

スマートフォンを用いた SQRC リーダシステムの開発：nearly invisible な SQRC のセラミックスへの焼き付けと職務権限に応じた秘密情報の表示

藤川真樹¹ 上野唯¹ 大澤大二² 西村英伍³ 五味宏太郎⁴
岩崎秀樹⁴ 原田敏明⁵ 安達直己⁵

概要：本論文では、セラミックス製品の表面に形成する nearly invisible な 2次元コードの形成方法と、当該コードから文字情報（公開情報と暗号化された秘密情報）を抽出する、スマートフォンと紫外線光源を用いた 2次元コードリーダーシステムを紹介する。Nearly invisible な 2次元コードは、セラミックス製品の意匠を可能な限り損なわずに文字情報を製品に持たせるために著者らが開発したものであり、当該コードは紫外線が照射されている間、青白い光を発光するため肉眼での視認が容易となる。リーダーシステムは、カメラ機能と 2次元コード認識アルゴリズムを用いて文字情報を抽出するが、デジタル鍵にアクセスできるスマートフォンのみが暗号化された秘密情報を復号できる。実験の結果、nearly invisible な 2次元コードが形成できること、およびリーダーシステムが文字情報を再現性をもって抽出できることがわかった。

1. はじめに

1.1 背景と目的

2次元コードの普及により、最近では当該コードが付された製品（家電製品、食料品、工具など）を目にすることが珍しくなくなってきた。消費者は、2次元コードリーダーアプリがインストールされたスマートフォンを用いることで、製造者が公開している製品に関する情報（製造者名、製品名、品質管理情報など）に簡単にアクセスできるため、製造業者と製品に対する信頼と安心を深めることができる。一方、製造業者は情報公開によって消費者からの信頼や製品に対する意見を得ることができる。

一般的に、2次元コードは明瞭に視認されることが重要であるため、当該コードは製品の表面に明示的に付される。一方、当該コードを明示的に付すことは製品の意匠を損なうおそれが大きいため、意匠を重視する製品（たとえばセラミックス製品）には付されない。しかしながら、このような製品に対して意匠を大きく損なわない程度の nearly invisible な 2次元コードを付し、消費者が製品に関する情報にアクセスしたいときにだけ当該コードが明瞭に視認可能になるならば、前段で述べたような消費者と製造業者間における win-win な関係が構築できるものと期待される。

上記のような特徴をもつ 2次元コードは、市場に受け入れられる可能性がある。この見解は、著者らが 2018 年に名古屋で開催された見本市に会場したマーチャントに対する聞き取り調査（n=109）から導き出したものである。49 のマーチャントが上記の特徴をもつ 2次元コードに好意的で

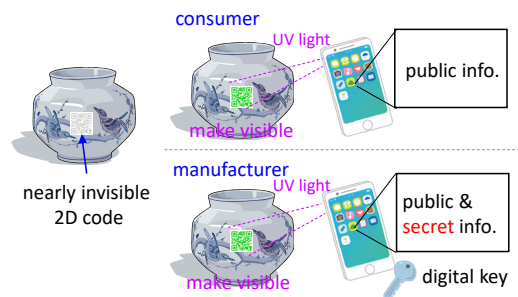


Fig. 1. 2次元コードとリーダーシステムのイメージ。紫外線が照射されている間、SQRC は visible となる。

あり「2次元コードが invisible だと製品の意匠は損なわれないが、消費者は製品に関する情報を見たいときに 2次元コードをすぐに見つけられない。一方、nearly invisible であれば製品の意匠は大きく損なわれず、消費者は 2次元コードを見つけやすい」という消費者目線の意見が寄せられた。

一方、これとは別に、マーチャントからは真正品のコピーが流通しているという現状について、技術的な対策を求める意見が寄せられた。具体的には、製品の真正性に関する消費者やマーチャントからの問い合わせに対して、製造業者が製品を検証できる技術的な仕組みの整備である。この場合、製造業者側での真正性の検証には迅速さが要求されるため、製品と検証方法を記述したマニュアルとを突合せるといった煩雑な作業を省略できることが望ましい。

そこで本論文では、意匠が重視される製品の 1 つとしてセラミックス製品に注目し、この表面に公開情報と暗号化された秘密情報を格納できるセキュアな 2次元コード (SQRC [1]) を nearly invisible にして焼きつける方法と、焼き付けられた SQRC を明瞭化しつつ文字情報（公開情報と秘密情報）を抽出できるスマートフォンベースのリーダーシステムを提案する (Fig. 1 にイメージを示す)。製品に関する情報を公開情報、具体的な真正性の検証方法を秘密情報とすることで、製造業者のみが製品ごとの秘密情報をス

1 工学院大学
Kogakuin University
2 株式会社高根シルク
Takane Silk Co., Ltd.
3 サイエンスパーク株式会社
Science Park Corporation
4 株式会社山加商店
Yamaka Shoten Ltd.
5 岐阜県セラミックス研究所
Gifu Prefectural Ceramics Research Institute

スマートフォンを使って読むことを可能にする（製品と公開情報・秘密情報は SQRC によって紐づいているため、製造業者側では前段で述べた突合作業を省略できる）。一方、SQRC の公開情報は一般的な QR コードリーダーを使って抽出できるため、消費者は当該リーダーを使って製品に関する情報を得ることができる。

著者らは、以下の流れで論述を展開する。2 章では、nearly invisible な SQRC をセラミックス製品の表面に焼き付ける方法と、スマートフォンと紫外線光源を用いた SQRC 読み取りシステムについて述べる。3 章では、当該システムを用いて、文字情報（公開情報と秘密情報）の抽出に再現性が見られる撮影条件を探索する。4 章で考察を述べ、5 章で本論文を総括する。

