

2023.9.1

Vol. **1**

技術開発研究所報

掲載内容

酸化マグネシウム混合土のフッ素除去能の時間変化

森 裕樹・和田 信一郎



技術開発研究所 発行

酸化マグネシウム混合土の フッ素除去能の時間変化

森 裕樹¹・和田 信一郎²

¹九州大学大学院農学研究院 環境農学部門 (福岡県福岡市西区元岡 744)

²株式会社アステック 技術開発研究所 (兵庫県姫路市実法寺 105)

質量比 10%の酸化マグネシウムを含む混合土を作成し、湿潤状態で養生しながらフッ素吸着能を測定した。フッ素吸着能は16日間の養生期間内に急速に低下し、その後156日の養生期間内にも徐々に低下した。156日後には、フッ素濃度 0.8 mg/L および 8 mg/L のときのフッ素除去能は混合土作成に用いた土の吸着能に近づいた。養生16日までに酸化マグネシウムはほとんど消失し、代わりに水酸化マグネシウムが生成し、その後水酸化マグネシウム量は若干減少傾向であった。湿潤状態での養生によるフッ素除去能の低下は、水酸化マグネシウムへの転換と、水酸化マグネシウムへのケイ酸の吸着によると推定した。

Key words: adsorption layer, fluoride, magnesium oxide

1. まえがき

酸化マグネシウムは鉱床から得られるマグネサイトや海水から沈殿させた水酸化マグネシウムを焼成することにより製造される。焼成温度によって得られる酸化マグネシウムの性質は大きく異なるが、600 °C~1100 °Cで焼成されたものは軽焼マグネシアとよばれ、酸や水との反応性が高い¹⁾。本報告の研究で用いた酸化マグネシウムも軽焼マグネシアに相当するものであり、引用する研究で用いられた酸化マグネシウムもほぼ例外なく軽焼マグネシアである。そのため、以下では単に酸化マグネシウムと称する。

酸化マグネシウムが水からフッ素を除去する機能を持つことは前世紀半ばから知られている^{2,3)}。フッ素の除去機構としては難溶性のフッ化マグネシウムの生成という機構も考えられるが、初期フッ素濃度が200 mg/L以下の場合にはフッ化マグネシウムは生成しないことが報告されている⁴⁾。フッ素との反応生成物のX線光電子分光などを用いた研究では、主要なフッ素の除去機構は酸化マグネシウムから水酸化マグネシウムへの転換時に、水酸化物イオンの代わりにフッ化物イオンが取り込まれることであるという研究結果が報告されている^{4,5)}。

酸化マグネシウムはフッ素以外の重金属類の除去能力もあるので、それを吸着層工法における吸着資材として利用とするための研究が行われている^{6,7)}。吸着層とは、有害物質を含む掘削ズリを盛り土材料等として利用する場合、盛り土から溶出した有害物質を吸着して地下浸透させないために盛り土層の下部に設置する吸着剤層のことである。また、吸着層

工法とは、有害物質を含む掘削ズリなどを盛り土利用するとき、吸着層を設置して有害物質の地下浸透を防止する工法のことである。

酸化マグネシウムを吸着層工法における吸着材として利用する場合、フッ素の主要な除去機構が、水和時に水酸化物イオンの代わりにフッ化物イオンを取り込むというものであるのなら、吸着層構築後フッ素の除去能力は次第に低下する可能性がある。なぜなら、吸着層に混入された酸化マグネシウムの大部分は、盛り土層からフッ素が到達する前に水和して水酸化マグネシウムになると考えられるからである。また、酸化マグネシウムはケイ酸鉱物との反応性が高く、土壌中のセキエイなどのケイ酸鉱物と反応してケイ酸マグネシウムを形成する可能性もある⁸⁾。

この研究ではこれらの可能性について検討するため、酸化マグネシウムを土と混合して湿潤状態を保ち、継続的に酸化マグネシウムの変化を追跡するとともにフッ素除去能を測定した。

2. 試料と実験方法

2.1. 試料

酸化マグネシウムとしては市販の、比較的粒度の小さいものを用いた。酸化マグネシウムの性質は粉末X線回折と示差熱-熱重量分析によって調べた。

酸化マグネシウムと混合する土としては、佐賀県下で採取した花崗岩由来土の次表層を用いた。土試料は採取後風乾し、2 mmの篩を通過した部分を用いた。使用した土のpHは5.9、有機態炭素含量は1.5

g/kgであった。また粘土 (< 2 μm) 含量は 53 g/kg, シルト(2 μm~20 μm)含量は 67 g/kg, 細砂 (20 μm~200 μm) 含量は 243 g/kg, 粗砂 (200 μm~2000 μm) 含量は 637 g/kg, であった。

