

## 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 5月23日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22350028

研究課題名（和文）生物機能を戦略基盤とする健康・環境センサーの開発

研究課題名（英文）Development of Health and Environment Checking Sensors Inspired from Biological Functions

研究代表者

増田 秀樹 (MASUDA HI DEKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：50209441

研究成果の概要（和文）：生物の有する特異機能を模倣し、健康センサーとして一酸化窒素センサーを、環境センサーとしてVOCセンサーおよび微生物センサーを開発した。

研究成果の概要（英文）：By mimicking specific functions of biological systems using metal complexes, we developed NO sensor as health checking one and VOC and microbe sensors as environment checking one.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：生物無機化学、錯体化学

科研費の分科・細目：化学、無機化学、生物無機化学

キーワード：NOセンサー、VOCセンサー、微生物センサー、健康センサー、環境センサー

## 1. 研究開始当初の背景

生物の酵素には、高選択性、高機能、高活性という3つのキーワードで特徴づけられるように、「酵素の基質特異性」という言葉がある。また、今日のあらゆる産業の発展を支えたのは化学工業の発展に外ならない訳であるが、非常に興味深いことに、これら技術の全てと言ってもいいほど、生物界でも同様の機能を有する生物がいるということである。我々は、これまでやってきた生物の有する、触媒やセンサーのようなスーパー機能の発現に関わる活性部位の構造および機能モデル研究の過程において偶然見いだした3つのセンサーについて紹介する。最初に取り上げるNOセンサーはニトリルヒドラーゼという、ニトリルという有毒性の化合物

を有用なアミドに変換する触媒であり、そのレスティング状態でNOが配位することから見つかった機能で、これをセンサーとして応用展開したものである。また、次に紹介するVOCセンサーは、酵素の基質特異性にヒントを得たもので、触媒反応は基質の誘導と活性部位の活性度で決まるといものである。ゼオライト細孔を反応場として金属フタロシアニンを内包することで金属酵素の活性部位周辺構造を再現できると考えたものである。そして3つ目の微生物センサーでは、全ての細胞が鉄の捕捉にシデロフォアという分子を使っていることから始まっており、鉄捕捉分子を取り込めば微生物を捕まえることができ、センサーとして使えるだろうと考えたものである。

## 2. 研究の目的

1. 健康センサーとして、血管の柔軟性を左右する一酸化窒素の生成を選択的に評価する最適なセンサーを設計・合成・開発する。また、環境センサーとして、環境中のアルデヒドやトルエン、ベンゼン、アルコール等の VOC 濃度をセンシングする VOC センサー、空中に浮遊する病原菌やウイルス等を捕捉し、生きたままセンシングする微生物センサーを設計・合成・構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法・成果

### (i) NO センサー

ニトリルをアミドに変換するニトリルヒドラーゼという酵素が、鉄(III)あるいはコバルト(III)イオンを有しており、その休止状態において NO 分子が空配位座に相互作用し、可視光を吸収することで脱離することが知られている。この酵素の活性中心金属イオンには、脱プロトンしたアミド窒素原子(N)が2つとシステイン由来の負電荷を持つ硫黄原子が3つ配位しており、非常に多くの負電荷に囲まれた環境にある。このことから強い電子供与可能な配位子を設計、合成することにより、NOのセンシングが可能な化合物を構築できると考えた。図1

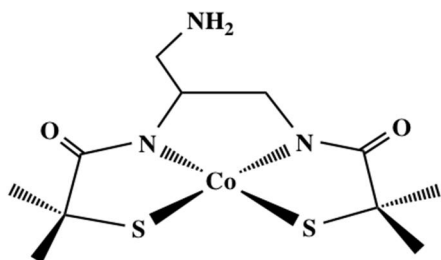


図1 コバルト(III)錯体(1)の推定構造

にそのモデルとして設計し合成したコバルト(III)錯体1の構造を示した。この錯体1は、溶液中における紫外可視吸収スペクトルから平面構造を有していることがわかった。通常コバルト(III)錯体は六配位八面体構造をとるにもかかわらず、配位子からの強いドナー性のため平面4配位構造をとったものと考えられ、5座目のアミン窒素原子は配位せず遊離していると考えられ、軸方向には NO をはじめとする小分子が相互作用できる十分な空間があることを示している。

このコバルト(III)錯体の溶液に対して NO ガスを吹き込んだところ、緑色溶液が直ちに赤橙色へと変化した。その吸収スペクトル変化を図2に示した。これは NO と錯体が反応し構造変化を生じたことを示している。

