

A new fractal approach to fabrication of smart materials to enhance water and moisture absorption

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-06-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 渡辺, 知規 メールアドレス: 所属:
URL	https://mu.repo.nii.ac.jp/records/545

機能性材料へのフラクタルの応用による吸水・吸湿性能の向上

A new fractal approach to fabrication of smart materials to enhance water and moisture absorption

渡辺 知規¹
Tomonori Watanabe

概要

孔を有するエポキシ樹脂の吸水・吸湿性能向上に対するフラクタルの有効性を検討した。特に、フラクタルの形状の違いが吸水・吸湿性能に及ぼす影響を明らかにするために、次数と種類が異なるフラクタル孔を用いて吸水試験(室温/高温)と吸湿試験(高温)を行った。また、吸水率の時間変化について数値解析により考察を行った。主たる結果として、フラクタル孔は円孔と比べて吸水・吸湿条件下での吸水率を高めることに有効であることが明らかとなった。

1 諸言

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) は、強度や耐熱性など様々な工業的利点を有しており活発な研究が行われている[1]。特に、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は、鋼に匹敵する強度と高い成形性を有することから、構造材料としての需要が急速に高まっている[2]。また、CFRP は、優れた機械的特性以外にも、異方性熱膨張や導電性など多くの機能的特性を備えている。それゆえ、近年では、CFRP の機能的特性に着目し、構造材料のみならず機能材料として、特に、センサ機能、アクチュエータ機能および自己修復機能などを有するスマート材料としての利用が提案されている[3]。たとえば、そのようなスマート材料のひとつに CFRP/Al アクティブラミネートがある[4,5,6]。CFRP/Al アクティブラミネートは、等方的に大きな熱膨張係数を持つアルミニウムと、繊維方向にのみ小さい熱膨張係数を持つ CFRP とを絶縁層を介して積層させた複合材料であり、異なる熱膨張率を持った材料を積層させることによって、環境温度の変化を感知して変形するパネル状アクチュエータとしての利用が期待されている。現在、このような機能性材料が機能を十分に発揮するための機能強化に関する研究が精力的に行われている。特に、吸水・吸湿性能については、材料の基本的性質のひとつであるがゆえに用途も広範囲に及ぶため、吸水・吸湿性能を向上させることは非常に重要な課題のひとつとなっている[2,5,6]。

一方、近年、数理工学をはじめ様々な分野でフラクタルに関する研究が行われている。フラクタルとは Mandelbrot によって導入された幾何学の概念のひとつである[7]。フラ

¹ 武蔵野大学数理工学センター員/武蔵野大学工学部数理工学科教授

クタルの特徴のひとつには、対象とするものの全体とその一部が自己相似となる構造をもつということがある。このような特徴をもつフラクタルは自然界に多く存在するとされており、ハスの葉の表面や人間の小腸にある柔毛、血管や木の分岐構造などが代表的な例とされている。ここで特に注目すべきは、単に自然界にフラクタルがみられるというだけではなく、機能向上のためにフラクタルが自然界に役立てられていると考えられるということである。たとえば、人間の小腸では栄養を効率よく吸収するためにフラクタルが利用されていると考えられている。人間の小腸内壁には、柔毛と呼ばれる長さ1mmほどの突起があり、この柔毛の表面にはさらに小さい微絨毛と呼ばれる突起が無数に存在している。これにより、小腸内壁部の表面積は、柔毛がない場合と比べて約600倍にもなり、テニスコート一面とほぼ同じ面積になる。このような小腸内壁部の表面積の拡大が、効率的に栄養分を体内に取り込むことを可能にしているということが知られている。これらのことから、フラクタルがもつ表面積拡大という効果を積極的に応用することによって、機能性材料の吸水・吸湿性能を向上させることができると考えられる。

よって本研究では、機能性材料の機能向上に資することを目指し、CFRPの代表的な母材であるエポキシ樹脂を対象にして、孔を有するエポキシ樹脂の吸水・吸湿性能向上に対するフラクタルの有効性を明らかにすることを目的とした。特に、フラクタルの形状の違いが吸水・吸湿性能に及ぼす影響を明らかにするために、次数と種類が異なるフラクタル孔を用いて吸水試験（室温/高温）と吸湿試験（高温）を行った。また、吸水率の時間変化について数値解析により考察を行った。

2 実験

2.1 試験片

吸水・吸湿試験には、異なる中空部断面形状をもち長手方向に平行に貫通する孔を有する直方体を用いた。中空部断面形状が円の場合の試験片形状と寸法を図1に示す。寸法は予備実験等をもとに決定した。中空部断面形状としては円に加え、自己相似フラクタルとして、図2に示すとおり、正三角形を基準としたものと正四角形を基準としたものを応用する。なお、本研究では、便宜上、自己相似性を作り出す操作の繰り返し回数を次数と呼び、中空部断面形状にフラクタルを応用した孔をフラクタル孔、中空部断面形状の輪郭の長さを孔の周長と呼ぶ。本研究では、図3に示す4種類の中空部断面形状を持つ試験片を作製し、順に、円孔、三角1次フラクタル孔、三角2次フラクタル孔、および、四角1次フラクタル孔と呼ぶものとする。なお寸法は、円孔を基準として中空部断面積を同一とする条件によって定めた。このとき、円孔の周長を1とすると、各孔の周長は、三角1次フラクタル孔1.5、三角2次フラクタル孔1.9、および、四角1次フラクタル孔1.6となる。

