 (1998).

[44] M. W. Haney, M. P. Christensen, P. Milojkovic, J. Ekman, P. Chandramani, R. Rozier, F. Kiamilev, Y. Liu and M. Hibbs-Brenner: "Multichip free-space global optical interconnection demonstration with integrated arrays of vertical-cavity surface-emitting lasers and photodetectors", Appl. Opt., **38**, pp. 6190–6200 (1999).

[45] Y. Li, T. Wang and R. A. Linke: "VCSEL-array-based angle-multiplexed optoelectronic crossbar interconnects", Appl. Opt., **35**, pp. 1282–1295 (1996).

[46] G. Kim, X. Han and R. T. Chen: "An 8-Gb/s optical backplane bus based on microchannel interconnects: design, fabrication, and performance measurements", IEEE J. of Lightwave Technology, **18**, pp. 1477–11486 (2000).

[47] 岩佐拓, 小山二三夫, 大和屋武, 伊賀健一："面発光レーザーアレーを用いる新しい室内光無線通信システムの提案", 第48回応用物理学関係連合講演会, p. 1143 (2001).

[48] M. Kajita, K. Kasahara, T. J. Kim, D. T. Neilson, I. Ogura, I. Redmond and E. Schenfeld: "Wavelength-division multiplexing free space optical interconnect networks for massively parallel processing systems", Appl. Opt., **37**, pp. 3746–3755 (1998).

[49] F. Koyama, T. Mukaihara, Y. Hayashi, N. Ohnoki, N. Hatori and K. Iga: "Wavelength control of vertical cavity surface emitting lasers by using nonplanar MOCVD", IEEE Photon. Technol. Lett., **7**, pp. 10–12 (1995).

[50] C.-C. Lin, F. Sugihwo and J. S. Harris, Jr.: "Laser parameter extraction for tunable vertical cavity lasers", Electronics Letters, **33**, pp. 1705–1707 (1997).

[51] F. Sugihwo, M. C. Larson and J. S. Harris, Jr.: "Micromachined widely tunable vertical cavity laser diodes", Journal of Microelectromechanical Systems, **7**, pp. 48–55 (1998).

[52] M. Kufner and S. Kufner Eds.: "Micro-optics and Lithography", VUBPRESS (1997).

[53] D. Prongué, H. P. Herzig, R. Dändliker and M. T. Gale: "Optimized kinoform structures for highly efficient fan-out elements", Appl. Opt., **31**, pp. 5706–5711 (1992).

[54] P. Ehbets, H. P. Herzig, D. Prongué and M. T. Gale: "High-efficiency continuous surface-relief gratings for two-dimensional array generation", Opt. Lett., **17**, pp. 908–910 (1992).

[55] D. F. Brosseau, F. Lacroix, M. H. Ayliffe, E. Bernier, B. Robertson, F. A. P. Tooley, D. V. Plant and A. G. Kirk: "Design, implementation, and characterization of a kinematically aligned, cascaded spot-array generator for a modulator-based free-space optical interconnect", Appl. Opt., **39**, pp. 733–745 (2000).

[56] T. Dresel, M. Beyerlein and J. Schwider: "Design of computer-generated beam-shaping holograms by iterative finite-element mesh adaption", Appl. Opt, **35**, pp. 6865–6874 (1996).

[57] W. Singer, H. P. Herzig, M. Kuittinen, D. Piper and J. Wangler: "Diffractive beamshaping elements at the fabrication limit", Opt. Eng., **35**, pp. 2779–2787 (1996).

[58] J. R. Leger, D. Chen and Z. Wang: "Diffractive optical element for mode shaping of a Nd:YAG laser", Opt. Lett., **19**, pp. 108–110 (1994).

[59] A. Vasara, J. Turunen and A. T. Friberg: "Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms", J. Opt. Soc. Am. A, **6**, pp. 1748–1754 (1989).

[60] 小原實, 神成文彦, 佐藤俊一: "レーザー応用光学", 第6章, 共立出版株式会社 (1998).

[61] J. Hofkens, J. Hotta, K. Sasaki, H. Masuhara, H. Faes and F. C. D. Schryver: "Laser-induced phase transition in aqueous solutions of hydrophobically modified poly(n-isopropylacrylamide)", Mol. Cryst. Liq. Cryst., **283**, pp. 165–172 (1996).

[62] M. M. Burns, J. M. Fournier and J. A. Golovchenko: "Optical matter: crystallization and binding in intense optical fields", Science, **249**, pp. 749–754 (1990).

