

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25281038

研究課題名(和文) ppbレベルのナノ薄膜試験紙、実用化のための基盤技術の深化と環境試料による評価

研究課題名(英文) Key technologies and application to environmental samples toward practical use of dye nanoparticle-coated test strips for the detection of toxic metal ions at ppb level

研究代表者

高橋 由紀子 (Takahashi, Yukiko)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00399502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：ppbレベルが判定可能なナノ薄膜試験紙の基盤技術の確立と環境試料での評価を行った。有機ナノ粒子作製として、ミスト化を経る作製法およびゼラチン中での合成を提案し、後者は粒径制御および長期間の分散安定性を見出した。ナノ粒子薄膜の浸透性の改善に水溶性ポリマーや保湿剤の添加が効果的であった。浸透性の制御をヒントに、新たにニッケル合金表面のニッケル検出用接触試験紙を提案した。ppbレベルでの鉄(II)および鉄(III)用の試験紙を作製し環境水中での測定を行った。鉄(II)用の試験紙での10秒の迅速モニタリングによって、地下水汲み上げ直後の鉄(II)から大気への溶け込みによる酸化過程の追跡に成功した。

研究成果の概要(英文)：High sensitive dye nanoparticle coated test strips (DNTSs) loaded with a thin layer composed of organic indicator dye nanoparticles have been improved from the viewpoint of preparation and detection technique and application to environmental water. Two different preparative methods of organic dye nanoparticles were proposed based on mist generation processes or precipitation in a gelatin solution. The later one provides approximately identical particle diameters and excellent long-term dispersion stability. To improve the color developing time of DNTS, the addition of water-soluble polymer and moisturizer was potentially effective to shorten the penetration time of ions and water molecules into dye nanoparticle layer. The DNTSs corresponding to the individual Fe(II) and Fe(III) ions were fabricated and applied to environmental water. The Fe(II) DNTS with the brief immersion for 10 seconds made successfully observation of Fe(II) concentration in groundwater change with time.

研究分野：ナノ材料化学、分析化学

キーワード：高感度試験紙 簡易分析 ナノ材料 環境分析

### 1. 研究開始当初の背景

「ナノ薄膜試験紙」は、有機比色試薬のナノ粒子もしくはナノコンポジットからなる薄膜を作製する技術およびこれを用いた高感度なナノ薄膜検出法からなり、いずれも申請者の独自発案および独自コンセプトである<sup>1)</sup>。有害イオンをターゲットとした、世界初の基準値 (ppb) レベルが測定可能な試験紙であり、誰でも・簡単・安価に・その場でできる現場分析法への適用を目指している。ppb レベルという市販のイオン試験紙に対して3-4桁の高感度化を達成しているが、これは市販の試験紙の場合、試薬はろ紙の厚さ分ほぼ均一に存在し、多くのシグナルは表面からは観測できないのに対し、本ナノ薄膜試験紙では試薬がナノ粒子としてフィルターの片面のみに400-700 nmの薄膜(ナノ薄膜)として局在するため、全てのシグナルを検出できるという特長による(図1)。既存の比色試薬の多くをナノ粒子として試験紙にできるため、多くのターゲットに対応可能であり、かつ1つのターゲットに対しても比色試薬群から最適な試薬をスクリーニング可能である。

環境基準および排水基準で規制されている、カドミウム、鉛、水銀、ニッケル、マンガ、亜鉛、鉄、フッ化物、ヒ素に対する基準値レベルが現場で判定可能なナノ薄膜試験紙の開発を行い、ppbレベルの検出が可能で、特に水銀試験紙では海水もしくは工業廃水サンプルを前処理無しで<sup>2,3)</sup>、亜鉛試験紙についてはメッキ処理水中で直接測定可能であり、高選択性で、妨害に強い分析法である。これは、試薬が固相であるための固液分離、反応速度差による分離、かつ水溶性マスキング剤による除去が可能であるため、他の分析法と比較しても実試料に対して極めて有利となる。

