

天然ゼオライトの土壌改良効果とその新しい使い方

東京農業大学応用生物科学部教授 後藤逸男

1. はじめに

ゼオライトは和名を沸石と称し、変質を受けた安山岩や玄武岩の空隙中に無・白色結晶体として18世紀中期に発見された。三次元網目状構造を持つ含水テクトアルミノケイ酸塩鉱物で、その一般式は $\text{Me}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (Me: アルカリまたはアルカリ土類金属、n: Meの電荷、x,y: 係数)で表される。造岩鉱物の中で最も風化抵抗性の強い石英の中のケイ素の一部がアルミニウムと同像置換した鉱物と考えれば、その構造と特性を理解しやすい。特異的なガス吸着やイオン吸着能を持つことが古くから知られていたが、その産出量がわずかであったため資源としての価値に乏しかった。しかし、1950年頃に東北地方のグリーンタフ地帯で、海底に堆積した火山灰中の火山ガラスの続成作用により生成した天然ゼオライトの鉱床が発見されて以来、産業資源として注目されるようになった。

1960年代には天然ゼオライトの大きな産地である栃木県¹⁾や宮城県²⁾などを中心に全国約30ヶ所で水田に対する施用試験³⁾が行われた。しかし、その施用効果に普遍性が認められなかったため、耕土培養対策資材として指定されるには至らなかった。その後、静岡農試の川口ら⁴⁾により、海岸砂丘地でゼオライトを施用した野菜の栽培試験が行われ、増収効果の他に土壌の陽イオン交換容量の増大や窒素の流亡防止効果など明瞭な施用効果が認められた。このような状況で、国内各地に大きな鉱床が開発されると、本来土壌の保肥力を改善するためのゼオライトが、野菜の連作障害を防止する、ケイ酸を多く含むのでそれが効果的に作物に吸収されて土壌病害にも効果がある、ハウスの塩類濃度障害を軽減するなど、科学的根拠のない効果をうたった万能資材として農業生産現場に登場した。購読者の多い農業雑誌などでも関連記事が幾度となく掲載されたこともあり、農家の間で注目される資材となった。しかし、期待されるような効果のないことが明らかになると、ゼオライトは「高い」「効かない」「いかさま」「まゆつば」土壌改良資材の代名詞となり果てた。しかし、その後1979年に制定された地力増進法では保肥力を改善する土壌改良資材に指定された。最近では年間約10万トンのゼオライトがゴルフ場や競技場などの緑化用資材や土壌改良資材・園芸資材として利用されている。

筆者らは1970年代から天然ゼオライトの土壌改良効果とその農業利用技術に関する実践的な研究を行ってきたので、最近の研究結果と新しい利用法について記すことにする。

2. 天然ゼオライトの鉱物組成と品質⁵⁾

ゼオライトは火山噴出物をその起源とするため、わが国を始めとする環太平洋諸国に多く産出される。その中でも日本は量・質共に世界有数のゼオライト産出国であり、最大の利用国でもある。主な生産地は秋田・山形・宮城・福島・北海道・島根・鹿児島などで、いずれもグリーンタフ地域である。国内の埋蔵量は数千万トンとも無尽蔵とも、あるいは日本列島自体がゼオライトの上に形成されているともいわれる。資源の乏しい日本の中では石灰と共に農業分野で利用できる数少ない天然資源であるので、これを上手に使わない手はない。

ゼオライトとは単一の鉱物ではなく、沸石類と呼ばれる一連の鉱物の総称で、天然には約40種類の沸石が知られている。これらの沸石のうち、わが国で資源として利用できるものはクリノプチロライトとモルデナイトおよびそれらの混合物の3種類に限られる。地力増進法で指定の対象となるゼオライトとは、これらの沸石類を主成分とする白色凝灰岩を破碎して粒状あるいは粉状に加工したものである。そこで、各地のゼオライト鉱山から集めた13点のゼオライトについて鉱物組成および陽イオン交換容量と交換性塩基組成を比較した。なお、試料中にはインドネシアのジャワ島産2点が含まれる。

