

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26246014

研究課題名(和文)印刷技術を用いた両親媒性分子による独立二分子膜の構築と選択的イオン透過膜の創成

研究課題名(英文) Production of single molecular bilayers with amphiphilic molecules by printing technologies toward selective ion permeable membrane

研究代表者

長谷川 達生 (Hasegawa, Tatsuo)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：00242016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、近年新しい製膜パターンニング法として注目される印刷技術を用いて、非対称な両親媒性有機分子による独立2分子膜を、望みの位置に望みの数だけ構築・配列する技術開発と応用展開を目的とした。まず両親媒性分子のなかでも、比較的大きな電子骨格にアルキル鎖を付与した棒状分子が、製膜性に非常に優れた2分子膜構造を構築することを見出すとともに、この構造形成にアルキル鎖間相互作用が重要な役割を担うことを明らかにした。この結果に基づきアルキル鎖長の異なる分子を組み合わせた新製膜法を開発し、ウエハースケールの大面積にわたり、わずか2分子の厚みの超極薄膜が均質に広がった単層2分子膜を得ることに初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to produce, deposit, and allocate independent single molecular bilayers, composed of amphiphilic asymmetric organic molecules, by printing technologies that attract considerable attentions as novel useful methods for thin-film formation and patterning of electronic functional materials. We first found that specific amphiphilic molecules, composed of relatively large pi-electron skeletons linked with alkyl chains, form a unique molecular-bilayer-type molecular packing, and is well fitted with uniform thin-film formation by the solution method. We also found that the intermolecular interactions between alkyl chains take crucial roles in the formation of the bilayer-type packing motif. Based on the findings, we successfully developed a unique solution-based technology to manufacture self-assembled ultrathin single molecular bilayers over an area as large as wafer scale, by using a mixed solution of molecules with different alkyl chain lengths.

研究分野：応用物理学

キーワード：プリンテッドエレクトロニクス 2分子膜 両親媒性分子 有機半導体

1. 研究開始当初の背景

(1) 両親媒性分子は、2分子膜、あるいは脂質2重層の構築により生体細胞膜をかたちづくることが知られ、異なる液体(水溶液)を分子レベルの厚みで分離する「究極の超薄膜」を与えることから、材料化学やコロイド・界面科学の主要な対象として、これまで膨大な研究がなされてきた。

(2) 2分子膜を人工的に構築する手法としては、両親媒性分子を水面上に展開するラングミュア法を初めいくつかの手法が知られてきたが、得られる膜はピンホールが多く安定性にも欠け、実用化が困難なことが課題であった。

(3) 一方、本研究代表者等は、インクジェット印刷法によるマイクロ液滴プロセスなどを用いて、有機半導体による薄膜を形成する新たなプロセス技術の開発を進め、例えば「ダブルショット・インクジェット印刷法」により、均質性のきわめて高い薄膜を得ることに成功してきた。

(4) 非対称な両親媒性有機分子に、以上の新しい溶液プロセス技術を組み合わせれば、わずか2分子分の厚みからなる極薄膜を、自在に形成することが可能になると期待されるが、このような取り組みはこれまで例がなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、マイクロ液滴の自在操作が可能な印刷技術を活用し、異なる液体(水溶液)を分子レベルの厚みだけで分離できる両親媒性分子による独立二分子膜(脂質二重層)を、望みの位置に望みの数だけ構築・配列する技術の開発とその応用展開を目的とする。

(2) このために、①両親媒性分子の特性にもとづく2段階印刷方式による独立二分子膜の新しい製造技術の開発、②液体中の独立二分子膜の機械的安定性の評価とその分子論的な解明、③イオンチャネル分子を膜内に高効率に導入する手法を②の知見のもと開発、の各課題に取り組む。

(3) 有機分子・バイオエレクトロニクスの未来を見据え、高効率の燃料電池・人工光合成・人工細胞系等を実現するための、選択的イオン透過膜の製造基盤技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 印刷法により独立単層2分子膜を構築するために適した材料を網羅的に探索する。生体で用いられる各種リン酸系脂質分子、及びπ電子系骨格とアルキル鎖を結合させた非対称分子などを研究対象とした。

