

分相法ポーラスガラスの人工物メトリクスへの応用

長澤 浩^{†1} 長澤 史記^{†2} 伊藤 公紀^{†1} 四方 順司^{†3}

概要: 今日のモバイルデバイスの爆発的普及や IoT (Internet of Things) 社会到来の影響を受けて、多くのデバイスやセンサー等の認証が必要とされており、人工物のセキュリティは益々その重要性を増している。人工物の認証に対しては、物理的材料の製造過程で生じ得るランダムネスを生かした人工物メトリクスの考え方が有効であるものの、人工物メトリクスの要件を理想的な形で満たす材料を発見することは当該分野の大きな課題となっている。本稿では、そのような材料として分相法ポーラスガラスを提案し、その有効性を簡易な実験と考察により報告する。

キーワード: 認証, 人工物メトリクス, 分相法ポーラスガラス

Application of Phase-separated Method Porous Glass to Artifact-metrics

Hiroshi Nagasawa^{†1} Fuminori Nagasawa^{†2} Kiminori Itoh^{†1} Junji Shikata^{†3}

Abstract. The current situation of wide spread of mobile devices and appearance of IoT (Internet of Things) requires authentication of many and various physical devices and sensors at a higher level. For such authentication of devices and sensors, it will be effective to consider artifact-metrics which utilizes randomness generated in the process of producing physical materials. However, it is not easy to find a material which provides ideal properties required in artifact-metrics. In this paper, we propose an application of phase-separated method porous glass to artifact-metrics, and we report its effectiveness by performing simple experiments and discussions.

Keywords: authentication, artifact-metrics, phase-separated method porous glass

1. はじめに

今日のモバイルデバイスの爆発的普及や IoT (Internet of Things) 社会到来の影響を受けて、多くのデバイスやセンサー等の認証が必要とされており、人工物のセキュリティは益々その重要性を増している。人工物の認証に対しては、その製造過程で生じ得るランダムネスを生かした人工物メトリクスの考え方が有効であるものの、人工物メトリクスの要件を理想的な形で満たす材料を発見することは当該分野の大きな課題となっている。本稿では、そのような材料として分相法ポーラスガラスを提案し、その有効性を実験と考察により報告する。

分相法ポーラスガラスとは、自己組織的に作成されたスピノーダル分相構造を持つ人工物であり、硬く強固なガラス質から形成され制御された基本 10nm から 50 μ m までの分岐した孔構造を持ちながら、その分岐構造は自然の自己組織に委ねられており、自然が作り出したランダムネスである。本稿では、このランダムネスを人工物メトリクスとして利用することを提案する。特に、分相法ポーラスガラ

スが人工物メトリクスに有効と考える理由として以下を挙げる。

- I. 分相法ポーラスガラスにおける孔の分岐構造はランダムに構成され、人工物メトリクスとして利用する上で大きなランダムネスをもつ。
- II. 10nm から 50 μ m までの分岐した孔構造のスケールを制御できるため、人工物メトリクスにおける幅広い精度の認証に利用できる。特に、非常に細かなスケールとして約 10nm のスケールのランダムネスを実現できる。
- III. 分相法ポーラスガラスは物理的に強固であるため、実用上十分な耐久性をもち、またガラス材料であることから自然な形で様々なデバイス (スマートフォン等) やセンサーに組み込むことが可能である。
- IV. 分相法ポーラスガラス製造に対しては高度に専門的な技術が要求されるものの、その製造コストは安価であるため、様々なデバイスやセンサーに安価に組み込むことが可能である。

本稿では、分相法ポーラスガラスに関して、上記の内容について説明する。項目 I に関しては 4 節で簡易的な実験により示し、項目 II, III, IV については 3 節において解説する。

^{†1} 株式会社 環境レジリエンス
Kankyo Resilience Co.,Ltd

^{†2} 東京工業大学情報理工学系
Tokyo Institute of Technology

^{†3} 横浜国立大学大学院環境情報研究院, 横浜国立大学高等科学研究院
Graduate School of Environment and Information Sciences / Institute of
Advanced Sciences, Yokohama National University

