

|              |                                                                                                                                             |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | ナノテクノロジー分野における技術進展に関する研究<br>：論文引用解析による検討                                                                                                    |
| Author(s)    | 梅澤，朋一；藤村，修三                                                                                                                                 |
| Citation     | 年次学術大会講演要旨集，29：18-21                                                                                                                        |
| Issue Date   | 2014-10-18                                                                                                                                  |
| Type         | Conference Paper                                                                                                                            |
| Text version | publisher                                                                                                                                   |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/12386">http://hdl.handle.net/10119/12386</a>                                                           |
| Rights       | 本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management. |
| Description  | 一般講演要旨                                                                                                                                      |

# ナノテクノロジー分野における技術進展に関する研究 —論文引用解析による検討—

○梅澤朋一，藤村修三（東京工業大学大学院）

## 1. はじめに

物質をナノメートルオーダーで自在に制御する先端科学技術であるナノテクノロジーは，社会的，経済的に波及効果の大きい技術であり，様々な分野への実用化が期待されている．一方でナノテクノロジーの実用化は困難であると考えられており，その背景として企業が，

①技術と市場がうまくマッチせず，適切な応用分野を見出せないため，製品化に難しさを感じている．

②大学/研究機関との関わりを重視しているが，製品開発に活かしていない．

と，考えている点が指摘されている<sup>1)</sup>．

本研究では，実際のナノテクノロジー研究がどのように進展しているのか把握するため，ナノテクノロジーの一つであるナノインプリントに注目した．この技術は，金型を高分子樹脂にプレスすることで金型のもつ微細パターンを樹脂表面に転写する技術であり，様々な応用が期待されている．ここでは，ナノインプリント技術とその応用がどのように関わって研究開発が進展しているのか，大学/研究機関と企業がどのように関わって研究開発が進んでいるのか，を明らかにする事を目的に論文の引用解析から検討を行った．

## 2. 研究方法

本研究では，ナノインプリント関連技術論文の引用関係を解析した（図1）．まず，Sciverse社のデータベースScopusを用い，“nanoimprint”というキーワードで2012年までの論文を3,322件抽出した．次にこの論文群の引用関係から，Newman-Girvan法によりクラスタリングを行った<sup>2)</sup>．各クラスタのラベリングは，論文に記載されているキーワードを用いた（後述）．最後に各クラスタ間の知識の流れを引用の方向性によって計測し，ナノインプリント技術と応用の間の知識の流れとナノインプリント技術の進展メカニズムを把握することを試みた．

ここで，各クラスタのラベリングは，各クラスタの特徴的なキーワードを以下の方法により抽出することで行った．論文群全体におけるキーワード $k$ の発生確率 $P_T(k)$ を

$$P_T(k) = N_T(k) / \sum N(k_n) \quad N_T(k) \text{ 論文群全体におけるキーワード } k \text{ の発生個数} \quad (1)$$

と定義する．一方 $n$ 番目のクラスタにおけるキーワード $k$ の発生確率 $P_{CLn}(k)$ を

$$P_{CLn}(k) = N_{CLn}(k) / \sum N_{CLn}(k_n) \quad N_{CLn}(k) \text{ } n \text{ 番目のクラスタにおけるキーワード } k \text{ の発生個数} \quad (2)$$

と定義する．ここで各クラスタに特徴的なキーワードがある場合には， $P_{CLn}(k)$ のスペクトルは図2のようにピークを持つ．すなわち， $P_{CLn}(k)$ と $P_T(k)$ の差分の大きいキーワードが各クラスタの特徴的なキーワードとなる．