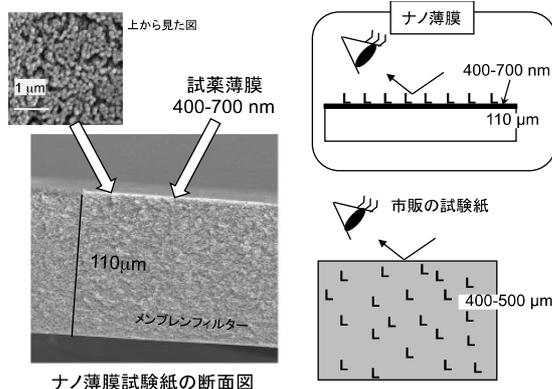


図1 ナノ薄膜試験紙の検出原理

### 2. 研究の目的

しかしながら本試験紙を実用化研究へと進める際に、有機ナノ粒子作製技術の確立およびナノ薄膜への浸透と反応性制御という基盤技術の確立が必要不可欠であることが明らかとなった。ナノ粒子作製法(再沈法<sup>4)</sup>)

は、量産が難しく、単分散で繰り返し良く100 nm以下の有機ナノ粒子を作成することが困難で、汎用性に欠けるため、試験紙を製品として生産するためには代替技術の開発が必須である。また、本試験紙は高感度である反面、検出に数十分～数時間程度がかかり、これはナノ粒子薄膜の疎水性に因り、イオンや水の浸透が困難となっているためである。微量のポリマー添加により膜への浸透性を制御可能で、検出時間も格段に短くかつ抽出率も高くなることが予備実験からわかっている。さらに、試験紙の特性上、何らかの実試料を測定できることが必要であり、ppbレベルの化学状態分析を行い、環境サンプルを用いて本試験紙のポテンシャルを評価したい。既に開発された試験紙について、試験紙自体及び分析法の改良を行うことで、分離の難しいイオンの妨害除去や2つの電荷状態をとりうる無機イオン種の化学形態別分析を目指す。

本研究では以下の5つのサブテーマに分けて研究を行う。(1)有機ナノ粒子のナノ粒子作製技術では、無機ナノ粒子の合成法として有効性が確認されている超音波噴霧熱分解法を応用し、超音波スプレーを用いたミスト化-ミスト分離に基づく有機ナノ粒子の合成法の開発を行う。量産、50~500 nmの粒子、単分散、汎用性、サイズの作り分けを達成したい。(2)比色試薬ナノ粒子のサイズ効果の検証は、本試験紙で用いる50~500 nmの間でサイズによってイオンとの反応性に差異があるのか、ナノ薄膜としたときの影響等を解明したい。(3)ナノ薄膜への浸透と反応性制御は、ナノ薄膜試験紙を既存の試験紙の'dip & read'に近づけることを目標とし、各種添加剤による改質を、浸透(反応時間)と反応性(抽出率)で系統的に評価する。(4)妨害除去技術の確立は、特に分離の難しい、周期表で同族のカドミウム試験紙での亜鉛および砒素試験紙でのリンの除去について、膜分離もしくは検液中での沈殿生成や吸着分離に基づいた除去技術を確立する。(5)ppbレベルの化学状態分析では、環境水中で2つの電荷状態をとりうる、鉄(2価/3価)の化学形態別検出の可能性を探る。以上3つの基盤技術の深化と2つの環境試料による評価を通して、高感度試験紙のプラットフォームとしての「ナノ薄膜試験紙」の地位を確立し、環境分析の現場で規制値を判定可能な本物の技術として世に送り出したい。

### 3. 研究の方法

(1)有機ナノ粒子のナノ粒子作製技術:無機ナノ粒子の合成法の超音波噴霧熱分解法<sup>5)</sup>を応用して、超音波スプレーを用いたミスト化-ミスト分離に基づいて、量産、汎用性が高く多くの疎水性色素に対応可能、粒子サイズ50~500 nm、単分散、サイズの作り分けが可能(50 nmと200 nm等)な、新規作製装置を開発する。作製された粒子は動的光散乱法