2.2 試験片作製方法

試験片材料には、エポキシ樹脂を用いた。本研究では、中子を用いた成型法によって孔を有する直方体形状の試験片を作製した。

2.2.1 中子の作製

中子の原型は厚さ 60mm の鋼材からワイヤーカット放電加工によって切り出して作製した。図 4 にこの鋼材製の中子を示す。つぎに、鋼材製の中子からエポキシ樹脂の成型に使用する中子をシリコンゴムにて作製した。鋼材製の中子をシリコンゴム（信越化学工業（株）KE-12）で型取りし、雌型を作製した。この雌型にラッカー塗料にて離型処理を施した後、シリコンゴムを流し込み、シリコンゴム製の中子を得た。シリコンゴム製の中子はそのままでは外部からの力や経時劣化によって変形してしまうため、注型時に心材として直径 3mm の鉄材を挿入した。

2.2.2 吸水・吸湿試験片

図 1 の試験片形状と寸法をもとにして、試験片外形の原型を木材から削りだして作製した。この原型に離型剤（信越化学工業（株）KF96SP）を塗布した後、シリコンゴム（信越化学工業（株）KE-12）で型取りし、雌型を作製した。この雌型に離型剤（信越化学工業（株）KF96SP）を塗布した後、同様に離型処理を施したシリコンゴム製の中子を設置した。この中子を設置した雌型にエポキシ樹脂を流し込み注型した。このエポキシ樹脂についてはあらかじめ、エポキシ樹脂（三菱化学（株）JER806）と硬化剤（富士化成工業（株）トーマイド 245LP）を重量比 5:3 で混合し、遊星型攪拌機（（株）シンキーAR-100）にて 2 分間の攪拌と 1 分間の脱泡を行った。型に流し込んだエポキシ樹脂は、真空乾燥機（アズワン（株）AVO-250N）にて 80°C で 2 時間加熱して硬化させた。硬化後に真空乾燥機から取り出し、型から外して中子を抜き取ったものを試験片とした。図 5 に吸水・吸湿試験片を示す。

以上の手順に従い、吸水試験と吸湿試験の各試験条件について、無孔、円孔、三角 1 次フラクタル孔、三角 2 次フラクタル孔、および、四角 1 次フラクタル孔の 5 種類の試験片を各 3 本ずつ作製した。

2.3 吸水・吸湿試験方法

吸水試験としては、試験片を水で満たした容器に完全に浸漬させたときの吸水量の時間変化を測定した。試験条件は、室温環境（25°C）と高温環境（80°C）の 2 種類とした。吸湿試験としては、試験条件を 80°C、90%RH として吸水量の時間変化を測定した。なお、吸水・吸湿にともなう試験片の寸法変化をレーザー変位計にて測定し、いずれの試験片においても寸法変化は十分に小さいことを確認した。これにより、寸法変化について、同一試験片での部位による差異や各種試験片間での差異は無いと判断した。以下、詳細を述べる。

はじめに、予備乾燥として、作製した試験片を真空乾燥機にて 80°C で 24 時間加熱した後、読み取り精度 0.1mg の電子天秤（（株）島津製作所 ATX-224）にて試験片の重量を計測した。この重量を試験片の乾燥時重量（ W_0 ）とした。

吸水試験では、水を張った容器にネットを敷き詰めて試験片底面と容器とが密着して吸水が阻害されることを防ぎ、十分に間隔をとって試験片を完全に浸漬させた。室温での吸水試験では試験片を入れた容器を 25°C の室温中に静置した。また、高温での吸水試

験では試験片を入れた容器を 80°C に保持した小型環境試験機に静置した。一方、高温での吸湿試験では、80°C、90%RH に保持した小型環境試験機に試験片を入れ静置した。

吸水量の時間変化を測定するために、試験片を試験開始から 10 時間後までは 1 時間おき、100 時間後までは 6 時間おき、それ以降は 24 時間おきに試験片を水中または環境試験機から取り出し、表面の水分を完全に拭き取った後、電子天秤にて試験片の重量 W_t を測定した。試験片の吸水率 M_t [%] は以下の式 (1) によって算出した。

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad [\%] \quad (1)$$

3 数値解析

エポキシ樹脂の吸水・吸湿は Fick 則に従うとし、拡散方程式にてモデル化できるものとした[2]。拡散方程式の数値計算には Crank-Nicolson 法を用いた。なお、本研究の数値計算では定性的傾向を知るのが目的であるので、吸水試験では初期条件として、水に触れている材料外周部の初期吸水率を 100% とし、それ以外の部位での初期吸水率は 0% とした。その他、数値計算に要する各種定数は文献値や本研究の実験結果を参照し適切に定めた。

