

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4867017号  
(P4867017)

(45) 発行日 平成24年2月1日(2012.2.1)

(24) 登録日 平成23年11月25日(2011.11.25)

(51) Int. Cl.	F I
<b>B 8 2 B 3/00 (2006.01)</b>	B 8 2 B 3/00
<b>B 0 1 J 19/08 (2006.01)</b>	B 0 1 J 19/08 D
<b>F 0 3 G 7/00 (2006.01)</b>	F 0 3 G 7/00 H
<b>F 0 4 B 9/00 (2006.01)</b>	F 0 4 B 9/00 B
<b>B 8 2 Y 15/00 (2011.01)</b>	B 8 2 Y 15/00

請求項の数 4 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2007-526903 (P2007-526903)  
 (86) (22) 出願日 平成18年7月28日 (2006.7.28)  
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2006/314955  
 (87) 国際公開番号 W02007/013579  
 (87) 国際公開日 平成19年2月1日 (2007.2.1)  
 審査請求日 平成20年4月11日 (2008.4.11)  
 (31) 優先権主張番号 特願2005-219787 (P2005-219787)  
 (32) 優先日 平成17年7月29日 (2005.7.29)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 504174135  
 国立大学法人九州工業大学  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号  
 (74) 代理人 100108660  
 弁理士 大川 譲  
 (72) 発明者 堀江 知義  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号 国立大学法人九州工業大学内  
 (72) 発明者 二保 知也  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号 国立大学法人九州工業大学内

審査官 山口 剛

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 カーボンナノチューブ駆動機構

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

円筒形カーボンナノチューブに対して、定常磁場を印加する手段と、変動磁場を印加する手段を備え、変動磁場を印加することにより、前記カーボンナノチューブ内に渦電流を発生させ、かつ、向きが変化する前記渦電流と、前記定常磁場により電磁力を発生させることにより、前記カーボンナノチューブを駆動することから成るカーボンナノチューブ駆動機構。

【請求項2】

前記定常磁場を印加する手段は、定常磁場を前記カーボンナノチューブに対して、その中心軸の一方向から印加すると共に、変動磁場を印加する手段は、前記カーボンナノチューブに対して、その側面の一方向から印加することにより、変動磁場の向きと同じ方向の電磁力を発生させ、前記カーボンナノチューブを振動させて、ナノアクチュエータとして機能させる請求項1に記載のカーボンナノチューブ駆動機構。

【請求項3】

前記定常磁場を印加する手段は、定常磁場を前記カーボンナノチューブに対して、その側面の一方向から印加すると共に、変動磁場を印加する手段は、カーボンナノチューブの側面に対して、前記定常磁場と同一方向、或いは逆方向に変動する磁場を印加することにより、前記定常磁場およびカーボンナノチューブの中心軸とは直角方向の電磁力を発生させ、前記カーボンナノチューブの断面を伸縮させて、ナノポンプとして機能させる請求項1に記載のカーボンナノチューブ駆動機構。

## 【請求項 4】

前記定常磁場を印加する手段は、定常磁場を前記カーボンナノチューブに対して、その中心軸の一方向から印加すると共に、変動磁場を印加する手段は、カーボンナノチューブの中心軸の一方向から、前記定常磁場と同一方向、或いは逆方向に変動する磁場を印加することにより、カーボンナノチューブの半径方向の電磁力を発生させ、前記カーボンナノチューブの断面を伸縮させることにより中心軸方向の長さも伸縮することを利用して、ナノプッシャーとして機能させる請求項 1 に記載のカーボンナノチューブ駆動機構。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、ナノマシンやナノアクチュエータといったナノスケールの超微小機械の駆動機構に適用することのできるカーボンナノチューブ（CNT）駆動機構に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、分子や原子を移動操作させるナノスケールのマニピュレータやマイクロマシン、ナノマシンといった超小型機械の技術開発が盛んに行われている。しかし、これらの機械にはナノスケールの駆動機構の開発が必要となる。

## 【0003】

このナノテクノロジーを支える基盤材料のひとつにカーボンナノチューブ（Carbon Nano Tube: CNT）がある。1991年に飯島により発見されたCNTは、炭素原子のみで構成される直径が約1nm、長さが約1 $\mu$ mの円筒形の細長い材料である（非特許文献1参照）。CNTの最大の特徴として多種多様な構造が存在し、構造によって金属や半導体の性質を示すことが挙げられる。またその他の特徴として、強度が高く弾力性があることや導電率が高いことが挙げられる。これらの性質を利用して、材料の原子構造を直接観ることができるナノマニピュレータや、原子や分子を直接操作することができるナノピンセット（非特許文献2参照）などが開発されている。

## 【0004】

中山喜萬（大阪府立大学）はナノピンセットの開発を行っている（特許文献1参照）。その結果、2本のCNTに電圧を印加するとピンセットは閉じて行き、4.5V以上で全閉し、電圧を取り除くと元に戻ることを明らかにしている。

## 【特許文献1】特開2002-172600号公報

【非特許文献1】斎藤理一郎、篠原久典、“カーボンナノチューブの基礎と応用”、培風館、2003

【非特許文献2】S. Akita and Y. Nakayama, "Nanotweezers consisting of carbon nanotube operating in an atomic force microscopy", APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol.79, pp.1691-1693, 2001.

【非特許文献3】T. Horie and T. Niho, "Electromagnetic and Mechanical Interaction Analysis of a Thin Shell Structure Vibration in an Electromagnetic Field", Int.J. of Applied Electromagnetics in Material, 4, 1994, pp.363-368

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

これまでのカーボンナノチューブを用いたナノスケールの駆動機構は、カーボンナノチューブに電圧を印加するための配線を必要とし、また、大きな駆動力を得るためには強い電圧を印加する必要があるが、このときには駆動機構に対して絶縁破壊を防ぐための対策も必要となる。さらに、これまでのカーボンナノチューブを用いた駆動機構の動作は、一方向の屈曲動作のみといった単純な動作である。

## 【0006】

そこで、本発明の目的は、カーボンナノチューブに対して、配線などを必要とせず非接触でエネルギーを供給することによって動作し、また、その動作も全方向屈曲動作や伸

10

20

30

40

50

縮動作といった運動自由度を持ち、さらに、駆動力や動作速度も制御できる強い駆動力が発生可能なナノスケールの駆動機構を実現することである。

【0007】

ナノアクチュエータやナノマニピュレータといったナノマシンの開発には、ナノサイズ  
の材料を駆動させる必要がある。本発明は、CNTが高導電性材料であることに注目して  
、従来技術とは異なる駆動原理に基づき、電磁力を用いたCNT駆動機構を提供する。な  
お、駆動機構の妥当性を検討するため有限要素法による電磁構造連成解析を行なう。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明のカーボンナノチューブ駆動機構は、円筒形カーボンナノチューブに対して、定  
常磁場を印加する手段と、変動磁場を印加する手段を備え、変動磁場を印加することによ  
り、カーボンナノチューブ内に渦電流を発生させ、かつ、向きが変化する渦電流と、定常  
磁場により電磁力を発生させることにより、カーボンナノチューブを駆動することから成  
る。

10

【0009】

また、定常磁場を印加する手段は、定常磁場を前記カーボンナノチューブに対して、そ  
の中心軸の一方向から印加すると共に、変動磁場を印加する手段は、前記カーボンナノチ  
ューブに対して、その側面の一方向から印加することにより、変動磁場の向きと同じ方向  
の電磁力を発生させ、カーボンナノチューブを振動させて、ナノアクチュエータとして機  
能させる。

20

【0010】

また、定常磁場を印加する手段は、定常磁場を前記カーボンナノチューブに対して、そ  
の側面の一方向或いはその中心軸の一方向から印加すると共に、変動磁場を印加する手段  
は、カーボンナノチューブの側面或いは中心軸の一方向から、定常磁場と同一方向、或い  
は逆方向に変動する磁場を印加することにより、定常磁場およびカーボンナノチューブの  
中心軸とは直角方向或いはカーボンナノチューブの半径方向の電磁力を発生させ、カーボ  
ンナノチューブの断面を伸縮させて、ナノポンプとして機能させる、或いは、断面を伸縮  
させることにより中心軸方向の長さも伸縮することを利用して、ナノプッシャーとして機  
能させる。

