

農地における酸性硫酸塩土壌混入対策 に関する検討

—炭カル施用法・施用量の検討結果—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 資源保全チーム ○横濱 充宏
国島 隼人

酸性硫酸塩土壌（以下ASS）は大気に触れると硫酸が生成して強酸性となる土壌である。農地整備事業で客土や置土等の農地への土砂搬入を行う場合、ASSが農地に混入して作物生育に悪影響を及ぼす場合がある。ASSと農地表土の種類別に炭カルの粒径別、施用法別の中和改良効果を比較検討した。細粒炭カルの混和施用が全ての土質（粗粒、中粒、細粒）の農地表土において効果的で、火山性ASSと海成ASSでは適正施用量が異なった。

キーワード：酸性硫酸塩土壌、農地混入被害対策、中和改良手法、炭カル施用量、pH

1. はじめに

酸性硫酸塩土壌（以下、ASS）は大気に触れると含有硫黄成分が酸化して硫酸となり、強酸性を示す特殊土壌である¹⁾。農地造成、客土採取、道路建設などで掘削を行うと、ASSが出現する場合がある²⁾。ASSは高濃度の硫黄成分を含み、火山碎屑物や熱水変質性安山岩に由来する火山性ASSと、汽水中に堆積した堆積土壌や堆積岩が地表に現れた海成ASSが知られている。また、これらは局地的に存在している場合が多い³⁾。ASSに含まれる硫黄成分は主にパイライト（黄鉄鉱： FeS_2 ）の形で存在し、酸化が全く進行していない状態では、強酸性を示さない場合が多い。土壌の色も、還元状態の土壌と同じ黄土色、灰白色あるいは青灰色を呈するため、見た目だけではASSと判断不可能で、存在場所の正確な把握が困難である。

農地整備事業で客土や置土などの農地への土砂搬入を行う場合、ASSが農地に混入し、農作物の生育に悪影響をおよぼす可能性がある。これを防止するため、寒地土木研究所では、現場で迅速にASSの判定が可能な簡易判定法を開発した⁴⁾。しかし、ASSの分布は局地的なことから、このような対策を講じても農地のごく一部にASSが搬入され、スポット状の生育被害（写真－1）が発生する可能性がある。ASSによる被害が発生した農地の中和改良対策として、水田表土への細粒炭カルの全面混和施用⁵⁾、水田および畑の表土に対する粗粒炭カルの全面混和施用と非汚染土壌の全面置土の併用⁶⁾が試みられているが大規模で高コストである。

このように、ASSで汚染された水田および畑の表土に対する全面改良手法の実施実績はあるが、ごく一部のみ

に被害が生じた農地の小規模な改良手法は検討されていない。また、草地や果樹園のように永年作物が作付けされており、炭カルの混和施用が難しい農地での改良手法の検討もなされていない。加えて、粗粒炭カルと細粒炭カルの改良効果の比較検証もなされていない。

そこで、ASSと農地表土の種類に対応した炭カルの粒径別、施用方法別の中和改良効果を比較するための室内ポット試験を行ったので、その結果を報告する。

2. 材料および方法

(1) 供試土の選定

石渡らは北海道における各種ASSの区分、分布および性状について調査し、ASSは火山性ASSと海成ASSに大



写真－1 客土にASSが一部混入した草地での被害例

きく区分されることを報告している³⁾。そこで、火山性ASSを札幌市で、海成ASSを天塩町で採取して供試した。

また、農地表土の粒径組成の違いがASS混入被害発生に対する改良効果におよぼす影響を調査するため、粒径組成の異なる農地表土を供試した。粗粒質農地表土は市販のマサ土を、中粒質農地表土は東神楽町の農地から採取したものを、細粒質農地表土は美唄市の農地から採取したものを供試した。

なお、供試土の理化学性およびその分析法については後述する。

(2) ポット試験の概要

1) 試験1

農地整備事業では、農地表土の理化学性を改良するため、農地表土上に客入土を撤出した後に農地表土と混和する客土が実施される場合と客入土を農地表土上に撤出して農地表土との混和を行わない置土が実施される場合がある。客入土の一部にASSが混入して客土ないし置土が実施されてASSによる酸性害が発生した場合を想定し、各種ASSと粒径組成の異なる各種農地表土が混和された客土を想定した試験区および各種ASSの置土を想定した試験区を設定した。

