

「ナノ・マイクロテクノロジーの制御理論と応用」

解 説

MEMS/Microsystem から NEMS/Nanosystem — トップダウンとボトムアップの融合ナノファブリ ケーションとナノシステムの設計

田畑 修*

1. はじめに

微小電気機械システム (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems) は微小空間において, さまざまな物理化学量を相互作用させることで新規な機能を発現させるシステム・デバイスとして応用が拡大している [1]. 近年では Moore の法則 (半導体の集積密度は, 18~24ヶ月で倍になる, という経験則) に従って微細化が進む LSI においても, MEMS との融合による更なる機能向上を目指す More than Moore あるいは Beyond Moore の動きが活発になっている. シリコン (Si) 微細加工を基盤技術として製作される MEMS に対して, Si 微細加工技術に限定せず, 精密加工技術などを含めた多様な先端加工技術を駆使して製作される微小システムは欧州を中心にマイクロシステム (Microsystem) と総称されるが, 両者の概念はほぼ同等である. 一方, MEMS/Microsystem の “M” を “N” にした NEMS/Nanosystem という用語を目にする機会が増えた. これはナノスケールで形状や配列を制御したナノスケールの機能構造要素 (ナノコンポーネント) をトップダウン加工で作製した MEMS, Microsystem, LSI に組み込むことでその機能を飛躍的に向上させた NEMS/Nanosystem が今後 nano-electronics, nano-photonics, plasmonics など多方面において応用できると期待されているからである. NEMS/Nanosystem はトータルサイズをナノスケールにスケールダウンしたシステム・デバイスと定義する必然性はなく, 筆者は広義に, 量子効果や表面効果を利用するためにナノスケールであることが必然である部分にナノ構造が応用されているシステム・デバイスを NEMS/Nanosystem と考える立場をとっている.

本稿では, 筆者が専門としている MEMS 用 3 次元微細加工技術の立場から, まず NEMS/Nanosystem を実現するためのナノファブリケーション技術としてトップダウン加工とボトムアップ加工の 2 種類のアプローチと, それぞれの最小加工寸法を律速している主要因について述べる. つぎに, トップダウン加工した基板にボトムアップ加工したナノコンポーネントをセルフアセンブル技術で融合する方法と筆者の取り組みの一端を紹介し, 最後

にセルフアセンブル技術を用いて NEMS/Nanosystem を実現するうえで必要となると予想される新しい設計パラダイムについて述べる.

