

6. 脱硫石膏による中国アルカリ土壌改良

Converting Sodium-Alkaline Soil into Fertile Farmland with Flue Gas Desulfurized Gypsum

定方正毅* 石川晴雄**

Masayoshi SADAKATA, Haruo ISHIKAWA

ABSTRACT; Gypsum is obtained as byproducts from desulfurization equipment in coal fired power plant. Desulfurization gypsum was able to reclaim the alkali soil in China with 0.5wt%. This result add incentive that establish the desulfurization process in China. This research can solve food problem and acid rain caused by air pollution all at once. This paper reports on results of the alkali soil reclamation in China for 6 years.

KEYWORDS; desulfurization, gypsum, alkali soil

1 はじめに

土壌改良材として脱硫石膏を利用することが出来れば、全国土の 27%が荒漠化（水土流失、土地の砂漠化、アルカリ化等）し、それが毎年 2400Km²（ほぼ神奈川県と同面積）も進行している中国を対象に、アルカリ土壌を改良でき、農地減少も解消できる。さらに、中国における産業エネルギーの 75%を占める石炭利用、その結果、日本の酸性雨にも影響を及ぼしている火力発電所などで排出する二酸化硫黄防止の脱硫装置普及のインセンティブになる。すなわち、食糧と環境問題を一石二鳥に解決できる可能性がある。

研究は、95 年（H7 年）より、中国アルカリ土壌現地調査（3ヶ所、瀋陽、フフホト、東営市）、中国アルカリ土壌による室内ポット試験、中国アルカリ土壌現地試験（瀋陽市康平県、小規模圃場 200m²、大規模圃場 1ha）といった順序で実施し、多くの知見を得た。一方、H12 年度は瀋陽市化学肥料工場には、従来の脱硫装置の 1/4 の価格で簡易式の脱硫装置を完成させ、その脱硫石膏も利用し同様な成果を得た。ここでは、これら H12 年度迄の 6 年間の試験の結果を紹介するものである。

なお、本研究は慶応大学研究プロジェクト「アジア地域の環境保全に関する研究、産業研究所長・吉岡完治教授のワーキンググループ 3 の一環として、前東京大学農学生命科学研究科教授（現県立秋田大学）松本聡、（財）電力中央研究所企画部長 新田義孝、瀋陽市人民政府参事 王克鎮氏および関係機関と共同で実施している研究である。本論文は KEIO DISCUSSION PAPER NO.67（H12 年 3 月）を基にしている。

2.研究の目的・経緯

2.1 研究の目的

石炭火力発電所などの脱硫装置から副産物として排出される石膏を用いて、不毛の土地であるナトリウム集積アルカリ土壌を農耕地に土壌改良できることを、現地圃場試験で実証する。あわせて経済効果の検討も

*東京大学大学院化学システム工学専攻 Department of Chemical System Engineering, University of Tokyo **（財）都市経済研究所 Urban Economic Research Institute

行い、将来中国火力発電所脱硫装置普及のインセンティブになるように、本手法の実用化を図る。

2.2 研究の経緯

研究は次の順序で実施された。

(A)1995 年 (H7 年)

- (1) 現地調査 (3 ケ所、瀋陽、フフホト、東営市)。水利水電科学研究院機関、カウンターパート OK の返事を得た。
- (2) 室内ポット試験 (中国アルカリ土壌に小麦を播種)。湿式脱硫石膏を重量比で混合、0.5, 1%で通常の生育を得た。

(B)1996 年(H8 年)

- (1) 現地小規模圃場試験 (瀋陽市康平県、200m²、トウモロコシ播種)。湿式脱硫石膏を重量比で混合、0.5, 1%で通常の生育を得た。康平県の平均雨量は 400mm。なお、諸事情によりカウンターパートは瀋陽市人民政府・科学技術委員会とした。

(C)1997 年 (H9 年)

- (1) 現地小規模圃場試験 (200m²、継続)。脱硫石膏 2 年継続効果を確認した。
- (2) 現地小規模圃場試験 (100m²、トウモロコシ播種、半乾式脱硫石膏施用)。0.5, 1%で通常の生育を得た。

(D)1998 年(H10 年)

1997 年 (1)、(2) の継続試験。脱硫石膏 3 年継続効果を確認した。

- (3) 現地大規模圃場試験 (1ha、湿式脱硫石膏)。脱硫石膏 0.5, 1%で生育を得た。本年は、雨が多く圃場に水溜りが数ヶ所出来た。土壌には白く塩類が集積した現象 (パッチ状) が出現した。