粉末 X 線回折によれば, 粘土画分の主要鉱物はカオリン鉱物とスメクタイト, シルト画分および砂画分の主要鉱物はセキエイとチョウ石であった。

2.2. 実験方法

養生実験

40 mL 容のポリプロピレン製遠心分離管に, 土試料 2.00 g と酸化マグネシウム 0.2 g をとり, 振り混ぜたり, 斜めに傾けて回転させたりすることによりよく混合した。全体が均一に混合されたことは, 混合物の色調から判断した。次に, 混合物に 0.5 mL の脱イオン水を滴下して全体を均一に湿潤化させた。遠心分離管を密栓し, 2 本ずつをひとまとめにして, ナイロン-ポリエチレン積層袋に入れ, 熱シールした (図 1)。水の添加量は, 供試土の含水比を自然含水比にするのに必要な量と酸化マグネシウムが水酸化マグネシウムに転換するときに消費される水の合計量とした。



図 1. 酸化マグネシウム混合土の養生の様子。



図 2. 形態変化測定用混合物の養生の様子。

別途, 土試料 30.0 g に 3.00 g の酸化マグネシウム

を混合し, 脱イオン水 7.2 mL を滴下して均一に湿らせた試料 15 点を作成した。水の添加量は, 供試土の含水比を自然含水比にするのに必要な量と酸化マグネシウムが水酸化マグネシウムに転換するときに消費される水の合計量とした。この試料はそのまま, ナイロン-ポリエチレン積層袋に入れ, 熱シールした (図 2)。これらの試料は実験室で所定の期間養生した後酸化マグネシウムの形態変化測定のために用いた。

フッ素除去量

所定時間実験室内で養生した後, 6 本ずつ開封して取り出し, フッ素濃度 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 175 mg/L, 250 mg/L および 500 mg/L の標準フッ化ナトリウム溶液 40 mL を添加した。土-酸化マグネシウムの混合物がほぐれるまで, 手による強振とうとボルテックスによる攪拌を繰り返した。その後, 往復振とうしながら 24 時間反応させた。3000 rpm で 20 分間遠心分離した後の上澄みを 0.45 μm のメンブランフィルターでろ過し, ろ液のフッ化物イオン濃度を測定した。メンブランフィルターによるろ過を行ったのは, 添加フッ素濃度が 25 mg/L と 50 mg/L の試料では, 遠心分離後にわずかな濁りが認められることがあったからである。

フッ化物イオン濃度の測定はフッ化物イオン選択性電極 (堀場製作所製 8010-10C) によって行った。測定手順は肥料分析⁸⁾に従い, 干渉防止剤として pH 5.5 のクエン酸ナトリウム緩衝液を添加した。フッ素濃度 0 mg/L~8 mg/L の範囲のデータが得られなかった場合には, この濃度範囲のデータを少なくとも 2 点得るため, 25 mg/L 以下のフッ化ナトリウム溶液を用いて追加の実験を行った。実験は 2 連ないし 3 連で行い, 平均を取った。

酸化マグネシウムの形態変化

所定時間養生した試料は, プラスチック皿の上に取り出して風乾した。風乾後, 5.00 g を乳鉢にとり, 皿の上でシリコンゴム栓を用いて土塊を解きほぐし, 全体を均一化した。



図 3. 集合体の解きほぐしと篩分け。

そのうちの 5.00 g をとり, メノウ乳鉢中でさらに土塊を解きほぐし, 目開き 105 μm の篩で篩別した (図 3)。篩上に残った試料は再度乳鉢に移し解きほ

ぐしを行った。この操作を、篩を通過する部分がほとんどなくなるまで（数回）繰り返した。篩を通過した試料について粉末 X 線回折および示差熱-熱重量分析（DTA-TG）を行った。

3. 実験結果

3.1. フッ素除去量の時間変化

図3に混合物のフッ素除去能の時間変化を示す。この図の横軸は除去実験における平衡フッ素濃度であり、縦軸は混合土1kgあたりのフッ素除去量である。これはいわゆる吸着等温線に相当するものであるが、酸化マグネシウムによるフッ素除去は吸着によるものではないのでここでは吸着という用語は用いず除去という用語を用いた。図中の数値は養生日数を示す。0日は、土と酸化マグネシウムを混合した直後にフッ化ナトリウムを添加して測定したものである。養生日数1日以上のは、混合土に水を加えてその期間密閉して放置し、フッ化ナトリウム溶液を加えて除去実験を行ったものである。

