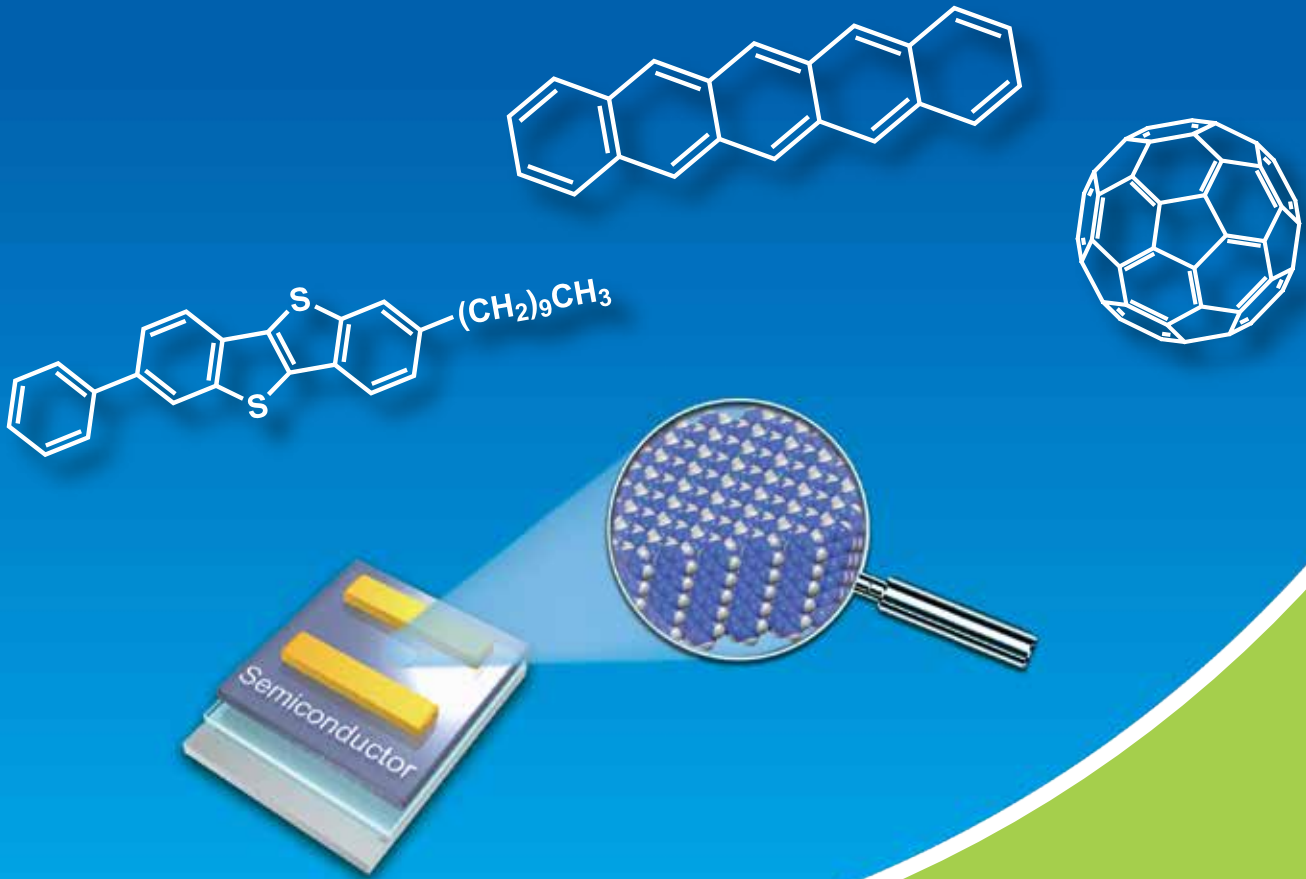


有機トランジスタ (OFET) 材料

Organic Transistor (OFET) Materials



高品質有機半導体材料

p型半導体材料

n型半導体材料

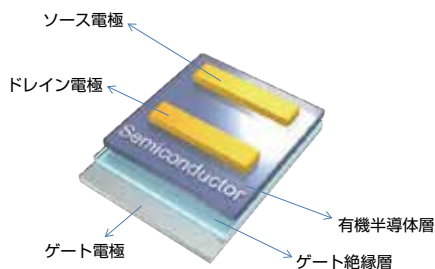
両極性半導体材料

液晶性半導体材料

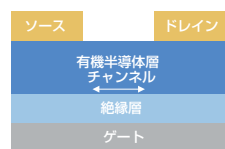
有機トランジスタ(OFET)材料

次世代デバイスとして有機半導体材料を用いた有機電界効果トランジスタ (Organic Field-effect Transistor: OFET) の研究開発が盛んに行われています。OFET研究は1984年に工藤らによりメロシアン色素の電界効果法による移動度を報告したのが始まりです¹⁾。その後、1997年にペンタセンを用いたOFETデバイスによりアモルファスシリコンに匹敵する電荷移動度 (1.5 cm²/Vs) が報告され²⁾、実用化の可能性が一気に高まりました。近年では伸縮・折り曲げできる電子回路や、皮膚に貼り付けて使用する生体・医療センサーなど、無機にはない有機半導体ならではの軽量性・柔軟性を活かした応用研究が展開されています^{3,4)}。また、有機半導体材料の大きな特徴である可溶性を活かし、フレキシブル基板上に印刷法で大面積かつ高密度なデバイスを作製する“プリントドエレクトロニクス”は、半導体デバイスの大量生産・低価格化につながるとして期待されています。モノとインターネットが繋がるIoT (Internet of Things) 社会では、多種多様かつ膨大なセンサーが必要になります。印刷で作製できる“プリントドエレクトロニクス”と“有機トランジスタ”の融合により様々な機能性を持つセンサーデバイスを大量かつ低コストに製造できる可能性があります⁵⁻⁷⁾。

OFETデバイスは有機半導体層、絶縁層、ソース・ドレイン・ゲート電極から構成され、キャリア (ホール・電子) 移動度や最低駆動電圧、on/off比、駆動安定性などのパラメータからデバイスの性能を評価できます。特に、キャリア移動度は有機半導体材料の電気物性を示す重要な指標であり、高速で動作する回路の作製には、高移動度を示す材料が必要不可欠です。



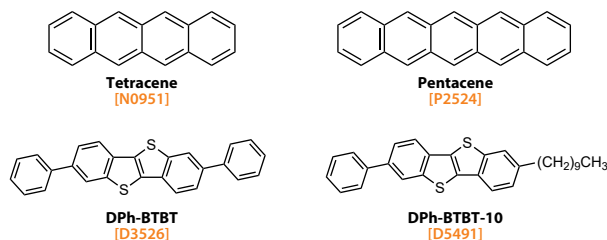
トップコンタクト型OFET略図



トップコンタクト型OFET断面図

キャリア移動度の向上には、 π 共役の拡張によって分子間相互作用を増加させる分子設計が一般的です。例えば、5つのベンゼン環が直線状に縮環したペンタセンは、4つのベンゼン環が縮環したテトラセンと比較して高い移動度を示します⁸⁾。しかしながら、単純な炭化水素での縮環数の線形的増加は、最高被占軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital: HOMO) の準位の上昇につながり、半導体材料の大気安定性が低下する傾向にあります⁸⁾。このキャリア移動度と大気安定性の間のトレードオフが、OFET材料開発における重大な課題となっていました。この

ような背景の中、2006年に瀧宮らによりチエノチオフェン骨格を導入した縮環化合物2,7-Diphenyl[1]benzo-thieno[3,2-b][1]benzothiophene (DPh-BTBT) が報告されました⁹⁾。DPh-BTBTにおいては、原子半径の大きな硫黄原子上にHOMOが存在するためキャリア移動に有利であり、更にHOMO準位は-5.6eVと深いため大気安定性に優れます。DPh-BTBTを用いた蒸着型OFETデバイスにてホール移動度2.0 cm²/Vsを達成しています。その後、2015年には半那らによりBTBT骨格にアルキル基とフェニル基をそれぞれ片側に置換した非対称構造の2-Decyl-7-phenyl[1]benzothiopheno[3,2-b][1]benzothiophene (Ph-BTBT-10) が報告されました¹⁰⁾。Ph-BTBT-10は溶剤に可溶かつ耐熱性と成膜性を兼ね備えた液晶性有機半導体材料であり、スピコート法により作製したFETデバイスにおいて、IGZOなどの無機半導体と同等の極めて高い移動度 ($\mu_{max} = 14.7$ cm²/Vs) と大気安定性を併せ持つp型有機半導体材料であることが報告されています。



有機材料の特徴として構造的多様性が挙げられます。新しいコンセプトと様々な材料の提案によって、OFET研究はその可能性を飛躍的に進化・発展させてきました。任意の化学修飾を施すことにより電気特性や加工特性を精密に制御できることは、目的の用途に合わせた機能性を持たせる上で非常に大きな強みとなります。

弊社ではOFET用途に適した材料群として約60種類の化合物を取り揃えております。ペンタセンやP3HTに代表されるホール輸送性の『p型半導体』、フラレン類やペリレンジイミド類などの『n型半導体』、両方のキャリアを輸送可能な『両極性半導体』、Ph-BTBT-10などの『液晶性半導体』にそれぞれをカテゴライズしております。さらにそれらの試薬に加えて、実用性を担保した『高品質有機半導体材料 (有機エレクトロニクス用)』を新たに用意しました。次項では、いくつかの高品質有機半導体材料の製品について、社内での評価例をあげて紹介します。

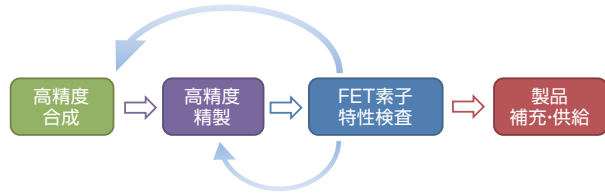
● 高品質有機半導体材料 (有機エレクトロニクス用)

「高品質有機半導体材料 (有機エレクトロニクス用)」は高純度に加えてトランジスタ性能 (移動度) を規格値*として設定し、全てのロットで実デバイスの電気物性を評価・検査しております。有機トランジスタにおける活性層の半導体材料には、極めて高い純度が求められますが、溶解性や安定性に問題がある材料は既存の分析法 (HPLC, GC, etc.) で詳細な純度を求めることが困難な場合があります。弊社では、お客様が安心して材料をお使いいただけるようトランジスタ材料のキャリア移動度を評価することで、従来分析法では分からない実デバイス上での半導

