Fabrication of Odor Sensor Using Peptide

Yuta Hotokebuchi Student Member (Kyushu University)

Kenshi Hayashi Member (Kyushu University)

Kiyoshi Toko Member (Kyushu University)

Ronggang Chen Member (Intelligent Sensor Technology Inc.)

Hidekazu Ikezaki Member (Intelligent Sensor Technology Inc.)

Keywords : odor sensor, peptide, amino acid, vanillin, QCM, fluorescence

An odor sensor which has a specific biomimetic receptor surface was investigated in this paper. In biological olfactory system, specific molecular features of odor molecules were recognized by the various olfactory receptor proteins, and a combination of activated receptors contains essential information about odor. The typical specific molecular features are molecular size, functional group, shape, and etc. Consequently, an odor sensor which measures quality and quantity of odor can be realized by recognizing substructure of odor molecules. Such odor sensor concept is called as an odor code sensor. There exist many candidates for fabricating methods of sensor surfaces which recognize molecular structure, however, we fabricated an odor sensor using peptides which can be designed and synthesized in their structure flexibly. Used peptides were designed to acquire a specific reception for substructure of a target odor molecule, i.e. vanilloids, where binding structure of biological TRPV1 receptors were adopted for the present peptide design (Fig.1). Thus, three peptides, Cys-Trp-Glu, Cys-Trp-Thr and Cys-Trp-Leu, were synthesized. Here, cysteine (Cys) was contained as a binding site with gold surface by a strong S-Au bond. Tryptophan (Trp) is a typical hydrophobic adsorption part of molecular recognition. Threonine (Thr), leucine (Leu) and glutamic acid (Glu) were contained as hydrogen bonding sites to a target chemical. Au surface of the sensor electrode was coated by the designed peptide using the method of self assembled monolayers (SAMs) using thiol compounds. Then functionalized Au surfaces by the peptide layer were characterized by an ellipsometry and a cyclic voltammetry (Fig.2), where reductive reaction occurred and desorption peak current was observed around -0.8V for model surface modifiers of Cys, Cys-Gly and Glu-Cys-Gly. As a result, thicknesses of peptides monolayers were estimated at around 1nm, and coverage of Au surface by peptides were about 21%. Moreover, we verified specific interaction between amino acid (Trp) and vanillin by fluorescence assay, where specific quenching of fluorescence (excitation 280nm, emission 356nm) from Trp was

observed against chemical compounds that have vanilloid substructures. The quenching might be brought about by binding between pi-electron of Trp and vanilloid. It suggests that vanilloid interact with Trp adjacently. The odorants of vanillin, phenethyl alcohol and hexanol were measured and discriminated by a QCM sensor with the peptide surface (Fig.3). QCM results suggest existence of unspecific adsorption with various odorants. Consequently, QCM sensor with obtained peptide surface can be utilized for detection of various odor molecules. On the other hand, in order to develop a high-sensitive and high-specific sensor for a certain chemical compound, further designing of peptides and novel detection methods are necessary.

Fig. 1. Biomimetic sensor using peptide.

Fig. 2. SV curve of Cys, Cys-Gly, Glu-Cys-Glu coated Au electrode.

Fig. 3. QCM responses of peptides-coated QCM for each odors.

ペプチドを用いた匂いセンサの作製

学生員 佛淵 祐太* 正員 林 健司*
 正員 都甲 潔* 正員 陳 栄剛**
 正員 池崎 秀和**

Fabrication of Odor Sensor Using Peptide

Yuta Hotokebuchi*, Student Member, Kenshi Hayashi*, Member, Kiyoshi Toko*, Member,
 Ronggang Chen**, Member, Hidekazu Ikezaki**, Member

We report fabrication of an odor sensor using peptides. Peptides were designed to acquire the specific reception for a target odor molecule. Au surface of the sensor electrode was coated by the designed peptide using the method of self assembled monolayers (SAMs). Functionalized Au surfaces by the peptides were confirmed by ellipsometry and cyclic voltammetry. The odorants of vanillin, phenethyl alcohol and hexanol were discriminated by QCM sensor with the peptide surface. Moreover, we verified specific interaction between amino acid (Trp) and vanillin by fluorescence assay.