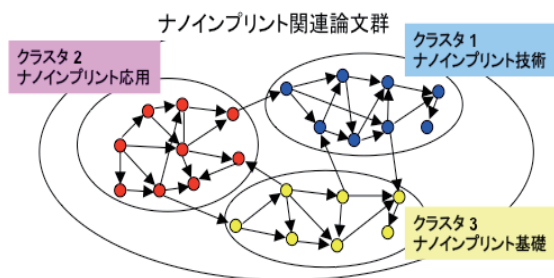


図1 論文の引用解析手法

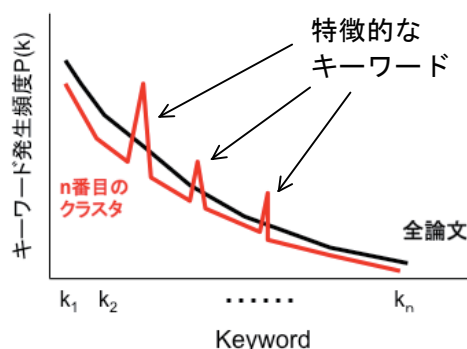


図2 特徴的なキーワードを抽出するための概念図

### 3. 研究結果と考察

#### 3.1. ナノインプリント技術とその応用の階層性

表 1 にナノインプリント関連論文のクラスタリング結果を示した. 27 のクラスタに分類出来た. また 2. で述べた方法でラベリングを行い, 各クラスタはナノインプリント技術 (青), ナノインプリント基礎 (メカニズム) (黄), 製造技術/装置 (緑), ナノインプリント応用 (赤) に分類された. ここで, 企業からの論文発表の比率はクラスタ毎に異なっている. 例えばナノインプリント基礎のクラスタは, 企業単独の論文は少なく, 大学/研究機関が主導していることが示唆された. 一方でナノインプリント応用においては, 企業から発表の多いクラスタとそうで無いクラスタに分類された. これは, 企業が注目し製品化に近い分野と, 大学/研究機関が主導し, まだ実用化が遠い分野の違いを反映しているものと考えられる.

表 1 各クラスタのラベリング結果と企業からの論文割合

| Cluster No. | Cluster Name                                                      | Cluster Type                  | Average Year | 論文件数 | 企業参加割合 [%] | 企業参加割合 企業のみ [%] |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|------|------------|-----------------|
| Cluster0-1  | Nanoimprint process                                               | Nanoimprint technique         | 2008.1       | 487  | 36.3%      | 10.7%           |
| Cluster0-2  | Novel nanoimprint process                                         | Nanoimprint technique         | 2008.1       | 367  | 22.9%      | 5.7%            |
| Cluster0-3  | Device application using nanoimprint                              | Application                   | 2009.0       | 294  | 29.6%      | 10.9%           |
| Cluster0-4  | Nanoimprint mechanism                                             | Nanoimprint technique (Basic) | 2007.2       | 288  | 20.5%      | 2.4%            |
| Cluster0-5  | Fabrication technique using nanoimprint and nanoimprint equipment | Fabrication                   | 2007.4       | 163  | 27.0%      | 14.1%           |
| Cluster0-6  | Patterned magnetic media                                          | Application                   | 2009.0       | 129  | 41.1%      | 17.8%           |
| Cluster0-7  | Nanostructure                                                     | Application                   | 2008.3       | 64   | 25.0%      | 6.3%            |
| Cluster0-8  | Optical and photonic device application                           | Application                   | 2009.8       | 52   | 30.8%      | 11.5%           |
| Cluster0-9  | Nanomaterial                                                      | Application                   | 2007.6       | 52   | 13.5%      | 5.8%            |
| Cluster0-10 | Organic photonics and electronics application                     | Application                   | 2008.4       | 47   | 19.1%      | 0.0%            |
| Cluster0-11 | Molecular dynamic simulation                                      | Nanoimprint technique (Basic) | 2008.8       | 43   | 11.6%      | 2.3%            |
| Cluster0-12 | Diffraction grating                                               | Application                   | 2008.8       | 38   | 13.2%      | 2.6%            |
| Cluster0-13 | Stamper                                                           | Nanoimprint technique         | 2007.9       | 37   | 13.5%      | 0.0%            |
| Cluster0-14 | Nanoparticle                                                      | Application                   | 2008.5       | 33   | 6.1%       | 3.0%            |
| Cluster0-15 | Waveguide                                                         | Application                   | 2009.4       | 29   | 48.3%      | 6.9%            |
| Cluster0-16 | Graphene                                                          | Application                   | 2010.1       | 22   | 45.5%      | 9.1%            |
| Cluster0-17 | Hydrophobicity                                                    | Application                   | 2007.1       | 18   | 5.6%       | 0.0%            |
| Cluster0-18 | Mold                                                              | Nanoimprint technique         | 2009.1       | 13   | 15.4%      | 7.7%            |
| Cluster0-19 | Organic solar cell                                                | Application                   | 2010.6       | 12   | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-20 | Si solar cell                                                     | Application                   | 2010.1       | 9    | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-21 | Transducer                                                        | Application                   | 2008.2       | 9    | 22.2%      | 0.0%            |
| Cluster0-22 | Liquid crystal                                                    | Application                   | 2005.5       | 8    | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-23 | Gas sensor                                                        | Application                   | 2010.0       | 4    | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-24 | Plasmonic waveguide                                               | Application                   | 2009.5       | 4    | 25.0%      | 0.0%            |
| Cluster0-25 | Complex nanostructure                                             | Application                   | 2010.7       | 3    | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-26 | Chromophore material                                              | Application                   | 2006.3       | 3    | 0.0%       | 0.0%            |
| Cluster0-27 | Fiber                                                             | Application                   | 2011.0       | 3    | 0.0%       | 0.0%            |