[63] H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg and H. Rubinsztein-Dunlop: "Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity", Phy. Rev. Lett., **75**, pp. 826–829 (1995).

[64] K. T. Gahagan and J. G. A. Swartzlander: "Optical vortex trapping of particles", Opt. Lett., **21**, pp. 827–829 (1996).

[65] 荒川泰彦: "総論: 光通信技術の研究開発動向", O Plus E, **23**, pp. 1036–1038 (2001).

[66] S. J. Mihailov, F. Bilodeau, K. O. Hill, D. C. Johnson, J. Albert and A. S. Holmes: "Apodization technique for fiber grating fabrication with a halftone transmission amplitude mask", Appl. Opt., **39**, pp. 3670–3677 (2000).

[67] M. K. Smit and C. Van-Dam: "PHASAR-based WDM devices: principles, design and applications", IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., **2**, pp. 236–250 (1996).

[68] E. M. Strzeleckaa, D. A. Louderback, B. J. Thibeault, G. B. Thompson, K. Bertilsson and L. A. Coldren: "Parallel free-space optical interconnect based on arrays of vertical-cavity lasers and detectors with monolithic microlenses", Appl. Opt., **37**, pp. 2811–2821 (1998).

[69] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson: "Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask", IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29**, pp. 1828–1836 (1982).

[70] J. Ojeda-Castañeda, L. R. Berriel-Valdos and E. Montes: "Bessel annular apodizers: imaging characteristics", Appl. Opt., **26**, pp. 2770–2772 (1987).

[71] J. Ojeda-Castaneda, R. Ramos and A. Noyola-Isgleas: "High focal depth by apodization and digital restoration", Appl. Opt., **27**, pp. 2583–2586 (1988).

[72] M. Mino and Y.Okano: "Improvement in the OTF of a defocused optical system through the use of shaded apertures", Appl. Opt., **10**, pp. 2219–2223 (1971).

[73] M. S. Kim and C. C. Guest: "Simulated annealing algorithm for binary phase only filters in pattern classification", Appl. Opt., **29**, pp. 1203–1208 (1990).

[74] 谷口周治："高機能回折光学素子作製用レーザービーム描画装置の試作", Master's thesis, 大阪大学大学院工学研究科 (1997).

[75] 小倉裕介："機能性位相光学素子の設計とレーザービーム描画装置による作製", Master's thesis, 大阪大学大学院工学研究科 (1999).

[76] A. E. Siegman: "Quasifast hankel transform", Opt. Lett., **1**, pp. 13–15 (1977).

[77] V. Soifer, V. Kotlyar and L. Doskolovich: "Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation", chapter 2, Taylor & Francis (1997).

[78] V. V.Kotlyar, P. G. Seraphimovich and V. Soifer: "An iterative weight-based method for calculating kinoforms", Proc. SPIE Image Processing and Computer Optics, **2363**, pp. 175–183 (1994).

[79] A. Savitzky and M. J. E. Golay: "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures", Anal. Chem., **36**, pp. 1627–1639 (1964).

[80] W. Däschner, P. Long, R. Stein, C. Wu and S. H. Lee: "Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass", Appl. Opt., **36**, pp. 4675–4680 (1997).

[81] A. P. Wood: "Design of infrared hybrid refractive-diffractive lens", Appl. Opt., **31**, pp. 2253–2258 (1992).

[82] B.-Z. Dong, G.-Q. Zhang, G.-Z. Yang, B.-Y. Gu, S.-H. Zheng, D.-H. Li, Y.-S. Chen, X.-M. Cui, M.-L. Chen and H.-D. Liu: "Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously", Appl. Opt., **35**, pp. 6859–6864 (1996).

[83] B. Gu, G. Yang, B. Dong, M. P. Chang and O. K. Ersoy: "Diffractive-phase-element design that implements several optical functions", Appl. Opt., **34**, pp. 2564–2570 (1995).

[84] G. Yang, B. Dong, B. Gu, J. Zhuang and O. K. Ersoy: "Gerchberg-saxton and yang-gu algorithm for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison", Appl. Opt., **33**, pp. 209–218 (1994).

[85] 辻内順平："ホログラフィー", 裳華房 (1997).

[86] 行松健一："光スイッチングと光インターコネクション", 共立出版株式会社 (1998).

[87] K. Hirabayashi, T. Yamamoto, S. Matsuo and S. Hino: "Board-to-board free-space optical interconnections passing through boards for a bookshelf-assembled terabit-per-second-class ATM switch", Appl. Opt., **37**, pp. 2985–2995 (1988).

