

MoO₃ および H₂MoO₄ の抗菌活性への pH の影響

中山 享 (新居浜工業高等専門学校 生物応用化学科, s.nakayama@niihama-nct.ac.jp)

伊藤 陽菜多 (新居浜工業高等専門学校 生物応用化学科, c1402003@niihama.kosen-ac.jp)

美簾 彩乃 (新居浜工業高等専門学校 生物応用化学科, c1401824@niihama.kosen-ac.jp)

福田 有里 (新居浜工業高等専門学校 専攻科 生物応用化学専攻, c1401825@niihama.kosen-ac.jp)

中原 望 (岡山大学 環境生命自然科学研究科, n-nakahara@s.okayama-u.ac.jp)

辻久巳 (新居浜工業高等専門学校 エンジニアリングデザイン教育センター, h.tsuji@niihama-nct.ac.jp)

Effect of pH on the antibacterial properties of MoO₃ and H₂MoO₄

Susumu Nakayama (Department of Applied Chemistry and Biotechnology, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Japan)

Hinata Ito (Applied Chemistry and Biotechnology, KOSEN, Niihama College, Japan)

Ayano Bito (Applied Chemistry and Biotechnology, KOSEN, Niihama College, Japan)

Yuri Fukuta (Applied Chemistry and Biotechnology Program, Advanced Engineering Course, KOSEN, Niihama College, Japan)

Nozomi Nakahara (Faculty of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University, Japan)

Hisami Tsuji (Engineering Design Education Center, KOSEN, Niihama College, Japan)

要約

MoO₃の高い抗菌活性は水分との接触反応により生成するH₃O⁺によるpHの低下が影響すると考えられている。難水溶性粉体で、H₃O⁺の生成を期待できるH₂MoO₄、WO₃、H₂WO₄、H型Yゼオライト、H型モルナイトゼオライトについて、MoO₃と共に大腸菌に対する抗菌活性を調べた。抗菌活性は、MoO₃の他にH₂MoO₄で認められたが、WO₃、H₂WO₄、H型Yゼオライト、H型モルナイトゼオライトでは認められなかった。抗菌活性が認められたMoO₃およびH₂MoO₄を脱イオン水中で1日静置した後、それぞれのpH値を測定したところ、MoO₃が3.52であり、H₂MoO₄が4.34であった。一方、抗菌活性が認められなかつたWO₃およびH₂WO₄のpH値は5.0以上であり、H型YゼオライトおよびH型モルナイトゼオライトのpH値は6.2以上であった。また、100 MPa加圧下状態での圧粉体のイオン伝導に関する抵抗率を室温にて測定した。MoO₃およびH₂MoO₄は他のサンプルより抵抗率が1桁以上低く、イオン伝導種と考えられるH⁺もしくはH₃O⁺濃度が高いと推測した。MoO₃およびH₂MoO₄の低いpH値、すなわち多くのH₃O⁺の生成が、抗菌活性に影響を与えていると考えた。

Abstract

The high antibacterial activity of MoO₃ is thought to be due to a decrease in pH caused by the generation of H₃O⁺ upon contact with water. The antibacterial activity of H₂MoO₄, WO₃, H₂WO₄, H-type Y zeolite, and H-type modonite zeolite, which are poorly water-soluble powders expected to generate H₃O⁺, was examined against *Escherichia coli* along with MoO₃. Antibacterial activity was observed not only for MoO₃ but also for H₂MoO₄, but not for WO₃, H₂WO₄, H-type Y zeolite, or H-type modonite zeolite. MoO₃ and H₂MoO₄, which exhibited antibacterial activity, were left in de-ionized water for one day, and their pH values were measured. The pH values of MoO₃ and H₂MoO₄ were 3.52 and 4.34, respectively. On the other hand, the pH values WO₃ and H₂WO₄, which did not exhibit antibacterial activity, were above 5.0, and those of H-type Y zeolite and H-type modonite zeolite were above 6.2. Furthermore, the resistivity of the compacts, related to ionic conduction, was measured at room temperature under a pressure of 100 MPa. MoO₃ and H₂MoO₄ had resistivities at least one order of magnitude lower than the other samples, suggesting that the concentrations of H⁺ or H₃O⁺, which are thought to be ionic conduction species, were high. The low pH values of MoO₃ and H₂MoO₄, i.e., the generation of large amounts of H₃O⁺, are thought to affect their antibacterial activity.