1.2 前提条件

- (1) 著者らは、セラミックス製品に焼き付ける SQRC のサイズを 1.5cm 四方とする。これは、落款（日本において製造業者を識別できるトレードマークの一種）の平均的なサイズ（1.5cm 四方）を参考にした。
- (2) SQRC の誤り訂正レベルは、一般的に使用されているレベル M（約 15%）を使用する[2]。一方、文字モードは英数字モードを使用する。これは、公開情報と秘密情報は http または https によりアクセス可能にしたいという著者らの思惑があり、文字モードのなかでは URL を表現しやすいからである。
- (3) SQRC に格納する秘密情報は、公開情報よりも多いものとする。これは、Table.1 に示すように製造業者側において職位が異なる複数の検証者の存在を想定しており、検証者ごとに異なる検証方法を秘密情報とするためである。たとえば、製品 n1 について簡易的な検証を行うスタッフは /n1/sec1/index.html のみが閲覧でき、詳細な検証を行う課長はすべての index.html を閲覧できる。検証方法の例として、たとえば /n1/sec1/index.html には「観測点 A に波長 B の紫外線を照射したときに A が蛍光することを確認する」というメッセージの記載が考えられる。なお、当該情報を公開しない理由は、当該情報をもとにして精巧な偽造品が作成されることを防ぐためである。

Table 1. 職位に応じた検証方法を記載した URL (表ではドメイン (例 : <https://www.abc.com/>) を省略している)。

職位	検証方法
スタッフ	/n1/sec1/index.html
主任	/n1/sec1/index.html
	/n1/sec2/index.html
課長	/n1/sec1/index.html
	/n1/sec2/index.html
	/n1/sec3/index.html

- (4) nearly invisible な SQRC を明瞭化するために、消費者と検証者は紫外線ライトを所有する（当該ライトは安価かつ容易に入手可能であるが、製造業者はペン型の紫外線ライトを製品と同封することで、消費者は製品に関する情報にアクセスしやすくなる）。
- (5) SQRC の読み取りについて、消費者は株式会社デンソーウェーブから無償で配布されている QR コードリーダーアプリを使用するが、検証者は著者らが開発した SQRC リーダーアプリを使用する。いずれのアプリも、同社によって開発された QR コード/SQRC 認識アルゴリズムを持つ。本論文では、SQRC リーダーアプリの性能を検証する。

2. SQRC の形成

セラミックス製品に図柄を焼き付ける方法として印刷技術（スクリーン印刷と転写紙）が用いられる。著者らは、SQRC の焼き付けに当該技術を用いる。本章では SQRC の生成、公開情報と秘密情報の構成、秘密情報のアクセス制御、SQRC の印刷および焼き付けについて述べる。

2.1 SQRC の生成

SQRC は、QR コードとともに株式会社デンソーウェーブによって開発された 2 次元コードである。Fig. 2 に示すように、外観は QR コードと同じである。QR コードには公開情報のみが格納できるのに対して、SQRC には公開情報と暗号化された秘密情報が格納できる。復号は、スマートフォンまたはクラウド環境で実行できるが、いずれの場合にもデジタル鍵が必要となる。このため、デジタル鍵にアクセスできないスマートフォンは秘密情報を閲覧できない。

SQRC に格納できる公開情報と暗号化された秘密情報の量は、(1) 誤り訂正レベル (L: 約 7%, M: 約 15%, Q: 約 25%, H: 約 30%), (2) 文字モード (数字, 英数字, バイナリ, 漢字), (3) バージョン (セルと呼ばれる四角い黒白の数のこと。ver.1 (21×21 セル) ~40 (177×177 セル)) の、3 つの組み合わせに依存する。一般的に、文字情報はセルのサイズが大きいほど (バージョンの数が小さいほど) 読み取りやすくなる。



Fig. 2. SQRC の例 (バージョン 2)。公開情報 22 文字, 暗号化された秘密情報 6 文字が含まれる。



Fig. 3. SQRC の例 (バージョン 3)。公開情報 22 文字, 暗号化された秘密情報 29 文字が含まれる。

著者らは 1.5cm 四方に収まる SQRC について、前提条件（誤り訂正レベル、文字モード）をもとに読み取りやすかつ公開情報と暗号化された秘密情報が可能な限り多く格納できるバージョンを探索した。その結果、バージョン 3 が最も多くの文字情報を格納できることが分かった (Fig. 3 にバージョン 3 の SQRC の例を示す)。バージョンを増やすことでより多くの文字情報を格納できるが、セルのサイズが Fig. 3 よりも小さくなり文字情報が読み取りにくくなるのが懸念される（カメラの分解能によるが、一般的にセルのサイズが小さいと文字情報が抽出しにくくなる）。また、印刷された SQRC の読み取り（反射光の観測）とは異なり、製品に焼き付ける SQRC は発光するため、カメラは発光を観測することになる（つまり、カメラの分解能が低い場合、個々のセルを明瞭に捉えられない可能性がある）。今回の実験は、著者らのアイデアの実現可能性を検証することが目的であるためバージョン 3 を採用したが、今後はカメラの分解能とセルのサイズとの相関関係について調査を行う予定である。

2.2 公開情報と秘密情報の構成

Table.2 に、公開情報と秘密情報の URL の例と対象者を示す（厳密にいうと、各ディレクトリにはコンテンツとして index.html が含まれるが、web クライアントはディレクトリを指定するだけで web サーバから index.html を受領できるため、SQRC に格納する情報はディレクトリだけで十分とする）。たとえば、消費者とすべての検証者は、製品 n1 の公開情報として <https://www.abc123.com/n1> が得られるため、これをブラウザに入力することで当該ディレクトリ内にあるコンテンツ index.html を閲覧できる。一方、課長は公開情報とともに Level 1 から 3 の秘密情報 /sec1、/sec2、/sec3 が得られるため、公開情報とこれらのディレクトリを組み合わせることで同様に 3 つの検証方法を閲覧できる。