[88] Y. Arai, R. Yasuda, K. Akashi, Y. Harada, H. Miyata, K. K. Jr. and H. Itoh: "Tying a molecular knot with optical tweezers", Nature, **399**, pp. 446–448 (1999).

[89] R. C. Gauthier: "Optical trapping: a tool to assist optical machining", Optics and laser technology, **29**, pp. 389–399 (1997).

[90] A. E. Chiou, W. Wang, G. J. Sonek, J. Hong and M. W. Berns: "Interferometric optical tweezers", Opt. Commun., **133**, pp. 7–10 (1997).

[91] B. H. Weigl and P. Yager: "Microfluidic diffusion-based separation and detection", Science, **283**, pp. 346–347 (1999).

[92] J. B. Knight, A. Vishwanath, J. P. Brody and R. H. Austin: "Hydrodynamic focusing on a silicon chip: Mixing nanoliters in microseconds", Phys. Rev. Lett., **80**, pp. 3863–3866 (1998).

[93] K. Jensen: "Smaller, faster chemistry", Nature, **393**, pp. 735–736 (1998).

[94] Q. Liu, L. Wang, A. G. Frutos, A. E. Condon, R. M. Corn and L. M. Smith: "DNA computing on surfaces", Nature, **403**, pp. 175–179 (2000).

[95] F. B. McCormick, F. A. P. Tooley, T. J. Cloonan, J. M. Sasian and H. S. Hinton: "Optical interconnections using microlens arrays", Opt. Quantum Electron., **24**, pp. S465–S477 (1992).

[96] M. Ozkan, M. M. Wang and S. C. Esener: "Application of VCSEL arrays to micro-manipulation of small objects and biological cells", Optics in Compting 2000, pp.

32–34 (2000).

[97] H. Felgner, O. Müller and M. Schliwa: "Calibration of light forces in optical tweezers", Appl. Opt., **34**, pp. 977–982 (1995).

[98] J. P. Barton, D. R. Alexander and S. A. Schaub: "Theoretical determination of net radiation force and torque for a spherical particle illuminated by a focused laser beam", J. Appl. Phys., **66**, pp. 4594–4602 (1989).

[99] G. Roosen and C. Imbert: "The TEM_{01} mode laser beam – a powerful tool for optical levitation of various types of spheres", Opt. Commun., **26**, pp. 432–436 (1978).

[100] R. C. Gauthier and S. Wallace: "Optical levitation of spheres: analytical development and numerical computations of the force equations", J. Opt. Soc. Am. B, **12**, pp. 1680–1686 (1995).

[101] N. B. Simpson, D. McGloin, K. Dholakia, L. Allen and M. J. Padgett: "Optical tweezers with increased axial trapping efficiency", J. mod Opitcs, **12**, pp. 1680–1686 (1995).

[102] J. Noordmans, P. J. Wit, H. C. van der Mei and H. J. Busscher: "Detachment of polystyrene particles from collector surfaces by surface tension forces induced by air-bubble passage through a parallel plate flow chamber", J. Adhesion Sci. Technol., **11**, pp. 957–970 (1997).

[103] S. Sinzinger and J. Jahns: "Integrated micro-optical imaging system with a high interconnection capacity fabricated in planar optics", Appl. Opt., **36**, pp. 4729–4735 (1997).

[104] D. Miyazaki, J. Tanida and Y. Ichioka: "Reflective block optics for packaging of optical computing systems", Opt. Lett., **19**, pp. 1291–1293 (1994).

[105] T. Kurokawa, S. Matsuo, T. Nakahara, K. Tateno, Y. Ohiso, A. Watatsuki and H. Tsuda: "Design approaches for VCSEL's and VCSEL-based smart pixels toward parallel optoelectronic processing", Appl. Opt., **37**, pp. 194–204 (1998).

[106] L. M. Adleman: "Molecular computation of solutions to combinatorial problems", Science, **266**, pp. 1021–1024 (1994).

[107] Q. Ouyang, P. D. Kaplan, S. Liu and A. Libchaber: "DNA solution of the maximal

clique problem", Science, **278**, pp. 446–449 (1997).

[108] K. Sakamoto, H. Gouzu, K. Kommiya, D. Kiga, S. Yokoyama, T. Yokomori and M. Hagiya: "Molecular computation by DNA hairpin formation", Science, **288**, pp. 1223–1226 (2000).

[109] T. Head, G. Rozenberg, R. S. Bladergroen, C. K. D. Breek, P. H. M. Lommerse and H. P. Spaink: "Computing with DNA by operating on plasmids", BioSystems, **57**, pp. 87–93 (2000).