4 結果と考察

吸水・吸湿実験から得られた吸水率の時間変化について、室温吸水条件下での結果を図 6 に、高温吸水条件下での結果を図 7 に、高温吸湿条件下での結果を図 8 に示す。数値計算による吸水率の時間変化の結果を図 9 に、吸水率の空間分布 (5000 ステップ時) を図 10 に示す。以下では三つの観点から考察を行う。

まず第一の観点として、フラクタル孔と円孔とを比較すると、図 6 から、概していずれの時間においても、吸水率は、円孔、四角 1 次フラクタル孔、三角 1 次フラクタル孔、三角 2 次フラクタル孔の順に高くなっていることがわかる。このことから、室温吸水条件下では、フラクタル孔を有する試験片は円孔を有する試験片に比べて吸水率が高くなることがわかる。同様のことは図 8 でも確認ができ、高温の吸湿条件下でも成り立つことがわかる。また、図 9 から数値計算結果からも同様の傾向を確認できる。したがって、フラクタル孔は円孔と比べて吸水・吸湿条件下での吸水率を高めることに有効であることがわかる。しかし、高温吸水条件下での結果である図 7 によると、フラクタル孔と円孔との各時間での吸水率の差はほとんど無くなっていることがわかる。これは、高温吸水条件下では、室温の場合と比べて温度の高さに起因して水分拡散の速さが大きくなり、この速さが水分拡散の支配的要因となってしまいうために、孔の形状の差異が現れにくくなったためと考えられる。このことから、フラクタル孔の有効性は水分拡散が比較的緩やかに生じるときに顕著にあらわれることがわかる。

つぎに第二の観点として、時間に対する吸水率の応答性に着目をする。室温吸水条件下での図 6 によると、上述のとおり、概していずれの時間においても吸水率は、円孔、四角 1 次フラクタル孔、三角 1 次フラクタル孔、三角 2 次フラクタル孔の順に高くなっており、各吸水率の時間変化については、吸水開始直後に各フラクタル孔が円孔に比べ

て高い吸水率となり、以後、円孔に対する各フラクタル孔の吸水率をほぼ同じ割合に維持しながら推移していくことがわかる。同様の傾向は、高温吸湿条件下での図 8 と数値計算結果の図 9 から確認できる。したがって、フラクタル孔は円孔と比べて短時間で吸水率を上昇させ、吸水・吸湿に対する即応性を高めることがわかる。しかしながら、高温吸水条件下での図 7 から、上述の水分拡散の支配的要因に関する考察結果を考慮すると、即応性についての有効性は低くなることがわかる。これらをまとめると、フラクタル孔によって吸水・吸湿への即応性は向上し、水分拡散が比較的緩やかに生じるときに効果が顕著にあらわれることがわかる。

最後に第三の観点として、フラクタル孔の形状の比較を行う。まず、自己相似性を作り出す操作の繰り返し数である次数に着目し、三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔の吸水率を比較すると、室温吸水条件下での図 6 によると、三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔は、いずれの時間においてもほぼ同程度の吸水率となっている。この傾向は、数値計算結果の図 9 から確認できる。そこで、吸水率の分布をあらわす数値計算結果である図 10 を見ると、三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔は、いずれも同じように吸水率がほぼ正六角形型に広がっていることがわかる。すなわち、室温吸水条件下では、三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔とでは、水分拡散の振舞いに違いはほとんど無く、このことが三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔の吸水率の差異を小さくしたと考えられる。したがって、このことは、むやみに次数をあげて孔の周長を大きくしたとしても必ずしもそれに見合う効果が得られるとは限らず、所望の効果をj得るのに十分な次数が存在することを示唆していると考えられる。ただし、高温吸湿条件下での図 8 では、いずれの時間においても、三角 2 次フラクタル孔が三角 1 次フラクタル孔よりも高い吸水率をあらわしていることを考慮すると、適切な次数は環境条件にも依存することがわかる。

つぎに、フラクタル孔についての異なる種類での比較として、三角 1 次フラクタル孔および三角 2 次フラクタル孔に対する四角 1 次フラクタル孔の結果の違いに着目する。室温吸水条件下での図 6 では、四角 1 次フラクタル孔の吸水率は、三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔に比べて、いずれの時間においても低くなることがわかる。この傾向は、高温吸湿条件下での図 8 および数値計算結果の図 9 から確認できる。そこで、吸水率の分布をあらわす数値計算結果である図 10 を見ると、四角 1 次フラクタル孔は吸水率が正四角形型に広がっていることがわかる。このことは、水分拡散の方向に異方性がもたらされていることを意味している。したがって、この異方性によって、水分が空間的に一様に拡散することが抑えられ、より同心円状に近い正六角形型の分布をする三角 1 次フラクタル孔と三角 2 次フラクタル孔に比べて低い吸水率になったと考えられる。さらに、四角 1 次フラクタル孔の周長と三角 1 次フラクタル孔の周長の比は 1.6 対 1.5 であり、四角 1 次フラクタル孔の周長が三角 1 次フラクタル孔の周長よりも大きいことを考慮すると、上記の次数についての考察と同様に、周長を大きくしたとしても必ずしもそれに見合う効果が得られるとは限らず、周長以外の要因も考慮に入れる必要があることがわかる。フラクタル孔の種類によって水分拡散の方向に異方性がもたらされるという結果は、機能性材料を新たに設計する立場から考えると、水分が拡散