また、農地整備事業が実施された後に作付けされる作物は、水稻や1年生作物が作付けされる場合と、一旦作付けされるとしばらく耕起を行わずに管理する永年作物（牧草や果樹など）を作付けする場合が想定される。前者の場合、作付け前に炭カルの混和施用が可能である。一方、永年作物が作付けされた圃場でASS混入による酸性害が発生した場合、炭カルを施用して農地表土と混和して中和改良を行うと作物が耕起作業によって傷つく可能性が高く、炭カルの表面施用により十分な中和効果が発揮されるならばこれが望ましい。そこで、炭カルの混和施用を想定した試験区および表面施用を想定した試験区を設定した。

設定した試験区の内訳は表－1の通りである。

2) 試験2

試験1で細粒炭カルの混和施用が効果的と判断されたため、この施用法における細粒炭カルの適正施用量を決定するためのポット試験を行った。

試験区の設定は表－2の通りである。

3) 試験3

試験2において、火山性ASSの試験区では細粒炭カルの適正施用量が決定できななかつたため、これを決定するためのミニポット試験を行った。

試験区の設定は表－3の通りである。

(3) ポット試験の方法

1) 試験1

試験1の試験方法を以下に示す。

A) 各種試験区の炭カル施用量は、佐々木⁵⁾の方法によ

りASSと農地表土の混和土ないしASSを過酸化水素水で酸化処理し、これらの供試土中の易酸化性硫黄を完全酸化した後に風乾調整した供試土を用いて、緩衝曲線法により求めた。

B) ワグネルポット（1/5000）の底に排水導管を設置し排水導管の高さ（約3cm）まで底土として鹿沼土を入れた。

C) 鹿沼土の上に厚さ15cmの供試土を充填した。供試土がASSと農地表土の混和土の場合、ASS：農地表土＝3:2＝9cm:6cmとなる分量を均一に混ぜ合わせて充填した。この比率は道内の国営農地再編整備事業での客土実態を調査し、最も厳しい条件である最大客土厚実績から決定した。これに加え、ASSを誤って置土してしまった場合を想定して、供試土全てをASSで充填した試験区も設定した。

表－1 試験1における試験区の設定

ASS	農地表土 設定意図	炭カル施用法 設定意図	炭カルの種類	ASS	農地表土 設定意図	炭カル施用法 設定意図	炭カルの種類
火山性	粗粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質	海成	粗粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質			混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		施用なし	－			施用なし	－
	中粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質		中粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質			混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		施用なし	－			施用なし	－
	細粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質		細粒質 ASS客土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質			混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		施用なし	－			施用なし	－
	なし ASS置土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質		なし ASS置土 想定	表面施用 永年作物作付 圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質			混和施用 水田・1年生作物 作付圃場想定	粗粒質
			細粒質				細粒質
		施用なし	－			施用なし	－

表－2 試験2における試験区の設定

ASS	農地表土 設定意図	改良目標pH	ASS	農地表土 設定意図	改良目標pH
火山性	粗粒質 ASS客土 想定	5.5	海成	粗粒質 ASS客土 想定	5.5
		6.0			6.0
		6.5			6.5
	中粒質 ASS客土 想定	5.5		中粒質 ASS客土 想定	5.5
		6.0			6.0
		6.5			6.5
	細粒質 ASS客土 想定	5.5		細粒質 ASS客土 想定	5.5
		6.0			6.0
		6.5			6.5
	なし ASS置土 想定	5.5		なし ASS置土 想定	5.5
		6.0			6.0
		6.5			6.5

表－3 試験3における試験区の設定

ASS	農地表土	炭カル施用区分
火山性	粗粒質	1.25倍
	中粒質	
	細粒質	
	なし	
	粗粒質	1.50倍
	中粒質	
	細粒質	
	なし	
	粗粒質	2.00倍
	中粒質	
	細粒質	
	なし	
	粗粒質	4.00倍
	中粒質	
	細粒質	
	なし	