[110] J. Tanida and Y. Ichioka: "Programming of optical array logic. 1: Image data processing", Appl. Opt., **27**, pp. 2926–2930 (1988).

[111] J. Tanida, M. Fukui and Y. Ichioka: "Programming of optical array logic. 2: Numerical data processing based on pattern logic", Appl. Opt., **27**, pp. 2931–2939 (1988).

[112] H. Hug and R. Schuler: "Strategies for the development of a peptide computer", Bioinformatics, **17**, pp. 364–368 (2001).

[113] C. Mao, T. H. LaBean, J. H. Reif and N. C. Seeman: "Logical computation using algorithmic self-assembly of DNA triple-crossover molecules", Nature, **407**, pp. 493–496 (2000).

[114] Y. Sakakibara and A. Suyama: "Intelligent DNA ships: logical operation of gene expression profiles on DNA computers", Genome Informatics, **11**, pp. 33–42 (2000).

[115] 余万吉, 高原高滋, 小西毅, 四谷任, 一岡芳樹："有効屈折率法を用いたマルチレベル位相型 CGH の作製", Optics Japan '99, pp. 141–142 (1999).

付 録 A

光圧による力の計算方法

本研究において光圧による力の数値解析の対象としたのは，大きさが μm オーダーの物体である．したがって，幾何光学的な考えに基づいて力を算出できる．具体的には，光をフォトンの集合と考え，各フォトンと物体との相互作用により誘起される光圧の和として力を求める．

照射光と物体との相互作用のモデルを図 A.1 に示す．(a) は 3 次元的な位置関係，(b) は (a) において z 軸と照射光の物体への入射位置を含む平面での断面図である．断面と x 軸とのなす角を ϕ，断面上における光の鉛直上向き方向に対する入射角を θ とする．物体は半径 r_s の誘電体球とする．物体と周囲の媒質との境界面では，光は屈折または反射して進行するものとし，物体による光の吸収は考慮しない．また，物体の中心と光の入射位置を通る直線が鉛直下向きとなす角を θ_1 で表す．物体の屈折率を n_s，周囲の媒体の屈折率を n_0，真空中の光の波長を λ_0 とする．

屈折・反射はそれぞれ，Snell の法則，反射の法則に従うものとする．光が入射角 $\theta_{\rm in}$ で物体に入射するとき，その屈折角 $\theta_{\rm refrac}$ と反射角 $\theta_{\rm reflec}$ は，

$$n_0 \sin\theta_{\rm in} = n_s \sin\theta_{\rm refrac}, \tag{A.1}$$

$$\theta_{\rm in} = -\theta_{\rm reflec}, \tag{A.2}$$

と表せる．また，Fresnel の式より，その時の反射率 $R(\theta_{\rm in})$ と透過率 $T(\theta_{\rm in})$ は，

$$R(\theta_{\rm in}) = \left[\frac{n_0 n_s(\sin^2\theta_{\rm in} - \sin^2\theta_{\rm refrac})}{n_0 n_s(\sin^2\theta_{\rm in} + \sin^2\theta_{\rm refrac}) + (n_0^2 + n_s^2)\sin\theta_{\rm in}\sin\theta_{\rm refrac}}\right]^2, \tag{A.3}$$