する方向に指向性を付与でき、非一様な水分拡散を実現できるということを意味している。さらに、フラクタルの次数と種類という形状に加えて、フラクタル孔の数や向きおよび配置などを工夫することで、複数の種々のフラクタル孔による相互の干渉による効果や相乗効果も期待できる。したがって、これらのことから、機能性材料へのフラクタルの応用の有効性と可能性を理解することができる。

以上、フラクタル孔の形状を比較した結果をまとめると、フラクタル孔の周長を大きくすることは水分拡散の向上には有効であるが、水分拡散には周長以外の要因も大きく影響することがわかる。特に、フラクタル孔の種類によっては、水分拡散の方向に指向性を付与することができることが明らかになった。

5 結言

本研究では、孔を有するエポキシ樹脂の吸水・吸湿性能向上に対するフラクタルの有効性を検討した。特に、フラクタルの形状の違いが吸水・吸湿性能に及ぼす影響を明らかにするために、次数と種類が異なるフラクタル孔を用いて吸水試験（室温/高温）と吸湿試験（高温）を行った。また、吸水率の時間変化について数値解析により考察を行った。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) フラクタル孔は円孔と比べて吸水・吸湿条件下での吸水率を高めることに有効である。特に、フラクタル孔の有効性は水分拡散が比較的緩やかに生じるときに顕著にあらわれる。
- (2) フラクタル孔によって吸水・吸湿への即応性は向上する。特に、このフラクタル孔による応答性への効果は、水分拡散が比較的緩やかに生じるときに顕著にあらわれる。
- (3) フラクタル孔の周長を大きくすることは水分拡散の向上には有効であるが、水分拡散には周長以外の要因も大きく影響する。フラクタル孔の種類によっては、水分拡散の方向に指向性を付与することができる。

謝辞

千葉大学大学院工学研究科機械系コースの渡辺研究室に所属をしていた学生諸子ならびに関係する皆様に感謝する。特に、本研究の遂行にあたって多くの貢献をいただいた、津田哲氏、皆川仁志氏、海野周太氏、大家健司氏、柳原悠希氏、糟谷直樹氏に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] たとえば、渡辺 知規, 胡 寧, 井上 創, 滝澤 直弥, 李 淵, “MWNT/Epoxy 複合材料の引張強度と破壊靱性に及ぼす表面処理/加圧硬化/液状ゴム添加の影響”, 日本複合材料学会誌, 39 巻, 2 号, (2013), pp.49-56.
- [2] 荒尾 与史彦, 小柳 潤, 八田 博志, 川田 宏之, “CFRP の吸湿濃度を考慮した微視的寸法変化の調査”, 日本複合材料学会誌, 34 巻, 3 号, (2008), pp.95-101.

- [3] 芳我 攻, 浅沼 博, 保坂 隆, 後藤 貴志, “ジュール加熱型スマート積層材料の研究：第1報, AI/CFRP 非対称積層材料の変形と初歩的知的応答”, 日本機械学会論文集 A 編, 69 巻, 681 号, (2003), pp.861-866.
- [4] 浅沼 博, “アクチュエータ機能をもつ積層複合材料”, 特許第 4132112 号, 特願平 8-298339.
- [5] 浅沼 博, 芳我 攻, 内藤 信正, 土屋 智文, “積層複合材料の熱変形を利用したアクチュエータの開発”, 日本複合材料学会研究発表講演会予稿集, (1996), pp.19-20.
- [6] 木部 光尋, 鈴木 智裕, 浅沼 博, “中空部導入によるアクティブラミネートの機能性向上”, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 17 号, No.416, (2009)
- [7] 松下貢, “フラクタルの物理〈1〉基礎編”, 裳華房, (2002).
- [8] 津田 哲, 機能性材料の性能向上を目的とした材料構造の提案と評価, 千葉大学大学院工学研究科修士論文, (2015).
- [9] 皆川 仁志, 新たな材料構造による機能性材料の性能向上, 千葉大学工学部機械工学科卒業論文, (2014).
- [10] 大家 健司, フラクタル図形による複合材料の機能改善に関する研究, 千葉大学工学部機械工学科卒業論文, (2015).
- [11] 柳原 悠希, 複合材料の機能向上を目的としたフラクタル構造を応用した材料の研究, 千葉大学工学部機械工学科卒業論文, (2015).

