



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

Vol. **15**

## 自己組織化応用プロセス分野の 技術戦略策定に向けて

2016年12月

<b>1</b> 章 自己組織化応用プロセス技術の概要 .....	2
<b>2</b> 章 自己組織化応用プロセス技術の置かれた状況 .....	3
2-1 自己組織化応用プロセス技術の産業応用 .....	3
2-2 自己組織化応用プロセス技術の動向 .....	5
2-3 各国の研究開発政策の状況 .....	10
<b>3</b> 章 自己組織化応用プロセス分野の技術課題 .....	15
<b>4</b> 章 おわりに .....	16

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## 1章 自己組織化応用 プロセス技術の概要

日本の産業技術の要となる電子・工学部品などの分野において、マイクロやナノレベルで制御された部材と、それらの製造技術は非常に重要である。

その製造技術は、「トップダウン法」と「ボトムアップ法」の2つの方法に分類される。

トップダウン法は、大きな素材の塊から余分な部分を取り除いて目的の形状や構造をつくる微細加工技術である。代表的な例として、半導体や電子デバイスの著しい高集積化を支えてきた微細加工技術である「フォトリソグラフィ」がある。フォトリソグラフィは光（主に紫外光）を用いて、マスクのパターンを感光材（レジスト）に転写して目的パターン等を対象物上に描く技術である。現在、フォトリソグラフィを利用した20nmを切る回路パターンのLSI（Large Scale Integration）の大量生産が実現されており、極短波長の紫外光を用いて、更なる微細化のための技術開発が進められているが、その限界に達しつつある。また、装置や材料のコストの増大も課題となっている。

ボトムアップ法は、原子や分子、それらの集合体である微結晶、微粒子など、多数の小さなユニットを組み立て、目的とする形状、パターン、構造を形成する微細組立技術である。究極の原子単位の組立技術としては、走査型プローブ顕微鏡や原子間力顕微鏡を用いた原子操作（マニピュレーション）技術がある。この技術によって二次元の原子配列の一部を他の原子と交換して文字を描くことに成功しているが、三次元の物体を自由に組み立てる技術には至っていない。

そこで、ボトムアップ法のうち、組立装置を用いることなく適当な周囲環境を設定するとユニットが自発的に集まり、パターンや構造を形成する「自己組織化」と呼ばれる現象を利用した技術に注目が集まっている。自己組織化は広い分野で用いられている概念で、物質・材料系の分野においても定義に幅があり、研究者の間でも共通認識が得られていない。

ここでは、自己組織化を「材料やデバイスの構成要素が自ら集まって、ある構造を形成していく、又はエネルギーや物質が拡散していく動的過程の中で構成要素が自らあるパターンや構造を形成していく現象」<sup>※1</sup>と定義し、産業技術に適用可能なプロセスという観点から以下の4つ<sup>※2</sup>に該当する技術を取り上げる。

1. 分子が自ら集合・集積し、目的とする機能を発現するような構造を形成する技術（例：MOF（Metal-Organic Framework：金属有機構造体）、相分離ポリマー、自己修復機能をもつ物質・材料等）
2. 結晶化における核生成・成長の過程、形状、配向などを制御する技術（例：電池電極の配向結晶等）
3. 生体分子や生体模倣システムにおける構造形成技術（例：階層構造形成による機能化、コロイド膜、医用ゲル等）
4. 界面や表面における自律的構造形成技術（例：ハニカム構造、アルミナ陽極酸化ナノホールアレイ等）

なお、自己組織化を用いたプロセスは電子・光学分野や触媒分野で実用化が期待されてきた技術であるが、上述の1～4に記したように、これまで経験的に用いられてきた、電子・工学・触媒分野以外の旧知の技術も含まれる。

※1 出所：高野・小口「自己組織化材料研究の動向」Science and Technology Trends July 2002（科学技術・学術政策研究所）を基に、NEDO技術戦略研究センター作成（2015）

※2 出所：EPSRC, A Roadmap to Innovation, The EPSRC Directed Assembly Network（2012）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2015）

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## 2章 自己組織化応用プロセス技術の置かれた状況

### 2-1 自己組織化応用プロセス技術の産業応用

表1に、自己組織化応用プロセス技術の想定用途先分野と部材をまとめた。本技術の多くは具体的な製品や部材そのものの開発ではなく、製造プロセスの技術開発であるため、市場規模を直接算出することは困難であるが、半導体関連部材など市場の大きな分野への寄与が期待され、製造産業への波及効果は大きいと予想される。

表1 自己組織化応用プロセス技術の想定用途先分野と部材の例

分野	部材	世界市場規模(2013年)
エレクトロニクス分野	半導体部材(ウエハ)	1.4兆円
	半導体周辺積層部材	3兆円
	有機EL部材	2兆円
	光学デバイス部材	4.3兆円
エネルギー分野	太陽電池用化合物半導体	2,500億円
	リチウム二次電池部材	1.9兆円
	燃料電池電極部材	1,400億円
化学・環境分野	触媒	6,200億円
	イオン交換設備部材	3,800億円
ライフサイエンス分野	バイオ技術・再生医療関連部材	2.3兆円
インフラ	コンクリート	4,520億円 (2015年国内市場規模)

出所:平成26年度成果報告書「日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集」、「セメントの需給」(一般社団法人セメント協会,2015)、「主要建設資材の市況動向と価格動向」(一般財団法人建設物価調査会,2015)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

