

4. 光ピンセットの理論解析

浮田 宏生

4.1 光ピンセットの歴史

4.2 光ピンセットの原理

図 4.1 は光ピンセットの原理図で、(a)は対物レンズで集光されたレーザー光が透明微粒子の中心の上の部位を照射している。光線 a に着目すると、微粒子の表面で屈折し進行方向を変えるので光の運動量が変化する。この運動量変化により、微粒子の表面に垂直に光圧 F_{at} が作用する。出射点においても同様に光圧 F_{at} が作用する。これらの合力として、微粒子の中心には力 F_a が作用する。光線 b についても同様である。この結果、光圧 F_a , F_b の合力 F が上向き焦点に向く方向に作用し、重力と浮力の差と光圧 F が釣り合う位置で微

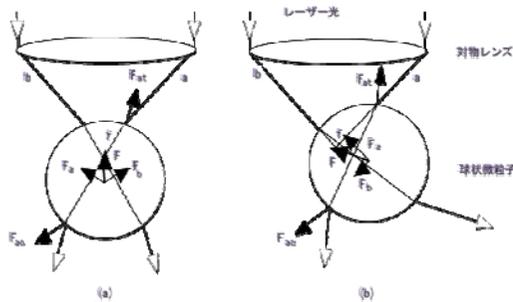


図 4.1 光ピンセットの原理

粒子は光トラップされる。

また、光軸からずれた位置にある微粒子を照射した同図 (b) の場合も、光トラップ力はレーザー光の焦点方向に作用し、微粒子は焦点付近でトラップされる。

4.3 光トラップ効率と計算方法⁽¹⁾

1 本の光線 P が球に入射する場合の光圧を解析する。

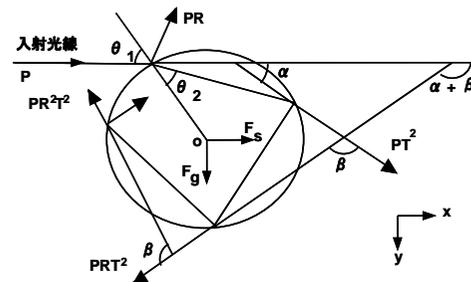


図 4.2 微小球に作用する光圧の計算方法

図 4.2 は、パワー P の光線が、入射角 θ_1 で球状微粒子に入射し、内部で反射を繰返しながら散乱するようすを示している。この光線によって発生する光圧 F_t を、入射光線に平行な成分 F_s と、それに垂直な成分 F_g の 2 つの成分に分解して積算する。 F_s , F_g はそれぞれ散乱力、勾配力と呼ばれ、次式で表される。ここで、 R は反射率、 T は透過率、 θ_2 は屈折角、 Q_s は散乱力の、 Q_g は

勾配力の光トラップ効率である。

$$F_s = [1 + R \cos 2\theta_1 - \frac{T^2 \{ \cos 2(\theta_1 - \theta_2) + R \cos 2\theta_1 \}}{1 + R^2 + 2R \cos 2\theta_2}] \frac{n_1 P}{c} = Q_s \frac{n_1 P}{c}$$

$$F_g = [R \sin 2\theta_1 - \frac{T^2 \{ \sin 2(\theta_1 - \theta_2) + R \sin 2\theta_1 \}}{1 + R^2 + 2R \cos 2\theta_2}] \frac{n_1 P}{c} = Q_g \frac{n_1 P}{c}$$

光トラップ効率の入射角依存性を解析すると、 Q_g が最大になる入射角は 71.8° になる (水中、ポリスチレン粒子)。このような入射角に相当する集光角を有する対物レンズは、開口数 NA が 1.25 以上の油浸になる。

4.4 ビームウエストの影響

4.5 重力による軸外トラップの影響⁽²⁾

- (1) A. Ashkin : Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime, *Biophysical Journal*, **61**, pp.569-582, 1992.
- (2) H. Ukita et al: Resolving discrepancy between theoretical and experimental optical trapping forces using effects of beam waist and trapping position displacement due to gravity, *Optical Review* **13**, 6, pp.436-442, 2006.