キーワード : 匂いセンサ, ペプチド, アミノ酸, バニリン, QCM, 蛍光

Keywords : odor sensor, peptide, amino acid, vanillin, QCM, fluorescence

1. はじめに

人間の嗅覚は多くの動物や昆虫には劣るが、食べ物の匂いで食欲を誘発され、異臭や悪臭によって安全でないことを察知するように、人が活動する上で欠かせない感覚のひとつである。しかしながら、人間ひとりひとりが感じる匂いは必ずしも同じではないし、検出感度や識別能力、質や量の表現能力も高くない。一般的に人が感じる匂いは各々の体調や年齢、生活環境によって大きく左右されるといわれており、匂いの客観的な指標は無い。そこで匂いを定量的に測定し、数値化することができる匂いセンサが必要になる。近年、匂いセンサの開発が進み、環境モニタリング、悪臭・水質汚染物質の検知や、爆発物、カビ臭を高感度で検出するものが作られている⁽¹⁾。ガスセンサとして広く用いられる酸化物半導体は、炭化水素類に対してサブ ppm オーダの感度を持つが、嗅覚の感度には遠く及ばない上、生体の受容体タンパクが持つ匂い分子の選択性を持たない。また、生体物質を用いる様々なバイオセンサは物質識別能力や感度に優れるが、膨大な種類の匂い物質に対して簡便な

センサとしての応用は難しい。

昨今の分子生物学に基づいた嗅覚生理学の研究で匂いを認識しているタンパク質の構造が明らかにされてきた。そのような構造をセンサの受容部に应用することができれば、より生物の嗅覚に近い特性を持つバイオメティック匂いセンサ(図1)が実現できると考えられる。そこで受容体を構成する約 300 残基のアミノ酸の中で、匂い分子の受容に強く寄与していると思われる少数のアミノ酸配列の機能を再現し、匂いセンサの受容部として応用することを試みた。

生体では受容体タンパクの官能基の一部が、匂い分子を様々な角度から三次元的に捕らえていることで認識している。しかしながら、本研究では敢えてタンパク質の三次元構造の再現にこだわるのではなく、2 個あるいは 3 個のアミノ酸が持つ、センサ表面に簡便に導入可能なペプチド

図1 ペプチドを用いたバイオメティックセンサ

Fig. 1. Biomimetic sensor using peptide.

* 九州大学大学院システム情報科学研究院情報エレクトロニクス部門
 〒819-0395 福岡市西区元岡 744
 Kyushu University

744, Motooka, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395
 ** (株) インテリジェントセンサーテクノロジー
 〒243-0032 神奈川県厚木市恩名 5-1-1
 Intelligent Sensor Technology Inc.
 5-1-1, Onna, Atugi-shi, Kanagawa 243-0032

(mini peptide) の機能性を評価することを目的とした。生体の分子認識に携わる官能基を設けないセンサ表面は、匂い分子の選択性に欠ける可能性が大きい。しかし、複数のアミノ酸の順序と組み合わせのみで作製されたコンビナトリアルな方法で分子認識を行うセンサが存在しないわけではなく、ペプチドアプタマーや RNA アプタマーなどに代表される研究が行われている^{(2)~(4)}。また、前述したように、人の場合で約 350 種類存在するといわれている匂い受容体が、匂い分子の厳密な分子認識を行っているのではなく、匂い分子のある特徴を認識している。このような匂い受容体の応答様式を模倣し、匂い分子の部分構造を検出する匂いセンサチップの開発を行っている^{(5)~(7)}。また、センサから得られる匂い情報である匂いコードを用いた匂い表現や匂い再生の試みもある⁽⁸⁾。しかしながら、生物と同じ匂い情報を得るにはより高い分子認識部が必要になる。このことから、匂い分子を正確に判断するためには、多様な部分構造を特定できるセンサを作り出す分子認識部を組み込めるシステムが必要である。アミノ酸の組み合わせで無数の表面特性が実現されるコンビナトリアルな構成が可能なペプチドを用いることは、匂い分子の正確な識別は困難でも、匂い分子の部分構造の認識には適したアイデアであると考えられることができる。