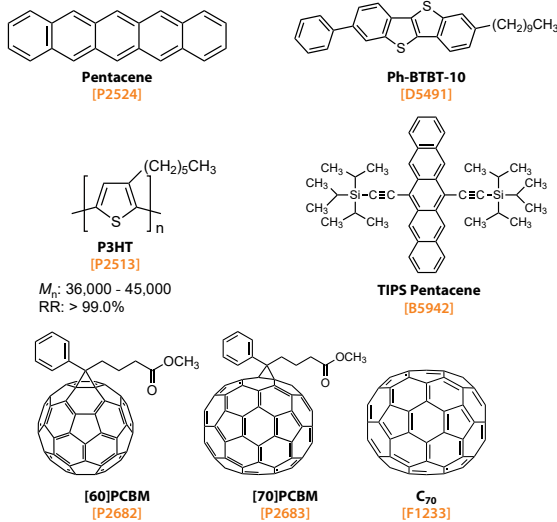
体材料のパフォーマンスを見極め、実用的な材料の安定供給を行うべく取組みを進めています。

(*弊社の装置設備・環境下におけるデバイス作製・評価より得られた値です)

デバイス評価結果を
材料合成・精製へフィードバック



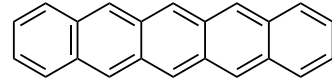
● 高品質 有機半導体材料 (有機エレクトロニクス用) 一覧



Compound	Product No.	Specification		
		Purity (%)	Mobility (cm ² /Vs)	Si/SiO ₂ Substrate Surface Condition
Pentacene	P2524	> 99.999	> 0.35	Bare
Ph-BTBT-10	D5491	> 99.5	> 10.0	ODTS
P3HT	P2513	Pd: < 100ppm	> 0.10	OTS
TIPS Pentacene	B5942	> 99.0	> 0.10	HMDS
C ₇₀	F1233	> 99.0	> 0.30	HMDS
[60]PCBM	P2682	> 99.5	> 0.020	HMDS
[70]PCBM	P2683	> 99.0	> 0.015	HMDS

1. デバイス評価例①:
代表的p型半導体材料 “ペンタセン”

Pentacene [P2524]
(99.999%, trace metals basis) (purified by sublimation)



Pentacene
[P2524]

規格値
純度 : > 99.999%
ホール移動度 : > 0.35 cm²/Vs
(bare Si/SiO₂ substrate)

ペンタセンは代表的なp型半導体材料であり、有機エレクトロニクスの分野においては、特にデバイス中での高い電荷輸送特性に関して数多くの研究例が報告されています^{2,11-13}。弊社では高品質なペンタセンとして**P2524**と**P0030**を取り扱っております。特に**P2524** (99.999%, trace metals basis) は電気物性の規格値としてOFET移動度「>0.35cm²/Vs (bare substrate)」を設定し、トランジスタデバイス作製・評価をすべてのロットで行い、規格値をクリアしたものを販売しています。

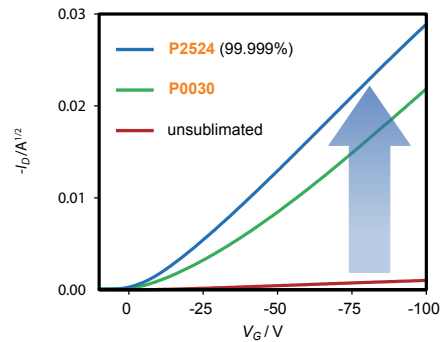


図1. グレードの異なるペンタセンによるOFET伝達特性

表1. グレードの異なるペンタセンのOFET特性まとめ

Product No.	Sample grade	Substrate	Mobility (cm ² /Vs)	V _{th} (V)
-	Pentacene (non-sublimation)	Si/SiO ₂ (bare)	5.3 × 10 ⁻⁴	-13
P0030	Pentacene (purified by sublimation)	Si/SiO ₂ (bare)	0.29	-22
P2524	Pentacene (99.999%, trace metals basis) (purified by sublimation)	Si/SiO ₂ (bare)	0.39	-10

1-a. OFETデバイス特性によるペンタセンの品質評価

n⁺-Si/SiO₂基板を蒸着機にセットし、真空蒸着法によりペンタセンの薄膜 (60 nm) を形成した後、金 (40 nm) を蒸着しソース・ドレイン電極を形成することで、トップコンタクト型OFETデバイスを作製しました。デバイスの特性評価は、窒素雰囲気下グローブボックス内にて行いました。

作製したデバイスの特性を図1、表1に示します。窒素雰囲気下にて測定した結果、昇華精製工程を経たペンタセンはFET性能の大幅な向上が見られました。昇華精製品**P2524** (99.999%, trace metals basis) を用いた場合はホール移動度 $\mu_{max} = 0.39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の

良好な値が観測されました。他社製の昇華精製グレードのペンタセンとの比較においても、弊社高純度ペンタセン**P2524**は特に優れたFET特性を有していることがわかりました (図2、表2)。

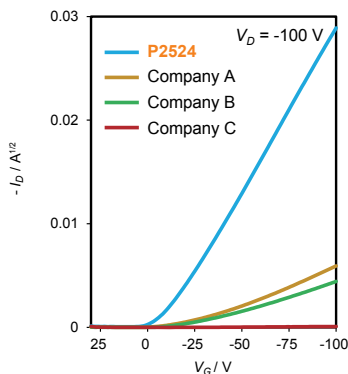


図2. 他社製ペンタセンとのOFET伝達特性比較

表2. 他社製ペンタセンとのOFET特性比較まとめ

	Substrate	Mobility (cm ² /Vs)	V _{th} (V)
P2524	Si/SiO ₂ (bare)	0.39	-10
Company A (sublimed)	Si/SiO ₂ (bare)	0.002	-25
Company B (sublimed)	Si/SiO ₂ (bare)	0.001	-25
Company C (sublimed)	Si/SiO ₂ (bare)	5.0 × 10 ⁻⁶	-23

1-b. ペンタセンのOFETデバイス最適化

n⁺-Si/SiO₂基板にn-Octyltrichlorosilane (OTS) [O0168]を用いてSelf-assembled-monolayer (SAM) 処理を行い、OFETデバイスの最適化を行いました (図3)。作製したデバイスの特性を図4および表3に示します。窒素雰囲気下にて測定した結果、OTSでSAM処理したデバイスではFET性能の大幅な向上が見られ、μ_{max} = 1.52 cm²/Vs、on/off比 1.5 × 10⁷の良好な値が観測されています。

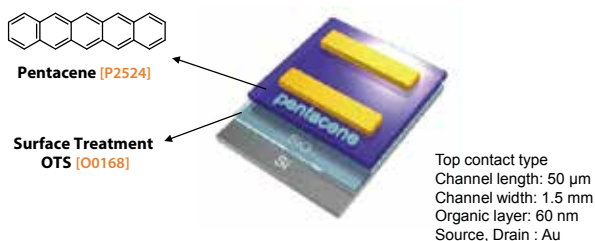


図3. ペンタセンを用いたOFET素子構造

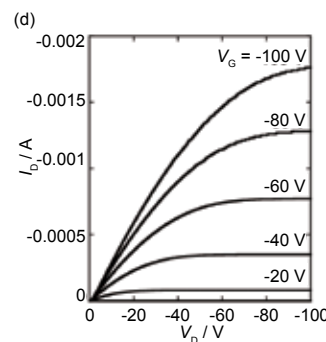
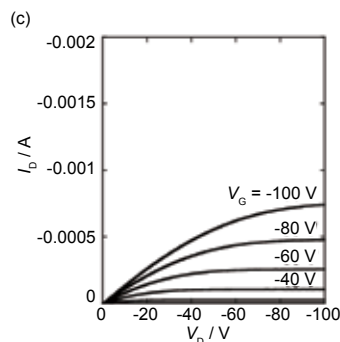
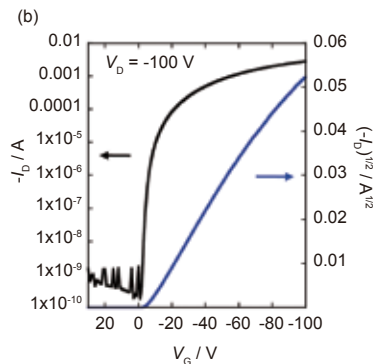
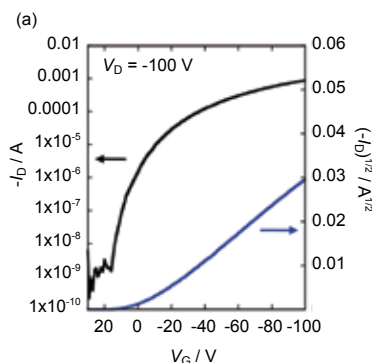


図4. 最適化したペンタセン-OFET特性 (a, c) bare, (b, d) OTS (a, b) 伝達特性、(c, d) 出力特性

表3. 最適化したペンタセン-OFETの素子特性まとめ

Compound	SAM	T _{sub} (°C)	Mobility (cm ² /Vs)	V _{th} (V)	on/off
Pentacene [P2513]	bare	RT	0.35 - 0.37	-5.3	3.9 × 10 ⁵
OTS [O0168]	OTS [O0168]	RT	1.50 - 1.52	-5.7	1.5 × 10 ⁷

1-c. AFM画像とXRD解析

原子間力顕微鏡 (AFM) および薄膜X線回折 (XRD) を用いて、作製したペンタセン膜の解析を行いました。AFM測定では、基板処理の有無に関わらず、どちらも非常に綺麗なテラス構造が観測されました (図5a)。また、XRD測定 (out-of-plane) では、どちらの基板でも (00h) に帰属されるピークが高次まで観測され、層間距離は15.5Å (2θ = 5.72°) であることがわかりました (図5b)。これらの結果は、ペンタセン分子は基板に対しedge-on配向した「薄膜相 (thin-film-phase)」を主として形成していることを示しています^{12,13)}。

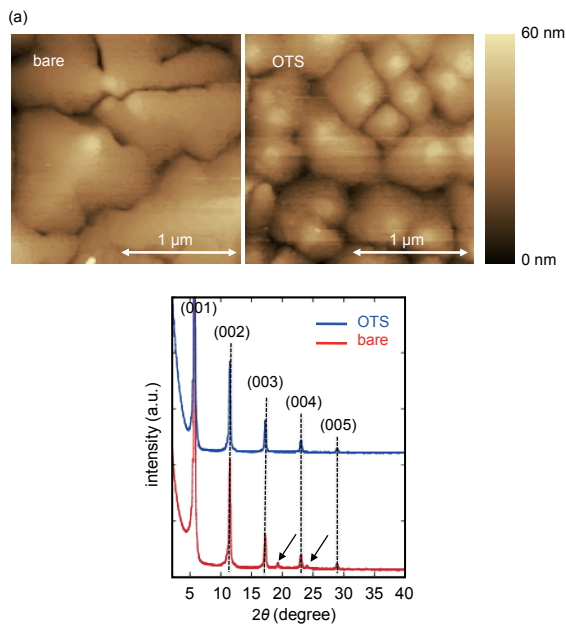


図5. ペンタセン薄膜のAFM画像 (a) およびXRD解析 (b)