実は、この錯体は高い NO 選択性を示すことが分かり、この錯体と NO 以外の分子との反応性についても紫外可視吸収スペクトル

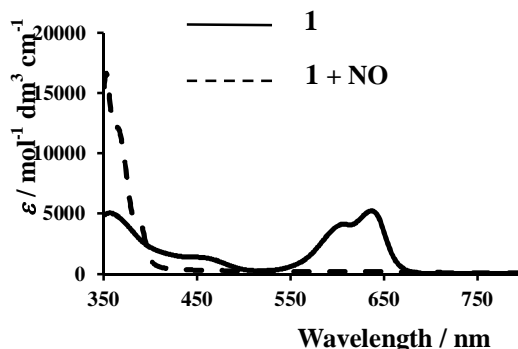


図2 NO 吹き込みによる吸収スペクトル変化

を検討した。例えば、亜硝酸イオン ( $\text{NO}_2^-$ ) は電気化学的な検出方法では NO の検出を妨害する最も大きな要因である。しかし、この錯体は  $\text{NO}_2^-$  とは反応せず、また生体内に存在する他の小分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}$ ) についても同様に過剰量添加したところ、 $\text{NO}_2^-$  の場合と同様、反応性は観測されなかった。以上のことからコバルト(III)錯体1はNOに対する選択性が高いことが明らかとなった。

次に、電気化学的に NO の検出が可能であるかどうかを評価するため、NO との反応の前後における電気化学的応答をサイクリックボルタンメトリー (CV) を用いて評価した。コバルト錯体1を溶解した水溶液 (NO 添加前) の CV を測定したところ準可逆的なコバルト(III/II)に相当する酸化還元波が  $-0.85\text{V}$  に得られた。NO ガスを吹き込んだ後の CV は、吹き込み前と比較して大きく変化し、 $-0.85\text{V}$  の酸化還元波が消失し、新たに  $-1.08\text{V}$  に還元波を得た。こうした一連の分光学的、電気化学的变化は類似環境を有する鉄(III)錯体でも見られており、いずれの化合物も NO の電気化学的な検出に利用可能であることを示しており、電極表面に修飾することにより NO センサーとして応用できる可能性があり、そのデバイス化を進めている。

### (ii) VOC センサー

揮発性有機化合物 (VOC) は、建材や壁紙用の接着剤の溶剤として使用されているトルエンなどの VOC によるアレルギー症状はシックハウス症候群として知られ、微量 VOC のセンシング技術は、健康・環境分野等の様々な分野で期待されている。

多孔質材料の一つであるゼオライトは、二酸化ケイ素骨格によりナノサイズの細孔が連なった構造を持つ古くから知られた化合物である。フォージャサイト型と呼ばれるゼオライトは骨格の Si/Al 比により X 型と Y 型に分類され、こうしたゼオライトはその構造とそれに起因する性質から、古くより

分子ふるい、酸触媒、吸湿材料などとして幅広く利用されてきた。また、フタロシアニンおよびその金属錯体は古くから染料として使用されており、塗料や磁性材料、あるいはアレルギーなどの吸着剤などとして幅広く研究開発や実用化が行われている、非常に平面性の高い化合物である。

この金属フタロシアニン錯体をゼオライト内に内包する方法には、シップインボトル法と呼ばれるゼオライト内に導入した遷移金属などの陽イオンを鑄型としてフタロシアニン骨格を組み上げていく方法がある。ゼオライト内に内包された金属フタロシアニン錯体は、ゼオライト骨格の super cage 内に孤立した形で取り込まれる。金属フタロシアニン錯体は平面性が高いために分子同士が重なり易く、そのため単独では分子本来の性質を発揮しにくい。一方、ゼオライト内部では分子が孤立しており、金属フタロシアニン錯体本来の性能を十分に発揮できる環境となっている。

我々はこれまでに主に金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトを利用した消臭材料の研究を行ってきた。これは金属フタロシアニン錯体が本来持っている酸化触媒としての機能を発揮させることで、ゼオライト細孔が吸着した悪臭物質等を金属フタロシアニン錯体の酸化力により分解するタイプの消臭材料である。我々はこの研究の中で、特定の有機化合物がこの金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトに吸着していると思われる挙動を偶然見出し、この現象が VOC のセンシングなどに利用できると考え、本材料を利用した VOC センサーの開発を行った。開発したセンサーでは、水晶振動子マイクロバランス法 (QCM) を用い、金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトを QCM チップ上に塗布することで VOC の吸着による周波数変化を観測することが可能なシステムである。

