

ISBN4-87805-048-9
C0343 ¥2800E
定価：本体価格2,800円(税別)

HUBA PRO.

極微な力で拓くナノの世界 原子・分子のナノ力学最前線

Aセッション 基調講演
ミクロな力で見た身近なナノの世界
摩擦と帯電をミクロに探る

森田 清三

Eセッション 生体分子をナノの力で観て操作する
DNA・たんぱく質を操作するナノの力

生体分子のナノ計測 猪飼 篤

たんぱく質の引っ張りを計算機で観察する

1分子操作の計算機シミュレーション 岡崎 進

Bセッション ナノ力学の最前線

原子と原子を結び1本の共有結合力を検出する

長谷川幸雄

ナノ世界における静電気力とエネルギー損失

富取 正彦

Fセッション 特別講演

ナノプローブ技術が切り開くナノテクノロジーの夢

青野 正和

Cセッション ナノの力で見た原子の世界

原子を区別して動かすナノの力 単一原子の分析計測

菅原 康弘

個々の原子の力をどのように視るか?

塚田 捷

Gセッション プローブ顕微鏡を極める

カーボンナノチューブで操るナノの力 中山 喜萬

ナノ構造中の原子を区別して3次元で見る 西川 治

Dセッション ナノの力で見た分子の世界

ナノの力で分子をみて操作する 単一分子イメージング

山田 啓文

分子を感じるナノの力

大西 洋

Hセッション ナノの力で磁性に迫る

ナノの力で解き明かす原子の磁性 武笠 幸一

磁気記録をナノの力で観察する 保坂 純男

Iセッション パネルディスカッション

極微な力で拓くナノの世界 - 原子・分子のナノ力学最前線 -

◆
'04 極微な力で拓くナノの世界 原子・分子のナノ力学最前線



2004 第18回「大学と科学」公開シンポジウム講演収録集

極微な力で拓くナノの世界

原子・分子のナノ力学最前線

主催：平成16年度文部科学省科学研究費補助金
研究成果公開促進費「研究成果公开发表(A)」補助事業
代表 大阪大学大学院工学研究科教授 森田 清三

後援：(社)応用物理学会 / (社)化学工学会 / (社)計測自動制御学会 / (社)軽金属学会 / (社)高分子学会 / (社)精密工学会 / (社)電気化学会 / (社)電気学会 / (社)電子情報通信学会 / (社)日本セラミックス協会 / (社)日本トライボロジー学会 / (社)日本化学会 / (社)日本機械学会 / (社)日本金属学会 / (社)日本顕微鏡学会 / (社)日本材料学会 / (社)日本非破壊検査協会 / (社)日本物理学会 / (社)日本分光学会 / (社)日本分析化学会 / (社)表面技術協会 / (社)粉体粉末冶金協会 / (社)レーザー学会 / 触媒学会 / 日本学術振興会 / 日本光学会 / 日本材料科学会 / 日本質量分析学会 / 日本真空協会 / 日本生物物理学会 / 日本組織細胞化学会 / 日本表面科学会 / 日本分子生物学会 / 日本免疫学会 / 日本油化学会 / 阪大フロンティア研究機構 / 光化学協会 / 粉体工学会

0170

極微な力で拓くナノの世界

原子・分子のナノ力学最前線

A セッション 基調講演

マイクロな力で見た身近なナノの世界 摩擦と帯電をマイクロに探る

大阪大学大学院工学研究科教授 森田 清三 10

はじめに / マクロな帯電の歴史、法則、原因 / マクロな帯電からマイクロな帯電へ
電圧制御型のマイクロな帯電と電荷の静電気力観察 / 正電荷と負電荷の帯電機構
接触帯電電荷の拡散と散逸 / 負電荷の接触帯電と電荷の散逸モデル
高密度に接触帯電した負電荷の静電気力の観察 / 電荷の相転移モデル
マクロな摩擦の歴史、法則、原因 / マクロな摩擦からマイクロな摩擦へ
マクロな摩擦の観察 / 格子周期をもつ原子レベルの2次元摩擦現象
格子周期をもつ2次元摩擦現象の定量化 / 格子周期をもつ2次元摩擦現象の揺らぎ
格子周期をもつ2次元摩擦現象の凝着と原因 / 格子周期をもつ2次元摩擦現象の荷重依存性
2次元スティック・スリップモデル / おわりに