2. 人工物メトリクス

バイオメトリクスが「ヒト」の身体的特徴（指紋や虹彩等）や行動的特徴（手書き署名の筆跡等）におけるランダムネスを利用して個々人の認証を行う技術なのに対し、人工物メトリクスは「モノ」の製造過程で生じ得るランダムネスを利用して個々の人工物の認証を行う技術である。今日のモバイルデバイスの爆発的普及やIoT社会到来を考えると、今後、「モノ」の認証は益々重要になると考えられ、人工物メトリクス研究の位置づけもこれまで以上に重要になるであろう。なお、人工物メトリクスの詳細については、例えば文献 [1] を参照されたい。

人工物メトリクスを実現する認証システムは人工物メトリック・システムとよばれている ([2])。ここで、人工物メトリック・システムは、基本的に次の2つのフェーズにより構成される。

- **登録フェーズ**：対象の人工物の登録を行うため、その特徴（ランダムネス）を表すデータ（以降、登録データとよぶ）をセンサーによって取得し、データベースに記録する。
- **検証フェーズ**：対象の人工物の認証を行うため、その特徴を表すデータ（以降、検証データとよぶ）をセンサーによって取得する。そして、この検証データと、データベースに記録されている登録データを用いて検証を行い、最終的に検証結果（受理または拒否）を出力する。

人工物メトリック・システムの目的は、登録フェーズで提示された人工物と、検証フェーズで提示された人工物が同一のモノであるかを判定することである。同一と判定する場合には「受理」を出力し、そうでないと判定する場合には「拒否」を出力するのである。

人工物メトリック・システムの基本的な精度を客観的に測る指標として、以下の FAR (または FMR: False Match Rate), FRR (または FNMR: False Non-Match Rate) が知られ

ている。

- ◆ **FAR (False Acceptance Rate: 誤受理率)**：異なる人工物に対し、誤って受理と判定する確率
- ◆ **FRR (False Rejection Rate: 誤拒否率)**：同一の人工物に対し、誤って拒否と判定する確率

上記の2種類の誤り確率（偽を真に判定する誤り確率と、真を偽に判定する誤り確率）は、人工物メトリック・システムだけによらず、一般的に、すべての認証システム（バイオメトリック・システム等）、判定システム、検定システム（仮説検定等）で考えることができ、これらシステムの基本的な精度を測る指標である。

また、人工物メトリック・システムに対する強固なセキュリティを測る指標として、以下の指標が知られている ([3])。

- ◆ **CAR (Clone Acceptance Rate: クローン受理率)**：偽の人工物であるクローンを誤って受理する確率
- 一般的にすべてのクローン製造可能性に対して、網羅的にCARを解析することは困難であるが、出来るだけ幅広く解析することが望ましいであろう。

これまでに、人工物として、紙、金属箔（アルミ箔）、磁性ファイバー、ナノ構造のレジスト倒壊を対象にしたシステム ([4], [5], [2], [6]) や、有価陶磁器の真贋判定のためのシステム ([7]) 等が提案されている。

本稿では、4節において、分相法ポーラスガラスに基づくシンプルな人工物メトリック・システムに対してFARとFRRの基本的精度の指標に対して評価を行う。このことにより、分相法ポーラスガラスが、人工物メトリクスへの応用上、大きなランダムネスをもつことを示す。そのため、分相法ポーラスガラスは潜在的に人工物メトリクスの理想的材料として期待できると考えられる。