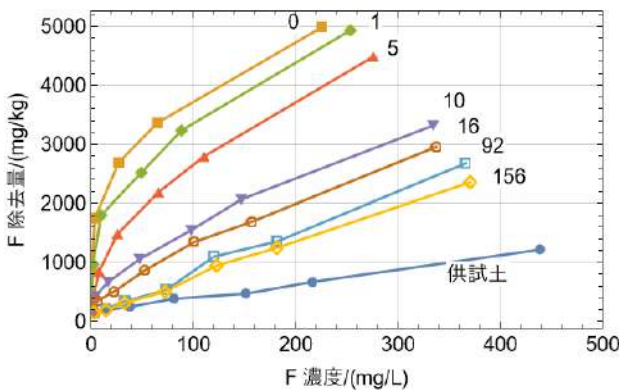


図4. 混合物および供試土のフッ素除去能。

いずれの養生日数でも、平衡フッ素濃度とフッ素除去量の関係は直線的ではなかった。近似曲線の傾きはフッ素濃度が低いところで大きく、フッ素濃度が高くなるとともに小さくなった。また、養生時間が長くなるとともにプロットは次第に下方に移動した。これは、混合土のフッ素除去能が時間とともに低下することを示している。

これらのデータを近似するため、ラングミュア式とフロンドリッヒ式のあてはめを行ったところ、フロンドリッヒ式

$$q = aC^b \quad (1)$$

の方が良く適合した。ここで q はフッ素除去量、 C は平衡フッ素濃度、 a と b はモデルパラメータである。

各養生日数のデータにフロンドリッヒ式をあては

め、得られたパラメータを用いて平衡フッ素濃度が 0.8 mg/L および 8 mg/L の場合のフッ素除去量を計算し図5, 6に示した。0.8 mg/L は水道水質基準および土壤溶出量基準に相当し、8 mg/L は一律排水基準に相当する。また、混合土作成に用いた土の 0.8 mg/L および 8 mg/L におけるフッ素除去量はそれぞれ 15.3 mg/kg および 74.5 mg/kg であった。

平衡濃度 0.8 mg/L に対するフッ素除去量は、仮にこの酸化マグネシウム混合土を用いて吸着層を構築した場合、吸着層を通過した浸透水のフッ素濃度が 0.8 mg/L に達するまでに除去できるフッ素量の目安になる。8 mg/L に対する除去量についても同様である。図5および図6は、フッ素濃度 0.8 mg/L, 8 mg/L のいずれの濃度においても酸化マグネシウムと土を混合して水を添加した後急速にフッ素除去能は低下し、少なくとも 92 日以降は、混合土作成に用いた土自体のフッ素除去能に近づいた。

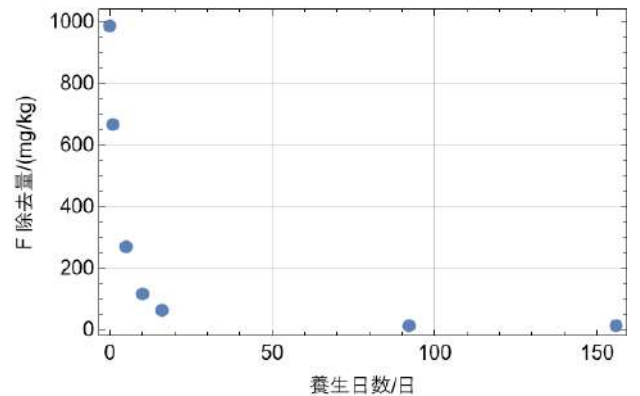


図5. 平衡フッ素濃度 0.8 mg/L におけるフッ素除去量。

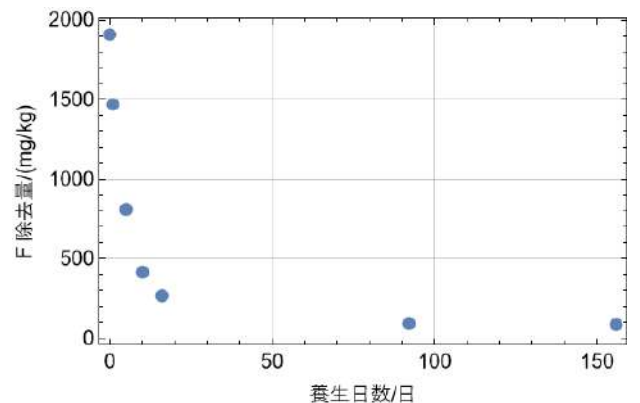
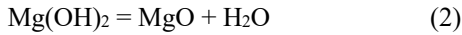


