

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22550114

研究課題名（和文）感光性自己組織化単分子膜の高機能化と有機薄膜トランジスタ作製への応用

研究課題名（英文）High functionalization of photosensitive self-assembled monolayers and its application to fabrication of organic thin film transistor

研究代表者

山口 和夫（YAMAGUCHI KAZUO）

神奈川大学・理学部・教授

研究者番号：20114902

研究成果の概要（和文）：自己組織化単分子膜（Self-Assembled Monolayer, **SAM**）を形成する化合物の分子設計を行い、熱酸化膜付きシリコン基板上に **SAM** を形成させることにより、従来の感光性 **SAM** の感度を 40 倍向上させた。また、分子設計以外にも **SAM** 形成や光照射の条件検討によっても、さらに大幅な感度の向上が可能であることを示した。さらに、有機薄膜トランジスタの性能を向上させるための感光性 **SAM** 形成化合物の分子設計・合成も行い、感光性 **SAM** の高機能化に成功した。

研究成果の概要（英文）：The sensitivity of photosensitive self-assembled monolayer (SAM) was improved forty times as much as that previously reported by molecular design of compounds forming SAM as well as employment of thermally oxidized silicon wafer as a substrate for SAM. In addition, it was shown that the improvement of photosensitivity was possible by investigation of conditions for the SAM formation and photoirradiation. Furthermore, a compound was molecularly designed and synthesized for high performance of organic thin film transistor leading to successfully high functionalization of photosensitive SAM.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：高分子化学、生物有機化学

科研費の分科・細目：複合化学・高分子化学

キーワード：高分子合成、超薄膜、ナノ材料、表面・界面物性

1. 研究開始当初の背景

OTFT 材料のキャリア移動度は、アモルファスシリコンやポリシリコンのそれに比べて、非常に低く、あまり注目されていなかった。しかし近年、単結晶や薄膜結晶の材料を用いたシリコンの性能に匹敵するような **OTFT** が報告されるようになり、新たな半導体材料と

して期待されるようになってきている。**OTFT** は、フレキシブルであり、軽量で耐衝撃性があり、印刷技術が利用でき、低コスト化が可能であること、大面積化が可能であることなどが、注目される点である。しかしながら、実用化に向けては解決しなければならない点が多々あるのが現状である。

OTFTの性能については、二種の界面の性質に強く依存している。一つは半導体と電極の界面であり、電荷の注入が電極から半導体へと起こる。もう一つは半導体と絶縁体の界面であり、電荷の移動が絶縁体近傍の半導体層で起こる。そこで、半導体層での移動度の向上のために、絶縁体層として、**SAM**を用いた研究が最近行われている (Park, Y. D. et al., *Materials Today*, **10**, 46(2007))。例えば、フッ素を導入した**SAM**を用いると、ペンタセン薄膜を用いたトランジスタチャネルにホールを蓄積し、結果として移動度の向上が見られている (Kobayashi, S. et al., *Nat. Mater.*, **3**, 317 (2004))。著者らは、これを**界面ドーピング**と呼んでおり、トランジスタ薄膜に対する**SAM**の電気双極子の影響として理解されている。また、長鎖アルキル鎖末端にフェノキシ基を導入した**SAM**もペンタセンを半導体として用いた**OTFT**に有用であることが報告されている (Halik, M. et al., *Nature*, **431**, 963 (2004))。以上のことから、**SAM**にフッ素あるいは芳香環を導入することは、**界面ドーピング**に有効であると、期待される。

2. 研究の目的

我々が開発した感光性の自己組織化単分子膜 (**Self-Assembled Monolayer**, 以下**SAM**)は、ケージド細胞培養基板として実用化の一手前まで来ている。

