トリリオンセンシング～IoT時代の官能検査に向けて～

寺崎 正*

Trillion Sensing –Sensory Inspection in IoT Era–

Nao TERASAKI*

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所製造技術研究部門トリリオンセンサ研究グループ (〒841-0052 佐賀県鳥栖市宿町807-1)

* Trillion Sensing Group, Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (807-1 Shuku-machi, Tosu, Saga 841-0052)

1. はじめに

年間1兆個のセンサを使用する社会「Trillion Sensors Universe」が始動した¹⁾。これは現在のセンサ需要の100倍、世界70億人が年間約150個ずつ使う世界、である。提唱者 Janusz Bryzek 氏 (VP, Fairchild Semiconductor) によれば、非連続に増大したセンサは、2033年までに供給が需要を上回る Abundance (潤沢な世界) を生みだす (図1)、そして医療／ヘルスケアの向上 (Personal health), 飢えを解消する食糧生産 (Agricultural production), 清潔な飲用水・大気汚染防止 (Environmental monitoring), クリーンエネルギー (Green energy production) の確立などの【地球規模の課題の解決】に導くと言う。しかも単なる慈善事業でなく、センサ、ネットワーク、解析、セキュリティ、サービス分野を中心に、莫大な市場・ビジネスチャンスを生み (例えば2018年までの世界市場、センサシステム700億円、サービス事業2,900億円: \$100円換算)、世界中でこれまでに無い程の雇用を創出する (5,500万件の雇用)、といった構想である。

図1. トリリオンセンサの世界 (a) 年間に使用するセンサ数の推移予想 (TSensor Roadmap より)

そこで本稿では、この始動したのトリリオン (一兆個) センサについて、

—トリリオンセンサとは? (概要と利益)

—トリリオンセンサを拓く技術基盤, 活用先, パラダイムシフト

—世界の動向 (トリリオンセンササミット, 動向の紹介)

—当グループの取り組み (現場に潜む3つの見えない, の可視化技術)

について紹介する。

特に筆者はトリリオンセンサを「人間の無意識を活用するためのセンシング」と位置付けており、その意味で人間の感覚 (視覚・聴覚・味覚・嗅覚・触覚など) を用いる官能検査との接点を見出す場としたい。

2. IoT時代に、トリリオンセンサが拓く未来 (図2)

年間1兆個のセンサを使用し何をするのか。ネットでつなぐIoT (Internet of Things), IoE (Internet of Everything) を交えた観点から、トリリオンセンサが拓く未来について私見を交えて、下記概観した。

図2. トリリオンセンサ, IoT (ネットで繋がる) が拓く未来

(1) IoT：技術的には、自律と協調，そのコミュニケーション技術

具体的には、

- ・多様な情報（センシング、官能評価、機械情報、人間情報）による価値分布の可視化

(トリリオンセンサの役割)

- ・センシング→判断→行動→評価, のサイクルの自動化
- ・「達成したい価値」の設定に対する, 最適行動の自動提案 (AI)

これらが成熟することで、例えば

- ・ 中央プログラムに従う製造（3次）から、製品が自律プログラムにより考え行う個の主張が全体製造フローに最適に融合する、4次産業革命（14.0）²⁾へ変革を迎える。

(2) IoT：ヒトの役割

自動で判断、行動 (action)、最適化が起こる社会では、ヒトの役割はさらに重要となる。「どのような価値」に対して行動を最適化するかが鍵である。この最も重要な価値創造・認識 (新しい価値への挑戦) に人が集中できるようになる。その際、判断基準を無意識レベルから可視化し、納得の判断に繋げる最前線のセンシングこそ、トリリオンセンサの役割である。一方、価値に応じて提案された最適行動に対して、自らを律し正しく行動する力、実行力と共に、教育は欠かせない。決して個人の最適化で終わらず、社会全体を良い方向に促す協調力など、実は純粋な「人間力」が最大限に生きる時代こそ、IoT 時代である。