B セッション ナノ力学の最前線

原子と原子を結ぶ1本の共有結合力を検出する

東京大学物性研究所助教授 長谷川幸雄 28

共有結合とAFMの原理 / AFMとSTMの距離感性 / 探針と試料の間に働く力
ファンデルワールス力の抑制 / 力の検出・測定 / Si(111)7 × 7表面のAFM像
フォース・カーブの測定 / AFMのプロブ / まとめ

ナノ世界における静電気力とエネルギー損失

北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科助教授 富取 正彦 37

はじめに / ナノ計測技術と理論計算の進歩 / NC-AFM像の電圧依存性
NC-AFMによる原子・分子の操作と組立
ピエゾ抵抗型シリコンカンチレバーとナノ力学的ナノピラー成長による探針の調製
印加電圧による静電気引力と変位電流 / NC-AFMとトンネル電流の同時観察
Ge/Si(111)のNC-AFM像と散逸エネルギー像
単振動ポテンシャルと探針 - 試料間相互作用 / おわりに

C セッション ナノの力で見た原子の世界

原子を区別して動かすナノの力 単一原子の分析計測

大阪大学大学院工学研究科教授 菅原 康弘 50

新しい計測技術 原子間力顕微鏡 / 原子種を同定する技術
電子軌道の違いによる相互作用力 / Si(100)-Sb理想表面での原子種の同定
族原子の種類同定は可能か / Si/Ge混在表面のAFM像
AFMで水素原子をとらえる / 原子間力顕微鏡を用いた原子操作 / おわりに

個々の原子の力をどのように視るか？

早稲田大学大学院理工学研究科教授 塚田 捷 60

はじめに / 理論的に課せられた課題 / 原子尺度相互作用と計測量
Si(111) 3 × 3-Ag表面のシミュレーション / シミュレーション像と計測像
NC-AFMのシミュレーション / 探針の構造の効果 理論は実験を再現
カーボンナノチューブを利用した探針 / 散逸揺動定理と揺動力顕微鏡 / おわりに

D セッション ナノの力で見た分子の世界

ナノの力で分子をみて操作する 単一分子イメージング

京都大学大学院工学研究科助教授 山田 啓文 72

はじめに / 有機分子デバイスの可能性 / 自己組織化膜(SAM膜)
アルカンチオール分子とチオール基の役割 / 金属フタロシアニン 有機半導体
フタロシアニンの分子イメージング / 2つの分子種からなるSAM膜の電位測定
ナノスケール分極の原理と制御 / おわりに

目次

分子を感じるナノの力

-神戸大学理学部教授 大西 洋 82
- 非接触型原子間力顕微鏡とナノの力 / NC-AFM による力の計測 / 引力を実感する実験
カルボン酸イオンの観察 / 二酸化チタン基板表面への解離吸着
カルボン酸分子層の混合単分子膜の顕微鏡像 / カルボン酸イオン分子の高さの計測
ファンデルワールス力の関与 / 分子の中身をのぞく / まとめ

Eセッション 生体分子をナノの力で観て操作する

- DNA・たんぱく質を操作するナノの力 生体分子のナノ計測
.....東京工業大学大学院生命理工学研究科教授 猪飼 篤 92

はじめに / AFM で DNA 分子を触る / AFM による染色体像
細胞表面の物質の検索と分布測定 / たんぱく質の立体構造の計測
シャペロニンとたんぱく質の相互作用 / たんぱく質を引き伸ばす
たんぱく質を引き伸ばして立体構造を壊す / 炭酸デヒドラーゼの立体構造
炭酸デヒドラーゼ引き伸ばしのシミュレーション / まとめ