図6. 平衡フッ素濃度 8 mg/L におけるフッ素除去量。

3.2. 酸化マグネシウムの形態変化

この実験で用いた酸化マグネシウムの性質を粉末 X 線回折と DTA-TG 分析によって調べたところ、粉末 X 線回折では酸化マグネシウムの回折ピークの他に微弱な水酸化マグネシウムのピークが認められた。また、DTA-TG 分析では、440 °C に吸熱ピー

クが認められ、それに対応する減量が認められた。この減量は水酸化マグネシウムからの脱水反応



によると考えられる。減量から推定した水酸化マグネシウム含量は約 15%であった。これは実験室での保存中に大気中の水蒸気を吸収して水和したことによると考えられた。

表 1 には養生後風乾した試料 5.00 g を解きほぐしながら篩分けして得られる <105 μm 画分の量を示す。原土から得られた <105 μm 画分の量は 34.6%であり、粒度分布から予想される量よりもやや多かった。酸化マグネシウム混合土では <105 μm 画分の割合は原土よりも多かった。これは原土に 10%の割合で添加された酸化マグネシウムの水和物やそれと原土の土粒子との反応生成物の大部分が篩を通過したことによると考えられる。 <105 μm 画分の割合と養生日数の間に系統的關係はなく、38.6%から 42.4%の比較的狭い範囲にあった。

表 1. 5.00 g から得られた <105 μm 画分の量。

	養生日数/日						
	原土	0	1	5	16	92	156
質量/g	1.73	2.12	1.95	1.93	2.05	2.09	2.01
割合/%	34.6	42.4	39.0	38.6	41.0	41.8	40.2

図 7 には、 <105 μm 画分の粉末 X 線回折図形の、回折角 36°~44° の領域を示す。酸化マグネシウムのこの領域の回折線は最強線ではないが、水酸化マグネシウムの回折線と同時に見ることができるのでこの領域を示した。0 日、つまり混合土作成直後の回折図形では、酸化マグネシウムの回折線が明瞭に認められ、水酸化マグネシウムの回折線は痕跡程度であった。この水酸化マグネシウムは混合土作成に用いた酸化マグネシウムに含まれていたものによると考えられる。

養生 1 日後には酸化マグネシウムの回折線強度は未養生の混合土の半分以下に低下した。しかし、水酸化マグネシウムの回折線強度は未養生の混合土のものほとんど変わらず痕跡程度であった。養生 5 日後には酸化マグネシウムの回折強度はさらに半減し、水酸化マグネシウム由来の回折線が認められるようになった。養生 16 日以降は酸化マグネシウム由来の回折線は認められなくなった。水酸化マグネシウム由来の回折線の強度は、16 日以降はほぼ一定であった。養生 1 日後および 5 日後の試料における酸化マグネシウムの回折線の極大位置がやや高角度側に移動していたがその理由は不明である。

図 8 に DTA-TG 分析の結果を示す。上から順に 0 日、1 日、5 日および 16 日間養生後の結果である。横軸は温度、青線は熱重量分析曲線、赤線は示差熱分析曲線である。熱重量分析に対する縦軸は右側、示差熱分析に対するのは左側である。