(E)1999 年 (H11 年)

1998 年(1)(2)(3)の継続試験。そして 1ha 圃場試験を追加した。

(F)2000 年 (H12 年)

1999 年実施した試験を継続。バイオブリケットの灰についてもアルカリ土壌への混合、0.5, 1%について圃場試験を実施した。また、瀋陽市化学肥料工場に 3 月、完成させた簡易式脱硫装置からの石膏についても試験を実施した。

3. 研究成果

3.1 1995 年 (H7 年)

中国瀋陽のアルカリ土壌を用いて、小麦の室内ポット試験を実施した。脱硫石膏は、日本の湿式脱硫装置からのものを用いた。表 1,2 に脱硫石膏と土壌の分析値を示した。

試験は、脱硫石膏を重量比で混合、0, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5, 5.0%の 7 種類について行った。その結果、脱硫石膏をわずか 0.5%加えることで、0%と比較にならないほど小麦の成長がよくなることがわかった(写真 1)。

水素イオン濃度 PH、電気伝導 EC、土壌の交換性ナトリウムの占める割合 ESP(後述 6 の塩類土壌で説明)についてみたのが、図 1、2、3 である。PH は脱硫石膏 1%以上の混合により、8 以下に改良できた。EC は 3%以上加えると、4ms/cm に近づくことがわかった。ESP は脱硫石膏を 5%加えたときに 15%を下回った。土壌の物理性は、その土壌の塩類含量あるいは粘土鉱物と腐植の質と量によって異なるので、15%という境界値 (アルカリ土壌の分類値) も便宜的なものである。表 2 からわかるように、この土壌中のカリウムとマグネシウムは微量であるために無視し、全陽イオンもカルシウムは微量であるため無視して、全陽イオンをカルシウムとナトリウムであると仮定すると、元来の土壌は ESP45%となる。

表1 脱硫石膏の組成分析値

	H ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	EC	pH
脱硫石膏	5.50	0.40	0.04	0.04	35.55	0.04	0.004	43.56	2.20	7.6
	wt%								ms/cm	1:10

写真1 脱硫石膏を混合して栽培したコムギの育成（無肥）

表2 瀋陽土壌の分析値

	meq/ 乾土100g
CEC	6.5
Ca	7.0
Mg	1.7
K	1.1
Na	11.3

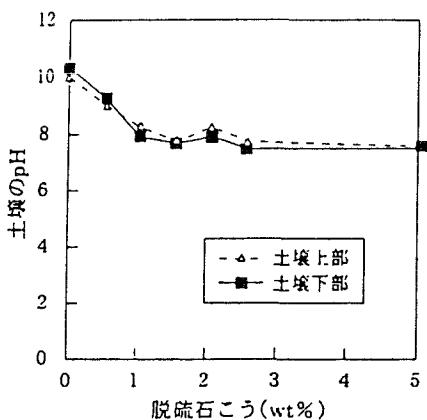
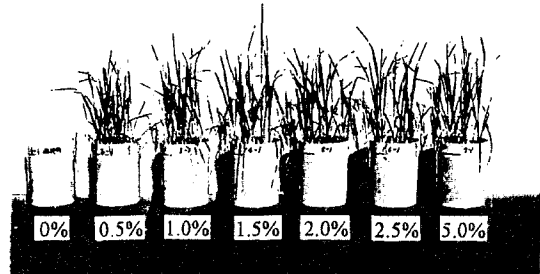