X線回折分析により調べた試料中の鉱物組成はクリノプチロライトを主体とするゼオライト4点、モルデナイト主体6点、両鉱物の混合3点であった。また、両鉱物の特異ピークの高さから定量したクリノプチロライトあるいはモルデナイト含有量(ゼオライト含有量)は20から83%と試料間で大きく相違した。大半の試料が70%程度以上を示したが、北海道産では50%程度とやや低かった。石川産はゼオライト含有率が20%と特異的に低く、随伴鉱物としてモンモリロナイト、緑泥石、石英などが含まれていた。日本産ゼオライトに比べて、インドネシア産では26、54%と低かった。

ゼオライトの品質として最も重要な陽イオン交換容量(CEC)はゼオライト含有率にほぼ支配され、日本産では85~182meq/100g、インドネシア産では80~90meq/100gであった。鉱物が相違してもゼオライト含有率が同等の試料間ではほぼ同程度の陽イオン交換容量を示した。なお、ゼオライト含有率が低かった石川産試料でも85meq/100gの値を示した原因は随伴するモンモリロナイトの影響である。

交換性塩基組成は鉱物の種類と密接に関連し、クリノプチロライト主体品は交換性カリウムとナトリウム、モルデナイト主体品は交換性カルシウムに富んでいた。

3. ゼオライトの施用効果^{5,6)}

性質が著しく異なる3種類の土壌(低地土:CEC 6.5meq/100g、赤黄色土壌:CEC:10.6meq/100g、黒ボク土:CEC 40.4meq/100g)に4種類のゼオライト(モルデナイト主体品(表1中の試料7):CEC 164meq/100g、クリノプチロライト主体品(試料10):CEC 159meq/100g、両者混合品(試料4):CEC 172meq/100g、インドネシア産(試料12):CEC 88.5meq/100g)を10アール当たり5トン相当量施用して、1/5000aワグネルポットを用いたトマトの栽培試験を行った。その結果、図1のようにゼオライトの施用効果は、ゼオライトの種類によるより土壌の違いにより大きく異なった。その効果は土壌のCECが小さいほど大きく、低地土では生育量が20~30%増加したが、CECの大きい黒ボク土ではほとんど施用効果が認められなかった。ゼオライトの種類による施用効果の違いは判然とせず、CECが約90meq/100gのインドネシア産ゼオライトでもCECの大きい日本産ゼオライトと同等の効果を示した。

上記の試験結果のように、CECの小さい土壌ではゼオライトの施用効果が期待できるので、砂丘未熟土からなる千葉県佐原市のナスハウスに福島県西会津産のゼオライトを10アール当たり2.5トン施用して、2年間ナスの収量調査を行った。その結果、表2のように、増収率は15%程度であったが、販売金額は2年間で約100万円増加した。このように収益性の高い施設園芸ではゼオライトによるわずかな増収効果が収入の増大につながる可能性も大きい。露地畑や牧草地に施用したゼオライトの効果はどの程度であろうか。

東京都世田谷区の黒ボク土からなる畑地に宮城県川原子産ゼオライト5トン/10a施用区、緑肥区、ゼオライト5トン/10a+緑肥区、対照区を設け、5年間に17作の野菜と緑肥作物を栽培した。なお、緑肥区では栽培したライムギやソルゴーを年間5～10トン/10a鋤込んだ。その結果、表3のようにゼオライト区の収量が対照区より高かったのは17作中5作に過ぎず、5年間の平均収量では対照区と全く変わらなかった。しかし、ゼオライトと緑肥を併用すると明らかな増収効果が認められ、その効果は緑肥単独区より大きかった。

次に、静岡県富士宮市内の多腐植質黒ボク土からなる草地に福島県川原子産ゼオライト(5トン/10a)と有機物(牛糞など5トン/10a)施用の有無を組み合わせた4試験区を設け、オーチャードグラスの収量調査を3年間行った。その結果、表4のようにゼオライト単独施用区でも対照区より10%弱増収したが、露地畑での試験と同様に有機物を併用すると増収率は約30%に達した。

上記の試験結果のように、ゼオライトの単独施用による作物の増収効果はせいぜい10%程度に過ぎないので、露地畑や牧草地あるいは水田では増収による収益がゼオライト代にも及ばないことも多いが、施設園芸では収益の増加も期待できる。