(2) 選定した材料に最適な溶液印刷プロセスの設計と適用を検討した上で、高い均質性を有する独立単層2分子膜の構築について検討した。得られた極薄膜について、光学顕微鏡、原子間力顕微鏡、薄膜 X 線回折、

電気的特性、溶液中での独立単層化等の検討を進めた。

(3) 結果的には後述するように、π電子骨格 BTBT を非対称に置換した 2-フェニル-7-アルキル-ベンゾチエノベンゾチオフェン(Ph-BTBT-C_n)系が、2分子膜構造を構築することを見出し、これを対象とした単層2分子膜の製造技術について徹底的な検討を進めた。

4. 研究成果

(1) 研究当初の取り組みにより印刷技術を用いた各種分子の製膜の様々な検討を行った結果、安定な人工独立2分子膜構造を構築するには、生体で用いられる各種リン酸系脂質分子を用いるより、π電子系骨格とアルキル鎖を結合させた非対称分子を用いることが、より有効なことが分かった。これはπ電子系骨格どうし、及びアルキル鎖どうしの分子間相互作用の重量によって、2分子膜構造が大きく安定化するためと考えられる。

(2) そこで比較的大きなπ電子骨格を有し、代表的な有機半導体を与えるベンゾチエノベンゾチオフェン(BTBT)について、長さの異なるアルキル鎖で置換した様々な分子材料の製膜性や分子パッキング構造について検討を行った。図1左上に、本研究で検討した3系統の BTBT 系分子の分子構造を示す。図1右上に、π電子骨格の片側を一定以上の長さのアルキル鎖で置換した分子の結晶性状を示す。ある程度の長さのアルキル鎖置換によって、層状性の高い結晶が得られていることが分かる。図1下に、これらの分子パッキング構造を示す。これより、一定以上の長さのアルキル鎖で置換した場合に、非対称な棒状の有機分子が向きを揃えて横つながりに層をなし、かつ向きが異なる一対の分子層が重なり合った2分子膜型の分子パッキング構造を形成することが明らかになった。

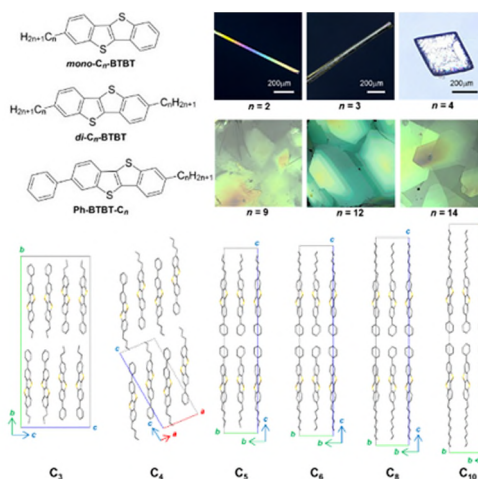


図1 π電子骨格BTBTの各種のアルキル置換体の分子構造(左上)、di-C_n-BTBT結晶の顕微鏡写真(右上)、Ph-BTBT-C_nの結晶構造のアルキル鎖長依存性。

(3) 一方、アルキル鎖長が n=4 以下の場合には、分子層

が形成されない、あるいは層内で分子の向きが互い違いになった。高精度の量子化学計算をもとに、隣接分子間の引力の大きさを求めた結果を図2に示す。n=5 以上の場合の分子層形成には、 π 電子骨格間の相互作用に加えて、アルキル鎖どうしの引力相互作用が大きく寄与していることが明らかになった。

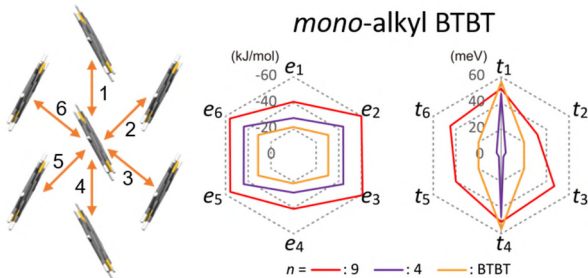


図2 DFT計算により求めた、層状ヘリンボン構造内における各隣接分子間の分子間引力(中)とトランスファー積分(右)。

(4) これらの2分子膜型の分子パッキング構造を示す材料は、非常に優れた層状結晶性を示し、実際これら材料を用いると、ブレードコート法のような簡易な塗布法を用いることで、数ミリメートル四方の大きさの単結晶薄膜が得られることが分かった。薄膜表面には、2分子膜の厚みに相当するステップ高さにもとづくステップ-テラス構造が見られることが、原子間力顕微鏡により確認された。分子レベルで膜厚の均質な領域も同程度の大きさに及んだ。ただ、これらの2分子膜どうしが積み重なる多層化を抑制することは容易ではなく、厚みが2分子膜1層から数十層に至るランダムな膜厚分布が得られた。

