

Title	論文情報の分析による電界効果トランジスタ分野の分析
Author(s)	藤末, 智夏; 藤末, 健三; 坂田, 一郎
Citation	年次学術大会講演要旨集, 31: 648-651
Issue Date	2016-11-05
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/13862
Rights	本著作物は研究・イノベーション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 Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

講演題目 論文情報の分析による電界効果トランジスタ分野の分析

○藤末智夏, 藤末健三, 坂田一郎 (東京大学)

概要

技術経営の分野において、論文・特許情報のビッグデータを俯瞰することによって、研究の全体像や萌芽領域を把握する手法が報告されている。このような手法は、経営学などの社会分野から太陽電池(PV)などの工学分野でも幅広く用いられてきている。しかし、半導体分野の領域の一つである、かつ省エネルギー化において重要な電界効果トランジスタ(FET)分野への応用例は報告されていない。そこで、本研究では論文情報のクラスタリングを行い、それぞれの平均発行年や国籍等を分析することによってFET分野における研究の全体像、萌芽領域、また、国ごとの研究の特徴の抽出を行った。

1. 序論

科学技術の発展に伴い、社会に発信される情報量は爆発的に増加している。例えば、DNAに関する論文は、ワトソンとクリックが二重らせん構造を発見した当時の年間発行数は100本ほどであったが、近年では年間10万本以上に激増し、現在の累積数は数百万本となっている[1]。このような情報の爆発によって研究領域は細分化され、全体像を把握することが専門家ですら困難になっている。加えて、研究者が自分の研究分野に閉じこもりその領域の論文のみの精読を行う、すなわち閉じた専門分野のみにおける活動を助長している。このような現象は他分野の研究者がその知識にアクセスする機会を失わせ、本来近分野の知識同士の融合を難しくしてしまう危険性がある。例えば、ロケットの打ち上げにおいて、設計者の単純な材料に関する知識の混乱が打ち上げ失敗という大きな事故を引き起こした事例がある。

また、知の構造化は学術研究の俯瞰的理解以外にもきわめて広範囲に応用できる。例えば、技術ロードマップの作成支援、研究戦略、研究資金の配分の最適化、萌芽領域の抽出、である。太陽電池分野においては、学術俯瞰によるロードマップの一部の再現・萌芽領域の抽出が報告されている[2][3]。

本研究では、FETにおける学術俯瞰を行った。FETとは、電流を制御するデバイスであり、スイッチング素子や増幅素子として活用されている。近年では、環境問題の懸念による省エネルギーへの関心の向上から、エネルギー高効率化において重要なFETの需要は安定して存在し、学術分野においても活発に研究が行われている。現段階ではSiC(シリコンカーバイド)やGaN(窒化ガリウム)等の無機材料を用いたFET製品が広く普及しているが、有機材料を用いた有機FETをはじめとして、次世代FETの研究領域が存在している。従って、知識構造が複雑で発展途上であり、本分野の分析は社会的ニーズが大きいものとなっている。

2. 実験手法

本研究では、学術俯瞰システムを用いて知の構造化を行った。学術俯瞰システムでは、WOS[4]から学術論文の書誌情報を収集し、重み付き引用ネットワーク作成・最大連結部分に絞るクラスタリングを行い、ネットワーク指標や俯瞰図を得た[1]。本研究においては、クエリ:(field AND effect AND transistor*)で書誌情報を入手した。得られたクラスタを更にクラスタリングすることで、それぞれサブクラスタ、サブサブクラスタを作成した。また、それぞれの発行年数の時系列変化、年齢、国籍に着目した統計を行った。

3. 結果・考察

得られた書誌情報は43,881件であり、FET分野の俯瞰図は以下のような結果となった(図1)。この俯瞰図は、書誌情報のうち引用ネットワークを可視化したものである。今回は、元の書誌情報から生まれたクラスタ#1から#3のみが一万以上の大きいファセット数であったため、これらの3つのクラスタについて考察した。