2. 実験方法

Au 基板を機能性材料で修飾する一般的な方法として、チオール基を持つ炭素鎖の溶液に Au 基板を浸漬することで、金と硫黄の配位結合により、Au 基板表面に自己組織化単分子膜 (SAMs) を形成する手法がある⁽⁹⁾。また、ペプチドを SAMs 表面に導入する方法としてその単分子膜上に官能基を二重修飾する手法がある⁽¹⁰⁾。しかし、今回設計するペプチドにチオール (-SH) 基を持つアミノ酸であるシステインを組み込むことで一般的な二重修飾の過程を省いて Au 基板を直接修飾することができる⁽¹¹⁾。

本研究ではまず第一に、匂いセンサ表面を修飾するペプチドの設計の後に電気化学的手法による Au 基板とペプチドの結合の確認を行う。さらにその後にペプチドが持つ分子認識機能の評価を行う。したがって本研究で行う実験の手順は以下の通りになる。

- (1) 検出対象の匂い分子と相互作用するペプチドの分子設計
- (2) 自己組織化単分子膜 (SAMs) 作製法を利用したペプチド修飾電極の作製
- (3) エリプソメトリーおよびストリッピングボルタメトリー (stripping voltammetry) による Au 基板表面と結合した分子の定量検出
- (4) 水晶振動子マイクロバランス法 (QCM) による複数種類のペプチドが持つ匂い分子応答と分子認識機能の差の評価
- (5) 蛍光分析による匂い分子とアミノ酸 (Trp) の会合の検出

〈2・1〉 ペプチドの設計 今回の研究で設計する分子認識機能ペプチドの検出ターゲットとしてバニロイドを選択した。バニロイドとは唐辛子の辛味主成分であるカプサイシンや、バニラの香りを持つバニリンが持つ部分構造のことである。生物がバニロイドを認識する受容体の総称をバニロイド受容体と呼んでおり、過渡的な電位応答性をする TRPV1 (VR1) をはじめとして TRPV2, TRPV3, TRPV4 などが知られている。近年の受容体の研究で、VR1 とバニロイドの会合のメカニズムが明らかにされつつある⁽¹²⁾。バニロイド受容機能を持つペプチドを設計するにあたり、カプサイシンの芳香環部分と π - π 相互作用 (疎水性相互作用) していると思われるトリプトファン (Trp) と、その隣に位置して水素結合を行うスレオニン (Thr) がバニロイドの認識に最も強く作用しているという結果を用いる⁽¹²⁾。なお、本研究ではバニロイドを代表する匂い分子として 20 °C で飽和蒸気圧濃度 2.9 ppm のバニリンを用いる。

上述の通りバニロイド受容体でカプサイシンのバニリル基を受容しているアミノ酸は、トリプトファン (Trp) とスレオニン (Thr) であると考えられることができる⁽¹²⁾。したがって匂いセンサ表面に用いるペプチドは、Trp-Thr の配列をベースに設計することとした。さらに、本実験では Au 基板を修飾するために、チオール基を持つ、アンカーとなるアミノ酸としてシステイン (Cys) の組み込みが不可欠である。したがって、最初に Cys-Trp-Thr のペプチドを基本形として設計、合成 (コスモバイオ) し、さらにこのペプチドの類似型のものとして Cys-Trp-Glu, Cys-Trp-Leu の匂い分子の吸着量の評価実験に用いる。設計した Cys-Trp-Thr を Chem 3D (Cambridgesoft) でモデリングした (図 2)。

