

農と緑のための土と肥料のはなし(その 16)

天然ゼオライトの土壤改良 効果とその農業利用(1)

東京農業大学応用生物科学部 教授 後藤 逸男



1. ゼオライトとは

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。その用途として当初は、製紙用充填材・水処理材・ガス分離などの工業分野の他、家畜飼料の添加材や土壤改良資材などの農業分野が中心であったが、最近ではわが国で産出される年間約 10 万トンの最も大きな用途はゴルフ場や競技場などの緑化用資材や土壤改良資材・園芸資材として利用である。

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、ケイ酸を多く含む鉱物であるのでケイ酸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つ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もなく掲載されたこともあり、農家の巷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「効かない」「いかさま」「まゆつば」土壤改良資材の代名詞となり果てた。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壤改良資材として政令指定された。なお、天然ゼオライトの他に火力発電所から発生する石炭灰（フライアッシュ）などケイ酸とアルミナを多く含む資材にアルカリを加えて化学反応により合成した人工ゼオライトが知られている。その特徴は陽イオン交換容量（CEC）が大きいことで、天然ゼオライトの数倍にも達するが、多量のナトリウムを含んでいるなどの理由で農業利用には適さない。

このようなゼオライトが、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故現場では事故発生初期から放射性セシウムなどで汚染された水の吸着処理材として使われて、一般の人々にもよく知られるようになった。また、2012 年春から福島県を中心に放射性セシウムで汚染された農地の修復にも利用されている。

筆者らは 1970 年代から天然ゼオライトの土壤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、その特性と農業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⁾

天然ゼオライト（以下、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、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、いずれもグリーントフ地域で国内の埋蔵量は数千万トンとも無尽蔵ともいわれる。ゼオライト鉱物の専門家の中には、「日本列島がゼオライトの上に浮かんでいる」とさえ表現する人もいる。いずれも、およそ2000万年前に海底深く生成したゼオライトがその後の地殻変動で隆起し、現在では山全体がゼオライト鉱床となっているため、ほとんどのゼオライト鉱山では、**写真1**のような状態で露天掘りされている。

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。**写真2**の左がゼオライト鉱山から採掘された原石で、それを細かく粉碎して粒径をそろえた粒状ゼオライト（**写真2**の右）が農園芸・緑化用土壌改良資材として市販されている。

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（**表1**）。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、



写真1 露天掘りされているゼオライト鉱山（山形県米沢市板谷）

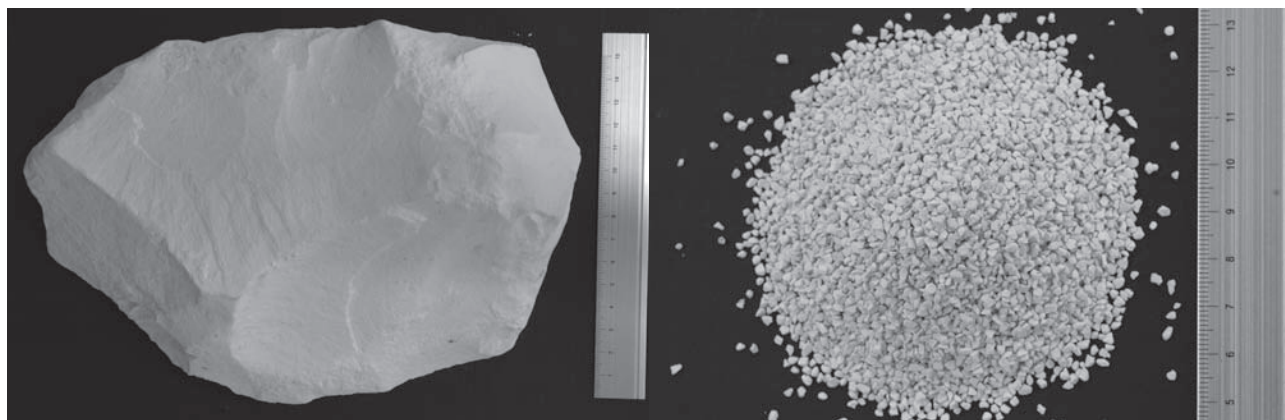


写真2 ゼオライトの原石（左）とそれを粉碎した市販品（右）（山形県米沢市板谷鉱山産）

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)	CEC 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