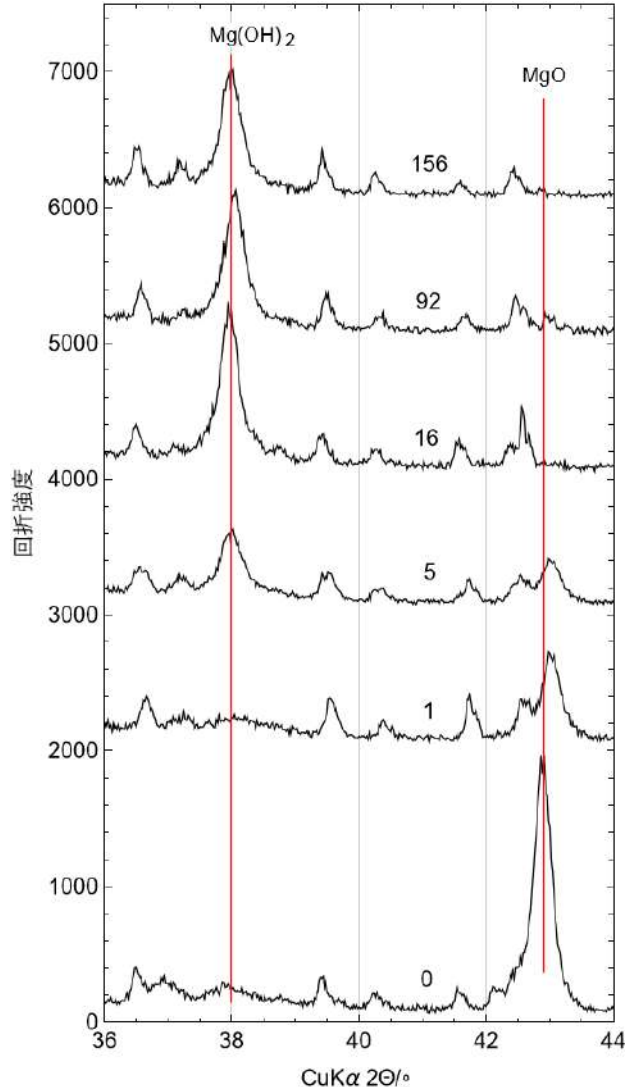


図 7. <105 μm 画分の粉末 X 線回折図形。

差熱分析ではどの養生期間のものでも 389 °C に吸熱ピークが認められ、熱重量分析ではそれに対する減量が認められた。これは水酸化マグネシウムの脱水(反応式(2))によるものである。室温から 150 °C の間にも吸熱ピークと減量が認められるが、これは吸着水の脱着によると考えられる。このほか、500 °C に微弱な吸熱ピークがあり、それに伴う減量もあったが、これは供試土に含まれるカオリン鉱物の熱分解に伴う脱水と考えられる。

養生 0 日の試料でも吸熱ピークと減量が認められるが、これは混合土作成に用いた水酸化マグネシウムの脱水によると考えられる。養生 1 日後には脱水

による減量はやや大きくなり、5日後にはさらに大きくなった。しかし、5日後の減量と16日後の減量には大きな差はなく、92日後および156日後の減量も5日後の減量と大きな差はなかった。

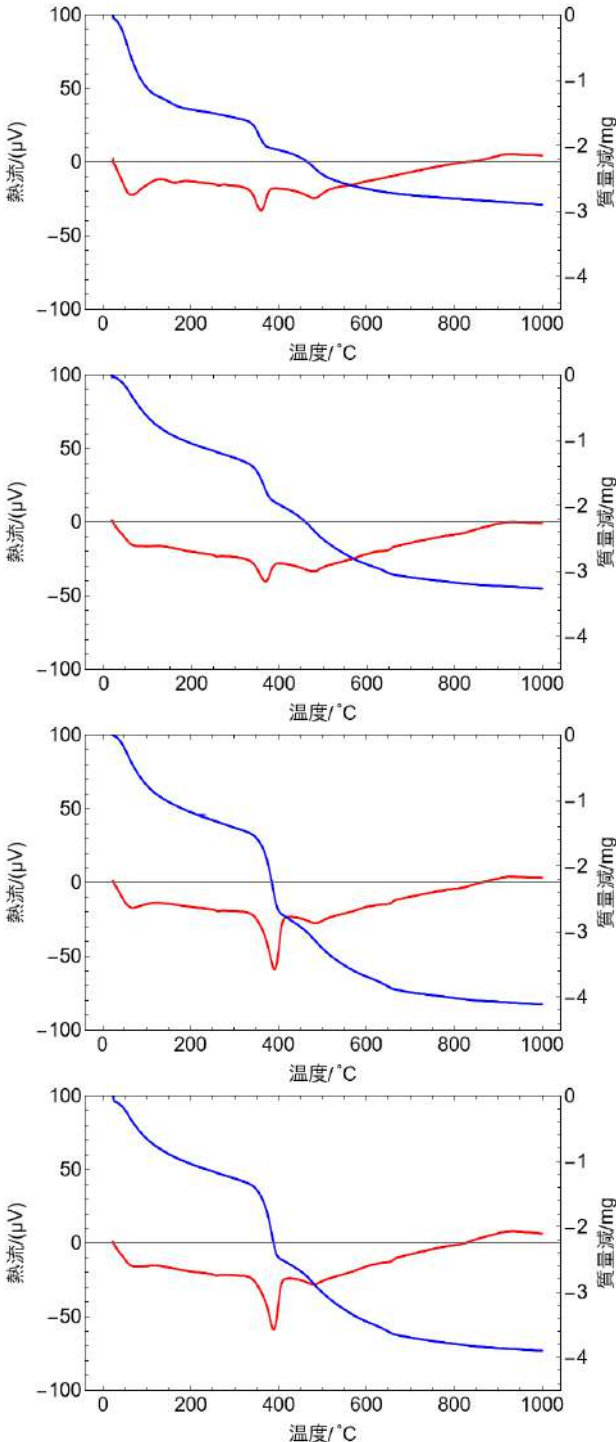


図8. 上から0日、1日、5日、16日後の熱分析結果。

この結果は、粉末X線回折における水酸化マグネシウムの回折線の変化とは対応していない。粉末X線回折においては、0日から1日の間での水酸化マ

グネシウムによる回折線の強度増加は認められなかった。また、5日後には1日後よりも回折強度が増加し、16日後にはさらに増加した。しかし、熱重量分析では5日後と16日後の、水酸化マグネシウムの脱水による減量はほぼ同じであった。