- D) 炭カルの表面施用区では100ml採土缶を中央部に浅く埋設してこの採土缶周辺にのみ炭カルを表面施用した。これはpHメーターを採土缶内部の土壤に挿入することによってpHメーターの電極が炭カルに接触することなく土壤pHの測定を可能にするためである。これにより、炭カルの溶出・移動による土壤pHの変化のみを測定し、炭カルの電極への接触による土壤pHの誤測定を防止できる。一方、炭カルの混和施用区の場合は供試土を全部ステンレスバット上に摘出し、供試土に炭カルを十分に混和した上で供試土をワグネルポットに戻した。なお、各種炭カルの施用は2024年4月9日に行った。
- E) 農地に雨が降った場合を想定し、約1週間に1回各ワグネルポットに充填した供試土表面に400ml撒水した。この撒水量は国土交通省気象庁のホームページより札幌市の2018年から2022年までの5カ年の降水量を調べ、週平均降水量を算出して求めた。
- F) 各種炭カル施用直前は1回、試験開始直後の直近3回は約1週間に1回その後は2～4週間に1回pHメーターで供試土のpHを計測した。
- G) ワグネルポットの排水口に穴付きゴム栓およびシリコンチューブを設置して余剰水をポリビンに回収した。
- H) 各種炭カル施用直前の2024年4月6日からおよそ6ヶ月後（178日後）の2024年9月30日まで供試土のpHを測定した。

2) 試験2

試験2の試験方法は、土壤pHの測定開始と測定終了の時期がそれぞれ2024年6月19日および2024年12月27日（測定開始191日後）であること以外は試験1と同様である。

3) 試験3

試験3の試験方法を以下に示す。

底に錐で穴を開けたポリプロピレン容器（φ80×86）にASSおよび農地表土の風乾細土および細粒炭カルを混和して投入した後に30mlの撒水を行い、pHメーターで撒水直後および撒水6日後の供試土のpHを測定した。なお、炭カル施用量の決定法、ASSおよび農地表土の混合割合は試験1および2と同等とした。

(4) 供試土の分析方法

供試土の分析方法を以下に示す。

- A) 粒径組成：ピペット法
B) 全硫黄：過酸化水素・硝酸・フッ化水素酸分解法およびイオンクロマト法
C) 全カルシウム：過塩素酸分解法および原子吸光法
D) pH(H₂O)：ガラス電極法（土液比：1:2.5）
E) pH(H₂O₂)：佐々木の方法⁹⁾

3. 結果および考察

(1) 供試土の粒径組成

供試土の粒径組成を表－4に示す。供試した農地表土のうち、粗粒質表土は砂が72.2%を占める砂土(S)、細粒質表土は粘土が32.5%を占める軽埴土(LiC)、中粒質表土は前述の2種類の農地表土の中間の性質を示す粒径組成であった。

火山性ASSは中粒質の砂壤土(SCL)で、海成ASSは粘土が37.9%を占める軽埴土(LiC)であった。

(2) 供試土の化学性

供試土の化学性を表－5に示す。石渡⁹⁾は北海道で採取した火山性ASS5試料および海成ASS15試料の化学性につ

表－4 供試土の粒径組成

供試土	採取地	粒径組成 (%)				土性
		粗砂	細砂	シルト	粘土	
火山性ASS	札幌市	30.1	32.5	13.0	24.4	SCL
海成ASS	天塩町	6.4	15.4	40.3	37.9	LiC
粗粒質表土	市販土（マサ土）	72.2	20.9	4.8	2.1	S
中粒質表土	東神楽町	54.2	20.3	14.8	10.7	SL
細粒質表土	美唄市	8.6	28.4	30.5	32.5	LiC