$$T(\theta_{\rm in}) = 1 - R(\theta_{\rm in}), \tag{A.4}$$

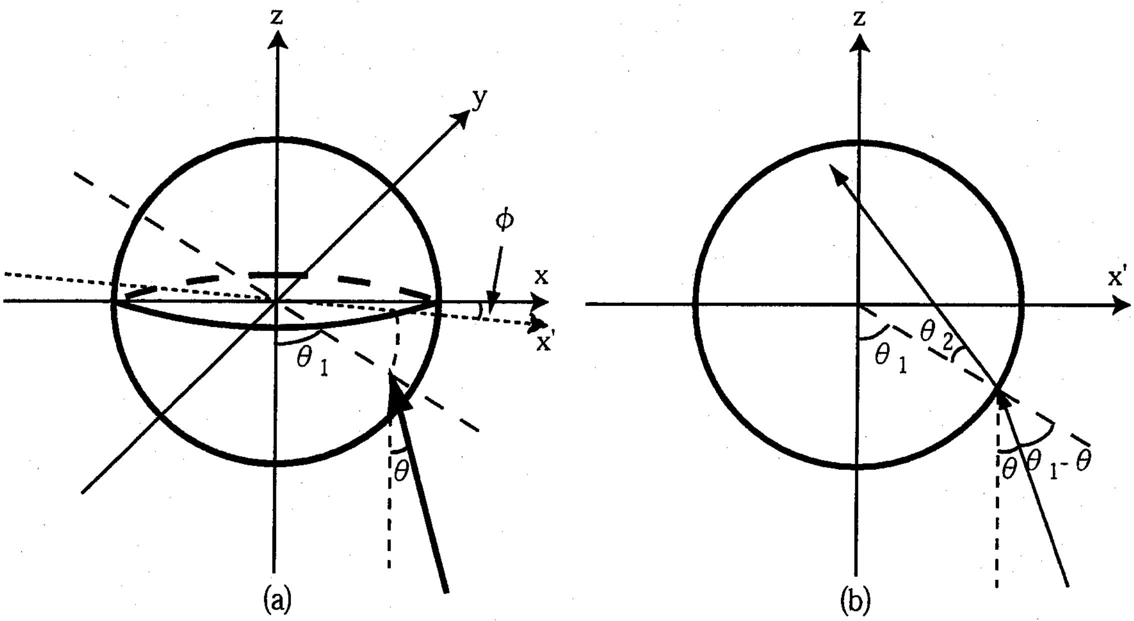


図 A.1　光圧による力の計算に用いるモデルと文字の定義. (a) 3 次元的な位置関係, (b) z 軸と照射光の物体への入射位置と含む平面での断面図.

と書ける. 単一のフォトンの運動量 p は,

$$p = \frac{h}{\lambda_0} n_0, \tag{A.5}$$

である.

$\theta_{\text{in}} = \theta_1 - \theta$ のときに式 (A.1) により算出される θ_{refrac} を θ_2 とおく. 物体に入射した光は, まず, 屈折または反射により進行方向を変化させる. 屈折後のフォトンの運動量を $\mathbf{p}^{(1t)} \equiv \left(p_x^{(1t)}, p_y^{(1t)}, p_z^{(1t)}\right)$, 反射後のフォトンの運動量 $\mathbf{p}^{(1r)} \equiv \left(p_x^{(1r)}, p_y^{(1r)}, p_z^{(1r)}\right)$ と書くと, それぞれ以下の式で表せる.

$$\mathbf{p}^{(1t)} = \left(\frac{h}{\lambda_0} n_s \cos(\theta_2 - \theta_1) \cos\phi, \frac{h}{\lambda_0} n_s \cos(\theta_2 - \theta_1) \sin\phi, \frac{h}{\lambda_0} n_s \cos(\theta_1 - \theta_2)\right), \tag{A.6}$$

$$\mathbf{p}^{(1r)} = \left(\frac{h}{\lambda_0} n_0 \sin(2\theta_1 - \theta) \cos\phi, \frac{h}{\lambda_0} n_0 \sin(2\theta_1 - \theta) \sin\phi, -\frac{h}{\lambda_0} n_0 \cos(2\theta_1 - \theta)\right). \tag{A.7}$$

ここで, 入射フォトンの運動量を $\mathbf{p}^{(\text{inc})} \equiv (p_x^{(\text{inc})}, p_y^{(\text{inc})}, p_z^{(\text{inc})})$ とおくと,

$$p_x^{(\mathrm{inc})} = \|\mathbf{p}^{(\mathrm{inc})}\| \sin(-\theta)\cos\phi, \tag{A.8}$$

$$p_y^{(\mathrm{inc})} = \|\mathbf{p}^{(\mathrm{inc})}\| \sin(-\theta)\sin\phi, \tag{A.9}$$

$$p_z^{(\mathrm{inc})} = \|\mathbf{p}^{(\mathrm{inc})}\| \cos\theta, \tag{A.10}$$

である．ただし，$\|\boldsymbol{\alpha}\|$ は $\boldsymbol{\alpha}$ の絶対値を表す．一度目の屈折によるフォトンの運動量変化 $\Delta\mathbf{p}^{(1t)}$，および，反射によるフォトンの運動量変化 $\Delta\mathbf{p}^{(1r)}$ は，それぞれ以下のように表せる．

$$\Delta\mathbf{p}^{(1t)} = \mathbf{p}^{(1t)} - \mathbf{p}^{(\mathrm{inc})}, \tag{A.11}$$

$$\Delta\mathbf{p}^{(1r)} = \mathbf{p}^{(1r)} - \mathbf{p}^{(\mathrm{inc})}. \tag{A.12}$$

