ナノ振動型レーザトラップにおける プローブ周囲流体解析シミュレータの構築*

田中 晋平^{*1}, 高谷 裕浩^{*2}, 林 照剛^{*2}

Building an Ambient Fluid Analysis around nm Oscillated Laser Trapping Probe

Shimpei TANAKA^{*3}, Yasuhiro TAKAYA and Terutake HAYASHI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In order to measure the 3D shape of microcomponents, a novel nano-CMM system has been developed based on an oscillated probing technique, which uses an optically trapped particle. The trapped particle is laterally oscillated at the focal plane of the objective. The frequency response of the oscillated particle typically agrees with the spring-mass-damper model. However the response disagrees with the theoretical curve of the conventional model equation in the range of high frequency. It is considered the difference between experiments and the model equation is caused from the numerical error for the fluid effect, which is applied on condition of creeping flow past a sphere. In this report, we construct a fluid simulation using SMAC method that calculates fluid resistance against an oscillating sphere in noninertial frame of reference. The fluid resistance damp the motion of an oscillating sphere pulled toward focal spot and spring-mass-damper system can be processed with the use of simulation.

Key Words: Fluid Resistance, Laser Trapping, SMAC Method, Noninertial Frame of Reference

1. 結 言

レーザトラップとは光放射圧を利用して μm オーダの微小な物体をレーザで捕捉・操作する技術である。筆者らは、この技術を応用し、レーザトラップされた微粒子をセンシングプローブとする光放射圧プローブ式ナノ CMM を開発している。光放射圧プローブ式ナノ CMM では、試料表面近傍で励振されるプローブ振動特性の変化を検出することで座標計測が行われ、大気中で nm オーダでの計測を行う⁽¹⁾。プローブをさらに高度化するには振動するプローブまわりの流体解析が不可欠であり、レーザトラップされた微粒子の周囲流体による計測の不確かさ評価を行うことで、計測の信頼性を向上させることができる。本報では、振動型レーザトラッピングプローブに SMAC 法を用いた流体解析シミュレータを適用し、実験環境でのパラメータを用いてプローブ球挙動解析をした結果について述べる。

2. 微粒子振動モデル

強制振動型レーザトラップでは図 1 のようにプローブ球を振動させ、周波数解析することでノイズの分離をはかっている⁽²⁾。プローブ球の運動モデルを考えると、振動状態にあるプローブ球は光放射圧によるバネの作用および周囲流体の粘性によるダンパの作用によって次式のパネーダンパ系の運動方程式にモデル化することができる。

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + k(x - A \sin 2\pi ft) = F(t) \quad (1)$$

Fig.1 Schematic of lateral oscillation of probe

Fig.2 Frequency response (Amplitude ratio)

* 原稿受付 2009年3月3日。

^{*1} 学生員, 大阪大学 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻。

E-mail: takaya@mech.eng.osaka-u.ac.jp

ここで m は捕捉した微粒子の質量, x は微粒子の振動方向の位置, D は周囲流体の粘性抵抗係数, k は振動方向に対するバネ定数, A はビームスポットの励振振幅, f は励振周波数, $F(t)$ は周囲流体から受けるランダム力である. 流体中において低速で運動する球体に対して用いられるストークスの法則が適用できると仮定すると, 周囲流体の粘性抵抗係数には次式で表されるストークスの抵抗係数が用いられる.

$$D = 6\pi\mu r \quad (2)$$

ここで r は微粒子の半径, μ は周囲流体の粘度を表す. 周囲流体のランダム力に対して正弦波変位励振を与えるとき, $F(t)$ による微粒子の位置変化は無視することができる. 定常振動の解を

$$x = X \exp \{i(2\pi ft) - \varphi\} \quad (3)$$

と仮定すると, 振幅 X と位相遅れ φ は共振周波数 f_n を用いて次のように表される.

$$X = \frac{f_n^2}{\sqrt{(f_n^2 - f^2)^2 + (Df/2\pi m)^2}} A \quad (4)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{f_n^2 - f^2}{\sqrt{(f_n^2 - f^2)^2 + (Df/2\pi m)^2}} \quad (5)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

以上のモデル化により, 実験結果とのフィッティングを行うと図2のようになり, 共振周波数近傍においてモデル式と十分一致しておらず, より適切なフィッティングが可能であると考えられる. モデル式から考えた場合, 誤差の要因としては質量 m , 粘性抵抗係数 D , バネ定数 k の3つが考えられる. 物体が流体内を加速度運動するとき, 見かけ上物体の質量が増加し, その影響は付加質量というもので表される. レーザトラップではプローブ球の密度に比べて, 周囲流体の大気の密度が十分小さいため, 付加質量による m への影響は無視できるものと考えられる. バネ定数 k については, 計測に用いられる振幅 500 nm 以内では一定とみなせることがわかっている⁽³⁾. 粘性抵抗 D の影響については, 振動状態にあるプローブ球の状態を考慮すると式(2)によるモデル化では不十分であると考えられ, 本研究ではより現象を表した流体評価を行うため

に, プローブ球まわりの流体解析を行う.

