

11. 光科学における応用物理

光とは何か？

波として振舞うとき

粒子として振舞うとき

光を作る – レーザー

光は電磁波の一種：さまざまな波長の電磁波とその利用

先端科学として

レーザーによる原子冷却（極低温度における原子操作と原子物理）

レーザーピンセット（ナノ・マイクロ粒子の操作と生命機能の計測）

超短パルスの発生（超高速現象の研究、化学反応の制御）

近接場光学、多光子光学（ナノ加工への応用）

社会と産業の中で

光ファイバー

光メモリ

光ディスプレイ（液晶、有機EL）

ホログラフィー（3次元物体の記録・再生、振動・変位測定）

分光分析（X線、紫外・可視光、赤外線、マイクロ波、テラヘルツ波等を用いた物質分析）

レーザー加工（表面微細加工、ガラスの内部加工、スパッタリング）

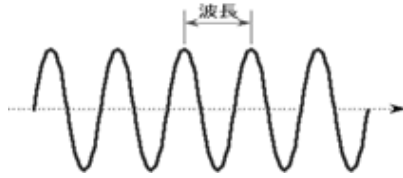
フォトリソグラフィ

医療への応用（ファイバースコープ、レーザーメス）

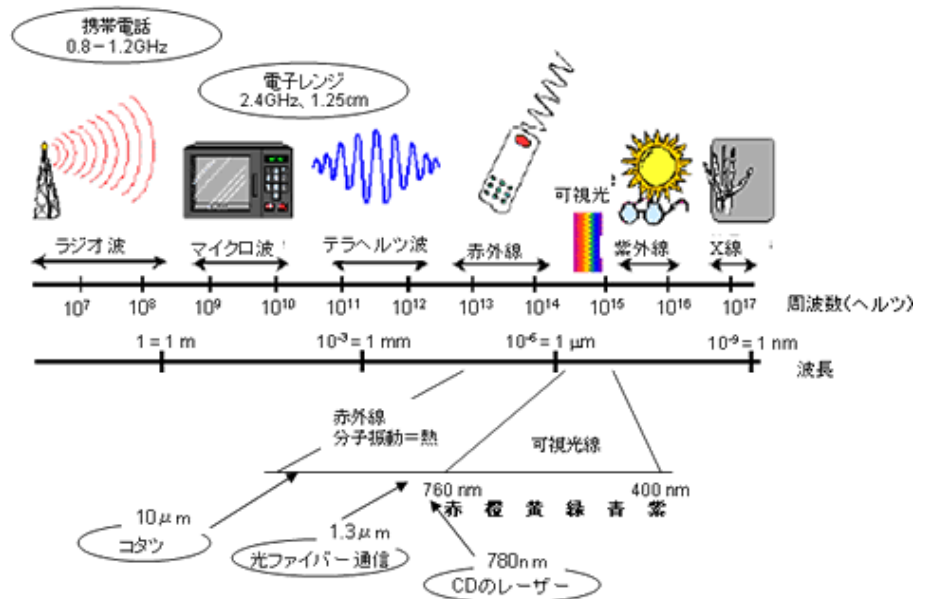
1.1. 光科学における応用物理

光・電磁波の周波数・波長とその使われ方

光を波として捉えた場合、光を特徴づける量として「波長」がある。



波長とは波の山と山の間の長さの事で、「目に見える」光の波長は、約390ナノメートルから770ナノメートルの範囲。これをミリメートルに直すと0.00039~0.00077ミリメートルとなる。人間の目には波長の短い順に紫、藍、青、緑、黄、橙、赤色に見える。光は電磁波の一種で、波長の違いによって、「紫外線」、「赤外線」、携帯電話やテレビ、ラジオの「電波」、電子レンジで弁当を暖めるのに使う「マイクロ波」、レントゲン写真を撮るのに使われる「X線」等がある。