(3) IoT：人類が獲得するもの

①物理的自由

- ・ 時間的自由：センシング→価値の抽出→判断→行動のサイクル、に必要な膨大タクトタイムからの解放
- ・ 誤判断、無意識による損失、感情・体調・個人差による判断斑（人間的限界）からの解放。

②選択の自由

- ・ 納得の行く選択（判断に必要な情報を揃える，行動・努力が報われる世界）
- ・ 選択の自由：自動化・労働を選択できる自由（機会）

(4) トリリオンセンサの役割

トリリオンセンサの役割は、IoTという自動最適化と協調の中で、鍵となる価値の創造と認識のため、価値分布（判断の狙い所）の可視化にある。数十兆という非連続的に膨大量のセンサによる潤沢な情報は、人間が意識している情報に加え、意識さえしていないが本来は重要な価値を定性的に浮き彫りにする。この意味で、トリリオンセンサとは、官能検査の自動化を支えるセンシング技術とも言える。ただ最も重要なことは、膨大な情報から、判断に最も決定的な情報 (useful ONE data) を見出すことである。さらに、常に情報が収集される必要はなく、必要な時に情報が取れるセンサ環境があるだけでも意味がある。情報に基づ

いた納得のいく選択、無意識をも活用でき、リソースを最大限使い尽くせる世界を拓くセンシング網の整備、これこそがトリリオンセンサの役割、と考えている。

3. トリリオンセンサの活用先 (TApps) とセンサ技術、パラダイムシフト

図3にトリリオンセンサのロードマップ策定時に記された活用先(TApps)と、それを拓くセンサ技術基盤を記す¹⁾。縦軸には、医療／ヘルスケア、食糧生産、環境、エネルギーと世界的な課題が並ぶ。トリリオンセンサの動機は、上記を中心に無意識な損失や過剰対策も含めて2-4割の無駄となるリソースを、如何に有効に活かすか、である。(図4)³⁾。センシングの意味とは、“値の測定”ではなく、“目を付ける事”である。従来、【重要な部分(既に既知の価値)を選択・集中的に計測】し、行動の最適化に利用して来た。選択的に注力し、6割のリソース活用の成果を考慮すると、先ずは成功と言える。一方、人口増加・環境変化・高齢化・多様化を鑑みて無駄となるリソース(残りの3-4割)を活かす時代、【何が、どれ程? 重要か(価値の分布)も測る】、いわゆる「目の付け所」から検討する必要

図 3. トリリオンセンサの活用先 (TApps) と、それを拓くセンサ技術基盤 (TSensor Roadmap より)

図4. トリリオンセンサのパラダイムシフト。年間に必要なセンサ数・計測機数と市場規模より

が生じた。これがトリリオンセンサに向けたパラダイムシフトである。

トリリオンセンサを支えるセンサ基盤は数多くあるが、今後注力すべきものとして、3つに分類されて紹介されている（図3）¹⁾。

(1) 既に成熟している計測技術、例えばMEMS, Chip, 分光技術

社会インフラや医療など、人命が関わる場面においての使用が有望。

(2) 印刷センサ

今後のトリリオンセンサのブレイクスルーとして、超低価格化に大きな期待がかかる。

(3) 画像センシング

(1)(2)と異なり小型センサでなく、機能性物質や現象自体をプローブとする点が特徴。これにより、価値の空間的分布・遷り変り（時間的分布）を計測漏れのない面的な情報として直接可視化できる事が魅力である。恐らく、(1)(2)でも情報が収集された後、さまざまな情報を統合して価値の空間的・時間的分布に言及する。その意味では、画像センシングとは、トリリオンセンサの視点(Trillion Sensor Eyes)を先導的に理解するツールでもある。

4. 世界の動向1：トリリオンセンササミットの紹介^{1),4),5)}

トリリオンセンササミット(TSensors Summit)では、センサネットワーク、スマートファクトリー、スマートインフ

ラ、セキュリティなどの分野で先導するアメリカ（2013年3月、10月、2014年11月）をはじめ、日本（2014年2月、2015年12月、東京）、ドイツ（2014年9月ミュンヘン）で開催され、10年後2025年までのロードマップ策定に至った¹⁾。