図1 脱硫石膏の土壌pHに対する効果

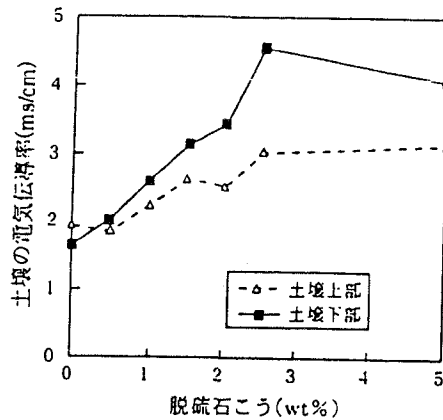


図2 脱硫石膏の土壌ECに対する効果

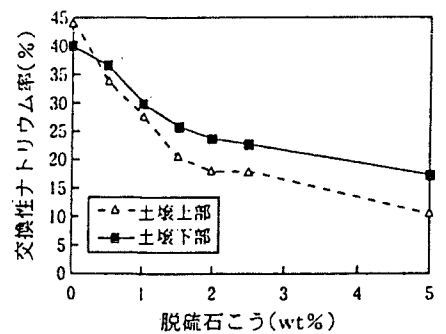


図3 脱硫石膏による交換性ナトリウムの減少

3.2 1996年（H8年）

現地小規模圃場試験は、200m²のアルカリ土壌にトウモロコシを播種した。試験は日本の脱硫石膏を用い重量比で混合、0, 0.25 (0.6k g/m²), 0.5 (1.2k g/m²), 1 (2.3k g/m²) %について行った。

その結果、%に比較すると0.5および1.0%の場合の生長がよく、1.0%の場合がもっともよかった（写真2）。なお、比較のため写真3に4年後の1999年の生育状況も示した。そして、背の高さ、実の重さ、生育速度は通常の農地で育ったものと変わらないという好結果を得た。pH10のアルカリ土壌に脱硫石膏を混合すると、乾燥時でも土が軟化し、トウモロコシの栽培が可能であることがわかった。

3.3 1997年（H9年）

本年は、200m²規模の継続試験のほか、新規に100m²圃場を追加し、半乾式脱硫石膏施用を試みた。作物はトウモロコシ。その結果は次のとおりである。

- (A) 一度加えた脱硫石膏の土壌改良効果は2年以上継続した。
- (B) 乾式脱硫石膏を混合しても、1% (2.3k g/m²) までなら、湿式脱硫石膏とほとんど同程度の土壌改良効果が認められた。
- (C) (B) の試験では、同一混合量であっても、圃場の位置によってトウモロコシの育ち具合が異なった。この原因として排水の関係が考えられた。



写真2

左後 0.25%混合区 右後 1%混合区
左前 0%混合区 右前 0.5%混合区

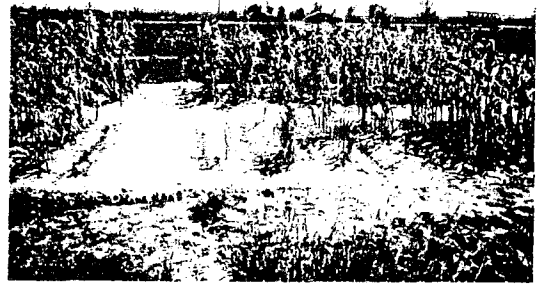


写真3

写真右側が写真2と同じ内容、左側は化成肥料を混入した場合の1%区。2000年も同様。

- (D) (A) の継続試験では、初年に劣った場所でも2年目になると育ち具合が向上した。このことから、石膏と土の混じり具合が年を追うごとによりくなり、その結果、土壤改良効果が現われることが期待された。
- (E) 脱硫酸石膏混合率と pH 脱硫酸石膏混合率と収穫量の関係は96年データでは混合1%がPHを10→8.5に下げ、収穫量 ha に換算すると約3000kg となっている。

3.4 1998 年 (H10 年)

本年は、小規模圃場試験の継続のほか、新規に大規模圃場試験を実施した。その結果は次のとおりである。

- (A) 96年に始めた小規模圃場試験の継続試験は、脱硫酸石膏の継続効果3年を確認できた。また、半乾式脱硫酸石膏も継続効果2年を確認できた。
- (B) 96年に始めた小規模試験では、脱硫酸石膏0.5,1%混合し、トウモロコシの生育が良かった場所でも土壌表面に白く塩類が集積していた。
- (C) 本年実施した1ha規模圃場試験では、塩類集積が白く島状になって分布（パッチ状）している部分が発生し、そこではトウモロコシは殆ど生育しなかった。その理由として下記が考えられた。
- (1) 97年までの小規模圃場試験では、作業者がスコップで石膏と土を混合したので混合状態がよかった。しかし、1ha規模の試験では、トラクターで耕起したあと、石膏を散布し、もう一度トラクターで細かく耕す所に土と石膏が混合するようにした。その結果、石膏の混合状態が不十分であった。
 - (2) トウモロコシの播種と石膏混合の時期が同じだったので、石膏が土になじまない状態であった。
 - (3) うねが不完全で、塩類が雨で流され水溜りができ、島状に堆積した。
 - (4) 98年は、例外的な多雨であったので、石膏が流された可能性がある。