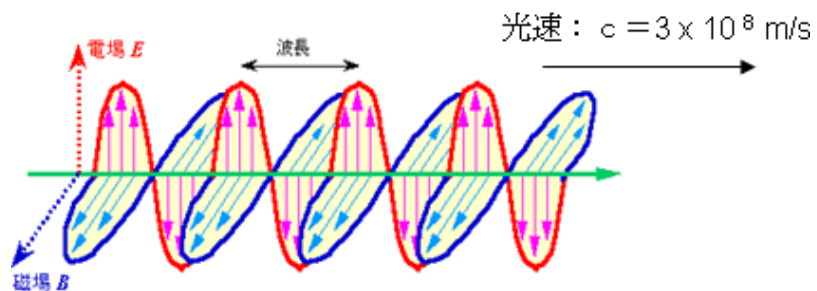


11. 光科学における応用物理

光・電磁波の周波数・波長とその使い方

「光は粒子と波の二重性を持っている」

光は波としての性質を有すると同時に、粒子としての性質も持っていることが、光電効果（1887年）やコンプトン効果（1927年）の実験、さらにはアインシュタインの光量子説（1905年）によって明らかとなった。光がエネルギー量子 $h\nu$ （ h はプランク定数）の単位で物質とエネルギーをやり取りするという考えは、量子力学の誕生に多大の貢献をはたした。波動-粒子の二重性は20世紀物理学における中心課題のひとつであり、またこの一見奇妙な光の性質を巧みに利用することによって、今日の光科学・技術の発展がもたらされた。



波動としての光： 電磁波

振動数 (ν)、波長 (λ)、速度 (c) : $c = \lambda \cdot \nu$ 回折、干渉、屈折



粒子としての光： 光量子 (光子、フォトン)

質量ゼロのエネルギーの塊

周波数 ν の1個の光子は $h\nu$ のエネルギーを持つ

エネルギー $E = h\nu$

運動量 $P = h/\lambda$

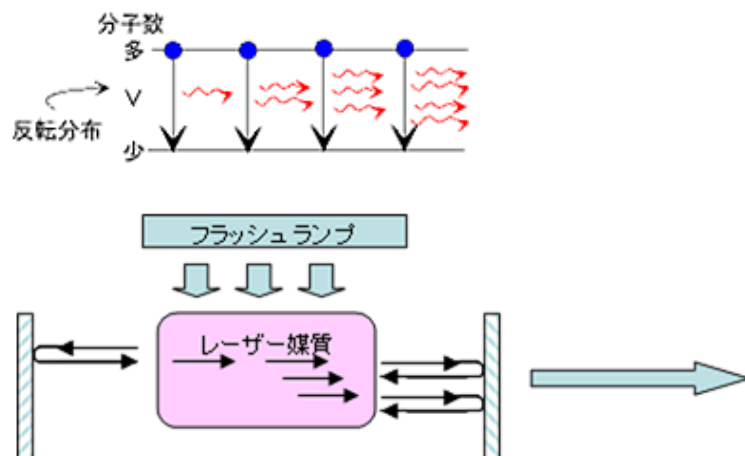
11. 光科学における応用物理

レーザー

レーザー（Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation）は、太陽や蛍光灯の光とは異なる優れた性質を備えている。1960年にアメリカのメイマン博士が世界で初めてルビーレーザーの発振をして以来、現在ではさまざまなレーザー装置が開発され、分析、加工、医療、通信などさまざまな分野で利用されている。

レーザーの原理

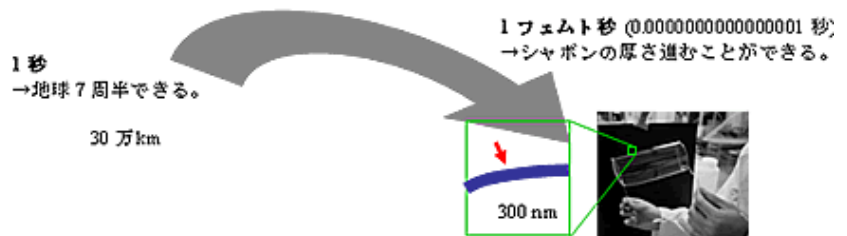
光や放電によって、エネルギーの高い状態の方が低い状態より分子の数の多い状態（反転分布）を作ります。最初の分子がまず自然放出で光を放出し、その光で誘導放出が生じます。これが繰り返されると、どんどん光の量が増えて（増幅）いきます。この光増幅を2枚の合わせ鏡（共振器）の中で起こします。すると、2枚の鏡を往復する光がどんどん増幅され、増幅した光が同じ位相で強く発生します。これをレーザー発振と言います。