(DLS)と電子顕微鏡観察(FE-SEM)にて、粒径、粒径分布、形状を確認し、試薬濃度、キャリアガス流量、電気炉温度等を最適化する。(2)比色試薬ナノ粒子のサイズ効果の検証:本試験紙で用いる50~500 nmの比色試薬ナノ粒子で、サイズによってイオンとの反応性に差異があるのか、1試薬から例えば80 nmと200 nmの分散液(水溶液)とナノ薄膜をそれぞれ作製し、イオンとの反応による呈色変化を透過吸収強度もしくは反射吸収強度のタイムスキャンにより確認する。全ての分散液およびナノ薄膜はDLSとFE-SEMによって粒子サイズの保証を行う。(3)ナノ薄膜への浸透と反応性制御:本試験紙は高感度である反面、数十分~数時間程度時間がかかり、抽出率も1%以下と非常に低い。これらはいずれもナノ薄膜の高い疎水性によるもので、薄膜内でのターゲットの浸透が不均一で、上層のみしか反応に寄与していないためと判明した<sup>6)</sup>。ナノ薄膜試験紙の反応時間と抽出率の大幅な改善を目的として、薄膜内での均一な浸透を目指し、ポリマー等の添加剤を添加してナノ薄膜を改質し、その効果を精査する。ナノ薄膜の反応時間はドロップテスト(図2)によって反射吸収強度のタイムスキャンから計測し、抽出率は反応後の試験紙の酸分解溶液をICP-MSにて定量することで求める。ナノ粒子及びナノ薄膜が溶解しない程度の微量の添加を基本として、濃度、分子量、分子構造による反応時間と抽出率に与える影響を調査する。同時に、試験紙断面のSEM観察によりナノ薄膜を確認、厚さを計測し、高感度マイクロスコープによって断面の色観察を行うことで、添加剤のナノ薄膜構造へ与える影響を調べる。以上を通して、添加剤によるナノ薄膜への浸透と反応性の制御指針を得る。(4)妨害除去技術の確立:特に分離の難しい、カドミウム試験紙での亜鉛、砒素試験紙でのリンの除去を目指し、先に模擬サンプル、次いで実サンプルにて除去能を評価する。カドミウム(II)-亜鉛(II)は分離が難しく、かつほとんどのサンプル中で共存する。イオン交換膜での塩化物錯体の分配の違いを利用して<sup>7)</sup>、イオン交換膜をナノ薄膜の上

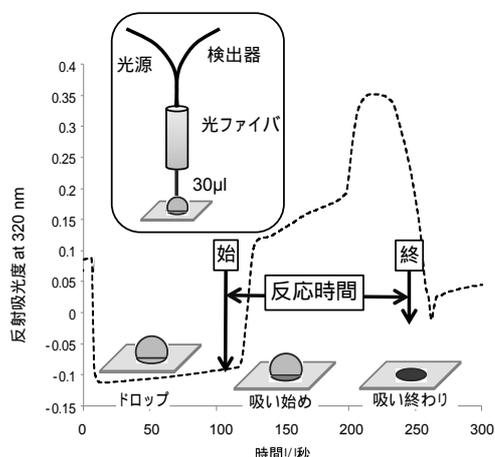


図2 ドロップテスト

に塗布し、分離除去を行う。(5) ppbレベルの化学状態分析:環境水中で2つの電荷状態をとらる、鉄(2価/3価)の化学形態別検出の可能性を、模擬サンプルにて探り、実サンプルにて評価する。鉄(2価)という酸化されやすいイオンを扱うため、サブテーマ(3)の結果を活用し、迅速定量とする。鉄(2価/3価)はそれぞれに特異に反応する試薬からなる2枚の試験紙を並べての同時検出を予定している。実サンプルは井戸水にて定量する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 有機ナノ粒子のナノ粒子作製技術

ミスト化-ミスト分離に基づいた合成法  
超音波スプレーによるミストのサイズ分離は、窒素気流下、中空ガラス管へ通過させることで行った。粒子は熱水中での析出とミスト直接加熱の2通りで作製し、ガラス管長さ、色素濃度、窒素流量が粒径、粒径分布および形状へ与える影響を調査した。周波数130 kHzの超音波スプレーで0.05~0.5 mMのテトラフェニルポルフィリンアセトン溶液をミスト化し、窒素気流 0.4 l min<sup>-1</sup> 下で長さ160 mmもしくは320 mmのガラス管内を通過後、80℃の熱水にバブリングした。熱水中での析出による粒子作製は、160 mmのガラス管を用いTPP濃度0.05、0.2、0.5 mMの場合、それぞれ平均粒径145、295、344 nmの球状粒子が、320 mmのガラス管ではTPP濃度0.5 mMの場合に平均粒径147 nmの粒子が得られた。粒子サイズは色素濃度に比例し、またガラス管が長くなるほど小さいミストが主となり比例し、サイズの作り分け可能であると示唆された。一方、ミストの直接加熱による粒子作製は、窒素気流0.5、1.0 l min<sup>-1</sup>の下TPP濃度0.5 mMでは平均粒径163、157 nmの粒子が、ペリレン濃度1.0 mMでは139、158 nmの四角粒子が得られた。窒素気流と粒子径の関係性は低いため、1ミストから1粒子が作製されるのに十分な加熱が達成されていることを意味する。