(D) アルカリ土壌改良における重金属

定方研究室で、重金属の挙動について調べた結果、次のことがわかった。脱硫酸石膏施用による重金属濃度の影響は、脱硫酸石膏中の重金属の存在自体でなく、石膏による土壌の透水性などの改良効果により表われるものと思われる。

そこで、試験圃場で収穫したトウモロコシの実中の重金属量を定量した。その結果、重金属量は対象区（無脱硫酸石膏）の重金属と比較すると、わずかに脱硫酸石膏施用に伴ない増加している重金属もあるが、施用量との相関はみられなかった。したがって、脱硫酸石膏施用による重金属の影響はないと考えられる。

3.5 1999 年 (H11 年)

本年は、次の課題を主眼において試験を行った。

- (A) 1ha規模圃場試験については、塩類が多く集積している島状（パッチ状）の部分のいかんして土壌改良

するかを課題とし、白い島状部分をスコップで十分に土を混ぜ返す。白い島状部分に（B）のように新たに石膏を加える。昨年は降雨が多く水溜まりができていたため、今年はいね高を大きくするようにする。

(B) 白い島状部分

周囲に杭を打ち小規模試験区を作り、石膏 0, 0.5, 1.2%を混合する。他の部分は継続試験とする。播種はトウモロコシ。

(C) 2つの小規模圃状試験は石膏の継続効果を調べる。

(D) 新規に 1ha 規模圃場を設け、石膏無混合区と脱硫石膏 1%混合区を設け試験する。

(A)(B)に関して本年のトウモロコシの生育は昨年は比較し、極めて良好であった。しかし、白い島状部分は面積が縮小した感があるが、依然として残っていた。

(C) の 2つの小規模圃場試験は、湿式、半乾式脱硫石膏混合とともにトウモロコシは生育しており、0.5, 1%混合区が生育がよかった。特に湿式脱硫石膏を用いた 200m²試験区は開始後 4年目になるが土壌改良効果は持続していた（写真 3）。この様子は 1年目と変わらない。乾式脱硫石膏を用いた 100m²試験区も 3年目を迎えている。(D) の新規に 1ha 規模圃場を設け、石膏 1%混合区と無混合区でトウモロコシの生育を大々的に比較してみた結果は、1%混合区での生育は良好であったが、無混合区では生育は見られなかった。

3.6 2000 年 (H12 年)

(A) 1996 年 a の小規模圃場実験は、脱硫石膏をアルカリ土壌に混合後、既に 5 年経過。1997 年 b の半乾式脱硫石膏混合についても 4 年、1998 年 C の大規模圃場試験も 2 年、継続効果を確認できた。また、バイオブリケット灰についても同様な効果を示した。トウモロコシの収穫量は、いずれの場合も 1%で ha 当たり 3~4000kg である。

(B) パッチ状についても、石膏混合量を 2%に増すと解決できることがわかったが、なお状況観察が必要である。

(C) 瀋陽市化学肥料工場からの脱硫石膏についても 0.5,1%の混合で同様な効果を示した。

なお、各年度の詳細な化学分析、生育状況については別途、各年報告書 (KEIO DISCUSSION PAPER) を作成している。

4.塩類土壌（アルカリ土壌）

塩類土壌とは、可溶性塩類の濃度が過大な特殊な性質の土壌で、農場の目的からすれば特殊な矯正と管理を必要とする不毛な土壌である。塩類土壌は、乾燥または半乾燥気候の大部分の地域に分布する。その生成は、降水量より蒸発散量の方が多い地域で、塩類の供給量が多く何らかの理由で地下水位が高くなったところに出現する。アルカリ土壌は塩類土壌の一種である。

米国農業省(OSDA)は、土壌の水飽和溶液の電気伝導度 EC(mS/cm)土壌の交換性ナトリウムの占める割合($ESP=ex.Na+/CEC \times 100$)および土壌の PH から、塩類土壌の分類を表 3 のように定義している。ただし、CEC は土壌の交換性ナトリウムの陽イオン交換座 (Cation Exchange Capacity, Cmol(+)/kg soil) である。