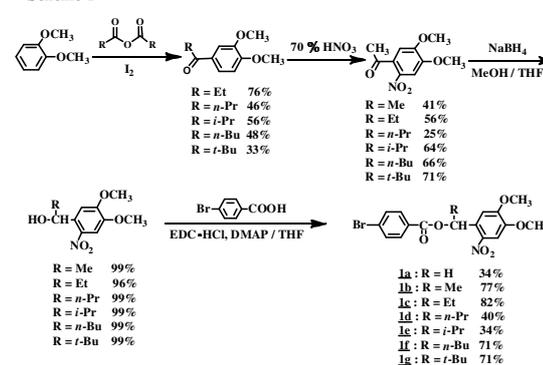
本研究では、この感光性**SAM**の高機能化を図るとともに、プラスチック基板上への有機薄膜トランジスタ (**Organic Thin Film Transistor**, 以下**OTFT**)作製への応用を目指す。具体的には、紫外線照射に対して高感度であり、露光部と未露光部との親水-疎水性の差が非常に大きな**SAM**を開発する。また、**OTFT**を塗布する未露光部は疎水性であると同時に**OTFT**のキャリア移動度を増加させるような構造を**SAM**に導入する。

3. 研究の方法

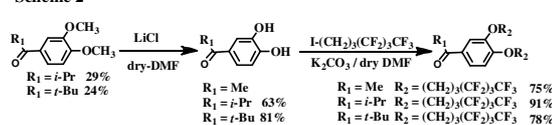
合成；シランカップリング剤のモデル化合物として**1a**およびそのペンジル位にメチル基、エチル基、プロピル基、イソプロピル基、ブチル基、*t*-ブチル基を導入した2-ニトロペンジルエステル誘導体**1b~1g**を合成した (Scheme 1)。また、Scheme 2~3に従って、芳香環にジメトキシ基あるいはジフルオロアルキル基を持ち、ペンジル位にメチル基、イソプロピル基、*t*-ブチル基を導入した光分解性シランカップリング剤**2~7**を合成した。また、Scheme 4に示すように、**2**の1つのメトキシ基の代わりにペンタフルオロフェニル基を導入した**8**を合成した。また、Scheme 4に示すように、**2**の1つのメトキシ基の代わりにペンタフルオロフェニル基を導入し

た**8**を合成した。**8**は有機薄膜トランジスタの性能を向上させることが期待される化合物である。

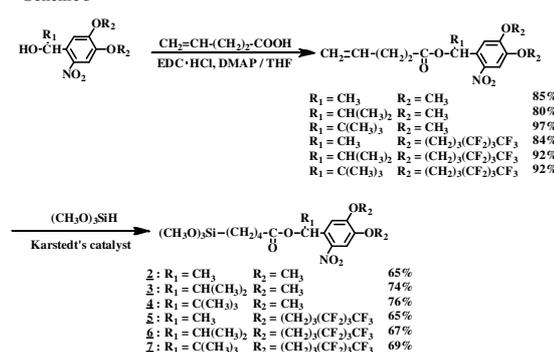
Scheme 1



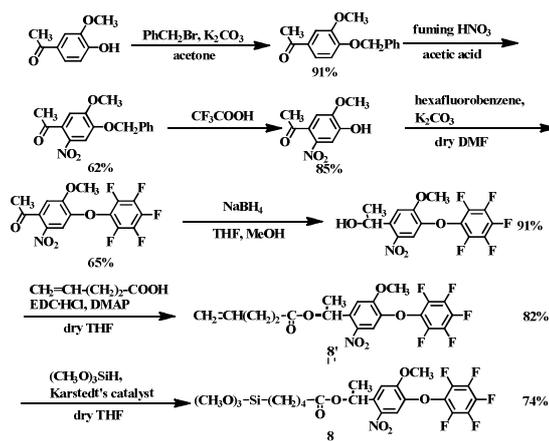
Scheme 2



Scheme 3



Scheme 4



溶液中でのモデル化合物の光分解評価；合成した誘導体をアセトニトリルで溶解し0.1 mM溶液を調製し、石英セルに3.5 ml量り入れ、超高压水銀灯を用いて、照度 100 mW / cm²、波長 300 nm (パイレックスガラスフィルター)とした光を任意の時間で照射し、高速液体ク