粉末X線回折の結果と熱分析結果を対比するため、図9に、 $2\theta = 38^\circ$ におけるピークの強度(赤丸)と $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ における減量率(%) (青丸)の養生日数に伴う変化をプロットした。生成した水酸化マグネシウムの $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ における減量率は養生開始とともに急増し、5日後に最大になり、それ以後は徐々に減少した。一方水酸化マグネシウム由来の回折線の強度は養生16日まで急増し、それ以後は徐々に減少した。このことは、酸化マグネシウムの水和は養生5日目にはほぼ完了するが、それまでの間に生成した水酸化マグネシウムの結晶度は低いことを示唆している。

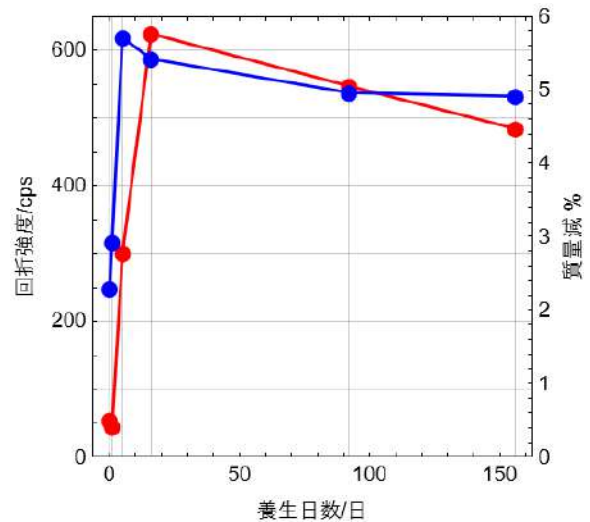


図9. $2\theta = 38^\circ$ におけるピークの強度(赤丸)と $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ における減量率(%) (青丸)の養生日数に伴う変化。

4. 考察

図4において、0日のプロットは、土と酸化マグネシウム粉末を混合した後にフッ化ナトリウム溶液を添加してフッ素除去実験を行った結果を示す。除去曲線は低フッ素濃度のところで急に立ち上がっており、平衡濃度が 0.8 mg/L のときの混合土 1 kg あたりのフッ素除去量は約 1000 mg/kg に達した。この濃度での土単独でのフッ素除去量は小さかったので、混合土中の酸化マグネシウムによるフッ素除去量は 10000 mg/kg に達する。この値は、粒径 $3\text{--}7\text{ nm}$ の超微粒子酸化マグネシウム⁴⁾による同濃度におけるフッ素除去量の55%に相当する除去量である。今回の実験で用いた酸化マグネシウムは、実験に使用する

前に一部が水和していたにもかかわらず非常に高いフッ素除去能力を示した。

しかし土と共存させて養生する過程でフッ素除去能は急速に失われた。その原因の1つとして、酸化マグネシウムが養生中に水酸化マグネシウムに転換したことが考えられる。酸化マグネシウムによるフッ素除去は、単に酸化マグネシウム粒子表面へのフッ化物イオンの吸着（表面錯形成）ではなく、酸化マグネシウムが水酸化マグネシウムに転換するとき、水酸化物イオンの代わりにフッ化物イオンが取り込まれることによると考えられている^{4,5)}。それに加えて、生成した水酸化マグネシウム表面における表面錯形成反応も寄与すると考えられる⁹⁾。一方、水酸化マグネシウムによるフッ素除去は、水酸化マグネシウム結晶表面における表面錯形成のみによると考えられる。その結果、土と混合した酸化マグネシウムがフッ素と遭遇する前に水酸化物に転換すればフッ素除去能は低下すると考えられる。実際、水酸化マグネシウムによるフッ素除去実験の結果⁹⁾と、それを再現するために採用されたモデルを用いて計算すると、平衡フッ素濃度 0.8 mg/L の時のフッ素除去能は約 1000 mg/kg、フッ素濃度 8 mg/L のときの除去量は約 5500 mg/kg となった。これらの値は先に引用した研究⁴⁾で報告された酸化マグネシウムのフッ素除去能の 1/10 に過ぎない。これらの研究^{4,9)}で用いられた酸化マグネシウムや水酸化マグネシウムは同一のものではないので比較・推論には限界があるが、水酸化マグネシウムのフッ素除去能は酸化マグネシウムのものと比較するとはるかに小さいと考えることは妥当であろう。