- たんぱく質の引っ張りを計算機で観察する 1 分子操作の計算機シミュレーション
.....自然科学研究機構・分子科学研究所教授 岡崎 進 101

はじめに / 計算機で行う化学実験 / 分子の運動を追跡する
2 分子間に働く力 分子動力学法 / α -ヘリックスの延伸実験
延伸にともなう α -ヘリックスのコンフォメーション変化
ポリペプチドのコンフォメーション変化 / ポリアラニンのシミュレーション
シミュレーション値と実験値の比較 / 自由エネルギープロフィール / まとめ

Fセッション 特別講演

- ナノプローブ技術が切り開くナノテクノロジーの夢
.....大阪大学大学院工学研究科教授 / 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所所長 青野 正和 112

ブレイクスルーと新しい計測分析技術 / ナノテクノロジーを支える顕微鏡の発明
2 探針 STM の開発 / 3 探針 STM、4 探針 AFM/STM の開発
ErSi₂ ナノワイヤの観察と計測 / 電気伝導度の次元性
導電性有機薄膜の電気抵抗の測定 / 重合した C₆₀ 薄膜の電気抵抗測定
1 点刺激で連鎖重合を誘起する / ナノワイヤによる配線
ポリジアセチレン高分子鎖の電気伝導 / ポリジアセチレンナノワイヤの応用
原子スイッチの開発と利用 / 今後の展望

Gセッション プロープ顕微鏡を極める

- カーボンナノチューブで操るナノの力
.....大阪府立大学大学院工学研究科教授 / 大阪大学大学院工学研究科特任教授 中山 喜萬 130

CNT の電気的な性質 / CNT の機械的性質 / CNT の先端は閉じている
SPM 探針としての CNT の特徴 / 空間分解能 / CNT カートリッジの製作
ナノファクトリー内での CNT の操作 / CNT 探針の座屈力、ヤング率の計測
CNT 探針を使った DNA とシリコンウエハ表面の観察 / ナノピンセットの製作

- ナノ構造中の原子を区別して 3 次元で見る
.....金沢工業大学工学部教授 西川 治 140

電界放射顕微鏡と電界イオン顕微鏡 / FEM と FIM の特徴
3 次元アトムプローブの特長 / 位置感知型イオン検出器を備えたアトムプローブ
微細な突起をもつ引出電極による分析 / カーボンナノチューブの分析
CNT の水素吸蔵特性 / シリコンの特性評価 / 分析結果の立体表示 / おわりに

Hセッション ナノの力で磁性に迫る

ナノの力で解き明かす原子の磁性

北海道大学創成科学研究機構特任教授 **武笠 幸一** 152

磁石とその利用 / ミクロな磁性 / 交換相互作用力顕微鏡 / 交換相互作用力の計算と計測
反強磁性体 NiO の測定実験 試料と探針の準備 / NiO(100)表面の測定結果
ラインプロファイルの解析 / シミュレーション結果 第1原理計算
ナノの力で解き明かす原子の磁性 / おわりに

磁気記録をナノの力で観察する

群馬大学大学院工学研究科教授 **保坂 純男** 164

ナノの世界の上に立つ磁気記録 / MFM における力の検出 / MFM の分解能
原子間力と磁気力 / 探針 - 試料間隙依存性 / MFM の高性能化へ向けて
動作環境による MFM 画像の比較 / ナノ領域の磁気記録パターン
表面漏洩磁場分布の測定 / MFM による微小ドットの記録・再生 / おわりに