表－5 供試土の化学性

供試土	採取地	含量 (cmol _e ・kg ⁻¹)		pH (H ₂ O)	pH (H ₂ O ₂)
		全S	全Ca		
火山性ASS	札幌市	240.0	1.8	2.6	1.4
海成ASS	天塩町	46.0	6.5	3.7	3.0
粗粒質表土	市販土（マサ土）	1.8	65.0	6.0	8.6
中粒質表土	東神楽町	4.0	16.0	5.2	6.9
細粒質表土	美唄市	6.0	22.0	5.1	6.4

いて比較検討し、全硫黄含量の平均値は火山性ASSで5.58%、海成ASSで1.31%と、火山性ASSで全硫黄含量が高いと評価している。また、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ ともに火山性ASSでの平均値がそれぞれ3.04および2.08、海成ASSでの平均値がそれぞれ3.83および2.68と両者とも火山性ASSで低いと評価している。

供試した火山性ASSと海成ASSの化学性も同様の傾向を示していた。供試した火山性ASSは海成ASSに比べて全硫黄含量が5.2倍多い特徴がある。

農地表土は、粗粒質表土で全カルシウム含量が他の2種類の農地表土のそれに比べて3倍以上多く、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が他の2種類の農地表土に比べて高い特徴がある。

(3) 表面施用した炭カルの状態（試験1）

炭カル施用直後と施用6ヶ月後の状態は、全ての試験区において違いは認められなかったため、代表例として細粒質農地表土に火山性ASSを混和した混和土に粗粒炭カルあるいは細粒炭カルを表面施用した試験区の施用6ヶ月後の写真を写真-2および写真-3に示す。

火山性ASSの試験区、海成ASSの試験区ともに、粗粒炭カルあるいは細粒炭カルを表面施用して6ヶ月後においても、炭カルはほとんど溶解しておらず表面に残存しており、炭カルを表面施用した場合の中和効果は小さいと推察された。

(4) 炭カル表面施用および混和施用での中和効果（試験1）

図-1に火山性ASSならびに火山性ASSと各種農地表土



写真-2 粗粒炭カル表面施用6ヶ月後（火山性ASS）



写真-3 細粒炭カル表面施用6ヶ月後（火山性ASS）

の混和土に、図-2に海成ASSおよび海成ASSと各種農地表土の混和土に各種炭カルを施用した場合の施用前、施用6日後、3ヶ月後および6ヶ月後の土壌pHを示す。この試験1では改良目標pHを5.0としており、供試土のpHがこれを上回ればASSおよびASSが混入した農地表土の中和改良が達成されたと評価できる。

なお、図中の略号と試験区との対応は表-6の通りである。

粗粒炭カルあるいは細粒炭カルの表面施用は、施用した炭カルが施用6ヶ月後においても土壌表面に残存して溶解消失しなかったことから、施用6ヶ月後においても土壌pHは低く推移し、十分な中和改良効果を発揮していなかった。