Bare (SAM処理無し) のXRD解析では、ペンタセン分子のface-on配向に帰属可能なピークが観測されました (図5b、黒矢印)。これが電荷輸送の大きな律速となり、移動度の低下を起こしたと考えられます (図6a)。一方、OTSでSAM処理したデバイスではそのようなピークは観測されませんでした。これらの結果から、OTSでSAM処理したデバイスでは理想的な薄膜相が形成され、FET性能の大幅な向上に繋がったと考えられます (図6b)。

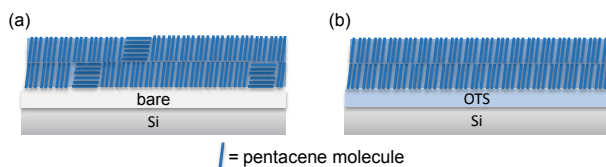
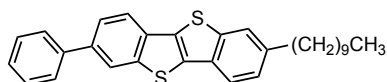


図6. ペンタセン薄膜内の分子配向イメージ

2. デバイス評価例② 高性能p型半導体材料 “Ph-BTBT-10”

Ph-BTBT-10
(= 2-Decyl-7-phenyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene) [D5491]



Ph-BTBT-10
[D5491]

Ph-BTBT-10は、近年報告された半導体材料の中でも特に優れた輸送特性を示すp型半導体材料であり、スメクチックE (SmE) 液晶相を示します。半那らは、スピコート法で作製したOFETデバイスにおいて無機半導体IGZOと同等の、極めて高い移動度 (μ_{\max}) 14.7 cm²/Vsと大気安定性を併せ持つp型有機半導体

材料であることを報告しています¹⁰⁾。弊社では、この優れたp型半導体材料であるPh-BTBT-10を製品化しました。社内にて蒸着法によるOFETデバイスの作製および評価を行っており、 $\mu_{\max} = 14.0$ cm²/Vsが得られています。

2-a. Ph-BTBT-10のデバイス性能評価

デバイス作製には、n⁺-Si/SiO₂のbare基板、またはOctadecyltrichlorosilane (ODTS) [O0079]でSAM処理を行った基板を用いました。基板を蒸着機にセットし、真空蒸着法により基板加熱下にてPh-BTBT-10[D5491]の薄膜 (40 nm) を形成した後、金 (40 nm) を蒸着しソース・ドレイン電極を形成することで、トップコンタクト型OFETデバイスを作製しました (図7)。その後、大気下にてアニーリング処理 (120°C, 5 minutes) を行い、アニーリング前後のFET特性の比較を行いました。

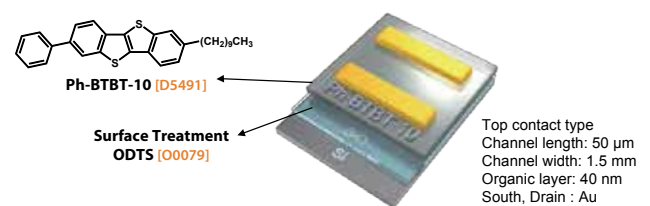
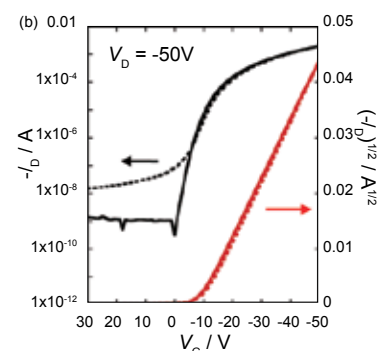
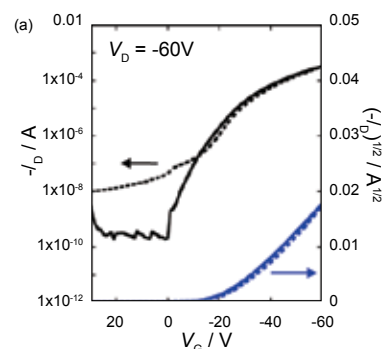


図7. Ph-BTBT-10 [D5491]を用いたOFET素子構造

作製したデバイスの特性を表4および図8に示します。全てのデバイスで安定したp型半導体特性が観測されました。また、SAMの有無に関わらず、アニーリング処理 (120°C, 5 minutes) を行うことでFET性能の大幅な向上が見られました。これは単分子層から2分子単膜層への相転移に起因するものと考えられます¹⁰⁾。bare基板では、 $\mu_{\max} = 4.86$ cm²/Vs、しきい値電圧 $V_{th} = -8$ Vの良好な値が得られました。ODTSでSAM処理した基板では、 V_{th} は大きいもののソース・ドレイン電流が大幅に増加し、 $\mu_{\max} = 14.0$ cm²/Vs、 $V_{th} = -22$ Vの極めて良好な値が得られました。



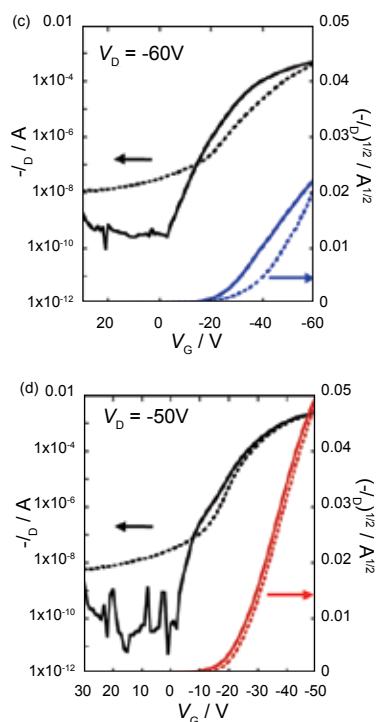


図8. Ph-BTBT-10 [D5491]を用いたOFET伝達特性
 (a) w/o annealing (bare) (b) annealing 120°C, 5min (bare)
 (c) w/o annealing (ODTS) (d) annealing 120°C, 5min (ODTS)

表4. Ph-BTBT-10を用いたOFET素子特性まとめ

Compound	SAM	Annealing Temp. (°C)	Mobility (cm ² /Vs)	V _{th} (V)
Ph-BTBT-10 [D5491]	bare	w/o	0.87 - 0.91	-24
		120	4.24 - 4.86	-8
	ODTS [O0079]	w/o	1.40 - 1.42	-23
		120	10.3 - 14.0	-22

2-b. 2D-GIXD解析

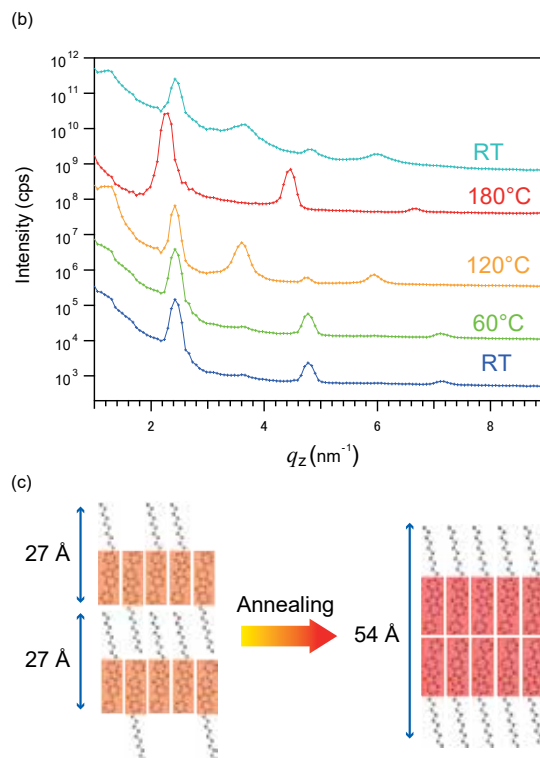
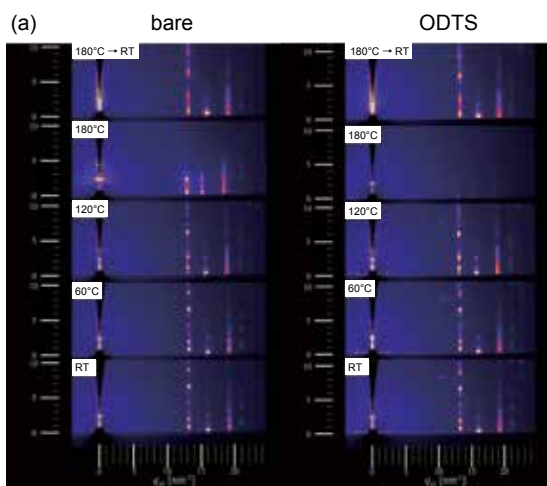


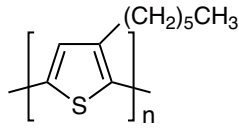
図9. (a) Ph-BTBT-10の2D-GIXD解析,
 (b) Out-of-plane (bare),
 (c) Ph-BTBT-10の相転移イメージ

Ph-BTBT-10薄膜中での結晶構造を二次元微小角入射X線回折 (2D-GIXD) を用いて解析しました (図9)。図9a, bには異なるアニーリング温度における加熱 *in situ* 2D-GIXD測定データを示します。室温及び60°Cでは層間距離 (*d*) が27Å程度の単分子層に起因するピークが得られました。一方、120°Cまで昇温した場合、回折ピークに変化が現れ、単分子層 (*d* = 27Å) から2分子膜層 (*d* = 54Å) への転移が起こったと考えられます (図9c)。液晶スメクチックE相 (SmE) への相転移温度は144°Cであり¹⁰⁾、180°Cの加熱条件下ではSmEに由来する回折ピークが観測されています。また、180°Cで形成したSmEから室温へ急冷却すると単分子と2分子膜層の混合層を発現することが示唆され、本系においては冷却速度が均一な結晶膜を得る為に極めて重要なファクターであると推測されます。

以上の結果、蒸着法により成膜したPh-BTBT-10膜においても単分子層から2分子膜層へ転移することがわかり、本解析結果は実際のFET特性の大幅な変動と一致します。Ph-BTBT-10は既に報告されている塗布法に加えて、蒸着法でも使用可能な実用性の高い有機半導体材料であることを見出しました¹⁰⁾。

3. デバイス評価例③ 高位置規則性ポリチオフェン“P3HT”

P3HT
(= Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl))
(regioregular) [P2513]