秘密情報の暗号化と復号はデジタル鍵を用いて行うが、暗号化・復号すべき秘密情報ごとにデジタル鍵が異なる。これは、上述したように秘密情報がレベル分けされており、上位の検証者ほど多くの秘密情報が得られるようにするためである。このコンセプトを実現するために、秘密情報は Fig. 4 に示すように入れ子構造にし、3 種類のデジタル鍵で暗号化する。たとえば、すべての検証者が閲覧できる秘密情報を得るためには 1 つのデジタル鍵を使用し、課長のみが閲覧できる秘密情報を得るためには 3 つのデジタル鍵を使用する。なお、これらの鍵は SQRC ごとに異なるため、「1 つの鍵の解読によって、他の SQRC の秘密情報が芋づる式に漏洩する」というリスクを下げるができる。

2.3 秘密情報のアクセス制御

Fig. 5 にネットワーク構成を示す。登場するエンティティは、スマートフォン、SQRC リーダアプリ、陶磁器 ID 管理サーバ（運営：著者ら）、SQRC 管理サーバ（運営：株式

会社デンソーウェーブ）である。SQRC リーダアプリには、起動時にユーザに ID とパスワードの入力を求める機能がある。

はじめに、ユーザの本人確認について説明する (Fig. 6 参照)。アプリは、ユーザが入力した ID とパスワードを陶磁器 ID 管理サーバに送信する。当該サーバにはユーザとそれに対応する ID とパスワードが保管されているため、ID とパスワードが正しい場合、秘密情報を表示できるようにするためにアプリをアクティベートする。

つぎに、秘密情報のアクセス制御について説明する (Fig. 7 参照)。SQRC から文字情報を抽出したアプリは、Level 1 の秘密情報の復号を SQRC 管理サーバに要求する。当該サ

Table 2. URL と対象者の関係。

URLs	対象者
[公開情報] https://www.abc123.com/n1	消費者とすべての検証者
[秘密情報 Level 1] /sec1	すべての検証者
[秘密情報 Level 2] /sec2	主任と課長
[秘密情報 Level 3] /sec3	課長

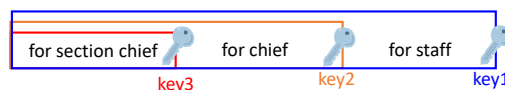


Fig. 4. 暗号化された秘密情報とデジタル鍵の関係

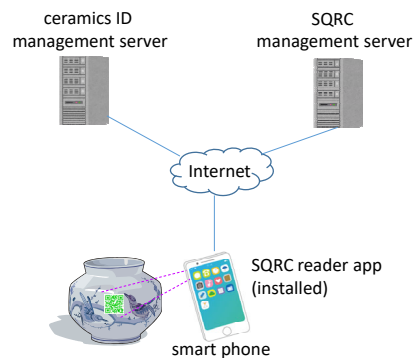


Fig. 5. ネットワーク構成とエンティティ

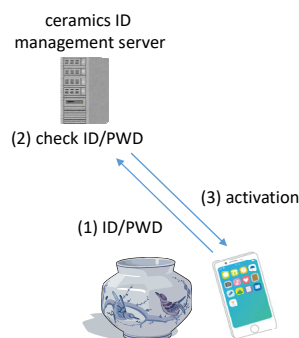


Fig. 6. ユーザ認証とアクティベーション

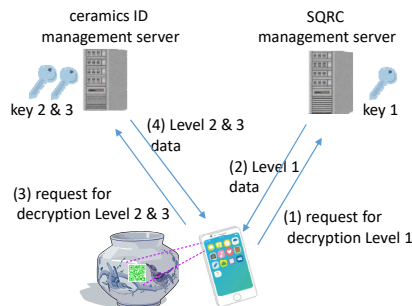


Fig. 7. 秘密情報のアクセス制御

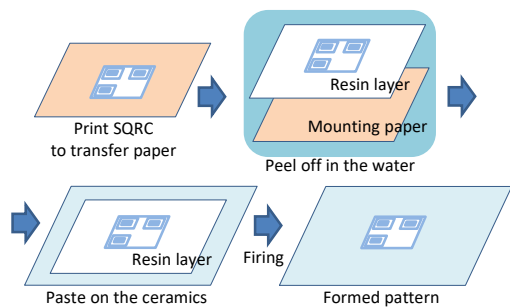


Fig. 8. SQRC の印刷と焼き付け

ーバは key 1 を使用して復号し、「Level 1 の秘密情報」と「暗号化された Level 2 と 3 の秘密情報」をアプリに送信する。上記のデータを受信したアプリは、「暗号化された Level 2 と 3 の秘密情報」の復号を陶磁器管理サーバに要求する。当該サーバは、ID に対応する秘密情報のレベルを参照し、これに応じた key を使って暗号化された秘密情報を復号し、アプリに送信する。アプリは、復号された秘密情報をディスプレイ上に表示する。

key 1 とそれ以外の鍵の管理が 2 つのサーバに分かれている理由は、本来、SQRC には備わっていない機能である「秘密情報のレベル分け」を実現させたかったからである。SQRC には 1 つの公開情報と 1 つの秘密情報を格納できるが、複数の秘密情報は格納できない。このため、Fig. 4 で示したように「key 2 と 3 で暗号化された秘密情報 (Level 2 と 3)」と「Level 1 の秘密情報」を連結し、key 1 で暗号化することにした。これにより、レベル分けされた 3 つの秘密情報の格納が可能になる。

上述したように、現時点では 2 つのサーバを用いて本人認証とアクセス制御を行うが、処理効率を高めるために将来的には 1 つのサーバで上記の処理を行うことを検討したい。