【発明の効果】

30

【0011】

本発明によれば、従来技術とは異なる駆動原理に基づき、電磁力を用いたCNT駆動機  
構を提供することが可能となる。これによって、ナノサイズ  
の材料を駆動させることができるナノアクチュエータやナノマニピュレータといったナノマシンを開発することが可能  
となる。

【0012】

本発明は、カーボンナノチューブに変動磁場を印加することにより生じる電流と磁場によ  
って生じる誘導電磁力を駆動力として用いるため、駆動のためのエネルギーを非接触で  
供給して動作させることができ、カーボンナノチューブに印加する磁場の方向により、曲  
げ動作や伸縮動作を行ない、また、カーボンナノチューブに印加する磁場の強さや変動速  
度を変化させることにより、駆動力や動作速度を制御できる。

40

【0013】

また、本発明は、カーボンナノチューブの高い導電性によりカーボンナノチューブに大  
きな電流を発生させることができるため、大きな駆動力を発生させることが可能となる。  
さらに、微小領域においては強い磁場を容易に得られるため、この磁場を用いることによ  
り大きな駆動力を発生させることが可能となる。

【0014】

ナノマシンやマイクロマシンは材料創成、超微細加工、ナノ・マイクロ医療をはじめと  
する幅広い分野への応用が期待される。しかし、その駆動機構はこれらのマシンよりも小  
さいサイズで、さらに、駆動力や動作速度の制御が可能である必要がある。本発明のカー

50

ボンナノチューブ駆動機構は、これらの条件を満足するため、ナノマシンやマイクロマシンの駆動機構として採用される可能性がある。また、分子や原子といった極微小サイズのさまざまな技術の応用には、これらのサイズの物体を搬送する機構が必要であり、本発明はこれら極微小サイズの物体の搬送機構としての応用が期待される。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】ナノアクチュエータの駆動原理を示す図である。

【図2】それ自体公知のCNTの立体構造を説明する図である。

【図3】電磁構造連成現象の流れを示す図である。

【図4】ナノアクチュエータの構成を説明する図である。

10

【図5】ナノポンプの動作原理を示す図である。

【図6】ナノポンプの構成を説明する図である。

【図7】ナノプッシャーの動作原理を示す図である。

【図8】ナノプッシャーの構成を説明する図である。

【図9】ナノサイズ搬送機構の動作原理を示す図である。

【図10】解析モデルを示す図である。

【図11】円筒部とふた部の材料定数を示す表である。

【図12】変動磁場および定常磁場の向きと拘束条件についてそれぞれ解析を行う解析ケースを示す表である。

【図13】円筒側面を固定し定常磁場をz軸方向に与えたときのP点およびQ点(図10参照)のx軸方向の変位を示す図である。

20

【図14】上下に振動していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図15】円筒左端を固定し、定常磁場をz軸方向に与えたときのP点およびQ点のx軸方向の変位を示す図である。

【図16】上下に振動していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図17】円筒側面を固定し、定常磁場をx軸方向に与えたときのP点およびQ点のx軸方向の変位を示す図である。

【図18】断面方向に変形していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図19】円筒左端を拘束し、定常磁場をx軸方向に与えたときのP点およびQ点のx軸方向の変位を示す図である。

30

【図20】断面方向に変形していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図21】円筒左端を拘束し、変動磁場および定常磁場をz軸方向に与えたときのP点およびQ点のz軸方向の変位を示す図である。

【図22】伸縮変形していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図23】解析を行う各ケース毎の長さ及び分割数を示す表である。

【図24】円筒左端を拘束し定常磁場をz軸方向に与えたときのP点のx軸方向の変位を示す図である。

【図25】上下に振動していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図26】円筒左端を拘束し、定常磁場をx軸方向に与えたときのP点のx軸方向の変位を示す図である。

40

【図27】断面方向に変形していることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

【図28】解析モデルを示す図である。

【図29】変動磁場の周波数及び解析の時間刻み幅を示す表である。

【図30】横軸に変動磁場の周波数、縦軸にQ点におけるx軸方向の最大変位量をとったグラフである。

【図31】変動磁場の周波数が30MHzのときの円筒の変形を示す図である。

【図32】ナノスケール搬送機構の解析モデルを示す図である。

【図33】カーボンナノチューブの先端の変位および軌跡を示す図である。

【図34】カーボンナノチューブの先端が円運動をしていることが分かる円筒全体の変形を示す図である。

50

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0016】

以下、ナノアクチュエータに適用した本発明の第1の実施形態のCNT駆動機構について、ナノアクチュエータの駆動原理を示す図1を参照して、説明する。図示のナノアクチュエータは、電磁力を用いて、CNTを上下に振動させる機構を有している。

1. 図1(A)のように置かれた円筒形CNTに対して、中心軸の一方向から(図中の左から)定常磁場を与える。

2. CNTに対して、側面の一方向から(図中の下から)変動磁場を与えると、CNT内に渦電流が発生する。

3. この渦電流と定常磁場により電磁力が生じ、円筒形CNTの長さ方向両側の一方(図中のa点)は上方向に、他方(図中のb点)は下方向に変形する(図1(B))。

4. ここで変動磁場を逆向きに与えると、CNT内の渦電流が逆向きに流れる(図1(C))。

5. この渦電流と定常磁場により電磁力が生じ、円筒形CNTの長さ方向両側の一方(図中のa点)は下方向に、他方(図中のb点)は上方向に変形する(図1(D))。

## 【0017】

変動磁場を与える向きを周期的に換えることにより、CNTは上下に振動することから、この機構はナノアクチュエータとしての機能を有することになる。以下、このナノアクチュエータ機能について、さらに説明する。

## 【0018】

図2は、それ自体公知のCNTの立体構造を説明する図である。CNTは、図示したように、炭素原子だけから構成される円筒形の材料である。円筒内は真空となっている。CNTの直径は約1nm( $10^{-9}$ m)、長さが約1 $\mu$ m( $10^{-6}$ m)と極小で細長い形状である。これは光の波長(1 $\mu$ m)より小さく、遺伝子の大きさに匹敵する。また円筒面は黒鉛(グラファイト)の六方格子からなる。CNTは円筒の巻方によって多彩に存在し、この立体構造によって金属や半導体の性質を示す。同じ物質が金属にも半導体にもなることがCNTの最大の特徴である。

## 【0019】

炭素の結合は原子間の結合の中で最も強いため、炭素のみで構成されるCNTの引張り強度は材料中最大(10GPa~)である。この値は剛鉄(~2GPa)の数倍の大きさである。

## 【0020】

また、CNTは、電気的特性として、電流密度が高く電気輸送量が大きいという特徴、及び、熱的性質として、熱伝導性がよくまた耐熱性に優れている(空气中:750度)という特徴を有している。

## 【0021】

図3は、CNTに生じる電磁構造連成現象の流れを示す図である。電磁構造連成現象とは、導電性構造物に変動磁場をかけることにより発生する渦電流と定常磁場による電磁力と、物体の変形速度と定常磁場による速度起電力が、構造物や構造物の渦電流に影響を与える現象である。

## 【0022】

図示したように左端を固定した円筒状の導電性構造物を例に、電磁構造連成現象の流れを説明する

1. 導電性構造物に定常磁場 $B_0$ を与える(図3(A))。

2. 構造物に変動磁場

## 【0023】

## 【数1】

$$\dot{B}^{ex}$$

## 【0024】

を与えると、構造物に渦電流 $J$ が発生する(図3(B))。

10

20

30

40

50

3. 定常磁場  $B_0$  とそれに垂直な渦電流成分により、 $J \times B_0$  の電磁力が生じ構造物は変形する (図3 (C))。

4. この変形による

【0025】

【数2】

変形速度  $\dot{u}$  と定常磁場  $B_0$  により  $\dot{u} \times B_0$

【0026】

の速度起電力が生じる (図3 (D))。

10

5. この速度起電力により、構造物の渦電流が逆方向に流れる (図3 (E))。

6. この渦電流  $J$  と定常磁場  $B_0$  により、 $J \times B_0$  の電磁力が生じ、構造物の変形を抑えようとする (図3 (F))。

