

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月2日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540317

研究課題名（和文） 陽電子を用いた天然岩石・鉱物中のナノ空孔解析

研究課題名（英文） Nanopore analysis of natural rocks and minerals by positron

研究代表者

中田 正隆（NAKATA MASATAKA）

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：80180305

研究成果の概要（和文）：

天然の岩石、鉱物中のナノスケールの空隙を陽電子消滅法によって調査した。窒素ガス吸着法、X線小角散乱法などの空隙計測法と組み合わせて調べたところ、陽電子消滅法のみがマイクロ孔領域の空隙に対して敏感であることがわかった。この性質を使用し、サポナイト鉱物中のオングストロームスケールの層間を介したセシウム移行の拡散係数を  $2.5 \times 10^{-8} [\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$  と定量することができた。

研究成果の概要（英文）：

Nano-scale pores in natural minerals and rocks were investigated by positron annihilation spectroscopy combined with other porosimetric techniques as  $\text{N}_2$  gas absorption porosimetry and small angle x-ray scattering. It was found that positron annihilation spectroscopy sensitively probes micropore less than 2 nm in diameter. The Cs diffusion coefficient through angstrom-scale inter layer spaces of saponite was evaluated to be  $2.5 \times 10^{-8} [\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$ .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：鉱物，ナノ空孔，陽電子，ポジトロニウム

## 1. 研究開始当初の背景

岩石・鉱物はさまざまな空隙を有している。これらの空隙は試料中を移動する地下水や、地下水と共に移動する化学物質の経路として機能する（物質移動）。また移動経路としてだけでなく、分子吸着・脱離の場としても機能する（吸着・脱離）。身近な例として、

コンクリートの劣化がある。コンクリート内の様々な種類、サイズの空隙が、付近に存在する可溶性の水酸化カルシウムや未水和セメント、低結晶性セメントゲルと反応し、劣化損傷に発展する。現在の環境問題の1つである放射性廃棄物地層処分も挙げることができる。高レベル放射性廃棄物は数千年から

10 万年以上にわたり、人間環境から隔離しなければならぬ。このため、地下深部に処分する方法が採られる。ところが地質環境にある放射性廃棄物は空隙を介して移動し、ついには生活圏へ漏出する。よって、精度の高いリスク予測のために、空隙の精密計測は不可欠である。

我々が手にする天然の鉱物には大小様々な種類、形状、サイズ、空隙（空孔、転位、積層不整、粒界、界面など）が含まれている。このような空隙を評価するために、水銀圧入法が標準的に用いられてきた。同手法は、マクロ孔（細孔直径 50 ナノメートルより大きいもの）以上の大きさの空隙、空隙が試料表面に対して連結している状態のもの（開放型空孔）、マイクロクラックの測定には適している。しかし、空隙が閉じた空間のもの（閉鎖型空孔）、マクロ孔より細かい空隙の測定は困難である。このため、さらに微細なメソ孔（2 から 50 ナノメートル）の評価には、ガス吸着法が用いられてきた。しかしながら、同手法も水銀圧入法と同様に閉鎖空孔を検出することはできない。さらに、細孔直径 2 ナノメートル以下のマイクロ孔の測定は困難である。透過型電子顕微鏡による空隙検出も試みられているが、主として軽元素から構成される岩石・鉱物試料ではコントラストが付きにくく、直接観察は困難である。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、水銀圧入法、ガス吸着法、透過型電子顕微鏡といった従来の手法では検出できなかった微視的領域の空隙に初めて焦点を当てる。このために、電子の反粒子である陽電子をプローブとした陽電子消滅法を初めて適用する。陽電子消滅法により、微視的な空隙を検出し、それらの形状、サイズ分布、周囲の環境（空隙がどのような元素に囲まれているか）を分析する。水銀圧入法、ガス吸着法のデータと併せて、マイクロ、メソ、マクロ孔をカバーした全ての空孔領域で議論し、物質移動、吸着・脱着に関して知見を得ることが目的である。特に、マイクロ孔領域の物質移行について定量的に議論することが目的である。

## 3. 研究の方法

本研究課題の内容は、大きく分けて I. 岩石・鉱物試料の調達と調整、II. 空隙の調査である。初年度は、I. 試料の調達と調整を行う。具体的には、フィールドワークに出向き試料を調達し、X 線回折測定（XRD 測定）、電子顕微鏡観察、熱膨張計測により調べる。次年度は、II. 空隙の調査を行う。具体的には、水銀圧入法、ガス吸着法、X 線小角散乱法、そして陽電子消滅法による空隙の調査を推進する。