(5) 次にこれら材料に見られる非常に優れた層状結晶性を活用し、本研究の目標である独立2分子膜を構築するための方策について検討を行った。特に前述の結果から、分子間の相互作用は、 π 電子骨格間、及びアルキル鎖間の引力相互作用がともに関与していることが分かる。そこで、 π 電子骨格に連結したアルキル鎖の長さが自由に変えられるという特長を活かし、フラストレーション効果により多層化を抑制するための種として活用する新しい製膜法を考案した。

(6) 図3に新しい製膜法の考え方を模式的に示す。すなわち、 π 電子骨格は同じままアルキル鎖長のより長い分子を少量混合した溶液を用いて膜形成すれば、 π 電子骨格どうしの重なり合いによって2分子膜を形成する分子の横つながりの自己組織化はたまためながら、アルキル鎖の長さのばらつきのため、自己組織化膜の表面にわずかな凹凸が生じると予想される。この凹凸により、2分子膜が別の2分子膜と積層できなくなり、多層化が抑えられて、単層2分子膜が得られると考えられる。

(7) 実際、Ph-BTBT-C₆とPh-BTBT-C₁₀の分子混合溶液(0.1 wt%)を、酸化被膜を表面層に持つシリコンウエハ

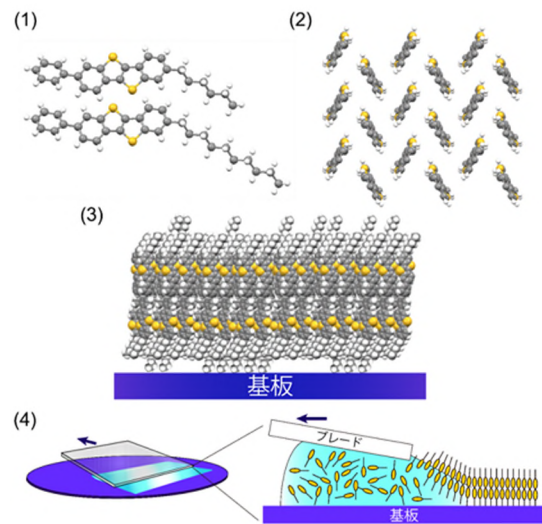


図3 製膜法の概念図。(1)用いた分子の分子構造、(2)分子パッキング構造、(3)単層2分子膜の概念図、(4)ブレードコート法と単層2分子膜が得られる様子の概念図。

ー上にブレードコート法を用いて塗布製膜したところ、ウエハ全面にわたって膜厚が分子レベルで均質な薄膜が得られた(図4)。原子間力顕微鏡による測定から、その膜厚は2分子膜1層のみの厚みに相当する4.4 ナノメートルの極薄半導体であることが分かった。なお、以上はアルキル鎖の炭素数6の分子と炭素数10の分子を9:1の比で混合した溶液を用いて得られた薄膜についての結果を示している。

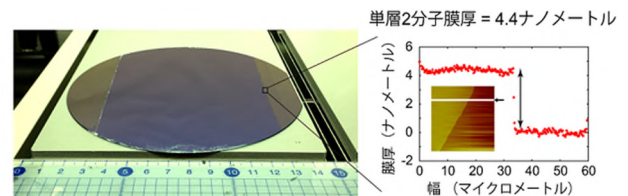


図4 シリコンウエハ上に形成した単層2分子膜(左)、薄膜端の原子間力顕微鏡像(右)。

(8) 図5左に、シリコンウエハ上の単層2分子膜をクロスニコル配置で偏光観察した結果を示す。ウエハ全面にわたって結晶薄膜が形成されていること、及び単一ドメインの大きさは10 cm×1 cmに及ぶことが分かった。図5右に、KEK放射光科学研究所のシンクロトロン放射光を用いて行った薄膜X線回折の実験結果を示す。単層2分子膜の層内分子配列にもとづく明瞭な回折スポットが観測された。得られた単層2分子膜の高い層内結晶性を示しているとともに、回折角から求めた結晶格子が、Ph-BTBT-C₆の結晶格子と一致していることが分かった。