ロマトグラフィー(High-Performance Liquid Chromatography, 以下 **HPLC**)で各時間でのエステル減少を測定した。各照射時間でのエステル減少から求めた反応速度定数と照射時間を一次プロットし、各誘導体の反応速度定数(k/s^{-1})を求めた。

溶液中での前駆体分子の光分解評価; **2**~**4**の前駆体である **2'**~**4'**を用いて 0.1 mM アセトニトリル溶液を調製し、溶液中での光分解を **1a**~**1g**と同様に行った。

表面修飾条件の最適化; 表面修飾時のシランカップリング剤濃度、温度、酢酸添加濃度を変えて **2**を用いてシリコンウェハと石英ガラス表面の修飾を行い、原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope, 以下 **AFM**)やUV測定、接触角測定により評価した。

2~**8**により形成した **SAM**の評価と比較; 各化合物により形成した **SAM**の評価はそれぞれを比較するために同条件で行った。無水トルエンにシランカップリング剤 **2**~**8**をそれぞれ溶解し、1 mM のトルエン溶液を調製した。このトルエン溶液に前処理済みのシリコンウェハまたは石英ガラスを入れ、窒素雰囲気下で 100°C に加熱し、3 時間浸漬させ、**SAM**を形成させた。この **SAM**を水の接触角測定やUV測定、X線反射率法(X-Ray Reflectivity, 以下 **XRR**)、**AFM**、X線光電子分光法(X-ray Photoelectron Spectroscopy, 以下 **XPS**)により評価した。光照射は超高压水銀灯を用いて、照度 50 mW / cm²、波長 320 nm 以上の条件で行った。

SAMの酸塩基応答性の評価; **6**で修飾したシリコンウェハに光照射し、5%NaHCO₃水溶液と2N HClに交互に浸漬させ、接触角の変化を調べた。

ラビング後の SAMの評価; ラビング後の **SAM**の評価として **6**で修飾したシリコンウェハ表面をキムワイプで一定方向に 10 回軽くこすり、基板を洗浄、乾燥した。この修飾基板について **AFM**により表面状態を観察し、接触角測定により評価した。

酸性溶液中での SAMの光分解評価; 調製した **6**の **SAM**を塩酸 0.1 M の2-プロパノール溶液に入れ、光照射した。この修飾基板について水の接触角測定や **XPS**測定により評価した。

石英ガラスおよび熱酸化膜付シリコンウェハ上での SAM調製と光分解評価; 石英ガラスおよび熱酸化膜付シリコンウェハ上に **6**の **SAM**を形成し、評価を行い、自然酸化膜を有するシリコンウェハ上の **SAM**と比較した。

SAMのパターニング; 光分解性シランカップリング剤 **2**を用いて、シリコンウェハ表面に **SAM**を形成し、フォトマスクを被せ、光照射した。露光後の **SAM**を蛍光微粒子の水溶液に浸漬させ、蛍光顕微鏡により観察した。

4. 研究成果

誘導体 **1a**~**1g**の反応速度定数はそれぞれ 0.011(**1a**), 0.026(**1b**), 0.027(**1c**), 0.029(**1d**), 0.046(**1e**), 0.034(**1f**), 0.078(**1g**)となり、光分解速度は **1g** > **1e** > **1f** > **1d** > **1c** > **1b** > **1a**の順となった。このことから置換基の高さが光分解速度に影響していることが分かった。また、前駆体 **2'**~**4'**の溶液中での光分解もベンジル位の置換基が高くなるほど光分解速度の向上がみられ、モデル化合物の光分解結果と傾向が一致した。次に表面修飾条件の検討について述べる。**2**を用いた表面修飾時のカップリング剤濃度、温度、酢酸添加濃度を変えて修飾した石英ガラス表面の接触角測定とUV測定により算出した表面密度を Table 1 に示す。