【0027】

本発明のCNT駆動機構は、このような電磁構造連成現象を利用して、CNTを駆動する。

【0028】

図4は、ナノアクチュエータの構成を説明する図である。カーボンナノチューブCNTは、その片端を拘束して配置される。このCNTに対して、中心軸の一方側 (例えば、拘束端側) から定常磁場を与え、かつ、側面の一方向から変動磁場を与える。これによって、前述したように、CNT内に発生した渦電流と定常磁場により電磁力が生じ、円筒形CNTの先端側は一方向に変形する。変動磁場を逆向きに与えることにより、電磁力が反対方向になり、円筒形CNTの先端側は他方向に変形することになる。このようにして、CNTの先端側に固定されたナノサイズ駆動対象物を、上下に振動させることが可能となる。

20

【0029】

次に、ナノポンプに適用した本発明の第2の実施形態のCNT駆動機構について、ナノポンプの動作原理を示す図5を参照して、説明する。図示のナノポンプは、電磁力を用いて、CNTの断面を伸縮させる機構を有している。

1. 図5 (A) のように置かれた円筒形CNTに対して、円筒形側面の一方向から (図中の下から) 定常磁場を与える。

30

2. CNTに定常磁場と同じ方向から変動磁場を与えると、CNT内に渦電流が発生する。

3. この渦電流と定常磁場により、定常磁場およびCNTの中心軸と直角方向に電磁力が生じる。これによって、定常磁場およびCNTの中心軸と直角方向の両側面 (図中の  $c$  ,  $c'$  点) が引張られ変形する (図5 (B))。

4. ここで変動磁場を逆向きに与えると、CNT内の渦電流が逆向きに流れる (図5 (C))。

5. この逆向きの渦電流と定常磁場により、図5 (B) とは逆方向の電磁力が生じ、定常磁場およびCNTの中心軸と直角方向の両側面は圧縮され、変形する (図5 (D))。

40

【0030】

このように、定常磁場と変動磁場を同じ方向から与え、変動磁場を与える向きを周期的に換えることにより、CNTの断面は伸縮することから、この機構はナノポンプとしての機能を有することになる。

【0031】

図6は、ナノポンプの構成を説明する図である。図示のように配置された円筒形カーボンナノチューブCNTに対して、変動電流発生装置からコイルに電流を流すことにより円筒形側面の一方向から変動磁場を与える。また、この変動電流発生装置から、一定の直流電流を重畳して流すことにより、同じコイルから同時に定常磁場を発生させることができる。これによって、前述したように、CNT内に発生した渦電流と定常磁場により、定常

50

磁場およびCNTの中心軸と直角方向に電磁力が生じる。これによって、定常磁場およびCNTの中心軸と直角方向の両側面が引張られ変形する。また、変動磁場を逆向きに与えることにより、CNT内の渦電流が逆向きになり、CNTの両側面は圧縮され、変形することになる。このようにして、電磁力を用いて、CNTの断面を伸縮させることにより、円筒形CNT内部のナノサイズ移動対象物を移動させることができるナノポンプとして機能する。

#### 【0032】

次に、ナノプッシャーに適用した本発明の第3の実施形態のCNT駆動機構について、ナノプッシャーの動作原理を示す図7を参照して、説明する。図示のナノプッシャーは、電磁力を用いて、CNTの断面を伸縮させることにより中心軸方向の長さを伸縮させる機構を有している。

1. 図7(A)のように置かれた円筒形CNTに対して、円筒形中心軸の一方向から(図中の左から)定常磁場を与える。

2. CNTに定常磁場と同じ方向から変動磁場を与えると、CNT内に渦電流が発生する。

3. この渦電流と定常磁場により、CNTの半径方向外向きの電磁力が生じる。これによって、CNTの断面が大きくなるため、これに伴いカーボンナノチューブが縮む(図7(B))。

4. ここで変動磁場を逆向きに与えると、CNT内の渦電流が逆向きに流れる(図7(C))。

5. この逆向きの渦電流と定常磁場により、図7(B)とは逆方向の電磁力が生じ、CNTの断面が圧縮されるため、これに伴いカーボンナノチューブが伸びる(図7(D))。

#### 【0033】

このように、定常磁場と変動磁場を同じ方向から与え、変動磁場を与える向きを周期的に換えることにより、CNTの断面が伸縮することによって中心軸方向の長さが伸縮することから、この機構はナノプッシャーとしての機能を有することになる。

#### 【0034】

図8は、ナノプッシャーの構成を説明する図である。図示のように配置された円筒形カーボンナノチューブCNTに対して、変動電流発生装置からコイルに電流を流すことにより円筒形中心軸の一方向から変動磁場を与える。また、この変動電流発生装置から、一定の直流電流を重畳して流すことにより、同じコイルから同時に定常磁場を発生させることができる。前述したように、CNT内に発生した渦電流と定常磁場により、定常磁場およびCNTの半径方向の電磁力が生じる。これによって、CNTの断面が大きくなり、これに伴いカーボンナノチューブが縮む。また、変動磁場を逆向きに与えることにより、CNT内の渦電流が逆向きになり、CNTの断面が圧縮されるに伴いカーボンナノチューブが伸びる。このようにして、電磁力を用いて、CNTの長さを伸縮させることにより、円筒形CNT先端のナノサイズ移動対象物を移動させることができるナノプッシャーとして機能する。

#### 【0035】

次に、ナノスケール搬送装置に適用した本発明の第4の実施形態のCNT駆動機構について、ナノサイズ搬送機構の動作原理を示す図9を参照して、説明する。図示のナノサイズ搬送機構は、電磁力を用いて、CNTを屈曲させる動作と、伸縮させる動作を組み合わせ、カーボンナノチューブ先端を円運動させることにより、ナノスケール搬送装置として機能させる。片端を拘束したCNTを絨毯状に設置する。屈曲動作させるために、第1のコイルから、CNTに側面から変動磁場を、かつ、第2のコイルに一定の電流を流すことにより、CNTの中心軸と同じ向きの定常磁場を与えることにより、CNTに発生した渦電流と定常磁場により、CNT先端を振動させる屈曲動作を行なう。また、伸縮動作させるために、このCNT側面の第1のコイルから定常磁場を与え、かつ、同時にこの第1のコイルから、定常磁場と同一方向或いは逆方向に変動する磁場を印加することにより、CNTの断面を伸縮させる伸縮動作を行なう。或いは、屈曲動作させるために、第1の

10

20

30

40

50

コイル、かつ、第2のコイルから変動磁場を与え、第1のコイルが作る磁場の時間変化によって生じる渦電流と第2のコイルによる磁場によって生じる電磁力によりCNTの先端を振動させる屈曲動作を行う。また、第2のコイルが作る磁場の時間変化によって生じる渦電流とこの第2のコイルによる磁場によって生じる電磁力によりCNTの断面を伸縮させる伸縮動作を行う。そして、これらの動作を組み合わせることによりCNTの先端が円運動することから、この機構は、絨毯状に設置したCNTの先端側に位置するナノサイズ搬送対象物を移動させるナノサイズ搬送機構としての機能を有することになる。

【実施例】

【0036】

以下に示すように、CNTを模擬した円筒モデルに対して、電磁構造連成解析を行い、CNTが駆動機構としての可能性を持つことを確認した。さらにCNTの変形量が、円筒の長さや与える磁場の周波数により変化することを確認した。