レーザー光の特徴

- ・ 可干渉性(コヒーレント)
- ・ 指向性に優れている
- ・ 集光性
- ・ 高いエネルギー密度・パワー密度
- ・ 単色光
- ・ 短時間パルス光

フェムト秒レーザー

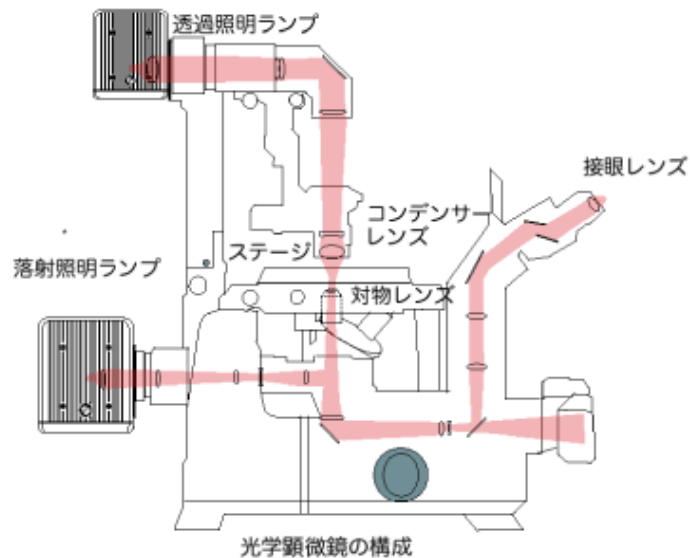


11. 光科学における応用物理

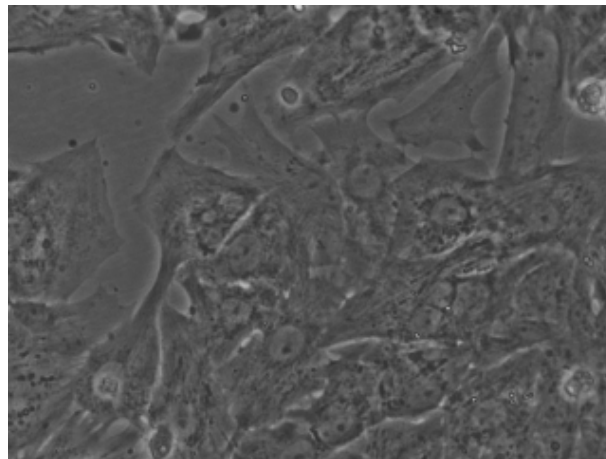
光で観る1：顕微鏡

顕微鏡は、対物レンズと接眼レンズの2つのレンズを使って試料を拡大して観察する、マイクロ領域の基盤技術である。この顕微鏡技術は半導体製造装置やCD、DVDなどの光記録装置にも応用されている。光を使う顕微鏡以外にも、電子線やX線等のより波長の短い波動を用いることで、ナノメートルスケールあるいは原子レベルの分解能が実現されている。

光学顕微鏡の構成



毛細血管の3次元観察像

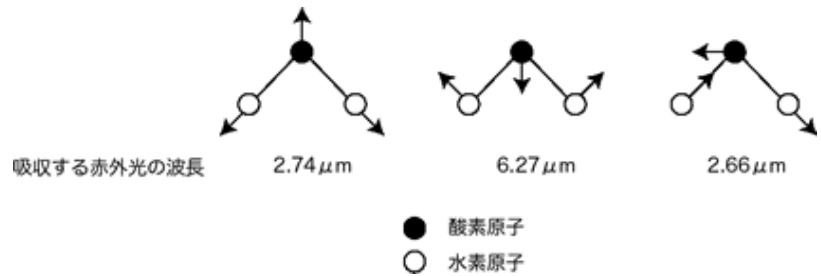


1.1. 光科学における応用物理

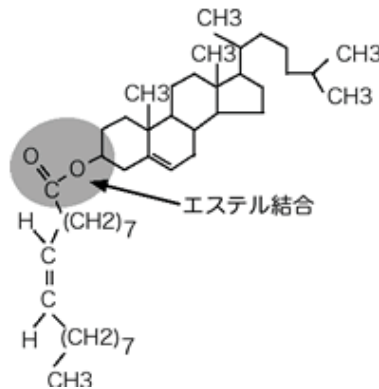
光で観る2：赤外分光分析

原子が互いに共有結合することで構成される分子は、共有結合部がバネとして働くことで振動をしている。この振動のエネルギーは赤外光（波長： $2.5\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ ）のもつエネルギー程度なので、赤外光を分子に照射すると、振動エネルギーに相当する赤外光だけを分子は吸収して、振動を始める。いろいろな波長の赤外光を分子に照射して、その透過率を測定することで、その分子の構造を特定することができる。