なお、2015年サミット会議に目を向ければ、主要課題は下記の通りである^{4),5)}

- ①潤沢な健康：Abundant Health（7件）
- ②潤沢な食糧：Abundant Food（4件）
- ③潤沢なエネルギー：Abundant Energy（1件）
- ④潤沢な環境：Abundant Green Environment（7件）
- ⑤潤沢なセンサ技術：Abundant Sensor Technologies（8件）

2030年までに100兆個にまで膨れ上がるセンサは、健康、食糧生産、環境に関するモニタリング情報を駆使し、行動に必要な判断、最適化を加えながら、自動的に自立的に(Autonomies)機能する。無駄・無意識損失を減らすサイクルが機能する、ひいては潤沢な世界を達成する、という構想である。まさにIoT(Internet of Things)の最前線であるセンシングをトリリオンセンサが担う決意とともとれる講演が相次いだ。

2015年版サミットの最大公約数的な要素技術は、「化学センサ」、「光学センサ」、「ガスセンサ」、「フレキシブル／印刷デバイス」である。特にトレンドキーワードを1つ挙げれば、「化学センサ」であろう。2014年版サミットまでに、画像センサ、温度センサ、加速度センサ、ひずみセンサなど、MEMSを中心とした物理センサ（活動量を測るセ

ンシング)が多く紹介された点とは対照的である。「化学センサ(含む、ガスセンサ)」が特に挙げられたのは、健康、農業、環境と展開の裾野が広く、大量・安価での作製が見込める印刷デバイスが比較的得意な領域だからであろう。講演でも、ヒトバイタル情報源として「汗」、「涙」、「呼気」(非侵襲性モニタリング)が挙げられ、軍人・労働者の就業化における疲労・ストレスにスポットが当たった。技術的にはUC San DiegoやMC10社のタトゥー型センサ、東京大学のE-Skinが紹介された。これらは2014年版サミットで紹介された、大塚製薬とプロテウス社の「デジタル錠剤」⁶⁾と共に大変興味深い。農業・食糧生産では土壌のイオン、水分、pH、窒素、環境モニタリングとして水質、二酸化炭素など、窒素酸化物などへのユビキタス計測事例が紹介された。「光学センサ」では、必要な波長情報に限定、簡便化した光学センシングシステムを搭載したドローンを使用して、食糧生産・農地・環境のモニタリング、情報マッピングなどの実用例が紹介された。

「印刷デバイス」に関しては、安価、大面積への大きな期待が現れ、今後のトリリオンセンサを拓く重点技術であることが紹介された⁷⁾。具体的な技術として、さまざまな機能材料の導入によりセンサの適応適用範囲を広げる事例、省電力デバイスを鑑みたナノ配線化への試みが紹介された。

一方で、地震センサ・モニタリングなど、人命に関わるセンサには高信頼性が第一であり、現時点ではMEMSセンサを使う旨の講演があり、印刷デバイスへの期待が多い中で、現在の実力を示唆する大変印象的な講演もあった。

5. 世界の動向2:印刷・生分解センサに向けて

挑戦課題は、「コスト」、「省電力・エネルギーハーベスト」である。例えば、消費電力50 nW以下のガスセンサ、超低消費電力(19 μ W)集積チップ、E-Skinでの給電(動き:ひずみ・振動など、熱電:体温)の講演は、大変白熱した。「コスト」に関して、トリリオンセンサの提唱者Bryzek氏より実現すべきコスト、可能性、拓ける用途に関して言及がある(図5)。これを基に、安価・大面積が可能な印刷センサデバイスに期待が集中し(図5の×の部分)、コンセンサスが一段と高まった。実際、トリリオンセンサ世界(100倍量のセンサ社会)を現有の資金投入・環境要求の中で達