Iセッション パネルディスカッション

極微な力で拓くナノの世界 - 原子・分子のナノ力学最前線 -

京都大学大学院工学研究科助教授 **山田 啓文** 176

神戸大学理学部教授 **大西 洋**

成蹊大学大学院工学研究科助教授 **佐々木成朗**

北陸先端科学技術大学院大学助教授 **富取 正彦**

東京工業大学大学院生命理工学研究科教授 **猪飼 篤**

実験の現状と将来

原子間力顕微鏡 / NC-AFM で可能な測定 / 広がるナノ力学技術 / 今後の課題と将来

理論の現状と将来

ナノテクノロジーにおけるナノ力学技術 / NC-AFM の階層性 サイズの階層性

NC-AFM の階層性 力の階層性 / 力の階層性と材料

NC-AFM 理論をどのように組み立てたか? / 探針 - 試料表面間相互作用力の計算法

シミュレーション法の確立と将来

話題提供「原子への応用」

探針先端の構造 / NC-AFM の観察例 原子から生体分子へ

話題提供「バイオへの応用」

細胞レベルでの観察 / たんぱく質を引き抜いて調べる / 針へのこだわりと期待

生体分子の観察用探針の製作 / 物性計測・分析法への展開 / 相互作用力の理論計算

プローブ顕微鏡の展望 / 細胞手術への展望

会場からの質問

まとめ

閉会にあたって

大阪大学大学院工学研究科教授 **森田 清三** 194

演者紹介

196

ミクロな力で見た 身近なナノの世界

摩擦と帯電をミクロに探る



森田 清三

大阪大学大学院工学研究科教授

はじめに

21世紀はナノテクノロジーの時代で、各種デバイスはどんどんミクロ化していきます。寸法 L のサイコロのような材料をミクロにしていくと、体積は L^3 で表面積は $6L^2$ なので、両者の比は表面積/体積 $=6/L$ となり、 L の減少とともに逆に大きくなっていきます。つまり、ナノの世界では、身近な物理現象である摩擦や帯電などの表面の効果、重力や質量などのバルク(体積)の効果を上回るようになります。いいかえると、ナノの世界は「表面」が支配する世界です。

摩擦や帯電は、空气中、室温で起こる身近な現象ですが、この摩擦や帯電の「素過程」は、現在でもいまだ十分には解明されていません。ここでは、ミクロな力で観察して探った摩擦や帯電の素過程について紹介します。

物質をどんどん小さくするミクロ化が進むと、原子レベルでは物理法則が変化することが量子力学ではよく知られています。たとえば、波とされていた光に粒子の性質が現れ、粒子とされていた電子に波の性質が現れます。では、摩擦や帯電をミクロにみると、ど

のような現象が現れるのでしょうか。ナノスケールでは、新しい道具をつくりだすことで、新しい世界が切り拓かれます。

マクロな帯電の歴史、法則、原因

帯電という現象は、約2,500年前の古代ギリシャ人が発見していたという記録が残っています。こすった場合の摩擦帯電と触った場合の接触帯電は、特に冬場に起こる身近な現象ですが、接触帯電は雰囲気によって起こり方が変化します。2つの物質、たとえば湿った空気中では、ポリスチレンと白金の接触帯電では負電荷が発生しますが、乾燥している空気中では正電荷が発生します。また、帯電自体が気まぐれで、実験では帯電量がばらつきます。たとえば、テフロンが、金、ナイロン、PMMAとそれぞれ接触したとき、テフロンには負電荷が発生することが多く、ナイロンとの組み合わせでは正電荷が発生します。このように、気まぐれで再現性がないといわれてきました。