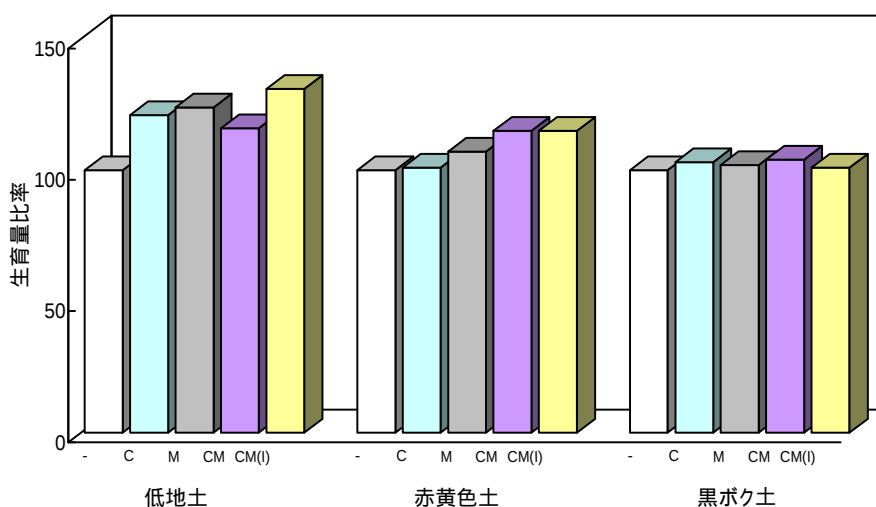


図1 ゼオライトの施用がトマト生育量に及ぼす影響

(ゼオライト無施用区を100とする比率)

- : ゼオライト無施用 C : クリノプチロライト主体品
M : モルデナイト主体品 CM : クリノプチロライト・モルデナイト混合品
CM(I) : クリノプチロライト・モルデナイト混合品(インドネシア産)

表1 天然ゼオライトのゼオライト含有率・陽イオン交換容量および交換性塩基組成

試料 No.	産 地	ゼオライト含有率(%)			pH(H ₂ O)	C E C meq/100g	交換性塩基(meq/100g)			
		C	M	含量			CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
1	北海道 十勝	20	31	51	7.6	97.5	50.5	8.7	20.1	10.3
2	北海道 長万部	52	-	52	8.3	103	38.1	8.8	18.8	25.7
3	秋田県 二ツ井	77	-	77	7.6	153	15.0	4.5	59.0	67.6
4	山形県 板谷	55	23	78	6.3	172	26.7	3.7	47.0	70.0
5	宮城県 白沢	-	77	77	6.5	92	25.3	5.6	17.6	39.4
6	宮城県 川原子	-	79	79	8.1	148	77.7	6.1	24.6	36.7
7	福島県 桑折	-	83	83	8.0	182	77.4	6.3	39.5	28.5
8	福島県 西会津	82	-	82	8.4	164	36.7	3.5	59.5	64.2
9	石川県	-	20	20	8.8	84.8	42.2	6.5	2.5	29.0
10	和歌山県 川辺	-	76	76	7.8	159	77.3	7.0	42.4	26.5
11	島根県 石見太田	74	-	74	8.0	147	45.0	4.7	32.3	54.9
12	インドネシア 西ジャワ	27	27	54	7.3	88.5	36.7	6.6	30.7	8.0
13	インドネシア 西ジャワ	-	26	26	7.5	83.5	34.7	4.3	23.3	11.1

C : クリノプチロライト M : モルデナイト

表2 ハウスナスに対するゼオライト施用効果

栽培期間	収量(t/10a)		ゼオライト施用に伴う増収割合	
	対照区*	ゼオライト区*	収量*	金額**
1年目	9.8	11	12.0%	428千円
2年目	8.5	9.8	15.2%	600千円

土壌: 海成砂土 天然ゼオライト施用量: 1.2ト/10アール

* 10アール当りに換算した収量

** 10アール当たりの増収額, ただし, ゼオライト代と施用経費(日当)を差し引いている

表3 畑作物・野菜に対する天然ゼオライトの施用効果(対照区の収量を100とする指数)