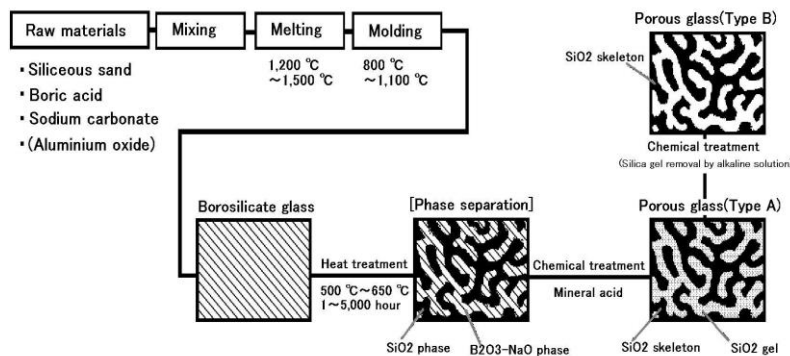


図1. 分相法ポーラスガラスの作成方法

3. 分相法ポーラスガラス

本節では、分相法ポーラスガラスについての説明を簡潔に行う。詳細については、文献 [8-13] を参照されたい。

「ガラス」は、非晶質のネットワークを持つ無機質の材料であり、アモルファス材料として、オングストロームレベルである原子・分子の目から見れば「無秩序」を代表する材料として「組織化」あるいは「秩序化」の対局として見る事が出来るが、他方、ナノレベル以上の視点から見れば、均一な素材として理解することが出来る。

我々が通常目にするガラスは、主にケイ酸と酸化ナトリウム、酸化カルシウムの3成分からなる一番ありふれたガラスである「ソーダライムガラス」、クリスタルガラスとして知られる酸化鉛を主成分とする「鉛ガラス」、理化学ガラスとも呼ばれる「ホウケイ酸ガラス」の三種類があり、これにケイ酸のみで形成される「石英ガラス」を加えたものが、ほぼ我々が目にするガラスである。

このなかで、膨張係数が低く、熱ショックに強く、化学的安定性も非常に優れたホウケイ酸ガラスは、特定の条件で使用されると、突然化学的に弱く割れやすくなる現象があり、昔は「ホウ酸異常」として知られていた。この原因が、ガラスの「分相」と言われる現象によるものであり、この現象を上手く使えば、高価な石英ガラスが安価に作成できるとして 1934 年に米国コーニング社により発明されたものが合成石英ガラス：バイコールガラスであり、その中間物として分相法ポーラスガラスが発明された。

分相法ポーラスガラスには、最終組成が SiO_2 : 96% 以上になる高ケイ酸型のものと、アルミナやジルコニアを含有するホウケイ酸型の物が報告されているが、この二種はその作成できる細孔径範囲が異なり、高ケイ酸型：1 nm ~ 300 nm、ホウケイ酸型：200 nm ~ 50 μm となる。

高ケイ酸型ポーラスガラスの作成工程を図 1 に示す。まず、珪砂と硼砂、ホウ酸と炭酸ソーダ、アルミナ等を用いて原料を調合し、1500 $^{\circ}\text{C}$ 程度で熔融し、 SiO_2 、 B_2O_3 、 Na_2O を主成分とする母体ガラスを作成・成型する。これを、ガラス転移点以上の温度で保持することにより分相を起こさせる。この際、ホウケイ酸ガラス母材は、ガラス転移点以上の温度にさらされると内部で各構成原子が揺らぎ、移動をおこす。結晶化とよく似ているが、アモルファスなガラスのまま、その温度でより安定な状態を取る二つのガラス相に分離し、微細な原子配列はランダムなアモルファス相のまま、もう少しマクロな塊としては、秩序構造を形成する。二つの相は、一つがほとんどケイ酸からなるシリカ相であり、残りがホウ酸と酸化ナトリウムとケイ酸からなるホウ酸ソーダ相である。この時、出発ガラスの組成と温度により、スポンジのように組織が絡み合ったスピノーダル構造を作る場合と、一つの相が液滴のように孤立したドロップレット構造を作る場合がある。ポーラスガラスは、連続相構造であるスピノーダル分相物から得られる。