室温で酢酸添加によって表面修飾している条件では接触角が他の条件よりも高いが表面修飾量はそれほど高くなく、**AFM**による表面観察でも非常に平滑な表面であることが確認できた。密度の高い単分子膜が形成されていることが推測でき、本研究で用いているシランカップリング剤での **SAM**の調製には低濃度、室温、酢酸添加での表面修飾が適している。いずれにしても、修飾時のシランカップリング剤の濃度や修飾温度、酢酸添加濃度が上がると表面密度と接触角もこれらの影響で上がっていくことが実験からわかった。また、表面密度が高いとき、光分解に要する露光量が多く必要となることが光分解の評価から明らかとなり、表面密度が光分解速度に影響することが確認できた。

Table 1. Contact angle and surface density of SAMs of **2** formed under various conditions

coupling agent (mM)	temperature	acetic acid (mM)	contact angle (degree)	surface density (molecules / cm ²)
1	100 °C	0	67	2.4 × 10 ¹⁴
2	100 °C	0	69	2.7 × 10 ¹⁴
3	100 °C	0	70	3.6 × 10 ¹⁴
1	0 °C	0	54	1.0 × 10 ¹⁴
1	r.t.	0	65	1.2 × 10 ¹⁴
1	60 °C	0	64	2.3 × 10 ¹⁴
1	100 °C	0	67	2.4 × 10 ¹⁴
1	r.t.	0	65	1.2 × 10 ¹⁴
1	r.t.	10	67	1.5 × 10 ¹⁴
1	r.t.	25	69	1.5 × 10 ¹⁴
1	r.t.	50	73	2.1 × 10 ¹⁴

2~**8**により同条件で形成した **SAM**の評価結果を Table 2 に示す。**SAM**ではベンジル位にイソプロピル基が置換した **3**, **6**が最も光に対する感度が高く、ベンジル位の置換基の高さと光に対する感度の関係は明らかではない。**SAM**状態での配向性の問題か立体障害に原因があると思われる。芳香環部位にパーフルオロ鎖を有する **5**~**7**については表面修飾後の接触角が 100° 近くとなり **2**~**4**と比べて大きな接触角が得られた。**8**の表面修飾後の接触角はそれほど大きくなかったが、**5**~**7**よりも高感度であった。

XRR測定の結果とUV測定により算出した表面密度を Table 3 に示す。

Table 2. Contact angle of water on SAMs with 2~8

compound	contact angle / degree		exposure dose / J·cm ⁻²	k / s ⁻¹
	modification	irradiation		
2	68	50	12	0.012
3	73	50	7.5	0.018
4	75	56	18	0.0074
5	97	57	30	0.0069
6	98	52	15	0.013
7	100	52	15	0.0093
8	72	53	9	0.018

Table 3. Results of XRR measurement and surface density of SAMs with 2~8

compound	thickness / nm				surface density (molecules / cm ²)
	modification		irradiation		
	found	calcd	found	calcd	
2	1.2	1.5	1.1	0.8	2.9 × 10 ¹⁴
3	1.2	1.5	1.1	0.8	2.7 × 10 ¹⁴
4	1.2	1.5	0.83	0.8	3.0 × 10 ¹⁴
5	1.1	2.1	0.83	0.8	1.9 × 10 ¹⁴
6	1.1	2.1	0.91	0.8	1.9 × 10 ¹⁴
7	1.3	2.1	0.92	0.8	1.7 × 10 ¹⁴
8	1.1	1.7	0.74	0.8	1.7 × 10 ¹⁴