2. トップダウン加工とボトムアップ加工

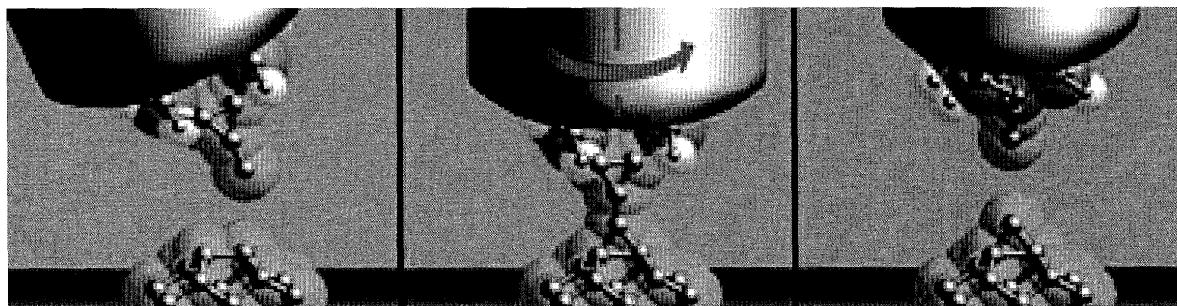
2.1 トップダウン加工

ナノコンポーネントを製作する際に, シリコンウエハあるいは, シリコンウエハ表面に形成された薄膜を加工して微細な点や線を形成する手法は, トップダウン加工とよばれる. Moore の法則に従って LSI の集積密度の向上を実現してきた半導体微細加工技術の進歩は, どこまで小さな点 (あるいは細い線) を製作できるかを示す最小加工分解能の進歩でもある. 1959 年 12 月 29 日, Richard Feynman は Caltech で行った有名な講演 “There’s Plenty of Room at the Bottom” の中で, トップダウンによるナノスケール加工の代表格である電子線描画技術について言及した [2]. 電子線描画は数 nm に絞った電子ビームを感光性高分子 (フォトレジスト) を薄く (数十 nm) 塗布した試料に照射してパターンを描画する. このとき, 加工できる最小加工分解能を律束するのは電子ビーム径ではなく, フォトレジスト内部で生ずる電子の散乱 (前方散乱) と基板表面に到達して跳ね返ってきた電子の散乱 (後方散乱) である [3]. たとえ, 1 点あるいは直線状のラインを描画したとしても, あたかも吸水性のよい紙に水性インクで書いた点や線のように, フォトレジストに描画されたパターンはにじんでしまう. 散乱により, 電子はフォトレジスト内部を 3 次元的に移動してフォトレジスト分子と衝突し反応する. また, 基板表面で生成される二次電子もフォトレジストと反応する. そのため, 電子ビームで露光される領域は, 電子ビーム径よりも大きくなる. この二次電子がビームを直接露光した位置以外にも与える影響や後方散乱電子による影響は近接効果とよばれる.

高加速電圧の電子ビーム描画装置を用いて入射させる電子ビームのエネルギーを上げれば二次電子の影響を減らすことはできるが, 電子ビームがフォトレジストに与えるエネルギー (= 電子が失うエネルギー) は小さくなり, その結果, 十分な露光量にするためには長い描画時間が必要となってしまう. 電子ビームのエネルギーを上げたにもかかわらず, フォトレジストに与えるエネルギー

* 京都大学 大学院 工学研究科

Key Words: MEMS, NEMS, Microsystem, Nanosystem, bottom up, top down, microfabrication.



第1図 Drexler らが提唱する“Machine-phase chemistry”の一例．マニピュレータが vinylidenecarbene をダイヤモンドの(100)面に表面再構成によって形成されたダイマーに近づけ、90度の回転と引張りによって vinylidenecarbene 先端の炭素をダイマーと結合させる [9]．

ギーが小さくなるのは奇異に感じられるが、フォトレジスト内で電子が失うエネルギーは $(\ln E)/E$ に比例する (E は入射エネルギー) ためである．二次電子や後方散乱電子の影響を軽減するためには、原子番号の小さい原子で構成された基板を使うのが効果的であるが、平面度や強度の観点から使用される基板材料はシリコン単結晶やガラスなどに限定される．したがって、電子線描画による最小加工分解能は数十 nm が限界となる．

波長数 nm の X 線を用いるシンクロトロン放射 X 線露光においても、最小加工寸法はフォトレジスト中で発生した光電子の拡散と基板からの反射が律束している．すなわち、トップダウンによるナノスケール加工における最小加工限界は確率的な過程に律束されるため、さらなる微細化を必要とする場合は、ボトムアップ加工の出番となる．