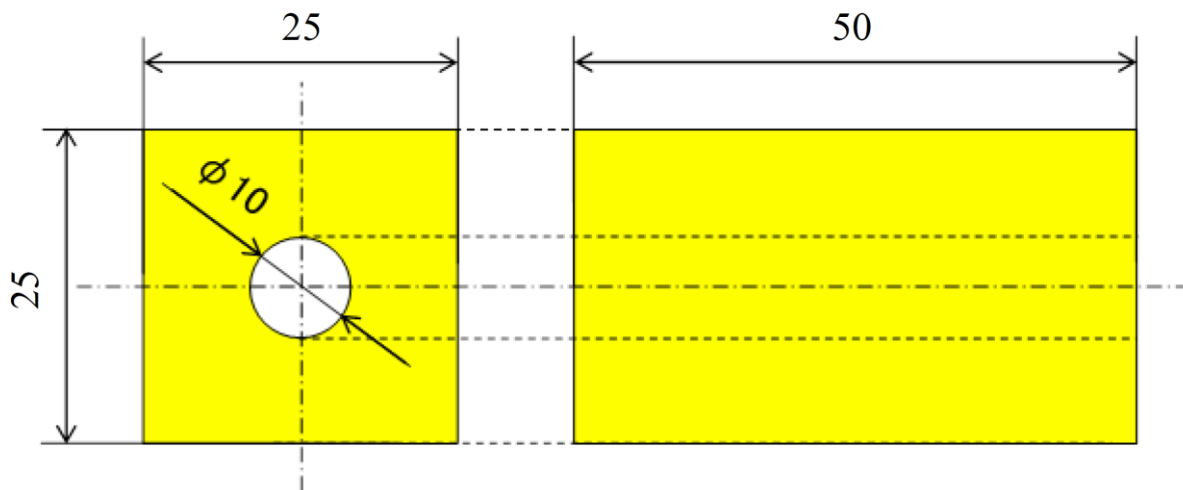
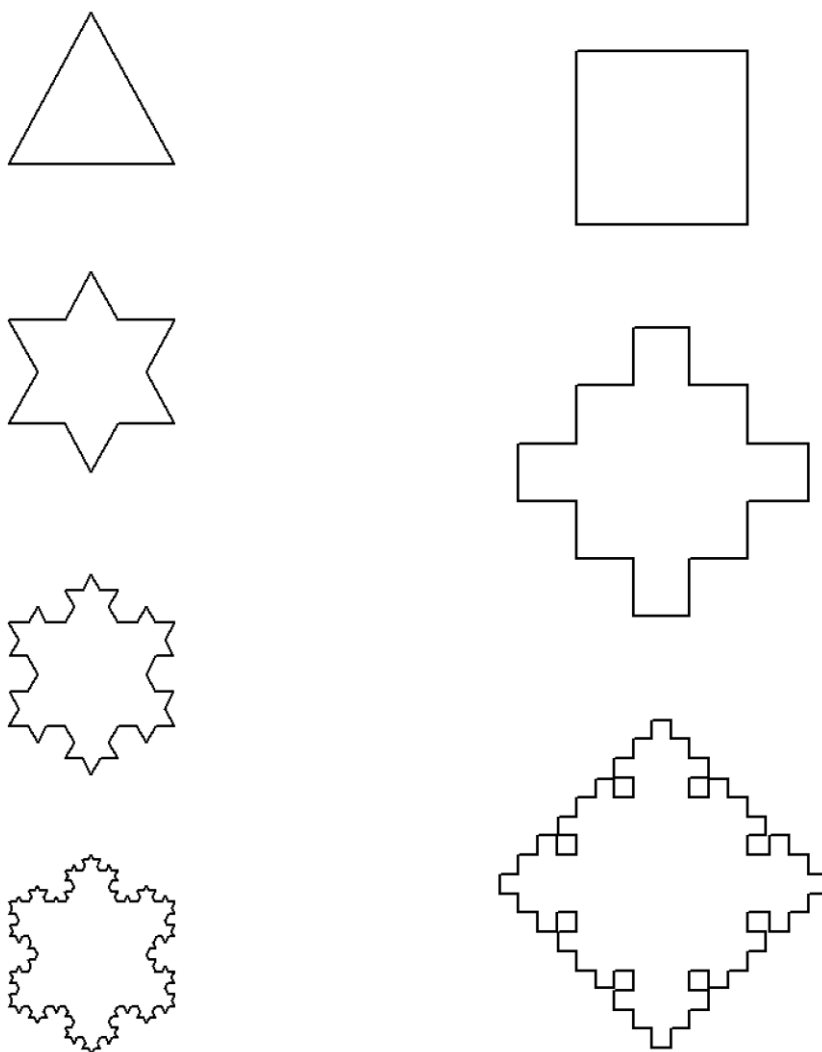