キーワード

阻止帯形成, 水素イオン濃度, pH メーター, プロトン伝導, インピーダンス測定

1. はじめに

優れた抗菌活性を示す無機固体物質としては、AgやCuの金属系の他に、難水溶性の酸化物系としてAg₂O、ZnO、CuO、CaO、TiO₂などが知られており、耐熱性がありプラスチックに練り込みことが可能で、すでに実際に使用されているものも多い。水溶性抗菌剤に較べて難溶性抗菌剤の場合、

抗菌活性が長期間に渡り維持できる利点がある（高麗, 1999; 菊池, 2000; 佐藤, 2009; 澤井, 2009; 狩野, 2018）。筆者らも、これまでにハロー法 (JIS L1902) をベースとして独自に開発した難水溶性粉体の抗菌剤としての感受性値 (MIC 値) を決定する方法で、Ag₂O、ZnO、CuOなどの大腸菌に対する抗菌活性を調べてきた (Nakayama et al., 2023)。それら難水溶性粉体の抗菌剤から微量に溶け出すイオン種によって発生する活性酸素種である過酸化水素H₂O₂、ヒドロキシラジカル・OH、スーパーオキシド：O₂⁻などが抗菌活性に関係していると考えられている (石田, 2011)。一方、着色、活性低下、使用環境制限

などの問題点が解決できる、高い抗菌活性を持つ新たな難水溶性抗菌剤の開発が未だ望まれている。そのような中で、酸化モリブデン MoO_3 の高い抗菌活性が最近注目されている。その高い抗菌活性には、 MoO_3 と水分との接触反応により生成するヒドロキシラジカルイオン H_3O^+ による pH の低下が影響している報告がある (Zollfrank et al., 2012; Matsumoto et al., 2019; 中島, 2020; Sakai et al., 2023)。 MoO_3 のように H_3O^+ の生成を期待できる難水溶性粉体については、モリブデン酸 H_2MoO_4 、酸化タンゲステン WO_3 、タンゲステン酸 H_2WO_4 、H型ゼオライト (Yゼオライト、モデルナイト) などがある。本研究では、それらの難水溶性粉体の大腸菌に対する抗菌活性について調べた。

2. 実験

2.1 原料および器具

抗菌活性試験粉体には、株式会社高純度化学研究所の MoO_3 (99.98 %)、 H_2WO_4 (99 %)、ナカライトスク株式会社の H_2MoO_4 (一級)、富士フィルム和光純薬株式会社の WO_3 (99.5 %)、H型Yゼオライト (HS-320)、H型モルデナイトゼオライト (HS-690) を用いた。また、抗菌活性試験粉体として調製した MMoO_4 (M: Ca, Sr, Ba) の出発原料には、富士フィルム和光純薬株式会社の $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (99 %)、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (特級)、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (特級)、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (特級)、 NH_3 水 (特級) を用いた。

培地の作製および抗菌性試験には、以下の試薬および器具を用いた。Difco 社のバクトトリプトン、ナカライトスク株式会社の酵母エキス、富士フィルム和光純薬株式会社の寒天と NaCl (特級)、アズワン株式会社のポリスチレン製滅菌シャーレ (直径 90 mm、高さ 15 mm)、タイトック株式会社の恒温振とう槽 (パーソナル-11)、アズワン株式会社の恒温槽 (クールインキュベーター i-CUBE・FCI-280G) である。

2.2 MMoO_4 (M: Ca, Sr, Ba) の調製

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 44 g を脱イオン水 300 mL に溶かした

水溶液に濃 NH_3 水を加えて pH を 10 付近にした後、全体量を 500 mL とした。1 mol·L⁻¹ の $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 水溶液になっている。同じく、濃 NH_3 水を加えて pH を 10 付近にした 0.33 mol·L⁻¹ の $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ の各水溶液も作製した。 $\text{M}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液 300 mL 中に、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 水溶液 200 mL を攪拌しながら滴下すると MMoO_4 沈殿が生成するので、吸引濾過し、脱イオン水とエチルアルコールで洗浄した後、120 °C にて十分に乾燥した (日本化学会, 1975)。