2~4の表面修飾後の膜厚は1.2 nmとなり、計算値の1.5 nmに近い値となったことから基板表面に密に配向したSAMを形成していることが示唆された。芳香環に2本のフッ化アルコキシ基を有する5~8の膜厚に関しては実測値が計算値よりもかなり低く、2~4の膜厚と同程度の値であった。2~4ではスパーサーアルキル鎖の分子間相互作用によって、密なSAMが形成されており、基板に対して垂直に近い状態で分子が配向しているが、5~8では、フッ化アルコキシ基またはパーフルオアリアルエーテルの影響で分子の配向性が乏しく、分子密度が低いため、計算値よりもかなり低い膜厚となったと考えられる。この事実はUV測定により求められた表面密度からも説明でき、2~4のSAMでは算出した表面密度は約3×10¹⁴ molecules / cm²であるのに対し、5~8のSAMでは約2×10¹⁴ molecules / cm²であった。このことから5~8のSAMは2~4のSAMに比べ分子密度が低いことが分かった。またAFMによる表面観察ではフッ化アルコキシ基を有する化合物の方が表面粗さは大きい傾向にあった。フッ化アルコキシ基を有するシランカップリング剤は溶液中でフッ化アルコキシ基の疎水性相互作用によっていくつかの分子の集合体を形成し、この集合体が基板表面に吸着することで粗い表面になりやすいのではないかと考えている。光照射前後の修飾基板のXPS測定から光分解性シランカップリング剤による修飾と光分解が確認できたが、光照射後でもF_{1s}のピークが残存していることから、副反応が起きていることが示唆された。酸塩基応答性の評価では、5%NaHCO₃水溶液に浸漬させると接触角が下がり、2NHClに浸漬させると接触角が上がったことから表面へのカルボキシ基導入を支持できる結果が得られた。塩基で光照射後の表面を処理することで接触角が光照射前の約100°から20°まで下が

り、約80°の接触角の差が得られることを示した。ラビング処理の評価では、SAMを擦ることによって、光照射前の接触角は低下したが、光分解に必要な露光量は減少した。AFMによる表面観察からラビング後の表面はラビング前の表面と比較して非常に平滑な表面となっていた。SAMを擦ることで表面の平滑性と配向性を向上させ、そのSAM上に配置した有機半導体の移動度を向上させる研究が報告されている(Yu-Tai Tao et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 2136 (2011))。また、平滑な表面は粗い表面よりも基板上の液滴の転落角を下げることができ、親撥パターン形成においても有利に働くと考えられる。酸性溶液中での光分解の評価はEvansらの文献を参考にしたもので、2-プロパノールのような立体障害の大きい溶媒を用いて酸性溶液中で光照射することでニトロ基が還元されるような副反応を抑えることができ、光分解を大幅に改善できることが報告されている(Stephen D. Evans et al., *J. Phys. Chem. C*, **113**, 21642 (2009))。本研究の化合物においても、XPS測定から副反応を妨げる効果があることが示唆され、反応速度が約2倍向上することが確認された。Table 4に自然酸化膜付シリコンウェハ、熱酸化膜付シリコンウェハおよび石英ガラス上での6を用いたSAMの接触角測定による光分解の評価結果を示す。反応速度定数が自然酸化膜付シリコンウェハ上に形成したSAMに比べて、熱酸化膜付シリコンウェハ上に形成したSAMは約17倍、石英ガラス上のSAMでは約12倍と大幅な感度の向上が見られた。感度が向上した要因としてはSAMの密度が関係していると思われる。

Table 4. Water contact angle of SAM of 6 on different substrates

substrate	contact angle (degree)		exposure dose (J / cm ²)	k (s ⁻¹)
	mod.	irr.		
	naturally oxidized Si	98		
thermally oxidized Si	98	56	1.5	0.22
quartz glass	100	53	2.5	0.16

最後にSAMのパターニングについて述べる。Fig. 1にパターニングに用いたフォトマスクとパターニングしたSAMの蛍光顕微鏡画像を示す。未露光部分への蛍光微粒子の吸着はほとんど見られず、きれいなパターンが得られ、線幅20 μmのパターンの形成に成功した。