試験区	1年目			2年目			3年目		
	エダマメ	ソルゴー	コカブ	エダマメ	ソルゴー	ホレンソウ	エダマメ	ソルゴー	コマツナ
対照区	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ゼオライト区	97	98	118	100	89	121	102	98	98
緑肥区	138	106	108	115	126	139	102	140	140
ゼオライト区+緑肥区	141	124	106	122	112	154	108	150	150
試験区	4年目				5年目				5年間の 平均
	エダマメ	ソルゴー	ホレンソウ	エンバク	エダマメ	ソルゴー	ホレンソウ	ライムギ	
対照区	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ゼオライト区	95	98	92	103	94	98	93	93	100
緑肥区	112	103	131	101	125	114	102	102	116
ゼオライト区+緑肥区	111	109	136	95	126	113	102	102	126

ゼオライト: 10アール当たり5トンを試験前のみ施用

緑肥 : 10アール当たり5~10トンのソルゴーやムギを毎年施用

表4 牧草(オーチャードグラス)に対する天然ゼオライトの施用効果

試験区	1年目		2年目		3年目		3年間の合計	
	収量*	指数	収量*	指数	収量*	指数	収量*	指数
対照区	3.75	100	4.45	100	4.4	100	12.6	100
ゼオライト区	4.51	120	4.58	103	4.6	105	13.7	109
有機物区	5.05	135	4.84	109	5.3	120	15.2	121
ゼオライト区+有機物区	5.28	141	5.87	132	5.59	127	16.7	133

収量* : 生草収量 t/ 10a

ゼオライト: 10アール当たり5トンを試験開始前のみ施用

有機物 : 10アール当たり5トンの牛糞などを毎年施用

4. 土壌中でのゼオライトの挙動

1) ゼオライトの安定性⁷⁾

ゼオライトと同程度の陽イオン交換容量を有する天然鉱物としてベントナイトが知られている。そこで、両資材の土壌中での挙動を比較する目的で次のような実験を行った。

遊離酸化アルミニウムに富む多腐植質黒ボク土から脱腐植処理後、分離した粒径2μ以下の粘土画分に同重量の天然ゼオライトあるいはベントナイトを混合してペースト状態とし、30℃で保温静置した。1週間後と1ヶ月後にその一部を採取して陽イオン交換容量を測定した。その結果、表5のように、ベントナイト区の陽イオン交換容量が経時的に低下したのに対して、ゼオライト区では全く変化しなかった。この現象はスメクタイト(モンモリロナイト)の層間中に土壌中のアルミニウムが侵入することによるスメクタイト構造の変質⁸⁾であることが知られている。しかし、石英のような三次元網目状構造を有するゼオライトはアルミニウムに富む酸性土壌や黒ボク土中に施用されてもその構造は変化しない。したがって、ゼオライトを一度施用すればその保肥力改善効果は長期間持続する。

表5 ゼオライト・ベントナイトの混合が粘土のCECに及ぼす影響

資材	保温静置期間		
	0日	1週間	1ヶ月
ゼオライト	68.3 (100)	69.7 (102)	69.3 (101)
ベントナイト	56.3 (100)	48.2 (86)	47.0 (84)

(meq/100g)

() : 0日を100とする比率

2) ゼオライトのカリウムイオンとアンモニウムイオン特異捕捉性⁹⁾

ゼオライトはその構造中に多量の永久陰電荷を有するだけでなく、カリウムとアンモニウムイオンを特異的に吸着捕捉することが知られている。その原因はゼオライト構造中にある多数のトンネル状細孔が両陽イオンの大きさにほぼ一致するためである。この細孔にはまり込んだ両イオンは塩類溶液には交換されて土壌溶液中に溶出するが、水にはほとんど溶出しない。そのため、ゼオライトを施用した土壌では交換性カリウムが増加して、塩基バランスが崩れると懸念されることが多い。しかし、ゼオライトを施用した土壌中の交換性カリウムと水溶性カリウムの関係を示した図2のように、ゼオライト施用量が増加するほど水溶性カリウムの割合が低下する。したがって、ゼオライトを多量に施用した圃場には従来の交換性カリウムによる土壌診断基準ではなく、例えば水溶性カリウムによる基準の設定が必要となる。