2.4 SQRC の印刷と焼き付け

公開情報と秘密情報が格納された SQRC は、スクリーン印刷技術を用いて転写紙上に印刷する。Fig. 8 に SQRC の印刷と製品への焼き付け方法を示す。はじめに、スキージオイル、ガラスフリット、顔料（紫外線を受光すると蛍光を示すもの）を使って絵の具（ペースト）を作製し、これ

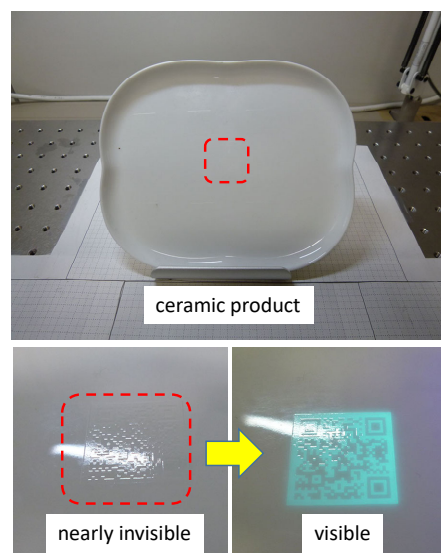


Fig. 9. SQRC が焼き付けられた製品

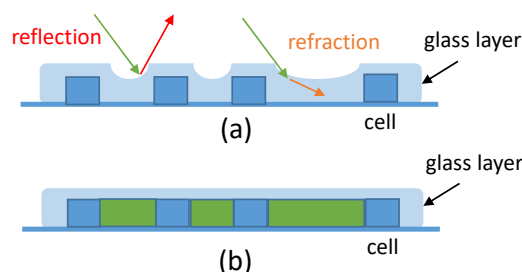


Fig. 10. 逆版印刷によるギャップの解消.

を用いて SQRC を転写紙に印刷する。つぎに、転写紙を水に浸して透明な樹脂層（表面に SQRC が印刷されている層）を剥離させ、これを 1 回目の焼成（glaze firing：製品に塗布された釉薬をガラス化させるプロセス）が終わった製品に貼り付けて乾燥させる。つぎに、製品に対して 2 回目の焼成（decoration firing：顔料を製品に溶着させるプロセス）を行う。これにより、炉内では転写紙の樹脂層とスキージオイルが気化し、ガラスフリットと顔料が残る。炉内で熔融したガラスフリットが顔料を製品の表面に定着させるとともにガラス層を形成するため nearly invisible な SQRC が形成される。

Fig. 9 に SQRC が焼き付けられた製品と、紫外線の照射によって明瞭化された SQRC を示す。nearly invisible な SQRC が明瞭に視認できることが分かる。なお、SQRC は透明なガラス層（ガラスフリット）でコーティングされるため、タワシなどで表面をこすっても破損することはない。nearly invisible な SQRC は、一般的なスクリーン印刷では実現できない。なぜならば、絵の具が付着する部分と付着しない部分が発生するため、Fig. 10 (a)に示すような凹凸が生じるからである。青色の部分（SQRC のセル部分）は顔料とガラスフリットであり、水色の部分はガラスフリットである。凹凸は、光の反射や屈折によってセルのエッジを

強調する (SQRC の存在が明瞭に視認できる)。

この凹凸をなくすために、著者らはセルを印刷する版 (正版) とは逆の版 (逆版) を作成し、Fig. 10 (b) に示すように 2 つの版を使って、転写紙に対して均一に絵の具が付着するようにした。逆版用の絵の具 (緑色の部分) として、著者らは顔料の代わりにアルミン酸ストロンチウムを使用した。当該材料を使用した理由は、青色の部分と屈折率や色合いを同じにするためである。

今回の実験では、白色の磁器を使用した。これは、ガラスフリット、顔料、アルミン酸ストロンチウムによって形成された SQRC が無色透明であることを目視で確認しやすくするためである。Fig. 9 で示したように SQRC は無色透明であったことから、これらの材料はセラミックス製品がもつベースの色に影響を与えにくいと考えられる。

3. 撮影条件の探索

本章では、製品に焼き付けられた SQRC について文字情報 (公開情報と秘密情報) の抽出に再現性が見られる撮影条件を探索する。再現性とは、ある特定の撮影条件のもとでは、文字情報の抽出が必ず成功することである。製品の取扱説明書を通して当該条件を消費者や検証者に示すことによって、彼らは所望の情報を得やすくなる。

3.1 実験システム

実験システムを Fig. 11 に示す。システムはスマートフォン、紫外線光源、固定治具、デスクライトと、これらを覆う暗室から構成される。スマートフォンには SQRC リーダアプリがインストールされている。紫外線光源 (LED385-SPT) は顔料を明るく発光させる 385nm の紫外線を照射でき、ボリュームツマミによって光量を無段階に調節できる。固定治具はスマートフォンとセラミックス製品 (白色の磁器皿) の角度を調節できる。デスクライト (Z-N1100W) は光量と色温度を調整できる (光量は無段階調節が可能、色温度は 3000K、4000K、5000K、6200K の 4 段階から選択可能)。スマートフォンには iPhone 8 (iOS11.3) と arrows M04 (Android7.1) を使用し、無線 LAN により Internet に接続する。

上記のスマートフォンを選定した理由は、それぞれの F 値が近いためである。iPhone 8 と arrows M04 の F 値はそれぞれ 1.8 と 2.0 である。F 値とはカメラに取り込まれる光量を数値化したものであり、この値が小さいほど光量は大きくなる。異なる OS を持つスマートフォンで SQRC の発光をほぼ同じ条件で撮影するために、著者らは当該値に近い 2 機種を選定した。

Fig. 12 に、アプリの画面遷移を示す。(1)はアプリのアイコンを示す (赤破線内を参照)。アイコンをタッチするとアプリが起動する。(2)はアプリ起動直後の画面を示す。ユーザは画面右上の認証ボタン (赤破線内を参照) をタッチし、