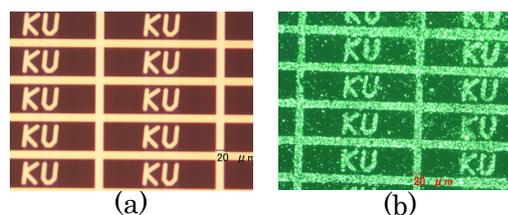


Fig. 1. (a) photomask(KU); (b) fluorescence microscope image of patterned SAM with FluoSpheres

本プロジェクト以前の研究では、2-ニトロベンジルエステルを含む5からシリコンウェ

ハ上に得られた高撥水性 SAM に対して光照射によってカルボン酸に開裂し、撥水性から親水性表面に変換するのに 60 J/cm^2 の露光量を必要としていた。本研究では、モデル化合物やシランカップリング剤の前駆体を用いた分子設計により、**5** のベンジル位のメチル基の代わりにイソプロピル基、*t*-ブチル基を導入した **6**, **7** は、光分解に対する感度が向上することが分かった。**6** を用いて熱酸化膜シリコンウェハ上に作成した撥水性 SAM は 1.5 J/cm^2 (30 s) の露光量で親水性表面に変換することを可能とし、40 倍の感度の向上を実現することができた。分子設計以外にも SAM 作製条件や光照射条件の検討により、大幅な感度の向上が可能であることを示し、感光性 SAM の高機能化に成功した。また、有機薄膜トランジスタへ応用する際に、移動度の向上が期待できる **8** を合成し、その感光性 SAM としての評価をすることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Jun Nakanishi, Yukiko Kikuchi, Yuki Tsujimura, Hidekazu Nakayama, Shingo Kaneko, Takahiro Shimizu, Kazuo Yamaguchi, Hideo Yokota, Yasuhiko Yoshida, Tohru Takarada, Mizuo Maeda, Yasuhiro Horiike, Precise patterning of photoactivatable glass coverslip for fluorescence observation of shape controlled cells, *Supramol. Chem.*, 査読有、Vol. 22、2010、pp. 396-405、
- ② 菅原路子、崔源垓、中西淳、山口和夫、横田秀夫、八木透、高精細な細胞運動制御および観察に向けた培養基板へのマイクロパターン形成手法の確立、電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌)、IEEJ Trans EIS, 査読有、Vol. 131、No. 4、2011、pp. 833-839
- ③ Shingo Kaneko, Hidekazu Nakayama, Yutaro Yoshino, Daisuke Fushimi, Kazuo Yamaguchi, Yasuhiro Horiike and Jun Nakanishi, Photocontrol of cell adhesion on amino-bearing surfaces by reversible conjugation of poly(ethylene glycol) via a photocleavable linker, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有、Vol. 13、No. 9、2011 pp. 4051-4059
- ④ Jun Nakanishi, Hidekazu Nakayama, Kazuo Yamaguchi, Andres J. Garcia, and Yasuhiro Horiike, Dynamic Culture Substrate That Captures Specific

Extracellular Matrix Protein in Response to Light. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 査読有、Vol. 12、No. 4、2011、pp. 044608/1-044608/8

- ⑤ Yoshikuni Edagawa, Jun Nakanishi, Kazuo Yamaguchi, Naoya Takeda, Spatiotemporally Controlled Navigation of Neurite Outgrowth in Sequential Steps on the Dynamically Photo-Patternable Surface, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 査読有、Vol. 99, 2012, pp. 20-26
- ⑥ Claudio G. Rolli, Hidekazu Nakayama, Kazuo Yamaguchi, Joachim P. Spatz, Ralf Kemkwemer, Jun Nakanishi, Switchable adhesive substrates: revealing geometry dependence in collective cell behavior, *Biomaterials*, 査読有、Vol. 33, No. 8、2012、pp. 2409-2418

[学会発表] (計 9 件)