〈2・2〉 ペプチド単分子膜の作製 今回の実験では前節で設計した 3 種類のトリペプチド (Cys-Trp-Thr, Cys-Trp-Glu, Cys-Trp-Leu) の他に、Au 基板へのシステイン吸着確認用としてシステイン (Cys) 単体とジペプチドとして Gly-Cys, およびトリペプチドとして Gly-Cys-Glu も用いた。

以下の手順でペプチド修飾電極を作製した。

- (1) 単分子膜作製基板として、ガラス基板上に Ti 20 nm, Au 200 nm を電子ビーム蒸着した Au 基板を用意

図 2 ペプチド (Cys-Trp-Thr) と vanillin の会合
Fig. 2. Expected association between Cys-Trp-Thr and vanillin.

(2) 基板上に付着している有機物等を取り除き, Au 表面を清浄化するために, 90 °C の TL1 洗浄液 (超純水 : 過酸化水素水 : 25 % アンモニア水 = 5 : 1 : 1) に 5 分間浸漬

- (3) 超純水による洗浄
- (4) エタノールによる洗浄
- (5) 濃度 10mM のペプチド水溶液に 5 分浸漬
- (6) エタノールによる超音波洗浄
- (7) 超純水による洗浄
- (8) エタノールによるリンス
- (9) Au 表面を窒素雰囲気下で乾燥

以上の手順で金表面に形成されたペプチド層の厚さをエリプソメーター (Mikropack SpecEL 2000 VIS) で測定した。その結果, Cys 修飾電極の表面有機層の膜厚は 1.41 nm, ジペプチド (Cys-Gly) で 1.12 nm, トリペプチド (Glu-Cys-Gly) で 0.99 nm となった。全体として分子サイズから予想される膜厚と同じオーダーの値が検出され, 修飾溶液の濃度と浸漬時間を下げると膜厚を下げることができることから, 用いた電極の作製条件では配向構造の詳細は不明だが SAMs のような単分子膜が形成されていると考えられる。一方, 長時間の修飾を行った電極の場合, ペプチドが堆積した複数層の多分子膜が Au 基板上に形成される。

Cys 修飾電極のストリッピングボルタンメトリー (ポテンシオスタット : AUTOLAB PGSTAT12, 溶液 : 1 M 水酸化カリウム水溶液, スweep速度 : 50 mV/s) で得られるストリッピングボルタモグラムの図 3 に示す。上記の条件では電極に吸着していた化学物質の酸化還元反応による脱離電流が得られ, 電極表面の吸着物質の検出と定量が可能である。この結果より 0.75V 付近で電流のピークが見られることが分かる。吸着量はシステインの場合で $1.84 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, 被覆率は 21.4 %であった。図に示すようにジペプチド (Cys-Gly), トリペプチド (Glu-Cys-Gly) でも吸着力の差によりピーク位置は異なるが, 同様に反応電流のピークを検出できたことから, チオールと Au の結合が電気化学反応により解離し

図 3 Cys, Cys-Gly, Glu-Cys-Gly 修飾 Au 電極のサイクリックボルタモグラム

Fig. 3. Stripping voltammetry curves of Cys, Cys-Gly, Glu-Cys-Gly coated Au electrode.

たとえることができる。つまり Cys の S 原子と Au の結合をアンカーとしたペプチド単分子膜により Au 表面が修飾された電極が得られることが確認できた。

3. 蛍光分析

ペプチドと匂い物質の相互作用を確認するため, 合成したペプチドに含まれる Trp の蛍光測定を行う。Trp がアミノ酸中で最も強い蛍光を持つことを利用し, Trp と匂い物質が会合した際に生じる Trp の蛍光変化を匂い物質ごとに比較する。Trp に vanillin, phenethyl alcohol, hexanol を加えた際の蛍光変化を分光蛍光光度計 (日立 F2500) を用いて測定した。励起波長は 280 nm とし, 300 nm ~ 500 nm の蛍光をスキャンした (図 4)。

結果より vanillin を加えたときのみ Trp の蛍光が大きくクエンチしていることから, vanillin と Trp に強い相互作用が起きていると考えられる。