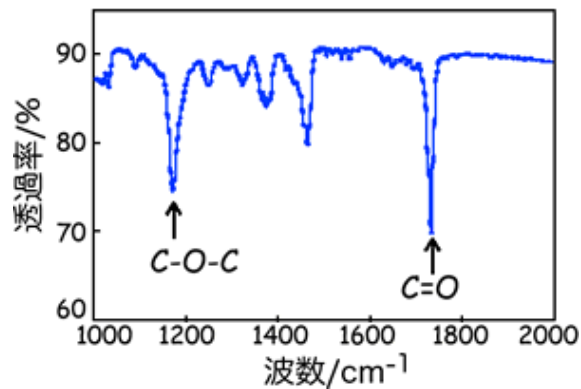
水分子の基準振動と吸収波長



オレイン酸コレステリル（動脈硬化の原因物質）



オレイン酸コレステリルの吸収スペクトル



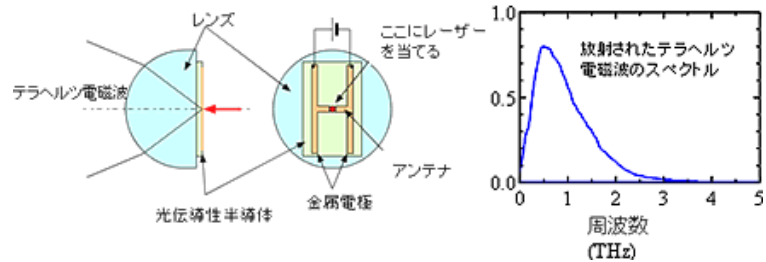
11. 光科学における応用物理

光で観る3：テラヘルツ電磁波の発生と応用

「テラヘルツ電磁波」は赤外線的一种であるが、発生するのも受信するのも難しかったため、これまであまり利用されていなかった。最近、レーザー技術を用いて強いテラヘルツ波が得られるようになり、その応用が注目されている。テラヘルツ電磁波には、1：プラスチック、紙、陶器などは良く通るが、水は通りにくく、金属は通らない、2：X線とは異なり、エネルギーが低いので人体に安全、などの性質がある。また、半導体中や超伝導体の電子の動き、物質の振動(フォノン)、ガスの回転運動、生体分子の振動などに敏感なため、いろいろな物質の性質を調べることができる。