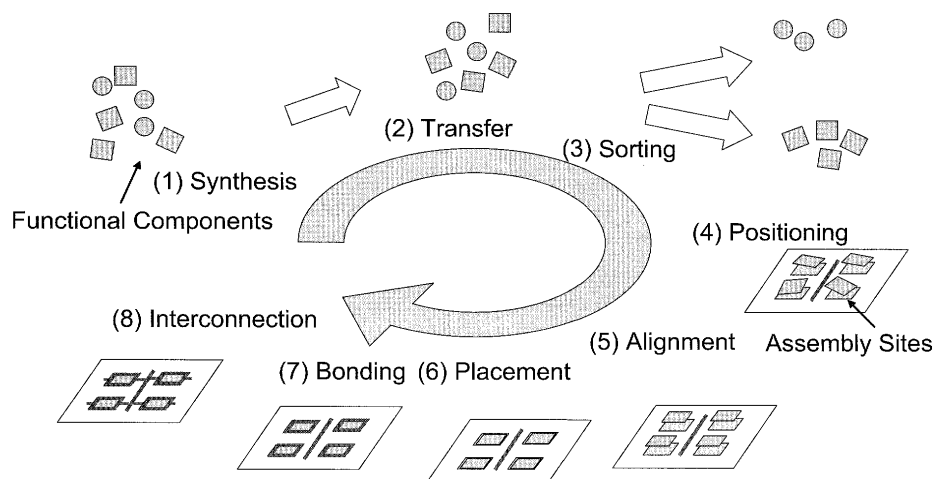
2.2 ボトムアップ加工

ナノスケールで発現する量子効果や表面効果を積極的に利用するために、原子、分子、あるいは微粒子の相互作用を用いた自己組織化（ボトムアップ加工）を用いてナノスケールで形状や配列を制御した機能材料を構築する試みは、ナノドットやナノ微粒子、機能薄膜などの実現で多くの成果をあげている．ボトムアップ加工を用いた原子・分子の自己組織化は、多様な材料においてテラメイド感覚でナノコンポーネントを実現できる可能性がある．ナノコンポーネントを大面積に規則的に配列することによって比較的構造のシンプルなナノポーラス材料やメタマテリアルを作製する研究や、数十 nm ～サブ μm オーダのより複雑なナノ構造を有するナノコンポーネントの実現を目指した DNA origami などの新規な手法に関する研究も加速している [4, 5]．

先述した 1959 年の講演で、Feynman は“The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom.”と、原子を単位としてナノ構造を操作するボトムアップ加工にも言及した．原子レベルの微細加工として、基板垂直方向に 1 層ずつ原子を積み重ねていく、あるいは削っていく技術は ALE (Atomic Layer Epitaxy) ある

いは原子層エッチングとして実現されており、これを用いた機能薄膜成膜とデバイスへの応用に関する研究は多い．しかし、さらに複雑な 3 次元ナノ構造の作製には基板面内方向の微細加工が必要である．基板面内方向の原子オーダ加工として典型的な手法は SPM (Scanning Probe Microscope) を用いた原子のピック&プレースによる方法である [6]．K. Eric Drexler は著書“Engines of Creation”で、原子・分子を原子オーダの精度で位置決めすることで化学反応を誘起させる“molecular assembler”を提唱した [7]．“molecular assembler”の実現可能性については、Eric Drexler と Richard Smalley の間で Chemical and Engineering News 誌を舞台にして交わされた議論が有名である [8]．Drexler は、第1図に示すような、原子ではなく分子を適切に搬送し精密に位置決めする“machine-phase chemistry”により、複雑な構造を組み立てるボトムアップ加工 [9]（加工というよりもむしろ合成）が可能であると述べている．分子は立体構造を有しているため、ボトムアップ加工を行う機械には対象とする分子を搬送し、姿勢を制御し、最適な角度で相手分子に近づける多自由度の動きが要求される．また、反応後にうまく分子をリリースする機能も必要である．

ボトムアップ加工の場合、相手の分子構造そのものがテンプレートとして分子のアセンブル位置、すなわち加工分解能を決めるため、トップダウン加工より優れた、分子振動スケールオーダの加工分解能が期待できる．一方で、分子が相手分子のしかるべき位置に結合するまでの間、熱による摂動に抗して分子を保持する際に要求される位置精度は、相手分子の結合位置周辺のポテンシャル場に依存する．熱による摂動の影響を低減するために雰囲気温度を下げると、分子間の反応が生じにくくなる．これらを考慮した多自由度を有する高精度マニピュレータによる“machine-phase chemistry”はまだ実現されていない．



第2図 確率論的アセンブルを構成する八つのユニット操作[10]