2.3 抗菌活性評価方法

抗菌活性評価は、以下のようにして行った。LB 寒天培地は、蒸留水 500 mL に、バクトトリプトン 5.0 g、酵母エキス 2.5 g、寒天 10 g、 NaCl 2.5 g を溶かし、2 気圧で 121 °C にて 15 分間滅菌処理し、少し冷却した後、シャーレに移し固化して作製した。大腸菌の液体培地は、蒸留水 20 mL に、バクトトリプトン 0.2 g、 NaCl 0.1 g、酵母エキス 0.1 g を溶かし、2 気圧で 121 °C にて 15 分間滅菌処理した後、常温まで冷却して作製した。大腸菌 (*Escherichia coli* NBRC 3301) を滅菌処理した白金耳で植菌した後、30 °C にて 110 spm で 24 時間振とう培養した。LB 寒天培地への大腸菌の植菌は、液体培地を 10^5 倍希釈したものを 100 μL 採取して LB 寒天培地に植菌し、コンラージ棒で全体に広げた。大腸菌を植菌した LB 寒天培地上に、抗菌活性試験粉体を $\varphi 10$ mm のステンレス製金型にて 100 MPa で加压成形した圧粉体を配置した。37 °C の恒温槽中に 24 時間放置した (Nakayama et al., 2023)。この一連の操作手順を、図 1 に示す。

37 °C の恒温槽中に 24 時間放置した後に、圧粉体の周囲にハロー (阻止円: 細菌の増殖が起こらない透明な領域) が認められた場合、抗菌活性ありと判断した。圧粉体の外周と大腸菌の増殖領域との最接近距離を測定し、「ハロー幅」とした。試験数は、 $n = 3$ とした。

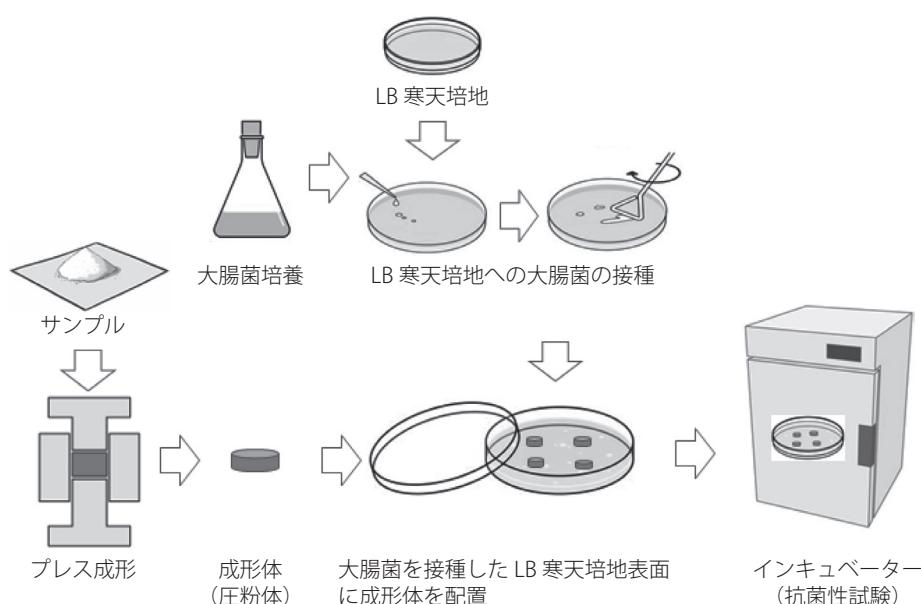


図 1：難水溶性粉体の抗菌活性評価手順

2.4 pH測定および伝導度測定

抗菌活性試験粉体0.15 gを脱イオン水15 mL中に1日静置後、各水溶液のpH値をザルトリウス社のpHメーター(DocupHmeter)で測定した。アルミニナモールドとSUS304上下電極パンチを用いた電気測定治具中に抗菌活性試験粉体を配置し、大気中にて一軸プレス機により100 MPaの圧力を掛け、室温でのプレス方向の電気特性をインピーダンスマーターHP4194により周波数100 Hz～10 MHzにて測定し、複素インピーダンス解析によって伝導度を決定した。

3. 結果

3.1 抗菌活性とpH値

MoO₃、H₂MoO₄、WO₃、H₂WO₄圧粉体の大腸菌に対する抗菌活性を調べたところ、図2および表1に示すように、すでに抗菌活性が知られているMoO₃の他にH₂MoO₄ではハロー形成は観察され、抗菌活性がみられた。一方、WO₃およびH₂WO₄ではハロー形成が観察されず、抗菌活性が認められなかった。MoO₃およびH₂MoO₄の抗菌効果は、以下のように試験中に培地の影響を受けて2段階の化学反応からヒドロキシラジカルイオンH₃O⁺が生成し、その生成したH₃O⁺によるpHの低下が影響しているとされている(Matsumoto et al., 2019)。