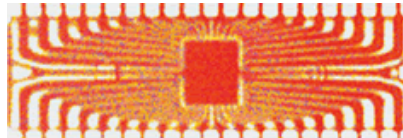
テラヘルツ波の発生

フェムト秒レーザーを使ってテラヘルツ電磁波を発生する

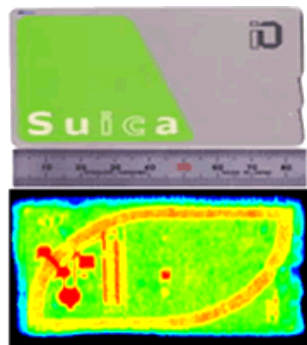


テラヘルツ電磁波で見たいろいろな物体

プラスチック中のIC



ICカード



歯



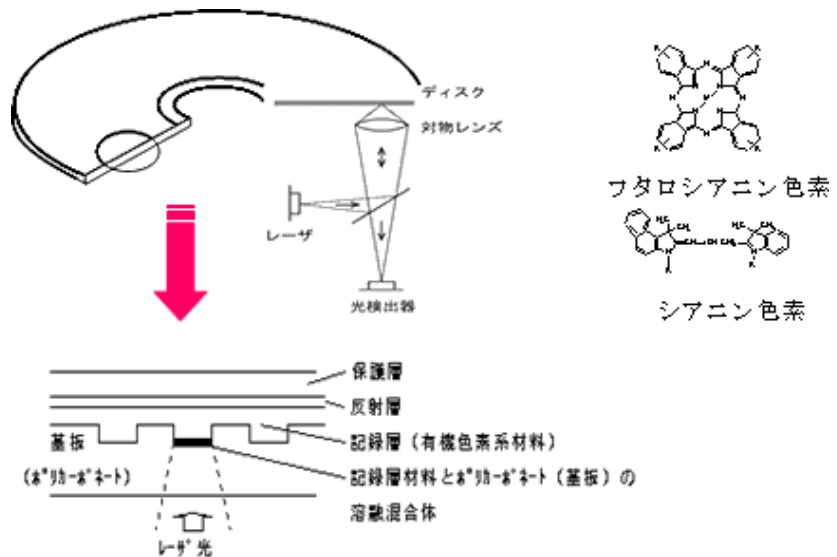
1.1. 光科学における応用物理

光で造る1：光メモリー

情報技術 (IT) の革新的発展の中、高密度記録へのニーズはとどまることを知らない。記録対象は、文書→画像→動画へと発展し、大容量かつ高速ストレージの記録媒体と技術が求められている。光 (レーザー) を使って情報を書き込み、読み出す光メモリーはこのようなニーズに応える記録装置として、DVDやCDなど身の周りの実用化されている。従来の平面 (2次元) の書き込みから、立体 (3次元) 的に情報を書くことで、より記憶容量を高めた3次元光メモリーの開発も進んでいる。

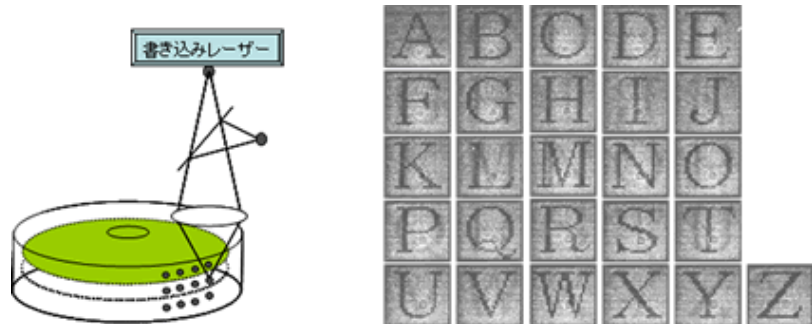
CD-R

記録材には有機色素が使われている。読み取り用よりも強いレーザー光によって相変化を誘起し色素の反射率を変化させる。この変化がビットに相当する。



3次元メモリー

3次元多層記録: 26 ページ (5 μm 間隔)

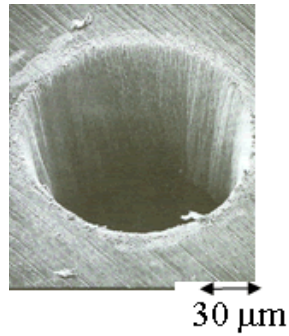


11. 光科学における応用物理

光で造る2：レーザーアブレーション加工

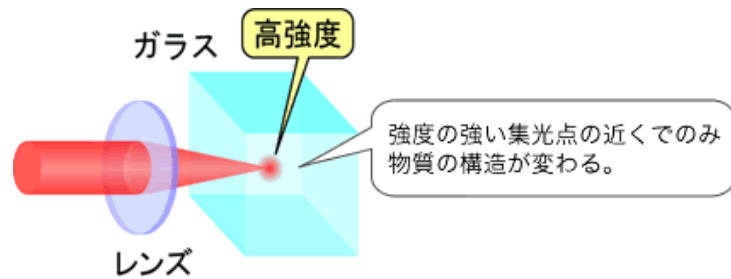
高強度・超短パルスレーザーを利用すると種々の固体材料の加工が可能となる。特に、フェムト秒（10⁻¹⁵秒）程度の短いパルス光の場合には、材料の一点に瞬時に光エネルギーを集中させることができるため、鋼鉄のような硬い材料の表面をナノメートルの精度で加工したり、透明なガラスの内部に加工することができる。こうした技術は最先端の微細加工や光メモリ、医療技術に広く応用されています。