一方、ゼオライト施用土壌中に施用されたアンモニウムイオンは硝酸化成作用が抑制され、硝酸態窒素の供給が緩効化される。そのメカニズムは、アンモニウムイオンがゼオライトの細孔中に捕捉される結果、土壌中の硝酸化成細菌から隔離されることにある。このように、ゼオライトの施用により、カリウムと窒素の肥効率を高めることができる。また、上記の栽培試験で認められたようなゼオライトと有機物の併用効果もアンモニウムイオンの特異捕捉性に起因している。

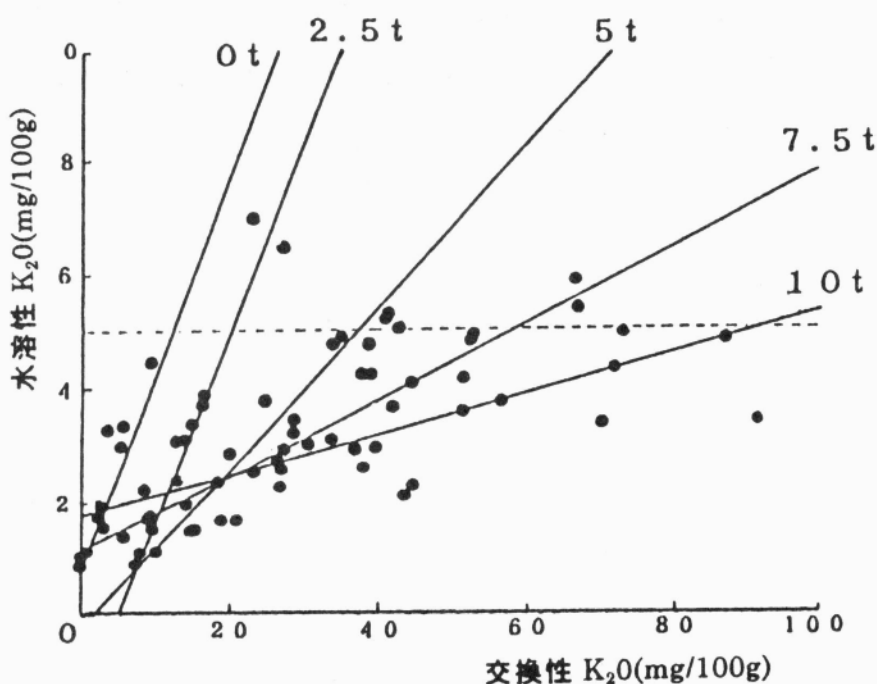


図2 ゼオライト施用土壌中の交換性カリウムと水溶性カリウムの関係
(図中の0~10tは10アール当たりのゼオライト施用量)

5. ゼオライトの新しい利用法

1) ゼオライトを主体とする園芸用育苗培土(ゼオライト培土)¹⁰⁾

野菜の栽培では古くから「苗半作」といわれるように、苗がその収量や品質を大きく左右する。そのため、農家では手間暇を惜しまず床土を作ってきたが、最近では省力化や土壌病害対策などの点から市販育苗培土が普及している。普及初期には水稻用培土のような山土を主原料とする園芸用培土が多かったが、最近では土を全く使用せず、軽量のバーミキュライトやパーライト、ピートモスを主成分とする人工培土が増えている。しかし、それらの資材には保肥力がないため緩効性肥料を添加して肥切れを防止している。

そこで、筆者はゼオライトの特性に注目して「ゼオライト培土」を開発した。粒径0.5～2mmの粒状ゼオライトを主体(約半量)として、保水材としてピートモスと少量のバーミキュライトやパーライトを混合し、リン酸アンモニウムなどの肥料を添加した培土である。アンモニウムイオンがゼオライトに特異捕捉されるため窒素添加量が多くても、電気伝導率が上昇しにくいと共に、その肥効が長期間持続すること、原料の全てが地力増進法で指定された土壌改良資材であるため、苗を定植することにより本圃の土壌が改良されることなどにこの培土の特長が見られる。現在、このゼオライト培土は果菜・葉菜・ネギ用育苗培土として広く実用化されている(写真1)。