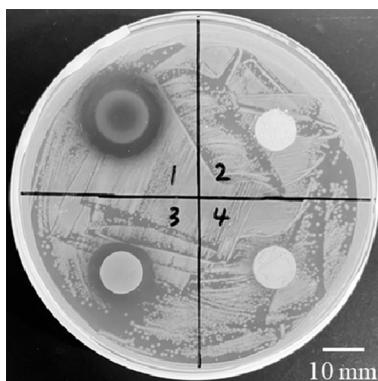
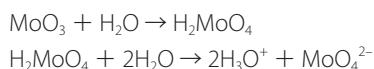


図2：(1) MoO₃、(2) WO₃、(3) H₂MoO₄、(4) H₂WO₄の大腸菌に対する抗菌活性を示すハロー形成状況

そこで、本研究で抗菌活性を調べた各サンプル粉体を脱イオン水中で1日静置した後のpH値を測定した。その結果を、表2にまとめた。抗菌活性が認められたMoO₃およびH₂MoO₄のpH値はそれぞれ3.52および4.34で低いpH値を示し、多くのH₃O⁺の生成が考えられる。また、ハロー幅の大きい、すなわち抗菌活性が高いMoO₃のpH値が、H₂MoO₄よりも低い値であった。一方、WO₃およびH₂WO₄のpH値は5.0以上であり、MoO₃およびH₂MoO₄に較べてH₃O⁺の生成が少ないことが、抗菌活性が認められなかつたことに影響を与えていると考えられる。また、MoO₃の水に対する溶解度は0.1420 g/100 gH₂O、H₂MoO₄は僅かに溶ける(slightly soluble in)、WO₃およびH₂WO₄は不溶性(insoluble in)と報告されており(Lide, 2003)、水に対する溶解度が大きいほどH₃O⁺の生成が多くなり、pH値が低下することと一致した。

表2：サンプル0.15 gを脱イオン水15 mL中に1日静置した後のpH値

MoO ₃	3.52
H ₂ MoO ₄	4.34
WO ₃	5.56
H ₂ WO ₄	5.01
H型Yゼオライト	7.01
H型モルデナイトゼオライト	6.25
CaMoO ₄	6.77
SrMoO ₄	7.56
BaMoO ₄	8.25

次に、H型YゼオライトおよびH型モルデナイトゼオライト圧粉体の大腸菌に対する抗菌活性を調べた。図3に示すようにハロー形成が観察されず、抗菌活性が認められなかつた。さらに、購入したH型YゼオライトとH型モルデナイトゼオライト粉体を、中棚の下に脱イオン水を配置したデシケータ内(湿潤状態)に1日以上放置した状態のもの、120 °Cの乾燥器に1日以上放置した状態のものの圧粉体についても抗菌活性を調べたが、すべてのサンプルでハロー形成は観察されず抗菌活性が認められなかつた。

H型YゼオライトおよびH型モルデナイトゼオライト粉体を脱イオン水中で1日静置した後のpH値は、表2に示すよ

表1：圧粉体サンプルの大腸菌に対する抗菌活性を示すハロー形成状況(n = 3)

MoO ₃	7 mm、6 mm、5 mm (活性有り)
H ₂ MoO ₄	4 mm、3 mm、2 mm (活性有り)
WO ₃	ハロー観察されず(活性無し)
H ₂ WO ₄	ハロー観察されず(活性無し)
H型Yゼオライト	ハロー観察されず(活性無し)
H型モルデナイトゼオライト	ハロー観察されず(活性無し)
CaMoO ₄	ハロー観察されず(活性無し)
SrMoO ₄	ハロー観察されず(活性無し)
BaMoO ₄	ハロー観察されず(活性無し)