3. アセンブル技術によるマイクロとナノの融合

3.1 セルフアセンブルプロセスによる NEMS/Nanosystem 構築

NEMS/Nanosystem を実現する手法としてボトムアップ加工が産業応用フェーズの視野に入るまでには、まだ多くの基礎研究が必要である。一方、電子ビーム加工を用いた微細加工は製品化された電子ビーム露光装置の導入により利用可能であるため、NEMS/Nanosystem、単電子トランジスタなどの量子デバイスやフォトニックデバイスなどの光デバイスのナノファブリケーションに広範に利用されている。しかし、電子ビーム露光装置を導入しても、NEMS/Nanosystem のみならず LSI へも応用が期待されている単層カーボンナノチューブ (Single Wall Carbon Nanotube: SWCN) などのナノ材料を配線、ゲート、センシングエレメントに利用することは困難である。その理由は、Si 半導体微細加工技術をベースとしている NEMS/Nanosystem や LSI の製造プロセスと SWCN の創製プロセスとのコンパティビリティがないためである。ナノスケールで3次元加工した多様な材料を MEMS と融合することで高機能化を目指す NEMS/Nanosystem にとって、ナノ材料とのプロセスコンパティビリティを確保することは困難である。

そこで注目されるのが、トップダウン加工した基板にボトムアップ加工したナノコンポーネントをアセンブル技術で融合する方法である。この方法は次の二つの利点を有する。

- (1) 化合物半導体、ポリマー、セラミックス、多様な金属など、従来の Si 微細加工プロセスとコンパティビリティのない多様なナノ材料を、それぞれに最適な合成・加工プロセスでナノコンポーネントに加工した後に NEMS/Nanosystem として集積化できる。
- (2) トップダウン加工の限界である 10nm の微細化の

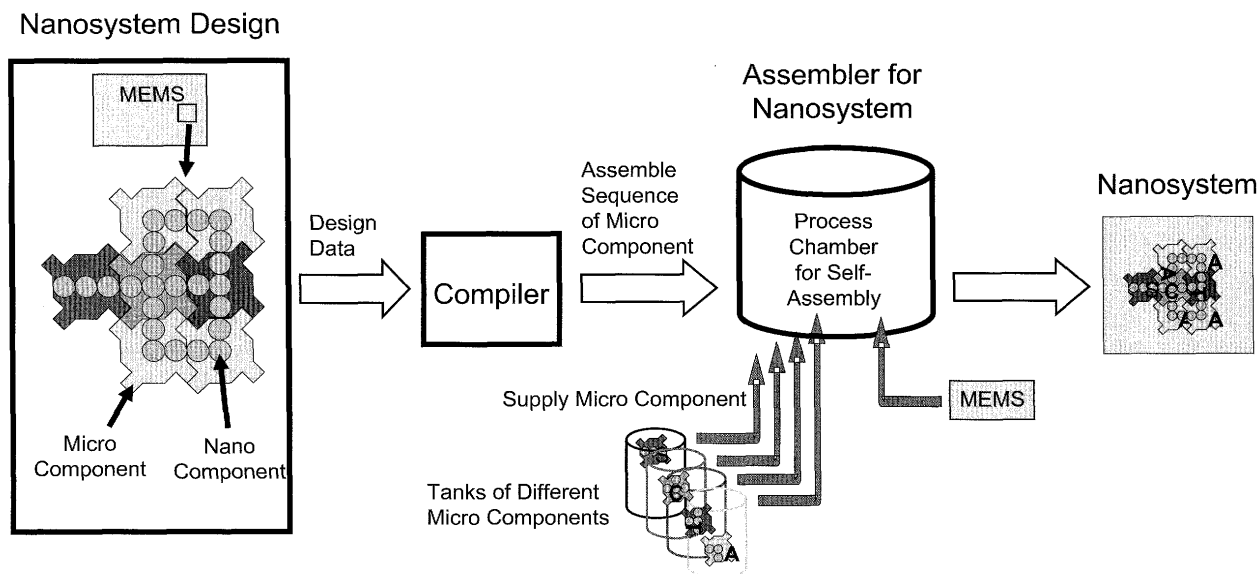
壁を超えた nm オーダー～サブ nm オーダーのナノ構造を NEMS/Nanosystem として集積化できる。