以下に、自己組織化プロセスの応用例を挙げる。

#### (1) 実用化されている応用例

##### ① 反射防止フィルム(プロセス工数の削減事例)

金属アルミニウム表面を陽極酸化すると、自己組織化により多数のナノ細孔(ナノホールアレイ)をもつ酸化アルミニウム膜が形成される。これを鋳型として作製したナノサイズの突起構造(モスアイ構造)をもつフィルム(図1)は、光の反射率が極めて小さいことから、シャープが液晶テレビ用の反射防止フィルムに採用した。この手法では1工程でナノホールアレイを生成できる。

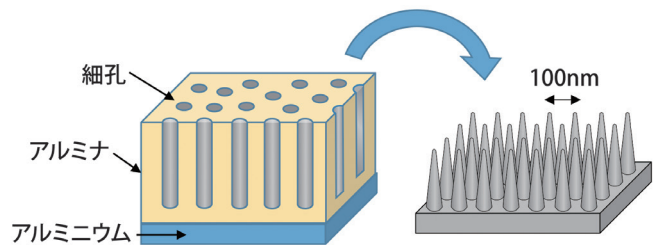


図1 陽極酸化法による反射防止フィルムの鋳型の製造  
出所: NEDO 技術戦略研究センター作成(2016)

##### ② 量子ドットレーザー(プロセス工数の削減事例)

ガリウム・ヒ素(GaAs)基板上にインジウム・ヒ素(InAs)を成膜する過程で、丸みをもつ多数のInAs突起物(量子ドット)が形成される(図2)。富士通と三井物産で設立されたベンチャー企業であるQDレーザーではこの基板を5~10積層した量子ドットレーザーデバイスを実用化している。この方法では1層当たり1工程で基板上にドットを量産できる。

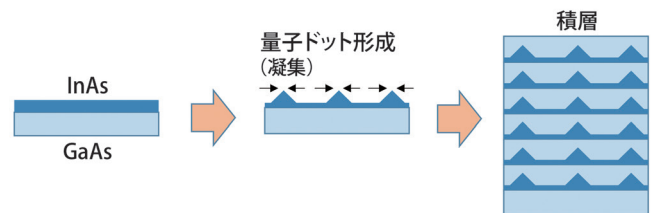


図2 GaAs基板上へのInAs量子ドット形成及び積層化によるレーザー素子  
出所: NEDO 技術戦略研究センター作成(2016)

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## ③メソポーラスシリカ（新構造の実現事例）

メソポーラスシリカは一定のサイズの細孔をもつ多孔質材料であり、界面活性剤分子の自己組織化による柱状構造を鋳型として製造され（図3）、触媒担体や吸着剤などに使われている。界面活性剤の長さにより、反応や吸着に合わせて最適な細孔径を形成することができる。なお、このような構造はトップダウン法では製造できない。

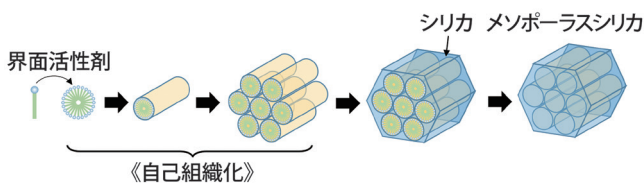


図3 界面活性剤の自己組織化を利用するメソポーラスシリカの製造

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2016）

## ④視野角拡大フィルム（新構造の実現事例）

富士フイルムが開発した、自己組織化を利用して円盤状液晶分子を傾斜配向させたフィルムは、液晶ディスプレイの視野角を拡大する機能を持ち、液晶テレビに採用された。

## (2) 今後実用化予定又は実用化が期待されている応用例

### ①半導体微細パターン（新構造の実現事例）

相分離系ポリマーブレンドの自己組織化を用い、集積回路の細線ピッチを微細化するDSA (Directed Self-Assembly) と呼ばれる技術をJSRが開発している。あらかじめフォトリソグラフィーでプレパターンニングした溝に相分離系ポリマーをコーティングし、自己組織化による相分離を誘起する。次いでエッチング処理を行い2分の1間隔のパターンが完成する（図4）。リソグラフィーの精度を上回る高精細な回路形成が可能になることから実用化が期待されている。

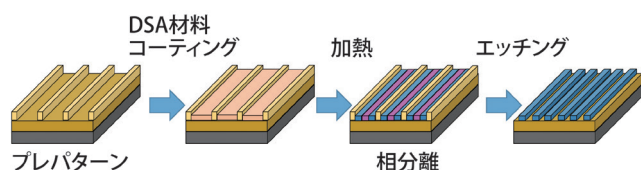


図4 自己組織化材料による細線加工の例

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2016）

## ②エアギャップ（省エネルギープロセスの実現事例）

次世代マイクロプロセッサの製造において、ナノワイヤー周囲に究極の絶縁体である真空の空間（エアギャップ）を自己組織化で均一に多数形成する技術がIBMによって開発された。この手法では、通常のフォトリソグラフィーで必要なマスキング、露光、エッチングのプロセスを省略できる。またその効果としてプロセッサの信号伝達を35%高速化し、消費エネルギーを15%節約できる<sup>※3</sup>。

## ③ハニカム構造（製造プロセス工数の削減事例）

基板上に自己組織化で形成される水滴を鋳型として蜂の巣構造の多孔質膜（ハニカム膜）を作製する技術が富士フイルム、帝人、ジャパン・ティッシュ・エンジニアリング、東北大学、北海道大学、金沢大学、北九州市立大学が参加するNEDOのプロジェクト（2007～2009年度）で開発され（図5）、医療用材料や細胞培養基材として実用化が期待されている。同じ工程をフォトリソグラフィーで製造する場合と比較し、工程数は100分の1に短縮される。