吸着層工法における吸着材として酸化マグネシウムを使用した場合、おそらく大部分の酸化マグネシウムは盛り土からの有害物質が浸透してくる以前に水和して水酸化マグネシウムに転換すると考えられる。吸着すべき汚染物質がフッ素である場合には、この実験で示されたように、時間とともに吸着能は低下すると考えられる。その速度は酸化マグネシウムの焼成温度や結晶の大きさによって異なると考えられる。酸化マグネシウム資材単独でのフッ素除去能ではなく、混合土作成に使用する予定の土と混合した後養生試験を行い、除去能の低下度合いを評価したうえで混合率を決定すべきであると考えられる。

酸化マグネシウムの水酸化マグネシウムへの転換が、フッ素除去能低下の唯一の原因であるとすれば、作成した混合土中の酸化マグネシウムのすべてが水酸化マグネシウムに転換してしまっただけにはフッ素除去能はそれ以上低下しないはずである。しかし、

粉末X線回折によって酸化マグネシウムが検出できなくなった16日以降（図7）もフッ素除去能は継続して低下した（図4, 図5, 図6）。この結果は、水酸化マグネシウムへの転換以外にもフッ素除去能を低下させる第2の要因があることを示唆する。

その第2の要因として考えられるのは酸化マグネシウムや水酸化マグネシウムのマグネシウムケイ酸塩への転換である¹⁰⁾。非晶質シリカと酸化マグネシウムを質量比2:1の割合で混合し、温度37℃、相対湿度100%の環境に放置した実験¹¹⁾では、2.5時間後には酸化マグネシウムは粉末X線回折によって検出できない程度に減少し、マグネシウムケイ酸塩が生成した。また、非晶質シリカではなくセキエイを用いた場合にも類似のマグネシウムケイ酸塩が生成することが報告されている¹¹⁾。別の研究者によって行われた類似の実験¹²⁾でも同様の現象が確認されており、生成したのは結晶度の低い層状ケイ酸塩鉱物であると推定されている。

この実験で混合土作成に用いた土の、シルトより粗粒な画分の主要鉱物はセキエイであった。セキエイの酸化マグネシウムとの反応性は非晶質シリカより小さいため¹²⁾、水和によりいったん水酸化マグネシウムが生成し、その後水酸化マグネシウムがセキエイと反応してマグネシウムケイ酸塩に転換したのかもしれない。図9に示された、養生16日以降の水酸化マグネシウム量の減少傾向はこの反応の進行を示していると考えられる。

さらに、酸化マグネシウムや水酸化マグネシウムのままでもフッ素除去能が低下する機構が存在する。それは酸化マグネシウムや水酸化マグネシウム結晶表面におけるケイ酸の表面錯形成である。水酸化マグネシウムによるフッ素除去は水酸化マグネシウム結晶表面のヒドロキシ基におけるフッ化物イオンの表面錯形成（この場合は表面ヒドロキシ基とフッ化物イオンの配位子交換と同義）である。表面ヒドロキシ基にケイ酸イオンが結合するとこの反応は阻害されると考えられる。養生16日から156日間のフッ素除去能の低下かは、水酸化マグネシウムの減少と、残存する水酸化マグネシウム結晶表面の変質の両方が寄与したと考えられる。

酸化マグネシウムや水酸化マグネシウムへのケイ酸の吸着に関する研究報告を見出すことはできなかったため、参考のために追加の実験を行った。プラスチック製遠心分離管に0.100gの酸化マグネシウムを取り、約2mmol/Lのケイ酸溶液を加えて一定時間ごとに残留ケイ酸濃度を測定した。その結果を図10に示す。