俯瞰図の中心部にある最も大きいオレンジ色の領域はナノカーボン系クラスタ、左端にある水色の領域は有機系クラスタ、それらの後ろに見える黄色い領域は無機系クラスタであり、半導体材料の種類によってクラスタが分離していた。クラスタ同士の重なり具合から、ナノカーボン系と無機系の相関性が高い一方で、有機系はクラスタ内の密度が高く、他分野との関係性は小さいことが示唆できた。また、クラスタの発行数の時系列変化より、FET の研究は初期において無機系が盛んであったが、2000 年過ぎごろからナノカーボン系、有機系も盛んに研究されるようになり、近年では特にナノカーボン系の研究の成長が著しい(図 2(a))。最初に作製された FET は無機材料である Si (シリコン) を用いたものであり、後に SiC や GaN などを用いた更に高性能なものが開発され、現在普及している FET の大半を占めている。しかし、クラスタの年齢からもわかるように、無機分野は学術研究の対象としては最も古く、近年ではナノカーボン系、有機系の論文の方が多く発行されている。ナノカーボン材料はナノサイズでありながら高いキャリア移動度(早い動作)を示す、有機材料は柔軟な薄膜で低コスト、というそれぞれ無機材料にはない利点を持つためである。よって、これらの次世代材料は現在実用化の段階には至っていないが、それに向けた学術研究が盛んに行われていることが分かった。

結果を更に詳しく調べるため再度クラスタリングを行ったところ、論文数が 1000 本以上である 10 個のサブクラスタを得た(図 1)。頻出キーワードを元にラベル付けを行い、各々の発行数時系列変化を調べた(図 2(b))。全サブクラスタ中でナノカーボン系のグラフェンの発行数が突出して急増しており、ここ 1,2 年では発行数が最大であることから、今最もホットな領域であることが示唆できた。これに対して、同じナノカーボン系のサブクラスタであるカーボンナノチューブとセンサ FET の発行数は伸び悩んでおり、カーボンナノチューブからグラフェンへの移り変わりを把握できた。一方有機分野では、高効率化、材料開発、特性評価のサブクラスタを得た。高効率化の研究では半導体層を最も基本的な有機半導体分子であるペンタセンに固定して、デバイスの設計に着目した性能の改善を行っている。材料開発・特性評価では低分子、高分子双方の研究が含まれているが、特に共役系高分子の成長が著しい。共役系高分子とは、ドナー分子とアクセプター分子から成る共重合高分子であり、有機物ながら金属に匹敵する伝導性を持つ。更に無機分野では、Si、GaN、ZnO (酸化亜鉛)、SiC のサブクラスタを得た。これらのうち、Si、GaN、SiC は製品として既に広く普及しているものの、学術研究としては成熟期を迎えている。一方で、薄膜透明半導体として有名な ZnO は比較的新しく、近年製品化が実現した分野である。

例えば、近年スマートフォンディスプレイに ZnO の一種である IGZO(Indium Gallium Zinc Oxide)を用いた製品が販売され、従来のディスプレイより更に高画質、省エネ、感度向上を可能にしたと報告されている[5]。

以上により、FET 分野における材料の種類または研究目的によって分かれた研究領域を把握し、研究の全体像を捉えることができた。また、現在実用化の段階にある無機材料は学術研究においては成熟期を迎えている一方で、ナノカーボン分野ではグラフェンを中心に、有機分野では共役系高分子を中心としてそれぞれ次世代 FET の開発が行われていることが分かった。