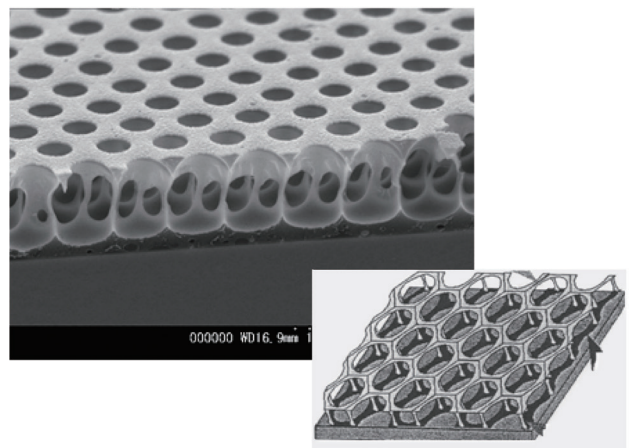


図5 自己組織化を利用して製造したハニカム膜

出所：NEDO Nanotech2014パンフレット  
<http://www.nedo.go.jp/content/100554475.pdf>

※3 出所：IBM プレスリリース（2007）  
<http://www-06.ibm.com/jp/press/20070507002.html>

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## ④自己修復コンクリート(自己修復材料の事例)

コンクリート構造物のひび割れを自律的に修復し、検査や補修のコストを大幅に削減することが可能になる自己修復コンクリートの開発が検討されている(図6)。通常用いられるセメントの配合比を変え、ひび割れに未反応成分が侵入して固まる能力を高める方法のほか、バクテリアやパイプネットワークを利用する方法等、様々なタイプが世界中で研究されている。

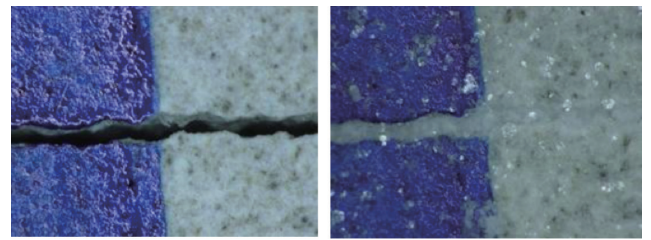


図6 自己修復コンクリートの研究例  
(セメントにひびを入れ(左図)水を浸すと、3日でひび割れが修復される(右図))

出所: NEDO ニュースリリース(2008年9月4日)  
([http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_0405A.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0405A.html))

## 2-2 自己組織化応用プロセス技術の動向

### (1) 論文分析

自己組織化に関する論文の国別発表件数と総発表件数の推移を図7に示す。自己組織化に関する論文発表総数は1990年あたりから一貫して増加しており、盛んに研究されてきた技術領域であることが分かる。国別の動向を見ると、日本、米国、ドイツ、フランスは近年頭打ち、又は漸減傾向にある一方、中国では2005年以降の伸びが大きい。

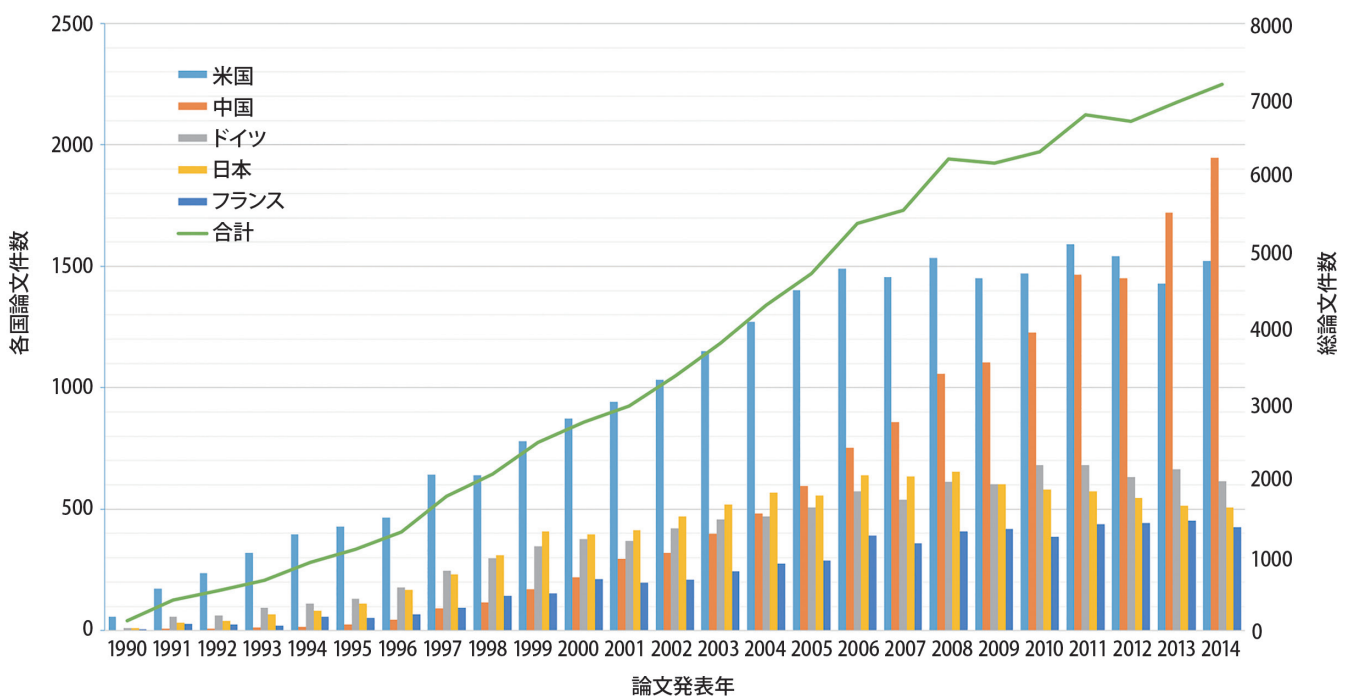


図7 自己組織化に関する論文数の推移(1990～2014年)