図 3 に各クラスタの論文数の推移を示した. クラスタ 0-1~0-10 のクラスタにおいては, ナノインプリント技術/基礎→ナノインプリント装置/製造技術→ナノインプリント応用の順に論文数の立ち上がりが見られる. 一方, ナノインプリント技術クラスタであるクラスタ 0-1 (Nanoimprint process) のサブクラスタは, 大きく 2 つに別れ, クラスタ 0-1-2 (UV-NIL) ~0-1-5 (Durability) は, 応用関連クラスタとほぼ同時期に立ち上がっている. 応用分野と関連性が考えられ, 相互の引用関係を調べた.

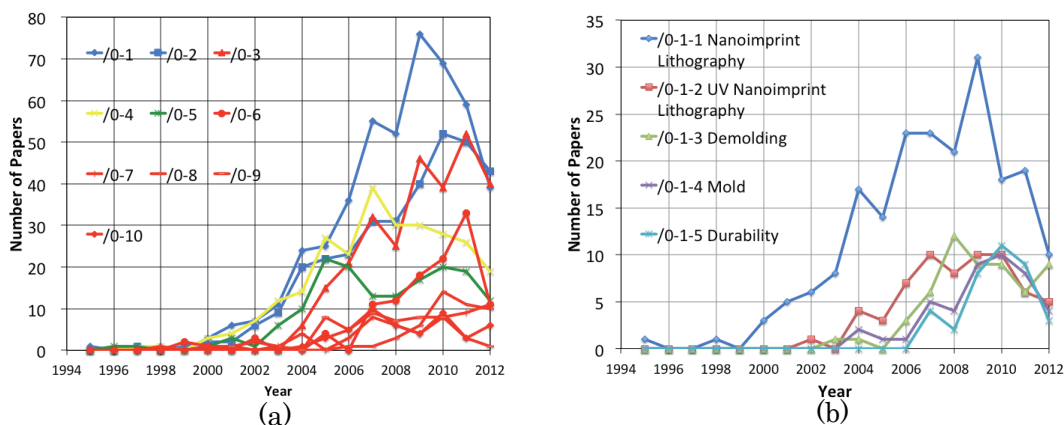


図 3 各クラスタの論文推移. (a) クラスタ 0-1~0-10, (b) クラスタ 0-1 のサブクラスタ (0-1-1~0-1-5)