P3HT
[P2513]

規格値

Pd : < 100 ppm

Mn : 27,000 - 45,000

RR : > 99.0%

移動度 : > 0.10 cm²/Vs
(OTS Si/SiO₂ substrate)

高分子半導体を用いたデバイスの性能は、材料純度だけでなく平均分子量や位置規則性など高分子材料特有の物性にも影響されるため、低分子半導体以上にロット間の誤差が大きくなる傾向があります。弊社では、京都大学 小澤教授との共同開発にて直接アリール化重合 (DArP) を用いた高い位置規則性を有するP3HT [P2513] を試薬化し、スピコート法によるOFETデバイスの作製及び評価を行いました^{14,15)}。また、P2513を含め6種のP3HTサンプルを同条件下で評価し、数平均分子量M_nとホール移動度の相関、位置規則性RRとホール移動度の相関について検証を行っています。

3-a. P3HTのデバイス作製

n⁺-Si/SiO₂基板 (SiO₂: 300nm) に、OTS [O0168] を用いてSAM処理を行いました。窒素雰囲気グローブボックス内で、P3HTとトリクロロベンゼン:クロロホルム混合溶媒を10 mg/mLの濃度で調整し、加熱攪拌を行いました。スピコート法 (1500RPM) にてOTSでSAM処理した基板上にP3HT [P2513] の薄膜を形成し、100°Cで熱アニールを行いました。その後、基板を大気暴露せずに蒸着機に搬送し、真空蒸着法で金 (60nm) を蒸着することで、ソース・ドレイン電極を形成し、トップコンタクト型OFETデバイスの作製を完了しました (図10)。作製したデバイスは窒素雰囲気下で測定しました。すべてのP3HTサンプルにおいても同様の手順でデバイスを作製しました。

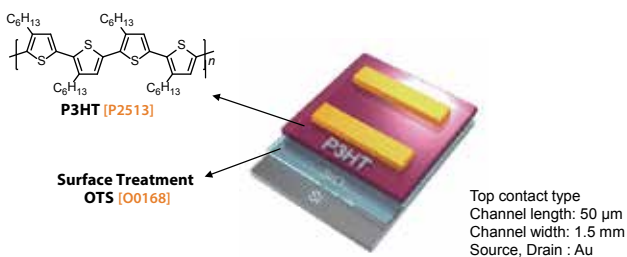


図 10. P3HT を用いた OFET 素子の構造

3-b. 分子量とホール移動度の相関

P2513と分子量の異なるサンプル3種について、作製したデバイスの特性を図11、表5に示します。サンプル1,2はP2513と同様の製法で製造された平均分子量の異なるロットです。平均分子量の増加に伴うホール移動度の向上が観測され、P2513を用いたデバイスでは、ホール移動度 $\mu_{\text{ave}} = 1.1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、on/off比 9×10^4 の良好なFET特性が得られました。平均分子量の増加による薄膜状態での結晶性の向上が要因と考えられます。

	RR (%)	M _n	Mobility (x 10 ⁻² cm ² /Vs)
P2513	99	40K	10.5±0.4
Sample 1	99	18K	5.9±0.3
Sample 2	99	8K	3.0±0.4
Sample 3	98	28K	6.5±0.7
Sample 4	91	39K	1.2±0.1
Sample 5	93	-	1.7±0.3

図 5. P3HT の位置規則性、平均分子量とデバイスのホール移動度

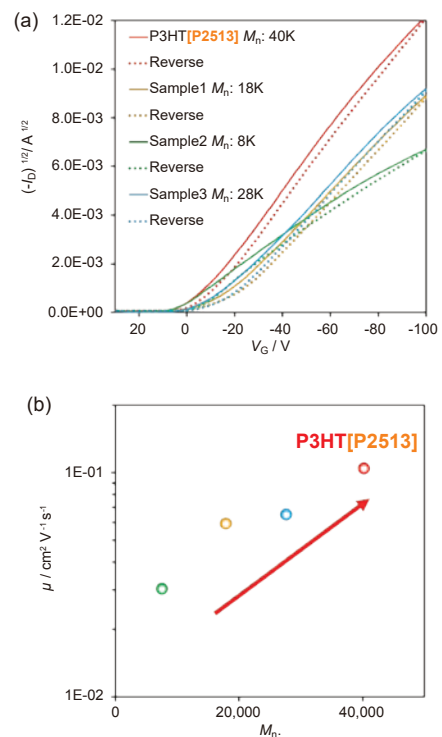


図 11. (a) 平均分子量の異なる P3HT を用いた OFET 伝達特性、(b) 平均分子量とホール移動度の相関

3-c. 位置規則性とホール移動度の相関

P2513と位置規則性の異なるサンプル2種について、作製したデバイスの特性を図12、表5に示します。サンプル4、5は他社製品を使用しています。位置規則性の上昇に伴う大幅なホール移動度の向上が実測されました。サンプル4 (RR: 91%, M_n : 39K) は **P2513**と同等の平均分子量を有するにも関わらず、ホール移動度はサンプル2 (RR: 99%, M_n : 8K)の方が優れていることがわかりました。つまり、本実験条件においては、平均分子量よりも位置規則性の方が効果的にFET性能に寄与することが明らかになりました。

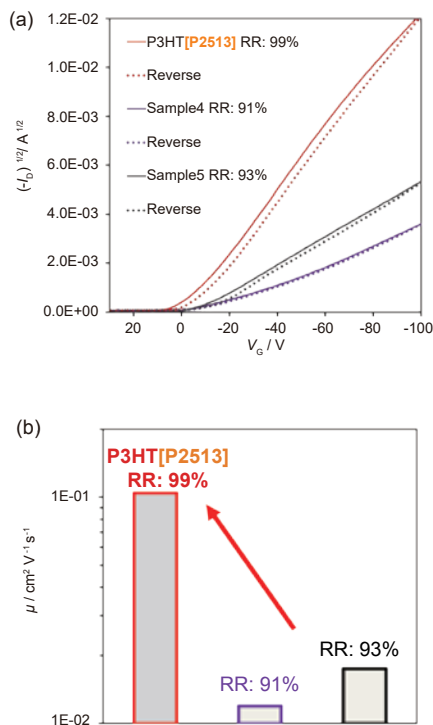


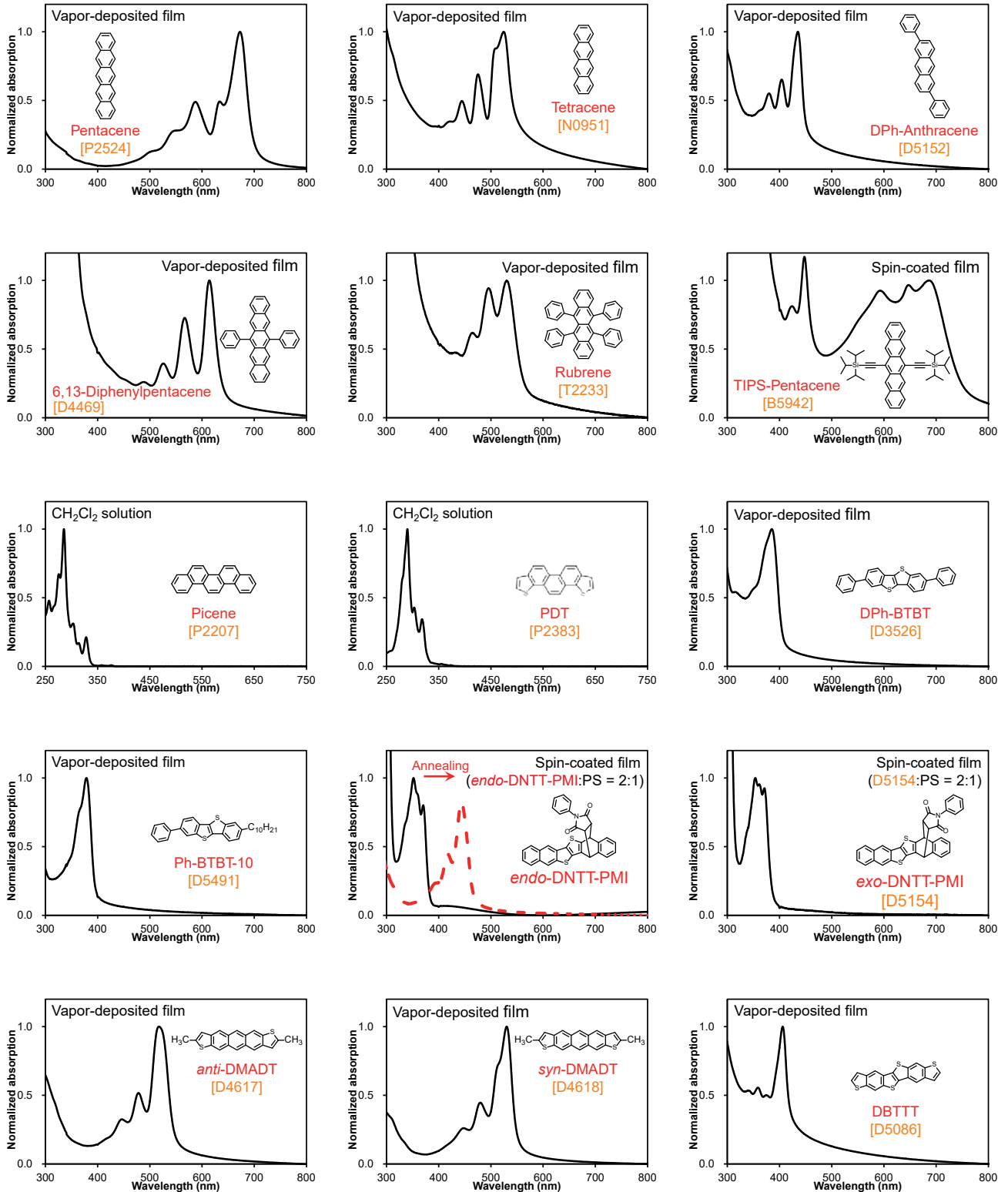
図 12. (a) 位置規則性の異なる P3HT を用いた OFET 伝達特性、
(b) 位置規則性とホール移動度の相関