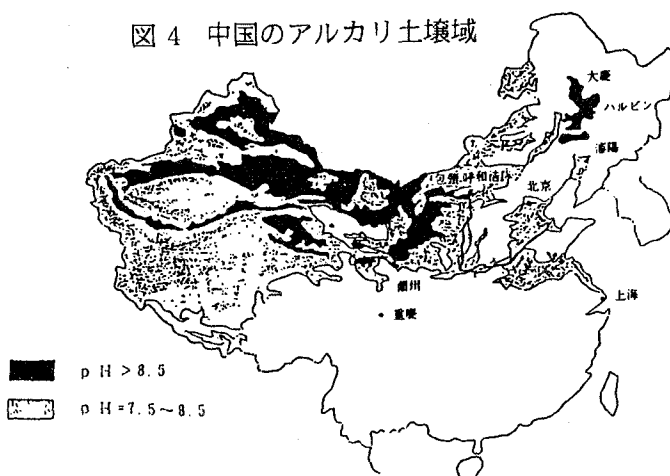
表 3 塩類土壌の分類

名 称	電気伝導度 (EC)	pH	ESP	ロシア・東ヨーロッパ
塩性土壌 (Saline soil)	4 ds/m 以上	8.5以下	15以下	ソロンチャック
アルカリ土壌 (alkali soil)	4 ds/m 以下	8.5以上	15以上	ソロネッツ
アルカリ土壌・塩性土壌 (Saline-alkali soil)	4 ds/m 以上	8.5以上	15以上	

中国におけるアルカリ土壌の分布（図-4）は、内蒙古自治区、吉林省、黒竜江省、遼寧省、新疆ウイグル自治区、河北省、陝西省、青海省の乾燥地、半乾燥地に広く分布している。

特に北緯 40 度以北の中国東北部、北部に集中的に存在しており、その面積は 10 万 km² と推定されている。中国では恐竜の足跡、草原のアバタなどと呼ばれ、土壌改良が困難で放置されたままになっている。

図 4 中国のアルカリ土壌域



5. 脱硫酸石膏によるアルカリ土壌の改良

土壌コロイドのカチオン吸着特性は、強い順に $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$ であることはよく知られている。したがって、アルカリ土壌にカルシウム資材を施用すれば、土壌コロイドに吸着されていたナトリウムは、順次カルシウムと置換反応を起こしながら、土壌コロイドの表面は次第にカルシウムに置き換わることが予想される。また、土壌中でこのような置換反応は、急激な反応ではなく徐々に行われることが考えられる。他方、土壌のイオン吸着座から離れたナトリウムは、カルシウム資材を構成する陰イオンと結合して塩を形成し、リーチングを続行すれば、水に溶解しいずれは土壌から消失する。

ただし、このような置換反応は、アルカリ土壌のイオン濃度が施用する改良資材のイオン濃度よりも高いときに進行するので、ある程度以上の改良資材を加えないと、実際の置換反応はみられない。土壌のイオン交換座はナトリウムイオンからカルシウムイオンに置換される。そうすると、土壌のカルシウムコロイドは大きな分散性を示さず、透水性を有するとともに、土壌反応の強いアルカリ性から中性ないしは弱アルカリ性に転ずる。また、カルシウムコロイドの乾燥過程では、粘土に膨潤性が生ずるため土層に亀裂が発達し、団粒構造を生成するようになるので、土壌の脱塩効果が著しく進行する。

6. おわりに

脱硫酸石膏によるアルカリ土壌改良効果が 5 年間継続している事が確認できた。バイオブリケット灰も改良効果がある事も確認出来た。瀋陽市化学肥料工場の脱硫酸石膏も予測通りの効果を示した。従って、一回アルカリ土壌に混合した石膏は改良効果はどの位継続するのか見極めることも課題である。しかし、実際中国農民に本方法を普及を図るためには、本方法の PR、コストの問題、仕組みの問題など課題を一つづつクリアしていくことが必要である。そのための一 PR として筆者の一人定方正毅は、2000 年 10 月、岩波新書「中国で環境問題に取り組む」を出版した事、近々中国語版も出版する事を付記しておく。

参考文献

- (1) 定方正毅、中国アルカリ土壌改良 p.12~13 要約、東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻報告書、1999 年 3 月
- (2) 松本聡、青木正則、脱硫酸石膏を利用した不良土壌の改良と食糧増産、P1042、日本エネルギー学会誌、vol.74, No.12(1995 年)