注：数字はハロー幅を示す。

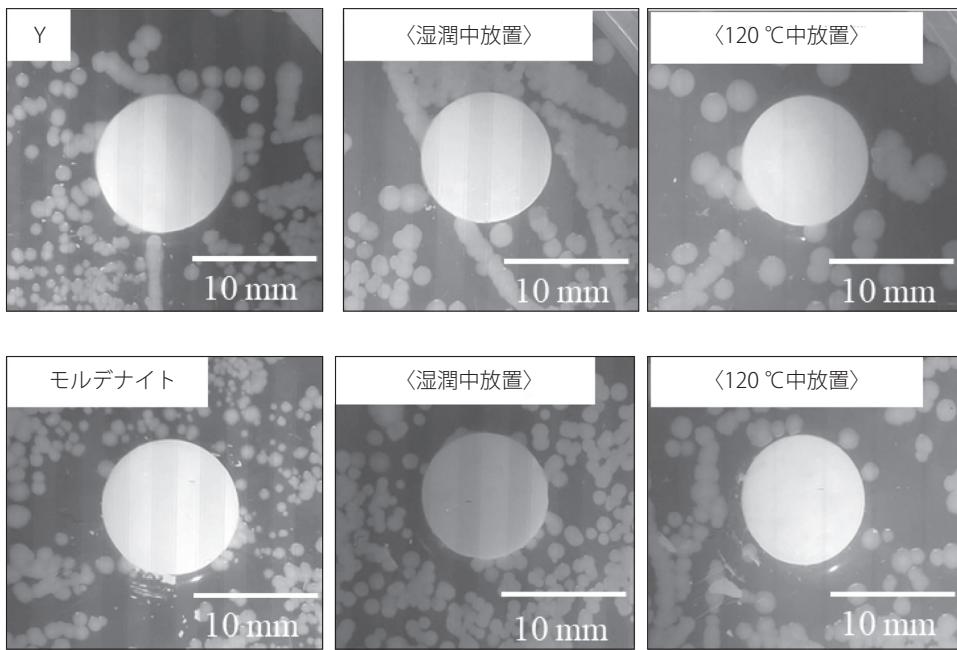


図3:H型YゼオライトおよびH型モルデナイトゼオライトの購入品、湿潤状態中放置品、120 °C放置品の大腸菌増殖状況

うに6～7であり、ほぼ中性領域であった。のことから、 H_3O^+ の生成が非常に少なく、抗菌活性が認められなかつたと考えられる。

一方、 $Mo^{VI}O_3$ は $Mo^{IV}O_2$ より高い抗ウイルス活性を示すとの考察として、 $Mo^{VI}O_3$ および $Mo^{IV}O_2$ 粉体を抗ウイルス性試験に用いた菌液に4時間浸漬し、分離した抽出液のICPによる分析を行われている（砂田他, 2020）。 $Mo^{VI}O_3$ では $Mo^{IV}O_2$ より20倍高いMo成分が観察されたことから、水素イオン濃度pHの他に MoO_4^{2-} などのイオン成分も高い抗ウイルス活性をもたらすのではないかという可能性が示されている。そこで、本研究ではHを含まないモリブデン酸塩（ $CaMoO_4$ 、 $SrMoO_4$ 、 $BaMoO_4$ ）を調製し、その抗菌活性を調べてみた。なお、 $MgMoO_4$ については沈殿が生成せず、調製できなかつた。図4に、抗菌活性試験の結果を示す。 H_2MoO_4 で観察されたハロー形成が、 $CaMoO_4$ 、 $SrMoO_4$ 、 $BaMoO_4$ では観察されず、抗菌活性が認められなかつた。

$CaMoO_4$ 、 $SrMoO_4$ 、 $BaMoO_4$ 粉体を脱イオン水中で1日静置後のpH値は表2に示すように6.7以上と中性～塩基性領域であり、 H_3O^+ の生成はほとんど無く、抗菌活性が認められないことに影響していると考えられる。 $CaMoO_4$ 、 $SrMoO_4$ 、 $BaMoO_4$ のpH値の順序は、アルカリ土類ケイ酸塩の塩基性の順序 ($MgO \cdot SiO_2 < CaO \cdot SiO_2 < SrO \cdot SiO_2 < BaO \cdot SiO_2$) と一致していた（新山・越後, 1971）。 $CaMoO_4$ および $BaMoO_4$ の水に対する溶解度は、それぞれ0.001120 g/100 g H_2O および0.002120 g/100 g H_2O と報告されている（Lide, 2003）。 MoO_3 の水に対する溶解度0.1420 g/100 g H_2O に較べて、2桁小さかつた。一方、 H_2MoO_4 の僅かに溶ける（slightly soluble in）に較べると、 $CaMoO_4$ および $BaMoO_4$ の水に対する溶解度は大きいか同程度と考えられる。のことから、 MoO_4^{2-} などのイオン成分の漏出は、抗菌活性が確認された H_2MoO_4 より抗菌活性が認められなかつた $CaMoO_4$ および $BaMoO_4$ が多いか同程度はあると判断できる。したがつて、 MoO_4^{2-} の漏出が抗菌活性に与える影響は少ないと考えた。