(9) 図6上に、アルキル鎖の長い分子と短い分子の混合比を変えた製膜を行った結果を示す。得られた薄膜

の光学顕微鏡像から、長い分子をわずかに混合 (3~50%) することで、単層2分子膜が効率よく得られることが分かった。一方、短い分子が少ない場合 (長い分子の割合が 50%以上) は、多重積層を避けることは難しかった。以上の実験結果から、分子の横つながりの自己組織化による2分子膜形成が保持されたまま、分子のアルキル鎖長の違いによる凹凸が2分子膜どうしの積層を抑える働きをし、2分子膜の単層化が実現していることが明らかになった(図6下)。

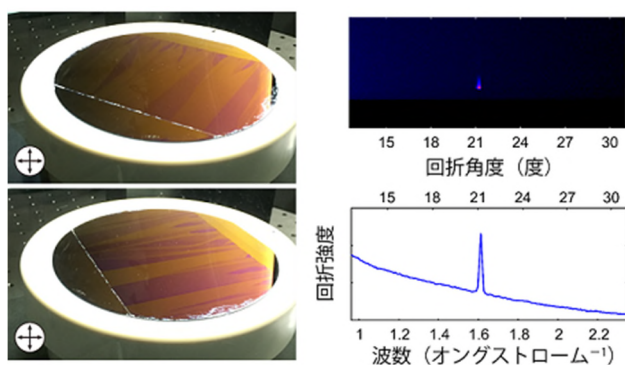


図5 ウエハー上単層2分子膜のクロスニコル顕微鏡観察(左)。基板を45°回転(図上→図下)により、薄膜の明るい(暗い)部分が一樣に暗く(明るく)変化しており、それぞれ単結晶ドメインであることが分かる。薄膜からの面内X線回折写真(右)。

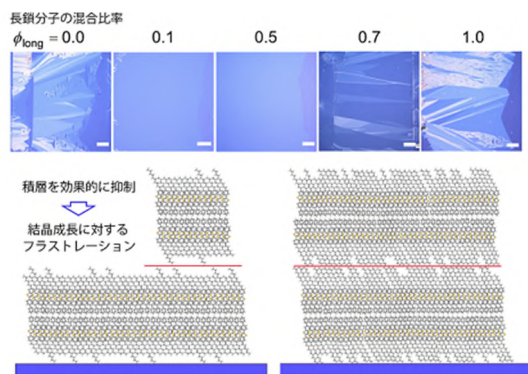


図6 単層2分子膜の形成メカニズム。長鎖分子と短鎖分子の混合比を変えた薄膜の顕微鏡像(上)。フラストレーション効果の概念図(下)。長鎖分子と短鎖分子の混合比によって積層を抑える効果が異なっており、長鎖分子の導入がより有効に働く。

(10) 以上により形成した超極薄半導体によるTFTを作製し、その特性を評価した。ゲート電圧を加えることによるドレイン電流変化をよみとる伝達特性には、負のゲート電圧を加えることによりドレイン電流が増加するp型特性が見られた。また各ゲート電圧のもとでの電流-電圧特性には、一定以上のドレイン電圧を加えることでドレイン電流値が一定となる典型的なTFTの挙動が見られた。伝達特性の測定結果を解析した結果、飽和領域の移動度

は $6.0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達した。さらにこれら超極薄TFTは、電流の流れる領域が非常に薄く外部からの刺激に対し電流値が敏感に応答することが確認された。このような特徴を活かすことにより、単層2分子膜の機能を活かした超高感度な分子センサーとしての応用が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計21件)

①荒井俊人、井上悟、浜井貴将、熊井玲児、長谷川達生、"Semiconductive single molecular bilayers realized using geometrical frustration", *Advanced Materials*、査読有、30巻、170256:1-7、2018年。