ここで、帯電が起こる機構について簡単に説明します(図1)。マクロな場合、2つの物質をある程度近づける(接触)と、トンネル効

マクロな場合

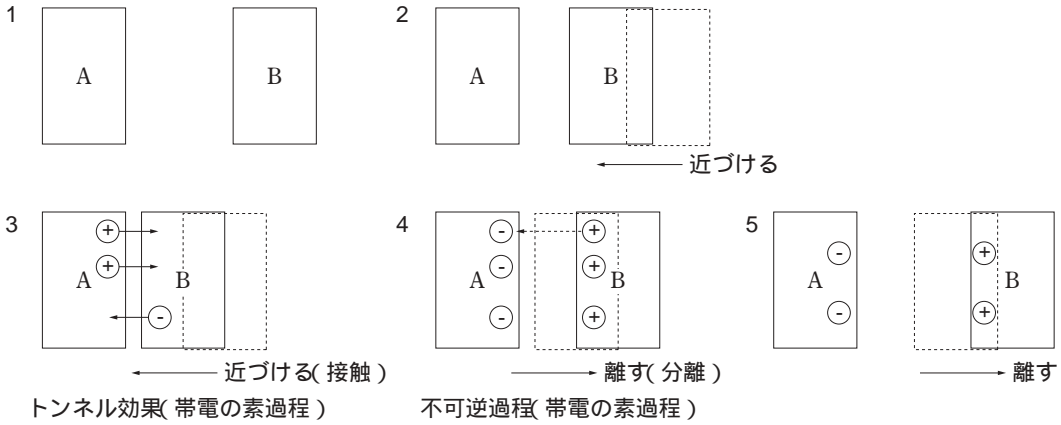


図1 接触帯電のプロセス。2物体A、Bの接触と分離

果などにより電荷が移動します。その後、離す(分離)と、電荷がもとに戻りきらず、少し残ります。これが、「帯電」です。

このような帯電の再現性が、なぜ、悪いのでしょうか。たとえば、非常に大きな板を考えると、表面には顕微鏡レベルでの小さな凸凹が多数あるため、さまざまところで接触します(図2A)。接触状態や接触点の数、接触面積などは制御できま

せん。これが、再現性を悪くしている理由のひとつです。また、絶縁体の場合、帯電した後に分離すると、どうしても残留電荷が残りますが、この残留電荷が再度帯電したときに逆流して、前と違った帯電が起こります。分離するときには当然、放電が起こります。これは身近な帯電の現象です。

それ以外にも問題があります。空気中にはごみや汚れがあります。1945年にノーベル物

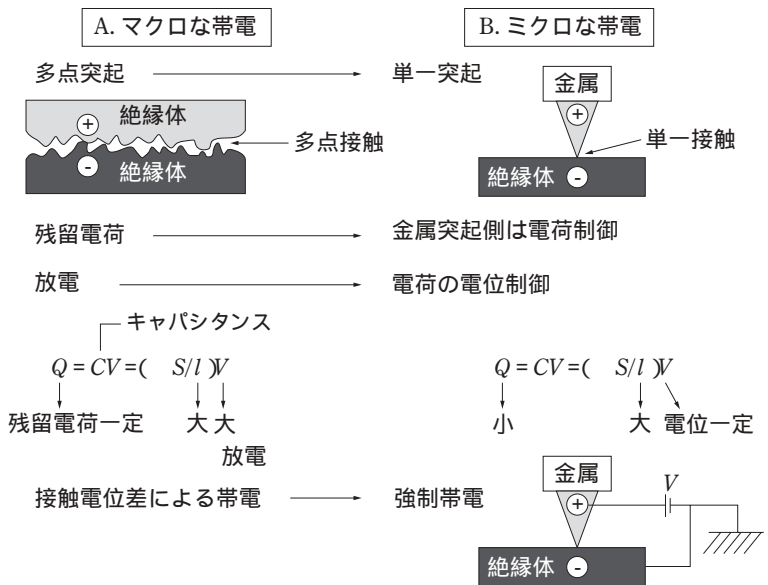


図2 マクロな帯電からミクロな帯電へ

理学賞を受賞したパウリは、英国のキャンディッシュ研究所に次のような言葉を残しています。「固体は、原子が非常に整然と並んで結晶状態をつくっているので、神様がつくりたもうたが、表面は悪魔がつくれた」と、固体表面が汚れていて、空気中、室温では再現性のある帯電の実験が非常に困難であることを述べています。

マクロな帯電からミクロな帯電へ

そこで、再現性と制御性のあるミクロな接触帯電を考えてみました(図2B)。たとえば、多くの突起での接触を、単一突起をもった単一接触として実験することにより、再現性が向上します。また、残留電荷については、一方を金属にして金属突起側を電荷制御すると、残留電荷の影響をほぼなくすることができます。

放電については、帯電した電荷量 Q と、その間に働く電圧 V とキャパシタンスの関係を $Q = CV$ と表したとき、キャパシタンスが距離 l の関数になります。つまり、電荷が一定の状態では距離を大きくすると電圧が大きくなって放電するため、電圧を制御するようにしました。電圧を制御した状態で距離 l を大きくすると、電荷は逆に少なくなって放電が起こらなくなります。