以下，屈折を続けて伝搬したフォトンが l 回目 $(l \geq 2)$ において，屈折するときの運動量変化を $\Delta\mathbf{p}^{(lt)} \equiv \left(p_x^{(lt)}, p_y^{(lt)}, p_z^{(lt)}\right)$，反射するときの運動量変化を $\Delta\mathbf{p}^{(lr)} \equiv \left(p_x^{(lr)}, p_y^{(lr)}, p_z^{(lr)}\right)$ と書くと，それぞれ以下のように表すことができる．

$$\Delta\mathbf{p}^{(lt)} = \begin{cases} \mathbf{p}^{(lt)} - \mathbf{p}^{((l-1)r)} & (l \geq 3) \\ \mathbf{p}^{(2t)} - \mathbf{p}^{(1t)} & (l = 2) \end{cases}, \tag{A.13}$$

$$\Delta\mathbf{p}^{(lr)} = \begin{cases} \mathbf{p}^{(lr)} - \mathbf{p}^{((l-1)r)} & (l \geq 3) \\ \mathbf{p}^{(2r)} - \mathbf{p}^{(1t)} & (l = 2) \end{cases}. \tag{A.14}$$

ただし，

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^{(lt)} = \Biggl(& -\frac{h}{\lambda_0} n_0 \sin\{2(\theta_1 + \theta_2) - \theta + l(\pi - 2\theta_2)\}\cos\phi\,, \\ & -\frac{h}{\lambda_0} n_0 \sin\{2(\theta_1 + \theta_2) - \theta + l(\pi - 2\theta_2)\}\sin\phi, \\ & \frac{h}{\lambda_0} n_0 \cos\{2(\theta_1 + \theta_2) - \theta + l(\pi - 2\theta_2)\}\Biggr), \end{aligned} \tag{A.15}$$

$$\mathbf{p}^{(lr)} = \left(\frac{h}{\lambda_0} n_s \sin\{\theta_1 + \theta_2 + l(\pi - 2\theta_2)\} \cos\phi \, , \right.$$
$$\frac{h}{\lambda_0} n_s \sin\{\theta_1 + \theta_2 + l(\pi - 2\theta_2)\} \sin\phi ,$$
$$\left. -\frac{h}{\lambda_0} n_0 \cos\{\theta_1 - \theta_2 + l(\pi - 2\theta_2)\} \right) , \tag{A.16}$$

である．

Fresnel の公式から求まる反射率および透過率（式 (A.3), (A.4)）を考慮すると，運動量変化の和 $\Delta\mathbf{P} \equiv (\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z)$ は，以下のように求められる．

$$\begin{aligned}
\Delta P_x &= T\Delta p_x^{(1t)} + T^2\Delta p_x^{(2t)} + \sum_{l=3}^{\infty} T^2 R^{l-2} \Delta p_x^{(lt)} \\
&\quad + R\Delta p_x^{(1r)} + TR\Delta p_x^{(2r)} + \sum_{l=3}^{\infty} TR^{l-1}(p_x^{(lr)} - p_x^{((l-1)r)}) \\
&= T\Delta p_x^{(1t)} + T^2\Delta p_x^{(2t)} \\
&\quad + \frac{T^2}{R^2}\left[\frac{h}{\lambda_0} n_0 \left\{ \cos(2\theta_1 + 2\theta_2 - \theta) A^{(\sin)}_{\alpha=-R} - \sin(2\theta_1 + 2\theta_2 - \theta) A^{(\cos)}_{\alpha=-R} \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{h}{\lambda_0} n_s \left\{ \cos(\theta_1 + 3\theta_2) A^{(\sin)}_{\alpha=-R} - \sin(\theta_1 + 3\theta_2) A^{(\cos)}_{\alpha=-R} \right\} \right] \cos\phi \\
&\quad + R\Delta p_{1rx} + TR\Delta p_{2rx} \\
&\quad - \frac{T}{R}\frac{h}{\lambda_0} n_s \left[\sin(\theta_1 + \theta_2) A^{(\cos)}_{\alpha=-R} - \cos(\theta_1 + \theta_2) A^{(\sin)}_{\alpha=-R} \right. \\
&\quad \left. + \sin(\theta_1 + 3\theta_2) A^{(\cos)}_{\alpha=-R} - \cos(\theta_1 + 3\theta_2) A^{(\sin)}_{\alpha=-R} \right] \cos\phi, ,
\end{aligned} \tag{A.17}$$