DOI:10.1002/adma.201707256

②松岡悟志、堤潤也、鎌田俊英、長谷川達生、"Microscopic gate-modulation imaging of charge and field distribution in polycrystalline organic transistors", *Journal of Applied Physics*、査読有、123巻、135301:1-11、2018年。

DOI:10.1063/1.5016884

③松岡悟志、堤潤也、松井弘之、鎌田俊英、長谷川達生、"Nanosecond Time-Resolved Microscopic Gate-Modulation Imaging of Polycrystalline Organic Thin-Film Transistors", *Physical Review Applied*、査読有、9巻、024025:1-10、2018年。

DOI:10.1103/PhysRevApplied.9.024025

④浜井貴将、荒井俊人、峯廻洋美、井上悟、浜井貴将、熊井玲児、長谷川達生、"Tunneling and origin of large access resistance in layered-crystal organic transistors", *Physical Review Applied*、査読有、8巻、054011:1-12、2017年。

DOI:10.1103/PhysRevApplied.8.054011

⑤米谷慎、峯廻洋美、山田寿一、長谷川達生、"Interface-Mediated Self-Assembly in Inkjet Printing of Single-Crystal Organic Semiconductor Films", *Journal of Physical Chemistry C*、査読有、121巻、8796-8803、2017年

DOI:10.1021/acs.jpcc.7b02143

⑥北原暁、青島圭佑、堤潤也、峯廻洋美、荒井俊人、長谷川達生、"Low-voltage operation of organic thin-film transistors based on ultrafine printed silver electrodes", *Organic Electronics*、査読有、50巻、426-428、2017年。

DOI:10.1016/j.orgel.2017.08.023

⑦柴田陽生、堤潤也、松岡悟志、峯廻洋美、荒井俊人、熊井玲児、長谷川達生、"Unidirectionally Crystallized Stable n-type Organic Thin-Film Transistors Based on Solution-Processable Donor-Acceptor Compounds", *Advanced Electronic Materials*、査読有、3巻、1700097、2017年。

DOI:10.1002/aelm.201700097

⑧米谷慎、峯廻洋美、山田寿一、長谷川達生、"Interface-Mediated Self-Assembly in Inkjet Printing of Single-Crystal Organic Semiconductor Films", *Journal of Physical Chemistry C*、査読有、121巻、8796-8803、2017年。

DOI:10.1021/acs.jpcc.7b02143

⑨堤潤也、松岡悟志、尾坂格、熊井玲児、長谷川達生、"Reduced exchange narrowing caused by gate-induced charge carriers in highmobility donor-acceptor copolymers"

Physical Review B、査読有、95 巻、115306:1-9、2017 年。

10.1103/PhysRevB.95.115306

⑩峯廻洋美、田中睦生、都築誠二、井上悟、山田寿一、熊井玲児、下位幸弘、長谷川達生、"Enhanced Layered-Herringbone Packing due to Long Alkyl Chain Substitution in Solution-Processable Organic Semiconductors"、*Chemistry of Materials*、査読有、29 巻、1245-1254、2017 年。

DOI:10.1021/acs.chemmater.6b04628

⑪堤潤也、松岡悟志、長谷川達生、「ゲート変調イメージングによる有機 TFT アレイの一括評価技術」、*応用物理*、査読有、85 巻、12 号、1037-、2016 年。

⑫井上悟、峯廻洋美、堤潤也、浜井貴将、荒井俊人、山田寿一、堀内佐智雄、田中睦生、米谷慎、熊井玲児、長谷川達生、"Molecular Requirements for Printable Organic Semiconductors in 7-Alkyl-2-phenyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophenes (Ph-BTBT-Cn' s)"、*MRS Advances*、査読有、1 巻、2653-2658、2016 年。

DOI:10.1557/adv.2016.441

⑬古池博信、堤潤也、松岡悟志、佐藤利磨、長谷川達生、金井要、"Electronic structure of stable n-type semiconducting molecular complex (diC8-BTBT)(TCNQ) studied by ultraviolet photoemission and inverse photoemission spectroscopy"