図 3 に実際に開発した装置の全景および模式図を示した。パーミエーターで発生した一定濃度の VOC は恒温チャンバー内に置かれたセル内に導入され、セル内部には発振器に接続された QCM チップがセットされており、振動子上に塗布された金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトに VOC が吸着すると周波数が変化するという方法である。

図 4 は各種 VOC を装置内に導入した場合の QCM の周波数変化を示したグラフである。何れの場合も VOC 導入直後から、時間の経過と共に VOC の吸着による周波数の減少が観測され、一定量の減少の後、吸着量の飽和により周波数の減少は停止した。対照実験として金属フタロシアニン錯体を含有しない通常のゼオライトを塗布した QCM チップを用いて同様の実験を行ったところ、目立った周波数の減少は観測されなかった。これはゼ

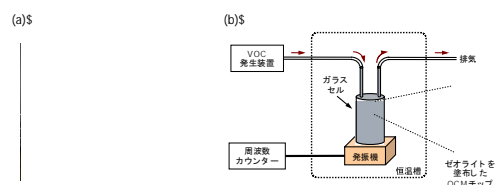


図 3 VOC センサー装置全景(a)と模式図(b)

オライト内部に内包された金属フタロシアニン錯体は何らかの相互作用で VOC を吸着していることを示している。VOC の違いによ

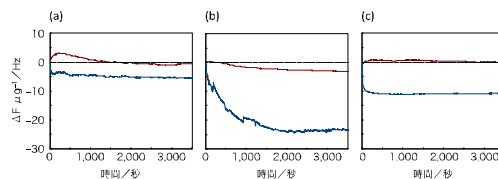


図 4 VOC の吸着実験 (a) トルエン (11 ppm)、(b) ピリジン (12 ppm)、(c) アセトアルデヒド (2 ppm)。

て周波数の減少速度などの吸着挙動に違いがあることから、VOC によって金属フタロシアニン錯体との間に働く相互作用に違いがあると考えられる。吸着した VOC は加熱しながら減圧することで簡単にゼオライト内部から脱離させることができ、塗布したゼオライト材料が QCM チップから剥落しない限り、本センサーは何度でも再利用可能である。

ゼオライト骨格の効果を確かめるために吸着挙動の観測されたピリジンとトルエンを用いて、飽和蒸気圧下での金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトへの VOC の吸着挙動をガス吸着装置により観測した。この場合はゼオライト骨格内部の細孔容量に応じて VOC の吸着が観測された。つまり金属フタロシアニン錯体を内包していない通常のゼオライトにおいても吸着挙動が観測され、金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトよりも多くの VOC を吸着した。これは飽和蒸気圧下では金属フタロシアニン錯体の有無に関わらず何れのゼオライトにおいても VOC の吸着が起き、その吸着量は単純にゼオライト骨格内の細孔容量の大きさに依存していることを示している。前述の QCM による測定では、極微量の VOC (数 ppm 程度) を導入した際に金属フタロシアニン錯体を内包したゼオライトでのみ VOC の吸着が起こっていた。これは一定量以下の濃度ではゼオライト自身の VOC 吸着能力は発揮されず、内包された金属フタロシアニンによる VOC の吸着が起こるためと考えられる。従って、本方法は微量の VOC のみを選択的に検出可能なデバイスを構築するための要素技術として有効と考えられる。

QCM では周波数変化を水晶振動子上に吸着した物質の質量変化に換算して議論することが可能である。表1に金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトに吸着した各VOCの吸着量および金属フタロシアニン1分子当たりの吸着分子数を示した。金属フタロシアニン錯体を内包していないゼオライトでは、ppmオーダーの濃度ではVOCの吸着挙動はほとんど見られないため、吸着分子はゼオライト内の金属フタロシアニン錯体近傍に存在していると考えられる。VOCは金属フタロシアニン近傍では、芳香環スタッキング( $\pi$ - $\pi$ 相互作用)やCH- $\pi$ 相互作用などの弱い相互作用、あるいはフタロシアニンの軸位に配位可能なピリジンなどのVOCでは金属中心への配位結合などによる相互作用が生じていると考えられる。従って、金属フタロシアニン1分子近傍に平均で最大3分子程度のVOC分子が相互作用していると考えられる。