鋼鉄のフェムト秒レーザー加工

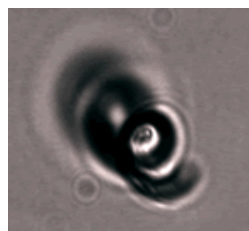


透明ガラスの内部加工

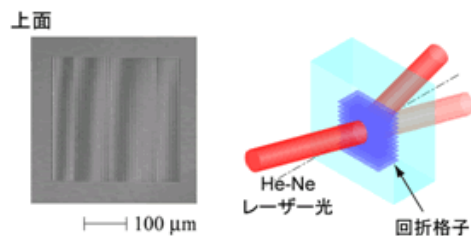
フェムト秒レーザー



ガラス内に作った3次元空孔



ガラス内部の回折格子とレーザー光の回折



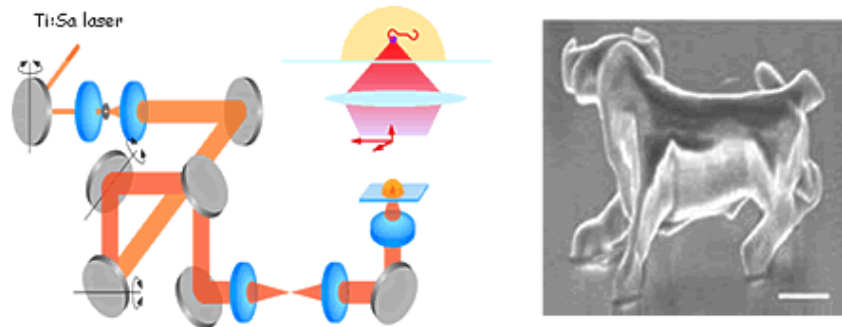
11. 光科学における応用物理

光で造る3：ナノ造形

光をエネルギー源としておこる化学反応を光反応という。レーザー光線の特徴の一つである高い集光性を利用すると、微小な空間だけを選択的に光反応させ、それを利用して微細な構造体を作製することができる。最近では、フェムト秒レーザーを使った多光子励起反応や、近接場光技術を駆使することによって、光の回折限界を超えた、ナノメートルの空間精度の光造形が可能となってきています。

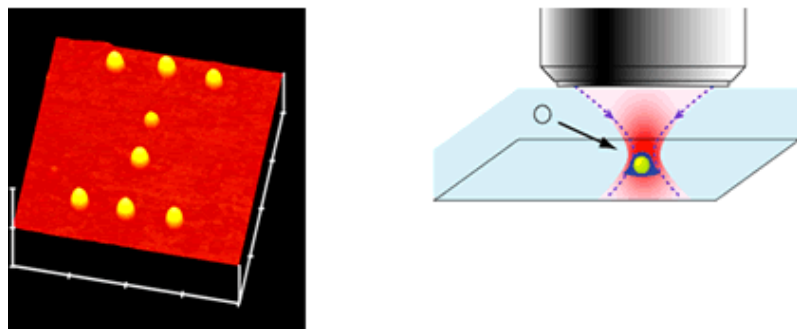
光造形

レーザーで樹脂を固めて作ったマイクロの牛



ナノ溶接

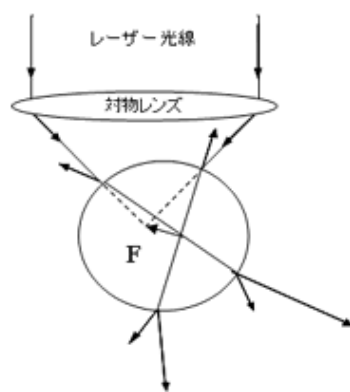
水中の金ナノ粒子をガラス板の表面に一粒ずつ接着し並べる



1.1. 光科学における応用物理

光で操る 1 : レーザーピンセット

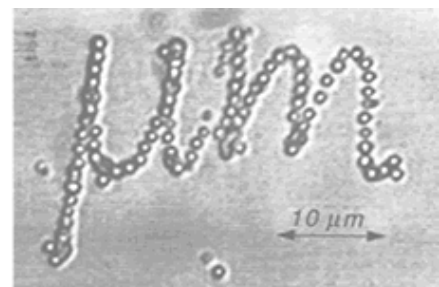
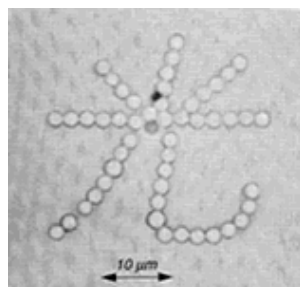
「光を物体に当てると力が働く」という現象は、ニュートンが17世紀に予見し、19世紀にはマクスウェルが光の電磁理論からこの力を証明した。この力はあまりに小さく（ 10^{-12} Nオーダー）、日常体感することはない。しかし、この極めて小さい光の力も微小な空間では無視できない存在となる。顕微鏡対物レンズを用いてレーザー光を急激に絞りに絞ることにより、水中のミクロンサイズの微粒子を集光位置に捕らえることができる。これを利用して微粒子を捕まえ、集め、並べる技術をレーザーマニピュレーションといい、化学やマイクロマシン、さらには生物学に应用されています。