二つの相に分かれた状態で、引き続き一定以上の温度にさらされ続けると、この二つの相が再配列を起こし、秩序構造が成長する。なお、この相分離を起こす温度領域を越えると再度均一なガラス組成に戻る。この分相現象は、ガラスを構成している成分分子が、安定化を求めて自己集合と散逸構造を繰り返して、その温度での最も安定な二つの相が、最も界面面積が小さくなる方向へ自己組織化している現象と考えることが出来る。これは、液体のスピノーダル分相によるパターン形成であるが、ガラスの反応は時間軸が極めて長いために、液体を凍結して取り出すことが出来る自己組織化による構造形成に他ならない。

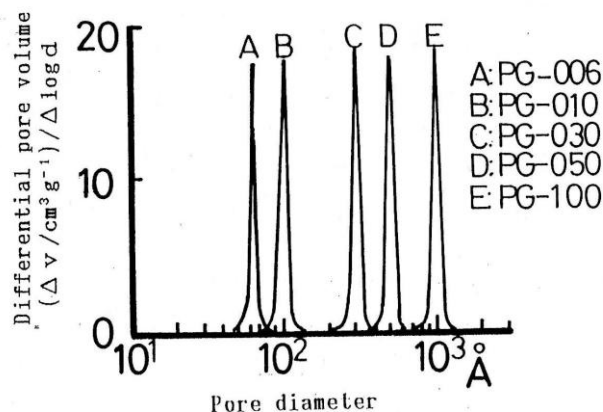


図 2. メソポーラスガラスの細孔分布の例 (5 種類)

A : 細孔直径 6nm, B : 10nm, C : 30nm, D : 50nm, E : 100nm

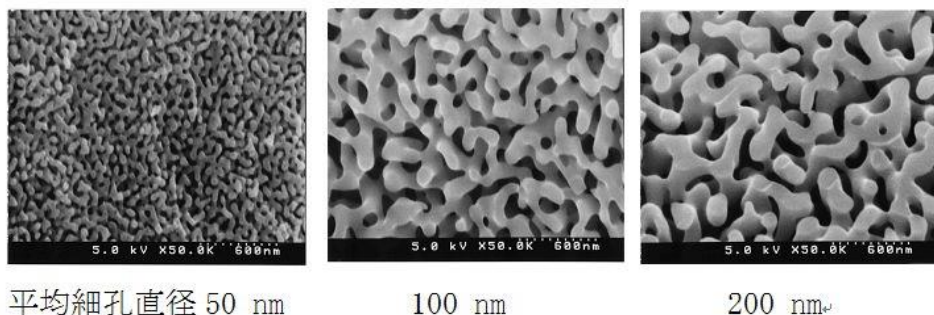


図 3: 分相法ポーラスガラスの SEM 写真

スピノーダル分相による構造形成の特徴は、大きく見ると秩序化であるが、結晶成長と異なり、秩序形成におけるランダム形成が含まれ、多数の分岐構造からなる構造は、相似形であるが全て異なると考えられ、外部からの制御による細孔構造の作りこみは、細孔径をコントロールすることは出来るが、その分岐構造を制御することまでは出来ない。また、この構造は細孔径を変えることにより、多様なモードのランダム構造を得ることもできる。

分相によるランダム構造は、細孔径で示される距離単位で必ずランダム性が発現し、次の単位距離で次のランダム性が発生することにより、最終的に非常に大きなランダム性を獲得する。

ポーラスガラスのスピノーダル構造は表面的には二次元、全体構造としては三次元の複雑構造となる。分相構造は、温度と時間の係数により決定されるが、同じ構造を持つ条件でも温度が異なれば、できあがるポーラスガラスの特性が異なるが、相似形であるため、その相違性は一見目立たないのも特徴となる。

分相済みの母材ガラスは、次に酸溶液により化学処理を施す。通常、数規定の硫酸、若しくは硝酸が用いられ、90℃以上に保持してホウ酸ソーダ相を溶かし出す。この処理が終わり、水洗後乾燥すると、図 2 で示す A タイプの SiO₂ : 約 96 % のポーラスガラスが得られる。A タイプのポーラスガラスの細孔構造は、分相構造を反映しておらず、実際は、シリカガラスからなる骨格構造の中にホウ酸ソーダ相由来のシリカゲルが堆積した構造になっており、これをアルカリ水溶液で除去するなど、何らかの方法で取り除く事により、分相構造を反映した B タイプのポーラスガラスが得られる。