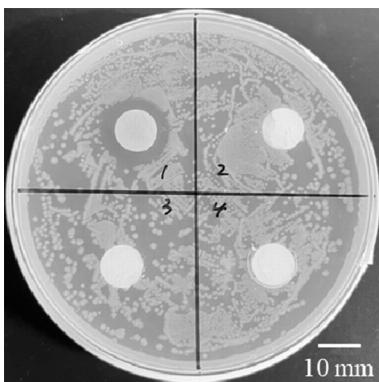


図4：(1) H_2MoO_4 、(2) $CaMoO_4$ 、(3) $SrMoO_4$ 、(4) $BaMoO_4$ の大腸菌に対する抗菌活性を示すハロー状況

3.2 抗菌活性とイオン伝導

MoO_3 、 H_2MoO_4 、 WO_3 、 H_2WO_4 は、プロトン伝導を示すことが知られている（岩原, 2001）。その伝導には H^+ もしくは H_3O^+ が関与することから、各サンプルの圧粉体（粒内抵抗+粒界抵抗）の室温大気中での抵抗率を測定した。表3に示すように、 MoO_3 、 H_2MoO_4 、 WO_3 、 H_2WO_4 、H型モルデナイトゼオライトでは抵抗率が測定できた。抗菌活性が認められなかつた WO_3 および H_2WO_4 の抵抗率は1桁、さらにH型モルデナイトゼオライトの抵抗率は2桁高かつた。のことから、イオン伝導種である H^+ もしくは H_3O^+ 濃度高いことが、 MoO_3 および H_2MoO_4 の抗菌活性に影響していると考えられる。

表3: 室温大気中にて一軸プレス機により100 MPaの圧力を掛けたサンプル圧粉体のプレス方向の抵抗率

MoO ₃	65 kΩ·cm
H ₂ MoO ₄	57 kΩ·cm
WO ₃	243 kΩ·cm
H ₂ WO ₄	861 kΩ·cm
H型Yゼオライト	測定限界以上
H型モルデナイトゼオライト	2.85 MΩ·cm
CaMoO ₄	測定限界以上
SrMoO ₄	測定限界以上
BaMoO ₄	測定限界以上

4.まとめ

高い抗菌活性を示すMoO₃では、水分との接触反応によって生成するH₃O⁺によるpH値の低下が、その抗菌活性へ影響していると考えられている。MoO₃と同じく難水溶性粉体で、H₃O⁺の生成が期待できるH₂MoO₄、WO₃、H₂WO₄、H型Yゼオライト、H型モルデナイトゼオライトの大腸菌に対する抗菌活性を、MoO₃と共に調べた。抗菌活性は、MoO₃およびH₂MoO₄のみで認められた。また、MoO₃の抗菌活性がH₂MoO₄よりも高かった。MoO₃およびH₂MoO₄を脱イオン水中で1日静置した後のpH値は、それぞれ3.52および4.34であった。一方、抗菌活性が認められなかったWO₃、H₂WO₄、H型Yゼオライト、H型モルデナイトゼオライトのpH値は、それぞれ5.56、5.01、7.01、6.25であり、MoO₃およびH₂MoO₄より高く、H₃O⁺の生成が少ないと考えられた。100 MPa加圧下状態での圧粉体で測定したMoO₃およびH₂MoO₄の室温でのイオン伝導に関する抵抗率は、それぞれ65 kΩcmおよび57 kΩcmであり、WO₃およびH₂WO₄より1桁、H型YゼオライトおよびH型モルデナイトゼオライトよりは2桁以上低く、イオン伝導種のH⁺もしくはH₃O⁺濃度が高いと推測できた。また、Hを含まないモリブデン酸塩(CaMoO₄、SrMoO₄、BaMoO₄)を調製したところ、抗菌活性は認められず、脱イオン水中で1日静置した後のpH値は6.7以上であり、イオン伝導に関する抵抗率は2.8 MΩcm以上であった。以上より、MoO₃およびH₂MoO₄の高い抗菌活性は、低いpH値、すなわち多くのH₃O⁺の生成が影響していると考えた。しかしながら、難水溶性粉末で高い抗菌活性が報告されているTeO₂ (Singhet al., 2022)は、脱イオン水中で1日静置した後のpH値は7.78であった。また、私たちが難水溶性粉末で抗菌活性ありと判断しているTl₂O₃およびCo₃O₄は、脱イオン水中で1日静置した後のpH値は、それぞれ9.02および9.79であった。このことから、抗菌活性には低いpH値以外に、漏出イオン種や活性酸素種など多くの要因が影響していると考えられるため、さらに様々な検討が必要である。