2)ゼオライトによる有機質肥料の緩効化¹¹⁾

環境にやさしい農業資材の目玉として緩効性肥料の普及が進んでいる。この種の肥料は従来の速効性肥料を被覆した被覆肥料と緩効性有機質肥料に大別される。前者は物理化学的な溶出性を示すので、皮膜の性質を変えることで容易に肥効を調節できるが、後者の内オキサミドやウレアホルムのように土壌微生物による分解を受けて無機化する肥料では肥効調節が難しい。通常は肥料の粒径を大きくすることでその目的を果たしているが、ゼオライトとクエン酸のような有機酸を利用すると緩効性が強化される。

図3は粉末オキサミドにゼオライトとクエン酸発酵廃液を1:1:0.3の割合で混合し造粒した資材の土壌中での窒素無機化を示したものである。オキサミド区に比べて著しい緩効性が認められるが、そのメカニズムは次のように考えられる。三種混合資材が土壌中に施用されるとクエン酸が溶解して水素イオンを遊離するとそれがゼオライトに交換吸着されて、酸性ゼオライトとなるため、混合物中のpHが低下して、オキサミドの分解が抑制される。しかし、次第に酸性ゼオライトが中和され、オキサミドの分解が始まると生成されたアンモニウムイオンがゼオライトに特異捕捉されて、硝酸化成作用が抑制されるために土壌中への硝酸態窒素放出が遅れる。

ゼオライトのこのような利用方法は、鶏糞にも応用できる。鶏糞といえば発酵鶏糞が最も一般的な利用方法であるが、発酵過程でアンモニアガスが放出されるため、発酵期間が長期に及ぶほど有機質肥料としての価値は低下する。一方、火力や天日で乾燥処理した鶏糞は窒素質肥料としての価値が高い反面、その肥効は速効的で施用後1週間ほどで大部分の窒素が無機化してしまう。そこで、乾燥鶏糞にゼオライトとクエン酸発酵廃液を混合して、ディスクペレッターなどでペレット化すると環境にやさしい緩効性有機質肥料を製造することができる。表6のように、この資材を使って野菜を栽培すると硝酸イオンの流亡抑制にも効果的である。

6.さいごに

地下資源の乏しいわが国にあって、ゼオライトは数少ない貴重な天然資源の一つである。従来は単なる土壌改良資材として圃場に施用することが多かったが、現在では多くの農園芸利用技術が開発されている。それらの技術を上手に使うと、最後にはゼオライトを土の中に入れて、保肥力を高めることが合理的な利用方法である。

これまでゼオライトは土壌を改良して農産物の収量を高めるための資材であったが、今後はそれだけでなく肥料の削減や環境に対する負荷軽減のための資材として使われることが望ましい。また、今後わが国のゼオライト利用技術がインドネシアなど世界のゼオライト産出国でも役に立つことを期待する。