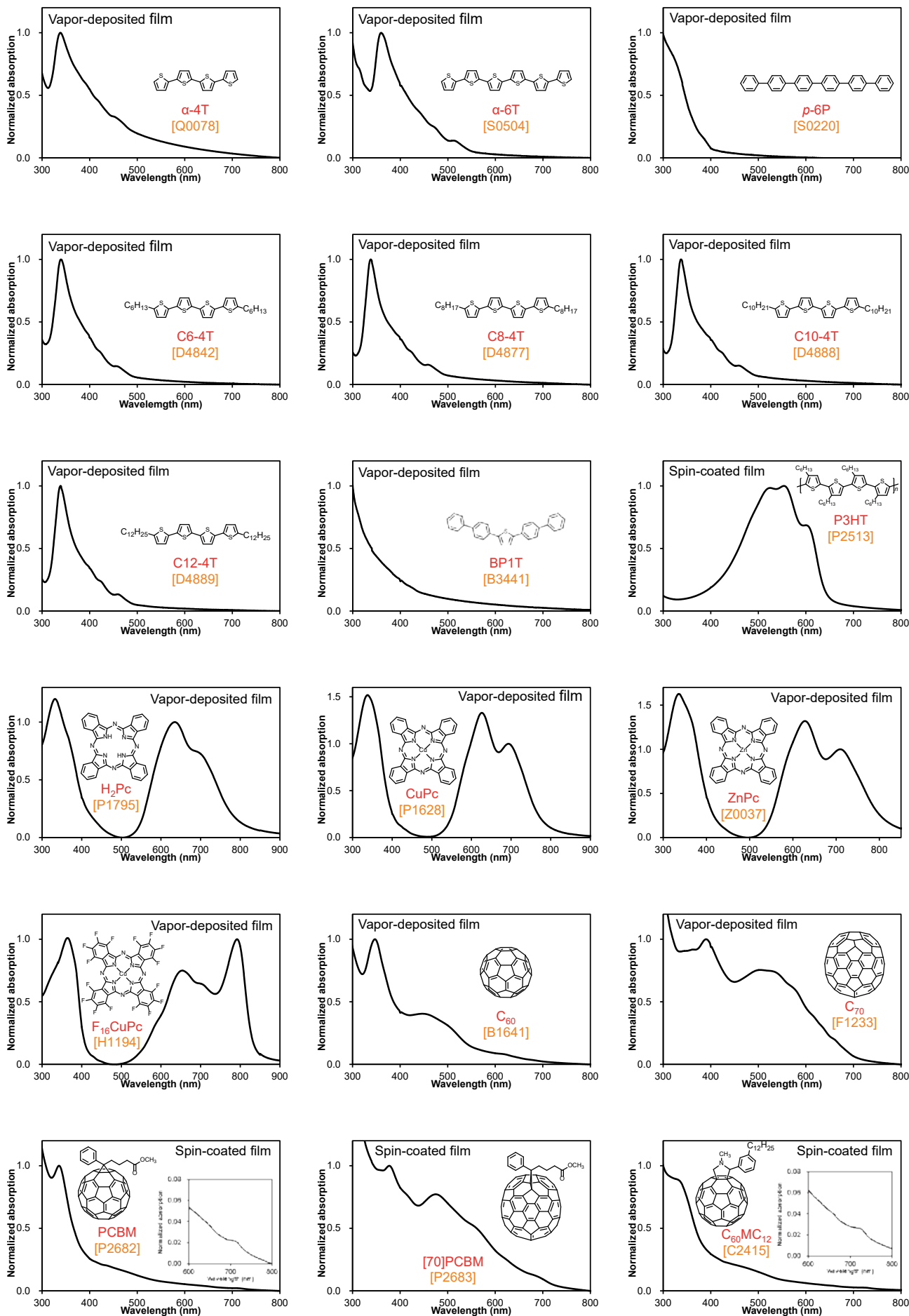
謝辞

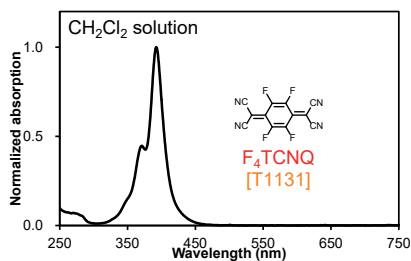
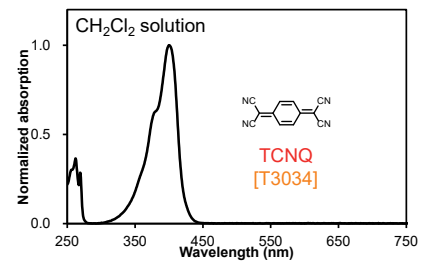
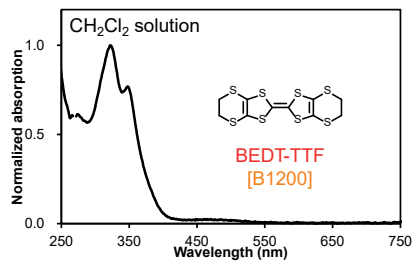
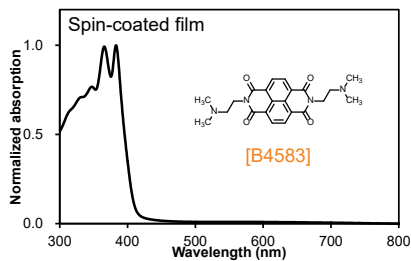
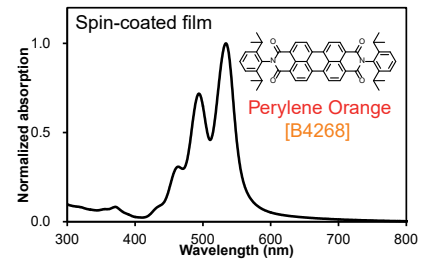
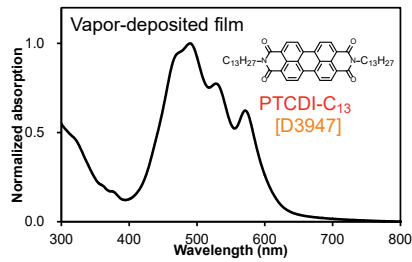
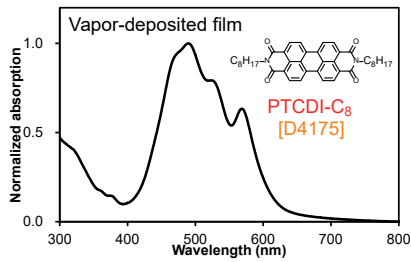
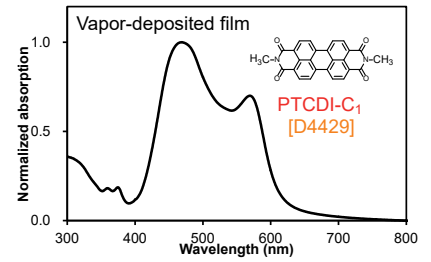
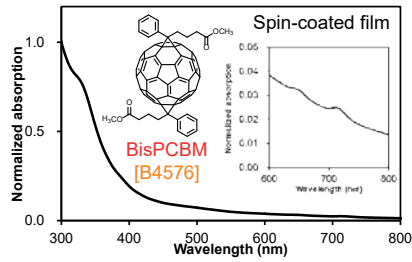
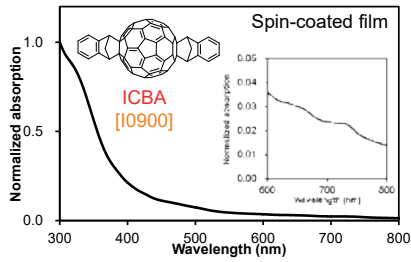
本稿における原子間力顕微鏡 (AFM: SPM-9700) は、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業の支援を受けて、(国立)産業技術総合研究所ナノプロセス施設において実施されました。薄膜X線回折 (XRD: SmartLab) は、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォームに参画する東京大学微細構造解析プラットフォームの支援を受けて実施されました。二次元微小角入射X線回折 (2D-GIXD) は、高輝度光科学研究センター (JASRI) の承認を得て、大型放射光施設 (Spring-8) のBL46XUおよびBL19B2にて実施されました (課題番号 2017B1817, 2017B1629)。また、本測定においては、岩手大学 吉本則之教授、葛原大軌助教、三浦慎平氏、大阪大学 鈴木充朗准教授、JASRI 小金澤智之博士に多大な技術的ご支援をいただいております。

有機トランジスタ材料の基礎物性

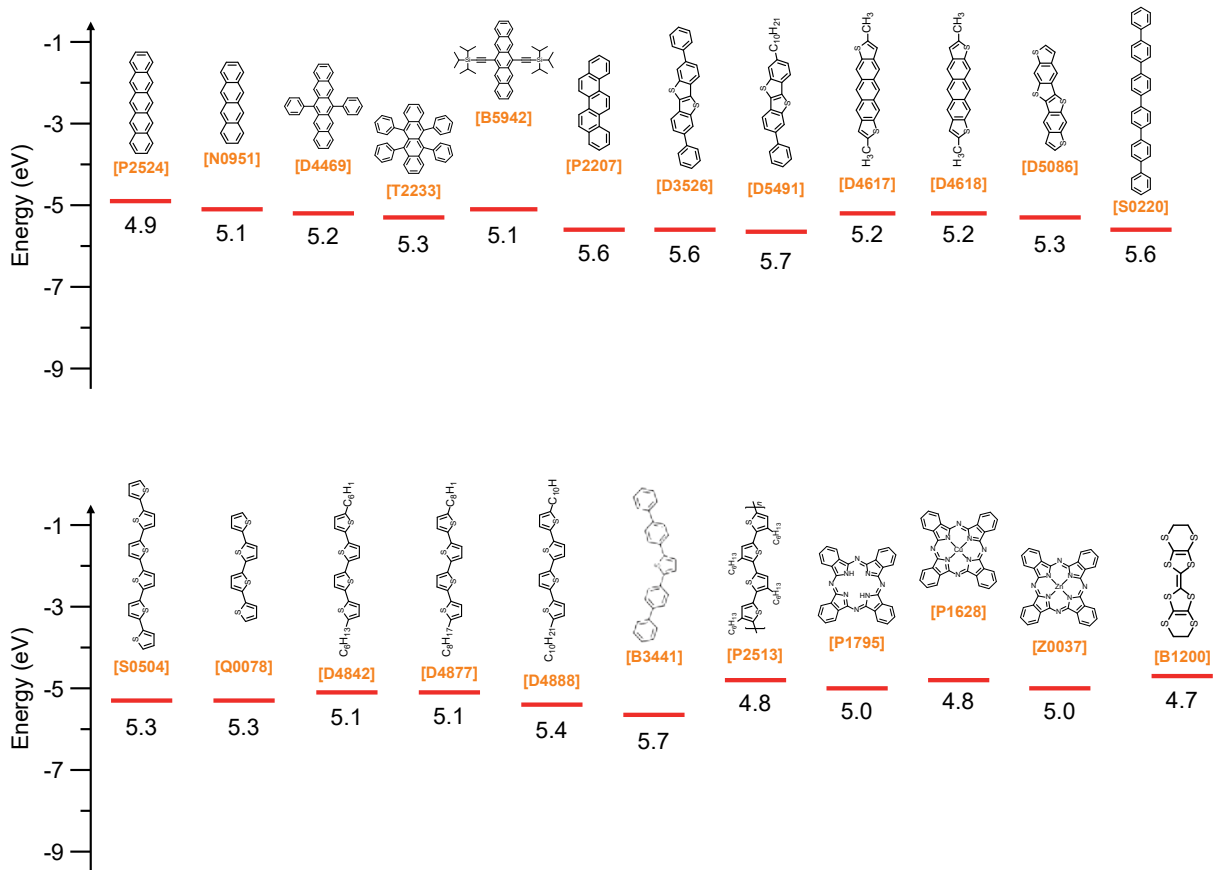
UV-Vis 吸収スペクトル (弊社内測定)