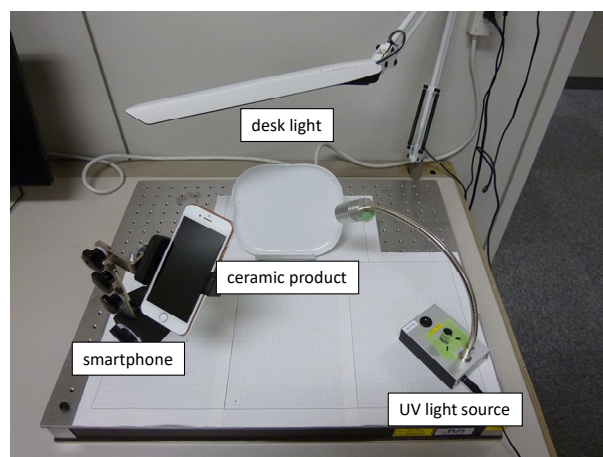


Fig. 11. 実験システム。



Fig. 12. SQRC リーダアプリの画面。

(3)に示す ID とパスワードを入力する画面に移動する。ユーザ認証に成功してアプリのアクティベーションが行われると、(4)に示す SQRC の読み取り画面に遷移する。(5)は読み取った SQRC の公開情報と秘密情報を表示した画面である。画面下部のスクリーンボタンをタッチすることで(4)に戻り、別の SQRC を読み取ることができる。

3.2 パラメータの設定と探索

前節で示した実験システムを用いて探索する撮影条件は以下の 6 つである。

- (1) SQRC の中心 (観測点) における照度と色温度。照度は照度計により計測するが、色温度はデスクライトによって設定された値を使用する。
- (2) 紫外線ライトと観測点までの距離と角度 (Fig. 13 参照)。各値は、定規と角度計を用いて計測する。

(3) スマートフォンのレンズと観測点までの距離と角度 (Fig. 14 参照). 各値は, 定規と角度計を用いて計測する.

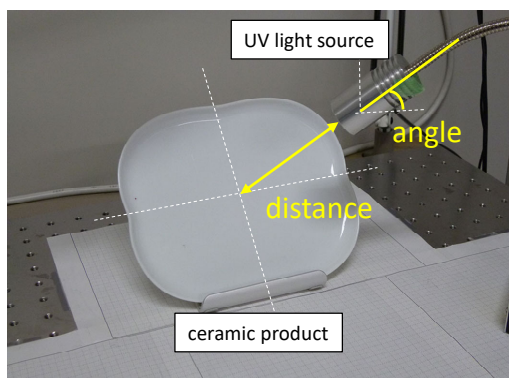


Fig. 13. Parameter No. (2).

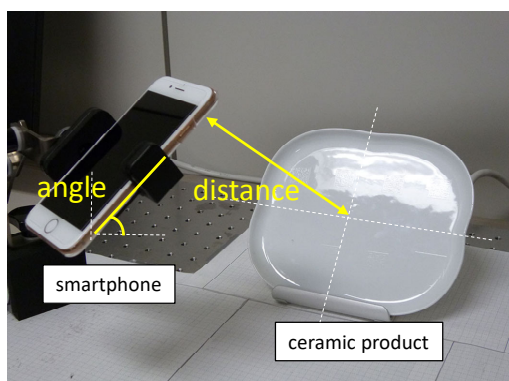


Fig. 14. Parameter No. (3).

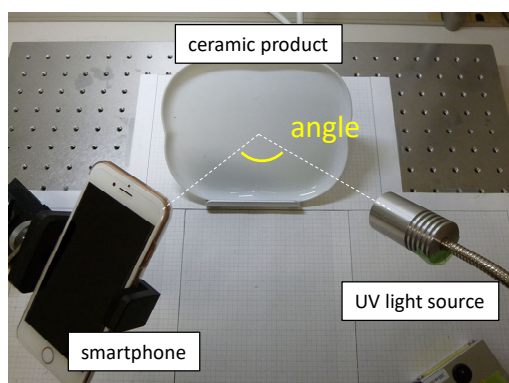


Fig. 15. Parameter No. (4).

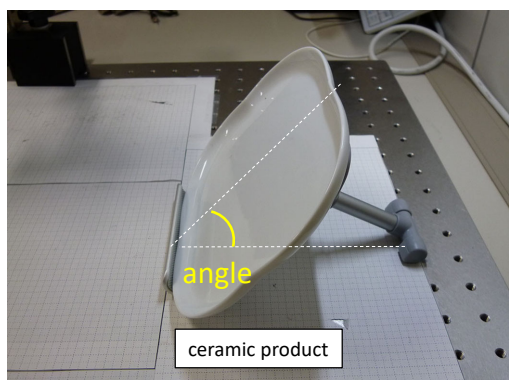


Fig. 16. Parameter No. (6).

(4) スマートフォンのレンズと紫外線ライトの角度 (Fig. 15 参照). 当該値は角度計を用いて計測する.

(5) 観測点での紫外線強度. 当該値は紫外線強度計を用いて計測する.

(6) SQRC (=皿) の角度 (Fig. 16 参照). 当該値は角度計を用いて計測する.

パラメータの探索は2つのステップにより行う. 第1ステップ(初期パラメータと基本パラメータの設定)は SQRC から文字情報を抽出できるスマートフォンのおおよその3次元位置を特定することが目的であり, 第2ステップは当該位置を起点として SQRC から文字情報を再現性をもって抽出できる各パラメータの範囲を特定することが目的である. はじめに, 第1ステップを説明する. 当該ステップは以下の通りである.

(a) パラメータ(1), (2), (5), (6)の初期パラメータを以下のように与える.

(1) 照度 300 lx, 色温度 3000K, (2) 距離 10cm, 角度 45度, (5) 1.0mW/cm², (6) 45度.