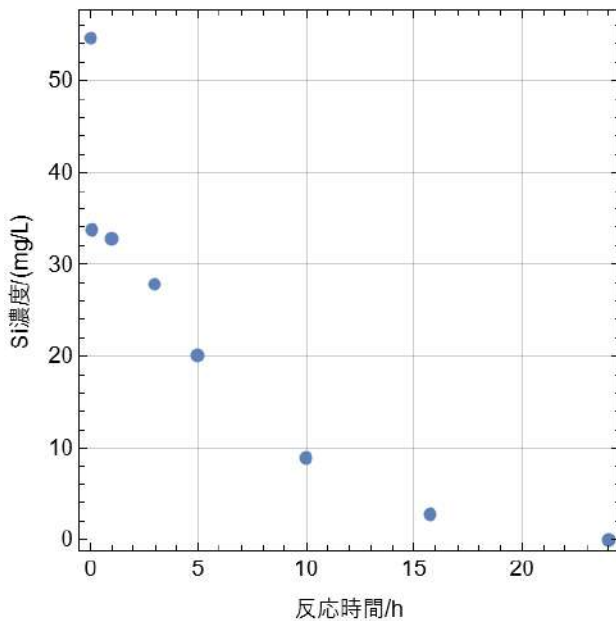


図 10. 酸化マグネシウムによるケイ酸吸着。

添加溶液のケイ酸濃度は約 55 mg/L であったが、添加 6 分後には 34 mg/L まで低下した。その後も徐々に低下し、24 時間後には検出できなくなった。この時点での酸化マグネシウムによるケイ酸吸着量は 27 500 mg/kg であった。この結果は、仮に酸化マグネシウムの水和反応が起こらない場合でも、土から溶出したケイ酸の吸着によりフッ素吸着能力が次第に低下することを示唆する。

酸化マグネシウムの水和速度は製造時の焼成温度や結晶の大きさによって大きく異なる¹⁾。また、ケイ酸の供給速度は混合土作成に用いた土の種類によって異なると考えられる。したがって、別種の酸化マグネシウムや土を用いたときには、定量的には異なる結果が得られると考えるべきである。この実験で用いた酸化マグネシウムは、水和速度が比較的に早いものであるため、水和速度の遅いものを試用して同様の実験を行う場合には、フッ素除去能の低下の程度は相対的には小さくなると考えられる。ただ、酸化マグネシウムを土と混合して湿潤条件においたときには、フッ素除去能が次第に低下することは確かと考えられる。このような使用法を計画する場合には、その程度について試験による事前評価を行うべきと考える。

謝辞

本研究報告は、九州大学農学研究院と株式会社アステックの共同研究の一部を取りまとめたものである。共同研究実施のために便宜を図っていただいた平舘俊太郎教授に謝意を表す。

引用文献

- 1) Aral H, Hill BD, Sparrow GS (2004) Value adding salts recovered from saline waters in disposal basins in the Murray-Darling Basin. CSIRO Minerals Report DMR-2378C.
- 2) Zettlemoyer AC, Zettlemoyer EA, Walker WC. (1947) Active magnesia. II. Adsorption of fluoride from aqueous solution. *Journal of American Chemical Society* 69, 1312–1315.
- 3) Fair GM, Geyer JC (1954) *Water supply and waste-water disposal*. New York: John Wiley & Sons, New York.
- 4) Shihabudheen M., Maliyekkal, Anshup, K.R. Antony, T. Pradeep (2010) High yield combustion synthesis of nanomagnesia and its application for fluoride removal. *Science of the Total Environment* 408, 2273-2282.
- 5) Booster JL, Van Sandwijk A, Reuter MA.(2003) Conversion of magnesium fluoride to magnesium hydroxide. *Mineral Engineering* 16, 273–81.
- 6) 菊池定人・國西健史・木虎智子・板谷裕輝 (2012) カルシウム/マグネシウム系複合材料の吸着層工法への適用に関する基礎的検討。土木学会第 67 回年次学術講演会 III-059.
- 7) Gathuka LW, Katsumi T, Takai A, Flores G, Inui T (2019) Enhanced sorption of attenuation layer underlying excavated soils with natural contamination. *Regional Conferences on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 379-384.
- 8) 農林水産消費安全技術センター (2023, Jan. 10) 肥料分析法. http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub6_data/sub6_analyze.html.
- 9) Tsuchiya K, Fuchida S, Tokoro C (2020) Experimental study and surface complexation modeling of fluoride removal by magnesium hydroxide in adsorption and coprecipitation process. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8, 104514.
- 10) 和田信一郎, 森下智貴 (2013) 酸化マグネシウムによる重金属類汚染土の不溶化処理と土壤中での鉱物化学反応. *粘土科学* 51, 107-117.
- 11) Hast N (1955) A reaction between silica and some magnesium compounds at room temperature and at +37 25 °C. *Arkiv för Kemi* 9, 343-360.
- 12) Ono H, Wada SI. (2007) Properties of layer silicates formed from MgO-SiO₂-H₂O mixtures at 25 °C. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University* 52, 159-162.

Technical report

Published by Astec Co., Ltd.

Technology Development Laboratory

〒671-2244 兵庫県姫路市実法寺 105

TEL : 079-267-5575 HP : <https://www.astec-geo.co.jp/index.html>