- ① 中嶋一樹、橋本徹平、内山嘉竜、伊藤倫子、山口和夫、ベンジル位の置換基が異なる光分解性 2-ニトロベンジルエステル型シランカップリング剤から得られる SAM の評価、第 59 回高分子討論会、2010 年 9 月 16 日、北海道大学 (札幌)
- ② 渡邊 和博、佐藤光、中嶋一樹、三原真理乃、力石紀子、山口和夫、2-ニトロベンジルエステル誘導体の光分解に対するベンジル位の置換基効果、日本化学会第 91 春季年会、2011 年 3 月 26 日、神奈川大学 (横浜)
- ③ 小西翼、伊藤倫子、山口和夫、鎖長の異なるスペーサーを持つ光分解性 2-ニトロベンジルエステル型シランカップリング剤から得られる自己組織化単分子膜の評価、第 60 回高分子討論会、2011 年 9 月 28 日、岡山大学 (岡山)
- ④ 小西翼、伊藤倫子、山口和夫、光分解性 2-ニトロベンジルエステル型シランカップリング剤を用いた自己組織化単分子膜の調製とその表面状態解析、2012 年 5 月 30 日、パシフィコ横浜 (神奈川)
- ⑤ 小西翼、伊藤倫子、山口和夫、二本鎖のフッ化アルコキシ基で置換された 2-ニトロベンジルエステル型光分解性シランカップリング剤により形成された自己組織化単分子膜の評価、第 61 回高分子討論会、2012 年 9 月 19 日、名古屋工業大学 (愛知)
- ⑥ 小西翼、伊藤倫子、山口和夫、Formation of photosensitive self-assembled monolayer prepared from silane coupling agents and surface state analysis、IUMRS-ICEM2012、2012 年 9 月

- 26日、パシフィコ横浜（神奈川県）
- ⑦ 齊藤佑典、渡邊和博、佐藤光、力石紀子、山口和夫、2-ニトロベンジルエステル誘導体の光分解に対するベンジル位の置換基効果、日本化学会第92春季年会、2012年3月26日、慶應義塾大学(東京)
- ⑧ 齊藤佑典、太田貴亮、渡邊和博、力石紀子、山口和夫、2-ニトロベンジルエステル誘導体の光分解に対するベンジル位の置換基の効果、第2回CSJ化学フェスタ2012、2012年10月16日、東京工業大学(東京)
- ⑨ 齊藤佑典、渡邊和博、佐藤光、力石紀子、山口和夫、2-ニトロベンジルエステル誘導体の光分解に対する α 位の置換基及び脱離基の効果、日本化学会第93春季年会、2013年3月23日、立命館大学(滋賀)

〔図書〕(計1件)

- ① 山口和夫、伊藤倫子、S&T出版、全面改訂版 シランカップリング剤の効果と使用法、第8章第4節 光応答性シランカップリング剤と応用、pp.317-333(2012年11月15日)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称:含フッ素化合物、パターン形成用基板、光分解性カップリング剤、パターン形成方法、化合物

発明者: 山口和夫

権利者: 学校法人神奈川大学、株式会社ニコン

種類: 特許

番号: 特願2012-194531

出願年月日: 平成24年9月4日

国内外の別: 国内

○取得状況(計3件)

名称: 細胞を固定化した基板の作製方法および基板

発明者: 前田瑞夫、宝田徹、中西淳、山口和夫

権利者: 独立行政法人理化学研究所、学校法人神奈川大学

種類: 特許

番号: 特許第4761731号

取得年月日: 2011年6月17日

国内外の別: 国内

名称: 光照射によって細胞付着性を付与可能にする細胞付着・培養用基材

発明者: 中西淳、山口和夫

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構、

学校法人神奈川大学

種類: 特許

番号: 特許第5167738号

取得年月日: 2013年1月11日

国内外の別: 国内

名称: 光分解性カップリング剤

発明者: 山口和夫

権利者: 学校法人神奈川大学

種類: 特許

番号: 特許第5196287号

取得年月日: 2013年2月15日

国内外の別: 国内

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 和夫 (YAMAGUCHI KAZUO)

神奈川大学・理学部・教授

研究者番号: 20114902