出所: Web of Science™ Core Collectionでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2015)

## 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

各国の論文総数の比率（図8）及び各国の被引用数TOP10の論文の総引用数（図9）をみると、いずれも米国がトップである。一方、近年論文数を伸ばしている中国は、論文比率では2位であるが被引用数はドイツ、フランス、日本に次いで5位である。

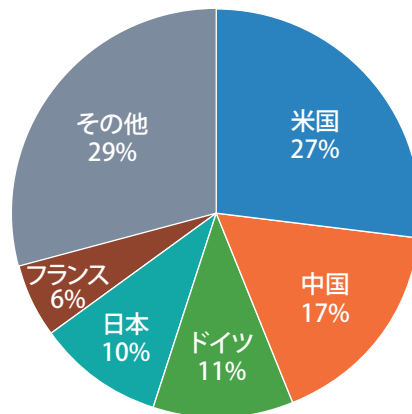


図8 国別の自己組織化に関する総論文比率（1990～2015年）

出所: Web of Science™ Core Collectionでの検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2015）

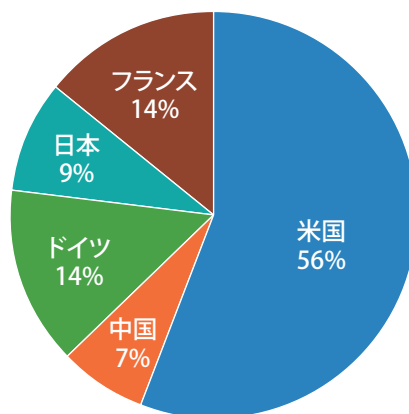


図9 各国被引用件数TOP10論文の総被引用比率（1990～2015年）

出所: Web of Science™ Core Collectionでの検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2015）

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

論文発表数の研究機関別TOP10には、中国、ロシア、米国、欧州とともに、東京大学、京都大学、東京工業大学の3機関が含まれている。(図10)。

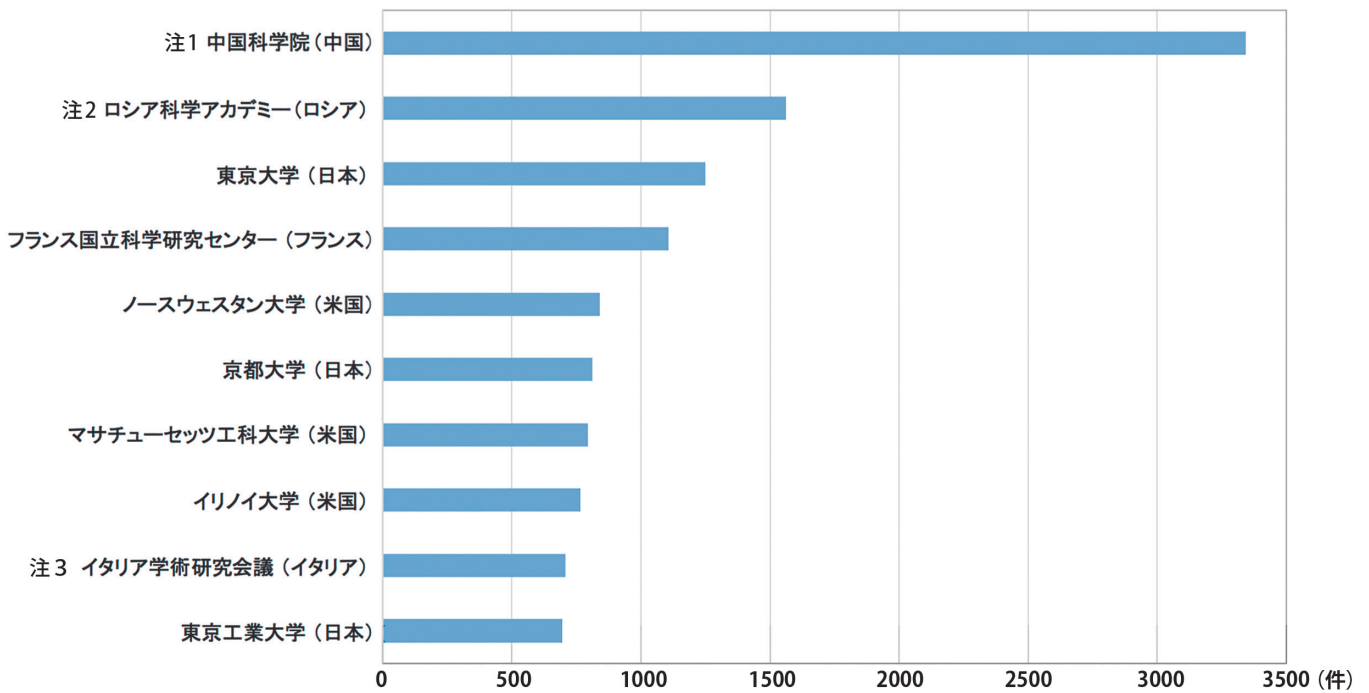


図10 自己組織化に関する論文数の研究機関TOP10 (1990～2015年)