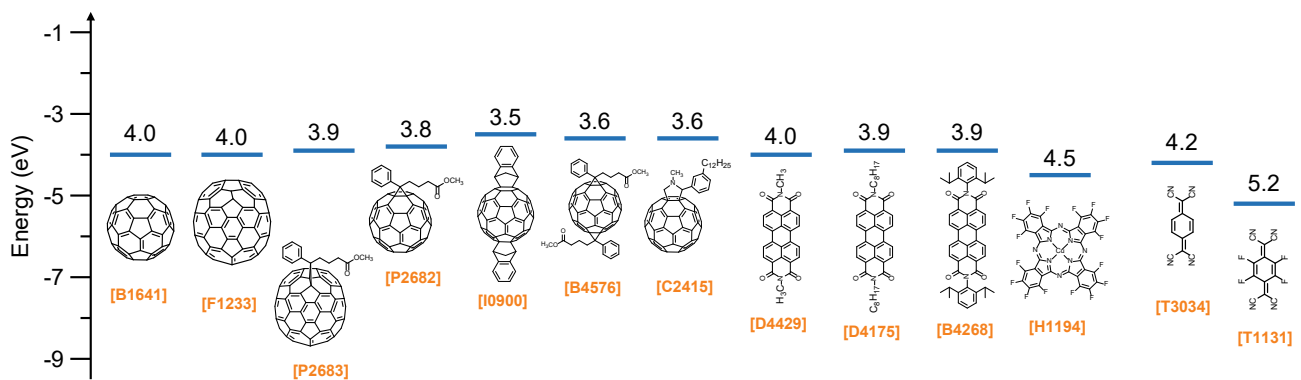




HOMO エネルギー準位



LUMO エネルギー準位



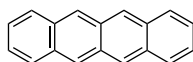
Product No.	Compound	LUMO (eV)	HOMO (eV)	E_g (eV)	Reference
N0951	Tetracene		5.1		20)
P2524	Pentacene		4.9		20)
T2233	Rubrene		5.3		20)
D4469	6,13-Diphenylpentacene	3.2	5.2	2.0	21)
B5942	TIPS-Pentacene	3.4	5.1	1.8	22)
P2207	Picene		5.6		23)
D3526	DPh-BTBT	2.4	5.6	3.2	24)
D5491	Ph-BTBT-10		5.7		25)
D4617	<i>anti</i> -DMADT	3.1	5.2		26)
D4618	<i>syn</i> -DMADT	3.0	5.2		26)
D5086	DBTTT	2.4	5.3	2.9	27)
S0220	6P	1.8	5.6	3.8	28)
S0504	6T	3.1	5.3	2.2	29)
Q0078	4T		5.3		30)
D4842	C6-4T		5.1	2.7	31)
D4877	C8-4T		5.1	2.7	31)
D4888	C10-4T	2.6	5.4		32)
B3441	BP1T		5.7		33)
P2513	P3HT		4.8		34)
P1628	CuPc	2.7	4.8	2.2	35)
P1795	H ₂ PC	2.7	5.0	2.2	35)
Z0037	ZnPc		5.0		36)
B1200	BEDT-TTF		4.7		37)
B4576	Bis-PCBM	3.6	6.0	2.4	38)
I0900	ICBA	3.5	6.0	2.5	38)
B1641	C ₆₀	4.0	6.4	2.4	38)
F1233	C ₇₀	4.0	6.4		38)
P2682	[60]PCBM	3.8	6.2		38)
P2683	[70]PCBM	3.8	5.9		38)
C2415	C ₆₀ MC ₁₂	3.6			39)
D4429	PTCDI-C ₁	4.0	6.6	2.6	40)
H1194	F ₁₆ CuPc	4.5	6.3	1.8	40)
D4175	PTCDI-C ₈	3.9	6.3	2.4	41)
B4268	Perylene Orange	3.9	6.2	2.3	42)
T3034	TCNQ	4.2			43)
T1131	F ₄ -TCNQ	5.2			44)

参考文献

- 1) K. Kudo, M. Yamashinaand, T. Moriizumi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1984**, 23, 130.
- 2) Y. Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson and T. N. Jackson, *IEEE Trans. Electron Devices* **1997**, 44, 1325.
- 3) M. Kaltenbrunner, T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, R. Schwödauier, I. Graz, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, T. Someya, *Nature* **2013**, 499, 458.
- 4) B. Chu, W. Burnett, J.W. Chung, Z. Bao, *Nature* **2017**, 355, 328.
- 5) A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay, A. Salleo, *Chem. Rev.* **2010**, 110, 3.
- 6) B. Kang, W. H. Lee, K. Cho, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2013**, 5, 2302.
- 7) K. Fukuda, T. Someya, *Adv. Mater.* **2017**, 29, 1602736.
- 8) J. G. Mei, Y. Diao, A. L. Appleton, L. Fang, Z. N. Bao, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135, 6724.
- 9) K. Takimiya, H. Ebata, K. Sakamoto, T. Izawa, T. Otsubo, Y. Kunugi, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 12604.
- 10) H. Iino, T. Usui, J.-I. Hanna, *Nat. Commun.* **2015**, 6, 6828.
- 11) R. Ruiz, D. Choudhary, B. Nickel, T. Toccoli, K.-C. Chang, A. C. Mayer, P. Clancy, J. M. Blakely, R. L. Headrick, S. Iannotta, G. G. Malliaras, *Chem. Mater.* **2004**, 16, 4497.
- 12) B. Nickel, M. Fiebig, S. Schiefer, M. Göllner, M. Huth, C. Erlen, P. Lugli, *Phys. Stat. Sol. A* **2008**, 205, 526
- 13) M. Kitamura, Y. Arakawa, *J. Phys.: Condens. Matter.* **2008**, 20, 184011
- 14) Q. Wang, R. Takita, Y. Kikuzaki, F. Ozawa, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, 132, 11420.
- 15) J.-R. Pouliot, M. Wakioka, F. Ozawa, Y. Li, M. Leclerc, *Macromol. Chem. Phys.* **2016**, 217, 1493.
- 16) R. Zhang, B. Li, M. C. Iovu, M. Jeffries-EL, G. Sauvé, J. Cooper, S. Jia, S. Tristram-Nagle, D. M. Smilgies, D. N. Lambeth, R. D. McCullough, T. Kowalewski, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 3480.
- 17) H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, D. M. de Leeuw, *Nature* **1999**, 401, 685.
- 18) J.-F. Chang, B. Sun, D. W. Breiby, M. M. Nielsen, T. I. Sölling, M. Giles, I. McCulloch, H. Sirringhaus, *Chem. Mater.* **2004**, 16, 4772.
- 19) L. A. Majewski, J. W. Kingsley, C. Balocco, A. M. Songa, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, 88, 222108.
- 20) N. Sato, K. Seki, H. Inokuchi, *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 2* **1981**, 77, 1621.
- 21) L. C. Picciolo, H. Murata, Z. H. Kafafi, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 78, 2378.
- 22) I. Kaur, W. Jia, R. P. Kopeski, S. Selvarasah, M. R. Dokmeci, C. Pramanik, N. E. McGruer, G. P. Miller, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130, 16274.
- 23) T. Hosokai, A. Hinderhofer, F. Bussolotti, K. Yonezawa, C. Lorch, A. Vorobiev, Y. Hasegawa, Y. Yamada, Y. Kubozoro, A. Gerlach, S. Kera, F. Schreiber, N. Ueno, *J. Phys. Chem. C* **2015**, 119, 2902.
- 24) K. Takimiya, H. Ebata, K. Sakamoto, T. Izawa, T. Otsubo, Y. Kunugi, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 12604.
- 25) M. Kunii, H. Iino, J. Hanna, *Appl. Phys. Lett.* **2017**, 110, 243301.
- 26) M. Mamada, T. Minamiki, H. Katagiri, S. Tokito, *Org. Lett.* **2012**, 14, 4062.
- 27) J.-I. Park, J. W. Chung, J.-Y. Kim, J. Lee, J. Y. Jung, B. Koo, B.-L. Lee, S. W. Lee, Y. W. Jin, S. Y. Lee, *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, 137, 12175.
- 28) C. Qian, J. Sun, L. Kong, Y. Fu, Y. Chen, J. Wang, S. Wang, H. Xie, H. Huang, J. Yang, Y. Gao, *ACS Photonics* **2017**, 4, 2573.
- 29) J. Sakai, T. Taima, T. Yamanari, K. Saito, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2009**, 93, 1149.
- 30) H. Méndez, G. Heimel, S. Winkler, J. Frisch, A. Opitz1, K. Sauer, B. Wegner, M. Oehzelt, C. Röthel, S. Duhm, D. Többsen, N. Koch, I. Salzmann, *Nat. Comm.* **2015**, 6, 8560
- 31) M. Ashizawa, T. Niimura, Y. Yu, K. Tsuboi, H. Matsumoto, R. Yamada, S. Kawauchi, A. Tanioka, T. Mori, *Tetrahedron* **2012**, 68, 2790.
- 32) S. A. Ponomarenko, S. Kirchmeyer, A. Elschner, N. M. Alpatova, M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid, *Chem. Mater.* **2006**, 18, 579.
- 33) T. J. Dingemans, A. Bacher, M. Thelakkat, L. G. Pedersen, E. T. Samulski, H.-W. Schmidt, *Synthetic Metals* **1999**, 105, 171.
- 34) V. Vohra, G. Arrighetti, L. Barba, K. Higashimine, W. Porzio, H. Murata, *J. Phys. Chem. Lett.* **2012**, 3, 1820.
- 35) D. R. T. Zahn, M. Gorgoi, O. D. Gordan, *Sol. Ener.* **2006**, 80, 707.
- 36) W. Tress, K. Leo, M. Riede, *Adv. Funct. Mater.* **2011**, 21, 2140.
- 37) N. Sato, G. Saito, H. Inokuchi, *Chem. Phys.* **1983**, 76, 79.
- 38) H. Yoshida, *J. Phys. Chem. C* **2014**, 118, 24377.
- 39) M. Chikamatsu, A. Itakura, Y. Yoshida, R. Azumi, K. Yase, *Chem. Mater.* **2008**, 20, 7365.
- 40) D. R. T. Zahn, G. N. Gavrila, M. Gorgoi, *Chem. Phys.* **2006**, 325, 99.
- 41) B. A. Jones, A. Facchetti, M. R. Wasielewski, T. J. Marks, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, 129, 15259.
- 42) I. Kim, H. M. Haverinen, Z. Wang, S. Madakuni, J. Li, G. E. Jabbour, *Appl. Phys. Lett.* **2009**, 95, 023305.
- 43) K. Kanai, K. Akaike, K. Koyasu, K. Sakai, T. Nishi, Y. Kamizuru, T. Nishi, Y. Ouchi, K. Seki, *Appl. Phys. A* **2009**, 95, 309.
- 44) W. Gao, A. Kahn, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 79, 4040.