図 1 電界効果トランジスタの学術俯瞰マップ

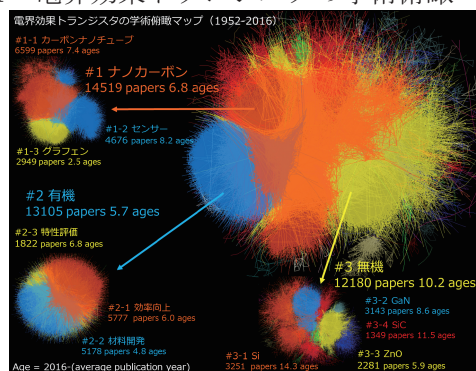
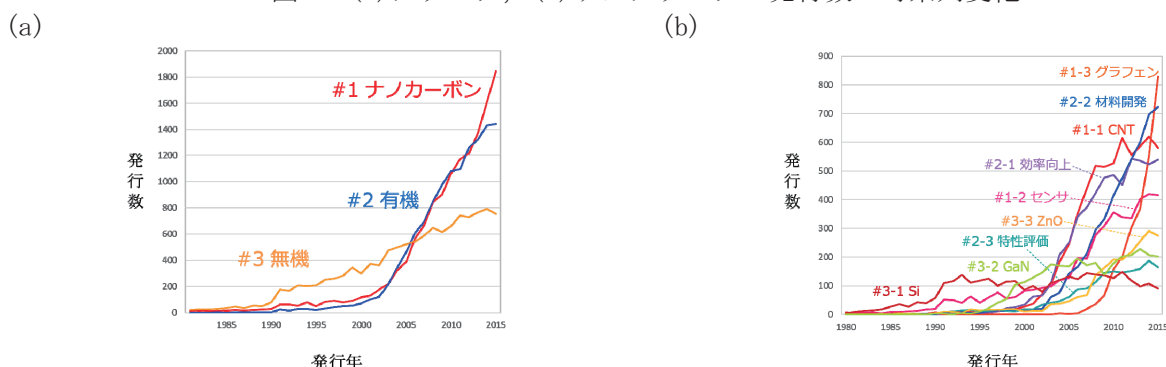


図 2 (a) クラスタ, (b) サブクラスタの発行数の時系列変化



次に、急成長しているグラフェンのサブクラスタについてさらに詳しく考察するために再度クラスタリングを行った(図3(a))。結果、グラフェン、 MoS_2 (二硫化モリブデン)、黒リンの3つのサブサブクラスタを得た。また、それぞれの年齢は3.3年、1.5年、1.0年となっており、発行数の時系列変化から、萌芽的であることが分かった(図3(b))。グラフェン、 MoS_2 、黒リンはいずれも二次元物質であり、単原子層あるいは数原子層でありながら数百~数千 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ という非常に高いキャリア移動度を示す特色を持つ。これは、微細で高性能なトランジスタの作製可能を意味し、集積度や動作速度の向上を可能にする。しかし、最初に開発された二次元材料であるグラフェンにはバンドギャップが小さいため、電流オフの状態において少量の電気を流してしまう、という欠点があった。以降オフ電流を抑制できる2次元材料の探索が行われ、結果として、 MoS_2 や黒リンが高いキャリア移動度を示し、その上で十分なバンドギャップを持つことから、FET材料として非常に優れていることが発見された[6][7]。この驚くべき発表以降、世界中の研究者によってこれらの材料についての研究が行われている。また、他のサブクラスタのクラスタリングの結果を図3~5に示した。