本法の問題点の一つは、吸湿材料であるゼオライトを用いているため、水分がある程度以上存在すると同時に水分子の吸着が起これ、VOCの検出に影響を及ぼすことである。そこで水分子の影響を取り除くため、既知法<sup>7)</sup>を参考に金属フタロシアニン錯体を内包したゼオライトの細孔表面のフッ化処理によりゼオライト自体を疎水化し、水分子の吸着が起これにくい材料を作製した。これをQCMチップの上に塗布し、水分子の吸着実験を行ったところ、図5に示したように、疎水化処理を施していない金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトに比べて水分の吸着は約半分に抑えられた。また疎水化前は吸着した水分の吸脱着に伴い、測定中に振動数の大きな変動が観測されたが、疎水化処理後はそちらも軽減されている。実際にVOCとしてピリジンを用いて疎水化処理前後で吸着実験を行ったところ、疎水化処理を施していない金属フタロシアニン錯体内包ゼオライトに比べて、疎水化処理後の方がピリジンの吸着量の増加が見られた。これは水の影響が排除されたこと、疎水化処理によりピリジンがゼオライト骨格内部

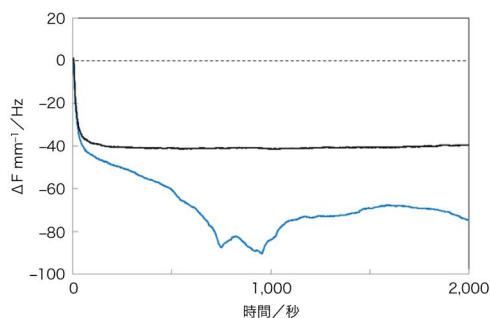


図5 ゼオライトを疎水化した結果(黒線)、水蒸気の効果は押さえられた。

まで浸透するようになったことなどが要因として考えられる。以上の様に、金属フタロシアニン錯体を内包したゼオライトは極微量のVOCを検出する材料として非常に有用であることが示された。

### (iii)微生物センサー

微生物や細胞を効率よく認識し吸着するセンサー素子を、細胞が鉄イオンを体内に取り込む際に利用するシデロフォアを用いて可能にした。ここでは、人工シデロフォアを合成し、それを利用し、基板表面に修飾した微生物センサーを開発した。

生命が生存する上で必須となる鉄イオンは、動物、植物、微生物などあらゆる生物で、シデロフォア(Feイオンを運搬する小分子の総称)と呼ばれる小分子が鉄イオンと結合して錯体を形成し、効率よく体内へのFeイオンとして摂取されている。シデロフォアの構造は様々であるが、鉄イオンとの結合部分の構造だけに注目すると、カテコール型・ヒドロキサム酸型・その他の3種類に大別される。細胞によって様々なシデロフォアを利用しているが、その構造的なモチーフは共通しており、いずれの場合も鉄イオンを捕捉する部位として酸素原子(-OH基や-C=O基)が利用されている。自然界では鉄イオンは安定な3価の形をとっており、通常水酸化鉄[Fe(OH)<sub>3</sub>]として存在している。しかし、水酸化鉄はコロイド状態で存在しており、ほとんど水に溶解せず、そのままでは利用できない。そのため微生物はわずかに溶けているFe<sup>3+</sup>イオンを利用しなければならず(溶解度はpH7で10<sup>-18</sup>M程度)、効率よくFeイオンを捕捉するために、シデロフォアはFe<sup>3+</sup>イオンと相性のよい酸素原子によって鉄イオンを捕捉できるように設計されている。

シデロフォアによって捕捉されたFeイオンは微生物の細胞膜を透過して体内へと摂取される。このFeイオンの細胞膜透過のプロセスには2通りの経路が知られているが、ここでは紙数の関係でその詳細は省略する。本題である微生物センサーは、細胞のシデロフォア認識・捕捉能を使うというものである。

人工シデロフォアは上述の天然シデロフォアの構造を模倣し、その機能を発現するように設計された合成分子である。これまでにカテコール型・ヒドロキサム酸型を問わず、様々な人工シデロフォアが合成されており、微生物のFeイオン取込み経路の研究用プローブ、あるいは創薬の見地から鉄過剰症の治療薬開発などにも応用されており、様々な角度から研究がおこなわれている。

我々は一連のヒドロキサム酸型人工シデロフォアを合成し、そのFe<sup>3+</sup>イオンとの錯形成過程や実際に微生物へ取り込まれる際の構造や酸化還元電位の影響について検討し