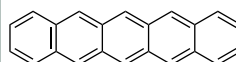
高品質有機半導体材料

N1173 200mg 1g



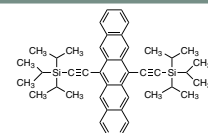
Naphthacene
[for organic electronics]
CAS RN: 92-24-0

P2524 100mg 1g



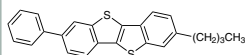
Pentacene (99.999%, trace metals basis) (purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 135-48-8

B5942 100mg



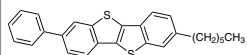
TIPS Pentacene
[for organic electronics]
CAS RN: 373596-08-8

B6248 100mg 250mg 1g



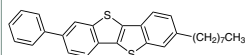
Ph-BTBT-4
[for organic electronics]
CAS RN: 1781261-91-3

H1769 100mg 250mg 1g



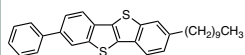
Ph-BTBT-6
[for organic electronics]
CAS RN: 1781261-93-5

O0576 100mg 250mg 1g



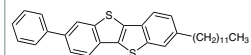
Ph-BTBT-8
[for organic electronics]
CAS RN: 1781261-95-7

D5491 100mg 250mg 1g



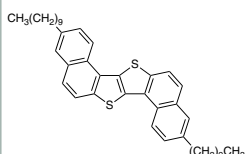
Ph-BTBT-10
[for organic electronics]
CAS RN: 1398395-83-9

D5910 100mg 250mg 1g



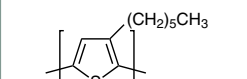
Ph-BTBT-12
[for organic electronics]
CAS RN: 1627606-00-1

D5796 100mg 250mg



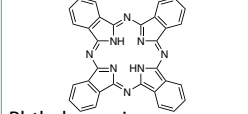
S-DNTT-10
[for organic electronics]

P2513 100mg 500mg



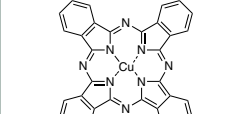
P3HT (regioregular)
[for organic electronics]
CAS RN: 110134-47-9

P2734 100mg 500mg



Phthalocyanine
(purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 574-93-6

C3645 100mg 500mg



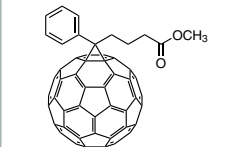
CuPc (purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 147-14-8

F1232 100mg



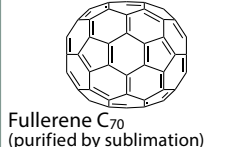
Fullerene C₆₀
(purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 99685-96-8

P2682 100mg



PCBM [for organic electronics]
CAS RN: 160848-22-6

F1233 100mg



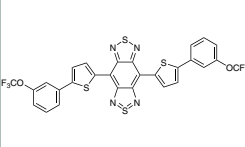
Fullerene C₇₀
(purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 115383-22-7

P2683 100mg



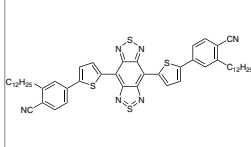
[70]PCBM (mixture of isomers)
[for organic electronics]
CAS RN: 609771-63-3

T3922 100mg 250mg



TU-1 [for organic electronics]
CAS RN: 1458041-70-7

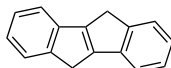
T3924 100mg 250mg



TU-3 [for organic electronics]
CAS RN: 1681007-44-2

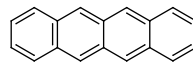
p 型半導体材料

D3191 1g



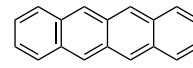
Diphenylsuccinone
CAS RN: 6543-29-9

N0001 100mg 1g 5g



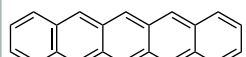
Naphthacene
CAS RN: 92-24-0

N0951 200mg 1g



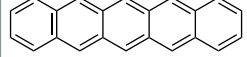
Naphthacene
(purified by sublimation)
CAS RN: 92-24-0

P0030 100mg 1g



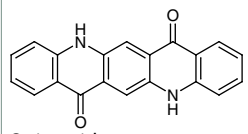
Pentacene (purified by sublimation)
CAS RN: 135-48-8

P2524 100mg 1g



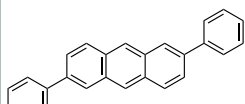
Pentacene (99.999%, trace metals basis) (purified by sublimation)
[for organic electronics]
CAS RN: 135-48-8

Q0083 1g



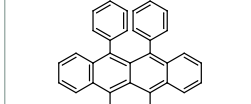
Quinacridone
(purified by sublimation)
CAS RN: 1047-16-1

D5152 100mg



2,6-Diphenylanthracene
(purified by sublimation)
CAS RN: 95950-70-2

T0561 100mg 1g



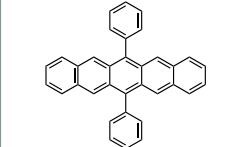
Rubrene
CAS RN: 517-51-1

T2233 250mg 1g



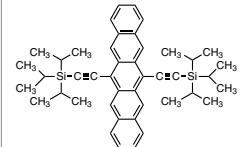
Rubrene (purified by sublimation)
CAS RN: 517-51-1

D4469 200mg



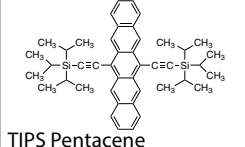
6,13-Diphenylpentacene
CAS RN: 76727-11-2

B3562 100mg



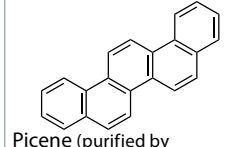
TIPS Pentacene
CAS RN: 373596-08-8

B5942 100mg



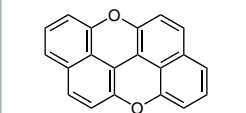
TIPS Pentacene
[for organic electronics]
CAS RN: 373596-08-8

P2207 100mg 500mg



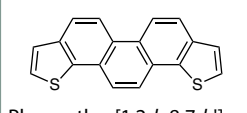
Picene (purified by sublimation) (>99.9%)
CAS RN: 213-46-7

X0083 1g



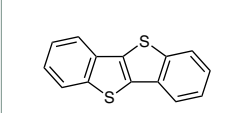
peri-Xanthenoxanthene
CAS RN: 191-28-6

P2383 100mg



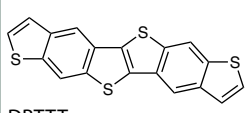
Phenanthro[1,2-b:8,7-b']-dithiophene
CAS RN: 1491133-64-2

B5551 200mg 1g



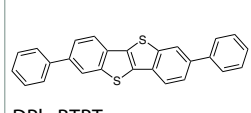
BTBT
CAS RN: 248-70-4

D5086 100mg



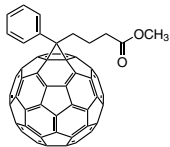
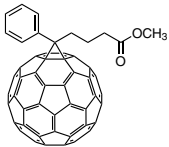
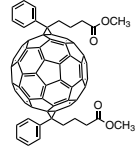
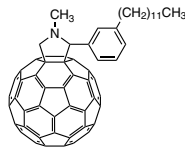
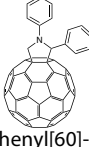
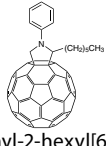

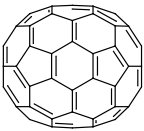
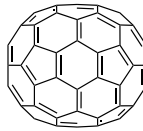
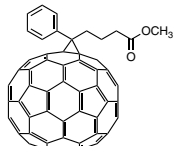
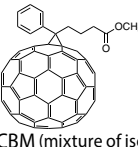
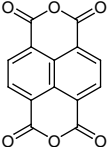
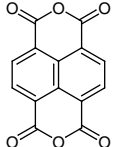
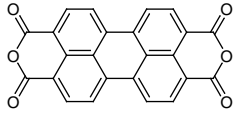
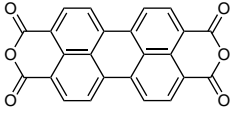
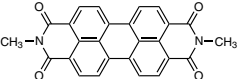
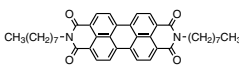
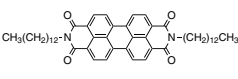
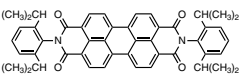
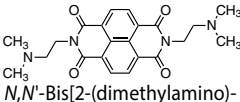
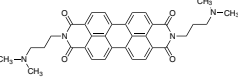
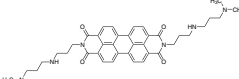
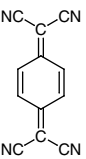
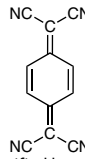
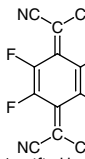
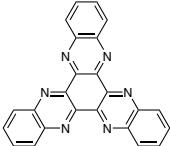
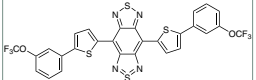
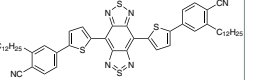
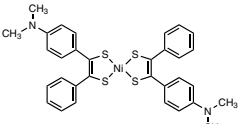
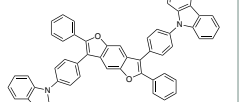
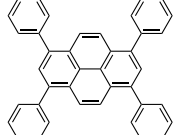
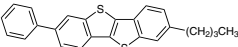
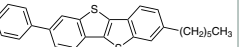
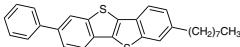
DBTTT
(purified by sublimation)
CAS RN: 1033611-96-9