これらは, 目視によって SQRC が明瞭に確認でき, かつスマートフォンのディスプレイ上において個々のセルが明瞭に確認できた(サチュレーションが発生していない)ときの値である. 一方, スマートフォンには3次元の自由度を与える(つまり, パラメータ(3)と(4)の初期パラメータを設定しない).

(b) スマートフォンを自由に動かしながら, SQRC から文字情報が得られる3次元位置を探索する(文字情報が得られなかった場合には, パラメータ(1), (2), (5), (6)を調整したあと再度(b)を実行する).

(c) (b)によって文字情報が得られた場合には, パラメータ(1), (2), (5), (6)を固定する. つぎに, パラメータ(3)と(4)を調整しながら, SQRC から文字情報が得られる3次元位置を探索する. 文字情報が得られた場合には, (1)~(6)を基本パラメータと定義する.

第1ステップによって得られた基本パラメータを Table.3 に示す. SQRC がアプリによって認識されてから公開情報と秘密情報の表示までにかかった時間は1秒以内であった. なお, 色温度の変化は SQRC の読み取りに影響を与えなかった.

Table 3. 基本パラメータ.

No.	値
(1)	照度 500 lx, 色温度 any
(2)	距離 9 cm, 角度 40 度
(3)	距離 9 cm, 角度 40 度
(4)	角度 30 度
(5)	紫外線強度 3.0 mW/cm ²
(6)	角度 45 度

Table 4. 基本パラメータの範囲.

No.	範囲
(1)	照度 350~500 lx, 色温度 any
(2)	距離 9~11 cm, 角度 40~55 度
(3)	距離 5~9 cm, 角度 40~55 度
(4)	角度 30~60 度
(5)	紫外線強度 3.0~5.0 mW/cm ²
(6)	角度 30~55 度

次に第2ステップを説明する. 当該ステップは以下の通りである. なお, ここでは特定の基本パラメータについて, それを起点とした範囲を設定して再現性を確認するが, 範囲の発散を避けるために各パラメータの範囲と刻み幅を以下のように定める.

照度: 前後 200 lx (50 lx 刻み)
距離: 前後 5 cm (1 cm 刻み)
角度: 前後 40 度 (1 度刻み)
紫外線強度: 前後 3.0 mW/cm ² (0.5 mW/cm ² 刻み)

(a') 基本パラメータのうち, 任意の2つのパラメータに着目する. 一方のパラメータ X を固定し, もう一方のパラメータ Y の前後の値について, SQRC が再現性をもって読み取れることを確認する. たとえば, パラメータ(4)と(6)に着目する場合, パラメータ(4)を 30 度で固定し, パラメータ(6) (45 度) について値を+40 度から-40 度まで 1 度ずつ変化させる. そして, 当該条件において SQRC の読み取りを 10 回行い, 10 回ともに文字情報が得られた場合には再現性があると認定する.

(b') 上記とは別の, 任意の2つのパラメータに着目し, (a') を実施する.

第2ステップによって得られた基本パラメータの範囲を Table.4 に示す. SQRC がアプリによって認識されてから公開情報と秘密情報の表示までにかかった時間はいずれも 1 秒以内であった. 以下に, SQRC が認識されなかったときのパラメータの範囲と SQRC の様子を示す.

- パラメータ(1)では, 照度が 350 lx を下回ると SQRC の発光が強く観測される (画角中の SQRC にサチュレーションが見られる) ことで, 照度が 500 lx を上回ると SQRC の発光が弱く観測される (セルが明瞭にならない) ことで, それぞれ SQRC として認識されなかった.
- パラメータ(2)では, 当該範囲を超えると SQRC に対して紫外線が均一に照射されず, 発光が不十分となり SQRC として認識されなかった.
- パラメータ(3)では, 距離が 5 cm を下回ると SQRC が画角に収まらず, 9 cm を超えると SQRC が小さく捉えられて SQRC として認識されなかった. 一方, 角度

の場合, 当該範囲を超えると画角中の SQRC が台形となり SQRC として認識されなかった.

- パラメータ(4)では, 当該範囲を超えるとパラメータ(3)における角度と同様の現象が発生し, SQRC として認識されなかった.
- パラメータ(5)では, 3.0 mW/cm² を下回ると SQRC の発光が弱く観測されることで, 5.0 mW/cm² を上回ると SQRC の発光が強く観測されることで, それぞれ SQRC として認識されなかった.
- パラメータ(6)では, 当該範囲を超えると SQRC に対して紫外線が均一に照射されず, 発光が不十分となり SQRC として認識されなかった.

4. 考察

本章では, 実用化という観点から安全性 (SQRC を形成する材料, 紫外線ライトの取り扱い), SQRC の認識から情報表示までの時間, 検証者の認証方法, 検証レベルと検証方法の保護, および製品の色と文字情報の抽出について議論する.

4.1 材料の安全性

2.4 節で述べたように, セラミックス製品の表面に形成される SQRC は Table. 5 に示す材料によって形成される.

本節では, 各材料の安全性を考察する.

- 蛍光顔料は, 化学的安定性が良好であり[3], 酸やアルカリなどといった物質と化学反応を起こしにくいという特徴を持つ. また, 当該顔料は人の肌に触れる印刷物の顔料として使用されている[3].
- ガラスフリットは, セラミックス製の食器をガラスコーティングするためのコーティング材として使用されている[4]. 安定した酸化物ガラスであるため, 化学的安定性は良好である.
- スキージオイルにはアクリル樹脂が用いられるが, 当該樹脂は安全性が高い[5]. スキージオイルは絵の具 (ペースト) を作製する際に顔料を分散させるために使用されるが, 絵の具をセラミックス製品に焼き付ける (焼成する) 際に, 炉の中で炭化せずに気化するという特徴を持つ[6]. このため, 焼き付けられた SQRC にはスキージオイルは残存しない.
- アルミン酸ストロンチウムは自発光体顔料として使用されており, 動物を使った生体検査で安全性が証明されている[7]. なお, 当該顔料の元素としてストロンチウム (38Sr) が使用されているが, これは自然界に存在するもので放射性ではない[7].