注1 中国科学院は中国国内の約100か所の分院、研究院、研究所等を総括する組織であり、単独の研究機関からの論文件数とは単純に比較できない

注2 ロシア科学アカデミーはロシア国内の約300か所の研究所を統括する組織であり、単独の研究機関からの論文件数とは単純に比較できない

注3 イタリア学術研究会議は約120の研究機関を統括するイタリア最大の学術組織であり、単独の研究機関からの論文件数とは単純に比較できない

出所: Web of Science™ Core Collectionでの検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 特許分析

自己組織化に関する特許出願件数は、一貫して増加傾向にある(図11)。

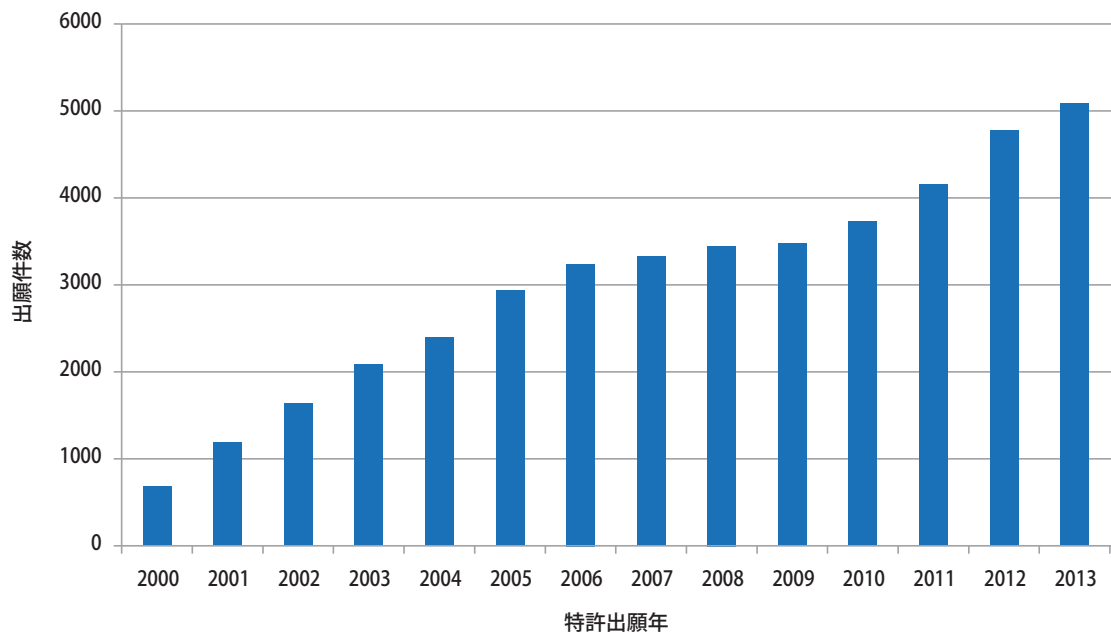


図11 自己組織化関係の特許出願件数の推移 (2000～2013年)  
出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

全出願人国籍の分析では、日本は米国、中国に次ぐ3位である。また、日本のシェア(19%)は米国(38%)の2分の1、中国(23%)とは拮抗している(図12)。

順位	出願人国籍	出願数
1	米国	18046
2	中国	11170
3	日本	9125
4	韓国	3935
5	欧州	1251
6	ドイツ	949
7	英国	916
8	フランス	473
9	台湾	327
10	PCT出願	671
	その他	1007

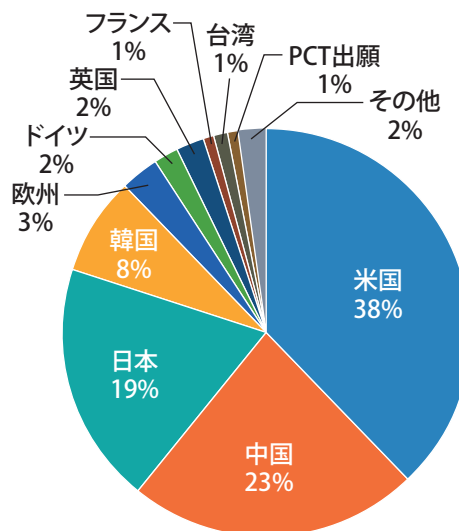


図12 自己組織化関係 特許出願人国籍 (2000～2015年)  
出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)



# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (3) プレーヤー

特許出願件数トップ20社中に日本の企業10社、産総研、JSTがランクインしており、特に富士フイルム(1位)、セイコーエプソン(2位)、ソニー(5位)等は上位5位に入っている(表2)。10位以内の日本企業が国内に出願した主な特許の内容を以下に示す。これら企業では自己組織化を積極的に材料プロセスに取り入れていることがうかがえる。

- ①富士フイルム: ハニカムフィルム、パターン形成、非湿潤性コーティングなど
- ②セイコーエプソン: 液晶の無機配向膜と自己組織化膜の組み合わせ、圧電体等の保護膜、はっ水膜など

- ③ソニー: スクリーンの表面の微粒子配列、半導体素子の積層実装基板など
- ④リコー: 薄膜トランジスタ保護膜、レジスト、圧電保護、液晶配向など
- ⑤キヤノン: マイクロレンズアレイ、有機トランジスタ(バイオセンサー)の有機表面反応層、多孔質材料、はっ水膜、インクジェット用のインクなど
- ⑥東芝: 半導体(レジストパターン形成)、磁気記録媒体(パターン形成、ドットマスクパターン形成)など

表2 自己組織化関係 特許出願企業ランキング(2000～2015年)