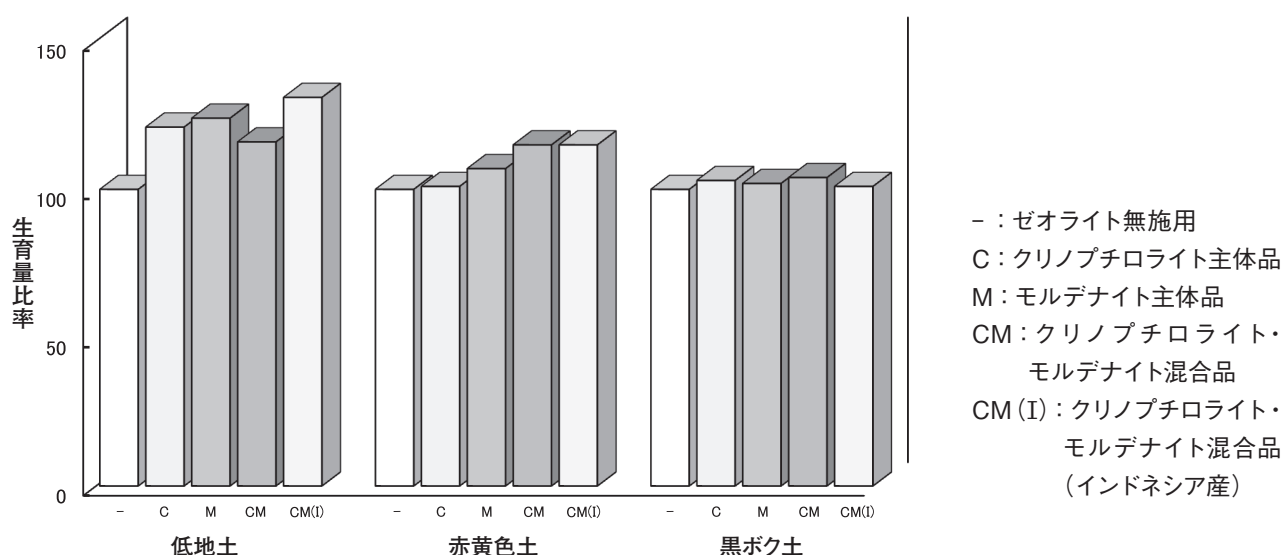


図1 ゼオライトの施用がトマト生育量に及ぼす影響 (ゼオライト無施用区を100とする比率)

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5t/10a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。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の大きな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

インドネシア産ゼオライトでも CEC の大きな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 の小さな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 2.5t/10a 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福島県川原子産ゼオライト 5t/10a 施用区、緑肥区、ゼオライト 5t/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 5~10t/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。

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 (5t/10a) と有機物 (牛糞など 5t/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

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 トン /10 アール

* 10 アール当たり換算した収量

** 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	ハウレンソウ	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	ハウレンソウ	エンバク	エダマメ	ソルゴー	ハウレンソウ	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：5t/10a を試験前のみ施用