##### ゼラチン分解物中での有機ナノ粒子作製

本法は研究中に発案されたもので、写真フィルムの塩化銀微粒子を作製する技術にヒントを得た。幾つかの有機色素にて、粒径分布が狭く、粒径制御され、かつ分散の時間安定性に優れた、マイルドな条件での作製方法であることを見出した。水中では粒子成長と2次凝集により、粒径が時間と共に大きく変化し、容易に凝集を生じるが、ゼラチン分解物を添加することで、2つの構造の異なる色素に対しても180時間まで粒径が変化せず安定に分散させることに成功し、粒径制御および分散安定性に優れた媒体であると認めた。本法はバッチ式であるが簡便・安価でスケールアップも容易と予想する。

##### (2) 比色試薬ナノ粒子のサイズ効果

上記(1)でのサイズ作り分けに至らなかった  
ので、本サブテーマは行わなかった。

### (3) ナノ薄膜への浸透と反応性制御

呈色時間の短縮を目的に、添加剤による効果を検討するため、およびに示す2つのモデル系にて検討を行った。

バソフェナントロリンナノ粒子試験紙での鉄(II)検出系：保湿剤として利用されている尿素やグリセリン、PVA等を添加剤として加えて改質し、これらの呈色および浸透時間への影響を評価した。試験紙は5 mM バソフェナントロリンのエタノール溶液100  $\mu$ lを、1000 rpmで攪拌している添加剤を含んだ水溶液中に射出し、得られたナノ粒子分散液を孔径0.05から0.1  $\mu$ mのメンブランフィルターで吸引濾過することで作製した。浸透時間を求めるため、液滴20  $\mu$ lを試験紙表面に滴下し、波長340 nmの反射吸収強度を時間毎に測定することで、液滴がナノ薄膜に浸透するまでの時間( $t_r$ )を定量化した。ナノ薄膜試験紙の呈色時間は、500 ppbのFe(II)を含有しpH調整した溶液20 mlに浸漬し、色彩計にて $L^*a^*b^*$ 表色系の赤色の变化を示す $a^*$ を測定することで評価した。添加剤なしの場合、浸漬試験において発色が飽和に到るまで90分以上要したが、0.8 Mの尿素を用いて製膜した場合、変色速度が増加した。尿素はタンパク質の変性剤としても知られていることから、ナノ粒子内または粒子表面に付着した尿素が周囲の水分子の水素結合を切断し、クラスター構造を破壊したことでイオンを粒子内に導きやすくなり変色速度が増加したと予想した。一方でアミノ酸類を添加しても変色速度は変わらなかった。添加剤を加えず製膜した場合、反射吸収強度から求めた $t_r$ は30分程度であったが、PVAを約0.1 mg L<sup>-1</sup>以上用いた場合約10分程度に $t_r$ は短縮された。また、PVAを添加しても、バソフェナントロリン-鉄(II)錯体の生成に基づく $a^*$ の強度は低下しなかった。以上より、上記の添加剤は検出感度を落とさず、検出時間の短縮を可能とすることがわかった。また、PVAを添加した場合に、フィルター単独の $t_r$ を下回ったことから、ナノ粒子層だけでなく担体であるメンブランフィルターにも影響を与えていることがわかった。