更に、このポーラスガラスの特徴としては、構造を支える骨格はガラスであり強固で固く、また、分相時に歪が取れることから通常のガラスより割れにくく、機械的にも化学的にも強固な材料である。更に、一度ケミカル処理をして、ポーラスガラスになった後は、分相が継続することは無く、熱的にも安定な材料である。

また、付け加えるならば、以上の作成法において、(1) 主原料は、ケイ酸（珪砂）、ほう酸、炭酸ナトリウム、アル

ミナ、ジルコニア等であり、通常のホウケイ酸ガラスと変わらないので、材料費は高価ではない。(2) また、作成工程は・原料混合・熔解・成型・分相・化学処理であり、作成に必要な機材は混合器、熔解ルツボ、電気炉（大気下）、化学処理反応器（フラスコ程度）であり、特に高価な機器は必要としないが、現時点でのポーラスガラスの価格は高い。しかしながら、これは主に工程費であり、少量生産での人件費が主である。更に、ポーラスガラスの加工は、通常のガラス加工と変わりなく、既に確立された設備・手法が利用できる。必要に応じポーラスガラスは、容易に大量の供給が可能である。

4. 実験方法とその結果

本節では、ポーラスガラスの孔の分布のランダムネスを調べるために簡易的な実験を行ったので、その実験方法と結果を報告する。

我々は、ポーラスガラスの画像に対し、孔の分布パターン的一致・不一致を判定するのに、特徴量を用いたパターンマッチングによる手法を利用した。その詳細については次節以降で説明する。

4.1 ポーラスガラス作成と画像取得方法

サンプルとして、典型的なホウケイ酸型ポーラスガラス（平均細孔径 200nm）を作成し、その異なる 8 か所を SEM（倍率 10,000 倍）で撮影し、8 枚の元画像 I, II, ..., VIII（以降、これらを親画像とよぶ）を得た。同様に、同じ 8 か所に対し、倍率を変えて SEM で撮影し（倍率 5,000 倍）、さらに 8 枚の元画像 i, ii, ..., viii（以降、これらの子画像とよぶ）を得た。ここでは、人工物メトリック・システムにおいて、登録フェーズと検証フェーズで画像を取得する際の精度が異なる場合を想定し（敢えて、画像取得センサーの精度が異なるという劣悪な状況を考えている）、それでも検証が有効に働くかを調べるため、倍率を変えた画像を実験対象とした。例えば、親画像が登録データ、子画像が検証データと考えれば良いであろう。

4.2 人工物メトリック・システムにおける検証方法

基本的に、親画像と子画像の検証方法として、Sift 特徴量を利用したパターンマッチングによる手法を利用した。ここで、Sift (Scale-Invariant Feature Transform) [6] は 1999

年に D. Lowe によって発表された特徴点検出およびその記述方法であり、画像の回転やスケール変化に不変、かつ照明の変化に強いという特徴がある。Sift はオープンソースの画像処理ライブラリである OpenCV に実装され、画像識別などで広く用いられている特徴量検出手法である。更に、親画像と子画像の検証において、局所特徴量の考え方も利用している。ここで、局所特徴量とは、画像の濃淡の大きい点を検出し、その周辺との微分をベクトルで表現したものである ([12])。

任意の親画像と子画像の組み合わせに対して、上記の方法で求めた特徴点の特徴量を総当たりで比較し、最も差 d の小さい特徴点のペアを見つけ出し、その d を距離とする。その後、すべての求めたペアに対して距離 d を比較し、 d が小さい順に n 個とり、それらの平均を両画像間の距離とした。これにより、親画像と子画像間のパターンマッチングを行うが、上記の n の値として、以下の 3 種類を考察の対象とした。