た。その結果、構造の嵩高さや分子内水素結合による酸化還元電位の違いが、微生物の増殖に大きく影響すること、つまり微生物への取込れ方に大きな差異のあることを示した。

次に、人工シデロフォア修飾基板の作製を紹介する。これまで合成した人工シデロフォアは実際に微生物の成長因子として働くことを示してきた。そこでこの人工シデロフォアと微生物の細胞表面に存在する結合タンパク質との相互作用を利用することで、微生物の吸着・固定が可能な素子を開発しようと考え、Fe イオンを捕捉した人工シデロフォアを電極などの基板上に修飾することで、微生物を吸着・固定化、あるいは検出することが可能なデバイスの構築を目指した。基板上に人工シデロフォアを導入するために、これまでに我々が合成してきた人工シデロフォアの末端に結合性の官能基である-NH<sub>2</sub>基を導入した構造をもつ人工シデロフォアを合成した。これにより、カルボン酸やアルデヒド、またはハロゲン化アルキルなど様々な官能基との結合が可能となる。まず-NH<sub>2</sub>基を導入した人工シデロフォアが実際に微生物に取り込まれるかどうかを確認するために、*Microbacterium flavescens* を用いて培養実験を行なった。この微生物は自分自身ではシデロフォアを産出せず、他の微生物が産出したヒドロキサム酸型シデロフォアを利用して増殖する。従って系内にシデロフォアが存在しない場合、Fe イオンを摂取できず増殖が抑えられ、人工シデロフォアの研究ではよく用いられる大変都合のよい微生物である。

基板への修飾は、まず金基板表面に活性エステルを自己組織化し、続いて Fe<sup>3+</sup>イオンと反応させた Fe-人工シデロフォア錯体の溶液に活性エステル修飾基板を浸漬することで、目的の人工シデロフォア修飾基板を得た。こうした基板修飾は金基板だけでなく、S 原子と親和性の高い他の金属にも応用可能である。またシランカップリング法を用いることにより、ガラスや Si 表面などへの修飾も可能であり、実際にガラス基板への鉄-シデロフォア錯体の修飾にも成功している。得られた Fe-人工シデロフォア修飾基板は-0.76 V vs. Ag/AgCl (pH 7)に酸化還元波を示し、これは修飾前の Fe-人工シデロフォアの酸化還元電位 (-0.74 V vs. Ag/AgCl) とほぼ同じ電位であり、ピーク電流の大きさが掃引速度に比例することから、Fe-人工シデロフォアが金電極表面に固定化されたことがわかる。

次に、シデロフォアを修飾した基板上で微生物(*M. flavescens*)を培養した後に、光学顕微鏡で表面観察を行なったところ、微生物がスポットとして幾つも観測されたイメージが得られた。人工シデロフォアの付いていない場合には全く微生物は観測されず、人工シデロフォアの効果である。実際の微

生物の形を捉えるために、より高分解能な測定が可能である原子間力顕微鏡(AFM)や走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて、培養後の人工シデロフォア基板表面を観察したところ、微生物が吸着・固定されている様子を鮮明にとらえることに成功した。これらの結果より、Fe-人工シデロフォア錯体を基板に修飾することで、微生物を吸着・固定化しうる事が判った。

この原理と水晶振動子マイクロバランス(OCM)法を用いて、微生物吸着挙動を追跡することを検討した。OCMは水晶振動子の表面に物質が吸着することによってその周波数が減少することを利用し、吸着物質の重さを求めることが可能な測定法である。(ii)で述べたと同様、OCMの水晶振動子上に蒸着したAu膜の上にFe-人工シデロフォア錯体を修飾した。この基板を用い微生物の吸着挙動を測定したところ、微生物の培養液の添加とともに周波数の低下がみられた。一方、培養液のみの添加では目立った周波数変化は見られなかったため、この挙動は振動子表面への微生物の吸着による周波数変化であることが示唆される。このように Fe-人工シデロフォア錯体への微生物の吸着による質量変化をリアルタイムで測定可能であることが示された。本研究は微生物によるシデロフォアの認識・取込能を利用して、微生物を基板表面へ吸着・固定することが可能であることを示したものであり、バイオリアクターへの利用や環境センサー・健康センサーとしての応用を目指している。今後の課題としては、詳細な吸着メカニズムの解明はもちろんのこと、微生物の種類と認識するシデロフォアの種類との関係(選択性)をライブラリー化し、汎用性を高めること、吸着効率を上げるなどの工夫が必要である。我々は微生物を固定化する新しい方法の一つとして、人工シデロフォア修飾基板の利用を提案したい。