## 4. 研究成果

平成 21 年度は、1. 様々な鉱物・岩石試料の調達・調整、2. ミクロ孔領域の空隙の評価に着手した。以下の試料を調達した。1. オパール（南オーストラリア、Cooper Pedy 産）、2. 微斜長石（岐阜県中津川市田原産）、3. 微斜長石（福島県石川郡産）、4. 黒雲母花崗岩（岡山県岡山市万成産）、5. 閃緑岩（福井県大野市西勝原産）、6. 橄欖岩（北海道様似群様似町幌溝産）、7. 角閃石ひん岩（滋賀県滋賀郡志賀町比良山産）、8. 玄武岩（兵庫県富岡市玄武洞産）、9. はんれい岩（山口県阿武郡須佐町高山産）、10. 流紋岩（長野県更埴市稲荷山町湯ノ崎産）、11. 黒雲母角閃石ゲイサイト（長崎県島原市雲仙産）、12. 輝石安山岩（長野県諏訪市角間新田産）、13. 白雲母（茨城県筑波山産）、14. 深度 273 m から採取された堆積岩（北海道幌延産）、15. 深度 623 m から採取された堆積岩（北海道幌延産）。これら全てについて、切削、研磨を行い、陽電子消滅実験、パームポロメトリー実験のための平板を作成した。加えて、X 線回折（XRD）測定用の粉末を作製した。

XRD 測定の結果、上記鉱物試料は比較的高い結晶性を示すことがわかった。深度 273 m の堆積岩については、クォーツ、斜長石、オパール、黄鉄鉱、イライト、菱苦土鉱が同定された。深度 623 m の堆積岩については、クォーツ、斜長石、クリストバライト、黄鉄鉱、イライト、菱苦土鉱が同定された。走査型電子顕微鏡観察により、マイクロクラック、ポイドを有する粒界構造は観察されなかった。

上記試料について、陽電子寿命測定を行い、マイクロ孔領域の空隙の評価を行った。ナノ空孔に対応する陽電子寿命が有意に検出された試料は、1. オパールと 15. 深度 273 m から採取された堆積岩だけであった。1. オパールについては約 15 %、15. 堆積岩については約 8 %得られた。いずれの試料についても得られた陽電子寿命は約 2.0 ns であり、空隙半径にして約 0.5 nm に相当する。オパール単体と XRD 測定でオパール相が同定された堆積岩試料についてだけナノ空孔が検出されたことは、オパールがナノ空孔を介した物質移行に重要な役割を果たすことを示唆している。そこで、オパール試料に限定して、水とともに起こる物質移行の可能性を調査に着手した。

ここでは、液体を用いて空隙の流体透過性を直接的に評価するパームポロメトリーという手法をオパール試料に適用した。パームポロメトリーを鉱物・岩石試料に適用した例はまだ無い。本手法は、水などの液体が圧力によって侵入・透過特性を計測するものである。この結果、僅かではあるが有意に液体がオパール試料に浸透することがわかった。オ

パールの結晶性が高くマイクロクラックやポイドを有する粒界がないこと、浸透する液体が僅かであることを考慮すると、液体がナノ空隙に浸透している可能性が示唆される。

平成 22 年度は、1 年目に引き続き、陽電子消滅法によるマイクロ孔領域の空隙評価を継続した。併せて、水銀圧入法、X 線小角散乱実験、窒素ガス吸着実験など、他の空隙計測手法を用いた評価も行った。平成 21 年度は、TAC モジュールを用いたアナログ計測システムを用いて、平均サイズと平均検出量を評価した。これに対して、2 年目は高分解能デジタル計測システムを用いることによって空隙計測を高精度化し、サイズ分布を計測した。併せて、水銀圧入法、X 線小角散乱実験、窒素ガス吸着実験など、他の空隙計測手法を用いた評価も行った。これにより、ポジトロニウム分光だけがマイクロ孔領域の空隙に対して感度が高いことがわかった。