さらに分子(エタノール溶液)粒子分散液(水)、膜での呈色時間を比較したところ、500 ppbのFe(II)に対して、分子は一瞬、粒子でも約5秒で呈色は飽和しているが、薄膜では90分以上と、粒子が薄膜となるところで反応性が極端に落ちていることがわかった。これは疎水性色素から成るナノ粒子により疎水性の凹凸構造が試験紙表面にでき、撥水性がより強調されて、水やイオンの浸透性が低下し、結果的に呈色時間が大幅に長くなると考察した。よってこの撥水性を下げる物質の添加が効果的であることがわかる。

5-Br-PADAP ナノ粒子試験紙でのCd(II)検出系：高分子電解質としてpDADMA、pASA、PVA、デンドロンを用い、これらを1~100 mg L<sup>-1</sup>含んだ水10 mlを1,000 rpmで攪拌し、2 mM 5-Br-PADAPアセトン溶液を100  $\mu$ l射出した。分散液をメンブランフィルター(孔径0.05  $\mu$ m)にて濾過し試験紙を作製した。浸透時間は同様にドロップテストで求めた。呈色時間は、試薬面積35 mmの試験紙を1/6カットし、700 ppbのCd(II)を含む検液20 mlに適時浸し、色彩計で分析した。Cd(II)の抽出率は試験紙を酸分解しICP-MSにて測定、算出した。電解質無しの $t_r$ は40分以上であったが、pDADMAもしくはPVA、デンドロンを用いた場合、50 mg L<sup>-1</sup>の添加で22~30分程度、100 mg L<sup>-1</sup>ではメンブランフィルターのみ約20分と同じとなった。pASAでは $t_r$ が上昇したことから、高分子電解質がナノ粒子層内に保持され、影響していることがわかる。呈色時間は電解質無しで135分、デンドロン、PVAでは15分および20分と大幅に短縮され、またpASAでは160分と、 $t_r$ と相関した。Cd(II)の抽出率は全ての電解質で4%前後となり、上記電解質はイオンの抽出率には影響せず、浸透速度を変化させることがわかった。

さらに分子、粒子分散液、膜での呈色時間を比較したところ、バソフェナントロリンと同様に、分子と粒子は10秒以内に呈色は飽和しているが薄膜のみ135分と、粒子が薄膜となると反応性が極端に落ちることがわかった。バソフェナントロリン試験紙での結果を支持するものであった。

### タッチテスト法の発案

浸透性の制御にヒントを得て、新たに固体サンプル向けの試験紙として、ニッケル合金・メッキに対する接触試験紙を発案した。金属をイオン化するための層を試験紙表面へ用いたことが鍵であり、金属アレルギーの人が身の回りのアクセサリや日用品を調べるための方法として提案したい。

### (4) 妨害除去技術の確立

5-Br-PADAP ナノ粒子試験紙でのCd(II)検出におけるZn(II)の妨害除去を検討した。MgCl<sub>2</sub>を大量に添加し、塩化物錯体の生成定数の差を利用してアニオン交換性ポリマーでの分離を試みたが、うまくいかなかった。また、作製した分離膜での前処理も検討したが、通常Cd(II)に汚染されているサンプルでもZn(II)は100倍以上含まれているため、高度な分離に向けての新たなアイデアが必要である。

ヒ素用試験紙でのリン酸の除去を検討した。カルシウムイオンとの沈殿生成や炭酸カルシウム粉への吸着等試みたが、自然界で20~100倍以上の高い濃度で存在するリン酸の完全除去には至らなかった。