さらに, vanillin と類似構造を持つ分子で実験を行った。ベンゼン環にヒドロキシ基やアルデヒド基, メトキシ基 (-OCH₃) が付加された分子である vanillyl alcohol, eugenol, anethole, anisole, phenethyl alcohol による Trp 蛍光変化を調べた結果, vanillin により近い構造である vanillyl alcohol, eugenol を加えた場合に Trp 蛍光の消光が確認された。

これらの蛍光クエンチの匂い物質濃度依存性が通常の解離曲線を示すことから Trp と vanillin が会合していると考え

図 4 Trp の蛍光スペクトルと匂いによるクエンチ
Fig. 4. Fluorescence spectra and quenching of Trp by odorants.

表 1 芳香族による Trp 蛍光消光効果

Table 1. Effect of Trp fluorescence quenching by aromatic compounds.

Odorant	Quenching of Trp fluorescence
Vanillin	-59.1%
Vanillyl alcohol	-58.2%
Eugenol	-56.4%
Anethole	+14.8%
Anisole	-2.68%
Phenethyl alcohol	-1.97%

えられる。以上より Trp の π - π^* 遷移により生じる蛍光が vanillin 分子の部分構造との会合によって Trp, ベンゼン環の π 電子の励起が強く影響を受け、共鳴的にエネルギー移動することにより妨げられたと考えられる⁽¹³⁾。このようなナノメートルオーダーの距離における会合が Trp-vanillin の場合において見られたことから、設計したペプチドが vanillin 吸着サイトとして機能していることがわかる。

4. QCM による匂い検出

QCM (USI UQ200) を用いて Cys-Trp-Thr, Cys-Trp-Glu, Cys-Trp-Leu の 3 種のペプチドを用いて vanillin, phenethyl alcohol, hexanol それぞれの匂いに対し以下の手順で匂いの検出実験を行った。また、QCM センサシステムとガスフロー系を図 5 に示す。

- (1) QCM を TL1 洗浄 (5 分)
 - (2) QCM をペプチド水溶液に浸漬 (5 分)
 - (3) QCM の表面をエタノール洗浄後窒素ブロー
 - (4) QCM の周波数測定開始
 - (5) 周波数の安定を待ち (10 分間) 匂いを注入
- 本研究ではペプチド表面への匂いの吸着親和性の大小を

図 5 QCM センサシステムとガスフローシステム

Fig. 5. QCM sensor system and gas flow system.

調べるために、匂い注入から 10 分後の周波数変化量を Δf として、単分子層の厚さのペプチド領域に吸着、残留する量を応答量とした (表 2)。なお、hexanol に対して大きな応答が見られるのは、hexanol が他の匂い物質に比べ飽和蒸気圧濃度が高いためである。用いた QCM 上のペプチド単分子膜の応答の上限は 20 Hz 以上であったため hexanol の場合も用いた濃度では飽和領域には達していない。また、いずれの実験でも吸着による質量負荷効果は小さいが、これは電極上の単分子膜である吸着膜への匂い物質吸着量が非常に少ないためである。QCM 表面への匂い分子それぞれに対し最も大きく応答したペプチド修飾電極の Δf を 1 として、他のペプチド修飾電極の Δf の比をグラフに表した (図 6)。図より vanillin は Glu を持つペプチドに最も多く吸着し、phenethyl alcohol は Thr を持つペプチドに最も多く吸着している。一方、hexanol は各ペプチドに均等な応答が見られた。なお、QCM 電極のペプチド表面修飾前後の QCM 共振周波数の変化から見積もられるペプチドの Au 表面への吸着量は、Cys-Trp-Glu, Cys-Trp-Leu, Cys-Trp-Thr それぞれにおいて $3.44 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, $2.93 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, $2.34 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ であった。この吸着量、すなわち表面の吸着ペプチド分子数により匂い応答は変化すると考えられるが、ペプチド分子数によって周波数応答を規格化したときの図 6 のパターンの大小関係は維持されるため、ここでは周波数変化そのもので評価を行った。

以上の結果からペプチドの表面に多様な匂い分子を受容する上で、特定の分子構造に対してより強い親和性を持っていることがわかる。蛍光分析の結果では Trp と vanillin が

表 2 匂い注入時の QCM 周波数応答 ($\Delta f/\text{Hz}$)

Table 2. QCM frequency responses ($\Delta f/\text{Hz}$) to the odorants.