次にスメクタイト層間をポジトロニウム分光により調査することを試みた。試料にはスメクトン SA (クニミネ工業製サポナイト) を用いた。大気中測定では、オルソポジトロニウム寿命 2.2 ns が 21 % 得られた。この寿命は、空隙サイズにして約 3 Å に相当し、層間におけるオルソポジトロニウム成分と考えられる。真空中 ( $10^{-5}$  Torr) で測定すると、層間におけるオルソポジトロニウム成分に加えて長いオルソポジトロニウム寿命 20 ns が 8 % 得られた。この長寿命成分は、150 度で 8 時間ベーキング処理を行うと 13 % に増加した。得られたポジトロニウム成分の挙動から、次のことが考えられる。大気中では、水分子が層間に多数吸着しているため、ポジトロニウムの多くは層間に存在し、そこで消滅している。真空を引くことによって層間の水分子が減少するため、放出してくるポジトロニウム成分が増加する。ベーキング処理を行うと、層間の水分子がさらに減少するため、放出してくるポジトロニウム成分がますます増加する。以上のことから、上記 2 種類のポジトロニウム (層間のポジトロニウムと放出ポジトロニウム) を用いれば、層間を介した物質移行を評価できることが示唆された。

さらに、バッチ試験によりセシウムを導入したスメクタイトの評価を行った。ナトリウム型スメクタイトの層間に、イオン交換によってセシウムが導入されると、層間に存在するナノ空隙の実効サイズが増加し、放出ポジトロニウム成分が発生することがわかった。これは、ナトリウムと比較してセシウムの水和度が低いいため、水分子が吸着しにくいいためである。以上より、層間のポジトロニウムと放出ポジトロニウムが、セシウムの層間を介した移行を評価する指標となり得ることがわかった。

平成 23 年度は、ナノ空隙を介した物質移

行を定量するため、ポジトロニウム分光によるナノ空隙計測を引き続き継続し、拡散試験データと併せて総合解析を行った。平成 22 年度に、2 種類のポジトロニウム (層間に存在するポジトロニウムと放出してくるポジトロニウム) を用いれば、セシウムの層間を介した物質移行を評価できる指標となり得ることが示唆された。しかしながら、ポジトロニウムデータは水和度を反映した間接的な変化である。ここでは、ポジトロニウムデータとセシウム量について校正曲線の作成し、セシウム拡散議論の可能性を詳細に調べた。層間ポジトロニウム寿命とその相対強度、放出ポジトロニウムとその相対強度について、5 ml 硝酸中含有セシウムイオンモル数についてプロットし、4 種類の校正曲線を作成した。層間ポジトロニウム寿命、放出ポジトロニウム寿命ともに、イオンモル数に対して有意な変化を示さなかった。層間ポジトロニウム相対強度は、僅かに変化を示しただけだった。放出ポジトロニウム相対強度は、イオンモル数に対して線形性を示しながら有意に変化した。以上のことから、放出ポジトロニウム相対強度を用いれば、セシウム拡散を議論できることがわかった。

サポナイト試料について、塩化セシウム溶液拡散を用いてセシウム拡散試験を推進した。拡散試験後のスメクタイト試料に対して、適当な厚さに切り出す解体作業を行った。切り出した試料に対して、硝酸でセシウムを溶出し、その後原子吸光法によりセシウム濃度の評価を行った。上流からの距離が長くなるにつれて、セシウム濃度は減少した。

上記と平行して、切り出した試料について陽電子寿命測定を推進した。層間ポジトロニウム寿命、放出ポジトロニウム寿命、層間ポジトロニウム相対強度、いずれも、上流からの距離に対して有意な変化を示さなかった。この傾向は、校正曲線作成の際に得られた傾向と一致する。放出ポジトロニウム相対強度は、拡散試験データと類似して、上流からの距離が長くなるにつれて減少した。

拡散試験後の試料について原子吸光法によって得られたセシウム濃度の距離依存性データから、フィックの拡散式に基づき拡散係数が  $2.0 \times 10^{-7}$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ] と見積もられた。ポジトロニウムデータ (放出ポジトロニウム相対強度) の距離依存性から、フィックの拡散式によって、拡散係数が  $2.5 \times 10^{-8}$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ] と見積もられた。セシウム濃度の距離依存性データから得られた拡散係数はナノ空隙の効果など全てを含んだ全体の拡散係数に相当する。一方、ポジトロニウムデータから得られた拡散係数は、ナノ空隙を介した拡散係数に相当する。ナノ空隙を介した拡散係数が、およそ一桁小さいことが判明した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