順位	出願人	本社所在地	出願数
1	富士フイルム	日本	719
2	セイコーエプソン		566
3	IBM	米国	562
4	SAMSUNG ELECTRONICS	韓国	559
5	ソニー	日本	515
6	カリフォルニア大学	米国	465
7	リコー	日本	386
8	産総研		356
9	キヤノン		347
10	東芝		344
11	マサチューセッツ工科大学	米国	333
12	科学技術振興機構(JST)	日本	330
13	浙江大学	中国	312
14	パナソニック	日本	307
15	大日本印刷		265
16	富士通		中国
	上海交通大学		
18	コニカミノルタ	日本	258
	Fudan大学	中国	
20	KAIST	韓国	242

出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

## 2-3 各国の研究開発政策の状況

### (1) 各国の研究開発及び産業化状況

各国の自己組織化に関する研究開発と産業化の状況を表3に示す。日本と欧州は特に基礎研究が優れている。一方、応用研究・開発や産業化については各国とも同程度の状況にある。

表3 各国の自己組織化に関する研究開発及び産業化状況

フェーズ	日本	米国	欧州	中国	韓国
基礎研究	◎(↗)	○(↗)	◎(↗)	△(↗)	○(→)
応用研究・開発	○(→)	○(↗)	○(→)	○(↗)	○(↗)
産業化	○(→)	○(↗)	○(↗)	○(↗)	○(→)

【フェーズ】

基礎研究: 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発: 研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

産業化: 量産技術・製品展開力のレベル

【評価】

◎: 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている

○: ある程度の活動・成果が見えている

△: 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない

×: 特筆すべき活動・成果が見えていない

【トレンド】

↗: 上昇傾向

→: 現状維持

↘: 下降傾向

出所: 研究開発の俯瞰報告書 テクノロジー・材料分野 (CRDS,2015) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 我が国における主なプロジェクト

自己組織化に関連する科学研究費補助金の採択件数の推移を図13に示した。採択件数の総数は1990年以降一貫して増大しており、研究が盛んであることが分かる。JSTプロジェクトでは広い領域の関連テーマが、ACCEL、CREST、ERATOの事業で実施されている(表4)。さらにNEDOプロジェクトにおいても、自己組織化が関与するプロジェクトを進めている(表5)。

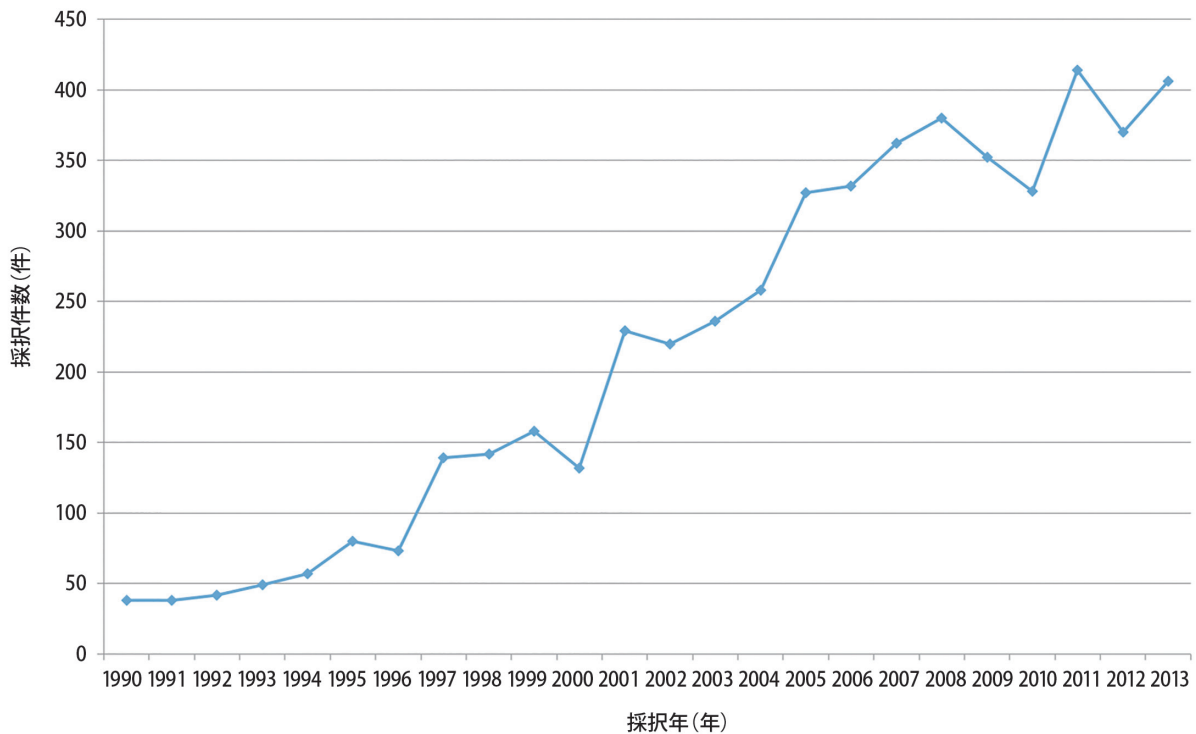


図13 科学研究費補助金の採択件数の推移(1990～2013年)

出所: 科学研究費助成事業データベース (<https://kaken.nii.ac.jp>) を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