$$
\begin{aligned}
\Delta P_y &= T\Delta p_y^{(1t)} + T^2\Delta p_y^{(2t)} + \sum_{l=3}^{\infty} T^2 R^{l-2}\Delta p_y^{(lt)} \\
&\quad + R\Delta p_y^{(1r)} + TR\Delta p_y^{(2r)} + \sum_{l=3}^{\infty} TR^{l-1}(p_y^{(lr)} - p_y^{((l-1)r)}) \\
&= T\Delta p_y^{(1t)} + T^2\Delta p_y^{(2t)} \\
&\quad + \frac{T^2}{R^2}\left[\frac{h}{\lambda_0}n_0\left\{\cos(2\theta_1+2\theta_2-\theta)A^{(\sin)}_{\alpha=-R} - \sin(2\theta_1+2\theta_2-\theta)A^{(\cos)}_{\alpha=-R}\right\}\right. \\
&\quad \left. + \frac{h}{\lambda_0}n_s\left\{\cos(\theta_1+3\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R} - \sin(\theta_1+3\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R}\right\}\right]\sin\phi \\
&\quad + R\Delta p_{1ry} + TR\Delta p_{2ry} \\
&\quad - \frac{T}{R}\frac{h}{\lambda_0}n_s\left[\sin(\theta_1+\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} - \cos(\theta_1+\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right. \\
&\quad \left. + \sin(\theta_1+3\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} - \cos(\theta_1+3\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right]\sin\phi, \qquad \text{(A.18)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta P_z &= T\Delta p_z^{(1t)} + T^2\Delta p_z^{(2t)} + \sum_{l=3}^{\infty} T^2 R^{l-2}(p_z^{(lt)} - p_z^{((l-1)r)}) \\
&\quad + R\Delta p_z^{(1r)} + TR\Delta p_z^{(2r)} + \sum_{l=3}^{\infty} TR^{l-1}(p_z^{(lr)} - p_z^{((l-1)r)}) \\
&= T\Delta p_z^{(1t)} + T^2\Delta p_z^{(2t)} \\
&\quad + \frac{T^2}{R^2}\left[\frac{h}{\lambda_0}n_0\left\{\cos(2\theta_1+2\theta_2-\theta)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} + \sin(2\theta_1+2\theta_2-\theta)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right\}\right. \\
&\quad \left. - \frac{h}{\lambda_0}n_s\left\{\cos(\theta_1+3\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} + \sin(\theta_1+3\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right\}\right] \\
&\quad + R\Delta p_z^{(1r)} + TR\Delta p_z^{(2r)} \\
&\quad - \frac{T}{R}\frac{h}{\lambda_0}n_s\left[\cos(\theta_1+\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} + \sin(\theta_1+\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right. \\
&\quad \left. + \cos(\theta_1+3\theta_2)A^{(\cos)}_{\alpha=-R} + \sin(\theta_1+3\theta_2)A^{(\sin)}_{\alpha=-R}\right]. \qquad \text{(A.19)}
\end{aligned}
$$

ここで,

$$
A^{(\cos)}_{\alpha=\alpha_0} \equiv \Sigma_{l=3}^{\infty}\alpha_0^l\cos(2l\theta_2) = \frac{\alpha_0^3\cos(6\theta_2) - \alpha_0^4\cos(4\theta_2)}{(1+\alpha_0^2) - 2\alpha_0\cos(2\theta_2)}, \qquad \text{(A.20)}
$$

$$
A^{(\sin)}_{\alpha=\alpha_0} \equiv \Sigma_{l=3}^{\infty}\alpha_0^l\sin(2l\theta_2) = \frac{\alpha_0^3\sin(6\theta_2) - \alpha_0^4\sin(4\theta_2)}{(1+\alpha_0^2) - 2\alpha_0\cos(2\theta_2)}, \qquad \text{(A.21)}
$$

と定義した．式 (A.17)–(A.19) を式 (6.1) に代入することにより，光圧による力が求まる．ただし本研究においては，各ビームのビームウェストが 2μm 以上と大きく，光軸方向の物体の浮揚位置は，ビームウェスト位置から数 10μm 程度の距離であることから，$\theta = 0$ として計算した．

著者発表論文

原著論文

[1] Y. Ogura, N. Shirai, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Wavelength-multiplexing diffractive phase elements: design, fabrication, and performance evaluation," Journal of Optical Society of America A **18**, 1082 – 1092 (2001).

[2] Y. Ogura, N. Shirai, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Wavelength-multiplexing diffractive phase element with quantized phase structure," Optical Review **8**, 245 – 248 (2001).

[3] Y. Ogura, K. Kagawa, and J. Tanida, "Optical manipulation of microscopic objects by means of vertical-cavity surface-emitting laser array sources," Applied Optics **40**, 5430 – 5435 (2001).