【0037】

渦電流解析の有限要素式は

【0038】

【数3】

$$U\dot{T} + R\dot{T} - C_e\dot{u} = \dot{B}^{ex} \quad (1)$$

【0039】

ここで、Uはインダクタンスマトリックス、Rはレジスタンスマトリックス、Tは電流ポテンシャル、

【0040】

【数4】

$$C_e\dot{u} \text{ は速度起電力に関する項、 } \dot{B}^{ex}$$

【0041】

は外部変動磁場ベクトルである。

【0042】

構造解析の有限要素式は

【0043】

【数5】

$$M\ddot{u} + K\dot{u} - C_s T = F^{ex} \quad (2)$$

【0044】

ここで、Mは質量マトリックス、Kは剛性マトリックス、uは変位、 $C_s T$ は電磁力に関する項、 $F^{ex}$ は外荷重ベクトルである。

【0045】

【数6】

$$C_e\dot{u} \text{ と } C_s T$$

【0046】

は連成項で、式(1)と式(2)を解くことにより、渦電流解析と構造解析の連成解析を行う(非特許文献3参照)。

【0047】

[CNTの電磁構造連成解析]

(1) 磁場の向きと拘束条件による挙動の依存性

解析モデルは、図10に示すように直径  $d = 2.0 \text{ nm}$ 、長さ  $L = 2.0 \text{ nm}$ 、厚さ  $t = 0.1 \text{ nm}$  の円筒形状である。電流ポテンシャルを未知変数とする渦電流解析により円筒形状問題を解析するため、円筒の右端には、非常にやわらかいふたがあるとして、この

10

20

30

40

50



ふたの抵抗率を非常に大きくすることによってふたには電流が流れないようにする。図 1 1 は、円筒部とふた部の材料定数を示す表である。

【 0 0 4 8 】

解析条件として要素分割は円周方向に 16 分割、長さ方向に 10 分割とする。時間刻み幅を  $1.0 \times 10^{-8}$  sec、ステップ数を 100 とする。変動磁場を  $B=1.0 \sin 2 \pi f t$  (f=3MHz), 定常磁場を  $B=1.0$ T とする。図 1 2 は、変動磁場および定常磁場の向きと拘束条件についてそれぞれ解析を行う解析ケースを示す表である。解析結果は、以下の通りである。

【 0 0 4 9 】

Case 1 : 円側面を固定し、変動磁場を x 軸方向、定常磁場を z 軸方向に与えたときの P 点および Q 点 (図 1 0 参照) の x 軸方向の変位を、図 1 3 に示す。図 1 3 より、P 点の変形量は Q 点の変形量より大きく、2 つの点は同期した振動をしている。また振動の周期によって、最大振幅が異なるため、この振動は大きい振動と小さい振動を繰り返している。図 1 4 は円筒全体の変形図で、円筒が上下に振動していることが分かる。

10

【 0 0 5 0 】

Case 2 : 円筒左端を固定し、変動磁場を x 軸方向、定常磁場を z 軸方向に与えたときの P 点および Q 点の x 軸方向の変位を図 1 5 に示す。図 1 5 より P 点と Q 点の変形量は等しく、2 つの点是对称的な振動をしている。図 1 6 は円筒全体の変形図で、円筒が上下に振動していることが分かるが、側面固定のとき (図 1 4 ) と比べて、振動が小さいことが分かる。

【 0 0 5 1 】

20

Case 3 : 円筒側面を固定し、変動磁場を x 軸方向、定常磁場を x 軸方向に与えたときの P 点および Q 点の x 軸方向の変位を図 1 7 に示す。図 1 7 より P 点の変形量は Q 点の変形量より 2 倍近くあり、2 つの点は同期した振動をしている。図 1 8 は円筒全体の変形図で、円筒が断面方向に変形していることが分かる。

【 0 0 5 2 】

Case 4 : 円筒左端を拘束し、変動磁場を x 軸方向、定常磁場を x 軸方向に与えたときの P 点および Q 点の x 軸方向の変位を図 1 9 に示す。図 1 9 より、側面を固定した場合 (図 1 7 ) と比べて、P 点、Q 点とも変形量が少ないことが分かる。側面固定の場合は 2 点が同期した振動をしていたが、このケースにおいては 2 点が対称的な変形をしている。また最大振幅は 2 点とも同じである。図 2 0 は、円筒全体の変形図で、円筒が断面方向に変形していることが分かる。

30

【 0 0 5 3 】

Case 5 : 円筒左端を拘束し、変動磁場を z 軸方向、定常磁場を z 軸方向に与えたときの P 点および Q 点の z 軸方向の変位を図 2 1 に示す。図 2 1 より P 点と Q 点の変形量は等しく、同期した振動をしている。図 2 2 は、円筒全体の変形図で、円筒が断面方向に変形し、また、この変形に伴ってカーボンナノチューブがその中心軸方向に伸縮運動をしていることが分かる。

【 0 0 5 4 】

これらの結果より、円筒形に変動磁場を与えると、円筒内に渦電流が発生することが確認できる。変動磁場を x 軸方向、定常磁場を z 軸方向に与えた場合、円筒は上下に振動するという結果は、図 1 を参照して説明したナノアクチュエータの動作説明と一致する。また、変動磁場を x 軸方向、定常磁場を x 軸方向に与えた場合も同様に、図 5 を参照して説明したナノポンプの動作説明と一致する。また、変動磁場を z 軸方向、定常磁場を z 軸方向に与えた場合も同様に、図 7 を参照して説明したナノプッシャーの動作説明と一致する。

40

【 0 0 5 5 】

側面を固定した場合、円筒形は拘束の影響を受けにくいために変形しやすく、円筒左端を固定した場合は、拘束の影響を受けやすいために変形しにくい。しかし円筒左端を固定した場合でも、円筒の長さが十分であれば円筒の先端は拘束の影響を受けにくくなるので、変形しやすいと考えられる。また左端を固定した場合、P 点と Q 点の変形量が等しいた

50

め、円筒の振動は一定と考えられる。

【 0 0 5 6 】

この駆動方法について、円筒側面を固定すると変形しやすいことが確認できたが、円筒側面を固定することはナノスケールの構造物の場合、困難だと考えられる。つまり円筒左端を固定した状態での駆動が有効だと考えられる。

【 0 0 5 7 】

( 2 ) 長さによる挙動の依存性

CNTの長さによる挙動の依存性の解析を行う。解析モデルは、図10に示すように、直径  $d = 2.0 \text{ nm}$ 、長さ  $L = 2.0 \text{ nm}$ 、厚さ  $t = 0.1 \text{ nm}$ の円筒形状である。材料定数については図11に示す値を用いる。

10

【 0 0 5 8 】

解析条件として、要素分割は円周方向に16分割とし、長さ方向については図23に示すようにする。拘束条件として、円筒の左端を固定する。時間刻み幅を  $1.0 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 、ステップ数を100とする。変動磁場  $B = 1.0 \sin 2\pi f t$  ( $f = 3 \text{ MHz}$ ) を  $x$  軸方向に与える。図23に示す長さの異なるモデルについて、定常磁場  $B = 1.0 \text{ T}$  を  $z$  軸方向に与えたときと、 $x$  軸方向に与えたときの解析をそれぞれ行う。

【 0 0 5 9 】

定常磁場を  $z$  軸方向に与えた場合の解析結果は、以下の通りである。

【 0 0 6 0 】

円筒左端を拘束し定常磁場を  $z$  軸方向に与えたときのP点の  $x$  軸方向の変位を図24に示す。図24より、円筒の長さが長くなるにつれて、P点の変形量が非常に大きくなっていることがわかる。また、振動の周期はどの長さとも同じであるため、自由端における変位の速度は円筒が長いほど速い。円筒の長さが10 nmまでの解析をおこなったが、実際には円筒の長さは直径の1000倍となることもあるので、弱い磁場でも変形しやすいと考えられる。図25は円筒全体の変形図で、円筒が上下に振動していることが分かる。図16の結果と比べても分かるように、長さが長くなると円筒先端(P点、Q点)の変形量が非常に大きくなっていることが確認できる。