粗粒炭カルの混和施用の試験区においては、施用6ヶ月後においても土壌pHの十分な上昇は認められず、中和改良効果は不十分であった。

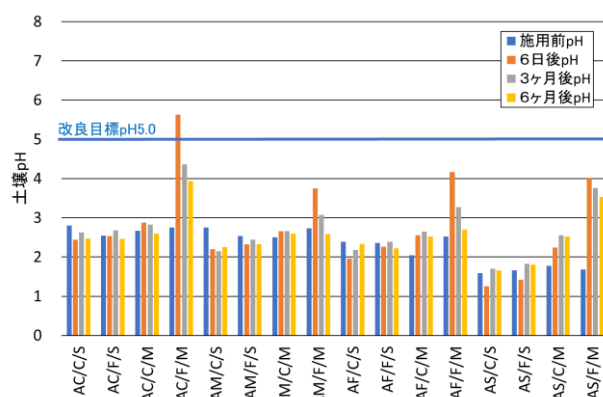


図-1 各種炭カル施用法の中和改良効果（火山性 ASS）

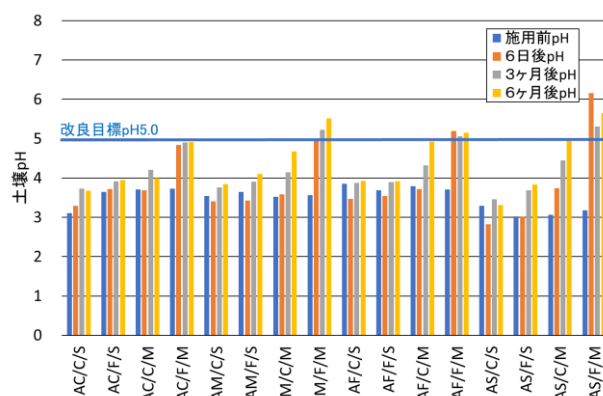


図-2 各種炭カル施用法の中和改良効果（海成 ASS）

表-6 図-1～4 および表-7 の略号対照表

土壌区	略号	炭カル種類	略号	施用法	略号
ASS+粗粒質農地表土	AC	粗粒炭カル	C	表面施用	S
ASS+中粒質農地表土	AM				
ASS+細粒質農地表土	AF	細粒炭カル	F	混和施用	M
ASSのみ	AS				
記載例（上：試験1（図1,2）／下：試験2（図3,4,表7））					略号
ASS+粗粒質農地表土+粗粒炭カル+表面施用					AC/C/S
ASS+粗粒質農地表土+改良目標pH5.0					AC/pH5.0

細粒炭カルの混和施用の試験区では、他の試験区に比べて明らかにpHが高く推移しており、細粒炭カルの混和施用のみがASSが持ち込まれた農地表土の中和改良に効果があると判断された。海成ASSの試験区では土壌pHが改良目標にほぼ達しているか達していた。しかし、火山性ASSの試験区では土壌pHが改良目標には達しておらず、中和改良効果が不十分であった。

(5) 細粒炭カル混和施用における適正施用量 (試験2, 3)

試験1の結果を受けて、各種ASSならびに各種ASSと各種農地表土の混和土に対する細粒炭カルの適正施用量を決定するための試験2を行った。図-3および図-4にその結果を示す。

なお、図中の略号と試験区との対応は表-6の通りである。

地力保全調査の要因強度別基準では、水田、普通畑、樹園地ともに、表土の土壌pHが6.0以上が望ましいとされている。

火山性ASS (図-3) の場合、改良目標pH6.5相当の細粒炭カルを混和しても火山性ASSおよび火山性ASSと農地表土の混和区で、炭カル施用6ヶ月後においても、ASSと中粒質農地表土の混和区以外は土壌pHが6.0を下回っており、十分な中和改良効果が発揮されているとは言えなかった。

一方、海成ASS (図-4) の場合、改良目標pH6.0およ

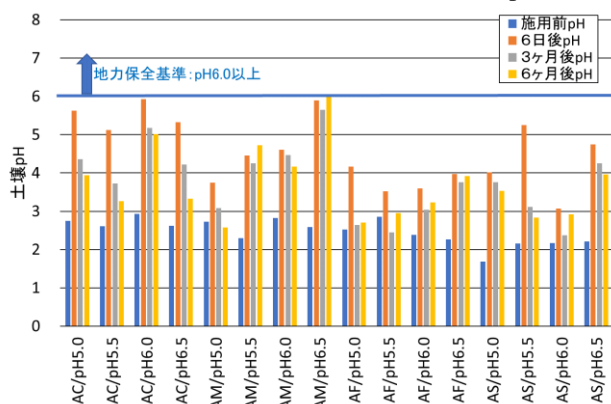


図-3 炭カル施用量と中和改良効果の関係 (火山性 ASS)

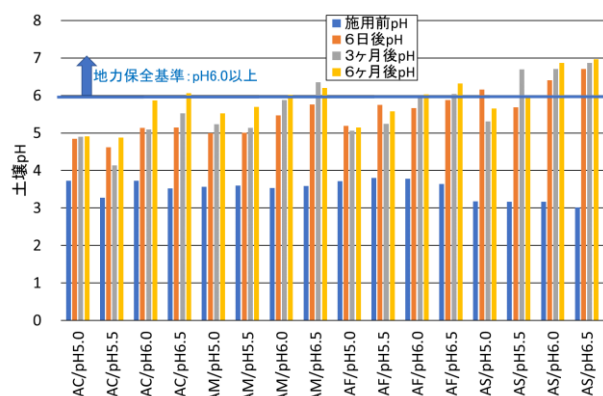


図-4 炭カル施用量と中和改良効果の関係 (海成 ASS)