図1 吸水・吸湿試験片形状と寸法（円孔の場合）



(a) 正三角形を基準としたもの (b) 正四角形を基準としたもの

図2 自己相似フラクタル



(a) 円孔 (b) 三角1次フラクタル孔 (c) 三角2次フラクタル孔 (d) 四角1次フラクタル孔

図3 中空部断面形状と周長比（図中数値は円孔の周長に対する周長比）



図4 中子の原型

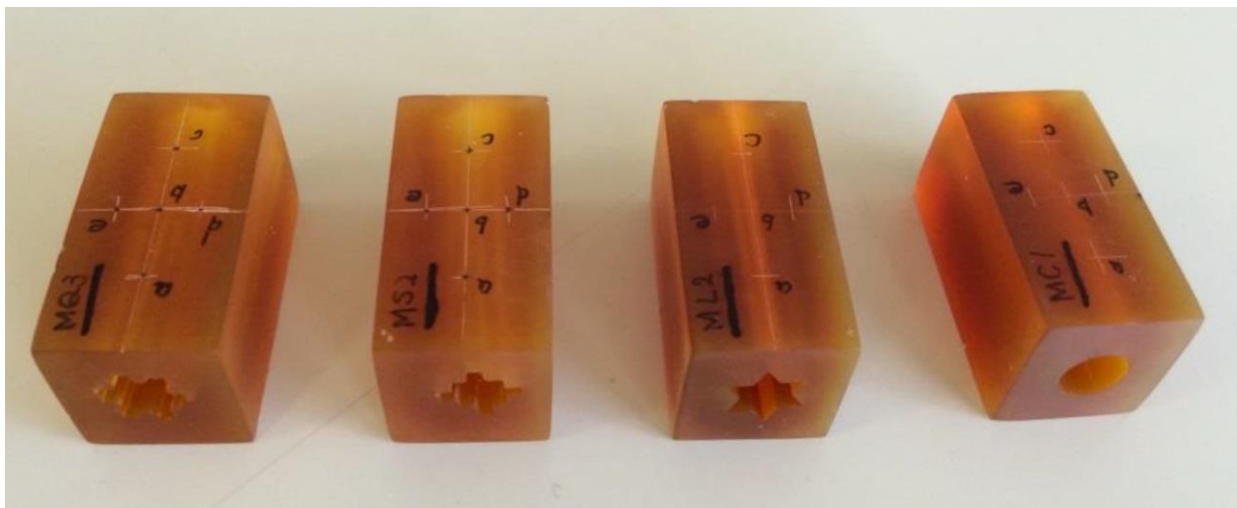