(5) ppb レベルの化学状態分析

Fe(II)イオンは地下水中に数 ppm、河川では数十~サブppbレベルで存在し、溶存酸素による酸化、有機物による光還元などで濃度が変動しやすい。ナノ薄膜試験紙は現場分析が特長であり、不安定な Fe<sup>2+</sup>の現場分析への適用を試みた。10 ppm~500 ppb と 500 ppb 以下の二つの濃度範囲に対応する、分析時間 10 秒と 10 分の検量線を作製した。10 秒検量線を用いて実際の地下水の分析を行った。試験紙はバソフェントロリンスルホン酸をラテックス粒子に吸着させメンブレンフィルターで吸引ろ過することで作製した。地下水は長岡技科大 9 号井戸から採取し(水温 11 °C、pH 7.12)、採水直後に 1 分間空バブリングし放置したものと放置の 2 つについて Fe<sup>2+</sup>濃度及び溶存酸素濃度(DO)を測定した。Fe<sup>2+</sup>濃度は硝酸で pH 2.3 に調整した後、10 秒間浸漬させて色彩計で計測した。図 3 のように採水直後の DO の違いによる Fe<sup>2+</sup>の変化を試験紙で経時観測することに成功した。また、Fe<sup>2+</sup>の酸化速度は  $d[Fe^{2+}]/dt = k[Fe^{2+}][O_2][OH^-]^{2.8}$  と報告されており、これを用いて時間毎の DO および pH から [Fe<sup>2+</sup>] の計算値をプロットしたところ、初期ではほぼ同じだったが、140 分から計算値と実験値の差が大きくなった。これは Fe<sup>2+</sup>の酸化で生成した三価鉄が地下水に含まれる有機物と錯体を形成し、この錯体が光還元され Fe<sup>2+</sup>が再び生成したためと予想している。実際に地下水の全炭素濃度は 1.4 ppm であり、有機物の存在を支持している。

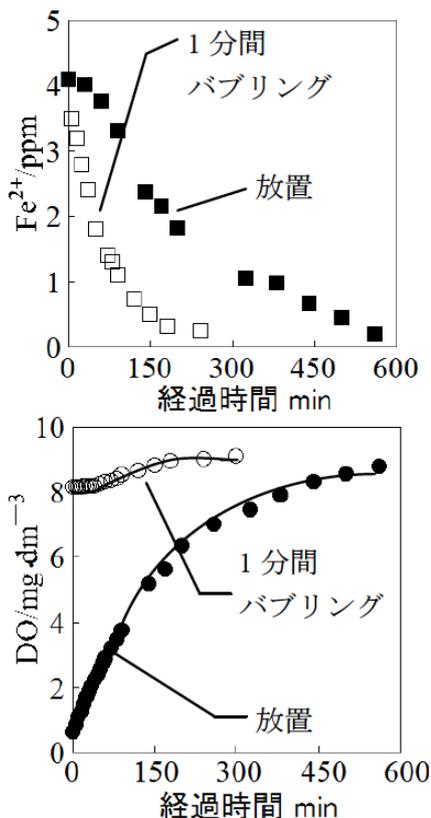


図 3 地下水の Fe<sup>2+</sup>濃度と DO 濃度の経時変化

<引用文献>

- 1) Y. Takahashi et al., Angew. Chem. Int. Ed., 45, 913(2006), Chemical & Engineering News, January 9, 6(2006)
- 2) 高橋由紀子、ジチゾンナノ薄膜試験紙を用いる通液濃縮法による水銀イオン検出における妨害除去法の検討” 査読あり、分析化学、61(2), 123-126 (2012).
- 3) Yukiko Takahashi, Supamas Danwittayakul and Toshishige M. Suzuki, Dithizone nanofiber-coated membrane for filtration-enrichment and colorimetric detection of trace Hg(II) ion, Analyst, 134, 1380 (2009)
- 4) H. Kasai, H. S. Nalwa, H. Oikawa, S. Okada, H. Matsuda, N. Minami, A. Kakuta, K. Ono, A. Mukoh and H. Nakanishi, Jpn. J. Appl. Phys., 1992, 31, L1132
- 5) UPS, J.H. Bang, Adv. Mater., 22, 1039 (2010)
- 6) 高橋由紀子、相馬聡、和久井喜人、2-(5-Bromo-2-pyridylazo)-5-diethylaminophenol ナノ薄膜試験紙の評価と浸漬によるカドミウム(II)イオンの検出特性、分析化学、61(3), 229-234 (2012).
- 7) T. Hayashita et al., Bull. Chem. Jpn., 63, 576 (1990)
- 8) 田村紘基他, 色材協会誌, 45, 11, 629-636 (1972)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

高橋由紀子、アニオン性色素及び塩基性交換体ナノ粒子からなるナノ薄膜試験紙の作製と評価、分析化学、査読有、63(6)、2014、pp.525-531  
DOI:10.2116/bunsekikagaku.63.525

和久井喜人、鈴木敏重、Visual Detection of Arsenic using Hydride Generation followed by Reaction with Silver bis(2-ethylhexyl)dithiocarbamate retained in a Support Filter, Anal. Sci., 30(6)、2014、pp.683-686  
DOI:10.2116/analsci.30.683