まず, ナノインプリント技術から各応用クラスタへの引用を調べた. クラスタ 0-1-1 (Nanoimprint lithography) からは, 各応用クラスタへ引用が見られたが, ここで引用されている論文は, ナノインプリントの最初の論文<sup>3)</sup> (Chou, 1995) のみであり, この論文から各応用クラスタが発生していた. 一方, ク

ラスト 0-1-2~0-1-5 からの引用については、引用のあるクラスタと無いクラスタに分かれた。図 4 に各応用クラスタの企業参加論文数とクラスタ 0-1-2~0-1-5 からの引用数との関係を示した。両者に直線関係が見られ、企業参加の多い応用クラスタ程、クラスタ 0-1-2~0-1-5 からの引用が多い。これらのサブクラスタの技術が製品化に重要な技術であることを示しているものと考えられる。

次に、逆の引用である、応用クラスタからナノインプリント技術クラスタ（クラスタ 0-1）への引用について調べた（表 2）。応用クラスタから、クラスタ 0-1-1 にはほとんど引用が無い一方、クラスタ 0-1-2~0-1-5 には多く引用があることがわかる。また、クラスタ 0-1-1 に比べて、クラスタ 0-1-2, 0-1-5 は企業の論文比率が大きい。これらのクラスタは、製品化に必要なプロセス技術であるという認識があり、企業が研究に参入していることを示していると考えられる。一方でクラスタ 0-1-3 は企業の論文参加比率が低い。この要因を調べるため、ナノインプリント基礎クラスタからクラスタ 0-1 への引用を調べた（表 3）。クラスタ 0-1-3 への引用が多いことがわかる。クラスタ 0-1-3 では技術進展させるために、基礎的な知識まで立ち戻らざるを得ない状況を反映しているものと考えられる。

表 2 応用クラスタからナノインプリント技術クラスタ（クラスタ 0-1）への引用と、クラスタ 0-1 における企業参加の関係

|            |                                  | 応用クラスタからの引用<br>規格化引用数 | 企業参加<br>論文比率 |
|------------|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| ナノインプリント技術 | 0-1-1 Nanoimprint lithography    | 0.04                  | 0.36         |
|            | 0-1-2 UV nanoimprint lithography | 0.16                  | 0.55         |
|            | 0-1-3 Demolding                  | 0.28                  | 0.22         |
|            | 0-1-4 Mold                       | 0.23                  | 0.36         |
|            | 0-1-5 Durability                 | 0.08                  | 0.43         |

ここまで議論を元にナノインプリント技術と応用の関係をモデル化した（図 5）。ナノインプリント技術と応用は、それぞれの技術領域で階層構造を取っており、ナノインプリント技術は、プロセス技術と量産プロセス技術の 2 つの階層、応用は、原理確認段階と製品化段階の 2 つの階層が確認された。また、各階層のプレーヤは異なっており、プロセス技術と原理確認段階の階層は大学/研究機関、量産プロセス技術と製品化段階の階層は企業がそれぞれキープレーヤであった。更にそれぞれの階層性を踏まえた上で、ナノインプリント技術と応用の関わりについては、

- ①ナノインプリント技術を適用し、応用側の原理確認を行う段階。
  - ②応用側からのフィードバックにより、量産プロセスとしての技術が開発される段階。
  - ③量産プロセス技術を応用製品に適用する段階
- という過程があると考えられる（図 5）。

### 3. 2. ナノインプリント技術の螺旋的技術進展

次にナノインプリント技術、基礎、応用の各クラスタ間における双方向の引用関係について時間的な変化を検討する。ここで、2 つの技術領域があった場合に、領域間で相互作用を行いながら技術進展していく、螺旋的技術進展モデルを提案する（図 6(a)）。理想的なモデルでは、まず領域  $\alpha$  の技術の影響により領域  $\beta$  の技術が進展する。次に領域  $\beta$  の技術の影響により、領域  $\alpha$  の技術が