- (1) Quartz formation in natural environment with respect to diffusion-reaction of water molecules in angstrom-scale open spaces, K. Sato, International Journal of Thermal and Environmental Engineering, in press. 査読有
- (2) Study of Gadolinium-Doped Ceria for High Efficiency Fuel Cell, T. Kosaka and K. Sato, International Journal of Thermal and Environmental Engineering, in press. 査読有
- (3) Steady-State Quartz Formation in terms of Water Migration through Nanopores, K. Sato, Proceedings of International Conference on Water, Energy and Environment 2011, 541-545 (2011). 査読有
- (4) Study of Gadolinium-Doped Ceria for High Efficiency Fuel Cell, Tomomi Kosaka and Kiminori Sato, Proceedings of International Conference on Water, Energy and Environment 2011, 622-624 (2011). 査読有
- (5) Origin of Organism-Dependent Biogenic Silica Quartz Formation, K. Sato, J. of Phys. Chem. B 115, 14874-14877 (2011).
- (6) Diffusion-Reaction of Water Molecules in Angstrom Pores as Basic Mechanism of Biogenic Quartz Formation, K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and T. Hatta, J. of Phys. Chem. C 115, 18131-18135 (2011). 査読有
- (7) Vacancies and atomic processes in intermetallics – from crystals to quasicrystals and bulk metallic glasses, Hans-Eckhardt Schaefer, Falko Baier, Markus A. Müller, Klaus J. Reichle, Klaus Reimann, Andrey Rempel, Kiminori Sato, Feng Ye, Xiangyi Zhang, and Wolfgang Sprengel, physica status solidi B 1-10 (2011). 査読有
- (8) Kinetic Study of Hydration-Dehydration in Nano-Scale Interlayer Spaces for Smectite Clay Minerals, K. Sato, K. Fujimoto, Proceedings of 10 th International congress for Applied Mineralogy, 637-643 (2011). 査読有
- (9) Macroscopic and Microscopic Investigation of Densification Behavior for Gadolinium-doped Ceria upon Sintering, Tomomi Kosaka and Kiminori Sato, Mater. Sci. Eng. 18, 0920141-0920143 (2011). 査読有
- (10) Characterization of open nanospaces in nanomaterials, Kiminori Sato, Proceedings of 2nd International Conference NANOCON 2010, B11-B15 (2010). 査読有
- (11) Geological Environment with Nanotechnology: Elemental Migration through Open Nanospaces, Kiminori Sato, Koichiro Fujimoto, Masataka Nakata, Tamao Hatta, and Naotatsu Shikazono, Proceedings of 2nd International Conference NANOCON 2010, PS31-PS35 (2010). 査読有
- (12) Nanoscale Densification Mechanism of Gadolinium-Doped Ceria upon Sintering, Tomomi Kosaka and Kiminori Sato, Proceedings of 2nd International Conference NANOCON 2010, B51-B54 (2010). 査読有
- (13) Free Volumes Associated with Sintering in Gadolinium Doped Ceria Solid Solutions, Tomomi Kosaka and Kiminori Sato, J. of Nanomaterials, 9351461-9351465 (2010). 査読有
- (14) Interlayer Spaces Associated with Hydration and Dehydration in Synthetic Saponite, K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 15, 0120061-012005 (2010). 査読有
- (15) Geological environment with respect to sub-nanoscale pores, K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, Proceedings of the International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications, 3351-3356 (2010). 査読有
- (16) Local atomic structures at grain boundaries in Gadolinium doped Cerium Oxides, Tomomi Kosaka and Kiminori Sato, High Temperature Materials and Processes 29, 373-379 (2010). 査読有
- (17) Improving the interfacial structure of nanocomposite magnets on an atomic scale, Defeng Guo, Wei Li, Xiaohong Li, Yan Chen, Kiminori Sato, Xiangyi Zhang, J. of Phys. D: Appl. Phys. 43, 3250031-3250035 (2010). 査読有
- (18) Study of Cs-loaded SiO<sub>2</sub> glass by thermal analysis and positron annihilation spectroscopy, K. Sato, H. Murakami, K. Ito, K. Hirata, and Y. Kobayashi, Journal of Physics: Conference Series 225, 0120461-0120466 (2010). 査読有
- (19) Study of Gadolinium-doped Cerium Oxide by XRD, TG-DTA, impedance analysis, and positron lifetime spectroscopy, S. Ohta, T. Kosaka, and K. Sato, Journal of Physics: Conference Series 225, 0120431-012045 (2010). 査読有
- (20) Review of Positron-Age-Momentum Correlation (AMOC) Studies of Open Nanospaces in Materials, K. Sato, H. Murakami, and Y. Kobayashi, Topics in Chemistry and Material Science, eds. K. Hadjiivanov, V. Valtchev, S. Mintova, G. Vayssilov, Heron Press Ltd., Vol. 4, 167-174 (2010). 査読有
- (21) Study of nanocrystallization transitions in amorphous Nd<sub>9</sub>Fe<sub>85</sub>B<sub>6</sub> on an atomic scale, Defeng Guo, Xiaohong Li, Wei Li, Lei Xu,