- 1-MNN : 最も小さい距離のみで測定する場合 ($n=1$)
- 10-MNN : 小さい順に 10 個の距離をとり、それらの平均で測定する場合 ($n=10$)
- 100-MNN : 小さい順に 100 個の距離をとり、それらの平均で測定する場合 ($n=100$)

上記の考察対象の距離を利用して、対象の両画像（親画像と子画像）の距離が、ある値（以降、閾値とよぶ）未満であれば、受理と判定し、閾値以上ならば拒否と判定する。

4.3 実験結果

親画像 I, II, ..., VIII と子画像 i, ii, ..., viii に対して、1-MNN による距離（小数点以下切り捨て）の値を表 1 に示す。

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
i	11	109	159	184	206	228	231	222
ii	110	16	153	175	195	185	241	221
iii	167	171	17	230	240	225	245	232
iv	143	162	221	15	233	218	224	225
v	120	134	234	179	17	213	234	248
vi	181	202	207	214	201	19	241	221
vii	247	190	236	232	246	236	15	236
viii	239	221	246	231	230	226	240	19

表 1 : 1-MNN による距離

表 1 において、対角成分に位置する値は、ポーラスガラスにおける同一の撮影部を指すため、受理と判定すべき場合の距離値であり、それ以外は拒否と判定すべき場合の距離値である。ここで、対角成分に位置する値はすべて 20 未満であるのに対して、それ以外の値は 100 以上である。このため、画像の高い固有性が確認でき、この事はポーラスガラスの孔の分布のランダムネスが大きいことを示している。

次に、上記の 3 種類（1-MNN, 10-MNN, 100-MNN）それぞれの場合に対して、FAR 及び FRR のグラフを図 4, 図 5, 図 6 で示す。ここで、図中の横軸は「距離の閾値」を表し、縦軸は「誤り確率」を表している。図中では、親画像 8 つ、子画像 8 つ、計 64 通りの距離を 1-MNN, 10-MNN, 100-MNN ごとに計算し、グラフを描いている。本結果は、実験データ数 64 に対して、良い精度を示していると考えられる。もしも、親画像と子画像の倍率の差がほとんど同じであれば、今回の実験結果よりも更に高い精度を示すであろう。本稿では、ポーラスガラスを人工物メトリクスに適用する場合の最初の実験として、僅かな実験データ数で、登録データと検証データを取得するセンサーに精度差があり、簡易的な検証方法を想定したシナリオで実験したが、それでも実験結果は良好な精度を示していると考えられる。そのため、ポーラスガラスは人工物メトリクスへの応用材料として期待できると考えている。

5. まとめ

本稿では、人工物メトリクスを実現する材料として、分相法ポーラスガラスを提案した。また、その有効性の根拠として、以下の項目について、実験と考察の立場から報告した。

- I. 分相法ポーラスガラスにおける孔の分岐構造はランダムに構成され、人工物メトリクスとして利用する上で大きなランダムネスをもつ。
- II. 10nm から 50 μ m までの分岐した孔構造のスケーリングを制御できるため、人工物メトリクスにおける幅広い精度の認証に利用できる。
- III. 分相法ポーラスガラスは物理的に強固であるため、実用上十分な耐久性をもち、またガラス材料であることから自然な形で様々なデバイス（スマートフォン等）やセンサーに組み込むことが可能である。
- IV. 分相法ポーラスガラス製造に対しては高度に専門的な技術が要求されるものの、その製造コストは安価であるため、様々なデバイスやセンサーに安価に組み込むことが可能である。

また、上記に加えて、ポーラスガラスの孔構造のスケーリングを小さくしていけばいくほど、そのクローンを作成することは困難であると考えられ、クローン製造困難性に関しても期待できるであろう。