[学会発表](計13件)

高橋由紀子、高野景子、和久井喜人、メッキ排水中の亜鉛イオン検出用ナノ薄膜試験紙、日本分析化学会第62年会、2013年9月12日、近畿大(大阪)

高橋由紀子、高野景子、阿部靖洋、和久井喜人、鉛イオン検出用ナノ薄膜試験紙の開発、日本分析化学会第62年会、2013年9月12日、近畿大(大阪)

佐藤孔紀、高橋由紀子、鉄(II)及び鉄(III)の同時分析を目指したナノ薄膜試験紙の

開発、第3回CSJフェスタ、2013年10月22日、船堀タワーホール（東京）

金井信和、高橋由紀子、バソフェナントロリンナノ粒子からなる鉄(II)用ナノ薄膜試験紙のポリマー添加による改善、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日、名大（名古屋）

金井信和、高橋由紀子、鉄(II)イオン用ナノ薄膜試験紙をモデルとした各種添加剤による呈色および浸透時間への影響の評価、日本分析化学会第63年会、2014年9月17日、広島大（広島）

高橋由紀子、相馬聡、和久井喜人、金井信和、カドミウム(II)イオン用ナノ薄膜試験紙の検出時間改善を目指した高分子電解質の添加効果、日本分析化学会第63年会、2014年9月18日、広島大（広島）

和久井喜人、鈴木敏重、ビス（2 - エチルヘキシル）アンモニウムビス（2 - エチルヘキシル）ジチオカルバメート銀錯体担持フィルターによるヒ素の目視検出、日本分析化学会第63年会、2014年09月19日、広島大（広島）

牛木万里、高橋由紀子、同時状態分析を目指した2価鉄用ならびに3価鉄用ナノ薄膜試験紙の開発、日本化学会第95春季年会、2015年3月26日、日大（千葉）

若井良太、高橋由紀子、超音波スプレーでのミスト化を経た有機色素ナノ粒子作製法の開発、日本化学会第95春季年会、2015年3月27日、日大（千葉）

穴井健太、和久井喜人、高橋由紀子、ニッケルイオン用ナノ薄膜試験紙のニッケル合金接触テストへの試行、日本分析化学会第64年会、2015年9月8日、九大（福岡）

和久井喜人、マグネシウムとクエン酸によるヒ素の揮発及び目視検出への適用、日本分析化学会第64年会、2015年09月11日、九州大（福岡）

坂本丞・金井信和・高橋由紀子、イオン検出用ナノ薄膜試験紙の呈色時間 改善のための制御因子、第5回CSJフェスタ2015、2015年10月15日、船堀タワーホール(東京)

牛木万里・高橋由紀子、環境水中の二価鉄イオンの現場分析を目指したナノ薄膜試験紙の開発、日本化学会第96春季年会、2016年3月26日、同志社大（京田辺）

〔図書〕(計2件)

Yukiko Takahashi, Elsevier, Dye

Nanoparticle-Coated Test Strips for Detection of ppb- Level Ions in Water, Nanotechnology Applications for Clean Water 2<sup>nd</sup> Edition, 2014, pp.63-72  
DOI:10.1016/B978-1-4557-3116-9.00004-4

Yukiko Takahashi, Springer, Dye Nano particle or Nanocomposite-Coated Test Papers for Detection at Ppb Levels of Harmful Ions, Handbook of Nanoparticles, 2015年, pp.1-13  
DOI:10.1007/978-3-319-13188-7\_38-1

〔産業財産権〕  
出願状況（計1件）

名称：ヒ素検出方法及びヒ素検出紙  
発明者：和久井喜人  
権利者：独立行政法人産業技術総合研究所  
種類：特許  
番号：特願 2013-241979  
出願年月日：2013年11月22日  
国内外の別：国内

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://mst.nagaokaut.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 由紀子 (TAKAHASHI, Yukiko)  
長岡技術科学大学・物質材料工学専攻・准教授  
研究者番号：00399502

### (2) 研究分担者

和久井 喜人 (WAKUI, Yoshito)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・化学プロセス研究部門・主任研究員  
研究者番号：10358369