以上のことから, SQRC を形成するための材料はいずれも安全であるといえる. ただし, これらは粉末であることから, 目に入ったり吸い込んだりすることのないように取り扱いには注意する必要がある.

Table 5. SQRC を形成する材料.

SQRC の正版	蛍光顔料 (ネモト・ルミマテリアル BGL-300FF), ガラスフリット (イザワピグメンツ 36101), スキージオイル (互応化学工業 OS-4360)
SQRC の逆版	アルミン酸ストロンチウム, ガラスフリット (イザワピグメンツ 36101)
SQRC のコーディング	ガラスフリット (イザワピグメンツ 36101)

4.2 紫外線ライトの取り扱い

セラミックス製品に焼き付けられた SQRC は、紫外線を照射することで明瞭に視認できるようになることから、紫外線ライトは必要不可欠である。紫外線ライトはブラックライトとも呼ばれ、産業界だけでなく教育やコスメティックス、エンターテインメントの分野でも使用されている[8, 9].

一般的に、市販されている紫外線ライトの波長は 350~380nm (UV-A) をピークとしており、人体に悪影響を及ぼすといわれる 320nm 以下の波長 (UV-B, UV-C) は含まれていない。300nm~400nm の紫外線が含まれている太陽光線と比べると、紫外線ライトは安全であるといえる[10]。ただし、紫外線光源を直視しないように注意喚起する必要がある。たとえば、セラミックス製品の取扱説明書や真正性の検証方法を記載した電子マニュアルに注意喚起文を記載するという方法が考えられる。

4.3 SQRC の認識から情報表示までの時間

SQRC がアプリによって認識されてから公開情報と秘密情報の表示までにかかった時間はいずれも 1 秒以内であった。これは、SQRC (誤り訂正レベル M, バージョン 3) に格納される文字情報が高々英数字 51 文字 (公開情報 22 文字, 秘密情報 29 文字) であり、SQRC 全体の総データビット数も高々 294bit (モードインジケータ, 文字数インジケータといったメタ情報を含む) と少量であったことに起因する。

3 つの秘密情報を表示する場合、アプリは 2 つのサーバと通信し、各サーバでは復号が実行されるが、上記の時間はユーザに心理的なストレスを与えるものではなく、実用に耐えられるものと考えられる。

4.4 検証者の認証方法

SQRC リーダアプリは、ID とパスワードを使って検証者を認証する。所有物 (スマートカードなど) を使った認証方法と比べて、記憶による認証方法 (ID とパスワード) は認証手段を携帯しなくてもよいというメリットがあるが、ID とパスワードの入力が煩雑、ショルダーハッキング (ID とパスワードの入力をのぞき見) される、ID とパスワードを忘却するというデメリットがある。

バイオメトリクス認証方法は、記憶による認証方式のメリットを保ちつつデメリットを解消できる方法である。ま

た、個人認証に関するグローバルな業界団体である FIDO (Fast Identity Online) アライアンスは、記憶に頼る認証方法への依存を減らすためにバイオメトリクスを活用するなど、シンプルで堅牢な認証方法の標準化を推進している[11]。このため今後は、バイオメトリクス認証が主流になるものと思われる。現在、いくつかのスマートフォンにはバイオメトリクス認証機能が搭載されており、マルチモーダル認証機能 (複数のバイオメトリクスを使用した個人認証) が搭載されたものも発売されている[12]。このため、今後はスマートフォンに搭載されたバイオメトリクス認証機能と SQRC リーダアプリとを連携させる予定である。

4.5 検証レベルと検証方法の保護

本論文では、真正性の検証方法を複数 (本論文では 3 つ) に分け、職位が上位の者ほど多くの検証方法を閲覧できるようにした。これは、検証にレベルを設けることで簡易な検証から詳細な検証までが実施できるようにするためである。簡易な検証は店頭での実施を想定しており、詳細な検証は製造業者の支店および本店での実施を想定している。

検証者が閲覧できる検証方法は、厳正に保護されるべきである。なぜならば、偽造者が当該方法を知り得た場合、検証の基準をクリアするコピー品が製造される可能性があるからである (たとえば、「観測点 A に波長 B の紫外線を照射したときに A が蛍光することを確認する」という検証方法を偽造者が入手した場合、偽造者は当該基準をクリアするような蛍光顔料を入手し、コピー品の観測点 A に当該顔料を焼き付ける可能性がある)。

検証方法を厳正に保護するための技術的な方法 (暗号技術, アクセス制御技術など) を導入することは当然として、「検証のときにだけ SQRC リーダアプリを起動する」という運用ルールの整備や、当該アプリが起動した時刻、検証者の名前、検証場所などを特定できる証跡管理システムの導入により、検証方法が漏洩しにくい環境を整備することが必要であると考えられる。

4.6 製品の色と文字情報の抽出

今回の実験では、白色の磁器を使用した。これは 2.4 節で述べたように、材料 (ガラスフリット, 顔料, アルミン酸ストロンチウム) によって形成された SQRC が無色透明であることを目視で確認しやすくするためである。Fig. 9 で示したように SQRC は無色透明であったことから、セラミックス製品がもつベースの色に影響を与えにくいと考えられる。

一方で、SQRC から発せられる青白い光は、セラミックス製品がもつ色に影響を受けて明瞭さが低下する可能性がある。たとえば、黒色は光を吸収することから SQRC が明瞭に発光せず、3.2 節で示した撮影条件下であっても当該コードから文字情報が抽出できない可能性がある。今後、著者らはセラミックス製品がもつベースの色と文字情報の抽出との関係を調査する予定である。