価格帯(円)	従来技術	拓ける用途例
100	○	社会インフラ (ソーシャル・デバイス)
10	○	衣類や靴、歯ブラシ、ペット(個人)
0.1	×	食料品(新鮮さ検知) 錠剤(物流)
0.01	×	1つの種・生育の管理 (農業・生産)

図5. トリリオンセンサで実現すべきコスト、現状、拓ける用途の見通し

成するには、少なくともコスト、環境インパクトとも単純計算で1%以下にする必要がある。世界中でも、印刷センサ、生分解センサの研究が、大学をも巻き込み沸騰している^{6)~15)}。

例えば、Rogerら(イリノイ大学)は、生体溶解(bio-soluble)材料であるマグネシウム(Mg)、酸化マグネシウム(MgO)、賦活シリコン(Si)を、半導体やMEMSで使われる活性ガスエッチング、電子ビームデポジション、転写など微細加工技術を駆使して、生体適合性のある絹にトランジスタやダイオード、インダクタ、キャパシタ、レジスタを形成し、駆動に成功した(図6a)⁹⁾。さらに、生分解性ポリマーPLGA上にCMOS回路を転写する作製技術の向上を進める一方で(図6b)¹⁰⁾、実際に生分解性の温度・圧力センサを用いてラットの脳内環境計測に成功するなど、実用を見据えた研究も進む(図6c)¹¹⁾。これらは、アメリカ国防高等研究計画局(DARPA)プロジェクトとして行われ、感染症が懸念される体内残留型センサの代替、戦場での兵士へのインプラント型医療処置への展開が見込まれる。

印刷センサに関しては、世界中で大学・企業を含め、多くの事例がある。その中でもJ. Wang(カリフォルニア大学サンディエゴ校)らの例は、従来、温度、圧力などの物理センサが主流であった印刷センサに、化学センサ(電気化学センサ)の観点を導入した点で、興味深い^{12),13)}。グルコースやラクトンなど汗などに含まれる代謝部資質を、タトゥー型印刷センサに修飾した酵素で電位信号に変換し、電気化学的に読み出す事に成功している(図7a)¹²⁾。また皮膚に貼る事を考慮し、曲げ・伸び可能なセンサデバイスなど、実用化研究へも取り組み、実際に運動・食事など生活での計測を開始している(図7b)¹³⁾。

この状況下、筆者もトリリオンセンサの第一人者Albert. P. Pisano教授(学科長、カリフォルニア大学サンディエゴ校)と共同で生分解性・印刷を両立するセンサの開発を行い、実際に生分解性フィルム(膜厚10–200 μ m)の上に印

図6. 生分解センサデバイスの動向(J. A. Rogerらの例より)

図 7. 印刷センサデバイスの動向 (J. Wang らの例より)

図 8. 生分解印刷センサの開発

刷細線を描くことに成功した (図 8)¹⁴⁾。本技術は、マイクロ流路をテンプレート¹⁵⁾として、そこに詰めたナノインク (図は、銀ナノ粒子：直径約 20 nm) を、被印刷物 (図は、ポリ乳酸 PLA フィルム) に転写することで、微小細線を描画するものである。原理的には複雑形状、例えば錠剤などの上にも細線描画が可能と期待している。

6. 現場の見えない価値を可視化する画像センシング (図 9)

当研究グループでは、製造の現場に潜む価値の可視化を合言葉に、3つの見えないに対する可視化技術の開発を行っている。

1つは、関係業界が長年見えないと諦めていた【潜傷】¹⁶⁾や【静電気】¹⁷⁾の可視化技術である (図 9a)。潜傷とは、医療デバイスでも多く使われている半導体 (Si)、スマートフォン (高機能ガラス)、パワーデバイス (SiC) の超精密研磨過程 (例えば Chemical Mechanical Polishing – 化学機械研磨) において原理的に発生する表面表層下のマイクロクラックである。潜っている為に表面観察では見えず、光散乱を使う一般的な検査法でも潜傷とゴミ・パーティクル・配線などの他の散乱体との区別が難しいため、潜傷検出は困難とされていた。それに対して、われわれは光散乱検出法の中で、試料に物理的、または非接触的に僅かな応力を与えることで、潜傷を選択検出することに成功している¹⁶⁾。現在、潜傷の選択検出率は、8-9割と高い。さらに、潜傷が