20

【 0 0 6 1 】

定常磁場を  $x$  軸方向に与えた場合の解析結果は、以下の通りである。円筒左端を拘束し、定常磁場を  $x$  軸方向に与えたときのP点の  $x$  軸方向の変位を図26に示す。図26より円筒の長さが長くなるにつれて、P点の変形量が大きくなっているが、長さが4 nmと10 nmの変形量はあまり変わらないことがわかる。長さを10 nm以上にしても、円筒先端の変形量はある一定の値に収束すると考えられる。図27は円筒全体の変形図で、円筒が断面方向に変形していることがわかる。

30

【 0 0 6 2 】

どのケースにおいても円筒の長さが長くなると変形量は大きくなった。しかし定常磁場を  $z$  軸方向に与えた場合は、変形量が円筒の長さに比例して急激に大きくなるのに対して、定常磁場を  $x$  軸方向から与えた場合は、円筒の長さが長くなるにつれて変形量に変化がみられなくなった。つまり円筒を上下に振動させる機構の場合には円筒の長さの影響を受けるが、円筒断面を伸縮させる機構の場合にはあまり影響がないことがわかる。

40

【 0 0 6 3 】

( 3 ) 周波数による挙動の依存性

周波数による挙動の依存性の解析を行う。解析モデルは図28のような直径  $d = 2.0 \text{ nm}$ 、長さ  $L = 10.0 \text{ nm}$ 、厚さ  $t = 0.1 \text{ nm}$ の円筒形状である。材料定数については図11に示す値を用いる。

【 0 0 6 4 】

解析条件として、要素分割は円周方向に16分割、長さ方向に50分割とする。拘束条件として、円筒の左端を固定する。変動磁場  $B = 1.0 \sin 2\pi f t$  を  $x$  軸方向に与える。定常磁場  $B = 1.0 \text{ T}$  を  $x$  軸方向に与えたときについて、周波数  $f$  を  $3 \text{ Hz}$  から除々に上げて解析を行う。図29は、変動磁場の周波数及び解析の時間刻み幅を示す表である。

50

## 【 0 0 6 5 】

解析結果は、以下の通りである。図 3 0 は、横軸に変動磁場の周波数、縦軸に Q 点における x 軸方向の最大変位量をとったグラフである。図 3 0 より変動磁場の周波数が大きくなるほど、Q 点における x 軸方向の最大変位量も大きくなっていることがわかる。図 3 1 に変動磁場の周波数が 3 0 M H z のときの円筒の変形図を示す。図 3 1 より、円筒が断面方向に変形していることがわかる。

## 【 0 0 6 6 】

変動磁場の周波数が円筒の固有振動数に近づくと、円筒は共振を起こし、変形しやすくなると考えられる。そこで、円筒形の固有振動数を求める。

## 【 0 0 6 7 】

理論的にこの円筒形の固有振動数を求めると円筒面内の固有振動数  $f$  は以下の式で与えられる。ただし境界条件を無拘束としている。

## 【 0 0 6 8 】

## 【数 7】

$$f = \frac{2.68}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{(1-\nu^2)\rho R^4}}$$

## 【 0 0 6 9 】

ここで、 $E$  はヤング率、 $I$  は断面次モーメント、 $\nu$  はポアソン比、 $R$  は半径である。この式より固有振動数  $f$  を求めると、 $f = 3.0 \times 10^{12}$  [ H z ] となる。図 3 0 から変動磁場の周波数がこの  $3.0 \times 10^{12}$  [ H z ] に近づくと従い変形が大きくなっていることが確認できる。

## 【 0 0 7 0 】

( 4 ) 屈曲動作と伸縮動作の組み合わせによるナノスケール搬送機構の検証

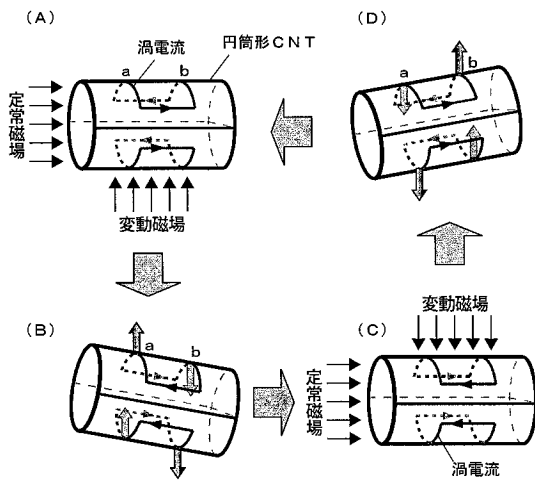
解析モデルは、図 3 2 に示すように直径  $d = 2.0$  n m、長さ  $L = 10.0$  n m、厚さ  $t = 0.1$  n m の円筒形状である。材料定数としては図 1 1 に示す値を用い、解析条件として要素分割は円周方向に 16 分割、長さ方向に 20 分割とする。時間刻み幅は  $1.0 \times 10^{-8}$  sec、ステップ数は 1500 とする。x 軸方向の変動磁場を  $B_x = 1.0 \sin(2\pi ft + \pi/2)$  T ( $f = 50$  kHz)、z 軸方向の変動磁場を  $B_z = 50.0 \sin(2\pi ft)$  T ( $f = 50$  kHz) とする。

## 【 0 0 7 1 】

P 点の x 軸方向および z 軸方向の変位およびその軌跡を図 3 3 に示す。図 3 3 より P 点が x 軸方向と z 軸方向に変形し、また、その軌跡が円となっていることがわかる。図 3 4 は、円筒全体の変形図で、屈曲運動と伸縮運動の組み合わせによって円筒の先端が円運動を行うため、ナノスケール搬送機構として動作することが確認される。