#### 4. 主な発論文等

(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 28 件) (全て審査有)

1. T. Inomata, Y. Nagai, N. Ohata, Y. Funahashi, T. Ozawa, and H. Masuda, "Visible Light-induced catalytic Oxidation Using Zeolite Encapsulating Two Distinct Metal Complexes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 01AJ03-1-4 (2011)
2. T. Ozawa, T. Shibayama, T. Yano, Y. Funahashi, and H. Masuda, "Nitrile Hydration by Co(III) Complex with Oxygenated S Atoms Inserted into

Mesoporous Silica," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 01AJ04-1 - 01AJ04-6 (2011)

3. T. Inomata, H. Eguchi, Y. Funahashi, T. Ozawa, and H. Masuda, " Adsorption Behavior of Molecules on a QCM Chip Modified with an Artificial Siderophore-Fe<sup>III</sup> Complex," *Langmuir*, **28**(2), 1611-1617 (2012)

4. Z. Zhang, T. Suwabe, M. Ishikawa, Y. Funahashi, T. Inomata, T. Ozawa and H. Masuda, " Highly selective binding of nitric oxide by Co<sup>III</sup> and Fe<sup>III</sup> complexes", *Dalton Trans.*, **42**(13), 4470-4478 (2013)

他に関係する原著論文 24 編 (全て審査有)

[学会発表] (招待講演のみ記載 計 2 件)

1. 「生物無機化学の挑戦 一分子認識・機能発現・デバイス化」第 7 回機能性分子シンポジウム [2009 年 10 月 31 日 筑波大学] 増田秀樹 (招待講演)

2. 「物質・エネルギー変換の未来を拓く高機能材料の開発」高分子学会ポリマーフロンティアサイエンス研究会 [2012 年 4 月 13 日 東工大] 「超ハイブリッド材料」増田秀樹 (招待講演)

[図書] (計 2 件)

書名：ベーシックマスター 無機化学  
出版社：オーム社  
出版年：2010 年  
著者：増田秀樹、長嶋雲兵 (共編著)

題目：「健康・環境センサーの開発」

書名：ケミカルエンジニアリング  
出版社：化学工業社  
出版年巻号頁：Vol. **57**(1), 43-54, 2012 年  
著者：増田秀樹、小澤智宏、猪股智彦

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称：高選択的 NO センシング素子  
発明者：増田秀樹、小澤智宏、船橋靖博、猪股智彦、諏訪部達也  
権利者：名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：2010-144463  
出願年月日：2010 年 6 月 25 日  
国内外の別：国内

名称：金属錯体内包ゼオライトの疎水化方法  
およびそれによって得られたセンサー  
発明者：増田秀樹、猪股智彦、山脇大輝  
権利者：名古屋工業大学  
種類：特許

番号：2011-181036

出願年月日：2011 年 8 月 23 日

国内外の別：国内

名称：人工分子により修飾した走査型プローブ顕微鏡用探針、およびこれに用いる人工錯体分子

発明者：増田秀樹、小澤智宏、猪股智彦、村瀬貴範

権利者：名古屋工業大学

種類：特許

番号：2012-286407

出願年月日：2012 年 12 月 28 日

国内外の別：国内

名称：人工シデロフォア錯体が修飾された微粒子、および当該微粒子が吸着したセンサー基板

発明者：増田秀樹、小澤智宏、猪股智彦、村瀬貴範

権利者：名古屋工業大学

種類：特許

番号：2012-057476

出願年月日：2013 年 3 月 24 日

国内外の別：国内

○特許取得状況 (計 1 件)

名称：**Method for detecting low concentration gas**

発明者：増田秀樹、猪股智彦、澤木啄

権利者：名古屋工業大学

種類：U.S. Pat.

番号：No. 8,365,576

取得年月日：2013 年 2 月 5 日

国内外の別：国外

[その他]

ホームページ等

<http://www.ach.nitech.ac.jp/~inorg/masuda/Japanese/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 秀樹 (HIDEKI MASUDA)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：50209441

(2) 研究分担者

・小澤 智宏 (TOMOHIRO OZAWA)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70270999

・船橋 靖博 (YASUHIRO FUNAHASHI)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：00321604

・猪股 智彦 (TOMOHIKO INOMATA)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：40397493