緑肥：5~10t/10a のソルゴーやライムギを毎年施用

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：5t/10a を試験開始前のみ施用

有機物：5t/10a の牛糞などを毎年施用

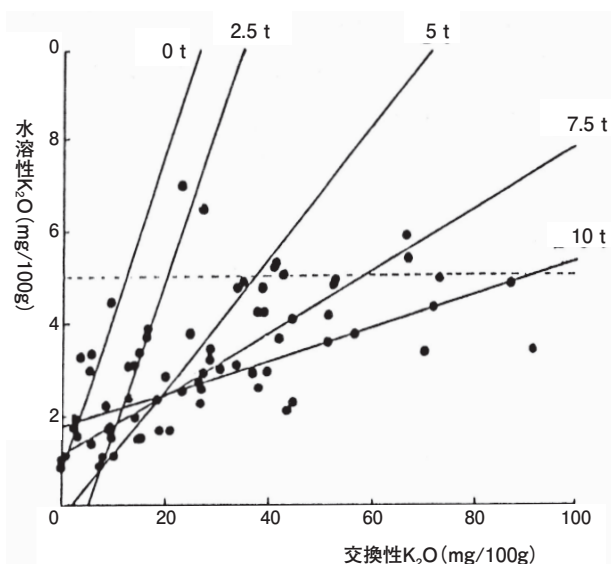


図2 ゼオライト施用土壤中の交換性カリウムと水溶性カリウムの関係
(図中の0～10tは10アール当たりのゼオライト施用量)

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。

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°C 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浸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

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)

() 内: 0 日を 100 とする比率

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。

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はなく、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交換されて土壌溶液中に溶出するため交換性陽イオンではあるが、水にはほとんど溶出しにくい。

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。

5. 万能資材ではないゼオライト

ゼオライトの構造をすき間だらけのジャングルジム（図3）と考えるとわかりやすい。しかし、そのすき間の大きさは0.4～0.8nmのナノサイズで、写真3ように電子顕微鏡でも見ることはできない。そのためゼオライト構造の中にはアンモニウムやカリウムイオンより小さなイオンしか入り込みことはできない。ゼオライトが微生物のすみかになるとよくいわれるが、それらのイオンより遙かに大きな微生物はゼオライトの中に入り込めない。アンモニウムイオンはゼオライトの中に入り込めるが微生物は入れない、実はこの性質がゼオライトに吸着された窒素肥料をゆっくり効かせる効果を生み出すキーポイントである。

ゼオライトの効能として、**土壌の保水性が高まる**ともよくいわれる。市販されているゼオライトは乾燥品であることが多いので、確かに水をよく吸収する。しかし、それらの水は吸着水と呼ばれる植物に吸収利用できない水で、**ゼオライトには保水力はない**。土壌の保水性を高めるには、ピートモスやパーライトなどの土壌改良資材を使う。

ゼオライトとモンモリロナイトのケイ酸含有量はどちらも約70%にも達するが、ゼオライト中のケ

イ酸はほとんどが頑強な結晶構造を作り上げているので、**ゼオライトから溶け出して植物に吸収されることは期待できない**。ただし、市販されているゼオライトの中には不純物として少量のモンモリロナイトが含まれていることがある。**モンモリロナイトは土壌中で徐々に分解され、その際2：1型結晶構造中のケイ酸が少量溶出するので、このケイ酸の一部**