※注: データベースへの反映に遅れがあるため、2013年までの分析を行った。

## 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

表4 自己組織化関連のJST採択プロジェクト

プロジェクト	テーマ	期間	研究総括(所属(当時))(敬称略)
ACCEL	自己組織化技術に立脚した革新的分子構造解析	2014-2018	藤田 誠 (東京大学)
CREST	超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製	2014-2019	加藤 隆史 (東京大学)
	プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製	2008-2016	曾根 純一 (物質・材料研究機構)
	ナノ界面技術の基盤構築	2006-2013	新海 征治 (崇城大学)
	二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出	2008-2012	安井 至 (東京大学)
	ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成	2006-2011	堀池 靖浩 (物質・材料研究機構)
	生命現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術	2004-2011	柳田 敏雄 (大阪大学)
ERATO	中嶋ナノクラスター集積制御プロジェクト	2009-2014	中嶋 敦 (慶應義塾大学)
	高原ソフト界面プロジェクト	2008-2013	高原 淳 (九州大学)
	下田ナノ液体プロセスプロジェクト	2006-2011	下田 達也 (北陸先端科学技術大学院大学)
	橋本光エネルギー変換システムプロジェクト	2005-2010	橋本 和仁 (東京大学)

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

表5 自己組織化が関係するNEDOプロジェクト

プロジェクト	テーマ	期間	委託先(敬称略)
エネルギー・環境新技術先導プログラム	低電力積層型半導体用高密度自己組織化配線技術の研究開発	2015	東北大学、東芝、物質・材料研究機構、東京大学
太陽エネルギー技術研究開発 革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)	高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日EU共同開発) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発(WP2)	2011-2014	東京大学先端科学技術研究センター
次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発	高度TFTアレイ印刷製造のための材料・プロセス技術開発	2011-2015	次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合
先導的産業技術創出事業 (若手研究グラント)	有機薄膜太陽電池用素材の製造コスト低減と高純度化を達成する重縮合反応の開発	2011-2015	桑原 純平 (筑波大学)
	ナノ構造制御によるポリマー薄膜太陽電池の高効率化	2011-2015	但馬 敬介 (理化学研究所)
	FePt系規則合金の強磁性-常磁性相変化を誘起するイオン照射型フラット・パターニング法によるビット・パターンド・メディアの開発	2011-2015	長谷川 崇 (秋田大学)
次世代半導体微細加工・評価基盤技術開発(超低電力デバイスプロジェクト)	EUVマスク検査・レジスト材料技術開発	2011-2015	(株) EUVL基盤開発センター

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (3) 欧州における主なプロジェクト

欧州では2000年以降、自己組織化に関係する70以上のプロジェクトが実施されてきた。このうち総額7億円を超える予算規模のプロジェクトを表6に示す。これらは欧州研究開発フレームワーク計画の第6次計画 (FP6)、第7次計画 (FP7)、及びその後継である「Horizon 2020」の予算で運営されており、研究内容や用途は多岐にわたっている。

表6 欧州における自己組織化に関する主なプロジェクト

プロジェクト/テーマ	期間	プロジェクト費(予算) (単位:億円) <sup>※注1</sup>	幹事国	研究開発成果の用途
Emerging Nanopatterning Methods	2004 - 2008	41.4	フィンランド	CMOS等半導体デバイス
Projecten IOP Self Healing Materials	2006 - 2014	26.6	オランダ	自己修復材料(ポリマー、複合材、金属・セラミクス、コンクリート・アスファルト、コーティングを含む)
Hybrid ultra-precision manufacturing process based on positional- and self-assembly for complex micro-products	2006 - 2010	17.9	スイス	汎用マイクロデバイス
Self-Assembled semiconductor Nanostructures for new Devices in photonics and Electronics	2004 - 2008	12.2	ドイツ	光デバイス、エレクトロニクス
Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures	2013 - 2016	7.5	ベルギー	自己修復コンクリート
Peptide-based Nanoparticles as Ocular Drug Delivery Vehicles	2010 - 2014	7.3	英国	ドラッグデリバリー
Nanochemistry and self-assembly routes to metamaterials for visible light	2009 - 2013	7.2	フランス	メタマテリアル
Sensitizer Activated Nanostructured Solar Cells	2011 - 2013	7.0	英国	増感型太陽電池

出所: Community Research and Development Information Service ウェブサイト ([http://cordis.europa.eu/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/home_en.html)) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

※注1: 為替1ユーロ=133円、1ドル=120円で換算

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (4) 米国における主なプロジェクト

アメリカ国防高等研究計画局 (DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency) は、原子サイズからナノメートルサイズの部品 (原料) を使い、ミリメートルサイズの製品を組み上げる技術開発プログラム「Atoms to Product (A2P)」を開始し、その実施者として10の大学、研究所、企業を選定したと発表した (2015年12月29日)。予算規模や開発内容の詳細は明らかになっていないが、一部のテーマは原子や分子の自己組織化現象の利用を想定していると推測される (表7)。

表7 DARPAのAtoms to Product (A2P) プロジェクトの概要

テーマ	実施機関・企業	内容	用途・目標
Nanometer to Millimeter in a Single System	Emboddy	生体模倣によるコラーゲンナノファイバを用いた再生医療	軍用、スポーツ
	Draper	DNA自己集合を利用し、高周波ロス低減のためのサブミクロンワイヤー編線を製造	携帯等の通信機器情報量を10倍に
	Voxel Inc.	三次元有機・無機マルチマテリアルを高速・低コストで原子から直接製造する技術	—
Optical Metamaterial Assembly	Boston Univ.	ナノ粒子を用いてナノメートル精度でメタマテリアルを構築	軍用 (ステルス、カムフラージュ)
	Univ. of Notre Dame	ホログラフィック光トラップ法を用いてメタマテリアルを構築	軍用
	HRL Labs.	入射角依存性のない赤外線高反射材料の構築	反射率98%
	PARC	デジタル・マイクロアセンブリ・プリンターの開発。これを用いてマイクロ構造がカスタマイズされたメタマテリアルを高速で製造	—
Flexible, General Purpose Assembly	Zyvex Labs.	マイクロ・ロボットを用い、マイクロメータスケールの機能性デバイスを製造	超高感度センサ、量子通信デバイス、超小型時計等
	SRI	MEMSと組み立てロボットの技術を組み合わせ、マイクロ及びミリメートルサイズのコンポーネントを集積もしくは電気的に結合させて、材料やエレクトロニクス・デバイス等を製造	高強度材料、高速エレクトロニクス、センサ
	Harvard Univ.	ミリメータスケールの外科用ツールを、低コストな積層プロセスで製造	低侵襲外科手術や救命処置