また、通常の帯電は、物質がもつ「正の電荷になりやすい」「負の電荷になりやすい」という接触電位差に起因しますが、私どもは探針と試料の間に電圧を印加することで帯電を

強制的に制御する方法を見い出しました(図2B)。この方法を用いると、絶縁体表面に正や負の電荷を、電荷量を制御して帯電することが可能になります。

電圧制御型のミクロな帯電と電荷の静電気力観察

具体的には、シリコン基板上に薄い酸化膜を作製し、その上に導電性テコを接触させた状態で強制的に電圧を印加して帯電させます(図3)。その後、導電性テコを試料から離して帯電した電荷量を観察しますが、その際に、適当な電圧を印加すると静電気力の空間変化が、導電性テコに印加した電圧がつくりだす電荷と試料側の電荷との掛け算で決まる部分として計測されます。すなわち、電圧を印加した導電性テコを試料に近づけた状態で走査することにより帯電電荷の画像を得るのが、静電気力顕微鏡です。

図4では、帯電後、1次元的な空間分布を測定しています。一方が空間分布でなく時間変化になっており、帯電した電荷に比例する

静電気力が時間とともに減少するのがわかります。つまり、シリコン酸化膜上で、空气中、室温で、電荷が減少することが測定できています。

この測定は、接触電圧として $-4V$ で20秒帯電した後、導電性テコに $-4V$ の電圧を印加して負電荷を誘起した状態で行っています(図4A)。その状態で斥力が働いたことにより、試料表面には負電荷が帯電しています。同じように帯電した後、

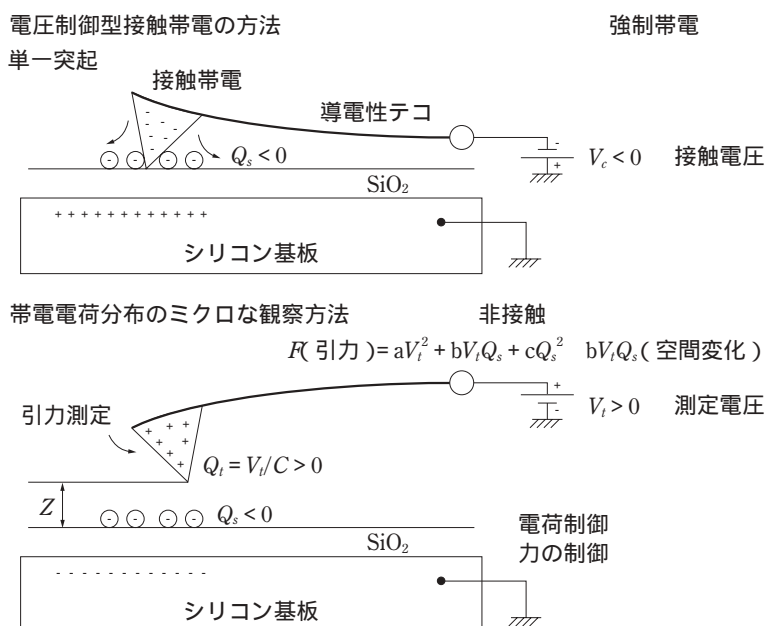


図3 “電圧制御型のミクロな帯電”と電荷の静電気力観察

本書は直接出版費の一部として文部科学省科学研究費補助金
(研究成果公開促進費「研究成果公開発表(A)」)の交付を受けています。

極微な力で拓くナノの世界

原子・分子のナノ力学最前線

平成 16 年 10 月 20 日 第 1 版発行

編 集 大阪大学大学院工学研究科教授 森田 清三

発行者 松田 國博

発行所 株式会社 クバプロ

〒 102-0072

東京都千代田区飯田橋 3-11-15 UEDA ビル 6 階

電話 03(3238)1689 振替 00170-9-173842

E-mail webmaster@kuba.co.jp

ホームページ <http://www.kuba.co.jp/>

印刷所 株式会社 技報堂

乱丁本・落丁本はお取り替えいたします。
価格はカバーに表示してあります。

ISBN4-87805-048-9 C0343