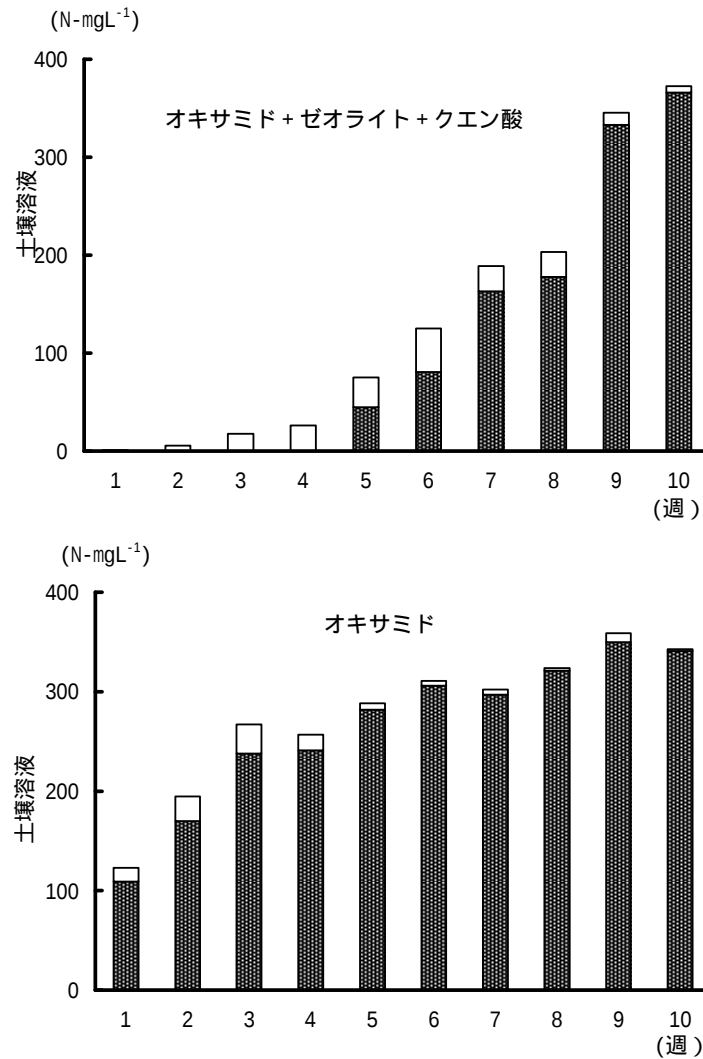


図3 ゼオライトとクエン酸がオキサミドの土壤中での無機化に及ぼす影響
土壌溶液中の硝酸態窒素(黒塗り部分)とアンモニア態窒素(白抜き部分)濃度

表6 鶏糞・ゼオライト・クエン酸混合ペレットの肥効と硝酸イオン溶脱量

試験区	生育量		溶脱量		2作合計(比率)	
	ソルゴー	チゲンサイ	ソルゴー	チゲンサイ	生育量	溶脱量
無肥料	65.6	41.9	36.1	26.9	53.8	31.5
化学肥料	100	100	100	100	100	100
鶏糞単独ペレット	103	81.7	87.4	69.3	92.4	78.4
鶏糞+ゼオライト+クエン酸	106	82.3	60.3	37.5	94.2	48.9

試験方法: 面積 0.15m^2 のコンテナによる栽培試験、窒素施肥量は各区同一

生育量: 化学肥料区を100とする比率で表示

溶脱量: 多量灌水でコンテナ下部より溶脱した硝酸イオン量、化学肥料区を100とする比率で表示

参考文献

- 1)坪田五郎・宮脇謙三・三宅 信・小川昭夫：大谷石石粉の農業利用に関する研究(第1報)、栃木県農試報告、4,35-56,1960
- 2)沼倉正二・浅野岩夫・若生松兵衛：水田に対するゼオライトの施用効果に関する研究(第1報)、宮城県農試報告、37,45-78,1966
- 3)農林省農政局農産課：ゼオライト施用試験成績、1964
- 4)川口菊雄：ゼオライトによる土壌改良、用水と営農、54,4-8,1977
- 5)Suwardi, Itsuo GOTO, Midori NINAKI:The quality of natural zeolites from Japan and Indonesia and their application effects for soil amendment, Jour.of Agri.Sci., Tokyo Nogyo Daigaku,39,133-148,1994
- 6)後藤逸男：天然ゼオライトの農業利用、ゼオライト、7,8-15,1990
- 7)後藤逸男・蜷木 翠：天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究(第2報)、東京農大農学集報、24,305-315,1980
- 8)沼尾林一郎：ベントナイトの土壌改良への利用及びその効果に関する研究、群馬県農試報告、3,45-58,1966
- 9)後藤逸男・蜷木 翠：天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究(第3報)、東京農大農学集報、25,164-168,1980
- 10)後藤逸男：特許公報 第009482、1990
- 11)後藤逸男：農業研究センター 平成9年度一般別枠研究「物質循環の高度化に基づく生態系調和型次世代農業システムの開発」推進会議資料、24-27、1998