図3 #1 カーボン系サブサブクラスタの(a)俯瞰図と(b)発行数の時系列変化

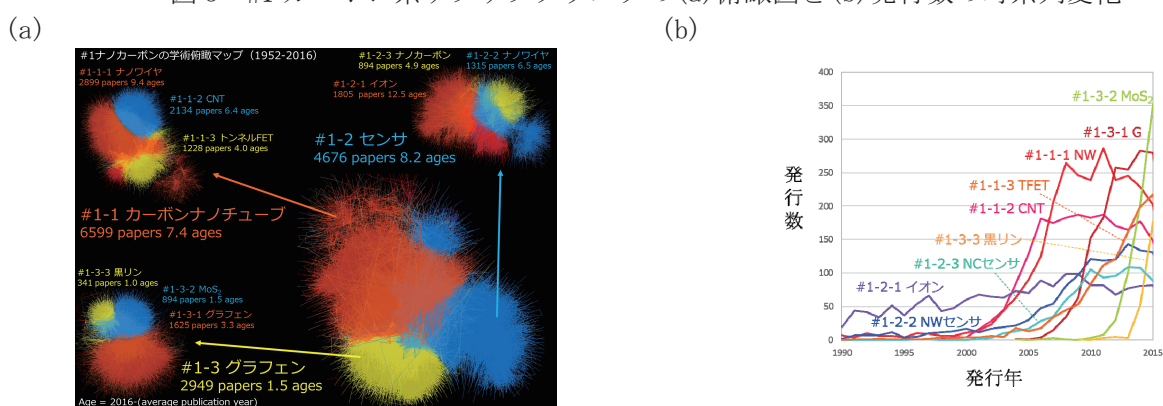


図4 #2 有機系サブサブクラスタの(a)俯瞰図と(b)発行数の時系列変化

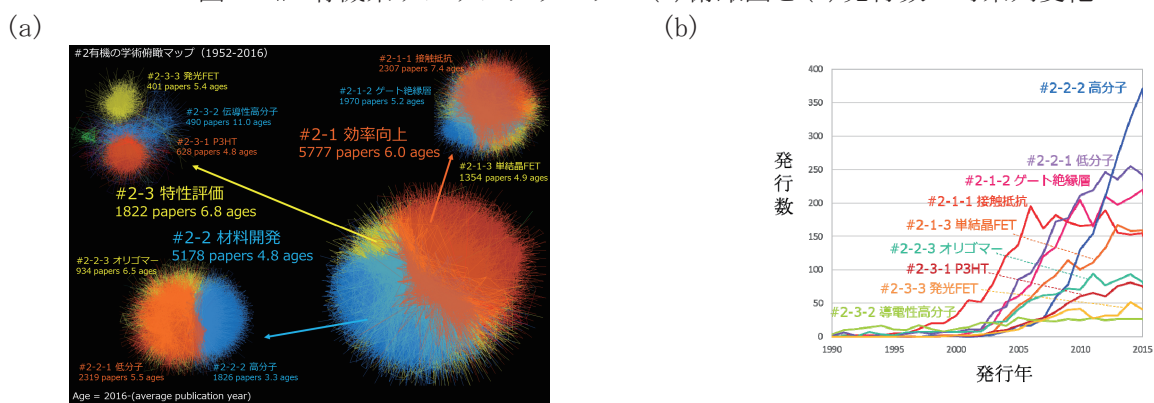
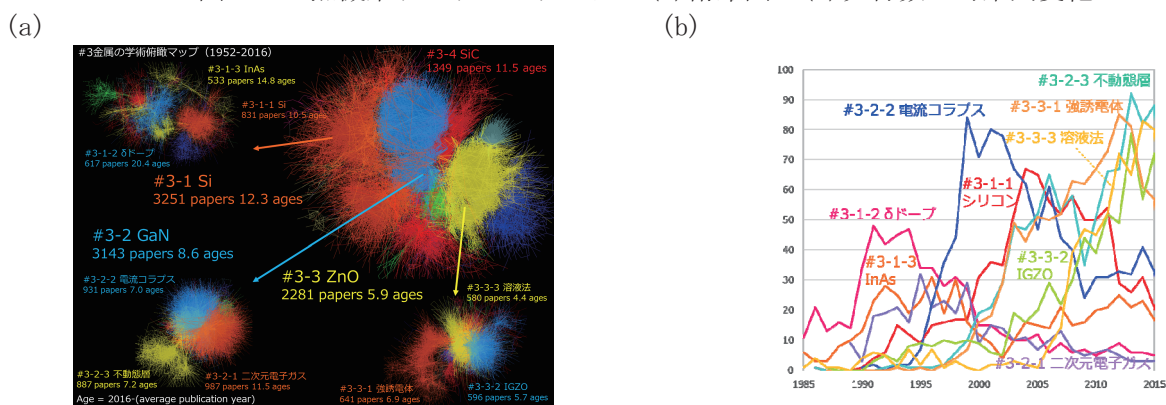
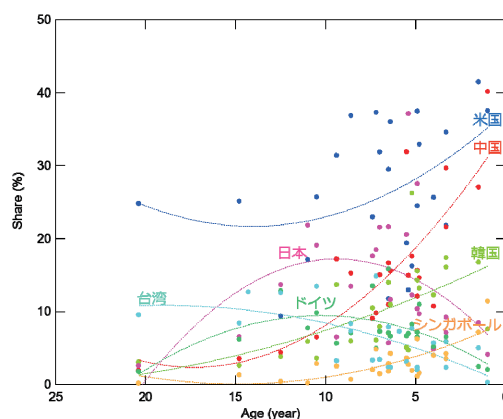