出所: DARPA ウェブサイト (<http://www.darpa.mil/news-events/2015-12-29>、及び <http://www.darpa.mil/work-with-us/a2p-performers>) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# 自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

## (5) 韓国における研究拠点

韓国では2013年に政府の研究機関であるIBS (Institute for Basic Science) 研究センターの組織の一つとしてCSC (Center for Self-assembly and Complexity)が形成された。ここでは、複雑性と自己集合の背後にある基礎原理の研究を通じ、新しい分子ネットワークシステムやナノ材料の創製を目指している。

## 3章 自己組織化応用プロセス分野の技術課題

これらの自己組織化応用プロセス技術の実用化に向けて共通する最も大きな技術課題は、自己組織化を任意にコントロールすること、すなわち制御性である。一例として、DSA技術による半導体微細パターンへの応用において、パターン形成時に発生する構造の乱れのイメージを図14に示す。本来、等幅・等間隔であるべき規則構造の一部に、途切れや枝分かかれなどの乱れ(点線囲い部分)が生じることがある。電子デバイス部材など、高い精度が求められる

用途では、このような不連続部分や線間隔・規則構造の乱れは製品機能の致命的欠陥をもたらす。したがって、乱れの無い高度な制御が求められる。

上記のような高度な制御を実現するためには、自己組織化応用プロセスの最もマイクロなレベルの現象である、原子・分子が集合し、クラスター・分子集合体・巨大分子・結晶化等のナノ構造体を形成していくメカニズムを理解することが重要である。さらに、ナノスケールでの原子・分子の挙動(分布と時間変化)を観察する高度な測定技術や、多数の原子・分子間に働く弱い相互作用による構造形成をシミュレーションする計算理論や計算ソフトウェアの開発が必要である。

また、マクロスケールの視点で、多数のナノ粒子など構造体がさらに高次の構造を形成していく過程や、結晶化初期の核発生から規則構造を形成し、結晶成長する過程等の自己組織化現象の制御因子(場や共存分子)を理解すると共に、実用化に向けた実材料へのスケールアップ技術、長期安定性・耐久性の確保、機能の複合化や多機能化、構造形成環境の精密な制御やトップダウン法との融合技術等の研究も必要である。

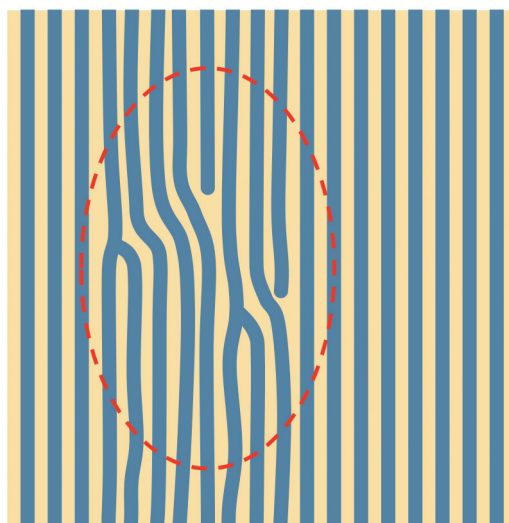


図14 DSAを利用した細線パターン形成時に発生する構造の乱れ(点線囲い部分)

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

## 4章 おわりに

自己組織化応用プロセス技術はナノテクノロジー・材料分野において、電子・光学材料分野をはじめとして様々な産業に大きな波及効果が期待される技術である。

論文・特許分析から、我が国には大学等の優れた研究成果の蓄積があり、材料プロセスに自己組織化を積極的に利用する企業も多いことが示された。しかしながら、自己組織化をプロセス技術として確立し、さらに広い用途分野に活用していくためには、前章で述べたように制御性の向上、欠陥の抑制、均一性向上など克服すべき課題がある。

したがって、我が国では産業界が抱えるこれらの技術課題を、優れた研究者とともに解決すべく、産学が連携した体制を築き、自己組織化応用プロセス技術の迅速かつ着実な産業化で世界をリードしていくことが望まれる。



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight Vol.15

自己組織化応用プロセス分野の技術戦略策定に向けて

2016年12月5日発行

TSC Foresight Vol.15 自己組織化応用プロセス分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター (TSC)

■センター長 川合 知二

■ ナノテクノロジー・材料ユニット

- ・ユニット長 川合 知二 (センター長兼任)
- ・主任研究員 成毛 治朗
- ・研究員 岡田 明彦  
井関 隆之  
鶴田 修一  
橋本 就吾
- ・フェロー 北岡 康夫 大阪大学大学院工学研究科  
附属高度人材育成センター教授  
出村 雅彦 東京大学先端科学技術研究センター  
特任教授

- 本書に関する問い合わせ先  
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)
- 本書は以下URL よりダウンロードできます。  
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。