3.2 確率論的アセンブルとユニット操作

MEMS 分野におけるアセンブルは決定論的 (deterministic) な手法と確率論的 (stochastic) な手法に大別される。決定論的手法はさらに順次処理 (serial) と並列処理 (parallel) に分類される。先述した SPM を用いたマニピュレーションは順次処理に属する。並列処理はそれぞれ異なる基板上に製作したコンポーネントを基板ごと接合、あるいは移設する方法である。順次処理・並列処理のいずれの方法も物理的に制御したアライメント (位置合わせ) 操作が必要であり、アライメント精度は機械的な位置決め精度で決まる。一方、確率論的手法は、エネルギーが小さくなる方向に作用する力 (エネルギー最小原理) を用いて部品を自動的に位置決めするセルフアセンブルであり、多数のアセンブリプロセスを同時に行える並列処理である。著者は、確率論的アセンブルを第2図の八つのユニット操作からなる複合プロセスと位置づけ、各ユニットプロセスを実現するために利用可能な多様な物理現象を利用したアプローチをメニューとして提供しようと考えている [10]。ナノコンポーネントと基板のアセンブルに関する要求仕様に応じて、各ユニットプロセスのメニューから最適な方法を選択し、組み合わせることでセルフアセンブルプロセスを系統的に設計できる環境の構築が最終目標である。

3.3 プログラムドセルフアセンブル

ナノコンポーネントを、単に MEMS・LSI のチップ上に均一に規則正しい秩序構造として形成しただけの場合、実現できる機能発現には限界がある。スケールによらず、システムは構成要素間で複雑な相互作用させることで高度な機能を発現しており、“多様な機能コンポーネントの複雑な相互配置の実現手段”がシステム構築の本質と考えられるからである。しかし、MEMS・LSI の機能部品として、ナノコンポーネントを決められた位



第3図 システム設計図に従ってナノコンポーネントをMEMS・LSIに融合するプログラムドアセンブルを実現するシステムの概念構成 [10]

置に（プログラム）正しく組み込む（アセンブル）技術はまだ実現されていない。すなわちプログラムドアセンブル技術の実現なくしては、ナノコンポーネントのNEMS/Nanosystemへの応用展開は極めて限定的になる。LSIにおいては、システム構造の複雑さはフォトマスクパターンに内包されている。電子描画においても本質は同じであり、2次元描画パターンデータがシステムの複雑さを内包している。従来のトップダウン加工において2次元描画パターンデータが果たしてきた役割をナノスケールにおいて代替し、システム設計図に従って機能コンポーネントをMEMS・LSIに融合させる手段として、著者はプログラムドアセンブル技術を提案している [10]。

第3図にプログラムドアセンブルを実現するためのシステムの基本概念を示す。大きさが μm ～サブ μm のナノコンポーネントをシステム構築のビルディングブロックとして用いる。ナノコンポーネントに形成するナノ構造は従来のセルフアセンブリで実現できるレベルのシンプルな秩序構造とし、機能に応じて複数種類のナノコンポーネントをあらかじめ準備しておく。システムが要求する複雑さは、ナノコンポーネントをプログラムに従って時系列的に空間配置していくことで実現する点が特徴である。ナノコンポーネントの空間的な相互配置を設計図として用意し、コンパイラが設計図に従ってアセンブラで行う機能コンポーネントのアセンブルシーケンスを決定する。アセンブラは、MEMS/Microsystem基板がプロセスチャンバにセットされると、設計図に応じて必要なナノコンポーネントを取り出し、ブロック間の相互作用力を時系列的に制御するために、その表面に後述する適切な物理化学的な処理を施す。その後、ナノコンポーネントを分散した溶液をMEMS/Microsystem基板