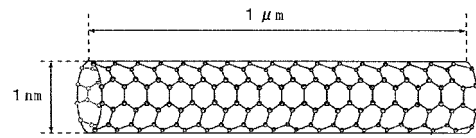
【 図 1 】

ナノアクチュエータの駆動原理



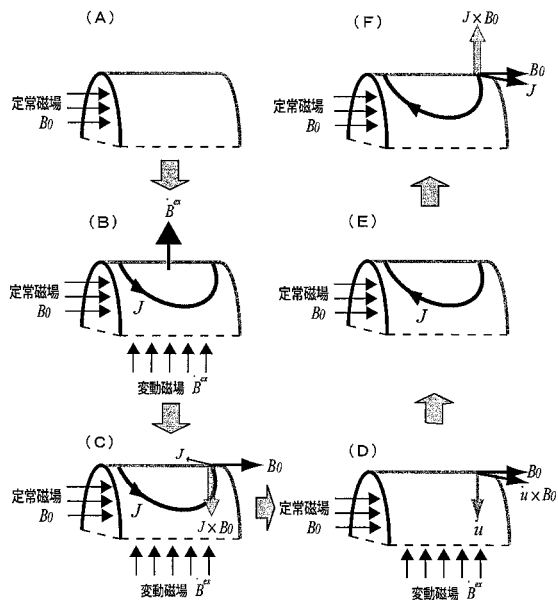
【 図 2 】

CNTの立体構造



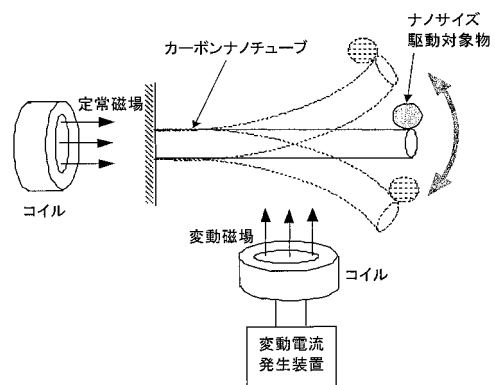
【 図 3 】

CNTに生じる電磁構造造成現象の流れ



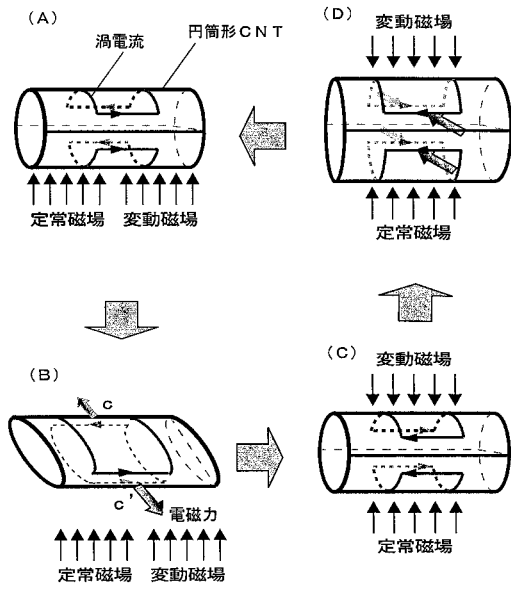
【 図 4 】

ナノアクチュエータ



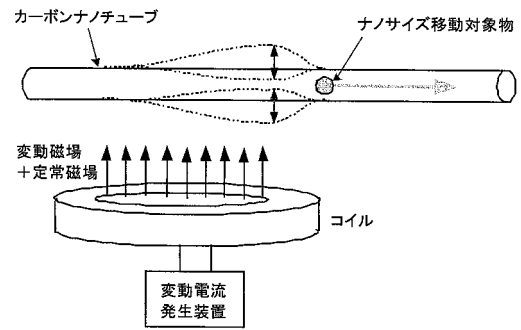
【図5】

ナノポンプの動作原理



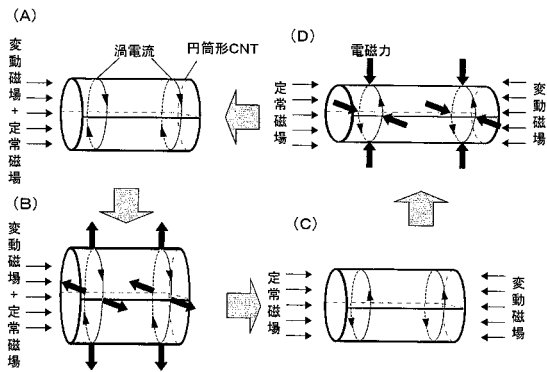
【図6】

ナノポンプ



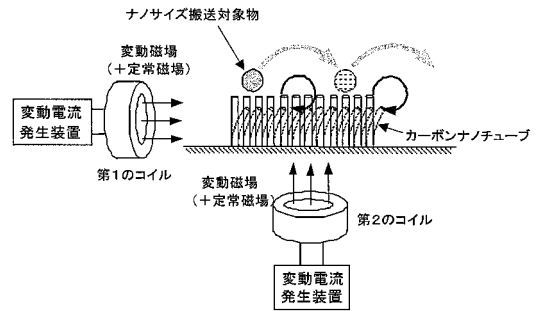
【図7】

ナノプッシャーの動作原理



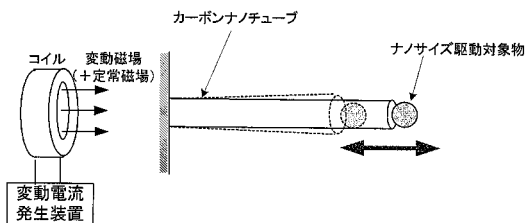
【図9】

ナノスケール搬送装置

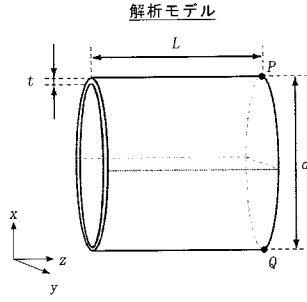


【図8】

ナノプッシャー



【図10】



【図11】

材料定数

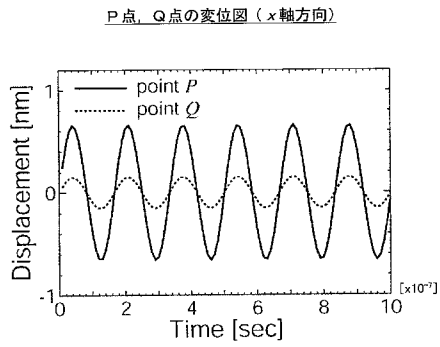
	円筒部	ふた部
ヤング率 [Pa]	$1.00 \times 10^{12}$	1.00
ポアソン比	0.30	0.30
抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ]	$6.68 \times 10^{-4}$	$6.68 \times 10^5$
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1300	1.00

【図12】

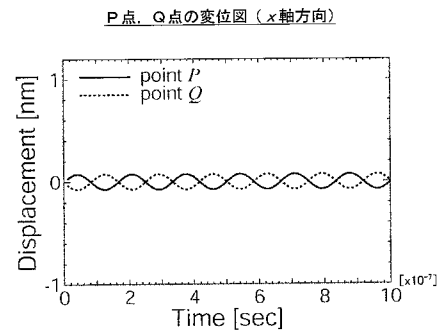
解析ケース

	拘束条件	変動磁場の方向	定常磁場の方向
case1	側面固定	$\pm x$	+z
case2	左端固定	$\pm x$	+z
case3	側面固定	$\pm x$	+x
case4	左端固定	$\pm x$	+x
case5	左端固定	$\pm z$	+z

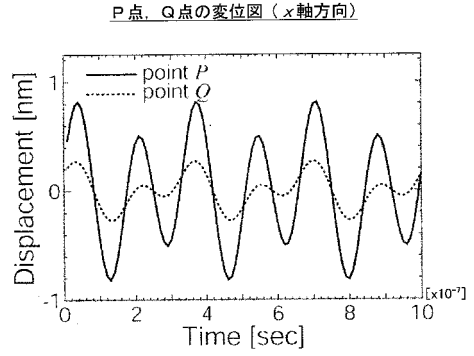
【図17】



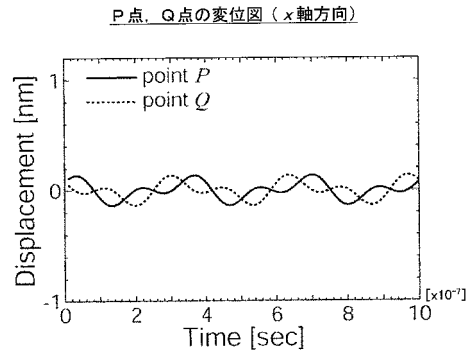
【図19】



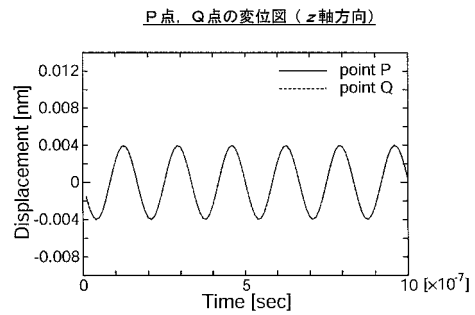
【図13】



【図15】



【図21】



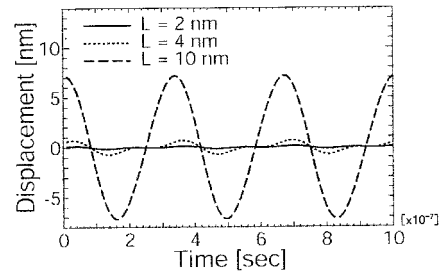
【図 2 3】

円筒の長さ及び分割数

	長さ (nm)	分割数
case1	2	10
case2	4	20
case3	10	50

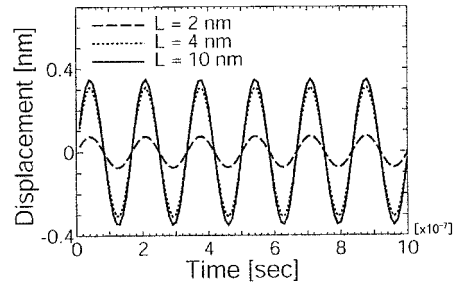
【図 2 4】

P点の変位図 (x軸方向)



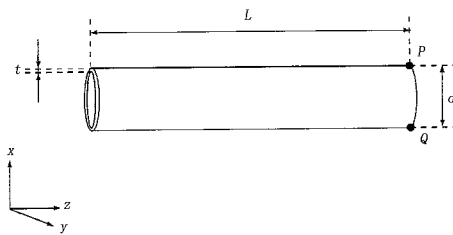
【図 2 6】

P点の変位図 (x軸方向)