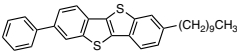
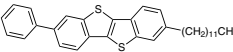
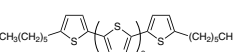
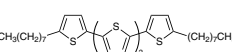
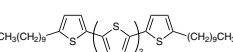
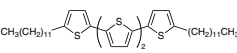
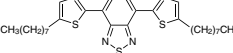
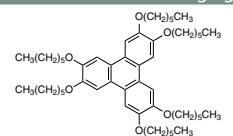
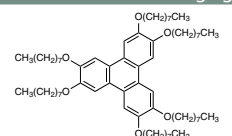
D3526 100mg



DPh-BTBT
(purified by sublimation)
CAS RN: 900806-58-8

<p>B6248 100mg 250mg 1g</p> <p>Ph-BTBT-4 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-91-3</p>	<p>H1769 100mg 250mg 1g</p> <p>Ph-BTBT-6 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-93-5</p>	<p>O0576 100mg 250mg 1g</p> <p>Ph-BTBT-8 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-95-7</p>	<p>D5491 100mg 250mg 1g</p> <p>Ph-BTBT-10 [for organic electronics] CAS RN: 1398395-83-9</p>	<p>D5910 100mg 250mg 1g</p> <p>Ph-BTBT-12 [for organic electronics] CAS RN: 1627606-00-1</p>
<p>D5796 100mg 250mg</p> <p>S-DNTT-10 [for organic electronics]</p>	<p>D4617 100mg</p> <p>anti-DMADT (purified by sublimation) CAS RN: 1019983-99-3</p>	<p>D4618 100mg</p> <p>syn-DMADT (purified by sublimation) CAS RN: 1392416-39-5</p>	<p>D5154 50mg</p> <p>exo-DNTT-PMI (DNTT-Precursor) CAS RN: 1269669-43-3</p>	<p>B3441 1g 5g</p> <p>BP7T CAS RN: 56316-86-0</p>
<p>D4487 200mg 1g</p> <p>4,7-Di(2-thienyl)-2,1,3-benzothiadiazole CAS RN: 165190-76-1</p>	<p>B4683 200mg</p> <p>4,7-Bis(5-<i>n</i>-octyl-2-thienyl)-2,1,3-benzothiadiazole CAS RN: 1171974-28-9</p>	<p>S0220 100mg 1g</p> <p>p-Sexiphenyl CAS RN: 4499-83-6</p>	<p>T1196 1g 5g</p> <p>α-Terthienyl (purified by sublimation) CAS RN: 1081-34-1</p>	<p>Q0078 100mg</p> <p>α-Quaterthiophene CAS RN: 5632-29-1</p>
<p>Q0079 100mg 500mg</p> <p>α-Quinquethiophene CAS RN: 5660-45-7</p>	<p>S0504 100mg 1g</p> <p>α-Sexithiophene (purified by sublimation) CAS RN: 88493-55-4</p>	<p>S0505 100mg</p> <p>α-Septithiophene CAS RN: 86100-63-2</p>	<p>O0313 100mg</p> <p>α-Octithiophene CAS RN: 113728-71-5</p>	<p>P2513 100mg 500mg</p> <p>P3HT (regioregular) [for organic electronics] CAS RN: 110134-47-9</p>
<p>D4842 100mg</p> <p>α,ω-Dihexylquaterthiophene CAS RN: 132814-92-7</p>	<p>D4877 100mg</p> <p>5,5''-Di-<i>n</i>-octyl-2,2':5,2'':5'',2'''-quaterthiophene CAS RN: 882659-01-0</p>	<p>D4888 100mg</p> <p>5,5''-Didecyl-2,2':5,2'':5'',2'''-quaterthiophene CAS RN: 514188-77-3</p>	<p>D4889 100mg</p> <p>5,5''-Didodecyl-2,2':5,2'':5'',2'''-quaterthiophene CAS RN: 153561-79-6</p>	<p>P2710 100mg</p> <p>PBTPD CAS RN: 1240372-42-2</p>
<p>P1795 1g</p> <p>Phthalocyanine (purified by sublimation) CAS RN: 574-93-6</p>	<p>P2734 100mg 500mg</p> <p>Phthalocyanine (purified by sublimation) [for organic electronics] CAS RN: 574-93-6</p>	<p>P1628 1g</p> <p>CuPc (purified by sublimation) CAS RN: 147-14-8</p>	<p>C3645 100mg 500mg</p> <p>CuPc (purified by sublimation) [for organic electronics] CAS RN: 147-14-8</p>	<p>P0767 1g 5g 25g</p> <p>ZnPc CAS RN: 14320-04-8</p>
<p>Z0037 500mg</p> <p>ZnPc (purified by sublimation) CAS RN: 14320-04-8</p>	<p>B1200 100mg 1g 5g</p> <p>BEDT-TTF CAS RN: 66946-48-3</p>	<p>B5672 1g 5g 25g</p> <p>TOP-HTM-α1 CAS RN: 872466-50-7</p>		
<p>n 型半導体材料</p>				
		<p>H1194 100mg 1g</p> <p>F16CuPc (purified by sublimation) CAS RN: 14916-87-1</p>	<p>B1641 100mg 500mg 1g</p> <p>Fullerene C₆₀ (pure) CAS RN: 99685-96-8</p>	<p>F1232 100mg</p> <p>Fullerene C₆₀ (purified by sublimation) [for organic electronics] CAS RN: 99685-96-8</p>

M2088 100mg  PCBM CAS RN: 160848-22-6	P2682 100mg  PCBM [for organic electronics] CAS RN: 160848-22-6	B4576 50mg  Bis-PCBM (mixture of isomers) CAS RN: 1048679-01-1	C2415 100mg  C ₆₀ MC ₁₂ CAS RN: 403483-19-2	D5757 100mg  N,2-Diphenyl[60]-fulleropyrrolidine CAS RN: 1373934-14-5
P2744 100mg  N,Phenyl-2-hexyl[60]-fulleropyrrolidine CAS RN: 1426332-00-4	I0900 50mg  ICBA CAS RN: 1207461-57-1	B1694 100mg  Fullerene C ₇₀ CAS RN: 115383-22-7	F1233 100mg  Fullerene C ₇₀ [for organic electronics] CAS RN: 115383-22-7	M2550 50mg  [70]PCBM (mixture of isomers) CAS RN: 609771-63-3
P2683 100mg  [70]PCBM (mixture of isomers) [for organic electronics] CAS RN: 609771-63-3	N0369 25g 250g  NTCDA CAS RN: 81-30-1	N0755 1g 5g  NTCDA (purified by sublimation) CAS RN: 81-30-1	P0972 25g 100g 500g  Pigment Red 224 CAS RN: 128-69-8	P2102 1g  Pigment Red 224 (purified by sublimation) CAS RN: 128-69-8
D4429 1g 5g  PTCDI-C ₁ CAS RN: 5521-31-3	D4175 1g  PTCDI-C ₈ CAS RN: 78151-58-3	D3947 200mg 1g  PTCDI-C ₁₃ CAS RN: 95689-92-2	B4268 1g 5g  Perylene Orange CAS RN: 82953-57-9	B4583 200mg  N,N'-Bis[2-(dimethylamino)ethyl]-1,8,4,5-naphthalene-tetracarboxydiimide CAS RN: 22291-04-9
B5954 200mg 1g  DAPER CAS RN: 117901-97-0	P3289 1g  PDINN CAS RN: 1020180-01-1	T0078 5g 25g  TCNQ CAS RN: 1518-16-7	T3034 1g 5g  TCNQ (purified by sublimation) CAS RN: 1518-16-7	T1131 100mg 1g  F ₄ TCNQ (purified by sublimation) CAS RN: 29261-33-4
D6085 250mg 1g  HATNA CAS RN: 214-83-5	T3922 100mg 250mg  TU-1 [for organic electronics] CAS RN: 1458041-70-7	T3924 100mg 250mg  TU-3 [for organic electronics] CAS RN: 1681007-44-2		
両極性半導体材料				
B4361 1g  BDN CAS RN: 38465-55-3	C2780 200mg 1g  CZBDF CAS RN: 1092578-51-2	T3042 50mg 200mg  1,3,6,8-Tetraphenylpyrene CAS RN: 13638-82-9		
液晶性半導体材料				
B6248 100mg 250mg 1g  Ph-BTBT-4 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-91-3	H1769 100mg 250mg 1g  Ph-BTBT-6 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-93-5	O0576 100mg 250mg 1g  Ph-BTBT-8 [for organic electronics] CAS RN: 1781261-95-7		

<p>D5491 100mg 250mg 1g</p>  <p>Ph-BTBT-10 [for organic electronics] CAS RN: 1398395-83-9</p>	<p>D5910 100mg 250mg 1g</p>  <p>Ph-BTBT-12 [for organic electronics] CAS RN: 1627606-00-1</p>	<p>D4842 100mg</p>  <p>α,ω-Dihexylquaterthiophene CAS RN: 132814-92-7</p>	<p>D4877 100mg</p>  <p>5,5''-Di-n-octyl-2,2':5',2'':5''',2''''-quaterthiophene CAS RN: 882659-01-0</p>	<p>D4888 100mg</p>  <p>5,5''-Didecyl-2,2':5',2'':5''',2''''-quaterthiophene CAS RN: 514188-77-3</p>
<p>D4889 100mg</p>  <p>5,5''-Didodecyl-2,2':5',2'':5''',2''''-quaterthiophene CAS RN: 153561-79-6</p>	<p>B4683 200mg</p>  <p>4,7-Bis(5-n-octyl-2-thienyl)-2,1,3-benzothiadiazole CAS RN: 1171974-28-9</p>	<p>H1449 200mg 1g</p>  <p>2,3,6,7,10,11-Hexakis(hexyloxy)triphenylene CAS RN: 70351-86-9</p>	<p>H1450 200mg 1g</p>  <p>2,3,6,7,10,11-Hexakis((n-octyl)oxy)triphenylene CAS RN: 70351-87-0</p>	

東京化成工業株式会社

試薬製品について

■本社営業部 〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 16-12 T-PLUS 日本橋小伝馬町8階
Tel: 03-3668-0489 Fax: 03-3668-0520 E-mail: Sales-JP@TCIchemicals.com

■大阪営業部 〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜1-1-21 第2中井ビル1階
Tel: 06-6228-1155 Fax: 06-6228-1158 E-mail: osaka-s@TCIchemicals.com

スケールアップ、受託サービス(合成・開発・製造)について

□化成品営業部 〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 16-12 T-PLUS 日本橋小伝馬町8階
Tel: 03-5651-5171 Fax: 03-5640-8021 E-mail: finechemicals@TCIchemicals.com

弊社製品取扱店

本誌掲載の化学品は試験・研究用にのみ使用するものです。化学知識のある専門家以外の方のご使用はお避けください。品目や製品情報等、掲載内容の変更を予告なく行う場合があります。内容の一部または全部の無断転載・複製はご遠慮ください。