上に供給し、基板上の多数のアクティブサイト（プログラムによって活性化された取り付け部）において同時並行的に順次セルフアセンブルでナノコンポーネントを配置する。コンパイラから提供されるシーケンス情報に基づいて上記を繰り返して、ナノコンポーネントを設計図どおりに順次空間的に配置していくことで複雑システムを構築する。

ブロック間の相互作用力を時系列的に制御する手法として、著者はDNAのハイブリダイゼーションを用いる方法を提案している [11, 12]。DNAは、接着する相手を選択し温度によって接着力の発現を制御できる、インテリジェント接着剤として用いられている。すでに、表面を一本鎖DNAで修飾した $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ のナノコンポーネントを模擬したシリコンブロックを、これと相補的な一本鎖DNAで修飾したシリコン基板上的のアセンブルサイトに、環境温度制御によるタイミング制御によって順次的にセルフアセンブルする基礎実験により、基本的概念の有効性を確認した。表面に一本鎖DNAを固定したナノコンポーネントの動的アセンブル挙動は複雑で、アセンブルプロセスのモデリングとこれに基づくプロセスの最適設計と制御は今後の課題である。

4. 確率論的アプローチの課題と設計パラダイムシフト

セルフアセンブルでナノコンポーネントをMEMS・LSIに組み込んでNEMS/Nanosystemを実現するプロセスが、確率論的な並列プロセスであることを述べた。この確率論的な並列プロセスを評価する際、プロセス時間と収率（必要なナノコンポーネントが正しい位置にアセンブルされた割合）が性能指標となる。短時間で100%の収率を達成できることが望ましいが、アセンブ

ルされたナノコンポーネントが、何らかの理由でディスプレイアセンブルされてしまう確率が有限である場合、無限時間を費やしても収率は 100% にはならない。ナノコンポーネントとサイトが接触する頻度を支配する様々なパラメータもプロセス時間と収率に大きな影響を与える。これらを最適化したプロセス制御を実現するためには、セルフアセンブルプロセスのモデリングが必要不可欠である。Drexler らが “machine-phase chemistry” を提唱したように、セルフアセンブルプロセスと化学反応には共通点が多いため、セルフアセンブルプロセスのモデリングも化学反応速度論や分子動力学の考え方を参考に構築できると期待される [14]。

もう一つの解決法は、NEMS/Nanosystem のシステム設計や動作原理に、システムの構成要素が完璧であることを前提とせず、システムに欠陥があることを前提とした新しい設計パラダイムを導入することである。すなわち、システムが不完全であることを前提とし、100% 以下の収率でアセンブルされた不完全なシステムでも、要求性能を満足する冗長性を高めたシステム設計を行う欠陥内包システムの設計論の構築である。ディスプレイのような多数の画素が規則的に配列されているデバイスにおいて、欠陥画素の情報を周りの情報から補完することによって欠陥による影響を回避する手法はあるが、NEMS/Nanosystem のような複雑なシステムで実現した例はない。微細化によって生み出される高密度化と高コストパフォーマンス化によって、チップ上に搭載できる機能が飛躍的に増大したため、欠陥内包システム設計パラダイムによって冗長性を高め、確率論的並列プロセスで製作する NEMS/Nanosystem の実現可能性が高まってきている。