(a) 本当に見えない (業界の諦め)

(b) 見えている筈 (経験/CAEに対して)

(c) 暗黙知

図 9. 現場の見えないを診る、可視化・画像センシング

実際はどの過程で出来るのか、研磨過程のプロセスファクターに加え、入荷、搬送、その他の行程も含め、時間的価値としての活用も重要である。業種によっては、無意識損失をなくし、数秒単位の改善を行うだけでも、莫大な利益となる。本例は、可視化計測×IoT×AIが、潜傷の様な負の価値を、ビジネスチャンスに変え得ることを示している。下段に示す【静電気】も製造現場で歩留りを著しく低下させるばかりか、爆発などの原因にもなるが、可視化は

困難とされてきた。実際、静電気対策グッズの市場は静電気計測市場より大きいことは、この困難さの表れと言える。さらに勘と経験で静電気対策は行うものの、評価が難しく有効な対策と安心できない。これに対して、当グループでは、走査式の収束超音波を対象物に照射し、静電気キャリアの振動により発生する電界を計測することで、静電気分布の可視化に成功している¹⁷⁾。製品検査技術に加え、製造現場の静電気計測、さらに除去・効率的利用への提案をも見据えて、取り組みを進めている。

次の見えないは、【応力・ひずみ分布】である。応力・ひずみ分布は目では見えない範疇でもあるが、寧ろ本件では、見えている筈の情報への挑戦と認識している。最近、応力・ひずみ分布は、シミュレーションを通してグラフィカルに可視化できる。もちろん極めて有効だが、疲労・動的な試験の場合、現実と異なることも多い。軽量化が進む航空機・自動車などのマルチマテリアル構想の中、次々と開発される先端材料・複合材料（データベースが十分に多くないもの）では尚更である。それに対して、力学的な刺激により発光する独自の応力発光センサ¹⁸⁾を使う事で、破壊の予兆である応力・ひずみ集中（図9b）、目視困難なマイクロクラック^{19),20)}、内部き裂・欠陥を²¹⁾、発光を介して可視化できる。実際、トリリオンセンサの応用先でもある橋梁・道路・建物のインフラ診断に対して、既に適応実験実績がある。例えば、供用後50年を超える橋梁のき裂開口変位や、ストップホールに対する応力集中、新たなき裂進展の検出に成功している（図9b下段）。なお、橋梁・構造物など社会インフラは、官能検査の最たる例である。打音検査によるわれ・浮きの検査、目視検査による0.2mm以上のひび割れ全数記録など、クラックゲージなどはあるが、音や見た目から個人の経験と力量において見極めを行う。一方で応力発光も、破壊予兆を発光で見える様にする点で、広義の官能検査である。応力発光パターンから、破壊予知のレベルを判断し、予測につなげる点は、官能検査と共通で重要である。

3つめの見えないは、暗黙知、の可視化である。暗黙知は、現場では皆知る知識だが、体系化されておらず、対策・判断に活かされていない知識の事である。例えば、めっきプロセスの現場には、休み明けには不良品が多い、一価銅が関係しているのでは、などの暗黙知が存在していた。それに対して、われわれは独自に確立した一価銅選択滴定試薬によるめっき液分析法によりプロセス中の状況を可視化することで、上記の暗黙知が正しい事を証明し、プロセス最適化に寄与した（図9c）^{22),23)}。

上記の技術は、直接的な『価値分布の可視化』であり、トリリオンセンサの役割そのものである。これは、重要な点のみならず、これまでに気付いていなかった価値も含めて、無意識の活用につながる。一方、IoTでネットにつながる事で、他のセンシング情報、不具合情報と紐づけて、製造