図5 吸水・吸湿試験片

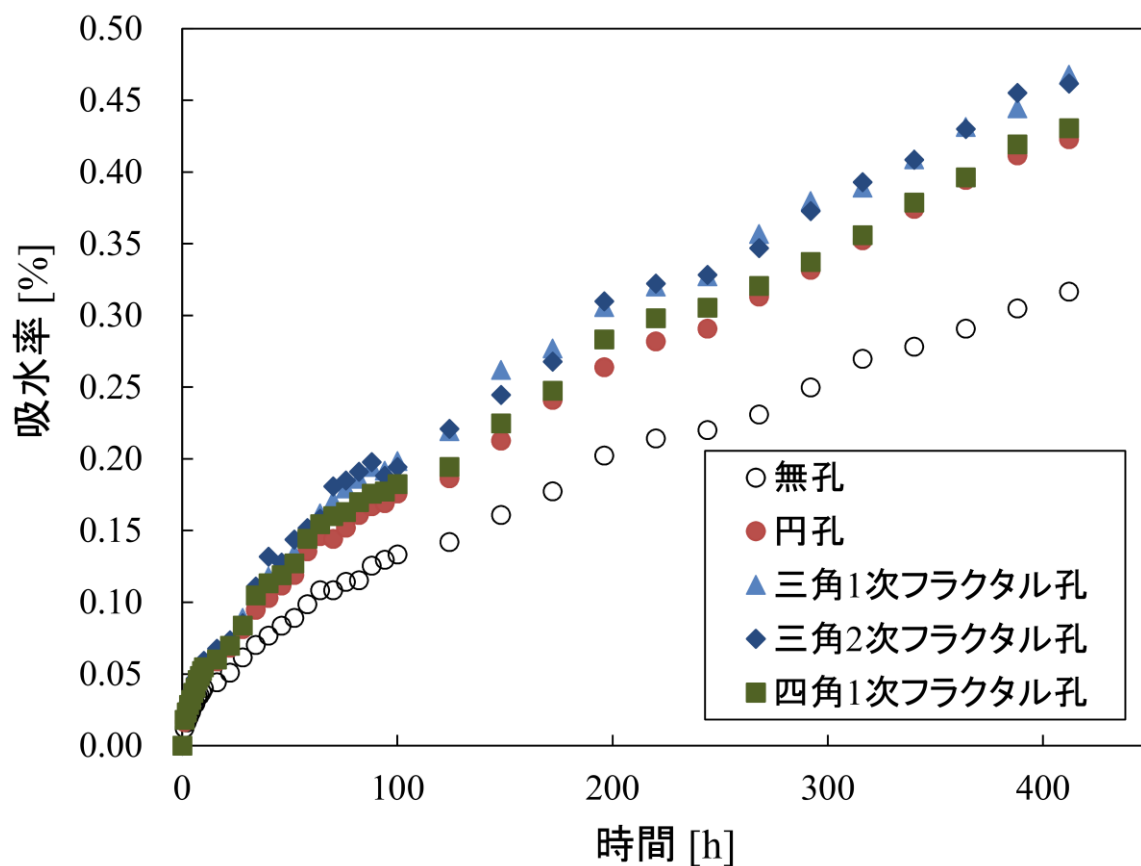


図6 室温吸水条件下での吸水率の時間変化

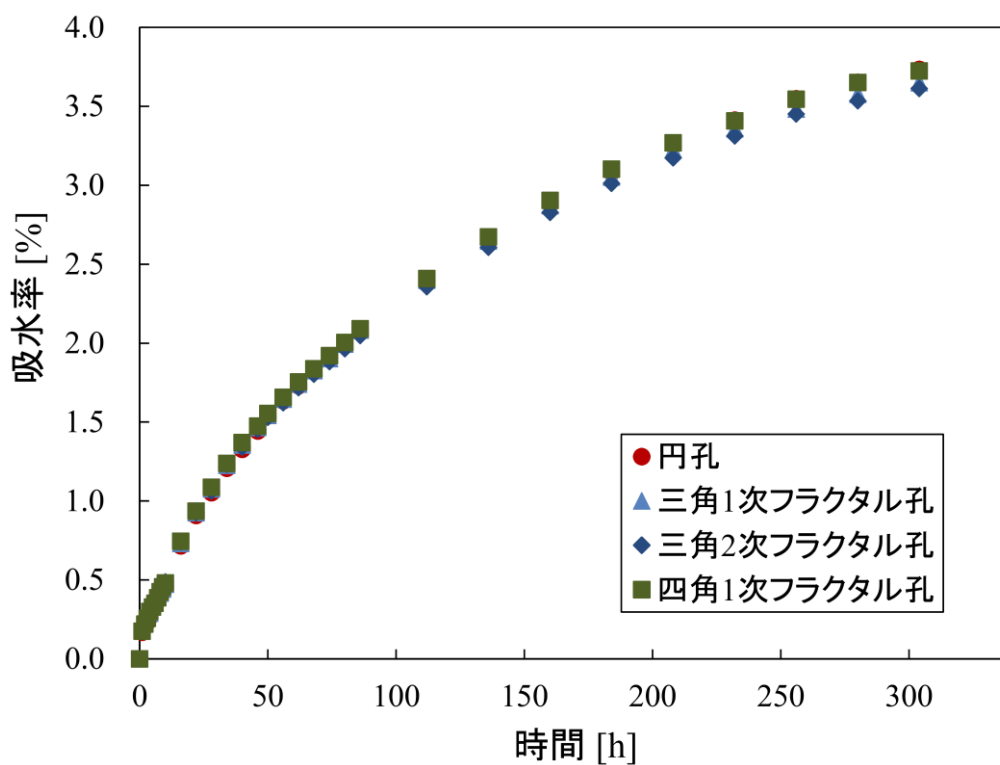


図7 高温吸水条件下での吸水率の時間変化

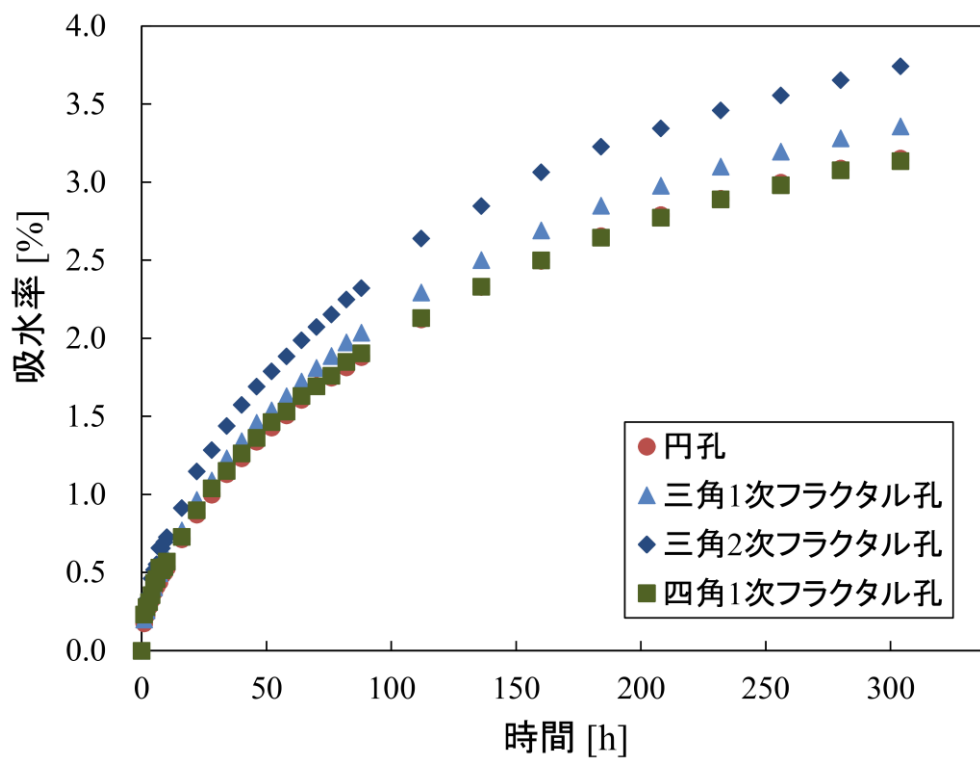


図8 高温吸湿条件下での吸水率の時間変化