[4] Y. Ogura, J. Tanida, Y. Ichioka, Y. Mokuno, and K. Matsuoka, "Diffractive phase element for shrinking focal spot diameter: design, fabrication, and application to laser beam lithography," Optical Review **8**, 416–421 (2001).

[5] Y. Ogura, N. Shirai, and J. Tanida, "Optical levitation and translation of a microscopic particle by use of multiple beams generated by vertical-cavity surface-emitting laser array sources," Applied Optics **41**, 5645–5654 (2002).

国際会議報告

[1] Y. Ogura, J. Tanida, Y. Ichioka, Y. Mokuno, and K. Matsuoka, "Diffractive phase element for reducing a diameter of main-lobe of a focal spot," in Optical Storage and Optical Information Processing, H. D. Shieh and T. D. Milster eds., Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers **4081**, pp. 226 – 235 (Taipei, 2000).

[2] Y. Ogura, N. Shirai, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Design and performance evaluation of

wavelength multiplexing diffractive phase elements," in 2nd International Conference on Optical Design and Fabrication (ODF 2000), T. Tsuruta general chair, Proceedings AP002138, pp. 105 – 108 (Tokyo, 2000).

[3] Y. Ogura, K. Kagawa, and J. Tanida,"Manipulation method for microparticles by optical trapping with VCSEL array," in The First Students' International Symposium on Advanced Engineering, p. 20 (Osaka, 2000).

[4] Y. Ogura, N. Shirai, and J. Tanida,"Board-to-board optical interconnects by means of wavelength multiplexing diffractive phase element," in Technical digest of CLEO/Pacific Rim 2001, pp. 696 – 697 (Chiba, 2001).

[5] Y. Ogura, N. Shirai, K. Kagawa, and J. Tanida,"Optical manipulation of micro-objects by resultant force induced by array sources," in technical digest of the eighth microoptics conference (MOC '01), pp. 286 – 289 (Osaka, 2001).

解説

[1] 小倉裕介，白井伸弘，谷田　純，"波長多重位相型計算機ホログラムの設計と特性評価"，光学 **30**，183 – 184 (2001).

その他

[1] 小倉裕介, 谷田　純, 一岡芳樹, "汎用空間情報変換モジュール OPIUM の機能評価", 第 58 回応用物理学会学術講演会, 2a-PA-16, (平成 9 年 10 月).

[2] 小倉裕介, 一岡芳樹, 谷口周治, 杢野由明, 松岡克典, "レーザービーム描画装置の高分解能化のための位相光学素子の設計と試作", Optics Japan '98, 18aB03, (平成 10 年 9 月).

[3] 小倉裕介, 谷田　純, 一岡芳樹, 杢野由明, 松岡克典, "エアリーディスクより小さい集光スポットを生成する位相光学素子の設計", 第 46 回応用物理学関係連合講演会, 30a-YH-6, (平成 11 年 3 月).

[4] 小倉裕介, 谷田　純, 一岡芳樹, 杢野由明, 松岡克典, "集光スポットのメインローブ径縮小のための位相光学素子の作製と評価", Optics Japan '99, 23pB2, (平成 11 年 11 月).

[5] 小倉裕介, 白井伸弘, 高原浩滋, 谷田　純, 一岡芳樹, "波長多重位相光学素子の作製と特性評価", 第47回応用物理学関係連合講演会, 31a-W-9, (平成12年3月).

[6] 小倉裕介, 香川景一郎, 谷田　純, "VCSELアレイを用いた光トラップ技術の検討", Optics Japan 2000, 7aA6, (平成12年10月).

[7] 小倉裕介, 白井伸弘, 谷田　純, "VCSELアレイ光トラップによる物体操作と情報処理への応用の検討", レーザー学会学術講演会第22回年次大会, H3-25pVI10, (平成14年1月).

[8] 小倉裕介, 白井伸弘, 谷田　純, "光トラップと分子計算技術の融合による超並列情報処理の検討", 第49回応用物理学関係連合講演会, 27a-ZH-18, (平成14年3月).

[9] K. Kagawa, Y. Ogura, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Discrete correlation processor as a building core of a digital optical computing system: architecture and optoelectronic embodiment," Applied Optics **38**, 7276–7281 (1999).

[10] K. Kagawa, K. Nitta, Y. Ogura, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Optoelectronic parallel-matching architecture: architecture description, performance estimation, and prototype demonstration," Applied Optics **40**, 283–298 (2001).

[11] K. Kagawa, Y. Ogura, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Prototype demonstration of discrete correlation processor-2 based on high-speed optical image steering for large-fan-out optical interconnections," Optical Review **8**, 18–25 (2001).