図5 #3 無機系サブサブクラスタの(a)俯瞰図と(b)発行数の時系列変化



更に、今回は国ごとのシェア率とサブサブクラスタの年齢との関係を調べた（図 6）。結果として、中国、アメリカ、シンガポール、韓国は、サブサブクラスタの年齢が高いほどシェア率が高い傾向にあり、MoS₂や黒リンなどの萌芽領域においても盛んに研究が行われていることが分かった。一方で台湾はサブサブクラスタの年齢が古いほどシェア率が高くなる傾向が見られ、成熟領域において強いことが分かった。驚くべきことに、台湾は太陽電池の研究においては萌芽領域に力を入れていると報告されており[8]、FET とは逆の結果であった。また、日本とドイツはその中間であった。

図6 サブサブクラスタの年齢とシェア率の関係



5. 結論

本研究では、学術俯瞰システムを用いて学術情報の引用ネットワークを構築することで、FET 分野における研究の全体像、萌芽領域、国ごとの研究傾向の把握を行った。FET の研究領域は大きく分けてナノカーボン、有機、無機の 3 つに分かれており、現在では無機 FET のみが製品化されているが、学術研究においてはナノカーボン、有機を用いた次世代 FET の研究が盛んであることが分かった。特に二次元分子であるグラフェン、MoS₂、黒リンについての研究領域は近年の成長が著しく、今後の発展が見込める領域を把握することができた。

今後は、テキストマイニングなどを用いた別手法による考察、特許情報など更に広い情報の分析を予定している。

参考文献

- [1] イノベーション政策研究センター, “学術俯瞰システム,” 2013. [Online]. Available: <http://academic-landscape.com/>.
- [2] Y. Kajikawa, S. Fujimoto, Y. Takeda, I. Sakata, and K. Matsushima, “Detection of emerging research fronts in solar cell research,” in ISSI2009.
- [3] N. Shibata, Y. Kajikawa, and I. Sakata, “Extracting the commercialization gap between science and technology - Case study of a solar cell,” Technological Forecasting & Social Change, vol. 77, pp. 1147-1155, 2010.
- [4] トムソン・ロイター, “WEB OF SCIENCE,” [Online]. Available: <https://apps.webofknowledge.com/>.
- [5] [SHARP, “テクノロジー解説 | IGZO テクノロジーのご紹介,” [Online]. Available: <http://www.sharp.co.jp/igzo/concept.html>. [Accessed: 09-Sep-2016].
- [6] [B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis, “Single-layer MoS₂ transistors,” Nature Nanotechnology, vol. 6, no.8, pp.1571-1580, 2011.
- [7] L. Li, Y. Yu, GJ. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng. X. Chen, and Y. Zhang, “Black phosphorus field-effect transistors,” Nature Nanotechnology, vol.9, no.5, pp.372-377, 2014.
- [8] Ichiro Sakata, and Hajime Sasaki, “Scientific Catch-Up in Asian Economics: A Case Study for Solar Cell,” Natural Resources, vol.4, no.1A, pp.134-141, 2013.