Organic Electronics、査読有、39 巻、184-190、2016 年。

DOI:10.1016/j.orgel.2016.10.005

⑭野田祐樹、峯廻洋美、松井弘之、山田寿一、荒井俊人、梶谷忠志、土井正男、長谷川達生、"Underlying Mechanism of Inkjet Printing of Uniform Organic Semiconductor Films Through Antisolvent Crystallization"、*Advanced Functional Materials*、査読有、25 巻、4022-4031、2015 年。

DOI:10.1002/adfm.201500802

⑮井上悟、峯廻洋美、堤潤也、近松真之、山田寿一、堀内佐智雄、田中睦生、熊井玲児、米谷慎、長谷川達生、"Effects of Substituted Alkyl Chain Length on Solution-Processable Layered Organic Semiconductor Crystals"、*Chemistry of Materials*、査読有、27 巻、3809-3812、2015 年。

DOI:10.1021/acs.chemmater.5b00810

⑯堤潤也、松岡悟志、井上悟、峯廻洋美、山田寿一、長谷川達生、"N-type field-effect transistors based on layered crystalline donor-acceptor semiconductors with dialkylated benzothienobenzothiophenes as electron donors"、*Journal of Material Chemistry C*、査読有、3 巻、1976-1981、2015 年。

DOI:10.1039/C4TC02481H

⑰柴田陽生、堤潤也、松岡悟志、松原浩司、吉田郵司、近松真之、長谷川達生、"Uniaxially oriented

polycrystalline thin films and air-stable n-type transistors based on donor-acceptor semiconductor (diC8BTBT)(FnTCNQ) [n = 0, 2, 4]"、*Applied Physics Letters*、査読有、106 巻、143303:1-4、2015 年。

DOI:10.1063/1.4918288

⑱峯廻洋美、野田祐樹、山田寿一、長谷川達生、「有機半導体のダブルショット・インクジェット印刷技術」、*化学工業*、65 巻、72-76、2014 年。

⑲峯廻洋美、山田寿一、長谷川達生、"Crystalline film growth of TIPS-pentacene by double-shot inkjet printing technique"、*Japanese Journal of Applied Physics*、査読有、53 巻、05HC10:1-4、2014 年。

DOI:10.7567/JJAP.53.05HC10

⑳長谷川達生、峯廻洋美、井川光弘、野田祐樹、山田寿一、「分子性半導体の印刷製造技術」、*固体物理*、49 巻、205-215、2014 年。

㉑峯廻洋美、堤潤也、井上悟、山田寿一、熊井玲児、長谷川達生、"Crystal structure of asymmetric organic semiconductor 7-decyl-2-phenyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene"、*Applied Physics Express*、査読有、7 巻、091601:1-3、2014 年。

DOI:10.7567/APEX.7.091601

[学会発表] (計 77 件、内招待講演 20 件)

①長谷川達生、「プリンテッドエレクトロニクスに向けた界面機能の創成と物質科学」、多重極限物質科学研究センター・シンポジウム『フォトサイエンスを基盤とした新奇物質科学の創生』(招待講演)、兵庫県、2018 年 1 月。

②長谷川達生、「塗布型電子材料の物質科学と高性能 TFT への応用」、東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度・多階層性が協奏する物質材料システムの科学」(招待講演)、宮城県、2017 年 12 月。

③長谷川達生、「先進印刷エレクトロニクス技術」、電子材料研究会・フレキシブルセラミックコーティング研究会(招待講演)、東京都、2017 年 11 月。

④長谷川達生、「塗布型電子材料の物質科学と高性能 TFT への応用」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会(招待講演)、福岡県、2017 年 9 月。

⑤荒井俊人、「プリンテッドエレクトロニクス実現に向けた新規有機半導体印刷技術の開発」第 3 回 K-CONNEX 研究会(招待講演)、兵庫県、2017 年 03 月。

⑥荒井俊人、井上悟、浜井貴将、峯廻洋美、熊井玲児、長谷川達生、「層間フラストレーションを用いた大面積単一分子層有機半導体超薄膜の作製と薄膜トランジスタへの応用」、第 64 回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)、神奈川県、2017 年 03 月。

⑦長谷川達生、「先進ナノ材料科学を基盤とする印刷エレクトロニクス技術」、

CPMT-Japan Evening Meeting(招待講演)、東京都、

2017年03月。

⑧長谷川達生、「ソフトマターとしてのプリンテッドエレクトロニクス（招待講演）」、分子系の複合電子機能 第181委員会 第25回研究会『ソフトマター物理の最前線と応用展開』、東京都、2016年12月。