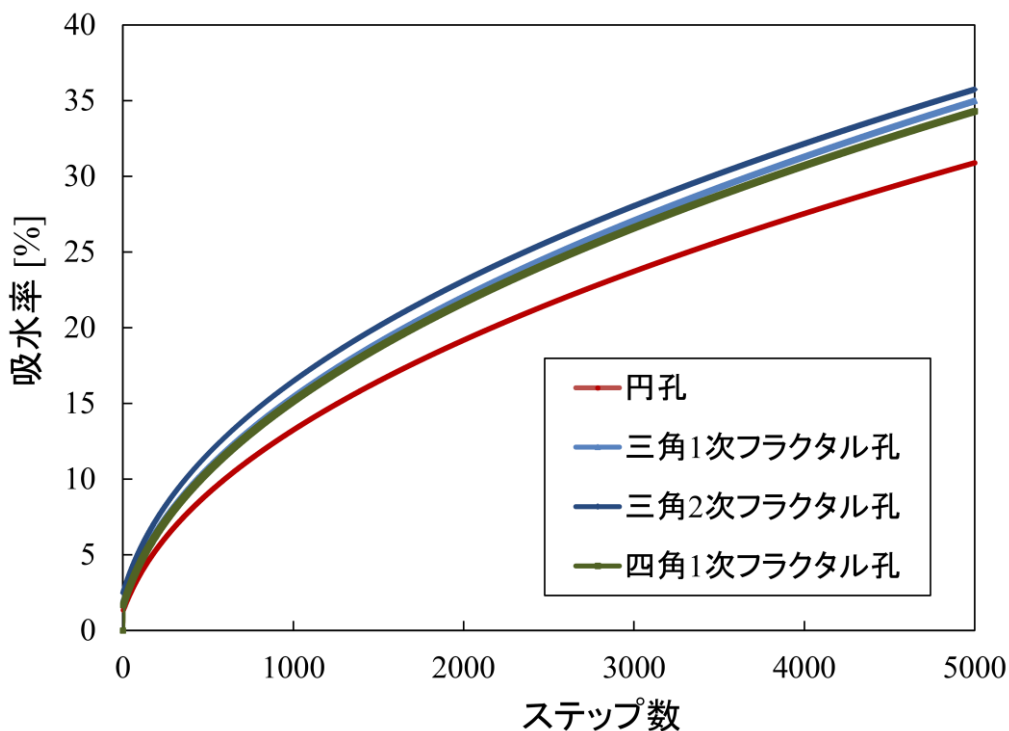
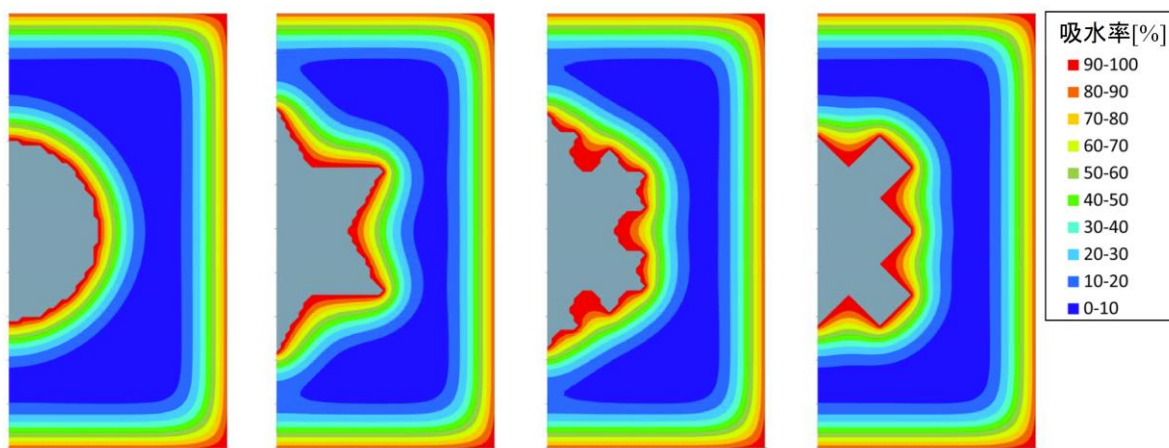


図9 数値計算による吸水率の時間変化



(a)円孔 (b)三角1次フラクタル孔 (c)三角2次フラクタル孔 (d)四角1次フラクタル孔

図10 数値計算による吸水率の空間分布 (5000 ステップ時)

(原稿提出: 2016年11月19日; 修正稿提出: 2017年1月18日)