引用文献

- 石田恒雄 (2011). 抗菌剤の特性と抗菌メカニズム. マテリアルライフ学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 21-32.
- 岩原弘育 (2001). プロトン導電性固体電解質に関する研究—

最近の動向—. *Electrochemistry*, Vol. 69, No. 10, pp. 788-793.

狩野伸自・増元秀子・木須一正 (2018). 県内の無機材料を活用した抗菌・防カビ剤の開発. 長崎県窯業技術センター研究報告(平成30年度), pp. 21-27.

菊地靖志 (2000). 抗菌性金属材料の現状と課題. までりあ, Vol. 39, No. 2, pp. 146-150.

高麗寛紀 (1999). 無機系抗菌剤の開発の現状と将来. 無機マテリアル, Vol. 6, No. 12, pp. 428-436.

Lide, D. R. (2003). *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition*, pp. 4-44, 49, 70, 71, 88, 92.

Matsumoto, T., Sunada, K., Nagai, T., Isobe, T., Matsushita, S., Ishiguro, H., and Nakajima, A. (2019). Preparation of hydrophobic La₂Mo₂O₉ ceramics with antibacterial and antiviral properties. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 378, 120610.

中島章 (2020). 撥水性、抗菌・抗ウイルス性、紫外線遮蔽性を併せ持つ新規酸化物固体材料の開発. コスマトロジー研究報告, Vol. 28, pp. 43-52.

Nakayama, S., Maeda, Y., Tsurimoto, M., Fukuta, Y., Tsuji, H., and Hayase, N. (2023). A simple method for evaluating the antimicrobial capacity of insoluble powdered inorganic materials. *Studies in Science and Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 171-174.

新山浩雄・越後谷悦郎 (1971). アルカリ土類金属ケイ酸塩の酸、塩基性. 工業化学雑誌, Vol. 74, No. 4, 560-563.

日本化学会 (編) (1975). 新実験化学講座—無機化合物の合成(II) 一. 丸善出版.

Sakai, T., Sunada, K., Mochizuki, Y., Isobe, T., Matsushita, S., Nagai, T., Ishiguro, H., and Nakajima, A. (2023). Antiviral and antifungal activities of tin molybdenum solid solution oxide prepared using mechanochemical processing. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 131, No. 8, pp. 482-487.

佐藤嘉洋 (2009). 金属材料の抗菌性. 高温学会誌, Vol. 35, No. 3, pp. 121-125.

澤井淳 (2009). 金属酸化物の抗菌活性とその応用に関する研究. 防菌防黴, Vol. 37, No. 7, pp. 501-509.

Singh, A., Dasauni, K., Nailwal, T., and Nenavathu B. P. (2022). TeO₂ deposited ZnO nanotubes combined with cefotaxime as a nanoantibiotic against Klebsiella pneumonia. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 67, pp. 451-455.

砂田香矢乃・畠山靖佳・永井武・石黒斎 (2020). 可視光下でのモリブデン酸化物の抗ウイルス活性に関する研究. KISTEC研究報告2020, pp. 206-208.

Zollfrank, C., Gutbrod, K., Wechsler, P., and Guggenbichler, J. P. (2012). Antimicrobial activity of transition metal acid MoO₃ prevents microbial growth on material surfaces. *Materials Science and Engineering C*, Vol. 32, pp. 47-54.

受稿日：2025年10月21日

受理日：2025年11月25日

発行日：2025年12月25日

Copyright © 2025 Society for Science and Technology



This article is licensed under a Creative Commons [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International] license.

<https://doi.org/10.11425/sst.14.159>