3. 流体解析シミュレータ

3・1 数値計算法および計算条件 プローブ球まわりに展開した計算格子 (格子点 $20 \times 40 \times 20$) の一部を図3に示す. 図3では原点にプローブ球まわりの格子を配しており, 半径 r 方向に格子が指数関数的に広がっているを表している. 流体の数値計算法には非慣性系における SMAC 法を用いた⁽⁴⁾. 空間差分法についてはコロケート格子を用いた2次精度中心差分, 時間発展については, 対流項は2次精度アダムスーバッシュフオース法, 粘性項は克蘭ク-ニコルソン法を用いた. 内部(球側)境界条件は, 物体表面として滑りなし条件, 圧力勾配なしとした. 一様流中の球に働く流体抵抗解析では, 流入境界は流速 U が一様に流入し, 流出境界では対流流出条件を適用した. 圧力境界条件としてはノイマン条件を用いた. プローブ球振動時の解析では, 計算領域が十分広いものとして流入境界では流速0とし, 流出境界では対流流出条件を用いた. ただし, 流入・流出境界条件は球の振動方向に応じて変化するようにした. 圧力境界条件としてはノイマン条件を適用した.

3・2 シミュレータ妥当性の検証 レイノルズ数が1より小さいとき, 理論では一様流中における球に働く流体抵抗は式(2)で表され, 抵抗係数は $c_D = 24/\text{Re}$ となる. この式を用いて, シミュレータの妥当性を検証する. 図4に $\text{Re} = 1.673 \times 10^4$ のときの流れ場を, 図5に一様流中の球における理論による流体抵抗と数値解析による流体抵抗の比較を示す. 流体は x の正方向に流れるものとしており, 図4(a)から流速が x の正方向に生じ, 球との摩擦によって流速が変化していることがわかる. 図4(b)から球の前縁では圧力が高く, 後縁では低くなっていることがわかる. これらの結果は一般的な一様流中での流れ場の状態と一致している. 図5では理論値と大変良く一致しており, 十分信頼性の高いシミュレータであることがわかる.

Fig.3 Numerical grid

(a) Velocity field

(b) Pressure field

Fig.4 Uniform stream around a sphere

Fig.5 Drag coefficient in uniform stream

Fig.6 Displacement of oscillating focal spot and sphere

3・3 周波数応答解析

振動するプローブ球まわりの流体解析を行った。結果の一例として、プローブ球の直径 $d = 8 \text{ } [\mu\text{m}]$ 、周囲流体密度 $\rho = 1.205 \text{ } [\text{kg/m}^3]$ 、粘性係数 $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ } [\text{Pa}\cdot\text{s}]$ 、バネ定数 $k = 1.22 \times 10^4 \text{ } [\text{N/m}]$ 、焦点振幅 $A = 500 \text{ } [\text{nm}]$ 、振動数 $f = 2400 \text{ } [\text{Hz}]$ のときの計算結果を図6に示す。図6は振動するレーザースポットとプローブ球の振動方向での変位を表している。レーザースポットに追従して光放射圧で球が引き寄せられ、共振することで振幅が大きくなり、周囲流体の抵抗によって一定となっていることがわかる。2400 Hzにおいては、従来のストークス抵抗を用いて計算される振幅比は5.91となっていたが、流体解析の結果では4.84となり、実験結果の値5.07に近づき、誤差が17%から4.5%へと減少している。実験結果との比較を考えた場合、従来の流体モデルを用いたフィッティングよりも流体解析を用いたプローブ解析のほうがより高精度に計算できていることがわかる。

4. まとめと今後の方針

SMAC法を用いたプローブ球まわりの流体解析を行った。2400 Hzにおける実験結果とシミュレーション結果を比較すると、従来の流体モデルでの値に比べて、振幅比、位相遅れともに誤差5%以内と改善され、大変精度の良い解析ができていることがわかった。このシミュレータに実験での周囲流体の条件を組み込むことで、温度による周囲流体の密度や粘度変化といった実際の実験では計測が難しいパラメータについても計測への流体影響を調べることができ、計測状態におけるプローブ球に及ぼす影響をより詳細に解明することができる。

文 献

- (1) Y. Takaya, K. Imai, S. Dejima and T. Miyoshi, Nano-Position Sensing Using Optically Motion-controlled Microprobe with PSD Based on Laser Trapping Technique, *Annals of the CIRP*, 54, 1 (2005), pp. 467-470.
- (2) B.A. Nemet, Y. Shabtai, M.C. Golomb : Imaging microscopic viscosity with confocal scanning optical tweezers, *Opt. Lett.*, vol.27, 4, 264(2002)
- (3) T. Hariyama, Y. Takaya and T. Miyoshi, New Mass Measurement Method of Aerosol Particle Using Vibrating Probe Particle Controlled by Radiation Pressure, *Proceeding of SPIE*, Vol. 5993, 599308 (2005)
- (4) S. Takeuchi, T. Yamazaki, T. Kajishima : Study of Solid-Fluid Interaction in Body-Fixed Non-Inertial Frame of Reference, *J. Fluid Science and Technology*, Vol. 1, No. 1 pp.1-11 (2006)