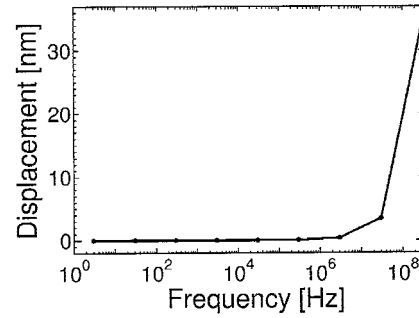
【図 2 8】

解析モデル



【図 3 0】

Q点の最大変位量



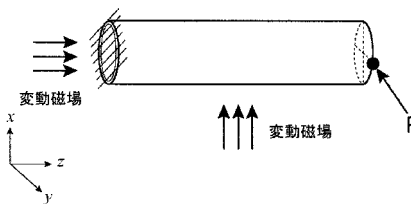
【図 2 9】

変動磁場の周波数及び解析の時間刻み幅

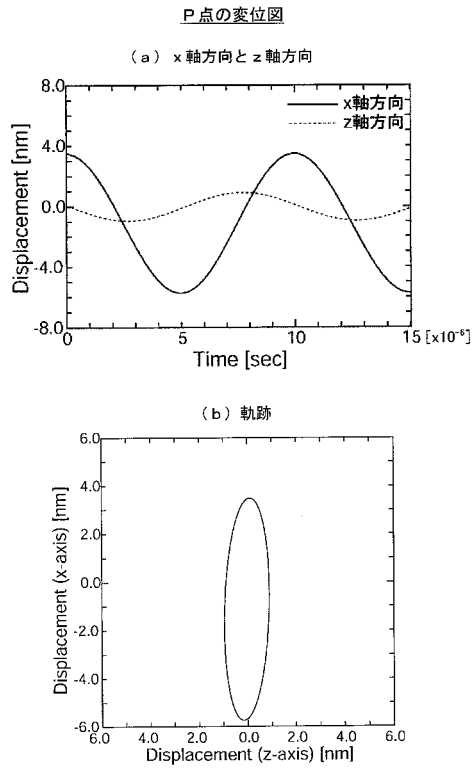
	周波数 [Hz]	時間刻み幅 [sec]
case1	$3.0 \times 10^0$	$1.0 \times 10^{-2}$
case2	$3.0 \times 10^1$	$1.0 \times 10^{-3}$
case3	$3.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-4}$
case4	$3.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^{-5}$
case5	$3.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^{-6}$
case6	$3.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^{-7}$
case7	$3.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{-8}$
case8	$3.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^{-9}$
case9	$3.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^{-10}$