	Cys-Trp-Leu	Cys-Trp-Thr	Cys-Trp-Glu
vanillin	1.13	1.94	3.53
phenethyl alcohol	1.71	3.99	2.8
hexanol	9.15	7.78	8.07

図 6 匂いに対するペプチド被覆 QCM の応答

Fig. 6. Responses of peptides-coated QCM to each odor.

強い相互作用を持ち、検知のための吸着サイトとして機能することが確認された。しかしながら、QCM 測定では Trp 以外の表面部分、すなわち Au 未修飾領域や想定した吸着サイト以外のペプチド領域に吸着する匂い物質も検出されるために高い応答特異性、選択性は期待できない。一方、Trp を含まない Cys 単分子膜の vanillin 応答と Trp を含むペプチド単分子膜の応答と比較すると Cys-Trp-Thr の場合では 44 %程度に低下する。このことから Trp が QCM 上の単分子膜においても vanillin との相互作用に寄与していると考えられる。このように非特異吸着による選択性の低下はあるものの、今回用いた 3 種類のペプチド表面の吸着特性の違いを利用したパターン認識による匂いのセンシングを行うことは可能であり、匂いセンサとして広い範囲の化学物質検出能力を有することがわかる。

5. 考 察

Trp の蛍光分析の結果、vanillin, vanilly alcohol および eugenol 等のベンゼン環にヒドロキシ基とメトキシ基がメタ位に結合した分子構造と Trp が会合により相互作用し、Trp 蛍光が消光していることが確認された。この特異性を利用して Trp を含むペプチドによって形成された vanillin 吸着膜の作製を試みたところ、vanillin に応答している傾向が見られ、パニロイドへの親和性による匂い検出が可能であった。しかしながら QCM による気相中での吸着量測定では液相中の蛍光測定で見られた Trp に相当する高い分子選択性は得られなかった。これは蛍光をもつ Trp のインドール環が前述の分子構造に消光反応を示していることが必ずしもペプチドと vanillin にのみ働く親和力に繋がるとは言えないということを示している。

一方、未処理の金表面そのものは物質選択性は無いものの、様々な匂い物質が吸着し、ペプチド単分子膜よりも高い QCM 応答性を示す。ペプチド修飾表面はそのような非特異応答性を下げ、金表面そのものよりも匂い応答性は低いものの、匂い分子認識能力を高めることができています。しかしながら、図 6 に示したような匂い応答においては想定した吸着サイト以外への非特異吸着を含んでおり、そのために応答パターンにおいては匂い分子に対する高い応答のチューニングは達成されていない。

このように分子認識能力を高めるためにはより構造を最適化したペプチドの設計が重要となる。パニロイドの検出に限定すれば、設計したペプチドの Trp 部位が高い選択性を持つことがわかる。つまり、ペプチドはインドール環以外の官能基を持つため、vanillin 以外の物質の吸着を許した結果になったと考えられる。この結果は、選択性を優先させた化学センサの場合は改善の必要があるが、化学物質の特徴を広く捉える匂いセンサの場合はペプチドが受容膜として優れた特徴となる。すなわち化学物質（匂い分子）との親和性が設計可能で、数多くのバリエーションを持つペプチドが合成可能であり、様々な匂い物質の検出部位として応用できる。