び6.5相当の細粒炭カルを混和施用することによって、施用6日後には地力保全調査要因強度別基準の基準値に達して施用6ヶ月後においても基準値を満たしていた。

よって、海成ASSが置土された、あるいは、海成ASSが客土された農地表土の中和改良は、改良目標pH6.0の細粒炭カルの混和施用によって達成できると判断できた。

試験2においても、火山性ASSならびに火山性ASSと各種農地表土の混和土での細粒炭カルの適正施用量を決定できなかったため、これを決定するための試験3を行った。この試験においては、改良目標pH6.5に相当する細粒炭カル施用量の1.25倍、1.50倍、2.00倍および4.00倍の細粒炭カルを火山性ASSならびに火山性ASSと各種農地表土との混和土に混和施用した。

図-5に結果を示す。細粒炭カルの施用量が改良目標pH6.5の1.25倍相当の試験区において、粗粒質農地表土と火山性ASSの混和土でpH6.6の他はいずれもpH7.0を超えていた。

試験3は時間の関係で細粒炭カル混和施用6日後までの土壌pHを計測して試験を終了している。試験2において、改良目標pH6.5相当の細粒炭カルを混和施用した場合の火山性ASSならびに火山性ASSと各種農地表土の混和土の土壌pHの推移を表-7に示す。表中の略号と試験区との対応は表-6の通りである。

細粒炭カル施用6日後と6ヶ月後を比較すると、平均して0.68、最大で1.99低下していた。これらのことを勘案すると、施用6日後から最大で2.0程度土壌pHが低下する恐れがあると推察される。

北海道では、農地表土の土壌理化学性の定点調査が長期間にわたって実施されており、1995年時点での農地表土のpHは4.0から7.7の間にあり、平均値は5.68であったこ

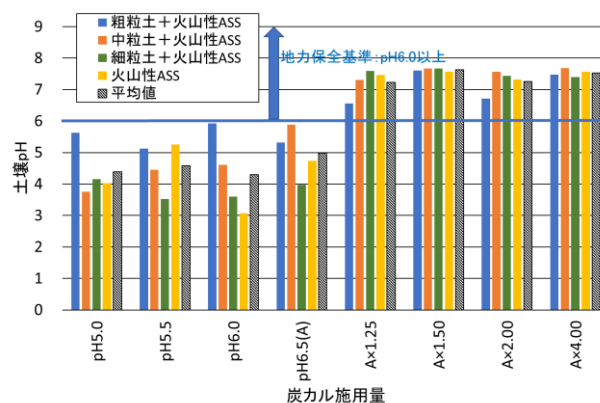


図-5 炭カル施用量と中和改良効果の関係 (火山性 ASS)

表-7 試験2の火山性ASSとその混和土でのpHの推移

	施用6日後pH	施用6ヶ月後pH	6日後と6ヶ月後のpH差
AC/pH6.5	5.32	3.33	-1.99
AM/pH6.5	5.89	6.01	0.12
AF/pH6.5	3.97	3.92	-0.05
AA/pH6.5	4.74	3.96	-0.78
平均値	4.98	4.31	-0.68

とが報告されている⁹⁾。このことを勘案すると、図-5の結果から2.0程度pHが低下した時のpHが最悪でも4.0以上であれば許容できる。

粗粒質農地表土と火山性ASSの混和土で細粒炭カル施用後のpHが6.6であったが、pHが6.6から2.0ほど低下してもpHは4.6であり、北海道の農地表土における最低値の4.0を上回っており、火山性ASSが置土ないし客土された農地表土の中和改良には、改良目標pH6.5相当の1.25倍の細粒炭カルを混和施用すれば農地表土のpHを許容できる範囲まで改良できると判断できる。