0.4～0.8nmのすき間にアンモニウムイオンやカリウムイオンがはまり込む

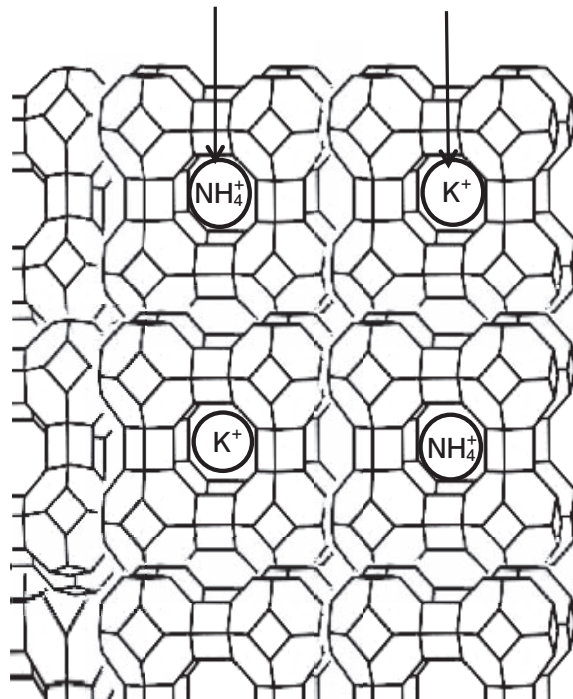


図3 ジャングルジムのようなゼオライト構造

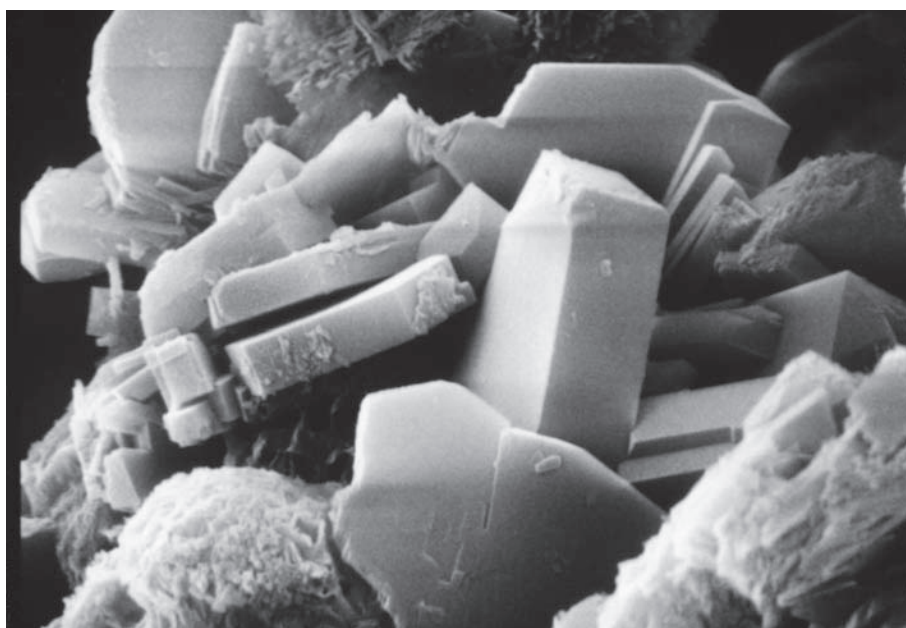


写真3 ゼオライトの電子顕微鏡写真（写真提供：日東粉化商事㈱）

が稲の他、キュウリやメロンなどケイ酸を利用する
ウリ科野菜に吸収されることは大いに考えられる。

しかし、ケイ酸を効かせたいのであれば、モンモリ
ロナイトよりケイ酸質肥料を使った方が合理的である。

ゼオライトは天然ミネラル鉱物で、微量元素の供
給に役立つというはなしも時々耳にするが、人工的
に添加しない限り天然のゼオライトに微量元素補給
効果は全く期待できない。

トマトやキュウリなどの施設野菜農家が最も期待
するゼオライトの効能のひとつが塩類濃度抑制のよ
うであるが、そのような効果は全くない。土壤中の
塩類の主体は硝酸イオンで、肥料として施した化学
肥料や有機質肥料の他、堆肥中の窒素成分が土壤微
生物の作用で変化してできる最終生成物である。ゼ
オライトは大きな CEC を持ち陽イオンを吸着する
が、陰イオンである硝酸イオンを吸着する能力はな
い。そのために、電気伝導率が高まったハウスにゼ
オライトを施用しても効果は期待できない。塩類濃
度の上昇を抑えるには、土壤診断結果に基づいて窒
素施用量を減らすことが最善の対策となる。ただし、
陰イオンであるリン酸イオンもゼオライトには直接
吸着されないが、ゼオライトに吸着されているカル
シウムと反応して植物に利用されやすいリン酸カル
シウムとなり、間接的ではあるが、ゼオライトはリ
ン酸肥料を効かせる助っ人として役立つ。

このように、ゼオライトは決して万能な土壤改良
資材ではない。その特性をよく理解して上手に使う
ことがゼオライトの農業利用の基本となる。

参考文献

- 1) 坪田五郎・宮脇謙三・三宅 信・小川昭夫：大
谷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壤改良、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・蛭木 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：ベントナイトの土壤改良への利用
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・蛭木 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