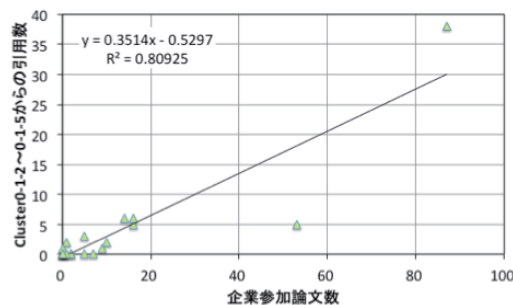


図 4 応用クラスタの企業参加論文数とクラスタ 0-1-2~0-1-5 からの引用数との関係

表 3 ナノインプリント基礎クラスタ（0-4, 0-11）からクラスタ 0-1 への引用

|            |                                  | 基礎クラスタからの引用<br>規格化引用数 |
|------------|----------------------------------|-----------------------|
| ナノインプリント基礎 | 0-1-1 Nanoimprint lithography    | 0.04                  |
|            | 0-1-2 UV nanoimprint lithography | 0.16                  |
|            | 0-1-3 Demolding                  | 0.48                  |
|            | 0-1-4 Mold                       | 0.17                  |
|            | 0-1-5 Durability                 | 0.08                  |

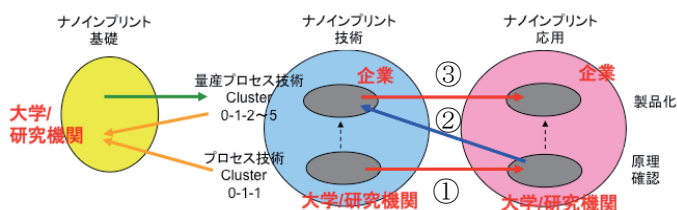


図 5 ナノインプリント技術と応用の階層モデル

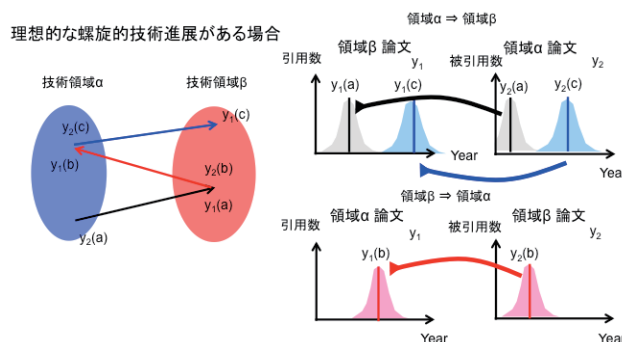


図 6 螺旋的技術進展モデル(a)と論文引用特性の関係(b)

進展する．このように領域間時間的に交互に影響を及ぼしながら技術進展していく．また、この場合、図 6 (b) のように領域間を時間的に交互に、論文の引用が現れるはずである．

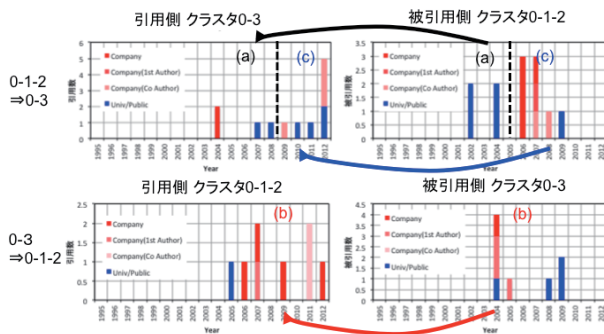


図 7 ナノインプリント技術クラスタ 0-1-2 とナノインプリント応用クラスタ 0-3 間の引用関係．  
赤：企業の論文，青：大学/研究機関の論文．

まず、ナノインプリント技術クラスタ 0-1-2 とナノインプリント応用クラスタ 0-3 間の引用関係を調べたところ、螺旋的技術進展に相当する、時間的に交互の引用関係が観察された (図 7)．また、クラスタ 0-1-2 における論文著者の属性は、(a) では大学/研究機関、(b) では企業、(c) では企業であり、螺旋が 1 度回転する (a) から (b) の過程でキープレーヤが大学/研究機関から企業に変わっている．