本稿では、平均細孔径 200nm のポーラスガラスの作成、僅かな取得画像数、登録データと検証データ生成時のセンサーの精度の相違、Sift 特徴量を利用したパターンマッチングによる検証方法、という状況下で実験を行った。もしも、これらの内容を、非常に小さな平均細孔径のポーラスガラスの作成、多くの取得画像数、登録データと検証データ生成時のセンサーの精度がほぼ同じ、洗練した検証方法、という改善された状況下で実験すれば、大幅に良い実験結

果が得られるものと期待する。今後は、上記のような観点から、ポーラスガラスに基づく人工物メトリック・システムの研究開発と実験による評価を進めて行き、ポーラスガラスの人工物メトリクスへの本格的応用に大きく期待したい。

参考文献

- [1] 松本弘之, 宇根正志, 松本勉, 岩下直行, 菅原嗣高, “人工物メトリクスの評価における現状と課題”, 金融研究, 第 23 巻第 1 号, pp. 61-140, 日本銀行金融研究所, 2014 年 6 月.
- [2] H. Matsumoto, I. Takeuchi, H. Hoshino, T. Sugahara, and T. Matsumoto, “An Artifact-metric System Which Utilizes Inherent Texture”, IPSJ Journal, 42 (8), pp. 139-152 (2001).
- [3] H. Matsumoto and T. Matsumoto, “Clone match rate evaluation for an artifact-metric system”, IPSJ Journal 44, pp. 1991-2001 (2003).
- [4] M. Yamakoshi, J. Tanaka, M. Furuie, M. Hirabayashi, and T. Matsumoto, “Individuality evaluation for paper based artifact-metrics using transmitted light image”, Proc. SPIE 6819, 68190H-1-68190H-10 (2008).
- [5] 吉田直樹, 横山雄紀, 西村和夫, 松本勉, “金属箔人工物メトリクス”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J99-A, No. 8, pp. 341-350 (Aug. 2016).
- [6] T. Matsumoto, M. Hoga, Y. Ohyagi, M. Ishikawa, M. Naruse, K. Hanaki, R. Suzuki, D. Sekiguchi, N. Tate, M. Ohtsu, “Nano-artifact metrics based on random collapse of resist”, Scientific Reports 4, Article number: 6142 (2014).
- [7] 藤川真樹, 小田史彦, 森安研吾, 淵真悟, 竹田美和, “有価陶磁器に対する人工物メトリクス適用のための研究”, Computer Security Symposium 2013, 3D3-4 (Oct. 2013).
- [8] H. P. Hood and M. E. Nordberg: USP 216744 (1938).
- [9] 江口清久, “ポーラスガラスの利用”, 日本金属学会会報, 第 23 巻, 第 12 号, pp. 989-995, 1984.
- [10] 江口清久, “多孔質ガラスの作り方, 使い方”, 表面, Vol. 25, No. 3, pp. 184-194 (1987).
- [11] H. Tanaka, T. Yazawa, K. Eguchi, H. Nagasawa, N. Matuda, and T. Einishi, “Precipitation of colloidal silica and pore size distribution in high silica porous glass”, Journal of Non-Crystalline Solids 65 pp. 301-309 (1984).
- [12] H. Nagasawa, Y. Matsumoto, N. Oi, S. Yokoyama, T. Yazawa, H. Tanaka, and K. Eguchi, “Effects of pore size on the retention time of octadecyl silanized porous glass in high performance liquid chromatography”, Analytical Science, vol. 7 (Suppl) pp. 181-182 (1991).
- [13] 長澤浩, “分相法ポーラスガラスのセンサーへの応用”, Chemical Sensors, Vol. 31, No. 1, pp. 10-20 (2015).
- [14] D. G. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features”, Proc. of the International Conference on Computer Vision, Corfu (Sept. 1999).
- [15] 佐々木栄祐, 今野俊一, 恒川佳隆, “エッジ画像と色情報を用いた SURF アルゴリズムの検討”, 計測自動制御学会東北支部 第 280 回研究集会, No. 280-4, pp. 1-7 (2013).