(6) 細粒炭カル混和施用での中和改良効果発現時期

図-3、4の結果から判断すると、ASS混入農地における細粒炭カルの混和施用による中和効果は速やかに発現し、(4)で述べた所要量を農地表土に混和施用すれば、細粒炭カル施用の6日後には中和改良箇所における作付けが可能であると言える。

(7) 中和効果と農地表土の粒径組成の関係

火山性ASSが混入した各種農地表土に対する細粒炭カルの混和施用効果(図-3)は、農地表土によって差異が認められ、粗粒質表土>中粒質表土>細粒質土となっており、粗粒質の土壌で中和効果が高かった。

海成ASSが混入した各種農地表土に対する細粒炭カルの混和施用効果(図-4)では、火山性ASSの場合のような顕著な傾向が認められなかった。

土壌は緩衝能を有しており、緩衝能の強い土壌は外部から酸物質やアルカリ物質が加えられても土壌pHの変化は軽微となる性質を有する。土壌の緩衝能は土壌中の粘土含量が多いほど強い⁹⁾。

ASSの粘土含量は火山性ASSで海成ASSより少なく、農地表土の粘土含量は粗粒質土<中粒質土<細粒質土の順に少ない。

火山性ASSと粗粒質農地表土の混和土において細粒炭カルの混和施用の中和効果が高かったという結果は、火山性ASSおよび粗粒質表土の粘土含量が他の供試土より少ないゆえに他の供試土に比べて緩衝能が小さかったためと考えられる。

しかしながら、その傾向は軽微であり、粒径組成別に細粒炭カルの施用量を変える必要はないと判断された。

4. まとめ

ASSと農地表土の種類に対応した炭カルの粒径別、施用方法別の中和改良効果を比較するための室内ポット試験を行った。

その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 炭カルの表面施用にはASS被害土壌の中和改良効

果が認められなかった。

2. 粗粒炭カルは細粒炭カルに比べて中和改良効果が明らかに劣っていた。
3. 細粒炭カルの混和施用が最も中和改良効果の高い改良法であった。
4. 海成ASSが誤って搬入された農地表土の中和改良は改良目標pH6.0相当の細粒炭カルの混和施用で可能であった。
5. 火山性ASSが誤って搬入された農地表土の中和改良は改良目標pH6.5相当の1.25倍の細粒炭カルの混和施用によって可能であった。
6. ASSが混入した農地表土の粒径組成が異なっても細粒炭カル混和施用によって同等の中和効果が発揮された。
7. 細粒炭カルの混和施用によって施用6日後には十分な中和効果が認められ、これより後には作物の作付けが可能と判断できた。

謝辞：供試土の採取にあたり、土地所有者および関係機関にご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石田哲也：北海道における酸性硫酸塩土壌の追録、第54回北海道開発技術研究発表会、環28、2011。
- 2) 松本 聡：酸性硫酸塩土壌、農業土木学会誌、第56巻、第5号、p.56、1988。
- 3) 石渡輝夫、沖田良隆、斎藤万之助：北海道における酸性硫酸塩土壌の区分、分布及び性状、日本土壤肥料科学雑誌、第63巻、第1号、pp.86-90、1992。
- 4) 中谷壮範、横濱充宏：酸性硫酸塩土壌の簡易判定法、第66回北海道開発技術研究発表会、環08、2022。
- 5) 佐々木信夫：新第三系に由来する酸性硫酸塩土壌Ⅱ。その土壌改良、ペドロジスト、第22巻、第2号、pp.102-114、1978。
- 6) 石渡輝夫：北海道における酸性硫酸塩土壌のペドロジーとエダフォロジー、ペドロジスト、第47巻、第2号、pp.129-134、2003。
- 7) 地力問題研究会：地力増進法解説、地球社、pp.136-141、1985。
- 8) 橋本 均：土壌環境基礎調査における土壌理化学性推移の実態と長期モニタリング調査の今後の課題、ペドロジスト、第44巻、第2号、pp.147-154、2000。
- 9) 石塚和裕：酸性降下物に対する土壌緩衝能の実態と評価、森林立地、第34巻、第1号、pp.26-35、1992。