を見守る製造網、製造プロセス管理、シミュレーションとの紐づけによるCAE（コンピューター支援設計工学）設計の高度化が、高速に、かつ自動的に進むことも期待できる。見えた情報を、納得のいく判断、無意識損失の無い、潤沢な社会に繋げていく取り組みの点で、IoT時代のトリリオンセンサと官能検査は共通の課題を持つと言える。

7. 本稿のまとめ

本稿は、トリリオンセンサの内容と利益、センサ技術基盤と活用先、直接的な可視化技術（当グループの取り組み）と官能検査の共通項について紹介した。一方で、「ビジネスモデル」、「セキュリティ」、「標準化」は今後を占う意味で、特に注視すべきである。特に「ビジネスモデル」は、超低価格のセンサ「材料・製造業」と、最も価値を生む「情報業」が両立し、WinWinになり得るか、が課題である。また「セキュリティ」も、他者からの個人・生体情報への無断アクセス、自動走行車のハッキングなど、単なる情報のみならず人命に関わる領域をインターネットに繋ぐ事に抵抗を感じる声も多い。「世界共通の問題解決」、「拓ける桁違いのメリット」、「新たなビジネスチャンス」、を信じつつ大きなイニシアチブが始動した、そんな期待感が牽引し要素技術開発が盛んになりつつあるトリリオンセンサであるが、一定の安心を得るための具体的な課題も見えつつある、という新たなフェーズに移っている。

(2016.8.28- 受理)

文 献

- 1) J. Bryzek: "Roadmap for the Trillion Sensor Universe,"
現状、ロードマップ、市場規模、課題、展開などの基本的データは、「trillion sensors roadmap」で検索すると、下記ファイルで確認できる。
・ Roadmap - TSensors Summit（公式サイト）
・ Roadmap for the Trillion Sensor Universe
- 2) “まるわかりインダストリー 4.0 第4次産業革命 日経BPムック,” 日経BP社, 2015
- 3) 下記参考資料(WEB)より、数値を抽出して著者が整理(2014年現在)。
矢野経済研究所: <http://www.yano.co.jp/>
経済産業相・統計資料: <http://www.meti.go.jp/statistics/>
国土交通省・統計資料: <http://www.mlit.go.jp/>
- 4) 寺崎 正: “光産業技術振興協会 国際会議速報,” H27-No.37, 2015
- 5) TSensor Summit2015 詳細アジェンダは下記URL参照:
<http://www.tsensorsummit.org/eventinfo.html>
- 6) 2014年トリリオンセンササミット東京にて紹介された。砂粒ほどの大きさセンサを服用する薬に混ぜ、胃に到達した段階で化学給電によりセンサが信号発信、2010年: 欧州連合にて承認、その後、アメリカ食品医薬品局(FDA)が体内