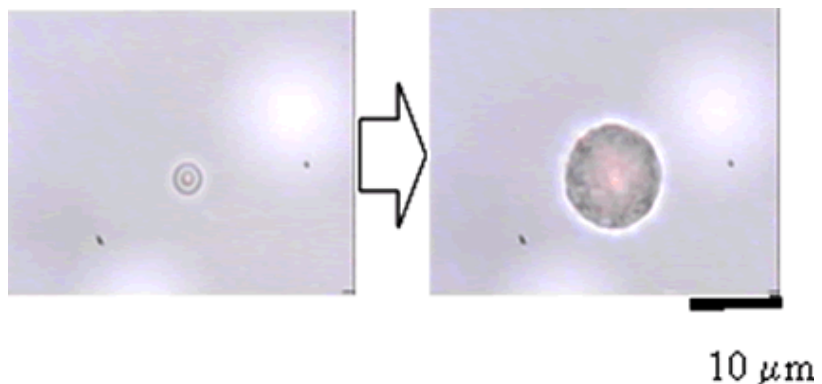
光が物体に当たり反射、屈折するとき光の進行方向が変わる。この現象は、光を粒子（フェトン）と考えると、光の運動量が変化することになる。光の運動量変化が物体に受け渡され、物体に力（放射圧）が働く。顕微鏡に集光したレーザー光と微粒子では（右図）、レーザーの集光位置に向かって力が働き、結果として微粒子を捕えることができる。

微粒子のレーザー操作

レーザー捕捉により、高分子微粒子を水中に並べて描いた文字



高分子ゲルの相転移

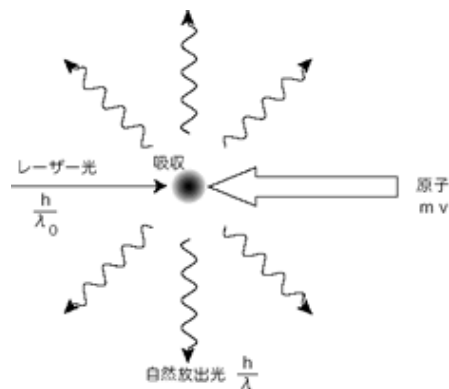


1.1. 光科学における応用物理

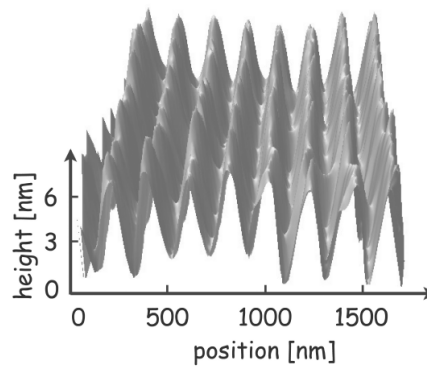
光で操る2：原子冷却

物質は低温状態にしても、その温度に見合った熱運動を続けている。気体状態では、熱運動により原子の吸収線を広げてしまうほどであるが、光の力学的作用（フォトンの運動量）を用いてこの熱運動をおさえる（冷却する）ことができる。下図に示すように熱運動している原子に次々と光を吸収させてその運動量を与えて減速させていくのである。現在では磁場と組み合わせることで、原子を 10^{-9}K という極低温状態にして閉じ込めることができ、ボーズアインシュタイン凝縮という特殊な量子状態を作り出すこともできる。

光による原子の減速（原理図： $\lambda_0 > \lambda$ ）



ナノ構造体の作製



1.1. 光科学における応用物理

光で操る3：化学反応のコヒーレント制御

フェムト秒レーザーの登場によって、分子内の原子核の動きが実時間でモニターできるようになってきた。化学反応、すなわち結合の切断と組み替え起こる様子を直接観察できる。さらにフェムト秒パルスの波束を制御することにより、化学反応を思いのまま操る手法が提案されている。