4.7 SQRC が印刷された転写紙の活用

本論文では、セラミックス製品に対して転写が可能な転写紙を用いて SQRC を製品に焼き付け、そこに公開情報と秘密情報を格納する方法を提案した。SQRC はこれまでに様々な活用方法が提案されている。たとえば、当該コードが付与されているもの（たとえば電子的な入場チケット）を保持している人の属性（個人情報）を秘密情報として取り扱い、本人確認時に当該属性とを照らし合わせることで、電子的な入場チケットの転売を防止することができる。上記の方法はヒトとその属性を照合する方法であり、本論文で提案した方法はモノとその属性を照合する方法である。近年では 2 要素認証が個人認証の方法として普及してきている。2 要素認証とは、「利用者だけが知っている何か」、「利用者だけが所持している何か」、「利用者自身の身体的な特徴」のうち、2 つの要素を組み合わせることで利用者の認証を行う仕組みのことである。このため、たとえば秘密情報の部分にヒトの属性とモノの属性の 2 つを格納することで、2 要素認証を実現することができる。上記の電子的な入場チケットの場合、対象とするヒトの属性（たとえば、生年月日）と、その人が所持しているモノの属性（たとえば、スマートフォンの機種）の 2 つが合致してはじめてイベント会場に入場させる、といったアイデアが考えられる。

上記のアイデアは、電子的なモノだけでなく、物理的なモノに印刷された SQRC にも適用可能である。たとえば、工作機械を起動させる際に、ヒトの属性（たとえば、指紋）とモノの属性（たとえば、社員証に印字されたバーコード）の 2 つが合致しないと当該機械が起動しないというアイデアが考えられる。

5. まとめ

本論文では、セラミックス製品の表面に *nearly invisible* な SQRC を焼き付ける方法と、SQRC から文字情報（公開情報と暗号化された秘密情報）を抽出する、スマートフォンと紫外線光源を用いた SQRC リーダシステムを紹介した。

本論文の前半では、*nearly invisible* かつ公開情報と暗号化された秘密情報を格納できる SQRC をセラミックス製品に焼き付ける方法を紹介した。著者らは、製品に関する情報を公開情報とし、製品の真正性を検証する方法を秘密情報とした。公開情報は消費者と検証者の両者が閲覧できるが、秘密情報は検証者のみが閲覧できる。秘密情報は 3 段階に分かれており、職位に応じた検証方法が閲覧できる。製品と公開情報、秘密情報は SQRC によって紐づいているため、検証者は製品とマニュアルを突合せなくてもよい。

光の反射と屈折によってセルのエッジが強調される（SQRC の存在が視認できる）のを抑制するために、正版と逆版を用いて転写紙上に SQRC を印刷した。これにより、製品に焼き付けられた SQRC は *nearly invisible* となった。紫外線を照射したところ、蛍光顔料の発光によって SQRC

が明瞭に視認できた。

本論文の後半では、製品に焼き付けられた SQRC について文字情報（公開情報と秘密情報）の抽出に再現性が見られる撮影条件を探索した。OS が異なる 2 台のスマートフォンを用いて探索を行った結果、9 つのパラメータが明らかとなった。このパラメータの範囲であれば、文字情報を確実に抽出できる。また、SQRC の認識から文字情報の表示までにかかった時間は 1 秒以下であった。考察の章では、実用化という観点から安全性（SQRC を形成する材料、紫外線ライトの取り扱い）、検証者の認証方法、検証レベルと検証方法の保護、および製品の色と文字情報の抽出について議論した。

謝辞

この研究は、平成 28 年度経済産業省・中部経済産業局・戦略的基盤技術高度化支援事業の支援を受けた。また、株式会社デンソーウェーブの中澤氏、林氏より技術的なアドバイスを頂いた。なお、論文中の QR コードおよび SQRC は株式会社デンソーウェーブの登録商標である。

参考文献

- [1] Denso wave incorporated, "SQRC: A single code carries two types of data: public and private", <https://www.denso-wave.com/en/system/qr/product/sqrc.html>
- [2] Denso wave incorporated, "Error Correction Feature", https://www.qrcode.com/en/about/error_correction.html
- [3] 株式会社ネモト・ルミマテリアル, N 夜光 BG シリーズの特性, Ver. March 2015.
- [4] 東罐マテリアル・テクノロジー株式会社, フリット（多成分ガラス）, <https://tomatec.co.jp/products/frit/>
- [5] 平凡社, 世界大百科事典, 第 2 版
- [6] 株式会社サンリュウ, 陶磁器やガラスへのデジタル印刷 (2-3 スキージオイル) , <https://sanryunews.com/category/ceramictoner/>
- [7] 株式会社ルミネッサス, 自発光体 Q&A, <http://luminessus.com/faq>
- [8] Educational Innovations, Inc. : "Ultraviolet Light Detecting Beads", http://cdn.teachersource.com/downloads/lesson_pdf/UV-AST.pdf
- [9] Ushio America, Inc. : "UV-B, BL & BLB", <https://www.ushio.com/files/specifications/blacklight-specialty-fluorescent.pdf>
- [10] Hiroaki Sasaki : "Shigaisen taisaku to ifuku (Japanese)", Society for Life Culture of Niigata, Vol. 17, pp. 37-40, 2011
- [11] Hidehito Gomi, and Wataru Oogami : "FIDO Authentication and Its Technology: Technical Specifications and Standardization Activities", IEICE Fundamentals Review, Vol. 12, No. 2, pp. 115-125, 2018
- [12] Samsung Malaysia Electronics (SME) : "What is Intelligent Scan and how to use it?", <https://www.samsung.com/my/support/mobile-devices/what-is-intelligent-scan-and-how-to-use-it/>, 2018