Kiminori Sato, and Xiangyi Zhang, J. of Phys. D: Appl. Phys. 42, 2154071-2154074 (2009). 査読有

(22) Nano- and micro-scale free volume in ultrafine grained Cu-1wt.%Pb alloy deformed by equal channel angular pressing, Sergiy V. Divinski, Jens Ribbe, Dietmar Baither, Guido Schmitz, Gerrit Reglitz, Harald Rösner, Kiminori Sato, Yuri Estrin, and Gerhard Wilde, Acta Materialia 57, 5706-5717 (2009). 査読有

(23) Atomic-scale structural evolution upon crystallite nucleation and growth in amorphous Fe78B13Si9, K. Sato, H. Murakami, K. Fujimoto, M. Nakata, W. Sprengel, H.-E. Schaefer, Y. Ueji, Y. Amemiya, and Y. Kobayashi, Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 0855051-0855054 (2009). 査読有

(24) Atomic-scale structural evolution in amorphous Nd9Fe85B6 subjected to severe plastic deformation at room temperature, Wei Li, Xiaohong Li, Defeng Guo, Kiminori Sato, D.V. Gunderov, V.V. Stolyarov, and Xiangyi Zhang, Appl. Phys. Lett. 94, 231941-231943 (2009). 査読有

(25) Probing the Elemental Environment around the Free Volume in Polymers with Positron Annihilation Age-Momentum Correlation Spectroscopy, K. Sato, H. Murakami, K. Ito, K. Hirata, and Y. Kobayashi, Macromolecules 42, 4853-4857 (2009). 査読有

(26) Nanocrystallization Mechanism of Amorphous Fe78B13Si9, K. Sato, H. Murakami, W. Sprengel, H.-E. Schaefer, Y. Kobayashi, Appl. Phys. Lett. 94, 1719041-1719043 (2009). 査読有

(27) Positron age-momentum-correlation studies of free volumes in polymers, K. Sato, H. Murakami, K. Ito, K. Hirata, Y. Kobayashi, Rad. Phys. and Chem. 78, 1085-1087 (2009). 査読有

(28) Mechanism of Bi precipitation in Sn65.4Bi34.6 Eutectic System, K. Sato, H. Murakami, K. Fujimoto, M. Nakata, and Y. Kobayashi, Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 0202211-0202213 (2009). 査読有

(29) Momentum distributions of ortho-positronium dependent on electronic state at free volume walls in insulators, K. Sato, H. Murakami, K. Ito, K. Hirata, and Y. Kobayashi, Materials Science Forum 607, 53-57 (2009). 査読有

(30) Open-nano pores in natural minerals studied by positron lifetime spectroscopy, K. Yoshizawa, K. Sato, H. Murakami, N. Shikazono, K. Fujimoto, and M. Nakata, Materials Science Forum 607, 189-191 (2009). 査読有

(31) Interlaboratory Comparison of Positron Annihilation Lifetime Measurements, K. Ito, T. Oka, Y. Kobayashi, Y. Shirai, K. Wada, M.