同様にナノインプリント技術クラスタ 0-1-2 とナノインプリント基礎クラスタ 0-4 間の引用関係においても、螺旋的技術進展が見られている (図 8)．ここでクラスタ 0-1-2 の論文著者属性は、(a) が大学/研究機関、(b) では、2004 年までは大学/研究機関であり、それ以降企業に変わっているものの、(c) において再度大学/研究機関となっている．

これらの結果を元に、ナノインプリントにおける螺旋的技術進展モデルを示した (図 9)．ナノインプリント技術は、基礎および応用の各領域と相互作用しながら技術進展していく螺旋的技術進展をしていることが明らかとなった．またナノインプリント技術の上位階層であるクラスタ 0-1-2 においては 3 つのサブ階層を持ち、各階層でプレーヤが異なっていた．

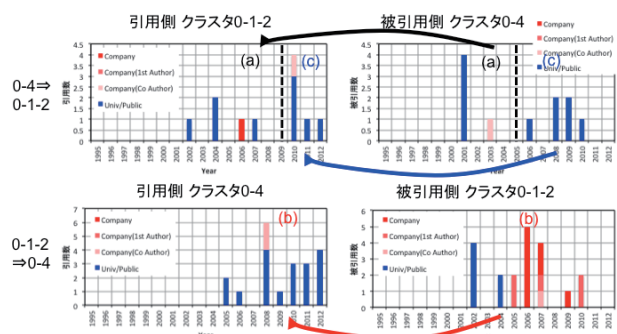


図 8 ナノインプリント技術クラスタ 0-1-2 とナノインプリント基礎クラスタ 0-4 間の引用関係．  
赤：企業の論文，青：大学/研究機関の論文．

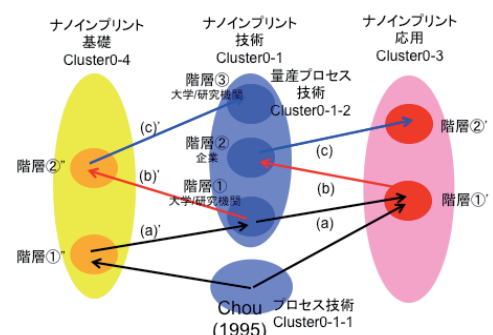


図 9 ナノインプリントにおける螺旋的技術進展モデル

#### 4. おわりに

本研究では、ナノインプリントにおける技術進展を論文の引用解析から検討した．その結果、ナノインプリント技術とその応用は、それぞれ階層構造が見られ、それぞれの階層のプレーヤは異なっていた．また、ナノインプリント技術では、基礎および応用の各分野と相互作用しながら技術が進展していく、螺旋的技術進展が見られた．このように、ナノインプリント分野の研究は、基礎から応用という単純な線形モデル<sup>4)</sup>ではなく、且つ基礎研究は大学/研究機関、応用は企業と言った単純な研究開発分担では無いことが明らかとなった．すなわち、技術の領域と階層性、その研究主体を強く意識した上で、各々が相互作用することを認識して、研究開発を進めることが重要である．

今後の課題として、ナノインプリント分野で個々の企業がどのように研究開発を進めているのかを明らかにすることが挙げられる．この点については、企業属性と論文発表しているクラスタと階層の関係、論文の共著関係等を精査し、企業がどのようにして技術獲得しているのかを検討する予定である．

#### 参考文献

- 1) 桐畑哲也：“ナノテクノロジー事業化とデスバレー現象,” JAPAN VENTURES REVIEW **5** (2004) 73.
- 2) M. E. J. Newman and M. Girvan: “Finding and evaluating community structure in networks,” Phys. Rev. **E 69** (2004) 026113.
- 3) S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom: “Imprint of sub-25nm visa and trenches in polymers,” Appl. Phys. Lett. **67** (1995) 3114.
- 4) 韓 金江：“技術進歩に関する理論-その概念と構造-,” 立命館経営学 **43** (2004) 123.