⑨長谷川達生、「Supramolecular Aspects（招待講演）」、産総研-理研 第2回量子技術イノベーションコアWS、東京都、2016年11月。

⑩長谷川達生、「Charge Transport in Layered-Crystalline Organic Semiconductors」、The 12th Japan-China Joint Symposium on Conduction and Photoconduction in Organic Solids and Related Phenomena（招待講演）、東京都、2016年10月。

⑪長谷川達生、「Charge transport in layered-crystalline organic semiconductors（招待講演）」、EMN on Organic Electronics and Photonics、スペイン国、2016年9月。

⑫柴田陽生、堤潤也、松岡悟志、峯廻洋美、荒井俊人、長谷川達生、「分子化合物半導体によるn型薄膜トランジスタの展望」第63回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）、東京都、2016年03月。

⑬峯廻洋美、「プリンテッドエレクトロニクスのための有機半導体材料の結晶構造解析」、PF研究会「放射光のオンリーワン計測と産業利用展開」（招待講演）、茨城県、2016年01月。

⑭長谷川達生、「Two-dimensional, Layered Crystalline Organic Semiconductors for Printed Electronics」、Sendai Plasma Forum（招待講演）、宮城県、2016年01月。

⑮峯廻洋美、野田祐樹、山田寿一、長谷川達生、「Single-crystal film growth of organic semiconductors using inkjet printing」EMN Collaborative Conference on Crystal Growth 2015（招待講演）、中華人民共和国、2015年12月。

⑯長谷川達生、「Charge Transport and Device Physics of Layered-Crystalline Organic Semiconductors」、SPIE OPTICS+PHOTONICS CONFERENCE（招待講演）、米国、2015年08月。

⑰峯廻洋美、「高性能有機トランジスタのためのダブルショット・インクジェット印刷技術」、第12回日本写真学会光機能性材料セミナー（招待講演）、東京都、2015年07月。

⑱長谷川達生、「Instability of Initial Contact Dynamics of Miscible Microdroplets on Solid Surface」、EMN Meeting on Droplets（招待講演）、タイ国、2015年05月。

⑲長谷川達生、「Interface Charge Transport and Device Physics of Organic Transistors」、International Center for Young Scientists (ICYS 2014)（招待講演）、福島県、2015年01月。

⑳長谷川達生、「Interface Charge Transport and Device Physics of Organic Semiconductors」、

5th International Meeting on Spin in Organic Semiconductors (SPINOS 2014)（招待講演）、姫路市、2014年10月。

他一般講演57件

[図書]（計1件）

長谷川達生、「Organic Electronics Materials and Devices」、第1章 "Physics of Organic Field Effect Transistors and the Materials"を担当、Springer、2015年。

[産業財産権]（計1件）

○出願状況

①名称：新規な縮合多環芳香族化合物及びその用途
発明者：峯廻洋美、井上悟、山田寿一、田中睦生、長谷川達生、貞光雄一、品村彰治

権利者：産業技術総合研究所、日本化薬株式会社
種類：特許

番号：特願2015-169218

出願年月日：2015年08月28日

国内外の別：国内

②名称：有機半導体組成物及びそれらからなる有機薄膜

発明者：荒井俊人、井上悟、長谷川達生

権利者：産業技術総合研究所、日本化薬株式会社
種類：特許

番号：特願2016-037213

出願年月日：2016年02月29日

国内外の別：国内

5. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 達生 (HASEGAWA, Tatsuo)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：00242016

(2) 研究分担者

荒井 俊人 (ARAI, Shunto)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号：40750980

(3) 研究分担者

峯廻 洋美 (MINEMAWARI, Hiromi)
産業技術総合研究所・フレキシブルエレクトロニクス研究センター・研究員
研究者番号：50573143

(5) 連携研究者

田中 睦生 (TANAKA, Mutsuo)
産業技術総合研究所・バイオメディカル研究部門・研究グループ長
研究者番号：70344108

(6) 連携研究者

米谷 慎 (YONEYA, Makoto)
産業技術総合研究所・フレキシブルエレクトロニクス研究センター・研究チーム長
研究者番号：30443237