服用型センサを医療機器として認可。

- 7) 三宅常之: “IoT に印刷の力,” 日経エレクトロニクス, 2 月号, p. 25, 2016
- 8) レビューとして L. S. Naira, and C. T. Laurencin: “Biodegradable polymers as biomaterials,” *Prog. Polym., Sci.*, Vol. **32**, p. 762, 2007
- 9) M. Peplow: “Biodegradable battery could melt inside the body,” *Nature News*, 2014, doi:10.1038/nature.2014.14919
- 10) S. W. Hwang, J. A. Rogers, et al.: “A Physically Transient Form of Silicon Electronics,” *Science.*, Vol. **337**, p. 1640, 2012
- 11) J. A. Rogers, et al.: “Triggered Transience of Metastable Poly (phthalaldehyde) for Transient Electronics,” *Adv. Mater.*, Vol. **26**, p. 3905, 2014
- 12) S. W. Hwang, J. A. Rogers, et al.: “Bioresorbable silicon electronic sensors for the brain,” *Nature.*, Vol. **530**, p. 71, 2016
- 13) A. J. Bandodkar, W. Z. Jia, C. Yardımcı, X. Wang, J. Ramirez, and J. Wang: “Tattoo-Based Noninvasive Glucose Monitoring: A Proof-of-Concept Study,” *Anal. Chem.*, Vol. **87**, p. 394, 2015
- 14) A. J. Bandodkar, R. N. Flores, W. Z. Jia, and J. Wang: “All-Printed Stretchable Electrochemical Devices,” *Adv. Mater.*, Vol. **27**, p. 3060, 2015
- 15) “(Hot News) 印刷で 1 兆個センサを安く, 医療狙い生分解性基板に配線,” 日経エレクトロニクス, 2015 年 11 月号, pp. 22–23
- 16) M. T. Demko, J. C. Cheng, and A. P. Pisano: “Rigid, Vapor-Permeable Poly (4-methyl-2-pentyne) Templates for High Resolution Patterning of Nanoparticles and Polymers,” *ACS Nano*, Vol. **6**, p. 6890, 2012
- 17) Y. Sakata, K. Sakai, and K. Nonaka: “Stress-induced light scattering method for the detection of latent flaws on fine polished glass substrates,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. **85**, p. 083303-1, 2014
- 18) 菊永和也, 星 貴之, 山下博史, 江頭正浩, 野中一洋: “集束超音波と誘起電界を用いた非近接型静電気計測技術の開発,” *J. Inst. Electrostat. Jpn. 静電気学会誌*, Vol. **38**, p. 101, 2014
- 19) 徐 超男, 上野直広, 寺崎 正, 山田浩志: “応力発光による構造体診断技術,” NTS, 2012
- 20) N. Terasaki and C. N. Xu: “Historical-log recording system for crack opening and growth based on mechanoluminescent flexible sensor,” *Sensors Journal IEEE*, Vol. **13**, p. 3999, 2013
- 21) N. Terasaki, C. N. Xu, C. Li, L. Zhang, Y. Sakata, N. Ueno, K. Yasuda, and L. Ichinose: “Fatigue crack detection of steel truss bridge by using mechanoluminescent sensor,” *Proceedings of The 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Vol. **6**, p. 2542, 2012
- 22) Y. Fujio, C. N. Xu, Y. Terasawa, Y. Sakata, J. Yamabe, N. Ueno, N. Terasaki, A. Yoshida, S. Watanabe, and Y. Murakami: “Sheet sensor using $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$ mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. **41**, p. 1333, 2016
- 23) 古賀淑哲ら: “硫酸銅電気めっき液中の一価銅の分析,” 表面技術, Vol. **63**, p. 52, 2012
- 23) T. Koga, C. Hirakawa, Y. Sakata, H. Noma, K. Nonaka, and N. Terasaki: “Control of Accumulation of Cu(I) in Copper Sulfate Electroplating Plating Solution,” *ECS Transactions*, accepted.

著者紹介

寺崎 正 (てらさき なお)
2003 年 3 月 九州大学工学府 博士 (工学) 取得, 2003 年 4 月 産業技術総合研究所 光技術研究部門 特別研究員, 2005 年 3 月 同所 実環境計測診断研究ラボ 研究員, 2011 年 主任研究員, 2013 年 10 月 同所 計測・計量標準分野研究企画室 企画主幹 2014 年 Jacobs, school of Engineering, UC San Diego, 客員研究員, 2015 年 同所 製造技術研究部門トリリオンセンサ研究グループ長 (現職)。日本化学会講演奨励賞 (2006 年), ソノケミストリー奨励賞 (2009 年), 土木学会優秀講演者 (2011 年), 他 4 件受賞。トリリオンセンサを拓く技術, 特に高感度・高密度バイオ光受容素子 (FET), 応力発光, 可視化技術 (静電気, 潜傷, 暗黙知), 生分解トリリオンセンサ, 3D センサデバイス印刷技術などの研究に従事。