Matsumoto, M. Fujinami, T. Hirade, Y. Honda, H. Hosomi, Y. Nagai, K. Inoue, H. Saito, K. Sakaki, K. Sato, A. Shimazu, and A. Uedono, Materials Science Forum 607, 248-250 (2009). 査読有

[学会発表] (計 19 件)

(1) K. Sato, Migration of Water molecules in Geological Environment, International Conference on Water, Energy, and Environment 2011, 2011.11.15, Sharjah, UAE

(2) K. Sato and Fujimoto, Kinetic Studies of Hydration-dehydration in Nano-Scale Spaces for Smectite Clay Minerals, 10th International Congress for Applied Mineralogy, 2011.8.2, Trondheim, Norway

(3) 佐藤公法, 小坂知己, ガドリニウム固溶セリアの焼結過程における緻密化の研究, 京大原子炉専門研究会, 2010.11.26, 京都大学

(4) K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, Elemental Migration through Nano- and Subnano-Scale Pores in Geological Environment, 36th International Symposium on Environmental Analytical Chemistry, 2010.10.8, Rome, Italy

(5) K. Sato, Characterization of open nanopores in nanomaterials, 2nd International Conference NANOCON 2010, 2010.10.12, Olomouc, Czech

(6) K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, Geological environment with nanotechnology, 2nd International Conference NANOCON 2010, 2010.10.12, Olomouc, Czech

(7) 佐藤公法, 小坂知己, 陽電子消滅法によるガドリニウム固溶セリアの焼結過程の研究, 日本物理学会, 2010.9.25, 大阪府立大学

(8) K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, Geological environment with respect to sub-nanoscale pores, International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications, 2010.8.6, Ottawa, Canada

(9) 佐藤公法, 藤本光一郎, 中田正隆, 八田珠郎, 地質環境における石英生成メカニズムの研究, 第 47 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2010.7.8, 日本未来科学館

(10) K. Sato, K. Fujimoto, M. Nakata, and N. Shikazono, Characterization of Nanodefekt and Elemental Migration in Insulating Materials, Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials, 2010.7.15, Pecs, Hungary

(11) 佐藤公法, 藤本光一郎, 中田正隆, 八田珠郎, 鹿園直建, ポジトロニウムを用いた石英生成プロセスのナノ構造評価, 資源地質学会, 2010.6.25, 東京大学

(12) 佐藤公法, ポジトロニウム元素依存性の発見とそれを用いたナノ構造評価, 日本物理学会, 2010.3.20, 岡山大学

(13) K. Sato, H. Murakami, and Y. Kobayashi, Probing Open Nanospaces in Functional

Materials with Positronium, The International Conference Material Science in the Age of Nano, 2009.11.26, Havana, Cuba

(14) K. Sato, H. Murakami, K. Ito, K. Hirata, Y. Kobayashi, and T. Hatta, Studies of positronium states in alkali-metal occluded glasses, Advanced Science Research Symposium 2009, 2009.11.12, 東海, テクノ交流館リコッティ

(15) 佐藤公法, 村上英興, 伊藤賢志, 平田浩一, 小林慶規, 陽電子寿命—運動量相関計測によるアルカリ金属吸蔵石英ガラスの研究, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009.9.28, 熊本大学

(16) K. Sato, H. Murakami, and Y. Kobayashi, Characterization of Open Nanospaces in Porous Materials by Positronium, 3rd International Symposium Advanced Micro- and mesoporous materials '2009, 2009.9.9, ブルガリア, アルベナ

(17) 佐藤公法, 村上英興, 藤本光一郎, 中田正隆, 地質環境における石英生成プロセスのナノ空孔サイトからの研究, 第 46 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2009.7.2, 日本科学未来館

(18) 佐藤公法, 中田正隆, 鹿園直建, 小室光世, 北海道幌延堆積岩試料中のナノ空隙占有物質の分析, 資源地質学会第 59 回年会学術講演会, 2009.6.26, 東京大学

(19) 佐藤公法, 村上英興, 小林慶規, 陽電子消滅法によるナノ結晶材料中の核生成および成長過程の研究, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009.3.27, 立教大学

[図書] (計 1 件)

(1) Quasicrystals: Types, Systems, and Techniques, eds. B.E. Puckermann, 分担執筆 pp. 77-105 “Chapter 3. Vacancies in Quasicrystals”, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2011, ISBN: 978-1-61761-230-5.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 正隆 (NAKATA MASATAKA)  
東京学芸大学・教育学部・教授  
研究者番号: 80180305

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

佐藤 公法 (SATO KIMINORI)  
東京学芸大学・教育学部・准教授  
研究者番号: 00401448