6. ま と め

匂い分子と特異的に相互作用するペプチドを設計し、ペプチド中のチオール基と Au の結合を利用してペプチド修飾 Au 基板を作製し QCM センサにより匂いのセンシングを試みた。結果として異なるペプチドごとに独特の匂い応答性が得られた。広く匂い物質を検出するセンサとしてペプチド単分子膜は受容膜として応用可能であった。今後はより高次のペプチドを用いた実験や非特異吸着による応答を抑える手段、匂い分子吸着を高感度に検出する方法を検討するのが課題である。

謝 辞

本研究の一部は農林水産省 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業（代表 株式会社インテリジェントセンサテクノロジー）により行われたものである。

（平成 21 年 12 月 2 日受付、平成 22 年 4 月 9 日再受付）

文 献

- (1) 外池光雄 編著：「におい・香りの情報通信」，フレグランスジャーナル社 (2007)
- (2) JW Szostak : "In vitro selection of RNA molecules that bind specific ligands", Nature, Vol.346, p.818 (1990)
- (3) F. Hoppe-Seyler and K. Butz : "Peptide aptamers: powerful new tools for molecular medicine", J. Mol. Med., Vol.78, p.426 (2000)
- (4) O'Sullivan and Ciara : "Aptasensors - the future of biosensing?", Analytical and bioanalytical chemistry, Vol.372, p.44 (2002)
- (5) R. Izumi, H. Abe, K. Hayashi, and K. Toko : "Odor Quantification of Aromatic Alcohols Using Artificial Olfactory Epithelium", Sensors and Materials, Vol.19, p.299 (2007)
- (6) K. Masunaga, S. Michiwaki, R. Izumi, F. Bjorefors, I. Lundstrom, K. Hayashi, and K. Toko : "Development of sensor surface with recognition of molecular substructure", Sensors and Actuators B, Vol.130, p.330 (2008)
- (7) C. Liu, K. Hayashi, and K. Toko : "A novel formation process of polyaniline micro-nanofiber network on solid substrates", Synthetic Metals, Vol.159, p.1077 (2009)
- (8) 林 健司：「匂いコードセンサの開発と応用」，電学論 E, Vol.128, p.29 (2008)
- (9) A. Ulman : "Formation and Structure of Self-Assembled Monolayers", Chem. Rev., Vol.96, p.1553 (1996)
- (10) B. Liedberg et al. : "Self-assembly of α -functionalized terthiophenes on gold", J. Phys. Chem., Vol.101, p.5951 (1997)
- (11) S. Wang, D. Du, and Q. C. Zou : "Electrochemical behavior of epinephrine at L-cysteine self-assembled monolayers modified gold electrode", Talanta, Vol.57, p.687 (2002)
- (12) N. R. Gavva : "Molecular determinants of vanilloid sensitivity in TRPV1", J. Biol. Chem., Vol.279, p.20283 (2004)
- (13) 井上晴夫・佐々木政子・高木克彦・朴 鐘震：「光化学 I」，丸善 (1999)

佛 淵 祐 太

（学生員） 1986 年 3 月 2 日生。2008 年 3 月九州大学工学部電気情報工学科卒業。2010 年 3 月年同大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻修了。匂いセンサの研究に従事。

林 健 司

(正員) 1990年九州大学大学院工学研究科電子工学専攻博士後期課程修了。工学博士(九州大学)。現在、九州大学大学院システム情報科学研究院システム情報科学研究院教授。味と匂いのセンシングとセンサ開発の研究に従事。

陳 栄 剛

(正員) 2004年3月九州大学大学院システム情報科学研究院修士課程修了後、インセント(株)入社。味と匂いセンサの研究開発に従事。

都 甲 潔

(正員) 1980年3月九州大学大学院工学研究科電子工学専攻博士後期課程修了。工学博士(九州大学)。九州大学工学部電子工学科助手。助教授を経て、1997年4月より九州大学大学院システム情報科学研究院教授。

池 崎 秀 和

(正員) 1986年早稲田大学理工学部電気工学修士課程修了。同年アンリツ(株)入社。味センサの研究開発に従事。2002年同社退社、インセント(株)を設立。現在、同社代表取締役社長。工学博士(九州大学)。