5. おわりに

MEMS 用 3 次元微細加工技術の立場から、NEMS/Nanosystem を実現するためのトップダウン加工とボトムアップ加工の 2 種類のナノファブリケーション技術を最小加工分解能の観点から概観し、トップダウン加工では確率的な現象が最小加工分解能を律束し、ボトムアップ加工では熱による摂動が最小加工分解能を律束することを述べた。つぎに、ナノスケールで 3 次元加工した多様な材料を MEMS と融合することで NEMS/Nanosystem を実現するセルフアセンブル手法について述べ、著者らのアプローチの一端と今後の方向を紹介した。また、セルフアセンブル法によって NEMS/Nanosystem を実現する際に必要と予想されるモデリングの重要性と欠陥内包冗長システムの設計論の必要性について述べた。MEMS・LSI に組み込んだ NEMS/Nanosystem の早期実用化を目指すのであれば、すべてのナノコンポーネントを一つ一つ位置決めして組み立てるスキームを棄て、確率論的製造プロセスを用いるために、製造と設計の研究者・技術者がそれぞれ新しいパラダイムでの協調・連

携を行う必要があり、本稿が関連する研究者の意見交換のきっかけとなれば幸いである。

(2009 年 3 月 10 日受付)

参考文献

- [1] O. Tabata, Y. Gianchandani and H. Zappe, ed.: *Comprehensive Microsystems*, Elsevier (2007)
- [2] R. P. Feynman: There's Plenty of Room at the Bottom, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [3] 木本, 矢野, 杉田, 黒部, 山本(共著): マイクロ応用加工, 共立出版 (1999)
- [4] P. W. K. Rothmund: Scaffolded DNA origami: from generalized multicrossovers to polygonal networks; *Nanotechnology: Science and Computation*, pp. 3-21 (2006)
- [5] F. Aldaye and H. F. Sleiman: Dynamic DNA templates for gold nanoparticle discrete structures: Control of geometry, particle identity, write /erase and structural switching; *J. Am. Chem. Soc.*, 129, pp. 4130-4131 (2007)
- [6] H. J. Lee and W. Ho: Single bond formation and characterization with a scanning tunneling microscope; *Science*, 286, pp. 1719-1722 (1999)
- [7] K. E. Drexler: *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Doubleday (1986)
- [8] Chemical & Engineering News: Cover Story - Nanotechnology, December 1, 2003, <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>
- [9] S. P. Walch and R. C. Merkle: Theoretical studies of diamond mechanosynthesis reactions; *Nanotechnology*, 9, pp. 285-296 (1998)
- [10] O. Tabata: Micro/Nano assembly as a key to SENS (Synthetic Engineering for Nano Systems); *ECS Transactions*, Vol. 16, Issue 15, pp. 40-64 (2008)
- [11] T. Kusakabe, T. Tanemura, Y. Higuchi, K. Sugano, T. Tsuchiya and O. Tabata: DNA mediated sequential self-assembly of nano/micro components; *Proc. of The 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 1052-1055 (2008)
- [12] T. Tanemura, G. Lopez, R. Sato, K. Sugano, T. Tsuchiya, O. Tabata, M. Fujita and M. Maeda: Sequential and selective self-assembly of micro components by DNA grafted polymer; *Proc. of The 22nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 184-187 (2009)
- [13] R. Sato, T. Tanemura, G. Lopez, M. Serry, K. Sugano, T. Tsuchiya and O. Tabata: Modeling of self-face-alignment process using contact potential difference; *Proc. of International Conference on Electronics Packaging (ICEP) 2009*, pp. 959-962 (2009)

著者略歴

た ばた
田 畑おさむ
修

1956年9月21日生。1979年名古屋工業大学計測工学科卒業，1981年名古屋工業大学大学院修士課程修了。同年(株)豊田中央研究所入社，1996年立命館大学理工学部機械工学科助教授，2000年同教授，2003年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻教授，2005年改組により同マイクロエンジニアリング専攻教授となり現在に至る。その間，2000年9月より12月までドイツ，フライブルグ大学客員教授，2001年1月から3月までスイス，連邦工科大学客員教授。主として，MEMS，マイクロシステム，微細加工に関する研究に従事。工学博士。1987年日本ME学会研究奨励賞，1991年電気学会論文発表賞，1993年および1998年R&D100Award，2002年センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム最優秀ポスタ賞，2004年立命館大学渡辺三彦発明賞受賞。機械学会，電気学会，IEEEなどの会員。