【図 3 2】

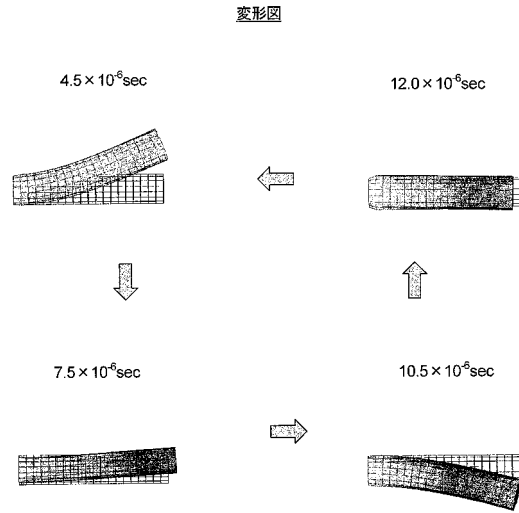
ナノスケール搬送機構の解析モデル



【 図 3 3 】

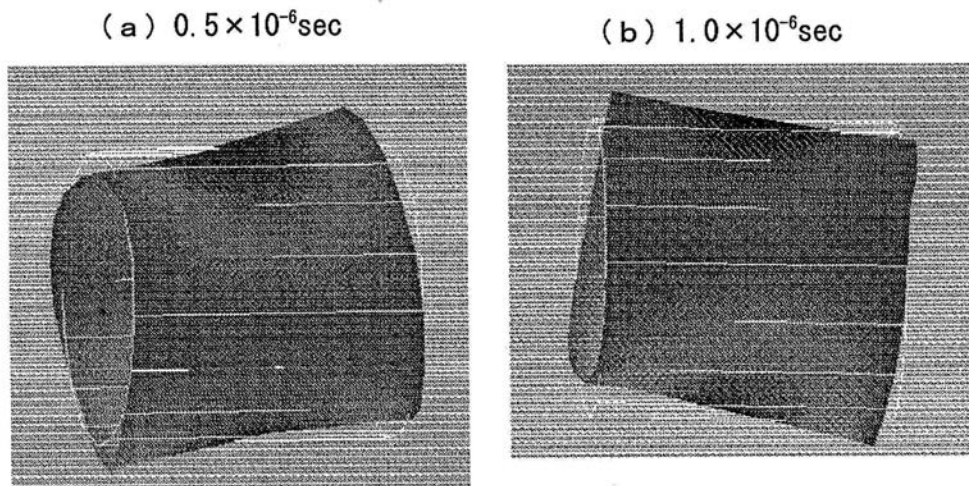


【 図 3 4 】




【 図 1 4 】

変形図

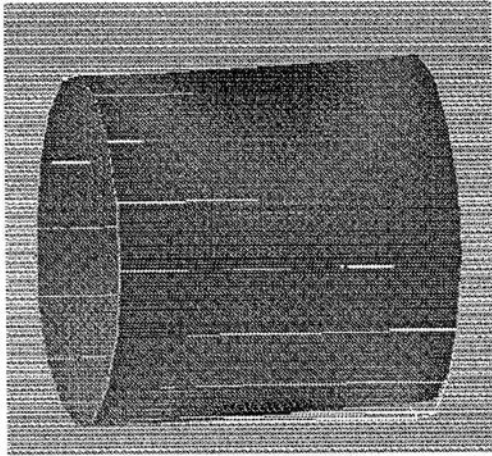




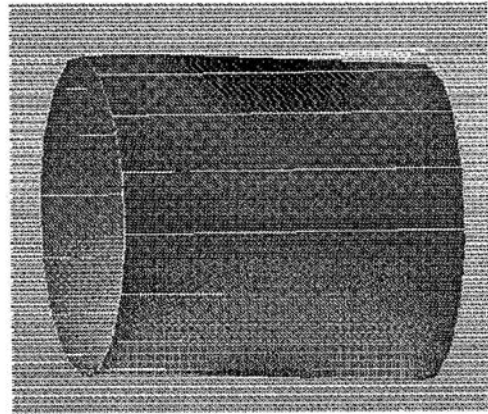
【 16】


变形图

(a)  $0.5 \times 10^{-6}$ sec



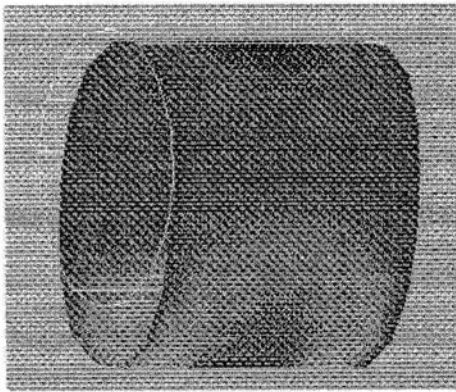
(b)  $1.0 \times 10^{-6}$ sec



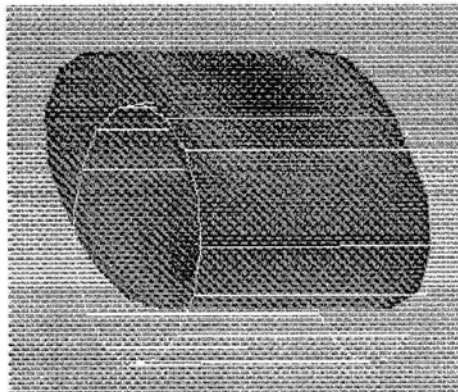
【 18】

变形图

(a)  $0.4 \times 10^{-6}$ sec



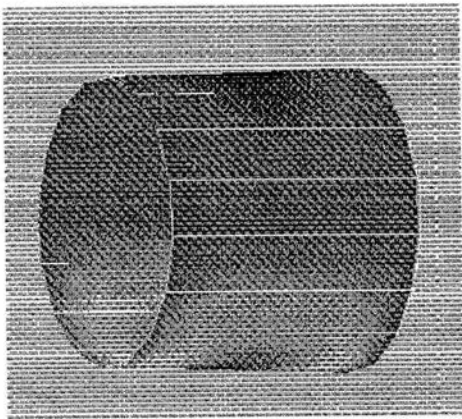
(b)  $0.8 \times 10^{-6}$ sec



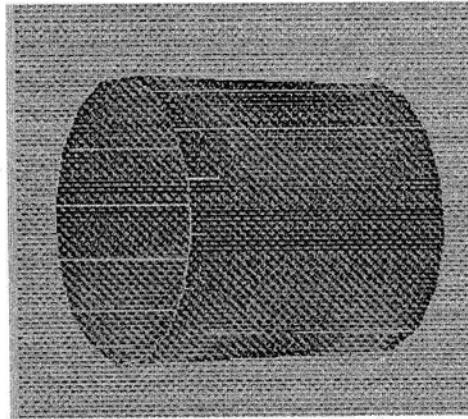
【図20】

変形図

(a)  $0.4 \times 10^{-6}$ sec



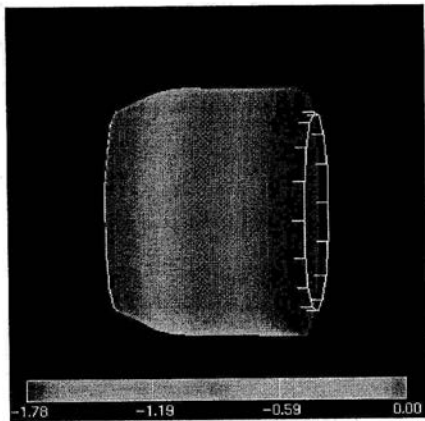
(b)  $0.8 \times 10^{-6}$ sec



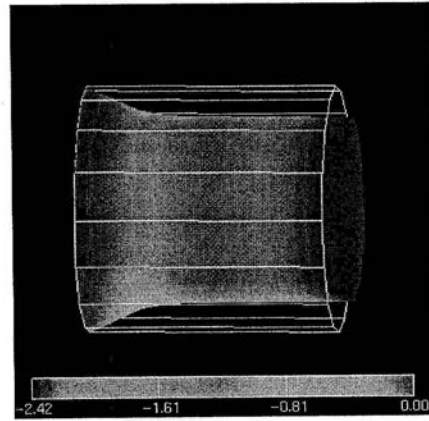
【図22】

変形図

(a)  $5.0 \times 10^{-8}$ sec



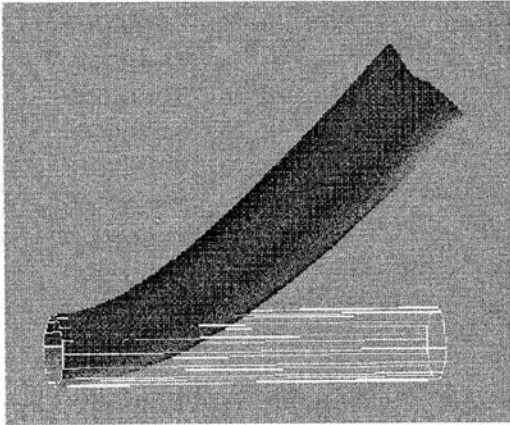
(b)  $3.0 \times 10^{-7}$ sec



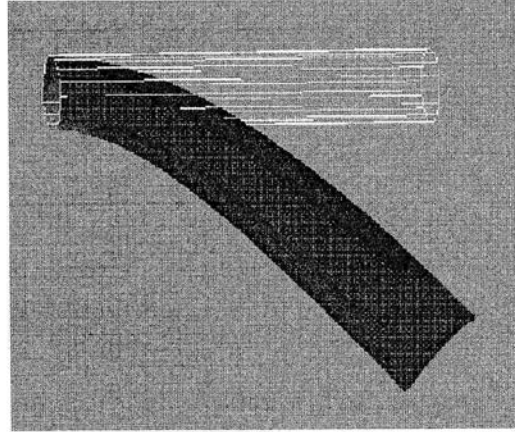
【図 25】

変形図

(a)  $0.5 \times 10^{-6}$ sec



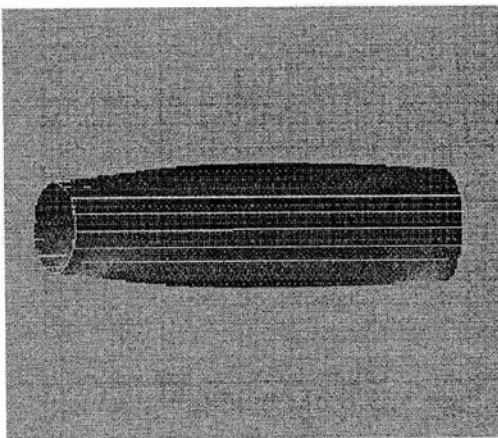
(b)  $1.0 \times 10^{-6}$ sec



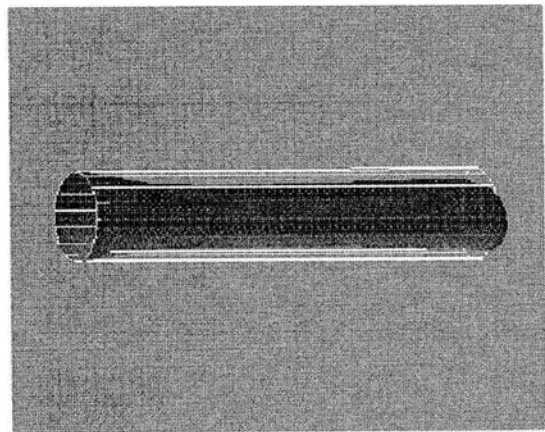
【図 27】

変形図

(a)  $0.4 \times 10^{-6}$ sec



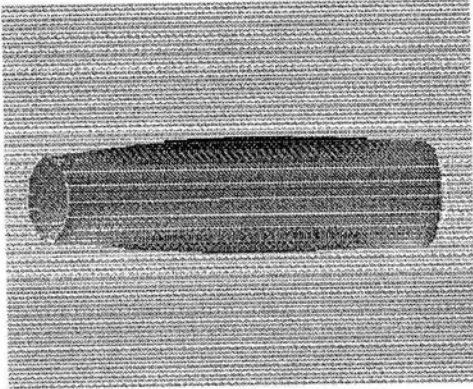
(b)  $0.8 \times 10^{-6}$ sec



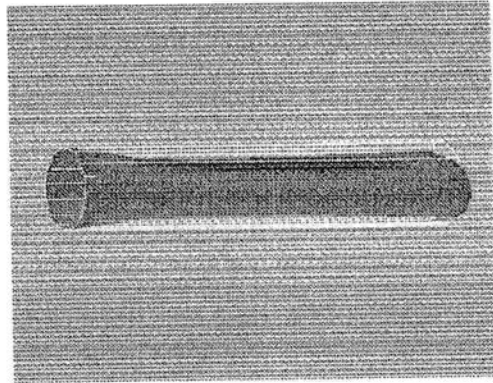
【図 3 1】

変形図

(a)  $0.4 \times 10^{-6}$ sec



(b)  $0.8 \times 10^{-6}$ sec



---

フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2004/054811(WO, A1)

特開2005-001885(JP, A)

特開2003-247830(JP, A)

特開平04-079780(JP, A)

特開平05-268782(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F03G 7/00

B01J 19/08

B82B 1/00- 3/00

B82Y 15/00

JST7580(JDreamII)

JSTPlus(JDreamII)